

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.018

合流制溢流控制指标与标准制定研究

李俊奇^{1,2}, 周金成¹, 杨 正³, 张建新⁴

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学国家级水环境实验教学示范中心, 北京 100044; 3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 4. 北京市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要:合流制溢流(combined sewer overflow, CSO)控制是城市水环境质量改善的关键一环,相关指标及标准制定尚显薄弱。基于技术的排放控制指标主要包括溢流频次、溢流体积控制率、污染物排放浓度限值、CSO 效率及稀释度等,因这些指标缺乏对 CSO 水质水量控制效果的综合评价,进而提出雨季 CSO 污染负荷占比的指标;基于受纳水体水质保障的控制指标包括急性氨中毒、溶解氧浓度及细菌标准等。总结 CSO 控制标准确定依据,主要分为类比分流制污染负荷确定 CSO 污染物排放标准、依据工程实践效果制定 CSO 效果标准以及依据水体用途对 CSO 制定不同控制水平的标准。在此基础上,提出在“摸清本底,明确目标,系统治理”的理念指导下构建以受纳水体水质达标为目标导向的 CSO 控制标准体系及治理技术路线,为我国 CSO 标准制定提供参考。

关键词:合流制溢流;控制指标;标准制定;城市水环境;污染负荷

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0124-08

Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow // LI Junqi^{1,2}, ZHOU Jincheng¹, YANG Zheng³, ZHANG Jianxin⁴ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Water Environment Experimental Teaching Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Beijing Drainage Group Co., Ltd, Beijing 100044, China)

Abstract: The control of combined sewer overflow (CSO) is a key part of improving the quality of urban water environment, and the related indicators and the formulation of standards are still weak. Technology-based emission control indicators mainly include overflow frequency, overflow volume capture rate, pollutant emission concentration limit, CSO efficiency and dilution, etc. Due to the lack of comprehensive evaluation of these indicators on CSO water quality and quantity control effect, the index of CSO pollution load proportion in rainy season is proposed. The control indexes based on the water quality assurance of receiving water include acute ammonia poisoning, dissolved oxygen concentration and bacterial standard, etc. This paper summarizes the basis for determining the CSO control standard, which is mainly divided into three parts; determining the CSO pollutant discharge standard by analogy with separate sewer system pollution load, establishing the CSO effect standard according to engineering practice effect, formulating different control levels of CSO according to the use of water body. On this basis, under the guidance of the concept of “finding out the background, making clear the goal, and systematic treatment”, the CSO control standard system and treatment technology route with the goal of meeting the water quality standard of receiving water body are proposed to provide reference for the formulation of CSO standards in China.

Key words: combined sewer overflow; control indicator; standard formulation; urban water environment; pollution load

2017 年,全国城镇污水处理率达到 94.54%^[1], 城市点源污染得到有效控制,但城市水环境状况依然不容乐观,合流制溢流(combined sewer overflow, CSO)污染的治理成为水环境质量提升的关键。《海

基金项目:北京市自然科学基金重点项目(8191001)

作者简介:李俊奇(1967—),男,教授,博士,主要从事城市雨水控制利用与水环境生态技术等研究。E-mail: jqli6711@vip.163.com

绵城市建设评价标准》对 CSO 排口提出年径流总量控制率不应小于 50%、处理设施处理 SS 质量浓度月均值不应大于 50 mg/L 的量化要求^[2]；《城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》将削减合流制溢流污染作为治理黑臭水体的重要举措^[3]。在兴建大型截污工程、提高系统截流倍数改善 CSO 直排现象时，未充分考虑污水处理系统各部分的收集处理容量，三部委印发的《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》可从污水处理全系统补齐短板、完善基础设施建设、科学调度等方面实现提质增效、改善水环境^[4]。部分城市在 CSO 控制过程中也提出了相关的设计要求，如昆明的 DB 5301/T 43—2020《城镇污水处理厂主要污染物排放限值》针对污染物提出分区分级的执行要求，并针对雨天 CSO 提出在雨季污水处理厂处理量为 1.1 倍的设计处理规模时，超量的溢流污水经一级强化处理，BOD₅、COD 及 TP 需达到 E 级标准后排放^[5]。国家层面尚未形成针对 CSO 污染控制的专项法规政策，仅在部分标准中对相关要求有所提及，并且现有的 CSO 排放标准与截流倍数标准、污水处理厂雨季排放标准、就地处理设施的排放标准等其他 CSO 控制系统的标准衔接程度不足。

1 CSO 控制指标

根据 CSO 排口衔接管网及水体的位置特征，CSO 控制指标可按基于技术的排放控制指标和基于受纳水体水质保障的控制指标两种方式划分。美国 CSO 长期控制规划多以年均溢流频次、年溢流体积控制率及年均污染物去除率作为主要控制指标；欧洲国家更侧重于基于受纳水体水质保障的相关指标；我国目前多以溢流频次、溢流体积控制率以及污染物排放限值作为指标进行监管。

1.1 基于技术的排放控制指标

基于技术的排放控制指标包括溢流频次、溢流体积控制率、污染物排放浓度限值、CSO 效率及稀释度等。

a. 溢流频次。溢流频次是衡量 CSO 发生频率的指标，常用年均值来表示，也可用季节限值(如可游泳季节)来表示。部分城市在海绵城市建设和黑臭水体治理时，多将其编入规划及实施方案中，以溢流频次的削减作为水环境质量提升的考核指标。本底条件和受纳水体敏感度是溢流频次标准制定的主要依据，管网类型及养护水平、降雨量、城市化程度等因素导致不同城市的本底溢流频次数值有较大差异。研究发现，上海苏州河南岸合流制管网系统与日本的 192 座城市的合流制管网系统相比，降雨特

性参数类似，截流倍数设计标准低，但因苏州河南岸合流制管网系统连通性高、坡度小、管径大以及大流域降雨时空分布差异性大，溢流频次仅为日本 192 座城市的平均溢流频次的 1/5^[6]。不同类型的受纳水体的水环境容量不同，对应的溢流频次也有较大差距，苏格兰环保局 (Scottish Environment Protection Agency) 针对不同用途的受纳水体设计不同的溢流频次标准，可游泳的水体溢流频次在可游泳的季节不超过 3 次，贝类捕捞区水域的溢流频次每年不超过 10 次，或者 CSO 排放许可证申请者可通过建模证明排放符合水质标准，溢流量超过 50 m³ 时被认为是严重溢流^[7]。溢流频次作为排放控制指标，与受纳水体系统衔接度不足，Lau 等^[8] 研究发现溢流频次和溢流体积削减率不是量化城市排水对受纳水体影响的最优指标。

b. 溢流体积控制率。溢流体积控制率是指通过雨污分流、截流、调蓄、处理等措施削减或收集的雨天溢流的合流污水体积与总溢流体积的百分比。美国、加拿大等国家将溢流体积控制率作为 CSO 污染控制的主要指标，各州/省针对溢流体积控制率提出具体的指标值。溢流体积控制率也是我国目前主要采用的 CSO 控制指标，从实施层面来说，存在着系统雨季运维调度的相关问题。如我国污水处理系统设计标准偏低，多数污水处理厂不具有雨季处理高负荷运行的能力，合流制截流干管将雨季合流污水输送到污水处理厂，在超过污水处理厂处理能力时，调蓄能力不足的水厂其超量污水在厂前溢流至水体，这部分未达标排放的体积使得溢流体积控制率较现实情况偏高。由于存在此类不合规排放现象，溢流体积控制率不能较好地反映 CSO 控制项目建设后受纳水体的水质特征。

c. 污染物排放浓度限值。美国《清洁水法》制定国家污染物排放削减制度 (national pollutant discharge elimination system, NPDES)，传统污染物排放限值采用最佳传统污染物控制技术法 (best conventional pollutant control technology, BCT)，非传统污染物和有毒污染物的排放限值采用最佳技术经济可行法 (best available technology economically achievable, BAT) 分析确定基于技术的污染物排放限值。奥地利综合考虑区域规模与溢流量制定固体污染物的排放限值，规定若人口数与溢流量之比小于 25 人/(L·s⁻¹) 时，应遵循 50 mg/L 的排放限值^[9]。我国 GB/T 51345—2018《海绵城市建设评价标准》中提出污水处理厂一级处理后采用就地处理设施处理，固体悬浮物 (SS) 排放质量浓度的月均值不应大于 50 mg/L^[2]。应注意的是，规定的月均值

50 mg/L 的限值要同时满足所有溢流口的年均溢流体积控制率达到 50% 的要求。在溢流体积削减标准的基础上,根据溢流量变化的特征,制定 CSO 处理的出水水质标准。

d. CSO 效率。CSO 效率是由奥地利水与废水协会(Austrian Water and Waste Management Association)颁布的《合流制溢流设计指南》中提出的一项控制指标,是指不产生溢流的径流雨水占雨水径流总量的百分比^[10]。CSO 效率的计算需通过水文模型进行 10 年以上的降雨连续模拟,CSO 效率计算应确定合流制管网的服务面积,用以将溢流量或径流量的体积单位转化为深度单位。其计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{v0}}{Q_{vr}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为 CSO 效率,%; Q_{v0} 为年均溢流量(不考虑外水入渗),mm/a; Q_{vr} 为年均雨水径流量,mm/a。

欧洲的许多国家对 CSO 效率的适宜性进行了研究,奥地利的相关研究发现年均降水量与 CSO 效率之间的相关性一般情况下较低,但在降雨历时超过 12 h 的情况下,相关性较好,奥地利立法将 CSO 效率作为控制指标^[11],此外,在颁布的《合流制设施设计指南》中提出溢流率可接受度($1/\eta$)的概念,并将其作为设计指标。

e. 稀释度。稀释度是合流制管网的总流量与管网的污水流量的百分比,如稀释度为 5 则表明管网流量 20% 为污水流量。稀释度指标又分为平均稀释度和最小稀释度。平均稀释度与我国的截流倍数定义相似,平均稀释度指溢流事件中管网总流量与污水流量的百分比,而截流倍数指截流雨水量与旱季污水量的百分比,与截流倍数相比,平均稀释度在反映溢流事件的水量占比上更具优势;最小稀释度是在管网无反坡的情况下,首次溢流的溢流量与旱季流量的百分比。两个溢流频次和溢流量相同的 CSO 区域可能有不同的污染负荷,对稀释程度的估计有助于量化这一点。对于稀释,不同国家和地区的要求不同,美国佐治亚洲环境保护局(Environmental Protection Division, EPD)要求 CSO 设施排放遵守水质标准,不允许稀释^[12]。英国标准协会颁布的 BS EN752—2008《室外排水与污水系统设计标准》中规定:当接纳水体自净能力不受到影响时,可将稀释倍数(溢流前稀释 5~8 倍的旱季流量)用作排放标准。

1.2 基于接纳水体水质保障的控制指标

基于接纳水体水质保障的控制指标包括常规污染物、急性氨中毒、溶解氧浓度、细菌标准及其他毒理指标等,其中应用较广的指标主要有急性氨中毒、

溶解氧浓度和细菌标准。

a. 急性氨中毒。合流污水除携带 SS、BOD 等常规污染物外,往往还存在高氮现象, NH_3 含量过高会损害水生生物健康。研究发现, NH_3 对鲫鱼、鲢鱼、鳙鱼和草鱼有不同程度的急性和慢性中毒影响^[13]。即使在非致死浓度下,也可能危害水生生物健康,而较低的溶解氧浓度会加强其中毒效果^[14]。

急性氨中毒指标主要在欧洲国家应用较广,英国的临时标准(fundamental intermittent standards, FIS)对鲤鱼科与鲑鱼科为主的水体的 CSO 污水 1 h 的氨质量浓度进行了细分,鲤鱼科不应高于 5 mg/L,鲑鱼科不应高于 2.5 mg/L。

b. 溶解氧浓度。溶解氧浓度在欧洲国家的 CSO 标准中通常与氨中毒指标并行监管,英国的临时标准 FIS 针对鲤鱼类和鲑鱼类水体制定了不同重现期的 NH_3 和溶解氧的限值。奥地利规定,若在旱季流量中无厌氧性微生物且河流坡度大于 3~5 m/km 时,无须考察溶解氧浓度指标。美国各州也对不同用途水体的溶解氧浓度制定了不同的标准。

c. 细菌标准。美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)建议各州对淡水用大肠杆菌活肠球菌指标,海水用肠球菌指标。在 34 个存在合流制溢流现象的州中,有 12 个州采用了 1986 年细菌环境水质标准。

1.3 现有指标总结

除上述已列指标外,不同国家对 CSO 事件间隔时间的划分方式也存在差异性,间隔时间的划分方式决定着溢流次数,相关 CSO 控制指标^[11-18]见表 1。

指标的选取应统筹考虑当地合流制区域规模、管网本底条件、区域调蓄能力、污水处理厂处理工艺规模及接纳水体敏感程度及水环境容量,科学制定因地制宜的指标体系,通过灰绿结合的技术措施实现削峰和接纳水体水质保障的双重目标。

溢流频次和溢流体积控制率与接纳水体的衔接度不足,难以量化合流制排水系统对接纳水体的影响。与上述两个指标相比,CSO 效率和稀释度更能反映合流制管网的雨水流量占比及雨季运行情况。因 CSO 的污染物与悬浮固体一般存在相关性,故 CSO 的污染物排放浓度限值通常以 SS 或 TSS 作为代表污染物,此指标从一定程度上能够反映水质情况,但依旧缺少与其他污染物相关性的量化论证。基于接纳水体水质保障的指标主要考虑水体用途和生物舒适度,包括娱乐、垂钓、游泳的可接触用途实现及水生生物的正常生存条件实现,此类作为目标导向的指标与基于技术的排放指标缺少量化关系。

表 1 CSO 控制指标一览

Table 1 Summary of CSO control indicators

| CSO 控制指标 | 定义 | 国家 | 控制标准 |
|--------------------|---|-----|--|
| 溢流频次 | CSO 排口的溢流次数(按年/月/雨季等计) | 美国 | 4~6 次 ^[18] |
| | | 荷兰 | 3~10 次 ^[11] |
| | | 比利时 | 低于 7 次 ^[11] |
| 溢流体积控制率 | 多年通过雨污分流、截流、调蓄、处理等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百分比 | 美国 | 85% (推定法要求), 各州在此基础上制定本州的溢流体积控制率的标准 ^[18] |
| | | 加拿大 | 借鉴美国 85% 的要求, 安大略省制定非海滩地区 90% 的控制要求 ^[16] |
| 污染物排放浓度限值 | 通过溢流量控制和水质处理实现的特定污染物的削减量与污染物总量的百分比 | 美国 | 授权各州制定具体的控制标准, 国家负责审核。如佐治亚州亚特兰大市制定了年 TSS 总量削减率不低于 60%、年 BOD ₅ 总量削减率不低于 25% 的标准; 俄勒冈州波特兰市制定了年 TSS 总量削减率不低于 70%、年 BOD ₅ 总量削减率不低于 50% 的标准 ^[18] |
| | | 加拿大 | 安大略省 F-5-5 程序规定了污染物最低处理要求, 包括碳生化需氧量 CBOD ₅ 去除率不低于 30%, TSS 去除率不低于 50%, 且至少每年 50% 的时间内(在自 4 月开始的 7 个月)质量浓度不超过 90 mg/L ^[16] |
| CSO 效率 | 不产生溢流的径流雨水占雨水径流总量的百分比 | 欧洲 | 奥地利、德国等欧洲国家将 CSO 效率作为 CSO 处理、储蓄设施的设计指标 ^[11] |
| | | 美国 | 地方各州根据工程实践经验确定 CSO 事件间隔时间 ^[15] |
| CSO 事件间隔时间 | 时空上两相邻 CSO 事件的间隔时间, 用于确定 CSO 事件的频次 | 加拿大 | 安大略省 CSO 7 项基本控制原则规定单个溢流口的 CSO 持续时间需小于 48 h ^[16] |
| | | 英国 | 使用 12/24 计数法: ①第一次溢流时开始计数; ②前 12 h 内的所有排放算作一次溢流事件; ③随后的 24 h 内的所有排放均视作一次溢流事件; ④继续计数, 直至后续的 24 h 时间段内无溢流事件 ^[21] |
| | | 美国 | 考虑受纳水体的自净能力, 可将稀释倍数(溢流前稀释 5~8 倍的旱季流量)可以用作排放标准 |
| 稀释度 | 平均稀释度是管网的总流量与管网的污水量的百分比; 最小稀释度是在顺流的情况下, 首次溢流的溢流量与旱季流量的百分比 | 英国 | 考虑受纳水体的自净能力, 可将稀释倍数(溢流前稀释 5~8 倍的旱季流量)可以用作排放标准 |
| | | 美国 | 乔治亚州环境保护局(EPD)要求在 CSO 设施排放点遵守水质标准, 不允许稀释 ^[12] |
| | | 加拿大 | 不列颠哥伦比亚省保证水环境质量的稀释度不高于 40:1 |
| 细菌标准 | 水体实现娱乐、垂钓、游泳等可接触用途所需的细菌限值 | 英国 | 2006 可接触水指令将可接触水体制定 3 级标准, 通过细菌浓度和占可接触季节时间的百分比进行监管, 贝类捕捞水体同样通过细菌浓度和时间占比进行监管 ^[17] |
| | | 美国 | 多以大肠杆菌月均值限值进行控制 ^[18] |
| | | 加拿大 | 在娱乐季节(6—9 月), CSO 区域的海滩 95% 的时间满足小于 100 个/mL 的要求 ^[16] |
| NH ₃ 浓度 | 受纳水体中非电离氨的质量浓度 | 英国 | 临时标准针对鲑鱼类适宜生存、鲤鱼类适宜生存、鲤鱼类临界生存 3 种水体的 NH ₃ 制定了不同的浓度/持续时间阈值的标准 |
| 溶解氧浓度 | 受纳水体中溶解氧的质量浓度 | 美国 | 各州制定不同的标准, 如新泽西州规定溶解氧质量浓度最小日均值不小于 5 mg/L ^[18] |
| | | 奥地利 | CSO 排放后河道中的溶解氧质量浓度不应低于 5 mg/L ^[11] |

1.4 系统性指标

1.4.1 雨季 CSO 污染负荷占比

总体来说, 现有的 CSO 控制指标是基于效果或基于目标导向, 并不能很好地衔接产汇流和溢流。本文在此提出雨季 CSO 污染负荷占比的概念, 雨季 CSO 污染负荷占比是雨季合流制区域产生溢流的径流雨水(管网中)污染负荷与该区域产汇流的地表雨水径流污染总负荷的百分比, 用以表征径流雨水对 CSO 的贡献率及合流制管网中雨污水污染负荷的比率, 典型污染物可选取 SS、BOD、COD、TN、TP 等。

$$\alpha = \frac{C_1 V_1}{C_2 V_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: α 为雨季 CSO 污染负荷占比, %; C_1 为合流制区域产生溢流的径流雨水(管网中)污染物质量浓

度, mg/L; V_1 为合流制区域产生溢流的径流雨水(管网中)体积, L; C_2 为合流制区域地表雨水径流污染物质量浓度, mg/L; V_2 为合流制区域地表雨水径流雨水体积, L。该指标适用于因降雨产生的合流制溢流事件(场次值或年均值)。

1.4.2 基于受纳水体水质保障的指标体系

现阶段, 应监测雨季合流制区域排水分区、管网、排口及受纳水体不同区段的水量、峰值流量及典型污染物浓度, 量化源头、管网、河(湖)水质水量的响应关系, 分析污染物之间的相关性, 确定适宜的排放指标和受纳水体水质保障指标。另外, 宜将黑臭水体特征指标的感官指标、水体生态流速指标及单位面积种群生物量指标等舒适度指标纳入基于受纳水体水质保障的指标体系, 从而完善指标体系。

2 CSO 控制标准确定依据

CSO 控制标准制定依据主要分为类比分流制污染负荷确定 CSO 污染物排放限值、依据工程实践效果制定 CSO 效果标准及依据水体用途对 CSO 制定不同控制水平的标准。

2.1 类比分流制污染负荷确定 CSO 污染物排放限值

制定区域 CSO 污染物排放限值时可假定该区域为分流制,概算出分流制情况下的污染物负荷量,将其转化为浓度限值。日本针对水环境质量在《环境基本法》的基础上制定了《水污染防治法》,强调在全国范围内使用统一的水环境质量和排放标准^[19]。2004 年,日本对《水污染防治法》的执行令进行了修订,建立了污水排放水质技术标准,标准针对旱季雨季两种情形制定日本的 CSO 排放水质标准,旱季对溢流口和污水处理厂出水制定 pH 值、大肠菌群数、悬浮固体、BOD₅、磷、氮的标准限值;雨季规定各 CSO 排口全年外排的污染物(以 BOD₅ 计)的平均质量浓度不高于 40 mg/L,该考核限值是根据相同情况下分流制排水系统的水质情况确定的,相当于 90% 的累积出水水质数值。

2.2 依据工程实践效果制定 CSO 效果标准

CSO 控制标准可依据工程实践效果制定,美国 CSO 效果标准的确定方法有推定法和实证法,推定法以效果标准代替基于水质的排放限值,实证法需通过建模证明水质达标^[18]。美国各州多以推定法通过 CSO 项目实践来制定 CSO 性能标准。实证法所需的数据较多,应用的规模较小,如美国纽约州奥尔巴尼海滩天然泳池,考虑到接纳水体水质模型模拟结果,采用实证法来制定 CSO 控制计划,达到《细菌水质标准》所衡量的监管合规性,研究结果显示,细菌和漂浮物是表征水质标准情况的主要污染物。

实证法通常用于验证基于推定法确定的标准限值合理性。田纳西州要求纳什维尔供水和下水道服务部证明 CSO 是否为水体溶解氧浓度低的原因。首先,田纳西州、纳什维尔供水和下水道服务部初步将年均溢流频次定为 8 次;其次,利用推定法对年均溢流频次 8 次的方案进行了重新评估,进而将限值设定为 6 次;之后,研究机构对纳什维尔的坎伯兰河上的奇特姆湖进行建模,通过实证法来验证并预测各种 CSO 控制方案可能取得的水质水量控制效果,将每年的 CSO 削减效果与建设成本及改善水体水质的效益进行比较筛选;实证法利用模型,确定年均溢流频次为 2 次、4 次、8 次、16 次条件下引起的水质影响^[20],结合推定法确定最终的年均溢流频次限值。

2.3 依据水体用途对 CSO 制定不同控制水平的标准

2.3.1 按水体用途评估及分类

CSO 控制标准制定应最终以接纳水体水质达标为导向,不同用途的接纳水体需要制定的限值标准也有差异,可针对水体用途(可接触、濒危物种生存等)进行评估。如美国的水质可达性分析(use attainability analysis, UAA)、欧洲的城市污染管理指南(urban pollution management, UPM)、加拿大的市政污水排放管理战略(management of municipal wastewater effluent, MWWE)等。

UAA 是对《清洁水法》规定的水体“可捕捞/可游泳”的可行性科学评估。综合考虑水质限值和成本效益,用以评估及中止水体不科学用途的使用,分析结果纳入州水质标准并提交 EPA 审核,以符合《清洁水法》和《濒危物种法》。水体用途分为现有用途和指定用途,现有用途是水体的实际用途,无论其是否符合水质标准;指定用途是水质标准中规定的水体用途,无论此用途是否可使用,如印第安纳州指定所有的水体用于人体可接触的娱乐用途,而非所有水体均已用于全身可接触的娱乐项目。存在 CSO 的区域进行水体水质可达性分析用以确定接纳水体用途是否受到损害及依据水体用途指定控制标准^[21]。

UPM 定义是在雨季对管网和污水处理系统的雨污水排放进行管理,以便具有成本效益的方式满足接纳水体的要求。UPM 既涉及监管方面又涉及工具(降雨、管网系统、污水处理工程和接纳水体的建模)。UPM 提到临时标准 FIS,即在短期高浓度污染事件中保护河流水生生物的限值,限值采用溶解氧和非电离氨在不同重现期的浓度/持续时间阈值。鲑鱼类水体营养盐含量通常较低,CSO 排放会对水环境产生更大的影响,UPM 将接纳水体按鲑鱼类适宜生存水体、鲤鱼类适宜生存水体、鲤鱼类临界生存水体 3 种不同类型分类限值。

加拿大的纽芬兰和拉布拉多省基于 MWWE 战略提出了《污水系统排水法规》(wastewater systems effluent regulations, WSER),制定了 CSO 风险评估过程,包括:①监测计算在连续的 12 个月期间,合流制管网溢流流量与排口排放流量的比值(< 10%、10% ~ 25%、25% ~ 50% 或 > 50%);②监测记录在 12 个月期间的溢流次数(< 5 次、5 ~ 15 次或 > 25 次);③CSO 通过每个溢流点沉积到环境敏感区域(如 500 m 范围内的贝类捕捞区、濒危物种等)的位置。对 3 个项目的不同表现水平分三类或四类水平评分,得出 CSO 排口的风险评分,进而制定适用于各类风险水平的控制方案及标准。若市政当局无监

测数据计算时,可根据设计流量估算溢流点和排放点的旱季平均流量的比值,根据降雨事件和 CSO 设计能力粗略估算溢流频率。风险评估得分高的 CSO 排口应制定严格的控制标准^[22]。

2.3.2 按水体分类制定标准

美国 CSO 控制标准制定将国家公园、野生动物保护区等敏感水体作为高优先级考虑因素,综合评价水体用途后进行标准制定,针对敏感水体的标准制定宜采用实证法。美国内布拉斯加州奥马哈市制定密苏里河的水质标准时考虑密苏里河中的濒危物种浅色鲟鱼、蓝鲈等的生存条件,在氨标准制定方面制定限值^[23]。堪萨斯州制定标准时也充分考虑了确定的 7 种受威胁或濒临灭绝的水生物种^[24]。

加拿大安大略省 CSO 控制政策从 3 个目标出发:①消除旱天溢流;②尽量减少 CSO 对水生生物和人类健康的影响;③在每年 6 月 1 日至 9 月 30 日的 4 个月内,受 CSO 影响的海滩至少 95% 的时间实现大肠杆菌的省级水质目标。相较于美国“所有 CSO 排口符合清洁水法案基于技术和水质要求”的控制目标,美国 CSO 控制政策基于“可捕捞/可游泳”的目标,安大略省的 CSO 政策更侧重于海滩地区水体娱乐用途得以保障。而非海滩地区,CSO 控制目标考虑排放指标,以 90% 溢流体积控制率为标准监管^[16]。日本的公共用水域(河川、湖沼、海域)根据相应的水域类型(自来水、工业用水、农业用水、水产、环境保护等水体用途)制定试用的标准值^[25],提出针对河川、湖沼、海域的 BOD、COD 标准值;针对湖沼、内湾的氮磷限值;针对水生生物保护目标的化学物质和溶解氧限值。

总结上述欧美、日本、加拿大的 CSO 治理经验及相关标准,美国各州多根据 EPA 推定法规定的溢流频次 4~6 次、溢流体积控制率 85% 作为参考,结合本区域项目实践效果提出各州的效果标准,少部分区域尺度和规模较小、易于建模的受纳水体区域采用实证法对水质达标进行理论计算;日本合流制污染物去除标准按相同情况下分流制的水质情况设定;加拿大安大略省对海滩非海滩水体分类监管,敏感水体采用类似美国实证法的水质目标;欧洲国家特别是英国近年来将控制目标从排放指标到受纳水体水质指标转换,目前采用环境质量目标/环境质量标准(EQO/EQS)作为 CSO 的控制标准。

3 研究展望

CSO 控制过程具有长期性、复杂性的特点,治理思路宜以规划方案近远期衔接、标准监管近远期衔接、技术措施近远期衔接为原则来制定。我国近期

可暂以排放限值监管,远期基于水体水质达标制定 CSO 控制标准中长期专项规划,统筹考虑近远期标准、技术措施的衔接,摸清本底、明确目标、系统治理,构建以受纳水体水质达标为目标导向的 CSO 控制标准体系及治理技术路线。

3.1 摸清本底——合流制管网溢流成因监测分析及水体敏感度判断

3.1.1 溢流成因分析

合流制区域的溢流成因差异性较大,部分地区盲目的通过“合改分”、兴建调蓄设施控制 CSO,缺乏系统本底的监测及地区 CSO 的成因分析。制定 CSO 控制标准前,应充分监测合流制管网本底条件,评估管网是否存在地下水、施工降水等外水入渗的情况及底泥沉积物淤积过多导致管网实际运行水位偏低的情况,底泥中沉积物的存在会使 CSO 的各类污染物形成协同效应,冲击水环境质量^[26]。此类管网本底条件造成的 CSO 现象应本着“修复优先”的原则,协调排水管网养护公司对破损漏损的管网修复、对管网底部清淤,优先解决管网功能性、结构性缺陷,提高管网雨季运行流速、降低运行水位。

3.1.2 受纳水体敏感度判断

基于水体功能属性保护的目标,划分不同水体、水体的不同区段的功能属性,明确 CSO 排放区域受纳水体的现有用途和潜在用途,综合考虑排放水质限值和成本效益,实时更新水体用途类型,中止水体不科学的用途。

3.2 明确目标——以水体水质达标为目标导向制定 CSO 控制标准

3.2.1 “源-厂-网-河(湖)”控制标准衔接

CSO 控制系统是由多个子系统衔接构成的,包括源头体积控制系统、截流管网系统、就地处理系统、调蓄系统、污水处理系统。目前在 CSO 控制的目标下,子系统标准相对独立,衔接程度不足,缺少系统统筹规划。应在子系统标准的基础上,充分考虑系统间水量水质传输削减规律,编制 CSO 控制中长期规划。在摸清系统本底的情况下,得到子系统的 CSO 控制效果,相同调蓄容积设计下的源头绿色设施和灰色调蓄设施截流污染物负荷不同,应制定的 CSO 排放标准也不宜相同。

3.2.2 应对水体分类制定 CSO 排放标准

通过调研发现,欧洲多采用基于受纳水体水质保障的控制指标,并对不同类型受纳水体制定不同的标准阈值监管。CSO 标准的制定宜从基于技术的排放限值转向基于受纳水体水质达标的排放限值,针对不同本底情况的合流制区域、不同敏感程度的受纳水体制定适宜的指标及限值。对娱乐、游泳、鱼

类养殖、水生生物保护区等不同用途水体分类制定标准。娱乐、游泳等可接触水用途的水体可制定严格的季节性细菌水质标准;对于鱼类养殖水域,考虑鱼类生存所需的溶解氧和毒理化合物的限值要求;对湖泊、海湾等敏感脆弱水体应保障换水周期,制定更严格的氮、磷排放的地方标准,防止水体富营养化;对生态流速快,自净能力强的河道型水体可适当放宽控制标准。

3.3 系统治理——构建“源-厂-网-河(湖)”全流程多系统综合调控的CSO技术体系

针对多个子系统衔接的CSO控制系统,应推进以“河(湖)”水质达标为目标的“源-厂-网-河(湖)”全流程多系统综合调控CSO技术体系。“源-网”协同实现源头减量、径流分担,灰绿结合削减污染物负荷;“厂-网”一体化实现雨季合流污水实时调度、合理运营,提高污水处理厂雨季处理能力,改良雨季处理工艺,合理匹配污水处理厂和管网的转输和处理规模,避免污水直接排入水体的现象发生,进而实现全流程多系统衔接,综合调控CSO,实现水体长治久清。

参考文献:

[1] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴2017[M]. 北京:国家统计局城市社会经济调查司, 2017.

[2] 翟慧敏,程启先,李书覃,等. 海绵城市理念演变的知识图谱可视化分析[J]. 水资源保护,2020,36(2):34-40. (ZHAI Huimin, CHENG Qixian, LI Shuqin, et al. Visual analysis of knowledge map of sponge city concept evolution [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):34-40. (in Chinese))

[3] 城市黑臭水体治理攻坚战实施方案[EB/OL]. [2020-03-03]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201810/t20181015_237912.html.

[4] 城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)[EB/OL]. [2020-03-01]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201905/t20190509_240490.html.

[5] 黄津辉,段亭亭. 中国海绵城市开发与加拿大综合雨洪管理对比研究:以多伦多为例[J]. 水资源保护,2017,33(5):5-12. (HUANG Jinhui, DUAN Tingting. Comparative study on sponge city development in China and integrated stormwater management in Canada; a case study of Toronto[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):5-12. (in Chinese))

[6] 谭琼,李田,徐月江,等. 苏州河沿岸合流制系统雨天溢流频率及其启示[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008,36(9):1232-1236. (TAN Qiong, LI Tian, XU Yuejiang, et al. Study on frequencies of combined sewer overflows of Shanghai Suzhou Creek area[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2008,36(9):1232-

1236(in Chinese))

[7] Scottish Environment Protection Agency. Regulatory method (WAT-RM-07) [EB/OL]. [2020-02-04]. https://www.sepa.org.uk/media/152727/wat_rm_07.pdf.

[8] LAU J, BUTLER D, SCHUETZE M. Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact? [J]. Urban Water,2002,4(2):181-189.

[9] KLEIDORFER M, RAUCH W. An application of Austrian legal requirements for CSO emissions[J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research,2011,64(5):1081.

[10] FENZ R, RAUCH W. Combined sewage treatment: requests and evaluation of the necessary measures using long-term continuum simulation[J]. Wiener Mitteilungen,2003(10):183.

[11] DE TOFFOL Sara. Sewer system performance assessment: an indicators based methodology [M]. Innsbruck: Innsbruck University Press,2009.

[12] RICHARDS T S, KREUTZBERGER W A. Development of site specific metals criteria for CSO discharges to headwater streams [J]. Proceedings of the Water Environment Federation,2001(9):350-360.

[13] 肖绪诚. 高氮对鱼类的影响及其与实验尺度的关系[D]. 北京:中国科学院大学,2016.

[14] ENGELHARD C, DE TOFFOL S, RAUCH W. Suitability of CSO performance indicators for compliance with ambient water quality targets[J]. Urban Water Journal,2008,5(1):43-49.

[15] 贾楠,王文亮,车伍,等. 合流制排水系统溢流事件划分方法案例分析[J]. 中国给水排水,2019(13):117-121. (JIA Nan, WANG Wenliang, CHE Wu, et al. Case study on division method of combined sewer system overflow events[J]. China Water & Wastewater,2019(13):117-121. (in Chinese))

[16] ZUKOV S G. CSO regulation in great lakes region of Canada and the United States: a comparative evaluation [C]//World Water and Environmental Resources Congress. Alaska:Elsevier,2005:1-11.

[17] Environment Agency. Water companies: environmental permits for storm overflows and emergency overflows [EB/OL]. (2018-05-08) [2020-05-01]. <https://www.gov.uk/government/publications/water-companies-environmental-permits-for-storm-overflows-and-emergency-overflows>.

[18] 贾楠,王文亮,车伍,等. 美国合流制溢流控制标准分析及对我国的启示[J]. 中国给水排水,2019(7):121-127. (JIA Nan, WANG Wenliang, CHE Wu, et al. Analysis of combined sewer overflow control standard of the United States and its enlightenment to China [J]. China Water & Wastewater,2019(7):121-127. (in Chinese))

- [19] 杨波,尚秀莉. 日本环境保护立法及污染物排放标准的启示[J]. 环境污染与防治,2010(6):94-97. (YANG Bo, SHANG Xiuli. Enlightenment from Japanese environmental protection legislation and pollutant discharge standard [J]. Environmental Pollution and Prevention,2010(6):94-97. (in Chinese))
- [20] ADAMS W R,THACKSTON E L,SPEECE R E. Modeling CSO impacts from Nashville using EPA's demonstration approach [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997,123(2):126-133.
- [21] EPA. Use attainability analysis(UAA)[EB/OL]. (2005-03-08)[2020-04-07]. <https://www.epa.gov/wqs-tech/use-attainability-analysis-uaa>.
- [22] Water Resources Management Division. Final report study on identification and characteristics of sewer overflows in newfoundland and labrador [EB/OL]. (2012-02-20)[2020-03-29]. <https://www.gov.nl.ca/mae/files/waterres-reports-wastewater-study-on-identification-and-characteristics-of-sewer-overflows-in-nl-feb-20-2012.pdf>.
- [23] CDRPC. Final update to long-term control plan for the omaha combined sewer overflow control program [EB/OL]. [2020-05-01]. https://omahacso.com/files/6814/1450/8302/Final_Omaha_LTCPUupdate-Appendices_Oct2014.pdf.
- [24] BNWRD. Bloomington and normal water reclamation district and city of bloomington long-term combined sewer overflow control plan[EB/OL]. (2006-12-26)[2020-04-29]. <https://www.cityblm.org/home/showdocument?id=58>.
- [25] 高娟,李贵宝,华珞,等. 日本水环境标准及其对我国的启示[J]. 中国水利,2005(11):41-43. (GAO Juan, LI Guibao, HUA Luo, et al. Water environment standard in Japan and inspiration to our country [J]. China Water Resources,2005(11):41-43. (in Chinese))
- [26] 佃柳,郑祥,郁达伟,等. 合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J]. 水资源保护,2019,35(3):76-83. (DIAN Liu, ZHENG Xiang, YU Dawei, et al. Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution[J]. Water Resources Protection,2019,35(3):76-83. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-10-27 编辑:王芳)

(上接第123页)

- [16] 李家科,张兆鑫,蒋春博,等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(1):1-8. (LI Jiake, ZHANG Zhaoxin, JIANG Chunbo, et al. Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):1-8. (in Chinese))
- [17] BAO Q, LIN Q, TIAN G, et al. Copper distribution in water-dispersible colloids of swine manure and its transport through quartz sand [J]. Journal of Hazardous Materials,2011,186(2/3):1660-1666.
- [18] GIMBERT L J, HAYGARTH P M, BECKETT R, et al. Comparison of centrifugation and filtration techniques for the size fractionation of colloidal material in soil suspensions using sedimentation field-flow fractionation [J]. Environmental Science & Technology,2005,39(6):1731-1735.
- [19] 赵康,陈冲,商建英. 腐殖酸-高岭石胶体对铀(VI)在饱和多孔介质中迁移过程的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(6):286-293. (ZHAO Kang, CHEN Chong, SHANG Jianying. Effect of humic acid-kaolinite on uranium transport in saturated porous media[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(6):286-293. (in Chinese))
- [20] PANG L,CLOSE M,SCHNEIDER D,et al. Effect of pore-water velocity on chemical nonequilibrium transport of Cd, Zn, and Pb in alluvial gravel columns [J]. Journal of Contaminant Hydrology,2002,57(3/4):241-258.
- [21] 贾晓玉,李海明,王博,等. 不同酸碱条件下胶体迁移对含水介质渗透性的影响[J]. 环境科学与技术,2009,32(5):45-47. (JIA Xiaoyu, LI Haiming, WANG Bo, et al. Effect of colloid transport on porous medium permeability in different acidic and basic environment [J]. Environmental Science & Technology,2009,32(5):45-47. (in Chinese))
- [22] 侯培强,任玉芬,王效科,等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学,2012,33(1):71-75. (HOU Peiqiang, REN Yufen, WANG Xiaoke, et al. Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff [J]. Environmental Science,2012,33(1):71-75. (in Chinese))
- [23] ZHAO Y, GU X, GAO S, et al. Adsorption of tetracycline (TC) onto montmorillonite: cations and humic acid effects [J]. Geoderma,2012,183/184:12-18.
- [24] 胡俊栋,沈亚婷,王学军. 离子强度、pH对土壤胶体释放、分配沉积行为的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(2):629-637. (HU Jundong, SHEN Yating, WANG Xuejun. The effect of ionic strength and pH conditions on the release, deposition and dispersibility behaviors of natural soil colloid [J]. Ecology and Environmental Sciences,2009,18(2):629-637. (in Chinese))
- [25] PANG Y, ZENG G, TANG L, et al. PEI-grafted magnetic porous powder for highly effective adsorption of heavy metal ions [J]. Desalination,2011,281:278-284.
- [26] KARATHANASIS A D, JOHNSON M C. Subsurface transport of Cd, Cr, and Mo mediated by biosolid colloids [J]. Science of the Total Environment,2006,354(2/3):157-169. (收稿日期:2020-02-25 编辑:熊水斌)