

西北地区“天空地”一体化环境监测体系构建研究

赵琦^{1,2,3}, 孟晓燕¹, 董开元¹, 何静¹, 陆杰¹, 许仲林¹, 贡红娟¹

1. 新疆大学生态与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830017

2. 巴音郭楞生态环境监测站, 新疆 库尔勒 841000

3. 自然资源部塔里木河流域下游水资源与生态效应野外科学观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830057

摘要:西北地区作为我国重要的生态安全屏障,其生态环境脆弱性与战略价值并存,这对该区域的精准环境监测提出了特殊挑战。系统构建了“天空地”一体化环境监测体系的技术路径,以应对该区域水资源短缺、土地荒漠化与生态退化等复合型环境问题。研究表明,通过集成高分辨率卫星遥感、无人机监测与智能传感网络技术,可构建覆盖宏观、中观、微观尺度的协同观测体系;结合监测设备的环境适应性改造与自供能技术创新,能有效提升极端环境下监测数据的连续性与可靠性。在管理机制层面,亟须建立统一的数据标准规范、跨部门共享平台与专业人才培养体系,以保障监测网络的可持续运行。研究成果可为西北地区生态环境监测能力提升提供技术集成方案与制度创新框架,对支撑区域生态安全屏障建设与高质量发展具有实践意义。

关键词:一体化监测;西北地区;监测网络优化

中图分类号: X84 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2025)S1-0001-10

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.S1.01

Research on the Construction of an Integrated Space-Air-Ground Environmental Monitoring System in Northwest China

ZHAO Qi^{1,2,3}, MENG Xiaoyan¹, DONG Kaiyuan¹, HE Jing¹, LU Jie¹, XU Zhonglin¹, YUN Hongjuan¹

1. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, 830017, China

2. Bayingolin Ecological and Environmental Monitoring Station, Korla 841000, China

3. Field Scientific Observation and Research Station for Water Resources and Ecological Effects in the Lower Tarim River Basin, Ministry of Natural Resources, Urumqi 830057, China

Abstract: As an important ecological security barrier in China, the northwest region possesses both ecological fragility and strategic value, posing special challenges for precise environmental monitoring in the area. This study systematically outlines the technical pathway for constructing an integrated “space-air-ground” monitoring system to address complex environmental issues such as water scarcity, land desertification, and ecological degradation in the area. Research shows that by integrating high-resolution satellite remote sensing, UAV monitoring, and intelligent sensor network technologies, a coordinated observation system covering macro, meso, and micro scales can be established. Coupled with environmental adaptation modifications of monitoring equipment and innovations in self-powering technologies, the continuity and reliability of monitoring data under extreme conditions can be effectively enhanced. At the management level, there is an urgent need to establish unified data standards, cross-departmental sharing platforms, and professional talent training systems to ensure the sustainable operation of the monitoring network. The research results provide a technical integration solution and institutional innovation framework for improving ecological and environmental monitoring capabilities in northwest China, with practical significance for supporting the construction of regional ecological security barriers and high-quality development.

Keywords: integrated monitoring; northwest region; monitoring network optimization

随着全球气候变化与人类活动强度的持续加剧,生态环境监测作为精准认知环境问题、科学支撑生态治理与决策的基石,战略地位日益凸显^[1]。传统环境监测手段多依赖于地面孤立站

点,存在覆盖范围有限、数据传输在偏远地区易受阻、难以实现大尺度实时动态感知等固有局限,已无法满足现代化环境治理体系对监测数据“全方位、高精度、短周期”的迫切需求。在此背景下,

收稿日期: 2025-10-09; **修订日期:** 2025-11-04

基金项目: 自然资源部塔里木河流域下游水资源与生态效应野外科学观测研究站开放课题(WZD-Y-20250106)

第一作者简介: 赵琦(1988-),女,新疆库尔勒人,博士研究生,高级工程师。

通讯作者: 许仲林

融合天基卫星、空基航空/无人机、地基传感器网络以及海基(在内陆地区可拓展为重要水体)观测平台的“天空地海”一体化监测理论应运而生^[2]。该理论通过多平台协同观测、多源数据融合与智能分析,旨在构建一个全空间、全要素、全时相的立体化感知体系,为实现生态环境治理能力现代化提供了革命性的技术路径^[3]。我国在《关于加快建立现代化生态环境监测体系的实施意见》等顶层设计中,已明确将构建“天空地海”一体化监测网络列为核心任务,标志着生态环境遥感监测正从辅助手段转变为主战场的关键支撑^[4]。

“天空地海”一体化监测体系的构建,深度依赖于前沿技术的交叉融合与协同创新。在数据获取层面,高分辨率光学卫星(如WorldView系列)、国产环境卫星(如环境一号、高分系列)与北斗导航卫星系统共同构成了天基观测的基础,实现了对地大范围、周期性宏观监测^[5]。其中,北斗系统凭借其高精度定位与授时、独特的短报文通信功能,在通信盲区实现了监测数据的可靠回传,有效解决了偏远地区的数据传输瓶颈^[6]。在空基与地基层面,利用无人机倾斜摄影测量技术能够快速获取重点区域的高精度三维实景模型,弥补了卫星影像在局部细节上的不足^[7];而覆盖各环境要素的智能传感器网络(如监测浮标、移动监测车、固定站点等)则负责采集精准的原位数据,为遥感反演与模型验证提供地面真值^[8]。在数据处理与应用层面,地理信息系统(GIS)作为强大的空间数据管理与分析引擎,实现了多源监测数据的融合、可视化与深度挖掘;大数据、人工智能技术正推动环境监测从静态描述向动态模拟、智能预警和决策支持跨越,最终形成“叠加—融合—大数据分析—智能化”的完整技术闭环^[9]。

西北地区作为我国的生态安全屏障区与典型生态脆弱区,其独特的极端干旱环境、稀缺的水资源与敏感的生态系统,对“天空地”一体化监测提出了更为迫切与典型的需求。甘肃敦煌西湖国家级自然保护区作为西北极端干旱区湿地-荒漠复合生态系统的典型代表,其生态演变直接关系到区域生态安全与敦煌绿洲的存续^[10]。研究人员应用“天空地”一体化监测系统,通过卫星遥感、无人机航拍与地面观测的结合,成功实现了对保护区土地利用、植被覆盖(NDVI反演)、水域变化

的动态监测,并构建了高精度的三维电子沙盘,为生态本底评估、退化原因诊断及保护修复对策制定提供了直观、科学的依据。这一区域性实践充分验证了一体化监测技术在应对西北地区环境挑战中的有效性与巨大潜力。因此,立足于国家战略需求与西北区域特性,系统梳理“天空地”一体化监测的理论框架、技术体系及其在西北环境监测中的应用路径,对于提升区域生态环境监管的精准性与前瞻性,支撑美丽中国与生态文明建设,具有重要的理论价值与现实意义。

1 研究区域与监测现状

1.1 研究区域

本研究聚焦中国西北典型生态脆弱区,涵盖新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区及陕西省北部。该区域年均降水量普遍低于300 mm,年蒸发量高达1 500~3 000 mm,属典型的干旱与半干旱气候区^[11]。地势西南高、东北低,横跨青藏高原、内蒙古高原和黄土高原西部,包括塔里木盆地、准噶尔盆地等大型封闭盆地,地形差异显著。区内分布有我国主要冰川区,如昆仑山、祁连山等山区,其冰川融水是塔里木河、疏勒河等内陆河流的主要径流来源。地表以荒漠和草原为主要植被类型,土地荒漠化与盐渍化问题突出,生态恢复力整体较弱^[12-13]。区域环境问题高度趋同,监测要素均主要聚焦于水资源(冰川、河流、湖泊)、荒漠化、植被动态及生态安全关键指标^[14-15]。

1.2 西北地区环境监测现状

当前,西北地区陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省(区)的生态环境监测网络已具备初步框架(表1)。从机构设置看,五省(区)均设有省级生态环境监测站;地市级层面,除青海省海北、黄南两个藏族自治州外,其余地市级行政单元均设有地市级生态环境监测站。水质自动监测方面,五省(区)水站数量呈梯度分布(陕西43个、新疆30个、甘肃28个、青海15个、宁夏12个),但整体仍难以全面覆盖西北广袤地域的水体环境。大气自动监测站布局呈现明显的空间不均衡性,陕西(43个)与新疆(40个)数量较多,宁夏(19个)与青海(11个)显著偏少;现有大气自动监测站多集中于城市建成区,广大偏远地区、荒漠及生态脆弱区尚未覆盖。

表 1 西北五省(区)监测基础能力情况表

Table 1 Monitoring capacity status of the five northwestern provinces (autonomous regions)

行政区域	省级监测机构数量	地市级监测机构数量	国家水质自动监测站	国家大气自动监测站
陕西省	1	11	43	43
甘肃省	1	14	28	36
宁夏回族自治区	1	5	12	19
青海省	1	6	15	11
新疆维吾尔自治区	1	14	30	40

1.3 现有体系短板分析

当前西北地区生态环境监测体系在支撑系统性、精细化环境监管方面仍存在显著不足,主要体现在监测覆盖、技术能力、数据融合及保障机制 4 个维度。

1.3.1 监测网络覆盖不足,要素体系尚不完整

现有监测站点在空间分布呈现“东密西疏”格局,塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地及阿尔金山等关键生态区域存在大范围监测盲区。对冰川冻土、荒漠生态系统、生物多样性等关键环境要素的监测能力薄弱,难以支撑“山水林田湖草沙”系统治理的需求。同时,基层监测站点普遍存在设备老化、指标有限等问题,导致监测数据的空间代表性和要素完整性不足,制约了区域生态环境本底状况系统性评估。

1.3.2 感知技术应用滞后,数据集成度亟待提升

新型感知技术的应用深度与广度明显不足。遥感技术多局限于传统的光学监测,高光谱、雷达遥感等先进手段应用有限;物联网传感器在极端环境下的可靠性、稳定性亟待提高;多源监测数据格式不一、标准各异,形成“数据孤岛”。此外,从数据采集到应用的转化效率较低,数据分析挖掘能力薄弱,导致监测成果难以满足精细化环境管理的时效性要求,严重影响监管决策的精准性。

1.3.3 资源保障机制薄弱,长效运行面临挑战

监测体系运行的资源保障水平与现代化要求存在显著差距。专业技术人员短缺问题突出,特别是在遥感解译、大数据分析等新兴领域;经费投入不稳定导致设备更新滞后,先进技术装备配置不足;跨部门协调机制不健全,数据共享、业务协同面临制度性障碍。这些基础支撑条件的薄弱,严重制约了监测体系的可持续发展,使其难以适应新时期生态环境监管的现代化要求。

2 需求分析与案例借鉴

2.1 监管需求

西北地区作为国家生态安全屏障核心区与典

型生态脆弱带,其环境监测需求具有显著的区域特殊性与战略紧迫性。依据《中共中央 国务院关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见》以及生态环境部《“十四五”生态环境监测规划》,西北地区核心监测需求可系统归纳为以下 4 个方面。

2.1.1 生态质量监测需求

西北地区生态质量监测的核心在于对关键生态屏障区实施全方位、多层次的动态评估与风险预警。祁连山、贺兰山、六盘山等山地系统不仅是生物多样性富集区,更是维系区域水平衡与阻挡风沙东侵的重要生态屏障^[16-17]。针对这些区域,亟须构建“天空地”一体化监测网络,综合利用高分辨率遥感卫星进行生态系统宏观格局识别,借助无人机航拍实现受损区域与工程治理效果高精度核查,并布设地面生态综合站对植被群落结构、土壤水分、物种多样性等参数进行长期定位观测。其目标是精准量化生态保护红线内自然生态系统的稳定性与恢复力,科学评估国家重大生态修复工程的实施成效,并为潜在生态破坏事件提供早期预警,服务于“守住自然生态安全边界”的国家战略。

2.1.2 水资源监测需求

西北地区水资源监测的迫切性源于其水资源的极度稀缺性与复杂的转化关系。该区域水资源总量有限,且呈现“南多北少、夏丰冬枯”的显著时空异质性,同时维系着冰川、积雪、地表水、土壤水与地下水的“五水循环”过程^[18-19]。传统的单点、分要素监测已难以满足精准管理需求。因此,必须建立融合多源卫星(如利用 GRACE 重力卫星监测地下水储量变化,利用光学与雷达卫星监测湖库面积与河川径流)与密集地面水文传感器(如水位、流量、水质自动站)的“天空地”一体化监测体系,通过数据同化技术,实现对重点流域水资源总量、消耗结构及动态平衡的精准核算,特别是对地下水超采区、内陆河尾间湖生态补水等进行精细化监控,为最严格水资源管理制度和水资

源优化配置提供不可替代的数据支撑。

2.1.3 沙尘天气监测需求

西北地区是东亚沙尘天气的主要策源地,构建高效的“监测-预警-防控”一体化体系至关重要。沙尘天气监测需覆盖“起沙-传输-沉降”全过程^[20-21]。在起沙阶段,需综合利用静止气象卫星(如 Himawari-8/9)与极轨卫星(如 MODIS)对塔克拉玛干沙漠等主要沙源地进行实时动态监测,识别地表裸露状况与起沙强度;在传输阶段,需依托气溶胶激光雷达网络与地面颗粒物监测站点,精准追踪沙尘输送路径、垂直结构与浓度变化。最终,通过将多平台监测数据同化至数值预报模型,显著提升沙尘天气发生时间、影响范围与强度的预报准确率和提前量。这套体系是实现防灾减灾、保障区域空气质量与公众健康,并服务于跨境环境治理国际合作的关键技术基础。

2.1.4 跨区域协作监测需求

西北地区生态系统(如祁连山脉、黄河流域)与环境污染(如沙尘传输)具有显著的跨行政区域特征^[22],消除“数据孤岛”、实现协同监测是保障国家生态战略落地的必然要求。当前,各省(区)监测网络在标准规范、数据格式与共享机制上存在差异,制约了对整体环境状况的评估与治理。因此,亟须在国家和流域层面推动建立统一的数据共享平台与业务协同机制,明确跨省断面、生态功能区等关键区域的联合监测责任;重点服务黄河流域生态保护和高质量发展等国家战略,实现对全流域水资源、水环境、水生态的统一监控与评价;通过区块链、云计算等技术确保数据安全与可信共享,形成监测合力,提升区域生态环境协同治理的现代化水平。

2.2 国内外区域“天空地”一体化监测典型案例分析

2.2.1 国内案例

吉林省构建的“天空地”一体化环境智慧监测网络,是支撑区域生态环境监测体系现代化的典型范例。该网络覆盖全省 18.74 万 km²,集成 126 个大气自动站(含长春超级站)、214 个手工与 126 个自动水环境监测断面、861 个土壤监测点位、6 800 余个噪声监测点及 623 个生态样地,并融合卫星遥感、无人机巡航、AI 声纹识别与数值模拟,构建了覆盖大气、水、土壤、噪声与生态五大要素的全尺度感知体系。在长白山、松花江^[23]等核心生态屏障区,依托国家生态质量综合监测

站及水生态试点监测工作,实现对珍稀物种、水源安全与生态退化趋势的精准感知和事前预警。科技创新方面,吉林省系统构建了“全年无休、24 小时在线”的空气质量智能预报系统,72 小时预报准确率超 90%。同时,通过融合多源遥感数据与生态模型,开展生境质量反演与风险评估,有效支撑了生态质量指数(EQI)的科学核算,全面提升了环境感知、预警与决策支持能力。该体系的成功实践,为我国其他省份推进生态环境智慧监测提供了可复制、可推广的系统性经验。

2.2.2 国外案例

从全球范围审视,中亚图兰低地(涵盖哈萨克斯坦南部、乌兹别克斯坦等地)与我国西北地区在环境禀赋上最具可比性。该区域同样面临咸海萎缩所引发的盐碱化、沙尘天气及跨境水资源争端等严峻挑战。其环境监测体系正经历从苏联时期遗留的、以地面站点为主的传统模式,向融合现代化技术与国际合作的“天地”协同模式转型。例如,利用美国 Landsat 与欧洲 Sentinel 系列卫星提供的长时间序列遥感影像,对咸海变化进行追踪,直观记录湖泊消亡过程^[24]。同时,世界银行、联合国开发计划署(UNDP)等国际组织推动建立的跨境水文气象合作网络,也成为当地监测数据的重要补充。然而,该地区普遍存在数据共享机制不畅、技术装备更新滞后等挑战,导致其监测体系的整体效能尚未完全发挥。

相比之下,美国西部干旱区(如科罗拉多河流域)的一体化监测体系则更为成熟与系统化^[25]。该体系深度融合了美国地质调查局(USGS)的 Landsat 卫星、美国国家航空航天局(NASA)的航空遥感(如航拍积雪调查)以及密集的地基观测网络[如美国自然资源保护局(NRCS)的 SNOTEL(雪情遥测)系统与 USGS 的全国水文网络]。通过数据同化技术,这些天、空、地数据被实时集成至国家水文模型(National Water Model),实现了对水资源从监测、模拟到预测的全流程管理,从而为跨州水权的精确分配与水库调度提供了关键的科学依据。

3 “天空地”一体化监测体系构建

西北地区“天空地”一体化监测体系的构建应遵循“问题导向、技术驱动、系统协同”原则,旨在通过多层次技术融合与制度创新实现生态环境

治理能力整体提升。该体系应以“精准感知、智能解析、动态预警”为核心目标,构建由4个支柱组成的整体框架:在技术层面,重点突破高分辨率遥感定量反演、AI智能解译与数字孪生等关键技术,形成从数据获取到决策支持的完整技术链条;在装备层面,建立“卫星-无人机-地面站”三级协同观测网络,实现从宏观到微观的多尺度覆盖;在平台层面,构建统一的数据中台与业务系统,打通“数据孤岛”;在制度层面,通过完善标准规范、共享机制和人才队伍,保障体系长效运行。

3.1 技术创新与升级

面向西北地区广阔的地理范围与复杂的环境问题,“天空地”一体化监测技术的持续创新与迭代是提升其效能的根本动力。未来需着力在感知、能源、分析与模拟4个层面实现突破。

3.1.1 发展高精度监测技术

高精度监测是精准识别环境问题与量化生态过程的前提。未来需持续推进国产高分系列、高光谱及SAR卫星的星座化建设,以期将对地观测的时间分辨率提升至小时级,空间分辨率稳定在亚米级,从而实现对西北地区冰川消融、绿洲萎缩、河湖变化等慢变量过程,以及突发性环境污染、生态破坏事件的高频次、精细化捕捉^[26]。例如,可借鉴利用高分五号02星高光谱数据精准识别城市大气甲醛污染的成功经验,将其应用于西北重点工业园区与城市群的大气复合污染溯源。同时,需大力发展无人载激光雷达、高光谱成像等新型传感器,形成对卫星遥感的有力补充,在关键生态功能区与污染场地实现“星机协同”立体观测,从根本上解决大范围精准监测的难题。

3.1.2 推广自供电监测技术

西北地区监测站点普遍面临电网覆盖薄弱、自然环境恶劣、设备维护成本高昂的严峻挑战。推广环境能量收集(Energy Harvesting)技术^[27],实现监测设备的自供电与免维护运行,是保障监测网络长期稳定、降低运营成本的关键路径。重点发展方向包括:优化基于压电、电磁原理的微风发电装置,使其在西北常见低风速条件下仍能高效俘获能量;结合高效太阳能薄膜电池与大容量储能单元,构建风-光-储混合供能系统;探索利用温差发电等技术从环境中收集能量。新疆电网已成功验证的基于压电-电磁复合发电的低风速自供电系统,为广布于戈壁、荒漠中的无人值守监测站点提供了可靠的技术范式。未来,应将自供电

设计作为西北地区所有新建地面监测站点的标配,从根本上破解监测站点能源供应瓶颈。

3.1.3 应用AI大模型技术

面对“天空地”一体化监测产生的海量、多模态数据,传统分析方法已难以为继。人工智能大模型技术,特别是面向遥感领域的预训练大模型,将成为解锁数据价值的核心引擎^[28]。此类模型通过在超大规模遥感数据集上进行预训练,能够学习通用性强、可迁移的特征表示,从而在面对西北地区特定的地物分类(如荒漠、草原、冰川)、变化检测(如荒漠化动态监测)和目标识别(如违规建设项目)等任务时,实现小样本甚至零样本下的高精度解译,极大提升数据分析的自动化水平与效率。例如,“秦岭·西电遥感脑”大模型所展现出的对复杂自然场景的强理解能力,可直接迁移应用于祁连山、昆仑山等区域的生态本底调查与人类活动干扰监测,实现对大范围生态破坏行为的自动识别与预警。

3.1.4 构建数字孪生系统

数字孪生是“天空地”一体化监测体系的高级形态与终极目标。其核心在于集成实时监测数据、历史观测资料与多学科机理模型,在数字空间中构建一个与西北地区真实环境动态同步、虚实映射、虚实交互的虚拟孪生体。未来应重点攻关多源数据融合与同化技术、高性能并行计算技术以及复杂系统耦合模型(如水文-生态-社会经济耦合模型),在流域尺度(如黑河流域、塔里木河流域)率先构建高保真度数字孪生系统^[29]。正如在张掖市开展的初步实践所示,一个成熟的黑河流域数字孪生系统能够模拟不同气候情景与人类活动干扰下的水资源分配、生态演变及社会经济影响,从而为流域水资源优化调度、生态流量保障与区域可持续发展提供涵盖事前模拟、事中调控、事后评估的全链条决策支持,将环境管理从被动响应提升至主动干预与精准调控的新高度。

3.2 “天空地”协同监测数据获取策略

构建西北地区“天空地”一体化监测网络,其物质基础在于针对区域特殊环境与监测目标,进行科学合理的设备选型与系统性部署。这要求各类设备不仅具备技术先进性,更需满足在极端环境下的可靠性、长期性与经济性。

3.2.1 卫星遥感监测系统

卫星遥感是实现西北地区全域覆盖和长时间序列监测的基石。在数据获取上,应构建以国产

高分系列(如高时间分辨率的高分一号、六号,亚米级高空间分辨率的高分二号、七号)为核心,兼容 Landsat 系列、Sentinel 系列等国际开源数据的协同观测体系。针对西北地区广阔的地理尺度,需优选具备宽覆盖能力与高重访周期的卫星数据,以实现生态环境宏观演变(如冰川退缩、植被物候动态、土地利用变化)的有效追踪。在具体部署应用上,需结合监测目标的尺度特性。例如,对于青海湖、艾比湖^[30]等典型内陆水体,可采用高分二号/七号的亚米级全色与多光谱数据,精确提取水域边界、识别盐渍化范围,并与布设于湖岸的地面水质传感器数据相互校验,构建“星地”协同的水环境精准监测范式。通过多源卫星数据的融合应用,可系统揭示西北地区环境变化的长期规律与驱动机制。

3.2.2 无人机监测系统

无人机监测平台是实现重点区域精细化、机动性巡查的关键装备^[31]。针对西北地区复杂的地形条件(如高山、峡谷)与频发的沙尘、大风等恶劣天气,设备选型应优先考虑具有高稳定性、强抗风能力及垂直起降功能的固定翼或混合布局无人机。传感器方面,除常规的多光谱相机外,应集成高光谱成像仪以精细识别植被胁迫与土壤成分,搭载激光雷达以获取高精度地形与植被三维结构信息,并可根据任务需求加装轻量化大气传感器。在宁夏等沙尘活跃区,可部署配备双向图像采集模块与能见度传感器的专用无人机,前视模块用于能见度测算,下视模块同步采集地表状况,实现对沙尘起沙、传输路径与强度的空地协同监测,为沙尘天气精准预报与溯源提供关键现场数据。此类无人机系统是对卫星遥感宏观监测的有效补充,能够快速响应突发环境事件,并对重点目标实施“定点解剖”。

3.2.3 地面监测系统

地面监测设备是获取精准原位数据、验证遥感反演结果的根本保障。在设备选型上,必须充分考虑西北地区干旱、强风沙、昼夜温差大等严酷环境,优先选用具备 IP65 及以上防护等级、耐沙尘腐蚀、宽温域工作特性的工业级传感器。具体设备包括光散射法扬尘在线监测仪、多参数水质监测仪、土壤温湿度与电导率传感器等。在能源供应方面,为解决戈壁荒漠等无市电覆盖区域的供电难题,应大力推广自供电传感器技术。例如,在新疆荒漠区部署的监测设备,可集成基于电磁

取能、高效太阳能薄膜发电、微风发电与温差发电技术的多源能量收集模块,构建混合供能系统。这种设计确保了在低风速、弱光照等不利条件下,设备仍能通过能量互补实现全年无间断、免维护运行,极大提升地面监测网络在无人区的部署可行性与数据连续性。

3.3 政策支持与体系建设

西北地区“天空地”一体化监测体系的可持续发展,亟须技术创新与制度保障协同推进。构建布局科学、标准统一、数据互通、人才充足的现代化监测体系,是提升区域生态环境治理能力的核心支撑。

3.3.1 优化监测网络布局

针对西北地区地域广阔、生态类型复杂、人类活动稀疏等特点,监测网络布局应坚持“分区分类、天地协同、点面结合”原则,构建多尺度融合的立体化感知体系。在宏观尺度,依托高时空分辨率卫星实现全域周期性覆盖;在中观与微观尺度,科学布设地面自动站与机动无人机巡检路径,重点强化对冰川退缩区、尾间湖变化带、荒漠-绿洲过渡带等关键生态敏感区的动态监控。可借鉴陕西经验,在冰川、荒漠等人力难及区域布设无人值守站,形成“宏观识势、微观溯源”的有序格局。

3.3.2 健全数据共享机制

数据共享是释放“天空地”一体化监测效能的关键环节。当前西北地区监测数据仍存在部门壁垒、标准异构、平台割裂等问题,严重制约协同治理能力。亟须在省级乃至西北区域层面建立跨部门数据协调机制,设立统一的数据治理机构,构建区域生态环境数据中台,明确数据权属与使用规则。可参考张掖“一张清单”模式,依托国家大数据中心西北节点,部署区域生态环境大数据平台,运用区块链保障安全,实现“一次采集、多方校核、互联互通、深度挖掘”。

3.3.3 推进监测标准化建设

标准化是保障监测数据科学性、可比性与权威性的核心基石^[32]。西北地区环境要素独特,如频繁沙尘天气、高矿化度内陆水体、脆弱高山生态系统等,亟须在国家现有标准体系基础上,制定适用于本区域的补充技术规范。重点包括:统一“天空地”多平台传感器的校准方法与频次;建立针对荒漠化土地、冰川、盐湖等典型地物的遥感解译与地面验证规程^[33];规范多源异构数据融合产品精度评价指标。此外,应联合科研与产业力量,

构建覆盖数据采集、处理、分析及共享的全链条标准体系,支撑数据集成与协同监测。

3.3.4 强化人才队伍建设

高水平监测体系的协同运行依赖于专业化、复合型人才的支撑。当前西北地区面临高端人才引进难、基层技术骨干流失快、实操能力不足等结构性矛盾。应实施“引育并重、精准施策”的人才战略:一方面依托重大科研项目和“西部人才计划”引进高层次人才;另一方面加强与本地院校的合作,培养熟悉本地环境的复合型技术人才。可借鉴陕西“三化两分一强化”监管模式,完善培训与激励机制,建设兼具一线实操与研发创新能力的人才梯队,夯实监测体系人力基础。

3.4 体系构建目标与核心成效

“天空地”一体化监测体系的构建,旨在实现西北地区生态环境治理从传统模式向智能感知、精准预警和科学决策的根本性转变。体系建成后,将实现以下关键突破:

全域覆盖的立体监测能力。通过构建“卫星全域扫描-无人机重点巡查-地面站精准验证”三级协同观测网络,使监测空间覆盖率提升至60%,彻底消除现有监测盲区,使冰川退缩、尾间湖变化等关键生态过程首次纳入常态化监测体系。

精准高效的协同溯源能力。建立多尺度协同的“监测—溯源—验证”技术链条,将环境问题发现与溯源效率从周/天级提升至小时级,实现从宏观现象识别到微观源头解析的完整技术突破。

前瞻精准的智能预警能力。基于AI大模型与数字孪生技术,构建重大环境风险智能预警系统,实现预警时效提升至24~72小时、预报准确率提升20%以上的技术跨越,支撑环境管理从被动响应向主动防控的根本转变。

标准统一的体系运行能力。通过制定覆盖设备校准、数据采集及产品生成的全链条标准体系,确保监测数据的可比性与权威性。结合自供电等环境适应性技术,将无人区站点运维成本降低40%以上,形成可复制、可推广的标准化运行模式,为区域监测网络的长效运行提供制度保障。

4 结论

本研究针对西北地区生态环境监测面临的关

键挑战,尝试从理论框架构建、技术方法集成、设备系统部署及制度保障等方面进行初步探讨,得出以下结论:

1) 监测需求与体系短板共同凸显系统性重构的紧迫性。西北地区生态环境监测面临系统性挑战,既包括生态屏障稳定性评估、水资源多维转化监测、沙尘天气全链条预警等复杂需求,又存在监测网络覆盖不全、天地协同机制缺失、技术装备更新滞后、制度保障薄弱等结构性短板。这种需求与能力之间的显著差距,凸显了推进“天空地”一体化监测体系建设的紧迫性,亟须通过系统性重构实现从单点监测向全域感知、从分散运营向协同治理的根本转变。

2) 技术融合与装备协同是构建系统化监测网络的核心路径。面对西北地区特殊环境,需构建“技术-装备-平台”三位一体的系统性解决方案。在技术层面,重点突破“高分辨率遥感+AI智能解译”的自动化分析能力,攻克海量数据快速处理瓶颈;推广“自供电+低功耗”的智能传感技术,破解无人区设备能源供给难题;通过构建生态环境数字孪生系统,实现从静态监测向动态模拟与预测预警的跨越。在装备部署层面,建立“卫星广域扫描-无人机重点巡查-地面站精准验证”三级协同观测网络:卫星实现宏观周期性覆盖,无人机承担复杂地形精细探测,地面设备具备耐候性、抗干扰与能源自给特性。通过技术赋能与装备协同,形成覆盖“天空地”的多尺度立体监测能力。

3) 政策体系与标准化建设是可持续发展的关键保障。技术体系的效能发挥依赖于强有力的政策与标准支撑。当前亟须完善“天空地”一体化监测的网络布局规划,消除监测盲区;建立跨部门、跨区域的数据共享机制与统一标准,打破“信息孤岛”;加强本土化人才培养,构建涵盖技术研发、运维管理和数据分析的全链条人才队伍,为监测体系的长期稳定运行提供坚实支撑。

4) 监测体系将实现从能力构建到治理效能的系统性跃升。“天空地”一体化监测体系将推动西北地区生态环境治理实现四重跨越:监测范围实现从局部到全域的根本转变,空间覆盖能力提升至60%;建立多级协同溯源机制,实现从宏观现象到微观源头的精准解析;构建智能预警体系,重大环境风险预警时效提升至24~72小时;通过标准化与自供电技术突破,实现监测网络的

低成本可持续运行。

综上,西北地区“天空地”一体化监测体系构建是一项系统性工程,必须坚持需求导向、技术驱动、装备适配与制度保障四者协同发展,方能有效提升区域生态环境治理能力的现代化水平,为国家生态安全屏障建设提供科学支撑。

参考文献 (References):

[1] 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 CAE, 2024, 26 (5) : 212-222.

[2] 朱南华诺娃,游代安,徐宁宇,等.“天空地海”一体化生态环境遥感监测体系研究[J].中国环境监测,2025,41(3):7-13.

ZHU Nanhuanuowa, YOU Daian, XU Ningning, et al. Research on the Ecological Environment Remote Sensing Monitoring System of Integration of “Space-Air-Ground-Sea” [J]. Environmental Monitoring in China, 2025, 41 (3) : 7-13.

[3] 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):2156-2164.

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) : 2156-2164.

[4] 蒋火华.加快建立完善现代化生态环境监测体系[J].环境与可持续发展,2023,48(3):63-68.

JIANG Huohua. Accelerate the Establishment and Improvement of a Modern Ecological Environment Monitoring System [J]. Environment and Sustainable Development, 2023, 48 (3) : 63-68.

[5] WOLANIN A, CAMPS-VALLS G, GÓMEZ-CHOVAL, et al. Estimating Crop Primary Productivity with Sentinel-2 and Landsat 8 Using Machine Learning Methods Trained with Radiative Transfer Simulations [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 225 : 441-457.

[6] 张利云,黄文德,张晓飞,等.基于北斗的天空地一体化环境监测平台研究[J].电子测量技术,2021,44(20):60-64.

ZHANG Liyun, HUANG Wende, ZHANG Xiaofei, et

al. A Space-Sky-Terrestrial Integration Environmental Monitoring Platform Based on Beidou [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (20) : 60-64.

[7] 胡义强,杨骥,荆文龙,等.基于无人机遥感的海岸带生态环境监测研究综述[J].测绘通报,2022(6):18-24.

HU Yiqiang, YANG Ji, JING Wenlong, et al. Review of Coastal Ecological Environment Monitoring Based on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022 (6) : 18-24.

[8] 孙慧芳.智能传感器网络在工业区空气质量自动监测中的应用[J].黑龙江环境通报,2025,38(6):144-146.

SUN Huifang. Application of Intelligent Sensor Network in Automatic Monitoring of Air Quality in Industrial Zone [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2025, 38 (6) : 144-146.

[9] 庄辉.生态环境检测发展与地理信息系统(GIS)技术应用研究[J].长江技术经济,2022(增刊1):50-52.

ZHUANG Hui. Ecological Environment Detection Development and Application Research of Geographic Information System (GIS) Technology [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2022 (S1) : 50-52.

[10] 张烁,杨翼辰,袁小芳,等.“天空地”一体化监测系统建设与应用——以敦煌西湖国家级自然保护区为例[J].甘肃林业科技,2025,50(3):73-82.

ZHANG Shuo, YANG Yichen, YUAN Xiaofang, et al. Development and Application of “Space-Aero-Ground” Integrated Monitoring System: A Case Study of Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2025, 50 (3) : 73-82.

[11] 王恒恒,王佳蓉,侯嘉焯,等.基于SA-RSEI模型的西北地区生态环境质量时空变化及驱动因素[J/OL].生态学报,2025:1-17.(2025-07-14)[2025-10-08].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STXZ20250711001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.

WANG Hengheng, WANG Jiarong, HOU Jiaye, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Ecological Environment Quality in the Northwest China Based on SA-RSEI Model [J / OL]. Chinese Journal of Ecology, 2025 : 1-17. (2025-07-14) [2025-10-08]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STXZ20250711001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.

- [12] 朱娜娜,徐保东,王聪,等. 1982—2018年中国北方耕地植被绿度时空变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2025, 45(18): 8939-8954.
ZHU Nana, XU Baodong, WANG Cong, et al. Spatiotemporal Characteristics and Drivers of Cropland Vegetation Greenness in Northern China from 1982 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(18): 8939-8954.
- [13] 尹立河,王平,王田野,等. 西北地区地下水依赖型植被生态水文过程研究进展与展望[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 16-30.
YIN Lihe, WANG Ping, WANG Tianye, et al. Review on Eco-Hydrological Processes of Groundwater-Dependent Vegetation in NW China: Progress and Outlook[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(2): 16-30.
- [14] 李智,苏洋,舒芹. 基于生态系统服务供需匹配的西北地区生态管理分区[J]. 干旱区地理, 2025, 48(6): 1115-1126.
LI Zhi, SU Yang, SHU Qin. Static-Dynamic Matching of Ecosystem Service Supply and Demand and Ecological Management Zoning in Northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(6): 1115-1126.
- [15] 曲怡,饶良懿. 黄河中游地区生态敏感性时空分异特征[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4568-4579.
QU Yi, RAO Liangyi. Spatio-Temporal Differentiation Characteristics of Ecological Sensitivity in the Middle Reaches of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4568-4579.
- [16] 高翔,闫安,李杰,等. 基于遥感生态指数改进模型的祁连山国家公园生态环境质量变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 744-753.
GAO Xiang, YAN An, LI Jie, et al. The Changes of Ecological Environment Quality in Qilian Mountain National Park Based on the Improved Model of Remote Sensing Ecological Index[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, 60(6): 744-753.
- [17] 宋永飞,何原荣,刘丽,等. 基于 Landsat-8 的贺兰山生态环境质量时空演变分析[J]. 测绘科学, 2025, 50(1): 82-93.
SONG Yongfei, HE Yuanrong, LIU Li, et al. Temporal and Spatial Evolution of Ecological Environment Quality in Helan Mountain Based on Landsat-8[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2025, 50(1): 82-93.
- [18] 李中华,井柳新,王帅,等. 黄河流域“从山顶到海洋”基于城市单元的水环境评价与管控策略研究[J/OL]. 环境科学研究, 2025: 1-16. (2025-09-19) [2025-10-08]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-HJKX20250916003.htm>.
LI Zhonghua, JING Liuxin, WANG Shuai, et al. Research on the Water Environment Management and Control Strategy of the Yellow River Basin from Mountains to the Sea Based on Urban Units[J/OL]. *Environmental Science Research*, 2025: 1-16. (2025-09-19) [2025-10-08]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-HJKX20250916003.htm>.
- [19] 杜森,孙佛佑,胥德泽,等. 黄河流域甘肃段水资源承载力-新型城镇化-生态环境耦合协调及影响因素[J/OL]. 环境科学, 2025: 1-15. (2025-09-15) [2025-10-08]. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjx.202506139>.
DU Sen, SUN Foyou, XU Deze, et al. Coupling Coordination and Influencing Factors Analysis of Water Resources Carrying Capacity, New-Type Urbanization, and Ecological Environment in the Gansu Section of the Yellow River Basin[J/OL]. *Environmental Science*, 2025: 1-15. (2025-09-15) [2025-10-08]. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjx.202506139>.
- [20] 霍彦峰,张脉惠,董自臻,等. 基于多源观测数据揭示中国春季沙尘活动的变化及其环流特征[J]. 大气科学, 2024, 48(5): 1855-1865.
HUO Yanfeng, ZHANG Maihui, DONG Zizhen, et al. Revealing the Variations and Circulation Characteristics of Dust Activity over China in Spring Based on Multi-source Observational Data[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(5): 1855-1865.
- [21] 马明杰,何清,杨兴华,等. 塔克拉玛干沙漠北缘沙尘天气起沙量的贡献研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 133-138.
MA Mingjie, HE Qing, YANG Xinghua, et al. Contributions of Dusty Weather to Dust Emission Amounts at the Northern Margin of the Taklimakan Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 133-138.
- [22] 卢泽洋,陈永富,崔向慧. 荒漠生态环境监测网络体系发展现状与管理对策探讨[J]. 林业资源管理, 2018(1): 1-8.
LU Zeyang, CHEN Yongfu, CUI Xianghui. Development Status and Management Strategies of Desert Ecological and Environmental Monitoring Network in China[J]. *Forest Resources Management*, 2018(1): 1-8.

- [23] 吕静,胡馨月. 基于 MCR 模型的长白山区域生态安全格局构建研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2024, 25(2): 76-82.
LYU Jing, HU Xinyue. Study on the Construction of Ecological Security Pattern in the Changbai Mountain Region Based on the MCR Model [J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 25(2): 76-82.
- [24] BARDWELL G, MANSOOR M, VAN ZWIETERING A, et al. Correction: The "Goldfish Bowl": A Qualitative Study of the Effects of Heightened Surveillance on People Who Use Drugs in a Rural and Coastal Canadian Setting [J]. Harm Reduction Journal, 2024, 21(1): 168.
- [25] JOSHI T P, ENGINEER N, HUSSEINALI M, et al. No Association Between Ambient Ultraviolet Exposure and Cutaneous Leiomyosarcoma Incidence in the United States: An Ecological Study Using Surveillance, Epidemiology, and End Results-NASA [J/OL]. Dermatologic Surgery, 2025. (2025-07-08) [2025-10-08]. https://journals.lww.com/dermatologicsurgery/citation/9900/no_association_between_ambient_ultraviolet.1301.aspx.
- [26] 高吉喜. "五基"协同生态遥感监测体系构建与应用[J]. 环境保护, 2022, 50(20): 13-19.
GAO Jixi. The Construction and Application of Remote Sensing Monitoring System Based on Multilevel Platform for Ecosystem [J]. Environmental Protection, 2022, 50(20): 13-19.
- [27] 李春龙, 黄辉, 梁云, 等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展现状及面临的挑战[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 27-35.
LI Chunlong, HUANG Hui, LIANG Yun, et al. Power Sensor-Oriented Development and Challenges of Environmental Energy Harvesting Technologies [J]. Electric Power, 2021, 54(2): 27-35.
- [28] 沈运华, 张秀荣, 刘晓煌, 等. 天空地一体化自然资源要素监测体系及其应用[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1 696-1 706.
SHEN Yunhua, ZHANG Xiurong, LIU Xiaohuang, et al. An Integrated Space-Aerial-Ground Monitoring System and Applications for Natural Resources Elements [J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1 696-1 706.
- [29] 余真真, 闫莉, 秦奋, 等. 黄河流域生态保护数字孪生平台构建技术与应用[J]. 人民黄河, 2025, 47(8): 10-14.
YU Zhenzhen, YAN Li, QIN Fen, et al. Construction Technology and Application of the Digital Twin Platform for Ecological Protection in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2025, 47(8): 10-14.
- [30] 郭佳丽, 马勇刚, 潘恒, 等. 艾比湖春夏季土壤盐渍化卫星监测对比分析[J/OL]. 干旱区地理, 2025: 1-20. (2025-06-18) [2025-10-08]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GHDL20250616003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [31] 李毅松, 王代华. 无人机任务载荷运行环境实时监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2025(6): 117-121.
LI Yisong, WANG Daihua. Design of Real-Time Monitoring System for Operation Environment of UAV Mission Payload [J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(6): 117-121.
- [32] 张丽娟, 杨艺, 张建辉, 等. "五基"协同大气环境立体遥感监测系统应用研究[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18(3): 214-226.
ZHANG Lijuan, YANG Yi, ZHANG Jianhui, et al. Research on the Application of Stereoscopic Remote Sensing Monitoring System Based on Multilevel Platform Collaboration for Atmospheric Environment [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2023, 18(3): 214-226.
- [33] 吴季友. 新时期生态环境遥感监测发展思路与举措[J]. 环境与可持续发展, 2024, 49(3): 21-26.
WU Jiyu. Development Ideas and Measures for Remote Sensing Monitoring of Ecological Environment in the New Era [J]. Environment and Sustainable Development, 2024, 49(3): 21-26.