

降雨初期径流污染影响下苏州市古城区河道水质 优化调度方案研究

肖 洋^{1,2,3}, 周 强¹, 许 晨⁴, 钟爱成⁵, 朱丽燕⁵, 盛林华⁵, 张涛涛¹,
张 驰², 姚 瑶¹

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
4. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 江苏 苏州 215009; 5. 苏州市河道管理处, 江苏 苏州 215011)

摘要:以苏州市古城区学士河为研究对象,分析了现有调度方案下降雨初期径流污染对河道水质的影响,基于 SWMM 和 MIKE11 模型构建了水文-水动力-水质耦合模型并用于不同调度方案下河道水质变化情况的模拟,提出了不同降雨情况下改善雨后学士河水质的优化调度方案。结果表明:学士河水质总体良好,河道水质在大雨和暴雨时降至Ⅳ类,大雨情况下降雨初期径流污染对河道水质影响最显著,暴雨情况下影响持续时间最长;构建的耦合模型对各断面水位、流量、水质的模拟效果良好;通过工况设计,合理提高大雨和暴雨期间的闸门流量,可显著降低水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值,使其稳定达到Ⅲ类水质标准,从而有效改善雨后河道水质状况。

关键词:降雨初期径流污染;水质模拟;SWMM 模型;MIKE11 模型;优化调度;学士河

中图分类号:TV121⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)06-0068-09

Study on optimal scheduling scheme for river water quality in Ancient District of Suzhou City under effects of initial rainfall runoff pollution//XIAO Yang^{1,2,3}, ZHOU Qiang¹, XU Chen⁴, ZHONG Aicheng⁵, ZHU Liyan⁵, SHENG Linhua⁵, ZHANG Taotao¹, ZHANG Chi², YAO Yao¹ (1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 5. Suzhou River Management Office, Suzhou 215011, China)

Abstract: Taking the Xueshi River in Ancient District of Suzhou City as the research object, this study analyzed the impact of initial rainfall runoff pollution on river water quality under the existing scheduling scheme. A hydrological-hydrodynamic-water quality coupled model was constructed based on the SWMM and MIKE11 models and used to simulate the changes in river water quality under different scheduling schemes. Furthermore, optimal scheduling schemes for improving the water quality of the Xueshi River after rainfall under different rainfall conditions were proposed. The results show that the overall water quality of the Xueshi River is good, but it degrades to Grade IV during heavy rain and rainstorm events. The initial rainfall runoff pollution has the most significant impact on the river water quality during heavy rain, while its impact lasts the longest during rainstorm. The constructed coupled model achieves good simulation results for water level, flow rate and water quality at each monitoring section. Through the design of working conditions, appropriately increasing the gate flow during heavy rain and rainstorm periods can significantly reduce the peak mass concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ in the water body, stabilizing the water quality to Grade III standard and thus effectively improving the river water quality after rainfall.

Key words: initial rainfall runoff pollution; water quality simulation; SWMM model; MIKE11 model; optimal scheduling; the Xueshi River

基金项目:国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209);国家自然科学基金面上项目(52379075);国家自然科学基金项目(42201132,52309102);苏州市水利水务科技项目(2023004)

作者简介:肖洋(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Sediment_lab@hhu.edu.cn

通信作者:许晨(1993—),女,讲师,博士,主要从事河湖水环境治理研究。E-mail: xc_mornings@163.com

随着城市化进程的不断加快,城市点源污染控制已取得显著成效^[1],面源污染问题逐渐突出,特别是降雨初期径流污染问题,已成为城市水环境治理的关键问题之一^[2]。苏州地处长江下游平原,河网纵横交错,水域面积约占总面积的42%,是我国水域面积比例最大的城市之一^[3]。近年来,苏州市通过点源污染整治、控源截污、调水冲污等手段开展了水环境治理,并取得了显著成效^[4],基本达到消除劣V类水体的目标,但面源污染问题尚未得到有效解决^[5]。降雨径流是面源污染的主要来源,降雨初期径流污染物浓度高、负荷大^[6],是造成水体污染的重要源头^[7]。苏州市古城区河道众多、水系相连,雨水管道从源头到排口的距离较短,降雨初期径流污染成为制约苏州市古城区水环境质量的主要因素^[8]。因此,开展苏州市古城区降雨初期径流污染控制,改善河网水环境质量,成为古城保护复兴亟待解决的重要问题。

在降雨初期径流污染控制方面,国内外学者们通过低影响开发(LID)和最佳管理措施(BMP_s)对雨水进行拦截、消纳^[9-11],对径流污染从源头进行就地截留和处理,以降低降雨初期径流对受纳水体的影响^[12]。例如:白建国等^[13]研究发现溢流堰式截流井在降雨初期对污染物的截流率在80%以上;席慕凡等^[14]利用初期雨水调蓄设施,设置不同的调蓄深度,提高了污染物的削减率。考虑水文和水动力过程有助于了解污染物的传输机制,从而制定有效的控制策略^[15-16],对降雨初期径流污染的控制具有重要意义。例如:Yang等^[17]结合水文水动力过程研究了降雨初期径流污染对城市河流水质时空变化的影响;Liu等^[18]定量分析了水文水动力过程对降雨径流污染的响应关系。水利调度在研究水文水动力过程中发挥着关键作用^[19-20],通过优化闸泵调度可以有效改善河道水体流动条件,提升水环境质量^[21]。例如:Wang等^[22]使用优化水闸控制规则有效降低了降雨径流中的污染物排放量,减少了20%以上的污染负荷;Yazdi等^[23]基于水文模型设计了一种泵站长期优化运行规则,降低了降雨条件下河道40%的峰值水位。现有研究大多聚焦于降雨初期径流污染控制的单一维度,如污染源控制策略或调度系统优化等^[24-26],较少综合考虑水文水动力过程的复杂性及其与径流污染之间的相互作用^[27-28]。鉴于此,结合水文水动力过程,通过优化调度方案调控水动力条件,有效降低下游断面的污染物浓度,对于维护河流水质健康具有重要意义。

学士河是苏州市古城区内重要的骨干河道之一,其水质治理对改善古城区生态环境、促进可持续

发展具有重要意义^[29]。本文以学士河为研究对象,分析现有调度方案下河道水质受降雨初期径流污染的影响,基于SWMM和MIKE11模型构建水文-水动力-水质耦合模型并模拟不同优化调度方案对河道水质的改善效果,以期城市河网水环境治理提供决策依据。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

苏州市古城区位于苏州市中心区域,占地面积约14.2 km²,河道总长35.28 km,其水域面积占苏州总面积的16.9%,区内河网发达,分布了护城河和主流系统。苏州属亚热带季风海洋性气候,气候温和湿润,降水充沛。年降水量的70%集中在4—9月,这期间的降水主要来自初夏的梅雨和夏秋的风雨^[30]。

古城区内的水系构成主要包括“三直三横”骨干河流及其他内部河道。“三直”分别指平江河、临顿河与齐门河、学士河,总体长度约18 km;“三横”分别指桃花坞河与西北街河、干将河、府前河。其中,学士河是苏州市古城区内第一直河,全长3.32 km,河道平均宽度为6.68 m,水域面积为0.22 km²,流经金阊、沧浪两个街道,跨桥18座。其上游与中市河相连通,中游与干将河相连通,下游与府前河相连通。根据古城区土地利用数据,学士河及其相连河道周围土地利用类型多为居住用地和商业用地,径流污染主要来自周边居住区和商业区的雨水排口初期冲刷。

2017年苏州市水务局发布的《苏州市污水专项规划修编简本(2017—2035)》中明确提到,苏州市古城区基本实现污水管网全覆盖、全收集、全输送,污水将通过管道全部收纳进入污水处理厂处理,管网覆盖率达99.8%,污水处理达标率达99%。2021年苏州市政府颁布的《苏州市污水治理提质增效三年行动实施方案》中提到,现阶段苏州市基本消除城镇建成区污水直排口的污水管网空白区,科学消除雨污管道错混接和污水直排口,有效管控合流制系统雨水天然溢流污染,消除污水入河源头。结合实地走访调研,针对点源污染,现阶段苏州市古城区已形成以污水管网为主导的管控模式,实现雨水和污水的分流输送,非点源污染是引起水环境恶化的重要因素之一。

1.2 数据来源

降雨数据、水文数据、管网数据、河道地形、闸泵调度等数据来源于苏州市河道管理处,其中降雨数据时间尺度为1 h,水质、水位、流量数据时间尺度为

2h(表1),构建水文-水动力-水质耦合模型需要对古城区整片河网进行概化,并利用水位、流量等数据进行参数率定及验证,河流流向及各站点位置如图1所示。高程数据来源于数字地球开放平台,土地利用数据来源于ESRI 2017—2022年全球土地利用数据平台。

表1 研究区内站点基本信息

站点	编号	类型	数据监测时间
邱家村	S1	雨量站	2019年10月至2023年9月
阊门	S2	水位、流量站	2022年6月至2023年9月
娄门	S3	水位、流量站	2022年6月至2023年9月
元和塘	S4	水位、流量站	2022年6月至2023年9月
小觅渡桥	S5	水位、流量站	2022年6月至2023年9月
苏安浜	S6	水位、流量站	2022年6月至2023年9月
平四桥	S7	水质站	2021年11月至2023年3月
学士河歌薰桥	S8	水质站	2020年4月至2023年12月

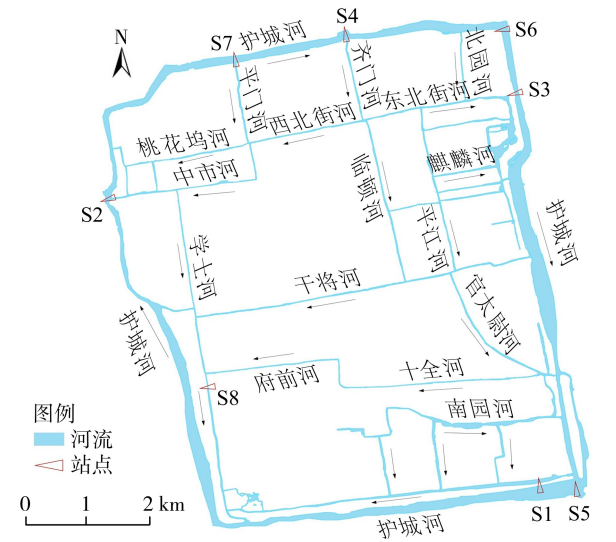


图1 研究区概况及站点位置

2 研究方法

采用苏州市古城区邱家村雨量站 2022—2023 年降雨数据,分析不同等级降雨对河道水质的影响。降雨按照 GB/T 28592—2012《降水量等级》划分,共分为小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个等级。基于SWMM 和 MIKE11 模型,构建了苏州市古城区水文-水动力-水质耦合模型,模拟闸门优化调度方案下学士河水质变化。

SWMM 模型是由美国环保署(EPA)于 1971 年研发的动态降雨径流模型,它可模拟完整的城市降雨径流循环^[16]。地表产流过程采用霍顿入渗模型来对汇水区的产流入渗过程进行分析。水质过程主要是对污染物累积和冲刷进行模拟,累积和冲刷过程采用指数函数方程进行演算^[31]。MIKE11 模型属于一维水动力-水质模型,其中,HD 模块(水动力模块)主要用于模拟水环境的水动力过程,其主要通

过求解圣维南方程组^[32]得到河道不同位置的水位或流量。AD 模块(对流扩散模块)是用来模拟水体中多种化学物质的对流扩散情况。

SWMM 和 MIKE11 模型使用输出-输入方法进行耦合,降雨首先由 SWMM 模型进行模拟计算,汇入管网后通过排口进入河流,采用管网模型计算径流量和污染物浓度,将输出结果作为边界条件耦合到 MIKE11 模型中。为了校准和验证耦合模型的准确性,将 SWMM 模型的计算结果导入 MIKE11 模型进行率定和验证。

2.1 模型构建

2.1.1 子汇水区概化

利用 ArcGIS 平台对研究区的排水管网系统进行概化,共概化为 168 个节点、48 个排水口、169 条管道。根据收集得到的古城区高程数据、坡度数据、土地利用数据以及管网数据,采用泰森多边形法对研究区域进行子汇水区的划分,共划分为 157 个子汇水区(图 2)。

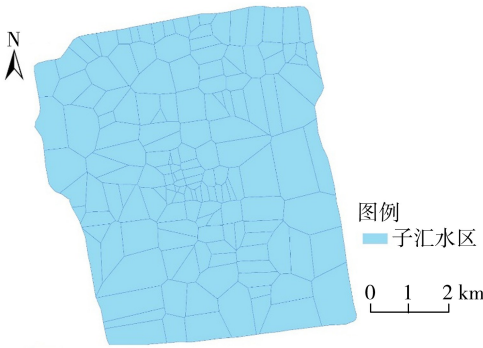


图2 研究区子汇水区示意图

2.1.2 主要参数选取

根据文献[33-34]及 SWMM 模型手册推荐范围,结合研究区域实际情况,SWMM 模型主要参数的取值范围及结果如表 2 所示。

表2 SWMM 模型主要参数取值

参数名称	单位	取值范围	参数选择
最小下渗速率	mm/h	0~10	3
最大下渗速率	mm/h	25~80	76.2
衰减系数	m ⁻¹	2~7	4
不透水区曼宁系数	m ^{1/3} /s	0.010~0.033	0.012
透水区曼宁系数	m ^{1/3} /s	0.05~0.80	0.15
管道曼宁系数	m ^{1/3} /s	0.010~0.025	0.013
透水区洼蓄量	mm	2~10	5
不透水区洼蓄量	mm	0.2~10	2
无洼地蓄水不渗透性	%	5~85	25

2.1.3 河网概化

古城区河网纵横交错,根据河网概化的基本原则进行合理概化。模型范围包括护城河、干将河、平江河、府前河等主要河道 21 条,共划分断面 81 个,断面为实测河道断面,断面间距 100~500 m,为保证

计算精度,在河流交汇、弯曲和宽度剧烈变化处加密断面。

2.1.4 边界条件

古城区内各闸泵站位置见图 3。其中,三星泵站因所在三星河水流出现滞留现象,在河网概化中被处理为闭边界;其余闸泵站均位于古城区内部河网。模型上边界为元和塘 B1 处和外塘河 B2 处实测流量过程,下边界为老运河 B3 处实测水位过程,降雨径流污染通过 SWMM 模型计算得到流量过程和水质浓度过程,并将模拟结果以点源的形式输入 MIKE11 模型中;模型模拟的初始水位采用降雨前的断面实测水位数据,河床糙率设置为 0.03。水质边界采用降雨前断面实测氨氮(NH₃-N)质量浓度。在模型率定和验证时,NH₃-N 质量浓度取值分别为 1.218、1.172 mg/L;在模拟大雨和暴雨情景时,取值分别为 1.254、1.175 mg/L。污染物衰减系数设置为 0.025 d⁻¹,模型模拟的计算时间步长为 5 s,输出结果的时间间隔为 2 h。

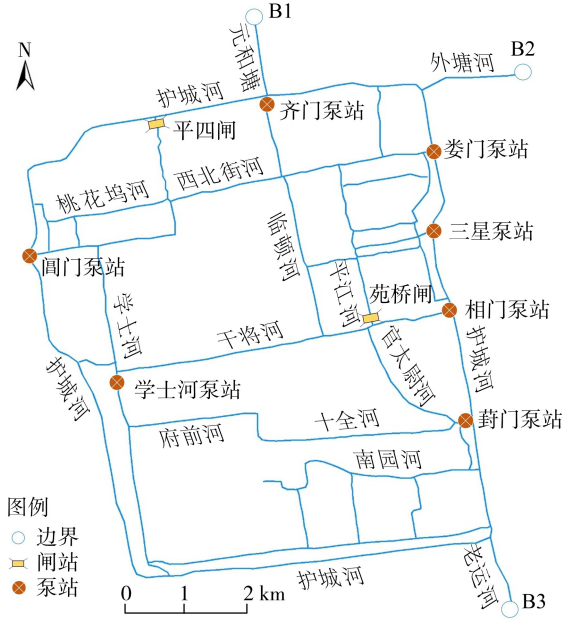


图 3 模型区域及闸泵站位置

2.2 模型率定和验证

模型的率定期为 2023 年 2 月 6 日至 2 月 9 日,验证期为 2023 年 2 月 10 日至 2 月 14 日,期间降水量分别为 26.8、45.4 mm。以古城区上游重要的监测断面阊门、姜门断面为水位、流量参考断面,平四桥、学士河歌薰桥为水质参考断面。相对误差是绝对误差与真值之比^[18,27],本文相对误差是指模拟值与实测值分别求平均值后的相对误差。

图 4 和图 5 为模型率定和验证的部分结果。在率定期,阊门、姜门断面水位最大误差分别为 4.2、1.8 cm,纳什系数分别为 0.85、0.84;流量的相对误

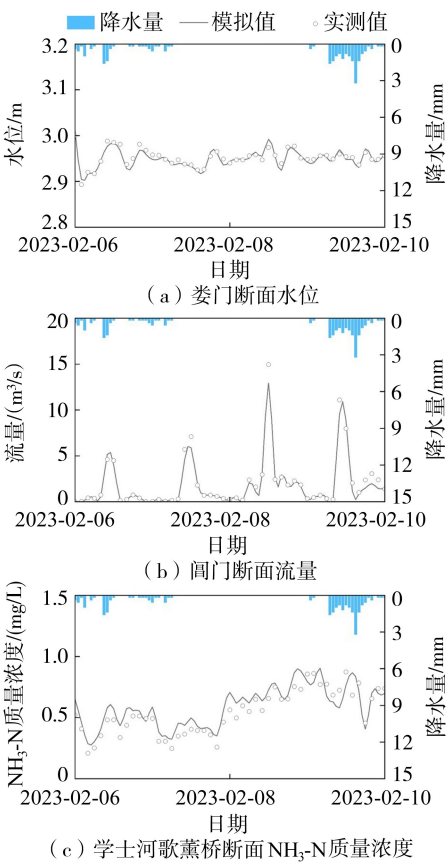


图 4 模型率定结果

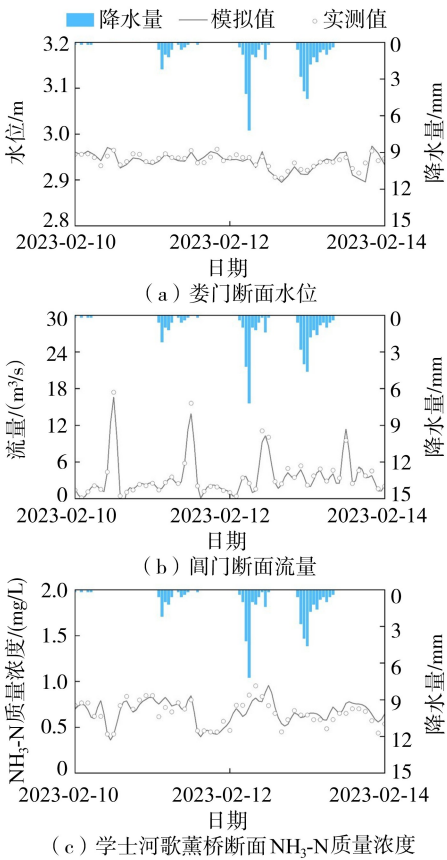


图 5 模型验证结果

差分别为 9.8%、5.5%,纳什系数分别为 0.96、0.98;水位、流量模拟结果均较好。平四桥和学士河

歌薰桥断面水质模拟的相对误差分别为 5.8% 和 8.6%,水质模拟效果良好。

在验证期, 阊门、娄门断面水位最大误差分别为 3.5、1.9 cm, 纳什系数分别为 0.90、0.87; 流量的相对误差分别为 4.4%、6.7%, 纳什系数分别为 0.97、0.91; 水位、流量模拟精度满足要求。平四桥和学士河歌薰桥断面水质模拟的相对误差分别为 7.8% 和 2.6%, 验证结果表明模型具有良好的模拟能力。

3 结果与分析

3.1 不同等级降雨与河道水质的关系

据调查, 学士河 DO、COD_{Mn}、TP 质量浓度均处于Ⅲ类水标准, 水质较好; NH₃-N 质量浓度维持在较高水平且波动明显, NH₃-N 是学士河主要的水体污染物。

本文统计了 2022—2023 年共 198 场降雨, 根据数据的有效性, 共筛选出有效降雨 46 场。根据降雨等级划分标准, 每种等级降雨分别选取 4 场进行研究, 共计 16 场降雨。同时对 16 场降雨的降雨强度进行了统计, 分析了现有调度方案(闸门开度为 30 cm) 在不同降雨情况下学士河的水质变化。

表 3 为基于 SWMM 模型计算得出的不同降雨条件下降雨径流产生的 NH₃-N 污染负荷。由表 3 可知, 不同降雨条件下产生的 NH₃-N 污染负荷存在差异。NH₃-N 污染负荷随降水总量增加而上升, 小雨和中雨条件下, 降雨强度较小且降雨历时较短, 地表径流不明显^[35-36], NH₃-N 污染负荷较小; 大雨和暴雨条件下降雨历时较长, 对地表的持续冲刷导致污染物累积总量越大^[37-38], NH₃-N 污染负荷明显高于其他雨型。

表 3 不同等级降雨事件的降水量和 NH ₃ -N 污染负荷				
降雨事件	降雨历时/h	降水总量/mm	平均降雨强度/(mm/h)	NH ₃ -N 污染负荷/kg
小雨 1	21	6.4	0.30	5.4
小雨 2	10	3.8	0.38	3.8
小雨 3	9	7.0	0.78	7.6
小雨 4	6	2.4	0.40	2.1
中雨 1	11	11.6	1.05	10.5
中雨 2	10	11.2	1.12	10.2
中雨 3	2	8.2	4.10	9.3
中雨 4	22	10.8	0.49	11.6
大雨 1	42	30.6	0.73	17.5
大雨 2	19	20.8	1.09	15.2
大雨 3	33	34.8	1.09	18.7
大雨 4	47	48.6	1.03	21.4
暴雨 1	13	54.6	4.20	27.3
暴雨 2	16	79.6	4.98	32.9
暴雨 3	3	55.7	18.57	28.5
暴雨 4	20	53.4	2.67	26.1

小雨情况下, 4 场降雨的降雨历时为 6~21 h, 平均降雨强度为 0.30~0.78 mm/h。中雨情况下, 4 场降雨事件的降雨历时为 2~22 h, 平均降雨强度为 0.49~4.10 mm/h。小雨及中雨对河道水质影响较小, NH₃-N 质量浓度随时间小幅度波动(图 6(a)(b))。大雨情况下, 4 场降雨事件的降雨历时为 19~47 h, 降雨历时较长, 平均降雨强度为 0.73~1.09 mm/h。随着降雨的持续进行, NH₃-N 质量浓度逐渐升高, 质量浓度峰值皆达到Ⅳ类水标准, 一段时间后降低至雨前水平(图 6(c))。暴雨情况下, 4 场降雨事件的降雨历时为 3~20 h, 平均降雨强度为 2.67~18.57 mm/h。降雨开始后, NH₃-N 质量浓度显著升高, 质量浓度峰值皆达到Ⅳ类水标准, 随后小幅度降低, 但仍处于降雨初期径流污染状态下(图 6(d))。

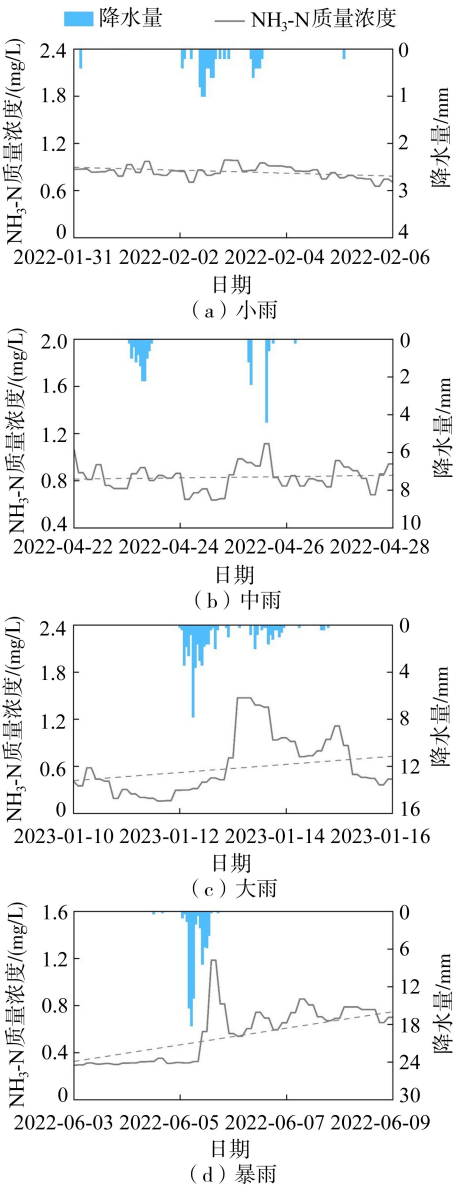


图 6 不同降雨情况下学士河水质变化
小雨和中雨情况下, 由于降雨强度较小, 产生的

径流不明显,径流污染较小,因此河流水质几乎不受影响。大雨情况下,由于产流及汇流需要一定时间,降雨初期径流污染具有一定的滞后性,但长历时的累积冲刷与持续输入导致污染物质量浓度峰值更高、整体水质恶化更显著。暴雨情况下,地表径流迅速形成,冲刷入河,径流污染响应时间更短,产生的污染负荷高,但雨量较大导致河道水体稀释作用更明显,因此 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值低于大雨情况。

3.2 优化调度方案研究

由上述研究可知,降雨初期径流污染是造成学士河水质不达标的主要原因之一,不同降雨条件对河道水质的影响存在显著差异。小雨和中雨情况下,降雨对河道水质产生的影响较小,整体水质变化不大。大雨和暴雨情况下,降雨初期径流污染严重,河道水质明显恶化,污染物质量浓度峰值会升至Ⅳ类水标准,且暴雨情况下河道水质与降雨初期径流污染的响应时间更短,河道水质变化更迅速。因此,选取大雨和暴雨两种降雨条件作为优化调度方案中的雨情工况设置。

目前学士河泵站已停机,古城区内闸泵调度现状为:三星泵站、闸门泵站闸门全开,平四闸、齐门泵站、相门泵站、葑门泵站闸门开度 1 m,娄门泵站闸门关闭,苑桥闸闸门开度 20~50 cm,学士河泵站闸门开度 30 cm。

泵站具体位置已在图 3 中标出。根据学士河现有调度方案,即学士河闸门开度为 30 cm,闸门为底孔出流,通过在模型中调整闸门开度来改变闸门处流量,在现有开度的基础上以平均 15 cm 逐渐增大闸门开度。在降雨开始后,大雨和暴雨情况下河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度升至峰值的平均时间分别为 24、18 h。因此,优化调度方案中闸门运行时间设置为降雨开始后至降雨结束。从水动力角度来说,调节闸门开度,可以增加流量,加速污染物的扩散和稀释,从而降低污染物浓度^[39-41],同时,流速的增加能够有效提高污染物的降解速率^[42-44]。为了更科学地确定调度方案,通过 MIKE11 模型来模拟不同流量条件下的水质变化情况,以预测加大学士河闸流量对水质的具体影响,从而为优化调度方案提供理论依据。

为有效改善现有调度方案下河道水质受降雨径流污染的影响,本文以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主要水质指标,以恢复河道水质达Ⅲ类水为目标,基于构建的苏州市古城区水文-水动力-水质耦合模型,选取 2023 年 1 月 12 日大雨和 2022 年 6 月 5 日暴雨两种降雨情景进行模拟,模拟的水位初始值采用断面实测水位数据,水质初始值采用断面实测水质数据,通过大

雨、暴雨情况下调整闸门开度改变水动力条件、调节水量来减少降雨初期径流污染、降低下游断面的污染物浓度,探究水质达到目标临界值($\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度低于 1 mg/L)的优化调度方案。因此,综合提出了 8 种优化调度方案,如表 4 所示。

表 4 不同降雨情景下优化调度方案

调度方案	闸门流量/(m^3/s)	闸门开度/cm
大雨方案 1	0.15	30
大雨方案 2	0.48	45
大雨方案 3	0.73	60
大雨方案 4	1.07	75
暴雨方案 1	0.20	30
暴雨方案 2	0.64	45
暴雨方案 3	0.98	60
暴雨方案 4	1.28	80

3.3 模拟结果

通过设计多种优化调度方案并进行模拟计算,比选得出大雨方案 4 和暴雨方案 4 满足水质目标,模拟结果如图 7 和图 8 所示,在现有调度方案下,发生大雨和暴雨时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值分别为 1.47 mg/L(Ⅳ类)和 1.19 mg/L(Ⅳ类),降雨期间 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均值分别为 0.83 mg/L 和 0.62 mg/L,随着降雨的持续进行,水质逐渐平稳。

根据 MIKE11 模拟结果,在大雨条件下,通过不断调整闸门开度为 45、60、75 cm 从而增大河道流量,发现当调整闸门开度至 75 cm 时,能够恰好使河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值降低至Ⅲ类水标准,此时河道流量为 1.07 m^3/s , $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值降低至 0.96 mg/L(Ⅲ类), $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均值降低至 0.42 mg/L。在暴雨条件下,由于暴雨产生的径流量大,通过不断调整闸门开度为 45、60、80 cm,发现当调整闸门开度至 80 cm 时,河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值恰好降低至Ⅲ类水标准,此时河道流量为 1.28 m^3/s , $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值降低至 0.98 mg/L(Ⅲ类), $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均值降低至 0.55 mg/L。

通过调整闸门开度,加大学士河闸流量,使河道流速增加,促进 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的降解。大雨条件下闸门开度为 75 cm、暴雨条件下闸门开度为 80 cm 这两种方案均能够在降雨时有效降低污染物质量浓度峰值,且使河道水质稳定在Ⅲ类。

4 结 论

a. 学士河 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度维持在较高的水平且波动明显,发生大雨和暴雨时降至Ⅳ类。小雨和中雨对河道水质影响较小,大雨及暴雨情况下,降雨初期径流污染对河道水质的影响存在一定的滞后性,大雨对河道水质影响最显著,暴雨对河道水质的

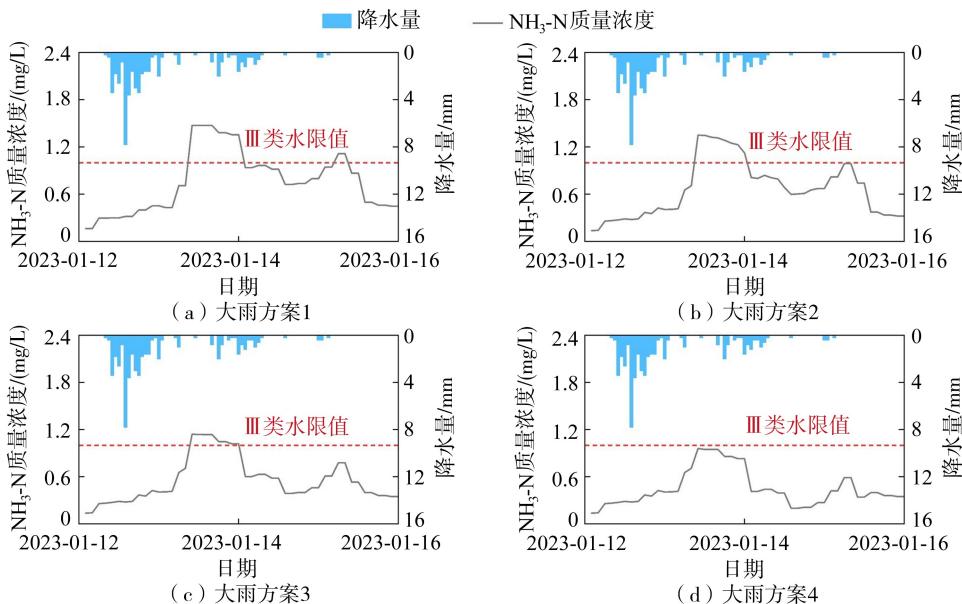


图7 大雨情况下优化方案模拟

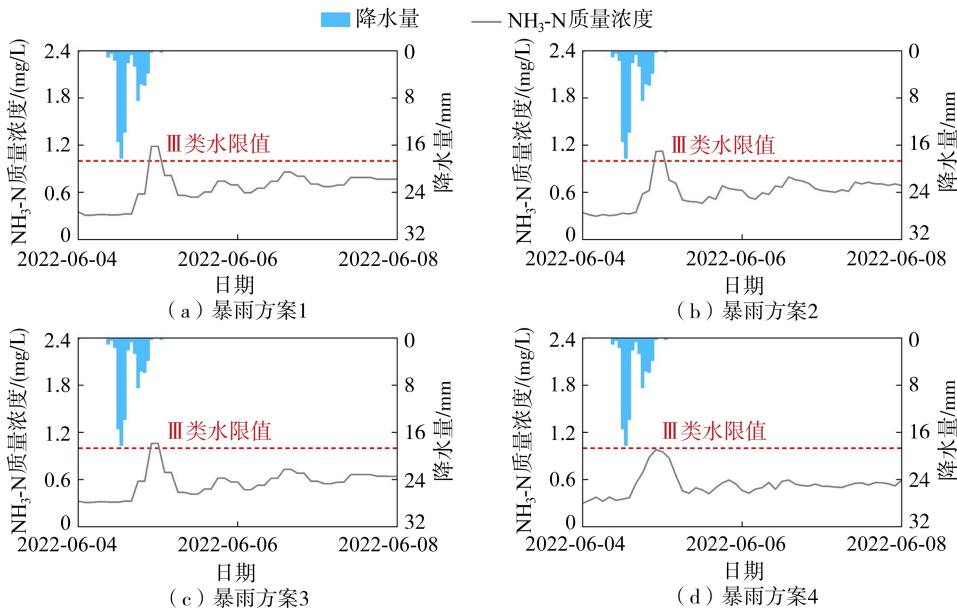


图8 暴雨情况下优化方案模拟

影响持续时间最长。

b. 设计的多种优化调度方案中,大雨情况下,闸门开度提升至75 cm,闸门处流量从 $0.15\text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $1.07\text{ m}^3/\text{s}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值从 1.47 mg/L 降低至 0.96 mg/L ;暴雨情况下,闸门开度提升至80 cm,闸门处流量从 $0.20\text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $1.28\text{ m}^3/\text{s}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值从 1.19 mg/L 降低至 0.98 mg/L ,优化后的水质均能达到Ⅲ类水标准。

参考文献:

[1] WAN Li, WANG Hongbin. Control of urban river water pollution is studied based on SMS[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 22: 101468.

[2] 陈亚松, 闫玉亭, 朱雅婷, 等. 重庆主城区降雨径流污染

特征及其社会影响因素分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 117-125. (CHEN Yasong, YAN Yuting, ZHU Yating, et al. Characteristics of rainfall-induced runoff pollution and its social influencing factors in main urban area of Chongqing City[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 117-125. (in Chinese))

[3] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1403-1415. (BAI Dongrui, ZHANG Tao, CHEN Tan, et al. Distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus bearing pollutants in the Ancient Town rivers of Suzhou[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1403-1415. (in Chinese))

[4] 胡洪营, 孙迎雪, 陈卓, 等. 城市水环境治理面临的课题与长效治理模式[J]. 环境工程, 2019, 37(10): 6-15.

- (HU Hongying, SUN Yingxue, CHEN Zhuo, et al. Topics and long-term governance model of urban water environment governance[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(10): 6-15. (in Chinese))
- [5] LIN Zhixin, XU Youpeng, WANG Qiang, et al. River system changes under urban expansion: insights from the Suzhou-Wuxi-Changzhou metropolitan area, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101766.
- [6] STEIN L, CLARK M P, KNOBEN W J M, et al. How do climate and catchment attributes influence flood generating processes? A large-sample study for 671 catchments across the contiguous USA [J]. Water Resources Research, 2021, 57(4): e2020WR028300.
- [7] 成浩科, 王旭, 张涛涛, 等. 建筑物密度对降雨径流溶解态污染物传输过程的影响[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(4): 39-44. (CHENG Haoke, WANG Xu, ZHANG Taotao, et al. Influence of building density on transport process of dissolved pollutants in rainfall runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 39-44. (in Chinese))
- [8] LAI Qiying, MA Jie, DU Wei, et al. Analysis of the source tracing and pollution characteristics of rainfall runoff in adjacent new and old urban areas[J]. Water, 2023, 15(17): 3018.
- [9] ARVAND S, NOROOZI Z G, DELGHANDI M, et al. Evaluating the impact of LID-BMPs on urban runoff reduction in an urban sub-catchment [J]. Urban Water Journal, 2023, 20(5): 604-615.
- [10] LIU Chengshuai, XIE Tianning, YU Qiying, et al. Study on the response analysis of LID hydrological process to rainfall pattern based on framework for dynamic simulation of urban floods [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119953.
- [11] PAMPALONI M, SORDO-WARD A, LOMPI M, et al. Performance of low impact development on peak flow reduction in an urban system[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2024, 60(2): 427-441.
- [12] GUO Zhou, ZHANG Xiang, WINSTON R, et al. A holistic analysis of Chinese sponge city cases by region: using PLS-SEM models to understand key factors impacting LID performance [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637: 131405.
- [13] 白建国, 朱洵. 初期径流雨水工程截流措施及效果初探[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 215-217. (BAI Jianguo, ZHU Xun. Preliminary analysis of interception measures on initial rainwater runoff [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 215-217. (in Chinese))
- [14] 席慕凡, 王先锋, 黎世荇, 等. 基于 SWMM 模型的城市初期雨水调蓄设施优化设计模拟[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(3): 42-46. (XI Mufan, WANG Xianfeng, LI Shixing, et al. Design optimization of urban initial rainwater regulation and storage facilities based on SWMM model[J]. Industrial Water & Wastewater, 2023, 54(3): 42-46. (in Chinese))
- [15] TANG Hongwu, YUAN Saiyu, CAO Hao. Theory and practice of hydrodynamic reconstruction in plain river networks[J]. Engineering, 2023, 24: 202-211.
- [16] 张炜, 胡乐, 钱启蒙, 等. 基于 Delft3D 的苏州市渭塘镇河道水动力水质模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 96-102. (ZHANG Wei, HU Le, QIAN Qimeng, et al. Simulation of hydrodynamics and water quality for Weitang Town river network in Suzhou based on Delft3D [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 96-102. (in Chinese))
- [17] YANG Linhan, LI Jianzhu, ZHOU Keke, et al. The effects of surface pollution on urban river water quality under rainfall events in Wuqing district, Tianjin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293: 126136.
- [18] LIU Bojun, XIA Jun, ZHU Feilin, et al. Response of hydrodynamics and water-quality conditions to climate change in a shallow lake [J]. Water Resources Management, 2021, 35(14): 4961-4976.
- [19] MA Jingtian, LIU Yang, LIU Jiaying, et al. Modeling and pilot-scale experiment of hydrodynamic regulation to improve the water quality of a plain urban river network: a case study of Changzhou, China [J]. Sustainability, 2023, 15(7): 5700.
- [20] 汤青峰, 彭立云, 蒋永红, 等. 基于 SWMM 的城市河网情景调控与分析研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 15-26. (TANG Qingfeng, PENG Liyun, JIANG Yonghong, et al. SWMM-based scenario regulation and analysis of urban river networks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 15-26. (in Chinese))
- [21] DE SOUZA S V, SHASTEEN K C, SEONG J, et al. Production planning in an indoor farm: using time and space requirements to define an efficient production schedule and farm size [J]. International Food and Agribusiness Management Review, 2024, 27(2): 237-255.
- [22] WANG Xuan, TIAN Wenchong, LIAO Zhenliang. Offline optimization of sluice control rules in the urban water system for flooding mitigation [J]. Water Resources Management, 2021, 35(3): 949-962.
- [23] YAZDI J, CHOI H S, KIM J H. A methodology for optimal operation of pumping stations in urban drainage systems [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2016, 11: 101-112.
- [24] LIN Fei, REN Honglei, QIN Jingsha, et al. Analysis of pollutant dispersion patterns in rivers under different rainfall based on an integrated water-land model [J].

- Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120314.
- [25] WANG Huiliang, HU Yuxin, GUO Yuan, et al. Urban flood forecasting based on the coupling of numerical weather model and stormwater model: a case study of Zhengzhou City[J]. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2022, 39: 100985.
- [26] WANG Luyao, LI Ruyi, DONG Xin. Integrated modeling of urban mobility, flood inundation, and sewer hydrodynamics processes to support resilience assessment of urban drainage systems[J]. Water Science & Technology, 2024, 90(1): 124-141.
- [27] AGRAWAL A, KOTHARI M, JAISWAL R K, et al. Estimation of runoff sensitivity to climate change using MIKE11 NAM model at Parvati Catchment of Rajasthan, India[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2024, 29(4): 781-795.
- [28] LAI Qiuying, MA Jie, HE Fei, et al. Response model for urban area source pollution and water environmental quality in a river network region[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(17): 10546.
- [29] 郭英壮, 王晓燕, 周丽丽, 等. 控制流域氮流失的最佳管理措施配置及效率评估[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 860-871. (GUO Yingzhuang, WANG Xiaoyan, ZHOU Lili, et al. Configuration and efficiency evaluation of the best management practices to control nitrogen loss in the watershed[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 860-871. (in Chinese))
- [30] 章欣. 苏州独墅湖高校校园雨水收集利用景观设计研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [31] 汤维明, 付晓花, 王盼, 等. 基于 SWMM 和 MIKE11 的城市河流水质动态模型构建及应用[J]. 西北水电, 2023(1): 6-12. (TANG Weiming, FU Xiaohua, WANG Pan, et al. Building and application of water quality dynamic model for urban river based on SWMM and MIKE11[J]. Northwest Hydropower, 2023(1): 6-12. (in Chinese))
- [32] 李青峰, 郭珊, 张茹玉, 等. MIKE11 模型在珠三角河网区水质改善研究中的应用[J]. 人民珠江, 2023, 44(2): 54-60. (LI Qingfeng, GUO Shan, ZHANG Ruyu, et al. Application of MIKE11 model in river network area of Pearl River Delta for water quality improvement[J]. Pearl River, 2023, 44(2): 54-60. (in Chinese))
- [33] GIRONÁS J, ROESNER L A, ROSSMAN L A, et al. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM) [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(6): 813-814.
- [34] 杨芬, 魏尊莉, 刘军梅, 等. 基于 SWMM 和 MIKE11 的改善雨后城市河湖水质优化调度方案研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 73-84. (YANG Fen, WEI Zunli, LIU Junmei, et al. Study on optimal water dispatching plan for improving urban river and lake water quality after rainfall based on SWMM and MIKE11[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(7): 73-84. (in Chinese))
- [35] IMBULANA S, TANAKA S, MORIYA A, et al. Inter-event and intra-event dynamics of microplastic emissions in an urban river during rainfall episodes [J]. Environmental Research, 2024, 243: 117882.
- [36] XING Zhaopeng, HUA Guofen, LIU Shangqing, et al. Calculation process and spatial heterogeneity characteristic of non-point source pollution caused by rainfall-runoff in Taizhou City[J]. Water Science & Technology, 2024, 90(5): 1359-1380.
- [37] MAO Jintao, LI Jiali, LI Longbo, et al. Characterization of road-deposited sediment wash-off and accurate splitting of initial runoff pollution in heterogeneous urban spaces[J]. Environmental Pollution, 2024, 347: 123766.
- [38] XIANG Yun, WEN Xiaoqing, HUANG Taiyu, et al. Research on an innovative governance path of abandoned pyrite mines based on the simulation of surrounding river basin environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 445: 141056.
- [39] KIM S, KIM S, HWANG S, et al. Impact assessment of water-level management on water quality in an estuary reservoir using a watershed-reservoir linkage model [J]. Agricultural Water Management, 2023, 280: 108234.
- [40] KIM J, JONES J R, SEO D. Factors affecting harmful algal bloom occurrence in a river with regulated hydrology[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 33: 100769.
- [41] KAZEMNADI Y, NAZARI M, KERACHIAN R. Adaptive reservoir operation considering water quantity and quality objectives: application of parallel cellular automata and sub-seasonal streamflow forecasts [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120294.
- [42] YANG Hao, WEI Chenchen, SUN Guanghui, et al. Responses of soil and ammonia nitrogen loss rates to hydraulic parameters under different slope gradients and rainfall intensities[J]. Water, 2024, 16(2): 230.
- [43] PERZAN Z, MAHER K. Transport, dispersion, and degradation of nonpoint source contaminants during flood-managed aquifer recharge [J]. Vadose Zone Journal, 2024, 23(2): e20307.
- [44] 王洪浩, 任焕莲, 栗泽超, 等. 水闸运行对丹河不同形态河段典型污染物降解系数的影响[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 57-60. (WANG Honghao, REN Huanlian, LI Zechao, et al. Effect of sluice operation on degradation coefficient of typical pollutants in different form reaches of Danhe River[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(8): 57-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-12-07 编辑: 俞云利)