

城市排水与
雨洪管理

DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 07. 018

基于水质指标的CSO调蓄池优化调控模式研究

同 玉¹, 成阳烁¹, 侯精明¹, 王 添¹, 栾广学¹, 姚 瑶¹,
雷 蕾¹, 杨宇英², 吴发荣²

(1. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 渭南市
住房和城乡建设局, 陕西 渭南 714025)

摘 要: 基于城市雨洪管理模型(SWMM),以渭南市典型合流制片区为例,构建多阀门调控的合流制溢流(CSO)污染数值模型。通过模拟研究区域在不同设计降雨重现期下的排水排污过程,分析CSO调蓄池与溢流排口分流前的管网关键节点、溢流排口现状及优化调控下的合流制溢流污染规律,提出基于水质指标的CSO调蓄池优化调控策略。结果表明,在不同降雨强度下,以最小污染负荷溢流为目标的生活污水总悬浮固体(TSS)浓度调控阈值为8 mg/L,即CSO调蓄池在TSS浓度高于此值时开启并收集合流污水。在1、5、20、50和100年一遇降雨条件下,现状生活污水TSS溢流负荷分别为0、0.58、0.88、1.01和1.05 t,经优化调控后分别为0、0.47、0.70、0.82和0.87 t,其中20年一遇降雨条件下的TSS溢流负荷削减率高达20.5%。该调控方法在维持CSO调蓄池设计容积不变的条件下,可显著削减CSO污染负荷,从而有效降低受纳水体的污染风险。

关键词: 合流制溢流污染; 调蓄池; 优化调控; 溢流特性; 雨洪管理模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0122-08

Research on Optimal Regulation Mode of CSO Storage Tank Based on Water Quality Indicators

TONG Yu¹, CHENG Yangshuo¹, HOU Jingming¹, WANG Tian¹, LUAN Guangxue¹,
YAO Yao¹, LEI Lei¹, YANG Yuying², WU Farong²

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Weinan Municipal Bureau of Housing and Urban-Rural Development, Weinan 714025, China)

Abstract: Based on the urban storm water management model (SWMM), this study constructed a numerical model of combined sewer overflow (CSO) pollution controlled by multiple valves, taking a typical combined sewer area in Weinan City as a case study. By simulating the drainage and pollutant discharge processes in the study area under different design rainfall return periods, the key nodes of the pipe network at the junctions of the CSO storage tank and overflow discharge outlet before separation were analyzed, and the overflow pollution patterns of the combined sewer system under optimal control were examined. Optimization strategies for the CSO storage tank based on water quality indicators were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52009104); 陕西省重点研发计划项目(2023GXJLH-042); 陕西省联合基金资助重点项目(2022JC-LHJJ-09); 中德合作交流项目(M-0427)

通信作者: 同玉 E-mail: tongyu@xaut.edu.cn

proposed. The results showed that under different rainfall intensities, the regulation threshold for the total suspended solids (TSS) concentration in domestic sewage, with the goal of minimizing pollution load overflow, was 8 mg/L. That was, the CSO storage tank was activated to collect combined sewage when the TSS concentration exceeds this value. Under conditions of 1-, 5-, 20-, 50-, and 100-year return period rainfall, the baseline TSS overflow loads of domestic sewage were 0 t, 0.58 t, 0.88 t, 1.01 t and 1.05 t, respectively, while those after optimal control were reduced to 0 t, 0.47 t, 0.70 t, 0.82 t, and 0.87 t. Notably, the TSS overflow load reduction rate reached 20.5% under the 20-year return period rainfall condition. The control method proposed in this study can significantly reduce CSO pollution loads while maintaining the designed volume of the CSO storage tank, thereby effectively mitigating the pollution risk to receiving water bodies.

Keywords: combined sewer overflow pollution; storage tank; optimization of control; overflow characteristics; storm water management model (SWMM)

随着我国城市化和工业化进程的加快,城市地面的不透水率不断增加,排水压力明显增大。基于历史、经济等原因,我国的合流制排水系统仍然广泛存在,致使暴雨条件下合流制溢流(CSO)污染事件频发^[1-3]。

近年来,针对CSO污染的治理,研究者已开展了大量工作来探索有效调控策略,常见的方法包括在排水系统末端或溢流口处实施调控、通过设置滞留设施来实现源头控制分散污染等^[4-6]。但在实际应用中,调蓄池往往在溢流情况严重时才被启用,这限制了其在控制污染负荷方面的潜力。目前已有部分学者从浊度入手,研究其在调蓄池高效利用中的优化调控模式。席广朋等^[7]通过模拟某区域在不同重现期下调蓄池内的水质变化,将调蓄池内浊度去除率开始降低的时间作为调蓄池出水实时控制参数,从而削减溢流污染负荷;Lacour等^[8]发现浊度可以作为调蓄池精准调控的污染物指标;熊园等^[9]设置时间或污水出水标准中浓度值作为调控指标,充分利用调蓄池并有效截留污染物。以上研究以水质为优化调控对象,进一步控制了CSO污染,但针对不同降雨条件下溢流污水流量和浓度协同变化规律的解析以及基于水质指标的CSO调蓄池调控模式仍鲜有研究。

鉴于此,以陕西省渭南市中心一区为研究对象,利用雨洪管理模型(SWMM)构建多阀门调控的CSO污染数值模型,模拟分析现状CSO调蓄池在不同设计降雨条件下的运行规律,进一步提出基于水质指标的CSO调蓄池优化调控策略,旨在降低区域

内生活污水溢流负荷,提高调蓄池利用效率,以期为该地区的城市水环境治理提供科学解决方案和工程技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择渭南市中心一区为研究区域,其位于渭南市东北部老城区,地势南高北低,靠近沈河左岸。主要污水来源为生活污水,现有排水体制以合流制为主,通过雨污合流排水管网排至污水处理厂或溢流至沈河。区域内现有污水处理厂1座,处理规模为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$;CSO调蓄池1座,建设规模为 $2.98\times 10^4\text{ m}^3$;溢流排口6个。

在SWMM模型中,通过设置阀门及其启闭控制规则来实现调蓄池进出水量目标。现有CSO调蓄池布设5个阀门: Z_1 控制管网水流向污水处理厂, Z_2 、 Z_3 控制来水流向调蓄池, Z_4 、 Z_5 控制污水从排口溢流至河道。调控规则如下: Z_1 在降雨开始即开启; Z_2 、 Z_3 在来水流量大于两阀门前DN1 000污水管道进水流量时开启,多余合流污水进入调蓄池; Z_4 、 Z_5 在调蓄池水位达到设计最高水位时开启,超过调蓄池调节能力的合流污水排入沈河。现状根据阀门控制条件编写规则控制阀门启闭。

研究区域的排水体制以截流合流制为主,其中,胜利大街和朝阳大街合流管道出水口的截流堰较高,降雨强度较大时,雨水无法及时排出;乐天大街排口前管道设置截留井,与上游管道有1 m高程差,雨季时可截留部分污水,另一部分则越过截流堰排向河道。

1.2 数据来源

1.2.1 降雨数据

本研究选用渭南市住房和城乡建设局提供的短历时180 min设计降雨数据,暴雨公式根据渭南气象站1993年—2022年的实测降雨数据推求,典型设计降雨雨型利用Pilgrim & Cordery法根据实测降雨资料推求。降雨重现期选择1、5、20、50、100年一遇,不同重现期下的降雨过程线如图1所示。

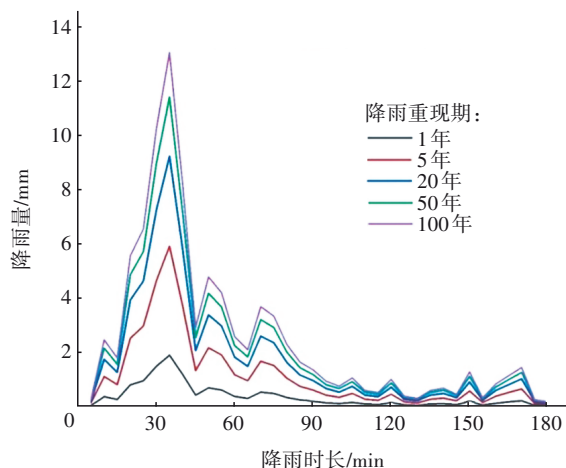


图1 设计雨型

Fig.1 Design rainfall pattern

1.2.2 生活污水数据

研究区域主要为市政道路及住宅,生活污水数据由渭南市排水有限责任公司,基于2023年1月—11月旱季运行数据统计,日平均进水量为63 864 m³/d, TSS浓度取旱季平均进水浓度即217.67 mg/L,将上述水量与水质参数作为模型输入条件,以多节点入流的方式加入模型中。

1.3 研究方法

SWMM可同时模拟地表径流、河道和管网的水力状态及水质输移过程。因此,采取该模型对研究区域合流制管网溢流情况进行模拟,根据研究区域地形条件、管网分布等资料划分子汇水区,构建雨水径流模型。模型将中心一区管网概化为1 294个节点及1 311根主管道,管道总长度为49.89 km。概化结果如图2所示。

模型构建完成后,根据土地利用情况,将子汇水区分为房屋、绿地、道路和其他4种类型。由于COD、TN、TP等污染指标和TSS具有正相关性^[10-11],本研究选取TSS作为代表污染物指标分析溢流水质的情况。

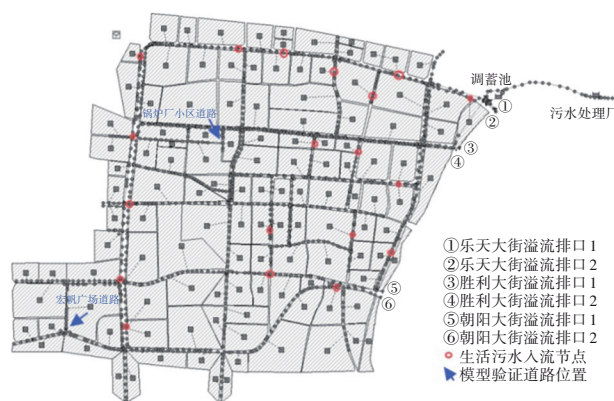


图2 渭南市中心一区SWMM模型概化示意

Fig.2 Generalization of SWMM model in district 1 of Weinan City center

本研究设定模拟时间为7 h,第一阶段为热启动阶段(0~2 h),确保生活污水流量符合实际空间分布特征;第二阶段为降雨阶段(2~5 h);第三阶段为雨后退水阶段(5~7 h)。

1.4 模型验证

1.4.1 模型率定

SWMM模型参数主要分为确定性参数和不确定性参数,确定性参数通过资料和计算获得,其中管长、管径、高程等参数主要依靠CAD图纸获取,地表漫流特征宽度通过计算获得;不确定参数通过SWMM手册和相关文献^[12-13]获取。在有足够的实测数据情况下,常采用纳什效率系数(NSE)评估模型的精确度。经率定,不确定参数的取值如下:不透水区曼宁系数为0.004 5,透水区曼宁系数为0.2,不透水区填洼量为3 mm,透水区填洼量为7 mm,最大入渗率为24.5 mm/h,最小入渗率为3.1 mm/h,衰减系数为5 d⁻¹,管道曼宁系数为0.013。

1.4.2 水量与水质验证

选取2024年5月25日和7月5日两场实测降雨及水量和水质监测数据对模型进行验证,降雨历时分别为302和544 min,总降雨量分别为23.8和26.1 mm。水量验证选取锅炉厂小区下游管道节点作为验证点,对节点水深进行验证;水质验证选取宏帆广场道路和锅炉厂小区道路作为验证点。将模型模拟得到的TSS浓度变化过程与实测数据进行对比,结果表明,与实测水量和水质数据相比,模型模拟得到的节点水位NSE分别为0.79和0.76, TSS浓度NSE分别为0.83和0.78,均大于0.70,表明该模型可靠性较高^[14],满足本研究要求。

2 结果与分析

2.1 现状模拟结果分析

2.1.1 CSO水量和水质对降雨重现期的响应

根据CSO调蓄池现状调蓄规则可知,当降雨开始且过流流量 $>0.995 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,CSO调蓄池阀门开启并收集合流污水;蓄满后关闭进水阀门,同时开启溢流排口控制阀门,允许合流污水溢流至沱河。优化前,当降雨重现期为1年时未发生溢流,随着降雨重现期的增加,5、20、50、100年一遇降雨条件下的溢流量分别为 5.49×10^4 、 11.14×10^4 、 14.00×10^4 、 $15.78 \times 10^4 \text{ m}^3$,TSS溢流负荷分别为0.58、0.88、

1.01、1.05 t,溢流污染愈发严重。

2.1.2 重点管段水量和水质的变化过程

CSO调蓄池的优化规则依赖于对现状调蓄规则下CSO溢流量与水质特性的精准掌握和解析。由图2可知,⑤、⑥排口距CSO调蓄池及污水处理厂位置较远,受其影响较小,而①、③排口前管段的水量和水质变化规律与②、④排口基本一致。同时,由于本文模拟方案中,降雨重现期为1年时未发生溢流现象,因此,仅对①、③排口前管段在5、20、100年一遇降雨条件下的溢流流量及TSS浓度变化过程进行分析,结果见图3。

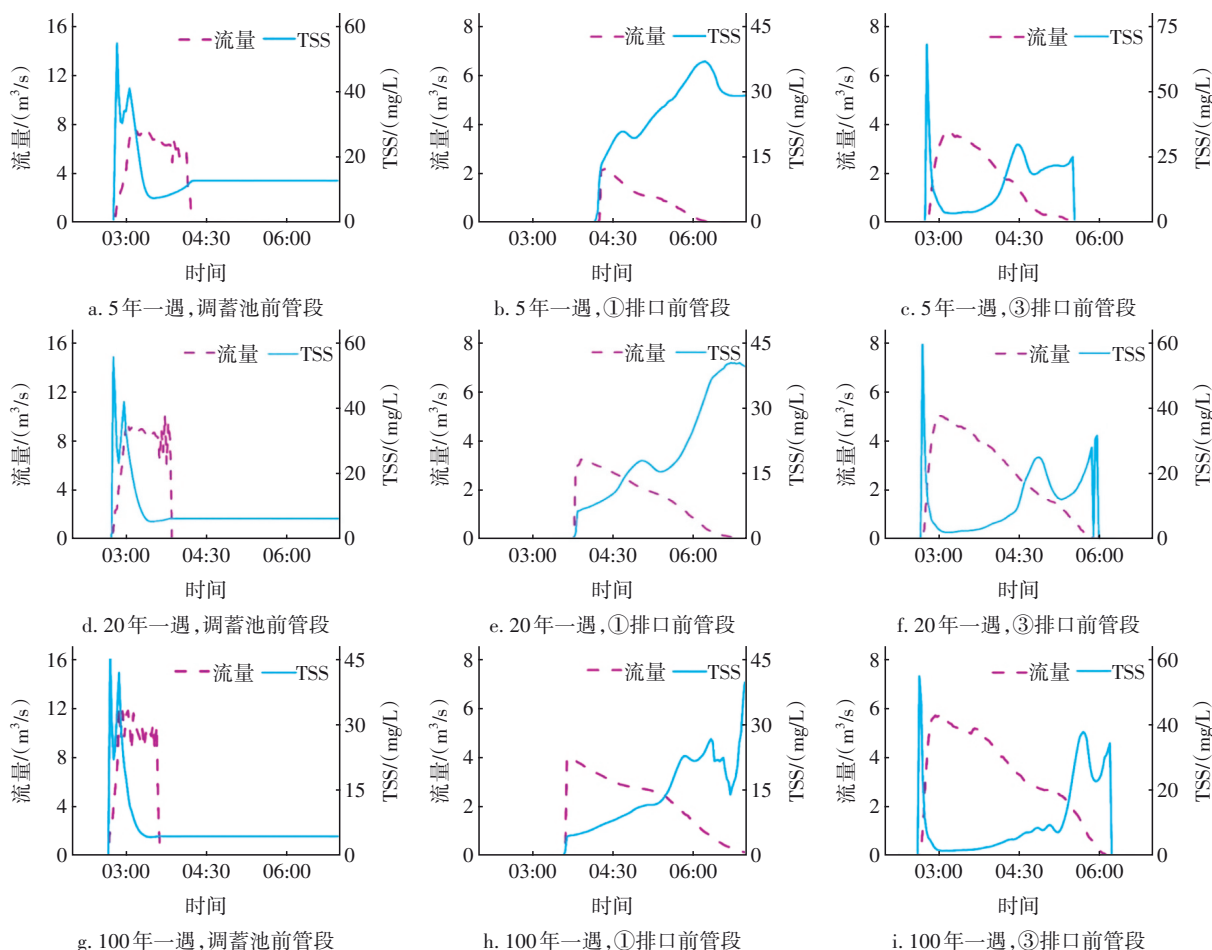


图3 现状条件下各管段处的流量与浓度变化过程

Fig.3 Variation process of flow rate and concentration at each pipe section under current condition

由图3(a)可知,在5年一遇降雨条件下,降雨开始1 h后调蓄池开启,初始时刻流量较小,但TSS浓度达到了峰值(55 mg/L)。20 min后,流量达到峰值($7.5 \text{ m}^3/\text{s}$),TSS浓度降至25.79 mg/L。调蓄池前期收集了大量高浓度污水,随后继续收集流量为 $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、TSS浓度为7.41 mg/L的污水直至蓄满。随后

乐天大街溢流排口开始溢流,初始流量和浓度较大,且TSS浓度持续上升导致溢流TSS负荷量增加。胜利大街溢流口在调蓄池收集污水阶段溢流量较大,但TSS浓度仅为6.29 mg/L,调蓄池蓄满后溢流浓度升高。

由图3(d)可知,在20年一遇降雨条件下,池前

入流流量、TSS浓度在降雨开始时迅速达到峰值,随后流量趋于平稳,约为 $8.89 \text{ m}^3/\text{s}$,调蓄池蓄满时间提前 0.5 h 。乐天大街溢流口前的起始溢流流量为 $3.24 \text{ m}^3/\text{s}$,较5年一遇降雨条件下有所升高,初始溢流浓度有所降低,但后续浓度持续升高。胜利大街溢流排口前的流量达到峰值时,TSS浓度仅为 2.24 mg/L ;待调蓄池集满后,流量虽呈下降趋势,但后续浓度升高。

由图3(g)可知,100年一遇降雨条件下的池前流量和浓度变化趋势与其他重现期基本一致。降雨开始时,调蓄池前管段的入流TSS浓度为 47.32 mg/L ,随后降低,最终稳定在 4.51 mg/L ,流量显著升高至 $11.49 \text{ m}^3/\text{s}$;而图3(h)和(i)显示溢流流量及浓度均增加,且溢流时间延长使TSS负荷量增大。

由上述模拟结果可知,调蓄池的现状运行规则存在一定的弊端。传统“遇雨则开”的调蓄模式以流量为主要控制条件,未能优先截留降雨初期小流量的高浓度污染水体,反而在降雨过程中收集了大量被雨水稀释的低浓度混合污水,导致后期的高浓度污水直接溢流至受纳水体,进而加剧受纳水体水质污染。

2.2 优化调控模拟结果

根据现状模拟结果,在不同重现期降雨条件下,通过分析CSO调蓄池、污水处理厂和溢流排口三处分流节点的流量及TSS浓度变化过程,设置了多种模拟工况来确定最佳调蓄阈值,从而实现溢流污染负荷的削减。由于节点J00068和节点J00371处的流量和浓度变化过程基本一致,故选取节点J00068进行分析,变化过程如图4所示,本文仅选取20年一遇降雨条件下的流量和浓度过程为例进行分析,其余重现期同理。

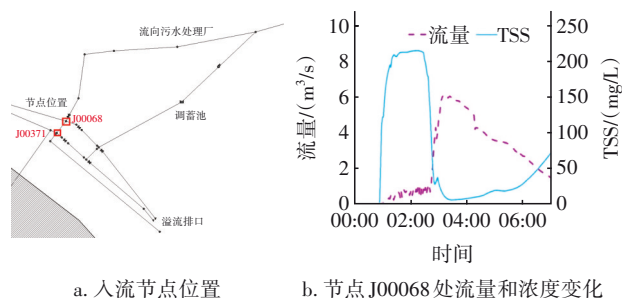


图4 入流节点位置及节点J00068处的流量和浓度变化

Fig.4 Location of inflow node and variation of flow rate and concentration at node J00068

由图4可知,部分高浓度污水在降雨前直接流

至污水处理厂。降雨开始后,阀门 Z_2 和 Z_3 开启,超过污水处理厂限制进水流量的合流污水流向调蓄池和溢流排口。调蓄池的收集过程为前期高浓度小流量和后期低浓度大流量。蓄满后,部分高浓度污水以溢流的形式排出,若将此阶段污水收集替换调蓄池后期收集的低浓度污水,则可以实现削减污染负荷的目标。因此本研究模拟了多种调蓄浓度的工况,不同降雨重现期条件下的最佳调控浓度阈值如图5所示。

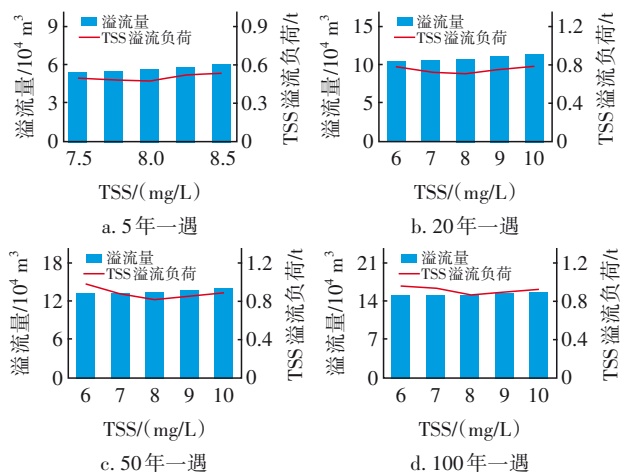


图5 不同重现期下的最佳调蓄浓度

Fig.5 Optimal storage concentration at different return periods

由图5可知,当设置不同的浓度阈值作为调蓄池的控制条件时,溢流量随着TSS浓度的降低而逐渐减小。然而,当TSS浓度阈值为 8 mg/L 时,溢流污染负荷量最少,因此,本研究将最佳调蓄浓度阈值设置为 8 mg/L ,并做出以下优化调控规则:降雨开始后,当入流TSS浓度高于 8 mg/L 时打开池前阀门 Z_2 、 Z_3 ,使调蓄池先收集高TSS浓度污水;TSS浓度低于 8 mg/L 时关闭池前阀门 Z_2 、 Z_3 并打开溢流阀门 Z_4 、 Z_5 ,将污水溢流至沈河,此时调蓄池仍有部分剩余储存空间;溢流一段时间后,污水浓度逐渐升高至 8 mg/L ,此时再开启池前阀门 Z_2 、 Z_3 ,利用剩余调蓄空间收集后期高浓度污水。各重现期的最优调蓄浓度值虽一致,但由于降雨强度和流量不同,故调蓄池的启闭时间存在一定差异。

2.3 优化前后结果对比

2.3.1 不同重现期下流量和浓度的变化过程

优化调控下重点管段的流量和TSS浓度变化过程模拟结果见图6。基于TSS最佳浓度阈值,通过优化调控规则收纳污水,5年重现期下前期流量最小,

收纳时间较长;在 20 年和 100 年重现期下,第一阶段峰值流量分别达到 7.07 和 8.50 m³/s。由图 6(b)、

(e)和(h)可知,在未溢流阶段 TSS 浓度较高,但流量极小,对模拟结果无影响。

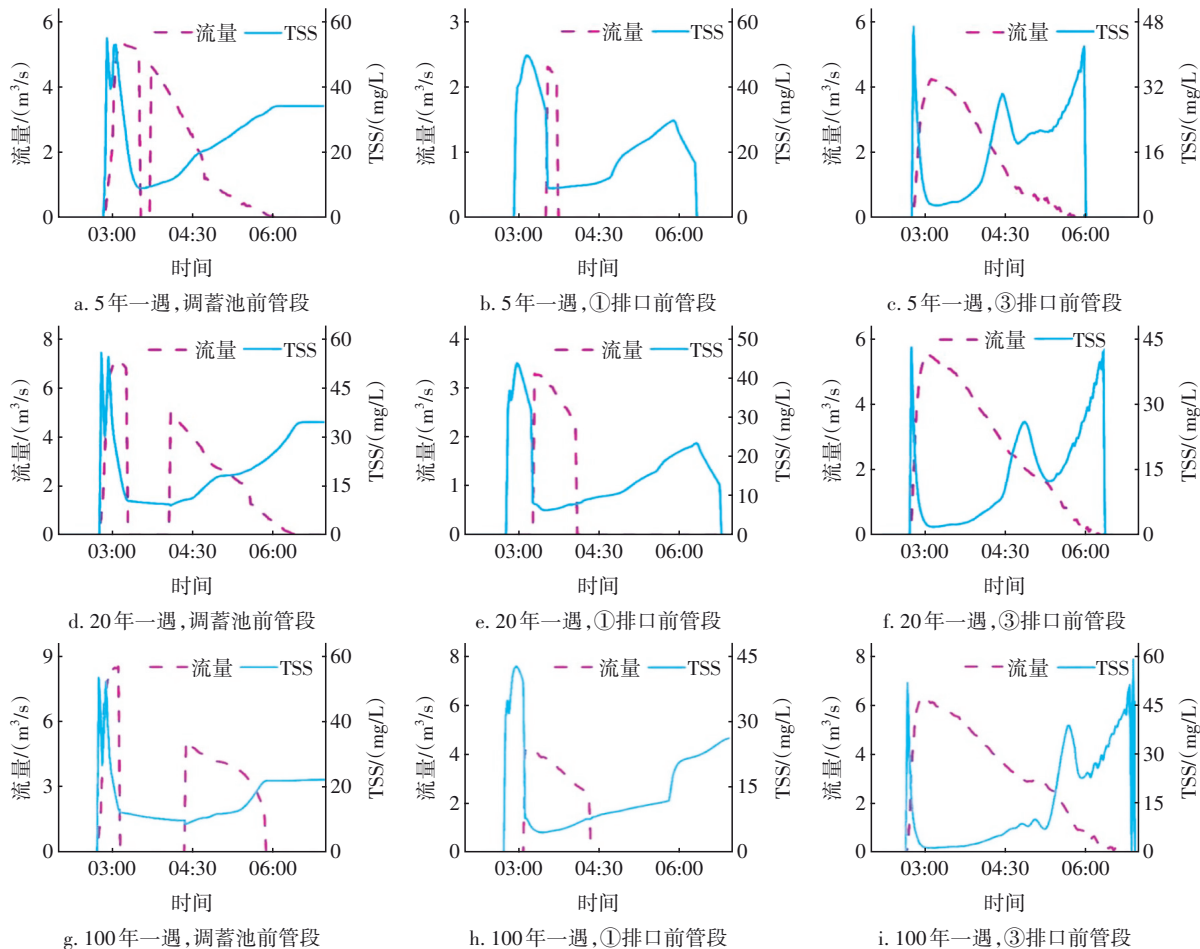


图 6 优化后各管段处的流量与浓度变化过程

Fig.6 Variation process of flow rate and concentration at each pipe section after optimization

乐天大街溢流排口严格遵循调蓄池阀门启闭规则进行溢流,溢流时 TSS 浓度均小于 8 mg/L,随着重现期的增大,溢流时间显著延长。多余污水部分流向污水处理厂或被调蓄池第二阶段收集,另一部分被胜利大街的两个溢流排口分担。然而胜利大街距离调蓄池较远,受调蓄规则影响较小,因此在第一阶段调蓄时,该管段处溢流浓度较低,平均溢流浓度仅为 4.51 mg/L,③排口在溢流阶段流量增大,TSS 平均浓度也升高至 24.67 mg/L,随着重现期的增大,溢流时间比①排口也更长,故此阶段溢流的 TSS 负荷较高。

2.3.2 各重现期的溢流量及污染负荷对比

优化后,5、20、50、100 年一遇降雨条件下溢流量分别为 5.39×10⁴、10.64×10⁴、13.35×10⁴、15.07×10⁴ m³,TSS 溢流负荷分别为 0.47、0.70、0.82、0.87

t。相比优化前,各重现期条件下的溢流量及污染负荷均有所降低,表明本研究提出的调控方法可有效降低溢流污染负荷。

优化前后各重现期下的溢流量及 TSS 溢流负荷对比结果见图 7。

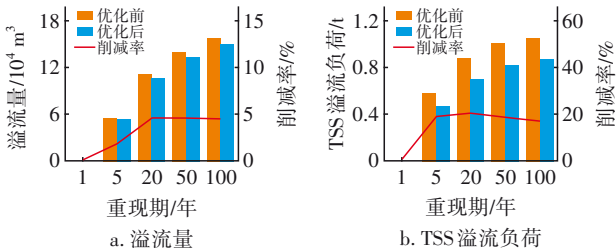


图 7 优化前后溢流量及 TSS 溢流负荷对比

Fig.7 Comparison of overflow volume and TSS load before and after optimization

图 7(a)显示,优化后溢流量均有所降低,除 5 年

重现期外,其余重现期下均降低明显,削减率约为4.5%。图7(b)表明,20年重现期下TSS溢流负荷削减效果最佳,削减率为20.5%,5、50、100年重现期下的削减率分别19.0%、18.8%、17.1%。

3 讨论

以上模拟结果表明,随着重现期的增加,溢流污染负荷(以TSS为例)亦增大,这与杨鹏^[15]、银雅伦等^[16]对合流制管网溢流规律的研究结果一致。

调蓄池的运行规则需根据不同降雨重现期进行优化,单一收集降雨初期时段的污水至调蓄池满,剩余污水排入河道的调控模式无法实现最优调控效果^[7]。本研究提出的优化模式在降雨强度增加的情况下使TSS溢流负荷减少了17.1%~20.5%。其中,应对中等强度降雨时效果最好,这是因为调蓄池容量有限,面对超标降雨时,经过第一阶段调蓄已接近满池,无法开启二次调蓄,导致结果与优化前对比并不显著;而在较低重现期时,流量过小,且第一阶段已收集大部分污水,故后期溢流浓度虽高但溢流负荷并不大。

在管网建设完备的情况下,根据实际溢流情况及不同降雨特性,同时考虑不同降雨重现期下调蓄池调控能力进行优化调控,以最优调蓄最小溢流,缓解CSO对水环境造成的负面影响。

4 结论

① 对于研究区域,在现状条件下,5年降雨重现期下开始发生溢流,5、20、50和100年降雨重现期下TSS溢流负荷分别为0.58、0.88、1.01和1.05 t;在小重现期降雨事件中,溢流污染物浓度较高;当降雨强度增加时,水体的稀释能力提升,降低了污染物浓度水平。

② 在不同降雨重现期下,通过设计不同TSS浓度阈值的调蓄工况,确定最优TSS浓度阈值为8 mg/L,并以此作为启闭CSO调蓄池优化调控的关键参数。

③ 优化后,在5、20、50和100年重现期降雨条件下,TSS溢流负荷分别削减了19.0%、20.5%、18.8%、17.1%。优化调控模式显著优于传统“遇雨则开”的调蓄模式,且应对20年重现期的中等强度降雨时效果最佳。

④ 本研究提出的优化调控模式可进一步提高CSO调蓄池的调控效果,减少溢流污染。本研究

可为渭南市合流制管网服务区域的污染治理提供有力支撑,为其他城市合流制溢流污染调控模式研究及治理工作提供参考。未来可结合初雨污染,探究基于生活污水和初雨污染双控目标的污染负荷最小溢流的CSO优化调控模式。

参考文献:

- [1] 符韵,杨森,李敏,等.黄孝河、机场河流域合流区溢流污染控制标准探索[J].中国给水排水,2024,40(18):29-35.
FU Y, YANG S, LI M, et al. Exploration of overflow pollution control standards in the combined sewer areas of Huangxiao River and Jichang River [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(18): 29-35 (in Chinese).
- [2] 陈梅娟,李伟英,朱晓媛,等.北京市龙潭西湖流域合流制溢流污染调蓄系统设计[J].中国给水排水,2024,40(18):71-74.
CHEN M J, LI W Y, ZHU X Y, et al. Design of regulation and storage system for combined overflow pollution control in the Longtanxi Lake area of Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(18): 71-74 (in Chinese).
- [3] 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 Y, MA J J, LI X, et al. Efficiency assessment method for combined sewer overflow pollution control system and its application [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(15): 123-130 (in Chinese).
- [4] 杨正,赵杨,车伍,等.典型发达国家合流制溢流控制的分析与比较[J].中国给水排水,2020,36(14):29-36.
YANG Z, ZHAO Y, CHE W, et al. Analysis and comparison of combined sewer overflow (CSO) control in representative developed countries [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 29-36 (in Chinese).
- [5] 谢三桃,朱慧雯,叶勇,等.环巢湖地区沙河流域污染负荷总量控制及削减措施[J].水资源保护,2024,40(1):127-134,141.
XIE S T, ZHU H L, YE Y, et al. Total pollution load control and reduction measures in the Shahe River basin around Chaohu Lake [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 127-134, 141 (in Chinese).
- [6] ZHU Q H, WANG Z Y, XIONG Y, et al. High dissolved oxygen regulation by side-stream

- supersaturated oxygenation impedes black-odor removal from rivers affected by combined sewer overflows [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 462: 142734.
- [7] 席广朋,王建龙,赵梦圆,等. 城市雨水调蓄池水质控制效果及其影响因素分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(12): 98-102.
- XI G P, WANG J L, ZHAO M Y, et al. Water quality control effect of urban rainwater storage tank and its influencing factors [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(12): 98-102 (in Chinese).
- [8] LACOUR C, JOANNIS C, CHEBBO G. Assessment of annual pollutant loads in combined sewers from continuous turbidity measurements: sensitivity to calibration data [J]. *Water Research*, 2009, 43(8): 2179-2190.
- [9] 熊园,黄翔峰,魏忠庆,等. 基于区域特征的水质调蓄池运行规则优化[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(13): 126-132.
- XIONG Y, HUANG X F, WEI Z Q, et al. Optimization of water quality storage tank operation rules based on regional characteristics [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(13): 126-132 (in Chinese).
- [10] 侯精明,栾广学,王添,等. “灰绿”协同措施对银川市合流制溢流污染的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 43-49, 86.
- HOU J M, LUAN G X, WANG T, et al. Influence of “grey-green” synergistic measures on combined sewer overflow pollution in Yinchuan City [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 43-49, 86 (in Chinese).
- [11] 周毅,周云笛. 初期雨水调蓄池单位面积调蓄深度数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(4): 43-46.
- ZHOU Y, ZHOU Y D. Numerical simulation of storage depth per unit area of initial rainwater storage tanks [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(4): 43-46 (in Chinese).
- [12] MA B Y, WU Z N, HU C H, et al. Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127269.
- [13] 郭天崎,黄明斌,朱谥远. 不同土地利用方式下表层土壤稳定入渗速率的时间变化[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 113-118.
- GUO T Q, HUANG M B, ZHU M Y. Temporal change of topsoil steady state infiltration rate under different land uses [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2): 113-118 (in Chinese).
- [14] HOU J M, WANG T, LI P, et al. An implicit friction source term treatment for overland flow simulation using shallow water flow model [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 357-366.
- [15] 杨鹏. SWMM模型在城市小流域降雨径流面源污染中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- YANG P. Application of SWMM Model to Rainfall Runoff Non-point Source Pollution in Urban Small Watershed [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [16] 银雅伦,侯精明,杨露,等. 银川市某高密度城区合流制溢流污染特性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(6): 95-102.
- YIN Y L, HOU J M, YANG L, et al. Pollution characteristics of combined sewer overflow in a high density urban area of Yinchuan City [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(6): 95-102 (in Chinese).
-
- 作者简介:**同玉(1984—),女,陕西咸阳人,博士,副教授,主要从事城市水环境治理、城市排水等方面的研究。
- E-mail:** tongyu@xaut.edu.cn
- 收稿日期:** 2025-01-20
- 修回日期:** 2025-03-14

(编辑:刘贵春)