

# 水土保持科技简报

第 17 期

水利部水土保持监测中心

2026 年 4 月

---

## 目 录

一、技术瞭望 .....	1
空天地协同智慧水土保持监测监管技术 .....	1
小流域土壤侵蚀模型（SWEM） .....	2
二、经验交流 .....	3
湖南以“四全模式”实现表土资源保护利用“多赢” .....	3
江苏省探索建立生态清洁小流域全域协同发展机制 .....	5
三、科研成果 .....	7
基于暴雨峰值特征的硝酸盐输出路径与模式识别框架 .....	7
极端降水事件对沟道流域可持续发展目标进展的破坏及适应路径 ..	9
光谱遥感水土跨介质氮磷污染监测关键技术 .....	13

## 一、技术瞭望

### ★空天地协同智慧水土保持监测监管技术

该成果基于无人机遥感数据高效分析、星载多源遥感影像智能解译、野外精准快速调查等方法，通过融合高光谱成像技术和激光雷达技术，实现对目标地物快速、准确、有效识别。土地利用、植被覆盖、人为扰动地块、关键水土保持措施等重要因子智能解译精度达 90%以上。适用于水土保持设计、施工、监测等管理。

**技术特点：**（1）采集数据类型多：包含无人机航测/倾斜摄影、无人机高光谱成像、无人机 LiDAR 测绘、地面光谱采集等；（2）影像解译精度高：土地利用、植被覆盖、人为扰动地块、关键水土保持措施等重要因子智能解译精度达 90%以上；耕地、林草、道路、建筑物的自动变化检测精度达 90%以上；（3）大数据挖掘及影像解译速度快：1 小时内可解译分析 4 万平方千米的高分一号影像（16 米分辨率多光谱，200 千米×200 千米一景）；（4）耦合机载高光谱和激光 LiDAR 技术：可同步获取、处理、分析厘米级高光谱影像和高精度点云数据；（5）水土流失模拟精度高：开发升级软件实现了区域水蚀风蚀联合精准计算、结果多尺度统计、成果多角度交叉验证分析等功能，准确率 90%以上。

**应用案例：**该成果已在黄河流域（片）水土保持专项执法行动和河南省级区域水土流失动态监测中推广应用。2022 年以来，运用该成果对黄河流域（片）近 3 万个生产建设项目进行风险排查，融合卫星遥感、无人机遥感、地面调查等技术，全面监控、及时发现、精准判别管理区域内的水土保持违法违规情形。

## ★小流域土壤侵蚀模型（SWEM）

该成果基于次降雨预报的小流域侵蚀输沙模型，耦合产流-汇流、侵蚀-输沙两大模块，考虑沟道工程对汇流与汇沙的调控作用，坡面径流采用 SCS-CN 模型计算，坡面汇流采用修正 SCS-单位线，沟道及河道汇流采用马斯京根或非线性马斯京根-康吉法计算，坡面侵蚀采用 CSLE 模型，汇沙采用泥沙连续方程。适用于小流域径流、洪峰流量与产沙量估算。

**应用场景：**（1）小流域径流、洪峰流量、坡面侵蚀模数及产沙量估算；（2）坡面及沟道工程措施减流、减沙以及削减洪峰效益评价；（3）小流域侵蚀泥沙来源关键区识别；（4）小流域水土保持措施规划；（5）小流域水土保持工程措施设计。

**应用案例：**该成果已在陕西省延安市安塞区杏树窑子沟推广应用。2019 年以来，基于丰、平、枯水年三个代表年下各次降雨的径流和泥沙计算结果，运用该成果，准确评价次降雨和不同水文年下治沟造地对流域水沙的影响。

该成果已在黑龙江省农垦总局九三分局鹤山农场境内鹤北小流域推广应用。2020 年以来，运用该成果准确评价流域东侧以及北侧旱地净侵蚀量。

（以上技术来源于 2025 年度成熟适用水利科技成果）

## 二、经验交流

### ★湖南以“四全模式”实现表土资源保护利用“多赢”

表土是珍贵的自然资源，是植物生长不可或缺的基础，形成1厘米厚的表土需要100-400年。长期以来，表土资源面临“应剥未剥、剥而难用”和供需错配等矛盾。为深入贯彻落实中办、国办《关于加强新时代水土保持工作的意见》关于“全面落实表土资源保护”要求，湖南探索完成表土资源科学化规范化交易，1000立方米河道滩涂余量表土以5万元公开转让，就近用于国家水土保持重点工程植被恢复，实现出让方获得“应剥尽剥”额外收益、受让方就近获取“优质好土”以及区域水土保持功能进一步提升的多赢局面，为表土资源保护利用提供了可复制、可推广的湖南经验。

**一是坚持全流程合规运作。**湖南省严格对标水土保持、国有资产处置等政策法规，对标《表土剥离及其再利用技术要求》国家标准，构建“科学选点、明确权属、规范剥离、检测评估、合理定价、合规审批、公开交易、履约交割”全流程操作规范。省水利厅牵头制定工作方案，明确市县水利部门、产权交易机构、技术支撑单位、项目业主等职责分工。洞口县人民政府组建工作专班、召开专题会议统筹推进，严格履行国有资产处置法定程序，县水利局联合财政、自然资源等部门对表土剥离范围、利用方向、交易资质逐项核验把关，从源头杜绝违规操作，确保交易全程合法合规、权责清晰、有据可查。

**二是坚持全维度专业评估。**针对表土资源定级难、定价难问题，构建“技术检测+价值评估”双支撑体系，委托中南林业科技大学开展表土取样与理化性质分析，精准判定土壤肥力、质地等核心指标，严把资源质量关口；由省水利水电勘测设计规划研究总院综合取土量、剥离条件、运输半径、市场供需等要素，出具专业价值评估报告，优选最佳取土点位，科学核定交易基准价，实现表土资源“优质优价、质价相符”，改变以往粗放估价的传统模式。

**三是坚持全公开平台交易。**依托湖南省联合产权交易所，将表土这一特殊自然资源纳入省级公共资源交易平台，实行公开挂牌、规范竞价、全程留痕，推动资源配置阳光化、市场化。本次交易信息全程公开、过程全程可溯，有效防范暗箱操作、利益输送风险，充分实现市场价值。出让方通过“应剥尽剥”获得额外资产收益，受让方就近获取优质种植土，大幅降低采购运输成本，同时显著提升生态修复植被成活率，打通闲置表土与生态修复需求的高效对接通道。

**四是坚持全链条协同管控。**建立“行政监管+平台监督+技术把关+社会公开”协同运作机制，由省水利厅统筹指导，联合产权交易平台、技术支撑单位、县级水利部门及水利部权威专家，对剥离科学性、交易合规性、利用规范性等关键环节严格把关。强化交易全过程跟踪管控，规范资金结算，确保表土用于生态修复，在激活市场活力的同时，牢牢守住生态保护底线，实现国有资产保值增值。

（以上由湖南省水利厅供稿）

## ★江苏省探索建立生态清洁小流域全域协同发展机制

2025年，江苏省依据全省自然资源、河流水系、生态管控区域、人文特色、开发强度等基础特征，充分挖掘小流域内土地利用、生态敏感因素、水土流失、区域功能等典型要素，综合多尺度、多要素、多类型生态特征评价指标，划分小流域共3510条，同步划定适宜建设生态清洁小流域区域范围，确定适宜建设生态清洁小流域3101条。在此基础上，开展生态清洁小流域优先建设区域研究，形成生态清洁小流域建设管理指导应用性成果，系统推进生态清洁小流域建设，累计建成生态清洁小流域1339条，覆盖率达43%。

### （1）高站位统筹谋划，绘就系统治理蓝图

强化政策保障、制度规范、规划引领，构建系统完备的政策支撑体系。一是明确总体目标。省委办公厅、省政府办公厅出台《关于加强新时代水土保持工作的实施意见》，明确到2035年全省生态清洁小流域覆盖率达50%的总体目标，有力推动生态清洁小流域提质增速。二是健全制度体系。联合省财政厅制定《江苏省生态清洁型小流域建设管理办法》，建立以奖代补机制，会同省市场监管局出台地方标准《生态清洁小流域建设技术规范》，明确规划与治理要求。三是强化规划引领。省、市、县三级上下联动，同步编制生态清洁小流域建设规划，推动生态清洁小流域建设有规可依、有序实施。

### （2）高效能协同联动，构建多元共治格局

坚持党委政府领导，全面构建水利牵头、部门配合、属地实施、社会参与的“1+N”协同机制。一是建立“一图一表一清单”的部门协作机制。统筹水利、自然资源、生态环境、住建、农业农村等部门，加强沟通协作，绘制流域治理空间规划图，下达任务分解表，建立事项协调清单，实现多部门协同联动。二是建立“财政主导、社会补充”的多元投入机制。统筹各级水利发展、农村人居环境整治提升、国土绿化等项目资金，夯实财政投入基础，制定吸引民间资本参与水土流失治理指引指南，鼓励

和支持社会资本投入水土流失治理。三是建立“政府牵头、部门联合”的考核评估机制。全面摸清小流域生态底色，统筹流域建设需求和相关规划，出台省级生态清洁小流域评价办法，将生态清洁小流域覆盖率纳入省级最严格水资源管理制度考核及美丽乡村建设评估指标体系，全力构建生态清洁小流域建设共治格局。

### （3）高质量推进落实，打造全域治理样板

坚持系统观念，立足流域整体性，集中连片推进生态清洁小流域提标扩面，生态清洁小流域覆盖率逐年提升。一是建设进度全面提速。锚定规划目标，会同相关部门分解下达年度任务，分区分类压茬推进。对有条件的地区，以县或乡镇为单位集中连片治理。通过信息化等手段，不断完善生态清洁小流域全周期建设监管、效益评价机制。“十四五”期间初步建设生态清洁小流域 1207 个，其中 2025 年新增 254 个。二是资金投入有力保障。统筹多渠道财政资金，积极引导社会资本投入，“十四五”期间全省生态清洁小流域建设累计投入 240 亿元，其中吸引社会资本投入超 10 亿元，省级财政奖补资金 8800 万元。三是综合效益逐步彰显。突出示范项目打造、特色经验探索，将生态清洁小流域建设与“农村产业”“观光旅游”相结合，以小流域为载体完成 14 单水土保持生态产品价值转化交易，交易金额 13 亿元，反哺水利及水土保持治理资金超 3 亿元。

（以上由江苏省水利厅供稿）

### 三、科研成果

#### ★基于暴雨峰值特征의硝酸盐输出路径与模式识别框架

硝酸盐源污染是农业流域水体污染防治的核心问题，暴雨事件作为硝酸盐从农田向水体迁移的关键驱动因素，其内部结构对水文过程和硝酸盐传输过程的调控机制尚未明确。既往研究多聚焦于暴雨事件雨量和雨强对硝酸盐输出的影响，忽视了暴雨峰值时序分布这一关键特征，导致对硝酸盐迁移规律的认识不够全面，难以支撑精准污染防治策略的制定。针对这一问题，长江流域水土保持监测中心站协同华中农业大学以丹江口库区五龙池小流域为研究区，结合高频监测、稳定同位素示踪及贝叶斯混合模型等技术，系统分析了20场暴雨事件中硝酸盐的输出路径与输出模式，构建了基于暴雨峰值时序分类的硝酸盐迁移评估框架。

(1) 暴雨峰值时序决定了水文连通性激活模式：研究将暴雨事件划分为早峰型、中峰型和晚峰型三种类型，发现不同雨型下水文路径激活存在显著差异（图1）。早峰型暴雨事件下雨水（16.7%）和浅层土壤水（21.6%）是主要径流来源，有利于增强地表水文连通性；中峰型暴雨事件以垂直入渗为主，深层土壤水贡献占比达42.1%；晚期峰值暴雨事件则呈现土壤水贡献随深度递增的特征，其中、深层土壤水贡献34.6%，表明了水文连通性激活存在明显延迟效应。

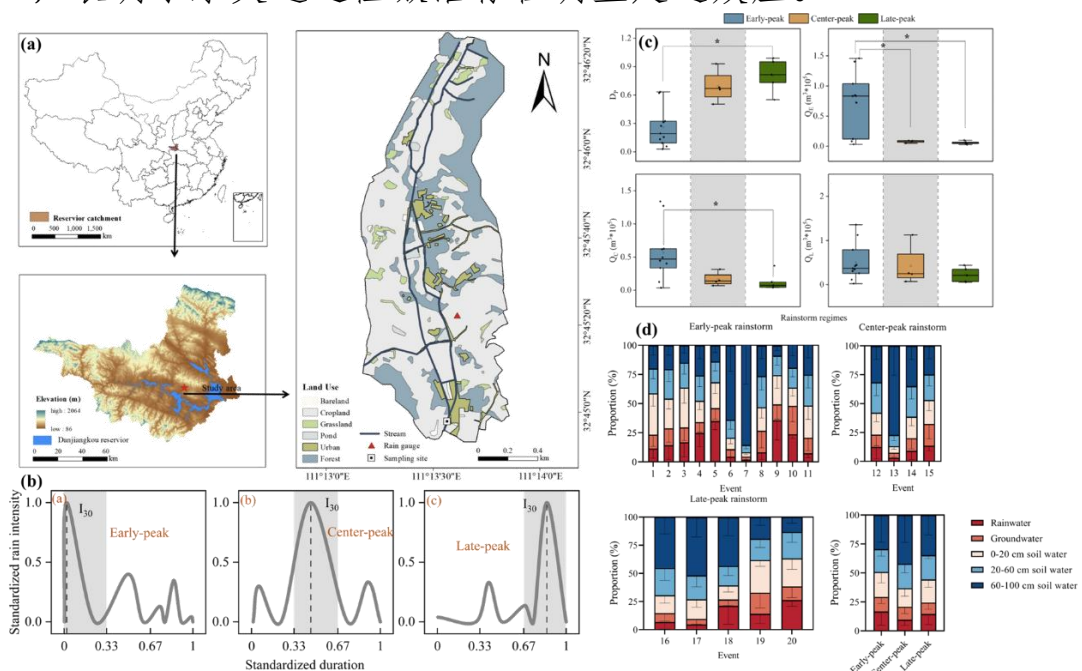


图1 五龙池小流域及不同雨型下径流组成变化特

(2) 硝酸盐输出模式存在雨型依赖性差异：通过浓度-流量（C-Q）关系分析，揭示了不同雨型下硝酸盐输出模式及特征存在显著差异（图2）。早、中峰型暴雨事件下强烈的地表水文连通性，导致硝酸盐输出以稳态行为（占比36%、75%）为主，表现出稳定的硝酸盐供给；而晚峰型暴雨事件通过激活地下水文连通性，引起强烈的稀释行为（占比60%），导致硝酸盐浓度最低。

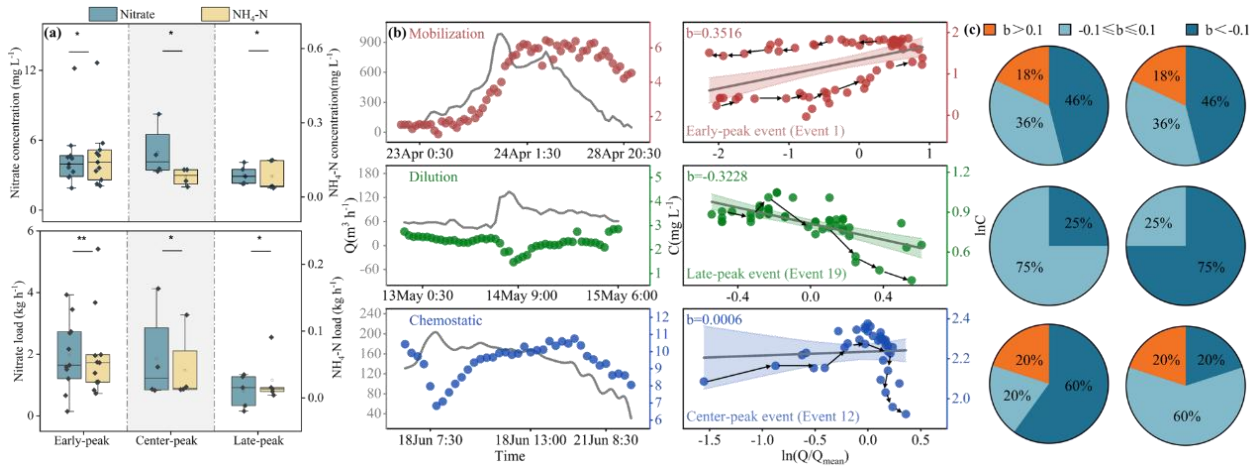


图2 不同雨型下硝酸盐变化特征及输出模式

(3) 基于暴雨格局差异的差异化流域管理措施制定：研究明确了暴雨峰值特征对硝酸盐输出的调控机制，为农业流域差异化硝酸盐污染防治措施的制定提供了科学依据。例如，针对早峰型暴雨事件强化梯田、湿地保育等地表径流拦截措施；针对中峰型暴雨事件优化深层土壤氮素调控与植被吸收方案；针对晚峰型暴雨事件聚焦深层土壤氮素管控与地下径流拦截。该研究对提升流域水质管理效率、保障饮用水源安全具有重要实践价值。

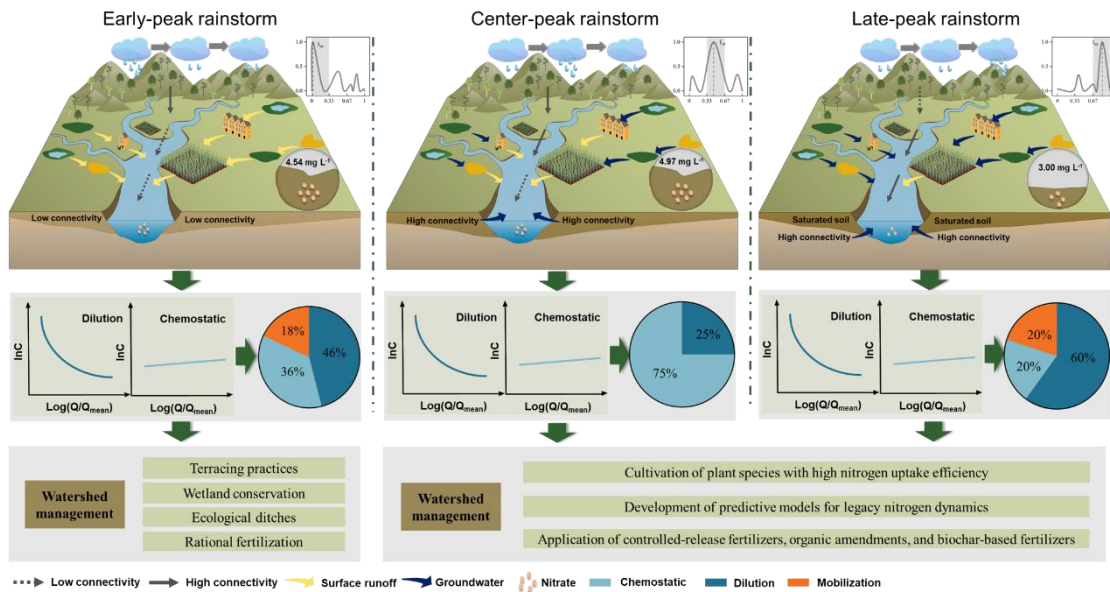


图 3 基于暴雨峰值时序特征的流域最佳管理措施框架

(以上由长江流域水土保持监测中心站供稿。引自 Ming Lei,

Yongyong Shi, Jian Wang, et al. Rainstorms peak governs nitrate export

pathways and patterns: Insights from high-frequency sampling and stable

isotopes. Water Research, 15 Jan. 2026)

### ★极端降水事件对沟道流域可持续发展目标进展的破坏及适应路径

生态系统服务在缓解极端气候事件方面具有重要作用，并为实现多个可持续发展目标（SDGs）提供了核心力量。极端降水事件频发已成为全球气候变化的显著特征，沟道流域因地形起伏大、防灾基础设施薄弱，成为极端降水引发洪涝、滑坡等灾害的高风险区域，其生态系统服务供给能力与灾害应急需求的匹配失衡问题突出，严重阻碍 SDGs 的实现。当前研究多聚焦于生态系统服务供给侧的长期贡献评估，对极端天气事件短时间尺度下的供需耦合关系关注不足。同时，生态系统服务与 SDGs 进展受损之间的定量关联研究较为缺乏，难以为沟道流域防灾减灾实践提供精准科学支撑。为此，北京林业大学水土保持学院研究团队以北京门头沟“23·7”极端降水事件为典型案例，结合实地调研数据，开展沟

道流域水土保持、洪水调蓄两大核心调节服务的供需评估，量化其对SDGs进展的受损特征，并识别最优水土保持应对措施，为极端降水背景下沟道流域的水土保持治理与可持续发展提供科学支撑（图1）。

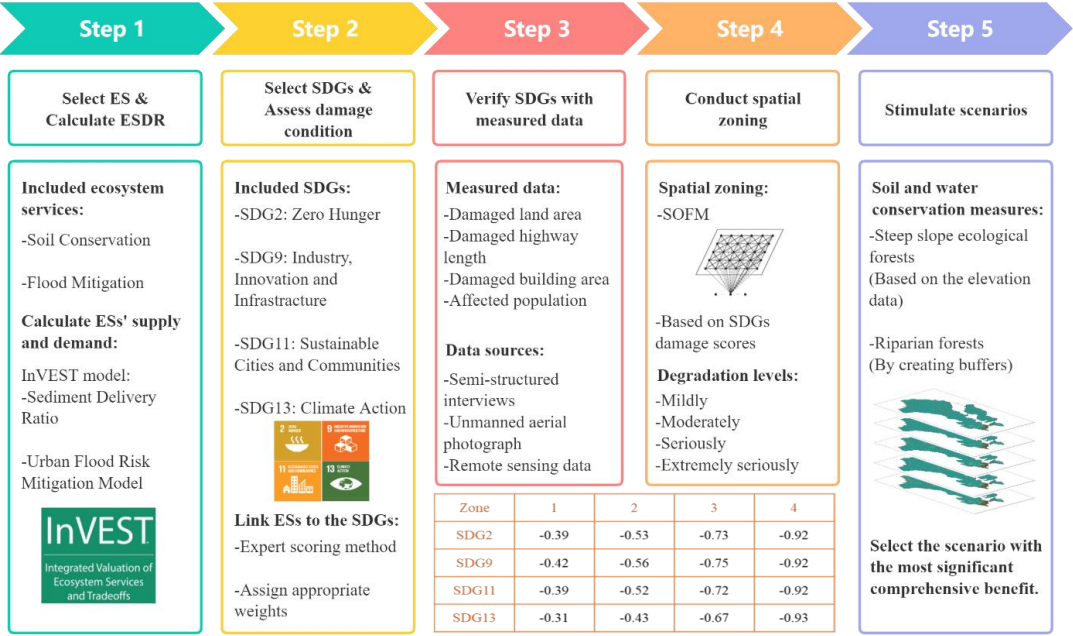


图1 研究框架

(1) 沟道流域生态系统服务供需呈显著赤字状态（图2）：水土保持服务供需比最低达-1.11（瓦窑沟、小龙门沟），洪水调蓄服务供需比最低达-1.28（斋堂水库），且供需失衡空间异质性显著，水土保持服务赤字呈南向北环状递增，洪水调蓄服务赤字随流域面积增大而加剧，其中西南部与北部流域赤字尤为突出。

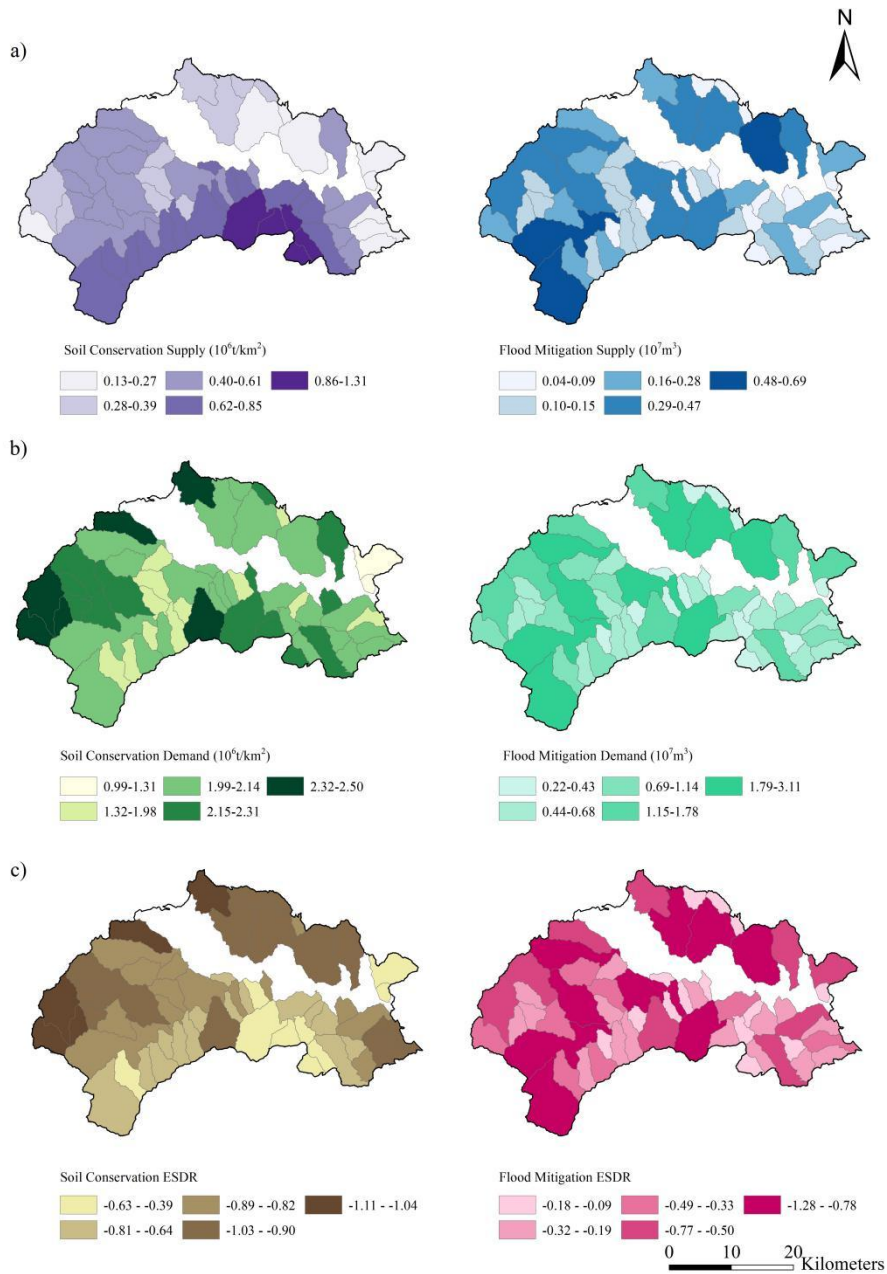


图2 土壤保持和洪水调蓄服务的供给、需求及供需比的空间格局

(2) **SDGs 进展受损呈明显空间分异特征 (图 2)**: 整体表现为西北山区重、东南平原轻, 极重度受损区占研究区总沟道流域面积的 34%, 该区域所有 SDGs 进程的受损得分均低于-0.92, 且受损程度存在差异, SDG9 (产业、创新和基础设施) 受损最显著, SDG13 (气候行动) 高等级受损占比最高, 而轻度、中度受损区主要集中在防灾基础设施完善的东部区域。

(3) **识别出应对极端降水的最佳植被型水土保持措施**: 在  $15^\circ$  以上的陡坡营造生态林和河岸 210m 范围内构建防护林的组合措施(情景 III)

对 SDGs 进程受损的缓解效果最佳（图 3），但不同受损区措施有效性差异显著。轻、中度受损区实施植被措施后 SDGs 进程受损改善达显著水平，而重度、极重度受损区因地形起伏大、洪水过程剧烈，植被措施的减灾效果有限。

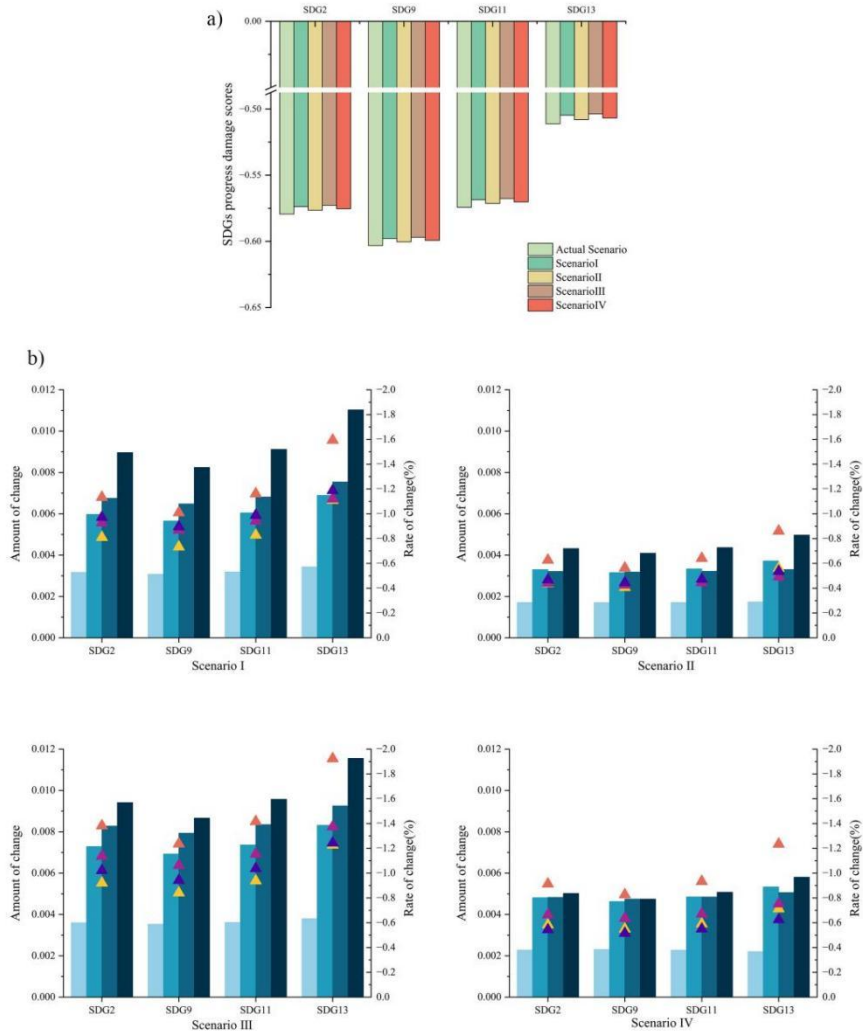


图 3 不同情景下各分区 SDGs 进展受损削弱程度

#### (4) 极端降水下生态系统服务供需失衡并非单一降水因素驱动：

洪峰流量与洪水调蓄服务供需比呈显著负相关 ( $-0.482, p < 0.01$ )，地形起伏、地表粗糙度是影响洪峰的关键地形因子；坡度、植被覆盖度为土壤侵蚀与流失的重要调控因素。同时，村落密度、道路密度等社会经济因素加剧了极端降水事件下 SDGs 进展受损，村均数  $\geq 4$  的流域受损程度显著更高。

本研究构建了基于生态系统服务供需耦合的 SDGs 进展受损评估新框架，精准识别出沟道流域应对极端降水的最佳植被型水土保持措施，

揭示了沟道流域生态系统服务失衡与 SDGs 进展受损的关键因素。研究成果为提升沟道流域的气候韧性和可持续发展能力提供科学依据与实践参考，对全球气候变化背景下沟道流域的适应性管理具有参考价值。

(Zihan Xu, Ziliang Xi, Shouhong Zhang, etc. Integrating ecosystem services supply and demand for extreme precipitation events: optimising gully watershed strategies. Ecosystem Services, Jan. 2026)

### ★光谱遥感水土跨介质氮磷污染监测关键技术

水土流失及其引起的氮磷面源污染是影响我国饮用水水源区水质的重要因素。面源污染具有空间分散性、来源复杂性、过程隐蔽性、输送随机性、水陆切割等特点，其监测治理长期面临技术挑战。传统的采样、实验、分析方法已无法满足当前水源保护高效、准确监测的需求。高(多)光谱遥感+深度学习模型能够从复杂的遥感数据中有效挖掘与水土氮磷含量相关的信息，从而实现水土氮磷含量的高效反演，但氮磷如何“由土入水”的跨介质监测成为制约面源污染高频监测的新瓶颈。

针对这一问题，长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站依托国家科技重大专项、南水北调中线水源公司科研专项等重大科技项目支撑，开展了光谱遥感水土跨介质氮磷污染监测关键技术研究，实现了在流域尺度上，水体与土壤间氮磷迁移及其污染耦合过程的实时和协同感知。

(1) 构建了适用于多介质、多尺度的氮磷高精度反演模型，通过超参数优化与交叉验证提升了面源污染光谱反演模型的稳定性与泛化能力。

针对水体光学信号微弱及水陆分割监测难题，研发了基于压缩感知去噪、几何与辐射同步校正及递归特征消除的高光谱数据预处理与降维技术。构建了适用于多介质、多尺度的总氮、总磷水土一体化反演模型，优选出基于流域特征的总氮、总磷分布式敏感波段。集成深度置信网络与极端梯度提升算法，显著提升了反演精度。其中，水域总磷、总氮训

训练集决定系数分别达到 0.989 和 0.999，测试集决定系数分别达到 0.962 和 0.809，有效解决了传统经验模型在污染物精准流向预测上的局限性。

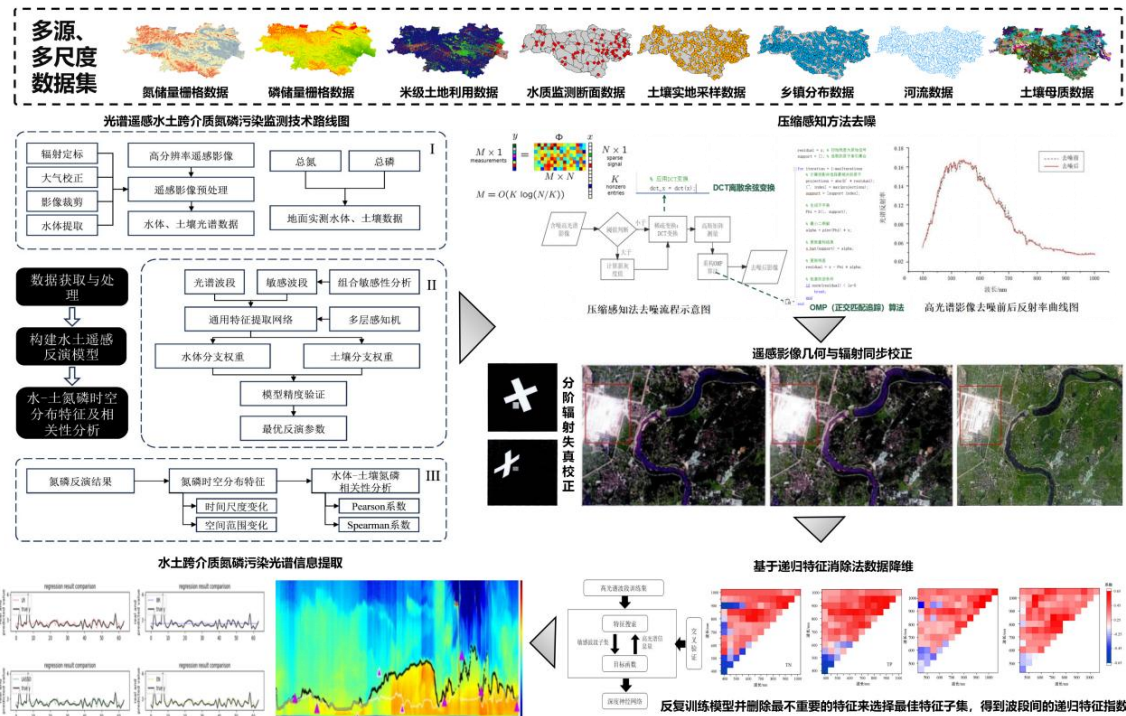


图 1 光谱遥感水土跨介质氮磷污染监测技术路线图

(2) 基于临近随机土体-水体反演数据匹配，建立了氮磷跨介质耦合模型，为划分面源污染热点地区提供了理论依据。

基于 2021 至 2024 年长时序反演结果，系统解析了氮磷时空分布特征创新，引入多维相关系数分析，厘清了典型控制单元水体与土壤两种介质的氮磷含量的相关关系，阐明了水土氮磷跨介质迁移积累的单调变化规律，精准识别出局部水土双高值的污染热点。实现了在流域尺度实时、协同感知水体与土壤间氮磷迁移及其污染耦合，有效解决了传统“水陆分割、监测滞后”的技术难题。

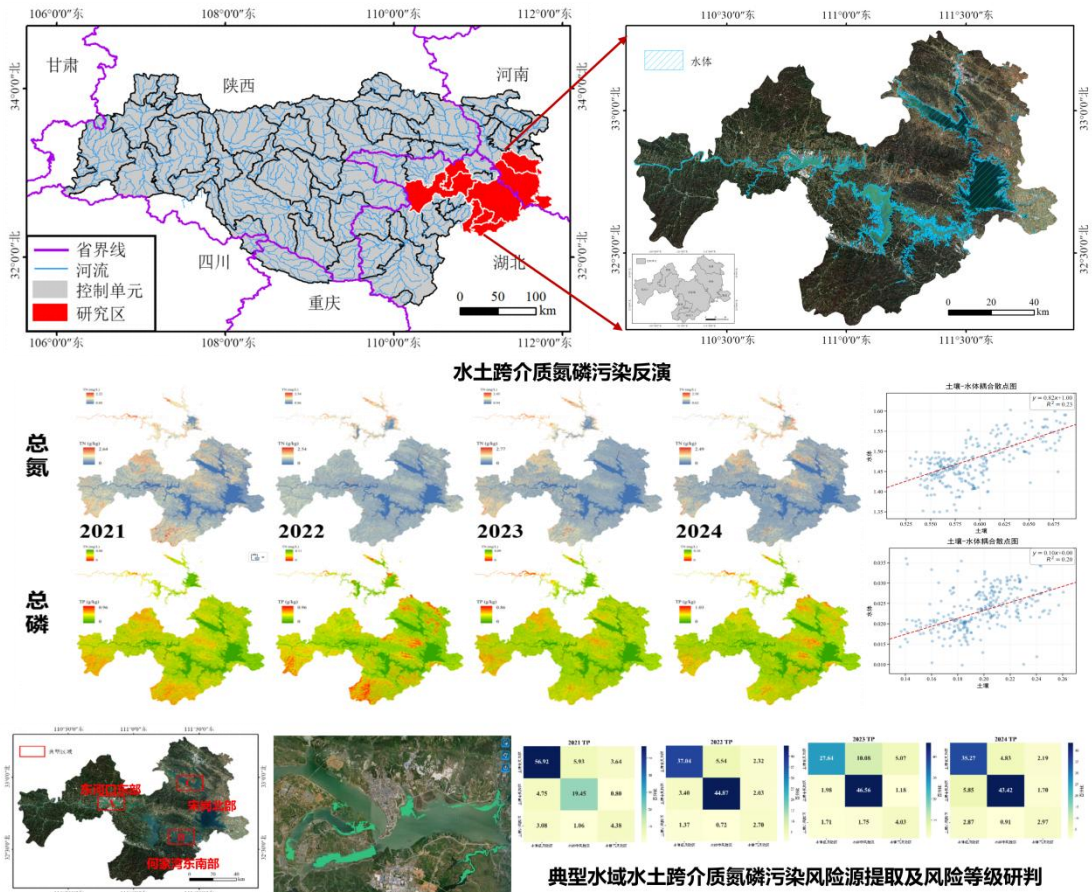


图 2 光谱遥感水土跨介质氮磷污染监测反演

(3) 构建了“空天地一体化”高光谱遥感监测技术体系，设计了丹江口库区高光谱反演监测信息系统，大幅提升了水土一体化监测技术能力和智慧化水平。

设计了丹江口库区高光谱反演监测信息系统，建立了卫星遥感（宏观覆盖）、无人机遥感（重点区域加密）、地面与水下固定站点（实时校验）深度融合的监测网络。提出基于迁移学习的深度神经网络模型和时空地理加权回归插值方法，有效解决了无卫星影像时段的数据缺失问题，实现了库区水质 15 项指标的周尺度反演监测。该成果有力支撑了丹江口水库高光谱遥感水质监测系统建设，完成了从试验验证到业务化运行的转化，显著提升了南水北调中线水源地的水质预警与应急监测能力，为流域水土保持综合治理与库区水质安全保障提供了强有力的技术支撑。

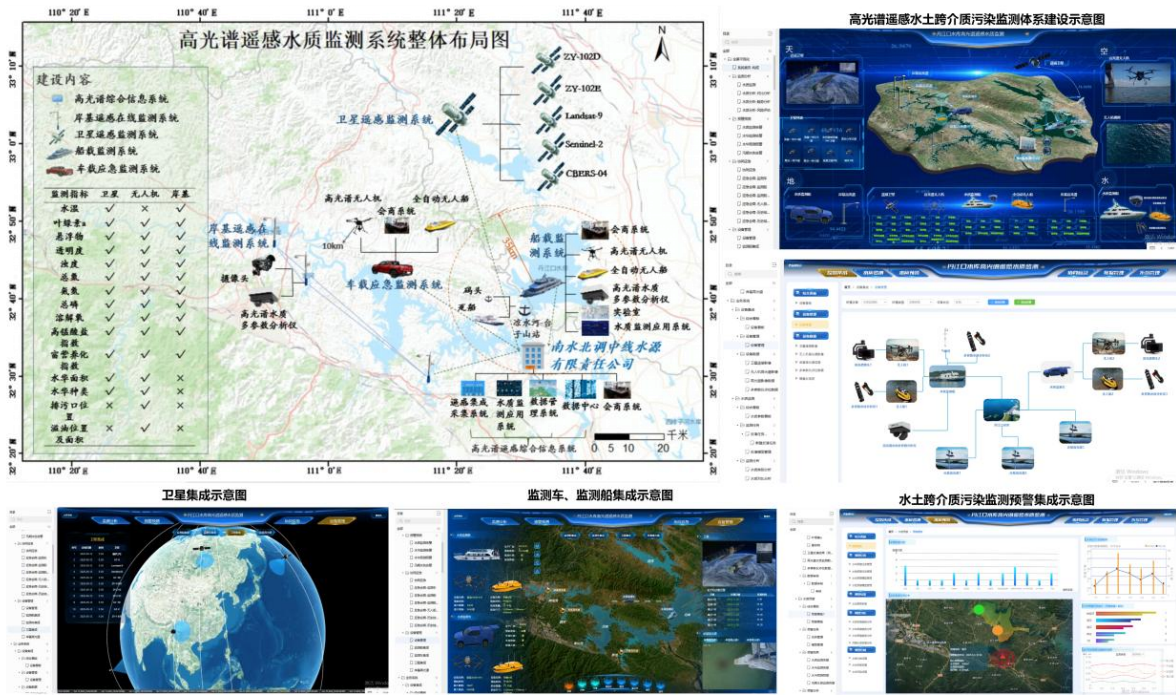


图3 “空天地一体化” 高光谱水质监测系统架构及应用场景

(1.Yong Zhang, Qingming Lin, Libo Ge, He Qin, Jiaoyang Xu, Xin Zhang, Yujie Wei. Contrasting water-quality responses to extreme rainfall between a reservoir and its tributaries: Implications for adaptive watershed management, Journal of Hydrology ,Oct.2025.

2.Yong Zhang, Chen Li,Jintao Liang.Spatiotemporal Patterns and Coupling Correlations of Nitrogen and Phosphorus in Water and Soil in the Danjiangkou Reservoir Basin, China,Catena,Nov.2025.

3.Yong Zhang,He Yao,Tong Liu,Mengqiu Wang, Dapeng Shi,Yangyang Wu .Hyperspectral Total Phosphorus Retrieval: State-of-the-art and Challenges, Remote Sensing,Feb.2026)

发送范围：部领导，相关司局，部直属有关单位，流域和省水行政主管部门及监机构，有关科研机构 and 高校