

流域治理视角下合流制雨季超量混合污水治理策略

刘智晓¹, 刘龙志², 王浩正², 王海玲³, 刘文欣⁴

(1. 北京首创股份有限公司, 北京 100044; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 3. 昆明滇池投资有限责任公司, 云南 昆明 650000; 4. 爱荷华自然资源部环境保护局, 美国)

摘要: 传统集中式城镇卫生系统在改善水环境的同时,也凸显了集中管网系统在雨季对汇水区域雨水快速收集、快速下泄导致的污水厂进水短期水量大幅提高的水力负荷冲击问题,而我国目前活性污泥系统工艺设计及运行模式无法应对雨季峰值流量,导致管网沿程溢流或厂前溢流或者超越,严重污染了城市河道、受纳水体。在分析集中式城镇排水系统应对峰值流量系统性欠缺的基础上,结合雨季峰值流量特性,总结了欧美发达国家在雨季超量混合流量处理方面主要的技术路线、解决方案和运行控制模式,并就我国流域治理大背景下实施雨季峰值流量处理在立法及排放标准方面提出了建议。

关键词: 合流制溢流污染控制; 雨季超量污水处理; 化学强化一级处理; 调蓄池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)08-0020-10

Watershed Management and Control Strategies for Urban Combined Sewer Overflows during Peak Wet Weather Flow Conditions

LIU Zhi-xiao¹, LIU Long-zhi², WANG Hao-zheng², WANG Hai-ling³,
LIU Wen-xin⁴

(1. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 3. Kunming Dianchi Investment Co. Ltd., Kunming 650000, China; 4. Environmental Service Division, Iowa Department of Natural Resources, USA)

Abstract: While the traditional urban sanitary sewers system collects wastewater and improves the water environment, it also reveals the hydraulic capacity shortage of the WWTPs and their insufficiency in handling peak wet weather flow problems caused by rapid increase of inflow due to high intensity stormwater collected from the catchment area and the rapid transfer of stormwater to the WWTPs in the centralized urban drainage system. However, the current wastewater treatment design and operation in our country, for example activated sludge design, does not address peak wet weather flow condition. This causes sanitary sewer collection system overflow and bypass before wastewater reaches wastewater treatment plants and internal bypass of wastewater design processes within the WWTP. The overflow and bypass have significantly polluted our rivers, receiving streams, and surface waters. Evaluating the systematic capacity shortage of the centralized urban collection systems in dealing with peak wet weather flow and analyzing the characteristics of the peak wet weather flow pattern in our country, this paper studied the main technical framework, solutions and operational control model of dealing with peak wet weather flows in the developed countries in Europe and North America. This paper has thus provided

recommendations to policy making and legislation as well as development of effluent discharge standards for peak wet weather flow treatment, serving as a next phase in watershed management in China.

Key words: CSO pollution control; peak wet weather flow treatment; CEPT; storage tank

流域水环境质量恶化、湖库水体富营养化、城镇黑臭水体是当今世界范围内水环境质量改善面临的共同挑战,造成水质恶化的外源驱动性重要因素就是人类活动加剧了污染物尤其是氮、磷等物质由固相向液相的转移、释放过程。因此,改善水环境质量的技术本质及措施就是要设法采用工程技术和运行控制措施减缓、削减或阻断氮、磷营养物向水体的转移与释放。集中式城镇排水系统由于其对雨季流量的大收集、大输送、快转输等特性,下游污水厂往往不具备超量混合污水处理能力,造成沿程溢流污染、厂前溢流或者厂内超越,给城市水系及接纳水体造成了短时冲击性污染,这是国内城市水体黑臭的直接原因,也是我国当今进行海绵城市建设和流域治理需迫切解决的系统性难题。

1 现代集中式城镇排水系统的系统性欠缺

现代城镇污水系统主要是集中式排水系统,包括合流制与分流制,但是我国很多城市现实管网情况复杂,多种管网建设模式并存,如截流式合流制等。传统集中式城镇污水系统在解决人类集聚区环境卫生、减缓水体污染等方面起到了重要作用。但是随着城市规模的不断扩大及人口密度的过度集中,这种大收集、集中处理的工业化集中式排水系统理念,注定成为水社会循环和水自然链条中最脆弱的环节。集中式城镇排水系统结构及风险点见图1。

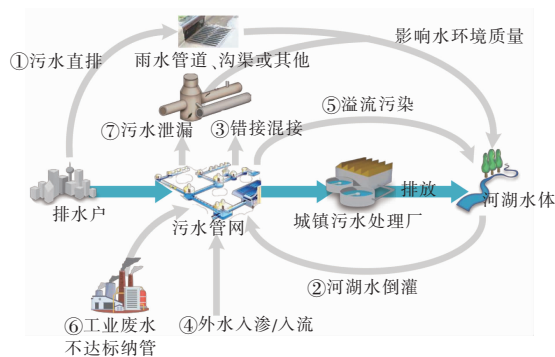


图1 集中式城镇排水系统结构及风险点示意

Fig.1 Sketch of structure and risk point of centralized urban drainage system

从图1可以看出,现代集中式排水系统从源头

收集、过程输送至末端处理及接纳水体排放,任何一个环节出现设施损坏或突发性失效,都将可能成为水环境的重大污染源,如转输过程的泄漏、处理过程的失效等都会造成污染物的外溢或急速释放。此外,在转输过程中外水的入渗和入流(Inflow & Infiltration,简称I/I)会稀释污染物导致浓度的降低和处理设施进水流量的大幅增加,提高了过程输送及污水厂处理成本。

从排水系统整体结构性、系统性角度来看,以普遍的截流式合流制系统为例,一方面我国合流制管网应对雨季流量设计标准(如截流倍数)偏低,很多城市实际截流倍数不足1.0^[1],大量合流混合污水不能得到有效收集截流;另一方面,国内污水厂按旱季流量进行设计,不具备雨季超量混合污水的处理能力,即便提高了截流倍数,污水厂也会在雨季成为限制排水系统发挥整体效能的“卡脖”环节,势必会导致雨季管网系统沿途出现合流制溢流(CSO)或在厂前溢流,因此,从城市水循环角度看,没有末端污水厂处理能力进行匹配的这种截污行为实际上是加速了污染物向水体的转移释放过程,CSO已被证明是新型微量有机污染物向接纳水体转移的主要途径之一^[2-3]。简而言之,上述问题可归结为集中式排水系统“源头-中途-末端”工程技术措施缺乏系统性考虑,“小-中-大”排水系统缺乏系统规划与能力衔接,这种典型的系统性、结构性问题也必然导致传统集中式排水系统在面对极端性气候条件时系统“弹性”不足^[4],导致城市排水系统安全问题和水环境问题频发。

从现实情况看,管网系统建设和运维环节中存在诸多问题又进一步加剧了集中式排水系统存在的系统性、结构性问题。仍以截流式合流制系统为例,很多城市排水管网由于施工质量差、后期维护管理不到位,导致雨污管网、河网混接错接严重;河水倒灌、地下水入侵、雨水进入污水系统等导致各类外水严重挤占污水管道空间,有些城市外水的入流入渗比例达到16%~55%^[5],截污干管多数情况下是满管运行,这种情况下截流倍数就已经失去了本来应有的工程意义,“满管”运行也削弱了管网对污水的

输送能力,也严重稀释了污染物浓度。有研究显示,污水中平均约有55%、33%、30%的COD、N、P未经任何有效处理而在中途泄漏或在管道内被去除^[6]。在满管流条件下,管内污水流速偏低,导致污水中颗粒性有机物发生沉积;进一步,满管运行导致管网在雨季失去在线存储能力,而国外案例研究表明,管网I/I率较高直接与CSO量呈正相关^[7],即入渗流量升高还会直接影响CSO。对于地下水位低的城市,存在管内污水的外泄,对德国莱比锡市的合流制排水系统监测研究显示,研究区域约9.9%~13%的旱季流量直接外泄到地下水,对地下水造成污染^[3]。综上,应该以系统性思维评估管网自身问题给整个排水系统带来的全局性影响。

2 传统集中式城镇排水系统改进思路

基于上述分析,从流域治理视角看,现代集中式城镇卫生系统整个链条中存在诸多风险环节,加之这种“收集-转输-处理-排放(或回用)”水的社会循环过程都是以高昂的投资和运营成本作为支撑,从环境风险及经济性角度而言,如不解决上述问题,只是承担流域范围内径流量的快速转移,传统集中式排水系统是不可持续的^[8],为此,需要更新思维,亟需构建以可靠性、弹性和可持续性为基本特征面向未来的现代城镇排水系统^[9],传统快速收集、快速释放的城镇排水系统在流域治理理念下各要素面临结构性、系统性重构^[10]。

具体来说,解决未来水环境问题,需要系统性思维,以流域为尺度,在流域“点-线-面-体”不同尺度上,从“量”“质”两个维度系统思维,以可持续性为基准原则,进行顶层规划、系统设计,从水社会循环链条各个环节入手,量化水质-污染源-排水系统之间的关系,从而科学构建面向未来实现可靠性、弹性与可持续性相统一的城镇排水系统。具体工程技术措施方面,着眼于污染物在集中式城镇排水系统中产生、输送与转化轨迹,需要对“管网-泵站-过程调蓄(处理)设施-污水厂”沿程各要素匹配性进行系统性评估,需要从“用户控制-源头分离-收集管网完善-污水厂处理及资源回收-排放过程控制”各个环节进行系统性规划。通过工程技术措施或管理手段,有效规划与实施排水管网的入渗入流、施工排水控制,削减污染物在输送过程中的渗漏或降解及通过各种排口向水体的转移,使污水厂成为污染物最终的接纳、处理或资源回收场所。

基于上述过程及原理分析,除了采用LID等绿色基础设施源头对雨水进行削峰和削减污染物浓度,中途构建分散式调蓄设施,管网输送环节采取工程技术措施修复漏损管道、混接错接进一步削减入渗流量外,应该尽最大可能充分利用管网系统的在线调蓄,并在末端提高污水厂雨季处理能力。

3 雨季污水处理厂流量特性

污水厂进水流量通常包括污水基础流量(Base Wastewater Flow,简称BWF)和入渗流量及雨水入流量。美国EPA相关报告中将I/I具体分为入流入渗量(Rainfall-derived infiltration and inflow, RDII)和地下水渗透量(Groundwater Infiltration, GWI),也就是说雨天污水厂进流分成三部分,即BWF、GWI和RDII,其中BWF主要指来自住宅区、商业、工业和政府机构的生活污水和生产废水,BWF与GWI共同组成了旱季流量(Dry Weather Flow, DWF)。而研究显示,GWI与年降水量也有显著的线性关系^[11]。以美国温斯顿塞勒姆市Elledge污水厂2010年9月30日降雨其上游管线流量变化曲线为例(见图2,图中1 gpm = 0.23 m³/h, 1 in = 2.54 cm),说明雨季合流制系统进水流量的组成及降雨影响。

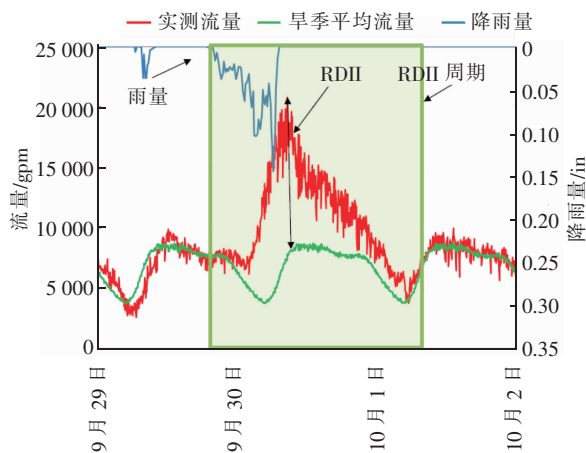


图2 美国Elledge污水厂上游管线在2010年9月30日降雨时的流量曲线

Fig. 2 Hydrograph decomposition for flow meter located upstream of the Elledge WWTP during the September 30, 2010 storm event

从图2可看出,降雨情形下,合流制管网雨季进水峰值流量受降雨影响较明显,存在显著的雨水效应,也就是RDII周期,这期间污水厂承受短期的冲击性流量,流量峰值系数达到2.66^[12]。通常,欧美污水厂雨季设计流量是旱季的3~8倍^[13]。

4 雨季超量混合污水治理策略

4.1 源头减量

近些年海绵城市建设尤其是源头 LID、蓝-绿基础设施(BGI)实践表明,LID、BGI 等措施可以就地削减区块峰值流量 20%~90%,展现了源头设施在雨季通过源头控制和滞留对排水系统削峰、错峰方面的作用^[14]。除此以外,BGI 等措施与灰色设施的结合还能削减污水处理过程温室气体的排放并降低污水厂的运行能耗^[15]。集中式排水系统尤其是合流制排水系统,提升对污染物的收集与去除效率,重要的措施是逐步控制管网的 L/I、清污分流,降低外水的比例,降低管道运行液位,进一步提升管网的流速和污染物的浓度,提高脱氮除磷效率,降低碳源、除磷等药剂的使用。

4.2 中途过程控制及径流分担

对于雨季峰值流量的管控,中途径流分担机制非常关键,中途径流分担措施之一主要是让下水道系统腾出空间,发挥管线的在线存储能力,或通过综合经济技术比较构建经济合理、规模适度的集中式或分散式调蓄设施^[16]。

中途调蓄可以建设在线或离线调蓄设施(调蓄池、深隧等),也可利用管网在线调蓄。调蓄池或者具有处理功能的高效调蓄处理池(Retention Treatment Basin,简称 RTB)在北美、欧洲等发达国家得到比较广泛的应用,不仅可以在雨季峰值流量期间进行调蓄,减少 CSO 频次或溢流总量,而且将处理功能与调蓄功能相结合,可以有效削减污染物。加拿大 Stantec 公司研究发现,RTB 在上升流速达到 11 m/h 时,通过投加聚合物经过物化处理对 SS 的去除率可达到 80%。我国近些年也对调蓄池进行了功能拓展和技术革新,如将调蓄功能与生物处理功能相结合,不但削减了 SS、TP,还进一步削减了 BOD₅ 和氨氮,可以原位实现 CSO 或者初雨的处理就地排放,而无需雨后泵送到污水厂进行处理,实际上这也是我国很多城镇污水厂在当前尚不具备雨季峰值流量处理能力时的一种中途截流就地处理模式的创新。管网在线调蓄通过欧美多年的实践应用已被证明是最经济的方式之一,可以有效降低 CSO 和污水厂前溢流^[17]。但国内很多地区下游管线满管运行,导致管内流速降低的同时,也失去了雨季峰值流量的在线存储空间,因此通过削减入渗流量、降低外水进入,控制城市外河道运行水位等综合措施

的实施进一步降低污水管网运行液位控制,可以为雨季峰值流量腾出在线存贮空间,以“空间”换“时间”,这是发挥管线调蓄能力的基础。此外,对于径流的过程控制,重要控制点是通过对不同汇水区域的管网系统采用分布式流量控制^[18],控制上游管线的流量向下游主干管网的输送速度,从而对污水厂流量起到削峰作用。该方式在欧美发达国家被证明是经济有效的办法,例如美国南本德市基于大量的监测数据,对管网关键位置的阀门进行动态控制,当污水厂达到最大处理能力或管网达到最大输送能力时才允许溢流,从而实现了管网在线存贮空间的充分利用,减少了灰色设施的投资^[19]。

4.3 末端采用污水厂雨季峰值流量处理

源头与中途措施的结合,基本目标是最大程度上削减外水进入市政排水系统。在大部分城市,现有的排水系统实际上面临系统重构,提高源头削减、过程调蓄与错峰削峰的流量控制能力。但是,对于超标雨水,上述新型排水系统布局只是从有限的空间和时间上减缓了峰值流量到达污水厂的时间,最终雨季峰值流量依然是污水厂面临的技术和运行难题,因此,如何构建污水厂的峰值处理能力,是我国多数城市未来改善水环境质量的“迈不过去的坎”,笔者结合国外成功案例及自身实践,总结并提出如下建议和对策。

4.3.1 关于污水厂处理能力的确定

在英美发达国家,不论排水体制采用合流制还是分流制,污水厂处理能力表征和确定与我国标准规范完全不同。如美国明尼苏达州根据不同情况确定了不同的污水厂设计流量指标:旱季月平均流量(ADW)、雨季月平均流量(AWW)、雨季小时峰值流量(PHWW)和雨季瞬间峰值流量(PIWW)等,且如果 PHWW/ADW > 3,需要考虑进水流量调蓄或处理工序的均衡措施。污水厂除了处理旱季流量,还同时预留雨季流量处理的能力,以美国北卡罗来纳州 Muddy, Elledge, South Fork Basins 三座污水厂实测值为例,年、月、日、时各自对应的峰值系数汇总见表 1^[12]。可以看出,美国污水厂处理能力具有很大的弹性和空间。相反,我国污水厂处理规模的确定,并没有考虑雨季峰值流量的处理,而仅仅是按照分流制水量估算原则考虑了综合生活污水量变化系数 K,跟发达国家相比,我国《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2016 年版)给定的 K 值偏低;其次,污

水厂构筑物设计流量并没有考虑雨季峰值流量的处理,导致雨季超出污水厂设计规模的混合污水在厂前或者中途管线形成 CSO,这是我国黑臭水体的直接原因。与此同时,国内近些年水体黑臭治理及海绵城市建设中很多城市实施了沿河截污,并提高了截流倍数,但是污水厂的处理能力却没有与之匹配,目前污水厂对峰值流量处理的缺失,已经成为新形势下改善水环境质量的瓶颈。

表 1 美国 Elledge, Muddy, South Fork Basins 三座污水厂

峰值系数

Tab. 1 Peaking factors of Elledge, Muddy, South Fork Basins WWTP in USA

项 目	年均值峰值系数	月均值峰值系数	最高日峰值系数	最大时峰值系数
Elledge 污水厂	1.14	1.22	2.67	3.27
Muddy 污水厂	1.18	1.26	3.01	3.53
South Fork Basins 污水厂	1.14	1.26	2.67	3.37

4.3.2 雨季峰值流量处理措施

① 物理-化学处理

物理-化学处理工艺在欧美污水厂处理雨季合流制峰值流量中得到广泛应用并有多年成熟经验,近些年我国个别城市如上海、昆明也开始了采用化学强化一级处理 (CEPT) 工艺处理合流制混合污水的实践。生产性试验表明,在优化药剂选型配比及工艺高效运行情况下,CEPT 效率可达到“COD 为 50%~86%、BOD₅ 为 50%~70%、SS 为 60%~90%、TP 为 70%~90%”,但对 TN、NH₃-N 去除极其有限。通常做法是旱季流量全部经过生化二级处理工艺,雨季峰值流量则通过与二级生物处理段并行的辅助处理设施进行处理^[20](见图 3),主要的处理工艺有 CEPT、高效澄清池等,近些年一些专有工艺如高效沉淀池 (威立雅 Actiflo[®]、苏伊士 DensaDeg[®])、Aqua-Aerobic Systems 公司高速滤池 (AquaPrime[™])、磁混凝沉淀 (CoMag[®]) 以及压缩球过滤 (CMF Media) 等。一些常用峰值流量处理工艺设计参数^[21]见图 4,上述工艺可以有效去除部分 SS、BOD₅ 和 TP 等,加载絮凝工艺甚至对 CSO 中疏水性有机污染物的去除率可达到 50%~80%^[20,22],未来“物理-化学处理”工艺将继续向集约化、高效、与生化工艺相结合的方向发展。

需要进一步说明的是,单独建设 CEPT 工艺单元或者峰值流量过滤单元容易导致投资过大和旱季

设备闲置问题,因此,设计中可以考虑这些设施实现旱季雨季“双重应用模式”,旱季用于三级深度处理,雨季用于峰值流量处理,可以分别用于改善出水水质或降低能耗,运行灵活,设计和运行模式见图 5。美国 Aqua-Aerobic Systems 公司从 2012 年就开始将 Pile cloth 滤池两用于 CSO 和污水厂三级深度处理, Tomahawk Creek WWTP 将其用于初级过滤,也取得了很好的效果,这为提高这些设施的运行灵活性和运行效率提供了重要范例。

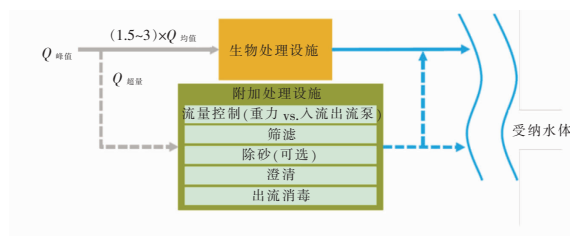


图 3 用于雨季峰值流量处理的设施

Fig. 3 Auxiliary treatment unit for peak wet weather flow treatment

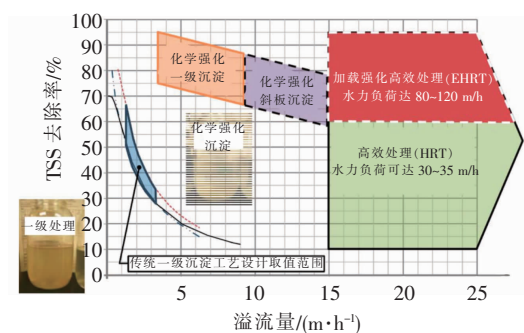


图 4 用于峰值流量处理的高效澄清工艺设计参数选择图谱

Fig. 4 Enhanced clarification process design parameter selection map for peak flow treatment

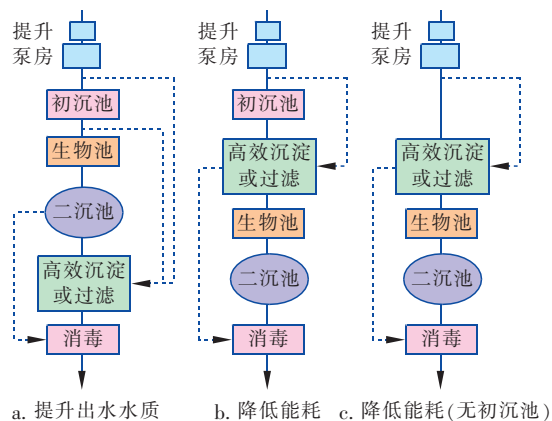


图 5 高效沉淀或高效过滤工艺旱季-雨季“双重应用”

Fig. 5 Dual-use auxiliary facilities of HRC or HRF process during dry and wet weather

② 分点进水(Step-feed)工艺

Step-feed 工艺独特的多点进水特性使其拥有了天然的应对峰值流量的优势,实践证明,在雨季采用分点进水工艺可以大幅度提高生化工艺的处理能力,分点进水工艺不但可以通过生物池沿程多点配水方式实现雨季峰值流量的提升,而且避免了传统工艺生物池首端单点进水导致峰值流量期间因二沉池固体负荷陡升可能引发大量活性污泥的溢出。美国在这方面有非常多的案例和成功经验^[23],例如俄亥俄州 Akron 市再生水厂通过采用 Step-feed 工艺,并通过对二沉池进行水力性能改进,雨季峰值流量期间二沉池水力负荷达到了 3 m/h,处理能力由

$41.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升到 $97.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,同时出水 BOD_5 、SS、氨氮、TP 等指标达到了当地的环保排放标准^[24]。由于分点进水效应,使得生化池前端可以储存较高的 MLSS,雨季模式,在生化系统对 MLSS 总保有量不变甚至提高的情况下,可以降低二沉池进水 MLSS 和固体负荷率,进而可有效提升二沉池水力负荷。纽约 Wards Island 污水厂干湿两季不同运行模式下 MLSS 在反应池各区段的分配及污泥总量见表 2,并以该厂采用分点进水工艺处理雨季峰值流量示范项目为例,说明采用分点进水工艺如何在旱季和雨季切换两种不同的运行模式,具体如图 6 所示。

表 2 Wards Island 污水厂干湿两季生物池各段 MLSS 及污泥量分布

Tab. 2 MLSS and biomass distribution of each pass of the bioreactor during wet and dry weather in Wards Island WWTTP

项 目	旱季			雨季		
	峰值流量占比/%	MLSS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	固体存量/lb	峰值流量占比/%	MLSS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	固体存量/lb
A 段	20	5 400	50 300	5	7 300	68 700
B 段	40	3 800	35 300	30	4 700	44 000
C 段	30	2 700	25 300	25	3 000	28 300
D 段	10	2 600	24 100	40	1 800	16 700

注: 1 lb=0.454 kg。

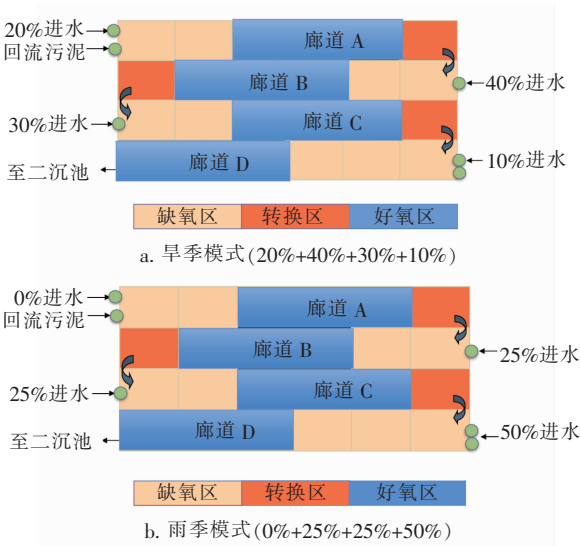


图 6 纽约 Wards Island 污水厂干湿两季生物池运行模式切换示意

Fig. 6 Operation mode switching of bioreactor during dry and wet weather of Wards Island WWTTP

分点进水工艺用于雨季峰值流量的处理在发达国家得到重视。例如,日本的“3W”法本质上也是分点进水工艺,“3W”在日本用于污水厂雨季流量的处理,雨季处理能力为 $3Q$ (Q 为旱季日均流量),

其中 $1Q$ 通过生物池完整处理过程,其余 $2Q$ 则从生物池后端接入。此外,雨季 Step-feed 工艺选择在末端进水就实现了接触-稳定工艺的运行模式,也是欧美污水厂处理雨季峰值流量常用的运行方式。分点进水工艺主要的技术要点是基于不同季节水温 and 水量变化,如何进行进水点的选择和水量的分配,在获取构筑物最大去除能力和高效去除污染物之间找到平衡。

③ 侧流活性污泥工艺

侧流活性污泥工艺在丹麦和瑞典等北欧国家具有比较多的应用案例,侧流活性污泥工艺集合了吸附-再生工艺、Step-feed 及活性污泥发酵工艺的各自技术优势,不但可以实现雨季峰值流量处理模式,而且侧流活性污泥池在雨季存储了大量活性污泥,还能进一步通过硝化、反硝化和厌氧发酵,实现低 C/N 比污水的强化脱氮除磷,更加适合我国国情。侧流活性污泥工艺运行方式灵活,旱季模式和雨季模式切换方便,旱季可以强化脱氮除磷,雨季可以作为活性污泥存储,实现峰值流量期间高浓度活性污泥在侧流 ARP 池的“离线”存储(见图 7),雨季峰值流量期间可以有效降低二沉池固体负荷,提升处理

能力,同时还能通过“主流-侧流”这种“主-辅”反应器联合模式强化脱氮除磷。根据实际项目经验,侧流活性污泥工艺利用存量设施并保持原排放标准情况下,在雨季可以进一步提升 30%~60% 的处理能力(个别项目处理能力提升达 100%),而无需新增曝气池池容,只需要对已有生物池池容进行功能划分和管道的重构。美国劳伦斯市 Wakarusa 再生水厂创新性地将 3 段式氧化沟池型与侧流活性污泥发酵(S2EBPR)相结合,实现了雨季峰值流量 3Q(Q 为旱季平均流量)的处理能力^[25],无需过滤和化学除磷,实现出水 TP < 0.2 mg/L、NO₃⁻-N < 8 mg/L,侧流活性污泥工艺与传统活性污泥工艺的结合彰显了未来应对雨季超量混合污水的弹性与稳定性。

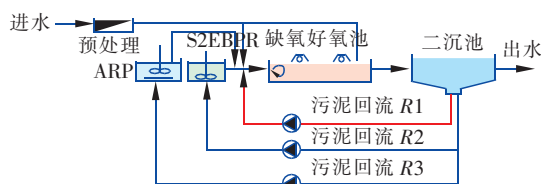


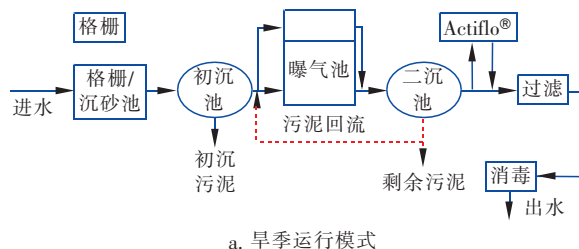
图7 侧流活性污泥工艺应对峰值流量运行模式

Fig. 7 Operation mode of side-stream activated sludge in wet weather

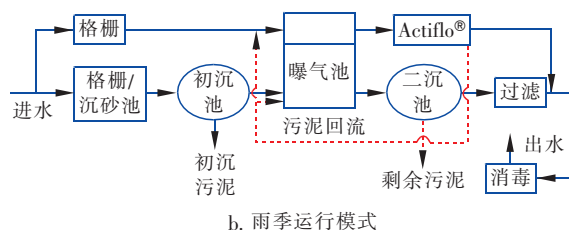
④ 活性污泥快速生物吸附-高效澄清工艺

活性污泥生物吸附-分离实际上是高负荷活性污泥法与高效固液分离技术的融合,目前商业化的工艺包如威立雅的 Actiflo[®]、BioMag[™]等。威立雅的 Actiflo[®]处理技术的优势是快速实现对 SS 的高效去除,对 BOD₅ 也有一定的去除效果,如果在此基础上将一部分活性污泥引入峰值流量处理设施,可以利用活性污泥快速吸附与生物降解功能,进一步提升对 SS、BOD₅ 的去除效率,是生化过程与高效物化分离技术的组合,其技术优势就是雨季峰值流量可以实现短 HRT 下较好的活性污泥生物处理效果(BOD₅ 去除率 ≥ 85%、SS 去除率为 90%~98%)。活性污泥吸附-高效分离工艺在美国已经有多个项目在建设和运行,具体工艺设计有不同的实现方式,不会导致旱季主体处理构筑物能力过度闲置。以美国 CH2M HILL 公司完成的 Creek 污水厂雨季能力提升项目为例,Actiflo[®]实现了“一池两用”(见图 8),雨季峰值流量一部分以 Setp-feed 模式进入生物接触池(停留时间为 28 min,MLSS 为 700~1 500 mg/L),然后泥水混合液至 BioActiflo[®]进行泥水分离,雨季模式下二沉池出水直接进入滤池;旱季切换

运行模式,生物吸附池作为生物池一部分,流出至二沉池-Actiflo[®],此时 Actiflo[®]作为三级深度处理的物理化学过程,没有活性污泥分离作用。该项目 2018 年进入调试,三个月的运行数据表明该工艺对 BOD₅ 的平均去除率达到 90.5%。



a. 旱季运行模式



b. 雨季运行模式

图8 高负荷生物吸附-分离工艺在旱季和雨季的运行模式切换

Fig. 8 High-load biosorption-separation process switching between dry and wet weather

4.4 厂-网联联控技术应对峰值流量

应对城市雨季峰值流量,仅靠灰色基础设施(调蓄池等)不仅投资大,运行成本也不经济,同时要发挥硬件设施之间的协同联动性。如何发挥排水管网、排水设施与末端污水厂之间的联动,20 世纪 90 年代开始,美国、德国、丹麦等国家在该领域进行了大量研究和实践,基于“管网-处理厂”系统集成化管控角度,采用实时控制(Real Time Control,简称 RTC)技术进行“厂-网”联调联控,充分通过“硬件-软件”组合提高或发挥“厂-池-站-网”的匹配性,可以有效提高系统空间容量和处理能力的使用率,在同等条件下减少合流制溢流污染和内涝风险、提高污水处理率,实践证明了 RTC 技术对提高城市排水系统弹性的优势,在不增加现有主要设施的基础上,可实现对 CSO 溢流量减少 23%~100% 的目标^[26]。

为更好地规范和指导 RTC 项目的实施,德国水协会于 2005 年发布的《排水管网实时控制规划框架》中包括了排水管网实时控制项目规划的步骤、可行性评估的要求和关键环节的具体要求等内容。

美国环保署于 2006 年发布了《城市排水管网的实时控制》,提出要依据采集的现场监测数据,动态调整设施设备的开关状态和运行参数,以达到晴天(提

高污水处理率)和雨天(减少 CSO 和内涝)的运行目标。不同城市水系统厂-网实时控制案例^[27-28]见表 3。

表 3 部分城市水系统厂-网实时控制溢流效果及频次

Tab. 3 CSO volume and frequency reduction by real-time control in various cities

项 目	现状问题	控制设施	控制效果
科灵	降雨强度逐年增加,强降雨下内涝和合流制溢流问题严重	泵站、子片区出水闸门	溢流频次削减 35%,少于 10 次/a;污水厂溢流量削减 40%;减少中心城区调蓄池规模
罗马	降雨时污水厂峰值流量过高,存在合流制溢流问题	堰	本地 RTC,溢流量削减 1%~46%;全局 RTC,溢流量削减 2%~100%
柏林	合流制溢流及带来的水质问题	泵站、堰、溢流管	溢流量削减 14.1%;溢流负荷削减 10.4%;一定程度上减少内涝
卢森堡	合流制溢流严重,降雨时污水厂负荷量较大	泵站、调蓄池阀门	溢流量削减 20%~80%
赫尔辛堡	合流制溢流及其带来的负荷问题严重,溢流频繁,污水厂峰值流量过高	CSO 泵站、堰	CSO 泵运行时间缩短;溢流频次降低;污水厂高位平稳运行;40%溢流量削减潜力
哥本哈根	合流制溢流问题严重,有内涝问题,现有设施的利用率不高	闸门、泵站	溢流量削减 50%以上

实施 RTC 策略主要是解决“厂-池-站-网”的匹配性问题,使得排水系统中各组成要素如管网、泵站、调蓄池和污水厂等在系统目标约束条件(溢流频次和溢流总量等)下实现雨污水收集、转输、调蓄和处理能力的相互匹配,实际上这也是我国近些年大规模沿河截污后面临的共性问题,“源头-中途-末端”没有实现各自能力的有效协同,快速化的工程实施又进一步加剧了各要素之间的不匹配性。目前,我国很多城市“厂-池-站-网”的匹配性存在很大问题,严重制约了水环境质量改善,主要体现在:①存量设施在线存储能力雨季没有充分释放和发挥;②降雨期间上游径流量无有效管控,对下游形成冲击负荷,缺乏中途径流分担机制;③上游排水系统收集能力与污水厂处理能力不匹配;④多种原因导致的调蓄池、泵站作为“承上启下”节点,面临上游管网收集和下游管网输送能力不匹配的瓶颈制约。因此,成功实施 RTC 策略,重要的前期基础性工作就是进行排水系统要素匹配性分析,发现、识别系统的瓶颈并定量评估,制定改造方案以提高系统的匹配性,在对瓶颈的识别分析基础上提出改造方案,统筹制定、调整 RTC 调度规则。

5 超量混合污水治理面临的法规、标准制约

目前我国尚未在法律、法规方面出台对雨季峰值流量进行处理的要求和规定,美国在联邦法规、EPA 历年出台的 CSO 控制策略中对污水厂雨季峰

值流量的处理均有明确定义和约定原则,且随着水环境质量提升和管理实践的不断丰富,美国 EPA 也在与利益相关方协调,试图不断更新上述规则。为了鼓励污水厂雨季多处理峰值流量,美国 1989 年就出台了 CSO 控制策略,USEPA 于 1994 年出台的 CSO 控制政策中明确提出了“九项基本控制措施”,要求发挥污水厂存量设施的最大化处理能力,对雨季超量混合污水或峰值流量进行处理,要求对合流制管网雨季收集到的 85% 的流量进行处理,这样相当于控制 CSO 溢流频次 4~6 次/a;对超量混合污水可采用“附加处理”措施。需要说明的是,一些用于雨季超量雨污混合流量处理的高效物化处理工艺如 EHRT,投资更省,作为集约型“非生物处理的二级处理”工艺,其出水可以获得同样的“二级处理”效果,出水与生化处理出水进行“掺混”最终经过消毒后排放,这有利于合流制系统减少 CSO 对环境的污染。值得进一步指出的是,在分流制污水系统(SSO),这种“掺混”的做法在美国持续多年存在争议,美国 EPA 对 CSO 同意“掺混”解决雨季峰值流量问题,但对 SSO 并没有明确法律政策。2013 年美国联邦第八巡回上诉法院裁定,SSO 使用非生物处理工艺处理峰值流量与经过生物处理的流量进行掺混并且达到排放标准是合法的,但该裁决只适用于第八巡回法院管辖范围内的 7 个州。美国在污水厂峰值流量处理政策方面已经有了数十年的积淀,虽然各州政策和做法不尽相同,但是都鼓励对雨季峰

值流量进行必要处理。因此,我国亟需出台这方面的法律法规,真正确立支撑“网-厂-河”模式的法律法规基础,从立法角度提倡和鼓励市政污水厂在雨季发挥设施最大能力对超额流量进行处理,最大程度削减CSO和向环境排放的污染物。

其次,在排放标准层面,目前我国的排放标准、取样约定及考核方式不利于雨季峰值流量的处理。欧美发达国家一般是基于流域TMDL理念下的排放许可证制度,采用周均值、月均值进行考核,而我国采用日均值考核,实际执法时往往采取瞬时值或实时在线仪表监测值。由于进水条件等多种原因导致对生物处理工艺的干扰并引起出水波动,为了稳定达标运行单位不得不采取更加保守的运行模式,对污水厂进水流量和工艺参数进行严格调控,日均值考核模式实际上大大提高了污水厂建设投资及运行成本,这种考核方式在技术层面和运营层面都制约了污水厂雨季进行峰值流量处理。尤其是雨季峰值流量处理设施往往是物理-化学强化一级处理,即便采用部分活性污泥工艺处理峰值流量出水也会存在短时不稳定现象,按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A考核或者近些年出台地标考核,会存在达标风险。因此,为激励污水厂对峰值流量进行处理,除了政策法规支撑外,执行层面建议可以借鉴欧美国家,在排放标准上要调整目前的日均值考核方式,可采用周均值和月均值水质达标考核方式;或者各地因地制宜单独制定针对峰值流量的排放标准和指导性处理技术路线,如昆明在《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》征求意见稿中,明确雨天污水厂处理量超过设计处理规模1.1倍时,超量溢流污水经一级强化处理,设置单独排放口,但超量污水处理并不对 NH_3-N 、TN进行要求,出水执行E级排放标准,即: BOD_5 为30 mg/L, COD为70 mg/L, TP为2 mg/L。针对合流制雨季超量混合污水制定单独排放标准和审批单独排放口,有利于鼓励污水厂多处理峰值流量,降低溢流排放量,促进水环境质量的持续改善,真正实现流域治理理念下的“网-厂-河-湖”综合治理体系。

参考文献:

- [1] 陈玮,程彩霞,徐慧伟,等. 合流制管网截流雨水对城镇污水处理厂处理效能影响分析[J]. 给水排水, 2017,43(10):36-40.
- [2] Launay M A, Dittmer U, Steinmetz H. Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows—Characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes[J]. Water Res, 2016,104: 82-92.
- [3] Musolff A, Leschik S, Reinstorf F, et al. Micropollutant loads in the urban water cycle[J]. Environ Sci Technol, 2010,44(13):4877-4883.
- [4] Juan-García P, Butler D, Comas J, et al. Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art[J]. Water Res, 2017, 115:149-161.
- [5] 王小婷,姚越,周炜,等. 基于三角分析法的城市污水管网入流入渗量评估[J]. 水污染及处理, 2019,7(4):152-159.
- Wang Xiaoting, Yao Yue, Zhou Wei, et al. Quantification of inflow and infiltration in urban sewer systems based on triangle method [J]. Water Pollution and Treatment, 2019,7(4):152-159(in Chinese).
- [6] Cao Y S, Tang J G, Henzen M, et al. The leakage of sewer systems and the impact on the 'black and odorous water bodies' and WWTPs in China [J]. Water Sci Technol, 2019,79(2):334-341.
- [7] Dirckx G, Fenu A, Wambecq T, et al. Dilution of sewage: Is it, after all, really worth the bother? [J]. J Hydrol, 2019,571:437-447.
- [8] Ramos H M, Pérez-Sánchez M, Bento F A, et al. Urban floods adaptation and sustainable drainage measures[J]. Fluids, 2017,2(4):61.
- [9] Casal-Campos A, Sadr S M K, Fu G T, et al. Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: An analysis of robustness under deep uncertainty [J]. Environ Sci Technol, 2018,52:9008-9021.
- [10] Mugume S N, Diao K, Astaraie-Imani M. Enhancing resilience in urban water systems for future cities[J]. Water Sci Technol; Water Supply, 2015,15(6):1343-1352.
- [11] Zhang L, Cheng F, Herr R, et al. An approach for estimating groundwater infiltration rates into wastewater collection systems under typical year conditions[J]. J Water Manage Modeling, 2013. DOI:10.14796/JWMM.

- R246-21.
- [12] Kennedy L B. Wastewater Flow Monitoring and Flow Projections [R]. USA: Camp Dresser & McKee (CDM), 2011.
- [13] 张辰. 基于海绵城市建设理念的排水工程设计[J]. 给水排水, 2019, 45(6): 1-5.
Zhang Chen. Drainage engineering design based on the concept of sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(6): 1-5 (in Chinese).
- [14] Tan P Y, Jim C Y. Greening Cities [M]. Singapore: Springer, 2017.
- [15] Wang R, Eckelman M J, Zimmerman J B. Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems [J]. Environ Sci Technol, 2013, 47: 11189-11198.
- [16] Mugume S N, Gomez D E, Fu G T, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems [J]. Water Res, 2015, 81: 15-26.
- [17] Zhang D, Martinez N, Lindholm G, et al. Manage sewer in-line storage control using hydraulic model and recurrent neural network [J]. Water Resour Manage, 2018, 32: 2079-2098.
- [18] Garofalo G, Giordano A, Piro P, et al. A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems [J]. J Network Computer Appl, 2017, 78: 30-42.
- [19] Kerkez B, Gruden C, Lewis M, et al. Smarter stormwater systems [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50: 7267-7273.
- [20] Fitzpatrick J D, Tetrick N J, Sengupta S, et al. Accurate wet-weather flow characterization and dynamic modeling help optimize treatment designs and operations [A]. Proceedings of the Water Environment Federation [C]. USA: WEF, 2012.
- [21] Brown J, Rothstein E, Federation W E, et al. Wet Weather Design and Operation in Water Resource Recovery Facilities [M]. USA: Water Environment Federation, 2014.
- [22] Gasperi J, Laborie B, Rocher V. Treatment of combined sewer overflows by ballasted flocculation; Removal study of a large broad spectrum of pollutants [J]. Chem Eng J, 2012, 211/212: 293-301.
- [23] Becker E, Sanderson T. Akron WRF step feed phase 2: Design, operation, performance and optimization of secondary treatment wetweather expansion and BNR upgrades [A]. WEFTEC 2019 Proceedings [C]. USA: Water Environment Federation, 2019.
- [24] Daigger G T, Siczka J S, Smith T F, et al. Marrying step feed with secondary clarifier improvements to significantly increase peak wet weather treatment capacity: An integrated methodology [J]. Water Environ Res, 2017, 89(8): 724-731.
- [25] Fitzpatrick Jim. Wet weather solutions for treatment plants [EB/OL]. https://cdn.ymaws.com/www.ncsafewater.org/resource/collection/4BCDDA1B-1BD8-480F-A9F3-16F889F14A8E/NCAWWAWEA_Charlotte_Water_Institute_2019_Fitzpatrick_2per.pdf, 2019-12-25.
- [26] Colas H, Pleau M, Lamarre J. Practical perspective on real-time control [J]. Water Qual Res J Canada, 2004, 39(4): 466-478.
- [27] Vezzaro L, Christensen M L, Thirsing C, et al. Water quality-based real time control of integrated urban drainage systems: A preliminary study from Copenhagen, Denmark [J]. Procedia Eng, 2014, 70: 1707-1716.
- [28] Schroeder K, Pawlowsky-Reusing E. Current state and development of the real-time control of the Berlin sewage system [J]. Water Sci Technol, 2005, 52(12): 181-187.



作者简介:刘智晓(1972-),男,山东莒县人,工学博士,教授级高级工程师,主要从事市政给排水系统、水厂、污水厂及水环境治理领域技术方案、优化与审核等相关工作。

E-mail: liuzhixiao@163.com

收稿日期: 2020-03-06