

内容简介

水文要素勘测是水资源科学管理、水利工程建设、防洪减灾及生态环境保护的核心基础，其勘测精度与方法科学性直接决定水文信息的可靠性与应用价值。本书立足当代水文勘测技术发展前沿，系统整合水文学、地质学、测绘学、信息技术等多学科理论与实践成果，全面阐述水文要素综合勘测的核心原理与实用方法。

全书紧扣“综合勘测”核心定位，突破传统单一要素勘测的局限，聚焦降水、径流、蒸发、水位、流量、水质、地下水等关键水文要素的协同勘测逻辑。书中既深入解析水文勘测的基本理论框架，包括水循环过程与水文要素时空演变规律对勘测方案的制约机制，也重点探讨现代勘测技术的融合应用，涵盖卫星遥感、无人机探测、GIS 空间分析、分层精细勘查、自动化监测等新技术与传统勘测手段的互补协同模式，解决复杂水文地质条件下勘测效率低、参数获取不准确等行业痛点。

本书突出理论与实践的深度结合，通过梳理国内外典型勘测案例，提炼不同流域、不同工程场景下的勘测方案优化思路，强调勘测数据的精准处理与多源数据融合分析方法，为水文资源评价、水利工程规划设计、水灾害风险防控、地下水合理开发等提供科学技术支撑。其内容兼具学术前瞻性与实践指导性，既可为水文水资源领域的科研工作者提供理论参考，也能为一线勘测技术人员、水利工程管理人员提供实操指导，同时适用于高等院校相关专业师生的教学辅助，助力推动水文勘测领域的技术创新与学科发展。

水文要素综合勘测原理与方法
Principles and Methods of Comprehensive Survey of Hydrological Elements

曹海迪 著

Principles and Methods of Comprehensive Survey of Hydrological Elements

水文要素综合勘测原理与方法

曹海迪 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

作者简介



曹海迪：女，民族汉，1985 年 3 月出生，甘肃定西人，中共党员。长期投身于水文水资源领域，在水文水资源测验、水文预报、水资源调查评价、水文调查、水文资料整编、水资源论证以及防洪评价等工作中积累了丰富的经验。学术成果丰硕，曾于在省部级期刊《地下水》独立发表论文 1 篇，在《农业科技与信息》期刊独立发表论文 2 篇，以专业能力和钻研精神为行业发展贡献力量。

Principles and Methods of Comprehensive Survey of Hydrological Elements

水文要素综合勘测原理与方法

曹海迪 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Principles and Methods of Comprehensive Survey of Hydrological Elements

题目：水文要素综合勘测原理与方法

Author: Haidi Cao

作者：曹海迪

ISBN: 979-8-90040-054-9

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Principles and Methods of Comprehensive Survey of Hydrological
Elements**

水文要素综合勘测原理与方法

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 15.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in March 2026

Printing: First printing in March 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

水文要素作为地球表层系统能量与物质循环的核心载体，其时空演变规律直接关系到水资源安全、水生态保护、防灾减灾等重大国计民生领域。随着全球气候变化加剧、人类活动影响深度拓展，水文情势呈现出更强的复杂性、不确定性和突变性，传统水文勘测手段在精度、效率和综合研判能力上逐渐显现局限，亟需构建融合多学科理论、集成先进技术的综合勘测体系，为水文科学研究与水资源精细化管理提供坚实支撑。在此背景下，系统梳理水文要素综合勘测的核心原理，整合前沿技术方法，形成兼具理论深度与实践指导价值的学术成果，成为当前水文水资源领域的重要研究课题。

水文要素综合勘测并非单一技术的简单叠加，而是以水文学、地质学、生态学、大气科学等多学科理论为基础，结合遥感测绘、传感器网络、大数据分析、数值模拟等现代技术，对降水、蒸发、径流、水位、水质、土壤含水量等关键水文要素进行全方位、立体化、高精度监测与分析的综合技术体系。近年来，国内外学者在水文勘测技术创新、数据融合方法、机理模型构建等方面开展了大量研究，推动了勘测技术从“点式监测”向“全域感知”、从“经验判断”向“智能研判”的转型升级。然而，现有研究成果多分散于各类学术期刊、技术报告中，缺乏对原理体系的系统整合和方法应用的全面梳理，难以满足科研工作者系统学习和工程技术人员实际应用的需求。

基于上述行业需求与学术空白，本书编写团队依托长期从事水文要素勘测与水资源研究的实践经验，结合近年来国内外相关领域的最新研究进展，致力于构建一套系统、完整的水文要素综合勘测理论与方法体系。编写过程中，我们始终秉持“理论与实践并重、传承与创新结合”的原则，一方面深入阐释水文要素综合勘测的核心理论基础，厘清不同勘测技术的原理机制与适用场景；另一方面重点整合各类先进勘测技术的应用方法，突出技术集成与实操性，力求为读者提供兼具学术深度与实践价值的知识体系。

本书的编写得到了众多同行专家的鼎力支持与指导，他们在学科前沿动态把握、核心内容筛选等方面提出了宝贵的修改建议。同时，编写过程中参

考了大量国内外相关领域的学术文献、技术标准和工程实践案例，在此向相关研究成果的创造者和实践者致以诚挚的谢意。此外，感谢出版社编辑团队在书稿审核、排版校对等工作中付出的辛勤努力，为本书的顺利出版提供了有力保障。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

——作者

第一章 绪论	1
第一节 水文要素概述与综合勘测的内涵	1
第二节 水文要素综合勘测的发展历程与现状	9
第三节 综合勘测在水资源保护领域的应用范畴	13
第二章 水文要素特性及其综合表征	25
第一节 主要水文要素的分类与基本特性	25
第二节 水文要素的时空变异性特征	33
第三节 影响水文要素变化的关键因素	38
第四节 水文要素综合表征的理论基础	44
第三章 水文要素综合勘测的传统与现代技术方法	49
第一节 地面水文观测技术	49
第二节 水文测验方法与站网规划	55
第三节 地下水动态监测与评价方法	61
第四节 传统与现代勘测方法的比较与适用性	68
第四章 现代空间信息技术在综合勘测中的应用	73
第一节 遥感 (RS) 水文信息提取原理与方法	73
第二节 地理信息系统 (GIS) 在数据管理与空间分析中的应用	78
第三节 无人机 (UAV) 低空遥感和近景摄影测量技术	83
第四节 物联网 (IoT) 与智能传感器技术	88
第五章 多源水文数据整合与质量控制	95
第一节 多源水文数据获取与标准化	95
第二节 水文数据预处理与同化技术	101
第三节 多源数据融合与信息提取方法	107

第四节 数据质量控制与不确定性评估	114
第六章 水文水资源测验原理与技术	121
第一节 水文站网规划设计与优化调整	121
第二节 流量、泥沙测验技术与方法进展	127
第三节 水文测验仪器比测与精度控制	133
第四节 水文资料整编与信息化管理	137
第七章 水文预报模型原理与综合应用	143
第一节 水文预报模型基本原理与分类	143
第二节 模型参数确定、率定与验证方法	150
第三节 实时洪水预报与校正技术	158
第四节 水文预报在水资源保护中的应用案例	165
第八章 水资源调查评价与论证方法	171
第一节 水资源基础调查与评价方法	171
第二节 水资源开发利用评价与供需平衡分析	176
第三节 水资源论证的理论与实践	181
第四节 基于综合勘测的水资源可持续性评价	188
第九章 防洪评价中的水文综合勘测技术	195
第一节 设计洪水计算原理与方法	195
第二节 洪水风险分析与区划技术	199
第三节 防洪工程能力评估与调度方案制定	204
第四节 防洪非工程措施与应急预案	209
第十章 水文要素综合勘测的未来发展与展望	215
第一节 新型传感器与智能勘测技术前沿	215
第二节 大数据与人工智能驱动的智慧水文	218
第三节 应对气候变化的水文勘测新挑战与新策略	224
第四节 服务于国家水网与生态文明建设的水文综合勘测体系	230
参考文献	237

第一章 绪论

第一节 水文要素概述与综合勘测的内涵

一、水文要素概述

(一) 水文要素的定义与核心属性

水文要素是构成水文系统的基本单元，是表征地球表层水文循环过程中各类水文现象的具体载体与量化指标，其形成与演化受控于气候系统、下垫面条件及人类活动的综合作用，是连接大气圈、水圈、岩石圈、生物圈物质循环与能量交换的关键纽带。从本质而言，水文要素并非孤立存在的单一现象，而是水文循环各环节的具象化体现，不同要素之间通过水量、能量的传递与转化形成有机整体，共同维系着地球表层水文系统的动态平衡。

水文要素的核心属性集中体现为时空变异性、关联性与敏感性三大特征。时空变异性是水文要素最显著的属性，在时间维度上，受大气环流周期性波动的影响，水文要素呈现出日内、季节、年际及年代际的多尺度变化规律，例如降水的季节性分配差异、河川径流的年际丰枯交替；在空间维度上，受地形地貌、植被覆盖、土壤类型等下垫面条件空间异质性的制约，水文要素呈现出明显的区域分异特征，从湿润地区的丰沛降水与旺盛蒸发，到干旱地区的稀少降水与强烈蒸发，形成了鲜明的空间梯度差异。关联性是水文要素的内在属性，各要素之间通过水文循环过程紧密耦合，例如降水作为地表径流的主要补给源，其时空分布特征直接决定了径流的形成过程与演化规律，而蒸发则通过消耗地表水量，间接影响径流的总量与时空分布；同时，水文要素与气象要素、生态要素之间也存在密切的相互作用，构成了复杂的水文 - 气象 - 生态耦合系统。敏感性则体现为水文要素对外部驱动因素变化的响应程度，无论是全球气候变化引发的气温升高、降水格局调整，还是人类活动导致的土地利用 / 覆被变化、水利工程建设、水资源开发利用等，都可能引发水文要素的显著变化，进而影响水文系统的结构与功能。

（二）水文要素的主要类型与表征指标

依据水文循环的关键环节与水文现象的表现形式,水文要素可划分为降水类、蒸发类、径流类、土壤水类、地下水类及冰雪类等主要类型,不同类型的水文要素具有特定的表征指标与观测内涵,共同构成了完整的水文要素体系。

降水类要素是水文循环的起始环节,是地表水资源的主要补给来源,主要表征大气中水汽凝结并降落到地表的过程与数量特征,核心表征指标包括降水量、降水强度、降水历时、降水频率、降水空间分布等。降水量是指一定时段内降落到地表某一区域的水汽凝结物(液态或固态)的总水量,通常以毫米为单位,是反映区域降水丰枯程度的核心指标;降水强度则是单位时间内的降水量,直接决定了降水的冲刷能力与产流效率,是分析暴雨洪水形成机制的关键参数;降水历时与降水频率则分别从时间持续长度与重现期角度,揭示了降水的时间分布特征,为水利工程设计、洪水风险评估提供重要依据。

蒸发类要素是水文循环的重要输出环节,表征地表水体、土壤水分及植被体内水分向大气中扩散的过程,主要包括水面蒸发、土壤蒸发与植被蒸腾三大类型,核心表征指标为蒸发量、蒸发率、潜在蒸发量等。水面蒸发是指开阔水体表面的水分蒸发过程,其大小主要受气温、气压、风速、相对湿度等气象因素的影响,是反映区域蒸发能力的基础指标;土壤蒸发是土壤中水分通过地表向大气蒸发的过程,受土壤含水量、土壤质地、地表覆盖等因素的制约,是土壤水分平衡的重要组成部分;植被蒸腾则是植被通过叶片气孔将体内水分释放到大气中的过程,与植被类型、生长状况、气象条件密切相关,是生态水文过程的核心环节。潜在蒸发量是指在充分供水条件下的最大可能蒸发量,是评估区域干湿状况、水资源供需平衡的重要基础数据。

径流类要素是水文循环的核心环节,表征降水在地表与地下的汇集、流动过程,是地表水资源的主要存在形式,主要分为地表径流、地下径流与壤中流三大类型,核心表征指标包括径流量、径流深、径流系数、径流模数、径流过程线等。径流量是指一定时段内通过河流某一断面的总水量,是反映区域水资源总量的核心指标;径流深是将径流量折算为某一区域平均水深的指标,便于不同区域之间的径流丰枯程度对比;径流系数是径流量与降水量的比值,反映了降水转化为径流的效率,其大小受下垫面条件与降水特征的共同影响;径流过程线则通过时序曲线的形式,直观反映了径流随时间的变化规律,是分析河川径流演化特征、洪

水过程的重要工具。

土壤水类要素是介于地表水体与地下水体之间的过渡性水文要素，表征土壤孔隙中储存的水分状况，是连接降水、蒸发与地下水补给的关键纽带，核心表征指标包括土壤含水量、田间持水量、凋萎含水量、土壤水势等。土壤含水量是指土壤中水分的质量或体积占土壤总质量或总体积的比例，直接影响作物生长、土壤通气性与养分迁移过程；田间持水量与凋萎含水量分别是土壤水的上限与下限指标，田间持水量是土壤能够保持的最大毛管水量，是农作物生长所需水分的重要保障，凋萎含水量则是农作物无法吸收利用的土壤水分临界值，两者共同决定了土壤的有效含水量范围。

地下水类要素表征地下含水层中的水分状况，是水资源的重要组成部分，尤其在干旱半干旱地区，地下水是保障生产生活与生态用水的关键水源，核心表征指标包括地下水位、地下水埋深、地下水径流量、地下水水质、含水层渗透系数等。地下水位是指地下水在含水层中的液面高程，其变化直接反映了地下水补给与排泄的平衡关系；地下水埋深是地下水位与地表的垂直距离，影响着地下水的开采难度与植被根系的吸水范围；渗透系数则反映了含水层对地下水的渗透能力，是评估地下水补给效率与地下水资源量的重要参数。

冰雪类要素主要存在于高纬度地区与高海拔山区，是固态的水资源储备，被称为“固态水库”，其积累与消融过程对水文循环与河川径流具有显著影响，核心表征指标包括积雪深度、积雪覆盖率、冰川面积、冰川厚度、冰雪消融量等。积雪深度与积雪覆盖率反映了积雪的空间分布与积累量，是春季融雪径流的主要补给来源；冰川面积与厚度则反映了冰川的储备规模，冰川消融量的变化直接影响河川径流的年内分配与年际变化，尤其在干旱区内陆河流域，冰川融水是河流的重要补给水源，对区域水资源安全具有决定性作用。

二、水文要素综合勘测的内涵

（一）水文要素综合勘测的定义

水文要素综合勘测是基于水文系统的整体性与复杂性特征，运用多学科理论、多技术手段，对各类水文要素及其相互作用过程、影响因素进行全面、系统、动态观测与调查的综合性水文工作。其核心目标是获取完整、准确的水文数据，揭示水文要素的时空分布规律与演化机制，阐明水文系统与气候系统、下垫面条件、

人类活动的相互作用关系，为水资源评价、水资源开发利用、水利工程建设、生态环境保护、洪水灾害防治等水文相关领域的决策制定提供科学依据。

与传统的单一水文要素观测相比，水文要素综合勘测具有鲜明的综合性与系统性特征。传统水文观测多侧重于某一特定水文要素（如降水、径流）的单点观测，观测范围有限，难以反映水文要素的空间异质性与各要素之间的关联性；而水文要素综合勘测则打破了单一要素、单点观测的局限，强调从整体视角出发，覆盖水文循环的全环节，整合各类水文要素的观测资源，实现对水文系统的全方位、多维度观测。同时，水文要素综合勘测并非各类水文要素观测的简单叠加，而是通过建立各要素之间的关联分析框架，实现对水文过程的系统性认知，不仅关注单个水文要素的变化规律，更注重揭示各要素之间的相互作用机制与水文系统的整体演化规律。

（二）水文要素综合勘测的核心特征

1. 观测对象的全面性

水文要素综合勘测以水文系统的整体演化过程为研究对象，其观测范围覆盖水文循环的全环节，涵盖降水、蒸发、径流、土壤水、地下水、冰雪等各类核心水文要素，同时兼顾影响水文要素演化的气象因素（气温、气压、风速、湿度等）、下垫面因素（地形、地貌、植被、土壤、地质等）与人类活动因素（土地利用/覆被变化、水利工程、水资源开采、城市化进程等）。通过对各类要素的全面观测，构建完整的水文要素观测体系，避免因观测对象的片面性导致对水文过程认知的偏差，为系统分析水文系统的演化规律提供全面的数据支撑。

2. 技术手段的集成性

水文要素综合勘测依托水文科学、气象科学、地质科学、生态学等多学科的理论基础，整合了传统水文观测技术与现代高新技术，形成了多技术融合的观测体系。在传统观测技术方面，保留了雨量计、蒸发器、水位计、流速仪等经典观测设备的核心作用，确保观测数据的稳定性与可靠性；在现代高新技术应用方面，集成了遥感技术、地理信息系统技术、全球定位系统技术、物联网技术、大数据技术等先进技术手段。遥感技术能够实现大范围、动态的水文要素空间分布观测，如积雪覆盖范围、地表水体面积、植被覆盖度等；地理信息系统技术能够实现水文数据的空间可视化分析与空间关联分析；全球定位系统技术能够实现观测站点的精准定位与移动观测；物联网技术能够实现水文观测数据的实时采集、传输与

远程监控；大数据技术则能够实现海量水文数据的存储、管理与深度挖掘分析。通过传统技术与现代技术的有机融合，水文要素综合勘测能够突破单一技术手段的局限，提升观测的精度、效率与空间覆盖范围。

3. 观测过程的动态性

水文系统是一个动态演化的系统，各类水文要素受气候波动、季节变化、人类活动等因素的影响，始终处于动态变化过程中。水文要素综合勘测充分考虑水文系统的动态性特征，通过建立长期连续的观测站点网络与动态监测机制，实现对水文要素变化过程的实时跟踪与长期记录。长期连续的观测能够揭示水文要素的年际、年代际变化规律，捕捉水文系统的长期演化趋势；动态监测则能够及时捕捉短期水文过程的变化特征，如暴雨洪水过程、融雪径流过程、突发水污染事件等水文应急事件的动态变化。通过动态观测与长期观测的结合，能够全面掌握水文要素的动态演化过程，为分析水文系统的稳定性与敏感性提供充分的数据支撑。

4. 观测数据的关联性

水文要素综合勘测强调各类观测数据之间的关联性分析，通过构建多要素协同观测体系，实现不同水文要素数据、水文要素与影响因素数据之间的有机衔接。在观测数据的采集过程中，注重观测时间、观测空间的一致性，确保不同要素数据之间具有可比性与关联性；在数据处理与分析过程中，通过建立多要素关联分析模型，揭示各水文要素之间、水文要素与气象因素、下垫面因素、人类活动因素之间的内在联系。例如，通过整合降水、气温、蒸发、径流等要素的观测数据，分析降水 - 蒸发 - 径流的转化关系；通过结合土地利用 / 覆被数据与径流数据，分析人类活动对径流过程的影响机制。观测数据的关联性分析能够提升水文数据的利用价值，为深入理解水文系统的演化机制提供科学依据。

5. 服务目标的多元性

水文要素综合勘测的服务目标贯穿于水资源开发利用、水生态环境保护、洪水灾害防治、水利工程建设、气候变化应对等多个水文相关领域，具有鲜明的多元性特征。在水资源评价领域，通过综合勘测获取的各类水文要素数据，能够为区域水资源总量评估、水资源时空分布特征分析、水资源供需平衡分析提供基础数据；在水生态环境保护领域，通过对河流水量、水质、水生生态等要素的综合观测，能够评估水生态系统的健康状况，为水生态保护与修复方案制定提供依据；

在洪水灾害防治领域，通过对降水、径流等要素的实时动态观测，能够实现洪水的精准预报预警，为洪水灾害应急处置提供技术支撑；在水利工程建设领域，综合勘测数据能够为工程选址、设计参数确定、工程运行效果评估提供科学依据；在气候变化应对领域，通过长期连续的水文要素观测，能够分析气候变化对水文系统的影响，为制定适应气候变化的水资源管理策略提供支撑。

（三）水文要素综合勘测的核心内容框架

1. 基础勘测体系构建

基础勘测体系构建是水文要素综合勘测的前提与基础，主要包括观测站点网络布局、观测指标体系确定、观测技术方案设计三大核心内容。观测站点网络布局需遵循科学性、代表性、经济性与系统性原则，结合区域水文特征、下垫面条件、人类活动分布等因素，合理确定观测站点的数量、位置与观测范围，构建覆盖全区域、兼顾重点区域的观测站点网络，确保观测数据能够全面反映区域水文要素的时空分布特征。观测指标体系确定需依据综合勘测的服务目标，围绕水文循环全环节，明确各类水文要素及影响因素的核心观测指标，细化各指标的观测精度要求、观测频率与观测时长，构建层次清晰、重点突出的观测指标体系。观测技术方案设计需结合各观测指标的特性与观测要求，合理选择观测技术与观测设备，制定详细的观测操作规范与数据采集流程，明确传统技术与现代技术的融合应用方式，确保观测数据的准确性、可靠性与连续性。

2. 多要素协同观测

多要素协同观测是水文要素综合勘测的核心内容，强调围绕水文循环过程，实现各类水文要素及影响因素的同步观测与数据联动。在降水观测方面，结合地面雨量计观测与遥感降水观测，实现降水的点面结合观测，精准获取降水的时空分布特征；在蒸发观测方面，整合水面蒸发、土壤蒸发、植被蒸腾的观测数据，结合遥感蒸发估算，全面掌握区域蒸发的总量与空间分布规律；在径流观测方面，通过河道断面观测、遥感径流反演等手段，实现地表径流、地下径流的同步观测，捕捉径流的动态变化过程；在土壤水与地下水观测方面，通过土壤水分传感器、地下水监测井等设备，实现土壤含水量与地下水位的长期连续观测，揭示土壤水与地下水的补给排泄关系；同时，同步观测气温、气压、风速、湿度等气象要素，地形、地貌、植被、土壤等下垫面要素，以及土地利用、水利工程运行等人类活动要素，为分析水文要素的演化驱动机制提供全面的数据支撑。

3. 数据处理与质量控制

数据处理与质量控制是保障水文要素综合勘测数据可靠性的关键环节，主要包括原始数据整理、数据预处理、数据质量检验与数据标准化处理等内容。原始数据整理需对观测获取的各类原始数据进行分类归档，梳理数据采集过程中的相关信息，确保数据的可追溯性；数据预处理需针对观测数据中可能存在的缺失值、异常值等问题，采用合理的处理方法（如插值法、异常值剔除等）进行修正，提升数据的完整性；数据质量检验需建立多维度的质量检验指标体系，从数据精度、数据一致性、数据连续性等方面对观测数据进行全面检验，剔除不合格数据，确保数据的可靠性；数据标准化处理需对不同来源、不同格式、不同单位的观测数据进行统一标准化处理，实现数据的互联互通与综合分析，为后续的水文过程分析与模型构建奠定基础。

4. 水文过程综合分析

水文过程综合分析是水文要素综合勘测的深化环节，旨在基于观测数据，揭示水文要素的时空分布规律与演化机制，阐明各要素之间的相互作用关系。通过时间序列分析、空间插值分析、趋势分析、突变分析等方法，分析各类水文要素的时间演化特征与空间分布规律；通过相关性分析、回归分析、耦合协调度分析等方法，揭示水文要素之间、水文要素与气象因素、下垫面因素、人类活动因素之间的内在联系；通过水文过程机理分析，阐明降水 - 蒸发 - 径流转化、土壤水 - 地下水补给排泄等关键水文过程的演化机制，构建水文要素相互作用的概念模型，提升对水文系统整体演化规律的认知水平。

5. 勘测成果应用与优化

勘测成果应用与优化是水文要素综合勘测的最终目标，强调将勘测获取的数据与分析成果应用于实际水文工作，并根据应用反馈对勘测体系进行动态优化。在成果应用方面，将勘测数据与分析成果应用于水资源评价、水生态环境保护、洪水灾害防治、水利工程建设等具体领域，为相关决策制定提供科学依据；在勘测体系优化方面，根据成果应用过程中发现的问题、区域水文环境的变化（如气候变化、人类活动强度变化等）以及观测技术的发展，及时调整观测站点布局、观测指标体系与观测技术方案，提升综合勘测的针对性与有效性，实现勘测体系的动态优化与可持续发展。

（四）水文要素综合勘测的重要意义

1. 支撑水资源科学管理

水资源是人类生存与发展的基础性资源，水资源的科学管理是保障区域经济社会可持续发展的关键。水文要素综合勘测能够获取全面、准确的水文数据，为水资源评价提供可靠的基础数据支撑，精准掌握区域水资源总量、时空分布特征与水资源开发利用潜力；通过分析水文要素与人类活动的相互作用关系，能够科学评估水资源开发利用对水文系统的影响，为合理的水资源开发利用方案、优化水资源配置格局提供科学依据；同时，基于长期连续的勘测数据，能够实时监控水资源动态变化，为水资源供需平衡调控、水资源节约保护等水资源管理工作提供技术支撑，推动水资源管理从经验管理向科学管理转变。

2. 保障水生态环境安全

随着人类活动强度的不断加大，水生态环境问题日益突出，如水体污染、水生态系统退化、水资源短缺等，严重威胁区域生态安全。水文要素综合勘测通过对河流量、水质、水生生态、土壤水、地下水等要素的全面观测，能够精准掌握水生态环境的现状与变化趋势；通过分析水文要素与水生态系统的相互作用机制，能够识别水生态环境问题的根源，为制定针对性的水生态保护与修复方案提供科学依据；同时，通过动态监测水生态环境变化，能够及时评估水生态保护措施的实施效果，为优化水生态环境保护策略提供支撑，保障水生态环境安全。

3. 提升洪水灾害防治能力

洪水灾害是我国最主要的自然灾害之一，严重威胁人民群众的生命财产安全与社会稳定。水文要素综合勘测通过对降水、径流等要素的实时动态观测与长期连续监测，能够精准捕捉暴雨洪水的形成过程与演化规律，为洪水预报预警提供精准的基础数据；通过分析洪水过程的时空演化特征与影响因素，能够提升洪水预报的精度与时效，为洪水灾害的提前防范与应急处置提供技术支撑；同时，基于勘测数据，能够科学评估区域洪水风险等级，为洪水灾害防治工程的规划设计、洪水风险区划的制定提供科学依据，提升区域洪水灾害防治能力，最大限度减少洪水灾害损失。

4. 服务气候变化应对

全球气候变化已成为不争的事实，其对水文系统的影响日益显著，导致降水格局调整、极端水文事件频发、水资源时空分布失衡等问题，对区域经济社会发

展与生态安全构成严重威胁。水文要素综合勘测通过长期连续的水文要素观测，能够获取气候变化背景下水文要素的长期演化数据，为分析气候变化对水文系统的影响提供基础数据支撑；通过揭示气候变化与水文要素演化的相互作用机制，能够精准评估气候变化对水资源安全、水生态环境、洪水灾害等方面的影响，为制定适应气候变化的水资源管理策略、水生态保护方案、洪水灾害防治措施提供科学依据，提升区域应对气候变化的能力。

5. 推动水文科学理论发展

水文科学的发展离不开长期、系统的观测数据支撑，水文要素综合勘测通过构建多要素、多尺度、多技术融合的观测体系，能够获取海量的、高质量的水文数据，为水文科学理论研究提供丰富的数据源；通过对水文要素时空分布规律与演化机制的深入分析，能够揭示水文循环过程的新规律、新特征，推动水文循环理论、水文极值理论、生态水文理论等水文科学核心理论的创新与发展；同时，综合勘测过程中多学科理论与技术的融合应用，能够促进水文科学与气象科学、地质科学、生态学、信息技术等相关学科的交叉融合，拓展水文科学的研究领域，提升水文科学的学科影响力。

第二节 水文要素综合勘测的发展历程与现状

水文要素综合勘测是水文科学体系的核心实践环节，是通过多技术手段对降水、蒸发、径流、泥沙、水质等关键水文要素进行系统监测、数据采集与综合分析的专业工作。其发展历程与人类对水文现象的认知深度、社会经济发展需求以及科学技术进步水平紧密关联，从早期经验性观测逐步走向现代化、智能化、网络化的综合勘测新阶段。梳理这一发展脉络，分析当前发展现状，对明确水文要素综合勘测的未来方向具有重要的理论与实践意义。

一、水文要素综合勘测的发展历程

水文要素勘测的起源可追溯至古代农业社会，彼时的勘测活动源于人类对水资源利用与水旱灾害防治的迫切需求，属于经验驱动下的初级观测阶段。在这一时期，生产力水平低下，科学理论体系尚未形成，人们对水文要素的监测主要依靠肉眼观察与简易工具测量，观测内容以河流水位、流量等与生产生活直接相关

的指标为主。例如，古代文明古国多在河流沿岸设立水尺，通过标记水位涨落记录汛期与枯水期的变化规律，这类观测行为具有明显的地域性与零散性特征，观测数据缺乏统一标准与系统整理，尚未形成“综合勘测”的概念与范式。

进入近代工业社会，水文要素勘测逐步从经验观测转向科学观测阶段，这一转变的核心驱动力来自近代自然科学的兴起与工业革命带来的技术革新。17世纪至19世纪，物理学、地理学、气象学等学科快速发展，为水文现象的机理研究提供了理论基础，人们开始以科学思维审视水文要素之间的内在联系，意识到单一要素观测无法完整揭示水文循环的全过程。与此同时，工业革命催生的精密仪器制造技术，推动了水文观测工具的升级，流速仪、蒸发器、雨量计等一批近代水文仪器相继问世，使得流量、蒸发量、降水量等水文要素的测量精度大幅提升。在这一背景下，各国开始逐步建立区域性水文观测站点，观测内容从单一要素向多要素拓展，观测数据的记录与整理趋于规范，水文要素勘测开始具备“综合性”的雏形。

20世纪以来，随着全球经济社会的快速发展，水资源开发利用强度不断加大，水旱灾害、水资源短缺、水污染等问题日益凸显，对水文要素勘测的系统性与全面性提出了更高要求，水文要素综合勘测由此进入系统发展阶段。20世纪中叶，水文科学形成独立的学科体系，水文循环理论、流域水文模型等理论成果的出现，为综合勘测提供了坚实的理论指导，明确了综合勘测需覆盖降水、径流、蒸发、下渗、泥沙、水质等全要素的技术方向。在技术层面，电子技术、通信技术的发展推动水文观测仪器向电子化、自动化方向转型，自记式雨量计、水位计等设备的普及，实现了水文数据的连续自动采集，摆脱了人工观测的时空限制。同时，区域性水文站网逐步整合为全国性水文监测网络，数据共享与综合分析成为可能，勘测工作从单一站点观测转向流域尺度的系统监测，“综合勘测”的内涵与外延得以正式确立。

20世纪末至今，信息技术的飞速发展与智能化技术的广泛应用，推动水文要素综合勘测迈入现代化与智能化发展阶段。以计算机技术、遥感技术（RS）、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）为代表的“3S”技术，以及物联网、大数据、人工智能等新兴技术，与水文勘测深度融合，彻底改变了传统勘测模式。遥感技术能够实现大范围、全天候的水文要素监测，突破了地面站网的空间限制，可快速获取流域内的降水分布、土壤含水量、水体面积等宏观信息；地理信息系

统为水文数据的存储、管理、分析与可视化提供了强大平台，实现了多源水文数据的整合与空间叠加分析；物联网技术则构建了“天地空”一体化的监测网络，使得水文站、雨量站、水质监测站等各类站点的数据能够实时传输、自动汇总。这一阶段的水文要素综合勘测，呈现出“全要素、全时空、智能化、网络化”的显著特征，勘测成果不仅为水资源管理、防洪减灾提供数据支撑，更成为全球气候变化研究、生态文明建设的重要基础数据。

二、水文要素综合勘测的发展现状

当前，全球水文要素综合勘测已形成较为完善的技术体系与管理体系，在勘测技术、站网建设、数据处理等方面取得了长足进步，同时也面临着新的挑战与发展机遇。

在勘测技术体系方面，现代化技术与设备的广泛应用，构建起“地面监测、空中遥感、空间探测”相结合的立体勘测格局。地面监测仍是水文要素综合勘测的基础，自动化、智能化观测设备已成为主流配置，雷达水位计、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、多参数水质监测仪等先进设备，实现了水位、流量、泥沙含量、pH值、溶解氧等要素的实时在线监测，测量精度与效率达到前所未有的高度。空中遥感勘测技术不断升级，从可见光遥感到微波遥感、高光谱遥感的发展，使得遥感技术能够穿透云层与植被覆盖，实现对复杂下垫面水文要素的精准监测，尤其在无资料地区的水文勘测中发挥着不可替代的作用。空间探测技术则为全球尺度的水文循环研究提供了支持，通过卫星搭载的各类传感器，可获取全球范围内的降水、蒸散发、冰川消融等水文要素数据，为研究气候变化对水文系统的影响提供了宏观视角。此外，无人机勘测技术的兴起，填补了地面监测与卫星遥感之间的尺度空白，其灵活性强、分辨率高的特点，适用于小流域、山区等复杂地形的精细化勘测，进一步完善了立体勘测技术体系。

在站网建设与布局方面，各国均已形成符合自身国情的水文监测站网体系，站网的覆盖范围与合理性不断提升。发达国家凭借技术与资金优势，已建成高密度、智能化的水文监测网络，站网布局兼顾了水资源管理、防洪减灾、生态保护等多重目标，能够实现对水文要素的精细化监测。发展中国家则根据自身需求，优先在重点流域、缺水地区、灾害易发区建设水文监测站点，逐步扩大站网覆盖范围。从全球范围来看，水文监测站网的发展呈现出“规模化、标准化、共享化”

的趋势，国际水文组织积极推动跨国界水文站网的合作与数据共享，旨在解决跨境河流水资源分配、水旱灾害联防联控等全球性问题。同时，站网建设更加注重生态水文监测，新增了大量针对生态流量、地下水水位、湿地水文等要素的监测站点，以适应生态文明建设的需求。

在数据处理与应用方面，大数据与人工智能技术的融入，推动水文数据从“海量积累”向“深度应用”转变。传统的水文数据处理多依赖人工分析与简单模型计算，效率低下且难以挖掘数据背后的复杂规律。如今，大数据技术能够对多源异构的水文数据进行清洗、整合与存储，构建起标准化的水文数据库；人工智能技术则为水文数据分析提供了新的方法，通过机器学习算法构建水文预测模型，可实现对洪水、干旱等水文极值事件的精准预报，提升防灾减灾的决策水平。此外，水文数据的应用领域不断拓展，除传统的水资源规划、工程设计外，还广泛应用于生态修复、智慧城市建设、农业灌溉优化等领域，为社会经济的可持续发展提供了有力支撑。

三、水文要素综合勘测面临的挑战与趋势

尽管水文要素综合勘测取得了显著进展，但在全球气候变化与人类活动加剧的双重影响下，仍面临诸多挑战。一方面，气候变化导致水文要素的时空分布规律更加复杂，极端水文事件的发生频率与强度明显增加，对勘测技术的适应性与数据的准确性提出了更高要求。传统的水文勘测与预测模型多基于历史数据构建，难以准确捕捉气候变化下的水文要素变异特征。另一方面，人类活动如城市化、水利工程建设、土地利用变化等，改变了流域下垫面条件，干扰了天然水文循环过程，使得水文要素的监测与模拟难度加大。此外，全球范围内水文监测站网的发展不均衡，部分地区尤其是发展中国家的偏远地区，站网密度不足，数据缺失严重，制约了全球水文数据的综合分析与应用。

未来，水文要素综合勘测将朝着智能化、精准化、一体化、全球化的方向发展。智能化是核心发展趋势，人工智能、物联网、区块链等技术将深度融入勘测的各个环节，实现从数据采集、传输、处理到应用的全流程智能化，例如通过智能传感器实现自主决策式监测，通过区块链技术保障水文数据的真实性与安全性。精准化发展则聚焦于提高勘测数据的精度与时空分辨率，满足精细化水资源管理与生态保护的需求，高光谱遥感、无人机激光雷达等技术的进一步应用，将推动水

文勘测向微观尺度延伸。一体化发展强调水文要素与气象、地质、生态等要素的协同勘测，构建“水文-气象-生态”一体化监测体系，以揭示多圈层相互作用下的水文循环规律。全球化发展则着眼于解决全球性水问题，加强国际间的技术合作与数据共享，构建全球水文监测网络，提升全球水文事件的预警与应对能力。

综上所述，水文要素综合勘测的发展历程，是一部人类认知水文规律、创新技术方法、适应社会需求的演进史。从早期的经验观测到现代化的智能勘测，其内涵与外延不断丰富，技术体系日趋完善。面对新的挑战与机遇，水文要素综合勘测需不断突破技术瓶颈，加强多学科融合与国际合作，为保障全球水资源安全、应对气候变化、实现可持续发展提供坚实的技术支撑。

第三节 综合勘测在水资源保护领域的应用范畴

一、水污染溯源与防控中的应用

水污染是当前水资源保护面临的主要挑战之一，精准的污染溯源与高效的污染防控是提升水资源保护成效的关键举措。综合勘测凭借其多技术融合、多维度监测的优势，能够实现对水污染来源的精准定位、污染扩散路径的动态追踪以及污染防控效果的实时评估，为水污染溯源与防控工作提供全流程的技术支撑。其应用主要体现在污染溯源勘测、污染扩散动态监测以及污染防控效果评估三个核心环节，形成了对水污染防控的闭环技术支撑体系。

（一）污染溯源勘测

污染溯源是水污染防控的前提，其核心目标是精准识别污染物的来源、种类、排放强度以及排放路径，为制定针对性的污染管控措施提供依据。综合勘测通过整合水质监测、水文监测、污染源排查、地球物理勘探等多种技术手段，打破了传统污染溯源中“点对点”排查的局限性，实现了对污染来源的系统化、精准化溯源。在面源污染溯源方面，综合勘测通过对区域内农业种植、畜禽养殖、城市径流、水土流失等面源污染潜在来源的全面排查，结合遥感监测、地表径流监测等技术手段，识别面源污染的主要贡献源。通过对不同区域、不同时段的面源污染负荷勘测，分析面源污染的时空分布特征，明确面源污染的关键影响因素，为制定面源污染防控措施提供精准指引。例如，通过对农业种植区的化肥农药使用

量、土壤养分流失量的勘测，结合地表径流水质监测数据，能够精准判断农业面源污染对周边水体的影响程度与贡献比例。

在点源污染溯源方面，综合勘测采用“排查—监测—验证”的递进式溯源思路，首先通过对区域内工业企业、污水处理厂、畜禽养殖小区等重点污染源排放单位的全面排查，梳理潜在污染排放源清单；随后通过在重点排放单位排污口、周边水体布设监测站点，实现对污染物排放浓度、排放量的实时监测，结合水文要素勘测结果，分析污染物的迁移转化路径；最后通过地球物理勘探、同位素示踪等技术手段，对污染来源进行精准验证，明确污染责任主体。针对隐蔽性点源污染，综合勘测通过地球物理勘探技术识别地下排污管道的分布的走向，结合地下水水质监测数据，精准定位隐蔽排污口的位置，为污染管控提供精准靶点。此外，综合勘测还能够通过对污染物种类、理化性质的分析，结合区域产业结构、污染源分布特征，实现对复合污染来源的精准溯源，为制定综合污染防治措施提供技术支撑。

（二）污染扩散动态监测

污染扩散动态监测是水污染防治的关键环节，其核心目标是实时掌握污染物的扩散范围、扩散速度以及影响区域，为及时采取应急防控措施、降低污染损失提供技术支撑。综合勘测通过构建“地面实时监测 + 遥感大范围监测 + 模型模拟预测”的立体化监测体系，实现了对污染扩散过程的全方位、动态化监测与预判。在地表水污染扩散监测方面，综合勘测通过在污染发生区域及周边水体布设实时监测站点，实现对污染物浓度、水流速度、水位等指标的实时监测，精准捕捉污染物的扩散动态。同时，利用无人机、卫星遥感等技术手段，实现对污染扩散范围的大范围、快速监测，尤其是在大型河流、湖泊等开阔水体污染监测中，遥感技术能够快速获取污染羽的空间分布范围，为应急处置方案制定提供直观依据。结合水文模型模拟分析，能够根据实时监测数据预判污染物的扩散路径与影响范围，为提前布设防控设施、转移受影响区域水资源使用者提供时间保障。

在地下水污染扩散监测方面，针对地下水污染隐蔽性强、扩散速度慢但影响周期长的特点，综合勘测通过布设地下水位、水质动态监测网，实现对地下水污染扩散过程的长期连续监测。利用地球物理勘探技术实时追踪地下水污染羽的迁移路径与扩散范围，结合地下水水流动力学模型，预判污染羽的演变趋势。同时，通过对地下水补给、径流、排泄条件的勘测分析，识别地下水污染扩散的关键通

道，为采取针对性的阻断措施提供技术支撑。此外，综合勘测还能够实现对跨界、跨区域污染扩散的监测，通过在跨界河流、输水干线等关键节点布设监测站点，实时监测污染物跨境扩散情况，为跨界水污染协同防控提供数据支撑。在突发水污染事件应急监测中，综合勘测能够快速响应，通过移动监测设备、无人机等技术手段快速开展现场勘测，实时掌握污染扩散动态，为应急处置决策提供精准、及时的技术支持，最大限度降低突发水污染事件造成的损失。

（三）污染防控效果评估

污染防控效果评估是检验水污染防治措施有效性、优化防控策略的重要依据，其核心目标是通过对比防控措施实施前后水资源质量、污染负荷等指标的对比分析，科学评估防控措施的实施成效。综合勘测通过构建常态化的监测评估体系，实现了对污染防控效果的动态跟踪评估与科学研判。在防控措施实施前，综合勘测通过对污染区域的全面勘测，明确污染现状、污染负荷以及影响范围，为制定防控措施提供基础数据，同时设定科学的评估基准值。在防控措施实施过程中，通过实时监测关键水质指标、污染负荷的变化情况，动态跟踪防控措施的实施效果，及时发现防控措施存在的问题并提出优化调整建议。例如，在工业污染管控措施实施过程中，通过监测企业排污口污染物排放浓度、排放量以及周边水体水质的变化，评估污染管控措施的有效性，若发现污染物排放未达标或周边水体水质未改善，及时调整管控措施。

在防控措施实施后，综合勘测通过对污染区域进行系统性的勘测评估，对比分析实施前后水资源质量、污染负荷、水生态系统状况等指标的变化，全面评估防控措施的长期成效。同时，结合区域社会经济发展状况，评估防控措施的经济效益、社会效益与生态效益，为后续污染防治策略优化提供科学依据。此外，综合勘测还能够针对不同类型的污染防治措施开展专项效果评估，例如对面源污染防控中的生态拦截工程、化肥农药减量措施，点源污染防控中的污水处理厂提标改造、排污口整治措施等，分别开展针对性的勘测评估，明确不同措施的适用场景与实施效果，为构建多元化的污染防治体系提供技术支撑。通过持续的污染防治效果评估，能够不断优化污染防治策略，提升水资源污染防治的精准性与有效性，推动水资源质量持续改善。

二、水生态系统保护与修复中的应用

水生态系统是水资源保护的核心载体，其健康状况直接关系到水资源的可持续利用。随着人类活动干扰强度的不断加大，水生态系统退化问题日益突出，如河流生态流量不足、湿地萎缩、水生生物多样性减少等，对水生态系统保护与修复工作提出了迫切需求。综合勘测通过对水生态系统关键要素的全面勘测、生态过程的系统分析，为水生态系统保护与修复方案制定、实施以及效果评估提供精准的技术支撑，其应用主要聚焦于水生态系统现状勘测评估、生态流量保障勘测以及水生态修复效果监测评估三个关键方向。

（一）水生态系统现状勘测评估

水生态系统现状勘测评估是水生态系统保护与修复的基础，其核心目标是精准掌握水生态系统的结构、功能状况以及退化程度，识别影响水生态系统健康的关键驱动因素。综合勘测通过整合水文监测、生态监测、遥感监测、实地调查等多种技术手段，实现了对水生态系统的全方位、系统化勘测评估。在水生态系统结构勘测方面，综合勘测涵盖了河流、湖泊、湿地等水体的形态结构勘测，如河流蜿蜒度、河道断面形态、湖泊岸线形态、湿地面积与分布等；同时，通过水生生物调查、植被调查等技术手段，掌握水生植物、水生动物、微生物的种类、数量与分布特征，明确水生生物多样性状况。例如，通过无人机遥感解译能够快速获取湿地的面积、分布范围以及变化情况，结合实地植被调查，掌握湿地植被的群落结构与覆盖度；通过水下生物监测设备，实现对水生动物的实时观测与种类识别，为水生生物多样性评估提供基础数据。

在水生态系统功能勘测评估方面，综合勘测通过对水体净化功能、水文调节功能、栖息地功能等关键生态功能的勘测分析，评估水生态系统的功能状况。例如，通过对水体中污染物降解能力的勘测，评估水体的净化功能；通过对河流径流调节能力、湿地蓄水能力的勘测，评估水生态系统的水文调节功能；通过对水生生物栖息地的水质、水文情势、底质条件等要素的勘测，评估栖息地的适宜性。同时，综合勘测还能够识别影响水生态系统健康的关键驱动因素，如水资源过度开发、水污染、水利工程建设、围湖造田等，通过对这些驱动因素的强度、影响范围的勘测分析，为制定针对性的保护与修复措施提供科学依据。此外，综合勘测还能够建立水生态系统健康评估指标体系，通过对各指标的量化勘测与综合分

析，实现对水生态系统健康状况的等级评估，为明确水生态修复的重点区域与优先级提供技术支撑。

（二）生态流量保障勘测

生态流量是维系河流、湖泊等水生态系统健康的关键要素，保障生态流量是水生态系统保护与修复的核心举措。综合勘测通过对河流生态流量需求的精准测算、生态流量保障状况的动态监测，为生态流量调控方案制定、实施提供技术支撑。在生态流量需求勘测测算方面，综合勘测结合水文观测数据、水生生物调查结果、河流形态勘测数据等，采用多种方法开展生态流量测算。通过对河流长系列径流量数据的分析，识别河流天然径流的时空分布特征与演变规律，明确维持河流基本生态功能的最小生态流量；通过对水生生物关键生活史阶段（如繁殖期、洄游期）的水文需求勘测，确定满足水生生物生存繁衍的适宜生态流量；结合河流形态、水质状况等勘测结果，综合测算保障河流生态系统完整的生态流量阈值。相较于传统单一的水文数据测算方法，综合勘测能够充分考虑水生态系统的多方面需求，提升生态流量测算的科学性与精准性。

在生态流量保障状况监测方面，综合勘测通过在河流关键断面布设水文监测站点，实现对生态流量下泄情况的实时监测，精准掌握生态流量的保障程度。同时，结合遥感监测技术，实现对河流、湖泊水面面积、湿地面积的动态监测，间接评估生态流量保障对水生态系统的影响。例如，通过监测河流关键断面的径流量，判断是否达到预设的生态流量阈值；通过监测湖泊水面面积的变化，评估生态流量补给对湖泊萎缩的遏制效果。此外，综合勘测还能够监测生态流量调控措施的实施效果，如水利工程生态调度、生态补水工程等，通过对调控前后河流径流量、水质状况、水生生物多样性等指标的对比分析，评估调控措施的有效性，为优化生态流量调控方案提供技术支撑。通过精准的生态流量勘测与保障，能够有效维系水生态系统的结构与功能，促进水生态系统的恢复与稳定。

（三）水生态修复效果监测评估

水生态修复效果监测评估是检验水生态修复工作成效、优化修复方案的关键环节，其核心目标是通过对修复区域水生态系统关键要素的动态监测与分析，科学评估修复措施对水生态系统结构与功能的改善效果。综合勘测通过构建“前期基线勘测—中期过程监测—后期成效评估”的全周期监测体系，实现了对水生态修复效果的系统化、精准化评估。在修复前期，综合勘测通过对修复区域的全面

勘测,明确水生态系统的基线状况,包括水质、水文、水生生物、植被覆盖等指标,为修复目标设定与修复方案制定提供基础数据,同时建立修复效果评估的基准体系。

在修复实施过程中,综合勘测通过实时监测修复区域的关键生态指标变化,动态跟踪修复措施的实施效果。例如,在河流生态修复工程中,监测河道形态、水流速度、水质指标、水生生物种类与数量的变化;在湿地修复工程中,监测湿地面积、水位、植被覆盖度、土壤含水量等指标的变化。通过过程监测,能够及时发现修复措施存在的问题,如生态修复材料选择不当、修复工程布局不合理等,为修复方案的及时调整提供技术支撑,确保修复工作朝着预设目标推进。在修复实施后,综合勘测通过对修复区域进行系统性的勘测评估,对比分析修复前后水生态系统结构与功能的变化,全面评估修复措施的长期成效。评估内容不仅包括水质改善、水生生物多样性提升、植被覆盖度提高等直接指标,还包括水生态系统水文调节功能、净化功能、栖息地功能等间接指标的改善情况。

同时,结合区域社会经济发展状况,评估水生态修复的社会效益与经济效益,如提升区域水资源保障能力、改善人居环境、促进生态旅游发展等。此外,综合勘测还能够针对不同类型的水生态修复措施开展专项效果评估,如生态护岸工程、水生植物种植工程、生态廊道建设工程等,明确不同修复措施的适用场景与实施效果,为构建多元化的水生态修复技术体系提供技术支撑。通过持续的水生态修复效果监测评估,能够不断优化修复策略与技术方法,提升水生态修复工作的科学性与有效性,推动水生态系统的持续改善与良性循环。

三、水资源开发利用监管中的应用

水资源开发利用监管是水资源保护的重要保障手段,其核心目标是规范水资源开发利用行为,遏制过度开发、无序开发等破坏水资源的行为,确保水资源的可持续利用。综合勘测通过对水资源开发利用全过程的动态监测、违规行为识别以及监管效果评估,为水资源开发利用监管提供精准、高效的技术支撑,构建起“事前预警—事中监管—事后评估”的全链条监管技术体系。其应用主要体现在水资源开发利用动态监测、违规开发利用行为勘测识别以及监管效果评估三个关键环节。

（一）水资源开发利用动态监测

水资源开发利用动态监测是水资源开发利用监管的基础，其核心目标是实时掌握区域水资源开发利用的动态变化情况，为监管决策提供及时、准确的数据支撑。综合勘测通过整合用水计量监测、水利工程运行监测、遥感监测等多种技术手段，实现了对水资源开发利用全过程的全方位动态监测。在取水环节监测方面，综合勘测通过在取水口布设智能计量监测设备，实现对取水量、取水时间、取水水质等指标的实时监测，精准掌握取水单位的取水行为。同时，通过对取水口位置、数量、取水方式的勘测，核查取水许可制度的执行情况，确保取水行为符合水资源保护要求。对于地下取水，通过地下水位动态监测网，实时监测地下取水对地下水资源数量的影响，及时发现过度开采地下水的行为。

在用水环节监测方面，综合勘测通过在工业、农业、生活等各类用水户布设用水监测设备，结合大数据分析技术，实现对用水量、用水结构、用水效率的动态监测。通过对工业用水重复利用率、农业灌溉水有效利用系数、生活用水定额等指标的实时监测，评估各类用水户的用水合理性，为开展精准化的用水监管提供依据。在排水环节监测方面，综合勘测通过对排污口的全面排查与监测，实现对排水量、排水水质的实时监测，核查排水单位是否符合污水排放标准，是否存在偷排、漏排等行为。同时，通过对排水管网的勘测，识别管网破损、渗漏等问题，避免污水渗入地下或直接排入水体造成污染。

此外，综合勘测还能够实现对水资源开发利用总量的动态监测，通过整合各环节监测数据，实时掌握区域水资源开发利用总量与控制指标的差距，为实施水资源总量控制管理提供技术支撑。在跨区域、跨流域水资源开发利用监测中，通过在关键跨界节点布设监测站点，实时监测水资源的流入、流出情况，为开展跨界水资源监管协作提供数据保障。

（二）违规开发利用行为勘测识别

违规开发利用行为是破坏水资源的主要诱因，精准识别违规行为是提升水资源开发利用监管成效的关键。综合勘测凭借其高精度、大范围、隐蔽性探测的技术优势，能够有效识别各类水资源违规开发利用行为，为监管执法提供精准靶点。在违规取水行为识别方面，综合勘测通过遥感影像解译、无人机巡查等技术手段，能够快速发现未经许可的非法取水口，尤其是在偏远山区、隐蔽区域的非法取水行为。通过对取水口的实地勘测与监测，核查其取水规模、取水方式以及对周边

水资源的影响，为执法处置提供依据。同时，通过地下水位动态监测数据与取水许可数据的对比分析，能够识别超许可取水量、超范围取水等违规行为。

在违规排污行为识别方面，综合勘测通过地球物理勘探技术能够识别地下隐蔽排污管道、非法排污口的位置与走向，结合水质监测数据，精准判断是否存在偷排、漏排污水的行为。通过对排污口排水水质的监测，能够识别超标排污、排放有毒有害污染物等违规行为。对于农业面源污染中的违规行为，如过量使用化肥农药、畜禽养殖污水直排等，综合勘测通过遥感监测、实地调查等技术手段，能够精准识别违规行为的发生区域与强度，为开展针对性的监管执法提供支撑。在违规破坏水生态系统行为识别方面，综合勘测通过遥感监测、无人机巡查等技术手段，能够快速发现围湖造田、非法采砂、破坏河道生态岸线、侵占湿地等违规行为。通过对违规行为影响区域的勘测评估，明确其对水生态系统结构与功能的破坏程度，为执法处置与生态修复提供技术依据。

此外，综合勘测还能够通过对水利工程运行数据的勘测核查，识别水利工程违规调度、违规蓄水等行为，如水利工程未按要求下泄生态流量、擅自改变工程用途等。通过对违规行为的精准识别与定位，能够大幅提升水资源监管执法的效率与精准度，有效遏制各类违规开发利用行为的发生，为水资源保护提供坚实的执法保障。

四、特殊水资源保护中的应用

特殊水资源是水资源体系中的重要组成部分，包括饮用水源地、地下水超采区、湿地、跨界水资源等，其保护工作具有特殊性、复杂性和高要求性。综合勘测针对特殊水资源的保护需求，结合其独特的水文、生态特征，提供定制化的勘测技术支撑，确保特殊水资源的安全与可持续利用。其应用主要聚焦于饮用水源地保护、地下水超采区治理以及湿地与跨界水资源保护三个关键领域。

（一）饮用水源地保护中的勘测应用

饮用水源地是保障城乡居民饮水安全的核心载体，其保护工作直接关系到人民群众的身体健康，具有极高的优先级。综合勘测通过对饮用水源地的全方位勘测评估、风险隐患监测以及保护效果评估，为饮用水源地保护提供精准的技术支撑。在饮用水源地现状勘测评估方面，综合勘测通过对水源地汇水区域、取水口周边的水文、水质、生态环境等要素的全面勘测，明确水源地的水资源数量、质

量状况以及水生态系统健康状况。通过对水源地水质指标的系统监测，包括常规水质指标、微量有机污染物、重金属等，评估水源地水质达标情况；通过对水源地汇水区域的污染源排查，识别潜在的污染风险源，为水源地保护范围划定、保护措施制定提供基础数据。

在水源地风险隐患监测方面，综合勘测构建了“常态化监测 + 应急监测”的双重监测体系。在常态化监测中，通过在水源地汇水区域、取水口布设实时监测站点，实现对水质、水文、污染源等指标的持续监测，及时发现水质异常变化，预警潜在的污染风险。在突发污染事件应急监测中，综合勘测能够快速响应，通过移动监测设备、无人机等技术手段快速开展现场勘测，精准定位污染来源、评估污染程度与影响范围，为应急处置决策提供技术支持，最大限度保障饮用水安全。此外，综合勘测还能够对饮用水源地保护措施的实施效果进行评估，如水源地隔离防护工程、生态缓冲带建设、污染源整治等措施，通过对保护措施实施前后水源地水质、生态环境等指标的对比分析，评估保护措施的有效性，为优化水源地保护方案提供技术支撑。同时，通过对水源地周边人类活动的监测，识别可能影响水源地安全的违规行为，为水源地监管提供依据。

（二）地下水超采区治理中的勘测应用

地下水超采是当前水资源保护面临的突出问题，长期超采会导致地下水位下降、地面沉降、含水层枯竭等一系列生态环境问题，对地下水超采区的治理已成为水资源保护的重要任务。综合勘测通过对地下水超采区的精准勘测评估、治理过程监测以及治理效果评估，为地下水超采区治理提供全流程的技术支撑。在超采区现状勘测评估方面，综合勘测通过地下水位监测网布设、地质钻探、地球物理勘探等技术手段，精准掌握超采区的范围、超采量、地下水位下降速率以及含水层结构变化情况。通过对长系列地下水位监测数据的分析，识别超采区的形成过程与演变规律；通过对地面沉降、地裂缝等地质灾害的勘测，评估超采对地质环境的影响；通过对超采区周边水资源状况的勘测，评估超采对地表水资源、水生态系统的影响，为制定科学的治理方案提供基础数据。

在治理过程监测方面，综合勘测通过对治理措施实施过程的动态监测，确保治理工作有序推进并达到预期目标。针对地下水禁采、限采措施，通过地下水位动态监测，实时掌握地下水位的恢复情况；针对地下水回补工程，通过对回补水源水质、回补量、回补区域地下水位变化的监测，评估回补工程的效果；针对替

代水源工程，通过对替代水源的数量、质量以及供水范围的监测，评估替代水源对遏制超采的支撑作用。同时，通过对地面沉降、地裂缝等地质灾害的持续监测，评估治理措施对缓解地质灾害的效果。在治理效果评估方面，综合勘测通过对超采区治理前后地下水位、含水层储量、地质环境、水生态系统等指标的对比分析，全面评估治理措施的长期成效。评估内容包括地下水位是否回升、含水层储量是否增加、地面沉降是否得到遏制、水生态系统是否得到恢复等。

同时，结合区域社会经济发展状况，评估治理工作的社会效益与经济效益，如保障城乡供水安全、改善生态环境、促进农业可持续发展等。通过持续的勘测评估，能够不断优化地下水超采区治理方案，提升治理成效，推动超采区地下水资源的可持续利用。

（三）湿地与跨界水资源保护中的勘测应用

湿地作为重要的水生态系统，具有涵养水源、净化水质、调节气候、维护生物多样性等多种生态功能；跨界水资源则关系到区域间的水资源安全与协调发展，两者的保护工作均具有特殊性与复杂性。综合勘测针对湿地与跨界水资源的保护需求，提供精准的技术支撑，保障其生态功能的发挥与合理利用。在湿地保护勘测方面，综合勘测通过遥感监测、无人机巡查、实地调查等技术手段，实现对湿地面积、分布范围、植被覆盖度、水文情势等关键要素的动态监测。通过对湿地水质、土壤含水量、地下水水位等指标的勘测，评估湿地的生态功能状况；通过对湿地内水生生物、鸟类等生物资源的调查，评估湿地的生物多样性状况。同时，通过对湿地周边人类活动的监测，识别影响湿地生态功能的违规行为，如围湖造田、非法占用湿地、过度开发湿地资源等，为湿地保护监管提供依据。此外，综合勘测还能够对湿地修复工程的效果进行监测评估，如湿地补水工程、植被恢复工程等，通过对修复前后湿地生态指标的对比分析，评估修复效果，为优化湿地保护与修复方案提供技术支撑。

在跨界水资源保护勘测方面，综合勘测通过在跨界河流、湖泊、输水干线等关键节点布设监测站点，实现对跨界水资源数量、质量的实时监测，精准掌握水资源的跨界流动情况。通过对跨界水资源时空分布特征的勘测分析，明确区域间的水资源分配关系；通过对跨界水污染的监测，识别污染来源与责任主体，为跨界水污染协同防控提供技术支撑。同时，综合勘测能够为跨界水资源保护协作提供基础数据支撑，通过对跨界水资源开发利用现状、水资源承载能力的勘测评估，

为区域间制定公平合理的水资源分配方案、协同保护策略提供科学依据。此外，综合勘测还能够对跨界水资源保护措施的实施效果进行评估，如跨界水污染治理工程、水资源调配工程等，通过对实施前后跨界水资源状况的对比分析，评估措施的有效性，为优化跨界水资源保护协作机制提供技术支撑。

综合勘测作为水资源保护领域的核心技术支撑手段，其应用范畴贯穿于水资源保护的全流程、各环节，涵盖水资源现状清查与评估、水污染溯源与防控、水生态系统保护与修复、水资源开发利用监管以及特殊水资源保护等多个关键领域，形成了全方位、多层次的技术支撑体系。在不同应用领域中，综合勘测凭借其多要素、高精度、系统化的技术优势，有效解决了传统勘测手段的局限性，为水资源保护策略制定、措施实施以及效果评估提供了精准、可靠的基础数据与技术保障。随着水资源保护工作的不断深入，以及勘测技术的持续创新，综合勘测在水资源保护领域的应用将更加精准、高效、智能化，其应用范畴也将进一步拓展与深化。未来，应进一步加强综合勘测技术的研发与融合应用，完善勘测技术标准体系，提升勘测数据的共享与利用效率，充分发挥综合勘测在水资源保护中的核心支撑作用，为推动水资源可持续利用、保障水生态安全提供更强有力的技术保障。

第二章 水文要素特性及其综合表征

第一节 主要水文要素的分类与基本特性

水文要素是水文系统运行变化的核心载体，是表征自然界水循环过程及水文现象本质特征的基本单元。在水文要素综合勘测工作中，准确界定主要水文要素的类型、明晰其核心特性，是构建勘测指标体系、选择科学勘测方法、保障勘测数据有效性的前提基础。自然界水文过程的复杂性决定了水文要素的多样性，不同水文要素在空间分布、时间演变、影响机制等方面存在显著差异，但其变化均遵循水循环的内在规律，且相互关联、相互制约，共同构成了完整的水文系统。本节基于水循环过程的内在逻辑，对主要水文要素进行科学分类，系统剖析各类水文要素的基本特性，为后续水文要素的综合表征与勘测工作提供理论支撑。

一、主要水文要素的分类依据与分类体系

水文要素的分类并非随意划分，而是需遵循科学性、系统性、实用性的基本原则。科学性原则要求分类依据需贴合水文要素的本质属性与水循环的客观规律，确保分类逻辑的严谨性；系统性原则强调需统筹水文要素间的内在关联，避免孤立划分，保障分类体系的完整性；实用性原则则要求分类结果能为水文勘测实践提供明确指引，具备较强的可操作性。基于上述原则，结合水文勘测工作的实际需求，可从水文要素的存在形态、运动形式、作用功能等多个维度构建分类依据，形成层次清晰、覆盖全面的分类体系。

（一）按存在形态划分

按存在形态划分是水文要素最基础的分类方式，核心依据是水文要素在自然界中呈现的物质形态差异，该分类方式能直观反映水文要素的物理特征，为勘测手段的选择提供基础参考。根据这一依据，可将主要水文要素分为液态水文要素、固态水文要素和气态水文要素三大类。

液态水文要素是自然界中分布最广泛、参与水文循环最活跃的水文要素类型，

其核心特征是具有良好的流动性和溶解性，能够在重力作用下发生空间迁移，是水文勘测工作的核心关注对象。常见的液态水文要素包括地表水、地下水、壤中流等，其中地表水又可进一步细分为河流径流、湖泊水、沼泽水等，地下水则可根据埋藏条件分为潜水、承压水等。此类水文要素的存在形态受温度、压力等环境因素影响较小，稳定性较强，是维系生态系统平衡和人类生产生活用水的主要水源。

固态水文要素是液态水文要素在低温环境下转化形成的产物，其存在形态与温度条件密切相关，具有明显的季节性和地域性特征。常见的固态水文要素包括冰川、积雪、冻土中的冰体等。冰川是固态水文要素的重要组成部分，主要分布在高纬度地区和高海拔山区，是地球上重要的淡水资源储备库；积雪则主要分布在中高纬度地区和山区，冬季积累、春季消融，其消融过程会对河流径流产生显著影响，是春季汛期形成的重要诱因之一；冻土中的冰体是冻土区水文循环的重要组成部分，其冻融过程会改变土壤的渗透性和含水量，进而影响地下水的补给和径流过程。

气态水文要素是水文要素在水汽蒸发、蒸腾作用下形成的产物，以水蒸气的形式存在于大气中，具有较强的流动性和扩散性，是水文循环中连接地表水、地下水与大气圈的关键纽带。常见的气态水文要素主要为大气水汽，其含量通常用相对湿度、绝对湿度等指标表征。大气水汽的空间分布极不均匀，受纬度、海陆位置、地形、植被覆盖等多种因素影响，其迁移和转化过程（如凝结、降水）是形成地表水和地下水补给的重要前提，对区域水文循环的强度和节奏具有决定性影响。

（二）按运动形式划分

按运动形式划分的核心依据是水文要素在水循环过程中的运动特征差异，该分类方式能清晰反映水文要素的动态变化规律，为分析水文过程的演变机制提供重要支撑。根据这一依据，可将主要水文要素分为径流类水文要素、蒸发蒸腾类水文要素、降水类水文要素三大类。

径流类水文要素是指在重力作用下沿地表或地下流动的水文要素，其运动具有明确的方向性和连续性，是水循环中地表径流和地下径流形成的核心载体。常见的径流类水文要素包括地表径流、地下径流、壤中流等。地表径流的运动主要受地形、地貌、植被覆盖等下垫面条件影响，运动路径较为复杂，流速和流量变

化较大；地下径流的运动则受地质构造、土壤孔隙度、渗透率等因素制约，运动速度相对缓慢，流量变化较为平稳；壤中流是介于地表径流和地下径流之间的径流类型，运动于土壤孔隙和岩石裂隙中，其运动特征兼具地表径流和地下径流的部分特点，对山区小流域的水文过程具有重要影响。

蒸发蒸腾类水文要素是指从地表或植被表面转化为气态进入大气的水文要素，其运动形式表现为分子扩散和气流输送，是水循环中水汽来源的重要组成部分。常见的蒸发蒸腾类水文要素包括水面蒸发、土壤蒸发、植被蒸腾等。水面蒸发是指水体表面的水汽蒸发过程，其强度主要受温度、风速、湿度等气象因素影响；土壤蒸发是指土壤中水分的蒸发过程，受土壤含水量、土壤质地、地表覆盖等因素制约；植被蒸腾是指植物通过叶片气孔将水分散发到大气中的过程，与植被类型、生长状况、气象条件等密切相关。蒸发蒸腾类水文要素的运动强度直接影响区域水资源的收支平衡，是评估区域干旱程度的重要指标。

降水类水文要素是指大气中的水汽凝结后降落到地表的水文要素，其运动形式表现为垂直下落，是水循环中水资源补给的主要来源。常见的降水类水文要素包括降雨、降雪、冰雹、霜、露等。降雨是最常见的降水类型，其运动特征受降水强度、降水历时、雨滴大小等因素影响，不同强度的降雨对地表径流的形成和土壤侵蚀的影响存在显著差异；降雪是高纬度地区和高海拔山区的主要降水类型，其运动和积累过程受温度、风速等因素制约，积雪的消融过程是区域水资源补给的重要环节；冰雹、霜、露等降水类型的出现频率相对较低，但对局部地区的水文过程和生态环境也会产生一定影响。

（三）按作用功能划分

按作用功能划分的核心依据是水文要素在水循环系统及生态环境中的作用与功能差异，该分类方式能凸显水文要素的实用价值，为针对性开展水文勘测工作提供明确导向。根据这一依据，可将主要水文要素分为水资源补给类水文要素、水文过程驱动类水文要素、生态支撑类水文要素三大类。

水资源补给类水文要素是指直接为地表水体和地下水体提供补给的水文要素，是维系区域水资源总量平衡的核心要素。常见的水资源补给类水文要素包括降水、冰川融水、积雪融水、跨区域径流等。降水是最主要的水资源补给要素，其补给量和补给时空分布直接决定区域水资源的丰富程度；冰川融水和积雪融水是干旱半干旱地区和山区的重要水资源补给来源，其补给过程具有明显的季节性；

跨区域径流是流域间水资源调配的重要载体，对缺水地区的水资源保障具有重要意义。此类水文要素的勘测是评估区域水资源承载力的关键基础。

水文过程驱动类水文要素是指推动水循环过程开展、影响水文现象演变的水文要素，其动态变化直接主导水文过程的节奏和强度。常见的水文过程驱动类水文要素包括径流、蒸发蒸腾、地下水运动等。径流的运动过程驱动了地表水体的更新和迁移，是连接陆地水文系统与海洋水文系统的关键纽带；蒸发蒸腾过程驱动了水汽的上升和迁移，是形成降水的重要前提；地下水运动过程驱动了地下水资源的更新和循环，对地表水资源的补给和排泄具有重要调节作用。此类水文要素的动态变化规律是分析区域水文过程演变趋势的核心内容。

生态支撑类水文要素是指为生态系统稳定运行提供支撑的水文要素，其数量和质量直接影响生态系统的结构和功能。常见的生态支撑类水文要素包括河流水、湖泊水、地下水、土壤水等。河流水和湖泊水为水生生物提供了生存栖息地，其水质和水量变化直接影响水生生态系统的稳定性；地下水和土壤水为陆生植物提供了生长所需的水分，其分布和含量变化影响植被的生长状况和分布格局；同时，生态支撑类水文要素还通过调节区域气候、净化环境等方式维系生态系统的平衡。此类水文要素的勘测是开展生态环境评估和生态保护工作的重要基础。

二、主要水文要素的基本特性

不同类型的水文要素虽在存在形态、运动形式和作用功能上存在差异，但均具备一些共通的基本特性，同时各类水文要素也拥有独特的个性特性。这些特性是水文要素本质属性的集中体现，也是水文勘测工作需重点把握的核心内容。深入剖析水文要素的基本特性，有助于精准识别水文现象的演变规律，提升水文勘测工作的科学性和有效性。

（一）水文要素的共性特性

1. 时空分布的不均匀性

时空分布的不均匀性是所有水文要素最核心的共性特性之一，指水文要素的数量、强度、形态等在时间维度和空间维度上均存在显著的差异分布特征。这种不均匀性是由气象因素、地形地貌、地质条件、植被覆盖等多种因素共同作用的结果，是水循环过程复杂性的直接体现。

在时间维度上，水文要素的不均匀性主要表现为季节性变化、年际变化和多年

年变化。以降水为例,多数地区的降水存在明显的季节性差异,分为雨季和旱季,雨季降水集中,旱季降水稀少;同时,降水的年际变化也十分显著,不同年份的降水量差异较大,存在丰水年和枯水年的交替;从多年尺度来看,降水还存在长期的波动变化趋势。径流、蒸发蒸腾等水文要素也具有类似的时间不均匀性特征,如河流径流的季节性变化与降水的季节性变化密切相关,夏季径流量大,冬季径流量小;蒸发蒸腾强度则随季节温度的变化而变化,夏季强度大,冬季强度小。

在空间维度上,水文要素的不均匀性主要表现为区域差异、流域差异和地形差异。以大气水汽为例,沿海地区的大气水汽含量明显高于内陆地区,湿润地区高于干旱地区;从地形来看,山区的大气水汽含量受地形抬升作用影响,通常高于平原地区。径流的空间分布也存在显著差异,我国南方地区河网密集,径流量大,北方地区河网稀疏,径流量小;同一流域内,上游地区的径流以山区径流为主,流速大,下游地区的径流以平原径流为主,流速小。地下水的空间分布则受地质构造和土壤质地影响,孔隙度大、渗透性好的区域地下水含量丰富,反之则地下水含量稀少。

2. 动态变化的连续性

动态变化的连续性是水文要素的另一重要共性特性,指水文要素的变化过程是连续不间断的,不存在突变性的中断,其变化状态能够通过时间序列的形式进行表征。这一特性源于水循环过程的连续性,水循环是一个持续不断的过程,在这一过程中,水文要素不断发生形态转化和空间迁移,其变化过程与水循环过程同步,具备显著的连续性。

水文要素的连续性主要体现在时间维度的变化上,无论是短期的小时尺度、日尺度变化,还是长期的年尺度、多年尺度变化,水文要素的状态均是连续过渡的。以河流径流为例,从一场降雨事件来看,径流的形成过程是从降雨初期的下渗补给,到地表径流的产生,再到径流量的峰值,最后到径流量的衰减,整个过程是连续不间断的,径流量的变化呈现出平滑的过渡特征;从年尺度来看,河流径流的变化从年初的枯水期,到汛期的径流量增长,再到汛后的径流量回落,也是一个连续的变化过程。蒸发蒸腾、地下水水位等水文要素的变化也具备类似的连续性特征,如地下水水位的变化受降水补给和径流排泄的影响,其水位升降过程是连续的,不会出现突然的升降跳跃。

水文要素的连续性为水文勘测工作提供了重要的理论支撑,基于这一特性,

可通过对水文要素的连续观测，构建完整的时间序列数据，进而分析其变化规律和演变趋势，为水文预测预报工作提供数据基础。

3. 要素间的关联性与耦合性

要素间的关联性与耦合性是水文要素的核心共性特性之一，指各类水文要素并非孤立存在，而是相互关联、相互影响、相互制约，形成一个有机的整体，共同参与水循环过程。这种关联性与耦合性是由水循环的内在规律决定的，某一水文要素的变化会通过水循环链条传递给其他水文要素，引发连锁反应。

水文要素的关联性主要体现在要素间的相互补给和相互转化上。例如，降水是地表径流、地下水、土壤水的主要补给来源，降水的变化会直接影响地表径流的径流量、地下水的水位和土壤水的含水量；地表径流和地下径流之间也存在相互补给关系，在河流汛期，地表径流会补给地下水，抬高地下水水位，在河流枯水期，地下水会补给地表径流，维持河流的基流；土壤水则是连接地表水和地下水的中间载体，土壤水的下渗会补给地下水，土壤水的蒸发会转化为大气水汽，参与降水过程。

水文要素的耦合性则体现在要素间的协同变化上。例如，蒸发蒸腾强度的增大会导致大气水汽含量的增加，进而可能引发降水强度的变化；降水强度的增大则会导致地表径流的增加和土壤含水量的饱和，进而影响地下水的补给过程。这种耦合关系使得水文系统形成了一个复杂的反馈机制，某一要素的微小变化可能会被放大，对整个水文系统的运行产生显著影响。要素间的关联性与耦合性要求在水文勘测工作中，不能孤立地对单一水文要素进行勘测，而需统筹考虑各类水文要素的相互影响，构建全面的勘测体系。

（二）各类水文要素的个性特性

1. 地表水要素的个性特性

地表水要素主要包括河流径流、湖泊水、沼泽水等，其核心个性特性表现为流动性强、响应速度快、受下垫面条件影响显著。河流径流是地表水要素中流动性最强的类型，其流动速度和径流量受地形坡度、河网密度、降水强度等因素影响，对降水的响应速度极快，通常在降雨后短时间内就会出现径流量的增长，形成洪水过程。湖泊水的流动性相对较弱，以蓄水量的变化为主，其水位变化速度较慢，对降水和径流的调节作用显著，能够减缓河流径流的洪峰流量，补充枯水期的径流量。沼泽水的流动性最差，主要以土壤水和浅层地下水的形式存在，其

含水量高,渗透性差,对区域的水文循环具有重要的调节作用,能够增加下渗量,减少地表径流,延缓洪水过程。

此外,地表水要素还具有明显的开放性特征,其水量和水质易受人类活动影响。例如,河流径流的径流量会因水利工程的调蓄、跨流域调水等人类活动而发生变化;湖泊水和沼泽水的水量则可能因围湖造田、沼泽开垦等人类活动而减少。同时,地表水要素的水质也易受工业废水、生活污水、农业面源污染等影响,其水质变化直接反映区域的生态环境状况。

2. 地下水要素的个性特性

地下水要素主要包括潜水、承压水、裂隙水、岩溶水等,其核心个性特性表现为埋藏性、稳定性强、运动速度缓慢、补给排泄过程漫长。地下水埋藏于地下土壤和岩石的孔隙、裂隙、溶洞中,无法直接观测,需要通过钻井、测井等专门的勘测手段才能获取其相关信息,这一埋藏性特征增加了地下水勘测工作的难度。与地表水相比,地下水的动态变化相对稳定,其水位、水量、水质的变化速度缓慢,受短期气象因素的影响较小,主要受长期降水补给和地质条件的制约。

地下水的运动速度极其缓慢,通常以厘米/天或米/年的量级运动,远低于地表水的运动速度,这使得地下水的循环周期漫长,从几年到几十年甚至上百年不等。地下水的补给过程主要通过土壤下渗、地表水入渗等方式进行,补给量相对有限;排泄过程则主要通过泉眼溢出、地下径流补给地表水、人工开采等方式进行,补给与排泄的平衡关系决定了地下水的动态变化。此外,地下水还具有储水性强的特性,地下土壤和岩石的孔隙、裂隙、溶洞等能够储存大量的地下水,形成地下水库,是区域水资源的重要储备形式。

3. 降水要素的个性特性

降水要素主要包括降雨、降雪、冰雹等,其核心个性特性表现为随机性强、时空变异性大、强度差异显著。降水的形成过程受大气环流、水汽输送、地形条件等多种复杂因素影响,其发生时间、发生地点、降水强度、降水历时等均具有较强的随机性,无法通过简单的规律进行精准预测。降水的时空变异性是各类水文要素中最显著的,在空间上,即使是同一区域的不同位置,降水强度和降水量也可能存在巨大差异,形成“十里不同天”的现象;在时间上,降水的季节性差异、年际差异均十分显著,丰水年与枯水年的降水量可能相差数倍。

降水的强度差异显著,不同类型的降水强度差异较大,即使是同一类型的降

水,其强度也可能在短时间内发生剧烈变化。例如,降雨可分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨等不同等级,暴雨的降水强度可达每小时数十毫米甚至上百毫米,而小雨的降水强度则不足每小时 2.5 毫米。降水强度的差异直接影响地表径流的形成速度和洪峰流量的大小,高强度的降水极易引发山洪、滑坡、泥石流等自然灾害。此外,降水要素还具有形态多样性的特征,受温度条件的影响,可呈现为液态的降雨、固态的降雪、冰雹等多种形态,不同形态的降水对水文过程的影响也存在显著差异。

4. 蒸发蒸腾要素的个性特性

蒸发蒸腾要素主要包括水面蒸发、土壤蒸发、植被蒸腾等,其核心个性特性表现为受气象因素影响显著、过程复杂性高、区域性强。蒸发蒸腾过程是水文要素从液态或固态转化为气态的过程,其强度直接受温度、风速、湿度、太阳辐射等气象因素的制约,其中温度是影响蒸发蒸腾强度的最核心因素,温度升高会显著加快蒸发蒸腾速度。风速的增大能够加速地表水汽的扩散,降低地表附近的湿度,从而促进蒸发蒸腾过程;太阳辐射则为蒸发蒸腾过程提供能量,增强蒸发蒸腾强度。

蒸发蒸腾过程的复杂性体现在其受多种因素的综合影响,除气象因素外,还受下垫面条件的显著影响。例如,水面蒸发受水体面积、水深、水质等因素影响;土壤蒸发受土壤含水量、土壤质地、地表覆盖度等因素影响;植被蒸腾则受植被类型、生长阶段、叶片面积等因素影响。不同下垫面条件下的蒸发蒸腾强度差异较大,即使在相同的气象条件下,水面蒸发强度也远大于土壤蒸发强度。此外,蒸发蒸腾要素还具有显著的区域性特征,不同区域的气象条件和下垫面条件存在差异,导致蒸发蒸腾强度的区域分布极不均匀,湿润地区的蒸发蒸腾强度通常高于干旱地区,植被覆盖度高的区域通常高于植被覆盖度低的区域。

5. 固态水文要素的个性特性

固态水文要素主要包括冰川、积雪、冻土冰体等,其核心个性特性表现为强季节性、高敏感性、积累与消融的周期性。固态水文要素的存在和变化与温度条件密切相关,具有极强的季节性特征,冬季温度降低,液态水文要素转化为固态水文要素,实现积累;春季和夏季温度升高,固态水文要素转化为液态水文要素,实现消融。例如,积雪通常在冬季积累,春季消融;冰川则在低温季节积累,高温季节消融,其积累与消融的平衡关系决定了冰川的体积变化。

固态水文要素对气候变化具有极高的敏感性，温度的微小变化就会导致其积累和消融过程的显著变化。全球气候变暖背景下，冰川和积雪的消融速度加快，导致冰川体积缩小、积雪覆盖面积减少，进而影响区域的水资源补给和水文循环过程。固态水文要素的积累与消融具有明显的周期性，积雪的积累与消融周期通常为一年，而冰川的积累与消融周期则长达数十年甚至上百年。此外，固态水文要素还具有分布的地域性特征，主要集中在高纬度地区和高海拔山区，这些区域的温度条件能够满足固态水文要素的存在需求，形成了独特的固态水文系统。固态水文要素的消融过程是区域水资源的重要补给来源，其消融量和消融速度直接影响河流径流的季节性变化，对区域的水资源平衡和生态环境具有重要影响。

综上所述，主要水文要素的分类体系基于不同的划分维度形成了层次清晰、覆盖全面的框架，各类水文要素既具备时空分布不均匀性、动态变化连续性、要素间关联性与耦合性等共性特性，又拥有独特的个性特性。准确把握水文要素的分类体系和基本特性，是开展水文要素综合勘测工作的前提和基础，能够为勘测指标的确定、勘测方法的选择、勘测数据的解读提供科学指引，进而提升水文勘测工作的质量和效率，为水资源的合理开发利用、水旱灾害的防治、生态环境的保护提供有力支撑。

第二节 水文要素的时空变异性特征

一、水文要素的时间变异性特征

水文要素的时间变异性贯穿于水文循环的全过程，不同时间尺度下的变异规律存在显著差异，且呈现出周期性、随机性、趋势性与波动性叠加的复杂特征。根据时间尺度的差异，可将水文要素的时间变异性划分为短时间尺度变异性、中时间尺度变异性与长时间尺度变异性三类，不同尺度的变异特征由不同的驱动因素主导，共同构成了水文要素时间演化的完整脉络。

（一）短时间尺度变异性

短时间尺度变异性通常对应小时、日、旬等短时间跨度，其核心特征是变异频率高、波动幅度大、随机性强，主要受短期气象过程与局部地形条件的直接驱动。在这一尺度下，降水、径流、蒸发等水文要素的变化尤为剧烈，且要素之间

的响应关系更为直接、迅速。以降水要素为例，短时间尺度内的降水受对流天气、锋面活动等短期气象系统的影响，呈现出显著的阵发性、局地性特征，降水强度、降水历时的波动幅度极大，可能在短时间内出现强降水与无降水的剧烈切换；与之对应的径流要素，在短时间尺度内会对降水产生快速响应，尤其是在山区或坡度较大的区域，地表径流可能在降水后短时间内形成峰值，随后迅速衰减，呈现出陡峭的洪峰过程，这种快速波动特征直接决定了短时洪涝灾害的发生风险。

除降水与径流外，蒸发要素的短时间尺度变异性也较为显著，其变化主要受日际间的气温、风速、相对湿度等气象要素的波动影响。在日内尺度上，蒸发量会随太阳辐射强度的变化呈现出明显的昼夜差异，白天蒸发量显著高于夜间；在日际尺度上，受天气系统的影响，蒸发量可能出现较大幅度的波动，如晴天蒸发量显著高于阴天或雨天。短时间尺度的水文要素变异性虽然持续时间短，但对水文勘测的时效性与精度要求极高，尤其是在极端降水、短时洪水等突发事件的监测中，需要精准捕捉水文要素的快速变异过程，为灾害预警提供及时的数据支撑。

（二）中时间尺度变异性

中时间尺度变异性对应的时间跨度通常为月、季、年，其核心特征是变异呈现出明显的周期性规律，同时叠加一定的随机性波动，主导驱动因素为气候系统的季节性波动与下垫面的季节性特征。在中时间尺度下，水文要素的变化与气候季节更替密切相关，形成了稳定的季节性周期，这也是中时间尺度变异性与短时间尺度变异性的核心差异。以我国季风气候区为例，受夏季风与冬季风的交替影响，降水要素在年尺度上呈现出明显的季节性分布，夏季降水充沛，冬季降水稀少，形成了显著的雨旱两季交替格局；径流要素随之呈现出季节性波动，夏季为汛期，径流量大、水位高，冬季为枯水期，径流量小、水位低，这种季节性周期特征在多年间呈现出相对稳定的规律。

除季节性周期外，中时间尺度的水文要素变异性还可能受到年际间气候波动的影响，呈现出一定的年际差异。例如，受厄尔尼诺、拉尼娜等气候现象的影响，某一区域的年降水量可能出现偏多或偏少的波动，对应的年径流量也会随之发生调整。与短时间尺度相比，中时间尺度的水文要素变异性虽然波动幅度相对较小，但持续时间更长，对区域水资源的年内分配、农业灌溉、城市供水等具有直接影响。在水文勘测中，中时间尺度的变异性特征是确定勘测频次、优化观测方案的重要依据，通过长期监测捕捉中时间尺度的变异规律，能够为水资源的年内调度

与年际统筹提供关键支撑。

（三）长时间尺度变异性

长时间尺度变异性对应的时间跨度通常为年代际、百年际甚至更长，其核心特征是变异呈现出明显的趋势性与阶段性，主导驱动因素为全球气候变化、下垫面长期演化及人类活动的累积影响。在长时间尺度下，水文要素的变化不再局限于短期的波动或季节性的周期，而是呈现出持续的上升或下降趋势，同时可能在不同的历史阶段呈现出不同的变异规律，这种趋势性变化对区域水资源格局的长期演化具有决定性影响。

全球气候变化是驱动水文要素长时间尺度变异性的核心因素之一，全球气温的持续上升会直接影响降水的时空分布、蒸发的强度与范围，进而导致径流、水位等要素的长期趋势性变化。例如，在全球变暖背景下，高纬度地区的降水可能呈现持续增加趋势，而部分干旱半干旱地区的降水则可能持续减少，导致区域径流的长期演变呈现差异化趋势。此外，下垫面的长期演化，如植被覆盖的自然变化、土壤理化性质的长期改变等，也会通过影响产汇流过程，导致水文要素的长时间尺度变异。人类活动的累积影响则是近代以来水文要素长时间尺度变异的重要驱动因素，大规模的水利工程建设、城市化进程、农业灌溉等活动，会从根本上改变水文循环的路径与强度，导致水文要素的长期趋势发生显著改变。

长时间尺度的水文要素变异性虽然变化速率相对缓慢，但影响范围广、持续时间长，对区域水资源的长期规划、生态系统的长期稳定具有深远意义。在水文勘测中，需要通过长序列的观测数据，捕捉水文要素的长时间尺度变异趋势，厘清自然因素与人类活动的贡献份额，为水资源的长期开发利用规划、应对气候变化的水资源适应性管理提供理论与数据支撑。

二、水文要素的空间变异性特征

水文要素的空间变异性是水文过程在空间维度上的分异体现，受下垫面条件的空间异质性、气候要素的空间分布差异及人类活动的空间不均衡性共同驱动，呈现出显著的区域分异、梯度分布与局部集聚特征。根据空间尺度的差异，可将水文要素的空间变异性划分为宏观尺度变异性、中观尺度变异性与微观尺度变异性三类，不同尺度的变异特征具有不同的表现形式与主导驱动因素，共同构成了水文要素的空间分布格局。

（一）宏观尺度变异性

宏观尺度变异性对应的空间范围通常为洲际、全国或大型流域，其核心特征是变异呈现出明显的区域分异规律，主导驱动因素为全球气候格局、大地形地貌与区域下垫面类型的宏观差异。在这一尺度下，水文要素的空间分布与全球气候带、地形地貌单元的划分高度契合，呈现出显著的地带性特征。以降水要素为例，受全球大气环流与海陆分布的影响，降水在宏观尺度上呈现出明显的纬度地带性与海陆地带性：赤道附近受赤道低压带控制，降水充沛；中纬度地区受西风带与副热带高压带交替控制，降水呈现季节性波动且区域差异显著；两极地区受极地高压带控制，降水稀少。从海陆分布来看，沿海地区受海洋湿润气流影响，降水较多；内陆地区远离海洋，湿润气流难以到达，降水稀少，形成了干旱半干旱区域。

径流要素的宏观尺度变异性同样与气候格局、地形地貌密切相关，在宏观尺度上呈现出显著的区域分异。例如，我国长江流域、珠江流域等南方流域，受亚热带季风气候影响，降水充沛，径流深较大，水资源丰富；而黄河流域、内陆河流域等北方流域，受温带大陆性气候与温带季风气候影响，降水稀少，径流深较小，水资源短缺。此外，大地形地貌对水文要素的宏观空间分布也具有显著的阻隔与引导作用，如青藏高原作为世界第三极，其地形起伏极大，不仅影响了区域气候格局，也导致了降水、径流等水文要素在高原内部与周边区域的显著差异；山脉的迎风坡与背风坡也会形成明显的降水差异，进而导致径流的空间分异。宏观尺度的水文要素空间变异性，决定了区域水资源的宏观分布格局，是水资源宏观规划、跨区域水资源调配的重要依据。

（二）中观尺度变异性

中观尺度变异性对应的空间范围通常为中小流域、县域或局部区域，其核心特征是变异呈现出明显的梯度分布与局部差异，主导驱动因素为区域地形地貌的细节差异、土壤与植被类型的空间分布及局部气候特征。在这一尺度下，水文要素的空间变异不再局限于宏观的区域分异，而是更多地受局部下垫面条件的影响，呈现出更为复杂的空间分布格局。以中小流域为例，流域内的地形起伏（如山地、丘陵、平原的分布）会直接影响降水的再分配与产汇流过程，导致径流、水位等水文要素在流域内的空间分布呈现出明显的梯度特征：山地地区坡度较大，地表径流流速快，汇流时间短，径流深相对较大；平原地区坡度平缓，地表径流流速慢，汇流时间长，且地下水补给较为丰富，径流深的空间分布相对均匀。

土壤与植被类型的空间分布也是驱动中观尺度水文要素变异性的的重要因素。不同类型的土壤具有不同的孔隙度、渗透系数,其蓄水能力与下渗能力存在显著差异,进而影响地表径流与地下径流的比例,导致径流要素的空间分异;植被覆盖度的空间差异则会通过影响截留、蒸发与下渗过程,改变水文要素的空间分布,如植被覆盖度高的区域,截留量与蒸发量较大,地表径流相对较小,而植被覆盖度低的区域则相反。此外,中观尺度的局部气候特征,如山谷风、海陆风等局地环流,也会导致降水等水文要素的局部空间差异。中观尺度的水文要素空间变异性,直接影响中小流域的水资源开发利用、水利工程布局及洪涝灾害的局部防控,是中观尺度水文勘测的核心关注对象。

(三) 微观尺度变异性

微观尺度变异性对应的空间范围通常为坡面、地块、河道断面等小范围区域,其核心特征是变异呈现出明显的局部集聚与微观差异,主导驱动因素为微地形起伏、土壤质地的微观差异、植被的局部分布及人类活动的局部干预。在这一尺度下,水文要素的空间变异更为剧烈,即使在较小的空间范围内,也可能出现显著的数值差异。以坡面为例,微地形的起伏(如小洼地、小坡坎)会导致降水的局部汇集与分流,使得地表径流在坡面的分布呈现出明显的集聚特征,部分低洼区域可能形成局部积水,而坡顶区域则可能径流稀少;土壤质地的微观差异,如砂质土壤与黏质土壤的交错分布,会导致下渗能力的局部差异,进而影响地下径流的空间分布。

在河道断面尺度上,水文要素的微观变异性也较为显著,如流速、水深、含沙量等要素在断面内的分布呈现出明显的差异,靠近岸边的流速较慢,水深较浅,而断面中部的流速较快,水深较深;含沙量则可能因水流动力的差异呈现出分层分布特征。此外,人类活动的局部干预,如局部区域的植树造林、耕地开垦、小型水利设施建设等,也会导致水文要素的微观空间变异。微观尺度的水文要素空间变异性,虽然影响范围较小,但对水文观测的精度要求极高,直接关系到水文数据的准确性与可靠性,是微观尺度水文勘测与观测方案设计的重要依据。

三、水文要素时空变异性对勘测工作的启示

水文要素时空变异性的普遍存在与复杂特征,决定了水文要素综合勘测工作必须立足变异规律,针对性地制定勘测方案、优化观测布局、提高观测精度。具

体而言,时空变异性对勘测工作的启示主要体现在以下三个方面:一是勘测方案的尺度适配性,即勘测方案的设计必须与水文要素变异的时间尺度和空间尺度相适配。对于短时间尺度的快速变异,应采用高频次的观测方案,确保能够捕捉到变异的动态过程;对于长时间尺度的趋势性变异,应采用长序列的连续观测,确保能够准确识别变异趋势;对于宏观尺度的空间变异,应采用大范围、低密度的观测布局,覆盖主要的区域分异单元;对于微观尺度的空间变异,应采用小范围、高密度的观测布局,精准捕捉局部差异。

二是观测布局的空间均衡性与重点针对性,即观测站点的布局既要兼顾空间覆盖的均衡性,以全面捕捉空间变异格局,又要针对变异剧烈的区域进行重点加密。例如,在中小流域勘测中,应在山地、丘陵、平原等不同地形单元均匀布设基础观测站点,同时在降水集中区、径流汇集区等变异剧烈区域增加观测站点密度,确保能够全面、精准地捕捉空间变异特征。三是勘测数据的多源融合性,即单一站点、单一尺度的勘测数据难以全面表征时空变异规律,需要通过多站点、多尺度、多类型的勘测数据融合,实现对时空变异规律的综合刻画。例如,将高频次的短期观测数据与长序列的长期观测数据相结合,将大范围的宏观观测数据与小范围的微观观测数据相结合,能够更全面地揭示水文要素的时空变异规律。

综上所述,水文要素的时空变异性是水文系统复杂性的核心体现,其时间变异呈现出不同尺度的波动与趋势特征,空间变异呈现出不同尺度的分异与集聚特征,二者相互耦合并受自然因素与人类活动的共同驱动。深入理解并掌握这些变异特征与规律,是水文要素综合勘测的前提与基础,能够为勘测方案的优化设计、观测精度的提升及勘测数据的有效应用提供科学指导,进而为水资源的科学管理、灾害的有效防控及生态系统的稳定保护提供有力支撑。

第三节 影响水文要素变化的关键因素

一、自然因素：水文要素变化的原生驱动力量

自然因素是水文要素形成与演化的基础驱动力,其作用具有长期性、基础性与区域性特征。气候系统、下垫面条件、地质构造与地貌形态等自然要素,通过调控水循环的各个环节,直接或间接影响着降水、蒸发、径流、土壤含水量等核

心水文要素的变化。自然因素的时空异质性，决定了水文要素变化的区域差异性与过程复杂性。

（一）气候系统：水文要素变化的核心调控因子

气候系统是水循环过程的能量来源与水汽载体，其变化直接主导着水文要素的时空演变规律。大气环流、气温、降水、湿度、风速等气候要素的波动，通过改变水循环的输入输出项，对各类水文要素产生全局性影响。气候系统的变化具有全球性与区域性并存的特征，既受全球气候变化的宏观驱动，也受区域气候异常的局部调控。

降水作为水文循环的核心输入项，其时空分布特征直接决定了径流、土壤含水量等水文要素的基础格局。降水的强度、历时、频率与空间分布，通过改变地表产流的补给量与补给节奏，影响径流的形成过程与量级变化。不同区域的降水特征受大气环流格局的调控，如季风区的降水集中性特征主导了该区域径流的季节性波动，而干旱半干旱地区的稀少降水则决定了其径流的稀缺性与不稳定性。降水的年际波动与长期变化趋势，更是导致水文要素年际变异与长期演化的关键驱动因素。

气温通过影响蒸发过程与冰雪消融量，间接调控水文要素的变化。气温升高会增强水面蒸发与陆面蒸散发能力，导致土壤含水量减少、径流补给量下降，尤其在干旱半干旱地区，蒸发量的变化对水文要素的影响更为显著。对于高海拔与高纬度地区，气温变化直接决定了冰雪覆盖的消融速度与消融量，冰雪融水作为重要的径流补给来源，其变化会直接导致径流的季节性波动与年际变异。此外，气温变化还会影响大气的持水能力，间接改变降水的形式与强度，进一步加剧水文要素的变化复杂性。

大气环流通过调控水汽的输送路径与输送量，影响降水的空间分布与时间分配，进而间接影响水文要素的区域格局。不同的环流系统主导着不同区域的水汽供应，如西风环流对中纬度地区的水汽输送、季风环流对热带与亚热带地区的水汽补给，均直接决定了这些区域的降水特征与水文要素基础状态。环流系统的异常波动会导致降水的异常变化，进而引发水文要素的异常波动，如厄尔尼诺现象通过改变全球大气环流格局，导致不同区域出现降水异常与径流变异。

（二）下垫面条件：水文要素变化的局地调制因子

下垫面作为水文过程的承载体，其物理性质与覆盖类型通过改变地表径流的

形成过程、蒸散发强度与地下水补给条件,对水文要素变化产生局地性调控作用。下垫面条件的空间异质性是导致水文要素区域差异的重要原因,即使在相同的气候背景下,不同的下垫面类型也会形成差异显著的水文过程。

植被覆盖是下垫面条件中影响水文要素变化的关键因子之一,其通过截留降水、减缓地表径流、增强土壤入渗、调控蒸散发等多种路径影响水文过程。植被的截留作用会减少直接到达地表的降水量,降低地表产流的初始补给量;植被根系形成的孔隙结构能够增强土壤的入渗能力,增加地下水补给量,减少地表径流;同时,植被的蒸散发过程会消耗土壤含水量,影响区域的水分平衡。不同植被类型的水文效应存在显著差异,森林植被的截留能力与入渗增强效应显著,能够有效调节径流的季节性波动,而草地与荒漠植被的水文调控能力相对较弱,对径流的影响以促进蒸发、减少径流为主。植被覆盖的时空变化,如森林砍伐与恢复、草地退化与改良等,会直接改变下垫面的水文调控能力,进而导致水文要素的相应变化。

土壤性质通过影响土壤的入渗能力、持水能力与给水度,调控降水在地表、土壤与地下水之间的分配比例,进而影响径流与土壤含水量等水文要素。土壤质地、孔隙度、有机质含量等物理性质是决定土壤入渗与持水能力的核心因素,砂质土壤的入渗能力强、持水能力弱,降水易快速下渗形成地下水补给,地表径流较少;黏质土壤的入渗能力弱、持水能力强,降水易在地表汇集形成地表径流,地下水补给相对不足。土壤厚度与分层结构也会影响水分的垂直运移过程,进而改变土壤含水量的垂直分布与地下水的补给过程。此外,土壤的冻融状态会显著改变其入渗与持水能力,在季节性冻土区,冻融层的存在会阻碍水分下渗,增加地表径流,影响区域的水文循环过程。

地表岩性通过影响地下水的赋存状态与径流的补给方式,对水文要素变化产生深层调控作用。不同岩性的透水性能与储水性能存在显著差异,透水岩层如砂岩、砾岩等,能够接纳大量降水入渗,形成丰富的地下水储量,是地下水补给的重要载体;不透水岩层如页岩、花岗岩等,会阻碍水分下渗,增加地表径流的形成。岩性的空间分布格局决定了区域地下水的分布特征与补给范围,进而影响地下水径流与泉流量等水文要素。此外,岩性风化形成的风化壳厚度与结构,也会影响土壤的形成过程与水文性质,间接调控水文要素的变化。

（三）地质构造与地貌形态：水文要素空间格局的塑造因子

地质构造与地貌形态通过塑造地表形态与地下含水空间，决定了水文要素的空间分布格局与径流的汇流路径，对水文要素的区域差异形成具有决定性作用。地质构造的演化与地貌形态的发育是长期自然过程的结果，其对水文要素的影响具有稳定性与区域性特征。

地貌形态通过改变地表坡度、坡向与汇流面积，调控地表径流的汇流速度与汇流量，进而影响径流的形成过程与时空分布。山地地区地势起伏大、坡度陡，地表径流汇流速度快，易形成集中性强、峰值高的径流过程；平原地区地势平坦、坡度缓，地表径流汇流速度慢，径流过程平缓，且易形成积水区域，增加蒸发量与土壤含水量。流域的形态特征如流域面积、流域形状、河长与河网密度等，直接决定了流域的汇流能力与径流响应时间，不同形态的流域在相同降水条件下会产生差异显著的径流过程。坡向通过影响太阳辐射接收量与降水分布，间接影响蒸散发与降水的空间分布，进而导致水文要素的空间异质性，如阳坡的蒸散发强度通常大于阴坡，导致阳坡的土壤含水量相对较低。

地质构造通过控制地下含水岩层的分布与连通性，影响地下水的赋存与运移过程，进而调控地下水径流、泉流量等水文要素。褶皱构造会使岩层发生弯曲变形，形成向斜储水构造与背斜泄水构造，向斜构造通常是地下水的富集区域，背斜构造则可能成为地下水的排泄通道；断裂构造能够打破岩层的连续性，形成地下水的运移通道或隔水屏障，断裂带附近往往是地下水的富集区与排泄区，泉流量的变化与断裂构造的活动性密切相关。此外，地质构造的演化还会影响地貌形态的发育过程，通过地貌形态的间接作用进一步调控水文要素的空间格局。

二、人类活动：水文要素变化的人为驱动力量

随着人类社会的发展，人类活动对水文循环过程的干预程度不断加深，已成为影响水文要素变化的重要驱动力量。与自然因素的长期性与稳定性不同，人类活动对水文要素的影响具有阶段性、主动性与显著性特征，其通过改变下垫面条件、干预水文循环环节、调节水资源分配等方式，直接或间接改变着水文要素的时空分布与演化规律。人类活动的影响范围已从局部区域扩展到流域乃至全球尺度，对水文生态系统的结构与功能产生了深远影响。

（一）土地利用 / 覆被变化：下垫面改造的直接驱动

土地利用 / 覆被变化是人类活动改造下垫面的主要方式，通过改变地表的物理性质与植被覆盖状态，直接影响水文过程与水文要素变化。城市化建设、农业开发、森林砍伐与恢复等土地利用 / 覆被变化过程，会显著改变地表径流的形成机制、蒸散发强度与地下水补给条件，是导致区域水文要素变异的重要人为因素。

城市化进程是土地利用 / 覆被变化的典型表现，其通过大面积硬化地表、建设排水系统等方式，显著改变了地表的水文过程。硬化地表如道路、建筑物等，会大幅降低地表入渗能力，减少地下水补给量，增加地表径流系数，导致暴雨时地表径流快速汇集，易引发城市内涝，同时也会改变径流的时空分布特征。城市排水系统的建设加快了地表径流的排泄速度，缩短了汇流时间，进一步加剧了径流的峰值与洪峰流量。此外，城市热岛效应会改变区域的微气候条件，影响降水与蒸发过程，间接调控水文要素的变化。

农业开发活动通过改变植被覆盖类型、实施灌溉与排水工程等方式，影响水文要素变化。农业用地的扩张往往伴随着自然植被的破坏，导致地表入渗能力下降、水土流失加剧，进而影响径流与土壤含水量。灌溉工程的建设与运行会改变区域的水分分配格局，增加农田的土壤含水量，同时也可能导致地下水位上升，引发土壤次生盐渍化；排水工程则会加速农田水分的排泄，减少土壤含水量，影响区域的地下水补给。不同的种植结构与耕作方式也会对水文过程产生不同影响，如水田与旱地的水分消耗与径流产生机制存在显著差异，深耕与免耕等耕作方式会改变土壤的孔隙结构，影响土壤入参与持水能力。

森林资源的开发与保护对水文要素变化具有重要影响。森林砍伐会减少植被截留量与土壤入渗量，增加地表径流与水土流失，导致径流的季节性波动加剧、洪峰流量增大；同时，森林植被的减少会降低蒸散发强度，改变区域的水分平衡。相反，森林恢复与人工造林能够增强植被的水文调控能力，增加截留量与入渗量，减少地表径流，调节径流的时空分布，提高土壤含水量与地下水补给量。森林资源的时空变化对流域的水文生态功能具有决定性作用，是维持流域水文稳定的重要保障。

（二）水利工程建设：水文循环的直接干预

水利工程是人类主动干预水文循环过程、调节水资源分配的重要手段，其建设与运行会直接改变径流的时空分布、地下水补给与排泄等水文过程，对水文要

素变化产生显著影响。水库、大坝、引水工程、调水工程等各类水利工程,通过拦蓄、调节、输送水资源等方式,重塑了区域的水文格局,同时也可能对水文生态系统产生深远影响。

水库与大坝是最常见的水利工程类型,其通过拦蓄上游径流,改变径流的时间分配格局。水库的蓄水功能能够调节径流的季节性波动,减少汛期洪峰流量,增加枯水期径流量,保障下游地区的水资源供应与防洪安全。同时,水库的建设会改变库区的水面面积与水体停留时间,增加水面蒸发量,影响区域的水分平衡;库区的淹没会改变下垫面类型,影响土壤含水量与地下水补给过程。此外,水库的调度运行会改变下游河道的流量过程,影响河道的冲淤演变、水生生态环境等,间接调控相关水文要素的变化。

引水与调水工程通过跨区域、跨流域输送水资源,直接改变了水资源的空间分布格局,进而影响不同区域的水文要素。引水工程通常将水资源从丰富区域输送到短缺区域,会减少水源地的径流量与地下水位,影响水源地的水文生态系统;同时,增加受水区的水资源量,改变受水区的土壤含水量、地下水位与径流过程。跨流域调水工程的影响范围更广,其不仅会改变调出区与调入区的水文格局,还可能对沿途区域的水文过程产生影响,如改变沿途的地下水补给与排泄、影响河道的生态流量等。水利工程的建设与运行需要充分考虑水文要素的变化规律,避免对水文生态系统造成不可逆转的影响。

(三) 水资源开发利用: 水量平衡的人为调控

水资源开发利用是人类社会发展的必然需求,其通过开采地下水、提取地表水等方式,直接改变区域的水量平衡状态,影响水文要素变化。随着人口增长与经济发展,水资源的开发利用强度不断加大,对地下水与地表水的过度开采已成为导致区域水文要素变异的重要原因,引发了一系列水文生态问题。

地下水开采是水资源开发利用的重要方式,过度开采地下水会导致地下水位持续下降,改变地下水的补给与排泄过程。地下水位下降会减少地下水的蒸发量,同时也会降低地下水对地表水的补给量,影响河流、湖泊等地表水的水量变化。长期过度开采地下水还可能导致地下漏斗、地面沉降等地质灾害,进一步改变地表的水文过程与地貌形态。此外,地下水开采还会影响土壤的含水量与植被生长,间接调控蒸散发与径流过程。

地表水的开发利用通过提取河流、湖泊、水库等水体的水量,改变地表水的

时空分布与运动过程。过度提取地表水会导致河流径流量减少，甚至出现断流现象，破坏河流的水文生态功能；同时，会减少湖泊、水库的蓄水量，改变其水面面积与蒸发量，影响区域的水分平衡。地表水的开发利用还会改变河流的水力条件，影响河道的冲淤演变与水生生物的生存环境，间接影响相关水文要素的变化。水资源的开发利用需要遵循水文循环规律，合理控制开发强度，实现水资源的可持续利用。

第四节 水文要素综合表征的理论基础

水文要素综合表征是水文勘测工作的核心环节，其本质是通过系统性的理论指导与方法设计，将水文系统中复杂、动态且相互关联的各要素特征，以科学、简洁且可解读的方式进行提炼与呈现。这一过程并非简单的要素信息罗列，而是建立在对水文系统本质规律深刻认知基础上的理性重构，需要多学科理论的交叉支撑。从水文科学的核心逻辑出发，结合系统科学、信息论、概率论等相关学科的理论成果，水文要素综合表征的理论基础逐步形成了相对完整的体系，为综合勘测工作的开展提供了根本性的理论遵循。本节将从水文系统整体性理论、水文过程动态演化理论、水文信息认知与表征理论、多要素关联耦合理论四个核心维度，系统阐述水文要素综合表征的理论支撑，厘清各理论的核心内涵及其在综合表征中的应用逻辑。

一、水文系统整体性理论

水文系统作为地球表层系统的重要组成部分，是由降水、蒸发、径流、地下水、水位、流量等多个要素相互作用、相互制约形成的有机整体。水文要素综合表征的首要理论前提，便是对水文系统整体性的认知与把握。该理论强调，水文系统的功能与特征并非各组成要素单独作用的简单叠加，而是要素间复杂相互作用产生的“整体效应”。因此，在对水文要素进行综合表征时，不能孤立地分析单个要素的特征，而需从系统整体的视角出发，统筹考虑各要素间的关联关系，确保表征结果能够真实反映水文系统的整体运行规律。

（一）水文系统的整体性内涵

水文系统的整体性体现在空间、时间与功能三个维度。从空间维度来看，水

文系统的各要素在空间上存在明确的耦合关系，不同区域的水文要素相互关联、相互影响，形成了跨区域的水文循环体系。例如，上游区域的径流变化会直接影响下游区域的水位与流量特征，山区的降水分配会通过地表径流与地下径流的转化，影响平原区的地下水补给状况。从时间维度来看，水文系统的演化具有明显的时序连续性，过去的水文过程会对当前的水文状态产生影响，当前的水文特征又会决定未来的水文演化趋势，形成了水文系统的时序关联整体性。从功能维度来看，水文系统通过各要素的协同作用，实现了水资源的循环、分配与调控功能，支撑着生态系统与人类社会的发展，各要素的功能相互配合，共同保障了水文系统整体功能的实现。

（二）整体性理论在综合表征中的应用逻辑

整体性理论为水文要素综合表征提供了核心的指导逻辑，具体体现在表征指标的选取、表征方法的设计与表征结果的解读三个方面。在表征指标选取层面，需基于整体性原则，筛选能够反映各要素关联关系与系统整体特征的指标，避免指标选取的片面性。例如，在表征某一区域的水文状况时，不仅要选取降水、径流等直接水文要素指标，还需选取地形、植被覆盖等间接影响水文过程的辅助指标，以全面反映水文系统的整体特征。在表征方法设计层面，需采用具有系统性的分析方法，将各要素的特征信息进行整合，构建能够体现要素间耦合关系的表征体系。在表征结果解读层面，需从系统整体的视角出发，结合各要素间的相互作用关系，对表征结果进行综合分析，避免仅从单个要素角度解读导致的认知偏差。例如，当表征结果显示某区域径流减少时，不能简单归因于降水减少，还需结合蒸发量变化、地下水开采状况、植被覆盖变化等多个要素的特征进行综合解读，明确径流减少的根本原因。

二、水文过程动态演化理论

水文系统是一个动态演化的开放系统，在自然因素与人类活动的共同作用下，其内部各要素的特征始终处于动态变化之中。水文过程动态演化理论揭示了水文要素随时间变化的规律与驱动机制，为水文要素综合表征提供了时间维度的理论支撑。该理论强调，水文要素的变化并非随机无序的，而是遵循特定的演化规律，其变化过程受到气候波动、地质构造运动、植被演化、人类活动等多种驱动因素的综合影响。水文要素综合表征需要准确捕捉水文过程的动态演化特征，清晰呈

现要素变化的趋势、周期与突变特征，为水文系统的预测与调控提供科学依据。

（一）水文过程的动态演化特征

水文过程的动态演化具有趋势性、周期性、突变性与随机性四大核心特征。趋势性是指水文要素在长期演化过程中呈现出的持续上升或下降的变化趋势，这种趋势通常由长期的气候变迁或人类活动的累积效应驱动。例如，在全球气候变暖的背景下，许多区域的蒸发量呈现出持续上升的趋势，部分干旱地区的降水呈现出持续减少的趋势。周期性是指水文要素的变化具有一定的时间周期，这种周期性通常与天文节律、气候系统的周期性波动相关。例如，降水要素存在年际周期、季节周期等不同尺度的周期性变化，径流要素也会随降水的周期性变化呈现出相应的周期特征。突变性是指水文要素在短时间内发生的剧烈变化，这种变化通常由突发性的自然事件或人类活动的重大干预引起。例如，大型水利工程的建设会导致下游径流在短时间内发生显著变化，强台风、暴雨等极端天气事件会导致水位、流量等要素的突变。随机性是指水文要素在演化过程中受到多种不确定因素的影响，呈现出一定的随机波动特征。例如，即使在相同的气候背景下，不同年份的降水总量与时空分布也会存在差异，导致径流等要素出现随机波动。

（二）动态演化理论对综合表征的指导意义

动态演化理论要求水文要素综合表征必须突破“静态表征”的局限，构建动态化的表征体系，准确捕捉水文要素的时序变化特征。在表征指标的设计上，需引入能够反映要素动态变化的指标，如变化速率、变化幅度、周期长度等，以量化水文过程的动态演化特征。在表征方法的选择上，需采用时序分析方法，对水文要素的时间序列数据进行系统分析，揭示其变化趋势、周期特征与突变点。同时，动态演化理论强调对水文过程驱动机制的分析，因此在综合表征过程中，还需结合驱动因素的特征，构建“要素变化 - 驱动机制”的联动表征体系，明确不同驱动因素对水文要素变化的贡献度。例如，在表征某一区域径流的动态变化时，需结合气候因素（降水、蒸发）与人类活动因素（水利工程、地下水开采）的变化特征，分析各因素对径流变化的影响，使表征结果不仅能够呈现“是什么变化”，还能解释“为什么变化”。

三、水文信息认知与表征理论

水文要素综合表征的本质是对水文信息的认知、提取与呈现过程，水文信息

认知与表征理论为这一过程提供了直接的理论指导。该理论以信息论为基础,结合水文科学的学科特性,探讨水文信息的产生、传输、存储与解读规律,明确水文信息表征的基本原则与方法。水文系统中蕴含着海量的信息,包括直接水文信息(如流量、水位、降水等实测数据所承载的信息)与间接水文信息(如地形、土壤、植被等数据所蕴含的与水文过程相关的信息)。水文信息认知与表征理论的核心目标,是通过科学的信息处理方法,从海量的信息中提取能够反映水文要素核心特征的关键信息,以简洁、准确的方式进行表征,实现水文信息的有效传递与利用。

(一) 水文信息的认知逻辑

水文信息的认知是一个从现象到本质、从局部到整体的逐步深化过程,其核心逻辑包括信息获取、信息筛选、信息解析三个环节。信息获取是水文信息认知的基础,通过水文勘测设备、遥感技术、地理信息系统等手段,收集水文系统各要素的原始数据,形成海量的水文信息数据集。信息筛选是在原始信息数据集的基础上,根据表征目标与需求,剔除冗余信息、干扰信息,筛选出能够反映水文要素核心特征的关键信息。这一环节需要基于对水文系统本质规律的认知,明确不同信息与表征目标的相关性,确保筛选出的信息具有针对性与有效性。信息解析是对筛选出的关键信息进行深入分析,揭示信息背后蕴含的水文要素特征与水文过程规律,实现从信息到知识的转化。例如,通过对径流时间序列数据的解析,能够识别出径流的变化趋势、周期特征与突变点,掌握径流的演化规律。

(二) 水文信息表征的基本原则与方法

基于水文信息认知与表征理论,水文要素综合表征需遵循准确性、简洁性、系统性与可解读性四大基本原则。准确性原则要求表征结果能够真实反映水文要素的实际特征,避免因信息处理不当或方法选择错误导致的表征偏差;简洁性原则要求在保证表征准确性的前提下,尽量简化表征形式,剔除冗余信息,提高信息传递的效率;系统性原则要求表征过程需统筹考虑各要素间的关联关系,确保表征结果能够全面反映水文系统的整体特征;可解读性原则要求表征结果通俗易懂,能够被水文勘测人员、水资源管理者等不同用户准确理解与利用。

在具体的表征方法上,水文信息认知与表征理论提供了多种思路与手段。从表征形式来看,可分为定性表征与定量表征两种类型。定性表征主要用于描述水文要素的特征与变化趋势,适用于无法进行精确量化的场景,如对某一区域水文

系统稳定性的描述；定量表征则通过具体的数值与指标，精确反映水文要素的特征，是水文要素综合表征的主要形式，如通过径流深、蒸发量等指标量化水文要素的特征。从信息处理方法来看，可采用信息融合技术、数据挖掘技术等，对多源水文信息进行整合与分析，提取关键信息，构建综合表征体系。例如，通过信息融合技术，将实测水文数据与遥感监测数据进行整合，能够更全面、准确地表征水文要素的空间分布特征。

第三章 水文要素综合勘测的传统与现代技术方法

第一节 地面水文观测技术

一、传统地面水文观测技术

传统地面水文观测技术是经过长期实践积累形成的基础观测方法，其核心优势在于操作简单、成本低廉、对观测环境的适应性强，在缺乏电力、网络等基础设施的偏远区域，或作为现代观测技术的补充验证手段，仍具有不可替代的作用。传统地面水文观测技术涵盖水位、流量、降水量、蒸发量、含沙量等多个核心水文要素的观测，每个要素均形成了相对成熟的观测流程和操作规范。

（一）传统水位观测技术

水位是指水体表面到某一基准面的垂直距离，是反映水体动态变化的核心水文要素之一，传统水位观测技术以直接观测和简易仪器观测为主，核心目标是获取连续、可靠的水位数据。

直接观测法是最原始的水位观测方法，主要通过设置水位尺实现。水位尺是刻有标准刻度的标尺，按材质可分为木质、搪瓷、混凝土等多种类型，按设置方式可分为直立式、倾斜式、矮桩式等。观测时，观测人员直接读取水位尺上水体表面对应的刻度，记录观测时间和数值。为保证观测精度，需选择水体平稳、不受回流、漩涡影响的观测断面，水位尺的零点需与选定的基准面精准对齐。直接观测法操作简单、成本极低，但受观测人员主观因素影响较大，且无法实现连续观测，仅适用于短期观测或应急观测场景。

简易仪器观测法则是在直接观测法基础上的改进，核心仪器为浮标式水位计，其工作原理是利用浮标随水位变化的升降运动，通过机械传动装置将水位变化转化为标尺的刻度变化，观测人员可通过读取标尺刻度获取水位数据。浮标式水位计分为立式和卧式两种，立式浮标水位计适用于水位变幅较大的河流、湖泊，卧

式浮标水位计则适用于水位变幅较小的沟渠、池塘等水域。相较于直接观测法，浮标式水位计减少了观测人员的主观误差，可实现准连续观测，但仍需人工定时记录，观测效率较低，且机械传动装置易受泥沙、漂浮物影响，需要定期维护。

（二）传统流量观测技术

流量是指单位时间内通过某一断面的水量，是水资源评价、水文灾害预警的核心指标，传统流量观测技术以流速面积法为核心，通过测量断面流速和面积计算流量，主要包括浮标法、流速仪法等。

浮标法是最简易的流量观测方法，其核心原理是利用浮标随水流运动的速度反映水流的平均流速，再结合观测断面的面积计算流量。观测时，首先在观测断面上下游划定上、中、下三个观测断面，测量并计算观测断面的面积；然后投放浮标，记录浮标从上游断面运动到下游断面的时间，计算浮标漂流速度；最后根据浮标类型（如水面浮标、浮杆浮标等）的流速系数，将浮标漂流速度转化为水流的实际平均流速，进而计算出流量。浮标法操作简单、设备轻便，适用于应急流量观测或缺乏专业仪器的场景，但受浮标投放位置、水流均匀性影响较大，观测精度较低，仅能作为粗略估算流量的手段。

流速仪法是传统流量观测中精度较高的方法，核心仪器为机械式流速仪，通过测量水流对流速仪叶轮的冲击力带动叶轮旋转，根据叶轮旋转次数与流速的对应关系计算流速。观测时，首先对观测断面进行划分，将断面划分为若干个小测段，测量每个测段的面积；然后将流速仪放置在每个测段的不同深度处，测量各深度的流速；根据各测段的流速和面积，计算每个测段的流量，最后汇总得到整个断面的流量。流速仪法观测精度较高，适用于河流、湖泊等多种水域的流量观测，但操作流程复杂，需要专业的观测人员和设备，观测耗时较长，且在水深过浅、水流湍急或含沙量过高的水域难以应用。

（三）传统降水量与蒸发量观测技术

降水量是指一定时间内降落到地面的液态或固态水的深度，蒸发量是指一定时间内水体表面蒸发的水量，二者是反映流域水量收支平衡的重要要素，传统观测技术以简易仪器直接观测为主。

传统降水量观测的核心仪器为雨量筒，雨量筒由承雨器、漏斗、储水瓶和雨量杯组成，其工作原理是通过承雨器收集降水，经漏斗导入储水瓶，观测时将储水瓶中的降水倒入雨量杯，读取雨量杯的刻度即可得到降水量数据。雨量筒的观

测精度取决于承雨器的口径和刻度的精准度，观测时需将雨量筒放置在开阔、无遮挡的区域，避免树木、建筑物等对降水的遮挡。对于固态降水（如降雪、冰雹），需先将固态水融化后再进行测量。传统降水量观测为人工定时观测，通常每日观测 2-4 次，无法捕捉短时强降水等极端降水事件的动态变化，观测精度受观测时间间隔影响较大。

传统蒸发量观测的核心仪器为蒸发皿，根据观测场景的不同，可分为小型蒸发皿、大型蒸发池等。小型蒸发皿适用于陆地蒸发量观测，大型蒸发池则适用于湖泊、水库等水体蒸发量观测。观测时，首先向蒸发皿中注入一定量的清水，记录初始水位；经过一定观测周期后，再次测量水位，计算水位变化量，即为该周期内的蒸发量。为减少外界因素的影响，蒸发皿需放置在专门的蒸发观测场，避免阳光直射、风力干扰等。传统蒸发量观测同样依赖人工定时测量，观测效率较低，且难以反映蒸发过程的实时变化，观测结果受环境因素影响较大。

（四）传统含沙量观测技术

含沙量是指单位体积水中所含泥沙的质量，是反映水体泥沙含量、评估水土流失程度的重要指标，传统含沙量观测技术以采样称重法为核心，通过采集水样、过滤泥沙、称重计算实现含沙量的测量。

传统含沙量观测的核心流程包括水样采集、泥沙分离、称重计算三个环节。水样采集需在观测断面的不同测段、不同深度处进行，确保采集的水样具有代表性；采集的水样需装入专用的采样瓶中，记录水样体积。泥沙分离环节主要通过过滤法实现，将水样倒入铺有滤纸的漏斗中，利用滤纸过滤水样中的泥沙，然后将带有泥沙的滤纸放入烘箱中烘干。称重计算环节则是通过电子天平称量烘干后泥沙与滤纸的总质量，减去滤纸的质量，得到泥沙的质量，再结合水样体积计算出含沙量。传统含沙量观测方法精度较高，但操作流程繁琐、耗时较长，且无法实现连续观测，仅适用于定点、定时的含沙量监测。

二、现代地面水文观测技术

现代地面水文观测技术以自动化、智能化、网络化为核心特征，依托传感技术、通信技术、计算机技术的融合应用，实现了水文要素的实时、连续、精准观测，大幅提升了观测效率和数据质量。与传统观测技术相比，现代地面水文观测技术具有观测范围广、响应速度快、数据传输及时、人为干扰小等显著优势，已

成为当前水文要素综合勘测的主流技术手段。现代地面水文观测技术同样涵盖水位、流量、降水量、蒸发量、含沙量等核心水文要素，其技术原理和操作流程较传统技术发生了根本性变革。

（一）现代水位观测技术

现代水位观测技术以自动化传感技术为核心，实现了水位数据的自动采集、实时传输和连续记录，主要包括压力式水位计、超声波水位计、雷达水位计等多种类型，适用于不同的观测场景。

压力式水位计的工作原理是利用水压与水深的对应关系测量水位，其核心部件为压力传感器，将压力传感器安装在水下固定位置，传感器可实时感知水体对其产生的压力，根据压力值计算出对应的水深，进而得到水位数据。压力式水位计分为投入式和埋入式两种，投入式适用于河流、湖泊、水库等水域，埋入式则适用于地下水水位观测。该技术具有观测精度高、抗干扰能力强、可实现连续观测等优势，不受水体浑浊度、漂浮物等因素影响，但需要定期校准压力传感器，确保测量精度。

超声波水位计的工作原理是利用超声波的传播特性测量水位，通过安装在水体上方的超声波发射装置向水面发射超声波，超声波遇到水面后反射回来，被接收装置接收，根据超声波的传播时间和传播速度计算出发射装置与水面的距离，进而得到水位数据。超声波水位计具有安装简便、无需接触水体、观测范围广等优势，适用于水位变幅较大的河流、湖泊、水库等水域，但受水体波动、风速、温度等环境因素影响较大，在恶劣天气条件下观测精度可能下降。

雷达水位计是在超声波水位计基础上发展而来的高精度水位观测设备，其工作原理是利用雷达波的传播特性测量水位，通过发射雷达波并接收水面反射的雷达波，根据雷达波的传播时间计算出水位数据。与超声波水位计相比，雷达水位计具有抗干扰能力更强、观测精度更高、适用范围更广等优势，不受风速、温度、湿度等环境因素影响，可在恶劣天气条件下稳定工作，适用于河流、湖泊、水库、海洋等多种水域的水位观测。现代水位观测技术通常与数据采集终端和通信模块相结合，观测到的水位数据可通过 GPRS、4G、5G、北斗等通信方式实时传输至数据中心，实现水位数据的远程监控和管理。

（二）现代流量观测技术

现代流量观测技术以自动化监测为核心，突破了传统流速面积法的局限

性,实现了流量数据的自动采集和实时计算,主要包括声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、电磁流量计、超声波流量计等技术,适用于不同类型的水域和流量条件。

声学多普勒流速剖面仪(ADCP)是当前应用最广泛的现代流量观测设备之一,其工作原理是利用声学多普勒效应测量水流速度,通过向水体发射声学信号,声学信号遇到水流中的悬浮颗粒后反射回来,根据反射信号的频率变化计算出水流的流速。ADCP可同时测量多个深度层面的流速,形成流速剖面,结合观测断面的面积数据,可自动计算出流量。该技术具有观测效率高、可实现连续观测、无需人工干预等优势,适用于河流、湖泊、水库等多种水域的流量观测,可在水深较大、水流湍急的水域稳定工作。ADCP分为船载式、固定式、便携式等多种类型,船载式适用于大范围、移动性的流量观测,固定式适用于定点、连续的流量监测,便携式则适用于应急流量观测。

电磁流量计的工作原理是利用电磁感应定律测量流量,通过在管道或渠道内安装电磁传感器,当水流通过传感器时,水流切割磁感线产生感应电动势,感应电动势的大小与水流速度成正比,根据感应电动势计算出流速,再结合断面面积计算出流量。电磁流量计适用于管道水流、渠道水流等封闭或半封闭水域的流量观测,具有观测精度高、抗干扰能力强、可实现连续观测等优势,但安装成本较高,对观测断面的平整度和水流均匀性有一定要求。

超声波流量计的工作原理是利用超声波在水流中的传播速度变化测量流速,通过在观测断面两侧安装超声波发射和接收装置,分别测量超声波顺水流和逆水流的传播时间,根据传播时间差计算出水流速度,进而计算出流量。超声波流量计分为外夹式和插入式两种,外夹式无需破坏管道或渠道结构,安装简便,适用于现有管道的流量监测;插入式则适用于大口径管道或渠道的流量观测。该技术具有安装方便、观测精度高、可实现连续观测等优势,但受水体浑浊度、气泡等因素影响较大,在水体含沙量过高或气泡较多的水域观测精度可能下降。

(三) 现代降水量与蒸发量观测技术

现代降水量与蒸发量观测技术以自动化传感和数据传输为核心,实现了观测数据的自动采集、实时传输和连续记录,大幅提升了观测效率和数据的时空连续性,主要包括翻斗式雨量计、称重式雨量计、蒸发传感器等设备。

翻斗式雨量计是现代降水量观测的主流设备,其工作原理是利用翻斗的翻转特性测量降水量,通过承雨器收集降水,降水经漏斗导入翻斗,当翻斗内的降水

量达到一定阈值时,翻斗在重力作用下翻转,触发计数开关,记录翻斗翻转的次数,根据翻斗的容积计算出降水量。翻斗式雨量计可实现降水量的自动采集和连续记录,观测精度高、响应速度快,适用于陆地、山区、平原等多种区域的降水量观测。该设备通常与数据采集终端和通信模块相结合,可将观测数据实时传输至数据中心,实现降水量的远程监控。为提高观测精度,翻斗式雨量计需定期校准翻斗的容积和计数开关的灵敏度。

称重式雨量计是一种高精度的降水量观测设备,适用于固态降水、混合降水等复杂降水类型的观测,其工作原理是利用称重传感器实时测量雨量筒内降水的质量,根据质量与降水量的对应关系计算出降水量。称重式雨量计可直接测量降水的质量,无需将固态降水融化,避免了传统观测方法中固态降水融化过程中的误差,观测精度更高,可捕捉短时强降水、小雪、冰雹等极端降水事件的动态变化。该设备同样具备自动采集、实时传输功能,适用于气象站、水文站等高精度降水量监测场景。

现代蒸发量观测技术以蒸发传感器为核心,实现了蒸发量的自动采集和连续记录,主要包括超声蒸发传感器、红外蒸发传感器等。超声蒸发传感器的工作原理是利用超声波测量蒸发皿内水位的实时变化,通过计算水位变化量得到蒸发量;红外蒸发传感器则是利用红外光的传播特性测量水位变化。与传统蒸发皿观测方法相比,现代蒸发量观测技术具有观测精度高、可实现连续观测、人为干扰小等优势,可实时捕捉蒸发过程的动态变化。同时,现代蒸发观测系统通常配备了防风、防晒等辅助装置,减少了环境因素对观测结果的影响,提升了观测数据的可靠性。

(四) 现代含沙量观测技术

现代含沙量观测技术以自动化传感和实时监测为核心,突破了传统采样称重法的局限性,实现了含沙量数据的连续采集和实时计算,主要包括激光粒度仪、声学含沙量计、振动式含沙量计等技术,适用于不同含沙量浓度的观测场景。

激光粒度仪的工作原理是利用激光散射特性测量泥沙颗粒的大小和浓度,通过向水样中发射激光,激光遇到泥沙颗粒后发生散射,散射光的强度和角度与泥沙颗粒的大小和浓度相关,根据散射光信号计算出含沙量。激光粒度仪具有观测精度高、测量范围广、可实现连续观测等优势,适用于含沙量较低的河流、湖泊等水域,可同时测量泥沙颗粒的粒度分布。该技术通常与自动采样装置相结合,实现水样的自动采集和分析,减少了人为操作的误差。

声学含沙量计的工作原理是利用声学信号在含沙水流中的传播特性测量含沙量,通过发射声学信号,声学信号在传播过程中会被泥沙颗粒吸收和散射,导致信号衰减,根据信号衰减程度计算出含沙量。声学含沙量计分为插入式和非接触式两种,插入式适用于河流、渠道等水域,非接触式则适用于水库、湖泊等大面积水域。该技术具有观测效率高、可实现连续观测、无需采样等优势,适用于含沙量较高的水域,但受泥沙颗粒大小、形状等因素影响较大,需要定期校准。

振动式含沙量计的工作原理是利用振动传感器的振动频率与含沙量的对应关系测量含沙量,将振动传感器浸入含沙水流中,传感器的振动频率会随含沙量的变化而变化,根据振动频率的变化计算出含沙量。该技术具有体积小、安装简便、抗干扰能力强等优势,适用于管道水流、小河道等水域的含沙量观测,可实现实时、连续观测。现代含沙量观测技术同样与通信模块相结合,观测数据可实时传输至数据中心,实现含沙量的远程监控和动态分析。

第二节 水文测验方法与站网规划

一、水文测验方法体系

水文测验方法体系以水文要素的类型为基础,涵盖降水、蒸发、地表水、地下水等关键要素的监测,不同要素的测验方法因监测对象的特性差异而呈现显著不同。从技术发展脉络来看,水文测验方法可分为传统人工测验与现代自动化测验两大类别,两类方法并非相互替代关系,而是在实际应用中形成互补,共同保障水文监测数据的连续性与可靠性。传统测验方法依托观测人员的经验与简易观测工具,构建了水文测验的基础框架;现代测验方法则借助传感技术、通信技术与数据处理技术的突破,实现了监测过程的自动化、精细化与远程化,极大拓展了水文测验的时空覆盖范围。

(一) 传统水文测验方法

传统水文测验方法是水文科学发展初期形成的基础观测手段,其核心特征是依赖人工操作完成数据的采集、记录与整理,具有操作简便、设备成本低、适应性强等特点,在部分偏远地区或特殊水文场景中仍具有不可替代的应用价值。传统水文测验方法围绕主要水文要素展开,形成了一套相对完整的观测体系。

在降水测验方面,传统方法以雨量筒观测法为核心,通过布设固定雨量筒,由观测人员定时读取雨量筒内的降水量数据。雨量筒的布设需遵循代表性原则,避开树木、建筑物等遮挡物,确保降水能够自然汇入筒内。观测频次根据监测需求确定,常规观测多为每日 8 时、20 时两次定时观测,暴雨等特殊天气过程中需加密观测频次,以捕捉降水的强度变化特征。除雨量筒外,传统降水测验还包括虹吸式雨量计的人工记录方法,虹吸式雨量计可自动记录降水过程的连续变化,但仍需人工定期检查设备运行状态、更换记录纸并整理观测数据。

地表水测验是传统水文测验的重点领域,核心是对河流、湖泊等水体的水位、流量、含沙量等指标的监测。水位测验的传统方法主要采用水尺观测法,通过在水体岸边布设固定水尺,观测人员直接读取水尺刻度获取水位数据。水尺的材质多为木质、搪瓷或混凝土,刻度标注清晰,根据水体的水深、流速等特征,可分为直立式、倾斜式、矮桩式等多种类型。流量测验的传统方法以流速仪法为核心,通过测定断面不同位置的流速,结合断面面积计算流量。观测时,观测人员需乘坐测船或借助桥梁、缆道等设施,将流速仪放置于断面不同水深处,记录流速仪的转速与观测时间,进而换算得到测点流速,再通过断面分块计算汇总得到断面总流量。含沙量测验的传统方法则采用采样法,通过采样器在断面不同位置采集水样,带回实验室后采用过滤、烘干、称重等方法测定水样含沙量,进而推算断面平均含沙量。

蒸发测验的传统方法主要包括蒸发器观测法与蒸发池观测法。蒸发器观测法通过布设标准蒸发器,每日定时测量蒸发器内的水量变化,结合同期降水量数据,计算实际蒸发量。常用的标准蒸发器有 20cm 口径蒸发器、E601 型蒸发器等,不同类型蒸发器的观测规范与数据换算方法存在差异。蒸发池观测法则通过构建与天然水体特性相近的蒸发池,观测池内水位变化,进而获取天然蒸发量数据,其观测结果比蒸发器更接近实际自然蒸发状况,但设备布设成本较高,适用于重点区域的蒸发监测。

地下水测验的传统方法以水井观测法为主,通过在地下含水层布设观测井,观测人员定时测量井内水位埋深,获取地下水水位变化数据。观测井的布设需根据地下水补给、径流、排泄规律,结合区域水文地质条件确定,观测频次多为每日一次或每周一次,重点区域可适当加密。对于地下水水质的传统测验,同样采用采样法,通过采集观测井内的地下水样,带回实验室进行水质指标分析。

（二）现代水文测验方法

随着信息技术、传感技术与通信技术的快速发展，现代水文测验方法突破了传统人工观测的局限，形成了以自动化监测为核心、远程传输与智能分析为支撑的新型测验体系。现代水文测验方法的核心优势在于能够实现水文数据的实时采集、连续监测与快速传输，大幅提升了测验效率与数据精度，同时降低了观测人员的劳动强度，尤其适用于恶劣环境、偏远地区以及大尺度流域的水文监测。

现代降水测验以自动雨量站为核心设备，集成了雨量传感模块、数据采集模块与通信传输模块。自动雨量站通过翻斗式雨量传感器将降水量转换为电信号，数据采集模块对电信号进行处理与存储，再通过 GPRS、北斗等通信技术将观测数据实时传输至监测中心。部分先进的自动雨量站还具备固态降水观测功能，能够实现雨、雪等不同降水形态的自动识别与监测。与传统人工观测相比，自动雨量站能够实现 24 小时连续观测，观测频次可达到分钟级，有效捕捉短时强降水等极端降水事件的变化过程。

现代地表水测验形成了多技术融合的监测体系，在水位、流量、含沙量等指标的监测中均实现了自动化升级。水位自动化监测主要采用压力式水位计、超声波水位计、雷达水位计等设备，这些设备能够持续采集水位数据，并通过通信模块实时传输至后台系统。其中，雷达水位计具有非接触式测量优势，适用于流速大、含沙量高的河流监测；压力式水位计则适用于水位变化平缓的湖泊、水库监测。流量自动化监测技术则包括声学多普勒流速剖面仪（ADCP）、雷达流速仪等设备，ADCP 能够同时测量断面的流速、水深等数据，快速计算断面流量，实现流量的实时监测；雷达流速仪通过测量水面流速，结合断面形态参数推算流量，具有安装简便、非接触测量的特点，适用于中小河流的流量监测。含沙量自动化监测则采用激光粒度仪、超声波含沙量传感器等设备，通过激光散射、超声波衰减等原理实现含沙量的实时测量，避免了传统采样法的滞后性。

现代蒸发测验以大型蒸发站为核心，集成了多种自动化观测设备。除了采用自动化蒸发器进行蒸发量监测外，还配备了太阳辐射、气温、湿度、风速等气象要素观测设备，通过综合分析气象要素与蒸发量的关系，提升蒸发量计算的精度。部分现代蒸发站还采用涡度相关法等先进技术，直接测量近地面层的水汽通量，实现蒸发量的直接观测，其观测结果更接近天然蒸发的实际状况。

现代地下水测验构建了“自动化观测井 + 远程监测系统”的监测模式。自动

化观测井配备了水位自动监测传感器、水质在线监测传感器等设备，能够实时采集地下水水位、水温、pH 值、电导率等指标数据。监测数据通过有线或无线通信技术传输至地下水监测中心，实现对地下水动态变化的实时掌控。对于大面积的地下水监测网络，还采用了地理信息系统（GIS）技术，将监测数据与空间信息相结合，实现地下水监测数据的可视化管理与分析，为地下水资源评价与保护提供精准支撑。

此外，现代水文测验还广泛应用了遥感技术、无人机监测技术等空天地一体化技术手段。遥感技术通过卫星或航空遥感平台，能够实现大尺度流域的降水、径流、植被覆盖等水文要素的宏观监测，尤其适用于无资料地区的水文监测；无人机监测技术则具有灵活性高、机动性强的优势，可用于河流断面测量、水库库容监测、水土流失监测等场景，弥补了地面监测的局限性。

二、水文站网规划的流程与内容

水文站网规划是一项系统性的工作，需要遵循科学的流程，全面覆盖规划准备、现状分析、站网布局、方案评估、优化调整等多个环节。每个环节都有其核心内容与技术要求，各环节之间紧密衔接，共同保障站网规划方案的科学性与可行性。

（一）规划准备阶段

规划准备阶段是水文站网规划的基础环节，核心任务是明确规划目标、划定规划范围、收集相关基础资料。规划目标的确定需结合区域社会经济发展需求与水文监测工作的实际需要，明确站网规划的核心任务，例如，是为了满足水资源评价需求，还是为了支撑水旱灾害防控工作，不同的规划目标将直接影响站网布局方案。规划范围的划定需根据流域水文特性与管理需求确定，可分为全流域规划、区域规划或专项规划，例如，针对某一河流流域的综合站网规划，或针对某一城市的地下水监测站网规划。基础资料的收集是规划准备阶段的关键工作，主要包括自然地理资料、水文气象资料、水文地质资料、社会经济资料、现有站网资料等。自然地理资料包括地形、地貌、土壤、植被等；水文气象资料包括历史降水、径流、蒸发、气温、湿度等观测数据；水文地质资料包括地下水含水层分布、埋藏深度、渗透性等；社会经济资料包括人口分布、工农业生产布局、水资源供需状况等；现有站网资料包括现有站点的布设位置、观测项目、观测频次、

数据质量等。通过全面收集这些基础资料，为后续的站网规划分析提供数据支撑。

（二）现状分析阶段

现状分析阶段的核心任务是对现有水文站网的运行状况进行全面评估，识别现有站网存在的问题与不足，为站网优化布局提供依据。现状分析主要包括以下几方面内容：一是现有站网覆盖范围分析，评估现有站点是否能够全面覆盖规划区域的水文特性区域，是否存在监测空白区域；二是观测项目完整性分析，评估现有站点的观测项目是否能够满足规划目标的需求，是否存在观测项目缺失或冗余的情况；三是观测数据质量分析，对现有站点的观测数据进行可靠性、一致性、代表性评估，分析数据缺失、误差等情况及其原因；四是站网运行效率分析，评估现有站点的建设成本、运行维护成本、人员配置等情况，分析站网运行的经济性与效率；五是社会经济需求匹配度分析，评估现有站网监测数据是否能够满足水资源管理、水利工程建设、水旱灾害防控等社会经济发展需求。通过现状分析，明确现有站网在覆盖范围、观测项目、数据质量、运行效率等方面存在的问题，例如，部分偏远区域存在监测空白、水质观测项目不足、部分站点数据误差较大等，为后续的站网布局优化提供明确的方向。

（三）站网布局阶段

站网布局阶段是水文站网规划的核心环节，核心任务是根据规划目标、现状分析结果，结合流域水文特性与自然地理条件，科学确定站点的布设位置、观测项目与观测频次。站点布设位置的确定需遵循代表性与系统性原则，通过水文分区的方法，将规划区域划分为若干个水文特性相似的区域，在每个区域内布设代表性站点。水文分区可采用成因分析法、聚类分析法等方法，结合地形、地貌、降水、径流等水文气象要素的空间分布特征进行划分。在站点布设过程中，还需考虑站点的可达性与安全性，避开洪水淹没区、地质灾害隐患区等危险区域，确保站点能够长期稳定运行。观测项目的确定需根据规划目标与区域水文特性，明确每个站点的核心观测项目与辅助观测项目。例如，流量站的核心观测项目为流量、水位，辅助观测项目可包括含沙量、水质等；降水站的核心观测项目为降水量，辅助观测项目可包括降水形态、气温等。观测频次的确定需根据水文要素的变化特征与监测需求，确保能够捕捉水文要素的时空变化规律。例如，降水站的观测频次在常规情况下可设置为每日 2 次，在暴雨季节可加密至每小时 1 次；地下水水位站的观测频次可设置为每日 1 次，在水资源开采高峰期可适当加密。

（四）方案评估阶段

方案评估阶段的核心任务是对初步形成的站网布局方案进行全面评估，验证方案的科学性、可行性与经济性，为方案的优化调整提供依据。方案评估主要包括以下几方面内容：一是代表性评估，通过分析规划站点的观测数据能否准确反映所在区域的水文特性，评估站网布局的代表性；二是覆盖范围评估，检查规划站点是否能够全面覆盖规划区域，是否消除了现有站网的监测空白区域；三是数据质量评估，预测规划站点的观测数据质量，分析可能影响数据质量的因素，提出针对性的保障措施；四是经济性评估，计算规划站网的建设成本与运行维护成本，评估方案的经济性，对比不同备选方案的成本效益，选择经济效益最优的方案；五是可行性评估，评估规划站点的选址、设备购置、土建工程、人员配置等方面的可行性，分析是否存在技术、资金、政策等方面的制约因素。通过方案评估，识别初步规划方案存在的问题与不足，例如，部分站点布设位置不合理、建设成本过高、技术难度过大等。

（五）优化调整与实施阶段

优化调整阶段的核心任务是根据方案评估结果，对初步规划方案进行修改完善，形成最终的站网规划方案。针对评估过程中发现的问题，采取相应的优化措施，例如，调整部分站点的布设位置，删减冗余的观测项目，优化观测频次，选择性价比更高的监测设备等。在优化调整过程中，需再次进行技术经济论证，确保优化后的方案能够满足规划目标的需求，同时具备良好的经济性与可行性。最终规划方案确定后，进入实施阶段。实施阶段的核心任务是按照规划方案开展站点建设、设备购置与安装、人员培训等工作，建立站网运行管理制度，确保站网能够顺利投入运行。在实施过程中，需加强质量控制，严格按照相关技术规范开展站点建设与设备安装工作，确保站点建设质量与监测数据质量。同时，还需建立站网运行维护机制，定期对站点设备进行维护与检修，及时处理设备故障，保障站网的长期稳定运行。

第三节 地下水动态监测与评价方法

一、地下水动态监测核心内容与技术体系

地下水动态监测是通过长期、系统的观测，获取地下水在自然条件与人类活动影响下的变化数据，其核心目标是厘清地下水动态变化的驱动机制，为后续评价工作提供可靠的数据支撑。地下水动态监测的内容具有多元性，涵盖地下水水位、水量、水质、水温等核心要素，不同监测内容对应不同的技术要求与方法体系。从技术发展脉络来看，地下水动态监测技术可分为传统监测技术与现代监测技术两大类，两类技术在观测原理、实施方式、精度水平等方面存在显著差异，但在实际勘测工作中相互补充，共同构成了完整的地下水动态监测技术体系。

（一）地下水动态监测核心内容

地下水水位监测是地下水动态监测中最基础、最核心的内容之一。地下水水位是反映地下水补给与排泄平衡关系的直观指标，其变化直接反映了地下水系统的水量收支状况。在自然条件下，地下水水位会随大气降水的入渗补给、地表水的渗漏补给以及蒸发排泄、地下径流排泄等过程呈现季节性波动；在人类活动影响下，地下水开采、农田灌溉、工程建设等行为会打破自然平衡状态，导致地下水水位出现持续性下降或异常波动。因此，地下水水位监测需针对不同的含水层类型（潜水含水层、承压含水层）、不同的水文地质单元，设置合理的监测点位与监测频率，确保能够精准捕捉水位的时空变化特征。

地下水水量监测主要针对地下水的补给量、排泄量以及开采量等关键指标开展观测，其核心目的是量化地下水系统的水量平衡状况。地下水补给量包括大气降水入渗补给量、地表水渗漏补给量、相邻含水层越流补给量等；地下水排泄量包括蒸发排泄量、地下径流排泄量、向地表水的排泄量等；人类活动产生的地下水开采量则是影响水量平衡的重要人为因素。水量监测需结合水文地质条件，采用合理的测算方法，实现对各类水量指标的精准量化，为判断地下水系统的可持续性提供数据支撑。

地下水水质监测是评估地下水环境质量的核心手段，其监测内容涵盖物理指标、化学指标与生物指标三大类。物理指标主要包括地下水的透明度、浑浊度、颜色、气味、水温等；化学指标包括 pH 值、溶解氧、化学需氧量、总硬度、重

金属离子含量、挥发性有机物含量等；生物指标主要包括细菌总数、大肠菌群等。地下水水质会受到自然地质环境与人为污染的双重影响，自然条件下，岩石风化、土壤淋溶等过程会改变地下水的化学组分；人为活动中，工业废水排放、农业化肥农药使用、生活垃圾填埋等行为会导致地下水污染物超标。因此，地下水水质监测需重点关注污染源周边、人口密集区、工业集中区等关键区域，及时发现水质异常变化。

地下水水温监测虽常被忽视，但也是地下水动态监测的重要内容之一。地下水水温受地质环境、地下水径流条件以及人类活动的影响，其变化具有一定的规律性。在自然条件下，地下水水温会随深度增加而升高，呈现地热梯度变化特征；在地下水补给区，由于大气降水入渗带来的低温水补给，水温会相对较低；在排泄区，地下水水温则相对稳定。此外，地热资源开发、地下工程建设等人类活动也会导致地下水水温异常变化。通过水温监测，不仅可以辅助判断地下水的补给来源与径流路径，还能为地热资源勘查、地下水污染溯源等工作提供重要参考。

（二）传统地下水动态监测技术

传统地下水动态监测技术依托简单的观测设备与人工操作，是地下水勘测工作中长期沿用的基础技术方法，具有操作简便、成本低廉、适应性强等特点，在水文地质条件相对简单、监测点位较为分散的区域仍具有一定的应用价值。

传统水位监测技术主要采用测钟、测绳、水位计等简易设备开展人工观测。测钟是由金属或塑料制成的中空容器，底部设有进水孔，使用时将测钟缓慢放入监测井中，当测钟接触到地下水面时，会产生明显的撞击声，此时通过测绳上的刻度即可读取水位深度。测绳法则是在测绳一端系上重物，缓慢放入监测井中，当重物接触水面时，根据测绳的刻度确定水位。传统水位监测技术的精度主要依赖于观测人员的操作经验，观测频率多为每日一次或定期观测，难以实现连续监测，且在恶劣天气条件下观测难度较大。

传统水量监测技术主要采用容积法、堰槽法等实测方法，结合水文地质参数进行估算。容积法适用于小型泉眼、水井等集中排泄或开采点的水量监测，通过测量一定时间内流出水体的体积，计算单位时间内的水量。堰槽法则是在地表水与地下水连通的渠道、溪流等区域设置堰槽，通过测量堰槽内的水位差，结合堰槽的流量公式计算地下水的排泄量或补给量。传统水量监测方法操作相对繁琐，受地形、地貌条件限制较大，且测量精度受人为因素影响较为明显。

传统水质监测技术以人工采样、实验室分析为核心流程。观测人员通过采样瓶在监测点位采集地下水样品，做好样品保存与标识后，送至实验室进行物理、化学及生物指标的分析。传统水质监测的采样频率多为每月一次或每季度一次，能够反映水质的阶段性变化特征，但难以捕捉水质的瞬时异常变化。此外，传统水质监测的分析精度受实验室设备条件与分析人员技术水平的限制，且采样过程中易出现样品污染，影响监测结果的可靠性。

（三）现代地下水动态监测技术

随着传感技术、通信技术与数据处理技术的快速发展，地下水动态监测技术逐步向自动化、智能化、精准化方向转型，现代地下水动态监测技术依托先进的监测设备与技术手段，实现了对地下水动态要素的连续、实时监测，大幅提升了监测效率与数据精度。

现代水位监测技术以自动化水位传感器为核心，结合数据传输系统实现实时监测。常用的自动化水位传感器包括压力式水位传感器、浮子式水位传感器、超声波水位传感器等。压力式水位传感器通过测量地下水对传感器的压力，换算得到水位深度，具有测量精度高、稳定性好、适应范围广等特点；浮子式水位传感器通过浮子随水位变化的升降，带动位移传感器产生电信号，实现水位的自动测量；超声波水位传感器则通过发射超声波，测量超声波从传感器到水面的传播时间，计算得到水位深度，具有非接触式测量的优势，适用于水质浑浊、腐蚀性强的地下水监测。现代水位监测系统通过数据采集终端将传感器获取的水位数据，经 GPRS、北斗等通信技术传输至监测中心，实现水位数据的实时接收、存储与分析，能够及时捕捉水位的瞬时变化。

现代水量监测技术融合了流量传感器、雷达监测等先进技术，实现了水量的自动化、精准化测量。在水井开采量监测中，可在水井出水管路安装电磁流量计、涡轮流量计等流量传感器，实时测量出水量；在泉眼、地下河等天然排泄点，可采用雷达流量计进行非接触式流量监测，通过雷达波反射原理测量水流速度，结合断面面积计算流量。现代水量监测技术不仅提高了测量精度，还实现了水量数据的实时传输与动态分析，能够为地下水开采调控提供及时的数据支撑。

现代水质监测技术形成了“在线实时监测 + 实验室精准分析”的多元化技术体系。在线水质监测系统通过在监测点位安装水质传感器，实现对 pH 值、溶解氧、电导率、浊度等常规水质指标的实时监测。水质传感器将监测到的水质参数转化

为电信号，经数据传输系统送至监测中心，能够及时发现水质的异常波动。对于重金属离子、挥发性有机物等复杂水质指标，则采用自动采样器结合实验室高精度分析设备进行监测，自动采样器可根据预设的采样频率与时间，自动采集地下水样品，确保样品的代表性与时效性，实验室分析则依托电感耦合等离子体质谱仪、气相色谱-质谱联用仪等先进设备，实现对微量污染物的精准检测。

此外，现代地下水动态监测技术还融合了遥感技术、地理信息系统（GIS）等空间技术，实现了地下水动态变化的空间可视化分析。遥感技术通过卫星或航空遥感设备，获取地表植被覆盖、土壤湿度、地表水分布等信息，间接反演地下水水位的空间分布特征；GIS技术则将监测点位数据与水文地质、地形地貌、土地利用等空间数据进行叠加分析，构建地下水动态监测空间数据库，为地下水动态变化的空间格局分析提供技术支撑。

二、地下水动态评价核心逻辑与方法体系

地下水动态评价是基于监测数据，结合水文地质条件与影响因素，分析地下水动态变化规律、识别驱动因素、研判演化趋势的过程。其核心逻辑是通过对监测数据的整合分析，揭示地下水系统的内在运行机制，评估地下水系统的稳定性与可持续性，为水资源管理、生态环境保护等工作提供决策依据。地下水动态评价方法需遵循科学性、系统性、实用性原则，根据评价目标与数据条件，选择合适的评价路径，形成了以定性评价为基础、定量评价为核心的完整方法体系。

（一）地下水动态评价核心目标与原则

地下水动态评价的核心目标包括三个方面：一是厘清地下水动态变化规律，明确水位、水量、水质等要素的时空变化特征，识别变化过程中的异常现象；二是解析地下水动态变化的驱动机制，区分自然因素（大气降水、地表水变化等）与人为因素（地下水开采、工程建设等）对地下水动态的影响程度；三是研判地下水系统的演化趋势，评估地下水动态变化对水资源安全、生态环境的潜在影响，提出针对性的调控建议。

地下水动态评价需遵循以下核心原则：一是科学性原则，评价方法需基于水文地质理论与科学原理，确保评价过程的合理性与评价结果的可靠性；二是系统性原则，需综合考虑地下水系统与大气圈、水圈、生物圈、岩石圈的相互作用，全面分析各类影响因素；三是实用性原则，评价指标与评价方法需结合实际需求，

确保评价结果能够直接服务于决策实践；四是动态性原则，地下水系统处于不断变化之中，评价工作需结合长期监测数据，实现动态更新与调整。

（二）传统地下水动态评价方法

传统地下水动态评价方法以定性分析与经验判断为主，依托长期积累的监测数据与水文地质调查成果，通过简单的数据分析与对比，揭示地下水动态变化规律。传统评价方法操作简便、适用性强，在数据积累不足、评价精度要求不高的场景中具有一定的应用价值。

趋势分析方法是传统地下水动态评价的常用方法之一，通过对长期监测数据的整理分析，绘制地下水动态变化曲线，直观反映水位、水量、水质等要素的变化趋势。常用的趋势分析方法包括直观图解法与统计分析法。直观图解法通过绘制年际变化曲线、季节变化曲线等，直接观察地下水动态的变化特征，判断变化趋势的持续性与波动性；统计分析法则通过计算监测数据的均值、极值、变差系数等统计指标，量化地下水动态的变化程度。例如，通过分析多年水位监测数据的年际变化曲线，可判断地下水水位是呈现上升、下降还是稳定趋势，结合降水数据对比，可初步识别大气降水对水位变化的影响。

成因分析方法是传统评价中解析地下水动态驱动机制的核心方法，通过结合水文地质条件与影响因素，定性判断各类因素对地下水动态的影响。在分析过程中，需综合考虑大气降水、地表水变化、地形地貌、地质构造等自然因素，以及地下水开采、农田灌溉、工业用水等人为因素，通过对比不同时期、不同区域的地下水动态变化特征，结合影响因素的变化情况，识别主导驱动因素。例如，在地下水开采集中区域，若监测发现水位持续下降，且下降趋势与开采量增加趋势一致，可初步判断地下水开采是导致水位下降的主导因素。

类型划分方法是通过对不同区域地下水动态变化特征的对比分析，划分地下水动态类型，揭示不同水文地质单元的地下水运行规律。根据地下水动态变化的主导因素与变化特征，常见的地下水动态类型包括降水入渗型、地表水补给型、蒸发排泄型、开采影响型等。降水入渗型地下水动态主要受大气降水控制，水位、水量随降水季节变化呈现明显的季节性波动；地表水补给型地下水动态则受地表水水位变化影响显著，与地表水动态变化具有同步性；蒸发排泄型地下水动态多出现于干旱半干旱地区的潜水含水层，水位随蒸发量变化呈现季节性下降；开采影响型地下水动态则主要受人类开采活动控制，水位、水量呈现持续性下降趋势。

通过类型划分,可实现对不同区域地下水动态特征的精准把握,为针对性的管理措施制定提供依据。

(三) 现代地下水动态评价方法

随着数据处理技术与数值模拟技术的发展,现代地下水动态评价方法逐步向定量化、精细化方向发展,通过整合多源监测数据,运用数学模型与信息化技术,实现对地下水动态变化的精准解析与趋势预测。现代评价方法能够有效克服传统评价方法的局限性,大幅提升评价结果的科学性与可靠性。

多元统计分析方法是现代地下水动态评价的核心定量方法之一,通过对多维度监测数据与影响因素数据的统计分析,量化各因素对地下水动态的影响程度,识别主导驱动因素。常用的多元统计分析方法包括相关性分析、主成分分析、回归分析等。相关性分析通过计算地下水动态指标与影响因素之间的相关系数,判断两者的相关程度;主成分分析通过对多个影响因素的降维处理,提取主导影响因子,简化评价过程;回归分析则通过构建地下水动态指标与影响因素之间的回归方程,量化各因素的影响权重,实现对地下水动态的定量预测。例如,通过对水位监测数据与降水、开采量数据的多元回归分析,可构建水位变化预测模型,精准预测不同降水情景与开采强度下的水位变化趋势。

数值模拟方法是现代地下水动态评价的先进技术手段,通过构建地下水系统数值模型,模拟地下水在不同条件下的动态变化过程。数值模型基于水文地质方程,结合监测数据与水文地质参数,将地下水系统的物理过程转化为数学表达式,通过数值计算方法求解,实现对地下水水位、水量、水质变化的精准模拟与预测。常用的地下水数值模拟软件包括 MODFLOW、FEFLOW、SEAWAT 等,其中 MODFLOW 因其通用性强、操作简便等特点,被广泛应用于地下水水量模拟;FEFLOW 则适用于复杂地质条件下的地下水水流与溶质运移模拟;SEAWAT 主要用于地下水与海水相互作用的模拟。数值模拟方法能够综合考虑各类自然因素与人为因素的耦合影响,精准复刻地下水系统的运行机制,为地下水动态趋势预测与调控方案制定提供强有力的技术支撑。

综合评价方法是结合多维度评价指标与评价方法,对地下水系统的稳定性、可持续性进行全面评估的方法。该方法通过构建包含水位稳定性、水量平衡、水质安全等多维度的评价指标体系,采用层次分析、模糊综合评价等方法,整合定性评价与定量评价结果,实现对地下水系统的综合研判。层次分析方法通过构建

递阶层次结构,明确各评价指标的权重,实现对复杂问题的系统分析;模糊综合评价方法则通过引入模糊数学理论,处理评价过程中的模糊性与不确定性,提升评价结果的合理性。综合评价方法能够全面反映地下水系统的整体状况,为水资源管理部门制定科学的地下水保护与开发利用方案提供全面的决策依据。

(四) 地下水动态评价的关键环节

地下水动态评价是一个系统性的过程,涉及数据处理、影响因素识别、方法选择、结果验证等多个关键环节,每个环节的质量直接影响评价结果的可靠性。数据预处理是评价工作的基础环节,需对监测数据进行筛选、整理与校验,剔除异常数据与缺失数据,确保数据的完整性与可靠性。在数据预处理过程中,需结合监测设备的运行状况、观测环境的变化,判断数据异常的原因,对缺失数据采用合理的插值方法进行补充。

影响因素识别是评价工作的核心环节,需全面梳理可能影响地下水动态的自然因素与人为因素,明确各因素的作用机制与影响范围。在识别过程中,需结合水文地质调查成果,通过实地勘查与数据对比,排除次要影响因素,聚焦主导驱动因素,为后续评价方法的选择与模型构建提供依据。

评价方法选择需遵循因地制宜原则,根据评价目标、数据条件与水文地质条件,选择合适的评价方法。在数据积累充足、评价精度要求高的场景中,可选择多元统计分析、数值模拟等定量评价方法;在数据不足、评价精度要求较低的场景中,可采用趋势分析、成因分析等定性评价方法;在综合评估地下水系统状况时,则应采用综合评价方法,整合多维度评价结果。

结果验证是确保评价可靠性的重要环节,需通过现场勘查、补充监测等方式,对评价结果进行验证。对于定量评价结果,可通过对比实测数据与预测数据的偏差,调整评价参数与模型结构,提升评价精度;对于定性评价结果,可结合实地调查成果,判断评价结论的合理性。此外,还需结合不同时期的监测数据,对评价结果进行动态验证,确保评价方法能够准确反映地下水系统的演化规律。

第四节 传统与现代勘测方法的比较与适用性

一、传统与现代水文勘测方法的应用效能比较

应用效能是衡量水文勘测方法实用价值的核心指标，主要涵盖勘测精度、勘测效率、覆盖范围、环境适应性等维度。传统与现代水文勘测方法基于不同的核心特征，在应用效能上呈现出互补性的优劣态势。对应用效能的系统比较，能够清晰界定两类方法的适用边界，为不同勘测场景下的方法选型提供量化参考。

（一）勘测精度的比较

传统水文勘测方法的勘测精度受人工操作与观测工具精度的双重限制，整体呈现出“宏观可靠、微观不足”的特点。在宏观水文要素监测中，如多年平均径流量、年降水量等，传统方法通过长期的人工观测积累了大量数据，能够较为准确地反映水文要素的长期变化规律，满足宏观水文分析的需求。但在微观水文过程监测中，如瞬时流速、短期暴雨强度、地下水动态变化等，传统方法由于观测频率低、人工操作误差大，难以实现精准监测。例如，在短期暴雨勘测中，人工定时观测难以捕捉暴雨峰值的精准出现时间与强度，导致降水量数据存在偏差；在流速勘测中，人工操作流速仪的测点偏差与读数误差，会直接影响流速数据的精度。

现代水文勘测方法依托高精度的传感设备与数字化技术，实现了勘测精度的显著提升，尤其在微观水文过程监测中展现出绝对优势。智能传感器能够精准感知水文要素的微小变化，观测精度可达毫米级或厘米级，远高于传统观测工具；同时，自动化监测模式规避了人工操作误差，确保了数据的准确性与可靠性。在宏观水文要素监测中，现代方法通过大范围的全覆盖观测与数字化建模，能够实现对水文要素时空分布规律的精准刻画，进一步提升了宏观勘测的精度。例如，卫星遥感技术能够精准监测大范围流域的积雪覆盖面积、冰川融化速率，为流域水资源评估提供高精度数据；智能流速仪能够实时捕捉河流水流的瞬时变化，精准获取流速的时空分布特征。但需要注意的是，现代水文勘测方法的精度依赖于设备的校准与维护，若设备校准不及时或出现故障，可能导致数据精度下降。

（二）勘测效率与覆盖范围的比较

传统水文勘测方法的勘测效率较低，覆盖范围有限。受人工操作模式的限制，

传统方法的观测频率较低，通常为每日 1-2 次定时观测，难以实现对水文要素的实时监测；同时，人工勘测的移动性较差，在复杂地形条件下，如山区、偏远流域，勘测人员的通行难度较大，导致勘测周期较长。在覆盖范围上，传统方法以单点观测为主，一个勘测团队通常只能完成小范围区域的勘测工作，若要实现流域尺度的勘测，需要布设大量的观测点，投入大量的人力与时间成本，难以满足大范围、快速勘测的需求。例如，在流域洪水应急勘测中，传统人工勘测方法难以在短时间内完成全流域的洪水水位、流速监测，无法为洪水防控提供及时的决策支撑。

现代水文勘测方法以自动化、智能化技术为支撑，实现了勘测效率与覆盖范围的大幅提升。自动化监测设备能够实现 24 小时连续实时监测，数据采集频率可根据需求灵活调整，从分钟级到小时级不等，能够快速捕捉水文要素的动态变化；无人机勘测平台与卫星遥感技术具有较强的机动性与覆盖能力，能够在短时间内完成大范围区域的勘测工作，尤其适用于复杂地形或应急场景下的勘测。例如，在突发洪水灾害中，通过无人机遥感与卫星遥感技术，可在几小时内完成全流域的洪水淹没范围、水位变化监测，为洪水防控与救灾决策提供及时、全面的数据支撑；在大范围流域水资源调查中，现代勘测方法可通过多源技术协同，快速完成流域内降水、径流、地下水等多要素的全面勘测，大幅缩短勘测周期。

（三）环境适应性与稳定性的比较

传统水文勘测方法具有较强的环境适应性与稳定性，尤其适用于复杂恶劣的勘测环境。传统勘测工具结构简单、抗干扰能力强，无需电力供应与网络支撑，能够在偏远山区、无电力覆盖区域、极端气候条件下正常使用。例如，在高海拔山区的降水勘测中，传统量雨筒无需电力与网络，可通过人工定期巡查完成数据收集；在地震、洪水等自然灾害现场，传统勘测工具不易受灾害环境的影响，能够快速投入勘测工作。此外，传统勘测方法的操作流程简单，不易受技术故障的影响，即使部分观测工具出现损坏，也可通过简易维修或更换工具快速恢复勘测工作，具有较高的稳定性。

现代水文勘测方法的环境适应性与稳定性受技术设备与外部条件的限制较大。智能监测设备、遥感设备等对工作环境具有一定的要求，在极端气候条件下，如高温、严寒、强暴雨、强风沙等，设备的性能可能受到影响，甚至出现故障；同时，现代勘测方法依赖电力供应与网络传输，在无电力覆盖、网络信号薄弱的

偏远区域，难以正常开展勘测工作。例如，在沙漠地区的水文勘测中，高温与强风沙可能导致智能传感器故障，网络信号薄弱可能导致数据传输中断；在高海拔山区，电力供应困难可能限制自动化监测设备的长期使用。此外，现代勘测方法的技术体系复杂，设备的校准、维护与维修需要专业的技术人员与设备，一旦出现技术故障，恢复勘测工作的周期较长，稳定性相对较弱。

二、传统与现代水文勘测方法的适用性分析

基于传统与现代水文勘测方法的核心特征与应用效能差异，两者在不同的勘测场景、勘测目标与勘测条件下具有不同的适用性。科学界定两类方法的适用范围，并非简单否定传统方法或盲目推崇现代技术，而是根据勘测工作的实际需求，实现两类方法的优势互补。适用性分析需结合勘测目标、勘测区域特征、勘测周期、技术条件、成本预算等多方面因素，确保选择的勘测方法能够高效、精准地完成勘测任务。

（一）传统水文勘测方法的适用场景

传统水文勘测方法凭借其简单便捷、环境适应性强、成本低廉等优势，在特定勘测场景下仍具有不可替代的价值，主要适用于以下情况：

一是偏远地区与无技术支撑条件的勘测场景。在无电力供应、无网络覆盖的偏远山区、农村地区，现代勘测设备难以正常运行，传统勘测方法成为开展水文勘测工作的唯一选择。例如，在偏远山区的小型流域水资源调查中，可通过人工布设水位尺、量雨筒等传统工具，完成降水、水位等基础水文要素的观测；在无网络信号的荒漠地区，通过人工定期巡查完成地下水埋深的观测。

二是应急勘测与临时监测场景。在地震、洪水、泥石流等自然灾害突发场景下，电力与网络设施可能遭到破坏，现代勘测设备无法快速投入使用，传统勘测方法凭借其简单便捷的优势，可快速开展应急勘测工作。例如，在洪水突发现场，勘测人员可携带流速仪、测绳等传统工具，快速完成洪水水位、流速的监测，为应急救援提供及时的数据支撑；在临时水利工程建设现场，通过传统勘测方法可快速完成基础水文数据的收集，满足工程建设的临时需求。

三是低精度要求的宏观勘测与普查场景。对于精度要求较低、以宏观规律总结为目标的水文勘测工作，传统勘测方法能够以较低的成本完成勘测任务。例如，在区域降水量普查中，通过布设大量的传统量雨筒，结合人工观测数据，可快速

完成区域降水量的宏观评估；在小型河流的径流规律分析中，通过长期的人工定时观测，可总结径流的季节变化规律，满足基础水文分析的需求。

四是成本预算有限的勘测项目。传统勘测工具成本低廉、维护费用低，无需大量的前期技术投入，适用于成本预算有限的水文勘测项目。例如，在基层水文站的日常监测工作中，通过传统勘测方法可完成基础水文要素的观测，满足日常水文工作的需求；在小型水利工程的前期勘测中，传统方法可有效控制勘测成本，实现经济效益与勘测效果的平衡。

（二）现代水文勘测方法的适用场景

现代水文勘测方法凭借其高精度、高效率、大范围覆盖等优势，在精细化、规模化、智能化的水文勘测场景中具有显著优势，主要适用于以下情况：

一是高精度、连续监测的水文勘测场景。对于需要精准捕捉水文要素动态变化的勘测任务，现代水文勘测方法是最优选择。例如，在大型水利工程的水文监测中，需要对水位、流速、含沙量等要素进行连续精准监测，以保障工程的安全运行，此时可通过部署智能监测系统实现全方位的实时监测；在地下水超采区的动态监测中，通过自动化监测仪可实现对地下水埋深的连续观测，精准掌握地下水的变化趋势。

二是大范围、流域尺度的勘测场景。对于流域尺度或区域尺度的水文勘测工作，现代勘测方法能够实现全覆盖、高效勘测，满足宏观水文分析的需求。例如，在长江、黄河等大型流域的水资源调查中，通过卫星遥感、无人机勘测与地面智能监测站协同，可快速完成全流域的降水、径流、积雪、冰川等多要素的全面勘测，为流域水资源优化配置提供全面的数据支撑；在区域水文灾害风险评估中，通过遥感技术可实现对灾害隐患点的大范围排查，提升风险评估的全面性与准确性。

三是应急响应与快速评估的勘测场景。在需要快速获取勘测数据的应急场景中，现代水文勘测方法能够大幅提升勘测效率，为决策提供及时支撑。例如，在台风、暴雨等极端天气引发的水文灾害应急响应中，通过卫星遥感与无人机技术可快速获取洪水淹没范围、水位变化等数据，为灾害评估与救灾决策提供实时支撑；在突发性水污染事件中，通过移动监测设备与无人机水质监测系统，可快速确定污染范围与污染程度，为污染防控提供及时的数据支撑。

四是数字化、智能化水文管理的勘测场景。随着水文工作向数字化、智能化转型，现代水文勘测方法成为构建智慧水文体系的核心支撑。例如，在智慧流域

管理中,通过现代勘测方法获取的数字化水文数据,可接入流域管理信息系统,实现对水文过程的精准模拟与预测,提升流域管理的智能化水平;在水资源精细化管理中,通过现代勘测方法实现对水资源时空分布的精准刻画,为水资源的科学配置与高效利用提供数据支撑。

(三) 传统与现代水文勘测方法的融合适用场景

在实际水文勘测工作中,单一的勘测方法往往难以满足复杂的勘测需求,传统与现代水文勘测方法的融合应用成为提升勘测质量与效率的有效途径,主要适用于以下情况:

一是复杂流域的全方位勘测场景。在地形复杂、水文过程多样的大型流域勘测中,可通过“现代技术全覆盖监测+传统方法重点验证”的融合模式,实现勘测精度与效率的平衡。例如,在山区流域的水文勘测中,通过卫星遥感与无人机技术完成大范围的地形与水文格局勘测,在关键河段或监测盲区布设传统观测点,通过人工观测验证现代技术监测数据的准确性,确保勘测成果的可靠性。

二是长期水文监测的连续性保障场景。在长期水文监测工作中,可通过“现代自动化监测为主+传统方法备份应急”的融合模式,保障监测工作的连续性与稳定性。例如,在长期水文监测站,部署智能自动化监测系统实现日常的连续监测,同时配备传统观测工具,当现代设备出现故障或遭遇极端天气时,通过人工观测确保监测数据的连续性,避免监测中断。

三是水文数据的校准与验证场景。现代水文勘测方法获取的数字化数据需要通过传统方法进行校准与验证,以确保数据的准确性。例如,在卫星遥感降水数据的验证中,通过布设传统量雨筒观测点,将人工观测数据与卫星遥感数据进行对比校准,提升遥感数据的精度;在智能传感器监测数据的验证中,通过人工定期实测,对传感器数据进行校准,确保监测数据的可靠性。

四是基层水文工作的提质增效场景。在基层水文站的日常工作中,可通过“传统经验结合现代技术”的融合模式,实现提质增效。例如,基层水文站工作人员可依托传统的水文观测经验,优化现代监测设备的布设位置,提升监测数据的代表性;同时,通过现代数据处理技术,快速处理传统人工观测数据,提升数据处理效率,实现传统经验与现代技术的优势互补。

第四章 现代空间信息技术在综合勘测中的应用

第一节 遥感 (RS) 水文信息提取原理与方法

一、遥感水文信息提取核心原理

遥感水文信息提取的本质是利用遥感传感器捕捉地物反射、发射或散射的电磁波信号,通过分析信号与水文要素的内在关联,反演得到所需的水文信息。其核心逻辑建立在电磁波与水文要素的相互作用规律之上,不同水文要素因其物理性质、物质组成的差异,对不同波长电磁波的响应特征存在显著区别,这一差异构成了遥感识别和提取水文信息的基础。同时,遥感技术的多平台、多光谱、多时相特性,使得水文信息提取能够覆盖从微观到宏观、从瞬时到动态的不同需求,适配水文要素时空分布不均的固有属性。

(一) 电磁波与水文要素的相互作用机制

电磁波是遥感技术传递地物信息的载体,其波长范围从紫外线到微波,不同波段的电磁波与水文要素的相互作用方式存在差异,主要表现为反射、吸收、发射和散射四种形式。对于地表水文要素而言,如水体、土壤湿度、植被含水量等,其对可见光-近红外波段的反射特性差异最为显著;而对于大气水文要素,如云层、降水、水汽等,红外和微波波段的吸收与发射特性更具识别价值。

水体在可见光波段具有低反射、高吸收的特征,尤其是在近红外波段,水体的吸收率接近 100%,这一特性使其能够与周边的植被、土壤等地物形成鲜明对比,成为遥感识别水体范围的核心依据。土壤湿度的变化则会影响土壤的介电常数,进而改变土壤对电磁波的反射和散射强度,一般而言,土壤湿度越高,反射率越低,这一规律为土壤含水量的遥感反演提供了基础。植被含水量作为重要的水文要素,其变化会导致植被在近红外和短波红外波段的反射率发生显著变化,当植被含水量降低时,短波红外波段的反射率会升高,这一特征被广泛应用于植被蒸

腾耗水相关信息的提取。

在大气水文要素的遥感探测中，红外波段主要用于捕捉云层的发射辐射，不同厚度和温度的云层在红外波段的辐射强度存在差异，可据此反演云层厚度和降水潜力；微波波段则因其具有穿透云层、不受天气条件影响的特性，成为降水监测、大气水汽含量反演的理想波段，微波信号与降水粒子的散射作用强度与降水强度密切相关，通过分析微波信号的衰减程度可实现降水信息的提取。

（二）遥感系统的水文适配性特征

遥感系统由传感器、运载平台、数据传输与处理系统三部分组成，其各组成部分的特性直接决定了水文信息提取的精度和效率。从运载平台来看，遥感技术可分为卫星遥感、航空遥感和近地遥感，不同平台的时空分辨率存在差异，适配不同尺度的水文勘测需求。卫星遥感具有宏观覆盖范围广、多时相连续观测的优势，适用于流域尺度的水文要素动态监测，如大范围的水体时空演变、区域土壤湿度分布等；航空遥感则具有较高的空间分辨率，适用于中小尺度的精细化勘测，如小流域的河道形态监测、灌区的灌溉面积提取等；近地遥感则通过无人机、三脚架等平台实现近距离观测，分辨率最高，适用于微观尺度的水文要素监测，如植被单株含水量、土壤表层湿度的精准测量。

从传感器类型来看，根据探测波段的不同，可分为可见光 - 近红外传感器、红外传感器、微波传感器等，不同传感器的探测范围和优势各不相同，形成了互补的水文信息提取能力。可见光 - 近红外传感器主要用于提取地表水文要素的空间分布信息，如水体范围、植被覆盖度等；红外传感器侧重于捕捉地物的热辐射信息，可用于水体温度、地表蒸散发等要素的反演；微波传感器则因其穿透性强、不受昼夜和天气条件限制的特性，能够实现全天候、全天时的水文监测，尤其适用于云雨天气下的降水监测、土壤深层湿度反演以及冰雪覆盖范围的监测。

二、遥感水文信息提取方法体系

遥感水文信息提取方法的发展历程伴随着遥感技术和信息技术的进步，从早期的目视解译到现代的自动化、智能化提取，形成了一套涵盖预处理、信息增强、特征提取、反演建模的完整方法体系。不同提取方法的核心差异在于对遥感影像特征的利用方式和分析手段，其适用场景与水文要素的类型、遥感数据的特性密切相关。本节从基础处理方法、核心提取方法和进阶建模方法三个层面，系统梳

理遥感水文信息提取的方法体系。

（一）遥感数据预处理方法

遥感数据预处理是水文信息提取的前置环节，其目的是消除遥感数据在获取过程中产生的误差和干扰，提高数据质量，为后续的信息提取提供可靠的数据源。预处理环节主要包括辐射校正、几何校正、影像裁剪与镶嵌等核心步骤，不同步骤针对的误差类型不同，处理方法也存在差异。

辐射校正是消除传感器自身误差、大气传输误差以及地表环境影响的关键步骤，其核心目标是将遥感影像的灰度值转换为地物真实的辐射亮度值。辐射校正可分为绝对校正和相对校正，绝对校正通过建立灰度值与辐射亮度的定量关系，实现对影像辐射精度的校准；相对校正则主要用于消除同一幅影像内不同区域的辐射差异，如阴影、光照不均匀等问题。在水文信息提取中，辐射校正的精度直接影响地物反射率的准确性，进而影响土壤湿度、植被含水量等要素的反演精度，尤其是在多时序数据对比分析中，辐射校正更是确保数据一致性的前提。

几何校正是消除遥感影像几何变形的过程，几何变形主要来源于传感器姿态变化、运载平台运动、地球曲率、地形起伏等因素。几何校正的核心是通过选取地面控制点，建立影像坐标与地理坐标之间的映射关系，实现影像的空间定位校准。对于水文信息提取而言，几何校正的精度直接影响水文要素空间分布信息的准确性，如河道边界的定位、流域范围的划分等，若几何校正精度不足，会导致提取的水文信息出现空间偏移，影响后续的水文分析结果。影像裁剪与镶嵌则是根据水文勘测的具体范围，对遥感影像进行裁剪或拼接，形成覆盖研究区域的完整影像数据，提高信息提取的效率和针对性。

（二）核心信息提取方法

核心信息提取方法是遥感水文信息提取的核心环节，根据分析手段的不同，可分为目视解译法、监督分类法、非监督分类法、指数提取法等，不同方法适用于不同类型的水文要素提取，具有各自的优势和局限性。

目视解译法是最基础的遥感信息提取方法，通过人工直接观察遥感影像的灰度、纹理、形状等特征，结合水文专业知识，识别并勾绘出所需的水文要素。该方法的优势在于能够充分利用人的主观判断能力，处理复杂的地物场景，适用于小范围、高精度的水文信息提取，如复杂地形下的河道边界提取、小型湖泊的识别等。但目视解译法效率低下，主观性强，受解译人员专业水平影响较大，难以

适用于大范围、多时相的水文信息动态监测。

监督分类法是基于已知地物样本的分类方法，通过选取具有代表性的地物样本（训练样本），建立样本的特征模型，然后利用该模型对整个遥感影像进行分类，实现水文要素的提取。该方法的核心是训练样本的选取和特征模型的构建，适用于地物类型明确、样本易获取的水文要素提取，如水体、植被、裸地等的分类提取。监督分类法的优势在于分类精度较高，结果稳定性好，适用于中大范围的水文信息提取，但该方法需要大量的实地调查数据作为支撑，样本选取的合理性直接影响分类结果的准确性。

非监督分类法无需已知地物样本，通过利用遥感影像自身的灰度统计特征，自动识别地物的类别，实现水文信息的提取。该方法的核心是基于影像像素的灰度值相似度进行聚类分析，将灰度特征相似的像素归为一类。非监督分类法的优势在于无需实地调查数据，效率较高，适用于地物类型简单、缺乏先验知识的水文信息提取场景。但该方法的分类结果需要结合专业知识进行后处理和验证，容易出现错分、漏分的情况，分类精度一般低于监督分类法。

指数提取法是基于不同波段的组合运算，构建能够突出特定水文要素的指数模型，通过设定阈值实现水文要素的提取。该方法的核心是利用水文要素与其他地物在波段反射率上的差异，构建针对性的指数公式。在水文信息提取中，常用的指数包括归一化差异水体指数（NDWI）、归一化差异植被指数（NDVI）、土壤调整植被指数（SAVI）等。其中，NDWI通过绿光波段与近红外波段的组合，能够有效突出水体信息，抑制植被和土壤的干扰，是水体提取的常用方法；NDVI则通过近红外波段与红光波段的组合，能够反映植被的生长状况和覆盖度，进而间接提取植被含水量等水文信息；SAVI则通过引入土壤调节因子，减少土壤背景对植被指数的影响，适用于土壤湿度较高区域的植被相关水文信息提取。指数提取法具有计算简单、效率高、针对性强的优势，适用于大范围、多时相的水文信息动态监测。

（三）进阶建模与反演方法

进阶建模与反演方法是针对复杂水文要素提取需求发展而来的方法，通过建立遥感信号与水文要素之间的定量关系模型，实现水文要素的精准反演。该方法适用于无法通过简单分类或指数提取得到的水文要素，如土壤含水量、地表蒸散发、降水强度等。根据建模方式的不同，进阶建模与反演方法可分为统计模型法、

物理模型法和机器学习模型法。

统计模型法是通过分析遥感数据与实测水文数据之间的统计关系,构建回归方程等统计模型,实现水文要素的反演。该方法的核心是利用大量的实测数据对模型参数进行拟合,适用于遥感信号与水文要素呈显著线性或非线性关系的场景。例如,在土壤含水量反演中,可通过分析土壤反射率与实测土壤含水量之间的统计关系,构建一元线性回归模型或多元逐步回归模型;在地表蒸散发反演中,可利用植被指数、地表温度等遥感参数与实测蒸散发数据构建统计模型。统计模型法的优势在于建模简单、计算效率高,适用于数据积累充足的区域,但该方法具有较强的地域性和时效性,模型参数需要根据研究区域的实际情况进行调整,泛化能力较弱。

物理模型法是基于电磁波与水文要素相互作用的物理机制,构建定量反演模型。该方法的核心是利用物理学原理描述遥感信号的传输过程和水文要素的影响机制,具有较强的理论基础和物理意义。例如,在微波遥感土壤湿度反演中,基于土壤的介电特性模型,建立微波后向散射系数与土壤湿度之间的物理关系;在红外遥感地表蒸散发反演中,基于能量平衡原理,构建地表能量通量与遥感参数之间的物理模型。物理模型法的优势在于泛化能力强、适用范围广,能够反映水文要素的内在物理机制,但该方法建模复杂,需要大量的物理参数,计算难度较大,对遥感数据的精度要求较高。

机器学习模型法是近年来随着人工智能技术发展而兴起的反演方法,通过利用机器学习算法的非线性拟合能力和特征学习能力,构建遥感数据与水文要素之间的复杂映射关系。常用的机器学习算法包括支持向量机、随机森林、神经网络等。该方法的核心是通过大量的训练数据让模型自动学习遥感特征与水文要素之间的关联,无需预先构建明确的数学模型。机器学习模型法的优势在于能够处理复杂的非线性关系,反演精度较高,适用于多源遥感数据融合的水文信息提取场景。例如,结合可见光、红外、微波等多源遥感数据,利用随机森林算法反演土壤含水量,能够综合利用不同波段的优势,提高反演精度。但机器学习模型法需要大量的训练数据,模型参数调整复杂,且模型的可解释性较弱,在实际应用中需要结合专业知识进行模型验证和优化。

第二节 地理信息系统 (GIS) 在数据管理与空间分析中的应用

一、GIS 在水文勘测数据管理中的应用

水文勘测数据的复杂性主要体现在数据类型的多样性、数据维度的时空性以及数据来源的分散性三个方面。传统的数据管理模式多采用文件存储与表格记录相结合的方式,存在数据整合难度大、查询效率低、时空关联能力弱以及数据共享性差等问题。GIS 技术凭借其标准化的空间数据模型与一体化的管理平台,能够有效破解传统数据管理的痛点,实现对水文勘测数据的规范化存储、高效化管理与便捷化共享。

(一) GIS 数据管理的核心机制

GIS 的数据管理核心在于其独特的空间数据模型与数据库管理系统的深度融合。与传统的数据模型不同, GIS 空间数据模型能够同时描述数据的属性特征与空间位置特征,并通过空间关系(如拓扑关系、邻近关系、包含关系等)建立不同数据要素之间的关联。从数据存储结构来看, GIS 主要采用矢量数据结构与栅格数据结构两种核心方式,分别适配不同类型的水文勘测数据:矢量数据结构以点、线、面等几何实体为基础,适用于描述流域边界、水利工程点位、河流廊道等具有明确空间轮廓的要素;栅格数据结构以规则网格为基本单元,通过网格单元的数值表达空间要素的分布特征,适用于描述降水分布、地形高程、土壤含水率等连续分布的水文要素。

在数据库层面, GIS 采用空间数据库管理系统(SDBMS),实现对矢量数据、栅格数据以及属性数据的一体化存储与管理。空间数据库管理系统在传统关系型数据库的基础上,增加了空间索引与空间查询功能,能够通过空间索引快速定位目标数据的空间位置,大幅提升数据查询与检索的效率。同时, GIS 数据管理平台具备标准化的数据接口,能够兼容不同格式的勘测数据(如全站仪测量数据、遥感影像数据、水文监测站时序数据等),实现多源数据的无缝整合与统一管理。

(二) 水文勘测数据的 GIS 规范化管理流程

基于 GIS 的水文勘测数据管理遵循“数据采集—数据预处理—数据入库—数据管理—数据共享”的规范化流程,每个环节都依托 GIS 技术实现对数据的质量

管控与高效处理。

在数据采集阶段，GIS 技术能够实现对多源勘测数据的同步整合。对于野外实测数据，如地形测量数据、水文站点监测数据等，可通过 GIS 移动终端直接采集并记录数据的空间位置信息与属性信息，实现数据采集与空间定位的一体化；对于遥感影像、数字高程模型（DEM）等间接勘测数据，GIS 能够通过标准化的数据格式转换工具，将其导入管理平台并完成空间坐标的校准；对于历史勘测数据与第三方数据，GIS 可通过数据清洗与格式标准化处理，消除数据冗余与格式差异，实现与现有数据体系的兼容。

数据预处理是保障水文勘测数据质量的关键环节，GIS 技术为预处理提供了多样化的工具支持。针对数据缺失问题，GIS 可通过空间插值、时序补全等方法实现数据的完善；针对数据误差，可利用 GIS 的空间叠加分析、拓扑检查等功能，识别并修正数据中的空间位置偏差与逻辑错误；针对数据冗余，GIS 能够通过数据聚合、属性筛选等方式，精简数据量的同时保留核心信息。经过预处理的水文勘测数据，将具备统一的空间坐标体系、规范的属性字段与可靠的数据质量，为后续的数据入库与管理奠定基础。

数据入库阶段的核心是实现数据的结构化存储与空间关联构建。GIS 空间数据库将水文勘测数据按照数据类型（矢量数据、栅格数据）与数据主题（地形数据、水文监测数据、植被覆盖数据等）进行分类存储，并为每类数据建立对应的空间索引与属性索引。同时，通过定义空间关系规则，建立不同主题数据之间的关联，如将水文监测站点数据与对应的流域边界数据进行关联，实现“站点一流域”的空间匹配，为后续的空间分析与数据查询提供关联基础。

在数据管理与共享层面，GIS 平台具备完善的权限管理与数据发布功能。管理人员可根据不同用户的需求，设置数据访问权限，保障数据的安全性；同时，通过 GIS 的地图服务功能，将水文勘测数据以可视化的方式发布，用户可通过网络终端实现对数据的查询、浏览与下载，大幅提升数据的共享效率与利用价值。此外，GIS 数据管理平台还支持数据的时序管理功能，能够记录水文要素的动态变化过程，为水文演变规律的研究提供完整的数据支撑。

（三）GIS 在水文勘测数据管理中的核心优势

相较于传统的数据管理模式，GIS 在水文勘测数据管理中的优势主要体现在三个方面。一是实现了多源数据的一体化整合。水文勘测涉及的实测数据、遥感

数据、历史数据等具有不同的格式与来源，GIS 通过标准化的数据接口与数据预处理工具，能够将这些数据整合到统一的管理平台中，消除数据孤岛，提升数据的整体性与关联性。二是提升了数据管理的效率与精度。GIS 的空间索引功能能够快速定位目标数据，大幅缩短数据查询与检索的时间；同时，通过拓扑检查、空间校准等功能，能够有效修正数据中的误差，提升数据质量。三是强化了数据的时空关联与可视化表达。GIS 能够同时管理数据的属性信息与空间信息，建立数据之间的时空关联，便于工作人员直观地掌握水文要素的空间分布与时序变化特征；通过地图可视化功能，将抽象的数据以地图图层的形式呈现，提升了数据的可读性与易懂性。

二、GIS 在水文勘测中的空间分析应用

水文要素的形成与演变过程具有显著的空间关联性，如降水的空间分布直接影响径流的形成与汇流过程，地形地貌决定了流域的汇流路径与水文响应特征，土壤与植被覆盖则影响着下渗与蒸发过程。传统的水文分析方法难以精准刻画这些空间关联特征，而 GIS 具备丰富的空间分析功能，能够通过对空间数据的运算与分析，挖掘水文要素之间的空间规律，为水文勘测结论的得出提供科学的技术支撑。GIS 在水文勘测中的空间分析应用，主要基于其核心的空间分析功能，结合水文勘测的具体需求，实现对流域特征提取、水文过程模拟、水文资源评估等方向的分析。

（一）GIS 空间分析核心功能体系

GIS 的空间分析功能是基于空间数据的位置、形态、关系等特征，通过一系列的空间运算实现对地理现象空间规律的挖掘，其核心功能体系主要包括空间叠加分析、空间插值分析、网络分析、地形分析等。这些功能相互配合，构成了完整的空间分析技术体系，能够满足水文勘测中不同类型的空间分析需求。

空间叠加分析是 GIS 空间分析的核心功能之一，其核心逻辑是将两个或多个不同主题的空间图层进行叠加运算，通过图层之间的空间关系（如交集、并集、差集等）生成新的空间图层与属性信息。通过空间叠加分析，能够实现不同水文要素之间的空间关联分析，如将降水分布图层与地形图层叠加，可分析不同地形区域的降水分布特征；将土壤类型图层与植被覆盖图层叠加，可探究土壤与植被的空间匹配关系及其对下渗过程的影响。

空间插值分析主要用于解决空间数据的离散性问题，通过对已知观测点的数据进行插值运算，生成连续的空间数据面。在水文勘测中，许多水文要素（如降水、气温、蒸发等）的观测数据多为离散的站点数据，通过 GIS 的空间插值功能（如克里金插值、反距离权重插值、样条函数插值等），能够将离散的站点数据转换为连续的空间分布数据，精准刻画水文要素的空间分布格局。空间插值分析的核心价值在于填补了观测数据的空间空白，为后续的流域水文分析提供了完整的空间数据支撑。

网络分析以线性网络为分析对象，通过对网络节点与边的属性分析，实现对网络连通性、路径优化、流量分配等问题的求解。在水文勘测中，河流廊道可视为典型的线性网络系统，GIS 的网络分析功能能够用于分析流域的汇流路径、河流网络的连通性，以及水利工程（如水库、水闸）在河流网络中的调控作用。通过网络分析，能够明确流域内水文径流的传输路径与汇聚特征，为流域水文过程的模拟与分析提供支撑。

地形分析是基于数字高程模型（DEM）的核心分析功能，通过对 DEM 数据的运算，提取地形起伏、坡度、坡向、流域边界、水系网络等地形特征信息。地形是影响水文过程的关键因素，流域的地形特征直接决定了汇流面积、汇流时间、径流速度等水文参数。GIS 的地形分析功能能够快速、精准地提取这些核心地形特征，为流域水文模型的构建与水文资源的评估提供基础数据。

（二）GIS 空间分析在水文勘测中的关键应用方向

结合水文勘测的核心需求，GIS 空间分析功能在水文勘测中的应用主要集中在流域特征提取、水文要素空间分布分析、汇流过程分析以及水文资源空间评估等关键方向，每个方向都依托 GIS 的核心分析功能，实现对水文规律的精准挖掘。

流域特征提取是水文勘测的基础工作，其核心是明确流域的空间范围与内部地形、水系等特征，为后续的水文分析提供基础框架。GIS 的地形分析功能是流域特征提取的核心技术支撑，通过对 DEM 数据的处理，可完成流域边界的精准划分、水系网络的自动提取、汇流面积的计算以及坡度、坡向等地形参数的获取。在流域边界提取方面，GIS 通过水文分析工具中的填洼、流向计算、汇流累积量计算等步骤，自动识别流域的分水岭，进而确定流域的空间范围，相较于传统的人工绘制方法，不仅大幅提升了工作效率，还提高了边界划分的精度；在水系网络提取方面，通过设定合理的汇流累积量阈值，GIS 能够自动识别河流的发源地、

河道走向与河流等级，构建完整的流域水系网络；同时，结合坡度、坡向分析，能够明确流域内不同区域的地形起伏特征，为分析径流的形成与汇流过程提供关键参数。

水文要素空间分布分析是探究水文要素空间规律的核心环节，主要通过 GIS 的空间叠加分析与空间插值分析实现。对于降水、蒸发、土壤含水率等离散分布的水文要素，首先通过空间插值分析将离散的站点观测数据转换为连续的空间分布图层，进而直观地呈现其空间分布格局；在此基础上，结合地形、土壤、植被等下垫面要素的空间图层，通过空间叠加分析，探究水文要素与下垫面要素之间的空间关联规律。例如，通过将插值生成的降水空间分布图层与地形坡度图层叠加，能够分析不同坡度区域的降水分布差异，探究地形起伏对降水再分配的影响；通过将土壤含水率空间分布图层与植被覆盖图层叠加，可明确不同植被类型区域的土壤含水率特征，为分析植被对下渗过程的调控作用提供支撑。此外，结合 GIS 的时序分析功能，还能够对比不同时期水文要素的空间分布变化，探究水文要素的空间演变规律。

汇流过程分析是水文勘测中探究径流形成与传输规律的关键内容，GIS 的网络分析与地形分析功能为汇流过程的分析提供了有力支撑。汇流过程的核心是明确径流的汇流路径与汇流范围，GIS 通过提取水系网络构建汇流网络模型，结合地形分析获取的汇流面积、坡度等参数，能够分析不同子流域的汇流特征；通过网络分析中的路径分析功能，可确定径流从发源地到出口断面的传输路径，明确汇流过程中的关键节点；同时，结合水文要素的空间分布数据，能够分析汇流过程中径流的补给与损耗特征，为探究流域的水文响应规律提供支撑。此外，GIS 还能够与水文汇流模型相结合，通过空间分析功能为模型提供精准的空间参数，提升汇流过程模拟的精度。

水文资源空间评估是水文勘测的重要目标之一，其核心是评估流域内水文资源的空间分布状况与开发利用潜力。GIS 的空间分析功能能够整合水文监测数据、地形数据、土地利用数据等多源数据，实现对水文资源的精准评估。在地表水资源评估方面，通过空间叠加分析将径流深空间分布图层与流域边界图层叠加，可计算不同子流域的地表水资源量，明确地表水资源的空间分布差异；在地下水资源评估方面，结合水文地质图层、土壤图层与降水分布图层，通过空间分析探究地下水的补给、径流与排泄规律，评估不同区域的地下水资源潜力；在水资源开

发利用评估方面，将水利工程分布图层与水资源空间分布图层叠加，分析水利工程的覆盖范围与对水资源的调控能力，为水资源的合理开发利用提供科学依据。

（三）GIS 空间分析在水文勘测中的应用价值

GIS 空间分析技术在水文勘测中的应用，不仅提升了水文勘测工作的效率与精度，更推动了水文勘测从“经验型”向“科学型”的转变，其核心应用价值主要体现在三个方面。一是实现了水文要素空间规律的精准挖掘。水文要素的演变过程受多种空间因素的综合影响，传统分析方法难以精准刻画这些复杂的空间关联，GIS 通过多种空间分析功能的组合应用，能够深入挖掘水文要素与下垫面要素之间的空间规律，为水文现象的成因分析提供科学支撑。二是提升了水文勘测的智能化水平。GIS 的空间分析功能能够实现对流域特征、水文分布等核心信息的自动提取与分析，大幅减少了人工干预，提升了勘测工作的效率与精度，同时也降低了人为误差对勘测结论的影响。三是为水文资源管理提供了可视化决策支撑。GIS 通过将空间分析结果以地图可视化的方式呈现，能够直观地展示水资源的空间分布、演变规律以及开发利用状况，为水资源的合理规划、调控与管理提供了清晰、直观的决策依据，提升了水文资源管理的科学性与针对性。

第三节 无人机 (UAV) 低空遥感和近景摄影测量技术

一、无人机低空遥感与近景摄影测量技术在水文要素综合勘测中的核心应用

结合水文要素综合勘测的核心需求，无人机低空遥感与近景摄影测量技术可广泛应用于地形地貌勘测、地表水体监测、水土流失调查、水利工程勘测等关键领域，通过精准获取各类水文要素信息，为水文分析与水资源管理提供数据支撑。

（一）流域地形地貌勘测

流域地形地貌是影响水文循环、径流形成、泥沙输移的核心要素，精准获取流域地形数据（如高程、坡度、坡向、沟谷分布等）是开展水文模型构建、水资源评估的基础。传统流域地形勘测多依赖全站仪、GPS 等设备进行点式测量，存在测量范围有限、数据密度不足、作业效率低等问题，尤其在复杂山区流域难以实现全面覆盖。

无人机低空遥感与近景摄影测量技术可通过航线规划实现对流域的全面覆盖飞行,获取高分辨率影像数据,结合摄影测量数据处理技术生成 DSM、DEM(数字高程模型)、DOM 等成果,进而提取流域地形地貌参数。相较于传统测量技术,该技术可实现更大范围的地形数据获取,且数据密度更高、空间连续性更强,能够精准捕捉流域内的沟谷、山脊、阶地等微地形特征。例如,在小流域综合治理勘测中,通过无人机获取的 DEM 数据可精准计算流域面积、沟谷密度、坡度分级等关键参数,为小流域水土流失治理规划、径流调控工程设计提供精准的地形数据支撑。同时,该技术可实现对地形的动态监测,通过不同时期的地形数据对比,分析流域地形变化(如沟谷侵蚀、岸坡坍塌等),为流域地貌演化研究与生态保护提供动态数据。

(二) 地表水体监测

地表水体(如河流、湖泊、水库、沼泽等)的分布范围、形态特征、动态变化是水文要素监测的核心内容,直接关系到水资源量评估、水生态保护、水灾害防控等工作。传统地表水体监测多依赖人工巡查、卫星遥感影像解译等方式,人工巡查效率低、范围有限,卫星遥感影像存在空间分辨率不足、时效性差等问题,难以满足精细化、实时化的监测需求。

无人机低空遥感与近景摄影测量技术可通过高分辨率光学影像精准识别地表水体边界,结合 DSM 数据计算水体面积、水面高程等参数,实现对地表水体分布范围的精准监测。对于河流、湖泊等线性或面状水体,可通过航线规划实现全流域或全湖域的覆盖监测,精准捕捉水体形态变化(如河道改道、湖泊萎缩或扩张、岸线变迁等)。同时,搭载多光谱或红外传感器的无人机可实现对水体理化属性的监测,通过光谱反演获取水体的叶绿素 a 浓度、悬浮物含量、透明度等参数,评估水体富营养化程度与污染状况,为水生态保护与水污染治理提供精准数据。在水库、湖泊水位监测中,可通过近景摄影测量技术对水位站周边区域进行精细测量,结合影像纹理特征与高程数据实现水位的精准反演,补充传统水位监测站点的不足,提升水位监测的空间覆盖范围。此外,在洪水监测中,无人机可快速响应,对洪水淹没区域进行低空飞行监测,实时获取淹没范围、淹没深度等信息,为洪水灾情评估、应急救援部署提供实时、精准的数据支撑。

(三) 水土流失调查

水土流失是水文生态环境恶化的重要表现,精准调查水土流失区域的分布范

围、侵蚀强度、侵蚀类型是开展水土流失治理的前提。传统水土流失调查多依赖人工实地调查与卫星影像解译，人工调查劳动强度大、效率低，卫星影像解译精度有限，难以精准捕捉小尺度的水土流失斑块。

无人机低空遥感与近景摄影测量技术可通过高分辨率影像精准识别水土流失区域的地表特征（如裸露坡面、侵蚀沟、弃土弃渣等），结合 DEM 数据提取坡度、坡向、地表破碎度等地形参数，进而判断水土流失类型与侵蚀强度。对于小尺度的水土流失斑块（如坡耕地侵蚀、小型侵蚀沟），近景摄影测量技术可实现近距离精细观测，精准获取侵蚀沟的深度、宽度、长度等参数，为水土流失量化评估提供数据支撑。同时，该技术可实现对水土流失治理区域的动态监测，通过不同时期的影像数据对比，分析治理措施（如梯田修建、植被恢复、挡土墙建设等）的实施效果，为优化水土流失治理方案提供依据。在山区水土流失调查中，无人机可规避地形限制，对偏远山区的水土流失区域进行全面覆盖监测，弥补传统调查技术的不足，提升水土流失调查的全面性与精准性。

（四）水利工程勘测

水利工程（如水库、大坝、水电站、河道整治工程等）的勘测设计、建设施工与运行维护，均需要精准的水文与地形数据支撑。传统水利工程勘测多依赖人工实地测量，在工程前期勘测阶段存在作业效率低、数据获取不全面等问题，在运行维护阶段难以对工程周边的地形变化、隐患区域进行实时监测。

在水利工程前期勘测阶段，无人机低空遥感与近景摄影测量技术可快速获取工程区域的地形地貌、水体分布、植被覆盖等数据，生成高精度的 DEM、DOM 与三维模型，为工程选址、线路规划、设计参数确定提供精准数据。例如，在河道整治工程勘测中，通过无人机获取的河道断面数据与岸线地形数据，可精准计算河道过流能力，为河道拓宽、疏浚等工程设计提供依据；在水库选址勘测中，可通过三维模型分析库区地形特征，评估水库库容、淹没范围等关键参数。在工程建设施工阶段，该技术可用于施工区域的地形监测与进度管控，通过定期获取施工区域的影像数据，对比分析施工前后的地形变化，评估工程施工质量与进度。在工程运行维护阶段，可对水利工程主体结构（如大坝、溢洪道）与周边区域进行动态监测，通过近景摄影测量技术精准捕捉大坝的变形、裂缝等隐患，通过地形数据对比分析工程周边的滑坡、坍塌等风险，为水利工程安全运行提供预警数据，降低工程运行风险。

二、无人机低空遥感与近景摄影测量技术在水文勘测中的应用要点与优化路径

（一）核心应用要点

为充分发挥无人机低空遥感与近景摄影测量技术在水文要素综合勘测中的应用效能，需把握以下核心应用要点，确保技术应用的规范性与精准性。

一是合理选择设备与载荷。根据水文勘测的具体需求（如勘测范围、精度要求、监测要素类型），合理选择无人机平台与传感器载荷。对于大范围流域勘测，应选择续航能力强、作业半径大的多旋翼或固定翼无人机；对于精细尺度测量（如河道断面、大坝裂缝监测），应选择机动性强、定位精度高的小型多旋翼无人机。传感器载荷的选择需结合监测要素类型，如监测水体分布与形态可选择高分辨率光学相机，监测水体污染状况可选择多光谱传感器，监测夜间水体或热源分布可选择红外传感器。同时，需确保设备的性能稳定性与精度达标，定期对无人机平台、传感器、定位设备进行校准与维护。

二是科学规划飞行航线与参数。飞行航线与参数的规划直接影响数据获取的质量与效率。在航线规划方面，需根据勘测区域的地形特征、范围大小与精度要求，选择合适的航线类型（如平行航线、环绕航线、断面航线），确保航线覆盖完整、无遗漏区域，同时规避障碍物（如山体、建筑物、高压线路）。对于大范围平面区域勘测，可采用平行航线；对于线性目标（如河流、公路），可采用断面航线；对于立体目标（如大坝、山体），可采用环绕航线。在飞行参数设置方面，需合理控制飞行高度、航向重叠度与旁向重叠度，飞行高度越低，数据分辨率越高，但作业范围越小；航向重叠度与旁向重叠度越高，数据匹配精度越高，但数据量越大、处理效率越低，需根据精度要求与作业效率需求进行平衡，通常航向重叠度设置为 60%-80%，旁向重叠度设置为 50%-70%。

三是严格把控数据处理质量。数据处理是实现从原始影像数据到精准勘测成果的关键环节，需严格把控数据处理的每个流程，确保成果精度。首先，对原始影像数据进行预处理，包括影像畸变校正、曝光补偿、噪声去除等，提升影像质量；其次，结合 GNSS（全球导航卫星系统）定位数据与地面控制点数据，进行影像空三加密处理，构建三维点云模型，地面控制点的布设需均匀分布于勘测区域，数量充足且精度达标，提升空三加密的精度；最后，根据勘测需求生成 DEM、

DOM、三维模型等成果，并对成果进行精度验证，通过实地测量数据与成果数据的对比分析，确保成果精度满足勘测要求。

四是重视作业安全与合规性。无人机作业需严格遵守国家空域管理规定，作业前向相关部门申请空域审批，避免违规飞行；同时，做好作业前的气象条件评估，规避大风、暴雨、雷电等恶劣天气，确保飞行安全。在危险区域（如滑坡体、洪水淹没区）作业时，需设置安全作业半径，避免无人机与人员进入危险区域；作业过程中实时监控无人机飞行状态，确保设备正常运行。此外，需做好数据安全，对勘测获取的水文数据进行加密存储与备份，避免数据丢失或泄露。

（二）技术应用优化路径

为进一步提升无人机低空遥感与近景摄影测量技术在水文要素综合勘测中的应用水平，需结合技术发展趋势与水文勘测需求，从技术融合、设备升级、人才培养、标准规范建设等方面构建优化路径。

一是加强多技术融合应用。推动无人机低空遥感、近景摄影测量技术与其他现代空间信息技术（如卫星遥感、GIS 地理信息系统、物联网）的深度融合，构建“空-天-地”一体化水文勘测体系。例如，结合卫星遥感的大范围宏观监测优势与无人机的精细化监测优势，实现从流域尺度到局部区域的全方位监测；将无人机勘测数据与 GIS 技术结合，构建水文要素空间数据库，实现数据的可视化管理与分析，提升水文勘测数据的应用价值。同时，探索无人机技术与水文模型的结合，将无人机获取的地形、水体等数据作为水文模型的输入参数，提升水文模型的模拟精度与预测能力。

二是推动设备与技术升级。紧跟无人机技术与传感器技术的发展趋势，推广应用续航能力更强、定位精度更高、载荷兼容性更好的无人机平台，提升作业效率与数据获取能力；研发适用于水文勘测的专用传感器（如高光谱水体监测传感器、穿透式水体深度测量传感器），拓展技术的应用范围。同时，优化数据处理算法，开发自动化、智能化的数据处理软件，提升数据处理效率与精度，降低对操作人员专业技能的依赖。例如，基于人工智能算法实现影像数据中水文要素的自动识别与提取，减少人工干预，提升数据处理的自动化水平。

三是强化专业人才培养。无人机低空遥感与近景摄影测量技术在水文勘测中的应用，需要具备水文专业知识、无人机操作技能、数据处理能力的复合型人才。应加强高校与科研机构的专业建设，开设水文与空间信息技术交叉学科课程，培

养兼具理论知识与实践能力的专业人才；同时，加强对现有水文勘测从业人员的技术培训，提升其无人机操作、数据处理、成果分析等技能水平，构建一支高素质的专业技术队伍，为技术的广泛应用提供人才支撑。

四是完善标准规范体系。目前，无人机低空遥感与近景摄影测量技术在水文勘测领域的应用尚未形成统一的标准规范，存在作业流程不规范、成果精度评价标准不统一等问题。应结合水文勘测的具体需求，制定完善技术应用标准规范，包括设备选型标准、飞行参数设置规范、数据处理流程规范、成果精度评价标准、数据安全规范等，明确技术应用的各个环节要求，实现技术应用的规范化与标准化。同时，加强行业内的技术交流与合作，推广先进的技术应用经验，提升行业整体应用水平。

无人机低空遥感与近景摄影测量技术凭借其机动灵活、高效精准、安全可控等突出优势，在水文要素综合勘测领域展现出广阔的应用前景，为流域地形地貌勘测、地表水体监测、水土流失调查、水利工程勘测等工作提供了全新的技术手段，有效提升了水文勘测工作的效率与精度。在技术应用过程中，需准确把握设备选型、航线规划、数据处理、安全合规等核心要点，确保技术应用的规范性与有效性。未来，随着技术的不断升级与多技术融合的深入推进，结合专业人才培养与标准规范建设的持续完善，无人机低空遥感与近景摄影测量技术将在水文要素综合勘测领域实现更广泛、更深入的应用，为水资源科学管理、水生态环境保护、水灾害精准防控提供更加强有力的技术支撑，推动水文勘测工作向智能化、精细化、现代化方向发展。

第四节 物联网 (IoT) 与智能传感器技术

一、物联网与智能传感器在水文勘测中的技术架构

(一) 总体架构设计

基于物联网与智能传感器技术的水文要素综合勘测系统，其总体架构以“感知层为基础、网络层为支撑、应用层为核心”，同时增设保障层确保系统稳定运行，形成“四层一体”的完整架构体系。该架构的核心设计理念是实现水文勘测数据的“全流程智能化管控”，从前端数据采集到后端应用服务，各层次之间通过标

准化接口与协议实现无缝衔接，保障数据传输与处理的高效性、安全性与可靠性。

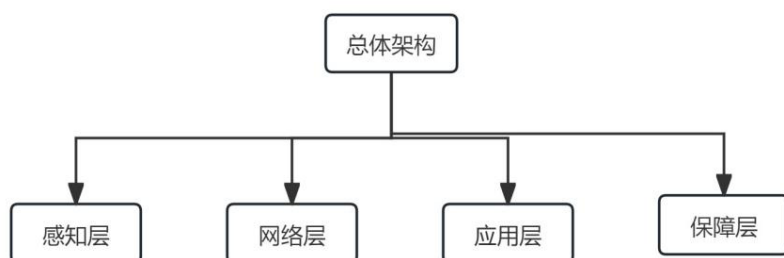


图 4-1 总体架构设计

总体架构的各层次既相互独立又协同配合：感知层负责完成水文要素的前端感知与数据采集，是系统的数据源头；网络层负责搭建多元化的传输通道，保障数据从感知层到应用层的实时、稳定传输；应用层负责对数据进行深度处理与价值挖掘，为各类水文勘测应用场景提供服务；保障层则通过技术手段与管理机制，为整个系统的硬件设备、网络传输、数据安全与运行维护提供全方位保障，确保系统长期稳定运行。

（二）感知层设计

感知层是水文勘测系统的基础环节，其设计核心是根据不同水文要素的勘测需求，合理部署各类智能传感器与数据采集终端，实现对关键水文参数的全面、精准感知。感知层的设备选型与部署方案需充分考虑水文勘测场景的复杂性，如江河湖库的恶劣环境、地下水系的封闭性、气象要素的多变性等，确保设备具备良好的环境适应性与稳定性。

在设备配置方面，感知层主要包括水文参数智能传感器、气象参数智能传感器、定位设备与数据采集终端四大类。水文参数智能传感器涵盖水位智能传感器、流量智能传感器、流速智能传感器、含沙量智能传感器、水质智能传感器（检测 pH 值、溶解氧、浊度、重金属等参数）、水温传感器等，用于捕获各类核心水文要素参数；气象参数智能传感器包括降水量传感器、蒸发量传感器、风速风向传感器、气温传感器、湿度传感器等，用于采集流域周边气象数据，为水文要素变化分析提供辅助支撑；定位设备主要采用 GPS/北斗双模定位模块，用于获取勘测点的精准地理位置信息，为流域水文要素空间分布分析提供依据；数据采集终端则负责汇总各类传感器采集的原始数据，完成数据预处理与格式转换，并通

过通信模块接入网络层。

在部署方式上，感知层采用“定点部署 + 移动部署”相结合的模式。定点部署主要针对江河湖库岸线、水文站、地下水监测井等固定勘测区域，通过安装固定型智能传感器实现长期连续监测；移动部署则针对河道中游、湖泊中心等动态勘测区域，通过搭载智能传感器的无人船、浮标等移动设备实现灵活勘测，弥补定点部署的覆盖盲区。同时，感知层设备采用模块化设计，便于后期根据勘测需求进行设备升级与扩展。

（三）网络层设计

网络层的核心功能是构建多元化、高可靠的传输通道，实现感知层数据向应用层的高效传输，其设计需兼顾数据传输的实时性、稳定性、安全性与经济性，同时适应水文勘测场景中复杂的地理环境，如山区、偏远流域等网络覆盖薄弱区域。基于水文勘测场景的多样性，网络层采用“无线通信为主、有线通信为辅、卫星通信为补充”的混合通信架构，确保不同场景下的数据传输需求均能得到满足。

无线通信方式主要包括蜂窝移动通信（4G/5G）、低功耗广域网（LoRa、NB-IoT）与无线局域网（WiFi）。蜂窝移动通信（4G/5G）具备传输速率高、覆盖范围广的优势，适用于水文站、流域管理中心等网络覆盖较好区域的实时数据传输，能够满足高清监测视频、海量传感器数据的快速传输需求；低功耗广域网（LoRa、NB-IoT）则具备功耗低、传输距离远、抗干扰能力强的特点，适用于偏远流域、山区等网络覆盖薄弱区域的传感器数据传输，其低功耗特性可大幅延长传感器的续航时间，减少电池更换频率；无线局域网（WiFi）则适用于水文监测站内的设备互联与数据传输，实现监测站内传感器、终端设备与本地服务器的高速互联。

有线通信方式主要采用光纤通信，适用于水文站、流域管理中心等固定站点之间的骨干数据传输，光纤通信具备传输速率高、稳定性强、抗干扰能力强的优势，能够保障海量水文数据的长期稳定传输；卫星通信则作为应急补充通信方式，适用于极端天气、地质灾害等导致地面通信网络中断情况下的应急数据传输，确保关键水文数据不丢失，保障勘测工作的连续性。此外，网络层还集成了数据加密、身份认证等安全技术，通过对传输数据进行加密处理、对接入设备进行身份认证，防止数据被窃取、篡改，保障数据传输安全。

（四）应用层设计

应用层是物联网与智能传感器技术在水文勘测中发挥实际价值的核心环节，其设计核心是通过对网络层传输的海量水文数据进行整合、分析、挖掘与可视化展示，为各类水文勘测应用场景提供精准、高效的服务。应用层采用“平台化+模块化”的设计思路，构建统一的水文勘测数据管理平台，同时根据不同应用需求设置多个功能模块，实现“一次采集、多方应用”的数据共享模式。

应用层的核心功能模块主要包括数据管理模块、数据分析模块、可视化展示模块、预警管控模块与数据共享模块。数据管理模块负责对采集到的各类水文数据进行存储、分类、备份与管理，采用分布式数据库技术实现海量数据的高效存储，同时建立数据质量评估机制，对数据进行筛选、去重与校验，保障数据质量；数据分析模块通过采用数据挖掘、统计分析等技术，对水文数据进行深度分析，挖掘水位、流量、水质等水文要素的变化规律，预测水文要素的未来变化趋势，为水文决策提供数据支撑；可视化展示模块采用地图可视化、图表可视化等方式，将水文数据以直观的形式展示给用户，包括流域水文要素空间分布地图、水文参数变化趋势图表、站点运行状态示意图等，方便用户快速掌握水文勘测情况；预警管控模块根据预设的水文参数阈值，对异常水文数据进行实时监测，当检测到参数超标时，自动发出预警信号，并可联动前端智能传感器与管控设备，实现勘测过程的智能化管控；数据共享模块则通过标准化接口，实现与其他水利管理平台、科研机构、政府部门的数据共享与交互，提升水文勘测数据的利用效率。

（五）保障层设计

保障层是确保整个水文勘测系统长期稳定运行的关键支撑，其设计涵盖硬件保障、网络保障、数据安全保障与运维保障四个方面。硬件保障主要通过选用高可靠性、高环境适应性的智能传感器、传输设备与服务器，同时采用冗余设计、防雷防水设计等技术，提升硬件设备在恶劣水文环境下的稳定性与使用寿命；网络保障通过建立网络状态实时监测机制，对传输网络的带宽、延迟、连接状态等进行实时监测，当出现网络故障时，自动切换至备用通信通道，保障数据传输的连续性；数据安全保障通过采用数据加密、身份认证、访问控制、安全审计等技术，构建全方位的数据安全防护体系，防止数据被窃取、篡改或泄露，同时建立数据备份与恢复机制，确保数据在极端情况下不丢失；运维保障则通过构建智能化运维管理平台，对前端传感器、传输设备、服务器等全系统设备的运行状态进

行实时监测，实现设备故障的提前预警与精准定位，同时建立运维管理机制，规范运维流程，提升运维效率，降低运维成本。

二、物联网与智能传感器在主要水文要素勘测中的应用

（一）在地表水要素勘测中的应用

地表水是水文要素勘测的核心对象之一，涵盖江河、湖泊、水库等多种水体，其勘测核心参数包括水位、流量、流速、含沙量、水质等。物联网与智能传感器技术的应用，彻底改变了传统地表水勘测依赖人工测量、效率低下、精度有限的局面，实现了地表水要素的自动化、精细化勘测。

在水位勘测方面，采用智能水位传感器（如超声波水位传感器、雷达水位传感器、压力式水位传感器等）结合物联网技术实现自动化监测。智能水位传感器部署于江河湖库的岸边或水中，能够实时捕获水位变化数据，通过内置的微处理器完成数据预处理后，经物联网传输网络实时上传至应用层平台。与传统人工测尺相比，智能水位传感器具备 24 小时连续监测能力，能够有效避免人工测量中的主观误差，同时适应暴雨、洪水等恶劣天气条件下的勘测需求，大幅提升水位勘测的精度与时效性。此外，通过在流域内多个点位部署智能水位传感器，可实现对地表水水位的全域监测，为洪水预警提供精准的水位数据支撑。

在流量与流速勘测方面，采用智能流速传感器、多普勒流量传感器等设备结合物联网技术实现自动化监测。智能流速传感器可部署于水流中或通过无人船搭载进行移动监测，实时捕获水流流速数据，结合断面尺寸等参数可计算出流量数据；多普勒流量传感器则通过发射超声波信号测量水流速度，具备非接触式测量优势，适用于水深较大、水流湍急的江河区域。两类传感器采集的数据均通过物联网实时上传至平台，平台可根据多点位流速与流量数据，分析地表水的流动规律，为水资源调度、水利工程管理提供数据支撑。

在含沙量与水质勘测方面，采用智能含沙量传感器、多参数水质传感器等设备实现自动化监测。智能含沙量传感器通过光学、声学等原理实时检测水中含沙量数据，能够有效避免传统采样化验方法的滞后性；多参数水质传感器则可同时检测 pH 值、溶解氧、浊度、COD、氨氮、重金属等多项水质参数，实现对地表水水质的全面监测。两类传感器采集的数据经物联网传输至平台后，平台可对水质状况进行实时评估，当检测到水质参数超标时，自动发出预警信号，为水资源

保护、水污染治理提供及时的数据支撑。

（二）在地下水要素勘测中的应用

地下水作为水资源的重要组成部分，其勘测工作面临着勘测环境封闭、人工操作难度大、监测点分散等挑战。物联网与智能传感器技术的应用，为地下水要素的精准、高效勘测提供了有效解决方案，其核心勘测参数包括地下水位、地下水埋深、地下水水质等。

在地下水位与埋深勘测方面，采用智能地下水位传感器（如压力式地下水位传感器、光纤式地下水位传感器等）结合物联网技术实现自动化监测。智能地下水位传感器部署于地下水监测井内，能够实时捕获地下水位变化数据，通过数据预处理后经物联网传输至平台。由于地下水监测井多位于偏远区域，网络覆盖薄弱，因此通常采用低功耗广域网（LoRa、NB-IoT）或卫星通信作为传输方式，确保数据的稳定传输。通过在流域内部署多个地下水监测点，可实现对地下水位空间分布与时间变化规律的全面掌握，为地下水资源评价、地下水超采治理提供数据支撑。

在地下水水质勘测方面，采用专用的地下水水质智能传感器部署于监测井内，实时检测地下水的 pH 值、溶解氧、总硬度、重金属等关键水质参数。考虑到地下水环境的封闭性与特殊性，智能传感器采用高耐腐蚀、低功耗设计，能够适应地下水的长期监测需求。传感器采集的水质数据经物联网传输至平台后，平台可对地下水水质状况进行实时评估，及时发现地下水污染问题，为地下水资源保护提供数据支撑。此外，通过将地下水勘测数据与地表水勘测数据进行整合分析，可实现对流域水资源的统筹评估，为水资源合理开发利用提供全面依据。

（三）在气象辅助要素勘测中的应用

气象要素（如降水量、蒸发量、风速风向、气温、湿度等）是影响水文要素变化的重要因素，其勘测数据为水文要素变化规律分析、水文预测预警提供重要辅助支撑。物联网与智能传感器技术在气象辅助要素勘测中的应用，实现了气象数据的自动化、精细化采集与传输。

在降水量勘测方面，采用智能雨量传感器（如翻斗式雨量传感器、光学雨量传感器等）结合物联网技术实现自动化监测。智能雨量传感器部署于流域周边的气象站点或开阔区域，能够实时捕获降水量数据，通过数据预处理后经物联网传输至平台。与传统人工雨量计相比，智能雨量传感器具备更高的测量精度与时效

性，能够实现降水量的实时监测与数据上传，为暴雨预警、洪水预报提供关键数据支撑。

在蒸发量勘测方面，采用智能蒸发传感器（如蒸发皿式智能传感器、超声波蒸发传感器等）实现自动化监测。智能蒸发传感器通过监测蒸发皿内水量的变化，实时计算蒸发量数据，结合气温、湿度等参数可进一步分析蒸发规律。传感器采集的数据经物联网传输至平台后，为水资源平衡分析、流域生态环境评估提供数据支撑。

在风速风向、气温湿度等要素勘测方面，采用智能风速风向传感器、智能温湿度传感器等设备实现自动化监测。这些传感器部署于气象站点或流域关键区域，实时捕获相关气象数据，经物联网传输至平台后，与水文数据进行整合分析，可提升水文预测预警的准确性。例如，通过将风速风向数据与水位、流量数据结合，可更精准地预测洪水的传播速度与影响范围；通过将气温湿度数据与蒸发量、水质数据结合，可分析气象条件对水资源循环与水质变化的影响。

第五章 多源水文数据整合与质量控制

第一节 多源水文数据获取与标准化

一、多源水文数据获取技术与流程

多源水文数据的获取是一个系统工程，需结合不同数据类型的特征，选择针对性的获取技术，遵循科学的获取流程，确保数据的全面性、时效性与可靠性。数据获取工作应坚持“需求导向、技术适配、质量优先”的原则，根据水文勘测的具体目标，明确所需数据的类型、时空尺度与精度要求，进而制定合理的获取方案，实现各类数据的高效获取与初步整合。

（一）核心获取技术体系

结合多源水文数据的分类特征，其获取技术体系主要涵盖传统实测技术、遥感监测技术与模型模拟技术三大板块，各类技术 in 应用场景、技术优势与操作要求上存在差异，需根据数据获取需求进行合理选型与组合应用。

传统实测技术是核心水文要素数据获取的基础技术，其发展历程悠久，技术体系成熟，核心优势在于数据精度高、可靠性强。在降水监测方面，主要采用雨量计监测技术，包括虹吸式雨量计、翻斗式雨量计、称重式雨量计等，其中翻斗式雨量计因操作简便、数据易传输等优势，被广泛应用于常规降水监测；称重式雨量计则能够精准监测固态降水、混合降水等特殊降水类型，适用于高寒、高海拔等特殊区域。在水位与流量监测方面，水位监测主要采用浮子式水位计、压力式水位计、超声波水位计等技术，其中浮子式水位计精度高、稳定性强，适用于长期定点监测；超声波水位计则具有非接触式监测的优势，适用于水质较差、泥沙含量高的水域。流量监测技术可分为直接测量技术与间接测量技术，直接测量技术主要采用流速仪法，通过测量水流速度与过水断面面积计算流量，是流量监测的标准方法；间接测量技术包括声学多普勒流速剖面仪（ADCP）技术、电磁流量计技术等，其中 ADCP 技术能够实现流量的快速、非接触式测量，适用于大断面、大流速的河流流量监测，大幅提升了流量监测的效率。在蒸发监测方面，

主要采用蒸发皿、蒸发器等设备进行实测，根据监测精度要求的不同，可选择小型蒸发皿、大型蒸发池等不同类型的设备，同时需结合气象数据对实测蒸发量进行校正，以获取真实的水面蒸发量。

遥感监测技术是实现大范围、宏观水文数据获取的关键技术，其核心优势在于空间覆盖范围广、监测效率高、能够实现动态监测。在降水遥感监测方面，主要采用卫星遥感技术，通过搭载在卫星上的微波传感器、红外传感器等设备，获取云层降水信息，进而反演大范围的降水分布数据。其中，微波遥感技术能够穿透云层，实现对降水的全天候监测，适用于暴雨、强对流等极端降水事件的监测；红外遥感技术则具有监测范围广、数据获取速度快等优势，适用于大范围降水趋势的快速监测。在土壤含水量监测方面，主要采用被动微波遥感、主动微波遥感等技术，通过监测土壤对微波信号的散射与辐射特征，反演土壤含水量数据。被动微波遥感技术适用于大范围、低精度的土壤含水量监测，主动微波遥感技术则具有更高的监测精度，适用于小范围、高精度的专项监测。在水域面积与径流监测方面，主要采用光学遥感技术，通过高分辨率卫星影像获取地表水体的分布信息，计算水域面积；同时，结合地形数据与遥感影像，可实现对地表径流的宏观监测与动态追踪。在冰川积雪监测方面，遥感技术能够实现对冰川积雪面积、厚度、消融量等要素的长期监测，为寒区水文循环分析提供重要数据支撑。

模型模拟技术是弥补实测数据时空缺失、实现水文数据预测的重要技术，其核心是通过构建水文模型，模拟水文循环过程，生成所需的水文数据。水文模型的构建需基于流域的下垫面条件、气象数据、实测水文数据等基础资料，明确模型的结构与参数。在数据获取过程中，模型模拟技术主要用于两个方面：一是对实测数据时空空白区的补充，通过模型模拟生成连续的时空序列数据，完善数据集；二是对未来水文状况的预测，结合气象预报数据与边界条件，模拟未来不同情景下的水文数据，为水资源规划、水文灾害预警等工作提供数据支持。模型模拟技术的应用效果取决于模型的合理性、参数的准确性以及基础数据的可靠性，因此在应用过程中需进行充分的模型验证与参数率定。

（二）数据获取关键流程

多源水文数据的获取并非简单的技术叠加，而是一个包含需求分析、方案设计、数据采集、初步筛选等环节的系统流程，每个环节紧密关联，共同确保数据的质量与适用性。

第一步，需求分析。明确水文勘测的具体目标与任务，梳理所需数据的类型、时空尺度、精度要求、数据量要求等核心指标。同时，分析现有数据资源状况，明确数据缺口，为后续技术选型与方案设计提供依据。需求分析是数据获取工作的前提，直接决定了获取方案的针对性与合理性。例如，若勘测目标为流域水资源现状评价，则需获取流域内长序列的降水、径流、蒸发、地下水位等核心水文要素数据，以及地形、土壤、植被等辅助水文要素数据；若勘测目标为短期水文灾害预警，则需获取实时、高精度的降水、水位、流量等数据。

第二步，方案设计。根据需求分析结果，结合不同数据类型的特征与获取技术的适用条件，制定详细的数据获取方案。方案内容应包括数据类型清单、各类型数据的获取技术选型、监测站点布设方案（针对传统实测数据）、遥感数据源选择（针对遥感监测数据）、模型选择与参数设定（针对模型模拟数据）、数据获取周期与时间节点、质量控制初步措施、人员与设备配置、成本预算等核心内容。方案设计需充分考虑技术的可行性、经济性与适用性，确保数据获取工作能够高效、有序开展。例如，在偏远山区开展水文数据获取工作时，需优先选择操作简便、维护成本低的监测设备，同时结合遥感技术弥补实测站点不足的问题。

第三步，数据采集实施。按照设计的获取方案，开展各类数据的采集工作。对于传统实测数据，需进行监测站点的布设、设备的安装与调试，确保设备正常运行，按照设定的监测周期进行数据采集与记录；对于遥感监测数据，需根据数据源选择相应的卫星或航空遥感平台，获取遥感影像数据，并进行初步的预处理（如辐射校正、几何校正等）；对于模型模拟数据，需收集整理基础资料，构建水文模型，进行参数率定与模型验证，进而生成所需的模拟数据。在数据采集过程中，需建立完善的现场记录制度，详细记录数据采集的时间、地点、设备运行状况、环境条件等信息，为后续数据质量控制提供依据。

第四步，数据初步筛选与整理。对采集获取的原始数据进行初步筛选，剔除明显错误、异常的数据（如超出合理范围的数据、重复数据、设备故障导致的无效数据等）。同时，对筛选后的数据进行初步整理，规范数据格式，补充数据属性信息（如数据来源、获取时间、监测站点编号、数据精度等），形成初步的数据集。数据初步筛选与整理工作能够有效减少后续数据标准化与整合的工作量，提升数据处理效率。

二、多源水文数据标准化体系构建

多源水文数据来自不同的获取渠道、不同的监测站点或不同的管理部门，在数据格式、编码规则、计量单位、精度标准、时空基准等方面存在显著差异，这种差异性导致各类数据难以直接进行整合与对比分析，严重制约了多源水文数据的深度应用。因此，构建完善的多源水文数据标准化体系，实现各类数据的统一规范，是解决数据差异问题、提升数据整合效率与质量的核心举措。多源水文数据标准化体系的构建应遵循“统一基准、规范格式、明确标准、分类施策”的原则，涵盖数据格式标准化、时空基准标准化、数据内容标准化、数据精度标准化等核心内容。

（一）数据格式标准化

数据格式是数据的存储与表达形式，多源水文数据的格式差异主要体现为文件格式、数据结构、编码方式等方面的不同。例如，传统实测数据可能以 Excel 表格、文本文件（TXT）、数据库表等形式存储；遥感监测数据可能以遥感影像格式（如 TIFF、ENVI）、二进制文件等形式存储；水文模型模拟数据可能以模型专属格式、文本文件等形式存储。数据格式的不统一导致数据读取、解析与整合难度较大，因此数据格式标准化是多源水文数据标准化的基础。

数据格式标准化的核心目标是制定统一的数据存储与表达规范，实现各类数据格式的统一转换与兼容。具体措施包括以下几个方面：一是制定统一的基础数据格式标准，明确多源水文数据的首选存储格式。结合水文数据的特征与行业应用习惯，可选择通用、易解析、兼容性强的格式作为标准格式，如文本文件（TXT）、逗号分隔值文件（CSV）、可扩展标记语言（XML）以及主流的关系型数据库格式等。对于结构化数据（如实测降水、流量数据），可采用 CSV 格式或数据库表格式存储；对于非结构化数据（如遥感影像数据），可采用标准化的影像格式（如 TIFF）存储，并配套生成标准化的元数据文件。二是规范数据结构与字段定义，明确各类数据的核心字段、字段类型、字段长度、字段含义等内容。例如，对于降水数据，应统一定义监测站点编号、监测时间、降水量、数据精度、数据状态等核心字段，确保不同来源的降水数据具有一致的结构。三是制定数据格式转换规范，明确不同格式数据向标准格式转换的方法、步骤与质量要求，开发针对性的格式转换工具，实现各类数据的高效、准确转换。同时，转换过程中

需确保数据信息的完整性，避免数据丢失或失真。

（二）时空基准标准化

时空基准是水文数据的核心属性，不同来源的水文数据往往采用不同的时间基准与空间基准，导致数据之间无法直接进行时空匹配与对比分析。例如，部分监测站点采用地方时间记录数据，部分站点采用北京时间；部分数据采用 1954 年北京坐标系，部分数据采用 1980 西安坐标系或 2000 国家大地坐标系；部分数据采用不同的高程基准（如 1956 年黄海高程系、1985 国家高程基准）。因此，时空基准标准化是实现多源水文数据时空匹配与整合的关键。

时间基准标准化的核心是统一数据的时间计量标准。应明确规定多源水文数据采用统一的时间基准（如北京时间），并规范时间表示格式。对于采用地方时间记录的原始数据，需制定时间转换规则，将其转换为标准时间。同时，规范时间分辨率的表示方式，明确不同时间尺度数据的时间戳格式（如实时监测数据采用“年-月-日时:分:秒”格式，日尺度数据采用“年-月-日”格式）。此外，对于不同监测周期的数据，需明确数据插值与整合的规则，确保时间序列的连续性与一致性。

空间基准标准化的核心是统一数据的空间坐标系与高程基准。应结合当前行业标准与应用需求，明确规定多源水文数据采用统一的空间坐标系（如 2000 国家大地坐标系）与高程基准（如 1985 国家高程基准）。对于采用非标准空间基准的原始数据，需制定坐标转换与高程转换规则，采用专业的转换工具将其转换为标准基准。在转换过程中，需确保转换精度符合要求，避免因基准转换导致的数据空间位置偏差。同时，规范空间数据的表达形式，对于点尺度数据，需明确监测站点的经纬度、高程等空间坐标信息；对于流域尺度、区域尺度的空间数据，需明确数据的空间范围、投影方式等信息，确保不同来源的空间数据能够准确叠加与匹配。

（三）数据内容标准化

数据内容标准化是指对多源水文数据的核心要素、计量单位、术语定义等内容进行统一规范，确保不同来源的数据在内容上具有一致性与可比性。数据内容的差异是多源水文数据整合的主要障碍之一，例如，不同监测站点对“降水量”的定义可能存在差异，部分站点记录的是瞬时降水量，部分站点记录的是时段降水量；不同部门采用的计量单位可能不同，部分采用毫米（mm）作为降水量计

量单位,部分采用厘米 (cm);部分数据采用的术语不规范,存在“同义不同名”或“同名不同义”的问题。

数据内容标准化的具体措施包括以下几个方面:一是制定统一的水文要素术语标准,明确各类水文要素、辅助水文要素的定义、内涵与外延,规范术语的表述方式,避免术语混淆。例如,明确“降水”“蒸发”“径流”等核心水文要素的定义,规范“地表径流”“地下径流”“产流量”等相关术语的表述。二是统一数据计量单位,根据水文要素的特征与行业标准,明确各类数据的标准计量单位。例如,降水量、蒸发量的标准计量单位为毫米 (mm),流量的标准计量单位为立方米每秒 (m^3/s),水位的标准计量单位为米 (m),土壤含水量的标准计量单位为百分比 (%)等。对于采用非标准计量单位的原始数据,需制定转换规则,将其转换为标准计量单位。三是规范数据统计口径,明确各类数据的统计方式、统计时段等内容。例如,明确时段降水量的统计时段 (如1小时、24小时),流量数据的统计方式 (如瞬时流量、日均流量、月均流量)等,确保不同来源的数据在统计口径上具有一致性。

(四) 数据精度标准化

数据精度是水文数据可靠性的核心体现,不同来源的多源水文数据因获取技术、设备精度、监测条件等因素的差异,其精度水平存在显著差异。若直接将不同精度的数据进行整合,会导致整合结果的精度失衡,影响后续水文分析的可靠性。因此,数据精度标准化是确保多源水文数据整合质量的重要保障。

数据精度标准化的核心是制定统一的数据精度分级标准与精度验证规范,明确各类水文数据的最低精度要求,对不同精度的数据进行分级与规范处理。具体措施包括以下几个方面:一是制定数据精度分级标准,根据水文要素的类型、获取技术、应用场景等因素,将数据精度划分为不同等级,并明确各级精度的具体指标。例如,将降水数据的精度划分为高精度、中精度、低精度三个等级,明确各级精度对应的测量误差范围;将遥感反演的土壤含水量数据精度划分为不同等级,明确各级精度对应的反演误差范围。二是明确各类数据的最低精度要求,根据水文勘测的目标与需求,制定不同应用场景下的数据精度阈值,确保获取的数据能够满足后续分析的需求。例如,用于水文灾害预警的实时降水数据,其精度要求应高于用于长期水文趋势分析的降水数据。三是制定数据精度验证规范,明确数据精度验证的方法、指标与流程。通过与高精度实测数据对比、交叉验证等

方式，对各类数据的精度进行验证，对于精度不满足要求的数据，需进行校正处理；若无法校正，则应明确标注数据精度等级，避免其在对精度要求较高的场景中应用。同时，规范数据精度标注方式，要求所有数据均需明确标注其精度等级、误差范围等信息，为后续数据整合与应用提供依据。

第二节 水文数据预处理与同化技术

一、水文数据预处理关键技术环节

水文数据预处理是一个多环节、多层次的技术过程，涵盖数据采集校验、数据清洗、数据标准化及数据整合准备四个关键技术环节。各环节紧密衔接，形成完整的预处理技术链条，确保原始水文数据的质量提升与标准化转化。其中，数据采集校验是预处理的前置环节，主要聚焦于原始数据的合法性与完整性初判；数据清洗是预处理的核心环节，重点解决数据中的异常、缺失等质量问题；数据标准化是实现多源数据协同的关键环节，致力于消除数据异质性；数据整合准备则为后续多源数据同化与整合提供直接支撑。

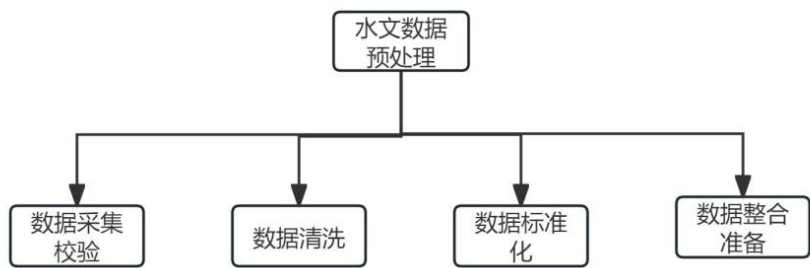


图 5-1 水文数据预处理

（一）数据采集校验

数据采集校验是水文数据预处理的首要环节，其核心任务是对原始水文数据的采集过程进行回溯校验，初步判断数据的合法性、完整性及采集过程的规范性。该环节主要包括采集设备校验、数据传输链路检查及原始数据格式校验三个方面。在采集设备校验方面，需核查观测设备的运行状态、校准记录及观测精度，确认设备是否处于正常工作状态，观测数据是否在设备的有效测量范围内，排除因设备故障、未及时校准等导致的系统性误差。数据传输链路检查则聚焦于数据从观

测站点传输至数据中心的过程,核查传输链路的稳定性、传输协议的规范性,排查因传输中断、信号干扰等导致的数据丢失或传输错误问题。原始数据格式校验则针对不同采集方式(自动观测、人工观测)、不同来源(水文站、气象站、遥感卫星)的数据格式进行核查,确认数据是否包含必要的核心信息(如观测时间、观测地点、观测值、数据采集人员/设备编号等),排除格式不规范、信息缺失的数据。通过数据采集校验,可初步筛选出合格的原始数据,剔除明显无效的数据,为后续处理环节减轻压力。

(二) 数据清洗

数据清洗是水文数据预处理的核心环节,旨在识别并修正原始数据中的异常值、缺失值,消除数据冗余,提升数据的可靠性与完整性。该环节主要包括异常值识别与处理、缺失值补充与处理、数据冗余剔除三个核心任务。

异常值是指偏离数据正常分布范围、不符合水文过程客观规律的数据,其产生原因主要包括设备故障、观测误差、传输错误及极端水文事件的误判等。异常值识别需结合水文数据的特性及水文规律,采用定性 with 定量相结合的方法。定性方法主要基于水文过程的常识判断,例如降水数据中出现的负值、径流数据中突然出现的远超历史极值的数值等,可直接判定为异常值;定量方法则通过统计分析手段,如 3σ 准则、箱线图法、趋势分析法等,结合数据的统计分布特征,识别超出合理范围的数据。异常值处理需遵循最小干预原则,根据异常值的产生原因及严重程度,采用不同的处理方法:对于因设备故障、传输错误导致的明显错误异常值,可直接剔除;对于因观测误差导致的轻微异常值,可结合周边观测站点数据、历史同期数据进行修正;对于可能是极端水文事件导致的异常值,需结合实际水文情势进行验证,不可盲目剔除或修正,避免丢失重要的水文信息。

缺失值是原始水文数据中常见的质量问题,其产生原因主要包括设备故障、观测中断、传输链路故障及数据记录遗漏等。缺失值处理的核心是在保障数据真实性的前提下,最大限度地补充缺失数据,提升数据完整性。缺失值处理方法需根据缺失率的高低、缺失数据的时空分布特征及水文数据的类型选择。对于缺失率较低(如单站点缺失率低于5%)、时空分布零散的缺失值,可采用相邻站点插值法、历史同期均值法、趋势延伸法等方法进行补充;对于缺失率较高、时空分布集中的缺失值,需结合数据采集过程的记录,判断缺失原因,若为设备长期故障导致的缺失,可考虑采用替代数据源(如周边站点数据、遥感反演数据)进

行补充,若无法补充,则需在后续分析中明确标注缺失范围,避免因强行补充导致数据失真;对于连续时间序列中的缺失值,需结合水文过程的连续性,采用时间序列插值方法,确保补充后的数据能够反映水文过程的连续变化规律。

数据冗余是指数据集中存在的重复数据、无关数据及冗余信息,其会增加数据存储与处理的成本,干扰后续分析结果。数据冗余剔除需首先明确数据的核心需求,筛选出与水文要素分析相关的核心数据,剔除无关数据;对于重复数据,需核查数据的采集时间、采集地点、观测值等核心信息,保留唯一有效的数据记录,剔除重复记录;对于数据中的冗余信息,如多余的格式符号、重复的备注信息等,需进行清理,简化数据结构,提升数据处理效率。

(三) 数据标准化

多源水文数据往往存在显著的异质性,主要体现在时空尺度差异、数据格式差异、计量单位差异及精度标准差异四个方面,这种异质性会导致不同来源的数据无法直接整合分析,因此数据标准化成为水文数据预处理的关键环节。数据标准化的核心任务是通过统一的技术规范,将不同来源的水文数据转化为统一标准的数据集,消除异质性,实现数据的协同兼容。该环节主要包括时空尺度标准化、数据格式标准化、计量单位标准化及精度标准标准化四个方面。

时空尺度标准化是针对不同来源数据的时间分辨率与空间分辨率差异进行统一。在时间尺度方面,不同观测设备、不同观测方式的水文数据时间分辨率存在差异,例如自动观测站的降水数据时间分辨率可达到分钟级,而人工观测数据时间分辨率多为日级,遥感反演的降水数据时间分辨率多为小时级或日级。时间尺度标准化需根据后续分析的需求,采用时间聚合或时间插值的方法,将不同时间分辨率的数据统一到目标时间尺度(如日级、小时级)。时间聚合是将高时间分辨率数据整合为低时间分辨率数据,如将分钟级降水数据聚合为日级降水数据;时间插值则是将低时间分辨率数据提升为高时间分辨率数据,需结合水文过程的连续性进行合理插值,确保数据的合理性。在空间尺度方面,不同来源的水文数据空间覆盖范围与空间分辨率差异显著,例如站点观测数据为点尺度数据,遥感反演数据为面尺度数据,且空间分辨率从米级到公里级不等。空间尺度标准化需根据分析区域的范围及精度需求,采用空间插值、空间聚合或空间匹配的方法,将不同空间尺度的数据统一到目标空间尺度。对于点尺度的站点数据,可通过空间插值转化为面尺度数据;对于面尺度的遥感数据,可通过空间聚合降低空间分

分辨率，或通过空间匹配与站点数据的空间位置相对应。

数据格式标准化是将不同格式的水文数据（如文本格式、表格格式、二进制格式、数据库格式等）转化为统一的标准格式，便于数据的存储、管理与后续处理。数据格式标准化需结合数据的类型及后续处理的需求，选择合适的标准格式，例如对于时间序列水文数据，可采用通用的表格格式（如 CSV 格式），明确列名与数据对应关系；对于空间水文数据，可采用标准的地理信息数据格式（如 Shapefile 格式、GeoTIFF 格式），确保空间信息的完整性与兼容性。同时，需对数据的编码方式、字段定义、缺失值标识等进行统一规范，避免因格式不统一导致的数据读取错误或信息丢失。

计量单位标准化是统一不同来源水文数据的计量单位，消除因计量单位差异导致的数据对比与整合困难。不同观测区域、不同观测设备可能采用不同的计量单位，例如降水数据可能采用毫米（mm）、厘米（cm）等计量单位，径流数据可能采用立方米每秒（m³/s）、升每秒（L/s）等计量单位。计量单位标准化需根据水文数据的类型及行业标准，将所有数据统一到规范的计量单位，例如降水数据统一采用毫米（mm），径流数据统一采用立方米每秒（m³/s），蒸发数据统一采用毫米（mm）等。在单位转换过程中，需严格遵循单位换算公式，确保数据数值的准确性。

精度标准标准化是统一不同来源水文数据的精度等级，消除因精度差异导致的数据整合偏差。不同观测设备的观测精度、不同数据处理方法的精度存在差异，例如高精度传感器的观测数据精度可达到 0.1mm，而普通观测设备的精度可能仅为 1mm，遥感反演数据的精度则受反演算法、数据源质量等因素影响，存在一定的误差范围。精度标准标准化需根据后续分析的精度需求，结合数据的实际精度，对数据进行精度调整，例如对高精度数据进行舍入处理，使其与目标精度匹配；对精度较低的数据，明确标注精度范围，在后续整合分析中考虑精度差异的影响，避免因精度不统一导致的整合结果偏差。

（四）数据整合准备

数据整合准备是水文数据预处理的收尾环节，旨在为后续的多源水文数据同化与整合提供直接支撑，主要包括数据关联匹配、数据质量评估与数据归档三个核心任务。数据关联匹配是建立不同来源水文数据之间的时空关联，明确数据之间的对应关系，例如将同一区域、同一时间的降水数据、径流数据、蒸发数据进

行关联,形成完整的水文要素数据集;同时,需建立数据与观测站点、观测设备、采集时间等元数据的关联,确保数据的可追溯性。数据质量评估是对预处理后的数据集进行全面的质量检验,评估指标包括数据完整性、数据可靠性、数据一致性及数据标准化程度等。通过质量评估,可判断预处理后的数据集是否满足后续整合与分析的需求,若未达到要求,则需返回之前的预处理环节进行二次处理;若达到要求,则可进入后续的同化与整合环节。数据归档是将预处理后的标准化数据集进行规范的存储与归档,建立完善的元数据信息,包括数据来源、预处理方法、数据质量评估结果、存储时间等,便于数据的管理、查询与后续应用。

二、水文数据同化关键应用环节与实施要点

水文数据同化的实施是一个系统的技术过程,需结合水文数据特性、水文模型类型及实际应用需求,合理设计同化流程,把控关键应用环节,确保同化效果。其关键应用环节主要包括同化数据筛选、同化时空匹配、同化参数设置、同化结果验证四个核心环节,各环节的实施质量直接决定同化结果的可靠性与精度。在实施过程中,需严格遵循实施要点,平衡数据利用效率与模型稳定性,实现多源水文数据的高效融合。

(一) 关键应用环节

同化数据筛选是水文数据同化的前置环节,其核心任务是从预处理后的多源水文数据中,筛选出符合同化需求的有效数据。同化数据筛选需考虑三个核心因素:一是数据与同化目标的相关性,优先选择与水文状态变量直接相关的数据,例如对径流状态进行同化时,优先选择实测径流数据、遥感反演的径流相关数据等;二是数据的精度与可靠性,筛选精度高、不确定性小的数据,避免低质量数据对同化结果产生干扰;三是数据的时空覆盖特性,结合水文模型的时空尺度,选择时空覆盖范围与模型匹配的数据,确保数据能够为模型提供充分的约束信息。同时,需根据同化方法的特性,筛选符合方法要求的数据类型,例如卡尔曼滤波系列方法适用于时序数据,变分同化方法适用于空间分布数据。

同化时空匹配是确保多源数据与水文模型有效融合的关键环节,其核心任务是实现观测数据与模型模拟结果在时间与空间尺度上的统一。时间匹配需确保观测数据的时间分辨率与模型的模拟时间步长一致,对于时间分辨率不匹配的数据,需通过时间插值或时间聚合的方法进行处理,确保数据在时间维度上能够有效融

合。空间匹配需确保观测数据的空间位置、空间分辨率与模型的网格结构、空间范围一致，对于点尺度观测数据，需通过空间插值转化为模型网格尺度的数据；对于面尺度数据，需通过空间匹配与模型网格相对应，确保数据在空间维度上的兼容性。在时空匹配过程中，需结合水文过程的时空演变规律，避免因尺度转换导致水文信息的失真。

同化参数设置是水文数据同化实施的核心环节，其核心任务是根据同化方法、水文模型及数据特性，合理设置同化参数，确保同化过程的稳定性与同化结果的精度。不同的同化方法具有不同的核心参数，例如卡尔曼滤波方法的核心参数包括过程误差协方差、观测误差协方差等；集合卡尔曼滤波方法的核心参数包括集合成员数量、扰动幅度等；变分同化方法的核心参数包括观测权重、正则化参数等。同化参数的设置需结合数据的精度评估结果、模型的不确定性分析结果，通过敏感性分析、试算等方法，确定最优的参数组合。过程误差协方差的设置需反映模型模拟的不确定性程度，观测误差协方差的设置需反映观测数据的精度，集合成员数量的设置需平衡同化精度与计算效率，正则化参数的设置需平衡目标函数优化效果与模型状态的稳定性。

同化结果验证是水文数据同化的收尾环节，其核心任务是对同化得到的水文状态估计值进行全面的验证与评估，判断同化结果的可靠性与精度，为同化方法的优化与改进提供依据。同化结果验证需采用定性与定量相结合的方法，定性验证主要通过对比同化结果与水文过程的客观规律，判断同化结果是否合理；定量验证则通过构建验证指标体系，量化同化结果的精度。常用的定量验证指标包括均方根误差、平均绝对误差、相关系数等，通过对比同化结果与实测数据的差异，评估同化结果的精度；同时，可通过对比同化前后模型模拟结果的精度变化，评估同化技术的有效性。在验证过程中，需选择独立的验证数据（未参与同化的实测数据），确保验证结果的客观性与可靠性。

（二）实施要点

水文数据同化的实施需遵循以下要点：一是坚持数据驱动与模型驱动相结合，充分发挥观测数据的约束作用与水文模型的物理机制支撑作用，避免过度依赖单一数据源或单一模型，确保同化结果既符合数据规律，又符合水文过程的物理特性；二是合理平衡同化精度与计算效率，根据实际应用需求，选择合适的同化方法与参数，在保证同化精度满足要求的前提下，尽量降低计算复杂度，提升同化

过程的效率,适用于实际水文业务的应用;三是重视不确定性分析,在同化的全流程中开展不确定性分析,包括观测数据的不确定性、模型的不确定性、同化参数的不确定性及同化结果的不确定性,通过不确定性分析,明确同化结果的可靠范围,为后续的水文分析与决策提供科学依据;四是动态优化同化策略,结合水文情势的变化,动态调整同化数据、同化参数及同化方法,例如在极端水文事件发生时,可增加观测数据的筛选频率,调整同化参数的取值,提升同化结果对极端水文事件的响应能力;五是加强多学科融合,水文数据同化涉及水文科学、概率统计、数学建模等多个学科领域,需加强多学科知识的融合应用,提升同化技术的科学性与适用性。

水文数据预处理与同化技术是多源水文数据整合与质量控制的核心技术支撑,其技术水平直接决定多源水文数据的利用效率与水文分析结果的可靠性。水文数据预处理通过数据采集校验、数据清洗、数据标准化及数据整合准备四个关键环节,实现了原始水文数据的质量提升与标准化转化,为多源数据的同化与整合奠定了坚实基础;水文数据同化技术则基于概率统计理论与水文模型,通过融合多源观测数据与模型信息,实现了对水文状态的最优估计,充分发挥了多源数据的互补优势,提升了水文数据的应用价值。

在实际应用中,需严格遵循水文数据预处理的基本原则,根据数据特性选择针对性的预处理技术;合理选择水文数据同化方法,把控同化关键应用环节,确保同化效果。未来,随着水文勘测技术、大数据技术及人工智能技术的发展,水文数据预处理与同化技术将向智能化、精细化、实时化方向发展,进一步提升多源水文数据的整合效率与质量控制水平,为水文要素综合勘测、水资源科学管理及水旱灾害防治提供更有力的技术支撑。

第三节 多源数据融合与信息提取方法

一、多源水文数据融合的层次与关键方法

多源水文数据融合通常按照数据处理的层级划分为数据层融合、特征层融合与决策层融合三个层次。不同层次的融合具有不同的处理对象、技术特点与适用场景,从底层原始数据到高层决策信息,形成了逐步递进的融合体系。选择适宜

的融合层次与方法，需结合数据源特征、融合目标及实际应用场景综合判断。

（一）数据层融合

数据层融合又称像素级融合，是最低层级的融合方式，其处理对象为原始水文数据。该层次融合的核心思路是在数据采集后，直接对来自不同数据源的原始数据进行整合处理，生成一幅统一的、更具可靠性的原始数据集合。数据层融合的优势在于能够最大限度地保留原始数据中的细节信息，避免在后续处理过程中丢失有用信息，因此适用于原始数据质量较好、格式统一且需要保留详细细节的场景。

数据层融合的关键在于实现不同数据源原始数据的时空匹配与冗余消除。由于不同数据源的监测时间、监测位置、数据分辨率可能存在差异，在融合前需通过时空配准步骤，将所有数据源的原始数据统一到相同的时间与空间尺度上。时间配准通常采用插值法，根据数据的时间分辨率差异，将低时间分辨率数据插值为高时间分辨率数据，或对高时间分辨率数据进行重采样，实现时间尺度的统一；空间配准则通过地理坐标匹配、空间插值等方法，将不同空间位置、不同空间分辨率的原始数据整合到统一的空间网格中。

在时空匹配的基础上，数据层融合的主要方法包括加权平均法、卡尔曼滤波法等。加权平均法是最基础、最常用的融合方法，其核心思想是根据不同数据源的可靠性赋予不同的权重，通过加权计算得到融合结果。权重的确定可基于数据的精度、稳定性等指标，可靠性越高的数据源赋予的权重越大。该方法具有计算简单、运算效率高的特点，适用于数据源数量较少、数据间冗余度较高的场景。卡尔曼滤波法则通过构建状态方程与观测方程，利用前一时刻的融合结果与当前时刻的观测数据，实现对当前时刻水文状态的最优估计，能够有效处理具有动态变化特征的水文数据，适用于实时性要求较高的动态水文监测场景。

需要注意的是，数据层融合对原始数据的质量要求较高，若原始数据中存在较多噪声或异常值，会直接影响融合结果的可靠性。因此，在数据层融合前，必须对原始数据进行严格的质量控制，剔除异常值、修正误差，确保原始数据的可靠性。此外，当数据源数量较多、数据量较大时，数据层融合的运算量会显著增加，可能影响融合的时效性，因此在实际应用中需结合数据量与实时性需求综合考量。

（二）特征层融合

特征层融合是中间层级的融合方式，其处理对象为从原始水文数据中提取的特征信息。该层次融合的核心思路是先对各数据源的原始数据进行特征提取，得到能够表征水文过程本质特征的特征向量，再对这些特征向量进行整合处理，生成统一的特征向量集合。特征层融合既保留了原始数据中的关键信息，又剔除了冗余信息，降低了数据处理的维度与运算量，同时对原始数据的质量要求相对较低，因此具有较广泛的适用场景。

特征提取是特征层融合的核心环节，其质量直接决定了融合结果的可靠性。不同类型的水文数据对应着不同的特征提取方法，例如，对于雨量、水位等时序数据，可通过趋势分析、周期分析、突变检测等方法提取时序特征，如趋势斜率、周期长度、突变点位置等；对于遥感影像等空间数据，可通过边缘检测、纹理分析、区域分割等方法提取空间特征，如水文要素的空间分布范围、边界轮廓、纹理特征等；对于水文模型模拟数据，可提取模型参数特征、模拟结果的误差特征等。特征提取的关键在于确保提取的特征能够准确反映水文过程的本质规律，同时具备良好的区分度与稳定性。

特征层融合的主要方法包括特征选择与特征融合两个方面。特征选择是从提取的所有特征向量中筛选出最具代表性、最能反映融合目标的特征子集，剔除冗余特征与无效特征，降低融合处理的复杂度。特征选择方法可分为过滤式、包裹式与嵌入式三类，过滤式方法通过计算特征的信息量、相关性等指标筛选特征，包裹式方法将特征选择与后续的分类或回归模型相结合筛选特征，嵌入式方法则在模型训练过程中自动完成特征选择。特征融合则是对筛选后的特征向量进行整合，生成统一的特征向量，常用方法包括主成分分析法、因子分析法、聚类分析法等。主成分分析法通过线性变换将多个相关的特征向量转化为少数几个不相关的主成分，实现特征维度的降维与融合，同时保留原始特征中的大部分信息；聚类分析法则通过计算特征向量间的相似度，将相似的特征归为一类，实现特征的整合与简化。

特征层融合兼顾了数据处理的精度与效率，适用于原始数据质量参差不齐、数据源数量较多且需要提取水文过程关键特征的场景，如水文要素的时空演变规律分析、水文异常事件的识别等。在实际应用中，特征提取方法与融合方法的选择需结合数据源类型与融合目标综合判断，确保融合结果能够准确反映水文过程

的本质特征。

（三）决策层融合

决策层融合是最高层级的融合方式，其处理对象为各数据源基于原始数据或特征数据得到的决策结果。该层次融合的核心思路是先让每个数据源独立完成决策分析，得到各自的决策结论，再通过一定的融合规则对这些决策结论进行整合，生成最终的统一决策结果。决策层融合具有较强的容错性，即使部分数据源的决策结果存在偏差，也可通过融合规则降低其对最终决策结果的影响，同时对原始数据的格式与质量要求最低，适用于数据源类型差异较大、原始数据质量较差且以决策支持为核心目标的场景。

决策层融合的关键环节包括单数据源决策与多决策结果融合两个部分。单数据源决策是指每个数据源根据自身的原始数据或特征数据，通过相应的决策模型得到独立的决策结论。不同数据源的决策模型可根据数据类型与决策目标选择，例如，对于时序水文数据，可采用时间序列预测模型得到决策结论；对于空间水文数据，可采用图像分类模型得到决策结论；对于定性描述类水文数据，可采用专家判断法得到决策结论。单数据源决策的核心是确保每个决策结论的可靠性，为后续的融合处理奠定基础。

多决策结果融合的核心是构建科学合理的融合规则，常用的融合规则包括投票法、贝叶斯推理法、D-S 证据理论等。投票法是最基础的决策融合方法，其核心思想是将多个数据源的决策结论视为“投票”，最终的决策结果为得票最多的结论。根据投票权重的不同，可分为简单多数投票、加权多数投票等，加权多数投票根据各数据源决策的可靠性赋予不同的权重，可靠性越高的数据源投票权重越大，能够提升融合结果的可靠性。贝叶斯推理法则基于贝叶斯概率理论，通过计算各决策结论的后验概率，将后验概率最大的结论作为最终决策结果，能够有效处理决策过程中的不确定性问题。D-S 证据理论则通过定义基本概率分配函数、信任函数与似然函数，对不同数据源的决策证据进行合成，适用于处理具有模糊性与不确定性的决策信息，在水文灾害预测预警等决策场景中具有较好的应用效果。

决策层融合的优势在于能够充分利用各数据源的决策优势，提升最终决策结果的可靠性与鲁棒性，适用于水文灾害预测预警、水资源优化配置决策等核心应用场景。但该层次融合也存在一定的局限性，由于需要先完成单数据源的决策分

析, 处理流程相对复杂, 且决策结果的质量依赖于单数据源决策的可靠性与融合规则的合理性。因此, 在实际应用中, 需合理选择单数据源决策模型与融合规则, 确保最终决策结果的科学性。

二、面向核心水文要素的信息提取路径

多源水文数据融合的最终目的是提取反映核心水文要素演变规律的有效信息, 核心水文要素包括降水、径流、蒸发、水位、含沙量等, 不同水文要素的表征特征、数据来源存在差异, 因此其信息提取路径也具有针对性。基于多源数据融合的信息提取, 需结合水文要素的固有特征, 选择适宜的融合层次与方法, 实现对水文要素信息的精准提取。

(一) 降水信息提取

降水是水文循环的核心环节, 其时空分布特征直接影响径流、洪水等水文过程。降水数据来源主要包括传统雨量站监测数据、遥感反演降水数据、气象模型模拟降水数据等, 其中雨量站数据具有较高的时间分辨率与精度, 但空间覆盖不均; 遥感反演数据具有广阔的空间覆盖范围, 但时间分辨率较低且精度受天气条件影响较大; 气象模型模拟数据能够实现降水的预测, 但存在一定的模拟误差。基于多源数据融合的降水信息提取, 核心目标是获取高时空分辨率、高精度的降水时空分布信息。

降水信息提取的常用路径为“数据层融合+特征层融合”的组合模式。首先, 对多源降水数据进行数据层融合, 完成时空配准与冗余消除。时间上, 将遥感反演数据、气象模型模拟数据插值为与雨量站数据一致的时间分辨率; 空间上, 采用空间插值方法将雨量站数据插值为与遥感反演数据一致的空间网格, 实现多源数据的时空匹配。随后, 采用加权平均法或卡尔曼滤波法对匹配后的原始数据进行融合, 生成初步的降水数据集合。在此基础上, 进行特征层融合, 提取降水的时序特征(如小时降水量、日降水量、降水强度、降水持续时间等)与空间特征(如降水中心位置、降水覆盖范围、降水空间梯度等), 通过主成分分析法等方法对特征向量进行融合, 最终得到精准的降水时空分布信息。

在降水信息提取过程中, 需重点关注降水数据的精度控制, 通过质量控制剔除异常降水数据, 同时结合地形、地貌等下垫面特征, 对融合结果进行修正。例如, 在山区等地形复杂区域, 降水受地形影响较大, 可结合数字高程模型(DEM)

数据对融合后的降水数据进行地形修正,提升降水信息的空间精度。

（二）径流信息提取

径流是水资源评估的核心指标,包括地表径流、地下径流等,其信息提取核心目标是获取径流过程、径流量、径流时空分布等信息。径流数据来源主要包括水文站监测径流数据、水文模型模拟径流数据、遥感反演径流数据等,其中水文站监测数据精度高,但仅能获取单点径流信息;水文模型模拟数据能够实现径流过程的连续模拟,但参数率定难度较大;遥感反演数据可实现径流的空间分布监测,但精度相对较低。基于多源数据融合的径流信息提取,需实现单点径流数据与空间径流数据的协同整合,提升径流信息的完整性与精度。

径流信息提取的常用路径为“特征层融合+决策层融合”的组合模式。对于水文站监测数据与水文模型模拟数据,首先进行特征层融合,提取径流的时序特征(如洪峰流量、洪峰出现时间、径流历时、枯水期径流量等),通过聚类分析法对特征向量进行融合,得到径流时序特征集合;对于遥感反演径流数据,提取径流的空间特征(如径流河道范围、径流空间分布密度等),与时序特征集合进行整合。随后,进行决策层融合,结合水文站监测决策、模型模拟决策、遥感反演决策等多源决策结果,采用加权多数投票法或 D-S 证据理论对决策结果进行融合,最终得到精准的径流信息。

在径流信息提取过程中,需重点关注径流过程的非线性特征,结合降水、蒸发等其他水文要素信息,对融合结果进行验证与修正。例如,通过降水-径流关系模型,验证融合得到的径流量是否合理,确保径流信息的可靠性。

（三）蒸发信息提取

蒸发是水文循环的重要输出环节,其信息提取核心目标是获取蒸发量的时空分布信息,为水资源平衡计算提供依据。蒸发数据来源主要包括蒸发站监测数据、遥感反演蒸发数据、气象模型模拟蒸发数据等,其中蒸发站监测数据精度高,但空间覆盖有限;遥感反演数据能够实现蒸发量的大范围空间监测,但精度受植被覆盖、土壤湿度等因素影响较大;气象模型模拟数据可实现蒸发量的预测,但存在一定的模拟误差。基于多源数据融合的蒸发信息提取,需结合蒸发过程的影响因素,实现多源数据的协同整合。

蒸发信息提取的常用路径为“数据层融合+特征层融合”的组合模式。首先,对多源蒸发数据进行数据层融合,完成时空匹配,将遥感反演数据、气象模

型模拟数据与蒸发站数据统一到相同的时空尺度。随后,采用加权平均法对匹配后的原始数据进行融合,生成初步的蒸发数据集合。在此基础上,进行特征层融合,提取蒸发的时序特征(如日蒸发量、月蒸发量、季节蒸发量等)与空间特征(如蒸发量空间分布、蒸发高值区与低值区分布等),结合植被覆盖度、土壤湿度、气温等影响因素,对特征向量进行筛选与融合,最终得到精准的蒸发时空分布信息。

在蒸发信息提取过程中,需重点关注下垫面特征对蒸发的影响,结合遥感反演的植被覆盖度数据、土壤湿度数据等,对融合后的蒸发数据进行修正。例如,在植被覆盖度高的区域,蒸发量较大,可通过植被覆盖度权重对蒸发数据进行调整,提升蒸发信息的精准度。

(四) 水位与含沙量信息提取

水位是反映水体变化的直观指标,含沙量则直接影响水体质量与河道演变,二者均是水文勘测的重要内容。水位数据来源主要包括水位站监测数据、遥感反演水位数据、水文模型模拟水位数据等;含沙量数据来源主要包括水文站监测数据、遥感反演含沙量数据等。基于多源数据融合的水位与含沙量信息提取,核心目标是获取水位与含沙量的时空演变信息。

水位信息提取的常用路径为“数据层融合+决策层融合”的组合模式。首先,对多源水位数据进行数据层融合,完成时空配准,将遥感反演数据、模型模拟数据与水位站数据统一到相同的时空尺度,采用卡尔曼滤波法对原始数据进行融合,生成初步的水位数据集合。随后,进行决策层融合,结合水位站监测决策、遥感反演决策、模型模拟决策等多源决策结果,采用贝叶斯推理法对决策结果进行融合,最终得到水位的时空演变信息。

含沙量信息提取的常用路径为“特征层融合”模式。由于含沙量数据多为时序数据与空间数据的结合,首先对多源含沙量数据进行特征提取,提取含沙量的时序特征(如瞬时含沙量、日平均含沙量、最大含沙量等)与空间特征(如含沙量空间分布、含沙量梯度等),通过主成分分析法对特征向量进行融合,结合水流速度、水位等水文要素信息,对融合结果进行修正,最终得到含沙量的时空演变信息。

第四节 数据质量控制与不确定性评估

一、多源水文数据质量控制的关键环节与技术路径

（一）数据预处理阶段的质量筛查

数据预处理是多源水文数据质量控制的基础环节，核心目标是通过初步的质量筛查，剔除明显存在质量问题的数据，为后续的精细化质量控制奠定基础。该阶段的质量筛查主要围绕数据的完整性与规范性展开，重点处理数据缺失、格式不统一、标识不规范等共性问题。

数据完整性筛查主要针对数据缺失问题，通过统计各类数据源的有效数据量、缺失比例及缺失时段分布，明确数据缺失的特征。对于多源水文数据而言，数据缺失可能源于观测设备故障、传输链路中断、恶劣天气影响等多种因素，不同原因导致的缺失在时空分布上存在不同规律。针对这一特点，完整性筛查需结合数据采集的实际情况，区分临时性缺失与永久性缺失，为后续的缺失数据补全提供依据。数据规范性筛查则聚焦于数据格式与标识的统一化处理，由于不同观测站点、不同遥感平台或不同模型输出的数据在格式、单位、时间戳标识等方面可能存在差异，需通过规范性筛查梳理各类数据的格式特征，制定统一的数据规范标准，完成数据格式转换、单位统一、时间戳同步等处理，消除多源数据间的格式冲突。

（二）核心质量指标的精准核验

在数据预处理的基础上，需针对水文数据的核心质量指标开展精准核验，重点保障数据的准确性与一致性，这是多源水文数据质量控制的核心环节。准确性核验的核心是识别数据集中的异常值，即偏离数据正常变化范围的极端值，这类数据往往源于观测误差、设备故障或数据传输错误，会严重影响水文分析结果的可靠性。

针对不同类型的水文数据，准确性核验需结合其物理意义与时空变化规律制定合理的判断标准。例如，对于降水、径流等站点观测数据，可基于长期观测形成的历史数据范围，设定合理的阈值区间，超出阈值区间的数据需标记为异常值；同时，结合水文要素的时空连续性特征，通过相邻站点数据对比、同一站点不同时段数据趋势分析等方式，识别突变型异常值。对于遥感反演的水文数据（如土

壤含水量、蒸散发量等），则需结合遥感数据的空间分辨率、反演算法适用范围等因素，通过相邻像素数据一致性检验、不同遥感数据源对比等方式开展准确性核验。

一致性核验主要针对多源数据间的逻辑冲突问题，确保不同来源的同一水文要素数据在时空维度上能够相互印证、协调统一。一致性核验可分为横向一致性与纵向一致性两个层面：横向一致性核验聚焦于同一时空尺度下不同来源数据的差异分析，例如对比同期同区域的站点观测降水数据与遥感反演降水数据，判断两者的差异是否在合理范围内；纵向一致性核验则关注同一数据源在不同时间尺度下的数据变化规律一致性，例如分析径流数据在日、月、年尺度上的变化趋势是否符合水文过程的固有规律，避免因数据误差导致的趋势扭曲。

（三）质量问题的修正与优化

通过质量筛查与精准核验识别出的数据质量问题，需采取针对性的修正与优化措施，最大限度提升数据质量。对于数据缺失问题，需根据缺失类型与数据特征选择合适的补全方法，确保补全后的数据能够贴合水文要素的实际变化规律。对于临时性、小范围的数据缺失，可采用相邻站点插值、历史同期数据替代等简单有效的方法；对于大范围、长时间序列的数据缺失，则需结合水文过程的物理机制，通过构建简单的水文响应模型实现缺失数据的精准补全，补全过程中需充分考虑水文要素的时空关联性，避免补全数据引入新的误差。

对于识别出的异常值，需首先明确异常值的产生原因，区分真性异常值与假性异常值：假性异常值多源于数据传输或存储过程中的错误，可通过原始观测记录核对、数据重新传输等方式进行修正；真性异常值则源于观测过程中的偶然误差或极端水文事件，对于偶然误差导致的异常值，可采用移动平均、中位数替代等方法进行平滑处理，消除误差影响；对于极端水文事件导致的异常值，若其符合水文过程的物理规律，则需保留该数据，避免因过度修正导致极端水文信息丢失。

对于多源数据间的一致性冲突问题，需结合各类数据的质量水平与可靠性程度，制定差异化的融合修正策略。优先采用质量更高、可靠性更强的数据作为基准，对其他来源的数据进行修正，例如以长期稳定运行的基准站点观测数据为基准，修正周边普通站点的观测数据，或修正遥感反演数据的系统偏差；同时，通过构建多源数据融合模型，充分挖掘不同来源数据的优势，实现数据质量的协同

优化,提升数据的整体可靠性。

二、多源水文数据不确定性的来源与表征特征

(一) 不确定性的核心来源

多源水文数据的不确定性是指数据无法精准表征水文要素真实状态的程度,其来源具有多样性与复杂性,可归纳为观测过程不确定性、数据传输与处理不确定性、水文过程固有不确定性三大类,各类不确定性相互叠加,共同影响数据的可靠性。

观测过程不确定性是多源水文数据不确定性的主要来源之一,源于观测设备、观测方法与观测环境等多方面因素的限制。观测设备的精度不足、稳定性差异,会直接导致观测数据与真实值存在偏差;不同观测方法的原理差异与适用范围限制,也会引发观测数据的不确定性,例如传统站点观测方法存在空间代表性不足的问题,而遥感观测方法则受传感器分辨率、大气校正精度等因素影响;观测环境的复杂多变(如极端天气、地形遮挡等)会干扰观测过程,导致观测数据出现波动,进一步加剧不确定性。

数据传输与处理过程也会引入不确定性。在数据传输过程中,传输链路的干扰、信号衰减等问题可能导致数据丢失或失真;在数据预处理过程中,数据格式转换、单位统一、缺失值补全、异常值修正等操作,若处理方法选择不当,可能会改变数据的原始特征,引入新的误差。尤其是在多源数据整合过程中,不同来源数据的时空尺度匹配、投影转换等处理环节,会因尺度效应、转换精度等因素产生不确定性,影响整合后数据的质量。

水文过程固有不确定性源于水文系统本身的复杂性与随机性。水文要素的变化受气候、地形、植被、土壤等多种因素的综合影响,这些因素之间存在复杂的相互作用关系,使得水文过程呈现出显著的非线性、随机性特征,难以通过观测数据完全精准表征;同时,水文要素的时空异质性显著,同一水文要素在不同时间、不同区域的变化规律存在差异,进一步增加了数据表征的不确定性。此外,人类活动(如水利工程建设、土地利用变化等)对水文过程的干扰具有不确定性,也会导致观测数据与自然水文过程的真实状态存在偏差。

(二) 不确定性的表征特征

多源水文数据的不确定性具有时空依赖性、叠加性、相对性等显著表征特征,

准确把握这些特征是开展不确定性评估的基础。时空依赖性是不确定性最核心的特征之一，表现为不确定性的分布随时间和空间的变化而变化。在时间维度上，不同水文时期（如汛期与枯水期）的观测环境、水文要素变化剧烈程度不同，不确定性大小存在差异，例如汛期降水强度大、变化快，观测数据的不确定性通常高于枯水期；在空间维度上，不同区域的地形地貌、气候条件、观测站点密度等存在差异，导致不确定性呈现出空间分异特征，例如山区观测站点稀疏，数据的空间代表性不足，不确定性通常高于平原地区。

叠加性是多源水文数据不确定性的另一重要特征。多源水文数据的不确定性源于观测、传输、处理等多个环节，各类不确定性并非孤立存在，而是相互叠加、相互影响，形成综合不确定性。例如，观测过程产生的误差会在数据传输过程中进一步放大，数据处理过程引入的误差会与原始观测误差叠加，导致最终数据的不确定性显著增加；同时，不同来源数据的不确定性在整合过程中会相互作用，形成多源数据特有的协同不确定性，进一步增加了不确定性的复杂性。

相对性是指多源水文数据的不确定性大小与评估标准、应用场景密切相关。同一组水文数据在不同的应用场景下，其不确定性的影响程度存在差异：对于精度要求较低的水文宏观分析，数据的小幅不确定性可能不会对结果产生显著影响；而对于精度要求较高的水文模拟预测，相同程度的不确定性可能会导致分析结果出现较大偏差。此外，不确定性的评估标准具有相对性，不同的评估方法、评估指标可能会得出不同的不确定性评估结果，因此在开展不确定性评估时，需结合具体的应用需求明确评估标准。

三、多源水文数据不确定性评估的框架与方法

（一）不确定性评估的核心框架

多源水文数据不确定性评估是一项系统性工作，需构建涵盖评估目标明确、评估范围界定、数据准备、评估实施、结果验证与应用五大环节的核心框架，确保评估工作科学有序开展。评估目标明确是评估工作的前提，需结合具体的水文应用场景，明确不确定性评估的核心需求，例如评估数据用于水文模拟时的不确定性影响，或评估多源数据整合后的数据可靠性；根据评估目标，确定评估的核心指标，如不确定性大小、分布特征、影响程度等。

评估范围界定需明确评估的水文要素类型、数据源范围及时空尺度。水文要

素类型可包括降水、径流、蒸发、土壤含水量等核心要素；数据源范围需明确参与评估的各类数据源（如站点观测数据、遥感反演数据、模型模拟数据等）；时空尺度则需结合应用需求确定，例如日尺度、月尺度的时间尺度，以及流域、区域等空间尺度，确保评估范围与应用场景高度匹配。数据准备环节需对参与评估的多源水文数据进行预处理，完成数据格式统一、时空尺度匹配、质量问题初步修正等工作，确保数据能够满足评估要求；同时，收集评估所需的辅助数据，如观测站点信息、遥感数据反演参数、水文流域特征数据等。

评估实施是不确定性评估的核心环节，需结合数据特征与评估目标选择合适的评估方法，开展多维度的不确定性分析，量化不确定性大小与分布特征，识别不确定性的主要来源；同时，分析不同来源数据不确定性的协同作用机制，评估多源数据整合过程中不确定性的传递与演化规律。结果验证环节需通过多种方式检验评估结果的可靠性，例如结合基准站点的高精度观测数据验证评估结果的准确性，通过不同评估方法的结果对比分析评估结果的稳定性；若评估结果存在偏差，需回溯评估过程，调整评估方法与参数，确保评估结果可靠。结果应用环节需将评估结果与具体的水文应用相结合，根据不确定性评估结果，为数据质量优化、多源数据整合方案调整、水文分析结果误差修正等提供依据，提升水文应用的可靠性。

（二）常用的不确定性评估方法

多源水文数据不确定性评估方法种类繁多，根据评估原理可分为统计分析法、对比验证法、敏感性分析法三大类，各类方法具有不同的适用场景与优缺点，需结合实际评估需求灵活选择。统计分析法是最基础、最常用的不确定性评估方法，核心思路是通过对水文数据的统计特征分析，量化数据的离散程度与波动范围，进而表征不确定性大小。常用的统计分析指标包括标准差、变异系数、四分位距等，这些指标能够直观反映数据的离散程度，离散程度越大，说明数据的不确定性越高。

对于时间序列水文数据，可通过趋势分析、周期性分析等统计方法，分析数据的时间变化规律，识别因数据误差导致的异常波动，进而评估时间维度上的不确定性；对于空间分布的水文数据（如遥感反演数据），可通过空间自相关分析、空间变异系数计算等方法，分析数据的空间分布均匀性，评估空间维度上的不确定性。统计分析法操作简便、计算效率高，适用于各类水文数据的初步不确定性

评估,但该方法主要基于数据的统计特征,难以充分考虑水文过程的物理机制,对于复杂水文场景下的不确定性评估精度有限。

对比验证法的核心思路是将待评估数据与高精度、高可靠性的基准数据进行对比,通过分析两者的差异量化待评估数据的不确定性,该方法能够充分结合数据的物理意义,评估结果准确性较高。基准数据的选择是对比验证法的关键,通常选择长期稳定运行的基准观测站点数据、经过严格验证的高精度遥感数据或物理机制完善的水文模型输出数据作为基准。评估过程中,通过计算待评估数据与基准数据的绝对误差、相对误差、均方根误差等指标,量化两者的差异,误差越大,说明待评估数据的不确定性越高。

对比验证法适用于各类水文数据的精准不确定性评估,尤其是对于遥感反演数据、模型模拟数据等间接获取的水文数据,对比验证法是评估其不确定性的核心手段。但该方法对基准数据的依赖性较强,若缺乏高质量的基准数据,评估工作难以开展;同时,基准数据本身也存在一定的不确定性,会对评估结果产生一定影响。

敏感性分析法主要用于评估多源数据整合过程中,不同来源数据不确定性对整合结果的影响程度,核心思路是通过改变某一数据源的输入误差,分析整合结果的变化幅度,进而判断该数据源不确定性对整合结果的敏感性。敏感性分析能够有效识别多源数据不确定性的关键来源,为多源数据整合方案的优化提供依据,例如通过敏感性分析发现某一遥感数据源的不确定性对整合结果影响最大,则需优先对该数据源进行质量优化。

敏感性分析法可分为局部敏感性分析与全局敏感性分析:局部敏感性分析法通过固定其他参数,仅改变单一数据源的误差参数,分析整合结果的变化,操作简便但难以考虑各数据源不确定性的交互作用;全局敏感性分析则同时改变多个数据源的误差参数,分析各参数及其交互作用对整合结果的影响,评估结果更全面但计算复杂度较高。敏感性分析法适用于多源数据整合场景下的不确定性评估,能够为整合过程的质量管控提供精准指导,但该方法需结合具体的整合模型开展,适用范围具有一定局限性。

第六章 水文水资源测验原理与技术

第一节 水文站网规划设计与优化调整

一、水文站网规划设计的核心内容与流程

（一）基础资料收集与区域水文特征分析

基础资料收集是水文站网规划设计的前提的基础，其完整性与准确性直接影响规划方案的科学性。收集的基础资料主要包括以下几类：一是自然地理资料，包括区域地形地貌图、地质构造资料、土壤类型分布图、植被覆盖资料、水系分布图等，用于分析区域自然地理条件对水文过程的影响；二是水文气象资料，包括现有水文测站的监测数据（降水、蒸发、径流、水位等）、气象站的气象数据（气温、风速、湿度等）、历史水文灾害资料等，用于揭示区域水文气象特征与变化规律；三是经济社会资料，包括区域人口分布、产业结构、城市规划、水资源开发利用现状、水利工程建设情况、水生态保护目标等，用于明确区域对水文监测的实际需求；四是现有站网资料，包括现有水文测站的位置、类型、监测项目、监测频次、运行状况、数据质量等，用于评估现有站网的不足与优化潜力。

在基础资料收集完成后，需开展区域水文特征分析工作。通过对水文气象资料的统计分析，明确区域降水的时空分布特征、蒸发量的变化规律、径流的形成与演化过程、水位的变化特征等关键水文要素的特性；结合自然地理资料，分析地形、地质、土壤、植被等要素对水文过程的影响，划分不同的水文分区；结合经济社会资料，识别区域水资源管理的关键问题与核心需求，明确水文监测的重点区域与重点项目。区域水文特征分析为后续测站布局、监测项目确定等工作提供科学依据。

（二）监测目标与监测项目确定

监测目标的确定是水文站网规划设计的核心导向，需根据区域经济社会发展需求、水资源管理任务、水生态保护目标等因素综合确定。不同区域的监测目标存在差异，总体而言，水文站网的监测目标主要包括：一是揭示区域水文循环规

律, 获取长期连续的水文基础数据, 为水文科学研究提供支撑; 二是评估区域水资源量与质, 为水资源开发利用、配置调度提供数据依据; 三是监测水旱灾害发生过程, 为水旱灾害预警、防控与应急处置提供支撑; 四是监测水生态环境状况, 为水生态保护与修复提供数据支撑; 五是服务水利工程建设与运行管理, 为工程设计、施工、调度与维护提供监测数据。

在监测目标明确后, 需对应确定监测项目。监测项目的选择需紧密围绕监测目标, 结合区域水文特征与实际需求, 确保监测数据能够全面支撑监测目标的实现。常见的水文监测项目包括: 一是水量监测项目, 包括降水、蒸发、径流、水位、泉水量等, 用于水资源量评估与水旱灾害监测; 二是水质监测项目, 包括 pH 值、溶解氧、化学需氧量、氨氮、总磷、重金属等, 用于水生态环境状况评估; 三是水文辅助监测项目, 包括气温、风速、湿度、土壤含水量等, 用于分析水文过程的影响因素。同时, 需根据监测目标的优先级, 明确各类监测项目的监测精度要求与监测频次, 确保重点监测项目能够获得足够的监测数据支撑。

(三) 测站类型与布局方案设计

1. 测站类型选择

测站类型的选择需根据监测目标、监测项目、区域水文特征及自然地理条件综合确定。按照监测对象与功能的不同, 水文测站可分为流量站、水位站、雨量站、蒸发站、水质站、土壤墒情站等多种类型。在实际规划设计中, 需结合区域需求合理搭配各类测站: 在流域干流及主要支流的关键控制断面, 需设置流量站与水位站, 全面监测径流与水位变化; 在降水监测区域, 需根据降水分布特征设置雨量站, 加密降水不均区域的雨量站布局; 在水资源蒸发强烈的区域, 需设置蒸发站, 监测水面蒸发与陆面蒸发量; 在水生态敏感区域、饮用水源地、排污口附近, 需设置水质站, 强化水质监测; 在农业灌溉区、干旱半干旱区域, 需设置土壤墒情站, 监测土壤含水量变化。同时, 可根据区域条件选择自动监测站、半自动监测站或人工监测站, 在监测需求高、交通不便的区域优先采用自动监测站, 提升监测效率与时效性。

2. 布局方案设计

测站布局方案设计是水文站网规划设计的核心环节, 需在区域水文特征分析的基础上, 结合监测目标与测站类型, 科学确定测站的数量与具体位置。布局方案设计需遵循代表性、系统性等基本原则, 确保测站能够全面覆盖监测区域的关

键部位。在流域尺度上，测站布局需兼顾上下游、干支流的关联性，在流域出口设置控制站，监测流域总径流量；在主要支流汇入干流处设置测站，监测支流径流贡献；在流域内关键水文节点（如水库、湖泊进出口）设置测站，监测水利工程对水文过程的影响。在区域尺度上，需根据水文分区结果，在不同水文分区内设置相应的测站，确保各分区的水文特征均能得到有效监测。同时，需重点关注监测薄弱区域，通过增设测站填补监测空白；对现有站网密度过高、监测数据重复的区域，可适当精简测站，优化资源配置。

测站位置的选择需满足以下要求：一是监测断面应选择在河道顺直、断面稳定、水流均匀、无回流、无浅滩与沙洲的区域，确保监测数据的准确性与稳定性；二是测站位置应交通便利，便于监测设备的安装、维护与监测人员的作业；三是测站位置应避开洪水淹没风险过高的区域，或采取相应的防护措施，确保测站长期稳定运行；四是水质监测站应选择在排污口下游、饮用水源地取水口上游、水生态敏感区域等关键位置，确保能够有效监测水质变化情况。

（四）站网密度论证与优化

站网密度是指单位面积或单位流域面积内的测站数量，其合理性直接影响监测数据的代表性与站网的经济效益。站网密度过高会导致监测资源浪费，增加建设与运行成本；站网密度过低则会导致监测数据不足，无法准确反映区域水文特征。因此，在测站布局方案设计完成后，需开展站网密度论证与优化工作。

站网密度论证需结合区域水文特征、监测目标、监测精度要求及经济成本等因素综合开展。首先，根据区域水文分区结果，分析不同分区的水文复杂性与监测需求，确定各分区的基础站网密度；其次，结合监测精度要求，通过水文模型模拟、统计分析等方法，评估不同站网密度下监测数据的误差范围，明确满足监测精度要求的最低站网密度；最后，结合经济成本分析，在满足监测精度要求的前提下，优化确定性价比最优的站网密度。

在站网密度优化过程中，需注重现有站网资源的利用，通过对现有测站的改造、升级与功能拓展，提升现有站网的监测能力，减少新增测站的数量。同时，可采用动态优化的思路，根据区域水文特征与监测需求的变化，适时调整站网密度，确保站网始终保持合理的布局状态。

（五）规划方案的评估与审批

水文站网规划方案设计完成后，需开展全面的评估工作，确保规划方案的科

学性、合理性与可行性。评估内容主要包括：一是技术可行性评估，评估规划方案中测站布局、监测项目、监测设备选择等是否符合水文监测技术标准，是否能够实现预期的监测目标，测站建设是否具备相应的自然地理条件与技术支撑；二是经济合理性评估，评估规划方案的建设成本、运行维护成本是否在合理范围内，是否具备相应的资金保障，对比不同规划方案的成本效益，验证方案的经济性；三是社会效益评估，评估规划方案实施后对水资源管理、水旱灾害防治、水生态保护等工作的支撑作用，分析方案实施带来的社会效益。

在评估工作完成后，需根据评估结果对规划方案进行修改完善，形成最终的水文站网规划方案。最终方案需按规定程序报相关部门审批，审批通过后作为站网建设、改造与运行管理的依据。

二、水文站网优化调整的核心内容与实施路径

（一）核心内容

1. 测站布局优化

测站布局优化是站网优化调整的核心内容，主要包括测站的增设、撤销与迁移。对于监测空白区域、水文特征发生显著变化的区域、经济社会发展需求强烈的区域，需增设相应的测站，填补监测空白，提升监测覆盖范围；对于监测数据重复、失去监测代表性、运行维护成本过高且无法改造的测站，需予以撤销，优化资源配置；对于因河道变迁、工程建设、城市发展等因素导致监测断面不稳定或监测环境破坏的测站，需进行迁移，选择水文特征相似、监测条件适宜的新位置重新设置测站。

2. 监测项目与频次优化

随着监测目标的变化，需对现有测站的监测项目与频次进行优化调整。对于新增的监测需求（如水质监测、水生态监测、城市内涝监测等），需在相应测站增设监测项目；对于已无监测需求或监测价值较低的项目，可适当删减；根据水文要素的变化规律与监测精度要求，优化监测频次，在水文要素变化剧烈的时期（如汛期、暴雨期）适当提高监测频次，在水文要素稳定的时期适当降低监测频次，确保以合理的监测成本获得足够的监测数据。

3. 监测技术与设备优化

利用现代水文监测技术对现有站网的监测技术与设备进行升级改造，是提升

站网监测效能的重要手段。对于老化、落后的监测设备，需及时更新换代，采用精度更高、稳定性更好、自动化程度更高的监测设备；对于具备条件的测站，可改造为自动监测站，实现水文要素的实时监测、数据自动传输与远程控制；引入遥感监测、无人机监测等新型监测技术，构建地面监测与空中遥感监测相结合的立体化监测网络，提升监测的覆盖面与时效性。

4. 站网功能优化

结合经济社会发展需求，拓展现有站网的功能，实现一站多能。例如，在流量站增设水质监测项目，使其同时具备水量与水质监测功能；在雨量站增设土壤墒情监测功能，提升对农业灌溉与干旱监测的支撑能力；在城市水文站增设内涝监测功能，强化城市防洪排涝监测预警。通过站网功能优化，提升监测资源的利用效率，拓展站网的服务范围。

（二）实施路径

1. 现有站网评估

开展现有站网的全面评估是优化调整工作的前提。评估内容主要包括：现有测站的布局合理性、监测项目的完整性与实用性、监测数据的质量与连续性、监测技术与设备的先进性与可靠性、站网运行维护成本与效益等。通过评估，明确现有站网存在的不足与优化调整的重点方向，为制定优化调整方案提供依据。在评估过程中，可采用现场调研、数据统计分析、水文模型模拟等多种方法，确保评估结果的科学性与准确性。

2. 优化调整方案制定

根据现有站网评估结果、区域水文特征变化、经济社会发展需求及监测技术发展趋势，制定详细的站网优化调整方案。方案应明确优化调整的目标、原则、核心内容、具体措施、实施步骤、资金保障与预期效益等内容。在方案制定过程中，需广泛征求水文监测、水资源管理、水利工程等领域专家的意见，结合不同利益相关方的需求，对方案进行反复论证与修改完善，确保方案的可行性与科学性。

3. 方案实施与过程管控

优化调整方案审批通过后，需按照方案确定的实施步骤有序推进实施工作。实施过程中，需加强过程管控，确保各项调整措施落实到位。对于新增测站，需严格按照水文监测技术标准开展选址、建设与设备安装工作，确保新站建设质量；对于改造升级的测站，需做好原有监测设备的拆除与新设备的安装调试工作，保

证监测数据的连续性；对于撤销的测站，需做好监测数据的整理归档工作，确保历史监测数据的安全保存。同时，需加强施工安全管理，避免施工过程中对周边环境与水利设施造成破坏。

4. 效果评估与动态调整

优化调整方案实施完成后，需开展效果评估工作，评估调整后的站网是否达到预期的监测目标，监测数据的代表性、准确性与可靠性是否得到提升，站网运行维护成本是否合理，是否能够满足经济社会发展对水文监测的需求。通过效果评估，总结优化调整工作的经验与不足，为后续站网管理工作提供参考。同时，由于气候变化与经济社会发展是一个长期动态的过程，水文站网的优化调整也应是一项长期持续的工作，需建立动态调整机制，定期对站网运行状况与监测需求进行评估，根据评估结果及时调整站网布局、监测项目与监测技术，确保站网始终保持最优的运行状态。

水文站网规划设计与优化调整是水文水资源测验工作的核心环节，其科学性与合理性直接决定了水文监测数据的质量与水文服务的效能。在气候变化加剧、经济社会快速发展的新形势下，水文站网规划设计需严格遵循代表性、系统性、科学性、实用性、经济性与前瞻性原则，通过扎实的基础资料收集与区域水文特征分析，明确监测目标与监测项目，科学设计测站类型与布局方案，合理论证站网密度，确保规划方案能够满足各类水文监测需求。同时，需建立常态化的站网优化调整机制，针对气候变化、需求变化、现有站网不足与技术发展等驱动因素，有序开展测站布局、监测项目、监测技术与站网功能的优化调整工作，实现站网的动态优化升级。

未来，随着水文监测技术的不断创新与水资源管理需求的不断升级，水文站网规划设计与优化调整工作将面临更高的要求。需进一步加强水文科学研究与技术创新，结合大数据、人工智能、遥感等先进技术，提升站网规划设计与优化调整的科学性与智能化水平；加强跨区域、跨部门的协作配合，统筹推进全国水文站网的规划与建设，构建覆盖全面、功能完善、技术先进、运行高效的现代化水文站网体系，为水资源精细化管理、水旱灾害防治、水生态保护与高质量发展提供坚实的水文数据支撑。

第二节 流量、泥沙测验技术与方法进展

一、流量测验技术与方法进展

流量测验是水文测验的核心内容之一,其本质是通过对水流运动规律的把握,实现对单位时间内通过某一过水断面水体体积的精准测算。从早期的简易测流工具到现代的自动化测流系统,流量测验技术的发展始终围绕着提升测验效率、拓展适用范围、提高数据精度三大核心目标展开。本节将从传统流量测验技术的优化升级、现代自动化流量测验技术的创新发展以及特殊环境下流量测验技术的突破三个维度,系统阐述流量测验技术与方法的进展。

(一) 传统流量测验技术的优化升级

传统流量测验技术以流速面积法为核心,涵盖浮标法、流速仪法、比降面积法等多种经典方法。此类方法经过长期的实践检验,技术体系成熟,在常规水文测验工作中仍占据重要地位。近年来,针对传统方法操作繁琐、测验效率低、人为误差大等问题,相关领域开展了一系列优化升级工作,进一步提升了传统技术的适用性与精准度。

在流速仪法的优化方面,核心进展体现在流速仪设备的迭代更新与测验流程的规范化改进。传统机械式流速仪存在启动流速高、测量范围有限、易受水流杂质影响等缺陷,新型声学流速仪、电磁流速仪的研发与应用有效弥补了这些不足。声学流速仪基于多普勒效应原理,无需与水流直接接触即可实现流速测量,适用于高含沙、多漂浮物等复杂水流环境;电磁流速仪则利用电磁感应原理,测量精度高、响应速度快,能够精准捕捉水流的瞬时流速变化。同时,针对传统流速仪法中测点布置、测次选择等环节的主观性问题,相关技术标准进一步明确了不同水文条件下的测点布置方案与测次优化原则,结合水文大数据分析技术,实现了测次的动态调整,在保证测验精度的前提下,有效减少了测验工作量。

浮标法作为一种简易便捷的流量测验方法,其优化升级主要聚焦于浮标类型的创新与流量计算方法的改进。传统浮标受水流扰动影响较大,稳定性差,新型环保浮标、智能追踪浮标的研发有效提升了浮标的抗干扰能力与追踪精度。智能追踪浮标集成了GPS定位模块与数据传输模块,能够实时反馈浮标的运动轨迹,结合GIS技术可快速计算出浮标的漂移速度,进而推算出断面流量。此外,通过

引入机器学习算法,对浮标法流量计算过程中的误差来源进行精准识别与量化分析,建立了误差修正模型,显著提升了浮标法的测量精度,使其在中小河流应急监测、洪水期快速测流等场景中得到更广泛的应用。

比降面积法在无实测流速资料的流域或特殊水文情势下具有独特的优势,其优化进展主要体现在比降观测精度的提升与断面糙率确定方法的改进。传统比降观测依赖人工布设测压管或水位计,观测效率低、精度有限,新型自动化水位监测站的应用实现了比降的实时、连续观测,观测精度与时效性大幅提升。同时,针对断面糙率确定主观性强的问题,结合流域下垫面特征数据、遥感影像数据以及历史水文观测数据,构建了糙率与流域特征参数之间的关联模型,实现了糙率的精准估算,进一步提高了比降面积法的流量计算精度。

(二) 现代自动化流量测验技术的创新发展

随着物联网、大数据、人工智能等新兴技术与水文测验领域的深度融合,现代自动化流量测验技术实现了跨越式发展,形成了以非接触式测流、在线实时监测、远程数据传输为核心的新型测验技术体系,有效突破了传统测验技术的时空限制,大幅提升了流量测验的智能化水平。

声学多普勒测流技术是当前自动化流量测验领域的主流技术之一,其核心设备包括声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、声学多普勒点流速仪(ADV)等。与传统流速仪相比,ADCP具有测量范围广、测速精度高、可实现断面流速剖面实时测量等优势,能够快速获取整个过水断面的流速分布数据,进而精准计算出断面流量。近年来,ADCP技术的创新进展主要体现在设备小型化、国产化与应用场景的拓展。小型化ADCP设备体积小、重量轻,便于携带与安装,适用于中小河流、渠道等狭窄过水断面的流量监测;国产化ADCP设备的研发成功打破了国外技术垄断,降低了设备采购与维护成本,推动了自动化流量测验技术的普及应用。此外,ADCP与无人船、无人机的结合,形成了无人化测流系统,能够在洪水期、偏远山区等危险或人迹罕至的区域开展流量监测,有效保障了测验人员的安全与测验工作的连续性。

雷达测流技术作为一种新型非接触式测流技术,凭借其测量范围广、响应速度快、不受水流含沙量影响等优势,在水文测验领域得到快速发展。雷达测流技术基于电磁波多普勒效应,通过发射雷达波并接收水流表面的反射波,计算出水流表面的流速,进而结合断面形态数据推算出断面流量。近年来,雷达测流技术

的创新进展主要体现在设备性能的提升与数据处理方法的优化。新型高频雷达测流设备测量精度更高，能够捕捉到水流的细微流速变化；便携式雷达测流设备的研发使得现场测流更加便捷，适用于应急监测、临时测流等场景。同时，通过引入大数据分析 with 人工智能算法，对雷达测流数据进行降噪处理与误差修正，进一步提升了测量精度。此外，雷达测流技术与视频监控技术的融合，实现了流量监测与水流状态可视化的结合，为水文分析提供了更丰富的数据源。

在线监测系统的集成化发展是现代自动化流量测验技术的另一重要进展。集成化在线监测系统以数据采集、传输、处理、分析为核心，整合了流速测量设备、水位测量设备、雨量测量设备等多种传感器，能够实现流量、水位、雨量等多个水文要素的同步监测。系统通过物联网技术将监测数据实时传输至数据中心，经数据处理软件进行分析、计算与存储，形成完整的水文监测数据成果。集成化在线监测系统的应用，实现了流量测验的常态化、连续化，能够及时捕捉水文情势的变化，为水资源管理、洪水预警预报等工作提供了精准、及时的数据支撑。此外，随着云计算与边缘计算技术的应用，在线监测系统的数据处理能力大幅提升，能够实现监测数据的实时分析与智能预警，进一步提升了水文测验工作的智能化水平。

（三）特殊环境下流量测验技术的突破

在高寒地区、喀斯特地貌、高含沙河流、潮汐河口等特殊环境下，水文情势复杂，传统流量测验技术往往难以适用，成为流量测验领域的难点问题。近年来，针对这些特殊环境的水文特征，相关领域开展了一系列技术创新与方法探索，实现了特殊环境下流量测验技术的突破。

在高寒地区，低温、冰冻等恶劣环境会导致传统测流设备无法正常工作，测验人员作业难度大。针对这一问题，研发了适用于高寒环境的低温-resistant 测流设备，采用特殊材料与保温技术，确保设备在低温环境下能够稳定运行。同时，创新了冰期流量测验方法，结合冰厚观测、冰下流速测量等技术，建立了冰期流量计算模型，实现了冰期流量的精准测算。此外，无人化测流系统在高寒地区的应用，有效避免了测验人员在恶劣环境下的作业风险，保障了冰期流量监测工作的顺利开展。

喀斯特地貌区流域地表破碎、地下河发育，水流呈现出地表径流与地下径流并存的复杂特征，传统流量测验技术难以全面捕捉流域的总流量。针对这一问题，

形成了“地表-地下”协同测流技术体系,通过地表水文站网与地下河监测点的合理布设,实现了地表径流与地下径流的同步监测。同时,利用遥感技术、地质雷达技术等手段,精准识别地下河的分布范围与走向,为地下径流监测点的布设提供了科学依据。此外,结合水文模型与数值模拟技术,整合地表与地下监测数据,实现了流域总流量的精准估算,有效解决了喀斯特地貌区流量测验的难题。

高含沙河流具有水流含沙量大、水流运动规律复杂、测流设备易磨损等特点,传统测流技术测量精度低、设备维护成本高。针对这一问题,研发了适用于高含沙水流的专用测流设备,采用耐磨、耐腐蚀材料,提升了设备的使用寿命与稳定性。同时,创新了高含沙水流流量测验方法,通过分析含沙量对水流流速、断面形态的影响,建立了含沙量修正模型,实现了高含沙水流流量的精准测算。此外,声学测流技术与电磁测流技术在高含沙河流中的应用,有效避免了传统接触式测流设备易被泥沙磨损的问题,进一步提升了高含沙河流流量测验的可靠性。

二、泥沙测验技术与方法进展

泥沙测验是水文水资源测验的重要组成部分,其目的是通过对水体中泥沙含量、级配等指标的监测,掌握泥沙的输移规律,为水资源开发利用、水利工程设计及运行、水生态环境保护等工作提供科学依据。泥沙测验技术的发展与流量测验技术相呼应,经历了从传统人工采样分析到现代自动化、智能化监测的演进过程。近年来,随着对泥沙输移规律认识的不断深化以及新兴技术的广泛应用,泥沙测验技术与方法在采样技术、分析技术以及监测系统集成等方面实现了显著突破。本节将从传统泥沙测验技术的优化、现代自动化泥沙测验技术的创新以及泥沙测验技术的集成化发展三个维度,系统阐述泥沙测验技术与方法的进展。

(一) 传统泥沙测验技术的优化

传统泥沙测验技术以人工采样、实验室分析为核心,主要包括悬移质采样、推移质采样以及泥沙颗粒级配分析等关键环节。此类方法技术成熟、操作规范,但存在采样效率低、劳动强度大、分析周期长等问题。近年来,针对这些问题,相关领域开展了一系列优化工作,提升了传统泥沙测验技术的效率与精度。

在悬移质采样技术优化方面,核心进展体现在采样器的改进与采样方法的规范化。传统悬移质采样器存在采样效率低、采样精度受水流扰动影响大等缺陷,新型悬移质采样器通过优化采样口设计、提升采样器的稳定性,有效减少了水流

扰动对采样精度的影响。同时,针对不同水文条件下的采样需求,研发了不同类型的专用采样器,如适用于高含沙水流的防堵采样器、适用于中小河流的便携式采样器等,拓展了采样器的适用范围。此外,通过制定完善的采样技术规范,明确了采样点布设、采样频次、样品保存与运输等环节的技术要求,减少了人为误差,提升了采样数据的可靠性。

推移质采样是传统泥沙测验中的难点环节,其优化进展主要体现在采样器的创新与采样方法的改进。传统推移质采样器存在采样效率低、易被泥沙堵塞、采样代表性差等问题,新型推移质采样器采用了更合理的结构设计,提升了采样器的抗冲击能力与采样效率。例如,改进型赫尔兹型采样器、压差式采样器等新型采样器能够更好地适应复杂的水流条件,准确采集推移质泥沙样品。同时,结合水文观测数据与流域下垫面特征,优化了推移质采样点的布设方案,通过增加采样断面与采样点数量,提升了采样数据的代表性。此外,通过引入统计学方法,对推移质输沙量进行估算,减少了采样数据的离散性,提升了估算精度。

在泥沙颗粒级配分析技术优化方面,主要进展体现在分析方法的改进与分析设备的升级。传统泥沙颗粒级配分析方法主要包括筛分法、比重计法等,这些方法操作繁琐、分析周期长,难以满足大批量样品分析的需求。新型激光粒度分析仪的应用实现了泥沙颗粒级配分析的自动化与快速化,该设备基于激光散射原理,能够在短时间内完成对泥沙样品颗粒级配的精准分析,分析范围广、精度高,有效提升了分析效率与精度。同时,通过建立激光粒度分析与传统分析方法之间的对比校正模型,解决了不同分析方法之间数据差异的问题,确保了分析数据的一致性与可靠性。

（二）现代自动化泥沙测验技术的创新

随着自动化技术、传感技术以及信息技术的快速发展,现代泥沙测验技术朝着自动化、智能化、实时化的方向发展,形成了以在线监测、非接触式监测为核心的新型测验技术体系,有效突破了传统泥沙测验技术的局限性,大幅提升了泥沙测验的效率与精度。

在线泥沙监测技术是现代自动化泥沙测验技术的核心组成部分,其通过在测验断面布设自动化采样与分析设备,实现了泥沙含量与颗粒级配的实时、连续监测。在线泥沙监测系统主要由采样单元、分析单元、数据传输单元以及数据处理单元组成。采样单元通过自动化采样器定时采集水体样品,送至分析单元进行泥

沙含量与颗粒级配分析；分析单元采用激光粒度分析、超声波分析等先进技术，实现了分析过程的自动化与快速化；数据传输单元通过物联网技术将监测数据实时传输至数据中心；数据处理单元对监测数据进行分析、计算与存储，形成完整的监测成果。近年来，在线泥沙监测技术的创新进展主要体现在设备性能的提升与系统稳定性的增强。新型在线监测设备测量精度更高、响应速度更快，能够适应复杂的水文环境；系统采用冗余设计与故障自诊断技术，提升了系统的稳定性与可靠性，确保了监测工作的连续开展。

非接触式泥沙监测技术是近年来泥沙测验领域的研究热点，其凭借无需接触水体、不受水流含沙量影响、监测范围广等优势，在复杂水文环境下的泥沙监测中得到广泛应用。非接触式泥沙监测技术主要包括遥感监测技术、雷达监测技术以及声学监测技术等。遥感监测技术通过卫星或无人机搭载的遥感传感器获取水体的光谱信息，结合泥沙的光谱特征模型，反演出水体的泥沙含量。近年来，高分辨率遥感技术的发展提升了遥感监测的空间分辨率与精度，能够实现小范围流域泥沙含量的精准监测；无人机遥感技术的应用则实现了泥沙监测的灵活性与时效性，适用于应急监测与小流域监测。雷达监测技术与声学监测技术通过发射雷达波或声波，利用泥沙颗粒对波的散射与衰减效应，反演出水体的泥沙含量与颗粒级配。此类技术能够实现泥沙含量的实时监测，适用于河流、湖泊、水库等多种水体的泥沙监测。

（三）泥沙测验技术的集成化发展

泥沙测验技术的集成化发展是现代泥沙测验技术的重要趋势，其通过整合多种测验技术与设备，实现了泥沙监测的多维度、全方位覆盖，提升了泥沙测验的综合能力。泥沙测验集成化系统通常整合了在线监测技术、非接触式监测技术以及传统采样分析技术，能够实现不同尺度、不同精度泥沙监测数据的互补与验证。

流域尺度泥沙监测集成系统是集成化发展的典型代表，该系统通过在流域内合理布设在线监测站、遥感监测点以及传统水文监测站，构建了“空-天-地”一体化的泥沙监测网络。空中层面通过卫星与无人机遥感技术实现流域尺度泥沙分布的宏观监测；地面层面通过在线监测站实现重点断面泥沙含量与颗粒级配的实时、连续监测；传统水文监测站则通过人工采样分析实现对监测数据的验证与补充。通过数据融合技术，整合不同层面的监测数据，实现了对流域泥沙输移规律的全面掌握。此类系统的应用，为流域水资源管理、水生态环境保护以及水土

保持工作提供了全面、精准的数据支撑。

水利工程泥沙监测集成系统则针对水利工程运行过程中的泥沙监测需求，整合了多种监测技术与设备，实现了工程区泥沙含量、颗粒级配、泥沙淤积与冲刷等指标的同步监测。该系统通过在水库、大坝、渠道等关键部位布设监测设备，实时监测工程运行过程中的泥沙动态，为工程的设计优化、运行调度以及安全评估提供科学依据。例如，在水库泥沙监测中，集成系统通过在线监测技术实时监测入库与出库泥沙含量，结合遥感技术监测水库泥沙淤积分布，通过数值模拟技术预测泥沙淤积演变趋势，为水库的清淤调度与水资源优化配置提供技术支持。

第三节 水文测验仪器比测与精度控制

一、水文测验仪器比测的实施流程与关键技术要点

（一）比测方案的制定

比测方案的制定是仪器比测工作顺利开展的前提，其内容的完整性与科学性直接决定了比测结果的可靠性与有效性。制定比测方案时，首先需明确比测目的与核心任务，根据比测目的确定比对对象、比对范围及比对指标，确保比测工作能够针对性地解决实际问题。例如，若比测目的是验证某新型流速仪的测量精度，则需明确比对对象为该新型流速仪与基准流速仪，比对指标为流速测量值的误差、相对误差等关键精度指标。

在明确比测目的与任务的基础上，需合理选择基准仪器与比对环境。基准仪器的选择应遵循权威性、稳定性与适用性原则，优先选用经国家计量认证机构校准合格、在有效期内且性能稳定的标准仪器，确保基准仪器的测量结果具有可靠性与可比性。比对环境的选择需结合实际测验需求，尽可能模拟仪器的实际应用场景，同时需考虑环境因素对测量结果的影响，避免因环境条件过于特殊导致比测结果不具备代表性。例如，开展河流流速仪比测时，应选择水流状态稳定、断面形态规则的河段作为比对区域，避免在急流、回流或断面不规则的区域开展比对，确保比对结果能够真实反映仪器在常规测验环境下的性能。

比测方案还应明确比测的技术要求与实施步骤，包括比测的样本量、测量频次、数据记录要求等内容。样本量的确定需综合考虑仪器测量误差的分布特征与

统计分析的可靠性要求, 样本量过小可能导致统计结果存在偏差, 无法准确反映仪器的真实性能; 样本量过大则会增加比测工作的成本与工作量, 降低工作效率。一般而言, 应根据比测仪器的类型与比对指标的特性, 结合统计学原理确定合理的样本量。测量频次的确定需考虑水文要素的变化规律, 对于流速、流量等变化较快的水文要素, 应适当提高测量频次, 确保能够捕捉到不同水文条件下仪器的测量性能; 对于水位、水质等变化相对缓慢的水文要素, 则可适当降低测量频次, 但需保证覆盖主要的变化区间。此外, 方案还应明确数据记录的内容与格式, 包括测量时间、测量人员、仪器编号、测量结果及环境条件等信息, 确保数据的可追溯性。

(二) 比测实施与数据采集

比测实施阶段是按照既定方案开展实际比对测量的核心环节, 该阶段的关键是严格控制测量条件, 确保基准仪器与待评价仪器在相同的测量环境、相同的测量时段及相同的测量点位下开展测量, 最大限度地减少外界干扰因素对测量结果的影响。在比测实施前, 需对所有参与比测的仪器进行全面检查与预处理, 包括仪器的外观检查、状态校准、参数设置等工作。对于需要预热的仪器, 应按照仪器操作规范进行充分预热; 对于需要进行零点校准的仪器, 应在测量前完成零点校准, 确保仪器处于正常的工作状态。同时, 需对测量区域的环境条件进行详细勘察与记录, 包括水流速度、水深、水温、风向风速等环境参数, 为后续数据处理与误差分析提供基础信息。

在数据采集过程中, 应严格遵循同步测量原则, 确保基准仪器与待评价仪器的测量动作同步进行, 避免因测量时间差导致的测量误差。对于自动化测量仪器, 可通过系统同步控制实现测量时间的一致性; 对于手动操作仪器, 则需由专业测量人员协同配合, 严格把控测量时机。同时, 应按照比测方案中规定的测量频次与样本量开展数据采集工作, 确保测量数据能够覆盖不同的水文条件与环境状态。在数据记录过程中, 应坚持实时记录、规范记录的原则, 避免数据遗漏或记录错误, 对于出现的异常数据, 应及时标注并记录异常情况的发生时间、环境条件等信息, 为后续数据审核与处理提供依据。

此外, 在比测实施过程中, 还应加强质量控制与安全管理。质量控制方面, 需定期对测量仪器的工作状态进行检查, 确保仪器在整个比测过程中始终处于稳定状态; 同时, 可通过重复测量的方式验证数据的重复性与可靠性, 对于重复性

较差的数据，应及时分析原因并采取相应的处理措施。安全管理方面，需根据测量区域的环境特点制定相应的安全防护措施，特别是在野外水文测验区域，应注意防范水流冲击、恶劣天气等安全风险，确保测量人员与仪器设备的安全。

（三）比测数据处理与结果分析

比测数据处理是对采集到的原始数据进行整理、审核与分析的过程，其目的是剔除异常数据、计算测量误差，进而评估待评价仪器的测量性能。数据处理的首要环节是数据审核，审核内容包括数据的完整性、规范性与合理性。对于缺失的记录，应及时查找原因，若为偶然因素导致的缺失，可根据相邻数据的变化规律进行合理补全；若为系统性因素导致的缺失，则应剔除该组数据。对于记录不规范的数据，如单位错误、格式错误等，应进行修正；对于明显不合理的数据，如超出仪器测量范围的数据、与相邻数据差异过大的数据，应结合测量时的环境条件与仪器工作状态进行分析，确认无误后剔除。

数据审核完成后，进入误差计算阶段。误差计算的核心是将待评价仪器的测量值与基准仪器的测量值进行比对，计算各类误差指标，包括绝对误差、相对误差、系统误差、随机误差等。绝对误差是待评价仪器测量值与基准仪器测量值的差值，能够直观反映单次测量的误差大小；相对误差是绝对误差与基准仪器测量值的比值，用于衡量误差的相对程度，便于不同量级测量数据的误差对比；系统误差是在相同条件下多次测量中保持不变或按一定规律变化的误差，其产生原因多与仪器的设计缺陷、校准不当等因素有关，可通过统计分析方法分离与估算；随机误差是在相同条件下多次测量中随机变化的误差，其产生原因多与外界环境的随机干扰、仪器的偶然波动等因素有关，可通过计算标准差、方差等统计指标衡量其离散程度。

在误差计算的基础上，需对比测结果进行综合分析，评估待评价仪器的测量性能是否满足水文测验技术规范的要求。分析内容包括误差的分布特征、误差随水文条件的变化规律、仪器的稳定性等。若待评价仪器的测量误差在规范允许的范围内，且误差分布均匀、无明显的系统误差，说明其测量性能合格，可用于实际水文测验工作；若测量误差超出规范允许范围，或存在明显的系统误差，则需分析误差产生的原因，提出针对性的改进措施，如仪器校准、参数调整等，经重新比测合格后方可投入使用。同时，通过比测结果分析，还可总结不同仪器的适用条件与使用注意事项，为仪器的优化选型与合理使用提供参考。

二、水文测验精度控制的核心体系与实现路径

（一）精度控制的核心内涵与基本原则

水文测验精度控制是指在水文测验全过程中，通过一系列技术措施与管理手段，控制各类误差来源，确保测验成果精度满足规定要求的综合性工作体系。其核心目标是将测验误差控制在允许范围内，保障测验数据的准确性、可靠性与可比性，为水文水资源分析评价与管理决策提供高质量的数据支撑。与仪器比测侧重于仪器本身的性能验证不同，精度控制贯穿于水文测验的整个流程，涵盖仪器选型、测验方案设计、现场测量、数据处理等各个环节，是一项系统性、全过程的质量管控工作。

实现水文测验精度控制，需遵循以下基本原则：一是系统性原则，精度控制应覆盖测验全过程，综合考虑仪器性能、测验方法、环境条件、人员操作等各类影响因素，构建全方位的精度控制体系，避免因单一环节的疏漏导致测验精度下降；二是针对性原则，不同水文要素的测验方法、误差来源存在差异，精度控制措施应结合具体测验项目的特点，针对性地解决主要误差来源，提高精度控制的有效性；三是规范性原则，精度控制工作应严格遵循国家及行业相关的水文测验技术规范与标准，确保各项控制措施的实施符合法定要求，测验成果具有可比性与权威性；四是经济性原则，在保障测验精度满足要求的前提下，应合理选择精度控制措施，平衡精度要求与工作成本，避免过度追求高精度导致资源浪费。

（二）精度控制的核心环节与技术措施

仪器选型与校准是精度控制的基础环节。在仪器选型阶段，应根据测验项目的精度要求、测验区域的水文条件，选择性能稳定、精度可靠且符合规范要求的测验仪器。对于需要计量认证的仪器，必须选用经国家计量认证机构校准合格的产品，并确保仪器在有效期内使用。在仪器使用前，需按照仪器操作规范进行全面校准，包括零点校准、量程校准等，确保仪器的测量精度符合要求。同时，应建立仪器定期校准制度，根据仪器的使用频率、工作环境及规范要求，确定合理的校准周期，定期对仪器进行校准维护，及时发现并解决仪器性能下降问题。

测验方案设计是精度控制的关键环节。合理的测验方案能够有效减少系统误差，提高测验精度。在测验方案设计过程中，应根据水文要素的变化规律与测验精度要求，确定合理的测验断面、测验点位、测量频次及样本量。例如，在流量

测验方案设计中,应选择断面形态规则、水流均匀稳定的测验断面,合理布置测流垂线与测点,确保测量数据能够全面反映断面流量的分布特征;在水位测验方案设计中,应选择水位变化平稳、不受风浪干扰的观测点位,确定合理的观测频次,确保能够准确捕捉水位的变化过程。同时,方案设计还应考虑环境因素对测验精度的影响,制定相应的抗干扰措施,如在风浪较大的区域设置防浪装置,减少风浪对水位测量的影响。

现场测量操作是精度控制的重要环节,操作人员的技术水平与操作规范性直接影响测验精度。因此,应加强对测量人员的专业培训,提高其技术水平与责任意识,确保测量人员能够熟练掌握仪器的操作方法与测验技术规范。在现场测量过程中,测量人员应严格按照测验方案与仪器操作规范开展工作,准确设置仪器参数、选择测量点位、记录测量数据。同时,应加强现场质量检查,通过重复测量、比对测量等方式验证测量数据的可靠性,及时发现并纠正操作过程中的错误。例如,在流速测量过程中,测量人员应确保流速仪的探头完全浸没在水中,且不受水流漩涡的影响,同时通过重复测量多次,验证测量数据的一致性。

数据处理与审核是精度控制的最后环节,能够有效剔除异常数据,减少随机误差对测验成果的影响。在数据处理过程中,应严格遵循规范的处理方法,采用科学的数据分析模型,确保数据处理结果的准确性。同时,应建立完善的数据审核制度,实行多级审核机制,对处理后的测验数据进行全面审核。审核内容包括数据的逻辑性、合理性、完整性,以及误差是否在允许范围内。对于审核发现的问题,应及时查找原因,采取相应的处理措施,如重新测量、修正数据等,确保最终的测验成果精度符合要求。

第四节 水文资料整编与信息化管理

一、水文资料整编的核心流程与关键环节

水文资料整编是一项流程化、标准化的工作,需遵循严格的操作流程,确保各环节有序衔接、高效推进。随着水文技术的发展,整编流程已逐步从传统的人工操作转向半自动化、自动化处理,但核心流程与关键环节仍保持相对稳定。明确水文资料整编的核心流程与关键环节,对于提升整编效率、保障整编质量具有

重要意义。

（一）水文资料整编的核心流程

完整的水文资料整编流程主要包括原始数据收集、数据审核、数据整理与计算、成果制表、成果审核与验收五个核心环节，各环节层层递进、相互关联。首先是原始数据收集环节，该环节是整编工作的基础，需全面收集水文测验过程中产生的各类原始数据，包括测验记录、观测日志、仪器校验记录等，同时收集流域概况、测验断面资料、气象资料等辅助信息，为后续的审核与整理工作提供支撑。数据收集需确保全面性与准确性，避免因资料缺失影响整编工作的推进。其次是数据审核环节，这是保障整编质量的关键环节，需对收集的原始数据进行系统性审核，包括逻辑性审核、合理性审核、一致性审核等。逻辑性审核主要核查数据之间的逻辑关系，判断是否存在矛盾；合理性审核结合流域水文特性、季节变化等因素，判断数据是否符合水文规律；一致性审核核查数据的格式、计量单位等是否统一。再次是数据整理与计算环节，在审核通过的基础上，对原始数据进行整理与标准化计算，包括数据的订正、缺失数据的补充、水文要素特征值的计算等。例如，对水位数据进行基面换算，对流量数据进行单位换算，计算时段平均流量、年最大流量等特征值。然后是成果制表环节，将整理计算后的水文数据按照规范格式编制成水文成果表，包括水位表、流量表、降水量表等，清晰呈现水文要素的变化情况。最后是成果审核与验收环节，对整编形成的水文成果进行最终审核，核查成果的可靠性、完整性、一致性与规范性，审核通过后进行验收归档，形成正式的水文整编成果。

（二）水文资料整编的关键环节

在水文资料整编的全流程中，数据审核与数据整理计算是最为关键的两个环节，直接决定了整编成果的质量。数据审核环节需采用多层次、多维度的审核方式，确保原始数据的准确性。在实际工作中，审核工作可分为初审、复审与终审三个层次，初审主要由一线测验人员完成，核查原始数据的完整性与初步合理性；复审由专业整编人员完成，对数据的逻辑性、一致性进行深入审核；终审由专家团队完成，对审核中发现的问题进行最终核查与确认。同时，审核过程中需充分利用水文规律与专业经验，对异常数据进行重点核查，例如，暴雨时段的流量数据是否与降水量数据匹配，枯水期的水位数据是否符合流域枯水特性等。对于发现的错误数据，需及时追溯原始测验记录，查明原因并进行订正；对于可疑数据，

需结合测验工况、仪器状态等因素进行验证，确保数据的可靠性。

数据整理与计算环节需严格遵循相关标准与规范，采用科学合理的方法进行数据处理。对于不同类型的水文要素数据，需采用针对性的整理与计算方法，例如，流量数据整理需结合测验断面的特性，采用合适的流量计算方法，确保计算结果的准确性；降水量数据整理需对不同观测时段的降水数据进行汇总，计算时段降水量、日降水量、年降水量等特征值。同时，对于缺失的数据，需根据数据缺失的时段与原因，采用合理的补充方法，例如，对于短期缺失的水位数据，可采用相邻时段数据插值的方法补充；对于较长时段缺失的数据，可结合流域内其他观测站点的数据进行推算，但需确保补充方法符合水文规律，避免人为造成数据失真。此外，在数据整理与计算过程中，需做好详细的记录，包括数据订正说明、缺失数据补充方法、计算过程等，为后续的成果审核与追溯提供依据。

二、水文资料信息化管理的应用价值与发展趋势

水文资料信息化管理的构建与完善，不仅推动了水文资料管理模式的变革，也大幅提升了水文资料的应用价值，为水文事业的发展注入了新的动力。同时，随着先进技术的不断迭代与水文业务需求的不断升级，水文资料信息化管理也呈现出明确的发展趋势，未来将朝着更加智能化、精细化、协同化的方向发展。

（一）水文资料信息化管理的应用价值

水文资料信息化管理的应用价值主要体现在提升管理效率、强化数据共享、支撑科学决策、保障水安全等多个方面。在提升管理效率方面，信息化管理实现了水文资料的自动化采集、智能化处理与数字化存储，大幅减少了人工操作环节，缩短了整编周期，提升了管理效率。例如，传统的人工整编工作需要大量工作人员花费较长时间进行数据审核与整理，而信息化管理系统可自动完成数据审核、计算等工作，显著提升了整编效率。同时，数字化存储方式也大幅节省了存储空间，方便了数据的查询与追溯。

在强化数据共享方面，信息化管理体系通过构建网络化的数据共享平台，打破了水文资料管理的部门壁垒与地域限制，实现了水文资料的跨部门、跨区域共享。相关部门与单位可通过共享平台便捷地获取所需的水文资料，避免了重复测验与数据冗余，提升了水文资料的利用效率。例如，水资源管理部门、水利工程建设单位、气象部门等可通过共享平台获取统一的水文数据，为水资源配置、水

利工程设计、气象预报等工作提供数据支撑,实现了水文资料的最大化利用。

在支撑科学决策方面,信息化管理体系借助大数据、人工智能等技术,实现了对水文数据的深度分析与挖掘,能够精准识别水文变化趋势,预测水文灾害风险,为水资源管理、水旱灾害防治等工作提供科学的决策支撑。例如,通过对长期水文数据的分析,可精准掌握流域水资源的时空分布规律,为水资源的合理配置、节约用水等政策的制定提供依据;通过对实时水文数据的监测与分析,可及时预警洪水、干旱等水文灾害,为灾害防控决策提供时间保障,提升灾害防控的科学性与有效性。

在保障水安全方面,水文资料信息化管理为水安全保障体系的构建提供了核心数据支撑。通过对水文要素的实时监测与精准分析,可全面掌握流域的水文情势,及时发现水资源短缺、水污染等问题,为水安全防控工作提供有力保障。例如,通过对水质数据的实时监测与分析,可及时发现水质异常情况,追溯污染源头,为水污染防治工作提供精准指引;通过对水资源总量的动态监测与分析,可合理调控水资源利用,保障城乡供水安全,为经济社会的可持续发展提供水安全保障。

(二) 水文资料信息化管理的发展趋势

未来,水文资料信息化管理将朝着智能化、精细化、协同化、智慧化的方向发展,不断提升管理水平与应用价值。在智能化方面,将进一步融合人工智能、机器学习等先进技术,实现水文资料的全流程智能化处理。例如,通过机器学习算法不断优化数据审核模型,提升异常数据识别的准确性与效率;利用人工智能技术实现水文成果的自动生成与智能分析,减少人工干预,提升处理精度。同时,智能化技术还将应用于水文预测预警,实现对水文灾害的精准预测,提升灾害防控的主动性。

在精细化方面,将进一步提升水文资料管理的精细化程度,实现对水文要素的精准监测与精细化处理。随着测验技术的发展,水文监测将更加精准,获取的水文数据将更加详细,信息化管理系统将能够对各类细粒度水文数据进行高效处理与分析,满足不同领域对水文资料的精细化需求。例如,针对小流域、支流等区域的水文监测数据,将实现精准的整理与分析,为小流域治理、区域水资源管理等工作提供精细化的数据支撑。

在协同化方面,将进一步加强水文资料信息化管理体系与其他相关系统的协同融合,构建跨部门、跨领域的协同管理平台。例如,加强与气象、水利、环保、

国土等部门的系统对接,实现水文数据与气象数据、环保数据、国土数据的融合分析,提升综合决策能力;加强流域内不同区域水文管理系统的协同,实现全流域水文资料的统一管理与联合分析,为流域水资源统筹管理提供支撑。同时,还将推动国际间的水文资料共享与协同,提升全球水文灾害防控的协同能力。

在智慧化方面,将构建智慧水文资料管理体系,实现水文资料的智慧化采集、智慧化处理与智慧化应用。通过整合物联网、大数据、云计算、人工智能等技术,构建全域覆盖、智能感知的水文监测网络,实现水文数据的实时、精准采集;借助智慧分析平台,实现对水文数据的深度挖掘与智能分析,为水资源精细化管理、水旱灾害精准防控等工作提供智慧决策支撑;通过智慧服务平台,为各类用户提供个性化、智能化的水文服务,推动水文资料的全民共享与应用。智慧化发展将成为水文资料信息化管理的核心方向,助力水文事业实现高质量发展。

综上所述,水文资料整编与信息化管理是水文水资源测验工作的重要组成部分,其质量与效率直接影响水文工作的科学性与有效性。水文资料整编需严格遵循可靠性、完整性、一致性、规范性的基本要求,通过系统的流程与关键环节把控,确保整编成果的质量;水文资料信息化管理则通过构建完善的核心架构,实现了水文资料的高效管理与充分利用,具有重要的应用价值。未来,随着先进技术的不断融合与应用,水文资料整编与信息化管理将朝着更加智能化、精细化、协同化、智慧化的方向发展,为水资源管理、水旱灾害防治、水生态保护等工作提供更加有力的支撑,助力水文事业实现现代化转型。

第七章 水文预报模型原理与综合应用

第一节 水文预报模型基本原理与分类

一、水文预报模型基本原理

水文预报模型的构建与应用，核心依托于水文循环的内在规律，同时融合了气象学、水动力学、统计学等多学科的基础理论。其本质是通过对水文过程的简化与抽象，建立输入、输出变量及中间状态变量之间的关联关系，从而实现对未来水文情势的预测。不同类型的水文预报模型，在原理表述与实现路径上存在差异，但均以水文过程的客观规律为根本遵循，核心原理可归纳为水文过程的概化、变量关系的构建以及预报不确定性的把控三个核心层面。

（一）水文过程的概化原理

自然水文过程是一个受气象、下垫面、人类活动等诸多因素综合影响的复杂非线性过程，涉及降水、截留、下渗、蒸发、产流、汇流等多个子过程，各子过程之间相互关联、相互作用，形成了复杂的嵌套关系。直接对完整的自然水文过程进行精准描述与预测，在技术上存在极大难度。因此，水文预报模型构建的首要步骤是对自然水文过程进行概化。

水文过程概化是指在不改变水文过程核心特征与主导规律的前提下，通过忽略次要因素、合并相似过程、简化边界条件等方式，将复杂的自然水文过程转化为可量化、可模拟的简化过程。概化的核心目标是在模型的简化程度与模拟精度之间寻求平衡——过度简化会导致模型无法反映水文过程的关键特征，降低预报精度；过度复杂则会增加模型参数校准的难度，提升数据需求门槛，同时放大模型的不确定性。

在概化过程中，需重点把握水文过程的主导因素与核心环节。例如，在产流过程概化中，需根据区域下垫面特征（如土壤类型、植被覆盖、地形地貌等），确定影响下渗与产流的主导因素，忽略局部小范围的下垫面差异；在汇流过程概化中，可将复杂的流域水系简化为具有特定拓扑结构的河网，将分散的汇流过程

整合为坡面汇流与河道汇流两个核心环节。通过合理概化，将自然水文过程转化为一系列可描述、可计算的模型单元，为后续变量关系的构建提供基础。

（二）变量关系的构建原理

变量关系的构建是水文预报模型的核心内容，其本质是通过数学方法或逻辑规则，建立模型输入变量与输出变量之间的关联。其中，输入变量通常为可观测、可获取的基础数据，主要包括气象数据（如降水、气温、蒸发量等）、下垫面数据（如流域面积、土壤含水量、植被覆盖率等）以及历史水文数据（如流量、水位等）；输出变量则是预报目标变量，如未来某一时刻的流量、水位、洪峰出现时间等；部分复杂模型还会引入中间状态变量，用于描述水文过程的中间演变特征，如土壤含水量、河道蓄水量等，以提升变量关系的合理性与模型的模拟精度。

变量关系的构建方式取决于对水文过程的认知程度与建模思路。从认知逻辑来看，主要可分为两类：一类是基于对水文过程物理机制的深入认知，通过水动力学、热力学等基础理论推导得出变量之间的物理方程，这类关系构建方式强调对水文过程内在规律的精准刻画；另一类是基于对历史数据的统计分析，通过挖掘输入与输出变量之间的统计关联，构建经验性或统计性的变量关系，这类方式不强调对物理机制的深入解析，而是依托数据的统计规律实现预测。

无论采用何种构建方式，变量关系都需满足两个核心要求：一是合理性，即变量关系需符合水文过程的客观规律，不能与已知的水文原理相违背；二是适用性，即变量关系需适用于特定的流域特征与水文情势，在不同的时空尺度下具有一定的稳定性。在实际建模过程中，变量关系的构建往往需要结合理论推导与实际数据验证，通过不断优化调整，确保模型能够准确反映输入与输出变量之间的关联。

（三）预报不确定性的把控原理

水文预报过程中存在不可避免的不确定性，这种不确定性贯穿于模型构建与应用的全过程，主要来源于三个方面：一是输入数据的不确定性，包括气象观测数据的误差、下垫面数据的空间异质性导致的参数代表性误差、历史水文数据的缺失与偏差等；二是模型结构的不确定性，即水文过程概化与变量关系构建无法完全复刻自然水文过程，存在一定的简化偏差；三是参数校准的不确定性，模型参数的取值是基于历史数据校准得到的，其取值精度与适用性受到历史数据样本量、样本代表性以及校准方法的影响。

因此,水文预报模型的基本原理不仅包括水文过程的概化与变量关系的构建,还包括对预报不确定性的把控。不确定性把控的核心目标是识别不确定性的来源与影响程度,通过合理的技术手段降低不确定性对预报结果的影响,提升预报结果的可靠性。

常见的不确定性把控手段包括:一是提升输入数据的精度,通过优化观测网络、采用数据同化技术整合多源数据等方式,降低输入数据的误差;二是优化模型结构,通过引入多源信息、改进概化方法等方式,提升模型对水文过程的刻画能力,降低结构不确定性;三是采用合理的参数校准方法,通过扩大样本量、采用多目标校准策略等方式,提升参数取值的合理性;四是开展预报结果的不确定性分析,通过区间预报、概率预报等方式,量化预报结果的不确定性范围,为决策提供更全面的参考信息。

二、水文预报模型的分类

随着水文科学与信息技术的发展,水文预报模型的种类不断丰富,不同模型在建模思路、适用场景、数据需求等方面存在显著差异。为了更好地理解、选择与应用水文预报模型,需要建立科学合理的分类体系。根据不同的分类标准,水文预报模型可划分为不同的类型。结合水文预报的实践需求与模型的核心特征,常见的分类标准主要包括建模思路、预报对象与时空尺度、输入数据类型等,不同分类标准下的模型类型各有侧重,且相互关联。

(一) 按建模思路分类

建模思路是区分水文预报模型最核心的标准之一,根据对水文过程认知程度与建模逻辑的差异,可将水文预报模型分为物理机制模型、经验统计模型以及混合模型三大类。这三类模型在原理基础、参数意义、适用范围等方面存在本质区别,分别适用于不同的水文情势与数据条件。

1. 物理机制模型

物理机制模型,又称概念性模型或分布式模型,其核心建模思路是基于对水文过程物理机制的深入认知,通过演绎推理的方式构建模型。这类模型以水文循环的物理规律为基础,将水文过程分解为一系列具有明确物理意义的子过程(如截留、下渗、产流、汇流等),并针对每个子过程,基于水动力学、热力学等基础理论,建立相应的物理方程,最终通过子过程的耦合实现对整个水文过程的模

拟与预报。

物理机制模型的核心优势在于具有明确的物理意义，模型参数通常与流域的物理特征（如土壤厚度、孔隙率、河道糙率等）直接相关，因此具有较强的时空迁移能力，能够适应下垫面条件与水文情势的变化。同时，由于其基于物理机制构建，能够更好地解释水文过程的演变规律，便于开展情景模拟与趋势预测。但这类模型也存在明显的局限性：一是对数据的需求较高，需要获取详细的下垫面数据与高精度的气象、水文观测数据；二是模型结构复杂，参数数量较多，参数校准的难度较大，需要耗费大量的人力与时间成本；三是对于一些物理机制尚未完全明确的水文子过程，仍需采用概化或经验公式进行描述，一定程度上影响了模型的模拟精度。

根据对流域空间异质性的考虑程度，物理机制模型又可进一步分为集总式模型与分布式模型。集总式模型将整个流域视为一个均匀的整体，忽略下垫面与气象数据的空间异质性，模型参数为流域的平均化参数；分布式模型则充分考虑流域的空间异质性，将流域划分为若干个具有相似下垫面特征的计算单元，每个单元采用独立的参数与方程进行模拟，通过单元之间的水量交换实现整个流域的水文过程模拟。分布式模型能够更精准地刻画水文过程的空间分布特征，但模型结构与计算过程更为复杂，对计算资源与数据精度的要求更高。

2. 经验统计模型

经验统计模型的建模思路与物理机制模型相反，其核心是基于对历史水文、气象数据的统计分析，通过归纳推理的方式构建输入变量与输出变量之间的统计关联，而不强调对水文过程物理机制的深入解析。这类模型的构建基础是“历史重演性”假设，即认为未来的水文情势将在一定程度上重复历史规律，因此可以通过挖掘历史数据中的统计规律实现对未来的预报。

经验统计模型的核心优势在于模型结构简单、参数数量少、计算效率高，对数据的需求相对较低，仅需要获取足够的历史观测数据即可构建模型。同时，这类模型的参数校准过程简单，易于操作，适用于数据基础薄弱、水文过程复杂且物理机制不明确的流域。但经验统计模型的局限性也十分显著：一是模型缺乏明确的物理意义，参数多为统计拟合参数，无法反映流域的物理特征，因此时空迁移能力较差，当流域下垫面条件或水文情势发生较大变化时，模型的预报精度会显著下降；二是模型的预报结果受历史数据样本的影响较大，若历史数据样本量

不足、代表性较差,会导致模型的统计规律不可靠,进而影响预报精度;三是模型无法解释水文过程的演变机制,仅能实现“黑箱”式的预测,不便于开展情景模拟与趋势分析。

常见的经验统计模型包括线性回归模型、多元回归模型、时间序列模型(如自回归滑动平均模型)、单位线法、相关图法等。这类模型在短期水文预报、数据基础薄弱区域的水文预报中应用较为广泛,在实际应用中通常需要结合最新的观测数据对模型参数进行动态更新,以提升模型的适应性。

3. 混合模型

混合模型是融合物理机制模型与经验统计模型建模思路的一类模型,其核心目标是充分发挥两类模型的优势,弥补各自的局限性。这类模型的构建思路通常有两种:一种是在物理机制模型中引入经验统计方法,用于解决物理机制不明确的子过程建模问题,或用于优化模型参数;另一种是在经验统计模型中融入流域物理特征参数,提升模型的物理合理性与时空迁移能力。

混合模型的核心优势在于兼顾了物理机制模型的物理合理性与经验统计模型的简洁高效性,能够在数据基础有限的情况下,既保证模型对水文过程核心规律的刻画,又提升模型的计算效率与适应性。例如,在分布式物理机制模型中,对于下渗过程的模拟,若物理机制尚未完全明确,可采用经验统计公式替代部分物理方程,以简化模型结构;在时间序列模型中,引入流域面积、土壤含水量等物理特征参数作为输入变量,提升模型的时空迁移能力。

随着信息技术的发展,混合模型的内涵不断丰富,近年来兴起的机器学习模型在一定程度上也属于混合模型的范畴。机器学习模型通过数据驱动的方式挖掘变量之间的复杂非线性关系,同时可以融入流域物理特征参数作为输入变量,既具备经验统计模型的数据驱动优势,又通过物理特征参数的引入提升了模型的物理合理性,在水文预报领域的应用越来越广泛。

(二) 按预报对象与时空尺度分类

根据预报对象与时空尺度的差异,水文预报模型可划分为不同的类型,这一分类标准更贴合水文预报的实践需求,便于根据具体的预报任务选择合适的模型。

1. 按预报对象分类

水文预报的对象涵盖了水文循环过程中的各类水文要素,根据预报对象的不同,可将水文预报模型分为流量预报模型、水位预报模型、降水径流预报模型、

蒸发预报模型、洪水预报模型、枯水预报模型等。

流量预报模型与水位预报模型是最常见的两类水文预报模型，其预报对象分别为河道流量与水位，是水资源调度、防洪决策的核心支撑模型。降水径流预报模型的预报对象是流域产流量，重点刻画降水与产流之间的关联关系，是流量预报与水位预报模型的基础。蒸发预报模型的预报对象是流域蒸发量，主要用于水资源平衡分析与干旱预警。洪水预报模型与枯水预报模型则是针对特殊水文情势的专项预报模型，其中洪水预报模型重点预报洪峰流量、洪峰出现时间、洪水过程线等洪水特征参数，用于防洪抢险决策；枯水预报模型则重点预报枯水期的流量、水位，用于水资源配置与干旱防控。

2. 按时空尺度分类

按时间尺度划分，水文预报模型可分为短期预报模型（预报时效小于3天）、中期预报模型（预报时效3-10天）、长期预报模型（预报时效10天-1年）以及超长期预报模型（预报时效大于1年）。不同时间尺度的预报模型，其建模思路与输入数据存在显著差异：短期预报模型通常以实时气象观测数据（如降水、气温）为主要输入，采用物理机制模型或经验统计模型，重点刻画短期水文过程的快速演变；中长期预报模型则更多依赖于气候预测数据，采用统计模型或耦合气候模型的水文模型，重点分析气候因素对水文过程的中长期影响；超长期预报模型主要用于水文趋势预测，通常结合气候变化情景与人类活动影响分析，采用物理机制模型或情景模拟模型。

按空间尺度划分，水文预报模型可分为流域尺度模型、区域尺度模型、河道尺度模型以及站点尺度模型。流域尺度模型以整个流域为模拟单元，重点刻画流域内的整体水文过程，用于流域水资源规划与防洪调度；区域尺度模型以多个相邻流域组成的区域为模拟单元，重点分析区域内的水文过程协同演变规律，用于区域水资源配置与水生态保护；河道尺度模型以特定河段为模拟单元，重点刻画河道内的水流运动过程，用于河道防洪调度与航运安全保障；站点尺度模型以单个水文观测站点为核心，重点预报站点处的水文要素变化，用于局部区域的水文监测与预警。

（三）按输入数据类型分类

输入数据是水文预报模型构建与运行的基础，根据输入数据类型的不同，水文预报模型可分为基于气象水文观测数据的模型、基于遥感数据的模型、基于同

化数据的模型等。

基于气象水文观测数据的模型是最传统、最常用的一类模型，其输入数据主要包括地面气象观测站的降水、气温、蒸发量等数据，以及水文观测站的流量、水位、土壤含水量等数据。这类模型的优势在于数据获取相对直接，精度可控，但其数据覆盖范围受观测站点分布的限制，在观测站点稀疏的区域，数据代表性较差。

基于遥感数据的模型是随着遥感技术发展兴起的一类模型，其输入数据主要包括卫星遥感获取的降水数据、植被覆盖数据、土壤含水量数据、地表温度数据等。这类模型的优势在于数据覆盖范围广，能够有效弥补地面观测站点的不足，适用于大面积、观测数据稀缺的区域。但遥感数据存在一定的空间分辨率与时间分辨率限制，数据精度受天气条件、传感器性能等因素影响较大，在实际应用中通常需要结合地面观测数据进行校准。

基于同化数据的模型是采用数据同化技术整合多源数据（如地面观测数据、遥感数据、数值预报数据等）作为输入的一类模型。数据同化技术能够充分融合不同来源数据的优势，降低单一数据的不确定性，提升输入数据的精度与空间覆盖度。这类模型的优势在于输入数据的可靠性更高，能够显著提升模型的预报精度，适用于对预报精度要求较高的场景。但数据同化技术的计算过程复杂，对计算资源的需求较高，且需要具备多源数据的获取与处理能力，应用门槛相对较高。

三、不同类型水文预报模型的对比与应用选择

不同类型的水文预报模型在建模思路、参数意义、数据需求、预报精度、适用范围等方面存在显著差异，不存在绝对最优的模型类型，只有最适合特定预报任务的模型。因此，在实际水文预报工作中，模型的选择需要综合考虑预报对象、时空尺度、数据基础、技术条件、决策需求等多方面因素，通过对不同模型的优势与局限性进行对比分析，选择最契合实际需求的模型。

从建模思路来看，物理机制模型适用于数据基础较好、下垫面条件复杂、需要开展情景模拟与趋势预测的场景，如大型流域的中长期洪水预报、水资源规划中的水文情势预测等；经验统计模型适用于数据基础薄弱、预报时效较短、对计算效率要求较高的场景，如小型流域的短期流量预报、观测站点稀疏区域的水文预报等；混合模型则适用于数据基础中等、需要兼顾预报精度与计算效率的场景，

如中型流域的中期水文预报、气候变化背景下的水文趋势预测等。

从时空尺度来看，短期、小尺度的水文预报可选择经验统计模型或结构简单的物理机制模型，能够在保证预报精度的同时提升计算效率；中长期、大尺度的水文预报则更适合选择物理机制模型或混合模型，能够更好地刻画水文过程的长期演变规律与空间分布特征。从预报对象来看，洪水预报通常需要选择能够精准刻画产汇流过程的物理机制模型或混合模型，以准确预报洪峰流量与洪水过程；枯水预报则可选择经验统计模型或结合气候因素的混合模型，重点分析枯水期水文要素的演变规律。

此外，模型的选择还需要考虑技术条件与决策需求。若具备较强的数据分析与计算能力，可选择结构复杂的分布式物理机制模型或混合模型；若技术条件有限，则应选择结构简单、操作便捷的经验统计模型。若决策需求强调预报结果的物理合理性与可解释性，应选择物理机制模型；若决策需求更注重预报效率与短期精度，则可选择经验统计模型。

综上所述，水文预报模型的分类体系为模型选择提供了重要参考，而模型的实际应用则需要结合具体的预报任务与现实条件，进行综合判断与优化选择。随着水文科学、信息技术与人工智能技术的不断发展，水文预报模型的分类体系也将不断丰富完善，模型的性能与适用性也将持续提升，为水文预报工作提供更加强有力的技术支撑。

第二节 模型参数确定、率定与验证方法

一、水文预报模型参数确定方法

水文预报模型参数的确定是模型构建的首要步骤，其核心目标是获取能够准确反映研究区域水文特征的参数初始值。不同类型的水文预报模型（如概念性模型、分布式模型）对应的参数特性存在差异，确定方法也需因地制宜。总体而言，参数确定方法可分为直接确定法与间接推断法两大类，两类方法各有适用场景，在实际应用中常相互配合使用。

（一）直接确定法

直接确定法是指通过实地勘测、观测数据统计分析等方式，直接获取模型参

数取值的方法。该方法的核心优势在于参数取值与研究区域的实际水文物理特性紧密关联，能够最大程度保证参数的物理合理性。在水文预报模型中，部分具有明确物理意义的参数可通过该方法直接确定，例如流域下垫面相关参数、土壤物理性质参数等。

对于流域下垫面参数，如流域面积、河长、比降等，可通过高精度地形图数字化处理、遥感影像解译等方式直接获取。借助地理信息系统技术，对研究区域的地形数据进行提取与分析，能够快速准确地得到此类参数的取值，且结果具有较高的客观性与可靠性。对于土壤物理性质参数，如土壤孔隙度、田间持水量等，可通过野外采样、室内试验等方式直接测定。通过在研究区域内布设典型采样点，采集不同深度、不同类型的土壤样本，利用专业试验设备测定样本的物理性质指标，进而确定模型中对应的参数取值。此外，对于降水、蒸发、径流等水文气象观测参数，可通过流域内的水文监测站网获取长期观测数据，经统计分析后直接作为模型输入参数或基础参数。

直接确定法的局限性在于其适用范围有限，仅适用于具有明确物理意义且可通过观测、试验手段直接获取的参数。对于部分反映水文过程复杂内在机制、难以直接观测的参数，该方法无法直接应用，需结合其他间接方法进行推断。

（二）间接推断法

间接推断法是指在无法通过直接观测或试验获取参数取值时，基于已有的水文观测数据、相似流域类比分析、经验公式估算等方式间接获取参数初始值的方法。该方法适用于那些物理意义相对模糊、难以直接量化的模型参数，是直接确定法的重要补充。

相似流域类比法是间接推断法中应用较为广泛的一种。其核心逻辑是：若两个流域在气候条件、下垫面特征、水文过程规律等方面具有较高的相似性，则其水文预报模型的参数取值也具有一定的相似性。在实际应用中，首先需筛选出与研究流域具有相似特征的参照流域，收集参照流域已校准的模型参数，然后结合研究流域与参照流域的差异的地方，对参照流域的参数进行适当修正，进而得到研究流域的参数初始值。该方法的关键在于相似流域的合理筛选，需建立多维度的相似性评价指标体系，确保类比结果的可靠性。

经验公式估算法是另一种常用的间接推断方法。基于长期的水文观测与研究，学术界已总结出大量针对不同水文参数的经验公式，这些公式通常以流域的基本

特征参数（如流域面积、平均坡度、植被覆盖率等）为自变量，通过回归分析等统计方法建立参数与自变量之间的量化关系。在实际应用中，只需获取研究流域的相关基本特征参数，代入对应的经验公式即可估算出模型参数的初始值。需要注意的是，经验公式具有较强的地域局限性，不同区域的水文特征存在差异，应用时需对经验公式的适用性进行验证，必要时进行参数修正。

此外，对于一些复杂的分布式水文模型，由于参数数量较多且空间异质性强，直接确定或通过简单类比、经验估算难以获取合理的初始参数场，可借助遥感数据反演、地理信息系统空间插值等技术手段，结合少量实测数据构建参数的空间分布初始场，为后续的参数率定工作奠定基础。

二、水文预报模型参数率定

水文预报模型参数率定是指在参数确定获取初始值的基础上，通过调整参数取值，使模型模拟结果与实际水文观测结果最大限度吻合的过程。该过程是连接模型理论与实际水文过程的关键桥梁，其核心目标是修正参数初始值的偏差，提升模型的拟合精度与适用性。参数率定需遵循科学的原则，按照规范的流程开展，同时合理选择适配的率定技术与方法。

（一）参数率定的核心原则

参数率定并非简单的参数取值调整，需遵循一定的核心原则，以确保率定结果的合理性与可靠性。首先是物理合理性原则，模型参数大多具有明确的物理意义，其取值范围存在客观限制。在率定过程中，无论模拟结果与观测结果的吻合程度如何，参数取值均不能超出其物理允许范围，否则会导致模型脱离实际水文过程，失去应用价值。例如，土壤含水量参数的取值不能大于土壤孔隙度，径流系数的取值不能大于 1。

其次是拟合精度与稳定性平衡原则，参数率定的核心目标是提升模型模拟结果与观测结果的拟合精度，但过度追求拟合精度可能导致参数过拟合。过拟合会使模型过度贴合观测数据中的随机误差，降低模型的泛化能力，当模型应用于新的水文情势预测时，预报精度会显著下降。因此，在率定过程中，需在保证拟合精度的同时，兼顾模型参数的稳定性，避免参数取值过度极端。

最后是对抗性原则，不同的水文预报目标对应的核心关注指标存在差异，参数率定需结合具体的预报目标开展。例如，针对防洪调度的水文预报模型，需重

点关注洪峰流量、洪峰出现时间等洪水特征指标的拟合精度；针对水资源评价的预报模型，则需重点关注径流总量、枯水期径流过程等指标的拟合效果。在率定过程中，需根据预报目标调整评价权重，确保率定结果适配实际应用需求。

（二）参数率定的基本流程

水文预报模型参数率定是一个系统性的过程，需按照规范的流程逐步开展，确保每一个环节的科学性与合理性。其基本流程主要包括率定数据准备、参数敏感性分析、参数优化调整、率定结果初步验证四个核心环节。

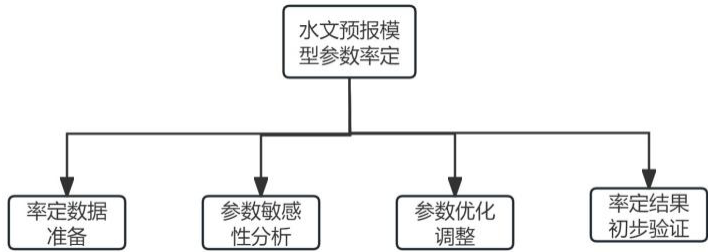


图 7-1 水文预报模型参数率定

率定数据准备是参数率定的基础工作，核心是筛选获取高质量的水文观测数据。率定数据需涵盖研究流域不同水文情势（如丰水期、平水期、枯水期）的观测结果，确保数据具有代表性，能够全面反映研究区域的水文过程特征。同时，需对观测数据进行预处理，剔除异常值、缺失值，对数据的一致性与可靠性进行验证，避免劣质数据影响率定结果的准确性。此外，还需根据模型要求，对数据进行格式转换、时间尺度匹配等处理，确保数据能够直接用于模型运算。

参数敏感性分析是参数率定的关键前置环节。复杂水文预报模型的参数数量较多，不同参数对模型输出结果的影响程度存在显著差异。通过参数敏感性分析，可识别出对模型输出结果影响较大的敏感性参数与影响较小的不敏感性参数。在率定过程中，可重点对敏感性参数进行优化调整，对不敏感性参数则可采用初始确定值，无需过多调整。这不仅能够降低参数率定的复杂度，提升率定效率，还能避免不敏感性参数的无效调整对率定结果产生干扰。

参数优化调整是率定过程的核心环节，即基于敏感性分析结果，以模型模拟结果与观测结果的拟合误差最小化为目标，对敏感性参数的取值进行迭代调整。该环节需结合适配的率定方法，按照预设的优化目标函数，逐步修正参数取值。

在调整过程中,需严格遵循参数的物理合理性原则,确保参数取值始终处于合理范围之内。同时,需实时监测模型模拟结果与观测结果的拟合情况,判断参数调整方向的合理性。

率定结果初步验证是参数率定的收尾环节。当参数调整至模型拟合误差达到预设阈值后,需采用率定数据集中的部分独立数据(或预留的验证数据)对率定结果进行初步验证。通过对比模拟结果与观测结果的吻合程度,判断率定参数的拟合效果与稳定性。若初步验证结果满足要求,则率定过程基本完成;若验证结果不达标,则需返回参数优化调整环节,重新调整参数取值,直至初步验证通过。

(三) 参数率定的关键技术要点

参数率定的技术要点主要体现在率定方法选择、目标函数设定两个核心方面。率定方法可分为人工率定法与自动率定法两大类,两类方法各有优劣,需根据模型类型、参数数量、数据质量等实际情况合理选择。

人工率定法是指凭借水文工作者的经验,通过手动调整参数取值,对比模拟结果与观测结果,逐步优化参数的方法。该方法的优势在于能够充分结合经验判断,避免参数取值偏离物理实际,适用于参数数量较少、物理意义明确的简单概念性水文模型。其局限性在于效率较低,主观性较强,不同研究者的经验差异可能导致率定结果存在较大偏差,且难以适用于参数数量较多的复杂分布式模型。

自动率定法是指基于数值优化算法,通过计算机程序自动搜索最优参数组合的方法。该方法以预设的目标函数为优化准则,利用优化算法在参数可行域内自动迭代搜索,能够显著提升率定效率,降低主观性影响,适用于参数数量较多、结构复杂的水文模型。常用的自动率定算法包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。不同的优化算法具有不同的搜索特性,需根据参数的复杂程度、目标函数的特性合理选择。例如,遗传算法具有全局搜索能力强的优势,适用于参数空间复杂、存在多个局部最优解的情况;粒子群优化算法收敛速度快,适用于参数空间相对简单的情况。

目标函数的设定是参数率定的核心准则,其作用是量化模型模拟结果与观测结果之间的偏差,为参数优化调整提供判断依据。目标函数的选择需结合水文预报目标与数据特征,确保其能够准确反映模型的拟合效果。常用的目标函数包括均方误差、纳什-萨克利夫效率系数、平均绝对误差、相对误差等。不同的目标函数对误差的敏感程度存在差异,例如,均方误差对大误差更为敏感,适用于重

点关注极端水文事件拟合精度的场景；纳什 - 萨克利夫效率系数能够综合反映整个水文过程的拟合程度，是水文模型率定中应用最为广泛的目标函数之一。在实际应用中，可根据具体的预报需求，选择单一目标函数或构建多目标函数组合，全面提升模型的拟合效果。

三、水文预报模型参数验证

水文预报模型参数验证是指在参数率定完成后，采用独立于率定数据的观测数据，对率定参数的可靠性、模型的泛化能力与适用性进行检验的过程。参数率定的核心目标是提升模型对现有观测数据的拟合精度，而参数验证的核心目标是确保模型能够准确模拟未参与率定的水文过程，验证模型的预报能力。只有通过严格的参数验证，才能确保模型参数的合理性与模型的实际应用价值。参数验证需遵循独立性原则，明确合理的验证维度，采用科学的验证评价方法。

（一）参数验证的核心原则与数据要求

参数验证的核心原则是 <加粗> 独立性原则 </加粗>，即验证数据必须独立于率定数据，不能与率定数据存在重叠。若采用与率定数据相同或部分重叠的数据进行验证，无法真实检验模型的泛化能力，验证结果会存在偏差，失去验证的实际意义。验证数据的独立性主要体现在时间维度与空间维度两个方面：时间维度上，验证数据的时间序列需与率定数据的时间序列完全分离，例如，若率定数据采用某流域 2000-2010 年的观测数据，则验证数据可采用 2011-2020 年的观测数据；空间维度上，若为分布式水文模型，验证数据的观测站点需与率定数据的观测站点相互独立，或采用未参与率定的子流域观测数据。

除独立性要求外，验证数据还需满足 <加粗> 代表性要求 </加粗>。验证数据应涵盖研究流域不同水文情势的观测结果，包括丰水期、平水期、枯水期等不同水文阶段，确保能够全面检验模型在不同水文条件下的适应能力。同时，验证数据的质量需与率定数据保持一致，需经过严格的预处理，剔除异常值、缺失值，确保数据的可靠性与一致性。此外，验证数据的时间尺度、空间分辨率需与模型输出结果相匹配，避免因数据尺度不匹配导致验证结果失真。

（二）参数验证的主要维度与评价指标

参数验证需从多个维度开展，全面检验模型参数的可靠性与模型的适用性。主要包括过程拟合精度验证、特征指标拟合精度验证、极端水文事件模拟能力验

证三个核心维度。不同维度的验证重点不同，共同构成了完整的参数验证体系。

过程拟合精度验证是参数验证的基础维度，核心是检验模型模拟的水文过程与实际观测的水文过程的整体吻合程度。该维度关注的是整个时间序列内水文过程的动态变化拟合情况，而非单一时间点的数值拟合。例如，对于径流过程验证，需重点关注模拟径流的变化趋势、峰值出现时间、谷值出现时间、过程线形状等与实际观测径流过程的吻合程度。过程拟合精度验证能够反映模型对水文过程内在演变规律的刻画能力，是判断模型适用性的重要依据。

特征指标拟合精度验证是参数验证的核心维度，重点检验模型对水文过程关键特征指标的模拟精度。不同类型的水文预报模型对应的关键特征指标存在差异，对于径流预报模型，关键特征指标主要包括洪峰流量、洪峰出现时间、径流总量、枯水期平均流量等；对于蒸发预报模型，关键特征指标主要包括日蒸发量、月蒸发总量、蒸发量峰值等。通过对比模拟特征指标与实际观测特征指标的偏差，能够直观判断模型在核心预报指标上的可靠性，为模型的实际应用提供直接参考。

极端水文事件模拟能力验证是参数验证的重要补充维度。极端水文事件（如特大洪水、严重干旱）对水资源规划、防洪调度、抗旱减灾等工作具有重要影响，是水文预报的重点关注对象。因此，需专门针对极端水文事件开展验证，检验模型对极端水文条件的适应能力与模拟精度。例如，对于特大洪水事件，需重点验证模型对洪峰流量、洪水过程历时、洪水总量等指标的模拟精度；对于严重干旱事件，需重点验证模型对枯水期径流持续时间、最小枯水流量等指标的模拟精度。极端水文事件模拟能力验证能够进一步提升模型应用的可靠性，避免因模型在极端条件下失效导致严重后果。

为量化验证结果，需采用科学的评价指标。参数验证的评价指标与参数率定的目标函数具有一定的关联性，但更注重对模型泛化能力的量化。常用的评价指标包括纳什 - 萨克利夫效率系数、均方根误差、平均绝对误差、相对误差、相关系数等。其中，纳什 - 萨克利夫效率系数能够综合反映水文过程的拟合精度，取值范围在 $-\infty$ 到 1 之间，取值越接近 1，说明模型拟合效果越好；均方根误差与平均绝对误差能够量化模拟结果与观测结果的绝对偏差，取值越小，拟合精度越高；相对误差能够反映模拟结果的相对偏差，适用于不同尺度水文数据的验证；相关系数能够反映模拟结果与观测结果的线性相关程度，取值越接近 1，说明两者的线性相关性越强。在实际验证过程中，需结合不同的验证维度，选择适配的

评价指标组合，全面量化验证结果。

（三）参数验证的实施路径与结果判定

参数验证的实施路径需结合模型类型、验证目标、数据条件等实际情况合理设计，总体可分为验证方案制定、数据预处理、模型模拟运算、结果对比分析、验证结论判定五个核心步骤。

验证方案制定是参数验证的前置工作，核心是明确验证目标、确定验证维度、选择验证评价指标、划分验证数据范围。在制定验证方案时，需结合模型的实际应用场景，明确验证的重点方向。例如，针对防洪调度模型，需将极端洪水事件模拟能力验证作为重点维度，提升洪峰流量、洪水过程历时等指标的评价权重。同时，需合理划分验证数据的时间范围与空间范围，确保验证数据的独立性与代表性。

数据预处理与参数率定阶段的数据预处理流程基本一致，核心是对验证数据进行质量检验、异常值剔除、缺失值处理、格式转换与尺度匹配。需确保验证数据的质量与率定数据保持一致，避免因数据质量问题影响验证结果的准确性。例如，对于验证数据中的异常洪峰流量值，需结合实际水文情势判断其合理性，若为观测误差导致的异常值，需予以剔除；若为真实的极端洪水事件数据，则需保留并作为极端事件验证的核心数据。

模型模拟运算阶段，需将率定后的参数代入水文预报模型，以预处理后的验证数据为输入，运行模型得到验证期的模拟结果。需确保模型运行的参数设置、边界条件与率定阶段保持一致，避免因模型设置差异导致模拟结果失真。例如，对于分布式水文模型，需确保验证期的土地利用类型、土壤类型等下垫面数据与率定期保持一致，若验证期内下垫面发生显著变化，需对模型参数进行适当调整后再次开展模拟运算。

结果对比分析阶段，需按照预设的验证维度与评价指标，将验证期的模型模拟结果与实际观测结果进行系统对比。需重点分析不同水文情势下模型的拟合精度差异，识别模型的优势与不足。例如，若模型在丰水期的模拟精度较高，而在枯水期的模拟精度较低，需深入分析原因，可能是模型中枯水期径流补给机制的刻画存在缺陷，也可能是率定过程中对枯水期参数的优化不足。同时，需对比率定期与验证期的评价指标差异，若两者差异较小，说明模型的泛化能力较强；若差异较大，则说明模型可能存在过拟合问题，需返回率定阶段重新调整参数。

验证结论判定是参数验证的收尾环节，需基于结果对比分析的结果，综合判断模型参数的可靠性与模型的适用性。若验证期的各项评价指标均满足预设阈值，且模型在不同水文情势、不同验证维度下均表现出良好的拟合效果，则可判定参数验证通过，率定后的参数可用于实际水文预报工作。若验证结果未达到预设阈值，或模型在某一关键验证维度存在明显缺陷，则需判定参数验证未通过。此时，需返回参数率定阶段，重新优化调整参数，或重新开展参数确定工作，必要时需对模型结构进行修正，直至参数验证通过。

模型参数确定、率定与验证是水文预报模型研发与应用的核心环节，三者相互关联、层层递进，共同决定了模型的预报精度与实际应用价值。参数确定为模型构建提供合理的初始参数基础，需结合直接观测与间接推断方法，确保初始参数的物理合理性与代表性；参数率定通过科学的优化调整，提升模型对实际水文过程的拟合精度，需遵循物理合理性、拟合精度与稳定性平衡、针对性等核心原则，按照规范的流程开展；参数验证则检验模型的泛化能力与适用性，需基于独立的验证数据，从过程拟合、特征指标、极端事件等多维度开展，确保模型能够准确刻画未参与率定的水文过程。

在实际工作中，需结合研究区域的水文特征、模型类型、预报目标等实际情况，合理选择参数确定、率定与验证的方法与技术，构建适配的技术流程。同时，需充分认识到水文过程的复杂性与不确定性，参数确定、率定与验证工作并非一蹴而就，需结合长期的水文观测数据与实际应用反馈，持续优化参数取值，提升模型的适应性与可靠性。未来，随着遥感技术、地理信息系统技术、数值优化算法的不断发展，参数确定、率定与验证的技术方法将不断创新，为水文预报模型的精准化应用提供更有力的支撑，助力水资源科学管理与水灾害有效防控。

第三节 实时洪水预报与校正技术

一、实时洪水预报的核心内涵与技术特征

实时洪水预报以流域洪水形成与演进规律为理论基础，融合实时观测数据、水文模型模拟与动态反馈调整技术，实现对洪水过程的精准、及时预判。其核心内涵不仅体现为对洪水要素的定量预测，更强调基于实时信息的动态更新与迭代

优化,形成“观测-模拟-预报-校正”的闭环运行模式。与离线洪水预报相比,实时洪水预报具有显著的技术特征,主要体现在时效性、动态性、不确定性与实用性四个方面,各特征相互关联、相互支撑,共同构成实时洪水预报的技术框架。

(一) 核心内涵解析

从水文预报的实践逻辑来看,实时洪水预报是连接水文理论与防洪实践的桥梁。其核心任务是在洪水形成与演进的全过程中,通过实时捕捉流域内的降水、蒸发、土壤含水量、河道水位、流量等关键水文要素信息,利用水文模型对洪水的形成、汇流过程进行动态模拟,进而预测未来一定时段内的洪水过程。与传统预报模式不同,实时洪水预报并非一次性输出预报结果,而是根据新获取的实时观测数据,持续对预报结果进行更新与修正,使预报结果不断逼近实际洪水过程。这种动态预报模式能够有效应对洪水过程中的各类不确定性因素,提升预报结果的可靠性,为防洪决策提供更具参考价值的依据。

从服务对象来看,实时洪水预报的核心服务目标是防洪调度与险情处置。在洪水来临前,通过精准的实时预报,能够为防洪工程的调度提供决策依据,如水库的预泄、分洪工程的启用等,最大限度地发挥防洪工程的防洪效益;在洪水演进过程中,通过实时跟踪预报,能够及时掌握洪水的发展态势,为险情排查、群众转移安置等应急处置工作提供时间保障,降低洪水灾害损失。因此,实时洪水预报的内涵不仅包含技术层面的动态模拟与校正,更包含服务层面的实战导向与应急支撑。

(二) 关键技术特征

时效性是实时洪水预报的首要技术特征。洪水过程具有突发性与演进快速性的特点,尤其是在中小流域,短历时强降雨引发的洪水往往在短时间内形成,对预报的时效性提出了极高要求。实时洪水预报需在获取观测数据后,快速完成数据处理、模型计算与结果输出,确保预报结果能够为防洪决策提供充足的准备时间。这就要求实时洪水预报系统具备高效的数据处理能力与快速的模型运算能力,实现从数据获取到预报输出的快速响应。

动态性是实时洪水预报区别于离线预报的核心特征。在实时洪水预报过程中,随着时间的推移,新的观测数据不断获取,这些数据包含了洪水过程的最新信息。实时洪水预报系统需利用这些新信息,对前期的预报结果进行动态更新与调整,形成滚动式预报。这种动态更新模式能够有效修正前期预报中的偏差,提升预报

结果的精准度。同时,动态性还体现在对流域下垫面条件变化的适应能力上,如流域内的植被覆盖变化、土地利用类型调整等,通过实时数据的反馈,使模型参数能够适应这些变化,保障预报结果的适用性。

不确定性是实时洪水预报无法回避的技术特征。洪水过程的形成与演进受到多种因素的综合影响,包括气象因素的随机性、下垫面条件的时空异质性、水文模型的结构缺陷以及观测数据的误差等,这些因素共同导致了实时洪水预报结果的不确定性。实时洪水预报的核心任务之一就是在充分认识不确定性的基础上,通过动态校正技术降低不确定性对预报结果的影响,提升预报结果的可靠性。同时,对预报不确定性的量化分析也是实时洪水预报的重要内容,能够为防洪决策提供更全面的参考信息。

实用性是实时洪水预报的根本特征。实时洪水预报的最终目的是为防洪实践服务,因此其预报结果必须具备良好的实用性与可操作性。这就要求预报结果的表述清晰、直观,能够准确反映洪水的关键特征,如洪峰流量、洪峰出现时间、洪水持续时间等;同时,预报系统还需具备良好的兼容性与扩展性,能够与防洪调度系统、应急指挥系统等实现数据共享与联动,确保预报结果能够快速应用于防洪决策实践。

二、实时洪水预报的技术体系构成

实时洪水预报技术体系是一个多环节、多要素协同运行的复杂系统,涵盖数据观测与传输、数据处理与预处理、水文模型模拟、预报结果输出与发布等核心环节。各环节紧密衔接,形成“数据输入-模型运算-结果输出-反馈调整”的闭环运行机制。其中,数据观测与传输是基础,数据处理与预处理是保障,水文模型模拟是核心,预报结果输出与发布是关键,各环节的技术水平直接影响实时洪水预报的精度与时效性。

(一) 数据观测与传输子系统

数据观测与传输子系统是实时洪水预报的基础支撑,其核心功能是实时获取流域内的关键水文、气象要素数据,并将数据快速传输至预报中心。观测数据的种类、精度与时效性直接影响预报结果的可靠性。主要观测要素包括降水、蒸发、土壤含水量、河道水位、流量、闸坝运行状态等,其中降水与河道流量是最核心的观测要素。

观测手段方面,随着水文监测技术的发展,已形成地面观测、遥感观测与水文站点观测相结合的立体化观测网络。地面观测主要通过雨量站、蒸发站、水位站、流量站等站点实现,能够获取定点、高精度的观测数据;遥感观测则通过卫星、雷达等设备实现,能够获取大范围、实时的降水、洪水淹没范围等数据,弥补地面站点观测的空间局限性;水文站点观测则通过自动监测设备实现,能够实现数据的自动化采集与存储,提升观测数据的时效性。

数据传输方面,主要采用无线传输与有线传输相结合的方式。无线传输包括GPRS、4G、5G、卫星通信等技术,具有传输速度快、覆盖范围广、灵活性强的特点,适用于偏远地区的水文站点数据传输;有线传输则包括光纤、以太网等技术,具有传输稳定、带宽大的特点,适用于靠近城镇的水文站点数据传输。通过立体化的数据观测网络与高效的数据传输技术,能够确保观测数据快速、准确地传输至预报中心,为实时洪水预报提供数据支撑。

(二) 数据处理与预处理子系统

由于观测数据可能存在缺失、异常、误差等问题,直接影响水文模型模拟的精度,因此数据处理与预处理子系统是实时洪水预报的重要保障环节。其核心功能是对获取的实时观测数据进行质量控制、缺失值补充、数据标准化等处理,形成符合水文模型输入要求的标准化数据。

数据质量控制是数据预处理的核心内容,主要包括异常数据识别与剔除、数据合理性检验等。异常数据识别主要通过阈值法、趋势分析法、相邻站点对比法等方法,识别出超出合理范围、趋势异常或与相邻站点数据差异过大的数据,并进行剔除或修正;数据合理性检验则通过水文要素的物理规律,检验观测数据的合理性,如降水数据与土壤含水量数据的匹配性、水位与流量数据的对应关系等。

缺失值补充是数据预处理的另一重要内容。由于观测设备故障、传输中断等原因,可能导致部分观测数据缺失,需要通过合理的方法进行补充。常用的缺失值补充方法包括线性插值法、相邻站点均值法、基于水文规律的估算方法等。对于短时段的数据缺失,可采用线性插值法;对于较长时段的数据缺失,则可采用相邻站点均值法或基于水文规律的估算方法,确保补充数据的合理性。

数据标准化则是将不同格式、不同单位的观测数据转换为统一的格式与单位,方便水文模型的输入与计算。例如,将降水数据的单位统一为毫米,将流量数据的单位统一为立方米每秒,将时间格式统一为北京时间等。通过数据标准化处理,

能够提升数据的一致性与可用性，保障水文模型模拟的顺利进行。

（三）水文模型模拟子系统

水文模型模拟子系统是实时洪水预报的核心环节，其核心功能是基于预处理后的实时观测数据，利用水文模型对流域内的洪水形成与演进过程进行动态模拟与预测。水文模型的选择与应用直接影响预报结果的精度，需根据流域的水文特征、下垫面条件、观测数据情况等因素，选择合适的水文模型。

常用的实时洪水预报模型包括概念性水文模型、分布式水文模型、经验性水文模型等。概念性水文模型基于水文循环的物理概念，将流域的水文过程概化为若干个简单的物理过程，如产流过程、汇流过程等，具有结构简单、参数较少、计算效率高的特点，适用于数据资料相对匮乏的流域；分布式水文模型基于流域的空间异质性，将流域划分为若干个网格单元，每个网格单元采用相同的水文模型进行模拟，能够更准确地反映流域内水文过程的空间差异，适用于数据资料丰富、下垫面条件复杂的流域；经验性水文模型则基于历史水文数据的统计分析，建立水文要素之间的经验关系，具有计算简单、时效性强的特点，适用于短期洪水预报。

在实时洪水预报过程中，水文模型模拟子系统需具备快速运算能力与动态更新能力。随着实时观测数据的不断输入，模型需快速完成参数调整与模拟计算，实现预报结果的滚动更新。同时，模型还需具备良好的稳定性与适应性，能够应对流域内的各类变化，如降水强度变化、下垫面条件变化等，保障模拟结果的可靠性。

（四）预报结果输出与发布子系统

预报结果输出与发布子系统是实时洪水预报服务于防洪实践的关键环节，其核心功能是将水文模型模拟得到的预报结果进行整理、分析与可视化展示，并通过多种渠道及时发布给相关部门与社会公众。预报结果的输出与发布需遵循清晰、直观、及时的原则，确保相关人员能够快速准确地获取预报信息。

预报结果输出主要包括洪水过程曲线、关键洪水要素（洪峰流量、洪峰出现时间、洪水总量等）、预报精度评价等内容。通过可视化技术，将预报结果以图表、曲线等形式展示，能够更直观地反映洪水的发展态势。同时，还需对预报结果的精度进行实时评价，为防洪决策提供更全面的参考信息。

预报结果发布渠道主要包括官方网站、手机 APP、短信平台、广播电视、应

急指挥系统等。针对不同的服务对象,采用不同的发布渠道:对于防洪决策部门,可通过应急指挥系统、短信平台等渠道发布详细的预报信息;对于社会公众,可通过官方网站、手机APP、广播电视等渠道发布简洁明了的预报信息与预警提示。通过多渠道的预报结果发布,能够确保预报信息的快速传播,为防洪决策与群众转移安置提供及时支撑。

三、实时洪水预报校正技术的核心原理与关键方法

实时校正技术是提升实时洪水预报精度的关键手段,其核心原理是利用实时观测数据与前期预报结果的偏差,通过一定的校正方法对后续预报结果进行调整,使预报结果不断逼近实际洪水过程。实时校正技术的本质是一种反馈控制机制,通过对预报偏差的动态监测与分析,建立偏差与预报结果之间的关联关系,进而实现对预报结果的精准校正。根据校正原理与方法的不同,常用的实时校正技术可分为基于偏差统计的校正方法、基于模型参数调整的校正方法、基于数据同化的校正方法三类,各类方法具有不同的技术特点与适用场景。

(一) 核心校正原理

实时洪水预报偏差的产生是多种因素共同作用的结果,主要包括气象预报误差、水文模型结构缺陷、模型参数率定偏差、观测数据误差等。这些偏差会导致水文模型的模拟结果与实际洪水过程存在差异,而实时校正技术通过对这些偏差的捕捉与修正,能够有效降低偏差对预报结果的影响。

实时校正的核心原理基于反馈控制理论,形成“预报-观测-偏差分析-校正-再预报”的闭环流程。具体而言,首先利用水文模型输出前期的洪水预报结果;然后将实时观测到的洪水要素数据与前期预报结果进行对比,计算两者之间的偏差;接着通过对偏差的统计分析、趋势分析等,揭示偏差的变化规律与产生原因;最后根据偏差规律,采用合适的校正方法对后续的预报结果进行调整,实现预报结果的优化。

实时校正的关键在于准确捕捉偏差的变化规律。由于洪水过程具有随机性与不确定性,偏差的变化规律也较为复杂,可能呈现出线性变化、非线性变化、周期性变化等特征。因此,实时校正技术需具备较强的自适应能力,能够根据偏差的动态变化调整校正策略,确保校正效果的稳定性与可靠性。

（二）关键校正方法

1. 基于偏差统计的校正方法

基于偏差统计的校正方法是最常用的实时校正方法之一，其核心思路是通过
对历史预报偏差与实时预报偏差的统计分析，建立偏差预测模型，进而对后续预
报结果进行校正。该方法具有原理简单、计算效率高、适用性强的特点，适用于
各类水文模型的实时校正。

常用的基于偏差统计的校正方法包括均值校正法、线性回归校正法、滑动平
均校正法等。均值校正法通过计算历史预报偏差的均值，将该均值作为校正量对
实时预报结果进行调整，适用于偏差相对稳定的情况；线性回归校正法则通过建
立预报结果与实际观测结果之间的线性回归关系，利用该关系对预报结果进行校
正，能够有效修正线性偏差；滑动平均校正法则通过计算一定时段内的预报偏差
的滑动平均值，利用该平均值对当前预报结果进行校正，能够有效平滑偏差的随
机波动，提升校正结果的稳定性。

基于偏差统计的校正方法的优势在于无需改变水文模型的结构与参数，仅通
过对预报结果的后处理实现校正，不会影响模型的核心逻辑。但其局限性也较为
明显，对于非线性偏差、突发性偏差的校正效果较差，适用于洪水过程相对平稳、
偏差变化规律较为简单的情况。

2. 基于模型参数调整的校正方法

基于模型参数调整的校正方法的核心思路是将预报偏差归因于水文模型的参
数误差，通过实时观测数据调整模型的关键参数，使模型的模拟结果与实际观测
结果相匹配，进而提升后续预报结果的精度。该方法能够从根源上修正模型的偏
差，校正效果相对稳定，适用于模型结构合理但参数存在偏差的情况。

常用的基于模型参数调整的校正方法包括实时参数率定法、卡尔曼滤波参数
调整法等。实时参数率定法通过将实时观测数据纳入模型参数率定过程，利用优
化算法实时调整模型参数，使模型的模拟误差最小化；卡尔曼滤波参数调整法则
基于卡尔曼滤波理论，将模型参数视为随机变量，通过实时观测数据更新参数的
估计值，实现参数的动态调整。

基于模型参数调整的校正方法的优势在于能够充分利用模型的物理机制，校
正效果具有较强的物理合理性，对于复杂洪水过程的校正效果优于基于偏差统计
的校正方法。但其局限性在于计算复杂度较高，需要较强的计算能力支撑，且参

数调整的合理性难以保证，若参数调整不当，可能导致模型的稳定性下降。

3. 基于数据同化的校正方法

基于数据同化的校正方法是一种融合多源数据与水文模型的先进校正技术，其核心思路是将实时观测数据与水文模型的模拟结果进行融合，利用数据同化算法获取最优的洪水状态估计与模型参数估计，进而提升预报结果的精度。该方法能够充分利用多源数据的优势，有效降低观测数据误差与模型不确定性对预报结果的影响，适用于数据资料丰富、下垫面条件复杂的流域。

常用的基于数据同化的校正方法包括 EnsembleKalmanFilter（集合卡尔曼滤波）、ParticleFilter（粒子滤波）、三维变分同化等。集合卡尔曼滤波通过生成多个模型参数集合，利用实时观测数据更新每个集合的状态变量，最终得到最优的状态估计；粒子滤波则基于蒙特卡洛模拟思想，通过大量粒子的随机采样与权重更新，实现对洪水状态的最优估计；三维变分同化则通过建立目标函数，将观测数据与模型模拟结果的偏差最小化，进而获取最优的模型参数与状态变量。

基于数据同化的校正方法的优势在于能够融合多源观测数据，充分利用各类数据的互补性，校正效果好、适应性强，是当前实时洪水预报校正技术的发展方向。但其局限性在于计算复杂度高、对观测数据的质量与数量要求较高，且算法实现难度较大，限制了其在部分中小流域的应用。

第四节 水文预报在水资源保护中的应用案例

一、河流水质保护中的水文预报应用案例

河流作为水资源循环的核心载体，其水质状况直接关系到流域生态安全与社会经济发展。在河流水质保护工作中，径流变化是影响水质的关键驱动因素——枯水期径流偏小，水体稀释自净能力不足，污染物易富集导致水质恶化；汛期强降雨引发的地表径流则会携带大量面源污染物汇入河流，形成突发性水质冲击。水文预报通过精准预判径流时序变化与洪峰演进过程，为河流水质调控提供提前量，实现水质风险的主动防控。以下以南方某典型丘陵山区流域为例，详细阐述水文预报在河流水质保护中的应用实践。

（一）案例背景

该流域总面积约 2800km²，属亚热带季风气候，年降水量 1600-1800mm，降水时空分布不均，60% 以上集中在 6-9 月的汛期。流域内河流为区域性重要饮用水源补给通道，同时承担着沿岸农田灌溉、工业用水及生态基流保障任务。近年来，随着流域内农业集约化程度提升与城镇化进程加快，面源污染（农田化肥农药流失、农村生活污水排放）与点源污染（沿岸小型工业废水排放）叠加，导致河流汛期水质波动剧烈，枯水期水质达标压力较大。其中，汛期强降雨后，河流 COD、氨氮等污染物浓度常出现短时超标，对沿岸饮用水源地取水安全构成威胁；枯水期则因径流不足，生态基流难以保障，水体自净能力下降，水质持续处于亚健康状态。为破解这一困境，当地水利与生态环境部门联合构建了基于水文预报的河流水质协同管控体系。

（二）水文预报方案设计

结合该流域的水文特征与水质保护需求，构建了“多源数据融合 + 过程化预报”的水文预报体系，重点实现对汛期径流峰值、峰现时间及枯水期径流持续时长的精准预判。在数据支撑层面，整合流域内 23 个雨量站、5 个水位站、3 个流量站的实时监测数据，同时接入气象部门的短期暴雨预报、中期降水趋势预测数据，构建起覆盖“降水 - 径流 - 水位”全链条的监测预报数据体系。在预报对象与时效层面，针对水质保护的核心需求，设定汛期 24 小时短期径流预报、72 小时洪峰演进预报，以及枯水期 7 天、15 天中长期径流趋势预报，确保预报成果能够为水质调控措施的实施提供充足时间窗口。在预报成果输出层面，采用“径流过程 + 水质风险等级”的复合输出模式，根据预报径流规模，划分“低风险、中风险、高风险”三个水质风险等级，为后续管控措施的精准落地提供明确指引。

（三）水资源保护实施路径与成效

基于水文预报成果，构建了“汛期污染截留 + 枯水期生态补水”的差异化管控路径。在汛期水质高风险时段，根据水文预报预判的洪峰演进时间与径流规模，提前 24-48 小时启动流域内面源污染防控措施：组织人员对沿岸农田排水沟渠的生态拦截坝进行预处理，清理拦截的污染物；关闭沿岸小型工业企业的废水排放口，暂停规模化养殖场的排污作业；通知下游饮用水源地取水口提前做好应急净化准备。同时，利用流域内已建成的 3 座水库，根据洪峰预报成果精准调控出库流量，避免洪峰叠加导致的污染物扩散。在枯水期径流偏小时段，根据中长

期水文预报预判的径流持续时长，提前制定生态补水方案：统筹上游水库蓄水与跨流域调水资源，按照“最小生态基流保障+水质达标”的原则，精准调控补水量与补水时序，确保河流核心断面的径流维持在临界生态基流以上，提升水体自净能力。

该体系运行以来，取得了显著的水资源保护成效。汛期河流 COD、氨氮等污染物浓度超标时长较之前减少 65% 以上，下游饮用水源地取水口水质达标率由 82% 提升至 98%；枯水期河流核心断面生态基流保障率达到 95%，水体透明度提升 30%，河流沿岸植被覆盖率明显提高，流域生态系统完整性得到有效修复。水文预报的应用，实现了河流水质保护从“事后治理”向“事前防控”的转变，大幅提升了管控措施的针对性与有效性。

二、饮用水源地安全保障中的水文预报应用案例

饮用水源地是水资源保护的核心区域，其水质与水量安全直接关系到公众健康。无论是地表饮用水源地（水库、湖泊、河流）还是地下饮用水源地，其安全保障均与水文过程密切相关——地表饮用水源地易受汛期暴雨径流携带的污染物影响，地下饮用水源地则依赖大气降水入渗补给维持水量稳定。水文预报通过对降水、径流、水位等要素的精准预判，为饮用水源地的水量保障、水质防控及应急处置提供技术支撑，筑牢饮用水安全防线。以下以北方某大型水库饮用水源地为例，阐述水文预报在其安全保障中的应用实践。

（一）案例背景

该水库总库容约 12 亿 m^3 ，是周边 3 座城市近 500 万人口的核心饮用水源地，同时承担着下游农田灌溉与生态基流保障任务。水库流域属温带大陆性季风气候，年降水量 500-600mm，降水集中在 7-8 月，且多以暴雨形式出现。该水源地的安全保障面临两大核心挑战：一是水量保障压力，近年来流域内降水偏少，加之上游用水需求增加，水库蓄水量持续偏低，枯水年份甚至出现供水紧张局面；二是水质防控压力，汛期暴雨径流携带的农田面源污染物、山区水土流失产生的泥沙及少量工业点源污染物汇入水库，易导致水库水质短时下降，尤其是入库口区域的浊度、COD 浓度易超标，影响饮用水净化效率。为保障水源地安全，当地水利、生态环境与供水部门联合构建了基于水文预报的水源地安全保障体系。

（二）水文预报方案设计

针对该水库水源地的安全保障需求,构建了“降水-径流-入库流量-水库水位-水质趋势”一体化水文预报体系。在预报范围上,覆盖水库全流域,重点监测上游3条主要入库河流的水文过程;在数据来源上,整合流域内18个雨量站、4个入库流量站、2个水库水位站的实时监测数据,接入气象部门的短期暴雨预报、中期降水趋势预报及长期气候预测数据,同时结合水库蓄水数据与上游用水数据,提升预报精准度;在预报时效与内容上,构建“短期-中期-长期”三级预报体系:短期(1-3天)重点预报暴雨过程、入库流量峰值及水质浊度变化趋势,为汛期水质应急防控提供支撑;中期(7-30天)重点预报流域降水总量与入库径流总量,为水库蓄水调控提供依据;长期(1-3个月)重点预报季节降水趋势与水库蓄水量变化,为年度供水调度方案制定提供支撑。

（三）水资源保护实施路径与成效

基于水文预报成果,从水量保障与水质防控两个维度构建水源地安全保障实施路径。在水量保障方面,根据中长期水文预报成果,制定差异化的水库调度方案:丰水年份,结合短期暴雨预报,提前预判入库洪峰规模,合理调控水库出库流量,在保障防洪安全的前提下,最大限度拦蓄洪水,提升水库蓄水量;平水年份,根据中期降水预报与上游用水需求,精准调控水库蓄水量,平衡供水、灌溉与生态基流需求;枯水年份,结合长期气候预测与降水趋势预报,提前制定应急供水方案,通过优化上游用水分配、实施跨流域调水等措施,保障核心供水需求。在水质防控方面,针对汛期水质风险,根据短期水文预报预判的暴雨过程与入库流量峰值,提前启动入库口区域的水质防控措施:在入库河流沿岸的生态拦截工程前增设临时拦截设施,强化面源污染物截留;组织人员清理入库口区域的漂浮物与沉积物;通知供水部门提前调整饮用水净化工艺参数,做好应对水质波动的准备。同时,根据水文预报的入库流量过程,合理调控水库闸门开度,避免入库污染物在库内大量富集。

该体系运行以来,有效提升了水源地安全保障能力。在水量保障方面,水库蓄水量保障率提升至92%,枯水年份供水紧张局面得到有效缓解,核心城市供水保障率达到100%;在水质防控方面,汛期入库口区域水质超标时长减少70%以上,水库水质稳定达到Ⅱ类标准,饮用水净化成本降低15%以上。水文预报的应用,实现了水源地“水量精准调控、水质提前防控”的目标,为公众饮用水安全提供

了坚实保障。

三、湿地生态保护中的水文预报应用案例

湿地作为“地球之肾”，具有涵养水源、净化水质、调节气候、维护生物多样性等重要生态功能，其生态功能的发挥高度依赖稳定的水文过程。无论是河流湿地、湖泊湿地还是沼泽湿地，其水文情势（水位、水量、径流过程）的变化均会直接影响湿地植被生长、土壤理化性质及生物栖息地质量。水文预报通过对降水、径流、水位等要素的预判，为湿地生态补水、水文情势调控提供技术支撑，保障湿地生态系统的稳定性与完整性。以下以长江中下游某国家级湿地自然保护区为例，阐述水文预报在湿地生态保护中的应用实践。

（一）案例背景

该湿地自然保护区总面积约 360km²，属长江中下游典型的淡水湖泊湿地，是迁徙鸟类的重要栖息地，同时承担着涵养水源、净化长江支流径流的生态功能。保护区内湿地生态系统的稳定性高度依赖长江干流与周边支流的水文补给，其核心生态需求是维持适宜的湿地水位与完整的水文周期。近年来，受全球气候变化与人类活动影响，该湿地面临两大生态问题：一是枯水期水位偏低，由于长江干流枯水期水位下降，加之周边支流用水需求增加，湿地补给水量不足，导致部分湿地斑块干涸，湿地植被覆盖率下降，鸟类栖息地面积缩小；二是汛期水位波动过大，极端暴雨事件引发的强径流导致湿地水位骤升，部分低洼区域的植被被淹没，破坏了生物栖息地的稳定性。为保护湿地生态系统，当地林业和草原、水利部门联合构建了基于水文预报的湿地生态水文调控体系。

（二）水文预报方案设计

针对该湿地的生态保护需求，构建了“长江干流水文 - 支流径流 - 湿地水位”联动水文预报体系。在监测范围上，覆盖湿地保护区及周边长江干流、3 条主要补给支流的水文过程；在数据来源上，整合长江干流水文站、支流径流站、湿地内部水位站的实时监测数据，接入气象部门的降水预报数据、水利部门的长江干流调度计划数据，同时结合湿地植被生长周期数据与鸟类迁徙规律数据，实现水文预报与生态需求的精准匹配；在预报内容与时效上，重点开展“枯水期补给径流预报”与“汛期湿地水位预报”：枯水期（11 月至次年 4 月）开展 7-30 天中长期径流预报，预判长江干流补水量与支流汇入量，为湿地生态补水提供依据；

汛期（5-10月）开展1-7天短期水位预报，预判极端降水引发的湿地水位变化，为湿地防洪与栖息地保护提供支撑。

（三）水资源保护实施路径与成效

基于水文预报成果，构建了“枯水期生态补水+汛期水位调控”的湿地生态保护实施路径。在枯水期，根据中长期水文预报预判的长江干流水位与支流径流情况，提前制定湿地生态补水方案：当预报长江干流水位高于湿地水位且支流径流不足时，通过引水闸引长江干流水补给湿地；当预报长江干流与支流径流均不足时，统筹调度周边小型水库蓄水补充湿地。补水过程中，根据水文预报的径流补给趋势，精准控制补水量与补水速度，确保湿地水位维持在适宜植被生长与鸟类栖息的范围内，避免因补水过快或过量破坏湿地土壤结构。在汛期，根据短期水文预报预判的降水过程与湿地水位变化趋势，提前启动水位调控措施：打开湿地周边的排水闸，提前降低湿地水位，预留防洪库容；对核心鸟类栖息地周边的围堤进行加固，避免水位骤升淹没栖息地；在降水结束后，根据水文预报的径流消退趋势，精准调控排水闸开度，逐步恢复湿地适宜水位，保障湿地生态系统的稳定性。

该体系运行以来，湿地生态保护成效显著。枯水期湿地干涸面积减少80%以上，核心区域植被覆盖率由65%提升至85%，鸟类栖息地面积扩大30%，迁徙鸟类种类与数量明显增加；汛期湿地水位波动幅度减小60%，核心栖息地未再出现被淹没的情况，湿地生态系统的稳定性显著提升。水文预报的应用，实现了湿地生态保护与水文过程调控的精准匹配，为湿地生态系统的可持续发展提供了有力支撑。

第八章 水资源调查评价与论证方法

第一节 水资源基础调查与评价方法

一、水资源基础调查核心内容与技术路径

水资源基础调查以区域水循环过程为核心脉络，覆盖“降水—地表水—地下水—水资源开发利用”全链条，通过实地勘测、资料收集、遥感监测等多种技术手段的融合应用，获取全面、准确的基础数据。其核心目标是厘清区域水资源的赋存状态、运动规律及开发利用程度，为后续评价工作奠定坚实的数据基础。

（一）降水与蒸发调查

降水是区域水资源的主要补给来源，蒸发则是水资源消耗的重要途径，二者共同决定了区域水资源的天然禀赋格局。降水调查以获取长时间序列、高密度的降水数据为核心，重点开展降水站点布设、降水数据收集与核查工作。在站点布设方面，需结合区域地形地貌特征、气候分区差异，遵循“均匀覆盖、重点加密”的原则，在平原区、丘陵区等降水分布相对均匀的区域合理布设常规降水站点，在山区、河谷等降水时空变异较大的区域加密站点布设，确保降水数据能够真实反映区域降水的时空分布特征。

降水数据收集涵盖历史观测数据与实时监测数据，历史数据主要来源于气象部门、水文部门的长期观测站网，实时数据则通过自动降水监测站、遥感卫星等手段获取。数据收集完成后，需开展严格的核查与修正工作，重点剔除数据缺失、异常波动等问题数据，对不同来源、不同精度的数据进行标准化处理，确保数据的一致性与可靠性。蒸发调查主要包括水面蒸发与陆面蒸发两部分，水面蒸发调查通过布设蒸发池、蒸发器等观测设施，获取不同时段的水面蒸发量数据，结合区域气候条件、水体类型，分析水面蒸发的时空变化规律；陆面蒸发调查则结合植被覆盖类型、土壤含水量、地形地貌等因素，采用遥感反演、实地观测相结合的方式，估算区域陆面蒸发量，明确陆面蒸发的空间分布特征。

（二）地表水调查

地表水是水资源开发利用的主要对象之一，其调查核心是掌握地表水体的分布范围、水量时空变化、水质状况及水系连通性。地表水体分布调查以河流、湖泊、水库、冰川等主要地表水体为调查对象，采用实地勘测与遥感影像解译相结合的方式，明确各类地表水体的空间位置、形态特征及分布面积。对于河流而言，重点调查河道走向、河长、河宽、水深、比降等几何参数，厘清流域水系结构、支流汇入关系及河道连通性；对于湖泊、水库，重点调查水域面积、岸线长度、平均水深、最大水深等参数，掌握其蓄水能力及空间分布特征；对于冰川等特殊地表水体，重点调查冰川覆盖面积、厚度、运动速度等，分析其消融规律及对河川径流的补给贡献。

地表水水量调查以河川径流监测为核心，通过布设水文监测站网，获取河流流量、水位、径流量等关键数据，分析径流的年内分配、年际变化及空间分布规律。在监测站网布设方面，需结合流域面积、河道特征、水文站网规划要求，在河流干流、主要支流的控制断面布设监测站点，实现对流域径流的全面监控。同时，结合区域水利工程建设情况，重点调查水库、闸坝等水利工程的运行调度方式、蓄水能力、泄洪量等，分析水利工程对河川径流的调节影响。地表水水质调查则以反映水体使用功能的关键水质指标为核心，包括 pH 值、溶解氧、化学需氧量、氨氮、总磷、重金属等，通过布设水质监测断面，定期开展实地采样与检测分析，掌握地表水水质的时空变化特征，识别主要污染来源及污染区域。

（三）地下水调查

地下水是区域水资源的重要组成部分，尤其在干旱半干旱地区，地下水是保障生产生活用水的关键水源。地下水调查重点围绕地下水赋存条件、水位动态、水量补给与排泄、水质状况展开，核心目标是厘清地下水系统的结构特征及资源禀赋。地下水赋存条件调查以区域地质构造、含水层岩性、隔水层分布为核心，通过地质钻探、物探（如电法勘探、地震勘探）等技术手段，明确含水层的空间分布范围、厚度、渗透性等关键参数，划分含水层类型（如孔隙含水层、裂隙含水层、岩溶含水层），构建区域地下水系统结构模型。

地下水水位动态调查通过布设地下水监测井网，长期监测地下水水位的时空变化，分析水位年内波动、年际变化规律，以及水位变化与降水、地表水补给、地下水开采之间的响应关系。在监测井网布设方面，需结合含水层分布特征、地

下水开采强度，在地下水补给区、排泄区、集中开采区等关键区域加密布设监测井，确保能够全面反映区域地下水水位动态变化。地下水补给与排泄调查通过分析降水入渗、地表水渗漏、侧向补给等补给途径，以及地下水蒸发、侧向排泄、人工开采等排泄途径，明确各补给、排泄项的数量及占比，掌握地下水系统的水量平衡关系。地下水水质调查与地表水水质调查类似，重点监测影响地下水使用安全的关键水质指标，结合地下水赋存条件，分析水质的空间分布特征及污染成因，识别地下水污染风险区域。

二、水资源基础评价核心框架与关键环节

水资源基础评价以水资源基础调查数据为支撑，遵循“客观公正、科学系统、因地制宜”的原则，围绕水资源数量评价、质量评价、开发利用程度评价及供需平衡分析四大核心维度展开，综合研判区域水资源的禀赋特征、开发利用合理性及可持续利用潜力。其核心目标是为水资源开发利用规划、水资源优化配置、水生态环境保护等工作提供科学依据。

（一）水资源数量评价

水资源数量评价是水资源基础评价的核心内容，重点评估区域天然水资源总量、地表水水资源量、地下水水资源量及可利用水资源量，明确水资源数量的时空分布特征。天然水资源总量是指区域在一定时期内（通常为多年平均）降水形成的地表水和地下水的总补给量，其评价需基于降水、地表水、地下水调查数据，采用水量平衡法进行估算，即天然水资源总量 = 地表水水资源量 + 地下水水资源量 - 地表水与地下水重复计算量，其中重复计算量主要包括地表水对地下水的补给量、地下水对地表水的排泄量等。

地表水水资源量评价以河川径流量为核心，通过对实测径流数据的还原计算（剔除水利工程、人类活动等对径流的影响），获取天然河川径流量，结合区域地表水体的蓄水变量，估算地表水水资源量。在评价过程中，需重点分析地表水水资源量的年内分配（如汛期、非汛期径流量占比）、年际变化（如丰水年、平水年、枯水年径流量差异）及空间分布特征，明确不同区域、不同时段的地表水水资源禀赋差异。地下水水资源量评价以地下水补给量为核心，结合地下水储存量的变化，估算地下水可开采量。评价过程中，需根据含水层类型、地下水赋存条件，分区域估算降水入渗补给量、地表水渗漏补给量等各项补给量，扣除不可

开采的地下水储量（如深层承压水、生态保护关键区地下水），明确区域地下水可利用资源量及空间分布特征。

可利用水资源量评价是在天然水资源总量评价的基础上，结合区域水资源开发利用条件、水利工程建设水平、生态环境保护要求，综合估算区域可有效利用的水资源总量。其评价需充分考虑水利工程的调蓄能力、水资源的时空匹配程度，以及生态基流、地下水生态红线等约束条件，避免过度开发导致水生态环境破坏。同时，需分区域、分时段开展可利用水资源量评价，明确不同区域的水资源开发潜力，为水资源优化配置提供依据。

（二）水资源质量评价

水资源质量评价是判断水资源使用功能、保障用水安全的关键，重点围绕地表水、地下水的水质状况，结合不同用水功能需求（如生活饮用水、工业用水、农业灌溉用水、生态环境用水），开展针对性的质量评价。评价过程需遵循相关水质标准（如《地表水环境质量标准》《地下水质量标准》），采用单因子评价法、综合污染指数法等评价方法，对调查获取的水质指标进行系统分析。

地表水质量评价需结合地表水体的功能定位，分断面、分河段开展评价。对于生活饮用水水源地，重点评价 pH 值、溶解氧、重金属、细菌总数等关键指标，确保水质符合饮用水安全标准；对于工业用水水源地，重点评价硬度、含盐量、化学需氧量等指标，满足工业生产用水要求；对于农业灌溉用水水源地，重点评价含盐量、重金属等指标，避免对农作物生长及土壤环境造成不良影响；对于生态环境用水水源地，重点评价水质对水生生物生存、河道生态系统稳定的保障程度。评价过程中，需识别地表水水质的时空变化规律，明确主要污染河段、污染时段及污染因子，分析污染成因，提出针对性的水质改善建议。

地下水质量评价需结合地下水的赋存条件、开采利用现状，分区域、分含水层开展评价。重点关注集中式饮用水水源地、地下水集中开采区的水质状况，评价关键水质指标是否符合相关标准。对于浅层地下水，需重点分析农业面源污染、生活污水渗漏等对水质的影响；对于深层承压水，需重点关注工业污染、地质背景值等因素导致的水质问题。评价过程中，需分析地下水水质的空间分布特征，识别地下水污染区域及污染扩散趋势，评估地下水水质对用水安全的影响，提出地下水污染防控及水质改善措施。

（三）水资源开发利用程度评价

水资源开发利用程度评价是研判区域水资源开发利用合理性的核心，通过计算水资源开发利用率、地表水开发利用率、地下水开采率等关键指标，结合区域水资源禀赋、社会经济发展水平、生态环境保护要求，综合评估区域水资源开发利用的适度性。水资源开发利用率是指区域实际供水量与可利用水资源量的比值，是反映水资源开发利用程度的核心指标；地表水开发利用率是指地表水实际供水量与地表水可利用资源量的比值；地下水开采率是指地下水实际开采量与地下水可开采资源量的比值。

评价过程中，需结合区域气候条件、水资源时空分布特征，分时段、分区域计算各项开发利用指标，对比不同区域、不同时期的指标差异，分析水资源开发利用的变化趋势。同时，需结合生态环境状况，如河道断流情况、地下水漏斗面积、水生态系统退化程度等，综合判断水资源开发利用是否过度。对于开发利用率过高的区域，需分析过度开发导致的生态环境问题，提出合理的压采方案及水资源调控措施；对于开发利用率较低的区域，需结合社会经济发展需求，分析水资源开发潜力，提出适度开发的规划建议。

此外，水资源开发利用程度评价还需关注水资源利用效率，通过计算万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、农田灌溉亩均用水量等指标，评估区域水资源利用的经济性与合理性。对比不同行业、不同区域的用水效率差异，识别节水潜力较大的领域，提出针对性的节水技术与管理措施，推动水资源利用方式从粗放型向集约型转变。

（四）水资源供需平衡分析

水资源供需平衡分析是水资源基础评价的重要落脚点，通过对比区域不同时期、不同情景下的水资源供给量与需求量，研判水资源供需平衡态势，识别供需矛盾突出的区域与时段，为水资源优化配置及开发利用规划提供依据。供需平衡分析需结合区域社会经济发展规划、人口增长预测、产业结构调整方向、生态环境保护目标等，分现状年、规划年（如近期、中期、远期）开展，同时考虑不同水文情景（如丰水年、平水年、枯水年）的影响，确保分析结果的全面性与可靠性。

水资源供给量预测需基于水资源基础调查数据，结合水利工程建设规划（如新建水库、跨区域调水工程、再生水利用工程等），预测不同时期的地表水供给量、地下水供给量、再生水供给量及跨区域调水量，综合得出区域水资源总供给

量。预测过程中,需充分考虑水利工程的建设进度、运行效率,以及水资源开发利用的约束条件(如生态基流、地下水开采红线等),确保供给量预测的合理性。

水资源需求量预测需分行业、分区域开展,结合人口增长、城镇化率提升、产业升级、农业种植结构调整、生态环境保护要求等,预测生活用水、工业用水、农业用水、生态环境用水的需求量。生活用水需求量预测需考虑城镇居民人均用水量增长、农村居民生活水平提升带来的用水需求变化;工业用水需求量预测需结合工业产值增长、产业结构优化(如高耗水产业转型升级)、节水技术推广等因素,分析工业用水的变化趋势;农业用水需求量预测需结合灌溉面积变化、作物类型调整、节水灌溉技术应用等,估算农业灌溉用水需求;生态环境用水需求量预测需结合河道生态基流保障、湖泊湿地补水、植被恢复等生态保护目标,确定最小生态用水需求量。

在供给量与需求量预测的基础上,开展不同情景下的水资源供需平衡分析,计算供需缺口或盈余量,明确供需矛盾突出的区域(如城市建成区、工业集中区、干旱缺水地区)与时段(如枯水年汛期、非汛期)。针对供需矛盾,提出针对性的解决方案,如优化水资源配置方案、推进节水型社会建设、加强水利工程建设、开展跨区域调水、提升再生水利用水平等,确保区域水资源能够支撑社会经济可持续发展与生态环境良性循环。

第二节 水资源开发利用评价与供需平衡分析

一、水资源开发利用评价核心内容与技术路径

(一) 核心评价内容体系

水资源开发利用评价的内容体系围绕“水源-供水-用水-效率-生态”五大核心维度展开,各维度相互关联、层层递进,形成完整的评价闭环。

水源开发状况评价是整个体系的基础,聚焦地表水、地下水、再生水、非常规水等不同水源的开发规模、开发比例及开发潜力。其中,地表水开发状况评价需重点梳理河道取水工程、水库蓄水工程等关键设施的建设规模与运行状况,分析地表水开发量占其可利用量的比例,判断地表水开发的合理性;地下水开发状况评价需关注不同区域地下水开采层位、开采量,重点核查是否存在超采现象,

梳理超采区域的分布范围与超采程度；再生水及非常规水开发状况评价则聚焦再生水回用工程、雨水集蓄工程、海水淡化工程等的建设与运行效果，分析非常规水开发利用占总用水量的比例，研判非常规水开发潜力。

供水系统运行状况评价聚焦“输配-保障”两大核心，涵盖供水工程的运行效率、供水范围、供水稳定性等关键指标。在输配效率层面，重点评价供水管道的漏损率、输配水过程中的水量损失等，分析输配系统存在的短板；在供水保障层面，重点评价城乡供水的覆盖率、应急供水能力，梳理不同季节、不同年份供水的波动情况，识别供水保障的薄弱时段与区域。同时，需关注不同供水主体的协同运行状况，例如骨干供水工程与地方小型供水工程的互补衔接情况，确保供水系统的整体稳定性。

用水结构与用水水平评价是分析开发利用合理性的核心环节，需按农业、工业、生活、生态四大用水部门进行细分梳理。农业用水需重点分析灌溉用水规模、灌溉方式的合理性，梳理高耗水作物种植面积占比；工业用水需聚焦重点行业用水规模，分析万元工业增加值用水量等关键指标，识别高耗水工业企业；生活用水需关注城乡居民人均用水量，分析生活用水的浪费现象；生态用水需核查生态流量保障情况、人工生态补水规模，确保生态用水需求得到有效满足。通过对各部门用水状况的梳理，可明确用水结构存在的问题，为优化用水结构提供方向。

开发利用效率评价需结合不同水源、不同用水部门的特点，选取针对性的效率指标。地表水开发效率可通过地表水利用系数、供水保证率等指标衡量；地下水开发效率可通过地下水开采效率、回补率等指标判断；农业用水效率可通过灌溉水利用系数、作物水分生产率等指标评价；工业用水效率可通过重复利用率、万元产值用水量等指标分析；生活用水效率可通过节水器具普及率、人均节水潜力等指标研判。通过多维度效率指标的综合分析，可全面掌握区域水资源开发利用的效率水平，识别效率提升的潜力空间。

生态影响评价是开发利用评价的重要补充，需重点分析开发利用活动对水资源生态系统的扰动。具体包括：地表水开发对河湖生态流量、水生生物栖息地的影响；地下水超采对地面沉降、土壤沙化、植被退化的影响；开发利用过程中尾水排放对水体水质的影响；水利工程建设对流域生态连通性的影响等。通过生态影响评价，可精准识别开发利用活动带来的生态风险，为后续生态修复与开发利用模式优化提供依据。

（二）关键技术路径

水资源开发利用评价的技术路径需遵循“数据整合 - 现状分析 - 问题识别 - 结论研判”的核心逻辑，结合资料收集、实地调研、综合研判等多种手段，确保评价结果的精准性与可靠性。

基础数据整合是评价工作的前提，需构建多源数据融合的数据库。数据来源主要包括：水资源调查获取的基础数据，如降水、径流、蒸发等水文数据，地下水埋深、水质等地下水监测数据；水利工程建设与运行数据，如水库、泵站、取水口等工程的建设规模、运行记录、供水量数据；用水统计数据，如各部门用水量、用水结构、用水效率等统计资料；经济社会发展数据，如人口规模、GDP、产业结构、耕地面积等数据；生态环境数据，如河湖生态流量监测数据、水质监测数据、植被覆盖度数据等。在数据整合过程中，需对不同来源、不同格式的数据进行标准化处理，核查数据的完整性与准确性，剔除异常数据，确保数据质量满足评价要求。

现状分析需结合数据整合结果，采用定性与定量相结合的方法。定量分析主要通过数据统计、指标计算等方式，梳理各维度的现状特征，例如通过统计不同水源的供水量数据，明确水源开发比例；通过计算灌溉水利用系数，掌握农业用水效率水平。定性分析则需结合区域水资源禀赋、经济社会发展阶段、水利工程建设水平等背景条件，对定量分析结果进行解读，例如结合区域气候特征分析农业灌溉用水规模的合理性，结合产业结构特点解读工业用水结构的形成原因。通过定性与定量分析的结合，可全面、客观地梳理区域水资源开发利用的现状特征。

问题识别需基于现状分析结果，结合水资源承载能力、区域发展规划、生态保护要求等核心标尺，精准定位开发利用过程中存在的短板与不足。具体可通过“横向对比 - 纵向对比 - 标准对照”三种方式开展：横向对比即与同类型区域的开发利用水平进行对比，识别本区域存在的差距；纵向对比即与区域不同时期的开发利用状况进行对比，分析发展趋势与存在的问题；标准对照即对照水资源承载能力红线、用水效率控制红线、水功能区限制纳污红线等相关标准，判断开发利用活动是否符合规范要求。通过多维度对比分析，可系统识别水源开发过度、用水结构失衡、利用效率偏低、生态影响突出等核心问题。

结论研判需综合现状分析与问题识别的结果，形成科学、客观的评价结论。结论需明确区域水资源开发利用的总体状况、核心优势、主要问题，同时结合区

域经济社会发展规划与生态保护要求, 预判未来开发利用的趋势。评价结论需具备针对性与实用性, 能够直接为后续供需平衡分析、水资源管理政策制定提供支撑。在结论研判过程中, 需充分征求水利、农业、工业、生态环境等多部门的意见, 确保结论符合区域发展实际, 具备可操作性。

二、水资源供需平衡分析核心逻辑与基础框架

(一) 核心逻辑阐释

水资源供需平衡分析的核心逻辑在于“以需定供、以供控需、供需协调”, 通过系统梳理区域水资源供给能力与需水需求, 分析不同情景下供需匹配关系, 预判供需缺口, 为水资源优化配置与开发利用模式调整提供科学依据。其核心要义在于打破“重供给、轻需求”的传统思维, 实现供给侧与需求侧的协同统筹——供给侧聚焦水资源的可供给能力提升, 需求侧聚焦用水需求的合理管控, 通过供需两侧的协同优化, 实现水资源的供需平衡。

从分析维度来看, 供需平衡分析需兼顾“时间维度”与“空间维度”的协同。时间维度需按不同水文年(丰水年、平水年、枯水年)、不同季节(汛期、非汛期)进行细分, 分析不同时段供需匹配关系, 重点关注枯水年、枯水期等关键时段的供需缺口; 空间维度需按不同行政区域、不同流域、不同用水片区进行细分, 分析不同区域的供需差异, 识别供需矛盾突出的区域。通过时空维度的协同分析, 可全面掌握区域水资源供需平衡的整体状况, 精准定位供需矛盾的关键时段与核心区域。

从情景设定来看, 供需平衡分析需构建“基准情景-优化情景”的对比框架。基准情景基于当前开发利用模式与经济社会发展规划, 预判未来水资源供需状况; 优化情景则结合节水改造、非常规水开发、水资源调配工程建设等优化措施, 分析措施实施后的供需平衡状况。通过不同情景的对比, 可明确优化措施的有效性, 为后续水资源优化配置方案的制定提供依据。同时, 情景设定需充分考虑气候变化、经济社会发展不确定性等因素, 增强分析结果的适应性与可靠性。

(二) 基础框架构建

水资源供需平衡分析的基础框架围绕“供给侧核算-需求侧预测-供需平衡分析-优化方案制定”四大核心环节展开, 各环节紧密衔接, 形成完整的分析体系。

供给侧可利用水资源量核算需结合区域水资源禀赋, 系统梳理地表水、地下

水、再生水、非常规水等不同水源的可供给能力。地表水可利用量需结合流域径流特征、水利工程调蓄能力，扣除生态基流、跨区域出境水量后确定；地下水可利用量需基于地下水补给量、储存量，结合生态保护要求，确定合理的开采上限；再生水可利用量需结合污水处理能力、再生水水质标准，分析不同回用途径的可利用规模；非常规水可利用量需结合区域雨水资源量、海水可利用范围，分析雨水集蓄、海水淡化的潜力。在核算过程中，需充分考虑水利工程的供水能力，包括现有工程的实际供水能力、规划新建工程的新增供水能力，确保供给侧核算结果能够真实反映区域水资源的实际供给水平。

需求侧需水量预测需按农业、工业、生活、生态四大用水部门，结合区域经济社会发展规划，采用科学的预测方法开展。农业需水量预测需结合耕地面积、种植结构调整规划、灌溉方式优化方案，分析不同情景下的灌溉需水量；工业需水量预测需结合 GDP 增长速度、产业结构升级规划、工业节水措施，分析万元工业增加值用水量的变化趋势，进而预判工业总需水量；生活需水量预测需结合人口增长趋势、城镇化率提升规划、居民生活水平提高幅度，分析城乡居民人均用水量的变化，预判生活总需水量；生态需水量预测需结合生态保护规划，分析河湖生态流量、人工生态补水、植被恢复补水等需求，确保生态需水量得到有效保障。在预测过程中，需充分考虑节水措施的实施效果，避免需水量的过度预判。

供需平衡分析需基于供给侧可利用水资源量与需求侧需水量的核算结果，按不同时空情景开展匹配分析。具体包括：年度供需平衡分析，即对比全年可利用水资源量与全年总需水量，判断年度供需是否平衡，核算供需缺口规模；时段供需平衡分析，即按汛期、非汛期等关键时段，对比时段内可利用水资源量与时段需水量，识别时段性供需矛盾；区域供需平衡分析，即按不同行政区域、用水片区，对比区域内可利用水资源量与区域需水量，定位区域供需矛盾。通过多维度供需平衡分析，可全面掌握区域水资源供需矛盾的分布特征，明确矛盾解决的重点方向。

优化方案制定是供需平衡分析的核心目标，需基于供需平衡分析结果，结合区域实际情况，制定针对性的供需优化措施。供给侧优化措施主要包括：新建、改扩建水利工程，提升水资源调蓄与输配能力；加大再生水、非常规水开发利用力度，拓展水资源供给渠道；推进跨区域水资源调配工程建设，优化水资源空间配置。需求侧优化措施主要包括：推进农业节水改造，推广高效灌溉技术；推动

工业节水升级，倒逼高耗水产业转型升级；加强生活节水管理，推广节水器具，提升居民节水意识；优化用水结构，优先保障生态用水与民生用水。通过供给侧与需求侧优化措施的协同实施，可有效化解水资源供需矛盾，实现区域水资源的供需平衡。

第三节 水资源论证的理论与实践

一、水资源论证的理论基础

水资源论证的理论体系以水资源科学为核心，融合生态学、经济学、系统科学等多学科理论成果，形成了涵盖资源属性认知、开发利用约束、生态平衡维系等多维度的理论框架。这些理论不仅明确了水资源论证的核心逻辑，也为实践工作的开展提供了根本性遵循。

（一）水资源可持续利用理论

水资源可持续利用理论是水资源论证的核心指导理论，其核心要义在于实现水资源开发利用与经济社会发展、生态环境保护的协调统一，确保当代人对水资源的利用不损害后代人满足自身需求的能力。该理论强调水资源的有限性与稀缺性，要求在水资源开发利用决策中，摒弃“重开发、轻保护”“重当前、轻长远”的传统理念，将水资源的承载能力作为各类开发活动的约束前提。在水资源论证实践中，可持续利用理论贯穿于论证全过程，从水资源量与质的评估，到开发方案的可行性分析，再到生态影响的预判，均需以是否符合可持续利用要求为核心判断标准。例如，在工业建设项目水资源论证中，需重点论证项目取用水规模是否在区域水资源承载能力范围内，是否采用节水技术减少水资源消耗，是否有效处理废水避免污染水体，确保项目建设不会对区域水资源的长期稳定供给产生不利影响。

（二）水资源承载能力理论

水资源承载能力理论为水资源论证提供了量化约束的理论依据，其核心是指在特定的时空条件下，水资源能够支撑经济社会发展与生态系统良性循环的最大规模。该理论明确了水资源开发利用的“天花板”，是判断各类开发活动是否可行的关键标尺。水资源承载能力并非固定不变的数值，而是受区域水文条件、生

态目标、技术水平、产业结构等多种因素影响，具有动态性与区域性特征。在水资源论证中，需结合区域水资源禀赋特征，科学评估区域水资源承载能力现状，进而判断拟开发项目或规划的取用水规模是否在承载能力允许范围内。对于水资源短缺区域，需严格控制高耗水项目的审批，推动产业结构向节水型转型；对于水资源相对丰富的区域，也需避免盲目开发导致生态流量被挤占，确保水资源承载能力不被突破。同时，水资源承载能力理论还要求在论证过程中，充分考虑不同发展阶段的水资源需求变化，为区域水资源的动态调控提供理论支撑。

（三）生态水文学理论

生态水文学理论聚焦于水资源与生态系统之间的相互作用关系，为水资源论证中生态影响评估提供了重要理论支撑。该理论认为，水资源不仅是经济社会发展的支撑资源，更是生态系统赖以生存的核心要素，河流、湖泊、湿地等水域的生态功能发挥，依赖于合理的水量、水质与水文过程。在水资源开发利用过程中，若过度挤占生态用水，将导致河流断流、湿地萎缩、生物多样性减少等一系列生态问题。因此，在水资源论证中，需基于生态水文学理论，重点论证开发活动对生态系统的影响，明确生态基流保障要求。例如，在水利枢纽项目论证中，需评估项目运行对下游河道生态基流的影响，制定合理的下泄流量方案，确保下游河流生态系统的正常运转；在跨流域调水项目论证中，需充分考虑调出区生态系统的承载能力，避免因水量调出导致调出区生态环境恶化。

（四）公共物品与外部性理论

水资源具有公共物品属性，其开发利用过程中存在明显的外部性，这一特征决定了水资源论证必须兼顾公共利益与外部影响的协调。公共物品理论认为，水资源作为全民共享的资源，其开发利用决策需充分考虑社会公共利益，避免少数主体的开发行为损害多数人的利益。外部性理论则指出，水资源开发利用活动可能产生正外部性（如防洪、灌溉、供水保障）或负外部性（如水体污染、生态破坏），需要通过科学的论证与调控，最大化正外部性，最小化负外部性。在水资源论证实践中，这一理论要求论证工作不仅关注项目自身的取用水效益，更要全面评估其对周边区域、其他用水主体及生态环境的外部影响。例如，在工业园区水资源论证中，需评估园区废水排放对周边水体的污染影响，以及园区取用水对周边农业用水、居民生活用水的挤占影响，提出针对性的防控措施，实现外部影响的内部化调控。

二、水资源论证的实践流程与关键环节

水资源论证的实践工作具有较强的系统性与规范性，需遵循“前期准备—现状调查—分析论证—结论编制”的核心流程，每个环节均有明确的工作目标与技术要求，确保论证成果的科学性与可靠性。

（一）前期准备阶段

前期准备是水资源论证工作的基础环节，其核心目标是明确论证范围、对象与重点，梳理相关基础资料，制定科学的论证方案。首先，需依据拟开发项目或规划的性质、规模、取用水方式，结合区域水资源管理要求，明确论证范围，包括取用水水源范围、用水区域范围、影响涉及范围等。例如，线性工程（如输水管道、铁路、公路）的论证范围需涵盖工程沿线的水资源影响区域，而点状工程（如工业厂房、水电站）的论证范围则以项目周边一定区域为主。其次，需全面收集相关基础资料，包括区域水文气象资料、水资源调查评价成果、水资源规划文件、用水定额标准、生态环境保护要求、项目可行性研究报告等。最后，基于资料收集情况与论证需求，制定详细的论证方案，明确各阶段的工作内容、技术方法、时间安排与人员分工，为后续论证工作的有序开展提供保障。

（二）现状调查与分析阶段

现状调查与分析是水资源论证的核心基础工作，旨在全面掌握论证区域的水资源禀赋、开发利用现状、生态环境状况及用水需求特征。该阶段主要包括三个方面的核心内容：一是水资源现状调查，通过收集区域水文监测数据、水资源评价成果等资料，分析区域地表水资源量、地下水资源量、水资源总量及分布特征，明确水源的水量稳定性与水质达标情况；同时，重点调查拟取用水水源的现状利用情况，包括已有取水口数量、取用水规模、用水结构等。二是用水现状分析，梳理论证区域内工业、农业、生活、生态等各类用水主体的用水规模、用水效率、节水潜力等，评估区域用水总量控制目标的落实情况。三是生态环境现状调查，调查论证区域内河流、湖泊、湿地等水域的生态功能、生态基流保障现状，以及水体水质、生物多样性等生态环境指标，识别区域生态环境的敏感点与保护要求。通过现状调查与分析，可清晰掌握区域水资源开发利用的基础条件，为后续的可行性论证提供数据支撑。

（三）核心论证阶段

核心论证阶段是水资源论证的关键环节，需基于前期调查成果，围绕取用水的可行性、合理性与安全性开展系统论证，具体包括水源可靠性论证、用水合理性论证、生态影响论证及水资源节约与保护措施论证四个核心方面。

水源可靠性论证是论证的首要内容，重点分析拟取用水水源的水量是否能够满足项目或规划的用水需求，水质是否符合用水标准。对于地表水水源，需结合水文系列资料，分析不同水文年（丰水年、平水年、枯水年）的水量保障程度，确保在极端枯水条件下仍能满足基本用水需求；对于地下水水源，需评估地下水补给能力，避免长期过量开采导致地下水位下降、地面沉降等问题。同时，需依据相关水质标准，分析水源水质指标是否达标，若存在水质超标情况，需论证水质改善措施的可行性。

用水合理性论证聚焦于用水规模与用水方式的合理性，需结合项目或规划的产业类型、生产工艺、用水定额等，分析取用水规模是否科学合理，是否符合区域用水总量控制与定额管理要求。例如，对于工业项目，需对比同行业先进用水定额，论证项目用水定额的合理性，分析是否采用先进的节水技术与工艺，是否存在浪费水资源的情况；对于农业项目，需论证灌溉方式、灌溉定额的合理性，推动节水灌溉技术的应用。同时，还需论证用水结构的合理性，避免高耗水、低效益的用水需求挤占生态用水与基本生活用水。

生态影响论证是基于生态水文学理论，评估取用水活动对区域生态系统的潜在影响。需重点分析取用水活动对河流生态基流、湖泊水位、湿地生态系统的影响，判断是否会导致生态系统退化、生物多样性减少等问题。对于可能产生不利生态影响的开发活动，需提出针对性的生态保护措施，如生态流量保障方案、湿地补水方案等，确保生态系统功能不被破坏。

水资源节约与保护措施论证则是针对论证过程中识别的问题，提出切实可行的节水与水资源保护措施。节水措施需结合项目或规划的用水特征，明确节水技术改造、中水回用、雨水集蓄利用等具体措施及预期效果；水资源保护措施则包括水污染防治措施、水源地保护措施、地下水超采防控措施等，确保取用水活动不会对水资源环境造成破坏。

（四）结论编制与评审阶段

结论编制与评审是水资源论证的收尾环节，旨在总结论证成果，形成科学、

规范的论证报告，并通过专业评审确保论证结论的可靠性与权威性。首先，需基于前期的调查与论证成果，编制水资源论证报告，明确论证范围、基础资料、现状分析结论、核心论证结论、节水与保护措施建议等核心内容，报告语言需严谨规范，逻辑清晰，结论明确。其次，论证报告需提交至相关水资源管理部门组织专家评审，专家团队需结合区域水资源管理要求、专业技术标准，对报告的科学性、合理性、可行性进行全面评审，提出评审意见。最后，论证单位需根据评审意见对报告进行修改完善，形成最终的论证报告，作为水资源管理部门审批取水许可、项目立项的重要依据。

三、水资源论证实践中的突出问题

随着水资源管理力度的不断加大，水资源论证制度在规范水资源开发利用行为、保障水资源安全方面发挥了重要作用，但在实践过程中，受区域水资源禀赋差异、论证技术水平、管理机制等多种因素影响，仍存在一系列突出问题，制约了论证工作的质量与成效。

（一）论证针对性不足，“一刀切”现象突出

当前部分水资源论证工作存在针对性不强的问题，未能充分结合项目或规划的具体特征、区域水资源禀赋差异开展个性化论证。一方面，论证内容与方法较为固化，多采用统一的模板与框架，对不同类型项目（如工业、农业、水利工程）的用水特征、生态影响差异关注不足。例如，对高耗水工业项目与低耗水服务业项目采用相同的论证标准，未能重点聚焦高耗水项目的节水潜力与水资源承载力匹配性论证；另一方面，对区域水资源差异的考量不足，在水资源短缺区域与水资源丰富区域采用相似的论证尺度，未能针对缺水区域制定更为严格的论证标准，也未能充分考虑丰水区域的生态流量保障需求。这种“一刀切”的论证模式，导致论证成果难以准确反映项目的实际水资源影响，降低了论证工作的科学性与实用性。

（二）基础资料支撑不足，数据可靠性有待提升

基础资料的完整性与可靠性是保障水资源论证质量的关键，但在实践中，部分区域存在基础资料短缺、数据精度不足、更新不及时等问题。一是部分偏远区域或小型流域缺乏长期的水文监测站点，水文监测数据不完整，导致水资源量评估、水源可靠性论证缺乏充足的数据支撑；二是部分区域的用水现状调查数据更

新不及时，难以准确反映当前区域的用水结构、用水效率变化情况，影响用水合理性论证的准确性；三是生态环境相关数据（如生态基流、生物多样性）获取难度较大，部分论证工作中仅采用经验值或类比数据，难以准确评估取用水活动对生态系统的实际影响。基础资料的不足，导致部分论证结论缺乏科学性与说服力，难以有效支撑水资源管理决策。

（三）生态影响论证深度不足，生态保护重视不够

尽管生态水文学理论已成为水资源论证的重要理论基础，但在实践中，部分论证工作对生态影响的论证深度仍显不足，存在“重经济、轻生态”的倾向。一是生态影响论证内容较为简化，多停留在定性描述层面，缺乏对生态影响的量化评估，难以准确判断取用水活动对生态系统的影响程度；二是对生态基流的保障论证不够充分，部分水利工程、跨流域调水项目的论证中，未能结合河流生态系统的实际需求，科学确定生态基流保障标准，导致项目运行后下游河道生态基流不足，生态系统退化；三是生态保护措施的针对性与可操作性不强，部分论证报告中提出的生态保护措施较为笼统，缺乏具体的实施路径、责任主体与保障机制，难以在实际工作中落地执行。

（四）论证成果应用与监管衔接不畅

水资源论证的核心目标是为水资源管理决策提供科学依据，但在实践中，存在论证成果应用不充分、与后续监管衔接不畅的问题。一方面，部分项目存在“重论证、轻落实”的现象，论证报告中提出的节水措施、水资源保护措施未能在项目建设与运行过程中有效落实，导致论证成果流于形式；另一方面，论证成果与取用水许可监管、水资源动态监测的衔接不足，缺乏对项目运行过程中取用水情况、生态影响情况的长期跟踪监测，难以及时发现并纠正项目运行中存在的水资源浪费、环境污染等问题。此外，部分区域的水资源论证评审机制不够完善，评审专家的专业性与独立性难以保障，也影响了论证成果的质量与应用效果。

四、水资源论证实践的优化路径

针对当前水资源论证实践中存在的突出问题，需结合区域水资源管理需求，从提升论证针对性、强化基础资料支撑、深化生态影响论证、完善成果应用与监管机制等方面入手，优化论证实践路径，提升论证工作的质量与成效。

（一）精准定位论证重点，提升论证针对性

结合项目类型与区域水资源禀赋差异，开展个性化、差异化论证，避免“一刀切”。一方面，针对不同类型项目制定差异化的论证重点：工业项目重点论证用水定额合理性、节水技术应用、废水处理与回用；农业项目重点论证灌溉方式优化、节水灌溉技术推广、农业面源污染防控；水利工程项目重点论证生态基流保障、上下游水资源协调配置；跨流域调水项目重点论证调出区与调入区的水资源平衡、生态影响协同防控。另一方面，针对不同水资源禀赋区域制定差异化的论证标准：水资源短缺区域严格控制高耗水项目论证审批，重点论证用水总量控制与节水潜力；水资源丰富区域重点论证生态流量保障、水资源高效利用，避免盲目开发导致生态破坏。同时，鼓励论证单位结合项目实际创新论证方法，提升论证成果的针对性与实用性。

（二）强化基础资料建设，提升数据支撑能力

加强水文监测、用水调查、生态环境监测等基础资料建设，为水资源论证提供可靠的数据支撑。一是完善水文监测网络，在偏远区域、小型流域增设水文监测站点，提升水文监测数据的完整性与精度；推进水文监测技术智能化升级，采用遥感、物联网等先进技术，实现水资源量、水质的实时动态监测。二是建立健全用水现状调查更新机制，定期开展区域用水普查，及时掌握用水结构、用水效率变化情况，更新用水定额标准，确保用水合理性论证的准确性。三是加强生态环境监测体系建设，重点开展河流生态基流、湿地生态水量、生物多样性等指标的监测，建立生态环境基础数据库，为生态影响论证提供量化数据支撑。同时，推动跨部门数据共享，整合水利、生态环境、农业、工业等部门的基础资料，提升资料利用效率。

（三）深化生态影响论证，强化生态保护导向

以生态水文学理论为指导，提升生态影响论证的深度与广度，将生态保护要求贯穿论证全过程。一是完善生态影响量化评估方法，结合区域生态系统特征，建立科学的生态影响评估指标体系，对取水活动的生态影响进行量化分析，准确判断影响程度与范围。二是科学确定生态基流保障标准，结合河流生态系统的实际需求，综合考虑水文过程、生物栖息地保护、水环境容量等因素，制定差异化的生态基流保障标准，确保水利工程、跨流域调水等项目运行过程中下游河道生态基流得到有效保障。三是提升生态保护措施的针对性与可操作性，结合论证

过程中识别的生态影响问题，制定具体的生态保护措施，明确实施路径、时间节点、责任主体与保障机制，确保措施能够落地执行。

（四）完善成果应用机制，强化全流程监管

构建“论证—审批—监管—评估”全流程闭环管理机制，提升论证成果的应用效果。一是强化论证成果与取水许可审批的衔接，将论证报告中的节水措施、水资源保护措施、生态基流保障要求作为取水许可审批的重要依据，对未落实论证要求的项目不予审批。二是建立论证成果落实跟踪监管机制，加强对项目建设与运行过程中取水情况、节水措施落实情况、生态保护措施执行情况的长期跟踪监测，定期开展论证成果落实效果评估，对未按要求落实的项目责令限期整改。三是完善论证评审机制，优化评审专家遴选方式，保障评审专家的专业性与独立性；建立评审意见反馈与整改跟踪机制，确保评审发现的问题得到有效解决。四是加强宣传引导，提升项目建设单位的水资源保护意识，推动其主动落实论证报告提出的各项要求，形成政府监管、企业自律、社会监督的协同管理格局。

水资源论证作为水资源管理的关键制度，其理论体系与实践流程的完善程度直接关系到水资源的可持续利用与区域经济社会的协调发展。立足水资源可持续利用、水资源承载能力等核心理论，规范论证实践流程，解决当前论证工作中存在的针对性不足、基础资料薄弱、生态影响论证深度不够、成果应用衔接不畅等问题，是提升水资源论证质量的关键路径。未来，随着水资源管理精细化水平的不断提升，需进一步推动水资源论证理论创新与实践优化，强化多学科融合，创新论证技术方法，完善全流程监管机制，使水资源论证真正成为保障水资源安全、推动生态环境保护与经济社会可持续发展的重要支撑。

第四节 基于综合勘测的水资源可持续性评价

一、基于综合勘测的水资源可持续性评价框架与核心内容

（一）评价框架构建原则

基于综合勘测的水资源可持续性评价框架的构建，需紧密结合综合勘测的技术特点与可持续性评价的核心需求，遵循以下四项核心原则：一是科学性原则，框架设计需基于水文循环规律、水资源系统理论等科学基础，确保评价逻辑清晰、

指标选取合理、方法运用得当，充分体现综合勘测数据的支撑价值；二是系统性原则，框架需统筹覆盖水资源系统、社会经济系统与生态环境系统，全面考量各系统间的相互作用与影响，避免单一系统或单一要素的片面评价；三是实用性原则，框架需紧密结合区域水资源管理的实际需求，指标选取需兼顾可操作性与针对性，评价流程需简洁高效，确保评价结果能够直接服务于决策实践；四是动态性原则，框架需充分考虑综合勘测的动态监测能力，预留动态评价模块，能够根据长期勘测数据的积累，实现对水资源可持续性的动态追踪与更新评价。

（二）总体评价框架

基于上述原则，构建“勘测数据整合 - 系统维度分解 - 指标体系构建 - 综合评价实施 - 结果应用反馈”的五阶段总体评价框架。其中，勘测数据整合是基础环节，核心是对综合勘测获取的水文、地质、生态、社会经济等多元数据进行梳理、校验与融合，形成标准化的评价数据集；系统维度分解是核心环节，将水资源可持续性评价划分为水资源供给可持续性、开发利用合理性、生态环境协调性三个核心维度，明确各维度的评价重点；指标体系构建是关键环节，基于各评价维度的核心需求，选取能够量化反映勘测数据特征的评价指标，形成层次清晰、逻辑严密的指标体系；综合评价实施是核心环节，运用科学的评价方法对各维度指标进行量化评估与综合研判，得出水资源可持续性评价结果；结果应用反馈是闭环环节，将评价结果应用于水资源管理实践，并根据管理实践中的反馈信息，优化勘测方案与评价框架，实现“勘测 - 评价 - 管理”的良性循环。

（三）核心评价内容

结合总体评价框架，基于综合勘测数据支撑，将水资源可持续性评价的核心内容划分为水资源供给可持续性评价、开发利用合理性评价、生态环境协调性评价三个核心维度，各维度既相互独立又相互关联，共同构成完整的评价体系。

1. 水资源供给可持续性评价

该维度主要基于综合勘测获取的水资源数量与质量数据，评估区域水资源的长期供给能力与稳定性，是水资源可持续性评价的基础。核心评价内容包括：一是水资源数量可持续性，基于降水、径流、地下水储量等长期勘测数据，分析水资源总量的时空分布特征与演变趋势，评估水资源供给的稳定性与保障能力；二是水资源质量可持续性，依托水质勘测数据，分析水体污染物的时空分布与变化规律，评估水资源质量是否满足长期利用需求，识别影响水质可持续性的关键因

素；三是水资源再生能力可持续性，基于水文循环勘测数据，分析区域水资源的再生能力与更新速率，评估水资源系统的自我修复能力，研判长期开发利用对水资源再生能力的影响。

2. 开发利用合理性评价

该维度基于综合勘测获取的开发利用状况数据，评估区域水资源开发利用强度、用水效率与结构的合理性，是衡量水资源可持续性的关键环节。核心评价内容包括：一是开发强度合理性，基于取水口勘测、水资源开发利用程度勘测数据，分析区域水资源开发利用率、地下水超采率等指标，评估开发强度是否超出水资源承载能力；二是用水效率合理性，依托用水定额勘测、水利工程效率勘测数据，评估工业用水重复利用率、农业灌溉水有效利用系数、城镇供水管网漏损率等指标，研判用水效率是否达到区域先进水平，识别节水潜力；三是用水结构合理性，基于用水结构勘测数据，分析生活用水、生产用水、生态用水的比例关系，评估用水结构是否与区域水资源禀赋、社会经济发展阶段相适配，是否保障了基本生态用水需求。

3. 生态环境协调性评价

该维度基于综合勘测获取的生态环境响应数据，评估水资源开发利用与生态环境系统的协调程度，是水资源可持续性评价的核心目标之一。核心评价内容包括：一是河湖生态系统协调性，基于河湖生态流量勘测、河湖形态勘测数据，评估水资源开发对河湖生态流量的保障程度，分析河湖水域面积、水质变化对水生生物栖息地的影响；二是地下水生态环境协调性，依托地下水水位动态勘测、土壤含水量勘测数据，评估地下水开发对土壤墒情、植被生长的影响，研判地下水漏斗区、地面沉降等生态问题的发展趋势；三是区域生态系统完整性，基于生态植被遥感勘测、湿地生态系统勘测数据，分析水资源开发利用对区域植被覆盖度、湿地面积、生物多样性的影响，评估生态系统的完整性与稳定性。

二、基于综合勘测的水资源可持续性评价实施流程与技术要点

（一）实施流程

基于综合勘测的水资源可持续性评价的实施流程需紧密结合综合勘测的工作进度与评价需求，遵循“前期准备-勘测数据整合-指标体系构建与量化-综合评价-结果分析与应用”的五步骤流程，确保评价工作有序推进、结果科学可靠。

1. 前期准备阶段

该阶段的核心任务是明确评价目标、划定评价范围、制定勘测方案与评价方案。首先,根据区域水资源管理需求,明确评价的核心目标与重点方向,如重点评估地下水超采区域的水资源可持续性,或评估跨流域调水工程影响区域的生态环境协调性;其次,基于综合勘测的初步成果,精准划定评价的空间范围与时间尺度,空间范围需覆盖水资源系统的完整边界,时间尺度需满足动态评价的需求,通常选取 5-10 年的长期勘测数据;最后,结合评价目标与范围,制定针对性的综合勘测方案与评价方案,明确勘测的技术手段、监测点位、数据精度要求,以及评价的方法、指标选取原则等。

2. 勘测数据整合阶段

该阶段是评价工作的基础,核心任务是对综合勘测获取的多元数据进行系统梳理、校验、标准化与融合。首先,对勘测数据进行分类整理,按照水资源数量、质量、开发利用、生态环境等类别进行归档,形成原始数据集;其次,开展数据质量校验,剔除异常数据、补充缺失数据,确保数据的完整性与精准性;再次,进行数据标准化处理,将不同格式、不同单位的勘测数据转换为统一的标准格式,便于后续分析与计算;最后,构建评价数据集,将标准化后的多元数据进行融合,形成覆盖评价全维度、全时段的综合数据集,为指标量化与综合评价提供数据支撑。

3. 指标体系构建与量化阶段

该阶段的核心任务是基于评价目标与勘测数据可获取性,构建科学合理的评价指标体系,并利用整合后的勘测数据对指标进行量化计算。首先,遵循科学性、系统性、实用性原则,从水资源供给可持续性、开发利用合理性、生态环境协调性三个维度选取评价指标,指标选取需确保能够通过勘测数据进行量化,避免选取无法量化或数据获取难度过大的指标;其次,明确各指标的量化方法与计算标准,基于整合后的勘测数据,计算各指标的实际值;最后,对量化后的指标进行归一化处理,消除不同指标间的量纲差异,为综合评价奠定基础。

4. 综合评价阶段

该阶段的核心任务是运用科学的评价方法,对归一化后的指标进行综合分析,得出水资源可持续性评价结果。首先,根据各指标的重要程度,采用层次分析法、熵权法等方法确定各指标的权重,权重确定需充分结合区域水资源特征与评价重

点；其次，选取合适的综合评价模型，如综合指数法、模糊综合评价法等，对各维度指标与总体指标进行综合计算，得出水资源可持续性综合得分；最后，根据综合得分与各维度得分，划分水资源可持续性等级，如可持续、基本可持续、临界不可持续、不可持续四个等级，明确区域水资源可持续性的现状水平。

5. 结果分析与应用阶段

该阶段的核心任务是深入分析评价结果，识别制约水资源可持续性的关键因素，并提出针对性的应用建议。首先，对综合评价结果进行深入解读，分析各维度得分的差异的原因，明确影响水资源可持续性的核心制约因素，如地下水超采、用水效率低下、生态流量不足等；其次，结合综合勘测数据，追溯制约因素产生的根源，为后续管理措施的制定提供精准依据；最后，基于评价结果与制约因素分析，提出水资源优化配置、节水减排、生态保护修复等针对性的管理建议，将评价结果转化为具体的管理实践，并建立评价结果反馈机制，根据管理实践效果优化后续的勘测方案与评价工作。

（二）技术要点

1. 勘测数据的质量控制技术要点

勘测数据的质量直接决定评价结果的可靠性，因此需强化数据质量控制。在数据采集阶段，需严格遵循勘测技术规范，确保监测点位的代表性、监测仪器的精度与稳定性；在数据整理阶段，需建立数据校验机制，采用异常值检测、相关性分析等方法剔除错误数据，对缺失数据采用合理的插值方法进行补充；在数据融合阶段，需采用数据同化技术，整合不同来源、不同精度的勘测数据，提升数据的一致性与完整性。

2. 指标体系的针对性构建技术要点

指标体系的构建需充分结合区域水资源特征与评价目标，避免指标体系的泛化。对于水资源短缺区域，应重点强化水资源供给可持续性与用水效率相关指标；对于水生态环境脆弱区域，应重点突出生态环境协调性相关指标；同时，指标选取需充分考虑勘测数据的可获取性，确保每个指标都有对应的勘测数据支撑，避免选取抽象、无法量化的指标。

3. 评价方法的适配性选择技术要点

评价方法的选择需结合评价指标的特征与评价目标的需求，确保方法的科学性与实用性。对于指标体系清晰、权重易确定的区域，可采用综合指数法；对于

评价指标存在模糊性、不确定性的区域,可采用模糊综合评价法;同时,可结合多种评价方法进行交叉验证,提升评价结果的可靠性。此外,评价方法的选择还需考虑操作的简便性,避免采用过于复杂、难以推广的评价方法。

4. 动态评价的技术实现要点

基于综合勘测的动态监测能力,实现水资源可持续性的动态评价是提升评价时效性的关键。需建立长期的勘测数据更新机制,定期补充新的勘测数据,对评价指标进行动态更新;同时,构建动态评价模型,能够根据数据的更新自动调整评价结果,实现对水资源可持续性的实时追踪与预警;此外,需建立评价结果的动态反馈机制,及时将动态评价结果应用于水资源管理实践,提升管理的时效性与针对性。

基于综合勘测的水资源可持续性评价,是破解当前水资源管理难题、推动水资源可持续利用的重要技术手段,其核心优势在于依托综合勘测的全要素、动态化数据支撑,实现对水资源可持续性的科学、精准、全面评估。本章从评价内涵与核心目标、综合勘测的支撑作用、评价框架与核心内容、实施流程与技术要点四个方面,系统构建了基于综合勘测的水资源可持续性评价体系,明确了“勘测-评价-管理”的良性循环思路。

在实际应用中,基于综合勘测的水资源可持续性评价需紧密结合区域水资源特征与管理需求,强化勘测数据的质量控制,优化指标体系与评价方法,充分发挥综合勘测的技术优势,提升评价结果的科学性与实用性。未来,随着综合勘测技术的不断创新与发展,如遥感技术、大数据技术、物联网技术等 in 勘测领域的深度应用,基于综合勘测的水资源可持续性评价将朝着更精准、更高效、更智能的方向发展,为水资源可持续管理提供更加强有力的技术支撑,推动实现水资源利用与社会经济发展、生态环境保护的协调共赢。

第九章 防洪评价中的水文综合勘测技术

第一节 设计洪水计算原理与方法

一、设计洪水计算的核心原理

设计洪水计算的核心原理源于水文循环规律、概率统计理论与流域产汇流原理的有机融合，其核心逻辑是：通过水文勘测获取流域基础数据与洪水观测资料，基于水文循环规律分析洪水形成机制，利用概率统计方法量化洪水发生的概率特征，结合产汇流原理推演洪水过程，最终确定符合设计标准的洪水特征值与洪水过程。三大核心原理相互支撑，构成设计洪水计算的理论框架，其中水文循环与产汇流原理是理解洪水形成机制的基础，概率统计原理是实现洪水风险量化的核心。

（一）水文循环与洪水形成原理

水文循环是流域洪水形成的根本驱动机制，降水作为洪水形成的主要补给来源，其时空分布特征直接决定洪水的生成潜力；下垫面条件则通过影响降水的截留、下渗、蒸发等过程，调控洪水的形成强度与过程。设计洪水计算的首要前提是明确流域水文循环特征，厘清洪水形成的关键环节，即降水—截留—下渗—产流—汇流的完整过程。在降水环节，需重点关注降水强度、历时、笼罩面积等参数，这些参数直接决定产流总量与产流速度；在截留与下渗环节，植被覆盖度、土壤类型、地形地貌等下垫面因素发挥主导作用，例如植被覆盖率高的区域截留量较大，土壤孔隙度高的区域下渗能力强，均会削弱产流强度；产流环节是降水转化为地表径流、地下径流的过程，不同流域的产流机制存在差异，如湿润地区多为蓄满产流，干旱地区多为超渗产流；汇流环节则是坡面径流汇集至河道，再沿河道向下游演进的过程，河道形态、坡度、糙率等因素影响汇流速度与洪水过程形态。

理解水文循环与洪水形成原理，是设计洪水计算方法选择与参数确定的基础。例如，在湿润流域与干旱流域的设计洪水计算中，需根据不同的产流机制选择对

应的计算模型；在地形复杂流域与平原流域，需结合汇流特征调整汇流参数，确保计算结果符合流域实际洪水特性。

（二）概率统计原理

由于洪水现象的随机性，单一历史洪水事件无法直接作为工程设计依据，需通过概率统计方法分析历史洪水资料，揭示洪水发生的概率规律，进而确定不同重现期对应的设计洪水指标，这是设计洪水计算的核心原理之一。概率统计原理在设计洪水计算中的应用，核心是构建洪水频率曲线，通过对历史洪水特征值的统计分析，确定洪水特征值与重现期之间的函数关系。

其核心逻辑是：将历史观测的洪水特征值视为随机变量的样本，通过样本分析推断总体分布规律，进而预估不同概率（重现期）下的洪水特征值。在实际应用中，需首先对历史洪水资料进行可靠性、一致性与代表性检验，确保样本能够真实反映流域洪水总体特征。可靠性检验重点核查观测数据的准确性，排除观测误差、资料缺失等问题；一致性检验旨在消除流域下垫面变化、观测方法调整等因素对洪水资料的影响，确保不同时期的洪水资料具有可比性；代表性检验则判断样本长度与样本分布是否能够充分反映流域洪水的统计规律，若样本代表性不足，需通过插补延长、区域洪水分析等方法补充完善。

基于检验后的历史洪水资料，选择合适的频率分布模型拟合洪水特征值的分布规律，通过参数估计确定分布函数，最终通过分布函数计算不同重现期对应的设计洪水特征值。概率统计原理的应用，实现了从历史洪水经验总结到未来洪水风险预估的跨越，是设计洪水计算标准化、科学化的关键支撑。

（三）流域产汇流原理

流域产汇流原理是设计洪水过程计算的核心依据，其核心是通过模拟流域内降水转化为洪水过程的物理机制，推演设计暴雨对应的洪水过程线，为工程设计提供完整的洪水荷载过程。与仅计算洪峰流量、洪量等特征参数相比，洪水过程线能够更全面地反映洪水的时间分布特征，对于水库调度、泄洪设施设计等工程而言，具有更为重要的实用价值。

产汇流原理在设计洪水计算中的应用，主要分为产流计算与汇流计算两个环节。产流计算的核心是确定设计暴雨中转化为径流的部分，即产流量，其计算需结合流域下垫面条件与降水特征，选择合适的产流模型，明确产流阈值与产流规律。汇流计算则是将计算出的产流量转化为河道洪水过程线，包括坡面汇流与河

道汇流两个阶段，坡面汇流是径流在坡面上的汇集过程，受地形、植被等因素影响；河道汇流是径流沿河道的演进过程，需考虑河道断面形态、糙率、比降等参数对水流速度的影响。通过产汇流模型的耦合应用，可实现从设计暴雨到设计洪水过程线的完整推演，为工程设计提供更为精准的洪水荷载依据。

二、设计洪水计算的常用方法

根据流域水文资料条件、洪水特性及工程设计需求，设计洪水计算形成了多种常用方法，不同方法的适用场景与技术逻辑存在差异，但核心目标均是精准量化设计洪水特征。结合防洪评价中水文综合勘测的实际应用场景，常用的设计洪水计算方法主要包括历史洪水调查分析法、频率计算法、暴雨洪水途径法三类。各类方法并非孤立应用，在实际工作中需根据资料条件进行组合运用，以提升计算结果的可靠性。

（一）历史洪水调查分析法

历史洪水调查分析法是通过实地调查、文献考证等方式，获取流域内未被水文观测记录的历史洪水信息，补充完善洪水样本系列，进而提升设计洪水计算精度的一种基础方法。该方法的核心优势在于能够延长洪水样本长度，尤其是获取稀遇洪水事件的信息，弥补短期观测资料对极端洪水过程反映不足的缺陷，对于资料短缺流域或稀遇设计洪水计算具有不可替代的作用。

历史洪水调查的核心内容包括历史洪水发生的时间、洪水痕迹、洪水成因及对应的流域下垫面条件等。在调查实施过程中，需结合流域地形地貌，重点核查沿河居民点、古建筑、河道两岸的洪水痕迹，如堤坝溃口痕迹、房屋淹没高度、桥梁冲刷痕迹等，通过水准测量确定洪水水位；同时，借助地方志、历史文献、民间口述等资料，考证洪水发生的年代、持续时间及影响范围。对于调查获取的历史洪水信息，需进行系统性验证，包括洪水痕迹的真实性核查、水位与流量的换算合理性分析、历史洪水重现期的科学判定等，确保调查资料的可靠性与准确性。

在获取可靠的历史洪水资料后，将其与实测洪水资料整合，形成完整的洪水样本系列，为后续频率计算提供更具代表性的样本基础。需要注意的是，历史洪水调查分析法的应用效果依赖于调查区域的历史文化积淀与地形条件，对于人类活动影响剧烈、历史资料匮乏的流域，其应用存在一定局限性。

（二）频率计算法

频率计算法是基于概率统计原理，通过对洪水样本系列的统计分析，构建洪水频率分布模型，进而计算不同重现期设计洪水特征值的核心方法，是设计洪水计算中应用最为广泛的方法之一。该方法的核心逻辑是通过样本推断总体，利用统计规律量化洪水风险，其应用前提是拥有足够长度、可靠的实测洪水资料或整合后的历史洪水与实测洪水混合样本系列。

频率计算法的实施过程主要包括样本系列整理、频率分布模型选择、参数估计及成果合理性检验四个核心步骤。在样本系列整理阶段，需对实测洪水资料进行筛选，剔除受人类活动（如水库调度、河道整治）影响显著的异常数据，确保样本的一致性；同时，结合历史洪水调查成果，对样本系列进行插补延长，提升样本代表性。在频率分布模型选择阶段，需根据流域洪水特性与样本分布特征，选择适配的分布模型，常用的模型包括皮尔逊Ⅲ型分布、耿贝尔分布、对数正态分布等，其中皮尔逊Ⅲ型分布因能够较好地拟合我国多数流域的洪水分布特征，被广泛应用于设计洪水计算中。

参数估计是频率计算法的核心环节，其目标是确定所选频率分布模型的参数，使模型能够最大程度贴合样本分布特征，常用的参数估计方法包括矩法、极大似然法、适线法等。其中，适线法由于能够结合水文专业经验进行主观调整，兼顾样本统计规律与流域实际洪水特性，在实际工作中应用最为普遍。在参数确定后，需进行成果合理性检验，从三个维度开展验证：一是与邻近流域的设计洪水成果进行对比，分析是否符合区域洪水规律；二是结合流域自然地理特征，检验计算结果与流域洪水成因的匹配性；三是对不同参数估计方法的计算成果进行比较，分析结果的稳定性与可靠性。

（三）暴雨洪水途径法

暴雨洪水途径法是在流域实测洪水资料短缺或不可靠时，通过分析设计暴雨与洪水之间的转化关系，由设计暴雨推求设计洪水的一种间接计算方法。该方法的核心依据是洪水形成的基本原理，即洪水主要由暴雨补给，在明确流域产汇流规律的前提下，可通过模拟暴雨转化为洪水的过程，实现设计洪水的推求。该方法适用于缺乏实测洪水资料的小流域、新建流域或受人类活动影响导致洪水资料失真的区域。

暴雨洪水途径法的实施需经历设计暴雨计算、产流计算、汇流计算三个核心

环节。设计暴雨计算是该方法的基础，其目标是确定特定重现期下的暴雨强度、历时及空间分布特征，需通过对流域实测暴雨资料的频率分析，或采用区域暴雨频率分析成果，确定设计暴雨参数。在产流计算环节，需根据流域下垫面条件与暴雨特征，选择合适的产流模型，如蓄满产流模型、超渗产流模型等，计算设计暴雨对应的产流量，明确产流的时空分布。汇流计算环节则是将产流量转化为河道洪水过程线，通过选用合适的汇流模型，如单位线法、瞬时单位线法、推理公式法等，模拟坡面汇流与河道汇流过程，最终得到设计洪水过程线及对应的洪峰流量、洪量等特征参数。

需要注意的是，暴雨洪水途径法的计算精度依赖于设计暴雨计算的准确性与产汇流模型的适配性，因此在应用过程中，需充分结合流域水文勘测资料，深入分析流域暴雨特性与产汇流规律，合理选择模型参数，确保计算成果能够真实反映流域洪水特征。

第二节 洪水风险分析与区划技术

一、洪水风险分析与区划的核心流程

洪水风险分析与区划是一项系统性的技术工作，需遵循“资料收集与整理—风险识别—风险评估—风险区划—成果验证与应用”的核心流程，各流程环节紧密衔接、逻辑闭环，确保技术实施的科学性与规范性。其中，资料收集与整理是技术实施的基础保障，风险识别与评估是核心技术环节，风险区划是成果转化的关键载体，成果验证与应用是技术价值实现的最终途径。

（一）资料收集与整理

资料收集与整理是洪水风险分析与区划工作的首要环节，其质量直接影响后续技术环节的准确性与可靠性。所需收集的资料涵盖水文气象资料、地形地貌资料、社会经济资料、水利工程资料、历史洪水灾害资料及生态环境资料等多个类别。水文气象资料主要包括降水、蒸发、径流、水位等实测数据及中长期预报数据，用于分析洪水形成的水文气象基础；地形地貌资料主要包括数字高程模型、地形坡度、地貌类型等，用于明确洪水传播的地形条件与空间路径；社会经济资料主要包括人口分布、城镇布局、产业结构、基础设施分布等，用于评估承灾体

脆弱性与洪水灾害可能造成的损失；水利工程资料主要包括水库、堤防、水闸等工程的布局、规模及运行参数，用于分析区域防洪工程的防护能力；历史洪水灾害资料主要包括历史洪水发生时间、强度、影响范围及损失情况，用于验证风险分析与区划结果的合理性；生态环境资料主要包括植被覆盖、湿地分布等，用于分析生态系统对洪水的调蓄能力。

在资料收集完成后，需开展系统的资料整理与预处理工作。首先，对收集的资料进行真实性与完整性核查，剔除异常数据与缺失严重的数据；其次，对不同来源、不同格式的资料进行标准化处理，统一数据精度与统计口径；最后，构建标准化的资料数据库，实现资料的系统化管理与高效调用，为后续风险识别与评估工作提供稳定的数据支撑。

（二）风险识别

风险识别是在资料收集与整理基础上，开展的针对性技术分析工作，其核心任务是明确区域洪水风险的核心来源、诱发因素及潜在影响范围。风险识别工作需结合区域实际情况，采用定性分析与定量分析相结合的方法。定性分析主要通过梳理历史洪水灾害案例、专家咨询等方式，初步判断区域洪水风险源类型与核心影响因素；定量分析则基于水文勘测数据与统计分析方法，明确不同风险源的发生概率与影响程度。

在技术实施过程中，需构建多维度的风险识别指标体系，指标选取需遵循科学性、针对性与可操作性原则。例如，针对暴雨洪水风险识别，可选取年最大降雨量、暴雨历时、暴雨强度等核心指标；针对山洪风险识别，可选取地形坡度、植被覆盖率、沟谷密度等核心指标；针对人为因素引发的洪水风险识别，可选取河道侵占率、围湖造田面积、水利工程调度偏差等核心指标。通过对指标体系的系统分析，明确区域洪水风险的核心特征与关键防控节点，为后续风险评估工作奠定基础。

（三）风险评估

风险评估是洪水风险分析与区划的核心技术环节，其核心任务是在风险识别基础上，对区域洪水风险等级进行量化判定。风险评估工作需遵循“致灾因子—承灾体—防灾能力”三位一体的评估框架，分步骤开展致灾因子评估、承灾体脆弱性评估与风险综合评估。

致灾因子评估主要聚焦于洪水强度与频率的量化分析，通过对水文勘测数据

的统计分析,明确不同频率洪水的水位、流量、淹没范围等关键参数,构建致灾因子强度等级体系。承灾体脆弱性评估需针对区域内不同类型承灾体,分析其在不同强度洪水影响下的易损程度,构建承灾体脆弱性评估指标体系,明确不同承灾体的脆弱性等级。防灾减灾能力评估则综合考量区域防洪工程防护能力、应急响应体系完善程度、公众防灾意识等因素,构建防灾减灾能力评估指标体系,量化区域对洪水灾害的抵御与应对能力。

在完成三个维度评估后,采用综合评估模型对评估结果进行整合,明确区域不同空间单元的洪水风险等级。评估过程中,需充分考虑各评估指标的权重分配,权重确定需结合区域实际情况与专家经验,确保评估结果的科学性与合理性。同时,需对评估结果进行敏感性分析,验证评估结果的稳定性与可靠性。

(四) 风险区划

风险区划是将风险评估结果转化为空间化成果的关键环节,其核心任务是结合区域空间特征与防洪减灾需求,将区域划分为不同风险等级的空间单元。风险区划工作需遵循科学性、实用性、协调性原则,确保区划结果既符合风险评估的量化结论,又能满足区域防洪减灾规划与空间规划的实际需求。

在技术实施过程中,首先需确定风险区划的等级体系,通常将区域洪水风险划分为高风险区、中风险区、低风险区三个核心等级,部分区域可根据实际需求增设极高风险区或极低风险区;其次,结合区域地形地貌特征、水文水系分布、行政区划边界及社会经济发展格局,合理划分区划单元,确保区划单元的完整性与合理性;最后,将风险评估结果与区划单元进行空间匹配,明确各区划单元的风险等级,并绘制洪水风险区划图,直观呈现区域洪水风险的空间分布特征。

同时,需针对不同风险等级区域制定差异化的防控要求,明确各区域的防洪减灾重点任务。例如,高风险区需重点强化防洪工程建设,提升工程防护标准,完善应急疏散体系,严格控制高风险产业布局;中风险区需兼顾工程防护与非工程措施,加强洪水监测预警系统建设,提升公众防灾减灾意识;低风险区需注重生态缓冲带建设,合理规划土地利用类型,避免人为因素加剧洪水风险。

(五) 成果验证与应用

成果验证与应用是洪水风险分析与区划工作的收尾环节,也是技术价值实现的关键途径。成果验证主要通过历史洪水灾害资料比对、专家评审等方式开展,将风险区划结果与历史洪水灾害的实际影响范围进行比对,验证区划结果的准确

性与合理性；通过专家评审，征求水文、水利、灾害管理等领域专家的意见，优化完善区划成果。

成果应用则需结合防洪评价的实际需求，将风险分析与区划成果转化为具体的防洪减灾决策依据。例如，在防洪工程规划设计中，可根据风险区划结果明确工程建设的重点区域与防护标准；在非工程防洪措施制定中，可结合风险区划结果优化监测预警站点布局，制定差异化的应急响应预案；在土地利用规划中，可根据风险区划结果划定洪水禁建区、限建区与适建区，优化区域空间发展格局；在洪水灾害应急管理中，可依据风险区划结果明确应急疏散的重点区域与疏散路径，提升应急处置效率。同时，需建立成果动态更新机制，结合气候变化、人类活动及水利工程建设等因素的变化，定期更新风险分析与区划成果，确保成果的时效性与适用性。

二、洪水风险分析与区划的关键技术环节

在洪水风险分析与区划技术实施过程中，存在多个关键技术环节，其技术实施质量直接影响整体技术成果的准确性与可靠性。其中，基础数据融合技术、风险评估指标体系构建技术、空间分析与区划技术是核心关键技术环节，需重点把控技术实施的规范性与科学性。

（一）基础数据融合技术

基础数据是洪水风险分析与区划的核心支撑，而基础数据融合技术则是解决多源数据异构性、提升数据利用效率的关键技术。由于洪水风险分析与区划所需资料涵盖水文气象、地形地貌、社会经济等多个类别，不同来源数据在数据格式、精度、时空尺度等方面存在显著差异，需通过数据融合技术实现多源数据的系统化整合。

基础数据融合技术主要包括数据格式标准化、时空尺度统一、数据质量优化三个核心层面。数据格式标准化主要通过数据转换技术，将不同格式的数据转换为统一的标准格式，实现数据的互通互用；时空尺度统一则针对不同时空尺度的数据，采用插值、重采样等技术，将数据统一到相同的时空尺度，确保数据的可比性；数据质量优化则通过数据清洗、异常值剔除、缺失值补全等技术，提升数据的准确性与完整性。同时，需构建多源数据融合数据库，采用数据库管理技术实现对融合数据的系统化管理与高效调用，为后续风险识别与评估工作提供稳定、

可靠的数据支撑。

（二）风险评估指标体系构建技术

风险评估指标体系是开展洪水风险评估的核心载体，其科学性与合理性直接影响风险评估结果的准确性。风险评估指标体系构建技术需遵循科学性、针对性、可操作性、系统性原则，结合区域洪水风险特征与防洪减灾需求，构建多维度、多层次的指标体系。

在技术实施过程中，首先需明确指标体系的构建框架，基于“致灾因子—承灾体—防灾能力”三位一体的评估逻辑，划分一级指标层面；其次，在一级指标层面下，结合区域实际情况选取二级、三级指标，例如致灾因子一级指标下可选取洪水频率、洪水强度、洪水历时等二级指标，承灾体脆弱性一级指标下可选取人口密度、建筑物密度、基础设施脆弱性等二级指标，防灾减灾能力一级指标下可选取防洪工程覆盖率、应急响应能力、公众防灾意识等二级指标；最后，采用层次分析、熵权法等方法确定各指标的权重，确保指标权重的合理性与科学性。同时，需对指标体系进行有效性验证，通过专家评审、实证分析等方式，优化完善指标体系，提升指标体系的针对性与可操作性。

（三）空间分析与区划技术

空间分析与区划技术是实现洪水风险空间化表达的关键技术，其核心在于通过空间分析方法，将风险评估的量化结果与区域空间特征进行精准匹配，形成科学合理的风险区划成果。空间分析与区划技术主要依托地理信息系统技术开展，涵盖空间数据处理、空间叠加分析、空间插值、区划单元划分等核心技术方法。

空间数据处理技术主要用于对地形地貌、行政区划、承灾体分布等空间数据的预处理，确保空间数据的准确性与完整性；空间叠加分析技术则用于将致灾因子空间分布数据、承灾体脆弱性空间分布数据、防灾减灾能力空间分布数据进行叠加运算，实现风险评估结果的空间化；空间插值技术则用于对离散的水文勘测数据进行空间插值处理，形成连续的空间数据图层，提升风险评估的空间精度；区划单元划分技术则结合区域地形地貌特征、行政区划边界及社会经济发展格局，采用空间聚类、边界优化等方法，划分合理的风险区划单元。通过上述空间分析技术的综合应用，实现洪水风险区划的科学性与实用性，为防洪减灾决策提供精准的空间导向性依据。

第三节 防洪工程能力评估与调度方案制定

一、防洪工程能力评估核心框架与技术支撑

防洪工程能力评估是一项系统性工作，其核心目标是明确工程在设计标准内及超标准洪水情景下的防洪承载能力、潜在风险点及应急处置可行性。评估工作需依托完整的技术框架，将水文综合勘测获取的基础数据与工程结构特性、流域防洪规划要求有机融合，形成“数据采集—特征分析—情景模拟—能力研判”的闭环评估体系。其中，水文综合勘测技术作为数据采集与特征分析的核心手段，为评估工作提供了流域洪水形成机制、历史洪水演变规律、极端洪水时空分布等关键信息，是确保评估结果科学性与精准性的前提。

（一）评估框架的核心构成要素

防洪工程能力评估框架的构建需兼顾系统性与针对性，核心构成要素包括评估范围界定、基础数据体系、评估指标体系及情景设定体系四大模块。评估范围界定需以防洪工程的影响区域为核心，涵盖工程本体、上下游防护河段、沿岸重要防护对象，同时明确工程与流域内其他防洪工程的协同关系，避免孤立评估导致结果偏差。基础数据体系是评估工作的核心支撑，主要由水文综合勘测数据、工程结构数据及流域防洪规划数据三部分构成，其中水文综合勘测数据包括流域降水时空分布、径流形成过程、洪水峰量关系、泥沙淤积特性等关键信息，需通过长期监测、历史资料复盘及现场勘测等多种手段整合获取，确保数据的完整性与时效性。

评估指标体系的构建需围绕“工程安全”与“防洪效能”两大核心目标，结合不同类型防洪工程的特性差异化设定。对于水库工程，核心评估指标包括防洪库容利用率、大坝抗滑稳定系数、溢洪道泄流能力、下游河道过流承载力等；对于堤防工程，核心评估指标则包括堤身防渗能力、堤基稳定性、堤顶高程达标率、穿堤建筑物安全系数等。指标设定需遵循可量化、可验证原则，确保评估过程的客观性与规范性。情景设定体系需覆盖常规防洪情景与极端洪水情景，常规情景以工程设计洪水标准为基准，包括百年一遇、千年一遇等不同重现期洪水；极端情景则需结合气候变化背景下的洪水演变趋势，设定超标准洪水、突发险情等非常规情景，为评估工程的应急承载能力提供依据。

（二）水文综合勘测技术的支撑作用

水文综合勘测技术贯穿于防洪工程能力评估的全流程，其支撑作用主要体现在基础数据供给、洪水特征解析及情景模拟校准三个层面。在基础数据供给层面，通过水文站网监测、遥感勘测、无人机巡查及水下地形勘测等多种技术手段，可精准获取流域降水、径流、洪水、泥沙等多维度水文要素数据，同时实现对工程周边地形地貌、河道演变状态的动态监测，为评估范围界定、工程结构安全性分析提供基础数据支撑。相较于传统勘测手段，现代水文综合勘测技术具备覆盖范围广、监测精度高、数据更新及时等优势，能够有效解决复杂流域下水文数据缺失、时空分布不均等问题，提升基础数据体系的完整性。

在洪水特征解析层面，依托水文综合勘测获取的长系列水文数据，通过水文统计分析、洪水过程反演等技术方法，可系统梳理流域洪水的时空分布规律、峰量关系、传播速度等核心特征，明确不同重现期洪水的致灾范围与影响程度。例如，通过对流域历史洪水痕迹的现场勘测与遥感影像解读，可精准还原历史特大洪水的淹没范围与峰值流量，为修正洪水频率曲线、提升设计洪水计算精度提供关键依据；通过对河道断面的动态监测，可分析河道淤积、冲刷对过流能力的影响，为评估工程下游河道的防洪承载能力提供技术支撑。

在情景模拟校准层面，水文综合勘测数据是洪水演进模拟、工程受力模拟等数值模拟工作的核心输入参数。通过将勘测获取的流域下垫面数据、水文要素数据与数值模拟模型结合，可实现对不同洪水情景下洪水演进过程、工程受力状态的精准模拟。同时，利用现场勘测获取的实际监测数据对模拟结果进行校准，可有效提升模型的模拟精度，确保评估结果能够真实反映工程的实际防洪能力。例如，在水库工程能力评估中，通过将勘测获取的入库径流数据、出库泄流数据与水库洪水调度模拟模型结合，可精准模拟不同洪水情景下水库的水位变化过程、溢洪道泄流能力，为评估水库的防洪库容利用率与大坝安全稳定性提供科学依据。

二、防洪工程能力评估关键技术要点

防洪工程能力评估需结合工程类型、流域水文特征及评估目标，针对性应用关键技术方法，确保评估过程的科学性与评估结果的精准性。从技术应用逻辑来看，关键技术要点主要集中在工程本体安全性评估、流域洪水承载能力评估及工程协同防洪效能评估三个核心环节，各环节均需依托水文综合勘测技术获取的基

础数据,实现评估工作的精准落地。

(一)工程本体安全性评估技术要点

工程本体安全性是防洪工程能力的核心基础,其评估需聚焦工程结构完整性、关键部位稳定性及运行状态可靠性三大核心维度。对于水库、水闸等蓄水挡水工程,本体安全性评估的核心是大坝、闸室等核心建筑物的结构稳定性,需结合水文综合勘测获取的洪水荷载数据、坝体渗流数据及地形地质数据,开展坝体抗滑稳定、抗倾覆稳定及渗流稳定性评估。在技术应用过程中,需重点关注极端洪水情景下的荷载叠加效应,通过水文勘测明确不同洪水重现期下的入库洪峰流量、水位涨幅等关键参数,精准计算洪水对坝体的冲击荷载与渗透压力,为结构稳定性分析提供精准输入。

对于堤防工程,本体安全性评估需重点关注堤身、堤基及穿堤建筑物三大关键部位。通过水文综合勘测技术中的地下水位监测、堤身渗流监测及河道地形勘测,可获取堤基土层分布、堤身填土压实度、地下水位动态变化及河道冲刷深度等关键数据,进而评估堤身防渗能力、堤基抗液化稳定性及河道冲刷对堤脚的影响。同时,结合遥感勘测与无人机巡查技术,可实现对堤身裂缝、沉陷、管涌等潜在险情的精准识别,为评估堤身结构完整性提供技术支撑。在评估过程中,需特别关注水文要素时空变化对工程本体安全性的动态影响,例如,长期高水位运行导致的堤身渗流变化、汛期暴雨引发的堤基软化等,通过动态监测数据及时修正评估结果,提升评估的时效性与针对性。

(二)流域洪水承载能力评估技术要点

流域洪水承载能力是衡量防洪工程能力的重要指标,其评估需立足流域整体防洪体系,结合水文综合勘测获取的流域水文特征、河道演变规律及防洪工程布局等信息,系统研判流域在不同洪水情景下的洪水疏导能力与淹没风险。核心技术要点包括河道过流能力评估、洪水传播路径研判及淹没范围预测三个方面。在河道过流能力评估中,通过水文综合勘测获取的河道断面形态、糙率系数、水位流量关系等数据,结合水力学原理开展河道过流能力计算,明确不同河段的过流瓶颈部位,为评估流域洪水疏导能力提供依据。同时,通过对河道演变过程的长期监测,分析泥沙淤积、河岸崩塌等因素对河道过流能力的影响,预判河道过流能力的变化趋势。

洪水传播路径研判需依托水文综合勘测获取的流域地形地貌数据、水系分布

数据及历史洪水传播记录,结合洪水演进模拟技术,明确不同洪水情景下洪水的传播方向、传播速度及影响范围。在技术应用过程中,需重点关注流域内重要节点(如水库、水闸、河道分叉口)对洪水传播路径的影响,通过精准模拟洪水在节点处的分流、汇流过程,提升传播路径研判的精准性。淹没范围预测则需结合水文综合勘测获取的地形高程数据、历史淹没痕迹数据,通过数值模拟与现场验证相结合的方式,明确不同洪水重现期下的淹没深度、淹没时长及影响区域,为评估流域洪水承载能力、划分防洪风险等级提供科学依据。

(三) 工程协同防洪效能评估技术要点

在流域防洪体系中,单一防洪工程的防洪能力难以满足全域防洪需求,需通过多个工程的协同调度实现防洪效能最大化。因此,工程协同防洪效能评估成为防洪工程能力评估的重要组成部分,其核心技术要点是明确不同工程之间的协同关系,评估协同调度下的整体防洪效能。评估工作需依托水文综合勘测获取的流域洪水时空分布数据、工程调度参数及上下游水文响应关系等信息,构建协同防洪效能评估模型,系统分析不同调度组合下的洪水削减效果、工程负荷分配及下游防洪压力变化。

在技术应用过程中,需重点关注工程之间的水文响应关联性,例如,上游水库的泄流过程对下游堤防工程的洪水压力影响、支流防洪工程与干流防洪工程的协同分流效果等。通过水文综合勘测技术获取的长系列水文监测数据,可精准量化不同工程调度方案下的水文要素变化,为评估协同防洪效能提供数据支撑。同时,结合流域防洪规划要求,评估当前工程布局下的协同防洪短板,为优化工程调度策略、提升整体防洪效能提供方向。

三、防洪调度方案制定原则与核心流程

防洪调度方案是实现防洪工程能力有效发挥的关键载体,其制定需以防洪工程能力评估结果为依据,结合流域防洪目标、工程运行特性及水文情势演变规律,遵循科学统筹、精准调控、安全优先、协同高效的核心原则。方案制定流程需形成“目标界定—基础分析—方案构建—模拟验证—优化完善”的完整闭环,确保方案的可行性、针对性与灵活性。水文综合勘测技术在方案制定的全流程中发挥着核心支撑作用,为基础分析、模拟验证等关键环节提供精准的水文数据保障。

（一）调度方案制定核心原则

安全优先原则是防洪调度方案制定的首要原则，需始终将保障人民群众生命财产安全、工程本体安全放在首位，确保方案能够有效抵御设计标准内洪水，最大限度降低超标洪水的灾害损失。在方案制定过程中，需结合防洪工程能力评估结果，明确不同洪水情景下的工程安全阈值，严格界定调度权限与应急处置边界，避免因调度不当引发工程险情。

科学统筹原则要求调度方案需统筹工程安全、生态保护、水资源利用等多重目标，避免单一防洪目标导向下的资源浪费或生态破坏。例如，在水库调度方案制定中，需结合水文综合勘测获取的来水预测数据，合理分配防洪库容与兴利库容，在保障防洪安全的前提下，兼顾灌溉、供水、生态流量保障等需求。同时，需统筹流域内不同区域、不同部门的防洪需求，协调上下游、左右岸的调度利益，实现全域防洪效益最大化。

精准调控原则要求调度方案需依托精准的水文数据支撑，结合洪水预报预警信息，实现对洪水过程的精准调控。通过水文综合勘测技术获取的实时水文监测数据与洪水预报数据，可精准预判洪水峰量、传播过程，为制定分阶段、分量级的调度策略提供依据。例如，针对不同重现期的洪水，设定差异化的泄流阈值与调度时序，实现对洪水峰值的精准削减。

协同高效原则强调调度方案需充分发挥流域内各类防洪工程的协同作用，构建“水库—堤防—水闸—分洪区”等多工程协同调度体系。在方案制定过程中，需明确不同工程的调度职责与协同关系，制定统一的调度指令与信息共享机制，确保洪水来临时各工程能够协同联动、高效处置。同时，需加强与气象、水文、应急等部门的协同配合，实现洪水预报、调度实施、应急处置的无缝衔接。

（二）调度方案制定核心流程

调度方案制定的核心流程始于防洪目标界定，需结合流域防洪规划要求与区域防洪需求，明确方案的核心目标的、适用范围及预期效益。例如，针对城市防洪保护区，核心目标是保障城市核心区域不被淹没、重要基础设施安全运行；针对农业灌区，核心目标是减少洪水对农田的淹没损失，保障农业生产安全。目标界定需具体、可量化，为后续方案构建提供明确导向。

基础分析是调度方案制定的关键环节，需依托水文综合勘测技术获取的基础数据，开展洪水情势分析、工程运行特性分析及防洪压力评估。洪水情势分析需

系统梳理流域历史洪水演变规律、当前水文情势及未来洪水演变趋势,明确不同洪水情景的关键特征参数;工程运行特性分析需结合防洪工程能力评估结果,明确工程的调度约束条件、泄流能力、库容分配等核心参数;防洪压力评估需结合流域防洪现状,识别防洪薄弱环节,明确不同区域的防洪优先级。

方案构建阶段需基于基础分析结果,结合调度原则,制定差异化的调度策略与实施步骤。针对不同洪水重现期,设定对应的调度阈值与调控措施,例如,在常遇洪水情景下,采用常规调度策略,优先保障工程安全与生态流量;在超标洪水情景下,启动应急调度策略,结合分洪、滞洪等措施,最大限度降低灾害损失。同时,明确调度指令的发布流程、责任主体及应急处置预案,确保方案的可操作性。

模拟验证阶段需依托水文综合勘测获取的基础数据,构建洪水调度模拟模型,对制定的调度方案进行数值模拟与效果验证。通过模拟不同洪水情景下方案的实施效果,评估方案对洪水峰值的削减能力、工程负荷的承载状态及下游淹没风险的降低程度。若模拟结果未达到预期防洪目标,需返回方案构建阶段进行调整优化;若模拟结果满足要求,则进入方案评审与完善阶段。

优化完善阶段需结合模拟验证结果与专家评审意见,对调度方案进行修订完善,同时建立方案动态调整机制。由于流域水文情势受气候变化、人类活动等因素影响不断变化,需依托水文综合勘测技术的长期监测数据,定期对调度方案进行评估与更新,确保方案始终适应流域防洪形势的变化。

第四节 防洪非工程措施与应急预案

一、防洪非工程措施的主要类型及实施要点

(一) 洪水监测预警系统建设

洪水监测预警系统是防洪非工程措施的核心技术支撑,其核心功能是实时捕捉洪水生成、演进过程中的关键水文要素,精准分析洪水发展态势,及时向公众和相关部门发布预警信息,为防洪决策和避洪行动提供时间保障。该系统的建设依赖于完善的水文综合勘测技术,通过布设雨量站、水位站、流量站、水质站等监测站点,结合遥感、遥测、地理信息系统等先进技术,实现对洪水全过程的动态监测。

在实施过程中,洪水监测预警系统建设需把握三个关键要点。一是监测站点的科学布设。监测站点的布局应基于区域水文特征、地形地貌、洪水风险等级等因素,确保监测范围全面覆盖洪水易发区域,重点区域适当加密站点,提升监测数据的空间分辨率。同时,要注重监测站点的稳定性和可靠性,选择地形相对平坦、交通便利、供电保障充足的区域布设站点,便于设备维护和数据传输。二是监测数据的精准传输与处理。通过建立稳定的通信网络,实现监测数据的实时传输,确保数据传输的及时性和准确性。同时,搭建专业的数据处理平台,对监测数据进行筛选、整理、分析和校验,剔除异常数据,生成精准的水文要素数据集,为洪水预报提供可靠的数据支撑。三是预警信息的高效发布与传播。建立多渠道、全方位的预警信息发布体系,整合广播电视、手机短信、微信公众号、应急广播、户外显示屏等多种发布渠道,确保预警信息能够快速传递到每一个单位、每一个人。同时,要注重预警信息的通俗性和易懂性,明确预警级别、可能发生的洪水灾害类型、影响范围和防范措施,让公众能够清晰理解并及时采取避洪行动。

（二）防洪法规与制度建设

防洪法规与制度建设是防洪非工程措施的制度保障,通过制定和完善相关法律法规、规章制度,规范防洪减灾工作中的各方行为,明确各级政府、部门、单位和个人在防洪减灾工作中的职责和义务,形成权责清晰、协同高效的防洪管理体系。防洪法规与制度建设涵盖多个方面,包括防洪规划制度、洪水风险管理办法、防洪责任制、应急处置机制、灾害救助制度等。

其实施要点主要包括两个方面。一方面,要注重法规制度的系统性和完整性。防洪减灾工作是一项复杂的系统工程,涉及多个部门和多个环节,相关法规制度的制定需统筹兼顾各方面需求,确保覆盖洪水监测预警、风险管控、应急响应、灾害救助、恢复重建等全流程,避免出现制度空白或相互冲突的情况。同时,要结合区域洪水灾害特点和经济社会发展实际,制定具有针对性和可操作性的法规制度,避免制度过于笼统或脱离实际。另一方面,要强化法规制度的执行与监督。完善的法规制度需要严格的执行和监督才能发挥作用,要建立健全防洪法规制度执行监督机制,明确监督主体、监督内容和监督方式,对违反防洪法规制度的行为依法予以惩处。同时,要加强対法规制度执行情况的宣传教育,提升各方主体的法治意识,引导其自觉遵守防洪法规制度。

（三）洪水风险管控与规划

洪水风险管控与规划是防洪非工程措施的前瞻性举措，通过对区域洪水风险进行全面评估，明确洪水风险等级和影响范围，制定科学合理的洪水风险管控规划，引导区域土地利用、城乡建设等活动避开高风险区域，从源头上降低洪水灾害风险。洪水风险管控与规划的实施，离不开水文综合勘测技术对洪水历史数据、水文要素分布、地形地貌等基础资料的精准获取和分析。

实施过程中，需重点把握三个环节。一是洪水风险评估。采用水文综合勘测技术，全面收集区域洪水历史观测数据、地形地貌数据、水文地质数据等基础资料，结合洪水演进模拟技术，对区域内不同强度洪水可能造成的影响进行全面评估，划分洪水风险等级，明确高、中、低风险区域的范围和边界，形成详细的洪水风险评估报告。二是洪水风险管控规划编制。基于洪水风险评估结果，结合区域经济社会发展规划、城乡总体规划等，编制洪水风险管控规划，明确不同风险区域的管控要求。例如，在高风险区域，严格限制新建居民点、工厂、学校等重要设施，鼓励现有居民和设施逐步搬迁；在中风险区域，合理控制建设规模和建设标准，配套建设必要的防洪非工程设施；在低风险区域，可正常开展建设活动，但需预留防洪应急空间。三是规划的落实与动态调整。将洪水风险管控规划纳入区域整体发展规划，确保规划内容在城乡建设、土地利用等工作中得到严格落实。同时，随着水文勘测技术的进步和经济社会的发展，及时对洪水风险评估结果和风险管控规划进行动态调整，提升规划的科学性和时效性。

（四）防洪宣传教育与公众参与

防洪宣传教育与公众参与是提升防洪减灾能力的社会基础，通过开展多样化的防洪宣传教育活动，提升公众的防洪意识和自救互救能力，引导公众主动参与防洪减灾工作，形成全社会共同应对洪水灾害的良好氛围。公众是洪水灾害的直接影响对象，也是防洪减灾工作的重要参与主体，其防洪意识和自救互救能力的高低，直接影响防洪减灾工作的成效。

实施要点主要包括两个方面。一方面，开展精准化的防洪宣传教育。根据不同群体的特点，制定差异化的宣传教育内容和方式。例如，针对农村居民，重点宣传山洪灾害的识别方法、避洪路线选择、自救互救技能等内容，采用应急广播、宣传栏、现场培训等贴近农村实际的方式开展宣传；针对城市居民，重点宣传城市内涝的防范措施、应急避难场所的位置和使用方法等内容，采用微信公众号、

短视频、社区宣传等方式开展宣传；针对中小學生，將防洪知识纳入校园安全教育课程，通过主题班会、知识竞赛、应急演练等方式，提升学生的防洪意识和应急避险能力。另一方面，搭建公众参与平台。建立健全公众参与防洪减灾工作的机制，鼓励公众积极参与洪水监测预警、风险排查、应急处置等工作。例如，招募防洪志愿者，开展洪水风险隐患排查活动；建立公众反馈渠道，鼓励公众及时上报洪水灾害隐患和预警信息；组织开展防洪应急演练，提升公众的应急响应和自救互救能力。

二、防洪应急预案的编制原则与核心内容

（一）应急预案的编制原则

防洪应急预案的编制需遵循科学性、实用性、系统性、可操作性等核心原则，确保预案能够有效指导应急处置工作。科学性原则是指应急预案的编制需基于区域洪水灾害特点、水文勘测数据、历史灾害经验等客观依据，采用科学的方法进行风险评估和应急响应流程设计，避免主观臆断。应急预案的各项内容需符合水文水利规律和应急管理工作的客观要求，确保应急处置措施的科学性和合理性。

实用性原则要求应急预案紧密结合区域实际情况，充分考虑区域的经济社会发展水平、交通通信条件、应急资源储备等实际因素，制定切实可行的应急处置措施。应急预案的内容需简洁明了，重点突出，便于应急管理人員和公众理解和执行，避免过于繁琐或脱离实际的内容。系统性原则强调应急预案的编制需统筹兼顾洪水灾害应急处置的各个环节，包括监测预警、应急响应启动、应急处置、灾害救助、恢复重建等，形成完整的应急处置体系。同时，要明确各级政府、部门、单位之间的职责分工和协同配合机制，确保应急处置工作的有序开展。可操作性原则是指应急预案需明确各项应急处置措施的实施主体、实施步骤、实施时间和实施要求，具有较强的可操作性。应急预案需针对不同等级的洪水灾害，制定差异化的应急响应措施，明确不同情况下的应急处置流程和工作重点，确保在实际应急处置工作中能够快速启动、有效实施。

（二）应急预案的核心内容

防洪应急预案的核心内容涵盖总则、组织体系与职责、监测预警与信息报告、应急响应、应急处置、灾害救助与恢复重建、应急保障等多个方面，各部分内容相互衔接、相互支撑，形成完整的应急处置指南。总则部分主要明确应急预案的

编制目的、编制依据、适用范围、工作原则和洪水灾害分级标准等基础内容。其中,洪水灾害分级标准是应急预案的关键内容之一,需基于区域水文勘测数据和历史洪水灾害情况,将洪水灾害划分为不同等级,如一般、较大、重大、特别重大四个等级,明确不同等级洪水灾害的判定标准和影响范围,为应急响应的启动提供依据。

组织体系与职责部分主要明确防洪应急处置的组织架构和各方职责。组织架构通常包括应急指挥部、综合协调组、监测预警组、应急处置组、灾害救助组、后勤保障组等多个专项工作组,明确各工作组的组成单位和主要职责。同时,明确各级政府、水利、应急、交通、公安、卫生健康等相关部门的职责分工,确保应急处置工作中各部门能够各司其职、协同配合。监测预警与信息报告部分主要规范洪水监测预警工作流程和信息报告机制。明确监测预警的责任主体、监测内容、监测频率和预警信息发布流程,确保预警信息能够及时、准确传递。同时,明确信息报告的责任主体、报告内容、报告时限和报告方式,确保洪水灾害信息能够快速上报,为应急决策提供及时依据。

应急响应部分是应急预案的核心环节,主要明确不同等级洪水灾害的应急响应启动条件、启动程序和应急响应措施。针对不同等级的洪水灾害,制定差异化的应急响应措施,包括人员转移安置、物资调配、工程调度、交通管制、医疗救援等。例如,对于特别重大洪水灾害,需启动最高等级应急响应,由省级或国家级应急指挥部统一指挥,组织大规模人员转移安置,调配大量应急物资和救援力量,实施重点工程调度和抢险救灾工作。应急处置部分主要规范应急处置的具体流程和措施,包括人员转移安置、抢险救灾、工程安全防护等。明确人员转移安置的范围、对象、路线和安置场所,确保转移工作有序、安全开展。同时,明确抢险救灾的重点区域和重点任务,规范抢险救灾队伍的调动和抢险物资的使用,确保抢险救灾工作的高效实施。

灾害救助与恢复重建部分主要明确洪水灾害后的救助工作和恢复重建工作流程。灾害救助工作包括受灾群众的基本生活保障、医疗救助、心理疏导等,明确救助物资的筹集、调配和发放机制,确保受灾群众能够及时获得基本生活保障。恢复重建工作包括基础设施恢复、生产恢复、生态修复等,明确恢复重建的责任主体、工作流程和资金保障机制,确保受灾区域能够快速恢复正常的生产生活秩序。应急保障部分主要明确应急处置工作所需的各项保障条件,包括物资保障、

队伍保障、资金保障、交通通信保障、医疗保障等。明确各类应急物资的储备种类、储备数量和储备地点，建立应急物资调配机制；明确应急救援队伍的组成、培训和演练要求，提升应急救援队伍的处置能力；明确应急资金的来源和使用管理办法，确保应急资金能够及时到位并规范使用。

第十章 水文要素综合勘测的未来发展与展望

第一节 新型传感器与智能勘测技术前沿

一、智能勘测技术的融合应用与创新

如果说新型传感器是水文勘测的“感知器官”，那么智能勘测技术就是水文勘测的“大脑中枢”。智能勘测技术以人工智能、大数据、物联网、云计算等现代信息技术为核心，通过与新型传感器技术的深度融合，实现水文要素勘测数据的自动采集、传输、处理、分析与预警，推动水文勘测从“数据获取”向“智能研判”转型。这种融合不是简单的技术叠加，而是通过数据链、技术链的协同联动，重构水文勘测的业务流程，提升勘测工作的智能化水平与决策支撑能力。

（一）物联网与水文勘测网络的智能化构建

物联网技术的核心是实现设备与设备、设备与平台之间的互联互通，其与新型传感器的结合，推动了水文勘测网络的智能化升级。传统水文勘测网络多为分散式布局，数据传输依赖人工采集或有限的有线传输，存在数据滞后、传输效率低、运维成本高等问题。基于物联网的智能勘测网络，通过在各类水文传感器中嵌入无线通信模块，实现传感器与数据中心的实时无线通信，构建起“全域覆盖、实时互联”的水文感知网络。

这种智能化勘测网络具备灵活扩展、自主运维的特点。网络中的传感器节点可根据勘测需求动态增减，实现勘测范围的灵活调整；同时，网络具备自我诊断与故障报警功能，能够实时监测传感器的运行状态，当出现设备故障、数据异常或通信中断时，自动向运维平台发送报警信息，大幅降低了运维成本。在实际应用中，智能化勘测网络可实现降水、径流、地下水、水质等多要素的同步实时监测，数据通过物联网传输至云端平台，为水资源管理部门提供实时的水文信息支撑。例如，在流域水资源管理中，智能化勘测网络可实时捕捉流域内各站点的水文数据，实现流域水文情势的全域感知与动态监控，为洪水预警、水资源调度提供精准的实时数据。

（二）人工智能在勘测数据处理中的深度应用

水文勘测数据具有海量性、复杂性、随机性的特点，传统数据处理方法多依赖人工分析，效率低下，且难以挖掘数据中隐藏的深层规律。人工智能技术，尤其是机器学习、深度学习算法的应用，为水文勘测数据的智能处理提供了强大的技术支撑。通过构建人工智能模型，可实现对勘测数据的自动清洗、异常识别、趋势分析与预测预警，大幅提升数据处理的效率与精度。

在数据预处理阶段，人工智能模型可自动识别并剔除传感器故障、环境干扰等因素导致的异常数据，实现数据的精准清洗，为后续分析提供高质量的数据基础。在数据趋势分析阶段，通过对海量历史勘测数据的学习，人工智能模型可挖掘水文要素的时空变化规律，识别不同水文要素之间的关联关系。例如，通过深度学习模型对降水、径流历史数据的学习，可精准捕捉降水与径流之间的响应关系，为径流预测提供支撑。在预测预警方面，人工智能模型可基于实时勘测数据与历史数据，实现对洪水、干旱、水质污染等水文灾害的精准预测与早期预警，为灾害防控争取时间。与传统预测方法相比，人工智能模型具备更强的自适应能力与预测精度，能够更好地应对水文要素的复杂变化。

（三）云计算与水文勘测数据的协同管理

随着新型传感器与智能勘测网络的广泛应用，水文勘测数据量呈指数级增长，传统的数据存储与管理模式已难以满足需求。云计算技术以其海量存储、高效计算、灵活扩展的特点，为水文勘测数据的协同管理提供了理想的解决方案。通过构建水文勘测云平台，可实现对全域勘测数据的集中存储、统一管理与高效共享。

云平台具备强大的计算能力，能够快速处理海量的勘测数据，为人工智能分析、水文模型计算等提供算力支撑。同时，云平台通过标准化的数据接口，实现了不同部门、不同区域之间的水文数据共享，打破了传统数据壁垒，提升了水文数据的利用效率。例如，水资源管理部门、防汛抗旱部门、生态环境部门可通过云平台共享水文勘测数据，协同开展水资源调度、防汛预警、水质保护等工作。此外，云平台还具备数据安全保障功能，通过数据加密、权限管理等技术，确保水文勘测数据的安全存储与规范使用。云计算与水文勘测的融合，推动了水文数据管理从“分散管理”向“协同共享”转型，为水文勘测的智能化发展提供了数据与算力支撑。

二、新型传感器与智能勘测技术的协同发展展望

新型传感器与智能勘测技术的协同发展，是水文要素综合勘测领域的未来发展方向，两者的深度融合将进一步提升水文勘测的精度、效率与智能化水平，拓展水文勘测的应用场景，为水资源科学管理、水生态环境保护、水灾害防控提供更加强有力的技术支撑。未来，随着技术的不断迭代升级，水文要素综合勘测将朝着全域化、实时化、智能化、精准化的方向持续迈进，构建起“全域感知、智能分析、精准决策”的水文勘测体系。

（一）全域化勘测覆盖能力持续提升

依托微型化、长续航、无源传感器技术的发展，结合物联网技术的广泛应用，未来的水文勘测网络将实现从传统的“重点区域勘测”向“全域覆盖勘测”的转变。不仅能够实现对大江大河、大型水库等重点区域的精细化勘测，还能填补偏远山区、无人区、极地、深海等极端环境区域的勘测空白，构建起陆域、水域、空域一体化的全域水文感知网络。通过全域化的勘测覆盖，能够全面掌握全球水文要素的时空分布规律，为全球气候变化研究、水资源合理配置提供全域性的水文数据支撑。

（二）智能化勘测决策能力不断增强

随着人工智能、大数据、云计算技术的持续发展，新型传感器获取的海量水文数据将得到更加充分的挖掘与利用。未来，水文勘测将不仅仅局限于数据的获取与传输，更将聚焦于数据的智能分析与精准决策。通过构建更加先进的人工智能模型，结合水文动力学、水文学等专业知识，实现对水文要素变化趋势的精准预测、水文灾害的早期预警以及水资源的智能调度。例如，基于实时勘测数据与人工智能模型的融合，可实现对洪水的精准预报、洪水演进过程的动态模拟，为防汛抗旱决策提供科学依据；通过对水资源供需数据的智能分析，可实现水资源的优化配置，提升水资源利用效率。

（三）跨界融合推动勘测技术创新突破

新型传感器与智能勘测技术的发展，离不开材料科学、微电子技术、信息技术、水文科学等多学科的跨界融合。未来，多学科的深度交叉融合将成为推动水文勘测技术创新的重要动力。例如，材料科学的突破将研发出更加耐高温、耐腐蚀、抗磨损的传感器材料，提升传感器在极端环境下的适应性；量子技术的应用

可能推动量子传感器的研发,实现水文要素的超高精度测量;人工智能与水文模型的深度融合,将构建出更加符合水文要素变化规律的智能模型,提升水文勘测的智能化水平。跨界融合将不断催生新的勘测技术、新的勘测设备与新的勘测方法,推动水文要素综合勘测领域的技术革新。

(四) 绿色低碳勘测模式逐步形成

在“双碳”目标的引领下,绿色低碳将成为水文勘测技术发展的重要导向。未来,长续航、无源传感器技术将进一步成熟,更多依赖环境能量供电的传感器将得到广泛应用,大幅降低勘测过程中的能源消耗;同时,传感器的材料将更加环保,减少对生态环境的影响。此外,智能勘测网络的优化设计将减少设备部署的数量与规模,降低勘测工程对生态环境的破坏。通过技术创新,将逐步形成绿色低碳的水文勘测模式,实现水文勘测与生态环境保护的协同发展。

结语:新型传感器与智能勘测技术的发展与融合,正深刻改变着水文要素综合勘测的面貌,推动水文勘测领域实现历史性变革。未来,随着技术的不断创新与应用,水文要素综合勘测将在精度、效率、范围等方面实现全面提升,为水资源科学管理、水生态环境保护、水灾害防控提供更加坚实的技术支撑。面对全球气候变化与水资源供需矛盾的严峻挑战,应持续加强新型传感器与智能勘测技术的研发与应用,推动多学科跨界融合,构建全域化、智能化、精准化的水文勘测体系,为实现水资源可持续利用、保障水安全提供有力保障。

第二节 大数据与人工智能驱动的智慧水文

一、大数据与人工智能赋能智慧水文的核心逻辑

智慧水文的核心目标是实现对水文系统复杂过程的精准认知与高效调控,而这一目标的达成离不开对海量、多源水文数据的有效利用和对水文过程内在规律的深度挖掘。大数据技术为破解传统水文数据分散、异构、价值密度低等难题提供了可行路径,人工智能技术则突破了传统水文模型对线性假设和经验参数的依赖,具备更强的复杂系统建模与预测能力。两者的协同赋能,构建了“数据获取—数据处理—规律挖掘—智能应用”的智慧水文核心逻辑链条,推动水文勘测从局部、静态、经验性的传统模式,向全域、动态、智能化的现代模式转型。

（一）数据维度：从分散碎片化到全域一体化

传统水文勘测数据主要依赖水文站、雨量站等固定监测站点的人工或半自动观测，数据类型较为单一，多集中于水位、流量、降雨量等核心水文要素，且数据覆盖范围有限，存在大量监测盲区，难以全面反映水文系统的全域动态变化。同时，不同监测部门、不同区域的水文数据标准不统一、存储分散，形成了“数据孤岛”，无法实现数据的有效共享与综合利用。大数据技术的应用，打破了传统水文数据的获取与管理壁垒。一方面，随着遥感遥感、无人机、物联网等技术的融入，水文数据获取渠道实现了多元化拓展，除传统站点数据外，新增了遥感影像数据、土壤墒情数据、地下水监测数据、气象雷达数据、植被覆盖数据等多类型数据，形成了“空天地”一体化的水文监测网络，实现了对水文要素的全域、实时、多维度感知；另一方面，大数据技术通过统一的数据标准与规范，对多源异构的水文数据进行清洗、整合、关联与存储，构建了全域一体化的水文大数据平台，消除了“数据孤岛”现象，实现了数据资源的高效共享与综合利用，为智慧水文的发展奠定了坚实的数据基础。

（二）分析维度：从经验驱动到智能认知

传统水文分析与预测主要依赖基于物理机制的概念性水文模型，这类模型需要基于大量的经验假设，对复杂的水文过程进行简化处理，模型参数的率定也多依赖人工经验，难以精准刻画水文系统的非线性、随机性和不确定性等复杂特性，导致模型在复杂水文场景下的预测精度和适应性有限。人工智能技术以其强大的非线性拟合、自适应学习和复杂模式识别能力，为水文过程的深度解析提供了全新的技术路径。通过对水文大数据的深度学习与训练，人工智能模型能够自动挖掘水文要素之间的潜在关联规律，无需依赖过多的物理假设和人工经验，即可构建高精度的水文过程预测模型，实现对水位、流量、洪峰、枯水期等水文要素的精准预测。同时，人工智能模型具备较强的自适应能力，能够根据实时监测数据动态调整模型参数，及时响应水文系统的动态变化，大幅提升了水文分析与预测的时效性和精准度，推动水文分析从经验驱动的传统模式向数据智能驱动的现代模式转型。

（三）应用维度：从被动响应到主动调控

传统水文勘测的应用多以数据上报、事后分析为主，对水旱灾害等水文突发事件的响应较为被动，往往只能在灾害发生后进行应急处置，难以实现提前预警

与主动调控。大数据与人工智能的深度融合，推动水文应用从被动响应向主动调控转型。基于全域一体化的水文大数据平台和高精度的人工智能预测模型，智慧水文系统能够实现对水文要素的实时监测、动态模拟与精准预测，提前预判水旱灾害等突发事件的发生时间、强度与影响范围，为灾害防控提供充足的预警时间。同时，结合水资源优化配置模型，智慧水文系统能够根据实时水文数据和用水需求，动态调整水资源分配方案，实现水资源的精细化管理与高效利用；针对水生态环境问题，能够通过对水文要素与生态要素的关联分析，精准识别水生态环境风险点，为水生态环境保护与修复提供科学的决策支撑，实现对水文系统的主动调控与精准管理。

二、人工智能在智慧水文勘测中的核心应用方向

人工智能技术在智慧水文勘测中的应用，聚焦于水文过程的智能解析、精准预测与科学决策，通过对水文大数据的深度挖掘与学习，实现对水文要素的全生命周期智能化管理。结合当前水文勘测的实际需求，人工智能技术的核心应用方向主要集中在水文要素智能预测、水文异常事件智能识别、水资源智能配置三个领域，每个领域的应用都显著提升了水文勘测与管理的智能化水平。

（一）水文要素智能预测

水文要素预测是水文勘测的核心任务之一，其预测精度直接关系到水资源管理、水旱灾害防控等工作的成效。传统水文预测模型受限于线性假设和经验参数，难以精准刻画水文系统的复杂非线性关系，预测精度和时效性难以满足实际需求。人工智能技术凭借其强大的非线性拟合和自适应学习能力，在水文要素预测领域展现出显著的优势。目前，用于水文要素预测的人工智能模型主要包括神经网络、支持向量机、决策树、随机森林等，这些模型通过对历史水文数据、气象数据、地形数据等多源数据的深度学习，能够自动挖掘水文要素之间的潜在关联规律，构建高精度的预测模型，实现对水位、流量、降雨量、洪峰流量、枯水期径流等关键水文要素的短期、中期和长期预测。与传统预测模型相比，人工智能预测模型无需依赖过多的物理假设，能够更好地适应水文系统的复杂性和不确定性，预测精度更高、时效性更强。同时，结合实时监测数据，人工智能模型能够动态调整模型参数，进一步提升预测的精准度，为水旱灾害预警、水资源调度等工作提供科学的决策依据。

（二）水文异常事件智能识别

水文异常事件如特大暴雨、洪水、干旱、水污染等，对社会经济发展和生态环境安全具有重大影响，及时、准确地识别水文异常事件是实现灾害防控与应急处置的关键。传统水文异常事件识别主要依赖人工监测与经验判断，存在识别滞后、误判率高、难以实现大范围监测等问题。人工智能技术的应用，实现了水文异常事件的智能化、自动化识别。通过构建基于人工智能的异常检测模型，对实时监测的水文大数据进行动态分析，能够自动识别数据中的异常波动，进而判断是否发生水文异常事件。例如，在洪水监测中，模型通过对水位、流量等实时数据的动态监测，当数据超过预设阈值或出现异常变化趋势时，能够自动发出预警信号，及时提醒相关部门采取应急处置措施；在水污染监测中，模型通过对水质监测数据的分析，能够快速识别水质指标的异常变化，精准定位污染区域与污染程度，为水污染防控与治理提供及时的技术支撑。此外，人工智能模型还能够通过对历史异常事件数据的学习，总结异常事件的发生规律与特征，提升对潜在异常事件的预判能力，实现从“事后识别”向“事前预判”的转变。

（三）水资源智能配置

水资源配置是水资源管理的核心内容，其核心目标是实现水资源的高效利用与合理分配，缓解水资源供需矛盾。传统水资源配置主要依赖经验决策和简单的数学模型，难以综合考虑水文系统的动态变化、用水需求的多元化以及生态环境的约束条件，配置方案的科学性与合理性有待提升。人工智能技术与水资源配置模型的结合，构建了智能化的水资源配置体系，实现了水资源的精细化、动态化配置。通过对水文大数据、用水需求数据、生态环境数据等多源数据的综合分析，人工智能模型能够精准预测水资源的供需状况，识别水资源配置中的关键约束因素；结合优化算法，能够自动生成多个水资源配置方案，并对方案的可行性与有效性进行评估，为水资源管理部门提供科学的决策支持。同时，智能化水资源配置体系能够根据实时水文数据和用水需求的变化，动态调整配置方案，实现水资源的动态优化配置。例如，在农业灌溉用水配置中，模型通过对土壤墒情、降雨量、作物需水量等数据的分析，精准计算灌溉用水量与灌溉时间，实现节水灌溉；在城乡供水配置中，模型结合城乡用水需求、水资源储量等数据，合理分配生活用水、生产用水和生态用水，确保水资源的均衡利用。

三、大数据与人工智能驱动智慧水文的发展趋势

随着大数据与人工智能技术的不断迭代升级,以及水文勘测需求的不断提升,智慧水文将朝着更加精准化、协同化、智能化、绿色化的方向发展,不断突破技术瓶颈,拓展应用领域,为水资源可持续管理提供更加强有力的技术支撑。未来,大数据与人工智能驱动智慧水文的发展趋势主要体现在以下四个方面。

(一) 多技术深度融合,提升智慧水文精准化水平

未来,智慧水文将进一步推动大数据、人工智能与遥感、物联网、区块链、数字孪生等新兴技术的深度融合,构建更加精准、高效的水文监测与分析体系。数字孪生技术的融入,将实现水文系统的虚拟化映射,通过对真实水文系统的动态模拟,精准再现水文要素的变化过程,为水文预测与调控提供更加直观、精准的技术支撑;区块链技术的应用,将提升水文数据的安全性及可信度,确保数据在采集、存储、共享过程中的不可篡改与可追溯,为水文数据的安全管理提供保障;遥感与物联网技术的进一步升级,将实现对水文要素的更高精度、更高频率的监测,拓展水文数据的获取维度与覆盖范围。多技术的深度融合,将突破单一技术的局限性,实现优势互补,进一步提升智慧水文的精准化水平。

(二) 跨领域协同合作,拓展智慧水文应用边界

水文系统是一个复杂的开放系统,与气象、生态、地质、社会经济等多个领域存在密切关联。未来,智慧水文将打破领域壁垒,加强与气象、生态环境、农业、城市规划等多个领域的协同合作,构建跨领域的水文大数据共享与分析平台,实现水文数据与多领域数据的深度融合与综合利用。例如,与气象领域的协同,将提升对极端天气引发的水文灾害的预测精度;与生态环境领域的协同,将实现对水文-生态耦合系统的精准监测与保护;与农业领域的协同,将优化农业灌溉用水配置,提升水资源利用效率;与城市规划领域的协同,将为海绵城市建设、城市内涝防控提供科学的决策支撑。跨领域协同合作,将拓展智慧水文的应用边界,实现对水文系统的全方位、多维度管理。

(三) 模型轻量化与智能化升级,提升智慧水文应用效率

当前,人工智能模型在水文领域的应用多依赖于高性能计算设备,模型的训练与推理效率有待提升,难以满足实时监测与调控的需求。未来,智慧水文将推动人工智能模型的轻量化与智能化升级,通过模型压缩、参数优化、迁移学习等

技术,降低模型的计算复杂度,提升模型的训练与推理效率,实现模型在嵌入式设备、移动终端等低性能设备上的部署与应用,满足实时监测与调控的需求。同时,模型的智能化升级将实现模型的自主学习与自适应优化,能够根据不同区域、不同场景的水文特征,自动调整模型结构与参数,提升模型的适应性与泛化能力。模型的轻量化与智能化升级,将进一步提升智慧水文的应用效率,推动智慧水文技术的广泛普及与应用。

(四) 绿色低碳导向,推动智慧水文可持续发展

在“双碳”目标背景下,绿色低碳发展已成为各领域的重要发展方向。未来,智慧水文将以绿色低碳为导向,推动水文监测与管理技术的绿色化升级。在监测设备方面,将大力推广低功耗、新能源监测设备,降低设备运行过程中的能源消耗;在数据中心建设方面,将采用绿色节能技术,优化数据中心的能源利用效率,降低碳排放;在水资源管理方面,通过智能化的水资源配置与调度,提升水资源利用效率,减少水资源浪费,推动水资源的可持续利用。绿色低碳导向的融入,将实现智慧水文技术的可持续发展,为水资源可持续管理与生态文明建设提供有力支撑。

大数据与人工智能技术的深度融合,为智慧水文的发展注入了强大动力,推动水文勘测领域实现了全方位的转型与升级。从数据维度的全域一体化整合,到分析维度的智能认知升级,再到应用维度的主动调控转型,大数据与人工智能构建了智慧水文的核心发展框架,显著提升了水文勘测与管理的智能化水平。当前,大数据与人工智能在智慧水文领域的应用已取得初步成效,但仍面临数据质量提升、模型适应性优化、跨领域协同不足等挑战。未来,随着多技术的深度融合、跨领域协同合作的加强、模型的不断升级以及绿色低碳理念的融入,智慧水文将朝着更加精准化、协同化、智能化、绿色化的方向发展,为水资源优化配置、水旱灾害防控、水生态环境保护等工作提供更加坚实的技术支撑,助力实现水资源可持续利用与生态文明建设的长远目标。

第三节 应对气候变化的水文勘测新挑战与新策略

一、气候变化背景下水文勘测面临的新挑战

气候变化通过改变水文循环的驱动因子与过程机制,使水文系统呈现出更强的非线性、随机性与不确定性特征,这不仅改变了水文勘测的对象属性,也对勘测的时空覆盖、精度控制、动态响应能力提出了全新要求。传统水文勘测体系基于相对稳定的气候背景构建,在应对气候变化引发的水文情势变异时,暴露出诸多适应性不足,主要体现在勘测对象复杂性提升、勘测技术适应性受限、勘测数据有效性不足以及勘测服务维度单一等多个方面。

(一) 勘测对象复杂性与不确定性激增

气候变化打破了传统水文系统的相对稳态,使水文勘测对象的时空演变规律更趋复杂,不确定性显著提升。从时间维度来看,气候变化导致降水、蒸发、径流等核心水文要素的年内分配与年际波动幅度大幅增加,极端降水、连续干旱等异常水文事件的发生频率与强度显著上升,水文要素的突变性特征愈发明显,传统基于长期平稳序列的勘测观测范式难以精准捕捉水文过程的动态演变规律。从空间维度来看,气候变化引发的区域水文情势分异加剧,不同区域、不同流域之间的水文响应差异显著,甚至出现与历史规律相悖的水文现象,如部分干旱区河流径流量异常增加、湿润区出现阶段性水资源短缺等,这使得水文勘测的空间布局难以适应区域水文格局的动态重构。同时,气候变化还引发了冰川融化、冻土退化、海平面上升等连锁反应,这些过程与陆地水文系统、海洋水文系统相互作用,形成了跨圈层、多尺度的复杂水文过程,进一步拓展了水文勘测的对象边界,增加了勘测的复杂性。此外,水文系统对气候变化的响应存在滞后性与累积效应,使得水文要素的演变过程更具隐蔽性,难以通过短期勘测观测精准识别其内在驱动机制,进一步加剧了水文勘测的不确定性。

(二) 传统勘测技术适应性与覆盖能力不足

传统水文勘测技术体系以定点、定时的常规观测为核心,依赖人工或半自动化设备开展数据采集,在应对气候变化引发的水文情势变异时,其适应性与空间覆盖能力均存在明显短板。在极端水文事件观测方面,传统水文站网的布局多基于历史水文情势设计,对极端降水引发的暴雨洪水、连续干旱导致的河道断流等

异常情况的观测能力不足,部分偏远山区、中小流域等区域的水文站网密度偏低,难以实现对极端水文事件的全面覆盖与精准监测,容易出现观测盲区。在动态水文过程观测方面,传统勘测技术的时间分辨率与空间分辨率难以满足气候变化背景下水文过程精细化观测的需求,例如,传统降水观测多采用小时或日尺度的观测频次,难以捕捉短时强降雨等极端降水事件的瞬时变化过程;传统径流观测多聚焦于河道干流,对支流、坡面径流等中小尺度水文过程的观测不足,难以完整刻画流域水文循环的全过程。同时,传统勘测技术对复杂下垫面条件的适应性较差,在冰川、冻土、高寒山区等特殊区域,由于自然环境恶劣,传统人工观测难以开展,自动化观测设备也面临低温、强辐射、冰雪覆盖等环境因素的干扰,观测数据的连续性与稳定性难以保障。此外,传统水文勘测技术多针对单一水文要素开展观测,缺乏对水文、气象、生态等多要素的协同观测能力,难以满足气候变化背景下多维度水文过程耦合分析的需求。

（三）勘测数据有效性与整合能力欠缺

水文勘测数据的有效性直接决定了水文分析与预测的精度,而气候变化背景下,传统勘测数据的代表性、完整性与时效性均受到显著影响,同时数据整合能力的不足进一步制约了数据价值的发挥。在数据代表性方面,传统水文勘测数据多基于长期平稳的气候背景积累,随着气候变化引发水文情势的变异,历史勘测数据的时空代表性逐渐下降,基于历史数据构建的水文模型与分析方法难以准确反映当前及未来的水文规律,导致勘测数据的应用价值大打折扣。在数据完整性方面,由于极端水文事件引发的观测设备损毁、观测环境破坏等问题频发,导致勘测数据出现断缺、异常等情况,进一步降低了数据的完整性。在数据时效性方面,传统水文勘测数据的采集、传输与处理流程相对繁琐,数据更新周期较长,难以实现对水文过程的实时动态监测,无法及时为极端水文事件的应急处置提供数据支撑。此外,当前水文勘测数据多分散于不同部门、不同流域的观测站点,数据格式不统一、标准不一致,缺乏有效的数据整合与共享机制,导致多源勘测数据难以实现深度融合,无法充分发挥数据的协同效应,难以满足气候变化背景下多尺度、多维度水文分析的需求。

（四）勘测服务维度与支撑能力单一

传统水文勘测服务主要聚焦于水资源量评估、水文灾害预警等基础层面,服务维度相对单一,难以满足气候变化背景下水资源管理、水生态保护、应对气候

变化等多领域的综合需求。在水资源管理方面,气候变化导致水资源时空分布格局重构,水资源短缺与洪涝灾害并存的矛盾愈发突出,需要水文勘测提供更精准的水资源动态评估、供需平衡分析等支撑服务,但传统水文勘测服务多局限于水资源量的静态观测,难以实现对水资源动态演变过程的精准刻画与预测,无法为水资源的精细化管理提供有效支撑。在水生态保护方面,气候变化与人类活动叠加,导致水生态系统面临严峻威胁,河流生态流量不足、湿地退化、水体污染等问题日益突出,需要水文勘测提供水文与生态协同观测的数据支撑,以揭示水文过程与生态系统演变的耦合关系,但传统水文勘测缺乏对生态水文要素的系统观测,难以满足水生态保护与修复的需求。在应对气候变化方面,需要水文勘测提供长期、连续的水文要素观测数据,以支撑气候变化对水文系统影响的评估与预测,为制定应对气候变化的水资源适应策略提供依据,但传统水文勘测服务缺乏对气候变化响应的针对性,难以提供多情景、多尺度的水文预测数据,支撑能力明显不足。

二、应对气候变化的水文勘测新策略

面对气候变化给水文勘测带来的一系列新挑战,亟需突破传统勘测体系的局限,从技术革新、站网优化、数据治理、服务升级等多个维度构建新型水文勘测策略,提升水文勘测对气候变化的适应性与响应能力,强化水文勘测在应对气候变化、保障水资源安全中的基础支撑作用。核心思路是立足水文系统的动态演变特征,以技术创新为核心,以体系优化为保障,以数据赋能为驱动,以服务升级为导向,构建“全域覆盖、精准感知、动态响应、多维支撑”的新型水文勘测体系。

(一) 推进勘测技术革新,构建多尺度精准感知体系

技术革新是提升水文勘测应对气候变化能力的核心支撑,需立足水文过程的多尺度、复杂性特征,整合空天地一体化观测技术,推动传统勘测技术的智能化升级,构建覆盖全域、精准高效的水文感知体系。在空天观测技术应用方面,应充分发挥遥感技术的宏观覆盖优势,利用高分辨率光学遥感、合成孔径雷达、重力卫星等技术,开展大范围的降水、蒸散发、土壤含水量、冰川面积、湿地分布等水文要素的遥感监测,弥补传统地面观测在空间覆盖上的不足,实现对流域尺度、区域尺度水文格局动态演变的宏观监测。同时,结合无人机遥感技术的灵活性优势,针对中小流域、偏远山区、极端事件影响区域等重点区域开展精细化观

测,实现对局部水文过程的精准捕捉。在地面观测技术升级方面,推动传统水文观测设备的自动化、智能化改造,推广应用智能水位计、多普勒流速仪、自动雨量站、土壤水分传感器等先进自动化设备,提升水文要素观测的时间分辨率与数据精度;针对冰川、冻土、高寒山区等特殊区域,研发适应极端环境的专用观测设备,解决特殊区域水文观测难题。在多技术融合方面,构建空天地一体化观测网络,实现遥感观测、地面观测、水文模型模拟的有机融合,通过多源数据的相互验证与补充,提升水文勘测数据的可靠性与完整性;同时,引入物联网、大数据、人工智能等技术,实现水文勘测数据的实时采集、传输、处理与分析,提升水文勘测的动态响应能力。

(二) 优化勘测站网布局,提升动态适应能力

针对气候变化引发的水文格局动态重构,需打破传统水文站网基于静态气候背景的布局思路,构建以流域为单元、以极端事件响应为重点、兼顾常规观测与动态监测的自适应站网体系,提升站网对水文情势变异的适应能力。在站网布局优化方面,应基于气候变化背景下的水文情势预测结果,结合不同区域、不同流域的水文响应特征,科学调整站网的空间分布,加密中小流域、偏远山区、生态脆弱区等重点区域的站网密度,填补观测盲区;同时,针对极端降水、洪水、干旱等异常水文事件的高发区域,增设专用观测站点,提升对极端水文事件的观测能力。在站网动态调整机制方面,建立基于水文情势演变的站网评估与优化机制,定期结合观测数据质量、水文情势变化等因素,对站网布局进行动态调整,确保站网的适应性与有效性;同时,推动跨流域、跨区域的站网协同布局,打破行政区域界限,构建互联互通的水文观测网络,提升对区域水文格局演变的整体监测能力。在站网功能升级方面,推动传统水文站点从单一要素观测向多要素协同观测转型,在重点站点增设气象、生态、土壤等配套观测设备,实现水文、气象、生态要素的同步观测,为分析气候变化背景下多要素耦合的水文过程提供数据支撑。

(三) 强化数据治理能力,提升数据应用价值

面对气候变化背景下水文勘测数据的复杂性与多样性特征,需强化数据治理能力,构建标准化、一体化的数据管理与共享体系,提升数据的有效性与应用价值。在数据标准化建设方面,制定统一的水文勘测数据采集、传输、存储、处理标准,规范数据格式、编码规则与质量控制要求,确保多源勘测数据的兼容性与

可比性；加强数据质量控制体系建设，建立涵盖数据采集、传输、处理全流程的质量检验机制，通过自动化校验、人工复核、多源数据对比等方式，及时识别并修正异常数据，保障数据的准确性与完整性。在数据整合与共享方面，构建一体化的水文勘测数据管理平台，整合分散于不同部门、不同流域的勘测数据，实现数据的集中管理与统一调度；建立跨部门、跨区域的数据共享机制，打破数据壁垒，推动水文勘测数据与气象、生态、地质等相关领域数据的共享共用，提升数据的协同应用能力。在数据深度挖掘方面，引入大数据、人工智能等技术，构建水文数据挖掘与分析模型，开展水文要素演变规律识别、极端水文事件预警预测、水文系统对气候变化的响应评估等研究，从海量勘测数据中挖掘有价值的信息，提升数据的应用深度；同时，建立基于数据驱动的水文预测预警体系，利用实时勘测数据与历史数据相结合的方式，提升水文预测的精度与时效性，为应对气候变化引发的水文灾害提供有效支撑。

（四）拓展勘测服务维度，构建综合支撑体系

顺应气候变化背景下水资源管理、水生态保护等领域的多元化需求，推动水文勘测服务从基础观测向综合支撑转型，拓展服务维度，提升服务的针对性与前瞻性，构建全方位的水文勘测服务支撑体系。在水资源精细化管理服务方面，基于精准的水文勘测数据，构建水资源动态评估模型，实现对水资源量、质、效的全方位监测与评估，为水资源优化配置、节水型社会建设提供数据支撑；针对气候变化引发的水资源时空分布变异，开展水资源供需平衡分析与预测，为跨流域调水、水资源应急调度等提供科学依据。在水生态保护与修复服务方面，强化生态水文要素的勘测观测，构建水文-生态耦合分析模型，揭示气候变化背景下水文过程对生态系统的影响机制，为河流生态流量保障、湿地保护修复、水生态功能区划定等提供数据支撑；针对生态脆弱区域，开展专项水文勘测，为生态保护修复工程的实施效果评估提供依据。在应对气候变化专项服务方面，构建长期、连续的水文勘测观测序列，开展气候变化对水文系统影响的定量评估，预测未来不同气候情景下的水文情势演变趋势，为制定区域应对气候变化的水资源适应策略提供科学支撑；加强与气象、气候等领域的协同合作，构建跨学科的水文-气候耦合预测模型，提升对极端水文事件的预警预测能力，为气候适应型水资源管理提供技术保障。此外，还应拓展水文勘测服务的应用场景，为水利工程建设、农业灌溉、城市防洪排涝等领域提供精准的水文数据支撑，提升水文勘测服务的

综合效益。

（五）完善保障机制，强化勘测体系协同能力

新型水文勘测体系的构建与运行需要完善的保障机制作为支撑，需从政策、资金、人才、科技等多个维度构建全方位的保障体系，强化勘测体系的协同能力。在政策保障方面，制定适应气候变化的水文勘测发展规划，明确水文勘测技术革新、站网优化、数据共享等方面的发展目标与重点任务；完善水文勘测相关法律法规与标准体系，规范水文勘测工作的开展，保障水文勘测数据的合法性与权威性。在资金保障方面，加大对水文勘测领域的资金投入，重点支持智能化观测设备研发、站网优化升级、数据管理平台建设等关键领域，保障新型水文勘测体系的构建与持续运行；建立多元化的资金投入机制，鼓励社会资本参与水文勘测领域的建设与运营，提升资金保障能力。在人才保障方面，加强水文勘测专业人才培养，培养兼具水文科学、信息技术、气候变化等多领域知识的复合型人才，提升水文勘测队伍的专业素养与技术能力；建立健全人才培养与激励机制，加强国内外技术交流与合作，引进先进技术与管理经验，提升水文勘测领域的整体人才水平。在科技保障方面，加强水文勘测领域的科技创新，设立专项科研项目，重点开展气候变化背景下水文勘测技术、数据挖掘方法、水文-气候耦合模型等关键技术研究，突破技术瓶颈；建立产学研协同创新机制，推动科研成果的转化与应用，提升水文勘测体系的科技支撑能力。

气候变化给水文勘测带来了全方位的挑战，同时也推动着水文勘测体系的转型升级。应对气候变化背景下的水文勘测新挑战，需要突破传统勘测体系的局限，以技术革新为核心，以站网优化为基础，以数据治理为支撑，以服务升级为导向，构建全域覆盖、精准感知、动态响应、多维支撑的新型水文勘测体系。通过推进勘测技术的智能化、一体化升级，优化站网的动态适应布局，强化数据的标准化管理与深度挖掘，拓展服务的多元化维度，完善全方位的保障机制，能够有效提升水文勘测对气候变化的适应性与响应能力，为应对气候变化、保障水资源安全、推进水生态保护提供坚实的数据与技术支撑。未来，随着信息技术、人工智能等新兴技术的不断发展，水文勘测体系将朝着更智能、更精准、更高效的方向发展，在应对全球气候变化的水资源治理中发挥更加重要的作用。同时，水文勘测领域还需加强国际合作与跨学科协同，共同攻克气候变化背景下水文勘测的关键科学与技术问题，为全球水资源可持续利用与气候适应能力提升贡献力量。

第四节 服务于国家水网与生态文明建设的水文综合勘测体系

一、水文综合勘测体系服务国家水网与生态文明建设的核心逻辑

国家水网以“系统治理、协同联动”为核心思路，通过跨区域、跨流域的水资源调配工程，实现水资源时空分布的优化配置，同时兼顾防洪、供水、生态等多重功能；生态文明建设则聚焦于统筹山水林田湖草沙冰系统治理，推动水资源利用与生态保护的协调发展。水文综合勘测体系作为连接二者的关键技术支撑，其构建逻辑需紧扣“需求导向、精准适配、协同赋能”三大核心，实现从传统“单点监测、分散分析”向“全域感知、系统研判”的转型。

（一）需求导向：锚定双重建设的核心水文支撑需求

国家水网建设的核心需求在于掌握跨流域水资源调配过程中的水量、水质、水位等关键水文要素的动态变化，保障调配工程的安全运行与高效发挥效益；生态文明建设则需要精准的水文数据支撑水生态保护修复、水环境治理、水生态承载力评估等工作。水文综合勘测体系的构建需精准锚定这双重需求，明确勘测范围、监测指标、数据精度等核心要求。例如，在跨流域调水工程沿线，需强化水量通量、水质达标率等指标的实时监测；在水生态敏感区域，则需重点监测生态流量、地下水埋深、湿地水文情势等要素，为生态保护修复提供数据支撑。需求导向的核心在于实现“勘测内容与建设需求的精准匹配”，避免资源浪费与数据缺失，确保勘测体系的实用性与针对性。

（二）精准适配：构建全要素全流程的勘测覆盖体系

国家水网的系统性与生态文明建设的综合性，决定了水文综合勘测体系必须突破传统勘测的空间局限与要素单一性，实现“全要素、全流程、全空间”的勘测覆盖。全要素勘测需涵盖水量、水质、水位、流速、水温、泥沙、生态流量等核心水文要素，同时兼顾气象、地质、植被等关联要素；全流程勘测需贯穿国家水网规划、建设、运行、管护全生命周期，以及生态文明建设中的现状调查、规划设计、实施监测、成效评估等全环节；全空间覆盖则需实现对地表水体、地下水、湿地、河湖岸带等不同水文单元的全面监测，消除勘测盲区。通过精准适配双重建设的空间与流程需求，确保水文数据能够完整反映水资源运动规律与水生

态演变态势。

（三）协同赋能：推动勘测数据与治理决策的深度融合

水文综合勘测体系的核心价值不仅在于获取精准的水文数据，更在于通过数据协同与分析研判，为国家水网运行调度与生态文明建设决策提供科学支撑。这就要求勘测体系构建过程中，强化“数据采集—传输—分析—应用”的全链条协同，打破数据壁垒，推动水文数据与水利工程数据、生态环境数据、气象数据等多领域数据的融合共享。通过协同赋能，实现水文数据从“基础资源”向“决策支撑要素”的转变，让勘测成果直接服务于国家水网的优化调度、水生态保护修复方案的制定、水环境治理成效的评估等关键决策环节，提升治理决策的科学性与精准性。

二、服务双重建设的水文综合勘测体系核心维度

围绕国家水网与生态文明建设的核心需求，服务型水文综合勘测体系需构建“勘测布局、技术支撑、数据治理、协同保障”四大核心维度，各维度相互关联、相互支撑，共同构成完整的体系框架。其中，勘测布局是基础，决定勘测体系的覆盖范围与精准程度；技术支撑是核心，为勘测数据的精准获取提供保障；数据治理是关键，确保数据的质量与高效应用；协同保障是支撑，保障体系的稳定运行与持续优化。

（一）勘测布局维度：全域协同的空间布局与要素配置

勘测布局的优化是实现水文综合勘测体系服务效能的基础，需结合国家水网的空间布局与生态文明建设的重点区域，构建“全域覆盖、重点强化、协同联动”的空间布局体系。在空间覆盖上，以国家水网的主干管网、支线工程为脉络，辐射覆盖上游水源地、中游调配枢纽、下游受水区，同时兼顾生态敏感区域、水环境重点治理区域、地下水超采治理区域等生态文明建设关键区域，形成“点线面结合、全域无盲区”的勘测网络。在站点配置上，按照“核心站点加密、一般站点优化、盲区站点补充”的原则，优化水文监测站点的空间分布，核心调配枢纽、水源地等关键节点设置高密度监测站点，确保能够精准捕捉水文要素的动态变化；在生态敏感区域，增设生态水文监测站点，重点监测生态流量、湿地水文情势等核心要素。在要素配置上，根据不同区域的核心需求，差异化配置监测指标，水源地重点配置水质、水量监测指标，生态敏感区域重点配置生态流量、植被覆盖

度关联监测指标,地下水超采区域重点配置地下水埋深、开采量监测指标,实现监测要素与区域需求的精准匹配。

（二）技术支撑维度：智能化融合的勘测技术体系

技术创新是提升水文综合勘测体系精准性与效率的核心支撑,需依托现代信息技术与水文勘测技术的深度融合,构建“智能化、自动化、立体化”的勘测技术体系。在地表水文勘测方面,推广应用高精度遥测技术、无人机巡查监测技术、多普勒流速剖面仪等先进技术设备,实现对水量、水位、流速等要素的实时自动化监测;在水质监测方面,应用自动化水质监测站、原位水质传感器等技术设备,实现对 COD、氨氮、总磷等关键水质指标的连续监测与自动预警。在地下水勘测方面,采用高精度地下水监测仪、分布式光纤监测技术等,实现对地下水埋深、水位变化、水质状况的精准监测,同时结合地质勘察技术,提升对地下水补给、径流、排泄规律的认知能力。在遥感勘测方面,依托高分辨率卫星遥感、航空遥感等技术,实现对大范围流域的水文情势、河湖水域面积、植被覆盖度等要素的宏观监测,弥补地面监测站点的空间局限。在技术融合方面,推动物联网、大数据、人工智能技术与水文勘测技术的深度融合,构建“空天地一体化”的勘测感知网络,实现勘测数据的自动采集、实时传输、智能分析与精准研判,提升勘测体系的响应效率与分析能力。例如,通过物联网技术实现各类监测设备的互联互通,形成统一的感知网络;通过大数据技术实现多源勘测数据的融合分析,挖掘水文要素与生态环境要素的内在关联;通过人工智能技术构建水文要素预测模型,提升对水文情势变化的预判能力。

（三）数据治理维度：全链条闭环的数据管理体系

水文数据的质量直接决定勘测体系的服务效能,需构建“全链条、闭环式”的数据治理体系,确保数据的真实性、准确性、完整性与时效性。在数据采集环节,建立严格的设备校准制度与数据采集规范,定期对监测设备进行校准维护,确保采集数据的精准性;同时,建立数据采集质量核查机制,对采集数据进行实时校验,及时发现并修正异常数据。在数据传输环节,采用加密传输技术、冗余备份技术,确保数据传输过程中的安全性与稳定性,避免数据丢失或篡改;构建多通道数据传输网络,结合卫星通信、5G 通信、物联网等多种传输方式,确保极端天气等特殊情况下数据传输的畅通性。在数据处理环节,建立标准化的数据处理流程,对采集的原始数据进行清洗、整理、标准化转换,消除数据格式差异

与冗余信息；同时，采用数据质量评价模型，对处理后的数据进行质量评级，确保数据质量符合应用需求。在数据共享应用环节，构建统一的数据共享平台，打破部门之间的数据壁垒，推动水文数据与水利工程数据、生态环境数据、气象数据等多领域数据的融合共享；建立数据分级分类管理制度，明确数据共享的范围与权限，确保数据安全的同时，提升数据的应用效率。此外，建立数据全生命周期管理机制，对数据的采集、传输、处理、应用、归档等全环节进行规范管理，确保数据的可追溯性与长期可用性。

（四）协同保障维度：多元联动的保障体系

水文综合勘测体系的稳定运行与持续优化，需要构建“政策、机制、人才、资金”多元联动的协同保障体系。在政策保障方面，完善水文勘测相关法律法规与标准体系，明确水文综合勘测体系建设的责任主体、建设标准、管理要求等，为体系建设提供政策依据；同时，加强政策引导，推动水文勘测工作与国家水网建设、生态文明建设相关规划的衔接，确保体系建设方向与国家战略需求保持一致。在机制保障方面，建立跨部门、跨区域协同联动机制，整合水利、生态环境、气象、地质等多部门的勘测资源，实现监测站点共享、数据资源共享、技术力量协同，避免重复建设；建立常态化的沟通协调机制，及时解决体系建设与运行过程中存在的问题。在人才保障方面，构建专业化的水文勘测人才队伍，加强对水文勘测技术、信息技术、数据分析等领域专业人才的培养与引进，提升队伍的综合素养；建立常态化的培训机制，加强对现有人员的技术培训，及时更新知识结构，适应智能化、信息化勘测技术的应用需求。在资金保障方面，建立稳定的资金投入机制，将水文综合勘测体系建设与运行维护资金纳入相关专项规划，保障体系建设的顺利推进与长期稳定运行；同时，鼓励社会资本参与水文勘测领域的建设与运营，拓宽资金投入渠道。

三、服务双重建设的水文综合勘测体系发展路径

构建服务于国家水网与生态文明建设的水文综合勘测体系，是一项系统性、长期性的工程，需遵循“统筹规划、分步实施、重点突破、持续优化”的发展思路，明确阶段性发展目标与关键任务，逐步推动体系的完善与升级。

（一）统筹规划阶段：强化顶层设计与规划衔接

统筹规划是体系建设的前提，需立足国家水网建设与生态文明建设的总体布

局,开展水文综合勘测体系建设的顶层设计。首先,开展全面的需求调研,系统梳理国家水网各环节、生态文明建设各领域的水文支撑需求,明确勘测体系的建设目标、核心任务、覆盖范围与技术标准。其次,加强与国家水网建设规划、生态文明建设相关规划、水文事业发展规划等的衔接,确保体系建设与各项规划的协同推进,避免规划冲突与资源浪费。再次,制定体系建设的总体方案与阶段性实施计划,明确各阶段的建设重点、时间节点与责任主体,确保体系建设有序推进。在顶层设计过程中,需充分考虑不同区域的自然地理条件、水文特征、经济社会发展水平等差异,制定差异化的建设策略,避免“一刀切”。例如,对于水资源短缺、水生态脆弱的西北地区,重点强化生态水文勘测能力建设;对于经济发达、水网密集的东部地区,重点提升水文勘测的智能化、信息化水平。

(二) 重点突破阶段: 聚焦关键领域与核心技术

在统筹规划的基础上,聚焦国家水网建设的关键工程与生态文明建设的重点区域,实现核心领域与关键技术的突破。一是重点推进国家水网主干工程沿线的勘测体系建设,优先完成上游水源地、核心调配枢纽、下游受水区等关键节点的监测站点建设与技术升级,实现对调水工程水量、水质的实时精准监测,保障调水工程的安全运行。二是聚焦生态敏感区域的水文勘测能力提升,重点加强长江经济带、黄河流域、京津冀生态涵养区等重点区域的生态水文监测站点建设,完善生态流量、湿地水文情势等核心指标的监测体系,为水生态保护修复提供精准数据支撑。三是推动关键勘测技术的研发与应用,重点突破智能化监测设备研发、多源数据融合分析、水文情势智能预测等核心技术,提升勘测体系的智能化水平。例如,研发适用于复杂水文环境的高精度原位监测传感器,解决特殊区域监测数据获取困难的问题;构建多源数据融合分析模型,实现水文数据与生态环境数据的深度融合与关联分析。四是推进数据共享平台建设,打破部门数据壁垒,实现水利、生态环境、气象等多部门数据的互联互通与共享应用,提升数据的综合利用效能。

(三) 全面提升阶段: 推动体系一体化与高质量发展

在重点突破的基础上,逐步扩大勘测体系的覆盖范围,推动体系的一体化建设与高质量发展。一是实现勘测网络的全域覆盖,完善支线水网、中小流域、地下水超采区域、农村水利设施等薄弱区域的监测站点建设,消除勘测盲区,形成“全域覆盖、无缝衔接”的勘测网络。二是推动勘测技术的全面升级,将智能化、

自动化勘测技术全面应用于各类监测站点，实现地表水文、地下水、生态水文等全领域的自动化监测，提升勘测数据的获取效率与精准度。三是完善数据治理体系，优化数据采集、传输、处理、应用全链条管理流程，建立健全数据质量评价与保障机制，提升数据质量；同时，深化人工智能、大数据等技术在数据分析中的应用，构建水文要素预测预警模型，提升数据的决策支撑能力。四是强化协同保障能力，完善跨部门、跨区域协同联动机制，推动勘测资源的优化配置与共享共用；加强人才队伍建设，培养一批兼具水文专业知识与信息技术能力的复合型人才；建立稳定的资金投入机制，保障体系的长期稳定运行与持续优化。

（四）持续优化阶段：建立动态调整与迭代升级机制

国家水网建设与生态文明建设是动态推进的过程，水文综合勘测体系需建立动态调整与迭代升级机制，确保始终适配发展需求。一是建立常态化的需求评估机制，定期梳理国家水网建设、生态文明建设的新需求、新任务，评估现有勘测体系的适配性，及时发现体系建设中存在的问题与不足。二是建立技术迭代升级机制，跟踪国内外水文勘测技术、信息技术的最新发展趋势，及时引进、吸收、应用先进技术与设备，推动勘测体系技术水平的持续提升。三是建立数据应用反馈机制，加强与数据应用部门的沟通对接，了解数据应用效果与改进需求，优化数据采集指标与分析模型，提升数据的实用性与针对性。四是建立体系运行评估机制，定期对勘测体系的运行效率、服务效能、资金使用效益等进行全面评估，根据评估结果及时调整体系建设重点与发展策略，实现体系的持续优化与高质量发展。

参考文献

- [1] 陈云, 陈熙, 张利敏.水文与水资源勘测研究和节约合理利用水资源[M].长春: 吉林科学技术出版社,2022.
- [2] 张兵, 史洪飞, 吴祥朗.水利水电工程勘测设计施工管理与水文环境[M].北京: 北京工业大学出版社,2020.
- [3] 丘宁.水文勘测技术与水资源现代化管理研究[M].哈尔滨: 东北林业大学出版社,2024.
- [4] 张玉胜, 雷成茂.水文勘测技术读本[M].延吉: 延边大学出版社,2017.
- [5] 李晶, 徐刚, 刘洋.工程地质与水文[M].北京: 北京理工大学出版社,2024.
- [6] 李伟, 高强, 孟祥凯.水文地质与工程地质勘察[M].武汉: 湖北科学技术出版社,2024.
- [7] 李常锁.水文地质勘查实务[M].济南: 山东科学技术出版社,2022.
- [8] 王凯琦, 莫继军, 刘超.水文地质与水资源开发[M].长春: 吉林科学技术出版社,2023.
- [9] 王文亮, 王晓燕, 崔姣利.水文与水资源管理[M].北京: 北京工业大学出版社,2023.
- [10] 徐勇, 马如财, 高明.水文地质与生态环境保护[M].沈阳: 辽宁电子出版社,2024.
- [11] 黄晓明.水文站网规划与优化研究[M].哈尔滨: 哈尔滨出版社,2023.
- [12] 王建平.水文地质勘察技术及应用[M].北京: 中国水利水电出版社,2021.
- [13] 李婷婷, 窦连波, 胡艳春.水文地质与环境地质研究[M].长春: 吉林科学技术出版社,2021.
- [14] 贾志强, 贾拓.水文地质环境与水质检测研究[M].沈阳: 辽宁电子出版社,2024.
- [15] 郭弘, 孙玲珑, 张先超.水文地质与生态修复研究[M].沈阳: 辽宁电子出版社,2022.

- [16] 赵明东.水文水资源勘测中遥感技术的应用分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2023(3):4.
- [17] 施凯.水文测验方式方法技术创新实践与探讨[J].华东科技(综合),2021(4):342-342.
- [18] 马京鸿.气候变化下山区河流水文勘测要素的动态响应机制[J].地质研究与环境保护,2025(2).
- [19] 黄会妙.水利工程中工程地质和水文地质勘测方法研究[J].水利科技与经济,2024,30(2):45-50.
- [20] 陶洁,李行,左其亭.湖泊生态需水计算方法比较及实例应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2022(020-002).
- [21] 王万杰,季柯妍,刘光,等.基于水文要素过程的流域地下水与地表水交换径流成分定量分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(6):44-51.