

# 陶岔渠首水质变化趋势分析及对策研究

刘联兵<sup>1</sup>, 李 飞<sup>2</sup>

(1. 水利部长江水利委员会汉江流域治理保护中心, 430010, 武汉; 2. 南水北调中线水源有限责任公司, 442700, 武汉)

**摘 要:**陶岔渠首作为南水北调中线工程“水龙头”, 其水质安全直接关系华北地区上亿人口的用水安全和生态安全。当前陶岔渠首水质总体优良, 但依然存在水质类别波动。通过对2017—2024年丹江口水库及陶岔渠首断面水质监测数据分析发现: 陶岔渠首断面水质总体维持在Ⅰ类(按照河流标准评价), 局部时段总磷、溶解氧和高锰酸盐指数等指标超Ⅰ类标准; 总磷、溶解氧和高锰酸盐指数是影响陶岔渠首断面水质类别的关键指标, 而入库流量、水位和水温是驱动水质演变的关键环境因子, 同时藻类增殖、局部水动力条件也可能加剧水质波动。基于此, 提出了优化水质水量监测体系、强化数字孪生汉江应用、严格流域风险综合管控和深化水质演变规律研究等管理对策, 为维持陶岔渠首断面优良水质、深化南水北调中线工程水源地水质安全保障工作提供科学依据与实践参考。

**关键词:**南水北调中线工程; 水源地; 陶岔渠首; 水质; 监测体系; 风险管控; 数字孪生; 演变规律

**Trend analysis of water quality changes and countermeasures at the Taocha Canal Head//LIU Lianbing, LI Fei**

**Abstract:** As the “water tap” of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, the water quality at the Taocha Canal Head is directly related to the water and ecological security of hundreds of millions of people in North China. Currently, the water quality at the Taocha Canal Head is generally excellent, though fluctuations in its classification still occur. Analysis of monitoring data from 2017 to 2024 for the Danjiangkou Reservoir and the Taocha Canal Head section shows that the water quality at the Taocha Canal Head has remained at Class I (evaluated according to river water quality standards), while indicators such as total phosphorus, dissolved oxygen, and permanganate index occasionally exceed Class I standards. Total phosphorus, dissolved oxygen, and permanganate index are the key indicators affecting the water quality classification at the Taocha Canal Head section, whereas inflow discharge, water level, and water temperature are the main environmental factors driving water quality variations. In addition, algal proliferation and local hydrodynamic conditions may intensify water quality fluctuations. Based on these findings, management measures are proposed, including optimizing the water quality and quantity monitoring system, strengthening the application of the Digital Twin Hanjiang River, enhancing comprehensive basin risk control, and deepening studies on water quality evolution. These measures provide a scientific basis and practical reference for maintaining excellent water quality at the Taocha Canal Head section and strengthening water quality security in the water source area of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project.

**Keywords:** Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project; water source area; Taocha Canal Head; water quality; monitoring system; risk control; digital twin; evolution law

中图分类号: TV+TU991.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)20-0058-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.20.009

收稿日期: 2025-08-20 修回日期: 2025-09-22

作者简介: 刘联兵, 党委书记、主任, 正高级工程师, 主要研究方向为水生态环境保护。

基金项目: 丹江口库区及其上游流域水质安全重点风险管控项目[ZSY/YG-ZX(2025)015]。

## 一、引言

南水北调中线工程承载着优化水资源配置、保障国家水安全的战略使命。该工程从丹江口水库陶岔渠首引水,输水廊道跨越千里贯通京津冀豫四省(直辖市),润泽26座大中型城市,直接受益人口超1.14亿人,在推动长江-黄河-海河等流域经济协同发展、支撑国家水网高质量建设中具有不可替代的战略价值。习近平总书记多次对丹江口库区及其上游流域水质安全保障作出重要指示批示,要求确保“一泓清水永续北上”。

陶岔渠首作为中线工程的“水龙头”,其水质状况直接关系到整个中线工程供水的安全性及可靠性。自2014年通水以来,陶岔渠首断面水质稳定保持在Ⅱ类及以上标准,但部分水质指标存在波动情况:一方面,农业面源污染、城镇生活排污等污染源在水源区依然存在,可能对水质产生影响;另一方面,区域气候变化引发水文条件或生态环境改变,加剧水源地水质变化。目前针对陶岔渠首断面这一关键控制节点的水质动态演变规律认识不足,对影响水质变化的主要因素也缺少研究。

本文通过分析2017—2024年丹江口水库和陶岔渠首断面水质类别,初步揭示了丹江口水库和陶岔渠首断面水质变化规律,辨识了影响陶岔渠首断面水质

变化的关键驱动因素,并从监测体系、模型应用、风险管控、规律研究等维度提出针对性管理对策,以期为深化南水北调中线工程水源地水质安全保障工作提供科学依据与实践参考。

## 二、研究方法

本研究中水质数据来源于2017—2024年丹江口库区水质监测站网监测数据,包括三类:①16个库内监测断面,监测频次为每月1次,监测指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)表1中的24项;②陶岔渠首断面,监测频次为每天1次,监测指标为水温、pH值、浊度、溶解氧、电导率、氨氮、总磷、总氮和高锰酸盐指数等常规9项;③利用3号船浮标站和马蹬镇固定站等水质自动监测站数据进行影响因素分析,各断面及水质自动监测站点分布见图1。依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),丹江口水库参照湖库标准(总氮不参评)进行评价,陶岔渠首断面参照河流标准进行评价。

## 三、丹江口水库和陶岔渠首断面水质变化趋势

### 1. 丹江口水库水质总体变化趋势

总体来看丹江口水库水质良好,绝大部分断面水



图1 监测断面及站点分布

质维持在Ⅱ类及以上标准,个别年份秋汛期水质有所下降。从水质年均变化趋势来看(见图2),2017—2024年,库区各断面水质以Ⅰ类、Ⅱ类为主,占比范围为56%~100%;其中除2021年出现Ⅳ类水质以外,其余年份水质为Ⅲ类及以上的断面占比为100%,水质为Ⅰ类和Ⅱ类的断面占比达到70%以上。此外,根据16个监测断面逐月监测数据(见图3),绝大部分断面逐月水质能维持在Ⅱ类及以上标准,其中孤山枢纽下、柳陂镇山跟前、杨溪铺、青山安阳和远河库湾等5个断面超Ⅱ类标准月份相对较多,水质达标率(达到Ⅱ类及以上标准比例)为45%~62%,其余11个断面的水质达标率在84%以上;而逐月水质变化剧烈的断面多集中于汉库区域,且水质下降时段多集中在8—10月的汉江秋汛期,如2017年、2021年和2023年等,秋汛期水质超Ⅱ类标准比例均在50%以上。

## 2. 陶岔渠首断面水质变化趋势和类别影响指标

陶岔渠首断面水质变化趋势如图4所示,总体来看,陶岔渠首断面水质优良,基本维持在Ⅰ类标准。2017—2024年,陶岔渠首断面Ⅰ~Ⅱ类水质天数占比基本达到100%,其中仅2021年9月、10月出现6天Ⅲ类水质;Ⅰ类水质天数占比在56%以上,且除2021年和2022年以外,其余年份Ⅰ类水质天数占比达到73%以上。从具体指标来看(见表1),总磷(TP)、溶解氧(DO)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)为影响陶岔渠首断面水质类别的主要因子,其中,2023年和2024年超Ⅰ类标准的指标主要为DO,分别超标7.70%和4.38%;其余年份超Ⅰ类标准的指标主要为COD<sub>Mn</sub>,超标范围为2.18%~13.78%;此外,TP虽然超Ⅰ类标准天数相对较少,但超标幅度相对较高,如2023年仅3天超Ⅰ类标准,但超标幅度达到28.33%。从具体时段来看,陶岔

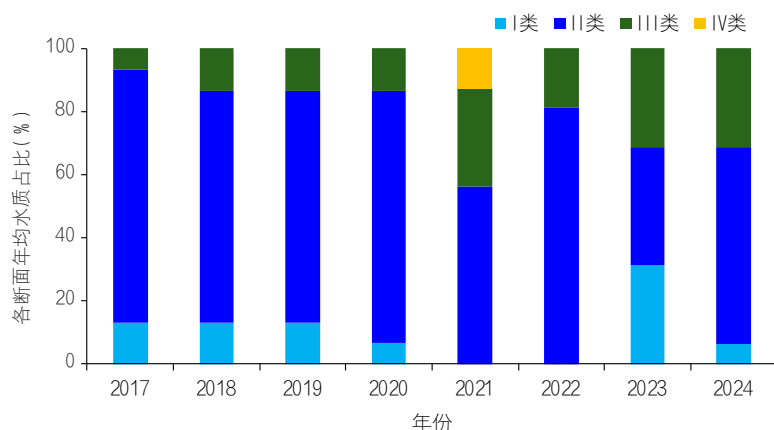


图2 丹江口水库水质年均变化趋势

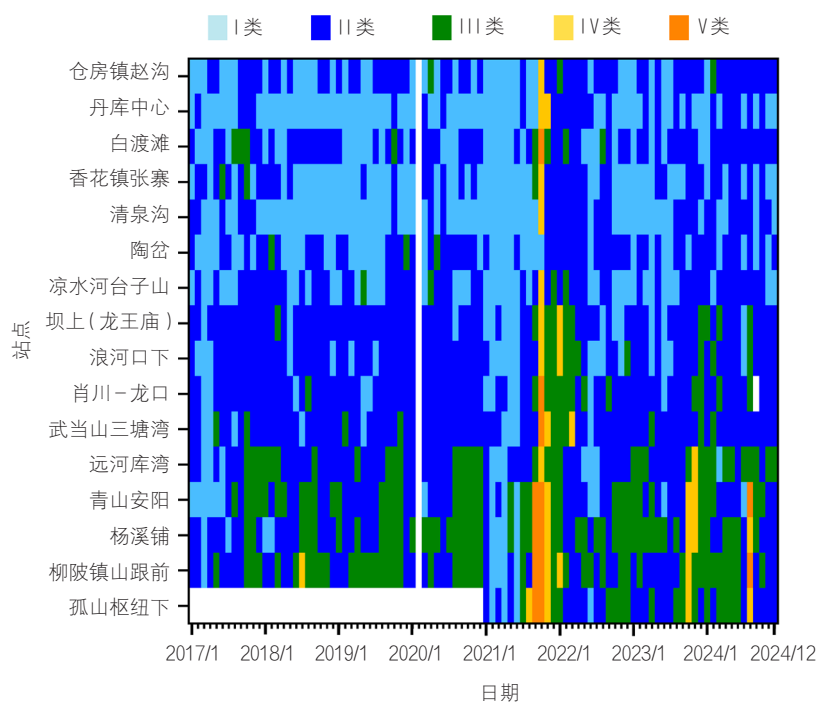


图3 16个监测断面水质月均变化趋势

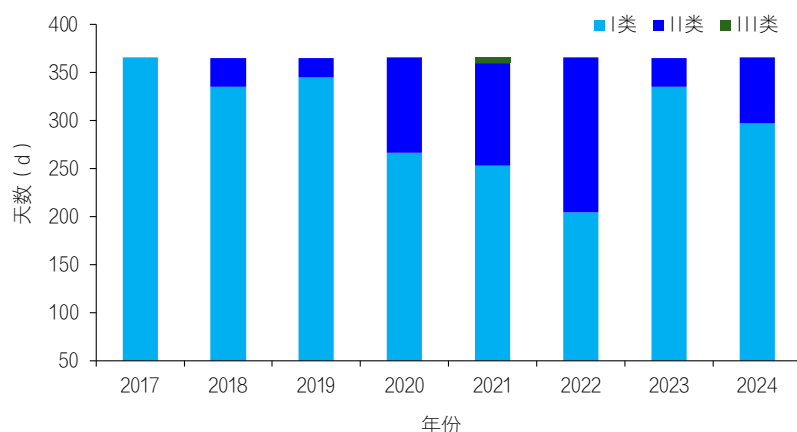


图4 2017—2024年陶岔渠首断面水质变化趋势

表1 陶岔渠首断面水质影响指标统计

年份	超Ⅰ类标准水质指标						水质类别超Ⅰ类标准天数( d )
	TP		DO		COD <sub>Mn</sub>		
	超Ⅰ类天数( d )	超Ⅰ类幅度( % )	超Ⅰ类天数( d )	超Ⅰ类幅度( % )	超Ⅰ类天数( d )	超Ⅰ类幅度( % )	
2017	0	/	0	/	0	/	0
2018	5	12	11	2.24	14	2.18	30
2019	4	12.50	1	1.30	18	2.73	20
2020	5	11	0	/	99	13.78	99
2021	8	55.56	37	9.48	85	10.45	113
2022	4	40	0	/	158	9.47	161
2023	3	28.33	22	7.70	6	2.67	30
2024	0	/	58	4.38	12	4.04	69

注：超Ⅰ类幅度以年超Ⅰ类标准的平均值计算。

渠首断面水质类别无明显季节性分布规律，如2020年集中在5—7月，2021年集中在8—12月，2022年集中在1—6月等。

3. 入库流量、水位和温度对陶岔渠首断面水质类别的影响

(1) 入库流量和水位

从2017—2024年近8年监测数据可见，陶岔渠首断面COD<sub>Mn</sub>和TP指标浓度变化与入库流量和水位之间存在一定响应关系（见图5）。在2019年、2021年和2023年典型水文周期中，当库区水位与入库流量达到峰值后，陶岔渠首断面COD<sub>Mn</sub>和TP浓度呈现规律性跃升，出现水质类别超Ⅰ类标准的情况。相关性分析表明，陶岔渠首COD<sub>Mn</sub>与水位存在显著正相关性（ $r=0.382, p<0.01$ ），与入库流量相关性不显著（ $r=0.005, p>0.05$ ）。从污染源输入角度考虑，陶岔渠首断面可能受两方面因素影响：一方面，入库河流作为流域污染物输移载体，高流量过程往往伴随流域面源污染的集中汇入，上游河网挟带的氮磷等营养盐及有机污染物随径流进入库区，形成突发性负荷冲击，通过水体迁移转化后对陶岔渠首断面水

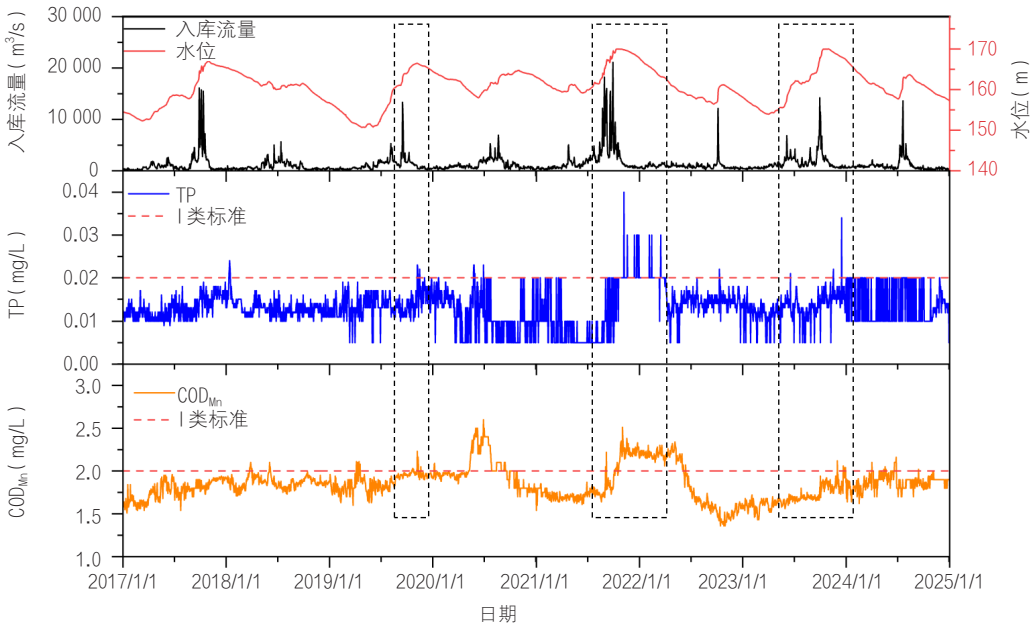


图5 2017—2024年陶岔渠首断面入库流量、水位与COD<sub>Mn</sub>和TP同期逐日变化

质产生影响；另一方面，水位抬升引发的消落区污染物释放效应不容忽视，特别是丹库水域消落区分布着大面积耕地，在库区水位抬升过程中，消落带土壤中蓄积的有机质、磷等污染物随淹没过程逐步释放，可能影响陶岔渠首水质。

以2021年为例，受汉江秋汛影响，8—10月丹江口水库入库流量明显增加（其中白河站入库洪峰达到17 700 m³/s，丹江入库洪峰达到2230 m³/s），水位持续上升，并于10月13日达到170 m。在此期间，陶岔渠首断面COD<sub>Mn</sub>浓度在10月初开始上升（首次突破2.0 mg/L），而同期上游的3号船浮标站COD<sub>Mn</sub>浓度仍低于2.0 mg/L，马蹬镇固定站的COD<sub>Mn</sub>浓度直至10月中旬才出现上升



趋势,时间上明显滞后于陶岔渠首断面。此外,马蹬镇固定站的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度超Ⅰ类标准现象( $>2.0\text{ mg/L}$ )持续至次年8月,而陶岔渠首断面在次年6月末已恢复至正常水平( $<2.0\text{ mg/L}$ )。若仅考虑水流传输的延迟效应,陶岔渠首断面的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度变化应晚于上游站点,但实际观测结果相反。加之该年份水位与 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度呈显著正相关( $r=0.861, p<0.01$ ),因此推测水位抬升导致的淹没释放(如淹没区有机物分解)可能是2021年陶岔渠首断面 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度异常升高的主要原因。

虽然陶岔渠首 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度与入库流量相关性不显著,但个别高流量入库条件仍可能影响陶岔渠首断面水质,因为入库河流除对陶岔渠首断面水体直接冲击作用外,其挟带的高浓度污染物还可能导致水库其他水域污染物本底浓度升高,从而间接影响该断面水质。此外,藻类活动也可能是陶岔渠首断面 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度变化的重要影响因素。例如,2020年5—8月期间,库区水位长期维持在160 m左右,且未出现明显洪水过程(入库流量峰值晚于 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度峰值),但陶岔渠首断面 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度仍持续94天超出Ⅰ类水质标准。同期监测数据显示,中线总干渠藻密度与 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度均处于较高水平,且已有研究证实二者呈显著正相关。结合藻类代谢过程中释放的溶解性有机质贡献,初步推断该时段水质异常可能受藻类增殖影响。

## (2) 温度

与多数研究结论一致,陶岔渠首断面DO含量表现出明显的温度依赖性特征。2017—2024年监测数据显示,DO含量呈现显著的季节性波动规律,大体在 $7\sim 12\text{ mg/L}$ 之间波动,其变化趋势与水温(WT)呈明显的反向对应关系(见图6)。相关性分析表明,DO含量与WT存在极显著负相关性( $r=-0.783, p<0.01$ )。值得注意的是,当WT超过 $22^\circ\text{C}$ 时,DO含量超Ⅰ类水质标准的概率显著升高至40%。以2021年、2023年和2024年为例,这三年WT超过 $22^\circ\text{C}$ 的天数分别达到136 d、156 d和169

d,均出现了DO含量小于 $7.5\text{ mg/L}$ (超Ⅰ类标准)情况。特别是2024年,DO含量小于 $7.5\text{ mg/L}$ 月份集中在7—10月,其间WT持续偏高,其中7月和9月WT超过 $22^\circ\text{C}$ 的天数均达30 d,10月达19 d。相关分析显示,该年度DO含量与WT的负相关性更强( $r=-0.861, p<0.01$ ),表明高水温是导致该年DO含量降类的主要驱动因素。

需要指出的是,温度对水质的影响具有多重性,除降低DO含量外,还会影响污染物迁移转化和生物活性等过程。同时,DO含量变化还受其他因素调控,如2019年和2022年,虽高温天数较多但未出现DO含量超Ⅰ类标准情况,这可能与水文条件、藻类活动及外源输入等因素有关。以2022年为例,在高温集中的6—10月,陶岔渠首平均入库流量为 $1086\text{ m}^3/\text{s}$ ,平均水位为158.4 m,均显著低于其他高温年份,该水文条件可能导致外源入库污染负荷和消落区内源释放强度减弱,输送至渠首水域的耗氧性物质总量减少,而 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 平均浓度仅为 $1.65\text{ mg/L}$ ,也印证了水体耗氧水平较低,从而为DO含量维持在较高水平提供了有利条件。上述分析表明,单一气象因子(如高温)并不直接决定DO浓度,其影响往往通过与水文、污染源及生物代谢等的交互作用而显现。因此,未来需加强多因子耦合作用机制研究,以更全面把握陶岔渠首断面水质演变规律。

## 四、维持陶岔渠首优良水质的管理对策

陶岔渠首是南水北调中线工程输水的起点,确保

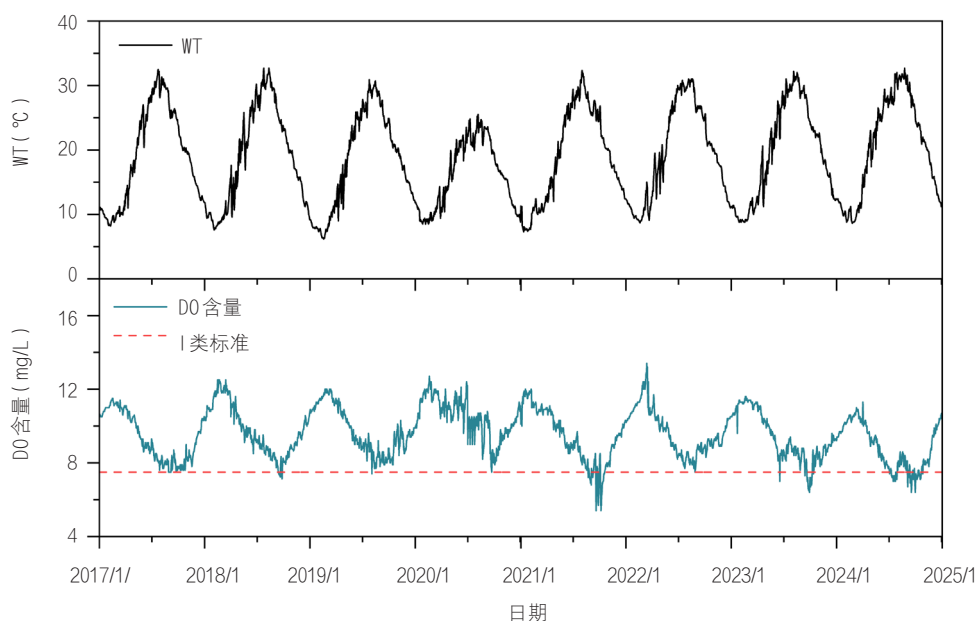


图6 2017—2024年陶岔渠首断面DO含量与WT同期逐日分布曲线

其水质优良是检验中线水源地水质保障和维护成效的关键。根据上述分析可知,入库流量、水位和温度是影响陶岔渠首水质类别波动的关键自然诱因,但根本制约仍源于流域污染物输入。陶岔渠首水质变化特征是自然因素和人为因素综合影响的结果,在自然因素难以人为调控的现实背景下,削减人为因素影响成为维持渠首水质优良的根本途径。为确保“一泓清水永续北上”,实现中线工程水质安全,本研究提出了优化水质水量监测体系、强化数字孪生汉江应用、严格流域风险综合管控和深化水质演变规律研究等系统性管理对策和建议。通过以上措施,系统构建看得清、算得准、管得住、谋得远的全链条智慧化水质管控体系,为实现陶岔渠首水质长期维持优良水平提供坚实保障。

### 1. 优化水质水量监测体系,确保水质问题“看得清”

监测是保障水质安全的基础与“耳目”。当前,水库管理单位已围绕库区及入库支流构建了相对严密的水质水量监测体系,然而,陶岔渠首断面作为南水北调中线工程水源地的关键节点,其受上游来水、消落区淹没、库区生态变化和气候变化等多重因素叠加影响。当前监测体系尚难以支撑该断面水质问题精准诊断,制约了水质风险防范从“被动应对”向“主动预警”的跨越。因此,建议进一步优化水质水量监测体系,确保水质问题“看得清”。

①构建立体监测网络,实现重点时空全覆盖。以陶岔渠首断面为核心,向上下游、入渠口等关键节点延伸,在汉库与丹库水域交换区等关键位置,优化和加紧密固定监测站点的布设,强化渠首水域的垂向分层监测,形成覆盖渠首水域与关键断面的常规立体监测网格,并加强洪水期和水华高发期等特殊风险时段的高频高密度动态化监测。

②拓宽监测指标广度和维度,支撑溯源与问题诊断。在常规水质指标监测基础上,强化氮、磷等关键指标形态监测,针对现代化生活与产业活动带来的污染新挑战,将抗生素、微塑料和内分泌干扰物等新污染物纳入监测体系;加强汉库与丹库交换水域和陶岔水域流场监测,揭示水库流态变化与陶岔渠首断面水质响应的内在关联。此外,考虑藻类对陶岔渠首断面水质的影响,建议将浮游植物定性和定量、叶绿素a浓度等关键水生态指标纳入常规监测体系;统筹推动水资源、水环境、水生态“三水”协同监测,在两库交互带和渠

首处增设水质水量同步监测断面,开展通量分析,量化水动力过程对污染物迁移的影响。

③强化流域断面联动评价,厘清责任与传输过程。在完善陶岔渠首断面上下游水域水质监测体系基础上,建议协同监测频次与技术标准,同步采集高锰酸盐指数、新污染物、水生态等核心指标,探明污染物迁移转化规律。与干渠水体开展水质联动评价,建立联动评价指标体系,明确陶岔渠首断面对干渠水体的污染影响,为南水北调中线工程跨区域联防联控提供决策依据。

④加强智能监测技术应用,提升感知与预警能力。加快推进陶岔渠首水质自动监测“超级站”的智能化升级,强化无人机巡检、高光谱遥感、生物传感等前沿技术的创新应用。全面布设高频在线监测仪、水下传感器、视频监控等物联网设备,实现水质、水量、水生态参数小时级高频采集与多源数据融合,彻底打通数据感知“最后一公里”,为水质安全风险早期识别与预警提供坚实技术支撑。

### 2. 强化数字孪生汉江应用,实现水质变化“算得准”

当前,陶岔渠首水质管理仍以人工监测和事后响应为主,面临水质波动或降类风险时,常难以精准追溯责任边界与明晰演变规律。在气候变化、水文情势与人类活动等多重因素复合影响下,未来陶岔渠首水质管理形势更趋复杂。突破当前困境的关键在于全面提升水质智慧管控能力。系统整合既有数字孪生丹江口工程、数字孪生汉江流域等平台资源,以预报、预警、预演、预案为核心,构建感知-模拟-决策-控制一体化智慧水质管控体系,以数字技术全面赋能陶岔渠首水质管理迈向精准智治新阶段,实现水质变化“算得准”。

①构建多源数据融合平台。整合接入数字孪生平台已汇聚的监测、业务、空间及物联感知数据,构建统一标准、动态更新的全要素数据资源库。通过数据清洗与融合处理,形成覆盖水文、水质、水生态、工程运行、气象等多维信息的“一张图”,为水质模拟与预测提供高质量数据支撑。

②强化预报能力建设。依托多源数据,构建并持续优化水动力-水质-生态耦合模型,实现对陶岔渠首断面水质指标(如TP、COD<sub>Mn</sub>、DO和藻密度等)的多情景精细化预报。融合气象与来水预报信息,有效延长预见期,提升预报准确性,为风险研判与调度决策提



供科学依据。同步完善数据报送与分析流程,增强时效性与可靠性,并推动人工智能技术在水质趋势研判中的深度应用,为实现水质风险早发现、早研判、早处置提供预报支撑。

③深化预警能力建设。建立分级分类水质安全预警指标体系和动态自适应阈值模型,基于实时监测与多源预报数据,实现水质超标、异常突变和潜在风险的自动识别与多渠道实时告警。推动从单一指标预警向多维度风险预警转变,积极推进从监测预警向预报预警跨越,增强风险预见和主动防控能力。

④加强预演能力建设。依托数字孪生平台的模拟仿真引擎,对不同的调度方案(如闸坝联调、生态补水)或突发情景(如污染事故、强降雨)进行多维度、多情景的动态预演与效果评估。针对洪水期水质波动风险,在保障防洪安全前提下,探索丹江口水库及上游水库梯级有序拦蓄,实现污染物有效拦截。通过“数字沙盘”对比不同方案的改善效果、成本与影响,为调度决策提供直观、科学的依据。

⑤完善预案能力建设。建立与预警等级和预演结果联动的智能预案库,实现应急处置流程的标准化与自动化。预警触发后,系统自动匹配并推荐最优处置预案,通过与工程调度系统协同,实现关键指令的一键下发,提升多部门协同效率与应急处置能力,确保水质安全风险可控、能控、在控。

### 3. 严格流域风险综合管控,保障波动风险“管得住”

自然因素难以人为调控,减轻人为污染负荷成为维持陶岔渠首水质优良的关键路径。为有效应对汛期水质波动这一重大不确定风险,建议严格流域风险综合管控,保障水质波动风险“管得住”。

①强化源头治理,削减入库污染负荷。持续推进生态清洁小流域建设,系统实施流域水土流失治理和生态缓冲带建设。推广绿色种植和生态养殖,减少化肥农药施用。完善城镇污水收集处理设施,推进雨污分流改造,严格管控工业点源与生活污染源排放,从源头减少氮、磷及耗氧性污染物的产生和迁移。

②加强过程拦截,构建梯级防控体系。在支流河口、丹库消落区及重点库湾等关键区域建设生态浮床、透水坝、人工湿地等拦截工程。强化初期雨水和溢流污染治理,推进城镇径流污染防控系统建设。优化流域闸坝与水库群联合调度,在保障防洪安全前提下发挥上游水库群拦污、滞污、净污作用。

③聚焦敏感区域,实施重点空间管控。严格落实《丹江口水库岸线保护与利用规划》,实行消落区土地用途管制和分区管控,持续推进消落区生态植被修复,选育耐淹植物种,恢复健康生态系统。依法贯彻《中华人民共和国长江保护法》,推动消落区禁止施用化肥农药,有效防控内源污染释放。加强对陶岔渠首周边及上游直接汇水区的巡查监管与生态保护,全面清理环境风险源,严禁任何可能威胁水质安全的活动,严守水源地生态红线。

④健全协同机制,实现跨区域、跨部门联防联控。建立流域水资源、水环境、水生态统一调度机制,以《陶岔渠首突发水污染事件应急预案》为基础,明确上下游地区地方政府,以及水利、生态环境、应急管理、农业农村、住房城乡建设等多部门职责,定期开展多部门联合应急演练。推动水利、气象、生态环境、农业农村等多部门数据实时共享与定期会商,重点完善水库与干渠管理单位的数据共享与调度联动机制。健全跨行政区流域生态补偿与协同治理制度,明晰各方责任与义务,形成责任共担、效益共享、齐抓共管的流域保护与发展格局。

### 4. 深化水质演变规律研究,驱动决策支持“谋得远”

当前研究表明,高锰酸盐指数、溶解氧、总磷等指标为陶岔渠首断面水质跨类别的关键影响因子,且发现入库流量、水位、温度等因素与陶岔渠首断面水质存在关联,但部分年份水质类别突变的诱因仍存认知盲区,尤其是库区对上游污染物输入的缓冲与转化机制尚未量化,导致难以精准掌握陶岔渠首断面水质演变规律和趋势。因此,亟须深入开展陶岔渠首断面的水质演变规律研究。

①厘清水质演变驱动机制,量化关键因子响应关系。重点研究高锰酸盐指数、溶解氧、总磷等指标对水质类别的决定性作用,系统分析其与流量、水位、温度等水文气象因子的耦合关系,构建不同水情条件下水质参数的定量响应模型,识别水质类别突变的临界水文阈值及主要驱动因子。

②揭示库区至渠首区段污染物迁移转化过程与缓冲机制。聚焦磷、有机物等污染物在该区段的吸附、沉降、降解等环境行为,分析消落区出露与淹没交替对内源释放的影响,量化库区水体对上游污染物输入的缓冲容量与净化效能。探究入库支流与陶岔渠首水质浓度关系,建立入库通量与陶岔渠首水质浓度的动态响

应关系,明确水质降类的入库通量风险阈值。

③强化水质趋势智能预测与多情景研判能力。基于上述机理认识,持续迭代升级数字孪生平台中的水质模型,开展不同水文条件、污染负荷、气候变化及藻类增殖情景下陶岔渠首水质变化的多维度模拟与趋势推演,增强对短期突变和长期趋势的预测能力,提升水质风险预警的预见性与防控精准性。

④构建基于知识的决策支持系统,形成适应性调控策略。结合典型风险情景下的模拟研判成果,系统评估生态调度、工程拦截等应急措施对陶岔渠首水质的改善效果,将响应规则与调控阈值转化为结构化知识库和决策算法,集成至水质管理业务系统,实现基于实时监测与预报结果的动态优化调度与自适应应急响应。

#### 参考文献:

- [1] 李勇.努力谱写新时代南水北调工程高质量发展新篇章[J].水利发展研究,2024,24(12):44-47.
- [2] 刘兆孝,习刚正,王超.南水北调中线工程水源地水质安全问题与对策思考[J].中国水利,2024(20):74-80.
- [3] WANG X Y, LI Z Q, LI M T.Impacts of climate change on stream flow and water quality in a drinking water source area, Northern China[J].Environmental Earth Sciences, 2018, 77(11):410-423.
- [4] MICHALAK A M.Study role of climate change in extreme threats to water quality[J].Nature, 2016, 535(7612):349-350.
- [5] 郭家钰,王从锋,林莉,等.丹江口水库氮磷营养盐分布规律及影响因子[J].环境科学与技术,2025,48(7):94-103.
- [6] 余启辉,林莉,金海洋,等.丹江口水库氮磷时空分布特征及水质安全保障对策[J].中国水利,2024(20):59-66.
- [7] 辛小康,王超,柳根,等.南水北调中线水源区农田面源污染防治现状分析与对策建议[J].中国水利,2024(20):81-88.
- [8] 尹炜,王超,王立,等.丹江口水库总磷时空分布特征及其影响因素[J].人民长江,2023,54(1):1-7+10.
- [9] 尹炜,朱惇,雷俊山,等.丹江口水库典型消落区不同土地利用类型土壤养分分布[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1185-1191.
- [10] 段扬,秦韬,王京晶,等.丹江口水库三维水动力模拟研究[J].人民黄河,2018,40(3):119-122+156.
- [11] WANG C, ZHANG H, PEI L, et al.Evidence on

the causes of the rising levels of COD (Mn) along the middle route of the South-to-North Diversion Project in China: The role of algal dissolved organic matter[J].Journal of environment sciences, 2022, 113(3):281-290.

- [12] 黄彩海,李合义,王彩金,等.水中饱和溶解氧热力学经验计算式的建立与应用[J].陕西环境,1996(2):12-16.
- [13] 王超,辛小康,王树磊,等.长距离人工输水渠道水质时空演变规律研究——以南水北调中线总干渠为例[J].环境科学学报,2022,42(2):184-194.
- [14] GUDASZ C, BASTVIKEN D, STEGER K, et al.Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments.[J].Nature, 2010, 466(7305):478-481.
- [15] PAERL HW, HUISMAN J.Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms.[J].Environmental microbiology reports, 2009, 1(1):27-37.
- [16] 黎睿,汤显强,胡艳平,等.四湖总干渠溶解氧季节性异常特征与成因分析[J].中国环境科学,2025,45(5):2816-2826.
- [17] 张胜,苏紫颖,林莉,等.泄洪对典型有机污染物迁移转化行为的影响——以丹江口水库为例[J].湖泊科学,2022,34(1):108-117.
- [18] 潘雄,林莉,张胜,等.丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征[J].环境科学,2021,42(3):1372-1379.
- [19] 许继军,曾子悦.适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[J].长江科学院院报,2021,38(10):27-32+39.
- [20] 钮新强,吴永妍,王磊,等.高质量建设国家水网工程的思考与建议[J].中国工程科学,2024,26(6):108-119.
- [21] 张潇月,刘杰,夏佩琦,等.深型水库沉积物-水界面磷释放时空特征与驱动机制:以丹江口水库为例[J/OL].环境科学,1-15(2025-08-19)[2025-10-21].<https://doi.org/10.13227/j.hjks.202504090>.
- [22] RUBIN H.Environmental fluid mechanics[M]. Florida: CRC Press, 2001.

责任编辑 董林琳