

Grassroots Agricultural Water Conservancy Projects: Global Case Comparison and Collaborative Innovation Model for Construction Management and Maintenance

**基层农田水利工程：
全球案例对比与建设管护的协同创新模式**

林新一 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Grassroots Agricultural Water Conservancy Projects: Global Case Comparison and Collaborative Innovation Model for Construction Management and Maintenance

题目：基层农田水利工程：全球案例对比与建设管护的协同创新模式

Author: Xinyi Lin

作者：林新一

ISBN: 979-8-90040-267-3

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Grassroots Agricultural Water Conservancy Projects: Global Case
Comparison and Collaborative Innovation Model for Construction
Management and Maintenance**

基层农田水利工程：全球案例对比与建设管护的协同创新模式

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: 15.5

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in July 2026

Printing: First printing in July 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.

前言

PREFACE

水是农业的命脉，农田水利则是保障国家粮食安全、促进农村繁荣与生态可持续的基础性工程。长期以来，我国基层农田水利建设取得了显著成就，但“重建设、轻管理”“重建轻养”等问题依然突出，导致大量工程效益衰减甚至失效，严重制约了农业现代化进程。进入新发展阶段，面对气候变化加剧、水资源约束趋紧、农村劳动力结构变化等多重挑战，传统的分散式、粗放型管理模式已难以为继。如何通过制度创新、技术赋能与多元协同，构建起权责清晰、运行高效、利益共享、风险共担的基层农田水利治理新格局，成为亟待破解的重大课题。

正是在这一时代背景下，本书应运而生。我们试图跳出单一工程技术视角，将农田水利置于国家治理体系与全球可持续发展议程的双重坐标中加以审视。一方面，深入挖掘以色列滴灌技术背后的精细化管理制度、荷兰圩田系统中的社区共治传统、日本“土地改良区”法律框架下的农民自治经验，以及美国垦务局与地方水务区的协同机制，从中提炼具有普适性的治理逻辑；另一方面，紧密结合我国东中西部不同区域的资源禀赋、经济水平与社会结构，探索因地制宜的协同创新路径。

本书的核心关切在于“协同”二字。我们认为，现代农田水利的有效治理，绝非仅靠政府投入或技术升级即可实现，而必须依靠流域上下游、政府与市场、专业机构与用水农户、工程建设与生态保护等多维主体的深度协同。为此，书中系统构建了“标准—组织—补偿—评估—人才”五位一体的协同创新框架：以高标准建设筑牢工程根基，以多元化组织激活内生动力，以市场化补偿平衡区域利益，以科学化评估引导持续改进，以多层次人才培养夯实智力支撑。

特别值得强调的是，本书高度重视制度与技术的融合。在数字化浪潮席

卷各行各业的今天，智慧水利不再是概念，而是提升管护效率的关键工具。通过 BIM 平台、无人机巡检、物联网传感器、水权交易平台等技术手段，不仅可以实现对工程状态的实时感知与精准调控，更能为绩效评估、生态补偿和水权交易提供数据基础，从而推动农田水利从“经验管理”迈向“数据驱动”。

此外，本书坚持“以人民为中心”的发展理念，始终将农户满意度、用水公平性、参与度作为衡量治理成效的重要标尺。无论组织模式如何创新，若不能惠及最广大的小农户，不能化解水事纠纷、增强社区凝聚力，便失去了其根本意义。因此，我们在设计评估指标时，不仅关注灌溉水利用系数、工程完好率等硬性指标，也纳入水分配公平性、弱势群体话语权、乡村社会资本等软性维度，力求呈现一幅立体、真实、有温度的治理图景。

本书的写作凝聚了多位研究者多年田野调查、政策咨询与国际比较的心得。我们深知，基层农田水利问题复杂而具体，任何理论模型都需经受实践的反复检验。正因如此，我们力求语言平实、案例翔实、建议可行，避免空泛议论，力图为一线工作者提供可操作的工具箱。

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

目 录

CONTENTS

第一章 全球农田水利发展现状与趋势	1
第一节 农田水利工程的基本概念与分类	1
第二节 全球农田水利发展历程回顾	5
第三节 当代农田水利发展面临的主要挑战	9
第四节 农田水利工程技术发展趋势	13
第五节 全球农田水利政策环境分析	18
第二章 亚洲典型国家农田水利建设模式	23
第一节 中国农田水利建设与管理特色	23
第二节 印度传统与现代水利工程融合	28
第三节 日本精细化农田水利管理体系	31
第四节 东南亚国家农田水利发展特点	36
第五节 亚洲模式对比分析与启示	40
第三章 欧美发达国家农田水利创新实践	45
第一节 美国大型灌区现代化改造经验	45
第二节 欧盟农田水利生态化建设路径	50
第三节 以色列高效节水灌溉技术应用	55
第四节 澳大利亚旱区水资源管理策略	58
第五节 欧美农田水利创新模式的启示与借鉴	62
第四章 非洲及拉美地区农田水利特色案例	69
第一节 埃及尼罗河流域灌溉系统	69
第二节 巴西雨养农业区水利设施建设	73
第三节 墨西哥高原地区水利工程特色	80

第四节 撒哈拉以南非洲小型水利项目	83
第五节 发展中国家农田水利发展路径	88
第五章 农田水利工程建设技术创新	93
第一节 智能化灌溉系统设计与应用	93
第二节 新型节水材料与施工工艺	98
第三节 数字化测绘与工程规划设计	104
第四节 生态友好型水利设施建设	108
第五节 工程建设质量管控体系	112
第六章 农田水利工程运维管理创新	119
第一节 全生命周期管理理念应用	119
第二节 智慧水务平台建设与运维	123
第三节 设备维护与更新改造策略	128
第四节 水资源调度与分配优化	133
第五节 管理绩效评估指标体系	138
第七章 基层农田水利组织模式创新	143
第一节 农民用水合作组织建设	143
第二节 公私合作模式的探索与实践	148
第三节 社区参与式管理机制	151
第四节 跨区域协调管理机制	155
第五节 基层农田水利工程组织模式创新效果评估	159
第八章 农田水利政策支持体系构建	165
第一节 法律法规保障体系建设	165
第二节 财政投入与融资机制	169
第三节 技术标准与规范制定	174
第四节 人才培养与技能提升	179
第五节 政策实施效果监测评估	184

第九章 农田水利可持续发展路径····· 191

 第一节 水资源可持续利用策略····· 191

 第二节 生态环境保护与修复····· 195

 第三节 气候变化适应能力建设····· 199

 第四节 经济效益与社会效益的平衡····· 203

 第五节 可持续发展指标体系····· 207

第十章 全球视野下的协同创新展望····· 213

 第一节 国际经验本土化路径····· 213

 第二节 技术创新与管理创新融合····· 217

 第三节 多层次协同治理机制····· 222

 第四节 未来发展趋势预测····· 227

 第五节 中国方案与国际合作前景····· 232

参考文献····· 237

第一章 全球农田水利发展现状与趋势

第一节 农田水利工程的基本概念与分类

一、农田水利工程的定义与内涵

（一）工程性水利设施的定义

狭义来讲，农田水利工程就是为调节、改善农田水分条件，满足农业生产需要而建设的水利工程设施。这就是农业生产的“骨架”，包含了取水、输水、配水、田间用水和多余水的排放全过程。它由拦截和储存地表径流的水库、塘坝，汲取地下水或河水的泵站、机井，以及庞大的输配水管网系统构成。这些实体工程依靠严格的设计和施工，在原本缺水或者经常遭受洪涝的土地上建立起了人工水循环系统。

随着科学技术的发展，工程性设施的建设标准和工程技术形态也不断发生改变。传统的土渠土坝正被防渗渠道、地下管道、装配式建筑物所取代。现代农田水利工程多采用耐久性材料，讲究科学的结构设计，以求降低输水损失，提高设施使用寿命。工程实体的建成是抵御自然气候不确定性的一道防线，依靠人为干预，把天然降水在时空分布上的不均转化为可控的灌溉水源，给作物生长提供稳定的水分保障。

（二）水资源调控与利用的内涵

农田水利工程不是简单的钢筋水泥堆砌，它的深层含义就是对水资源进行科学调控、高效利用。这是根据自然水循环的规律，通过人工的方式，对地表水、地下水、土壤水、大气降水等加以联合调度的一种过程。农田水利可以看成软硬件融合的资源配置艺术。按照作物的需水规律、土壤的含水特性、气象条件的变化来精确控制供水量、供水时间，实现水资源在时间上重新分配、空间上合理调配。

现代水资源调节的意义已上升到生态平衡这个层面。它不再只是掠夺式的利用，在满足农业用水需求的同时，必须保证地下水位的合理范围，防止土壤次生盐碱化，保证河流下游的生态基流。这就要求工程运行过程中，用系统论、控制

论的方法，把流域水文模型和作物生长模型结合起来，通过精细化的调度指令，实现从水源到作物根系的全过程水流控制。调控能力是反映地区农田水利现代化程度的重要指标，也是决定单方水产出效益的关键因素。

（三）服务农业生产的根本目标

农田水利工程所有的建设和管理活动，最终目的都是服务于农业生产，这是它存在的根本，也是它发展的逻辑起点和终点。其服务目标主要体现在以下几个方面：

1. 保障国家的粮食安全以及重要农产品的供给。依靠可靠灌溉水源的高标准农田，成为粮食生产的稳压器。尤其在干旱和半干旱地区，水利设施的好坏决定复种指数、作物单产的高低，成为克服资源环境限制，提高土地产出率的重要条件。

2. 提高农业防灾抗灾能力。农业属于受气候变化影响最大的行业。完善的排灌体系既可以抵御极端降雨引发的洪涝灾害，也可以抵御持续高温引发的干旱灾害。依靠“早能灌、涝能排”的工程体系，把自然灾害给农业生产造成的冲击降到最低，保证农业生产过程的连续性和稳定性。

二、基层农田水利工程的特点与地位

在宏大的水利网络中，基层农田水利工程具有十分特殊的生态位。它们是大中型骨干工程的延伸，也是直接面向农业生产一线的终端。对其特点和地位进行深入分析，对于认识当前管护难题、探索新的管护模式具有十分重要的意义，因为这些看似微小的工程节点，实际上支撑着庞大的农业生态系统。

（一）“最后一公里”的关键作用

基层农田水利工程常被称为灌溉系统的“毛细血管”，它最突出的地位就是解决了水利服务农业的“最后一公里”问题。大型水库、干渠属于水资源调配的“主动脉”，倘若缺少末级渠系、田间闸门、小型泵站等“末梢神经”的连接，再丰沛的水资源也无法到达作物根部。该环节是否畅通直接关系到整个灌溉系统的工作效率。现实中很多灌区的骨干工程都很完善，但是因为田间工程没有配套好，出现“有水用不上”的现象，基层工程将水源与地块连起来不可少的作用就体现出来。

就水利工程系统的效能而言，基层设施属于灌溉效率转化的关键节点。水流经过长距离输送之后，在踏入田间地头的那一刹那，它的利用方式就决定了是漫

灌浪费还是滴灌精准。基层工程的技术水平与完好程度直接决定着田间水的利用系数。如果“最后一公里”的渠道渗漏严重或者没有计量设施，上游所有的节水努力都将付之东流。因此基层农田水利工程不单是物理连接的末端，也是节水技术落地、水效提升的前沿阵地。

其二就是对于精准农业技术的承载能力。随着水肥一体化、智能灌溉等现代农业技术的应用，基层水利设施已经不仅仅只是输水的通道，更成了各种传感器、控制阀门、施肥装置的载体。没有完善的田间管网和动力设施，现代农业的高科技装备就如同无根之木。基层农田水利工程的现代化程度，实际上就是农业生产方式现代化的上限，也是传统农业向智慧农业跨越的基础。

（二）规模小、数量多、分布广的特点

基层农田水利工程在物理形态上具有非常明显的微、多、散的特性。相比于耗资巨大的大型水利枢纽，单个基层工程规模较小，可能是口机井、一条几百米长的斗渠、一座小型塘坝或者一个几十千瓦功率的泵站。单体规模小，建设技术门槛低，但是也容易被宏观规划和资金分配所忽略，造成建设标准不统一。

数量众多是其又一显著特点。在一个普通的农业县域内，大型水库的数量不会很多，但是田间地头的机井、水闸、末级渠道等的数量却以万计。如此庞大的资产存量产生出数量众多的工程设施，给普查、登记、确权以及之后的维护管理工作带来了巨大的行政成本和技术难题。对管理部门来说，成千上万的分散点位，传统的层级管理模式常常捉襟见肘，很难做到全覆盖的实时监管。

地域分布范围大，且分散度也很高使得管理的难度进一步增大。工程分布在田野、山地、丘陵之中，地理环境各不相同，有处在交通方便的平地，也有处在偏远山区。由于空间分布非常分散，所以统一的管护工作很难进行，维修人员通勤成本高，不能产生规模化运营收益。就是这种“星罗棋布”的特点，决定了基层农田水利工程不能简单地照搬大型工程的集中管理方式，必须探索出符合其分散特点的小范围、社会化管护方式。

（三）与农民生产生活关系最密切

基层农田水利工程同农民的利益联系最紧，互动也最密。对农户来说，大型水库可能遥不可及，但田边的水渠、地头的机井却是他们日常生产生活所必需接触的。这些设施能不能正常运转，直接关系到农民能不能按时播种、灌溉、收获庄稼，直接关系到农民家庭经济收入。一眼机井出水畅通，意味着丰收的希望；

一条渠道淤塞堵塞，就会造成上下游用水纠纷。

农村基层水利设施常常是村民集体公议的公共事务问题。围绕用水秩序的维持、水费的收取、工程维修用工等，成为农村基层治理的重要内容。设施良好的管理可以提升村民的自治能力，促进农村社会的团结；设施的废弃或管理上的混乱都会引起邻里之间的矛盾，对农村社会的和谐发展造成影响。从这样的角度来讲，基层农田水利工程不单是生产设施，也是农村社会关系的调节器。

与此同时，农民是这些工程最直接的受益者和使用者，他们的参与意愿和参与行为对工程的存亡起着决定性的作用。与其它基础设施不同的是，基层农田水利工程具有很强的“准公共产品”或者“俱乐部产品”性质，很难把使用者管护的责任完全分离开来。农民是否爱惜设施、是否主动清淤除草、是否愿意分担维护费用，直接影响工程使用寿命。历史上无数的案例表明，脱离农民参与的政府包办模式在基层水利上不能长久，只有建立起利益共享、责任共担的机制，让农民成为工程的真正主人，才能解决重建轻管的问题。

基层农田水利工程特征与影响表

特征	具体表现	关联影响
“最后一公里”	连接骨干工程与田间地头，决定水利服务效率。	影响灌溉系统整体效能，节水技术落地，精准农业发展上限。
“微、多、散”	单体规模小，数量庞大，地域分布广泛且分散。	建设标准不一，管理成本高，传统管理模式难以覆盖。
与农民关系密切	农民日常生产生活依赖，关乎家庭收入和村集体事务。	影响农村社会稳定与团结，农民参与意愿决定工程可持续性。
多功能性	除灌溉外，兼具生活供水、消防、生态景观等功能。	融入农村人居环境和文化生活，是和美乡村建设组成部分。

从上表可以看出，基层农田水利工程具有乡村发展过程中所起的多种作用。这层密切的关系在生活方面也表现出来。许多地方的农田水利设施同时具有生活供水、农村消防和生态景观的功能。村边塘坝既是灌溉水源又是村民洗衣垂钓的地方；穿村而过的渠道常常寄托着乡愁。因此，基层农田水利工程的建设和管护，深深地嵌入农村的人居环境和文化生活之中，成为宜居宜业和美乡村建设不可分割的部分。

第二节 全球农田水利发展历程回顾

一、古代文明的农田水利萌芽

（一）古埃及尼罗河的泛滥灌溉

古埃及文明被称作尼罗河的赠礼，它所处的独特地理环境孕育出了著名的盆地灌溉系统。尼罗河每年定期的洪水泛滥不是灾难，而是农业生产所必需的条件。古埃及人利用纵横交错的堤坝把河谷平原划分成很多大块的方形盆地。当洪水来临时，人们挖开堤坝，把肥沃的淤泥水引入盆地蓄积起来。洪峰漫灌既满足了农作物的用水需求，又使洪水退去后留下的黑色淤泥成为土地上最优质的有机肥料，使这片土地几千年来地力水平一直很高，支撑起金字塔之下繁荣的帝国。

为了管理庞大的水利工程，古埃及就建立了一套严密的观测及行政管理制度。祭司、官吏按照尼罗河尺来测定水位的高低情况，从而预测来年的收成好坏，据此制定相应的税收政策。依靠水文观测的早期管理方式，清楚地表明了国家公权力在水利资源分配中起到的决定性作用。整个灌溉系统依靠中央集权的高效组织来运行，当中央政权衰弱之后，各地的水利设施因为缺少统一的调度、维护而陷入瘫痪，造成农业产量的剧烈波动。高度集中化的治水社会特征，给古埃及政治体制和社会形态造成了深刻的影响。

依靠自然泛滥的灌溉方式虽然是被动的，但是体现了古埃及人同自然共存的朴素哲学。他们并没有试图截断河流或者彻底改变河道，而是用疏导和滞留的方法，把狂野的洪水变成滋养万物的乳汁。顺应自然的治水理念使尼罗河谷的农业生态系统一直保持稳定。即使是在技术手段比较落后的青铜时代，埃及人也依靠这种独特的灌溉方式，创造了地中海世界当时最高的农业生产率，成为古代世界的粮仓。

（二）中国古代都江堰等经典工程

与古埃及相比，中国古代的水利建设具有更强的主观能动性，工程水平也更高。其中最璀璨的明珠就是战国时期的都江堰。这座岷江中游的水利工程，是全世界现存最古老的、唯一留存的无坝引水的大型水利工程。李冰父子设计工程时就提出了分四六、平潦旱的科学治水原则。鱼嘴分水堤、飞沙堰溢洪道、宝瓶口进水口这三个主体工程有机配合，解决了江水自动分流、自动排沙、控制进水流

量这三个世界级难题。这套系统利用流体力学原理，在枯水期把六成的江水引入灌区，在丰水期把六成的江水排到外江，达到防洪灌溉两全的目的。

中国古代水利文明的又一特点就是地域适应性强、类型多样。除了都江堰这种大型无坝引水工程，关中地区郑国渠也是长距离引水灌溉的高超技术典范。郑国渠横向截断多条河流，把泾河含沙量大的河水引到贫瘠的盐碱地，通过淤灌改良土壤，使关中平原成为秦国统一天下的可靠后方。同时，江南水乡的人们修建了大量圩田、塘浦，形成了利用洼地、筑堤束水的水网体系；在干旱的新疆地区，劳动人民发明了坎儿井，用地下暗渠输水减少蒸发。这些建筑工程千差万别，但是它们有一个共同点，就是蕴含着“因势利导”的东方哲学思想。

中国古代水利工程特点概览

特点	描述	典型工程
因势利导	顺应自然规律，利用地形地貌，而非强行对抗。	都江堰
主观能动性	工程师积极改造自然，而非完全被动适应。	郑国渠
类型多样	适应不同地理环境，发展出多种工程形式。	圩田、坎儿井
工程技术高超	巧妙运用流体力学原理，实现复杂功能。	都江堰
重视管理体系	建立从中央到地方、官民结合的管理制度。	各朝代

从中国古代水利工程的特点概览中可以看出，各个朝代的封建统治者都将治水当成治国的第一要务，创建出了一套由上而下、和基层自治结合起来的水利管理机构。从国家层面讲，中央设有工部水司负责大型骨干工程的规划、修缮等；从基层乡村来讲，形成以宗族、地缘关系为纽带的民间用水组织。组织一般由德高望重的乡绅主持，制订出详细的“水规水约”，用抓阄、轮灌等方式解决农户间的用水矛盾。官督民办、民办公助的管护模式，保证了基层农田水利设施能够在历史的长河中一直运转，也为后人研究水利社会学留下了丰富的本土案例。

（三）古罗马水道与渠系建设

古罗马文明在水利工程方面有很突出的成就，帝国领土上到处是高架水道，渠系网络也非常复杂。罗马人继承并发扬了伊特鲁里亚人和希腊人的水利技术，把拱券结构运用得炉火纯青。罗马的工程师们为了把干净的水送到城市、农田里，花尽了人力物力修建了成百上千公里的输水管道。这些水道常常要跨越深谷河流，著名的加尔桥就是这一时期的杰作，三层拱券叠放的结构既坚固耐用又体现了数学上的精确。罗马水道设计的坡度非常之大，一般为千分之几，依靠重力流长距离输水，在没有精密测量仪器的古代，这是项工程奇迹。

罗马人建立了详细的农田灌溉系统，水从主水道分流到各级支渠，再由支渠输送到田地里。为了规范水资源的使用，罗马法中有很多关于水权的法律条文。法律规定了土地所有者对于流经其土地上的水流所享有的权利和义务。上游地主不能随意截断水源影响下游灌溉，用水时间的分配一般是通过契约的形式来确定的。依靠法律契约维系的水利秩序，使罗马帝国的农业生产具有很强的契约精神和稳定性，给地中海沿岸的葡萄园、橄榄园和谷物种植提供可靠的水源保障。

古罗马水利工程既是技术上的成就，又是行政管理能力的表现。帝国设水务执政官管理水道维修、水量分配。他们用大量的奴隶来清理渠道的淤泥、修补渗漏。随着罗马军队的扩张，这种先进的水利技术以及管理方式被传到北非、伊比利亚半岛和高卢等地。在北非干旱的边缘，罗马人建造蓄水池、集雨设施，把原来的荒芜之地变成了帝国的粮仓。虽然随着帝国的灭亡，许多宏大的水道也渐渐废弃，但是其工程原理、水权法理却对后世欧洲乃至全球的水利发展产生了深远的影响。

二、二战后至 20 世纪末的现代化转型

（一）绿色革命与灌溉农业的扩张

20 世纪中期以后出现的绿色革命是现代农业发展史上的一个分水岭。用推广高产作物品种、现代农业投入品等手段极大地缓解了世界粮食危机，这一切的基础就是灌溉农业的迅速发展。高产的小麦、水稻品种虽然产量很高，但是对水分十分敏感，必须有稳定的、充足的灌溉才能保证。为了配合良种推广，以亚洲、拉丁美洲为代表的发展中国家发起了史无前例的水利建设高潮。这一时期的水利发展具有一定的技术特征：

1. 地下水开发利用技术发生了根本性的改变。内燃机水泵、电力排灌设备的普及使得人类获取水资源的能力冲破了地表水的束缚。在印度恒河平原、巴基斯坦印度河流域，成千上万口管井像雨后春笋一样冒出来，使以前依靠季节性降雨的旱地变成了可以一年多熟的稳产田。分散的灌溉方式极大地提高了农民的生产积极性。

2. 大型灌区现代化改造及配套。各国政府投入巨资对传统的土渠进行防渗处理，修建钢筋混凝土结构的各类水工建筑物。喷灌、滴灌等节水灌溉技术最早是从以色列、美国等发达国家向全世界推广的，虽然初期投资较高，但是在干旱地

区具有很大的节水增产效益。农业生产方式从原来的靠天吃饭转变为人工控制。

3. 农业集约化程度迅速提升。灌溉条件的改善使化肥、农药的利用率大大提高，产生了水、肥、种协同增产的效应。水稻单产在短短二十年内翻了一番，养活了众多的人口。但是随之而来的便是水资源的过度开采，地下水位下降、土壤次生盐碱化等生态问题在 20 世纪末期逐渐显现出来，给之后的可持续发展埋下了隐患。

（二）世界银行等国际组织的推动作用

二战以后，以世界银行、亚洲开发银行为代表的国际多边金融机构，在世界农田水利现代化进程中起到了举足轻重的作用。冷战之下，它们把水利基础设施的打造当作援助发展中国家摆脱贫困、巩固社会秩序的方式。从 20 世纪 50 年代到 80 年代，国际资本的流向主要是大型水坝和骨干渠道。这一时期被称为“大坝时代”，亚非拉大陆上拔地而起许多截断江河的宏伟工程，是国家现代化的象征，目的是集中调控水资源，以期达到发电、防洪、灌溉的综合效益。

这些国际组织提供的低息贷款数目很多，而且输出的还有国外的工程技术标准与项目管理标准。国外工程师带去了严谨的可行性研究、成本效益分析、复杂的招投标程序，使受援国水利工程建设的规范化程度得到很大提高。在这个过程中许多发展中国家培养出了自己的专门水利技术队伍，现代水工设计、施工的关键技术也被他们掌握。技术转移所带来的影响是深远的，从根本上改变了许多国家传统水利建设的方式，使它们走上了现代工程管理的道路。

20 世纪 90 年代由于大型工程投资回报率下降、管理不善等问题，世界银行等机构的政策导向也发生重大转变。逐渐认识到单靠工程建设有局限性，开始重视软硬件结合。国际组织开始大力推广参与式灌溉管理的理念，把支渠以下的灌溉设施交由农民用水户协会来管理。改革目的就是明确产权、赋权于民，解决重建轻管的顽疾。虽然这个模式在不同国家的效果参差不齐，但是它显示出全球水利治理正在由原来的单纯的技术工程视角，向更加重视制度建设和社会资本的综合治理视角转变。

（三）水资源管理理念的初步确立

伴随着工业化、城市化的快速发展，20 世纪末期，水资源短缺、水环境恶化已经成为全球性的危机。传统的“供给管理”，即通过不断地修建工程来增加供水以满足需求的方法，已难以为继。在这个背景之下，现代水资源管理思想开

始萌芽并逐步形成。1992 年在都柏林召开的国际水与环境大会上通过的《都柏林原则》，是现代水资源管理史上的一座里程碑。该原则提出水是有限的、脆弱的资源，水资源的开发利用和管理要采取参与式的方式，妇女在水资源管理中处于中心地位，水具有经济价值，应将水作为经济商品来对待。

这些思想提出以后，世界农田水利发展进入了一个反思和调整的新时期。各国逐渐认识到，农业是最大的用水部门，必须由粗放用水向节约用水转变。综合水资源管理已经成为国际共识，即流域内地表水与地下水、水量与水质、上游与下游、农业用水与生态用水的统筹考虑。在此思想下，许多国家开始修改水法、实行水权交易试点，用市场调节的方式调整水资源分配、提高灌溉用水的经济效率。

环境保护意识的提高，对于水利工程建设、运行也产生了很大的影响。人们不再只看重工程规模，开始关注工程给河流生态系统造成的影响。20 世纪末，一些发达国家已经开始拆除旧的水坝、恢复河流的自然形态。对于农田水利来说，就是建设重点从单一的引水灌田变为生态灌区的建设，灌溉排水系统不仅要满足作物生长的需要，还要保护农田生态系统的生物多样性，控制面源污染。尽管转型困难并且存在争议，但是它明确地指出了 21 世纪农田水利发展的大方向。

第三节 当代农田水利发展面临的主要挑战

一、水资源短缺与供需矛盾加剧

（一）全球气候变化影响下的水文不确定性

全球气候变暖正在深刻地改变着地球的水循环模式，传统的“水文平稳性”假定已经不再成立。给依靠历史数据进行规划设计的农田水利工程造成巨大的适应性难题。气温升高会加快地表水的蒸发和作物的蒸腾，使农业生产耗水量明显增加。即便是降水量没有变化的地区，实际可利用的有效水资源量在客观上也是减少的。更让人担忧的是降水的时空分布规律变得紊乱起来，出现“少雨期更旱、多雨期更涝”的极端现象。

降水强度突变使得按照旧标准建设的水利设施陷入两难境地，干旱年份蓄水设施由于径流减少不能自然补给蓄满，灌溉保证率随之降低，本应起到抗旱作用

的工程成了无水可用的摆设；暴雨频发的季节，短历时强降雨常常超过沟渠、涵闸的排涝设计标准，造成洪涝灾害，农田被淹，水利设施被冲毁。

气候变化使积雪融化时间变晚、冰川储量增加，这对以冰雪融水为主要灌溉水源的流域来说就是一场灾难。春季径流洪峰提前，与农作物需水高峰期错位，加重了季节性缺水矛盾。沿海地区由于海平面上升引起的咸潮上溯，地下水咸化，使很多用于灌溉的水井不能再使用，土壤次生盐碱化的风险也随之增大。由于气候因素造成的水文不确定性，使基层农田水利工程调度运行异常复杂，单一的工程措施已经不能适应多变的自然风险。

（二）人口增长与城镇化带来的用水竞争

伴随着全球人口总量的不断增加以及发展中国家城镇化进程的加快，水资源所承担的压力越来越大。

1. 人口基数的增大直接造成粮食总需求的增长。为了满足人类生存的基本营养需求，农业生产必须保持高强度产出，这就客观上要求农业用水量保持稳定甚至增加。为了生产更多的肉类和高蛋白食品，畜牧业和饲料作物的扩张又加大了虚拟水的消耗。虽然农业从占比上看是最大的用水户，但其绝对需求量仍然非常大。

2. 城镇化是人口在空间上的转移，也是资源消费方式的重组。城市工业用水和生活用水的边际效益高于农业灌溉用水。按照市场经济资源配置的原则，水资源必然会流向效益更高的地方，产生虹吸效应。这使得大量的本来属于农业的优质水资源被挤占，很多灌区只能被动地接受水源被截留、水权被置换的事实。城市扩张直接侵占了原来的灌排渠系，使水利网络被割裂。由于城市建设一般都以防洪和交通为优先考虑，农田水系被人为破坏，造成“人为缺水”的现象在城乡结合部比较普遍。

（三）水污染加剧可用水资源减少

水质型缺水已经成为继资源型缺水之后，限制当代农田水利效能发挥的又一个“隐形杀手”。工业化进程产生废水排放，加上城镇生活污水集中处理的滞后，造成大量未达到标准的污水排入江河湖泊，直接污染了农业灌溉用水。由于基层水利工程大多位于流域末端或者地势低洼处，它们常常是各种污染物的最终去向。一旦灌溉水源被重金属、持久性有机污染物或者病原微生物所污染，水利工程输送的就不再是对作物的甘露，而是对土壤和作物的毒水。

农业自身的面源污染也不能忽略。过量使用化肥、农药，使农田退水和地表径流中的氮、磷严重超标。不但造成受纳水体富营养化，引发蓝藻爆发等生态灾难，使水体功能丧失，而且造成下游地区无水可用或者用水成本增加。这就造成了“有水不能用”的尴尬局面，实质上就是减少了该区域可用水量。被污染的水体会对水利设施本身产生腐蚀作用，加快泵站、闸门等金属结构的损坏速度，降低混凝土构件的耐久性。在地下水超采严重的地区，由于地层深处劣质水的入侵，灌溉水质的矿化度急剧上升，长期使用这样的水源灌溉，会使耕地土壤板结硬化、次生盐渍化，最终可能会导致以水利工程为支撑的农业生态系统崩溃。

二、工程老化与管护资金不足

相比于自然环境所带来严峻的考验，工程体系自身存在的物理性衰退以及管理层面的经济困境，更直接地属于内部隐患。大量原有的设施由于长时间的使用而功能退化，但是与之相适应的维护资金和管护制度却长期没有建立起来，造成工程效益大打折扣。

（一）大量工程进入“中年期”，功能衰减

放眼世界，许多国家的基层农田水利骨干网络大都是在 20 世纪中期到八十年代建成的。经过多年的使用，这批庞大的工程存量现在已经普遍进入了所谓的“中年期”或者“老年期”，物理结构的自然损耗已经接近临界点。衬砌脱落、渠底淤积抬高、启闭不畅、机电设备落后等问题比比皆是。

以混凝土结构为主的灌排设施，由于水流冲刷、冻融循环、干湿交替等作用，出现严重的碳化和裂缝，造成输水过程中渗漏损失很大。根据相关统计数据显示，在部分已经老化的灌区里，渠系水利用系数已经不到设计值的二分之一，大量的宝贵水资源白白被浪费。水库、塘坝淤积问题十分严重，泥沙沉积导致有效库容大幅度减少，调蓄能力降低，洪水位上升，溃坝风险增大。这些老化工程在应对现代农业所要求的精准灌溉、高频率调度时就显得力不从心了。原来用来防洪抗旱的标准已经不能满足目前的资产保护要求，成了悬在农村地区头顶上的一颗隐患。功能性衰减不是局部的，是大面积、条带状的，其修复难度大，技术复杂度远远高于新建工程。

这些“中年期”水利工程的现状，见下方《老化农田水利工程常见问题及影响》表：

老化农田水利工程常见问题及影响表

问题类别	具体表现	直接影响	长期影响
输水渠道	衬砌脱落、裂缝、淤积	渗漏严重、输水效率低	水资源浪费、灌溉保证率下降
水库塘坝	泥沙淤积、库容减少	调蓄能力下降、洪水位升高	溃坝风险增大、防洪抗旱能力减弱
泵站闸门	机电设备老化、启闭不畅	运行不稳定、故障率高	灌溉排涝不及时、农业生产受阻
管网系统	管道腐蚀、堵塞、破损	供水压力不稳、水质下降	灌溉效率低下、设备维修成本高
结构安全	混凝土碳化、钢筋锈蚀	结构稳定性降低、安全隐患	使用寿命缩短、需大规模重建

（二）政府财政投入与维护需求缺口大

农田水利工程属于典型的准公共产品，建设和维护高度依靠公共财政的支持。但是，目前世界上各个国家都存在财政困难的情况，因此在该方面投入很少，出现了巨大的资金缺口。

工程老化速度越来越快，维修养护所需的资金呈几何级数增长，但是政府预算的增长率远远不能跟上维修成本攀升的速度。通货膨胀、劳动力成本和原材料价格的飞涨使有限的管护资金购买力不断缩小。地方政府在财政支出优先顺序上，一般都把能带来直接税收回报的工业项目或者城市基础设施放在前面。农田水利属于弱势产业的配套工程，资金保障常被边缘化，常常陷入没有钱修的局面甚至无钱管的窘境。

基层水利管护资金来源单一，完全依靠上级转移支付，没有多元化的社会资本投入途径。由于农业用水的经济效益低，并且水费征收机制不健全，依靠水费收入支付工程全成本运行维护在大多数地方还是不现实的。这样的“造血功能”缺乏，造成工程管护陷入恶性循环之中，投入不足，工程就会出问题，经济效益随之下滑，也就更加无力投入。尤其在经济欠发达的农业主产区，地方财政的配套能力非常有限，国家补助只能解决由于工程损毁产生的应急抢修问题，日常的预防性养护根本无法得到保障，最终往往“小病拖成大病”，不得不花费更大的代价去重建。

（三）重建轻管现象普遍存在

在制度文化和行政绩效考核机制的深层逻辑里，“重建设、轻管理”已经成

为长期困扰农田水利发展的顽疾。根本原因是建设与管理在政治可见度和利益分配上存在着巨大差别。

新建工程或者大规模改造项目,一般具有较强的视觉冲击力和形象展示效果,能够成为地方官员政绩考核的显性指标,在短期内能拉动投资,产生工程建设带来的经济数据增长。各部门热衷于争取新项目、开工和竣工典礼大肆铺张浪费地开展工程建设。日常的运行管护工作琐碎、隐蔽、缺少亮点,是项需要长期坚持的“良心活”,它的效果很难在短期内量化体现,所以常常被决策者有意无意地忽视。

这就造成了“最后一公里”的问题一直存在。国家建设起来的骨干工程标准高,但是田间的末级渠系由于缺少管护主体和资金支持,大多处于废弃的状态。产权改革不到位的地方,集体经济组织虚化造成小型水利设施陷入“公地悲剧”,农民个人没有能力去修理,集体因缺少组织力而无人牵头,造成大量的泵站、水窖、沟渠无人过问。即使已经完成了确权划界的工程,但由于缺少强制性管护责任约束和技术指导,承包人仍然会采取掠夺式的使用方式,只用不修,直到工程报废为止。由于没有这样的管理软环境,硬件建设所花费的大量资金不能转化成持久的生产力,造成巨大的社会资源浪费。

第四节 农田水利工程技术发展趋势

一、高效节水与精准灌溉技术

(一) 滴灌、微喷灌技术的普及与优化

滴灌和微喷灌作为节水高效的主体技术,正在由高附加值的经济作物向大田粮食作物推广,这是由于核心部件不断的技术革新所导致的。现代滴灌系统的核心就是灌水器的流道设计。新型迷宫流道结构在保证水力学性能优化的同时,能在很小的压力下获得均匀的出水流速,并且有很好的抗堵塞能力。用计算流体力学模拟出的紊流流道可以抑制泥沙沉积、微生物滋生,从而延长滴灌带的使用寿命、降低维修费用。压力补偿技术的广泛应用,使滴灌系统在地形起伏的复杂地势上也能保证首尾出水一致,不再受地形的影响,实现高效灌溉。

地下滴灌技术属于滴灌的高级形态,正成为技术优化的新方向。将滴灌管理设于作物根系活动层里,让水分直接供给到根部土壤,彻底消除了地表蒸发损失,

把水分利用率提高到了一个新的水平。为了克服地下滴灌时根系会往滴孔里长，材料科学与生物技术实现了跨界合作。新型滴头材料中加入抑制根系向内生长的微量元素或者化合物，或者采用物理阻根结构设计，在保证作物正常生长的基础上有效防止了根系堵塞滴头。微喷灌技术在雾化效果以及射程方面也有了很大的提高，新的旋转式微喷头可以喷洒出更加均匀细密的雾滴，既能灌溉，又能调节高温季节田间的微气候，为作物生长创造良好的温湿度环境。

水肥一体化技术的深入融合，成了灌溉技术改进的又一重要方式。用文丘里施肥器、注肥泵等精确施肥设备，可溶性肥料随着灌溉水准确地供给到作物的根部，达到水肥同步的目的。该技术模式冲破了传统施肥的盲目性，按照作物生长周期营养需求曲线实行按需供给，不但肥料利用率明显提升，过量施肥造成的面源污染得以削减，而且凭借少量多次的施用准则，很好地遏制了土壤盐渍化危险。

（二）基于物联网的智能灌溉控制系统

物联网技术深度参与，给农田水利工程赋予了感知和思考的能力，创建起闭环的智能灌溉控制体系。抛弃人的主观经验，依靠实时数据做科学决策。田间布置的高密度传感器网络属于系统的神经末梢，可以对不同土层的土壤含水率、基质电导率、温度变化实施 24 小时监测。利用小型气象站获取的降雨量、风速、光照辐射等数据，可以创建出较为精确的田间环境数字孪生模型，给灌溉决策提供较多的数据支持。

智能控制系统的核心在于云端决策大脑的构建与算法迭代，其运行逻辑包含以下几个关键环节：

1. 数据融合与分析：用 NB-IoT 或者 LoRa 等低功耗广域网技术将田间的大量数据实时传送到云平台。云计算中心凭借大数据算法，把即时气象数据同作物需水模型融合起来，算出作物现在的蒸散发量以及水分亏缺状况。

2. 智能决策与下发：根据事先设定的灌溉策略（定时定量、阈值触发或者动态需水预测）来生成最优灌溉方案并下发到田间控制器。该方法支持边缘计算，即网络不稳的时候也会根据事先设置好的逻辑执行紧急灌溉任务。

3. 精准执行反馈，得到指令以后，智能阀门控制器打开电磁阀，变频水泵根据管网压力改变转速，从而实现了恒压供水。同时系统还会对管道的流量、压力进行监测，一旦出现爆管、漏水、堵塞等异常情况，就会发出报警信号，并及时切断水源，通过手机 APP 将故障信息发送给管理者。

这样高度智能化的管理方式大大地减轻了农村的劳动力。农户使用智能手机终端就可以远程查看田间墒情、作物长势、设备运行状况，随时随地远程控制。对规模化种植农场，系统可以基于历史数据生成全生长周期用水用肥报告，为下个生产季节生产计划的调整提供科学依据，真正实现了从靠天吃饭到数据种田的转变。

（三）变量灌溉与按需供水技术

变量灌溉技术是当前大型喷灌机技术最高水平，解决了同一地块内因土壤质地、地形地貌、作物长势等引起的不均匀需水问题。传统的中心支轴式喷灌机工作时一般都采用均匀的喷水量，致使低洼处积水、高岗处干旱，沙土区漏水、粘土区径流。变量灌溉系统集成高精度定位系统、地理信息系统，把整个农田划成无数个独立的管理网格，每个网格根据土壤持水能力、作物实际需水情况来赋予不同的处方图。

车载计算机根据实时的位置信息读取处方图数据，独立控制每一组喷头电磁阀的开闭频率或者脉冲宽度。通过调节喷头喷水时间的比例，在不影响系统压力的情况下，可以对不同的部位进行精确的调节。大型农场使用该技术可以避免对非种植区（道路、水塘、岩石露头等）的无效灌溉，对作物生长较弱的地方进行重点补偿，大大提高水资源利用率，提高作物整齐度。

按需供水技术主要是输配水渠道系统自动化控制。大型灌区传统计划供水方式存在上游弃水、下游缺水的时间矛盾。现代的渠道控制系统使用了先进的下游控制算法，在渠道沿线安装了自动测控闸门、水位传感器等设备，可以感知下游用水户取水情况和渠道水位的变化。控制算法根据下游水位变化趋势，反向计算出上游各层闸门的开度调整量，实现下游索取、上游响应的目的。按需供水模式明显减小了渠道退水损失，提高了灌溉水利用系数，为灌区水权交易、精确计量收费打下了技术基础。

二、新材料与新工艺的应用

（一）管道输水技术的普及与新材料应用

管道输水代替明渠输水可以提高输水效率、减少占地面积和蒸发损失，新型管材的研制与使用就是这一趋势的物化表现。传统混凝土管自重大、接头易漏水、内壁粗糙等缺点，正在被高性能复合管材所取代。高密度聚乙烯管具有较好的柔

韧性、耐腐蚀性，施工安装方便，因此田间末级管网多用高密度聚乙烯管。改性聚氯乙烯管材由于加入了增韧剂，克服了传统聚氯乙烯管材低温脆性缺陷，提高了高寒地区管材的抗冲击性，大幅减少管材在运输、安装过程中破损的概率。

玻璃纤维增强塑料夹砂管、大口径钢塑复合管的发明，给长距离、大流量的主干输水工程提供了一种理想的解决方案。这些新材料管材内壁光滑，糙率系数很小，在相同管径下输水能力远超传统管材，或者在相同流量下可以减小管径，从而降低工程投资和运行能耗。对于复杂的地质条件，柔性接口技术与非开挖顶管施工工艺相结合，可以使管道经过公路、河流、建筑物时更安全高效。

为了应对老化问题越来越严重，管材配方中加入纳米改性剂。加入抗紫外线、抗氧化等纳米助剂之后，塑料管材的耐候性发生了质的改变，大大减缓了长时间暴露在野外的光氧老化速度。对一些灌溉水质不好的情况，新型管材内壁采用防结垢涂层技术，减少钙镁离子的附着沉淀，保持管道的通水能力，降低后期清洗维护的成本，保证输水系统全生命周期高效运转。

（二）防渗新材料与环保型施工工艺

渠道防渗对于减少输水损失来说十分重要，新一代防渗材料致力于寻找防渗与生态友好的平衡点。传统混凝土硬化衬砌防渗效果好，但是切断了水土气之间的自然交换，造成渠道生态系统退化。因此新型土工合成材料如膨润土防水毯和复合土工膜被广泛应用。这些材料防渗系数大、适应变形能力强，能适应地基的不均匀沉降，不会使防渗层开裂。两布一膜、一布一膜等复合材料集防渗、反滤、排水、加筋保护于一身，大大简化了施工结构。

生态型防渗工艺是近年的热点，要造出“会呼吸”的渠道。生态混凝土技术是通过控制骨料级配、胶凝材料用量来形成连续孔隙结构的多孔混凝土。该材料有一定的结构强度和防渗能力（底部加防渗膜），又有孔隙供植物根系穿行，扎入土中，实现渠坡绿化。这既巩固了边坡，又给两栖动物、昆虫、微生物给予了栖息地，改善了水体的自净能力。

新型环保固化剂的应用改变了传统的土壤固化方法。采用生物酶、高分子聚合物等环保材料对渠道原土进行改性固化，可实现少用或不用水泥砂石就地取材形成高强度防渗层。该工艺可以减少建材开采、运输阶段产生的碳排放，同时又不会对周边农田环境造成破坏。喷涂型聚脲弹性体等新型防护材料的出现，给老旧渠道防渗修复提供了快速的解决办法，瞬间固化、无缝隙、附着力强等特点，

使应急抢修可以在不停水的情况下进行。

（三）预制装配式建筑在水利设施中的应用

预制装配式建筑技术正在深刻地改变着基层农田水利工程的建造方式，由原来的“现场建造”变为“工厂制造、现场安装”。此一变革很好地解决了基层水利工程点多面广、施工环境恶劣、质量监督难、施工受农时季节限制等众多难题。工厂化预制使得 U 型槽、矩形渠、检查井、泵房墙体等标准化构件能在严格的质量控制体系下大批量生产。采取高频振捣、蒸汽养护、精密模具等措施，使预制构件混凝土密实度、外观质量、几何尺寸精度远高于现场浇筑，完全避免了蜂窝麻面、露筋等常见质量通病。

装配式施工显著提升了工程建设效率和文明施工水平，具体优势可见下表：

装配式施工优势对比表

施工速度与工期	预制构件生产与现场基础开挖可同步进行，现场安装简便快捷，像搭积木一样。工程建设最大限度利用冬春农闲时间，在极短窗口期内完成主体工程，避免工期拖延影响春耕灌溉。交通不便的山区农田中，轻量化、分段式预制构件运输搬运更方便。
环境影响	现场湿作业大量减少，噪音、粉尘、建筑垃圾产生大幅降低。标准化干式连接技术，如企口连接、螺栓连接、高性能橡胶止水带的使用，一方面保证结构整体性、防渗性，另一方面也使设施今后改扩建或拆除时，构件可回收重复利用，符合循环经济理念。
设计标准化	推动农田水利设施标准化、定型化设计。通过创建统一构件标准图集与模块库，设计师能快速将不同流量、地形的工程方案拼装出来，大幅减少设计工作量，降低出错率。

装配式技术推动了农田水利设施标准化、定型化设计。创建统一的构件标准图集、模块库，设计师可以快速地将不同流量的水流、地形的工程方案拼装出来，使设计工作量大大减少，出错率也大大降低。工业化建设模式为高标准农田大规模建设提供了一条可以复制、推广的高效途径，使农田水利工程建设管理进入现代化、规范化的新阶段。

第五节 全球农田水利政策环境分析

一、国际组织与公约的推动作用

（一）联合国可持续发展目标的指引

2030 年可持续发展议程成为农田水利发展最高级别指导思想，其中目标 6（清洁饮水和卫生设施）、目标 2（零饥饿）成为促进农田水利发展的两个最大动力。在这种情况下，提高农业用水效率不再只是经济问题，而是关乎全球水安全和粮食安全的政治问题。各国在执行可持续发展目标的时候，必须重新考虑基层水利工程的规划思路，把水资源的节约集约利用放在首位。具体表现在指标 6.4 上，即大幅度提高各行各业用水效率，保证持续的淡水供应。直接使各国对传统的灌溉大水漫灌系统进行现代化改造，促使管道输水、喷灌、滴灌等高效节水技术得到推广。

全球性议程也把保护修复生态系统放在重要的位置。可持续发展目标 6.6 明确要求保护和恢复与水有关的生态系统，即山地、森林、湿地、河流、含水层和湖泊。这就意味着修建基层农田水利工程的时候，一定要考虑到它给周边环境带来的影响，不能因为过度取水而导致河流断流或者地下水超采。因此许多国家就修改了水利工程的审批标准，加大了环境影响评价的比重，部分地区也实行了退耕还湿、休耕轮作等政策，以达到农业生产与生态保护相协调的目的。政策导向的转变使基层水利管护由原来的供给型向需求型、生态型转变，用精准计量、水权分配来引导农户自觉保护水资源。

可持续发展的目标除了技术、生态外，更加重视包容性、公平性。目标 6.b 明确指出，支持并加强地方社区参与水与卫生管理。该指导意见在全世界推进了参与式灌溉管理模式的发展，提倡创建用水户协会之类的基层自治组织，把农民参加工程建设、运行和维护的权利给予农民。经过国际合作和经验交流，各国逐渐认识到，只有将决策权下放到基层，并保证妇女、边缘群体有话语权，才能保证水利工程的长期可持续运行。以人为本的治理理念正在改变以往自上而下行政命令式的管理方式，激发基层社会的内生动力，为农田水利的协同创新打下了坚实的社会基础。

（二）世界粮食安全委员会的政策倡导

世界粮食安全委员会是联合国粮农组织体系内最重要的政府间平台，它所发布的政策建议对全球农业水利投资方向有巨大的影响。该委员会一直关注粮食不安全、营养不良的根源性问题，知道水是农业生产的生命线。在此认知下，委员会提倡把水资源管理融合到更为广泛的粮食安全战略当中，看重水、土地、能源以及粮食之间的联系。其主要观点是农田水利设施修建不能一味追求产量最大化，要注重营养敏感型农业发展，改善灌溉条件，推广多样化作物种植，提高贫困人口膳食质量与健康水平。

世界粮食安全委员会十分关注小农户在水利系统中的权利。虽然主要涉及土地权属，但是对依附于土地的水权治理也有影响。委员会认为各国政府在推进大型灌溉项目的时候，应当充分尊重并保护当地社区的既存习惯性水权，防止资本介入或者大规模开发造成小农用水权益的丧失。

政策倡导使得多国政府在修订水法的时候，加入了对习惯法和社区自治规则的认可，从而给基层水利纠纷的解决赋予了多种法律依据。在气候变化的大背景之下，为了提高农业系统的韧性，委员会提出建设小型、分散的集雨工程和微型灌溉系统，从而提高小农户抵御干旱、洪涝灾害的能力。小而美的工程模式同传统的大兴土木形成了对比，更加符合可持续发展的理念。

（三）国际水利与环境组织的合作框架

国际灌排委员会、世界水理事会和全球水伙伴等专业机构搭建起多级合作平台，创建出全球农田水利技术与管理经验知识共享网。它们举办世界水论坛、国际灌排大会等高层次会议，是各国政策制定者、专家学者、从业人员交流最新的理念和经验的场所。在各种框架之下，前沿的灌溉技术标准、现代管理软件、革新的投融资模式能够快速地跨出国界传播。国际灌排委员会制定的灌溉效率测算标准和现代化灌区评价体系，被很多发展中国家直接采用或者作为制定本国标准的重要参考，从而改善了基层水利工程建设规范性和标准化的程度。

国际金融机构，如世界银行、亚洲开发银行，在与环境组织合作时，渐渐形成了一套严格的贷款项目保障政策。这些政策一般要求受援国在实施农田水利项目的时候，执行严格的环境和社会保障程序，比如生物多样性保护程序、非自愿移民安置计划、原住民权益保障程序等等。外部资金附加条件，从客观上迫使受援国提高自身的政策执行能力以及监管水平，促进国内有关法律、法规的完善。

国际组织还倡导跨界河流流域治理的区域合作，认为上游国家与下游国家应该建立起信息交流以及利益补偿的机制。对于处在跨界流域的基层灌区来说，这就意味着它的取用水行为除了受到国内法律的约束外，还要受流域层面国际协议安排的约束，从而将基层水利管理纳入了更大的地缘政治、生态外交框架。

国际组织在农田水利领域的主要贡献

推动政策制定	设定共同目标，颁布技术规范，提供资金援助，形成“软法”影响。
指引发展方向	联合国可持续发展目标指引水资源节约集约利用，促进技术现代化，强调生态保护和修复，关注包容性和公平性。
倡导权益保护	世界粮食安全委员会倡导营养敏感型农业，重视小农户权益，推动习惯性水权的承认。
促进行业标准	国际灌排委员会等组织制定技术标准，如灌溉效率测算标准，现代化灌区评价体系，提升规范化水平。
强化项目监管	世界银行、亚洲开发银行等金融机构设定严格的环境和社会保障政策，促使受援国完善法律法规，提升监管水平。
促进区域合作	推动跨界河流流域治理，建立信息共享和利益补偿制度，将基层水利纳入地缘政治和生态外交框架。

如上表所示，国际组织在农田水利发展中发挥着多维度的关键作用。

二、各国国家战略与政策导向

（一）发达国家注重生态与现代化

发达国家大多已经建成农田水利基础设施骨干网络，因此政策重心大多转向已有的设施现代化改造以及生态功能拓展。欧盟的《水框架指令》是目前世界上对水资源管理最严格的法规之一，要求所有成员国的水体都要达到良好的生态状态。该指令迫使各国政府大幅减少农业用水行为，对河流开发也施加了很大限制。在这样的政策之下，欧洲国家农田水利工程的规划不再只是考虑灌溉保证率，更多的考虑其作为生态廊道的建设、湿地恢复、生物栖息地的保护等功能。很多灌区采取生态沟渠改造、兴建人工湿地等方式，达到了农业生产同生态环境相协调的共存。

美国、澳大利亚等国家非常重视依靠高科技来提高水利管理的精细化程度。美国的现代农业水利政策是精准农业与智慧水利的深度融合，政府用补贴推动农户使用土壤墒情监测传感器、自动控制闸门、基于卫星遥感的决策支持系统。导向性政策不但大幅度提高了灌溉水的利用率，而且大大降低了劳动力成本。与此

同时,日本、韩国由于人多地少的原因,政策更注重水田农业的多功能性。日本政府在《土地改良长期计划》中提出,农田水利设施要具有防洪、涵养水源、调节微气候、传承乡村文化等多种功能。所以日本投入巨资把古老的灌溉排水渠道改造成了漂亮的景观性工程,成为乡村旅游的载体,给基层水利工程带来了新的经济效益和社会效益。

（二）发展中国家强调粮食安全与扶贫

对于大多数发展中国家来说,解决温饱问题、消灭贫困仍然是国家战略的头等大事,因而其农田水利政策具有很强的生产导向和社保色彩。亚洲、非洲许多国家把扩大灌溉面积作为保证本国粮食安全的根本途径。印度是世界上最大的地下水开采国,其政策对农业用电和水泵的购置一直给予巨额补贴,目的在于降低农民的生产成本,保证粮食产量的稳定增长。虽然这些政策解决了短期的粮食问题,但是也导致地下水枯竭等严重的环境问题,促使印度政府近几年来开始实行太阳能水泵替代计划,试图在能源转型和水资源保护之间找到新的平衡。

非洲国家政策的主要目的就是打破基础设施薄弱的瓶颈。由于缺少大型骨干工程,许多非洲国家把目光转向了容易实施、成本低廉的小型水利工程。政府一般会联合非政府组织推广脚踏水泵、小型集雨窖、简易重力滴灌系统等来改善小农户的生计。这种“扶贫式”的水利政策重视技术的适宜性与可承受性,希望最穷的人也能从灌溉带来的增产效益中得到一些。

中国是最大的发展中国家,其农田水利政策已经从“重建设轻管理”转向了“建管并重”。在乡村振兴战略的宏大背景之下,中国政府不断地加大对于高标准农田建设的投入力度,提出要补齐农田水利短板,提高农业综合生产能力。同时国家层面大力推进农业水价综合改革,试图建立精准补贴、节水奖励机制,解决长期以来基层水利工程存在的有人用、无人管、坏了等靠要的问题。中国的实践经验显示,在发展中国家现代化的过程中兼顾供给的增长以及效率的提高,可以为其他的发展中国家提供治理的经验。

（三）各国水权制度与水市场建设差异

水权制度是农田水利管护的基础,各国水权划分与转让机制的不同,对基层水资源配置效率有着长久的影响。

1. 以市场化程度较高的澳大利亚为代表,在墨累达令流域创建出全球最成熟的水权交易市场。法律规定水权和土地所有权相分离,水权有独立的财产属性。

农户按照市场价格信号，根据需要将用水权用于灌溉生产或者出售给其他需要用水的行业、地区。高度市场化的机制极大地提高了水资源的经济价值，推动低效农业退出，水资源向高附加值作物流动。就基层管护来说，灌区管理单位必须具有很高的计量精度和配水能力，才能支持频繁的市场交易行为。

2. 智利模式是另一种典型的自由主义水权实践。智利《水法》允许私人永久拥有水权，水资源的分配完全由市场决定，政府干预很少。该制度虽然调动了私人资本投资水利工程的积极性，但是也造成了水权垄断、社会不公。在干旱年份，大型农业企业可以收购水权来侵占小农户的生存空间。

3. 以色列实行的是严格的国家水权制度。法律规定水资源属于国家所有，由水务局进行统一管理和调配。政府每年按照降雨量和水库蓄水量为农业部门分配年度用水定额，实行阶梯水价。以行政为主导、经济为杠杆相结合的方式，保证了在水资源极度缺乏的时候，水资源的公平分配和高效利用。

与上述国家不同，实行习惯水权制度的国家，比如部分伊斯兰国家和东南亚国家，水权界定不清，常常依附于土地或者社区成员身份。虽然传统分配模式内部交易成本低，但是面对外部竞争和现代化农业需求的时候，缺乏弹性和效率。各国水权制度的不同，本质上是各国在公平和效率、政府和市场之间进行权衡的结果，也决定了各国基层农田水利管护模式必然呈现出多元并存的局面。

第二章 亚洲典型国家农田水利建设模式

第一节 中国农田水利建设与管理特色

一、多元化投入与管护机制探索

面对着庞大的基层水利设施存量以及持续增长的维护需求，单靠中央和地方财政的投入已经不能适应新时代的发展要求了。中国依靠深层次的机制革新，主动引导社会资本、农村集体经济组织和受益农户共同参与，逐渐形成起“政府主导、社会参与、受益主体负责”的共建共管新态势，较好地破解了长期以来困扰基层水利的“重建轻管”难题。

（一）“民办公助”模式的推广

小型农田水利设施数量多、分布广，是保障国家粮食安全的“毛细血管”。针对以往基层水利建设资金投入不足、群众参与积极性不高的状况，中国各地普遍采取的是民办公助的建设模式。该模式的核心特点就是：政府财政资金主要用于工程所需材料费、设备购置费、机械施工费等，土建工程及部分配套设施由受益农户或村集体自行投工投劳完成。将国家财政的引导作用同农民群众的主体作用有机结合的方式，一方面可以降低财政负担，另一方面能够调动起农民建设家园的积极性。实践中各地都制定了专门的申报审批及奖补制度，采取先建后补、多干多补的方式来提高资金的使用效益。

与此同时，“民办公助”模式重视产权制度改革来解决最后一段管护缺位的问题。工程建成并经验收合格后，有关部门会将工程移交给使用单位，确定工程的所有权、使用权和管护责任。通过颁发产权证书的方式，使小型水库、塘坝、泵站等水利设施的所有权明确归属村集体、农民用水合作组织或者个体农户。产权明晰之后，管护主体就有了经营的合法权利，部分地区给管护主体提供利用水利设施开展养殖、林果种植等综合经营的机会，所得收益用以工程的日常维修养护，进而形成“以水养水、以库养库”的良性循环机制。此种模式不仅可以解决建设资金缺乏的问题，而且从根本上改变了因为产权不清而无人管理养护的局面。

在地形复杂、施工难度大的山区，又发展出更加灵活的形式。地方政府给农民自建工程的质量安全、科学性提供技术指导和规划设计服务。工程建设时，水利部门的技术人员下到田间地头，对工程施工的关键环节开展现场监督，保证国家拨付的补助物资能真正变成实际的灌溉能力。依靠这样上下衔接的创建方式，原本分散、低效的农田水利设施得到了系统性的修缮和升级，农业生产条件明显改善，农业抵御自然灾害的能力也得到了提高。

（二）农民用水户协会的规范化发展

随着农村经济体制改革的发展，传统的集体管理方式逐渐被参与式的灌溉管理所取代，农民用水户协会这样的新型基层互助合作组织也随之诞生。该类协会是由灌区内的受益农户自愿组成的，以民主方式选举产生理事会、监事会，负责本区域内田间工程的日常维护、用水计划的制定、水费的收取、用水矛盾的调解等工作。经过多年的发展，农民用水户协会由最初的试点走向全面推广，在规范化建设上取得了很好的成效。为了保证协会正常运转，各地积极健全协会内部治理结构，探索出多种方式：

1. 健全章程及制度建设。各地用水户协会按照法律法规的要求制订出详细的章程，规定会员的权利义务、议事规则、财务管理制度等。以制度化的方式来保证协会运作的透明、公允，防止少数人垄断用水权益。尤其是对水费收缴这个敏感环节实行“水价公开、水量公开、水费公开”的“三公开”制度，使农户明白用水、清清楚楚交费，极大提高了农户对协会的信任度和参与度。

2. 提升能力建设，政策支持。政府部门采取购买服务、专项补助等形式支持协会办公场所建设、计量设备改造、信息化设备购置。同时定期对协会骨干进行业务培训，提高其在工程管护、节水灌溉技术应用、财务管理等各方面的业务能力。部分地区把末级渠系改造项目施工权交给规范程度较高的用水户协会，使用水户协会参与工程建设时提高了凝聚力和服务能力。

但是也出现了协会空壳化、行政化倾向严重的问题。因此相关部门加大了清理整顿力度，强调协会的民办性质，剥离行政依附关系，使协会真正代表农户利益。同时加入第三方评价机制，对协会运作成效展开量化考评，并把考评结果同财政奖补资金联系起来，倒逼协会提升服务水平。规范发展的农民用水户协会已经成为政府与农户之间的桥梁，在节水、化解用水纠纷、维护水利工程完好等方面起着不可替代的作用，是基层水利治理体系中不可缺少的一部分。

（三）农业水价综合改革试点

长期以来由于农业用水价格形成机制不健全、水费征收难、精准补贴缺位等原因严重制约了农田水利良性运行。2016 年以后，我国全面启动农业水价综合改革，以建立农业水价形成机制、精准补贴和节水奖励机制、工程建设和管护机制、用水管理机制这四大机制。改革的主要内容就是合理确定农业水价，使供水成本显性化。各地按照水资源是否稀缺、工程运行维护费用高低、农户承受能力的强弱等实行分类水价、分档水价。对粮食作物，在保证运行成本的基础上设置较低的水价；对经济作物、养殖业则适当提高水价来体现水资源的商品属性。

为了防止水价改革增加农民的负担，改革配套实行了精准补贴和节水奖励制度。对定额内的农业用水给予财政补贴，保证农户种粮成本不上涨；对超定额用水实行累进加价，倒逼农户使用滴灌、喷灌等高效节水技术。设立节水奖励基金，给予用水量低于定额、实行节水措施的用水主体物质奖励。既可借助价格杠杆在水资源调配中起到调节效果，又可维持农民种粮积极性。

完善试点地区计量设备，是落实改革的基础条件。在干支渠口、田间井房安装智能化计量设备，以电折水或者直接计量，从过去的按亩收费的粗放方式中解脱出来，让“明白水”有了可能。水权分配与交易也同步展开，部分灌区把水权落实到农户，节水成果可在本区域内部买卖，让节水变成一种可变现的收入。经过多年的探索，农业水价综合改革已经从试点进入深水区，初步形成了节水减排、工程良性运行的双赢局面，为解决农田水利“钱从哪里来、水往哪里流”的问题提供了一种制度化的解决途径。

中国农田水利多元投入与管护模式对比

模式名称	核心机制	主要特点	资金来源	产权归属	解决问题
民办公助	政府补助与农民投劳相结合	减轻财政负担，激发农民积极性	政府财政、农民自筹	村集体、用水户协会或农户	重建轻管、资金不足
农民用水户协会	农户自愿参与、民主管理	提高用水效率，化解用水纠纷	会员会费、政府补助	协会所有	用水管理粗放、矛盾多
农业水价综合改革	合理水价、精准补贴、节水奖励	促进节水，保障工程良性运行	水费收入、财政补贴	国家所有，农户享有水权	水资源浪费、工程管护难

从表上可以看出，中国农田水利多元投资与管护互相补充、相辅相成地形成了一个相互联系的管理系统。

二、新时期智慧水利与生态水利建设

信息技术飞速发展、生态文明理念不断深入，正在推动我国农田水利建设实现数字化转型、绿色升级。现代科技和生态理念的深度融合，给水利工程赋予了新的面貌，使水利管理向着更加精细化、智能化发展，达到经济效益和生态效益同步提高。

（一）国家数字孪生水利战略

数字孪生水利是中国水利高质量发展新时期的标志性战略工程。该战略运用物联网、大数据、云计算、人工智能这些新一代信息技术，创建起一个同物理水利工程全面映射的数字虚拟体系。在农田水利中应用数字孪生技术，就是对灌区水系、渠系、建筑物、田间作物等所有要素进行数字化建模。依靠高精度地形测绘，遥感数据监测，创建可视化的数字灌区，管理者不出门就可以了解整个灌区的运行情况。

该战略的核心就是实现预报、预警、预演、预案这四个功能。数字孪生系统接入气象预报数据、水文监测实时数据之后，就可以对未来旱涝情势进行准确的推演。灌溉季节到来前，可在虚拟空间中对各种配水方案进行仿真模拟，从水量供需平衡和潜在风险点两个方面选择最佳调度方案。例如当突发性干旱来临的时候，系统可以马上算出各个支渠的输水损失以及作物需要水分的紧急程度，然后自动产生抗旱配水方案，及时有效地进行应对。

数字孪生水利可以实现工程全生命周期智能管理。建设期间依靠建筑信息模型技术开展工程设计的碰撞检查与施工模拟，防止实体建造出错，在使用期间依靠传感器网络随时了解闸门，泵站的工作状况，对以往的数据加以分析，进而实施设备健康趋向的预知性维修。这样一种从物理世界到数字世界的双向投射以及即时互动，完全冲破了以前水利“靠经验治水”的局限，促使农田水利朝着“智慧治水”迈进，给保障粮食安全赋予了强大的技术支撑。

（二）河湖长制与水生态文明建设

中国独创的河湖长制不但是水环境治理的重大制度创新，也极大地影响了农田水利建设和管护的理念。该制度之下，各级党政主要领导为河长、湖长，对辖区内的水生态环境负有总责任，形成的是省、市、县、乡、村五级责任体系。农田水利的灌排系统治理不再只是孤立的工程行为，而是被纳入到流域生态治理的

大局当中。沟渠、坑塘等末梢水系相当于河流的毛细血管，其水质好坏直接影响到大江大河的健康，因此也被纳入河湖长制的考核范围。

水利工程设计与建设以水生态文明为指导思想，设计理念和建设理念都发生了根本性的改变。传统的“三面光”硬化渠道由于切断了水土生物联系、破坏了生物多样性，正被生态型护坡所取代。各地在推进高标准农田建设时开始大量使用多孔混凝土、生态袋、植草砖等生态材料对渠道进行衬砌，在保证输水效率的同时也给水生动植物留出了栖息空间，恢复了农田水系的自净能力。

同时农业面源污染防治是河湖长制下的一项重要工作。利用生态拦截沟渠、湿地氧化塘等装置来对农田退水进行逐级净化，有效拦截氮磷营养物质，防止其直接排入自然水体造成富营养化。农田水利工程除了有灌溉排水的功能之外，还有生态修复的功能。源头减量、过程拦截、末端治理的综合防控体系，使农田水利工程集灌溉排水和生态修复于一身。如今，在中国的大地上，越来越多的灌区呈现出“水清岸绿景美”的生态画卷，实现了农业生产和生态环境的协调发展，生动践行了“绿水青山就是金山银山”的发展理念。

（三）灌区信息化与智能化管理平台

大型灌区是粮食生产的主阵地，管理水平直接影响水的利用率。我国积极推进灌区信息化建设，建设灌溉用水全过程智能化管理平台，对灌溉用水实行精细化管理。该平台集成了雷达水位计、超声波流量计、土壤墒情传感器、高清视频监控等各种感知设备，形成了灌区一张网感知网络，对渠道水位、流量、闸门开度、田间土壤湿度等主要信息进行实时采集。

依靠智能算法和决策支持系统，可以达到对水资源的合理分配、自动调度。根据作物生长模型、实时气象数据、土壤墒情计算出各个灌溉单元的供水量，再结合渠道输水能力得出精确的斗口配水计划。指令下达后，与它相联的智能闸门和泵站控制系统就会自动执行启闭动作，这不但可以大大减轻工作人员的劳动强度，而且还可以把配水误差控制在很小的范围内，从而避免由于人为操作造成的浪费水资源。

信息化平台也打通了服务农户的最后“一公里”。许多灌区开发了手机应用程序或者小程序，农户通过手机就可以查询灌溉进度、水费缴纳情况、用水政策，还可以远程申请用水、控制田间出水桩。便利的用水服务方式大大地提高了用水透明度、农户满意度。平台积累起来的大量的历史数据，也成了灌区长远的经济

发展、工程改造、科研的宝贵的数据资产。从手工巡渠、手工记账到远程监控、大数据分析，中国灌区管理正进行由“汗水驱动”到“数据驱动”深刻的转变。

第二节 印度传统与现代水利工程融合

一、传统灌溉系统的保护与活化

印度本土孕育出独具地域特色的传统水利知识体系，根据当地自然地理条件发展起来的灌溉系统，不但是农业生产的基础，也是社区凝聚力的纽带。经过一段时间的被忽视之后，由于现代供水系统不稳定且生态代价高昂，传统水利设施的修复与活化又回到了政策视野和民间实践的中心，成为应对气候变化、水资源短缺的重要策略。

（一）阶梯井与社区池塘的修复利用

印度西北部的干旱、半干旱地区阶梯井是精巧的储水建筑，也是地下水资源管理的工程奇迹。结构复杂的井，层层台阶一直延伸到蓄水层，最大限度地减少了水分的蒸发，在雨季也能够收集地表径流。以前，阶梯井因为管道供水的普及而成了落后的代名词，有些地方还成了垃圾填埋场。但是随着水危机的不断加剧，拉贾斯坦邦和古吉拉特邦等地掀起了大规模的水遗产复兴运动。修复工作不单是清除淤泥、加固井壁这些物理工程，更重视水源地的主要功能的恢复。

社区池塘是南亚次大陆最常见的雨水收集方式，正在发生着自下而上的复兴。这些被称为坦卡或者约翰德等土质的蓄水设施，设计精巧，能有效地拦截雨季的暴雨，直接给农田提供灌溉用水，更重要的是它的渗透作用能有效地补给附近的浅层地下水。很多村庄没有政府组织，依靠非政府组织的帮助，自发地重新挖开了被填埋的池塘，修好了进水渠。根据实地观测数据，经过系统修复的池塘群能够明显提高周围水井水位，使多年的干涸农田重新得到耕种。低成本、低技术门槛的修复方式，很好地证明了古代水利设施在今天仍然具有不可替代的韧性和生命力。

（二）传统知识的现代价值挖掘

传统的水利知识不是简单经验的堆积，而是一个符合一定微气候、地质条件的科学体系。印度传统水利智慧的核心就是就地拦蓄，雨水降落的地方就进行收

集管理，不长距离输送。分散式的水资源管理哲学，在应对极端气候事件的时候表现出非常高的适应性。现代水文学家从古代文献、口述历史中关于水流走向、土壤渗透率、植被护坡的记载中找到的生态逻辑与现代可持续发展的理念是一致的。

喜马拉雅山脉南麓，传统的竹管滴灌系统靠重力将泉水送到梯田，水分利用效率不比现代塑料管道滴灌系统低，而且完全可生物降解，维护费用低。研究人员正在把重力的自然流原理用在山区灌溉上，以减少对电力的依靠。同时，传统知识中有关轮作休耕、水土保持的农艺措施也被重新纳入到现代农业推广体系中来，用以缓解化肥农药过量使用造成的面源污染。挖掘传统知识本质上是技术自信的回归，它主张引进国外的工程技术不能割裂本土生态智慧。

（三）社区在传统水利管理中的角色

传统水利系统运行机制中硬件设施只是基础，社区主导的管理制度才是它能够延续千年的核心。

1. 决策权下放给社区。在传统的村落议事会制度之下，水是分配给每个村民，水的维修由各户分担、对违反者进行处罚等事务都是由村民共同商议来完成。该种参与式的管理方式可以使水利设施的维护、使用被公平的享受到了每一个农户，有效防止由于外部行政干预导致的水权分配不公的情况。

2. 劳动力投入的制度保障。许多传统的水利复兴案例中，社区重新建立起了义务工制度，即每个受益的家庭每年要出动一定数量的劳动日，去清理渠道的淤泥或者修补堤坝。被称作“布施”的劳动方式明显增强了村民对水利设施的归属感和责任感。

3.3 水权分配规则本土化创新。为了适应现代农业的需要，在传统的管理模式中加入了一些比较精细的计量分配规则。优先保障生活用水、牲畜饮水，限制高耗水作物的种植面积，干旱年实行严格的配额制度。依靠社区共识的管理模式，大大降低了水资源冲突发生的几率。

二、绿色革命后的现代化挑战

（一）地下水超采与管井泛滥问题

电力补贴政策加廉价的管井技术，在印度农村造成了一场无声的生态灾难。为了发展农业，许多邦政府实行长期农业用电免费或者极低费率的政策，使农民

没有节制地抽水。本该用于抗旱储备的深层地下水，被常态化地用在种植水稻、甘蔗等高耗水经济作物上。掠夺式开采造成地下水位急剧下降，有的地方地下水位一年下降一米多，形成巨大的地下漏斗区。

浅层含水层被抽干之后，农民只好打更深的管井，这样既大大提高了农业生产成本，加大了贫富差距，又造成了水质性缺水。深层地下水中常常含有高浓度的氟化物和砷，过度开采会使得有毒物质释放出来，严重危害农村居民的饮水安全。政府虽然极力推广微灌技术、限制新井挖掘以控制超采趋势，但是由于庞大的既得利益群体以及粮食增产的压力，地下水超采在短期内是无法根除的。

（二）大型灌溉工程的效率与公平性

印度独立以后兴建了许多大型水库和灌区工程，用以跨流域调水解决水资源时空分布不均的问题。但这些宏大的工程在运行的过程中却存在着效率低下、分配不公的双重困境。

大型灌区普遍存在重建轻管的现象，干支渠系统老损严重，输水过程中渗漏、蒸发损失大，有的灌区水利用系数甚至不到百分之四十。同时由于缺少排水系统，长期漫灌造成严重的土壤次生盐碱化和内涝问题，使原本肥沃的土地失去了生产力。

在水资源分配是否公平上，大型灌区就有“首尾之分”。位于渠道首部的农户常常用水过多，种植高耗水作物；位于渠道尾部的农户常常遇到无水可用的困境。由此产生的空间不平等，又引起社会矛盾的激化，甚至造成不同的邦之间、村落之间发生水事纠纷。官僚化的管理机构对农民的实际需求反应迟缓，缺乏灵活的水量调度机制，从而加大了供需错配的状况。

（三）水资源管理的碎片化困境

印度水资源管理面临的重大制度性障碍在于行政职能的碎片化与条块分割，导致协同治理难以实现。

1. 地表水与地下水管理相互脱离。行政上地表水由水利部门主管，重在大坝、运河等工程建设；地下水由地下水委员会负责监测。人为分割忽略了水循环的整体性，地表水灌区地下水补给效应不能充分发挥，依赖地下水的地区地表水的替代作用也不能体现出来。

2. 涉水部门间缺少有效的协调机制。农业部门管种植结构调整，电力部门管能源供应，水利部门管水源调度，各部门按照各自绩效指标来制定政策。农业部

门推行的三季稻种植模式要大量灌溉，水利部门的供水计划却不能与之匹配；而电力部门的补贴政策客观上也抵消了水利部门的控水措施。

3. 中央和地方的权力斗争加大了管理难度。根据印度宪法，水资源管理属于邦级事务，但是许多河流会流经多个邦。因为缺少强有力的中央协调机构以及有法律效力的流域管理规划，各邦在水资源的开发上常常各自为政、竞相建设拦截工程，造成上下游关系紧张，整个流域的水资源利用效率大大降低。碎片化的治理结构给综合性水资源管理改革造成了诸多障碍。

印度水资源管理碎片化困境

困境类型	表现	影响
地表水与地下水管理脱节	行政职责分离，缺乏整体观	影响水循环的完整性，限制补给与替代作用
部门协调不足	各部门各自为政，政策冲突	导致资源供需错配，抵消管理效果
中央与地方权力斗争	缺乏统一规划，各自为政	导致跨邦水资源纠纷，降低利用效率

从上表可知，印度水资源管理所面临的挑战是系统性的，而不是单一的，其根本原因在于行政职能的碎片化、部门之间缺乏协调、中央与地方在水资源管理权责上存在持续的博弈。

第三节 日本精细化农田水利管理体系

一、完善的土地改良区制度

（一）法律保障下的农民自治组织

日本农田水利管理组织的核心就是依据《土地改良法》设立的土地改良区。它不是普通的农民协会或合作社，而是一个具有公共法人性质的特殊行政主体。其具有极高的权威性和执行力，在很多方面和地方行政机构相当，但其实质上仍是个人因地缘关系而自组织起来的团体。依照法律规定，一旦某个区域内三分之二以上的农户同意进行农田水利设施的改良或建设，该区域内所有相关农户都必须强制加入土地改良区。该“强制入会”的制度有效地阻止了个别人反对造成搭便车或者工程停滞的现象，从而保证集体行动的一致性。

土地改良区实行民主自治，理事长和管理人员都是由会员农户选举产生的。由此产生的自下而上的治理结构，使得决策过程可以充分反映使用者群体的实际

需求。土地改良区作为公共法人有权制定章程、征收费用，甚至在必要的时候采取强制措施。因此，在处理复杂的农村利益关系上它就具有了独特的协调能力和法律手段。不同于松散的民间组织，土地改良区在享有权利的同时，也接受农林水产省及地方政府的监督。其年度预算、决算、重大工程项目变更等都要报批，形成双向制约机制，成为日本农田水利基层治理的根基。

经过长期的发展，土地改良区已经不再只是水利管理的地方，而是农村社区凝聚力的纽带。它既管水，又管农地整治、农道修建、农村环境综合治理。基于法律保障的自治模式，既保证了日本的农田水利管理行政命令的刚性，又具有社区自治的弹性，为解决“最后一公里”灌溉难题提供组织上的保障。

（二）覆盖“建、管、用”全链条

日本土地改良区对农田水利工程的规划设计、施工以及后期运行管理均实行全面负责。在建设初期，土地改良区起着很重要的作用，具有需求整合的功能。项目立项阶段改良区组织农户多次协商，确定工程规模、走向及受益区域。由于工程建设常常牵涉土地调换、产权变更，改良区作为由农民自己成立的组织，在土地置换、化解征地矛盾等方面，具有政府无法取代的优势。深度介入可以保证工程设计方案精准对接农业生产实际需要，避免出现政府修了渠农民却不用的情况。

日本的建设资金筹措与管理实行分级负担制。干渠、泵站等骨干工程一般由中央政府和都道府县财政负担大部分建设费用，一般占总投资的百分之八十以上。田间末级渠道及配套设施建设费用，由受益农户承担部分，土地改良区将这部分农民自筹资金进行汇总后，作为项目实施主体或配合单位参与建设监管。资金分担方式体现水利的公益性质，又增强使用者的责任意识。因为农民投入了真金白银建设，所以在工程监督上会更加尽心尽力，从而保证工程质量。

工程竣工后交接、管理，是该制度的又一特点。一般而言，骨干水利工程建成后会交由土地改良区进行日常管理。政府不再直接参与具体的运营工作，但是会提供技术指导，对必要的维修予以补贴。土地改良区具体负责安排配水计划，调度水资源，检查设施。从水源到田间进水口，整个输配水过程的调度权非常集中。该种模式很好地解决了建管相脱离问题，建设与管理可以实现无缝对接，工程设施投入使用以后立即产生效益并长期处于良好的运行状态。

（三）精细化的工程维护与水费收取

关于设施维护，日本土地改良区的管理细密到可以想象。传统的共同作业模式一直保留至今，并不断得到改进，农户有义务参加每年定期进行的渠道清淤、除草、简易修缮等工作。劳动投入虽然降低了养护成本，但是提高了农户对于水利设施的认同感和爱护心。技术要求高、涉及大型泵站、自动化闸门等设备的，改良区通过招标的方式将维护工作委托给专业的工程公司。农户义务劳动与专业化外包双轨制维护方式，既考虑了经济性又保证了专业性，使水利设施即使建成几十年以后仍然可以保持高效运转。

土地改良区水费收取和管理独立且透明。水费由两部分组成，具体信息见下表：

土地改良区水费构成表

水费类型	构成项目	分摊方式	特点
经常性维持管理费	管理人员工资、设施日常维修、电费、办公费等	按照农户受益面积核算	保证改良区稳定资金流，不受农业生产波动影响
偿还金或特别征收金	工程建设初期农户分担的建设成本贷款、大修专项资金	按照长期还款计划分摊到每年水费账单上	确保建设资金回收，应对突发大修需求

第一部分为经常性维护管理费，主要是用来支付管理人员工资、设施日常维护、电费、办公费等。分摊方式一般根据农户受益面积来计算，不论当年是否种植水稻，只要土地具备灌溉条件就需要缴纳基本费用。按面积收费模式保证了改良区有稳定的资金流来维持基本运作，不受农业生产波动的影响。

第二部分是偿还金或者特别征收金，用以偿还工程初期农户分担的建设成本贷款，或者用作大修工程的专项资金。土地改良区将按照长期的还款计划，把这笔款项分摊到每年的水费账单上。

收费机制的成功之处就在于公开、透明和强制约束。每年年初，土地改良区都会给全体会员公布详细的预算报告，每一分钱的支出都能查到去向。土地改良区有准行政权，对恶意拖欠水费的农户可以采取强制执行或者留置权等法律措施追缴。严格的财务管理制度以及收费保障，使日本的农田水利工程可以摆脱重建轻管的恶性循环，形成以水养水的良性可持续运行。

二、高标准的水利设施建设

（一）田间渠道的混凝土衬砌与标准化

日本农田水利设施最显著的一个特点就是硬化率、标准化程度极高。在广大的稻作区，几乎所有的田间渠道都是混凝土衬砌。不仅可以有效地减少输水过程中的渗漏所造成的损失，提高水资源利用系数，也可以应对人口结构变化带来的挑战。传统的土渠需要大量人力定期除草、修整，而随着日本农村老龄化程度不断加剧、劳动力日益短缺，混凝土渠道因为免维护或者低维护的特点，成为了必然选择。硬化工程完全改变了农村的水利景观，沟渠线条笔直，断面整齐，便于管理。

标准化设计在渠道建设中一直存在。日本农田水利工程多用预制混凝土 U 型槽或 L 型构件，这些构件在工厂标准化生产，质量容易控制，现场拼接效率高。为了配合大规模农业机械作业，日本实行灌排分离的工程布局。灌溉渠道与排水沟渠在空间上是相互独立的，互不干扰。灌溉渠道一般铺设在高处或者采用管道输水，依靠重力自流；排水沟则深挖在低处，保证田间积水可以迅速排出。从而保证了田块有合适的干湿湿度，为大型拖拉机、收割机下田作业打下了良好的基础。

近些年来，由于对水资源管理精度的要求越来越高，所以管道化输水在田间工程中的占比越来越大。尤其是干旱地区或者旱作农业区，地埋式低压管道系统取代了明渠。管道化完全消除了蒸发、渗漏，并且把原来被明渠占用了的土地空间解放出来，扩大了有效耕地面积。配合田间给水栓，农户打开阀门即可进行灌溉，如同使用自来水一样方便，大大减轻了灌溉劳动强度。高标准的硬件基础成为日本现代农业高效生产物理骨架。

（二）自动化控制与远程监测系统

在信息化潮流的推动下，日本农田水利管理向着智能化的方向发展。由于农村劳动力兼业化普遍，全职农户减少，自动化控制系统成了解决“无人管水”问题的关键。在主要灌区，从干渠首部取水枢纽到支渠分水闸，大部分都装有电动执行机构和远程控制终端。管理人员不必亲临现场，只需在中央控制室通过电脑或手持移动终端进行操作，就可以对几公里甚至几十公里外的闸门开度进行精确调节，从而实现水量的精准调配。

远程监测系统就充当了“千里眼”的角色。各种水位计、流量计、雨量传感

器分布在水利网络的各个重要节点，实时采集水情数据并上传到云端服务器。这些数据经由系统自动分析处理之后，就能创建起实时的水力模型。当上游水位发生变化或者降雨量达到预警阈值时，就会发出警报并按照预先设定的逻辑控制下游闸门。暴雨来临之前系统会预先降低渠道水位，腾出库容来容纳洪水；干旱时可以精确地计算出每一滴水的流向，有效地防止浪费。

这套系统也慢慢和农户的田间管理系相结合。部分先进的土地改良区已经开发出面向农户的手机应用程序。农户使用手机就可以查看到自家田块周边水渠的水位，也可以远程申请灌溉。根据申请队列及渠道输水能力来排程，再通知农户打开田间进水阀。这样一种“订单式”的供水方式将水利管理的颗粒度细化到每一个地块上，大大地提高了用水效率。以数据为驱动的决策模式，使日本的农田水利由过去的依靠经验进入到了科学化、精准化的新阶段。

（三）兼顾防灾与景观的多功能设计

日本的农田水利工程不单纯追求灌溉排水等单一经济效益，而是将防洪抗旱、生态保护、景观营造等纳入到统一的设计里，体现出了多功能水利的理念。由于日本台风暴雨多发，水田、水利设施被当作流域防洪体系的重要组成。在非灌溉季节或者暴雨预警期，田间排水闸门会被巧妙地当作临时滞洪区，从而削减洪峰流量，减小下游城市防洪压力。这就是田园大坝功能，不需要建造大型水库，只要现有的农田设施就可以提供巨大的调蓄库容。

生态友好型设计的理念也被体现在工程的细节之中。为了解决混凝土硬化渠道对生物栖息环境造成的割裂，日本水利工程改造中广泛使用近自然工法。在混凝土渠道底部铺设卵石或在侧壁设置各种形式的生物逃生坡、鱼巢等为青蛙、泥鳅等水生生物提供繁殖和迁徙的通道。水源涵养区有意地保留湿地、原有的植被，使水利设施与周围的自然环境相融合，而不是突兀地出现人工建筑。

水利设施景观化设计较好地改变了乡村面貌。设计师在设计沟渠、泵站时都会考虑同当地传统村落风貌的协调性。许多水利设施周边被开辟成亲水公园或者步道，古老的水车经过修复成为地标性建筑，灌溉水渠也成了乡村旅游的风景线。兼顾景观和生态的设计既改善了农村人居面貌，又给发展休闲农业、乡村旅游创造了条件。通过赋予水利设施多重意义，冰冷的工程构筑物变成了有生命的乡村综合基础设施。

第四节 东南亚国家农田水利发展特点

一、以水稻灌溉为主的系统建设

（一）泰国、越南湄公河流域灌溉系统

湄公河流域是东南亚重要的农业产区，下游和三角洲地区集中了泰国、越南最大、最复杂的水利系统。泰国以昭披耶河、湄公河支流等灌溉系统为基础，成为了世界主要的大米出口国。水利工程多是国家主导的大型基础设施，有横跨河流的大型拦河坝、纵横交错的混凝土干渠等。这些宏大的工程在雨季可以调蓄洪水，把洪水变成旱季农业生产的宝贵资源。泰国皇家灌溉厅在其中起着绝对的主导作用，用完善层级管理机构统一调度水量。虽然自上而下的管理方式宏观调控效率高，但是为了解决由于行政层级过长而产生的末端管理失灵问题，末端渠道的维护和分配责任渐渐转移给了农民用水户协会。

视线转到越南，湄公河三角洲的水利系统就表现出了一种“与水共生”的智慧。越南处于入海口地区，农田水利工程除了防洪、防咸潮外，其他同上。当地农民与政府共同修筑起密集的堤防、排灌渠系，按照潮汐规律开闭闸门。丰水期堤防可以保护稻田不受洪水淹没，并且可以引入部分富含泥沙的水流来充实土壤；枯水期靠复杂的渠道系统调节，引入淡水以防海水倒灌。

近几年来，越南的水利建设越来越重视适应气候变化。面对上游来水减少、海平面上升这两大压力，当地推行“与洪水共处”的生态水利模式。坚固的混凝土防洪堤渐渐被更具有弹性的生态堤防所替代，农业种植结构也发生了变化，一些低洼地区的水利设施变成了适合水产养殖和水稻轮作的混合系统。体现出由对抗自然向顺应自然规律的工程哲学转变，给三角洲地区的可持续农业发展赋予了新的工程范式。

（二）菲律宾的社区灌溉系统

菲律宾农田水利的发展具有很强的社会动员能力和基层自治传统，核心就是社区基础的灌溉管理。与大陆东南亚国家依赖大型河流不一样，菲律宾由于破碎的岛屿地理环境产生了分散的中小流域治理模式。灌溉系统在历史上大多是由当地农民自发修建的，其中起决定性作用的是一种叫作“桑赫拉”的传统灌溉会社。这些依靠血缘、地缘关系联结起来的社会组织，在没有政府强力干预的情况下，能够自行找到水源、开挖渠道、制定用水规则等。

随着现代化进程的发展,菲律宾国家灌溉局并没有完全取代传统的社区组织,而是采取了参与式的灌溉管理方式。该策略的主要内容就是把国家投资修建的次级、末级渠道交由农民灌溉协会来管理。政府负责水源工程、主干渠道的管护工作,田间工程的管护责任全部下放。

1. 农民灌溉协会有很高的自主权,可以根据实际种植面积和作物需水情况来决定收费标准。所收费用一部分上交国家用作大型工程折旧,大部分留作社区渠道清淤、修缮费用。

2. 为了保证系统公平运转,社区内部实行严格的劳动义务分担制度,即会员按照自己所拥有的灌溉面积付出相应的义务工日,用于雨季前的渠道清理和水毁工程修复,这叫做“以工代赈”,大大降低现金维护成本。

公私合作治理结构很好地解决了国家财政投入不足、基层管护缺位这两个矛盾。通过确权赋能,农民由被动的水利服务接受者变为设施的所有者和管理者,身份的变化极大地提高了农民爱护水利设施的积极性。虽然在应对极端气候灾害的时候单个社区的力量是微不足道的,但是由于灌溉协会联盟的建立,各个社区开始在流域层面上进行水权的协调,形成了一个自下而上的流域治理雏形。

（三）印度尼西亚的梯田与小型蓄水设施

印度尼西亚是世界上最大的群岛国家,其农田水利系统与火山地质地貌完全吻合,其中最出名的就是巴厘岛的苏巴克系统。它不但是一个灌溉工程体系,也是把哲学、宗教和农业技术结合起来的社会组织形式。在陡坡上开出了层层梯田。水经由精心设计的隧道和沟渠从火山口湖流下来,经过各个水庙,最后流到每一亩田地里。

苏巴克系统独立于行政命令之外,由水庙祭司根据宗教历法以及水源状况来决定种植计划。表面上看是“迷信”的管理办法,实际上却有着很高的生态智慧,统一调集各区域的播种、休耕时间,控制病虫害,上下游梯田公平用水。每一滴水在汇入大海之前,被反复利用了无数次,这种程度的水分利用效率是现代工程所不能达到的。

除梯田灌溉外,对于众多没有地表径流的小岛和干旱地区,印度尼西亚大力发展小型蓄水设施——“恩邦”。依地势而建的小型水库、水塘主要用来收集雨季的地表径流,以供旱季灌溉。政府供给挖掘机械和防渗材料,土地、劳动力由受益农户供给。

这些分散的点状水源像珍珠一样分布在群岛各地,使农业生产非常具有韧性。利用简易提水设备和小型蓄水工程相结合,使以前只能种植一季的旱地变成了高产的水浇地。“小、微、散”的水利工程模式投资少、见效快,农户可以自行管理,非常符合群岛国家地理特点和小农经济特征,成为大型灌溉系统的重要补充。

二、国际援助与合作的重要作用

(一) 亚洲开发银行等机构的资金与技术支持

亚洲开发银行、世界银行等多边金融机构为东南亚农田水利工程最大的外部资金来源。支持重点随着时代的发展而发生重大变化。早起主要是修建大型水坝、泵站、干渠等,靠大量的工程投入来快速提高粮食产量。那时混凝土、钢筋成了援助项目的标志,在湄公河、伊洛瓦底江流域出现了成百上千的大型灌溉区。

新世纪以后,它们的援助方式发生根本性的转变,开始重视软实力的塑造和工程的持续性。目前的援助项目一般都会带有严格的制度改革要求,如要求受援国建立独立的水务监管机构、推行水价改革、完善用水户协会的法律地位。资金不再只用在渠道浇筑上,更多地被用在资产管理系统的开发、水文监测网络的数字化升级、基层管理人员的培训上。

“软硬结合”式的援助方式大大提高了东南亚国家水利工程的投资效益。以柬埔寨为例,在亚洲开发银行的帮助下,该国不仅修复了战争时期被破坏的灌溉系统,而且还建立了适应市场经济的水利工程运作维护制度,原先只能依靠财政输血维持的灌溉区开始逐步学会“自我造血”。

(二) 跨国流域水资源合作管理

东南亚多条主要河流都是跨国界的,湄公河更是六国之间的纽带,因此跨国水资源合作成为该地区农田水利发展不能回避的问题。随着上游水电开发加速和下游农业用水需求的增加,上下游水资源矛盾也越来越突出。湄公河委员会等区域合作机制在其中起到了非常重要的协调作用。

建立跨国界的水文数据共享平台,使各国可以及时了解流域内的降雨、径流、水库调度情况,对下游国家的农业防灾减灾有着非常重要的作用。当上游大坝泄洪或者蓄水时,按照事先的通报机制,下游的越南、柬埔寨可以提前调整农田水利闸门的启闭状态,避免人为造成的水旱灾害。

合作也波及技术交流、联合规划等其他方面。各国专家共同制定流域发展战

略，研究怎样在保障能源安全的前提下，尽量减少对下游农业生态系统的影响。尽管国家间还存在利益冲突，但是借助制度化对话平台将水利冲突转变为水利外交，保证区域农田水利系统整体安全稳定。该种跨国合作模式，给世界上其他共享河流区的农业水资源管理树立了一个很好的典范。

东南亚地区跨国河流与相关合作机制表

跨国河流	流域国家（部分）	主要合作机制	合作内容
湄公河	中国、老挝、缅甸、泰国、柬埔寨、越南	湄公河委员会	水文数据共享、流域规划、水电开发协调、防灾减灾
伊洛瓦底江	印度、中国、缅甸	伊洛瓦底江委员会	水资源管理、航运、生态保护
萨尔温江	中国、缅甸、泰国	（暂无常设国际机构）	主要通过双边或多边对话

根据上表可以看出，跨国合作机制在东南亚的河流治理中起着重要作用，在湄公河流域的合作模式已经比较成熟。

（三）技术引进与本土化适应

在国际合作的大框架下，先进的节水灌溉技术、信息化管理方式不断地涌入东南亚，但是技术落地时并不是简单的复制，而是一个深入的本土化适应过程。无论是以色列的滴灌技术、澳大利亚的自动化测控系统还是中国的太阳能提水技术，当它们被用于东南亚时，都根据当地小农户的经营方式以及气候条件做了相应的调整。

1. 低压重力式滴灌系统、光伏直驱水泵等都是针对小农户地块细碎、供电不稳定等特点而研制的。设备结构简单，维护成本低，不需要复杂的控制中心就可以使用，从而大大降低了使用高新技术的门槛。

2. 利用智能手机普及率高的优势开发基于移动互联网的水权交易、报修应用程序。农民只要简单点下鼠标就能完成灌溉申请、故障上报，接地气的信息化方式比高成本的 SCADA 系统实用得多。

技术引进成功最后要靠本土化的人才。国际合作项目一般会有有一个大规模的培训计划，目的是培养出一批既懂现代工程科技，又了解本地区农业实践的“土专家”。这些地方技术人员成了引进的高端技术和田间作业之间的桥梁，他们将引进的设备进行二次改造，使之更适应热带高温高湿的环境。经过引进、消化、吸收、再创新的过程，东南亚国家正在逐步形成一套国际先进、符合本地区实际的现代农田水利技术体系，给传统农业的转型升级提供了强大的科技推力。

第五节 亚洲模式对比分析与启示

一、政府与市场角色的不同定位

农田水利是准公共产品,建设与管护责任的划分一直是各国政策制定的难题。亚洲各国在政府主导与市场机制的融合上,采取的不是强力的干预,而是社会协同的各种方式。不同制度下治理逻辑的不同,也体现出各国在公平与效率之间采取的不同策略。

亚洲农田水利治理模式对比表

特征	中国（强政府引导下的市场化探索）	印度（社区自治与政府监管的平衡）	日本（法律框架下的农民自主管理）
主导力量	中央政府、地方政府	社区组织、邦政府水利部门	土地改良区（农民主体组织）
资金来源	政府财政投入为主，积极引入社会资本	社区自筹、政府财政补贴	赋课金、特别费（农民缴纳），政府补助
管护模式	政府主导+市场化服务（购买服务、特许经营）	用水户协会管理支渠以下，政府宏观监管	土地改良区（民主选举、专业管理）
权利下放	逐步将末端管护权责下放给合作组织	大比例下放支渠以下工程管理权给社区	法律明确农民在建设管理中的绝对主体地位
驱动机制	国家意志、财政投入、市场价格杠杆	村社自治传统、法律保障、政府激励	《土地改良法》、强制性参与、技术规范
挑战 / 问题	市场发展不足、社会资本积极性不高	社会分层、种姓矛盾、精英俘获	老龄化、劳动力短缺（通过技术弥补）

从中表可知，中、印、日三国农田水利治理模式各有侧重，其背后所隐藏的制度设计以及实施路径也大相径庭。

（一）中国：强政府引导下的市场化探索

中国在农田水利方面的探索，体现出了国家意志在农业基础设施建设中起到的核心推动作用，也表现出在市场经济环境之下，对传统公共产品供给方式的改革尝试。中国长期以来一直把水利当作农业的命脉，是国家粮食安全和社会稳定的基石。中央政府依靠强大的财政汲取能力与行政动员体系，形成自上而下的资金投入机制，不断加大对于大型灌区节水改造、泵站更新、高标准农田创建的投入强度。举国体制的优势在于集中力量办大事，保证骨干工程体系的完整性、抗灾能力逐步提高；流域性特大旱涝灾害发生时，可以迅速调动跨区域资源进行工

程修复、应急调度，表现出很高的组织动员效率。

随着农村税费改革的深入，土地流转速度加快，传统的行政命令式管护模式已经无法继续下去了。在中国政府主导的基础上，积极运用市场机制和社会资本来解决最后一段路的管护问题。各地政府相继开展农业水价综合改革试点工作，试图寻找建立以水养水的良性循环。采取超定额累进加价制度和精准补贴政策，在保障农民基本用水权益的前提下，用价格杠杆倒逼用水户节水，提高水资源利用效率。政府不再包揽一切事务，而是以购买服务、特许经营等方式，引导农民用水合作组织、专业化服务公司参与末级渠系的日常维护，以合同形式确定并固定管护责任。

政府搭台、市场唱戏的混合治理模式不断加深，并且具有强大的生命力。它不但可以有效解决以往的重建轻管顽疾，解决工程老化失修的问题，也可以激发基层水利服务的内生动力。部分先进的地区已经建立了水权交易市场，允许节余的水权在不同的用水户或者行业之间进行交易，从而实现了水资源的资产化管理。虽然在一些经济欠发达地区，市场发展不足、社会资本参与积极性不高的问题仍然存在，但是总体趋势已经从单一的行政命令向多元共治转变，力求找到保证国家粮食安全和提高水资源微观配置效率的最佳结合点。

（二）印度：社区自治与政府监管的平衡

印度有广阔的灌溉面积以及复杂的社会结构，因此它的水利治理长期受到财政赤字、官僚体制效率低下等问题的影响，从而促使它较早地实行参与式灌溉管理改革。印度各邦一般通过立法形式确定用水户协会的法律地位，将支渠以下的工程管理权大部分下放给社区组织。权力下放不是简单的政府推卸责任，而是在印度深厚的村社自治传统和地缘纽带的基础上进行的。农民不再是被动用水者，而获得了水权分配的话语权，还要承担渠道清淤、水费收缴、内部纠纷调解等具体的责任。这种依靠熟人社会、地缘关系而形成的共同体意识，可以降低监督的成本、交易的费用，使得违规用水的行为在社区内部就可以自我约束。

社区自治在实际运行中不是完全脱离政府的，而是一种微妙的博弈关系。大型水源工程、大坝和主干渠由邦政府水利部门控制，政府主要起监管和提供技术支持的作用，宏观上对水资源进行调度和工程安全把关，而田间地头的分配效率更多依赖于社区的组织能力。分层治理结构试图在宏观调控和微观活力之间取得平衡，政府用财政补贴激励表现好的用水户协会，但是保留对水费标准的核准权，

防止垄断定价损害贫困农户利益。

印度的实践表明，社区自治模式在各个地区所取得的效果是不一样的。在安得拉邦、马哈拉施特拉邦等地方，由于有完善的法律保障以及活跃的非政府组织，水利自治效率很高，灌溉保证率和水费回收率都有很大的提高。在分层严重、种姓矛盾激烈的地方，弱势群体的用水权益常常不能被保障，社区内部权力寻租和精英俘获的情况时有发生。社区自治的成功，并不是依靠制度设计的精巧，而是依靠社会资本的积累来创造公平公正的乡村治理环境，否则就会成为强者对弱者的一种剥削。

（三）日本：法律框架下的农民自主管理

日本农田水利管理的根基是“土地改良区”，这是一种具有非常强的法律效力和公法人地位的农民主体组织。日本在二战后就制定了详细的《土地改良法》，将农民在农田水利建设与管理中的绝对主体地位法律化。法律规定，凡是属于受益范围内的农户都必须参加当地的土地改良区，按照规定缴纳赋课金、特别费来保证设施更新维护和日常经营。强制性与自主性并存的机制从根本上解决了集体行动中搭便车的问题，保证管护资金有稳定的长期来源，不会受到政府财政波动的影响。

在日本高度工业化、城市化的背景下，并未减少对农业水利的投入，在精细的制度安排下实现了城乡水利协调发展。土地改良区不只是农业灌溉，还要担负农村防火用水、地下水回灌、景观生态维持等许多公共事务。因此非农部门、城市居民也愿意拿出税收转移支付等形式支持水利，形成良性循环。日本政府重视制定高标准的技术规范，并且会给予大量的工程建设的补助。一般来说，重大工程的建设费用大部分由国家和地方财政支付，农民承担的比例很小，但建成后的管理权全部归改良区所有。

1. 组织严密、权责明确，土地改良区内部治理很规范，设置了民主选举产生的理事会、监事会，决策过程公开透明。水由调运到田间配灌，每一个灌溉单元由专人管理，用详细的记录表单体现全过程精细化管理的全过程。

2. 高水平的技术标准化、智能化。为适应农村人口老龄化、劳动力减少的现状，日本大力推进水利设施的自动化改造。依靠遥测遥控系统和自动水位调节闸门，极大地降低了人力巡查的成本，使少数专业人员就能控制大面积的灌区网络。这种技术密集型的自主管理模式，给亚洲国家破解老龄化难题给予了有益范本。

二、技术路径选择的差异与共性

（一）大型工程与小型设施的互补

由于亚洲季风气候造成降水时空分布极不均匀，因此大型调蓄工程的存在才具有必要性和合理性。无论是中国的南水北调工程及其配套工程，还是印度的宏大河流联网计划，都是为了用跨流域、远距离的输水线路来解决某地缺水的问题。这些国家级的骨干工程是农田水利的“大动脉”，给粮食主产区提供稳定的水源基础保障，有效抵御了极端干旱气候造成的毁灭性打击。大工程具有无可替代的宏观调控能力，可以对水资源进行更大范围内的优化配置，是国家粮食安全底线的物质保障。

但是，如果没有毛细血管的通畅，大动脉的血液就无法滋养每寸土地。各国在发展大型水利工程的同时，也越来越重视小型微型水利设施的建设，这是纠正过去“重骨干轻配套”倾向的体现。中国大力推行的五小水利（小水窖、小水池、小泵站、小塘坝、小水渠），在西南山区和丘陵地带起到了非常大的作用。这些设施造价低、产权明晰、管理方便，能灵活机动地收集雨水及地表径流，很好地解决了破碎化地形灌溉的问题。

大中小微并举的做法体现出系统论的治理思想。大型工程重在宏观调控和总量平衡，解决“有水”问题；小型设施重在微观调节和因地制宜，解决“用水”问题。二者不是替代关系，而是功能互补、层次不同的水网体系。当干旱造成大型水库水位下降时，星罗棋布的小型蓄水工程常常可以成为“救命水”，保证作物的生存；洪涝之时，小型设施的滞洪削峰作用又可以减轻骨干排水河道的压力。通过科学调度把大工程的“刚性”和小设施的“韧性”结合在一起，形成亚洲农田水利技术路径的明显特征，提高了整个农业系统抵御气候变化的弹性。

（二）传统智慧与现代技术的融合

亚洲拥有悠久的灌溉文明，坎儿井、梯田水系、陂塘等传统水利工程都带有深厚的生态智慧，这些都是千百年来人与自然的相互作用的结果。现代水利工程并没有完全否定过去的遗产，而是将过去遗产与最新的科技融合在一起。日本在加固古老的水渠以及实施现代化改造的时候，会特意保留这些水渠的生物通道功能和多孔隙结构，并且采用物联网传感器网络来对水位流速展开实时监测。这样既保留了传统自流灌溉低耗能的特点，又实现了精确测量和生态保护的双重目的。

在西北干旱区古法砂田保墒的基础上，用现代压力滴灌技术配合可降解地膜覆盖形成了高效的膜下滴灌方式。这种模式有效减少了无效蒸发，每一滴水都直接送到作物根部，农艺与农机设备达到了完美的契合。传统智慧里顺应天时地利、因势利导的哲学思想，给现代节水技术的开发给予许多启示。利用地形落差产生的自然水头进行微灌可以减少能源消耗；运用传统的轮灌制度加上大数据算法来调配配水时间，能减少输水损耗。

融合并不只在物理设施的“硬连接”上体现出来，也在管理软件的“软结合”上反映出来。利用云计算平台和大数据分析来对传统村规民约进行数字化重构；根据作物全生育期需水模型以及气象预报来自动生成配水方案，最后将配水方案通过手机应用发送给农户。此种古为今用、推陈出新的技术路径，既能减少新技术落地时所造成的社会阻力和适应成本，又能增加水利工程的文化内涵和生态价值，防止技术至上主义所导致的环境负外部性和社会疏离感。

（三）从单一供水向综合服务转变

伴随着农业现代化的推进，农田水利工程的功能边界也发生变化，不再仅仅是灌溉排水了，而逐步向综合性农业生产服务转变。现代先进的灌区正由单一的供水灌区转变为集水肥一体化、农情监测、农业技术推广等多种功能为一体的综合服务平台，依靠遍布田间的水网系统。利用加压灌溉管道系统把液体肥料、水溶性农药与灌溉水按照需要准确混合施用，既大大减少了施肥施药的劳动量，又大幅度地降低了化肥农药的面源污染，从而促进农业生产的绿色转型。

水利设施的信息化终端成了小农户对接大市场的一座桥。智能水表和灌溉控制系统不仅可以完成计量收费的功能，还可以收集到土壤墒情、气象、作物生长等各方面的信息，为农民提供气象预警、病虫害防治建议、市场价格信息等各类服务。一些试点地区灌溉服务组织利用水利设施管网的优势开展农村供水、污水处理、光伏发电等各种业务，形成了水利和多种业务相结合的发展模式。

综合服务模式大大提升了水利工程的附加值，水利管护组织可以依靠增值服务获得稳定的收益，来弥补工程日常维护的经费缺口，从而打破长期以来的基层水利完全依靠财政输血的被动局面。农田水利工程由单一的要害提供者，变为农业产业链综合服务机构，为农业产业链延伸、价值链提升奠定了坚实的基础。这就需要建设者在规划、设计阶段就留出接口，管理者要有跨领域综合服务的能力，这是未来亚洲农田水利发展的更高层次目标。

第三章 欧美发达国家农田水利创新实践

欧美发达国家农业现代化进程中积累的农田水利建设和管理经验较多，其中美国等国最为明显。依靠技术创新、依靠技术革新，制度创新以及生态理念的渗透来创建出高效的农田水利系统。深入探究各国基层农田水利协同创新的经验，对于探寻符合各地实际情况的创新模式有着十分重要的参考意义。

第一节 美国大型灌区现代化改造经验

一、垦务局灌区的系统化升级

（一）输配水系统的自动化与远程控制

传统的灌区管理主要依靠人工巡渠来操作闸门，受气候变化和用水波动的反应比较迟钝，管理效率不高。垦务局主导的现代化改造核心就是全过程数字监控，即由水源地到田间分水口全部用上数据采集与监视控制系统。由此引起灌区管理者的改变是，可以随时对各个渠道的水位、流量、流速等进行了解，依靠高精度的传感器网络，使原本模糊不清的水流情况变得一清二楚。中央控制室的操作人员只需要通过计算机终端，就可以对几百公里外的水闸、泵站进行远程精确控制，大大缩短了配水响应时间。

自动化系统的应用，不仅是硬件设备的升级，更是一场管理流程的深刻变革。在操作层面，系统能基于实时数据，根据上下游水力响应自动运算并调控闸门开启度，从而精准消除人工操作的误差与水力振荡。在效率层面，这种智能调控机制显著提升了输水效率，大幅减少了弃水浪费。在决策层面，自动化改造建立的历史数据库，为灌区水量调度提供了可靠的数据支撑，使管理者能深入分析长期用水规律，制定出更为科学合理的年度供水计划。

远程控制系统既提高了灌区的运行效率，又大幅度地提高了灌区的安全性。系统设有水位突然上升或者流量突然增大的多重预警系统，一旦发生这种情况就会立刻发出警报，并且自动实施紧急关闭程序，从而防止渠道漫溢或者溃坝等事

故的发生。全天候自动化值守模式对于工程的安全运行起着不可替代的作用，在突发暴雨或者设备故障的时候，系统可以快速响应，尽量减少灾害造成的损失。

（二）水权交易与市场化配置机制

美国西部灌区在水资源分配上最突出的创新，就是形成了一套完备的水权交易制度。该制度冲破了水资源在单一用途或者特定区域内的固有状态，让水流向经济效益更好的地方。在美国，水权是法律所保护的一种私有财产，具有排他性、可转让性。在严格限定初始水权的前提下，灌区内部及跨灌区的水市场逐渐形成，农户之间、农业与城市之间、农业与工业之间可以进行水权的租赁或买卖。

市场化配置机制极大地调动起节水的内在动力。当节约下来的水权能在市场上进行交易并带来一定的经济收益时，农户投资节水灌溉设施、改善种植结构的积极性被空前提高。很多灌区的农户自觉地将传统的漫灌改为滴灌或者喷灌，减少田间耗水量，积累可以交易的水权额度。该机制把水资源从价值低下的农业用水，引向价值较高的经济作物种植或者稀缺的城市工业用水，从而使整个区域水资源的经济效益达到最大。

水权交易不是完全自由的市场行为，是有法律限制的，第三方评估是严格的。为防止交易活动给第三方造成损害或破坏生态环境，交易方案必须要做详尽的水文分析和公众听证程序。在跨流域水权交易时，不能减少下游用户的水权，也不能造成河流生态基流的枯竭。既发挥市场活力的同时又加以制度约束的水资源配置模式，为解决水资源短缺问题提供了一条可以借助经济杠杆的有效途径。

（三）灌区用水户协会的自主运营

灌区管理权下放成为美国农田水利改革的又一特点。大力扶持用水户协会等自治组织，政府职能转变，基层管护效能提高。垦务局逐步退出灌区末级渠系的日常管理，将末级渠系的管理责任通过合同的方式交由用水户协会承担。协会属于独立的法人团体，享有高度的自治权，它的理事会成员由农户通过直接投票来选举产生，对全体会员负责。

用水户协会自主运营的基础就是权责利相统一。协会有制定水费标准、收缴水费、雇佣管理人员、安排工程维修计划的权力。由于管理者本身就是用水户，对于灌溉需求有最直接的感受，因此能够更灵活地根据农业生产实际节奏来制定配水计划，避免官僚主义造成效率低下。并且由于协会有公开透明的财务管理、民主协商的机制，使农户对灌区的管理更加信任，参与度更高，有效地化解了供水矛盾。

政府不是“撒手不管”，而是作为技术支持者、监督者来运作协会。垦务局会定期为协会管理人员提供工程技术、财务管理、法律法规等各方面的培训，提高他们的业务水平。政府对大型工程改造项目给予低息贷款或者专项补助，减轻协会资金压力。政府与农户合作方式即政府引导、农户自主管理，在发挥政府宏观规划、资金支持作用的同时，调动基层社会自我管理的积极性，保证灌区工程长期良性运转。

二、水资源综合管理实践

（一）流域层面的统一规划与调度

打破行政区划壁垒，以流域为单位实行统一规划、统一调度，是实现水资源优化配置的前提。美国在主要的河流流域都设置了强有力的流域管理机构或者协调机构，根据流域的水文特点以及资源承载能力来制定长期的综合管理规划。规划内容不仅仅是水量分配，还包括水质保护、防洪减灾、水力发电等各个方面，保证各项涉水活动在流域整体利益的框架内有条不紊地进行。

1. 流域管理机构普遍使用先进的计算机模拟模型和大数据分析技术，对流域内降雨、径流、蒸发、各种用水需求进行模拟。情景分析可以预测不同的气候条件和调度方案下水资源供需状况，从而制定出有韧性的调度策略。依靠科学数据来决策的模式，使流域的管理具有了较强的预见性和准确性。

2. 多方参与的协商机制对于流域规划的制定和执行来说非常关键。联邦政府、各州政府、地方自治团体、原住民部落、环保组织等利益相关者代表，就流域管理的重大问题进行交流会议或者听证会。虽然这样会增加决策的时间成本，但是从长远来说，可以协调好各方的利益，减少执行过程中遇到的阻力，保证政策的连续性和稳定性。

（二）农业、城市、生态用水的协调

在水资源总量有限的情况下，怎样协调好农业灌溉、城市供水、生态需水三者之间的竞争关系，成为灌区现代化面临的一个严峻问题。美国成立水资源转换机制与协商平台，寻求行之有效的协调方法。在干旱年或城市用水高峰期，建立短期水银行或者期权合约，使农业用水临时转移给城市和工业，既缓解了城市缺水状况，又为农民提供额外的经济补偿。

同时生态用水的法律地位得到提升。有关法规规定，在分配水资源时要优先

保证河流基本生态功能的最小流量。在生态敏感区，甚至实行了以水定地的政策，用退耕还水、休耕轮作等方式减少农业用水对生态环境的占用。协调机制把生态用水不再当作剩余水量的被动接受者，而把它同生活用水、生产用水一样重要地纳入到统一配置之中。

为了达到三者和谐共生的目的，大力推广水资源梯级利用和循环利用技术。将城市污水处理厂达标尾水输送到灌区用作灌溉，既能解决农业用水不足的问题，又能降低城市污水排放的压力，实现了以废补源。跨部门、跨行业的合作打破以前行业分割的局面，形成城乡统筹、生态友好型的水资源使用新格局。

（三）应对干旱的应急响应与储备机制

面对全球气候变暖带来的干旱天气越来越频繁，美国灌区也建立了一套比较完备的干旱应急响应和储备制度，实现了由被动应对到主动规避的转变。这套机制的关键之处在于形成了依靠触发指标的分层响应体系。

干旱预警响应等级表

干旱程度	主要应对措施
轻度干旱	宣传教育、自愿节水
中度干旱	强制实行配额供水、限制高耗水作物
重度干旱	停景观用水、实施严格用水限制
极端干旱	启动紧急调水、储备水抽取

当流域内积雪量、水库蓄水量或降雨量低于某个阈值的时候就会触发不同的干旱预警，具体措施见上表。轻度干旱阶段主要依靠宣传教育、自愿节水；随着旱情加重，强制实行配额供水、限制高耗水作物、停止景观用水等。分级响应机制使抗旱行动的及时性、针对性得以保证，避免了由于反应迟缓造成形势失控。

地下水贮藏是抗旱的战略基础。丰水年份，灌区将多余的地表水存入入渗池作为地下含水层的补给水源，或者直接向地下水库注水，将水资源“存”到地下。这种“丰蓄枯用”的方式，在干旱的时候起着备用水源的作用。干旱来临时，按照事先制定的取水计划使用储备水，可有效平抑地表水供应的波动，保证农业生产正常进行。战略储备思维大大提高了灌区抵御气候风险的韧性。

三、可持续灌溉与生态保护

（一）灌溉回归水的处理与再利用

长期以来的大水漫灌造成土壤盐渍化和灌溉回归水污染严重，曾经是美国西部农业面临的重要环境问题。为克服该弊端，现代灌区一般都建有较为完备的排水收集和处理系统。农田排水不再随便排入河流，而是通过地下暗管或者专门的排水沟汇集到处理设施中。对于高盐度的回归水，用反渗透脱盐、生物净化塘等办法将其净化到可以利用的标准。

经过处理的回归水不是直接丢弃，而是有了新的用途。一部分水被送到耐盐作物的种植区，用来灌溉大麦、棉花等耐盐作物，使水资源得到二次利用；还有一部分水用于湿地补给或者工业冷却。含有硒等微量元素的排水，就使用特殊的生物反应器来无害化处理，防止其在食物链中富集。全周期水质管理方式彻底改变了过去只灌不排、用而不管的粗放式做法，有效地遏制了农业面源污染的蔓延。

源头控制技术也得到广泛应用，推广精准灌溉技术严格控制灌溉水量和淋洗水量，从源头上减少深层渗漏和地表径流的产生，大幅度降低回归水的总量。以源头减量、末端治理、循环利用为路径的综合治理模式，在解决排水出路的同时，还将环境负担变成了资源，是农业可持续发展的鲜活实践。

（二）减少农业面源污染的技术措施

为了保证受纳水体水质安全，在田间地头采用美国灌区的最佳管理实践，最大限度地减少化肥、农药、沉积物进入水体。

在工程上修建了生态缓冲带、植被过滤带。在农田和河道之间保留或者恢复出一定宽度的原生植被带，依靠植物的拦截、吸收、降解作用，阻止农田径流携带的氮磷营养盐和泥沙进入河流。还建有沉沙池、人工湿地，对农田径流进行初步处理。看似简单的生态工程在运行过程中具有很高的污染物去除率，是水质的最后一道防线。

大力推广农艺方面的保护性耕作和测土配方施肥。采用免耕或者少耕技术，保持地表有作物残茬，提升土壤有机质含量，削减土壤侵蚀与养分流失。使用先进的土壤养分快速检测仪器，按作物生长需要的量施肥，防止过量施肥造成的浪费和污染。综合病虫害防治技术使用之后，化学农药的使用量减少，农药残留对水生生态系统毒害的风险也随之降低。

（三）保护湿地与河流生态健康

现代水利工程建设认为健康的河流生态系统是农业可持续发展的基础。因此，在灌区改造中保护湿地和河流生态健康问题被提到了前所未有的高度。

河流不再只是输送水的渠道，而是一个有自然形态、生态功能的完整系统。河流修复工程中拆除了一些老旧的、影响鱼类洄游的低效水坝，在必要的大坝上修建现代化的鱼道和升鱼机，恢复鱼类的生命通道。同时模拟自然水文过程，实行生态调度，在一定的季节放水形成人造洪峰，冲刷河床淤积、重塑深潭浅滩地貌，给水生生物创造适宜的栖息环境。

灌区内部和周边的湿地也被严格保护。用灌溉尾水或者季节性洪水来给退化的湿地补充水分，使湿地植被恢复，重新成为鸟类迁徙停歇地和栖息地。人工或者半人工湿地不仅可以净化水质，而且大大增加了该区域的生物多样性，提升了景观价值。依靠形成生态补偿机制，促使农户参与到湿地守护当中来，把部分低产田改为季节性湿地，达至农业生产与生态保护相互促进。这种融合发展思想，就是说农田水利工程由原来的生产型变成生态、生产、生活型。

第二节 欧盟农田水利生态化建设路径

一、共同农业政策的生态导向

（一）生态补偿与交叉合规机制

欧盟农业补贴发放的基本条件为交叉合规机制，申请直接支付的农户必须满足一整套法定管理标准以及良好的农业、环境要求。以水资源保护为核心考核指标，规定农户取水灌溉需持有效取水许可证并遵守水计量规定，不得非法打井或超量抽水。对硝酸盐脆弱区的农田实行化肥农药用量的限量、时间上的限用，有效地防止了农业退水导致的地表径流污染。

农户达不到上述的环境标准，那么它所得到的农业补贴就会按比例被扣除，严重违规者甚至会被取消全部的资格。把经济利益同生态责任直接挂钩的做法，迫使农业生产者不得不去审视自己的生产方式，把水利设施的维护、水资源的合理利用变为一种自觉的经济理性行为。欧盟采用这种正向鼓励、负向约束的办法，在基层形成了一道防水利工程生态破坏的墙，保证每一分农业补贴都有一份对环境的许诺。

（二）对环境友好型农业的补贴

为了促使农户做出多于法定标准的生态农业活动，欧盟设置了专门的农业环境气候措施，对采用环境友好型耕作方式的农户给予额外的财政补偿。这部分资金主要支持可以明显改善水土保持功能的农业活动，比如有机农业推广、覆盖作物种植、休耕制度的实行等。

1. 有机农业补贴政策在转型期和成熟期两个阶段上实施，可以弥补由于减少化学投入品而带来的短期产量下降的问题，间接减少高浓度农业废水给水利沟渠造成的污染负荷。

2. 精准灌溉和生态缓冲带建设补贴：给使用精准灌溉技术、建立生态缓冲带的农户给予专项资金奖励，鼓励农户在农田里修建小型的生物过滤装置来过滤农田排水。

补贴不是一次性发放的，而是长期合同中给农户的，在五年到七年中实行环境友好型耕作。长效机制保证了农田水利生态化改造的连续性，避免农民在市场波动的时候又走向掠夺式经营的老路，也给区域水质改善和生物多样性恢复提供稳定的资金支持。

（三）农村发展计划中的水利项目支持

共同农业政策第二项举措就是农村发展计划，专门拨出大量资金，推动农田水利设施现代化改造和生态化升级。这部分资金不再像以前那样只重视灌溉面积的增加，而是明确规定用于提高水资源利用效率、减少环境足迹的项目。

所有申请资助的灌溉工程项目在立项前都必须经过严格的评估，证明该灌溉工程可以达到 5% 到 25% 的节水效果，并不会对水体状况造成不良影响。对水资源缺乏的地区项目来说，欧盟规定必须在减少取水总量的前提下，设置生态流量泄放设施，保证河流生态系统最基本的需水量。大笔资金主要用在了老旧渠道防渗改造和智能水网建设上，依靠自动控制和土壤湿度传感器配合来实现精准灌溉。这样的投资方向彻底改变了以往水利工程重建设轻管理的问题，促使农村水利设施向数字化、生态化方向发展，给农业水价改革和水权交易提供强有力的物质保障。

二、基于自然的解决方案

气候变化的挑战越来越严峻，生物多样性丧失的危机越来越严重，欧盟在农

田水利建设上大力推行基于自然的解决方案，依靠自然的力量来管理水资源，取代或者补充传统的灰色混凝土工程。

基于自然的农田水利解决方案示例

解决方案	核心理念	主要效益	应用场景
恢复河流自然形态与洪泛区	“给河流让路”，恢复河流与洪泛区的连通性	削减洪峰，减轻下游防洪压力；增加鱼类、两栖类栖息地；补给地下水，增强区域水资源调蓄能力；提升生态多样性。	曾经被人工渠化、硬化的河流及其周边区域。
建设生态沟渠与人工湿地	利用生物和物理过程净化农业排水	拦截泥沙，吸收氮磷等营养物质，降解有机污染物；改善水质，减少面源污染；增加生物栖息地；提升景观价值。	农田排水末端、低洼地带、污染易发区。
推广保护性耕作与节水技术	减少土壤扰动，作物秸秆覆盖，精准用水	提高土壤有机质含量，改善土壤结构；增强土壤蓄水保墒能力（“土壤水库”）；大幅度减少水资源消耗和土壤侵蚀。	各种农田，尤其适用于干旱半干旱地区和水资源紧张区域。

这些解决方案的具体实践，可见上方“基于自然的农田水利解决方案示例”表。

（一）恢复河流自然形态与洪泛区

欧洲许多地方为了农业排水和扩大耕地面积，把河流截弯取直，两岸筑起混凝土堤防，结果是河流自净能力下降，洪水风险增加。目前欧盟正在推行“给河流让路”的理念，逆转这一过程，大规模开展河流自然形态的修复工程。

这项工作就是拆掉一些已经废弃的硬堤，重新挖掘出弯曲迂回的河道，让河流恢复自然的水路形态以及深浅不一的地形地貌。工程建设中特别重视恢复河流及周边洪泛区的连通性，洪水季节河水漫过一定范围的低洼农田或湿地。不仅可以削减洪峰，减轻下游城市防洪压力，还可以给鱼类、两栖类动物提供繁殖栖息地。被淹没的洪泛区在枯水期依靠土壤渗透补给地下水，从而提高了区域水资源的调蓄能力。实际上把农田水利工程从单一的排灌系统变成流域生态系统的一部分，实现防洪安全和生态修复双丰收。

（二）建设生态沟渠与湿地净化水质

欧盟在田间区域大量开展生态沟渠、人工湿地建设等工作来增强农田排水到自然水体前最后的生态屏障。传统的排水沟渠多为光面混凝土或者简单土沟，极易造成水土流失和污染物直排。生态沟渠改造中会在沟底、边坡种植吸附净化功能的挺水植物，芦苇、香蒲等。

这些植物根系发达，可以拦截径流带来的泥沙，吸收水中过多的氮磷营养物质，还可以为微生物提供附着的基质，分解有机污染物。沟渠的重要节点处设置沉淀池和小型跌水堰，采用物理沉降和增加水体复氧能力的方式来提高水质净化效果。对于大面积的连片农田，欧盟提倡利用低洼地带建立表面流或者潜流的人工湿地系统，将农田排水集中于此做进一步的处理。经过湿地净化之后的水体，水质指标一般能够达到或者超过受纳水体的标准，既解决了农业面源污染问题，又形成了优美的乡村景观，提高了农田周边的生态服务价值。

（三）推广保护性耕作与节水技术

为了从源头上减少水资源消耗、土壤结构破坏，欧盟把保护性耕作技术、高效节水灌溉技术作为农田水利生态化的主要手段。保护性耕作就是少耕或免耕，用作物秸秆覆盖地表以减少土壤水分蒸发、风蚀和水蚀。

此种耕作方式能大幅度提高土壤有机质含量，改善土壤孔隙度，进而提高土壤自身蓄水保墒能力，被形象地称为“土壤水库”。配套的是滴灌、微喷灌等高效节水技术的全面推广，通过铺设在地表的管网，把水直接送到作物根部，大大减少了输水过程中由于渗漏、蒸发造成的损失。欧盟在推行这些技术的时候，会考虑到当地种植结构和气候特点，从而研发出一些适应性比较强的技术模式。在南欧干旱地区大力推广地下滴灌技术，进一步减少无效蒸发；在西欧平原地区结合大型平移式喷灌机，实行变量灌溉，根据田块内土壤肥力和作物生长状况的不同来精确调节灌水量。农艺、农机、水利三者结合，实现农业用水精细化管理，提高水分生产率。

三、严格的水环境标准与监管

（一）水框架指令的要求

水框架指令是欧盟水资源管理的重要指导性文件，其主要目的就是使所有成员国的水体都达到“良好的生态状态”。此指令打破了以往只关注水质理化指标的传统做法，把水生生物群落结构、水文形态特征等生态因素也纳入考虑，这对农田水利工程建设与运行提出了非常高的要求。

按照指令的要求，成员国必须以流域为单位制定综合管理计划，明确农业活动给水环境造成的压力，并提出具体的整改措施。如果某一河流域因为农业取水造成河流断流或者地下水超采，或者因为农田排水造成水体富营养化，那么该

流域就属于未达标，相关国家必须在限定的时间内完成整改，否则会受到巨额罚款。指令里还提到全成本回收原则，也就是农业用水价格要包含工程建设费，运行维护费，资源成本，环境成本。这就意味着农户要为自己的超量用水、污染环境埋单，从而在经济上形成倒逼机制，促使农业生产者主动寻找节水减排的技术路线。

（二）硝酸盐指令对农业用水的限制

为了治理农业面源污染这个顽疾，欧盟制定出《硝酸盐指令》，目的是减少、防止农业来源的硝酸盐对水体造成的污染。命令各国划定硝酸盐易受影响的区域，在这些区域内制定农业行动计划。

1. 水利工程调度限制，在脆弱区内，农田水利工程的调度运行受到限制，在雨季或者土壤饱和的时候，不能实施漫灌，以免引发养分顺着地表径流流失。

2. 化肥农药施用规定：指令对化肥、有机肥施用设禁施期和最高施用量，例如，每公顷耕地每年施用畜禽粪便氮含量不超过 170 公斤。

成员国要搭建起完备的监测网络，定时检测地表水和地下水里的硝酸盐含量，把检测得到的数据上报给欧盟委员会。当监测数据超标时，行动纲领就要立刻加强，采用更加严厉的限制手段。这种靠监测数据的动态管理机制，保证农业生产活动一直处在水环境承载能力的限度之内，较好地控制了农业面源污染恶化的趋势。

（三）成员国间的协调与监督机制

由于欧洲多条河流都是跨国河流，在水利工程建设及管理过程中牵涉众多国家的利益，所以欧盟为此建立了完善的成员国间协调与监督机制。对莱茵河、多瑙河这样的国际河流，沿岸国家共同成立了国际河流保护委员会，对整个流域的农田水利及水资源进行统一规划。

在此机制下，上游国家的农田水利建设要充分考虑对下游国家的水量、水质影响，任何大型水利项目在立项前都必须做跨国环境影响评价。欧盟委员会是超国家监督机构，会定期对各个成员国指令执行情况进行检查和评价，对执行不力的或者弄虚作假的国家启动侵权程序，由欧洲法院作出裁决。强有力的跨国监督和司法保障冲破了行政区划造成的壁垒，消除了流域治理里的“公地悲剧”，使得各国农田水利生态化建设可以达成一致。公众参与属于监督机制的重要组成，流域管理计划以及监测数据应该对社会公开，接受非政府组织与公众的监督质询，进而提升政策执行的透明度以及约束力。

第三节 以色列高效节水灌溉技术应用

一、滴灌技术的发明与全球推广

滴灌技术的出现完全改变了人类的灌溉方式，它不但是工程技术的突破，更是农业生产方式由粗放型向集约型、精准型转变的革命。这项技术把水资源利用效率提高到了前所未有的水平，成为全球干旱、半干旱地区农业发展的基石。

（一）从概念到商业化应用创新历程

二十世纪三十年代水利工程师辛卡·布拉斯在一次偶然的时机里发现一棵不靠灌溉就能茁壮生长的树，它的根部下有一道细细的水管漏水。这就使他进一步地认识到，缓慢稳定的水滴直接作用于植物根系的效果比大水漫灌好得多。经过几十年的理论研究以及初步试验，布拉斯在六十年代同哈泽里姆基布兹合作，使滴灌技术从实验室走向田间。本阶段研发团队所遇到的困难主要体现在三个方面，一是如何防止微小出水孔堵塞，二是怎样使管道内的压力分布均匀，三是怎样寻找一种既耐久又经济的塑料。

在基布兹模式的集体农庄里，为这项技术的早期试验提供了最好的场所，农民和工程师在田间地头密切配合，经过无数次的失败与改进，才研制出第一代实用的滴灌发射器。依靠独特的水流通道设计，在低压下水流可以均匀地滴落。耐特菲姆公司成立之后，滴灌技术进入商业化运作阶段。初期的推广并不顺利，传统的观念认为只有大量浇水才能保证作物生长，但是以色列南部荒漠农业的奇迹很快就打破了这一观念。由于滴灌能大幅度提高产量，节水一半以上，所以这项技术在国内迅速普及，随后又跨出国界，向美国、澳大利亚和非洲缺水地区大量输出，开创了全球农业节水的新时代。

（二）水肥一体化技术的精准控制

随着滴灌技术的推广，以色列农业科研人员又开发出了水肥一体化技术，把灌溉和施肥两个独立的农事活动有机地结合了起来。其基本原理就是以灌溉系统为载体，把可溶性肥料按作物生长所需比例溶解在水中，随着水流送到作物根部的土壤里。它可以克服传统化肥施用中养分挥发、流失、破坏土壤结构的缺点，达到水肥双效高效利用的目的。控制系统根据不同的作物在不同的生长期所需要的氮、磷、钾以及微量元素比例来配制营养液。

使用该技术极大地提高了农业生产控制程度以及标准化水平。由于养分是以离子的形式存在于土壤溶液中，所以作物根系可以以最小的生理能耗来吸收，大大提高了肥料的利用率。更重要的是可以解决干旱地区普遍存在的土壤次生盐渍化问题。通过控制滴灌水量、频率，可以在根系周围形成一个低盐分湿润球，把盐分推向湿润锋边缘，为作物根系创造一个适宜生长的微环境。精确根区管理方法使得贫瘠、盐碱、沙土等不适合农业生产的土地，也能种植出经济价值高的作物，扩大了农业生产用地。

（三）持续的技术迭代与产品升级

1. 压力补偿技术在滴灌的发展史上是十分重要的一个节点。早期滴灌管在长距离铺设或者地势起伏大的农田中，很容易出现首尾出水量不一致的问题。为此，以色列研发人员发明了带硅胶膜片的压力补偿滴头，不管管道里的水压怎么变化，滴头内部的调节机构都会让出水流量保持不变。使滴灌系统可以适应山地地形、超长距离农田铺设，简化系统设计建造，保证每一株作物都能得到同样的水肥。

2. 开发防堵塞的办法，保证系统的长时间稳定工作。新一代滴灌产品使用了迷宫式流道，通过产生强烈的紊流来防止颗粒物的沉积，将灌溉水中的泥沙、有机物、化学沉淀等都隔绝在外。高端产品还带有自动反冲洗和根系入侵防护，防止植物根系进入滴孔造成堵塞。不断更新的技术使灌溉设备使用寿命更长，农户维修费更少，劳动强度降低。

3. 随着人们环保意识的提高，可回收、生物降解材料也被用到了产品升级中。为了解决大量废弃滴灌带造成的白色污染问题，以色列企业开发出了时间更长、壁更薄且易回收的滴灌管，并在大田玉米、马铃薯等作物收割之后能够自然降解的环保型滴灌带。产品全生命周期的考虑，体现出技术创新在追求经济效益的时候，也对生态环境保护有深入的思考。

二、全国水资源统一配置体系

（一）塔哈拉什输水工程的核心作用

被誉为以色列水利大动脉的塔哈拉什输水工程，是该国历史上最大的基础设施项目之一。该工程开始于二十世纪五十年代，经过十多年艰苦奋斗才建成。核心战略意图就是改变自然资源分布不均的状况，把北部较为丰富的加利利湖淡水，通过数百公里的运输输送到南部的内盖夫沙漠地区。工程主体是由成千上万的混

凝土管道、明渠、隧道、大型泵站群等构成的贯穿南北的输水脊梁。

工程在建设克服了巨大的地理、工程技术上的困难。加利利湖位于海平面以下二百多米处，输水线路要越过丘陵高地，必须建大功率提升泵站将水抽升到海平面以上，这对当时的流体力学设计和电力供应系统来说都是极大的考验。塔哈拉什工程建成通水以后，既解决了南部地区农业、生活用水的迫切需要，又有很深的战略意义。使内盖夫沙漠开发成为现实，百万亩荒漠变为良田、定居点，大大拓宽了以色列生存发展空间，成为国家水安全保障体系核心。

（二）北水南调与多水源联合调度

依靠国家输水工程这个主干网，以色列形成起一个遍布全国、彼此相连的水资源调配网络，实现了北水南调和多水源联合调度。该网络并不是简单的单向输送，而是由地表水库、地下含水层、海水淡化厂、污水处理厂等各种水源节点组成的复杂网状系统。通过精准的调度中心，水务管理部门可以像调配电能一样调配水资源，根据各地、不同时段降雨量和用水需求在全国范围内进行水量的动态调配。

在雨季、冬季，把北部多余的地表水回灌到沿海或山区地下含水层，防止水资源白白流入海洋；涵养地下水，防止海水倒灌。在旱季或者干旱年，可以抽取地下水或者调动海水淡化产能来补充管网。多水源联合调度模式大大提高了供水系统的韧性、可靠性。即使遭遇连续数年的干旱天气，以色列也能依靠灵活变换水源、调整流向的办法来保证农业灌溉和城市用水的正常需求，不至于因为某一个水源枯竭而陷入系统性的危机当中。

（三）海水淡化与再生水利用的规模化

面对日益严峻的水资源短缺问题，以色列没有只依靠天然水资源，而是把重点放在了“制造水”上，大力发展海水淡化和再生水循环利用，从根本上改变了水资源的供给方式。在海水淡化上，以色列在地中海沿岸建成了索雷克、哈代拉等一批世界级的大型反渗透海水淡化厂。这些工厂采用最新膜技术和能量回收设备，把海水淡化成本降到很低，使淡化水不但可以饮用，而且经济上还可以作为农业的补充水源。目前海水淡化水已经成为该国生活用水的主体。

以色列再生水利用也位居世界前列。该国建立起了比较完善的污水收集处理系统，城市污水经过物理、生物、化学等工序处理后，净化程度非常高。沙夫丹污水处理厂是该领域的典范，它把特拉维夫都会区的污水处理后回灌到沙丘含水

层，采用土壤含水层处理的方式进一步净化和储存，最后通过专门的“紫色管道”输送到南部农业区。目前，以色列 80% 以上的农业灌溉用水是经过处理的再生水。大规模的循环利用模式，凭空创造了一个巨大的新水源，既减少了污染，又将十分宝贵的天然淡水资源解放出来供生活消费，实现了生态效益与经济效益的双赢。

第四节 澳大利亚旱区水资源管理策略

一、水权改革与水市场建设

（一）从“取水许可”到“水权”的转变

二十世纪九十年代以前，澳大利亚的水资源管理大多实行用水权利和土地所有权挂钩的“取水许可”制度。水被当作土地的附属品，不能独立流转，造成水资源大多固定在效率低下的传统农业种植中，不能够转移到附加值更高的现代农业领域。为应对水资源日益紧张的严峻形势，澳大利亚政府开展供水行业重大改革，主要措施就是水土分离，即将附着在土地上的用水权从土地中分离出来，确立为独立、受法律承认的可交易资产。

此改革进程长久以来就处在漫长的法律界定和权益核实之中。各州政府根据历史用水数据、河流径流量和环境承载能力等因素，给流域水资源总量设置上限，并把总量按各个用水户进行细化，从而确定出具体的“水权份额”。新型的水权不再只是行政许可，它具有排他性、可转让性、法律保障的财产权性质。水权确定之后，农户就有了更为灵活的资产处置权，这就为之后水市场的建立打下了坚实的法理基础，让水资源可以像土地、资本一样，成为生产要素在经济体系中自由流动。

（二）可交易的水权市场建立与运行

水权产权明晰后，澳大利亚就形成了世界上最活跃、最成熟的水权交易市场。市场大致可以分为两个层次，一个是永久性水权交易市场，即水权持有者永久转让其拥有的长期水资源份额，一般伴随着农业生产结构的重大调整或者农户的退出；另一个是临时性水量分配交易市场，即农户只对当年或者某一特定时段内可用水量指标进行交易。双层的市场结构极大提高了灌溉农户的资源配置的灵活性，使灌溉农户可以根据当年的降雨情况、市场价格波动和作物需水周期来调整自身的水资源使用策略。

就市场运行机制而言，澳大利亚创建了统一的电子交易平台以及信息公开透明的发布系统，从而使得交易价格能够及时地反映供求关系。旱情加重，水资源供应紧张时，水价自然上涨，低效益作物种植者卖水权得钱，高效益作物种植者买水权继续生产。这就完成了水资源向高价值农业领域自动流转。

政府为了保证交易公平、高效，出台了一系列的交易规则、监管办法来预防市场垄断、投机。跨区域的水权交易必须进行严格的水文影响评价，不能对第三方权益或者生态环境造成不良的影响。以市场价格信号为资源配置的依据，在很大程度上取代了传统的行政配给，从而大大提高了每一滴水的经济产出效率。

（三）水权回收与生态用水保障

澳大利亚政府追求经济效率的同时，也清楚地认识到过度开发利用会致使河流生态系统遭到灾难性的破坏。所以，在建立水市场以后，政府创造性的提出了一种新的介入方式，那就是政府作为市场主体，以大规模水权回购的方式补上历史欠下的生态账。联邦政府设立了一个资金池，像普通买家一样进入水权交易市场，从自愿出售水权的农户那里买水权。被回购的水权不再用于农业灌溉，转而成为环境水权，由专门的环境水持有者来统一管理、调度。

环境水权使用完全按照生态修复的客观规律。管理机构依照河流湿地的生态需水特性，在繁殖期或者枯水期，经由人工调控手段向下游放水，从而维持河道连通性，改良水质，守护生物多样性。依靠市场手段解决生态问题的做法，一方面可以避免强制行政征收所引起的矛盾，另一方面也可以给退出农业生产的农户提供合理的经济退出渠道。与此同时，政府投资改善灌区基础设施，把节省下来的输水损失变成环境用水，农业节水和生态修复互相促进。

二、墨累－达令流域的综合管理

（一）流域层面的权威管理机构

早期的流域管理依靠各州之间进行协商，但是由于地方利益的争夺，常常会造成决策效率低下、执行不力。为彻底改变这一状况，澳大利亚联邦政府制订了一项有历史意义的《水法》，并据此成立了墨累－达令流域管理局。该机构不同于以前的协调委员会，它是一个有独立法定职权的联邦机构，在全流域水资源统一规划、监测、监管方面具有比各州水利部门更高的权力。

流域管理局的主要职责就是制订全流域长期管理策略，并监督各州的水资源

计划是否符合规定。它有独立的数据采集、分析能力，不需要各州上报数据就可以独立掌握流域水文实况。执法上，管理局可以就违反流域规划的过度取水、非法截流等行为进行调查并予以处罚。把管理权上收至流域层面，有效抑制了各州各自为政、以邻为壑的短视行为，保障了国家水资源战略的刚性执行。

（二）流域综合规划的制定与实施

流域治理的关键手段就是制定并执行有法律效力的墨累 - 达令流域规划。规划制定过程中摒弃了以往仅仅依靠行政命令的做法，是在进行了详尽的科学研究、广泛的征求意见之后形成的。规划最重要的内容就是确定可持续导流限额，也就是在保证流域生态系统长期健康的情况下，人类可以从河流中取用的最大水量。该限值是根据历史水文数据、气候变化趋势和生态需水模型计算得出的，是全流域水资源开发利用的不可逾越红线。

规划的实施采取分阶段、分区域推进的方式。管理局把全流域分成若干个子集水区，给每一个子集水区确定减量目标和时间表。各州政府根据总规划修改本州水资源分配计划，并送交流域管理局审核批准后方可执行。州计划不能满足全流域可持续导流限额要求时，联邦机构可以否决并进行干预。联邦定标准，各州去执行，全程受监管的规划实施体系，保证宏观减排目标能够逐层落实到每一个取水口。

（三）州际间的水权分配与利益协调

跨行政区的水资源管理中，上游和下游的利益分配一直存在矛盾。墨累 - 达令河流域横跨昆士兰州、新南威尔士州、维多利亚州、南澳大利亚州，各方对水量的分配一直有争议。为了平衡各州的利益，澳大利亚就建立了一套用协议和规则来进行分配的机制。对于不同来水情况下的各州可分配水量比例作出了明确规定，同时严格保证南澳州最下游的生态基流。

流域内设立了部长级理事会这个高级别的协商平台，当出现特殊旱情或者突发状况的时候，各州水利部长在此框架内进行政治层面的谈判和妥协。同时为了协调好上游开发与下游保护的关系，联邦政府在财政转移支付和基础设施投资上对受限地区给予倾斜，用经济补偿的方式缓解由于水权减少造成的地方财政压力。把刚性分配规则同灵活的政治协商、经济补偿结合起来的模式，使州际摩擦成本大大降低，保持了流域治理体系的政治稳定。

三、应对极端干旱的适应性策略

在全球气候变化背景之下,由于极端干旱事件的发生越来越频繁且不可预测,澳大利亚也不再单纯依靠单一的工程抗旱手段,而是逐渐形成了包含技术、经济、管理等各方面在内的综合性应对策略。此策略目的是提高农业系统在水资源极度匮乏状况下的生存韧性,依靠主动调整 and 适应,将灾害造成的损失降到最低。

澳大利亚应对极端干旱的部分适应性策略

策略类别	具体措施	核心目标
技术优化	灌溉效率提升与节水技术普及	减少农业用水,提高用水效率
结构调整	农业结构调整与休耕补贴	适应水资源变化,优化农作模式
风险管理	干旱预警与应急响应体系	提前预警,快速有效应对灾害

见上表,澳大利亚在应对极端干旱方面采取了多维度策略。

(一) 灌溉效率提升与节水技术普及

技术创新属于对抗干旱的第一道防线。澳大利亚政府大力推动灌区现代化改造工程,用财政补贴的办法使农民逐渐淘汰落后的漫灌、沟灌等灌溉方式,全部推行滴灌、微喷灌等节水技术。同硬件升级相应的是智能管理系统的广泛应用,现代农场普遍安装了土壤墒情传感器、作物生长监测仪、自动化控制阀门等设备来实现按需供肥、按需供水。

为发掘更多的节水潜力,科研机构 and 农业推广部门研制出一套抗旱作物品种 and 农艺节水技术,在果树种植中推广根区交替灌溉技术,在棉花种植上采用覆盖保墒技术。政府设立了专门的“农场灌溉效率提高计划”,给农户提供一定的资金支持,条件是农户必须将节省下来的部分水权还给政府,作为环境流。既促进了技术更新换代,又实现了水资源的社会效益最大化。

(二) 农业结构调整与休耕补贴

当干旱严重到技术节水已经无法维持生产的时候,农业结构的战略性调整就成为必然的选择。澳大利亚农业部门指导农户根据水资源的长期可利用性调整种植结构,从高耗水的水稻、棉花等作物转向耐旱、高附加值的园艺作物或者旱作农业。在水资源极度缺乏的一年,市场机制会让农户做出理性的休耕决定,很多一年生作物的种植户会卖掉当年的水分配权,停止耕种以减少损失。

对因干旱造成收入急剧减少的农户,政府不采取简单的救济性拨款,而采取带有结构调整导向的补贴政策。通过“退出一揽子计划”,对于处于水资源不可

持续地区或者没有竞争力的农户，给予永远退出农业生产的资助，并且给予职业技能培训帮助他们转行。对暂时陷入困境但具有长期生存能力的农户，可以给予低息贷款或者家庭生计补贴来保障他们的基本生活需求，同时也要保护好那些重要的果树和多年的种植，以便旱情过后可以很快的恢复生产。

（三）干旱预警与应急响应体系

建立科学精准的预警体系，是实现主动抗旱的前提。澳大利亚气象局同水利部门合作，创建起世界范围内的水资源评价及干旱预警系统。该系统可以利用气象数据、土壤湿度、水库蓄量、河流径流预测等信息，提前数月判断各个区域是否会发生干旱。农户和管理者根据预警信息可以提前做好下一季度的种植计划、配水计划，避免盲目播种造成的巨大损失。

各州都制订了详细的极端干旱应急预案。当预警达到触发线的时候，预案就启动了，一系列强制性的限制措施也跟着执行起来，分级限制农业用水、暂停低优先级市政用水等等，甚至启用备用海水淡化厂或者再生水系统，以确保关键的人畜饮水安全。这套体系非常重视“关键的人类用水需求”，把最高优先级给城乡居民的基本生存用水，在最坏的情况下也能保证居民的基本生活用水。同时应急体系也包含心理疏导和社区支持服务，关注干旱给农村社区带来的心理冲击和社会问题，体现出了抗旱减灾中的人文关怀。

第五节 欧美农田水利创新模式的启示与借鉴

一、技术与管理模式的适用性

（一）大型灌区自动化对中国北方的借鉴意义

中国北方地区一直存在水资源短缺与农业灌溉需求旺盛的矛盾。欧美大型灌区成熟的自动化控制技术给我们提供了有效的解决途径。在美国西部和欧洲一些干旱地区，采用数据采集与监控系统，可以对几百公里长的渠道进行实时监控，并且可以进行精确的水量调度。该技术体系通过在重要的节点上设置高精度的传感器以及自动闸门，再加上中央控制室的智能算法，从而实现了从水源地到田间地头的全链条精准配水。对我国北方的大型灌区来说，采用该系统可大幅度降低人工巡渠的劳动强度和安全风险，同时依靠毫秒级的流量调节来减少输水过程中出现的跑冒滴漏现象，从而提高灌溉水利用系数。

对于中国北方井灌区和渠灌区并存的实际情况，在借鉴欧美自动化模式的时候还要注意“软硬兼施”。硬件设备的更新固然重要，但是与之相配套的决策支持系统也同样不可缺少。欧美国家在灌区管理时，常常会把气象预报、土壤墒情监测、作物需水模型等信息融合起来，从而制定出动态的灌溉计划。中国北方灌区推进现代化改造的时候，应当搭建起智能决策平台，把散落各处的监测数据变成易于理解的管理图谱。依靠云计算和物联网技术的融合实现按需供水、计费收费，从根本上改变传统“大水漫灌”的粗放式用水方式，促使农业用水方式从粗放型向集约化、精细化转变。

技术落地应用还要考虑维护成本以及操作门槛。欧美国家自动化设备一般要求高素质技术工人去维护，中国基层水利站点的普遍情况是人员老化、技术力量薄弱。因此，在引进自动化设备时应该选用耐用性强、操作界面友好、维修方便的机器，并设立区域性的专业技术服务中心。可采取政府购买服务或者与科技企业联手的方式，来应对基层管护力量不足的状况，保障自动化系统长久稳定地运转，让节水增效的效果落到实处，而不是沦为“形象工程”。

（二）水权市场建设的前提条件与路径选择

水权交易市场是水资源配置的高级形式。欧美一些国家在这方面经验更足，核心就是产权清楚、交易规则透明。例如澳大利亚墨累达令流域，美国西部部分州水权和土地所有权分离，可以单独交易。该机制促使农户以节水技术节约下来的水量指标来市场出售获利，从而自发形成节水动力。对中国来说，借鉴该模式的第一步就是完成农业水权的初始分配和确权登记，将集体用水权细化到每一个具体的用水户或者用水组织，明确每一滴水的归属，为后续的市场流转提供法理基础。

中国在建立水权市场时不能一蹴而就，要采取逐步推进的方式。欧美国家经验说明完备的计量设施为水权交易提供技术保障。只有精确计量之后，交易双方对于水量才有共同的认识，防止由于数据不明而产生纠纷。中国应该从水资源超载区或大灌区开始试点，完善量测水设施，建立统一的水权交易平台。市场培育初期，政府仍然需要起到主导作用，规定交易价格的上下限，防止资本过度炒作造成农业用水成本大幅上升，保障粮食生产安全。同时应建立水权回购机制，把一部分交易水量用于生态补水，达到经济效益和生态效益的双赢。

（三）自然解决方案在中国乡村水系治理中的应用

基于自然的解决方案成了欧洲农田水利治理的大路。它的本质就是依靠生态系统自身的功能来解决水资源管理问题，而不仅仅依靠混凝土等灰色基础设施。

传统水利工程多重视渠道硬化和裁弯取直，提高了输水效率，但是切断了水体与土壤、生物之间生态联系，造成生物多样性减少、水体自净能力降低。自然解决方案理念认为，在农田排水沟渠的建设中保留或者重建植被缓冲带，利用植物根系截留农田退水中氮磷营养盐，形成“生态沟渠 - 人工湿地 - 调蓄塘”复合生态系统。既能有效地控制农业面源污染，改善农村水环境质量，又能给两栖动物和鸟类提供栖息地，恢复乡村田园的自然景观，与当前中国推行的生态文明建设和美丽乡村战略不谋而合。

自然解决方案理念应用到中国的乡村水系治理上，就要改变以往工程至上的传统观念。规划设计时要充分尊重河流沟渠的自然状态，避免过度裁弯取直和全断面硬化。使用透水性强的材料代替传统的混凝土衬砌，提高水体的渗透、呼吸功能。在南方水网地区，可以结合农田建设，在低洼处建雨水滞蓄湿地，既能减轻因暴雨造成的农田渍涝，又可做枯水期的补充水源。

自然解决方案的应用还要同乡村产业发展相结合。生态化水系治理可优化乡村整体环境质量，给发展生态农业、休闲旅游等绿色产业赋予条件。挖掘水利工程的景观价值、文化价值，把单一的农田水利设施变成集灌溉排水、生态涵养、观光休闲为一体的综合性生态资产，真正实现“绿水青山”变“金山银山”。

二、政策与法律框架的启示

（一）强化顶层设计与法律保障

欧美国家在农田水利管理上普遍实行严格的依法行政，其法律体系呈现出层次分明、权责清晰的特点。

1. 法律体系的系统性，专项性。欧盟的水框架指令确立了流域管理的总原则，对农业用水部分作出了具体的附属条款，就灌溉工程的建造标准、水质保护和违法惩罚做出规定。虽然中国已经有《水法》等基础性的法律，但农田水利建设管护方面的专项立法还需进一步细化。借鉴欧美国家的经验，加快农田水利条例的制订和完善，并将工程产权归属、管护主体责任、经费筹措渠道等问题用法律的形式确定下来，消除政策的不确定性，给基层水利工作提供有法可依的保障。

2. 执法监管的刚性约束，这是法律效力得以实现的保证。发达国家对于破坏水利设施、非法取水等行为处罚严厉，并且有专门的水务执法队伍进行巡逻。中国完善立法之后要加大执法力量下沉力度，实行跨部门联合执法制度，严厉打击侵占河道、破坏灌溉设施等违法行为。树立法律权威、加大违法成本、引导用水主体自觉遵守水利管理秩序、从源头上防止“重建轻管”，保证农田水利设施安全完好。

（二）运用经济杠杆激励节水行为

欧美国家在推进农业节水的时候，很少依靠行政命令，多用价格补贴、税收优惠等经济手段来促使农户自觉改变用水行为。基本原理就是把外部性成本内部化，用利益补偿来减少农户的节水改造成本。政府在推行高效节水灌溉项目的时候，一方面会给农户买设备补贴钱，另一方面会按照农户真实的节水成效，给农户额外的运营奖励，让节水变成一种赚钱的生产方式。

价格机制是调节用水需求最灵敏的信号。一些水资源匮乏的欧美国家实行阶梯水价和季节性水价相结合的制度。枯水期或者用水高峰期适当提高水价，抑制不必要的浪费；丰水期则实行低价政策。中国可以参照农业水价综合改革，实行更加灵活的动态定价。对使用滴灌、喷灌等先进灌溉技术的农户实行水价优惠或者定额内精准补贴；对超定额用水的粗放经营者实行累进加价制度。

金融工具创新属于经济激励的组成部分。欧美国家设立水利专项基金、发行绿色债券等方式，引导社会资本参与农田水利的建设。中国可以借鉴其做法，发展节水贷、水权质押等绿色金融产品，解决新型农业经营主体购买节水设备、修缮水利设施时遇到的融资难题。利用政府贴息、担保等方式降低社会资本进入的门槛，形成政府主导、市场运作、多元投资的良好机制。

（三）建立跨部门、跨区域的协调机制

水资源具有流动性，因此水资源管理必须超越行政区划的限制，实行流域管理。欧美国家在流域管理上有很多协调的经验，莱茵河保护委员会、田纳西流域管理局等都是跨部门、跨区域的典范。

中国长期存在“九龙治水”的现象，水利、农业、自然资源、生态环境等部门在农田水利管理中存在职能交叉，容易出现管理真空或者重复建设。效仿欧美模式，建立强有力的流域协调机构已是迫在眉睫。这样的机构不能是松散的联席会议性质的组织，而应当在规划编制、水量调度、监督考核等各个方面赋予其实际权力。

从微观上来讲，应该建立涉水信息共享机制。打破各部门的数据孤岛，使水文气象、农情监测、土地利用等数据可以互相访问。经过创建统一的信息管理平台，各个部门可以依靠同样的数据来做出决定，防止由于信息不对等引发政策矛盾。还要建立跨区域利益补偿机制，上游地区为保护水源所做的牺牲，应当由下游地区通过财政转移支付或者对口支援等方式予以补偿，以调动全流域各方参与农田水利建设和管护的积极性。

三、文化与社会背景的差异与调适

（一）私有制与集体所有制下的管理差异

欧美国家的农田水利模式是在土地私有、大农场经营的基础上建立起来的。农场主拥有土地的永久产权，因此有强烈的动力去建设和维护灌溉设施，因为这些投资会直接带来资产增值。稳定的产权结构使得使用者自建、自管、自用的模式高效运转。中国实行农村土地集体所有制，农户通过承包经营权取得土地使用权，地块细碎化现象普遍。因为存在差异，所以单个农户对水利设施的投资意愿不高，也无法单独承担大型设施的维护费用。

就这种根本性的差别而言，中国在借鉴的时候不能指望原子化的农户自发地投入。必须要加强村集体经济组织对农田水利管护工作统筹的作用。通过土地经营权的适当流转或者托管，培育种粮大户、家庭农场、农民合作社等新型农业经营主体，提升土地经营的规模化程度，模拟出类似大农场的投资激励环境。同时要创新产权制度，把农田水利设施的所有权确权到村集体或者用水合作组织，赋予其合法的资产处置权和收益权，解决“公地悲剧”。

对于不能实现规模化经营的农户地区，应该探索统分结合的管护模式。骨干工程由政府或者集体管护，田间工程依靠村规民约确定农户的维护责任。或者引入社会化服务组织，由农户支付费用购买灌溉服务，将管护责任转嫁到专业的第三方机构上，解决集体所有制下责任主体缺位的问题。

（二）农民组织化程度与合作文化

欧美国家用水户协会多为农民自愿自下而上建立的自治性组织，有很强的契约精神与合作文化传统。权责分明、参与意识强，用水纠纷通过民主协商解决。

反观中国，尽管各地都建立了用水户协会，但有些组织的行政色彩较重、农民参与度不高、运作形式化等问题还仍然存在。中国传统的乡土文化中，宗族关

系、熟人社会的伦理规范起着重要的作用，这和国外的契约文化有很大差别。因此，在培养中国的农民用水合作组织时，不能照搬国外的章程和选举程序，而要充分发挥本土社会资本的作用。

可以依托村“两委”或者农村红白理事会等已有的权威组织架构，把用水管理职能融入其中。依靠乡村熟人社会的舆论约束力来监督偷水、破坏设施等不文明行为。同时重视培育农村水利能人或乡贤作为带头人，依靠他们在村民中具有威望和号召力，推进合作组织的有效运作。逐渐使农民由被动接受管理变成主动参与治理，形成符合中国乡土的现代合作文化。

（三）结合国情进行本土化改造

欧美模式的本土化改造，最终还是要找到一条符合中国“大国小农”国情和社会主义市场经济体制的特色道路。这就要求我们在吸收外来经验的时候，坚持辩证思维，取其精华，去其糟粕。

一方面要吸收它的技术理性以及标准化的管理优点。积极引进先进的节水灌溉技术、自动控制技术、精细化管理流程等，提高中国农田水利工程科技含量和运行效率。利用现代信息技术手段来克服传统的人工管理低效的状况，推动基层水利管理向数字化方向发展。

同时还要克服它单纯依靠市场调节和私人治理的局限性。充分发挥中国特色社会主义制度集中力量办大事的优势，保证政府在农田水利建设中起主导作用，特别是在公益性强、投资回报周期长的骨干工程建设方面，政府财政投入不可缺少。

本土化改造还要体现多元模式并存。中国地大物博，南北差异明显。经济发达的沿海地区可以借鉴欧美市场化运作的模式，推行工程物业化管理；经济欠发达的中西部地区应更多地保留政府兜底、集体组织动员的作用，实行公益性岗位与群众义务投劳相结合的模式。

最终目的就是把欧美先进的理念与中国制度优势、文化传统结合起来，创新出具有中国特色的农田水利管护新模式。建立以政府为主导，市场运作，社会参与，党支部、合作社、农户三方相结合的管理机制。融合不是简单的物理叠加，而是像化学反应一样产生有机结合，目的是建立适应现代农业发展需要，符合中国乡村治理结构的农田水利保障体系，为国家粮食安全和乡村振兴战略提供强有力的支撑。

欧美农田水利模式借鉴要点

模式类型	欧美经验核心要点	中国本土化借鉴方向
技术管理	精准化、自动化、市场化为主导	大型灌区自动化： 北方地区引入 SCADA 系统，兼顾“软硬”，构建智能决策平台，选用易维护设备并提供专业服务。
	健全计量设施，动态定价机制	水权市场建设： 明晰水权，分步试点，完善计量，政府初期引导价格，建立回购机制。
	基于自然的解决方案	乡村水系治理： 推广生态沟渠、人工湿地，尊重自然，透水材料替代硬化，结合乡村产业发展。
政策法律	法律体系系统性、专项性，严格执法	顶层设计与法律： 加快农田水利条例修订，明确产权责任，加强执法力量，打击违法行为。
	经济杠杆（补贴、优惠、水价）	激励节水行为： 推广节水补贴、运营奖励，实行阶梯 / 季节性水价，创新绿色金融产品。
	跨部门、跨区域协调机制	协调机制： 成立强有力流域协调机构，打破数据孤岛，建立跨区域利益补偿机制。
文化社会	土地私有，大农场，使用者自治	私有制与集体所有制： 强化村集体统筹，培育新型经营主体，创新产权制度，骨干工程政府 / 集体管护，田间工程村规民约或社会化服务。
	用水户协会，契约精神	农民组织化程度： 依托村“两委”等现有组织，利用熟人社会舆论约束，培养农村水能人。
		本土化改造： 吸收技术理性，发挥政府主导作用，体现多元模式并存，结合中国制度优势与文化传统。

第四章 非洲及拉美地区农田水利特色案例

第一节 埃及尼罗河流域灌溉系统

一、古代灌溉系统与现代阿斯旺大坝

（一）传统畦灌向常年灌溉的转变

在漫长的古代历史中，埃及的农业主要依靠一种叫做畦灌的传统系统。这与尼罗河的自然水循环规律不谋而合：每当夏末秋初洪水来临时，农民就挖沟引水，将河水引入被堤坝圈起来的广阔田地里。水分在田块中滞留数周，等到土壤充分吸收水分、沉积下肥沃的淤泥之后，多余的水量就被排回河道，农民随即在湿润的土地上播种小麦、大麦等冬季作物。一年一熟的耕作方式下，收成完全取决于天意，洪水大了涝，小了旱，农业收成具有很大的不确定性。

十九世纪初，穆罕默德·阿里帕夏推行现代化改革的时候，埃及便开始了摆脱自然节律的束缚，朝着常年灌溉体系的方向前进。为了种植棉花、甘蔗等需要夏季供水的经济作物，工程人员在尼罗河主干道及支流上建了许多拦河坝和调节闸，通过抬高水位来引开新开挖的深水渠道。该项工程举措使尼罗河水可以全年不断流入农田，彻底改变了千百年来只能种植一季作物的历史。耕作制度由粗放的一年一熟转为集约的一年两熟甚至三熟，土地复种指数成倍增长，为埃及人口激增提供基本粮食保障，也为现代埃及灌溉农业奠定物理基础。

（二）阿斯旺高坝的效益与争议

20 世纪中期，由于人口压力和能源需求的不断增长，埃及政府在苏联的帮助下修建了著名的阿斯旺高坝。这座宏伟的工程把尼罗河的水全部拦蓄在纳赛尔湖里，形成一个巨大的多年调节水库。高坝的修建使尼罗河下游不再发生洪涝灾害，埃及对水资源的控制权得到了完全的保障。它不但给农业提供稳定的灌溉水源，把原本的季节性耕地全部变成了常年灌溉地，而且通过水力发电支撑着埃及的工业化进程，在干旱年份更是成为国家水安全的“战略银行”，有效避免了历史上多次发生的饥荒悲剧。

但这个超级工程所造成的生态和社会的负面影响也不能忽视。大坝阻隔了上游高原的冲刷淤泥，使下游农田缺少了天然肥料的补给，农民不得不大量使用化学肥料，长期使用就会造成土壤板结、退化。泥沙被截留，尼罗河三角洲缺少沉积物补充，海岸线在海水侵蚀下不断后退，海水倒灌造成沿海耕地次生盐碱化越来越严重。长期灌溉造成地下水位上升，排水问题成了农业可持续发展的一大障碍，政府后期虽然兴建了大批农田排水工程，但是人和自然的较量还远未结束。

（三）灌区渠系的网络化与分级管理

现代埃及的灌溉系统呈现一种高等级树状结构，一方面可以保证水流传输效率，另一方面又可以区分出不同的管理权。从尼罗河干流引水的第一级主干渠规模宏大，甚至可以通航，之后水流被分配到二级支渠，再进入三级斗渠，最后流入末级田间渠道，当地称之为迈斯卡。由多层次形成的输水网络遍布河谷、三角洲区域，总长度数万公里，是埃及农业的生命线。

1. 在管理体制上采取埃及政府和农户双管齐下的办法。水利灌溉部对主干渠、支渠等主要工程有绝对的管理权，进行水量的宏观调度、大型工程的维修、水质的检测等工作，保证水资源在宏观上公平合理地分配。

2. 到末端渠道层面的时候，管理责任就下放到了基层。为了提高用水效率，减少财政负担，埃及大力发展用水户协会，把迈斯卡层级的管理权下放到农户。农户自己选举出协会代表来协调灌溉轮次、管理田间渠道、解决邻里间的水事纠纷，参与式的管理模式在一定程度上缓解了末端管理缺失的问题。

二、水资源高效利用与节约

面对水资源的刚性供给约束和不断增大的需水缺口，埃及发现单靠工程手段增加供水已经不能够满足需求。近几年来，该国的工作重心转为需求侧管理，试图依靠技术升级、工程改造、经济杠杆的综合使用，提高农业用水效率和效益。该方面转型有技术升级、制度改革两方面内容，是埃及走向农业现代化重要部分。

（一）滴灌等现代节水技术的推广

尼罗河谷和三角洲的“旧地”灌区，受长期形成的耕作习惯和土地细碎化的影响，大水漫灌仍然是主要的灌溉方式，水资源浪费严重。为了改变这种情况，埃及政府在沙漠开垦的新地灌区实行了强制性的节水政策。法律规定新垦土地一律使用滴灌、喷灌等现代高效节水灌溉方式，不得采用传统的地面灌溉。用这些

技术给作物根系直接送养分和水分，减少了蒸发和深层渗漏的损失，沙漠种植才成为可能。

传统灌区推广技术会遇到许多社会经济障碍。小农户缺少资金来购买昂贵的节水设备，对新技术的维护管理能力也比较弱。为此埃及政府同国际组织合作开展了一系列示范项目，给农民改造灌溉系统提供设备补贴、低息贷款、技术培训。在种植水果、蔬菜等高附加值作物的地区，已经取得了一些滴灌技术的成效，既节约了用水又提高了作物的产量和品质。但是对种植小麦、水稻等大田作物的农户来说，向现代微灌的转变还是一个漫长而艰难的过程。

（二）渠道衬砌与防渗改造

埃及庞大的灌溉渠系以土渠为主，土质松散、渠道老化，输水时渗漏损失很大。再加上渠道内杂草丛生严重妨碍水流速度，使输水效率下降。为挽救稀缺的淡水资源，埃及启动了国家渠道修复、防渗衬砌等计划。该计划主要是对核心灌区的主要支渠以及迈斯卡进行硬化处理，用混凝土预制板、土工膜等对渠道的底部和边坡进行衬砌。

该工程一完工就产生了明显的效果，衬砌后的渠道表面光洁，水流速度快，灌溉水从田头流入地头的时间由原来的几小时缩短为几十分钟，轮灌周期大大缩短，灌溉保证率提高。防渗处理有效阻止了渠道周围土壤的次生盐碱化，减少了由于漏水造成的地下水异常抬升。渠道硬化后消除了杂草生长的土壤环境，降低了清淤除草的维护成本，改善了农村地区水环境卫生状况，降低了血吸虫病等水媒疾病传播的风险。

（三）灌溉水费制度改革

在伊斯兰文化传统里，“水是真主的恩赐，神圣不可买卖”这一观念在埃及扎下根来，于是灌溉用水长期以来免费供应。农民只管田间的扬水燃料费，而巨大的水利工程建设与维护费用全部由国家财政来承担。但随着财政压力增大和水资源日益匮乏，“大锅饭”式的供水方式已经无法继续下去，建立合理的水价机制成为提高用水效率、实现工程可持续管理的必然选择。

埃及政府在推行水费改革的时候非常小心。官方不会直接使用“水价”这个敏感词，多用“成本回收”“服务费”这样的词。在一些由国际贷款支持的灌溉改良项目中，政府开始对受益农户收取部分工程改造成本以及以后工程维护费用。收费不是按照用水量来计算的，而是按照耕地面积分摊。但是即使是这样温和的

改革也遭到了农民的强烈反对，很多农户认为这是政府推卸责任。

目前，学术界和政策制定者认为造成水资源浪费的主要原因是缺乏经济杠杆，必须建立反映稀缺程度的水价体系；但从社会稳定和农民承受能力出发，政府不能贸然实行全面的计量收费。为此，政府一方面加大对违规用水、超定额用水的处罚力度来约束用水行为，另一方面又试图通过增加土地税的方式收回一部分水利工程建设投资，并寄希望于用水户协会能自行筹集末级渠道的养护资金。

三、流域国际合作与挑战

（一）《尼罗河流域倡议》的框架与合作

为了打破尼罗河流域国家长期互不信任的僵局，寻求共赢的发展道路，在世界银行等国际机构的斡旋下，1999年尼罗河流域国家共同发起成立了尼罗河流域倡议。这是一种过渡性的区域合作机制，试图创建一个全流域的对话平台，交换水文数据，开展联合研究，推进跨国水利项目，从而慢慢形成起各国之间的互信。

《尼罗河流域倡议》主要构成

组成部分	目标	核心内容
共享愿景项目	宏观层面，形成共同认识	环境行动、电力贸易、水资源规划等
辅助行动项目	聚焦子流域具体需求	东尼罗河流域和赤道湖区工程投资合作

根据尼罗河流域倡议主要构成，NBI框架设计分成了“共享愿景项目”和“辅助行动项目”。前者从宏观角度出发，致力于形成各国对流域可持续发展的一致认识，包括环境行动、电力贸易、水资源规划等；后者从东尼罗河流域和赤道湖区两个子流域的具体需求出发，推动实际的工程投资合作。在这样的框架之下，各国的技术官员定期会面，交换水情信息，在流域环保、防洪预警等非敏感领域取得了一些成果。尽管NBI并没有解决水权分配的问题，但它也至少给各国提供了一个能够避免直接对抗的、可以坐下来进行交谈的机制性平台。

（二）埃塞俄比亚复兴大坝引发的争端

近些年来，尼罗河流域最引人注目的事件就是埃塞俄比亚在青尼罗河上修建的“复兴大坝”。这座非洲最大的水电站被埃塞俄比亚看作是国家复兴的标志，目的在于解决国内的电力短缺问题并出口创汇。但对下游的埃及来说，青尼罗河占到尼罗河干流80%以上水量，复兴大坝的兴建被视作对其国家生存底线的直接威胁。

争端的焦点主要是大坝的蓄水方案以及干旱年份的调度规则。埃及方面担心埃塞俄比亚如果在短时间内将巨大的水库蓄满，会导致下游水量急剧下降，造成埃及农业和人民的重大损失；遇到连续干旱年份，如果不放水，阿斯旺大坝的调节能力就会枯竭。双方就蓄水年限、枯水期流量释放标准、争端解决机制等技术问题反复、长时间地进行了谈判。埃塞俄比亚坚持自己主权范围内的开发权利，不签署任何会限制其未来发展的永久性协议；埃及引用历史协议来要求保障它的“既得水权”。

（三）未来水资源分配的博弈与展望

尼罗河流域的水资源争端会愈演愈烈。气候变化模型表明，该地区的降水波动性会增加，极端干旱、洪涝灾害出现频率将增大，水管理的不确定性也随之增大。流域内所有国家人口都在迅速增长，对粮食、能源的需求呈指数级增长，水资源争夺已经从简单的水量分配，发展为涉及到粮食安全、能源安全等综合生存空间的争夺。

唯一的方法就是把零和博弈变成区域一体化合作。未来的水资源分配不能仅仅依靠水量的物理分割，而应该转向利益共享。跨境电网，埃塞俄比亚水电低价卖给埃及，换取埃及在农业技术和资本投资方面的援助；虚拟水贸易，根据各国比较优势安排农作物种植，以实现整个流域水效益的最大化。虽然新的全流域合作条约实现起来依旧困难重重，但是从技术层面和经济发展层面的务实合作角度看，可以为尼罗河流域的和平、繁荣开辟出一条狭窄却实际可行的道路。

第二节 巴西雨养农业区水利设施建设

一、塞拉多草原的农业开发奇迹

（一）从稀树草原到“世界粮仓”的转变

二十世纪七十年代以前，由于塞拉多地区土壤酸性大、有机质缺乏，加之雨量分布不均匀，普遍认为该地不适合发展农业。随后，巴西政府开始推行大规模的农业开发计划，其核心就是用科学的方法来解决“水”和“土”的限制。科研机构研发出适合热带气候的大豆新品种，大力推广石灰撒施技术改良土壤酸性，使作物根系能深扎下去，充分利用深层土壤水分。与此同时农业基础设施建设也

跟上了，道路、电力、初级水利网的铺设使这个地区地理上被隔绝的状态被打破。

随着农业开发，塞拉多出现以大豆、玉米、棉花为主的规模化种植。其成功之处在于准确把握了自然降雨的规律，并且人工辅助灌溉起到了很好的补充作用。雨季中，充沛的降雨量可以满足作物生长大部分的需要；在旱季或者由于气候异常造成的枯水期里，农田水利设施起决定性作用。经过几十年的艰苦奋斗，这片曾经贫瘠的稀树草原不仅做到了粮食自给自足，还成为了世界上重要的农产品出口基地，这其中水利支撑体系的贡献功不可没。

农业生产布局的改善，要靠水资源的合理规划。开发初期规划者就认识到要根据水资源的承载能力确定种植规模。利用遥感技术和水文监测网，可以对区域内水资源状况有全面的了解，为农民合理安排播种时间、灌溉计划提供依据。科学的宏观调控使塞拉多地区农业产出最大化，同时避免了其它地区因为过度开发造成生态崩溃，为世界热带农业的开发提供了一个重要的范例。

（二）小型水库与地下水的开发利用

不同于亚洲各国大多采用政府主推的大规模灌溉渠系，巴西塞拉多地区水利设施建设更偏向于分散化、农户自建。由于该地区地势平坦、土地权属集中，大型农场主一般在自家土地上修建小型水库或者拦水坝。这些小型蓄水设施可以将雨季的地表径流储存起来，变成旱季可以使用的灌溉水源。分散的蓄水方式既减轻了国家财政对大型水利工程上的负担，又赋予农业生产者更大的用水自主权，使他们可以根据作物的生长周期来灵活地调配水源。

地下水开发是该地区农业水利的又一个主要支柱。塞拉多地区有很多含水层，给支轴式喷灌系统的广泛使用提供了有利的条件。在广袤的农田里巨大的圆形喷灌机昼夜不停地运转，从地下深处抽水给作物整个生长期提供精准供水。灌溉方式自动化程度高、覆盖面大，使水资源的利用效率大大提高，实现了当地一年两熟甚至三熟的耕作制度，使土地产出率得到提高。

虽然地下水资源较为丰富，但是无序开采还是引起了担忧。因此巴西实行了严格的水资源使用许可制度。农户在钻探水井、安装灌溉设备前要向环保部门申请许可证，证明用水量不会给含水层带来不可逆的损害。监管部门会定时观测地下水水位的变动情况，如果出现不正常的急剧下降趋势，就会马上实施限制取水等相关举措。以开发和保护并重的管理理念来保证地下水资源的可持续利用，防止因为短期的利益而破坏长期的发展。

技术创新对提高灌溉效率起着至关重要的作用。现代化灌溉设备大多配置有土壤湿度传感器以及小型气象站,能按照实时数据自动调整喷水量以及喷灌时间。有些先进的农场甚至采用变量灌溉技术,根据地块内各个区域土壤质地以及作物长势的不同来实行精准灌溉。既能节省宝贵的水资源、能源费用,又可以防止因灌溉量过大造成肥料流失、土壤盐碱化等生态污染。

（三）免耕保护与水土保持

塞拉多地区高温,土壤水分蒸发快,单靠灌溉不能满足作物的水分要求,因此保水和供水同等重要。免耕法(又称零耕技术)作为新的耕作方式在这里得到了广泛的推广。核心就是取消传统的翻耕环节,直接在覆盖有前茬作物秸秆的土地上播种。厚实的秸秆覆盖层像给大地盖上了一床被子,有效地阻止了阳光直射到土壤上,从而大大降低了地表温度和水分的蒸发速度。

秸秆覆盖层有很强的水土保持作用。多暴雨的热带地区,若没有植被覆盖保护,就会极容易被雨水冲刷走掉,造成耕地退化和河床淤积。免耕表面留有植物残茬,能起到缓冲雨滴冲击力的作用,减缓地表径流的速度,增加雨水入渗量。农田土壤就变成了一个巨大的“海绵”,可以充分吸收并储存雨水,大大提高自然降雨的利用率,减轻人工灌溉的压力。采用免耕技术的农田土壤含水量比传统耕作的农田要高,因此作物的抗旱性也相对较高。

除了保水以外,免耕还有利于土壤生物多样性的恢复。长期免耕给蚯蚓等土壤动物、微生物创造了良好的繁殖条件,它们在土壤里形成复杂的孔隙网络,从而改善了土壤的通气透水性。就形成了一个良性循环,土壤结构逐年变好,肥力年年上升。对巴西的农户来说,免耕不只是农业技术,而且是水资源管理哲学,它仿照自然生态系统运行方式,让农业生产同水土资源保护达成和谐共生。

二、家庭农业与土地改革项目

（一）国家土地改革署的水利配套

巴西国家殖民和土地改革研究所是土地改革的主要组织者,也是安置点农户基础设施配套的主体。水利设施缺乏一直成为许多新建农业定居点生产发展中的主要障碍。为此该机构设立专项资金来钻探公共机井、建设集中供水站以及铺设输水管网。这些基础设施既解决了农户生活用水问题,也为庭院经济和小规模灌溉农业的发展打下了基础,使过去荒地具备了生存和生产的基本条件。

项目规划、施工实施阶段资金分散、施工难度大、后期管理缺位等问题比较常见。为了提高资金的使用效益，开始推行“需定建”的建设方式，即按照定居点的地理环境、水资源分布状况和农户的种植意愿，量体裁衣式地制定水利工程施工方案。在地下水资源缺乏的地方，重点建设雨水收集窖、地表蓄水池；靠近河流的地方，主要建设小型泵站、引水渠。这种因势利导的做法，很好地提高了水利设施的实用率与覆盖面积。

但是硬件设施建好只是第一步，如何保证硬件设施长期稳定运行更加重要。过去由于缺乏有效的维护手段，很多公共水利设施在建成之后不久就因为故障而停止使用，造成了巨大的资源浪费。为此，政府开始实行“建管并重”的政策，在项目立项时就确定了产权和管护责任。与地方政府和农户组织签订协议，把水利设施的日常维护权交给受益主体，提供必要的技术指导和维修资金补贴，探索出适合小农户的水利设施管护新途径。

（二）社区主导的小型灌溉项目

1. 在很多偏远的家庭农业社区，靠自上而下的政府项目很难做到完全覆盖，于是社区主导的小型灌溉项目出现了。这些项目一般是由当地的农户协会或者合作社发起，动员社区内部的劳动力、资金以及外部非政府组织的帮助来建设、管理灌溉设施。这种模式极大地激发了农户建渠的积极性、主动性，修建的水利设施更符合实际需要，修建成本也大幅降低。

2. 社区项目所用技术一般为成本低、易维护的适用技术。微灌、滴灌技术由于节水、高效，在蔬菜、水果的种植中广泛使用。农户用当地的塑料管、旧储水罐等制作简易灌溉系统。尽管这些设施比较简陋，但是它们实用性很强，能大大提高农作物的产量和品质，帮助小农户在少量的土地上取得更好的经济效益，从而提高生活水平。

3. 社会资本对于社区水利项目运作起到核心的作用。邻里之间关系亲密，共同的利益促使形成了有效的水资源管理规则。社区成员用民主协商的方式来制定用水分配方案、设施维护计划，约定每户的灌溉时间以及各自的义务。社区内部还有一套行之有效的监督和惩罚制度来处理违规行为。依靠互信互助的社会组织形式，弥补正式制度的不足，保证小型灌溉系统长期良性运转。

（三）技术培训与信贷支持

对于资金和技术双重缺乏的农户来说，只拥有水利设施硬件是不足的，必须

要有相应的信贷支持和科技培训。巴西政府推行的加强家庭农业国家计划就是该领域内政策典范。该计划给水利基础设施建设设置专门低息贷款额度，使农户用较低成本取得水泵、管道、喷灌设备的资金。金融工具参与进来大大降低了小农户使用现代灌溉技术的门槛，激发了农村水利建设内生的动力。

与之相配的一整套技术推广服务也开始实行了。各州的农业技术推广企业派出了大量的技术人员到田间地头，教农户怎样安装、调试、保养灌溉设备。更重要的是，他们教农户怎样科学灌溉，按照作物需水规律，土壤墒情，水肥一体化的原则来灌溉。经过长时间的“知识输血”，农户虽然学会了设备的操作，但是仍旧保持着以前的用水观念，没有学会用最少的水获得最大的产出，从而没有实现从粗放用水到集约用水的转变。

信贷和技术融合产生的是 1+1 大于 2 的效果。银行放贷的时候，常常会要求农户参加培训，技术人员会对项目可行性加以评判。这种捆绑使信贷资金真正流入有潜力的生产领域，也提升了项目的成功率。很多曾深陷贫困的家庭农户都是靠这“组合拳”建起了自家的稳定灌溉系统，农作物产量翻了一番，走出贫困泥潭，充分体现了政策协同支持的力量。

三、生物燃料与水资源竞争

（一）甘蔗乙醇种植对灌溉的需求

甘蔗是一种高耗水作物，在生长过程中要消耗大量的水。为了达到更高的生物量积累和糖分转化率，单靠自然降雨已经不能满足现代甘蔗种植的要求，在旱季或者降雨不稳定的年份里更是如此。因此，补充灌溉成了提高甘蔗单产、保证乙醇原料稳定供应的主要方法。圣保罗等甘蔗主产区的大型种植园大多都有完善的灌溉系统，主要通过抽取河水或者地下水进行喷灌或者滴灌，高强度的用水方式使得甘蔗产业成为当地的用水大户。

除常规灌溉用水外，在甘蔗栽培中还普遍实行“救命水”灌溉。在极度干旱的关键生长期里，利用少量灌溉来维持作物的生命力，防止由于缺水造成作物枯死或者严重减产。虽然每次的取水量小，但是大面积种植下总取水量还是很大的。为了解决乙醇生产过程中产生的废液——酒糟的处理问题，种植园一般将酒糟和灌溉水混合之后，再通过施肥灌溉系统回用于农田。虽然实现了废物资源化利用，但是对灌溉系统的耐腐蚀性和防堵塞性提出了更高的要求，同时还要严密监测它

对土壤和地下水可能造成的潜在污染。

甘蔗种植边界的扩大加重了水资源的压力。由于传统的种植区土地已经饱和，甘蔗种植向塞拉多等生态脆弱区扩展。这些地方本身降雨就集中，水资源又比较匮乏，大规模的甘蔗种植引入，无异于在原本就不平衡的水资源供需线上又重重加了一块雪。为了保持产量，新垦区往往需要投入更多的灌溉成本，造成局部地区地下水位下降，还会和下游生态用水、生活用水产生矛盾，使水资源短缺问题愈加严重，引起社会各界的高度关注。

（二）能源与粮食安全的水资源平衡

生物燃料产业的迅速发展，不可避免地 and 粮食作物产生了水资源的竞争。在土地和水资源总量有限的情况下，将大量水资源用于种植甘蔗等能源作物，必然会挤占大豆、玉米等粮食作物的用水份额。竞争不单是实体水资源的争夺，也是对灌溉基础设施投资倾斜的争夺。资本和政策过分偏向能源农业，就会使粮食生产部门的水利投入减少，进而影响国家粮食安全。

为了协调以上的矛盾，巴西建立农业生态区划制度。根据各地的气候、土壤、水资源等条件来科学地划定甘蔗等能源作物的适宜种植区、限制种植区和禁止种植区。在亚马逊雨林边沿、潘塔纳尔湿地等生态敏感地区，禁止甘蔗种植，从而保护水资源以及生物多样性。在粮食主产区，通过立法限制甘蔗种植面积占比来保障粮食作物用水使用权优先权。从源头避免能源作物和粮食作物在用水上产生无序竞争，是空间控制方法。

流域水资源委员会从微观层面上起到了很重要的作用。这些机构是由政府、企业、农户、民间组织等组成的，负责制订流域内水资源分配方案。枯水期或者水资源紧缺的时候，委员会依照先保生活用水、后保生产和生态的原则来调节农业用水。能源作物灌溉需求与粮食作物发生冲突时，一般会通过协商的方式采取错峰用水、有偿转让水权等市场化或者行政化手段，寻找各方利益的最大公约数，在能源发展与粮食安全之间努力寻找一个脆弱的平衡点。

生物燃料与粮食生产水资源分配挑战及对策表

挑战方面	具体表现	政策对策	实施效果
水资源竞争	大规模能源作物种植挤占粮食作物用水	农业生态区划、限制种植区	减少无序竞争，保护敏感区
生态压力	种植边界扩大，局部水资源短缺、水位下降	水资源使用许可制度、地下水监测	避免过度开采，保障可持续利用
管理协调	能源与粮食生产部门用水需求冲突	流域水资源委员会协调、优先保障生活用水	促进利益平衡，优化用水效率
废液处理	酒糟回用对灌溉系统及环境的潜在影响	监测污染，提高灌溉系统要求	资源化利用，降低环境风险
区域发展	能源作物向脆弱区扩张，加剧短缺	严格禁止生态敏感区种植	保护生态，避免水资源恶化

如表所示，巴西在发展生物燃料的同时必须面对水资源保护问题，为此已经采取了多项政策措施。

（三）可持续发展的政策导向

1. 为了应对水资源危机，巴西政府制订了一系列有利于生物燃料产业可持续发展的法规。RenovaBio 在碳减排目标之外还要将水资源利用效率引入生物燃料的认证体系。乙醇生产企业如果能够证明其原料种植过程中使用了节水灌溉技术，并保护了水源地生态，那么就可以获得更高的碳信用评分，在市场上获得经济溢价。利用市场手段倒逼产业链上下游主动改善水资源管理水平。

2. 水源地保护的法律法规越来越严格。新的《森林法》规定农场要保留一定比例的原生植被作为法定储备林，河流沿岸和泉眼周围要设永久保护区。植被形成天然的生态屏障，可以涵养水源、过滤农田径流中的污染物，保持河流生态系统健康。对于违反相关规定农业生产者不仅会受到巨额罚款，而且还会失去农业信贷的支持，强有力的法律约束为水资源的可持续利用筑起了坚实的底线。

3. 政策导向由原来的单一资源管理转向现在的生态系统服务付费。一些地方开始建立水资源生态补偿制度，对实行雨养农业、积极进行水土保持或者主动放弃种植高耗水作物的农户给予经济补偿。这既是对其生态效益的认可，又是对其因为节水而产生的经济损失的补偿。通过塑造正向激励机制来培育全社会的节水护水文化，在生物能源时代给巴西农业绿色转型提供长久助力。

第三节 墨西哥高原地区水利工程特色

一、古代玛雅与阿兹特克水利智慧

（一）奇南帕系统

奇南帕，被称为“漂浮的花园”，是阿兹特克人在墨西哥谷地浅水湖泊上创造的一种高产农业水利系统，其工程原理至今仍有很高的科研价值。这样的系统不是真正的漂浮，湖床沉积着有机质淤泥、水生植物残体、陆地表土，堆叠成一个个长方形的人工耕作岛屿。岛屿四周一般种植当地的墨西哥落羽杉，树根发达、耐水湿，能牢牢固定堆积的土壤，不使其流失到湖水中，就如同天然的挡土墙；同时树冠稀疏，不遮挡作物生长所需要的阳光。

这种独特的水利构造形成出一个水土交互活跃的微生态环境。耕作层以下的水分靠毛细管作用不断供给给作物根系，使得奇南帕系统几乎不需要人工灌溉就能保证作物全年生长。农民会定期清除水渠、沟渠等处淤泥和腐烂植被，将它们用作有机肥料回填到耕作面上，既疏通了水网，保证了水流畅通，又使土壤肥力保持在较高的水平上，实现了养分的闭环循环。

阿兹特克帝国最鼎盛的时候，这种高效的水利农业模式遍布特斯科科湖及其子湖的大片地区，给特诺奇蒂特兰城数十万人口的粮食供应提供可靠保障。至今墨西哥城南的霍奇米尔科地区还保留有一部分奇南帕遗迹。尽管城市化、水源污染给它造成一定的威胁，但是单位面积产量仍然高于一般旱作农业，这也体现了古代水利工程在土地利用效率、生态平衡方面所取得的巨大成就。

（二）梯田与雨水收集系统

与墨西哥谷地湖泊农业相反的是，散布在高原山区和尤卡坦半岛北部的古代文明，它们所面对的同样是崎岖的地形和季节性降水造成的水资源匮乏问题。于是这些文明就产生了梯田和雨水收集工程这样的精确用水技术。瓦哈卡州等地的高地，原住民依山势开垦出层层叠叠的梯田，再在梯田边缘修筑起石质或者土质的挡墙。挡墙除了保持水土之外，还构成了一套精细的地表径流管理系统。经过精心设计的坡度和排水沟渠，雨水一层层被拦截并引导渗透到土壤里，既能防止暴雨造成的山体滑坡，又能把雨季短暂的降水最大程度地转化为土壤中的储水量，来抵御漫长的干旱季节。

尤卡坦半岛北部的玛雅文明发展出另一种适应喀斯特地貌的水利智慧。由于地表没有河流，而且岩层透水性很强，玛雅人创造了叫做库尔顿的地下蓄水池。蓄水池大多挖掘在居住区或者神庙广场地下，内壁涂灰泥以防漏水，地表集雨区经过平整、硬化处理，使降雨迅速流入地下储存。在一些规模较大的城址遗址里，考古学家发现了庞大的水库网，依靠堤坝、复杂的闸门系统来控制水流。该类设施不仅可以为居民提供饮用水，在干旱时期也可以给周边集约化农田进行辅助灌溉。对地表径流以及地下储水空间实施立体化的开发利用，体现出古代先民面对极端水文地质状况时所具有的强大工程适应力。

（三）传统知识的现代传承

随着全世界对于可持续发展以及生态农业的重视程度不断提升，墨西哥古代水利智慧也开始从“遗迹”变为“技术源泉”。许多农业生态学家、水利工程师对奇南帕、梯田系统的工作原理进行重新认识，试图把其生态原理应用到现代农田水利建设中。在墨西哥中部一些原住民社区里，传统的梯田维护技术正在被重新发掘出来，并与现代材料科学相结合进行改良，用生态袋代替一部分石块筑田埂，既减轻了劳动强度，又保持了传统水土保持的功能。

同时为了应对现代单一种植农业造成的土壤退化和水资源浪费的问题，一些试验性的农业项目也开始模仿奇南帕的水土植物共生模式。在湿地保护区周围，科研人员指导农民建造小型的类似奇南帕的湿地农业单元，用湿地本身具有的净化功能处理农业废水并产出高品质有机蔬菜。既保护了生物多样性，又给当地农民开辟了新的生存途径。传统水利知识不再被视为落后的象征，它被看作是应对气候变化、增强农业系统韧性的宝库，其中蕴含的适度开发、循环利用的思想正在潜移默化地影响着墨西哥新一代的水利政策。

二、现代灌溉工程的规模化发展

（一）大型引水工程与灌区建设

从 20 世纪中期开始，墨西哥联邦政府就实行了一系列宏大的水利基础设施建设规划，目的在于解决水资源空间分布和农业生产潜力不匹配的问题。按照这个战略，国家水务部门在锡那罗亚、索诺拉和勒尔马 - 查帕拉河流域等主要农业区规划建设了几十个大型水利工程。这些工程一般是横跨河流的巨型混凝土大坝、穿越山脉的长距离输水隧洞和呈网状分布的干支渠系。它的工程量之大、技术之

难，标志着墨西哥水利工程进入了工业时代。

大型灌区的建设使得墨西哥的农业疆域大大扩展，把原来只能依靠零星降雨的荒漠之地变成了四季常青的良田。西北部沿海平原通过拦截发源于西马德雷山脉的河流径流，建立起各个流域间的联合供水网络，该地区已发展成为北美主要的蔬菜、水果生产基地。为了提高输水效率，新建灌区大多采用混凝土衬砌渠道来减少沿途渗漏，同时安装了现代化测控闸门，可以实现灌溉水量的精细化调度。

大型水利工程的建设，不单是技术上的成功，也是国家意志在空间上的重新塑造。政府控制了水源就控制了区域经济发展命脉，灌区的布局同国家的人口迁移政策、产业布局密切相关。这些巨大的水利网络把分散的农户组织成统一的工业化生产单元，给墨西哥农业融入全球市场提供不可缺少的硬件条件。

墨西哥主要大型灌区分布与特色

区域	主要河流 / 水源	典型作物	特点
西北部沿海平原	西马德雷山脉河流	蔬菜、水果、玉米	联合供水网络，高附加值农业
勒尔马 - 查帕拉	勒尔马河	谷物、豆类、蔬菜	历史悠久，人口密集，水资源压力大
索诺拉谷地	索诺拉河	小麦、棉花、蔬菜	现代化灌溉，农业出口导向
巴希奥地区	地下水	苜蓿、浆果、鳄梨	地下水超采严重，高耗水经济作物

由表可见，墨西哥大型灌区的分布同当地的自然禀赋、经济发展策略紧密相关，西北部和中北部地区是这些灌区的聚集地，同时也是国家农业生产的中心。

（二）地下水开发与管井灌溉

由于地表水开发已经接近极限，加上农业集约化程度不断提高，墨西哥高原地区灌溉重心逐渐转向地下水。墨西哥中部高原盆地气候温和、土壤肥沃，但是地表径流少，地下水遂成为高价值经济作物种植的重要水源。二十世纪七十年代以后，随着钻井技术以及电力排灌设备的推广，机井灌溉在墨西哥的农业中所占的比重越来越大，形成了一个庞大的地下水开采网。

在巴希奥地区和拉古纳地区，成千上万的深井昼夜不停地抽吸着地下含水层的水源，用来灌溉苜蓿、浆果、鳄梨等高耗水作物。这种方便、比较稳定的供水方式，使农民摆脱了降雨季节的束缚，可以进行一年多熟的高强度耕作。管井灌溉的普及，使农民为了节约灌溉抽水成本，在农田里自发地安装滴灌、喷灌装置，从而提高了水的利用效率。

但是大范围的地下水开采也造成了严重的地质环境问题。由于开采量一直大于自然补给量，墨西哥高原很多地方的地下水位快速下降，含水层枯竭，水质变坏。更严重的是，过度的地下水抽取造成地面沉降，特别是在墨西哥城及其周边地区，破坏了地表建筑和城市设施，也使原有的自然水文循环遭到不可逆的破坏，已经成为现代灌溉工程发展中不得不面对的沉重挑战。

（三）水资源管理权下放给用水户协会

二十世纪九十年代，由于财政负担过重、官僚管理低效，墨西哥进行了水利管理体制的一次深刻的改革，其主要内容为把灌溉系统的管理、运行、维护责任由中央政府转移到农民用水户协会。此次改革用市场机制和用户参与来解决长期存在的灌溉设施老化失修、水费收缴率低、水资源浪费严重等问题，创建起政府监管下的用户自治模式。

1. 管理权下放、财务自平衡，改革后原由国家水务部门直接管理的各个灌区被划分为若干灌溉单元，每个单元成立独立的用水户协会，具有法人资格。政府把灌溉设施的使用权交给协会，授权其收取水费，收取的水费全部用于工程日常维护及管理人员工资，形成了“以水养水”的财务自平衡机制。这种模式极大地调动了农户的管护积极性，很多灌区在移交后，渠道的完好率和灌溉服务的及时性都有了很大提高。

2. 民主化管理与协同治理用水户协会的成立促进水资源管理民主化发展。协会的领导机构是由全部用水户投票产生的，水费定价、灌溉计划制定等重大事情均须经由会员大会讨论通过。从而使得水资源的分配更公开、公正，消除了以前行政指令式管理造成的寻租空间以及分配不公。各协会可以组成联合会，在流域层面参与水资源宏观配置协商，将基层农民的声音传达给国家水资源管理决策层，从而形成自下而上的协同治理结构。

第四节 撒哈拉以南非洲小型水利项目

一、以社区为基础的小型灌溉

（一）小水库、池塘与漫灌系统

在撒哈拉以南非洲农村，依靠地形地势建造的小型蓄水设施是农业用水的主要来源。此类工程一般利用当地低洼处或者季节性河道，经人工或者简易机械开

挖成土坝、蓄水池。它的设计思想就是雨季拦截地表径流，以便在旱季使用。小水库、农场池塘多用当地的黏土、石块、夯土建造，大幅降低原材料成本，远低于大型水库钢筋混凝土结构的成本。为了降低高温气候下水分剧烈蒸发和渗漏，一些先进的项目已经采用塑料薄膜或者当地特有的防渗材料铺设池底。这些星罗棋布的微型蓄水点虽然单体容量小，但是汇聚起来就形成了一个巨大的分布式水网，给周边农田提供宝贵的救命水。

与蓄水设施相配套的是以重力为动力的漫灌系统。因为能源不足，当地农民用高低地势开挖简易土渠，把水库水引入田里。虽然该种灌溉方式的水资源利用效率比现代化的喷灌、滴灌要低，但是由于它不需要电力驱动、维护成本低、技术门槛几乎为零，在贫困地区具有很强的生命力。土渠网络不但是灌溉系统，而且是村民们协作互助的社区功能——大家一起清淤、修缮、分配水量，从而形成一种基于地缘关系的互助机制。但是这种粗放式的漫灌存在水土流失和土壤盐渍化的问题，在缺乏科学排水设计的地区，长时间的漫灌会使耕地质量降低。

对于半干旱地区特有的沙河地貌，一种叫做沙坝的创新技术在肯尼亚等国被广泛使用。沙坝不是直接拦截明水，是在季节性河道上筑堤坝拦截泥沙。因为沙粒之间有空隙，水分可以存于沙层之下，既不致烈日下蒸发，又经天然沙滤层的过滤。农民只要在河床边挖浅井或者安装手压泵，就能获得经过过滤的干净水源，用来灌溉小块菜地或果园。顺应自然的智慧，在非洲基层水利于极端环境里生存的韧性，给解决水资源缺乏问题赋予了一种十分具有本土特色的工程范本。

（二）脚踏泵、太阳能泵等提水工具

由于技术下放、市场机制的加入，个体农户取地下水、地表水的能力得到提高，最具有代表性的就是人力提水工具向机械化、清洁能源化提水工具的转变。东非、西非农村地区长期以来一直有一种叫作脚踏泵的简易机械装置，它带来了一场“静悄悄的革命”。装置类似于健身踏步机，依靠人体自重和杠杆作用，双脚交替踩踏带动活塞运动，将浅层地下水或者河水抽到地面。脚踏泵的效率比传统的提桶取水高出数倍，劳动强度也大大降低，一个农户就可以灌溉 0.5 至 1 公顷的经济作物。低成本技术方案使无数的小农户在旱季都能种出高附加值的蔬菜，从而由原来的生存型农业转变为市场导向型农业。

近些年来，全球光伏成本的下滑给非洲小微水利带来了新的生机，太阳能水泵正在慢慢取代人力泵和柴油泵，成为新一代的提水利器。

1. 能源独立性和经济性：非洲大部分农村地区都没有电网覆盖，柴油泵动力大，但是高昂的燃料费用以及频繁的机械故障常常使贫困农户望而却步。太阳能水泵系统依靠当地丰富的太阳能资源，一次性投入之后几乎没有运行成本，彻底解决了能源瓶颈以及持续投入的问题。

2. 技术集成化和智能化：现代太阳能提水系统一般都采用了直流无刷电机、最大功率点追踪控制器等技术，即使在早晚光照不足的时候也能保证一定的出水量。高端水利设备上还带有移动支付、远程监控等，农户可以使用手机购买灌溉服务，采用“即买即用”的商业模式，大大降低了农户第一次购买设备的经济压力，也让先进的农机装备走进了基层农户家中。

虽然太阳能水泵有诸多优点，但是推广太阳能水泵仍然存在很多困难。由于市场碎片化造成产品质量良莠不齐，没有统一的售后服务制度，设备一旦出问题就变成了废铁。大量廉价而低质的太阳能水泵进入市场，虽然在短期内提高了装机量，但是由于寿命短，反而降低了农户的信任度。完善本地化供应链、培养具备维修能力的本土人才、创建质量认证体系，是保证绿色提水技术在非洲基层长期发挥作用的前提。只有当技术供给与本地维护能力相匹配的时候，太阳能水泵才能真正成为推动非洲农业现代化的绿色引擎。

（三）妇女在小型水利项目中的关键作用

在撒哈拉以南非洲的农业生产中，妇女们做着大部分的耕作，同时也是家庭用水的主要获取者与管理者。小型水利项目对于改善农村妇女的生活境遇、提高农村妇女的社会经济地位有着不可估量的作用。传统上妇女和女童每天要长途跋涉去取水，既费力又占用了她们学习、参加经济活动和照顾家庭的时间。社区小型灌溉设施的建设，特别是靠近村庄的浅井、蓄水池、高效提水工具的使用，直接减少了取水半径，使妇女从繁重的取水劳动中解脱出来，这就是所谓的时间贫困的缓解。

获得灌溉条件的便利之后，妇女便成了家庭菜园和经济作物种植的主力。她们经营着小规模的灌溉农业，可以种植西红柿、洋葱、叶菜等生长周期短、市场需求大的经济作物。这不仅使家庭膳食营养得到改善，改善了儿童营养不良的普遍状况，更重要的是，妇女通过出售农产品而获得经济上的独立。直接转化为家庭内话语权的增加，妇女在子女教育、医疗开支、家庭资产分配等大事上的发言权增大。许多小型水利工程在设计之初就专门成立妇女主导的用水管理小组，既

提高了工程管护效率，又在乡村社会内部培养了女性的领导力、组织力。

但是性别不平等的结构性障碍仍然存在。很多传统社区的土地所有者是男性，水权和地权绑定，妇女在灌溉系统中处于附属地位。当水源缺乏的时候，妇女的用水需求常常排在男性主掌的大田作物之后。技术要求较高的灌溉设备，例如柴油机泵，历来被当作“男性的工具”，妇女在相关的操作和保养中往往被排除在外。因此，要促进妇女在水利项目中的全面参与，单靠工程技术是不行的，需要深刻的社会制度变革，让她们既然是水的搬运者，又是水资源的管理者和受益者。

二、国际非政府组织与发展援助的角色

（一）项目资金、技术与能力建设支持

国际援助机构通过不同的资金渠道，为非洲小型水利项目启动打下了基础。资金一般以赠款、低息贷款或者混合融资的形式出现，直接用于购买建筑材料、挖掘设备、水泵等硬件。与一般由政府主导的大规模基础设施项目不同的是，小型水利项目资金流向更加灵活，可以直接到达偏远的乡村社区。除了物质捐赠之外，技术转让、能力建设被看作是有长期意义的援助。

1. 本土化改良适应技术国际非政府组织努力把成熟灌溉技术加以改造，使之适应非洲的地理情况和经济水平。采用当地廉价材料代替昂贵的进口管道，水泵结构设计成易于拆卸维修的形式等。技术降维不是降低标准，而提高技术的普及率、抗风险性，在没有专业技术人员的农村地区，使普通村民能掌握基本的技术操作与保养。

2. 全周期的能力培训体系：援助项目里常常包含许多“软性投入”，也就是针对农户展开的各种形式的培训。既包括砌筑水渠、安装水泵等工程技术，又包含农业技术、灌溉制度、农产品销售等内容。通过建立田间学校或者示范基地，专家与农民面对面交流、手把手教学，目的在于培养出一批既懂水利又懂农业的新型农民，使硬件设施真正转化为农业生产力。

（二）参与式农村评估方法的应用

为了防止过去援助项目中出现“大象工程”、“水土不服”的问题，国际非政府组织在项目规划阶段大量使用参与式农村评估的方法。此种方法重视社区的主体性，尊重本土知识，是有效的调研和规划手段。项目开始之前工作人员会去到

村中组织村民一起用绘制资源图、季节历、问题排序等方法来共同分析社区水资源现状、需求优先次序、可能存在的限制因素。

它的实质就是打破传统上“专家决策，民众执行”的模式，形成民众决策、专家协助的自下而上的模式。村民不再是项目仅仅的接受者，而是项目的规划者和所有者。他们可以指出在何处修建水塘占用耕地最少，哪条路线引水最省力，还可以根据自己的耕作习惯提出灌溉频率、水量的具体要求。经过这样深度的参与，项目方案才会更符合实际，村民对工程的心理认同感、归属感大大增加，为之后的自主管理打下了良好的民意基础。

参与式评价特别重视听取边缘群体意见。在传统的乡村议事中，贫困户、妇女、少数民族的意见很容易被忽视。采用分组讨论、半结构化访谈等方式使弱势群体的用水需求也被考虑进去。例如，确定取水点位置时，专门征求负责取水的妇女的意见，以保证取水路径的安全、便利；水费分摊办法中考虑到贫困户的支付能力，设计出更公平的阶梯水价或者劳务代偿办法。包容性的规划过程使水利工程不单是一个建设行为，更成为社区团结、社会公平的催化剂。

（三）项目可持续性与退出机制

国际援助项目最大的难题之一就是其“项目制”的临时性与水利工程长期运行维护的需求之间的矛盾。很多设施项目周期结束后，由于没有后续的维护资金和管理机制，很快便成了田间的废墟。为避免建设、废弃、再建设的恶性循环，现代发展援助越来越重视退出机制的设计，力求在项目执行过程中就建立起一个可以自我造血、自我运转的本土化管理体系。

为了保证可持续性，首先要建立具有法律效力或者社区公约约束力的用水户协会。在没有政府的协助下，社区会选出一个管理委员会来决定灌溉制度、解决用水纠纷并安排日常的维护工作。最重要的是要建立透明且可行的水费收缴及管理制度，把所收的水费作为维修基金使用，用来购买易损件、支付维修人员的工资。以水养水的财务模型是工程长久存续的经济保证。

援助机构努力培育起商业化的技术服务生态。不如扶持当地小微企业或技工当水利服务商是解决这一问题的办法。通过提供启动工具包、技术认证、商业经营指引等来帮助他们创建乡镇维修网点或者零配件商店。这样在工程出现故障的时候，农户可以在市场上方便的获得服务，而维修人员也可以通过提供服务来获得收入，从而形成良性市场互动。只有当维护服务变成一种盈利的商业行为，

而不仅仅是义务劳动的时候，技术支持体系才具有真正的生命力，在外部援助撤出以后，水利设施依然可以正常运转。

第五节 发展中国家农田水利发展路径

一、从“硬件”建设到“软件”提升

（一）从单纯修建工程到注重管理能力

历史的经验一次又一次地证明，钢筋混凝土工程虽然重要，但是如果没有有效的管理，其作用就会大打折扣。许多发展中国家依靠外部援助大规模建设灌溉区，但是缺少相应的管理维护制度，很多渠道淤积、泵站瘫痪。目前的主要问题是建立长效的工程管护体系。这就意味着政策重心要下移，关注点也要从工程竣工验收延伸到工程全生命周期的效能评判。提升管理能力不再只是技术培训，而是涉及产权界定、水价形成机制、水权交易等多方面制度安排的过程。只有决策程序透明、过程公开，每一滴水才能被记录、被监督，工程长久的服务效益才能得到保证。

资金缺乏常常会使得管理能力的短板更加明显，但也会给管理创新提供机会。由于财政资金不能全部支付所有的维护费用，提高管理效率就显得非常必要。精细化管理需要管理者对水资源供需动态有灵敏的感觉，根据作物生长周期和气候变化合理安排灌溉。对基层水利站点来说，培养一批懂技术、会管理、善协调的本土人才队伍比引进先进设备更为重要。只有管理者意识到从管理设备到经营水资源，农田水利工程才有可能发挥出其生产力的潜能，而不会成为财政负担沉重的“烂尾工程”。

（二）从技术引进到本土创新

技术转移过去是发展中国家提高农业生产力的捷径，但发达国家高能耗、高技术门槛的水利设施，由于“水土不服”，盲目移植往往告吹。昂贵的喷灌、滴灌系统在电力供应不稳定或者缺乏专业维修服务的偏远农村中，很容易因为一个零件的缺失而变成废铁。现阶段的发展趋势就是推广适用技术、鼓励本土创新，更注重技术的经济可行性和社会接受性。这一改变倡导科研机构同当地农民一起开发低成本、易维护、高产出的灌溉设备。改良型脚踏泵、重力滴灌系统、太阳能微型提水器等草根创新都有很强的生命力。

本土创新还包含对于传统水利智慧进行挖掘并加以现代化的改良。许多发展中国家有着数千年历史传承的坎儿井、梯田水系等传统灌溉方式，它们的生态适应性非常高。现代水利已将这些传统方法作为落后，并使用现代的材料学和水力学原理来进行改良。如用新型防渗材料修复古老的渠道，在传统的集雨窖池中加装净化装置等。这种融合途径既保留了当地社区对于传统技术文化的认同感，降低了技术推广的学习门槛，又大幅度提高了水资源的利用效率，给资源贫瘠地区指明了一条低成本的现代化转型之路。

（三）从单一目标到多功能综合发展

随着农村经济结构越来越多元化，农田水利工程的功能也发生了根本性的改变。过去只对粮食作物灌溉的单一目的模式，已经不能满足现代农村社区多元化的需求。当前的水利规划理念更加注重把水利工程作为农村综合发展的载体，“一水多用”、系统集成。

1. 在规划和设计阶段要充分考虑农村生活用水、畜禽养殖用水、庭院经济用水等多种用水需求。灌溉渠水被引入村庄蓄水池和生态塘，从而解决了农村饮水安全、改善卫生环境等问题。综合供水模式大大提高水利设施的边际效益，使有限的工程投资惠及更多人，也增强了社区对于水利设施的依赖性以及保护意识。

2. 水利工程开始具有生态涵养和景观营造的功能。在很多发展中国家的乡村振兴实践当中，农田水利系统被规划为湿地公园或者生态廊道，不仅可以净化农田退水，削减面源污染，还可以给乡村旅游提供丰富的景观资源。挖掘水利工程在渔业养殖、交通运输、小水电开发等方面的潜力，使农田水利成为激活农村经济活力、实现经济效益、社会效益和生态效益有机统一的多面手。

二、多元化主体的协同参与

（一）政府、市场、社会组织角色定位

明确各方面的责任边界，这是协同治理的先决条件。政府的作用正由全能型建设者变为规则制定者和兜底保障者。其主要职能就是制定水资源利用的法律法规，编制宏观规划，为大型骨干工程提供资金支持，监管水市场公平运行，保证生态底线不被突破。用竞争机制把市场机制引入工程建造、设备采购和技术服务等各方面来降低成本、提高效率。私营企业在高效节水设备、专业化维修保养服务上有着明显的优势，可以弥补公共服务难以达到的空白。

社会组织在其中起着不可替代的润滑剂、粘合剂的作用。非政府组织、行业协会、学术团体依靠其贴近基层、反应迅速的优势，在组织农民培训、调解用水矛盾、推广适用技术等方面发挥着不可替代的作用。它们能弥补政府行政力量执行时的刚性不足，也能弥补市场逐利行为造成盲区，使各个利益主体之间的信息传递更加有效。尤其是在政府的治理能力比较薄弱的偏远地区，国际和本土的社会组织常常是沟通外部资源和社区需求的桥梁，促成了很多“小而美”的水利项目。这样三维互动的治理结构，一起构成一个更具有韧性的水利服务生态系统。

（二）公私合作模式的探索

在农田水利领域实行公私合作模式不是件容易的事，但是发展中国家正在努力探索适合本国国情的途径。由于农业灌溉项目投资回报率低，回收期长，传统的商业资本都不愿意介入。为解决以上问题，各国开始用捆绑高附加值收益项目来吸引社会资本。将灌溉供水和城镇供水、水力发电或高附加值经济作物种植基地建设相结合，用交叉补贴的方法来调节项目收益，使私营部门在参与水利公益事业中获得合理的经济回报。

风险分担机制设计的好坏直接决定着公私合作是否能够成功。政府一般会通过特许经营权、购买服务、财政贴息、税收优惠等手段来降低企业的投资风险和运营成本。合同中还应该明确政府与企业之间的权利义务关系，特别对水价调整、水量保证、不可抗力应对等重要条款进行规定。一些国家还实行建设-移交-经营、建设-拥有-经营等灵活的模式，使企业在一段时间内享有工程的经营权和收益权。此种模式除了可以带来建设资金外，更重要的是把企业先进的管理经验和手段引入农田水利工程，提高工程运行效率和质量，为解决资金问题提供了一种可行的办法。

（三）赋能社区与农民的主体地位

不论治理模式怎样改变，农民一直都是农田水利工程的最后使用者，也是最重要的利益相关者。赋能社区，确立农民主体地位，才是解决最后一公里管护难题的根本出路。参与式灌溉管理已经在多个发展中国家得到推广，主要就是将工程决策权、管理权和监督权真正交给用水户协会或者农民用水合作组织。这就需要法律明确授予农民用水组织合法的社团地位和水权，使农民用水组织可以以独立主体的身份参与水资源管理和市场交易。

赋能不单单是权利的转移，更是能力的培养。经过不断的培训与组织引导，

提高农民对工程的维护、财务的管理、纠纷的调解等自我治理能力。倡导妇女、边缘群体参加用水决策，保证用水权利的公平分配，属于社区赋能的一个重要方面。当农民意识到自己不仅是水利工程的使用者，同时也是拥有者和管理者时，他们爱护工程、节约用水的内在动力就会被激发出来。经过实践证明，凡是社区参与度高、农民自我管理能力强的灌区，其工程完好率和水费收缴率比单纯的行政命令管理的灌区高得多。这种自下而上的治理力量，是农田水利长效运行最牢固的社会根基。

第五章 农田水利工程建设技术创新

第一节 智能化灌溉系统设计与应用

一、基于感知与控制网络

（一）土壤墒情、气象、作物长势传感器布设

精准农田感知需要有全方位的传感器网络的布置，其中土壤水分墒情监测最为重要。基层农田水利工程中，传感器的布置不能简单按照网格化来布设，应该根据地块土壤质地、地形地貌、作物根系分布等特点进行异质性布置。一般用分层布设法在作物根系主要吸水层、缓冲层、深层渗漏层埋设水分和温度传感器来获取土壤剖面水分动态数据。立体化的监测方式可以很好地把握土壤水分垂直迁移的规律，从而判定是否有深层渗漏或者水分胁迫。同时考虑到田间微气候的变异性，气象观测站点位置的选择要避开障碍物的遮挡，保证风速、光照、温湿度等观测数据的代表性，从而为参考作物蒸散发量计算提供准确的输入。

作物长势监测使用的是更为先进的光学传感技术。通过在作物生长的重要区域设置多光谱相机或者高清视频监控设备，可以得到作物叶片叶绿素含量的变化、冠层覆盖度、萎蔫状况等信息。这些非接触式的光学传感器，弥补了地下土壤数据不能及时反映作物水分状况的滞后性问题，实现了根据作物的生理生态特征对作物水分状况进行实时诊断。为了降低边际成本，一般采用固定监测站加移动巡检设备的方式，在典型地块布置高精度固定站，利用无人机或者手持设备对大范围区域进行校核补点，在保证数据精度的基础上控制建设成本。

（二）智能阀门、水泵与控制器集成

执行层的智能化程度直接影响到灌溉指令执行的及时性和准确性。传统的阀门、水泵只具有机械开关功能，经过智能改造后就具有了边缘计算和状态反馈功能。现代智能水泵普遍具有变频控制技术，可以按照管网压力的即时反馈来自动调节转速，维持系统恒压供水，有效地解决了因地势起伏、多支管同时开启造成的压力波动问题，保证了灌头喷洒的均匀度。智能阀门装有流量计和压力传感器，

是远程开关的执行机构，也可以实时知道通过阀门的水量、流速。当监测数据出现异常，例如流量突然增大预示着管网破裂时，阀门可以自动执行紧急关闭程序，把报警信息上传。

现场控制器整合，就是把分散的执行单元织成一张协同工作的网络。目前常用的现场控制器除了具有最基本的数据采集和指令下发功能外，还带有逻辑运算模块，在断网时可以做到本地自治。这就意味着即便是在偏远的农田发生通信中断这样的极端情况，控制器仍然可以根据事先设定好的轮灌制度，或者根据本地的传感器数据独立完成灌溉工作，从而大大提高了系统的鲁棒性。设备间开始采用总线制或者新的接口标准，简化了田间布线复杂性，后期维护和更换设备更为方便，降低了基层管护人员的技术要求。

（三）无线通信技术应用

农田环境广阔而分散的特点，给通信技术的覆盖范围、功耗、稳定性等提出了特殊的需要。传统的有线传输方式由于布线成本高、容易被破坏等缺点，正在逐渐被无线通信技术所取代。低功耗广域网技术在农田水利中得到了广泛的应用，它的优点就是覆盖范围大、穿透力强、连接容量大、能耗极低。该技术可以实现数公里范围内海量传感器节点低频数据上报，电池寿命可达数年，大大减少运维工作量。

针对不同应用场景的数据传输需求，构建分层异构的通信网络已成为主流趋势。

农田通信网络分层与应用场景表

网络层级	应用场景	主要传输数据类型	通信技术范例	关键优势
感知层至汇聚节点	小数据包传输，远程传感器数据上报	土壤墒情、阀门状态、小型环境参数	低功耗广域网（如 LoRaWAN, NB-IoT）	覆盖距离远、穿透力强、功耗低、电池寿命长
汇聚节点至控制中心	视频图像传输，高频控制指令交互	视频监控、高清图像、实时控制指令	高速蜂窝移动通信（如 4G/5G）、定点微波	高带宽、实时性强、传输速度快
局部盲区及复杂地形	网络延伸，数据跳传	各类传感器数据，少量控制指令	自组网（如 Mesh 网络）	灵活组网、无死角覆盖、提高鲁棒性

从上表可以看出，在感知层和终端节点之间主要使用低功耗长距离通信协议，保证土壤墒情、阀门状态等小数据包可以穿透作物冠层和土壤阻隔，传输到田间

汇聚节点。田间汇聚节点和控制中心之间，对需要传输视频图像或者进行高频控制指令交互的关键节点，则采用高速蜂窝移动通信网络或者定点微波传输技术，保证大数据量传输的实时性和带宽要求。局部盲区或者地形复杂的地方，自组网技术就成为了有效的补充，依靠节点之间的数据跳传来实现网络的延伸，从而保证通信网络无死角，打通了农田信息传输的最后一公里。

二、决策支持与智能灌溉模型

（一）作物需水量计算模型

作物需水量计算是制定合理灌溉制度的基础，主要是正确计算出作物各个生育期的生理耗水和生态耗水。传统的计算方法大多依靠经验公式或者单一气象参数，不能适应多变的农田小气候。现代智能灌溉系统大多用能量平衡和空气动力学原理的彭曼-蒙特斯公式为标准算法。该模型综合考虑了净辐射、土壤热通量、空气温度、湿度、风速等气象因子，可以得到标准草面的参考作物蒸散发量。在此基础上又加入了作物系数这个变量，而这个变量并不是一个固定的数值，它会随着具体的作物品种、生长发育时期（如播种期、快速生长发育期、生长期、成熟期）的不同而变化。

为了提高模型的适用性，还要用土壤水分胁迫系数对计算结果进行修正。当土壤含水率小于某一临界值时，作物根系吸水会感到困难，实际蒸发蒸腾量小于潜在蒸发蒸腾量，这时模型要能识别这种非线性关系，防止由于水资源浪费造成需水量的过度计算。用田间实测的土壤水分特征曲线来确定田间持水量和凋萎系数，建立反映气象、土壤、作物连续体中水分传输规律的精细化模型。这样一种以模型驱动的计算方式，使灌溉不再依靠感觉的“浇地”，而按照作物生理需求的“浇作物”。

（二）基于机器学习的灌溉决策优化

随着农业大数据的积累，仅使用机理模型已经不能满足复杂场景下的决策需求了，以数据驱动为主的基于机器学习的灌溉决策优化方法成了新的方向。收集历史灌溉记录、气象数据、土壤墒情变化、作物产量品质数据等，可以建立深度神经网络或者随机森林等预测模型。具有很强的非线性映射能力，可以自动地学习环境因子和作物需水之间隐含的关系，即使是一些微小的影响因素也可以被准确捕捉。模型可以学习到在某种风向、风速的组合下，某个区域土壤水分蒸发速

率的变化规律。

机器学习算法的实时决策应用具有很强的灵活性以及自适应性。系统可以依据实时土壤水分下降速度，预估未来几小时或几天的旱情发展趋势，再根据预先设定的目标（产量最高、水分利用效率最好或者经济效益最好），自行产生推荐的灌溉计划。此方案不再采用固定的定式的灌溉开始时间、持续时长、轮灌顺序等参数，把它们当作可以变化的变量。更重要的是该系统有在线学习功能，每次执行灌溉后所产生的效果反馈，即灌溉后土壤水分的实际情况以及作物生长情况的变化，都会成为新的训练样本输入到模型中，从而使决策算法不断迭代更新。随着运行时间的增加，决策会越来越准确，真正意义上实现了人工智能赋能农业节水。

（三）与天气预报结合的动态灌溉制度

传统的自动化灌溉经常会出现刚浇完地就下雨的情况，造成严重的水浪费和渍害。把高精度的数值天气预报数据引进到灌溉决策系统里面，这就是破解这个痛点的金钥匙。系统通过应用程序接口实时获取 3 到 7 天天气预报信息，重点获取降雨概率、降雨量、降雨分布时段等数据，把这些数据作为反馈输入到决策模型里。模型会评价预报降雨量是否满足未来一段时间内作物需水要求，降雨概率是否大于设定的阈值（如 70%），若条件满足则可以推迟或者取消原有的灌溉计划，充分利用天然降水。

动态调整机制在利用降雨的同时，也规避了极端天气。如预报有大风天气时，喷灌系统自动停止，避免雾化水滴被风吹走造成灌溉不匀、浪费；预报高温热害预警时段，提前开启微喷灌增加田间湿度，利用蒸发潜热降低冠层温度。以看天吃饭式的智能化升级来说，实际上就是把被动应对转变为主动预判，使灌溉制度的灵活性和科学性得到了很大程度的提升。系统会对预报数据和实测数据不断进行比较，修正预报误差对决策的影响，在保证节水优先的前提下，保证不会因为误判天气而影响到作物的生长，实现了人工灌溉与自然降水的时空协同。

三、智能化灌溉系统的集成与示范

（一）从田间单元到灌区级系统集成

智能灌溉系统建设不能只停留在单个田块的独立运行上，而应该向灌区级综合控制平台发展。集成时要破信息孤岛，建统一数据标准和通信协议，把水源调

度、渠系输水、田间配水等全过程纳入一张数字网络。灌区层级系统主要从宏观角度进行水量平衡和调度优化,对干、支、斗、农各级渠道和泵站进行联合监控,实现上下游水量的协调供给,防止上游漫灌、下游断流。

在技术架构上,通常采用云边端协同的模式:

1. 端侧设备:负责高频数据的采集与执行。
2. 边缘网关:负责数据的清洗、聚合与本地实时控制。
3. 云端平台:承担海量数据存储、复杂模型运算、跨区域调度及可视化展示等重任。
4. 地理信息系统整合以后,管理者就可以在电子地图上看到各个区域的灌溉情况、阀门开关状态和有无报警信息。

由田间微观单元到灌区宏观系统纵向集成,物理水网和数字信息网完全重合,大大提高基层水利工程管理效率及应急响应速度。

(二) 不同作物的差异化方案

农田水利工程的服务对象千差万别,智能灌溉系统的建设要充分考虑到作物种类生物上的差异,根据具体情况,定制出差异化的技术方案。对于水稻等大田粮食作物来说,关键在于利用水位传感器准确控制田面水层的深浅,实行“薄、浅、湿、晒”的控制灌溉,系统需要具备毫米级的淹灌水深调节能力,同时能够根据水稻的分蘖期、拔节期等重要生育时期自动调节水位目标值,实现节水增产、减少面源污染。

果树、蔬菜等高经济价值的作物,大多采用滴灌或者微喷灌技术,并且与水肥一体化系统相结合。根据果树根系深、株距大的特点,智能系统要准确控制滴头的流量和滴灌时间,使水分精准浸润根系密集区而不是无效的行间土壤;温室蔬菜要结合温湿度传感器,采用高频微量的脉冲式灌溉。不同的作物对水分敏感程度不同,在系统中可以事先输入专家策略库,用户只需要输入所种作物的种类和种植时间,系统就可以根据用户的输入提供初始灌溉方案,然后在运行过程中根据反馈信息对灌溉方案进行微调。这种不同的技术供应,使得智能化系统可以在各种各样的农业生产场景中发挥出最大的作用。

(三) 经济效益与节水效益评估

智能化灌溉系统建设投资大,科学评价综合效益是它得以推广的前提。效益评价既是工程效果的检验,也是改进后续运营的依据。经济效益上除了对因精准

灌溉导致的作物产量提升、品质改善所造成的增收进行直接核算之外，还要对要素投入的节省进行核算。智能系统可以大大减少人工巡渠、开关闸门所耗费的劳动力，显著降低人力成本；通过水肥一体化精准施用化肥农药，减少化肥农药的浪费，再降低农业生产边际成本。

节水效益评价就要创建严格的量化指标体系。对建设前后亩均灌溉用水量、水分生产率、灌溉水利用系数进行对比，可以直观地看出技术创新的节水效果。

1. 用耗水结构分析来区分生产性耗水（蒸腾）和非生产性耗水（棵间蒸发、渗漏），评价系统降低无效耗水的效果。

2. 生态效益也不可忽视，精准灌溉可以减小深层下渗造成的地下水硝酸盐污染，也能降低过量灌溉引发的土壤次生盐渍化的风险。

3. 在示范区建立长期效益监测机制，用数据证明智能化改造投入产出效益、节水实际成效。

这就为基层农田水利工程的投融资模式创新奠定了可靠的数据基础，使行业从以前主要依靠财政补贴的方式，转向了市场化多元投入的方式。

第二节 新型节水材料与施工工艺

一、管道输水系统新材料应用

（一）聚乙烯、聚氯乙烯等塑料管道的优化与升级

传统的聚乙烯、聚氯乙烯管道在农田水利中已经应用了很多年。但是随着现代农业对供水压力、耐久性要求的不断提高，对基础树脂进行改性已经成为研发热点。在原材料中添加纳米级填料或者特殊的抗氧化助剂，新一代的农用塑料管道耐环境应力开裂性得到明显改善。改性处理大大提高了管材在埋地环境下抗老化的能力，设计使用寿命已突破五十年，从而大幅度降低了基层水利工程重置成本。

新型改性聚乙烯管道的低温抗冲击性特别好。为了满足北方寒冷地区冬灌要求，科研人员通过改变分子链结构，开发出了柔韧性较好、在零下 20 摄氏度恶劣环境施工也不会出现脆性断裂的管材。同时在地表铺设的灌溉支管里添加抗紫外线技术，有效防止了太阳辐射对于高分子链的破坏，解决了长期暴晒所造成的管壁褪色、粉化问题。

生产工艺的变革也会使产品质量不断提高。现代挤出成型技术加在线检测系统,可以保证管壁厚度均匀,去除生产过程中的内应力残留。精密的制造工艺保证了每根出厂管道都能够承受设计标称的额定压力,从而大大减小了由于管壁厚薄不均造成的高压输水时爆管的风险,给高标准农田高压喷灌系统提供可靠的安全保障。

（二）新型复合材料管道的研发

地形复杂多变,输水要求高扬程,单一材质的塑料管难以达到高强度、耐腐蚀的目的,新型复合材料管道随之出现。玻璃纤维增强塑料夹砂管因轻质高强的特点,在大口径长距离输水工程中得到了普遍的使用。该类管道以高强度玻璃纤维为增强骨架,热固性树脂为基体,中间夹有石英砂层以增加刚度。由此形成的“三明治”结构,让管道既轻又可以承受大荷载、大水压,非常适合用于公路下或者地下深埋的输水干渠。

钢骨架塑料复合管把钢材的高强度和塑料的耐腐蚀性融合起来。采用在聚乙烯管壁内嵌入高强度钢丝网骨架的方法制造出的复合管材,克服了纯塑料管和传统大口径钢管各自的缺点。钢丝网可以有效抑制聚乙烯基体的蠕变,使管道长期高压运行的时候依然能够保持良好的几何形状。在山区农田水利工程中,该种管道可以很好地适应地形剧烈起伏的变化,而且不需要像钢管那样做复杂的防腐处理,施工的便利性大大提高。

（三）管道接口防渗漏新技术

1. 热熔电熔连接技术:热熔电熔连接技术的普及,完全解决了传统承插式接口的密封问题。用电熔焊机将预埋有电阻丝的管件和管材端口加热到熔融状态,分子链在高温下互相渗透缠绕,冷却后就形成了一个浑然一体、强度更高的连接节点。连接强度甚至比管材本身还要高,从根本上杜绝了由于地基沉降、热胀冷缩等原因造成的接口松动、漏水,实现了管道系统的零泄漏。

2. 柔性橡胶密封圈材料升级,高性能弹性体三元乙丙橡胶被广泛使用于密封圈的制造,使其具有很好的回弹性和耐老化性。新型接口设计采用双唇或多唇密封,当水压升高时水流会自动把密封唇口压紧产生压力自密封的效果。该设计使管道接口可以有一定的角度偏转,可以较好地适应软土地基的沉降变形,保证输水系统的整体完整性。

二、渠道防渗新材料与结构

（一）土工膜、膨润土防水毯的应用

复合土工膜属于柔性防渗材料,大中型灌区渠道改造中起着不可替代的作用。它一般是由两层土工布夹一层高密度聚乙烯膜构成的,即“两布一膜”。外层土工织物一方面可以保护防渗膜不被尖石穿刺,另一方面可以增大防渗层与土体之间的摩擦系数,防止防渗层在边坡上滑动。施工时大幅宽的土工膜减少了接头数量,与双轨热楔焊接技术结合,能形成易于检查、强度较高的焊缝,保证防渗层整体的气密性、水密性。

膨润土防水毯则利用了钠基膨润土遇水膨胀的特性。当它被铺设在渠道底部并与水接触的时候,夹层里的膨润土颗粒就会吸水膨胀,形成一层致密不透水凝胶体。与刚性防渗材料不同的是,膨润土防水毯具有独特的自愈功能,施工过程中如果出现小的穿刺破洞,那么膨润土凝胶体就会自动填充到破洞里,继续发挥防渗的作用。因此它很适合用做冻融频繁、地基容易变形的寒旱地区,能很好地避免刚性防渗层因冻胀开裂而失效的问题。

对于地下水位较高的渠道工程,新型复合防渗结构中还增加了逆止排水系统。在土工膜下面设置透水软管或者排水网,可以及时把膜下积存的水分排走,从而消除了扬压力对防渗层的破坏。该种防排结合的观念克服了传统全封闭防渗结构所遇到的鼓包、浮起的现象,极大提升了工程长期的运行稳定性。

在施工工艺上采用机械化铺设技术使用率高。专用铺膜机可以一次完成开沟、铺膜、回填、压实这四道工序,保证防渗材料铺设平整、张力控制精确。此种标准化施工模式可以减少人为操作误差,工期缩短近一半,给抢抓农闲季节开展水利建设创造了有利条件。

（二）混凝土衬砌的优化设计与施工

混凝土衬砌技术的革新主要是改善混凝土抗裂性和耐久性。推广使用聚丙烯纤维混凝土,很好地控制了混凝土早期塑性收缩裂缝的出现。成千上万根细纤维均匀分布在混凝土基体里,形成三维乱向支撑体系,使衬砌板的抗拉强度和抗冲击韧性大大提高。昼夜温差大的荒漠地区,纤维混凝土表现出良好的抗温变疲劳性能,可以大幅度减少由于温度应力造成的贯穿性裂缝。

预制装配式混凝土衬砌技术正在改变基层水利工程施工的局面。工厂内标准

化生产 U 型、梯型、矩型混凝土预制构件,高频振捣、蒸汽养护使密实度和强度高于现场浇筑混凝土。施工现场只需要拼装、勾缝即可完成渠道衬砌。不受季节气候的影响,构件外形规整,水力糙率小,能大幅度提高渠道的输水流速、输沙能力,减少泥沙淤积。

现浇混凝土衬砌工艺也正向大型化、机械化发展。滑模摊铺机技术的引进,使渠道边坡混凝土可以连续浇筑、振捣、抹光。滑模机沿着渠道轴线匀速推进,液压系统精确地控制着衬砌的厚度以及边坡的坡度,不但消除了施工缝,而且使混凝土的整体密实度大大提高。无缝连续施工技术适用于长距离干渠的修建,可以很好地解决传统分块浇筑时由于伸缩缝处理不善造成的渗漏问题。

(三) 生态型护坡新材料

生态型护坡材料的研究,目的是解决水利工程建设的硬化和生态保护的矛盾。多孔混凝土是具有连续孔隙结构的一种特殊的建筑材料,既可以保证护坡强度,又可以为植物生长提供生存空间。其内部孔隙率可达到百分之二十五以上,在填充营养土和草籽之后,植物根系可以穿过混凝土的孔隙深入土体,形成混凝土、根系、土壤三者复合的固土系统。护坡在汛期可以抵御水流的冲刷,枯水时期却成了一片充满生机的绿色景观,达到了工程的安全与生态修复的双重目的。

联锁式生态护坡砖为特殊几何形状,块体之间通过凹凸榫槽相互咬合,形成柔性整体防护层。这样构造使单个砌块在一定的范围内可以移动而不会掉落,很好地适应了土堤沉降变形。砌块中心留植草孔提高坡面透水性,降低孔隙水压力,为两栖动物提供栖息、避难场所,维持农田生态系统生物多样性。

石笼网格生态护坡技术就是用高强度镀锌钢丝编制成网箱,内部装卵石或者块石。这样的结构透水性好、柔韧性好,可以自由沉降适应河床的变化。泥沙渐渐沉淀在石缝中,水生植物在网箱表面生长繁茂,最后把人工结构隐藏于自然之中。石笼网格护坡比传统浆砌石护坡造价低、施工方便,而且能保持水体和土壤物质交换的通道,提高水体自净能力。

三、高效节水灌溉设备创新

(一) 抗堵塞、压力补偿式滴灌带 / 头

1. 抗堵塞性:抗堵塞性是保证滴灌系统正常工作的一项。新一代滴灌带使用了宽流道和迷宫式流道相结合的方式。迷宫流道内部设置了复杂的涡旋发生结构,

使水流产生强烈的涡旋运动，使微小的泥沙颗粒始终悬浮，不容易沉积。高端产品中还带有自清洗功能，当检测到流道压力突然增大时，弹性隔膜会自动扩张，增大过流断面，将堵塞物冲出流道，然后恢复正常工作状态，大大降低了对水质过滤系统的要求。

2. 压力补偿技术，压力补偿技术使滴灌系统在起伏的地形和长距离铺设的情况下，仍然可以达到均匀灌溉的目的。在滴头内装入高精度硅胶补偿膜片，出水量就不再受进水压力变化的影响。当管道压力在一定的范围内波动的时候，膜片会根据压力的变化而发生形变来调节出水口的大小，从而保证每一个滴头的出水量保持不变。该技术突破之后，山地丘陵地区果园灌溉就无高差限制了，同时也可以增大管线铺设长度，减少支管、接头件数量，从而降低成本。

高效节水灌溉设备对比

设备类型	主要特点	优点	适用场景
滴灌系统（抗堵塞）	宽流道、迷宫式流道、自清洗功能	抗堵塞能力强，维护量少	水质一般、对均匀度要求高的作物
滴灌系统(压力补偿)	内置硅胶补偿膜片	出水均匀，不受地形和管道长度影响	丘陵山区、长距离铺设、精准灌溉
低压喷灌	改进喷嘴流道水力设计	节能显著，雾化效果好	电力供应紧张、偏远农区、中低压供水
精准喷灌	GPS定位、电磁阀控制、变量施水	按需灌溉，水肥匹配	大面积农场、高标准农业、土壤条件复杂
一体化灌溉机组	集成抽水、过滤、水肥混合、控制	操作便捷、水肥一体化管理	基层水利部门、小型农场、快速部署
模块化灌溉系统	标准接口设计、部件可增减替换	扩展性强、适应性好、维护方便	不同灌溉面积、水质、管理需求
光伏直驱灌溉	太阳能供电，变频控制	零运行成本、零碳排放、可持续	无电地区、光照资源丰富地区

从上表可以看出，不同高效节水灌溉设备在技术特点、应用场景及经济效益上各有侧重。

（二）低能耗、精准喷灌设备

低压喷灌技术的出现使灌溉系统的耗能降低。传统的喷灌设备一般需要较高的工作压力才能保证喷洒均匀度，新型低压摇臂喷头、旋转式喷头采用改进的喷嘴流道水力设计，在一百五十千帕以下的压力下仍能保持较好的雾化效果和覆盖范围。配合配套的低压输水管网，该种系统可节省能源百分之三十以上，在电力

供应紧张或靠柴油发电的偏远农区有重要的推广价值。

精准喷灌设备采用了变量施水技术,对田间各个地方实行区别化管理。采用全球定位系统定位模块和电磁阀控制系统,按照事先设定的处方图,实现大型平移式或中心支轴式喷灌机各个跨度喷头流量的自动调节。对土壤持水性差或者作物生长旺盛的地区加大灌水量,对低洼湿地则减少或停止喷灌。这种按需灌溉的模式,就是根据植物生长的不同时期,给予植物不同需求的水肥供应。

智能感知技术融合之后,喷灌变得准确起来。安装在喷灌机上的冠层温度传感器、多光谱相机可对作物生长水胁迫指数和生长发育状况实施实时测定。系统根据实时检测到的数据来调节行进速度以及喷洒量,真正做到了哪里缺就补哪里,缺多少补多少。闭环控制的出现是喷灌技术由自动化向智能化的跨越,也是大面积农场中开展精细化管理的有效技术手段。

(三) 一体化、模块化灌溉机组

一体化灌溉机组将抽水、过滤净化、水肥混合、自动控制等全部功能集成为一个可移动的单元。这种高集成度的设备在出厂前已经把所有的内部管路和电路连好调好,用户使用时只需要接通进出水口和电源就可以了。对技术基础较差的基层水利管理部门来说,这是一种“傻瓜式”的操作模式,很大程度上降低了设备安装和保养的难度。机组内部一般装有文丘里施肥器或者注肥泵,实现了水肥一体化管理,灌溉的同时完成追肥作业,大大减少了劳动力。

引入模块化设计,灌溉系统就具有了很强的可扩充性和适应性。灌溉机组的过滤器、施肥罐、控制器等各个功能部件都采用标准接口设计,用户根据灌溉面积和水质可以增加或者替换模块。水质较差的地方可以串联多个过滤模块,温室大棚内进行精细化管理的时候,可以快速接入物联网控制模块。积木式组装一方面便于系统升级,另一方面也使零部件维修更换变得十分方便快捷。

新能源技术的结合给无电地区的灌溉提供了一种新的解决办法。光伏直驱变频灌溉机组用太阳能板产生的直流电直接驱动水泵,用变频控制器实时调节水泵转速来适应光照强度的变化。该系统省去了昂贵且寿命短的蓄电池组,用“以水蓄能”的方式:在有阳光的时候多抽水到高位水池里储存起来,供阴天或者夜晚使用。该绿色灌溉模式运行成本几乎可以忽略不计,并且零碳排放,完全符合全球农业可持续发展的方向,在光照条件较好的干旱半干旱地区有良好的应用前景。

第三节 数字化测绘与工程规划设计

一、无人机遥感与三维建模技术

（一）无人机航测在工程勘察中的应用

传统水利工程勘察一般使用全站仪、经纬仪等人带着仪器到处跑点。这种方式在地形破碎、植被茂盛或者交通不便的山区丘陵农田地区，作业效率低并且很难取得全面细致的地形数据。无人机低空航测技术出现以后，完全改变了上述情况。工程人员只需要在测区周边选择合适的起降点，设置好飞行航线和重叠率，搭载高分辨率光学相机或激光雷达载荷的飞行器就可以自动执行任务。无人机能在极短的时间内完成大面积灌区的拍摄，获取大量的高清晰度的影像数据，野外作业时间可以压缩到传统方法的十分之一甚至更少。

无人机航测对于解决“看不见、进不去、测不准”的难题有明显的优势。植被覆盖度较高的灌区用小型激光雷达系统，可以利用多回波穿透植被冠层到达地面，获取真实的地面点云数据，有效地消除植被对地形测绘的干扰。无人机可以自由改变飞行高度和方向，对于地势险峻、深沟峡谷的引水渠首或者深水区，可以接近拍摄，保证勘察数据无盲区。非接触式测量方式极大保障了测绘人员的安全，也大大提高了数据的现势性，使设计人员得到的是反映测区最新情况的第一手资料，为后续科学规划提供可靠依据。

（二）高精度 DEM/DOM 数据生成

通过利用无人机拍摄的大量航拍影像、激光点云等数据，经过专业的摄影测量软件处理之后，可以生成高精度的数字高程模型和数字正射影像。DEM 可以对地表起伏进行数字化模拟，可以准确地反映农田的坡度、坡向、沟渠的纵横比降。基层水利设计人员用该模型可以快速完成土方量计算、汇水面积分析、灌溉自流范围的判断。与传统的稀疏高程点生成等高线图相比，用密集点云生成的数字高程模型可以保留微地貌特征，例如田埂的起伏、旧沟渠的深浅等，这对于田间微灌溉系统布置十分重要，可以有效地避免由于高程误差造成的水流不畅或者田块被淹的问题。

数字正射影像把具有地图几何精度和丰富的纹理特征的照片有机结合在一起。农田水利规划当中，这种影像图好像是一张非常大的高清“照片地图”，它既有准确的地理坐标，又能清楚地显示出农田、道路、房屋、林地等地物的实际

分布情况。设计人员可以直接用数字正射影像来进行渠道选线、泵站选点和配套建筑物布置。这样设计的规划方案最大限度地避开了坟地、重要建筑物、基本农田保护区等，从而减少征地拆迁矛盾。高分辨率影像资料也给工程建成后的资产管理、确权划界提供了一个无可争议的数字化凭证，完成了从规划设计到后期管护的数据链闭环。

（三）三维可视化工程规划设计

随着计算机图形学的发展，把二维测绘数据转化为三维可视化工程模型，已经成为了提高设计质量的重要手段。

1. 三维可视化技术可以把抽象的设计图纸转换成立体的模型。设计人员可以在虚拟空间里从各个角度去观察、推敲渠道、水闸、泵站等建筑物。地形、建筑物融合建模之后，设计人员可以清楚地知道工程布置同周边环境是否协调，进水口设置是否恰当，渠道开挖填筑是否均衡，从而在设计阶段就对方案进行改进，防止施工过程中出现大的变更。

2. 用图形来表现设计方案可以显著减少沟通的成本。基层水利项目方案汇报对象一般为当地村民、村干部及没有水利专业知识决策者。枯燥的工程图纸很难被大众所理解，但是三维漫游视频或交互式模型却能使人们置身其中，直观地感受到工程建成后的效果。利益相关方可以直接看到自己的田地是否被占用，桥梁是否适合农机通行，因此更加愿意参加方案讨论，避免因信息不对称而产生的矛盾，保证项目的顺利实施。

3. 三维设计还可以进一步进行空间分析。在复杂地形情况下，渠道经过山体或者跨越河流时，三维模型可以用于地质条件分析以及结构受力的初步分析。叠加地质岩性纹理之后设计者可以直观地发现滑坡、崩塌等地质灾害隐患点，在模型内设置防护措施以保证工程的安全可靠。

二、地理信息系统与 BIM 融合

（一）基于 GIS 的灌区空间信息管理

地理信息系统在灌区管理当中是“超级大脑”，它不只是一个地图仓库，还是一个强大的空间分析发动机。GIS 可以将土壤类型、种植结构、水资源分布、气象数据、已有的水利设施等各个不同的数据整合到一起进行统一的管理。管理者建立完整的灌区空间数据库之后，就可以清楚地知道每条渠道的走向、每一个

放水口的控制范围、每一块农田的需水特性。对家底的数字化摸查，为水资源的优化配置打下了数据基础。

在规划阶段，用 GIS 的空间叠加分析、网络分析等进行分析可以科学地划定灌溉区块，计算出各个渠道的控制面积和输水长度，并可以确定出最佳的管网级配和管网布置。系统还可以根据数字高程模型自动生成流域边界、汇流线等，帮助排水系统的设计，保证暴雨时农田积水能及时排出去。基于位置的服务使巡检人员的轨迹、工程维修记录、水费收缴等信息可以实时上传到对应的地理要素上，把灌区事务管理变得可视化、动态化，极大地提高了基层水利站所办事的速度和反应的敏捷性。

（二）BIM 技术在水利工程全生命周期应用

建筑信息模型技术以“信息”为核心，把工程建筑物的物理属性、功能属性以参数化的方式封装到三维模型中。农田水利工程中无论是 U 型槽、装配式涵管等标准化的构件还是泵站厂房等复杂的结构，都可以创建出对应的参数化族库。设计阶段使用带信息的构件进行拼装设计，系统会自动统计工程量，生成准确的材料清单，彻底告别人工数图纸算量的麻烦和误差。任何设计的修改都会实时驱动工程量数据的更新，使设计和概算同步联动，有效地控制工程造价。

BIM 技术的价值也体现在施工和运维阶段。施工时用三维模型来指导预制构件的生产、安装，减少返工浪费。工程交付的不只是一个实体工程，还有一个包含所有构件的材质、型号、厂家、安装日期以及维护手册等信息的数字孪生模型。运维人员在模型上点击任意一个水泵或者闸门，就可以看到这个水泵或者闸门的详细参数以及以往的维修记录。全生命周期的信息传递模式可以解决传统信息传递中断的问题，使设施的维修保养更加科学及时，从而有效地延长工程的使用寿命。

（三）GIS+BIM 的协同设计与施工管理

宏观地理场景和微观工程模型的融合，解决了农田水利工程“落地”的难题。单一的建筑信息模型只孤立存在着，缺少周围环境的支撑；而单一的地理信息系统虽然有地形地貌，但是不能表达复杂的建筑物内部结构。把高精度的水利工程模型放到真实的地理坐标场景里，就完成了宏观和微观的完美连接。设计人员在三维地形上调节渠道坡度，使挖填土方量最为合理；准确模拟泵站进水闸门与自然河道的交接状况，改善水流形态，防止淤积和冲刷。

在施工管理上，这就形成一个数字沙盘。施工道路布置、弃土场选择、临时设施搭建等均可以按照该融合场景进行统筹规划。管理者可以给场景加上时间轴，进行施工进度模拟，直观看到各个时间节点上工程的形象变化以及周边环境的影响。以道路或者村庄上方的管网施工为例，利用融合模型可以制定出交通疏导方案，分析施工噪声和扬尘的扩散范围，并据此采取相应的环保措施。协同管理模式把工程建设不再是孤立事件，而是与周边生态、社会环境相协调的过程，体现出现代水利工程建设系统观、生态观。

三、虚拟现实与仿真技术

（一）工程方案的虚拟展示与评审

虚拟现实技术打破了屏幕的束缚，评审专家和用户可以像走进电影里一样，以第一人称的角度，沉浸式的进入未来水利工程之中。借助头戴式显示设备或者沉浸式投影系统，体验者可以在虚拟灌区里自由漫步，站在渡槽上面俯视农田，潜入泵站前池观察格栅的布置情况。沉浸式体验使人们对工程的规模、空间关系有非常敏锐的感知，在平面图纸上不易察觉的空间冲突或者设计缺陷，在虚拟环境中会一目了然。检修通道窄不窄、阀门操作地方是否宽敞、警示标志是不是醒目这些细节，在虚拟评审的时候就能立刻察觉并予以改正。

基层农田水利项目虚拟展示属于公众参与的途径。在占地协调、用水分配的村民大会上，用虚拟现实的形式展示工程建成后自家田块灌溉条件改善的情况，这样直观的利益呈现能够消除村民疑虑，争取群众支持。同时体验者也可以随时对虚拟环境中方案进行更改，例如改变渠系走向、取水口位置等等。经过多次交互式迭代，得到一个技术可行、经济合理、社会认可的最优方案。这种参与式的设计流程是以人为本的建设思想，使工程更具有社会适应性。

（二）施工过程的模拟与优化

1. 农田水利工程点多面广，施工战线长，受农时季节影响大。使用计算机仿真技术，可以在三维模型的基础上加上时间轴，从而对整个施工过程进行四维动态模拟。对重要工序进行逻辑编排可以自动演示场地平整、沟槽开挖、管道铺设、回填恢复等全过程。

2. 在模拟过程中，软件会自检施工资源在时间上、空间上的冲突。狭窄的机耕道上，大型挖掘机、运土车会不会出现堵塞的情况呢？灌溉高峰期进行渠道改

造会改变农业用水吗？经过预演，项目管理方可以根据实际情况修改施工组织设计、错峰工序的安排、增加关键工序的资源投入量以控制工期。

3. 深基坑、高边坡等高风险施工项目，如泵站、水库除险加固，仿真技术可对不同的施工方案所造成的工程结构稳定、安全的风险进行模拟。通过对比不同支护方案的模拟结果来选择最安全、最经济的施工方法。还能模拟极端天气的施工应急预案，比如暴雨突然降临的时候基坑的排水抢险过程，经由虚拟演练来加强施工队伍的应急处置能力，守住安全生产的底线。

（三）洪水演进与灌溉过程的动态仿真

水动力学仿真模型可以用来验证水利工程的功能。对基层水利工程所承担的防洪排涝任务，使用数值模拟技术建立洪水演进模型，可以模拟不同重现期的暴雨洪水在流域内汇流、扩散、淹没的过程。输入地形、雨量、河道断面等数据，可以模拟出洪水在河道中水位的变化，水流的速度分布情况，漫滩淹没区的范围，水深的消涨。设计人员据此可以准确核对堤防高度、排涝泵站规模、涵闸过流能力，找出系统中的薄弱环节，例如由于桥梁阻水造成的水位壅高、局部地势低洼处的积水风险等，进而有针对性地改善排涝布局，提高工程的防灾韧性。

灌溉管理上动态仿真也起到重要的作用。建立渠系水力控制模型，就可以模拟出渠道输水过程中水流的演进和水量损失。根据农作物需水模型和土壤墒情数据，系统可以推算出不同的配水方案下灌溉效率和田间水利用系数。管理者可以进行轮灌、续灌等不同的调度模拟，从而了解不同调度对渠道水位波动及末端供水保证率产生的影响。数字化预演使管理者可以制定出合理的灌溉制度，在旱情来临之前做好应急配水预案，在水资源紧缺之时调整调度策略，保证有限的水资源精准送达最需要它的地块，从而实现农业节水增效。

第四节 生态友好型水利设施建设

一、生态渠道与生态护岸设计

（一）多孔化、近自然化的渠道断面设计

传统的三面光矩形或者梯形混凝土渠道断面，由于表面光滑、水流均匀，不能为水生生物提供附着、栖息的条件，所以常常被称做生态荒漠。与此相反的是生态友好型渠道设计重视断面的多孔性以及近自然性。该设计理念认为，在满足

水力学输水要求的基础上,应尽可能地保持或者模拟天然河道的形态特征。用复式断面结构,枯水期保证主槽输水,丰水期用滩地行洪,给两栖动物提供季节性栖息地。

从材料构造来说,多孔化设计十分重要。采用多孔混凝土、无砂混凝土、干砌石等透水材料做渠道衬砌,保留渠道周边土壤毛细管作用,保持地下水与渠道水体双向补给通道。这种通透性可以调节农田局部微气候,也可以使好氧微生物在孔隙中聚集,对流经的水体进行原位净化。更重要的是,粗糙的断面形态会增大水流的紊动程度,提高水体中溶解氧的含量,给底栖生物创造合适的物理化学条件,从微观层面重新构建农田水利系统的生态基础。

(二) 植生、石笼等生态护岸技术

生态护岸技术是水体和陆地生态系统之间的纽带,主要是利用植物根系的固土作用和工程材料的抗冲刷作用相结合,形成一种稳定、有生命力的岸坡防护结构。目前在全球范围内广泛应用的为植生型护岸,主要有植生混凝土、生态袋、植生毯等。在多孔混凝土或者土工材料内部预先放置植物种子、缓释肥料、保水剂等,待植物生长后,其根系穿过护岸材料深入到边坡土层中,起到“加筋”的作用,大大提高了岸坡的抗剪强度和稳定性。

除了单纯的植被种植,石笼网箱、雷诺护垫也是比较典型的生态工法。采用高强度镀锌钢丝网做箱体,箱体中填当地卵石或块石。石笼结构具有较好的柔性和透水性,地基有微小的沉降也不会使它断裂。经过岁月的冲刷,石块之间空隙被泥土填满之后长出小草和小灌木,使工程结构融入到自然环境中去。会呼吸的护岸能有效消减波浪能量,减小岸坡受到的侵蚀,并为昆虫和小型哺乳动物提供觅食、筑巢的场所,是农田生态系统重要的线性生物廊道。

(三) 为水生生物创设栖息地

农田水利设施创建的时候,主动给水生生物创造栖息地是改良生物多样性的高阶策略。这就需要设计者有跨学科的视野,把水生生物的生活习性融入到工程的细节里。具体措施有:

1. 形成深潭和浅滩交错的序列:在渠道底部设计深潭和浅滩交替出现的形态。深潭为鱼类提供越冬、避暑的深水栖息地;浅滩光照充足,有利于藻类的生长,给水生生物提供丰富的食物资源,同时也有利于提高水流的曝气量。

2. 设置生物避难所和鱼巢:在渠道的侧壁或底部埋设预制混凝土管、空心砖

或者堆砌大块石，形成复杂多孔的结构。在渠道周期性清淤或者水位发生剧烈变化的时候，可以给鱼虾蟹类提供紧急的避难场所，避免种群数量出现剧烈的波动。

3. 设置动物逃生斜坡，在干渠表面比较光滑的地方，每隔一段距离设置粗糙斜坡或者阶梯，便于掉入渠道内的青蛙、刺猬等小型陆生动物爬出，防止工程设施对非目标生物造成意外伤害。

二、湿地净化与生态沟渠系统

（一）在灌区构建人工湿地处理农田退水

人工湿地是模拟自然湿地的结构和功能而建成的工程设施，是处理农田退水最经济、最有效的手段之一。在灌区低洼处或者排水末端，经过精心设计基质层、植物群落以及水流路径，就能够创造出表面流湿地或者潜流湿地。基质层一般由砾石、沸石、生物炭等组成，除了起到物理过滤的作用之外，还为反硝化细菌等功能微生物提供巨大的附着表面积，通过微生物的代谢作用将水中的硝态氮转化为氮气排放。

植物选择与配置对于人工湿地高效运行十分重要。在湿地内种植芦苇、香蒲、美人蕉等挺水植物，以及金鱼藻、黑藻等沉水植物，利用植物根系的直接吸收作用来去除水体中的氮磷营养盐。茂密的植物茎叶可以减缓水流速度，有利于悬浮颗粒物的沉降，同时给根区输送氧气，形成好氧、缺氧、厌氧交替的微环境，从而提高各种形态污染物的去除效率。散落在田地地头的“湿地肾脏”，既能净化回归水，又能调节区域微气候，为鸟类提供栖息地，使农田生态系统整体服务功能大大提高。

（二）生态沟渠对氮磷的拦截与净化

生态沟渠是对传统农田排水沟的生态化改造，把单一的排水通道变成集拦截、吸附、降解为一体的线性净化反应器。生态沟渠通过改造沟底形态和边坡结构，使水流在沟渠中停留的时间明显增长。在沟渠中每隔一段距离设置透水坝、生态堰或者节制闸，阶梯式设计既可以滞留水体、增加沉淀时间，又可以在跌水处增加溶解氧，促进氨氮的硝化反应。

沟渠内生物强化技术也不可缺少。沟底铺设多孔吸附材料，在边坡和沟底种植对氮磷有超强富集能力的本土水生植物，可以形成立体的植物拦截网。作物生长期这些植物与农作物竞争流失的养分，从而有效地削减了进入下游水体的污

染负荷。当生态沟渠系统建设完整的时候，农田排水中的总氮、总磷浓度可以减少 30% 以上至 50% 以上。到非灌溉季节时，干枯的植物残体要及时收割移出，防止营养物质二次释放回水体，这才叫营养物质的移除和资源化。

（三）水利设施与景观生态的融合

现代基层农田水利工程不再只是冰冷的钢筋混凝土构筑物，也是乡村景观的重要组成。规划阶段设计师就会考虑水利工程和周边田园风光、村落肌理相协调，力求打造出“渠成景、水如画”的田园生态景观。地面泵站、水闸等在设计的时候就将当地的传统建筑元素融入其中，使建筑物和周围环境相互融合在一起，不会出现视觉上的冲突。

水面的景观化利用也成了新的方向。依托生态沟渠、建设亲水平台、生态步道、科普长廊，把水利工程变成村民休闲娱乐和接受生态教育的场所。既改善了农村人居环境，又为发展乡村生态旅游、休闲农业打下了资源基础，实现了水利工程生态效益、社会效益和经济效益的统一。在这种融合发展的方式下，农田水利工程就成了人和自然、生产和发展之美的桥梁。

三、绿色施工与环保材料应用

（一）减少施工扰动与水土保持

绿色施工的第一个原则就是最大程度地减少对原生环境的破坏。在施工组织设计阶段，必须对施工区域的生物多样性进行详细的调查，合理规划施工便道和作业面，避开敏感生态区域以及珍稀动植物栖息地。对于必须占用的土地，必须严格控制施工红线，禁止超红线开挖、堆土。

具体的水土保持措施在施工中占据核心地位：

1. 表土剥离保护，开挖前剥离含有有机质、植物种子的土壤（一般 30cm 至 50cm），堆存到设置有临时防护措施的场所（覆盖、撒草籽等）。待工程完工后再将弃土回填到迹地恢复区，利于植被的早日恢复。

2. 泥沙控制、径流管理，施工场地四周设截水沟、沉沙池、拦挡围堰等，防止施工时产生的泥浆、浊水直接排入周围的河道、农田。在雨季施工时要加强对裸露坡面的保护，防止土壤侵蚀造成面源污染。

3. 避开生物繁殖期：按照鱼类、鸟类的繁殖期合理安排施工进度，减少高噪声、高扰动的水下、水边作业，以示对生命的尊重。

（二）利用当地材料与可再生材料

根据地区特点利用当地材料可以减少工程的碳足迹，并体现地域特色。在基层农田水利工程中首先要选择项目所在地附近出现的石材、木材、竹材等天然材料，减少因运输建材而导致的远距离能源消耗和尾气排放。山区水利工程中用开挖出的块石修筑挡土墙或护岸，成本低，石材质地、色泽与环境协调。

可再生材料的应用范围也越来越广。经过防腐处理的竹木材料，可以用来修建小型渠道护坡桩、进水闸门、亲水栈道。竹木材料相比混凝土、钢铁有固碳作用，生命周期结束之后可以自然降解，不会造成永久性的环境负担。一些新型生物基复合材料，如用秸秆纤维增强的生态塑料，也开始尝试用于排水管网和小型水工构件的制造，变废为宝的思路给农业废弃物的资源化利用开辟了新的途径。

（三）施工废弃物的资源化利用

施工过程中产生的废物如果处理不当就会成为巨大的环境隐患，但如果能够合理利用，则可以转化为宝贵的资源。土石方平衡是实现废弃物减量化最基础的办法，经由精确测量与设计，尽可能让开挖量和回填量持平，缩减外弃土方的数量。多余土方可以用来平整地形、填平洼地、形成微地形景观，而不能简单地运往弃土场填埋。

拆除下来的旧水利设施所用的混凝土块、砖石等材料，现代绿色施工提倡破碎、筛选成再生骨料。再生骨料可以用来铺设施工便道路基、填充石笼网箱或者作为生态护岸的填充材料。一方面可以减少天然砂石资源开采，保护山体河床，另一方面可以解决建筑垃圾围城问题。施工现场的废木料、包装材料等也要分类回收，建立详细的废弃物管理台账，追踪每吨废弃物的去向，力争实现施工过程“零浪费”或“低排放”，真正把循环经济理念落实到农田水利建设中。

第五节 工程建设质量管控体系

一、全过程质量标准化管管理

（一）建立从设计到验收的质量标准体系

建立包含设计、施工、原材料采购到竣工验收全过程的质量标准体系，是保证工程质量一致、可靠的保证。设计阶段根据各区域的水土资源状况和种植结构，

制定不同的工程设计导则,对渠道防渗、泵站结构、管道铺设等技术参数做出详细规定,防止设计标准过低造成先天不足。施工阶段的质量标准要细化到每一个工序操作,编制详细的施工工艺手册,将混凝土浇筑、土方回填、砌石勾缝等作业流程图表化、标准化,让一线施工人员一眼就能看出质量要求。

对于原材料的准入标准也不能放松。必须建立严格的材料进场检验制度,对水泥、钢筋、管材、土工膜等主要材料实行“双随机”抽检,保证所有进场材料均符合国家及行业标准。验收阶段,应抛弃只依靠外观、简单测量的传统方法,推行分阶段、分部位的验收标准,建立单元工程、分部工程、单位工程三级验收制度。只有当前环节的质量指标都符合要求之后,才能进行下一阶段的工作,从而形成层层把关、环环相扣的质量标准闭环。如此一套全覆盖的标准体系,能从根本上遏制基层水利工程普遍存在的重进度轻质量的现象,为工程长期运行打下良好的基础。

（二）关键工序的质量控制点设置

农田水利工程多、面广,隐蔽工程多,关键工序质量控制的好坏直接关系到整个工程成败。因此在施工组织设计中要准确找出影响工程安全、功能的核心节点,并设为质量控制点(H点)或者见证点(W点)。如渠道衬砌工程中渠床削坡、平整度是决定衬砌板是否能抵抗冻胀破坏的重要因素,应列为一级控制点,专人旁站监督。对于管道灌溉工程来说,管槽开挖深度、管道连接密封性试压、回填土密实度等都要严格控制。

混凝土工程的配合比设计、搅拌时间、振捣密实度、养护措施等均应有明确的控制指标。在低温或者高温等极端天气施工时要增加温控监测点,防止温度裂缝。对于地基处理、钢筋绑扎等隐蔽工程,在被覆盖前必须做严格的联合验收,并留存影像资料,保证“隐蔽不隐患”。科学地布置控制点,把质量管理的触角伸向施工末梢,就能及时发现偏差、及时纠正,避免微小质量瑕疵发展成大问题。点面结合的控制策略,是提高基层水利工程精细化管理水平的必然选择。

（三）推行质量责任终身制

推行质量责任终身制,是加强工程参建各方质量意识的制度利器,用法律和行政手段将质量责任与个人职业生涯深度绑定。该制度规定,在工程开工前,项目法人、勘察、设计、施工、监理等单位要签订质量终身责任承诺书,承诺在工程建设期间以及使用期内承担相应责任。无论责任人的职位如何变动、岗位怎样

调整，只要在设计使用年限内因为建设原因造成质量事故，就依法追究相关责任人的法律责任。

为了保证责任追究的可操作性，工程现场应该设置永久性标牌，标明参建单位名称和项目负责人姓名，接受社会监督。另外建立完善的质量责任档案，把各责任人身份证号、执业资格章号、手写签名等信息存入电子档案系统，使责任主体可以追溯。这样一种人随工程走、责任捆绑的机制，可以大大提高参建人员对工程的敬畏心和责任感，使他们在每一个决策、每一次操作时都如履薄冰，自觉地抵制偷工减料、违规操作。放眼全球，德国、日本等国在水利基础设施建设中推行的终身责任制，已经被证明是保证工程质量、延长工程寿命最有效的制度之一。

二、智能化质量检测与监测

（一）无损检测技术在工程中的应用

无损检测技术由于具有非破坏性、高效性、高精度等特点，在基层农田水利工程质量检测中具有很大的应用前景。相比于传统的钻芯取样等破坏性检测方法，效率低，对工程结构造成损害，不能实现大面积全覆盖检测。地质雷达技术可以快速扫描渠道衬砌板后脱空状况、土壤密实度，用电磁波反射图谱准确定位隐患部位，给后续注浆加固提供可靠的依据。回弹仪联合超声波检测仪使用时，可以无损检测混凝土结构强度以及内部缺陷，从而评判水闸、渡槽等重要建筑物的结构完好性。

长距离输水管道工程里，管道爬行机器人装有高清摄像头和激光扫描仪，可以进入管道内部做全面检查，自动找出裂缝，变形，接口错位等情况，克服了人工无法进入狭小空间检查的困难。

红外热成像技术利用物体表面温度不同来迅速找到堤坝、渠道的渗漏点以及异常含水区，在工程运行初期隐患排查中起到不可替代的作用。

无损检测技术应用场景及优势表

技术名称	应用场景	优势特点
地质雷达	渠道衬砌脱空、土壤密实度检测	快速扫描、精准定位隐患
回弹仪与超声波检测仪	混凝土结构强度与内部缺陷检测	无损、评估结构完整性
管道爬行机器人	长距离输水管道内部检查	全方位检测、解决狭小空间检查难题
红外热成像技术	堤坝、渠道渗漏点及异常含水区识别	快速、初期隐患排查

从上表可知，由于高科技手段的介入，检测结果更加准确、科学，人为因素造成的干扰被削减了，质量问题无处藏身。

（二）施工过程的远程视频监控

由于基层农田水利工程所在位置分散、范围广，战线长，监管人员少，需要建设 5G 和物联网技术的远程视频监控系统。在施工现场的重要施工点、拌合站、材料堆场等处安装高清球机、全景摄像机，管理人员无需亲自到现场，在指挥中心或者通过移动终端就可以实时了解施工情况。这可以对施工过程实施全天候的“云监工”，而且能依靠 AI 图像识别算法自动抓拍未戴安全帽、未穿反光背心等违规行为，甚至可以检测出混凝土浇筑不连续、土方回填厚度超限等质量违规。

对于偏远地区或者网络信号不佳的施工地段，可使用太阳能供电、4G/5G 无线传输的监控设备，或用无人机定期巡航拍摄。无人机装载高清相机和倾斜摄影模块，能生成施工现场的三维实景模型，用不同的时期模型来比较可以直观的分析工程进度、土方量的变化。视频监控数据存放在云端，既是工程进度款支付的审核依据，又是日后质量问题追溯的重要证据。数字化监管方式有效解决了基层监管人员短缺的问题，降低了监管成本，提高监管效率。

（三）工程安全与健康监测系统

工程建设及之后的运行过程中，植入智能化的安全与健康监测系统，就给水利工程装上了实时的“体检医生”。大型泵站、水闸、高填方渠道等重要建筑物在施工期间就预埋渗压计、应力计、位移计等传感器。这些感知装置就像人体的神经末梢一样可以实时采集到结构内应力、渗流压力、沉降变形等各种数据。物联网网关把数据上传到云平台，系统内建的分析模型会对数据实施实时处理以及趋势预估。

监测数据超过安全阈值时，系统就会引发多级报警程序，采用短信、APP 推送等手段尽快将信息告知管理人员，从而让他们马上采取紧急措施，避免事故的

发生。汛期高水位时可以对堤坝的渗流稳定性情况进行实时分析，在冰冻期检测渠道衬砌板是否冻胀，提供抗冻养护的依据。长期积累的监测数据形成工程健康档案，给工程的设计参数优化、科学养护维修计划的制定提供数据支撑。由人防转为技防，大大提高了农田水利工程的主动防御能力、全生命周期管理水平。

三、质量追溯与信用评价体系

（一）建立工程质量信息档案

创建全要素、数字化工程质量信息档案，是做到质量可追溯的前提。利用现代信息技术给每一个农田水利项目赋予一个唯一的“数字身份证”。其内容不仅要有传统的图纸、施工日志、检测报告电子版，还要把几何信息、材料特性、施工工艺、验收数据集成到三维模型里，用 BIM 技术。点击模型中的任意构件，就可以看到这个构件的原材料来自哪里、生产厂家是谁、施工班组是哪一组、验收人员是谁、验收时间是几号等详细信息。

用区块链技术来存证关键质量数据，由于去中心化、不可篡改的特点，能很好地保证档案数据的真实性及公信力。在工程实体上，可在水闸机房、渠道断面等显眼位置设置二维码标识牌，公众通过手机扫描就可以获取工程简介、参建单位信息、质量监督电话等，从而形成良好的社会监督氛围。贯穿工程整个生命阶段的信息档案，一方面可以在日后运行维护、改扩建的时候提供详实的基础资料，另一方面也可以使质量问题的责任认定有迹可循，从源头上加强了各方的质量责任意识。

（二）对施工、监理单位的信用评价

建立科学、动态的信用评价体系，是实行施工、监理单位分类监管、优胜劣汰的有效办法。水利主管部门应制订统一的信用评价标准，把工程实体质量抽检合格率、施工现场安全文明情况、合同履行情况、农民工工资支付情况等纳入评价指标体系。评价过程应采用日常检查和定期考核相结合的方式，运用“双随机、一公开”执法检查对市场主体良好行为和不良行为进行实时记录，按照得分来自自动产生信用等级。

评价结果要同招投标机制紧密结合，实行差别化的市场准入政策。信用等级高的单位参加招投标活动时可获加分奖励，履约保证金的缴纳比例也会减少，日常监督检查的频率相应降低；信用等级低、被列入黑名单的单位依法不能参加新

工程的招标，违法失信成本相应提高。以信用为基础的市场监管，净化建筑市场环境，使施工单位、监理单位自觉加强内部管理，把质量、信誉当作企业生存之本，从而提高整个行业的技术素质和管理水准。

（三）引入第三方质量检测与评估

打破传统自检、自评、自验模式可能出现的利益输送、人情干扰，引入独立、专业的第三方质量检测和评价机构就显得非常必要。第三方机构独立于建设、施工、监理单位之外，只对法律法规和技术标准负责，可以从客观、公正的角度给工程质量进行体检。政府部门可以采取购买服务的方式，委托有相应资质的第三方检测机构对隐蔽工程、关键部位、主要原材料进行飞行检测（突击检查）。

第三方评估不应该只限于对实体的质量检测上，还应该延伸到对质量管理体系运行效果的评价上来。专家团队通过查阅资料、现场询问、现场测试等方式对项目法人履职能力、监理单位旁站到位率、施工单位质保体系运行情况等进行综合打分，出具具有法律效力的评估报告。该报告将会成为工程验收、绩效考评、资金支付的凭证。独立质量审计已经成为部分发达国家水利工程中常规的质量管理措施。第三方检测与评价的引入可以产生“鲶鱼效应”，打破地方保护主义，发现深层次的质量问题，促使参建各方始终保持警醒，保证每一方混凝土、每一米渠道都能经得起历史和时间的考验。

第六章 农田水利工程运维管理创新

第一节 全生命周期管理理念应用

一、LCM 理念的引入与框架构建

（一）从“重建轻管”到“建管并重”的转变

我国长期以来，在基层农田水利建设上一直存在重建设投入、轻运行管理的现象。很多工程在建成后，由于缺乏足够的维护资金和管护措施，很快出现老化损坏，陷入投资、建设、损坏、再投资的恶性循环。根本原因是考核制度重新增工程量的显性政绩，轻存量资产隐性效益的保持。全生命周期管理理念首先要实现思想认识上的根本性转变，把运维管理放在工程全寿命期的中心位置，认识到运维是建设的延续，也是工程价值实现的根本保证。

要由“重建轻管”转向“建管并重”，就必须从制度设计上加以纠正。这就意味着项目立项之初就要同时编制详细的运维方案，落实管护主体和经费来源，防止出现“有钱建、无钱管”的情况。同时建立建设质量同后期运维效果相挂钩的责任追究制度，促使建设单位在施工过程中充分考虑后期的维护便利性和耐久性，防止由于施工阶段的先天不足给后期管理带来无法挽回的损失。这样就使得管理重心后移，使工程建设与农业生产服务更加紧密地结合在一起。

（二）涵盖规划、设计、建设、运行、更新、报废全阶段

全生命周期管理要打破各个阶段的壁垒，把工程看作一个动态发展的有机体。在规划与设计阶段不能只考虑工程结构本身，而应该充分预判未来几十年农业种植结构调整、水资源供需变化、生态环境影响，将未来运维需求前置转化成当下的设计参数，例如选择耐磨损材料、预留检修通道等。建设阶段要严控质量标准，形成完备的工程档案，为后期运维积累足量的数据基础。运行阶段历时最久，须要不断开展监测和保养工作；更新和报废阶段牵涉到资产残值回收以及环境整治。

1. 规划设计阶段必须做全寿命期的技术经济对比，不能只考虑初始投资，长

期运行的能耗、维修费用也不能忽视。低造价高运费的短视方案不得，农户需求要充分调研，工程布局要符合农业生产实际。

2. 建设移交阶段，实行建管结合模式，提倡未来管护主体尽早参与工程建设监管，掌握工程特性，移交时将完整的数字化图纸及维护手册一并移交，无缝对接。

3. 运行维护及报废阶段，构建动态的健康诊断体系，依据工程状况适时调整保养策略，在工程步入经济寿命或者技术寿命终点之时，妥善开展报废更新工作，防止带病运行导致安全事故发生。

（三）全生命周期成本分析方法

全生命周期成本分析是经济评价的一种综合性手段，它超越了传统的工程造价控制范围，把工程全生命周期内所有的费用都包括进来。初始建造费用、运行时的能源消耗费用、定期维修和应急抢修费用、管理人员工资费用、拆除回收费用。使用资金的时间价值概念把不同时段发生的费用折算成现值再求和，就能更准确地体现工程的经济性。该种分析方式可以清楚地表明，高质量、高标准的初始投入虽然会增加建设成本，但是能大幅度地减少后期运维负担，最终在全生命周期内达到总成本最低。

此法要能广泛使用，必须要有庞大的基础数据库，其中应包括各地区不同类型水利设施的历史维修记录、能耗情况、人工费等数据。挖掘分析大数据之后就可以创建准确的成本预测模型。传统上渠道防渗材料多采用价格低廉的混凝土板，但是在全生命周期成本分析之后可能会发现，新型高分子复合材料单价较高，但是它抗冻胀、耐腐蚀、施工方便，因此全寿命期修补次数少、渗漏损失小，综合效益反而更好。

该种方法的推广也能规范好政府与市场间的投入分担关系。经过清晰测算运维阶段的刚性成本支出，可以给农业水价改革提供科学依据，合理确定水费征收标准以及政府精准补贴数额。促使决策者从整个社会角度来考虑资源利用效率，克服部门利益分割造成的成本转嫁，为基层农田水利工程投融资模式创新奠定了算账基础，有利于提高资金使用效益。

二、资产管理与决策优化

存量资产规模不断增大，怎样依靠精细化管理来达成资产保值增值，成了基层水利部门不得不面对的课题。资产管理与决策优化，目的在于利用现代信息技

术，建立水利工程资产的数字映射，对资产状态实施实时感知和数据分析，制订出合理的保养和更新计划，在资金有限的情况下，保证工程设施一直处在最好的服务状态。

（四）建立水利工程资产台账

建立全面、准确、动态的水利工程资产台账，是开展现代化水利工程资产管理的基础。考虑到基层农田水利工程数量很多、分布很广、线路很长、产权复杂的实际情况，传统的纸质档案管理方式已经不能满足需要。资产台账的建立首先要对区域内的沟渠、机井、泵站、水闸等各类设施做全面清查，使用卫星遥感、无人机测绘等技术手段对这些设施的位置和属性进行准确记录。每一个工程实体都应该有一个唯一的身份标识，把它的建设年代、规格型号、设计标准、权属单位等静态信息同历次的维修记录、运行状态评价等动态信息联系起来，形成“一物一码、一物一档”。

水利工程资产台账信息示例

信息类别	示例内容	备注
基础信息		
资产名称	某村农田灌溉泵站	
资产编号	PS-XY-001	唯一身份标识
建设年代	1995 年	
规格型号	200QJ-30/4 型潜水泵	
设计标准	设计流量 30m³/h	
权属单位	某镇水利管理站	
地理坐标	经度 XXX，纬度 YYY	精准定位
动态信息		
历次维修记录	2010 年电机检修，2015 年叶轮更换	详细记录维修时间、内容、负责人
运行状态评价	泵站运行稳定，能耗略高	定期更新
历史故障	2018 年轴承损坏停机	
维护手册	详见电子版《泵站维护规程》	
关联数据	连接土地确权、财政资金平台	共享互通

资产台账的价值体现就是动态更新和共享使用。管理人员可以利用地理信息系统以及移动互联网技术，借助移动终端对巡查数据以及维修记录予以更新，保证台账的信息与工程的实际状况一直相符。数字台账要冲破部门间的 a 信息孤岛，同国土、农业、财政等有关部门的数据平台实现互连互通。与土地确权数据相联

系可以明确每一段渠道所服务农户的范围；与财政资金管理系统对接可以跟踪每一笔管护资金的流向和绩效。清楚的资产台账，可以解决家底不清的问题，也可以给明确管护责任、推进工程产权制度改革提供法律依据和数据支撑。

（五）基于状态的维护策略

基于状态的维护就是运维管理模式从被动抢修到主动预防的变化。传统的定期维护模式一般是按照固定的时间间隔来进行的，这样就容易造成设备在状态较好的时候被过多地维修，而在设备迅速劣化的时候却出现维修延迟。状态维护策略就是按工程设施的实际健康状况来决定什么时候维修，维修什么。这就需要建立完善的监测感知体系，通过在工程上安装水位计、流量计、振动传感器、应力计等物联网设备，对工程运行的重要参数进行实时采集，同时结合人工定期巡检和影像资料，对工程进行全方位的“体检”。

健康状况维持主要依靠健康诊断模型、风险评价系统。对大量的运行数据进行趋势分析，可以了解设备性能衰退的规律。水泵振动频率的微小变化就可以用来推测轴承磨损情况，渠道流量和水位的对应关系可以判断出淤积或者渗漏情况。系统会依据事先设定的阈值给出不同的预警以及相应的维护建议。对处在亚健康状态的设施要及时开展小修保养，防止小病变成大病；对重点部位、重点区域加大监测频率，并且优先调动维修力量。

这种方法可以提高运维资金使用效率。在资金有限的情况下，把资源集中到最需要维护、对系统安全影响最大的环节上，避免出现平均用力的撒胡椒面式做法。状态维护还要重视维护过程的标准性和规范性。每次的维护作业都必须按照技术规程执行，维修前后状态的变化要如实记录，形成闭环反馈。反馈数据反过来又能修正诊断模型，使状态评价越来越准确。经过长时间的改进完善，最终形成一个监测、诊断、决策、执行、评价的智能运维系统，使工程的使用年限大大延长。

（六）更新改造时机的科学决策

农田水利工程为实物类资产，具有客观的生命周期，合理确定更新改造时机，是实现投入产出平衡的重要决策。过早更新会浪费资产的剩余价值，增加不必要的财政支出；过晚更新就会使工程故障率急剧上升，维修费用呈指数增长，严重的时候会出现断水停灌的情况，影响农业的稳产保供。科学的决策机制应该把工程的物理寿命、经济寿命和技术寿命都考虑进去。物理寿命是由材料老化、结构

损毁的程度决定的；经济寿命是维持继续运行的边际成本与更新改造年均分摊成本比较；技术寿命是新技术出现后，由于效率低、能耗高而使旧工程失去使用价值的时间。

构建更新改造决策模型要使用多目标优化算法。决策者在算经济账的时候还要算社会账、生态账。模型需要包含供水保证率、灌溉水利用系数、能源单耗、对周边生态环境的影响、农户满意度等多指标，用层次分析法或者模糊综合评价法对各个工程的更新紧迫性进行排序。如对于一座高能耗的老旧泵站，虽然其物理结构仍然可以使用，但是如果通过更新改造可以节约大量的电费，并且能够大幅提高提水效率，那么从全生命周期效益的角度出发，提前更新是合理的。

决策过程还要考虑到资金的可得性以及政策导向。财政资金紧张的年份要优先安排存在重大安全隐患、直接影响灌溉核心效益的“卡脖子”工程；在政策宽松的时候可以适度超前推广绿色智能的新技术、新材料。决策机制要具有动态调整的能力，一旦外部环境、工程状况发生改变，就对计划进行复核，做出相应的调整。同时还要制定专家评审、群众参与的决策程序，广泛收集水利专家、基层干部、受益农民的意见，使农田水利设施的新旧更替走上良性循环轨道，保持工程体系的持续活力。

第二节 智慧水务平台建设与运维

一、一体化水务信息平台架构

（一）感知层、网络层、平台层、应用层设计

感知层属于智慧水务的“神经末梢”，它最重要的任务就是不断地、准确地从物理世界采集原始数据。在基层农田水利领域中感知体系要全面覆盖水源地、灌溉渠系、田间地头和各类水工构筑物等主要部分。比如在重要的取水口设置超声波流量计或者电磁流量计，从而对水量进行精确计量，在干支渠和重点闸门处设置水位计和闸位传感器，实时监测输水情况，在田间则需要高密度布置土壤墒情传感器、小型气象观测站和作物生长监控摄像头。所有的设备必须具有工业级防护能力，可以抵御野外恶劣的环境，并且带有边缘计算模块，对数据进行初步清洗和校验，保证上传数据的真实性、有效性。

网络层是连接感知设备和数据中心的传输通道，网络层是否稳定、覆盖范围是否够大决定了整个系统能否正常运转。由于农田水利工程多分布在地理环境较为偏远、地形比较复杂的农村，单一的通信方式不能满足需要。因此网络层应该采用有线和无线结合、公网和专网互补的混合组网方式。光纤网络可以覆盖到的泵站和管理所，使用有线宽带来保证大流量数据稳定传输；在田野地区利用 5G 技术高带宽低延迟的特点，结合低功耗广域网技术，建立起一张全域覆盖的物联网数据传输网络。针对深山峡谷等通信盲区，北斗卫星短报文通信可以作为应急传输手段，在极端天气或者灾害发生的时候，保证重要的监测数据可以回传，使通信链路畅通无阻。

平台层和应用层就是数据的深加工和业务的多种展示。平台层使用先进的云计算架构，把感知层产生的海量异构数据汇集到一起，用分布式存储和并行计算技术对数据进行标准化之后持久化保存。在此基础上构建数据中台和业务中台，封装各种通用算法模型和业务逻辑组件，给上层应用提供灵活方便的接口服务。应用层根据不同的用户群体设计出不同的界面。给管理人员提供大屏可视化指挥、巡检管理、资产管理等综合管理系统；给农户、用水合作组织提供水权交易、灌溉申请、费用查询等便捷的移动端应用程序，从而实现从云端到指尖的“全链条”智慧化管理。

（二）云平台与大数据中心建设

云平台、大数据中心是智慧水务体系海量数据存储，强算力的基础。建设时要全面考虑数据安全、系统稳定、计算资源可以弹性伸缩。从基础设施方面讲，可以利用现有的政务云或者行业云等资源来创建混合云架构；把不敏感的公共服务数据存储在公网云上；借助公网云强大的弹性计算能力来应对灌溉高峰期访问量剧增的问题；但是对工程安全、水资源调配等重要敏感数据就存放在私有云或者本地数据中心里；保障数据主权和数据安全处于可控的状态。

1. 硬件设施建设是大数据中心的基础保障。需要高性能服务器集群、大容量磁盘阵列、高速网络交换设备，构建高可用、高并发的计算存储环境。在存储系统的设计上采用分布式文件系统和对象存储相结合的方式，可以同时满足结构化监测数据的快速查询以及视频监控、无人机巡检影像等非结构化数据的大规模存储需求。同时必须建立完善的异地容灾备份机制，在自然灾害或者人为攻击造成主数据中心瘫痪的时候，能够使备用中心快速接管业务，保证数据不丢失，服务不断线。

2. 软件环境、算力调度能力的打造同样不能忽视。大数据中心要配备先进的大数据处理框架,支持流式计算和批处理计算两种模式。流式计算主要用于实时监测数据的处理,使告警信息可以做到毫秒级响应;批处理计算主要是对历史长序列数据做深入挖掘和分析,发现水文规律和工程运行特征。因此需要引入人工智能计算引擎加载水文预报算法模型、需水预测算法模型、工程健康诊断算法模型等将沉睡的数据变成有价值的信息资产。使用容器化技术以及微服务架构,可以达到计算资源的动态分配、任务调度的目的,极大地提高硬件资源的利用率,同时有效地降低运维成本。

(三) 数据标准与接口规范制定

智慧水务创建碰到的最严峻考验之一,就是多源异构数据融合以及系统之间互相连接。为了彻底消除“数据孤岛”问题,制定统一、规范并且具有前瞻性的数据标准体系就显得十分重要。标准应涵盖数据采集、传输、存储、处理、交换、销毁全过程,和现行国家、行业标准保持高度一致,还要吸收国际通用技术规范。在具体的编制过程中要建立详细的数据字典,对水利工程对象、监测指标、行政区划、组织机构等基础信息进行统一编码,确定各类数据的名称、类型、长度、精度、计量单位,保证不同厂家、不同批次设备采集的数据在语义上完全一致,为后续的大数据分析清除障碍。

制定接口标准可以达成系统集成以及业务协同的目的。多元化信息化环境中各个子系统由不同的供应商开发,使用不同的开发语言和技术架构。因此定义一套标准化的应用程序接口规范是必不可少的。此规范应该对接口的通信协议、报文格式、参数含义、错误代码和安全认证方式做出明确的规定。采用表述性状态转移风格的接口设计,用轻量级的数据交换格式进行数据传输,可以降低系统的耦合度,提高交互效率。针对历史遗留下来的老旧系统,就要开发专门的数据转换适配器,把非标准接口转换成标准接口,以此达成新老系统的平滑对接。

数据安全标准给整个标准体系划了一条不能触碰的“红线”。制定接口规范的时候,也必须确定数据安全交换的协议。身份认证,访问控制,数据加密传输,操作审计等。对于关系到国家水安全、关键工程参数等敏感数据,一定要使用国产密码算法加密且要严格实行分级分类管理。根据不同的用户对数据使用的授权大小,做出具体的规则,规定数据可以共享的范围和限度,防止数据泄露、滥用等。依靠统一认证授权中心完成单点登录以及统一鉴权,保证只有合法的用户与

应用才可以访问平台资源，进而形成一道牢不可破的数据安全壁垒。

二、核心功能模块开发与应用

在打下坚实的基础架构和数据底座之后，对核心功能模块进行开发和应用，就是智慧水务平台发挥效用的直接体现。这些模块主要是根据农田水利管理业务需要，采用数字化方式解决农田水利管理资源分配、工程养护、服务群众等过程中出现的难点、痛点问题，实现水利管理由被动应对到主动预判的转变。

核心功能模块概览

模块名称	主要功能	核心价值
水资源实时监控与调度	地理信息可视化、智能需水预测、供水调度、自动化控制、应急调度	精准管理水资源，提高利用效率，缓解用水矛盾
工程安全监测与预警	结构健康监测、图像识别、多级预警、大数据趋势预测、维护建议	提前发现隐患，预防灾害发生，延长工程寿命
水费计收与用户服务	智能计费、多样化支付、互动交流、报修投诉、农户信息推送	公开透明，提升服务便捷性，保障资金来源，促进科学用水

如核心功能模块概览所示，以下是具体的模块功能介绍：

（一）水资源实时监控与调度模块

水资源实时监控调度模块属于智慧水务平台的主要业务模块，对水资源实施精细化、合理化管理。本模块借助地理信息系统技术，创建起农田水利工程的“数字孪生”场景，把实际水系分布，渠道走向，闸站位置，实时水情等信息，用三维可视化的方式直观地显示在管理大屏上。管理人员不必亲临现场，就可以通过数字地图对全域水资源的动态有全面的了解，各级渠道的流量、流速，水库、塘坝的蓄水量，地下水位的升降趋势等。全景式监控的能力大大提高态势感知的及时性、全面性。

本模块在实时监测的基础上，又整合了智能水资源调度系统。根据农业灌溉季节性强、需水量变化大的特点，系统内部装有需水模型和水力学模型联合调度算法。根据气象预报数据、土壤墒情实时监测数据、作物生长周期需水规律，自动计算出未来一段时间内各个灌溉片区的需水量。再根据目前水资源的供水量和渠道的输水能力，自动生成最优的配水方案，准确得出各个闸门的开启时间、开启度以及开启时长。既可以避免由于经验调度造成的浪费或者灌溉不及时，又可以有效缓解上下游的用水矛盾。

自动化控制成为调度模块得以落实的重要一环。通过现地自动控制终端的联动,调度指令可以直接转化为闸门、泵站的精确控制动作。系统具有远程手动控制、定时控制以及全自动闭环控制功能。自动模式下,系统会根据实时的流量、水位数据自动调节闸门的开度,保证渠道水位稳定,保证配水精度。该模块还具有突发事件应急调度的功能。系统在检测到暴雨洪水或者突发水污染事件的时候,可以模拟出不同的应急处理方案,给决策者提供快速的关闸蓄水、开闸泄洪或者应急调水等指令,最大程度的减少灾害造成的损失,保障灌溉安全和区域水安全。

（二）工程安全监测与预警模块

农田水利工程数量多、分布广,且多为土木结构,长期使用很容易受到自然侵蚀和人为破坏,安全隐患潜伏期长、突发性强。工程安全监测与预警模块,用全方位的健康监测网络扮演着工程的“全科医生”。除了传统位移、沉降、渗压等结构监测数据外,本模块把视频监控和无人机巡检影像数据也融合进来。用先进的图像识别技术来识别渠道边坡滑坡、堤坝裂缝、闸门锈蚀变形、违章建筑侵占等现象,把宏观和微观的监测方式结合起来。

预警机制成了这个模块发挥防灾减灾功能的关键。按照设计安全标准以及以前运行的记录,系统给各个监测指标设定多级的预警阈值。当监测数据超过设定的范围或者数据的变化速率出现突变的时候,系统就会立即触发报警程序。报警信息不再只是控制中心大屏显示,而是通过短信、手机应用程序推送、声光报警器等多种方式,第一时间将报警信息通知到辖区内的巡检人员、工程管理负责人、相关行政领导。预警信息包含报警地点,异常指标数值、潜在的风险等级以及应处的措施等,保证最后一线信息的通路畅通无阻。

大数据趋势预测分析属于该模块的高级应用。系统不仅可以对当前的异常情况发出报警,还可以通过挖掘长序列监测数据来建立工程健康衰变模型。从而使系统可以预测出工程结构未来一段时间的发展趋势,提前发现可能出现结构疲劳或者结构稳定性下降。系统会据此生成预防性维护建议,指导管理单位在工程损坏之前进行有针对性的加固或者维修,把抢修变成保养,大大提高工程的使用寿命。汛期时,此模块还可以按照水文预报来模拟高水位运作下的工程安全状况,给防汛调度提供参考,保证工程安全度汛。

（三）水费计收与用户服务模块

水费计收和用户服务模块,是水利管理部门同广大用水户之间的重要纽带,

也是工程良性运转资金来源的重要渠道。传统的水费收取方式大多依靠人工抄表、现金缴费，效率低且易产生计量纠纷、资金截留的风险。本模块用物联网智能水表、电子支付方式对水费收取过程进行全方位的革新。系统可以设置阶梯水价、分类水价等多种计价方式，并能根据用水人种类（普通农户、种粮大户、农业企业等）和作物种类来计算用水人应该缴纳的水费。用户可以随时通过手机端查看自家用水量、水费账单、账户余额，使消费过程公开透明，有效化解因为计量不准产生的矛盾。

支付渠道的多样化与便捷化，属于本模块的一大特点。全面接入微信支付、支付宝、银联云闪付等主流第三方支付平台以及网上银行接口，用户可随时随地进行水费预存、缴费。对于不太熟悉智能手机的老年人，系统还保留了线下服务网点代缴的功能，配备手持智能终端设备，现场收费、现场打印发票、实时上传数据，保证资金流、信息流同步，彻底杜绝了“人情水”、“糊涂账”现象的发生，保证水费足额、及时进入银行账户，为工程的日常维护养护提供可靠的资金保障。

用户服务功能主要是提高农户的用水体验以及参与感。模块里加入了互动交流社区以及报修服务。农户在田间发现渠道破损、设备故障、灌溉纠纷等，可以通过手机拍照后一键报修或者投诉。系统会自动给每个工单分配到片区网格员去处理，在过程中全程跟踪，把处理结果反馈给用户，得到用户的满意度评价，完成闭环监管服务流程。系统会定时给农户推送天气预报，土壤含水率信息，科学灌溉建议措施，农业政策宣贯等信息，从而引导农户进行科学灌溉，节约用水。经过这样的双向互动服务模式之后，农户对于水利工作的理解与认同就会不断加强，促使基层水利管理由原来的单一管理向社会共治方向积极转变。

第三节 设备维护与更新改造策略

一、标准化与精细化维护流程

（一）制定设备维护手册与 SOP

在基层水利工程设备的实际运行当中，设备维护手册以及标准作业程序的制订为规范化管理打下了基础。这不仅仅是一份操作说明，而是根据工程设计参数、设备制造特点、当地土壤、水质、气候等环境因素来定制的执行指南。一套完整

的维护手册应该包含设备整个生命周期的所有内容，从最初的安装调试、试运行参数检查、每天的启停、季节性的封存与启用等每一个步骤都应该有详细的说明。SOP 的编制要遵照“动作标准化、流程可视化、风险可控化”的准则，把繁杂的机械原理转化为一线管护人员容易明白的执行动作。基层管护人员素质参差不齐，手册的表现形式也不能单一起来，除了图文之外还要加上流程图、实操视频、增强现实导向的数字化指引等，这样才能保证不同背景的操作员把握住重要的管护关键。

随着农业种植结构调整、灌溉技术更新，维护手册、SOP 不是一成不变的死文件。引进新型变频控制柜、智能水肥一体化设备或更换不同材质的管道阀门的时候，应即刻对相关操作规程进行修订。编写人员由设备供应商的技术员、水利工程的专家、有管护经验的职工组成，保证严谨和可行之间相互验证。标准作业程序中还应明确每一个操作步骤的关键控制点和潜在风险源，检修深井泵时进行电气隔离、清理渠道拦污栅时防止跌落等，必须按规定的顺序进行，不得跳过重要的安全步骤。制度化的约束可以最大程度上减少人为误操作造成的设备损坏风险，保证人员和资产的安全。

（二）日常巡检、定期保养、故障维修制度

创建分层次、全覆盖的设备保养维修体系，这是将隐患消灭在萌芽时期的手段。这个体系一般由高频次的日常巡检，周期性的深度保养，响应及时的故障维修这三部分有机构成，形成闭环。

1. 日常巡检要求管护人员做到眼到、耳到、手到、心到。用每天开机前和关机后的时间，通过耳朵听水泵机组的运转声音，用手摸电机外壳的温度，看控制柜的指示灯是否正常，观察管道连接处的密封情况来作出判断。高频次检查可以及时发现螺栓松动、润滑油泄露、异响震动等早期故障，防止小故障引发停机事故。

2. 定期保养就是根据设备的运转时长或者季节周期来进行深层次的保养。灌溉季节结束之后，必须对所有的金属构件进行除锈防腐处理，更换齿轮箱润滑油，清洗过滤器滤芯，对电气线路进行绝缘测试。对长期处在水下浸泡状态的潜水泵等重要设备，按照年度计划开展吊装检修，查看叶轮磨损状况，机械密封是否完好，保证次年灌溉高峰期能“拉得出、打得响”。

3. 故障维修制度的核心就是时效性和专业性。建立健全分级响应机制，一般

机械故障管护站要保证 24 小时内完成修复工作，对控制部分或者大型电机等重大故障，必须启动应急预案，调动区域内维修力量或者请求厂家技术援助，争取在农作物需水临界期前恢复供水，将农业损失控制到最低限度。

制度的执行不能仅仅依靠自觉，还要靠考核机制来推动。应该把巡检记录是否完整，保养计划完成的比率，故障修复及时率等当作管护人员绩效评价的依据。对在巡检中及时发现重大隐患、避免事故发生的给予实质性的奖励；对于保养不力造成设备过早报废的，要追究责任。用奖惩分明的办法促使管护人员改变坏后再修的被动思想，向主动养重于修转变。

（三）维护记录与档案管理

设备维护记录不但是工作痕迹的留存，也是改善管理决策的数据资产。每一次的巡检数据，每一次更换部件的型号、每次故障的详细情况以及处理结果都应该详细的记录下来。传统的纸质记录容易丢失，也不利于统计分析，现代化管护模式提倡建立电子化的设备档案系统。每一个水泵、一个闸门就应有一个唯一的身份标识码（二维码或者 RFID），管护人员手持终端一扫就可以录入本次的维护情况，并实时上传到云端数据库。于是管理者可以随时调出任意设备的全部档案信息，清楚地了解该设备的使用时间、维修次数、备件消耗情况。

档案管理价值更多的在未来的指导上体现。经过对长期积累起来的维修数据进行分析可以找到某品牌、某型号设备的故障规律。发现某一批次电磁阀在超过 2000 小时后普遍出现线圈烧毁问题的时候，管理者可以在后续采购中改变选型或者提前进行预防性更换。档案的完整性是进行工程效益评价、资产折旧计算的依据，也是申请财政资金支持更新改造的数据支撑。完善的设备报废更新历史记录，可以证明设备已经到了设计寿命，而维修费用已经大于新设备的价值，从而使得资产管理程序合法、透明。档案管理应该包含设备的出厂技术资料、图纸、软件备份等静态信息，保证人员更替时不出现断档，管护工作能够连续进行。

二、预测性维护技术应用

（一）基于振动、温度等数据的设备故障预测

物理参数的异常常常就是设备出现故障的前兆。布设高精度传感器网络，可以给水利设施赋予感知自身健康状况的能力。在泵站核心电机和轴承处装设振动传感器、温度传感器，可以对设备运行过程中细小的变化做出实时捕捉。机械设

备的磨损、不对中、动不平衡等常见故障，早期都会以某个频率的振动信号增大来表现。滚动轴承内圈剥落会形成不同于外圈损伤的特征频率，频谱分析技术可以使得技术人员在轴承抱死之前找到故障源。温度监测也十分重要，当电机绕组温度异常升高的时候，一般都意味着散热系统堵塞、过载或者绕组之间短路等，能够在绝缘层损坏之前自动断电并发出警报。

除了振动、温度之外，液压系统的压力脉动、润滑油中金属屑的含量、电气系统的电流谐波分量等都是很好的诊断指标。在大型灌区的主干管网当中，依靠流量传感器与压力传感器联手形成的“感官系统”，能够及时发现管道内部淤积的严重情况或者细微的渗漏点。当监测到水泵扬程和流量特性曲线偏离出厂标准曲线的时候，可以判定叶轮气蚀或者口环磨损。多源异构数据实时采集，然后进行边缘计算处理，这就是预测性维护的感知基础。农田水利现场环境恶劣，潮湿、尘土、雷击等都会对传感器提出很高的防护要求，所以在选择时要选用工业级或者军工级防护标准的设备，并配以相应的防雷、抗干扰装置，以保证采集数据的真实、稳定。

经过长时间的监测，可以为每一台重要的设备建立一个专属的基准指纹库。设备在新机器磨合期、稳定运行期、耗损老化期所表现出的参数特征是不一样的。根据基准数据进行对比分析，可以消除环境温度变化、水位变化等外部因素的影响，准确找到设备自身性能劣化趋势。依靠物理感知来预测的技术，使维修工作从以前的“中医把脉”式的经验猜测提高到现在的“核磁共振”式精确检测，故障识别准确率大幅度提高。

（二）利用 AI 算法分析设备健康状态

人工智能算法可以发现大量的监测数据中隐藏的规律，解决人脑不能直接发现的问题。用机器学习的方法，以深度神经网络、时序分析模型为工具，对设备以往的运行数据进行分析、训练。根据设备在不同的工况下（即不同的水位、不同的电压波动范围）表现所形成的正常行为范式，就可以构建起一个高维健康评价模型。实时数据输入到模型中之后，算法就会算出此时的健康度指数以及剩余使用寿命。这样的分析不单是简单地阈值判断，更多的是依靠多参数耦合的综合推理。温度上升是由于天气炎热，但是温度上升的同时伴随着某些频率的振动增大和电流波形畸变，人工智能模型就会以很高的置信度认为轴承要失效了。

随着运行数据的积累，人工智能模型具有自我进化的特点。每一个故障的

发生和处理，都是对模型的一个“再训练”的过程，使模型对于应用场景中独有的故障特征更加敏感。数字孪生技术在一些先进的示范灌区中已经应用于大型泵站的管理。在虚拟空间中创建和实体设备相同的数字模型，将实时的传感器数据映射到虚拟模型上面，人工智能算法在虚拟环境里模拟出各种极端的工况下设备的反应，进而推导出不同维护策略对设备寿命所造成的影响。这种“虚实结合”的分析方式，让管理者可以在不干扰实际生产的情况下，提前演练出最好的维护方案。

人工智能可以很好地解决专家资源缺乏的问题。在广大的农村地区，缺乏有经验的机电工程师是常态。依靠云平台的 AI 诊断系统可以把各个乡镇分散的水利设施连接起来，然后由云端强大的算力进行统一分析。当系统检测到异常的时候不仅可以发出警报，还可以自动生成故障诊断报告和维修建议，推送给一线管护人员手机上。这就如同给每一位基层管护人员配备了一个随时待命的“专家顾问”，很大程度上降低了高技术门槛给基层维护工作带来的影响，让技术红利人人共享。

（三）提前预警与备品备件管理

预测性维护的落脚点是行动，即依靠提前预警来实现备品备件的科学管理以及供应链优化。传统的库存管理常常要面对两难选择：备件库存太多会占用大量的资金，有锈蚀过期的风险；备件库存太少，在出现故障的时候，就陷入了无米之炊的境地，造成长时间的停机停水。基于故障预测的智能预警系统可以完全打破目前的僵局。

1. 当 AI 模型判断出一台水泵的机械密封在未来 30 天内会失效的时候，就会触发预警程序，向管理员发出采购建议，甚至可以对接供应商 ERP 系统进行采购。准时制备件供应方式保证备件在故障发生前的维护窗口期内到达现场，减少库存支出的同时保证维修速度。

2. 预警系统可以按故障的紧急程度进行分级推送。对于非紧急性能衰减预警，系统会建议将其加入到下一个灌溉间歇期的常规保养计划当中；而突然出现的高风险预警则会通过电话、短信、APP 弹窗等多种方式强烈提醒，并通知附近的维修服务队伍做好应急准备。

3. 以区域大数据为载体的备件共享属于协同创新的又一方向。用预测性维护平台，可以了解该区域内所有的同种设备的健康状况和备件需求分布情况。相邻

的乡镇或者水管单位可以建立备件虚拟联储库，互通有无。某处出现紧急故障，自有备件不够时，系统马上可以调动周边最近的闲置备件来支援。

智能化备件管理再一次改变了供应链的关系。设备制造商不再是卖产品，而是通过远程运维平台卖“备件+服务”。对设备状态的准确把握使制造商可以主动给用户提供改进升级方案，用新耐磨材料零件更换旧部件、升级控制软件等来提高设备性能。不但延长了工程使用寿命，还推动了农田水利服务产业升级，形成建设方、管护方、供应方三者共赢的良性生态。

预测性维护核心优势与传统维护对比表

特性	传统维护（被动 / 预防）	预测性维护
维护时机	设备故障后（被动）；固定周期 / 时间（预防）	基于设备健康状态和故障趋势预测
故障预防	依靠经验或定期检查，易出现漏检或过度保养	精准识别早期异常，提前干预
停机时间	故障发生后紧急停机，维修时间不可控	计划性停机维修，时间可控，最小化停机损失
维护成本	维修和备件成本高，存在过度保养或意外故障成本	优化备件库存，减少非必要维护，降低总成本
备件管理	静态库存，易造成积压或短缺	动态按需采购，实现“准时制”供应
设备寿命	相对固定，受制于突发故障	有效延长设备使用寿命
数据利用	记录分散，难以有效分析	大数据分析，形成故障预测模型
人工依赖	高度依赖人工经验和巡检	人工智能辅助，降低人工经验要求

从上表可知，预测性维护相比于传统维护模式有明显的优势，它用前瞻性的数据和智能预知来保证设备可以一直健康地运行。

第四节 水资源调度与分配优化

一、基于模型的优化调度

（一）灌区水资源系统模拟模型

灌区水资源系统模拟模型是实现科学调度的基础，它的目的就是対自然水循环和人工干预过程进行数字化复刻。要形成这样的模型，就得把气象驱动数据，下垫面特性参数，水利工程拓扑结构全都考虑进去，这样才能搭建出一个可以动态显示“土壤 - 作物 - 大气”连续体水分传输过程的计算平台。从物理机理上讲，

模型要能够正确地求出非恒定流问题；用圣维南方程来刻画复杂渠道系统里水流推进、衰减和滞后情形；另外还需用土壤水分运动方程来模拟田间尺度上的入渗、蒸发和深层渗漏过程。于是不同的灌溉方案下水量分配、输水损耗的时空特征就通过物理过程的精细化模拟清晰地展现出来，为之后的优化决策提供准确的状态量输入。

为了保证模拟结果的可靠，模型参数的率定和验证是十分重要的。在实际中一般选取较长时间段的历史观测数据，用系统辨识的方式来反算出校正系数。物联网技术发展以后，新型模拟模型开始采用数据同化技术对模型的状态信息实施实时更新，如将遥感反演得到的土壤湿度数据同渠道水位监测数据融合起来。具备自我修正能力的动态模拟系统，能对灌区每立方米水的去向及使用情况做全过程的记录与量化考核，从根本上改变了以前粗放型的水资源管理模式。

发达国家的现代化灌区在全渠道控制的基础上又加入了水力模拟模型，实现了从水源到田间分水口整个链条的全流程数字孪生。经过模型模拟出不同的气候情景下的作物需水响应，得到多种供配水方案，在不同供水效率的情况下得出可能存在的风险。基于仿真做出的决策支持可以大大减少试错的成本，也给解决复杂的渠系水力响应滞后提供了新的技术手段，使长距离输水的精准控制成为可能。

（二）线性规划、动态规划等优化算法应用

在明确了系统运行状态以及约束条件之后，怎样从大量的可行调度方案中选取最优策略，就需要依靠各种优化算法的深入运用。线性规划最早被应用于水资源配置，由于其求解速度快、全局收敛性好，在单一时段、线性约束下被广泛地应用到水量分配问题上。实际操作时，把作物产量同灌溉水量的关系线性化，或者建立以最小化输水损失作为线性目标函数，管理者就能利用单纯形法快速算出各支渠、斗渠在某一时段的理想分水量。虽然现实中的物理过程是非线性的，但是线性规划仍可用来确定基准配水比例，给从宏观到微观的逐层细化提供顶层设计。

灌溉调度的阶段性、时序性使得动态规划算法有很强的适应性。灌溉过程本质上就是多阶段决策过程，当前时段的配水决策既影响作物即时生长，又影响土壤蓄水状况，进而左右下一时段的灌溉需求和水资源可利用量。动态规划把灌溉周期分为若干个离散时段，在时间上反向或者正向递推，从而解决了跨时段水量调蓄与分配的问题。水库调度和渠道配水联合运行时，用动态规划考虑水库蓄水

位的变化和下游灌区需求的变化，既保证长期的供水安全，又达到短期供水效益的最大化。

随着计算机计算能力的提高，传统算法不能解决的高维、非线性、非凸优化问题，现在可以用进化算法来解决。该类算法模仿自然界生物进化或者群体行为的机制，不需要目标函数的连续性、可导性，可以处理包含离散变量（泵站开启台数、闸门开度档位）的混合整数规划问题。面对渠系水力耦合严重、配水约束极其复杂的情形，进化算法可以有效地避开局部最优的麻烦，在全局范围内找到一个既能保证工程安全又能用水高效的满意解，给精细化调度供应了强大的算法引擎。

（三）考虑多目标的调度

现代农田水利工程的服务对象由原来的单一农业生产，扩展到城乡供水、水力发电、生态补水等多方面，逐渐成为综合性的水资源配置系统。在这个转型过程里，单方面追求经济效益最大化的调度方式已经不适用了，必须要建立一个考虑多目标协同的调度体系。多目标调度要在如下几方面求得平衡：

1. 农业增产和节水高效要平衡，在满足作物关键需水期用水需求的前提下，尽量压缩非关键期的灌溉定额，采用非充分灌溉的方法提高水分生产率，实现从“以水定产”向“以水优产”的转变。

2. 上游、下游用水公平性以及总体的效益权衡：渠系末端的农户很容易受到供水不足或者供水的滞后影响。在调度优化中加入公平性指标（基尼系数、泰尔指数等），将其作为约束或者目标函数，用轮灌制度保证各个农户用水权利的相对平均。

3. 生产用水和生态用水之间的矛盾：随着生态文明建设的推进，维持河道基本生态基流、保障湿地补水已经成为水利调度的刚性约束。多目标模型中必须要将生态缺水量最小化作为一个重要目标，在枯水年份合理制定农业与生态的让利分担机制。

为了在互相冲突的目标间找到折中的方案，一般采用帕累托最优理论生成非劣解集，再用多属性决策方法帮助管理者做出最终的选择。实际应用时多采用权重系数法或者约束法，根据当前的水情背景、政策导向来确定各目标的优先次序。干旱年可以加大生活用水保障和生态底线目标比重，减少高耗水作物灌溉配额；丰水年则更注重发电效益、地下水回补等目标的实现。体现出现代水利工程在复

杂的社会经济环境中所具有的适应性和韧性，目的是使水资源的利用达到经济、社会、生态效益的最大化。

二、实时调度与应急响应

（一）基于来水预测的滚动调度

滚动调度机制的核心思想就是着眼未来、把握当前、动态修正，用不断更新的预测信息来消除长周期规划中的累积误差。在这种机制下，调度周期被划分成多个向前滑动的控制窗口，每个控制窗口内又包含执行时段和预测时段。系统定时（每小时或者每天）获取最新的气象预报、水情监测、土壤墒情数据，驱动水文模型对未来一段时间的来水、需水进行重新预测。然后利用更新后的边界条件再次运行优化模型，得到新的调度指令序列，但只执行当前时段的第一条指令，到下一个时刻再重复上述过程。

这样就形成了闭环反馈式的调度模式，系统对短期内的波动有了很强的适应能力。比如雷达降雨预报显示未来几小时灌区会有强降雨过程，滚动调度系统就会马上得到这个消息，然后快速算出降雨产生的有效利用量，相应地减少原定的渠道引水指令，提前关闭或调小渠首闸门。既节约了宝贵的水资源，又可以有效防止灌排叠加引起的农田渍涝灾害。当上游水源由于突发情况出现流量急剧减少的时候，系统可以马上察觉到偏差，然后动态地对下游各个分水口的配水量比例进行调节，以此来减小由供水波动所造成的冲击。

支撑高效滚动调度，底层数据传输及处理架构必须有高时效性以及稳定性。现代灌区一般采用边缘计算加云计算的架构，现场控制单元可以对数据进行清洗，并进行初步的逻辑判断，在网络通信受限的情况下也能实现基本的滚动控制，云端平台进行复杂的全系统优化计算，并将修正后的策略及时下发。高频次、即时性的交互机制使水资源调度具有了生命体一样应激反应的能力，将人工干预的滞后性降到最低。

（二）旱涝急转情况下的应急调度预案

全球气候变暖背景下，旱涝急转属于影响农田水利工程安全以及农业生产稳定性的极端事件。一般表现为长时间的干旱之后出现短时间的大雨，灌区需要快速从抗旱转为防汛排涝。单一常规调度已不能解决问题，必须编制储备专项应急调度预案，保证工程体系面对工况急剧变化时的响应速度与运行安全。

应急预案的重点就是建立灵敏的触发机制和高效的模式切换程序。预案中要确定旱涝急转的预警阈值,当气象预报或者实时监测数据达到阈值时,系统立即停止正常的灌溉输水。此时调度指令的优先级发生了根本性的转变:原本全开以抢引水源的进水闸必须迅速关闭,切断客水入渠;原本处于关闭状态的排水闸、泄水闸、排涝泵站则必须同时打开。用水力模型进行水锤效应与渠道水位波动的预演,根据预演结果制定出合理的闸门启闭顺序,防止启闭速度过快造成渠道漫溢或边坡失稳。

应急预案在物理工程调度的同时还要包含非工程措施的配合,即紧急动员人力疏通田间排水沟渠、调配移动抽水设备进行低洼地排水,在此期间给农业生产提供指导。蓄水型灌区预案还应考虑雨洪资源的资源化利用,在保证大坝和堤防安全的前提下,利用暴雨末期退水过程适度回蓄水量,为之后可能重现的干旱储备水源。“防”和“用”互相促进,“排”和“蓄”兼顾的辩证施治方法,是解决极端水文事件、提高农田生态系统韧性的智慧。

(三) 跨区域、跨流域的协同调度机制

随着大型骨干水网工程的建设与联网,农田水利调度也从单一行政区划或者单一流域的物理界限中走出来,成为跨区域、跨流域的复杂巨系统。在这种情况下,上下游之间、左右岸之间以及不同的水源供区之间存在着错综复杂的水力联系,建立协同调度机制成了打破行政壁垒、实现资源空间均衡配置的必然要求。

跨区域协同调度的基础就是信息全面共享、透明化。创建数字孪生流域平台,冲破各个行政部门、管理单位之间存在的壁垒,达成雨情、水情、工情、灾情等信息的及时共享。上游水库的泄流计划可以即时通知下游灌区,使其提前做好引水准备;下游的需水信息也可以及时反馈给上游调度中心,作为优化放水的依据。由于信息不对称造成的弃水浪费或者供水脱节问题被消除,使整个流域的水资源利用效率得到提高。

就制度而言,协同调度要以完备的协商、补偿制度为支撑。通过建立流域管理机构为领导、沿线地方政府为成员的联合调度指挥机构,实行统一调度指令、统一水量分配方案。发生局部旱情或者水污染事件,需要实行跨流域应急调水的时候,协同机制能够马上启动多水源联合调度方案,利用连通工程开展水量置换和互济。为了保证协同机制的长期运行,还需要探索通过水权交易或者生态补偿等经济杠杆,对因为顾全大局而牺牲用水利益的地区给予合理的经济补偿,把行

政指令的刚性和市场机制的柔性结合起来，凝聚起全流域共保水安全、保粮食生产的合力。超越局部利益，找到最有利于全体各方的最优协同形式，是世界农田水利治理现代化的更高阶段。

第五节 管理绩效评估指标体系

一、绩效评估框架与原则

（一）平衡计分卡等框架的应用

基层农田水利工程的管理绩效评价里加入平衡计分卡框架，这是对传统单一财务指标评价模式的重大革新。传统的评价大都集中于工程造价的控制或者单纯的维修费用的计算，忽略了服务对象的需求以及组织内部成长的可能。平衡计分卡把水利工程短期运营目标同长期可持续发展战略结合起来，用财务、客户、内部业务流程、学习与成长四个方面，来衡量。

财务方面：侧重资金使用是否合规、性价比如何，确保每一笔管护费用都与相应的维护成效相匹配。

客户方面：将农户满意程度、用水便捷性作为核心考量因素，重视水利设施的服务特性。

内部业务流程维度考察的是管理机构的工作效率，比如故障响应时间、巡检制度的落实情况、水费收取是否规范等。此维度加入之后，管理单位改善了日常运作流程，削减了冗余环节，提升了解决问题的效率。经过梳理和优化业务流程之后，会发现管理上的瓶颈，再用制度创新来解决。从国际上成功案例可以看出，对于内部维修程序能够妥善处理、水资源调度快速的灌区来说，工程寿命和效益远高于管理不善的灌区。

学习与成长维度，也就是管理人员专业化水平以及信息化技术的应用程度。考虑到基层水利管护人员大多数年龄较大，缺少新技术的知识积累，那么此项考察的是管护人员是否定期接受培训以及接受新技术的能力。该维度纳入之后，评价体系不再只是对过去进行总结，而更包含了对于未来进行预测。像有没有装智能监测设备、管理团队会不会用现代节水灌溉技术这些，都是衡量灌区管理水平的标尺，推动基层水利管理组织不断地进行自我革新，从而适应现代化农业发展的需求。

（二）SMART 原则

确定具体的评价指标要遵循 SMART 原则，使评价指标具有可操作性、导向性。SMART 原则就是好的指标应该满足具体的、可衡量的、可实现的、相关的、有时限的这六个条件。基层农田水利领域中的提高灌溉效率、加强设施维护等口号式的目标，由于缺少具体的实施标准而容易流于形式。按照 SMART 原则，要求将每一个管理目标转化为具体的行动指南。像把“加强维护”细化成“主干渠道完好率大于 95%”或者“泵站设备故障停机时间不超过 24 小时”，这样一来，管理者就知道该把工作重点放在哪里，做到何种程度。

SMART 原则下的指标特性

特性	说明	基层水利应用示例
具体性	目标清晰明确，而非模糊概括。	将“加强维护”具体为“主干渠道完好率大于 95%”
可衡量性	指标可量化或有明确的等级标准，便于评估。	巡查记录完整性、隐患数量及整改率作为巡查质量的替代性指标
可实现性	指标设置需结合实际情况，既有挑战性又不脱离现实。	综合考虑当地经济、水资源状况和工程现状，避免指标过高或过低
相关性	指标与农田水利工程的最终目标（农业生产、水资源节约）紧密相关。	灌溉高峰期关注供水保证率、配水及时性；非灌溉季节关注工程维护进度
时限性	各项任务有明确的截止时间，避免拖延。	设立具体时间节点，确保各项管护工作及时开展

可衡量性要求所有的指标都可以量化或者有明确的等级。对不能直接量化的管理行为（巡查质量），用巡查记录完整度、发现的隐患数量、隐患整改率等代替性指标进行量化考核。可实现性是指指标的设置要结合当地的经济发展水平、水资源的丰枯程度、工程现状等，具有一定难度，但不能脱离实际，避免指标过高打击基层管护人员的积极性，指标过低失去激励作用。

相关性、时限性保证了评估指标同农田水利工程的最终目标密切相关，即保障农业生产、节约水资源，各项任务都有明确的截止时间。灌溉高峰期指标要突出供水保证率、配水及时性；非灌溉季节则以工程维护保养、冬修进度为主。设定具体的时间节点，可以有效地防止拖延，促使管护工作及时展开，形成以评促管、以评促建的良性循环。

（三）定量与定性指标相结合

单独使用定量指标，虽然客观准确，但是很难反映出基层农田水利管理中复

杂的各种社会关系和组织行为；单独使用定性指标，虽可以涵盖软性管理内容，但是容易受到主观因素的影响。因此在建立评估体系的时候，必须坚持定量与定性指标并重的原则。

定量指标主要是用来考察工程实物量、水资源利用数据、财务收支等硬性指标，例如渠道防渗率、灌溉水有效利用系数、水费回收率等。这些数据用仪器监测、统计报表等方式得到，具有无可比拟的客观性，是评价管理成效的骨架。

定性指标主要用来评价管理机制是否健全、组织协调能力、民主议事氛围、农户的主观感受等。用水户协会运作是否规范、村规民约是否得到有效执行、水事纠纷调解机制是否顺畅等问题，不能用简单的数字来衡量，需要通过问卷调查、专家访谈、现场查阅档案等方式综合评价。定性指标是定量数据的必要补充，它可以解释相同投入在不同的地方会有截然不同的结果。

实际操作时要合理确定这两种指标的权重。针对工程技术含量较高的环节，要加大定量指标的权重，保证硬性任务的完成；针对涉及农户组织动员、利益协调等社会性较强的环节，要加大定性指标的权重。结合两者的分析既可以反映工程本身的状态，也可以体现出管理方面人的因素，形成立体、丰满的评价画像，为提高基层农田水利治理能力提供科学依据。

二、多维度评估指标设计

（一）工程完好率与设备利用率

工程完好率可以反映农田水利设施的物理健康状况，也是日常管护工作是否到位最直接的体现。该指标包含干、支、斗、农各级渠道的通畅情况、防渗状况，泵站、水闸、机井等枢纽建筑物是否正常运行。高标准的工程完好率要求渠道无淤积、无塌陷，衬砌结构完好；水闸启闭灵活、止水良好；机电设备保养及时、无带病运转。定期拉网排查打分可以督促管护主体承担维修养护责任，防止出现一年建三年坏五年烂的情况。

设备利用率考察投资有效性以及资源配置的合理性。我国很多地方曾经出现过国家投入巨资建设的喷灌、微灌设备，由于管理不善或者不适应耕作制度而被废弃，造成巨大的资源浪费。设备利用率指标要求评估各类灌溉设施在实际农业生产中的投入使用时长与设计能力的匹配度，例如提灌站的开启运行时长、高效节水灌溉系统的实际灌溉面积占比等。高设备利用率说明工程真实服务于农业生

产，不是仅仅做展示用的样板工程。

评价时还需要加入故障修复及时率这个辅助指标。设备发生故障几乎是必然的，关键是管理机构能不能在最短的时间内作出反应来进行修理，尤其在农时紧张的灌溉季节就更需要如此。该指标反映的是一线备品备件、检修人员、应急响应等能力。利用工程完好率和设备利用率双重考核，可以保证农田水利工程有健康的“体魄”和高效的“灵魂”，一直保持良好的备战状态。

（二）灌溉水有效利用系数与节水效益

灌溉水有效利用系数是衡量农田水利工程技术水平和管理水平的指标，反映的是从源头取水到田地作物真正吸收利用全过程的水量损失。系数的提高不单要依靠渠道防渗、管道输水等工程措施的应用，还要依靠科学的配水调度和适时的田间灌溉管理。在评价体系中此指标要根据各个灌区的作物种植结构、土壤类型、气候情况进行标准化修正，从而保证横向比较的公正性。高系数代表水资源浪费少，是水资源精细化管理的体现。

节水效益评估维度

维度	评估内容	评价指标示例
生态效益	节水带来的环境改善，例如对地下水超采区修复作用。	节水量折算生态价值、地下水位恢复情况、化肥农药径流减少量
经济效益	节水对农户灌溉成本、农作物产量和品质的影响。	亩均灌溉成本变化、作物产量增幅、农产品品质提升幅度
宏观价值	区域水生态安全、水资源可持续利用的贡献。	区域水资源供需平衡改善、水生态系统健康指数

节水效益评价不能只看水量的节约，还要考虑它带来的生态效益和经济效益。应该通过对比节水灌溉前后亩均用水量来得到总节水量，然后根据当地的水资源短缺情况折算成生态价值。减少灌溉过量可以降低化肥农药流失量，对地下水超采漏斗区的修复有积极的作用。这就需要评估者有宏观的视角，把单个工程的节水行为放到区域水生态安全的大背景下加以考虑。

从农民来说，节水效益最直接的体现就是灌溉成本的减少。因此，应该设置亩均灌溉成本变化的评价指标，来验证节水工程是否真正为农民减负。同时要考察水肥一体化等技术是否真的可以增产提质，达到节水增收的双重目的。

（三）用户满意度与水费回收率

用户满意度是评判基层农田水利管理服务质量好坏的标准。农户是工程的直

接受受益者和使用者，对供水及时性、水量充足性、水费收取透明度、设施维护响应速度等有着最直接的感受。评估体系中要有详细的满意度调查模块，采用入户走访、问卷调查、手机 APP 反馈等多种方式征求农户意见。此指标考察的是农户对现状的评价，同时考察了农户诉求落实的情况。高满意度一般说明管理机构与农户之间建立了良好的信任，这也是工程长久运行的社会基础。

水费回收率可以反映工程财务的可持续性以及农户的付费意愿。长期以来，水费收缴难一直困扰着基层水利管护工作，直接造成管护资金不足，工程年久失修。水费回收率高低一定程度上反映了供水服务质量，只有当农户认可供水服务创造的价值时，才会愿意按时交水费。它也体现出用水计量设施是否完善，收费是否公平。

在此基础上还需要考虑水事纠纷发生率以及化解率。水事纠纷频频发生，大多因为配水不公或者管理混乱造成的，而解决纠纷的能力，正是基层治理能力的体现。将水费回收率同用户满意度、纠纷化解率联合起来评价，就能产生一个反映社会管理效能的综合视角。以“人”为主导的评估理念使管理者由工程看护者变为综合服务提供者，靠优质服务争取农户的支持和配合，破解基层水利管护难、收费难的体制顽疾。

第七章 基层农田水利组织模式创新

第一节 农民用水合作组织建设

一、法律地位与治理结构

（一）明确农民用水户协会的法人地位

长期以来，基层用水组织面临的最大难题之一就是法律身份不明确，从而严重地阻碍了其作为市场主体作用的实现。明确农民用水户协会的法人地位，即将其纳入国家法律登记体系，赋予其独立的民事权利能力和行为能力。在具体实践中应根据各地实际情况，用水户协会登记为社会团体法人或者农业专业合作社法人。身份确定之后，协会可以取得独立的财产所有权或者管理权，从而可以以组织名义开设银行账户、签署工程管护合同、进行融资信贷。独立的法人地位可以明晰政府、灌区管理单位和用水户三方的权责边界，避免行政权力对协会自主管理的干涉，为协会独立运营提供有力的法理支撑。

获得法人资格只是第一步，更重要的就是通过法律形式确认协会对于末级渠系工程的资产权益。在确权时，应以颁发产权证书或者签订委托管理协议的方式，将具体的工程设施管护权交由具有法人资格的协会。既可解决产权虚置问题，也可给协会今后开展经营性服务工作提供必要的资产支撑。这样一来，用水户协会就不再是村委会的一个附属机构，而是一个有独立意志、能独立承担法律责任法人单位。用水户协会属于水利系统中的重要组织单元，其对于调动基层治理活力有着基础性的作用。

放眼世界范围的经验，缺乏独立法人地位的用水组织很难长久存在。发展中国家早期的实践中，由于法律上不予承认，用水组织在法律纠纷中不能为自己争取权益，也无法同供水商进行平等的商业谈判。中国在推进基层农田水利改革时，一定要吸取这些教训，要么通过立法，要么通过地方性法规，一方面给协会发“出生证”，另一方面给协会参加市场活动发“通行证”。这会原本分散、原子化的农户集结成有谈判能力的集体行动单位，让他们在水权交易、水价协商、工程

更新改造这些大事上发挥作用，保证基层水利资产能保值增值并持续利用下去。

（二）健全会员大会、理事会、监事会制度

构建权责分明、相互制衡的内部治理结构，就是农民用水户协会区别于传统的行政管理模式之处。完善的“三会”制度可以保证组织民主化和科学化的运行。会员大会为最高权力机构，必须由全体用水户或其代表组成，有制定章程、选举理事和监事、审议财务预算和重大工程项目等权力。会员大会的常态运作保证普通农户有发言权，防止组织成为少数人的牟利工具。理事会是执行机构，负责日常的水务管理、工程维护、费用收缴等具体工作，其成员由会员大会直接选举产生，应具备一定的管理能力、公信力，忠实执行会员大会的决议。

监事会的设立，是加强内部监督，防止权力被滥用或者资产流失的一种制度安排。监事会成员的组成应该独立于理事会，并对会员大会负责，主要工作包括对财务收支合法合规性的监督和理事履职廉洁性的监督。为了防止机构空转，在实际情况当中必须制定一份详细而完备的议事规则和监督程序，主要体现在以下两方面：

1. 建立定期会议制度：会员大会每年至少召开一次，遇有重大事项可以临时召开；理事会、监事会根据农时和管理需要实行月度或者季度例会，保证信息畅通、决策及时。

2. 建立信息公开制度，理事会应当定期向监事会、全体会员公布工程管护情况、资金使用情况；监事会有权随时查阅财务账目，可以对理事会成员进行质询，发现有违反规定的行为，有权提请召开临时会员大会予以罢免或者问责。

分权制衡的架构设计，其根本目的就是为了防止集体行动中出现的搭便车、内部人控制的问题。依靠制度化的权力配置，把乡村社会的传统信任同现代契约精神有机地融合起来，从而形成一种具有约束力并且有激励作用的内生治理机制。这就要求管理者必须在阳光下行使权力，也给每一位普通用水户赋予了合法的监督途径。只有“三会”制度真正落到实处，而不是应付差事，农民用水户协会才能成为真正的属于农户的组织，在复杂的乡村利益关系中公允而有效地运作，最终实现灌溉管理的良性循环。

（三）制定民主选举与决策机制

民主选举和科学决策，是保证农民用水合作组织代表性和合法性的灵魂所在。协会的领导层必须真正来源于用水户的意愿，和行政任命不同。选举机制的设计

应该大力推行直接选举或者以灌片为单位的推选制度，保证每一个用水户都拥有选举权和被选举权。选举过程要公开透明，严禁贿选和暗箱操作，并鼓励那些长期从事农业生产、懂水利工程、在群众中有威望的“田秀才”、“土专家”进入管理层。这样的自下而上式的授权，就使得管理者具有了天然的合法性与权威性，在之后的水费收缴、纠纷调解等工作当中更易于得到农户的理解与支持。

决策机制科学化对于提高管理效率有非常重要的作用。对水价调整、工程投工投劳、水量分配等重大问题采取一事一议的民主决策方式。为了兼顾效率和公平，在灌溉面积投票的基础上实行加权投票，既照顾到大户的利益，又不会使小农户的利益被忽视。在决策之前应充分披露有关信息并广泛征求意见，可采取召开灌片会议、张榜公布等方式，使所有相关的利益方都能够充分地发表自己的意见。对于牵涉重大利益调整的事项，可以设置较高的通过比例门槛，比如规定需要达到三分之二以上的会员赞同才能实行，以此来降低决策风险，稳固决策执行的群众基础。

广泛的民主决策过程本质上就是利益的博弈和整合。它提供了一个平台，使上游和下游、大户和散户、种植大户和普通农户能坐在一起，理性地交流协商出共识。虽然这样会增加沟通成本，但从长远看，经过充分民主协商的决定，由于执行起来更容易，因此在执行过程中遇到的阻力和冲突会更少。在此期间还要加入外部监督力量，即乡镇水利站或者司法所，对选举以及决策程序的合法性予以指导并加以鉴证，保证民主机制不走样、不变形，切实为所有用水户的利益着想。

二、核心能力建设与赋权

（一）水利工程运行维护技能培训

基层水利工程的运行维护属于技术含量比较高的工作，其质量的好坏直接影响到灌溉系统使用寿命以及供水效率。目前许多用水组织存在管理人员老化、技术知识缺乏的情况。因此，建立工程运维技能培训体系已迫在眉睫。培训不能只停留在理论讲解的层次上，而应该深入到田间地头进行实际操作训练。培训内容包括泵站机电设备操作规程、渠道防渗修补技术、田间闸门准确控制、滴灌喷灌系统日常保养等。可以邀请水利技术专业人员定期到田间指导农户，手把手教农户故障排查、应急抢修的方法和技巧，把复杂的工程原理转化成农户能够掌握的操作口诀和规程。

随着现代农业技术的发展，运维技能的内涵也不断丰富。除传统土建和机电维修之外，信息化手段的应用已经成为新的能力增长点。协会要逐步引导骨干成员学习使用智能灌溉控制系统、手机 APP 远程报修及水量监测平台。依靠数字化工具的加持，管理者可以对工程的运作情况了如指掌，进而达成精准调度并开展预防性的保养。又如教会管水员读取智能水表流量数据、利用无人机巡查渠道隐患等现代技能的加入，就会极大地提高管护效率，减少人力成本。

为了保证培训效果能够长久维持，应该设置技能认证及考核制度。对掌握核心运维技能的管水员，发相应的上岗证书并把薪酬和技能挂钩。同时鼓励协会内实行师徒制活动，发现本土技术能人，促进技术经验的代际传承。在这个过程中，政府部门要起资源供应者的角色，创建专门的培训资金，编写通俗的培训教材，搭建区域的技术交流平台，安排不同协会之间的观摩学习。通过不断的学习和技能的磨练，把普通农民培养成具有专业素养的“水利工匠”，从而给工程安全高效运行提供可靠的人才保障。

（二）财务管理与水费计收能力培养

财务健康是农民用水合作组织生存和发展的生命线。缺少正规的财务管理以及有效的水费计收办法，组织就容易出现“没钱办事”的瘫痪状况。所以，培养财务管理能力的第一件事就是建立会计核算的标准化。协会应配置或者聘请具有专业资质的财务人员，依照国家有关财务会计制度的规定设立独立的账簿，对水费收入、财政补贴、工程维修费用等进行分类核算。每一笔资金流动都必须有凭证可以查，不能出现白条抵库、账实不符的情况。规范化的财务报表可以清楚地向会员展示组织的经济状况，获得农户的信任，也可以给政府审计和社会监督提供可靠的依据。

水费收取能力改善属于财务管理范畴的工作。长期以来，农业用水费征收难一直困扰着基层水利工作。要解决这个问题，要从技术和制度两方面着手。从技术角度看，应该大力推广计量设施的安装和使用，把传统的按亩收费变为按方收费。精准计量可以消除农户对于水费分摊是否公平的疑虑，为足额收缴提供硬性依据。从制度上来说，协会要形成一套合理的水价形成机制，工程运行成本、农户的承受能力、节水激励等各方面因素都要考虑进去，科学定价。可以召开听证会等形式让农户参加水价制定过程，提高水价政策的透明度和民众的接受程度。

对于搭便车行为及拒交水费的行为应该创建起多元化的制约方式。一方面同

村委会合作，把水费缴纳情况纳入到村规民约以及信用评价体系当中，对于恶意拖欠的人员在集体福利分发等方面加以限制；另一方面尝试推行“水权交易”和“预付费 IC 卡”，创建起“先缴费、后用水”的刚性约束。提高财务人员的沟通能力及服务意识，把收费过程转变为宣传节水政策、了解农户需求的过程。建立公开透明、公平合理、具有强制力的财务、收费制度，保证协会有稳定的资金流，进而保证工程的维护、服务的升级，最终实现“以水养水”的良性循环。

（三）谈判、协调与冲突解决能力提升

在水资源越来越紧张的情况下，用水的竞争、利益的矛盾不可避免。因此提高农民用水合作组织谈判、协调和冲突解决的能力，对于灌区社会稳定和公平用水具有紧迫性。该种能力首先表现在协会同外部主体的博弈当中。与上级供水单位交往时，协会要代表全体农户就水权、水量进行谈判，争取到合理的供水指标和供水时间。这就需要管理者对相关的法律法规、水文数据、合同条款等有足够的了解，从而能够有理有据地保障农户的权益。当出现因涉水工程建设（修路架桥破坏渠道等）而产生的索赔谈判时，协会要有与施工方、政府部门进行谈判的能力，以保证集体资产不受侵害。

内部矛盾能否妥善解决，也是衡量协会治理能力的一个标准。上下游争水、工程漏水致淹没纠纷、水费分摊纠纷等不断发生。这些矛盾的解决不能单纯依靠行政命令，而应该依靠社会资本和协商技巧。

1. 建立分级调解机制，对一般小微矛盾由片长或者管水员进行现场调解；对涉及面广、利益复杂的纠纷由理事会牵头，村两委、乡贤能人共同协商调解。

2. 注重使用“情、理、法”相结合的方式，在尊重乡土社会人情面子的情况下，水规则的底线绝不能破。制定用水公约以及违约处罚条款，使解决冲突制度化。

农民用水合作组织核心能力建设与赋权表

能力领域	主要内容	赋权目标
水利工程运行维护技能	泵站机电设备操作、渠道修补、闸门控制、节水灌溉设备保养、智能灌溉系统应用、无人机巡查	培养“水利工匠”，确保工程安全高效运行，提升管理效率
财务管理与 水费计收	标准会计核算、水费精准计量、合理水价机制、约束机制（村规民约、IC 卡）、沟通技巧	确保财务健康，实现“以水养水”良性循环，增强组织可持续性
谈判、协调 与冲突解决	对外谈判（水权、水量、索赔）、对内调解（上下游争水、纠纷）、“情理法”结合、沟通技巧	维护农户权益，化解基层水事矛盾，构建和谐灌区社会

提高上述能力还要重视沟通技巧、心理素质的培养。培训管理者掌握倾听、换位思考、非暴力沟通，能够在冲突现场快速平复情绪、控制局面。引导协会建立意见箱、接待日等意见诉求反馈渠道，在矛盾爆发前及时了解农户的意见与需求，并加以解决。从全球的角度看，很多成功的用水组织都起到了一种社会“润滑剂”的作用。赋权赋能（见上表），使协会成为化解基层水事矛盾的第一道防线，不仅可以有效降低司法、行政成本，还可以在互动中再造乡村社会的信任网络、合作意识，为农田水利事业的长久稳定发展创造良好的社会环境。

第二节 公私合作模式的探索与实践

一、公私合作模式在农田水利领域的适用性

（一）适用于具有经营性的水利项目

农田水利工程种类繁多，并非所有项目都适合采用公私合作的方式。该模式主要适合于能产生稳定现金流、具有一定经营性质的准公益性项目。完全公益的田间排涝工程或者只是关乎防洪安全的设施，由于没有直接的收益来源，社会资本无法介入，仍然由政府出资。相反，对高效节水灌溉工程、供水价格形成机制完善、可以通过水权交易、土地流转等方式增加收益的项目，公私合作具有很强的生命力。

在这些项目当中，凭借恰当的制度安排，“沉睡”的水利资产能够被唤醒，变成具备经济效益的经营性资产。以高效节水灌溉项目为例，可以将水费收入、节余水权交易收入、项目区内高附加值农业种植收益等打包作为项目的主要收益来源。它能够吸引社会资本长期经营管理水利设施并可以获得合理的回报，从而调动起社会资本参与农田水利设施建设和管护的积极性。

只有项目本身具备“造血”的功能或者经过综合开发可以形成明确的盈利模式，公私合作才能真正落地生根。因此，在项目策划阶段要对工程的经济可行性进行深入研究，找出并分离出具有市场价值的经营性要素，为社会资本的进入创造必要的经济条件。

（二）明确政府与私营部门的风险分担

健全完善的风险分担机制，是公私合作模式成功的根本。基层农田水利工程

存在许多风险因素，工程建设过程中存在完工风险、技术风险，气候变化造成的水资源供应风险，农产品价格波动引起的支付意愿风险，政策调整带来的法律风险等。风险分配不公，会直接导致合作破裂或者项目烂尾。

1. 政府部门的责任：政府主要承担由于法律法规、政策调整、最低需求保障等产生的风险。由于农业生产受政策影响较大，政府要保证相关政策补贴的连续性，做好土地征收、水资源调配等行政工作。遇到不可抗力造成的大自然灾害时，政府要承担起主要的救灾、重建责任，体现水利的公益性质。

2. 私营部门的责任是进行工程的设计、施工、运营、保养并承担部分融资的风险。依靠自身的技术优势和管理经验，社会资本方可以更有效地控制工程造价、缩短工期，在运营阶段用精细化手段降低管护成本。技术故障、运营效率低等属于商业管理方面的风险，由社会资本方自行承担。

双方风险边界之外还有一些共同承担的风险，即一般性的气候波动和市场需求的小幅变动。此类风险一般用合同中的调价条款、保险和风险准备金等办法来应对。准确地对风险进行分类和匹配，使能控制风险的一方去承担相应的责任，是降低整个项目成本、提高合作稳定性的重要方法。

（三）保障公共利益与农民用水权益

在推行公私合作的时候，要防范市场逐利性对公共利益的侵害，保障农民用水权益不受侵害。农田水利工程是农业生产的根基，也是保证国家粮食安全、农村社会稳定的重要根基。虽然社会资本的介入会带来一定的市场逻辑，但是水利工程服务“三农”的本质属性不能改变。

防止垄断性定价、保证公共利益的关键就是降低服务质量。政府在将经营权让渡出去的同时，必须保留强大的监管权。这涉及创建严格的价目监管体系，规定水价最高限价，推行阶梯水价政策，组建起由政府代表、农民用水户协会及第三方专家构成的监督委员会，定时对社会资本方的服务水准，供水保证率以及工程完好率展开考核。一旦发现社会资本为了降低成本而降低工程质量或者擅自提高水价，政府就必须采用惩罚措施或者行使介入权进行接管。

应该保护农民作为最终使用者知情权和参与权。项目立项、方案设计、定价听证等各个环节都要充分征求项目区农民的意见。扶持农民用水户协会参与到终端的管理当中来，促成社会资本同农户间的良性互动。如果项目不考虑农民的实际承受能力与用水习惯，那么再先进的工程也可能会因为遭到抵制而无法发挥应

有的作用。因此，平衡商业可持续性和社会公平性，是公私合作模式在农田水利领域行稳致远的前提。

二、典型公私合作模式的应用

（一）建设－运营－移交模式

建设－运营－移交模式是新建农田水利工程中用得最多、最经典的一种公私合作方式。政府通过特许经营权的方式把水利工程的融资、建设权交给社会资本方。工程竣工以后，社会资本方在合同规定的特许经营期内享有运营权，通过向农户收取水费、开展综合经营或者获得政府的可行性缺口补助来回收投资并获取利润。特许期满后工程将无偿移交于政府。

该模式最适用于投资规模大、技术要求高、以新建为主的灌区骨干工程或现代化高效节水园区。对地方政府来说，最大的优势就是可以大大减轻当期的财政支出压力，有效地利用社会资金来完善基础设施。同时，因为社会资本方要经过20年甚至更长的时间才能回收投资，所以他们在建设的时候就考虑到工程质量以及全生命期的养护成本，避免了传统模式下重建设、轻管理的问题。

在操作时，特许经营期的确定非常重要。期限过短会导致水价过高，农民无法承受；期限过长会导致社会资本暴利。所以要根据准确的财务测算，确定一个既能吸引投资又能保证公益性的合理期限。移交环节的资产评估以及性能测试也不能忽视，必须保证移交时工程设施的良好可用性，防止运营方在合同期末故意停止维护，把“烂摊子”留给政府。

（二）设计－建设－融资－运营模式

设计、建设、融资、运营模式是一种整合度更高的合作方式，把工程的设计环节也纳入到社会资本的责任范围里。不同于以往政府出方案、企业照图施工的模式，而是将社会资本方置于项目规划设计的起始点，充分发挥其技术优势对工程方案进行优化。

在基层农田水利项目中，该模式的价值就更为突出。社会资本方常常具备先进的节水灌溉技术、智能控制技术和新材料应用经验。企业有充分的动力，在设计阶段就选择全生命周期成本更低的设计方案，把设计同后期的建设、运营紧密结合。管网布置上，企业在设计时就会考虑到初期建设成本与后期泵站运行能耗成本，选择最佳的管径、材质，以达到长期运营节能降耗的目的。

该种模式需要政府部门有较强的合同管理、绩效监管能力。由于政府在放权之后不再直接控制工程的具体技术细节，而是转而对产出绩效进行考核。政府要明确灌溉保证率、水利用系数等指标对社会资本方进行约束。从“管过程”到“管结果”的转变虽然会加大招标和合同谈判的复杂程度，但是能够极大地激发市场主体的创新动力，促使农田水利工程向技术密集型、管理集约型方向发展。

（三）合同外包与特许经营模式

对于大量已经建成但是面临管护缺失、设施老化的存量农田水利工程，合同外包和特许经营的方式提供了解决方案。此种模式一般不需要社会资本方投入大量的基础设施建设资金，主要依靠引入社会资本方的专业管理服务。

合同外包一般是指政府或者村集体把灌溉设施的维修养护、泵站运行、渠道清淤等具体业务，以服务外包的形式委托给专业的农田水利管护公司或物业公司。政府按照服务质量支付费用。此方式灵活便捷，适合规模小、分布散的田间工程。专业公司依靠自身区域化、规模化作业，能够安排专门的维修队伍与设备，相对于村集体分散管理来说，单位维护成本低、响应速度快。

特许经营模式更进一步，政府把存量资产整体经营权转让给社会资本。社会资本方对设施进行更新改造、日常经营，拥有相应的收费权。该模式一般用于有收益的提水泵站或者连片灌溉管网。政府盘活存量资产可回笼资金，用于新的水利建设，社会资本方引入现代化企业管理制度后，可优化人员配置，控制能耗，堵塞水费征收漏洞，实现工程扭亏为盈。在实施过程中，资产权属的确定、防止国有资产流失、妥善安置原管理人员是必须解决的重点问题。

第三节 社区参与式管理机制

一、参与式规划与设计

（一）运用参与式农村评估工具

传统的工程勘测大多采用专家技术指标、卫星地图等，对微观地理环境、复杂的村社社会结构没有考虑。采用参与式农村评估工具（Participatory Rural Appraisal, PRA）可以较好地克服视角的不足。它不是一份简单的调查问卷，而是一次社会动员，一次知识挖掘的过程。项目执行团队会下田去、请老农民、妇

女代表、村干部一起画社区资源地图、水系分布图，用当地人对地形地貌的记忆来修正图纸上的误差。编制季节性历法，掌握作物需水高峰期与农闲时间，就能合理安排施工进度，不扰农。

半结构化访谈和田野漫步把技术逻辑同乡土知识联系在一起。技术人员不再是高高在上地指导，而是细致的倾听者，和村民一起沿着拟定好的渠道线路走，实地考察每一个进水口位置是否合理，每一段沟渠的走向是否顺应自然水势。这样的评价方式可以找出工程风险点，比如容易塌方的地段、地下渗漏的区域等，也可以看出村庄内部长年形成的水权分配习惯和历史遗留的问题。话语权下沉之后，原本枯燥的工程数据就有了活化社会学的意义，使规划方案在达到水力学原理的同时，也更符合村庄的社会生态系统，实现了技术理性与价值理性的统一。

（二）让农民在工程选址、设计中发声

工程选址和工程设计细节都会影响到农户的利益。以往很多纠纷的产生，都是由于没有考虑到农民作为土地使用者应该享有的知情权和表达权。在参与式机制下，设计方案的确定不是由一方决定的，而是多方博弈、协商的过程。渠道经过自家田地，占地补偿怎么算、灌溉口是否方便、田间道路是否被阻等细节问题，如果在设计阶段没有得到妥善答复，就可能在施工过程中变成“钉子”问题。因此，建立起制度化的表达渠道，在图纸最后确定之前就听取农民的意见是必然的。

下表列出了设计阶段需重点考虑的农民意见：

设计阶段农民意见关注点

渠道线路选择	尊重当地农民意见，优先利用原有自然沟渠或田埂道路，减少耕地占用，降低土方开挖量，避免因破坏风水、祖坟等引发文化冲突。
构筑物形式确定	根据地块种植结构和灌溉习惯，允许农户对斗门、农门的型号及控制方式提出个性化要求。例如，经济作物区可设计更精准的量水设施，粮食作物区则保留操作简便的传统闸门。

开放式的设计流程虽然会增加初期沟通的时间成本，但是从长远来看，却极大地提高了设计的适用性。农民认可设计方案，就说明他们明白工程的目的，同时也可以接受外部的干预。协商而得的技术方案比单纯追求工程标准化的方案更具生命力，因为把使用者的智慧和需求嵌入到物理结构中，消解了可能产生的抵触情绪，为工程顺利实施扫清了障碍。

（三）形成社区共识与集体承诺

硬件设施再好，没有软件制度做支撑的水渠，再结实也不能长久。工程开工前取得广泛的社区共识，并将其转化为具有约束力的集体承诺，就是参与式管理机制的重要成果。共识不是简单的口头答应，而是在充分认识工程权利义务关系的基础上形成的社会契约。项目开工前要经过村民大会、户主代表会等渠道多次讨论工程建成后管护方式、水费收缴标准、违规用水处罚等问题。只有当大多数受益人认为这些规则合理并愿意为此负责的时候，项目才能开始。

这种集体承诺一般会以书面协议或者村规民约的形式予以固定，从而成为解决用水纠纷的依据。明确了各方在工程生命周期中所起的作用，国家承担大部分资金投入和技术支持，社区配合必要的工作，后期维护由社区承担。事前契约可以防止搭便车，每一个受益者都清楚，要享受灌溉的便利就必须承担相应的义务。经由民主协商得出的规则比行政命令有更强的执行力，因为它是村民内化了的道德规范和公正观念。一旦形成集体行动的逻辑，社区内部的社会资本就会被调动起来，邻里之间的相互监督会成为保障工程正常运转的隐形力量，在制度上保证农田水利工程的公共性不被个人私利所侵犯。

二、参与式建设与监督

（一）组织农民投工投劳参与建设

基层农田水利创建时推行农民投工投劳，不是简单地强行征用农民的劳动力，而是把劳动变成资本的一种产权制度革新。不同于传统的徭役式派工，现代参与式建设提倡使用“以工代赈”或者“劳务折资”的方式，使农民通过出力获得劳务报酬或者劳务折资形式的工程集体股份。这可以缓解资金的压力，有限的财政资金可以覆盖更广的范围或者提高工程的标准，也可以为不能外出务工的剩余劳动力提供在家门口就业、增加收入的机会，对于低收入家庭来说，参与本身就是一种精准扶贫。

施工组织形式在实际施工中就显得非常重要。可以将工程量化整为零，划分成若干个易于操作的标段，优先发包给本村的能工巧匠施工队或农民合作社。施工队伍对于本地区的地质情况熟悉，受熟人社会的声誉制约，因此比外来施工队伍重视信誉。施工时，老一辈的泥瓦匠、石匠带年轻劳动力干活，边干边学，在完成工程的同时完成了传统营造技艺的“传帮带”。农民自己搬每一块石头，搅

拌每一桶砂浆的时候，他们流的汗就会变成对自己所建工程的“心理确权”。参与过程冲破了政府建设、农民旁观的心态，把建设进程变成社区内部的集体行动，极大地改善了村庄的凝聚力和动员能力。

（二）成立社区质量监督小组

农田水利工程由于隐蔽工程多、线路长、覆盖面广，给质量监管造成困难。单纯依靠政府监理力量不能实现全面覆盖，容易出现偷工减料、以次充好等腐败行为。由村民推选产生社区质量监督小组，是解决该问题的有效办法。监督员多为村里的公道正派、有建筑经验的老党员、老干部或村民代表，他们居住在施工现场附近，可以做到全天候、无死角的贴身监督。不同于外部监理，他们与工程质量存在直接利益关系，任何一个裂缝、任何一个渗漏都会影响到自家的灌溉效益，所以他们具有最强的监督动力。

监督小组的职权必须要有制度保障，可以检查水泥、钢筋等原材料进场质量，可以对关键工序（如混凝土浇筑、渠道垫层铺设）旁站监理，甚至拥有票决权，即对质量不合格的工程有权要求停工返修。因为签字权掌握在他们手中，所以承包商不能绕过他们来进行工程结算。为了提高监督的专业性，有关职能部门要在开工前对监督员开展基础技术培训，教授辨识水泥标号的方法、测量渠道坡度、评判砌体饱满程度等技术。“土洋结合”的监管体系就形成了严密的质量防护网。承包商在遇到的既懂行又较真的“土监理”面前，很难去弄虚作假。实践证明，只要有社区监督小组发挥作用的地方，工程的耐久性、完好率就明显好于单纯依靠行政验收的项目，真正做到了花小钱办大事、办好工程。

（三）增强农民的归属感和责任感

工程实体建设过程实质上就是农民心理归属感的形成过程。由于长期以来城乡二元结构的存在，许多农村公共设施被当作国家的财产，农民没有爱护的意识，甚至出现人为破坏或者侵占渠道用地谋取私利的现象。要改变这样的状况，就必须通过深入的参与，把“他者的工程”变成“我们的工程”。农民全程参加规划争论、建设劳动、质量严格把关之后，工程才有了他们的记忆和情感，成了社区集体记忆。由劳动投入所产生的自豪感，是任何产权证照所不能取代的心理联系。

归属感建立的好坏直接影响后面管护的效果。一个人不会轻易毁掉自己亲手建造的东西，一个社区也不会轻易毁掉大家共同建造的水利设施。这种心理会一直延续到工程交付以后很久很久。渠道淤积的时候村民会自行组织清理；有人往

渠道里倾倒垃圾，不需要执法队去处理，周围邻居就会主动制止。内生的管护动力来源于建设时期形成的主人翁意识。水利工程不再只是冰冷的水泥建筑，它成了维系村庄生产和生活的共同体财产。农民参与式建设既带来了灌溉的便利，又带来了自治的感受，精神上的收获对于推进乡村社会自治、善治意义重大。

第四节 跨区域协调管理机制

一、流域尺度的统一管理

（一）成立跨行政区的流域管理委员会

传统水利管理方式受行政区域的限制，容易产生九龙治水的局面，上下游在防洪、排涝、灌溉等各方面缺乏有效的沟通与协调。解决此问题的方式就是创建跨越行政区的流域管理委员会，而这是全世界在水治理中达成的共识。该委员会不应该仅仅是一个松散的议事机构，应该有实质性的管理权力和法律地位，成为流域内水资源配置、工程布局、调度管理的最高决策机构。其成员构成应该体现出广泛的代表性以及专业性，既要有沿线各级政府的行政负责人，也要有水利技术专家、主要灌区的代表以及基层用水户协会的成员，保证决策过程能够考虑到各方面的利益诉求，既有专业理性又有社会公平。

从运行机制上来说，流域管理委员会要形成定期协商、决策的程序，就跨区水利工程建设计划、枯水期水量分配及突发性水污染事件等作出规定。赋予委员会水事纠纷裁决权，可以减少行政协调成本，防止地方保护主义给整个水资源造成危害。许多国际流域治理的成功案例表明，只要有流域管理机构的一定实力，就可以把分散的治理活动组合成有组织、有计划的活动，使各个区域内农田水利设施工程由各自为战变为协同共治，从而达到流域内水土资源的可持续利用。

委员会还要承担监督和评价的职能，定期对流域内各行政区用水指标的执行情况、工程管护绩效、水生态保护效果进行考核。自上而下的监督加上横向的利益协调，就形成了一个严密的管理闭环。特别是遇到极端气候事件的时候，统一指挥调度可以最大程度地发挥流域内水利工程体系的减灾效益，保证粮食生产安全和社会稳定。

（二）制定流域综合规划与水量分配方案

流域综合规划属于水资源统一管理的顶层设计，要以流域的自然本底情况和社会经济发展需要为依据来进行前瞻性、系统性的谋划。规划编制要统筹地表水与地下水联合调度、当地水与外调水联合优化配置、生活用水、生产用水与生态用水合理比例。这就需要规划制定者突破狭隘的局部利益视角，站在全流域一盘棋的高度科学测算水资源承载能力，确定水资源开发利用的上限红线。规划时不仅要考虑骨干工程的布置，还要考虑到田间地头的毛细血管，保证干支渠系有效接续，灌排通畅。

水量分配方案是化解跨区域用水矛盾的核心依据，其制定过程必须遵循公平、效率与可持续原则。

1. 初始水权分配逻辑的确定是关键，要从各个行政区的人口数量、耕地面积、过往用水的传统习惯、产业的结构特征等出发，借助现代水文模型进行精确测算，得出一份符合水文规律且满足实际需求的配水定额。

2. 方案应具有动态调整的弹性：建立丰枯水年调节系数和应急调度预案，在遇到特大干旱或者突发性水源短缺的时候，根据事先设定的优先级来调整分配指标，优先保障基本生活用水和粮食核心产区灌溉用水。

用法律的形式固化水量分配方案，并赋予其强制执行力，就是跨区域协调机制落地的制度保障。严格的总量控制、定额管理，会倒逼各行政区加强内部节水管理，促使高耗水农业向节水高效农业转变。同时明确的水权界定也为以后开展跨区域水权交易奠定了产权基础，使得市场机制可以在水资源优化配置中起到辅助作用，提高流域水资源的利用效率。

（三）建立信息共享与联合调度平台

信息不对称属于造成跨区域水利管理协调难题的技术性制约因素。构建全流域统一的信息共享平台，就是要冲破行政区和部门之间数据壁垒，实现水情、雨情、工情、农情数据实时共享。该平台应该利用物联网、卫星遥感、云计算等现代信息技术，在流域内关键断面上游、主要水库、骨干渠道和典型灌区布置高精度的监测感知设备，形成全流域立体化的感知网络。通过大量的数据自动采集和传输，使管理者可以清楚的了解到每一块立方米的流动情况和利用情况，从而为管理者的科学决策提供良好的数据支持。

在数据共享的基础上构建联合调度平台，利用数字孪生技术对整个流域水利

系统进行虚拟仿真,模拟水流演化及工程响应,比较不同的调度方案。因此跨区域的水量调度不再依靠经验判断或者事后的补救,而是根据模型预测的主动干预。灌溉高峰期,平台根据上下游土壤墒情差别及作物需水规律产生最佳配水方案,精确掌控闸门启闭,泵站开停,做到水资源按需分配,精确灌溉,大减输水过程中的跑冒滴漏和弃水浪费。

当流域遭受洪水威胁或者水质受到污染的时候,联合调度平台的价值就得以体现。能够迅速整合全流域的工程调度权,统一指挥上游水库拦蓄洪水、中游湖泊调蓄错峰、下游河道泄洪排涝,最大限度地发挥防洪减灾效益。以数据为驱动的联合调度模式从根本上改变了以前依靠电话通知、人工操作的滞后管理方式,极大地提高了跨区域水利工程体系的应急响应速度和协同作战能力。

为了保证平台长久稳定地运行,需要制定统一的技术标准和数据规范,使不同区域、不同层次的系统之间可以无缝对接。同时建立水情信息发布审核和通报制度,保证水情信息的权威性、透明度,增加上下游之间互信。依靠技术手段的加持,把物理上分离的农田水利工程串接成逻辑上耦合的智能网络,是实现跨区域协调管理现代化的必然选择。

二、灌区上下游的生态补偿机制

(一) 明确生态保护者与受益者的权责

生态补偿机制的逻辑起点是明确生态产权及责任主体。按照谁受益谁补偿、谁保护谁受偿的原则,必须在法律上明确上游地区作为生态产品供给者权利,下游地区作为生态服务消费者付费义务。权责关系的确定不能仅仅停留在道德层面,还需要形成具有法律效力的契约关系。对流域生态系统服务价值进行评估,量算上游区域为保护水质、涵养水源而付出的机会成本及直接管护费用,给制定补偿标准提供科学依据。

权利主体的界定要具体到行政区甚至基层组织。上游乡镇、村集体以及水源地保护农户因退耕还林、减少化肥农药使用或者放弃高污染产业所造成的经济损失,均属于受偿主体。与此相反,下游利用优质水源发展高效农业、工业,享受良好生态环境的城镇居民和企业是法定的补偿主体。明确这种关系可以消除搭便车的心理,使生态价值在经济循环中得以体现。

创建常态化的跨区域协商对话机制,属于权责落实的重要环节。在流域管理

机构的协调下，上下游政府就水质保护目标、水量保障指标、生态补偿额度等进行协商并签订协议。这种契约式的管理，把笼统的生态责任变成具体的指标体系，断面水质达标率、入境水量保证率之类的就是。如果上游没有达到约定目标，就会减少相应的补偿资金；相反，如果上游超额完成任务或者下游用水超标，则应增加补偿或者支付超额水费，从而形成双向约束、权责对等的治理格局。

（二）探索资金补偿、项目补偿、政策补偿等方式

生态补偿的实现形式要多样化，要符合不同地区经济发展水平和实际需要，不能只有财政转移支付一种形式，否则会形成依赖，不可持续。

生态补偿方式表

补偿方式	实施机制	资金来源 / 具体措施	目的 / 效果
资金补偿	横向财政转移支付	下游政府财政出资、征收水资源费 / 生态税	补偿上游机会成本，支付管护劳务，提高资金精准性（“以奖代补”）
项目补偿	异地开发、基础设施援建	下游援建高效节水灌溉、生态清洁小流域、农产品加工园区	改善上游生产生活条件，促进流域产业分工协作，实现生态经济双赢
政策补偿	发展权益让渡与倾斜	建立排污权 / 水权 / 用能权跨区交易机制，上级政府专项补助倾斜	激励上游保护生态，调节区域发展差距，通过市场机制优化资源配置

从生态补偿方式表可知，资金补偿是最直接的补偿方式，一般以横向财政转移支付的方式进行。由下游受益地区政府财政出资或者通过征收水资源费、生态税等方式筹集资金，直接拨付给上游地区。资金主要用作补偿因生态保护而放弃的发展机会成本，支付水源地巡查管护人员的劳务报酬。为了提高资金使用的精准度，可以采取以奖代补的方式，将资金发放同生态治理绩效挂钩。

项目补偿即异地开发、基础设施援建实现平衡。下游经济发达地区可以在上游援建高效节水灌溉工程、生态清洁小流域治理项目或者共建农产品加工园区。造血式的补偿既改善了上游的生产生活条件，又促进流域内产业的分工协作。下游提供技术、资金支持，上游发展有机农业，下游包销绿色农产品，生态保护与经济发展相得益彰。

政策补偿就是发展权益的让渡和倾斜。区域发展规划中可以尝试建立排污权、水权、用能权等指标的跨区交易机制。上游地区可以将节约下来的水权指标或者富余的排污权指标，用市场价格向下游地区有偿转让，从而得到经济收益。上级

政府在安排重大生产力布局、土地利用指标或专项补助资金时，可以适当向生态保护任务繁重的上游地区倾斜，用政策红利差异化的配置来调节区域发展差距。

（三）建立跨区域的生态补偿基金

为了保证生态补偿机制长久稳定的运作，建立独立运行的跨区域生态补偿基金是国际通用的成熟的经验。该基金的资金来源要形成政府引导、市场运作、社会参与的多元化的投入机制。除了上下游政府的财政出资外，还可以吸纳水电开发企业、大用户捐资、发行绿色债券或者彩票公益金。基金设立目的为平衡年度间财政收支波动，保障生态保护投入连续、可预期，防止因地方财政状况好或者坏造成补偿断供。

基金管理要遵从专业化、透明化准则，引进第三方专业机构来托管和审计。基金使用方向应严格限定在流域内水源涵养林建设、面源污染治理、河道生态修复、基层水利管护能力提升等几个方面。健全项目的申报、评审、验收制度，使每一分钱都用得其所。并且要定时向公众公布基金收支情况及执行成果，推行社会监督，改善基金信誉。

从长远来看，生态补偿基金还应该发挥金融杠杆的作用，创建绿色担保基金或者贴息贷款，引导社会资本流向流域内的生态农业、环保产业。把生态补偿资金变成产业发展资本金，助力上游地区培育和发展绿色新动力，慢慢改善自身“造血”能力。当上游地区依靠绿色产业实现富民强县时，单纯的“输血式”补偿就会转变为以绿色产业链为基础的互利模式，使流域生态保护和经济社会发展紧密结合，给基层农田水利工程长期维护奠定良好的生态经济基础。

第五节 基层农田水利工程组织模式创新效果评估

一、评估框架与指标体系

（一）从效率、公平、可持续性、适应性等维度评估

效率维度用资源利用的投入产出角度来衡量，分成配置效率和技术效率。农田水利组织模式中技术效率体现为灌溉水利用系数的提高、输水损失的减少，是反映在一定的组织管理模式下工程设施物理性能发挥程度的指标。配置效率是指资金、人力、管理成本的合理搭配，在管护资金有限的情况下，何种组织形式可

以在边际成本最低的时候，实现最大的灌溉服务覆盖。不同的模式下水资源边际产出价值不同，高效的组织形式应该促进水权向高价值用途流动，抑制浪费行为，通过精细化管理提高每一滴水的生产潜能。

公平性对基层水利治理十分重要，它关系到社区的稳定以及组织的合法性。评价重点放在上下游用水户间水量分配差异上，大户和小农户用水权有无保障，不同收入水平人群支付费用是否合理。如果新的组织模式造成水资源被少数强势利益集团所垄断，再高效的模式也会因为缺少公平性而不能持续。因此水分配中的基尼系数应用、用水机会均等化程度、弱势群体在水事决策中的发言权等都是公平性评价指标。只有当水利服务如同水一样普惠地供给给灌溉区的每一个居民，成本分摊依据“受益者付费”的原则，同时充分考虑支付能力的时候，组织模式才有其应有的伦理价值。

可持续性、适应性，属于组织模式生命力的长效指标。可持续性指的不单只是工程设施物理上的寿命以及完整度，而包含着财务自给能力以及生态承受力。需要考察水费的收取率是否可以满足运行维护成本，组织是否拥有稳定的外部资金来源，以及灌溉行为是否造成地下水超采或者土壤盐碱化等环境负外部性。适应性就是指组织对外部变化的弹性，即组织应对气候变化造成的极端旱涝灾害的能力，以及组织对农产品价格波动、农村劳动力转移等社会经济环境变化的应对能力。具有良好适应性的组织模式依靠灵活的制度安排，在不确定的环境里能保持功能上的连续性和结构上的稳定状态，不会因为外界干扰而陷入瘫痪。

（二）工程效益、经济效益、社会效益指标

建立综合效益指标体系，就是将治理理念由抽象变为具体的数据，既要算经济账，也要算民生账、设施账。

1. 工程效益指标主要看硬件设施运行状况和服务能力。核心指标有灌溉保证率提高幅度、渠道及泵站完好率、设施故障平均修复时间、灌溉水利用系数。这些都是直接体现管护主体有没有尽责，新的组织模式是否真正解决了“重建轻管”这个顽疾。引进专业管护公司之后，需要对设施巡检频率是否按要求执行进行量化评价，进而带来工程使用寿命的延长值。

2. 经济效益指标，主要通过水利改善带来的农业增产增收、节约成本等体现。具体为亩均粮食产量增长率、高附加值经济作物种植面积占比变化、单位方水农业产值、农民亩均灌溉成本降低额。组织模式创新要从削减农民的等待成本入手，

依靠规模化经营减少单位面积灌溉能耗。水权交易带来的额外收益以及得到的节水奖励资金情况,也被作为经济效益指标的补充,体现组织在市场机制下创造价值的能力。

3. 考察水利治理对农村社会资本和公共秩序的影响,属于社会效益指标。主要是指水事纠纷发生率下降的幅度、因改善灌溉条件增加的农村就业机会、农民参与村集体事务的热情、改善水环境对乡村宜居度所做的贡献。良好的水利组织常常是社区共识的黏合剂,大家共同参与水管理,互相增进信任,互相配合做事,避免了因争抢水源发生邻里之间的矛盾纠纷,使乡村社会更加和谐。

(三) 组织治理能力与农民满意度指标

组织治理能力是决定农田水利工程能否长期良性运转的软实力,农民满意度则是检验一切改革成效的试金石。两者一起构成了评价体系中主观和客观相结合的重要部分。

治理能力评价主要考察的是组织的制度化程度以及执行力。规章制度健全情况,即是否有明确的用水调度规则、财务制度、奖惩制度;决策民主性、透明度,即重大水事决策是否充分协商,财务账目是否定期公开;执行监督有效性,即组织对违规用水、破坏设施行为的查处是否有力。治理能力强的组织应该有清晰的产权,规范的决策程序和强有力的约束措施,可以有效地避免搭便车的行为,从而减少集体行为的交易成本。

农民满意度指标是从服务对象的角度出发,采用问卷调查、访谈等手段得到的第一手资料。评价内容包括农民对供水及时性、水价合理性、工程维修质量、投诉处理反馈速度、组织人员服务态度等各方面总体评价。农民的付费意愿很大程度上受其满意度水平的影响。当农民切实感受到组织模式改变带来的便利和实惠之后,参与管护、缴纳水费的积极性就会大大提高。因此把农民的主观感受转化成信任度指数和支撑度指数,可以迅速发现组织运行过程中出现的各种问题,给模式的微调提供即时的反馈信号。

二、不同组织模式的比较分析

(一) 三种主要农田水利组织模式比较

全球范围内,可以断定的是,没有一种组织形式是万能的。水用户协会、公私合营和传统的社区管理这三种模式各有利弊,其绩效好坏由各自不同的资源条

件、制度环境、社会结构等因素决定。通过横向比较可以认识不同的模式及其特点，也可以认识各种模式适用的条件。

三种主要农田水利组织模式比较

特征 / 模式	水用户协会	公私合营	社区管理
主导方	农民 / 社区	政府与私人部门	社区 / 村委会
优势	借助社会资本，降低监督协调成本；信息对称度高；道德约束强。	引入专业技术与管理能力，提高效率；标准化服务；规模效应降低运营费。	制度惯性强，执行成本低；嵌入村庄治理结构；“花小钱办大事”效率高。
劣势	面临集体行动困境；组织动员成本高；技术能力弱，处理复杂工程维护时效率低。	缔约、监管成本高；履约风险大；企业逐利可能导致水价上涨或增加农民负担。	资金匮乏，人才短缺；应对跨区域、高技术工程力不从心；长期效益递减。
适用场景	中小型灌区，有一定组织基础的社区。	大型、复杂、技术密集型水利工程；水资源稀缺、需精准计量。	小微型水利工程，基于地缘关系；劳动力富余、现金支付能力差的区域。
核心挑战	规避集体行动困境，提升专业能力。	平衡效率与公平，有效监管私人部门。	资金与技术瓶颈，应对现代复杂需求。

从以上三种主要农田水利组织模式比较可知，不同的模式在成本效益、专业能力、适用性上存在较大的差别。成本效益细化后可以将其分为工程建设成本、运行维护成本、交易成本。水用户协会模式属于参与式治理，它最明显的优势就是能够依靠农村内部的社会资本，有效地降低监督成本和协调成本。由于成员之间存在熟人社会的信任机制，信息不对称程度较低，违规用水的道德风险很容易被内部舆论所约束。但是水用户协会存在集体行动的困境，组织动员成本高，缺乏专业能力处理大型复杂的工程维修，在技术效率低下时容易造成实际维护成本增加，存在低成本低质量的风险。

公私合营模式用市场机制来提高效率，核心思想就是依靠私人部门的专业技术和管理能力提高效率。就效益来说，公私合营模式可以大幅提高设施完好率和灌溉服务标准化程度，进而依靠规模效应来降低单位运营成本。但就交易成本而言，公私合营模式的缔约成本、监管成本、履约风险都很高。政府就要耗费很多资源去设计合同、监督绩效，以免企业出现机会主义行为。私人资本的逐利性也会导致水价上涨，如果财政补贴机制设计不合理，就会加重农民负担或者引起社会反对，从而抵消技术效率给农民带来的好处。

传统的社区管理模式依靠村委会或者宗族力量，制度惯性强，执行成本低，水利管护被嵌入村庄的总体治理结构之中，不需要另行设立组织机构。该模式在小微型水利工程中性价比非常高，可以实现“花小钱办大事”。但是面对跨区域、高技术含量的现代水利工程，由于社区管理资金不足、人才缺乏的问题，很容易造成水利工程老化失修，长期效益呈现递减的趋势。相比于公私合营模式，社区管理更符合传统社会契约精神，但是两者在初始进入制度的时候都会付出巨大的代价。

（二）不同模式在不同区域、不同规模下的适用性

由于地理环境存在差异、工程规模也不同，所以组织模式的选择表现出“权变”的特点。对于水资源极度缺乏的干旱半干旱地区，如中国的西北地区、中东和北非的部分地区等，由于水资源非常匮乏，所以必须严格实行总量控制、定额管理。在这些地方，松散的社区管理难以遏制用水冲动，因此，采用政府强力监管与水用户协会自我约束相结合的方式更为合适。在大灌区要引进公私合营形式，用技术手段来做到准确计量并高效输配，加大刚性约束。

水资源较为丰富的南方稻作区或者湿润地区，灌溉主要是为了抵御季节性干旱，水利工程多为小型的塘坝、沟渠，分布比较分散、微观。在此类地区，社区管理或者以村组为单位的水用户协会有着很强的生命力。由于工程规模小、技术门槛低，依靠地缘关系的熟人合作最省成本、反应最迅速。对于牵涉到多个行政村的、灌溉面积在万亩以上的大、中型灌区，由于利益协调复杂、维修资金庞大，单靠一个社区管理是不行的，必须建立水用户协会联席会议制度或引进第三方专业管护企业（即公私合营模式），实行骨干工程专业管、田间工程群众管的分级治理模式。

经济发展水平也是决定模式是否适用的重要因素。在经济发达、农业集约化水平高的地区农户时间机会成本高，农户付费请专业人员服务意愿更高，为公私合作模式或者专业服务组织生存提供土壤。欠发达的传统农业区劳动力丰富但是现金支付能力弱，农民更愿意用“两工”来代替现金支付。在这种情况下，强调共同劳作、互助合作的社区管理或初级水用户协会模式就更符合当地的社会经济基础。

（三）混合模式的潜力与挑战

随着实践的深入，单一模式的局限性就体现出来。目前以政府为主导、市场

为运作主体、社会为参与主体的混合模式正成为全球农田水利治理的新趋势。混合模式想取各家之长，用政府行政权威保证公平和投入，专业公司提高效率，水用户协会群众基础降低交易成本。如政府购买服务加水用户协会监督的模式，既解决水用户协会技术弱的问题，又用赋权农民监督企业的方式来克服公私合营模式存在的监管盲区。

混合模式所具有潜力就在于，它可以依靠机制耦合产生协同效应。在一些成功的案例中，混合模式通过明晰产权，把小型水利工程的所有权归村集体或者水用户协会所有，经营权通过拍卖、租赁等方式流转给专业大户或者合作社，实现了所有权和经营权的分离。既激活了沉睡的资产，又保证了公共利益不流失。把“水权交易”等市场化手段放进混合治理结构里，节余的水指标就能变现，给工程管护供应了一种持续的资金来源，冲破了长期以来依靠财政输血的困局。

但是混合模式在落地时也遇到了严峻的挑战。核心问题就是多元主体之间利益的争夺以及责任边界的不清。当政府、企业、水用户协会三方介入时，就容易出现“三个和尚没水喝”的现象。设计出一个精巧的契约体系，把行政逻辑、市场逻辑、社会逻辑三者融合在一起，是一项非常困难的制度工程。当企业追求利润最大化、水用户协会追求用水成本最小化发生冲突的时候，如果没有强有力的仲裁机制，合作就会破裂。混合模式给基层治理能力提出更高的要求。缺少懂技术、懂管理、懂法律的复合型人才，复杂的混合设计反而会造成系统熵值升高，使系统的运行效率降低。所以，混合模式的推广不能搞“一刀切”，必须在试点的基础上不断调试磨合，逐步建立起来以契约精神为基础、以多方共赢为目标的利益联结机制。

第八章 农田水利政策支持体系构建

第一节 法律法规保障体系建设

一、国家层面水利基本法的完善

（一）《水法》中关于农田水利的条款细化

现行《水法》作为水资源管理的基础性法律，对于农田水利的规定多为原则性规定，缺少对基层具体情形的可操作性规定。在今后的修法中应在法律条文中增加专门章节或者条款，明确农业节水优先的法律地位。这些细化条款要包含农田水利规划的法律效力、建设标准的强制执行、水源保护的特别规定。法律应该明确规定在水资源分配中要首先保障农业生产的需要。尤其在干旱、半干旱地区，法律更应当强制性地规定农业用水的红线，坚决阻止工业和城市用水无序挤占农业生态用水。

法律修订要充分考虑到农田水利设施保护范围的划定问题。应当用立法的形式明确水利工程的保护范围和保护对象，禁止在保护范围内从事任何危害工程安全、影响工程运行的活动。就因国家重大基础设施建设需要占用农田水利设施的情形而言，在法律条款中应当明确补偿标准以及恢复重建责任，保证农业灌溉功能不会因为外部建设而受到影响。通过国家大法层面的一系列规定，给农田水利筑起了一道坚不可摧的保护网。

（二）明确各类水利工程的产权归属

长期以来，由于产权不清、责任不明、利益不对称，基层农田水利设施存在国家管不到、集体管不好、农民管不了的问题。因此法律上必须对大、中、小各种水利工程的产权作出明确的划分。国家投资建设的大型骨干工程要明确国有资产属性，由政府指定专门机构来行使所有权和管理权。而对于数量众多、分布广泛的小型农田水利工程，法律上应当确认其所有权可以依法下放给农村集体经济组织、农民用水合作组织，甚至直接归农户个人所有。

在确定所有权之后，法律还要对使用权、处置权、收益权的流转做出规定。

用立法形式确立投资、所有权、受益、负担一致的原则来鼓励社会资本参加农田水利建设。法律条文应明确规定，已经确权登记的水利设施的产权受到法律保护，产权人可以依法将水利设施抵押、出租或者转让。产权制度的法律确认，可以有效激活农村水利资产，调动社会各方面特别是广大农民群众参与水利建设与管护的积极性，从根本上解决由于产权虚置而造成的设施荒废问题。

（三）规定各方主体的权利、义务与责任

建立起权责对等的法律关系，才是保证农田水利工程正常运转的前提。法律条文中必须明确政府、供水单位、用水组织、农户个人之间的权利义务界限。对于政府而言，法律规定应明确规划编制、资金投入、监督管理等各方面的法定责任，并加强行政问责，对渎职造成水利设施毁损、水资源浪费的行为追究法律责任。对于供水单位来说，法律上应当规定其按照合同的约定，向需水人供应足够的、符合要求的水源，并负责设施的日常养护。

对于广大农民和用水组织而言，法律也要规定相应的义务。农户在方便享用水的同时也要承担着按时交纳水费、爱护田间工程设施、积极采用节水灌溉技术等法定义务。法律上应该明确禁止私自截流、破坏渠道、污染水源等行为，并规定相应的惩罚措施。用法律条文把各方面行为固定下来，形成权利有保障、义务有履行、责任有追究的完整闭环，从而有效消除管理中推诿扯皮的现象，构建起基于法治契约精神的新型农田水利治理结构。

二、专项法规与部门规章的制定

（一）出台《农田水利条例》或类似法规

为了把宏观的法律原则转变为具体的操作规范，国家亟需制定出一部专门的《农田水利条例》，或者对它进行全面的更新。该条例应该是农田水利的“操作手册”，要对从规划设计、资金筹措、工程建设到运行管护的全过程进行覆盖。条例内容应当对农田水利工程建设的技术标准、质量监管体系、财政投入比例、支付方式等作出详细规定，保证农田水利工程建设资金链条的安全高效。

在此基础上，条例还要重点解决工程建成后的“最后一公里”管护问题。应以法规形式强制要求在工程立项时同步制定管护方案，明确管护主体和管护经费来源，真正实现“建管并重”。条例还要对农田水利服务市场准入、服务标准以及退出机制作出规定，以利于专业化服务队伍进入田间地头。用这样一部综合性

的行政法规来整合分散在各个职能部门的职责，消除监管盲区，为农田水利事业建立一个完备、科学的行政管理法规体系。

（二）制定农民用水户组织管理办法

农民用水户组织是政府和农户之间的桥梁，但是目前农民用水户组织的法律地位还很尴尬，运行也不规范。因此，制定专门的农民用水户组织管理办法迫在眉睫。该办法的主要内容包括：

1. 明确法律主体地位，规范注册登记程序。办法应规定用水户组织在民政或者农业农村部门登记注册的程序，赋予其独立的法人资格，使用水户组织可以以独立主体的身份参加工程发包、水费收缴和银行开户，彻底解决用水户组织的黑户问题。

2. 健全内部治理结构以及民主决策机制。强制要求用水户组织建立会员（代表）大会、理事会、监事会制度，规定重大事项必须经过民主协商之后才能作出决定，防止组织行政化或者被少数人把持。

3. 界定经营范围、财务管理制度。允许用水户开展与水利相关的各种经营活动以补充管护经费，但是必须规定建立公开透明的财务账目，定期向成员公布收支情况，接受政府的审计和群众的监督，从而保证组织的公益性和服务性不褪色。

（三）完善水权、水市场、水价相关法规

经济手段得以顺利实施，必须有完善的法规体系做保障。必须健全水权交易、水市场培育、农业水价综合改革等相关的法规体系。关于水权，要制定《农业水权确权登记管理办法》，规范水权初始分配、确权登记、证书发放的程序，保证每方水都有个归属。在此基础上还要制定水权交易管理办法，确定交易平台、交易规则、价格形成机制和纠纷解决方式，保证水权在区域之间、行业之间、农户之间有序流转。

关于水价改革要修订水利工程供水价格管理办法，确立成本补偿、合理收益、优质优价、公平负担的定价原则。法规中应当明确实行分类水价及超定额累进加价，倒逼农业节约用水。另外，法规里要同时建立精准补贴和节水奖励制度，确定补贴对象、标准和程序，保证水价上调不会增加农民的负担。依靠这一整套法规组合拳，用好价格杠杆调节用水需求，做到水资源高效配置、节约利用。

三、地方法规与村规民约的补充

（一）鼓励地方结合实际出台实施细则

省、自治区、直辖市的人大及其常委会应当根据上位法，结合本地区的水情、农情，制定具有地方特色的实施细则或者地方性法规。水资源匮乏的北方地区的地方立法应着重于地下水超采治理、高效节水灌溉技术的强制推广和严格的取水许可制度；而水资源丰富的南方地区的地方法规重点则应放在排涝设施建设、水生态环境保护 and 防止水体富营养化等方面。

地方实施细则还应将中央法律中留有余地的条款具体化。对小型水利工程产权改革，地方可以制订具体的操作指南，对拍卖、租赁、承包等不同的改革方式作出详细规定，提供相应的合同范本。就农业水价改革来说，地方要按照当地农民的承受能力，制定出具体的分步调整方案和精准补贴细则。经过这样差异化的立法实践之后，法律制度就会更符合基层实际，提高法律的可执行性、实施效果，避免一刀切造成的政策失灵。

（二）支持将水利管理纳入村规民约

村规民约是农村熟人社会中独有的、有约束力、感召力的非正式制度。因此应该积极支持、引导各地将农田水利建设和管护的核心要求写入村规民约，使之成为村民自我管理、自我教育、自我服务的行为准则。在制定村规民约的时候，要发扬民主，组织村民以“一事一议”的形式，共同商定渠道清淤投工投劳标准、轮灌顺序、水费分摊办法、违规用水的内部惩戒措施。

将水利管理纳入村规民约，就是把国家法律意志转化为村民普遍认同的道德规范与乡土契约。利用舆论的压力和“面子文化”来约束村民的用水行为，可以有效地降低监督成本，这就是软法治理。破坏田间闸门的个人，除了赔偿损失外，还要在村民大会上公开检讨。依靠社区内部认同开展的治理，效果通常要比单纯的行政处罚好得多，可以很大程度上减少水事纠纷，促进邻里和睦，用水公正。

（三）形成多层次、立体化的法规体系

农田水利政策支持体系的形成，其最终目的就是要建立起一个在国家基本法领航下，在专项法规相撑上，在地方法规相配套下，在村规民约相补充下的多层次、立体化的法规体系。这个系统应该像精密齿轮组一样，大齿轮带小齿轮，环环相扣，协调运转。国家规定的方向和原则解决全局性、根本性问题，专项

法规给出操作指南解决技术性、程序性问题，地方法规管末端落实解决区域性、特殊性问题，村规民约集中于具体实践解决自治性、微观性问题。

在这个立体化的体系当中，上下级法律规范之间必须做到高度的协调统一，下位法不得与上位法相冲突，在上位法授权的范围内进行创新突破。同时需要建立动态调整机制，随着农业生产方式的变化和水利技术的进步，及时对不符合发展的法规条款进行修改或者废止。只有编织起这样一张严密而有弹性的法治之网，才能把农田水利建设与管护的每一个环节都纳入规范轨道，为实现农业强、农村美、农民富提供源源不断的水利支撑和制度保障。

为了更好地展示农田水利政策支持体系各层级之间关系及侧重点，下面表格对此进行了总结，具体请看农田水利政策支持体系层级构成表。

农田水利政策支持体系层级构成表

层级	主要载体	功能定位
国家层面	水法、基本水利政策	宏观指导，确立基本原则与战略地位
专项法规	农田水利条例、水权管理办法	细化执行标准，提供操作规范
地方法规	地方性水利条例、实施细则	因地制宜，具体化中央法律，解决区域差异
村规民约	村民大会决议、乡土约定	自我管理，解决微观实践与行为规范

第二节 财政投入与融资机制

一、稳定增长的政府财政投入

（一）将农田水利纳入各级财政优先保障领域

建立有法律效力、制度刚性强的财政保障体系，是保证农田水利资金来源稳定的根本途径。公共财政预算编制时应该确定农田水利建设及管护支出的优先顺序。这就意味着年度预算总金额中必须为小型农田水利设施修复、灌区节水改造以及末级渠系维护留出一部分专门资金，不能被其他临时性开支所挤占。各级地方政府要根据本地区农业发展规划和水利设施建设现状，制定中长期财政投入计划，确定年度增长比率，保证财政投入年增长率不小于同级财政经常性收入年增长率。

有预算编制的优先还不够，还要建立预算执行和监督机制。设立专门的绩效考核指标，把农田水利资金到位率、使用效率和工程实际效益纳入到地方政府政

绩考核体系当中。对产粮大县和财政困难地区，上级财政要建立精准的转移支付制度，加大一般性转移支付力度，并设立专项补助来弥补基层财政在水利投入上的不足。自上而下的资金保障逻辑，意在消除区域经济发展水平不同所造成的水利基础设施的不平衡，让每一寸良田都能得到水利设施的滋养。为防止层层下达的财政资金被截留、挪用，要建立资金直达制度，使财政活水直接流入田间地头的工程，最大限度地发挥资金效益。

（二）设立农田水利建设专项基金

在一般公共预算之外设立农田水利建设专项基金，可以平滑年度资金波动，集中力量办大事。专项基金应当实行专户管理、专款专用，形成独立的资金蓄水池，用以支持重大水利工程建设、突发性水毁工程修复、关键技术改造项目等。该基金的资金来源可以多样化，除财政拨款外，还可以整合各部门原来分散的涉农资金。长期以来，由于“九龙治水”而造成的资金分散、重复建设等问题一直困扰着基层水利的发展，设立统一的专项基金能够把零散的资源“握指成拳”，提高资金使用的集约化程度和精准度。

专项基金的管理运作模式也要创新，不能仅仅停留在拨款的层面，而应该探索建立基金自我增值或者循环使用的机制。对具备一定收益能力的准公益性项目，基金可以采取股权投资、债权投资等形式参与进来，待项目产生收益后，通过分红或者本金加利息的形式收回资金，提高基金的持续“造血”功能。基金的使用方向除了新建工程之外，应该划拨一部分专门用来维修养护存量工程。长期以来，建设资金比较充足，而管护资金十分短缺的现象普遍存在，专项基金的设立就是为了纠正这种偏差，通过设立“管护专户”，保证工程建成后有钱修、有人管，打破“建好就坏、坏了再建”的循环。

（三）完善土地出让收益用于农业农村的比例

土地出让收益是地方政府财政收入的重要组成部分，提高它用于农业农村的比例，属于工业反哺农业、城市支持农村的战略举措。土地出让所得之财理当用于土地。过去大量的土地增值收益被用来建设城市基础设施，造成了城乡基础设施建设存在巨大差距。因此必须从制度上硬性规定，把土地出让收益中的一部分固定用于高标准农田建设、农田水利设施配套投入，随着时间的推移这一比例要逐步提高，从而形成稳定的资金供给流。

1. 根据省区，分类设立计提标准。由于各个地区土地市场活跃度和出让收益

规模存在巨大差别，不能采用一刀切的比例。土地出让收入多的发达地区应该设定较高的绝对额提取要求，欠发达地区主要保证资金专款专用率，并用中央统筹调剂机制平衡区域间资金供给。

2.2. 负面清单加正面引导，规范资金使用。严格限定土地出让收益用于农田水利建设的支出范围，主要支持田间灌排工程、小型水源工程、灌区末级渠系防渗等。不得用这笔钱去搞非农领域内的楼堂馆所建设或者一般性的行政支出。同时还要建立资金使用公示制度，接受社会监督，使土地产生的财富回到农业生产最需要的地方。

二、多元化的市场融资渠道

（一）政策性金融的信贷支持

政策性金融机构并不将利润最大化作为唯一目标，其天然具有公益性强、投资回报率低的农田水利工程特性。农业政策性银行应该真正发挥在农村金融体系中骨干支柱的作用，给基层农田水利项目提供长期、低利率的信贷支持。金融机构应改变传统商业贷款模式，根据水利项目投资周期特点设计 20 年以上的长期贷款产品，使贷款利率周期和水利项目收益周期相对应，降低水利项目初期还款压力。

为解决农田水利项目普遍缺乏有效抵押物的问题，政策性银行可以探索以项目现金流为基础的信用贷款模式，也可以探索以项目权益为质押的质押贷款模式。另外也可以通过央行抵押补充贷款等货币政策工具来降低资金成本，给水利工程提供更好的利率。政策性金融的介入，不单是资金的输入，更重要的是起到引导的作用，通过加大对高标准农田、高效节水灌溉等重点领域的倾斜支持力度，吸引更多的商业金融机构加入。应当建立政策性金融和商业性金融的联动机制，对大型水利枢纽或者骨干工程可以采取银团贷款的形式，政策性银行牵头、商业银行参与分担风险、共享收益，从而放大金融资金的作用。

（二）发行农田水利建设专项债券

地方政府专项债券已经成为目前重要的基础设施融资方式，将农田水利纳入重点支持范围，是拓宽融资渠道的一种方式。发行农田水利建设专项债券，把未来分散的、长期的项目收益变成即刻可以使用的建设资金，从而解决目前的投入不足的问题。地方政府应该认真梳理出本地区有收益潜力的一系列水利工程，例如供水工程、水力发电、水库旅游开发等，以此来制定债券的发行方案。

专项债券的发行、管理都侧重项目的收益和融资自求平衡。当单个农田水利项目收益较差，不能覆盖本息时，可以采用“肥瘦搭配”的方式，将公益性强的农田水利项目与收益较好的城乡供水、污水处理、产业园区开发等项目打包形成综合项目包。对整个项目收益进行核算，从而提高资产包的信用等级和融资能力。专项债券的期限要灵活多样，短期债用于满足临时性资金周转的需要，中长期债券应该与工程建设运营周期相适应。同时加强对债券资金使用过程的监管，保证资金按照项目流向使用，不得挪用，建立偿债保障机制，防止地方政府债务风险。

（三）引导社会资本和民间资本投入

打破农田水利建设政府“一统天下”的局面，积极引导社会资本参与，是提高农田水利工程建设运营效率的重要途径。政府和社会资本合作模式已经被大规模水利工程所采用，应该进一步研究其在基层小型农田水利工程中的适用形式。可以采用特许经营、购买服务、股权合作等办法，吸引有能力的企业参加农田水利设施的建设与管护。为了调动社会资本的积极性，政府要建立科学的回报机制。

一方面，可以实行水价改革，允许社会资本方在一定范围内收取水费，并获得水权交易的收益；另一方面，对于纯公益性的管护环节，政府可以采取购买服务的方式，按管护效果向社会资本方支付费用。对民间资本特别是新型农业经营主体（种粮大户、农民合作社、农业龙头企业等）应鼓励其自建自管或者“先建后补”。这些主体为农田水利工程直接受益者，天然就具有管护动力。政府可以采用以奖代补、贷款贴息的办法来激励他们投资建设田间工程。对于社会资本投资建设的农田水利工程，在不改变用地性质的情况下，可在工程周边水土资源上开展种植养殖、生态旅游等综合经营，延伸产业链条，挖掘工程附加值，实现“以地养水”“以商养水”的可持续发展方式。

三、创新的金融产品与服务

（一）探索以水权、未来收益为质押的贷款

水权制度改革给农田水利融资开拓了新的想象领域。初始水权分配明确之后，便可开展水权质押贷款业务，将水资源使用权由抽象的权益变为可量化的金融资产。金融机构要创建完备的水权价值评价体系，按照水权交易市场以前的数据和未来的预期，合理评定水权的抵押价值。农户或者用水合作组织可以持水权证作为质押物向银行申请贷款，用于节水设施改造、水利工程维护。

除了水权之外，项目未来预期收益权也可作为融资的担保品。对那些可以产生稳定现金流的节水灌溉项目或者供水工程，金融机构可以创新推出应收账款质押贷款、收费权质押贷款等产品。这就需要建立规范的资金回笼账户监管制度，保证项目收益首先用于还贷。为降低银行放贷顾虑，可以探索工程资产和特许经营权组合质押模式，把水利设施实体资产与运营收益权一起打包质押，提高信贷资金安全保障程度。融资模式的核心就是把未来收益“变现”为当前的建设资金，实现了资金的时间价值跨越。

（二）开发农业水利设施保险产品

农田水利工程大多位于野外，很容易受到洪水、干旱、山体滑坡等自然灾害的破坏，存在很大的毁坏风险。采用保险机制，利用市场化风险转移手段，可以给工程的安全运行提供“保护伞”。保险公司应按照农田水利设施的特性开发多样化的保险产品。

农业水利设施保险产品类型

保险产品名称	适用范围 / 保障内容	作用
水利工程设施财产保险	覆盖水库、大坝、泵站、渠道等固定资产，保障因自然灾害或意外事故造成的工程损毁。	确保工程迅速恢复功能，降低灾害损失。
工程质量潜在缺陷保险	在工程建造期间投保，保障工程在使用过程中因设计、施工等原因造成的质量缺陷。	转移工程质量风险，并通过第三方监管倒逼施工方提升质量。
管护责任保险	针对管护主体因疏忽造成的第三方损失进行赔付。	分散管护风险，保障第三方权益。

根据上表可知，根据农田水利工程的特点可以推行水利工程设施财产险。对水库、大坝、泵站、渠道等固定资产投保综合财产险，一旦发生由于自然灾害或者意外事故导致的工程损毁，保险公司就会给予修复资金，保证工程能及时恢复正常功能。探索工程质量潜在缺陷保险。在工程建造期间加保此险种，如果工程投入使用后出现由于设计、施工等造成质量瑕疵的问题，由保险公司来承担赔偿责任或者修复的责任。这既能转嫁风险，保险公司请来的第三方风险管理公司还会对工程质量实施全程监管，进而倒逼施工方改善建设品质。第三，发展管护责任保险，由保险公司赔付管护主体因疏忽而造成的第三方损失。政府可以对经营主体或者管护组织给予一定的保费补贴，减少经营主体或者管护组织的投保成本，培养保险意识。

（三）建立融资担保与风险补偿机制

因为农业生产具有弱势特性，水利工程具有长期周期，所以信贷资金的违约风险较大。因此建立融资担保和风险补偿机制，对于打通金融资金流入农业的最后一公里来说是非常重要的。政府出资设立的融资担保公司应该把农田水利项目作为重点支持对象，逐步降低担保费率，取消反担保，为缺少有效抵押物的水利建设主体提供信用增级服务。

建立政银担三方风险分担机制势在必行。贷款不良时政府风险补偿基金、担保公司、银行按照事先约定的比例分担损失，防止任何一方承担过大的风险，从而提高银行放贷的意愿。具体做法是设定一个代偿率的最高限额，在这个限额之内，实行全额或者部分的风险补偿。同时建立省级再担保体系，给基层担保机构分险支持，分散区域金融风险。这样一种制度安排，可以用较少的财政资金撬动数倍、甚至数十倍的银行信贷资金投入农田水利建设，发挥财政资金的杠杆效应。建立信用评价体系，对守信的建设管护主体提高授信额度、降低利率等给予奖励，对失信主体实行联合惩戒，改善农田水利领域金融生态环境。

第三节 技术标准与规范制定

一、完善工程建设技术标准体系

（一）修订并发布灌溉与排水工程设计、施工、验收规范

农田水利工程设计规范要与区域水土资源承载能力、农业种植结构改变趋势相适应。传统的工程设计标准大多只考虑水力学计算和结构稳定，而忽略了田间微观用水管理的便利性。新的规范修订工作要体现全生命周期管理的思想，在设计阶段就充分考虑后期管护的方便性和成本控制。根据北方井灌区和南方自流灌区的不同特点，分别制定抗冻胀、防淤积的专项设计细则。施工过程中对隐蔽工程要给出详细的工艺要求，在沟槽回填、管道焊接等关键工序的量化标准上做出明确的规定，不能按照个人经验来随意施工。

工程成效的根本保证之一就是验收标准的更新。过去的验收大多走过场，重外表轻实质，重主体轻配套。新版验收规范中应增加严格性能检测程序，必须带压试水、全系统联动调试、灌水均匀度实测。建议引入第三方检测机构参加验收工作，根据量化数据出具验收报告，保证每一个渠道、每一个出水口都能达到设

计要求。只有标准制定得更加细致、更加严格，才能倒逼建设方在施工过程中不能有一丝懈怠，从而彻底解决工程“建好就坏、通水即漏”的顽疾，使每一笔财政投入都能变成实实在在的灌溉保障能力。

（二）制定节水灌溉设备、材料的产品标准

目前市场上节水灌溉设备良莠不齐，低质低价竞争严重，对工程的长期效益构成巨大威胁。因此，建立严格的产品准入标准和质量分级制度迫在眉睫。对滴灌带、喷头、过滤器、智能控制器等主要部件，应制定高于国家通用标准的行业专项标准。尤其是在材料的抗老化性能、耐腐蚀性、水力性能稳定程度上要设下明确的“红线”。长期暴露在户外的输水软管，应规定出它的抗紫外线辐射等级以及预期的寿命，防止由于材料迅速老化而造成系统瘫痪。

1. 健全核心部件的物理性能指标体系。微灌系统中的灌水器，需重点控制制造偏差系数和流态指数，保证在不同压力下出水均匀，这对作物是否能均等获得水肥起着直接决定作用。对于过滤系统，也要根据水质的不同来建立拦截效率的标准，防止过滤效果达不到要求而造成堵塞。

2. 推进智能设备的接口标准化。随着物联网技术在农田水利中应用，各种传感器、控制阀门通讯协议不兼容的问题已经成为系统集成的瓶颈。制定统一的数据传输协议和硬件接口标准，可以降低设备互联互通成本，为以后数字化升级预留空间，避免由于厂家绑定而造成的技术垄断、维护困难。

（三）建立不同区域、不同作物的灌溉定额标准

实施精准灌溉的前提是有科学的灌溉定额标准。我国幅员辽阔，气候土壤条件千差万别，一刀切的灌溉指标既不科学又会造成水资源的浪费。建立分区域、分作物、分生育期的精细化灌溉定额体系，是落实最严格水资源管理制度的技术依据。这项工作需要依靠长期的田间试验数据，结合当地的气象蒸发散量、作物系数、土壤保水性，用大数据分析来建立动态的需水模型。

灌溉定额标准既是技术参考，又是法律约束，也是水权分配、水价形成的基础。在水资源短缺地区，实行强制节水定额，倒逼种植结构调整和节水技术使用。在水资源比较丰富的地方，定额标准就侧重于防止过量灌溉导致的肥料淋失和面源污染。建立国家、省、县三级定额标准体系，根据气候变化和作物品种更新周期定期修订，可以指导农民何时灌、灌多少，实现由“浇地”向“浇作物”的根本性转变，使每一滴水都产出最大的粮食效益。

二、推广先进适用的技术模式

（一）发布节水灌溉技术推荐目录

面对种类繁多的节水技术及产品，基层管理者与农户很容易陷入选择的困境。编制并定期发布节水灌溉技术推荐目录，就相当于给市场提供了一份“白名单”。这份目录的筛选要严格客观，在考虑技术的先进性、创新性的同时还要评价其经济适用性、维护便捷性。对于那些技术指标高但是造价昂贵，维护复杂的贵族技术应该慎重推荐；而那些经过实践检验，耐用性好、农民容易掌握的“傻瓜式”技术则要重点推广。

推荐目录要实行动态管理，建立退出、增补制度。对于实际使用中故障率高、售后服务差的技术产品要及时从目录中淘汰，向社会公布。政府财政补贴政策要和推荐目录挂钩，引导资金流向优质高效的技术模式。具体化为平原井灌区、山地自流灌区、设施农业区等不同的板块，给不同的应用场景供应个性化的技术菜单。可减小基层的试错成本，也可以促使相关企业按目录要求开展研发创新，进而实现整个产业链良性循环。

（二）编制生态友好型水利工程技术指南

现代农田水利工程不能只看作钢筋混凝土的堆砌，而应该成为农田生态系统的重要组成部分。编制生态友好型水利工程技术指南，改变以前过度硬化、切断生物通道的建设方式。指南中应当明确在渠道设计中保留或者重建生物栖息空间的方式，采用多孔隙的生态混凝土、连锁砖、土工格室等代替传统的光面衬砌。既能达到输水防渗的目的，又可以为两栖动物、微生物提供栖息地，提高水体的自净能力。

生态指南还要考虑工程与周围景观的协调。泵站、水闸等建筑物设计要与当地的乡村风貌相协调，不能出现工业化的痕迹。对退水系统，指南应当推荐建立生态湿地或者植被缓冲带，来拦截农田排水中的氮磷营养盐，减轻对下游水体的污染。依托技术指南的引领，把生态理念转化成可执行的工程参数，使农田水利从单一的生产功能向“生产、生态、生活”三生共赢转变，还可借鉴发达国家创建生态沟渠的有效做法，探寻出适合我国国情的绿色发展路径。

（三）建立技术示范与推广基地

“耳听为虚，眼见为实”，创建高标准的技术示范与推广基地就是解决技术落地最后“一公里”的直接手段。这些基地不能只是新设备的“盆景”，应该是

全流程标准化作业的“样板间”。基地严格根据新修订的标准建设管理，从水源工程到田间末级渠系的协同运行模式一目了然地展示给参观者，使参观者能清楚看到标准化建设带来的节水增产效果和管护便利。

示范基地还要起到数据采集和反馈的作用。在基地内布置高密度监测设备，得到各种技术模式下作物生长数据、土壤墒情变化数据、工程运行能耗数据和维护成本数据。真实田间的数据将会成为日后制定标准，政策的基础。同时支持高校、科研院所和地方政府共建产学研用一体化基地，对最新的科研成果在基地内进行中试熟化。举办现场观摩会、农民田间学校，使周边农户直接体验新技术的操作过程，发挥辐射带动作用，实现先进技术模式在区域内的广泛推广，做到“做给农民看、带着农民干”。

技术模式推广途径

途径	主要内容	优势	重点推广对象
技术推荐目录	筛选并发布先进、适用的节水灌溉技术清单。	降低基层选择难度，引导市场规范发展。	基层管理者、农户、相关企业
生态友好指南	明确生态工程设计与建设规范，倡导绿色理念。	促进农田水利与生态环境协调发展。	设计施工单位、决策者
示范推广基地	建立全流程标准化样板工程，进行数据监测和技术熟化。	直观展示技术效果，提供实践经验与数据支持。	农户、技术人员、科研单位

由表可知，多种途径并行发展，保证了先进的适用技术模式得以在农田水利建设上真正起作用。

三、加强标准的宣贯与执行监督

（一）开展管理人员和技术人员培训

人的素质是标准执行的主要因素。目前基层水利队伍中存在年龄结构、知识结构老化，对新标准、新技术接受程度不高的情况。因此必须创建分层次、分类别、常态化的培训体系。培训内容不能只是枯燥的条文宣读，而应该结合典型案例分析，从工程失效给社会造成的严重后果，以及严格执行标准所带来的长期利益等角度出发。对于设计人员，主要是生态设计理念和新型材料应用方面的教育；对于施工管理人员，主要是关键工序质量控制标准的教育；对于一线管护人员，主要是设备操作规范和故障排查流程的训练。

培训形式要革新，可以借助现代信息技术提升培训质量。编制图文并茂、易于理解的国家标准解读手册和视频教程，以手机 APP 或微信小程序的形式发送给每一个从业者，以便随时查阅。建立持证上岗、继续教育制度，重要岗位技术人员的考核认证要严格按照相关标准进行。通过不断更新知识、消除认知偏差，使整个行业形成学标准、懂标准、用标准的浓厚氛围，从根本上提高基层队伍执行技术规范的主观性及能力。

（二）强化工程建设过程中的标准执行

工程建设过程中是标准落实的重要时期，要抓好过程控制，织密监督网络。监理单位应切实履行职责，对施工质量实行全天候旁站式监管；沟槽开挖深度、垫层铺设厚度、管道连接质量等隐蔽工程留存影像资料，实行每道工序必检、每项数据必核。推行工程质量终身制，将标准执行情况纳入到项目法人考核之中。

运用数字化监管的手段，可以提高标准的执行力。像用无人机航拍加远程视频监控对施工现场实施随时检查，发现不符合要求的马上改正。在工程的重要部位预埋传感器，实现混凝土强度、结构变形等各项指标的在线监测。大型灌区改造项目可以建立 BIM 管理平台，将设计标准模型与实际施工进度、质量数据进行对比，达到精细化管理的目的。并聘请村民代表和用水协会的监督人员来参与工程监督工作，给他们授予举报不合规施工行为的权力，从而形成行政监督、技术监督和社会监督三者相辅相成的监督体系，使违规者无处可逃。

（三）建立违反标准的惩戒机制

没有惩罚的规则，就像没有牙齿的老虎。为保证技术标准的严肃性，必须有一套严格的惩罚措施。对违反强制性标准的设计、施工、监理、材料供应等单位及个人依法依规予以查处。建立农田水利建设市场信用评价体系，把标准执行情况作为信用评价的重要权重。对存在严重质量问题或者恶意篡改检测数据的市场主体，应当列入“黑名单”，限制其参加后续水利工程招投标活动，实行“一处失信，处处受限”的市场禁入措施。

1. 加大经济惩罚力度，扩大法律追究。对于因违反标准而造成工程质量事故的，除扣除工程款外还要处以罚款，依法追究相关责任人的法律责任。要破除“法不责众”的侥幸心理，查处典型案件，形成强大的震慑力。

2. 建立责任倒查制度，对已经验收交付使用的工程，在使用过程中如果出现由于建设期间违规行为造成的重大故障，应立即启动倒查程序，倒查设计、施工、

验收等各个环节的责任。将标准执行同个人职业信誉联系起来,促使从业人员在每一个细节上都不要越过标准底线。只有让违规的成本远大于违规的收益,才能真正筑起质量安全的“防火墙”,确保农田水利工程经得起时间的考验,也经得起大自然的考验。

第四节 人才培养与技能提升

一、构建多层次教育培养体系

(一) 高校设立农田水利相关专业

高等院校是农田水利高层次人才的培养摇篮,专业的设置和课程的设置必须符合现代农业发展需要。传统的水利工程学科大多集中于大型枢纽工程的设计和施工,对于田间微观水土环境的调控、高效节水灌溉技术、智慧水利系统等有所忽视。高校在保留水力学、土力学等核心课程的基础上应该增设农业水土工程、水资源规划利用、农田生态环境修复和农业物联网技术等跨学科课程,促进水利工程与农学、信息技术、生态环境科学的交叉融合。同时设立专门的农田水利二级学科或者特色专业方向,培养宏观视野、复合型知识结构的拔尖创新人才,以应对未来气候变化、资源约束下日趋复杂的挑战。

课程教学模式改革迫在眉睫。应该大幅度提高实践教学所占的比例,建设校内模拟实验中心和校外产教融合实训基地,使学生在校期间就接触到最新的喷灌、滴灌设备和自动化控制系统。高校可广泛使用案例教学法,深入研究国内外典型农田水利工程规划、设计、管理的经验,培养学生的社会经济发展因素和生态伦理问题认识。应该鼓励学生积极参加导师的科研团队,深入农村一线开展社会调研和技术服务,在解决实际问题的过程中提高科研思维和工程实践能力。

为了扩大学生的国际视野,高校要积极开展国际交流与合作,引进国外优质的教育资源和先进的教材,派遣优秀的学生去水利发达国家短期学习或者攻读学位。通过举办国际学术会议以及邀请国外知名专家学者前来讲学,使学生掌握世界农田水利科技的发展动态和前沿方向,培养出有国际竞争力的学生。

(二) 职业院校培养一线技术技能人才

职业院校在农田水利技术技能人才培养体系中起着承上启下的作用,主要任

务是培养动手能力强、实践经验丰富的应用型人才给基层水利管理单位、灌排企业、新型农业经营主体。就目前基层水利队伍老龄化严重、专业技能缺乏的现状，各地职业院校应根据区域农业产业布局和水利发展规划，及时调整专业设置，重点开设水利工程施工技术、机电排灌设备运行与维护、节水灌溉技术等专业。实施订单式培养模式，和地方水务部门以及相关企业签署人才培养的协议，使招生和招工同步进行，课堂同岗位对接。

教学内容改革要以实用、管用、够用为原则，大量削减难懂的深奥的理论推导，大幅度增加设备安装调试、故障诊断排除、工程巡查维护等实操训练课时。推行双证书制度，鼓励学生取得学历证书的同时取得水利工程施工员、水利工程质量检测员、泵站运行工等职业技能等级证书，提高就业竞争力。加强“双师型”教师队伍建设，聘请有丰富一线工作经验的高级工程师、技师担任兼职教师，把生产一线最新的技术、工艺、规范带进课堂，保证教学内容与产业发展同步。

职业院校人才培养核心策略

策略	具体内容	目的
深化产教融合	与大中型灌区、水利施工企业建立深度合作，设立“厂中校”或“校中厂”，通过“师带徒”学习精湛技艺。	让学生在真实工作环境中学习，传承工匠精神。
开展职业技能竞赛	定期举办各级各类水利职业技能大赛，表彰技术能手。	调动学生钻研技术热情，营造“崇尚技能、尊重人才”的社会氛围，提高职业教育吸引力。

（三）开展对基层水利员和农民的实用技术培训

基层水利员和广大农户是农田水利工程最直接的使用者、管护者，技术水平与责任意识直接决定工程“最后一公里”是否畅通。根据该群体的特点，在培训工作上应当以政府为主导，各个部门协助，社会力量的参与，采取灵活多样、易于理解的方法进行。充分利用冬春农闲时节，组织技术专家到村镇举办培训班、现场观摩会，主要讲授农田水利法规知识、小型水利工程养护管理知识、田间节水灌溉技术等内容，目的在于解决实际生产中遇到的具体问题。

伴随着信息化技术的普及，培训方式也应该随之更新。可以开发专门的手机应用或者微信小程序，制作图文并茂、短小精悍的微视频教程，使农民朋友“轻点”即可随时随地学习水泵维修、渠道防渗、水肥一体化等实用技术。创建远程技术咨询服务，开通专家热线和在线问答系统，即刻解决基层工作人员在工程管

护过程中遇到的疑难问题，实现技术服务的零距离、全天候。

除了教技术，还要培育起新型职业农民的水利素养与合作意识。对农民用水合作组织进行骨干培训，挑选出一些懂技术、会管理、愿意奉献的“土专家”、“田秀才”，发挥他们的示范引领作用，以点带面，带动周边农户积极参与到农田水利工程建设与管护中来。结合农村精神文明创建活动，大力宣传爱水护水、节约用水的先进事迹，促使农民形成水利工程人人建、建好工程为人的主人翁思想，从根本上破解重建轻管的问题。

二、建立产学研协同创新平台

（一）支持高校、科研院所与企业合作

打破高校、科研院所之间存在的“围墙”，让它们走出校门，面向市场，主动发现企业的需求和痛点，同涉水、涉农企业建立长期稳定的战略合作关系。政府要设立产学研合作专项引导资金，用税收优惠、贷款贴息等手段，支持企业向高校或者科研院所委托技术攻关、产品研发，或者联合申报国家、地方的重大科技项目。在合作模式上可以探索建立企业出题、高校解题、政府助题的机制，引导科研人员把论文写到祖国的大地上，把科研成果应用到农业现代化建设中。

企业作为技术创新的主体，应该加大研发投入，健全内部研发机构，提高自主创新能力。鼓励龙头企业牵头，联合上下游企业、高校和科研院所等组建农田水利产业技术创新战略联盟，就行业共性关键技术开展联合攻关，制定行业标准和规范，促进产业链、创新链、资金链的深度融合。利用产学研对接交流会、科技成果展示交易会等形式来搭建信息沟通与供需对接的平台，使技术转移、成果转化能达到多方互利共赢的效果。

加强知识产权的保护与利用是保证产学研合作发展的前提。健全科研成果归属、利益分配、风险分担机制，规定合作各方在成果产出中的权利义务，保障创新者的合法权益。支持高校、科研院所专门设立技术转移机构，培育一批既懂技术、又懂市场、还懂法律的技术经纪人，为产学研合作提供全方位专业化服务，破解科技成果转化过程中的堵点、痛点。

（二）共建技术研发中心和成果转化基地

物理空间载体的作用不可替代，对技术研发、科技成果转化起到重要的作用。鼓励有条件的高校、科研院所与地方政府、企业合作共建农田水利工程技术研究

中心、重点实验室和产业技术研究院。这些研发平台应当装备起先进的仪器设备和试验设施，聚集起国内外顶尖的创新人才团队，对区域农田水利发展出现的重大需求，展开前瞻性、基础性以及应用性的研究工作，给行业技术改进给予源源不断的源头活水。

在粮食主产区、严重缺水区、生态脆弱区等建设各种类型、各具特色的农田水利科技成果转化示范基地和现代农业科技园区。它们不但是新技术、新产品、新工艺的试验基地，也是向广大农民展示现代水利科技魅力的样板间。在基地集中展示高效节水灌溉、智慧水利管控、面源污染治理等先进技术模式，使农民看得见、摸得着科技带来的增产增收效果，从而主动使用科技。

科技成果转化基地运营模式与作用

模式 / 作用	具体描述	预期效益
基地 + 农户推广	依靠示范基地，定期组织周边农户现场参观学习，发放技术手册和良种良法。	最大限度发挥基地的辐射带动作用，加速新技术普及。
健全运行管理机制	探索多元投入、企业化运作、社会化服务的运营模式。	增强基地自身“造血”功能和可持续发展能力，避免项目结束后基地荒废。

（三）鼓励科技人员深入基层服务

科技人员是技术传播的主要载体，只有让他们沉下去、扎下去，才能真正打通科技进村入户的通道。要不断完善科技特派员制度，从政治素质好、业务水平高、作风正派、有责任心的科技人员中选派一批到乡村定点帮扶、提供技术服务。科技特派员不能只是传授技术，还要帮助农民理清发展思路，解决生产经营中的实际困难，成为农民致富的领路人、贴心人。

实行科研人员、基地、农户三者相结合的服务模式，使科研人员带着项目、成果到农村去领办、创办、协办农业科技型企业、专业合作社，与农民结成利益共同体，共同承担风险，共享收益。既可以加快科技成果的转化应用，又可以使科研人员通过创业获得合理的经济回报，实现自身的价值和社会价值。对于长期在基层一线工作的科技人员，职称评定、职务晋升、表彰奖励等要给予政策倾斜，使他们在政治上获得荣誉、经济上获得实惠、社会上获得地位。

建立健全科技人员服务基层考核评价制度，不唯论文、不唯学历、不唯奖项，突出解决实际问题能力、技术推广面积和效益、农民群众满意度等作为主要考核

指标。建立科技人员业绩档案，进行定期考核，实行动态管理，督促科技人员真蹲实驻、真抓实干，保证科技服务取得实实在在的成效，避免形式主义。

三、完善人才激励与评价机制

（一）改善基层水利人员的工作待遇

提高基层水利人员的薪酬待遇是稳定队伍最直接有效的方法。各级政府要将基层水利服务机构人头经费全额纳入财政预算，保证工资按时足额发放到基层水利服务机构工作人员账户，建立正常的工资增长机制，保证个人收入水平与当地经济社会发展相适应。对于在偏远山区、贫困地区和条件艰苦的基层水利站工作的人，应当设立专门的艰苦边远地区津贴和乡镇补贴，并且标准上予以提高，以弥补他们所作出的工作环境和生活条件上的牺牲。

除最低生活保障工资以外，还要千方百计改善基层水利人员的生活、工作条件。增加水利站的建设资金，修缮办公场所，配备交通、办公、生活设施，使职工解除生活、出行的后顾之忧。落实国家带薪年休假、定期体检、社会保险等各项福利政策，关心职工身心健康，增强职工的归属感与幸福感。

对非在编的聘用人员、农村水管员等也要通过政府购买服务、以奖代补等方式来保证其合理的劳动报酬和社会保障待遇。探索建立岗位绩效工资制度，将收入同工作业绩、服务质量挂钩，实行多劳多得、优绩优酬，打破大锅饭现象，充分调动各类人员的工作积极性、主动性。

（二）设立农田水利领域的科技奖项

荣誉激励对人才创新创造活力的激发有很强的精神动力。建议国家及地方各级科技奖励体系中，设置农田水利领域专门的奖项类别或评审组别，主要奖励在节水灌溉技术研发、灌区现代化改造、基层水利管理体制改革等各方面做出突出成绩的集体和个人。奖项评选标准应该更加重视成果的实用性、推广价值，而不能只看重理论深度和论文发表数量，使真正解决实际问题、产生显著社会经济效益的“土专家”也能登上领奖台。

行业协会、学会可以设置有行业社会影响的奖项，比如农田水利杰出贡献奖、基层水利工匠奖等，定期组织评选活动。举行隆重的颁奖典礼，采取多种手段宣传获奖者的先进经验及事迹，树立起行业标杆，树立起榜样，提升农田水利行业社会知名度与良好形象。

根据地方实际情况可以设立“最美水利员”、“金牌护水员”等荣誉称号，对长期扎根一线、成绩突出的一线水利职工和农民管护员予以表彰。把获得荣誉称号作为评先评优、职称晋升、推荐各级党代表、人大代表、政协委员的重要依据，使优秀人才有荣誉感、尊严感，在政治上、社会上受到尊重。

（三）将技术推广服务成效作为职称评定依据

传统的职称评价体系重论文、重课题、重奖项，致使很多基层技术人员把大量的精力都用在写论文、跑项目上，甚至出现了“论文满天飞、成果不落地”的现象。因此，必须坚决破除唯论文、唯学历、唯资历、唯奖项的倾向，建立以品德、能力、业绩为导向的职称评价体系，将技术推广服务成效作为基层农田水利专业技术人员职称评定的重要依据。

具体操作上，对于在基层一线从事农田水利工程建设、管理、技术应用工作年限较长的技术人员来说，在职称评定过程中不再硬性要求必须要有论文、科研成果，而是在很大程度上侧重考察解决生产技术难题的能力、推广新技术的面积、工程运行管理效益、服务对象满意度等。可以把核心期刊发表论文的硬性要求换成撰写技术工作总结、工程运行管理报告、解决技术难题的专题报告、编写实用技术培训教材等。

实行代表作制，申报人员可挑选有代表性的成果参与评审，比如所制订的技术标准、获得的专利授权、通过鉴定的新产品、完成的工程设计方案等。下放职称评审权，有条件的地区或单位可以自行开展基层水利专业技术人员职称评审，制定符合基层实际、符合水利专业的评审标准，使真正干得好的人能够评上职称，使评得上的人能够留得住，发挥职称评审的导向作用，引导广大人才把论文写在水利工程的建设工地上。

第五节 政策实施效果监测评估

一、建立科学的评估指标体系

（一）涵盖投入、过程、产出、效果、影响等全链条环节

全链条的指标设计要求评价工作要覆盖政策实施的全部周期，从开始到结束形成一个闭环。投入环节中指标不仅要核算中央和地方财政资金的到位率，还要

分析多元化投入结构及规模，考察资金使用是否合规、是否及时。过程环节重点对项目立项是否科学、招标是否公开、施工管理是否规范、监理制度是否能够落实开展监督，保证工程在实施过程中能有条不紊地推进。

产出环节考核主要对物理实体建设成果进行考核，新建或修缮渠道长度、泵站个数、节水灌溉设施覆盖面积等都是政策实施后直接反映出来的。效果环节要求更进一步，用量化分析来展示水利设施运行后灌溉保证率提高的程度、水资源利用系数改善的情况、单位面积产量增长的数据等。影响环节的指标设计最为宏大且深远，考察的是政策实施后带来的长期变革，即农民收入结构的改善、农村生态环境的修复、基层水利服务组织的自我造血能力、农村社会治理结构的完善。经过这样多角度、多层次的逻辑结构评价之后，就可以准确地勾勒出基层农田水利工程从蓝图到田间的大致模样，清楚地看到各个阶段各个环节的执行情况及其存在的问题。

（二）定量指标与定性指标相结合

单纯的数据很难全面地反映出基层农田水利工程复杂的社会现实。因此将客观的定量数据和主观的定性分析有机结合，是提高评价准确性的必经之路。定量指标用“硬数据”体现“硬实力”，工程完好率、年均运行小时数、亩均节水方量、粮食增产吨数等都是具体的数值。这些数据应当来自于统计报表以及实地测量，它们具备不可辩驳的客观性，从而给纵向的历史对比以及横向的区域比较赋予了可信的凭借。

定性指标主要体现的是那些不能用数值来衡量、具有软实力性质的变化，比如用水户对水费收缴制度的认同度、农民参与管护的积极性、基层水利协会内部的凝聚力、政策执行过程中产生的社会矛盾或共识。用深度访谈、问卷调查、座谈会等形式获得定性信息，可以很好地解释定量数据背后所隐含的原因。如某地工程完好率较高（定量数据），农民满意度却不高（定性信息），就说明当地供水时间与农时需求错配问题比较严重。两者结合起来，既可以看到水利设施物理上的特点，也可以观察到它的社会性，从而摆脱单纯以数据论好坏的局限，使评估的结果既有骨架又有血肉，真实地表现出基层农田水利治理的复杂生态。

（三）短期效益与长期效益并重

评价基层农田水利工程是否合理，必须全面考虑它给当前和未来带来的利与弊。短期效益指标主要是指那些立竿见影的效益，比如当季农作物抗旱效果、建

设期内拉动的农村就业人数、当年财政资金支付进度等。这些指标对保持政策热度，提振基层信心起到了不可替代的作用，也是政策执行力的即时反馈。

长期效益指标关注的是那些需要很长时间才能显现出来的价值，它着眼于代际公平、生态安全。地下水超采区水位回升趋势、土壤盐渍化改良程度、生物多样性恢复情况、水利工程全生命周期维护成本控制等。如果只顾眼前粮食增产，不顾长远水资源承载力，最终会酿成难以挽回的生态悲剧。因此科学的评估体系要给长期指标留出足够大的比重，促使地方政府和建设主体抛弃急功近利的政绩观，转而重视工程的耐久性、生态的友好性以及制度的韧性。长期效益的持续追踪会促使建设管护模式的革新，推动基层探寻出一条既能保障当下粮食安全，又能守护绿水青山的协同发展之路。

二、运用多样化的评估方法

（一）定期开展政策实施情况的自评与第三方评估

创建内部自评和外部他评双重评价体系，这是冲破部门利益壁垒、取得真实信息的途径。具体的执行路径如下图所示。

1. 各级水利、农业农村部门要建立年度任务清单的常态化自评机制，逐项检查工程进度、资金使用、管护落实情况。自评不但可以查漏补缺，还是基层管理者自我反思、自我提高的过程。自评可以早发现政策执行过程中的小问题，在内部管理权限内及时纠正，保证政策执行不偏。

2. 引入第三方独立评价机构，这便是保证评估公信力的条件之一。这些机构可以包括高校科研院所、专业的咨询公司、具有行业信誉的社会组织等。第三方评估要双盲抽检、突击检查，在行政系统外独立地做客观审计。其职责不单单对数据的真实性进行核实，而且还要从专业的角度对工程的技术方案、经济效益和社会影响等作出深入分析，并出具真实可靠的评估报告。

3. 探索实行国际同行评审，请国际水利专家对典型项目进行考察指导。在全球视野的引入下，把本土实践放在国际标准之下进行考察，有利于发现自身在技术应用和管理模式上存在的不足，从而借鉴全球范围内先进的管护经验。

（二）运用大数据、遥感等技术手段进行监测

现代信息技术飞速发展给农田水利评估提供了前所未有的技术支持，对广阔的农田水利设施实行实时、全面的监测变得可行。利用高分辨率的卫星遥感技术，

可以对灌区范围内的作物种植结构、土壤墒情变化、实际灌溉面积等进行大范围的扫描。这种“天眼”监测可以很好地解决以往人工填写数据时可能存在的瞒报、虚报情况，准确找到工程设施闲置或者损毁的地方，给评价提供无法辩驳的影像证据。

现代技术在农田水利监测评估中的应用

技术类型	监测对象 / 内容	主要优势
卫星遥感	作物种植结构、土壤墒情、实际灌溉面积	大范围、宏观监测，破解瞒报虚报
物联网	输水效率、能耗水平、设备运行状况	实时、精细化监测，数据时效性高
大数据分析	运行效率报告、设备故障预测	智能分析、预测预警，辅助决策

物联网技术的使用使监测的触角可以伸向工程的神经末梢。在重要的渠首、泵站、田间井房等关键位置安装智能流量计、水位传感器、视频监控设备等，可以实时获取输水效率、能耗水平、设备运行状态等大量数据。大数据分析平台在清洗、挖掘、建模之后，除了可以自动生成运行效率评价报告之外，还可以根据历史数据预测出设备出现故障的概率，进而实现从“事后评价”到“事前预警”的转变。从上表可知，技术驱动的监测模式大幅度降低人力成本，提高数据的时效性、准确性，给政策执行效果评估打下了良好的数字基础。

（三）开展典型案例的深入剖析

宏观数据的监测之外，微观层面的典型案例剖析，就是认识政策实施机理、发现深层次问题的显微镜。宏观数据只能体现是什么，典型的案例才能说明为什么。评价工作要选取自然地理条件、经济发展水平、管护模式不同的代表性项目点做细致的调查研究。

深入剖析的前提是对团队下沉到基层，与村干部、用水协会负责人、普通农户等面对面交流。这就要跟踪一个具体项目，从立项时博弈、建设时监管、运行时管护费用分摊的全过程，来反映政策在基层落地的真实情况。剖析时要重视极端案例，既要成功的例子中找出来可复制的协同创新做法，“以工代赈”的高效组织形式，“水权交易”的市场化激励手段等；也要从失败的案例中找出来工程荒废的根本原因，可能是产权纠纷，资金断链，技术水土不服。用鲜活的案例叙述来充实评估报告的内容，给政策的调整提供有温度、有深度的参考。

三、强化评估结果的运用

（一）形成评估报告并向社会公开

评估报告不但是决策层的参考文件，也是向社会公众交代的“明白账”。每次评价结束之后，都要形成一份详细的、规范的评价报告，内容包括总体评价、主要成绩、存在问题、原因分析、解决办法。报告要防止使用晦涩的专业术语，用普通人能听懂的语言和形象的图表来表述，保证非专业人员也能看明白。

实行评价结果的社会公开制度，是保证公众知情权，加强社会监督的一种方式。除涉及国家安全或者商业秘密的以外，评估报告全文或者摘要应当通过政府门户网站、新闻媒体、村务公开栏等方式向社会公布。公开的内容不只是成功的经验，还要敢于暴露存在的问题并承诺改正。每一笔财政资金的流向、每一个水利设施的效果都在阳光下运作，受到受益农户、纳税人、媒体的监督。透明的操作可以倒逼责任主体认真履行职责，提升政府的公信力，调动社会各方面力量参与农田水利建设与管护的积极性，营造全社会共同关注、共同监督的良好局面。

（二）作为政策调整、延续或终止的依据

评价结果要同政策的生命周期管理相结合，成为行政决策的“指挥棒”。应该建立动态的政策调整机制，对于实施效果佳、群众满意度高、生态效益好的模式及项目给予资金支持、用地指标、评优评先等方面的优先权，并对其中开展好的方式方法给予相应的政策引导，可以考虑扩大试点范围或者上升到区域性的推广。

相反，对那些被评价时发现问题多、投入产出低甚至造成生态破坏和社会矛盾的政策措施，必须以之为依据，按下暂停键或者停止键。坚决清理名存实亡的僵尸工程、不切实际的形象工程，及时止损。根据评价结果来修改具体的政策，例如改变补助标准、明确管护单位的权利和责任、修订技术规范等。用循证决策的方式来制定政策调整方案，可以有效地避免“拍脑袋”决策的盲目性，保证农田水利政策与农业农村发展的实际需要相适应，提高财政资金使用效益和政策的精准度。

（三）建立政策实施的反馈与纠错机制

基层治理环境比较复杂，在执行过程中容易出现偏差或异化的现象，因此要建立灵敏高效、动态调整的反馈纠错机制。这就要求评价体系内嵌快速反应模块，

打通田间地头到决策中枢的信息直通车。当监测数据出现异常波动或者社会评价集中爆发负面舆情的时候，就要马上启动纠错机制。

纠错机制的运作是由问题识别、责任倒查、整改落实、复核销号这四个环节构成的。对评估中发现的一般性、倾向性问题，首先要分析它属于顶层设计问题还是基层落实执行问题。若问题产生的原因是由于执行方面的，例如管理费用被截留或者工程质量不合格等原因引起的，那么就需要立刻启动问责程序；如果是因为政策本身的弊端造成的，例如灌溉定额不科学等，就要立即启动政策的修订。还要建立整改情况的“回头看”制度，防止问题表面化整改，保证问题真正得到解决。经过不断的试错、纠错、再优化的过程，不断提高政策体系的弹性和适应性，保证基层农田水利建设与管护模式在协同创新中不断趋于完善，最终真正惠及广大农民。

第九章 农田水利可持续发展路径

第一节 水资源可持续利用策略

一、总量控制与强度管理

（一）严格区域用水总量控制红线

区域用水总量控制红线为刚性约束，保证农业用水不占生态用水、不超采地下水。各地区按照本地区的水资源总储量算出可利用水资源总量，逐级细化到流域、灌区、行政村。这不是简单的数字分界，这里面包含着对水文地质的分析、对社会经济发展需求的预测、对生态需水保障的考虑。对于水资源超载地区，必须暂停新增取水许可，强制实行用水减量置换，使该区域取用水总量控制在红线范围之内。

就实行而言，红线管理机制要配合严格考核问责制度。应该使用卫星遥感、物联网监测等现代技术来实时动态地观测区域用水的状况。当用水量接近红线的时候，应立即启动预警机制，严格控制高耗水作物种植面积，削减非必要的农业用水支出。硬性约束可以促使地方政府和农业经营主体积极寻找节水方法，调整种植结构，从根本上削减对水资源的过度利用，从而达到水资源开发和利用与区域承载能力的动态平衡。

（二）推行农业灌溉用水定额管理

农业灌溉用水定额管理，是总量控制落实到田间地头的环节。这就需要根据不同的作物种类、生长周期、土壤质地、气象条件等制定出科学合理的单位面积用水定额标准。定额不能是一套固定的数值，而应该是一套可以动态调整的指标体系。干旱年可适当紧缩定额标准，使农户采取亏缺灌溉等应急节水措施；丰水年可适当放宽定额标准，引导利用雨洪资源补给地下水。

推行定额管理的关键是准确计量加上奖惩机制的有机结合。传统的大水漫灌以及按亩收费的模式会隐藏真正的用水成本，降低农民节水的内驱力。定额管理实施之后，灌区必须配套建设完善的量测水设施，斗口或者田间地头都要进行精

确计量。在此基础上实行定额内优惠、超定额累进加价的水价政策。用水量低于定额的农户或组织可以获得水权回购或者资金奖励，使节水行为获得实实在在的经济收益；超定额用水者则大幅提高水价，增加生产成本，用经济杠杆撬动节水潜力的释放。

（三）建立水资源承载能力监测预警机制

水资源承载能力监测预警机制，是保证区域水安全，防止生态退化的重要“前哨站”。建立地面水、地下水、土壤墒情、生态流量的全方位监测网络，掌握水资源系统运行状况。

1. 构建起多方面的监测指标体系才算是预警的基础。除了常规的水位、流量、降雨量数据之外，还要加入地下水埋深、水质变化、河湖生态需水满足程度、灌区退水对环境影响等数据。汇集到大数据平台之后经过分析，就可以清楚地反映出目前水资源所承受的压力情况。

2. 制定分级的预警标准和应急预案为机制运行提供保障。根据监测得到的数据以及承载能力阈值比较结果，将区域水资源状况划分成盈余、平衡、临界超载、严重超载这四个等级，对应蓝色、黄色、橙色、红色这四种预警信号。

3. 实行动态调整与反馈是机制发挥作用的保障。当发布黄色或者橙色预警的时候，系统就会触发相应的管控措施，比如限制取水、改变调度方案等。同时要定时对预警效果进行评价，按环境改变及时调整预警阈值，保证监测预警体系的科学性与及时性，给农业水资源的持续利用给予有力的决策支撑。

水资源承载能力预警等级表

预警等级	信号颜色	区域水资源状态	典型应对措施
1级预警	蓝色	盈余	维持正常用水，鼓励水资源优化利用
2级预警	黄色	平衡	关注用水变化，适度引导节水
3级预警	橙色	临界超载	启动限水预案，调整灌溉方式，限制高耗水作物
4级预警	红色	严重超载	严格限制取水，强制休耕或减产，实施紧急调度

如上表所示，不同预警等级将触发不同的响应机制，确保水资源管理具备动态性和灵活性。

二、非常规水资源的开发利用

（一）加大再生水在农业灌溉中的利用

再生水是指经过严格处理的城镇生活污水、工业废水等，水量比较稳定，含有氮、磷等作物生长所需营养元素。再生水用于农业灌溉既可以缓解农业缺水，降低污染物排放，又具有较好的生态效益和经济效益。推广时要创建严格的水质标准及监测体系，保证灌溉用水符合农田灌溉水质标准，避免重金属，持久性有机污染物以及病原微生物给土壤和作物造成污染。

再生水利用要依靠完善的设施来连接。须要规划建设再生水输配管网，把污水处理厂同周边灌区物理衔接起来。针对再生水盐分偏高或者某些指标波动较大，可采用清浑混灌或轮灌的方式，即按一定比例混合再生水和地表水、地下水使用，或在作物非敏感生育期使用再生水。同时应该加强长期使用再生水的农田土壤环境监测，研究土壤理化性质的变化规律，并配合增加有机肥、深翻耕作等农艺措施来化解土壤盐渍化风险，保证耕地质量安全。

（二）推广雨水集蓄利用技术

雨水集蓄利用技术是解决山区、丘陵地区和干旱、半干旱地区农业用水难题的有效手段。通过工程手段对自然降水进行收集、储存和净化，使其成为可以控制的农业灌溉用水，能极大提高降水资源的利用率。

雨水集蓄系统一般由集流面、输水渠系、沉沙池和蓄水窖（池）等组成。集流面可以利用温室大棚棚面、硬化路面或者经过处理的自然坡面；蓄水设施根据地形灵活布置，可以是水窖、水柜或者小型塘坝。设施农业将棚面雨水收集和微灌系统结合起来，可实现集雨、蓄水、节灌的一体化运作。在南方有季节性干旱的地区，用坑塘堰坝来拦蓄雨洪资源，不仅可以满足旱季的灌溉用水，还可以发挥削峰滞洪、减少水土流失的作用，实现了水资源的时空置换。

（三）沿海地区适度开展海水淡化利用

沿海地区淡水资源缺乏同农业生产需求之间存在明显的矛盾，适度实施海水淡化利用成为解决该问题的新途径。虽然目前海水淡化成本较高，但是随着反渗透膜技术、能量回收装置的发展，其在经济作物种植、高端设施农业中的可行性不断提高。

海水淡化在农业上并不是直接用淡化的水，而更多地采用淡化水和咸水混合或淡化水和雨水联合调度的模式。对耐盐碱作物或者高附加值经济作物来说，通

过精准控制灌溉水矿化度，在保证作物生长的同时可以大大降低用水成本。在海岛及沿海缺水城市周边，可以依托能源产业布局，用电厂余热或风能、太阳能等可再生能源驱动海水淡化装置，构建能源、水、农业协同发展的绿色循环模式，探索出一条技术可行、经济合理、生态安全的海洋水资源农业利用之路。

三、水资源循环利用与高效配置

（一）构建灌区内部水循环利用体系

灌区内部水循环利用体系，即利用工程和管理措施，拦截收集灌溉过程中产生的回归水，尽量减少水量损失。传统的灌溉方式中大量的退水直接排入河道或者渗漏流失，造成资源浪费的同时也会带走了面源污染物进入下游水体。

1. 要想实现循环利用，先要形成完整的排水回收网络。在灌区下游或者低洼处设置拦截沟渠、集水坑塘和泵站等装置，把农田退水、渠道渗漏水集中收集起来。

2. 利用生态湿地技术净化收集到的退水。种植芦苇、菖蒲等水生植物可以降解水中的氮磷营养盐和农药残留，水质达到回灌标准后形成灌溉、排水、净化、再灌溉的闭路循环。

3. 优化灌溉调度方案，达到上下游水量梯级利用的目的。大型灌区可以根据地势高低、作物需水不同，将上游片区的退水作为下游片区的灌溉水源，通过科学调度减少从水源地取水的总量，明显提高灌区水的重复利用率。

（二）推广“水－肥－土”一体化管理

水肥土一体化管理是现代农田水利与农艺技术深度融合的产物，它已经超出了传统灌溉的范围，把水分管理、养分供给、土壤改良紧密地结合起来。该模式以灌溉系统为载体，把溶解后的肥料随着灌溉水直接输送到作物根部的土壤中，从而达到水肥同时供给和精准调控的目的。

与传统撒施肥料、漫灌相比，一体化管理可减少肥料挥发、淋溶所造成的损失，提高肥料利用率，并且可以防止由于深渗漏造成的水资源浪费。根据土壤墒情监测和养分检测的结果来制定精准的灌溉施肥制度，缺什么补什么、缺多少补多少。此种管理方式有益于改良土壤理化状况，从长远角度看可保持土壤团粒结构，改善土壤保水保肥能力。在干旱、半干旱地区，和地膜覆盖、深松耕作等保墒技术结合使用的话，可以形成强大的抗旱减灾能力，将有限的水资源转化为最大的生物产量。

（三）通过水市场促进水资源优化配置

引入市场机制，建立规范的水权交易市场，是用经济手段优化水资源配置的有效途径。在确定初始水权的基础上，允许水权在不同的用户、不同的行业、不同的区域之间有偿转让，可以促进水资源流向效率更高、效益更好的领域。

水市场正常运转要依靠完善的交易平台及监管规则。农户或用水组织通过节水改造所节约下来的水量指标，可以拿到市场上出售，卖给工业企业或者城市用水单位。所得的收益可以再投入到农田水利设施的建设和养护中。这极大地调动了农业主体节水的内在动力，把“要我节水”变成“我要节水”。为了防止水权交易影响农业生产，政府需要划定最低生态水位保护和基本粮食生产用水保障的下限，对交易价格进行宏观调控，防止价格大幅波动。依靠水市场价格发现功能，真实反映水资源的稀缺程度，促使全社会形成珍惜水、节约水的良好风尚，最终实现水资源配置效率与公平的统一。

第二节 生态环境保护与修复

一、面源污染防控与治理

（一）推广测土配方施肥与绿色防控技术

全面推广测土配方施肥技术，不仅可以提高农业产量，而且是从源头削减面源污染的有效措施。通过土壤养分状况的精准监测，根据不同作物各个生长阶段的需肥规律来制定科学合理的施肥方案，彻底改变过去盲目施肥、过量施肥的粗放方式。精准施肥可以大幅度提高肥料利用率，减少氮磷通过地表径流或者土壤渗漏进入水体，从而降低水体富营养化的风险。配合使用同步智能施肥机械，将肥料精准地施用到作物根系集中区，可以有效地防止养分挥发、流失，达到农业投入品减量的目的。

采用绿色防控技术可以减少化学农药污染。依靠农田水利工程的管护网络，大面积推行生物防治、物理防治等非化学防治措施，形成天敌昆虫保护利用、性诱剂诱捕、杀虫灯诱杀等多道防线。用赤眼蜂等寄生性天敌控制害虫数量；在田头地边种植显花植物，给天敌提供栖息、营养补给的条件，以维持农田生态系统的自我调节能力。病虫害初起时，先选用生物农药、高效低毒低残留农药，再用

高效植保机械精准施药，严格控制农药用量和施药次数，从根本上切断有毒有害物质向水土环境转移的途径。

（二）建设生态沟渠与湿地拦截净化污染物

传统的水泥硬化沟渠输水效率虽然高，但是丧失了自净功能，反而加快了污染物向下游输送。生态沟渠建设就是重建排水系统的生态功能，对现有的沟渠进行生态化改造或者新建具有拦截、净化功能的生态沟渠，构建从田间到沟渠再到河湖的梯度净化系统。生态沟渠设计一般采用多孔隙结构的生态砖或格宾网箱做护坡材料，给微生物和小水生动植物提供附着和栖息空间，提高水体生物降解能力。沟底不再做全面硬化，保留自然底泥，种植苦草、伊乐藻等沉水植物，沉水植物可以吸附底泥中的重金属，还可以通过光合作用增加水体溶解氧，促进有机污染物的氧化分解。

人工湿地属于面源污染治理的末端加强手段，一般设置于排水沟渠汇入主河道的节点之处。它依靠基质、植物和微生物三者共同发挥的物理、化学和生物作用，来对农田退水做深度的净化。基质层对悬浮物起到过滤、吸附、沉淀的作用，并能够吸附磷素；湿地植物如芦苇、香蒲、美人蕉等，一方面直接吸收水体中的氮磷营养盐，另一方面其发达的根系可以将氧气输送到基质中，形成好氧和缺氧交替的微环境，有利于硝化菌和反硝化菌的生长，从而达到脱氮的效果。经过生态沟渠、人工湿地层层拦截和净化，农田排水水质可以明显改善，有效减少对受纳水体的污染负荷，水利工程成为天然的污水处理厂。

（三）划定农业面源污染重点防控区

准确划定农业面源污染重点防控区，是实行分级分类管理、提高治理效率的前提。该过程要综合地理信息系统、遥感监测和长期水质监测数据，对流域内地形地貌、水系分布、土地利用类型、土壤侵蚀强度、农业种植结构等空间信息做叠加分析。重点防控区主要是饮用水水源地保护区、重要湖库周边敏感区、主要入河排污口上游汇水区和地下水易受污染的脆弱区。在这些区域里将实行更为严格的农业环境管理政策，限制高耗水、高耗肥作物的种植面积，强制推行生态种植模式，建立生态缓冲带，禁止化肥农药过度使用。

对于已经确定的重点防控区要实行动态监测预警制度。高密度布置土壤养分监测点和水质自动监测站，及时掌握面源污染的时空变化规律。一旦监测指标超过预警值，就要立刻触发应急响应机制，查找污染源头并采取相应的阻止措施。

同时根据不同的风险等级防控区，制定出差异化的补偿政策，对因为执行严格的环保标准而造成收入减少的农户，给予生态补偿，以此激励农户积极主动地参与到面源污染防治中去。科学划分、严格控制，可以将有限的治理资源集中在环境风险最大的地方，从而建立起重点突出、防守严密的农业生态安全屏障。

二、灌区生态系统健康维护

（一）保障河流、湖泊的生态基流

在水资源非常缺乏的灌区，农业用水和生态用水之间的矛盾越来越突出。保证生态基流是保持水体自净能力、保证水生生物生存的底线。生态基流不是固定的数值，它是随季节变化、生物生命周期需求、水文循环规律而动态变化的流量范围。必须抛弃以前“农业优先、挤占生态用水”的调度方式，把生态需水当作水资源配置的刚性约束指标。使用精细的水资源调度模型，根据不同的水文年来计算维持河流、湖泊基本形态、防止河道断流、保证鱼类洄游产卵所必需的最小流量和合适的脉冲流量。

为了切实保障生态基流，灌区管理部门需要采取多项综合性措施，详情可见下表：

保障生态基流综合措施表

措施类型	具体内容	预期效果
水库群联合调度	在枯水期或生物关键繁殖期，有计划进行生态补水，模拟自然水文过程；采用人工洪峰刺激鱼类产卵，保持河道连通性。	维持河流生态功能，促进水生生物繁衍。
严格控制引水比例	在取水枢纽设置生态流量泄放设施并安装在线监测设备，确保泄放流量符合管控要求，避免河道因灌溉而干涸。	防止河道脱水，保障下游生态用水需求。
推进农业节水改造	运用渠道防渗、管道输水、喷微灌等高效节水技术，挖掘节水潜力；节约的水资源优先用于河流湖泊生态补水。	提高水资源利用效率，实现农业节水与生态补水的良性循环。

这些措施共同作用，旨在实现水资源的高效利用与生态环境的协同发展。

（二）恢复和重建灌区内的生物栖息地

农田水利工程建设常用的渠道硬化、河道裁弯取直等措施，虽然提高了输水效率和防洪能力，但是也切断了水陆交错带的物质能量交换，严重破坏了生物栖息地。恢复和重建灌区生物栖息地的核心就是恢复水体的形态多样性、空间异质

性。在河道整治过程中，要尽量保留或者恢复河道的自然蜿蜒形态，不能因为过度渠化造成流速单一、生境单调。摒弃传统的全断面混凝土护坡，采用生态混凝土、植被型护坡、木桩柳枝护岸等近自然工法，给两栖动物、底栖生物和鱼类提供避难、觅食、繁殖的微生境。

灌区内的坑塘、沟渠、湿地是农业景观中重要的生物庇护所。应该实行水系连通工程，消除沟渠、湖泊间横向的通水障碍，拆除拦水坝、跌水等纵向的过水障碍物或者架设鱼道、仿自然旁道等方式来恢复水生生物洄游通道。在田地中保留一定的自然植被带或荒地，形成生物廊道，连接被切割的生境斑块，利于种群间的基因交流。同时创造深潭、浅滩、急流、缓流等不同的水力条件来满足各种生物的习性，使灌区的水系不单单是输送水资源的通道，而是生机勃勃的生命网络。

（三）维护生物多样性与生态系统稳定性

生物多样性给灌区生态系统稳定，抵抗外界干扰赋予了有力保障。保护生物多样性不能只保护个别珍稀物种，而要保护整个食物网结构的完整。灌区管理上少用高毒广谱农药，保护农田里蜜蜂、蜘蛛、蛙类有益生物，维持害虫和天敌生态平衡。同时加强对于入侵物种福寿螺、水葫芦等对水利工程、水生态系统造成严重危害的监测防控，建立健全的快速反应防控体系，防止其爆发式扩散，挤占本地物种的生存空间。

提升生态系统稳定性还要加强灌区生态系统韧性建设。构建多营养级的生态群落来提高生态系统的冗余度，使生态系统在受到干旱、洪涝、突发性污染等冲击的时候，可以快速调节、恢复到平衡状态。定期对灌区的水生态健康状况进行评价，选择底栖动物完整性指数、浮游植物多样性指数、鱼类保有指数等作为评价指标，用数值化的方法评价修复的效果。根据评价结果动态调整管护措施，在水生植物过度生长的时候适当收割防止二次污染，在鱼类资源衰退的时候进行增殖放流改善种群结构。只有经过长期、系统的维护，才能使灌区由单一的生产功能区转变为生产、生活、生态“三生融合”的绿色空间，持续为人类提供优质的生态产品和服务。

第三节 气候变化适应能力建设

一、气候变化影响评估与风险识别

（一）评估气候变化对区域水资源的影响

气候变暖正在加速全球和区域水循环，造成降水在时间上、空间上分布极不均匀，不确定性也大大增加。这就直接冲击了传统农田水利工程所依靠的“水文稳态”假设。气温升高造成蒸发蒸腾量明显增大，导致土壤水分无效损耗加重，干旱和半干旱农业区的水资源供需矛盾日趋严重。地表径流衰减的幅度一般大于降水减少的幅度，使小型水库、塘坝的蓄水率长期保持在较低的水平，本应用于抗旱的灌溉系统因缺水而无法调节使用。与此同时高纬度、湿润地区会由于降水量的增多而产生洪涝灾害，短时强降雨的次数增多，农田排水系统的负荷会突然增加数倍，如果不能及时排除积水，作物根系就会发生渍害，造成大面积减产。

除水量的多少以外，气候变化还明显改变了水资源在一年当中如何分配。春季融雪时间提前、融雪速度加快，春汛峰值提前出现，而作物生长关键期的夏季又容易出现径流枯竭。水土资源在时间尺度上错配的情况，就是目前评估工作的主要内容。许多基层水利工程设计的时候依据的是几十年前的水文资料，没有考虑到现在这种极端化的径流模式，使工程的调节能力远远不能满足实际需求。利用已建立好的精细化区域水文模型，对不同气候情景下地表水-地下水的转换关系进行模拟，可以量化气候因子对可利用水资源量的影响程度。评价不能只看总量的增减，还要看水质的变化，因为高温、低流量容易造成水体富营养化，进而降低农业灌溉水源的有效性。

（二）识别极端天气事件对水利工程的脆弱性

基层农田水利工程多为中小型工程，相比于大型骨干水利枢纽来说，其抗干扰能力要弱一些。极端暴雨造成的山洪、泥石流携带大量泥沙、漂浮物，很容易堵塞因断面狭小、流速受限而形成的末级渠道，甚至冲毁渠首进水闸、渡槽等重要节点。工程结构一旦遭到破坏，修复工作因为资金和技术上的滞后，不能迅速完成，造成灌溉中断，农业生产遭受不可逆转的损失。长期干旱时土石坝体会由于干燥而出现裂缝，在久旱转涝的时候，这些隐藏的裂缝很容易变成溃坝的通道。旱涝交替的冲击对土质水利设施的破坏力，比单一的灾害要大得多。

冻融循环的异常变化也是识别工程脆弱性不能忽视的因素。在全球高寒农业区气温发生急剧变化的情况下，土壤冻融循环次数的增加给混凝土渠道衬砌板、浆砌石结构的稳定带来巨大挑战。频繁的冻胀、融沉作用会促使工程材料老化剥蚀，渠道防渗层就会产生破裂、滑坡、坍塌。对于这个问题，识别工作要重点放在工程材料的抗冻性能和地基处理的稳固性上。通过对历史灾害数据进行复盘分析，并开展现场工程实体的物理检测，可以得到一份关于极端天气冲击下脆弱性的清单，从而明确在什么类型的工程结构、什么材质的设施上，会在怎样的极端天气下出现功能失效的情况。

（三）绘制气候变化风险地图

风险地图绘制就是把抽象的数据分析转换成可视化的决策支持工具，可以清楚地展示出气候风险在地理空间上的分布情况以及强弱。采用地理信息系统以及遥感技术，将区域地形地貌、水系分布、农田布局以及预测的气候变化情景等图层叠加，可以得到高精度的气候变化风险区划图。图中清楚地标出了易受洪涝侵袭的低洼易涝区、易受干旱威胁的水源匮乏区，将现有的水利工程设施叠加在上面，就可以确定处于高风险区的重点防护对象。比如山洪沟口的老灌溉枢纽处就标为高危节点，滑坡体附近的输水渠道处就标为重要监测段，这样就给后续的除险加固工作找到了精准的靶子。

风险地图的形成是动态的，要不断加入实时气象监测数据和工程运行反馈信息。运用大数据分析算法对不同的区域、不同的重现期的极端天气可能会遭受灾害的概率进行模拟计算，就可以得到动态风险演变趋势图。既有利于管理部门从宏观上把握区域农田水利系统的安全底线，也有利于基层管理人员确定巡查的重点。借助风险地图的帮助，有限的资金应该被优先用于风险等级最高、一旦发生问题损失就最大的地方，这样才能最大程度地使有限资金得到合理利用。

可视化风险管理工具有很高的社会参与价值。公布部分非涉密风险地图给用水户协会、农户，可以提高公众的风险防范意识。农户知道自己家的田块是干旱高风险区，就会更主动地配合执行节水灌溉措施或者调整种植结构；知道自己家附近的水利设施有洪灾隐患，在暴雨来临时也会更主动地参与设施的巡查和抢护。因此风险地图不但是技术层面的评估成果，更是凝聚社会共识、推动多方参与气候适应性建设的沟通桥梁，把复杂的气候科学转化为基层可以理解、可以操作的管理语言。

二、构建韧性水利基础设施

（一）提高工程设计标准，增强抗灾能力

面对日益严峻的气候问题，沿用以往的工程设计标准已经不能满足现实的安全需要。因此需要系统修订和提高基层农田水利工程设计标准。这不是简单的加固，而是在全生命周期风险的基础上，对工程的水文计算参数、结构安全系数、耐久性指标重新定义。

1. 修订水文计算参数及设防等级，废止仅以过去 30 年或 50 年气象资料为计算序列的做法，将近年极端天气事件峰值数据纳入频率计算序列，提高设计暴雨、设计洪水的重现期标准。对承担重要灌溉任务或者位于人口稠密区的渠道、塘坝，其防洪标准应在原来基础上提高一级，在超标准洪水来临时，主体结构不致遭受毁灭性破坏，给下游疏散留有余地。

2. 推广应用高性能材料和新型结构，工程建设中应全面禁止使用抗冻、抗渗性能差的低标号混凝土、简易砌石等，采用高分子聚合材料、生态格网、改性高性能混凝土。新材料不但具有更强的抗侵蚀、抗老化性能，能够适应冻融交替、干湿循环的恶劣环境，而且往往具有一定的自愈合性能。结构上推广使用柔性连接技术、装配式结构，在工程地基产生微小变形的时候仍然可以保证整体的完整性，防止因为刚性断裂而导致功能的丧失。

3. 加强工程周围生态防护体系：单纯工程硬化会割裂生态联系，抗冲刷能力差。应提倡采用工程加生态的模式对沟渠两侧的护坡进行修复，用根系发达的植被固土保水，减缓洪水流速。在水库、塘坝周边营造水源涵养林，既能减少入库泥沙，又能调节小气候、降低水体蒸发，从而在源头处提高工程系统对极端气候的缓冲能力。

以下表格汇总了不同类型水利工程在气候变化背景下设计标准的优化方向：

水利工程设计标准优化方向表

设计要素	传统标准特点	气候适应性优化方向	预期效益
水文参数	基于历史数据，周期短	纳入极端事件峰值，延长周期，提高重现期	提升工程对超设计标准洪水的抵御能力
设防等级	相对固定，考虑经济性	结合区域重要性和人口密度，适当提高等级	保障关键设施安全，减少灾害损失
工程材料	传统混凝土、砌石	高性能混凝土、高分子材料、自愈合材料	增强抗冻融、抗侵蚀、抗老化能力
结构形式	刚性结构，整体性差	柔性连接、装配式结构	适应地基微变形，保持结构完整性
生态防护	硬化为主，割裂生态	“工程+生态”结合，植被护坡、水源涵养林	固土保水，减缓流速，调节小气候，减少泥沙
风险考量	单一灾害，短期效应	全生命周期风险评估，复合灾害考量	提高工程整体韧性与可持续性

由上表可见，优化设计标准需从多个维度综合考虑，实现工程韧性与生态功能的协同提升。

（二）建设备用水源与应急供水系统

建立具有高冗余性的供水网络，是提高农田水利系统韧性的主要办法。其要义在于冲破单一水源依靠的脆弱情形，创建起“长藤结瓜、多源互补”的应急保障体系。这就需要在规划阶段就有意识地储备并建设多层次水源，以保证当主要灌溉水源由于干旱枯竭或水质污染而无法使用的时候，系统还能保持基本的生存和生产供水能力。这不完全是浪费，它是系统应对不确定性风险的一种保险。

具体建设中应该大力推行蓄、引、提相结合的工程布局。对以水库为主源的灌区，在渠系末端或者田间地头设置一定数量的蓄水池、涝池、水窖，利用雨季收集地表径流或者非灌溉期储存渠道余水，形成分布式的微型水库群。分散的蓄水设施像许多调节阀，在暴雨时削减洪峰，在干旱时给作物提供救命的水。同时合理利用地下水作为战略后备水源，建设一定数量的机井并封存备用，形成地下水应急开采系统。必须规定只能在特大干旱年才可以使用，平时则通过回灌补源来涵养地下水位，实现地表水、地下水的联合调度。

（三）推广适应气候变化的农业技术

水利基础设施的硬件建设要和农业生产的软件技术深度融合，才能发挥出最大的气候适应效能。这就需要将工程的视角延伸到田间地头，推广能够与水

利设施协同运作、最大限度地利用有限水资源的农业技术，形成工程保供水、农艺促节水的良性循环。

在干旱缺水的地区应该全面推广喷灌、微灌、水肥一体化等技术。用管网在田间布设，直接把水肥输送到作物根部，大大减少了输水过程中漏、渗、蒸发量，可以根据天气变化调整灌溉制度。现代化智能灌溉系统可以和气象预报数据联动，降雨来临之前自动停止灌溉，干热风来临之前适时喷水增湿，从而对气候的波动做出及时的反应。精准管控能力大大降低农业生产受天气的影响程度，即使在降水量大幅减少的年份，也可以依靠每一滴水养活庄稼。

高效节水灌溉的同时，农艺措施的改进也不能缺少。推广保护性耕作技术，即免耕、少耕、秸秆还田，可以提高土壤有机质含量，改善土壤团粒结构，从而大幅度提高土壤的蓄水保墒能力。深松整地可以破坏坚实的犁底层，形成一个巨大的土壤水库，储存更多的降水，减少地表径流。根据区域长期的气候变化趋势，在作物种植结构上，应该引导农户适当减少高耗水作物的种植面积，改种耐旱、耐高温、生长周期短的抗逆性品种。采用“适水种植”的调整，既减轻了水利工程的供水压力，又在需求端使农业生态系统在应对气候冲击的时候更具有韧性、稳定性。依靠工程措施和生物、农艺措施的有机结合，基层农田水利系统不再是一个孤立的水泥建筑群，而是一个有生命力、具有自我调节功能的综合适应性系统。

第四节 经济效益与社会效益的平衡

一、提高农业生产的综合效益

（一）通过节水增效降低农业生产成本

传统的粗放型灌溉模式下农业用水利用率很低。一方面造成珍贵水资源的浪费，另一方面漫灌导致的水抽水量大、人工照看费用高，大大压缩了农业生产利润空间。借鉴全世界范围内的成功经验，用压力管道输水、喷灌、微灌以及相应的自动化控制系统，从根上改造农业生产成本结构是完全可能的。当水利工程加入现代节水技术之后，灌溉就不再只是“浇地”了，而是精准地“给水”。可以达到水肥药一体化的目的，大幅度减少化肥、农药的流失浪费，有效降低面源污染治理的潜在外部成本。

精准灌溉系统依靠传感器来判断土壤墒情并按照需要灌溉，有效减少了无效蒸发以及深层渗漏，单位面积的用水量下降了30%以上。对规模化种植主体来说，成本节约的效果立刻就显现出来。以前数十人夜以继日巡视水渠繁重工作，现在只需要少数人来完成，劳动成本也就大幅度降低。创新管护模式，引入第三方专业服务公司实施集约化管理，设备运行维护成本因规模经济效应而进一步降低。以技术代替人工、以精确取代粗放的方式使得每一滴水、每一度电的投入都能带来实实在在的作物产量，把农业生产的边际成本压缩到最低，给农产品在市场上的竞争争取了重要的价格优势。

（二）保障粮食安全与农产品有效供给

粮食安全是国家安全的基础，水利是粮食生产的命脉。基层农田水利工程的抗灾减灾能力决定粮食供应是否稳定可靠。在气候变化越来越严重、极端天气频发、旱涝灾害交替出现的背景下，农业生产受到了严峻的威胁。完善的农田水利体系依靠跨区域调水、蓄水设施调节、田间排灌系统快速反应等来缓解由于降雨时空分布不均造成的风险。干旱之年，它们是作物生存的“救命水”；洪涝之时，它们又成为排干田间积水的“保护网”。这样旱能灌、涝能排的高标准农田建设，把以前靠天吃饭的农业生产逐步转变为可控制的工业化流程，保证粮食产能底线不被突破。

稳定的水利保障不仅可以保证总产量的安全，还可以保证农产品供给的连续性以及品质的一致性。现代供应链对于农产品的规格、上市时间都有要求，没有稳定水源保障的农田无法满足订单农业的需求。建设高水平的基层水利工程，可使农业生产者对作物的生长周期实施精准掌控，进而达成错峰上市，充实市场空白。供给侧稳定对平抑市场价格波动、保障城市居民“米袋子”“菜篮子”，具有不能替代的宏观经济意义。众多的实践表明，凡是农田水利设施健全的地方，粮食生产波动率就比平均水平要低一些。确定性本身就是巨大的经济效益，降低了全社会的粮食储备成本和救灾支出，给国民经济的平稳运行打下了坚实的物质基础。

（三）促进农业产业结构调整与农民增收

水利条件的改善，是农业种植结构调整的前提，也是农民由“种得活”向“卖得好”过渡的重要桥梁。水利设施薄弱的地方，农民只能种耐旱、经济价值低的传统粮食作物，收入微薄，而且存在同质化竞争。农田水利工程升级改造之后，

水源保证能力明显改善，土地的适种范围也跟着拓展，农民有了改种高附加值经济作物的底气。放眼全球，发展设施蔬菜、特色林果、花卉苗木，无一不是依靠精细化的灌溉系统来实现的。由于水利条件改善所造成的种植结构的调整，可以使每亩地的产量提高几倍甚至几十倍，直接推动农民经营性收入快速增长。

协同创新的建设管护模式起到催化剂的作用。通过建立水利与产业融合发展的机制，基层水利工程一般会 and 现代农业园区规划同步开展，用用水权的灵活流转、水价的市场化杠杆来引导水资源向高收益产业集聚。

1. 在水土资源配置优化的先行区里，依靠完善的灌排设施形成以企业为主导、基地为依托、农户为基础的产业化经营模式。农民既可以流转土地获得租金收入，又可以在家门口就业获得工资性收入。多元化的收入来源，是在水利基础设施对产业升级有力支持下形成的。

2. 高标准农田水利设施大范围地提高了耕地质量等级，使原本零星分散、低产的土地具备了机械化作业的条件，从而促进了土地的规模化经营。既解放了农村剩余劳动力，又使农民从土地流转溢价中获益，最终实现了水利兴、产业旺、农民富的良性循环。

二、保障社会公平与公众参与

（一）确保弱势群体的用水权益

农田水利系统运行到末端的时候，资源分配的天然不平等就会暴露出来。处在渠道末端或者地势较高的农户常常会遇到有水用不上、用水成本高的现象。他们大多数是经济基础薄弱的群体，在争夺资源的时候处于不利的地位。如果没有制度上的倾斜和保障，很容易就会陷入贫困的漩涡。保障社会公平的第一项任务，就是依靠工程布局的合理安排和管理制度的兜底保障，保证所有农户，尤其是小农户、贫困户、处于水利系统边缘的农户，至少有最基本的用水权益。这就要求工程规划阶段要摆脱只追求投资回报率的思维定式，有意识地加大对偏远、贫困地区设施的投入，从而消除水利服务的盲区。

在具体的管护中要建立刚性的配水规则，禁止上游截流霸占水源，造成下游断流。对于经济困难的弱势群体来说，应该研究实行精准的水价补贴或者基本用水量减免政策，以保证他们不会因为水价上涨而放弃灌溉，也不会因为水致贫。协同创新模式是把政府主导和社区互助结合在一起。用水户协会成立之后，在章

程中可以明确写入口粮田灌溉优先，旱情发生时实行上下游轮灌，依靠集体行动来纠正市场机制可能造成的“马太效应”。只有最弱势群体的用水权益得到保障，农田水利工程才算是具备了普惠性社会价值，成为缩小城乡差距、促进区域协调发展的稳定器。

（二）建立公开透明的水务信息发布机制

信息不对称是造成基层水利治理失灵、产生社会矛盾的根源。当水资源的分配方案、工程建设的资金使用、水费收取标准及去向等重要信息处在封闭的状态，就会产生公众的猜疑和不信任，从而影响管护工作的顺利进行。建立公开透明的水务信息公开机制，是提高管理效率的一种手段，也是保障公众知情权、保持社会公信力的一种方式。现代信息技术的发展给该机制的实施提供低成本、高效能的解决途径。创建数字化的水务管理平台，可以把隐性的管理流程转变为显性的，使权力运行在阳光之下。

推行水务信息的全面公开，需要从静态的数据披露转向动态的全过程直播。

1. 在工程建设期间，将项目规划图、预算明细、施工进度、质量检测报告等具体事宜公示给受益群众，让他们知道钱花在哪里、工程怎样建设，防止出现偷工减料、挪用资金的现象。

2. 运营管护期主要是水权的透明分配、财务的公开核算。用手机 app 或者村务公开栏公布各个支渠的供水时间、流量数据以及每户的水费账单，做到“用明白水、交明白费”。透明化的机制能遏制基层微腐败，消除农民水费收取中的抵触情绪，重塑干群之间信任契约。由于摩擦系数的减少，水利工程的管理成本也会大幅度降低。

（三）拓宽公众参与决策和监督的渠道

基层农田水利工程的使用者是广大农民。他们对于当地的水土状况以及实际需要是最为了解的，但是在传统自上而下的管理体制之下，农民往往只是被动的接受者，缺少参与决策的机会。这就造成了很多工程建造成后无人使用，损坏了无人修。保障社会效益的主要方式就是赋权，用制度安排扩大公众参与决策和监督的范围，使农民真正成为水利工程的主人。参与不能只在听证会上等形式中，而应该渗透在设计、建设、运行、维护等全过程之中。

在世界各地的参与式灌溉管理模式中，用水户协会等农民自管组织起了很重要的作用。政府在制定区域水利规划或者调整水价政策的时候，应该把农民代表

纳入决策委员会，充分听取一线使用者的意见，保证政策符合实际、切实可行。监督上应该给予受益农户对工程质量的否决权，对管护人员有考核权。设立公开举报电话、聘请村民为义务监督员等可以构成一个无处不在的社会监督网。农民在发现渠道损坏或者配水不公的时候，可以有畅通的渠道进行反馈，并且能够得到及时的处理。深度公众参与一方面能够激发农民爱水惜水的内生动力，让农民主动、自觉地投入到设施维护的投工投劳里，另一方面也可以化解潜在的社会矛盾于基层之内，形成一个共建共治共享的良性治理模式，从而达到农田水利工程社会效益不断增加的目的。

水务信息公开内容与方式表

信息内容	公开方式	目的
工程建设期		
项目规划图	村务公开栏、社区平台、线上公示	了解工程全貌，防止信息垄断
预算明细	村务公开栏、社区平台、线上公示	确保资金合理使用，防止贪污挪用
施工进度	村务公开栏、社区平台、施工现场公示	监督工程按时推进，掌握进展情况
质量检测报告	村务公开栏、社区平台、线上公示	确保工程质量达标，保障使用寿命
运营管护期		
水权分配方案	村务公开栏、手机 APP、入户告知	确保公平用水，消除分配疑虑
供水时间与流量	村务公开栏、手机 APP	便于农户合理安排灌溉，提高用水效率
每户水费账单	手机 APP、短信通知、入户告知	清晰消费明细，避免费用纠纷
维护保养记录	村务公开栏、线上公示	监督管护团队工作，延长设施寿命

如上表所示，透明化信息公开有利于提高基层水利治理效率、公信力，加强群众对水利工程的信任感和参与度。

第五节 可持续发展指标体系

一、指标体系构建的原则与方法

（一）科学性、系统性、可操作性原则

科学性原则成了创建指标体系的根基。它要求所选取的每一个指标都必须客观、真实地反映基层农田水利工程的内在运行规律以及外部关联特点，不能主观臆断或者模糊定性。即指标的定义必须有明确的物理意义或者经济学含义，数据

的采集、计算和分析方法也应当符合水文学、生态学、统计学的基本要求。在评价灌溉效率时不能仅仅依靠经验来判断，必须用水量平衡原理建立准确的计算模型，保证评价结果经得起时间和实践的检验，真正体现工程运行过程中所表现出的物理效应和资源消耗情况。

系统性原则把基层农田水利工程看成是由自然资源、工程设施、管理主体、受益客体组成的复杂巨系统。所以评价指标要包含系统所有的方面，保证工程结构坚固可靠的同时，还要考虑到水循环利用、管理体系完善程度以及利益相关农户的满意度。片面的评价会造成管理导向的失误，只重工程建设速度而轻后期管护人才的培养，或只重节水指标而轻周边生态景观功能的丧失等。构建系统性指标框架，就是要把各个要素之间的逻辑理清楚，形成多层次、多角度的评价网络，使得各个指标相互独立又相互补充，共同反映工程可持续发展的全貌。

可操作性原则像一座桥梁，把理论模型同基层实践联系在一起。它充分考虑到基层水利管理单位人员素质、技术装备、资金投入等各方面的现实差距，力求使数据采集更简单，计算过程更清晰。如果指标体系复杂、深奥，依靠昂贵的监测设备或者复杂的数学模型，那么在农村基层就很难推广，最终会变成纸上谈兵。因此，在保证科学性、系统性的同时，应优先选择已经通过现有的统计渠道可以获取的，或者只需要简单的现场观察、问卷调查就可以得到的指标，保证基层管护人员能够理解、会使用，使指标体系真正成为指导日常管护工作的实用工具。

（二）采用 PSR 等模型框架

压力状态响应模型是使用较广的一种因果关系分析模型，在环境以及可持续发展的评价领域被广泛使用。将其用于创建基层农田水利工程指标体系，便可以清晰的表明出人类活动、工程状况和管理应对之间存在的动态反馈关系。在这个框架内：

“压力”指标体现的是人类农业生产活动、自然气候条件对农田水利系统的需求与负担，比如作物种植结构的需水强度、干旱洪涝灾害发生的频率、农业面源污染排放的强度等等。这些指标可以反映出工程所面临的风险与挑战的来源，是造成系统变化的原因。压力指标的监测可以预警工程所遭遇的超载风险，及时调配资源。

状态指标主要体现农田水利工程在某一时点的物理属性及功能状况，是系统受到各种压力作用后所处的现实状态。包含渠道及建筑物完好程度、灌溉水利用

系数、农田排水能力、灌区周边土壤及水环境质量等。状态指标是评价的中心，直接反映工程目前的健康状况和服务能力，是决定工程是否需要维修、改造或者更新的主要依据。对状态指标展开长时间的跟踪之后，管理者便能够绘制出工程性能的衰减曲线，找出系统当中存在的薄弱之处，进而给有目的地采取行动给予明确的指引。

“响应”指标是反映人类社会为了缓解压力、改善状态而采取的政策、资金、技术等措施，体现的是管理体系的能动性、适应性。水费征收制度落实情况、管护资金投入强度、节水技术普及率、农民参与用水管理程度等。响应指标的好坏直接关系到系统的未来走向：积极有效的反应可以缓解压力、恢复状态，形成良性循环；滞后的反应就会导致系统功能持续退化。使用该模型框架可以串起分散的指标形成因果链条，帮助管理者理解为什么改、改什么、改得怎么样，从而由被动的应对变为积极的管理。

（三）结合联合国可持续发展目标进行本土化

联合国提出的可持续发展目标给全球范围内解决水资源短缺、农业发展问题提供宏观指导，其中有关清洁饮水与卫生设施、零饥饿的目标，与基层农田水利工程的建设初衷不谋而合。把那些国际通用的宏观目标融入到具体的工程评价体系当中，一方面可以拓宽我国农田水利管理的国际化视角，另一方面也可以借助同国际先进水平的对比来找出自身的不足之处。我们可以从国际水资源利用效率评价标准出发，重新审视我国灌区用水计量是否准确、节水潜力是否被充分挖掘；从可持续粮食生产系统角度出发，促使基层水利工程更多地考虑农业生产系统韧性建设，提高抵御极端气候事件的能力。

但单纯的照搬国际指标就会出现水土不服的情况。因此，必须根据我国国情以及各地的地域特点对指标做深层次的本土化改造。我国地域广阔，南北气候差异大，水资源分布及农业种植习惯也大相径庭：南方水乡重排水防涝和水生态保护，北方旱区则重雨水集蓄与高效节水。因此，在借鉴可持续发展目标的框架时，需要对指标的内涵、权重、评价标准做出适应性调整，剔除不符合中国农村实际情况的指标，增加能够体现中国农田水利管理特色实践的创新指标，如“田长制”“河长制”在末级渠系管护中的落实情况等。

本土化是宏观到微观再回到宏观的过程，把可持续发展目标的宏大愿景变成基层管护人员可以理解、执行的微观任务。例如把“提高水资源利用效率”的目

标分解成斗渠农渠衬砌率、田间灌溉水利用系数、单位亩产耗水量等可量化检测的物理指标；把“保护水生态系统”的目标转化成生态沟渠覆盖率、灌区生物多样性指数等在地化指标。经过层层传导转化之后，国际公认的可持续发展理念就能真正渗入到每一条渠道、每一寸农田的日常经营当中，从而塑造出具有全球视野和中国特色的农田水利评价准则。

由此创建的多维指标映射关系，不但可以对单个工程的可持续性进行评定，还可以对不同的区域或者不同类型的工程进行横向比较。比较的目的并不是为了排名，而是找出在不同的自然和社会经济条件下最适宜的管护模式。经济发达地区可以更多地参考可持续发展目标中有关技术创新、基础设施现代化的指标，生态脆弱区则应该加大生态修复、资源保护指标的权重。根据中国复杂的农村实际情况灵活地调整本土化的策略，使得指标体系一直保持着旺盛的生命力和很强的解释力。

二、核心指标的选择与界定

（一）水资源可持续利用指标

水资源是农田水利工程运行所依赖的物质基础，水资源利用状况的好坏和能否持续利用，直接关系到工程的生命力。本维度所选择的指标应该包括取水、输水、用水、回水整个过程，主要考察水量节约和循环利用。

1. 灌溉水有效利用系数，是反映灌区从水源取水到田间作物吸收利用的最主要指标。它既是工程设施防渗能力的反映，也是田间用水管理精细化程度的写照。基层评价中建议细化为渠系水利用系数和田间水利用系数，明确水量损失的主要环节是输水渠道的渗漏还是田间漫灌的浪费，从而对节水改造有的放矢。

2. 单位面积用水量和产出比：只强调节水而不重视农业产出，会导致水土资源不匹配。因此需要引入水土匹配效率指标。该指标体现的是每灌溉一单位水量所获得的粮食产量或经济产值，可以清楚地反映水资源转化为农业经济效益的能力。根据不同的作物种植区特点设定不同的基准值，可以促使农户在保证产量的基础上，通过改善灌溉制度、调整种植结构等方式减少用水强度，提高水资源利用率。

3. 区域地下水埋深变化率，对以地下水灌溉为主地区而言，这是判断水资源开采是否超载的“红线”。长期观测地下水位升降趋势，可评价目前的灌溉方式是否正以透支未来水资源为代价。如果水位持续下降，就说明灌溉规模已经超出了当地水资源的承载能力，这时要启动预警系统并采取缩减开采、轮作休耕或者

调换水源等措施，保证水资源的可持续利用。

（二）生态环境健康指标

随着生态文明建设的持续推进，基层农田水利工程的作用也不再只是灌溉排水，其生态服务价值也越来越明显。生态环境健康指标用以评价工程建设和运行对周边自然环境的影响，提倡环境友好型的水利发展模式。

1. 灌排退水水质达标率：这是重要的监控点。农田排水中氮、磷、农药残留含量过高，直接排入河湖，就会成为主要的农业面污染源。此指标要定时检测排水口的水质，促使灌区采用生态沟渠拦截，湿地净化等手段，减小农业生产活动对外部水环境的负担。

2. 生态沟渠、自然岸坡保有率：生态兼容性评价的形态指标。传统的混凝土硬化渠道虽然输水效率高，但是阻断了水、土、气、生物之间的物质能量交换，导致生物多样性丧失。该指标主张末级渠系建设时要留出一定比例的土质岸坡、多孔隙结构、植被缓冲带等，给两栖动物、水生植物、微生物等提供栖息和繁殖的空间。既有利于维持农田生态系统平衡，又可以利用生物自净功能改善水质，从而达到工程安全和生态健康双赢的目的。

3. 土壤次生盐渍化风险指数，主要是针对干旱、半干旱灌区，由于不合理的灌溉制度造成地下水位上升，盐分在表层土壤中积累，土地荒废。根据土壤含盐量、地下水矿化度及排水设施的有效性来建立盐渍化风险评估模型。为了促使管理者重视排水系统的建立和养护，改变过去重灌轻排的观念，控制地下水位，实施淋盐洗盐，保证耕地资源的可持续利用，防止因水利工程运行不当引发生态灾难而设立的指标。

（三）经济社会发展指标

工程的可持续发展最后要表现在经济上可行、社会上认可。只有工程能持续带来经济效益、得到受益人群普遍支持的时候，管护机制才能长久运行。

1. 工程管护资金自给率，是反映工程管护“经济造血”功能的重要指标。用工程管护实际费用中用水费收入、水权交易、土地增值收益等来源筹集的管护资金所占的比例来计算。该指标越高，工程对政府财政补贴的依赖程度就越低，工程自我维持、自我更新改造的能力就越强，市场化运行机制就越成熟。

2. 水费收缴率和农户参与度：这是两个反映社会治理效果的指标。水费收缴率不仅仅是一个财务数据，也是农户对于工程服务质量满意度以及支付意愿的直

接反映。高收缴率一般表示供水可靠、计量公正、服务周到。农户参与度是反映受益主体在工程规划、建设，特别是后期管护决策中话语权和行动力的重要指标，可以用参与用水协会的比例、参与投工投劳的频次来衡量。这两大指标共同反映出工程管理的社会根基，体现的是由政府单方面管理向社会全民参与这一种必然走向。

3. 粮食产量稳定、农业收入增长率：工程社会效益的最终落脚点。农田水利工程的根本任务就是实现旱涝保收。因此，在极端气候年份，灌区的粮食产量波动幅度应该比非灌区小得多，产量的稳定是国家粮食安全的基础。工程运行同时带动农业增效、农民增收，改善灌溉条件引导发展高附加值经济作物。把这两个指标加到评价体系里，就能保证工程建设一直围着“三农”发展的主要利益转，防止工程建设同农业生产脱节，切实做到以水兴农、以水富农。

核心指标体系概览

指标维度	具体指标	衡量重点	意义
水资源可持续利用	灌溉水有效利用系数	水量节约与循环利用	反映工程防渗与用水管理水平，指导节水改造
	单位面积用水量与产出比	水土匹配效率	评估水资源转化为经济效益的能力，优化种植结构
	区域地下水埋深变化率	地下水开采负荷	预警水资源超载风险，保障地下水资源永续利用
生态环境健康	灌排退水水质达标率	农业面源污染控制	监测排水质量，推动生态净化措施，减轻环境负荷
	生态沟渠和自然岸坡保有率	工程生态兼容性	促进生物多样性，利用生态功能改善水质，实现生态安全
	土壤次生盐渍化风险指数	耕地资源保护	评估盐渍化风险，指导排水系统建设与管理，保障耕地永续利用
经济社会发展	工程管护资金自给率	经济造血能力	衡量工程市场化运行程度，降低财政依赖，提升自我发展能力
	水费收缴率与农户参与度	社会治理效能	反映农户满意度和参与度，推动共同治理，提升服务质量
	粮食产量稳定及农业收入增长率	社会效益与民生福祉	确保粮食安全，带动农民增收，服务“三农”核心利益

从上面的表格可知，采用多维多层次的核心指标体系可以全面、深入的评价基层农田水利工程可持续发展情况。

第十章 全球视野下的协同创新展望

第一节 国际经验本土化路径

一、本土化的基本原则与挑战

（一）因地制宜，避免“水土不服”

世界各地的农田水利工程都建立在地势和气候等自然环境的基础上。因此，在借鉴他国经验时，自然适配性必须放在第一位。以色列滴灌技术高效的原因在于，以色列的沙漠气候、沙质土壤导致的。但是我国大部分农业主产区处于季风气候带，降雨具有明显的季节性，土壤类型也多种多样。盲目套用很容易造成技术应用与自然环境不相符。部分地区引进高效节水灌溉设施时没有考虑到当地水源含沙量大、水质硬度高的特点，昂贵的滴灌设备在很短的时间内就被堵塞报废了，造成资金浪费的同时，也打击了基层农户接受新技术的积极性。

农田水利工程不单是技术设施，它还是一个与土地利用模式紧密结合的空间系统。欧美国家大多采用大规模农场化经营，水利设施一般服务于连片平整的土地，自动化程度高，覆盖面广。相反，在我国大部分农村地区以小农户分散经营为主，地块细碎化严重，呈“插花地”式分布的土地对水利设施的灵活性、通达度提出了不同的要求。不考虑土地经营形式的差异，盲目引进适合大农场的大型喷灌机械，必然出现机具进地难、灌溉覆盖死角多、邻里用水矛盾频发等水土不服的现象。

真正的因地制宜，是在引进国际经验时，对本土的微观地理环境做细致的评估。这就需要工程技术人员深入到田间地头，对当地的地形地貌、水文地质状况、作物种植结构等进行详细的勘测，把国际上先进的设计理念同本地独有的自然要素有机地结合在一起。只有当外来技术经过适应性改造，能符合当地水土特点、契合农作物生长规律，并能有效应对气候波动造成风险的时候，这样的本土化尝试才算是迈出了坚实的第一步。

（二）制度、文化、经济水平的差异与调适

制度环境和社会文化背景是决定农田水利管护模式成败的隐性力量，其影响常常大于技术本身。国外发达国家大多建立在成熟的市场经济体系和完善的法律框架之上，水权交易制度明晰，农场主协会等社会组织在水利工程管护中起着主导作用，并且有较强的付费意愿和能力。我国基层农田水利具有很强的公益性，长期以来形成了政府主导、集体组织配合的治理模式。直接套用私有产权、完全市场化管护模式下的理念，会碰到制度摩擦，还可能引发管护责任真空。从经济水平上看，发达国家的农业从业者拥有雄厚的资本，可以承受高昂的运维成本；而我国大部分农户的收入水平较低，如果引进的模式后期维护费用过高，就会造成工程“建得起、用不起”的局面，最终成为摆设。

文化观念的差异也不能忽视，水文化在不同的文明中有着截然不同的解释。在一些国家，水被看作商品，用水付费天经地义；在我国传统的农耕文化中，水一般被看作公共资源或天赋福利，农户的用水缴费意识还处在培养阶段。深层次的文化心理差别，使我们在推行参与式灌溉管理或者水价改革的时候，不能简单地套用国外的量化模型，而必须加入本土的乡村治理智慧。我们在尊重乡规民约、熟人社会运行逻辑的前提下，探寻符合国情的激励约束机制，依靠宣传教育、利益引导的方式来缩小外来制度与本土文化心理之间的差异。

调适就是制度创新，这就意味着我们在学习国外的经验的时候要做基因重组。不单单是降低标准，简化程序，更在于找到外来模式与本土制度优点的结合点。可以在我国农村基层党组织领导下，将国外用水户协会的民主协商机制嵌入到村民自治体系中，既可以发挥行政动员的高效性，又可以调动农户的主体性。要正视城乡二元结构所造成要素流动的阻碍，依靠财政补贴、金融扶持等政策手段来弥补农户在经济承受能力上的不足，从而为国际先进的管护模式落地打下坚实的经济基础。

（三）技术引进与自主创新的平衡

在农田水利现代化的大过程中，技术引进无疑就是一条缩短差距的捷径。但过度依靠技术引进，就容易陷入“引进—落后—再引进”的恶性循环之中。发达国家在节水灌溉设备、自动化控制系统、水资源管理软件等方面已经达到了较高的水平，但这并不意味着我们只能当这些技术的单一消费者。核心技术是买不来的，在关系到国家粮食安全、水安全的战略领域，必须要有清醒的头脑，把技术

引进当作自主创新的起点而不是终点。

技术引进与自主创新策略表

阶段	核心任务	具体行动	目标
1. 深度学习与解构	掌握核心原理	组织科研力量进行逆向工程、原理剖析；弄清设计逻辑、核心算法、材料配方。	将外来技术“黑箱”转变为透明知识体系，实现“知其然更知其所以然”。
2. 二次开发与功能跃升	适应本土需求	根据我国复杂农艺要求优化控制算法；针对水质差异改进材料工艺；简化人机交互界面。	开发具有中国特色的升级版产品，实现技术本土化应用。
3. 创建自主知识产权体系	突破关键瓶颈	鼓励科研院所与龙头企业合作，加大研发投入；重点突破关键零部件和核心控制系统。	培育拥有自主知识产权的专利技术和标准规范，逐步实现高端农田水利装备国产化替代。
4. 开放性创新与国际合作	提升全球竞争力	建立国际联合实验室、开展跨国技术转移合作；鼓励“以我为主、博采众长”。	从更高起点推进自主创新，培育具国际竞争力的本土农田水利技术产业集群。

妥善处理引进和创新的辩证关系才能把握发展的主动权。我们应该提倡“以我为主、兼收并蓄”的开放型创新理念，用全球化的创新资源去满足本地的需求。通过创建国际联合实验室、开展跨国技术转移合作等手段，在更高起点上推进自主创新，培育出具有国际竞争力的国内农田水利技术产业集群，从而完成从技术跟跑到并跑乃至领跑的跨越。

二、本土化的实施步骤与方法

（一）深入学习与理解国际经验的本质

本土化的前提是对国际经验做“去伪存真”的深度解读，不能停留在表面的模仿。我们很容易被国外宏大的工程景观、精密的仪器设备所吸引，但会忽略支撑这些现象背后所隐藏的管理逻辑、政策环境和社会契约。真正的学习应当是穿透性的，探究成功案例是在什么样的历史条件下产生的，解决了哪些核心矛盾，运行机制中哪些是普遍适用的规律，哪些又是特定环境下形成的。学习荷兰的水利工程，不能只看到拦海大坝的雄伟，更应该理解荷兰人“还地于水”的治水思想和多方利益相关者共同决策的圩田模式治理结构。

要建立起这样的理解，需要依靠多层次的知识交流机制。不仅要组织技术人员出国考察培训，还要派遣管理人员、政策制定者、社会学家开展跨学科综合调

研。查阅原始档案，访谈当事人，参与实地作业，从全生命周期角度复盘国外项目。更不能忽略的就是那些失败的案例或者过程中的曲折，其中包含的风险提示常常比成功的经验本身更有价值。只有真正弄清国际经验的底层逻辑和边界条件，在本土化过程中才能心里有数，避免因误读而造成的决策失误，为以后探索实践奠定坚实认知基础。

（二）开展本土化试点与示范

充分了解国际经验精髓之后，必须用试点先行的方式在小范围内做压力测试，这是降低改革成本、规避系统性风险的必要之举。试点工作不求面面俱到，而应该选择具有代表性、并且具备一定特殊性的地方进行专门攻关，通过实践来检验外来模式和当地实际情况的匹配度。

1. 试点区域的选择：应该选择气候类型、地形地貌、种植结构、经济发展水平不同的代表性县区或者灌区作为试点。试点的地区最好是有一定基层组织基础、群众配合度的地区，有利于新模式的引进实施。

2. 差异化剪裁策略，按照各个试点地区实际情况来对引进的国际经验予以差异化剪裁。经济发达地区把自动化灌溉和市场化管护模式作为主要的研究对象，欠发达地区则把低成本、易操作的适用技术和基于社区的互助管护制度作为主要的研究对象。

3. 创建监测评价体系，依靠第三方评价机构对项目全过程展开监督，涵盖建设进度，运行效率，资金使用，社会效益等。重点考察农户的接受程度以及参与意愿，获得一线的、真实的反馈数据，及时发现并纠正实施过程中的偏差。

试点过程本身就是一个不断试错、不断纠偏的动态过程。我们要给试点工作留有余地，容许暂时的困难，甚至局部的失败，重要的是从实践中得到真实的数据和鲜活的经验。通过“解剖麻雀”可以清楚地看到外来模式落地本土时遇到的种种具体阻碍，技术上水土不服、制度上利益冲突等都能在可控的范围内暴露出来，为后续方案的优化调整提供最直接的依据。

（三）总结提炼形成本土化模式

试点的最终目的是形成可以复制、可以推广的成熟模式。试点项目取得阶段性成果之后，就要立即开展系统性的总结提炼工作，将实践过程中获得的感性认识提升到理性规律的高度，把零散的操作经验转化为标准化、规范化的政策制度，从而实现从盆景到风景的转变。

这一过程要求我们跳出具体项目的细节，从宏观的角度去考察本土化改造的效果。组建跨部门、跨学科的专家队伍，对试点数据进行深入挖掘、联系，找出真正有效的措施以及在什么情况下有效。在此基础上编制出不同区域类型的农田水利工程建设和管护技术指南，规定工程建设标准、设备选型准则、运行管理规程。同时把试点中行之有效的管理制度上升为政策文件，在水权分配、水价形成、工程产权界定等各个方面出台具体的指导意见，为新模式的推广提供坚实的制度保障。

总结提炼要包含人才培养和社会动员机制的创建。把试点中出现的能工巧匠、管理能手以及配合度高的农户吸纳到培训师资源库中，通过他们现身说法来消除其他地区的农户顾虑。组织现场观摩会、经验交流会，用现代媒体广泛宣传农田水利本土化创新的故事，营造全社会关心支持的良好氛围。最终形成的本土化模式应该是集技术、管理、政策、文化为一体的综合解决方案，既受到国际先进经验的启发，又深深扎根在中国大地上，有强大的生命力和适应性，能够为我国基层农田水利工程的高质量发展提供源源不断的动力。

第二节 技术创新与管理创新融合

一、技术驱动管理变革

（一）数字化、智能化技术重塑管理流程

传统农田水利工程管理方式以人工巡查、电话调度、纸质记录为主，效率低、信息传递滞后失真的风险大。数字化介入使僵局得以改变。以物联网感知体系为例，可以对灌区的水位、流量、土壤墒情、闸门运行状况等进行毫秒级的准确采集和实时传输。在线化的数据使得管理流程由“人找信息”变成“信息找人”。管理者不用再高强度地跑动去了解工情，只需坐在控制中心或使用手持终端，就可掌握全局的动态。因此决策链条大大缩短，指令下达更加扁平化、直接化，有效地消除了层级传递过程中的损耗和延误。

智能化技术也深入到了决策的核心。依靠大数据分析以及人工智能算法，可以凭借历史数据加上实时工情，自动生成最优的水资源调配方案及工程保养计划。以往依靠资深水利员个人经验来进行的经验式调度，正逐渐被以算法模型为基础

的精确调度所取代。用水高峰期，根据各支渠的瞬时流量和作物需水模型，可以准确地调节闸门的开启程度来达到按需供水、错峰灌溉的目的。流程重塑之后，不再依赖具体管理人员经验水平来执行管理行为，使管理行为趋向标准化、规范化，大幅度减少人为操作失误造成的水资源浪费和工程损毁的风险，构建起以数据为驱动的新型业务流转体系。

云计算平台打破了各部门孤立的运作模式，从而可以实行协同式管理。过去气象、水文、农业等各方面数据互不相通，基层水利管理常常处在信息盲区。利用云平台技术融合异构数据，可以很好地打破水利部门的管理界限，深入实现与农业种植结构调整、气象灾害防范等工作的协同。气象系统预报即将出现暴雨的时候，智能管理平台可以立刻启动排涝预案，向有关责任人发出预警信息并预先降低内河水位，这就是技术改变管理流程的鲜活例证。

从全世界范围看，完成现代化转型的灌区大多采用数字孪生技术，对实体工程实行全面的数字化复制。管理者在虚拟空间中可以模拟各种突发情况，从而改善现实中的管理预案。这种“以虚控实”的技术手段，把事后处置前移至事前预防，从根子上冲破了传统管理流程里“亡羊补牢”的被动状态，创建起具备自适应、自学习能力的智慧化管理闭环，让每一滴水的流动都处在严密的数字监管流程之中。

（二）新技术催生新的管理模式与业态

技术创新一方面可以提高原有的管理效率，另一方面会衍生出新的管理模式、商业模式，打破公益性水利工程缺乏市场活力的固有观念。

1. 合同节水管理模式出现属于技术赋能的典型表现。依靠高精度的计量设备、智能控制阀门，用水量可以被精确计量、确权，给市场化运作的农田水利节水改造项目提供商业基础。第三方专业节水服务企业投入资金建设高效节水灌溉设施，用先进的物联网技术进行专业管护，最后通过节约下来的水费获取收益分成。此种模式把单纯的行政管理变为依靠技术契约的市场化管理，解决了基层资金短缺的问题，也引进了专业的技术管理力量，达到了多方共赢的目的。

2. 水权交易市场活跃也需要技术的支撑。在没有精确计量和确权技术的年代，水权交易只停留在理论阶段。现在的区块链技术与智能水表结合起来，每一个立方米水的流转过过程都可被溯源、可被证明，并且交易成本也大幅度减少。农户或者用水组织在使用滴灌、喷灌等节水技术之后，可以将多余的水权在网上交易平

台出售给工业企业或者缺水灌区。依靠技术信用构建的新型业态，极大地激发了基层管护主体的节水内生动力，使管理模式从原来的单纯的“管水”转变为现在的“经营水”，赋予水资源商品属性，激活了沉睡的农村水资产。

（三）技术赋能提升管理效率与精准度

传统的漫灌方式下，由于管理粗糙，水资源利用系数一直处于低位徘徊，灌溉水的有效利用率一般不足百分之五十。精准灌溉技术使用后管理精度上了一个台阶。土壤墒情传感器与作物生长模型相结合之后，管理系统可以准确地计算出作物各个生长期所需的灌溉水量，把灌溉指令精确到每块田、每棵树。点对点精准供给使水资源在时间和空间上得到合理调配，彻底终结了以前大锅饭式的供水方式，大大提高了水资源的利用率，节约了水资源，避免了由于过度灌溉导致的土壤盐碱化和肥料流失问题。

管理效率的提高也体现在人力资源被释放出来。在无人机巡检、视频监控技术助力下，一名管理人员有效管护的面积，由原来的几百亩增加到现在的数千亩乃至上万亩。无人机带高光谱相机，可以很快找到渠道周边违章建筑、非法取水口、水生植物淤积等，效率是人工巡查的几十倍。对埋在地下的输水管道，用声波探测、电磁感应技术可以精确定位细小的漏点，给维修人员指明挖掘的具体位置，减少盲目挖掘所花费的时间和工程量。技术赋能之后的更加高效的管理，大大减少单位面积的管护成本，很好地解决了基层水利队伍人员老龄化、人数少的实际情况。

财务管理是否精准也能看成是技术的加持。以前的农业水费收缴常常是一笔糊涂账，每亩收费既不公平，也不能真实反映实际用水情况，造成水费难以收取，工程运行维护经费严重不足。智能水表和移动支付技术结合之后，可以采取预付费、后用水的管理方式，也可以实行阶梯式用水收费。每一笔水费产生的时候都有相应的用水量数据与之对应，用户可以随时通过手机看到自己的用水明细以及余额，彻底消除了缴费过程中出现扯皮的现象。资金流和信息流准确对接，保证了工程管护经费足额到位，给设施长期良性运转打下了坚实的经济基础。

技术对于提升极端气候事件的管理效率有重大的作用。气象雷达和水文模型相结合的洪旱灾害预警系统，能够在灾害发生之前数小时甚至数天就对即将发生的灾情做出预测，从而给管理者争取到宝贵的应对时间。在抗旱调度中，系统能够根据有限的水源存量来自动生成保证生活用水、兼顾生产用水的调配方案；在

防洪排涝中，系统能准确控制泵站群的启停组合，达到用最小能耗获得最快排水的目的。在极端情况下仍能精准控制的能力，是传统的人经验所不能达到的，极大地提高了农田水利工程的防灾减灾效果和安全保障水平。

二、管理需求引领技术创新

（一）管理实践中的痛点成为技术创新的源泉

基层农田水利工程分布零散、广泛，大多位于野外，所处的管护环境复杂。设备被盗、人为破坏、供电困难等一直影响着管理者。由此产生了各种专门的技术来解决。为了应对野外设备取电难、布线贵的问题，研发人员开发出基于 LoRa、NB-IoT 等低功耗广域网的无线传输技术以及高效太阳能加锂电池自供电系统，使得监测设备可以长时间不需要外接电源工作。技术创新的动力完全是为了解决供电的卡脖子问题而产生的迫切需要。

针对渠道闸门被非法开启、水资源被盗窃问题的管理难题，防盗防破坏技术应运而生。新一代智能闸门采用高强度防撬材料、隐蔽式锁具，并且还可以对震动进行报警、摄像头拍照。非授权暴力开启行为被检测到之后，闸门会立刻发出警报，并将图像实时上传到管理中心。为了解决由于偏远地区信号覆盖弱造成的数据传输中断的问题，多模通信融合技术也被使用进来，设备可以自动在 4G、5G、北斗卫星短报文等通信方式之间切换，保证在任何极端环境下管理指令都能够准确下达。各项技术的研创与应用，哪一个不是修补管理漏洞、回应一线管护人员强烈诉求的举措呢？

由于农田水利工程常常因为资金短缺而无法支付昂贵的专业维护费用，所以技术发展也偏向于免维护或者少维护。科研机构、企业为满足这一要求，研发出自清洗传感器、耐腐蚀耐磨的水工材料和磁悬浮无轴承水泵等。革新使设备的保养周期大大的延长，降低了对专业维修人员的依赖，使技术产品更适合基层粗放的使用环境。由此可见，正是管理层对降低运维成本、提高设备可靠性不懈的追求，促使着相关的硬件技术不断更新换代。

（二）精细化管理要求更高水平的技术支撑

随着水资源刚性约束制度的建立，农田水利管理的目标也从单纯的保证灌溉，转变为水资源的高效利用和生态环境的协同保护。精细化管理目标的提高，给技术支持提出更高的要求。为了满足总量控制和定额管理的要求，传统的机械式水

表已经不能胜任，需要开发出量程比大、始动流量小、能抵抗水中杂质干扰的超声波或电磁流量计。对计量精度的高要求，使流体计量科学在农业领域得到越来越深的应用，测量技术也从实验室走向了田间地头。

农田水利精细化管理中的技术需求示例

领域	管理目标	传统方式痛点	新技术支撑与成果
水资源计量	总量控制与定额管理	机械水表精度不足，易受杂质影响	超声波 / 电磁流量计（高精度、宽量程）
生态保护	水质监测与生态流量控制	缺乏实时数据，污染难及时发现	多参数水质在线监测传感器，生态调度算法
面源污染治理	农田退水精准管理	退水直接排放，污染风险高	生态沟渠构建，智慧排水控制技术
灌溉制度优化	作物精准灌溉	经验判断，效率低，浪费大	农业大数据挖掘，作物生长模拟技术

从上表可知，生态农业的发展要求灌溉水既要满足作物的生长，又要满足农田生态系统健康的需求。因此，技术创新就要体现在水质检测和生态流量的调控上。新型多参数水质在线监测传感器被开发出来，可以实时监测灌溉水中的氮磷含量、重金属指标和农药残留，当超标时就立即联动闸门停止供水，防止土壤污染。同时为了保证河湖生态流量，在智能闸控系统中加入了生态调度算法，在满足生态基流的基础上进行农业配水。这样一种生态和生产并重的精细化管理逻辑，使水利工程技术同环境科学技术产生了交叉融合的趋势。

在农业面源污染精细化治理方面，要对农田退水实行精准管理。于是生态沟渠的构建技术与智慧排水控制技术就融合在一起。通过在排水口设置智能控制装置，根据沟渠内植物对氮磷的吸收降解规律，精准控制排水的停留时间，达到“边排边治”的效果。工程设施同生物技术相融合的创新，完全是对现代水利管理中“水清岸绿”生态环保要求的回应，体现了管理目标升级对技术维度的拓展作用。

与此同时，由于作物种植结构的改变，灌溉制度变得越来越复杂，不同作物对水分的敏感程度大不一样。按照作物全生命周期的需水规律进行精准灌溉，就需要建立包含气象、土壤、作物生理等多维信息的智能决策模型。这促进了农业大数据挖掘技术、作物生长模拟技术的发展，科研人员努力研究更加精确的蒸发蒸腾量计算公式、作物水分生产函数，以满足精细化管理中“适时、适量、适位”的极致灌溉要求。

（三）用户需求导向的技术研发方向

农田水利工程最终使用者是广大农户和基层用水组织，他们使用的感觉以及接受程度直接影响到技术的推广使用。因此用户需求成了技术开发的指南针。

因为农村地区人口老龄化严重，留守老人对复杂的电子设备的操作能力较差，所以要求技术产品具有很高的易用性。研发方向因此转向傻瓜式操作界面和一键式管理系统。像智能灌溉 APP 变得越来越简单，大字体、语音提示、图示引导成了标配，还推出了不需要智能手机，刷卡或者遥控器就能完成灌溉的简易终端。完全按照用户特征进行的老龄化、人性化的定向创新，降低了技术应用门槛，打通了技术落地的最后一公里。

农户对于成本很敏感，昂贵的贵族技术在基层很难存活下来。于是技术创新只能走低成本的路。材料科学家在寻找性能优良的工程塑料来代替昂贵的金属制造阀门、管道；电子工程师用芯片集成化设计、大规模生产的方法使传感器的成本降低。以性价比为研发导向，促成简单的水肥一体化设备、便携式智能流量计等物美价廉的产品大量出现，使现代化灌溉技术真正惠及普通的小农户。

用户对于售后服务的便捷性也有了很高的要求。为解决设备损坏后无人修理的问题，在技术研发时引入远程诊断和模块化设计思想。现代化的智能控制器一般都具有自检功能，可以将故障代码远程发到厂家技术人员的大脑上，实现远程排障。硬件结构方面，模块化使用户不用专业工具，损坏一个模块，换上新的就可以继续使用。由于这项技术的改进是基于用户的维护便利性，因此极大地提高了用户对新技术的信任度和满意度，反过来又促进了新技术的推广使用。可以说，正因对用户需求有深刻的认识并作出积极回应，才使得农田水利技术创新具有了旺盛的生命力。

第三节 多层次协同治理机制

一、政府、市场、社会多元共治

（一）明确各主体的权责边界与协同方式

多元共治的背景下政府角色要从“全能划桨者”变为“掌舵者”。其主要职能就是制订科学的规划标准，提供必要的基础财政资金支持，建立严格的管理制度。大型骨干工程、公益性较强的末级渠系，政府要兜底，保障国家的粮食安全

和生态底线。相反,市场主体应该充分发挥自身在资源配置中高效的优点,通过特许经营、委托运营等方式参与田间工程的维护和经营管理,用价格杠杆调节用水需求,从而促进水资源的节约集约高效利用。社会主体主要包括广大农户和各种用水合作组织,是工程的直接受益者和最终使用者,有责任参加日常看护、按时交合理用水费并积极反馈使用体验和建议。

三者之间不能只停留在口号上,而应该落实到具体的法律契约和制度安排上。政府可以通过购买服务的形式将原由事业单位承担的维修养护工作,通过招投标的方式交给专业的公司或者农民合作社来执行。过程中一定要形成详细的权力清单和责任清单,明确工程所有权、管理权、使用权的分立与合并。只有产权清晰,市场主体才会愿意进行长期投资,社会主体才会真正产生主人翁意识。权责法定是杜绝在治理中产生推诿、责任不清问题的主要制度保证。

（二）构建信息共享、决策协商的平台

信息不对称是制约多元主体协同的痼疾。往往政府掌握政策资源,企业掌握技术数据,农户掌握现场实况,三者之间存在着巨大的信息鸿沟。因此创建一个统一的信息共享平台,是打破僵局的有效办法。利用现在的物联网、大数据、云计算等技术建立一个综合数据库,将水源、工程运作参数、灌溉用水量、水费收缴情况等信息实时汇集到一起。该平台需要向全部的利益相关方开放不同权限的接口,政府可以随时了解工程绩效,企业可以随时调配维护资源,农户可以随时查看用水账单和政策变动。

在此基础上,建立实体化的协商议事机构,就是信息平台的有效补充。在村镇层面可以成立由政府代表、技术专家、企业负责人、农户代表等组成的“水事理事会”或者“灌溉管理委员会”,定期召开联席会议。协商平台主要是解决工程建设以及管护过程中出现的各种矛盾。灌溉高峰期的水量分配、水价调整的听证、工程维修方案的确定等,通过面对面的沟通协商,寻求各方利益的最大公约数,把矛盾化解在基层。

（三）形成优势互补、合作共赢的格局

多元共治的最终目的是各方都受益,而不仅仅是责任分担。只有当各个参与主体都能从协同治理中得到正向激励的时候,该模式才具有可持续性。政府采用市场机制和社会力量,不但可以减轻财政负担,而且可以提高公共服务质量,进而提高行政效率。市场主体不仅可以获得合理的投资回报,而且在技术创新过程

中还可以降低农业服务业的运营成本，开拓新的农业服务领域。广大农户作为社会主体参与治理后，用水更加可靠、综合用水成本降低，农业生产效益也得到了提高。

为了使良性循环得到维持并加以巩固，必须要设计出精巧的利益绑定机制。积极推进水权交易改革，将节约下来的水指标上市交易，收益按比例分配给国家、集体、农户，充分调动全社会节水的积极性。在基础设施建设方面，可以实行公私合作模式，让社会资本通过土地流转、发展设施农业等手段来获取水利工程周边的收益，把其中的一部分收益反哺给水利工程日常管护费用。这种“以水养水、以地养水”的新方式，把单一的公益性投入变成带有自我造血功能的产业链条，从根子上冲破了基层农田水利工程“有人建、没人管、无钱修”的困局。

二、纵向协同

（一）加强顶层设计与基层创新的良性互动

中央政府在农田水利建设中担负着宏观调控和战略规划的重大责任，要制订出国家层面的水利发展蓝图及标准。顶层设计一般具有普适性与指导性，但遇到千差万别的地域环境和农业生产方式时，就一定要留出足够的弹性空间。地方政府，尤其是县乡两级，直接面对具体的工程和农户，最清楚一线实际的需求和痛点。因此加强纵向协同，上级部门在制定政策时要充分调研，尊重地方差异性，不能一概而论地使用行政命令。

激励基层创新，是保持治理体系活力的关键。各地实践中摸索出的“农业水价综合改革”和用水户协会实体化运作等经验，就是解决实际问题的“金钥匙”。上级部门要建立包容试错、鼓励探索的机制，对基层涌现出来的有效治理模式及时总结提炼。建立国家级或者省级的试点示范区，把局部成功的经验上升为区域性的乃至全国性的政策规范，实现从点突破到面推广。由此形成自上而下的规划引领、自下而上的经验反馈、纵向协同的动态闭环，既要有高度、也要有温度。

（二）完善跨层级的事权与财权划分

长期以来，基层农田水利建设存在着事权下移而财权上收的矛盾。县乡基层政府是大部分建设组织和管护责任的执行者，但是它的财政实力却很难满足巨大的资金需求。健全跨层级的事权与财权分配机制，是理顺纵向协同关系的前提。必须坚持事权和支出责任相适应的原则，重新梳理各级政府的责任清单。跨区域、

受益面广的大型重点水利工程由中央和省级财政承担主要投资责任，区域性的中型工程由市、县两级财政统筹安排，田间地头的微型工程可采取奖补结合的方式，调动村集体和农户的参与积极性。

资金拨付和管理上必须改变条块分割、撒胡椒面式的投入方式。建立涉农资金整合机制，将分散在发展改革、财政、水利、农业农村、自然资源等各个部门的钱打包整合，在县一级进行统筹使用，集中力量办大事。此外要加大对产粮大县、财政困难县的转移支付力度，保证基层政府有管护能力。还应探索建立稳定的管护经费保障机制，把农田水利设施维修养护资金列入各级财政预算，防止重建轻管，保证每一分财政资金都变成实实在在的灌溉效益。

（三）建立政策传导与执行反馈机制

政策从制定到执行要经过较长的行政链条，过程中容易出现信号衰减或者扭曲。建立高效的政策传导机制，才能保证纵向协同的执行力。运用现代政务办公系统、数字化管理手段，可使政策文件扁平化下达，减少中间环节的滞后、干扰。上级部门要通过定期的督导检查、绩效考评、专项审计等方式对下级政府的政策执行过程进行全方位的监督，保证政令畅通。

执行反馈机制也不能缺少。基层在执行政策过程中遇到的实际问题、技术难题、民众需求等都需要有顺畅无阻的渠道上达到上级部门。建立起直通车制度或者定点联系制度，让基层的声音可以直接传到决策层那里。双向互动的沟通机制一方面可以使上级部门及时调整、改善所执行的政策，同时也可以给基层干部执行政策的信心提供保证。当考核指标和激励机制紧密结合起来，把高标准农田建设管护成果作为地方政府绩效考核体系中的关键部分，作为评优评先和资金分配的重要依据时，纵向协同的内在动力就会被充分激发出来，从而形成上下一心、步调一致的治理态势。

三、横向协同

（一）打破部门壁垒，建立跨部门协调机制

农田水利建设牵涉到水利、农业农村、自然资源、发展改革、财政等许多职能部门。由于部门利益固化以及职能交叉，容易造成规划冲突、标准不一、重复建设等问题。例如农业部门负责高标准农田建设中的田间工程，水利部门负责水源骨干工程，如果两者规划不衔接，就会出现有水进不去田或者田好了水不来的

情况。因此必须建立高规格的跨部门协调机制，即成立以政府主要领导为组长的农田水利建设领导小组，协调各部门的规划编制、项目审批、资金安排等各项工作。

跨部门协调机制的关键突破

环节	具体内容	目的
多规合一	对各部门农田水利规划图斑叠加比对，统一建设标准和技术规范。	消除规划矛盾，确保“一张蓝图绘到底”。
信息共享	水文、气象、墒情、耕地红线等数据实时共享。	为科学调度、精准灌溉提供数据支撑。
联合执法	对非法取水、破坏水利设施等违法行为实行多部门联合执法。	提高执法效率，震慑违法行为。

在经过这些突破以后，可以有效提升协同效果，表4跨部门协作机制关键突破。并且要形成部门间的信息共享、联合执法的机制。水利部门的水文数据、气象部门的降雨预测，农业部门的墒情资料，自然资源部门的耕地红线数据等等，应该达到实时的共享，从而为科学的调度以及精准的灌溉提供可靠的数据支持。对于非法取水、破坏水利设施等违法行为，由有关部门实行联合执法，共同加以打击。

（二）推动跨区域、跨流域的协同治理

水资源具有流动性，因此农田水利治理不能只局限于某一个行政区划内。上下游之间、左右岸之间往往存在着用水权益的博弈。上游过度截流会导致下游断流，下游排水不畅会造成上游内涝。因此推进跨区域、跨流域的协同治理就要建立流域尺度为基础的协商对话机制。流域管理机构应该充分发挥统筹协调的作用，组织各相关行政区域的地方政府签订用水协议，明确各方的取水定额、排水标准和生态流量下泄责任。

生态补偿机制属于调节跨区域利益平衡的杠杆。受益区应当向下游受损区或者上游水源保护区支付合理的生态补偿金，以补偿其因保护水资源而放弃的发展机会成本。跨界河流治理可以实行升级版的河长制，在跨界河流上设立跨界联合河长，定期进行联合巡河、交叉检查。对跨区域的大型灌区，应打破行政区划的限制，设立统一的灌区管理机构，实行垂直管理或者双重管理，统一调度水资源、统一维护骨干工程，以达到灌溉效益的最大化和区域发展的公平化。

（三）促进基础设施共建共享与管理联动

在农田水利基础设施建设中，相邻区域或者不同的项目之间存在着资源共享

的可能性。相邻的两个乡镇可以共用一座大型泵站或者一条输水干渠，既可以避免重复建设投资，又可以节约土地、资金。这就要求规划部门在立项之初就要从区域整体出发，用科学的选址、管网布局的方法来实现服务半径的最优覆盖。

管理联动给硬件共享赋予了软性保证。共用的基础设施各方都应当一起拟定管护条例，组成联合管护组并依照受益程度来分担运行维护费用。抗旱防汛等特殊时期必须建立应急联动响应机制，统一调度区域内机井、泵站、抗旱物资，真正实现一方有难八方支援。从技术上来说，实现互联互通各个区域的自动化控制系统与云平台，采用远程监控、智能联控的方式对各个区域进行管理，可以大大提高管理的精细化程度，也给跨区资源调度提供了技术上的可能。硬件加软件全部横向打通之后，整个基层农田水利工程的防风险能力与服务水平就会被显著改善。

第四节 未来发展趋势预测

一、技术发展趋势

（一）人工智能与大数据深度应用

数据要素正在成为继土地、劳动力、资本、技术之后的第五大生产要素，深入到基层农田水利的各个环节。传统的依靠经验进行灌溉的方式正在被大数据分析之下，由人工智能算法与大数据相结合而做出的精确决策所取代。田间的感知终端可以全天候对气象信息、土壤墒情、作物长势、水利设施运行状况等各种信息进行采集。这些数据汇集到云端之后，深度学习模型就能体现出强大的算力优势，对作物需水规律实施动态模拟与预测。系统不再像以往那样按照固定的灌溉计划机械地进行灌溉工作，而是根据实时的环境参数和作物生长的生理周期，生成最合适的配水方案，实现了从“浇地”到“浇作物”的转变。

数字孪生技术出现以后，给基层水利工程运行维护带来革命性的变化。在虚拟空间里创建与物理实体高度匹配的数字模型，管理者可以对灌区水流运动、设施损耗等开展全流程模拟。不仅可以实时反映工程当前的情况，还可以预测未来可能会出现险情或故障。当传感器检测到某个地方渠道流速异常或者水泵振动频率变化的时候，人工智能系统可以立即发现淤积风险或者设备故障的迹象，并

自动产生预警信息以及处理建议。此种预测性维护方式极大地减少了由于突发故障所造成的停水风险，使工程设施使用寿命得以延长，而且显著降低了人工巡检成本以及盲区。

伴随着算法的不断更新，水利大数据的应用也越来越社会化。根据农田水利大数据分析结果可以为农业保险定损、信贷评估提供准确的数据支撑，也可以为区域种植结构调整提供科学依据。智能算法对于复杂的非线性水文过程有着明显的优势，因此灌区水资源调度更加精细。多水源联合调度情况下，人工智能会考虑地表水、地下水、再生水等各种水源之间互相转换的关系，以毫秒级的速度计算出既能满足作物生长需要，又能保持地下水位平衡的最佳调度方案，从而在更大范围内实现水资源高效利用和生态保护的动态平衡。

（二）新材料、新能源技术的突破性应用

材料科学新的突破将会使农田水利工程结构形式和耐久性发生改变。传统的混凝土渠道、土渠在长期运行过程中会出现冻胀破坏、渗漏损失大、易长青苔杂草等现象，而新型高分子复合材料、纳米改性材料的出现，给解决这些问题带来了可能。

水利工程新型材料特点

材料类型	关键特性	优势应用
自修复智能混凝土	内部含修复剂，遇微裂缝自动固化	渠道衬砌、泵站建设，降低维护成本
高性能土工合成材料	抗拉强度高、耐老化	防渗工程、长距离输水渠道，适应复杂地质和极端气候
生态型护坡材料	兼顾工程防护与生物生长	渠道边坡，维护农田生态系统连续性

如上表所示，新型材料加入以后可以大大提高工程的安全性、环保性。具有自修复功能的智能混凝土正在逐渐走出实验室，被应用到渠道衬砌、泵站建设中。该材料内部包裹着一种修复剂，当存在微裂缝的时候就会自动释放并立即固化，从而有效阻止了渗漏通道，极大程度地缩减了工程全生命周期的维护成本。高性能土工合成材料在防渗工程中应用越来越广，它具有很好的抗拉强度和耐老化性能，在复杂地质条件下修建长距离输水渠道成为可能，尤其在各种极端气候环境下，新型柔性防渗材料比传统的刚性材料有更好的适应性。

与此同时，新能源技术同水利设施的融合正在重新塑造基层水利能源供应体

系。偏远的农牧区或者电网难以到达的地方，光伏提水系统有很强的生命力。这已经不是简单的“光伏+水泵”了，这是“光储直柔”在灌溉系统里的深入应用。新型光伏水利系统可以按照日照强度来调节水泵转速，实现日出而作、日落而息的自动化灌溉，同时利用储能设备，在夜间用低谷电价或者储存的绿色能源进行补充。这完全解决了能源缺乏造成的“有水灌不了”问题，大幅度减少了农业灌溉的碳排放，符合世界农业绿色低碳发展的大趋势。

（三）空天地一体化监测网络的形成

单一的监测手段已经不能满足现代农田水利对时空分辨率的高要求了，建立空天地一体化的立体感知网络已势在必行。该网络体系冲破了传统监测在空间和时间上的束缚，把宏观的卫星遥感，中观的无人机巡检，微观的地面物联网传感器有机地融合起来，产生全覆盖，无死角的感知能力。

高分辨率对地观测卫星就像“天眼”一样，可以对大范围的灌区进行周期性的扫描。利用多光谱和高光谱遥感技术，卫星可以对一个区域内土壤水分、农作物种植结构、旱涝灾害发展情况等进行准确的反演。宏观视角的数据对流域水资源调配、跨区域应急调度有不可替代的战略价值。与此相配合的是处于中观层面的无人机低空遥感系统，它具有极高的机动性和灵活性，可以对重点渠道、难以到达的深山取水口等进行高精度的贴近摄影测量。搭载激光雷达的无人机可以穿透植被覆盖，准确获取渠道断面的几何参数，及时发现因地质沉降或者人为破坏造成的输水瓶颈。

地面端的物联网感知体系便成了整个监测网络的“神经末梢”。新一代智能传感器具有低功耗、远距离传输、边缘计算等特点，被大量布设在重要的分水闸、量水堰、田间土壤剖面里。传感器不再只是传送原始数据，在终端处会对采集到的数据做初步的清洗和异常判断，从而减轻通讯网络的负担。这三层监测网络并不是孤立的，而是通过统一的数据融合平台进行交互的。当天空中的卫星检测到某个区域的植被指数出现异常时，系统就调度最近的无人机去实地调查，并将图像实时传送到地面巡查人员处，同时联合地下的土壤水分传感器做比对。天上看、空中探、地上查的协同作业模式，使得农田水利的监管能力实现了质的飞跃，每一滴水的流向都清晰可见，每一个工程隐患都无处遁形。

二、管理发展趋势

（一）从工程管理向资源与生态管理转变

长期以来，基层农田水利的管理重点是工程设施安全运行和输水效率，即把水送达到。伴随生态文明理念的推广以及水资源刚性约束的加大，管理目标发生了根本性的位移，从工程管理向水资源、水生态综合管理转变。这就意味着，评价一个水利工程好不好，不再仅仅是看渠道是否完好、流速是否达标，还要看它是否适合区域水资源承载能力、是否对生态环境友好。

未来的管理模式会将水看作是有生命力的生态要素，而不仅仅是生产资料。生态流量保障将成为工程设计和维护中不能越过的红线。渠道不再是裸露的混凝土沟槽，生态型护坡、生物通道的设计将成为标配，保证水利设施不会割裂农田生态系统的连续性，为两栖动物、水生生物留出生存空间。水资源配置上总量控制、定额管理会更加严格，水权交易机制也将从理论走向田间。管理者应像管理资产那样去管理水资源，建立详细的水账户体系，每一立方水使用都将有迹可循、有价可依。

而且在退水环节上也有所重视。传统管理会忽略灌溉退水给环境带来的影响，但未来的生态管理模式会把退水治理包含在闭环里。通过建设生态沟渠、人工湿地等工程设施拦截、净化农田退水中的氮磷，实现循环利用或者达标排放。这就需要管理者有更广阔的视野，把农田水利系统当作流域生态系统的一部分，在保证农业生产用水的前提下，主动承担涵养水源、改善小气候、维护生物多样性的生态责任，实现生产效益和生态效益的帕累托改进。

（二）从分散管理向系统化、流域化管理转变

传统的基层农田水利管理，由于受行政区划的限制，往往存在着碎片化的问题。同一条河流、同一个灌区由于跨越了不同的乡镇、村庄，可能会造成管理标准不一、调度指令冲突的情况，上游漫灌，下游喊渴或者有钱建、没钱管的情况。所以未来必然会打破行政壁垒，走向流域化系统化的统一管理。

系统化管理就是对源、渠、田、排整个过程进行整体控制。这就需要建立跨行政区域的灌区管理机构或者协调机制，对骨干工程和田间微灌工程实行统一规划、统一标准、统一调度。依靠信息化的手段，把原本各自为政的各个泵站、闸门联结成一个整体，上下游水量可以精确对应。以大型灌区为例，干渠的输水计

划会与支渠、斗渠乃至农渠的配水需求实时挂钩，中间环节的信息不对等、管理脱节将会被消除。

流域化管理需要跳出单个灌区的视野，从整个流域的水资源平衡角度统筹。农田水利不再是孤立的用水单元，而是流域防洪、排涝、抗旱体系中的重要一环。

流域化管理核心策略

策略类别	具体内容	预期效益
资源调度	建立流域水资源调度中心，统筹农业、生活、生态用水	优化水资源分配，应对枯丰水期变化
综合治理	推行路、渠、林、田综合治理模式，结合高标准农田建设	实现山水林田湖草沙系统治理，提升整体生态效应
体制改革	赋予流域管理机构更大权力与协调能力，法律明确权责	从根本上解决基层水利“最后一公里”瓶颈，实现水资源最优配置

上表为流域化管理的主要策略。具体来说，需要建立流域水资源调度中心，统筹协调好农业用水、生活用水、生态用水三者之间的关系，在枯水期保证生活用水，丰水期利用农田水利设施调蓄雨洪资源。同时推行路、渠、林、田综合治理，将农田水利建设与高标准农田建设、国土空间整治、小流域生态修复等有机融合，推进山水林田湖草沙系统治理。

这就需要管理体制进行深层次的改革，赋予流域管理机构更大的权力及协调能力，用法律来确定各个行政主体在流域水资源管理中的权利和义务。只有建立起系统化的、流域性的管理格局，才能从根本上解决基层水利最后一公里的瓶颈问题，达到水资源更大空间尺度上的最佳配置。

（三）从政府主导向多元协同治理转变

过去几十年里，基层农田水利建设管理主要依靠政府财政投入和行政推动，初期以“保姆式”管理为主，起到了很好的作用，但是也逐渐暴露出了财政负担重、管护效率低、农民主体缺失等问题。存量资产越来越大，服务需求越来越多，单一的政府主政模式已经不能适应，政府+市场+社会多元协同治理成为必然。

将来的治理结构会是开放的生态系统。政府由包办操盘者变为规则制定者、基本公共服务提供者，主要就是政策指导、规划制定、监管考核。采用特许经营、政府购买服务、公私合营等方式，将大量的建设、管护工作交由市场主体承担。专业的第三方水务公司、物业化管理公司依靠技术优势和管理经验来承担灌区的日常运维工作，用企业化的经营理念来降低漏损、节约能耗、开展综合经营获取

收益，从而达到工程管护良性循环。

农民用水合作组织在治理体系中会起到重要作用。直接受益者农民的主体地位会得到实质性的加强。通过赋权赋能，用水协会拥有水权分配、水费收取、工程维护的权利和责任，调动起农民内在参与管护的动力。未来的用水协会不会只是挂个名的组织，而会成为有独立法人资格、规范运作的互助组织。由于农村土地流转的加速，家庭农场、农业合作社等新型农业经营主体也会成为重要的管护力量。多元主体以契约为基础，形成利益共同体，实行政府主导、市场运作、农户参与、协会自治的新型治理机制，形成风险共担、利益共享的协同治理格局。

第五节 中国方案与国际合作前景

一、中国经验的总结与提炼

（一）大规模基础设施建设与现代化改造经验

中国在农田水利基础设施建设中体现出来的动员能力与执行效率，无疑是十分突出的。国家通过制定中长期水利发展规划，把农田水利建设放在国家粮食安全战略的重要位置上，保证资金投入的连续性以及工程建设的系统性。从早年的肩挑背扛修水库的艰苦奋斗，到如今的大型灌区续建配套和节水改造的精准实施，中国一直坚持着集中力量办大事的原则，可以在短时间内调动大量的资源。依靠跨区域的水资源调配工程和田间地头到处可见的“毛细血管”，中国形成了一张覆盖全国、保障有力的灌溉网。这样的建设模式很好地解决了水资源在空间上分布不均的先天不足，并且标准化的工程施工，提高了农业抵抗自然灾害的能力。

（二）政府主导与农民参与相结合的管理模式

在中国长期的农田水利管理实践当中，渐渐产生了一种以政府为主导，农民参与的双层管理形式。政府起规划者、投资者、监管者的角色，主要对骨干工程的修建、守护工作进行规划，同时制定法律法规和政策标准。政府依靠中央财政转移支付和地方配套资金，承担了大部分具有准公共产品性质的水利工程建设成本，有效地解决了农业水利建设投资大、回报周期长的问题。但是单靠政府力量很难触及田间地头的末级渠系，所以激发受益主体的内生动力成为解决问题的关键。

为了解决最后一公里的管护问题，各地积极培育用水合作组织，推行农民用水户协会等多种形式的农民参与机制。在政府的领导下，基层自治组织对支渠以下田间工程进行日常维护、用水管理、水费收取等工作。农民也由被动接受者变成了工程的主人翁，并参与到水利工程全生命周期的管理之中。既可以大大降低国家运营管理用水成本，又形成了公平透明的用水秩序，降低了用水矛盾，并提高了灌溉服务响应速度和精确性。

随着农村产权制度改革，这种管理模式也不断变化。部分地区实行小型农田水利工程产权流转，将产权归村集体或者农民用水合作组织所有，颁发产权证，明确了管护主体和责任。与之相配套的是农业水价综合改革，用精准补贴、节水奖励的方式来保证工程良性运行的经费需求，用经济杠杆引导农民自觉节水。政府与市场“双管齐下”，行政推动和社会参与“互相补充”的治理结构，较好地解决了“公地悲剧”问题，保证了农田水利工程“建得成、用得起、管得好、长受益”。

（三）精准扶贫与乡村振兴中的水利实践

水利是农业的命脉，也是消除贫困的基础。农田水利创建在中国脱贫攻坚的宏大叙事里有着无法替代的先导地位。我国贫困地区水资源短缺、基础设施建设水平较低，因此中国在农村饮水安全巩固提升工程、特色产业灌溉配套工程上做了大量的工作。精准识别贫困村、贫困户的用水需求，根据当地的实际情况修建了大量的中小型水利工程，即小水窖、小水池、小泵站等，彻底解决了农村人口的饮水安全问题，同时也为贫困地区发展蔬菜、果林、中药材等高附加值特色农业提供了可靠的水源保障。“以水兴产、以产富民”的实践路径清晰表明了水利基础设施对打破贫困代际传递、增强贫困地区“造血”功能的重要意义。

进入乡村振兴阶段之后，水利实践的内涵才被进一步地拓展和加深。水利建设不再只具有生产功能，而是向生态宜居、乡风文明等各方面延伸。各地按照美丽乡村建设的要求开展农村水系综合整治，疏浚河道、建设生态护坡、打造亲水景观等，大大改善了农村人居环境，也促进了乡村旅游等新业态的发展。水利工程也就成了生产、生活、生态的纽带，水环境的好转也提高了乡村的总体吸引力和发展水平。

中国的实践证明，农田水利建设要与国家宏观战略紧密结合。各个发展阶段的水利建设重点不一样，从一开始的“保生存、保吃饭”转变为后来的“保生态、

促发展”。向老少边穷地区倾斜水利投入，发挥水利基础设施的溢出效应，带动整个区域经济整体跃升，走出一条有中国特色的水利扶贫和乡村振兴之路。这对处于贫困陷阱中全球农业国家有非常现实的意义，它清楚地表明了怎样通过准确投放基础设施来实现包容性增长。

二、中国方案的全球贡献

（一）为发展中国家提供可借鉴的发展路径

长期以来，国际上关于农田水利建设的主流话语大多由发达国家主导，其推崇的大规模、高投入、高技术模式对于许多资金匮乏、技术薄弱的发展中国家来说，常常“水土不服”。中国是世界上最大的发展中国家，其农田水利发展过程是从低水平到高水平、从人工到机械化智能化的完整渐进过程。“阶梯式”的发展道路对于广大亚非拉国家来说更具有亲和力和可操作性。中国方案强调的是用适宜技术同本土资源相融合，依据各国的经济发展状况、自然环境条件挑选最恰当的灌溉模式和管理体制，不是简单照搬国外的先进水准。

中国方案以实用性、普惠性为特点。在很多发展中国家，小农户仍然是农业生产的主要力量，这与中国的农业经营现状非常接近。中国在小农经济基础上形成的“统分结合”灌溉管理模式、低成本高效率的节水技术、“群管群防”基层治理模式，可以直接对接上述国家的需求。中国推广的小型农田水利工程建设模式投资少、见效快、易维护，尤其适合财政能力弱的国家快速提高农业生产能力。

更重要的是，中国方案提出的是以人为本的发展理念。水利建设不但是一个工程性的问题，也是民生政治问题。分享中国政府责任落实、社会资本的介绍、农民权益保障等制度设计，有利于发展中国家建立更加公平、高效的水治理架构。依靠相似的历史背景和发展阶段进行经验交流，可以大大降低发展中国家在探索现代化道路中所付出的试错成本，也能提高发展中国家独立自主解决粮食安全问题的信心和能力。

（二）在“一带一路”倡议下分享技术与经验

共建“一带一路”倡议给中国的农田水利技术与经验走向世界提供了广阔的舞台。中国不再只是工程承包方，还会是技术标准、管理经验的输出国。中国企业及科研机构以双边合作机制为依托，在沿线国家开展了诸多农田水利基础设施建设。除水库、大坝等硬件设施的建设外，还包括规划设计、施工建设、运行管

理过程中所有的技术标准输出。在东南亚、中亚、非洲等地区，中国援助建设的灌溉工程极大地改善了当地的农业生产条件，使许多以前依靠雨养的农田变成了旱涝保收的良田。

该合作模式的主要特点就是技术转移、人才培养。依靠境外经贸合作区、农业技术示范中心，中国大规模举办农业水利技术培训，教当地技术人员和农民先进的灌溉技术以及设备的操作保养技术。设立鲁班工坊等职业教育平台，培养了一大批懂技术、会管理的水利专业人才，提高了东道国水利发展的内生动力。这样的授人以渔合作方式，保证了援助项目移交之后可以长期稳定运转，避免了以往国际援助中重建轻管理的问题。

（三）参与全球水治理规则制定

随着综合国力的不断提高，中国对全球水治理体系的建设与改革参与的更加深入，也努力把中国的智慧转化为国际规则。在全球水资源短缺、气候变化越来越严重的情况下，传统的水治理规则受到了很大的冲击，迫切需要新的理念和方法。中国依靠世界水论坛、国际灌溉排水委员会这些国际多边平台，大肆宣传“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水理念，使得国际社会对水资源管理里的公平与效率再次认识。中国是国际公约的坚定履约方，也是全球水治理议程的重要设置方，举办高级别水利国际会议、发布行业发展报告、主导制定一批国际水利技术标准，有效地提高了在全球水治理中的话语权。

中国所提跨界河流合作“互利共赢、协商对话”原则，给全球复杂的水外交争端提供了一个建设性的范例。与主张零和博弈、对抗思维的人不一样，中国主张采用联合开发、数据共享、生态补偿的办法，把跨境水资源变成沿岸国家合作的纽带。该立场得到了国际社会的普遍认同，对于水资源争端频发地区而言，中国提出的和平合作开发模式有重要的借鉴意义。

中国会进一步同国际组织及各国进行合作，促进建立更加公平合理的全球水资源治理体系。中国正在积极推动联合国 2030 年可持续发展议程中有关水的目标，消除饥饿，建设清洁用水设施，履行大国责任；中国提倡“人水和谐”的全球生态文明理念，主张各国共同应对极端气候水灾害，保护水资源生态系统。从输出中国方案到参与规则制定，中国由全球农田水利治理的参与者变成引领者，为解决人类共同的水安全问题提供不可替代的中国方案。

参考文献

- [1] 王莉,李依恒,赵富强,等.智慧赋能与多元联动:河南省小型水利设施协同治理创新研究[J].南方农机, 2025(z1).
- [2] 金军华,周先水.探析农业农田水利灌溉与排水工程管理[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2024(003):000.
- [3] 杨鸿昀.农村水利设施投入机制及其效率研究——以云南省为例[D].云南财经大学[2025-12-10].
- [4] 笛 张,庆帅 王.农田水利工程中高效节水灌溉技术的实践探讨[J].水电科技, 2024, 7(2):44.
- [5] 李林珠.贵州都匀:农田水利工程协同管理新模式探讨[J].中国农村科技, 2025 (5):38-40.
- [6] 刘毅添.乡村振兴背景下广东佛冈县农田水利项目运维体系构建[J].农业工程技术, 2025, 45(19):60.
- [7] 田芬.小型农田水利工程建后管护多元主体协同模式探究——以甘肃省嘉峪关市为例[J].农业科技创新, 2025(8).
- [8] 蔡荣,马旺林,郭晓东.小型农田水利设施合作供给的农户意愿实证分析——以盐城市农田灌溉水渠改造为例[J].资源科学, 2014(12):10.
- [9] 刘振国.基于乡村振兴背景的农田水利工程建设探讨[J].今日农业, 2022(21): 0034-0034.
- [10] 王保民,张文煜.小型灌区农田水利渠道设计及施工探讨[J].建筑工程技术与设计, 2018, 000(003):1490.
- [11] 刘海英,李大胜.农田水利设施多中心治理研究——基于供给效率的分析[J].贵州社会科学, 2014(5):5.
- [12] 张森,郭占锋.中国古代农业技术对现代农业发展的启示[J].农业现代化研究, 2019, 40(6):9.
- [13] 李剑.乡村振兴背景下农田水利管护绩效提升研究[D].河南科技大学[2025-12-10].

- [14] 卢鹏,郭庆.信息化技术在农田水利工程施工管理中的应用[J].农业科技创新, 2025(5).
- [15] 李晶晶,华坚.基于VAR模型的农业基础建设对低碳农业影响研究——以江苏省为例[J].陕西农业科学, 2017, 63(6):4.
- [16] 霍仁龙.云南山区农田水利建设演变的量化研究(1950—1980)[J].中国经济史研究, 2019(4):13.
- [17] 刘继龙,任高奇,付强,等.黑土区玉米地土壤水分的时空变异性研究[J].应用基础与工程科学学报, 2016(6):13.
- [18] 冯钊,孙宁.智能化管理系统在农田水利中的应用探索[J].奥秘, 2024(22): 262-264.
- [19] 孙连波.新时代农村小型农田水利工程管理优化策略研究[J].江西农业, 2025 (6):151-153.
- [20] 党文涛,肖丽丽.以工代赈赋能农业水利新质生产力发展的路径探析[J].农业与技术, 2025, 45(14):173-176.
- [21] 霍仁龙.云南山区农田水利建设演变的量化研究(1950—1980)[J]. 2021(2019-4):79-91.
- [22] 李刚,赵鹏,孙书洪.农田水利工程建筑物的安全评价研究[J].科学技术创新, 2020(16):2.
- [23] 王保民,张文煜.小型灌区农田水利渠道设计及施工探讨[J]. 2018.
- [24] 彭亚敏,韩成银,杨钰晨.江苏省大中型灌区与高标准农田协同建设研究[J].江苏水利, 2024(5):7-10.
- [25] 郝永风.小型灌区农田水利渠道设计及施工探讨[J].城市建设理论研究:电子版, 2012(33).