

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.08.014

# 美国金县合流制溢流控制案例之技术与标准

王文亮<sup>1</sup>, 张昱<sup>2</sup>, 蔡然<sup>3</sup>, 付振<sup>4</sup>, 白献宇<sup>4</sup>, 李小静<sup>2</sup>,  
张洪良<sup>3</sup>

(1. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 城市雨水系统与  
水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京  
100044; 4. 北控技术服务<广东>有限公司, 广东 广州 511300)

**摘要:** 美国金县的合流制溢流控制经过40多年的研究和实践,已形成了较为完整的技术标准体系和监督管理体系,取得了良好的成效,很多方面在美国处于较领先水平。金县将污水处理厂、合流制溢流调蓄与处理厂、合流制管网溢流排放口统一纳入1个排放许可进行管理,“厂-网”排放标准与工艺工况设计以受纳水体环境质量为目标,与雨季、旱季运行条件相匹配,污染物减排“费用-效果”较优。着重介绍了金县西点污水处理厂流域合流制溢流控制工程的实施与运行情况、排放标准与达标情况,以期为我国城市合流制溢流控制工程实践提供借鉴。

**关键词:** 合流制溢流控制; 调蓄处理厂; 技术与标准

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)08-0099-09

## Introduction to the Combined Sewer Overflow Control Technologies and Standards in King County, USA

WANG Wen-liang<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, CAI Ran<sup>3</sup>, FU Zhen<sup>4</sup>, BAI Xian-yu<sup>4</sup>,  
LI Xiao-jing<sup>2</sup>, ZHANG Hong-liang<sup>3</sup>

(1. *Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China*; 2. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China*; 3. *Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China*; 4. *Beijing Enterprises Technical Service <Guangdong> Co. Ltd., Guangzhou 511300, China*)

**Abstract:** After more than 40 years of research and practice, King County's combined sewer overflow (CSO) control has formed a relatively complete technical standards system and supervision and management system, and achieved good results. In many aspects, it is at the leading level in the United States. King County integrates the wastewater treatment plant, the CSO storage and treatment plant, and the sewer overflow outfall into one discharge permit for management. The “plant-network” discharge standard and process are designed for receiving the information of water quality, matching the wet and dry weather operating conditions. The “cost-effectiveness” of pollutant emission achieved better performance. In order to provide reference for the practice of urban CSO control engineering in China, the implementation and operation of the CSO control project in the watershed of the West Point wastewater treatment plant, as well as the discharge standards and compliance were introduced.

**Key words:** CSO control; storage and treatment plant; technology and standard

近几年,我国城镇污水处理提质增效成效显著,一方面,城市黑臭水体基本消除,城市生活污水收集处理效能显著提高;而另一方面,雨天合流制溢流(CSO)造成的水体“返黑返臭”问题凸显。虽然CSO控制已成为绝大多数城市水环境治理的“标配”,部分城市也取得了较好的效果,但CSO排放标准难确定、“厂-网-河”能力难匹配等问题却无法短期解决<sup>[1]</sup>,城市CSO控制成效仍待提高。

美国CSO控制起源于1989年国家环保局(EPA)发布的CSO控制政策,而华盛顿州金县的CSO治理工作起源于20世纪70年代,在CSO控制规划建设和运行管理方面积累了丰富的经验。为此,以金县西点污水处理厂流域CSO控制为案例,介绍其CSO控制技术与标准,以期为我国CSO控制提供参考。

## 1 基础设施与受纳水体基本情况

在西点污水处理厂流域范围内,由金县管辖且纳入国家污染物排放削减(NPDES)许可管理的排水设施包括38个CSO排放口、4座CSO处理厂及西点污水处理厂<sup>[2]</sup>。需指出的是,由于最近一个许可期(2015年—2020年)内的监测数据尚未汇总发布,故所引数据均来自2009年—2014年许可期。

### 1.1 排水管网

金县污水收集系统分为东、西两个分区,西点污水处理厂收集处理西区污水,覆盖华盛顿湖以北、以西区域及西雅图市区。其中,华盛顿湖以北区域为分流制,西雅图市区约75%的区域(约169.97 km<sup>2</sup>)为合流制,合流污水通过泵站、截流干管最终由两条隧道汇入西点污水处理厂。

金县采用监控与数据收集系统(SCADA)自动监测并控制西区污水系统中的污水流量,可最大限度地利用管网的调蓄能力减少CSO,以及最大限度地降低管网流量激增,使尽量多的污水得到处理。

#### 1.1.1 CSO排放口

金县管辖的CSO排放口共38个,均分布在西雅图市区内,1983年的分析表明,这些排放口平均每年发生431次溢流,未经处理直接排放的合流污水达量 $871 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。自1988年起,西雅图市政局和金县实施了一批项目,CSO频次和水量得到一定控制,根据2006年—2012年的数据,金县平均每年未经处理直接排放的合流污水已减至 $307 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1995年—2005年,金县建设了Elliott West CSO处理厂和Henderson/MLK CSO处理厂,并建设了CSO监控网站,公众可通过网站对CSO进行实时监督评价。2008年发布《CSO削减计划(2008年更新版)》,提出优先在沿海区域实施部分CSO控制项目,并于2013年底开工建设4个CSO控制项目,包括3个调蓄池建设项目和1个社区绿色基础设施建设项目。2012年,金县通过了《CSO长期控制规划(2012年修订版)》,并于2013年与州环保局、国家环保局(EPA)及联邦司法部达成协议,提出实施9项CSO控制要求,将每个CSO排放口的排放事件数控制在年均不超过1次,并在2030年前完成。2013年协议和长期控制规划中指出,38个CSO排放口已有16个达到“年均不超过1次”标准,并详细给出了22个未达标CSO排放口的编号、名称、排放受纳水体、目前控制状态、工程实施规划与状态等信息。

#### 1.1.2 入流/入渗控制

金县于1999年提出“地区入流/入渗(Inflow/Infiltration, I/I)控制项目”,旨在“费用-效果”可行时,降低管网雨季峰值流量,控制分流制污水管网溢流,减少外水的输送和处理费用。为落实该项目,金县与地方相关部门投入4 100万美元,历时6年,实施了I/I研究项目。该研究项目始于2000年,主要开展了以下工作:①采用大量流量监测和模型分析,确定地方管网系统I/I对地区管网系统的贡献量;②在12个地方管网系统内选择实施10个试点项目,开展I/I控制效果评价,进行I/I控制技术测试并积累投资成本信息;③2004年提出I/I系列控制草案,包括模型标准、操作流程、政策、指南等;④2005年11月完成I/I控制“费用-效果”分析;⑤提出地区I/I长期控制规划,并于2006年5月通过金县批复;⑥2007年—2009年由金县与各地方当局一同开展I/I控制可行性分析,并选择3个区域开展I/I控制先行先试;⑦实施“Skyway and sewer district”流域I/I控制项目,对350条支管进行修复,目标为管网I/I峰值流量削减不小于60%,约 $0.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。受流域范围估计不足及地下水位不稳定等因素影响,该项目实际实施效果并不理想,经监测和模型初步评估,I/I峰值流量削减值为19%<sup>[3]</sup>。

### 1.2 CSO处理厂

#### 1.2.1 处理能力与工艺工况

金县4座CSO处理厂的设计能力见表1<sup>[3]</sup>。

表1 CSO 处理厂设计处理能力

Tab.1 Design capability of CSO treatment plant

项 目	设计指标	数值
Alki CSO 处理厂	雨天进水峰值流量/( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	24.6
	进水 TSS 年均负荷/( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ )	4.4
Carkeek CSO 处理厂	雨天进水峰值流量/( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	7.6
	进水 TSS 年均负荷/( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ )	2.3
Elliott West CSO 处理厂	雨天进水峰值流量/( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	94.6
	调蓄隧道直径/m	4.5
	调蓄隧道长度/km	1.9
	隧道调蓄容积/ $10^4 \text{ m}^3$	2.7
Henderson/MLK CSO 处理厂	调蓄隧道直径/m	4.5
	调蓄隧道长度/km	0.9
	隧道调蓄容积/ $10^4 \text{ m}^3$	1.3

① Alki CSO 处理厂

Alki CSO 处理厂建于1958年,具备污水一级处

理能力,1998年被改造为一座接近全自动化的CSO处理厂,并于1999年纳入NPDES许可管理,工艺工况见图1<sup>[3-4]</sup>。旱天运行时,污水送往西点污水处理厂进行二级处理。雨天运行时,当管网流量超过下游调流构筑物过流能力或下游调蓄隧道蓄满时,Alki CSO处理厂通过格栅、沉淀及消毒处理合流制污水。此时,若进水量较小,进水在CSO处理厂自身调蓄空间内消纳,无出水排放;若进水流量低于设计处理能力且水量超过处理厂调蓄能力,CSO处理厂出水经排放口排放入海;若进水流量超过设计处理能力,污水通过泵站经CSO排放口直接溢流入海。雨后或降雨过程中,下游泵站能力有富余时,厂内污水、泥砂均回流至管网送往西点污水处理厂处理。

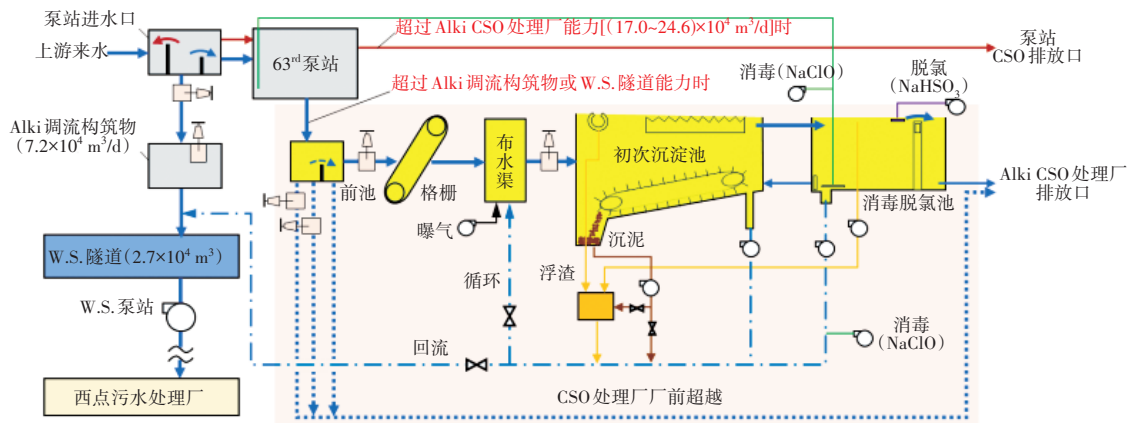


图1 Alki CSO 处理厂工艺工况

Fig.1 Process flow of Alki CSO treatment plant

② Carkeek CSO 处理厂

Carkeek CSO 处理厂建于1962年,1994年11月

金县新建泵站并将其改造为CSO处理厂,随后纳入NPDES许可管理,工艺工况如图2所示<sup>[3-4]</sup>。

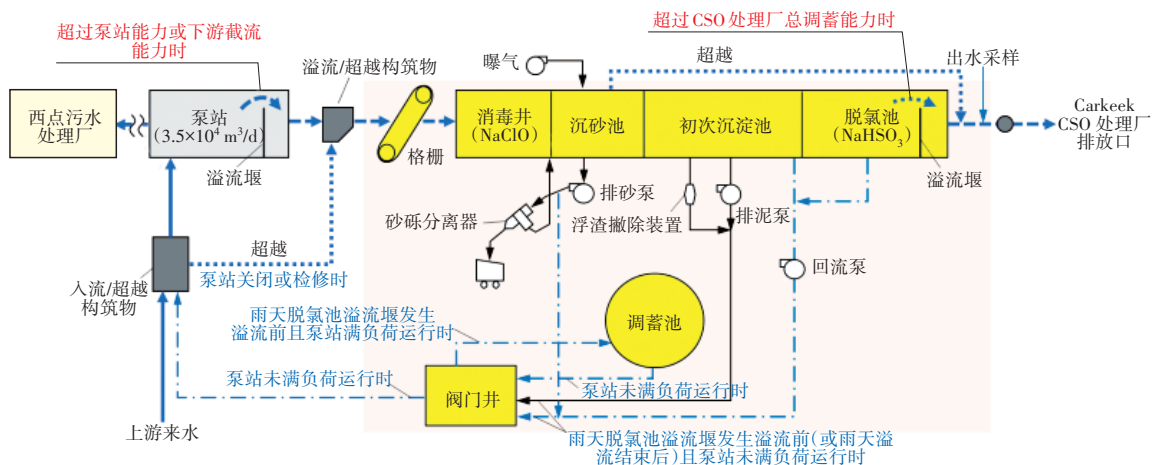


图2 Carkeek CSO 处理厂工艺工况

Fig.2 Process flow of Carkeek CSO treatment plant

旱天运行时,Carkeek CSO 处理厂仅作为泵站运行,污水送往西点污水处理厂。雨天运行时,设施开启至关闭的全过程始终有人员值守,并提供预防性的运行检查与维护,工艺工况与 Alki CSO 处理厂类似。

### ③ Elliott West CSO 处理厂

Elliott West CSO 处理厂建于2005年5月,当年纳入 NPDES 许可管理,新建设的格栅、消毒设施、出水切换与脱氯设施及排放口等是对原有 CSO 控制设施的有效补充,工艺工况如图3所示<sup>[3-4]</sup>。

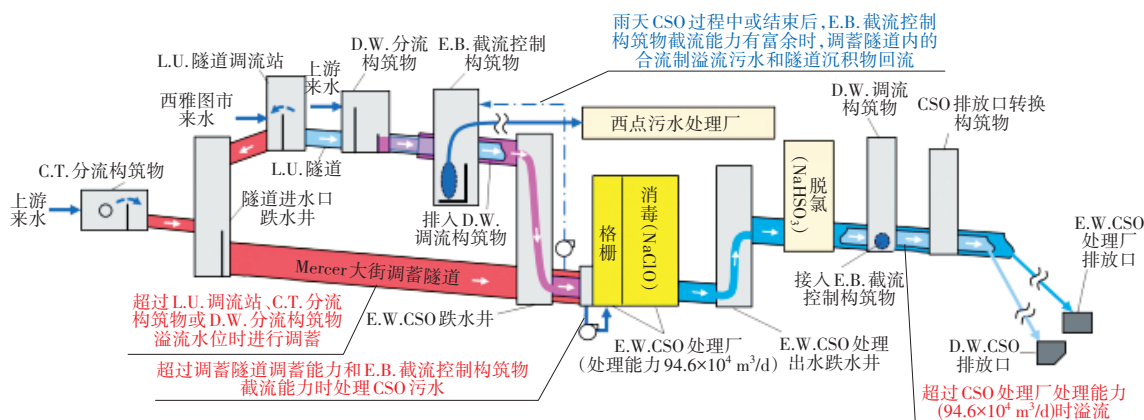


图3 Elliott West CSO 处理厂处理工艺

Fig.3 Process flow of Elliott West CSO treatment plant

当雨天流量超过分流/调流构筑物能力时,合流污水溢流进入调蓄隧道,超过隧道调蓄能力且下游截流构筑物截流能力无富余时,CSO 处理厂运行,出水通过处理厂排放口排放入海;当流量 $>94.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,污水通过CSO 排放口排放入海。雨后或降雨过程中,只要下游截流构筑物有富余能力,

隧道内污水、沉积物均送往西点污水处理厂处理。

### ④ Henderson/MLK CSO 处理厂

2005年,通过更新原有泵站并建设具备调蓄和处理能力的隧道,Henderson/MLK CSO 处理厂建成并纳入 NPDES 许可管理。工艺工况如图4所示<sup>[3-4]</sup>。

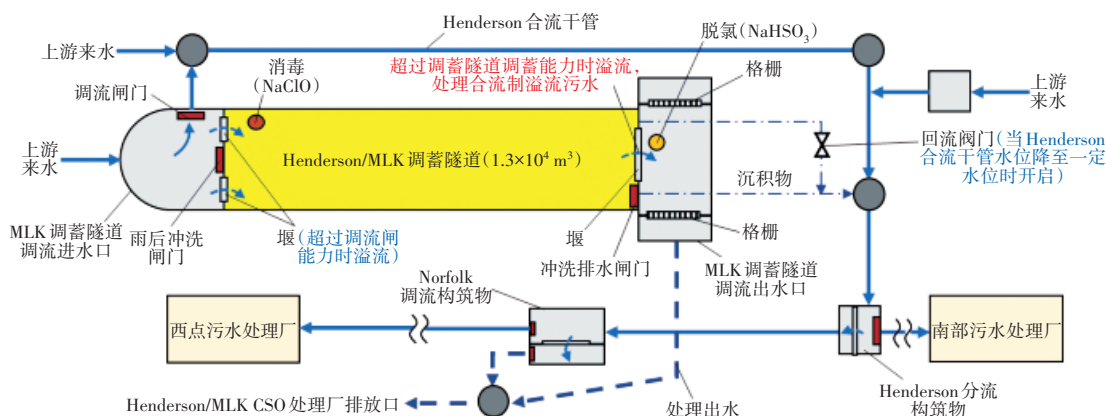


图4 Henderson/MLK CSO 处理厂处理工艺

Fig.4 Process flow of Henderson/MLK CSO treatment plant

雨天运行时,超过调流闸门能力的污水溢流进入隧道进行沉淀和消毒处理,隧道蓄满时,污水溢流至出水口并经格栅处理后由处理厂排放口排放入河。雨后或降雨过程中,当下游干管水位降至一定高度时,隧道中存储的污水、沉积物均经干管送

往西点污水处理厂或南部污水处理厂处理。

### 1.2.2 进水与出水水质

根据金县2009年7月—2013年10月监测数据,4座CSO 处理厂进、出水情况如表2所示<sup>[3]</sup>,为与进水水质进行对比,出水仅列出BOD<sub>5</sub>和TSS两个参数。

表2 CSO 处理厂进水、出水情况

Tab.2 Influent and effluent characteristics of CSO treatment plant

项 目	进水量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		出水量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		进水 BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )		出水 BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )		进水 TSS/ (mg·L <sup>-1</sup> )		出水 TSS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	
	平均值	最大值	月均值	最大月	月均值	最大月	月均值	最大月	月均值	最大月	月均值	最大月
Alki CSO 处理厂	5.2	19.2	3.7	15.8	36	93	23	40	89	213	34	65
Carkeek CSO 处理厂	1.4	7.0	1.2	6.6	147	658	38	132	208	1 016	46	132
Elliott West CSO 处理厂	16.1	75.7	7.6	36.9	77	391	69	191	150	706	144	708
Henderson/MLK CSO 处理厂	1.8	7.9	0.9	6.3	23	45	5	16	55	104	31	45

1.3 西点污水处理厂

1.3.1 处理能力与工艺工况

西点污水处理厂建于1965年,1995年被认定为具备二级处理水平,来水包括家庭和商业污水以及西雅图市工业废水(约3.6×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d),1999年被纳入NPDES许可管理。西点污水处理厂设计处理能力见表3<sup>[3]</sup>,工艺工况见图5<sup>[3-4]</sup>。当雨天进水量>114×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d时,合流制溢流污水超越生物处理单元,经消毒处理后与二级处理出水混合再排放。

表3 西点污水处理厂设计处理能力

Tab.3 Design criteria of West Point wastewater treatment plant

项 目	设计标准
最大月平均流量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	81.4
旱天雨季平均流量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	50.3
合流污水瞬时峰值流量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	167
最大月进水 BOD <sub>5</sub> 负荷/(t·d <sup>-1</sup> )	91.2
最大月进水 TSS 负荷/(t·d <sup>-1</sup> )	98.9

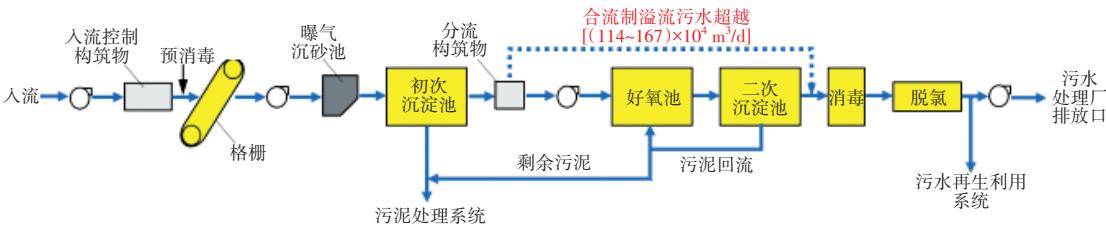


图5 西点污水处理厂工艺工况  
Fig.5 Process flow of West Point wastewater treatment plant

1.3.2 进水与出水水质

根据金县2009年7月—2013年10月监测数据,西点污水处理厂进、出水水质如表4所示<sup>[3]</sup>,为与进水水质进行对比,出水仅列出CBOD<sub>5</sub>、TSS两个参数。

此外,金县分别于2012年1月、4月、7月、10月对西点污水处理厂排放水的急性毒性和慢性毒性进行了测试。结果表明,出水水质达到了急性毒性排放标准,即测试水量100%为排放污水时,相应浓度下暴露后水生生物的存活率中值不小于80%,且各独立测试的存活率均不小于65%;同时,水质也符合慢性毒性标准要求,即空白对照水样与测试样的毒性无显著统计差异,其中,测试样中3.1%为排放污水,其余为未受排放污水污染的受纳水体水,空白对照水样中100%为未受排放污水污染的受纳水体水。

表4 西点污水处理厂进、出水情况

Tab.4 Influent and effluent characteristics of West Point wastewater treatment plant

项目	样品数量/个		进水/(mg·L <sup>-1</sup> )		出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	
	进水	出水	月均值	最大月均值	月均值	最大月均值
BOD <sub>5</sub>	260		193 (62.2 t/d)	270 (76.5 t/d)		
CBOD <sub>5</sub>	1 800	200	165 (53.1 t/d)	227 (66.9 t/d)	14 (5.9 t/d)	27 (15.1 t/d)
TSS	1 800	200	221 (53.1 t/d)	293 (66.9 t/d)	21 (9.8 t/d)	45 (27.8 t/d)

注: 括号内数值为污染物质量。

1.4 受纳水体法定功能与水质基准

1.4.1 水生生物保护功能

西点污水处理厂、Alki CSO 处理厂、Carkeek CSO 处理厂出水排放至 Puget Sound 海湾非凡等级

的水域, Elliott West CSO 处理厂出水排放至 Puget Sound 海湾杰出等级的水域,出水水质需要满足如表 5 所示的具有水生生物保护功能的水质基准<sup>[3]</sup>。Henderson/MLK CSO 处理厂出水排放至 Duwamish 河杰出等级的水域,由于河道受潮汐影响,所具有的水生生物保护功能的水质基准按照杰出等级海水水域基准执行。

表 5 Puget Sound 海湾具有水生生物保护功能的水质基准  
Tab.5 Water quality criteria for marine aquatic life uses in Puget Sound

项 目	非凡等级水域水质基准	杰出等级水域水质基准
温度(最大日值)/℃	13	16
DO(最小日值)/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.0	6.0
浊度	背景值≤50 NTU 时,增值 5 NTU; 背景值>50 NTU 时,增幅 10%	
pH	7.0~8.5 且变化值≤0.2	7.0~8.5 且变化值≤0.5

1.4.2 贝类捕捞功能与娱乐功能

西点污水处理厂、Alki CSO 处理厂、Carkeek CSO 处理厂、Elliott West CSO 处理厂排放口周边水域需具备贝类捕捞功能与海水直接接触类娱乐功能,粪大肠杆菌菌群几何平均值≤14 个/100 mL,且粪大肠杆菌菌群几何平均值>43 个/100 mL 的水质样品数量占比≤10%,或水质样品数量<10 个时占比为 0。

1.4.3 养殖功能与娱乐功能

Henderson/MLK CSO 处理厂出水排放口周边水域需具备水生生物养殖与迁移功能及淡水非直接接触类娱乐功能,粪大肠杆菌菌群几何平均值≤200 个/100 mL,且粪大肠杆菌菌群几何平均值>400 个/100 mL 的水质样品数量占比≤10%,水质样品数量<10 个时占比为 0。

1.4.4 其他功能

受纳水体还应具备野生生物栖息、捕捞、贸易与航运、帆船运动及美学功能。

2 排放标准

2.1 基于技术的排放限值与达标情况

2.1.1 CSO 排放口

作为基于技术的排放限值,联邦 CSO 控制政策要求必须实施 CSO“九项基本控制措施”。“九项基本控制措施”相关文章介绍较多,不再赘述。

2.1.2 CSO 处理厂

CSO 处理厂基于技术的排放限值如表 6 所示<sup>[2]</sup>,所有水质参数均以排放事件为单位进行监测和评价<sup>[5]</sup>。值得注意的是,TSS 去除率包含 CSO 处理厂内的去除量和回流至西点污水处理厂处理获得的去除量;对于 SS,考虑间歇进水、流量变化剧烈的特点,州环保局采用年均值进行评价。

表 6 CSO 处理厂排放限值  
Tab.6 Effluent limits of CSO treatment plant

项 目		计算方式	数值
TSS		月均值	写入报告
		年均值	质量去除率不小于 50%
SS/(mL·L <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		年均值	0.3
pH		最小瞬时值	6.0
		最大瞬时值	9.0
粪大肠杆菌/(个·100 mL <sup>-1</sup> )		月几何平均值	200
总余氯/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Alki CSO 处理厂	最大日均值	0.234
	Carkeek CSO 处理厂		0.49
	Elliott West CSO 处理厂		0.109
	Henderson/MLK CSO 处理厂		0.039
注： 总余氯为基于水质的排放限值。			

根据金县 2009 年 7 月—2013 年 9 月的监测数据,4 座 CSO 处理厂达标情况如下<sup>[3]</sup>:

① Alki CSO 处理厂:粪大肠杆菌、总余氯、pH 排放限值不达标事件共有 9 次。2009 年—2012 年逐年计算,共有 27 次进水事件和 19 次排放事件,各年 TSS 和 SS 排放限值均达标,共减少 25.4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 合流污水直接排放入海;按 4 年平均计算,出水排放量和排放事件次数限值分别为 40.9×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 和 29 次,实际分别为 19.7×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 和 5 次。

② Carkeek CSO 处理厂:粪大肠杆菌、总余氯、pH 排放限值不达标事件共有 5 次。2009 年—2012 年逐年计算,共有 50 次进水事件和 23 次排放事件,各年 TSS 和 SS 排放限值均达标,共减少 6.4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 合流污水直接排放入海;按 4 年平均计算,出水排放量和排放事件次数限值分别为 17.4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 和 10 次,实际分别为 7.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 和 6 次。

③ Elliott West CSO 处理厂:2009 年—2012 年逐年计算,共有 158 次进水事件和 45 次排放事件,

共减少 337×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 合流污水直接排放入河。由于人为和设备故障,粪大肠杆菌、总余氯、pH 排放限值、TSS、SS 不达标事件共有 36 次。

④ Henderson/MLK CSO 处理厂:2009 年—2012 年逐年计算,共有 12 次进水事件和 4 次排放事件,各年 TSS 和 SS 排放限值均达标,共减少 9.1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 合流污水直接排放入河。

2.1.3 西点污水处理厂

西点污水处理厂基于技术的排放限值见表 7<sup>[2]</sup>。

表 7 西点污水处理厂排放限值

Tab.7 Effluent limits of West Point wastewater treatment plant

项 目	计算方式	数值
CBOD <sub>5</sub>	周均值	浓度:25 mg/L;质量:20.3 t/d
	月均值	浓度:40 mg/L;质量:32.5 t/d;削减率:旱季(5月—10月)为 85%,雨季(11月—4月)为 80%
TSS	周均值	浓度:30 mg/L;质量:24.4 t/d
	月均值	浓度:45 mg/L;质量:36.6 t/d;削减率:旱季(5月—10月)为 85%,雨季(11月—4月)为 80%
总余氯/ (mg·L <sup>-1</sup> )	月均值	0.139
	最大日均值	0.364
粪大肠杆 菌/(个·100 mL <sup>-1</sup> )	月几何平均值	200
	周几何平均值	400
pH	最小瞬时值	6.0
	最大瞬时值	9.0

注:总余氯为基于水质标准的排放限值。

按照联邦政府 CSO“九项基本控制措施”要求,金县应最大限度地合流污水送往西点污水处理厂处理,以削减 CSO。超时、超量径流雨水进入污水处理厂会影响 CBOD<sub>5</sub> 与 TSS 浓度削减效果,州环保局根据近 4 年月平均进水浓度分析,提出旱季与雨季浓度削减率分别为 85% 和 80%。2009 年 7 月—2013 年 9 月监测数据表明,西点污水处理厂达到了许可规定的排放限值要求。

2.2 基于水质的排放限值与达标情况

2.2.1 CSO 排放口

华盛顿州要求所有合流制溢流点位均不能影响接纳水体水质标准达标与法定功能,溢流形成的颗粒物沉积还应满足沉积物标准,且不能对生物有不利影响。为此,州环保局对 CSO 制定的标准为

“未经处理的 CSO 排放事件年均不超过 1 次”,金县在每年的 NPDES 许可执行情况总结及在 CSO 长期控制规划修订时,需逐年计算包括该年与前 19 年在内的共 20 年 CSO 次数的平均值,以评价各年、各 CSO 排放口是否达标。如上所述,38 个 CSO 排放口已有 16 个达到“年均不超过 1 次”的标准。

2.2.2 混合区标准

按照 EPA 的有关政策,在水体具有稀释能力、点源排放口排放标准允许超出接纳水体水质标准时,要求排放污水和接纳水体实现快速和完全的混合,在一个体积有限的混合区内达到水体水质标准,即在混合区范围内,可以不达到接纳水体水质标准,只满足水体的法定功能即可,但在混合区的外边界处及其外围均应达标。对于排水综合毒性(Whole Effluent Toxicity, WET)指标,混合区可分为急性(毒性)混合区和慢性(毒性)混合区。

华盛顿州环保局要求采用模型方法分析排放污水与接纳水体在一定水力临界条件下的混合区边界处的稀释因子、水质标准达标情况及混合区范围。稀释因子表示污水量与接纳水体水量的混合量,如稀释因子为 430,表示边界处排放污水体积占 1/430,接纳水体体积占 429/430。混合区范围应尽量小,金县要求混合区宽度不得超过河道总宽度的 25%,具备条件时可通过在排放口增设扩散器等方式,使混合更迅速和更充分,进而使混合区尺寸更小。

混合区的水质标准包括水生生物标准和人体健康标准,前者可应用在急性和慢性混合区边界上,后者则仅用于慢性混合区边界上。急性、慢性混合区的水质标准根据毒性水质基准与毒性阈值确定。对于急性毒性阈值,可根据受试生物经过 48 h 或 96 h 短期暴露后的存活率确定;对于慢性毒性阈值,可根据受试生物经过 7 d 较长时间暴露后的存活率与繁殖发育情况确定。根据毒性阈值,可进一步计算得到急性毒性单位 TU<sub>a</sub> 和慢性毒性单位 TU<sub>c</sub>,TU 值越大,表示毒性越强。EPA 建议将 0.3 TU<sub>a</sub> 和 1.0 TU<sub>c</sub> 分别作为接纳水体的急性和慢性毒性水质基准,个别地区直接采用该值作为接纳水体的毒性水质标准。例如,阿拉斯加州要求慢性混合区边界处和污水排放口处(若不存在混合区)的毒性水质标准为 1.0 TU<sub>c</sub>;明尼苏达州某部落要求若存在混合区,急性和慢性混合区边界处的毒性水质标准

分别为 $0.3\text{ TU}_a$ 和 $1.0\text{ TU}_c$ ,若无混合区,污水排放口处的急性和慢性毒性标准值分别为 $1.0\text{ TU}_a$ 和 $1.0\text{ TU}_c$ 。<sup>[6]</sup>

综上,确定受纳水体的混合区稀释因子、水质标准及混合区大小后,便可按照受纳水体水质基准制定相应的污水排放限值,即基于水质的排放限值。NPDES许可(2015年—2020年)中给出了西点污水厂和4个CSO处理厂的混合区范围和稀释因子,具体如表8所示<sup>[2]</sup>。根据这些数据及所述受纳水体水质基准值,州环保局对各处理厂排放限值进行了校核,表明受纳水体溶解氧、pH、粪大肠杆菌、浊度、有毒物质(氨、氯化物、金属及其他优先控制污染物)及温度等水质基准达标<sup>[3]</sup>。

表8 各排放口的混合区范围与稀释因子

Tab.8 Dilution zone sizes and dilution factors for permitted outfalls

项 目	混合区半		稀释因子			
	径/英尺		水生生物		人体健康	
	慢性毒性	急性毒性	慢性毒性	急性毒性	致癌物质	非致癌物质
西点污水处理厂	430	43	188	28	324	324
Alki CSO处理厂	343	34	99	20		
Carkeek CSO处理厂	395	39.5	104	75		
Elliott West CSO处理厂	260	26	9.7	8.4		
Henderson/MLK CSO处理厂	312	31.2	10.3	1.9		

注: 1英尺=0.30 m。

### 2.2.3 定量、定性基准及反恶化要求

为保护受纳水体水生生物与娱乐功能,华盛顿州确定了定量的化学、物理水质基准,根据联邦政府的相关政策,确定了水体中总的可回收重金属水质基准。为保护人体健康,华盛顿州采用了EPA发布的91个定量的水质基准,以避免通过食用鱼类、贝类或饮用受污染的地表水而使人体暴露于与癌症等疾病有关的污染物质中。此外,还有关于放射类物质的基准和标准。

华盛顿州的限制还包含有毒或放射性污染物的污水排放行为,并通过定性的基准防止排放行为对受纳水体造成如下潜在危害:①对水体法定功能有不利影响;②对生物有急性或慢性毒性作用;③破坏美学价值;④对人体健康有不利影响。

华盛顿州还制定反恶化政策使水体不再因人

为污染而进一步恶化,具体包括如下规定:①对于所有地表水体,要维持和保护它们现有的法定功能以及为保护这些功能所必须达到的水质水平;②即使水体的现有水质有利于水生生物繁殖并优于人类在水中、水上娱乐所必需的水平,也要维持和保护现有水质,不可使之恶化,对水质的负面影响也只有在绝对必需的情况下且满足一定的条件才允许发生;③国家和州一级的公园和野生动物栖息地被认为是重要的国家资源,要维持和保护这里的高水平水质水体以及其他有重要休闲和生态意义的水体,不得使之恶化。

## 3 启示与建议

### 3.1 启示

① “污水处理厂-管网调蓄-CSO处理厂”是CSO控制的三道关卡。污水处理厂是CSO控制的首道关卡,道理非常简单,二级处理对合流污水的净化效果最好,但前提是污水处理厂具备雨天处理合流污水的能力。如前所述,根据西点污水处理厂厂内合流制溢流污水设计超越流量( $114\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ )和旱天平均流量( $50.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ )计算,其截流倍数仅为1.3,比国内规范要求的截流倍数(2~5)还小,但真正做到截流倍数范围内合流污水的二级处理更为重要。此外,西点污水处理厂还具备处理合流制溢流污水的较大空间(设计超越流量 $114\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 至瞬时峰值流量 $167\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ )。

从CSO处理厂的运行工况可以看出,在雨后和降雨过程中,只要下游管网能力出现富余,CSO处理厂或调蓄隧道内的合流制溢流污水均会优先回流至管网送往污水处理厂处理,实现污水处理厂二级处理能力的充分利用。而在Alki和Carkeek CSO处理厂的排放限值中,给出了出水排放体积和次数的要求,也表明应首先利用CSO处理厂具有的调蓄空间,迫不得已才会排放。

从CSO处理厂的运行工况还可以看出,管网中泵站、分流/调流/截流构筑物等关键瓶颈点的能力决定了调蓄隧道的启动与否,而隧道调蓄能力决定了CSO处理厂是否启动。这首先说明了管网中的这些过流能力的“瓶颈点”至关重要,其次说明了充分利用“厂-网”调蓄能力的重要性,CSO处理厂的一级处理能力仅是CSO控制的最后一关。

② CSO污水处理技术与控制标准应与CSO

特征相匹配。强降雨引发的合流制溢流最突出的特征就是流量和水质变化的剧烈性,这与污水处理厂旱天污水进水流量、水质的相对稳定性明显不同,再加上雨水的稀释作用,这些足以影响污水处理厂的二级处理效果,也决定了污水处理厂超越处理合流制溢流污水及CSO处理厂出水水质的不稳定性。基于此,西点污水处理厂根据实际运行经验,分别给出了雨季和旱季有区别性的排放标准,从水质指标的考核方式上,也采用月均值、周均值这种具有弹性的方式。

对于CSO处理厂,进水流量、水质不仅发生剧烈变化,而且还是间歇性的,1年进水次数多的百余次,少的几次,因此,处理工艺应能适应剧烈变化的水力负荷,4座CSO处理厂均采用了适应性较强的“一级沉淀+消毒”工艺,水质考核同样采用月均值、年均值,并且以“排放事件”为单位进行分析计算。此外,水质指标的选择也与处理工艺相匹配,以TSS、SS、粪大肠杆菌为主。

③ 受纳水体环境质量是CSO控制效果的最终判别标准。美国污水排放标准分为基于技术的排放限值和基于水质的排放限值,后者是按受纳水体环境质量标准倒推确定的,往往严于基于技术的排放限值,即水质控制指标的选择和限值的确定应根据受纳水体法定功能及相应的水质基准确定,并非越多越好、越严越好,从西点污水处理厂和4座CSO处理厂的排放限值及其制定方法便可以看出这一特点。此外,从“混合区”政策还可以看出,当受纳水体稀释能力较大时,还可以在一定的空间范围内给污水排放适当的“豁免权”,也值得我国借鉴。

### 3.2 建议

综上可知,结合我国排水管网与城市水体建设和管理的现状,借鉴美国金县西点污水处理厂流域的CSO控制经验,提出如下建议:

① 摸清“厂-网”本底条件,治理外水入侵等管网病害,评估管网过流能力和调蓄能力,识别关键“瓶颈点”;恢复管网“截流倍数”,调整污水处理厂的运行策略,确保污水厂的雨天处理能力。

② 对CSO水量、频次、污染特征进行充分评估,总结CSO控制项目建设管理方面的经验教训,评估“费用-效果”关系,尽快出台控制标准、技术工艺、运行工况等方面的政策法规和技术标准。

### 参考文献:

- [1] 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).
- [2] King County Wastewater Treatment Division. National Pollutant Discharge Elimination System: Waste Discharge Permit No. WA0029181 [R]. Washington: Washington State Department of Ecology, 2014.
- [3] King County Wastewater Treatment Division. Fact Sheet for NPDES Permit WA0029181: West Point Wastewater Treatment Plant and Combined Sewer Overflow System [R]. Washington: Washington State Department of Ecology, 2014.
- [4] King County Wastewater Treatment Division. West Point Treatment Plant and CSO System Application for Renewal of the NPDES Permit (WA002918-1) [R]. King County: Department of Natural Resources and Parks Wastewater Treatment Division, 2019.
- [5] 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, 2019,35(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, 35(13): 117-121 (in Chinese).
- [6] 王宏洋,赵鑫,曲超,等. 美国排水综合毒性在有毒污染物排放控制中的应用方法与启示[J]. 环境工程技术学报, 2016,6(6): 636-644.  
WANG Hongyang, ZHAO Xin, QU Chao, *et al.* Application and enlightenment of whole effluent toxicity for toxics control in United States [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(6): 636-644 (in Chinese).

作者简介:王文亮(1984-),男,山东临沂人,博士,副教授,研究方向为城市水文水力模型、内涝治理与CSO控制。

E-mail:wangwenliang@bucea.edu.cn

收稿日期:2022-01-21

修回日期:2022-01-26

(编辑:丁彩娟)