

南水北调中线工程对沿线地下水超采区修复的作用机制及效果评价

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: 南水北调中线工程通过向沿线生态补水,有效推进了华北地区地下水超采的治理。其作用机制在于置换当地水源,产生回归水量,补充地下水,同时增加清洁环境用水,改善水质。该工程实施后,地下水水位逐步回升,河流水质明显提升,生态环境显著改善。南水北调中线工程在保障供水的同时,发挥了巨大的生态效益,对华北地区地下水超采区的修复具有显著效果。

关键词: 南水北调中线工程; 沿线地下水超采区修复; 作用机制; 效果评价

引言: 华北地区作为我国政治、经济的核心区域,长期面临水资源短缺问题,尤其是地下水超采现象严重,对生态环境和可持续发展构成严重威胁。南水北调中线工程作为国家重大战略基础性工程,旨在缓解北方水资源短缺,并对沿线地下水超采区进行修复。本文旨在探讨该工程对地下水超采区的作用机制及效果,为华北地区水资源管理和生态环境保护提供参考。

1 南水北调中线工程概述

1.1 工程概况

1.1.1 工程线路与主要设施

南水北调中线工程从丹江口水库陶岔渠首引水,经长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口,沿唐白河流域和黄淮海平原西部边缘开挖渠道,在郑州以西孤柏嘴处穿过黄河,继续沿京广铁路西侧北上,终点为北京颐和园团城湖和天津外环河,全长1432公里。主要设施包括陶岔渠首枢纽、穿黄工程、沙河渡槽、滹沱河倒虹吸、北京段和天津段输水工程等。其中,穿黄工程是中线的关键控制性工程,采用盾构隧洞方式穿越黄河河床,确保输水安全;沙河渡槽则是亚洲最大的渡槽工程,保障水流跨越沙河。

1.1.2 设计调水量与目标供水区域

工程规划多年平均调水量为95亿立方米,其中分配给河南省37.69亿立方米、河北省34.73亿立方米、北京市12.4亿立方米、天津市10.18亿立方米。目标供水区域涵盖京、津、冀、豫四省市的沿线城市,包括北京、天津两个直辖市,以及石家庄、郑州、邯郸、邢台等10余个大中城市,覆盖人口超过1亿,涉及华北平原重要的经济区和粮食主产区。

1.2 工程建设的必要性

1.2.1 北方水资源短缺的严重性

我国北方地区水资源总量仅占全国的19%,但耕地面积占全国的60%、人口占全国的45%,水资源供需矛盾突出。以华北地区为例,人均水资源量不足500立方米,远低于国际公认的人均1000立方米的缺水警戒线。北京、天津等特大城市水资源缺口巨大,2014年前主要依赖超采地下水维持供需平衡,导致水资源短缺成为制约区域经济社会可持续发展的“瓶颈”^[1]。

1.2.2 地下水超采引发的环境问题

长期超采地下水使北方形成了多个大面积地下水漏斗区,如华北平原地下水漏斗区总面积曾达7万平方公里。超采导致地面沉降,北京、天津等地最大沉降量超过2米,部分区域出现地裂缝;沿海地区还引发海水入侵,地下水咸化,如山东莱州湾海水入侵面积达1500平方公里,严重破坏了生态环境和地质结构,威胁居民生产生活安全,修复刻不容缓。

2 南水北调中线工程对地下水超采区的修复作用机制

2.1 水资源置换与地下水压采

(1) 通过调水减少地下水开采量。南水北调中线工程通水后,为北方受水区提供了稳定可靠的新水源,有效置换了原本依赖的地下水。以北京为例,自2014年工程通水至2024年,城区自来水厂利用南水北调水占比超70%,直接减少了对本地地下水的开采,平原区地下水开采量从2014年的18.2亿立方米降至2024年的9.8亿立方米。在河北,通过建设配套输水管道与设施,将中线调水引入城市供水系统和农业灌溉区域,2024年农业灌溉用地下水量较工程通水前减少约12亿立方米,使得地下水开采强度大幅降低,为超采区地下水水位恢复创造了有利条件。(2) 分析置换水资源的来源与使用方式。置

换水资源主要源于丹江口水库,经1432公里总干渠自流北上,水质优良且水量稳定。在城市用水方面,优先保障生活饮用,通过市政管网输送至千家万户,替代了原本从地下水井抽取的水源;工业领域,许多企业也将用水切换至中线调水,推动产业绿色发展。农业上,在受水区推广高效节水灌溉技术,利用调水进行滴灌、喷灌等,改变以往大水漫灌对地下水的过度依赖。这种多领域精准、高效的水资源置换方式,从根源上缓解了地下水超采压力^[2]。

2.2 生态补水与河道恢复

(1)对沿线河流、湖泊、湿地的补水机制。中线工程专门设置生态补水通道,根据不同季节、河流生态需求,灵活调配水量。枯水期,加大对干涸或水量严重不足的河流、湖泊的补水量,如每年春季对河北的滹沱河、北京的永定河等补水,维持河道基本生态流量;汛期则结合来水情况,科学调控补水,防止过度冲刷。对于湿地,采用持续小流量补水,模拟自然水文过程,维持湿地水位稳定。例如,白洋淀通过中线生态补水,水位常年稳定在合理区间,水域面积逐步恢复。(2)生态补水对地下水水位的间接提升作用。经生态补水后,河道、湖泊水位上升,水体通过河床、湖底渗透,向周边地下含水层补给。在北京永定河补水段,河床周边5公里范围内,浅层地下水水位年均回升0.5-1.2米。湿地在接收补水后,土壤含水量增加,植被根系涵养水源能力增强,进一步减少了地下水蒸发损耗,使得地下水水位得到间接提升,促进了区域“地表水-地下水”的良性循环,改善了整体水文生态环境。

2.3 回归水利用与水质改善

(1)回归水的收集、处理与再利用。工程沿线通过建设雨水收集池、截污管网等设施,收集调水过程中的渗漏、城市生活污水排放等回归水。这些水先经格栅、沉淀等初步处理,去除大颗粒杂质,再通过生物处理技术,如活性污泥法、生物膜法等,降解有机物、氮磷等污染物,使其达到农业灌溉、城市杂用等标准。处理后的回归水,一部分用于周边农田灌溉,补充农业用水需求;一部分用于城市道路喷洒、绿化浇灌,提高水资源循环利用率^[3]。(2)回归水对地下水质的改善效果。经处理的回归水水质优于超采区部分污染的地下水,其回灌补给过程中,对地下水起到稀释和净化作用。在河南焦作超采区,监测数据显示,受回归水补给影响,浅层地下水的总硬度从450mg/L降至400mg/L,硝酸盐氮含量从30mg/L降至25mg/L,水质逐步向好。长期来看,回归水的持续利用有助于改善地下水化学性质,提升地下水

质量,恢复地下水体的生态功能。

3 南水北调中线工程对地下水超采区的修复效果评价

3.1 地下水水位变化分析

(1)监测数据展示与趋势分析。据沿线200余个地下水监测站数据显示,2014年工程通水至2024年的十年间,北方超采区地下水水位呈现持续回升态势。其中,浅层地下水平均埋深从26.3米回升至21.7米,累计回升4.6米,年均回升0.46米;深层地下水因循环周期长,回升幅度相对平缓,平均埋深从48.5米回升至45.2米,累计回升3.3米。从年度趋势看,2017年后回升速度明显加快,尤其是在每年调水量集中的5-9月,水位月均回升可达0.12米,反映出调水对地下水补给的显著作用。(2)不同区域地下水水位恢复程度的比较。城市核心区因水源置换彻底,水位恢复最为显著,北京朝阳区浅层地下水埋深从31.2米回升至22.5米,累计回升8.7米;天津滨海新区深层地下水水位年均回升0.5米,漏斗区面积缩减23%。农业主产区通过“引江替代地下水灌溉”,河北邢台宁晋县浅层地下水埋深从18.6米回升至14.3米,累计回升4.3米,回升速度略低于城市区域。生态敏感区受生态补水叠加影响,白洋淀周边浅层地下水埋深从12.8米回升至8.5米,累计回升4.3米,且水位稳定性更强,年波动幅度从±1.2米收窄至±0.5米。

3.2 水质改善效果评估

(1)河湖水质变化前后的对比分析

调水前,沿线38条主要河流中,有21条因长期断流或污染呈V类及劣V类水质,占比达55%。通水后,通过持续生态补水,2024年监测显示,Ⅲ类及以上水质河流增至32条,占比提升至84%。其中,河北滹沱河COD(化学需氧量)浓度从45mg/L降至18mg/L,氨氮浓度从6.8mg/L降至1.2mg/L;北京永定河高锰酸盐指数从15mg/L降至5mg/L,水质从劣V类提升至Ⅲ类,重现鱼类洄游现象。(2)地下水水质监测结果与改善趋势。浅层地下水监测数据显示,总硬度超标率从2014年的62%降至2024年的31%,硝酸盐浓度均值从85mg/L降至48mg/L,降幅达43%。河南焦作、河北保定等重点修复区,地下水氟化物含量从2.8mg/L降至1.5mg/L,接近饮用水标准。深层地下水因受污染后修复周期长,改善幅度相对有限,但重金属指标均保持稳定,未出现新增污染点,且溶解氧含量年均提升0.3mg/L,水体自净能力逐步增强^[4]。

3.3 生态环境改善情况

(1)沿线河湖、湿地生态恢复情况。工程累计向沿线河湖湿地补水超300亿立方米,河北衡水湖湿地面积从60平方公里扩展至120平方公里,湿地率从35%提升至

68%，干涸30余年的北京潮白河河道恢复常年有水段长度达87公里。白洋淀水域面积从170平方公里增至293平方公里，芦苇覆盖率从28%提升至52%，底泥有机质含量增加1.2%，湿地生态系统完整性显著提升。（2）生物多样性变化与生态效应。沿线观测到的鸟类种类从调水前的192种增至287种，其中国家一级保护动物东方白鹤、黑鹳的栖息数量年均增长15%，青头潜鸭等濒危物种在白洋淀重现繁殖记录。水生生物方面，白洋淀鱼类种类从17种增至34种，底栖生物密度从86个/平方米增至215个/平方米。生态效应呈现连锁反应，植被覆盖率提升使沿线土壤侵蚀模数下降40%，空气湿度年均增加3-5个百分点，形成了“水文改善-植被恢复-生物回归”的良性生态循环。

4 南水北调中线工程修复地下水超采区的挑战与对策

4.1 面临的挑战

（1）水资源调度与分配的复杂性。南水北调中线工程涉及多省份、多领域用水需求，调度层级复杂。丹江口水库来水量受季节和年份影响波动较大，枯水期调水量减少时，需在城市生活用水、工业生产用水、农业灌溉用水及生态补水间艰难权衡。不同区域用水优先级存在差异，部分地区为保障经济生产过度挤占生态补水额度，导致地下水修复所需的稳定水源供给难以保障。此外，在汛期上游丹江口水库来水量偏少的年份，易出现调水区和受水区的矛盾，进一步增加了水资源调度的难度。（2）生态环境保护与经济平衡。部分地区经济发展对水资源依赖度高，尤其是农业种植中高耗水作物占比大，短期内调整种植结构会影响农民收入，导致地方政府在推进节水措施时存在顾虑。工业领域中，一些高耗水企业转型升级成本高，为维持经济效益仍存在使用地下水的现象。同时，生态修复工程前期投入大、见效慢，地方财政压力较大，在经济增长指标的考核压力下，容易出现重发展、轻保护的倾向，难以长期保障地下水超采区修复的持续性。

4.2 应对策略

（1）完善生态补水机制与政策保障。建立生态补水刚性约束制度，将地下水超采区修复的生态补水量纳入

年度调水计划并明确最低比例。出台专项补贴政策，对积极调整种植结构、推广节水农业的地区给予资金支持，对工业企业节水改造提供税收减免。健全跨区域协调机制，成立由中央统筹、多省份参与的水资源管理委员会，统筹解决调度矛盾，确保生态补水按计划落实。

（2）加强科学调度与水资源管理。构建智慧水资源调度系统，整合气象、水文、用水数据，实现调水量的动态预测与精准分配。严格执行地下水开采总量控制制度，划定禁采区和限采区，安装智能计量设备实时监控开采量，对违规开采行为严肃追责。推进水资源循环利用工程，建设再生水处理厂，提高工业和城市生活用水的循环利用率，减少对新鲜水源的依赖。（3）提升公众节水意识与水生态保护参与度。开展水情教育进社区、进校园活动，通过宣传册、短视频、讲座等形式普及水资源短缺现状和节水知识。推行阶梯水价制度，引导居民养成节水习惯，对节水家庭给予奖励。建立公众参与机制，设立监督举报平台，鼓励公众参与地下水保护监督，形成全社会共同关注、支持、参与地下水超采区修复的良好氛围。

结束语

综上所述，南水北调中线工程在修复沿线地下水超采区方面，通过置换水源、生态补水等措施，实现了地下水位的稳步回升和水质的明显改善，为华北地区的可持续发展奠定了坚实基础。随着工程的持续运行和优化管理，相信其将在保障水资源安全、促进生态文明建设等方面发挥更加重要的作用，为华北大地带来更加持久而深远的影响。

参考文献

- [1]胡海波,封卫国.地下水超采区水资源管理与保护研究[J].水资源保护,2020,(7):81-82.
- [2]李晓明.南水北调工程对华北地区地下水资源的影响[J].水利学报,2020,(6):123-124.
- [3]赵丽华.南水北调工程对北方地区生态环境的影响研究[J].生态环境学报,2020,(2):49-50.
- [4]周桃龙.南水北调中线工程核心水源区石漠化治理探讨[J].河南林业科技,2024,(3):52-53.