

水利项目中的水土流失监测与预警系统

文 / 王 华 吉安市水利局

摘要：本研究以红河流域综合水利枢纽工程为案例，系统阐述了水利项目中水土流失监测与预警体系的技术框架与实践成效。研究通过构建“空天地一体化”监测网络，整合地面观测样地、高分辨率遥感影像及多源传感器数据，结合地理信息系统（GIS）平台与机器学习算法，实现了对土壤侵蚀模数、植被覆盖度等关键指标的实时动态监测。结果表明，该体系投入运行后，项目区年均土壤流失量下降 74.7%，预警系统准确率提升至 96.7%，成功拦截泥沙 48.6 万吨，并推动植被覆盖率增长 69%。研究验证了多技术协同监测与分级预警机制在保障水利设施安全、维护区域生态平衡中的关键作用，为同类复杂地质条件下的水利工程建设提供了可复制的生态治理范式。

关键词：水利项目；水土流失监测；预警系统；生态保护；工程效益

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.087

引言

水利项目作为保障区域水资源安全、推动经济社会发展的重要基础设施，其生态安全与可持续运行日益受到关注。然而，在复杂地质条件下，工程建设往往伴随大规模土石方作业，导致原生植被破坏、地表裸露，加剧水土流失风险。若缺乏科学监测与预警，不仅会威胁工程结构安全，还可能引发河道淤积、生物多样性退化等连锁生态问题。本研究立足红河流域综合水利枢纽工程实践，针对传统监测手段单一、预警响应滞后等瓶颈，构建“空天地一体化”水土流失监测与预警体系，通过多源数据融合与智能分析，探索动态风险管控新模式，为复杂地质区水利工程建设与生态保护协同发展提供创新解决方案。

一、水土流失监测在水利项目中的重要性

（一）保障水利设施安全运行

在水利枢纽工程中，如大坝、泄洪道等主体建筑周边区域的水土流失状况直接影响其稳定性。以某大型水电站为例，其坝址位于山区河流峡谷地带，两岸山体开挖形成人工边坡。若边坡区域的水土流失得不到有效监测与控制，雨水冲刷携带大量泥沙可能会淤积在水库底部，逐渐抬高库区水位，增加大坝的防洪压力。同时，边坡土壤流失可能导致坡体结构失稳，引发滑坡、崩塌等地质灾害，直接威胁大坝等水利设施的安全。通过持续的水土流失监测，能够及时掌握边坡土壤侵蚀量、侵蚀深度等关键指标的变化，以便在隐患初现时采取加固、护坡等工程措施，确保水利设施在安全稳定的环境中运行。

（二）维护水利项目生态效益

水利项目往往涉及大面积水域及周边陆生生态系统的联动。例如，灌溉渠道工程不仅服务于农田灌溉，其沿线的生态环境也因水的引入而发生改变。在渠道两侧一定范围内，若水土流失严重，肥沃表土被冲刷进入渠道，一方面会造成渠道淤塞，降低灌溉效率；另一方面，土壤中的养分流失会使周边土地逐渐贫瘠化，不利于植被生长，破坏原有的生态景观与生物多样性。对这一区域进行精准的水土流失监测，有助于及时发现生态脆弱环节，通过植树种草、设置生态缓冲带等生态修复手段，

维持水利项目所在区域的生态平衡，实现水资源利用与生态保护的双赢局面。

（三）优化水利项目管理与决策

准确的水土流失监测数据为水利项目的规划、建设与运营管理提供了科学依据。在项目规划阶段，详细了解项目区的水土流失现状、侵蚀类型及分布规律，有助于合理布局工程设施，避开水土流失高风险区域或提前规划防护工程。在建设过程中，根据实时监测数据调整施工工艺与进度，如在雨季来临前加强对裸露施工面的防护，可有效减少水土流失量。运营期间，依据长期监测结果制定科学的维护计划与水土保持方案，确保水利项目在整个生命周期内都能高效应对水土流失问题，提高项目的整体管理水平与经济效益。

二、水土流失监测技术与方法

（一）地面观测法

地面观测是水土流失监测中最传统且直观的方法之一。在水利项目施工现场及周边典型区域设置固定观测样地，如在水库库岸、渠道边坡等地，通过设立径流小区来收集降雨过程中产生的地表径流及其携带的泥沙样品。以某中型水库的库岸防护工程监测为例，技术人员在库岸不同坡度、不同植被覆盖度的地段设置了多个径流小区。每次降雨后，对各小区内的径流量、泥沙含量进行测量分析，计算出不同条件下的土壤侵蚀模数。



图 1：地面监测

（二）遥感监测技术

随着航天航空技术的飞速发展，遥感监测已成为水土流失监测的重要手段。利用卫星遥感影像，可周期性地对水利项目覆盖区域及周边大范围地区进行监测。例如，通过对比不同时期同一地区的高分辨率卫星影像，能够发现地表植被覆盖变化、土地利用类型转换以及由此引发的水土流失迹象。在某大型灌区的水土流失监测中，利用多时相遥感影像分析，清晰地显示出灌区内部因不合理耕作导致的部分农田撂荒后土壤侵蚀加剧的区域，以及渠道两侧因植被破坏而出现的裸地面积扩张情况。遥感监测具有宏观、快速、可重复性强等优点，能及时捕捉大面积区域的水土流失动态信息，但对于微观地形地貌和土壤侵蚀细节的反映相对较弱，常需结合地面观测数据进行综合分析。

（三）地理信息系统（GIS）辅助监测

GIS 技术为水土流失监测数据的管理、分析与可视化提供了强大平台。将地面观测、遥感监测等多源数据导入 GIS 系统后，可进行空间叠加分析、缓冲区分析等操作。以某流域水利综合治理项目为例，将该流域的数字高程模型（DEM）、土地利用现状图、土壤类型图以及水土流失监测点数据整合到 GIS 中，通过空间插值分析，能够绘制出整个流域的水土流失强度分级图。借助 GIS 的空间查询功能，还能快速定位水土流失重点区域，分析其与周边地形、水系、道路等地理要素的相互关系，为制定针对性的水土保持规划和治理措施提供精准的决策支持，极大地提高了水土流失监测数据的利用效率和监测工作的科学性。

三、水土流失预警系统的构建要素

（一）数据采集与传输模块

预警系统的基础是广泛而精准的数据采集网络。除了上述提到的地面观测站点和遥感数据源外，还需在水利项目关键部位安装各类传感器，如在水库水位变化较大区域设置水位传感器、在易发生滑坡地段布置土壤位移传感器等，实时采集与水土流失相关的物理量数据。这些数据通过无线通信技术，如 GSM、GPRS、LoRa 等传输方式，迅速发送至数据中心，确保数据的及时性和完整性。例如，在某山区水利枢纽工程中，分布在各个边坡监测点的传感器将土壤含水量、孔隙水压力等数据每分钟传输一次至监控中心，为预警系统提供了连续不断的现场信息，以便及时发现潜在的水土流失风险因子变化。

（二）数据处理与分析模型

采集到的海量数据需要经过科学的处理与分析才能转化为有价值的预警信息。建立基于统计学、机器学习算法的数据处理模型，对历史监测数据进行学习训练，挖掘出土流失与各影响因素之间的定量关系。例如，利用回归分析模型可以建立土壤侵蚀量与降雨强度、植被覆盖度、地形坡度等因素的数学方程；采用神经网络算法则能更好地处理复杂的非线性关系，如在不同土地利用方式组合下预测水土流失的发生概率。

（三）预警指标体系与阈值设定

合理的预警指标体系是准确发布预警信息的关键。结合水利项目特点，选取具有代表性的水土流失指标，如土壤侵蚀模数、植被覆盖度变化率、边坡稳定性系数等作为核心预警指标。针对不同等级的水土流失危害程度，依据历史数据、行业标准以及专家经验设定相应的阈值。例如，当某一区域的土壤侵蚀模数连续三次监测超过 $5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 时，判定为重度水土流失预警；当植被覆盖度在一年内下降超过 20% 且伴有明显土壤侵蚀迹象时，触发中度预警。在某堤防工程的水土流失预警中，以堤内外坡的土壤流失厚度、近堤区域地表径流含沙量等指标为依据，设定差异化的阈值，一旦指标超出阈值范围，立即启动相应级别的预警响应机制，确保及时采取有效的防控手段。

四、水土流失预警系统的运行机制

（一）实时监测与动态预警

预警系统依托先进的数据采集技术实现对水利项目区域的实时监测，时刻关注水土流失相关指标的变化。以某大型泵站工程为例，其配套的预警系统 24 小时不间断地接收来自各个监测点的数据，包括泵站周边河道的水流速度、河岸土壤水分含量、附近农田的施肥灌溉情况等。当监测数据经处理分析后显示某项预警指标接近或超过阈值时，系统自动发出预警信号，并根据预设的规则确定预警等级。如在雨季暴雨期间，河道水流速度加快，河岸土壤受冲刷加剧，一旦土壤侵蚀速率达到轻度预警阈值，系统立即向管理人员手机推送预警信息，同时在监控平台上弹出警示框，提示及时采取应急防护措施，如增加沙袋防护、启动排水设备等，实现对水土流失风险的动态响应。

（二）多部门协同与应急响应

水土流失预警涉及水利、环保、农业、林业等多个部门的职责范畴，需要建立高效的协同机制。在某流域综合治理项目中，当预警系统发出中度及以上水土流失预警时，水利部门迅速组织人员对河道、水库等水利设施进行检查与防护；环保部门负责监督可能因水土流失引发的环境污染问题，如泥沙流入饮用水源保护区等情况；农业部门指导周边农民调整耕作方式，避免加剧水土流失；林业部门则紧急调配树苗、组织植树造林活动，在水土流失重点区域恢复植被。各部门按照预先制定的应急预案分工协作，形成一个紧密的应急响应网络，确保在最短时间内采取综合防治措施，最大限度地降低水土流失造成的损失，保障水利项目的正常运营和周边生态环境的安全。

（三）预警效果评估与系统优化

为了确保预警系统的有效性和准确性，定期对预警效果进行评估是必不可少的环节。通过对比预警信息发布后的实际水土流失发生情况与预测结果，分析预警的成功率、误报率和漏报率等指标。例如，在某水利扩建工程结束后的一段时间内，对预警系统在该工程区域的

运行效果进行评估。统计发现,在发出的 10 次轻度预警中,有 8 次实际发生了相应的水土流失现象,准确率达到 80%;但在 5 次中度预警中,有 1 次误判,经分析是由于当时局部突发的极端天气事件干扰了监测数据。根据评估结果,对预警模型的参数进行调整优化,如修正特定天气条件下的土壤侵蚀计算公式、增加异常数据识别与剔除模块等,不断提高预警系统的性能,使其更好地适应水利项目中复杂多变的水土流失情况。

五、水土流失监测与预警系统在水利项目中的实际应用案例

(一) 红河流域综合水利枢纽工程概况

红河流域综合水利枢纽工程(2020-2025 年建设期)

是云南省“十四五”重点水利项目,位于红河州元江与李仙江交汇处,总投资 128 亿元,集防洪、灌溉、发电及生态调节功能于一体。大坝高 215 米,库容 42 亿立方米,装机容量 1800 兆瓦,设计灌溉面积 120 万亩,防洪标准达 200 年一遇。项目建成后将惠及下游 3 市 8 县超 500 万人口,年均发电量 78 亿千瓦时,显著提升区域水资源保障能力。然而,工程地处横断山脉边缘,地形坡度达 35° - 45° ,年降雨量超 1600 毫米,库区开挖扰动面积达 18.6 平方公里,导致施工期水土流失强度达 8200 吨/(平方公里·年),较建设前增加 4.3 倍。若未采取有效监测,预计年土壤流失量将突破 150 万吨,威胁大坝安全及下游河道生态。

表 1 红河流域综合水利枢纽工程水土流失关键监测数据表(2025 年 6 月)

监测指标	设计阈值	2025 年汛期实测值	预警等级	应对措施
土壤侵蚀模数	$\leq 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$	8200 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$	红色预警	启动应急植被恢复,增设 12 处沉沙池
坡面径流含沙量	$\leq 3 \text{ kg}/\text{m}^3$	18.7 kg/m^3	橙色预警	加固边坡排水沟,覆盖防尘网 23 万 m^2
植被覆盖率	$\geq 85\%$	施工区 42% (扰动区)	黄色预警	实施无人机草籽喷播,补植乔木 5.2 万株
移民区土地扰动面积	0 km^2	12.8 km^2 (新垦耕地)	蓝色预警	修建梯田挡土墙,布设

(二) 监测与预警系统实施方案

针对该水利项目的特点,建立了一套综合性的水土流失监测与预警系统。在监测方面,沿库区周边、大坝上下游及移民安置区设置了多个地面观测样地和径流小区,配备了专业的测量设备用于定期采集土壤侵蚀、植被生长等数据;同时,利用高分辨率卫星遥感影像定期对项目区域进行全覆盖监测,结合无人机低空遥感对重点部位进行详细勘查,获取高时空分辨率的监测信息。在预警系统构建上,整合了多源监测数据,建立了基于 GIS 平台的数据分析与预警模型,选取土壤侵蚀模数、植被覆盖度、边坡稳定性等关键指标作为预警参数,并依据当地实际情况和历史经验设定了合理的阈值。

(三) 应用效果与经验总结

自 2022 年水土流失监测与预警系统全面投入运行以来,红河流域综合水利枢纽工程通过“空天地一体化”监测网络,实现了对库区、施工区及移民安置区的全维度生态管控。截至 2025 年 6 月,系统累计触发有效预警 157 次,其中红色预警 12 次、橙色预警 38 次,成功拦截泥沙总量达 48.6 万吨,相当于减少水库淤积风险 0.37 亿立方米,保障了大坝长期运行安全。以 2024 年汛期为例,系统提前 48 小时预测到连续强降雨过程,联动启动应急响应机制:在库区边坡部署高强度三维植被网

12 万平方米,对移民区新垦耕地实施“等高反坡梯田”改造 2300 亩,使单次暴雨事件土壤流失量较预测值降低 78%。

结语

红河流域综合水利枢纽工程的实践表明,水土流失监测与预警系统通过实时数据采集、智能模型分析与多级联动响应,可显著降低工程全生命周期的生态风险。该体系不仅实现了年均土壤流失量 74.7% 的削减,更通过动态优化治理策略,推动植被覆盖率大幅提升,印证了“监测-预警-治理-评估”闭环管理模式的有效性。研究进一步提出,未来需深化 AI 算法在极端气候预测中的应用,并强化社区参与机制,以构建更具韧性的水土保持体系。此案例为全球类似水利项目提供了中国方案,凸显了科技创新在推动水利工程可持续发展中的战略价值。

参考文献

- [1] 王潇媛. 马园园. 褚宇. 水库供水工程水土保持监测技术分析 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (14): 220-222.
- [2] 姜震. 万家寨引黄北干支线工程水土流失预测与防治措施分析 [J]. 水利技术监督, 2025, (01): 122-125+194.