

朱炜坤,柳慧敏,叶永.生态补水对滨海山溪型河流水环境改善效应研究[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

生态补水对滨海山溪型河流水环境改善效应研究

朱炜坤¹,柳慧敏²,叶永^{2*}

(1. 深圳市大鹏新区住房和建设局,广东 深圳 518119;2. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:滨海山溪型河流普遍存在旱季基流匮乏、潮汐往复扰动显著、氮素内源富集突出等问题,单一水源生态补水模式难以实现全年水质稳定达标,而双水源协同控氮作用机制与时序响应规律尚不明确。以深圳西涌河为研究对象,基于2022年全年逐月水文、地形、潮汐、水质多源原位监测数据,构建MIKE21二维水动力-水质耦合模型,通过多断面分季节水位、总氮实测数据完成模型率定与验证(水位纳什效率系数 $NSE>0.75$,水质模拟相对误差 $<12\%$)。设置无补水、单一水库补水、水库耦合单厂再生水、水库耦合双厂再生水4类模拟工况,从流场滞水区演变特征、总氮空间分布格局、水质改善效率、达标水域占比四个维度,量化分析不同补水模式的水环境改善效应,探究1~3个月连续补水的时序演变规律及四季水质改善差异性。结果表明:双水源联合补水可协同发挥水力置换与低浓度再生水稀释的双重增效作用,在最优工况(水库补水 $0.10\text{ m}^3/\text{s}$ +双厂再生水补水 $0.12\text{ m}^3/\text{s}$)下,流域总氮综合改善率达29.5%,地表水Ⅲ类达标水域占比由22%提升至80%;水质改善效果与补水时长呈显著正相关,连续3个月稳态补水为河道水质稳定达标的临界时长;受低温环境、监测揭示的底泥内源氮释放现象及潮汐顶托叠加效应影响,冬季枯水期水质治理效能显著低于丰、平水期。本研究阐明了潮汐扰动下山溪河流双水源补水的时序控氮机理,可为华南地区同类滨海河道生态补水长效调度与水质精细化管理提供技术支撑。

关键词:MIKE21;生态补水;滨海山溪河流;总氮;水环境改善;时序响应

中图分类号:X522;TV143 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-10

滨海山溪型河流兼具山区季节性径流与河口潮汐往复流的双重水文特征,一般存在汛期径流暴涨暴落、旱季天然基流匮乏的演变规律,受沿海丘陵地形阻隔与下游海湾周期性潮汐顶托叠加影响,河道水体交换效率低下、水动力条件衰减,仅大潮瞬时时段存在局部水动力短时增强现象,整体水环境稳定性较差^[1-2]。深圳滨海中小型山溪河道潮汐回水扰动频繁,加上村镇面源污染输入与底泥内源氮持续释放,导致河道总氮超标问题呈现常态化、顽固性特征,劣Ⅴ类水体占比长期偏高。构建适应潮汐扰动、季节变化的水动力-水质耦合数值模型,

精准预判多工况、多时序尺度下水环境响应规律,是实现生态补水方案优选、水量精细化调度及水质长效改善的核心技术手段^[3]。

水质模拟常采用MIKE系列模型^[4-5],利用该模型林曦^[6]构建了河网水动力-水质数学模型,模拟了再生水生态补水对氨氮等关键指标的影响。Li^[7]基于MIKE21建立了水动力水质模型,模拟比较了湖泊水质演变的全年趋势,通过夏季湖泊补水改善水动力条件。Yang^[8]建立MIKE21 FM模型研究引水对典型城市人工湖水质的影响。现有研究多聚焦单一地表水补水模式,针对内陆平原河湖的水质

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFC3001903);高等学校科研项目(SDHZ2020236)

收稿日期:2026-08-04 **修回日期:**2026-09-18

作者简介:朱炜坤(1989—),男,硕士,研究方向为水环境治理。

通信作者:叶永(1969—),男,博士,教授,研究方向为水利水电工程。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

改善效果分析较为成熟,但针对华南滨海山溪型潮汐河道,潮汐往复扰动下双水源协同控氮的量化机理、时序响应规律及长效调度机制研究仍较为薄弱。

基于此,本文以深圳大鹏新区西涌河为研究对象,依托2022年全域原位逐月水文、水质监测数据,构建MIKE21二维水动力-水质耦合模型,结合流域生态基流核算结果设置梯度双水源补水工况,系统量化不同补水模式下河道流场演变、总氮时空衰减规律及水质达标面积变化特征,优化滨海山溪河道精细化补水调度方案,为华南地区同类潮汐型中小滨海河道生态修复与水质管控提供工程参考意义。

1 水质监测与主控因子识别

1.1 研究区概况

西涌河坐落于深圳市大鹏新区南澳街道,流域地理见图1,河流发源于区域南端蛇引坑,上游干流贯穿西洋尾村,中游沿岸布设南社村、西涌村、西贡村人居片区,下游衔接西贡支流,干支流汇流后于西涌湾入海口汇入大鹏湾海域,流域总面积9.5 km²,流域内无大中型蓄水、调蓄水利工程。研究区水文水环境特征典型:一是旱季天然径流不足0.05 m³/s,水体滞留严重,氮素内源富集突出;二是下游

受潮汐周期性顶托,水体交换受阻,单一补水模式提质效果有限;三是外源面源与内源底泥污染叠加,水质季节性超标问题顽固,具备双水源补水优化研究的典型条件。

1.2 水样采集与检测

结合河道地形、补水点位、支流汇入断面及潮汐影响分区,选取河道K0+500~K1+300核心治理河段布设监测断面,共计设置5个原位采样点位:K1(K0+400)、K2(K0+700)、K3(K1+000)、K4(K1+300)、K5(K1+400)。采用深水有机玻璃采水器采集表层河道原状水体,装入无菌避光样品瓶,即刻置于4℃低温保温箱封存转运,完成野外采样后24 h内送入实验室完成指标检测。核心监测指标包含总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})四类常规水环境指标。采样统一选取落潮中期,弱化潮时差异带来的采样偏差,保障数据可比性。指标检测参照国家现行行业标准执行。

1.3 水环境主控因子识别

各断面水质时序变化规律见图2,原位监测结果表明:河道TP年均浓度0.316 mg/L、COD_{Mn}年均浓度9.59 mg/L,全域断面均可满足地表水V类水体标准。NH₃-N年均浓度3.21 mg/L,仅下游潮汐扰动局部断面呈劣V类超标,污染空间范围局限、外源输

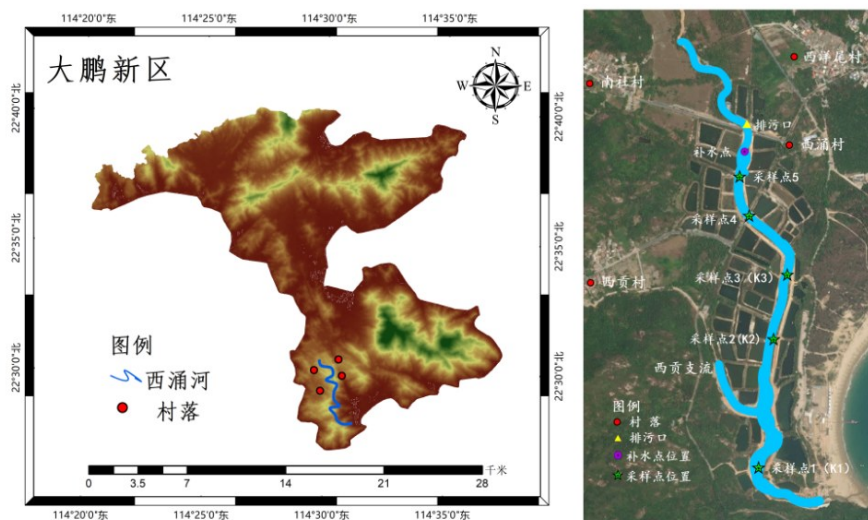


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area and river system

入来源可控,相较于全域持续性超标指标治理难度更低。TN 年均浓度 6.65 mg/L,全监测断面全年持续性超标、超标倍数最高,叠加滨海河道底泥内源氮释放特性、补水工况水质差异化响应特征,结合深圳市流域水环境考核管控要求,判定 TN 为该河

段水质达标限制性主控因子,因此选取 TN 作为水质评价的核心指标开展研究。本研究水质评价执行 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》河流-湖泊评价体系,不采用海洋水质评价标准。

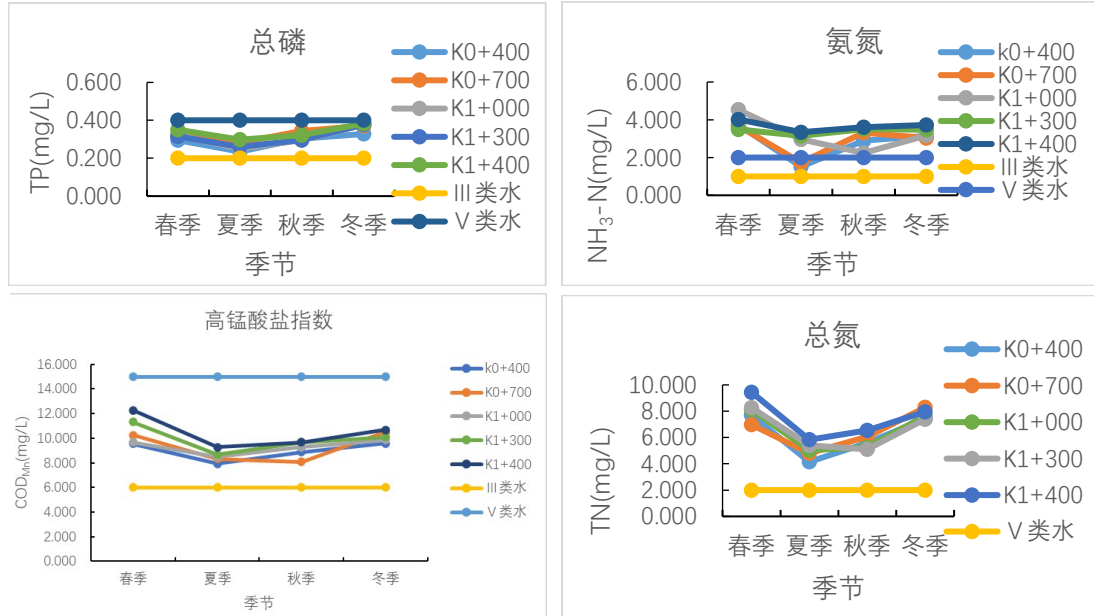


图2 各监测断面时序变化特征

Fig. 2 Temporal variation characteristics of water quality at each monitoring section

2 生态需水量核算与补水方案

2.1 河道生态需水量计算

结合滨海山溪河流水文条件,构建涵盖生态基流、水面蒸发、河床渗漏、景观补水的综合生态需水量核算体系^[9-10],水期划分参考区域多年水文节律特征,生态需水量关键输入参数采用流域多年统计资料;2022年为完整覆盖丰-平-枯的典型水文年,主要用于现状情景模拟验证。基于研究区2022年逐月水文数据,划分丰水期(6—9月)、平水期(4—5、10月)、枯水期(11—次年3月)开展分时段核算,规避年均值核算的均一化偏差。总需水量公式如下:

$$W_{\text{总}} = W_{\text{基}} + W_{\text{蒸}} + W_{\text{渗}} + W_{\text{景}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{总}}$ 为河道综合生态需水量, m^3 ; $W_{\text{基}}$ 为河道生态基流需水量, m^3 ; $W_{\text{蒸}}$ 为河道水面蒸发需水量, m^3 ; $W_{\text{渗}}$ 为河床渗漏补给需水量, m^3 ; $W_{\text{景}}$ 为河道沿岸生

态景观需水量, m^3 。

深圳南部沿海多年平均水面蒸发量 1 346 mm,西涌河常态水体表面积 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,核算河道年均蒸发需水量 $7.4 \times 10^4 \text{ m}^3$;流域多年平均天然径流量 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$,年径流总量 $473 \times 10^4 \text{ m}^3$,参照南方丘陵河道渗漏率取值标准,取流域年均水量 1.5% 作为河床渗漏水量,核算渗漏需水量 $7.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。采用 Tennant 法核算生态基流,不受河口潮汐水位顶托影响,潮汐作用仅补偿下游水位,无法补充河道径流,可不纳入基流计算,一般选取多年平均径流量 60% 作为河道适宜生态基流^[5],基流需水量 $283.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。依托深圳市地方用水定额标准 (DB 44/T 1461.3—2021) 面积定额法核算景观需水量:

$$W_{\text{景}} = \psi A \quad (2)$$

式中: ψ 为河道沿岸绿化用水定额,取 $0.28 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; A 为河道滨岸绿化带覆盖面积, m^2 。核算的景观

需水量 $14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

整合四类需水组分,河道年综合生态需水量 $312.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,折算稳态平均生态补水流量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$,为后续补水流量设置提供边界依据。

2.2 补水方案工况设置

补水水源分为两类:枫木浪水库原生地表水、片区新建两座污水净化厂再生水,集中取水点位统一布设至河道中游西涌村断面,与模型入流边界匹

配。每座净水厂年净化水规模可达到 $182.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,折算设置单座净水厂满负荷出水流量(单厂补水)为 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$,两座净水厂联合满负荷出水流量(双厂联合补水)为 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ 。再生水出水水质稳定达到地表水Ⅲ类标准,出水TN浓度 0.75 mg/L 。本文设置现状工况+三类梯度补水工况,固定水库补水流量恒定,梯度提升再生水补水量,探究双水源补水协同增效机制,工况参数如表2所示。

表2 不同补水方案对应流量

Tab. 2 Flow parameters of different ecological water replenishment schemes

补水方案	水库引水/ m^3/s	水质净化厂引水/ m^3/s	工况说明
方案0	—	—	现状无补水工况
方案1	0.10	—	单一水库补水工况
方案2	0.10	0.06	水库耦合单厂再生水补水工况
方案3	0.10	0.12	水库耦合双厂联合再生水补水工况

3 模型建立与参数验证

3.1 模型建立及边界条件

选用MIKE21 FM二维水动力-水质耦合模型,基于研究区1:500实测地形数据剖分非结构化三角网格,模型网格及地形示意如图3所示,共6390个节点、9370个计算单元,最小网格尺寸5m,可精细刻画窄河道微地形、近岸滞水区与潮汐回水带,空间精度满足小型山溪河道精细化模拟需求。

模型采用动态计算时间步长(数百秒级),可完整解析滨海河道半日潮往复过程。模拟周期覆盖2022年完整水文年,包含丰、平、枯全水期及暴雨、强潮汐极端工况。下游开边界采用逐日实测潮位数据,通过模型内部时序插值匹配动态计算步长,精准复现潮汐往复水动力过程,结果输出统计步长为86400s(1d)。

水动力模型上游干流、支流采用逐月实测流量作为入流边界,河道下游海湾出口采用逐日实测潮汐水位作为出流边界,海域边界水质常年稳定,无大幅突变,能准确模拟潮汐上溯带来的水体与污染物交换过程,沿岸排污边界采用逐月实测水质浓度动态赋值,贴合流域实际污染输入特征。水质模型

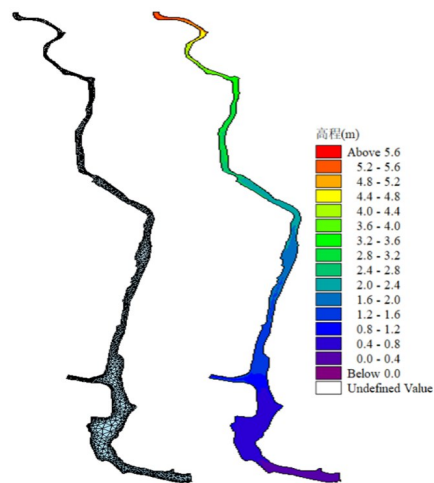


图3 网格划分及地形

Fig. 3 Schematic diagram of river mesh division and terrain

入流边界、沿岸排污口边界采用2022年逐月实测水质浓度赋值(图4),干支流逐月入流流量边界见表3。

3.2 模型率定与验证

3.2.1 计算参数确定

结合研究区地形地貌、水文水质原位监测数据及区域河道参数取值经验,通过多轮试算与敏感性

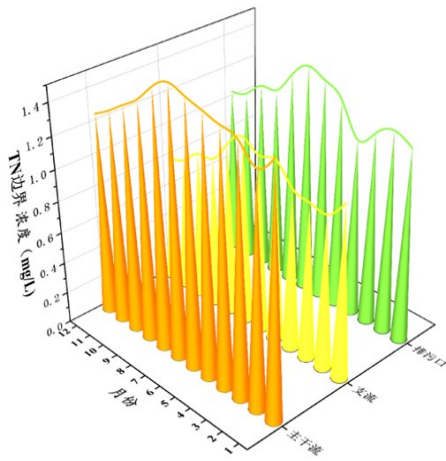


图4 TN 边界浓度

Fig. 4 Temporal variation of TN boundary concentration

表3 西涌河入河流量边界

Tab. 3 Monthly inflow boundary of the main stream and tributaries of the Xichong River

月份	上游	支流
1	0.048	0.010
2	0.038	0.017
3	0.059	0.022
4	0.077	0.027
5	0.183	0.046
6	0.212	0.077
7	0.318	0.080
8	0.172	0.042
9	0.103	0.028
10	0.058	0.022
11	0.045	0.016
12	0.042	0.009

分析,完成模型参数本地化校准,核心参数取值如下。

a)地形网格参数:基于流域1:500实测地形数据与水下横断面监测数据完成地形插值,非结构化三角网格可精准适配小型山溪河道微地形变化,满足精细化流场与污染物扩散模拟精度要求。

b)河床糙率参数:结合砂质河床原位踏勘结果,参照华南滨海山溪河道参数区间,经试算校准确定全域综合糙率 $n=0.031$,贴合河道实际水流阻力特征。

c)水动力干湿边界参数:采用浅水河道最优数值参数体系,干水深0.005 m、淹没水深0.05 m、湿水深0.1 m,有效规避浅滩干湿交替引发的计算振荡,提升模型稳定性。

d)水质扩散与降解参数:参照华南滨海潮汐河道、山溪型河流参数取值区间,结合室内水质静态降解实验与野外原位监测数据联合校准,充分适配研究区盐度扰动、低温降解滞后、底泥内源释放的本地化水环境特征,确定水体横向扩散系数 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 、TN综合一阶降解系数 0.025 d^{-1} ,参数取值贴合区域实际污染衰减规律。

e)水文与潮汐边界:上游干支流逐月实测流量作为入流边界,下游入海口逐日实测潮位数据作为开边界,完整复现全年丰、平、枯水期水文节律与潮汐往复扰动过程。

f)初始水质边界:基于5个断面逐月实测TN浓度动态赋值入流与沿岸边界,模型全域初始TN浓度赋值 1.464 mg/L ,为全河道网格空间平均本底值。前述TN浓度 6.65 mg/L 为潮汐滞水区局部监测断面年均高值,现状工况干流TN浓度 $1.4 \sim 1.9 \text{ mg/L}$ 为主流通道平均浓度,三者统计口径不同,反映了TN浓度空间分布差异性。

确定模型参数后,将2022年完整水文年划分为率定期(1—6月)与验证期(7—12月),率定期覆盖枯、平、前期丰水工况;验证期包含主汛期、冬季强潮汐工况。流域年际水文、水质、潮汐扰动波动幅度小于10%,单水文年监测数据具备全域代表性,且经多季节分段参数校准,有效降低模拟偶然性偏差。

3.2.2 水动力模型验证

西涌河下游无固定水文监测站点,为完成水动力模型验证,全方位校验全流域模型模拟精度与适配性,构建K1、K2、K3、K4四个断面水动力验证体系,覆盖河道上游、中游、下游及潮汐影响区段,其

中2个核心断面验证结果见图5。选取纳什效率系数(NSE)开展模拟精度评价^[11],经计算,K1、K2、K3、

K4断面水位纳什效率系数(NSE)均大于0.75,模拟值与实测值拟合度良好,满足工程模拟精度要求。

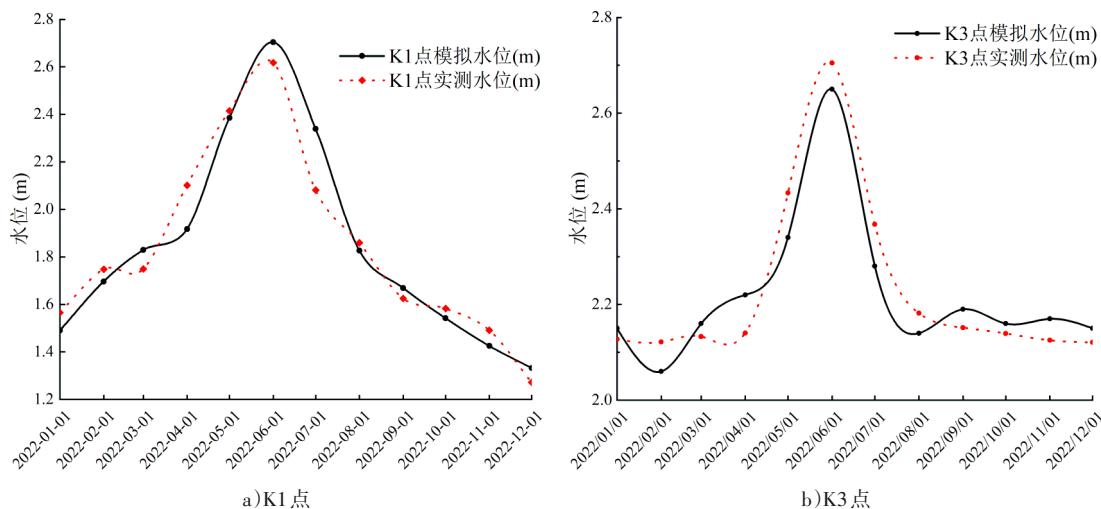


图5 水位验证结果

Fig. 5 Water level verification results of monitoring sections

3.2.3 水质模型验证

结合小型潮汐河道研究成果^[12-13],水体横向扩散系数初始取值区间为 $1\sim5\text{ m}^2/\text{s}$,华南滨海潮汐河道、山溪型河流TN降解系数普遍介于 $0.02\sim0.03\text{ d}^{-1}$,结合研究区2022年逐月水温、盐度、潮汐监测数据,通过室内水质静态降解实验+野外原位监测校准,适配本区域盐度扰动、低温衰减、底泥内源释放的本地化特征,设置 $0.015\sim0.035\text{ d}^{-1}$ 梯度参数开展敏感性分析,确定本模型水体扩散系数 $1\text{ m}^2/\text{s}$ 、TN一阶综合降解系数 0.025 d^{-1} 取值下全域断面模拟误差最小,参数稳定性最优,可精准适配西涌河水环境模拟需求。

依托5个点位全年水质监测数据集,完成TN水质模型校准验证,验证结果见图6。结果表明,枯水期受低温、强潮汐顶托、内源氮释放增强影响,TN模拟相对误差略高于丰水期,但整体仍低于12%,满足模拟精度要求,有效支撑“冬季补水改善效果偏弱”的季节性结论,丰水期和平水期结果显示各断面TN浓度模拟值与实测值相对误差均低于10%,曲线拟合度较好。可见,构建耦合模型可复现西涌河TN迁移衰减规律,满足多补水工况模拟需求。

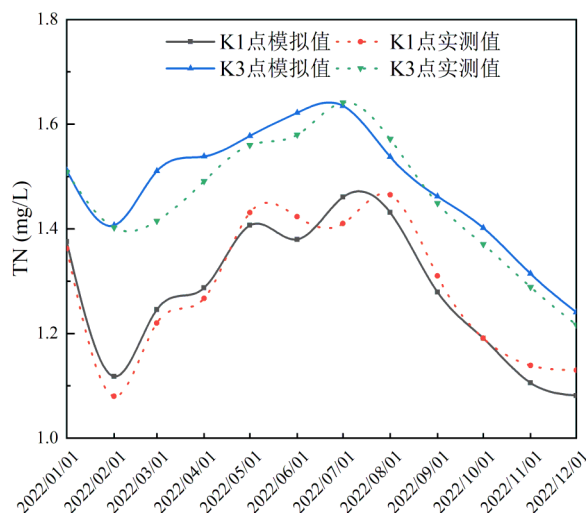


图6 TN实测与计算结果对比

Fig. 6 Comparison of measured and simulated TN concentration

4 模拟结果与机理分析

4.1 补水对河道水动力场的改善特征

结合潮汐河道研究通用标准,采用潮汐周期平均流速 $v < 0.001\text{ m/s}$ 作为滞水区判定阈值,规避潮汐瞬时流速正负波动的干扰。河道潮汐影响边界:潮区界为K1+300断面,为潮汐可影响的最远河段;

潮流界为 K1+000 断面, 为潮水往复扰动的核心区段, 潮流界以下河段水动力受潮汐主导, 以上河段以天然径流与补水径流驱动为主。各工况水动力参数统计结果见表 4。现状方案 0 河道全域平均流速仅 0.010 m/s, 滞水区总面积 20 215 m², 占河道水面总面积 36.75%, 水体交换能力极差; 随着水库单一补水、双水源联合补水量逐级提升, 河道干流、支流整体流速抬升, 近岸缓流滞水区持续缩减。对比各工况, 方案 3 全域滞水区累计消减 4 917 m², 水体置换效率、水力连通性最优, 水动力提质效果显著优于单一水库补水模式。

表 4 不同补水方案下水动力参数对比

Tab. 4 Comparison of hydrodynamic parameters under different water replenishment schemes

补水方案	平均流速/ (m·s ⁻¹)	最大流速/ (m·s ⁻¹)	滞水面积/m ²
方案 0	0.010	0.196	20 215
方案 1	0.019	0.370	16 973
方案 2	0.021	0.341	16 448
方案 3	0.025	0.355	15 298

4.2 河道 TN 空间分布演变规律

不同工况下河道 TN 空间分布特征如图 7 所示。现状工况下, 河道干流 TN 质量浓度维持在 1.4~1.9 mg/L, 全域水质无法满足地表水Ⅲ类标准, 中游补水区段、下游潮汐顶托区段存在显著的氮素富集现象。单一水库补水仅能小幅改善河道水动力条件, TN 削减效能有限; 水库耦合双厂再生水联合补水模式, 可同步发挥低浓度再生水的稀释作用与水力置换的增效作用, 实现全域氮负荷高效削减。最优工

况下, 河道全域 TN 浓度降至 1.0~1.3 mg/L, 中游滞水区、下游潮汐回水带的氮素富集问题得到有效解决。同时, 水动力条件优化、滞水区消减与 TN 污染负荷降低, 有效提升河道水体复氧能力, 解决局部低氧问题, 实现水质多指标协同增效提质。

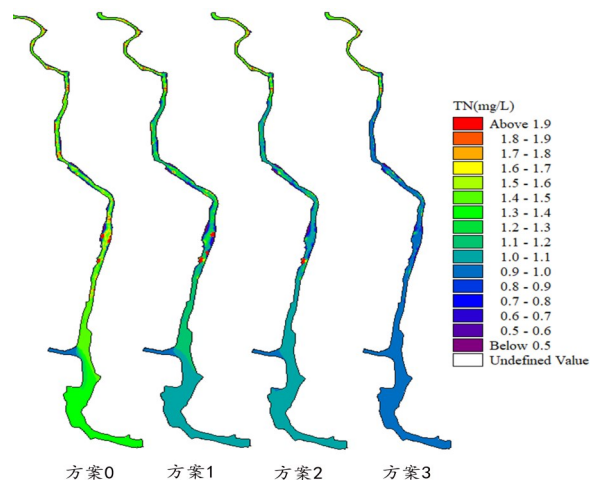


图 7 方案 0 和不同补水方案下 TN 浓度分布

Fig. 7 Spatial distribution of TN concentration under baseline and different replenishment scenarios

4.3 TN 浓度改善率与水体达标面积响应规律

引入水质指标浓度改善率、水体水质达标率两项量化评价指标^[14], 定量核算各工况水质修复成效:

$$\eta = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为污染物浓度改善率, %; C_0 为补水前污染物年均浓度, mg/L; C_i 为补水后污染物年均浓度, mg/L。

$$R = \frac{S_q}{S_{\text{总}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R 为地表水Ⅲ类水体达标率, %; S_q 为水质达标水域面积, m²; $S_{\text{总}}$ 为河道总水面面积, m²。水质达标判定依据 GB 3838—2002 地表水Ⅲ类总氮指标阈值。

各工况水质达标率变化如图 8 所示。量化结果表明, 方案 1、2、3 断面 TN 平均改善率分别为

14.09%~22.31%、17.5%~26.3%、23.8%~33.1%, 基于模型全域网格单元模拟数据加权核算, 得出干流、支流、滞水区、潮汐影响区全域加权综合改善率达 29.5% 的结论(方案 3)。现状工况水体达标率仅 22%, 三类补水工况实施后, 水体达标率依次提升至 32%、50%、80%, 双水源联合补水的水质提质优势

极为显著。

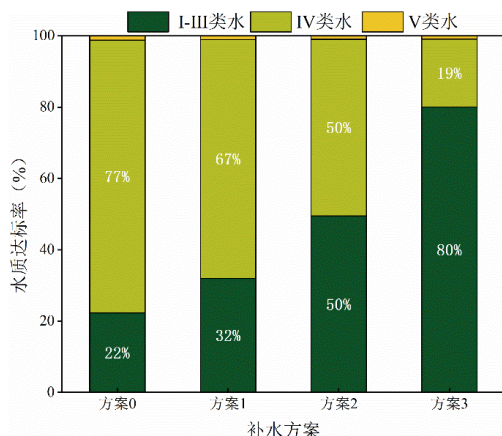


图8 补水前后水质超标率变化

Fig. 8 Variation of water quality compliance rate before and after water replenishment

4.4 水质时序响应与季节差异机制

选取干流典型断面K1开展时序与季节差异化分析(图9),剥离天然径流、潮汐强度的季节干扰。结果显示,水质改善效率整体呈夏季、春季、秋季、冬季依次递减的时序规律。方案3四季TN降幅分别为24.0%、32.3%、21.5%、14.0%。夏季天然径流充沛、水体交换速率快,稀释与水动力增效协同作用最强;冬季枯水期基流匮乏、潮汐顶托作用强,现场监测反映底泥存在内源氮释放加剧现象,单一补水效能受限,水质改善效果最弱,双水源大流量补水可有效弱化季节水文扰动的负面影响,提升枯水期水质调控稳定性。

增设1~4个月梯度稳态补水时序模拟,结果表明:补水1个月时,TN综合改善率16.2%,水体达标率41%,水质改善效果有限;连续补水2个月时,改善率提升至24.7%,达标率65%,仅主干河段局部达标;连续补水3个月时,TN衰减趋于稳定,综合改善率达29.5%,主干河道水质稳定达到地表水Ⅲ类标准;继续延长补水时长,水质改善增幅趋于平缓,验证了3个月为该流域水质稳定达标的临界有效补水时长。

5 结论

基于2022年实测水文水质与潮汐数据,通过

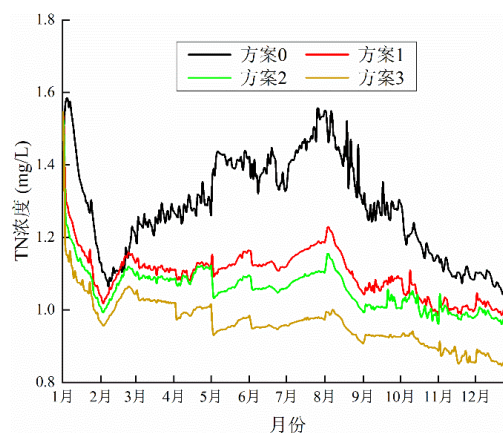


图9 不同补水方案下K1断面TN时序变化

Fig. 9 Temporal variation of TN concentration at K1 section under different replenishment schemes

MIKE21耦合模型量化分析多生态补水模式对滨海山溪型河道的水环境改善规律,结论如下。

a)生态补水可有效重构河道水动力场,提升水体交换能力、消减滞水区。在同等总补水流量下,水库-再生水双水源联合补水的改善效果显著优于单一水源补水,是一种具有潮汐河道特征的优质补水模式。

b)河道水质改善效果与补水时长呈显著正相关,连续3个月稳态补水为河道主干水域水质稳定达标的临界时长,可为区域常态化补水调度提供时序参考。

c)受水温、天然基流、潮汐扰动、现场监测表征的底泥内源释放的季节差异影响,河道水质改善效果季节性差异显著,冬季枯水期治理效能最弱,是水质管控的重点难点时段。本模型未耦合底泥释放模块,内源释放仅作为机理层面驱动因素分析。

由于缺乏长时序连续流速与逐小时高频水质监测,潮汐周期内水质瞬时波动未加以考虑。文中评价体系以TN水质指标为主,未纳入其他水质因子以及生态、经济、盐度变化等多维度指标,后续可开展多目标综合优化研究。

参考文献:

- [1] 孙生龙. 面向山溪性河流洪水的城镇防洪规划研究[J]. 水利科技与经济, 2025, 31(7): 134-139.

- Sun Shenglong. Study on urban flood control planning for mountain-stream flood [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2025, 31(7): 134-139. (in Chinese)
- [2] 王菲, 王贤平, 郑志勤, 等. 基于水动力水质模拟的感潮河网生态补水研究[J]. 给水排水, 2021, 57(S2): 223-228.
- Wang Fei, Wang Xianping, Zheng Zhiqin, et al. Research on ecological water replenishment of tidal river network based on hydrodynamic and water quality simulation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(S2): 223-228. (in Chinese)
- [3] 李胜东, 冯健, 张世宝, 等. 生态补水措施对杞麓湖水质改善效果的模拟分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 35-39.
- Li Shengdong, Feng Jian, Zhang Shibao, et al. Simulation analysis of water quality improvement effect of ecological water replenishment measures in Qilu Lake [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 35-39. (in Chinese)
- [4] 高华勇, 赵璧奎, 郭晓娟, 等. 基于 MIKE 11 的粤港澳大湾区河涌生态补水调度方案评估[J]. 人民珠江, 2024, 45(7): 48-57.
- Gao Huayong, Zhao Bikui, Guo Xiaojuan et al. Evaluation of scheduling schemes for ecological water replenishment of river in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on MIKE 11[J]. Pearl River, 2024, 45(7): 48-57. (in Chinese)
- [5] Ye Y, Zhang J, Liu H, Zhu W. Predictive simulation study on the effect of small and medium river basin outfall treatment measures on water quality improvement [J]. Water. 2023; 15(13):2359.
- [6] 林曦, 赖秋英, 许益新, 等. 中国南方水质型缺水地区再生水生态补水效益研究[J]. 水利水电快报, 2025, 46(9): 119-124.
- Lin Xi, Lai Qiuying, Xu Yixin, et al. Study on ecological water replenishment benefits of reclaimed water in water-deficient areas of South China [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2025, 46(9): 119-124. (in Chinese)
- [7] Li J, Chen Y, Wang Z. Effect of pollution load reduction on water quality in rural lakes in the shallow hill water network area [J]. Water Supply, 2022, 22(7): 6213-6229.
- [8] Yang H, Wang J, Li J, et al. Modelling impacts of water diversion on water quality in an urban artificial lake [J]. Environmental Pollution, 2021, 276: 116694.
- [9] 谈荫, 涂新军, 余红刚, 等. 基于 MIKE 的滨海城市内涝模拟及深隧工程排涝效果评估[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 123-131.
- Tan Yin, Tu Xinjun, Yu Honggang. et al. Waterlogging simulation and drainage effect assessment of deep tunnel engineering in a Coastal City based on MIKE [J]. PEARL RIVER, 2024, 45(5): 123-131. (in Chinese)
- [10] 刘玉婷, 许继军, 刘思敏, 等. 长江上游地区生态需水量变化研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(8): 120-131.
- Liu Yuting, Xu Jijun, Liu Simin, et al. Study on change of eco-water demand in region of upper Yangtze River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(8): 120-131. (in Chinese)
- [11] 刘晨辉, 刘思颀, 李丹, 等. 基于 MIKE21 模型的长江中环排污口水质影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(01): 72-76.
- Liu Chenhui, Liu Sisi, Li Dan, et al. An analysis of the impact of Zhonghuan sewage outlet on water quality of the Yangtze River based on MIKE21 model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(01): 72-76. (in Chinese)
- [12] 杨海瑞, 马念, 陈杰, 等. 生态补水对山地城市河流水环境的改善效果[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(S): 89-95.
- Yang Hairui, Ma Nian, Chen Jie, et al. Improvement effect of ecological water replenishment on river water environment in mountainous cities[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(S): 89-95. (in Chinese)
- [13] 谢梦瑶, 高玉琴, 彭亚敏, 等. 农村河道生态治理模式水质改善效果模拟[J]. 水电能源科学, 2024, 42(3): 200-203.
- Xie Mengyao, Gao Yuqin, Peng Yamin, et al. Simulation of the effect of rural river ecological management mode on water quality improvement [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(3): 200-203. (in Chinese)
- [14] 杨卫, 张利平, 李宗礼, 等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. 地理学报, 2018, 73(01): 115-128.
- Yang Wei, Zhang Liping, Li Zongli, et al. Interconnected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(01): 115-128. (in Chinese)

Study on Water Environment Improvement Effect of Ecological Water Replenishment for Coastal Mountain-Stream Rivers

ZHU Weikun¹, LIU Huimin², YE Yong^{2*}

(1. Housing and Construction Bureau of Dapeng New District, Shenzhen 518119, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Mountain-stream rivers in coastal areas commonly face issues such as low base flow during dry seasons, significant tidal fluctuations, and prominent internal nitrogen enrichment, making it difficult to achieve year-round stable water quality through a single water source ecological replenishment model. The mechanisms and temporal response patterns of dual water source collaborative nitrogen control remain unclear. Taking the Xichong River in Shenzhen as the study site, a MIKE21 two-dimensional hydrodynamic-water quality coupling model was constructed based on monthly hydrological, topographic, tidal, and water quality multi-source in-situ monitoring data from 2022. Model calibration and validation were completed using measured data of water level and total nitrogen across multiple cross-sections by season (Nash efficiency coefficient for water level >0.75, relative error for water quality simulation <12%). Four simulation scenarios were designed: no replenishment, single reservoir replenishment, reservoir-coupled single plant reclaimed water, and reservoir-coupled dual plant reclaimed water. From four dimensions—evolution characteristics of flow field stagnant zones, spatial distribution patterns of total nitrogen, water quality improvement efficiency, and proportion of compliant water bodies—quantitative analysis was conducted on the water environment improvement effects of different replenishment modes, exploring the temporal evolution patterns of continuous replenishment (1–3 months) and seasonal differences in water quality improvement. Results show that dual water source joint replenishment can synergistically enhance hydraulic displacement and low-concentration reclaimed water dilution effects. Under the optimal scenario (reservoir replenishment 0.10 m³/s + dual plant reclaimed water replenishment 0.12 m³/s), the comprehensive improvement rate of total nitrogen in the watershed reached 29.5%, and the proportion of surface water compliant with Class III standards increased from 22% to 80%. Water quality improvement efficacy is significantly positively correlated with replenishment duration, with continuous 3-month steady replenishment being the critical threshold for stable river water quality compliance. Due to low-temperature environments, monitored phenomena of sediment internal nitrogen release, and tidal backflow effects, water quality management efficacy during winter dry seasons is significantly lower than in flood and average flow periods. This study elucidates the temporal nitrogen control mechanism of dual water source replenishment in tidal-influenced mountain-stream rivers, providing technical support for long-term ecological replenishment scheduling and refined water quality management of similar coastal rivers in South China.

Keywords: MIKE21; ecological water replenishment; coastal mountain stream; total nitrogen (TN); water environment improvement; temporal response

(责任编辑:李燕珊)