# 国家治理视域下生态环境监测网络建设:国际比较与中国实践

陈传忠[1],解　鑫[1],朱　擎[1],藏　楠[1],方贞民[1],贾世琪[1],刘　岩[1],陈冒银[1],李铭煊[1],丰　玉[1],胡冠九[2],谢剑锋[3],胡天洋[1],金小伟[1]

1. 中国环境监测总站,国家环境保护环境监测质量控制重点实验室,北京 100012
2. 江苏省环境监测中心,江苏 南京 210019
3. 河北省生态环境监测中心,河北 石家庄 050037

**摘　要**:生态环境监测是生态文明建设的基石,正经历从传统技术工具向国家治理基础设施的深刻战略转型。本研究基于国家治理体系现代化视角,创新性构建了涵盖管理、技术、社会与文化的生态环境监测“四维属性”分析框架,并系统梳理了欧盟、美国等发达国家和地区的监测网络建设经验,揭示了其“科学监测与法治管理协同、央地分权与区域联防互动”的内在规律。在此基础上,深入剖析了中国生态环境监测网络的演进历程与实践成效。本研究认为,中国通过实行省以下垂直管理改革、构建跨部门协同机制以及推动天空地海一体化技术创新,已建成全球规模最大、要素最全的监测网络。这一实践形成了制度优势与技术驱动并重的环境监测体系,为全球环境治理提供了中国方案。为应对新污染物监测能力不足和法治体系待完善等挑战,未来中国应进一步强化监测专门立法,深化数智化技术应用,优化多元共治机制,推动监测网络向精准化、智能化迈进,为“双碳”目标的实现和美丽中国建设提供坚实科学支撑。

**关键词**:国家治理体系;生态环境监测网络;“四维属性”;天空地海一体化;中国方案

**中图分类号**:X84　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1002-6002(2026)01-0001-21

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2026.01.01

## Ecological and Environmental Monitoring Networks Under National Governance: International Comparisons and China's Practice

CHEN Chuanzhong[1], XIE Xin[1], ZHU Qing[1], ZANG Nan[1], FANG Zhenmin[1], JIA Shiqi[1], LIU Yan[1], CHEN Maoyin[1], LI Mingxuan[1], FENG Yu[1], HU Guanjiu[2], XIE Jianfeng[3], HU Tianyang[1], JIN Xiaowei[1]

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China
2. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing 210019, China
3. Hebei Eco-Environmental Monitoring Center, Shijiazhuang 050037, China

**Abstract**: Ecological and environmental monitoring is the cornerstone of ecological civilization construction and is currently undergoing a profound transformation from a traditional technical tool into a critical infrastructure for national governance. From the perspective of the modernization of the national governance system, this paper develops a “four-dimensional analytical framework” for ecological and environmental monitoring, covering management, technology, society, and culture. By systematically reviewing the experiences of developed countries and regions such as the European Union and the United States in constructing monitoring networks, this study reveals underlying mechanisms that drive synergy between scientific monitoring and rule-of-law management, as well as the interactions between central-local decentralization and regional joint prevention. Furthermore, the paper provides an in-depth analysis of the evolutionary process and practical achievements of China's ecological and environmental monitoring network. The study suggests that through the implementation of vertical management reform below the provincial level, the establishment of cross-departmental coordination mechanisms, and the innovation of “space-air-ground-sea” integrated technologies, China has established the world's largest and most comprehensive monitoring network, forming a “Chinese Solution” that emphasizes both institutional advantages and technological drivers. To address challenges such as insufficient monitoring capabilities for emerging pollutants and the need for improving the legal system, future efforts should focus on strengthening

**收稿日期**:2026-01-10;**修订日期**:2026-01-26

**基金项目**:京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2024ZD1200100,2025ZD1207600)

**第一作者简介**:陈传忠(1974—),男,正高级工程师,chencz@cnemc.cn。

specialized legislation for monitoring, deepening the application of digital and intelligent technologies, and optimizing multi-party collaborative governance mechanisms. These measures aim to promote the development of the ecological and environmental monitoring network towards greater precision, comprehensiveness, and intelligence, thereby providing strong scientific support for achieving the "dual carbon" goals and building a Beautiful China.

**Keywords**: national governance system; ecological and environmental monitoring network; "four-dimensional attributes"; space-air-ground-sea integration; Chinese Solution

当前,全球环境治理正面临前所未有的挑战,空气污染和水污染问题仍然严峻,每年导致数百万人过早死亡,阻碍了联合国可持续发展目标(SDGs)中清洁水和空气相关目标的实现[1]。《联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告》(IPCC AR6)警示,全球平均气温较工业化前水平已上升 1.1 ℃;如延续当前排放路径,到 2030 年或将跨越 1.5 ℃的临界阈值,直接威胁约 30 亿人口的生存与安全[2]。与此同时,生物多样性的空前丧失使约 100 万物种面临灭绝风险[3]。在这一背景下,生态环境监测网络作为环境治理的基础设施,正从传统的"测量工具"向国家治理"基石"转变。有效的环境治理必须依托科学严谨、翔实可靠的监测数据。准确、全面、及时的环境信息不仅是科学制定政策的基础,更是评估环境变化趋势和支撑国际社会协同应对生态危机的关键依据。

数字化时代正重塑环境监测的形态与功能。物联网、人工智能、大数据和卫星遥感等技术的融合应用,促进监测网络实现了 3 个层面的质变:从点状监测向网格化监测拓展、从被动响应向主动预警转变、从单一介质监测向多介质综合分析跃升[4-5]。这种数智化变革不仅突破了传统监测在空间覆盖度和时间分辨率上的局限,提升了监测精度和预警能力,更拓展了监测数据在环境决策、风险防控和公共参与中的应用边界。现代化监测体系正成为支撑国家治理现代化的重要技术基础,为准确识别污染源、精准治理环境问题和科学评估治理成效提供了可靠保障。

中国高度重视生态文明建设,以习近平生态文明思想为指导,将生态环境保护提升到前所未有的战略高度。"绿水青山就是金山银山""山水林田湖草沙是一个生命共同体"等重要理念,强调了生态系统的整体性和人与自然和谐共生的重要性。自 2015 年国务院办公厅印发《生态环境监测网络建设方案》以来,中国致力于构建全国统一、天地一体、上下协同、信息共享的生态环境监测网络,并通过《生态环境监测规划纲要(2020—2035 年)》等政策推进监测现代化。习近平生态文明思想为新时代生态环境监测赋予了新的内涵和动力。本研究旨在探索在国家治理框架下,如何构建并有效运行高效、透明、可持续的生态环境监测网络。面对全球环境挑战日益复杂和环境治理要求不断提高的现实,本研究采取双轨并行的研究思路:一方面,通过国际比较视角,系统分析欧盟、美国等发达国家和地区成熟监测网络的法律框架、组织架构、技术体系和公众参与机制,提炼其内在规律与普适经验;另一方面,梳理总结中国近年来在生态环境监测网络建设中取得的制度创新、技术突破和中国特色监测网络的治理模式。通过对比分析,不仅为中国深化生态环境监测体系建设提供借鉴,也为发展中国家和新兴经济体提供可资参考的经验,进而推动构建更加公平、有效的全球环境治理体系,助力应对共同的生态环境挑战。

## 1 生态环境监测网络研究分析的多维属性框架

生态环境监测作为国家生态环境治理体系的重要组成部分,既非单纯的技术活动,也非纯粹的行政行为,而是一项兼具多重属性的复杂系统工程。从理论分析视角看,生态环境监测可通过"四维属性"框架进行系统解析,即管理属性、技术属性、社会属性与文化属性。这一多维框架有助于剖析监测网络在国家治理体系中的多元功能与内在逻辑,不仅揭示监测网络的复杂性,也为其在实践中的优化升级提供理论支撑。

### 1.1 生态环境监测的管理属性

生态环境监测的管理属性体现在其作为治理工具,全面深入地嵌入环境治理整体架构,贯穿决策全流程并提供科学支持。

环境治理实践表明,无论是我国从 20 世纪 80 年代确立环境保护基本国策、出台《环境保护

法》,到21世纪将生态文明建设纳入“五位一体”总体布局并明确美丽中国建设目标,还是国外从19世纪泰晤士河大恶臭事件推动《泰晤士河净化法案》[6]出台,到当代《京都议定书》《巴黎协定》等国际环境治理协议的签订与履行[7-8],环境监测始终发挥着不可或缺的支撑作用[9-10]。在国家治理层面,环境监测通过采样、分析检测、观测、监视等手段提供基础数据,成为政府环境管理、政策制定、效果评估、区域限批和生态补偿的重要依据。在国际合作层面,监测数据则为“绿色外交”提供科学共识与互信基础,支撑国际规则执行与履约问责,在应对跨境环境危机中发挥着重要的技术纽带作用[11]。

从治理过程看,监测的管理属性贯穿“发现问题—明确目标—制定对策—实施治理—评估效果”的全周期,赋予环境管理“用数据说话”的科学性[12]。具体而言,在政策制定与规划阶段,监测数据为污染现状评估与生态系统健康状况判断提供科学依据;在执行与监管环节,监测数据支持实时预警、事中监管与污染溯源;在绩效评估和责任追究层面,长期监测数据则成为衡量政策效果与追究责任的法定依据[13]。在全球实践中,多层级权责配置和多元主体协同互动已成为监测管理的普遍趋势[14]。通过垂直管理(如中国的“国家—省—市—县”体系,美国的“联邦—州—地方”结构)、部门协同(如生态环境、水利、气象、农业等跨部门协作)、区域协同(如中国的京津冀协同、美国的湖湾协同等),各国正致力于整合监测资源,打破区域部门壁垒,明确监测事权的统一性、独立性与权威性,为提升监测数据可比性和真实性奠定制度基础。

### 1.2 生态环境监测的技术属性

技术属性体现了生态环境监测网络强大的工具性与创新性,是确保监测数据准确性、时效性与代表性的关键支撑。其核心内涵主要体现在3个方面:

首先,在监测网络体系设计上,需综合考虑监测点位的时空布局、监测要素的多样性以及准确度与响应速度的平衡。随着生态环境问题日益呈现立体化、综合化趋势,传统单要素监测已难以满足需求,需要整合大气、水、土壤、海洋、生物多样性等多介质监测,实现从点状到区域、从局部到整体的天空地海立体覆盖,构建全要素协同感知的综合监测体系。

其次,以数智化变革为主要特征的技术创新正加速推进。物联网[15-16]、5G/6G通信[17-18]、区块链[19-20]、eDNA/eRNA[21-22]、生物传感器[23-24]等新兴技术为监测体系带来深刻变革,大大提升了监测的精细化程度和实时性能。卫星遥感、高光谱成像和无人机等遥感技术的广泛应用,配合地面自动监测系统和移动监测车,实现了快速大范围数据采集和精确定位[25]。人工智能与大数据分析则进一步挖掘海量数据的内在关联,支持污染溯源与风险预测,推动监测网络从“事后测量”向“事前预防”转型[26]。

最后,严格而系统化的数据质量控制(QA/QC)与量值溯源体系构成了技术层面的“生命线”。从采样、分析、传输、存储到发布,各环节必须遵循统一标准与规范;通过参考方法、实验室比对、比对监测、在线审计等手段,确保数据的可信度与可用性。无论是美国以质量保证项目计划(QAPP)体系严控数据质量[27],欧盟通过欧洲校准中心统一计量溯源[28-29],还是中国逐步加强法定计量技术机构统筹[30],均体现了对数据精度和一致性的严格要求,确保监测数据能够客观反映环境质量状况。

### 1.3 生态环境监测的社会属性

生态环境监测不仅是环境管理的“耳目”与“哨兵”,更是保障公众权利、引导社会行为、塑造集体认同的重要工具,展现出鲜明的社会属性。

其一,提供公共信息服务,保障公众环境知情权。生态环境监测的首要社会职能在于将技术数据转化为公开的公共信息,从根本上保障公众的环境知情权,为后续的社会监督与行动提供事实依据。监测网络产出的空气质量指数、水质类别、企业排污数据等信息关乎公共利益,将其系统性公开有效打破了信息壁垒,使公众从环境状况的“被动承受者”转变为“主动知情者”。例如,浙江省推行的“环保码”制度[31],依据监测数据对企业进行环境信用评级(红、黄、绿)并向社会公开[32],实现了数据驱动下的精准社会监督[33-34]。

其二,构建新的参与路径,形成多元协同治理格局。生态环境监测为社会力量提供了具体的参与接口,通过引导公众从认知到实践,推动环境治理主体从单一政府主导向多元社会协同转变。一方面,公众可依据官方或第三方发布的权威监测数据,进行有据可依的质疑、举报与维权[35];另一方面,随着传感技术成本的降低,“民间监测”作

为官方体系的有益补充逐渐兴起。环保志愿者使用便携式检测包进行水体简易监测并上传数据,网民通过自媒体曝光污染问题等现象,构建起广泛的民间监测监督网络,不仅拓展了数据来源,更强化了公众的主体责任感,将环境治理从政府“独角戏”转变为社会“大合唱”[36]。

其三,凝聚社会广泛共识,塑造绿色发展向心力。生态环境监测通过提供客观、中立、可量化的事实基础,为社会各界就环境问题的认知、讨论与决策提供了共同的“语言”和“标尺”,有效弥合认知分歧,凝聚绿色发展共识,引导集体行动[37]。在全球层面,关于气候变化的国际共识正是建立在全球温室气体浓度监测、海平面上升观测等长期科学监测的基础之上[28-29]。相关监测数据以不容置疑的方式揭示了问题的严峻性与紧迫性,最终推动了《巴黎协定》等全球性协议的达成。在国家层面,当 $PM_{2.5}$ 成为重点监测对象后,社会关注点便从“能见度”转向“健康影响”,形成了协同治理 $PM_{2.5}$ 的共识。通过监测数据对比治理前后的生态环境改善效果,能够以直观有力的方式向社会阐明“为什么要转型发展”以及“转型带来了什么”,赢得更广泛理解与支持,将社会力量凝聚到绿色发展的共同目标上来。

### 1.4 生态环境监测的文化属性

文化属性在生态环境监测研究中常被忽视,却是决定监测可持续性与社会认同感的重要内核。它既包含对自然的价值认知和伦理取向,也涉及公众对环境信息的感知与互动方式,通过家国情怀和科学精神的培育塑造,最终影响监测网络的长远发展路径。

首先,人类对环境的文化认同与生态文明理念深度交织。中国倡导的“绿水青山就是金山银山”理念彰显了经济发展与生态保护的和谐统一[38-39]。这一理念引导公众珍视生态环境监测成果[40],将监测视为保护“绿水青山”的必由之路[41]。在欧美国家,生态中心主义或环境正义等思潮同样激发了对监测数据透明性与公正性的更高期望,展现了不同文化背景下对生态环境信息的差异化需求[42-43]。

其次,从文化视角看,监测数据不仅是冰冷的数字,还承载着公众对地方生态环境记忆和认同的情感诉求。无论是记录城市雾霾天数还是追踪河流鱼类多样性变化,监测网络的每一次观测都在塑造一个地区的环境“叙事”。不同文化背景下,公众对环境风险与信息公开的容忍度、主动性和信任水平迥异,这直接影响着监测制度的传播效果和执行效力。

再次,文化属性左右着环境信息“知—信—行”的转化过程。只有让公众真正“相信”监测数据的客观中立,才能进一步形成有效的“行为”改变——如在源头减少排放或对污染企业进行社会抵制。微观层面,一些地方通过环境教育课程、社区科普等方式,让青少年与家庭亲身参与水质检测、大气质量观测,培育“与自然共生”的生态价值观;宏观层面,国家通过弘扬“人与自然和谐发展”理念、践行习近平生态文明思想,将监测活动融入社会主流文化,形成全社会共同参与环境监测与保护的行动自觉。

综上所述,管理、技术、社会与文化四重维度彼此交织,共同构成生态环境监测体系的整体功能与发展动力。管理属性为监测提供制度化保障与权威性,技术属性推动监测的精准化与智能化升级,社会属性凸显公众参与与共治潜能,而文化属性则关乎价值认同与社会共识的长期构建。这一多维分析框架不仅有助于理解不同国家和地区环境监测经验的差异,也为中国在深化生态环境监测网络建设、持续推动生态文明建设的过程中提供了更加立体而深刻的思考视角,有利于形成更加系统、全面、可持续的生态环境监测网络发展战略。

## 2 主要国家和地区生态环境监测网络的比较分析

### 2.1 欧盟环境信息与观测网络

欧盟的环境监测制度在全球范围内以覆盖面广、法律体系严谨及区域协同治理高效见长。其特色主要体现在法律框架、组织架构及实践案例 3 个层面。

#### 2.1.1 欧盟《水框架指令》的历史演进与监测制度发展

从欧盟水环境治理体系的历史演进来看,其先后经历了从分散立法到统一框架、从污染控制到生态恢复的制度演进。20 世纪 70 年代,欧共体(欧盟前身)先后颁布《地表水质量指令》《危险物质排放指令》《渔业水域指令》《饮用水指令》等专项法规,形成了以单一用途为导向的多元立法体系,但缺乏整体协调性与流域统筹机制。1995

年,欧盟委员会对既有水政策进行了综合评估,并提出了统一的政策框架建议,认为现有体系存在目标分散、标准不统一、缺乏综合性管理等问题。1997 年发布的《水框架指令》草案经多轮修订,于 2000 年正式通过并自 2003 年开始在成员国实施,标志着欧盟从要素分治向流域一体化管理的制度转型[44-45]。《水框架指令》的核心目标是确保所有水体达到“良好状态”(包括良好生态状态和良好化学状态),并规定成员国按河流流域区进行综合管理,设立公众参与机制和经济调控措施[46-47]。此后,《地下水指令》《饮用水指令》《环境质量标准指令》等补充立法不断完善了欧盟水环境治理的层级体系。

欧盟在法律层面奠定了系统的环境监测制度基础。基于《欧洲联盟运作条约》第 191 至 193 条,引入了“预防原则”“污染者付费原则”和“高水平环境保护目标”等核心理念;通过一系列框架性指令与法规,明确了各成员国在环境监测、数据评估和信息报告等方面的责任和义务。例如,《水框架指令》要求成员国按照“集水区”单元管理地表水和地下水,必须建立系统的水质监测网络[48];《空气质量指令》对成员国空气质量监测点位密度和监测指标作出统一规定,并要求定期向欧盟委员会上报监测结果[49]。同时,生物多样性、海洋环境和工业排放等领域也分别设有专门法律文本,为监测提供更细化的制度保障。此类指令尽管需要在各成员国立法转化,但欧盟委员会依法享有监督其执行情况的权力,并可在成员国未能履行义务时启动侵权诉讼程序;欧洲环境署(EEA)则通过数据汇集、评估和技术支持,为欧盟层面的监督与决策提供科学依据,从而在整体上保障了欧盟环境治理体系的协调性和执行力[50-51]。

### 2.1.2 欧盟水环境监测体系的组织与网络运行机制

在组织架构上,欧盟建立了欧洲环境信息与观测网络(EIONET),作为数据收集、整合与共享的专门平台。EEA 在此过程中扮演指挥中枢角色:通过与成员国的国家联络机构、参考中心和主题监测网络合作,以统一的数据标准、指令格式实现对各国监测信息的汇总与评估。这种“自下而上”与“自上而下”相结合的模式,既保留了成员国在技术路径与地域特色上的多样性,也能较好地满足区域层面对比分析和跨界环境议题综合研判需求。

此外,EEA 向公众开放专门的信息门户,保障信息的可及性和透明度,并通过年度环境状况报告等形式,为欧盟政策制定和成员国环保规划提供科学依据。在此协同体系下,欧盟在气候、生态保护、可持续发展等领域积累了系统化的数据和治理经验。

### 2.1.3 流域尺度监测实践案例——《保护莱茵河公约》

莱茵河流域是欧盟《水框架指令》实施成效的典型代表。该流域横跨 9 个国家,依托莱茵河这一重要内河航道,成为欧洲最重要的经济走廊之一。历史上,受工业化与城市化影响,莱茵河一度被称为“欧洲的下水道”[52]。自 1950 年国际莱茵河保护委员会(ICPR)成立以来,莱茵河流域国家逐步形成并发展了以该委员会为核心的跨国协作机制。1999 年《保护莱茵河公约》的签署以及 2000 年欧盟《水框架指令》的实施,进一步强化和完善了这一跨国流域治理体系。ICPR 通过统一监测、联合评估与协同治理,实现了流域生态显著恢复[53]。其监测网络遵循“代表性、可比性与多尺度覆盖”原则,在主干流与支流、不同地貌单元均布设长期监测断面。监测结果显示,截至 2018 年,流域内氮磷排放量较 2000 年下降约 40%,改造障碍物超过 600 处,恢复鲑鱼产卵地约 370 $hm^2$,多样化栖息地面积较 2000 年增加逾 200%[54],生态系统健康状况持续改善,部分河段已恢复原生鱼类洄游功能[55]。该案例充分展示了欧盟在跨国流域治理中“科学监测—协同管理—目标导向—公众参与”的完整路径,验证了《水框架指令》在促进区域生态保护协同与政策一致性方面的制度优势。

欧盟环境监测与管理体系的核心特征可概括为以下 4 点:一是体系一体化与目标明确化。通过统一的法律框架和明确的“良好状态”目标,实现从要素分治到系统集成的转变。二是执行刚性与灵活性并重。欧盟法律对成员国具有约束力,欧盟委员会可通过法律监督和侵权诉讼程序保障政策落实。同时,指令本身要求成员国基于流域特征制定具体管理计划。三是数据驱动与公众参与相结合。EIONET 的数据公开与信息共享机制增强了政策透明度和社会信任度。四是科学与政策的深度融合。监测结果直接服务于政策修订与战略规划,形成“监测—评估—决策—反馈”的循

环机制。欧盟的经验表明,在区域层面实现环境治理协同,有赖于法律约束、制度稳定与科学支撑相结合的系统性框架。其以流域为单元的综合监测体系与跨国协调机制,为其他区域的水环境治理提供了可借鉴的制度范式。

## 2.2 美国环境监测体系

美国的环境监测体系同样拥有坚实的法律根基和庞大的网络,但与欧盟相比,其更强调法律责任落实与执法导向。其特点主要体现在历史发展、组织架构和技术标准 3 方面,尤其以水环境监测体系为代表。

### 2.2.1 《清洁水法》演进与监测制度发展

美国水环境监测体系的发展与《清洁水法》的演进紧密相连,呈现从简单水质检测到全面生态评估的历史进程。20 世纪初期,美国地质调查局(USGS)和公共卫生署(PHS)开始采集全国水质数据,为后续监测体系的建立奠定了科学基础。1948 年《联邦水污染控制法》首次确立了联邦层面水污染治理的法律框架。1972 年修订的《清洁水法》带来了监测制度的重大转型,联邦政府成为核心执法与监管机构,建立了“水质目标—技术标准—许可监管”的制度链条,监测活动开始标准化、体系化[56]。美国环保署(EPA)负责制定统一监测方法指南,各州则承担常规监测任务,形成了联邦指导、州执行的监测框架。自 1980 年代后期起,尤其在 1990 年代至 21 世纪初,环境监测逐步从点源走向非点源,从单一化学污染物指标扩展为结合生物与生态健康的综合评估项目[57]。1987 年《水质法案》的修订强化了非点源控制机制并促进了“最大日负荷计划”(TMDL)制度的实施,环境监测开始整合水质、水文和生物指标[58],形成更为全面的评估体系。此外,公众获取监测数据的权利进一步扩大,监测透明度显著提升[59]。2000 年至今属于司法争议与边界重塑期,核心争议围绕联邦管辖范围界定,特别是“可航行水体”定义的法律解释。从 2001 年的“湿地纳入”问题,到 2023 年美国最高法院收紧管辖范围的一系列司法争议[60],反映了联邦与州权力边界的持续调整。尽管争议不断,流域生态修复、气候韧性与自然基解决方案正逐步成为水环境治理的新方向,标志着美国水污染防治向更全面的生态系统管理转变。

《清洁水法》为美国水环境监测体系提供了坚实的法律基础[61]。该法要求联邦和州级机构开展水质监测与数据报告,使监测数据成为水质管理和决策的重要基础,支撑政策制定、标准设立、排放许可、执法行动和成效评估等全流程决策。其法律框架确立了多层次的监测责任体系:EPA 负责制定监测方法指南,开展国家水资源调查;州环保部门承担常规监测、达标评估和执法活动;污染源需按照排放许可要求开展自我监测并保存相关记录。《清洁水法》还建立了监测与管理决策的紧密联系机制,通过将监测结果与水质标准达成情况挂钩,为不达标水体制定 TMDL 提供依据。同时,该法律要求定期向公众公开监测数据,为公民诉讼和社会监督提供事实基础,形成了政府监管与公众参与相结合的监测信息应用模式,使监测活动从单纯的技术活动上升为环境治理的核心环节。

### 2.2.2 多层次组织架构与职能配置

美国水环境监测体系形成了联邦、州、流域多层次协同的组织架构,各层级主体职责明晰、分工协作。在联邦层面,EPA 承担标准制定与全国评估的核心职能,负责制定国家层面的水质标准建议与技术基准、监测技术规范和质量保证/质量控制要求,统筹资金拨付与审计监管。此外,EPA 还负责维护包括空气质量系统(AQS)、水质监测数据库(WQX/STORET)等在内的多类官方数据库,为政策制定、科研分析和公众监督提供支撑。

州级环保部门是区域监测与执法的主体,承担日常水环境监测的主要工作量。各州开展常规水质监测,评估本州水体达标情况,定期向 EPA 报告,并针对违规企业采取执法行动。州层面的监测主要聚焦两个关键问题——排污者是否守法以及水体是否达标,两者构成了面向污染源管控和水环境质量评价的双向评估体系。流域层面的监测由各州及地方政府负责,确保《清洁水法》全链条管控在流域生态保护中的落地。流域监测机构跨州协作执行流域监测计划,评估治理成效,弥补了行政区划监测的不足,实现了以水体自然边界为单位的综合评估。排污者自行监测是美国水环境监测体系的重要组成部分。根据国家污染物排放消除系统(NPDES)许可要求,污染源必须安装监测设备,保存排放记录,按要求提交监测报告,配合检查并提供证据。这种“污染者自证”机制将监测责任部分转移给污染源,既降低了政府监管成本,又增强了企业环境合规意识。

除了行政监管,美国水环境监测体系的另一

大特色在于建立了高效的科学与政策协同机制,主要体现在 USGS 与 EPA 的分工协作上。USGS 主要负责提供科学数据与技术支持,EPA 则负责制定标准与推动政策落实,二者形成了“科学-政策”紧密协同。USGS 运行覆盖全国的实时连续监测网络,包括大量河流流量站、水质监测点、地下水位监测井和降水站,为 EPA、各州和科研机构提供基础数据。这些站点构成了美国水文与水环境监测的重要骨干网络。

2.2.3 监测技术标准与质量控制体系

美国在《清洁水法》体系下建立了排放标准与水质标准并行的双轨制标准框架。排放标准主要包括基于技术的排放标准和基于水质的排放标准,用以直接控制污染源排放;水质标准则是基于水体用途设置目标,用以保障水体功能实现。这一双轨制框架通过技术更新、标准制定与实施、排污许可证管理等措施形成闭环管理,使监测工作既服务于排污管控,又服务于水质保障。

美国水质标准的一大特色是根据水体指定用途实行差异化制定。根据水体的公共供水、娱乐用水、水生生物保护用水、渔业用水、农业用水等不同用途,制定差异化指示指标。这种基于用途的监测标准体系能够使有限的监测资源更加精准地配置到水体的关键功能保障上,提高了监测的目标导向性。

在数据质量上,美国尤为重视 QAPP 审批制度。对于使用联邦资金或用于监管决策的监测项目,通常要求在立项阶段就通过 QAPP 明确采样设计、分析方法、内部/外部审核规则及事后评估等环节,以保证数据的可溯源性和法律合规性[27]。此外,近年来“公民科学”在美国日渐兴盛,EPA 鼓励并支持“公民科学”项目开展补充性监测,并为这些项目提供质量保证(如 QAPP 指南)支持。

2.2.4 切萨皮克湾计划的综合监测实践

切萨皮克湾计划(CBP)是美国为恢复和保护其最大的河口生态系统——切萨皮克湾而设立的一个标志性跨区域合作治理项目。CBP 建立了全面的监测指标体系,涵盖水质参数(包括营养物、沉积物、化学污染物及其他物理化学指标)、水文条件以及生态指标(如水下植被、浮游生物与底栖生物等)。这些监测数据来源于多个合作监测站点并按计划采集,为水质状态和生态健康评估提供持续支持[62]。此外,CBP 建立了多层次、多周期的评估框架和问责机制。在评估方面,包括水质标准达成评估、协议指标评估、分区评估和流域实施计划评估。这些评估按不同周期进行,从持续监测到年度统计、两年策略审查和中长期全面评估,形成了多尺度评估体系[63]。为强化问责,CBP 采用了“交通灯”评级系统、水质达标率计算、最佳管理实践验证等创新机制,确保减排成果真实有效,形成了“监测—评估—纠偏”的闭环管理模式。

自实施流域综合治理以来,CBP 在污染物负荷、生态恢复、治理制度方面均有进展[64]。监测数据显示,流域主要河流的氮、磷、悬浮沉积物输入量有明显下降趋势,水下植被得到了有效恢复,生态环境逐步改善。但在治理过程中,CBP 仍面临非点源污染增长、气候波动影响等挑战。

**2.3 全球与区域环境监测合作机制**

在全球与区域层面,针对跨国界的大气、水体、生物多样性保护,国际组织和多国合作日益成为环境监测与治理的关键力量。

2.3.1 全球大气监测网与世界气象组织的协调作用

由世界气象组织发起的全球大气监测网(GAW)在大气成分观测领域具有全球影响力[65]。其运行模式依托成员国或科研机构自愿贡献观测站点,并以世界校准中心(WCC)和中央校准实验室(CCL)等为质量控制枢纽,为全球观测数据提供质量控制与计量溯源核心支撑,最终将观测数据统一汇总到世界数据中心(WDC)进行公开、共享和研究[66]。此类分布式模式令 GAW 能够在温室气体、臭氧层、气溶胶、污染物长距离传输等范畴,提供跨地区、跨时段的可靠监测数据,形成对联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告等国际评估报告的科学支撑。

2.3.2 IPCC 的数据整合与评估模式

IPCC 本身并不直接进行原始监测工作,其核心任务是整合和评估来自全球各地的气候监测数据、模型模拟结果以及社会经济影响评估结果。通过严格的同行评议和与各国政府的反复磋商,IPCC 将这些科学研究成果汇总并封装成系统的综合报告[67-68]。IPCC 借助世界气象组织、联合国环境规划署等的全球数据共享平台,结合文献研究、观测记录与模型对比,形成对全球变暖、极端气候事件以及气候变化对生态系统和生物多样性的影响等的发展趋势的科学共识。虽然不具备法

律强制执行力,但其报告常被视为各国气候与环境谈判及国内政策制定的重要科学依据。

2.3.3 区域性监测合作——跨境污染联合防治

除了全球层面,一些地区性合作网络也发挥着特定的功能。例如,中日韩三国在沙尘暴监测、海洋塑料污染研究上开展了联合观测和数据共享[69];欧盟与地中海周边国家签署多边环境合作协议,对跨境水体及污染源进行联防联控[70];非洲国家则在国际援助下,共同探索跨境河流生态保护的时空监测合作模式[71]。这些区域性网络的成功,通常取决于共同的政治诉求、统一的数据标准和透明的机制设计。

**2.4 国际比较分析与特征总结**

通过对欧美及国际合作机制的系统比较可以发现,各国虽然在制度背景、地缘政治、组织模式和经济条件上各具差异,但在环境监测网络的核心要素上呈现出若干共性趋势与特征。

2.4.1 法律保障与制度设计的比较

美国与欧盟分别代表联邦制单一主权国家与具有超国家特征的区域联盟两种不同的政治结构,各自形成了特色鲜明的法律体系。美国更强调通过联邦层面法律为监测提供强刚性约束,辅以法律责任追究,推动监测落地与数据合规;欧盟虽以指令性文件为主,但通过欧盟条约及相关法规赋予了欧盟委员会相应的监督与评估权力,并将侵权诉讼程序作为执行保障,同时依托 EEA 提供的数据和评估支持,确保了区域一体化的执行力。尽管法律形式不同,两者均依靠法律支撑增强监测的公信力和权威性,将监测数据质量保障上升为法律义务。在制度设计上,欧盟《水框架指令》强调“流域一体化管理”与“生态质量目标”,推动监测向生态系统健康评估转型;美国则建立了排放标准与环境质量标准并行的双轨制框架,形成从污染源到环境质量的全链条管控。这些制度设计上的差异,反映了不同政治结构与环境治理传统下的技术路径选择。

2.4.2 组织管理模式的多样性与协同

从采用“联邦—州”体制的美国,到由多个主权国家构成的欧盟,环境监测网络几乎都呈现“多层级、分权+协调”的组织特征。美国由 EPA 主导标准制定并提供技术支持,由州级政府强化属地执法;欧盟则以 EEA 及其主导的 EIONET 为主轴,在成员国数据上报、信息整合和评估反馈中发挥关键的协调与技术支撑作用。尽管组织形式不同,两者都实现了从“部门自管”到“跨级链接”、从“碎片化监测”到“协同整合”的转变。特别值得注意的是,无论是美国 USGS 与 EPA 的“科学-政策”协同配合,还是欧盟 EEA 与成员国的“中心-节点”网络架构,都在很大程度上促进了科学专业性与政策执行力的有机融合。这种协同模式有效避免了“技术孤岛”和“政策盲区”,使环境监测能够真正服务于决策过程。

2.4.3 技术标准与数据质量的共性

在监测技术标准上,国际上呈现明显的趋同态势。科学共识与市场需求推动了监测设备、计量基准在关键参数和方法上的逐步统一,以及国际标准化组织(ISO)、欧洲标准化委员会(CEN)、EPA 参考方法的不断对接;国际仪器制造巨头的技术迭代进一步促进了跨国比较的一致性。此外,高分辨率卫星遥感、eDNA、大数据分析等新技术更是呈现了跨区域的共同发展态势。在数据质量控制领域,无论是美国的 QAPP 体系,还是欧盟的计量溯源体系,抑或是 GAW 的校准中心体系,都体现了对数据质量从规范制定、方法论选择、实验室能力建设到质量评估的全流程管控。这种对数据质量的共同重视,反映了环境监测从“有没有”向“准不准”、从“能不能测”向“可不可信”的普遍转变。

2.4.4 公众参与机制的创新发展

相较于传统政府主导的监测模式,欧美及国际合作项目日益积极地拥抱公众参与。美国推动“公民科学”,以法律保障公众对监测数据的知情权和诉讼权;欧盟通过《奥胡斯公约》和环境信息公开指令,保障公民、非政府组织获取环境信息并参与环境相关决策的权利,使其有机会对监测数据进行独立解读并影响政策过程;国际环境合作项目也引入非政府组织,在跨国监测中发挥补充作用。这种公众参与模式的发展,一方面扩展了监测网络覆盖面,填补了官方监测体系的空白;另一方面增强了环境治理的民主性与透明度,推动信息沟通实现从“单向告知”到“双向互动”的转变。公众对环境信息的关注与行动,也为环境政策的制定与执行提供了社会基础。

2.4.5 综合评估与启示

生态环境监测在不同国家和地区已从“搜索污染真相的工具”演变为“支撑国家治理和全球治理的基础设施”。欧美的经验表明,健全的法律制度是确保监测权威与稳定的根本,跨层级与

跨部门协同是监测网络高效运行的保障,技术创新是提高监测广度与深度的抓手,社会参与则为监测数据赋予更广泛的意义与更强的监督约束力。

对中国而言,在继续强化法律和技术能力建设的同时,尤其需要重视制度化监督与公众参与的良性融合,加快与国际标准接轨,形成既满足本国发展需求又与国际趋势相协调的生态环境监测治理体系。这不仅有助于更有效地应对国内生态环境挑战,也能在国际层面发挥更大影响力,为构建公平、合作、可持续的全球环境治理网络提供中国智慧和中国方案。

通过对欧盟、美国及国际合作模式的多维比较可见,完善的生态环境监测网络必须建立在坚实的法治和技术基础之上,辅之以有效的组织管理及社会参与,方能成为推动生态环境质量改善与国家治理现代化的核心力量。在监测体系建设中,既要吸取国际经验,又要立足国情,形成本国特色的监测网络治理模式。

## 3 中国特色生态环境监测网络的构建与发展

我国生态环境监测网络建设是国家治理体系现代化的重要组成部分,在习近平生态文明思想指引下,通过制度创新、技术突破和体系重构,形成了具有鲜明中国特色的监测治理模式。本部分从网络体系构建、组织管理创新、技术能力提升和价值功能实现 4 个维度,系统分析中国生态环境监测网络的发展路径与实践成效。

### 3.1 全要素覆盖的监测网络体系构建

#### 3.1.1 国家监测网络的系统化布局与规模化发展

我国生态环境监测网络建设遵循“统一规划、分级建设、全面覆盖、资源共享”原则,实现了从分散布点到系统布局、从单一要素到综合集成的历史性跨越。截至“十四五”末期,国家直接组织的监测点位达 3.3 万个,构建了覆盖大气、水、土壤、生态、海洋等全要素的立体化监测体系[72](图 1)。其中,大气环境监测网络 1 618 个国控站点覆盖 339 个地级及以上城市,实现城市空气质量监测全覆盖;地表水监测网络 3 030 个国控断面主要布设于十大流域、重要水体省市界和重点水功能区,确保流域水质评价的代表性和完整性;土壤环境监测网络 2.2 万个点位重点聚焦农用地和建设用地,为土壤污染防治提供基础数据支撑;生态质量监测体系包含 200 余个综合观测站和 1.6 万余个生态样地,实现对典型生态系统的长期定位观测[73];海洋环境监测网络 1 411 个站点覆盖近岸海域;7 颗在轨专属环境卫星提供宏观尺度遥感监测能力。这一网络体系的建成,标志着中国监测能力从“局部感知”向“全域覆盖”、从“要素分割”向“系统集成”的根本性转变。

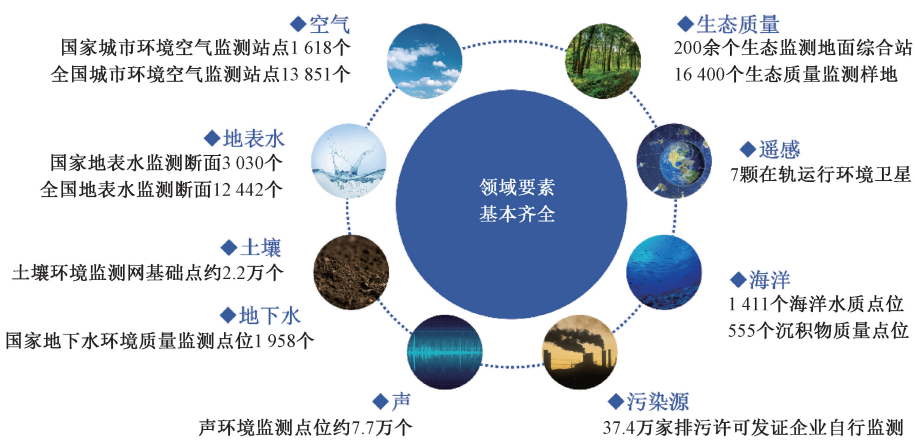


**图 1 我国现有生态环境监测网络的覆盖要素和点位**

**Fig. 1 The coverage elements and points of the current ecological and environmental monitoring network in China**

#### 3.1.2 监测指标体系的科学化构建与动态优化

我国生态环境监测指标体系建设坚持“需求导向、科学合理、动态调整”的原则,实现了从常规污染物向新污染物、从环境质量向生态健康的拓展深化[74]。在指标选择上,既保持与国际标准的衔接性,又充分考虑中国环境问题的特殊性。大气监测在国际通行的 6 项基本指标基础上,针对中国 $PM_{2.5}$ 污染突出的特点,率先将其纳入常

规监测并建立评价标准体系;水环境监测在传统理化指标基础上,创新性地引入水生生物等生态指标,推动评价体系从“水质达标”向“水生态健康”转变[75-76]。在监测方法上,实现了从人工采样分析向自动在线监测的技术升级,大气和地表水主要指标基本实现自动化监测,显著提升了监测时效性和数据连续性。特别是在“双碳”目标背景下,温室气体监测体系建设取得重要突破,初步建立了覆盖 $CO_2$、$CH_4$、$N_2O$ 等主要温室气体的监测网络,为“双碳”目标的实现提供科学支撑[77]。

### 3.2 垂直管理与协同治理的组织体系创新

我国生态环境监测网络在组织管理方面经历了从“地方分割”到“条块结合”、从“条线垂管”到“多部门协同”的深刻变革,形成“国家—省—市—县”四级联动、跨部门协同治理、社会有序参与的“大监测”格局(图 2)。

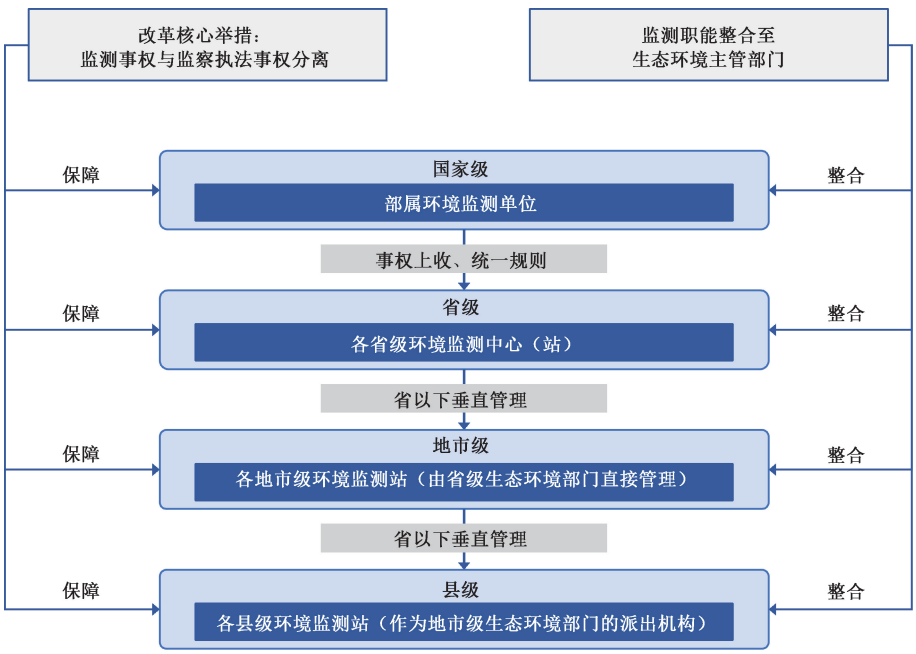


**图 2 “国家—省—市—县”四级生态环境监测架构**

**Fig. 2 A four-level ecological and environmental monitoring framework of “country-province-city-county”**

#### 3.2.1 省以下垂直管理改革的制度性突破

我国生态环境监测组织体系改革的核心是通过省以下垂直管理,从根本上解决地方保护主义对监测数据客观性的干扰。这一改革通过“事权上收、责任下沉”的制度设计,实现了监测事权与监察执法事权的有效分离。国家层面统一行使生态环境质量监测职能,省级生态环境部门统一管理本行政区域内的监测机构和人员,地市级和县级监测机构分别作为省级和地市级生态环境部门的派出机构开展监测工作。这种制度安排确保了监测机构的独立性和专业性,有效杜绝了地方行政干预,显著提升了监测数据的真实性、准确性和权威性。同时,通过中央财政统筹投资建设国家监测网络,特别是加强中西部欠发达地区监测能力建设,有效缓解了区域发展不平衡带来的监测能力差异,推动了全国监测“一盘棋”格局的形成[78-79]。

#### 3.2.2 跨部门协同的“大监测”格局构建

我国创新性地构建了“统一领导、分工负责、协同配合”的跨部门监测协作机制[73]。在国务院统一领导下,生态环境部门牵头负责生态环境质量监测,自然资源、水利、农业农村、气象、林草等部门分别开展资源调查、水文监测、农业面源监测、气象观测、森林草原监测等专项工作。通过建立部际联席会议制度、数据共享平台和联合监测机制,实现了多源监测数据的有效整合。特别是在重大环境事件应对、区域联防联控、流域共治等重点领域,跨部门协同发挥了关键作用。这种“条块结合、纵横贯通”的组织模式,既保证了监测工作的专业性和系统性,又实现了监测资源的优化配置和高效利用。

#### 3.2.3 政府主导与市场参与的双轮驱动机制

我国在坚持政府监测主导地位的同时,积极培育和规范社会化监测服务市场,形成了“政府

主导、市场补充、社会参与”的多元化监测服务格局。政府监测机构承担质量监测、监督监测、应急监测等核心职能,确保监测的公益性和权威性;社会监测机构在设备研发、运维服务、专项监测等领域发挥专业优势,提供灵活高效的市场化服务。通过建立资质认定、信用评价、质量监督等制度体系,规范社会监测机构行为,保障监测数据质量。这种双轮驱动机制既发挥了政府的主导作用,又激发了市场活力,推动监测服务供给能力的整体提升。

### 3.3 数字化智能化的技术体系跃升

在数字中国与绿色发展双重战略引领下,中国生态环境监测技术创新体系的自动化、数字化和智能化水平全面提升,推动监测方式从传统人工采样向智能感知、精准预警与智慧决策系统性跨越,朝着国家生态环境监测网 2.0 版目标稳步迈进。

#### 3.3.1 天空地海一体化监测技术体系构建

我国已构建以高精度环境卫星、无人机、无人船、地面自动监测站、移动监测平台为主体的立体化感知监测技术体系。卫星遥感方面,初步建成覆盖大气、水、生态等多要素的遥感监测星座,实现大尺度环境质量与生态变化周期性观测;地面及近地监测系统通过自动站点实现实时数据采集传输,无人机与走航监测弥补固定点位空间限制,提升热点区域识别精准性[80-81];eDNA、声学传感、微纳传感等新技术逐步应用于生物多样性监测、噪声评估等场景,显著拓宽监测维度并提升感知灵敏度[82-83]。

#### 3.3.2 人工智能与大数据的深度应用

将人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术深度融合到监测全流程,推动监测模式从人工密集型向技术密集型转变[84]。在数据采集环节,通过智能传感器、物联网技术,实现监测设备的智能化管理和远程控制;在数据传输环节,依托 5G 通信技术,构建高速、稳定的数据传输网络;在数据分析环节,运用机器学习、深度学习等人工智能技术,实现海量监测数据的智能识别、异常诊断和趋势预测;在决策支撑环节,通过构建数字孪生、仿真模拟等技术平台,为环境管理提供科学化、精准化的决策支持。特别是生态环境大数据平台的建设,实现了多源异构数据的融合分析和可视化展示,显著提升了监测数据的应用价值[85]。

#### 3.3.3 自主可控的技术装备创新发展

我国高度重视监测技术装备的自主创新,通过“产学研用”协同创新机制,推动关键技术突破和核心装备国产化。在传感器技术方面,成功研发了高精度颗粒物监测、水质多参数在线监测等核心传感器,打破了国外技术垄断;在分析仪器方面,国产大气、水质自动监测设备性能指标达到国际先进水平,市场占有率大幅提升;在系统集成方面,自主开发了监测数据采集传输、质量控制、综合分析等软件系统,形成了完整的技术链条。这种自主创新能力的提升,不仅降低了监测成本,提高了技术适用性,更重要的是确保了国家生态环境监测的技术安全和数据安全。

### 3.4 多元价值的功能实现与社会服务

中国生态环境监测网络建设的最终价值,体现在数据产品的多元转化与深度应用中,全面支撑国家治理、企业转型、公众健康与全球合作,是“监测为民”价值属性的具体实践。

#### 3.4.1 国家治理决策的科学支撑功能

生态环境监测数据已深度嵌入国家环境治理的全过程,成为政策制定、执法监管、成效评估的核心依据。在宏观决策层面,监测数据支撑了“大气十条”“水十条”“土十条”等重大环境政策的制定与调整;在监管执法层面,监测数据为中央生态环保督察、环境执法检查提供客观证据,有效提升了执法的精准性和威慑力;在考核评价层面,监测数据直接用于污染防治攻坚战成效考核、生态文明建设目标评价,推动形成了“用数据说话、用数据决策、用数据管理”的治理模式。特别是在应对重污染天气、突发环境事件等紧急情况时,监测网络的快速响应和精准预警能力,为科学决策和有效应对提供了关键支撑。

#### 3.4.2 企业绿色发展的引导服务功能

监测数据为企业绿色转型提供了重要的技术支撑和市场信号。通过将企业自行监测与政府监督监测相结合,推动企业建立内部环境管理体系,实现污染物排放的精细化管控。监测数据与排污许可、环境信用评价、绿色金融等制度深度融合,引导企业主动承担环境责任。在国际贸易领域,高质量的监测数据成为企业应对绿色贸易壁垒、提升产品竞争力的重要依据[86]。特别是在碳排放监测方面,精准的碳排放数据不仅是企业参与碳市场交易的基础,更是企业 ESG(环境、社会和治理)信息披露和可持续发展战略的核心内容。

3.4.3 公众健康保障的信息服务功能

生态环境监测坚持以人民为中心的发展理念,通过多渠道、多形式的信息发布,保障公众环境知情权和健康权益。空气质量指数、水质状况、辐射环境等监测信息的实时发布,已成为公众日常生活的重要参考。通过手机 APP、网站、电视等多媒体平台,公众可以随时获取关心的环境质量信息,合理安排出行和户外活动。特别是针对敏感人群的健康风险提示,体现了监测服务的人文关怀。同时,监测信息的公开透明,增强了公众的环境意识和参与意识,形成了全社会共同关注环境、参与环保的良好氛围。

3.4.4 全球环境治理的国际合作功能

中国生态环境监测网络在服务国内治理的同时,积极参与全球环境治理合作。通过与联合国环境规划署、世界气象组织等国际组织的深度合作,中国监测数据为全球气候变化评估、生物多样性保护等提供了重要支撑。在“一带一路”框架下,中国向共建国家提供监测技术援助和能力建设支持,共建环境监测站点,共享监测数据,推动构建更加公平、包容的全球环境监测体系[87]。这种开放共享的合作模式,既展现了负责任大国的担当,也为全球环境治理贡献了中国智慧和中国方案。

## 4 中国经验的理论总结与国际意义

### 4.1 中国特色环境监测模式的理论内涵

中国在国家治理体系框架下构建的生态环境监测模式,是制度优势、系统思维、技术创新与文化传承的有机统一,为全球生态环境监测网络建设提供了独特范式。

4.1.1 国家治理体系的制度优势

中国特色生态环境监测网络充分发挥了“集中力量办大事”的制度优势,举全国之力构建了纵向贯通、横向协同的监测体系,在美丽中国建设中实现制度优势向发展优势转化。相较于国际上监测体系建设分散于各类政府行动计划,中国通过行政体制改革逐步构建统一集约的监测组织体系,实现了央地协同、区域均衡。例如,依托中央财政统筹建设国家级生态环境监测网络并统一运维,借助跨部门数据共享机制整合了分散的监测资源,通过省以下垂直管理改革有效消除了地方保护主义干扰。这种“‘自上而下’与‘自下而上’相结合”“条块结合、纵横贯通”的治理模式,使中国能够在短时间内建成覆盖广泛、运行高效的国家监测网络,实现了从“碎片化监测”到“一盘棋监测”的转变。

4.1.2 整体性与系统性的思维方法

中国特色生态环境监测坚持整体性与系统性的思维方法,通过指导监测的价值内核与认知框架,建设了一体化生态环境监测网络,推动了上下贯通的治理实践。“坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理”的战略部署,以其整体性、系统性的思维,引领从山顶到海洋的天空地海一体化监测网络体系的顶层设计。这一体系实现了对“气水土固生”全要素的精准获取、对环境污染的全方位智能感知、对“山水林田湖草沙”的全覆盖协同观测、对生态状况的全地域立体监控以及对减污降碳的全过程高效支撑,有效推动生态环境治理实现了从“末端控制”向“全过程管理”、从“单要素减排”向“多污染物协同控制”的根本性转变[88]。同时,“绿水青山就是金山银山”的理念与中国传统“天人合一”的哲学智慧一脉相承,为监测工作注入深厚文化底蕴,赢得广泛社会认同,并通过“自上而下”制度推动与“自下而上”公众参与,转化为强大实践动力,形成执行有力、参与广泛的监测与治理模式。

4.1.3 需求场景为牵引的技术创新

中国生态环境监测网络的发展呈现出需求牵引与场景验证相互促进的螺旋式上升路径,以环境治理的痛点或政策目标为导向驱动技术创新。一方面,明确的政策目标与治理需求是技术升级的核心驱动力。例如,美丽中国建设等战略目标以及重污染天气应对、水环境达标评价等管理需求,对监测的精度、时效性等提出更高要求,牵引监测技术的定向攻关与迭代升级。另一方面,通过发挥监测领域较大规模市场和丰富应用场景优势,打造新技术新产品“试验场”,加快推动新技术新产品大规模场景化应用和发展。例如,为满足高频次、高灵活度的监测需求,市场催生了适用于环境采样的无人机[89];为实现运维降本增效,企业加速了站点智能无人化运维技术的研发。这种“需求牵引、技术支撑、市场驱动”的良性循环,激发了中国环境监测能力持续提升的内生动力。

4.1.4 与时俱进的动态调整策略

中国环境监测网络建设坚持“实事求是、因地制宜、分步实施、重点突破”的原则,针对不同

区域、不同发展阶段采取差异化布局和动态调整策略。中国在生态环境治理领域的探索,核心经验在于成功实现了从以重点污染物总量控制为主的末端管控,到以质量改善为核心的污染防治攻坚,再向以生态安全为目标的美丽中国建设的动态跃升,为全球特别是发展中国家提供了一条从工业污染到生态文明的可借鉴路径。这一转变超越了发达国家“先污染、后治理”的传统模式,展现了巨型经济体在快速发展中通过将坚持国家战略主导、强化监测评估与严格考核问责相结合,实现环境质量全方位、快速改善的系统性能力。实践证明,强有力的环境治理非但不是经济发展的负担,反而是推动高质量、可持续发展的核心动力。其中,生态环境监测作为基础支撑,价值属性持续深化,从服务减排考核的“数据工具”演进为支撑中央生态环保督察、预警生态风险、保障公众健康的“治理基石”。这一角色演变构成中国方案的关键一环,为全球可持续发展目标的实现贡献独特实施范式。

### 4.2 对发展中国家的启示

中国作为全球最大的发展中国家,其生态环境监测网络从无到有、从弱到强的发展历程,为其他发展中国家提供了宝贵经验。

#### 4.2.1 分阶段、有重点的建设策略

中国幅员辽阔、区域发展不平衡的国情与许多发展中国家相似。中国的实践表明,生态环境监测网络建设应遵循“有所为、有所不为”的策略,而非盲目追求“全要素、全覆盖”的理想化目标。对发展中国家而言,可优先聚焦与人民健康和生态安全关系最密切的监测领域,如城市空气质量、饮用水源安全、工业集聚区污染防控等,建立基础监测网络;随着经济实力增强和技术能力提升,再逐步向生态系统完整性监测、温室气体源汇监测等深层次领域拓展[73]。这种渐进式发展路径既能有效解决最紧迫的环境问题,又避免了因监测投入过大而挤占治理资金的风险。

#### 4.2.2 兼顾成本与效能的技术路线

中国在监测技术发展上经历了从“人工采样—实验室分析”到“自动监测—在线传输”再到“智能感知—数据融合”的演进过程[90]。这一渐进式路径为发展中国家提供了可借鉴的技术路线:一是技术选择与经济承受能力相匹配,可采用“关键节点高标准、一般区域适度标准”的布局原则;二是将有限监测资源优先配置在污染热点区域和敏感点位,实现“重点突破、以点带面”;三是善用“传统技术+新兴技术”混合模式,如将传统监测与低成本传感器、移动监测、卫星遥感等手段结合,在确保数据准确性的同时扩大覆盖范围,降低综合成本。中国的经验还表明,发展中国家可通过区域联合监测、数据共享平台、第三方专业服务等多种模式,避免监测设施重复建设和资源浪费。同时,积极引入社会资本和国际合作项目,拓展监测网络筹资渠道,实现环境监测的可持续发展。

#### 4.2.3 技术应用与制度建设同步推进

中国在监测网络建设过程中,不仅注重技术能力提升,更重视配套制度建设,为监测数据的准确性、权威性和应用价值提供保障。对发展中国家而言,在引入新技术的同时,应同步完善法律法规体系、质量控制规范和数据管理制度,防止出现“有设备无标准、有数据不可信”的局面。特别值得借鉴的是,中国通过垂直管理改革解决了地方干预监测的问题,通过第三方质控和比对验证保障了数据质量,通过信息公开制度增强了社会监督力量。这些制度创新使监测数据真正成为环境决策和公众参与的可靠依据。发展中国家可结合本国实际,在监测网络建设初期就建立明确的职责分工、严格的质量控制和透明的信息公开机制,为监测数据的有效应用奠定制度基础。

### 4.3 对全球环境治理的贡献

#### 4.3.1 提供具有可复制性的中国方案

中国探索出的生态环境监测与国家治理深度融合的模式,为全球特别是新兴经济体提供了有益借鉴。一是在组织模式上,中国的“垂直管理+横向协同”机制有效破解了环境监测中的体制障碍;二是在技术路径上,中国的天地一体化立体监测网络实现了高效能、低成本的监测覆盖;三是在应用场景上,中国将监测数据深度融入环境执法、政策评估和公众服务等多元应用场景。这些经验和做法具有较强的适应性和可推广性,特别是对面临类似工业化、城市化挑战的发展中国家具有重要参考价值。例如,中国在京津冀区域大气污染联防联控中建立的跨行政区域监测协作机制,为解决跨境污染问题提供了可行方案[91];中国在重点流域水生态环境监测中采用的上下游断面对比评价机制,为流域生态补偿制度提供了科学依据。这些创新实践正在通过“一带一路”环保合作和南南合作等渠道向更多国家推广[92]。

4.3.2 促进全球监测数据共享与合作

中国积极参与全球环境监测合作,通过多种途径推动全球环境数据共享和能力建设。一方面,中国与世界气象组织、联合国环境规划署等国际组织建立了紧密合作关系,积极参与 GAW、全球环境监测系统(GEMS)等国际监测网络建设,为全球气候变化、臭氧层保护等研究提供中国数据。另一方面,中国通过“一带一路”绿色发展合作平台[93],与共建国家共建环境监测站点,共享监测技术和数据处理能力,助力发展中国家提升环境治理水平。特别是在中日韩三国环保合作、澜湄合作、中国-东盟环保合作等区域平台框架下,中国积极推动跨境环境监测合作,建立联合监测点,开展联合监测活动,为区域环境问题的协同解决提供了科学基础。这种开放共享、互利共赢的合作理念,既填补了全球环境监测网络的空白区域,又促进了发展中国家监测能力的整体提升,为全球环境治理注入了新动力[94]。

4.3.3 助力构建更加公平、包容的全球治理体系

中国在推动生态环境监测国际合作过程中,始终坚持“共商共建共享”原则和“人类命运共同体”理念,致力于构建更加公平、包容的全球环境治理体系。不同于传统的“自上而下”技术转移模式,中国更注重与合作伙伴国平等交流,共同探索适合当地国情的监测解决方案。在具体实践中,中国对外援助和合作项目强调能力建设与技术转移相结合,通过培训当地技术人员、提供适用技术和设备、协助建立本土化质控体系等方式,增强发展中国家的自主监测能力。例如,中国在东南亚、非洲等地区建设的环境监测实验室和培训中心,已成为当地环境管理的重要支撑力量。此外,中国积极推动在国际环境治理规则制定中体现发展中国家的合理诉求,倡导建立更加公平、合理的全球环境监测数据共享机制,使发展中国家在信息获取、技术应用和治理参与方面获得更多话语权。这种以互利共赢为导向的国际合作理念,正逐步改变国际环境治理的传统格局,推动全球环境治理体系向更加平等、包容的方向发展。

### 4.4 理论与实践的综合启示

综合中国生态环境监测网络建设的理论内涵及其国际意义,可归纳出以下关键启示:第一,生态环境监测已从单纯的技术支撑工具转变为国家治理的重要基础设施,其价值不仅体现在生态环境质量评价领域,更延伸到政府决策、公众参与、国际合作等多元治理维度。第二,有效的生态环境监测网络需要制度、技术、组织和文化的协同支撑。中国经验表明,技术创新需要制度保障,制度落实需要技术支撑,而公众认同则是监测网络可持续发展的社会基础。第三,生态环境监测的发展路径应与国家发展阶段、经济承受能力和环境治理重点相适应,既不能盲目追求高精尖技术而忽视基础能力建设,也不能满足于基础监测而缺乏前瞻性布局。第四,在全球环境挑战日益复杂的背景下,各国需要加强监测技术和数据共享合作,共同构建更加完善的全球环境监测体系,为应对气候变化、生物多样性丧失等全球性环境问题提供科学支撑。

中国通过将制度优势、技术创新、系统思维与文化价值观深度融合,构建了具有自身特色的生态环境监测治理模式。这一模式不仅有效支撑了国内生态文明建设,也为全球环境治理贡献了中国智慧和中国方案。未来,随着法律体系的进一步健全、核心技术的持续突破和国际合作的不断深化,中国生态环境监测网络有望在服务国家治理和全球环境治理中发挥更加重要的作用。

## 5 挑战与展望

### 5.1 面临的主要挑战

通过对国内外监测实践的比较研究发现,当前中国生态环境监测网络建设面临的挑战主要体现在政策法律、技术方法和应用转化 3 个维度。

5.1.1 政策与法律层面的挑战

在全球环境治理格局加速调整的背景下,中国生态环境监测网络在制度建设方面仍面临诸多挑战。首先,生态环境监测制度体系仍不健全。尽管《生态环境监测条例》已经出台,但相关配套制度文件还有待完善。其次,多部门协调机制有待强化。生态环境、自然资源、水利、农业、气象等部门分别拥有独立的监测网络与数据平台,形成了“条块分割”的格局。虽然近年来跨部门数据共享取得一定进展,但在数据标准统一、信息互联互通、技术规范协调等方面仍存在障碍,导致监测资源配置效率不高、数据整合难度大。再次,国际环境监测规则演变对中国提出新要求。随着欧盟碳边境调节机制(CBAM)等新型环境贸易措施的实施[95],以及全球环境治理对数据透明度要求的提高,中国如何在保障数据真实性和完整性的同

时,提升在国际环境规则制定中的话语权,成为亟待解答的议题[96]。

5.1.2 技术与方法层面的挑战

中国生态环境监测技术虽取得长足进步,但在面向国家治理的复杂需求时仍存在一系列技术瓶颈。首先,新污染物监测与多介质复合污染评估能力不足。随着经济社会的发展,微塑料、内分泌干扰物、抗生素、纳米颗粒物等新污染物对生态环境的影响日益凸显,但针对这类污染物的快速检测方法、标准物质和评价标准尚不完善,增加了全面掌握环境风险的难度[97]。其次,生态系统完整性监测与生物多样性评估面临技术挑战。相比于常规污染物监测,生态系统健康状况和生物多样性变化监测需要更广阔的空间覆盖、更长的监测时间序列和更精细的指标体系,现有监测手段在时空分辨率、连续性和系统性方面仍有较大提升空间[98]。再次,数据质量控制与安全保障面临更高要求。随着传感器网络、卫星遥感和物联网技术的广泛应用,监测数据量呈几何级增长。如何在海量数据环境下保障数据质量、防止数据篡改、保护敏感信息安全,同时实现数据价值的最大化挖掘,对现有质量控制与数据治理体系提出了更高要求。

5.1.3 应用与转化层面的挑战

生态环境监测从数据获取到价值实现的转化链条仍面临诸多挑战。一方面,监测数据与决策支持的衔接不够紧密。部分监测指标与生态环境管理需求存在脱节,监测数据未能及时转化为有效的治理措施,降低了监测工作的实际效益。另一方面,监测数据的公开与应用还存在平衡难题。如何在保护敏感信息与满足公众环境知情权之间找到平衡点,以及如何避免监测数据被误读或滥用,仍需探索更加成熟的机制。此外,区域发展不平衡导致监测能力差距明显。经济发达地区已建立较为完善的监测网络,而欠发达地区在设备配置、人才培养、运行维护等方面仍面临诸多困难。这种“两极化”现象不仅影响全国监测数据的一致性和可比性,也可能导致环境风险在薄弱区域累积,威胁区域生态安全。

## 5.2 发展趋势与建议

面对上述挑战,基于国际经验与中国实践,提出以下发展趋势判断与政策建议,以推动生态环境监测网络更好地服务于国家治理体系现代化。

5.2.1 强化一体化立法与多层级治理体系

《生态环境监测条例》已正式施行,要加快推进《环境监测数据弄虚作假行为判定及处理办法》等配套制度与技术文件的制修订工作,从源头准入加强监管,增强制度执行的刚性约束,提升配套政策的协同实施效果。在组织架构上,持续深化垂直管理改革成果,建立国家、省、市、县四级联动,跨部门、跨区域协同的多层级治理体系。通过建立部际协调机制,打破部门数据壁垒,推动生态环境、自然资源、水利、气象等部门的监测资源整合与数据共享。特别是在京津冀、长三角、粤港澳大湾区等关键区域,应强化区域联防联控机制,建立统一的监测标准和数据平台,为区域生态环境协同治理提供支撑。

5.2.2 深化天空地海一体化监测技术创新

应以国家重大科技专项为依托,加强生态环境监测关键技术攻关与装备自主创新。重点突破高精度传感器、新污染物快速检测、生态系统健康评估等核心技术,提升环境监测的精准性、全面性和预见性。同时,积极推进卫星遥感、无人机、自动站、走航监测等多平台协同的立体监测体系建设,实现从“点状监测”向“网格化监测”、从“被动响应”向“主动预警”的转变。在技术应用方面,加强人工智能、区块链、大数据等新兴技术与环境监测的深度融合,通过建立智能分析模型提升对海量监测数据的挖掘能力,利用区块链技术保障数据全过程可追溯、不可篡改,借助大数据平台实现多源异构数据的整合与共享。特别是在“双碳”目标背景下,加快建设覆盖温室气体排放、碳汇能力评估的监测体系,为碳达峰碳中和提供科学支撑。

5.2.3 优化多元协同的监测数据应用机制

构建以数据价值实现为导向的监测成果应用体系。一方面,强化监测数据在环境决策中的支撑作用,建立“监测—评估—决策—反馈”闭环管理机制,确保监测结果能够真正转化为有效的治理措施;另一方面,拓展监测数据的多元应用场景,为产业转型升级、区域协同发展、公众健康保护等提供精准服务。在数据共享方面,建立“政府主导、多方参与、分级分类、安全可控”的监测数据开放共享机制。根据数据敏感程度和应用需求,制定差异化的共享策略,在保障国家安全和商业秘密的前提下,最大限度释放数据价值。同时,鼓励企业、科研机构、社会组织等多元主体参与生

态环境监测,形成政府监测与社会监测相互补充的格局。

5.2.4 加强区域均衡发展与国际合作

加大对欠发达地区和生态敏感区域监测能力建设的支持力度。通过中央财政转移支付、技术帮扶等方式,提升薄弱地区的监测基础设施和技术水平。探索“移动实验室+云平台”等创新模式,为偏远地区提供灵活高效的监测服务,缩小区域间监测能力差距。在国际合作方面,积极参与全球环境治理,深化与联合国环境规划署、世界气象组织等国际组织的合作,参与制定国际监测标准和规则,提升中国在全球环境治理中的话语权和影响力。同时,依托“一带一路”绿色发展合作平台,加强与发展中国家的监测技术交流与能力建设合作,共同应对全球环境挑战。

5.2.5 培育生态环境监测人才队伍与文化

加强生态环境监测专业人才培养,建立多层次、多学科的人才培养体系。一方面,加强高校相关专业建设,培养具备跨学科背景的专业人才;另一方面,强化在职人员培训,提升一线监测人员的技术水平和职业素养。同时,应建立有利于人才成长的评价激励机制,吸引更多优秀人才投身环境监测事业。在文化建设方面,培育“数据至上、质量为本”的监测职业文化,强化监测人员的职业荣誉感和责任意识,确保监测数据的真实准确。同时,加强环境监测科普教育,提升公众对监测数据的理解能力和应用意识,形成全社会共同参与、共同监督的良好氛围。

## 5.3 结语

生态环境监测网络作为国家治理体系的重要基础设施,正在从传统的“测量工具”向现代化的“治理支撑”转变。面对新时代生态文明建设要求,我国生态环境监测网络建设应坚持系统观念,统筹法律制度、组织体系、技术创新和人才培养等多重要素,构建全面覆盖、运行高效和保障有力的现代化监测网络。

未来,随着法律保障的进一步健全、技术水平的持续提升以及多元协同机制的不断完善,我国生态环境监测网络将更好地服务于生态环境治理体系和治理能力现代化,为建设美丽中国、实现中华民族永续发展提供更加坚实的科学支撑,同时为全球环境治理贡献更多中国智慧和中国方案。通过不断完善“制度+技术+应用”三位一体的监测治理模式,我国生态环境监测网络有望实现从“跟跑”到“并跑”再到部分领域“领跑”的历史性跨越,为构建人与自然和谐共生的现代化奠定坚实基础。

**参考文献(References):**

[1] FULLER R, LANDRIGAN P J, BALAKRISHNAN K, et al. Pollution and Health: A Progress Update[J]. The Lancet Planetary Health, 2022, 6(6): e535-e547.

[2] LEE H, ROMERO J. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.

[3] BRONDÍZIO E S, SETTELE J, DIAZ S, et al. Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services[R]. Bonn, Germany: IPBES, 2019.

[4] MISHRA D, MISHRA R K, AGARWAL R. Artificial Intelligence and Big Data in Environmental Monitoring and Decision Support: Revolutionizing Ecosystem Management[J]. Journal of Science Research International (JSRI), 2025, 11(5): 28-39.

[5] 彭令,殷志强,金爱芳,等. 国内外自然资源监测与观测网络建设现状及经验启示[J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2 156-2 164.
PENG Ling, YIN Zhiqiang, JIN Aifang, et al. Status and Enlightenment of Natural Resources Monitoring and Observation Network Construction in China and Aboard[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2 156-2 164.

[6] Parliament of the United Kingdom. Thames Purification Act 1866[Z]. 1866.

[7] Conference of the Parties to the UNFCCC. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change[Z]. 1997.

[8] Conference of the Parties to the UNFCCC. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change[Z]. 2015.

[9] VOGLER J. The European Contribution to Global Environmental Governance[J]. International Affairs, 2005, 81(4): 835-850.

[10] BENNETT N J, SATTERFIELD T. Environmental Governance: A Practical Framework to Guide Design, Evaluation, and Analysis[J]. Conservation Letters, 2018, 11(6): e12600.

[11] 张皓,赵岑,陈传忠,等. 发达国家和地区生态环境

监测发展经历对中国的启示[J]. 中国环境监测,2021,37(1):34-39.
ZHANG Hao,ZHAO Cen,CHEN Chuanzhong,et al. Insights of Development Experience of Ecological and Environmental Monitoring in Developed Countries and Regions to China[J]. Environmental Monitoring in China,2021,37(1):34-39.

[12] 杨林章,冯彦房,施卫明,等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(1):96-101.
YANG Linzhang, FENG Yanfang, SHI Weiming, et al. Review of the Advances and Development Trends in Agricultural Non-point Source Pollution Control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2013,21(1):96-101.

[13] 周波,何威. 生态环境监测网络与企业绿色转型——数字赋能环境监测数据共享的视角[J]. 安徽师范大学学报(社会科学版),2026,54(1):106-119.
ZHOU Bo, HE Wei. Network of Environmental Monitoring and Corporate Green Transformation-Digital Enabling Environmental Monitoring Data Sharing Perspective[J]. Journal of Anhui Normal University (Social Sciences),2026,54(1):106-119.

[14] 秦天宝,侯芳. 论国际环境公约遵约机制的演变[J]. 区域与全球发展,2017,1(2):54-68,156.
QIN Tianbao, HOU Fang. On the Evolution of the Compliance Mechanism of International Environmental Conventions[J]. Area Studies and Global Development,2017,1(2):54-68,156.

[15] HART J K, MARTINEZ K. Environmental Sensor Networks:A Revolution in the Earth System Science?[J]. Earth-Science Reviews, 2006, 78(3/4): 177-191.

[16] GUBBI J,BUYYA R,MARUSIC S,et al. Internet of Things (IoT):A Vision,Architectural Elements,and Future Directions[J]. Future Generation Computer Systems,2013,29(7):1 645-1 660.

[17] ULLAH S, LI J Q, CHEN J, et al. A Survey on Emerging Trends and Applications of 5G and 6G to Healthcare Environments[J]. ACM Computing Surveys,2024,57(4):1-36.

[18] SHAFIK W. Factoring 6G Technology and Beyond in Advancing Human Life Management and Natural Habitats[M]//HAQUE S,SINGH S K. 6G Impacts on Natural Habitats and Human Life. PA USA:IGI Global Scientific Publishing,2025:319-358.

[19] CASINO F, DASAKLIS T K, PATSAKIS C. A Systematic Literature Review of Blockchain-Based Applications:Current Status,Classification and Open Issues[J]. Telematics and Informatics,2019,36:55-81.

[20] RAMADAN M N A, ALI M A H, JABER H, et al. Blockchain-Secured IoT-Federated Learning for Industrial Air Pollution Monitoring: A Mechanistic Approach to Exposure Prediction and Environmental Safety[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2025,300:118442.

[21] DEINER K, BIK H M, MÄCHLER E, et al. Environmental DNA Metabarcoding: Transforming How We Survey Animal and Plant Communities[J]. Molecular Ecology,2017,26(21):5 872-5 895.

[22] THOMSEN P F, WILLERSLEV E. Environmental DNA—An Emerging Tool in Conservation for Monitoring Past and Present Biodiversity[J]. Biological Conservation,2015,183:4-18.

[23] SASSOLAS A, LECA-BOUVIER B D, BLUM L J. DNA Biosensors and Microarrays[J]. Chemical Reviews,2008,108(1):109-139.

[24] MEHROTRA P. Biosensors and Their Applications—A Review[J]. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research,2016,6(2):153-159.

[25] CHADALAVADA S, FAUST O, SALVI M, et al. Application of Artificial Intelligence in Air Pollution Monitoring and Forecasting: A Systematic Review[J]. Environmental Modelling & Software,2025,185:106312.

[26] OLAWADE D B, WADA O Z, IGE A O, et al. Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Advancements, Challenges, and Future Directions[J]. Hygiene and Environmental Health Advances, 2024,12:100114.

[27] United States Environmental Protection Agency. Guidance for Quality Assurance Project Plans for Modeling: EPA QA/G-5M[Z]. Washington, DC: U. S. EPA,2024.

[28] THIEL F. Digital Transformation of Legal Metrology—The European Metrology Cloud[J]. OIML Bulletin, 2018,59(1):10-21.

[29] HENSON A, KÜHNE M, ERARD L. The European Metrology Research Programme in Action[J]. NCSLI Measure,2009,4(4):26-33.

[30] 王江南,龚亮,卢晓华. 以国家计量发展规划引领标准物质高质量发展[J]. 中国计量,2024(12):47-50,57.
WANG Jiangnan,GONG Liang,LU Xiaohua. Lead the

High-Quality Development of Standard Substances with the National Metrology Development Plan[J]. China Metrology,2024(12):47-50,57.

[31] GONG X X, WANG J, XIAO Z S. Effects of Digitization on Environmental Governance in Public Services:Evidence from China[J]. Public Money & Management,2025:1-13.

[32] CHEN M,GROSSKLAGS J. Algorithmic Regulation at the City Level in China[J]. Data & Policy,2025,7:e37.

[33] ZHANG C,ZOU X,FENG X Y,et al. Environmental Credit-Based Governance and Green Finance:A Study of the Promulgation of the Law of Environmental Credit Evaluation [J]. Polish Journal of Environmental Studies,2024,33(4):4 917-4 931.

[34] LIN A Y, LIU Y J, ZHOU S L, et al. Data-Driven Analysis and Evaluation of Regional Resources and the Environmental Carrying Capacity [J]. Sustainability,2023,15(10):8372.

[35] 马燕,焦跃辉. 论环境知情权[J]. 当代法学,2003,17(9):20-23.
MA Yan, JIAO Yuehui. On the Right to Environmental Information[J]. Contemporary Legal Science,2003,17(9):20-23.

[36] 辛方坤,孙荣. 环境治理中的公众参与——授权合作的“嘉兴模式”研究[J]. 上海行政学院学报,2016,17(4):72-80.
XIN Fangkun, SUN Rong. Public Participation in Environmental Governance:A Case of Partnership and Authorized in Jiaxing City [J]. The Journal of Shanghai Administration Institute, 2016, 17(4): 72-80.

[37] 涂正革. 公众参与环境治理的理论逻辑与实践模式[J]. 国家治理,2018(48):34-48.
TU Zhengge. The Theoretical Logic and Practical Models of Public Participation in Environmental Governance[J]. Governance,2018(48):34-48.

[38] YU H,GENG R Z,WANG M,et al. The Practice of the Construction of China's Core Concept of Ecological Civilization:The Coordinated Development of the Environment and Economy[J]. Sustainability,2025,17(18):8353.

[39] WEI F W, CUI S H, LIU N, et al. Ecological Civilization:China's Effort to Build a Shared Future for All Life on Earth[J]. National Science Review,2021,8(7):nwaa279.

[40] 姜霞,王坤,郑朔方,等. 山水林田湖草生态保护修复的系统思想——践行“绿水青山就是金山银山”[J]. 环境工程技术学报,2019,9(5):475-481.
JIANG Xia, WANG Kun, ZHENG Shuofang, et al. Ecological Protection and Restoration System of Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grassland: Practicing the Theory of Lucid Waters and Lush Mountains Are Invaluable Assets [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 475-481.

[41] SUN P H, CUI M X, TANG D C. The Concept of “Lucid Waters and Lush Mountains” Green Development and Aesthetic Study of Huai'an Canal Culture [J]. Cultura: International Journal of Philosophy of Culture and Axiology, 2025, 22(2): 585-599.

[42] PETRIĆ D. Environmental Justice in the European Union: A Critical Reassessment [J]. Croatian Yearbook of European Law and Policy,2019,15(1): 215-267.

[43] KOPNINA H. Of Big Hegemonies and Little Tigers: Ecocentrism and Environmental Justice [J]. The Journal of Environmental Education, 2016, 47(2): 139-150.

[44] GIAKOUMIS T, VOULVOULIS N. The Transition of EU Water Policy Towards the Water Framework Directive's Integrated River Basin Management Paradigm[J]. Environmental Management, 2018, 62(5):819-831.

[45] MOSS T. The Governance of Land Use in River Basins: Prospects for Overcoming Problems of Institutional Interplay with the EU Water Framework Directive[J]. Land Use Policy,2004,21(1):85-94.

[46] VAN KATS N,DIEPERINK C,VAN RIJSWICK M,et al. Towards a Good Ecological Status? The Prospects for the Third Implementation Cycle of the EU Water Framework Directive in the Netherlands[J]. Water,2022,14(3):486.

[47] BOSCHECK R. The EU Water Framework Directive: Meeting the Global Call for Regulatory Guidance?[J]. Intereconomics,2006,41:268-271.

[48] 熊永兰,张志强,尉永平. 国际典型流域管理规划的新特点及其启示[J]. 生态经济,2014,30(2):45-48.
XIONG Yonglan, ZHANG Zhiqiang, WEI Yongping. Management Plans of Important International River Basins:New Features and Implications[J]. Ecological Economy,2014,30(2):45-48.

[49] 姚颖,蓝艳,张慧勇,等. 欧洲大气污染防治的成效、经验及启示[J]. 环境与可持续发展,2021,46

(6):176-180.
YAO Ying, LAN Yan, ZHANG Huiyong, et al. Prevention and Control of Air Pollution in Europe: Achievements, Experience and Implications [J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46 (6):176-180.

[50] 朱明哲.司法如何参与气候治理——比较法视角下的观察[J].政治与法律,2022(7):18-33.
ZHU Mingzhe. On the Judicial Power's Role in Climate Governance—An Observation from the Perspective of Comparative Law[J]. Political Science and Law,2022(7):18-33.

[51] 张平华.欧盟环境政策实施体系研究[J].环境保护,2002,30(1):44-45,48.
ZHANG Pinghua. Study on Environmental Policy System of European Union [J]. Environmental Protection,2002,30(1):44-45,48.

[52] KLEEMANN K. "Moby Dick" in the Rhine: How a Beluga Whale Raised Awareness of Water Pollution in West Germany[J/OL]. Arcadia, 2018(6). [2026-01-10]. http://www.environmentandsociety.org/node/8222.

[53] FENTEN T, DIEPERINK C. Governance Conditions for a Successful Restoration of Riverine Ecosystems, Lessons from the Rhine River Basin [J]. Water, 2024,16(20):2983.

[54] EARLE J R, BLACKLOCKE S, BRUEN M, et al. Integrating the Implementation of the European Union Water Framework Directive and Floods Directive in Ireland[J]. Water Science and Technology, 2011, 64 (10):2 044-2 051.

[55] RAMLER D, KECKEIS H. Effects of Large-River Restoration Measures on Ecological Fish Guilds and Focal Species of Conservation in a Large European River (Danube, Austria) [J]. Science of the Total Environment,2019,686:1 076-1 089.

[56] COOTER W S. Clean Water Act Assessment Processes in Relation to Changing U.S. Environmental Protection Agency Management Strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(20):5 265-5 273.

[57] COOTER W, RINEER J, BERGENROTH B. A Nationally Consistent NHDPlus Framework for Identifying Interstate Waters: Implications for Integrated Assessments and Interjurisdictional TMDLs [J]. Environmental Management, 2010, 46(3):510-524.

[58] KAHL J S, STODDARD J L, HAEUBER R, et al. Have U.S. Surface Waters Responded to the 1990 Clean Air Act Amendments? [J]. Environmental Science & Technology,2004,38(24):484A-490A.

[59] RUBIO-IGLESIAS J M, EDOVALD T, GREW R, et al. Citizen Science and Environmental Protection Agencies: Engaging Citizens to Address Key Environmental Challenges[J]. Frontiers in Climate, 2020,2:600998.

[60] Harvard Law Review. Clean Water Act—"Waters of the United States"—Sackett v. EPA[J]. Harvard Law Review,2023,137:390-399.

[61] HAWKINS C P. The Clean Water Rule: Defining the Scope of the Clean Water Act [J]. Freshwater Science,2015,34(4):1 585-1 587.

[62] KIM H W, LI M H. Managing Stormwater for Urban Sustainability: An Evaluation of Local Comprehensive Plans in the Chesapeake Bay Watershed Region[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2017,60(10):1 702-1 725.

[63] HOOD R R, SHENK G W, DIXON R L, et al. The Chesapeake Bay Program Modeling System: Overview and Recommendations for Future Development[J]. Ecological Modelling,2021,465:109635.

[64] BHATT G, LINKER L, SHENK G, et al. Water Quality Impacts of Climate Change, Land Use, and Population Growth in the Chesapeake Bay Watershed [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association,2023,59(6):1 313-1 341.

[65] GAW, WMO. The Global Atmosphere Watch Programme 25 Years of Global Coordinated Atmospheric Composition Observations and Analyses: WMO-No. 1143 [R]. Geneva: World Meteorological Organization,2014.

[66] HALL B D, CROTWELL A M, KITZIS D R, et al. Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) $CO_2$ Calibration Scale [J]. Atmospheric Measurement Techniques,2021,14(4):3 015-3 032.

[67] DÖBBELING-HILDEBRANDT N. Evidence Synthesis Methods to Enhance Climate Policy Evaluation for IPCC Assessments [D]. Leeds, UK: University of Leeds,2024.

[68] MINX J C, CALLAGHAN M, LAMB W F, et al. Learning About Climate Change Solutions in the IPCC and Beyond[J]. Environmental Science & Policy, 2017,77:252-259.

[69] HAO H J, JIANG C F. The Path of Transboundary Marine Plastic Waste Management in China, Japan,

and "South Korea" from the Perspective of the Blue Economy[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 9: 1075667.

[70] IRIYE A. Environmental History and International History[J]. Diplomatic History, 2008, 32(4): 643-646.

[71] KIM I. Regional Environmental Cooperation on Transboundary Air Pollution in the Middle East and North Africa[J]. Journal of South Asian and Middle Eastern Studies, 2023, 46(3): 1-21.

[72] 王桥,刘绍民,王国强,等.我国生态环境监测网络体系发展研究[J].中国工程科学,2024,26(5):212-222.
WANG Qiao, LIU Shaomin, WANG Guoqiang, et al. Development of Ecological Environment Monitoring Network System in China [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineerng, 2024, 26(5): 212-222.

[73] 冯晓娟,米湘成,肖治术,等.中国生物多样性监测与研究网络建设及进展[J].中国科学院院刊,2019,34(12):1 389-1 398.
FENG Xiaojuan, MI Xiangcheng, XIAO Zhishu, et al. Overview of Chinese Biodiversity Observation Network (Sino BON) [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(12): 1 389-1 398.

[74] 张皓,赵岑,陈传忠,等.新发展阶段生态环境监测面临的若干问题和解决思路[J].环境监控与预警,2022,14(1):79-83.
ZHANG Hao, ZHAO Cen, CHEN Chuanzhong, et al. Problems and Solutions of Ecological Environment Monitoring in the New Development Stage [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2022, 14(1): 79-83.

[75] 曹家乐,张亚辉,张瑾,等.国内外水生态健康评价研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(5):1 402-1 410.
CAO Jiale, ZHANG Yahui, ZHANG Jin, et al. Research Progress of Water Ecological Health Assessment at Home and Abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1 402-1 410.

[76] 谷思雨,陈凯,金小伟,等.水生生物环境 DNA 监测技术的发展、应用与标准化[J].水生生物学报,2024,48(8):1 443-1 458.
GU Siyu, CHEN Kai, JIN Xiaowei, et al. Development, Applications, and Standardization of Environmental DNA Monitoring Technology for Aquatic Organisms[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(8): 1 443-1 458.

[77] 曹军,汪琦,徐政,等.我国环境空气中温室气体监测技术研究进展[J].环境监控与预警,2022,14(1):1-6.
CAO Jun, WANG Qi, XU Zheng, et al. Research Progress in Monitoring Technology for Atmospheric Greenhouse Gases in China [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2022, 14(1): 1-6.

[78] 周娴,陈德敏.生态环境安全的实践困境与法治进路[J].重庆大学学报(社会科学版),2023,29(6):258-271.
ZHOU Xian, CHEN Demin. Practical Dilemma and the Rule of Law Approach for Ecological Environment Security[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2023, 29(6): 258-271.

[79] 王运涛,王国强,王桥,等.我国生态环境大数据发展现状与展望[J].中国工程科学,2022,24(5):56-62.
WANG Yuntao, WANG Guoqiang, WANG Qiao, et al. Development Status and Prospects of Ecological Environment Big Data in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 56-62.

[80] BAINES R, PATIBALLA S K, BOOTH J, et al. Multi-environment Robotic Transitions Through Adaptive Morphogenesis[J]. Nature, 2022, 610(7 931): 283-289.

[81] HU Y Q, YANG C X, YANG J, et al. Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing and Its Application in Coastal Ecological Environment Monitoring [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 821(1): 012018.

[82] BOUCHET P, PHILLIPS C, HUANG Z, et al. Comparative Assessment of Pelagic Sampling Methods Used in Marine Monitoring [R]. National Environmental Science Programme, Marine Biodiversity Hub, 2018.

[83] SEESAARD T, KAMJORNKITTIKOON K, WONGCHOOSUK C. A Comprehensive Review on Advancements in Sensors for Air Pollution Applications[J]. Science of the Total Environment, 2024, 951: 175696.

[84] VISHAL, SHARMA M, JAIN S. Unmanned Aerial Vehicles and Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Applications Across Diverse Emission Sources [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 127: 106409.

[85] PENG S H, BAO N S, GU N, et al. Enhanced Assessment of Chlorophyll-a and Total Nitrogen

Dynamics Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Model and Hyperspectral Imagery in Coastal Wetland Water[J]. Environmental Technology & Innovation, 2025,40:104521.

[86] YANG J Y, ZUO Z L, LI Y L, et al. Manufacturing Enterprises Move Towards Sustainable Development: ESG Performance, Market-Based Environmental Regulation, and Green Technological Innovation[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 372: 123244.

[87] LIU H J, YANG Q Y, CHEN B Z, et al. Spatial and Temporal Evolution and Influencing Factors of Human Settlement Environment Quality in Xinjiang, China [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 16543.

[88] ZHANG D W. Establishing a Nation-Wide Eco-Environment Monitoring Network for Sustainable Governance [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2025, 26: 100585.

[89] ZHU C M, SHEN Q, ZHANG K, et al. Multiscale Detection and Assessment of Vegetation Eco-Environmental Restoration Following Ecological Water Compensation in the Lower Reaches of the Tarim River, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14 (22): 5855.

[90] 陈善荣. 我国生态环境监测的 40 年发展回顾与展望[J]. 环境保护, 2018, 46(20): 21-25.
CHEN Shanrong. Retrospect and Prospect of China's Ecological Environment Monitoring Reform in the Past 40 Years [J]. Environmental Protection, 2018, 46 (20): 21-25.

[91] ZHAO Y M, HANSON A. Endeavoring for China's Environment and Development Transformation: Three Decades of China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED) [M]. Singapore: Springer, 2024.

[92] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Records of Press Conference of State Council Information Office [M]//2020 Press Conference Records of Ministry of Ecology and Environment, the People's Republic of China. Singapore: Springer, 2022: 11-420.

[93] HUANG M X, LI S Y. The Analysis of the Impact of the Belt and Road Initiative on the Green Development of Participating Countries [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137869.

[94] ZHANG T, ZHANG K. Establishment and Application of Modern Ecological Governance Systems from the Perspective of Digital Empowerment [J]. Sustainability, 2025, 17(3): 1176.

[95] CHANG J Z. Implementation of the EU Carbon Border Adjustment Mechanism and China's Policy and Legal Responses [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025, 110: 107683.

[96] YUE T, TONG J, QIAO Y B, et al. Carbon Governance or Trade Gaming: China's Approach to Addressing the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 484: 144359.

[97] WU F, ROBINSON B, GAO Y, et al. New Contaminants: Existence and Knowledge Gaps [J]. New Contaminants, 2025, 1: e001.

[98] SOUBRY I, DOAN T, CHU T, et al. A Systematic Review on the Integration of Remote Sensing and GIS to Forest and Grassland Ecosystem Health Attributes, Indicators, and Measures[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3262.