

针对农业面源污染的湖泊周边多参数协同监测与溯源分析

章 年

洪湖市生态环境监测站 湖北 洪湖 433200

【摘要】：农业面源污染是导致湖泊富营养化的关键原因，其分散性、隐蔽性特征使传统监测与治理面临巨大挑战。以我国第七大淡水湖洪湖为例，洪湖正处于水质提升攻坚阶段，厘清其周边污染来源是实施精准治理的前提。本文首先剖析了洪湖农业面源污染监测溯源面临的核心问题，并构建一套解决方案，旨在为洪湖及同类浅水湖泊的面源污染治理提供系统的技术方法与决策支持。

【关键词】：农业面源污染；湖泊周边；协同监测；溯源分析

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.081

引言

农业面源污染主要指在农业生产工作中，不合理或者过量使用农业物资如化肥、农药、地膜等，或者任意排放农业废弃物，如农村垃圾、禽畜粪便、固体垃圾等，导致污染水体、大气、土壤等^[1]。洪湖作为长江中下游典型的浅水通江湖泊，近年来通过系统治理，水质已呈现改善趋势，但农业面源污染负荷重、底泥内源释放风险高等深层次问题依然存在。因此，融合现代感知技术、大数据分析和流域水文学，构建一套从“监测预警”到“溯源解析”再到“评估反馈”的全链条技术体系，具有紧迫的现实意义和科学价值。

1 洪湖农业面源污染监测与溯源的核心问题剖析

1.1 污染源复杂分散，排放通量难以精准锁定

洪湖作为长江中游典型浅水湖泊，其农业面源污染来源呈现“点线面”交织的复杂格局，给通量核算带来极大挑战。流域内70%水量来自四湖总干渠，承接上游农业生产排水与城镇尾水，而农业面源在总污染负荷中占比达82%，其中总磷排放占比更是高达80%左右。污染源涵盖多个维度：种植业方面，洪湖市虾稻共养面积超百万亩，化肥亩均施用量达25公斤，降雨形成的地表径流携带氮磷养分直入湖区；养殖业中，集中连片养殖池塘尾水日均排放量超3万吨，粪污中氨氮浓度可达150mg/L却缺乏有效处理；地下水排泄成为易被忽视的隐蔽源，3月丰水期时地下水携带总氮输入通量达90.75mg/(m²·d)，占外源输入的54.72%。污染源沿湖岸线分散分布，受作物种植周期、养殖排污习惯影响，排放具有间歇性与随机性^[2]，现有监测手段难以实现全时段覆盖，导致污染贡献占比与排放总量始终存在核算偏差，无法为精准治污提供明确靶标。

1.2 传统监测方法滞后，无法响应污染动态过程

当前洪湖流域沿用的传统监测模式，已难以匹配农业面源污染的动态变化特征。现有194个农业面源污染控制断面多采用季度人工采样监测，监测指标以总氮、总磷等常规参数为主，采样间隔最长达3个月，完全错过暴雨后污染峰值的短历时爆发过程。相关实测数据显示，一次强降雨后入湖河口总磷浓度可从0.079mg/L骤升至0.32mg/L，而传统监测根本无法捕捉这一关键动态。技术手段上仍依赖实验室化学分析，单次样品检测周期需48小时，数据反馈严重滞后，无法为污染应急处置提供实时支撑。尽管已布设多个养殖尾水监测点位，但多采用固定断面采样，未能结合养殖周期调整监测频率^[3]，如虾苗投放期的集中排污与收获期的清塘废水排放，均处于监测盲区。“定时定点”的静态监测模式，与洪湖农业污染“雨前蓄污、雨中爆发、雨后消退”的动态过程完全脱节，导致监测数据无法真实反映污染迁移规律。

1.3 浅水湖泊风浪扰动剧烈，内源污染贡献率不明

洪湖平均水深仅1.35米，属典型浅水湖泊，全年6级以上大风天数超50天，剧烈风浪扰动使底泥频繁悬浮，内源污染释放成为水质提升的隐形障碍。沉积物监测数据显示，洪湖底泥中有机质含量达19%，总氮、总磷含量分别为4407.4mg/kg和1421.0mg/kg，氮的年释放潜力达3500-14000吨，磷达350-400吨，夏季总氮释放速率更是冬季的4倍多。但目前内源污染贡献率始终缺乏精准数据支撑，核心问题在于风浪扰动下“内源释放-悬浮-沉降”的动态过程未被有效捕捉。传统静态释放模拟试验显示，5天内上覆水总氮浓度可升高1.467mg/L，但该结果无法反映自然风浪下底泥再悬浮导致的瞬时释放峰值。

作者简介：姓名：章年，性别：男，出生年份：1969年，民族：汉，籍贯：湖北洪湖，学历：本科（环境工程），职称：中级，单位：洪湖市生态环境监测站，研究方向：环境监测、环境科学、环境工程。

同时,内源与外源污染的耦合作用难以区分^[4],如风浪掀起的底泥颗粒会吸附外源输入的磷素,形成“外源促内源”的叠加效应。贡献率核算的模糊性导致治理措施陷入“重外源轻内源”的误区,部分区域外源治理后水质仍无改善,根源就在于未管控内源污染这一关键因子。

2 面向洪湖的面源污染多参数协同监测体系构建

2.1 布设空天地立体传感网络,集成原位快速监测技术

针对洪湖污染源分散、传统监测覆盖不足的问题,相关部门应构建“天-空-地-水”四级立体传感网络,实现全流程污染动态捕捉。天基层面依托高分六号卫星,每月获取30m分辨率多光谱影像,识别流域内虾稻共养区、养殖池塘的空间分布变化,为污染负荷估算提供基础数据;空基部分借鉴广东鹤地水库经验,在洪湖周边布设3套无人机自主巡航基站,搭载高光谱传感器实现90km²库区每周3次巡航,精准识别蓝藻水华及面源污染入湖口位置,单基站年自主巡航频次不低于200次。地面与水面监测采用“固定站+移动点”结合模式,在四湖总干渠等6个主要入湖河口建设水质自动监测站,集成奥谱天成ATE5300全光谱监测设备,秒级输出总磷、总氮等多项参数,无需化学试剂即可实现原位连续监测;同时配备5艘监测船,在湖心及近岸区域布设20个浮标式传感器,实时采集浊度、溶解氧等数据,采样频率设为10Hz,确保风浪天气下数据不中断,形成覆盖全流程的高密度监测矩阵。

2.2 聚焦特征污染物与新污染物,实施动态靶向监测

结合洪湖农业污染负荷特征,相关部门应构建“常规参数+特征指标+新污染物”的靶向监测体系,精准锁定污染核心因子^[5]。常规监测重点强化总磷、总氮等指标的高频采集,与洪湖水水质考核要求直接对接,其中总磷监测精度提升至0.001mg/L,匹配其0.079mg/L的均值现状。特征污染物监测针对虾稻共养与水产养殖特点,重点跟踪氨氮、COD及叶绿素a,在养殖集中区设置15个专项监测点,养殖旺季(4-10月)将监测频次从每周1次提升至每日1次,捕捉饲料投放高峰期的污染排放峰值。新污染物监测聚焦农药残留与抗生素,选取三唑类农药、氟苯尼考等典型指标,采用固相萃取-高效液相色谱法进行检测,在洪湖周边5个乡镇的农田退水口设置采样点,揭示农业生产中新型污染物的迁移路径。监测时间与农业生产周期深度耦合,在化肥施用后3天、暴雨后1小时启动加密监测,实现“污染排放-过程迁移-入湖响应”的全链条跟踪,避免传统监测与污染动态脱节的问题。

2.3 耦合水文气象与水质数据,实时预警污染事件风险

相关部门应依托数字孪生技术构建多数据融合预警模型,破解洪湖污染响应滞后难题,实现风险的提前预判与精准处置。数据层整合三类核心信息:水质数据来自立体监测网络的实时采集,涵盖子流域水文响应单元监测结果;水文数据包括

四湖总干渠入湖流量、湖泊水位等,采样间隔设为15分钟;气象数据接入周边11个气象站点的降水量、风速等参数,提前24小时获取降雨预报信息。模型构建采用SWAT模型与GRNN神经网络耦合方式,前者基于DEM数据与土地利用类型,模拟不同降雨强度下的污染流失量,后者通过机器学习挖掘水质与气象因子的关联规律,预测精度达98%以上。预警系统设置三级阈值,当预测总磷浓度超0.1mg/L或降雨量达50mm/24h时,自动触发一级预警,通过手机端向流域管理部门推送预警信息,附带污染扩散路径模拟图与应急监测方案,实现“降雨预报-污染预判-应急响应”的无缝衔接,为污染事件处置争取4小时以上准备时间。

3 基于多源数据融合的污染溯源分析与评估反馈

3.1 构建污染源特征指纹图谱,解析污染物迁移耦合关系

为破解洪湖污染源分散且难以区分的难题,相关部门应整合立体监测网络采集的多维度数据,构建“同位素标记-水化学指标-生物标志物”三维污染源特征指纹图谱,实现不同污染类型的精准画像。在样本采集环节,覆盖洪湖流域虾稻共养区、规模化水产养殖池塘、散居农户生活污水排放口、旱作农田退水口等典型污染源,系统采集水体、沉积物及排放源端样品。通过稳定同位素检测技术,明确各类污染源的氮氧同位素比值特征,养殖尾水因饲料分解代谢, $\delta^{15}N$ 值呈现显著富集特征,而农田径流受化肥施用影响, $\delta^{15}N$ 值表现为典型的化肥输入信号;同步检测水化学指标,虾稻共养区排水中含有特征性稻壳纤维衍生物,水产养殖尾水则伴随养殖饲料残留的特定氨基酸组分,生活污水中可检出洗涤剂特征组分。结合水文监测数据与水力模型,解析污染物在“农田-沟渠-河口-湖泊”系统中的迁移耦合关系,明确不同水文情景下污染物的滞留时间、扩散路径及转化规律,如暴雨期地表径流携带的污染物在沟渠系统中呈现快速迁移特征,而枯水期地下水补给携带的污染物则表现为缓慢释放态势,通过指纹图谱与迁移过程的对应分析,可实现入湖污染物与上游污染源的精准关联。

3.2 应用多元统计与模型算法,定量解析污染源贡献率

相关部门应依托多源监测数据构建“统计筛选-模型反演”的双层次定量分析体系,实现洪湖各类污染源贡献度的精准核算。首先基于立体监测网络获取的全流域水质、水文及污染源监测数据,筛选总氮、总磷、氨氮、特定生物标志物等核心指标,构建标准化数据集,剔除异常值后进行数据归一化处理,为后续分析奠定基础。在多元统计分析层面,采用主成分分析提取影响洪湖水质的关键污染因子,通过因子载荷矩阵识别不同污染因子对应的污染源类型;结合聚类分析将污染特征相似的监测断面归为同一类别,明确不同区域的污染主导类型。模型算法层面,引入改进型源解析模型,整合流域数字高程模型、土地利用类型、污染源分布等空间数据,将多元统计识别的污

染因子作为输入参数,通过设置不同污染源情景模拟,反演各类污染源对湖泊核心水质指标的贡献强度。针对洪湖浅水湖泊特性,模型中特别融入风浪扰动对底泥释放的影响系数,实现内源与外源污染贡献的分离核算。通过该体系可清晰界定虾稻共养、水产养殖、旱作农业、生活污水等不同污染源的贡献量级,为靶向治理提供精准的量化依据。

3.3 建立溯源反馈动态评估模型,驱动治理措施精准优化

以污染源解析结果为核心,相关部门应构建“污染负荷-治理措施-效果响应”的溯源反馈动态评估模型,实现洪湖治理方案的智能优化与动态调整。模型数据层整合三类核心信息:溯源环节获取的污染源贡献数据、各类治理技术的净化效率参数、洪湖流域的水文地形与土地利用数据,形成标准化数据库。评估模块采用多目标优化算法,设定水质改善目标、技术可行性、经济成本等约束条件,针对不同污染区域的主导污染源类型,构建多元化治理措施组合方案库,涵盖生态沟渠、人工湿地、尾水净化设施、精准施肥技术等各类措施。模型可模拟不同措施组合的实施效果,如针对养殖集中区,可对比“尾水预

处理+人工湿地”“生态浮床+微生物制剂”等不同方案的污染削减效果与成本投入,筛选最优组合。同时建立动态反馈机制,将立体监测网络获取的治理后水质数据实时反馈至模型,通过对比实际效果与模拟结果的偏差,分析偏差成因,进而调整模型参数与措施组合方案。例如当监测发现某区域总磷削减效果未达预期时,模型可自动溯源至该区域主导污染源的贡献变化或治理措施效率衰减,推荐调整措施参数或增加辅助治理技术,形成“溯源-评估-优化-反馈”的闭环优化流程。

4 结语

农业面源污染成为湖泊富营养化的重要推手,具有随机性强、排放不固定、机理复杂等特点,导致“说不清污染来源、算不准污染负荷、搞不明迁移路径”成为治理中的普遍困境。要实现从“总体改善”到“精准提升”的跨越,必须突破现有监测碎片化、溯源模糊化的技术瓶颈。未来,可进一步探索将数字孪生、人工智能预测等技术与本体系深度融合,实现更为前瞻的模拟与决策。

参考文献:

- [1] 王珂.农业面源污染对水质的影响和防治对策研究[J].农业灾害研究,2021,11(12):110-111.
- [2] 段典榕,孔燕,罗玉,张晓旭.抚仙湖流域农业面源污染防治策略研究[J].环境科学导刊,2021,40(03):1-3.
- [3] 段四喜,杨泽,李艳兰,何搏,施剑春,宋伟志.洱海流域农业面源污染研究进展[J].生态与农村环境学报,2021,37(03):279-286.
- [4] 张蓓.云南省高原湖泊农业面源污染防治和措施[J].资源节约与环保,2020,(07):52.
- [5] 侯娟,赵祥华.云南省高原湖泊农业面源污染防治和对策研究[J].环境科学导刊,2018,37(06):63-65.