

作者简介

康耀中，男，40岁，研究生 / 高级工程师，现就职于鄂尔多斯市固体废物与土壤生态环境技术中心，长期从事生态环境保护与工业固体废物减量化、资源化、无害化处置等方面的相关方案、规划、制度编制工作，开展煤矸石、粉煤灰、气化渣等固体废物调查和生态环境形势分析，主要参与编制研究报告等理论研究成果 3 项；专业技术项目 6 项。正在参与科研课题《煤气化渣全量高值化综合利用成套技术研发及成果转化》、《利用煤矸石实施水土流失沟壑生态环境治理技术规范》等。



PRICE: \$60. 00



刘杰波 刘海龙 康耀中 主编

生态系统视角下的环境影响评价方法学
Methodology of Environmental Impact Assessment from an Ecosystem Perspective

Methodology of Environmental Impact Assessment from an Ecosystem Perspective

生态系统视角下的环境影响评价方法学

刘杰波 刘海龙 康耀中 主编



作者简介



刘杰波，硕士研究生，高级工程师，从事环境监测、环境影响评价相关工作 19 年，发表论文 2 篇，获得实用新型专利 1 项。
2006 年 10 月—2018 年 01 月，主要从事于环境监测，先后任技术负责人、授权签字人。
2018 年 01 月—至今，主要从事环境影响报告书（表）评估及审核相关工作，参与评估及审核环境影响报告书（表）500 余份。

刘海龙，生态理学硕士研究生，在读博士研究生，生态环境保护高级工程师，从事生态环境领域工作 16 年，作为主要编著人员合著专著 1 项，发表论文 10 篇，主持编制生态领域地方标准 5 个，参与申报重点研发科技项目 5 项，成功申报发明专利 1 项、实用新型专利 5 项，支持、独立和参与完成了近 30 多项生态领域相关报告、方案的编制。
一、2009.02-2019.09 任职于鄂尔多斯市环境保护中心监测站，主要从事环境影响报告的编制、环境监测、“三线一单”生态环境分区管控成果编制等相关工作，担任项目负责人；
二、2019.09-2021.04 任职于鄂尔多斯市机动车尾气监测管理中心，主要从事参与划定《国家第三阶段（含）标准以下柴油货车禁限行区域》和《禁止使用高排放非道路移动机械区域》，参与高排放车辆的入户监督抽测和全市拥有或租赁 20 辆以上柴油货车用车大户的入户监督抽测，担任项目负责人；
三、2021.04-2024.07 任职于鄂尔多斯市固体废物与土壤生态环境技术中心，主要从事“无废城市”建设、固体废弃物规划技术研究、家电拆解技术复核、生态环境领域科学研究、标准的制定等相关工作，担任中心副主任；
四、2024.07- 至今 任职于鄂尔多斯市固体废物与土壤生态环境技术中心，主要从事“无废城市”建设、固体废弃物规划技术研究、家电拆解技术复核、生态环境领域科学研究、标准的制定等相关工作，担任中心主任。



Methodology of Environmental Impact Assessment from an Ecosystem Perspective

生态系统视角下的环境影响评价方法学

刘杰波 刘海龙 康耀中 主编



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Methodology of Environmental Impact Assessment from an Ecosystem Perspective

题目：生态系统视角下的环境影响评价方法学

Author: Jiebo Liu, Hailong Liu, Yaozhong Kang

作者：刘杰波 刘海龙 康耀中

ISBN: 979-8-90040-058-7

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

Methodology of Environmental Impact Assessment from an Ecosystem Perspective

生态系统视角下的环境影响评价方法学

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: 16.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in March 2026

Printing: First printing in March 2026

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

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

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

编委会 EDITORIAL BOARD

主 编

刘杰波	鄂尔多斯市生态环境监测监控中心
刘海龙	鄂尔多斯市固体废物与土壤生态环境技术中心
康耀中	鄂尔多斯市固体废物与土壤生态环境技术中心

内容简介ABSTRACT

《生态系统视角下的环境影响评价方法学》是一部立足新时代生态文明建设需求、系统整合国内外生态环评理论与实践成果的学术专著。本书以生态系统整体性、系统性和动态性为核心理念，全面重构环境影响评价（EIA）的技术路径与制度框架，旨在推动我国环评体系由传统污染导向向生态功能保护与服务价值维护转型。

全书共分六章，首先系统梳理了生态系统视角下环境影响评价的理论基础，包括生态系统结构、功能、过程及其服务价值等核心概念，并深入剖析当前我国环评实践中存在的“重工程轻生态”“重末端轻源头”等问题。随后，作者详细解读了我国现行生态影响评价技术标准体系，涵盖国家级导则（如 HJ19—2022）、行业专项规范（水利、交通、矿产等）及地方特色标准，阐明多层次标准如何协同支撑精细化、差异化评价。书中还重点探讨了生态补偿机制在环评中的嵌入路径，分析资金来源单一、使用效率低下及长效机制缺失等现实困境，并提出市场化补偿、绿色金融创新与跨区域治理等改革方向。

在国际经验部分，本书对比研究了美国《国家环境政策法》（NEPA）的战略环评思想、欧盟环评指令与自然 2000 网络的协同机制，以及日本环评中对“人与自然接触场所”的文化服务考量，提炼出可供我国借鉴的制度设计与技术方法。最后，作者结合鄂尔多斯等地的实践案例，展示了如何将生态保护红线、生物多样性优先区、生态廊道等空间管控要素融入项目选址与环评决策，实现发展与保护的协同优化。

本书兼具理论深度与实践指导价值，适用于生态环境管理、规划编制、环评咨询、科研教学等多个领域，可为政策制定者、环评工程师、生态学者及高校师生提供系统参考，助力构建以生态系统完整性为核心的现代环境治理体系。

前言 PREFACE

随着生态文明建设被纳入“五位一体”总体布局，生态环境保护已从末端治理转向全过程、全要素、全地域的系统治理。在此背景下，传统的环境影响评价制度——长期聚焦于污染物排放控制与局部环境质量变化——日益显现出其在应对复杂生态问题上的局限性。生态系统作为人类赖以生存和发展的基础，其结构完整性、功能稳定性与服务可持续性，正成为衡量发展质量的核心标尺。因此，推动环境影响评价从“污染防控型”向“生态守护型”转型，不仅是技术方法的升级，更是发展理念的深刻变革。

本书《生态系统视角下的环境影响评价方法学》正是基于这一时代命题而撰写。我们试图回答：如何在环评中真正体现生态系统的整体性？如何科学识别项目建设对生物多样性、生态过程及服务功能的累积性、间接性影响？又如何通过制度设计将生态保护目标有效嵌入发展规划与工程决策之中？

为此，本书首先确立了以生态系统为核心的新范式。区别于传统环评对单一环境介质（如水、气、声）的割裂分析，我们强调将陆地与水域生态系统视为有机整体，关注物种—群落—景观—区域多尺度间的相互作用。在此基础上，系统梳理了我国现行生态影响评价技术标准体系，从国家导则到行业规范再到地方细则，揭示其如何逐层细化、因地制宜地回应不同生态敏感区的保护需求。特别值得一提的是，《环境影响评价技术导则 生态影响》（HJ19—2022）的实施，标志着我国生态环评正式迈入定量化、规范化新阶段，而本书对此进行了深入解读与应用指引。

同时，我们清醒认识到，技术方法的进步必须与制度创新同步。生态补偿作为连接“保护者受益、破坏者担责”的关键机制，在环评中尚未充分发挥作用。书中剖析了当前补偿资金依赖财政、监管缺位、绩效模糊等瓶颈，并提出构建“财政引导+市场驱动+社区参与”的多元补偿模式，推动形成

生态保护的内生动力。

国际经验亦为我们提供了宝贵镜鉴。美国 NEPA 通过程序正义保障生态考量前置，欧盟以指令体系实现环评与栖息地保护法规的无缝衔接，日本则在细节中体现对自然文化服务的尊重。这些经验启示我们：有效的生态环评不仅是技术工具，更是民主决策、科学治理与价值共识的载体。

本书凝聚了编委会成员近二十年一线环评审核、生态监测与政策研究的实践经验，也融入了对“无废城市”“三线一单”“生态保护红线”等国家战略的思考。我们深知，生态系统视角下的环评方法学仍在探索之中，尚需更多实证检验与理论深化。

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 生态系统视角下的环境影响评价理论基础	1
第一节 生态系统结构与功能特征	1
第二节 环境影响评价的理论演进	6
第三节 生态系统完整性评价原理	11
第四节 生态承载力与阈值理论	16
第五节 生态系统服务功能评估框架	23
第二章 生态系统调查与监测方法	29
第一节 生态系统本底调查技术	29
第二节 生物多样性监测方法	35
第三节 生态系统关键参数识别	41
第四节 遥感与地理信息系统技术在生态调查中的应用	47
第三章 生态系统影响识别与预测模型	55
第一节 生态系统影响因子识别	55
第二节 生态过程模拟与预测	61
第三节 生态系统响应机制分析	68
第四节 多尺度影响预测模型构建	73
第四章 生态系统健康评价体系	79
第一节 生态系统健康指标体系	79
第二节 生态完整性评价方法	85
第三节 生态系统弹性评估	90
第四节 生态风险评价模型	97
第五章 生态系统服务功能评价	103
第一节 生态系统服务分类体系	103
第二节 供给服务量化评估	108

第三节 生态系统调节服务价值评估·····	114
第四节 文化服务功能评价·····	119
第六章 生态累积影响评价方法·····	125
第一节 累积影响机理分析·····	125
第二节 时空累积效应评估·····	130
第三节 多源压力叠加分析·····	137
第四节 生态累积风险预警·····	144
第七章 生态系统适应性管理·····	151
第一节 生态保护红线划定·····	151
第二节 生态修复与补偿机制·····	156
第三节 生态系统监测预警·····	163
第四节 适应性管理决策支持·····	169
第八章 案例分析与实践应用·····	177
第一节 流域生态系统评价案例·····	177
第二节 城市生态空间评价实践·····	183
第三节 重大工程生态影响评价·····	188
第四节 自然保护区影响评价·····	194
第九章 生态系统评价政策与法规体系·····	201
第一节 环境影响评价法律制度·····	201
第二节 生态系统保护政策框架·····	207
第三节 生态补偿政策机制·····	213
第四节 国际经验与比较研究·····	217
第十章 生态系统评价技术标准与展望·····	225
第一节 生态系统评价技术规范·····	225
第二节 评价指标体系标准化·····	231
第三节 新技术方法应用前景·····	237
第四节 生态系统评价发展趋势·····	243
参考文献·····	247

第一章 生态系统视角下的环境影响评价理论基础

第一节 生态系统结构与功能特征

一、生态系统的组成要素与结构层次

生态系统完整性的表现形式就是多样的组成要素以及明确的结构层次。这些要素和层次互相依存、有机结合，一起形成了生态系统物质循环和能量流动的基本框架。它们是生态系统稳定发展物质基础和结构前提，任何外部干扰都会改变它们的基本构成，进而引发一系列连锁反应。

（一）生产者、消费者、分解者与非生物环境

生态系统是一个功能整体，由生物组分和非生物环境两大部分组成。非生物环境包括阳光、空气、水分、土壤、无机盐等，是生命活动所必需的物质和能量的来源。它是所有生物生存的物理化学条件，是生物群落赖以生存的空间和环境，它的性质和状态决定着生态系统属于哪种类型、有多大面积以及具有多高的生产力。

生物组分按照生态系统中所起的作用以及获取营养的方式，可以清楚地分为生产者、消费者和分解者这三个基本功能类群。三者之间存在复杂的关系，一起推动生态系统的动态过程。它们互相配合传递能量，进行物质循环利用，是维持生态系统动态平衡的力量。任何一个环节的缺失都会使生态系统崩溃。

具体来看，各组分扮演着不可替代的角色：

1. 生产者主要是绿色植物和能进行光合作用或化能合成作用的微生物，是生态系统的能量基础。它们把太阳能等无机能源转化为化学能，合成有机物，既满足了自身的生长发育需求，又为所有的生物提供了最初的食物来源，是联系无机世界与生物世界的桥梁。

2. 消费者指除了生产者之外的所有动物，都是异养生物，必须依靠其他生物获取能量。根据取食对象的不同，分为以植物为食的初级消费者（植食性动物），以植食性动物为食的次级消费者（肉食性动物），以及更高层次的肉食动物。消

费者存在加快了生态系统内部能量流动、物质转移。各种捕食关系交错在一起，成为生态系统复杂互动网络的主要组成部分。

3. 分解者主要是细菌、真菌等微生物，是生态系统的“清洁工”。它们把动植物的遗体、排泄物等有机碎屑分解成简单的无机物(二氧化碳、水和矿质元素)，这些无机物再被生产者吸收利用。此过程保证物质循环再生，是生物群落和非生物环境之间联系的纽带。如果没有分解者参与，生态系统的物质循环就会停止。

生态系统生物组分功能表

功能类群	营养方式	主要作用	典型代表	能量来源
生产者	自养	能量转换，有机物合成	绿色植物、光合细菌	太阳能 / 化学能
消费者	异养	能量传递，加速物质循环	动物(初级、次级、三级)	摄食其他生物
分解者	异养(腐生)	有机物分解，物质循环再生	细菌、真菌	动植物遗体、排泄物

从上面的生态系统生物组分功能表中可以知道，在生态系统中生产者、消费者、分解者各司其职，共同维持着生态系统的稳定和运转。

(二) 营养级、食物链与食物网结构

生态系统内部的能量和物质是通过生物之间的取食关系进行传递的，这种传递路径就构成了系统的营养结构。营养级是用来描述生物在食物链中所处位置的术语，它指的是能量和养分从最初的生产者开始，沿食物链流动的每一个环节或者层次。生产者处在第一营养级，初级消费者处在第二营养级，次级消费者处在第三营养级，以此类推。分层结构为生态系统能量流动效率、物质迁移路径的分析打下了基础。

食物链是生态系统中能量流动、物质循环的线性通道，它以“谁吃谁”的捕食关系来表现能量由生产者到各级消费者单向流动的过程。典型的草原食物链是草→兔→狐，草是生产者，兔是初级消费者，狐是次级消费者。但是自然界中的营养关系比单一的链条要复杂得多。大多数消费者并不是只取食一种生物，同一种生物也可以被多种捕食者所摄食。因此，众多互相交叉、密切相关联的食物链就组成了一个复杂的网状结构，称为食物网。食物网更接近于真实的生态系统中物种之间的营养关系，能体现能量流动的多条途径。食物网的复杂程度，比如链条长短、物种连接的紧密程度等等，常常被当作评判生态系统稳定性的指标。一

个复杂的食物网使能量、物质的流通途径更加多样化，当某一物种的数量出现剧烈波动的时候，它的影响可以通过食物网中的其他途径得到缓冲，从而提高整个生态系统的抵抗力稳定性和恢复力。

（三）生态系统的水平与垂直结构特征

生态系统的结构包括物种组成和营养关系，也包含生物群落的空间配置与分布，即空间结构。空间结构一般分为水平结构和垂直结构两个方面，二者共同形成了多样的栖息地和生态位，是决定区域生物多样性的重要因素。

垂直结构指的是生物群落在垂直方向上表现出的分层现象，森林生态系统体现得最为明显。一个成熟的森林生态系统，从上到下一般可以清楚地划分成树冠层、亚乔木层、灌木层、草本层、地被层（苔藓层）和地下根系及土壤层。每一层都有它独特的光照、温度、湿度等微环境条件，生活着适应这些微环境的特有动植物以及微生物种群。垂直分层极大地提高了空间资源利用率，也给多种物种共存创造了有利条件。

水平结构是不同生态系统类型（森林、草地、湿地等）在景观尺度上互相交错，形成了斑块、廊道、基质的景观格局。群落内部水平结构表现为物种的聚集、随机或者均匀分布。空间异质性，斑块边缘产生的边缘效应，往往可以创造出独特的生态生境，吸引很多物种，提高区域生物多样性水平。

生态系统的垂直结构、水平结构一起决定三维空间的复杂程度。结构复杂的生态系统一般都意味着其内环境更为复杂，可以为更多的物种提供生态位，容纳更多物种并支持更丰富的生物多样性、更复杂的生态过程。因此，在进行环境影响评价的时候，应该主要考虑项目建设活动是否会破坏生态系统原来的空间结构。林木砍伐会破坏森林的垂直分层，工程建设会割裂景观的水平连通性，都会对区域生态系统的稳定性以及生物多样性造成深远的影响。

二、生态系统的核心功能与过程

生态系统的结构是生态功能的基础，能量流动、物质循环、信息传递是维持生态系统动态平衡的三个主要功能。三大功能彼此交织、互相联系，共同组成了生命系统运转的中心机制，保证生态系统的持续稳定。

（一）能量流动的单向性与逐级递减规律

生态系统运转需要能量的推动，与物质可以循环利用不同，能量在生态系统

中的流动是单向的、不可循环的。能量流动的起点是生产者（主要是绿色植物）通过光合作用固定下来的太阳能，这也是流经几乎所有生态系统的总能量来源。以化学能的形式储存在有机物中，通过食物链和食物网的途径，由生产者传递给初级消费者，再依次传递给次级消费者、三级消费者，最后被分解者所利用。每一次传递过程中，大部分能量会以热能的形式通过生物体的呼吸作用散失到环境中，不能被下一级营养级再次利用。能量流沿太阳→生产者→消费者→分解者→热能方向单向流动，最后散失到宇宙空间中，不能再回到系统中被利用。

能量流动的另一个基本规律就是逐级递减。能量从一个营养级传到下一个营养级时，它的传递效率一般只有 10% ~ 20% 左右。这就意味着，一个营养级同化的能量中大约有 80% 到 90% 会因为呼吸消耗、未被利用或者未被消化吸收等的原因而损失，不能传递给下一个营养级。能量的逐级大幅度减少，决定了生态系统中营养级的数量一般不多，一般不超过四到五个层次。这就是生态系统中生产者总生物量和总能量远大于初级消费者，并依次递减，形成典型的能量金字塔的原因。这条规律在很大程度上决定着一个生态系统能承载多少，各种生物在自然状态下会有多大量。

（二）物质循环的生物地球化学过程

与能量的单向流动不同的是，生命体所需要的碳、氮、磷、硫、水等化学元素在生态系统中是反复利用、循环流动的。生物群落与非生物环境之间反复移动的元素，就叫做物质循环或者生物地球化学循环。保证了生命必需的营养物质能源源不断地供给生物利用，是生态系统长久保持和发展的重要物质基础。

各种元素的循环途径和机制不同，但总体上都体现了生物过程和地质化学过程的紧密耦合。大气中二氧化碳被生产者通过光合作用吸收，转化成有机物后进入生物群落。有机碳随着食物链在不同消费者之间传递。生物体进行呼吸作用，死亡后被分解者分解，碳就以二氧化碳的形式重新释放到大气中，完成一个快速的生物循环。一部分碳会以化石燃料或者沉积岩的形式，被长久地封存于地壳当中，经过漫长地质循环过程才得以形成。但是大量的燃烧化石燃料等人类活动，造成全球碳循环出现严重失衡。

氮循环主要依靠微生物的驱动，虽然大气中氮气丰富，但是绝大多数生物不能直接利用。它必须依靠固氮微生物（根瘤菌）把它转化为氨之后才能进入生物循环。然后通过氨化作用、硝化作用、反硝化作用等一系列微生物活动，氮元素

在有机体和无机环境之间进行交换，最后以氮气的形式返回到大气中。磷循环为典型的沉积型循环，主要储库位于岩石圈，循环速度慢，容易流失到深海沉积中而中断。深入认识这些循环过程及速率，对认识污染物质在环境中的迁移转化规律，评价人类活动对生态系统功能的影响都具有十分重要的意义。

（三）信息传递及其在生态系统自我调节中的作用

信息传递属于生态系统的三大基本功能之一，对调节生物种间关系以及维持系统稳定起着至关重要的作用。生态系统中的信息分为物理信息、化学信息和行为信息三类。物理信息包括光照周期、温度变化等，化学信息为植物释放的化感物质、动物释放的信息素，行为信息为鸟类的鸣叫、蜜蜂的舞蹈。信息在生物和环境之间、生物与生物之间传递，进而影响生物的生长、发育、繁殖、行为、种间关系。

生态系统的自我调节的基础就是信息传递。生态系统一般都具有一定的自我调节能力，即当它受到外界干扰的时候，可以通过内部反馈机制来抵抗干扰、恢复稳定。调节的核心就是负反馈。某一区域的食草动物因为食物丰富而数量剧增，这一信息会促使它的天敌（捕食者）数量随之增加。捕食者数量的增加反过来抑制食草动物的数量，使食草动物的数量降低到一定程度后，系统又可以重新达到相对平衡的状态。反馈调节正是通过信息传递来实现的，它是生态系统动态平衡（或称稳态）得以维持的重要机制。

当外界干扰的强度、频率超过生态系统调节能力的阈值时，就会使生态系统的结构和功能遭到破坏甚至崩溃。因此，环境影响评价的一个重要的工作，就是预估人类活动对生态系统造成干扰是否超过它的自我调节能力，找到那些可能切断关键信息流、破坏重要反馈回路的影响，并据此提出合理的缓解和保护措施。生物多样性越丰富，营养结构越复杂，生态系统自我调节能力就越强。

第二节 环境影响评价的理论演进

环境影响评价作为联系发展与环境的制度工具，其理论依据和方法学体系不是一成不变的。它随着人们对环境问题认识的加深、社会经济发展模式的转变和可持续发展观念的普及而不断完善。发展脉络十分清楚：由微观到宏观，由单一到综合，由被动响应到主动引导。

一、从项目环评到战略环评的范式转变

这其中的主要原因就是环境管理思想彻底改变。环评的关注点由原来的孤立、具体的建设项目提升为具有决定性影响的宏观规划、政策层面，实现了从“治标”到“治本”的战略性跨越，在决策源头预防和减缓环境影响。

（一）以末端治理为导向的传统项目环评

项目环境影响评价是环评制度的最初形态，是工业化进程中建设项目污染问题日益严重而产生的。核心逻辑就是：即在项目开工前，对项目实施以后会产生的环境影响进行科学的预测和评价，然后提出防治污染、保护生态的措施。该评价模式具有很强的针对性，每一个独立的工厂、道路、水坝等都作为一个评价单元，重点考察建设、运营过程中对周围水、气、声、固体废物等环境要素所造成的影响。

其评价方法主要依靠工程分析和模型预测，用污染物排放量、扩散范围、浓度来判断是否符合国家或者地方的环境质量和排放标准。以合规性为主要评价标准的评价方式，在环境管理的初期起到了举足轻重的作用。它有效地遏制了大量严重污染项目的盲目上马，强制要求企业安装净化设备、改进处理工艺等“末端治理”措施，从很大程度上控制了点源污染的无序扩散，对改善局部地区的环境质量起到了积极的作用。

项目环境影响评价本质上属于防御性的、补救性的环境管理方法。它介入决策的时机一般比较晚，多在项目选址、规模、工艺等主要参数基本确定之后才开始。因此环评结论往往只能给出有限的建议或者否决意见，不能从根本上改变项目的环境属性，也不能有效地引导项目做出更优的区位选择。更关键的是它把单个项目同区域环境分割开来，不能很好地处理同一区域内多个项目所产生的累积效应以及协同效应。由于只考虑单个项目，项目环评在解决区域性的、流域性的

复杂环境问题时就显得力不从心了，这也为之后规划环评、战略环评的出现埋下了伏笔。

（二）区域开发与规划环评的兴起

项目环评越深入，其只看局部、忽略全局的弊端就越明显。当区域内多个项目相继通过独立的环评审批之后，即使每一个项目的排污行为都符合规定，但是它们的综合影响叠加在一起，仍然会超过区域环境的承载能力，造成区域整体环境质量下降。因此产生了合成谬误，促使人们开始寻找一种更加宏观的评价手段，区域开发和规划环境影响评价也就应运而生。它把评价尺度由单个项目扩展为地理空间单元，即工业园区、经济开发区、新城建设、流域综合治理等一系列开发活动或者空间规划。

规划环评的主要任务是在规划编制阶段，对规划实施后可能造成的资源环境影响进行评价。它已经不再只是核算具体的污染物排放，更加重视对区域层面的资源承载力、生态空间布局、环境容量和发展布局合理性进行评价。经过规划方案环境协调性评价可以对产业结构和空间布局做出调整，从而从源头上防范环境风险。它可以把生态敏感区划定清楚，对高耗能、高污染产业设定严格的环境准入门槛，引导这些产业往环境容量较大的地区集聚，为该区域将来项目环评给出明确的上位指导以及约束框架。承上启下的作用使后续项目环评更高效、更准确，减少了重复的区域背景分析，并且使单个项目的决策符合整个区域的环保目标。

（三）政策、法规层面的战略环评发展

战略环境影响评价作为环评理论发展最高阶段的产物，把环境考量前置到了决策链的最前端。它主要对政府所制定的重大政策、所颁布的法规和长远发展规划等进行系统的环境影响分析。相对于项目环评和规划环评而言，战略环评的视野最宽，作用也最根本。它所审查的不再是具体的物理活动，而是这些活动背后的设计和规则。

战略环评在决策的萌芽时期就将可持续发展的理念融入其中，保证经济、社会、环境等各个方面的目标能够协调一致。其评价对象非常广泛，可以是国家能源政策、农业发展战略、交通网络规划、贸易协定等。通过比较不同政策选项带来的环境后果，战略环评可以使决策者认识到由于长期的、累积的、跨界口的环境风险与机会所导致的潜在环境后果，从而做出更绿色、更有韧性的政策法规。它的出现，使环境管理由对环境污染和资源耗竭造成的环境问题被动作出反应，

变为通过积极塑造可持续发展路径的方式去应对。其主要特征有如下几点：

1. 战略环评着眼宏观尺度，长远未来的发展方向与方式选择是否符合环境要求，而不是考虑建设细节。它能在问题未形成之前就进行干预，具有很强的预防功能。

2. 整合性、协调性。战略环评把环境因素同经济、社会因素放在同等重要的位置上加以综合考虑，力求使各个政府部门的政策相互配合，不发生抵触或者相互削弱的情况。

3. 程序性和互动性。战略环评要深入嵌入到政策制定的全过程当中，成为一种动态的、反复的协商改进的过程，而且非常重视公众参与，以此来提高决策的科学性和社会接受度。

项目环评、规划环评和战略环评三者在评价对象、介入时机与作用上各有侧重，详见下表。

环境影响评价范式演进对比表

评价类型	评价对象	介入决策时机	关注焦点	作用
项目环评	具体建设项目	选址、设计基本确定后	局部污染防治、合规性	防御性、补救性，控制点源污染
规划环评	区域开发规划、政策	规划编制阶段	区域承载力、生态格局、布局合理性	宏观引导、前置预防，优化空间与产业
战略环评	重大政策、法规、长远规划	决策萌芽期	可持续发展、政策环境协调性	顶层设计、主动塑造可持续发展路径

二、从要素评价到生态系统评价的深化

环评理论另一条并行发展的路径，就是评价内容认知程度的不断加深。早期评价方法把复杂环境分解成若干个独立的要素来分析。机械论观点虽然便于量化的操作，但是忽略了自然界万物之间互相联系的内在本质。生态系统评价的深入，就是对生命共同体思想的一种回归和实践。

（一）水、气、声、渣等单要素评价的局限

传统的环境影响评价方法论，很大程度上是分割式地评价环境介质。它把复杂的环境系统简化成大气、地表水、地下水、土壤、声环境、固体废弃物等若干个独立的要素或者子系统。评价工作也被拆分，由各个领域的专家分别预测和评

价项目对空气污染、水体污染、噪声的影响等。该方法的优点在于操作简单方便，可以对各类污染问题采用成熟的预测模型和明确的标准，得到直观的量化结果。

但是还原论思维模式有着严重的内在问题。把环境要素间普遍存在的作用关系和联系割裂开来。自然环境是有机整体，各个要素之间通过物质循环、能量流动、信息传递联系在一起。排入大气的酸性物质会沉降在土壤和水体中，使它们酸化并进而影响到植物生长及水生生物的生存环境；过度开发土地破坏土壤结构的同时也会改变局部区域的地表径流情况，从而影响到下游河流水文状况和水质。单要素评价不能很好地体现跨介质的污染迁移转化途径以及连锁反应，因而造成其评价结论的片面性，甚至产生误导。

评价终点往往只关注污染物浓度是否达标，很少去研究物理化学变化给生态系统结构和功能带来的深层次的影响。即使一个区域水质的化学指标全部达标，但如果河流被渠化、湿地被侵占，其作为水生生物栖息地、洪水调蓄区、景观游憩地的生态功能也可能已经严重退化。单要素评价不能对这些生态功能的损失做出有效的评价。

最终造成这样的评价模式就会陷入“头痛医头，脚痛医脚”的治理困境。如为了解决空气污染问题而采用的湿法脱硫工艺，就会产生大量的废水和石膏渣，从而将大气污染问题转为水污染和固体废弃物处置问题。单要素评价由于缺少系统观念，不能对污染转移的现象进行权衡与优化，更不能从根本上指导实现环境效益最大化。对环境影响的认识只停留在物理和化学的层面，没有深入地认识它的生态学过程，这是最大的不足。

（二）景观生态学与区域生态评价的引入

为了克服单要素评价的局限，环境影响评价开始主动、有选择地吸收和采用生态学理论和方法，景观生态学的引入对生态学理论和方法的吸收起到了重要的推动作用。景观生态学注重的是空间格局与生态过程的相互作用，为环评提供了一种新的视角和分析工具，使得环评可以从“斑块、廊道、基质”这样的宏观空间结构来理解、评价人类活动的影响。这种视角不再把土地当做一个均质平面，而是把它当成是由森林斑块、河流廊道和农田基质等不同的生态系统构成的动态镶嵌体。

按照景观生态学理论，环评的着眼点由原来的单一污染浓度，扩大到区域生态格局的完整性以及连通性。评价一条新修公路时除了常规的噪声、尾气污染评

价外，还要重点考虑它是否破坏重要的动物迁徙通道，是否造成大面积生境碎片化以及由此带来的长期生态影响。评价指标也变得更加丰富，加入了斑块密度、破碎度指数、景观连接度、优势度指数等可以定量描述景观空间格局变化的参数，使得生态系统结构性影响的评价更加科学、具体。

在这样的理论基础上，区域生态评价慢慢形成起一种综合、成熟的评价方法。它的主要目的就是保护区域生态安全，保证生态系统服务功能的可持续性。评价过程一般包括：开展区域生态系统类型、分布、质量、敏感性调查与评价，确定重要的生态功能区和生态廊道，分析规划或开发活动对整个区域生态系统健康的综合影响。区域生态评价的结论一般用生态功能区划图、生态适宜性分区图等形式来表示，给国土空间规划、产业布局优化、生态保护红线的划定提供直接的科学依据，从而实现了从重视环境质量到重视生态健康的认知飞跃。

（三）基于生态系统整体性的综合评价范式

迈向以生态系统整体性为综合评价范式的生态环评，既是环评理论发展的必然结果，也是对人与自然关系的最深刻的认识。该范式把评价对象看作一个完整的、能够自我调节的生命支持系统，它的重点在于评价人类活动对生态系统结构、过程、功能及所提供服务造成的影响。它冲破了单单看重单个生态因子或者空间格局的局限，想要解决一个根本性的问题，开发建设活动会不会破坏生态系统的完整性，稳定性和恢复力，以及它持续为人类提供产品和劳务的能力。

在此范式之下，评价工作开展很大程度上依靠对生态系统复杂作用机制的深入认识。不仅要考虑直接的物理、化学冲击，还要考虑这些冲击通过食物链、能量流、生物地球化学循环等途径在系统中传递、放大，最终反映在生态系统状态变化上。评价水利枢纽工程不仅要考虑它对下游水文情势的影响，还要系统地评价这种改变对河漫滩湿地生态系统、河口鱼类洄游产卵和整个流域生物多样性所产生综合影响。因而评价方法中往往会用上系统动力学模型、生态网络分析、生态足迹模型、生态系统服务价值评估等综合手段模拟和预估复杂的生态响应过程。最终目的就是实现以自然为本的方案，即在满足人类发展的同时，遵循自然规律，保护、修复并可持续利用生态系统，达到人与自然的和谐共存。要求环评不再仅仅是一个消极的“否决”工具，而应该转变为一种积极的、可以改善发展方案、提高区域生态资本的“设计”工具。

第三节 生态系统完整性评价原理

生态系统完整性是用来度量生态系统的健康程度和自然性的一个概念，它是指生态系统结构与功能保持原来的状态，抵御外界干扰，有自我调节与恢复的能力。只有在充分认识生态系统完整性原理的基础上，才有可能对某一地区项目建设所可能造成的环境影响作出科学的评价，从而为保护生物多样性、保证生态系统可持续发展提供可靠的依据。

一、生态系统完整性的内涵与维度

生态系统完整性的概念是有丰富层次和多方面解释的，它不仅仅是生态系统中物种、元素的完整，更重要的是生态系统中动态过程和它们之间的联系是否健全。为了对完整性做出准确的评价，需要从多方面进行分析，只有这样，才能全面了解一个生态系统的实际状况以及它的潜力。

（一）生物完整性、化学完整性与物理完整性

生态系统完整性一般被看作生物、化学、物理三方面的综合体现，三者彼此联系、缺一不可，是生态系统健康、稳定的基础。生物完整性是核心，生物完整性考察的是生态系统支持和维持一个平衡、适应性强的生物群落的能力，该生物群落应包含该区域自然生境下所应有物种组成、多样性和功能结构。评价生物完整性主要是对本地物种的丰度、群落结构、优势种的健康、关键功能类群的完整性等进行评价。生物完整性高的系统，物种组成接近自然，抗外来物种入侵。

化学完整性就是指生态系统内部物质循环、能量流动所需要的化学环境状态。即水体、土壤、大气等环境介质中化学元素的浓度、化学物质的形态处于自然波动范围之内，利于本地生物正常生长、繁殖、代谢。水体营养盐浓度、pH 值、溶解氧含量、土壤有机质、重金属含量等都是化学完整性的主要指标。化学环境一旦失衡，比如水体富营养化或者土壤污染，就会直接破坏生物完整性，从而影响生态系统的稳定性。

物理完整性主要是指生态系统物理环境结构和动态过程，也就是地形地貌、水文情势、栖息地结构等要素。河流生态系统的物理完整性是指河流生态系统自然河道形态、水流速度、底质组成、岸带植被结构等；森林生态系统的物理完整性表现在林冠结构、枯落物层厚度、土壤物理性质等。完整的物理结构给生物提

供了多种多样的栖息地和生存空间，保证了生态过程的顺利进行。栖息地被破坏会造成物理完整性受到严重的损害，影响物种的迁徙以及基因交流，从而降低整个生态系统的韧性。

（二）结构完整性与功能完整性

从系统论的角度来说，生态系统完整性可分成结构完整性和功能完整性这两大类。二者密切相关，结构是功能的基础，功能是结构的体现和必然结果，二者共同维持生态系统的动态平衡。

结构完整性即生态系统组成成分的完整程度，包括了非生物环境和生物群落等各个方面。它包含生态系统中所有的物种种类、数量、种群年龄结构、性别比例、群落空间分布格局（垂直分层、水平镶嵌）和生物与非生物环境共同构成的栖息地类型及其空间布局。生态系统结构完整，有生产者、消费者、分解者等营养级，物种间形成稳定的复杂的食物网。结构完整性可以理解为生态系统“静态”组成的情况，是评价生态系统健康状况的一个基本视角。

功能完整性主要是指生态系统内部各种物质、能量、信息交换、转化等动态过程的体现，也是系统整体表现的一种，是判断生态系统是否健康的标准。它包含物质循环、能量流动、信息传递这三个基本过程。具体表现为生态系统具有正常的初级生产力、分解速率、营养盐循环效率、水分涵养能力等。功能的完整也表现在生态系统对来自外界的干扰抵抗的能力、恢复的能力，也就是我们说的系统的稳定性和韧性。一个功能完整的生态系统可以保持自己内部平衡，也可以长久地为人类提供清新的空气、清洁的水等生态系统服务。因此功能完整性的评价一般需要长时间的动态监测，才能准确把握生态过程变化趋势。

（三）时空尺度下的完整性概念

生态系统完整性评价、认识要限定于特定的时空范围内，因为生态系统的结构、过程在不同的尺度上差别很大。不考虑尺度效应的话，评价结果会出现偏差甚至得出错误的结论。因而进行环境影响评价的时候应该明确评价的时间范围，空间边界，考虑尺度依赖性。

空间尺度的变化会直接影响我们对生态系统完整性的认知：

1. 在小尺度或者斑块尺度上我们关心的是某一生境的物种组成、种间关系以及微环境。评价林分是否完整，主要看林下植被多样性、土壤微生物活性等。

2. 当尺度扩大到景观尺度的时候，评价的重点就转而变成不同生态系统斑块

之间空间排列、连接性和异质性。景观破碎化程度、廊道连通性、斑块类型多样性等属于完整性评价指标。

3. 在大尺度，即区域或者全球尺度上，评价的重点就是生物地理区划、气候调节、跨区域的物质循环等宏观生态过程。

时间尺度也是认识完整性不可缺少的方面。生态系统完整性不是一成不变的，它会随着时间变化出现周期性的波动，长期演替，也会对突如其来的事件做出反应。短期内完整性受季节性气候变化或者偶然出现的自然干扰（洪水、火灾）影响，但是系统一般具备一定的恢复能力。从长期演替看，一个处于演替早期的生态系统，其物种组成和结构可能比较简单，但这并不说明它的完整性一定不好，关键在于它是否有向成熟阶段演替的潜力和趋势。因此评价完整性要设定合理的“时间基线”，合理考虑生态系统的自然演替规律和历史变化范围，不能简单地以某个静态时间切片作为唯一的评判标准。

二、生态系统完整性的评价标准

确定科学、客观的评价标准，是进行生态系统完整性有效评价的前提。评价标准就是测量生态系统偏离理想状态的量。标准的设定过程是复杂而困难的，在选择参照系统以及分析历史背景的时候，也要充分考虑不同生态系统类型之间的差别。

（一）参照系统的选择与建立

参照系统是评价生态系统完整性的重要基准，它规定了在人类活动影响最小的情况下，被认为是最完整的或者最健康的生态系统应该具有的状态。通过对比受扰生态系统和参照生态系统，就可以定量确定受损程度。参照系统的选取与建立是评价过程中极为重要的一个环节，它的质量好坏直接影响评价结果的可靠性。

参照系统选择一般要遵循区域化原则，即选择和待评价系统处在同一个生态地理区，物理环境相似（气候、地质、土壤类型等）的生态系统。最好的参照系统是区域内还没有被人类干扰的原始生态系统，如国家公园、自然保护区核心区等。这些区域的生物群落以及生态过程最能体现该区域自然本底的情况。通过详细的生态调查得到这些参照点的生物、化学、物理等特征指标数据，就可以绘制出参照状态的蓝图。

在人类活动频繁的地方，找到完全没有受过干扰的原始生态系统几乎是不可

能的。在这种情况下只能选取受干扰最轻的地点作为参照。这些地方虽然也受到一定程度的人类影响，但是区域内最接近自然状态。可以将各个参照点的数据整合起来，形成一个更具代表性、更具普遍意义的一般参照标准，从而避免单一参照点所具有的特殊性。参照系统是建立在动态过程之上的，它随着监测数据的不断积累、生态系统认识的加深而不断地被修正和完善，从而保证其作为评价基准的有效性、科学性。

建立参照系统除了依靠实地考察，从历史资料中挖掘信息也是不可缺少的。通过分析历史文献、地图、航拍照片、古生态学证据（孢粉、沉积物记录）等可以重建评价区域在工业化以前或者某一历史时期的生态状况，作为历史参照。该方法对于已经找不到合适现实参照的区域来说尤为重要。不论使用哪种方法，参照系统最终的目的都是给完整性评价提供一个明确的、可以量化的、被科学界和管理者共同接受的“标准”，以此保证评价工作能规范、标准化地进行。

（二）基于历史数据与生态模型的基准设定

当没有理想的现实参照系统的时候，用历史数据和生态模型来设定评价基准就成为了一种重要的替代方法。通过回溯历史或者模拟未来，构建出一个理论上的应有状态，用它作为衡量现实生态系统完整性的标准。此种基准的设定方式比较灵活，可以适用于不同的地区、不同数据可获得情况。

历史数据对重现生态系统最初状态有很重要的作用。数据可以有长期气象记录、水文监测数据、土地利用变迁图、以往生物资源调查报告、地方志物候记载、古树年轮、湖泊沉积物岩芯等。对这些分散的历史信息加以挖掘、整理并加以分析之后，就可大致还原出在人类大规模干涉出现之前，这片区域的生态系统具有哪些重要特征，比如它的优势物种是什么、植被以何种类型为主、河流呈现怎样的形态、物种丰富度如何等等。对不同年代的航空影像加以分析，就可以定量得出过去几十年湿地面积萎缩、景观格局破碎化的情况，进而设定一个以历史状态为参照的恢复目标。以历史为参照进行设定，可以给当前完整性损失的评价赋予纵向比较的参照。

生态模型给基准设定提供强有力的预测和模拟工具。通过建立机理模型或者统计模型，就可以模拟出在没有人类压力（污染排放、土地开发等）的情况下，生态系统本应具有的结构和功能状态。水文模型可以模拟出没有大坝截流的天然径流过程；植被动态模型可以预测在现有的气候条件下，如果没有人为干扰的话，

顶级群落的类型以及其分布。这些模型是依照生态学原理创建起来的，把区域的气候，地形，土壤等本底数据当作输入，其输出结果就可以看作是理论上的参照基准。模型的优点是可以进行情景分析，即模拟不同的管理措施或者不同的干扰强度下生态系统未来的反应，给决策提供前瞻性的科学支持。将历史数据与生态模型相结合，可以互相验证、互相补充，从而得到更加稳固可靠、更加完备的评价基准。

（三）不同类型生态系统的完整性标准差异

生态系统完整性的评价标准不是一成不变的，它具有很强的类型特异性。不同的生态系统，如森林、湿地、草原、海洋等，其核心结构组成、主要生态过程以及对环境干扰的反应是不一样的，因此要使用与之相适应的有针对性的评价指标和标准。

森林生态系统完整性评价一般会从森林垂直结构复杂性（乔、灌、草层发育状况）、林龄结构、树种组成、涵养水源、保持水土等生态功能等几个方面进行考虑。对完整天然林的评价标准会看重乡土树种的优势度、枯倒木的数量及其分解状况（是生物栖息地和营养循环的关键环节），还有大型哺乳动物的存在情况。人工林的评价标准更注重生物多样性改善潜力、生态服务稳定性等指标。不同类型的生态系统主要的评价指标如下表所示。

常见生态系统完整性评价指标示例表

生态系统类型	结构完整性核心指标	功能完整性核心指标
森林生态系统	垂直结构复杂性、林龄结构、树种组成、乡土树种优势度、枯倒木数量	涵养水源能力、保持水土能力、生物多样性维持、碳汇功能
湿地生态系统	水文连通性、自然岸线率、水生植被覆盖度、关键指示物种栖息地质量	水体净化能力、生态流量满足率、生物地球化学循环、碳储存
草原生态系统	植被盖度、优势牧草种类与组成、生物多样性指数、土壤结构	生产力、固碳能力、土壤保持、水循环调节、抗干扰能力
海洋生态系统	珊瑚礁活珊瑚覆盖率、重要鱼类种群生物量、海草床密度与分布、外来物种入侵情况	初级生产力、营养循环、物种迁徙廊道连通性、海洋碳循环

湿地生态系统完整性标准以湿地水文情势、生物地球化学功能为依据。水文连通性、水体停留时间、自然水位波动等都是湿地功能的重要方面。所以评价指

标一般会包括自然岸线率、生态流量满足率、水生植被覆盖度等。水鸟等重要的指示物种的种群变化、栖息地质量也属于评价湿地完整性的重要内容。

海洋生态系统完整性评价要解决的三维空间、大尺度问题，其常见的评价标准有珊瑚礁活珊瑚覆盖率、重要鱼类种群生物量、海草床密度和分布、外来物种入侵等。因此，根据不同的生态系统类型来制定专门的评价技术指南和标准体系，是保证环境影响评价科学性、准确性的必然要求。

第四节 生态承载力与阈值理论

把生态承载力和生态阈值理论融入到环境影响评价之中，这是达成区域可持续发展的关键需求。本节从概念、理论基础和在环境影响评价中具体的应用三个角度，论述其内容，为构建人与自然和谐共生的现代化提供科学的决策理论依据。

一、生态承载力的概念与构成

生态承载力是生态系统的稳定性，也是人类活动与环境相互作用强度的度量。深入认识其基本概念及构成要素，乃是评判人类活动给环境带来的影响，制订合理可持续发展策略的基本条件与先决要素。

（一）资源承载力、环境承载力与生态弹性力

生态承载力是一个复合概念，一般可以分解为资源承载力、环境承载力和生态弹性力三个部分。其构成要素及核心特点，见生态承载力构成要素表。

生态承载力构成要素表

要素名称	侧重方面	核心考量	典型案例
资源承载力	自然资源供给能力	可持续利用阈值、消耗速率、替代方案	水资源短缺、土地贫瘠、能源枯竭
环境承载力	污染物吸收净化能力	污染物负荷上限、环境质量标准	大气环境容量、水环境容量
生态弹性力	系统恢复与抗风险能力	结构功能保持、自我调节机制	洪灾后植被恢复、污染后水体净化

资源承载力就是在保证生态系统再生能力不遭到破坏的情况下，某地可以长期供给的自然资源的数量和速度。水资源、土地资源、生物资源、能源矿产等给社会经济发展提供最直接的物质保障。对资源承载力的评估，要区分可再生资源

和不可再生资源，前者主要考虑它的可持续使用的临界值，后者则要考虑资源的消耗速度及其替代方案。

环境承载力，也叫做环境容量，强调的是生态系统对外部输入的废物进行吸收、分解和净化的能力。指在环境质量不降低的情况下，即不超出现行标准的情况下，某一个环境单元所能承受的最大污染负荷。这是环境影响评价中污染物总量控制的理论基础。大气环境容量决定一个区域内可以允许的最大二氧化硫、氮氧化物等污染物排放量，水环境容量则限定可以排入水体中的最大化学需氧量、氨氮等污染物总量。

生态弹性力，又叫生态恢复力或韧性，指生态系统受到外界干扰（自然灾害，人类活动等），能维持原有结构，功能和过程并从中恢复的能力。它不是一个固定的数值，而是对系统稳定性的一种动态的、抗风险能力的度量。一个高弹性的生态系统，即使短期超越其资源或者环境的承载能力，也能依靠自我调节机制重新达到平衡。但是当干扰强度过大时，生态系统就会出现结构性的崩溃，或者会跳变到另一个稳定的状态，造成不可逆转的生态退化。这三者共同形成了生态承载力的全部内容，在环境影响评价时必须一并考虑。

（二）承载力的“水桶效应”与短板理论

生态承载力的评价与管理，正充分地体现了水桶效应或者短板理论的主要观点。一个区域的综合生态承载力，并不是由该区域最丰富的资源或者最强的环境净化能力所决定的，而是受限于该区域最稀缺、最脆弱的限制性因子，也就是所谓的“最短木板”。限制因子指的是大面积的水资源缺乏、土地贫瘠、环境容量饱和或者某一物种濒危等情况。以干旱、半干旱地区为例，水资源承载力常常是决定区域人口数量和经济发展水平的决定性短板，即使土地资源比较丰富，综合承载力也往往较低。

环境影响评价当中，识别并重视区域生态系统“短板”有着极为重要的指导意义。环评工作不能平均用力，应该把重点放在限制性因子的影响评价上。评价需要找出拟建项目或者规划实施后，哪一个生态要素最先达到或者超过其承载极限。项目设计以及相应的减缓措施，也应该围绕提高或者保护这块“短板”来展开。以水资源为短板的城市新区规划，其环境影响评价的重点就是水资源供需平衡分析、再生水利用率的强制性要求、节水技术的推广应用等，目的是保证开发活动不会造成水资源系统崩溃，从而提高整个区域可持续发展能力。

（三）承载力动态变化与不确定性

生态承载力不是一个固定不变的绝对数值，具有很强的动态性和不确定性。所谓动态性，就是指承载能力随着时间、自然条件、技术水平、社会经济状况变化而有不同。从季节上来说，丰水期与枯水期的水资源承载力大相径庭；从更长的时间尺度上讲，气候变化、生态演替等自然过程会从根本上改变承载力的基础。科技进步同样会影响承载力，污水处理技术的提高可以增加水环境容量，农业育种技术的发展可以提高土地资源的承载力。管理水平同政策导向一起影响资源利用效率与环境保护力度，从而调节实际承载能力。

动态性也伴随着很高的不确定性，给环境影响评价带来了严峻的挑战。不确定性主要是由三个方面引起的，第一是认知不确定性，即对于复杂生态系统内部相互作用机制、反馈循环的认识还不完全，造成承载力模型本身存在偏差；第二是自然变异性，生态系统自身存在随机波动，极端天气事件的发生频率和强度难以预测，这些事件可能会瞬间改变区域的承载状况；第三是社会经济不确定性，未来产业结构、消费模式、人口流动等社会因素难以预料，它们会直接影响资源需求和污染物排放。

面对动态性、不确定性，环境影响评价应该摒弃将承载力作为固定红线的僵化观念，转向使用适应性、弹性的管理范式。即环境影响评价不但要评价当前状态下所具有的承载力，还要进行情景分析和风险评价，来预估在不同的发展途径以及外部冲击下承载力将会发生怎样的改变。评价结论一定要体现不确定性，最好能建立长期生态监测网络和预警系统。对承载力进行定期重新评价，根据监测结果反馈来调整发展规划和环保措施，对区域生态环境进行适应性管理，保证发展一直保持在安全的生态边界之内。

二、生态阈值的理论基础与识别

生态阈值，指生态系统状态发生非线性突变的临界点，是生态系统从一种稳定的状态到另一种稳定的状态的一个根本性转变。深入认识其理论基础，掌握其识别方法，对防止不可逆的环境破坏，实行前瞻性环境管理有着十分重要的意义。

（一）生态阈值的定义与类型

生态阈值是指当外界压力或者内部变量发生变化，并且达到某个临界点的时候，生态系统结构、功能或者组成会发生突然、剧烈并且往往是不可逆的改变。

跨越阈值之后，系统响应模式就会从渐渐的、线性的改变，变成非线性的、突变的改变。典型的例子就是湖泊富营养化：当水体中氮、磷等营养物质负荷不断增大，超过某个临界值以后，湖泊生态系统就会从沉水植物为主的清澈状态，转变为藻类大量繁殖为主的浑浊状态。一旦出现这种转变，即使之后营养物负荷有所降低，也很难自行恢复到原来的状态。

环境科学和生态学研究，按性质、驱动因素等将生态阈值分为了不同的种类来认识和管理。

1. 结构性阈值主要是生态系统物理结构或者生物结构发生改变的临界点。当森林覆盖率降低到一个临界值以下的时候，可能会造成该区域的小气候发生剧烈变化，并且会引发大面积的土壤侵蚀；而栖息地斑块之间的距离大于某一个关键值的时候，就会导致种群间基因交流中断，进而造成局部灭绝。

2. 功能性阈值，与生态系统关键过程速率或者状态变化有关。土壤酸化到某个 pH 临界点的时候，有毒金属元素的活性会迅速增加，抑制微生物的活动，使土壤肥力系统崩溃；如果河流的溶解氧浓度低于某一阈值，就会造成鱼类等水生生物大量死亡。

3. 复合性阈值指的是多方面压力因素共同产生出来的阈值，其临界点不是由单一变量所决定的，而是由多维压力空间中的一个临界曲面决定的。珊瑚礁白化是海水温度升高、海洋酸化双重压力超过珊瑚礁耐受极限所造成的结果。识别这些阈值并且进行预测是很困难的。

（二）生态系统非线性响应与突变理论

传统的环境影响评价大多存在线性思维，认为环境影响程度与压力强度成正比。但是生态阈值的存在完全推翻了这个假设，表明生态系统普遍存在着非线性的响应。生态系统内部复杂的正负反馈，就是造成非线性响应和阈值现象的根源。压力刚开始的时候，系统依靠自我净化、生态补偿这些负反馈机制来维持稳定，所以变化比较缓慢。但是当压力继续增加时，负反馈的调节作用不能或者不能克服破坏，正反馈机制就会占上风，比如藻类大量繁殖释放出更多的营养物质，土壤侵蚀使得植被更难恢复等等，系统状态迅速恶化，发生突变。

突变理论给我们提供了理解量变到质变飞跃的强有力的数学工具。该理论描述的是系统在连续变化的控制参数的影响下，状态变量出现不连续跳跃的过程。生态系统存在两个或者多个稳定状态，就像山谷里的球一样，在不同的谷底上达

到平衡。外部压力就像不断推动小球的力，压力把小球推过山脊（阈值）之后，小球就会很快滚落到另一个谷底，这时系统就跃迁到了一个新的稳定状态。

该理论最重要的一个启示就是滞后效应。即系统退化的路径和恢复的路径是不一样的。一旦系统超过临界值进入退化状态，再把压力降到临界点以下也难于恢复到原来的状态。唯一能使它恢复的办法就是把压力降到原来的阈值低得多的地方，甚至需要大范围的人工帮助。恢复的难度之大、成本之高，说明在环境影响评价中识别并规避生态阈值的极端重要，环境管理的根本目的就是防止跨越阈值，而不是事后修复。

（三）阈值识别的实验与模型方法

科学识别生态阈值是将其应用到环境管理的前提，尽管存在很多困难，但是已经发展出许多有效的办法。实验方法就是控制条件下的操作，直接观察阈值现象。即实验室内的微宇宙实验，野外中宇宙或全生态系统水平的控制实验。在多个隔离的湖泊中设置不同的磷添加梯度，就可以直接看到湖泊由清澈变浑浊的临界磷浓度。利用长期生态监测数据、古生态记录（湖泊沉积物、树木年轮等）来重建历史时期生态系统的演变过程，也可以从中找到过去发生过的突变和相应的环境压力水平。

因为大规模实验存在伦理、成本和时间限制，所以模型方法成了识别和预测生态阈值的重要途径。统计模型可以对长时间段的监测数据进行分析，从而找到系统接近临界点的预警信号。理论研究发现，当系统接近阈值的时候，它从微小的扰动中恢复的速度会变慢，这就是临界慢化现象，表现为数据时间序列中自相关性增强、方差增大。通过监测这些统计指标的变化，可以给阈值的到来提供早期预警。另一类是机理模型，也叫过程基础模型，根据对生态系统生物、物理、化学过程的深入认识，用数学方程模拟系统的动态变化。对模型进行不同的压力情景模拟，可以得到系统响应轨迹，进而得到引起系统状态突变的压力阈值。尽管这些模型需要正确认识系统的机理，但是它们有很强的预测能力，在环境影响评价中有着广阔的应用前景。

三、承载力与阈值在环评中的应用

把生态承载力和阈值理论从抽象的概念转变为具体的实践，就是提高环境影响评价的科学性和有效性的重要途径。它存在于项目规划前期，过程管理，区域

空间管控等诸多方面,主要表现在开发强度控制,风险预警,区域空间规划等方面。

(一) 基于承载力的开发强度控制

生态承载力评价为区域或者流域开发活动确定了一个科学的限度,是宏观调控开发强度的根本依据。环境影响评价,尤其是规划环评,要将承载力分析作为核心内容,把抽象的承载力转化为具体的、可操作的控制指标,保证人类活动的总量和强度被限制在生态系统所能承受的范围内。这就使环境影响评价由被动应对单个项目的影响,转变为主动引领区域的绿色发展。

在城镇化的进程中,承载力分析被用来确定城市发展的规模。通过对水资源、土地资源、能源供给、环境容量等开展综合评定可以得出城市的人口承载力、建筑规模承载力、产业承载力。环境影响评价报告要明确规划方案是否超过承载力限制,给出调整意见,像改变城市空间布局,划定开发边界,推行绿色建筑和循环经济模式等,促使城市发展同资源环境相适应。

从产业布局角度来说,按照环境承载力来实施总量控制是硬性约束。对重点排污行业规划,环境影响评价要正确算出区域大气、水体等环境要素的纳污能力,将其当作审批新建、扩建项目污染物排放总量的最高限度。环评既要评价项目自身达标排放的情况,又要评价项目对区域环境容量的占用情况,保证区域污染物总量不超过环境承载力的“天花板”。

对于生态脆弱区,旅游、畜牧业等开发活动的承载力控制就更加细致。环境影响评价要根据对当地植被、土壤、水源、生物多样性承载力的核算来确定其“生态容量”,即景区每天能接待的最大游客数量、草场的合理载畜率等。把这些指标变成具体的管理规定,用控制进场人数、分时段限定区域等方法来防止过度开发造成生态服务功能的永久丧失。

(二) 预警机制与阈值管理

生态阈值给出了一条明确的临界警示线,使得环境管理由事后补救转变为事前预防。环境影响评价要识别项目或者规划区的主要生态阈值,在此基础上构建多层次的生态风险预警和响应机制。将环境监测、风险评价、管理决策紧密结合,构成一个动态闭环管理系统。

预警机制建立的第一步就是挑选可以有效反映系统状态,接近阈值的预警指标。湖泊生态系统主要指标有叶绿素 a 浓度、透明度、溶解氧水平等。环境影响评价报告上应该确定出安全阈值、警报阈值和行动阈值。监测数据的指标达到预

警阈值的 80% 时，就会向管理部门发出黄色警报，提高监测频次并启动备用措施；当监测数据不断恶化达到安全阈值的 95% 时，就会向有关部门发出红色警报，命令停止或限制一部分生产活动，开启应急净化工程等措施，防止系统超过临界点。

阈值管理属于以主动避险的方式来实施生态风险管理的一种手段。环境影响评价报告不能只是预测影响，还要给出具体的阈值管理措施。该方案应该包括一份行动路线图，明确监测责任主体、监测频率和方式、各级预警触发条件以及不同预警级别时所应采取的一系列管理对策。把阈值理论融入到日常的环境管理中，使决策更科学、更有前瞻性，有效防止环境退化的“温水煮青蛙”式发展，保证生态系统一直处于健康、有弹性的范围里。

（三）区域生态安全格局的构建

生态承载力和阈值理论是形成区域生态安全格局的理论基础。生态安全格局即为了保障和提升区域生态系统整体服务功能与稳定性，对国土空间战略性生态要素进行识别、保护的最优空间格局。环境影响评价，尤其是战略环境影响评价，在这个过程中起着不可替代的作用。

构建生态安全格局的第一步就是综合评价，辨识出该区域的生态源地。这些源地是生态系统的服务功能最强的、生物多样性最丰富、对区域生态过程起决定性作用的关键板块，一般是在承载力评价中确定的生态功能极重要区域。同时使用阈值分析来找出生态“脆断点”，即一旦被破坏就会导致整个区域生态系统产生连锁反应、造成系统性风险的脆弱区域，比如重要的水源涵养区、关键的物种迁徙通道等。这些区域一起构成了生态系统的核心保护区。

环境影响评价要对人类活动对生态过程的阻力进行分析，从而找出生态廊道。廊道是不同的“源地”之间互相联系的纽带，保证物质、能量、物种的流动，从而影响整个区域生态系统连通性以及整体的韧性。利用承载力和阈值分析，可以确定出廊道的适宜宽度和位置，保证廊道不被高强度开发所切割或者破坏。把各种重要的生态空间（源地、廊道等）联系起来，就可以构建出点线面结合的区域生态安全网络。

生态安全格局一确定，就成为该区域内所有开发建设活动必须遵循的空间底线，也就是生态保护红线。任何规划、项目的环境影响评价都必须对生态安全格局的影响作出评价，严禁任何形式的侵占或者破坏。承载力与阈值理论从宏观上

指导着国土空间生产、生活、生态三大空间合理布局，保护最关键的生态区域，引导开发建设活动在承载力允许范围内有条不紊地进行，最终实现区域发展生态安全和可持续性。

第五节 生态系统服务功能评估框架

生态系统服务功能评价把环境影响评价从局部转向整体。本文对概念、分类体系进行说明，提出环评各个阶段有效融合的方法，为科学决策提供可靠的方法论支持。

一、生态系统服务的概念与分类体系

正确界定生态系统服务的范围，科学构建生态系统服务的分类体系，是开展生态系统服务有效评估与管理的基础。本部分主要梳理国际公认的分类体系，为之后环评整合使用打下理论基础。

（一）MA 分类框架

千年生态系统评估框架是一套非常有影响力的生态系统服务分类体系。它由联合国以及多个国际组织于 21 世纪初发起，目的是对全球生态系统的变化给人类福祉带来的影响进行评估，从而给决策者提供科学的应对策略。MA 框架的核心思想就是把生态系统与人类福祉直接联系起来，明确地指出人类对生态系统所提供的各种惠益，这些惠益就是生态系统服务。该框架确定之后，生态系统功能的认识就由单一的生态学领域扩展到经济学、社会学以及政策科学等交叉学科之中，极大地提高了生态系统服务在世界环境治理议程中的话语权。

MA 框架把生态系统服务分成四类，供给服务，调节服务，文化服务和支持服务。该分类方法逻辑性强，包含着生态系统给人类带来的各种作用。供给服务最直接，直接提供物质产品；调节服务通过调节自然过程来维持宜居环境；文化服务满足人的精神需求；支持服务是其他所有服务产生的基础。这个四分法框架既给学术研究供应了共同的分析语言，又向公众和政策制定者显示，守护生态系统不是简单的环境问题，它同经济进展，社会公平以及人类生活品质有着联系，是个根本性问题，为后来的环境经济核算和生态补偿政策制订赋予了理论根基。

(二) TEEB 分类

生态系统和生物多样性经济学研究以 MA 框架为依据，对生态系统服务的经济学含义和政策应用方向做更深层次的探究。TEEB 项目的目的在于评估生物多样性丧失的经济成本，提供生态系统服务主流化的手段和工具。和 MA 框架相比，TEEB 分类体系更注重服务流向人类社会并产生价值的过程，提出了一个由生态系统结构到过程、功能、服务、惠益和价值的一个级联模型，清晰地揭示了价值产生的全过程。

TEEB 的分类体系在 MA 的基础上做了调整和细化，更利于经济学分析和价值评估。它把服务分成供给服务、调节服务、栖息地或者支持服务、文化服务和舒适服务这五类，其中栖息地或者支持服务同生物多样性维持功能联系更为密切，凸显了它在维持其它服务方面的重要作用。TEEB 分类的主要贡献就是：

- 1. 强化了经济学视角：整理出各种服务的经济评价方法，推动了生态系统服务价值化研究的规范化。
- 2. 突出了政策相关性，用大量的案例研究展示了生态系统服务纳入国家会计体系、土地利用规划、商业决策等各个领域的具体方法，使评估结果更具操作性。
- 3. 对应关系更加细致：该框架努力在生态过程和人类具体的获得惠益之间建立更明确的关系，方便量化的评估。

生态系统服务分类框架对比表

特征 / 框架	MA 分类框架	TEEB 分类框架
发起机构	联合国等多家国际机构	联合国环境规划署、欧盟委员会等
核心目的	评估全球生态系统变化对人类福祉影响，为决策提供科学建议	评估生物多样性丧失的经济成本，推动生态系统服务主流化
主要分类	供给服务、调节服务、文化服务、支持服务	供给服务、调节服务、栖息地或支持服务、文化和舒适服务
侧重点	生态系统与人类福祉的直接关联	服务流向人类社会并产生价值的经济学过程（级联模型）
应用导向	科学评估、政策建议	经济评估、政策整合、价值化研究

如生态系统服务分类框架对比表所示，TEEB 分类在 MA 基础上更侧重于经济视角与政策应用。

(三) 供给、调节、支持和文化服务功能

供给服务就是生态系统直接产生的、可供人类消耗或者利用的物质产品。

该类服务与人类生产生活最为密切，市场体系最容易认可它的价值。典型的供给服务有供给食物，如农作物、渔业产品、野生动植物；供给淡水，如饮用水、灌溉水、工业用水；供给木材、纤维、燃料，如薪柴、棉花、竹子等；供给生物化学物质、遗传资源，为药品研制、生物技术革新提供基础。项目建设对农田、林地、水域的占用或污染都会直接影响到这些供给服务的产量和质量。

调节服务是生态系统对自然过程的调控给人类带来的非物质惠益。这些服务对环境稳定、抵御自然灾害起着重要的作用，它们的价值大多数为隐性的，但是一旦遭到破坏，就会造成巨大的经济损失和社会损失。主要调节服务有：气候调节，森林、海洋吸收二氧化碳，缓解全球变暖；洪水调蓄，湿地、湖泊在暴雨时蓄积多余水量，减轻下游洪灾；水质净化，生态系统通过物理沉降、化学分解、生物吸收等途径去除水体中的污染物；病虫害控制，健康的生态系统可以维持天敌种群，抑制农业害虫和疾病传播媒介的爆发。

文化服务是指人们从生态系统中得到的非物质利益，主要满足人们精神、文化、认知等各方面的需要。此类服务同地区的文化认同、知识体系、审美情趣、身心健康密切相关，其价值带有强烈的主观性和地域性。文化服务功能主要表现在精神和宗教价值、美学价值、娱乐和生态旅游、教育和科研价值这四个方面。

支持服务指维持其他三种生态系统服务产生出的自然过程和生态功能，它们不会直接被人类利用，而是生态系统自我维持的基础。支持服务的作用是间接的、长期的，如同工厂的厂房和基础设备一样，给生产最终产品提供条件。核心支持服务有：土壤形成和保持，为植物提供生长基质和养分；营养物质循环，即碳、氮、磷等重要元素在生态系统中的循环过程，是生命活动的基础；初级生产，即绿色植物通过光合作用把太阳能转化为生物质能，是整个食物网的能量来源；以及为物种提供栖息地，维持生物多样性。在环评过程中如果忽略支持服务的影响，就可能造成对项目长期累积性生态风险严重低估。

二、生态系统服务评估在环评中的整合

将生态系统服务评估理念、方法融入传统环境影响评价中，是实现生态系统视角下环评科学化、精细化的主要途径。本部分主要对整合的途径以及核心技术环节进行阐述。

（一）将服务评估纳入影响识别与预测

传统的环境影响评价，影响识别一般只关注项目造成空气、水、土壤等单个环境要素物理化学指标变化。生态系统服务评估则把视角由要素转向功能，不单要关注生态系统结构的变化，还要考虑这种变化将怎样影响生态系统为人类提供惠益的能力。这就要求在环评初期即影响识别与筛选阶段，就对区域生态系统服务基线进行系统调查，识别出项目所在区域的主要生态系统服务类型、供给水平、空间分布和服务受益人群。

整合的过程就是形成一条清晰的“影响链”，即由项目活动引起生态系统结构、过程的变化，进而导致生态系统服务功能的改变，最终影响到人类福祉。以水利工程的兴建为例，它会致使河流流速发生改变，水文节律也会受到影响，这样一来，河流自身净化水质的能力就打上了问号，渔业资源的供应变得不确定，最终下游老百姓的饮用水安全以及渔民的生活来源都会受到牵连。采用这条分析链构建环评，可以更全面地揭示项目可能会带来的生态影响，对传统评价方法中所容易忽略的间接影响和累积影响也有更多的表现。预测环节要依靠生态模型，像 InVEST, ARIES 这些，模拟不同建设方案下重要生态系统服务供给量的时空变化，给方案比选和改进赋予定量依据。

把服务评价加入到影响识别当中时，也要重视服务的流动性以及受益人群在空间上的差异性。很多生态系统服务，像水源涵养、空气净化这些，产生的地方和受益的地方通常不一样。因此评价不能只局限于项目建设的直接影响范围，必须追溯服务流的路径，识别并评价下游或者下风向区域受益人群所受的影响。通过服务流分析，可以打破行政区域的束缚，从流域或者更大的区域来考察项目所造成的影响，从而避免决策的局限性以及由此带来的区域环境不公。这就需要环评工作做好区域间数据的整合以及协同分析，从而提高评价的科学性、系统性。

（二）服务损失与增益的量化与价值化

量化与价值化项目活动所引起的生态系统服务变化，是整合评估的核心技术环节，也是把生态影响纳入决策权衡的关键步骤。量化评估指运用科学的方法计算项目前后生态系统服务供给量的变化，并以物理单位来表达，比如每年固碳多少吨、净化水量多少立方米、提供栖息地面积多少公顷等。此过程一般会用到地理信息系统、遥感技术和生态系统过程模型。输入土地利用类型、植被覆盖、土壤类型、气象数据等基础信息，可以模拟生态系统生物物理过程，定量评估各项

服务的供给能力。量化结果给后面的影响显著性判断、生态补偿标准制定提供客观科学依据。

在量化评价的基础上,价值化评价用货币单位来度量生态系统服务变化的经济价值。其目的不是将自然商品化,而是在决策时,可以将生态系统所提供的贡献和造成的损失,与项目的经济效益等指标放在同一个框架内进行比较和权衡,使得那些在传统成本效益分析中常常被忽略的“外部性”影响显现出来。价值评估的方法很多,应根据服务类型选择合适的策略。木材、水产品等供给服务可以采用市场价值法;旅游休闲等文化服务可以采用旅行成本法或者享乐定价法;对于调节服务和非使用价值,由于没有市场交易,一般采用意愿调查法,如条件价值评估法、选择实验等陈述性偏好方法,或者采用恢复成本法、避免损害成本法等替代性市场技术。

量化、价值化的过程是复杂的,并且带有不确定性。生态模型的参数设定、基础数据的精确度、价值评判方法的选择、所牵涉到的伦理问题等,都会对最后的结果造成较大影响。给一个有独特精神价值的圣地定价,本身就会引起伦理争议。因此,在环评实践过程中应该对价值化结果持谨慎的态度,不能把其作为唯一的决策依据。更重要的是它所具有的信息揭示功能,经过量化和价值化之后,决策者对于各种开发方案的环境经济得失就有了更为清晰的认识,也更容易发现受不同影响的群体,进而推动有关资源分配和可持续发展的公众讨论。评估报告中应该详细说明所用的方法、数据来源、假设条件、结果的不确定性,保证决策过程的透明性和科学性。把量化成果同定性剖析、专家意见以及公众参与联系起来,才会有更加稳固、更加公允的评价结果。

(三) 基于服务功能的生态补偿决策

生态系统服务评估结果可以给制定科学、公平、高效的生态补偿方案提供直接的依据。传统的生态补偿,大多是对被占用的土地或者受损的植被进行简单的修复,缺乏针对性。根据服务功能的补偿决策,要求补偿措施要以恢复或者替代受损的关键生态系统服务为出发点,达到功能对等或者价值对等的补偿效果。补偿不仅要考虑“量”还要考虑其质量和类型。如果一个项目主要是对区域水源涵养服务造成损害,那么补偿措施就应当首先选择可以提高水源涵养能力的项目,比如在上游地区植树造林、退耕还湿等,而不是简单地其他地方种一片水源涵养能力较低的草坪。

服务评价量化及价值化的结果，可以成为制定补偿标准和规模的依据。计算项目造成的生态系统服务损失量以及经济价值可以为落实谁受益、谁补偿、谁损害、谁赔偿的原则提供可操作的工具。补偿额度可以是服务价值损失的总额，也可以是恢复同等服务功能所需成本。生态补偿由粗略估计变成了根据科学核算的精细化管理，使生态补偿更加合理、透明，减少生态补偿过程中的随意性。同时可以识别受益人，更准确地把补偿资金或项目导向到因项目建设而受损的社区、个人，保证社会公平。

基于服务功能的补偿决策催生了各种新型市场化补偿机制。生态银行或者栖息地银行等机制，开发者可以买断第三方专业机构修复或者创造出来的“生态系统服务信用”，以此来抵消自身项目引发的生态损害。分散的、小规模补偿项目集中起来，实现生态修复的规模化、专业化，从而提高生态恢复效果和资金使用效率。环评过程中根据服务评估结果要求项目方制定生态补偿方案，明确补偿目标服务、补偿方式（原地恢复、异地补偿、购买信用等），补偿时序安排和监测计划，把生态补偿作为项目许可的前置条件，保证生态补偿真正落地，实现区域生态系统服务占补平衡甚至净增加。

第二章 生态系统调查与监测方法

生态系统调查与监测是环境影响评价的基础,它依靠系统的数据采集和分析,给科学评判建设项目对生态环境的可能影响,预估生态系统的变化趋向,规划出有效的保护和恢复措施赋予了关键的科学支持,是达成生态系统健康持续管理的前提。

第一节 生态系统本底调查技术

生态系统本底调查就是对评价区在项目建设前生态系统的结构、功能和过程的实际情况进行全面、准确的认识。这项基础性的工作为之后影响预测和评价提供了重要的参照,调查质量的好坏直接关系到环境影响评价结果的可靠性和科学性。

一、调查方案设计与前期准备

科学合理的调查方案是高效、精准开展本底调查的蓝图。周密的前期准备,即明确调查目的、选择合适的技术手段、充分收集资料、组建一支精干的队伍,是保证调查工作顺利进行并获得高质量数据的前提。

(一) 调查范围、目标与内容的确定

调查范围的确定是本底调查的第一个环节。它不能只包括项目本身直接占用的区域,还要包含它所影响的周边地区,比如水文下游、大气污染物扩散区、关键物种迁徙通道等。评价范围的划定要以生态系统完整性为依据,考虑地形地貌、水系流域、植被类型等自然边界,保证主要生态关联区域被纳入调查范围。评价范围可以分为核心区、直接影响区、间接影响区,不同的区域调查精度和侧重点也不一样。

调查目标的確立要同环境影响评价的主要任务,也就是识别并评价项目可能造成的生态影响相联系。目标要具体、量化,确定区域内珍稀濒危物种的分布和

种群数量、评价区域重要生态服务功能的价值、确定区域的生态敏感区和生态脆弱区等。确定目标之后，才可以有目的的开展调查，避免盲目性、浪费资源。

调查内容是实现调查目的的载体，必须全面包含生态系统所有的组成要素。内容框架包括非生物环境要素、生物要素、社会经济要素。非生物环境包括地形地貌、气象、水文、土壤等；生物要素包含植被类型、物种组成、群落结构、生物多样性、关键种群动态等；社会经济要素包含土地利用现状、人类活动强度等。内容的深浅、宽窄要与项目性质、区域生态重要性、可能造成的影响严重程度相适应。

（二）调查技术路线与工作方法选择

调查技术路线是指导整个调查工作开展的逻辑框架和流程图，它清楚地描绘出从前期准备、野外调查、室内分析、数据处理到成果集成的全过程。技术路线的设计要突出系统性、综合性，多学科交叉、多技术融合要得到重视。一般来说，技术路线从资料收集、遥感解译开始，大致判识出区域生态格局，以此来指导野外调查样地的布设；然后进行实地调查和样品采集，将样品送至实验室进行分析测试；最后将所有数据整合分析，形成本底状况综合评估报告。

由于不同的工作方法会导致调查数据不能进行比较或者准确，所以要根据不同的调查内容选择标准、成熟并适用的方法。3S 技术即遥感、地理信息系统、全球定位系统，在宏观上应用于土地利用 / 覆盖变化分析、植被格局制图、生境评价等，可快速大面积获取空间信息。而野外实地调查对于中观和微观尺度来说是无可取代的。植物群落调查可使用样方法或者样线法；动物调查可以使用红外相机陷阱法、样线法或标志重捕法；土壤调查包含采样点布置、剖面观察等内容。实验室分析方法选择也十分重要，土壤理化性质测定、水质分析、生物样品分子鉴定等都要按照国家或行业标准严格进行，这样才能保证数据可信。

（三）图件、资料收集与人员组织培训

实地调查前要收集整理与评价区有关的已有的图件和文献资料，这是提高工作效率，完善调查方案的重要步骤。需要收集的图件有地形图、地质图、水文地质图、土壤类型图、土地利用现状图、植被类型图等。图件给解析区域自然地理背景，初步划定生态单元提供直观依据。文献资料有区域自然资源报告、环境质量报告、生态功能区划、相关科研论文、地方志、类似工程的环境影响评价报告等，可以给本底状况的描述提供历史数据和背景信息。

人员组织和培训属于保证调查质量的重要过程。生态系统调查是一项多学科综合性的工作，要组建一个专业结构合理的团队，团队成员应该涵盖植物学、动物学、土壤学、水文学、环境科学等领域的专家和技术人员。团队内部要建立好分工协作的制度。在调查开始之前，需要对所有的参与方进行系统培训。培训内容包括调查方案、技术规程讲解、调查表格填写、各种仪器设备使用方法、野外工作安全知识、数据质量控制要求等，统一技术标准、操作流程，尽可能减少人为因素造成的系统误差，保证不同调查小组得到的数据一致性、可比性。

二、非生物环境要素调查

非生物环境是生态系统存在的基础，也是生态系统获取能量的来源，非生物环境的特性和状况直接影响生物群落的种类、分布和演替。因此，对地形地貌、水文、气象、土壤及环境背景等非生物要素开展调查，是认识生态系统结构与功能的前提。这些要素的详细调查内容和典型方法，见非生物环境要素调查内容概览表。

非生物环境要素调查内容概览表

要素	调查内容 / 参数	典型方法
地形地貌	地貌类型、海拔、坡度、坡向、起伏度、微地貌单元	地形图分析、遥感解译、野外勘察、DEM 分析
水文地质	地表水（河流、湖泊、水库分布、径流量、水位）、地下水（含水层、埋深、富水性、补给径排）、水质（pH、DO、COD、氨氮、总磷、重金属）	水文站资料、流量测量、水系图绘制、钻孔勘探、物探、抽水试验、断面监测取样
气象气候	气温、降水量、湿度、风速风向、日照时数、蒸发量、极端天气事件	气象台站资料、临时观测点
土壤	土壤类型、分布、剖面构型、物理性质（容重、孔隙度、颗粒组成或机械组成、持水能力）、化学性质（pH、有机质、CEC、N、P、K、重金属、有机污染物）	资料收集、遥感解译、野外剖面观察、样品实验室分析
环境质量背景	大气、水、土、声环境中各项污染物本底浓度	监测点位布设、定时定频取样监测、实验室分析

（一）地形地貌与水文地质调查

地形地貌调查主要查明区域内地形地貌类型、形态、分布。调查内容主要是海拔、坡度、坡向、地表起伏度等宏观地形参数，以及冲沟、台地、洼地等微地

貌单元的识别与描述。调查方法一般采用地形图分析法、遥感影像解译法和野外踏勘法相结合的方法。用数字高程模型分析可以定量提取各种地形因子,为评价区域水土流失敏感性、生境异质性以及工程建设适宜性提供基本数据。地貌特征对局地小气候、土壤发育和植被分布等起着非常重要的作用,是生态空间分异的主要因素。

水文地质调查的主要内容是掌握区域内地下水、地表水的赋存状态、运动规律和水化学特征。地表水调查要确定主要河流、湖泊、水库的分布、径流量、水位变化规律及水体间的水力联系,调查手段有水文站资料收集、现场流量测量和水系图绘制。地下水调查主要是对含水层的类型、埋深、厚度、富水性以及地下水的补给、径流、排泄条件进行调查,采用钻孔勘探、物探、抽水试验等方法可以获得相关参数。

水文调查还要包含水质状况的评价。在代表性水体上设置监测断面,定时取样,测定水样的pH值、悬浮物、溶解氧、化学需氧量、氨氮、总磷、重金属等项目,以了解水体现状水质是否满足相应功能区划要求。对于评价项目建设对水环境的影响来说这些数据十分重要,特别是对于排放废水或者会改变水文情势的工程。

(二) 气象、气候要素与土壤理化性质调查

气象和气候要素调查的目的是了解评价区的光、热、水等气候资源特征及其变化规律。调查工作一般先从附近气象台站的长期观测资料开始,获取气温、降水量、湿度、风速、风向、日照时数、蒸发量等逐日或逐月的数据。根据统计数据可以判断出该区的气候类型,确定生长季节长短、热量水分盈亏和极端天气事件的发生频率。评价区没有气象站或者地形复杂导致小气候差异明显,需要设置临时观测点做短期同步观测来获得更准确的数据。气候条件是决定区域植被带性分布、农业生产潜力主要因素。

土壤是非生物界与生物界之间重要的环节,土壤性质调查是陆地生态系统评价的重要部分。土壤调查要查明区域内土壤类型、分布、剖面构型和理化性质。调查一般用资料收集、遥感解译的方式进行初步预判,以单元、发生、形态相结合的方式设置土壤采样点。采样点要遍及所有的母质种类,地形部位以及植被种类。

野外调查要进行土壤剖面观察,详细记录剖面层次、颜色、质地、结构、新生体等形态特征,并分层采集土壤样品。样品带回实验室进行分析。物理性质分

析主要是土壤容重、孔隙度、颗粒组成或机械组成、持水能力等，这些性质影响土壤的通气、保水、抗蚀能力。

从化学性质上来讲一般包括土壤pH值、有机质含量、阳离子交换量、氮、磷、钾等养分元素含量。根据项目的特点，还需要检测重金属、有机污染物等潜在污染物的含量。这些理化性质的数据可以综合反映土壤肥力状况、缓冲能力、环境质量，是评价土地生产力、预测污染物迁移转化、制定土地复垦方案的基础。

（三）环境质量背景值调查

环境质量背景值调查，是在项目开工前对大气、地表水、地下水、土壤、声环境等各项污染物的本底浓度或水平进行调查。背景值是评判项目建成后环境质量是否变坏的标准和参照，也是评价污染控制措施是否有效的依据。背景值调查结果的准确性会直接影响到环境影响评价结论的客观性、公正性。

调查工作首先要根据区域环境功能区划、潜在污染源分布情况科学布设监测点位。点位的选择要具有代表性，能够反映整个区域的环境质量状况以及环境敏感点的环境质量状况。大气监测点要考虑到主导风向以及污染源的上风向、下风向；水质监测断面应设在河流上游、功能区交界处和纳污水体；土壤背景点应选择远离污染源、人为干扰小的地方。监测时段、频率的设置要体现污染物浓度在不同季节、不同时段的变化规律，一般需连续或者间断监测一个水文年或者一个完整的季节，从而得到准确的年均值或者季节均值。监测项目根据项目产生的特征污染物及国家有关环境质量标准确定。

三、生物群落与种群调查

生物群落和种群是生态系统的主体，结构、多样性、动态直接反映了生态系统的健康状况。对区域内植物、动物、微生物进行系统调查，是确定关键物种、评价生态系统稳定性和服务功能、预测生态影响的基础。

（一）植物群落调查

植物群落调查主要是查明评价区的植被类型、群落结构、物种组成以及时空分布格局。它是生态系统评价中最基本的环节，因为植物属于生产者，是生态系统能量流动和物质循环的开始。调查一般用样方、样带、样点相结合的方法。

样方法是植物群落数量特征调查中使用最多、最基础的方法。在具有代表性的地段设置一定面积的样方，调查样方内植物种类、数量、高度、盖度、多度、

频度等。样方大小因群落类型而异，乔木林样方大于灌木林，灌木林样方大于草本群落。样方可随机、系统或者主观布设。通过对多个样方的数据进行综合分析，得到物种重要值、Shannon - Wiener 指数、Simpson 指数、群落相似性系数等，从而对群落进行定量描述。植物群落调查的主要内容可概括为：

1. 根据群落外貌、结构及优势种，划分群落类型，绘制植被类型分布图。
2. 物种组成及多样性，编制区域植物名录，重点研究国家、地方保护植物、特有种、古树名木的种类及数量。
3. 群落结构分析：描述群落的垂直结构（乔木、灌木、草本、地被）和水平结构（斑块性、镶嵌性）。
4. 生物量与生产力估算：通过实测或模型估算，评估植被的固碳能力和生产力水平。

样带法多用来探究植被随着环境梯度（海拔、坡向等）而变化的规律。无样地法，例如点中心四分法，适用于树木密度不能用样方统计的稀疏森林或者疏林草原。这些调查数据一起组成了对于区域植被本底情况的全面描述，是生境质量评定以及植被恢复方案制定的直接依据。

（二）动物种群调查

动物种群调查的目的是查明评价区域内的野生动物种类、数量、分布、栖息地状况以及迁徙规律。由于动物活动能力较强，隐蔽性大，因此动物的调查难度一般大于植物。因此需要根据不同的动物类群习性采用不同的调查技术。对于兽类一般使用红外相机陷阱的方式做长时间无干扰的监测，同时结合样线法记录足迹、粪便等痕迹，辅以当地居民访谈。此种组合形式有利于获取物种名录，并可估算某些物种的相对多度。

鸟类调查主要用样线法和样点法。调查员按照事先规划好的路线或者指定的样点，在鸟类活动高峰期（清晨、傍晚）进行观察和鸣声识别，并记录下遇到的所有的鸟类种类及数量。水鸟的调查应在固定的观察点使用望远镜进行同步调查。两栖爬行动物调查一般在夜间或者雨天进行，可以采用搜寻法、陷阱法。鱼类调查方法有电捕、刺网、地笼等，渔业统计资料也可以一并采用。昆虫等无脊椎动物的调查方法有扫网法、灯光诱捕法、马氏网法等。

所有的动物调查都要把受保护的珍稀濒危动物、有重要生态价值的指示动物作为重点。要对它的种群数量，散布范围，繁殖地，觅食地，迁徙通道等关键生

境展开调查并确定位置。这些信息是判断项目会否给关键物种带来严重危害，是否会破坏区域生物多样性的依据，也是决定项目位置和生态保护措施的重要标准。

（三）微生物群落调查与分子生物学技术

土壤和水体中微生物是生态系统物质循环、能量流动的重要驱动力，几乎参与所有的生物地球化学过程，例如有机质分解、氮固定、反硝化等。传统的微生物调查依靠纯培养技术，但环境中大多数微生物是不可培养的。这样传统的办法就很难完全反映生态系统中微生物群落结构和多样性。

现代分子生物学技术的发展越来越快，尤其是高通量测序技术在微生物生态学研究中的运用，给微生物生态学的研究带来了革命性的变化。这些技术不需要依靠微生物培养，可以从环境样品（土壤、水体、沉积物）中提取总脱氧核糖核酸，对某些特定标记基因（细菌的 16S rRNA 基因、真菌的 ITS 序列）进行扩增测序，快速、准确地得到样品中微生物的物种组成、相对丰度及群落结构。宏基因组学技术可以反映微生物群落整体功能潜力。分子技术手段使调查向更广处推进，可以揭示微生物群落对环境变化的响应机制，是评价生态系统健康状况和功能稳定性的有力工具，也是应对环境变化的有效手段。

第二节 生物多样性监测方法

生物多样性是生态系统健康和稳定的标志，对它实施科学有效的监测，是环境影响评价的重要内容。本节主要对生物多样性在遗传、物种、生态系统这三个层次上主要的监测方法和技术进行系统的阐述，为建设项目对生态环境可能造成的影响提供全面、准确的评价依据，保证评价的科学性、客观性，指导生态保护与修复实践。

一、遗传多样性监测技术

遗传多样性属于生物多样性内在的基础，涉及物种的适应能力以及进化的可能。遗传多样性的监测是反映环境变化对生物种群影响最根本的方法，是从分子层面进行的。通过对基因频率、等位基因变异情况等进行考察，可以了解种群遗传健康状况以及它同外部环境之间的相互关系，为提前预警、定点保护提供决策支持。

（一）同工酶电泳与 DNA 分子标记技术

同工酶电泳技术属于遗传多样性研究的早期手段，它经由探究生物体内酶在电场中迁移的不同来体现等位基因的变异。该方法成本低，操作简便，在早期种群遗传学研究中应用较多，可以直接提供基因位点的多态性以及杂合度信息，为种群遗传变异水平评估提供了一个初步的方法。

随着分子生物学的发展，以 DNA 为分子标记技术的多态性高、稳定性好、信息量大等特点，逐渐成为遗传多样性监测的主要手段。第一代标记技术，限制性片段长度多态性，使用限制性内切酶切割基因组 DNA，根据片段长度的不同来进行检测。第二代标记技术以聚合酶链式反应为基础，有随机扩增多态性 DNA、扩增片段长度多态性和简单重复序列（微卫星）等。其中简单重复序列标记由于其多态性高、共显性遗传、重复性好等特点，在种群遗传结构分析、亲缘关系鉴定、基因流分析等许多方面都有应用。

最新的分子标记技术用单核苷酸多态性代表，直接检测基因组上单个核苷酸的变异。单核苷酸多态性标记数量繁多，遍布全身，遗传又稳定，适宜做高通量的自动化检测。单核苷酸多态性标记与第二代测序技术相结合之后，可以实现以前未达到的高分辨率、广覆盖度的物种基因变异图谱的呈现，成为精确定量评价环境影响遗传效应的有效手段，大大促进保护遗传学、分子生态学的进步。

（二）种群遗传结构与基因流分析

种群遗传结构分析就是探究遗传变异在地理空间上的分布情况，种群内部及不同种群之间的分化程度。通过分析不同的地理居群个体分子标记数据可以得到等位基因频率，再用 F 统计量（Fst 值等）等来量化种群间的遗传分化。Fst 值越大，种群间的遗传差异越大，与地理隔离或者生殖隔离有关。分子变异分析可以把总的遗传变异分解成区域之间、区域内种群之间、种群内部，进而更细致地研究遗传结构形成的原因。

基因流是基因在种群之间迁移、交换的过程，是保持种群遗传联系、减缓遗传分化、补充遗传多样性的动力。环境中进行影响评价的时候，判断一个项目的建设（道路、大坝等）是否会对物种原有的基因流通道造成阻碍是非常重要的。基因流强度可以采用间接法或者直接法来估算。间接法一般用 Fst 值来推算，在一定的模型下，基因流大小和 Fst 值呈负相关。直接法用标记 - 释放 - 重捕、亲子鉴定等技术对个体的迁移、繁殖进行追踪。近些年来，依靠溯祖理论的贝叶斯

分析方法（像 IMA、Treemix 这些软件），可以凭借 DNA 序列数据，在比较复杂的种群历史背景之下推测基因流的方向、速率以及时间，这给评判生境破碎化带来的遗传影响赋予了更为精确的手段。

（三）遗传多样性指数的计算与评估

为了定量地描述和比较不同的种群遗传多样性水平，研究者建立了一系列的遗传多样性指数。这些指数一般根据分子标记数据计算得出，可以直观反映种群的遗传多样性、均匀度，是评价种群健康状况、适应能力的重要依据。

遗传多样性水平的评价，一般包含许多关键指数的计算与比较，具体见遗传多样性指数常见指标表。

遗传多样性指数常见指标表

指数名称	衡量内容	描述与意义
多态位点百分率	种群内变异基因的广度	种群内存在多态性（两个或以上等位基因）的基因座所占比例，反映遗传变异普遍性。
等位基因数	特定位点等位基因数量	在某一位点上观测到的所有等位基因的总数。
有效等位基因数	对遗传多样性有实际贡献的等位基因数量	考虑等位基因频率分布，对等位基因数量的加权统计，更精确反映实际贡献。
观测杂合度	种群中实际检测到的杂合子比例	种群中实际检测到的杂合子个体所占的比例。
期望杂合度	理论杂合度	根据哈迪 - 温伯格平衡定律，由等位基因频率计算出的理论杂合度。
核苷酸多样性 (π)	DNA 序列水平的平均差异	随机抽取的两条序列在核苷酸位点上的平均差异数。

由上表可以看出，对上述指数进行综合分析可以了解一个种群遗传多样性的总体状况。在环境影响评价时可以将受项目影响的区域和没有受影响的区域（对照区）的种群遗传多样性指数进行比较，以判断人类活动是否导致种群遗传多样性的丧失或者遗传侵蚀，从而为制定相应的保护措施提供科学依据。

二、物种多样性监测方法

物种是生态功能的基本单元，也是生物多样性最直观的体现，物种多样性变化是环境影响评价中最为关键且普遍受到关注的内容。对物种组成、数量、分布

和动态变化进行监测，可以对生态系统的健康状况、稳定性和服务功能受损情况进行直接判断。科学的监测方法为制定保护策略打下基础。

（一）物种编目与区系调查

物种编目是指对某一区域内所有的生物物种进行系统的调查、鉴定和登记，了解该区域生物多样性现状的一项基础性工作。此项工作一般要植物学、动物学、微生物学等各个领域的分类学家相互配合才能完成。调查方法根据目标类群的生物学习性而不同：植物调查常用样方法和样线法；大型哺乳动物可用红外相机、痕迹调查法；鸟类调查多用样点法和穿越法；昆虫调查用灯诱、马氏网等。全面编目可以形成该区域的物种名录，这是后续所有多样性分析的基础。

区系调查是在物种编目基础上，从地理分布和历史进化角度对某地区物种组成进行地理成分、特有现象、起源演化规律等研究。通过分析区系成分可判定该区域在全球生物地理格局中的地位及特性，能发现具有特殊保护价值的特有种、孑遗种等。通过对某山脉植物区系的分析，可以反映该山脉同邻近山脉、远方大陆板块之间曾经存在的联系。区系调查结果对于确定保护优先区、认识生物多样性格局形成原因有重要的科学意义。

翔实的物种编目和区系分析是做环境影响评价的前提，也是评价项目影响范围和强度的依据。用历史资料与现状调查做对比，可以确定环境改变造成物种局部消失或被外来种代替。对分布有大量特有种或者古老区系成分的地区，任何开发建设活动都应当持更加谨慎的态度，并采取更加严格的保护措施。

（二）物种丰富度、均匀度与多样性指数

对于物种多样性的量化分析，不应只对物种数量进行简单的统计，而应该包括物种数量和各个物种所占的数量。因此，生态学家提出了许多指数来度量群落多样性。

物种丰富度指数主要反映的是群落中物种数量多少。最简单的指标就是物种总数，即在样方或区域内记录到的全部物种数。Margalef 指数和 Gleason 指数在此基础上又考虑了样本大小（总个体数或者面积）的影响，使不同规模的群落之间有较好的可比性。高丰富度一般表示生态系统的结构更加复杂，能够提供更多的生态位。

物种均匀度指数是反映群落中各个物种个体数分布均匀程度的指标。Pielou 均匀度指数是常用的指标之一，Shannon-Wiener 指数计算得出的，取值范围为 0-1，

数值越接近 1，表示群落中各个物种的个体数分布越均匀，没有明显的优势种。高均匀度一般代表群落内部对资源利用更充分，系统的稳定性也会更好。

综合性物种多样性指数既包含物种丰富度又包含均匀度的信息。Shannon-Wiener 指数是从信息论中得出的，它的值越大代表群落物种多样性越高、不确定性越大。Simpson 指数是随机从群落中抽取两个个体属于同一物种的概率，Simpson 指数越小，多样性越高。实际使用中一般用 Simpson 指数的倒数或 $1 - \text{Simpson 指数}$ ，使数值变化方向与多样性高低一致。综合使用这些指数，可以为评价和比较不同生境的物种多样性状况提供定量的科学依据。

（三）珍稀濒危物种与指示物种监测

生物多样性监测中，某些物种由于它特殊的生态地位或者保护价值而需要受到特别的关注。珍稀濒危物种由于种群数量稀少、生存受到严重威胁，所以成为保护工作的重点。对其监测的第一项任务就是确定其准确的分布范围、种群数量、年龄结构、性别比例。监测技术手段多种多样，有样线调查、红外相机阵列、DNA 个体识别（粪便、毛发等非损伤性取样）、卫星追踪等。经过长时间的动态监测，可以判断种群是增加、减少还是稳定，分析种群面临的主要威胁因素（栖息地丧失、盗猎、环境污染等），评价保护措施（建立保护区、开展人工繁育等）的效果。

指示物种是对环境条件变化或其他物种状况敏感的物种。它们存在、缺失或者数量变化可以作为评价生态系统健康状况的“风向标”。理想的指示物种应该是易于监测、对某种环境压力反应强烈、分布与所指示的环境条件相关等等。有些地衣、苔藓对空气污染很敏感，可以作为大气质量的指示物种；石蚕、蜉蝣等水生昆虫对水体溶氧量、有机污染敏感，是水质监测的良好指标。在环境影响评价中选择合适的指示物种进行重点监测，可以在有限的资源下迅速有效的反映整个生态系统的环境变化。

三、生态系统多样性监测

生态系统多样性属于生物多样性的最高层次，它涉及某一区域内生态系统（或生境）类型的多样性，这些类型在空间上的排列组合方式（即景观格局），以及它们所承载的生态过程。生态系统多样性监测是从宏观上把握区域生态系统的整体结构、功能以及变化，对区域性开发规划以及生态安全格局的形成起着决定性

的作用。

（一）景观格局与生态系统类型制图

景观格局即景观组成单元，即不同类型的生态系统斑块在空间上的配置与组合，是生态过程在空间上作用的结果。景观格局分析给生态系统多样性的监测提供基本的内容。生态系统类型制图是格局分析的第一步，主要使用遥感和地理信息系统技术。通过对高分辨率卫星影像或者航空照片进行解译，结合实地调查，可以将某一地区的地表划分为森林、草原、湿地、农田、城市等不同的生态系统（或土地利用）类型，从而得到生态系统类型分布图。

得到生态系统类型图之后，可以利用景观生态学原理和专业分析软件来计算一系列景观格局指数，从而定量描述景观的结构特征。指数包括斑块水平的斑块面积、周长、形状指数，类型水平的某类生态系统总面积、斑块数、最大斑块指数，景观整体水平的斑块密度、边缘密度、斑块丰富度、香农多样性指数、优势度指数、聚集度指数等。这些指数可以从不同角度体现景观的破碎化水平、异质性、连通性和复杂性，给评判人类活动给区域生态系统总体结构带来的影响赋予量化指标。

（二）生态系统多样性的度量与评价

生态系统多样性度量与评价需要包含生态系统类型数量（ α 多样性），也要包含不同类型在空间上的交换和替代（ β 多样性），以及整个区域的总多样性（ γ 多样性）。

α 多样性即某一区域内生态系统类型丰富度，用区域内生态系统类型总数来表示。景观层面也可以借鉴物种多样性的方法，计算景观的香农多样性指数或者辛普森多样性指数，这些指数综合了生态系统类型的数量和面积比例，更能反映景观的异质性。景观中生态系统类型越多、各个类型面积分布越均匀， α 多样性就越高。

β 多样性是景观单元之间生态系统组成上的差异或相似。Whittaker 等人提出的 β 多样性指数，是通过比较不同样点或者区域的生态系统名录来计算得出的，数值越大，表示沿着环境梯度，生态系统更替的速度就越快，区域内生境的差异就越大。高 β 多样性表示区域可以给更多对生境有特殊要求的物种提供庇护所。 γ 多样性是区域或者景观的总多样性，是由 α 多样性和 β 多样性共同决定的。

对生态系统多样性的评价还要结合其功能和质量。利用遥感反演得到的植被净初级生产力、土壤保持量等指标，可以对不同的生态系统服务功能价值进行评价。根据综合景观格局指数、多尺度多样性指数、生态系统功能指标，可以对某一地区生态系统多样性现状、重要性以及外界干扰下稳定性做出评价。

（三）关键栖息地与生态廊道的监测

关键栖息地指对保持区域生物多样性有重大作用的特别区域，即珍稀物种的繁殖地、觅食地、水源地或者重要的自然遗迹。确定这些重要的栖息地之后，就可以开始进行保护工作了。它们一般依据物种分布模型、专家知识或者分析景观中资源富集的区域来确定。对重要栖息地的监测重点在于分析它的面积，完整度和内部生境质量变化。利用遥感影像动态观测一片湿地面积萎缩情况，或者用水质监测来判断其水体环境好坏。

生态廊道就是将不同的栖息地斑块连接起来的线状或带状生态系统，它保证物种可以在不同的栖息地之间移动、觅食、进行基因交流，对缓解生境破碎化所造成的不良影响起到关键作用。对生态廊道的监测要先用景观连通性分析（如最小成本路径分析）来识别出潜在的或者已有的廊道。监测的主要内容有廊道结构完整性（是否断开）、宽度、植被覆盖度、实际利用的物种。可以直接用红外相机、动物足迹监测板等记录动物穿越廊道的次数和种类，来评价廊道是否有效。项目建设在开展环境影响评价的时候，一定要保证不会把重要的生态廊道给切断，如果无法避免的要截断，那就应该设计并建造人工廊道，比如动物通道、过鱼设施等等来补偿。

第三节 生态系统关键参数识别

生态系统视角下的环境影响评价里，对关键参数进行准确的识别与量化，是开展科学评价的前提。这些参数包括生态系统结构、功能以及生态系统对环境变化的响应等各个方面，是认识生态系统现状、预测其发展变化的重要依据，为环境影响评价的深入、科学提供基础。生态系统关键参数可以分为结构参数、功能参数、状态与响应参数三类，分类及举例如下表所示：

生态系统关键参数分类与示例

分类	示例参数 / 指标	衡量侧重	作用 / 意义
结构参数	群落组成（多样性指数、优势种）、生物量、叶面积指数、年龄结构、空间格局	静态构成、物质基础	反映生态系统组织规律、提供基线数据
功能参数	能量流动效率、物质循环速率（分解 / 矿化速率）、蒸散量、营养级位置	动态过程、运行机制	体现生态系统生命力、能量物质转化效率
状态与响应参数	健康与活力指标（净初级生产力、生物完整性指数）、敏感性参数、关键 / 指示物种	健康状况、对干扰的反应	评估风险、指导管理决策、预警变化

如上表所示，各类参数从不同的角度反映生态系统复杂性，共同组成了环境影响评价的全面框架。

一、生态系统结构参数识别

生态系统结构是它的功能以及稳定性的物质基础和空间载体。结构参数识别是刻画生态系统静态特征，发现生态系统内部组织规律和物质组成。这是后续功能评价和响应预测的基础，给环境影响评价赋予了重要的基线数据和空间参照。

（一）群落组成与优势种、建群种识别

群落组成是反映生态系统结构最基本、最重要的参数之一，直接体现出生物多样性情况。通过测定物种丰富度、多度、频度等基本指标，再计算出多样性指数（香农 - 威纳指数、辛普森指数）、均匀度指数等综合指标，来综合反映群落的复杂性、稳定性。物种丰富、分布均匀的群落有更强的抵抗力和恢复力。

优势种就是群落中数量最多、生物量最大或者对群落影响最显著的物种。识别时一般用重要值（一个综合优势度指标）来判断。重要值是相对多度、相对频度和相对优势度（盖度或者生物量）的综合，可以全面反映物种在群落中的地位。优势种的健康状况及其动态变化，是评价整个群落乃至生态系统稳定性的风向标。

建群种是指决定群落环境特征，为其他物种创造必要生存条件的物种。乔木层建群种由于高大的树冠改变林下光照、温度、湿度条件，从而决定林下灌木、草本、微生物种类及分布。因此识别建群种对认识生态系统的中心构建者、保持其结构完整性有重要意义。一旦建群种受到损害或者消失，就有可能导致群落结

构发生颠覆性的变化。

（二）生物量、生产力与叶面积指数

生物量指的是某一时刻单位面积或者单位体积内生物体的总干重。是生态系统的能量、物质储存库，也是碳汇评价与能量流动分析的基础数据。生物量可分为地上生物量和地下生物量，对生物量的准确估计可以全面评价生态系统的物质存量和固碳能力。环境影响评价当中，项目建设引发的植被破坏会带来生物量的下降，对这种损失进行量化是评价生态影响的重要部分。

生产力，特别是净初级生产力，体现的是生态系统单位时间内通过光合作用净积累有机物的速率。它是体现生态系统活力与功能的基础，也是评价生态系统健康状况的重要指标之一。生产力的高低决定了生态系统能支撑多少消费者的生物量、能量流动的大小。

叶面积指数是指单位面积上植物叶片总面积的比值，是无量纲的参数。它体现植被冠层结构，决定植物截获太阳辐射多少，从而影响光合作用，蒸散，降水拦截等重要生态过程。叶面积指数把生态系统结构和功能联系起来，可以敏感地反映植被生长状况以及环境胁迫。环境影响评价过程中，利用遥感等手段可以对叶面积指数进行大范围的时空监测，从而判断项目活动对区域植被生长和生态功能的影响。

（三）年龄结构与空间格局参数

种群的年龄结构，也就是种群中各个年龄阶段的个体所占的比例，是判断种群动态和再生能力的重要参数。对于森林等以长寿物种为主的生态系统来说，通过对建群种或者优势种的年龄结构（即增长型、稳定型或者衰退型龄级分布）进行分析，可以判断其种群的更新情况以及未来的发展趋势。一个具有合理年龄梯度的种群，一般会具有自我维持的能力，这对于评价生态系统的长期稳定性很有意义。

空间格局指的是生态系统中物种个体、种群或者群落在空间上的分布情况，主要有聚集分布、随机分布和均匀分布这三种。这样的格局是由生物与环境、生物与生物之间的相互作用形成的，对资源获取、种内和种间竞争、协同作用以及能量和物质流动都有影响。植物聚集分布一般表示种子扩散受阻或者有利生境呈斑块状分布。

分析空间格局有利于认识生态系统的组织形式及内在机制。破碎化、斑块隔

离等格局的变化属于人类活动影响下常见的生态问题，会使得边缘效应加大，物种迁移受阻，从而降低生物多样性。因此，用景观指数等定量方法来描述项目建设前后的生态系统空间格局变化，就是评价项目对生态系统完整性、连通性的影响的重要环节。

年龄结构和空间格局参数一起表现出生态系统在时间上、空间上的组织特征。结构复杂、异质性高的生态系统稳定性较高，对干扰有较好的缓冲作用。把它们加入到评价体系当中，就能对潜在的环境影响的长期性以及空间累积效应比较有全面的认识，从而给生态保护和修复措施的制定给予科学依据。

二、生态系统功能参数识别

生态系统的功能是它内在生命力的动态表现，就是能量转化、物质循环、信息传递。功能参数的识别，就是揭示生态系统这个“活”系统是如何运行的、运行效率怎么样，为衡量人类活动对生态过程干扰的程度提供直接依据，是动态评价的重要要素。

（一）能量流动效率与营养级位置

生态系统中能量流动是单向的，从生产者（植物）通过食物链传给消费者。能量流动状况的评价，关键在于能量传递效率以及生物在营养级中的位置。能量流动效率的评估要用到一些重要的指标，这些指标一起反映生态系统中能量被利用、转化的效果。

1. 同化效率：指某一营养级的生物所摄取的能量中，能转化为自身可用能量的比例。该效率随着物种的生理特性和食物性质的不同而不同，比如食草动物对植物的同化效率就比食肉动物对猎物的同化效率要低。

2. 生产效率，即同化能量中用于生长、繁殖（即形成新生物量）的比例，是能量转化为下一营养级可利用物质的效率。

3. 营养级传递效率：著名的十分之一定律表示，能量从一个营养级到下一个营养级的平均传递效率为 10%。该参数是认识食物链长短及生态系统承载力的基础。

营养级位置决定着物种在食物网中的角色。传统的整数营养级划分正在被基于稳定同位素 ^{15}N 分析的连续营养级位置所补充，后者更能反映生物实际的食性。环境影响会改变物种组成或者行为，扰乱原有能量传递途径及效率。比如污染会

造成某些关键消费者消失，从而断掉某些能量流动途径，最后波及整个生态系统结构和功能。

（二）物质循环速率

不同于单向流动的能量，在生态系统中化学元素是循环利用的。物质循环的速率，而不是元素的存量，才是评判生态系统功能效率与稳定性的标准。在环境影响评价中要重视生态系统功能所依赖的生物地球化学循环，特别是碳、氮、磷等元素的循环速率参数。

分解速率是物质循环过程中的一个关键的、有影响的因素。凋落物分解快慢，决定着锁定于有机质中的养分何时能重新回到土壤中，供植物再次利用。通过凋落物分解实验（如使用分解袋测定），可得到某一环境下分解常数。这个参数直接体现了分解者群落（微生物，土壤动物）的活跃程度和效率，它会受到温度，湿度，凋落物质量等诸多因素的影响。

养分矿化速率指有机态养分（有机氮、有机磷等）被微生物转化成植物可吸收利用的无机态养分（铵根、硝酸根、磷酸根等）的速度。它是分解过程和初级生产的桥梁。用原位土壤培养等方法测定净矿化速率，净矿化速率越高，生态系统生产力水平就越高。

周转时间即元素在植物生物量、土壤有机质等库中平均停留的时间，是反映循环速率的综合指标。周转时间较短，一般表明物质循环系统更高效、更活跃。环境影响如酸沉降会加快土壤养分淋溶，土壤重金属污染会抑制微生物活性，减缓分解和矿化速率。这都会使物质循环速率、路径发生改变，进而影响生态系统长期健康和可持续性。

（三）水分平衡与蒸散量参数

水分是决定陆地生态系统功能的核心因素，水分的收支状况直接影响生态系统的类型、结构和生产力。水分平衡基本方程描述的是降水（输入）在生态系统中的分配，一部分通过蒸散发返回大气，一部分通过地表或者地下径流离开系统，剩下的部分引起系统内土壤水、地下水等储量的变化。

蒸散量是生态系统水分平衡中最为活跃和最重要的功能参数之一，它是由植被蒸腾和地表蒸发两大部分组成的。蒸散过程是水分循环的重要环节，也是地表能量平衡的重要部分。它会以潜热的形式消耗掉大量的太阳辐射能，对于调节区域气候、缓解地表增温有着不可忽视的作用。蒸散总量及其组成（尤其是植被蒸

腾)与植物的光合作用息息相关,所以蒸散量的多少可以间接体现生态系统的生产能力。蒸散量参数的评估可以采用涡度相关技术、蒸渗仪等直接观测的方式,也可以采用遥感模型(Penman-Monteith 模型、PT-JPL 模型)进行大范围的估算。森林砍伐、水体建设等土地利用方式的改变都会对下垫面蒸散特性产生影响,进而影响到区域水均衡以及微气候。这时,对这些参数的量化就成为评价水文生态效应的基础。

三、生态系统状态与响应参数

为了对环境影响评价做出预见性判断,需要评价生态系统目前的健康状况以及对将来压力的反应。此类参数包含了结构与功能的信息,给风险评价及管理决策赋予了直接的根据,成了联系评价与管理、达成可持续发展的纽带。

(一) 生态系统健康与活力指标

生态系统健康就是指它保持自身组织结构、进行自我调节和抵御外界干扰的能力。一般用一系列指标综合评定,活力、组织结构、恢复力为三个主要方面。活力是生态系统新陈代谢或生产力的大小,用净初级生产力或者总初级生产力来表示。一个有活力的系统可以固定能量,产生生物量。

组织结构是指生态系统内部组分(物种、群落)数量及其相互联系,用物种多样性、连通性指数或者食物网复杂性等参数来衡量。复杂的组织结构一般会使得功能冗余度更高,稳定性更好。恢复力是指生态系统遭受干扰之后,恢复到原来状态或者功能的能力与速率,是体现生态系统弹性的关键指标。

在实际操作中会选取一系列具体的量化指标来建立健康评价体系。用遥感技术获得的归一化植被指数可以对大面积、长时间段的植被活力进行监测。生物完整性指数是通过对某一类群(鱼类、底栖动物等)的群落结构与参照状态的偏离程度来评价水生态系统是否健康的指标。通过综合分析这些指标,可以对生态系统的总体健康状况做出定性或者定量的评价,给环境影响评价提供宏观基准。

(二) 生态系统对干扰的敏感性参数

生态敏感性是指生态系统受自然或者人为干扰时所表现出的反应程度,即它在外界压力下发生结构或者功能退化的可能性大小。敏感性高意味着即使受到很小的干扰,生态系统也会出现较大的负面效应,因此常常列为生态保护的重点。评估生态敏感性就是找出决定系统脆弱性的内在属性。地形陡峭、土壤容易遭受

侵蚀的地区对土地开发活动特别敏感；物种多样性低、功能冗余度低的生态系统，一旦失去关键物种就很容易崩溃。敏感性评价一般用指标叠加法，把不同的敏感因子（水土流失敏感性、土地荒漠化敏感性、生境重要性等）叠加生成综合敏感性分布图。对这些参数识别以后，规划阶段就可以避开高敏感区域，从一开始避免生态被破坏。

（三）关键物种与生态过程的指示参数

关键物种指的是在生态系统中，其发挥的作用远远大于其生物量的物种，它们的存在或者不存在都会对群落的结构和功能产生重大影响。关键物种可以是顶级捕食者，例如狼、海獭等，控制食草动物数量来保持植被的健康；也可以是生态系统工程师，比如河狸、珊瑚等，它们改变物理环境来给其他生物提供栖息地。识别并监测关键物种种群数量、健康状况、行为变化，可以有效地对生态系统可能出现的重大变化发出预警。

指示物种是对某一环境变化比较敏感的物种，它们的存在、消失或者状态变化可以作为环境质量的“信号灯”。地衣对空气污染（特别是二氧化硫）十分敏感，它的消失可以作为区域空气质量恶化的指示。水生昆虫对于水体溶氧量、有机污染有着明确的耐受限度，它们的群落组成发生变化，也是评判水质的好生物指标。通过监测指示物种或者指示过程（关键的传粉或者种子扩散过程等）的参数，可以以较低的成本高效地获取生态系统状态的早期预警信息，为及时的环境管理与干预提供依据。

第四节 遥感与地理信息系统技术在生态调查中的应用

现代空间信息技术的发展，特别是遥感、地理信息系统、全球定位系统这三者的融合使用，给生态环境调查提供了一种新的技术途径。这些技术具有宏观、动态、快速、准确等特点，可以弥补传统生态调查方法在空间尺度、时间序列上存在的不足，在生态系统视角下的环境影响评价中不可缺少。

一、遥感技术在生态调查中的应用

遥感技术属于一种非接触式的地球观测技术，可以对大范围的地面物体实施电磁波信息的获取。经过处理分析之后可以有效地提取出生态系统类型、结构、

功能参数，为生态现状调查评价提供丰富的基础数据源，也是宏观生态格局分析的重要技术。

（一）多光谱、高分辨率遥感影像解译

多光谱遥感技术利用传感器在不同的电磁波段上同时对地物进行观测，获得多个波段图像组成的数据立方体。地球上不同的地物，植被、水体、土壤、人造建筑等，对于不同波段的电磁波的反射、吸收特性存在较大的差异，差异形成了它们独有的“光谱指纹”。高分辨率影像给分析地物的空间结构、纹理和几何形状赋予了丰富的信息。根据光谱和空间特征来区分不同的生态类型，如阔叶林和针叶林可以区分，湿地的沼泽、滩涂等也可以准确区分。

影像解译是遥感影像提取有用信息的主要过程，主要分为目视解译和计算机自动分类两种方法。目视解译依靠专家的专业知识、经验，直接观察影像的色调、形状、大小、纹理、阴影等特征来判读地物类型，精度高但是效率低，适合小范围或者重要区域的详细调查。计算机自动分类是利用算法模型按照像元的光谱特征进行自动分组，分为监督分类和非监督分类。监督分类需要事先选取已知地物类型的训练样本，使计算机学习之后对整个影像进行分类；非监督分类不需要先验知识，计算机会自动将光谱特性相似的像元聚类成不同的类别，再由人工对这些类别进行定义。

在环境影响评价的生态调查阶段，多光谱、高分辨率影像解译有着非常大的作用。可以快速得到项目区及影响范围的土地利用、土地覆盖现状图，准确圈出森林、草地、湿地、农田等生态系统空间分布的边界。这有利于评价生态系统的完整性，可以识别出重要的生态功能区、生态敏感区，为后续的生物多样性调查、生境质量评价、工程占地分析提供准确的空间数据支持，是开展生态影响评价工作的基础。

（二）植被指数与植被覆盖度反演

植被指数是利用遥感影像不同波段的反射率进行数学运算得到的数值，可以简单有效地反映地表植被的生长状况和覆盖度。其中归一化差分植被指数是最常用的。其基本原理就是健康绿色植被在近红外波段反射率高，在红光波段由于叶绿素的光合作用而具有强烈的吸收特性。经过计算近红外波段和红光波段反射率之差再做归一化处理，得到的数值越大代表植被生长越旺盛、覆盖度越大。

植被覆盖度是植被冠层垂直投影面积占研究区总面积的百分数，是衡量一个

地区生态环境质量的指标。用植被指数反演植被覆盖度是遥感定量分析的重要应用。像元二分模型是一种简单有效的方法。该模型认为每个遥感影像像元的地表信息可以分为植被和土壤两部分，像元的植被指数值就是这两种组分信息贡献的线性组合。通过确定研究区完全被植被覆盖的像元（对应最大植被指数），和完全裸露土壤的像元（对应最小植被指数），建立植被指数和植被覆盖度的线性关系，就可以计算出每一个像元的植被覆盖度，得到全区的植被覆盖度空间分布图。这就给监测区域植被变化赋予了定量的科学依据，对森林恢复、草地退化、土地荒漠化等生态过程开展定量研究，评定工程建设给区域植被生态系统带来的影响，有着不可替代的价值。

（三）激光雷达与生物量估算

激光雷达是主动式遥感技术的一种，它向目标发射激光脉冲并接收反射回来的信号，可以准确地获取地表的三维空间信息，生成高密度的数字点云数据。与传统的光学遥感只能得到地表二维信息不同，激光雷达的激光脉冲能够穿透植被冠层到达地面，因此可以得到冠层顶部、内部和地面高程信息。这就使它在森林生态系统结构参数精细提取方面具有很大的优势。

用激光雷达点云数据可以反演出单木树高、冠幅、胸径、枝下高、冠层密度等一系列重要的森林垂直结构参数。经过点云滤波后可以得到地面点和植被点，进而得到数字高程模型和数字表面模型，两者之差为冠层高度模型，可以直接看出林分的垂直结构。地上生物量是评价森林生态系统碳储量、生产力等的指标。传统的生物量估算依靠耗时费力的野外样地调查。激光雷达技术可以利用提取的森林结构参数（树高、冠幅）拟合异速生长方程，把样地尺度上的生物量信息外推到整个区域，实现大范围、高精度的森林生物量空间制图。对项目建设产生的碳排放、森林生态系统服务功能的损失进行评价，都具有非常重要的科学意义。

二、地理信息系统空间分析技术

地理信息系统即能够对地理空间数据进行采集、存储、管理、分析、可视化的计算机系统。它是一个储存和展示生态调查数据的平台，也是一个强大的空间分析工具箱，能够发现数据之间隐藏的空间关系、空间格局、空间过程，给生态影响的深入分析和科学评价提供决策支持。

（一）生态系统类型制图与空间数据库构建

生态系统类型制图是在统一的地理坐标系下，综合遥感解译、野外调查等手段获得的生态信息，生成反映区域各种生态系统空间分布、面积、边界的专题地图。在地理信息系统环境中完成该过程，用矢量化、属性赋值等方式把森林、灌丛、草地、湿地、农田、城市等各种生态系统单元抽象成有明确空间位置和边界的多边形要素。

创建生态环境的空间数据库，为生态信息的有效管理和综合分析打下基础。按照一定的数据标准和结构，把生态系统图斑、水系、道路、居民点、地形地貌、土壤类型、生物多样性观测点位等所有生态相关的空间数据和属性数据，进行系统化、规范化地整理和保存。一个设计完善的数据库不仅包含地理要素本身，而且存储大量的地理要素属性信息。对于一个森林图斑来说，它的属性表里可以有面积、优势树种、林龄、郁闭度、生态系统服务价值等等。创建数据库一般有如下几个步骤：

1. 数据采集与预处理，收集项目区各种图纸、遥感影像、统计报表、野外调查数据，进行格式转换、坐标配准、数字处理。
2. 根据评价需要设计数据库的逻辑结构，确定数据分层、要素类及各个要素的属性字段。
3. 数据入库建库：根据设计的数据库结构把经过处理的数据录入到数据库管理系统中，创建空间索引来提高查询和分析的速度。
4. 元数据编制，给每一个数据集编写元数据，详细说明数据来源、精度、生产时间、坐标系统等信息，保证数据可追溯、可共享。该数据库成为后面所有空间分析的基础，也是环境影响评价实现信息化、可视化的基础平台。

（二）空间叠加分析与缓冲区分析

空间叠加分析是地理信息系统中最常用、最重要的功能之一，它把两个或者多个不同的主题图层在空间上叠加在一起，产生一个新的图层，新的图层继承了原来图层的所有属性。地理要素之间的空间联系就可被发现。在环境影响评价时，将拟建项目的工程布局图层和生态敏感区图层（自然保护区、饮用水水源保护区、珍稀物种栖息地）叠加起来，可以清楚、准确地判断出工程项目是否穿过或者占用生态敏感区，也可以准确算出被占用或者受影响的面积，为项目选址合理性分析及影响程度的量化评判提供直接证据。

缓冲区分析是研究地理要素空间邻近性的有效方法。它以点、线或者面状要素为中心，自动产生该要素周围一定宽度的区域，即缓冲区。这个宽度可以按照影响类型、影响强度来定。对新建公路两侧的野生动物活动走廊来说，可以将公路的中线作为划分不同缓冲带的依据（比如 50 米、100 米、200 米等），从而取得各种噪声、光照等影响的辐射范围。对点状污染源建立周围不同距离的缓冲区，叠加水系、居民点等图层，便可得到该点源的可能扩散范围及影响对象，为制定环保措施、确定保护距离提供科学依据。

（三）景观格局指数计算与分析

景观格局指的是景观的组成单元，也就是不同的生态系统类型的斑块在空间上的排列组合。景观格局指数是将景观格局信息高度浓缩，可以定量反映景观结构组成和空间配置特点的一系列指标。这些指数一般用地理信息系统软件平台（结合 FRAGSTATS 模块）计算，通过生态系统类型图或土地利用图获得，可以从斑块、类型、景观三个角度来描述景观的异质性。常用的景观格局指数及生态学意义，见下表：

常用的景观格局指数及生态学意义

指数名称	简要生态学意义
斑块密度	反映景观破碎化程度，斑块越多越破碎。
平均斑块面积	衡量斑块平均大小，面积越小越破碎。
边缘密度	表征生态系统交错带长度，与物种交流及边缘效应有关。
斑块形状指数	描述斑块形状复杂性，越复杂，物质能量交换越强。
聚集度指数	反映同类型斑块聚集或离散分布，影响物种迁移扩散。
香农多样性指数	衡量景观多样性和均匀性，值越高越多样稳定。

通过对项目建设前后这些景观格局指数变化状况的计算与分析，可以对工程活动造成的区域生态系统结构完整性的定量化评价，从而揭示出由于这种结构完整性破坏而引发的生境破碎化、孤岛化等生态问题。

三、“3S” 技术集成与动态监测

把全球定位系统，遥感，地理信息系统这三者融合起来，就形成了“3S”技术，可以对空间信息做到实时获取，动态分析并实现可视化管理。优点就是把生态背景调查从静态转化为动态，可以实时监测预警过程，从而使得环境影响评价更加科学和前瞻。

（一）全球定位系统定位与野外调查数据采集

全球定位系统具有全天候、高精度的三维定位特点，在现代生态野外调查中起着不可替代的作用。调查员手持全球定位系统接收机可以快速准确地获得调查样点、样线或者样方的地理坐标。不论是布设植被样方、采集土壤剖面、布设水质监测点、记录珍稀动植物位置，还是其他任何需要在野外进行的空间数据采集，全球定位系统都为野外数据提供了一定的空间基础，即野外数据有空间定位。

全球定位系统的应用远远不止是点位的记录。利用移动地理信息系统技术，野外调查员可以利用手机或平板电脑将采集到的物种信息、生境照片、环境参数等属性数据录入到和空间位置相关的电子表格或者数据库中。所见即所得的数据采集方式，大大提高了野外工作的效率和数据规范化水平。带有精确坐标的野外实测数据，是检验遥感影像解译精度的重要依据，也是充实、完善地理信息系统空间数据库属性信息的重要来源。这样就实现了天空与地面信息有效融合，可以保证生态调查结果的真实性、可靠性。

（二）遥感与地理信息系统结合的生态系统变化检测

生态系统是动态的系统，一次现状调查不能完全反映生态系统长期变化的趋势。遥感和地理信息系统相结合，可以为生态系统的动态变化检测提供强有力的技术支持。变化检测的核心就是用同一个地区、不同时间的几幅遥感影像对比，来识别地表在某个时间段内变化的地物类型以及变化量。

实现变化检测的技术手段有很多。可以直接对两期影像进行代数运算（差值法、比值法），突出像元值发生显著变化的区域；也可以分别对两期影像进行分类，再对分类结果图进行叠加比较（分类后比较法），得到详细的“从-到”变化信息矩阵，精确统计出各类生态系统之间相互转化的面积。像这样的，就可以知道有多少林地变成了建设用地，或者有多少耕地退耕还林。

地理信息系统在此过程中起着非常重要的作用。它既给多时相遥感影像精确配准赋予了平台，又对变化检测成果作了深入的空间统计分析并加以可视化展示。利用地理信息系统可以将检测出的变化图斑与项目工程范围、行政区划、自然保护区边界等其它空间数据叠加分析，从而得出变化的原因，对某一个区域的生态系统演变的速率和模式作出评价。依靠长时间序列数据进行动态分析，环境影响评价就从“静态快照”变为“动态过程”，可以更加科学地预估和评价工程建设所产生出的长期累积生态影响。

（三）生态环境动态监测与预警系统构建

基于 3S 技术的集成创建区域生态环境动态监测和预警系统，就是生态系统视角下环境影响评价方法学走向现代化的重要表现。这个体系是个把数据采集、数据处理、数据分析、数据管理、决策支持集合起来的综合信息平台。它把地理信息系统空间数据库当作核心，定时同最新遥感影像数据和地面监测站点数据融合起来，于是就产生了一条持续更新的生态环境信息流。

利用创建的数据自动处理模型，定时产出区域的植被覆盖、水体面积、土地利用格局等主要生态指标专题数据产品，经过同历史的比较，可以迅速发现异常区域。在此基础上就可以建立生态环境预警模型。以森林覆盖率、湿地萎缩速率这些生态指标的安全阈值来举例，森林覆盖率的下限、湿地萎缩的警戒线之类，当监测数据达到或者超出这一阈值的时候，系统就会自动发出警告信息，并且用地图、图表的形式显示出问题出现的地方、严重程度以及发展趋势。主动式监测预警机制出现以后，改变了以前被动滞后式环境管理的模式，使得管理者可以及时发现潜在的生态风险，采取预防措施来避免或者减轻重大生态环境问题的发生，最终达到生态系统精细化、智能化管理的目的。

第三章 生态系统影响识别与预测模型

第一节 生态系统影响因子识别

影响因子是引起环境发生改变的根源，对它的准确识别，正是开展环境影响评价工作的根本。本文从分类筛选、作用途径和范围界定三个方面入手，研究影响因子识别体系的建立，希望构建出一个全面且能突出主要问题的识别体系，保证评价的科学性和针对性。

一、影响因子的分类与筛选

为了系统认识并有效管理复杂的影响因子，必须要建立科学的分类体系，并采用高效的方法筛选出对生态系统构成主要威胁的因素。这是保证评价资源合理分配和保证评价深入的前提，可以避免面面俱到但重点不突出的困境。

（一）按来源分类：建设项目、区域开发、政策法规

影响因子的来源是多层次的，对其进行分类有利于追本溯源，在源头上对影响因子进行有效的控制和管理。建设项目是最直接最普遍的一类，建设项目工程活动本身，大坝修建引起河流生态水文情势变化、道路建设割裂野生动物栖息地、工厂生产排放污染物等都会直接干扰到生态系统。此类因子的特点是来源清楚，影响比较集中，容易在项目层面识别和量化。

区域开发活动产生的影响因子就更加宏观、复杂。它一般是由一系列相互联系的建设项目、土地利用的变化组成的，例如新城区开发、大型工业园区建设或者流域综合治理等。这类影响因子是区域土地覆被巨变的影响因子、能源与水资源耗费激增的影响因子、污染物排放总量累积的影响因子、基础设施网络形成的影响因子所导致的生态格局巨变。其影响一般是多点、多源、相互交织的复杂特性。

政策法规则属于一种特殊的、影响方式较为间接但可能会产生深远影响的驱动因子来源。一项农业补贴政策能够改变区域内的种植结构，进而影响到土壤的健康和生物多样性；一项能源政策会推进清洁能源的发展，从而减少温室气体排

放，给气候系统带来积极影响；城市规划法规直接决定了未来城市发展走向以及模式，对于区域生态安全格局来说具有深远的意义。因此从生态系统角度出发评价时，必须将宏观政策驱动力纳入其中。

（二）按性质分类：物理、化学、生物、社会经济

按照影响因子的内在属性来划分，能够更好地认识其作用机理与生态效应。物理性影响因子主要是工程活动等引起能量形式或者物质形态改变。噪声、振动对动物行为造成的干扰；大型水利工程造成的水温、流速、泥沙含量等水文情势的变化；地面硬化、热岛效应对局部小气候的影响。这些都会直接改变生物赖以生存的环境物理条件。

化学性影响因子属于环境影响评价当中较为重视的一类，多牵涉到物质的化学成分以及浓度的改变。工业废水、废气、固体废物中含有的重金属、持久性有机污染物等有毒有害物质在食物链中富集，对生态系统的健康造成长期的危害。农业活动中化肥、农药使用过多，会造成水体富营养化和土壤污染。这些化学物质的迁移转化过程比较复杂，影响范围也更广。

生物性影响因子直接对生态系统中的生物组成起作用。外来物种引进之后由于缺少天敌而大量繁殖，侵占本地物种的生存空间，破坏食物网结构，造成本地物种灭绝。工程建设造成的栖息地破坏、破碎化，使生物的生存空间被缩小，种群间不能进行交流，是造成生物多样性丧失的主要原因之一。微生物病原体的传播属于这一类。

社会经济影响因子是表现人类社会系统与生态系统之间的联系。人口密度增大、产业结构调整、居民生活方式改变、土地所有权变动、传统文化景观的改变等都会给生态系统造成压力。像旅游业过度发展会打扰野生动物，破坏植被，产生大量垃圾。将社会经济因子纳入分析，体现的是生态系统视角下评价方法学整体性的特点，人是生态系统中不可分割的一部分。

（三）关键影响因子的筛选方法

面对众多的影响因子，评价工作要进行筛选，把重点放在那些会导致明显生态变化的“关键因子”上。要求评价过程不但要具有全面性，而且要追求精准性。合理选择灵活运用适合的方法来提高评价效率和科学性。

常用的筛选方法就是多种技术手段的综合使用。下面列出了一些常见的方法和特点，见关键影响因素筛选方法比较表。

关键影响因子筛选方法比较表

筛选方法	核心机制	应用优势
矩阵分析法 (如利奥波德矩阵)	构建“活动 - 要素”矩阵，半定量打分评估相互作用	直观呈现复杂关系；有助于初步识别重要影响
专家咨询法 (如德尔非法)	邀请多领域专家，匿名打分、多轮反馈达成共识	充分利用专家经验智慧；对复杂或新兴问题有效
清单核查法	依据预设清单，逐项核对潜在影响因子	标准化程度高；操作简便；不易遗漏常见影响
类比分析法	借鉴类似项目或相似环境案例的数据与教训	提高预测准确性；节省时间和资源；提供实证参考

1. 矩阵分析法，建立“人类活动 - 环境要素”矩阵，找出项目活动和生态系统各个要素之间的相互作用。著名的利奥波德矩阵就是用半定量评分法对影响进行筛选，直观地找出最主要的影响。

2. 专家咨询法，采用专家系统或德尔菲法，邀请各方面的专家对可能产生的影响因子的重要程度、影响力、影响时长等方面进行匿名打分，多轮征求达成一致意见，从而确定关键因子。该方法可以很好地综合专家的经验知识和判断力。

3. 清单核查法：按照某个行业的特点或者工程项目的类型，使用事先编制好的影响因子清单逐项核对。该方法结构化程度高，不容易遗漏，适合于标准化程度较高的建设项目。

4. 类比分析法，即对同类型或者相似环境下已经发生过的其他项目环保数据、经验教训进行研究，从而预测并选择出本项目可能会产生重大影响的环境因素。此方法要求有高质量的案例数据，并且要准确地确定类比条件。

实践中一般会结合使用这些方法，先利用清单法、矩阵法进行初步的、广泛的识别，再辅以专家咨询法、类比分析法进行深入的、聚焦筛选，最后确定出需要重点评价的关键影响因子集合。

二、影响途径与作用链分析

找出影响因子之后，核心任务就是分析它们是如何通过什么途径对生态系统产生影响的，并形成怎样的因果链条。仅仅罗列因子是不足以的，必须对因子的传递过程和内在联系做深入的分析，才能准确预测生态系统对因子变化的响应。

(一) 直接影响、间接影响与累积影响

环境影响并不是孤立的，而是通过复杂途径和形式表现出来的。直接影响就

是项目活动对生态系统造成的最初、第一层的冲击。化工厂废水排口造成下游河段水质变坏；露天开采直接破坏地表植被、土壤，毁坏土地生态系统。此类影响同项目活动之间存在着直接的因果联系，时空上彼此紧密相联，较易确定并且进行预测。

间接影响是由直接影响引起的次生或者更高层次的连锁反应。它在时间、空间上同项目活动有一定距离，具有隐蔽性。水质变差会引起鱼类死亡，进而影响吃鱼类的水鸟数量，最后改变整个水生食物网的结构。道路建设导致的栖息地被割裂，会影响动物的迁徙，造成小种群遗传多样性降低、局部灭绝概率增加。

累积影响属于生态系统视角下环境影响评价的重点和难点。它是由过去、现在和可以预见的未来一系列独立或者互相联系的活动所产生，随着时间和空间的积累而形成的综合环境影响。单个活动影响很小，但是多个活动的叠加就会突破生态系统的阈值，产生质变。流域内多个小型水电站建设，从单个来看影响不大，但累积起来却会彻底改变整个河流的生态连通性以及水文节律。累积影响还包括协同效应，即不同的影响因子相互之间会产生影响，其影响效果大于各个影响因子的影响效果之和。

（二）影响的“压力－状态－响应”链条

采用 PSR（压力 - 状态 - 响应）模型，对从人类活动到生态系统变化再到社会响应的全过程进行梳理，是十分有效的方法。该模型最早是由经济合作与发展组织提出，目前被广泛地应用于环境评价和报告领域，很好地揭示了人与环境之间相互影响的关系。

压力指人类活动给环境造成的负荷，是产生影响的来源和动力。这可以是资源的过度索取，比如水资源开采、土地利用变化，也可以是污染物的无序排放，比如工业废气、农业面源污染。评价过程中压力一般用可量化的指标来表示，污染物排放量、土地开发强度等。认识并分析压力，就是认识环境问题产生的原因。

状态指在人类活动压力下，生态系统状况和质量。这是压力的直接结果，即环境要素以及生态系统结构、功能的变化。水体污染物浓度、土壤健康水平、生物多样性程度、森林覆盖率等。对状态进行监测和评价，是判断环境质量好坏、生态系统是否健康的依据。

而“响应”是指社会为适应环境变化所做出的各种行为，包括政策制定、法律完善、管理行为、公众意识提高等等。政府对于水体富营养化问题会采取更加

严格的排污标准来应对，并开展生态修复等回应措施。反应既可以是对负面状态的补救，也可以是对压力的直接干预。PSR 模型依靠形成完备的逻辑闭环，使评价者在发现并认识问题的时候，也能全面顾及到解决的策略和手段，把评价同管理决策有效地衔接起来。

（三）影响网络图的构建与分析

为了更直观、全面地展示各个影响因子之间复杂的联系，用影响网络图是一种高效的方法。与线性因果链不同的是，网络图可以体现影响之间的交叉、反馈和多路径传递的特点，更贴近生态系统作为一个复杂网络的真实属性。

建立影响网络图首先要确定网络中的节点和边。节点可以代表项目活动、影响因子、生态系统组分（物种、栖息地）、生态过程（水循环、能量流动）等。边表示节点之间的因果关系或者相互作用，一般用有向箭头来表示，箭头的方向表示影响的传递路径。箭头从工业废水排放指向水体中重金属浓度，再从后者指向鱼类体内重金属富集，最后指向渔业资源价值下降。

影响网络图可以反映很多深层次的信息。按照节点度（所连接边数）来分析可以发现主导因子和感受器。在网络中找到路径，可以追踪源头到终点所有的影响链。更重要的是它能够发现反馈回路，即植被被破坏导致水土流失加重，而土壤贫瘠化又反过来加重植被难以恢复的恶性循环。对系统进行这样的分析，就能找到干预的关键节点，就是在何处实施干预措施，才能最有效地阻止负面的影响蔓延，或者推动整个系统向积极的恢复方向转变，从而让缓解措施的制定更有战略眼光和系统思维。

三、影响范围的界定与分级

确定影响范围以及程度，是进行有效评价、制定有针对性的保护措施的前提。本节重点研究怎样科学界定影响范围，对影响进行量化分级，从而给影响的价值评判和管理决策赋予客观依据，成为联系科学分析和实际管理的纽带。

（一）空间范围：项目区、影响区、外围区

确定影响的空间范围是评价工作的基础，一般将影响分为不同的层次。项目区就是直接占用区，范围最明确的部分，指的是建设项目永久或者临时占用到的土地和水域。例如，工厂厂区、水库淹没区、公路线路本身等。该区域原生生态系统一般被彻底改变或完全取代。

影响区是指项目活动所产生影响可以直达或间接到达,使生态系统结构、功能产生可观测变化的区域。其边界远大于项目区,而且根据影响类型不同而不同。大气影响区指的是污染物扩散模型预测出的超标浓度覆盖范围;水环境影响区指的是下游受到污染的河段;噪声影响区指的是声环境质量发生明显变化的区域;生态影响区指的是受项目活动干扰的整个野生动物种群活动范围。影响区的划分要按照科学模型预测、类比分析、现场监测。

外围区,又称为关注区,是直接影響區以外的一个更大的地理单元,一般以生态系统完整性为依据来确定,如整个流域、区域生态廊道、重要生态功能区等。尽管该区域内项目的影响已经不那么重要了,但是它却是评价累积影响、分析区域生态安全格局、设定生态参照系的重要空间尺度。考虑外围区,是从孤立的项目评价向基于区域生态系统的整体性评价转变。

(二) 时间范围: 建设期、运营期、退役期

环境影响评价要贯穿项目整个生命周期,各个阶段的影响特征和强度不一样。建设期是项目对环境造成扰动最严重的一个时期,但是持续时间较短。该阶段的影响主要有,土地开挖、植被清除、扬尘、施工噪声、对当地交通及社区的临时影响等。这些影响大多都是急性的、可逆的,但如果处理不当,也会造成水土流失、物种栖息地永久丧失等长期的后果。

运营期是项目产生效益的时期,也是项目长期、持续环境影响主要发生的时间段。工厂在运作过程中不断排出废水废气,消耗资源能源,水电站运行时会对河流的水文情势造成持久的影响。这些影响是慢性、累积的,累积效应是评价的重点。运营期影响特征同项目工艺水平、管理质量、环保设施运转状况等有关。

退役期是项目生命周期的终点,但是其环境影响并不会随之结束。拆除设施会产大量的固体废物和噪声,遗留的场地会存在土壤和地下水污染的风险。所以评价中必须要有退役后生态恢复、场地修复的计划。完整的生命周期评价,保证项目整个生命周期的环境责任都能被考虑进去,防止短视行为给生态系统带来不可逆的损害。从生态系统角度看,退役期是开始生态恢复和重建的良机。

(三) 影响程度的分级标准与量化

为了使得评价的结果更具有客观性,且便于进行对比,就必须创建一个标准化的评价体系对影响程度做出定级量化的判定。这有利于决策者比较不同的影响,衡量利弊。量化的前提是确定评价基线,即在没有项目活动时生态系统的自然状

态及变化趋势，所有的影响的评价都以此基线为参照。

影响程度的分级通常会综合考虑多个维度的标准，形成一个综合性的判断：

1. 影响的性质：判断影响是积极的还是消极的。
2. 影响的强度，即影响使环境要素或者生态参数偏离基线的程度，比如污染物浓度超过环境标准的倍数，或者物种丰富度减少的百分比。
3. 影响的范围：指影响在空间上的广度，是局部的、区域性的还是跨国界的。
4. 影响的持续时间：影响是暂时的（施工期噪声），长期的（运营期排放），还是永久的（土地占用）。
5. 影响的可逆性，指影响源消失以后，受影响的生态系统能否自行恢复到原来的状态，以及恢复需要的时间。
6. 影响的重要性，由受影响的对象是否珍贵或者敏感来决定。珍稀濒危物种栖息地受到轻微影响，它的重要性就会比一般的农业生态系统受到的明显影响大得多。

对上述标准进行定性描述或者半定量赋值，就可以把影响区分为重大、显著、一般、轻微等不同的等级，进而给环境管理措施的制订以及项目方案的选择赋予明确的决策依据。

第二节 生态过程模拟与预测

在从生态系统角度出发来进行生态环境影响评价的时候，模拟和预测作为现状分析和影响评价之间的关键联系纽带。通过建立科学的数学模型可以定量地、动态地反映出生态系统受内外部驱动力影响所发生的变化，从而给决策提供具有前瞻性的科学依据。

一、生物地球化学循环过程模拟

生物地球化学循环是生态系统物质循环和能量转化的中心。模拟这些过程，对于评价工程建设、土地利用变化等人为活动对生态系统功能稳定性长期影响十分重要，也是认识生态系统响应机制的重要途径。

（一）碳、氮、磷循环模型

碳、氮、磷是构成生命的基本元素，它们的循环过程影响生态系统的生产力、

稳定性、环境质量。环境影响评价所用的碳、氮、磷循环模型，多数是过程机理模型，试图模拟这些元素在生态系统各个圈层（大气、植被、土壤、水体）之间迁移、转化、储存的过程。像 CENTURY 模型、Biome-BGC 模型这些常常用来模拟陆地生态系统碳氮动态的模型，可以细致地模拟光合作用、呼吸作用、凋落物分解、土壤有机质形成与矿化这些过程，从而评价土地利用改变或者气候变化情形下，生态系统碳汇功能和土壤肥力会怎样变化。

在水生生态系统中常用水质模型模拟氮、磷等营养元素的循环。除了能模拟流域水文过程，SWAT 模型还有一个比较复杂的营养盐循环模块，能预测不同土地利用方式、点源、面源污染输入下，河流中断面氮磷浓度和负荷随时间、空间的变化。用数学方程组来描述复杂的生物化学反应，比如硝化、反硝化、磷吸附解吸等，通过求解方程组来对水体富营养化的风险进行动态评价和预警。

应用这些模型，环境影响评价就不再只是对静态的污染物浓度进行分析，而是可以深入到生态系统内部，揭示污染负荷对初级生产力、食物网结构、整个生态系统健康的影响。模型可以用来比较不同开发方案下关键元素循环通量的影响程度，找到存在的生态风险阈值，进而给制定更加科学合理的生态补偿、环境管理措施提供定量的依据。选择模型的时候要考虑到评价区域的生态特性、主要环境问题以及数据是否好获取，保证模型结构和评价目的相适应。

（二）模型参数率定与验证

模型参数的率定（校准）与验证是保证模拟预测结果可靠性的必要过程，也是模型由理论走向实际应用的重要过程。未经校准、验证的模型，其输出结果的不确定性很高，不能为环境影响评价提供科学的依据。参数校准，也就是模型校准，就是调整模型中不能直接测量的参数（反应速率常数、分配系数等），使模型输出值与实测观测值（土壤有机碳含量、河流氮磷浓度等）之间的误差最小化。一般通过优化算法来寻找最佳参数组合，优化算法有手动试错法、遗传算法、贝叶斯方法等。

验证是使用另一组独立的观测数据来检验已经校准过的模型，评价其对于新数据环境的预测能力以及泛化能力。一般将收集到的现场数据分为两部分，一部分做参数率定，一部分做模型验证。衡量模型性能的指标有决定系数（ R^2 ）、纳什效率系数、均方根误差等统计量。理想的模型在率定和验证时都应该是准确的、稳定的。如果验证结果不理想，就需要重新检查模型结构、参数的物理意义或者

数据质量，然后重新进行率定，这是一个循环往复的过程。整个率定和验证过程的透明化、规范化，是保证环境影响评价结论科学性、公信力的前提。

（三）不同情景下的循环过程变化预测

完成模型率定和验证之后，环境影响评价的核心任务就是建立不同的情景，预测未来生态系统中生物地球化学循环会发生什么样的变化。情景分析就是把抽象的开发活动或者环境变化转变为具体的模型输入，进而定量评估它可能产生的环境影响。

情景的设定需要紧密结合评价对象的具体特征和潜在影响。

1. 土地利用变化情景：模拟项目建设（如城市扩张、道路建设、农业开垦）造成的植被类型、覆盖率、土壤管理方式的变化，把这些参数输入模型中预测其对区域碳储量、土壤养分流失、水体氮磷负荷的影响。

2. 气候变化情景，利用耦合的全球或者区域气候模型（GCMs/RCMs）预测结果，设定未来不同的温室气体排放路径下气温、降水、辐射等气象驱动数据，用来评价气候变化与项目建设叠加效应对元素循环的长期影响。

3. 污染排放情景：按照项目工程设计方案设定不同的污染物排放水平（污水处理厂尾水排放标准、农业施肥量等）来模拟对下游水体生态系统氮磷循环及富营养化程度的影响。

通过对基线情景（无项目建设活动）与各种开发情景模拟结果的对比，可以很直观地看出由于项目建设活动导致的元素循环通量、速率和储量变化的幅度和方向，为方案选择、影响规避和生态修复措施的制定提供直接的定量依据。

二、水文生态过程模拟

水是生态系统的命脉，水文过程塑造地貌，影响物质迁移、植被分布、生物栖息地的形成。水文生态过程模拟，就是定量描述人类活动对流域水循环和生态效应的影响，是涉及水资源的工程进行环境影响评价时不可缺少的技术手段。

（一）流域水文模型

流域水文模型是用来模拟、预测某一流域内水文循环过程的数学模型。它把流域作为基本单元，考虑了降水、蒸发、截留、下渗、壤中流、地下径流和河道汇流等许多复杂过程。按照对物理过程的描述是否细致，可以将模型分为集总式、半分布式、分布式模型。分布式水文模型如 SWAT、MIKE SHE 等可以很好地表

达流域的空间异质性，即地形、土壤、土地利用等，因此在环境影响评价中得到了广泛的应用。该类模型把流域分成若干子单元或者网格，对每一个单元进行独立的水平衡计算，然后利用河网演算模块把各个单元的出流汇合到流域出口，得到任意断面的流量、水量等信息。

流域水文模型在环境影响评价中的关键作用，就是对由于建设或土地利用变化给水资源在时间、空间上的分配造成的具体影响进行量化。通过改变模型中土地利用的输入图层，可以模拟大规模城市化（不透水面增加）造成洪峰流量增大、峰现时间提前等影响，设置水库调度规则，可以预测大坝建设对下游河流径流过程的调节作用，即丰枯季节流量的变化以及生态基流的保证程度。模拟结果表明，项目活动会对水文情势产生影响，可以为水资源安全、防洪风险和水生生物栖息地的影响提供基础数据。

（二）地下水－地表水耦合模型

地下水和地表水属于统一水循环系统中的两个相互联系的组成部分。它们之间水量的交换、物质的交换（潜流排泄、河床渗漏）对维持河川基流、湿地生态系统健康、水质稳定起着重要的作用。传统环境影响评价一般将两者分开来分析，不能准确地对那些同时影响到两个系统的工程活动进行评价。地下水－地表水耦合模型，例如 MODFLOW 和河网模型（SWAT 的河道模块）的耦合，或者完全集成的模型，可以同时求解地表水流动方程和地下水渗流方程，准确模拟地表水和地下水在交换界面上的动态交互过程。

耦合模型在环境影响评价中的运用范围很广。对于产生大量疏降水的矿产开采、地下工程等项目，耦合模型可以预测地下水位下降造成附近河流水量减少的程度，从而评价可能会造成的河道断流、湿地干涸等生态风险。对河道整治、水库蓄水等引起地表水位发生改变的工程，可以模拟河水入渗补给地下水的量级变化，并模拟对区域地下水流场和水质的影响。如果耦合了溶质运移模块，还可以对污染物在地下水、地表水系统中迁移的过程进行追踪，给跨介质污染风险评价提供依据。一体化的模拟方法大大提高了我们对水系统相互影响的认识程度，使评价结果更加全面准确。

耦合模拟的难点就是其复杂性，需要详细的地质水文资料来建立和校准模型，含水层结构、渗透系数、河床导水系数等。尽管数据要求高、计算量大，但是它在处理复杂交互问题时所表现出的优越性，使其成为评价重大工程水环境影响的

先进工具。模型可以反映出那些非直接的、滞后的、隐蔽的生态环境影响，例如地下水位发生微小变化会怎样经过一段时日改变土壤的水分状况，从而导致植物群落发生演替。长时序、跨圈层的因果链分析，是传统评价手段所不能达到的。

（三）工程活动对径流、泥沙、水质的影响预测

工程活动，特别是大型水利工程、交通基础设施和城镇化建设等都会改变流域的地表形态和下垫面性质，从而对径流产生、泥沙输移、水体化学和生物过程产生明显影响。利用水文生态模型可以定量预测多方面的影响。在径流上，模型经由改动土地利用参数（不透水面积比例，植被覆盖密度），地形参数以及模拟工程建造（修建大坝，开挖渠道，平整土地）对流域产汇流机制产生的影响，从而预估流量过程线，洪峰流量，年径流量等重要水文特性量的变化状况。

泥沙预测也是其中的一部分。模型中一般会设置土壤侵蚀模块（修正的通用土壤流失方程 MUSLE）、泥沙输移模块等。输入工程扰动后地形、土壤、植被信息，可以预报工程区及下游土壤侵蚀速率、河流含沙量、河道冲淤变化趋势。可以用来评价大型水库的拦沙效果，预测下游河床的冲刷情况，也可以预测河口三角洲的长期演变。水质方面，用耦合水动力、泥沙、水质的模型来模拟氮、磷、重金属、有机物等污染物随水流的迁移、转化和归趋。输入工程造成的新增点源或者面源污染负荷，模型可以预估下游控制断面的水质响应，评判水体功能区的水质达标状况以及水生态系统的健康风险，进而对污染控制措施的有效性进行事前评估。

三、植被动态与演替过程模拟

植被是生态系统结构和功能的主体，植被的动态变化直接体现着生态系统是否健康以及它的演替方向。植被动态演替过程的模拟，用数学模型再现植被生长、死亡、竞争和演替规律，给预测人类活动及环境变化对陆地生态系统影响提供有力工具。

（一）森林动态模型

森林动态模型是专门用来模拟森林生态系统长期演替过程的模型，对评价采伐、火灾、病虫害、气候变化等干扰因素给森林结构与功能造成的影响有着重要的作用。这类模型大体分为两种：以个体为基础的模型和斑块模型。

森林动态模型分类对比

模型类型	建模尺度	核心思想	优点	缺点
个体模型（如 JABOWA 系列）	单个样地 / 间隙	模拟每棵树的生长、死亡、更新	细节丰富，能反映个体竞争	计算量大，参数多，适用于小尺度
斑块 / 生态系统模型	林分 / 植被斑块平均状态	模拟整个斑块的平均状态变量	计算高效，适用于大规模、长时间	细节缺失，无法反映个体差异

上表可以发现，以个体为研究对象的模型又被称为间隙模型，其中以 JABOWA 为代表的系列模型是最基础的。树木生长需要的光、温、水、肥等资源，又受树木之间的竞争所制约。对大量的个体生命史过程进行模拟并累积之后，模型就可以自下而上地生成整个森林群落物种组成、直径结构和生物量变化的规律。

另一种是斑块或者生态系统层次上的模型，不跟踪单个树木，而模拟林分或者植被斑块的平均状态变量，例如总生物量、叶面积指数等。该类模型计算效率较高，适合做大量的、长时间的模拟。在环境影响评价中，森林动态模型可以预测不同采伐方式（皆伐、择伐）对森林恢复速度和未来物种组成的影响，也可以评价工程建设引起的森林破碎化对于内部林窗动态、边缘效应的长期影响，还可以预测气候变化情景下原有森林类型能否持续存在，将演变为何种类型。这些预测结果可以给制定可持续的森林经营方案、生态恢复措施提供科学依据。

建立和使用这些模型需要对区域内主要树种的生物学特性（最大生长速率、耐阴性、寿命等）有较深刻的认识，同时需要长时间的森林监测数据来进行参数化和检验。虽然有不确定性，但是森林动态模型仍然是理解森林生态系统对于复杂干扰的反应、预测它的变化最重要的工具之一。

（二）植被 – 气候关系模型

植被的地理分布格局宏观上是由气候条件决定的。植被与气候的关系模型，建立植被类型或植被生理生态特性与气候变量的定量关系，用以预测气候变化对植被分布的影响。该类模型的发展过程是由静态到动态、由经验到机理。

1. 生命带模型、生态位模型：早期模型，霍尔德里奇生命带分类系统就是用年均生物温度、年降水量、潜在蒸散量等少数几个气候因子来划分全球植被类型。现代物种分布模型（或称生态位模型），如 MaxEnt，则通过物种已有的分布点以及一系列环境变量（主要是气候变量），采用统计方法来构建物种的生态位，并预测不同气候情景下适生区会发生怎样的变化。在评价气候变化对某个物种，尤其是珍稀濒危物种的栖息地影响上，这种模型被使用较多。

2. 动态全球植被模型：是目前研究气候与植被相互作用的前沿工具，LPJ、Biome3 等。它们既考虑了气候对植被分布的影响，又考虑到了植被生长、竞争、死亡、生物地球化学循环以及植被对气候的反馈作用。DGVMs 可以模拟不同的植被功能型之间的竞争关系，也可以预测气候变化引起的生态系统结构（例如森林被草原取代）和功能（例如碳汇能力）的长期变化。利用降尺度后的气候预测数据驱动 DGVMs 做区域性的开发项目环境影响评价，可以评价项目所在地未来植被转换的风险。

（三）干扰下的植被演替预测

自然和人为干扰都是植被演替的动力。环境影响评价的重要内容之一就是预测项目建设这个“强干扰”事件给区域植被自然演替轨迹会带来怎样的影响。植被演替预测模型能对此进行量化。常用的模型有马尔可夫链模型、元胞自动机模型、状态 - 转型理论模型。

马尔科夫链模型把植被演替当作一个随机过程，用植被类型之间的转移概率矩阵来预测某一时刻各种植被出现的概率。转移概率矩阵可以由历史遥感影像数据或者专家知识来确定，适合模拟大尺度、长时间的植被格局变化。

元胞自动机模型属于空间动态模型，它把空间分成网格单元（元胞），每个网格单元的植被状态是确定的。元胞状态的演化既取决于自身，也受周围元胞状态的影响。用已经定义好的转换规则，模型可以模拟出复杂的植被斑块动态和空间格局变化过程，尤其适合模拟火灾蔓延、病虫害扩散、物种入侵等具有很强的空间自相关性的干扰过程。对于评价线性工程（公路、铁路等）的影响，该模型可以很好地模拟出植被格局被切割后的情况，也可以模拟出两侧植被演替的长期影响。利用这些模型可以对植被群落结构、演替过程和生态系统恢复力做进一步的研究，进而给出更加有针对性的生态保护和恢复方案。

第三节 生态系统响应机制分析

生态系统对外界干扰和压力的反应,是个在多层面上彼此发生联系并形成起复杂过程的反应。它包括个体生理行为改变、整个生态系统景观格局改变在内,核心是生物体与生态系统相适应、相调节。分析其反应机理,对精准的预测和评价生态环境的影响,制定合理、科学的有效生态保护与修复措施,具有重要的意义。

一、个体与种群层面的响应

生态系统受到环境变化的影响,首先做出反应的是构成生态系统的基本单元——生物个体和种群。该层次的反应为更高一级生态效应的产生打下了基础,其表现形式多端,直接影响到物种生存与延续。

(一) 行为响应与生理生态适应

生物个体在受到环境胁迫的时候,会先采取行为调节的方式来趋利避害。动物会因为温度上升、水资源缺乏或者污染物的存在,而改变自己的栖息地、迁徙路线、觅食时间或者繁殖方式。这些行为反应一般都很快速而且具有可塑性,是生物应对短期环境变化的第一道防线。当环境的变化一直存在,行为调节不能解决压力的时候,生理生态适应机制就会被激活。许多植物可以调节气孔导度来应对干旱胁迫,也可以改变根冠比来适应贫瘠土壤。动物会通过改变新陈代谢的速率,或者分泌应激激素等方法来保持体内的环境处于一种稳定的状态。环境压力从长远来说还会起到选择的作用,使得种群在遗传上发生适应性的进化,耐受性性状的基因在种群中的频率会逐渐增大,从而达到对新环境的生理生态适应。虽然该过程比较缓慢,却是物种在多变的环境中长久生存的重要条件。

(二) 种群数量动态与分布格局变化

环境变化影响着生物体的生存、繁殖、死亡率,进而影响到物种数量的变化。污染物会直接导致个体死亡或者繁殖能力下降,造成种群数量急剧减少。气候变暖会造成某些物种繁殖期延长、繁殖代数增多,短期内种群数量增大。栖息地改变也影响种群动态。生境丧失或者质量下降会减少环境容纳量,压缩种群生存空间,使得种群密度降低、数量波动增大。这些改变最后都将反映在种群的年龄结构、性比、增长率等重要参数上面。

物种的地理分布格局对于环境变化也十分敏感。全球变暖已经使很多物种的

适生区向高纬度或者高海拔地区移动，从而改变了它们的分布范围。现有的研究表明，北半球许多种类的蝴蝶、鸟类、哺乳动物等都有向北迁徙的现象。分布格局的变化不但会影响到物种自身的存续，也会引起迁入区和迁出区生态系统内物种之间相互作用的重新配置。对于扩散能力弱或者生境呈碎片状岛屿分布的物种，由于不能通过迁徙来追随适宜的气候，因此面临的风险很大，甚至会导致局部分布区收缩或者消失。

（三）物种灭绝与入侵风险分析

当环境发生剧烈的、持续性的改变的时候，物种灭绝的风险就会随之增大。如果环境变化的速度和程度超过了物种行为调节、生理适应、遗传进化的承受范围，那么种群就会不可避免地走向衰退、灭绝。生境被分割是造成物种灭绝风险增加的罪魁祸首。道路建设、城市扩张、农业开发等人类活动造成的生境破碎一方面使栖息地面积缩小，另一方面将原来的完整栖息地分成很多小斑块，切断了种群间的基因交流通道，使小种群因为随机事件而灭绝的可能性大大增加。对需要大面积栖息地或者扩散能力较弱的物种来说，其影响是致命的。

与此同时，环境变化以及人类活动为外来物种入侵创造了有利的条件。全球贸易、交通快速发展造成物种跨地区传播，气候变化、原生生态退化给外来物种创造了新的适生环境、定殖条件。外来物种入侵风险评价属于环境影响评价的组成部分，一般借助指标体系来评判物种引入之后，种群能否建立起来，是否会蔓延扩散并造成负面效应的风险等级。成功的入侵物种一般具有繁殖力强、生态位广、适应新环境快等特点。一旦在新环境中建立稳定的种群，就会和本地物种争夺资源，捕食本地物种，传播疾病，改变整个生态系统的结构与功能，给生物多样性造成严重威胁。

二、群落与生态系统层面的响应

当环境影响在个体、种群层面上累积到一定程度的时候，就会引起更高层次生物群落结构以及生态系统整体功能的改变。深层次的变化说明生态系统的状态已经发生了根本性的改变，其后果一般是严重的、复杂的。

（一）群落结构演替与优势种更替

生物群落的物种组成和结构不是一成不变的，它会受到内因和外因的驱动而不断演替。环境干扰，不管是火灾、风暴这样的自然干扰，还是伐木、污染这类

的人为干扰，都会破坏群落原来所处的平衡状态，造成次生演替。干扰的频率、强度和规模都会决定演替方向以及速度。在干扰初期，生命周期短、扩散力强的先锋物种会快速占领裸露的生境。随着时间的推移，群落内部的竞争、捕食等相互作用以及环境的逐步恢复，会使竞争能力强的后期演替物种取代先锋物种，群落的物种丰富度、垂直结构和异质性也会不断提高。

优势种的更替是群落演替最明显的特点之一。环境改变有利于某些物种的生长繁殖，使其在资源竞争中占优势，成为新的优势种；而原来的优势种由于不能适应新的环境而逐渐衰退。如长期氮沉降影响下，喜氮草本就会占据群落优势地位，排挤适应贫瘠环境的物种。优势种更替不只是群落表观面貌的改变，更重要的是由于不同物种在生态系统中所起的作用不同，这种更替会连锁性地影响到养分循环、能量流动等重要的生态过程。

（二）生态系统功能变化

生态系统的功能是人的幸福的基础，只有生态系统健康，才能保证它的功能正常发挥。目前全球生物多样性急剧下降，使得生态系统各项功能普遍受到削弱。研究表明，生物多样性同生态系统功能之间存在着正相关的关系。物种丰富的生态系统由于功能性状更加多样，一般具有较高的生产力、较稳定的养分循环和较强的病虫害抵抗力。当生物多样性下降，尤其是那些具有关键功能的物种消失的时候，整个生态系统所具有的净初级生产力，凋落物分解速率，碳汇能力等也会随之减少。

环境的变化会直接或者间接地改变生态系统的基本功能。持续升温加干旱会直接削弱森林的固碳能力，甚至使森林从碳汇变成碳源。土地利用方式的改变，比如将湿地开垦成农田、林地等，都会大大削弱该区域的水源涵养和洪涝调蓄功能。生态系统服务功能评价已经成为环境影响评价的重要部分。它对生态系统所提供产品和服务（水源涵养、土壤保持、生物多样性维持等）进行量化，给决策者在经济发展与生态保护之间做权衡提供重要依据。这样可以更全面的了解到由于环境变化而产生的真实的生态成本。

（三）生态系统稳定性与弹性变化

生态系统稳定性指的是一种生态系统受到外力干扰之后，能够保持其原有结构和功能基本不变的能力。它包括抵抗力（抵抗干扰的能力）和恢复力（受到干扰后恢复原状的能力，又称弹性）。生态系统在受到一定程度的干扰之后仍能保

持稳定。生物多样性一般被看作保持生态系统稳定的重要因素。生态系统中物种的数量越多，物种间的功能冗余度就越大。当某个物种因为环境变化而衰退的时候，其他功能相似的物种就能发挥补偿作用，减少整个系统功能上的损失，提高系统抵抗力。

但是人类活动以及剧烈的环境变化都会对生态系统的稳定性、弹性造成影响。长期的污染、过度的资源开采、频繁的极端气候事件等，都会使生态系统的自我调节能力下降，抵抗力和恢复力降低。当压力超过一个临界点（即阈值）的时候，生态系统可能会发生突发的改变，由一个稳定的状态突然转变为一个新的、大多数是退化的稳定状态，这种转变一般是不可逆的。比如浅水湖泊受过量营养盐输入压力时，可能会从清澈的沉水植物占优势状态，突然转变成浑浊的藻类水华占优势状态。因此，对环境影响造成生态系统稳定性、弹性改变的程度做进一步的了解和评估，对于避免生态系统发生灾难性突变、保障生态安全来说十分重要。

三、景观生态层面的响应

环境影响的效应不仅限于单个生态系统内部，更能在更大的景观尺度上体现出来，进而改变各个生态系统单元之间的空间分布及相互作用。景观层面的响应主要是生态系统格局、过程和尺度之间复杂关系的研究。

（一）景观格局破碎化与连通性改变

景观格局的破碎化是人类活动对自然景观影响最大、最深远的一种方式，主要特征就是大面积连续的生境被分割成许多面积小、彼此隔绝的斑块。格局变化不单是生境总量的减少，更主要的是斑块之间隔离度的增大、边缘效应的加强。比如斑块密度、景观形状指数等就经常用来对破碎化程度进行定量的描述。破碎化会阻碍野生动物的移动与扩散，阻断植物种子的传播路径，使基因流通受到妨碍，增大小种群濒危的风险，从而给生物多样性造成极大的影响。

常见景观格局与连通性指数表

指数名称	描述及生态学意义	作用
斑块密度	单位面积内斑块的数量，反映景观破碎化程度，数值越高破碎化越严重。	定量表征景观破碎化程度
景观形状指数	衡量斑块形状复杂度的指标，形状越复杂通常边缘效应越显著，数值越大形状越不规则。	评估边缘效应和斑块形状复杂性
整合连通性指数	评估景观中所有斑块间连通性的综合指标，考虑了斑块面积和距离。	衡量整体景观连通性
可能连通性指数	评估特定斑块或区域对整体连通性贡献的指标，可用于识别关键斑块和廊道。	识别关键连接要素
欧氏最近邻距离	斑块边缘到最近邻斑块边缘的距离，反映斑块间的隔离程度，数值越大隔离越严重。	反映斑块隔离程度

破碎化对应的是景观连通性的改变。景观连通性是景观对物种在不同生境斑块之间移动的促进或阻碍程度，是景观的重要生态过程属性。道路、城市等人工地物对物种扩散起到巨大阻碍作用，使整个景观的连通性变低。评价景观连通性可以利用整合连通性指数或可能连通性指数等，这些指数可以用来确定维持区域连通性的关键斑块和廊道。保护并恢复景观连通性，比如创建生态廊道、设立生态踏脚石等，是减轻生境破碎化造成的负面影响、改善景观整体生态功能的有效方法。可见上表所列指数是分析景观格局的工具。

（二）景观功能流受阻

景观功能流是指景观单元之间发生物质、能量、信息的流动，动物迁徙、水流输送、营养物质循环、基因交流等都属于景观功能流。这些流动是联系各个生态系统、保证景观整体功能完整性的生命线。景观格局一旦发生变化，就会直接影响到功能流是否畅通。水坝的建造会破坏河流自然连通性，改变水文情况，影响鱼类洄游通道以及下游生态系统的泥沙补给。城市化进程中不透水地面大面积扩张，就会阻碍地表水下渗，改变区域水循环过程，而且会阻断土壤动物和微生物的水平移动。

道路网络属于典型的线性分割要素，一方面直接破坏地表植被，另一方面又会给许多动物的移动造成屏障效应，产生“路杀”现象，同时也是噪声和化学污染物的扩散源。这些阻碍效应破坏了景观的重要生态过程，使得原本作为一个整体起作用的景观被割裂成功能上相互隔离的部分。当物种流、能量流、信息流受

阻时,景观的自我维持、自我调节能力就会大大降低,对外部干扰的抵抗力也会变弱。因此,在开展环境影响评价时,应该充分考虑到项目建设会怎样对关键景观功能流造成阻碍。

（三）区域生态安全格局演变

区域生态安全格局是保证区域生态系统健康、生态服务持续供给的重要景观空间结构。生态源地是指区域内生境质量好、面积大、对维系生物多样性以及生态过程起决定性作用的核心斑块;生态廊道是连接不同源地的线性或者带状区域,用以保证物种和能量的流通;生态节点就是廊道上的重要战略点。这一个生态格局的完整和稳定就成为区域乃至国家生态安全的基础。

人类活动、环境变化均可造成区域生态安全格局的改变。城市无序扩张、大规模的农业开发活动会侵占或者分割重要的生态源地,切断重要的生态廊道,从而影响生态安全格局的完整性以及其功能。退耕还林还草、创建自然保护区网络、塑造城市绿道系统等生态修复工程可以改善、加强生态安全格局。分析生态安全格局变化趋势,找出潜在的生态风险点、格局断裂点,可以给国土空间规划、生态红线划定以及生态补偿机制的建立提供科学依据,从而主动避免、减轻发展建设活动对区域生态安全造成的负面影响,最终达到区域的可持续发展。

第四节 多尺度影响预测模型构建

生态系统是复杂的巨系统,它的结构和功能在不同时空尺度上都表现出了很大的异质性。因此,环境影响评价要冲破单一尺度的限制,创建多尺度预测模型,才干愈加真切地表现人类活动给生态系统引发的级联效应和累积效应。

一、多尺度模型的概念与框架

多尺度模型把各个空间时间和分辨率的信息考虑进去,找出它们之间相互作用、相互影响的关系。它给认识生态系统对扰动的回应赋予了全面的视角,成为由微观机理走向宏观格局预测的关键联系。

（一）点、线、面、域不同空间尺度

空间尺度为定位生态格局和过程打下基础。在环境影响评价中,一般把空间尺度分为点、线、面、域四个层次。点尺度主要研究具体的污染源、珍稀物种的

巢穴或者特定的监测点，影响范围一般局部的。线尺度指的是带状或者廊道状的地理要素，例如河流、道路、管线等，评价重点为它对水文连通性、生物迁徙通道的切割和阻隔作用。面尺度扩大到有一定面积的均质或者功能单元，如湖泊、湿地、森林斑块或者整个项目区，主要研究面状生态系统服务功能的丧失以及生境质量的变化。域尺度是最大的空间尺度，包括区域、流域或者更大的景观格局，在这个尺度上主要评价项目累积性、区域性生态环境影响，即整个区域生物多样性的宏观效应或者水资源平衡的宏观效应。

正确辨识并清楚地区分出不同尺度是建设多尺度模型的必要前提。这就要求评价工作不能孤立地看待一个项目，而要从更大的地理环境出发去认识点源污染是如何通过河流这条“线”扩散到整个“面”状的湖泊，最终影响到整个“域”的生态安全格局。多尺度分析的核心思想就是从大到小，再从小到大，保证评估的全面性、系统性。

（二）短期、中期、长期不同时间尺度

生态系统反应的时间尺度也是分阶段的，环境影响是滞后且持久的。短期尺度一般就是项目建设期与施工期，生态会受到严重的并且局部的干扰，比如土地开挖、植被清理、噪声污染等等。这些影响直接、明显，但是也可能给以后更深层次的变化埋下了伏笔。

中期尺度通常指项目的运营期，此时的影响会成为长期的压力。工业企业稳定排污、水库运行引起的水文情势变化、交通线路对野生动物的长期干扰等都属于此类。此时生态系统可能还具有一定的适应性，但是功能退化的苗头已经出现，慢变量（土壤肥力、物种组成）也开始发生变化。

长期尺度指的是项目运营结束之后很长一段时间的情形，牵涉到生态系统的恢复、演替以及不可逆的改变。矿山开采结束之后几十年乃至上百年时间内植被的恢复过程，大坝修建之后对下游三角洲地貌的永久性改变，污染物在食物链中长期的富集效应。从长远来看，项目的影子同气候变化等宏观推动要素互相交织，于是就形成了复杂且累积的影响效果。环境影响评价应该充分考虑到时间尺度上的差异，不能因为忽略了长期潜在的影响而做出短视的决定。

（三）尺度间的关联与信息传递机制

不同时空尺度并不是孤立存在的，它们之间存在着物质流、能量流、信息流，从而形成一个相互影响的层次系统。尺度间的联系以及信息传递机制，即多尺度

模型的关键所在，它说明局部扰动怎样被放大并传递到更高层次，宏观背景又怎样约束并调节局部过程。点状污染源的排放浓度（微观信息）经过水流输送（线性过程）影响下游整个湖泊的水质（宏观格局），区域气候模式（宏观背景）又通过影响降雨、蒸发来调节污染物稀释扩散的速率（局部过程）。

信息传递机制有尺度上推、尺度下推两种。尺度上推即把微观尺度上个体行为、局部过程通过聚合或者平均化，得到宏观尺度上的系统格局和动态。尺度下推是把宏观尺度的约束条件或背景变量，分解后施加给微观尺度单元上，进而影响其状态及行为。环境影响评价模型里，明晰这种双向互动情形很关键，这样有利于预估系统受到外界冲击时，可能会出现跨尺度级联失效或者突变状况，给风险防范赋予科学依据。

二、常用多尺度预测模型介绍

多尺度预测模型的种类繁多，选择哪种模型取决于被评价的对象、可以获取的数据以及研究的目的。本节主要介绍生态环境影响评价中常用的、有代表性的几种模型的基本原理和适用范围。

常用多尺度预测模型特点对比表

模型类型	核心思想	优势	适用场景
基于个体模型	自下而上，关注个体属性与行为	刻画生物异质性，模拟涌现现象	特定物种（珍稀濒危）、栖息地连通性、种群动态
基于主体模型	自下而上，主体具决策能力与互动	处理人与环境耦合的复杂系统	土地利用变化、水资源管理、政策评估
元胞自动机	离散空间，局部规则产生复杂格局	空间动态模拟能力强，直观	城镇扩张、森林砍伐、景观格局变化
马尔可夫链	概率描述状态转移	预测宏观数量变化趋势	土地利用类型面积、长期趋势预测

从上表中可以看出，不同模型各有侧重，可根据具体需求灵活选用。

（一）基于个体的模型

基于个体的模型（Individual-Based Model, IBM）属于自下而上的模拟方法，着重于生态系统的基本单元，即每一个生物个体。模型会给每一个体赋予一套独有的属性（年龄、大小、能量等）和行为规则（觅食、繁殖、躲避天敌、移动）。通过模拟大量的个体在一定环境下的自主行为以及相互作用，模型的宏观输出，

例如种群数量的波动、空间分布格局的改变、群落结构的演化等等，就会作为涌现现象自然而然地产生出来。该模型很好地刻画了生物异质性和环境异质性，适合研究个体行为对种群动态的贡献。

环境影响评价时，以个体为基础的模型可以评判建设项目对某一种类的，特别是珍稀濒危物种的不良影响。模拟道路网络对动物移动路径、栖息地连通性的影响，从而评价种群被分割的风险；或者模拟水温升高对鱼类个体生长、繁殖成功率的影响，进而预测整个鱼类种群的未来生存力。该类模型可以清晰的体现影响机理，给生态补偿和缓解措施的制定提供有力支持。

（二）基于主体的模型

基于主体的模型（Agent-Based Model, ABM）和基于个体的模型思想相似，都属于自下而上的建模范式，但是 ABM 的主体概念更加宽泛。主体既可以是一个生物个体，也可以是人个体、家庭、企业、政府等能够自主作出决策的能动者。每一个主体都有感知环境的能力、制定规则的能力、采取行动的能力，通过复杂的网络相互作用、相互学习，共同创造、改变着所处的社会生态系统状态。

基于主体的模型对于人类活动与自然环境相互耦合的复杂系统来说，有着特别的优势。环境影响评价中经常用来模拟土地利用变化、水资源管理冲突、污染治理策略等问题。其主要建模步骤为：

1. 对不同类型的主体进行属性定义、行为规则定义以及决策逻辑定义，如模拟农民根据市场价格、政府补贴等来决定种植何种作物。
2. 构建主体所处的空间环境，包括自然资源、基础设施和社会网络。
3. 规定各个设定主体之间以及主体与环境之间的互动规则，让系统在时间上、空间上发生演化，从而观察宏观格局的涌现。

评价者可以依靠这个模型去探究设立生态保护红线、征收排污税等不同的政策情景，考察各个利益相关者对此的反应，再评估这些反应最后对生态环境造成的影响，进而达成对社会生态系统动态变化的综合预测与评判。

（三）元胞自动机与马尔可夫链模型

元胞自动机（Cellular Automata，简称 CA）和马尔可夫链模型都是用来模拟土地利用和景观格局动态变化的有效手段。元胞自动机是一种离散的空间动态模型，它把空间分成规则的网格（元胞），每一个元胞有一个确定的状态（森林、耕地、建设用地）。元胞的状态根据它自身当前状态和相邻元胞的状态，按照事

先规定好的转换规则在离散的时间步长上进行更新。通过局部规则简单的互动就产生了复杂的空间结构。

马尔可夫链模型依靠概率来描述状态的转移，能够利用历史数据计算出各种土地利用类型之间互相转换的概率矩阵，从而预测未来某时刻各类土地利用类型的总量和面积，但是它自身没有空间表达能力。结合两者可以扬长避短，先利用马尔可夫链预测未来土地利用类型的总需求量，再用元胞自动机强大的空间模拟能力，按照地形、交通、政策规划等空间变量设定的转换规则，把变化量分配到空间网格上。该类模型常用来预测城镇扩张、森林砍伐、土地退化等过程，可以得到未来景观格局图，在此基础上评价生物多样性、水土保持等生态功能的影响。

三、模型的不确定性分析与验证

任何模型都是对现实世界的简化，必然带有不确定性。对模型做系统性不确定性分析并加以严格验证，是保证预测结果可靠、提高评价结论科学性、可信度的重要步骤。

（一）参数不确定性与结构不确定性

模型的不确定性主要是参数不确定性和结构不确定性造成的。充分认识并度量这两类不确定性，才能评价模型可信度。

参数不确定性是由模型输入参数的真实值不能准确测量或未知引起的。生态模型中许多参数，物种死亡率、扩散速率、环境容量等，都是通过有限的观测数据来估计的，本身就带有置信区间。不确定性会被模型的计算过程所传递和放大，最终使得模型的输出结果也成为范围而不是确定值。处理参数不确定性常用的方法为蒙特卡洛模拟，即对参数进行大量的随机抽样，反复运行模型，最后得到输出结果的概率分布。

结构不确定性是由于我们对于模拟现实世界认识的不全面所引起的，即模型本身的数学结构、基本假设或者过程描述存在偏差。比如模型忽略了某些重要的生态过程，或者错误地简化了物种间的相互作用。结构不确定性比参数不确定性更难识别和量化，因为它存在于模型创建之初的理论当中。比较不同的结构模型对于同一个问题的模拟结果，或者邀请多领域专家对模型假设进行评价，是识别和应对结构不确定性的一种方式。

（二）敏感性分析与情景分析

敏感性分析、情景分析是应对、解释模型不确定性两种主要的技术手段。敏感性分析就是找出影响模型输出结果最大的输入参数或者模型假设。通过对各个参数值进行系统地改变,然后观察模型输出结果相应变化的大小来确定模型的“关键先生”。有助于把有限的科研资源用在准确测定这些重要参数上,以此降低模型总体的不确定性。敏感性分析分为局部敏感性分析与全局敏感性分析。局部敏感性分析就是一次只改变一个参数,全局敏感性分析则同时改变所有的参数,更能体现参数之间的交互作用。

情景分析就是研究未来各种可能性的一种方法,特别适合于解决深度不确定性问题,即驱动因素和影响机制本身都不确定。它不是预测最有可能发生的未来,而是构造出一些内部逻辑自洽、有代表性的未来发展路径或者“故事”。在环境影响评价中可以创建不同的社会经济发展情景、气候变化情景、政策干预情景等,把它们作为模型的输入,运行模型来评价项目在不同未来世界中的潜在环境影响和稳健性。这就给决策人给予了一种更为完备的风险状况认识,有益于制订出更具适应性和弹性的管理策略。

（三）模型验证与后评估

模型验证是保证模型能正确地反映或者预测现实世界的动态的过程,也是建立模型可信度的前提。验证过程一般包括:首先是模型检验,即检查模型的代码、逻辑等有无错误。其次为模型标定,用一部分已知的观测数据对模型中的关键参数进行调整和确定,使模型输出能最好地拟合这部分数据。最重要的是模型确认,即用一组独立观测数据来检验模型的预测能力。通过严格验证确认过的模型才被认为有较高的可信度。

环境影响评价中模型的应用不应该是单纯的完成预测报告,而后评估环节也不能被忽视。后评估即在项目实施以后,用长期的环境监测获得实际影响的数据,然后与模型当初预测结果作比较。不仅是对模型准确性进行最后的检验,而且也是对模型的一个宝贵的学习过程。如果预测和实际相差很大,就要分析原因,是模型结构有问题,还是参数设置不合理,或者是出现了未曾预料到的外部驱动因素。根据后评估的反馈不断修正和完善预测模型,可以提高未来同类项目环境影响评价的科学性,也是适应性管理理念在环评领域中的具体应用。

第四章 生态系统健康评价体系

第一节 生态系统健康指标体系

一、生态系统健康的概念与标准

准确地界定生态系统健康的概念内涵，确定评价标准，是评价工作顺利开展的理论依据，给以后指标的选择指明方向，保证评价结论的科学性和可比性。

（一）活力、组织力和恢复力的“VOR”框架

活力、组织力、恢复力框架被国际社会广泛认可为生态系统健康评价的概念模型，给生态系统的健康理解、衡量提供了一个综合的理论视角。这个框架把复杂的系统状态分解成三个相互联系的主要特性，使评价过程更有结构感。

活力体现的是生态系统代谢能力或者生产力水平，一般用能量流动、物质循环的速率与效率来表示。一个有活力的生态系统可以高效地捕获和转化能量，支持生物量快速增长和有机质的积累。森林的净初级生产力、草地产草量、水体的叶绿素浓度等都可以作为系统活力的度量。活力的强弱直接影响生态系统所提供产品和服务数量的多少，是生态系统发挥作用的基础。

组织力是对于生态系统内部结构和过程复杂性、完整性的描述。它包含物种多样性、营养级结构的复杂性、生境异质性和各组分之间相互作用网络的稳定性。有组织的系统能量流动和物质循环途径较多，资源利用效率高，对局部扰动有较好的缓冲能力。生物多样性指数、食物网连接度、景观格局指数都是用来评价组织力的指标。

恢复力是指生态系统受到外界干扰（自然灾害、人为污染等）之后，仍能保持或者恢复到原来结构、功能和过程的能力。它属于系统本身所具有的调整和修复的能力。一个恢复力强的生态系统，在受到重大扰动之后，依靠自身的恢复力可以很快回到稳定状态，而不会发生结构性崩溃或者功能的退化。评价恢复力就是看系统对于某种胁迫的响应时间、恢复速度和生态系统服务功能是否稳定。

（二）生态系统健康的定义与内涵

生态系统健康是个多维的、综合性的科学概念，它借鉴了人类医学中的健康概念，来描述生态系统的整体功能状态。这并不表示系统处于一种静止的原始状态，而是说系统在动态平衡的状态下保持结构完整、功能稳定，并且不断地为人类社会提供各种各样的生态系统服务。健康的生态系统是可持续的、有弹性的，不会陷入生态系统窘迫综合症的困扰之中。

生态系统健康包含的内容很多，不只是传统生态学所关注的系统稳定性和完整性。它包含生态、经济、社会三方面的价值评判。生态上要求保持生物多样性，保证重要的生态过程正常进行，提高系统的自我组织能力。经济研究生态系统为人类提供产品和服务的能力，供给清洁水、调节气候、保持土壤肥力等。社会层面指生态系统为人类福祉所做出的各种贡献，即提供休闲娱乐场所、保持文化多样性、保证环境公平等。

因此，生态系统的健康是具有规范性的，即它的标准会随着社会发展目标、价值取向的变化而变化。评价一个生态系统是否健康，不能只看生态学的客观数据，还要明确评价主体希望生态系统达到什么样的状态、提供什么样的服务。所以生态系统健康评价不仅仅是技术性的工作，更是一个需要各利益相关者参与、协商来决定发展目标的社会过程。它要评价者依照科学分析，兼顾区域发展需求和生态保护目的。

（三）健康生态系统的参照标准

生态系统健康评价需要建立明确的参照标准或者基准状态，否则健康或者不健康的判断就缺少客观依据。参照标准给予评价以尺度与目的，它是评判当前生态系统状况偏离程度并判定其变动趋向的基本准绳。选择什么样的状态作为参照，直接决定评价结果所体现的内容以及政策指导意义。

参照标准的选取不是固定不变的，可以根据评价目标以及区域特点进行选择。常见的参照标准类型有历史基准，即采用未受或极少受人类干扰的历史时期生态系统状态作为参照，对评价长期累积性环境影响具有重要意义；区域最佳状态，即选择同一生态区内受人为干扰最少、功能最完善的现存生态系统作为参照，这种方法操作性较强；预设目标基准，即根据生态恢复目标或区域可持续发展规划，人为设定一个未来期望达到的理想状态作为参照。采用目标作为标准更能将评价工作与环境管理决策相结合。无论采用什么标准，都必须经过充分的科学论证，

并说明此标准的设立根据及适用条件。

二、指标体系构建的原则与方法

生态系统健康评价指标体系的构建是项系统工程，要遵照科学原则，采用合适的办法工具，才能保证构建出的体系能全面、客观地反映生态系统的健康状况，给环境管理赋予有力的决策支撑。

（一）科学性、系统性、可操作性原则

建立评价指标体系要严格遵守科学性、系统性、可操作性这三个基本原则，这是保证评价结果质量的基本保证。

科学性原则是指标体系的灵魂，所有指标都必须有明确的生态学意义和坚实的理论基础，能真实地反映出生态系统某一方面特性或者过程。指标选取要按照生态系统结构和功能的内在联系进行，不能选取相关性低或者含义不清的指标。同时指标获取方式、计算方法以及数据来源要科学、可靠、可重复，从而保证评价结果的客观性和准确性。

系统性原则即指标体系要具有整体性、层次性。生态系统是一个复杂的整体，它的健康状况是由很多因素共同决定的。因此指标体系要全面涉及生态系统的活力、组织力、恢复力等各个方面，全方位反映结构、功能、过程的完整性。可以采用压力 - 状态 - 响应这样的框架模型，从不同的角度构建起一个有条理、严密的指标网络，从而避免出现以偏概全或者遗漏重要信息的情况。

可操作性原则是指标体系能够有效应用的前提。该原则强调指标应具备以下特征：

1. 可度量性：指标应是可被定量或定性测量的，避免使用过于抽象、无法量化的概念。
2. 数据可获取性：获取指标需要的数据在技术上可行，在经济成本和时间成本上是合理的，可以实现长期监测。
3. 敏感性，指标要能快速体现生态系统状态的变动以及管理举措成效，及时发出警报并给予决策回应。

（二）压力 - 状态 - 响应模型框架

压力 - 状态 - 响应模型在环境评价与管理中被广泛使用，它给生态健康评价指标体系的搭建赋予了明确的因果链条。该模型最早是由经济合作与发展组织提

出，用以解释人类活动与环境变化之间的相互关系，给制定有效环境政策提供参考。

该模型的主要逻辑是“压力”指标反映的是给生态系统造成影响的各种人类活动和社会经济驱动力，比如污染物排放强度、土地开发强度、资源消耗速度等。压力导致生态系统的状态发生变化，即生态系统物理、化学、生物属性的变化，比如生物多样性下降、水体富营养化、土壤质量退化等。状态指标可以直接反映生态系统的健康状况。当生态系统状态变坏之后，社会就会通过各种政策、管理、投资等行为来作出“回应”，试图减轻压力或者修复已经退化的生态系统状态。响应指标衡量的是环保投资占国内生产总值的比重、自然保护区面积占总面积的比例、环保法规执行力度等社会努力。压力 - 状态 - 响应模型用这样的逻辑链把环境问题、环境后果以及解决环境问题的方法联系起来，使得指标体系更有政策相关性。

（三）层次分析法与专家咨询法

在建立好指标体系之后，对各个指标赋予相对重要性，即赋予权重，在评价的过程中也起着非常重要的作用。层次分析法和专家咨询法是确定指标权重的常用组合方法，可以将定性判断与定量计算相结合，使权重分配更加科学合理。

层次分析法属于多准则决策分析方法，会把复杂的评价目标拆解成目标层、准则层、指标层等不同层次，之后依靠专家针对同一层次的各个指标展开两两比较，创建判断矩阵以量化各个指标的相对重要程度。此法通过求出判断矩阵的最大特征根以及相应的特征向量，从而得出各项指标的权重，再利用一致性检验来检查专家打分结果是否具有逻辑性，保证结果的合理性。它把复杂的权重分配问题变成了许多简单的比较判断，思路清楚，系统性强。

专家咨询法（德尔菲法）是进行层次分析法的重要辅助。经由领域专家群体匿名问卷调查、信息反馈等途径，汇集专家的知识与经验，给指标筛选和两两比较过程提供高质量的参考依据。匿名反馈、循环征询的方式可以避免权威专家意见的引导，减小个人主观性，使专家意见慢慢趋于一致，形成被大家普遍接受的共识。将专家咨询法与层次分析法结合使用，可以克服单一方法的缺点，使指标权重的确定既有理论依据，又有实际经验。

三、不同类型生态系统的健康指标

生态系统类型在结构组成、主导功能、所受胁迫压力等各方面都存在着较大的差异，因此其健康评价指标体系也必须因地区而异，具有较强的针对性，不能千篇一律。

（一）森林生态系统健康指标

森林是陆地生态系统的主体，森林的健康关系到维持全球生态平衡。森林生态系统健康评价是对森林生态系统结构完整性、功能稳定性以及持续提供生态服务的能力做全方面的评定。指标体系一般用森林的生产力、生物多样性、土壤健康、抗干扰能力等内容来体现森林整体的运行状况。

森林生态系统健康评价关键指标概览

指标类型	关键指标举例	衡量内容
活力指标	净初级生产力、叶面积指数、林分蓄积量增长率	能量捕获与生物量积累效率
组织力指标	物种多样性（辛普森指数）、群落垂直结构复杂性、林下植被盖度、土壤有机质含量	结构稳定性与资源利用效率
恢复力与风险指标	病虫害发生率、火灾风险等级、林分自然更新能力、外来物种入侵程度	抵抗外部干扰的能力
压力指标	大气沉降（酸、氮）、林地破碎化指数、人为采伐强度	森林退化的外部驱动因素

如表所示，森林活力评价指标主要是净初级生产力、叶面积指数、林分蓄积量增长率。这些指标可以反映出森林固定太阳能、积累生物量的能力。对组织结构来说，主要是物种多样性（辛普森指数）、群落垂直结构复杂性、林下植被盖度、土壤有机质含量。结构复杂、物种繁多的森林稳定性高、资源利用效率高。

恢复力、系统风险指标有病虫害发生率、火灾风险等级、林分自然更新能力、外来物种入侵程度等。它们是森林抵御自然灾害、生物入侵等各种外力的压力。压力指标同样不可或缺，大气沉降（酸、氮）、林地破碎化指数、人为采伐强度等都是反映森林退化外部驱动因素的指标。根据上述各项指标，便可对森林生态系统健康状况做出诊断。

（二）湿地生态系统健康指标

湿地生态系统被称作“地球之肾”，湿地生态系统的健康状况直接影响水资

源安全、生物多样性保护和区域气候调节。湿地健康评价主要看水文情势、水环境质量、生物完整性这三个方面，它们一起决定湿地生态功能是否能够正常发挥。

水文是湿地的生命线，相关指标十分重要。水位保证率、水文连通性、最小生态流量满足程度等体现湿地赖以生存的水文过程是否稳定、自然。水环境质量指标主要是总氮、总磷、化学需氧量、重金属浓度等，用来评价水体污染状况以及对水生生物的影响。

生物完整性是评价湿地健康的重要指标，其相关的指标体系庞大。植被指标可以选取优势物种盖度、沉水、浮水、挺水植物比例、植被群落多样性等。动物指标一般选取有指示意义的类群，如水鸟种类和数量、底栖无脊椎动物多样性指数等。生物指标对于湿地生态系统结构和功能的综合变化十分敏感。把上述指标同湿地面积变化率、人类活动强度这些压力指标结合起来，就能对湿地的健康状况作出全面的描述。

（三）城市生态系统健康指标

城市生态系统是人与自然高度耦合的复合生态系统，城市生态系统健康评价除了生态学指标外，还需要结合城市居民的福祉和城市可持续发展。评价目的在于衡量城市生态系统提供良好人居环境、保持生态平衡、应对环境风险等各方面表现的综合情况。

城市生态系统健康评价指标体系一般都具有很强的交叉学科性。体现系统活力和结构的指标有建成区绿地覆盖率、人均公园绿地面积、蓝绿空间连通度指数、城市热岛效应强度等。这些指标表现出了城市“绿色基础设施”的数量和质量，是调节城市微气候、净化空气和提供休憩空间的基础要素。

体现系统功能与服务，突出人与自然的交互。城市雨水径流控制率、空气质量优良天数占比、噪声达标区覆盖率、居民环境满意度等都和城市居民健康生活密切相关。系统代谢效率的反映指标，比如单位国内生产总值能耗、水资源重复利用率、生活垃圾回收率等，也是评价一个城市生态系统是否可持续的标志之一，它们共同体现了一个城市作为人 - 工 - 自然综合体运行健康的程度。

第二节 生态完整性评价方法

一、结构完整性评价方法

生态系统结构完整性是生态系统功能完整性的物质基础，是生物群落组成、物种多样性以及景观单元空间格局的综合体现。评价结构完整性就是考察生态系统受到外界干扰之后，物理和生物组分保持原来状态的能力，以此来反映系统潜在的退化风险。

（一）生物完整性指数及其应用

生物完整性指数是多度量参数的综合指数，用生物群落的属性来度量和评价生态系统健康。该指数是由 Karr 最早提出的用来评价水生生态系统，选取了物种丰富度、组成、营养结构、生物个体健康状况等对人类干扰敏感的生物学指标，然后综合成一个数值，直观反映生态系统的完整性水平。

生物完整性指数构建过程一般要选择参照点（代表未受干扰或轻微受干扰的“健康”生态系统状态），挑选对压力有响应的生物度量指标，确定各个指标的评分标准，最后整合成综合指数。在河流生态系统评价时，常常以鱼类、底栖大型无脊椎动物或者着生藻类为指示生物群落，用它们的种类数量、优势种、敏感种所占比例、摄食功能群等参数来计算生物完整性指数值。

生物完整性指数应用广泛，可以用来评价某个区域（河流、湖泊、湿地）的生态健康状况，也可以用来监测、评价污染事件、工程建设或者管理措施对生态系统的影响。它最大的优点就是把复杂的生物信息变成简单的评分，这样决策者就可以很快找到需要解决问题的区域，然后制定保护和恢复的计划。虽然生物完整性指数在指标选取、评分标准等各方面存在一定区域依赖性和主观性，但是由于它标准化、定量化的特点，使得它成为环境影响评价中不可缺少的工具。

（二）景观格局指数与结构完整性

景观格局指数是通过对于景观要素（斑块）的类型、数量、形状以及空间配置进行定量分析，从而表现景观结构特征和空间异质性的一种方法。这些指数可以反映出人类活动给自然生态系统带来的变化，例如栖息地的破碎化、景观异质性丧失等等，从而间接的来评价生态系统的结构完整性。在环境影响评价中，景观格局分析已经成为了评价区域尺度生态影响的主要手段。

常用的景观格局指数有斑块、类型、景观三个层次。以下景观格局指数表给出了部分常用的指数以及它们的生态学意义。

景观格局指数及其生态学意义表

指数名称	缩写	生态学意义
斑块密度	PD	反映景观破碎化程度，密度越大，破碎化越严重。
平均斑块面积	AREA_MN	反映景观破碎化程度，面积越小，破碎化越严重。
斑块形状指数	SHAPE_MN	表征斑块形状的复杂性，形状越复杂，边缘效应越大。
聚集度指数	CONTAG	衡量不同斑块类型的聚集或延展情况，蔓延度越高，连通性越好。

将不同时段或不同情况下景观格局指数进行比较，就可以看出土地利用的变化给生态系统结构带来的影响。城市扩张或者道路修建常常造成斑块密度上升，平均斑块面积减小，景观连通性下降，进而影响物种迁徙，挤压野生动物的生存空间，破坏生态系统的结构完整性。因此将景观格局指数纳入评价体系可以给土地利用规划优化、减少项目建设对生态结构的负面影响提供科学依据。

（三）栖息地质量与连通性评价

栖息地质量和连通性是评价生态系统结构是否完整的重要指标，直接决定生物多样性能否长期存在，物种能否长期生存。栖息地质量评价关注的是某一区域内能给物种提供生存、繁衍资源和条件的程度，连通性评价侧重于生物在不同栖息地斑块间的移动是否容易。

1. 栖息地质量评价一般用模型完成，其中 InVEST 模型的栖息地质量模块应用最广。该方法把土地利用/覆被类型，威胁源（城市，道路，农田）的分布和强度，不同栖息地类型对威胁的敏感度综合起来，得到栖息地质量地图。通过地图可以清楚地看出区域内栖息地质量水平分布以及退化情况，给生物多样性保护关键区域的选择提供空间指引。

2. 栖息地连通性评价考察生态流是否畅通。评价方法由最初的廊道识别发展到现在的复杂的图论连通性指数。整合性连接度指数、可能连接度指数等被广泛使用，用以评价单个栖息地斑块对整个景观连通性的作用。通过分析，就可以找到关键的“踏脚石”斑块和生态廊道，它们是物种扩散、基因交流、应对气候变化所必需的生命通道。

在环境影响评价中将栖息地质量和连通性分析相结合，可以对建设项目（交通线、水利工程等）对野生动物廊道造成的割裂作用进行系统的评价，预测它给

重要物种的生存状况带来的影响，进而制定出设立生态廊道、修建动物通道等具体的缓解措施，从而最大程度上减少生态系统结构完整性受到的破坏。

二、功能完整性评价方法

生态系统功能是指生态系统中各种生物、非生物要素相互影响、相互作用所产生的一系列效应和功能，主要包括能量转化、物质循环、环境调节等主要过程。功能完整性评价主要是针对核心生态过程的速率、效率和稳定性，目的在于判断生态系统在受到压力的时候能否保持重要的服务能力。

（一）能量流动与物质循环功能评估

能量流动、物质循环是生态系统最基本的功能，是所有生命活动和生态过程得以维持的基础。能量以太阳能的形式进入生态系统，经过生产者光合作用而被固定，再逐级递减地传递给各个营养级；物质则在生态系统内及生态系统与外部环境之间循环往复。评估其目的就在于显示人类活动对生态系统新陈代谢所造成的影响。

评价能量流动一般会关注生态系统的初级生产力，即绿色植物单位时间内固定的能量总量。通过遥感模型可以估算净初级生产力或者总初级生产力。净初级生产力可以反映出生态系统把太阳能转化成生物质的能力，是评价生态系统活力的重要指标。

物质循环功能评价比较复杂，一般以碳循环、氮循环、磷循环等重要的生物地球化学循环过程为切入点。利用 InVEST 模型的固碳模块来评价生态系统的碳储存和固定能力。就氮、磷循环而言，重点是查明面源污染（农业化肥流失、城镇污水）向水体、土壤的输入负荷，以及湿地、森林等生态系统对污染物的净化、截留能力。人类活动造成的水体富营养化会破坏水生态系统的物质循环平衡。

环境影响评价依靠监测和模拟能量流动和物质循环的关键参数，评价项目建设或者区域开发给生态系统主要功能带来的影响，比如估算由于土地利用改变而造成的碳汇丧失，预估新增的污染排放对水体循环功能产生的影响，进而为生态补偿以及污染控制措施给予支持。

（二）生态系统生产力与分解功能

生态系统生产力和分解功能是能量流动、物质循环的过程体现，二者共同作用使生态系统得以生长、代谢。生产力是指有机物质积累的速度，分解功能是指

有机物质分解、养分再循环的功能，两者共同维持着生态系统的动态平衡。

生态系统生产力一般用净初级生产力来衡量，即生产者通过光合作用固定的总能量减去自身呼吸消耗后剩下的部分。它是整个生态系统中食物链能量的基础，也是评价生态系统活力和健康状况的直接指标。目前利用遥感数据和生态模型（CASA 模型）可以实现大范围、长时间的净初级生产力估算，从而分析气候变化、人类活动对植被生长情况的影响。

分解功能主要是由土壤中的微生物、小型动物来完成的，把死亡的有机质（枯枝落叶）分解成无机物，释放出来的养分被植物吸收利用，是物质循环的重要环节。分解速率受温度、湿度、土壤理化性质、凋落物质量等影响。评价分解功能可以在野外设置分解袋，直接测定特定凋落物的分解速率，也可以测定土壤微生物生物量、土壤呼吸速率等间接指标。一个健康生态系统中生产与分解应该是相对平衡的，如果分解过快或过慢都意味着生态系统功能出现紊乱。

（三）水文调节与气候缓冲功能评价

水文调节、气候缓冲是生态系统提供的两种主要调节服务，对维持区域水平衡、减缓极端气候事件的影响、保障人类居住环境安全有着不可替代的作用。这些功能的评价属于生态系统视角下环境影响评价的内容，涉及流域开发、城市规划等诸多方面。

水文调节功能主要是水源涵养、洪水调蓄、水质净化等。森林、草地和湿地等生态系统依靠植被冠层、枯落物层、土壤层拦截雨水，增大下渗，减缓径流速度，从而补充地下水，调节河流流量。评估该类功能一般会用到产水量、水源涵养模块等工具，例如 SWAT 模型、InVEST 模型，这些模型可以模拟不同土地利用情景下产水量、径流变化、污染物截留量，能定量评价城市化、毁林等活动对流域水文过程的负面影响。

气候缓冲功能就是调节局部气温、湿度和稳定大气成分的作用。城市绿地、水体蒸腾作用可以缓解城市热岛效应，森林生态系统光合作用吸收二氧化碳，对全球碳循环和气候变化起到碳汇的作用。评估这类功能可以采用气象站数据进行局地小气候对比观测，也可以用遥感影像反演地表温度，或者用固碳模型量化生态系统的碳汇能力。评价结果可以给城市规划中绿地系统的布局、区域温室气体减排策略的制定提供科学依据。

三、综合完整性评价模型

由于生态完整性属于一个多维度、多层次的复杂概念，因此，单个指标无法充分体现出它的全部情况。因此，在环境影响评价的实际工作中，常常需要使用综合评价模型，综合考虑结构和功能的很多指标，最后得出关于生态完整性水平的综合结论。

（一）多指标综合指数法

多指标综合指数法是目前最常用的综合评价方法之一，它的基本思想是建立包含多个指标的评价体系，对各个指标进行标准化、加权求和，得到一个综合指数，来反映生态系统的整体质量。此法逻辑清楚、结果直观、便于比较。

该方法的主要步骤为，按照评价目的和区域生态特征，选取可以全面体现生态系统结构、功能状况的评价指标，生物丰度、植被覆盖度、水网密度、污染负荷等。由于各个指标的量纲、数量级不同，需要对指标进行无量纲化处理。再次就是确定各个指标的权重，权重体现各个指标在总体评价中所占的比例，常用的赋权方法有层次分析法、专家打分法、熵权法等。将标准化后的指标值与权重相乘再求和，即得综合评价价值。

（二）模糊综合评价法

模糊综合评价法是用模糊数学理论来解决评价过程中存在的模糊性、不确定性问题的一种有效方法。生态系统完整性的概念本身是模糊的，评价标准不是非黑即白的，而是一个连续变化的区间。该方法可以很好地解决边界不清、难以精确确定量的问题，使评价结果更加符合实际。

模糊综合评价的基本步骤包括：

1. 构造因素集、评语集。因素集是由参与评价的所有指标构成的，评语集是对评价结果的等级划分，例如优、良、中、差。
2. 确定隶属度矩阵，这一环节非常重要，主要目的是确定各个评价指标对于各个等级的隶属程度。隶属度是介于 0 和 1 之间的数值，它体现的是某指标属于某个等级的可能性或者程度。一般用建立隶属函数或者专家打分的方法来实现。
3. 确定指标权重。与多指标综合指数法一样，需要确定各评价指标的相对重要性，即权重向量。
4. 模糊矩阵运算，权重向量与隶属度矩阵之间做模糊合成运算，得出综合评

价结果向量。按照最大隶属度的原则,向量中数值最大的元素所对应的评语等级就是最后的综合评价结果。

该方法可以对定性指标和定量指标进行系统的处理,将专家经验与客观数据结合起来,特别适合评价指标不能准确量化或者评价标准不明确的生态环境问题。

(三) 神经网络等机器学习评价模型

伴随大数据、人工智能的发展,以人工神经网络、支持向量机、随机森林为代表的机器学习模型在生态完整性评价中起了很大的作用。这些模型擅长处理生态系统普遍存在的复杂的、非线性的关系,可以对复杂的高维数据进行学习、分析从而找到规律。

1. 人工神经网络模型模仿生物神经系统的结构和功能,用大量的环境监测数据、遥感数据等作为输入,用已知的生态状况等级作为输出目标进行训练,建立二者之间的映射关系。经过训练的模型就可以对新输入数据做预测、分类和评价未知区域的生态完整性。

2. 机器学习模型相比于传统的评价模型最大的优点就是自学习、自适应。不需要事先确定指标的权重或者数学公式,可以自动从数据中找出重要的影响因素和复杂的关系,从而避免传统方法中人为赋权的主观性。

利用遥感影像提取出的各种景观指数、气候数据、社会经济数据作为模型输入,把专家评定的生态完整性等级作为输出目标,训练神经网络模型。建立该模型之后可以快速、自动化地完成大面积的生态完整性评价以及动态监测,大大提高了评价效率和客观性。从而使得环境影响评价走上智能化的、精确化的道路。

第三节 生态系统弹性评估

一、生态系统弹性的概念与维度

生态系统弹性是认识和应对生态系统对于干扰的反应所用的主要理论。它看重系统在不断变动的环境里维持其持久性、适应性以及转化的能力,而不仅仅是复归到某个理想的原始状况。这就使环境影响评价有了更现实、更前卫的目标。

(一) 工程弹性与生态弹性的区别

工程弹性与生态弹性是完全不一样的两个概念。工程弹性指的是系统在离开

一个稳定的平衡点之后，可以快速回到这个平衡点的能力。它一般假定系统存在唯一、全局稳定的平衡态，注重抗干扰、快速恢复的效率，常用于工程结构或者严格控制的系统中。在这种视角下，最好的管理方式就是尽可能使系统不偏离它的最优状态。

而生态弹性指的是系统在遭受干扰或者重组之后，依然能够维持自身原有功能、结构、特性以及反馈的能力。它认为生态系统会存在多个稳定的状态或者吸引域。其核心就是系统可以承受多大程度的扰动而不发生质变，即不跨越阈值进入一个完全不同的稳定状态。生态弹性更加重视系统持久性、适应性以及学习能力。在环境管理实践过程中，两种弹性有较大的区别。如果只以工程弹性为目标，那么管理措施就会变得僵化，进而削弱系统应对未来不确定性冲击的能力。因此环境影响评价要更多关注怎样维持或加强生态系统的生态弹性，保证生态系统在承受人类活动、气候变化等压力时仍能保持其主要的生态过程和服务功能。

（二）吸收能力、适应能力与转化能力

生态系统弹性可以分解成吸收能力、适应能力和转化能力这三者互相联系的三个核心能力。三者构成一个完整的系统来应对内外部的干扰，为环境影响评价提供具体可操作的分析角度。

生态系统弹性的核心能力

能力类型	定义	特点与作用
吸收能力	系统在不改变基本结构和功能的前提下，承受和消纳外部干扰的程度。	依赖系统内部冗余度、物种多样性；表现为快速缓冲和恢复；例如湿地对污染物的过滤吸附功能。
适应能力	系统对环境变化及持续压力做出内部调整的能力。	涉及物种行为、种群结构改变、群落演替和生态过程自我调节；使系统在变化中学习并保持长期稳定。
转化能力	当现有状态难以为继时，系统发生根本性重组，转变为更能适应当前环境的新状态，并持续提供有价值生态系统服务的能力。	结构和功能彻底变革，而非简单微调；应对剧烈或不可逆变化；需考虑长远和宏大尺度。

吸收能力也称为缓冲能力，指生态系统的基本结构和功能不发生变化的情况下，能够承受并消化外界干扰的程度。主要依靠的是系统冗余度、物种多样性以及快速恢复的生物物理过程。湿地生态系统依靠植被、土壤对污染物进行过滤、吸附，具有很强的水质净化、吸收能力。在环境影响评价当中，判定项目活动有

没有超出生态系统关键过程的吸收能力，这是一项主要任务，其中判定纳污河段自净能力极限便是其一。

适应能力是指生态系统对于环境变化或者持续压力所作出的内部调整。这就牵涉到物种行为的改变、种群结构的调整、群落演替和生态系统过程的自我调节。一个有强大适应能力的系统，可以在变化的环境中不断学习、调整，使得系统长期稳定并且有生产力。维持遗传多样性，改善栖息地之间的连通性才是提高适应力的根本。

转化能力就是指当现有的系统状态无法继续维持的时候，生态系统能够发生根本性的重组，转变为一个新的、更能适应当前环境的系统状态，仍然可以提供一些有价值的生态系统服务的能力。这种改变是结构和功能的彻底改变，不是简单的调整。对于环境影响评价来说，意识到转化的可能性，就表示要考虑到更为长远、更为宏大的尺度，为可能发生的系统转型做好准备，促使它朝着期望的方向转变。

正如生态系统弹性的核心能力表所示，吸收、适应和转化共同构建了生态系统应对扰动的完整策略。

（三）弹性阈值与多稳态理论

弹性阈值、多稳态理论属于生态弹性理论的重要组成，它们很好地阐释了生态系统反应的非线性特征。生态系统的变化不是一直平缓、可预测的，当外部压力或者内部条件的变化超过系统弹性阈值的时候，就可能产生快速、剧烈，甚至不可逆的状态突变。

多稳态理论认为，在相同的外部环境之下，一个生态系统可以存在多种不同的稳定状态，并且每一种稳定状态都是由一个或者几个反馈机制来维持的。浅水湖泊在清澈的水草型稳态与浑浊的藻类型稳态之间可以相互转化。当湖泊由于营养盐输入过多等压力而跨越阈值从清澈态变成浑浊态后，即使以后营养盐水平恢复到最初的水平，系统也会因为内部正反馈（如浑浊水体抑制水生植物生长、底泥扰动加剧等）被锁定在浑浊态上，表现出明显的滞后效应。因此生态系统的恢复会变得非常困难并且代价巨大。

在环境影响评价中识别并量化弹性阈值，就成为预防重大生态灾害的关键步骤。评价工作不能局限于传统的线性剂量效应分析，而要找出能引起系统状态突变的敏感驱动因子以及重要的阈值区间。这就需要评价方法不能只考虑项目活动

所产生的直接效果，还必须对生态系统关键反馈回路产生的影响做深入的分析，从而判断出项目活动是会推动还是会削弱系统远离或者逼近危险阈值。对多稳态机制有更深入的认识之后，就能更有预见性、预防性地制订环境影响评价的对策，从而防止那些看似很小、但积少成多最终造成无法挽回的生态系统退化。

二、弹性评估的指标与方法

科学评价生态系统的弹性，是将生态系统弹性有效应用于环境影响评价的前提。弹性包含多个方面，比较复杂，评价时应当结合各个层面、各个尺度的指标以及相应的评价方法来构建出完整的评价体系，从而作出合适的决策。

（一）基于生态系统过程指标的评估

生态系统过程指的是维持生态系统结构和功能的能量流动、物质循环，生态系统过程的稳定高效是生态系统健康和弹性最直接的体现。基于过程的指标可以反映生态系统对于干扰的反应，属于弹性评价的重要部分。该类指标主要用以反映生态系统重要循环的速度、效率和稳定性。

评估中常用的过程指标包括：

1. 初级生产力：衡量生态系统固定太阳能的能力，是生态系统的能量基础。它的稳定性以及恢复速度是评价系统吸收能力、适应能力好坏的标志。
2. 养分循环和持留效率：健康的生态系统一般会有紧密的养分循环，可以很好地保持氮、磷等关键元素。养分流失率增大，便是系统受压、弹性下降的早期警报。
3. 分解速率：有机物分解是把生产者与消费者联系起来，实现物质循环的重要环节。分解速率的变化，会对整个生态系统的养分有效性和能量流动造成直接的影响。
4. 水文调节功能，即径流调节能力、水分涵养能力等。这些过程的稳定对保持区域水平衡、抵御旱涝灾害有重要的作用。

对项目建设前后这些重要的过程指标进行监测比较，就可以直接衡量项目建设活动给生态系统功能稳定性带来的影响大小，进而判断出项目对系统弹性的破坏程度。

（二）基于景观格局指标的评估

景观格局指的是景观组成单元的空间分布与配置情况，直接影响生态过程的

速度和方向，也决定着生态系统的弹性水平。景观格局相关的指标可以反映生态系统的脆弱性以及恢复潜力，对评价区域尺度累积性环境影响有重要意义。

景观格局会影生物种扩散、迁移、基因交流，直接影响到生物多样性的保持以及生态系统的适应性。高度破碎化、孤岛式的景观生态系统弹性一般较低，因为物种不能在不同的斑块之间自由移动来躲避干扰或者重新定居。相反，具有良好连通性、较高异质性的景观可以给生物提供更多的避难所和资源，使整个系统表现出更高的弹性。

弹性评价时，经常用到地理信息系统和遥感技术，计算出一系列景观格局指数来量化景观的结构特征。常用的有斑块数量密度、平均斑块面积、边缘密度、斑块形态复杂性以及景观连通度指数。斑块数量增多，平均面积减小，都说明景观破碎化程度在加剧，景观连通度降低，说明物种迁移通道受阻。通过分析项目建设造成的景观格局改变来评价环境影响，进而可以对项目对栖息地质量、生物多样性的潜在影响做出评估，从而判断此工程会对该区域生态系统弹性造成怎样长期的负面影响。

（三）基于模型模拟的弹性评估

由于生态系统具有复杂性、非线性动态等特点，因此依靠经验数据和静态指标很难对生态系统的弹性做出全面的评价。模型模拟是一种很强的前瞻性分析手段，可以针对不同的情景探究生态系统动态的反应，找出可能存在的阈值和状态改变点，给弹性评价赋予了重要的定量和半定量分析手段。

利用模型进行模拟，可以对大量的数据、机理认识等进行整合，建立生态系统的虚拟实验室。对于土地开发程度、污染物排放量、气候变化等各种扰动下生态系统主要变量变化的趋势进行模拟。系统动力学模型可以很好地捕捉系统内部复杂的反馈回路，有利于发现导致系统状态突变的内在原因。基于个体的模型可以对物种之间的相互作用进行微观尺度上的模拟，进而考察其对宏观格局产生的影响，特别适合于研究生物多样性同系统弹性之间的关系。

模型模拟在环境影响评价实践当中有着非常大的应用价值。它可以预测一个项目活动所引发的累积效应或长期影响，也可以用来判定一个系统越过某一临界点的可能性。可以利用状态和转变模型，模拟森林或者湿地生态系统的不同干预管理措施下，维持健康状态或者变成次生状态的概率。情景模拟分析不但可以量化项目给生态系统弹性造成的影响大小，而且可以比较不同的缓解措施的效果，

从而为制定最具成本效益和生态效益的适应性管理措施提供科学依据，最终把环境影响评价从被动的“影响判断”转变为主动的“弹性管理”设计。

三、提升生态系统弹性的管理策略

环境影响评价的最终目的不但是发现并评估影响，而且还要提出规避、减缓和补偿不利影响的措施。生态系统弹性框架下管理策略的主要目的就是提高系统应对不确定性、变化的能力，保证其可以持续提供生态服务。

（一）保护生物多样性与关键物种

生物多样性是生态系统弹性的根基。物种多样性丰富，尤其是功能多样性，意味着有很多物种可以执行相似的功能。这种功能冗余就像是一种“保险”，当某些物种因为环境的变化而衰退的时候，功能类似的其它物种就可以取代它们，从而维持生态系统的功能不变。任何改善生态系统弹性的措施都必须把生物多样性保护放在第一位。

环境影响评价中就表示，不能只重视珍稀濒危物种的保护，而应该扩大到整个物种组合，特别是功能群多样性保护。对能提供重要生态服务（传粉、种子传播、害虫控制等）的功能种群要优先保护。保护措施有就地保护和生态修复，退化的土地上种植多种本地植物，而不是一种树种，从而增加区域内物种和功能的多样性。

在生态系统中起重要作用的顶级捕食者、海狸、珊瑚礁等物种，对生态系统有着不可忽视的影响，它们的灭绝或者存活都会牵动整个生态系统。识别并严格保护关键物种和它的栖息地，是提高生态系统弹性的有效方法。环境影响评价要系统评估项目给这些关键物种带来的影响，并采取最严格的保护措施，保证物种种群健康，保证其功能的正常发挥。

（二）维持栖息地连通性与景观异质性

在人类活动越来越强，景观越来越破碎化的背景下，保持和恢复栖息地的空间结构对提高生态系统的弹性至关重要。栖息地的连通性和景观异质性，是保证物种长期生存、适应环境变化、维持健康生态过程的两个主要的空间特征。

栖息地连通性是生物在不同栖息地斑块之间移动的难易程度或便利性。良好的连通性可以促进基因交流，避免小种群的遗传衰退，在局部灾害或者环境恶化的时候，可以给物种提供新的适宜生存环境，维持捕食者与猎物、植物与传粉者

之间的正常生态关系。在气候变化的背景下，连通性对于物种寻找其气候适宜区的“生态廊道”起着举足轻重的作用。因此环境影响评价应该重点考察道路、大坝等工程对景观连通性的影响，积极倡导修建生态廊道、高架桥、涵洞等来缓解影响，或者规划把重要的生态节点、廊道纳入保护范围。

景观异质性是指景观在组成、结构上多样化程度或者复杂性，它可以给更多的物种提供多样化的栖息地、食物资源和避难所。以森林、草地、湿地、农田等多种成分组成，异质性的景观在整体弹性及稳定性方面都大于单一均质景观。异质性可以减缓干扰的扩散，在干扰发生之后也可以为生态恢复提供更多的物种来源。因此不宜大范围推行单一的土地利用方式，应该采取提升景观复杂性和多样性的土地利用模式，并保留小微湿地、林缘等重要的异质性单元。

（三）减少人为压力与适应性管理

提高生态系统弹性，根本方法之一就是识别并减少慢性人为压力，这些压力会削弱系统的恢复力和适应力。这些压力源有面源污染、点源污染、过度资源开发、外来物种入侵、土地利用剧变等。即便生态系统具有很大的内在弹性，如果长时间承受高强度的压力，也会一点一滴地削弱它缓冲的能力，最终导致系统崩溃。环境影响评价要准确地识别项目产生的主要压力源，提出源头控制和过程削减的措施，保证项目活动对生态系统产生的压力不超过系统所能承受的阈值。

生态系统本质是复杂的、不确定的，所以任何的规划或者管理措施都不是完美的。适应性管理是一种在实践中学习、不断调整的管理，它把管理措施看作是检验假设的“实验”。此法重视管理过程中实施系统监测，评价管理措施实际效果，将反馈信息用作调整改善后续管理决策的依据。核心循环步骤为：

1. 明确管理目标并建立系统模型。
2. 设计并实施管理方案。
3. 对关键指标进行长期监测。
4. 评估监测结果，对比预期目标。
5. 根据评估结果调整管理方案，进入新的管理循环。

在环境影响评价后期管理中使用适应性管理方法，即是从“预测与评估”转向“学习与适应”，承认知识有限，用结构化的过程应对不确定性，不断改进管理成效，最终实现生态系统弹性有效维护和增强。

第四节 生态风险评价模型

一、生态风险评价的“四步法”

四步法被国际上称为生态风险评价的经典方法。它把繁杂的评价过程拆解成四个相互关联的步骤，形成起来逻辑清楚，操作简便的标准化流程，为系统开展生态风险评价赋予了方法论根基。

（一）危害识别

危害识别是生态风险评价的起点，主要就是识别环境中潜在的、可能会对生态系统造成不良影响的各种胁迫因子，并对这些因子可能引起的生态效应类型进行初步的描述。胁迫因子多种多样，化学性的（重金属、持久性有机污染物）、物理性的（温度变化、栖息地破坏）或者生物性的（外来物种入侵、病原体传播）都可以。

这一阶段的工作需要大量的资料搜集和分析工作，项目工程分析资料、区域环境背景调查资料、污染物毒理学数据库、相关科学文献等。经过筛选和分析之后，评价者要找出需要加以关注的胁迫因子，也就是“风险源”，还要确定这些胁迫因子可能会对哪些生态系统成分造成影响，即“受体”，可以是某种物种、种群、群落或者整个生态系统。此步骤是否准确，直接关系到后面评价工作走向如何、深度怎样，是整个评价工作的基础。

（二）剂量-效应关系分析

剂量效应关系分析就是研究胁迫因子暴露水平（剂量）与生态受体产生有害效应（效应）的关系。它是联系危害与风险的纽带，是用数学模型或者函数来表达，随着暴露剂量的增大，不良反应发生率或者严重程度如何变化，从而为风险的定量描述提供重要的参数。

分析过程一般会利用大量的生态毒理学实验数据。在实验室条件下，通过改变污染物的浓度来观察污染物对标准实验生物致死率、生长抑制率、繁殖成功率等终点的效应，从而得到半致死浓度、半效应浓度、无观测效应浓度和最低观测效应浓度等重要的阈值。非化学胁迫因子，如栖息地面积减少，也可以建立它与物种丰富度或者种群数量之间的量化关系。这些关系曲线斜率、阈值体现的是生态受体对于某种胁迫的敏感程度。

（三）暴露评估

暴露评估的核心目的就是确定或者预测胁迫因子在环境中的时空分布，明确生态受体和胁迫因子的接触途径、频率、时间，最后计算出生态受体实际承受的暴露剂量或浓度。这是综合的过程，需要对胁迫因子的环境行为和生态受体的生态习性做全面的考虑。

评价一般从胁迫因子释放源入手，然后模拟它在水、土壤、大气等环境介质中迁移、转化、归趋的过程。此环节要使用环境动力学模型，比如水质模型、大气扩散模型等来预测污染物在空间上分布。然后需要对生态受体的行为模式进行详细分析，包括觅食区域、食物组成、栖息地利用等，从而确定出主要的暴露途径，即呼吸、皮肤接触、饮水或者食物链富集等。最终受体在某一时间尺度上的总暴露量，可以看作是环境浓度和受体行为参数的乘积。

（四）风险表征

风险表征是生态风险评价的最后一步，它把剂量效应关系分析的结果和暴露评估的结果结合起来，在一定的暴露情景下，估计生态系统出现不利影响的概率和程度。其目的在于用科学、清晰的方式说明风险的性质、程度，对不确定性作出充分的说明。

风险表征常用的方法之一就是风险商值法。此办法按照预测的环境浓度同预测的无效应浓度的比值（ $RQ=PEC/PNEC$ ）来判定风险。当 RQ 值小于 1 的时候，一般认为风险处在可接受的范围之内；当 RQ 值大于或者等于 1 的时候，就说明存在潜在的生态风险，需要引起重视并采取相应的管理措施。风险表征除了要计算风险商以外，还应该对结果进行深入的论述，指明风险的来源、影响范围、主要受体，在评价过程中用到的假设和模型引入的不确定性。最终结论要用简洁明了的语言呈报给决策者，为决策者制定环境管理策略、风险控制措施提供可靠的科学依据。

二、区域生态风险评价方法

区域生态风险评价把研究尺度从单一的项目或者污染源扩大到流域、城市群或者自然保护区等更大的地理单元。其主要考虑区域内各种风险源与多类生态受体之间复杂的相互作用，以确定区域的生态安全格局和识别出重要的风险区。

（一）风险源识别与风险受体分析

在区域尺度上，风险源的识别要冲破单一污染源的束缚，全面剖析区域内一

切会对生态系统形成胁迫的人类活动和自然灾害。工业园区、农业面源污染、城市扩张、交通网络等所有压力源。地理信息系统技术在此环节起到了关键性的作用，可以实现风险源的空间定位以及强度量化，从而绘制出区域风险源分布图。

风险受体分析主要识别出区域内生态价值高或者对胁迫敏感的单元，并对其进行评价。这些受体可以是珍稀濒危物种的栖息地、水源涵养区、湿地、森林等重要的生态系统服务功能区。完成生态系统敏感性评价之后，根据生物多样性、生态系统服务价值、保护等级等指标，可以准确判断各个区域的生态重要性及脆弱性，从而得到区域生态受体敏感性空间分布图。

把风险源的强度与受体的敏感性进行空间叠加，就是区域风险评价的关键步骤。因此高强度风险源与高敏感性受体在地理空间上重合的区域，就是生态风险热点区，应重点关注并优先管理。

（二）暴露途径与不确定性分析

区域生态风险评估中的暴露分析，主要是研究胁迫因子在大尺度空间上迁移扩散的路径，也就是暴露途径。这一般涉及复杂的环境过程，污染物随地表径流进入河流，然后用水动力作用向下游输送；或者大气污染物通过沉降影响大片森林和土壤。要模仿长距离、跨介质的迁移过程，预估胁迫因子在区域内地势各处与不同时间段的演变情况，就得依靠多介质环境模型。

不确定性分析在区域评价中尤为重要，因为宏观尺度上数据获取、模型参数确定、过程模拟等各方面都存在着很大的不确定性，

1. 参数不确定性，模型中许多输入参数（污染物降解速率、动物迁移率等）一般用范围值而不是精确值给出。
2. 模型不确定性：任何模型都是对现实世界的近似，其结构可能与真实过程存在偏差。
3. 数据不确定性：监测数据的空间覆盖度与时间分辨率有限，且存在测量误差。

为了更好地应对不确定性，在评估中经常使用蒙特卡洛模拟、敏感性分析等方法，对风险结果做概率性描述，而不是给出单一确定值。最后用风险概率分布或者置信区间表示评估结果，给决策者提供更多信息。

（三）区域生态风险等级划分与制图

区域生态风险评价的最后成果一般会以风险地图的形式展示出来，把复杂的

风险信息可视化，给区域规划和环境管理提供决策支撑。此步骤就是把评价区划分为几个单元，比如网格、小流域等，然后再求出每个单元的综合生态风险指数。

该指数的建立一般要综合考虑风险源强度、受体敏感性和二者之间暴露关系。可构造综合风险模型，用压力 - 状态 - 响应框架来建立指标体系，给各项指标赋予权重，最后得到各个评估单元的风险值。

根据计算出的风险分值，用自然断点法、等间距法或者专家知识法等方法来确定风险等级划分的临界值，把区域分为低风险、较低风险、中等风险、较高风险和高风险等几个等级。利用 GIS 技术给不同的风险等级评估单元赋予相应的颜色或符号，得到区域生态风险空间格局图。图中清楚地标出了风险防范的重点区域和优先次序，目的是使环境管理资源得到更加准确、高效的配置和利用。

三、新型生态风险评价

社会发展、科学认知提高，传统的以单一化学污染物为核心评价对象的生态风险评价方法，已经不能应对日趋复杂的环境挑战。新型生态风险评估出现之后，它重视的是复合污染、生物入侵、气候变化这些新兴的、具有高不确定性和系统性风险的类型。

（一）复合污染生态风险

生态系统中多种污染物混合是常态，各种污染物之间会互相影响，产生复合毒效应。复合污染生态风险评价就是为此而产生的，它不再把污染物看作独立的胁迫因子，而是把污染物看作一个整体，评价其对生态系统的综合影响。

污染物之间常常会产生联合作用，其作用类型主要有相加作用、协同作用和拮抗作用。不同的联合作用机制，大大影响复合污染的生态效应，也增大准确预测的难度。具体的类型及特征见下表：

复合污染中污染物联合作用类型表

类型	定义 / 特征	毒性表现
相加作用	混合物各组分毒性简单叠加	总毒性等于各组分毒性之和
协同作用	混合物总毒性显著高于各组分毒性之和	“ $1+1 > 2$ ”
拮抗作用	混合物总毒性低于各组分毒性之和	总毒性小于各组分毒性之和

由于复合污染作用机理复杂，对复合污染的生态效应进行准确的预测仍然有困难。目前常用的评价模型有浓度相加模型和独立作用模型，分别适用于作用机

理相似和不相似的污染物混合体系。基于整体毒性测试的生物评价法，比如用藻类、水蚤等指示生物直接测定水样的综合毒性，也是评价复合污染风险的方法。

（二）外来物种入侵风险

外来物种入侵是造成全球生物多样性丧失的第二大原因，其生态风险评价就是对非本地物种在新生态系统中定居、扩散以及可能造成的生态和经济损害进行评价。与化学污染不同的是，生物入侵的风险源是具有生命活动和繁殖能力的生物体，风险过程具有自我放大、不可逆的特点。

入侵风险评价一般遵循一条严密的逻辑链条，即对物种引入、定殖、扩散以及产生影响等各个阶段的概率做系统的评价。模型要考虑物种本身的生物学特性（繁殖力、环境适应度、攻击性），考虑引入途径的频率和规模，也要考虑入侵地生态系统的可入侵性（是否有天敌、资源是否充足、是否受到干扰等）。评价方法有定性专家打分法、半定量矩阵模型、定量物种分布模型等。物种分布模型按照物种原产地所处环境条件，并结合未来气候情景进行预测，得出该物种在引入地潜在的适生区域，作为早期预警以及重点防控区划分的依据。

（三）气候变化生态风险

气候变化属于一种全球性的、长期性的环境压力，它所具有的生态风险具备了尺度宏大、影响深远以及高度不确定性的明显特点。它直接影响物种的生理状况和地理分布，改变生态系统结构、过程，并与其它环境压力（污染、栖息地破碎化）相互作用产生级联效应和协同影响。

气候变化生态风险评价的核心就是认识和预测生态系统对全球变暖、降水格局改变、极端天气事件频发等变化的反应。评估一般先建立未来气候变化的情景，用全球或者区域气候模型预测温度、降水等主要气候变量。然后将这些气候情景输入物种分布模型、动态植被模型或者生态系统过程模型等生态学模型中，模拟气候变化对物种适生区迁移、群落演替、生态系统生产力以及碳循环等的影响。

此类评价存在着很大的难题，特别是在怎样应对多尺度效应以及复杂的系统反馈机制上。气温上升会使部分物种迁移到高纬度或者高海拔的地方，但是这种迁移速度不能跟上气候变化的速度，或者受地理障碍的限制，最终会导致物种灭绝。评价不能只看单个物种的风险，还要看生态系统功能和服务（水源涵养、粮食生产等）的稳定性。评估结果对于制定出长期适应性管理策略来说具有举足轻重的作用。

第五章 生态系统服务功能评价

第一节 生态系统服务分类体系

一、国际主流分类体系比较

国际上已经形成多个有影响的生态系统服务分类体系，各有千秋，互相促进。掌握主要思想与区别，可以为我们选择和搭建满足某种评价需求的分类方式提供帮助。

（一）MA 分类体系

千年生态系统评估第一次系统地创建了一个全球性的生态系统服务分类框架，为以后的研究打下了基础。它把生态系统服务分为供给服务、调节服务、文化服务、支持服务四类。供给服务是人类从生态系统中直接获取的物质，如食物、水；调节服务是生态系统过程调节带来的效益，如气候调节、洪水调蓄。

文化服务是人类从生态系统得来的精神上的精神价值和启发。支持服务是保证其它所有服务得以维持的基础，包括土壤形成、光合作用、养分循环等。MA 框架最大的贡献在于它的综合性和创新性，它使人们认识到生态系统在经济活动中所起到的作用。但是部分服务类别之间存在重叠，支持服务和其他三者的关系也引发了后续的讨论。

（二）TEEB 分类体系

生态系统与生物多样性经济学倡议在 MA 框架的基础上更重视生态系统服务价值和它给人类带来的福利。TEEB 分类体系目的在于更好地为经济评估与政策制定服务，将服务分为供给服务、调节服务、栖息地服务、文化服务 4 类，共计 22 项服务。

该体系的重大调整之一就是把 MA 中的“支持服务”换成了“栖息地服务”，并且与“调节服务”并列，凸显栖息地维持基因库和物种多样性的功能，这对其他服务的长期稳定供给有着直接的影响。TEEB 框架把生态过程、服务功能、人类福祉、经济价值联系起来，给将生态资本纳入国民经济核算体系、环境决策提

供更清晰的逻辑路径。

（三）CICES 标准

通用国际生态系统服务分类标准为了响应环境经济核算体系的需求而制定，它的目的就是给不同的研究、评价项目提供标准化、分级的分类系统，以便数据整合与比较。CICES 有着严格的等级制度，把服务分成部、组、类和类别这四级。

该标准把服务分成供给、调节与维持、文化三大部分，特意把支持服务排除在外，认为支持服务是生态系统内部的功能，而不是直接提供给人的最终产品，这样就防止了价值评估时出现重复计算的问题。CICES 设计具有很强的操作性和扩展性，可以同各种生物物理、社会经济数据对接，适用于国家及区域尺度上的生态资产核算与管理，给生态系统服务的标准化评价提供了一个重要的工具。

二、中国生态系统服务分类框架

按照中国特有的自然地理格局和生态环境问题，创建本土化的生态系统服务分类框架十分必要。该框架要充分体现出中国生态系统的特点，还要能有效地支撑起国家生态文明建设以及环境管理实践。

（一）《全国生态系统分类体系》简介

为了统一规范全国的生态系统评估工作，中国生态环境部会同有关部门发布了有指导意义的技术文件，其中包括符合中国国情的生态系统服务分类框架。该框架以国内长期积累的生态学研究经验为基础，用全国和重点区域的生态系统观测数据，科学、系统评价我国生态系统的状况和服务功能，为生态保护红线划定、生态补偿机制建立、重大工程环境影响评价提供技术支持。

本体系在参考 MA 等国际主要框架的基础上，又充分考虑了中国地域辽阔、生态系统类型繁多、人地关系复杂等特点。突出了与国家生态环境保护战略目标的一致性，把具有典型地域特征、重大生态意义的水源涵养、水土保持、防风固沙等服务功能放在突出位置，其实用性更强，成为引领中国环评工作中生态系统服务评价的重要依据。

（二）供给服务、调节服务、支持服务、文化服务的具体内容

中国的分类框架也沿用了四大服务分类的逻辑，但是根据中国国情对内容进行了细化和界定，使其更符合实际管理的需求。

1. 供给服务指生态系统直接提供的物质产品。食物供给，即农作物、畜产品、

水产品、林副产品等；提供原材料，即木材、竹材、纤维、药材等工业及生活用原料；提供水资源，即地表水、地下水等生产生活用水。

2. 调节服务指生态系统为保持自身环境稳定、适应环境变化而发挥的作用。气体调节，吸收二氧化碳，释放氧气；气候调节，调节局部温湿度和降水；环境净化，吸收和降解污染物，净化水体和空气；水文调节，调蓄洪水，补给地下水；土壤保持，植被固定土壤，减少侵蚀。防风固沙、海岸带防护等属于这一类。

3. 支持服务是保证其它三种服务得以实现的基础性生态过程。它主要包括维持土壤肥力的营养物质循环过程、供给生态系统能量的初级生产过程即光合作用，以及各类生物生存、繁殖、迁徙的栖息地功能。虽然这些服务不会被人类直接使用，但是它们功能的正常运转是生态系统健康、持续地产生其他服务的根本保证。

4. 文化服务，生态系统给人们带来的非物质精神以及文化方面的益处。提供公众休闲、娱乐和旅游的场所，比如自然公园、风景名胜区；给审美价值高的自然景观创造环境；给艺术创作、科学研究提供灵感；作为地方知识、宗教信仰和文化遗产等特殊的场合。这些服务对提高居民的生活质量、传承地方文化起着不可替代的作用。

生态系统服务分类示例

服务类型	示例项目	关键作用
供给服务	农作物、木材	提供物质产品
调节服务	碳汇、洪水调蓄	维持环境稳定
支持服务	土壤形成、营养循环	支撑其他服务
文化服务	自然观光、科研灵感	提供非物质惠益

从上表可清楚地看出，中国生态系统服务分类框架中主要的服务类型以及其对应的典型实例，也体现了各类服务对于生态系统的重要性。

（三）分类体系在环评中的应用原则

在环境影响评价实践活动中应用生态系统服务分类体系，要遵循一系列基本原则，保证评价的科学性、相关性、有效性。首要原则是相关性原则，按照建设项目或者规划的类型、规模以及所处区域的生态敏感程度，来判定对建设项目或者规划产生较大影响的重要生态系统服务。可以避免面面俱到而重点不突出的问题，使评价更有针对性。

综合性原则要求评价要兼顾容易量化的服务供给等，也要同等重视难以用货

币衡量的调节服务、文化服务等,从总体上反映项目可能产生的正负面生态影响。同时要遵循尺度匹配的原则,保证评价的空间范围和受生态系统服务流动影响的空间范围一致,从而找到影响的源和汇。应坚持定量和定性相结合的原则,对可以量化的服务用模型模拟或现场观测评价;对不能量化的服务用专家咨询、公众参与等半定量或定性的方法评价;力求客观全面。

三、生态系统服务的空间异质性

生态系统服务不是均匀分布在地面上的,供给能力和人类需求在空间上存在明显的差异。把握好空间异质性,是评价环境影响,作出正确的生态保护与管理决策的重要环节。

(一) 服务的“供给区”与“受益区”

生态系统服务的产生地与受益地空间上通常是分离的,所以才产生了服务供给区和服务受益区这两个概念。供给区,或称服务产生区,是指生态结构、过程完整,能够持续提供某种或某些生态系统服务的地域,如提供水源涵养功能的森林流域上游。受益区是指可以直接或者间接从服务中获益的人类社区或者经济区域,例如下游城市和农田。

供需空间上的分离性是生态系统服务跨区域流动的结果,也是造成区域间生态利益冲突、合作需求的主要原因。环境影响评价中准确辨别并分清这两种类型范围十分重要。建设项目的选址在服务供给区,但它带来的影响会沿着服务流动的路径传送到远处的受益区。上游水库修建会改变下游河流的水文情势,威胁下游城市供水安全和水生生物多样性。

因此,环境影响评价的范围不能只限于项目的行政边界内,而应该延伸到受到影响的服务供给—流动—受益链条上。这就需要评价工作开展空间分析,确定服务流的路径、强度、范围,找到所有可能受到影响的利益相关者,特别是那些地理距离项目很远但是高度依赖相关服务的群体,全面评价项目产生的外部性影响,为制定合理的生态补偿方案、区域协调发展政策提供依据。

(二) 服务的空间流动与尺度效应

生态系统服务具有空间流动性这一特性,不同类型的生态系统服务流动方式、影响范围存在差异。一些服务,如土壤形成、本地授粉等,影响范围小,具有很强的局部性。水源涵养、洪水调蓄等服务是以水文过程的形式在流域这一中尺度

上发生、传递。碳固定、气候调节等生态服务具有全球性，某一地区的生态系统变化会对全球气候系统产生影响。

服务的流动性直接导致尺度效应问题，也就是评估结果会因为研究空间尺度（范围、粒度）的不同而发生变化。环境影响评价中，如果选取的评价尺度不合适，会导致对项目影响严重低估或者高估。对于影响局部授粉服务的小项目，小尺度评价就足够了；而对于影响大江大河水源涵养功能的大项目来说，必须用流域尺度来进行评价，否则就不能发现其对下游广大区域的连锁效应。

所以生态系统服务评价过程要根据主要受影响的服务种类，科学地确定评价空间边界和分析单元的尺度。这就需要采取多尺度综合分析的办法，把项目所在地的微观尺度分析同服务流动路径上的中观、宏观尺度分析结合起来。把握好尺度效应，可更准确的掌握项目实际的空间分布和影响程度，防止因尺度不当造成的决策失误，保证评价结果能够对决策起到支撑的作用。

（三）服务的“热点”与“冷点”识别

为了在有限的资源条件下实现生态服务供给的最大效益，找出生态服务供给的关键区域（热点、冷点）就显得十分重要。生态系统服务热点指的是在一定空间范围之内，能提供多种高水平生态系统服务的区域。这些区域的生态系统结构完整、功能强大，是区域生态安全的“压舱石”、“稳定器”，重要的水源涵养区、生物多样性中心等。

生态系统服务的冷点指的是生态系统服务供给水平低的区域，由于自然条件限制或者长期受到干扰而出现生态退化。识别出热点和冷点之后，就便于进行空间规划以及环境管理决策。环境影响评价中热点区域应作为生态保护优先区、生态红线区，任何开发建设活动在热点区域内都应受到严格限制或者禁止，以避免对重要的生态功能造成不可逆的破坏。

冷点区域也不能被忽略。这些区域一般被当作生态修复和重建的重点。环评工作可以依据项目的特征，针对冷点地区提出生态修复或补偿的措施，把项目的部分生态影响转变为改善区域生态环境的机会。识别方法一般依靠地理信息系统的空间分析技术，把多种服务的评价结果展开空间叠加、统计分析，量化区域服务供给能力，绘制出热点与冷点的空间分布图，从而为制定差异化的环境保护策略，改良国土空间开发格局给予直观的科学支撑。

第二节 供给服务量化评估

生态系统供给服务是人类生存和发展所需要的物质基础，包含食物、淡水、原材料、能源等诸多方面。对这些供给服务进行科学的、准确的量化评价，是识别建设项目可能给人类福祉带来的直接或者间接影响，进而采取有效的缓解措施的前提。

一、食物生产服务评估

食物生产作为生态系统最基本的供给服务，对其评价要综合考虑农业、林业、畜牧业和渔业等各个领域。对这些领域的深入剖析，可以知晓区域食物供应能力以及它受人类活动影响的变化趋向。

（一）农产品、林产品、畜产品产量统计

评价农产品、林产品、畜产品的供给能力，一般用产量统计。最直接、最权威的方法就是使用官方统计数据，即各级政府公布的统计年鉴、农业普查数据、各个部门发布的年度报告等。一般数据有主要农作物（谷物、蔬菜、水果）的播种面积、单位面积产量；各类林产品（木材、竹材、林果）的采伐量、产量；主要畜产品（肉、蛋、奶）的存栏量、出栏量等。该方法的好处是数据来源权威、系统性强，为长时间序列的宏观分析打下可靠的基础。

在统计数据难以取得或者精度不高的地方，采用抽样调查与模型模拟相结合的方法。抽样调查是在具有代表性的地块或者养殖场内进行实地测产，获得一手数据，之后用统计方法来估计出全区的总产量。同时，遥感技术和作物生长模型的结合为大范围、高时效的产量估测打开了新的大门。利用高分辨率卫星影像解译得到的作物种植面积、长势作为输入，与气象数据、土壤参数等一起作为输入，输入到 WOFOST、CERES 等作物生长模型中进行模拟，进而预测产量。该方法不仅可以评估现有供给能力，也可以预测气候变化、土地利用变化的情景下产量的变化。

（二）渔业资源量与捕捞量评估

渔业资源评价是水域生态系统食物供给服务评价的一个重要组成部分，其主要任务就是准确地掌握渔业资源的蕴藏量（存量）和可持续捕捞量（流量）。渔业资源本身评价要采用专门的水生生物学调查方法。声学探测法是常用的测定中

上层鱼类资源的方法之一，利用探鱼仪发出声波，接收并分析回波信号，得到鱼群密度和生物量。对底层鱼种，多用底拖网抽样调查，根据单位面积内捕获的鱼量来推算整个区域的资源密度。标记重捕法是一种经典的种群数量估计方法，即在鱼身上做上标记后放回水中，然后再捕捞一部分个体来估计种群的规模。

捕捞量的评价一方面依靠渔业主管部门的统计数据，即渔船作业日志、渔港上岸量统计等，这些数据直接体现人类从生态系统获取渔业产品数量。另一方面，单位捕捞努力量渔获量也可以间接反映渔业资源丰度的变化。长期单位捕捞努力量渔获量的减少通常被认为资源衰退的信号。

渔业资源评估常用模型及参数表

模型类型	主要应用	关键输入数据	输出结果	管理意义
剩余产量模型	估算最大可持续产量	单位捕捞努力量渔获量、捕捞努力量	最大可持续产量、最佳捕捞努力量	设定捕捞限额、制定管理策略
结构化模型	评估种群动态、年龄组成	年龄结构、增长率、死亡率、补充量	渔业资源量、种群恢复能力	精准渔业管理、资源保护
生态系统模型	综合考虑渔业与环境相互作用	生物量、营养级、环境因子	生态系统健康状况、渔业承载力	宏观政策制定、生态系统管理

综合资源量和捕捞量的数据，结合资源评价模型可以得到最大可持续产量，这是渔业管理中一个重要的概念，即在保证资源能够再生的基础上，可以长期保持的最高捕捞水平。如经典剩余产量模型 Schaefer 模型、Fox 模型等，用单位捕捞努力量渔获量和捕捞努力量的关系来估算最大可持续产量，为合理确定捕捞限额和管理措施提供决策支持。

（三）供给服务的时空动态变化分析

对食物供给服务的评价，不能只看数值，还要分析它在时间、空间上的变化规律。时间序列分析是把握供给服务长期变化趋势的手段。连续多年的产量数据可以发现食物生产的增长、停滞或者衰退的趋势，也可以分析其周期性波动和突变点。然后把它们同气候变化、技术发展、市场需求、政策变动等关联起来加以分析，便能较好地把握变化背后的缘由。

空间分析主要是研究食物供应在地理分布上存在的差别。利用地理信息系统技术对农产品、林产品、畜产品、渔业产量等数据进行空间化处理，可以得到食

物生产强度分布图，从而找到食物生产的高产区和供给能力较弱的边缘区。进一步结合土地利用状况、土壤质量、水资源分布等空间信息，就能分析出影响食物生产空间布局的自然因素和人为因素。使用土地利用变化模型来预测城镇扩张、生态退耕等不同发展情景下食物生产空间格局的变化，给区域土地利用规划以及粮食安全提供科学依据。

二、淡水供给服务评估

淡水是生命生存和发展的基础资源，也是经济社会发展的基础性资源。淡水供给服务评价要从水量、水质、水文调节功能等多个角度出发，对生态系统提供和保持清洁淡水的能力进行综合评价。

（一）地表水资源量与地下水资源量评估

地表水资源量的评价主要依靠多年的水文观测资料。流域内的水文站网对河流断面流量以及水库、湖泊水位进行连续观测，给计算区域内径流量提供基本数据。径流量是评价一个地区水资源丰富程度的主要指标，径流量年际、年内变化的情况可以体现该地区水资源的供给稳定性与季节性。水量平衡方程是区域水资源评价的基本理论框架，把降水量、蒸散发量、径流量和蓄水量变化联系起来，以定量化的方法评价水资源的来源、去向和转化过程。

近些年来，遥感技术在地表水资源评价中所起的作用变得越发关键。利用陆地卫星、哨兵系列卫星的多光谱图像可以准确地确定湖泊、水库的位置，也可以观测到湖泊、水库面积、蓄水量等的变化。测高卫星可以测量大型湖泊、河流的水位，是估算水量的重要参数。这些技术手段在很大程度上克服了地面监测站点空间分布不均的缺点。

地下水资源量评价更为复杂，主要依靠地下水监测井网和数值模拟。监测井可以直接测量地下水的埋深来反映地下水储量动态变化。在此基础上，建立地下水流数值模型（MODFLOW 模型等）是量化地下水资源的主要方法。该类模型综合考虑区域地质结构、含水层参数、降水入渗补给、地表水和地下水相互作用、人类开采活动等，可以模拟地下水流场、水位时空分布，进而评价地下水的可开采储量及可持续利用潜力。

（二）水资源可利用量与水质评价

水资源总量并不等于人类社会可以实际利用的水资源量。水资源可利用量的

评估需要在水资源总量的基础上减去维持河流、湖泊、湿地生态系统健康所需要的生态需水量。生态需水量的计算方法有 Tennant 法、水力学法、栖息地模拟法等。科学地确定生态需水量，把它作为不可挤占的“环境流量”，是保证水资源开发利用可持续性的基本前提。因此，可利用水资源量一般是指水资源总量扣除生态需水量之后的剩余部分。

水质是衡量淡水供给服务质量好坏的重要指标，水量再大，水质不好也难以有效利用。水质评价是多个指标的综合。

1. 物理和常规化学指标监测：这是最基础的监测内容，定期对水温、pH 值、溶解氧、电导率、浊度、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷、总氮等进行监测。

2. 特定污染物检测：对于一些特定的污染源还要对其中有害于人体健康、生态环境的物质进行测定，如重金属（汞、镉、铅等）、持久性有机污染物等等。

3. 水质综合指数评价法，为了全面反映水体质量状况，一般采用单因子评价和综合指数评价相结合的方法。国家地表水环境质量标准根据各项指标和标准限值来判定水质类别。水质指数等模型把很多水质参数经过加权计算整合成一个单一的、无量纲的指数，直观体现水体的污染程度。

4. 水生态健康评价不同于传统的水化学评价，它是从水生生物（浮游植物、底栖动物、鱼类）的群落结构、完整性和功能等角度来评价水生态系统健康状况，更能体现水质的长期累积影响。

（三）水源涵养功能量化方法

水源涵养就是森林、草地、湿地等生态系统依靠特有的植被冠层、枯枝落叶层、土壤层截留、吸收、下渗、储存降水，使集中的降水变成平缓的地表径流和地下径流，从而调节水量、削减洪峰、净化水质的过程。量化此功能对于了解生态系统保持淡水供给稳定、清洁所起到的作用有重要的意义。其核心就是量度生态系统中增加的水量，即水源涵养量，一般用水量平衡方程变式计算，即水源涵养量等于总降水量减去蒸散发量和地表径流冲刷量。

模型模拟法为实际应用测评的定量分析手段。产水模块是国际上应用最广的模块之一，在 InVEST 模型中占有很重要的位置。该模型以水量平衡原理为基础，结合区域降雨量、潜热蒸散发量、土地利用 / 覆盖情况、土壤厚度、植物可利用水含量等数据，可以以栅格为单位，空间显式地计算出每个地块的产水量。对比

不同土地利用情景（森林砍伐和恢复）下产水量变化，可以很清楚地评价出某种人类活动对水源涵养功能的影响。类似地 SWAT 等分布式水文模型可以对流域内各个点的水物理过程进行详细的模拟，定量得到水源涵养功能以及土地管理措施对其的影响。利用这些模型方法，可以进行环境影响评价中土地利用变化和下游水资源供给变化的直接、定量的联系分析。

三、原材料与能源供给评估

生态系统既给人类提供了食物和水，又是工业原材料和可再生能源的仓库。对其供给能力的评价，对于资源的可持续利用、循环经济的建立、应对气候变化都有着十分重要的意义。

（一）木材、药材等工业原材料供给

对木材供应能力进行评估主要是依靠森林资源普查的数据。国家或者区域尺度的森林资源连续清查体系，可以提供有关森林面积、蓄积量、树种组成、龄组结构等信息。根据这些数据，可以利用森林生长模型来预测未来一段时间内森林的生长量。木材的可持续供应量，亦称年可采伐量，是指在森林资源不减少、生态功能不退化、按照森林年生长量加上必要的经营管理措施所确定的。环境影响评价中涉及到林地占用项目的，要对其可能造成的木材供给能力损失进行分析。

对药材、树胶、纤维等非木材林产品的供给评估也面临很大的困难，因为种类多、分布分散，缺少系统的统计数据。常用的方法有：野外样地调查法，即在具有代表性的区域设置样地，对目标物种的蕴藏量和密度进行实地调查，从而推算整个区域的资源总量；生境适宜性模型法，利用物种已知分布点及其相关环境变量（气候、土壤、地形）来预测物种在整个区域内的潜在适生区及资源丰度；社区访谈法，通过访谈当地居民了解这些资源的利用历史、采集强度和资源变化趋势。结合上述方法，可以对非木材林产品的供给状况以及可持续利用潜力进行初步的判断。

（二）水能、风能、太阳能等可再生能源供给

水能、风能、太阳能等可再生能源能够有效地替代化石能源，促使能源结构转型。能源供给潜力的评价，属于能源项目开发环境影响评价的一部分。

水能资源评价主要是计算理论蕴藏量和技术可开发量。理论蕴藏量受河流流量、落差的影响，可利用多年的高精度水文观测资料、地形资料来计算。技术可

开发量是在理论蕴藏量的基础上,考虑到当前的技术水平,剔除生态保护红线区、自然保护区等禁止或者限制开发的区域之后实际能够开发的能量。地理信息系统技术对于寻找理想的坝址、规划水电站的位置等具有重要的作用。

风能潜力评价主要是研究风速和风功率密度。评估工作首先要获取长期、高分辨率的气象数据,地面气象站、测风塔或者卫星遥感反演的风场数据。接着用风能资源评价模型来考虑空气密度、风机轮毂高度处风速分布(常用威布尔分布来描述)等因素,求出区域风功率密度。技术可开发量还要考虑地形、土地利用类型(避开城镇、基本农田)、电网接入条件等限制性因素,用地理信息系统空间叠加分析来筛选出适合建设风电场的区域。

太阳能潜力评价主要是依靠太阳总辐射量数据。数据可以来自地面辐射观测站或者更大的卫星遥感产品。评估时要算出区域单位面积的年总辐射量,然后联系地形坡度、坡向数据,剖析不同地形状况下的太阳能资源分布情形。技术可开发量还要排除不适合安装光伏阵列的区域,比如水体、陡坡、永久阴影区等,综合考虑土地的可利用性和社会经济因素。

(三) 供给服务的可持续性评价

生态系统供给服务的评价最终要体现为它的可持续性。可持续性评价就是判断当前的利用方式和强度能否长久维持,不会对生态系统未来供给能力造成损害。需要将供给服务的消耗速率与生态系统再生或者恢复的速率进行比较。当消耗速率大于再生速率的时候,这项服务就处于不可持续的状态。

评价可持续性有多种工具和指标。生态足迹分析法被广泛认可,它把人类对各种产品、服务的消费量换算成生产这些产品、服务所需要的生物生产性土地面积,再与地球或区域的生态承载力(即生物生产性土地总面积)作比较。当生态足迹大于生态承载力时,就会产生生态赤字,表示资源利用是不可持续的。生命周期评价是一种有力的工具,可以对某种产品或者服务从原材料获取、生产、使用到废弃处理的整个过程进行分析,找出供应链中不可持续的环节。还可以用生态系统恢复力的概念来衡量供给系统面对干旱、病虫害、市场波动等外界干扰时保持自身功能和结构稳定的能力。一个可持续的供给系统应该具有强大的恢复力。

第三节 生态系统调节服务价值评估

一、气候调节服务评估

气候调节服务指的是生态系统通过影响大气化学成分与物理过程，对宏观、微观气候起到稳定与缓冲作用的服务。评价此项服务对于揭示项目活动在碳循环、温室气体平衡、局地气候环境等各方面的影响十分重要。

（一）碳储存与碳汇量核算

生态系统的碳储存功能,即它通过光合作用把大气中的二氧化碳固定在植被、土壤等碳库中的能力。森林、湿地、草原、海洋是地球上的主要碳库。碳储存核算一般把生态系统的碳库分为地上生物量、地下生物量、枯落物、死亡木质残体和土壤有机碳五种。各个碳库的储量是评价生态系统固碳能力的基础。

碳储存与碳汇量的核算方法主要包括样地清查法、模型模拟法和遥感估算法。

碳储存与碳汇量核算方法比较表

方法名称	主要特点	适用范围	数据精确度	资源投入
样地清查法	直接测量、取样分析,数据精确度高	小范围研究	高	高
模型模拟法	综合考虑土地利用、气候、土壤等多种数据,模拟变化	区域尺度评价	中	中
遥感估算法	利用卫星影像数据建立生物量与遥感信息经验关系	大范围、高效率监测	中等	低 - 中

如上表所示,样地清查法直接在代表性区域内设立样地,测量、取样分析各个碳库的碳含量,数据精确度高,但耗时耗力,只适用于小范围的研究。模型模拟法(InVEST模型、CENTURY模型等)可以考虑到土地利用状况、气候和土壤等因素的影响,对于生态系统碳储量以及碳汇量变化的预测较为适合,更适合做区域尺度的评价。遥感估算法则依靠卫星影像数据(NDVI, LiDAR)形成生物量同遥感信息之间的经验联系,从而达成对大面积,高效率碳储量空间制图和监测的目的。环境影响评价中,一般将项目区内不同的生态系统类型面积乘以相应的单位面积碳密度,加总得到区域总碳储量,通过比较项目建设前后碳储量的增减来评价项目对碳储存服务的影响。碳密度数据选择要顾及区域特性,先用本地实测数据或者邻近区域的研究成果,保证评估结果对。

（二）温室气体排放与吸收平衡

生态系统在吸收二氧化碳的时候，生态系统内部的生物地球化学过程也伴随着甲烷、氧化亚氮等其他温室气体的排放和吸收。厌氧条件下湿地是甲烷的重要排放源，森林土壤常常是甲烷的吸收汇。因此要全面评价气候调节服务，就要考虑到各种温室气体的源汇平衡关系。

核心在于建立项目影响下的温室气体账户，系统核算生态系统自身温室气体吸收和排放通量，再加上由于项目活动（土地利用变化、能源消耗、交通运输等）所引起的额外排放。土地利用变化成为引起平衡变动的因素。如将森林变为农田或者建设用地，植被被移除、土壤受到扰动，就会释放出原本储存的碳，改变土壤微生物的活动，增加氧化亚氮的排放。评估时需比较有项目情景和无项目基线情景下温室气体净通量的差异，以判断项目对区域温室气体平衡的最终效应是正向还是负向。可以参照联合国政府间气候变化专门委员会发布的国家温室气体清单指南，用排放因子法对各种活动进行量化。

（三）区域微气候调节效应评估

生态系统（城市绿地、水体）通过蒸腾作用、遮荫作用以及吸收太阳辐射等来调节局部地区的温度、湿度、风速，创造出一个好的微气候环境，有效地减轻了城市热岛效应。这一调节效应属于人居环境质量的服务功能之一。

评价区域微气候调节效应，可以采用实地监测、遥感反演、模型模拟等手段。在项目区内、外不同植被覆盖区布置小型气象站，长期观测温度、湿度等微气候参数变化，可以反映生态系统的调节状况。遥感反演技术，尤其是用热红外波段的卫星数据，可以大尺度地反演地表温度。通过对比项目建设前后或者不同地块的地表温度差异，可以定量地评价出绿地、水体等对周围环境降温的范围和强度。

模型模拟法功能更为强大，可以对未来进行预测。ENVI-met 等微气候模拟软件，可以创建三维的城市或者自然环境模型，输入建筑、植被、水体等的空间布局信息以及气象背景数据，对局地空间内气流、热量、水分的传输和散布过程进行精细模拟。在模型中修改土地覆盖类型，把草地换为不透水地面，动态模拟并且量化这种改变对周边微气候指标（生理等效温度）影响程度，给项目布局优化提供科学依据，最大程度上提高生态效益。

二、水文调节服务评估

水文调节服务指生态系统凭借自身的结构和过程，对降水实施截留、渗透、储存和净化，从而影响地表径流、地下水补给和水质的服务。评价水文调节服务，对防洪减灾、保障水资源安全、维持水生态健康有重要的意义。

（一）洪水调蓄功能评估

森林、湖泊、湿地等自然系统起到天然海绵的作用。林冠截留、枯枝落叶层吸收、土壤入渗等都属于它们的暂时储存雨水的方式，可以削减洪峰流量，推迟洪峰出现的时间，从而减小下游地区洪水的风险。评价洪水调蓄功能，核心就是量化的生态系统的可蓄水能力和减少的径流量。

评估方法主要是水量平衡模型法、水文模型法。水量平衡法用区域降水量、蒸散发量、径流量、土壤含水量变化来推算生态系统在一次降雨事件中截留、储存的水量。该方法简单，但不能体现过程的动态性。更加复杂也更为准确的分布式水文模型有 SWAT 模型、InVEST 产水模块等。可以考虑地形、土壤、土地利用、气象等数据，模拟降雨在不同的下垫面上产生径流、汇流的过程。通过设置有无特定生态系统（森林、湿地）两种情景，对比两种情景下流域出口断面洪峰流量和径流过程线，两者之差即为该生态系统对洪水的调蓄量。评估结果可以给国土空间规划、生态保护红线划定等提供重要的参考。

（二）水质净化功能评估

湿地、河岸植被缓冲带等自然生态系统的水质净化器。它们会经过物理沉降、植物吸收、微生物降解等一系列复杂的过程，有效地去除水体中的氮、磷、悬浮物等污染物，保持和改善水环境质量。

水质净化功能的评价，就是对生态系统去除污染物的量或者削减负荷的能力进行衡量。评估一般从识别主要的污染源和污染物类型开始，比如农业面源污染产生的氮、磷营养盐。常用的评价方法有输出系数法、模型模拟法等。输出系数法是根据不同的土地利用 / 覆被类型有不同的污染物输出强度的经验规律，将各种土地利用类型的面积乘以相应的污染物输出系数，来估算进入水体的污染物总量。建设项目前后对比土地利用状况，可以评价建设项目对污染物负荷的影响。

模型模拟法更加细致，如 InVEST 模型养分输移比模块，在考虑污染物产生的同时，也考虑污染物在坡面输移过程中被植被、地形拦截和吸收的效率。该模

型可以将污染物的来源地、生态系统的净化功能区进行空间化表达，其评价结果用污染物（总氮、总磷等）去除量来表示。通过过程模拟，发现生态系统结构变化对水质净化功能影响的机理，可以为生态修复措施的布置提供指导。

评价还要考虑生态系统中污染物净化的阈值效应。当污染物的负荷超过生态系统的自净能力的时候，其功能就会下降甚至消失。因此，环境影响评价不能只考虑存量功能的减少，更应该考察项目新增加的污染物负荷是否能适应区域水环境容量、生态系统净化能力。

（三）土壤保持与侵蚀控制评估

土壤保持指生态系统依靠植被覆盖和根系固土、减缓地表径流，从而减少水力侵蚀、风力侵蚀的功能。这项服务对于保持土地生产力、防止土地退化、减少河流泥沙淤积、保证基础设施的安全起着不可替代的作用。

土壤保持功能评价中经典且应用最广的方法为通用土壤流失方程和它的修正版。该模型用因子量化土壤侵蚀量，其基本思想是，某区域土壤侵蚀量等于潜在侵蚀量被人类活动、自然地表综合作用所减少后的结果。模型的几个主要因子有：

1. 降雨侵蚀力因子 R ，反映降雨引发土壤侵蚀的潜在能力。
2. 土壤可蚀性因子 K ，表示土壤抵抗侵蚀的敏感程度。
3. 坡长坡度因子 LS ，代表地形对水土流失的影响。
4. 植被覆盖与管理因子 C ，表征植被和耕作管理措施对减缓侵蚀作用的核心贡献。
5. 水土保持措施因子 P ，指工程或耕作措施对控制水土流失的贡献。

通过因子相乘法可获得地块年平均土壤侵蚀模数。通过计算潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量的差值，就能得到生态系统目前提供的土壤保持服务量。项目建设前后对比土地利用变化，得到 C 因子和 P 因子的变化量，就可以定量判断项目对土壤保持功能的影响是加强还是减弱。

三、环境净化与维持养分循环服务

这类服务包含生态系统对于大气和水体污染物的吸收分解作用，也包含促使关键元素生物地球化学循环的根基作用。它们是保持环境质量、保证生态系统生产力和稳定性的基础，对它们进行评价可以更好地认识项目建设的深层生态环境影响。

（一）大气污染物清除量估算

森林等植被生态系统被人们称为“地球之肺”，它们能吸收二氧化碳，还能吸附大气中的二氧化硫、氮氧化物、臭氧和 PM_{2.5} 等颗粒物。这对改善区域空气质量，保证公众健康有着重大意义。

估算植被清除大气污染物量，主要用干沉降模型。基本原理为污染物清除量 = 污染物在大气中的平均浓度 × 沉降速率 × 植被叶面积。沉降速率是关键参数，受污染物种类、气象条件（风速、湿度）、植被结构（叶面积指数、树种、叶片粗糙度）等众多复杂因素的影响。叶面积指数是度量植被冠层大小的指标，一般可以由遥感影像反演或者结合地面调查得到。

具体评价时可以利用 i-Tree 模型套件等专业软件。模型内建不同树种对于各类污染物的沉降速率数据库，根据项目区植被组成、气象数据和环境空气质量监测数据，可以较为准确地量化工林群落移除污染物的物理量。项目建设引起的绿地面积和植被结构改变，可以作为评价区域空气净化服务供给能力增减的依据。即使房地产项目可能减少总体绿地面积，但如果科学配置滞尘能力强、抗污染树种的话，在局部上还是有可能改善空气净化的。

（二）水体污染物净化功能评估

与前文所提到的陆地生态系统对地表径流的过滤作用不一样，此处的水体污染物净化功能特指水生生态系统（如河流、湖泊）自身所具有的净化能力，也就是水体的自净能力。水体内部物理稀释扩散、化学氧化还原、微生物、水生植物的吸收降解等一系列过程，共同完成对进入水体污染物的削减。评价该功能的主要内容就是确定水体的环境容量，即在不破坏其生态功能的前提下，水体所能容纳和净化的最大污染物负荷。

评价方法一般是用水质模型，一维的 Streeter-Phelps 模型可以计算河流中生化需氧量和溶解氧的纵向变化，评价水体对有机污染物的降解能力。对于复杂的环境影响评价，可以采用二维或者三维水质模型（WASP、MIKE 系列等），综合考虑水动力、污染物迁移转化、生物过程，模拟项目排污口下游污染带的范围和浓度变化，判断是否超出水功能区管理要求和水体自净能力。

（三）氮、磷等关键元素的循环与固定

氮、磷是生命活动所必需的营养元素，它们的生物地球化学循环是生态系统功能的基础。生态系统通过固氮作用、反硝化作用、磷的吸附固定等方式调节这

些元素的形态、可利用性、迁移转化，保持区域养分平衡。人类活动，如农业施肥、污水排放等，很容易破坏这样的平衡，引起水体富营养化等严重的环境问题。

对于氮循环影响评估，主要研究项目活动怎样改变生态系统中重要的氮转化过程。土地开发会破坏具有高效反硝化脱氮功能的湿地和河岸带，减弱将活性氮转化成无害氮气回归大气的途径，加大氮素向下游水体的输出。可以采用物质流的方法建立项目区域的氮素平衡预算表，量度各项输入（大气沉降、施肥）和输出（径流流失、气体挥发、产物收获）的变化情况，从而得出氮素净滞留量。

对磷循环的评价，主要是对磷在土壤-植被系统中固定、迁移的过程进行评估。磷主要来自于岩石风化，在生态系统中迁移性较差，很容易被土壤颗粒吸附固定。评估要剖析土地利用改变（毁林开荒）怎样经由增大土壤侵蚀，致使本来被固定的颗粒态磷大量踏入水体。InVEST等模型的养分模块也可以用来评价氮、磷循环，根据土壤类型、地形、植被覆盖等数据，模拟磷在地表的截留和输出，量化生态系统控制磷流失的服务价值。通过比较项目前后的氮、磷滞留量变化来反映项目对于维持区域养分循环稳定性所起的作用。

第四节 文化服务功能评价

一、休闲娱乐服务评价

休闲娱乐服务是生态系统文化功能最直接的体现，它给公众提供休憩、观光和审美体验的场所。评价这样的服务价值，一方面可以体现出生态系统给当地居民生活品质做出的贡献，另一方面也可以为生态保护和旅游开发的协同发展给予量化支持。

（一）旅游人次、旅游收入统计

旅游人次、旅游收入是反映生态系统休闲娱乐服务价值最直接、最基本量化指标。通过统计某一区域游客数量以及相关经济活动，可以清楚地体现出该地作为旅游目的地所具有的吸引力，并且可以体现出它给地方经济带来的贡献。此法数据来源清楚，操作简单，适合做初步价值评估。

实际操作中主要依靠收集景区管理部门、地方旅游局、统计部门等发布的年度报告、统计年鉴、财务报表。统计项目为年度游客总人次、各类游客来源占比、

人均消费水平、门票收入、住宿餐饮收入、交通收入、购物收入等关联产业收入。通过纵向、横向对比,可以发现项目建设前后或者不同的生态管理模式下,休闲娱乐价值变化的趋势,为环境影响评价提供数据支持。但是该方法没有包含游客的消费者剩余,也就是游客愿意支付的最高费用和实际支付的费用之间的差额,这会导致对生态系统实际游憩价值的低估。

(二) 游憩价值评估

游憩价值评估是测量生态系统给游客提供的、超出其消费的福利或者满足感,也就是消费者剩余。这部分价值不能通过市场直接反映出来,所以需要用非市场价值评估方法来计算。常用的方法主要有旅行成本法和意愿价值评估法两种,从不同的角度反映出游憩资源的经济价值。

旅行成本法是一种揭示偏好的方法,基本假设是:游客到达某个游憩地所付出的旅行成本(时间成本和直接花费)可以看作是这个地方的环境资源价格。通过对不同区域的游客旅行成本与出游率进行分析,可以得到游憩需求曲线,进而估算出游客的消费者剩余。该方法依靠游客实际行为数据来开展评价,结果比较客观。其应用的前提是游客的旅行目的单一,且旅行成本与游憩价值之间呈相关性。对于有多处游览地或者旅行花费难以预估的游客来说,该方法并不适用。

意愿价值评估法,又称条件价值评估法,是陈述偏好法的一种。构建一个假想市场,直接询问受访者,在设想的这个市场上为了保护或者改善某个环境资源(如使某处景点保持可访问性)所能够承受的最高支付意愿或者放弃该环境资源所能接受的最低补偿额。该方法能反映出所有经济价值,包括非使用价值,适用范围广。但是评估结果是否准确,很大程度上取决于问卷设计是否科学、样本选取是否具有代表性、被调查者对于假想市场情境的把握程度如何、回答是否真实。

(三) 自然景观美学价值评价

自然景观的美学价值属于生态系统文化服务的一部分,是人对自然环境的主观审美感受与认识。对其进行评价的目的是将主观感受转化为可以分析、可以比较的客观数据,为景观规划和生态保护决策提供支持。评价方法有二种:一种是以专家经验为基础的描述性分析,另一种是以公众感受为基础的定量评价。

定量评价的方法当中,美景度评估法应用最广。该方法以大量的受试者(普通大众或者专家)为对象,对一组代表不同景观特征的照片或者视频进行美学评分。用统计学的方法来分析评分结果与景观物理特征(地形、水体、植被、色彩

等)的关系,建立预测模型,可以对大范围的景观美学价值进行空间制图和动态评价。语义差异法也被经常用到评估中,此方法使用一系列反义形容词对(例如“宁静的-嘈杂的”、“自然的-人工的”)来反映人们对景观的种种情感反应。这些依靠公众感知的方法,可以将抽象的美学感受变成具体的数据,给环境影响评价里比较不同方案的视觉影响赋予了科学的参照。

文化服务功能评价方法汇总表

评估方法	评估对象	主要特点	优点	局限性
旅游人次/收入统计	休闲娱乐	市场数据直接反映	数据易获取,操作简便,直观反映经济贡献	不含消费者剩余,可能低估价值;仅限市场价值
旅行成本法	休闲娱乐(游憩价值)	基于实际旅行行为	结果客观,反映实际支付意愿	假设旅行目的单一,不适用于多目的地旅行
意愿价值评估法	休闲娱乐、文化精神(消费者剩余、非使用价值)	假想市场问卷调查	可评估非市场价值,包含使用及非使用价值,适用范围广	依赖问卷设计,易受偏差影响(策略性、信息偏差等)
美景度评估法	自然景观美学	基于公众或专家评分,结合物理特征建模	可实现量化、空间制图,评价结果易于比较	评价过程主观性较强,依赖样本代表性
语义差异法	自然景观美学	基于反义形容词对,测量情感反应	捕捉细微情感差异,辅助理解公众感知	难以直接货币化,结果受文化背景影响
替代成本法	科研教育	估算替代设施或服务的成本	提供货币化价值的下限	难以找到功能完全相同的替代品
文献/作品分析、访谈	文化精神(灵感来源)	质性研究,分析文化产品和口述历史	深入探究非货币化价值,揭示深层联系	难以量化,不直接货币化

根据上表可知,各种评价方法对复杂多样且没有市场价值的生态系统优劣各半。

二、科研教育服务评价

生态系统是天然的自然科学实验室,也是环境教育与科普活动的天然基地。其特有的生态环境、罕见的物种资源、典型的地质地貌,给科学探索、知识传播提供了丰富的素材。对科研教育服务价值的评价可以突出生态系统对于科学发展、

提高公众科学素养所起到的作用。

（一）科研论文、专著产出统计

以某个生态系统作为研究对象所获得的科研成果，是这一区域科研价值的体现。通过对国内学术期刊、学术会议发表的，以该区域为研究主题的论文、报告及出版的有关专著数量的统计分析，可以客观地反映对该科学知识体系的贡献。

统计时需要确定检索标准，即检索的关键词（研究区地名、特有物种名等）、时间范围以及检索的数据库来源。分析内容不能只看产出数量，还要看发表期刊等级、论文被引用次数、研究涉及学科领域等质量指标。有利于发现该生态系统在哪些科学领域有特殊的科研价值，以及它在全世界或区域科研网络中所处的地位。在环境影响评价中，对比项目实施前后相关科研产出的变化，可以预测潜在开发活动给生态系统科研功能带来的正面或者负面影响。

（二）科研基地、实习基地数量

在一定的生态系统中建立起来的科研台站、教学实习基地、科普教育中心 etc 实体性机构的数量和规模，是科研教育服务功能的载体和直接反映。这些基地存在说明该生态系统的价值已经得到科研机构、教育机构的认可，被纳入了它们长期的规划之中。在一定范围内对这些基地的数量、级别、活动频率进行评价，可以大体上反映出该生态系统的科研教育平台功能。设在自然保护区内的国家级野外科学观测研究站，科研服务价值就大得多。统计数据可以来自相关高校、科研院所或者保护区管理部门，通过对基地接待人次、开设课程数量、科研项目等级等数据进行分析，可以为该服务的价值评价提供有力的支撑。

（三）科研教育价值间接评估

科研教育价值的货币化评价是评价工作中较难的一项，一般用间接的方法进行估算。替代成本法属于其中一种。用估算的方法构造一个具有相同科研教育功能的人工设施，或者找到一个能够代替自然环境所需要的费用，来衡量当前生态系统提供的服务价值。可以估算建设具有相似物种多样性、生态过程模拟功能的实验室或者植物园的成本，作为该自然生态系统科研教育价值的下限。

另一种就是按照实际投入来评价。可以统计某一生态系统内开展的各种科研项目总经费投入，各级政府、社会团体对相关科普教育活动的投入资金。经费总额在某种程度上可以反映社会为获取该生态系统所提供的科研、教育服务所付出的成本。尽管这些方法各有利弊（替代成本法很难找到功能完全相同的替代品），

但是它们给理解并衡量这种非市场价值赋予了可行的探查途径，有益于在环境影响评价的成本效益分析里更好地表现生态保护的价值。

三、文化精神服务评价

生态系统不但生产物质产品、调节环境，还是人类精神世界富饶的宝库。它有历史记忆，可以激发艺术创作，使人们得到归属感、精神安慰。这类文化精神服务的价值是抽象的、高度个性化的，但对其价值的识别和评价对于认识人地关系的深层意义、守护文化多样性具有十分重要的意义。

（一）自然遗产、文化遗产价值

一个生态系统如果因为其独特的自然或者文化特征而被列为世界遗产、国家级风景名胜区或者自然与文化遗产地，那么它的价值就得到了最高级别的承认。这些称号本身就是对它的突出普遍价值的证明。评价这样的价值首先要梳理出该地区所拥有的各级名录以及荣誉称号，详细阐述入选标准和核心价值要素。

遗产的价值表现在多方面。自然遗产的价值体现为地质地貌的奇特、生物多样性的珍稀或者自然景观的超群美学。对于文化遗产来说，它的价值就蕴含在它所承载的历史信息、所蕴含的文化传统或艺术成就当中。评价不能仅仅罗列这些价值，应该对它们的完整性和真实性进行深入的分析。环境影响评价里，任何会破坏这些核心价值的活动都应该被严厉审查。虽然遗产的内在价值是无法用金钱来衡量的，但是借助意愿价值评估法等途径，调研出公众为了保护不可再生资源所愿意付出的经济代价，以此作为决策的依据。

（二）宗教、艺术、美学灵感来源

许多自然景观自古就是宗教圣地、神话传说的发源地，也是无数艺术家、诗人、作家和音乐家的灵感来源。精神层面的服务功能会对一个区域或者一个民族的文化认同、精神世界造成深远影响。对这样的价值进行评价，不能仅限于经济学范畴，而应该更多地采用文化人类学、历史学、艺术史等研究方法。

具体评估可从以下几个方面展开：

1. 文献与文化作品分析：整理与生态系统相关的史书、宗教经典、神话传说、诗歌、画作、音乐、影视作品等，用内容分析法挖掘自然环境在这些文化产品中的象征意义和核心地位。统计相关作品数量以及影响力可以间接地作为其灵感价值的依据。

2. 社会调查和访谈：针对当地居民、宗教人士、艺术家等，探究人们对于某一特定的景观（神山、圣湖）所怀有的情感依恋、精神寄托以及创作灵感的来源，并且对涉及到的口述历史以及民俗活动做出记录。

质性研究方法可以深入探讨生态系统同人的情感、精神世界之间的联系，解决纯粹的量化评估所不能克服的问题。评价的重点是发现并阐述出这些价值，而不是强行把它们货币化，保证它们在环境影响评价决策过程中能够被重视。

（三）存在价值与遗产价值评估

存在价值和遗产价值属于生态系统非使用价值的组成部分，表现深层环境伦理。存在价值是指人们仅仅因为知道某个生态系统或物种能够持续存在而获得的满足感，即使他们从未也无计划去实地使用或体验。遗产价值就是人们为了把珍贵的自然、文化资源完好地留给后代而产生的满足感。

这两种价值的评价全部依靠陈述偏好法，尤其是意愿价值评估法。在设计问卷的时候需要仔细研究，对被调查对象解释清楚存在价值和遗产价值的概念，为受访者构造一个可信的支付情景，例如询问他们是否愿意为了某个和他们生活没有直接关系的、遥远的自然保护区永久保护而贡献一份力量（通过捐款或者税收方式）。这便是目前唯一能体现出这两种非功利性价值的方法。虽然 CVM 存在支付情境假设性太强、信息偏差、策略性偏差等缺陷，但是它给论证看似“无用”的生态系统保护必要性提供了重要的理论依据和量化方法，使环境决策从狭隘的功利主义角度中走出来。

第六章 生态累积影响评价方法

第一节 累积影响机理分析

对累积影响的内在机理有充分的认识，是做好评估的前提和基础。即要清楚地分辨各种影响的来源和类型，揭示出各种影响之间错综复杂的关系，确定好评价工作的空间和时间范围，为后面识别、预测、评价等工作打下了坚实的基础。

一、累积影响的来源与类型

累积影响产生的原因是人对生态系统的持续或者反复的干扰，其表现形式多种多样。一般从时间、空间、化学物质相互作用等几个方面展开分析，这些方面一起构成了累积影响识别与分析的基本框架，也体现了影响叠加的复杂性。其主要种类及特点如下表所示。

累积影响类型及特征表

影响类型	核心特点	表现形式	典型例子
时间累积	单一项目长期影响	持续或间断影响贯穿生命周期	水电站对河流长期阻隔影响
空间累积	多个项目协同影响	集中分布，总体效应大于叠加	流域内多源污染，形成“蚕食效应”
化学累积	多种污染物协同作用	生物摄取、富集，产生联合毒性	持久性有机污染物在生物体内积累

（一）时间累积：单一项目长期影响

时间累积效应指的是单个开发项目，在较长时间内对生态系统造成持续或间断影响所产生出来的效果。此种影响会贯穿于项目整个生命周期当中，建设阶段会造成地表扰动，运营阶段会出现污染物持续低剂量排放的情况，废弃之后还会遗留环境风险。水电站建设在施工期间就已经改变了局部的生态环境，建成以后对河流的物理结构、水温、洄游鱼类通道等造成长时间阻隔，可能会长达数十年乃至上百年。时间拥挤式的影响正在慢慢消耗生态系统的自我恢复能力，最终导

致生态功能退化或者消失。

这种长期的、慢性的压力不会立刻引发剧烈的生态反应，但是它的后果会随着时间慢慢累积。生态系统对于这类压力的反应往往是滞后的，影响初期或者能够依靠自身调节保持稳定。当累积的压力超过系统承受极限的时候，就会发生状态突变。所以评价不能局限于项目运营期，要从长计议考虑其可能产生的延迟性、长期性的影响。

（二）空间累积：多个项目协同影响

空间累积是在一定的地理范围内，不同的独立或者相互关联的开发活动，给同一个生态系统或者环境要素造成的叠加影响。这些活动类型、规模、强度各不相同，单个项目的效应不大，但是当它们在空间上集中分布时，总体效应就会大于各个项目影响之和，从而形成空间拥挤现象。流域开发、工业园区建设、城市群扩展等情况下更加明显。

典型的例子就是上游矿产开采、中游农业面源污染、下游城镇污水排放等共同对河流生态系统的影响。每一个污染源都可能符合自身的排放标准，但是它们同时存在却导致下游水体总污染物负荷超标，造成水质恶化、生物多样性减少等一系列问题。这种影响也被称作“蚕食效应”，就是很多微小分散的生境破坏行为，联合起来就会造成一个区域内生态系统结构和功能的大退化。空间累积评价的难点在于怎样全面地找出所有的相关影响源，理清它们之间复杂的相互影响途径。

多种影响因素叠加在一起，责任就难以确定，环境管理也变得复杂起来。评价工作要从孤立项目视角转向区域性整体视角，把所有现有的活动、在建项目和可以预见到的未来规划活动，比如已经规划好的项目、区域发展政策等，纳入到一个统一的分析框架里，对这些活动共同作用于共享生态资源所造成的压力进行综合评价。

（三）化学累积：多种污染物协同作用

化学累积即环境中各种污染物同时存在，通过生物体的摄取、吸收、富集后产生复杂的联合毒性。累积效应不仅会在一个生物体内发生，还可以通过食物链一层一层地传递和放大。很多持久性有机污染物和重金属，虽然在环境介质中浓度较低，但会在生物脂肪组织中不断累积，达到足以对自身或者捕食者造成危害的程度，这就是所谓的生物累积和生物放大效应。

环境中存在多种化学物质时，它们之间会相互影响，其联合毒性不是简单的

线性叠加。这些污染物形成的“化学鸡尾酒”环境风险不能用单一物质毒性数据来预测。某些污染物会增强其他物质毒性，或者共同作用于生物体的同一个靶器官，造成超出预期的危害。因此累积影响评价要考虑复合污染的整体风险，不能只考虑每一个污染物是否小于其独立安全阈值。

二、累积效应的相互作用机制

各种环境影响不是孤立存在的，它们之间存在着复杂的相互作用，产生出多样化的累积效应。掌握不同效应之间的相互作用机理，即协同、拮抗、加和等，是正确预测和评价累积环境影响的前提，也是保证评价结果科学、可靠的前提。不同的累积效应之间的相互作用机制的特点，见下表。

累积效应相互作用机制表

效应类型	核心特点	数学表达	典型表现
协同效应	总效应大于各独立效应之和	$1 + 1 > 2$	氮磷共存导致藻类爆发性增长
拮抗效应	总效应小于各独立效应之和	$1 + 1 < 2$	黏土吸附降低重金属毒性
加和效应	总效应等于各独立效应之和	$1 + 1 = 2$	多个工厂排放同类保守型污染物叠加
独立效应	各因素作用于不同组分，无明显相互影响	(无特定数学表达)	噪声与废水对不同受体的影响
阈值效应	压力超临界点引发生态系统剧变	非线性	湖泊富营养化达到临界点后水质突变

(一) 协同效应与拮抗效应

协同效应是指两种或者两种以上的影响同时存在的时候，总的效果大于各个影响单独作用时的效果之和，即 $1+1 > 2$ 。这是累积影响中最复杂的作用机制，其潜在的危害也最大。水体中的氮、磷等营养盐都会促进藻类的生长，但是二者以适宜比例共存，加上合适的光照和温度，会使得藻类爆发性增长，造成的问题远比单靠某一种营养盐单独作用所造成的要严重得多。协同效应的存在说明，每个单独影响源强度都在标准限值以内时，叠加起来也会导致严重的环境问题。

与协同效应相反的是拮抗效应，即不同影响共同作用产生的总效应小于各影响单独作用时的效应之和，即“ $1+1 < 2$ ”。在此情况下，一种影响的存在或抑制、削弱另一种影响的效果。土壤中某一类黏土矿物对于重金属离子有较强的吸附作

用,使重金属离子的生物有效性及毒性降低。拮抗作用在某种程度上或者有助于缓解环境压力,但是它的发生和作用强度是不确定的,在评价的时候要特别注意,不能轻率地将某些影响作为无需考虑的理由。

由于这两种效应并存,所以累积影响预测非常困难。评价工作不能简单的把各个影响因素线性相加,而应该基于对生态过程深入认识,识别出会产生显著协同或拮抗作用的关键影响组合,并用合适的模型或者实验方法进行定量或者定性的分析。

(二) 加和效应与独立效应

1. 加和效应是最简单最直观的相互作用形式,不同的影响产生的总效应就是各个影响单独作用时的效应之和,即 $1+1=2$ 。不同的影响源同时影响同一环境受体,且影响机制类似或者相互独立时,一般认为是加和关系。如果两个工厂向同一条河流排放性质稳定、无相互作用的保守型污染物,那么在下游某断面的总浓度可以看成是两者直接叠加。由于复杂的作用机理不清楚,加和模型常常作为基本评价手段。

2. 独立效应即不同的影响因素通过作用于生态系统的不同组分,以不同的方式、不同的时间发挥作用,彼此间没有明显的相互影响。例如,某建设项目噪声污染对周边陆生动物行为造成影响,废水排放对水生生态系统造成影响,二者的影响作用机制、受体相对独立,可以分开评价。虽然高度关联生态系统中的绝对独立性比较少见,但是当影响路径明确、受体差异大的时候,可以采用独立效应处理方式简化评价过程,使分析更具有针对性。

(三) 阈值效应与非线性响应

生态系统对外界压力的反应不是线性的、逐步的,阈值效应就是其中一种典型的非线性反应模式。生态系统具有一定的弹性与抵抗力,当累积压力没有达到某个临界点(即阈值)的时候,生态系统结构与功能不会发生明显的变化,依然可以保持相对稳定的状态。当累积压力超过这个临界值时,即使增加一点也会使系统状态发生剧烈、迅速甚至不可逆转的变化,这就叫临界转换或者引爆点。湖泊生态系统富营养化过程就是一个典型的例子,营养盐负荷刚开始增加的时候,湖水会一直保持清澈的状态,但是当负荷超过临界值以后,水体就会迅速变成藻类大量繁殖的浑浊状态。

非线性响应特性给累积影响评价带来了很大的不确定性。传统的线性外推预

测法不能很好地预测这种突变行为,进而会大大高估风险。评价工作要尽力找出生态系统关键阈值,这就需要对生态系统结构、功能以及动态过程有深刻的认识。通过历史数据分析、生态模型模拟等方式可以判断出系统距离临界阈值还有多远,给决策提供预警。认识并应对非线性响应,这是生态累积影响评价不同于传统评价方法的一个明显特点。

三、累积影响评价的时空范围界定

科学合理地确定评价时空范围,是保证累积影响评价全面性、有效性的重要前提。累积影响常常超出单个项目物理边界和生命周期,所以必须采用基于生态系统整体性的方式来确定分析范围,防止因范围过小而忽略重要影响。

(一) 时间范围:回顾性、现状性、预测性评价

累积影响评价时间边界要包含过去、现在、未来三个方面,形成完整的环境变化轨迹。回顾性评价是了解历史上人类活动对目前环境背景的影响,认识生态系统演进的轨迹和现状的原因,以此作为确定环境基线的依据。没有对过去进行理解,就无法正确评价新增加的边际效应。

现状性评价主要是考察当前所有活动给生态系统带来的影响,目的是评价生态系统的健康状况以及承受能力。这就是联系过去和未来的桥梁。预测性评价是核心环节,它在现状评价的基础上,加上拟建项目以及其它可以预见的未来活动(已经规划的项目、区域发展政策等)的影响,来预测未来生态系统可能的状态。

这三个时间尺度结合在一起就组成了完整的评价体系。这样的框架可以评判拟建项目是否会导致累积影响超过生态阈值,同时可以揭示区域环境质量长期变化趋势,给可持续发展的决策提供更加宏观、具有前瞻性的视角。

(二) 空间范围:流域、区域、景观单元

累积影响评价的空间范围不应只局限于行政区划或者项目厂址红线,而应该采用可以反映生态过程和影响传递路径的自然地理单元。流域是进行水环境、水生态累积影响评价的最佳单元,因为流域本身就将地表水和地下水汇流路径整合在一起,可以完整反映上游活动对下游的影响。对于大气污染、气候变化等环境问题,应该把空气质量控制区或者气候区等较大尺度的区域作为评价范围。

土地利用变化、生物多样性保护、生境破碎化等,用景观生态学理念来研究尤为重要。用景观单元作评价边界,可以更有效地分析不同的开发活动对生态斑

块、廊道、基质的影响，评价它们对物种迁移、能量流动、物质循环等生态过程的累积影响。空间边界的选择是由主要的生态要素、受体和影响传递途径所决定的，需要经过科学分析才能确定，保证评价范围的生态相关性。

（三）边界划分与“闭合”问题

实际上很难划定出绝对清晰、封闭的评价边界。生态系统是开放的，各种物质、能量、信息的流动超越人为划定的界限，这就是所谓的闭合问题。划定边界就是按照评价目的与重要性原则，在无限关联的生态网络中找到可以操作的边界范围。如果边界划定过小，就会忽略重要的外部影响因素以及远距离效应；如果边界划定过大，那么数据采集、模型构建就会变得异常复杂，甚至无法实现。

解决这个问题的常用方法就是采用分层或者嵌套的边界体系。可设置核心评价区，即项目直接影响和主要间接影响所处的区域；同时设置较广的协调区或背景区，考虑次要的、远距离的或宏观背景性影响。边界确定要有充分的科学依据，说明纳入或排除某些影响源或区域的原因。权衡评价的深浅、宽窄与可行时，要由评价者依靠专业知识与经验去判定。

第二节 时空累积效应评估

环境影响的发生和发展并不是孤立的，它有明显的累积性。时空累积效应评估是从生态系统角度出发，对多源、多类别环境扰动在时间上长跨度、空间上大范围内的叠加、转化、滞后效应进行综合评价的环节。它体现出环境影响评价由静态的、局部的考察变为动态的、整体的剖析。各种方法详细的分类和应用场景可参考累积效应评价方法分类表。

累积效应评估方法分类表

评估类型	主要方法	核心思想 / 应用场景
时间累积效应	趋势分析与回归分析	识别环境指标随时间的变化方向与速度，分析持续累积性
	时间序列分析与突变检测	揭示数据内在规律，预测未来状态，检测突发性变化节点
	生态系统状态演替轨迹分析	描述生态系统状态转变过程及概率，评估长期稳定性与演变趋势
空间累积效应	空间叠加分析与缓冲区分析	识别多压力源重叠区域，评估潜在影响范围，发现“热点”区域
	景观格局累积效应指数	量化景观结构特征变化，间接评估栖息地破碎化、连通性等
	空间自相关分析	衡量变量空间分布聚集性，识别环境指标的“热点”与“冷点”
时空耦合累积效应	时空立方体模型	整合空间与时间维度，挖掘时空模式，洞察动态变化过程
	地理加权回归模型	解决空间异质性问题，揭示驱动因子与响应的空间差异
	基于地理信息系统的时空动态模拟	通过计算机模型再现或预估生态系统在多压力下的时空演变

一、时间累积效应评估方法

时间累积效应指各种环境影响随着时间的推移产生叠加、协同或者拮抗的作用，从而导致生态系统结构与功能产生非线性的、不可逆的变化。为了评价该效应，需要用到能对长时间序列数据进行处理分析的方法，从而发现环境质量、生态系统状态等的变化趋势、周期性波动和重要的转折点。

（一）趋势分析与回归分析

趋势分析、回归分析是认识生态环境要素长期变化规律的基本方法。在环境影响评价过程中，用此方法来评价某个环境指标或者生态参数随时间变化的趋势和速度，进而判断它是否会持续影响并且不断累积。以该区域内项目建设之前、之中、之后多年来的水质监测数据为样本，建立化学需氧量、总磷、总氮等主要指标与时间的回归模型。既可以利用简单的线性回归来描述逐渐增大或者逐渐减小的趋势，也可以用多项式回归或者非线性回归去拟合复杂的波动变化过程。

通过回归模型的斜率、显著性水平、决定系数等统计量的分析来对污染物的

累积速度、变化趋势的确定性进行客观的评价。应用此方法来长期评价生态系统服务价值,可以得到不同土地利用变化下生态系统服务功能的退化或者改善情况,可以预测其发展趋势并且为制定生态补偿措施提供量化的依据。

回归分析可以对单个指标进行分析,也可以研究多个驱动因子(污染物排放量、气候变化指标、人类活动强度)对一个生态响应变量(生物多样性指数、植被覆盖度)的综合影响。该类分析可以将复杂环境中的各种因素影响分离出来,找出某一项目或活动的累积影响占比,从而提高环境影响评价的准确性以及归因能力。

(二) 时间序列分析与突变检测

时间序列分析就是对环境数据随时间变化的内在规律和结构进行分析,包括长期趋势、季节性、周期性和随机扰动。相比简单的回归分析来说,时间序列模型比如自回归移动平均模型等,更能处理数据点之间的时间相关性,预测未来环境状态的准确性也更高。环境影响评价里,该方法可预估无项目情景下的生态系统自然发展轨迹,之后把项目实施后的实际监测序列同这个轨迹加以对比,就能有效地辨别并衡量项目的长期累积影响。

突变检测属于时间序列分析的一个分支,它的主要任务就是找到序列由稳定状态快速转换到另一种状态的节点。曼-肯德尔检验、佩蒂特检验、滑动 T 检验等非参数方法在水文、气象、生态监测数据中被广泛使用,目的在于找到生态系统发生急剧变化的年份。评价实践中的突变点一般是重大工程开工、重要的污染控制措施实施或者极端气候事件发生时,可以检验因果关系,评价这些事件给生态系统稳定性造成的冲击。突变检测可以判断出项目实行以后,生态系统恢复力极限是否被超越,从而导致系统状态的变化。

(三) 生态系统状态演替轨迹分析

生态系统不是一成不变的,会因为内部动力和外部干扰发生演替。生态系统状态演替轨迹分析,即描述和预测生态系统在不同状态之间转变的过程以及概率,以此来评价累积影响下生态系统长期稳定的趋势和演变轨迹。一般我们把复杂的生态系统简化为几个可以识别的、相对稳定的状态(草地、灌丛、疏林等),并用长时间序列的遥感影像或者生态监测数据来跟踪它们之间的变化。

该分析过程通常包含以下步骤:

1. 定义并识别生态系统的状态。按照关键生态指标(植被覆盖度、优势物种、

土壤有机质含量等)把生态系统划分成不同的状态类型。

2. 建立状态转移矩阵。通过对连续时间点的状态转移,得到状态转移的概率。马尔可夫链模型是实现此目的的常用工具,马尔可夫链模型假定未来的状态只与当前的状态有关。

3. 分析演替轨迹与稳态。根据转移矩阵可以模拟生态系统未来几十年甚至上百年的发展轨迹,预测生态系统达到顶极群落的可能性、需要的时间,或者识别生态系统是否存在多个稳定态,以及发生状态突变的潜在风险。

通过对比有无项目两种情形下的状态转移概率以及最终稳态,可以充分反映项目活动对生态系统自然演替过程的干扰。大型水利工程的兴建会大大增加湿地向陆地生态系统演替的几率,长期的矿产开发会使森林生态系统不可逆转地退化成荒漠生态系统。分析不再局限于单一指标,而是对整个生态系统动态和弹性有一个全面的把握。

二、空间累积效应评估方法

空间累积效应是指由于多个开发活动或者污染源在地理空间上的叠加、邻近或者相互作用而产生的,其影响范围和强度一般大于单个源的直接作用区域。评价这类效应,就要使用能融合并处理地理空间信息的方法,以显示环境影响的空间格局、关联性等重要区域。

(一) 空间叠加分析与缓冲区分析

空间叠加分析是地理信息系统最经典、最核心的分析功能之一,核心就是将两个或者两个以上的不同主题的地图图层叠合在一起,得到一个包含所有输入图层属性的新图层,进而揭示地理要素间的关系。在评判空间累积效应的时候,这种方法可以清楚地表现出好几个压力源的空间重叠部分。将不同的工业企业的污染物影响范围图、交通干线噪声影响区图和居民区、自然保护区等敏感目标分布图叠加在一起,就可以迅速找到同时受到多种环境压力影响的“热点”区域。这些区域的生态风险和环境健康风险最大,是重点关注和管控的区域。

缓冲区分析是一种基本而且高效的地理空间分析方法,它以点、线、面状地理要素为中心,在周围建立一个指定宽度的区域(缓冲区),来考察该中心地理要素可能产生的影响范围。根据不同的污染源或者开发项目,按照污染物扩散特征、影响程度等合理确定缓冲区大小。对大型工厂划定大的空气污染影响缓冲区,

对公路划定窄的噪声影响缓冲区。

将不同的缓冲区叠加起来进行分析,就可以确定影响的程度。区域内缓冲区的重叠次数越多,说明该区域受到的累积压力就越大。该方法原理简单,操作方便,结果直观,可以有效地对空间风险进行初步筛选和等级划分,为之后复杂的模型分析提供重要的基础数据和空间指导。

结合敏感性评价,可以给不同的土地利用类型赋予不同的敏感度权重,再与叠加的压力缓冲区进行计算,就得到一个综合的空间累积影响风险图。该图清楚地显示出了压力源集中且生态系统脆弱的地区,给区域环境管理和空间规划提供更加科学的决策支持。

(二) 景观格局累积效应指数

人类活动与自然过程的长久累积效应,最后就表现在区域景观格局的变动上,比如栖息地破碎化、廊道连通性变差、景观异质性增多或减少等等。景观格局累积效应指数是通过对景观结构特征变化进行量化,来间接评价生态系统所受的累积压力。这些指数一般是根据遥感影像解译出来的土地利用、土地覆盖数据来计算的,然后通过地理信息系统或者专业的景观格局分析软件得到。

常用的景观格局指数可以分为三个层次,在斑块水平上,关注单个栖息地斑块的面积、周长、形状等;在类型水平上,关注某一类景观(如森林、湿地)的斑块数量、密度、最大斑块指数等;在景观水平上,使用多样性指数(香农多样性指数)、优势度指数、蔓延度指数、破碎度指数等,从整体上反映整个区域景观的结构复杂性、优势程度和空间邻接关系。斑块密度、边缘密度增大一般表示景观破碎化程度越高。蔓延度指数值越小,说明景观中存在很多的小斑块,连通性差,会影响物种的迁徙以及基因交流。用不同年份的景观格局指数做比较,可以定量地评价累积效应的时空变化过程。

(三) 空间自相关分析

空间自相关分析是用来度量某一变量在空间上的分布是否具有聚集性,也就是相邻位置的观测值比远距离位置的观测值更相似。空间自相关在环境影响评价中可以用来发现累积效应“热点”、“冷点”的区域。全局空间自相关一般用莫兰指数来度量,它用来判断整个研究区的环境指标(土壤重金属含量、空气污染浓度)是否有明显的聚集、离散或者随机分布的模式。正莫兰指数比较大,高值与高值聚集,低值与低值聚集,间接说明存在累积效应。

局部的空间自相关的方法，比如安瑟林提出的局部莫兰指数或者盖蒂斯 - 奥德统计量，可以找出这种聚集现象发生在哪里。利用局部莫兰指数可以将研究区分为高 - 高聚集区、低 - 低聚集区、高 - 低离散区、低 - 高离散区。

在评价中“热点”区是很多污染源影响的叠加区或是污染物通过介质传输的汇集区，是空间累积效应最强烈的区域，应为环境监测和污染治理的重点区。冷点区域一般是生态保护较好或者生态恢复成功的地方。空间自相关分析把统计学和地理学联系起来，为找出空间数据里隐藏的累积模式提供科学的方法。

三、时空耦合累积效应评估

时空耦合累积效应的评判超出了单独的时间或者空间层面，想要明白环境影响怎样在时空统一体里动态展开，流传并彼此影响。该类方法比较复杂，需要较强的数据处理和建模能力，但能给出关于累积效应过程更为深刻和动态的理解，也是进行预测性环境管理的重要技术手段。

（一）时空立方体模型

时空立方体是数据可视化与分析的一种强有力的框架，把地理空间（ x, y 轴）和时间（ z 轴）融合在一个三维结构中。地理空间被划分成规则的网格（正方形或者六边形），时间被细分成了离散的步长（天、月、年）。每个时空单元（即一个立方体）表示在某个地点、某个时间段里，某环境指标的值或者某件事情发生的次数。立方体可以反映某一天某城市街区 $PM_{2.5}$ 浓度的均值，也可以表示某一年某保护区野生动物的观测次数。

建立时空立方体之后就可以使用各种时空模式挖掘工具进行分析。新兴时空热点分析，也就是找出在时间和空间上不断出现、新增、减弱、振荡的热点和冷点区域，可以明确地反映出环境问题区域的变化趋向。局部异常值分析可以找出和周围时空环境明显不同的异常点。不仅可以发现累积效应发生的地方，还可以找到它开始的时间以及发展过程，给人们认识污染扩散、生态退化等动态过程提供了新的视角。

（二）地理加权回归模型

传统的回归模型（普通最小二乘法等）一般假定模型参数在整个研究区内是不变的，即变量关系在空间上是一致均匀的。但是对空间异质性明显的生态系统来说，这一假设很难成立。地理加权回归模型用局部回归方程来解决，回归系数

随空间位置变化而变化。地理加权回归模型针对研究区每一个点或者要素，都会得到一个独立的回归方程，这个方程的建立只用到该点邻域范围内的数据。

在累积效应的评价中，地理加权回归模型可以体现出污染排放强度、土地开发强度这些驱动因子和物种多样性、水体富营养化水平这样的生态响应之间存在的空间差异。同样数量的污染排放，在接近水源涵养区的地方所造成的生态损害会比在工业区更加严重，这会在地理加权回归模型估计出的空间变化的回归系数中体现出来。

通过地理加权回归系数进行空间可视化，就可以得到一系列的参数图，直观地表现出影响强弱和方向在何处最大、何处最小，甚至在不同的地方作用方向相反。可以找到对某一压力源最敏感的生态区域，虽然该压力源本身强度不大，但是由于生态系统的脆弱性，仍然会产生显著的累积效应。

地理加权回归模型可以识别并妥善处理空间非平稳性，对累积效应驱动机制的认识也更接近地理现实。该模型在环境科学、生态学、城市规划等各个领域中被越来越广泛地使用，也为因地制宜的环境管理策略提供了一种精细化的科学手段。

（三）基于地理信息系统的时空动态模拟

利用地理信息系统进行时空动态模拟，属于评价并预测累积效应的高阶方法之一，它主要依靠计算机模型来再现或者预估生态系统在不同压力作用下，随着时间发展而产生的空间变化过程。利用数学规则和算法来表示复杂的生态过程、人类的决策行为、空间相互作用的机制，在虚拟环境中模拟出不同的发展情景下未来生态环境的变化。

常用的模型有元胞自动机模型和智能体模型。元胞自动机模型把空间划分成网格单元（元胞），每一个元胞有着不一样的状态（比如土地利用类型），而它的未来状态是由自身当前的状态、邻域的状态以及一组转换规则所决定的。自下而上的模拟方法特别适合于模拟城市扩张、土地利用变化等空间扩散的过程及它给生态格局带来的累积效应。智能体模型把系统中的能动单元（农户、企业、动物等）看成具有自主行为和决策能力的智能体，模拟智能体之间以及智能体和环境之间的相互作用。智能体模型可以更好的体现人的决策的复杂性以及适应性，适合研究政策变动对生态系统产生的累积效应。系统动力学模型与地理信息系统相结合的趋势也已经出现。

第三节 多源压力叠加分析

生态系统常常要承受来自各种不同来源、性质各异的多重环境压力。这些压力之间可能存在协同增强、相互拮抗或者简单的累积效应，因此，评价单一压力已经不能反映它对生态系统综合影响。开展多源压力叠加分析，正成为从生态系统整体视角展开环境影响评价的关键之处，也是个大难题。

一、压力源的识别与分类

要深入地开展叠加分析并综合评价，首先要对构成生态系统威胁的各类压力源进行系统的识别、分类。经过科学的划分之后，不同压力的来源、性质以及作用方式就会清晰地呈现出来，这就为创建全面且有条理的综合评价指标体系打下了坚实的基础。

（一）点源、线源、面源压力

环境压力的空间分布特征是环境压力的重要属性之一，根据此可以将其分为点源压力、线源压力、面源压力。此种分类方法可以清楚地显示压力在生态系统中所处的空间分布状况，对制定有空间针对性的管控措施十分重要。

点源压力是指污染物或者干扰集中在一个或者几个固定的点位释放，影响范围一般以排放点为圆心向外扩散、强度逐渐衰减。典型的点源有工业企业排污口、城镇污水处理厂排水口、大型养殖场的废弃物堆放点等。点源压力强度大、浓度高，相对容易监测和管理，但是局部影响严重，可能给周围生态系统造成急性或长期的严重破坏。

线源压力沿线性廊道分布，比如交通干线、航道、输油输气管道等。公路、铁路带来的噪音、尾气以及路面径流对于沿线的生态系统造成影响，影响到动物迁徙、植物生长。河流本身也可以看作是输送污染物的线源，把上游的污染物向下游输送，进而影响到整个流域的水生生态系统。线源压力会产生廊道效应和阻隔效应，造成生境破碎化，妨碍物种交流。

面源压力表现为大范围、来源分散、不能确定具体的排放点，主要是由土地利用方式造成的。农业生产中使用的化肥农药流失、城市地表径流带来的各种污染物、大气沉降等都属于面源压力。面源单点强度不大，但是影响范围广、总量大，控制难度大，会对区域水环境、土壤质量以及生物多样性产生长期累积的影响。

（二）物理性、化学性、生物性压力

根据压力的性质以及作用机制，可以将其分为物理性、化学性、生物性三类。该分类利于认识压力对生态系统结构和功能的影响机理，为评判各种压力间的相互作用打下基础。

物理性压力主要通过改变生态系统的物理环境条件来产生影响，其中包括：

1. 生境破碎化与丧失，城市扩张、道路修建、土地开垦等人类活动造成的，直接缩减了生物的生存空间，把种群之间分割开来，这是生物多样性下降的主要原因。

2. 水文情势改变，大坝兴建，水资源过度开发利用等致使河流径流量，水位，流速等发生改变，从而影响水生生物的生命周期及其栖息地。

3. 物理扰动：噪声污染干扰动物通讯、捕食行为；人工构筑物阻碍动物迁徙；土壤压实影响植物根系生长和土壤生物活动；热污染改变水体温度等等。

化学性压力指各种化学物质进入环境，给生态系统带来毒害作用或者改变环境化学平衡。重金属、持久性有机污染物、石油类等有毒有害物质通过生物富集和生物放大的作用，给处于食物链顶端的生物造成很大的危害。营养盐（氮、磷）过多会促进水体富营养化，造成蓝藻爆发，破坏水生态系统的结构和功能。酸化物质的沉降会造成土壤、水体酸化，不利于植物生长、水生生物生存。

生物性压力是由于生物种群、群落方面干扰而造成的。外来物种入侵是最典型的例子，入侵物种会和本地物种争夺资源、捕食本地物种或者传播疾病，导致本地物种被排挤，食物网结构发生变化，严重的时候还会造成当地物种灭绝。过度捕捞、采伐或者放牧等资源过度利用的行为会直接造成目标物种数量减少、种群结构破坏，进而对与之相关的其他物种产生连锁反应，从而影响整个生态系统的稳定性及其提供的服务功能。

（三）社会经济活动压力

物理、化学、生物性的压力不是孤立存在的，它们产生的根源都是人类的社会经济活动。从驱动力角度出发，把压力同具体的社会经济活动联系起来，更符合生态系统视角下环境影响评价的系统性、前瞻性。这样的分类方式利于从源头上发现问题，给制定可持续的管理对策提供决策依据。

工业化、城市化压力是造成区域生态压力的主要压力。工业生产产生大量的废水、废气、固体废物，是化学压力的集中体现。城市建设造成大面积土

地利用方式改变、生境丧失与破碎化,不透水地表面积增加改变了局地水文循环,人口与产业聚集产生大量点源、面源污染。交通基础设施建设作为伴生的过程,形成了典型的线源物理压力。

农业活动属于影响范围最广的面源压力源。为了保证粮食产量,化肥农药的大量使用使营养盐和有毒化学物质进入水土环境。大规模土地开发、不合理的灌溉方式造成栖息地破坏、水资源缺乏、土壤盐碱化。集约化畜禽养殖产生的粪污如果处理不妥,也会成为重要的污染源。

旅游开发、资源开采等其他的经济活动也是重要的压力源。旅游活动在给地方带来经济效益的同时,也可能因为游客的过度进入、基础设施的建设等原因而对敏感的生态区造成物理上的干扰和污染。矿产、森林、水产等自然资源的开采和利用如果超过生态系统承载能力,就会造成资源枯竭、生态系统退化,属于生物性、物理性压力的复合体。

二、压力叠加的量化方法

在识别和分类出压力源之后,核心任务就是科学地量化各个压力强度以及叠加后产生的综合效应。由于不同的压力源具有不同的数据单位以及作用机理,必须用系统的方法将它们进行整合、放在同一框架里进行比较和叠加,才能对总压力水平进行客观的判断。

(一) 压力指数构建与权重确定

构建综合压力指数来度量多源压力。其基本思路是将不同类型、不同单位的压力指标经过标准化处理之后再行加权求和,最后得到一个可以反映区域生态系统承受总体压力无量纲的指数。

指数构建的第一步就是选择有代表性的压力指标。指标选择要遵循科学性、代表性和可量化性原则,全面包含点源、线源、面源和物理、化学、生物等各方面的压力。单位面积化肥施用量、工业废水排放强度、路网密度、外来物种分布密度等都可以作为具体的指标。

第二步就是标准化各个指标,消除量纲、数量级差异带来的影响。常用的标准化方法有最大最小值标准化法、Z 分数标准化法等,将所有指标值转换到可以比较的区间内,如 $[0, 1]$ 或者 $[-1, 1]$ 。这是之后加权求和的前提。

第三步确定各个压力指标的权重。权重分配直接决定最后评价结果的科学性,

是整个方法里最难的部分。权重确定方法可以分为主观赋权法、客观赋权法。主观赋权法即专家咨询法、层次分析法等，依靠专家的知识 and 经验来确定各个压力对某一生态系统的重要性。客观赋权法，例如熵权法、变异系数法等，完全根据数据本身的离散程度或者信息量来确定权重，不掺杂人为因素。实践中一般会采用主观和客观相结合的方法来得到更合理的权重体系。

通过加权求和公式，将标准化后的各个指标值乘以对应权重然后求和，就可以得到各个评价单元的综合压力指数。该指数的值越大，说明该地区的生态系统所承受的综合压力就越大。利用空间制图的方法可以直观地表现出压力的空间分布情况。

（二）多元统计分析与主成分分析

当压力指标较多且相互之间存在高度相关时，简单的加权求和很难体现压力之间的复杂关系以及主导的压力类型。这时采用多元统计分析的方法就成为了一种有效的解决方式，可以从复杂的多维数据中提取重要的信息，找出最重要的压力组合。

相关性分析、聚类分析属于常见的探索性手段。计算各压力指标之间的相关系数可以发现哪些压力倾向于同时出现，从而可以推测它们是由同一种人类活动所引起，或者彼此相互加强。聚类分析可以将具有相似压力特征的区域或者样本点归为一类，得到不同的主导压力类型，即压力组合区，例如工业污染主导区、农业面源主导区，从而为分区管理提供依据。

PCA 是一种更强的降维工具。它用线性变换将原来的许多相关性高的压力指标，转化成数量少且互相独立的新综合指标，称为第一主成分。每个主成分都是由原始变量线性组合而成的，可以解释原始数据大部分的方差。一般而言，前几个主成分就可以代表大部分压力信息，从而大大简化了数据结构。通过对主成分载荷矩阵的分析，可以得知每一个主成分是由哪些原始压力指标构成的，从而给主成分赋予具体的生态学含义，如城市化和工业污染压力主成分、农业集约化压力主成分等。用这些主成分代替原来的指标做叠加分析或者风险评价，就能防止信息冗余。

（三）基于模型的压力响应关系

指数法、多元统计分析侧重于评价压力的“量”，而基于模型的分析致力于揭示压力与生态系统状态之间“响应”的因果关系。用数学或者计算机模型模拟

生态系统在各种压力组合下发生的变化,可以更好地理解叠加效应的机理,也可以预测未来的变化趋势。

剂量-反应模型属于基本的压力响应关系模型,它表现了某种压力(污染物浓度等)强度的改变同生态系统某个状态指标(物种死亡率、生物量等)反应之间的定量联系。在多源压力的情境下,可以扩展为多元回归模型或者非线性模型,来探究多种压力变量怎样共同作用于生态系统状态。有利于判断是否存在协同效应(总影响大于各个压力影响之和)或者拮抗效应(总影响小于各个压力影响之和)。

机理模型,例如食物网模型、生物地球化学循环模型、种群动态模型等更加复杂和健壮。这些模型按照生态学过程的内在机理进行模拟,能够表现出压力怎样通过改变能量流动、物质循环或者种群相互作用,最终造成整个生态系统结构和功能的变化。流域水质模型可以模拟出不同的点源、面源污染负荷下河流中氮磷循环和藻类生长的过程。虽然这类模型的建模过程比较复杂,对于数据的要求也较高,但是由于该类模型具有很强的预测能力,因此可以为环境管理决策提供可靠科学的依据。

空间显式模型,栖息地适宜度模型、土地利用变化模型等都和地理信息系统紧密结合。它们可以把压力数据同生态系统数据在空间上叠加起来分析,评价压力在空间上的分布怎样影响物种的栖息地品质和连通性。此类模型对评价生境破碎化、城市扩张等物理性压力给生态带来的影响有着特殊之处,其结果可以直接用于生态安全格局塑造和空间规划。

三、多源压力的综合影响评估

环境影响评价的最终目的就是综合评价压力对生态系统造成的影响,给管理与决策提供依据。这就需要使用综合的评估框架和工具,把压力、生态系统状况以及人类社会之间的联系找出来。

(一) 压力-状态-响应综合模型

压力-状态-响应模型是一种应用很广的评价模型。它建立起了因果链,直观地表现出了环境问题的逻辑联系,给环境管理赋予了系统的思考途径。该模型的核心逻辑为:人类活动给环境带来压力,环境及自然资源的状态随之变化,最后社会用各种政策、措施来做出回应。

PSR 模型的多源压力叠加分析价值就是整合性。前面提到的压力指数或者主成分分析的结果,可以作为模型中的“压力”指标。生态系统监测数据,例如生物多样性指数、植被覆盖率、水质等级等,就成为状态指标。通过建立压力指标与状态指标的定量或者定性关系,可以评价多源压力的综合影响程度。可以分析综合压力指数和区域生物多样性丧失速率的关系。模型中用来缓解压力或者改善状态的管理措施就是模型中的“响应”部分,例如设立保护区、实行污染控制标准、调整产业结构等。评价这些应对措施的效果又能反馈给压力与状态的调节中,形成一个闭环的管理循环。

(二) 驱动力 - 压力 - 状态 - 影响 - 响应模型

驱动力、压力、状态、影响、响应模型是在 PSR 模型基础上发展起来的更加完善的框架。增加驱动力与影响这两个环节以更加完整地表现社会、经济 and 环境的相互联系过程,从根源上提出解决问题更为宽广的视野。

该模型将整个因果链条扩展为五个相互关联的部分:

1. 驱动力指造成环境变化的根本性社会、经济、人口因素,人口增长、经济发展模式、消费需求等都是产生环境压力的原因。
2. 压力是指驱动力转化为对环境的直接作用,即前面提到的各种污染排放、资源消耗、土地利用变化等。
3. 状态:在压力的作用下环境表现出的物理、化学、生物状况,如空气质量、水体健康状况、生物多样性水平等。
4. 影响,环境状态的变化给生态系统服务功能、人类健康和社会经济福祉造成的后果,如粮食减产、健康风险增大、生物资源丧失等。
5. 响应,即社会各层面为应对环境问题所做出的政策法规、技术改进、公众参与等行动,这些行动能够对驱动力、压力、状态或者影响等任何一个环节产生直接作用。

DPSIR 模型不但能够条理清楚地整理多源压力的复杂信息,而且突出环境改变对人类社会最终结果的影响,从而使得评价的结果与社会经济的决策更加紧密地联系在一起。对从驱动力到影响整个链条进行分析,决策者就可以找到最有利的干预点来制定出更加根本、具有前瞻性的环保政策。

主要环境压力评估模型对比

模型名称	核心结构	关注点	优势	局限性
PSR	压力 - 状态 - 响应	因果链条	概念简单, 易于理解和应用	未充分考虑驱动力与影响
DPSIR	驱动力 - 压力 - 状态 - 影响 - 响应	完整因果链, 社会 - 经济 - 环境互动	框架全面, 揭示深层驱动力与最终影响	结构复杂, 数据需求高, 构建难度大

从上表可以看出 PSR 模型简单明了, 容易理解, DPSIR 模型更加全面, 可以更深入地揭示环境问题的深层驱动因素以及最终的社会经济影响。

(三) 多源压力风险区划

多源压力风险区划就是将压力叠加分析结果和生态系统敏感性相结合, 对空间进行表达和应用的一种重要方法。其目的就是找出生态风险最高的地区, 以便对这些地区实施差别化的空间管控和生态保护修复。其基本思想是相同的压力对不同的区域影响是不一样的, 生态越是敏感、越重要, 所面临的风险就越大。

风险区划一般要完成压力评价、暴露和响应评价(生态敏感性评价)、风险等级划分这三个步骤。按照上述压力指数或者模型来绘制综合压力强度空间分布图。对区域生态系统敏感性进行评价, 要考虑区域生态系统服务功能的重要性、生物多样性丰富程度、生态系统恢复力等各个方面, 并且要给出生态敏感性空间分布图。之后, 在地理信息系统平台中, 将压力分布图与敏感性分布图进行空间叠加, 一般采用矩阵分析法或者乘积法, 得到每个空间单元的生态风险指数。根据计算出的风险指数用自然断点法等分类方法把研究区划分为低、中、高、极高等级的风险区, 得到最终的生态风险区划图。此图可以直观地标识出需要重点关注并采取干预措施的“热点”区域, 给国土空间规划、生态保护红线划定、环境准入管理等提供重要的决策依据。

第四节 生态累积风险预警

生态累积风险预警,核心就是推动环境影响评价由被动应对转变为主动防控。它建立起了一个集监测、模型分析、响应为一体的综合体系,其目的就是识别并预测多种压力源在时间和空间上的叠加效应,预测生态系统突变或者临界阈值跨越的风险,从而给决策者提供前瞻性支持。从而可以在不可逆的生态损害发生之前就及时采取干预措施。

一、累积风险预警指标体系

建立科学、系统又可行的预警指标体系,是实现有效预警的前提。该体系需要把复杂的生态系统结构和功能变化转化成可以量化的、可以监测的指标,进而客观、动态地反映区域生态系统所承受的累积性风险状况。

(一) 预警指标的选取原则

预警指标的选取必须严格遵循一系列科学原则,以确保其有效性和可靠性。

科学性和敏感性:指标要能真实地反映出生态系统主要过程对于累积压力的早期反应,在系统状态发生根本改变之前就能发出警示信号。

全面性、代表性,即指标体系的建立要全面,能反映生态系统从压力源、状态到响应的全过程。可以采用PSR(压力、状态、响应)和DPSIR(驱动力、压力、状态、影响、响应)等现有的理论框架,对指标进行系统的筛选。

可获得性与可操作性,再完美的指标,如果不能用现有的技术手段进行长期、稳定的低成本监测,那么这个指标也失去了它的实用价值。因此选择时必须考虑监测技术的可行性、监测成本的经济性以及数据获取的及时性,保证预警体系的落实。

前瞻性应优先选择可以预示未来风险发展趋势的先导指标,生物群落结构中优势种的替代、关键功能种群的变动等。这些指标一般比宏观的生态系统服务价值变化要敏感。

区域异质性与针对性:指标选择还要考虑到区域生态系统的异质性以及特定风险的针对性。不同的生态系统(森林、湿地、城市)脆弱性以及主要的胁迫因素不一样,预警指标应该有所侧重。流域生态系统以水文情势变化、溶解氧、底栖生物指数等为主要指标,城市生态系统更关注不透水面积比例、热岛效应强度、

空气质量指数等。最终得到的指标集应该是多层次、多维度的有机整体，既有反映宏观格局的景观指数，又有反映微观过程的生化指标等等，共同构成完整的区域生态累积风险图景。

（二）预警等级与阈值设定

预警等级、阈值是预警系统判断风险的标准。把连续变化的数值转换成离散、有管理意义的等级，是连接监测数据和管理行动的关键纽带。预警等级一般划分成蓝色（无警）、黄色（轻警）、橙色（中警）以及红色（重警）等，每个等级所对应的管控要求会根据风险情况的不同而有所区别。

阈值设定在预警系统中技术难度最大，也是最困难的一环，它是否准确直接决定了预警是否准确、可靠。阈值确定方法很多，需要综合使用各种手段：

1. 统计学方法：例如百分位数法，根据历史数据的变化范围确定指标异常值的界限。

2. 生态学原理，从污染物剂量效应关系、生态承载力模型或者生态系统恢复力理论着手，找寻引发系统状态发生转变的临界点。

3. 标准和经验，参考已有的国家或者地方环境质量标准，并且利用专家经验判断（采用德尔菲法）也是确定阈值的有益补充。

理想的阈值应该是动态的、适应性的，要根据生态系统背景值、演替阶段、管理目标的变化进行适时调整，不能是一成不变的静态数值。

（三）综合预警指数构建

单一指标一般只能反映生态系统的某一个方面的状况，不能对复杂的累积风险进行全面的评估。为了对生态系统整体的风险做出判断，需要使用数学的方法，把分散的预警指标综合起来，形成一个综合预警指数。可以将多维的信息转为一维的数值，使管理者能够快速把握总体趋势，辅助决策。

构建综合预警指数通常遵循一套标准化的流程，其中权重分配是核心环节：

1. 指标无量纲化处理：由于各个指标的单位、量纲、变化范围都不同，需要通过标准化或者归一化的方法，把它们转换成可以比较的无量纲数值，以消除量纲差异带来的影响。

2. 权重确定，权重是各个指标在总的风险评价中所占的比重。权重确定方法有主观赋权法和客观赋权法两种，主观赋权法包括层次分析法、专家打分法等，客观赋权法有熵值法、主成分分析法等，实践中一般将两者结合起来使用。

3. 指标加权聚合，在确定权重之后，采用加权求和、加权乘积等模型，把全部标准化后的指标值聚合起来，得到一个综合预警指数。该指数的变化趋势及绝对值可以指示生态累积风险变化的方向，也可以用来判定当前的预警等级。

二、累积风险预警模型

预警模型是生态累积风险预警系统的大脑，它对大量监测数据进行处理，对复杂的因果关系加以分析，进而对未来的风险状况做出预测和判断。根据建立原理和技术复杂度可以分为不同的预警模型，来满足各种不同数据条件和预警要求。

预警模型类型对比

模型类型	核心原理	优点	缺点	适用场景
统计学模型	基于历史数据统计规律	理论基础扎实、结构简单、易解释、数据需求相对较低	难以体现复杂非线性相互作用	数据量较少、初期预警、稳定性要求高
机器学习模型	自动学习复杂模式与关系	擅长处理高维、高噪声、非线性问题，预测精度高	“黑箱”特性、需要大量历史数据进行训练	数据量大、关系复杂、高精度预测
动态与仿真模型	基于生态系统机理，模拟动态变化	可解释原因、情景分析、辅助管理策略	建立过程复杂、需要大量机理知识和参数	长期趋势预测、政策干预效果评估、情景模拟

(一) 基于统计学的预警模型

统计学模型属于预警领域的经典方法，其原理是对历史数据统计规律进行分析，进而预测未来发展趋势以及风险状况。该类模型理论基础坚实、结构简单、解释性强，对数据量的要求不高，在数据较少时具有很大的实用性。常用的时间序列分析法、多元回归分析法、判别分析法等。

时间序列模型，比如 ARIMA，主要是预测单个关键指标，例如某种污染物浓度、某种物种数量的未来变化趋势。分析指标历史时间序列数据可以发现它的周期性、趋势性和随机性，并据此做外推预测。多元回归模型就是建立多个压力指标（自变量）和生态响应指标（因变量）之间的定量关系，从而分析各个压力源的贡献度，预测在特定的压力组合下生态系统的情况。

判别分析模型可以直接用来做预警等级的判定。根据不同的预警等级历史样本数据来建立判别函数，从而确定新的监测指标值属于哪一个预警等级。以上表格中所列出的统计模型可以给出风险预警的基础量化方法，虽然这些模型无法很

好地体现生态系统复杂的非线性交互作用，但是由于它们稳定性好，解释性强，所以在许多实际情况中仍然是必须的。

（二）基于机器学习的预警模型

伴随着大数据以及计算能力的迅速发展，机器学习模型在生态风险预警方面有巨大的潜力。该类模型适合高维、高噪声、非线性的问题，可以自动地学习复杂的模式以及关系，能解决传统统计方法所不能处理的问题。它的主要优点就是预测性强，能很好地拟合复杂系统的运行情况。

SVM、ANN、随机森林等属于常用的机器学习预警模型。支持向量机对小样本、非线性、高维模式识别效果较好，适合做风险等级分类。人工神经网络模仿人的神经元连接方式来建立高度非线性的映射关系，从而对生态系统的各种压力做出的复杂的反应做出预测。随机森林属于集成学习的一种方法，既可以保持预测的准确率，又可以评价各个压力指标对于最终风险的贡献度，有利于找到主要的风险因素。这些模型一般要依靠大量的历史数据来完成训练，从中找到数据中潜在的规律。尽管它有着“黑箱”的特点，会为机理层面的解释带来一定的困难，但是它的高预测精度也使得它成为了现代预警系统的重要技术基础。

（三）动态预警与仿真模型

动态预警和仿真模型属于预警技术体系中比较复杂，但是具有前瞻性的类型。与主要依靠数据驱动的统计、机器学习模型不同，该类模型是基于对生态系统内物质循环、能量流动、物种间相互作用等关键过程的理解，用数学方程来表达并模拟系统的动态变化。它们不仅可以做预测，而且可以分析原因，给情景分析和策略制定提供强有力的辅助。

系统动力学模型是其中一种，用存量流量图来建立正负反馈回路，从而模拟生态、社会、经济复合系统长期动态变化。该模型适合研究政策干预对系统行为的长期影响，可以评价不同的管理方案下累积风险的变化。

另一类重要的模型为基于个体的模型，该模型用个体行为模拟的方式来观察宏观层面上的系统模式。对研究栖息地破碎化对物种生存的影响、污染扩散行为等有独特的优势。

动态模型最大的价值是仿真。管理者可以对模型设定不同的发展情景，比如不同的土地利用规划、污染排放标准等，通过模拟来预测未来几十年可能产生的生态结果。实验室式的试验，使决策者在政策实施前就能预见政策的累积生态风

险，从而选择最好的管理路径，由被动应对向主动预防的策略转变。模型建立过程较复杂，需要大量的机理知识以及参数数据做支撑，属于生态预警研究的前沿方向。

三、预警系统的构建与应用

一个完整的生态累积风险预警系统，不仅仅是一个科学的指标体系和先进的预警模型，它更是一个集数据采集、模型运算、信息发布、管理响应的综合业务平台。实用性以及效能的发挥，依靠各个功能模块之间无间断地、高效率地相互配合来实现。

（一）数据采集与传输系统

数据是预警系统“血液”，稳定、高效、全面的数据采集与传输系统，是保证预警时效性、准确性的基础。此系统会把各种不一样的数据源的数据合起来，形成一个“空天地”一体的立体监测网络。

地面监测：自动化的环境监测站、生态观测站、物联网传感器网络等可提供高频率的现场观测数据。

空中和空间监测主要是依靠遥感技术。卫星遥感可以宏观、定期地获得土地利用变化、植被覆盖率、地表温度、水体面积等主要参数，为大范围生态格局累积效应评价提供数据支持。无人机遥感由于高分辨率、灵活等特点，在重点区域的细致观察、应急考察上起着很重要的作用。

所有采集的数据必须经过稳定的无线网络（5G、卫星通信）实时或者准实时的传输到数据中心。经过严格质量控制，标准化数据清洗，整合之后才能进入后面的分析模型。

（二）预警模型与决策支持系统

预警模型与决策支持系统为预警系统的中枢。把前端获取的数据同后端繁杂的预警模型库接上，形成起一个自动化的流程，用来处理数据，算风险，显结果，帮人做决定。该系统的中心就是集成化的软件平台，把数据管理模块、模型库模块、分析与可视化模块、知识库模块有机构成一个整体。

数据管理模块：主要负责海量、异源数据的存储与调用。

模型库：包含各种预警模型，系统可以根据预警需求自动或半自动选择合适的模型进行计算，得到综合预警指数以及各个分项指标状态。

分析与可视化模块（决策支持）将复杂模型输出结果以地理信息系统地图、动态仪表盘、趋势图、雷达图等易于决策者理解的形式呈现出来，清楚显示风险出现的地点、严重程度以及发展趋势。

一个先进的决策支持系统通常具备以下功能：

1. 实时预警：系统可全天候、无间断工作，当检测到预警阈值时，实时产生预警信号。

2. 溯源分析：当出现预警的时候，系统可以快速找到造成预警的主要驱动因子和压力源。

3. 情景模拟，用动态仿真模型可以模拟出各种控制措施所带来的影响。

4. 知识库支持，关联法律法规、环境标准、应急预案、专家知识等，给决策提供科学依据和行动准则。

（三）预警信息发布与响应机制

预警的最终目的是引发有效的管理行动，所以有效的预警信息发布与响应是预警技术系统和管理实践之间的“最后一公里”。必须建立一套规范化、制度化的程序，保证预警信息可以准确、及时地传递给有关责任人，同时启动相应的应急响应程序。

信息发布要有渠道、有分级。按照不同的预警等级和影响范围，分层次向政府相关部门、相关企业、社会公众等，通过官方网站、手机应用、短信、广播等渠道定向或者公开发布。

与之相对应的就是权责分明、操作性强的应急预案。预案要具体说明预警黄、橙、红色等级对应的管控措施，限定某些地方开发活动范围，限制重点污染源企业减产限排，启动生态修复工程等。预案还要确定各责任部门、协作机制、资源调配方案。为了保证响应机制的有效性，定期的应急演练和对预警事件复盘分析是不能缺少的环节。经过不断的演练和优化，可以保证在真实的风险出现时，整个体系能够迅速、有条理、高效地运转，最大限度地减少生态累积风险造成的不良影响。

第七章 生态系统适应性管理

第一节 生态保护红线划定

一、生态保护红线的内涵与意义

生态保护红线是一项新的生态文明制度，内容丰富，意义重大。它是国土空间管制的有力手段，也是国家生态安全战略的重要支柱。通过把生态功能、环境质量、资源利用等各方面融合起来，它给国土空间开发形成了刚性约束，为达成人与自然的和谐共生给予了坚实的制度支撑。

（一）国家生态安全的底线与生命线

生态保护红线划定，是为了给国家生态安全构筑一条不可逾越的底线、生命线，在国家治理体系中占有举足轻重的位置。这些区域是维系国家生态系统健康稳定的中心地带，一旦这些区域的生态功能遭到破坏，就会直接危及到国家的长治久安和可持续发展。重要的水源涵养区关系到亿万人的饮水安全；大江大河的源头区牵系着整个流域的生态平衡；关键的生物多样性保护区，是珍稀物种最后的栖息地、珍贵的基因宝库。

把那些地方包含在红线范围之内，施行最严密的守护，事实上就是于国土空间上划出不容碰触的生态“红区”。此条红线有效地防止了重要的生态空间被片面化、功能退化的问题出现，对自然灾害的抵御、气候调节、环境保护都起到了坚固的自然作用。从宏观上来说，稳定的生态系统是保证国家经济社会持续健康发展的基础。因此严格坚守生态保护红线就是守护国家发展的生态根基，保证中华民族永续发展的生态空间不被侵犯，这已经成为必须一体遵循的国家意志。

（二）生态功能保障基线、环境质量安全底线

生态保护红线划定以后，就确定了一条生态功能保障的基线。它确定了对于维持区域乃至全国生态平衡十分重要的水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护等功能区。这些区域的生态过程和功能一旦被破坏，恢复起来非常困难，还会引发一系列连锁的生态问题。把它们划入红线范围，就表示这些区域的主要

任务是保证其主导生态功能的稳定并有所提升，而不是经济开发。为国土空间规划以及各类开发活动划定了明确的生态边界，保证生态产品的供给能力不降低。

红线也是环境质量的底线。在环境承载力有限的条件下，有些地区的生态系统十分脆弱或者敏感，例如水土流失敏感区、土地沙化敏感区等。这些区域生态系统一旦遭到破坏，很容易造成严重的土壤侵蚀与土地荒漠化，从而波及更广大的地区环境质量。生态保护红线通过严格的用途管制，禁止或限制在这些区域内进行可能加剧环境风险的开发建设活动，从而从源头上预防环境质量的恶化。这种底线思维，就是防止区域生态环境发生系统性崩溃的最后防线，保证环境质量不突破生态系统可以承受的限度。

（三）自然资源利用上线

生态保护红线给自然资源开发利用设定了一个清楚的上限。它以最核心的生态空间作为强制保护对象，从空间上划定了开发的边界，即哪些地区的自然资源（土地、矿产、水、生物资源等）原则上不得被消耗、不得转为建设用地。空间上的禁区设置，是优化国土空间开发格局的前提，它要求各类开发活动必须要在红线之外的适宜空间内进行，从而促进形成生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀的国土空间新格局。这一制度根本上改变了以前“摊大饼”式无序扩张，过度占用自然生态空间的状况，是实现资源可持续利用、高质量发展的关键手段。红线划定之后，所有与主体功能定位相违背的开发活动都会被禁止，给自然资源的代际公平和永续利用提供了有力的法律和空间保障。

二、生态保护红线划定的技术方法

生态保护红线划定是一项科学性很强、技术要求很高的工作，坚持科学性、整体性、协调性等原则，综合运用生态学、地理信息系统、遥感等技术以及定量与定性相结合的方法，准确识别出需要严格保护的生态空间，落到具体地块。

（一）生态系统服务重要性评估

生态系统服务重要性评价是确定关键生态功能区的主要技术环节。其目的就是通过模型模拟、空间分析的方法，对各个区域在提供各种生态系统服务方面的重要程度进行定量评价。评估的过程大体上由以下步骤组成：

1. 关键服务类型识别，根据国家或者区域生态特征和保护需求，筛选出主导性的生态系统服务类型，主要有水源涵养、水土保持、生物多样性保护、防风固

沙等。

2. 服务物质量核算采用水量平衡方程、通用土壤流失方程 (USLE/RUSLE)、修正风蚀方程、生境质量模型等成熟的生态系统模型, 利用土地利用、气象、土壤、地形、植被等多源数据, 得到每个空间单元 (栅格) 的生态系统服务物质量。

3. 分级与归一化, 将各项服务物质量的评价结果进行分级, 一般采用自然断点法等统计方法, 分为极重要、重要、一般重要等。这一步可以找出各项服务功能最突出的核心区域。

经过以上评估后可以得到很多专题图层, 可以清楚地反映出各个生态系统服务在空间上分布情况及重要性差异, 从而为之后红线范围确定提供科学依据。被评定为极重要的区域, 也就是生态保护红线划定的首选候选区。

(二) 生态系统敏感性评估

生态系统敏感性评估就是找出生态系统自身结构和功能比较不稳定、容易受到外界干扰而导致生态退化的地区。此类评价关注的是生态系统本身所具有的脆弱性, 对防范生态灾害、维持生态系统稳定起着非常重要的作用。评价过程一般是分析某类生态问题在空间上出现的倾向性, 比如水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性以及盐渍化敏感性等等。

技术方法主要是建立综合评价指标体系, 再用空间叠加的方法识别出敏感区。又如水土流失敏感性评价要考量降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖等因子。给各个因子赋予不同的权重, 并用地理信息系统叠加加权分析, 可以得到综合敏感性指数图。根据指数的高低把区域分成极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感、不敏感等不同等级。被评为极敏感、高度敏感的区域, 因为生态系统很脆弱, 存在较大的生态风险, 所以也应该被优先纳入生态保护红线范围内。

(三) 生态保护红线边界确定与落地

经过生态系统的服务重要性评价、生态系统的敏感性评价以后, 红线边界的划定和落地工作才真正开始, 这是一项包含多个步骤、需要多部门共同参与的复杂决策过程。

首先进行的是评估结果的整合。技术上一一般采用取并集或叠加的方式, 把所有被评为“极重要”的生态功能区以及被评为“极敏感”的生态敏感区在空间上合并起来, 从而得到初步的生态保护红线建议范围。该范围涵盖了对生态安全起

着决定性作用或者自身非常脆弱的区域。

第二是对初步范围进行校验衔接。将初步确定的红线范围同已有的各类自然保护地（国家公园、自然保护区、森林公园等禁止开发区域）的空间进行叠加对比，保证这些依法设立的保护地全部包含在红线之内。还要与国土空间规划中的永久基本农田保护红线、城镇开发边界相衔接，妥善处理好三条控制线的关系，避免产生矛盾。

再次是边界的优化和精确落位。初步红线边界是由栅格数据生成的，一般比较破碎、不规则。因此需要结合实际的自然地理边界，如山脊线、河流、湖泊岸线、道路、明显的地块边界等对红线边界进行规整和平滑处理，使红线边界更清晰、完整、便于管理。这一过程称为勘界定标，是保证红线可以被准确识别并得到有效监管的前提。

经科学论证、部门协调、公众参与之后，最后确定下来的生态保护红线划定方案，将以法定的形式公布出来，被纳入全国国土空间规划“一张图”中统一管理。在红线边界处设统一的标识标牌，写明红线范围、管控要求、责任主体，真正做到红线落地。

三、红线的管控与监督

生态保护红线确定之后，其主要目的就是“严守”。为此必须建立一个系统、严格、高效的管控和监督体系，确保红线区域生态功能不下降、面积不减少、性质不改变。这一般就是用清单管理、技术监控、动态调整等机制有机结合形成闭环管理。

（一）红线区的准入清单与负面清单

对红线区域实行精细化、差异化控制，采用“清单制”管理方式，即准入清单和负面清单。取代以前一刀切的绝对禁止的方式，严格保护的同时，在必要的时候给一些对生态环境影响很小的活动留有空间，体现出科学性和灵活性。

负面清单明确在红线区域内各类禁止开发建设活动，工矿开发、房地产开发、大规模养殖等对生态系统造成严重或者不可逆破坏的工业化、城镇化项目。负面清单就是红线管控的“高压线”，任何单位和个人不得越界。对违反负面清单的予以依法依规严肃查处并追责。准入清单是指在不影响主导生态功能、不破坏生态环境的前提下，在红线内可以进行的有限的人为活动。即不破坏生态功能的生

态旅游、科学研究与观测、教学实习、符合相关规划的居民生活点维护、对生态系统进行保护、修复和管理等活动。双清单制度的设立，在保证红线的刚性约束的同时，也考虑到了当地居民基本的生产生活需求以及生态保护工作实际需要，保证红线管控既有可操作性又有合理性，保证相关工作顺利进行。

（二）遥感监测与地面核查相结合的监管

为对广大复杂的红线区进行有效监管，必须构筑一个天上看、地上查的立体化的监管网络。这样的监管方式即结合了遥感监测又结合了地面核查，可以对红线区域内的人为活动进行实时、全面、精确的监视。

遥感监测主要是对大范围、高频率的动态监测提供主要的技术手段。通过高分辨率卫星影像、无人机，对红线内区域进行定期巡查，用图像对比和智能分析的方法，迅速找到地表发生的各种变化，如新出现的建筑物、道路、开垦土地、植被破坏等疑似违法活动。为监管提供及时线索，大大提高发现问题的效率。国家、地方政府建立起来的生态保护红线监管平台，可以整合所有的遥感数据，发现人类活动后发出警告。

地面核查是确认遥感监测发现的线索、开展执法的地面环节。接到预警信息之后，地方生态环境、自然资源等相关部门的执法人员或者生态管护员会立刻赶往现场，对疑似问题的性质、规模、影响等进行实地勘察核实。一经发现属于违法违规活动，就启动执法程序，依法予以查处，追责，并监督做好生态修复工作。这就形成了一个发现—核实—处理的闭环，对破坏红线的行为起到震慑作用，实现监管无死角。

（三）红线调整的动态机制与程序

生态保护红线虽然强调刚性的约束和稳定性，但它并不是一成不变的。考虑到国家重大战略实施、不可抗力（重大自然灾害造成生态功能永久性丧失等）、科学认识的不断深化等情况下，必须建立一套非常严格、科学规范的动态调整机制和程序。这一机制的主要原则是红线面积只能增加，不能减少；生态功能只能加强，不能削弱。

红线的调整必须按照法定程序进行，不能有随意性，也不能受地方保护主义的影响。当因国家重大基础设施建设、重大民生保障项目或者重大战略资源勘查等需要调整，并且不能避开红线的时候，应当由省级人民政府组织全面论证，评估调整的必要性、可行性以及生态环境的影响。论证报告要详尽阐述调整缘由、

调整范畴、生态影响状况，给出“占一补一、占优补优”的生态补偿方案，保证调整后的红线总面积不缩减，整体生态功能不降低。调整方案要经由国家有关主管部门技术审核并严格把关，最后交最高一级行政机关核准之后方能执行。整个过程要公开，要接受社会监督。严格动态调整机制，在保证生态保护红线严肃性、权威性的基础上，也为发展中出现的矛盾留出了余地，体现了灵活性与原则性相结合的特点。

生态系统服务重要性评估与敏感性评估参数汇总

评估类型	评估重点	主要考虑因子	典型模型 / 方法	敏感区级别
生态系统服务重要性评估	关键生态功能区识别	水源涵养、水土保持、生物多样性、防风固沙等	InVEST 模型，水量平衡方程，USLE/RUSLE，RWEQ	极重要、重要、一般重要
生态系统敏感性评估	生态系统脆弱性识别	降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖等	空间叠加法，综合评价指标体系	极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感、不敏感

根据上表可以知道，在生态保护红线划定的过程中，不能缺少生态系统服务重要性和生态系统敏感性这两个评价因素。综合运用这些关键参数以及评价的方法，可以使我们更加科学、更加准确地确定出要优先保护的生态空间，给红线精确定位奠定良好的基础。

第二节 生态修复与补偿机制

一、退化生态系统修复技术

退化生态系统修复就是借助于人为的力量，按照生态学原理并结合工程技术手段，让遭到破坏的生态系统重新具备结构完整性和功能稳定性。它成为解决存量生态环境问题的主要手段，技术选择要根据实际情况，在退化成因、自然条件、社会经济因素三个方面进行综合判断。

（一）植被恢复与土壤改良技术

植被恢复是生态修复最直观的体现，也是生态修复的重要环节，植被恢复的好坏直接关系到生态系统结构、功能的重建。技术体系要依照自然演替的规律，首先选用本地物种，创建合理的植物群落，从而稳固生态系统的基本功能。具体

方法有封山育林、人工造林、飞播造林等，同时结合近自然经营理念开展抚育间伐、补植改造，改善林分结构，提高生态系统自我调节能力。植被恢复过程中土壤是限制因子。土壤改良技术就是恢复土壤的物理结构、化学性质以及生物活性。物理改良，深耕、掺砂等，改善土壤通透性；化学改良，施用石灰、有机肥、土壤改良剂等，调节土壤酸碱度和养分；生物改良，引入蚯蚓、微生物菌剂等，增加土壤有机质和有益微生物数量，重塑健康的土壤微生态环境。

将植被恢复同土壤改良结合起来，形成一个互相促进的系统工程，是修复成功的保证。在干旱半干旱地区，可用抗旱先锋植物进行初期定植，靠其根系固土、聚水，为后续物种引入创造条件。另外配合使用保水剂和地表覆盖来降低土壤水分蒸发，提高植被成活率。对于被重金属或者有机物污染的土壤，植物修复技术，特别是超富集植物，在重建植被的同时也去除了污染物，具有生态效益和环境效益。

（二）水体生态修复与湿地重建技术

水体生态系统退化，富营养化问题已经成为目前普遍存在的环境问题。水体生态修复就是减少内外污染负荷，恢复水生生物多样性，重建健康的生态系统。技术途径主要有物理、化学、生物三种。物理方法有清淤、引水冲兑、曝气增氧等，改善水体的水动力条件和溶解氧水平。化学方法絮凝沉降、化学除磷等见效快，但要注意二次污染。生物方法目前是研究与应用的热点，它是按照生态系统中物质循环和能量流动的规律，建立由食藻虫、沉水植物、水生动物、微生物等共生的生态系统，从而提高水体的自净能力。

湿地是“地球之肾”，对于净化水质、调蓄洪水、维持生物多样性有着不可替代的作用。湿地重建属于水体生态修复的主要部分，主要目的是恢复湿地的水文过程以及生态功能。人工湿地技术，特别是潜流湿地、表流湿地，常被用来处理点源和面源污染，在基质、植物和微生物共同作用下可以高效去除氮、磷等营养物质。湿地重建要合理设计地形地貌、恰当安排水生植物群落，为鸟类、鱼类等动物创造适宜的栖息环境，从而达到水质净化、生物多样性恢复双重目的。湿地重建既不是简单的技术工程，也不是对自然生态过程的模仿，而是对自然生态过程的一种优化。

大型湖泊、河流的修复一般用流域管理的方式。即对上游污染源加以控制、在沿岸建立生态缓冲带拦截农业面源污染、恢复河岸植被加固堤岸、实施生态调

度保障下游生态用水。这些措施一起形成了一张从源头到末端、从水域到陆域的立体修复网，很好地体现了生态系统整体性管理的思想。

（三）矿山废弃地生态修复技术

矿产资源开发给经济发展带来利益的同时，也留下了大量的废弃地，造成大量的土地破坏、植被消失、水土流失和重金属污染等一系列严重的生态环境问题。矿山废弃地生态修复属于复杂系统工程，目的是消除环境安全风险，恢复土地生产力，重建区域生态系统。修复过程大体上要按照以下步骤进行：

1. 地形重塑、边坡稳定，对采矿造成的陡坡、凹陷地等进行整治，用削坡、阶梯化处理等工程措施消除地质灾害隐患，为后续土壤重建、植被恢复提供稳定的立地条件。

2. 土壤重建。矿山废石、尾矿一般缺乏土壤结构和养分，需要改良或者覆盖客土。采用周边表土、有机废弃物、污泥等材料，形成具有一定肥力和持水性的生长介质层，利于植被定居和生长。

3. 植被恢复，选择耐贫瘠、耐干旱、抗污染的先锋植物进行初期绿化。这些植物可以快速地覆盖地表，减少水土流失，又可以慢慢地通过自身的生命活动改善土壤。待先锋群落稳定之后，再逐渐引入灌木、乔木，使生态系统趋向更加稳定的顶级群落演替。

4. 污染治理、生态功能提升。酸性矿山废水、重金属污染的治理可采用源头控制、被动处理系统（人工湿地）、植物萃取等方法。修复后期根据区域规划，可以把修复过的矿区转变为公园、农田或者具有某种生态功能的保护区，提高其生态服务价值。

二、生态补偿的理论标准

生态补偿是制度安排，以生态系统服务价值理论为基础，用经济手段调节生态保护者和受益者之间的利益关系。其目的就是将生态保护和建设的外部性内部化，促使区域或者个人主动去保护生态环境，从而实现人与自然的和谐共生。建立科学合理生态补偿机制，是达到生态公平、实现可持续发展的必要手段。

（一）生态补偿的理论基础

生态补偿机制的建立有深厚的经济学与生态学理论基础。外部性理论是其核心基础，生态保护行为产生正外部性（水源涵养、空气净化），但是成本由保护

者承担,受益者却没有支付相应的对价;相反,环境破坏行为则产生负外部性。生态补偿用激励正外部性的方式、对负外部性行为收费的方式来达到成本和效益的内部化的目的,以解决市场失灵的问题。

公共物品理论给生态补偿赋予了另外一个视角。清洁的空气、水源等生态产品具有非竞争性、非排他性,属于典型的公共物品,市场机制很难自发地实现最优供给。这就为政府以公共利益代表的身份,通过财政转移支付等方式对生态系统服务提供者进行补偿,提供理论依据。产权理论,特别是科斯定理认为,明晰产权、交易成本低的情况下,当事人可以通过协商来解决外部性问题,这就为市场化生态补偿模式(排污权交易)打下基础。

生态系统服务价值理论为生态补偿的量化奠定了直接的理论基础。生态系统为人类福祉提供支持、供给、调节、文化等各方面的服务,这些服务具有客观的经济价值。经由科学衡量这些服务的价值量,就可以给补偿额度与标准的确定赋予直接依循的根据,使得补偿由定性走向定量,从而改进制度的可操作性并提升公平性。这些理论一起构成生态补偿制度设计的框架。

(二) 生态补偿标准的核算方法

生态补偿标准是生态补偿机制的基础,它的科学合理性直接关系到生态补偿政策效果的好坏和可持续发展。核算方式多种多样,选择的时候要考虑到补偿目的、数据获取的可行性以及区域的实际情况。

机会成本法是一种常用的方法,它把生态保护者因为保护行为而放弃的发展机会所造成的收益损失,当作补偿的依据。该方法简单易行,利于利益相关者接受,特别是对补偿某一地区农户或地方政府来说。

成本分析法属于另一类重要的方法,分为恢复成本法和防护成本法。恢复成本法以修复受损生态系统到原来状态所需要的费用为补偿标准,适用于已经造成生态破坏的情况。防护成本法则以采取预防措施防止生态环境损害的费用为依据。该类方法依据实际投入,数据容易获得,但是会低估生态系统的内在价值和永久性的损失。

价值评估法则直接关注生态系统服务功能,目的在于对它的经济价值进行量化。其中市场价值法是采用市场上已有的类似生态产品价格进行评估,影子工程法是用功能相同的人工工程造价代替,意愿调查法(如条件价值评估法)是通过问卷调查公众为改善生态环境愿意支付或接受补偿的金额。近几年来,基于生态

系统生产总值核算的综合评价方法逐渐兴起，它对区域内所有生态服务的总价值进行全面评价，给宏观生态补偿决策提供科学依据。

各种核算方法各有侧重与局限，具体对比如下表所示。

生态补偿标准核算方法对比表

方法名称	主要特点	适用场景 / 优势	局限性 / 挑战
机会成本法	以保护者放弃的发展机会收益为补偿依据	简单易懂，易被利益相关者接受；适用于对特定区域农户或地方政府补偿	可能低估生态系统的内在价值；难以全面衡量复杂生态系统服务
恢复成本法	将修复受损生态系统至原状所需费用作为补偿标准	适用于已造成生态破坏的补偿；数据较易取得	关注修复成本，可能忽略预防价值和长远影响
防护成本法	以防止生态环境损害所采取预防措施的费用为基础	适用于预防性保护措施的成本补偿；数据较易取得	可能低估生态系统的内在价值和永久性损失
市场价值法	通过市场上类似生态产品的价格评估服务价值	适用于具有市场交易属性的生态产品	许多生态服务无直接市场价格，难以量化
影子工程法	用功能相同的人工工程造价代替生态服务价值	概念直观，便于理解	可能无法完全模拟生态系统的复杂功能和价值
意愿调查法	通过问卷调查公众支付意愿或接受补偿意愿	可评估无市场价格的生态服务价值；体现公众偏好	易受调查设计、受访者认知等主观因素影响
GEP 核算法	全面核算区域内全部生态系统服务的总价值	为宏观生态补偿决策提供科学支撑；综合性强	核算复杂，数据要求高；指标体系构建尚待完善

上表表明，选择合适的生态补偿标准核算方法要综合考虑补偿目标、数据的可获得性以及具体的区域情况，权衡各种方法的优缺点。

（三）纵向与横向生态补偿机制

按照补偿关系中行政层级和区域特征的不同，生态补偿机制分为纵向生态补偿和横向生态补偿。纵向生态补偿指的是不同层级的政府之间，上级政府给承担重要生态功能保护职责的下级政府提供财政转移支付。该模式体现的是中央或者上级政府对于国家、区域的生态安全的保障作用。国家重点生态功能区转移支付属于纵向补偿，即中央财政给水源涵养区、江河源头区、防风固沙区等区域的县域提供财政补助，补偿因限制开发而造成的财政收入减少，进而激励地方政府承

担起生态保护责任。

横向生态补偿就是指同级行政主体之间，特别是跨行政区划的流域上下游、左右岸地区之间的生态补偿。该模式的基本逻辑就是“谁受益，谁补偿”，即下游或者受益地区给上游或者保护地区的生态保护投入以经济补偿。横向补偿比纵向补偿更能体现区域之间的公平合作精神，可以打破行政区划的壁垒，实现流域或者区域的协同治理。新安江流域是我国首个跨省流域横向生态补偿试点，安徽、浙江两省共同设立补偿基金，按照水质监测结果对资金进行奖惩分配，较好地激发了上游安徽省保护水环境的积极性，保障了下游浙江省的用水安全，是横向生态补偿的典范。这种模式正在赤水河、九洲江等流域得到推广和应用，是解决跨界生态环境问题的制度创新。

三、生态补偿的实践模式

生态补偿由理论走向实践，已经形成了各种各样的实施模式。这些模式因为主导力量不同、资金来源不同、运作方式不同而有不同的特点，是各国、各个地区根据本国的经济发展水平与制度文化背景做出的适应性选择。探索适合我国国情的生态补偿实践模式，对推进生态文明建设有重大的现实意义。

（一）政府主导型生态补偿

政府主导型生态补偿是指政府作为补偿主体或者主导者，以财政投入、政策引导等方式对生态保护者进行补偿的模式。该模式在生态补偿实践的初期阶段，以及涉及重要公共生态产品领域的时候，常常占据主导地位。最大的优点就是政府具有很强的组织动员能力以及充足的财政资源，可以进行跨区、大范围生态补偿，适合国家级重要生态功能区、自然保护区以及重大生态修复工程。

政府主导型补偿一般以公共财政资金为基础，通过生态补偿专项资金、财政转移支付、生态岗位设置等方式进行。在中国的退耕还林还草工程中，中央财政给实施退耕的农户发粮食和现金补贴，这就属于政府直接补偿。此类模式政策目标明确、执行力强、在短时间内可以取得明显的生态效果。

但是补偿标准的确定以及动态调整机制比较繁琐，容易出现“一刀切”的情况，忽视地区差异。资金使用效率及监管问题不可轻视，需要防范补偿资金被挪用或者分配不公的隐患。过度依靠政府资金会遏制市场机制的发展，造成保护行为缺乏内生动力，当财政扶持减少之时，保护成效也就难以保持。因此政府主导

型模式要不断改进，提高决策的科学性、资金分配的准确性，积极探索与市场机制的结合。

（二）市场化生态补偿

市场化生态补偿，又叫生态服务付费，是指生态系统服务的受益者和提供者，在自愿协商的基础上，通过市场化交易的方式，对生态保护行为予以补偿的机制。它强调依靠市场这只“看不见的手”配置生态资源，用更高的效率达到生态保护的目的。核心在于确定生态服务的产权，搭建买卖双方能够有效交易的平台或市场。

市场化生态补偿方式有水权交易、碳排放权交易、排污权交易、生物多样性补偿银行等。在水权交易中，节水方可以把自己节约的水资源指标卖给需水方，从而获得经济收益，这促使了水资源的节约和高效利用。碳交易市场给控排企业赋予了买林业碳汇等减排量的渠道，以此来抵消自身超出部分的排放量。由此产生的资金会流向从事植树造林、森林保护的农民或者企业，从而达到应对气候变化与生态保护两全其美的目的。生物多样性补偿银行就是要求项目开发者为生物栖息地损失支付“信用”，用来资助其他地方的生态修复和保护项目，实现“占补平衡”。

该模式的优势为灵活性高，效率高。依靠价格信号，可以将有限的保护资金引向成本最低、效益最高的地区，充分调动保护者内在动力和创新活力。并且可以吸引社会资本参与生态保护，拓宽生态补偿资金来源渠道。

市场化生态补偿机制的建立与运行要依靠健全的法律基础，科学的生态服务价值认定与评价制度，完善的市场监督体系以及低廉的交易费用等。在实践中，纯粹的市场化模式很少，一般需要政府在制度设计、市场培育、监督管理等方面发挥“助产士”和“裁判员”的作用，形成政府引导、市场驱动的混合模式。

（三）国际生态补偿案例借鉴

在全球范围内，很多国家对生态补偿做了有益尝试，它们的成功与失败都给我国建立和完善生态补偿制度给予重要参照。哥斯达黎加是实行生态服务付费计划最早的国家之一。该国通过燃油征税等途径建立国家森林基金，向提供水源涵养、生物多样性保护、碳汇和景观美学四方面生态服务的森林土地所有者支付费用。此案例成功的因素有明确法律依据、稳定的资金来源、把保护行为与经济利益直接挂钩的逻辑清晰。

美国的湿地补偿银行制度是应该学习的典范。该项制度规定,开发活动造成湿地破坏的企业,可以向专门从事湿地恢复和创建的“补偿银行”购买“湿地信用”,并承担相应的补偿责任。市场化机制推动湿地修复走向专业化、规模化,提升了补偿的生态与经济效益,给破解开发与保护之间的矛盾赋予了一种新的解决办法。德国的“影响减缓调节”法规要求所有的建设项目必须对不可避免的生态损害进行实物补偿,遵循“避免-减缓-补偿”的顺序,且将补偿措施纳入到规划审批的全过程之中,体现出严格的预防原则以及责任的落实。国际上成功的生态补偿机制一般都会具有明晰的产权界定、合适的价值评价标准、多元的补偿资金来源、严格的管理监督办法和广泛的公众参与。

第三节 生态系统监测预警

一、生态系统监测网络构建

建立一个全面高效生态系统监测网络,可以获得准确连续的生态环境信息,也是进行有效预警、科学评价的前提。为此需要综合使用多种监测手段,建立宏观和微观相结合、多层次、多维度、立体的观测体系,保证观测数据的完整性、代表性、科学性。

(一) 天-空-地一体化监测体系

天-空-地一体化监测体系,就是把各平台的优势有机融合,构成层次分明、覆盖面广、尺度适合的生态系统立体感知网络。在“天”的层次上主要依靠遥感卫星,利用遥感卫星覆盖面积大、重访周期短的特点对大范围的植被覆盖、土地利用情况、水体面积、地表温度等宏观生态情况进行长时间、动态的观测。光学遥感与雷达遥感等不同的传感器协同使用可以有效穿透云层,得到更多的地表信息,为区域生态系统健康状况提供宏观诊断的基础数据。

从“空”这一层面来说,以无人机为代表的低空遥感平台起着承上启下的关键作用。无人机携带高清相机、多光谱或者高光谱传感器、激光雷达等设备,在中等或小规模区域内,获得高分辨率、高时效性的影像和数据,并对区域内植被群落结构、物种分布、土壤侵蚀状况以及人类活动的影响做详细的分析。由于其机动灵活,所以能对重点地区进行细致入微的“体检”,从而成为卫星遥感的有

效补充。地面监测层面是整个监测网络的基础，依靠地面定位观测站、传感器网络、野外调查样地来获得高精度的、连续的现场观测数据。三者有机协同，形成的是天基宏观普查发现异常、空基中观详查锁定问题、地基微观核查验证机理的数据闭环，大大提高了生态监测的深度、广度和精度，为之后的预警分析打下了坚实可靠的数据基础。

（二）地面定位观测站与样地布设

地面定位观测站、样地的科学布设，是保证监测数据具有代表性和准确性的重要环节，也是“天-空-地”体系获取“真值”的关键落脚点。观测站选址布局要按照系统性、代表性和长期性的原则，把观测站优先布置在典型的生态系统类型区（森林、草原、湿地、农田、荒漠）、生态功能重要区（水源涵养区、生物多样性保护优先区）、生态环境脆弱区（水土流失严重区、石漠化地区）、人类活动影响强烈的区（工矿区、城市群周边）等。这些站点构成国家或者区域的生态监测网的基本骨架。

地面观测站一般会配备自动气象站、水文水质监测仪、土壤墒情仪、大气组分分析仪等自动化设备，对一些重要的环境因子进行长时间的连续的高频率的在线监测，以及时发现生态系统对于环境变化的即时反应。与之相辅相成的是样地。样地是进行生物、生态过程的详细调查的单位，样地布设常采用分层抽样、网格化布设等方法。样地内定期进行的工作有植被群落调查（记录物种组成、多度、盖度、高度、胸径等）、生物量测定、土壤理化性质分析、动物多样性观测（鸟类、昆虫等）等。

站点加样地的方式把高时间分辨率的自动化监测同高精度、多指标的周期性人工调查有机地结合起来。固定站点连续数据可以体现生态系统动态变化过程和速率，样地详细调查可以阐明这些变化背后生物的机制和结构演变。通过科学地布设这些点位，这些点位所获得的准确数据可以用于检验和修正大范围遥感反演模型，把点上的“真值”信息推广到整个区域，达到对区域生态系统状况进行准确掌握的目的。

（三）监测指标与数据标准化

科学的监测指标体系、严格的数据标准化，是监测数据和评价预警的桥梁，也是保证监测网络产出信息可比、可用、可信的根本保证。选择监测指标时需要同生态系统的结构、功能、胁迫这三个方面联系起来，形成全面的、敏感的监测

指标集,既能够反映出生态系统现在的情况,又可以预知它将来会发生怎样的变化。

为了使数据能够得到有效整合,就需要制定、执行数据采集、处理、存储和共享全过程的标准。具体可以从以下几个方面进行:

监测指标分类与示例表

指标类型	主要描述	典型示例
结构指标	生态系统的组成成分与空间格局	植被覆盖度、叶面积指数、生物多样性指数、景观格局指数
功能指标	生态系统的物质循环、能量流动、信息传递过程	净初级生产力、蒸散发量、土壤有机质含量、固碳释氧能力、水源涵养量
胁迫指标	生态系统所面临的自然及人为压力	环境污染物浓度、土壤重金属含量、土地退化面积、外来物种入侵程度、人类活动强度指数

各类监测指标的详细分类及示例,可见以上监测指标分类与示例表。

1. 生态系统结构指标:主要描述生态系统的组成成分以及空间格局。像植被覆盖度、叶面积指数、生物多样性指数、优势种、景观格局指数(斑块密度、破碎化程度、连接度)之类的。这些指标可以直接体现出生态系统的完整性以及稳定性。

2. 生态系统功能指标:生态系统的物质循环、能量流动、信息传递过程,用此类指标来量度。核心指标为净初级生产力、蒸散发量、土壤有机质含量、固碳释氧能力、水源涵养量、水土保持服务价值等。它们是评价生态系统服务能力及健康状况的指标。

3. 生态系统胁迫指标:用来反映生态系统受到的自然和人为压力的指标。环境污染物浓度、土壤重金属含量,土地退化程度,沙漠化面积比例,外来物种入侵程度,人类活动强度指数等。这些指标可以成为预警系统输入变量。

所有的监测活动所产生数据,不论是自动采集还是人工调查得到的,都必须按照统一的观测规范、数据格式、质量控制流程、元数据标准来执行。数据标准化可以把来自不同来源、不同时间、不同地方的数据做对比,是进行区域间、时段间的生态综合评价和风险预警的前提,也是数据共享和模型联动的前提。

二、生态预警指标与模型

获取大量监测数据之后,核心任务就是建立科学的预警指标体系和有效的预

警模型，把复杂的量化信息转化为直观的预警信号，提前识别并干预潜在的生态风险，从而将“被动治理”转变为“主动防范”，提高环境管理的预见性和前瞻性。

（一）生态退化预警指标

生态退化预警指标就如同生态系统健康状况的晴雨表和报警器，它的主要作用是发现生态系统从稳定状态向退化状态转变的早期征兆。这些指标非常敏感，可以在生态系统受到不可逆破坏之前发出预警。既考虑系统状态值本身，又考虑状态值的变化速率、变化幅度、超出正常波动范围的情况，从各方面把握系统的动态过程。

预警指标主要可以分为以下几类，一是植被遥感指标，植被指数连续下降趋势指标、植被物候期异常提前或延迟指标、植被生产力对降水的响应敏感度变化指标（如雨养利用效率降低）。另一类是以水文、土壤为指标的，河流径流量出现大幅波动、地下水位持续下降、湖泊水体富营养化指数快速升高、土壤侵蚀模数急剧增大、土壤有机质含量快速流失等。

生物多样性方面的重要指标有，关键功能种群数量的大幅减少、指示物种分布范围缩小、群落结构稳定性降低等现象。建立有效的退化预警指标体系的关键就是确定各项指标的预警阈值。该阈值一般用历史数据长期记录来确定，找到生态系统正常波动的基线范围。一旦出现某个或者某些指标持续超出这个范围的情形，比如连续几个监测周期，指标的数值一直低于历史同期的10%分位数的时候，系统就会自动触发预警信号，提示管理人员对这个区域给予特别关注并加以诊断。

（二）生态风险预警模型

单一预警指标只能反映生态系统的某一个局部状况，而生态风险是由多种压力和系统脆弱性共同作用形成的。因此必须建立综合的生态风险预警模型，将各方面信息综合起来，对未来的风险进行定量的评价和概率预测，把零散的监测数据转化为对整个系统风险水平的全面认识，为决策提供更加完整的科学依据。

目前主流的预警模型构建方法有基于指标体系的综合指数法、统计学方法、基于过程的机理模型。综合指数法利用经典框架给各个指标赋予权重，得到综合生态风险指数。权重的确定可以采用专家打分法、层次分析法等方法。统计学方法，尤其是利用机器学习算法，通过历史数据学习压力因子和生态退化事件之间复杂的非线性关系，并据此建立预测模型，以预测未来生态风险发生的可能性。这类模型具有数据驱动的特征，预测精度较高。过程机理模型模拟生态系统生物

地球化学过程，预测生态系统在不同情景下（气候变化、土地利用改变）的响应情况，它对数据和机理认知度要求较高，但是能更好地解释风险产生的过程。模型选取依据预警目标、能获取的数据以及对生态系统过程的认识程度而定。

（三）预警等级与发布机制

为了使预警信息能被管理者所理解并采取相应的行动，就必须建立预警等级划分标准以及预警信息发布机制。这是一道科学分析与管理实践之间的“最后一公里”，它的完备情况决定着监测预警体系能不能落到实处。

预警等级用不同颜色的编码来表示风险的程度，有蓝色、黄色、橙色、红色四个等级。蓝色预警（四级），当监测到一些指标出现轻微异常情况时，有风险但并不紧急，要加强检测和分析但不立即干预。黄色预警（三级），警示级，生态退化趋势明，风险概率大，相关部门应启动调查程序，做好应急预案。

橙色预警（二级）为警告级，生态系统已经出现较严重的退化或者高风险事件即将发生，应当立即采取限制性或者补救性措施控制事态发展。红色预警（一级）属于严重级，指生态系统已经遭受了严重的破坏，或者重大生态灾难即将发生或者正在发生，需要立即启动最高级别的应急预案，采取一切必要的措施减轻损失。各级别的触发条件由预警模型结果来决定，把风险指数大小、波及范围广窄、变化速度缓急、可能造成后果的严重程度都考虑进去。

预警信息发布机制应该保证预警信息的权威性、时效性和准确性。必须明确预警信息发布的主体（一般为政府环境保护主管部门或者授权机构）、发布流程、发布渠道、发布对象。发布渠道应该多样化，包括官方网站、专用信息平台、手机应用、新闻媒体等，保证信息能够迅速传递给各级政府决策者、相关企业和社会公众。预警信息应该包含预警等级、影响范围、简要情况说明、引起预警的关键指标以及建议采取的应对措施等内容，方便各个层面的响应行动有据可依，保证预警工作落到实处。

三、监测预警平台建设

为了把监测网络得到的数据、预警模型分析得到的结果转化为有效的管理措施，就要建设一个集数据管理、预警分析、信息发布、决策支持为一体的综合性监测预警平台。该平台可以称为整个体系的“大脑”和“神经中枢”，对数据进行汇集、处理、分析，最后将信息呈现并传递出去。

（一）数据管理与共享平台

数据管理与共享平台作为整个监测预警体系的数字底座，主要工作就是把大量的、多源的、异构的生态环境数据汇聚、规范化之后，再实现高效共享。平台要有很强的数据接入能力，能兼容并且融合来自卫星遥感、无人机、地面传感器网络、人工野外调查等各种数据来源的数据流。因此需要创建数据接口及协议，实现数据自动接收、清洗、质控、入库，去伪存真原始数据保证数据源真实可靠。

平台内部要建立统一的生态环境数据库，用空间数据库技术对数据进行结构化存储和管理。所有入库的数据必须带有完整的元数据，即数据来源、采集时间、空间位置、测量方法、精度等，保证数据的可追溯、可利用。更重要的是要打破部门、区域之间的数据壁垒，创建开放的数据共享机制。通过标准接口为用户提供便捷查询、检索、使用平台数据的渠道，支持不同学科的科学研究的，促进政府内部各部门之间的协作管理，使社会公众能够了解自己所在区域的情况，从而最大程度地发挥监测数据的作用。

（二）可视化展示与决策支持系统

可视化展示与决策支持系统是数据分析与管理决策之间的桥梁，它的目的就是直观、易理解的方式把复杂的监测数据和预警模型结果呈现给决策者，提供科学的决策支持。该系统一般利用地理信息系统为平台，创建一体化的、一张图式的综合表现界面。管理者由此可以清楚地了解到各种生态监测站的分布情况、各监测点的实时监测数据变化曲线、各个生态系统结构与功能的空间分布情况。

预警模型发出警报的时候，系统会自动把预警区域在地图上高亮显示出来，并用不同的颜色标记预警等级。用户点击预警区域，就会弹出一个详细的窗口，显示出造成预警的主要指标、过去的变化趋势、和其他周边地区的比较等。系统要给出时空查询，缓冲区分析，叠加分析等各式各样的交互式分析工具，以此来辅助管理者找寻问题的原因。

系统核心的价值就是它的决策支持功能。它不只是一个数据展示器，还是管理者智能的助手。系统内部创建决策知识库，可以按照预警等级、生态问题类型智能给出相应的对策、应急预案。当某一地区出现土壤侵蚀黄色预警时，系统就会给出坡面水土保持工程、植被恢复等对策，并且给出类似的成功案例供参考。这样智能化的决策支撑大大提高了环境管理的科学性以及反应速度。

（三）平台的运维与更新

监测预警平台是一个需要长期稳定运行、不断迭代发展的动态系统，并不是一劳永逸的。平台的运维和更新是保证其生命力、有效性的东西。运维工作主要是保证平台硬件设施（服务器、网络、存储设备等）正常运转，日常的系统监控、性能优化、数据备份、灾难恢复等，保证系统 7x24 小时不间断服务。还需要成立技术支持小组来解决用户使用过程中遇到的技术问题，根据用户的建议持续改进平台。

平台的持续更新，对维持平台自身的先进性来说是重要的。伴随着生态学研究以及信息技术的发展，监测指标、预警模型和数据分析的方法也在不断更新。平台应该具有良好的可扩展性，模块化设计以便平台功能升级和模型的更新。更新内容可以是加入新的遥感数据源、分析算法，根据最新的科研成果对预警模型的参数和结构进行优化调整，提高准确性，也可以根据管理需求增加新的可视化模块和决策支持功能。健全完善评价更新制度，保证平台能够及时吸纳新的知识技术，与时俱进，才能为生态环境管理提供持久有力的支持。

第四节 适应性管理决策支持

一、适应性管理的理念与循环

适应性管理是一种把科学研究同管理实践结合起来的方法。把管理行为看作检验假设、增加认识的方式，在不确定性条件下不断调整管理决策来提高生态系统的恢复力。

（一）“认识 – 规划 – 实施 – 监测 – 评估 – 调整”循环

适应性管理最核心的特点就是它的动态反馈循环机制，一般概括为“认识、规划、实施、监测、评估、调整”这六个相互联系的环节。一个循环从对生态系统结构、功能和所受威胁的系统认识开始，在此基础上确定管理目标，识别出主要的不确定性，然后提出若干备选的管理方案。规划阶段把这些方案转化为可以执行的行动计划。实施阶段就是把计划付诸实践的过程，本身也可以视为大规模的生态实验。

监测紧随其后，它对管理干预措施引发的生态系统反应进行系统记录，是这

个循环里获得反馈信息的重要部分。评估阶段依靠监测数据剖析管理行动实际成效同预期目的是否契合，考查当初规划阶段作出的科学假定是否成立。根据评价结果对原有的认识、目标、规划方案、监测体系进行新一轮的管理决策，开启新的循环。这样不断迭代的过程可以保证管理策略随着认知的加深、环境的改变而不断发展、不断完善，从而有效防止传统管理方式出现僵化和滞后的情况。

（二）面向不确定性的管理策略

生态系统本身具有复杂性、动态性，因此环境管理中必然存在不确定性，例如对于系统组分间关系了解不足所造成的结构不确定性、模型参数估计不准确所造成的参数不确定性、系统内部固有变异所引起的随机不确定性。适应性管理并不是试图消除这些不确定性，而是把不确定性当作管理过程的固有部分来正视、利用。它把管理干预当作一个受控的实验，主动去探索系统对于各种干预措施的反应，从而系统地减少认知上的不确定性。

该策略大体可以分为被动适应性管理、主动适应性管理两种类型。被动适应性管理是用当前认为的最优的管理方式作为初步的策略，然后通过监测评价来逐步修正。此法风险小，但学习效率低。主动适应性管理更具有探索性，它会主动去尝试各种各样的管理方案，甚至包括那些不是最优但可以提供宝贵信息的管理方案，其目的是为了尽可能地提高学习效率，从而更快地找到一条长期最优点的管理之路。

选择什么样的方法需要根据问题的性质，管理者对风险的承受程度以及潜在的学习价值来确定。无论用哪种方式，基本思想就是把决策制定看作一个动态学习的过程，在行动中学习、在学习中调整，从而使管理策略在面对未来不确定性变化的时候更具韧性、更有效。这种思维的转变，就是从找一个单一的、静态的“最佳”方案，变成建一个能不断学习、不断改进的灵活管理架构。

适应性管理策略对比表

特征类别	被动适应性管理	主动适应性管理
策略特点	以现有最优方案为基础，逐步修正	主动尝试多种方案，包括非最优方案
核心目的	优化现有方案，降低短期风险	最大化学习效率，快速探寻最优路径
学习效率	较低	较高
风险承受	相对较低	相对较高
应用场景	对当前管理方案有一定信心，变化较慢	存在高度不确定性，急需新知识
范例	基于历史数据调整水资源配额	设立实验样地测试不同入侵物种清除法

由上表可知,被动适应性管理同主动适应性管理在策略特点、学习效率、风险承受能力等各方面存在明显差别,适宜的管理场合也不相同。

(三) 学习与知识积累在管理中的作用

适应性管理把“在干中学”制度化,把学习和知识积累当作管理成功的关键要素。其最终目的不仅仅解决眼前的环境问题,而是对被管理的生态系统有更深入的认识,给未来的决策奠定更加科学的依据。管理循环每一次完成都会有知识的积累,这些积累是结构化的并且可以被验证。

知识的积累从多方面表现出来,它修正和完善有关生态系统运转机理的概念模型和数学模型,使预测更加准确。它还表现出各种管理措施的成本效益与生态效应,给方案选择赋予了丰富的经验证据。经过长时间的监测与评价,管理机构就会形成有关某一地区生态系统动态的宝贵数据库,而这个数据库本身就是一种战略性的知识财富。知识积累的过程也要建立起相应的知识管理体系,保证从监测数据到评估结论再到决策调整的每一个环节信息畅通,不造成经验的流失。有效的适应性管理体系可以把个人的经验转化为机构的知识,促使管理水平螺旋式上升,保证决策的科学性、前瞻性。

二、决策支持系统构建

要让适应性管理的理念切实落到实处,必定需要强有力的技工具作为支撑。决策支持系统依靠集成化的信息技术,给管理者提供数据分析、模型预测、方案评价等各方面的功能,成为科学决策和适应性循环的关键平台。

(一) 数据库、模型库、方法库集成

创建起一个功能完备的适应性管理决策支撑体系,它的技术关键之处在于数据库、模型库和方法库这“三库”的融合。这是一项把数据、知识和分析工具结合在一起的繁杂工作,目的在于给决策者赋予一站式的信息处理和分析环境。数据库就是系统的大脑,它会把来自环境监测、社会经济调查、遥感影像等各处的众多不同种类的数据存起来,并对其进行管理。它必须有快速检索、修改数据以及保证信息准确及时的能力。

模型库是系统的“大脑”,里面存储着用来模拟生态系统动态、预测环境变化、评价管理措施影响的各种模型,比如水文模型、生态位模型、土地利用变化模型、经济评价模型等等。模型库要具备灵活的调用和组合能力,让使用者在面

对具体问题的时候,可以随意挑选适宜的模型来开展分析工作。方法库就像系统的工具箱一样提供了数据处理、统计分析、多目标优化、不确定性分析等一系列的方法和算法。它可以帮用户从原始数据中找出有用的信息,解释清楚分析模型给出的结果,也能支撑起复杂决策的过程。

三库的有效集成对于决策支持系统成功来说起到决定性的作用。经由统一的平台把三者无缝对接,从而达成从数据输入,模型运行到结果分析的全部流程自动化,这极大地优化了决策分析的效率与科学性,并给予适应性管理迭代循环以十分有力的技术支撑。

(二) 多目标决策分析与情景模拟

环境管理决策中往往会有很多互相冲突的目标,比如生态保护、经济发展、社会公平等等。决策支持系统需要具有很强的多目标决策分析能力,从而帮助决策者做出平衡的选择。可以使用层次分析法、模糊综合评价法、多目标规划等方法,将各个利益相关方不同的偏好量化为评价标准,评价各个备选方案在各个目标下的表现,找到帕累托最优解集,给集体协商和科学决策提供透明的依据。

情景模拟属于对抗不确定性最主要的方式之一。与模型库联动产生出多种未来发展情景,不同的气候变化情景、政策干预情景、经济发展路径等等。在这些假设的情境中,系统可以模拟并评价各种管理措施的长期效果以及可能存在的风险,回答如果……那么……的问题。前瞻性分析可以让决策者了解系统对外部干扰、内部管理的敏感性,找到在各种未来可能性下都能稳健地表现出来的管理策略,即鲁棒性决策,与适应性管理应对不确定性的理念不谋而合。

(三) 人机交互与可视化界面

决策支持系统最后服务于管理者、科学家、公众等各方面的利益相关者,他们所处的专业领域及信息需求存在差异。所以友好的直观的人机交互界面、可视化界面是系统被广泛使用的前提。好的设计应当尽最大努力把复杂的过程简化,使用户能通过图形界面轻松地调用数据、运行模型、设置参数等等,降低系统使用的门槛。

可视化给沟通复杂的信息架起了桥梁。系统应该可以将大量的监测数据、抽象的模型结果、复杂的分析过程用地图、图表、动画等形式直观地表现出来。利用地理信息系统技术将生态服务空间分布、不同管理措施下土地利用格局变化等动态表现出来,可以大大提高信息冲击力和易读性。交互式图表可以由用户自行

去探索数据之间的关系，在其中发现隐藏的规律。强大的可视化能力可以迅速抓住问题的重点，也可以给公众参与和利益相关方沟通提供一个共同的语言基础，从而达到提高决策透明度和民主化的目的。

三、适应性管理的实践案例

理论的价值在于实践，适应性管理被应用于全球各种生态系统管理领域，从小尺度的城市环境、大规模的流域到具体的保护区，其主要思想和手段都具有很强的适用性。

（一）流域水资源适应性管理

流域是自然与社会经济活动高度交叉的复合生态系统，水资源管理中存在很多不确定性，受到气候变化造成降水格局的变化和极端天气事件的频繁发生的影响。适应性管理给流域水资源配置和生态流量保证提供了一个有效的框架。干旱区流域管理者经常面临农业灌溉、工业用水和下游湿地生态系统健康三者之间进行权衡的问题。

最初的管理方案是用历史平均径流数据来确定的固定的生态流量阈值。但在适应性管理的框架下，这就成了一个需要检验的假设。管理者会建立包含水文、水质、生物多样性等各方面内容的监测网络。在实施初期方案之后，监测数据表明，在枯水年份，固定的生态流量不能很好地维持关键物种的栖息地，造成生物多样性下降。管理部门根据评价结果来改变策略，用实时水文情势来调节生态流量。

新方案按照不同的丰枯水平年制定分级水量分配方案，再结合季节性生态需水规律进行精细化调度。经过若干次“开展、监测、调整”的循环之后，流域水资源利用效率得以改善，下游湿地生态系统的重要指标也呈逐步好转趋势。既解决具体问题，又获得流域生态水文响应知识，使以后水资源管理决策更科学、有预见性。

（二）自然保护区适应性管理

自然保护区是生物多样性保护的核心区域，但是也同样会受到内部干扰（物种入侵）以及外部压力（社区发展）的影响。适应性管理可以使得保护区管理者在资源有限的情况下，制定并且不断完善所采取的管理措施。对于受到外来植物入侵的森林保护区来说，主要的管理目标就是控制入侵物种的扩散，恢复原有植被。

管理初期对于清除方法（人工拔除、化学防治、火烧等），哪种最有效、成本效益比最高，还存在很大的不确定性。所以管理者就会采取主动适应性管理策略：

1. 设立实验样地：在保护区里选择一些代表性的入侵地块，然后将其随机分成不同的管理处理组（不同的清除方法、对照组）。

2. 系统干预与监测：严格依照方案开展干预工作，并对各个样地内入侵植物的密度、原生植物的恢复状况、土壤理化性质等各项指标实施长期的、标准的检测。

3. 模型化评价与学习，用监测数据建立统计模型，分析不同的处理措施效果、成本以及对非目标物种的影响。评估结果清楚地显示，在某种地形状况下，“人工拔除+生态恢复”模式在长期控制成效和生物多样性守护上最好。在人工拔除和生态恢复的基础上增加植被恢复、土壤改良措施，不仅能够持续发挥人工拔除对水芹的控制作用，还能改善生态环境，给乡土植物提供良好的生长环境，促进水芹天敌种类增加，最终达到水芹长期控制和生态环境多样性保护的目的。

4. 管理策略调整：按照这个结论，保护区对下一年度的管理计划进行调整，把资源集中到效果最好的方案上，在更大的范围内推广。同时管理工作也对新情况的出现加以监测。因此保护区有效地控制了入侵物种，积累了本区域的管理经验。

（三）城市生态空间适应性管理

城市是动态的、人为干扰大的生态系统，因此对于城市绿地、水体等生态空间的规划和管理方案应该具备较强的灵活性，才能更好地对应城市的发展和环境变化所带来的问题。适应性管理给城市绿色基础设施建设、养护提供了一条科学的方法。海绵城市建设中的雨水花园主要目的是削减径流污染，调蓄雨洪，改善微环境。

尽管在规划设计阶段可以用模型来估算雨水花园的效果，但它的实际运行效果受到当地降雨模式、土壤透水性、植物配置、维护情况等诸多因素的影响，存在很大的不确定性。适应性管理就是将不同的设计参数（如下渗层厚度、植物种类组合）看作一系列并行的管理实验。雨水花园建成后，在进出水口安装水量水质传感器、土壤湿度计等设备，对每一个雨水花园在不同降雨事件下表现进行连续监测。

管理者在对监测数据进行评价分析之后，可以确定出在当地条件下表现最好

的设计方案，然后将这些经验知识反馈给后续新建雨水花园的设计规范。对于已有的设施，如果监测表明某些植物在强降雨后状况不好或者维护费用高，管理部门就可以及时更换或者改变维护的方法。这种靠证据的连续改良进程，保证了城市生态空间功能持续改善，更好地应付气候变化的考验，达成城市生态系统韧性动态加强的目的。

第八章 案例分析与实践应用

第一节 流域生态系统评价案例

一、案例背景与评价目标

案例背景、评价目标的明确界定,是进行一切评价工作的前提和基础。它决定评价的范围、深度和评价结果是否有现实指导意义,保证评价工作能够准确地回应流域开发引起的环境问题。

(一) 某大型流域开发概况

本例选取了我国南方亚热带湿润气候区一个大型流域作为研究区,流域面积约十万平方公里,水系发达、支流众多,是该区域重要的水源地、农业主产区和生物多样性热点地区。近二十年来,伴随着区域经济的快速发展,流域也经历了高强度的开发,水利水电工程梯级开发、航道疏浚与港口建设、沿岸大规模的工业园区和城镇化建设。上游地区修建了大量的水库,主要用来发电、防洪;中游地区以灌溉农业、水产养殖、航运为主,城镇群落密集;下游地区形成重化工业为主的沿江产业带,人口和经济活动高度集中。

这些开发活动对于促进社会经济发展、保证能源供应、提高航运能力等都起到了重要的作用,但同时又对流域原有的自然生态格局和水文情势造成了深远的影响。多目标、跨区域开发主体及其活动互相交织,使流域的生态环境问题变得十分复杂和有关联,传统的针对单一工程的环境影响评价已经不能全面地反映其整体的、长远的影响,需要从生态系统的宏观角度进行系统的审视。

(二) 生态系统主要问题与挑战

高强度流域开发造成了连锁的生态环境问题。水库群兴建以后,天然径流过程被改变,下游水文情势趋向均一化,河漫滩湿地的水文补给被削弱,水生生物的产卵节律受到影响,洄游性鱼类的生存受到严重影响。河流连续性遭到破坏,水坝成为物质、能量和物种流动的阻碍物,使上下游生态系统被人为分开,生物廊道功能受到严重影响。

水质污染问题也十分严重，中游地区农业面源污染，即化肥、农药流失以及大规模水产养殖所造成的氮、磷等营养物质进入河水中，加重了水体富营养化。下游沿岸工业园区排放的工业废水，尽管经过了一定的处理，但是部分特征污染物和重金属的长期积累效应不能忽略，会对水生生物和底栖动物造成潜在的生态毒理危害。同时航道疏浚、挖沙等活动扰动河床底质，使水体悬浮物浓度增大，破坏了底栖生物栖息地，进一步加重了水生态系统退化。

沿岸土地利用发生剧烈变化，大量滩涂、湿地被开垦成建设用地或者农田，造成滨水生态缓冲带的消失、生境的破碎化、单一化。不但会削弱生态系统的自然净化能力，而且会使珍稀鸟类、两栖爬行动物的种群数量大幅减少。这些问题是叠加的，一起给流域生态系统结构的完整性、功能的稳定性造成了严重的威胁，急需科学评价并加以应对。

（三）评价目标与工作范围

根据上述背景和挑战，本次环境影响评价的目的为：以生态系统的整体性为出发点，科学地评价过去二十年开发活动对流域造成的累积性生态影响，诊断流域生态系统的健康状况，找出主要的生态风险源、敏感区，预测在目前的发展模式下流域生态变化的趋势。在此基础上，提出科学可行的适应性管理措施、生态修复方案，给流域今后可持续发展、生态保护提供科学依据，促进经济、生态保护协同发展。

评价工作范围在空间上涉及整个流域，即从上游的水源涵养区到下游的河口三角洲，重点是水库库区、主要支流汇入口、工业园区和城镇密集区、自然保护区、重要湿地生态系统等。本次评价在时间尺度上对现状年的生态状况进行分析的同时，也查阅了开发活动开始前的历史基线数据，对未来不同的发展情景进行了前瞻性预测。评价内容主要针对生态系统的主要要素，即水文情势、水环境质量、水生和陆生生物多样性、生态系统结构和服务功能等几个方面展开，力求从各个方面、各个角度来揭示流域开发的生态效应。

二、评价方法与技术路线

本节主要说明为了达到评价目标而建立的综合技术框架。该框架把多尺度、多学科的分析方法融合起来，依靠系统化技术路线来保证评价过程的科学性、系统性、可操作性，给复杂流域生态问题的剖析给予了方法论支撑。

（一）流域生态系统健康评价

流域生态系统健康评价是本次工作的基础，其主要目的是对流域生态系统进行一个综合性的科学评判。评价使用的是国际上普遍采用的活力、组织力、恢复力概念模型框架，再根据该流域特点进行了本地化的建构。该模型较好地反映了生态系统的代谢能力、结构复杂性、抵抗干扰后恢复的能力。

在具体操作中，首先构建了一套多层次的指标体系。

1. 活力层，主要是从流域的初级生产力角度出发，选取了单位面积植被净初级生产力、水体叶绿素 a 浓度等。单位面积植被净初级生产力数据主要采用遥感反演法获取，叶绿素 a 浓度结合遥感监测和水质常规监测站点实测数据。

2. 组织力层：主要是评价生态系统的结构时空异质性以及连通性。选择景观格局指数（斑块密度、香农多样性指数、蔓延度指数）、河流连通性指数作为评价指标。景观格局指数是用多期遥感影像解译出的土地利用数据来计算的，河流连通性指数主要考虑的是水利枢纽对河流纵向连通的阻隔程度。

3. 恢复力层，评价生态系统对外界各种力量的响应和恢复能力。用土壤保持量、水域面积保有率、生物多样性指数作为表征指标。生物多样性指数将重点保护物种的观测数据、历史调查资料结合在一起，用生境质量模型（InVEST 模型的相关模块）的评价结果。

对专家打分法、层次分析法所确定的各个指标权重进行标准化，得到各个评价单元及整个流域生态系统健康综合指数。评价结果以空间可视化形式呈现出来，直接体现出流域生态系统健康等级及其空间分异规律，为发现有问题区域提供直接依据。

（二）生态系统服务功能评估

生态系统服务是自然生态系统和人类福祉之间的桥梁，对它进行量化评估可以反映开发活动给人们带来的潜在影响。本次评价重点选取了和流域特征有密切联系的水源涵养、水质净化、洪水调蓄、生物多样性维持这四个流域关键的服务功能进行评价。评价过程主要是用模型模拟和空间分析相结合的方法。因为具有较强的空间表现力，需要的输入数据较少，所以用 InVEST 模型作为主要工具。

从具体的角度看，InVEST 模型的“Water Yield”模块用当地的降水、蒸散发、土壤特性、土地利用数据来估算整个流域的水源涵养量及其空间分布。对于水质净化服务，用“Nutrient Delivery Ratio”模块模拟氮、磷等主要污染物从源头到

河口的输送、滞留、净化过程，从而量算生态系统削减面源污染的贡献。洪水调蓄功能评价把水文模型径流模拟结果同土地利用数据融合起来，探究不同生态系统类型（森林、湿地等）削减洪峰流量的作用。生物多样性维持服务评估是在前面的健康评价的基础上，用生境质量模块来分析城镇扩张、道路建设等威胁因子对生境的综合影响。通过比较不同时期（开发前、开发后等）的评价结果来清楚地反映各种服务功能的时空演变趋势。

（三）累积影响与风险评价

流域开发中有许多单个项目，单个项目的影响会随时间、空间推移产生累加效应，累加效应往往大于单个项目影响的总和。本次评价中设置了累积影响评价环节，主要研究水文情势改变、生境破碎化、污染物负荷这三个方面累积影响。评价技术路线是情景分析+空间叠置+模型模拟。用不同的开发情景（基准情景、高强度开发情景、生态优先情景）来模拟各种情况下各项累积影响程度及范围。用水文模型来模拟梯级水库联合调度对下游水文过程的累积效应。

生态风险评价是在累积影响分析的基础上，识别并评价生态灾害或者不利后果发生可能性及严重程度。评价框架按照风险源识别、暴露和危害性分析、风险表征这条经典路径。首先对流域内主要的风险源进行梳理，工程风险有水库垮坝等，污染事故风险有危险化学品泄漏等，生态系统退化风险有生境丧失、水质偏差引起的生物种群崩溃等。

然后利用暴露分析确定出风险受体（珍稀物种栖息地、饮用水水源地保护区、重要湿地等）所受风险源影响的空间范围和程度。危害性分析就是评估风险源一旦发生会对受体造成的危害程度，这部分工作一般需要借助生态毒理学数据或者历史灾害资料。

最后利用建立的风险矩阵或者计算风险指数（ $\text{风险} = \text{可能性} \times \text{后果}$ ）对各个区域、各类生态风险进行分级排序。将评价结果用生态风险地图的形式呈现出来，突出流域内生态风险较高的“热点”区域，为制定优先的风险防范和应急管理措施提供准确的指引。综合性评价法可以克服单个项目评价的局限性，从宏观上把握整个流域生态安全状况。

三、评价结果与管理建议

根据前面所做的系统评价，本节给出核心的评价结论，在此基础上提出有针

对性的可操作性流域适应性管理对策。目的是把科学的诊断结果转变为实际的管理措施，引领流域走上生态、经济协调发展的道路。

（一）流域生态系统健康等级与空间分布

综合评价结果说明，该流域生态系统健康状况大体上属于中等偏下水平，而且空间上差异很大。健康等级较高的区域主要为上游水源涵养林区、支流源头区域，人类活动干扰少、植被覆盖度高、景观破碎化程度低、生态系统结构完整，健康指数基本都在 0.7 以上，属于健康或亚健康状态。这些区域对于保持整个流域生态系统的稳定起着举足轻重的作用，是必不可少的基础。

流域生态系统健康等级划分与特征表

健康等级	健康指数范围	主要区域	主要特征
健康 / 亚健康	≥ 0.7	上游水源涵养林区、支流源头区域	人类活动干扰小、植被覆盖率高、景观破碎化程度低、生态系统结构完整
预警状态	0.4 - 0.6	中游广大农业区、城镇密集区	土地开垦、建设扩张、自然植被稀疏、景观破碎化严重、河流廊道连续性差、组织力低
不健康	< 0.4	下游沿江工业带、河口	点源与面源污染严重、水质差、生物种类急剧减少、活力和恢复力严重破坏

流域生态系统健康等级划分和特征表表明，中下游生态系统的健康状况都较差。中游广大农业区、城镇密集区因为长期土地开垦、建设扩张，自然植被稀少，景观格局高度破碎化，河流廊道连续性差，生态系统组织力低，健康指数多在 0.4 到 0.6 之间，处于预警状态。最严重的是下游沿江工业带和河口，点源与面源污染同时存在，多年水质为劣 V 类，生物种类急剧减少，生态系统的活力、恢复力被严重破坏，健康指数低于 0.4，属于不健康。从上游到下游的健康状况梯度下降格局，很好地表现出了人类活动强度和生态系统退化程度的正相关关系。

（二）主要生态服务功能变化与驱动力

伴随着过去 20 年流域生态系统的健康状况改变，流域生态系统所提供的关键生态服务功能也会出现权衡或者协同变化。水源涵养功能整体呈下降趋势，中游地区更为明显，大面积林地、草地被改造成建设用地、耕地，地表径流系数增大，土壤蓄水能力降低。经过 InVEST 模型模拟得到整个流域年均水源涵养量比之前减少了大约 15%。水质净化功能严重退化，主要是中下游。虽然上游的森林

生态系统仍然在起着很重要的营养盐拦截作用，但是其净化能力已经不能抵消中下游巨大的污染负荷，从而使得整个流域的氮磷输出通量大幅度增加，成为水体富营养化的主要驱动因素。

洪水调蓄功能有复杂的区域变化。上游大型水库的修建在一定程度上提高了区域暴雨洪水的拦蓄能力，对下游重点城市起到一定的保护作用。但是中下游大量的湖泊、洼地等天然调蓄空间被围垦占用，整个流域对于极端降雨事件的自然弹性大大降低。生物多样性维持功能的衰退，属于所有服务功能当中最严重的一种。主要原因是水坝阻挡了洄游通道、滨水湿地生境消失、水污染对水生生物毒害。服务功能的改变清楚地显示出来，流域开发在获得经济利益的同时，却付出了巨大的生态系统服务价值的代价，这样的发展模式不能持续。

（三）流域适应性管理对策建议

根据评价结果，提出以下流域生态系统退化改善措施及建议。适应性管理就是承认生态系统管理的复杂性、不确定性，在实践中“边做边学”，并建立持续的监测、评价、反馈调整机制。

1. 实行生态系统功能分区差异化的管理。根据评价识别出来的生态系统健康和服务功能空间格局，将全流域划分为生态保护核心区、生态修复优先区、优化发展协调区。对于上游水源涵养林等核心区实行最严格的保护措施，禁止任何开发建设行为。对中下游生态退化严重的区域要作为生态修复的重点来对待，实施退耕还湿、滨水缓冲带重构、污染源综合治理等一系列工作。对经济发达地区重点推进产业转型升级和绿色发展，严格环境准入，优化空间布局。

2. 全流域水资源、水环境统一调度管理。创建跨部门、跨区域的流域管理协调机构，协调防洪、供水、发电、航运、生态用水等各种用水需求。尤其要开展水库群的生态化联合调度，通过人工生态流量和模拟自然洪峰来修复被改变的水文情势，保证下游河道的基本生态需水，为水生生物的繁殖和河漫滩湿地的恢复创造条件。建立流域总量为基础的污染物排放总量控制制度，把减排任务分解到各个行政单位并严格考核。

3. 建立流域生态廊道和生物多样性保护一体化网络。对于生境破碎化、河流连通性降低的问题，需要从系统规划的角度建立生态廊道。在陆地上把破碎的森林斑块和自然保护区用起来保护陆生动物的迁徙。水域方面，对已建水坝全面开展修建鱼类洄游通道（鱼道、升鱼机）等补救工程，恢复河流纵向连通性。要创

建全流域的长久生态监测网络，针对关键物种，重要生境以及主要生态指标展开连续监测，评价管理举措的成效，依照监测结果随时对管理方案加以调整和改善。

第二节 城市生态空间评价实践

一、案例城市生态空间概况

滨海市的生态空间是城市发展的根基，其变化过程以及现状形态清楚地体现了人与自然环境间的关系。全面了解滨海市的生态情况，是科学评价和有效规划的基础，也是找出主要生态问题、确定保护重点的前提。

（一）城市化进程与生态空间演变

改革开放之后，滨海市进入了前所未有的城市化、工业化高速发展时期。近四十年来，城市建成区面积扩大了近十倍，人口数量急剧增加。此过程给原有的自然和半自然生态空间造成了严重的破坏。大片农田、滩涂湿地、山麓林地被开垦为工业园区、住宅区、交通设施，生态用地面积急剧减少。

伴随着总量的减少而发生的是生态空间的结构性退化。连续的农田林网被城市建筑和道路网络无情地割裂、侵占，形成一个又一个小小的、孤立的、分散的生态斑块。两岸硬质化开发造成河流廊道功能萎缩，围垦、污染造成滨海湿地面积减少，生态功能下降。这不是简单的空间转移，是对生态系统完整性与连续性的破坏，削弱了区域生态系统的自我调节能力，也削弱了它对城市发展的支撑能力。生态空间变化的轨迹清晰地表现出城市扩张和生态退缩之间的斗争，也为以后的评价和修复工作指明了问题的根源。

（二）主要生态空间类型与格局

滨海市生态空间类型较多，山海城田交错。主要的生态空间类型及功能见滨海市主要生态空间类型表。

滨海市主要生态空间类型表

生态空间类型	典型分布区域	主要生态功能
中央山地森林	城市北部	区域生态源地，生物多样性宝库
滨江河流水系	贯穿城市东西	城市主要生态廊道，水源涵养
滩涂湿地和红树林	东部沿海	重要海岸防护屏障，候鸟栖息地
城市公园、绿地、湖泊	城市内部零星分布	日常休憩，生态体验，改善人居环境

从空间格局来说，滨海市的生态空间为“一核、一脉、多节点”的组团式结构。“一心”指北部中央山体公园，它是城市的核心生态绿肺，起到重要的生态源地作用。一脉是指滨江河及其支流形成的蓝色廊道网络，将城市内外的生态功能区连结起来。多点即城区内大小不一、分布零散的公园绿地，它们像生态踏脚石一样对维持城市内部生物流动、改善人居环境质量起着重要的作用。宏观上看有框架，但是微观层面连接性弱，部分廊道存在断点，生态网络整体效能有待提高。

（三）生态空间面临的主要压力

目前，滨海市的生态空间受到城市化、工业化、人口增加等种种压力，生态环境的健康与稳定处于危机之中。城市建设用地不断扩大仍然是最大的威胁。对规划控制不严的地区，建设开发不断蚕食山体、林地和基本农田边缘地带，生态斑块越缩越小、越分越碎，严重威胁区域生态安全底线。日积月累的侵蚀效应正在慢慢削弱生态系统的服务功能。

环境污染成为又一压力源，工业企业的废水废气、农业面源污染、城市生活污水不断影响着滨江河流水质，部分河段水体发黑发臭，水生生物种类变少。沿海地区受到海水养殖污染和陆源污染物排海的双重影响，造成近岸海域水体富营养化，危及红树林等珍贵海洋生态系统的生存。土壤污染也得提一提，搬迁工业遗留下来的地块，重金属或者有机污染物超标的情况时有发生，这是城市生态系统里的“疮疤”。

生物多样性丧失的风险正在加大。外来物种入侵，互花米草在滨海湿地的蔓延，占据了本地物种的生存空间，破坏了湿地生态系统结构和功能。由于栖息地被破坏、破碎化，许多本地物种的数量减少，区域物种的遗传多样性受到威胁。除高强度城市化开发活动外，夜间灯光、噪声等各种人类活动也对动物的觅食、繁殖等造成很大影响。

居民需求和供给的矛盾也越来越明显，居民对生态空间的需求和供给。随着生活水平的提高，市民对高质量的休闲空间、干净的环境、美丽的景观的需求也越来越大。城市中心区的公园绿地数量少、分布不均匀，人均公园绿地面积远低于标准，不能满足高密度人口的日常需要。一些生态空间虽然面积大，但是可达性差、配套设施不全，造成其文化服务、游憩功能不能得到充分发挥，从而导致生态福祉供给与居民需求相脱节。

二、城市生态空间评价体系

为了科学地诊断滨海市生态空间的生态环境状况，为未来发展制定出规划，就必须创建起一个多方面、系统的分析评定系统。该体系不再只考虑环境质量，而是把生态系统结构、功能和服务融合起来，对生态空间现状、潜力和风险进行全方位的评价。

（一）生态空间质量评价指标

生态空间质量是评价的基础，直接体现生态系统本身的好坏状况。本评价体系从生物物理、环境化学、景观格局三方面来建立综合指标体系，目的是要全方位地刻画出生态空间的品质。

从生物物理的角度来看主要研究植被生长状况和生物多样性水平。利用归一化植被指数、叶面积指数等遥感指标，大致了解植被的覆盖情况和生长活力。野外样方调查能了解主要区域物种丰富度指数、主要物种分布、种群状况，直接体现出生态系统的环境质量、内在活力。

在环境化学层面，则聚焦于影响生态系统健康的关键环境因子。这部分指标包括：

1. 水环境质量，通过化学需氧量、氨氮、总磷等水质指标来反映河流、湖泊等地表水体污染程度。

2. 大气环境质量：监测空气质量指数、PM_{2.5}、O₃ 等污染物浓度，评价大气环境对植被和居民健康的危害。

3. 土壤环境质量：重点区域的土壤采样分析（工业遗留地、农田），重金属、有机污染物的检测，土壤健康风险的评估。这些指标一起构成生态空间环境基底化学体检的报告，是判断其能否支撑健康生态过程的基础。

（二）生态服务功能与居民福祉评价

生态空间本身有内在价值，但更重要的是它给人类社会提供了多样化的生态系统服务，直接关系到居民的福祉。评价体系把生态服务功能评价作为主要部分，着重对调节服务、支持服务和文化服务进行量化。采用 InVEST 模型等手段，对水源涵养、土壤保持、碳储存、空气净化等主要调节服务的物质量和价值量进行评估，找出提供主要生态服务的区域。如模拟降雨径流过程，准确得出北部山地森林削减洪峰、补给地下水的贡献。

评价把生态服务同居民福祉联系起来。从公园绿地的空间分布、面积、可达性、服务人口等出发来评价公园绿地在休憩娱乐、体育健身、环境教育等方面的文化服务公平性、充足性。采用问卷调查法、社区访谈法调查居民对生态空间实际利用频率、满意度、主观感知价值，把居民实际需求和感受纳入到评价中来。以人的视角出发，把评估结果由冷冰冰的生态数据变成一份与民生福祉有关的报告，给城市规划改善给予直接的社会需求引导。

（三）生态安全格局与韧性评价

面对环境变化越来越复杂、城市风险越来越多的状况，生态空间安全格局的韧性就显得特别重要。评估生态系统结构完整性的指标，抵抗干扰的能力和维持自身能力的指标。依照“源地、廊道、节点”的理论模型，用最小累积阻力模型找出城市生态网络中重要的要素。大面积、高品质的自然保护区和森林公园被划作生态源地，属于生物多样性保护的重点。连接这些源地的河流和绿带被看作是生态廊道，它们是否连贯、多宽决定了物种能否迁徙、能量能否流动。

在此基础上，对生态安全格局的稳健性开展评价。利用情景模拟分析在新增建设用地、交通干线建设等城市发展压力下，生态网络的连通性受到怎样的影响，从而找出网络中脆弱的生态夹点或断裂点。这都是生态保护修复的重点区域。

韧性评价主要考察生态系统对于极端事件的抵抗力。通过对城市绿地、湿地在暴雨期间的雨水调蓄能力进行分析，评价城市绿地、湿地在防治城市内涝中的作用。通过对滨海红树林、防护林带在台风、风暴潮中消浪、固堤作用进行评估来得出其对于海岸带的保护效益。将生态空间看作城市的绿色基础设施，采用面向风险的方法进行评价，可以给城市防灾减灾规划和气候变化适应策略提供重要的科学依据，有助于创建出更加弹性、更加安全的城市生态系统。

三、评价结果与规划应用

评价的最终目的就是指导实践，把复杂的评价结果转化成清晰的分区、明确的规划指引和具体的控制措施，是连接科学研究和城市治理的桥梁，也是实现生态空间有效保护和合理利用的根本途径。

（一）城市生态空间质量分级

根据多维度评估指标的标准化得分，用 GIS 的空间叠加分析技术把滨海市的生态空间质量分成优、良、中、差四个等级，生成了生态空间质量分布图。经过评估发现，滨海市生态空间质量存在明显的空间分异现象。

优级区主要是北部中央山地森林和东部沿海未受严重干扰的自然湿地，植被覆盖率高、生物多样性丰富、环境质量好，是城市生态安全的根基。良级区域主要是城市大型公园、水库周边和部分生态林地，是城市生态系统的重要组成。大部分城市建成区的零散绿地、部分河段为中等水平，受到一定程度的人为干扰。差级区域主要是工业污染严重的河岸硬质化地段，建筑垃圾侵占的城郊边缘区域，这些地方的生态功能退化严重，是生态修复的重点和难点。分级图像城市管理者手中的一份生态健康晴雨表，为差异化生态空间管控、资源投入策略提供科学依据。

（二）生态廊道与生态节点识别

根据生态安全格局分析结果，找到了滨海市生态网络中的关键结构要素。滨江河主流以及两岸的滨水绿带一起形成全城一级生态廊道，是保证区域生态连通性的主动脉。连接北部山体和滨江河的次级河流、城市主干道两边的防护绿带一起构成二级生态廊道。廊道一起形成城市生物流动的脉络。

评估中找出许多重要的生态节点。北部中央山体公园、东部河口湿地公园被划为特级生态源地，是区域生物多样性最主要的扩散源。城区内的人民公园、东湖公园等大型综合性公园被划为一类生态节点，是城市内部生物主要的栖息地和“跳板”。分析当中也显示出网络的脆弱之处，许多廊道被城市快速路或者高密度建筑区截断，形成物种迁徙的生态断裂点。明确廊道、节点和断裂点的位置为构建完整畅通的城市生态网络、做精准的生态修复工程指明了具体方向。

（三）城市规划与生态空间管控建议

就滨海市未来城市发展、生态空间管控提出了一系列可行的建议，以使生态

优先的理念深入城市发展的决策之中。

1. 创建刚性的生态保护红线体系。将被评为优级的生态空间、核心生态源地、一级生态廊道全部划入生态保护红线内,采取最严格的管控措施,禁止开发建设,保证城市核心生态功能区的绝对安全。

2. 实行精准的生态修复和提升工程。对于评估为“差”级的污染河段和退化土地,编制专项生态修复方案,底泥清淤、水生植被恢复、土壤改良等。对已经识别出的生态断裂点,可以修建生态天桥、涵洞或者楔形绿地等来重新连接被分割的生态廊道,改善网络连通性。

3. 改善城市蓝绿空间的布局。城市总体规划修编中要突出“一心、一脉、多点”的生态格局,新区开发、旧城改造中必须强制性保留生态廊道及小型生态绿地,积极推进口袋公园、社区公园建设,提升公园绿地服务的公平性、可达性,实现 300 米见绿、500 米见园的目标。

4. 创建以生态系统服务为基础的补偿和激励机制。探索建立流域上下游、生态保护区和受益区之间横向的生态补偿机制,给那些由于保护生态空间而导致发展受限的地方给予经济补偿。同时引导社会资本参与生态保护和修复项目,用政策激励的方式,把生态空间保护和管理模式由政府单一投入变为全社会共同参与、共同发展的模式,保证生态空间保护的持久性、可持续性。

第三节 重大工程生态影响评价

一、重大工程案例简介

要真正认识重大工程的生态影响,就必须从具体的工程实例出发,对其工程特性、区域生态背景以及评价工作主要要素进行分析。可以给影响识别、预测以及保护措施的提出提供实际的参考,使整个评价过程更具有针对性和可操作性。

(一) 交通、水利、能源等工程概况

重大工程指投资巨大、规模宏大、社会经济意义重大的建设项目,主要分布在交通、水利、能源等领域。高速公路、铁路、大型桥梁等交通工程由于其本身线性的延伸特征,经过不同的生态系统、栖息地,因此很容易导致生境碎片化、阻隔化。一条高速公路,只要它穿越山岭,跨越山谷,就会把一片完整的森林生

态系统切成两半，破坏沿路的动物迁徙通道。

水利工程，大型水库大坝、跨流域调水工程等对水文情势的改变非常明显。此类工程虽然可以带来防洪、供水、清洁能源等益处，但是也会显著改变河流流速、水位、水温等水环境要素，从而影响水生生物的生存环境，特别是对洄游鱼类的繁殖影响很大。能源工程有水电站、火电站、核电站以及大规模的风电、光伏电站等。这些工程在建设时期会造成大范围的土地扰动和植被破坏，运营时期又会产生温排水、电磁辐射、污染物排放等影响，给局部微气候、生物群落带来长久的后果。

这些重大工程的共同特点是生态影响具有复合性、长期性。建设期间，土地占用、土石方开挖、施工噪声等属于直接的短期影响。而运营之后，工程本身的存在就会不断改变区域的生态格局和过程，产生间接的、累积的生态效应。因此，在进行生态影响评价的时候，一定要认识到不同类型的工程对于生态系统所特有的作用机制，这样才能准确地找出重要的影响环节。

（二）工程所在区域生态系统特征

对工程所在区域生态系统特征进行详细调查、评估，即生态基线调查，是生态影响评价的基础性工作。其主要任务是摸清评价范围内生态本底的情况，为以后影响预测和保护措施的制定提供科学依据。调查内容主要是区域内生态系统的类型、结构、功能以及主要的生态敏感目标。

首先要识别出区域内生态系统分布图景，即森林、草地、湿地、农田、河流等生态系统类型、面积及空间分布。在此基础上，还要对各个生态系统结构进行详细的调查，建立生物物种名录，重点是珍稀濒危、特有和受保护的动植物物种的种群数量、分布和生境。植被盖度、生物量、群落结构等也是调查内容。这些数据一般通过遥感影像解译结合样方、样线等地面调查的方法得到。

生态系统功能评价同样十分重要，可以体现生态系统给人类提供的服务价值。主要有水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性保护、气候调节等服务功能。评价这些功能发生改变的程度，可以更好地体现工程建设可能造成的生态损失。同时区域内的水土流失、土地沙化、石漠化、生物入侵等突出生态问题也不能忽视，因为工程建设会加重已经存在的问题。准确把握这些生态系统的特点，才能在以后的评价中科学地判断出工程的影响性质和程度。

（三）评价等级与范围

确定评价等级和范围是生态影响评价工作的纲领性工作，它直接影响评价工作的深度、广度和资源投入。生态影响评价等级划分标准如下表所示，它规定根据工程占用面积大小、影响区生态敏感程度这两个指标把评价工作等级分为一级、二级、三级。

生态影响评价等级划分标准

评价等级	主要考虑因素	评价深度要求
一级评价	涉及特殊生态敏感区且占地规模大	详细现场调查，深入定量分析
二级评价	涉及一般生态敏感区或占地规模较大	较详细调查分析，部分定量
三级评价	不涉及敏感区且占地规模小	简要调查分析，定性描述

生态敏感性为第一标准，评价区内存在自然保护区、饮用水水源保护区等特殊生态敏感区或者森林公园、地质公园等重要生态敏感区的，该区域评价等级应提升。工程占地规模也是一个很重要的因素，永久占地、临时占地总面积越大，潜在的生态影响范围就越大，评价等级也就越高。对于涉及特殊生态敏感区，工程占地很大的项目一般都要进行一级评价，需要做详细的现场调查、定量分析。

评价范围的确定要保证包含全部直接、间接以及累积影响的区域。评价范围一般不应小于工程所在地加上周围一定缓冲区域之和。对公路、铁路等线性工程评价时必须考虑到其廊道对两侧生态系统的阻隔、切割影响。水利工程的评价范围除了水库淹没区、工程占地区之外，还应该包括受水文情势变化影响的下游河段。

确定评价范围和等级是科学决策的过程，需要评价人员在项目初步分析阶段就对工程特性、区域生态特征有清晰的认识。合理的等级和范围的确定是后续工作能够顺利开展的前提，可以防止由于评价过深造成的浪费人力、财力等资源，也可以防止由于范围过窄、等级过低而遗漏重要的生态影响，从而保证评价结论的正确性。

二、生态影响识别与预测

工程概况和评价范围确定之后，生态影响评价就进入核心阶段，即对工程可能造成的一切生态影响进行系统的识别和科学的预测。该过程目的在于找出工程活动同生态系统间的相互作用关系，进而为采取有效的缓解措施给予决策参照。

（一）工程对生态系统结构的影响

重大工程建设对生态系统结构的影响直接而显著，主要体现在对生态系统组成和空间格局的改变上。

1. 栖息地丧失和破碎化。工程永久占地、临时占地如路基、厂房、水库淹没区、取土场等都会直接侵占和破坏原来的自然植被，造成野生动植物栖息地的永久性丧失。线性工程，比如公路、铁路、输水管道这些，就好比利刃一样把原本连贯的生态系统割开，形成廊道阻隔，造成生境破碎化。破碎化会使动物的活动范围缩小，阻碍基因交流，增大边缘效应，削弱小斑块抵御外界干扰的能力，造成某些物种的局部灭绝。

2. 生物多样性减少。栖息地的消失和破碎化直接造成生物多样性的减少。工程建设和运营过程中产生的噪声、光污染、水体污染等，会驱赶或者毒害敏感物种，从而改变区域内的物种组成。施工队伍的进入和交通运输的增加，也有可能无意间带进外来入侵物种。外来物种一旦可以适应并扩展其领地，就会与本地种争夺资源，打破原来的食物链结构，使当地生物多样性受到更多的危害。对于珍稀濒危物种的影响同样不能忽视，因为珍稀濒危物种的生存条件本来就比较苛刻，生境哪怕发生一点变化，都可能会对它们的种群造成致命的打击。

（二）工程对生态系统功能的影响

工程建设一方面会改变生态系统的物理结构，另一方面也会对生态过程和服务功能产生影响。生态系统功能是人类赖以生存和发展的基础，一旦遭到破坏，就会对区域生态安全造成影响。其中水源涵养、水土保持、物质循环、能量流动等受到影响最大。

工程建设期间的大面积开挖，植被的清除，地表被破坏，土壤裸露。降雨或者强风的时候，很容易出现严重的水土流失和土壤风蚀。流失的土壤进入水体后，会造成河流水质污染、河流含沙量增大，严重时还会造成淤积河道、水库。森林、湿地等水源涵养能力强的生态系统面积减少会直接降低区域截留、入渗、蓄积降水的能力，改变地表径流和地下水补给规律，造成旱季径流量减少、雨季洪峰增大，从而加重水旱灾害。

工程活动会破坏生态系统中能量流动、物质循环。大面积植被被破坏，区域光合作用总量减少，即改变了生态系统初级生产力这个能量输入基础。水库形成以后会改变水体的热力学结构，影响水温分层，从而干扰水生生态系统内部的物

质循环过程。污染物排放后会通过食物链进行富集，生物放大作用使顶级捕食者受到严重危害，破坏生态系统正常的能量流动路径。

（三）累积影响与生态风险预测

重大工程的生态影响不是孤立存在的，它所造成的长期、间接、叠加的累积效应，一般要比短期的直接影响要深远、复杂得多。生态风险预测就是在不确定性中，对未来可能会出现的生态损害及其发生的概率进行评估，是主动避免生态灾难的重要手段。

累积影响在时间和空间上都有体现。时间积累指的就是随着时间推移影响效应越来越明显，如同一条河流上的多个水电站梯级开发以后，鱼类洄游受到阻隔的作用逐级叠加，最终造成物种消失。空间累积就是多个不同的工程在同一个区域产生的影响叠加起来。一个地区如果同时存在交通建设、工业区开发、矿产开采，那么这些项目对空气、水体、土壤的影响就会相互影响，产生大于各个单个项目影响之和的“协同效应”。

生态风险预测是在影响识别的基础上，进一步分析不利影响发生的可能性和严重性。需要建立压力-响应模型，分析工程活动（压力）引起生态系统状态（响应）变化。预测内容有物种灭绝风险、关键生态系统功能丧失风险、生态灾害（滑坡、泥石流等）发生概率增加的风险等。风险预测的结果一般是用概率或者风险图谱来表示，可以清楚地显示出高风险区和主要的风险源，给管理者一个预警，使他们能将有限的保护资源投入到最需要的地方，从而制定出更具前瞻性风险规避和应急管理预案。

三、生态保护与恢复措施

根据对生态影响的识别和预测，制定出全面、可行、有效的生态保护和恢复措施，才是生态影响评价的落脚点。这些措施渗透到工程的设计、施工以及运营的全部过程之中，其目的就在于尽可能地防止或者减少不利影响，并且对不可避免的损失予以补偿和重建。

（一）避让、减缓、补偿、重建措施

生态保护措施分避让、减缓、补偿和重建这样四个层次来实施，体现的是一个从源头预防到最后治理的逻辑顺序。

1. 避让是最优先、最有效的保护方式。工程规划和选址时要通过改善线路或

者改善场址布局,主动避开生态保护红线、自然保护区、重要物种栖息地等生态敏感区。重新规划道路路线绕行一片原始森林,或者改变水库坝址以避开鱼类产卵场被淹没。避让是从源头上杜绝了生态影响的发生。

2. 减缓是指当避让不能完全实现的时候,采取一系列的工程、管理措施来减小、降低不利影响。施工期可设置沉沙池、挡土墙、表土剥离苫盖等措施控制水土流失;选择合理的施工时段、低噪声施工机械减少对野生动物的干扰。运营期可以为线性工程建设野生动物通道(涵洞、立交桥等),保证生态廊道的连通性;水利工程可以采取生态调度、分层取水等办法,模仿天然水文过程,保证下游河道的生态需水。

3. 补偿与重建,对不可避免、不能减缓的生态损失要予以补偿。生态补偿的核心就是对受损的生态系统服务功能进行等价或者增补。补偿方法有异地修复栖息地、建设人工鱼巢、放流增殖、交纳生态补偿费等。生态重建就是对工程影响区内的被破坏的生态系统进行人工辅助恢复,例如在临时占地、废弃矿山等地开展植被恢复、土壤改良、景观重塑,力求重建一个结构合理、功能稳定的新生生态系统。

(二) 生态监测与监理计划

生态监测与监理计划是对各项生态保护措施落实情况的重要检查环节,也是检验各项生态保护措施是否有效的环节。它横跨工程施工及运行期间,是种动态的反馈调节进程。

生态监测计划要依照影响预测的关键环节及保护措施重点来制订。监测内容应包括所有受影响的生态要素,如水土流失状况、水质改变情况、植被恢复进程、主要保护物种的种群数量及其活动规律等。监测点布设要有代表性,能反映影响的主区、对照区和可能扩散的区域。监测频率按照影响的时效性(施工期高,运营期低)和季节性变化来决定。经过长时间、系统的观察,可以发现意料之外的影响,也可以对保护措施的实际效果做出评价。

生态监理属于把生态保护需求融入工程监理体系的制度创新。生态监理工程师对施工现场各项生态环保措施落实情况实施监督,保障施工过程符合环评报告及其批复的要求。包括检查表土是否按规定堆放,野生动物通道是否按设计施工,施工废水是否达标排放等。监理人员可以制止破坏生态环境的行为并进行记录上报,形成有效的现场约束力,将纸面上的环保承诺变为施工现场的行动。

（三）措施的有效性与后评估

对生态保护和恢复措施的效果进行评价，在评价的基础上开展生态影响后评价，是实现项目全生命周期环境管理、推进适应性管理的重要环节。这一阶段的主要目的就是总结经验，找出问题，为以后做类似工程时提供借鉴。

措施有效性评价主要用生态监测数据进行对比分析。通过动物通道建成前后野生动物通过率的对比来评价其连通性，通过恢复区植被盖度、物种多样性、土壤理化性质等的变化来判断生态重建是否成功。评价结果应该指出哪些措施有效、哪些效果不好或失败，并分析造成这些结果的原因，可能是技术问题、管理疏忽或者对生态规律认识不够。

生态影响后评价是在工程投入使用一段时间之后，将实际生态效果同环评阶段预测结果相比较、核实。其目的是检验预测方法是否准确，评价结论是否可靠，并对保护措施长期效果进行总体评价。后评估不只是单个项目环境责任的一次最终检测，也是十分重要的学习过程。通过对后评估发现的问题以及积累起来的经验进行及时反馈，可以促使环境影响评价的方法体系、技术导则以及管理制度不断得到完善，使整个行业的生态保护水平持续提高，最终实现重大工程在发展和保护之间动态平衡的目的。

第四节 自然保护区影响评价

一、自然保护区案例背景

要真正理解自然保护区环评的复杂性，联系具体案例加以分析才最为重要。一个典型的案例可以清楚地反映出保护对象、社区矛盾以及评价工作的主要目的，为后面的技术性评价和管理对策的制定提供现实的参照，使评价工作更加具有针对性和可行性。

（一）自然保护区类型与保护对象

本案例选择的流域型自然保护区，生态系统类型为森林-湿地复合生态系统，是重要的水源涵养地和生物基因库。该保护区的地理位置很特别，它跨越了两个行政区域，上游是大面积的原始针阔混交林，中下游则是开阔的沼泽湿地。两者一起形成了区域内重要的生态屏障。

保护区主要保护对象具有层次性。从物种角度，国家一级保护鸟类丹顶鹤及其繁殖地、迁徙停歇地；从生态系统角度，整个湿地生态系统结构、功能，以及调节区域气候、净化水质、维持流域水平衡等。区内特有的森林生态系统以及丰富的生物多样性也都在保护范围内。这些保护对象相互联系，一起构成评价工作所要保护的生态系统核心。

（二）周边社区发展与保护冲突

自然保护区的边界并不是与世隔绝的，其周围有以传统农牧业为主要生计来源的数个社区。长久以来，这些社区居民生活和生产的方式都和保护区自然环境密切相关。但是随着保护区的建立和管理措施的严格，社区居民传统的资源利用方式被限制了，直接关系到社区居民的经济收入。

发展需求与发展保护目标之间的矛盾就变得越发突出。部分社区居民为了维持生计会有违规放牧、盗伐林木、过度捕捞等行为，直接给保护区生态环境造成压力。社区改善经济条件的需要促使他们引进外来产业或扩大耕种面积等，这都会对保护区的生态廊道、缓冲地带造成严重破坏，属于典型的“人地冲突”。

解决矛盾是保护区管理与环境影响评价中不能回避的问题。评价工作要充分尊重社区的生存权和发展权，把社区因素纳入评价体系，分析保护措施对社区社会经济的影响，社区活动对生态系统的影响。否则，任何的保护政策都是难以落到实处、产生持久的效果的。

（三）评价目的与重点关注问题

本次环境影响评价的目的远远大于一般的项目准入评价，核心是对项目进行诊断性的、战略性的综合评价。评价目的是识别并评价当前保护区的管理措施、周边社区发展活动给生态系统带来的综合影响，根据评价结果提出科学的管理优化对策和社区协同发展路径，以期达到保护区生态价值和社区福祉的双赢。

基于此目的，评价工作将重点关注以下几个核心问题：

1. 关键物种生存威胁识别：对丹顶鹤种群数量变化趋势、栖息地质量退化状况进行分析，找到丹顶鹤生存受影响的主要压力源，如栖息地破碎化、食物资源减少、人为干扰等。

2. 生态系统完整性的健康诊断，考察湿地水文情势改变、水体富营养化程度、森林生态系统结构稳定性。并注意外来物种入侵的危险，生态廊道连通性降低的程度。

3. 保护与发展冲突的根源剖析,开展社区调研,量化保护政策给社区居民生计造成的影响程度,了解社区居民对保护工作的认识和需求,剖析造成冲突的深层次社会经济原因,为寻找有效的解决办法提供支持。

二、对保护对象的影响评价

对保护对象的影响评价是整个工作的技术核心,需要运用科学的方法和严谨的数据,定量或者定性地反映各种人类活动对物种、生态系统及其服务功能造成的实际损害或者潜在风险,为之后的决策提供直接的科学依据。

(一) 对关键物种及其栖息地的影响

丹顶鹤这种关键物种的影响评价要从种群和栖息地两个方面展开。从种群层面来说,通过对长期监测数据的分析,可以得到种群数量、繁殖成功率、存活率等关键参数的年际变化情况,再用人口学模型进行种群生存力分析来预测在当前干扰水平下,种群所面临的长期灭绝风险。评价要重视人类活动密集区,道路,村庄周边,深入探究这些区域对丹顶鹤繁殖,觅食,迁徙行为的干扰强度和影响范围。

从栖息地层面,评价工作用遥感影像和地理信息系统技术绘制精确的栖息地分布图,并对它是否适合做动态的评价。主要论述了由于周边农业开垦、旅游设施建设等活动所导致的栖息地面积减少、破碎化加重以及质量下降等问题。农药、化肥的使用会通过地表径流污染湿地,从而影响丹顶鹤的食物来源(鱼类、两栖类),进而威胁到它的生存。

评价还要找出丹顶鹤的重要栖息地斑块,比如繁殖区、夜栖地等,再考察这些斑块之间生态廊道的连通性。交通路线的阻隔、农业设施的发展可能会切断它们的迁移路径,造成生态孤岛,物种种群的遗传多样性就容易消失。分析的结果可以直接指向要优先保护和修复的空间单元。

(二) 对生态系统完整性的影响

生态系统完整度是反映生态系统健康程度的指标。评价时要超越单一物种,重点看生态系统的组成、结构、功能是否健全。对于森林和湿地复合生态系统来说,评价要考虑到其物质循环、能量流动、信息传递的过程是否畅通。评价的第一项主要工作就是对水文情势的改变进行评价。上游不合理土地利用方式,例如毁林开荒,会破坏森林的持水能力,使旱季径流减少、雨季洪水增多,这样的不稳定的水文输入严重破坏了下游湿地生态系统的稳态,影响湿地植被生长和演替。

同时评价生态系统的营养循环是否被破坏。周边社区农业面源污染和生活污水排放会带来大量的氮、磷等营养物质进入湿地，造成水体富营养化，藻类大量繁殖，水生植物群落结构被破坏，水生动物死亡，原有的食物网结构被破坏。人类活动有可能无意间带入有极高竞争力、对本地物种构成极大威胁的外来入侵物种，外来物种排挤本地物种，改变生态系统中物种组成，降低生物多样性，进而削弱生态系统的弹性和自我修复能力。评价需要设定参照点，把受干扰区域的物种构成、功能群比例、关键生态过程速率与原生状态区域的相应指标作对比，从而对生态系统完整性受损的程度作出全面的评定。

（三）对主要保护功能的影响

自然保护区的功能体现在它所提供的重要的生态系统服务上。本次评价的重点是对生物多样性保育、水源涵养、洪水调蓄这三个方面的作用受到的影响进行评价。生物多样性保育功能的评价不能只看物种名录的变化，还要考察功能多样性和遗传多样性。丹顶鹤濒危、其它伴生动植物种群衰退等都是该功能退化的直接表现。

水源涵养功能的评价主要是森林生态系统。用模型模拟、定位观测的方法来评价林地面积缩减、植被退化对降水截留和土壤蓄水能力的影响。评价结果可能会显示，由于森林覆盖率的降低，流域产水量的波动变得越来越大，旱季的供水能力有所下降，这对保护区本身以及下游地区下游地区的水安全都会产生影响。洪水调蓄功能评价以湿地为主。湿地像海绵一样，可以吸收、缓释洪水。评价会剖析由于湿地面积缩小，围垦导致的蓄水空间丧失等给其调蓄能力造成的损失，并按照区域降水状况来评判在极端天气事件发生时，这种功能退化所引发的防洪风险。

自然保护区环评重点关注问题及目标

关注问题	主要评估内容	评价目标
关键物种生存威胁	丹顶鹤种群数量、繁殖成功率变化；栖息地质量（破碎化、食物资源、人为干扰）；种群生存力分析。	识别核心威胁源，预测长期生存风险，为物种保护策略提供依据。
生态系统完整性	湿地水文情势（水质、水位、流量）变化；水体富营养化；森林生态系统结构稳定性；外来物种入侵风险；生态廊道连通性。	诊断生态系统健康状况，揭示结构与功能受损程度，为修复和管理提供方向。
保护与发展冲突	保护政策对社区生计的影响（经济收入、资源获取）；社区对保护工作的认知与需求；深层次社会经济根源；违规行为（放牧、盗伐、捕捞）。	量化冲突影响，理解社区立场，为制定可持续共赢的解决方案奠定基础。

从上表可知,自然保护区的环评工作包含从微观物种到宏观生态系统,再到人与自然和谐共处的诸多方面,目的是全方位地剖析问题并指引出路。

三、管理对策与社区共管

根据全面的影响评价结果,要制定出既能保护生态又能实现社会经济可持续发展的综合管理措施。这几种对策不能单独实施,必须是一种包含空间优化、机制更新和发展模式转型等许多要素的综合解决办法,它的重点是把社区从保护的对立面变成保护的同盟军。

(一) 保护区功能区调整与优化建议

科学的功能分区是自然保护区能够得到有效管理的前提。依据丹顶鹤等重要物种栖息地以及生态系统敏感性识别评价结果,联系实际状况来优化现有的功能分区,从而达到动态的改进。对新发现的丹顶鹤重要的繁殖地、觅食水域划出保护区核心区,用最严格的保护措施禁止一切人为活动。还要加强连接关键栖息地斑块的生态廊道保护,有些地方甚至要设立廊道管理区,保证物种迁徙、基因交流。

缓冲区、实验区要按照生态承载力、社区发展需求进行重新规划。在核心区缓冲区要严格控制生产经营活动,提倡采取生态修复的方式。在实验区,可以探索人与自然和谐共生之道,划出一部分区域做生态旅游、环境教育或可持续农业试验,把人类活动引导到对生态系统影响最小的地区。根据科学评价结果实行分区调整,可以使得有限的管理资源集中用于最需要的地方,提高保护效果。

(二) 社区参与式管理机制

从根本上解决保护和发展之间的矛盾,就要建立以社区参与式共管为核心的保护体系,使当地居民成为保护工作的主体而不是客体。建立一个自然保护区共管委员会,作为保护区管理局、地方政府、社区代表、科研单位等组织之间日常交流与决策的机构。委员会定期开会商议保护区的管理规章、年度工作计划及与社区利益有关的各种事宜。

在此机制之下,可以探索出许多种社区参与的形式。像请当地的有经验的村民当社区护林员或者巡护员,利用他们了解当地情况的优势,参与到平时的资源监测、防火防盗、宣传教育等工作中来,给予一定的劳动报酬。组织社区居民参与生态修复项目,植树造林、湿地恢复等,用“以工代赈”的方式来提高居民收入。有利于社区民间环保组织开展小规模生态监测和环保活动,提高社区环保意识。

识和自我管理能力。

参与式管理可以化解管理部门与社区的矛盾，减少管理成本，把社区传统的生态知识融入到现代的保护管理体系之中，使保护措施更加科学有效。赋予社区在保护过程中得到实际利益的权利，可以激活社区自身保护的动机，从而形成长期的、多方共同的保护合力。

（三）生态补偿与可持续发展模式

建立完善的生态补偿机制对于调动社区参与保护、促进区域可持续发展具有非常重大的经济意义。建议创建起多元的横向、纵向生态补偿制度。纵向补偿方面要积极争取国家和省级财政转移支付，对因生态环境保护而失去发展机会的社区实行直接财政补助。在横向补偿方面，可以探索建立流域下游受益地区对上游保护地区进行补偿的机制，即下游的城市或者工业企业可以通过购买水源地生态服务的形式，向上游社区支付补偿金，以支持其进行生态保护和绿色产业发展。

同时要帮社区找寻并守护起与保护目标相契合的可持续发展路径，达成由“输血”到“造血”的转变。可以依靠保护区独有的自然和文化资源，在严格规划控制的基础上发展生态旅游。社区参加组织的观鸟、自然体验、农家住宿等各项活动所获得的收益。还可以支持社区发展特色生态农业，如有机水稻种植、林下经济（菌菇、中草药种植），通过品牌创建、市场对接提高产品的附加值。可持续的生计方式会减少社区对于保护区自然资源的依赖，改善社区的经济状况，提高社区成员保护生态环境的意识，达到生态保护和社区发展相互促进的良性循环。

第九章 生态系统评价政策与法规体系

第一节 环境影响评价法律制度

一、中国《环评法》的核心内容

《中华人民共和国环境影响评价法》为环评制度赋予了法律地位并确定了基本框架，其中包含了分类管理、程序要求、法律责任等诸多方面内容，共同构成起一道防止环境损害的坚固防线。

（一）环评的分类管理与程序要求

环境影响评价法的重要之处在于其科学的分类管理。本法则按照建设项目对环境影响程度不同，将环评工作分为三类：对于可能造成重大环境影响的项目，要求编制内容全面、论证深入的环境影响报告书；对可能造成轻度环境影响的，编制比较简化的环境影响报告表；对于环境影响很小、不需要进行环评的项目，只须填写环境影响登记表，实行备案管理。这样一种分类方法体现出精细化、差异化管理的思想，利于合理调配监管资源，提高审批效率。

在程序上法律也作了规定。建设单位在项目开工前必须完成环评文件的编制，并报有审批权的生态环境主管部门审批。审批程序包含受理、审查、作出决定等部分，公开信息、公众参与有所凸显。对于需要编制报告书的项目，法律上规定建设单位在报批前应当征求有关单位和专家、公众的意见，并将采纳意见的情况作为审批的重要依据之一。此程序设计目的在于保证环评决策的科学性、民主性、透明度，从程序上保证生态保护目标的实现。

（二）规划环评与项目环评的法律地位

《环境影响评价法》将规划环境影响评价和建设项目环境影响评价并重，二者一起成为环评制度的两大支柱。规划环评处在决策链条的最前端，主要是对土地利用、区域开发、产业发展等宏观规划展开评价，企图从源头和战略层面阻止环境问题的发生。法律规定，报送审批的相关规划应当附有环境影响篇章或者说明，分析规划实施后可能产生的环境影响，提出预防或者减轻环境影响的措施。

审批机关作出决策时应当将规划环评的结论作为参考依据,从法律上加大了规划的生态环境约束。

项目环评是按照具体工程建设,在规划环评宏观指导之下开展的微观工作。它继承并细化规划环评的要求,对项目建设和运营过程中可能产生的具体环境影响做详细的评价。法律对规划环评与项目环评的关系作出明确规定,即规划环评对项目环评具有指导、约束作用,项目环评应满足有关规划环评的结论及审查意见,不符合规划环评要求的建设项目,其环评文件不予批准。这就形成了一种先规划后项目的逻辑关系,避免了项目层面的各自为政、累积性环境影响的失控,提高了环境保护决策的整体性、系统性,是生态系统管理理念在法律层面上的体现。

双层评价体系把环保关口前移,从过去对单个项目污染采取应对措施,转变为主从宏观布局、源头控制入手,对区域、流域的可持续发展起到至关重要的作用。用法律的形式来确定两者的地位以及联系,保证从战略到具体实施的连续性,为构建科学的国土空间开发保护格局提供强有力的法律保障。

(三) 法律责任与监管机制

《环境影响评价法》对环评制度严肃、有效具有法律后果及监管。法律明确了建设单位、环评编制单位、审批部门及有关责任人,在环评活动中所应承担的法律责任。法律上对未批先建等违法活动设置了严厉的处罚,即责令停工、罚款巨额金额,并使相关人受到行政追责。近年来法律修订进一步强化了建设单位主体责任,规定建设单位对环评文件内容、结论负责,加大对环评弄虚作假行为的处罚力度。

从监管机制上来说,法律对生态环境主管部门的环评全过程监督权作了规定,包括环评文件编制质量的抽查、环评审批程序合法性的监督、建设项目及运营过程中的环保措施落实情况的现场检查等。实行了谁审批、谁监管的原则,强化了审批部门的事中事后的监管责任。同时建立环评单位、从业人员信用体系,将技术单位及人员的信用同表现挂钩,实行守信激励、失信惩戒,规范环评技术服务市场,保证环评文件科学性、公正性。这就形成了一条完整的从事前、事中到事后的监管链条。

二、与生态系统评价相关的法律法规

除环评法这一核心法律外，中国法律体系里还有许多与生态系统评价相关的法律，这些法律从不同的角度、不同的层面给生态系统的完整性和功能性提供法律支持。

（一）《环境保护法》、《野生动物保护法》等

《中华人民共和国环境保护法》属于环境领域基础性法律，确立了保护优先，预防为主，公众参与等基本原则，规定了国家对重点生态功能区、生态环境敏感区、脆弱区划定生态保护红线，实行严格保护。该法提倡开发利用自然资源应当采取保护生态环境的措施，为生态系统评价赋予了根本的法律依据以及价值指向。它建立起来的环境监测、环境信息公开、公众参与等制度，给生态系统评价的开展提供重要的社会支撑和数据帮助。

《中华人民共和国野生动物保护法》从物种、栖息地角度对生态系统评价提出要求。按照该法的规定，在选址选线时要尽量避开野生动物迁徙洄游通道和重要的栖息地。不能避让时，要在环评文件中给出减缓不利影响的专项措施，如修建野生动物通道、过鱼设施等。这就把生物多样性保护目标直接纳入到环评过程中，要求环评工作考虑项目对特定物种及其所处环境的影响，体现了对生态系统关键组成成分的特别重视。

其他相关法律如《水法》、《森林法》、《草原法》等，分别从水资源、森林生态系统、草原生态系统等不同的要素角度，对开发建设活动提出生态保护要求。这些法律与《环评法》互相补充，一起形成了保护各种生态系统的法网，使从生态系统角度开展环境影响评价既有《环评法》的直接依据，又有其他多部相关法律法规的协同支持，从而形成综合的法律保障体系。

生态系统评价相关法律法规概览

法律法规名称	核心关注点	对生态系统评价的贡献 / 要求
《环境保护法》	宏观原则、生态保护红线	提供基本法律依据与价值导向，强调源头预防、生态红线保护
《野生动物保护法》	物种及栖息地保护	强制考虑野生动物通道、栖息地，提出减缓措施，纳入环评
《水法》	水资源保护与管理	对水资源开发利用提出生态保护要求，关注水生态健康
《森林法》	森林生态系统保护	规范林地利用，强调森林生态功能，限制破坏性开发
《草原法》	草原生态系统保护	规定草原合理利用与保护，防治退化，维护草地生态平衡
《自然保护区条例》	重点区域分区保护	划定核心区、缓冲区、实验区，严格限制建设，高标准要求
《风景名胜区条例》	自然与人文景观保护	限制区内建设活动，要求与总体规划相符，关注景观完整性

正如上表所示，不同法律法规从各自侧重出发，共同构成了支撑生态系统评价的全面法律框架。

（二）自然保护区、风景名胜区相关规定

对生态系统功能十分重要、生态环境十分敏感的区域，国家通过专门的条例实行特别保护，这些规定是生态系统评价中必须严格遵守的刚性约束。

1. 《自然保护区条例》明确将自然保护区划分为核心区、缓冲区和实验区，并实行分区管理。在核心区和缓冲区内，严禁进行任何生产设施的建设；在实验区内，也禁止建设污染环境、破坏资源或景观的项目。这意味着任何拟在自然保护区内或其周边开展的建设项目，其环境影响评价必须首先判断是否符合条例的禁入规定。对于经批准在实验区建设的项目，其污染排放标准和生态影响控制要求也远高于一般区域，评价标准更为严格。

2. 《风景名胜区条例》同样对区内的建设活动施加了严格限制。条例禁止在资源保育区和风景游览区内建设与资源保护无关的建筑物。所有建设活动都必须经过风景名胜区管理机构的审核，并符合风景名胜区的总体规划。新设立的风景区不得与自然保护区范围重叠交叉，体现了对不同保护地类型进行协调管理的要求。在进行相关项目的生态系统评价时，必须充分考虑其对自然景观、人文景观完整性的影响，确保开发活动与保护目标相协调。这些规定为评价提供了

明确的红线和底线。

（三）地方性法规与规章

在国家的法律框架下，各省市自治区按照自身的自然环境特点、经济社会发展需要，制定了许多带有地方特色的环保法规和规章。地方性立法属于国家法律体系的有益补充，把宏观法规原则具体化、情境化，给特定区域的生态系统评价赋予相关的法律根基。有的省份为了保护本省重要的湖泊、江河流域或者重点生态功能区等，专门制定了保护条例，条例中包含的标准比国家标准要严格，要求更具体，甚至划定禁止开发的区域。

地方性法规、规章对本行政区域内环评审批权限、重点保护的生态系统类型、特色物种、区域性环境标准做出详细规定。沿海省份有海岸带保护、海洋生态系统的保护特别规定，内陆干旱地区的水资源保护、荒漠化防治法规较多。因此，在生态系统评价的具体实施时除了要符合国家统一的法律以外，还要对项目所在地地方性法规、规章制度等进行研究，使评价结果提出的保护措施更加适应地方具体的管理需求，保证评价工作能精确的反映区域内生态问题。

三、环评法律制度的执行与挑战

尽管中国已经形成了一套比较完整的环评法律制度体系，但是在实际工作中仍然存在一些问题，这些问题影响了环评制度预防环境损害的功能，也对以生态系统为导向的评价方法学提出了更高的要求。

（一）“未批先建”等违法现象治理

未批先建是环评法律制度执行过程中一直存在的顽疾。有的建设单位为了抢占市场先机或者规避环保投资，在没有取得环评批复的情况下就擅自开工建设。这就破坏了环评制度的权威性，“预防为主”的立法目的也就实现不了，环境风险就处于失控状态。法律规定对未批先建的行为有严格的处罚措施，但由于存在地方保护主义、执法不力、执法惩戒力不够等原因，除及时对“未批先建”的行为进行制止、纠正外，仍有部分工程不能得到有效控制。

历史遗留的“未批先建”项目清理起来更麻烦，涉及就业、社会稳定等方方面面，致使清理整顿工作陷入两难境地。近几年来，国家加大了对“未批先建”等违法行为的查处力度，依靠强化环境监管执法、实行区域限批等方式取得了一定成效。解决这一问题要长时间保持高压态势，加大违法成本，改进监管手段，

探寻长效机制，铲除企业规避环评的侥幸心理，保证法律尊严。

（二）环评质量与公众参与

环评文件质量的好坏关系着环评制度的生命力，也影响决策的科学性。在实际中存在着环评文件内容不实、评价不深入、结论含糊其辞、弄虚作假等现象。这些走形式的环评不能有效地识别和评价生态风险，还会给污染项目洗绿，影响决策。因此，生态环境部门通过技术复核、质量抽查，建立环评编制单位及人员的信用体系来提高环评质量。

公众参与可以提高环评质量，也可以使决策更民主。以往公众参与中存在参与渠道不畅通、信息公开不够、被代表等现象，从而影响到公众意见的真实表达和有效采纳。近些年来，有关法规对公众参与的程序、方式及责任主体均有更为明晰的规定，比如要求环评报告书全文公开、建设单位担负公众参与的责任主体等，目的在于保障公众的知情权、参与权、监督权。但是，怎样才能真正激发公众参与的积极性，科学地采纳公众的合理意见，并将采纳的意见有效地融入到生态系统评价与决策之中，仍然是法律制度执行方面有待继续研究和完善的课题。

（三）法律制度的完善方向

生态文明建设对环评法律制度提出了新要求，环评法律制度体系还需不断完善，与时俱进。未来完善的走向就是使法律制度具有系统性、协同性、可操作性。主要发展方向就是强化生态系统整体保护意识，促使相关法律从只保护单个环境要素变为保护整个生态系统结构、功能的完整性。这就需要在《环评法》及有关法律中更加突出地强调对生物多样性、生态系统服务功能、累积性生态影响的评价要求。

第二，要增强规划环评的法律约束力，切实发挥规划环评为宏观决策源头预防的作用。探索规划环评和项目环评更有效的联动机制，对符合规划环评要求的项目环评内容进行简化，提高评价效率。要完善生态环境损害赔偿和环评制度之间的衔接，明确因环评失实或者决策失误造成生态损害的责任追究机制，形成有效的倒逼机制。另外按照“放管服”的改革要求，在优化审批流程的同时还要同步创新并加强事中事后监管手段，利用大数据、遥感等现代技术提高监管效率，保证环评制度不落空。

第二节 生态系统保护政策框架

一、国家生态系统保护战略

国家生态系统保护战略属于维护国家生态安全的顶层设计，在国家层面安排国土空间的开发与保护，为各类开发建设活动划出不可逾越的生态红线，是实现人与自然和谐共生的基本保障，对全国范围的生态保护工作具有纲领作用。

（一）主体功能区战略与生态安全格局

主体功能区战略是优化国土空间开发格局的一项重大制度创新，主要依据各区域的资源环境承载能力、目前的开发密度、发展潜力，把国土空间划分为优化开发区、重点开发区、限制开发区和禁止开发区四种类型。此战略的目的就是使人口分布、经济布局、资源环境承载力相协调，形成合理的城镇化发展格局、农业产业结构、生态安全格局。从生态系统保护的角度出发，限制开发区和禁止开发区是国家生态安全格局的主体部分。这些区域一般为水源涵养区、生物多样性保护区、水土流失严重的地区等生态功能重要或者生态环境脆弱的地区，采用严格的产业准入和开发强度管制手段，保持并提高其生态产品供给能力，从而保证国家整体生态系统的稳定和安全。

生态安全格局的构建属于主体功能区战略的重要目标之一。识别出生态系统服务的节点、生态廊道与战略要点之后，形成一个联系起重要的生态功能区的网络体系，保证生态的过程可以持续下去，物种之间也能自由迁徙。任何项目在进行环境影响评价的时候，都需要考虑到它所在地的主体功能区定位，以及它对区域生态安全格局可能造成的影响。对于不符合主体功能定位、可能导致生态廊道分割、破坏重要生态源地的项目，必须严格限制或者禁止，以保证国土空间的开发不突破生态安全的底线。

（二）“三区三线”管控政策

三区三线指城镇空间、农业空间、生态空间这三大区域，以及与之对应的城镇开发边界、永久基本农田、生态保护红线三条控制线。这是落实主体功能区战略，加强国土空间用途管制，实现具体化、精细化的重要工具。三区三线划定之后，各类开发建设活动就有了明确的空间坐标和刚性约束，也是环境影响评价必须遵守的前置条件。

生态保护红线在“三区三线”管控中处于重中之重的地位，把生态功能极重要区域和生态极脆弱区域依法划定出来，实行强制性严格保护。原则上，任何不符合管控规则的开发建设活动，都不准在生态保护红线内进行。项目选址是否碰到生态保护红线，应作为第一道否决性标准。实践中应当正确确定红线范围，分析项目建成后造成的直接占用、间接影响（噪声、光污染等对动物栖息的干扰）以及累积效应，论证其是否符合红线管控条例中允许的有限人为活动类型。

城镇开发边界、永久基本农田有重要的生态意义。城镇开发边界的划定可以有效地避免城市无序的摊大饼式的扩展，保护城市周围的自然生态空间。永久基本农田不仅是国家粮食安全的基础，而且是具有调节气候、净化环境功能的农田生态系统。因此，环境影响评价要充分论证项目建设对这两条线的影响，尤其在重大基础设施穿越或靠近这两条线的时候，必须提出有效的生态减缓和补偿措施，保证国土空间的生态功能不会因为项目建设而下降。

（三）生物多样性保护战略与行动计划

中国有丰富的生物多样性，把生物多样性保护上升为国家战略。中国生物多样性保护战略与行动计划提出新时期保护工作的总体目标、优先领域和行动方向。该战略以就地保护和迁地保护相结合为特点，利用建立国家公园为主的自然保护地体系、划定生物多样性保护优先区域等措施，对我国的珍稀物种资源、生态系统进行系统性的保护。从2023年到2030年中国的生物多样性战略与行动计划，进一步继承了昆明会议达成的“昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架”，提出了实施生物多样性主流化、应对丧失威胁、可持续利用、治理能力现代化这四个优先领域。

环境影响评价属于实行生物多样性保护战略的重要途径。在项目评价的过程中一般有几个关键的步骤：

1. 调查与评价，首先要掌握项目所在地的生物多样性本底状况，即生态系统类型、物种名录（重点为珍稀濒危物种、特有物种）、遗传资源分布、重要的生物廊道等。

2. 影响分析：对项目在建设期和运营期可能给生物多样性带来的各种直接、间接的影响进行剖析，例如生境丧失、生境破碎化、对物种的惊扰、阻隔、外来物种入侵风险、环境污染对生物体的毒害等。

3. 减缓措施及补偿，根据影响分析结果，按照“避让-减缓-修复-补偿”

的措施序列。优先选择生态影响最小的方案（避让）；对不可避免的影响采取工程或者管理手段予以减轻（减缓）；对受损的生态系统进行功能恢复（修复）；对造成永久性或者难以恢复的损失，通过建立新的栖息地或者提升其他区域的生态质量进行补偿。

二、重点领域生态保护政策

按照不同的生态系统所具有的特殊性以及所面对的主要威胁，国家制定了一系列专门的保护政策。这些政策给某领域环境影响评价提供更加详细、具体且具有强制性的法律规定以及规范，保证评价的专业性、针对性，有效地保护了各种典型的生态系统健康、完整。

（一）森林、湿地、草原保护政策

我国为森林、湿地、草原三大生态系统分别制定了相应的法律法规和保护规划，形成了比较完整的政策体系。在森林保护方面，严格控制林地用途、采伐限额，突出生态公益林、天然林保护和修复。在草原保护上，《草原法》确立了基本草原保护、草畜平衡、禁牧休牧三大制度来阻止草原退化。湿地保护是生态文明建设的重要内容，我国第一部专门的湿地保护法于近年实施，规定了湿地的分级管理、总量控制、名录制度，给湿地保护与修复工作提供强有力的法律保障。

所有的这些政策都在环境影响评价上做了规定。在对涉及森林生态系统项目的评估中，要对项目占用的林地、砍伐的林木、森林生态功能（水源涵养、生物多样性保护等）的影响进行评价，并对项目的必要性、不可替代性做出充分的论证。占用林地的项目必须依法办理审批手续，并足额落实占补平衡。在草原地区评价的重点是项目对草原植被的破坏、草地生产力影响、加剧区域沙化、水土流失等。

对于湿地生态系统来说，环评的过程更为复杂，要对项目对湿地的水文情势、水质、土壤、生物多样性等诸多方面的影响进行综合评价。特别是一些全国湿地保护规划中列明的重要的湿地，标准更为严格。项目建设尽量避开湿地，不能避开的必须采取措施减轻不利影响，制定详细的生态修复方案，保证湿地生态功能不降低。对于跨越河流水系的桥梁、道路等工程，应该科学设计桥墩位置及施工方案，最大程度上减小对河流湿地水文连通性和水生生物栖息地的破坏。

（二）水土保持与荒漠化防治政策

水土流失、荒漠化是我国发展过程中所面临的主要的生态问题。我国水土保

持的基本法律是《中华人民共和国水土保持法》，该法确定的方针是“预防为主、保护优先、全面规划、综合治理、因地制宜、突出重点、科学管理、注重效益”。法律规定，在山区、丘陵区、风沙区等水土流失重点防治区进行生产建设活动时，必须编制水土保持方案，并且防治措施要和主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。这一要求直接嵌入到环境影响评价的过程中，水土保持方案成为环评报告书的重要组成部分或者专项附件。

荒漠化防治主要针对干旱、半干旱和亚湿润干旱地区，用法律、经济和技术手段控制土地沙化，保护和恢复沙区植被。《全国防沙治沙规划》等政策文件对重点防治区域、治理目标做了规定，提出了封禁保护、人工造林种草、工程固沙等综合治理措施。环境影响评价在涉及这些区域的时候，一定要重视项目活动会不会破坏沙区原生植被，扰动地表结构，从而加重风蚀沙化。评价时要给出可行的防风固沙举措，像设置沙障，植被恢复之类，还要对这些举措在项目区气候，土壤状况下的可行性以及长期效果作出评价。

（三）海洋生态保护政策

海洋生态保护是建设海洋强国的根本。我国通过不断修法，在原有生态保护红线制度、排污总量控制、陆海统筹等现代海洋环境治理制度的基础上，逐步完善。新修订的法律条文坚持“保护优先、预防为主、源头防控、综合治理”的原则，并对海洋生态保护、防治陆源及工程项目的污染、监督管理等作出了系统的规定。这些规定给海洋、海岸带工程的环境影响评价设定了严格的法律规定。

海洋环境影响评价必须体现陆海统筹的思想，不能只评价项目本身对海洋生态系统造成的直接影响，比如对珊瑚礁、红树林、海草床等典型生境的破坏，还要追溯陆域污染源，评价陆源污染物入海对海洋水质和生态系统造成的长期影响。围填海、跨海桥梁、海底管道、海上风电等重大海洋工程的环评，更需要做专题论证。评价内容一般包含海洋水动力环境、地形地貌、海洋生物多样性、渔业资源、海岸线稳定等。法律明确禁止在重点海洋生态功能区、生态环境敏感区、脆弱区等海域划定生态保护红线内开展破坏生态功能的活动，这是海洋环评中一条不能触碰的“高压线”。评价时还要重视珍稀濒危海洋物种及其栖息地的保护，提出有效的避让、减缓措施，按照损害担责原则，研究制定出科学合理的生态补偿、修复方案。

我国海洋生态保护主要政策与措施

政策 / 措施类别	具体内容	目的
法律法规	《海洋环境保护法》	提供海洋环境保护的法律框架
空间管控	海洋生态保护红线制度	强制性保护重点海洋生态区域
污染防治	排污总量控制、陆海统筹	减少陆源和海上污染，改善海洋水质
项目管理	严格海洋工程环评，专题论证	确保海洋工程建设的生态安全性
生态修复	生态补偿与修复方案	针对生态损害，恢复海洋生态功能
生物保护	珍稀濒危物种及栖息地保护	维护海洋生物多样性

从表中可以看出，我国海洋生态保护的政策体系包含法律、空间、污染、项目、修复和生物保护等多个方面，一起构筑起海洋生态安全的屏障。

三、生态保护政策的实施机制

政策生命力的体现就是执行。为了使生态保护战略和政策由纸上走向现实，国家建立了强有力的执行机制。绩效考核、生态环保督察、财政投入、市场化激励、科技支撑、公众参与等多方面一起构成生态文明建设的制度保障。

（一）政府绩效考核与生态环保督察

将生态文明建设成效纳入地方党政领导班子绩效考核体系，是推动生态保护责任落实的好办法。生态文明建设目标评价考核办法等文件的发布，才正式提出“绿色 GDP”导向。考核指标涉及资源利用、环境质量、生态保护、公众满意度等各个方面，促使地方政府发展行为由原来的单方面追求经济增长转变为经济、社会、生态效益的统一。考核压力传导到环境影响评价环节，使审批部门更加严格地把关项目的生态环境影响，有效地防止高污染、高耗能项目的引进。

中央生态环境保护督察属于推进政策落实的又一重大制度创新。督察工作由中央直接组织，以解决突出生态环境问题为重点，对省级党委和政府、相关部委、中央企业开展。督察内容包括决策部署、责任落实、问题整改等各个方面的内容，具有很高的权威性，具有很强的威慑力。公开曝光典型案例、严肃追责问效，环保督察很好地击破了地方的中梗阻、选择性执法等障碍。大大强化了环境影响评价制度的严肃性，对那些未批先建、批建不符的违法项目和环评走过场、审批宽松软的现象形成强大的倒逼整改压力。

（二）财政投入与市场化激励

健全的生态保护补偿机制，是利用经济手段推进生态保护的重要政策。按照

谁受益谁补偿的原则，用财政转移支付等方式对因承担生态保护责任而发展受限的地区、个人给予经济补偿。国家已经对森林、草原、湿地、水流等建立了补偿制度，有效地调动了生态功能区保护生态环境的积极性。环境影响评价过程中，对造成生态损害的项目来说，生态补偿为修复和平衡的手段。评价报告应该对项目造成的生态系统服务价值损失做出科学的评估，据此提出补偿的标准和方式，比如缴纳生态补偿金，开展异地生态修复项目等。

除政府主导的财政投入以外，不能忽视的是建立多元化的市场化激励机制。推行排污权交易、碳排放权交易、水权交易等环境权益交易制度，依靠市场发现价格的功能，使环境容量、生态资源拥有明确的经济价值。企业依靠技术升级减排，富余的减排指标可以在市场上出售获利，从而产生减排的内在驱动力。发展绿色信贷、培育绿色债券、绿色保险等金融产品，调动更多的社会资金投向环保产业和生态友好型项目。环境影响评价结果也成为金融机构开展风险评价、授信决策的重要依据，不符合生态环保要求的项目会受到融资限制，市场化的约束力极大地提升了环评制度的作用。

（三）科技支撑与公众参与

科技创新是增强生态保护能力、提高环境影响评价科学性的重要支撑。国家通过设立重大科研专项、建设重点实验室、野外观测台站等形式来不断加大对生态系统演变规律、生态退化机理、生态修复关键技术等研究领域的研究投入。这些研究成果给环评工作赋予了前沿的监测技术，精确的预测模型以及有效的治理方案。利用遥感技术、地理信息系统可以快速准确地评价一个区域的生态系统格局变化；利用环境 DNA 技术可以高效地进行生物多样性调查。科技进步使环境影响评价可以更量化的、具体的反映项目可能造成的生态影响，提高决策的科学性。

公众参与是生态保护政策执行不可缺少的环节，也是现代环境治理体系的一个重要特点。新修订的《环境保护法》用专章的形式对信息公开、公众参与进行规定，保障了公众的知情权、参与权、监督权。环境影响评价流程里，公众参与属于法定环节，建设单位需用公告，座谈会，问卷调查等方法，广泛搜集项目周边公众的意见。公众凭借自己对本地区环境的熟悉可以为环评提供有价值的现场信息，对评价结果和环保措施的合理性、实施情况进行监督。透明、规范的公众参与既可以化解社会矛盾，又可以集思广益，使项目的决策更加符合公共利益，

从而使得生态保护政策更好地服务于人民。

第三节 生态补偿政策机制

一、生态补偿的政策框架与类型

中国的生态补偿政策体系是多层次、多渠道的，既有中央主导的纵向转移支付，又有地方政府间通过协商建立的横向补偿，还有市场化和社会力量参与的多样化方式。

（一）中央对地方重点生态功能区转移支付

中央对地方重点生态功能区的转移支付属于纵向生态补偿的制度安排，主要目的在于保障国家生态安全、缩小区域发展差距。该政策依靠中央财政，给那些承担重要生态功能、由于保护环境不能大规模开发的地方给予资金上的支持，以补偿其维护生态环境的成本和发展的机会损失。资金分配一般采取公式化办法，以地区生态重要性、财政收支、人口数、环保成果等客观因素为考量重点来求得公平性、效率性的双赢。

自上而下的补偿方式，有效地调动了地方政府保护生态环境的积极性。财政能力较弱但是生态地位重要的县域，转移支付是改善民生、提供基本公共服务的主要资金来源。伴随着制度的日益健全，绩效考核制度也得以建立，生态保护工作的效果成为资金配置的重要依据，进而形成了激励和制约，使得地方政府履行生态保护职责的积极性被充分调动起来，从而提高资金使用的效益。

（二）跨省流域横向生态补偿

跨省流域横向生态补偿机制，是解决流域上下游地区之间利益矛盾、成本共担、效益共享、合作共治的创新做法。按照谁保护谁受益、谁污染谁付费的原则，由下游生态受益区给上游保护责任区做经济补偿。该模式一般由上游省、市、县三级政府自主协商，就补偿基准、标准、方式以及水质水量考核指标等达成一致。

横向补偿更能体现出地区间生态依赖以及经济联系，明确责任，有效激励上游地区加强污染治理、水源涵养。中央政府在此一般起引导、协调作用，以奖励资金、技术支持和搭建协商平台的形式推动跨省补偿协议的签署和执行。这有利于流域的协同治理，也给其它生态要素横向补偿提供了一些有益的经验。

（三）市场化、多元化生态补偿机制

在政府主导的模式之外建立市场化、多元化的生态补偿机制是生态文明建设的需要。核心就是依靠市场力量和社会资本，通过市场交易等方式实现生态产品的价值，拓宽补偿资金的来源，形成可持续的生态保护投入模式。目的就是构建政府、企业、社会组织、公众共同参与的环境治理体系。

其具体实现路径多样化，涵盖多个层面：

- 1. 碳排放权、水权交易。通过建立环境权益交易市场，将碳汇、水资源等生态产品的价值量化为可以交易的商品，促使企业或者个人采用技术升级或者行为改变的方式来减少排放、节约资源，从而获得经济收益。
- 2. 在生态保护的基础上发展生态旅游、绿色农业、林下经济等特色产业，把绿水青山的生态价值转化为金山银山，使当地社区直接从生态保护中受益。
- 3. 绿色金融和社会资本的参与。通过设立绿色发展基金、发行绿色债券、引导社会捐赠等方式，动员企业和社会资本参与生态保护修复。生态环境导向开发模式，就是生态治理项目与产业开发项目捆绑的一种创新实践，用产业收益来补偿生态保护成本。

二、生态补偿标准的核算方法

生态补偿标准的核算是机制的重要部分，决定着补偿是否公允可行。合理的标准既要弥补保护者成本，也要让受益者接受，所以需要多种方法综合测算，对比见下表：

生态补偿标准核算方法对比表

方法	核心依据	优点	局限性
成本核算	保护方投入的直接与机会成本	操作简便，易设定底线	易低估生态效益，未体现外部价值
效益评估	生态系统服务经济价值	体现生态价值，符合受益者付费原则	评估复杂，数据要求高，结果不确定
协商博弈	多方协商达成共识	灵活性高，反映各方诉求，易执行	过程复杂，依赖协调，受谈判力影响

（一）基于成本核算的方法

成本核算是最直接、最基本的一种确定生态补偿的方法，即补偿额至少要覆盖保护者为生态保护所付出的全部成本。直接成本是开展环保、治污、生态修复

等工作的经费投入，包括污水处理、植树造林、封山管护等费用。机会成本则是保护地区为生态环境所放弃或限制开发活动造成的潜在经济收益损失，如自然保护区限制矿产、工业建设的收入损失。

此法概念清楚、数据容易获得、操作方便，实践中应用较多。它给补偿标准的设定划定了清晰的下限，从而保证保护者的付出可以有所回报。但是其不足之处在于只考虑了保护方的投入，没有充分体现生态系统服务巨大的外部效益，容易造成补偿标准低估。

（二）基于效益评估的方法

效益评估法（又称生态系统服务价值评估法），以生态系统所提供的服务经济价值为补偿额。本方法的主要目的就是将生态系统的水源涵养、水土保持、气候调节、生物多样性保护等效益货币化，为补偿标准提供一个理论上限。

评估方法有市场价值法、替代成本法和意愿调查法。这样可以更好的体现出生态保护的实际行动，也是“谁受益谁补偿”的原则。但是技术要求高、数据量大、评估结果不确定性大，计算出来的价值远超过当前财政支付能力，因此在实践中多作为理论指导和谈判参考。

（三）协商与博弈定价方法

协商和博弈定价法认为，生态补偿标准的确定不但是技术问题，也是多方利益主体经济和政治的博弈过程。促使生态保护者（上游地区）和生态受益者（下游地区）在平等的谈判桌前，通过协商、对话、博弈等方式来取得双方或多方都认可的补偿额。在这种情况下，成本核算与效益评价的数据就成了双方议价的依据。保护方希望补偿金额可以抵消其成本并且体现生态环境的价值，受益方按照自己的支付意愿以及获得的生态服务程度来出价。中央或上级政府可以充当仲裁者或者协调者，利用引导性资金或者基本规则来促进谈判达成。这种方式较为灵活，可以较好地体现各方的利益诉求和实际支付能力，最终达成的协议也更容易得到遵守执行，新安江流域的“对赌”协议就是此种方法的典型应用。

三、生态补偿的实践与挑战

中国在生态补偿上做了许多探索和实践，有丰富的经验可循，流域治理成果明显。但是这些实践也会暴露出资金来源、效率监督和长效机制建设的问题，需要后续改革才能解决。

（一）新安江流域等试点经验

新安江是中国第一个跨省流域生态补偿机制试点，在横向上给全国的生态补偿提供了很好的范例。该模式以安徽（上游）和浙江（下游）两省签订的“对赌协议”为核心，以跨省界断面的水质为考核标准，如果水质达标，下游浙江向上游安徽支付补偿资金；如果水质不达标，安徽赔付给浙江。中央财政在试点开始时也投入引导资金来鼓励双方的参与。

这一项实践能够取得成功，最根本的条件就是形成了一套权责分明、结果导向的激励约束体系。有明确的考核标准和奖惩措施，大大调动了上游黄山市保护水环境的积极性，从而投入大量资金调整产业结构、治理污染源、修复生态环境。最终新安江水质多年优于并超过补偿协议标准，将大量的优质水供给下游的千岛湖，达到生态效益与经济效益的双重目标。

新安江模式成功以后，在全国多条流域推行。证明了有效的制度安排可以化解上游保护、下游受益的区域发展矛盾，把生态保护的外部性内部化。既促进了流域的协同共治，又使上游地区走上了绿色发展的道路，把生态优势转变为经济优势，为绿水青山就是金山银山的理论加上了生动的注脚。

（二）资金来源、使用效率与监管问题

生态补偿虽然已经有了较好的效果，但是仍有很多问题，资金问题是其中最严重的问题。目前中国生态补偿资金主要依靠各级政府财政投入，资金来源单一。随着补偿范围扩大、标准提高，单纯依靠财政“输血”已经不能满足需要，必须依靠市场化手段吸引社会资本，实现资金来源多元化。

资金使用效率以及监管又成为难题。补偿资金真的一分文没留给生态保护和修复？有无挪用，效果如何评价？这些问题都很普遍，有些地方重资金分配，轻绩效管理，没有建立起资金使用全过程的监管和科学的绩效评价体系。这就造成资金的浪费，降低了补偿政策的效果。因此，需要有透明规范的资金管理办法，引入第三方评估和公众监督，把绩效评价结果同资金分配联系起来，从而提升资金使用效益。

（三）生态补偿长效机制构建

要使生态补偿由短期试点项目变为常态化、制度化的长久之计，就必须创建起长久稳定的生态补偿长效机制。这就需要从立法、资金、治理结构等各方面做系统设计。虽然已经颁布了《生态保护补偿条例》，但是具体的领域法规还不完

备，影响了生态补偿工作有法可依。

长效机制创建的关键就是保证资金来源的稳定性、可持续性。除发挥财政资金主导作用外，更重要的就是发展市场化补偿模式，健全排污权、碳排放权、水权等交易市场，创新绿色金融产品，培育生态产业，使生态保护地区依靠自身发展获得可持续收入。长效机制还要有完善的治理结构，创建跨区域、跨部门的协调机构，加强监测和评估体系建设，保障当地社区与公众的知情权、参与权，保证补偿决策的科学性、公平性，最终达到生态保护与区域发展良性循环。

第四节 国际经验与比较研究

一、发达国家生态系统评价制度

发达国家的环境影响评价制度经过几十年的发展，已经从最初的单个项目污染物排放评价发展成综合考虑生态系统服务、生物多样性、累积效应的综合性的决策支持工具。美国、欧盟、日本各自有着不同的特点，但是它们的共同点就是都促进了环评制度向更加科学化、系统化的方向发展，给解决复杂的生态环境问题提供了制度保障。

（一）美国国家环境政策法与战略环评

美国国家环境政策法是世界上第一部综合性环境法律，对于环境影响评价制度的建立起着开创性的作用，并对世界其他国家立法产生深远影响。该法案规定，联邦机构凡实行可能对人类生态环境造成重大影响的行为（包括立法和重大行政措施）时，都必须写一份环境影响报告书。报告书要对拟议行动给环境造成的各种影响实施全面剖析，涵盖生态系统，自然资源，社会经济的短期与长期影响，还要评价不可避免的不利影响以及各种备选方案。NEPA 的核心就是程序性，它并不是直接禁止破坏环境的项目，而是在做决策前充分了解并考虑环境影响，保障公众知情权和参与权，用程序正义来推动实体正义。

就生态系统来说，NEPA 的作用更加突出。它要求评价单个项目同过去、现在和将来可以预见的其他项目共同作用下对环境产生的增量影响，这超出了单个项目评价的范围，促使评价者从更大的时空尺度上考虑区域生态系统的承载力和恢复力。NEPA 孕育了战略环境评价的思想和实践。虽然法案本身没有直接使用“战

略环评”的说法，但是它对政策、规划、计划等上位决策进行环境评价的原则，为战略环评的发展打下了基础。战略环评在决策早段、宏观层面介入，从源头上杜绝了不合理区域开发规划、产业政策、资源利用计划给大尺度生态系统造成的系统性、长期性破坏，对大尺度生态系统完整性、稳定性保护起着至关重要的作用。

（二）欧盟环境影响评价指令

欧盟的环境影响评价体系是以指令形式建立起来的，要求成员国将之转化为国内法加以执行，既保证基本原则的统一性，又给成员国一定的灵活性。欧盟环境影响评价指令及其后续修订一起构成一个包含项目环评、战略环评的完整体系。指令附件一为必须强制开展环评的项目清单，附件二为成员国按照一定标准筛选出的项目清单，确保对重大项目环境影响进行充分考虑。评估内容要求识别、描述和评价项目可能对生物多样性（包括受保护物种和栖息地）、土地、土壤、水、空气、气候、景观、物质资产、文化遗产以及这些因素之间相互作用所造成的直接和间接影响。

欧盟环评指令的重要特点就是它与欧盟其他国家的环境法规相互配合，形成一个强大的法律保护网，共同服务于生态保护的目标。环评过程必须考虑《鸟类指令》和《栖息地指令》划定的自然 2000 生态保护网络。对于所有可能对保护区造成较大影响的计划或者项目，都需要做专门适当的评估，证明其不会对保护区造成破坏。《水框架指令》要求维持和改善水生态系统良好状态，也是项目环评的依据。这样的多指令互相配合的模式使得环评不再是独立的程序，而是嵌入到整个生态系统管理过程中，保证开发建设活动和生态保护目标相协调。这样一种制度安排就体现出了从源头开始，到过程再到结果的一种全链条的生态系统保护思想。

（三）日本环境影响评价法

日本是资源匮乏、人口稠密、自然灾害频发的岛国，日本环境影响评价制度充分体现了日本的国情和社会文化特点。1997 年日本制定了《环境影响评价法》，在此之前已经有近 30 年的地方实践和行政指导经验。该法案创建起一套严密的、细致的、严谨的评价过程，包含筛选、决定范围、起草草案并公告、征求公众意见、撰写最后报告、政府复核等环节。其中日本环评的一个特点就是“范围界定书”。在评价工作开始之前征求公众、专家意见来确定评价对象、范围、方法，可以提高评价的科学性、针对性，避免后期产生重大分歧。

日本环评法对于生态系统考虑的细致程度较高。除了传统的物理化学环境要

素以外，对动物、植物和生态系统综合影响的评价也被提及。评估内容要涵盖生态系统的结构（物种组成、植被覆盖）和功能（物质循环、能量流动），对于重要的、脆弱的或者有代表性的生态系统要加以重视。日本环评还有一个特别的项目，即“人与自然接触活动场所”，考察项目对人们从事自然观光、休闲、学习等活动场所的影响，间接体现了对生态系统文化服务功能的重视，反映了人与自然和谐共生的东方哲学思想。

该制度非常重视公众的参与，评价过程从开始到结束都有公告、纵览、征求意见的法定程序，保证利益相关方的充分参与。这样一种深入的沟通协商机制，虽然有时候会拖长评价的时间，不过有益于消除社会矛盾，提升最后决定的公信力和可接受程度。日本的环评制度就是一个过程，也是一个社会共识的形成过程，在复杂的社会经济环境中保护生态系统显得尤为关键。

二、国际生态补偿与生态服务付费机制

环境影响评价的一个重要目的就是防止和减轻对生态系统的损害，生态补偿、生态服务付费机制为不可避免的损害提供了一种经济上的解决途径，也为生态系统保护者提供了一种积极的激励。遵循谁受益谁付费、谁破坏谁补偿的原则，用市场化的方式将生态系统的外部价值内部化，是生态系统管理工具箱中的重要部分。

（一）哥斯达黎加生态服务付费

哥斯达黎加的生态服务付费项目是世界上第一个把生态系统服务商品化的典型实例。上世纪中期，该国森林砍伐、土地退化问题严重，哥斯达黎加政府于1996年通过新《森林法》创造性地提出了国家生态服务付费制度。这一制度承认森林生态系统有四种主要的功能，即温室气体减排（碳汇）、水文服务（保持水源、调节流量）、生物多样性保护、景观美学价值。因此，政府通过国家林业基金给自愿保护、恢复或者实行可持续森林管理的土地所有者支付费用，以补偿他们由于保护行为而放弃的经济利益。

项目的资金来源是多样化的，最初主要依靠对化石燃料征税，后来逐步扩展到向水电公司、瓶装水企业等水资源使用者收取费用，并得到国际组织援助和私人部门的投资。受益者付费模式把生态服务的价值转化为可以交易的经济激励，极大调动了私人土地所有者参与生态保护的积极性。哥斯达黎加的实践表明，只要设计科学、保障有力、资金稳定，建立一个生态服务付费机制，就可以有效地

扭转生态退化的趋势，使森林覆盖率从最低点回升，实现经济持续发展与生态环境良好相协调的发展局面，给世界各国，特别是发展中国家提供宝贵的经验。

（二）欧盟农业环境补贴政策

欧盟共同农业政策是欧盟最大的、影响最深远的政策之一，它的产生历程清楚地显示，由只看重粮食生产向重视农业生态系统多功能性转变的过程。传统农业补贴主要是按产量发放，造成农业生产过犹不及，产生生物多样性丧失、水土污染、景观雷同等一系列生态环境问题。为了应对这些挑战，欧盟逐渐对共同农业政策实施“绿化”改革，将直接补贴同农民完成一定环保任务联系起来，形成了一套规模庞大的农业环境补贴体系。

这些绿化措施规定了农民必须做出一系列对环境、气候、对国家有利的强制性行为，才能得到全部的直接补贴。主要包括：

1. 作物多样化：即在耕地上种植多种作物来提高农业生态系统的韧性，改善土壤健康状况，减少病虫害。
2. 维持永久性草地：保护碳储存和生物多样性的载体，禁止将草地、牧场开垦为耕地。
3. 划定生态焦点区，具有一定耕地面积的农场主要将不少于其耕地面积 5% 的土地作为生态焦点区，田边地角、树篱、缓冲带、固氮作物等都属于此类，为野生动植物提供栖息地和生态廊道。

这项政策把数亿欧元的财政补贴与具体的生态保护行为联系起来，目的就是促使全欧盟百万农民采取可持续的生产方式。它是宏观政策层面用经济杠杆来引导微观主体行为，进而维护和提高农业景观生态系统服务功能的典型案例。

（三）国际碳汇交易机制

气候变化是全球性的生态危机，基于市场机制的碳汇交易制度是应对气候变化的创新。在《京都议定书》、《巴黎协定》等国际气候框架之下，全球形成了强制履约市场和自愿市场为两大部分的碳市场体系。碳汇是指森林、草原、湿地、土壤等生态系统的吸收二氧化碳、储存二氧化碳的能力，是可量化、可交易的商品。通过造林、再造林、森林管理、农业土壤改良等方式增加的碳储存量，经由严格的核证程序之后，能够转变成碳信用额度，在市场上开展交易。

其运行逻辑就是把保护、修复生态系统的行为赋予直接的经济价值。发达国家或者高排放企业可以购买发展中国家林业碳汇项目信用额度，用较低的成本完

成自身的减排承诺。与此同时资金流向这些生态保护项目所在地区，给当地社区提供新的收入来源，促使他们成为森林以及各种生态系统的保护者。国际碳汇交易既是应对气候变化的手段，也是全球范围的生态补偿机制。它促使资金和技术从北向南流动，一个设计良好的碳汇项目，在产生碳减排效果的同时，往往还会带来保护生物多样性、改善水源涵养、防止水土流失等一系列生态协同收益，是实现气候目标和生态系统保护双赢的工具。

三、对中国的启示与借鉴

深入探究国际环境影响评价、生态补偿等各方面的前沿经验，联系我国生态文明建设的宏伟蓝图和现实难题，能够给我国相关制度的改革和完善给予方向指引。中国应当加快建立起一个更加系统化、协同化、高效化的环境治理体系，来解决发展过程中所遇到的复杂的生态环境问题。国际上对比可以发现下表。

国际环境政策机制对比表

特性 / 国家 / 组织	美国 NEPA 制度	欧盟环评指令	日本环境影响评价法	哥斯达黎加 PES	欧盟农业环境补贴	国际碳汇交易
制度类型	法律	指令	法律	政策 / 法律	政策	市场机制
核心关注点	程序正义、累积影响、战略环评雏形	完整体系（项目 + 战略）、生物多样性、指令协同	精细化生态考量、公众参与、范围界定	森林服务商品化、受益者付费	农业绿色化、生态服务支付	减排、生态补偿、市场交易
生态系统视角	增量影响、区域承载力	生物多样性、保护区、水生态	结构与功能、人与自然接触场所	温室气体、水文、生物多样性、景观美学	作物多样化、永久草地、生态焦点区	碳吸收与储存、生物多样性协同收益
公众参与度	高（知情权、参与权）	高	高（公告、意见征求、范围界定）	中（土地所有者自愿参与）	中（农民执行义务）	中（项目透明度、核证）
经济工具	无直接经济工具	无直接经济工具	无直接经济工具	生态服务支付	补贴与环保挂钩	碳信用交易
全球 / 国内影响	全球环评制度先驱	区域统一标准	亚洲国家借鉴	发展中国家典范	区域农业政策	全球气候治理

（一）完善法律法规体系

中国的环境影响评价制度虽然有了很大的进步，但是对整个生态系统的保护

还存在提升的空间。参照美国 NEPA 对于累积影响的重视、欧盟指令对于生态要素的全面涵盖,我国在修订《环境影响评价法》及相关法规时,应当加强对生态系统服务功能、生态系统结构完整度、生物多样性的评价要求。推动环评由要素清单式的评估变为以生态系统承载力、恢复力、稳定性为依据的综合研判,对于涉及重要生态功能区、生态环境敏感区、脆弱区的项目要进行更为严格的生态影响专项评价。

提高战略环评的法律地位,强化它的刚性约束力十分重要。借鉴美欧的经验,使战略环评在国土空间规划、重大产业政策、能源资源开发规划等宏观决策过程的早期阶段真正嵌入进去,发挥源头预防的作用。要构建启动机制、制订技术导则、推行独立审查程序并实行强有力的追责机制,保证战略环评的结果能够对规划政策的制定和调整产生实际影响,防止项目环评“改不动”,规划环评“跟不上”。加强《环境影响评价法》同《长江保护法》、《黄河保护法》以及国家公园有关法律法规的衔接,合力保护好重点流域、区域生态系统。

(二) 创新市场化政策工具

中国的生态补偿已经进行了不少探索,但还应借鉴国外的成功经验,创建起系统性的、市场化的政策工具箱。哥斯达黎加的经验显示,实行全国性的、法律性的生态服务付费制度,是动员全社会力量共同保护的较好办法。中国可以加快建立除重点生态功能区转移支付之外的、更加多样化的生态补偿资金渠道,比如研究开征与生态服务有关的税费,引导和鼓励水资源使用者、矿产资源开发者等生态系统服务的受益者、使用者以市场化方式向保护者付费。这就需要建立科学的生态系统服务价值核算体系,确定合理的补偿标准和支付方式,保证补偿的公平、有效。

在碳市场方面,中国已经建立起世界上规模最大的全国碳排放权交易市场,未来要发掘其在生态保护方面的作用。可参考国际碳汇交易经验,完善林业、草原、湿地碳汇项目核证方法学和交易规则,把更多基于自然的解决方案纳入碳市场,甚至发展生物多样性信用、水权交易等新市场化工具。借助金融创新来引导大量社会资本投向生态保护产业,把保护生态环境的行为变成能够带来经济收益的行为,把绿水青山真正变成金山银山。

(三) 加强国际合作与能力建设

生态保护是全世界人民共同的事业,面对气候变化、生物多样性减少等全球

性难题，没有一个国家可以置身事外。中国应该以更加开放的姿态，全方位开展环境领域合作。利用“一带一路”绿色发展国际联盟等多边平台积极分享中国在生态修复、荒漠化治理等各方面的成功经验，同时系统地引进吸收发达国家在环境影响评价技术方法、生态系统监测网络建设、环境信息公开、公众参与等各方面的先进理念和实践。

加强能力建设，是实行生态系统视角环评方法的根本保证。这需要国内外的共同合作。一方面要鼓励和支持国内的高校、科研院所同国际顶尖的研究机构建立联合研究中心，一起开展符合中国复杂生态系统的评价模型和指标体系研究。另一方面用人员互访、合作培训等方法培养出一批既懂生态学、环境科学又懂经济学、法学、社会学的复合型环评人才。同时学习国外环评公众参与成熟的经验，建设透明、便捷、有效的参与途径，提高群众科学素养，让群众成为生态保护的积极行动者和监督者，为建设人与自然和谐共生的现代化奠定坚实的群众基础和智力支持。

第十章 生态系统评价技术标准与展望

第一节 生态系统评价技术规范

一、国家与行业技术标准体系

该体系以国家级技术导则为主导，辅之以针对某些行业或地区特点的技术导则及地方性标准，从而形成起我国生态影响评价多层次、全方位的技术指导体系，为其法规基础。

（一）《环境影响评价技术导则 生态影响》

HJ19—2022 环境影响评价技术导则生态影响是由生态环境部发布并实施的，是我国生态影响评价领域具有纲领性意义的技术文件。它是国家生态影响评价技术标准体系的基础。该导则对生态影响评价的基本原则、内容、程序、方法等都做了系统规定，适用于会对生态系统造成影响的规划、建设项目的环境影响评价工作。它的公布和实施，意味着我国对生态影响的评价由粗放的定性描述转变成系统化、定量化、规范化的管理，对于从源头上防止和减轻生态破坏有着里程碑式的意义。

导则的核心内容是以生态系统整体性为出发点，把生态系统的结构、功能、过程作为评价主线。规定评价范围要包括陆地和水域生态系统，评价因子包含生物多样性、生态系统服务功能、生境质量、生态结构完整性等诸多方面。导则创建起“现状调查、影响预估、保护举措”三者并存的评价体系，评价工作要知晓项目所在地的生态本底情况，合理预估项目建设与运营所导致的直接、间接以及累积的生态影响，之后再提出有指向性、可执行的生态保护和恢复措施。

该导则的权威性、普适性在于它是生态环境主管部门审批建设项目环境影响报告书（表）中生态影响评价内容的依据。统一全国的评价标准和技术要求，使得各个地区、各个类型项目的生态影响评价具有可比性，进而提高评价结论的科学性、公信力。导则的不断修订也体现了国家生态环境保护战略的演变，对生态保护红线、生物多样性保护优先区域等敏感目标的保护要求越来越严格，促使建

设项目优化选址选线，主动避让重要的生态空间。

（二）相关行业生态评价技术规范

在国家通用导则的基础上，根据各个行业建设项目所造成的不同的生态影响，相关主管部门制定了一系列行业生态评价技术规范，是对通用导则在具体领域内的细化和补充。这些行业规范充分考虑了本行业生产特点、工艺流程及对生态系统造成的影响方式，评价内容更加具体、更有针对性，提出的保护措施更加贴切，提高了评价工作指导性和可操作性。

这些行业标准通常聚焦于特定类型的生态影响，并提供更为详尽的调查方法与预测模型。例如：

1. 水利水电行业技术规范：就大坝建设对河流连通性、水文情势改变对下游水生生物及河岸带植被的影响、水库淹没区陆生生态系统损失、鱼类洄游通道保护等提出有针对性的监测和补偿措施要求。

2. 交通运输行业规范涉及到公路、铁路等线性工程建设给野生动物栖息地造成的分割，给动物迁徙通道带来的阻碍，施工期的植被扰动和运营期的噪声光污染等问题，并且强调了生态廊道、动物通道等缓解措施的设置。

3. 矿产资源开发行业规范，主要关注大规模地表开挖造成土地占用、植被破坏，废石堆存带来的景观破坏、水土流失，矿区重金属污染对土壤、水生态系统可能造成的危害等问题。

行业规范的存，在于让生态影响评价可以更为深入地接触到项目的中心工艺环节，找到影响项目发展的重要因素，促使行业绿色发展和技术进步。它们是把宏观的生态保护需求同微观的工程实践联系起来的桥梁，很好地避免了评价工作中出现的“一刀切”问题。

（三）地方生态评价技术标准

地方生态评价技术标准是国家、行业标准体系的重要补充，它从某一行政区域的自然地理条件、生态系统特征、社会经济发展需求出发，把国家层面的宏观要求同地方的精细化管理紧密结合起来。我国地域辽阔，生态类型丰富，东北有森林湿地，西北有荒漠戈壁，青藏高原有高寒生态系统，东南沿海有红树林、珊瑚礁等，各具特色。各个生态系统对于环境的敏感度以及脆弱性各不相同，国家通用标准不能完全包含所有的生态保护特殊要求，因此地方标准的制定就显得十分必要。

地方标准一般由省级环保部门制订，内容具有较强的地域性、针对性。它们会对本行政区内的珍稀濒危物种、特有生态系统或者重要的生态功能区（水源涵养区、江河源头区等）提出比国家标准更严格的要求和保护标准。某些省份会对境内的喀斯特地貌生态系统制订专门的评价指南，明确石漠化风险评价的方法；或者对重要的候鸟迁徙停歇地，要求项目评价必须包含对鸟类迁徙行为影响的专题论述。地方标准可以同地方生态保护规划、生态保护红线划定成果、主体功能区规划相衔接，使项目环评结论与地方空间管控要求紧密结合，提高规划环评和项目环评的联动性。

我国的生态影响评价技术标准体系是由国家级、行业级、地方级标准层层递进、相互配合形成的。下表清楚地显示了各个层次标准的特点：

中国生态影响评价技术标准体系构成表

标准层级	主要发布机构	适用范围	主要特点
国家级	生态环境部	全国性、普适性	纲领性文件，宏观指导，确立基本原则和方法
行业级	各行业主管部门	特定行业领域	针对性强，细化通用导则，考虑行业特殊性
地方级	省级环保部门	特定行政区域	地域性强，结合地方生态特点，可严于国家标准

从上表中可见，这种多层次的体系保障了生态影响评价的全面性和精细化。

二、技术规范的主要内容与要求

技术规范的关键在于为评价操作提供具体的准则和评判标准，内容覆盖从评价等级到影响预测的全部环节，保证评价工作的条理性和科学性，是保证评价质量的重要组成。

（一）评价工作等级划分

评价工作等级划分属于生态影响评价的初始步骤，按照建设项目可能造成的生态影响程度以及所在区域的生态敏感性，对评价工作的深度和广度加以分级，从而达到评价资源的合理利用的目的。不同的管理方式，让经过充分的论证的重大项目得以简化程序，同时一般的项目也可以加快评价工作、提高评价工作的针对性和效率。

划分等级的参考依据主要是两个因素相结合而形成的矩阵，项目影响特征是

指项目本身影响的性质、规模、工程占地范围和作用等,评价区生态敏感性是指区域生态系统的价值以及对外界影响的承受力。技术导则一般都会给出一个生态敏感性分级表,把自然保护区、风景名胜區、重要湿地、饮用水水源保护区、水土流失重点防治区等区域划为高度敏感区。大型的、影响范围广的建设项目,如果位于生态高度敏感区,其评价工作等级一般定为一級;反之则为二級或者三級。不同的等级有着完全不一样的评价要求,一級评价需要全面深入的现状调查和定量的影响预测,三級评价只需要简单的分析和定性的描述。

(二) 现状调查与评价方法

生态现状调查与评价是整个生态影响评价工作基础。其所用的数据的准确性、全面性直接影响后面影响预测和评价结论的可信度。技术规范就这一环节提出了系统严格的要求,目的是要全面掌握评价范围内生态环境的本底状况,客观认识评价范围内主要的生态问题和关键的保护对象。该步骤的主要目的,就是为后面影响分析建立一个明确可比的零点状态。

调查内容要全面覆盖生态系统的各个部分以及层次。从宏观上来说,需要利用遥感影像、地理信息系统技术,对区域内土地利用/覆盖类型、景观格局、生态系统类型以及它们的空间分布情况进行研究。中观上要调查主要生态系统(森林、草地、湿地、农田等)的结构,群落类型、优势种、植被盖度等。微观上关注生物多样性,对区域内野生动植物资源进行调查,重点保护国家、地方重点保护物种、珍稀濒危物种、特有物种的种类、数量、分布及生境。水源涵养、水土保持、防风固沙、气候调节等生态系统服务功能已经成为了现状调查和评价的重点。

为了保证调查质量,技术规范对调查的方法、时间、频次都有具体的规定。调查方法的选择要科学合理,一般采用遥感解译与地面样方、样线调查相结合的方式。对于动植物调查,繁殖季、越冬期等不同时段会进行多次,以体现其动态变化。从数据来源上来说,重视历史数据收集和现场实地考察相结合,力求达到全面、及时的目的。数据采集结束后还要对现状进行评价,判断区域生态系统的完整性、稳定性,服务功能价值如何,识别出生态敏感区、主要保护目标,这些都会成为影响预测、评估的重点对象。

现状评价不单单是对数据的罗列,更是对数据进行深度分析并加以价值判断的过程。需要用生态学理论,采用生物多样性指数、景观生态学指数等方法来分

析调查数据，从而判断当前生态系统是否健康。计算香农威纳指数可以评价物种多样性水平，分析斑块密度、连接度等景观指数可以评价生境破碎化的程度。最终，对于现状调查与评价成果要采用易于识别、预测项目所造成的生态影响的图件、表格、文字等形式表现出来，从而为有关的决策提供可靠的依据。

（三）影响预测与评价要求

影响预测与评价属于生态影响评价的重要环节，它在全面了解现状的基础上，对建设项目在建设阶段、运行阶段可能会对生态系统造成的各种影响进行科学的预估和评价。技术规范有具体的要求，预测要科学，评价要客观，结论要清晰，以此为项目的决策和改进设计给予重要的支撑。

规范要求影响预测要全面、系统，需要考虑不同时间、空间尺度以及不同类型的影响。从时间上分，施工期的短期、急性影响（如植被清除、水土流失），运营期的长期、慢性影响（如生境隔断、物种干扰）。从空间上来看，要识别出项目直接占地区域的影响，还要识别出项目影响范围以外的间接影响，例如道路开通引发的区域开发压力。从性质上，既要考虑不利影响，也要考虑可能产生的有利影响，特别要注意累积性影响，即本项目与周边已有的或规划中的项目共同作用的影响。

选择预测方法要有科学依据，不同影响类型和评价等级所偏重不同。对可以量化的影响，例如土地占用导致的生境损失面积、水土流失量等，应该使用模型计算、类比分析等定量方法。如用 USLE 估算水土流失增加量，或用栖息地模型评判对某物种适宜生境的影响。对景观美学价值、动物行为干扰等无法量化的影响，可用专家咨询法、矩阵分析法等定性或半定量的方法进行预测。不管采用哪种形式，技术规范都要求对预测参数来源、计算方法、不确定性、预测结果的可靠性作出清楚说明。

预测完成后，就要进行影响评价，也就是判断预测出的生态变化是否可以接受。评价标准要符合相关法律法规和标准的要求（生态保护红线控制要求、重要保护物种保护规定），并且不能对区域生态系统的稳定性、完整性造成不可逆转的破坏，也不能给本地区的可持续发展带来重大影响。最终的评价结论要清楚、具体，说明项目存在哪些主要的生态环境问题，给出项目环境可行“可行”“不可行”或者“经采取某某措施后可行”的结论。

三、技术规范的执行与修订

一个完备的技术规范体系，单单依靠科学的设计是不够的，还需要有效的执行、及时的反馈以及不断的更新，形成一个动态的闭环管理过程，从而保证标准能够真正落实并与时俱进。

（一）标准的宣贯与培训

标准生命力体现在应用之中。为了让标准能被广泛使用，就要进行大量的宣传和培训。一项新的技术规范或者修订版技术规范出台之后，需要经过一系列有组织的活动，使其中的内容和要求为广大评价从业人员、审批管理人员以及建设单位所知晓并理解。宣贯工作的目的在于统一思想认识，明确标准的法律地位和技术导向，保证评价实践中各方正确理解其精神。

培训工作更加具体深入，一般采取集中授课、案例分析、专题研讨等形式，由标准主要起草专家或者有经验的从业者进行讲解。培训内容不能只是对每条标准的逐条说明，还应该介绍每一条标准背后的科学道理、实际应用，讲解新技术、新方法的运用，从典型案例的分析中寻找问题，找出一般出现的错误。经过系统的培训，可以有效地提高评价人员的技术水平和专业素养，避免由于标准理解不统一造成的评价质量参差不齐现象，从而保证技术规范在全国范围内得到统一、规范的执行。

（二）执行中的问题与反馈

任何一项技术标准在实际应用过程中都会遇到预料之外的问题或挑战。因此，建立一个畅通的问题反馈渠道就成为标准自我完善的必要环节。生态影响评价的实践当中从业人员就会遇到一些规定太过理想化，在具体的执行中难以实现；评价指标的获取成本高，经济可行性不高；或者新问题出现而已有标准存在覆盖空白的情形。

一线实践中反馈回来的信息非常宝贵，是检验标准科学性、适用性、前瞻性的试金石。因此行业主管部门、标准化技术委员会要建立并保持常态化的反馈渠道，定期召开座谈会、设意见征集网站等。对这些问题进行系统地收集整理分析后，就可以准确地找出技术规范中存在的不足，辨别出最为迫切需要修订完善的部分。不但可以解决眼前的实际问题，而且是促使标准不断改善的根本动力，保证标准体系的现实指导性。

（三）标准的动态修订与完善

生态系统是复杂的动态系统，人们对它的认识在不断深化，评价技术也在不断进步，国家生态保护战略和管理需求也在不断变化。这就决定了生态影响评价技术规范必须是开放的和不断发展的，而不是一成不变的教条。标准的动态修订和完善是适应变化的必然选择，也是保证标准科学性、先进性的基本途径。

修订工作启动，一般是由多种因素共同推动的。除了实践中积累的问题反馈，生态学、环境科学等领域内出现的重大科研成果，比如对生态系统阈值、累积效应机理全新的认识，也会给标准的修订提供新的理论支持。新的监测技术（环境DNA、卫星遥感高光谱技术等）和模拟技术（人工智能驱动的生态模型等）的发展使更精确、高效的评价成为可能，因此需要及时吸纳到标准里。国家重大战略部署，例如“碳达峰、碳中和”目标的提出，也需要将碳汇功能影响等内容的考虑纳入生态影响评价之中。

标准的修订不是随意的，是由跨学科专家对现有标准进行评价修订，并征求各方意见而来的。未来的修订方向将会更加重视生态系统服务量化的评价，气候变化情景下生态风险的分析，生物多样性净增益目标的实现途径，以及基于自然的解决方案等前沿领域。经过这样的定时、科学的动态修订之后，我国的生态影响评价技术标准体系就会一直同国际前沿水平保持一致，更好地为我国生态文明建设创建大业贡献力量。

第二节 评价指标体系标准化

一、指标体系标准化的意义与原则

指标体系标准化就是把分散的、多种类的评价指标，整合成一套通用规范、统一口径、统一标准的系统性工具。它是实现环境影响评价从定性描述走向定量分析、从主观判断迈向科学决策的重要步骤，为评价方法的科学运用打下了良好的基础。

（一）保证评价结果的可比性与科学性

环境影响评价结果科学性、可信度保证就是指标体系标准化的目的。形成统一的评价体系，统一指标的定义、计算方式和评价基准，可以消除由于评价主体、

评价时间、评价区域的不同所导致的评价结果的差异,使得不同项目、不同区域的环境影响评价结果具有横向、纵向的可比性。该可比性对于区域累积性环境影响评价、环境政策效果评估、国家或者区域生态环境状况宏观调控都具有不可替代的作用。当所有的评价都采用统一的语言、标尺的时候,决策者就可以清晰地比较各个开发方案对生态系统的利弊,从而做出科学的决策。

标准化的评价指标体系可以降低评价过程中主观的随意性。它给评价人员赋予了明确的操作规程和评判标准,有效地减小了由于个人经验、知识水平或者价值取向的不同给评价结果带来的干扰,使得评价过程更加透明、公平。严格的数据来源规范以及质量控制要求,可以提高评价所用基础数据的可信度,进而从源头上保证评价结论的科学性。既可以提高评价报告的说服力,也可以为环境管理、监督执法和司法仲裁提供可靠的科学依据,这是环境影响评价制度走向成熟、规范化的必由之路。

(二) 系统性、代表性、可操作性原则

系统性原则就是生态系统视角下选择指标的基本要求。生态系统是由生产者、消费者、分解者和非生物环境组成的复杂整体,各组成成分互相联系、互相制约,并处于动态平衡中。因此评价指标体系要全面体现生态系统的整体特征,从结构、功能、过程三个方面来体现。这就意味着指标的选择既要考虑物种多样性、植被覆盖率这些结构性指标,也要考虑能量流动、物质循环这些过程性指标,还要考虑水源涵养、气候调节这些生态系统服务功能指标,力求从宏观上把握项目建设对生态系统完整性和稳定性的影响,防止以偏概全。

代表性原则意在用最少的指标来体现最大的信息量,准确反映生态系统的主要特征以及它所面临的主要胁迫。在复杂的生态系统中,指标不是越多越好,过多的指标不但会增大评价的成本和难度,还会掩盖主要矛盾。选择代表性指标的关键是找出生态系统中的关键物种、关键生境或者关键的生态过程。用区域内指示物种或者旗舰物种的种群动态来表征生物多样性的变化,或者用土壤有机质含量来反映土壤健康状况。这些指标对环境的变化很敏感,可以起到牵一发而动全身的预警和指示的作用。

可操作性原则要求指标具有现实性。一个看起来很理想的指标,如果数据很难获得、监测成本高、计算复杂,在评价工作中就没有什么实际价值了。可操作性指标定义明确,数据可以通过常规监测、遥感影像、统计年鉴等途径获得,

并具有可靠的数据质量。同时指标的计算要简单科学，评价的标准要具体化，便于不同层次的评价者把握。在保证科学性的同时还要考虑经济性和时效性，这是标准化指标体系能够得到广泛应用并有效执行的重要条件。

（三）定量与定性指标相结合

生态系统影响评价里，定量指标和定性指标的结合应用，是达成全面深入评价的必然走向。定量指标用具体的数值来表示环境要素的状态或者变化，大气污染物浓度、地表水化学需氧量、物种丰富度指数等都属于定量指标。该类指标准确直观，便于建立数学模型、趋势预测、不同方案比较，是评价工作科学化、标准化的基础。它们给环境影响的程度和范围赋予了客观衡量，是硬性的、可验证的评价准则。定量和定性指标的特点、优势、应用场景见下表。

定量与定性指标对比表

指标类型	特点	优势	局限性	应用场景
定量指标	数值化表达；精确、客观	便于建立模型、趋势预测、方案比较；评价科学化、标准化基础	难以完全表达生态系统复杂性及非结构性影响	大气污染物浓度、地表水化学需氧量、物种丰富度指数等
定性指标	等级划分、专家咨询、情景描述；主观判断	弥补定量不足，纳入非量化影响；贴近实际，融合经验与价值	主观性较强，可能存在争议	生态美学价值、文化服务、生态系统恢复力、栖息地破碎化格局等

但是生态系统并不只是简单的数字可以完全表达的。许多重要的生态价值和环境影响是模糊的、非结构性的，不能进行准确的量化。区域生态系统的美学价值、文化服务功能、生态系统的恢复力与脆弱性、生物栖息地的破碎化格局等，对于这些影响的描述和判断就需要用到定性指标。定性指标一般用等级划分、专家咨询、模糊综合评判或者情景描述的方式进行评价。它们可以弥补定量分析的不足，把那些无法量化的因素纳入评价范围，使评价结果更接近生态系统实际情况以及人们的主观感受。把专家的经验知识同公众的价值判断结合起来，使评价更加全面，更加有人文关怀。因此，一个完整的标准化指标体系必定是定量指标与定性指标的有机结合，二者互相补充，共同体现项目对生态系统的影响。

二、关键指标的标准化方法

对关键指标进行标准化，就是保证评价体系能够正常运转的技术核心。这就

牵涉到对指标内涵、获取手段、评判尺度等一系列标准的规范化工作，目的是给所有的评价活动赋予明确、统一、可反复操作的框架。

（一）指标定义与内涵的统一

指标定义和内涵的统一为标准化打下了基础。同一个指标名称，在不同的学科背景或者应用场景下，其含义完全不一样，这就是评价结果出现分歧、无法比较的首要原因。生物多样性指标的内涵可以包括遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性等各个层次。标准化时要确定评价中的“生物多样性”包含哪些层次，给出准确的操作性定义。例如可以将其明确为评价区域内维管植物物种的香农-威纳指数，将宽泛的概念具体化为可以被测量、可以被计算的实体。

统一界定工作要形成规范性文件，对每一个关键指标的理论依据、生态学意义、适用范围以及与其它指标的逻辑关系做出详细的说明。这既是对指标本身的界定，也是对指标选用理由的解释，使指标选用更加科学。编制《环境影响评价生态系统指标术语和定义规范》等技术文件，使得所有的评价参与方对于每一个指标都形成一致无歧义的理解。为后面数据采集、计算分析、结果解释等奠定了基础，是实现评价过程规范化的逻辑起点。

（二）指标计算方法与数据来源规范

明确指标内涵之后，就要对指标的计算方法以及数据来源加以严格规定。即使指标的定义一样，如果用不同的公式或者数据采集方法计算，也可能得出完全相反的结果。标准化工作要给每一个定量指标赋予唯一，或者在特定情形下可以选用的计算公式，而且要细致地阐述公式内各个参数的含义，单位以及取值方法。针对复杂模型指标，要注明模型种类，主要算法，输入参数列表以及建议的软件工具，保证计算过程可以重复。

数据是评价的生命线，数据来源的规范性也同样重要。标准化体系应该规定好各类指标数据的获取优先顺序、采集技术标准和质量控制要求。

1. 数据来源层级：优先采用国家或地方官方统计数据、生态环境监测网络数据；其次利用标准化遥感解译、野外调查和样品分析获得的数据；最后可以采用模型模拟或者文献引用数据，需要注明不确定性。

2. 野外调查中采样布点原则、采样频率、样品处理和测试方法等技术规范都必须符合国家标准或者行业标准。土壤样品采集深度、混合方式，水样采集容器及固定剂等均应按照国家或行业标准执行。

3. 质量控制：从数据采集、传输、存储到分析全过程建立质量保证或者质量控制体系，包括数据记录规范性、仪器定期校准、空白对照和平行样检测等，保证数据的真实性、准确性、完整性。

（三）指标权重确定与评价标准

指标权重的确定属于综合评价的关键环节，它体现出各个指标在总体评价目标中各自所占的比例。由于生态系统各个要素重要性是不相同的，对不同的指标给予合理的权重，直接关系到最后的评价结论是否科学、是否具有导向性。标准化工作应当给出一套科学、透明的权重确定方法论。常用的方法有层次分析法、德尔菲法、熵值法等。标准化并不是要确定一组固定的权重值，而是要规范权重值的确定过程和方法。各个区域根据当地生态敏感性、保护目标、主要环境问题进行适应性调整，但是任何调整都必须有充分的理由和合理的说明。就自然保护区来说，其生物多样性有关的指标权重要比一般地区高得多。

评价标准是衡量环境影响程度的尺子，也是判断其可接受性的依据。没有标准的评价会失去方向，需要建立与评价指标相对应的标准体系。这些标准可以是来源于国家或者地方的环境质量标准、污染物排放标准、生态保护红线管控要求等法律法规规定的标准。对于没有国家法定标准的生态指标，例如生态系统健康指数、栖息地质量等，可以参照相关研究成果、区域生态背景值或者组织专家论证来确定评价的基准值、阈值或者等级划分标准。可以将区域历史最佳的生态状况作为参照标准，也可以把生态系统发生不可逆退化的临界点设定为预警阈值。建立起这样的标准体系以后，评价结果就由原先的“影响有多大”转变为“影响是否显著、是否可接受”的科学判断。

三、标准化指标库的建设

为了系统地管理和使用以上标准化成果，建设一个动态的、开放的、共享的标准化指标库就成了必然的选择。该指标库不是简单的一个指标集，而是一个集指标定义、计算、评价标准和应用实例于一身的综合性的知识管理平台。

（一）分类型、分区域指标库构建

生态系统的地域差异很大，种类繁多。不同类型的建设项目（水电工程、矿产开发、城市建设等）对生态系统的影响方式和影响环节不同；不同区域的生态系统（森林、草原、湿地、海洋等）其结构、功能、脆弱性也不同。因此，通用

的一套指标库不能满足精细化、差异化的评价需求。标准化指标库的创建要遵照分类型、分区域这一原则。

分类型构建，即根据不同的开发活动来建立相应的指标子库。水利工程指标库应该突出水文情势变化、水生生物连通性、洄游鱼类栖息地等特色指标；矿产开发指标库则应侧重地表扰动、土壤重金属污染、含水层破坏等。分区域构建就是按照我国生态地理分区，为各个生态区（东北森林区、黄土高原区、青藏高寒区等）创建有地方特色的指标子库。这些子库除了包含全国通用的指标之外，还会增加一些可以反映此地独有的生态特征、主要的生态问题以及高敏感性因子的指标。模块化组成方式保证评价具有统一的规范性，同时还可以体现对问题进行具体分析和处理的特点，大大提升评价的实用性、科学性。

（二）指标库的动态更新与维护

生态系统处在不断变化之中，人们对它的规律的认知也在不断加深，环境管理目标和评价技术也不断更新。标准化指标库不是一成不变的，它必须要建立起一个动态的更新与维护机制来保证它的科学性、前瞻性。此种机制应该包含定期评价审查以及即时的反应性调整。定期评价的周期为3至5年一次，由生态学、环境科学、行业专家和管理部门组成的委员会对指标库整体适用性、各指标的科学性、可操作性做全面审查，淘汰不适用、过时的指标，修正存在问题的指标参数或计算方法。

响应式调整指的是当出现新兴外来物种入侵等新的重大生态问题，国家发布“双碳”目标等重大生态环保战略，高分辨率遥感监测技术广泛使用等评价技术有重大突破时，可以及时启动更新程序，将新的、更有效的指标或者方法加入到库中。更新维护过程要公开透明，充分听取各方面意见，每次修订都要详细记录并说明理由，使指标库的发展脉络一目了然。持续不断的“新陈代谢”能力，才是保证指标库有生命力和权威性的重要因素。

（三）指标库的共享与应用

标准化指标库最大的价值在于被广泛地使用与共享。必须打破信息孤岛，创建开放、便捷的共享平台。可以创建专门的网站或者云服务平台，向各个级别的环评机构、建设单位、管理部门、科研院所以及社会公众开放。平台应当给予用户友好易用的界面以支撑在线的查询，筛选，下载以及组合操作。并且要有详细的使用手册，计算工具和实际案例。用户可以根据项目类型和所在区域快速生成

一份专业、规范的评价指标体系建议。

应用推广指标库，有利于环境影响评价领域的知识积累、传承。汇集各个项目评价实践数据之后，指标库自身就可以成为一个大数据平台，从而为开展区域累积性影响评价、战略环境评价以及生态系统演变规律研究等提供重要的数据支撑。同时也可以作为环境管理人员、环评从业人员的培训教材，提高整个行业的专业水平。建立用户反馈渠道，收集应用过程中遇到的问题以及改进建议，形成应用、反馈、改进、再应用的良性循环，使生态系统视角下的环境影响评价方法学走向成熟完备。

第三节 新技术方法应用前景

一、大数据与人工智能的应用

大数据同人工智能技术相融合，正在改变环境影响评价所依靠的数据根基、预测模型以及决策范式。通过对海量、多源、异构的环境数据进行深入挖掘和智能分析，揭示传统方法发现不了、看不清的生态系统的复杂关系及变化规律，使评价工作进入到智慧化的新阶段。

（一）生态环境大数据平台建设

生态大数据平台的创建为智能评价打下了基础。传统环境影响评价经常碰到数据来源少、时间空间尺度不契合、信息孤岛这些问题，进而致使评价不够全面、系统。建设一体化的生态环境大数据平台的核心就是把来自卫星遥感、地面监测站、无人机、物联网传感器、社会经济统计等各种数据源进行整合。该平台利用云计算、分布式存储等技术，对水、土、气、生、人等各方面的数据进行标准化接入、清洗、融合、管理，形成一张网覆盖面广、及时更新、精度高、易管理的“一张图”数据库。

依靠这个平台，评价人员可以展开长时段的大范围生态系统格局和过程分析，而且能够持续追踪行政区域生态系统结构，功能以及服务对人类活动的反应。不但给评价工作赋予了可靠的数值支撑，而且有效地冲破了部门之间的数据壁垒，借助数据共享和协同分析，对累积的、地域的生态环境影响展开综合研判，把评价视角由单个项目扩大到整个区域生态系统层面，进而给国土空间规划，产业布

局等宏观决策赋予更加科学的支撑。

（二）机器学习在影响预测中的应用

机器学习算法凭借其强大的非线性拟合能力以及模式识别能力，给生态环境影响的精准预测开辟了新的道路。传统的物理模型或统计模型，在处理生态系统这样的复杂、非线性巨系统时，由于简化假设太多或者机理不明，所以预测精度受限。机器学习模型，例如人工神经网络、随机森林、支持向量机等，可以直接利用大量的历史监测数据以及环境背景数据进行学习，找到数据里面隐藏的复杂映射关系。

机器学习技术可以准确预测出建设项目会对区域空气质量、地表水环境、土壤健康、生物多样性等各方面造成什么样的影响。比如用已经训练好的带气象、污染源、地形等众多特征的模型，来更好地预测新增污染源对周边大气污染物浓度时空分布的影响。生物多样性评价时，可以将栖息地因子、气候变量、人类活动强度数据等整合起来，预估某个物种栖息地的适宜性及种群变化趋向，评价因建设活动引发的生境破碎化和生物多样性损害程度。

深度学习中卷积神经网络对于遥感影像数据处理有巨大的潜力。可以自动识别、分类土地利用类型、植被覆盖变化、湿地萎缩等，对生态系统结构变化进行快速、准确的监测，还可以对未来情景进行模拟，为生态影响评价提供动态、可视化的预测结果，极大提高预测工作的效率和可靠性。

（三）智能决策支持系统

创建智能决策支撑体系，这是促使环境影响评价成果高效率转变的关键部分。该系统把大数据平台、预测模型库、环境标准库、法律法规库和专家知识库融合起来，目的是给管理者给予科学的、高效的、透明的决策支撑。它不只是数据汇集、模型集成的系统，还是一个人机交互的具有分析、评价、优化、预警功能平台。

一个完善的智能决策支持系统能够实现以下多方面功能突破：

1. 多方案比选与优化，系统按照给定的生态保护目的、环境质量标准和社会经济约束，自动生成不同的项目布局、工艺路线或污染控制方案，快速模拟这些方案的生态环境影响，利用多目标优化算法找出环境、经济、社会效益综合最好的方案。

2. 减缓措施智能推荐：依据预测出来的负面影响的种类及程度，从知识库中匹配出最适合的生态保护、污染防治方案，比较各种组合方案的成本效益，为制

定科学合理的环境治理方案提供依据。

3. 实时预警动态管理，在项目建设及运营期间，系统可以接入实时监测数据，当出现指标异常或者偏离预测轨迹的时候，就会立刻发出警报，并给予应急调控的建议，以此来达成对环境影响的闭环控制并实现动态反馈调整，保证各项环保举措落到实处。

二、环境 DNA 等分子生物学技术

以环境 DNA 技术分子生物学方法为代表，由于其高灵敏度、高通量、无损伤等优点，正在给生态调查和健康评价带来革命。这些技术可以从环境介质中直接获取物种的遗传信息，很好地克服了传统形态学调查对专业知识以及物种可见性的依赖，给快速、全面地掌握生态系统状况提供了前所未有的微观视角。环境 DNA 等主要分子生物学技术在生态环境评价中的具体应用以及优势，见下表。

主要分子生物学技术在生态环境评价中的应用

技术名称	主要原理 / 目标	关键优势	应用领域
环境 DNA 技术	从环境介质中提取生物游离 DNA 并测序	高灵敏、无损伤、快速全面、突破传统形态学限制	生物多样性快速监测与评估、物种分布调查、入侵物种早期预警
定量 PCR	对特定环境 DNA 片段进行定量扩增	精准量化特定物种的相对丰度	关键物种、濒危物种丰度变化监测、保护成效评估
宏基因组学	对环境样本中所有微生物基因组进行测序	揭示微生物群落代谢潜力与功能组成	生态系统功能诊断（如碳氮循环、污染物降解）、耕作方式影响评估
宏转录组学	分析生物体实际表达的基因	直接体现生物体对环境压力的生理响应与功能变化	生态系统健康早期预警、低剂量污染物胁迫诊断

（一）生物多样性快速监测与评估

环境 DNA 技术是通过采集水体、土壤、沉积物或者空气样品，提取其中的游离生物遗传物质片段，然后利用高通量测序技术进行分析，从而确定样品所在环境中有哪些物种。这项技术很大程度上提高了生物多样性调查的效率和范围。传统的调查费时费力，并且行踪隐秘、形态类似、体型极小或者处于生命特定阶段的物种（卵、幼虫）不能很好地进行监测。环境 DNA 技术可以实现一个区域内微生物到哺乳动物物种名录“一站式”获取。

环境 DNA 技术可以在项目开始之前、项目进行中以及项目结束之后,快速获取区域内生物多样性本底资料和受影响后的情况。水电工程评价中,对上下游水体环境 DNA 进行分析,就可以全面了解大坝建成之后,对鱼类、两栖类和水生无脊椎动物群落结构造成的影响。在森林开发项目中,土壤环境 DNA 分析可以反映土壤微生物、真菌、小型动物群落受到的干扰。该技术由于具有高效、全面的数据获取能力,可以对项目对生态环境的影响做更加详细准确的评价,有效解决了传统样方、样线调查法在空间上存在局限性和物种覆盖率低的缺陷。

深入地讲,用定量 PCR 对环境 DNA 数据实施定量分析,可以得到某种物种的相对丰度情况,进而更好地认识生态系统结构的变化。这可以直接提供工程活动造成关键物种、珍稀濒危物种数量大幅度下降的证据,从而使生物多样性保护措施更有针对性。

(二) 物种分布与入侵监测

对物种的地理分布掌握是其保护和管理的的前提,对外来入侵物种的早期预警和快速应对是维持生态系统稳定的前提。环境 DNA 技术在这两方面都有着重大的意义。珍稀濒危物种由于种群密度低、活动隐蔽,用传统调查方法很难找到它们的踪迹。在潜在栖息地广泛进行环境 DNA 采样可以低成本地获得这些物种的分布信息。

外来物种入侵防范工作依靠环境 DNA 技术来当“生态哨兵”。很多入侵物种在扩散初期数量很少,很难被发现;一旦形成优势种群,其造成的危害就无法逆转。对港口、边境、交通枢纽等高风险地区定期开展水体或者土壤环境 DNA 监测,可以在入侵物种立足未稳之时就探测到它们的遗传信号,以此达到“零存活”级别的早期警报。这给环境影响评价里判定项目会不会变成外来物种入侵、扩散的渠道给予了有力的技术手段,还能指引制订更具前瞻性的防范举措,从源头上切断生物入侵链。

(三) 生态系统健康诊断

生态系统健康状况并不是单纯由物种组成决定的,而更深层的在于生态系统的功能是否稳定高效。分子生物学技术,特别是宏基因组学、宏转录组学等,可以超越“有哪些物种”这样的表面现象,深入到功能层面去分析这些物种正在做什么,从而给生态系统的健康做出精准的判断。宏基因组学对环境样本中的全部微生物基因组进行测序,可以了解微生物群落的代谢潜力和功能组成,比如土

壤中的碳氮循环、水体污染物降解等。

环境影响评价可以采用这些技术，对项目活动对生态系统主要功能的影响进行评价。通过分析农田土壤微生物宏基因组，可以评价不同的耕作方式或者农药使用对土壤肥力保持、固氮、有机质分解等功能的影响。水污染治理项目里，经由对比治理前后水体微生物群落功能基因的改变状况，可以依此判定生态修复手段是否有效恢复了水体的自净功能。

宏转录组学更进一步，从生物体实际表达的基因入手，直接体现生物体在特定环境压力下生理活动及功能的响应情况。这可当作一个灵敏的“生物预警”机制。当生态系统受到低剂量的污染物的胁迫时，尽管宏观的生态指标还没有发生明显的变化，但是生物群落的基因表达谱已经出现了应激反应。检测这些分子水平上的早期信号可以提早发现生态系统受到的压力，及时采取保护性的预防措施，防止生态系统发生不可逆转的退化，争取抢救的时间。生态系统健康评价正在由原来的形态学、生态学水平，向更深层次、更敏感的分子功能水平发展。

三、区块链技术的应用探索

区块链技术具有去中心化、公开透明、数据不可篡改等特点，给环境影响评价及其后续管理中信任问题提供新的解决思路。它不是直接的生态分析工具，而是搭建了一个可靠的底层合作基础架构，在生态监测、补偿机制、价值实现等环节起着重要的作用，保证评价过程的公正性以及措施的有效性。

（一）生态监测数据的可信存证

环境影响评价的科学性、公正性在很大程度上受监测数据真实性、准确性、完整性的影响。在传统的模式下，数据从采集、传递、储存到使用等各个环节都有可能被篡改或者丢失，很容易造成公信力危机。区块链技术给环境监测数据增加了一个很强的“信任锚点”。将核验过的监测数据（企业排污数据、生态本底调查数据）的哈希值（数字指纹）存入区块链，任何对原始数据的细微改动都会导致哈希值的改变，极易被发现。

这样就形成了一个可信存证机制，即提交给评价机构、监管部门的数据具有不可否认性、可追溯性。数据上链之后，其来源、时间戳、内容摘要等都会被固定下来，为之后的责任认定、执法检查、司法仲裁等提供强有力的证据。既提高了环评报告的权威性，又对数据提供方（企业、第三方监测机构等）形成有效的

约束，促使数据产生方提高数据质量管控水平，从源头上保证评价决策所依靠的信息质量。

（二）生态补偿资金的透明化管理

生态补偿是解决发展和保护利益冲突的重要方式，但是传统生态补偿资金管理中存在环节多、效率低、透明度低等问题，会降低生态补偿政策的实施效果。区块链与智能合约相结合，可以对生态补偿资金实行自动化、透明化、精准化的管理。智能合约是一种在满足预设条件的时候能够自动执行的计算机程序，可以部署在区块链上。

生态保护成效（森林覆盖率提升，水质改善等）可以作为智能合约的触发条件。成效可以由与区块链相连的可信物联网设备或者遥感数据自动验证。系统判定保护目标达成之后，智能合约就自动把补偿金从支付方账户转到受益人（实施生态保护的社区或者个人）的账户上。整个过程不需要人工干预，交易记录公开透明，杜绝了资金被截留挪用的可能性。一方面使资金拨付更加迅速，管理费用大幅减少；另一方面将补偿和成效相挂钩，保证每一笔钱用在地方，从而极大地提高了生态保护的积极性。

（三）碳交易与生态产品价值实现

推动生态产品价值实现，就是对“绿水青山就是金山银山”最好的践行。区块链技术给碳信用、水权、排污权等环境权益的交易和经营，赋予安全又高效的市场设施。碳交易市场的主要问题之一就是双重计算，即同一减排量被重复出售或者被用作抵消。通过把每吨核证碳减排量（或者别的生态产品）变成代币，创建独一无二且无法分割的数字资产，在区块链上追踪这种数字资产从其所有者产生之时，转让之日到注销之刻的全部过程。

保证碳信用的唯一性、真实性，彻底解决双重计算问题。去中心化的交易平台可以降低碳市场点对点交易的交易门槛，小微企业和个人也可以更多地参与进来，减少中介费用，提高市场流动性。环境影响评价的这种价值实现路径更可靠，在评价过程中提出的以新带老的减排方案、生态修复项目碳汇价值等更容易转化为经济收益，从而给绿色低碳项目的开展与实施提供更强有力的市场激励。

第四节 生态系统评价发展趋势

一、从静态评价向动态评价发展

传统的环评大多为“快照式”的静态评价，不能体现生态系统随着时间变化及累积效应。未来评价要转向动态视角，用连续观测和过程模拟去寻找其长久的演变规律，从而达成生态风险的前瞻性防范。

（一）长期生态监测与动态评估

长期生态监测为动态评价打下基础。依靠国家生态观测研究网络和各类生态站，建设覆盖重要区域的长期连续观测体系，可以获得大量的长时间序列数据。这些数据能够体现生态系统对于长期驱动力的反应规律，也给环评供应了动态的生态背景基线。动态评价把生态本底当作变化的区间而不是固定值，可以更科学地区分项目“扰动”和系统自身“脉动”。

对生态状况进行定时跟踪评价，使项目全生命周期的生态状况不断更新，根据生态状况的变化调整保护修复措施，从而达到适应性管理的目的。把评价由一次项目的准入判断变为项目周期内的生态管理。

（二）实时、在线评价系统

信息技术的发展，尤其是物联网、传感器网络以及5G技术，使得建立实时的、在线的生态系统评价系统成为可能。在重要的生态功能区、自然保护区和大型工程影响区布设大量传感器，可对水质、空气、土壤、植被、动物活动等关键参数进行实时高频采集。

数据实时上传到云上，平台依靠大数据，云计算技术来剖析，建模海量的数据，可以即时知晓生态系统的健康情况，创建生态风险警报模型。当监测指标超过设定的阈值时，系统就会自动发出警报，给管理单位预留时间来对发生的异常做出紧急处理。

这种实时在线系统把环评从事后总结推进到事中干预、事前预警，明显改进了生态环境监管的主动性和及时性。

（三）生态系统演变趋势预测

动态评价要回顾过去、监控现在、预测未来，预测生态系统的发展趋势。要求生态学模型和计算机模拟技术深度融合。未来的环评会更加依赖各种预测模型，

比如基于元胞自动机、多智能体的土地利用变化模拟,来预测区域景观格局的变化;基于系统动力学的模型,可以模拟复合生态系统中各个要素之间的复杂反馈。

近几年来,深度学习以及人工智能的时间序列预测算法,对于复杂非线性的生态数据有着极大的处理潜力。通过多情景分析框架来模拟不同政策、工程方案、气候路径下生态系统未来可能会出现的状态,从而给决策者提供关于不同的选择长期生态影响的科学预见,帮助决策者选择对生态影响最小的发展路径。

二、从单一评价向综合集成评价发展

生态系统是复杂的有机整体,各要素之间相互联系、相互影响。割裂式的单一要素评价已经不能适应系统性保护的要求。未来的评价要走向综合集成,强调它的整体性、关联性、系统性思维。

(一) 自然-社会-经济复合生态系统评价

人类社会经济活动是生态系统最大的外驱动力,而人类的福祉也与生态系统服务密切相关。因此,未来的环评要冲破单纯自然生态的束缚,创建起“自然-社会-经济”复合生态系统评价体系。此类评价既要考虑项目对生物多样性等自然要素的影响,也要考虑这些生态变化经由生态系统服务链条对区域经济、居民生计产生的反作用。

评价方法会用生态系统服务价值评估、能值分析、生态足迹这些工具来量化自然资本和人类福祉之间的联系。水利工程评价中除了考虑河流生态系统的影响之外,还要考虑水利工程对下游农业、渔业、地方病防控等社会经济系统产生的综合效益和成本。

剖析复合系统内部耦合关系,评价就更能深入地反映出项目可持续性,进而推动人与自然和谐共生的发展。

(二) 多学科、多技术融合评价

生态系统评价的综合性必然要有多学科交叉、多技术融合。单一学科的知识和方法不能解决生态系统复杂的问题。未来的工作将是由生态学、地理学、环境科学、经济学、社会学、计算机科学等领域专家组成的系统工程。技术上是“空天地”一体化、宏观微观相结合的融合。不同的生态系统监测技术见下表。

不同尺度生态系统监测技术表

尺度	主要技术	应用场景	特点
宏观	遥感、地理信息系统	大范围生态格局、质量、功能动态监测	覆盖广、时间序列长
中观	无人机低空遥感	特定区域精细化调查	高时效、高分辨率
微观	环境 DNA、稳定同位素示踪	生物多样性评估、物质循环过程揭示	精准、深入、革命性
跨尺度	大数据、人工智能	异构数据整合、深度挖掘、智能建模	发现规律、提升科学性

①遥感和地理信息系统技术在宏观尺度上还是主体。利用多种遥感数据融合可以实现对生态系统的格局、质量、功能的大范围、长时间动态监测。②中观尺度上，无人机低空遥感以其高时效、高分辨率优势，可对特定区域进行精细化调查。③微观尺度上，环境 DNA、稳定同位素示踪等生物技术，为精准评估生物多样性状况和揭示生态系统内部物质循环过程提供了革命性工具。

大数据、人工智能技术是起“粘合剂”作用，把各种异构数据融合起来，开展深入的挖掘和智能建模，进而找出生态规律，改善评价的科学性。

（三）“山水林田湖草沙”生命共同体评价

山水林田湖草沙生命共同体理念认为，环评不仅要评价单一的生态系统类型，还要从区域或者流域等宏观的地理单元进行整体评价。此法重视要素间的关联性和生态过程的完整性。它不再单独评判项目对一片林地或者一条河流造成的后果，而是将项目放在整个生命共同体里，剖析可能会引发的连锁反应。

评价一个上游的矿产开发项目时，不仅要考虑到它对矿区植被的直接影响，还要考虑到它对下游河流、湿地、农田乃至整个流域的生物多样性所造成的一系列连锁反应。评价重点由原来的要素存量评价变为生态系统结构完整性、廊道连通性、关键生态过程稳定性综合评价。要求评价指标体系有系统性，模型可以模拟生态系统之间物质流和能量流。从这个角度出发，评价就更能服务于国土空间生态修复、区域生态安全格局的构建。

三、从评价向决策支持与管理服务发展

环境影响评价最终的目的不是生成一份报告，而是把科学结论转化为可以指导决策的智慧。未来评价会愈加重视成果的转化和应用，给生态环境的精细化治理和科学决策赋予强有力的、可操作的支撑。

（一）评价结果的可视化与通俗化

复杂的评价模型、大量的数据、专业的术语，使得评价报告成了决策者和公众的“知识壁垒”。为了使评价结论“看得懂、用得上”，未来的发展方向必然是评价结果的多元化、可视化、通俗化。利用地理信息系统技术，可以把生态健康状况、敏感性、环境影响程度等空间信息，用专题地图、热力图等形式直观地展示出来。交互式数据仪表盘汇集主要的评价指标供决策者查看。

三维建模、虚拟现实、增强现实等沉浸式技术，可模拟项目建成后对景观的改变或生态恢复工程的效果，给公众参与和方案比选赋予直观感受。用图、表、动画等形式将专业科学结论呈现出来，评价结果就更容易被非专业背景的决策者、企业管理者、社会公众所接受，进而形成生态保护的社会共识。

（二）面向管理的精准化、智能化决策支持

未来生态系统评价将会被深入到管理流程之中，成为智能决策支持系统。该系统不再只是信息的提供者，而是可以响应管理需求，成为管理者可靠的“参谋”。将评价模型、空间数据库、政策法规库、专家知识库融合在一起。

管理者面对具体问题，例如怎样从备选厂址中选择出生态影响最小的方案？有限的生态修复资金应该优先投向哪里？决策支持系统可以快速运行模型，模拟不同的管理方案带来的生态影响，根据预设的目标给出最好的或者次好的管理措施。

人工智能，特别是机器学习算法，在这个过程里会起到关键的作用，它借助学习历史数据以及专家的经验，不断地提升模型预测的精确度，也使得决策推荐更加合理。这样改变可以大大提高生态环境管理的科学性、精确性、智能化水平。

（三）生态系统评价与国土空间规划深度融合

国土空间规划是对国土空间开发保护格局的顶层设计。生态系统评价必须和它深度融合，才能从源头上预防或者减轻环境影响。未来趋势是区域性的、战略性的生态系统综合评价，将会成为国土空间规划编制的前置条件和科学基础。评价结果经过对区域生态系统重要性、敏感性、服务功能综合评价之后，会直接影响到“三区三线”的划分结果。

像水源涵养功能、生物多样性维持功能这样特别重要的区域，就要纳入生态保护红线。在规划实施阶段，针对具体建设项目环评，也要以国土空间规划确定的空间用途管制和准入要求为重要约束。深度融合即保证从宏观规划到微观项目都实行生态优先的原则，把生态保护要求嵌入空间蓝图之中，使生态评价由被动应对转变为主动引领的重大战略转变。

参考文献

- [1] 吕文宝,徐占军,杨丽琪,等.多重外源胁迫下汾河流域耕地生态系统稳定性的时空演变及分区[C]//第十二届现代生态学讲座暨林草与环境学科研究生学术论坛.山西农业大学资源环境学院, 2023.
- [2] 熊薇.环境—生物群落相互关系研究:从方法到应用[J]. 2019.
- [3] 任景明.基于复合生态管理的政策环境评价方法研究[J].博士, 2007. DOI:http://159.226.240.226/handle/311016/375.
- [4] 李 渊.基于生态湿地及联合修复技术的 河道综合治理[J].Water Conservancy Science & Techonlogy & Economy, 2025, 31(10).DOI:10.3969/j.issn.1006-7175.2025.10.026.
- [5] 张兵,祝颖盈,蓝春,等.自然解:气候变化影响下的历史城市环境认知与保护规划方法[J].城市规划学刊, 2024(001):000.
- [6] 王敬儒.秦岭北麓生态交错带多尺度生态修复规划策略研究[D].西安建筑科技大学,2023.
- [7] 段晓晨,钱睿,徐达.高铁区域水与动植物环境影响系统动力学评价方法研究[J].铁道学报, 2022, 44(8):178-186.DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2022.08.019.
- [8] 张潇尹.生态经济学视角下的资源型区域经济发展模式研究[D].山西财经大学,2015.
- [9] 贺芊芊,尕丹才让,张迎春,等.青海生态修复与社会-经济-生态高质量发展耦合机制研究[J].环境生态学, 2025, 7(9):130-136.
- [10] 王玉婷,王书建,张洵赫,等.生态系统服务视角下的景观美学研究进展[J].生态科学, 2022(001):041.
- [11] 苑海燕.生态文明视角下环境心理学应用研究——评《环境心理学:环境—行为研究及其设计应用》[J].生态经济, 2020, 36(8):2.
- [12] 李星冉,刘怡萱,董石,等.西藏勒布沟土壤微生物多样性和群落组成的海拔分布特征及其影响因素[J].生态学报, 2025(19).

- [13] 蔡志丹.生态环境治理中的湿地保护与恢复策略研究[J].黑龙江环境通报, 2025(9).
- [14] 万路通,刘小丹,郭汉清,等.首都西部生态涵养区生态系统服务功能权衡/协同的多尺度特征及驱动因素[J].中国沙漠, 2025, 45(6):206-219.DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00136.
- [15] 史学瀛,赵腾宇.生态安全视角下遗传资源利用的环境风险规制[J].北方论丛, 2023(3):57-65.DOI:10.13761/j.cnki.cn23-1073/c.2023.03.006.
- [16] 薛依婷,姚焱中.土地利用视角下的生态系统服务价值研究演化及热点:科学知识图谱的可视化分析[J].国土资源导刊, 2025(2):115-127.
- [17] 王妍,余朝毅,徐鑫,等.汉江中下游河流生态系统健康评价[J].海洋湖沼通报, 2025(5).
- [18] 刘建婷,郭雪燕.规划环境影响评价方法学研究现状及对策[J]. 2020.
- [19] 刘敏俊.景观生态学在环境影响评价中的应用[J].北方环境, 2018. DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.04.009.
- [20] 孙宇红,白宏涛,王会芝.规划环境影响评价方法学研究现状及对策探讨[J].环境科学导刊, 2020, 39(4):4.
- [21] 张雪娇.规划环境影响评价方法学研究现状及对策探讨[J].商品与质量, 2020, 000(041):77.
- [22] 刘建婷,郭雪燕.规划环境影响评价方法学研究现状及对策[J].魅力中国, 2020(45).