

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 15. 018

合流制溢流污染控制系统效能评估方法研究及应用

张英¹, 马晶晶², 李璇², 吴雪^{1,3}, 何佳¹, 杨艳¹,
支国强¹, 邵智¹, 邓伟明¹, 周鸿斌¹, 白荣⁴, 吴丽芳¹

(1. 昆明市生态环境科学研究院, 云南 昆明 650032; 2. 昆明排水设施管理有限责任公司, 云南 昆明 650118; 3. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500;
4. 昆明滇池水务股份有限公司, 云南 昆明 650228)

摘要: 为提升合流制溢流污染控制系统的运行效能,持续改善水环境质量,结合黑臭水体治理、城镇污水处理提质增效等上位政策的要求,选择与溢流污染控制相关的排水设施以及溢流污染产生的环境影响等方面的相关指标,提出了溢流污染控制系统评估的指标体系,并建立了基于模糊综合评价法的效能评估方法;同时,以滇池流域北片排水分区作为案例区,进行了溢流污染控制系统的效能评估。从各指标的评价结果来看,案例区合流制溢流污染控制系统整体效能偏低,评估结果不容乐观,现状设施效能亟待提高。基于效能评估结果可识别片区溢流污染控制短板,明确片区的溢流污染控制重点,并为片区溢流污染控制体系的完善提供支撑。

关键词: 合流制溢流污染; 效能评估指标体系; 模糊综合评价; 滇池流域

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0123-08

Efficiency Assessment Method for Combined Sewer Overflow Pollution Control System and Its Application

ZHANG Ying¹, MA Jing-jing², LI Xuan², WU Xue^{1,3}, HE Jia¹, YANG Yan¹,
ZHI Guo-qiang¹, SHAO Zhi¹, DENG Wei-ming¹, ZHOU Hong-bin¹, BAI Rong⁴,
WU Li-fang¹

(1. Kunming Institute of Ecological and Environmental Sciences, Kunming 650032, China;
2. Kunming Drainage Facilities Management Co. Ltd., Kunming 650118, China; 3. Faculty of
Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China; 4. Kunming Dianchi Water Treatment Co. Ltd., Kunming 650228,
China)

Abstract: To enhance the operational efficiency of the combined sewer overflow pollution control system and continually improve water environment quality, the drainage facilities related to overflow pollution control and environmental impact indicators caused by overflow pollution were selected in line with upper-level policies such as black and odorous water treatment and urban wastewater treatment for

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-001-001); 长江生态环境保护修复联合研究(二期)
(2022-LHYJ-02-0511-01)

通信作者: 何佳 E-mail: deszxb@163.com

quality and efficiency improvement. Furthermore, an index system for evaluating the overflow pollution control system was proposed and an effectiveness evaluation method based on fuzzy comprehensive evaluation was established. Simultaneously, the efficacy of the overflow pollution control system was assessed using the drainage area of the northern part of Dianchi basin as a case study. Based on the evaluation results of each parameter, the overall operational efficiency of the overflow pollution control system in the specified area was suboptimal, and the assessment outcomes were not promising, indicating a need for enhancement in current facility efficiency. The results of the efficiency evaluation could help identify the shortcomings in overflow pollution control within the area, clarify key points for controlling overflow pollution, and support improvements to the local overflow pollution control system.

Key words: combined sewer overflow pollution; performance evaluation indicator system; fuzzy comprehensive evaluation; Dianchi Lake basin

合流制溢流(CSO)污染是城市排水系统发展过程中较为常见的问题之一,国内外很多城市都存在CSO污染问题^[1-2]。针对此问题,国外较早系统地开展了CSO污染控制工作,如美国的CSO排污许可证制度、CSO九项基本控制措施等,日本的大管径截流与调蓄干管、末端处理设施雨季运行工艺改进等,德国的雨水调蓄设施、过流净化处理等^[3]。我国CSO污染控制工作起步相对较晚,但目前不少城市已开展了相关研究及实践,如上海苏州河治理二期工程项目中的合流制调蓄池建设、广州东濠涌试验段深层隧道工程^[4]和荔枝湾涌综合整治工程^[5]、镇江市金山湖“深层截流主干管+末端调蓄及处理”系统^[6]等。昆明市针对滇池流域CSO污染也开展了大量的实践工作,自2010年起陆续建成了19座CSO调蓄池,探索了污水处理厂雨季的运行模式,在政策保障方面先后出台了《昆明市滇池流域调蓄池分类管理考核办法(试行)》和《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)等^[7]。

对溢流污染控制系统的运行效果进行综合评估,能够科学客观地了解系统的运行情况及环境效益,有助于补齐短板,改善河湖汛期水质。目前,国内外学者针对溢流污染控制系统的评估开展了一些研究^[1,8-9],但缺乏一定的系统性,评估的对象相对单一。鉴于此,笔者以水环境质量稳定提升为根本目的,选择与溢流污染控制相关的排水设施以及溢流污染产生的环境影响等方面的相关指标,构建多指标综合评估体系,基于层次分析法进行指标权重的计算,基于模糊综合分析法实现各指标的量化分析,以实现溢流污染综合效益的识别。

1 评估指标体系构建

溢流污染控制是一项综合性工程,溢流污染控制系统效能与系统建设情况、建成后各项设施的实际运行情况息息相关,而溢流污染作为城市河道汛期的主要污染源,其控制程度直接关系到城市水体汛期水质的改善程度,因此,在进行溢流污染控制系统效能评估时应统筹各项因素进行综合评估,以全面体现溢流污染控制的实际效果。基于此,本研究结合黑臭水体治理、城镇污水处理提质增效等上位政策的要求以及相关研究成果,建立了溢流污染控制评估指标体系,如图1所示。溢流污染控制系统效能评估(A)是目标层,决定目标层的3个因素(准则层)主要包括控制系统建设状况(B1)、控制设施运行效能(B2)、环境影响情况(B3)。其中,控制系统建设状况包括4个指标,控制设施运行效能包括6个指标,环境影响情况包括3个指标。

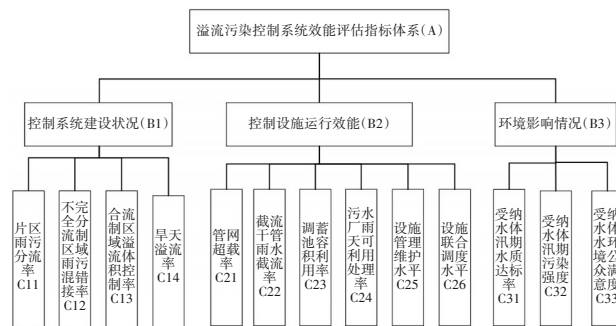


图1 评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system

为实现溢流污染控制系统效能评估的量化,通过分析相关文献和标准规范,结合专家意见和运维人员经验,确定各指标的量化方法,见表1。

表1 各评估指标的定义及计算方法

Tab.1 Definition and calculation method of each evaluation index

| 准则层 | 指标层 | 指标含义 | 计算方法 |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 控制系统建设状况 | 片区雨污分流率 ^[10] | 完全雨污分流的区域面积占总区域面积的比例 ¹ | (完全分流制区域面积/评价区域总面积)×100% |
| | 不完全分流制区域雨污混错接率 ^[11] | 不完全分流制区域雨污管道存在混、错接的节点个数占比 | (存在混、错接的节点数/不完全分流制区域管网节点总数)×100% |
| | 合流制区域溢流体积控制率 ^[9] | 通过措施削减或收集处理的雨天溢流的合流污水体积与总溢流体积的比例 | (控制的溢流水体积/总溢流体积)×100% ² |
| | 旱天溢流率 ^[11] | 旱天存在溢流现象的溢流口所占比例 | (旱天溢流的溢流口数量/溢流口总数)×100% |
| 控制设施运行效能 | 管网超载率 ^[12] | 旱天充满度超过0.9的管段长度占总管段长度的比例 | (旱天主干管最大充满度>0.9的管段长度/主干管总长度)×100% |
| | 截流干管雨水截流率 ^[13] | 合流制区域年累计截流的雨水量占年总降雨量的比例 | (年累计截流雨水量/年总降雨量)×100% |
| | 调蓄池容积利用率 ^[8] | 调蓄池单次调蓄容积占设计容积的比例 ³ | (调蓄池实际调蓄容积/设计容积)×100% |
| | 污水厂雨天可利用处理率 ^[14] | 污水厂雨天能够处理的合流污水量占比 | [(最大日处理量-旱天日均处理量)/最大日处理量]×100% |
| | 设施管理维护水平 | 溢流污染控制设施的管理水平 | 定性指标,通过专家打分确定 |
| | 设施联合调度水平 ^[15-16] | 区域内厂-池-站-网联合调度运行的能力 | 定性指标,通过专家打分确定 |
| 环境影响情况 | 受纳水体汛期水质达标率(源自生态环境部) | 评价期内受纳水体水质达标次数占总监测次数的比例 | (达标次数/总监测次数)×100% |
| | 受纳水体汛期污染强度(源自生态环境部) | 受纳水体汛期首要污染物浓度与考核目标浓度限值的比值 | 汛期首要污染物浓度/考核目标 |
| | 受纳水体水环境公众满意度 | 公众对于受纳水体水环境的满意程度 | 满意的人数/调查总人数 |
| 注: ¹ 完全雨污分流的区域指采用不同管渠系统分别收集、输送污水和雨水,且不存在雨污混、错接的区域。 ² 控制的溢流水体积指雨天通过截流、调蓄、处理的合流污水的总量;总溢流体积指雨天控制的溢流水体积与经合流制溢流排口溢流排放进入环境水体的合流污水量之和。 ³ 调蓄池单次调蓄容积指发生超过调蓄池设计能力的降雨事件时,调蓄池的单次实际调蓄量,以评价期内所有超过调蓄池设计能力降雨事件中统计得到的平均容积利用率作为评价价值,如存在多个调蓄池,则以多个调蓄池容积利用率的平均值作为评价价值。 | | | |

2 模糊综合评价方法

模糊综合评价方法主要是运用隶属度理论来进行指标的量化,将指标按一定标准划分等级后再对其进行模糊评价,得到评价结果,对于具有多层次的指标体系,对每级指标进行逐级评价,得到最终完整结论^[10,15]。

2.1 评价区域确定

在进行溢流污染控制系统效能评估时,应首先确定评价区域,由于溢流污染控制系统与城市排水系统、河湖水体等均有关联,因此在进行评估时,应综合考虑污水处理厂的服务范围以及河道沿线排放口服务范围,二者范围不一致时,应将二者叠加后作为评估单元。

2.2 权重向量建立

采用层次分析法进行指标权重的计算。层次分析法基于定量和定性的系统分析,将与总目标决策相关的因素进行层级划分,然后基于各指标的重要性确定其权重^[14,17]。通常采用1-9标度法进行重要程度比较,然后按照相对重要性进行赋值。

2.3 确定评价等级论域

本研究中将评价指标分为5个等级,记作Ⅰ~Ⅴ,其中,等级Ⅰ表示溢流污染控制效果最好,等级Ⅴ表示溢流污染控制效果最差。各定量指标中,片区雨污分流率、合流制区域溢流体积控制率、截流干管雨水截流率、调蓄池容积利用率、污水厂雨天可利用处理率、受纳水体汛期水质达标率、受纳水

水体环境公众满意度为偏大型指标,即指标值越大,表示溢流污染控制效果越好;不完全分流制区域雨污混错接率、旱天溢流率、管网超载率、受纳水体汛期污染强度为偏小型指标,即指标值越小,表示溢流污染控制效果越好。

各评估指标中,定量指标主要根据国家的相关政策标准及统计数据进行等级论域的划分,本研究中雨污分流率范围为30%~90%^[18],不完全分流制区域雨污混错接率范围为0.1%~0.5%,合流制区域溢流体积控制率范围为55%^[19]~85%^[9],旱天溢流率范围为0~20%,管网超载率范围为5%~20%,截流干管雨水截流率范围为40%~80%^[13],调蓄池容积利用率范围为50%~90%^[20],污水厂雨天可利用处理率范围为10%~30%^[21],受纳水体汛期水质达标率范围为20%~100%,受纳水体汛期污染强度范围为1~2,受纳水体水环境公众满意度范围为60%~90%。定性指标主要采用十分制进行等级论域的划分。具体划分情况如表2所示。

表2 评估指标等级论域划分

Tab.2 Evaluation index grade theory domain division

| 项目 | 等级 | | | | |
|------------------|-----|------|------|-------|-----|
| | I | II | III | IV | V |
| 片区雨污分流率/% | 90 | 75 | 60 | 45 | 30 |
| 不完全分流制区域雨污混错接率/% | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| 合流制区域溢流体积控制率/% | 85 | 77.5 | 70 | 62.5 | 55 |
| 旱天溢流率/% | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 管网超载率/% | 5 | 8.75 | 12.5 | 16.25 | 20 |
| 截流干管雨水截流率/% | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
| 调蓄池容积利用率/% | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 |
| 污水厂雨天可利用处理率/% | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| 设施管理维护水平 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
| 设施联合调度水平 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
| 受纳水体汛期水质达标率/% | 100 | 80 | 60 | 40 | 20 |
| 受纳水体汛期污染强度 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
| 受纳水体公众满意度/% | 90 | 82.5 | 75 | 67.5 | 60 |

2.4 建立隶属函数评价矩阵

在本研究中,定性指标通过咨询专家及相关部门工作人员后,采用百分比统计法来确定;定量指标采用半梯形分布图法求解隶属度,其中偏大型指标采用“升半梯形分布图”法求解,偏小型指标采用“降半梯形分布图”法求解^[22]。

2.5 多指标综合评价

根据各子集的权向量与模糊综合矩阵,得到一级模糊综合评价结果向量,根据最大隶属度原则对各准则层进行综合判定。由各子集的模糊综合矩阵建立二级的模糊综合矩阵,合成各准则层的权向量和模糊综合矩阵,得到二级综合评价结果向量,基于最大隶属度原则进行最终的综合评价^[23]。

3 案例区域溢流污染控制系统效能评估

3.1 案例区域概况

以昆明主城区北片排水分区作为案例区域,利用构建的评估指标体系对该片区的溢流污染控制系统效能进行评估。案例区主要位于滇池流域北部区域,区域内水系密集,包括盘龙江和金汁河2条主要河流以及20余条支流沟渠。污水处理系统主要依托昆明市第四和第五水质净化厂,两座污水处理厂之间可通过张官营泵站实现水量调度,现状两座污水处理厂旱天已超负荷运行。受片区开发和历史上排水系统改造的影响,片区排水系统现状为合流制与分流制并存,并存在一定程度的雨污混接问题,以二环路为界,二环路以内区域主要为截流式合流制排水体制,二环路以外区域则主要呈现出上游雨污管网并行铺设、下游雨污管道接入合流制渠道后经末端截污进入污水管网的情况,片区截污干管主要沿河道两岸铺设,雨天超过截流管过流能力的合流污水溢流进入河道,造成河道汛期水质恶化,现状共有24个主要合流制溢流口。

为控制北片区合流制溢流污染,昆明市政府自“十二五”以来,以雨污分流改造和合流制调蓄池建设为重点开展了治理工程,现状片区共计建设完成了7座合流制调蓄池、16座面山雨洪拦截调蓄池,片区内第五水质净化厂探索性地开展了雨季一级强化系统研究,在来水量超过设计处理规模的1.1倍时,可以启动雨季运行模式,采用一级强化系统对超量合流污水进行处理,允许运行的处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。总体上,现状北片区基本形成了“源头拦蓄-局部清污分流-错峰调蓄-水量调配”的合流制溢流污染控制体系。

评价区域主要根据案例区内两座污水处理厂的服务范围以及河道沿岸排放口的服务范围进行叠加分析后确定,总面积约为 117.24 km^2 ,排水系统分布如图2所示。



图2 案例区排水系统示意

Fig.2 Schematic diagram of drainage system in case area

3.2 指标权重赋值结果

指标权重分配结果如表3所示。

表3 评估指标权重分情况

Tab.3 Evaluation index weight distribution

| 目标层 | 准则层 | | 指标层 | | |
|--------------|----------|-------|----------------|--------|-------|
| | 指标名称 | 权重 | 指标名称 | 占准则层权重 | 综合权重 |
| 溢流污染控制系统效能评估 | 控制系统建设状况 | 0.443 | 片区雨污分流率 | 0.359 | 0.159 |
| | | | 不完全分流制区域雨污混错接率 | 0.123 | 0.054 |
| | | | 合流制区域溢流体积控制率 | 0.325 | 0.144 |
| | | | 旱天溢流率 | 0.193 | 0.085 |
| | | | 管网超载率 | 0.243 | 0.094 |
| | 控制设施运行效能 | 0.387 | 截流干管雨水截流率 | 0.217 | 0.084 |
| | | | 调蓄池容积利用率 | 0.123 | 0.048 |
| | | | 污水处理厂雨天可利用处理率 | 0.292 | 0.113 |
| | | | 设施管理维护水平 | 0.080 | 0.031 |
| | | | 设施联合调度水平 | 0.046 | 0.018 |
| | | | 受纳水体汛期水质达标率 | 0.249 | 0.042 |
| | 环境影响情况 | 0.169 | 受纳水体汛期污染强度 | 0.594 | 0.100 |
| | | | 受纳水体水环境公众满意度 | 0.157 | 0.027 |

本研究主要通过问卷调查的方式,邀请昆明市排水主管部门、溢流污染设施运行管理部门的相关管理人员以及领域相关专家,基于1-9标度法对指标的重要性进行了两两对比,并选取占比最大的判定值获取各评估指标的判断矩阵。对判断矩阵的每列进行归一化处理,按行求平均值后得到各指标的权重,并进行一致性检验,结果显示,CR=0.018<0.1,满足一致性检验。

3.3 综合评价结果

对案例区各指标值以及隶属度进行计算,计算结果如表4所示。

表4 模糊综合隶属度矩阵

Tab.4 Fuzzy comprehensive membership degree matrix

| 准则层 | 指标名称 | 实际值 | 隶属度 | | | | |
|----------|----------------|-------|------|------|------|------|------|
| | | | I | II | III | IV | V |
| 控制系统建设状况 | 片区雨污分流率 | 38.0% | 0 | 0 | 0 | 0.53 | 0.47 |
| | 不完全分流制区域雨污混错接率 | 0.26% | 0 | 0.4 | 0.6 | 0 | 0 |
| | 合流制区域溢流体积控制率 | 61.2% | 0 | 0 | 0 | 0.83 | 0.17 |
| | 旱天溢流率 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 控制设施运行效能 | 管网超载率 | 16.9% | 0 | 0 | 0 | 0.83 | 0.17 |
| | 截流干管雨水截流率 | 45.8% | 0 | 0 | 0 | 0.58 | 0.42 |
| | 调蓄池容积利用率 | 49.1% | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 污水厂雨天可利用处理率 | 29.3% | 0.86 | 0.14 | 0 | 0 | 0 |
| | 设施管理维护水平 | — | 0.13 | 0.27 | 0.33 | 0.20 | 0.07 |
| | 设施联合调度水平 | — | 0.07 | 0.17 | 0.37 | 0.33 | 0.07 |
| 环境影响情况 | 受纳水体汛期水质达标率 | 33.3% | 0 | 0 | 0 | 0.67 | 0.33 |
| | 受纳水体汛期污染强度 | 5.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 受纳水体水环境公众满意度 | 89% | 0.87 | 0.13 | 0 | 0 | 0 |

注: 设施管理维护水平和设施联合调度水平通过统计专家评价结果中各等级论域的百分比得到。

案例区溢流污染控制效能评估的各项指标中,片区雨污分流率、不完全分流制区域雨污混错接率通过案例区排水管网探测数据统计得到,合流制区域溢流体积控制率、管网超载率、截流干管雨水截流率由案例区排水系统水力模型模拟得到,旱天溢

流率、设施管理维护水平、设施联合调度水平、受纳水体水环境公众满意度由实地调查及问卷调查等方式得到,污水厂雨天可利用处理率和调蓄池容积利用率由污水厂及调蓄池的运行报表统计得到,受纳水体汛期水质达标率和污染强度由河道自动站的监测数据统计得到。

根据各指标层的权向量及综合评价矩阵,分别进行二级和一级综合评价,评价结果如图3所示。根据最大隶属度原则,案例区溢流污染控制系统建设状况、控制设施运行效能指标处于Ⅳ级的隶属度均较高,环境影响情况指标处于Ⅴ级的隶属度较高,从综合评价结果上看,处于“Ⅰ级”的可能性为21.1%,处于“Ⅱ级”的可能性为5.2%,处于“Ⅲ级”的可能性为5.0%,处于“Ⅳ级”的可能性为37.2%,处于“Ⅴ级”的可能性为31.5%。

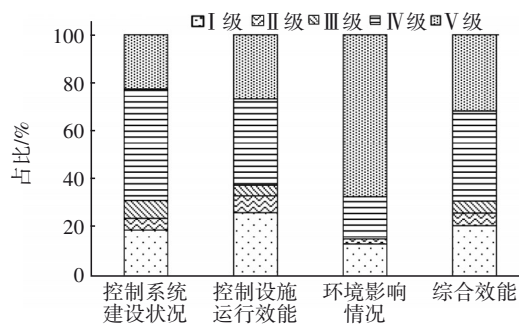


图3 案例区综合评估结果

Fig.3 Case area comprehensive evaluation results

总体上,案例区合流制溢流污染控制系统综合效能偏低。准则层的三项指标中,环境影响情况主要反映汛期合流制溢流污染对城市水体的直接影响程度,其直接受控制系统建设情况和控制设施运行效能的影响。从评价结果看,案例区汛期合流制溢流污染已经对水环境造成较大影响,主要原因是控制系统建设情况和控制设施运行效能偏低。

从控制系统建设状况看,短板指标主要包括片区雨污分流率和合流制区域溢流体积控制率,这两项指标主要表征了案例区整体的溢流污染控制效果。雨污分流率偏低,表明区域内合流制区域面积较大,合流制溢流污染控制的需求也较大;溢流体积控制率偏低,表明现状区域内溢流污染控制设施控制的溢流水量不足,仍有大量溢流污水进入天然水体,其主要表现为溢流污染控制设施规模不足或控制设施实际运行效能不足两个方面。从控制设施运行效能来看,短板指标主要为管网超载率、截

流干管雨水截流率和调蓄池容积利用率,主要表现为管网系统和调蓄系统运行效能不足。

因此,基于评估结果,案例区在现状溢流污染控制体系的基础上,应该从控制系统建设和控制系统效能提升两方面发力,进一步完善溢流污染控制系统,减少汛期溢流量,降低河道汛期污染强度,提升河道汛期水质达标率。具体地,应进一步开展雨污分流改造工作,提升雨污分流率,从源头上减少合流污水量,并同步开展排水系统清污分流工作,通过挤外水,并配合管网运行水位调控,降低管网超载率,对于铺设于河道内的截流干管以及存在河水倒灌风险的截流口进行改造,提升截污干管的运行效能,优化调蓄设施的运行模式,从基于经验的人工运行调度逐步向智能化调度转变,提升调蓄池运行调度的精细化水平,充分发挥调蓄系统对合流制溢流污染的控制作用。

3 结论与建议

开展溢流污染控制系统效能评估,能够明确现状区域溢流污染控制情况,识别溢流污染控制短板,为现状溢流污染治理设施效能提升以及后续溢流污染控制系统完善提供支撑。本研究系统地梳理了滇池流域溢流污染控制体系现状,在此基础上提出了溢流污染控制系统效能评估指标体系,评估指标中除部分指标需要结合模型手段分析外,大部分指标主要依托治理设施运行报表及适量的监测数据就可以进行,总体上,评估指标具有易获取性和可量化性,对于与滇池流域溢流污染控制系统类似的区域,具有一定的可推广性。

本研究以昆明主城区北片排水分区作为案例区进行了溢流污染治理设施效能评估,评估结果不容乐观,现状设施效能亟待提高,根据评估结果,应系统规划片区下一步的溢流污染控制重点。近期建议以现有调蓄池提质增效为重点,科学制定“一池一策”,强化片区“厂-池-站-网”的联合调度,提升现有设施对于合流制溢流污染的控制效果,同时进一步推进片区污水处理能力建设,实现处理能力的旱雨季双提升;远期结合片区更新改造,开展灰、绿设施相结合的溢流污染控制策略,源头上进一步提升片区绿色设施的比例,输移过程中加快推进片区雨污分流改造,进一步提升源头控制系统效能以及片区雨污分流率,从根本上减少合流制溢流污染对

片区河道水环境的影响。

参考文献:

- [1] MORGAN D, XIAO L, MCNABOLA A. Evaluation of combined sewer overflow assessment methods: case study of Cork City, Ireland [J]. *Water Environment Journal*, 2017, 31(2): 202–208.
- [2] 何俊超, 李明明, 刘睿, 等. 国内外合流制溢流污染管控体系研究[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 42–49.
HE Junchao, LI Mingming, LIU Rui, *et al.* Research on management and control system of combined overflow pollution in China and overseas [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(4): 42–49 (in Chinese).
- [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 Zheng, ZHAO Yang, CHE Wu, *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).
- [4] 赵泽坤, 车伍, 赵杨, 等. 中美合流制溢流污染控制概要比较[J]. *给水排水*, 2018, 44(11): 128–134.
ZHAO Zekun, CHE Wu, ZHAO Yang, *et al.* Summary comparison of combined sewer overflow control between China and United States [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(11): 128–134 (in Chinese).
- [5] 李捷, 隋军, 冯云刚. 上西关涌流域调蓄工程控制溢流污染研究[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(1): 464–468.
LI Jie, SUI Jun, FENG Yungang. Study on pollution control of overflow from detention tank of Shangxiguan creek [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1): 464–468 (in Chinese).
- [6] 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 Yang, CHE Wu, YANG Zheng. Analysis of characteristics of china urban combined sewer system and related other sewer systems [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 18–28 (in Chinese).
- [7] 刘智晓, 刘龙志, 王浩正, 等. 流域治理视角下合流制雨季超量混合污水治理策略[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(8): 20–29.
LIU Zhixiao, LIU Longzhi, WANG Haozheng, *et al.* Watershed management and control strategies for urban combined sewer overflows during peak wet weather flow conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(8): 20–29 (in Chinese).
- [8] 佟举钢, 冯江, 郭婷. 昆明市合流污水调蓄池效能评估指标体系的构建[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(8): 34–38.
TONG Jugang, FENG Jiang, GUO Ting. Construction of index system for assessing efficiency of combined sewage storage tanks in Kunming [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(8): 34–38 (in Chinese).
- [9] 李俊奇, 周金成, 杨正, 等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 124–131.
LI Junqi, ZHOU Jincheng, YANG Zheng, *et al.* Study on control indicators and standard for mulation of combined sewer overflow [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 124–131 (in Chinese).
- [10] 朱闻博. 水质模型在深圳前海水城中的应用[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(3): 104–108.
ZHU Wenbo. Application of water quality model in Qianhai water city in Shenzhen [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(3): 104–108 (in Chinese).
- [11] LI T, ZHANG W, FENG C, *et al.* Performance assessment of separate and combined sewer systems in metropolitan areas in Southern China [J]. *Water Science Technology*, 2014, 69(2): 422–429.
- [12] 张金萍, 张浩锐, 方宏远. 基于SWMM和SCS法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 110–121.
ZHANG Jinping, ZHANG Haorui, FANG Hongyuan. Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(1): 110–121 (in Chinese).
- [13] 中国工程建设标准化协会. 合流制排水系统截流设施技术规程: T/CECS 91—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Interception Facilities of Combined Sewage System: T/CECS 91–2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021 (in Chinese).
- [14] 李广英, 何跃君, 冯朝晖, 等. 青南地区城镇污水处理厂综合效率评估分析[J]. *地球环境学报*, 2021, 12

- (4): 436-446.
- LI Guangying, HE Yuejun, FENG Zhaohui, *et al.* Comprehensive evaluation of wastewater treatment plant in the southern Qinghai based on Fuzzy-AHP model[J]. *Journal of Earth Environment*, 2021, 12(4): 436-446 (in Chinese).
- [15] 黄荣, 蒋龙, 王浩正, 等. 岳阳市某流域排水系统联合调度解决方案研究[J]. *给水排水*, 2022, 48(6): 137-143.
- HUANG Rong, JIANG Long, WANG Haozheng, *et al.* Joint dispatching solution for drainage system of a drainage basin in Yueyang City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(6): 137-143 (in Chinese).
- [16] 周杨军, 解铭, 薛江儒, 等. 关于合流制排水系统提质增效方法与措施的思考[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(16): 1-7.
- ZHOU Yangjun, XIE Ming, XUE Jiangru, *et al.* Thinking on methods and measures for the quality and efficiency improvement of combined drainage system [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(16): 1-7 (in Chinese).
- [17] ACHU A, THOMAS J, REGHUNATH R. Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP) [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 10: 100365.
- [18] 王俊岭, 熊玉华, 张现国, 等. 基于AHP-模糊综合评价法的城市排水管网状态和运行效能评价——以淮安市淮安区为例[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1162-1169.
- WANG Junling, XIONG Yuhua, ZHANG Xianguo, *et al.* Evaluation of the state and operational effectiveness of urban drainage pipenetwork based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method: taking Huai'an District of Huai'an City as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(4): 1162-1169 (in Chinese).
- [19] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设评价标准: GB/T 51345—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Assessment Standard for Sponge City Construction Effect: GB/T 51345-2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019 (in Chinese).
- [20] 卢小艳, 李田, 董鲁燕. 基于管网水力模型的雨水调蓄池运行效率评估[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(17): 44-48.
- LU Xiaoyan, LI Tian, DONG Luyan. Performance efficiency of detention tank based on hydraulic model for drainage system[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(17): 44-48 (in Chinese).
- [21] 余诚, 王凯军, 葛敬, 等. 城市面源污染治理综合解决方案思考: 以滇池为例[J]. *给水排水*, 2022, 48(3): 45-53.
- YU Cheng, WANG Kaijun, GE Jing, *et al.* Analysis of urban non-point source pollution control in Dianchi Basin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(3): 45-53 (in Chinese).
- [22] 章艳红, 方梦婷, 武晋玄, 等. 基于模糊综合评价法的栗水河水质评价与对比分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(5): 470-476.
- ZHANG Yanhong, FANG Mengting, WU Jinxuan, *et al.* Water quality evaluation of the Lishui River based on fuzzy comprehensive evaluation method and comparative analysis [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(5): 470-476 (in Chinese).
- [23] 王逸可, 方国华, 张钰, 等. 基于改进模糊综合评价的河流型水源地风险评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 670-681.
- WANG Yike, FANG Guohua, ZHANG Yu, *et al.* Risk assessment of river-type water source areas based on improved fuzzy comprehensive evaluation [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(4): 670-681 (in Chinese).

作者简介:张英(1987-),女,云南禄丰人,硕士,高级工程师,主要研究方向为环境规划、城市排水系统模型、水环境保护与治理、地下水污染防治等。

收稿日期:2022-08-09

修回日期:2023-01-19

(编辑:刘贵春)