

曹喆, 王成坤, 王川涛, 等. 基于 SWMM 模型的合流制溢流污染控制调蓄池容积设计[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 139–146, 191.

CAO Z, WANG C K, WANG C T, et al. Volume design of storage tank for combined overflow pollution control based on SWMM model [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 139–146, 191.

基于 SWMM 模型的合流制溢流污染控制调蓄池容积设计

曹喆^{1,*}, 王成坤¹, 王川涛¹, 李士翔¹, 王俊佳¹, 刘悦忆²

(1. 中国城市规划设计研究院深圳分院, 广东深圳 518000; 2. 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院, 广东东莞 523000)

摘要 【目的】为了控制合流制溢流污染, 文章探索合流制溢流污染调蓄池容积设计方法。【方法】文章以东莞市生态园区域为研究对象, 基于暴雨洪水管理模型(SWMM), 概化排渠和相关汇水分区, 构建区域合流制溢流水力模型, 研究典型水文年条件下调蓄池设计容积对合流制溢流污染控制效果的影响, 采用年总溢流水量、年总溢流次数和年总溢流 COD 负荷作为评价合流制溢流污染特征的指标。【结果】通过增加调蓄池容积能够提升溢流水量控制率, 但是由于边际效益递减, 存在一个最优化点, 在该点之前提升调蓄池容积能够显著性地增加溢流污染控制效果, 在最优点之后继续增加调蓄池的容积, 对溢流污染控制效果提升有限。研究案例中, 4 条排渠对应的最优调蓄池体积分别为 8 000、10 000、15 000、1 000 m³, 对应研究区域溢流污染物负荷和溢流水量的控制率分别为 62.4% 和 51.8%, 相较未设置调蓄池工况, 减少了 43 次年溢流次数。【结论】合流制溢流污染存在初期冲刷效应, 相同调蓄池容积时, 调蓄池对溢流污染物负荷的控制率高于对溢流水量的控制率。采用能反映真实汇流过程的数学模型法, 有助于在调蓄池的污染控制效率和建设规模之间寻求技术经济平衡点。研究提出的设计方法对现行技术规范关于合流制溢流污染控制调蓄池容积的设计指引是有益的补充。

关键词 合流制溢(CSO)流污染 SWMM 调蓄池 容积设计 溢流污染物负荷 溢流水量

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0139-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.017

Volume Design of Storage Tank for Combined Overflow Pollution Control Based on SWMM Model

CAO Zhe^{1,*}, WANG Chengkun¹, WANG Chuantao¹, LI Shixiang¹, WANG Junjia¹, LIU Yueyi²

(1. Shenzhen Branch of China Academy of Urban Planning and Design, Shenzhen 518000, China;

2. School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, China)

Abstract [Objective] To control combined sewer overflow (CSO) pollution, this study explores a design method for storage tank volume in CSO pollution control. [Methods] Taking the ecological park area of Dongguan City as the research object, based on the storm water management model (SWMM), the drainage channels and related catching-up zones were generalized to construct the regional CSO hydraulic model, and the influence of the designed volume of the storage tank on the pollution control effect of the CSO under typical hydrological year conditions, annual total overflow volume, annual total overflow frequency and the annual total overflow COD load as the indices to evaluate the pollution characteristics of the CSO. [Results] Increasing the volume of the storage tank could enhance the control rate of overflow water volume. However, due to the diminishing marginal benefit, there existed an optimal point. Before this point, increasing the volume of the storage tank could significantly improve the control effect of overflow pollution. After the optimal point, further increasing the volume of the storage tank had limited effect on improving the control effect of overflow pollution. In this study case, the optimal volumes of the storage tanks corresponding to the four drainage channels were 8 000, 10 000, 15 000, and 1 000 m³, respectively. The control rates of the overflow pollutant load and overflow water volume in the corresponding study area were 62.4% and 51.8% respectively. Compared with the working condition without storage tanks, the number of overflows

[收稿日期] 2023-07-21

[基金项目] 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2040206); 国家自然科学基金面上项目(52179009); 国家自然科学基金青年项目(51909035)

[通信作者] 曹喆(1993—), 女, 工程师, 研究方向为海绵城市规划、城市水系规划, E-mail: 414418669@qq.com。

in the following year was reduced by 43. [Conclusion] There is an initial scouring effect in the pollution of CSO. When the volume of the storage tank is the same, the control rate of the storage tank for the pollutant load of the overflow is higher than that for the overflow water volume. Adopting the mathematical model method that can reflect the real confluence process is conducive to seeking a technical and economic balance point between the pollution control efficiency of the storage tank and the construction scale. The design method proposed in the research is a beneficial supplement to the current technical specifications' design guidelines for the volume of CSO pollution control and storage tanks.

Keywords combined sewer overflows(CSO) pollution SWMM storage tank volume design overflow pollutants load overflow capacity

我国多数城市尤其是老城区合流制排水系统将长期存在^[1-2]。暴雨时,当降雨强度超出截流倍数设计标准,合流制系统将发生溢流现象,从而污染受纳水体。为控制合流制溢流污染,国内外诸多城市进行了长期的研究探索,逐步形成了源头控制、存储调蓄、末端处理等一系列合流制溢流污染控制策略^[3]。其中,修建调蓄池是一项效果显著的工程技术措施。

如何确定调蓄池适宜的调蓄量是合流制溢流污染控制工程设计中的重要课题^[4]。《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)推荐采用截流倍数法估算用于合流制溢流污染控制的调蓄池的容积,截流倍数的确定应综合考虑污染负荷消减率、下游排水系统运行负荷、原截流倍数和截流量占降雨量比例之间的关系等因素。截流倍数法忽略了降雨汇流过程这一对合流制溢流污染控制具有重要影响的因素,且截流倍数确定过程较为复杂,在实际操作中存在诸多困难。《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)提出,对于有条件的地区,宜采用数学模型法确定调蓄池容积^[5]。

本文以东莞市生态园区域的合流制排水系统为例,以暴雨洪水管理模型(SWMM)为研究辅助平台,研究典型年降雨条件下的调蓄池容积对合流制溢流污染控制效果的影响,探索基于数学模型模拟的合流制溢流污染控制调蓄池容积的设计方法。

1 研究区域概况

东莞市生态园流域汇水面积为 74.9 km²,涉及石排镇、石龙镇、茶山镇、东坑镇、横沥镇、生态园 6 个行政辖区。其中,生态园为分流制排水系统,外围其他各镇为合流制排水系统。旱季时,生态园外围污水通过冲美排渠、田边排渠、中坑二渠、坑尾一渠、坑尾渠、埔新二渠、文庙排渠、下沙排渠、福隆排渠 9 条排渠收集后进入位于东园大道的污水主干管,最

终送至南畲朗污水处理厂进行处理。在 9 条排渠与污水主干管之间建设有截流井,现状截流倍数约为 1,由于南畲朗排渠雨季现状水位较高,9 条排渠下游截流闸现状均为常闭状态。暴雨时,该截污系统会产生溢流,溢流污水进入南畲朗-大圳埔排渠,对生态园内部水体造成污染。生态园流域污水系统如图 1 所示。

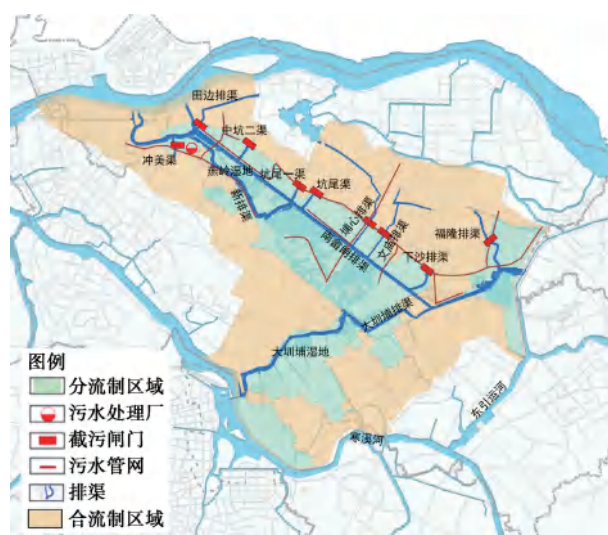


图 1 生态园流域污水系统

Fig. 1 Wastewater System in the Ecological Park Basin

2 合流制溢流污染计算模型构建

2.1 降雨条件

通过对最近 31 年的降雨量资料进行分析,得到丰水年(25%)年降雨量为 1 956 mm,平水年(50%)年降雨量为 1 729 mm,枯水年(75%)年降雨量为 1 488 mm。生态园内部水体为 1 个受控的相对封闭独立管理水系,具有稳定的补水水源,水系水环境受雨季合流制溢流污染影响显著。考虑不利工况,本设计选取降雨量接近丰水年(25%)工况的 2006 年降雨序列(降雨量为 1 956 mm)作为模型输入降雨条件。

2.2 模型构建

基于 1 : 500 的地形图得到南畲朗-大圳埔流域高程模型 (DEM) 数据, 利用 ArcGIS 的水文分析模块, 结合流域内土地利用情况, 共划分 37 个汇水分区, 其中, 与本次设计研究相关的汇水分区编号分别为 C1~C9 的区域, 模型概化结果如图 2 所示。



图 2 研究区域污水系统模型概化图
Fig. 2 Generalized Model Map of Sewage System
in the Research Area

合流制溢流污染为雨季时 9 条排渠截污并溢流产生。各排渠相关参数如表 1 所示。

表 1 模型中排渠主要参数
Tab. 1 Key Parameters of the Drainage

编号	排渠名称	渠长/m	渠宽/m	汇流面积/km ²	旱季污水排放量/(t·d ⁻¹)
C1	涌美排渠	411	12	1.03	1 100
C2	田边排渠	2 115	8	2.15	5 700
C3	中坑二渠	103	8	1.0	2 100
C4	坑尾一渠	299	8	0.79	700
C5	坑尾排渠	400	8	0.96	500
C6	埔新排渠	682	10	4.28	34 000
C7	文庙排渠	680	10	4.04	34 000
C8	下沙排渠	845	15	0.89	2 300
C9	福隆排渠	1 081	15	3.62	3 800

降雨序列选用 2006 年实测小时降雨量数据。汇水区地表入渗模型采用 Horton 模型, 最大入渗速率为 36 mm/h, 最小入渗速率为 10 mm/h, 衰减系数为 4 h⁻¹, 排干时间为 7 d。不渗透地表百分比根据用地类型进行设置, 坡度根据实际高程取值为 0.5%~5.0%, 不渗透路面和渗透路面的曼宁粗糙系数分别取 0.10 和 0.01。排水管网统一概化为圆形

管, 管壁曼宁粗糙系数取 0.014。9 条排渠均设置溢流堰, 堰高与堰宽根据依据现状设施相关设计参数确定。

选取 COD 作为合流制溢流污染的评价指标。结合实测数据, COD 质量浓度设置为 169.1 mg/L。地表径流所产生的污染, 依据不同下垫面的用地类型进行模拟, 污染物积累函数选用指数函数。下垫面类型概化为建筑屋面、绿地和路面 3 种类型, COD 在不同类型用地中的累积和冲刷参数如表 2 所示。

表 2 地表污染物累积过程和冲刷过程参数取值
Tab. 2 Key Parameters of Rainwash and Accumulation
Processes of Surface Pollutants

下垫面	参数	内容
建筑屋面	污染物增长函数类型	饱和函数增长 (SAT)
	最大累计量/(kg·hm ⁻²)	80
	半饱和累积时间/d	10
	污染物冲刷函数类型	指数函数冲刷 (EXP)
	冲刷系数	0.11
	冲刷指数	1.2
路面	污染物增长函数类型	SAT
	最大累计量/(kg·hm ⁻²)	170
	半饱和累积时间/d	10
	污染物冲刷函数类型	EXP
	冲刷系数	0.007
	冲刷指数	1.5
绿地	街道清扫间隔/d	7
	街道清扫去除率	60%
	污染物增长函数类型	SAT
	最大累计量/(kg·hm ⁻²)	40
	半饱和累积时间/d	10
	污染物冲刷函数类型	EXP
	冲刷系数	0.11
	冲刷指数	1.2

2.3 模拟过程与参数率定

选取 2006 年全年小时降雨统计序列作为模型运算周期。SWMM 模型演算选用动态波方式, 综合考虑管道和排渠蓄水、回水、进出口损失、流向逆转等情况。通过模拟无调蓄池工况以及增设不同容积调蓄池工况, 研究典型年降雨条件下的溢流频次、溢流量和溢流污染物负荷, 分析不同调蓄池容积对合流制溢流污染控制效果的影响, 探索基于 SWMM

水力模型的合流制溢流污染调蓄池容积设计方法。

以文庙排渠(C7)为例,对比实测年总溢流 COD 数据与模型运行 COD 数据。模型模拟的文庙排渠(C7)年总溢流 COD 量为 127 830.7 kg、年总溢流量为 296.9 万 m³;实测的总溢流 COD 量为 122 890.5 kg、年总溢流量为 286.1 万 m³,两者结果相差不大,说明模拟结果较为准确,基本可以反映南畬朗-大圳埔排水分区水质变化过程。

3 结果与讨论

3.1 生态园合流制系统溢流污染特征

3.1.1 典型水文年溢流特征

典型水文年工况,9 条排渠总计发生溢流 153 次,溢流总污水量为 817.9 万 m³,溢流 COD 总量为 390 200.0 kg,对生态园水体造成了显著污染。其中,汇流面积较大的田边排渠(C2)、埔新排渠(C6)、文庙排渠(C7)、福隆排渠(C9)为溢流污染的主要来源,对总溢流量和总溢流 COD 量贡献率分别为 93.2%和 95.2%(表 3)。因此,控制田边排渠(C2)、埔新排渠(C6)、文庙排渠(C7)、福隆排渠(C9)的溢流污染是提升生态园水体环境质量的关键。

表 3 无调蓄工况下各排渠合流制溢流污染模拟结果
Tab. 3 Simulated Combined Sewer Overflow Pollution of Each Drains without Storage Tanks

编号	汇流面积/ hm ²	年总溢流 水量/m ³	年总溢流 COD 量/kg	年总溢流 次数/次
C1	103	0.5 万	81.1	9
C2	215	138.1 万	97 422.4	22
C3	100	6.1 万	1 465.4	12
C4	79	10.6 万	3 034.1	9
C5	96	4.6 万	876.3	11
C6	428	256.8 万	11 7786.7	27
C7	404	296.9 万	127 830.7	30
C8	89	34.2 万	13 105.2	13
C9	362	70.1 万	28 643.5	20

采用年总溢流量、年总溢流次数和年总溢流 COD 负荷作为评价合流制溢流污染特征的指标。分别用以上 3 个指标对排渠汇水面积作线性回归分析(图 3),结果显示,排渠汇水面积与以上 3 个指标呈现较好的线性关系,年溢流总量与汇流面积之间线性相关性最高, R^2 达到 0.981。年总溢流 COD 负荷与汇流面积之间相关性偏低,主要是初期冲刷效

应导致 COD 负荷主要集中分布在降雨初期。当初期雨水汇入排渠后,合流制溢流污染的污染物也将主要分布在溢流过程的前中期,这种污染物在整个降雨过程中的不均匀分布特性,降低了年总溢流 COD 负荷与汇水面积之间的线性相关性。

3.1.2 单次降雨溢流过程特征

选择溢流污染最为严重的文庙排渠(C7),研究典型水文年内一场较大降雨工况时的溢流特征。现状南畬朗排渠雨季的运行水位较高,约为 1.6 m,而截污闸闸门高为 1.7 m。因此,各截污闸现状均为常闭状态,旱季排渠污水截流至污水厂集中处理,雨季合流制污水越过截污闸溢流进入南畬朗排渠,造成水质污染。暴雨时,溢流量随降雨过程出现 3 个峰值,溢流变化规律与降雨强度变化规律基本一致,主要溢流发生在降雨前期,集中为 120~360 min[图 4(a)、图 4(b)]。COD 浓度分布与流量分布不同,其高值主要集中为 90~180 min[图 4(c)]。

进一步研究溢流量和溢流 COD 负荷的累积分布发现,溢流量随时间呈现较为均匀的增长,而累积溢流 COD 负荷则主要发生在前 360 min 内[图 4(d)]。上述模拟结果说明合流制溢流污染存在初期冲刷效应,导致初期雨水污染物浓度往往较高。此外,相关文献^[6]表明,管道沉积冲刷亦可影响初期雨水污染物浓度并产生初期效应。

3.2 调蓄池容积对合流制溢流污染控制影响

根据前文分析,9 条排渠中汇流面积最大的 4 条排渠对溢流污染的贡献率在 90%以上。通过设置调蓄池控制上述 4 条排渠溢流污染,雨天时,将初期溢流污水导入调蓄池中,降雨结束后,逐步排入截流污水干管至污水处理厂。通过 SWMM 模拟计算,研究不同调蓄池容积对溢流污染控制效果的影响,以确定合理的调蓄池容积^[7]。在合流制排水系统中,合流制溢流污染调蓄池主要分布在排污渠与污水主干管衔接的截流井之前。常见的合流制溢流式调蓄池可分为末端调蓄池和中间调蓄池。其中末端调蓄池主要用于面源污染的控制,中间调蓄池主要用于提高系统的排水标准和改善系统管网运行负荷等。本文在各排渠汇入南畬朗-大圳埔排渠前的位置规划布置调蓄池,从南畬朗-大圳埔 74.9 km² 汇水分区视角来看,亦属于中间调蓄池。

根据模拟计算结果,通过增加调蓄池容积能够提升对溢流水量的控制率,但是由于边际效益递减,

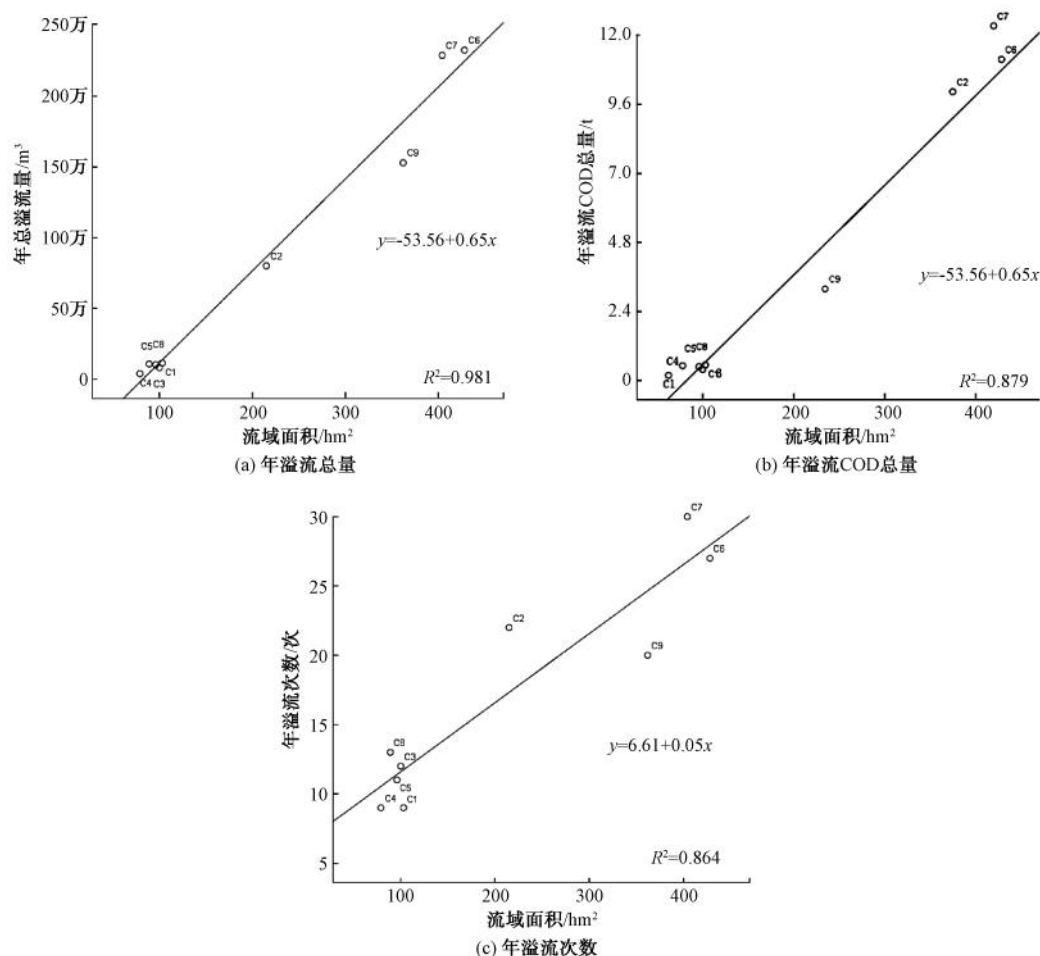


图3 合流制溢流污染特征指标与流域汇水面积线性回归分析

Fig. 3 Linear Regression Analysis between Characteristic Index of Combined Sewer Overflow Pollution and Catchment Area of Watershed

存在一个最优化点,在该点之前提升调蓄池容积能够显著地增加溢流污染控制效果,在该点之后继续增加调蓄池的体积,对溢流污染控制效果提升有限^[8]。如以溢流量为控制标准,田边排渠(C2)、埔新排渠(C6)、文庙排渠(C7)、福隆排渠(C9)4条排渠的较为适宜调蓄池容积分别为10 000、15 000、20 000、1 500 m³,4条排渠总溢流量控制率分别为63.6%、56.2%、56.1%、76.8%(图5)。

由于初期冲刷效应^[9],降雨径流污染物主要集中在降雨过程的前中期,合流制溢流污染物也主要分布在降雨的前中期。根据模拟计算结果,在调蓄池设计容积相同的情况下,调蓄池对于溢流COD负荷的控制效果优于对于溢流量的控制效果,对4条排渠溢流COD负荷的控制率将分别为75.9%、65.0%、60.1%和89.4%(如图6中红点所示)。若

从溢流COD总量的控制出发,4条排渠对应的最佳调蓄池体积分别为8 000、10 000、15 000、1 000 m³,此时对4条排渠溢流COD的控制率分别为71.5%、62.6%、58.5%、88.1%(如图6中黄点对应),在控制效果较好的条件下,调蓄池体积得到了一定减小。

统计文庙排渠(C7)在一个典型年内的各次溢流量,发现典型水文年内发生绝大多数的溢流过程的溢流量在20 000 m³以下(图7),说明将调蓄池容积设计为20 000 m³即可实现对多数溢流的有效控制,而20 000 m³以上体积则只对少数几次较大的溢流过程起作用,在全年中的使用效率不高,这解释了调蓄池容积设计问题中的边际效应^[10]。

3.3 生态园区域合流制溢流污染控制策略

根据以上分析结果,选取9条排渠中汇水面积较大4条排渠,分别规划建设调蓄容积为8 000、

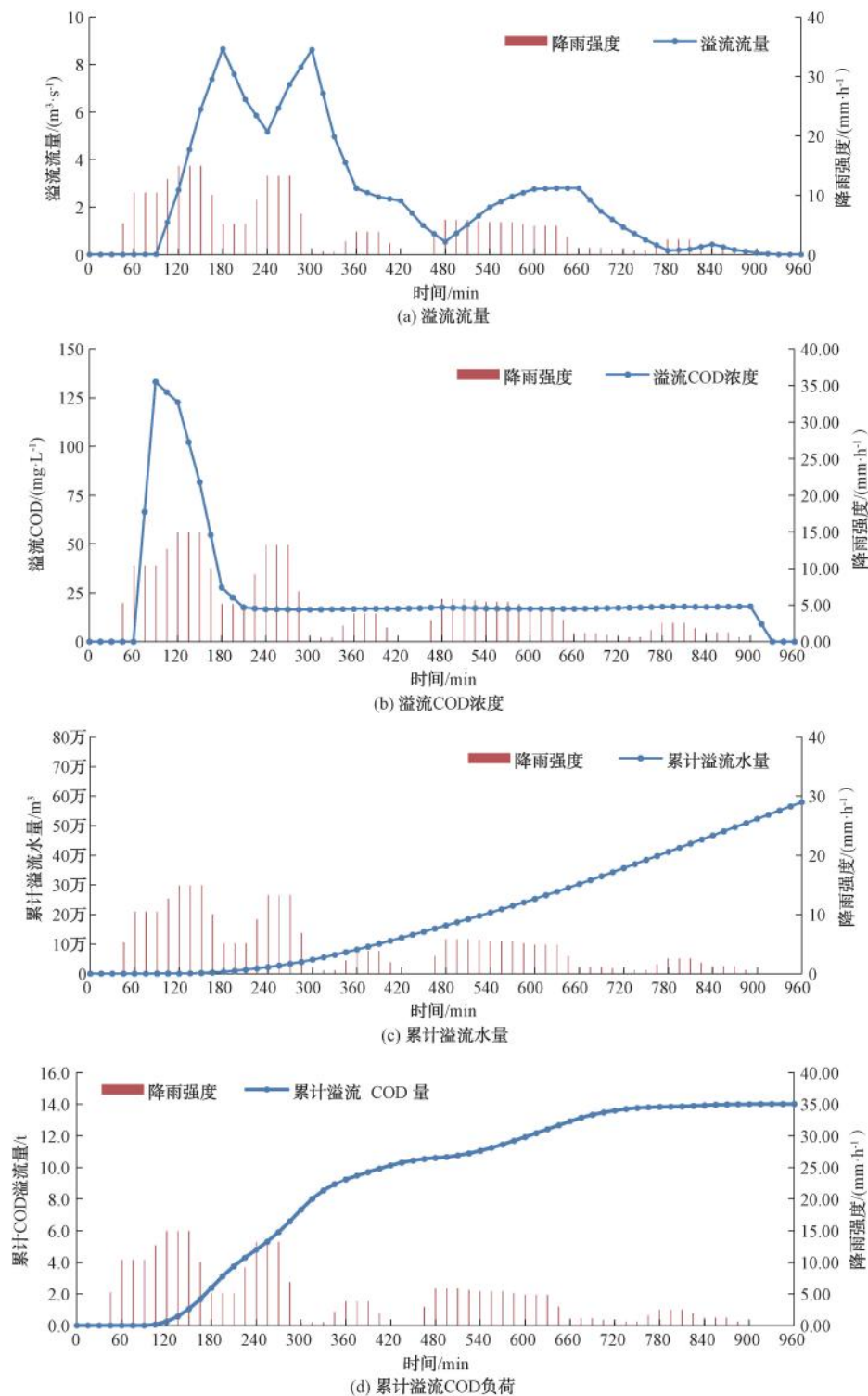


图4 文庙排渠(C7)典型溢流过程特征

Fig. 4 Distribution of Overflow Quantity and Pollutant Load of Wenmiao (C7) Drainage

10 000、15 000、1 000 m^3 的调蓄池,对生态园区域溢流污染进行调蓄控制,对整个研究区域可分别实现调蓄 51.8% 的溢流水量和 62.4% 的溢流 COD 总量,

并减少 43 次年总溢流次数(表 4),以较低的经济成本实现较好的合流制溢流污染控制。综上可知,溢流污染物削减率在一定范围内随调蓄量增加而增

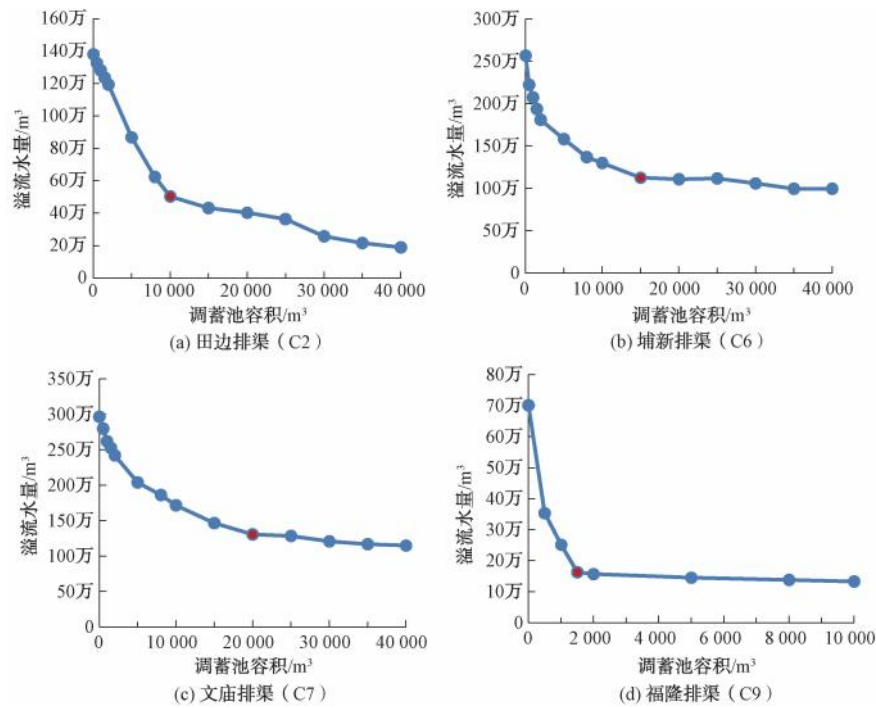


图 5 不同调蓄池体积对溢流水量控制曲线

Fig. 5 Curve of Overflow Control with Different Storage Tank Volumes

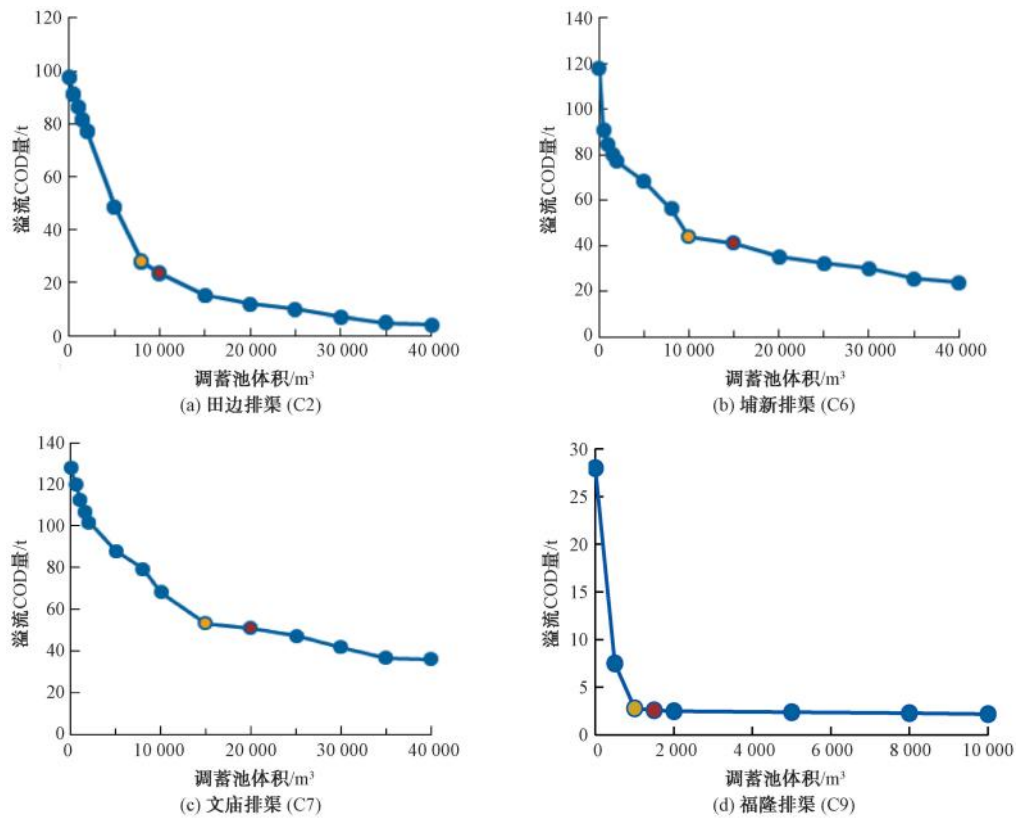


图 6 不同体积调蓄池对溢流 COD 量控制曲线

Fig. 6 Curve of COD Control with Different Storage Tank Volumes

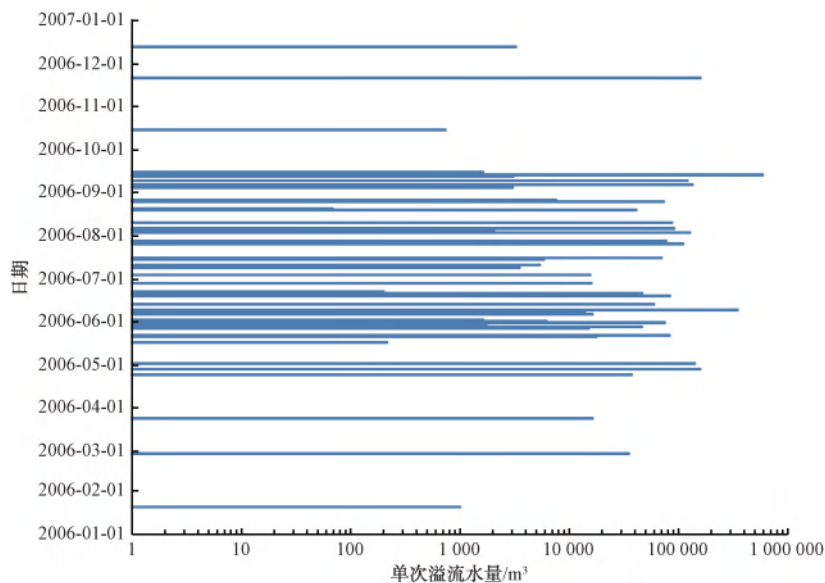


图 7 文庙排渠(C7)典型年溢流情况统计

Fig. 7 Statistics Chart of Overflows of Wenmiao Drainage (C7) in the Typical Year

大,即调蓄池有效容积越大,对合流制溢流径流污染去除率越高,更有利于提升水体水质;但随着调蓄量的增加,在该点之后继续增加调蓄池的体积,对溢流污染控制效果提升非常有限,即造成了经济上的浪费。因此,以满足综合径流污染去除效果最佳的调蓄池容积即为经济性最优解。

表 4 合流制调蓄池控制策略及效果
Tab. 4 Control Solutions and Effects Combined Sewer Overflow Pollution

编号	调蓄池 体积/m ³	溢流水量 控制率	溢流 COD 量 控制率	年总溢流次 数减少/次
C1	不设置	0	0	0
C2	8 000	54. 9%	71. 5%	11
C3	不设置	0	0	0
C4	不设置	0	0	0
C5	不设置	0	0	0
C6	10 000	49. 5%	62. 6%	8
C7	15 000	56. 1%	58. 5%	10
C8	不设置	0	0	0
C9	1 000	76. 8%	88. 1%	14

4 结论

本研究以生态园区域合流制溢流污染控制设计实践为例,采用 SWMM 水力模型法,进行调蓄池容积设计,并提出生态园区域合流制溢流污染控制策略。合流制溢流污染发生过程存在初期冲刷效应,调蓄池容积的设计应考虑初期冲刷效应的影响。水

力模型法真实反映了降雨发生时的流域汇流过程和径流污染物初期冲刷效应,可在调蓄池污染控制效率和建设容积之间寻求技术经济平衡点,实现对合流制溢流污染的高效控制。

参考文献

[1] 王家卓,胡应均,张春洋,等. 对我国合流制排水系统及其溢流污染控制的思考[J]. 环境保护, 2018, 46(17):14-19.
WANG J Z, HU Y J, ZHANG C Y, et al. Some perspectives on combined sewer system and its overflow control in China[J]. Environmental Protection, 2018, 46(17):14-19.

[2] 赵杨,车伍,杨正. 中国城市合流制及相关排水系统的主要特征分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 18-28.
ZHAO Y, CHE W, YANG Z. Analysis of characteristics of China urban combined sewer system and related other sewer systems[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 18-28.

[3] 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.

[4] 姚永连,杨新宇,周琪皓,等. 基于合流制年溢流频次控制的调蓄池优化设计[J]. 净水技术, 2021, 40(7):79-85.
YAO Y L, YANG X Y, ZHOU Q H, et al. Optimal design of storage tank based on annual frequency control of combined sewer overflows [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 79-85.

(下转第 191 页)

(1)河湖(水源地)藻类监测、藻华预警、微生物总量评价。

(2)水厂深度处理工艺臭氧投加、消毒接触效果评价。

(3)回用水、中水、再生水、冷凝水、循环水等的微生物控制。

(4)管网水、管网末梢水、二次供水的水龄分析。

(5)管网三定(定期、定点、定时)冲洗效果快速评价。

(6)二次供水水箱(池)清洗消毒效果评价。

(7)瓶装水、实验室纯水的微生物总量检测。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 生活饮用水卫生标准; GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National State Administration for Market Regulation of People's Republic of China, National Standardization Administration of People's Republic of China. Standards for drinking water quality; GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [2] 中华人民共和国国家环境保护总局, 中华人民共和国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: 中国标准出版社, 2002.

National State Environmental Protection Administration of People's Republic of China, National General Administration of Quality Supervision and Inspection and Quarantine of People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water; GB 3838—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

- [3] 中华人民共和国国家环境保护总局, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准; GB 18918—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

National State Environmental Protection Administration of People's Republic of China, National General Administration of Quality Supervision and Inspection and Quarantine of People's Republic of China. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant; GB 18918—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

- [4] American Society for Testing and Materials. Standard test method for adenosine triphosphate (ATP) content of microorganisms in water; ASTM D4012—23a[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2023.

- [5] 中华人民共和国生态环境部. 环境监测分析方法标准制订技术导则; HJ 168—2020[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2020.
- National Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. Technical guideline for the development of environmental monitoring analytical method standards; HJ 168—2020[S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2020.

(上接第 146 页)

- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇雨水调蓄工程技术规范; GB 51174—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for urban stormwater detention and retention engineering; GB 51174—2017 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2017.
- [6] 张青文, 余健, 李天兵. 雨水管道沉积物污染初期冲刷效应及初期雨水量研究[J]. 给水排水, 2020, 46(7): 119–124.
- ZHANG Q W, YU J, LI T B. Study on first flush effect and initial rainwater volume in storm sewer sediments pollution[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(7): 119–124.
- [7] 张卫, 赵树旗, 卢兴超, 等. 华盛顿哥伦比亚特区合流制管网溢流污染治理及长效管控策略的工程经验分析[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 110–117.
- ZHANG W, ZHAO S Q, LU X C, et al. Engineering experience analysis on pollution control and long term control strategy of combined sewer overflows in Washington D.C. [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 110–117.
- [8] 沙桐, 王洋, 汪聪, 等. 南方水系发达区域村镇水环境综合

治理关键技术与示范[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 115–119, 129.

SHA T, WANG Y, WANG C, et al. Crucial technologies and demonstration of comprehensive treatment of water environment in villages and towns in southern developed water system areas[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 115–119, 129.

- [9] 钟江丽, 沈捷, 高华, 等. 基于 DOM 荧光光谱分析的初期雨水径流污染物溯源[J]. 中国给水排水, 2023, 39(7): 133–138.

ZHONG J L, SHEN J, GAO H, et al. Source tracing of initial rainwater runoff pollutants based on DOM fluorescence spectrum analysis[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 133–138.

- [10] 符韵, 陈翠珍, 李敏, 等. 武汉市汉口片区排水体系运行效能评估[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 139–150.

FU Y, CHEN C Z, LI M, et al. Evaluation of operation efficiency for drainage systems in Hankou Area of Wuhan City [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 139–150.