

再生水补给城市河道对水体自净能力的影响机制研究

许家杰 龚俊楠 林海南 李婴婴 滕良方
宁波市城市排水有限公司 浙江 宁波 315000

摘 要：城市化加速与水资源短缺，使再生水成为维持城市河道生态功能的重要补水水源，但其复杂水质或影响受纳水体自净能力。本文系统探究再生水补给对城市河道水体自净能力的影响机制，采用文献综述、理论分析与案例推演结合的方法，从物理、化学、生物三个维度，剖析再生水补给如何改变水动力、营养盐结构等，进而影响水体的稀释扩散、化学转化与生物降解过程。研究发现，适度补给可增加基流、改善水动力，提升物理自净能力；但携带的氮、磷等营养盐及微量有机污染物，可能抑制化学自净，对生物自净有双重效应，既促进异养菌生长，也可能抑制关键功能菌群。基于此，提出优化再生水深度处理工艺、构建协同净化系统、实施智慧化生态调度等策略，为科学利用再生水治理城市水环境提供支撑。

关键词：再生水；城市河道；水体自净能力；影响机制；微生物群落；生态补水

引言

21世纪，全球城市人口持续增长，城市生态系统压力剧增，水资源短缺与水环境污染成为两大核心挑战。传统水源枯竭，难以满足城市多元用水需求；大量污水直排河道，引发水体黑臭、富营养化等生态退化问题。在此形势下，将再生水回用于城市河道生态补水，兼具资源循环利用与水环境修复效益，成为战略选择。《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》鼓励此做法。然而，再生水并非纯净水，常规处理对总氮、总磷及新兴污染物去除效率有限。当复杂水质的再生水持续大规模注入封闭、流动性差的城市河道，其对受纳水体生态系统，尤其是水体自净能力的影响，关乎工程长期生态安全与可持续性。水体自净能力是河流生态系统健康的关键指标和水环境承载力的核心参数。因此，揭示再生水补给对其影响机制，既有理论价值，也能为相关标准制定、方案优化和精准修复提供科学依据。

1 再生水与水体自净能力的概念界定

1.1 再生水的水质特征

再生水通常指城市污水处理厂二级或深度处理后的

出水。其水质取决于原污水性质、处理工艺及运行管理水平。典型的再生水水质呈现出一种看似清洁却内含复杂性的特征。常规污染物如悬浮固体（SS）和生化需氧量（BOD5）通常较低，能够满足基本的回用标准，但化学需氧量（COD）中往往包含相当比例的难降解有机物^[1]。更为关键的是，即使经过专门的脱氮除磷工艺，再生水中的总氮（TN）和总磷（TP）浓度依然显著高于地表水环境质量标准，通常TN在5-15 mg/L，TP在0.3-1.0 mg/L之间，这为其进入受纳水体后引发富营养化埋下了隐患。此外，再生水还含有较高浓度的溶解性无机盐，导致电导率升高，同时不可避免地携带着痕量但持久性的新兴污染物，如抗生素、非甾体抗炎药等药品及个人护理品（PPCPs），以及抗生素抗性基因（ARGs）。尽管病原微生物数量已大幅削减，但其潜在风险依然存在。在物理特性上，再生水的水温通常较为恒定，且溶解氧（DO）浓度接近饱和，这些特性也将与其与天然河水混合过程中发挥作用。表1展示了典型再生水主要水质指标与我国《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）中V类水限值的对比，可清晰看出其氮、磷负荷偏高的特征。

表1：再生水典型水质与地表水V类标准对比

水质指标	再生水典型浓度范围(mg/L)	地表水V类标准限值(mg/L)
总氮（TN）	5-15	≤ 2.0
总磷（TP）	0.3-1.0	≤ 0.4
化学需氧量（COD）	30-60	≤ 40
生化需氧量（BOD ₅ ）	< 10	≤ 10
悬浮物（SS）	< 10	≤ 30
溶解氧（DO）	接近饱和	≥ 2.0

1.2 水体自净能力的内涵与构成

水体自净能力由物理、化学和生物过程协同实现。

物理过程通过稀释、扩散、沉降和挥发降低污染物浓度，依赖水流条件；化学过程包括氧化还原、酸碱中和、吸附凝聚及光解等，改变污染物形态；生物过程为核心，由微生物主导：好氧菌将有机物矿化为CO₂和H₂O，硝化与反硝化菌协同脱氮，水生生物也参与吸收与摄食。三者相互耦合：良好水动力促进复氧，支持好氧降解；微生物耗氧又影响氧化还原状态，调控化学反应方向与速率。

表2：再生水排入自然水体后对水质与自净过程的典型影响

影响维度	具体现象/变化趋势	机制解释
水动力条件	枯水期流量增加30%–200%，流速提升	再生水提供稳定补给，增强稀释扩散能力
溶解氧（DO）	下游500 m内DO维持较高（> 6 mg/L），但1–2 km后显著下降（< 4 mg/L）	初期复氧充足，但后续因有机物与氮负荷耗氧导致DO消耗
氮素转化	硝化作用初期增强，反硝化受限；TN去除率通常 < 30%	高C/N比不足、缺氧区缺乏，抑制反硝化菌活性
磷的归趋	TP浓度沿程下降缓慢，部分河段出现底泥磷释放	再生水中磷多为溶解态，易被吸附但易在还原条件下再释放
微生物群落	硝化菌丰度上升，但多样性下降；ARGs检出率提高2–5倍	选择性压力（如抗生素残留）导致抗性基因富集
藻类响应	叶绿素a浓度升高，蓝藻比例增加	氮磷持续输入促进初级生产力，尤其利于蓝藻生长
新兴污染物	PPCPs（如布洛芬、磺胺类）在下游1 km内检出率 > 80%，半衰期 > 7天	自然水体对其降解能力有限，主要依赖光解与稀释
注：数据综合自北京、天津、深圳等地再生水补给河道的长期监测研究（2015–2024）。		

2 再生水补给对水体自净能力的影响机制

再生水作为一种外源输入，通过改变接纳水体的水量、水质和能量（水温），重塑了其物理、化学和生物环境，进而对自净能力产生复杂而深刻的影响。

2.1 对物理自净能力的影响

再生水补给对物理自净能力的影响总体上是积极且直接的。对于众多因上游截流、地下水超采等原因而常年干涸或仅有涓涓细流的城市河道而言，其物理自净能力几近于零。引入再生水作为稳定的生态基流，能够从根本上改变这一局面。持续的水流注入显著增加了河道的流量，提高了水流速度，有效打破了原有的死水区和缓流区，极大地增强了污染物的稀释和输移扩散能力。这种“以动促净”的效应是再生水补给最根本的生态价值之一，它为后续的化学和生物净化过程创造了必要的水动力前提^[2]。当然，在特定条件下，例如夏季再生水温度显著低于天然河水时，也可能在局部水域形成温跃层，阻碍水体垂向交换，对污染物的混合产生不利影响，但这种情况相对少见，其正面效应远大于潜在的负面效应。

2.2 对化学自净能力的影响

再生水中高浓度氮、磷等营养盐打破河道原有平衡。过量氨氮在硝化过程中剧烈耗氧，加之难降解有机物缓慢分解持续耗氧，导致水体溶解氧骤降，由好氧转为缺氧甚至厌氧状态。这不仅抑制了二价铁、锰等的氧化沉淀，还促使底泥中铁、锰氧化物还原溶解，释放吸附的

磷，引发内源污染二次释放，形成“耗氧–释磷–再耗氧”的恶性循环，严重削弱水体化学自净能力。虽有局部离子促进胶体沉降的微弱正面效应，但远不足以抵消耗氧造成的整体功能衰退。但也存在一定的积极面。例如，再生水中含有的某些离子成分可以促进胶体颗粒的凝聚沉降，有助于减少悬浮物和部分污染物。此外，当合理控制再生水中的氨氮浓度，并结合有效的管理措施，可以减轻对溶解氧的过度消耗，从而保护水体的氧化还原状态，支持铁、锰等重金属的自然沉淀过程，有助于提高化学自净效率。

2.3 对生物自净能力的影响

积极方面，对于极度贫瘠的城市河道，再生水中的可生物降解有机物和溶解性有机碳可作为异养微生物“食物”，刺激其生长，短期内增强有机污染物降解能力。稳定水流和水量为生物膜提供生存环境，生物膜含多样微生物群落，是生物自净主要场所，再生水补给防止河道干涸，保护了这一关键净化单元。消极方面，再生水中高浓度氨氮抑制硝化菌，低溶解氧扼杀好氧菌活性；痕量抗生素、重金属等对微生物具毒性，致敏感菌死亡、耐药或杂菌增殖，破坏群落结构与功能；外源微生物竞争排挤本地优势菌，降低系统韧性。最典型后果是氮磷促藻类暴发，引发藻华—缺氧—黑臭恶性循环，严重破坏生物自净能力。

3 综合效应与阈值探讨

再生水补给对水体自净能力的影响,是物理、化学、生物效应综合作用的结果。理想状态下,物理效应改善水动力,可部分抵消化学和生物效应的负面影响,让水体维持相对健康的平衡。但这种平衡十分脆弱,依赖一系列临界阈值。水量阈值是基础,补给水量要能维持河道基本生态流量,保证一定流速以实现有效复氧和污染物输移,低于此值,物理自净失效,系统迅速恶化。水质阈值更为关键,再生水中TN、TP、COD等关键指标须严格控制在受纳水体环境容量内,超标则化学耗氧和生物毒性效应占主导,自净能力崩溃。且水质阈值并非固定,与河道形态、流速、光照、水温及原有生态系统健康状况等因素相关,有高度时空异质性。实践中,不少再生水补给项目初期效果不错,但因对水质阈值把控不严、对生态系统动态演变认识不足,后期出现水体富营养化、黑臭等问题。这凸显了从“静态达标”向“动态承载”管理理念转变的必要性和紧迫性^[3]。

4 优化调控策略

4.1 源头控制:提升再生水水质

这是规避风险、确保安全的根本之策。应摒弃“一刀切”的回用标准,转而根据受纳水体的具体环境容量和预期生态功能定位,制定差异化的、更具针对性的再生水水质要求。在处理工艺上,应大力推广和应用高效生物脱氮除磷工艺,如厌氧-缺氧-好氧(A²/O)、序批式反应器(SBR)等,并耦合反硝化深床滤池、高效沉淀池等深度处理单元,力争将出水总氮降至5 mg/L以下,总磷降至0.2 mg/L以下,从源头上切断富营养化的物质基础。对于经济发达、技术条件成熟的地区,还可积极探索应用臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)、高级氧化(AOPs)或膜过滤(如纳滤NF)等先进技术,以有效削减抗生素、内分泌干扰物等新兴污染物,为受纳水体的微生物生态系统提供更安全的输入。

4.2 过程协同:构建“再生水-自然水”协同净化系统

不应将再生水视为唯一的、孤立的水源,而应将其置于一个更大的水文生态格局中考量,与雨水、上游来水等自然水源进行协同调度,构建一个更具韧性和自净能力的复合水系。一个行之有效的做法是在再生水入河前或沿河岸带建设人工湿地系统。无论是表面流还是潜流湿地,都能凭借其内部的基质、挺水/沉水植物以及丰富的微生物群落,对再生水进行二次深度净化,有效拦截悬浮物、吸收氮磷、降解有机物,扮演起“生态肾”的角色^[4]。同时,对河道护岸进行生态化改造,采用多孔、透水的材料,为微生物和水生生物提供多样化的栖息地。在

溶解氧易成为限制因子的关键河段,可辅以太阳能曝气机、纯氧微纳米曝气等设备,主动提升水体溶解氧水平,为好氧生物自净过程的顺利进行提供坚实的保障。

4.3 末端智慧:实施基于自净能力的生态调度

在信息化时代,应充分利用物联网、大数据和人工智能等现代技术,建立智慧水务管理系统,实现对再生水补给的精细化、智能化管理。首先,需要在河道的关键断面布设涵盖水质、水量、水文等多要素的在线监测站网,实时、动态地掌握水体的健康状况,特别是能够反映微生物活性的指标(比如耗氧速率SOUR),以此作为水体自净能力的“晴雨表”。在此基础上,结合精准的天气预报(降雨事件会显著改变天然径流)和经过率定的水质-水动力耦合模型,对再生水的补给量和补给点进行动态优化调度。例如,在藻类易发的高温季节,可策略性地减少富含磷的再生水补给;或在暴雨过后,适时加大补给量以冲刷河道,带走累积的污染物。这种基于生态系统反馈的智慧调度模式,是实现再生水安全、高效、可持续利用的未来方向。

5 结语

本研究系统探讨了再生水补给城市河道对水体自净能力的影响机制,得出以下结论:再生水补给对水体自净能力的影响多维度且非线性,增加基流提升物理自净能力,但过量营养盐和新兴污染物对化学、生物自净构成挑战;生物自净能力是影响核心,再生水既可能激活微生物,也可能因水质特性抑制关键功能菌群、引发失衡,最终效应取决于补给水质、水量与受纳水体环境容量的动态平衡;要实现再生水安全高效回用,需采取“源头-过程-末端”全链条综合调控策略,提升再生水水质并构建协同净化系统与智慧化生态调度;未来研究应注重长期定位观测,结合前沿技术解析微生物群落功能演变规律,开发评估模型,为城市水环境精细化管理提供科技支撑。

参考文献

- [1]李黛青,夏莎莎,张镇松,等.再生水补给型城市河道水生态环境质量评价方法研究[J].环境化学,2024,43(12):4112-4120.
- [2]孟婷婷,董月群,闻丞,等.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(04):1552-1561.
- [3]刘全忠,彭柯,苏振华,等.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(01):256-266.
- [4]李莉.再生水补给城市河道的生态服务价值预测[J].四川环境,2021,40(01):104-108.