



中国城市科学研究会
水环境与水生态分会
Water Environment & Ecology Council
of Chinese Society for Urban Studies



长江生态环境保护
修复联合研究中心
National Joint Research Center
for Yangtze River Conservation

2026(第三届)长江大保护 优秀实践案例汇编



主办单位：中国城市科学研究会水环境与水生态分会
长江生态环境保护修复联合研究中心

2026年5月

目录

四十年生命接力：中华鲟物种保护创新与实践	1
三峡水利水电工程区域植物多样性综合保护与生态应用	6
梁子湖湖泊水生态环境智慧监管技术集成实践	16
AOA 工艺不停水改造与智慧化运行集成示范工程.....	22
农田面源污染生态阻控多场景实践	27
洪湖山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目	37
农业面源污染防控模式创新与实践	45
江西九江市城镇污泥和餐厨垃圾协同厌氧沼液厌氧氨氧化技术示范 项目.....	52

四十年生命接力：中华鲟物种保护创新与实践

申报单位：中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所

一、项目目的及意义

本案例旨在回顾中华鲟研究所四十余年来围绕中华鲟物种保护所开展的工作成效，系统呈现我国在长江珍稀濒危物种抢救性保护领域的探索历程。作为与恐龙同时代的古老物种，中华鲟见证了地球生态的漫长演变。面对当前栖息地改变、自然产卵中断等多重压力，中华鲟保护工作的首要目标是通过长期科研攻关与保护实践，确保这一古老物种能够实现永续生存和繁衍。本案例是我国自上世纪 80 年代以来持续推进长江水生生物保护工作的一个生动缩影，四十年的接续努力，既是对中华鲟物种存续责任的坚守，也为新时代长江流域生物多样性保护工作积累了宝贵经验，充分展现了我国在履行生物多样性保护国际义务、推动长江大保护战略实施中的长远眼光与责任担当。

二、项目总体情况

中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所（以下简称“研究所”）是我国首个因大型水利工程设立的珍稀鱼类科研机构。自 1982 年成立以来，研究所以国家一级重点保护野生动物——中华鲟为核心保护目标，统筹推进“迁地保护”与“就地保护”两大研究工作，逐步构建起覆盖“人工保种—增殖放流—自然种群恢复”的全链条保护体系，推动中华鲟保护实现了从“依赖野生资源被动抢救”向“人工种群可持续自我维持”的历史性跨越。

在迁地保护方面，研究所在行业内率先突破子二代、子三代中华鲟全人工繁殖技术，开发了中华鲟全生命周期性别鉴定技术体系，完成了世界首个八倍体物种——中华鲟全基因组测序和组装，建成了包含精子、细胞、基因等七种子库的长江珍稀鱼类种质资源库和“全要素控制亲鱼养殖系统”。截至 2025 年底，研究所建成了国内规模最大、年龄梯队最完善的中华鲟子二代人工种群。

在就地保护方面，研究所构建了覆盖长江中下游 1800 公里的声呐监测网络，成功研发了国内首个基于北斗卫星导航系统的国产化鱼类卫星标记追踪设备，并首次实现了人工培育中华鲟亲鱼在自然环境中自主产卵和孵化出苗。截至 2025

年底，研究所累计放流各类规格中华鲟约 650 万尾，占全国中华鲟放流总量 60% 以上。

三、项目解决的具体问题

1、解决了中华鲟物种“永续生存”的问题

20 世纪后期以来，受栖息地破坏、过度捕捞等多重因素影响，中华鲟野生种群急剧衰退，物种延续面临严峻危机。面对这一困境，研究所持续四十年深耕中华鲟全人工繁育技术，先后突破子二代、子三代全人工繁殖，成功实现中华鲟物种的永续生存。

2、攻克了中华鲟规模化繁育的技术瓶颈

人工养殖条件下，中华鲟普遍存在性腺发育周期长、成熟率低、种质退化风险高、近亲繁殖隐患大等系列难题，严重制约人工种群的长期健康发展。针对这一技术瓶颈，研究所系统构建了中华鲟规模化繁育技术体系，为中华鲟增殖放流提供稳定的苗种供应。

3、填补了中华鲟“江—海”洄游监测体系缺失

长期以来，中华鲟海洋生活史状况主要依靠渔民误捕回访、传统物理标记等零散手段，导致降河洄游路径、入海存活率、海洋分布范围等关键数据严重缺失。针对这一问题，研究所系统构建了覆盖长江中下游至近海水域的监测体系，为增殖放流效果评估和全生活史保护提供了坚实技术支撑。

4、突破了中华鲟人工群体自然繁殖的技术难题

2013 年以来，葛洲坝下中华鲟产卵场功能持续衰退，2017 年起连续 9 年未监测到自然产卵，野生种群自然繁殖活动近乎中断。针对这一严峻形势，研究所创新提出并验证了“人工+自然”复合保护体系，为中华鲟自然种群恢复开辟了全新路径。

四、项目创新点

1、创新提出了中华鲟“营养+水温”周年调控技术体系

2、系统构建了中华鲟核心梯队建设技术体系

3、建成了覆盖长江至近海海域的“江-海”洄游监测体系

4、首创了中华鲟“人工-自然”复合保护体系

五、应用场景和运行实例

1、中华鲟全人工繁殖技术创新

研究所自 1982 年成立以来，持续推进中华鲟全人工繁殖技术攻关，先后实现野生中华鲟人工繁殖、人工催产素替代脑垂体催产等关键突破，成功掌握大规格幼鲟培育技术，并在行业内率先突破子二代全人工繁殖，实现中华鲟在人工培育条件下成熟与繁殖。在此基础上，创新构建了“营养+水温”周年调控技术，有效缩短了雌性亲鱼性腺发育周期。基于四十余年的技术沉淀，2025 年在行业内首次实现子三代全人工繁殖，推动中华鲟物种保护实现从“依赖野生资源”向“人工种群可持续自我维持”的历史性跨越。



图 1 子三代中华鲟繁殖出膜

2、中华鲟规模化繁育体系建设

研究所构建了以基因组学指导为核心、贯穿“亲鱼管理-苗种繁育”全过程的规模化繁育体系，率先完成了世界首个八倍体动物——中华鲟全基因组测序与组装，从基因组层面确证中华鲟为同源八倍体，为种群遗传管理提供了科学依据。在此基础上，开发 DNA 性别鉴定及核心梯队建设关键技术，实现中华鲟多龄级人工种群梯队优选，彻底摆脱对野生亲本的依赖。2024 年，研究所建成了“全要素控制亲鱼养殖系统”，集成循环水处理与智慧管控平台，为开展大规模增殖放流提供坚实保障。

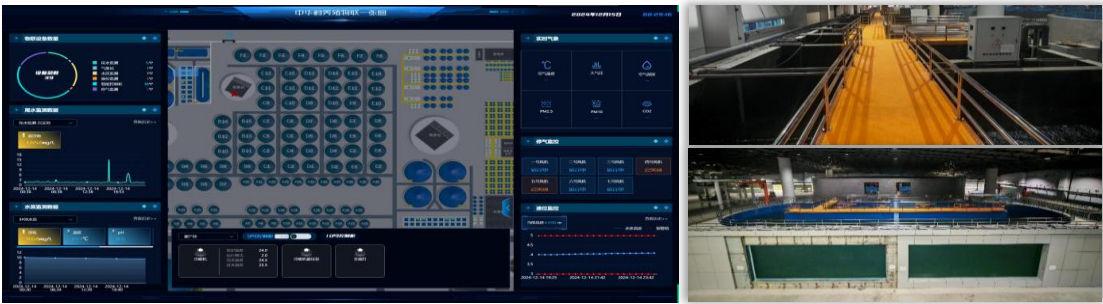


图 2 全要素控制亲鱼养殖系统

3、中华鲟“江-海”洄游监测体系建设

研究所聚焦中华鲟“江-海”洄游监测需求,系统构建了覆盖长江中下游至近海水域的立体化监测技术体系。在长江中游至入海口约 1800 公里江段布设 17 个监测断面,投入接收机 20 余台,系统阐明了中华鲟降河洄游全过程,证实宜昌江段放流中华鲟平均入海率不低于 60%。在近海海域,综合运用环境 DNA、卫星标记追踪、卫星遥感影像等多源数据,初步推断出放流中华鲟在长江口至舟山群岛海域的集中分布区,揭示了近海迁移行为与水温、饵料资源的关联性。2025 年,研究所联合有关单位成功研制出首个基于北斗卫星导航系统的国产化鱼类卫星标记设备,实现关键技术自主可控,为中华鲟全生活史保护提供了有力支撑。



图 3 国产化鱼类卫星追踪标记

4、中华鲟人工群体自然繁殖技术研究

研究所在全球范围内首次提出并验证了“人工+自然”途径恢复中华鲟自然产卵的理论和技術,揭示了营养、水温、水动力条件协同的性腺发育同步与自然产卵行为诱发机制,攻克了全周期精准调控、仿生环境营造与智能管控等关键技术,实现了人工培育中华鲟在受控条件下自然产卵,为珍稀濒危鱼类保护开辟了全新路径。



图 4 受控条件下中华鲟自然产卵试验场

六、项目实施效果和效益分析

1、生态效益显著，有力支撑中华鲟物种延续

四十余年来，研究所累计放流中华鲟超 650 万尾，有效补充了中华鲟野外种群数量。“子三代中华鲟繁殖成功”、“受控条件下中华鲟自然产卵试验成功”等多项成果受到行业主管部门高度肯定和国内外媒体的广泛关注报道。研究所先后获批“农业农村部宜昌中华鲟保护基地”、“全国首批中华鲟种源保护繁育基地”。2026 年“全球首次突破中华鲟人工群体自然繁殖技术”成功入选中央企业原创技术策源地十大标志性成果。

2、社会效益突出，全面提升公众保护意识与国际影响力

围绕中华鲟物种保护，研究所精心打造了一系列极具影响力的生态文化产品。2015—2018 年推出“我与中华鲟 共护长江美”志愿服务品牌，联合主流媒体及 5000 余名志愿者在 11 个城市持续开展系列宣传活动，受益超 2 万人次。2018 年起与联合国开发计划署共同发起“三峡·中华鲟全球宣讲大使”项目，向国际社会宣讲长江生态环保理念。2023 年，结合中华鲟增殖放流活动共同推出云端微课堂，面向青少年科普中华鲟保护知识。2024 年，中华鲟物种保护实践案例成功入选联合国《生物多样性公约》第十六次缔约方大会（COP16）能源转型促进生物多样性保护名录，长江特有野生动植物保护的国际关注度持续提升。

七、经验总结和发展建议

中华鲟研究所经过四十年的持续探索与实践，统筹推进中华鲟“迁地保护”与“就地保护”深度融合，系统构建了“人工保种—增殖放流—自然种群恢复”的全链条保护体系，首创了“人工+自然”复合保护新路径，实现了从“被动抢救”向“人工种群可持续自我维持”的历史性跨越。作为长江珍稀特有鱼类保护的旗舰物种，中华鲟的保护成效不仅是衡量长江流域生物多样性保护成果的重要标尺，更承载着人与自然和谐共生的深层价值。面向未来，中华鲟物种保护工作既需要进一步完善政策机制、凝聚多方科研力量，更需要全社会共同守护好长江生态环境。唯有将中华鲟保护深度融入“共抓大保护、不搞大开发”的战略实践中，才能确保这一古老物种的永续生存，才能为共建人与自然和谐共生的美丽中国注入源源不断的生态动能。

三峡水利水电工程区域植物多样性综合保护与生态应用

申报单位：长江珍稀植物研究所

一、项目目的及意义

三峡库区作为我国重要生态功能区，孕育众多特有珍稀植物。为了践行“在保护中发展、在发展中保护”理念，减少三峡水利水电工程蓄水运行对库区生态环境的潜在影响，守护库区特有珍稀植物资源，推动工程建设与生态保护协同发展。本项目通过系统科学的保护举措，实现了疏花水柏枝、荷叶铁线蕨等特有珍稀物种长期存续，构建了完整植物保护技术体系，推动库区脆弱生态区修复，筑牢长江生态屏障，助力国家“双碳”目标与美丽中国建设，为全球大型工程建设生物多样性保护提供了可借鉴的“中国方案”，实现了三峡工程经济效益与生态效益的有机统一。

二、项目总体情况

《三峡水利水电工程区域植物多样性综合保护与生态应用》属于综合管理类项目，主要贡献单位为长江珍稀植物研究所。本项目聚焦整个三峡库区特有珍稀资源植物，持续 20 余年开展库区植物多样性保护与生态修复工作，业务范围涵盖特有珍稀资源植物“野外调查—抢救收集—迁地保育—野外回归”全流程，促进库区生态安全及区域可持续发展。项目建成总面积超 160 万平方米的长江珍稀植物保护基地，打造了 8 大植物专类园及科研、科普等多功能区域；成功构建了珍稀资源植物保护及生态应用技术体系，实现科研、科普教育与生态修复一体化，最大限度降低工程建设对库区植物多样性的影响，促进库区植被生态恢复。



图 1 长江珍稀植物研究所及珍稀植物迁地保护基地

三、项目解决的具体问题

本项目针对三峡水利水电工程建设及蓄水运行可能带来的生态环境影响，前瞻性地解决了以下问题：一是解决了工程蓄水对库区植物多样性的影响。对三峡工程环评报告中提到多种可能会受工程建设及蓄水影响物种，通过实施迁地保护、繁育复壮，避免了特有珍稀物种灭绝。二是解决了库区珍稀植物保护技术需求。突破荷叶铁线蕨、丰都车前等特有物种繁殖技术瓶颈，构建植物“资源收集（Resource）、科学研究（Research）、应用方案（Resolution）”的 3R 保护技术模式。三是解决了工程建设引发的生态治理难题。通过挖掘库区植物资源用于生态修复，实现消落带、高陡边坡、工程建设弃渣场等生态脆弱区的固土护坡及污染防控，全面提升区域生态承载力。四是解决了工程建设与生态保护不协调问题，率先提出“同步设计、同步施工、同步保护”的“三同时”生态保护理念，将工程施工对区域生态环境的影响降至最小，实现工程建设与生态保护协同推进。五是建成标准化保护基地与科普平台，有效促进科研与科普协同发展，实现科研科普双向奔赴。

四、项目创新点

1、构建“迁地保护评价+多途径繁育”一体化综合保护技术体系，突破种群遗传局限性与繁育技术瓶颈。

一方面通过核心种质优选，建立基于遗传多样性指标的迁地保护成效评估方法，解决迁地保护种群遗传局限性的关键难题；另一方面，创新研发“悬浮搭桥”孢子播种、“微环境”繁育等特色技术，融合构建多途径高效繁育体系；进一步结合植物多组学研究，揭示植物抗逆遗传机制及分子遗传调控网络，建立定向化繁育技术体系。



图 2 珍稀资源植物野外调查



I 级重点保护野生植物荷叶铁线蕨 II 级重点保护野生植物疏花水柏枝扦插

图 2 国家重点保护野生职务繁育图

2、建立珍稀植物野外回归近自然驯化技术体系，显著提升回归苗木野外适应能力。

聚焦珍稀植物野外回归存活率低、适应能力弱的核心痛点，突破传统回归技术单一化局限，构建“人工驯化+近自然恢复+系统监测”一体化植物野外回归技术。通过技术创新，优化回归苗木驯化流程，结合原生境环境特征精准调控适配条件，建立长期监测和动态管理机制，助力苗木快速适应野生环境。

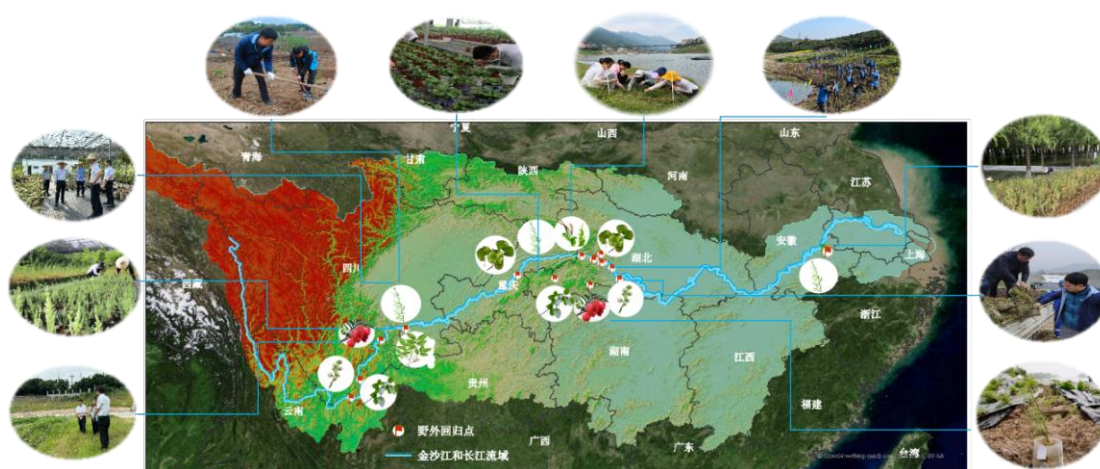


图 3 珍稀资源植物野外回归示意图

3、首创兼顾珍稀植物保护的生态脆弱区修复理念，实现生态修复与珍稀植物保护的有机统一。

率先提出了“同步设计、同步施工、同步保护”的生态脆弱区修复与珍稀植物保护的“三同时”生态保护理念。针对水库消落带，利用自主培育的珍稀植物，创新研发复杂立地条件下水库消落带生态修复技术，筛选 20 种耐淹植物并建立分区分层配置模式；针对高陡边坡修复，构建了绿色罩面网结合攀缘植物垂直绿化

面向群众讲“土话”、传真情，向青少年播撒生态种子，在国际舞台分享中国生态保护经验，分层触达不同受众，每年线上线下惠及超 1000 万人次，让生态保护理念深入人心，凝聚护绿合力。



图 6 各类科普讲座、研学活动

五、应用场景和运行实例

项目实施过程中，通过对三峡库区建库前后植物种类 20 余年的系统调查，基本摸清了区域内植物群落组成、物种分布及数量变化特征。截至目前，已经完成 2130 种，3 万余株特有珍稀资源植物的迁地保护，牵头制定林草引种驯化行业标准，形成了三峡库区特有珍稀资源植物完整的迁地保护网络，珙桐、红豆杉、楠木等数十种特有珍稀植物移栽成活率达到 90%，其中迁地保护的珙桐及其子

代首次在华中低海拔地区连片开花结实，并在三峡坝区成功建成独具特色的长江流域珍稀资源植物活体/离体保存资源库；攻克荷叶铁线蕨、珙桐等数十种珍稀植物繁育瓶颈，通过多途径高效繁育技术构建，缩短了珍稀植物繁育周期，其中荷叶铁线蕨孢子体繁育周期缩短 1/3，实现了珙桐、红豆杉等特有珍稀植物当年播种当年出苗，有效解决了特有珍稀植物难繁育的问题，形成近百件国内外发明专利，牵头制定濒危野生植物人工培植行业标准；完成水柏枝属内首个物种——疏花水柏枝全基因组的测序及组装，系统解析其逆境响应分子机制，成功构建并阐明了疏花水柏枝特异的抗逆基因调控网络，为物种保护后续定向化选育奠定了关键基础；利用自主繁育苗木，在长江流域设立 20 余个回归还植点，成功将荷叶铁线蕨、疏花水柏枝等多种珍稀资源植物回归至长江流域各植物原生/近生地，累计回归苗木 6 万余株，回归苗木整体存活率维持在 90%以上，三峡库区消落带生态修复示范区建设项目中推广应用面积 3 万 m²，在三峡坝区内建成 8 个植物专类园，整体修复率达 83.7%。



图 7 湖北宜昌秭归童庄河植树节珍稀植物还植现场

本项目形成的多项技术方向整体推动了珍稀植物保护从被动抢救向主动培育、优质化提升、资源化利用转变，相关经验技术形成多项技术标准，正逐步向金沙江流域、“三北”等重点区域推广应用，并形成可复制、可推广的保护与应用

模式，相关实践成果于 2026 年成功入选中国第七次《生物多样性公约》国家报告和 COP16 首批能源转型促进生物多样性保护名录，为全球生物多样性保护与绿色发展提供了中国案例。



图 8 金沙江珍稀植物保护基地



图 9 入选中国第七次《生物多样性公约》国家报告



图 10 入选 COP16 首批能源转型促进生物多样性保护名录

六、项目实施效果和效益分析

2018 年 4 月，习近平总书记在视察三峡工程时嘱托项目负责人黄桂云：“你们的工作非常有意义，是造福子孙后代的事。”，五年后的 2023 年，习近平总书记再次给黄桂云团队回信勉励：“来信收到，希望你和你的同事们再接再厉，为保护长江特有珍稀植物作出更大的贡献”，产生了重大的社会影响。



图 11 习近平总书记栽植楠木

本项目的开展使三峡库区植物多样性得以有效保护，相关生态脆弱区域生态环境状况得到实质性改善，打造了水利水电工程与植物多样性保护协同发展典范。

本项目**社会效益显著**：有效提升了三峡坝区旅游竞争力与游客体验，带动文旅产业提质升级；成功获批建设国家生态环境科普基地，有效增强公众生态保护意识与参与度；带动移民就业，改善生活水平，维护区域社会稳定；**生态效益突出**：三峡坝库区植被覆盖率得到有效提升，生物多样性、水土保持与固碳增汇能力增强，累计固碳超 10.67 万吨，空气与水环境质量改善，保障生产生活用水；**经济效益可观**：集成技术降低修复及植物管护成本约 1 亿元，碳汇收益约 600 万元，带动旅游及相关消费，助推区域绿色经济发展。

七、经验总结和发展建议

本项目经过 20 余年持续实施，逐步形成了以长江珍稀植物研究所为核心、以全链条保护模式为抓手、以工程与生态协同发展为目标的综合保护模式，构建起“资源收集、科研攻关、繁育复壮、野外回归、生态修复、科普文旅”一体化运行体系。项目坚持长期系统布局，围绕三峡库区全域开展植物调查与保育工作，通过技术创新突破珍稀植物繁育与野外回归瓶颈，将“三同时”生态修复理念贯穿工程建设全过程，实现了植物保护与消落带、弃渣场等脆弱区域治理的有机融合，同时统筹生态、社会与经济效益，形成了可复制、可推广的大型水利工程生物多样性保护经验，为长江大保护提供了坚实支撑。

当前项目在持续推进过程中仍面临一些现实难点。如部分珍稀植物野外回归种群自然更新能力较弱，种群遗传稳定性有待进一步提升；消落带等区域生态环境波动较大，后期监测管护难度高、成本持续增加，长效运维保障压力突出；三峡库区分段管理格局下，区域间保护标准、数据资源尚未实现高效统一，协同保护力度不足；生态产品价值实现路径仍较为单一，碳汇、生态旅游等产业化转化水平有待提高。

针对上述问题，项目后续将继续强化珍稀植物种群科学管护，优化种质资源配置，完善长期动态监测体系，提升野外种群自我繁衍能力；积极协同对接区域内地方政府，统筹水利、林业、生态环境、自然资源等属地管理部门统一保护标准、共享监测数据、打通跨区域分段管理壁垒；健全稳定的长效运维机制，加大资金保障力度，推广智能化监测管护技术，有效降低养护成本；加强库区跨区域

协同保护力度，建立统一协调机制与数据共享平台，规范技术标准，形成全域保护合力；同时积极拓宽生态价值转化渠道，完善生态产品价值核算体系，深化科普研学、碳汇交易等业态培育，推动项目保护成果与绿色产业深度融合，实现生态效益与经济效益长效可持续发展。

梁子湖湖泊水生态环境智慧监管技术集成实践

申报单位：湖北省生态环境科学研究院（省生态环境工程评估中心）

一、项目目的及意义

梁子湖位于长江中游南岸，地跨武汉、鄂州两市，水域面积 339.2 km²，是典型浅水型湖泊，全国第八大淡水湖，长江中游重要生态屏障和战略水源地，被誉为“华中物种基因库”。“十四五”以来，湖泊水质虽达考核目标，但污染源管控粗放、生态系统退化、监测预警能力滞后等深层次挑战依然存在，传统治理模式已难以为继。

本项目是落实长江大保护战略的重要实践，以“数智化”为突破口，系统构建梁子湖流域“空天地水”一体化智慧监管体系，破解跨区域、多要素的湖泊治理难题。项目的实施，不仅为武汉都市圈饮用水安全守护、长江重要湖泊生态修复提供了坚实保障，更探索形成可复制、可推广的流域智慧治理“湖北模式”，为我国湖泊治理现代化贡献创新方案。

二、项目总体情况

本项目由湖北省生态环境科学研究院负责建设与实施。目前项目一期已全面建成并投入稳定运行，成效显著，实现了从“人防”到“技防”的跨越式转变。

项目以全面提升梁子湖流域水生态环境自动化监管与现代化决策能力为核心目标，建设范围覆盖全水域及周边陆域，构建了“全域感知、智慧管理、协同处置”的治理新范式。建设内容高度集成，主要形成两大体系：

1、全域监测感知体系：构建了“空-天-地-水”立体监测网络，集成水质自动站、水文站、气象站、高空瞭望视频、无人机、遥感卫星等多维感知终端，实现对流域“水环境、水生态、水资源”及人类活动全周期、常态化的精准监控，彻底改变了传统“人海战术”的低效模式。

2、智慧管理应用体系：基于数字孪生技术，打造了梁子湖智慧管理平台。该平台作为流域治理的“智慧大脑”，融合多源数据，构建了水质预警、污染溯源、水华预测、智能处置等核心应用模块，形成了“监测-预警-决策-处置-评估”的闭环管理流程，显著提升了流域管理的科学化、精细化水平。

三、项目解决的具体问题

1、破解“监测盲区”，筑牢饮用水安全防线

针对监测能力不足、指标不全的痛点，建成水质“超级站”与全自动“黑灯实验室”，监测能力全面覆盖饮用水源地 109 项全指标，并拓展至 600 余项新污染物监测，为武汉市备用水源地构筑起全方位安全屏障。

2、升级“监管手段”，大幅提升环境监管效能

针对人工巡查时效性差、覆盖面窄等问题，布设 32 个水质自动站、18 个水文站、7 个气象站，实现关键断面数据小时级在线监测。通过 94 个高空摄像头与 8 套无人机协同作业，构建“全域可视、自动巡航”的智能监管网络，实现对非法捕捞、违法排污等行为的精准识别和快速响应。

3、填补“感知空白”，支撑水生态系统精准修复

针对水生态监测长期依赖人工的难题，研发水生生物智能识别系统，全面提升监测能力。同时通过多源遥感反演技术，实现对叶绿素、藻密度等指标的高频监测，为生态修复提供关键数据支撑。

4、打破“数据孤岛”，构建跨区域协同治理新机制

针对数据分散、联动不足的顽疾，搭建 278TB 存储、3.5P 算力的云平台，构建梁子湖数字孪生底座，将环保、水利等多源数据汇聚成“生态环境一本账”，建立“实时预警、联合研判、协同处置”的业务闭环，有效解决跨市协同治理难题。

四、项目创新点

1、模式创新：首创“全域智治”的流域现代化治理新模式

项目打破了传统湖泊治理“碎片化”的困局，率先建成覆盖“水环境、水生态、水资源、人类活动”的全要素、全时空智能感知网络，并构建了与之匹配的“一网统管”智慧平台。从物理感知到数字孪生，从数据驱动到闭环处置，实现了从经验管理向数据治理的根本性变革，为流域治理现代化提供了可复制的“湖北样板”。

2、技术创新：攻克水生态智能监测与 AI 识别关键技术

项目瞄准水生态监测自动化程度低的行业痛点，联合科研机构攻关，成功研发了浮游生物、底栖动物、鱼类的 AI 智能识别设备与大数据平台。浮游生物图

片库突破 700 万张，常见物种识别准确率超 90%，单个样品从图像采集到报告生成仅需 10 分钟。这一创新彻底颠覆了传统人工镜检模式，填补了国内水生态智能化监测领域的空白，技术达到行业领先水平。

3、应用创新：构建饮用水安全“超级站”+“黑灯实验室”双重保障

项目创新性地将在线监测“超级站”的实时预警能力与全自动“黑灯实验室”的高通量、全指标分析能力相结合，实现了对水源地监测指标的基本覆盖及新污染物的定期筛查。AGV 机器人、自动分析单元的引入，实现了无人值守下的 24 小时不间断运行，极大提升了风险感知的及时性与全面性，为饮用水安全提供了“全天候、无死角”的硬核保障。

4、集成创新：打造“数字孪生+智慧应用”的流域决策指挥中枢

项目基于高精度数字孪生底座，集成了水质预警、污染溯源、水华风险预测、非法捕捞智能识别、水生态综合评估等一系列智能应用。这种系统集成与业务深度融合的创新，使得平台不仅是数据的“展示板”，更成为可计算、可推演、可决策的“指挥部”，实现了从“看见”到“预见”再到“干预”的能力跃升。

五、应用场景和运行实例

1、多源数据融合，实现精准预警溯源

应用场景：针对湖区及支流水质异常问题，融合水质、水文、气象多维数据，动态研判污染成因与趋势。

运行实例：项目通过 32 个水质自动站、18 个水文站等组成的监测网络，实现了对怀万港、入湖口等关键区域水质变化的实时监控与趋势分析。系统在某次水质异常波动时，自动关联水文气象数据，快速将问题指向上游支流高桥河的暴雨径流冲击，为管理部门精准制定应急措施提供了数据支撑，避免了污染的扩大化。

2、空天地联动，打造立体化智能巡查新模式

应用场景：针对岸线长、执法难问题，利用高空视频和无人机实现水域岸线全天候、无死角自动巡查与违法行为智能识别。

运行实例：项目在湖周布设 94 个高点视频监控，覆盖 5km 重点区域，AI 算法可精准识别非法垂钓、湖面漂浮物等。同时，8 套无人机定期对生态敏感区、入湖口等区域开展巡航。在一次例行巡查中，无人机精准锁定了一处隐蔽的非法

钓鱼行为，为执法人员现场处置提供了铁证，执法效率提升 80%以上。

3、水生态智能监测，科学评估治理成效

应用场景：利用智能识别设备和遥感技术，定期监测水生生物种群及植被分布，为生态修复提供量化依据。

运行实例：建立梁子湖水生植被水华遥感分类算法，通过遥感解译与历史数据对比，项目清晰揭示了 2015-2025 年十年间梁子湖水生植被从“牛山湖区域等局部高密度”到“全湖域逐渐消亡”再到“零星分布于周边沿岸”的演变轨迹。这一量化分析结果，为梁子湖修复方案提供了关键的空间区位参考。

4、数字孪生赋能，驱动管理流程全闭环

应用场景：基于数字孪生底座，将污染源排查、问题发现、整改落实等线下业务与线上平台无缝对接。

运行实例：在流域污染源精细化管理中，平台通过流域分区和水系图，智能筛选重点排查对象。现场人员利用无人机和高清摄像头核查后，将问题点位、照片、分级清单实时上传平台，实现了污染源调查资料的在线化、可视化和台账化管理。从问题发现到纳入整改清单，全程在线流转，大大提高了管理效率和决策的科学性。

六、项目实施效果和效益分析

1、生态效益：夯实科学治水根基，驱动生态系统正向演替

项目构建的全域感知网络，为梁子湖提供了高精度、长序列的“水环境-水生态-水文气象”本底数据，已应用于污染源精细管控和水生态修复决策，正积极引导流域生态系统向健康、稳定方向演替。

2、经济效益：降低治理成本，保障区域高质量发展

项目经济效益体现在“减损”与“降本”。精准预警每年可有效避免水华、水质恶化等带来的直接经济损失数百万元。智慧监管替代传统“人海战术”，日常巡查人力成本降低约 60%，间接效益显著。

3、社会效益：提升公众获得感，培育绿色环保意识

项目通过保障饮用水安全、改善湖泊观感，提升了流域居民获得感与幸福感。同时，项目作为生动具体的环保实践，其示范效应远胜传统宣传，潜移默化中增强公众环保意识，营造全社会共建共治共享的良好氛围。

4、示范效益：打造智慧治理“湖北样板”，引领行业技术革新

项目面向国家水环境治理数智化转型重大需求，率先在长江中游地区成功实践“空天地水”一体化智慧监管与治理模式，其建设思路、技术方案、管理模式具有极高借鉴价值。项目成果在多个行业会议上交流推广，为全国流域治理现代化贡献了“湖北经验”。

七、经验总结和发展建议

梁子湖智慧管理体系的成功实践，是顶层设计与基层探索有机结合、科技创新与业务需求深度融合的典范。主要经验可概括为“四个坚持”：

1、坚持数据筑基，精准诊断是治理的前提。只有建立“空天地水”一体化的精准监测网络，获取全面、可靠、连续的数据，才能科学识别问题根源，确保治理措施靶向发力。

2、坚持系统观念，协同治理是成功的关键。湖泊治理必须摒弃“头痛医头”的碎片化思维，将污染治理与生态修复、跨区域联动与跨部门协同、硬件建设与软件应用作为一个整体统筹推进。

3、坚持数智赋能，技术驱动是效能的引擎。要敢于拥抱人工智能、数字孪生等前沿技术，推动其与生态环境管理深度融合，通过技术手段实现管理模式的根本性变革，提升治理效能。

4、坚持应用导向，实战实效是建设的归宿。所有技术创新和平台建设，必须紧密围绕解决实际管理问题、服务一线业务需求，避免建成“空中楼阁”，确保平台“能用、管用、好用”。

为巩固成果、持续引领，建议下一步重点推进以下工作：

1、推动“功能实现”向“效能最优”深化。在现有闭环基础上，推动智慧平台与流域行政管理流程深度融合，构建从“问题发现-线上交办-现场整改-系统销号”的全链条数字化管理机制，将技术能力真正转化为治理效能。

2、建立“建管并重”的长效运维保障体系。明确运维主体，落实运维资金，培育专业化运维团队，建立“以用促维”的激励机制，确保感知网络和智慧平台持续稳定运行，实现“建成一个、运行一个、见效一个”。

3、谋划“湖北智慧生态”体系的战略布局。以梁子湖为成功样板，提炼形成可复制、可推广的技术标准与建设指南。积极谋划在洪湖、丹江口水库、三峡

水库等长江流域重点水体推广应用，逐步构建覆盖全省的现代化水生态环境智慧治理体系，为长江大保护贡献更多湖北力量。

AOA 工艺不停水改造与智慧化运行集成示范工程

申报单位：安徽舜禹水务股份有限公司

联合申报单位：北京工业大学

一、项目目的及意义

本项目立足长江大保护战略，聚焦巢湖流域城镇污水处理厂“低碳氮比进水脱氮难、高能耗、高药耗、提标改造受限”等共性难题，创新开发低影响原位改造装备，破解 AOA 工艺快速落地的技术瓶颈。通过融合智慧水务技术，构建智慧曝气与智能加药系统，实现精准控制与高效运行，显著降低能耗与药耗。作为长江流域首个 AOA 工艺规模化工程应用案例，项目不仅保障出水稳定达标，更形成可复制、可推广的低碳智慧运维模式，为城镇污水处理行业绿色转型提供示范，有力支撑长江经济带高质量发展和国家“双碳”战略实施。

二、项目总体情况

“AOA 工艺不停水改造与智慧化运行集成示范工程”依托安徽省科技创新攻坚计划（项目编号：202423110050028），由安徽舜禹水务股份有限公司联合北京工业大学彭永臻院士团队共同研发实施，聚焦技术攻关与工程落地。项目以长丰县下塘工业园区污水处理厂为实施对象，设计处理规模 3 万吨/日，原生化段采用两级 AO 工艺，出水需同时满足《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB 34/2710-2016）及《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 要求。针对原厂存在运维成本高、控制难度大、提标受限等问题，项目对生化段实施 AOA 工艺原位不停水低影响改造，创新集成 OTE 曝气优化控制技术，并同步部署智慧曝气、智能加药等智慧运维系统。改造后系统稳定运行，出水水质全面达标，碳源与电耗显著降低，形成具有完全自主知识产权的污水处理低碳提质成套技术方案，已获授权发明专利 3 项，为长江流域污水处理厂绿色低碳升级提供了可复制、可推广的工程范式。

三、项目解决的具体问题

本项目在三方面实现关键技术突破：一是破解传统改造需停产、扩地的行业瓶颈。采用装配式模块化装备与不停水原位改造技术，在不新增用地、不中断运

行前提下完成工艺重构，彻底规避污水溢流风险，为长江流域污水厂提标改造提供可复制范式。二是攻克低碳氮比污水脱氮效率低的核心难题。针对巢湖流域进水碳氮比普遍偏低问题，创新采用 AOA 工艺后置缺氧区设计，激活微生物胞内碳源驱动内源反硝化，使生化段出水总氮稳定低于 8 mg/L，显著优于传统两级 AO 工艺。三是突破智慧控制滞后难题。在好氧末端与缺氧区关键节点增设氨氮、硝态氮过程仪表，融合 AI 算法开发智慧曝气与智能加药系统，实现曝气量与碳源投加的精准按需调控。改造后碳源药耗降低 50%以上，曝气电耗下降 10–20%，大幅提升了运行效率与低碳水平，为污水处理厂智能化、绿色化升级提供了系统解决方案。

四、项目创新点

本项目在污水处理厂升级改造方面取得了显著进展，具体表现在以下三个方面：

1、改造模式创新，实现低影响原位提质

为应对传统改造需停产、扩地的挑战，本项目创新研发了不停水低影响改造技术（LIR 技术），通过定制化工艺包与装配式模块化装备的应用，如氨氮梯度营造装置、陆上安装推流器及可提升式曝气系统等，在不新增用地和主体构筑物的前提下完成工艺升级。这种改进方式不仅缩短了改造周期达 40%以上，而且避免了因施工导致的污水溢流风险，实现了污水处理设施的“无扰式升级”，特别适用于城镇环境下的污水处理需求。

2、数智化融合创新，实现全流程精准管控

在数智化方面，本项目构建了“工艺技术+智能算法”的融合管控体系，针对 AOA 工艺开发了精准曝气与智慧加药控制系统。其中，精准曝气系统采用氨氮与 DO 双参数闭环控制，并结合前馈反馈逻辑进行动态调节；智慧加药系统则根据硝态氮在线监测数据联动数字加药泵，实现药剂投加的精确预判与实时调整。此外，还打通了“厂-网-河”数据链，构建全流程智慧运维平台，推动行业从传统的经验运营向现代的数字智能运营转型，提高了污水处理过程的无人化和精细化管理水平。

3、低碳效益创新，践行长江大保护绿色发展理念

本项目还致力于形成污水处理全流程减碳技术体系，通过减少碳源药剂的使

用和优化曝气能耗，有效降低了间接碳排放。据统计，项目实施后年节碳量达到 916.8 吨 eCO₂，相当于每年种植 4.5 万至 9.1 万棵树的碳吸收量。同时，出水水质持续改善，有助于削减排入长江流域的氮磷污染物，缓解受纳水体的富营养化现象，从而在污染减排与节能降碳两个维度上，为长江大保护战略提供了切实可行的创新实践案例。

综上所述，本项目通过技术创新，不仅提升了污水处理效率和质量，同时也大幅减少了对环境的影响，为长江流域乃至全国范围内的污水处理厂升级改造提供了宝贵的经验和技术支持。

五、应用场景和运行实例

本项目位于长丰县下塘工业园区污水处理厂，设计处理规模 3 万吨/日，原采用两级 AO 工艺，进水以生活污水为主、混入少量工业废水，普遍存在碳氮比偏低问题，导致脱氮效率不足、外加碳源依赖度高、能耗药耗大、自动化水平低等运行瓶颈。为系统性破解上述难题，项目实施 AOA（厌氧-好氧-缺氧）工艺原位不停水改造，在不新增用地、不中断运行的前提下，对生化系统进行重构：优化水力停留时间分配，将原好氧区 HRT 缩短约 50%，释放池容用于增设后置缺氧区；同步安装高效推流器强化内循环与反硝化效果，并配套部署基于 AI 算法的智慧曝气与智能加药系统，实现关键运行参数的精准调控。

改造后系统稳定高效运行，生化段出水总氮稳定低于 8 mg/L，COD 去除率超 90%、氨氮去除率逾 95%、总磷去除率达 90%，全面满足《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB34/2710-2016）及一级 A 标准要求。在节能降耗方面成效显著：碳源投加量减少 50%以上，曝气电耗降低 10-20%，年减碳量达 916.8 吨 eCO₂，相当于年植树 4.5 万至 9.1 万棵的碳汇效益。该项目作为安徽省首个 AOA 工艺规模化工程应用示范，不仅验证了该技术在低碳氮比污水条件下的高效脱氮能力与工程可行性，更形成了集“低影响改造+智慧运行+低碳减排”于一体的可复制、可推广技术路径，为长江流域污水处理厂绿色低碳升级提供了标杆样板。

六、项目实施效果和效益分析

项目实施成效显著，综合效益突出。**环境效益方面**，改造后出水 COD、氨氮、总磷、总氮等核心指标持续稳定达到巢湖流域地方标准，主要指标优于地表水IV类，有效削减入湖入江污染物负荷，缓解水体富营养化风险；年减碳 916.8 吨 eCO_2 ，有力支撑污水处理行业绿色低碳转型。**经济效益方面**，通过 AOA 工艺优化与智慧控制系统，碳源药耗降低 50%以上，曝气电耗下降 10–20%，投资回收期约 1.5 年，远优于行业平均水平；且实现不停产、不新增用地改造，大幅节省建设成本与运营损失，降本增效显著。**社会效益方面**，低影响施工杜绝了改造期污水溢流风险，保障城镇水环境安全和居民正常生活；作为安徽省首个规模化 AOA 工艺应用工程，项目形成了可复制、可推广的低碳智慧改造范式，推动水处理技术国产化与行业升级，为长江大保护和高质量发展提供有力支撑。

七、经验总结和发展建议

项目通过构建“高校理论研发-企业工程化落地-场景验证优化”的全链条创新体系，成功实现了实验室技术向规模化工程应用的高效转化。以问题为导向，针对性优化工艺参数与改造模式，解决了长江流域城镇污水处理厂低碳氮比进水、提标改造受限等问题，达到了水质、成本、低碳多重目标。此外，项目将工艺与数智化深度融合，实现了从“经验调控”到“精准智能管控”的跨越，并采用了低影响改造模式，在不中断服务的前提下完成提质升级。

然而，项目面临的主要难点包括：AOA 工艺的技术推广认知壁垒需进一步突破；行业缺乏完善的低碳评价体系，影响了低碳技术市场化推广；中小污水厂资金约束明显，限制了技术下沉应用。为此，建议强化示范引领，加快技术推广；推动标准建设，完善低碳技术评价体系；创新商业模式，解决中小厂改造资金难题；深化技术研发，持续拓展技术边界。这些措施旨在打破行业壁垒，激活低碳技术市场价值，并为复杂水质场景提供更高效的解决方案。

农田面源污染生态阻控多场景实践

申报单位：上海市农业科学院

一、项目目的及意义

在长江大保护背景下，针对农田（尤其是高标准农田）生态空间不足、面源污染相对严重、生物多样性低下等问题，同时针对行业领域技术系统性不强等缺陷，以不占用额外土地、顺应农业生产、满足水利要求为前提，创新性提出了工程为导向的有限空间识别与分析方法，研发了田块排水、沟渠沿程、入河排口的全流程分布式阻控工艺，并实现关键节点技术装备化，最终形成了技术模块化、工艺规范化、建设模式化的农田面源污染生态阻控技术系统（图 1），将生态基础叠加于现有农田基础之上，可有效平衡控效率和成本，并兼顾后续管护的便捷性。

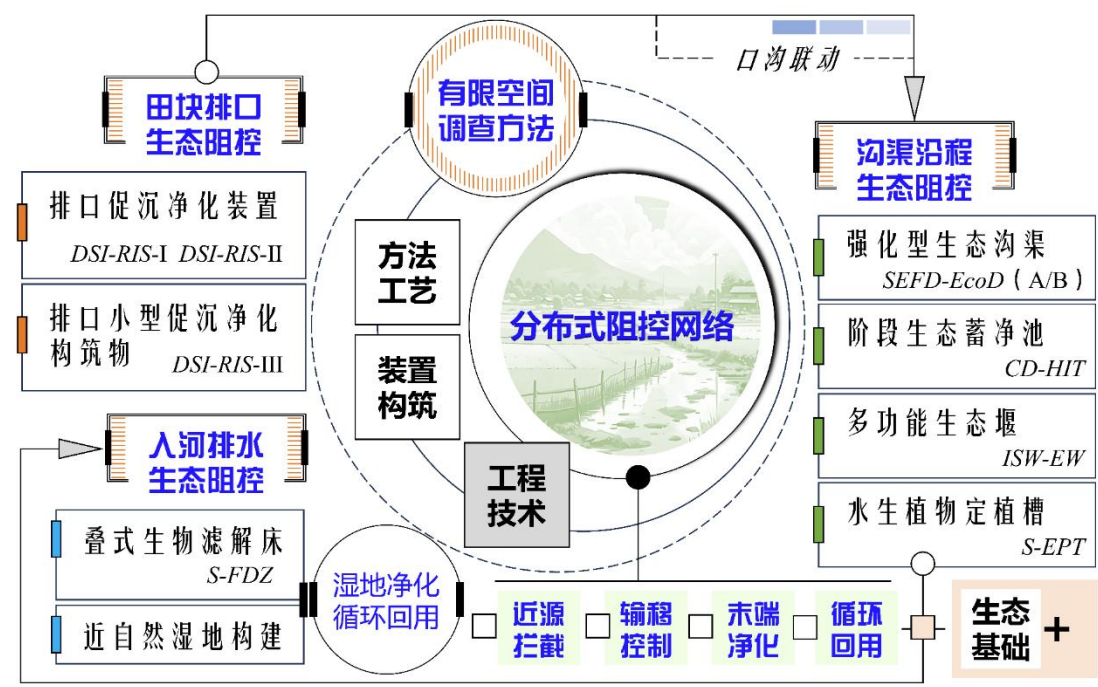


图 1 项目技术系统总体思路与构成图

二、项目总体情况

项目名称：农田面源污染生态阻控多场景实践

项目的设计、建设单位和运行管理单位：试点项目由各区农业技术推广服务中心负责建设，上海市农业科学院指导设计，上海宏烨农机专业合作社、上海宇洲果蔬专业合作社等用户运行管理。

投入经费情况：试点项目总投资约 450 万元。

项目主体业务领域：农业面源污染治理领域。

覆盖范围：总农田面积 1500 亩，以水稻种植为主。

主要功能：在现有农田基础上，构建一套工程导向的农田面源污染生态阻控系统，通过精准诊断、科学规划和模块化工程措施，实现面源污染的源头减量、过程阻控与末端净化，同时提升农田生态服务功能，并兼顾建设成本和后期管护便捷性。

三、项目解决的具体问题

项目具体可解决以下问题：

1、有限空间利用不科学、工程布局盲目低效

针对可利用的“有限空间”识别不精准，导致工艺配置缺乏科学参数的问题，项目提出“有限空间”识别与分析流程，构建空间负荷对比、边界曲率分析等概念与方法，直接为后续工艺与技术配置提供参数。

2、田块近源污染拦截能力弱

针对农田田块排水悬浮物浓度高，污染物易直接进入沟渠的问题，项目研发快滤分流工艺系统，实现近源初步高效拦截，减少污染物向下游输移。

3、沟渠沿程净化功能缺失、适配性差

针对现有土质排沟和硬质排水渠生态阻控能力弱，且不同类型沟渠缺乏针对性改造问题，项目提出二级沿程阻控工艺，显著提升沿程阻控能力，同时改善生境、提高生物多样性。

4、入河排口末端净化不足、水资源无法循环利用

针对农田退水直接入河或小微水体，缺乏最后生态屏障的问题，项目构建三级阻控工艺，实现深度净化与尾水回用，减少入河污染负荷。

总之，项目通过技术模块化、工艺规范化、建设模式化的构建，形成农田面源生态阻控系统，平衡阻控效率、建设成本与后期管护便捷性。

四、项目创新点

以农田面源阻控效率、成本和维护三者平衡为出发点，将生态环境基础叠加于农田原有基础之上，提升生态韧性。构建了工程建设为导向的调查分析方法；确立了多套适应长江流域农田面源污染阻控的工艺技术系统；部分技术实现了装

备化，并可进行模块化加工与规范化安装，降低了建设与运维成本；形成了两类不同场景的模式化应用。具体如下：

1、工程设计为导向的调查分析方法与思路

提出了“有限空间”识别与分析流程，构建了工程建设为导向的空间负荷对比、边界曲率分析等概念与方法，为工艺与技术配置提供直接的参数，填补了该领域工程建设空白。（获发明专利 4 项，软著 1 项）

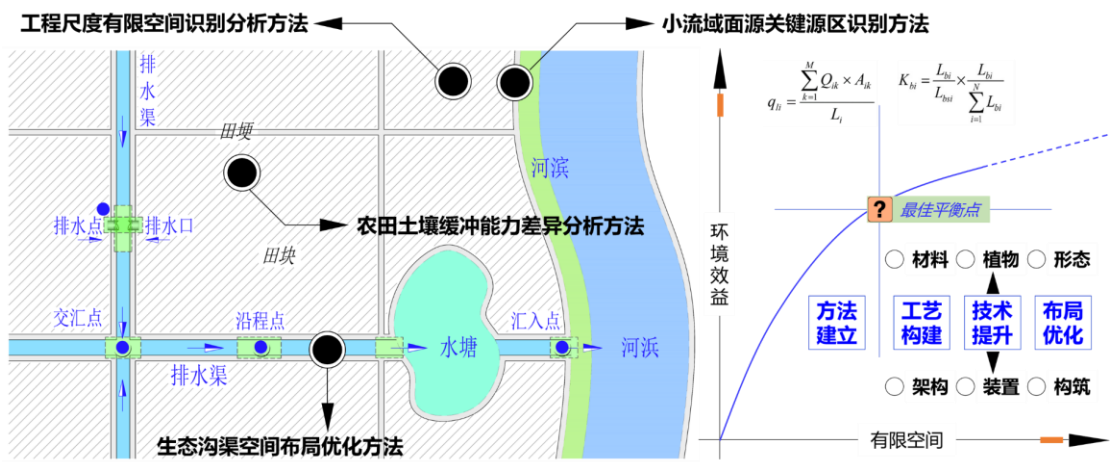


图 2 工程设计为导向的调查场景与思路

2、田块排水阻控工艺技术（一级阻控：近源拦截）

针对工程区田块排水悬浮物高等问题，首次提出了近源拦截的快滤分流工艺系统（*DSI-RIS*），初步拦截部分污染物，并根据不同应用场景，研发了快滤净化装置和构筑物。（获发明专利 1 项）

（1）田块排水阻控 *DSI-RIS*-II 工艺装备（与硬质排渠配合）

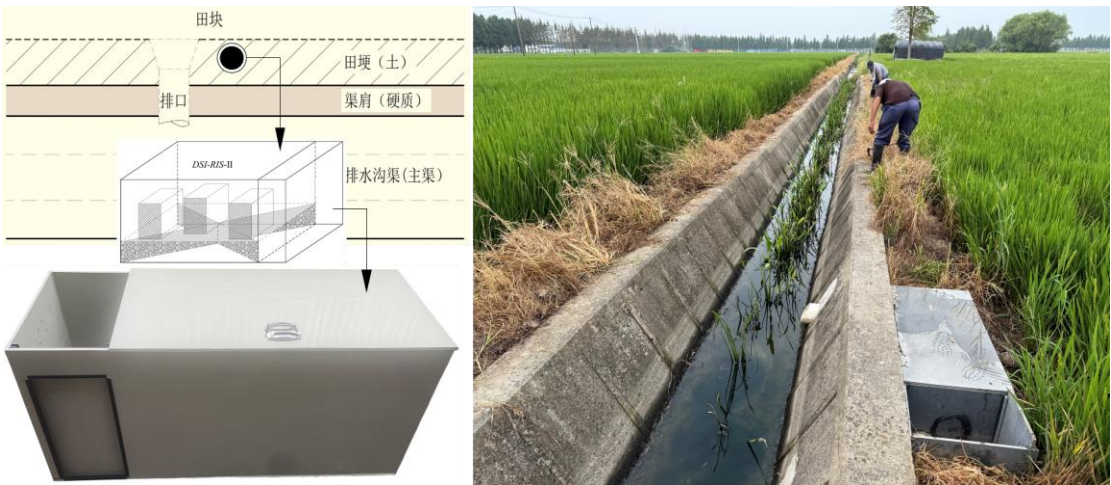


图 3 田块排水阻控 *DSI-RIS*-II 工艺装备设计及实景

(2) 田块排水阻控 *DSI-RIS-III* 工艺构筑 (与生态沟渠配合)



图 4 田块排水阻控 *DSI-RIS-III* 工艺构筑设计及实景

3、沟渠沿程阻控工艺技术 (二级阻控: 输移控制)

沟渠是面源污染阻控的主要场所之一, 针对农田土质排沟及硬质排渠, 针对性的进行生态阻控工艺配置。(获发明专利 2 项, 实用新型 1 项, 软著 1 项)

(1) 断面强化净化型生态沟渠 (*SEFD-EcoD-A*)

在现有生态沟渠构建思路的基础上, 采用阶段式断面改造, 强化局部净化效率, 提升生态沟渠阻控能力。

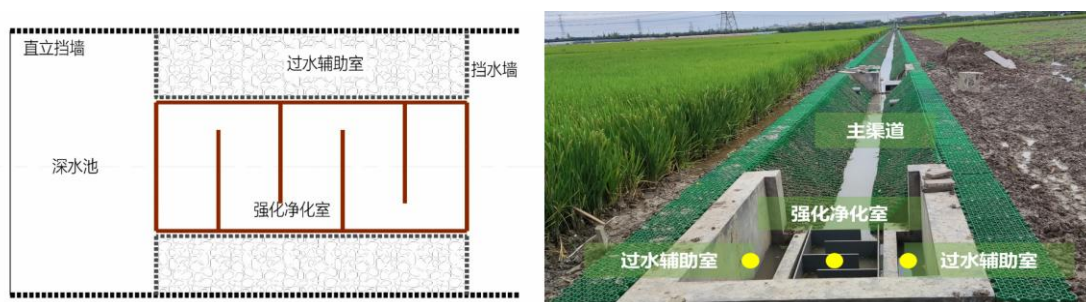


图 5 断面强化净化型生态沟渠 (*SEFD-EcoD-A*) 设计与实景

(2) 薄层流接触氧化型生态沟渠 (*SEFD-EcoD-B*)

对于宽度 $\geq 3.0\text{m}$ 土质排沟, 可采用局部薄层流接触氧化技术系统, 通过堰坝、基底等构建, 形成立体分层流动, 提高生态沟渠阻控净化能力。

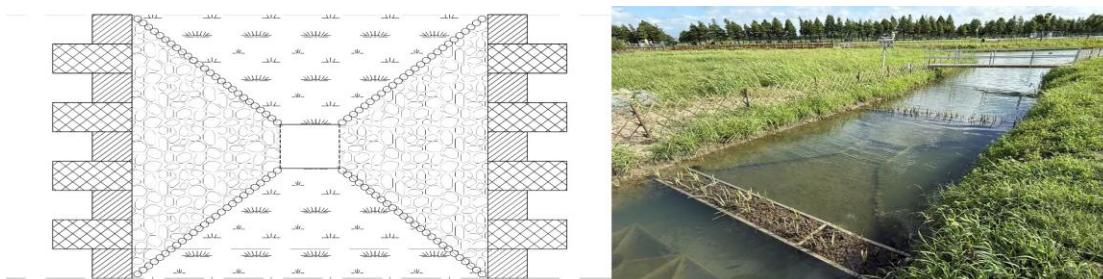


图 6 薄层流接触氧化型生态沟渠 (*SEFD-EcoD-B*) 设计与实景

（3）硬质排渠生态化改造技术系统

针对硬质排水渠，建立多功能生态堰+植物定植槽+生态蓄净池改造工艺系统，重构沟渠生态，提高污染物阻控能力，并有利于生物多样性提高。

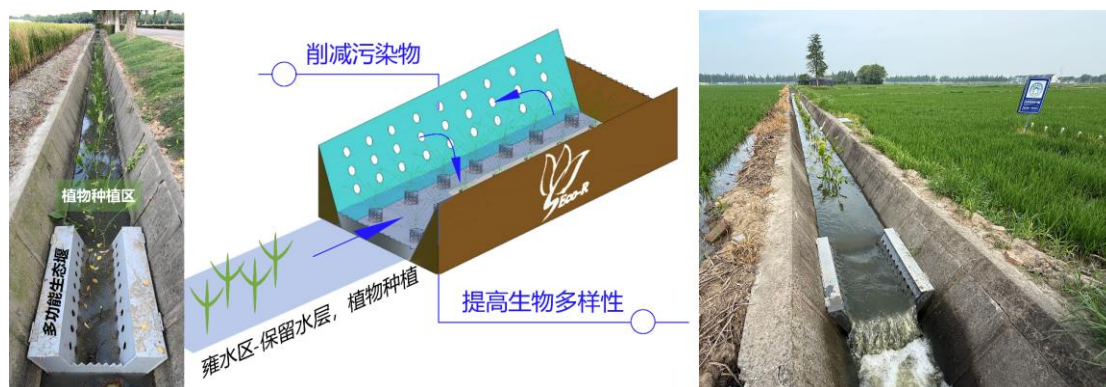


图 7 硬质排渠改造多功能生态堰（ISW-EW）设计与应用

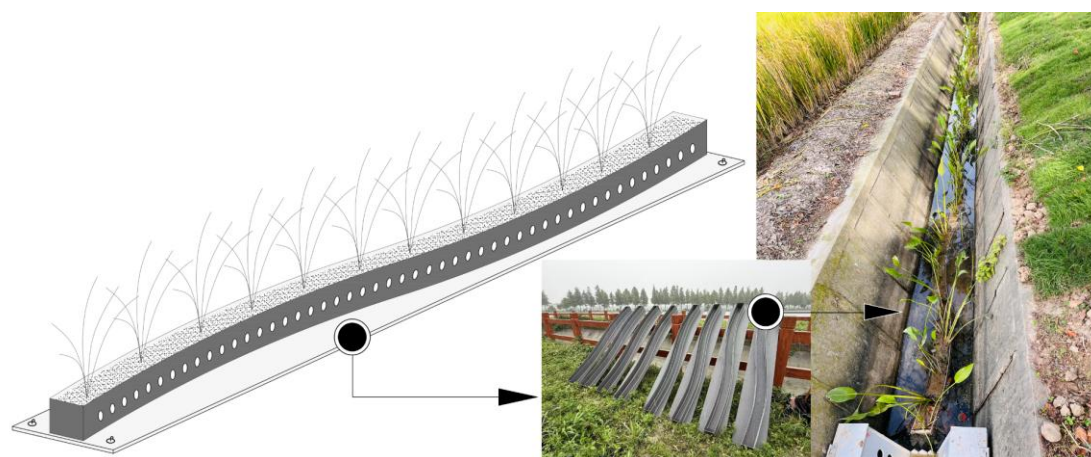


图 8 硬质排渠改造 S 型植物定植槽（S-EPT）设计与应用

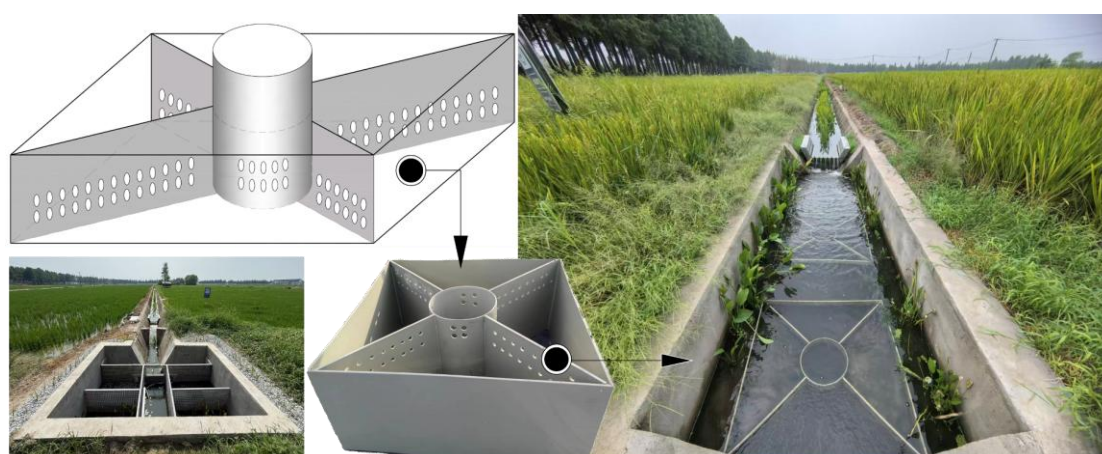


图 9 硬质排渠改造生态蓄净池及装备（CD-HIT）设计与应用

4、入河排口阻控及回用技术（三级阻控：末端净化与回用）

湿地系统是面源污染阻控的另一个重要场所。对于具备小型河流、水塘等小

微水体区域，采用近自然方式构建生态湿地，调蓄净化农田退水及循环回用；不具备上述条件，可采用叠式生物滤解床系统，建设入水前的最后一道生态屏障。（获发明专利 2 项）

（1）近自然循环湿地系统构建技术（形式一）



图 10 近自然循环湿地构建技术设计与应用

（2）叠式生物滤解床（*S-FDZ*）技术系统

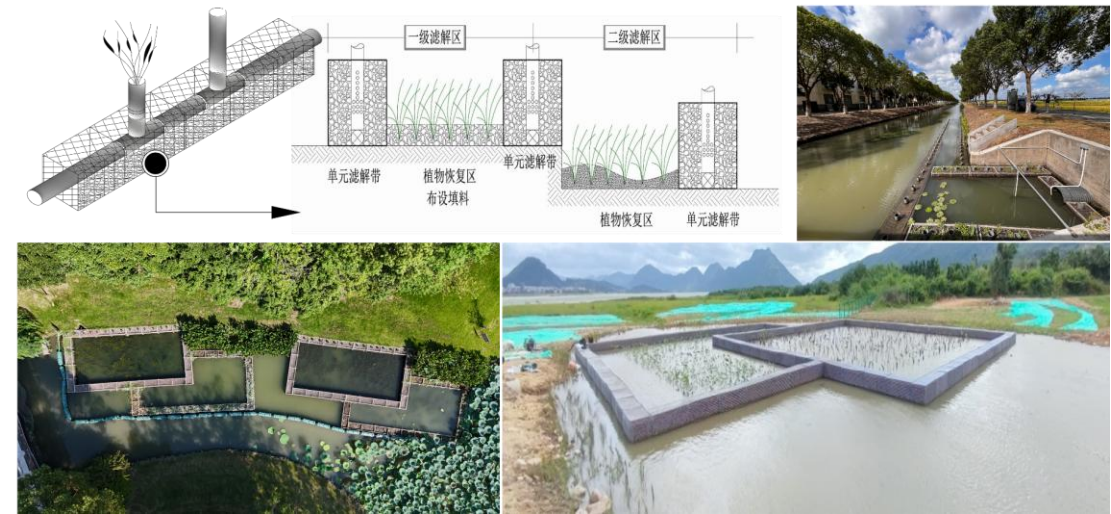


图 11 叠式生物滤解床（*S-FDZ*）设计与应用

五、应用场景和运行实例

本项目是农田生态阻控多场景实践的展现，紧密结合了长江中下游平原河网区稻麦轮作农田的基本特点，区分不同工况条件（退水沿程有限空间差异），以空间要素为依托，形成了两大类不同场景下的应用。

案例 1：最优要素应用场景（上海松江、闵行）

总规模 700 亩（水稻为主，部分小龙虾轮作），具备完整的沟渠塘空间，但排水路径多样。主要采用薄层流接触氧化型生态沟渠、近自然湿地（循环回用）等工艺进行建设（图 12）。阶段效果表明：阻控系统对 TN、TP 的平均去除率分别可达到 50.0%和 45.0%以上，力争在稻季循环回用率达到 40%以上（即大部分时间近零排放）。



图 12 最优要素应用场景生态阻控工程案例

案例 2：单一要素应用场景（上海奉贤、金山）

总规模 800 亩（稻菜），有限空间包括田块排口、土质排沟、硬质排渠及入河道滨水区域。采用田块排口阻控、断面强化净化型生态沟渠、硬质排渠生态化改造、滨水叠式生物滤解床等工艺建设生态阻控网络（图 13）。2 年监测结果：

施肥期出水总氮（TN）和总磷（TP）平均去除率分别为 42.9%、31.9%；非施肥期为 31.0%、25.8%。



图 13 单一要素应用场景生态阻控工程案例

六、项目实施效果和效益分析

实施效果：项目通过有限空间识别与“近源拦截-输移控制-末端净化与回用”三级阻控工艺，在不同农田场景下实现了良好的污染物削减效果，总氮（TN）和总磷（TP）平均削减率分别可达到 30-50%和 25-40%。同时，技术系统采用嵌入式改造模式，不占用额外土地，在这一过程中，改善生境，使水生植物覆盖率提

高，生物多样性得到明显改善，部分治理区域已初步形成稳定的自净能力。

在经济效益方面：技术系统依托现有排水设施进行嵌入式改造，无需新增土地，单位面积建设成本降低；模块化装备有效缩短了施工周期，进一步压缩了人工和材料费用；袋装填料便于定期更换，维护操作简便，使得后期管护费用降低，长期经济效益显著。

在社会效益方面：为农田面源污染治理提供了系统性、可复制的解决方案，有效填补了行业技术碎片化的缺陷，有力推动农业绿色转型；通过改善农田及周边水体水质、减少入河污染负荷，不仅保护了水生态安全，还显著提升了乡村人居环境。

总之，在保障粮食生产安全的前提下，项目实现了污染控制与生态提升的双赢，高度契合国家和地方乡村振兴的要求，为我国农业绿色可持续发展提供了可复制、可推广的技术路径，展现出较强的政策契合度与社会认可度。

七、经验总结和发展建议

项目构建的主要模式：农田面源污染生态阻控技术系统构建的核心特点在于工程导向、全流程分布式以及模块化叠加。首先，以有限空间识别与分析为核心的工程调查方法，定量空间负荷对比、边界曲率分析等数据，为后续工艺配置提供直接可靠的参数支撑。其次，在阻控工艺实施层形成田块近源、沟渠沿程、入河排口末端的三级分布式阻控模式。同时，将生态沟渠空间布局优化、尾水污染负荷解析、土壤缓冲能力评估等方法与三级分布式阻控系统的具体工程措施有机结合，实现技术模块化、工艺规范化、建设模式化，确保系统长期稳定运行。

经验主要体现在以下几个方面：一是不占用额外土地，所有措施均嵌入现有排水设施与有限空间，顺应农田（尤其是高标准农田）的平整化要求和水利功能，化解了生产与生态之间的矛盾；二是坚持工程导向的精准决策，有效避免了传统经验式布局的盲目性，大幅提高了资源配置效率；三是采用模块化与标准化设计，显著降低了建设与管护成本，便于复制推广；四是实现了多目标协同，在高效削减总氮、总磷和悬浮物等面源污染物的同时，改善生境，提升生物多样性，耦合面源污染控制与农田生态系统服务功能。

存在的难点和问题：尽管项目取得了良好成效，但在实际应用中仍面临一些难点与问题。比如，不同区域适配性具有挑战性，土壤类型、气候条件和作物种

植结构的显著差异需要大量本地化调研工作；虽然模块化设计降低了维护难度，但基层农户或管护队伍的技术水平参差不齐，进而影响长期效果的稳定性；经济效益量化与推广激励机制仍有不足，初期投入仍需一定政策支持，导致部分地区推广积极性不高。

意见建议：为进一步提升项目成熟度与推广价值，后续应加强动态监测与智能升级，从而提升有限空间识别和工艺参数的动态调整能力；推进区域化参数构建，建立参数本地化数据库，提高体系的区域适配性；将管护绩效纳入高标准农田建设考核指标，确保长期效果稳定。

总之，该项目已形成较为成熟的模块化技术路径，未来聚焦智能化、区域化、长效化方向，通过政策支持、技术迭代与服务体系的协同完善，推动从示范项目向大规模推广应用转变，为全国农田绿色可持续发展提供更加坚实的科技支撑。

洪湖山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目

申报单位：中交第一航务工程局有限公司

联合申报单位：中交一航局武汉建设投资有限公司、中交河海工程有限公司、北京爱地生态环境有限公司

一、项目目的及意义

洪湖是中国第七大淡水湖、湖北省第一大湖，是长江中下游重要的调蓄湖泊和生态屏障。近年来随着社会发展，入湖污染负荷日益增加，生态环境持续恶化。2022 年，长江荆江段及洪湖流域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程作为国家“十四五”第二批山水林田湖草沙一体化保护和修复工程开始实施。洪湖山水项目为其核心板块，旨在通过系统性、整体性的治理策略，统筹解决洪湖流域面临的生态退化、环境污染等问题，重构“江湖联动、人水和谐”的生态格局。项目的实施推动了流域生态环境与经济发展协同共进，形成“技术修复—系统治理—民生共赢”的可复制范式，为长江流域同类湖泊生态治理提供实践参考，助力长江经济带高质量发展。

二、项目总体情况

洪湖山水林田湖草沙一体化保护和修复工程位于湖北省洪湖市，建设单位为洪湖市兴瑞投资有限公司，设计单位为湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司，由中交第一航务工程有限公司组建的联合体承建，洪湖市市政府各部门组建洪湖市山水林田湖草沙一体化保护和修复工程工作领导小组办公室，负责整个项目的统筹调度。项目总投资约为 16 亿元，由长江—洪湖段岸线生态修复工程项目、洪湖国家级自然保护区（洪湖南片区）生态修复工程项目、洪湖湖滨生态缓冲带建设工程、洪湖茶坛岛等区域生态移民及修复工程、江汉平原水产养殖生态化改造与污染治理（洪湖片区）试点项目五个单位工程组成。项目累计完成 26.4 公里长江-洪湖段岸线生态修复、8 万平米城市生活垃圾填埋场生态修复、约 9000 亩养殖尾水治理、270 余公里生态沟渠治理、打造 158 万平米生态斑块、恢复 180 万平米水陆植被等工程内容，从长江岸线、湖泊、河流、湿地、植被等多维度全面改善洪湖流域生态环境，覆盖洪湖市城区、沿江 6 个乡镇级沿江 45 个村庄，

服务人口约 50 万人。项目实施以来，有效促进了洪湖水质稳定提升、生物多样性恢复、人居环境改善、水产养殖业绿色转型、生态旅游业蓬勃发展等核心功能。

三、项目解决的具体问题

1、长江岸线生态退化问题：解决洪湖段长江岸线岸土裸露、防护林老化、水土流失严重问题，破解岸线生态防护功能薄弱、人居环境与生态绿廊建设脱节的痛点。

2、城市固废与空气污染难题：攻克洪湖城市垃圾填埋场渗滤液重金属、氨氮超标难题，减少渗滤液扩散污染，解决空气恶臭长期影响居民生活的问题，完成中央环保督察重点整改任务。

3、农业面源污染恶性循环问题：破解江汉平原水产养殖业尾水直排导致的湖水富营养化问题，解决养殖积淤严重、水体自净能力低下，以及“湖体污染反伤养殖”的生态与民生双重困境。

4、湖泊生态系统退化问题：解决洪湖水质持续恶化、沉水植被几近消亡、湖底荒漠蔓延的生态危机，提升洪湖水质，恢复湖泊生态系统结构和生物多样性支撑功能。

5、环湖湿地功能断裂问题：破解长期围垸养殖造成的环湖水系割裂、湿地生态链断裂难题，打通环湖水体循环堵点，恢复湿地水文连通性与生态调节功能。

6、河湖水系连通不畅问题：解决流域内河道防洪淤积严重，排涝能力减弱、功能失效问题，破解沟渠与河湖水体连通性差、水体交换能力弱的问题，实现流域水系纵向、横向、垂向三维空间上连通，引导河湖实现自我修复和改善。

四、项目创新点

1、长江岸线生态修复融合模式：创新“生态防护+人文赋能”岸线治理模式，摒弃简单绿化，以“分段精治、换种提质”为原则精选本土耐候树种，融合洪湖红色文化打造特色生态景观，实现岸线生态功能与人文价值双重提升。

2、渗沥液全量化处理工艺：突破传统渗沥液生化处理局限，创新采用 DTRO 膜技术+MVR 蒸发+母液协同焚烧全量化处理工艺，日处理能力达 500 立方米，攻克渗滤液重金属、氨氮超标难题，出水水质稳定达标，为同类中小城市垃圾填埋场治理提供了经济可行的技术路径。

3、养殖尾水精准治理体系：升级传统“三池两坝”为“四池三坝”工艺，

集成纳米微管增氧、生态浮岛拦截、生态隔离带吸附等技术，实现养殖尾水从“基础净化”到“精准调控+生态修复”的跨越，部分区域水质从劣V类提升至Ⅲ类，构建起“物理拦截+植物吸附+微生物分解”的立体净化网络，适配大规模水产养殖区污染治理需求。

4、水生植物恢复深化产学研用链条：与中科院武汉植物园联合成立“水生态环境恢复技术实验室”，系统开展水生植物种质资源筛选与适应性培育，优化沉水植物群落配置，基于不同区域底泥特性科学配置 18 种水生植物组合，使大湖内水生植物成活率从不足 40%提升至 90%，水体透明度提高 1.5 倍，氮磷负荷削减率达 50%，为湖泊水生植物恢复提供可量化技术路径。

5、生态友好型施工模式：构建全方位低干扰施工体系，创新采用“无人机运苗+人工种植”环保作业模式，大幅削减机械使用量，实现湖中作业零污染；推行“错峰作业+生态隔离”施工原则，在候鸟越冬期暂停湖心区施工，架设数十公里生态隔离网，最大限度减少工程对野生动物栖息繁衍的影响，实现生态治理与生物多样性保护同步推进。

五、应用场景和运行实例

1、长江-洪湖段岸线生态修复

作为维系长江与洪湖间的“生态纽带”，曾岸土裸露、林带衰颓、水土流失严重。项目团队以“分段精治、换种提质”为方略，精选乌桕、池杉等本土树种，融合红色文化打造“红叶漫堤”景观。累计栽植乔灌木 7.2 万株、铺设草皮 20 万平方米，如今沿线景观焕然一新，林木葱郁蓄积增长，昔日的生态伤疤已蝶变为人水相依的活力长廊。



图 1 长江岸线生态修复前



图 2 长江岸线生态修复后

2、洪湖市垃圾填埋场生态修复

洪湖市垃圾填埋场占地 65 亩，恶臭气体常年弥漫，是周边居民多年的“心头刺”。项目采用“垃圾减量化—渗滤液全量化处理—垂直帷幕—堆体整形—封场覆盖系统”的全方位治理模式，运用“预处理+两级 DTRO+MVR+母液焚烧”的先进渗滤液全量化处理工艺，设置塑性混凝土墙结构环场帷幕，布设 5 层封场结构层，完成 8 万平方米埋库区覆绿，垃圾场蝶变为绿意盎然的生态公园，并被评选为 2025 年中南六省（区）生活垃圾填埋场生态修复示范案例。



图 3 垃圾填埋场生态修复前



图 4 垃圾填埋场生态修复后

3、江汉平原水产养殖生态化改造与污染治理

江汉平原水产养殖业受洪湖水水质恶化影响遭受重创，生态危机与民生困境交织。项目团队因地制宜重构空间，创新清淤模式，克服施工受限难题，将传统的“三池两坝”升级为“四池三坝”尾水处理工艺，搭配纳米微管增氧技术及生态浮岛、隔离带，实现尾水精准调控与生态修复。净化后尾水水质从V类提升为Ⅲ类，预计每年可削减 CODMn 57.38 吨、TN 11.47 吨、TP 2.3 吨，水体自净能力大幅提升，水产品质量产量双增长，有力推动当地绿色农业转型升级。



图 5 三八湖渔场生态化改造前



图 6 三八湖渔场生态化改造后

4、洪湖水生植物恢复

针对湖区水生植物成活率低难题，项目团队持续深化产学研合作，与中国科学院武汉植物园联合成立“水生态环境恢复技术实验室”，采用“无人机运苗+人工种植”+“错峰作业”的生态友好型的施工模式，累计恢复水生植被 18 种，面积超万亩，重现“水下森林”盛景。如今，湖区夏日荷花连片绽放，冬日候鸟成群起舞，曾经的“水下荒漠”已变回生物多样性的“宝库”。



图 7 大湖水生植物恢复前



图 8 大湖水生植物恢复后

5、环湖湿地生态修复

洪湖茶坛岛环湖水域因长期围垸养殖导致水系割裂、湿地功能退化。项目团队通过拆除阻隔水系的围垸堤坝，打通水体循环“堵点”，按湿地水文梯度布局，打造 12 处“生态驿站”，成功营造 158 万平米生态斑块，恢复 180 万平米水陆植被，让环湖湿地的生态拼图重归完整。在 2025 年洪湖马拉松赛事中，由项目团队精心打造的金湾湿地沿线 4 公里被誉为“洪马”最美赛道，并通过参赛者和媒体镜头的传播，让生态治理成果跨越赛场、走向大众，成为生态治理助力区域发展的生动范本。



图 9 金湾湿地治理前



图 10 金湾湿地治理后

六、项目实施效果和效益分析

1、生态效益显著，长江之肾重焕生机

洪湖水质从劣Ⅴ类稳定提升至Ⅳ类以上，氮磷总量下降 30%，创近 5 年来最好水平。累计恢复乔木 15 万株、水生植物超万亩，湿地植被覆盖率从 13.7% 提升至 32.5%，累计监测到越冬水鸟 28 种 37818 只，含白鹤及多种国家二级保护鸟类，生物多样性日益丰富。同时完成 9000 亩养殖尾水、270 余公里生态沟渠治理和 1 座垃圾填埋场修复，从源头大幅削减入湖污染负荷。

2、社会效益广泛，美誉度持续提升

洪湖人居环境实现蝶变，垃圾场变公园，黑臭水体变生态廊道，斑驳岸线变生态绿廊，市民获得感与幸福感显著增强。项目通过共同缔造、应急抢险、志愿服务践行社会责任，获当地政府与群众高度认可，省、市各级领导多次调研观摩并高度评价治理成果。新华网、人民网等主流媒体专题报道项目，全方位展现洪湖生态蝶变与团队治理实践，示范效应持续彰显。

3、经济效益凸显，绿水青山流金淌银

洪湖生态颜值成功转化为旅游价值，全市年旅游人数突破 830 万人次，同比增长 16.4%，2025 年首届环洪湖马拉松赛事举办，项目打造的生态美景成为赛事亮眼背景板。生态养殖推动农业转型升级，清水蟹亩产翻倍，养殖户每亩增收 1500 至 2000 元，水产品质量与产量双提升，实现了生态效益与民生福祉的双赢。

七、经验总结和发展建议

1、成功经验总结

（1）坚持系统治理理念，锚定长江大保护核心要求：以山水林田湖草沙一体化理念为指导，统筹长江岸线、湖泊、湿地、农业区、乡村沟渠等全流域治理，破解长江中游湖泊“污染-生态退化-发展受限”的连锁问题，实现流域生态系统整体修复，彰显长江大保护“系统性、整体性、协同性”原则。

（2）强化科技赋能核心，深化产学研深度融合：联合顶尖科研院所成立专项实验室，针对固废处理、养殖尾水治理、植被恢复等痛点开展关键技术攻关，实现“技术研发-工程应用-效果验证”闭环，为生态治理提供坚实技术支撑，打造“科技+生态”的治理样板。

（3）创新生态民生双赢，推动共建共享共治：摒弃“重治理、轻民生”传

统模式，将生态工程与乡村振兴、民生服务深度融合，融入地方“共同缔造”理念，让群众从生态治理的“旁观者”变为“参与者”和“受益者”，实现生态效益与民生福祉协同提升。

（4）坚守生态友好原则，实现治理与保护同步：将生物多样性保护贯穿施工全过程，采用“无人机运苗+人工种植”、错峰作业、生态隔离带等低干扰施工模式，最大限度减少工程对生态环境的扰动，彰显长江大保护“尊重自然、顺应自然、保护自然”的生态初心。

2、存在的难点和问题

（1）流域长效管护机制有待完善：洪湖流域跨区域、多主体管理特征明显，后续生态设施、生态沟渠、河湖连通水系的运维，以及水质常态化监测的跨部门、跨乡镇协同机制尚需进一步健全。

（2）生态产品价值转化路径较单一：目前生态价值主要通过生态旅游实现转化，生态养殖品牌化、生态文创开发、湿地研学等多元转化路径尚未充分挖掘，生态产品附加值有待进一步提升。

（3）跨流域协同治理力度需加强：洪湖受四湖流域上游客水输入影响较大，跨流域污染联防联控机制需进一步完善，上游入湖污染负荷管控难度较大，影响治理效果的长期稳定性。

3、发展建议

（1）提升生态治理智能化水平：借鉴长江流域城市湖泊智慧治理经验，构建洪湖生态智慧监测平台，集成水质、生物、水文、气象等多维度监测数据，实现生态风险智能预警、治理措施精准调度，推动生态治理向数字化、智能化升级。

（2）拓宽生态产品价值转化路径：依托洪湖生态资源，打造“生态养殖+生态旅游+生态文创+湿地研学”融合产业链，培育洪湖清水蟹、野生红莲等绿色农产品品牌，开发红色文化与生态景观结合的特色文旅产品，推动生态效益向经济价值持续转化。

（3）持续深化环保科普与宣传：以洪湖生态治理成果为载体，建设长江大保护科普教育基地，结合中小学研学、社区科普、志愿者行动等形式，开展常态化环保宣传活动，普及河湖、沟渠生态保护知识，将绿色理念植入群众生活，营造共护长江、共守洪湖的社会氛围。

（4）推广洪湖治理模式，赋能长江大保护：将洪湖“技术修复-系统治理-民生共赢”模式进行系统化总结，提炼可复制、可推广的技术范式和管理标准，在长江流域同类淡水湖生态治理中推广应用，并结合各地实际优化调整，让洪湖经验成为长江大保护的重要实践支撑，为长江经济带高质量发展持续贡献力量。

农业面源污染防控模式创新与实践

申报单位：内江市资中生态环境局

联合申报单位：中国环境科学研究院

一、项目目的及意义

随着我国点源污染得到有效控制，农业面源污染已成为制约水环境质量持续改善的关键因素。习近平总书记强调，要以钉钉子精神推进农业面源污染防治。近年来，资中县在农业面源污染防控方面采取了一系列措施，并取得阶段性成效，但仍存在污染底数不清、排放路径不明、治理措施针对性不强等问题。为破解治理难题，补齐经验短板，资中县坚持“抓重点、分区治、精细管”思路，应用流域面源污染“测-溯-算-治-管”全链条防控技术体系，系统推进农业面源污染综合防控，旨在实现农业面源污染防治工作的规范化、常态化；探索形成适合丘陵山区特点的治理路径、政策与方法，为全省乃至更大范围提供可复制、可推广的实践经验；推动农业绿色转型和可持续发展，为资中县农业高质量发展提供坚实保障。

二、项目总体情况

资中县农业面源污染防控工作在全县统一领导下，由中国环境科学研究院提供技术支撑，内江市资中生态环境局、资中县农业农村局及 6 个乡镇协同推进。防控覆盖麻柳河与球溪河流域，涉及 6 个乡镇，总投资约 1800 万元。

资中县构建了“人工采样+自动监测+平台预警”的多层级监测网络，形成覆盖“源头-沟渠-河流”的全过程农业面源污染监测体系。该体系共布设 30 个手工监测站、6 个水文水质自动监测站、1 个气象站和 1 个农业面源野外观测站，实现了关键断面水质水量同步在线监测与水质实时预警。通过应用流域面源污染“测-溯-算-治-管”全链条防控技术体系，精准识别了农业面源污染关键源区。结合丘陵地区实际，聚焦养殖业与种植业污染防治，采取优化养殖方式、推行畜禽粪污绿色种养循环、建立粪肥流向全程追溯监管体系等措施，系统治理畜禽养殖污染；同时，推广应用绿色防控、弥雾机精准喷药等技术，深入推进种植业统防统治与化肥农药减量化；在球溪河、麻柳河等流域，建设岸线生态缓冲带、生态拦截沟、植被恢复工程和水生森林系统等，对沿线农业面源污染进行有效阻隔和

净化。2025 年底，就全县农业面源污染治理开展了绩效评估工作。

三、项目解决的具体问题

1、建立监测体系，填补农业面源污染监测空白

针对部分地区缺乏系统监测能力的问题，项目以麻柳河、球溪河流域为单元，综合考虑气象水文、水质通量等因素，覆盖入境、出境及重点区域，科学布设了 30 个地表水手工监测点位、6 个水质水量自动监测站、14 个地下水监测点、1 个农业面源野外观测站及农田径流实验小区，构建了“源头-过程-末端”的农业面源污染全过程监测网络，实现了对污染状况的系统化、常态化监控。

2、推动绿色循环，破解粪污处理与化肥减量难题

针对畜禽粪污处理难、化肥依赖度高等问题，创新建立粪肥绿色种养循环长效机制与流向全程追溯监管体系。通过沼液高效还田，项目区化肥施用量平均减少 12-15%，耕地土壤有机质提升 0.1-0.5%，全县畜禽粪污综合利用率达 90%以上，有效促进了种养结合与农业投入品减量化。

3、改善流域水质，提升重点区域水环境质量

防控工作开展前，石板河、白鹤河流域水质为劣 V 类，张家溪流域水质不能稳定达到 III 类标准。通过系统治理，石板河、白鹤河流域水质分别改善至 IV 类和 III 类，张家溪流域水质稳定在 III 类，显著提升了农业集中种植区及小流域水环境质量，有效回应了周边群众对良好水环境的诉求。

四、项目创新点

1、创新构建丘陵山区“测-溯-算”技术系统

针对丘陵山区流域面源污染“测不准、溯不清、算不明”的技术难题，系统构建了“监测-溯源-核算”（“测-溯-算”）一体化定量评估技术系统，实现污染评估从经验判断向定量评估的转变。在“测”的环节，构建“人工采样+自动监测+平台预警”的多层级监测网络，形成覆盖“源头-沟渠-河流”的全过程农业面源污染监测体，实现监测能力从无到有、从点到网的提升。在“溯”的环节，基于汇水路径、源强和输移过程，建立下垫面阻力基面评价指标体系与最小累积阻力模型，精准识别了防控区域污染风险空间分布，形成优先管控清单。在“算”的环节，通过建设农田径流野外观测实验区，监测氮、磷、COD 等径流污染物浓度，填补本地本底数据空白，并结合实测径流流失系数与入户调查数据，核算

污染物排放强度，为治理优先级提供依据。以此为基础，创新构建农业面源污染治理与监督指导信息系统，推动监管向数字化、智能化转型。

2、创新构建“2311”畜禽粪污资源化利用模式

系统构建“两条循环链、三级循环路径、一个市场主体、一套监管机制”的“2311”畜禽粪污资源化利用新模式。一是创新“牛-肥-果”、“猪-沼-果”两条循环链条。前者依托有机肥生产企业，将肉牛养殖废弃物转化为商品有机肥，已带动全县新（改）建垫料发酵床圈舍 6.69 万平方米，推广率 77%。后者通过“管网输送+社会化服务”实现沼液高效还田，如铁佛养殖场铺设管网 26 公里，年消纳沼液约 1.3 万吨，服务面积超万亩，区域粪污综合利用率稳定在 90%以上。二是构建县域大循环、区域中循环、农户小循环三级利用路径。三是培育有机肥生产龙头企业，推动市场化运作。四是建立粪肥流向全程追溯监管机制。该模式累计建设种养循环示范区 5.2 万亩，综合利用粪污 6.5 万余吨，实现化肥减量 12-15%、土壤有机质提升 0.1-0.5%，亩均节本增效 520 元。模式通过成本分摊机制已在全县 22 个乡镇推广，累计利用粪肥 36.9 万吨，实现节本增效约 1.41 亿元。

3、创新建立农业面源污染防治绩效评估体系

为科学量化评估治理成效，探索建立了“可量化、可考核、可追溯”的农业面源污染防治绩效评估体系。体系涵盖治理工作、治理成效、流域水环境质量改善 3 大部分 20 个具体指标，采用综合评价法，以 2020 年为基准年进行评估，客观反映了治理水平，为防控工作的精准推进和长效管理提供了科学依据。

五、应用场景和运行实例

应用场景主要集中在麻柳河和球溪河流域农业面源调查、监测、溯源、治理和绩效评估。

1、农业面源污染监测体系构建

以麻柳河、球溪河流域为单元，综合考虑气象水文、水质通量等因素，覆盖入境、出境及重点区域，布设了 30 个地表水手工监测点位、6 个水质水量自动监测站、14 个地下水监测点、1 个农业面源野外观测站及农田径流实验小区，构建了“源头-过程-末端”的农业面源污染多层次监测网络。

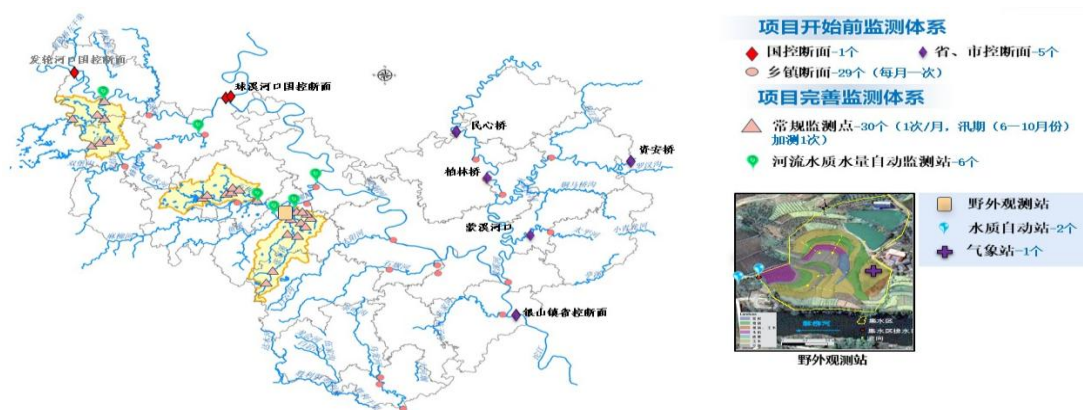


图 1 农业面源污染监测体系



图 2 农业面源野外观测站

2、畜禽粪污绿色种养循环模式构建



图 3 “养殖户+有机肥企业+种植基地”商品化生产模式

一是建立“养殖户+第三方服务机构+种植基地及受益农户”就近消纳模式和

“养殖户+有机肥企业+种植基地”商品化生产模式，公开遴选运输、施用服务主体，实现粪肥“产、运、施”一体化服务，拓展资源化利用渠道。持续对全县老旧畜禽规模养殖场进行畜禽粪污资源化利用处理配套设施设备改造升级。

二是构建粪肥流向全程智慧追溯监管体系。运用物联网与大数据技术，建立覆盖“收集—运输—处理—还田”全链条的数字化监管平台，实现粪肥流向闭环管理。通过为 12 辆运输车辆加装视频、传感器与定位终端，实时采集作业数据；管理平台设置多类用户端口，集成订单、轨迹、计量、补贴等一体化功能，实现全流程可视、可查、可溯。



图 4 粪肥流向全程智慧追溯监管体系

3、流域生态治理修复末端治理

在石板河流域、白鹤河流域实施河流生态保护修复工程，建设岸线恢复工程 1000 平方米，水生森林系统构建工程 15000 平方米，生态沟渠约 450 米、生态拦截沟约 5600 米、河道护岸绿化修复约 5400 平方米、沟渠末端堰塘修复约 500 平方米、河面清杂约 34200 平方米，建立水域水生植物恢复系统与土著鱼类投放。



图 5 流域生态治理修复末端治理工程

六、项目实施效果和效益分析

1、社会效益显著

防控工作实施有效推动了农村人居环境持续改善，促进了农产品质量与食品安全水平提升。通过治理，农业面源污染负荷得到有效削减，农民健康与生活品质获得保障，群众满意度持续提高。同时，通过推广绿色生产技术，助力农业节本增收，为乡村振兴注入了绿色发展动能。

2、环境效益突出

一是土壤质量有效提升，在绿色种养循环示范区内，化肥施用量减少约 15%，土壤有机质含量提升 0.5%，土壤肥力与地力显著增强。二是流域水质明显改善，白鹤河出口断面氨氮、总磷浓度分别下降 48%和 26%；石板河全流域水质提升，出口断面高锰酸盐指数、总磷、氨氮浓度分别下降 22%、9%和 6%。三是人居环境持续优化，截至 2025 年，全县 301 个行政村生活污水得到有效治理，治理率达 85.05%，农村生态与生活环境质量稳步提高。

3、经济效益明显

一是促进农业投入品减量，2024 年全县农药使用量同比减少 0.63%，农业面源污染源头减排取得实效。二是实现农业节本增收。项目区化肥施用量减少约 15%，其中血橙亩均增收 456 元，粮食作物亩均增收 121 元，农业生产效益与可持续性同步提升。三是降低粪污处理成本，通过推广畜禽粪污资源化利用模式，处理成本平均降低 30 元/立方米，减轻了养殖主体负担，提高了资源化利用积极性。

七、经验总结和发展建议

资中县作为全国农业面源污染治理与监督指导试点县，坚持“抓重点、分区治、精细管”思路，创新构建了丘陵地区种养结合型面源污染防控模式，工作成效显著，为同类地区提供可复制经验。

1、主要经验与构建模式

一是闭环治理，全链条管控。建立调查、监测、溯源、预警、治理、绩效评价闭环管理，覆盖种植、养殖、农村生活三大污染源，靶向治理 13 个优先行政村，治理精准度大幅提升。

二是种养循环，资源化增效。创新“2311”粪污利用模式，打造“猪-沼-果”

“牛-肥-果”循环链条，建成粪污全链条追溯系统，实现粪污收集、运输、处理、还田全程可监可控，畜禽粪污综合利用率达 95.12%。

三是智慧赋能，精准监管。建成水质水量自动监测站与智慧监管平台，实现数据实时查看、水质报警、溯源分析，推动治理从“人工粗放”向“数字精准”转变。

四是多元保障，长效推进。构建财政奖补、社会化服务、联合执法、乡风文明积分制协同机制，激发经营主体与村民参与积极性，部门联动、镇村落实的责任体系高效运转。

五是分类施策，系统修复。种植业推广绿色防控与化肥减量，养殖业实施设施改造与源头减量，农村生活污水采用分散式生态治理，同步开展流域生态修复，水环境质量持续改善。

2、存在的难点与问题

一是丘陵地形制约明显，地势起伏、村庄分散，污水管网、生态沟渠建设难度大、成本高，运维压力大。二是长效资金保障不足，监测设备、治理设施运维与社会化服务持续投入压力大，可持续性有待增强。三是种养匹配不够均衡，部分区域粪肥供需时空错位，资源化利用效率仍有提升空间。

3、下一步发展建议

一是适配丘陵优化技术，推广小型化、分散式治理设施，强化生态沟渠、塘堰湿地等低成本生态拦截，降低建设运维成本。二是强化源头精准管控，扩大测土配方、绿色防控覆盖面，完善粪肥供需调度，规范散户治理，提升种养循环效率。三是健全长效资金机制，争取上级资金，引导社会资本投入，建立“财政+主体+受益方”多元投入与专业化运维模式。四是深化智慧协同治理，升级监管平台，拓展监测维度；完善跨部门执法，优化积分制，提升村民参与度。

江西九江市城镇污泥和餐厨垃圾协同厌氧沼液厌氧氨氧化技术示范项目

申报单位：同济大学、长江经济带生态环境国家工程研究中心、九江市三峡智慧水管家有限公司

一、项目目的及意义

依托国家重点研发计划“长江经济带典型城市多源污泥协同处置集成示范”项目，团队在江西九江开发了耦合驱动的两段式厌氧氨氧化示范工程。旨在构建两段式自养脱氮工艺，解决高氨氮沼液处理高的难题，摆脱碳源依赖；研发智控软件，实现了对工艺过程中亚硝酸盐积累和碱度供给的智能调控。此项目实现脱氮容积负荷达 $0.70 \text{ kg N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ，平均总氮去除率达到 85%，脱氮环节处理成本降低 50% 以上。不仅验证了低碳、低成本治污的技术可行性，更显著提升了固废全链条处理的经济效益。作为长江经济带多源有机固废协同处理的工程样板，本项目为我国“双碳”目标下的污水处理转型提供了可复制、可推广的工程参考。

二、项目总体情况

本项目名称为“江西九江市城镇污泥和餐厨垃圾协同厌氧沼液厌氧氨氧化技术示范项目”，依托国家重点研发计划“长江经济带典型城市多源污泥协同处置集成示范”专项。旨在攻克长江经济带典型城市在多源有机固废协同厌氧消化处置过程中的沼液处理难题。

工程主体由亚硝化反应器、调蓄池及厌氧氨氧化反应器构成。业务覆盖九江市中心城区市政污水处理厂的污泥及餐饮/厨余垃圾协同厌氧消化产生的复杂沼液。项目创新构建“AnAOB 富集-微生物驯化-稳定运行”三阶段启动策略，为厌氧氨氧化菌创造稳定生长环境。配套集成自主研发的“两段式厌氧氨氧化反应器智能控制软件 V1.0”，通过在线监测数据与参数拟合的深度融合，对亚硝化酸盐积累与碱度供给的智能调控，提升了复杂工况下系统的运行稳定性与脱氮效率。系统脱氮容积负荷达到 $0.70 \text{ kg N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ，平均总氮去除率达到 85%。

三、项目解决的具体问题

- 1、彻底解决了协同厌氧消化沼液难处理问题

市政污泥与厨余垃圾协同厌氧消化产生的沼液富含氨氮，但有机碳源不足，传统硝化-反硝化工艺需要外加碳源，成本高且能耗大。本项目验证了两段式厌氧氨氧化工艺无需外加碳源即可高效脱氮的可行性。

2、有效解决了复杂水质对厌氧氨氧化菌（AnAOB）的抑制风险

协同厌氧消化沼液不仅氨氮浓度高，其高浓度有机物及有毒物质容易抑制生长缓慢的 AnAOB。本项目通过三阶段启动策略（AnAOB 富集→微生物驯化→稳定运行），使 AnAOB 成功适应复杂水质，并保持了优势菌属（*Candidatus Brocadia*）的稳定。

3、高效解决了难以精准控制部分亚硝化程度的问题

自主研发的“两段式厌氧氨氧化反应器智能控制软件 V1.0”，通过动态数学模型，实现了对工艺过程中亚硝酸盐积累和碱度供给的智能调控，确保 PN 反应器稳定地产出适合后续厌氧氨氧化反应的进水，避免了因操作滞后或调控不准导致的系统失稳或处理效果下降。

4、解决了工程规模下的经济性与运行稳定性问题

在工程规模条件下，保证处理效果的同时控制运行成本是一个现实挑战。该系统脱氮容积负荷达到 $0.70 \text{ kg N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ，平均总氮去除率达到 85%，脱氮环节处理成本降低 50%以上，远低于传统工艺，展现了良好的经济性和工程推广潜力。

四、项目创新点

1、市政污泥与厨余垃圾协同厌氧消化沼液的两段式厌氧氨氧化工程化应用

针对市政污泥与厨余垃圾协同厌氧消化产生的高氨氮、高浓度有机物、低碳氮比及强抑制性沼液，本项目实施了两段式厌氧氨氧化工艺的工程化应用。在工程规模下，系统克服了协同厌氧消化场景下水质波动大、成分复杂带来的运行风险，实现了长期稳定运行，成功验证了该工艺在复杂多源沼液处理中的技术可行性。

2、“AnAOB 富集-微生物驯化-稳定运行”三阶段启动策略

为应对协同厌氧消化沼液对厌氧氨氧化菌（AnAOB）的活性抑制，本项目提出“AnAOB 富集-微生物驯化-稳定运行”三阶段启动体系。该策略初期利用合成废水恢复厌氧氨氧化功能菌活性，中期逐步提高实际沼液配比以驯化菌群环境适应，后期完全转换为实际沼液，完成了工程的快速启动。这一启动策略显著缩短

了工艺调试周期，为复杂水质的生物脱氮启动工程提供了可复制的经验。

3、自主研发智能控制软件实现精准调控

针对部分亚硝化阶段对亚硝酸盐积累控制的严苛要求，项目配套开发并应用了“两段式厌氧氨氧化反应器智能控制软件 V1.0”。该软件基于氨氮、亚硝态氮及碱度变化速率的化学计量关系构建动态数学模型，通过对进出水数据的实时分析预测次日水质趋势，并结合在线监测反馈进行参数拟合。这一数字化手段有效解决了传统人工调节滞后、难以实时响应复杂水质波动的问题，大幅提升了系统的抗冲击能力与稳定性。

4、复杂水质下微生物群落的演变与适应性机制

通过宏基因组学分析，系统揭示了协同厌氧消化沼液高氨氮、高盐度、高有机物压力下功能微生物的动态演变规律。厌氧氨氧化核心菌群 *Candidatus Brocadia* 始终保持主导地位，同时耐盐菌与异养菌增殖，系统构建了功能互补的群落结构。这种微生物多样性的动态调整形成了生态冗余，有效缓解了复杂基质对核心功能菌的直接冲击，从生物学视角阐释了两段式厌氧氨氧化工艺在真实工况下维持脱氮性能稳定性的内在机制。

5、低成本高负荷运行验证经济可行性

系统实现了 85% 的总氮去除率，脱氮容积负荷达到 $0.70 \text{ kg N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。经核算，该工艺脱氮环节处理成本降低 50% 以上，较传统硝化-反硝化工艺显著降低。这种经济优势主要源于免除外加碳源、降低曝气能耗以及智能化运行带来的成本节约，为协同厌氧消化沼液的高效处理提供了兼具技术先进性与经济竞争力的解决方案。

五、应用场景和运行实例

1、应用场景

本工程示范项目位于中国江西省九江市，旨在解决市政污泥与厨余垃圾协同厌氧消化及离心脱水后产生的沼液。示范装置由部分亚硝化反应器、调蓄池、厌氧氨氧化反应器组成（图 1a）。

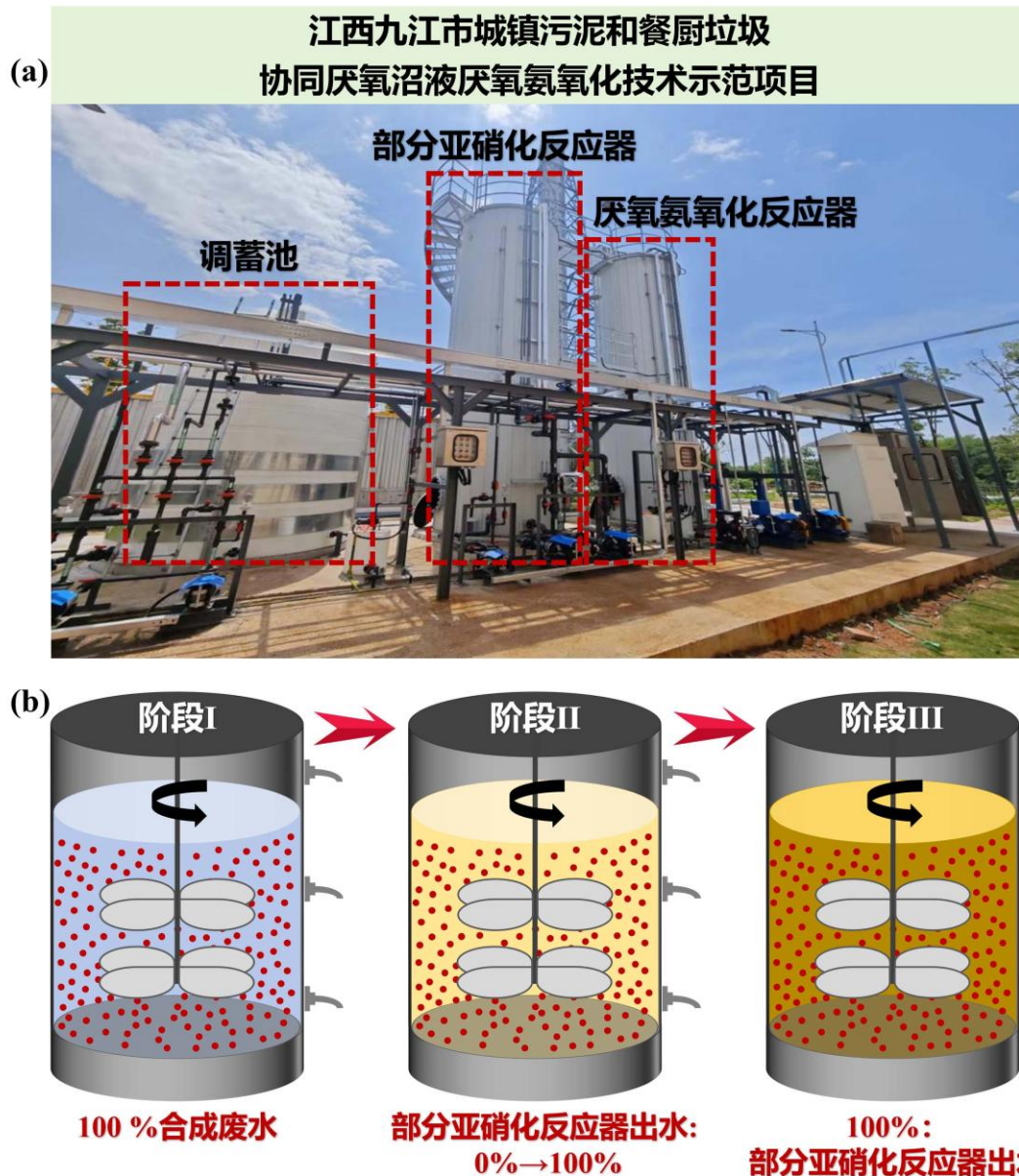


图 1 (a) 工程规模两段式厌氧氨氧化工艺现场装置图；(b) 厌氧氨氧化反应器“三阶段”进水模式

2、运行实例

在两段式厌氧氨氧化工艺启动及运行期间，部分亚硝化反应器始终以 100% 的协同厌氧消化沼液作为进水；厌氧氨氧化反应器则采取循序渐进的“三阶段”运行模式以确保系统稳定性（图 1b）：AnAOB 富集阶段（阶段I，采用 100%合成废水）、微生物驯化阶段（阶段II，逐步增加部分亚硝化反应器出水的比例，同时减少合成废水比例）以及稳定运行阶段（阶段III，采用 100%的部分亚硝化反应器出水）。

厌氧氨氧化进水需严格控制氨氮/亚硝氮比例，本项目深入揭示了“碱度消耗-亚硝化反应”的响应规律，并建立了浓度预测模型。基于此，开发了适用于两段式厌氧氨氧化工艺智能调控技术。该技术实现了亚硝化段出水水质的精准预测与反馈调节，相关成果以获得工艺智能控制软件著作权（图 2），显著提升了系统的运行鲁棒性。



图 2 自主开发的《厌氧氨氧化反应器智能控制软件 V1.0》

现场运行数据验证了两段式厌氧氨氧化工艺结合智能调控技术在复杂水质条件下的技术可行性与经济性。部分亚硝化反应器出水的氨氮与亚硝氮浓度比例维持在理论需求值 1.32 左右，为后续厌氧氨氧化段提供了理想的进水基质条件。厌氧氨氧化反应器中成功富集了厌氧氨氧化红菌，形成了良好的颗粒污泥状态（图 3）。两段式厌氧氨氧化工艺系统的平均总氮去除率达到 85%，脱氮容积负荷达到 $0.70 \text{ kg N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ，脱氮缓解处理成本降低 50% 以上，具有极高的经济推广价值。



图 3 江西九江厌氧氨氧化反应器内颗粒污泥

六、项目实施效果和效益分析

本项目攻克了运用厌氧氨氧化工艺处理多源有机固废厌氧消化沼液菌种富集困难、工程启动与调控方法不足等国际性难题，研发了具体完全自主知识产权的成套高效厌氧消化沼液低碳处理关键技术与装备。

在长江经济带重点区域的工程示范表明，该技术对协同厌氧消化沼液总氮去除率达到 85%以上，可为长江大保护等污染防治攻坚战提供关键技术支撑。通过多源有机固废厌氧消化-沼液低碳处理的全程闭环，推动污水处理过程向“能源中和”升级，可有力支撑污泥等有机固废的全链条处理处置。

该工程项目启动过程的研究成果已在环境领域国际期刊《ACS ES&T Water》上正式发表，题为“Start-Up of Full-Scale Two-Stage Partial Nitritation/Anammox (PN/A) Process Treating Reject Water from Codigestion of Sludge and Food Waste”，并被选为当期的副封面论文。

项目团队经过十年的研发与实践，构建了涵盖污水厂污泥、厨余垃圾等城市多源有机固废厌氧消化沼液的自养脱氮全链条技术体系，在九江、长沙、重庆等地实现了工程示范与应用，处理能力涵盖 15-500 m³/d 等不同规模，工程脱氮容积负荷达到 0.7 kg N/(m³ · d)以上。通过构建自主可控的技术体系，有助于破解高氨氮废水处理难题，推动了环保产业向标准化、智能化、低碳化升级，具有显著的环境效益和社会效益。

七、经验总结和发展建议

依托国家重点研发计划“长江经济带典型城市多源污泥协同处置集成示范”项目，采用两段式厌氧氨氧化工艺，对长江经济带典型城市市政污泥与厨余垃圾协同厌氧消化沼液进行高效脱氮处理。在启动运行方面，创新性提出“AnAOB富集-微生物驯化-稳定运行”三阶段递进式启动策略；在控制模式上，项目自主研发了“两段式厌氧氨氧化反应器智能控制软件 V1.0”，基于动态数学模型实现亚硝酸盐积累与碱度供给的精准调控。作为长江经济带多源有机固废协同处理的工程样板，本项目为我国“双碳”目标下的有机固废全链条处理处置转型提供了可复制、可推广的工程参考。

该项目在现阶段还存在以下局限性：

1、技术的行业应用规模有待进一步提升。通过该项目技术和装备的开发，

已实现了工程示范和应用，并展示良好技术经济优势。但是我国有机固废领域涉及的行业多、产业发展水平不均衡，导致基于厌氧氨氧化的沼液脱氮处理技术应用还有很大发展空间，尤其针对环卫行业的餐厨垃圾厌氧沼液处理，目前应用规模尚处于起步阶段，是未来产业发展的重点方向之一。

2、技术的应用范围有待进一步扩展。除了城镇有机固废外，其他行业（如畜禽养殖行业的畜禽粪便等）产生的有机固废在厌氧消化资源化过程中，同样面临沼液处理难的问题。未来有望进一步扩展技术的应用范围，服务更多行业的绿色低碳发展。

今后主要研究方向：

1、随着近年来科学技术的快速发展，学科交叉和融合已成为科技创新的发展趋势。在微生物自养脱氮领域，分子生物学、材料科学、信息科学等现代科技手段已得到应用，未来将借助先进的研发手段，对低碳脱氮技术进行创新提升，满足未来国家战略需求。

2、随着国家生态文明建设的不断推进，以及资源能源短缺，应对气候变化的挑战，城镇有机固废的处理处置会有更高的要求。研究适合于未来资源化能源化处理处置更高要求的新技术，以满足资源化、绿色化回收利用未来发展趋势。