

# 构建受损水体修复技术体系 支撑河湖生态修复新战略

## ——水专项“受损水体修复技术集成与应用”课题进展

秀美的洱海

课题背景

党的十八大以来,我国高度重视生态环境保护工作。2018年5月,习近平总书记在全国生态环境保护大会上指出,“山水林田湖草是生命共同体,要统筹兼顾、整体施策、多措并举,全方位、全地域、全过程开展生态文明建设”。2020年11月14日习近平总书记在全国推动长江经济带发展座谈会上指出,“要从生态系统整体性和流域系统性出发,追根溯源、系统治疗”。

为了推进我国水体修复技术规范化、系列化、标准化,加快构建水体修复技术体系,解决河流、湖泊、城市三类水体生态功能不足与生态完整性受损的问题,设置了“受损水体修复技术集成与应用”课题(2017ZX07401-003)(以下简称课题)。课题由中国

环境科学研究院承担,中国科学院水生生物研究所、南京大学、西安建筑科技大学、北京师范大学、重庆大学等5家单位共同参与。

课题组系统梳理了“十一五”以来水专项130余项课题,涉及松花江、辽河、淮河、海河、东江等五大河流域及太湖、巢湖、洱海等十大湖泊流域,从“支撑技术-关键技术-成套技术”3个尺度集成了河流、湖泊、城市三类受损水体修复成套技术,构建了受损水体生态修复技术体系;编制了受损河流、湖泊、城市水体等修复技术标准,推动河湖修复技术系列化建设;总结形成了适用于洱海、巢湖、淮河等受损水体修复技术模式,为我国河湖生态修复与恢复提供了有力的技术支持。

### 加强受损水体修复技术标准建设,推动技术工程化应用

技术的标准化是其工程化应用的前提,加强受损水体修复技术标准建设也是课题重要的目标之一。目前,我国河湖生态修复工程专用技术标准较少,在实施过程中主要参考其他通用标准中涉及生态修复的部分,多为景观工程、水利工程等领域的通用标准,缺乏对生态系统整体性和系统性的考量。我国不同流域河湖生态异

质性显著,数量有限的河湖修复专用技术标准缺乏流域特色及适用针对性,制约了现有河湖修复技术的推广应用。“工欲善其事,必先利其器”,推动河湖修复技术系列化建设势在必行。

课题组聚焦当前水生态保护修复的新形势,梳理生态修复技术标准建设和含生态修复内容的通用标准200余项,根据受损水体修复技术体系特点,以流域生态空间的整体性和关联性为重要依据,以源头水源涵养、中游河道及河滨湿地、下游洲滩与河口、湖荡及湖滨缓冲带、湖湾及浅水区、湖泊敞水区等生态空间修复为主线,以水质和底质修复、水生生物恢复、有害生物控制等生态系统要素恢复调控为轴线,构建河湖修复技术标准体系框架。

标准研究基础30余项,与中国环境科学学会合作,共同推动完成了《受损湖泊生态修复技术指南》《受损河流生态修复技术指南》《入湖河口前置库技术指南》《城市内河水体环保疏浚工程技术指南》《污水处理厂尾水人工湿地净化技术指南》《沉水植物种苗工厂化规模繁育技术规程》《湖泊蓝藻水华控制技术指南》《受损湖泊修复工程运行维护与管理技术指南》《仿生式过滤除藻技术指南》《城市受损水体修复技术指南》《仿生式过滤除藻技术指南》《城市受损水体修复技术指南》等第一批(共计12项)团体标准编制与立项工作,范围涵盖生态修复技术与管理,目前正在积极推动第二批生态修复相关技术标准的编制与立项。

生态修复技术标准的制定,将有力推动我国受损水体修复技术的工程化应用。

### 构建受损水系修复技术体系,推动技术系列化、规范化和成套化

“水十条”实施以来,我国水环境治理取得了显著成效,水生态修复成为“十三五”水环境保护治理的核心主题。依托水体污染控制与治理重大专项(以下简称“水专项”),我国水体修复技术研究已经取得丰硕成果,但已研发出的技术层次混杂、系列化程度不高;技术参数化水平薄弱,技术规范不足;技术链条不够清晰,技术成套化研究不足,整体集成度不高,难以满足我国受损水体规模化应用的迫切需求。

课题组总结了“十一五”和“十二五”水专项受损水体修复技术研究成果,跟踪了“十三五”水专项水生态修复技术,调查了水专项技术示范和应用效果,在调研国内外受损水体修复技术发展的基础上,整理了300余项支撑技术,从流域生态空间、生态系统要素两个维度,构建生态修复技术全链条,集成了46项关键技术,形成清水产流与河流水质提升、缓冲带与湖滨带修复等11项受损水体修复成套技术,凝练形成河流、湖泊、城市水体3个修复技术系列,并针对典型受损水体提出了针对性生态修复模式,初步构建了受损水体修复技术体系。

受损水体水生态健康评估与问题诊断成套技术建立了水生态健康和胁迫压力评估指标体系。水生态健康评估指标包括生态空间、水文、水质、底质、水生生物和食物网结构六大类;水体胁迫压力指标包括入湖污染负荷、生态空间受损、水文节律改变、人类活动压力和外来种入侵五大类。采用层次分析法和专家赋值法确定指标权重,利用熵权法、评价模型判断健康或胁迫程度,以标准值为参考依据,对水体现状各指标值进行评估。

清水产流与河流水质提升成套技术针对森林植被水源调蓄功能失衡、湿地截污净化功能低下、河流水质下降等问题,集成了源头清水产流保障、岸带污染拦截削减、人工湿地强化净化、河道生态净化、高效河流原位净化等5项关键技术;提出了“源头区水源涵养林结构优化与调控-低效水源涵养林改造-一河/库周边滨水植被结构调控与空间配置”北方林地清水产流模式和“植物-填料串联-岸带截污-生态氧化床”基流匮乏河流水质提升等模式。这一成套技术已在浑河、府河、贾鲁河等流域进行了推广应用,应用规模近500公里,可实现森林源头水质达地表Ⅱ类水标准,确保入湖

河水COD、氨氮等主要水质指标达到地表Ⅲ类输水水质目标。

河道生境修复与生态完整性恢复成套技术针对湿地萎缩与破碎化严重、生物多样性显著降低、生态水面不足、动植物生境受损、河滩淤积等河流生态完整性破坏问题,集成了生物栖息地修复、功能群配置及群落构建、健康水生态系统恢复等关键技术;提出了“健康诊断-修复等级界定-功能群配置-食物链稳定构建-生境改善”多闸坝基流匮乏河流水生境修复模式。这一成套技术已在松花江、辽河(太子河)和淮河(颍河)等流域进行了推广应用,应用规模总面积达100万余亩,其中颍河示范工程河段水质指标由原黑臭水体改善至基本达到Ⅳ类~Ⅴ类水标准。

大型洲滩/湖荡与河口湿地修复成套技术针对洲滩/湖荡及河口区生态退化、水资源再生功能差、径流负荷高、水体富营养化严重等问题,集成了基底修复与基质调整、湿地植被群落构建及恢复、河口湿地特征污染物净化、洲滩河口湿地水盐调控、湖滨湿地空间格局构建、湖荡湿地水量调蓄与布水等关键技术;提出了“石油开采区湿地功能恢复和烃类污染物削减-水稻生产全过程氮磷多级生态削减与控制-芦苇湿地生态用水调控及生境修复与污染阻控”入海河口区大型湿地修复模式,“湿地生态水格局构建-植被优化配置-污染阻断”漫滩湿地修复模式以及平原河网内湖口湿地、冲击扇型入湖河口湿地、汇流型前置库入湖河口湿地、河口异位湿地等修复模式。这一成套技术已在松花江三角洲、辽河入海口、南四湖入湖口、洱海罗时江入湖口、太湖扁担河入湖口等区域进行了推广应用,应用规模近120公里,修复湿地面积30万亩以上。

缓冲带与湖滨带修复成套技术针对湖滨缓冲带入湖污染负荷高、生态屏障功能退化、生态空间被压缩、生物多样性下降等问题,按技术链条集成了湖滨缓冲带空间构建、缓冲带入湖水净化、湖滨带生境恢复、湖滨生物群落恢复等关键技术。针对不同湖泊的湖滨缓冲带自然特征和受损状况,形成了平原河网一大堤型、平原圩区型、高原山前坝区型、山体陡岸型及反季节、大水位变幅库区日落带等五大类湖滨缓冲带修复模式。此项成套技术在太湖、巢湖、南四湖、洱海和滇池等湖泊推广生态岸线恢复超过

500公里。

湖湾及浅水区生态修复成套技术针对局部湖湾蓝藻水华暴发、底泥内源污染负荷加剧、浅水区水生植物覆盖度下降等问题,按生态修复对象集成了湖泊蓝藻水华控制、湖泊底泥污染控制、水生植物群落恢复等关键技术,针对不同湖湾受损状况,形成了轻度退化型湖湾、中度退化型湖湾和重度退化型湖湾等三大类湖湾及浅水区生态修复模式。此项成套技术已在太湖、洱海、成都锦城湖、郑州龙湖等区域进行了推广应用。

湖泊敞水区生态调控成套技术针对不同程度受损湖泊面临的问题,集成了鱼类群落控制与食物网调控、大型底栖动物恢复与食物网调控、浮游动物恢复与食物网调控、外来物种清除等关键技术,形成了轻度受损湖泊、中度受损湖泊、重度受损湖泊以及外来入侵种湖泊等4种敞水区修复模式。此项成套技术已在太湖、洱海、巢湖、昆明等多个城市的水体整治工程中得到应用。

城市水体水质净化成套技术针对我国城市水体富营养化严重、黑臭频发等问题,集成了高盐水体滨缓冲带植被优化配置和生态护岸、内碳源反硝化生态滤床、水体化学-微生物-水生植物强化净化等关键技术;提出了“污染负荷削减-旁路循环处理-原位生态修复”的技术模式,水体中的TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和COD<sub>Mn</sub>去除率分别可达到41%、66%和49%,示范水体水质可达到Ⅳ类,消除了黑臭现象,DO能维持在3.8mg/L~5.4mg/L。这一成套技术在上海、合肥、天津、巢湖、昆明等多个城市的水体整治工程中得到应用。

城市水体生态修复成套技术针对城市水体景观生态功能完整性缺失问题,突破了多级溢流坝复氧、城市湖泊人工强化复氧、生物操纵等城市湖库健康水生态系统构建、城市水体水生植物恢复、城市河湖原净化系统修复与重建等关键技术;提出了“水力调控-水生植物恢复-生态链重构”修复模式,可实现水流流速不低于0.1m/s,溶解氧浓度平均提高40%以上,植被覆盖率大幅提升。这一成套技术已在北京、天津、常州、昆明、重庆等多个城市水体修复工程中得到应用。

河流水环境综合管理与调控成套技术针对天然河道基流缺乏、河流闸坝密集、水量时空分布不均衡等问题,集成了多级溢流坝复氧、河流生态基流核算和调控、流域生态补偿等关键技术,提出了“生态基流保障-大型污染事故防范-水生态安全防控”和“极度缺水保障调度-重度污染水体监控与治理”等模式。此项成套技术已在海河、淮河流域多项水环境治理工程或规划中得到推广应用。

湖泊流域综合调控与管理成套技术针对引水调水生态风险不明确、调水水质水量波动大、环境监测管理响应不及时、分析决策功能薄弱等问题,集成了水质水量模拟与计算、引水调度与布水、流域综合管理平台等关键技术,提高了流域水环境监测数据的完整性和时空代表性,为河湖流域水环境管理、湖库蓝藻水华防控预警提供了科学、全面和综合的决策支持。



### 聚焦重点河湖修复,支撑水体生态环境改善

针对富营养化初期湖湾洱海入湖河流氮磷污染负荷高、湖滨缓冲带受损严重、水生态系统退化等问题,以水专项研发技术为主,课题组构建了“入湖河流清水产流修复-农田塘库调蓄净化体系构建-河口湿地建设-缓冲带建设-湖滨带生态修复-水节律调控与水生植物恢复-银鱼捕捞及渔业结构调控”洱海流域河湖生态修复成套技术,支撑了洱海34条河流总长度162.8公里的入湖河流清水河道修复、近1万亩洱海旁路湿地建设、坝区5000多亩农田调蓄净化库塘湿地建设、环湖1806户客栈及农户生态搬迁、岸线长度129km面积近万亩湖滨缓冲带修复、主要湖湾水生植被优化及太湖252km<sup>2</sup>渔业结构调控等工程,总投资达100多亿元,5年内对洱海、西太公鱼等外来鱼类进行捕捞量达1万吨,近4年洱海总磷及氨氮浓度持续下降,其中总磷基本达到Ⅱ类,入湖河流及湖泊生态环境呈现向好的趋势。

湖泊生态修复相关的成套技术在巢湖环湖及河口湿地、太湖贡湖湾、南四湖等其他重点湖泊进行了大规模推广应用。巢湖十八联圩河口湿地恢复面积27.6km<sup>2</sup>,年处理水量约2.9亿立方米,平均日处理水量约81万立方米,项目建成后区域内进行地形改造与水系连通,打破区域之间的阻隔,恢复森林沼泽、灌丛沼泽、草本沼泽、季节性草本滩涂、湖泊湿地和河流湿地生境,鸟类和鱼类种类及数量显著增加,有利于形成更加稳定的生态系统。

针对淮河流域闸坝众多,生态基流缺乏,尾水不达标,沟渠河流生境破碎,水体生态恢复能力降低;极端流态下环境流障碍、河



城市水体修复案例

流湿地基底受损和水生态系统恢复功能下降等系列问题,以水专项研发“强化-耦联-侧渗-削减”的污染河流梯级序净化技术、“深潭-浅滩-生态渗滤岛-生物多样性-功能群”的链式生境恢复技术、“环境流调控-基底修复-生境诱导-生态系统构建”的河流生态系统修复技术作为支撑,实现了索须河、贾鲁河、洛河等100多公里的河道生态恢复,并对25万吨/天的污水处理厂尾水与黑臭河道进行生态净化,使COD、氨氮和总磷的去除率分别达到40%、80%和50%左右,劣Ⅴ类河水生态净化后达Ⅳ类标准,色度、总氮优于景观再生水标准。本土生物物种丰富度提高了66%,沉水植物、挺水植物、底栖动物、浮游动物、鱼类、鸟类六大生物功能群结构完整,食物链得到恢复。示范区河段溶解氧由不足2mg/L提升到8mg/L以上,劣Ⅴ类河水水质改善到Ⅳ类水,部分指标甚至达到了Ⅱ类水标准,贾鲁河等流域水质、水生态质量显著好转。

河流生态修复的相关成套技术在长江流域、淮河流域、雄安新区、合肥南淝河、山西汾河、陕西渭河及福建莆田流域等大型河流(流域)生态修复工程中推广应用,长度超过500公里,总面积达

150万余亩;建立了“潘安湖新模式”和“常熟新模式”,实现了江苏潘安湖、九里湖国家湿地公园及常熟市南唐省级湿地公园水质净化、污染河流治理和水生态修复,提升了生态旅游价值。

针对城市山地区型深水湖泊湖库面分布极不规则、多数湖湾水流缓慢、水质状况差异大、水生态系统单一的问题,研发了“入湖支流生物滤池深度处理技术(生物滤池-人工湿地工艺)”“湖泊人工强化水体循环技术(潜水器推流-喷泉复氧工艺)”“湖泊健康水生态构建技术(生态浮岛-生态沉箱-动物调控工艺)”等系列关键技术,形成了以“入湖负荷削减-水体循环-生态恢复”为核心的山地区型深水缓流湖泊修复模式。这一模式在重庆园博园示范应用,提高了库湾的溶解氧浓度水平,显著抑制了藻类聚集生长情况,COD、TN、TP、TSS的平均去除率分别达到63.4%、26.7%、37.8%、49.2%,园区内景观生态功能显著提升。园博园2020年7月被授予“两江新区无废景区”和“两江新区无废公园”荣誉称号。这一工艺模式在重庆江北区、江津区、小安溪、高石水库、断桥湾水库、天鹅湖、肖家河等水环境整治项目中得到推广。

刘晓星



洱海流域河湖生态修复成套技术示意图及示范效果