

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0113

基于水动力-水生态耦合模拟的城市河网补水综合效益评估

王宇萌, 程军蕊, 王 晓*, 王 侃

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 城市河网区作为复杂水环境系统, 相较于普通河流水体对象的污染输入更为广泛, 其时空变化更为复杂, 而传统预测及评价方法难以对城区河网环境提升效果进行全面准确的综合评估。以宁波市鄞东南平原河网区作为研究对象, 分别建立一维河网水动力、污染迁移转化、水生态反应数学耦合模型, 并结合宁波市补水规划进行工况模拟, 开展能反映河网区水环境、水生态多指标及其空间评价目标的综合评价。结果表明: 耦合模型精度较高, 能较好反映目标河网区水质变化情况; 河网水质改善呈现显著的季节差异, 补水方案需着重考虑丰水期与春夏时节水环境的质量情况; 通过对不同补水方案的综合评价, 发现方案七、九能够满足目标河网区水质的达标要求。

关键词: 城市河网; 生态补水; 水环境数学模型; 水动力水生态耦合; 综合评价

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 04-0104-10

近年来, 随着我国城市化率的快速提高, 城市水环境作为受到人类活动多重影响的敏感水体对象, 面临着城市污染排放、水动力不足、河道生态功能退化等一系列的威胁与挑战。城市水体多数为静止或流动性差的封闭水域, 水动力、水体自净能力较天然水体严重不足, 加之城市中企业废水、生活污水等点源型污染源密集分布, 持续向水体输入大量外源污染; 同时大量氮磷等物质在水体中滞留、富集, 加剧了藻类繁殖及水体富营养化, 使城市的水环境问题日益突出^[1]。城市河网区水环境质量持续下降, 不仅严重破坏了水生态系统平衡, 也威胁着城市居民的生活质量和健康。为综合改善城市水体交换能力、提升水环境质量、缓解富营养化, 生态补水作为重要的水环境治理途径已在城市水环境治理中得到了广泛应用。因此, 科学准确地预测河网区生态补水效果不仅能保证河网水系整治工程的高效实施, 还能更好地优化生态补水水资源配置格局, 强化城市水系水环境和水生态的修复效果^[2-4], 进一步促进城市河网区的可持续发展^[5]。

目前, 生态补水效果预测常用方法包括经验公式法^[6-7]、物理模型法^[8-9]和数值模拟法^[10-11]。与耗费大量人力成本、数据获取难度大的传统预测方法相比, 数值模拟法则通过计算机强大的运算能力, 能够精确模拟水流场和水质变化, 因此已逐渐成为主流的研究工具。众多研究者对生态补水数值模型进行了大量研究, 也在补水后环境改善效果和评价方面取得了显著成果。Zhang 等^[12]运用 MIKE21 模型构建了白龟山水库水环境模型, 发现提高流速能有效改善水质, 增强水体自净能力。Jiang^[13]基于二维数值分析模型对古尔普乔恩河再生水补水前后 1 a 的水质变化进行分析, 结果显示该河水质改善效果显著。Lü 等^[14]利用 ARIMA 模型预测了不同补水工程对藻类密度变化的影响, 并阐述了控制藻类水华风险的相关意义。

目前生态补水研究已取得诸多成果, 但现有研究视角仍较为单一, 多聚焦于补水后水动力及水质提升效果、水体富营养化控制等方面, 且当前对于水动力、水质、水体富营养化的综合改善效果的研

收稿日期: 2024-07-08 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金浙江省水利厅联合基金 (LZJWY23E090007)

第一作者: 王宇萌, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及迁移转化规律模拟。E-mail: skydriver06@163.com

*通信作者: 王 晓, 博士/讲师, 主要研究方向为水文及水资源。E-mail: wangxiao1@nbu.edu.cn

究还比较缺乏,对局部复杂河网区的研究应用也同样稀缺。城市河网水环境影响评价面临显著挑战,不仅源于城市河网结构复杂,水体交换易引发污染物迁移和富营养化的时空变化,还因为生态补水对水动力驱动、污染物迁移转化、溶解氧效应、富营养化反应等关键过程具有多维度影响。因此,亟须开展水质模拟和水环境的综合评价分析。

在此背景下,本文针对城市河网区的结构复杂性,充分考虑生态补水对于水动力驱动、污染物迁移转化、藻类生长等过程的复杂影响,构建适用于平原河网补水片区的水环境模拟模型,开展补水效果量化分析,模拟能反映时空动态分布的补水情景,以此研究不同生态补水方案对区域水环境的空间改善效果。通过科学筛选空间评价点位,最终根据结果比选出合理的河流生态补水方案,为宁波鄞东南平原河网区水环境治理及未来规划提出建议,同时也能为当地生态补水决策规划提供科学依据。

1 研究区域概况

宁波鄞东南平原属典型的平原河网地区,是目前宁波市城镇化发展最为迅速的地区之一,其地势南高北低,东高西低,自古以来就形成了南北、东西交叉密布的河网水系^[15]。区域内河网纵横交错,

由前塘河、长丰河、三桥江等骨干及其所属数支流小河组成,自西南向东北流向,具有蓄积雨洪、分流下渗、灌溉和生态等功能^[16]。河网研究区示意图如图1所示。

平原河网地区深受城市化进程影响,长期以来,由于人工改造频繁、河道硬质化、雨污水排放不达标、点面源污染物直排等原因,鄞东南河网自然生态系统已遭破坏,城市水体环境急剧恶化。为此宁波市全面实施全域水环境治理“生态提升”行动,围绕河道生态需水量,提出了生态补水工作的目标及要求,并在全市范围内系统地实施“清水环通”工程,全面推动河道生态补水以及河道生态修复工作的协同开展。

2 研究方法

通过概化河网、设立模型断面及边界条件等数值模拟手段,构建研究河网区域的一维水动力-水环境耦合模型,探究该区域在生态补水前后的水质改善效果,并以此确定最优的生态补水方案。

2.1 现场同步监测

2022年1月—12月对目标河网片区开展采样调研和同步监测。同步监测设水动力、水质、水生态监测断面8个,具体位置分布如图1所示。其中,

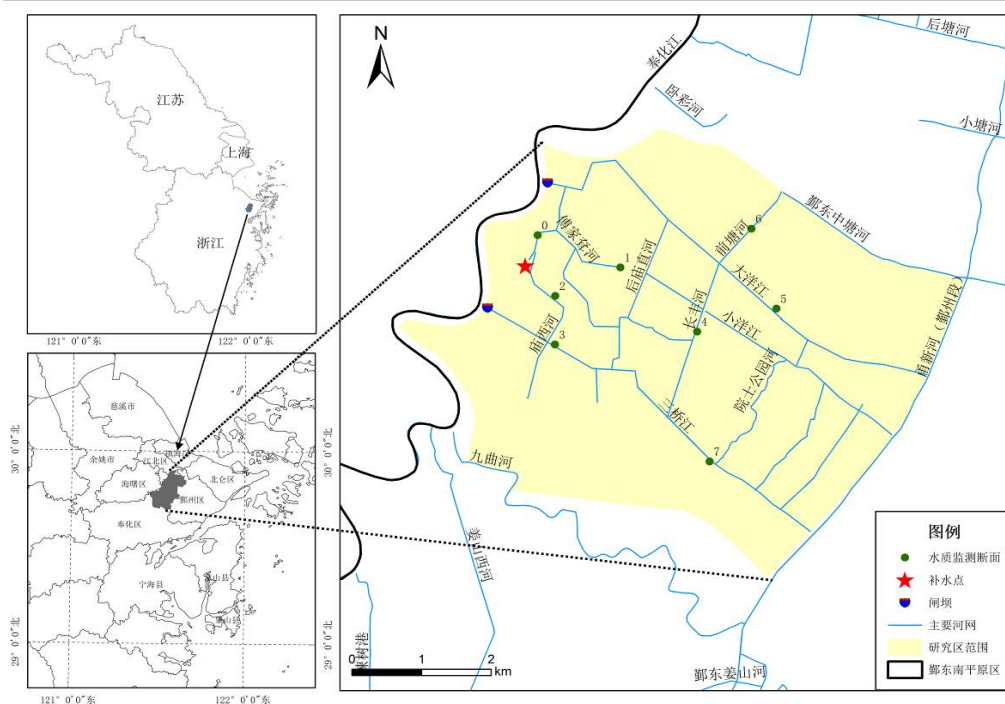


图1 研究区河网区位和监测断面分布图

水动力监测指标为流速、流量、水深和流向;水质监测指标涵盖能体现城市水体典型污染的重要指标:化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP);水生态监测指标为能反映富营养化的关键指标:溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chla)。

2.2 模型构建

2.2.1 水动力模拟计算公式

河网区水动力模拟采用一维圣维南方程,对河道各断面的水位和流量进行模拟。圣维南方程是反映有关物理定律的微分方程,包括连续方程(基于质量守恒定律)和动量方程(基于牛顿第二定律):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: A 为过水体积, m³; t 为时间, s; Q 为流量, m³; x 为流程, m; q 为侧向入流, m³/s; α 为动量修正系数; g 为重力加速度, m/s²; h 为水位, m; C 为谢才系数; R 为水力半径, m。

2.2.2 对流扩散模拟计算公式

对流扩散模拟是基于水动力模拟计算得到的水动力条件,主要通过通过对流扩散方程来计算污染物的质量浓度。

水体中对流扩散的一维方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x'} = \frac{\partial}{\partial x'} \left(E_x \frac{\partial c}{\partial x'} \right) - Kc \quad (3)$$

式中: c 为模拟物质质量浓度, mg/L; t' 为时间坐标, s; u 为水体平均流速, m/s; x' 为空间坐标, m; E_x 为对流扩散系数, m²/s; K 为衰减系数, mg/d。

对流扩散系数计算公式为

$$E_x = av^b \quad (4)$$

式中: v 为流速, m/s; a 、 b 为经验系数。

2.2.3 典型污染物及富营养化模拟

围绕水体富营养化程度,可通过数学公式或微分方程对水环境生态中各组分进行描述^[17]。参考相关文献[18-21]和经典模型手册^[22]确定核心污染物的反应原理,其具体反应过程如下。

(1) 典型污染物

污染负荷降解采用阿伦纽斯公式进行赋值^[23]。

$$X_{de} = -K'X\theta^{(T-20)} \frac{C_{DO}}{C_{DO} + C_{HS}} \quad (5)$$

式中: X_{de} 为污染负荷降解速率, mg/(L·d); K' 为污染负荷降解速率常数, d⁻¹; X 为污染负荷, mg/L; θ 为阿伦纽斯温度系数; T 为水温, °C; C_{DO} 为溶解氧质量浓度, mg/L; C_{HS} 为污染负荷半饱和氧质量浓度, mg/L。

(2) 溶解氧(DO)

$$\frac{dC_{DO}}{dt} = r_{DO} + p_{DO} - c_{DO} + c_{COD} \quad (6)$$

式中: r_{DO} 为大气复氧过程中的增氧量, mg/L; p_{DO} 为藻类光合作用产氧量, mg/L; c_{DO} 为呼吸作用消耗的耗氧量, mg/L; c_{COD} 为 COD 降解过程的耗氧量, mg/L。

(3) 叶绿素(CHL)

$$\frac{dC_{CHL}}{dt} = p_{CHL} - d_{CHL} - s_{CHL} \quad (7)$$

式中: C_{CHL} 为水中叶绿素 a 质量浓度, mg/L; p_{CHL} 为叶绿素 a 产生量, mg/L; d_{CHL} 为叶绿素 a 死亡量, mg/L; s_{CHL} 为叶绿素 a 沉降量, mg/L。

2.2.4 迁移转化-生化模拟耦合

生化反应中的营养盐及富营养化复杂生态过程需要进行模型耦合,采用如下方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_{x'} \frac{\partial c}{\partial x''} = D_{x''} \frac{\partial^2 c}{\partial x''^2} + S_c + P_c \quad (8)$$

$$P_c = \frac{dc}{dt} = \sum_i^n Z_{pro,i} \quad (9)$$

式中: $u_{x'}$ 为沿河流速分量, m/s; x'' 为沿程坐标, m; $D_{x''}$ 为扩散系数, m²/s; S_c 为源汇项; P_c 为营养盐以及藻类物质的反应方程; $Z_{pro,i}$ 为涉及的所有反应过程。

2.3 基于熵权法的权重计算

假设有 m 个评价对象和 n 个评价指标,第 i 个对象第 j 个指标值为 r_{ij} 。在将原始数据标准化后,得到矩阵多目标决策矩阵,并在 $r = (r_{ij})_{m \times n}$ 基础上,对应评价指标的熵值为

$$f_{ij} = \frac{1+r_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1+r_{ij})}, \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \quad (10)$$

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \left[\sum_{j=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \right] \quad (11)$$

式中: f_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 项指标的信息熵; r_{ij} 为第 i 个对象第 j 个指标的值; H_j 为第 j 项评价

指标的熵值。

求得各指标的信息熵后, 对应指标的客观权重则可通过以下公式进行计算,

$$\varpi_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)}$$

(11)

式中: ϖ_j 为第 j 个评价指标熵权重, $0 \leq \varpi_1(j) \leq 1$, $\sum_{j=1}^n \varpi_1(j) = 1$ 。

2.4 补水方案制定

为改善城市河网区水环境和水生态问题, 宁波市利用再生水厂尾水来作为补水水源进行生态补水工作。本文选择位于鄞东南平原河网核心区的长丰片区作为本次补水研究区域, 希望通过制定科学合理的河网区生态补水方案对补水效果进行综合评估, 选出最优补水方案。

根据相关补水规划, 本次目标补水片区以长丰净水厂达标排放的再生水作为补水水源, 经由傅家堰河补入河网。根据长丰净水厂现状处理能力及未来规划目标, 提出 10 种组合补水方案 (表 1)。

表 1 补水模拟方案设计表

方案编号	补水点流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	补水点水质	方案编号	补水点流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	补水点水质
一	5.0×10^4	准Ⅲ类	六	10.0×10^4	准Ⅳ类
二	5.0×10^4	准Ⅳ类	七	13.5×10^4	准Ⅲ类
三	6.5×10^4	准Ⅲ类	八	13.5×10^4	准Ⅳ类
四	6.5×10^4	准Ⅳ类	九	15.0×10^4	准Ⅲ类
五	10.0×10^4	准Ⅲ类	十	15.0×10^4	准Ⅳ类

注: 准Ⅲ类水和准Ⅳ类水指主要指标 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) [24] 中Ⅲ类和Ⅳ类水的要求。

3 结果与分析

3.1 目标现状水质分析及评价

根据宁波市水环境功能区划, 将补水区设定为城市河道功能区。本文以研究区内河网各项水环境

指标达标为总目标, 结合水质监测数据, 参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) [24], 采用逐项指标评价法开展现状水质评价工作, 参评指标包括 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、DO 和 Chla, 其中 Chla 评价标准参考高阳俊等 [25] 对于叶绿素 a 的富营养化分级标准 (表 2)。

从图 2 的河网现状水质监测数据分析可以看出, 补水研究区内的河网水质整体较差, 污染严重, 监测断面的各项水质指标超过 60% 为Ⅳ类和Ⅴ类。河网中化学需氧量指标达到Ⅳ类和Ⅴ类标准的监测断面约占所有断面 70%; 河网内氨氮和溶解氧指标较好, 达到Ⅰ类和Ⅱ类标准的监测断面约占河网监测断面 40%; 河网总磷指标达到Ⅲ类标准的监测断面约占河网监测断面 30%, 达到Ⅱ类标准的监测断面不足 10%; 河网内叶绿素 a 指标较差, 多数为Ⅴ类, 少数达到Ⅳ类标准。

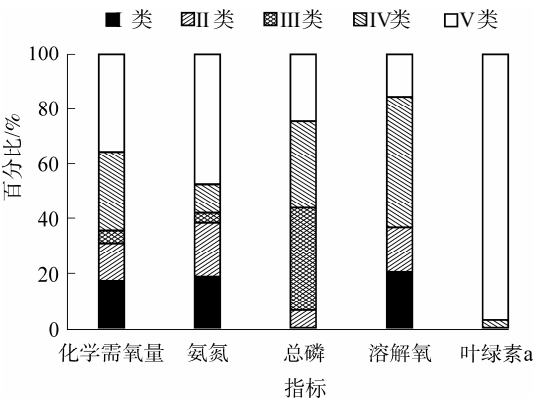


图 2 现状水质分析

3.2 耦合模型构建及参数率定

河道概化是模型构建的基础, 其核心是确保概化后的河道能够准确反映区域的蓄水能力和水流方向 [26]。本研究基于研究区河道断面实测资料对河网进行概化, 最终得到由 23 条河道、115 个节点组成, 总长约 38.55 km 的概化河网。模型水动力边界方面, 上游边界采用流量边界, 具体数据来源

表 2 部分参评指标评价标准限值 [24-25] 单位: mg/L

指标名称	I类	II类	III类	IV类	V类
化学需氧量 (COD)	≤ 15	≤ 15	≤ 20	≤ 30	≤ 40
氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)	≤ 0.15	≤ 0.50	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 2.0
总磷 (TP)	≤ 0.02	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.4
溶解氧 (DO)	≥ 7.5	≥ 6	≥ 5	≥ 3	≥ 2
叶绿素 a (Chla)	$\leq 0.001\ 6$	$\leq 0.010\ 0$	≤ 0.026	≤ 0.064	≤ 0.160

于傅家圩河、区府环河、庙西河、前塘河的实测流量资料;下游边界采用水位边界,数据取自于大洋江、小洋江及前塘河的同步监测数据。水质边界分别考虑点源分布、面源污染以及各支流的污染物贡献,其边界时间序列数据均基于实测水质资料,涵盖的水质指标包括 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、DO 和 Chla。

3.2.1 水动力模型参数的率定验证

水动力模型参数率定选择 2022 年 1 月—10 月补水片区河网监测断面实测资料,以河道糙率 n' 为主要参数对模型进行率定,最终确定整个模拟河网中 n' 取值范围为 0.032~0.038^[27]。采用纳什效率系数法(NSE)和均方根误差(RMSE)对图 3 水位计算结果进行误差分析,结果显示 NES 值为 0.993~0.997, RMSE 值为 0.011~0.039,表明所构建模型精度较高,糙率取值合理。

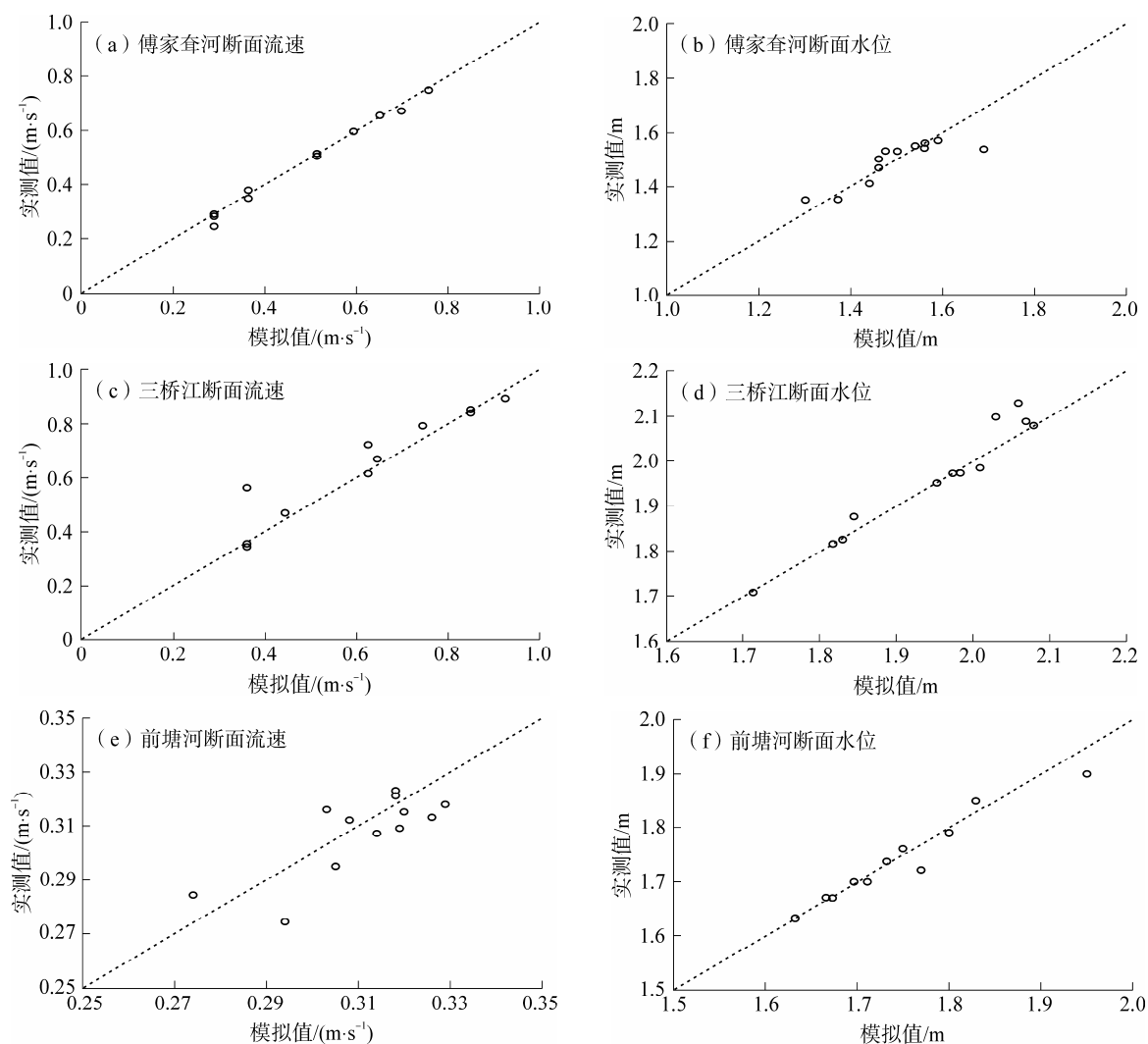


图 3 水动力率定验证

3.2.2 水环境生态耦合模型参数的率定验证

本文的对流扩散及生态模拟均以水动力模拟为基础,首先通过对流扩散模拟污染物的物理迁移过程,进而通过更完善的生态模块对污染物的生化反应过程进行综合模拟。由于耦合模型涉及参数较多,因此需先率定相对独立的状态变量。通过文献资料[28-30]初步确定率定范围,并在此基础上开展率定工作。选取 2022 年 1 月—10 月化学需氧量、氨氮、总磷、溶解氧和叶绿素 a 的指标率定模型参数,通过图 4 的计算可知, NSE 值为 0.993~0.997, RMSE 值为 0.390~0.693,表明模型能真实反映研究区内水质变化过程的特征。

3.3 生态补水方案模拟结果分析

根据模型计算结果,由图 5 可见各补水方案对水质均有一定程度的改善。其中,方案一、二实施

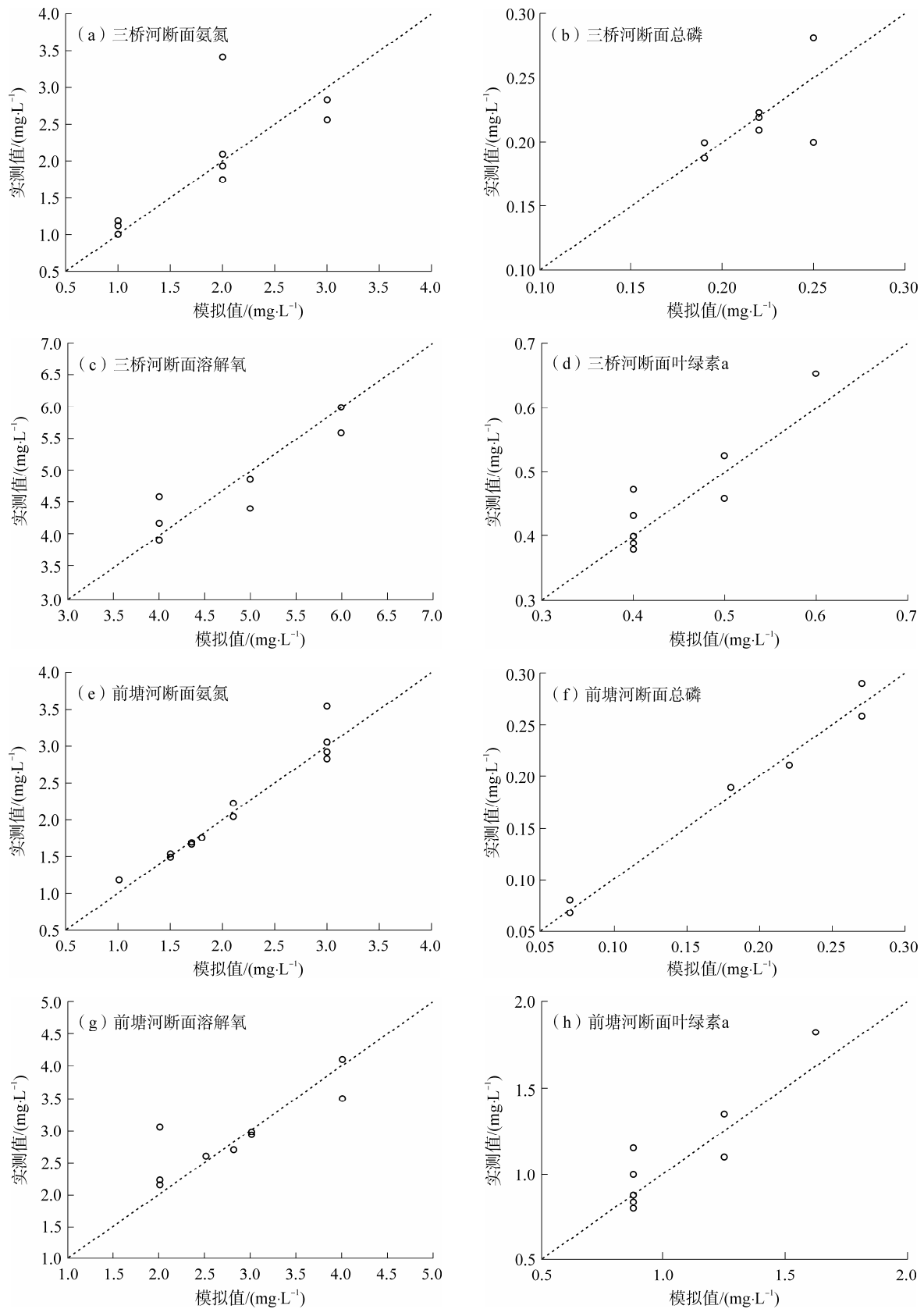


图4 部分断面模型率定验证

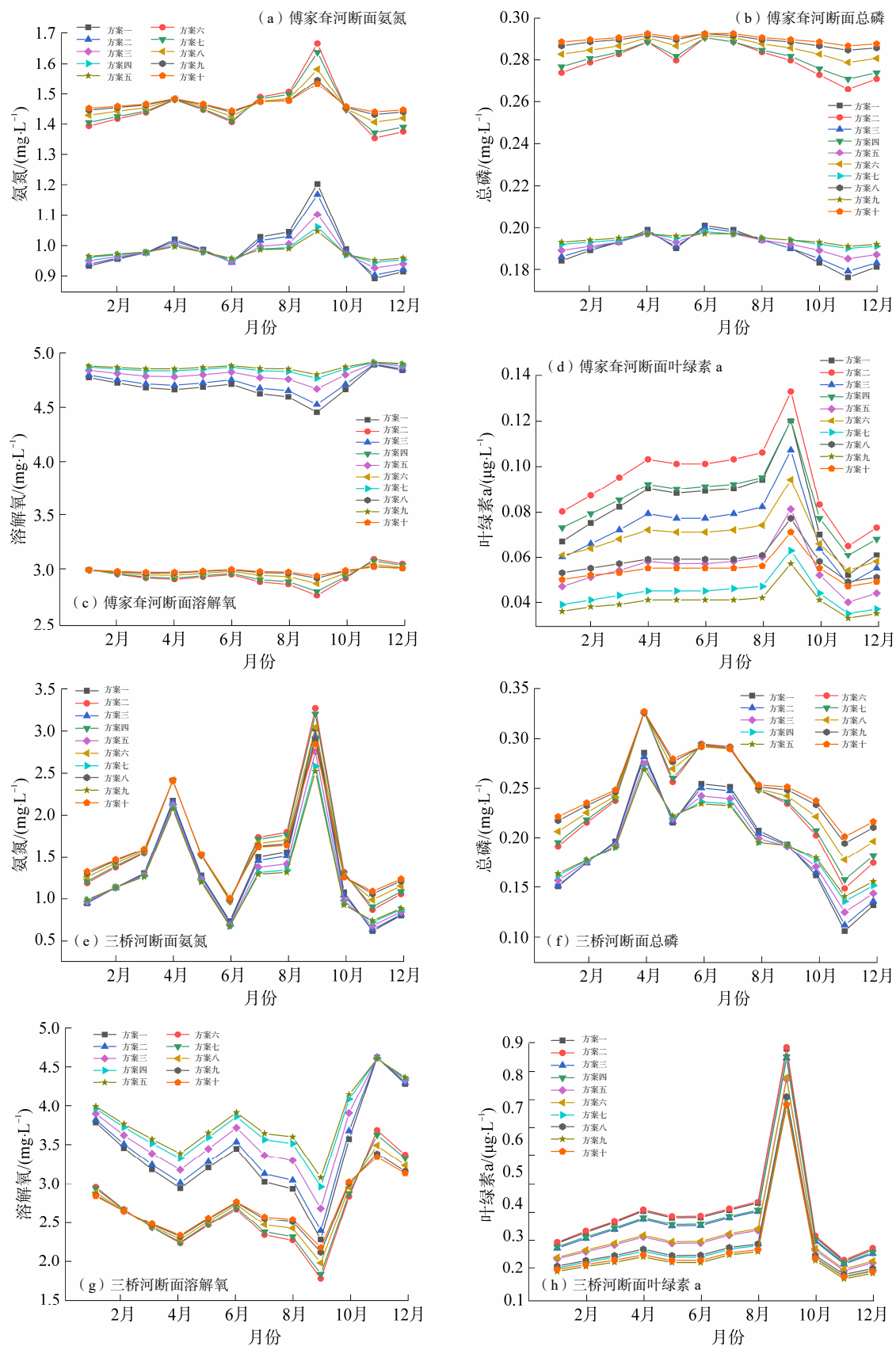


图5 部分核心断面中氨氮、总磷、溶解氧和叶绿素 a 的质量浓度变化

后的污染物质量浓度上升趋势最为明显,水质改善效果较差;对比之下,方案九补水后污染物质量浓度上升趋势最小,水质改善效果明显。总体来说,各补水方案实施后的河网区内的水质、水生态各项指标均得到了一定改善,且随着不同方案运行,补水量、补水水质不断提高,河网水环境改善效果也逐渐增强。

在各方案补水影响下,河网水质改善均呈现显著的季节变化特征。河网区各断面的氨氮、总磷及叶绿素 a 指标均表现为先显著上升,后缓慢下降的趋势,高峰期集中在 4—9 月;而溶解氧指标则呈现相反趋势。相关分析表明,主要是雨季城市径流污染负荷增加、温度升高促进藻类生长等诸多因素共同影响的结果。因此,为稳定实现水环境质量达标,生态补水改善需要着重强化雨季及春夏时节的水环境提升措施。

同时,各方案也同样呈现显著的空间效应差异。傅家圩河、三桥江等靠近补水点的河网上游片区断面水质改善效果明显,在不同补水方案下,监测断面水质的氨氮、总磷指标提升幅度达 2.04%~78.18%,叶绿素 a 指标下降率达 60.09%。与之相比,前塘河、大洋江、小洋江等断面由于距离补水点较远,且处于补水河网片区的下游边界,因此其补水效果较差;氨氮、总磷指标改善率仅为 1.09%~50.21%,叶绿素 a 指标下降率为 43.61%。模拟及现场观测结果表明,补水效应会随着水体迁移,并与外部来水交汇而不断降低,同时处于下游河网区的断面更易受到外部河道污染物的输入影响,导致水质改善效果较弱。

3.4 生态补水效果综合评价

3.4.1 水环境指标因子权重确定

根据城市河网实际情况,所选的水质评价指标 COD、NH₃-N、TP、DO、Chla 对城市河网的影响程度存在差异。因此,需利用采样测得的河网监测断面水质指标数据对不同水质指标进行权重计算,以明确各水质指标对城市河网区水环境的不同影响程度。

通过表 3 可计算得出指标对河网区水环境影响程度从高到低依次为 NH₃-N > DO > Chla > TP > COD,由此可确定 NH₃-N 为本研究河网区域内最重要的水质指标,DO 次之。

表 3 河网水质指标权重

水质指标	权重
化学需氧量 (COD)	0.180 8
氨氮 (NH ₃ -N)	0.219 4
总磷 (TP)	0.184 9
溶解氧 (DO)	0.210 3
叶绿素 a (Chla)	0.204 6

3.4.2 考虑水环境指标因子权重及河网区空间断面权重的综合评价

基于本次水质-水生态耦合模型计算得到的各方案水环境动态预测结果,结合上节水环境指标因子权重,可计算得出不同方案下河网区整体水环境、水生态综合预测结果。考虑到各水环境计算结果指标的差异性,并结合水质标准(准IV类)进行归一化处理,最终综合评价结果如图 6 所示。

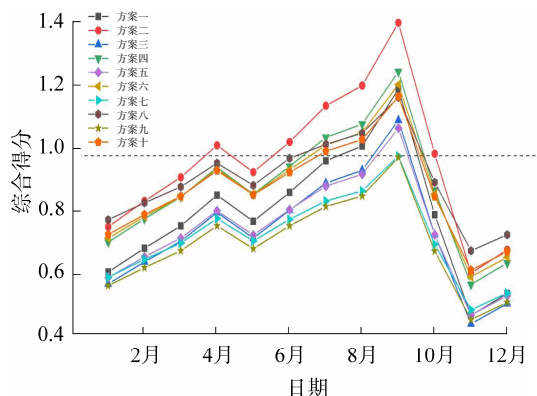


图 6 河网水质综合评价

图 6 结果表明,各补水方案在 7—10 月综合得分均处于峰值,且远超过达标线“1.0”,自 9 月起综合得分呈下降趋势,至 10 月,各方案除方案二外均能达标,虽然在 11 月后出现小幅上升趋势,但整体得分相较补水前有显著降低,且水质均达标。同时,准III类补水方案的水质整体达标率高于准IV类补水方案水质达标率。对比 10 个补水方案,只有方案七、九综合得分均位于“1.0”以下,说明它们的补水方案能满足水质达标要求。综上,生态补水对河网区水质改善皆有一定效果,但仅有方案七、九能满足目标河网区水质达标要求。

4 结论

针对城市河网区复杂的水环境状况,通过建立长丰片区平原河网一维水动力、水环境、水生态耦

合模型,充分考虑了河网水环境的时空动态变化和水环境-水生态达标评价指标权重,探讨了不同生态补水方案下河网区水环境的综合提升效果,以期在城市河网区水环境-水生态长效管理与合理决策提供理论参考。

(1) 模型构建与验证。建立了包括水动力、水生态模块的目标城市河网一维数学模型,采用2022年水环境监测数据对模型进行率定与验证。结果显示,耦合模型精度较高,能够较好地模拟河网中COD、NH₃-N、TP、DO、Chla等物质的迁移转化,可有效量化不同补水水质和水量对目标河网水环境整体改善的影响。

(2) 补水效果的时空特征。通过模拟10个生态补水工况,发现河网水质改善呈现显著的季节变化,说明生态补水方案需着重考虑丰水期、春夏时节期间的水环境提升措施;同时,补水效果存在显著的空间衰减效应,靠近补水点的上游片区水环境综合达标率比远离补水点的下游片区高出约20%。

(3) 关键评价指标与断面筛选。基于耦合模型模拟结果,结合熵权法计算河网区空间断面权重及多因子权重,以此进行河网区生态补水综合评价,筛选出傅家壩河、三桥江、大洋江面和前塘河为代表的6个重点空间评价断面,以及以氨氮(权重0.2194)和溶解氧(权重0.2103)为代表的關鍵水质指标。

(4) 最优方案筛选。通过多补水方案模拟以及补水效果综合评价,结合水环境-水生态达标分析,发现方案七(补水量 $13.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,准Ⅲ类水)和方案九(补水量 $15.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,准Ⅲ类水)能满足目标河网区水环境-水生态的综合达标要求。

参考文献:

- [1] 高成,顾春旭.考虑初期雨水污染的平原河网地区活水效果分析[J].水资源保护,2019,35(3):69-75.
- [2] 董鹤,刘翠珠,杨帆,等.潮白河与永定河生态补水效果分析综述[J].北京水务,2022(6):5-8.
- [3] 江涛,朱淑兰,张强,等.潮汐河网闸泵联合调度的水环境效应数值模拟[J].水利学报,2011,42(4):388-395.
- [4] 李雁鹏,吴玮,张如锋,等. MIKE11 模型在河道生态修复方案优选中的应用[J].水电能源科学,2019,37(11):41-45.
- [5] 胡亚伟,常东明,高子乐,等.黄河下游引黄灌区水系连通条件下水环境变化效应模拟[J].人民黄河,2023,45(8):1-5.
- [6] SON C T, GIANG N T H, THAO T P, et al. Assessment of Cau River water quality assessment using a combination of water quality and pollution indices[J]. Journal of water supply: research and technology-aqua, 2020, 69(2):160-172.
- [7] JI X L, DAHLGREN R A, ZHANG M H. Comparison of seven water quality assessment methods for the characterization and management of highly impaired river systems[J]. Environmental monitoring and assessment, 2016, 188(1):15.
- [8] CHO Y. Development of a water quality assessment model: a water quality assessment model based on watershed characteristics by non-linear regression[J]. Water science and technology-water supply, 2015, 15(2): 236-247.
- [9] SUN Z L, CHENG K Y, LIU J, et al. Simulation of water quality in a river network with time-varying lateral inflows and pollutants[J]. Water, 2023, 15(16):2861.
- [10] WANG G Q, ZHANG Q Z, WANG P Z, et al. Water quality prediction based on an innovated physical and data driving hybrid model at basin scale[J]. Journal of environmental informatics, 2024, 43(2):141-154.
- [11] MANNINA G, VIVIANI G. A parsimonious dynamic model for river water quality assessment[J]. Water science and technology, 2010, 61(3):607-618.
- [12] ZHANG X Q, DUAN B S, HE S Y, et al. Simulation study on the impact of ecological water replenishment on reservoir water environment based on MIKE21: taking Baiguishan reservoir as an example[J]. Ecological indicators, 2022, 138:108802.
- [13] JIANG D W. Analysis of the water quality improvement in urban stream using MIKE21 FM[J]. Applied sciences, 2021, 11(19):8890.
- [14] LÜ X M, ZHANG J, LIANG P, et al. Phytoplankton in an urban river replenished by reclaimed water: features, influential factors and simulation[J]. Ecological indicators, 2020, 112:106090.
- [15] 孟慧芳. 鄞东南平原河网区水系结构与连通变化及其对调蓄能力的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [16] 孟慧芳, 许有鹏, 徐光来, 等. 平原河网区河流连通性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5):626-631.
- [17] 李明, 李添雨, 时宇, 等. 基于 MIKE 耦合模型的入河污染模拟与控制效能研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1):283-292.

- [18] 马强, 陈福容, 王颖. 基于 MIKE11 Ecolab 模型的梁滩河流域水污染问题探讨[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11):33-36, 72.
- [19] 龚依琳. 基于 ECOLAB 的澜沧江小湾水库水质模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [20] 蔡金榜, 苏良湖, 孙旭, 等. 基于 MIKE11 Ecolab 的常州平原河网水质模型构建研究[C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第二卷), 2017.
- [21] 刘江, 陈国鼎, 曾继军, 等. 基于 MIKE 对流扩散和生态耦合模型的鸭子荡水库水质模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1):118-122.
- [22] DHL. WQ templates scientific description[R]. Copenhagen, Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2012.
- [23] 李添雨, 李振华, 黄炳彬, 等. 基于 MIKE21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1):293-300.
- [24] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [25] 高阳俊, 曹勇, 赵振, 等. 基于叶绿素 a 分级的东部湖区富营养化标准研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(增刊 2):218-220.
- [26] 杨松彬. 嘉兴市区河网汇流数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.
- [27] 段承坤. 一维河网水动力模型的预测校正解法与建模技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [28] 丁钰童, 莫李娟, 黄冬菁, 等. 基于 MIKE11 的引排水改善平原河网水环境质量模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(9):166-170, 176.
- [29] 林龙, 张莉, 许银春. 宁波杭州湾新区河网水动力及水质数值模拟研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(6):45-49.
- [30] 刘路. 基于水质模型的区域污染控制研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.

Comprehensive evaluation of urban river network water replenishment based on hydrodynamic-water ecological coupling simulation

WANG Yumeng, CHENG Junrui, WANG Xiao, WANG Kan

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The urban river network regions represent intricate aquatic systems exhibiting intricate characteristics distinct from conventional river bodies. These areas frequently contend with extensive pollution influxes and intricate spatial and temporal variations in their aquatic milieu. Consequently, conventional prognostic and appraisal methodologies have been encountering challenges in accurately and comprehensively gauging the overall efficacy of enhancements within urban river networks. This investigation specifically focuses on the southeast plain river network area within Ningbo City. The study constructs a comprehensive one-dimensional hydrodynamic-pollutant transport-transformation-water ecology coupled model. Leveraging this framework, and in conjunction with the water replenishment strategy of Ningbo City, some scenario simulations are executed to comprehensively appraise the water environment and water ecology of the river network area, including spatial evaluation benchmarks. The results indicate that: the coupling model has high accuracy, which can reflect the changes of water quality in the urban river networks; the improvement of water quality in the river network shows significant seasonal changes, and the water replenishment plan needs to focus on improving the water environment during the abundant water period and spring/summer seasons. This comprehensive evaluation of water replenishment plan suggests that the seventh scheme and the ninth scheme can meet the water quality standards in the target river network area.

Key words: urban river networks; ecological water supplementation; mathematical model of water environment; hydrodynamic water ecological coupling; comprehensive evaluation

(责任编辑 章践立)