

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.03.013

合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展

佃 柳^{1,2}, 郑 祥¹, 郁达伟^{2,3}, 魏源送^{2,3,4}

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085;
3. 中国科学院生态环境研究中心环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085;
4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 综述了国内外合流制管道溢流污染特征与控制的研究进展, 总结了合流制管道溢流废水的污染物来源、水质水量关系和水环境影响特征, 分析了影响合流制管道溢流污染特征的影响因素、常用合流制管道溢流污染控制措施, 以及旋流分离、沉淀等末端控制技术的研究进展; 指出管道沉积物的沉积、冲刷、污染释放监测与管道、截流井和排口净化技术的工艺组合, 是控制我国合流制管道溢流污染的关键技术节点。

关键词: 合流制管道溢流; 管道沉积物; 冲刷; 污染释放

中图分类号: X52; TU992.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2019)03-0076-08

Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution // DIAN Liu^{1,2}, ZHENG Xiang¹, YU Dawei^{2,3}, WEI Yuansong^{2,3,4} (1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper reviews the research progress of characteristics and control of combined sewer overflows (CSOs) pollution at home and abroad. The pollutant sources, the relationship between the water quality and quantity, and water environment impact characteristics of CSOs wastewater are summarized, and the influencing factors of pollution characteristics of CSOs are analyzed, and the control measures for pollution of common CSOs are discussed in different categories. The research progress of end control technologies such as cyclone separation and sedimentation is compared. Finally, it is pointed out that the combination of deposition-flush-contamination release monitoring of pipeline sediments and combined pipeline, intercepting wells and drain outlet purification technologies is the key technical node for controlling the pollution of CSOs in China.

Key words: combined sewer overflows (CSOs); pipeline sediment; flush; contamination release

合流制排水系统(combined sewer system, CSS)是城市排水系统的重要组成部分,包括雨、污合流制管道收集系统和末端控制系统^[1-2],用同一套管道收集和传输雨水和污水,最终退水到受纳水体中^[3]。早期城市污水管道系统不完善,形成了目前城市核心区合流制管道占比较高的现状,囿于改造难度和成本,这些存量合流制管道仍将长期存在。例如,2015年英国城镇排水管道的总长为32.3万km,雨污合流管道占比70%^[4-5];2010年德国城镇的排水

管道长达54万km,其中雨污合流管道、污水管道和雨水管道分别占46%、33%和21%^[6];法国、日本的雨污合流管道占排水管道长度的70%左右^[5],其中东京的占比为83%,而大阪市的占比高达97%^[7];美国采用合流制排水管道的州有32个,大多数分布在美国的东北部和五大湖地区^[8]。

我国城镇排水系统自20世纪80年代中后期开始在新建地区逐步采用分流制,GB 50014—2006《室外排水设计规范》规定新建地区宜采用分流制;

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-002);国家自然科学基金(51478460)

作者简介:佃柳(1993—),女,硕士研究生,研究方向为合流制管道溢流污染控制。E-mail:326208002@qq.com

通信作者:郁达伟,博士。E-mail:dwyu@reces.ac.cn

2011年修订为新建地区应采用分流制(干旱地区除外)。《中国城市建设统计年鉴:2016》^[9]数据表明,我国雨污合流管道占比在东部、中部、西部和东北地区分别为14.05%、25.88%、19.04%和38.93%,而北京为10.03%,雨污合流管道占比东部低、西部高,占比明显低于发达国家城镇。

在降水径流形成时,CSS存在流量超过管道截留能力的情况,导致雨污合流制管道部分废水直接溢流到地表水体形成瞬时污染源,称为合流制管道溢流(combined sewer overflows,CSOs)污染^[10]。由于CSOs污染主要存在于城镇核心区和建成区,对城镇水环境和亲水空间的影响较大,已成为我国城镇日益突出的瞬时污染源。同时,CSOs也是降水径流进入和补充地表水体的重要途径,成为城镇地表水重要的季节性非常规水源。

CSOs是重要的季节性河道水源,更是突出的瞬时污染源,其污染控制是海绵城市建设、城市黑臭水体治理等的关键环节^[11]。CSOs的污染特征较为复杂,涉及降水径流、管网冲淤和污染释放等过程,而CSOs的水量特征仍有待进一步研究,影响了CSOs污染控制措施的实施。本文综述了CSOs污染的来源、成因和影响及CSOs污染常用控制措施的研究进展,指出管道沉积物监测和管网系统优化是控制CSOs污染的关键。

1 CSOs 污染的来源与特性

1.1 CSOs 污染的来源

合流制管道水量主要来自降水径流和生活污水,有时也包括工业废水、农田和绿化退水等,因此CSOs污染通常认为有降水径流、生活污水和管道沉积物3个主要来源^[12],现有研究认为合流制管道沉积物是CSOs污染的重要来源,其多种污染物的贡献率一般在47%~80%^[13-14]。CSOs所携带的污染物中,管道沉积物贡献了SS、VSS、TSS、COD、BOD₅、TOC、TN、TP的50%以上,而径流雨水、生活污水分别贡献了25%左右,只有氨氮、凯氏氮主要来源于径流雨水和生活污水^[12-16]。此外,CSOs还可能携带重金属,研究表明重金属主要来源于降水径流^[17]。Gromaire-Mertz等^[12]总结了巴黎31次降水事件,发现CSOs中铅和锌主要来源于金属屋顶腐蚀,并通过降水径流汇入合流制管道;而铜主要来源于排水管中沉积物的侵蚀、沉积和释放过程(约贡献28%~68%),降水径流和生活污水对铜的贡献率始终低于30%^[13]。上述研究表明,控制管道沉积物对控制CSOs的多数污染物具有重要意义。

管道沉积物、降水径流和生活污水均深受人类

活动的影响,日益加速的流域系统城市化更直接强化了人类活动的影响。传统城市化进程降低了下垫面渗透能力,加速了产汇流过程,最终增加了降水径流强度和径流量。天气晴朗时,人类活动产生的污染物积累储存在城市下垫面(特别是屋顶、道路、停车场等),在降水过程中,污染物随城市径流汇入合流制管道,并因为溢流而部分直接排入接纳水体,恶化水体水质^[18]。因而,CSOs污染的控制既要控制管道沉积物,又要从海绵城市、绿色基础设施等源头出发,进行合理规划和低影响开发,从而降低降水径流的峰值流量,减少CSOs事件次数,实现CSOs的水质水量协同控制。

1.2 CSOs 污染的特性

CSOs污染的特性包括典型污染物、污染负荷及其影响因素等。由于管道沉积物的存在,导致CSOs的多种污染物可能在沉积物中形成潜在的协同效应,强化了溢流事件对水环境的冲击。通常入河污染负荷是水量乘以水质(污染物浓度)的概念,但CSOs过程中水量波动较大,并且溢流污染物浓度极大地受溢流冲刷强度影响,CSOs水质水量之间具有较强的关联性,难以简单采用常规的平均流量乘以平均浓度来计算CSOs污染负荷,有必要分别总结CSOs水质、水量及其相互关系。

1.2.1 CSOs 水质特性

CSOs污染物可以大致分为4类:①耗氧物质(BOD、COD和NH₄⁺等);②营养物质(氮磷);③有毒有害物质(NH₃、重金属等);④微生物(粪便细菌等)^[19]。不同国家的降水特性、地理条件、人类活动强度以及排水管道的的设计参数均不同,因而各国CSOs废水中各污染物的浓度值存在较大差异,国内各大城市的情况也不尽相同^[20-26]。比较而言,人类活动强度大、降水少的特大型城市CSOs污染较为严重,与GB3838—2002《地表水环境质量标准》V类标准相比,北京市CSOs中的COD超标17倍,TP超标6倍^[25],上海市CSOs中的COD超标15倍,BOD₅超标20倍^[24],对城市水环境的影响极大。

CSOs中重金属和病原微生物的污染也受到关注,西班牙CSOs中锌的浓度较大,而巴黎CSOs的重金属也较为突出。关于微生物量,AI Aukidy等^[27]发现在意大利东北部的海域,相对于污水处理厂排入海域的水量,CSOs只占8%,但其排入水体中的病原微生物量却占90%以上;不仅如此,CSOs中还存在贾第鞭毛虫、隐孢子虫^[28]和诺如病毒^[29]等,但是国内在这方面的调查做得比较少,有待进一步研究。

近年来,CSOs污染中的微污染物也受到关注,

Ellis 等^[30-31]研究表明,除了污水处理厂排放的污水外,城市地表水体中微污染物的主要来源是雨水径流和 CSOs。Launay 等^[32]在 7 次降水事件中,评估了 69 种有机微污染物的排放量,其中 60 种微污染物存在于 CSOs 中,包括 PPCPs、城市杀虫剂、工业化学品、阻燃剂、增塑剂和 PAHs。国内的情况尚不清楚。

随着国外基础数据的增加,越来越多的研究者利用所获取的历史数据并结合模型等方法进行 CSOs 水质的模拟,环境流体动力学模型(EFDC)^[33]、水质分析模拟程序(WASP)^[33]、条件回归树测试^[34]、流体动力学模型^[35]等方法的应用使得 CSOs 水质进一步得以明确,有助于制定改善水质的方案,国内研究应结合实际情况合理借鉴。

1.2.2 CSOs 水量特性

一般用累积水量表示 CSOs 水量和污染贡献,但 CSOs 具有瞬时性和间歇性,瞬时流量变化幅度很大,很难通过瞬时观测就直接计算出 CSOs 水量,通常需要在整个降水过程中连续不断地监测。2014 年 6—9 月,Al Aukidy 等^[27]连续监测了意大利一个海滨城市的 CSOs 水量情况,发现 CSOs 水量占该区域排放总量的 8%。由于 CSOs 水量的连续监测耗时耗力,且影响因素很多,现有研究更侧重降水量、降水径流量和截留倍数等参数的关系研究^[20-22]。CSOs 水量特性较为复杂,需要进行连续监测或使用模型^[36]等手段来进一步研究,从而明确 CSOs 的水量特征。

1.2.3 CSOs 水质与水量间的关系

CSOs 存在初始冲刷效应(first flush),在 CSOs 的初始阶段,污染物的负荷相对较高^[37-38]。Barco 等^[37]在面积为 12.7 hm²的城市集水区探究了 CSOs 水质与水量的关系,验证了各种污染物的初始冲刷效应,结果表明所研究的 23 次降水事件中,几乎所有的降水事件以及所有的污染物均存在初始冲刷现象,平均前 20% 的径流量中包含了 40% 的污染物负荷,但降水强度较小时(累积降水量小于 7 mm,持续降水时间小于 50 min),初始冲刷效应比较微弱。

1.3 CSOs 污染的影响

CSOs 污染的来源既包括地表雨水径流和生活污水,也包括管道沉积物,其水质既综合了径流雨水和生活污水的特征,也受到合流制管道状况、降水性质等多种因素的影响,因而 CSOs 的水质情况非常复杂,水量也很不稳定。Gromaire-Mertz 等^[12]研究发现,SS 是 CSOs 污染的重要载体,有机物(VSS、COD、BOD₅等)对接纳水域具有冲击效应,重金属(Cd、Cu、Pb、Zn 等)对接纳水体具有严重的累积效

应。因此 CSOs 污染主要是通过污染接纳水体而引发一系列环境问题,破坏公共环境及生态环境^[39]。CSOs 具有以下危害^[40]:①导致水体富营养化;②破坏水体生态结构;③影响接纳水体的观赏价值;④危害公共健康;⑤制约整个城市的可持续发展。

定量评估 CSOs 对环境风险的方法有动态溢流风险评估(DORA)^[41]、贝叶斯网络(BN)模型^[39]等。动态溢流风险评估是通过考察径流量、排水管道中存储的水的体积以及影响径流预测的不确定因素等指标,来量化评估 CSOs 风险,进而提出控制措施来有效降低 CSOs 污染风险;而贝叶斯网络模型用于评估因降水引发的 CSOs 污染中微生物污染对公众及生态环境造成的风险。

2 CSOs 污染的影响因素

2.1 降水径流

降水的基本特征包括降水量、降水历时、降水间隔、降水强度、前期晴天数和雨型等,不同参数条件下,CSOs 的特性也不同。降水径流具有污染稀释和管道沉积物冲刷两种作用,张智等^[42-43]研究表明,小到中雨(5~16.9 mm/d)时稀释效应明显;中到大雨(17~37.9 mm/d)时,管道冲刷效应逐步突出,CSOs 污染物浓度上升;暴雨(50~99.9 mm/d)时以稀释作用为主。Bersinger 等^[44]将在线监测与条件回归树测试相结合,识别出影响 CSOs 污水中 COD 浓度的 3 个主要影响因子为前期晴天数、平均降雨强度和降雨前管网中的流量。当前期晴天数低于 2.375 d 且平均降水强度也低(<0.867 mm/h)时,CSOs 污水中 COD 浓度较低,具体得出的参数会根据预测模型和各地历史数据的不同而有所差异,例如 Bersinger 等^[45]在 2015 年采用条件回归树测试得到的使 CSOs 污水中 COD 浓度达到最大值的前期晴天数临界值为 5 d。

降水区域的下垫面会影响 CSOs 的特性。下垫面是大气与其下界的固态地面或液态水面的分界面,城市下垫面主要有屋面、路面和绿地 3 种形式^[46],不同的下垫面由于其材质、污染积累过程等不同,降水时所形成的径流污染性质也不相同,从而最终 CSOs 的污染特性也不同。Gromaire-Mertz 等^[12,47]监测研究了巴黎某集水区的径流雨水水质,发现径流雨水中重金属污染主要来自屋面,SS 和 COD 主要来自庭院和街道。赵磊等^[15]的研究表明,城市下垫面降水径流污染物输出浓度大小顺序为道路、庭院和屋顶,道路是城市面源污染的关键源区,占总降水径流量约 1/4 的道路产出了 40%~80% 的污染物负荷,而占总降水径流量近一半的屋顶仅

产生了4%~30%的污染物负荷。

2.2 生活污水

生活污水是CSOs污染负荷的主要来源之一,而城市生活污水的水质水量变化复杂,受人口数量及素质、城市功能区类型、季节、时间等各方面因素的影响,因而CSOs的水质水量也受到这些因素的综合影响。

另外,生活污水之所以成为CSOs污染负荷的来源之一,是因为降水量较大时,管道中的生活污水与降水径流的总量超过管道负荷,造成溢流,因而两者之间的混合比直接影响了CSOs污水的水质。Hvitved-Jacobsen^[48]提出了混合比的具体计算方式,根据其计算公式,既可计算一次降水的溢流污染负荷,也可计算出CSOs每年产生的污染物平均负荷,评估其对受纳水体的影响。

2.3 合流制管道

a. 管道截流倍数。CSS在降水时被截留的降水径流量与平均旱流污水量的比值称为截流倍数 n_0 ,一定程度上反映了合流制管道的截污能力。GB50014—2006《室外排水设计规范》中规定, n_0 应根据旱流污水的水质、水量、排放水体的环境容量、水文、气候、经济和排水区域大小等因素经计算确定,宜采用2~5。通常截留倍数越大越好,但当超过一定值后,其截留效果增加的就不再明显;同时过高的截留倍数会导致管道造价和沉积物迅速增加,反而不利于CSOs污染控制,因而应选定适宜的截留倍数^[49]。国内外合流制管道截流倍数选取情况^[19-50]各不相同,英国、德国、比利时、西班牙等欧洲国家分别将其定为5、3、2~5、2~3;日本定为2;中国、美国国土面积大,各地气候条件差距大,截留倍数范围较大,定为2~5,其中,北京为1~2,天津为3~5,沈阳和上海均为2,而武汉和桂林则均定为1。

b. 管道沉积物污染。现有研究表明,管道沉积物是CSOs污染的重要来源,其原因是在非雨季时,合流制管道内只有生活污水,水量少、流速低,管道充满度低,污水里的污染物很容易沉积到管道底部。降水时,由于冲刷作用,部分沉积物会重新进入流动的污水中,使合流制污水的污染负荷变高^[51]。杨云安等^[52]研究表明,中国老城区不同功能区的管道沉积物粒度分布范围是 $d_{10} = 1.89 \sim 6.57 \mu\text{m}$ 、 $d_{50} = 12.38 \sim 33.00 \mu\text{m}$ 、 $d_{90} = 39.06 \sim 129.67 \mu\text{m}$,功能区之间的粒度分布略有差异,但无显著规律。石山^[53]进一步分析了污水管道中沉积物的组分,发现管道中的沉积物以无机物颗粒为主,而有机物组分占比不足20%,这与Michelbach^[54]的研究结果类似。究

其原因,进入管道中的无机物的粒径和密度大于有机物,不易被流水冲走,更容易在管道中沉积。

CSOs污染特性主要受生活污水对管道沉积物的影响,以及降水径流特性和管道特征对沉积物冲刷的影响,总体来说,人类活动强度大、降水少而集中的城市区域CSOs污染更为严重。合流制管道的水质水量影响因素多、地域区别大,从而使得CSOs污染问题较为复杂,需要进行深入的现场调研,明确污染特征和成因,为针对性的CSOs污染控制措施提供可靠的基础数据,从而提出地域性的CSOs污染高效控制策略。

3 CSOs污染控制方法

很多国家如美国、日本、德国等早在20世纪60年代就意识到了CSOs污染问题,并开展了控制研究,从而制定了一系列的控制规范。CSOs污染控制措施可根据CSOs的产、流、汇过程将其归纳为源头控制、过程控制和末端控制三大类,其中,过程控制包括管道控制、存储调蓄两个环节,每个环节都发挥着重要作用。

3.1 源头控制

现有研究表明,快速汇集的降水径流初始冲刷是CSOs污染的重要成因,因而CSOs污染的源头控制主要是控制雨水径流,减少其进入CSS的峰值径流量是改善CSOs的水质和降低CSOs水量的主要途径。源头控制包括管理和技术两种手段,其中管理手段主要是由欧美等发达国家率先提出的,包括最佳管理措施(BMPs)^[55]、多层次全过程控制政策^[56]等;而目前较为先进的技术是低影响开发(low impact development, LID),国内又叫“海绵城市”^[57-59],常用于雨洪控制的LID包括屋顶绿化、植被浅沟、渗透铺装、雨水花园等^[60]。生物滤池是一种典型的LID,这些年被广泛应用于控制城市雨水径流污染。Wu等^[61]提出了一种含有饱和带的多层生物滤池,主要用于探究生物滤池对污染物的去除效率以及饱和时间(浸泡时间)的影响。蔡庆拟等^[62]基于SWMM模型的LID模块,模拟分析采用渗透铺装、下凹式绿地、雨水花园以及不同LID组合的方案对城市雨洪的控制作用,发现采用渗透铺装、下凹式绿地和雨水花园等LID措施,洪峰流量和径流系数均明显降低,可有效缓解市政管道的排水压力,各种LID措施的雨洪控制效果在低重现期降水时更为显著。

3.2 过程控制

CSOs污染的过程控制主要从管道控制和存储调蓄两个方面考虑。

a. 管道控制。主要是从管道设计的角度来控制 CSOs 的污染状况,例如选取合适的合流制管道截流倍数,一般是在环境标准许可的前提下,尽量选取较小的截流倍数,这样可经济有效地截留污染物。除截留倍数的选择外,管道的衔接也至关重要,但目前国内的市政排水与水利排涝两个标准的衔接仍无规范的统一方法,黄国如等^[63]针对该问题,通过模型研究提出了城市排水管道的规划建设应至少保证排水口底高程高于河道底高程 0.5 m 以上的建议。此外还有控制管道的渗漏和渗入、原位修复管线以及对管道进行定期冲洗等措施,其中控制管道的渗漏和渗入以及原位修复管线是针对现存管道的破损、缺陷等问题,对其进行修复;而管道冲洗则是在旱季时,对管道内的沉积污染物进行定期冲刷,并直接送入污水处理厂进行处理后再排放,避免在雨天造成沉积污染物释放并溢流的现象^[48,64]。冲洗方式主要分为人工冲洗和机械冲洗,而冲洗的频率与强度则与管道内污染物的沉积、冲刷、释放规律有关,需加强监测并进一步研究。

b. 存储调蓄。指在产流过程中设置调蓄设施,将雨水、雨污混合废水暂时存储起来,待流量减小时再进行处理。该方式能够有效削减洪峰流量,降低下游合流制干管以及截流泵站的实际容量,从而达到减轻 CSOs 污染的目的^[7]。该方式是发达国家最初进行 CSOs 污染控制时采用的方法,其中德国早期对 CSOs 污染控制的典型方法就是修建大量的雨水池用以截流处理合流制管道中的污染雨水^[65];日本的雨水资源非常丰富,为了缓解 CSOs 污染,同时也为了将雨水资源再利用,在 20 世纪 70 年代开始研究雨水调蓄池^[66]。随着对 CSOs 研究的深入,存储调蓄已初步形成了一套相对完善的设计计算方法和运行管理体系,发达国家也逐渐将存储调蓄过渡为源头控制^[67]。我国由于仍处于 CSOs 污染控制探索阶段,加之合流制管道大部分位于开发密度较高的老城区,受场地条件限制,很难采用源头控制技术,因而存储调蓄比较适合现阶段国内的 CSOs 污染控制。调蓄池形式多样,最主要的是溢流截流池和分流装置两种^[68]。中间调蓄设施的设计和 CSOs 水质水量密切相关,需对水质水量进行实地调研。

3.3 末端控制

末端控制主要是管道系统末端的污染物净化,以减少排入受纳水体的污染物负荷量,去除的物质包括营养物质(氮磷等)、有机污染物质、微生物等。末端控制方法主要有旋流分离器分离、薄板分离、砂滤分离、格栅分离等机械方法和吸附、混凝、絮凝、消毒等物理化学方法。通常情况下,由于长期多因素

的污染,受纳水体的水质恶劣,CSOs 污染的治理只是整个水域治理修复的一小部分,因而有研究者^[5]也认为末端控制也包括在最大化去除 CSOs 污染物后,对整个受纳水体进行的生态修复,生态修复措施包括人工湿地、植被过滤带、入渗沟等。本文所述的 CSOs 污染削减技术不考虑受纳水体的生态修复。

不论是源头控制、过程控制还是末端处理,都是 CSOs 污染控制的有效途径,但是源头控制和过程控制并不能彻底解决 CSOs 污染问题,当降水量较大时,依然会发生溢流,因而末端处理是 CSOs 污染的最有效、最彻底同时也是最快的解决方法。

a. 机械方法。用于 CSOs 污染控制的机械方法包括旋流分离器分离、薄板分离、砂滤分离、格栅分离等,其中最典型且运用最广泛的机械方法是旋流分离器分离。旋流分离器是一种分离分级设备,利用离心沉降原理,在一定的压力下,将两相或多相混合液分离开。沉积下来的重相聚集在旋流分离器的底部并被排出,而分离出的上清液由溢流口排出,该部分水质与原水相比,水质明显改善,沉积物去除率达到 80% 以上,SS 能降低 36% ~ 90%,COD 能降低 15% ~ 80%^[69-70]。目前,storm kingTM旋流分离器、EPA 旋流分离器和 fluidsepTM旋流分离器是 3 种最常用于 CSOs 污染治理的旋流分离器^[71]。Luyckx 等^[72]发现在实际降水情况下,当处理效率高于 70% 时,storm kingTM旋流分离器比溢流堰更经济。在意大利,Sullivan 等^[73]对 EPA 旋流分离器进行了为期 2 年的降水监测,发现 EPA 旋流分离器对颗粒物的分离效果主要取决于进水的污染物浓度,其中 SS 占主导作用。PISANO 等^[74]通过研究 5 场不同的降水事件,发现 fluidsepTM旋流分离器能去除 32% ~ 91% 的 TSS。因占地面积小、建设费用低,旋流分离器分离技术是欧美等发达国家最常用的 CSOs 污染控制技术^[75],但旋流分离器在国内的 CSOs 污染控制中应用还比较少,需要加强研究。

b. 物理化学方法。物理化学方法是 CSOs 污染末端控制常用的方法。沉淀技术是最早被用于 CSOs 污染控制的技术之一,早期的沉淀池主要是指传统城市污水处理工艺中的一级处理单元,置于沉砂池之后,例如,1998 年德国建有近 2 万个沉淀池用于处理 CSOs 污染,约占整个国家 CSOs 污染处理系统的一半,该处理设施对 CSOs 污染中的 SS 去除率为 55% ~ 75%^[76]。为了减少沉淀池的占地面积,一级化学强化技术——混凝沉淀被提出,通过投加价格低廉的混凝剂,提高了沉淀池对 CSOs 污染的去除效果,对 COD 和 TP 的去除率达到 50% ~ 80%,SS 的去除率增加到 70% ~ 90%^[77],目前,混

凝沉淀技术正被广泛应用于CSOs污染处理中。但是混凝沉淀工艺中药剂投加量不易控制,暴雨时易造成二次污染^[78]。为进一步减少药剂的投加量,并提高污染去除效率,磁混凝技术被提出并应用于处理CSOs污染,在最佳投加量下,磁混凝技术的TP和COD去除率分别能达到96.79%和96.31%^[79]。为了控制CSOs中携带的病原微生物,往往需要在CSOs污染控制的最后过程中进行消毒,目前运用最多的消毒技术有氯消毒、臭氧消毒和紫外消毒3种。一般而言,消毒方法的选择是根据当地的CSOs水量来确定的^[80]。

4 研究展望

CSOs污染主要来源于管道沉积物。其污染物以悬浮态为主,与暴雨径流存在明显的初始冲刷效应,导致CSOs污染成为重要的季节性水源污染源、突出的瞬时污染源。我国合流制管道、沿河截污管道如何有效控制溢流仍需进一步研究,建议从以下两方面开展溢流污染控制研究:

a. CSOs污染特性。监测降水径流、管网流量、溢流水质相互关系及其变化规律,调查合流制管道沉积物沉积、冲刷、污染组成和释放规律,为后续溢流污染治理提供污染源参数。

b. CSOs污染防控关键技术。明确管道结构、冲洗方式和设施工艺对管道沉积物沉积、冲刷和释放规律的影响,优化合流制管道、截流井和排口净化技术,提出工艺组合,形成溢流污染控制的技术解决方案。

参考文献:

[1] 王淑梅,王宝贞,曹向东,等.对我国城市排水体制的探讨[J].中国给水排水,2007,23(12):16-21. (WANG Shumei, WANG Baozhen, CAO Xiangdong, et al. Discussion on chinese urban drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(12): 16-21. (in Chinese))

[2] VAN DAAL P, GRUBER G, LANGEVELD J, et al. Performance evaluation of real time control in urban wastewater systems in practice: review and perspective [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 90-101.

[3] 张杰.合流制排水系统雨天溢流污染控制及优化调度研究[D].天津:天津大学,2012.

[4] ELLIS J B, BUTLER D. Surface water sewer misconnections in England and Wales: pollution sources and impacts[J]. Science of the Total Environment, 2015, 526: 98-109.

[5] 吴春笃,解清杰,陶明清.合流制排水系统污染控制原理与技术[M].镇江:江苏大学出版社,2014.

[6] 张洲.德国:为何道路不积水[J].河北水利,2016(2): 34-34. (ZHANG Zhou. Why aren't German roads flooded [J]. Hebei Water Resources, 2016(2): 34-34. (in Chinese))

[7] 李思远.合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术研究[D].北京:清华大学,2015.

[8] 杨雪,车伍,李俊奇,等.国内外对合流制管道溢流污染的控制与管理[J].中国给水排水,2008,24(16):7-11. (YANG Xue, CHE Wu, LI Junqi, et al. Control and management of combined sewer overflow pollution at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(16): 7-11. (in Chinese))

[9] 国家统计局城市社会经济调查司.中国城市建设统计年鉴;2016[M].北京:中国统计出版社,2016.

[10] 麦穗海,黄翔峰,汪正亮,等.合流制排水系统污水溢流污染控制技术进展[J].四川环境,2004,23(3):18-21. (MAI Suihai, HUANG Xiangfeng, WANG Zhengliang, et al. Technique development on the pollution control of combined sewer overflows [J]. Sichuan Environment, 2004, 23(3): 18-21. (in Chinese))

[11] 徐祖信,王卫刚,李怀正,等.合流制排水系统溢流污水处理技术[J].环境工程,2010(增刊1):153-156. (XU Zuxin, WANG Weigang, LI Huaizheng, et al. Combined drainage system overflow sewage treatment technology[J]. Environmental Engineering, 2010(Sup1): 153-156. (in Chinese))

[12] GROMAIRE-MERTZ M C, GARNAUD S, SAAD M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers [J]. Water Research, 2001, 35(2): 521-533.

[13] GASPERI J, GROMAIRE-MERTZ M C, KAFI M, et al. Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems [J]. Water Research, 2010, 44(20): 5875-5886.

[14] HANNOUCHE A, CHEBBO G, JOANNIS C. Assessment of the contribution of sewer deposits to suspended solids loads in combined sewer systems during rain events [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(8): 5311-5317.

[15] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等.合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J].环境科学学报,2008,28(8): 1561-1570. (ZHAO Lei, YANG Fengle, WANG Junsong, et al. Characterization of storm-water pollutant sources in a combined sewer network [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(8): 1561-1570. (in Chinese))

[16] 李海燕,徐尚玲,黄延,等.合流制排水管道雨季出流污染负荷研究[J].环境科学学报,2013,33(9): 2522-2530. (LI Haiyan, XU Shangling, HUANG Yan, et al. Pollution loading of overflow in combined drainage

- channels during rainy season [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(9) :2522-2530. (in Chinese)
- [17] BOLLER M. Tracking heavy metals reveals sustainability deficits of urban drainage systems [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(9) :77-87.
- [18] CHIN A. Urban transformation of river landscapes in a global context [J]. *Geomorphology*, 2006, 79 (3/4) : 460-487.
- [19] PUERTA J, SUAREZ J. Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain [J]. *Urban Water*, 2002, 4(3) :291-299.
- [20] SOONTHORNNONDA P, CHRISTENSEN E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater [J]. *Water Research*, 2008, 42 (8/9) : 1989-1998.
- [21] GROMAIRE-MERTZ M C, CHEBBO G, SAADM. Origins and characteristics of urban wet weather pollution in combined sewer systems: the experimental urban catchment “Le Marais” in Paris [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(1) :35-43.
- [22] LEE J H, BANG K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. *Water research*, 2000, 34(6) :1773-1780.
- [23] SZTRUHÁR D, SOKÁČ M, HOLIENČIN A, et al. Comprehensive assessment of combined sewer overflows in Slovakia [J]. *Urban Water*, 2002, 4(3) :237-243.
- [24] 李贺, 李田. 上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究 [J]. *环境科学*, 2006, 27(8) :1565-9. (LI He, LI Tian. Study on the characteristics of combined sewer overflow from the high density residential area in shanghai [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(8) :1565-1569. (in Chinese))
- [25] ZHANG W, CHE W, LIU D K, et al. Characterization of runoff from various urban catchments at different spatial scales in Beijing, China [J]. *Water Science and Technology*, 2012, 66(1) :21-27.
- [26] 杨逢乐, 赵磊. 合流制排水系统降雨径流污染物特征及初期冲刷效应 [J]. *生态环境学报*, 2007, 16(6) :1627-1632. (YANG Fengle, ZHAO Lei. Pollutant characteristics and first flush effect of runoff in combined sewer system [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6) :1627-1632. (in Chinese))
- [27] AL AUKIDY M, VERLICCHI P. Contributions of combined sewer overflows and treated effluents to the bacterial load released into a coastal area [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607 :483-496.
- [28] MAC KENZIE W R, HOXIE N J, PROCTOR M E, et al. A massive outbreak in Milwaukee of *Cryptosporidium* infection transmitted through the public water supply [J]. *New England Journal of Medicine*, 1994, 331 (3) : 161-167.
- [29] CAMPOS C J A, AVANT J, LOWTHER J, et al. Human norovirus in untreated sewage and effluents from primary, secondary and tertiary treatment processes [J]. *Water Research*, 2016, 103 :224-232.
- [30] ELLIS J B. Pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in urban receiving waters [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1) :184-189.
- [31] LUO Y, GUO W, NGO H H, et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473 :619-641.
- [32] LAUNAY M A, DITTMER U, STEINMETZH. Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows: characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes [J]. *Water Research*, 2016, 104 :82-92.
- [33] QUIJANO J, ZHU Zhenduo, MORALES V, et al. Three-dimensional model to capture the fate and transport of combined sewer overflow discharges: a case study in the Chicago Area Waterway System [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576 :362-373.
- [34] BERSINGER T, BAREILLE G, PIGOT T, et al. Online monitoring and conditional regression tree test: useful tools for a better understanding of combined sewer network behavior [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625 :336-343.
- [35] BJÖRKLUND K, BONDELIND M, KARLSSON A, et al. Hydrodynamic modelling of the influence of stormwater and combined sewer overflows on receiving water quality: Benzo(a) pyrene and copper risks to recreational water [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207 :32-42.
- [36] ABDELLATIF M, ATHERTON W, ALKHADDAR R M, et al. Quantitative assessment of sewer overflow performance with climate change in northwest England [J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2015, 60(4) :636-650.
- [37] BARCO J, PAPIRI S, STENSTROM M K. First flush in a combined sewer system [J]. *Chemosphere*, 2008, 71(5) :827-833.
- [38] XU Z, XIONG L, LI H, et al. Pollution characterization and source analysis of the wet weather discharges in storm drainages [J]. *Desalin Water Treat*, 2017, 72 :169-181.
- [39] GOULDING R, JAYASURIYA N, HORAN E. A Bayesian network model to assess the public health risk associated with wet weather sewer overflows discharging into waterways [J]. *Water Research*, 2012, 46 (16) : 4933-4940.
- [40] 赵庆豪. 雨天合流制排水系统水质水量调查与分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [41] EZZARO L, GRUM M. A generalised dynamic overflow

- risk assessment (DORA) for real time control of urban drainage systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515 (13):292-303.
- [42] 张智,魏婷,胡坚,等.合流制排水系统污水水质及悬浮物粒度分布特征研究[J].*给水排水*,2014(增刊1):185-189. (ZHANG Zhi, WEI Ting, HU Jian, et al. Study on water quality and particle size distribution characteristics of combined sewer system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014 (Sup1): 185-189. (in Chinese))
- [43] 陈长太,徐贵泉.市政泵站雨天排放对黄浦江、苏州河水质的影响[J].*水资源保护*,2014,30(6):59-62. (CHEN Changtai, XU Guiquan. Influence of overflow discharge from municipal pumping station in rainy days on water quality of Huangpu River and Suzhou Creek [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30 (6): 59-62. (in Chinese))
- [44] BERSINGER T, BAREILLE G, PIGOT T, et al. Online monitoring and conditional regression tree test; useful tools for a better understanding of combined sewer network behavior [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:336-343.
- [45] BERSINGER T, LE HECHO I, BAREILLE G, et al. Assessment of erosion and sedimentation dynamic in a combined sewer network using online turbidity monitoring [J]. *Water Science and Technology*, 2015, 72 (8): 1375-1382.
- [46] 任玉芬,王效科,韩冰,等.城市不同下垫面的降水径流污染[J].*生态学报*,2005,25(12):3225-3230. (REN Yufen, WANG Xiaoke, HAN Bing, et al. Chemical analysis on stormwater-run off pollution of different underlying urban surfaces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (12): 3225-3230. (in Chinese))
- [47] GROMAIRE-MERTZ M C, GARNAUD S, GONZALEZ A, et al. Characterisation of urban runoff pollution in Paris [J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39 (2): 1-8.
- [48] HVITVED-JACOBSEN T. Urban and highway stormwater pollution; concepts and engineering [M]. Boca Raton, Florida; CRC Press, 2010.
- [49] 刘燕,尹澄清,车伍,等.合流制溢流污水污染控制技术研究进展[J].*给水排水*,2009,35(增刊1):282-287. (LIU Yan YIN Chengqing, CHE Wu, et al. Research progress on the control technology of effluent pollution from combined effluent system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35 (Sup1): 282-287. (in Chinese))
- [50] 刘保生.浅谈截流倍数[J].*甘肃科技*,2006,22(12):185. (LIU Baosheng. Analysis of interception ratio of combined system [J]. *Gansu Science and Technology*, 2006, 22 (12): 185. (in Chinese))
- [51] 徐一茗.合流制管道溢流的影响因素及其污染治理措施[J].*山西建筑*,2010,36(34):170-172. (XU Yiming. Influencing factors and pollution control measures on combined sewer overflows [J]. *Shanxi Architecture*, 2010, 36 (34): 170-172. (in Chinese))
- [52] 杨永安,管运涛,许光明,等.老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J].*给水排水*,2011,37(9):159-162. (YANG Yun'an, GUAN Yuntao, XU Guangming, et al. Study on sediment properties of drainage pipes in different functional areas of old city [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37 (9): 159-162. (in Chinese))
- [53] 石山.西安市污水管网沉积物形成规律及影响因素研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [54] MICHELBAACH S. Origin, resuspension and settling characteristics of solids transported in combined sewage [J]. *Water Science and Technology*, 1995, 31 (7): 69-76.
- [55] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩.国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J].*水资源保护*,2016,32(1):42-45. (LIAO Chaohsien, GAO Aiguo, HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32 (1): 42-45. (in Chinese))
- [56] 李俊奇,刘洋,车伍.发达国家雨水管理机制及政策[J].*城乡建设*,2011(8):75-6. (LI Junqi, LIU Yang, CHE Wu. Rainwater management mechanism and policy in developed countries [J]. *Urban and Rural Development*, 2011 (8): 75-76. (in Chinese))
- [57] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].*建设科技*,2015(1):1-7. (QIU Baoxing. The connotation, ways and prospects of LID [J]. *Construction Science and Technology*, 2015 (1): 1-7. (in Chinese))
- [58] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].*中国软科学*,2016(1):79-97. (WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with chinese characteristics [J]. *China Soft Science*, 2016 (1): 79-97. (in Chinese))
- [59] 夏军,石卫,王强,等.海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J].*水资源保护*,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33 (1): 1-8. (in Chinese))
- [60] AHIABLAME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2012, 223 (7): 4253-4273.
- [61] WU J, CAO X, ZHAO J, et al. Performance of biofilter with a saturated zone for urban stormwater runoff pollution control; influence of vegetation type and saturation time [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 105: 355-361.

- water level of Baiyangdian Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5):1033-1040. (in Chinese))
- [24] 程俊翔,徐力刚,吴睿,等. 东洞庭湖最低生态水位研究[J]. *江西科学*, 2015, 33(6):932-937. (CHENG Junxiang, XU Ligang, WU Rui, et al. Study on the lowest ecological water level of East Dongting Lake [J]. *Jiangxi Science*, 2015, 33(6):932-937. (in Chinese))
- [25] 黄菊梅,邹用昌,彭嘉栋,等. 1960—2011年洞庭湖区年降水量变化特征[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(6):81-86. (HUANG Jumei, ZOU Yongchang, PENG Jiadong, et al. Variation characteristics of annual precipitation from 1960 to 2011 in Dongting Lake area [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(6):81-86. (in Chinese))
- [26] ZHANG Chang, YUAN Yujie, ZENG Guangming, et al. Influence of hydrological regime and climatic factor on waterbird abundance in Dongting Lake Wetland, China: implications for biological conservation [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90:473-481.
- [27] 余勋. 洞庭湖不确定性水质评价及生态水位研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
(收稿日期:2018-05-05 编辑:熊水斌)

(上接第83页)

- [62] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2):31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2):31-36. (in Chinese))
- [63] 黄国如,王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2):1-5. (HUANG Guoru, WANG Xin. Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2):1-5. (in Chinese))
- [64] SHAHSAVARI G, ARNAUD-FASSETTA G, CAMPISANO A. A field experiment to evaluate the cleaning performance of sewer flushing on non-uniform sediment deposits [J]. *Water Research*, 2017, 118:59-69.
- [65] 唐建国,曹飞,全洪福,等. 德国排水管道状况介绍[J]. *给水排水*, 2003, 29(5):4-9. (TANG Jianguo, CAO Fei, QUAN Hongfu, et al. Brief on german sewage system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, 29(5):4-9. (in Chinese))
- [66] 王健,周玉文,刘嘉,等. 雨水调蓄池在国内外应用简况[J]. *北京水务*, 2010(3):6-9. (WANG Jian, ZHOU Yuwen, LIU Jia, et al. Application of rainwater storage tanks at home and abroad [J]. *Beijing Water*, 2010(3):6-9. (in Chinese))
- [67] 王建龙,黄涛,张萍萍,等. 合流制溢流调蓄池污染控制研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(8):85-89. (WANG Jianlong, HUANG Tao, ZHANG Pingping, et al. Research progress on combined sewer overflow stormwater storage tank for pollution control [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, 37(8):85-89. (in Chinese))
- [68] PETRUCK A, CASSAR A, DETTMAR J. Advanced real time control of a combined sewer system [J]. *Water Science & Technology*, 1998, 37(1):319-326.
- [69] ALKHADDAR R M, HIGGINS P R, PHIPPS D A, et al. Residence time distribution of a model hydrodynamic vortex separator [J]. *Urban Water*, 2001, 3(1/2):17-24.
- [70] 吴春笃. 城市合流管网溢流污染控制规划研究[M]. 镇江:江苏大学出版社, 2014.
- [71] 马倩倩,蔡欣,丁怡斐. 旋流分离器在合流制溢流污染控制中的应用进展[J]. *绿色科技*, 2016(2):68-70. (MA Qianqian, CAI Xin, DING Yifei. The application progress of cyclone separator in the control of overflow pollution in combined flow control system [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016(2):68-70. (in Chinese))
- [72] LUYCKX G, VAES G, BERLAMONT J. Comparison between the separating efficiency of an improved high-side weir overflow and a hydrodynamic storm king™ separator [J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39(9):177-184.
- [73] SULLIVAN R H, URE J E, PARKINSON F, et al. Design manual: swirl and helical bend pollution control devices [R]. Washington D C: EPA, 1982.
- [74] PISANO W C, BROMBACH H. Operational experience with vortex solids separators for combined sewer overflow (CSO) control [J]. *Water Science & Technology*, 2011, 29:383-391.
- [75] LEE D H, MIN K S, KANG J H. Performance evaluation and a sizing method for hydrodynamic separators treating urban stormwater runoff [J]. *Water Science & Technology*, 2014, 69(10):2122-2131.
- [76] COCK W D, BLOM P, VAES G, et al. The feasibility of flocculation in a storage sedimentation basin [J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39(2):75-83.
- [77] 张力,张善发,周琪. 化学强化一级处理工艺处理上海合流污水溢流水的中试研究[J]. *净水技术*, 2010, 29(3):18-21. (ZHANG Li, ZHANG Shanfa, ZHOU Qi. Pilot scale experiment on chemically enhanced primary treatment (CEPT) for combined sewer overflows (CSOs) in Shanghai [J]. *Water Purification Technology*, 2010, 29(3):18-21. (in Chinese))
- [78] 邢丽贞,王恩革,常青霞. 合流制污水溢流治理技术综述[J]. *山东建筑大学学报*, 2011, 26(2):166-169. (XING Lizhen, WANG Enge, CHANG Qingxia. On the treatment technologies for combined sewer overflows [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2011, 26(2):166-169. (in Chinese))
- [79] 谈文彦. CSO水质特征及磁絮凝最佳参数研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- [80] TCHOBANOGLOUS G, BURTON F L, STENSEL H D. *Wastewater engineering treatment and reuse* [M]. 4th ed. Boston, US: McGraw-Hill Higher Education, 2003:50-51.
(收稿日期:2018-06-14 编辑:熊水斌)