

基于水环境容量的雨源型城市河道汛期氨氮溢流污染控制

沈建军¹, 李一平¹, 晋来钰¹, 张 煌², 周玉璇¹, 张子淇¹, 李景波³

(1. 河海大学环境学院; 2. 中国中铁生态环境专业研发中心; 3. 水利部综合事业局新华水利控股集团有限公司)

摘要:基于一维水动力-水质耦合模型和水环境容量模型,分析了日尺度下雨源型城市河道氨氮溢流污染和水环境容量的时空分布特征;采用熵权法和模糊综合评价法,提出了兼顾环境效益与经济效益的溢流污染综合调控方案。结果表明:日尺度下,河道断面氨氮峰值质量浓度与水环境容量谷值对降雨及污染物排放存在明显滞后效应,且水质恢复时间随着降雨强度的增大而延长,雨源型城市河道溢流污染分布与水环境容量存在空间错位,中游城区既是溢流污染关键负荷区,也是水环境容量瓶颈区,下游则具有较强的污染缓冲承载能力;末端调蓄措施可有效降低中、小雨场景河道断面氨氮峰值质量浓度,并维持水环境容量充足,大雨场景则需采用末端调蓄与生态补水组合措施,且靠近考核断面的污染负荷削减对水质改善效果最为直接;建设成本是制约溢流污染控制方案实施的关键因素,中、小雨场景应侧重污染负荷削减,大雨场景下需协同调控污染负荷削减率与生态补水量,以实现成本约束下的环境效益最大化。

关键词:氨氮溢流污染;水动力-水质耦合模型;水环境容量;模糊综合评价法;雨源型城市;城市河道

Control of ammonia nitrogen overflow pollution in rain-fed urban rivers during flood season based on water environmental capacity//Shen Jianjun¹, Li Yiping¹, Jin Laiyu¹, Zhang Huang², Zhou Yuxuan¹, Zhang Ziqi¹, Li Jingbo³
(1. College of Environment, Hohai University; 2. Eco-Environmental Research and Development Center of China Railway Group Limited; 3. Xinhua Water Resources Holding Group Corporation, Bureau of Comprehensive Development of Ministry of Water Resources)

Abstract: Based on one-dimensional hydrodynamic-water quality coupled models and water environmental capacity models, this study analyzes the spatiotemporal distribution characteristics of ammonia nitrogen overflow pollution and water environmental capacity in urban rivers at a daily scale. Using the entropy weight method and fuzzy comprehensive evaluation method, a comprehensive regulation and control scheme for overflow pollution control is proposed, taking into account both environmental and economic benefits. The results show that at the daily scale, the peak mass concentration of ammonia nitrogen at river sections and the valley value of water environmental capacity exhibit an obvious lag effect in response to rainfall and pollutant discharge. Additionally, the water quality recovery time prolongs with increasing rainfall intensity. A spatial mismatch exists between overflow pollution distribution and water environmental capacity in rain-fed urban rivers: the midstream urban area serves as both the critical load zone for overflow pollution and the bottleneck zone for water environmental capacity, while the downstream area demonstrates strong pollution buffering and carrying capacity. Terminal storage measures can effectively reduce the peak mass concentration of ammonia nitrogen at river sections under light and moderate rainfall scenarios and maintain adequate water environmental capacity. For heavy rainfall scenarios, a combination of terminal storage and ecological water replenishment is required, and pollution load reduction near assessment sections yields the most direct improvement in water quality. Construction cost is a key factor restricting the implementation of overflow pollution control schemes. Under light and moderate rainfall, priority should be given to pollution load reduction, whereas under heavy rainfall, the pollution load reduction rate and ecological water replenishment volume need to be coordinately regulated to maximize environmental benefits under cost constraints.

Key words: ammonia nitrogen overflow pollution; hydrodynamic-water quality coupled models; water environmental capacity; fuzzy comprehensive evaluation method; rain-fed city; urban river

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208900);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2023-重大-22)

作者简介:沈建军(2000—),男,硕士研究生,主要从事水污染控制技术研究。E-mail:1421852723@qq.com

通信作者:李一平(1978—),男,教授,博士,主要从事流域水环境综合治理研究。E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

溢流污染是雨源型城市河道环境污染的主要来源之一。雨源型城市河道非汛期缺乏稳定水源,汛期降雨后,未经处理的生活污水、管网淤泥和地表径流等污染物进入河道,直接冲击水环境容量较小的水体^[1]。而降雨强度的增大将持续加剧城市排水系统负荷,溢流总量成倍增加^[2],雨天溢流污染已成为我国多数城区面临的水环境整治难题^[3]。雨源型城市河道溢流污染的控制可以总结为源头治理、过程控制、存储调蓄和末端处理的全流程控制^[4]:①源头治理。低影响开发设施可以从源头控制降雨产生的径流量和污染物,削减洪峰,降低径流、雨水对管网系统的冲击^[5]。②过程控制。常见的措施包括优化截流倍数、管道冲洗及加强管道检查与修复等^[6]。③存储调蓄。指通过设置调蓄设施,将排水系统无法处理的超量雨水和雨污混合水暂时存储,相当于增大排水系统的截流量,可有效降低溢流污染发生频次及河道污染程度^[7]。④末端处理。指通过物理、化学、生物等多种技术手段,在溢流污染排放的最后阶段,减少溢流污水中的污染物含量。相对于源头治理、过程控制和末端处理,存储调蓄能更直观地削减溢流污染负荷^[8]。詹志威等^[9]利用 SWAT 模型模拟了不同排水系统改造方案的溢流量及水质控制效果,结果表明,储存调蓄池对溢流污水量的截流比例可达 90% 以上,极大缓解了城市内涝和黑臭水体问题。目前,城市溢流污染控制多以溢流量削减为目标。例如, Ma 等^[10]总结了物理模型、统计模型和人工智能 3 种常用溢流污染预测模型,认为溢流体积、次数、水位是最常用的模型输出;而 SWMM^[11]、MIKE^[12]、InfoWorks ICM^[13]等物理模型已成为溢流污染时空预测及控制研究的热门工具。

水环境容量是指水体在规定的目标下所能容纳的最大污染量^[14],反映了污染物在水环境中的迁移及转化规律,是衡量水体水环境承载能力的重要指标。一般情况下,某一水体水环境容量的大小主要取决于水体特性、水质目标和污染物特性等因素^[15]。①根据数学计算方法的不同,水环境容量计算方法可分为线性规划法^[16]、模型试错法^[17]、公式法^[18]等确定性数学方法,以及未确知数学法^[19]、概率稀释模型法^[20]、随机规划法^[21]等不确定性数学方法。②鉴于水体达标范围的不同,水环境容量计算方法可分为水体总体达标法和控制断面达标法。按照控制断面位置的不同,控制断面达标法又可分为断首控制法与断末控制法等^[22]。

Jin 等^[23]将 SWAT 模型与经控制断面修正的水文模型相结合,探究了流域年尺度下不同控制措施

对动态水环境容量的影响,并基于降解系数,通过过程模拟的确定性数学方法研究了计算影响因素。Wang 等^[24]采用属于机器学习范畴的不确定性数学方法,通过训练人工神经网络,构建流域污染物输入与考核断面水质浓度的响应关系,优化污染源通量输入计算以获得更大的水环境容量,并以年为单位实施总量控制。在建立污染物输入与水环境容量关系的同时,还需在总量控制的基础上实现污染物合理分配。Guan 等^[25]建立了以水环境容量和污染物减排率限制为约束、以综合基尼系数最小为目标的加权多准则优化模型,得到了年总量控制中污染物分配最公平高效的污染物排放方案。

目前,针对水环境容量的研究多集中于年尺度、大流域的动态水环境容量研究,溢流污染控制以排水系统溢流量削减为目标,而在降雨日尺度下,以河道水环境容量和控制断面水质为约束的溢流污染控制研究较为匮乏。因此,本文以长江下游雨源型城市河道为例,借助监测和模型模拟等手段,分析场次降雨下溢流污染负荷和水环境容量的时空分布特征,结合区域经济成本要素,以实现场次河道剩余水环境容量充分利用和考核断面水质达标为目标,提出精细化雨天溢流污染控制方案,为雨源型城市河道综合治理和流域经济高质量协同发展提供科学依据。

1 研究区概况

选取长江下游某城市河道为研究区,河道全长约 9.86 km,整体呈 Y 形分布。依据污染源类型,将河道控制单元划分为上游段、中游段、下游段。上游段长约 1.0 km,平均河宽 3.5 m,河道断面面积较小,水流流速快,水动力条件较差,主要受排水口溢流污染影响,降雨后短时间里容易出现断面水质恶化现象;中游段为河道东、西支交汇前河段,长约 0.8 km,平均河宽 3 m,水流速度有所降低,主要受 A 泵站与 B 泵站雨污混接溢流污染影响,降雨后泵站排水 NH₃-N 负荷较高;下游段为东、西支汇合至控制断面前河段,长约 3.2 km,平均河宽 65 m,河道断面面积较大,流速较慢,主要受 C 泵站排水影响,入河污染物可得到充分的混合与降解。研究区示意图如图 1 所示。

M、N 断面为研究区下游两处考核断面,水质执行 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准。根据 2022 年逐月水质监测数据, M、N 断面 NH₃-N 均出现超标的情况。对比监测结果可知, NH₃-N 是研究区主要污染因子。依据 GB/T 28592—2012《降水量等级》,选取研究区汛期 3 场特征降雨,将其划分为小雨、中雨、大雨 3 种降雨类

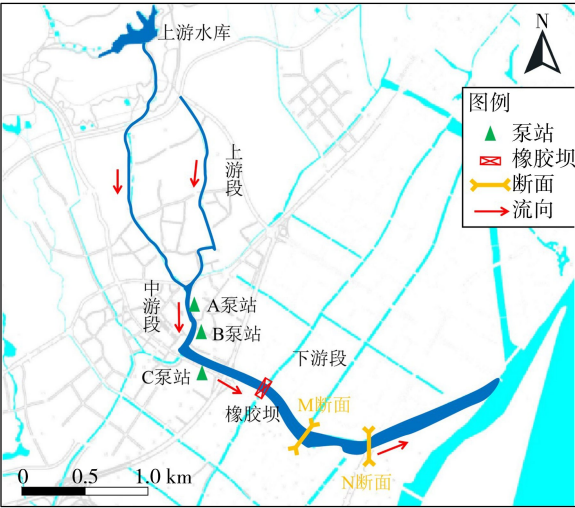


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

型,该3场降雨具有良好的代表性和科学性^[26],其降水量划分标准和降雨强度如表1所示。

基于2022年研究区考核断面日尺度水质监测数据,考核断面NH₃-N质量浓度变化与降雨过程具有极强的响应关系,雨后M、N断面NH₃-N超标次数占比分别为44%和61%。雨天排水口及泵站溢流污水入河是导致考核断面水质下降的主要原因。

2 研究方法

2.1 河道模型构建及率定

采用InfoWorksICM河道模型构建一维河流水动力-水质耦合数学模型,该模型在污染物时空分布评估方面适用性良好^[27],一维河流水动力模块采用一维河道非恒定流圣维南方程组,由质量守恒方程与动量守恒方程组成;一维河道水质模块基于一维对流扩散方程,模拟水体中污染物随水流的输移扩散规律^[28]。

模型构建以入江口2022年5月12—18日实测水位数据作为水位边界条件,以研究区上游流量及现有生态补水点流量作为流量边界条件;选取研究区上游、各生态补水点及入江口实测NH₃-N质量浓度作为水质边界条件。模型主要设置了3座泵站、13处滚水坝、1处干流橡胶坝等可控水工建筑物,布设下游干流3个断面及8个支流断面,共计11个监测断面。雨天研究区主要污染源包括A、B、C泵站

排水,以及上游纯雨水排水口与雨污混接排水口两种类型共5处排水口。基于2022年7月6—20日3场典型降雨期间上游排水口及下游泵站水量、水质实测数据,将雨天各排水口与泵站的排水量及水质以时间序列形式作为点源污染输入河道模型。入流事件、水位事件及污染负荷过程线均采用时间序列数据,可反映城市排水系统高度动态变化的污染物排放特征对河道水环境的影响。

模型河道糙率经验值为0.02~0.04,NH₃-N降解系数经验值为0.09~0.3 d⁻¹^[29]。遵循先水量、后水质的率定原则,选取2022年5月12—18日长江水文站水位和M断面的水质监测数据进行模型参数率定。分别以水位、NH₃-N质量浓度作为水量模型与水质模型的分析指标,平均相对偏差(BIAS)作为模拟精度的评价指标^[30]。率定后模型计算值与实测值的对比如图2所示。水量模型橡胶坝上、下游BIAS分别为0.008、0.01;水质模型BIAS为0.17,水量模型和水质模型模拟精度较好,满足研究需求,率定得到河道糙率值为0.035,NH₃-N降解系数为0.1 d⁻¹。

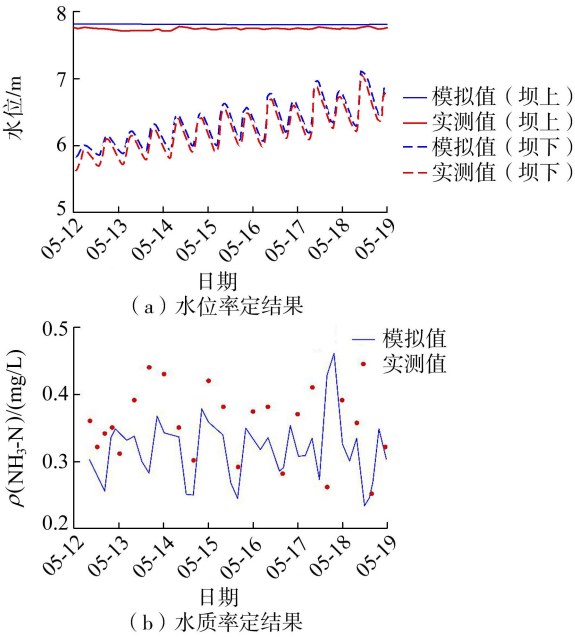


图2 模型率定结果

Fig.2 Model calibration results

2.2 水环境容量模型选择

水环境容量表征河道在某条件下允许排入的最

表1 特征降雨类型及划分标准

Table 1 Characteristic rainfall types and classification criteria

日期	降水量/mm	降雨历时/h	最大降雨强度/(mm/h)	平均降雨强度/(mm/h)	24 h 降水量划分标准/mm	降雨类型
2022-07-06	7.39	2.8	7.8	2.6	0.1~9.9	小雨
2022-07-20	13.40	10.8	8.1	1.2	10.0~24.9	中雨
2022-07-10	29.47	6.6	11.4	4.5	25.0~49.9	大雨

大污染负荷,包括差值容量和自净容量^[31]。差值容量表征河道水质管理目标与现状值的差异,自净容量表征河道在某一时段内的自我净化能力。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,采用单因子评价法判定水质类别。假定污水进入水体后污染物均匀混合,按照一维水质 S-P 模型计算河道纳污能力:

$$W_L = W_1 + W_2 \tag{1}$$

其中
$$W_1 = Q_0(\rho_g - \rho_0) \times 10^{-3} T$$
$$W_2 = Q_0(\rho_0 - \rho) \times 10^{-3} T$$
$$\rho = \rho_0 e^{-KL/86400u} \quad u = Q_0/A$$

式中: W_L 为水环境容量, kg; W_1 为差值容量, kg; W_2 为自净容量, kg; Q_0 为入流断面流量, m^3/s ; ρ_g 为管理目标质量浓度, mg/L; ρ_0 为入流断面本底质量浓度, mg/L; ρ 为河道自然衰减后的质量浓度, mg/L; T 为计算时间, s; u 为水流流速, m/s; A 为断面面积, m^2 ; K 为衰减系数, d^{-1} ; L 为河段长度, m。

2.3 模糊综合评价方法

模糊综合评价法通过模糊数学理论,将定性问题转化为定量问题,适用于处理具有不确定性和模糊性的评价问题^[32]。其主要步骤包括:确定评价因素集和评语集、确定权重向量、构建模糊关系矩阵、开展模糊合成运算并得出评价结果^[33]。

本文结合熵权法,通过计算指标的变异程度来确定权重,指标变异程度越大,提供的信息量越多,所赋权重也越高^[34]。将熵权法应用于模糊综合评价方法的权重计算,可客观确定各评价因素权重,有效提升评价结果的科学性与可靠性。

3 结果与分析

3.1 流域水环境容量分析

3.1.1 溢流污染现状

不同雨型下各排水口 NH_3-N 溢流负荷如表 2 所示,4 个雨污混接截流溢流排水口的 NH_3-N 溢流污染负荷总量均大于分流制雨水排水口出流污染负荷总量,尤其是中、大雨条件下,4 个雨污混接截流溢流排水口的 NH_3-N 溢流负荷量均占上游溢流污染总量的 80%以上,大雨上游排水口 NH_3-N 溢流总负荷高达 13.272 kg,溢流负荷随降水量增大逐渐增大。

表 3 不同雨型 3 座泵站排水情况

Table 3 Drainage performance of three pumping stations under different rainfall patterns									
泵站	排水量/ m^3			$\rho(NH_3-N)/(mg/L)$			NH_3-N 溢流负荷/kg		
	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨
A	3 000	4 440	45 480	11.90	23.30	13.63	35.70	103.45	619.89
B	3 840	5 220	43 440	8.28	16.10	12.44	31.80	84.04	540.39
C	31 800	27 600	270 600	1.43	3.44	2.07	45.47	94.94	560.14

表 2 不同雨型上游各排水口 NH_3-N 溢流负荷
Table 2 NH_3-N overflow loads from upstream outlets under different rainfall patterns

特征雨型	NH_3-N 溢流负荷/kg				
	R1	R2	R3	R4	Y1
小雨	0.123	0.031	0.810	0.271	0.937
中雨	0.360	0.084	2.319	1.766	0.846
大雨	0.924	0.107	6.499	4.598	1.144

基于多场典型降雨事件下排水口与泵站溢流水质、水量监测数据,研究区汛期主要污染源为上游排水口和泵站溢流,主要污染因子为 NH_3-N 。选取上游 5 个典型雨水排水口, R1、R2、R3、R4 均为雨污混接截流溢流排水口, Y1 为分流制纯雨水排水口。由于污染源和排水系统水力条件的差异,排水口污染物排放浓度差异较大。经计算,不同雨型下各排水口 NH_3-N 溢流负荷如表 2 所示, R1~R4 的 NH_3-N 溢流负荷总量均大于 Y1 出流负荷总量,尤其是中、大雨条件下, R1~R4 的 NH_3-N 溢流负荷量均占上游溢流污染总量的 80%以上,溢流负荷随降水量增大逐渐增大。

不同于排水口分散式溢流排放,泵站雨天溢流属于短时间集中式溢流,对受纳水体的冲击负荷较大。对 2022 年河道存在雨污混接的雨水泵站(A、B 泵站)与分流制雨水泵站(C 泵站)排水量和降水量的关系进行对比分析可知,3 座雨水泵站排水时间与降雨时间基本一致,均在降雨当天及雨后 1~2 d 开始排水。不同雨型下 3 座泵站的排水量、 NH_3-N 质量浓度及 NH_3-N 溢流负荷如表 3 所示。可见, C 泵站排水量最大,其次是 B 泵站和 A 泵站,二者在不同雨型下排水量相近。由于 A、B 泵站存在雨污混接情况,其 NH_3-N 质量浓度远大于 C 泵站,中雨和大雨条件下 A 泵站 NH_3-N 溢流负荷排放量最大。

3.1.2 水环境容量时间分布

鉴于汛期溢流时河道流速较大,以溢流期间河道水质不恶化为管理目标,流量与流速均采用不同雨型下水环境容量计算时段内的平均值。将上游 5 个排水口概化为距离河段末端 1.8 km 的排污口, A、B 泵站至河段末端断面的平均距离为 0.8 km, C 泵站至考核断面的距离为 3.2 km。

河道动态水环境容量主要受水动力及水质因素影响:降雨使河道流量增大、流速加快,进而提升了

雨期河道的水环境容量^[35];排水口及泵站污染物排放入河导致断面污染物浓度升高,水环境容量盈余降低^[36]。根据实际监测数据与模型模拟结果,计算不同雨型下日尺度水环境容量,在不同雨型计算时段的降水量、污染物通量、考核断面河道流量、污染物质量浓度及河道整体水环境容量变化如图 3 所示。

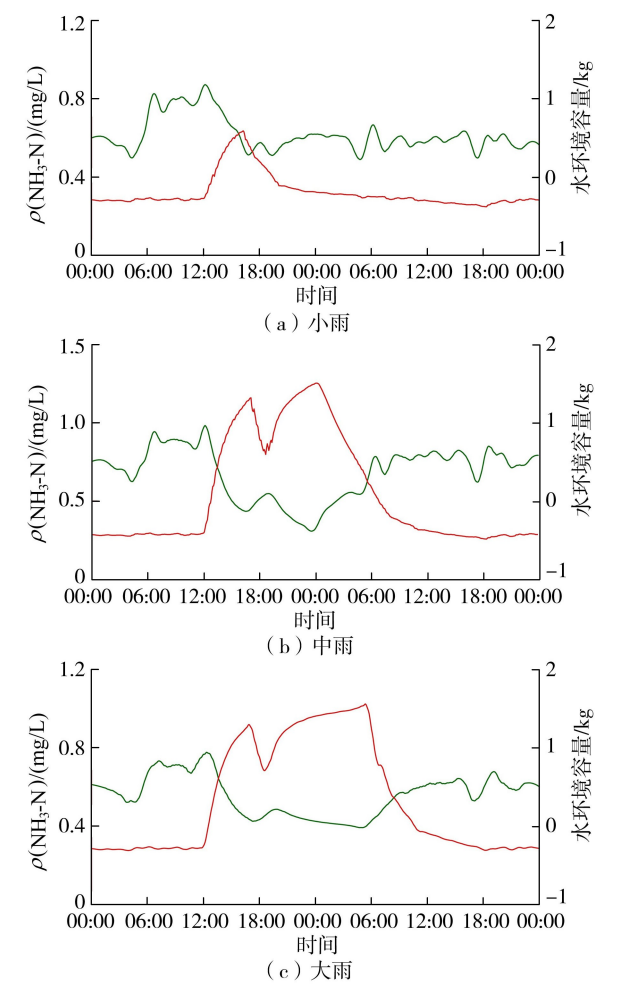


图 3 水环境容量及影响因素时间分布
Fig. 3 Water environmental capacity and temporal distribution of its influencing factors

结果表明,经不同程度降雨后,3 种雨型下河道水环境容量与流量均有所提升;降雨后一段时间内污染物开始入河,主要系下游泵站开闸排涝所致。随着大量污染物汇入,河道流量略有上升,考核断面 NH₃-N 质量浓度逐步升高,3 种雨型峰值质量浓度分别达 0.683、1.253、1.026 mg/L,其中中雨和大雨

条件下峰值质量浓度超过Ⅲ类水标准(GB 3838—2002《地表水环境质量标准》),此时河道水环境容量亦降至最低。雨天河道水质及水环境容量恢复至雨前水平所需时间也随降水量增加而延长,3 种雨型对应的恢复时间分别约为 24、36、48 h,大雨条件下恢复时长为小雨的两倍以上。由此可见,河道流量与断面浓度受降雨及污染物排放影响,均呈先升高后降低并最终稳定于雨前水平的趋势;河道日尺度动态水环境容量随着流量增大而升高,随着断面浓度升高而降低,最终趋于稳定。考核断面浓度与动态水环境容量对降雨及污染物排放的响应存在一定的滞后性,该结论与杨升^[37]关于溢流污染与河道水质响应关系的研究结论一致;且随着降雨强度的增大,河道水质恢复所需时间逐步增加。

3.1.3 水环境容量空间分布

考虑到排水口和泵站排水对考核断面 NH₃-N 质量浓度的影响存在一定的滞后性,且不同雨型下考核断面水质波动特征与恢复时长存在差异。以降雨开始至降雨结束考核断面水质恢复至降雨前水平的时长作为场次降雨水环境容量的计算时段^[38],研究 3 种雨型下河道各河段水环境容量。根据模型模拟结果及水环境容量时间分布特征分析,小雨、中雨、大雨的水环境容量计算时长分别为 24、36、48 h。根据式(1)计算不同雨型下各河段水环境容量及剩余水环境容量,结果如表 4 所示。

对比不同雨型下各河段 NH₃-N 溢流负荷与水环境容量:小雨条件下,上游排水口和下游泵站 NH₃-N 排放负荷较低,各河段水环境容量均有较多盈余;中雨条件下,A、B 泵站开始大量排水,高浓度混接污水汇入河流,中游段剩余水环境容量仅有 19.65 kg,得益于下游段水环境容量较大,河道整体剩余水环境容量未出现超标;大雨条件下,降雨虽使河道水环境容量有所提升,但下游 3 座泵站均启动大量排水,河道 NH₃-N 总负荷高达 1 734.09 kg,河道短时间内无法完成稀释降解,剩余水环境容量呈负值。由此可见,在中雨和大雨条件下,河道整体剩余水环境容量较少。

上游段水环境容量足够承受汛期排水口溢流污染,因排水口溢流对降雨的响应时间较短,河道断面

表 4 NH₃-N 溢流负荷及水环境容量计算结果

单位:kg

Table 4 Calculation results of NH₃-N overflow load and water environmental capacity

unit:kg

河段	溢流负荷			水环境容量			剩余水环境容量		
	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨
上游段	3.63	5.59	13.67	10.83	18.33	25.82	7.20	12.74	12.15
中游段	66.88	187.50	1 160.28	125.66	207.15	301.08	58.78	19.65	-859.20
下游段	45.47	94.94	560.14	357.50	557.03	770.42	312.03	462.09	210.28

浓度存在短暂超标现象。随着时间推移,上游段污染负荷可在下游得到稀释降解;中游段分布有 A、B 两座雨污混接泵站,且地处城区,中雨、大雨条件下该河段水环境容量严重不足,需对污染负荷进行削减与缓排,依托河道的自净能力,增加溢流污染物在河段内运移过程中的自然降解量;下游段河道水动力条件较好,大雨条件下水环境容量可达 770.42 kg,说明下游段在容纳 C 泵站 NH₃-N 溢流负荷的同时,可有效承接上游无法容纳的负荷,实现小雨、中雨条件下河道整体水环境容量达标。

河道污染负荷和水环境容量时空分布特征分析表明,小雨时河道考核断面污染物峰值质量浓度和水环境容量均达标,上游排水口相对于中下游泵站溢流量较小,对下游考核断面影响有限,因此控制中雨、大雨时的河道流量及中下游泵站溢流量,是保障研究区水质与水环境容量达标的关键。牛晋兰等^[39]研究表明,受污染物入河浓度及排水口与目标断面距离的影响,各河段对考核断面水质和整体水环境容量的影响差异显著,需要进行针对性的污染物排放控制和水环境容量分配。在中下游泵站溢流处可设置调蓄池、截污干管等截污措施,避免断面水质短时间超标,末端截污也已被证实是相对源头和过程治理更有效的溢流控制措施^[40]。因此,在下游雨水泵站区域,需对 3 座泵站的水质、水量进行削减与时间调控,避免降雨较大时大量污染负荷入河冲击河道水质,在时间和空间上合理分配污染负荷,充分利用河道自净能力,实现考核断面水质达标^[41]。

3.2 流域溢流污染控制措施

3.2.1 截流调蓄措施

河道现状分析结果表明,中雨及大雨条件下,存在污水混接的雨水泵站溢流排放是受纳河道的主要污染源,要实现河道断面水质稳定达标,需对污水混接的雨水泵站溢流进行有效控制。工程实践中,通常在泵站上游修建截污管,将泵站前池污水抽排至下游污水处理厂,并配套建设雨水调蓄池,以减轻雨天泵站溢流对河道断面水质的影响。考虑下游污水

处理厂雨天可接收截流污水量及调蓄池建设用地条件,参考程江等^[42]提出的调蓄池容积设计经验公式,受降雨强度与用地类型影响,上海苏州河地区调蓄池对溢流污染负荷的削减率在大雨条件下最高为 20%,中雨条件为 40%。据此,本文设定大雨条件下污染负荷分别削减 10%、20%两种模拟方案,中雨条件下分别削减 10%、20%、30%、40%4 种模拟方案。

泵站截流改造后断面水质及水环境容量变化如表 5 所示。随着泵站污染排放负荷削减率提高,断面 NH₃-N 质量浓度持续降低,河道剩余水环境容量相应提升。中雨条件下考核断面水质最差,当削减率达到 30%时,考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度可满足Ⅲ类水标准;大雨条件下剩余水环境容量最低,削减率达 20%时仍为负值。泵站截流改造在中雨条件下对断面水质改善效果最显著,可有效截留初期高浓度混接污水,降低入河污染负荷,避免考核断面污染物浓度短时间急剧升高;而在大雨条件下,对剩余水环境容量提升效果有限,由于污染负荷总量较大,仅依靠污染负荷削减难以实现水环境容量达标。

3.2.2 生态补水措施

本文研究区河道水量主要来源于上游水库,有长江原水补水和污水处理厂中水补水两条补水路径。模拟在泵站污染负荷不削减的条件下,分别在河道中游段和下游段实施补水,补水量考虑正常生态流量和流域可供水量,在中雨、大雨雨型下设置 10 万、15 万、20 万 t/d 等 3 种方案,进行考核断面水质预测及水环境容量计算。中游与下游实施生态补水后,考核断面水质及水环境容量情况见表 6。随着河道补水量的逐步增加,水环境容量不断提升,但考核断面污染物浓度下降不明显。中雨、大雨条件下,考核断面水质始终较差,NH₃-N 峰值质量浓度均无法达到Ⅲ类水标准。

中游与下游补水效果对比表明,不同点位的补水措施对考核断面水质改善效果同样不佳。中游补水时,因中游段和下游段流量均有所提升,河道整体水环境容量提升相对更为显著。Jiang 等^[43]基于水环境容量对沿海小流域生态补水的研究表明,生

表 5 不同雨型泵站截流改造后考核断面水质和水环境容量

Table 5 Water quality and environmental capacity at assessment cross-section after pump station interception reconstruction under different rainfall patterns					
雨型	削减率/%	NH ₃ -N 峰值质量浓度/(mg/L)	污染负荷/kg	水环境容量/kg	剩余水环境容量/kg
中雨	10	1.145	259.79	782.51	522.72
	20	1.038	231.54	782.51	550.97
	30	0.931	203.30	782.51	579.21
	40	0.802	175.05	782.51	607.45
大雨	10	0.937	1562.05	1097.32	-464.73
	20	0.848	1390.00	1097.32	-292.68

表 6 中、下游补水后考核断面水质和水环境容量

Table 6 Water quality and water environmental capacity at assessment cross-sections after water replenishment in middle and lower reaches

断面	雨型	补水量/(万 t/d)	NH ₃ -N 峰值质量浓度/(mg/L)	污染负荷/kg	水环境容量/kg	剩余水环境容量/kg
中游	中雨	10	1.243	288.03	859.19	571.16
		15	1.222	288.03	936.93	648.90
		20	1.205	288.03	1005.27	717.24
	大雨	10	1.031	1734.09	1441.32	-292.77
		15	1.022	1734.09	1582.93	-151.16
		20	1.015	1734.09	1695.67	-38.42
下游	中雨	10	1.243	288.03	857.50	569.47
		15	1.236	288.03	921.77	633.74
		20	1.219	288.03	974.26	686.23
	大雨	10	1.031	1734.09	1399.92	-334.17
		15	1.024	1734.09	1528.33	-205.76
		20	1.019	1734.09	1656.73	-77.36

态补水在改善河道水质和景观的同时,需兼顾补水水质对河道水质的影响,本文污水处理厂中水水质为Ⅳ类水,因此对考核断面水质改善效果有限,仅能提升河道流量。河道流量随着补水量增加而增大,但大雨条件下仍无法满足污染负荷和水环境容量的要求,因此需将污染负荷削减和生态补水措施相结合,以实现各雨型下考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度及剩余水环境容量达标。

3.2.3 组合方案

a. 中雨。针对中雨条件下河道剩余水环境容量充足但考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度仍超标的现象,基于已有污染负荷削减方案,设置污染负荷削减量在 A、B、C 泵站间不同的分配方案,同时考虑各方案下新建调蓄池截流污水总量,以及调蓄池水泵抽排运行成本(按 3 座泵站调蓄池水泵总耗电量折算)。中雨条件下各泵站污染负荷削减组合方案对比见表 7。可见,在总污染负荷削减量相近的情况下,相较于削减 A、B 泵站污染负荷,加大对下游 C 泵站污染负荷削减,河道水质改善效果更为显著。但 C 泵站前池具有水质浓度低、水量大的特点,需截流更多污水才能实现目标削减率,相应调蓄池运行成本更高。该结论与熊鸿斌等^[44]针对老城区截流式排水系统改造的研究结果一致,即分区制定不同削减率截流污染负荷,较传统截流方式具有更优

的水质改善效果。在将考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度与剩余水环境容量作为环境效益指标的同时,应尽可能降低能耗,协调泵站排水与调蓄池截流的作用。

b. 大雨。针对大雨条件下河道剩余水环境容量不足、考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度超标的问题,结合中雨条件下各泵站污染负荷削减分布结果及中、下游生态补水效果,设置大雨条件下污染负荷削减与生态补水的组合调控方案,同时考虑各工况新建调蓄池截留污水量、建设成本、运行成本及补水成本,其中调蓄池建设成本依据大雨截留污水所需容积确定,补水成本综合考虑补水管道建设、水价及运行维护管理费用。大雨条件下不同污染负荷削减与生态补水组合方案结果对比见表 8。可见,不同方案下 NH₃-N 峰值质量浓度介于 0.840~0.928 mg/L,满足Ⅲ类水标准;剩余水环境容量为 20.88~305.67 kg,亦达到标准要求。随着大雨条件下污染负荷削减率和补水量的提高,考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度随之降低,剩余水环境容量相应提升,但调蓄池的建设运行成本及补水成本也随之增加。大雨条件下加大下游 C 泵站污染负荷削减同样可以降低考核断面 NH₃-N 峰值质量浓度,但会使整体剩余水环境容量略有下降,易出现水环境容量余量不足的问题,且建设与运行成本大幅上升。最

表 7 中雨条件下各泵站污染负荷削减组合方案对比

Table 7 Comparison for combined pollution load reduction schemes of each pump station under moderate rainfall

削减方案	NH ₃ -N 峰值质量浓度/(mg/L)	剩余水环境容量/kg	截流污水量/m ³	运行成本/万元
A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 30%	0.988	560.46	10212	0.030
A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 40%	0.824	569.96	12972	0.039
A、B 泵站各削减 30%、C 泵站削减 40%	0.812	588.71	13938	0.040
A、B 泵站各削减 30%、C 泵站削减 20%	1.038	569.72	8418	0.021
A、B 泵站各削减 40%、C 泵站削减 20%	0.978	588.47	9384	0.022
A、B 泵站各削减 40%、C 泵站削减 30%	0.922	597.96	12144	0.032

表 8 大雨条件下不同污染负荷削减与生态补水组合方案结果对比

Table 8 Comparison of combined schemes of pollution load reduction and ecological water replenishment under heavy rain

组合方案	NH ₃ -N 峰值质量 浓度/(mg/L)	剩余水环境 容量/kg	截流污 水量/m ³	建设成 本/万元	运行成 本/万元	补水成 本/万元
整体削减 10%+补水 15 万 t/d	0.928	20.88	35952	3595.2	0.019	1.5
整体削减 10%+补水 20 万 t/d	0.925	133.62	35952	3595.2	0.019	2.0
整体削减 20%+补水 10 万 t/d	0.848	51.32	71904	7190.4	0.038	1.0
整体削减 20%+补水 15 万 t/d	0.842	192.93	71904	7190.4	0.038	1.5
整体削减 20%+补水 20 万 t/d	0.840	305.67	71904	7190.4	0.038	2.0
A、B 泵站各削减 10%、C 泵站削减 20%+补水 15 万 t/d	0.898	76.90	63012	6301.2	0.036	1.5
A、B 泵站各削减 10%、C 泵站削减 20%+补水 20 万 t/d	0.892	189.64	63012	6301.2	0.036	2.0
A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 10%+补水 15 万 t/d	0.920	136.91	44844	4484.4	0.022	1.5
A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 10%+补水 20 万 t/d	0.918	249.65	44844	4484.4	0.022	2.0

优组合方案需采用综合评价法,结合各项环境与经济指标进行综合评价,在实现河道水环境目标达标的同时,控制溢流污染治理成本,协调雨水泵站排涝与减污之间的平衡关系。

3.3 综合方案评价

基于各类单一及组合工况,利用模糊综合评价法构建环境效益和经济效益的综合评价指标体系,对所有工况进行全过程科学筛选评价。其中环境效益指标包括中雨 NH₃-N 峰值质量浓度、中雨剩余水环境容量、大雨 NH₃-N 峰值质量浓度、大雨剩余水环境容量,经济效益指标包括建设成本、运行成本、补水成本,结合熵权法计算各指标客观权重,结果分别为 0.0954、0.0866、0.0955、0.1537、0.4748、0.0366、0.0574。综合方案共设置 92 个中雨与大雨措施组合工况,经计算综合得分前 10 的工况如表 9 所示。

综上,在环境效益指标中大雨剩余水环境容量权重占比较高,在经济效益指标中建设成本权重占比高达 0.4748。分析其原因,大雨条件下溢流污染负荷较大,导致剩余水环境容量波动较大,随着截流溢流污水量的增加,调蓄池建设规模与成本也大幅提升。由综合方案评价结果可知,最优工况为:中雨整体污染负荷削减 40%,大雨整体削减 10%及中游补水 20 万 t/d。由表 9 可以看出,中雨条件下应尽

可能提高污染负荷削减量,并加大靠近考核断面的 C 泵站削减量;大雨条件下因截流污水量大、调蓄池建设成本高,污染负荷削减率需控制在 10%,可通过成本较低的中游生态补水提升水环境容量,以实现溢流污染控制目标。

因此,依据评估结果,雨源型城市河道雨天溢流污染控制应兼顾提升环境效益与降低治理成本,中雨时应提高各泵站溢流污染负荷削减率,减少考核断面短时水质超标现象;大雨时适当控制污染负荷削减率,实施生态补水措施以提升水环境容量,充分发挥调蓄系统截流控制能力与河道自净能力,实现雨天河道考核断面水质与剩余水环境容量同步达标。实际运行中,从降雨发生到溢流污染控制的响应需与实时控制技术相结合。降雨初期可通过雷达降水预报和地面雨量站实时反馈;降雨过程中通过泵站前池水位及水质传感器实时监测,针对不同雨型启用对应调控措施,实现雨天溢流污染的精准及时控制。

4 结 论

a. 雨源型城市河道溢流污染与水环境容量存在显著的时空分布差异。时间上,河道日尺度动态水环境容量随着流量增大而增大,但受考核断面质量浓度升高制约最终趋于稳定;水环境容量谷值与

表 9 综合方案得分最高工况

Table 9 Working condition with highest comprehensive score

中雨措施	大雨措施	综合得分
整体削减 40%	整体削减 10%+中游补水 15 万 t/d	0.608
A、B 泵站各削减 30%、C 泵站削减 40%	整体削减 10%+中游补水 20 万 t/d	0.598
整体削减 40%	整体削减 10%+中游补水 15 万 t/d	0.591
A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 40%	整体削减 10%+中游补水 20 万 t/d	0.587
A、B 泵站各削减 30%、C 泵站削减 40%	整体削减 10%+中游补水 15 万 t/d	0.581
A、B 泵站各削减 40%、C 泵站削减 30%	整体削减 10%+中游补水 20 万 t/d	0.578
整体削减 40%	A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 10%+补水 20 万 t/d	0.576
A、B 泵站各削减 20%、C 泵站削减 40%	整体削减 10%+中游补水 15 万 t/d	0.570
整体削减 30%	整体削减 10%+中游补水 20 万 t/d	0.568
A、B 泵站各削减 30%、C 泵站削减 40%	A、B 泵站各削减 20%、C 削减 10%+补水 20 万 t/d	0.565

考核断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 峰值质量浓度对降雨及污染物排放的响应存在明显滞后,且河道恢复时间与降雨强度呈正相关关系。空间上,溢流污染负荷与水环境容量分布呈沿程变化特征,上游以排水口溢流为主,溢流量对下游考核断面影响较小;中游城区泵站溢流量与水环境容量难以匹配,大雨时剩余水环境容量为负值,为溢流污染控制的关键;下游缓冲与承载能力较强。识别关键污染源和水环境容量瓶颈区是实现精准调控的基础。

b. 提出基于降雨强度分级的差异化、组合式溢流污染控制策略。单一末端调蓄设施可有效保障小雨、中雨考核断面质量浓度和剩余水环境容量达标,单一的生态补水措施对断面水质改善效果不佳,仅对流量有所提升。随着降雨强度的增加,溢流污染负荷急速增长,大雨时需采用末端调蓄与生态补水调控策略,同时靠近考核断面的溢流污染负荷削减对断面水质提升效果更为直接有效。通过优化污染负荷削减与生态补水的控制策略,可实现断面水质和水环境容量的同步达标。

c. 兼顾环境经济效益的综合调控方案是溢流污染控制的最优选择。通过构建熵权法与模糊综合评价法相结合的评价指标体系发现,经济效益,特别是基础设施建设成本,是制约污染控制方案可行性的关键因素。方案评估结果表明,在成本约束下,中、小雨条件可适当提高污染负荷削减率,大雨条件则适当降低污染负荷削减率并增加生态补水量,以实现单位成本下环境效益最大化。

参考文献:

[1] 韦必颖,成建梅,苏晓煜,等. 深圳市 2015—2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应[J]. 环境科学,2024,45(2):780-791. (Wei Biying, Cheng Jianmei, Su Xiaoyu, et al. Temporal and spatial changes in water quality of rain source rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and their response to rainfall [J]. Environmental Science, 2024, 45 (2): 780-791. (in Chinese))

[2] 高长松,肖洋,许栋,等. 暴雨雨型对城市排水管网和地表洪涝过程的联合影响[J]. 水资源保护,2025,41(4):60-70. (Gao Changsong, Xiao Yang, Xu Dong, et al. The joint impact of rainfall patterns on urban drainage networks and surface flooding processes [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 60-70. (in Chinese))

[3] 史秀芳,卢亚静,潘兴瑶,等. 合流制溢流污染控制技术、管理与政策研究进展[J]. 给水排水,2020,56(增刊1):740-747. (Shi Xiufang, Lu Yajing, Pan Xingyao, et al. Research progress on overflow pollution control technology, management and policy of combined system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56 (S1) :

740-747. (in Chinese))

[4] 袁汝华,李趁,陈建明. 基于 CVM 的城市河道改造生态环境价值评估[J]. 水利经济, 2024, 42 (3): 27-35. (Yuan Ruhua, Li Chen, Chen Jianming. Ecological environment value assessment of urban river channel reconstruction based on CVM [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (3): 27-35. (in Chinese))

[5] 宋嘉. 中国特色海绵城市及低影响开发措施发展研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2023 (1): 154-156. (Song Jia. Research on the development of sponge city with Chinese characteristics and low-impact development measures [J]. Intelligent Building & Smart City, 2023 (1): 154-156. (in Chinese))

[6] 刘宇轩,高雅弘,王振北,等. 城镇合流制排水系统溢流污染控制综述[J]. 环境工程, 2023, 41 (12): 32-47. (Liu Yuxuan, Gao Yahong, Wang Zhenbei, et al. Survey on overflow pollution control of urban confluence drainage system [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (12): 32-47. (in Chinese))

[7] 张璐. 基于污染控制的合流制排水管网溢流调蓄容积优化研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.

[8] 王心舒,江思珉,郑茂辉,等. 城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 (6): 49-56. (Wang Xinshu, Jiang Simin, Zheng Maohui, et al. Simulation evaluation of optimization scheme for drainage system in high-density urban areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (6): 49-56. (in Chinese))

[9] 詹志威,李孟,金溪. 基于 SWMM 模型的合流制管道溢流污染控制系统模拟[J]. 环境工程学报, 2020, 14 (2): 423-431. (Zhan Zhiwei, Li Meng, Jin Xi. Simulation of overflow pollution control system of confluence pipeline based on SWMM model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14 (2): 423-431. (in Chinese))

[10] Ma Shihui, Zayed T, Xing Jidou, et al. A state-of-the-art review for the prediction of overflow in urban sewer systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139923.

[11] Roseboro A, Torres M N, Zhu Zhendou, et al. The impacts of climate change and porous pavements on combined sewer overflows: a case study of the city of buffalo, New York, USA [J]. Frontiers in Water, 2021, 3: 725174.

[12] Lund N S V, Falk A K V, Borup M, et al. Model predictive control of urban drainage systems: a review and perspective towards smart real-time water management [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2018, 48 (3): 279-339.

[13] Gogien F, Dechesne M, Martinerie R, et al. Assessing the impact of climate change on combined sewer overflows based on small time step future rainfall timeseries and

- long-term continuous sewer network modelling[J]. Water Research,2023,230: 119504.
- [14] 李珊,周孝德,李靖. 太子河流域水环境容量研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(5):111-114. (Li Shan, Zhou Xiaode, Li Jing. Study on water environmental capacity of Taizi River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22 (5): 111-114. (in Chinese))
- [15] 逢勇,陆桂华. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社,2010.
- [16] 赵素芹,孙翔,侯东林,等. 应对畜禽养殖跨界污染的流域水资源生态补偿量研究:以国家生态补偿示范区九洲江流域为例[J]. 生态学报,2020,40(10):3247-3257. (Zhao Suqin, Sun Xiang, Hou Donglin, et al. Research on the amount of ecological compensation of water resources in river basins coping with cross-border pollution of livestock and poultry breeding:a case study of Jiuzhou River Basin in national ecological compensation demonstration zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (10):3247-3257. (in Chinese))
- [17] 吴睿,葛苏阳,郭效光,等. 基于 MIKE11 模型的十五里河动态水环境容量分析[J]. 安徽农业大学学报,2020,47(2):288-293. (Wu Rui, Ge Suyang, Guo Xiaoguang, et al. Dynamic water environment capacity analysis of Shiwuli River based on MIKE11 model [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(2):288-293. (in Chinese))
- [18] 何立霞,张玉玲,贾晓宇,等. 干旱地区水环境容量的研究:以张家口市境内永定河为例[J]. 草业科学,2020,37(7):1368-1375. (He Lixia, Zhang Yuling, Jia Xiaoyu, et al. Research on water environment capacity in arid areas:a case study of Yongding River in Zhangjiakou City [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(7):1368-1375. (in Chinese))
- [19] 钟鸣,周刚,高运法,等. 基于不确定性方法的河流水环境容量计算[J]. 人民长江,2020,51(3):31-36. (Zhong Ming, Zhou Gang, Gao Yunfa, et al. Calculation of river water environment capacity based on uncertainty method [J]. Yangtze River, 2020, 51 (3): 31-36. (in Chinese))
- [20] 刘璐瑶,冯民权. 基于水质目标管理的淩水河水环境容量研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(2):45-49. (Liu Luyao, Feng Minquan. Research on water environment capacity of Shushui River based on water quality objective management [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29 (2): 45-49. (in Chinese))
- [21] 王莹,张幼宽,梁修雨,等. 沙颍河安徽段水环境容量计算及动态分析[J]. 人民黄河,2019,41(1):79-84. (Wang Ying, Zhang Youkuan, Liang Xiuyu, et al. Calculation and dynamic analysis of water environment capacity in Anhui Section of Shaying River [J]. Yellow River, 2019, 41(1):79-84. (in Chinese))
- [22] 张琳,周建银,王家生,等. 基于控制断面法的水环境容量及污染综合治理研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(11):23-26. (Zhang Lin, Zhou Jianyin, Wang Jiasheng, et al. Research on water environment capacity and comprehensive pollution control based on control section method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(11):23-26. (in Chinese))
- [23] Jin Huiyu, Chen Wanqi, Zhao Zhengzhong, et al. New framework for dynamic water environmental capacity estimation integrating the hydro-environmental model and load-duration curve method: a case study in Data-Scarce Luanhe River Basin [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (14):8389.
- [24] Wang Xin, Li Rong, Tian Yong, et al. Watershed-scale water environmental capacity estimation assisted by machine learning [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126310.
- [25] Guan Bei, Liang Xiuqiong, Yang Yang, et al. Optimal allocation of water pollutant discharge permits based on environmental Gini coefficient (EGC): a case study of Qinhuai River Basin in Nanjing, China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 26(2):5179-5198.
- [26] 徐荣,邓雅静,李一平,等. 秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与降雨特征响应关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):11-20. (Xu Rong, Deng Yajing, Li Yiping, et al. Relationship between water quality and rainfall characteristics of typical drainage pump station forebay in Qinhuai River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (1): 11-20. (in Chinese))
- [27] 王亚军,李森,李肇隆. 基于 InfoWorks ICM 模型的白龙江流域甘肃段水质模拟及分析[J]. 环境工程学报,2024,18(3):653-662. (Wang Yajun, Li Sen, Li Zhaolong. Water quality simulation and analysis of the Gansu Section of the Bailongjiang River Basin based on the InfoWorks ICM model [J]. Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(3):653-662. (in Chinese))
- [28] 洪志贤,王传琳,秦子晴,等. 基于 MIKE11 的江南平原河网动态水环境容量分析[J]. 环境工程学报,2024,18(3):663-675. (Hong Zhixian, Wang Chuanlin, Qin Ziqing, et al. Dynamic water environment capacity analysis of river network in the Yangtze River Plain based on MIKE11 [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(3):663-675. (in Chinese))
- [29] 瞿一清,逢勇. 基于龙王庙断面水质达标的城南河流域水环境容量[J]. 水资源保护,2018,34(5):76-80. (Qu Yiqing, Pang Yong. Water environment capacity of Chengnan River Basin based on water quality standard of Longwangmiao Section [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):76-80. (in Chinese))

- [30] 熊鸿斌,陈雪,张斯思. 基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法[J]. 环境科学,2017,38(12): 5063-5073. (Xiong Hongbin, Chen Xue, Zhang Sisi. A method for improving the water quality of polluted rivers based on MIKE11 model[J]. Environmental Science, 2017,38(12):5063-5073. (in Chinese))
- [31] 董飞,刘晓波,彭文启,等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J]. 水科学进展,2014,25(3):451-463. (Dong Fei, Liu Xiaobo, Peng Wenqi, et al. Review and prospect of calculation method of surface water environmental capacity[J]. Advances in Water Science, 2014,25(3):451-463. (in Chinese))
- [32] 夏小强,张乐,要丽娟,等. 基于 AHP-模糊综合评价法的渭河河流健康评价[J]. 西北大学学报(自然科学版),2024,54(3):413-423. (Xia Xiaoqiang, Zhang Le, Yao Lijuan, et al. Health assessment of Weihe River based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Northwest University(Natural Sciences), 2024, 54(3):413-423. (in Chinese))
- [33] 张英,马晶晶,李璇,等. 合流制溢流污染控制系统效能评估方法研究及应用[J]. 中国给水排水,2024,40(15):123-130. (Zhang Ying, Ma Jingjing, Li Xuan, et al. Research and application of efficiency evaluation method of combined overflow pollution control system[J]. China Water & Wastewater Engineering, 2024,40(15): 123-130. (in Chinese))
- [34] 刘红雨,刘友存,孟丽红,等. 熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展[J]. 冰川冻土,2022,44(1):299-306. (Liu Hongyu, Liu Youcun, Meng Lihong, et al. Research progress of entropy weight method in water resources and water environment assessment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(1):299-306. (in Chinese))
- [35] 崔嵩,贾朝阳,付强,等. 河流动态水环境容量核算与影响因素分析[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):66-76. (Cui Song, Jia Chaoyang, Fu Qiang, et al. River dynamic water environment capacity accounting and influencing factors analysis[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 66-76. (in Chinese))
- [36] 吴比,李云成,樊皓,等. 水文水质条件对河段纳污能力的影响:以乌东德库尾攀枝花河段为例[J]. 长江科学院院报,2024,41(7):64-71. (Wu Bi, Li Yuncheng, Fan Hao, et al. Effect of hydrological and water quality conditions on the pollutant-holding capacity of river section:a case study of the Panzhihua River section of Wudong Dekuwei[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024,41(7):64-71. (in Chinese))
- [37] 杨升. 某市合流制溢流污染防控及受纳河道水质响应数值模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2024.
- [38] 于磊,黄瑞晶,李容,等. 基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):41-48. (Yu Lei, Huang Ruijing, Li Rong, et al. Research on overflow pollution control of confluence system in the sub-central section of the North Canal based on the pollution holding capacity of the river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):41-48. (in Chinese))
- [39] 牛晋兰,丁佳佳,苏丽萍. 流域水环境容量计算及分配方法探讨:以濠溪河为例[J]. 人民长江,2020,51(3):37-41. (Niu Jinlan, Ding Jiajia, Su Liping. Discussion on calculation and allocation methods of water environment capacity in river basins: a case study of Laixi River[J]. Yangtze River, 2020,51(3):37-41. (in Chinese))
- [40] 曹秀芹,禹然,洪国渊,等. 基于雨水截流率的合流制改造措施研究[J]. 环境污染与防治,2024,46(8):1213-1219. (Cao Xiuqin, Yu Ran, Hong Guoyuan, et al. Research on confluence system transformation measures based on rainwater interception rate[J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(8): 1213-1219. (in Chinese))
- [41] 孙冬梅,程雅芳,冯平. 海河干流汛期动态水环境容量计算研究[J]. 水利学报,2019,50(12):1454-1466. (Sun Dongmei, Cheng Yafang, Feng Ping. Study on the calculation of dynamic water environment capacity in flood season of the main stream of Haihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1454-1466. (in Chinese))
- [42] 程江,许莉,潘炜,等. 雨水调蓄池容积设计标准及其污染减排效益研究[J]. 中国给水排水,2013,29(23):166-170. (Cheng Jiang, Xu Li, Pan Wei, et al. Research on the design standard of rainwater storage tank volume and its pollution reduction benefit[J]. China Water & Wastewater Engineering, 2013, 29(23): 166-170. (in Chinese))
- [43] Jiang Wenjun, Zhuang Wei, Wen Changqi, et al. Calculation of ecological water replenishment in small coastal watersheds based on environmental capacity constraints:a case study of eastern Xiamen, China[J]. Ecological Indicators, 2023,155:111034.
- [44] 熊鸿斌,冯晨潇. 基于 MIKE11 的合流制截流倍数优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(3):371-377. (Xiong Hongbin, Feng Chenxiao. Interception factor optimization of confluence system based on MIKE11[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Sciences), 2023,46(3):371-377. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-09 编辑:胡新宇)