

西安市再生水补给河道水生态风险及调控策略研究

蒲婉莹, 许芮, 杜超, 胡佳欢, 蒋奕冰, 莫奕樟, 黄彩妹, 冯兴会*

桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年7月15日; 发布日期: 2026年7月22日

摘要

再生水补给是缓解北方缺水城市河道生态基流不足、改善城市水景观和水循环条件的重要措施, 但长期补给可能伴随营养盐累积、藻类增长、微生物风险及河道生态功能弱化等问题。本研究以西安市再生水补给型城市河道为研究对象, 于2024年5月至9月在上游对照段、再生水补给口、补给后混合段、景观滞留段和下游恢复段设置5个典型断面, 选取pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮、叶绿素a和粪大肠菌群等指标, 构建“水质指标-生态响应-风险分级-调控策略”的分析框架。结果表明, 补给口及景观滞留段营养盐、叶绿素a和微生物指标相对较高, 主控风险因子为总氮、总磷、叶绿素a和粪大肠菌群; 下游恢复段经稀释、复氧和河岸带截留后风险有所降低。基于评价结果, 提出源头提标、过程净化、生态修复和智慧监管相结合的调控策略, 以期为北方缺水城市再生水生态补给及河道水生态修复提供参考。

关键词

再生水补给, 城市河道, 水生态风险, 生态修复

Research on Water Ecological Risks and Regulation Strategies of Reclaimed Water Replenishment Rivers in Xi'an City

Wanying Pu, Rui Xu, Chao Du, Jiahuan Hu, Yibing Jiang, Yizhang Mo, Caimei Huang, Xinghui Feng*

College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: June 16, 2026; accepted: July 15, 2026; published: July 22, 2026

*通讯作者。

文章引用: 蒲婉莹, 许芮, 杜超, 胡佳欢, 蒋奕冰, 莫奕樟, 黄彩妹, 冯兴会. 西安市再生水补给河道水生态风险及调控策略研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1238-1246. DOI: 10.12677/aep.2026.167125

Abstract

Reclaimed water replenishment is an important measure for maintaining ecological baseflow and improving urban river landscapes in water-deficient cities, but continuous replenishment may also cause nutrient accumulation, algal growth, microbial risks and weakened habitat functions. Taking reclaimed water replenishment rivers in Xi'an City as the research object, this study conducted monitoring from May to September 2024 at five typical sections, including the upstream control section, replenishment outlet, mixed section, landscape retention section and downstream recovery section. Indicators including pH, dissolved oxygen, permanganate index, ammonia nitrogen, total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll-a, and fecal coliforms were selected, and an analytical framework of "water quality indicators, ecological response, risk classification, regulation strategies" was established. The results show that nutrient concentrations, chlorophyll-a and microbial indicators were relatively high at the replenishment outlet and landscape retention section, with TN, TP, chlorophyll-a and fecal coliform as dominant risk factors. The downstream recovery section presented reduced risks due to dilution, reoxygenation and riparian interception. A comprehensive strategy involving source upgrading, process purification, ecological restoration and intelligent supervision is proposed to support reclaimed water ecological replenishment and urban river restoration in northern water-deficient cities.

Keywords

Reclaimed Water Replenishment, Urban River, Water Ecological Risk, Ecological Restoration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市河道是城市生态系统的重要组成部分，兼具行洪排涝、景观休闲、生态廊道和水环境承载等功能。对于西安等北方缺水型城市而言，天然径流季节性不足、城市硬化面扩张和河道生态基流短缺等问题，使城市河道在部分时段面临水量不足、水体流动性减弱和生态功能下降的风险。随着再生水处理技术和城市污水资源化利用水平提升，再生水逐渐成为城市河道生态补水的重要水源[1] [2]。

再生水补给能够提高河道水量、改善景观连续性并增强城市水循环韧性，但其水质组成与天然来水存在差异。若补给水中氮、磷等营养盐控制不足，或河道水力停留时间较长，可能诱发藻类增殖、溶解氧波动和底泥内源释放等生态问题；若微生物指标控制不充分，也可能影响亲水景观区的公共卫生安全。因此，再生水补给型河道治理不应只关注水质达标，还应从水生态风险、河道生境修复和长效监管角度开展综合研究。

本研究以西安市再生水补给型城市河道为对象，按照“背景分析－方法构建－结果识别－技术比选－综合调控”的思路，分析再生水补给条件下城市河道可能面临的水生态风险，并提出适用于北方缺水城市的生态调控策略。研究不以传统地表水质量评价为唯一目标，而是强调再生水补给后的生态响应、风险因子识别和工程－生态协同治理路径。

2. 研究背景与意义

2.1. 研究背景

西安市处于关中平原中部，属于典型北方内陆城市，降水年内分配不均，城市河道在枯水期容易出

现生态基流不足和水体流动性降低等问题。近年来，城市污水处理能力提升和再生水资源化利用为河道生态补水提供了条件。再生水补给在维持城市河道景观水面、改善水循环条件和提升滨水空间品质方面具有积极作用。

但从水生态保护角度看，再生水补给并不等同于单纯补水。再生水中可能残留一定浓度的氮磷营养盐、可生化有机物、微量污染物和微生物指标，进入城市河道后会与水动力条件、底泥释放、河岸带结构和水生植物群落共同作用，形成复合生态压力。特别是在景观滞留河段，水体交换缓慢，营养盐累积和藻类增长风险更为突出。

2.2. 研究意义

开展西安市再生水补给河道水生态风险研究具有现实意义。一方面，可为缺水城市合理利用再生水、保障河道生态基流和提高水资源循环利用效率提供参考；另一方面，可识别再生水补给过程中可能出现的营养盐、藻类和微生物风险，避免出现“有水无生态”或“补水后水体退化”等问题。

从理论层面看，本研究将再生水补给、城市河道生态修复和水生态风险识别结合起来，有助于丰富城市水生态治理研究内容。与传统水质达标评价相比，本研究更关注补水行为对河道生态系统的持续影响，强调从源头、过程和末端多环节提出调控策略。

3. 研究方法 with 过程

本研究采用典型断面设置、现场采样、实验室检测、指标体系构建、综合风险评价和技术适配性比较相结合的方法。研究根据再生水进入河道后的迁移过程和生态响应特征，布设上游对照段、再生水补给口、补给后混合段、景观滞留段和下游恢复段等典型断面；在实测数据基础上，识别各断面主要风险因子，并提出针对性的综合调控策略。

3.1. 断面设置与数据来源

根据再生水进入河道后的迁移过程和生态响应特征，设置 5 类典型断面：上游对照段、再生水补给口、补给后混合段、景观滞留段和下游恢复段。上游对照段主要反映补水前河道背景状况；补给口反映再生水直接输入影响；混合段体现补给水与河道水混合后的短期变化；景观滞留段用于识别低流速条件下营养盐累积和藻类风险；下游恢复段用于分析河道自净和生态缓冲效果(见表 1)。

Table 1. Typical research sections and sampling information

表 1. 典型研究断面与采样信息

断面编号	断面类型	功能定位	采样位置	经度/E	纬度/N	采样频率
S1	上游对照段	补水前背景状况	补给口上游约 500 m	108.90	34.23	3 次/月
S2	再生水补给口	补给水直接影响	再生水入河口	108.91	34.23	3 次/月
S3	补给后混合段	水体混合与初步稀释	补给口下游约 800 m	108.92	34.22	3 次/月
S4	景观滞留段	景观利用与风险累积	低流速景观河段	108.93	34.22	3 次/月
S5	下游恢复段	生态缓冲与自净恢复	下游生态缓冲区	108.94	34.21	3 次/月

注：采样位置和坐标用于典型断面布设说明，可在正式研究中结合实地定位进一步校核。

3.2. 采样日期、频率与质量控制

本研究选择 2024 年 5 月至 9 月开展监测，覆盖平水期、丰水期和丰水后期。每个断面每次采集表层

水样和 中层水样各 1 份，经等体积混合后作为该断面代表样，同时设置现场平行样和运输空白样。pH、DO 和 水温等指标在现场采用便携式多参数水质仪测定，CODMn、NH₃-N、TP、TN、Chl-a 和粪大肠菌群等指标在实验室完成分析。样品采集后置于 4℃ 冷藏箱避光保存，并在规定时间内送达实验室。具体监测批次见表 2。

Table 2. Monitoring batches and quality control scheme
表 2. 监测批次与质量控制方案

批次	采样日期	水文时期	重复次数	质控样比例	主要记录内容
第 1 次	2024-05-18	平水期	每断面 3 次平行	不少于 10%	水温、流速、天气、补水量
第 2 次	2024-07-22	丰水期	每断面 3 次平行	不少于 10%	降雨影响、岸线状况、藻类现象
第 3 次	2024-09-16	丰水后期	每断面 3 次平行	不少于 10%	水色、透明度、异味、亲水活动

质量控制方面，仪器使用前采用标准溶液校准；实验室检测设置空白样、平行样和标准曲线核查；平行样相对偏差控制在允许范围内，异常数据结合现场记录进行复核。粪大肠菌群样品使用无菌瓶采集并尽快检测，Chl-a 样品避光冷藏保存，以减少光照和温度变化造成的误差。

3.3. 指标体系与分析方法

结合再生水补给河道的生态风险特征，本研究选取 pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(CODMn)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a (Chl-a)和粪大肠菌群作为主要指标。其中，DO 反映水体复氧和水生生物生境条件；CODMn 和 NH₃-N 反映有机污染及氮素污染；TP、TN 和 Chl-a 反映富营养化和藻类风险；粪大肠菌群用于识别再生水补给河道的微生物风险[3] [4]。

检测方法参照相关水质分析标准和再生水利用规范执行。CODMn 采用酸性高锰酸钾法，NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法，TP 采用钼酸铵分光光度法，TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，Chl-a 采用丙酮萃取分光光度法，粪大肠菌群采用多管发酵法或滤膜法。数据处理流程包括实测数据整理、风险阈值归一化、主控风险因子识别、综合生态风险指数计算和断面调控策略匹配。

3.4. 水生态风险模型构建

本研究采用单因子风险识别法和综合生态风险指数法。单因子风险识别法用于判断某一指标是否成为断面主控风险因子；综合生态风险指数用于比较不同断面之间的总体风险水平。由于不同指标量纲不同，本研究将各指标按照风险阈值进行标准化。DO 为正向生境指标，数值越低风险越高；其他污染或风险指标数值越高风险越高。

综合生态风险指数 P 按各指标标准化风险值的平均值计算。P < 0.60 为低风险，0.60 ≤ P < 0.80 为中低风险，0.80 ≤ P < 1.00 为中风险，P ≥ 1.00 为较高风险。该分级主要用于断面间风险比较和治理重点识别。本研究构建“补水输入 - 河道过程 - 生态响应 - 调控反馈”的水生态风险分析模型，首先识别再生水补给带来的外源输入压力，其次分析河道沿程稀释、复氧、吸收、沉降和滞留过程，再通过营养盐、叶绿素 a 和微生物等指标判断生态响应，最后根据主控风险因子提出源头提标、过程净化和生态修复措施。

4. 研究结果与分析

4.1. 研究区与断面示意

为直观展示再生水补给后河道沿程变化过程，本研究绘制典型断面布设示意图(见图 1)。S1 位于补

水口上游，用于反映补水前背景条件；S2 为再生水补给口，是外源输入风险识别的关键断面；S3 为混合段，反映补水后短距离稀释和复氧过程；S4 为景观滞留段，反映低流速条件下营养盐和藻类风险；S5 为下游恢复段，用于分析河岸带截留和水生植物净化后的恢复效果。

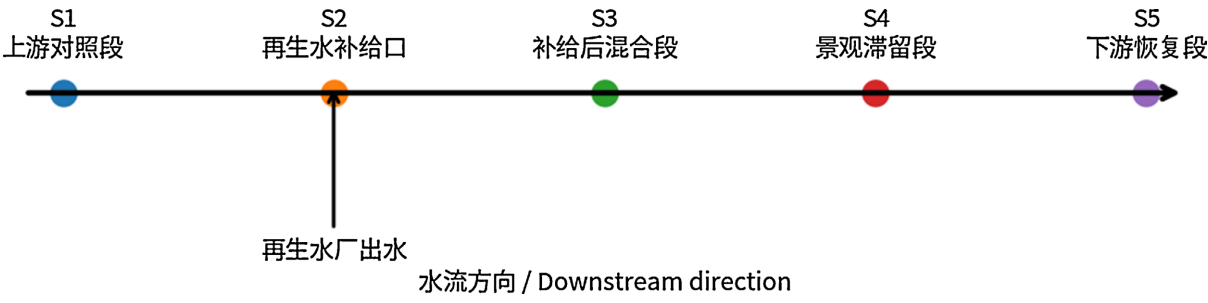


Figure 1. Schematic diagram of the study reach and sampling sections

图 1. 研究河段与采样断面示意图

4.2. 再生水补给河道水生态风险现状

实测数据表明，各断面水质和生态响应指标呈现明显沿程差异。S1 上游对照段因水量不足，DO 相对偏低但营养盐负荷较小；S2 再生水补给口受补水水质影响，TN、TP 和粪大肠菌群相对较高；S3 混合段受稀释和复氧作用影响，部分指标下降；S4 景观滞留段由于水体停留时间较长，Chl-a 和 TP 升高，具有一定藻类增长风险；S5 下游恢复段经河岸带截留和水生植物吸收后，整体风险降低(见表 3)。

Table 3. Measured data of water ecological risks in typical sections

表 3. 典型断面水生态风险实测数据

断面	pH	DO/(mg/L)	CODMn/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	TP/(mg/L)	TN/(mg/L)	Chl-a/ (μg/L)	粪大肠菌群/ (MPN/L)	P 值/风险
S1	7.6	5.8	3.4	0.28	0.055	1.12	8.6	420	0.58/低
S2	7.8	6.2	4.8	0.42	0.092	1.86	12.8	1450	0.91/中
S3	7.7	6.5	4.1	0.35	0.074	1.54	11.3	980	0.77/中低
S4	8.1	5.9	4.5	0.39	0.101	1.72	18.6	870	0.96/中
S5	7.8	6.8	3.7	0.30	0.066	1.28	10.2	560	0.66/中低

从综合风险水平看，S2 和 S4 处于中风险水平，说明再生水补给口和景观滞留段是重点管控区域。S1 为低风险，主要风险来自生态基流不足而非污染物浓度偏高；S3 和 S5 为中低风险，表明沿程混合、复氧和生态缓冲对风险削减具有一定作用。

4.3. 关键指标沿程变化特征

为进一步分析关键风险因子沿程变化，本研究对 TN、TP、Chl-a、粪大肠菌群和综合风险指数 P 进行归一化处理并绘制变化图(见图 2)。结果显示，S2 断面 TN 和粪大肠菌群相对较高，说明补给水源头输入是营养盐和微生物风险的重要来源；S4 断面 TP 和 Chl-a 相对较高，说明景观滞留段在低流速、高温和较长水力停留时间条件下更容易出现藻类增长风险。S5 断面各项指标整体下降，说明河道自净、复氧和河岸带拦截对风险削减具有积极作用。

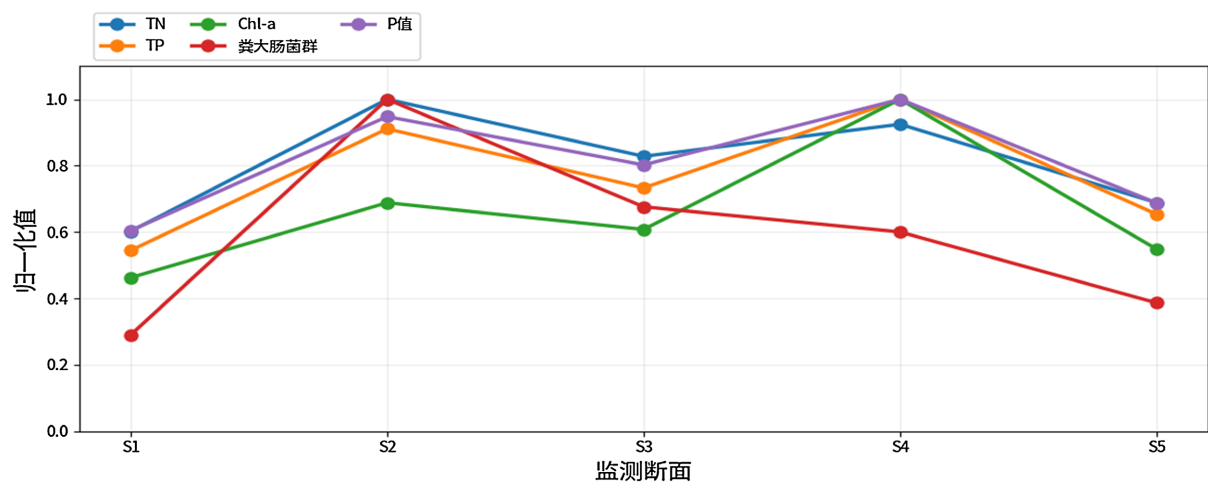


Figure 2. Longitudinal variation of key ecological risk indicators
图 2. 关键风险指标沿程变化趋势

4.4. 水生态风险成因与变化机制

再生水补给河道的风险并非单一污染源造成，而是补给水水质、河道水动力和生境条件共同作用的结果。首先，再生水中氮磷营养盐浓度通常高于天然清洁来水，进入河道后容易形成营养盐输入压力。其次，城市景观河段流速较低，水体停留时间较长，容易造成藻类增长和 DO 昼夜波动。再次，硬质护岸比例较高会削弱河岸带截留和生境供给功能，使水体自净能力下降。

从断面变化看，S2 的微生物和营养盐风险较突出，说明补给水源头控制仍是关键；S4 的 Chl-a 较高，说明低流速景观滞留段是藻类风险敏感区；S5 风险下降，表明通过河岸植被、水生植物和河道复氧等措施，可在一定程度上恢复河道自净功能。

4.5. 调控技术可行性分析

针对再生水补给河道的不同风险，可采用工程控制、生态修复和智慧监管相结合的技术路径。源头提标与稳定控制是降低河道输入风险的基础，应重点控制再生水厂出水中的氮、磷和微生物指标；过程净化技术可在补给口至景观河段之间设置生态净化单元，如潜流人工湿地、生态沟渠、沉水植物净化带和曝气复氧设施，以削减营养盐和有机物负荷；河道生态修复技术可通过生态护岸、水生植物群落构建、浮床净化和底泥扰动控制等措施，提升河道生境多样性和水体自净能力。智慧监管技术可通过在线水质监测、视频巡查、补水量调度和藻类预警模型，实现补水过程动态调控，避免因补水量、流速和水质波动导致生态风险集中出现[5] [6]。

5. 讨论

5.1. 研究结果的环境意义

本研究表明，再生水补给型城市河道治理不能只关注“补水量是否充足”，还应关注补水后的生态响应。对于北方缺水城市而言，再生水补给能够缓解生态基流不足，但如果缺少营养盐控制和河道生态修复，可能导致水体富营养化、藻类增长和景观水体异味等问题。因此，再生水补给应从水资源利用工程转向水生态系统调控工程。

从环境工程角度看，本研究提出的风险识别框架有助于将污水资源化利用、水环境管理和河道生态修复结合起来。对于西安市这类缺水型城市，构建安全、稳定、生态友好的再生水补给体系，是提升城

市水生态韧性的重要路径。

5.2. 与同类城市研究对比

北京、天津等北方城市同样存在天然来水不足和再生水补给需求。已有研究表明,再生水补给能够改善城市河湖水量和景观连续性,但若补给水中 TN、TP 控制不足,且河道或景观水体交换能力较弱,容易出现藻类增长和水质波动问题[7] [8]。本研究中 S2 和 S4 断面风险相对较高,与同类城市再生水补给水体中“补给口输入压力”和“滞留段藻类风险”并存的特征基本一致。

与北京部分再生水补给河湖相比,西安城市河道在枯水期生态基流不足问题更加突出,因此补水对维持水面和改善景观连续性具有更直接意义;但与天津等平原河网城市类似,低流速和高温季节会放大营养盐累积及藻类风险。从国际再生水利用经验看,再生水回用于城市景观和生态补水时,除满足常规水质要求外,还需关注长期运行中的营养盐累积、病原微生物控制和公众暴露风险[9] [10]。差异主要来自气候条件、水动力条件、补水规模和河岸带结构。由此可见,西安市再生水补给河道应避免单纯依赖补水量增加,而应通过补给水源头提标、过程净化单元和景观滞留段生态调度形成全过程管理链条。

5.3. 研究不足之处

本研究虽基于实测数据开展水生态风险分析,但监测时段和断面数量仍有限,尚难全面反映不同季节、不同补水规模和极端天气条件下的风险变化。其次,研究指标以常规水质和生态响应指标为主,对微量有机污染物、抗生素和抗性基因等新污染物关注不足。再次,综合风险指数的权重设置相对简化,未充分考虑水动力条件、河道形态和生物群落结构的差异。

5.4. 未来研究方向

未来研究可从以下方面深化:一是开展长期连续监测,获取再生水补给口及下游河段的季节性变化数据;二是引入水动力模型和藻类增长模型,分析补水量、流速和水温对生态风险的影响;三是增加底泥营养盐释放、微量污染物和生物群落调查;四是建立水质-水生态-水动力耦合评价体系,为再生水补给调度和河道生态修复提供更精细的技术支撑。

6. 综合调控方案及适配性分析

基于上述分析,本研究提出适用于西安市再生水补给型城市河道的综合调控方案。该方案以源头提标控制为前提,以工程净化与生态修复联合应用为核心,以长期监测评估和智慧监管为保障,形成“源头-过程-末端-反馈”一体化治理路径。

6.1. 源头提标控制

加强再生水厂出水水质稳定控制,重点关注 TN、TP、NH₃-N 和微生物指标。对于进入景观河道的再生水,应在满足 GB/T 18921-2019 等相关要求的基础上,结合受纳河道生态敏感性设置厂内加严控制目标,建议补给水 TN 尽量控制在 10 mg/L 以下、TP 控制在 0.3 mg/L 以下,并在高温季节强化消毒稳定性和余氯衰减评估。对 S2 断面,应建立补水量、水质和补水时段联动控制机制,当 TN、TP 或粪大肠菌群出现异常升高时,及时降低补水强度并启动源头排查。

6.2. 工程净化与生态修复联合应用

在补给口下游设置人工湿地、生态沟渠或植物净化带,对再生水进行二次生态净化。对于 S4 景观滞留段,应增加水体流动性,配置适合当地气候的沉水植物和挺水植物,如苦草、狐尾藻、金鱼藻、芦苇和

香蒲等, 沉水植物初期覆盖度可控制在 30%~50%, 并根据透明度和水深逐步优化。对藻类风险较高时段, 可采用微孔曝气或太阳能曝气设备, 在夜间或清晨间歇运行 2~4 h/d, 维持 DO 不低于 5 mg/L, 降低低氧和藻类暴发风险。

6.3. 水生态长期修复

围绕“水量 - 水质 - 生境 - 生物”四个方面开展长期修复。通过生态补水调度维持适宜流速, 通过营养盐控制降低藻类风险, 通过河岸带恢复改善栖息地, 通过水生植物群落构建提升系统稳定性。对于硬质岸线比例较高的河段, 应逐步增加生态护岸、浅滩和缓坡带, 提升河岸带对颗粒物和营养盐的截留能力。

6.4. 监测与评估

建立补给水源、补给口、景观滞留段和下游恢复段的分级监测网络。监测指标除常规水质外, 还应逐步纳入 Chl-a、透明度、藻类密度、底泥营养盐和水生生物指标。对高温、低流速和集中补水等敏感时段, 应增加监测频次并开展预警。建议在线监测平台至少布设 DO、水温、电导率、浊度和叶绿素 a 传感器, 并与补水泵站运行数据联动。

6.5. 方案适配性分析

西安市缺水特征明显, 再生水资源化利用需求较高, 因此“源头提标 - 过程净化 - 生态修复 - 智慧监管”的综合路径具有较强适配性。为使调控策略与研究发现紧密对应, 本研究进一步提出分断面措施(见表 4)。该方案既能保障河道生态基流, 又能降低营养盐和藻类风险; 既适用于新建补水工程, 也可用于已有景观河道的生态化改造。

Table 4. Matching regulation measures based on section-specific risks

表 4. 基于断面风险的调控措施匹配

断面	主要风险	调控目标	建议措施	优先级
S1	生态基流不足	提高水体流动性	优化补水调度、维持基础水量	中
S2	TN、TP 和微生物输入	削减源头输入风险	再生水厂提标、消毒稳定性控制、异常水质预警	高
S3	混合不充分	促进稀释复氧	跌水、微曝气、生态沟渠过渡净化	中
S4	藻类增长与滞留风险	控制 Chl-a 和 TP 累积	沉水植物恢复、间歇曝气、循环流动、遮荫与生态护岸	高
S5	下游恢复稳定性	增强自净与缓冲	河岸带修复、水生植物管理、长期监测评估	中

7. 结论与展望

本研究以西安市再生水补给型城市河道为研究对象, 构建了水生态风险识别与调控策略分析框架。主要结论如下:

- 1) 再生水补给能够改善北方缺水城市河道生态基流不足问题, 但补给水中的氮、磷和微生物指标可能带来水生态风险。
- 2) 实测数据分析表明, 再生水补给口和景观滞留段是风险相对集中的区域, 主控因子主要包括 TN、TP、Chl-a 和粪大肠菌群。
- 3) 河道沿程混合、复氧、植物吸收和河岸带截留可降低部分风险, 但仅依靠自然自净难以长期维持生态稳定, 需采取工程和生态联合调控措施。

4) 西安市再生水补给河道治理应坚持“源头提标 - 过程净化 - 生态修复 - 智慧监管”的综合路径,推动城市河道从景观补水向生态健康提升转变。未来应结合实地监测数据和水动力模型,进一步完善再生水补给河道的风险预警和调度管理体系。

参考文献

- [1] 生态环境部. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] 住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 城市污水再生利用 景观环境用水水质: GB/T 18921-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [3] 生态环境部. 地表水环境质量监测技术规范: HJ 91.2-2022 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2022.
- [4] 孟婷婷, 董月群, 闻丞, 薛晓飞, 冒建华, 黄越, 李丹, 汪洋, 徐开翔. 生物多样性导向的再生水补给型城市河道水生态修复效果[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1552-1561.
- [5] 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇. 城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 256-266.
- [6] 赵亚芳, 白华清, 孙政. 人工湿地在污水处理中的应用案例及常见问题探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(5): 53-61.
- [7] 李兆欣, 赵斌斌, 顾永钢, 刘操, 骆虎. 北京典型再生水补水型河道水质变化分析[J]. 北京水务, 2016(5): 17-20.
- [8] 赵乐军, 王秀朵, 刘春光, 等. 再生水回用于景观水体的富营养化趋势研究[J]. 给水排水, 2008, 34(12): 13-16.
- [9] Bixio, D., Thoeve, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T., *et al.* (2006) Wastewater Reuse in Europe. *Desalination*, **187**, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.070>
- [10] Angelakis, A. and Snyder, S. (2015) Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future. *Water*, **7**, 4887-4895. <https://doi.org/10.3390/w7094887>