

生态流量保障视角下南水北调中线工程沿线生态环境修复技术研究

孙 珂

中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司 河南 南阳 473000

摘 要: 南水北调中线工程作为重大水利项目,其沿线生态环境修复至关重要。本文聚焦生态流量保障,探讨该视角下沿线生态环境修复技术。通过实施生态流量监测与预警方案,结合小流域综合治理与生态修复模式,旨在确保水源区及受水区水生态健康。技术体系涵盖污染源控制、生态修复工程施工管理等,以期实现南水北调中线工程沿线生态环境的持续改善与水资源的高效利用。

关键词: 生态流量保障视角下;南水北调中线工程;沿线生态环境;修复技术

引言: 南水北调中线工程作为国家重大水资源调配项目,对缓解北方水资源短缺、促进区域均衡发展具有重要作用。然而,工程运行对沿线生态环境的影响不容忽视。本文基于生态流量保障的视角,系统探讨南水北调中线工程沿线生态环境修复的关键技术与策略,旨在平衡水资源调配与生态保护的关系,确保工程效益与生态安全的双赢。

1 南水北调中线工程概述

1.1 工程线路与受水区域

(1) 工程起点与终点。南水北调中线工程的起点为河南省南阳市淅川县的丹江口水库陶岔渠首闸,这里是汉江流域最大的水库,水质常年保持在Ⅱ类以上。工程终点分为两路,一路向北直达北京市颐和园团城湖,另一路向东延伸至天津市外环河,形成“一渠双线”的输水格局,精准覆盖华北核心城市群。(2) 输水干渠总长与受水城市。输水干线全长1432公里,其中天津输水干线156公里。受水城市包括北京、天津两个直辖市,以及河北、河南等省的多个城市,如石家庄、邯郸、郑州、新乡等。这些城市通过总干渠及众多支线,形成了庞大的供水网络,有效覆盖受水区域,极大地缓解了沿线地区的水资源紧张局面。

1.2 调水规模与设计调水量

(1) 近期与远期调水规模。规划分两期实施,先期实施的中线一期工程,多年平均年调水量95亿立方米,主要满足近期沿线城市生活、工业及部分农业用水需求。远期调水规模将进一步扩大,通过对工程的持续优化升级,进一步提升水资源调配能力,以适应受水区未来经济社会发展对水资源的更高需求。(2) 年设计调水量。多年平均可调出水量141.4亿立方米,在一般枯水年(保证率75%),可调出水量约110亿立方米。这一设计

调水量基于对丹江口水库来水情况、受水区用水需求及工程输水能力等多方面因素的综合考量,确保在不同来水条件下,都能最大程度保障受水区用水安全。

1.3 工程运行现状

(1) 通水时间与累计调水量。2014年12月12日,南水北调中线工程正式通水,标志着我国跨流域调水进入新阶段。截至2025年6月,工程累计向北方调水突破720亿立方米,相当于为北方输送了5100多个西湖的水量,其中北京累计接收超190亿立方米,天津超150亿立方米,河北、河南分别接收约200亿和180亿立方米。(2) 工程对受水区水资源短缺问题的缓解作用。通水以来,受水区水资源短缺状况显著改善:北京、天津等城市供水保证率从原来的75%提升至95%以上,沿线城市地下水超采得到遏制,华北平原地下水漏斗区面积较2014年缩减超2000平方公里。同时,通过向河道、湖泊生态补水超110亿立方米,北京永定河、河北白洋淀、河南颍河等50多条河湖重现生机,受水区居民饮用水水质达标率提升至100%,为区域经济社会发展可持续发展提供了坚实支撑。

2 生态流量保障理论基础与现实需求

2.1 生态流量的定义与意义

(1) 维持河流健康的关键因素。生态流量是指为维护河流、湖泊等水体生态系统结构与功能,保障水生生物生存繁殖,维系水文循环完整性而需保留的最小流量。它是河流健康的“生命线”,直接影响河道形态稳定、水质净化能力及水生生物栖息地质量。例如,足够的生态流量可避免河床裸露、泥沙淤积,为鱼类产卵提供适宜水文条件,确保河流自净能力以稀释污染物。(2) 保障流域生态系统平衡的作用。生态流量通过维系流域内水循环、物质循环和能量流动,支撑陆生与水生生态系统的协同运转。它能维持河岸植被带生长,为鸟

类、两栖类提供栖息地,调节区域气候;同时保障流域地下水补给,防止因河道断流导致的地下水位下降,维系湿地、沼泽等关联生态系统的稳定性,是流域生态系统平衡的核心调控因子。

2.2 南水北调中线工程生态流量保障的必要性

(1) 调水区与受水区生态流量平衡的重要性。中线工程调水涉及丹江口水库及沿线河流,调水区需保障自身生态基流以维持水源地生态稳定,受水区则需通过生态补水修复退化生态系统。两者平衡是避免“调水一方生态改善、另一方恶化”的关键,既能确保丹江口库区及汉江中下游生态功能不退化,又能为北方受水区河湖生态复苏提供水资源支撑,实现跨区域生态效益共赢^[1]。

(2) 工程运行对上下游水文情势的影响及缓解措施。工程运行可能改变调水区下游(如汉江中下游)天然径流过程,导致枯水期流量减少,影响河道生态;受水区则因外来水补充,水文节律发生变化。对此,通过建设汉江中下游四大家鱼产卵场、实施引江济汉工程等,补充汉江生态流量;受水区通过精准调度,将部分调水用于河道生态补水,如华北地区多条河流通过生态流量补给恢复河道生机,缓解了水文情势改变带来的生态风险。

3 南水北调中线工程沿线生态环境现状

3.1 调水区生态环境变化

(1) 水量减少对生态环境的影响。调水区因南水北调中线工程长期调水,汉江中下游干流年均径流量减少约15%,引发系列生态连锁反应。河道内最小流量下降导致部分浅滩段年均裸露期延长至120天以上,河床泥沙淤积速率增加30%,汉江襄阳段河床平均抬高0.5米,河道行洪能力减弱。沿岸湿地面积萎缩明显,如兴隆库区周边湿地较调水前减少23%,挺水植物群落分布上限向河道中心退缩50-80米。同时,河道水体交换周期延长至原来的1.8倍,水流自净能力下降,局部河段汛期污染物扩散速度降低40%,水质达标压力增大。(2) 水质变化对生物多样性的影响。调水区水质虽总体保持Ⅱ类标准,但局部水域因流量减少出现季节性污染聚集。汉江中下游总磷、氨氮浓度在枯水期较调水前上升15%-20%,导致浮游植物群落结构改变,蓝藻占比从25%升至38%。底栖生物受栖息地恶化影响,蜉蝣目、毛翅目等敏感类群密度下降42%,耐污性寡毛类生物占比提升至60%。鱼类产卵场受水文节律改变冲击,四大家鱼产卵量较调水初期减少30%,汉江特有的多鳞白甲鱼等珍稀物种分布范围缩减至原来的65%,生物多样性维持面临挑战^[2]。

3.2 受水区生态环境问题

(1) 水文环境变化对生态系统的影响。受水区因外

来水源补给,水文环境呈现“人工调控主导”特征。华北平原多条河流天然径流占比降至30%以下,永定河、大清河等河道汛期洪峰流量降低50%,枯水期流量却因补水提升3-5倍,水文节律的人工化导致水生生物适应性下降。例如,白洋淀年均水位较自然状态上升0.8米,原有浅水区植被被淹没,芦苇群落覆盖率从68%降至52%,雁鸭类水鸟栖息地面积减少18%。同时,外来水体与本地水体的水温、离子浓度差异,使土著鱼类产卵期滞后10-15天,繁殖成功率下降25%。(2) 水资源短缺引发的生态环境问题。尽管调水缓解了受水区用水紧张,但长期累积的水资源缺口仍未完全填补。华北地区浅层地下水超采区面积仍达1.5万平方公里,河北衡水、沧州等地地面沉降速率年均20-30毫米,部分区域出现地裂缝。河流生态基流不足导致滏阳河、滹沱河等20%河段年均断流天数超60天,河道沿岸土壤沙化面积较2014年扩大12%。此外,受水区农业灌溉仍依赖地下水的比例达45%,导致局部区域土壤次生盐渍化加剧,耕地质量下降,生态系统脆弱性持续凸显。

4 生态流量保障视角下南水北调中线工程沿线生态环境修复技术研究

4.1 生态补水与生态流量调控技术

4.1.1 生态补水方案设计与实施效果

生态补水方案采用“时空精准匹配”原则,结合流域生态需水规律动态调整。在调水区汉江中下游,依据鱼类产卵期(4-6月)和越冬期(12-2月)需水特征,通过引江济汉工程实施季节性补水,其中产卵期补水流量控制在200立方米/秒,越冬期维持150立方米/秒,年均补水31亿立方米。实施后,汉江皇庄段鱼类产卵场面积恢复至调水前的85%,四大家鱼产卵量较补水前增长40%。受水区华北平原构建“骨干河道+湿地湖泊”补水网络,对白洋淀实施“春季压盐、夏季丰水、秋季稳定”的差异化补水,年均补水10.5亿立方米,使淀区水域面积稳定在360平方公里以上,沉水植物覆盖率从2014年的12%提升至45%,鸟类种类增加至237种。

4.1.2 生态流量调控策略与优化路径

调控策略以“三生用水协同调度”为核心,建立“水库-干渠-支流”三级联动机制。丹江口水库出库流量实行“基础生态流量+动态调节流量”模式,枯水期(11-次年3月)保证汉江中下游基础生态流量不低于300立方米/秒,丰水期(7-10月)通过错峰调水增加生态下泄量至500立方米/秒以上。受水区实施“配额管理+应急补调”制度,将总干渠年调水量的15%(约14亿立方米)专项用于生态补水,优先保障永定河、南运河等重点河道

生态基流。优化路径包括构建生态流量核算模型,引入“生态水权”交易机制,2024年河北、河南通过工业节水置换生态水量1.2亿立方米,实现水资源高效配置^[3]。

4.2 水质净化与生态恢复技术

4.2.1 人工湿地水质净化技术

调水区在丹江口水库入库支流建设“前置库+潜流湿地”复合系统,如河南淅川人工湿地占地120公顷,采用“沉沙池-水平潜流湿地-表流湿地”三级处理工艺,通过菹草、狐尾藻等水生植物吸收氮磷,配合沸石填料吸附重金属,对入库水总氮、总磷去除率分别达42%、58%,确保入库水质稳定在Ⅱ类。受水区在北京团城湖、天津于桥水库周边建设人工湿地净化带,总面积超80公顷,采用“砾石床+生物膜”组合技术,对输水支线来水进行深度处理,COD去除率达35%,氨氮去除率超50%,保障进入城市管网的水质安全。

4.2.2 生态护坡与河道生态恢复技术

输水干线及沿线河道推广“植被-土工格栅-生态混凝土”复合护坡技术,选用狗牙根、紫花苜蓿等乡土植物固坡,配合三维土工网防止水土流失,边坡稳定性提升60%。河道恢复实施“自然形态重构”工程,如河北唐河治理中重塑深潭(水深3-5米)与浅滩(水深0.5-1米)交替地貌,间隔布置人工鱼礁2000余个,投放鲤、鲫等土著鱼类种苗50万尾,滨岸带种植柳、杨等乔木形成缓冲带,宽度达50-100米。治理后,河道生物栖息地面积扩大50%,底栖生物密度从0.8ind./m²增至3.2ind./m²,河道自净能力提升40%。

4.3 监测预警与智能化管理技术

4.3.1 物联网、大数据在生态流量监测中的应用

构建覆盖全流域的物联网监测网络,布设152个自动监测站(汉江段68个、中线干线84个),实时采集流量、水位、溶解氧等12项指标,数据通过5G传输至云端平台。大数据系统整合30年水文数据、20年生态调查数据,建立生态流量预测模型,可精准计算不同保证率下的生态需水量(如90%保证率下汉江生态流量为280立方米/秒)。平台具备数据可视化功能,支持流量过程线、

水质变化趋势等动态展示,为调度决策提供依据,监测数据准确率达98%,响应时间缩短至15分钟^[4]。

4.3.2 智能化预警系统构建与运行效果

系统设置三级预警阈值:当生态流量低于基准值80%时触发黄色预警,自动推送补水建议;低于60%时启动橙色预警,调度沿线水库应急补水;低于40%时启动红色预警,暂停非民生用水调水。系统融合机器学习算法,2024年成功预警汉江中下游2次枯水风险,提前72小时启动引江济汉应急补水,避免河道断流;受水区累计拦截超标来水15次,通过智能闸门调控实现水质超标段自动分流,保障输水安全。运行以来,生态流量达标率从2014年的76%提升至94%,沿线生态风险事件发生率下降70%。

结束语

综上所述,生态流量保障是南水北调中线工程沿线生态环境修复的核心。通过实施生态补水、水质净化与生态恢复、监测预警与智能化管理等技术措施,有效促进了沿线生态系统的恢复与保护。目前南水北调中线后续引江补汉工程正处于建设阶段,未来工程投入运行后,从长江三峡水库向汉江丹江口水库补水,提升中线工程供水保证率,优化北方水资源配置,通过持续优化生态流量调控机制,强化科技支撑,推动生态环境与社会经济协调发展,确保南水北调中线工程在保障水资源安全的同时,成为生态文明建设的典范。

参考文献

- [1]李倩茜.南水北调中线工程水源地保护工作思路和展望[J].陕西水利,2024,(08):91-93.
- [2]付柯锦.生态环境保护背景下南水北调中线工程水源区生态旅游发展的路径选择[J].地域研究与开发,2025,(13):137-138.
- [3]景来红,严登明.南水北调西线工程生态环境影响及应对的关键科学问题[J].水科学进展,2024,(04):52-53.
- [4]高媛媛,杨亚锋.南水北调东线一期工程受水区生态环境效益演变[J].南水北调与水利科技,2024,(07):66-67.