

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.14.006

中国城市合流制溢流控制的系统衔接关系剖析

闫攀¹, 赵杨¹, 车伍^{2,3}, 杨正^{4,5}, 李敏⁶, 陈灿¹

(1. 北京雨人润科生态技术有限责任公司, 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. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京
100044; 4. 中国地质大学<北京> 水资源与环境学院, 北京 100083; 5. 北京雨人润科生态
技术有限责任公司 城市雨洪管理研究中心, 北京 100044; 6. 武汉市水务科学研究院,
湖北 武汉 430010)

摘要: 合流制溢流(CSO)控制子系统之间的衔接关系是科学合理制定 CSO 控制策略、长期规划和实施方案必须解决好的基础性、系统性问题。结合各城市 CSO 控制中存在的一些突出问题和误区,详细剖析 CSO 控制各子系统之间的衔接及制约关系,以及这些基本关系受现实条件的影响。进而提出通过系统优化配置实现 CSO 控制目标的基本思路 and 原则,并对未来国内城市制定 CSO 控制策略的一些重点工作提出建议。

关键词: 合流制溢流控制; 排水系统; 溢流污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)14-0037-09

Analysis of the Conjunctive Relationship of Urban Combined Sewer Overflow Control System in China

YAN Pan¹, ZHAO Yang¹, CHE Wu^{2,3}, YANG Zheng^{4,5}, LI Min⁶, CHEN Can¹

(1. *Beijing Yuren Rain-eco Technology Co. Ltd., 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 Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China*; 4. *School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences <Beijing>, Beijing 100083, China*; 5. *Urban Stormwater Management Research Center, Beijing Yuren Rain-eco Technology Co. Ltd., Beijing 100044, China*; 6. *Wuhan Water Research Institute, Wuhan 430010, China*)

Abstract: To scientifically and rationally formulate Combined Sewer Overflow (CSO) pollution control strategy, long-term plan and implementation program, conjunctive relationship among CSO control subsystems is a fundamental and systematic problem that must be solved. Based on some outstanding issues and misunderstandings in urban CSO pollution control, this paper focuses on the analysis of the connection and restriction among CSO pollution control subsystems, and how these basic relationships are affected by actual conditions. Furthermore, the paper puts forward the basic principles of system optimization to effectively achieve CSO control goals, and presents suggestions on the important parts of CSO control strategies formulation of domestic cities in the future.

Key words: combined sewer overflow control; drainage system; CSO pollution

我国城市合流制及相关排水系统具有明显的多样性、复杂性、差异性特征,制定控制策略时,如果

缺乏对城市排水系统的系统摸排和全面评估,缺乏对排水系统自身特征和外部条件造成影响的深入分析,就容易将不同情况下的污染问题与合流制溢流(CSO)污染混为一谈或区分不清,陷入顾此失彼的混乱或各持己见的窘境,从而影响重大决策和工程建设的科学性、合理性。限于篇幅,文中难以对合流制及其相关排水系统的全系统衔接关系进行全面分析和讨论。但本质上,不同类型“雨污合流污水”面临的决策难题、控制策略、系统衔接关系及规律等,与截流式合流制排水系统具有较多共性且原理基本相通,以“雨污水混流、溢流、截流”为基本特征的截流式合流制排水系统代表了相对较完整、典型的合流污水处置方式,也是未来合流制区域排水系统更新和完善的重点。因此,主要围绕截流式合流制排水系统对CSO控制总体思路和各子系统的衔接关系进行深入探讨,尤其关注系统真实运行状况、现实条件等对衔接关系及系统决策产生的影响。

事实上,CSO控制中各子系统的特点及其之间的衔接关系,直接影响了各城市的CSO控制策略及工程决策。美国、德国、日本在CSO控制策略选择上的倾向与差异,很大程度上就是基于对系统及系统关系的重视和切实的把握,如美国有一定代表性的“大截流”以及德国应用较多的“分散调蓄”等,都是在对城市基本条件、排水系统现状及内部衔接关系进行综合评估的基础上做出的优化策略选择。

而我国城市合流制排水系统面临的条件更复

杂,溢流污染的危害也更为严重,但大部分城市长期缺乏系统性控制思路和可持续的策略^[1]。从目前关于CSO控制的一些专业讨论,及当前各城市已开展的相关规划、项目设计及实施情况来看,存在几方面比较普遍的共性问题,极大地影响了CSO控制系统的决策、工程合理性和部分已实施工程的运行效率,并直接导致部分工程难以达到预期目标。这些系统性问题常见于:①CSO控制策略和实施方案中的系统构成不完整;②某些重要控制措施的上、下游子系统能力不匹配,导致“无效投资”,例如盲目改造截流干管和提高截流倍数或设置大型CSO调蓄设施,但系统处理能力与之明显不匹配;③工程项目设计工况与系统的实际工况差异巨大,存在较大隐患;④重大工程决策时对水质目标可达性及整体方案技术经济合理性分析和比选不足,缺乏系统角度的优化分析和近远期规划,实施项目在整个决策系统中的重要性、贡献率、优先级和时间安排等不清晰;⑤对复杂而庞大的系统工程面临的实际困难、制约因素和可达性,亦即风险分析不足。

这些共性问题及现实困惑共同反映出,必须对CSO控制系统的衔接关系及其受现实运行条件的综合影响高度重视,也需要更为深入的探讨和剖析。

1 截流式合流制系统污染物转输及溢流控制

典型的截流式合流制排水系统一般包括:雨水和污水的收集、截流、就地处理和污水厂处理、排放等环节,具体构成及污染物转输、排放见图1。

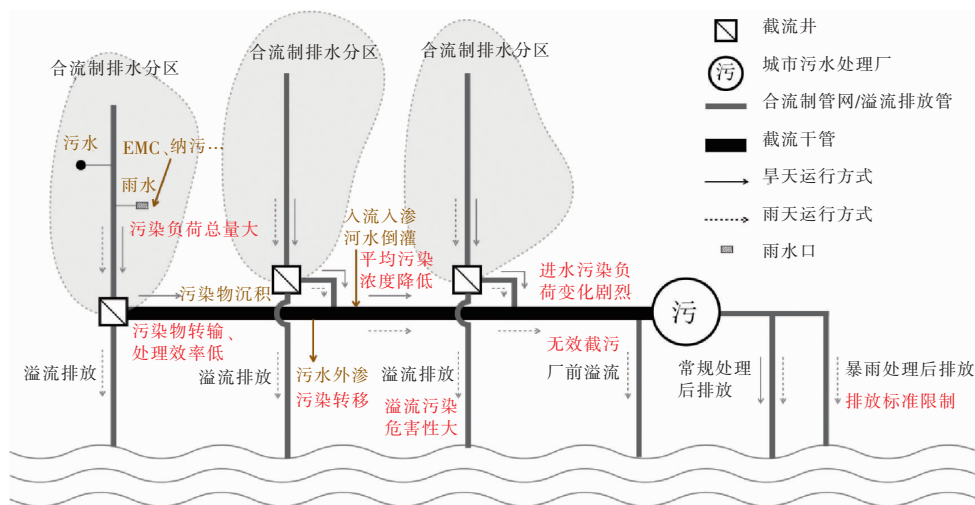


图1 截流式合流制排水系统构成及污染物转输、排放

Fig.1 Composition of intercepted combined sewer system, and the transfer and discharge of pollutants

旱天,合流污水通过污水处理厂全流程处理后排放;雨天,在系统截流及处理能力范围内的合流污

水经过全流程或单独处理后排放,超出截流或处理能力的合流污水,主要集中在截流干管溢流口、污水处理厂的厂前紧急溢流口发生溢流。也有部分城市存在一些特殊情况,暴雨时因管网排放能力不足、地面坡度大等原因导致合流污水地面漫溢排放。

在我国,由于城市管理、居民生活习惯等外部条件造成的系列影响,污染物在合流制排水系统内的收集、转输、排放情况极为复杂,且具有很大的危害性。首先,国内城市普遍存在垃圾丢弃、清扫不善、沿街商铺排污漏污等问题,下垫面及雨水口内污染物累积水平高,降雨时大量冲刷至管网系统,导致雨水径流污染非常严重。其次,我国合流制管道防沉积设计不足和缺乏专门的运维冲洗,大量污染物容易沉积在管道内,当管道流量达到一定程度时,就会导致严重的管内冲刷,携带高浓度“黑水”的合流污水产生溢流,对河湖水体构成重度水污染威胁,许多城市雨季的黑臭现象即与此有关。而且,暴雨时被

大量冲刷和集中排放的合流污水,对污水处理厂的处理工艺也构成冲击性影响。此外,由于管网转输过程中地下水及其他水源入流入渗、污染物沉积等影响,造成旱天污水处理厂进厂污水浓度低,处理工艺受影响,甚至有些污水处理厂需要持续添加碳源才能保障正常运行。以上几方面原因,最终导致合流制系统污染物实际收集、转输及处理效率低下,溢流污染严重。

针对污染物在合流制系统中产生、转输及排放等关键环节,主要通过低影响开发源头减排、雨污分流改造、管网截流能力提升、调蓄及回送、调蓄及就地处理、污水厂升级改造等工程技术措施,综合达到削减CSO污染负荷的目的,具体如图2所示。为了最大限度地利用现有系统和减少污染物来源,一些非工程性措施(如公共教育、街道清扫、排污管理、管道冲洗和清淤等)及管道系统的优化(如实时控制、管网修复等)等也是CSO控制的重要举措^[2]。

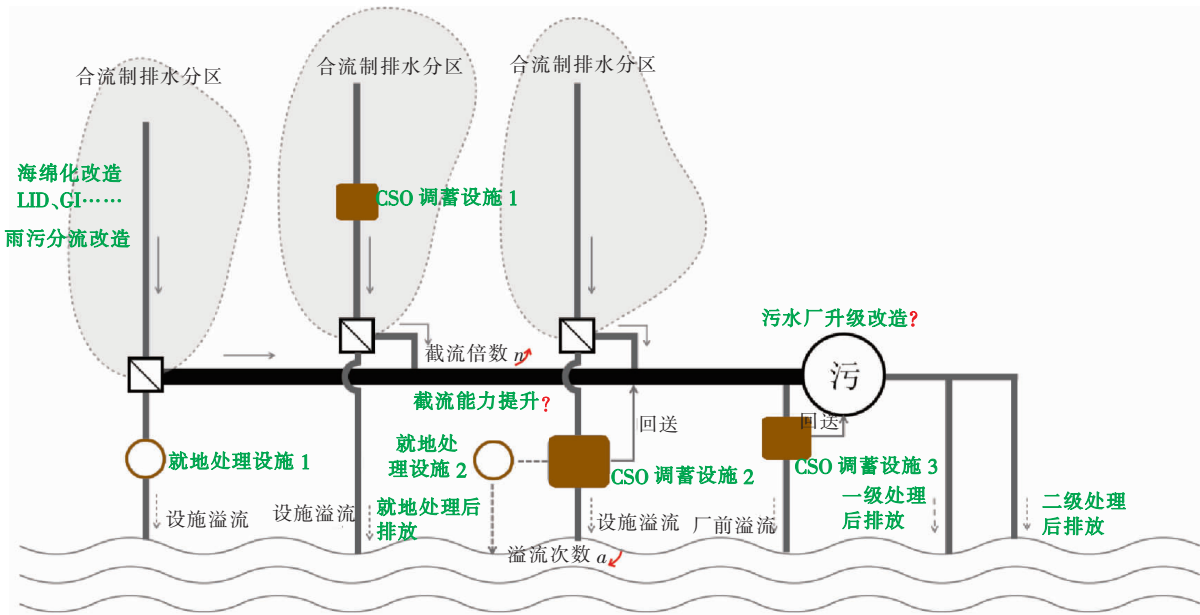


图2 CSO控制系统架构

Fig. 2 Composition of combined sewer overflow control system

上述CSO控制子系统之间有些呈互补作用,如源头控制与调蓄、处理系统的关系;也有些由于自身特点,构成对其他子系统的制约,如处理系统对截流、调蓄系统产生的影响。在具体工程中,如何结合合流制区域基本条件,统筹运用好这些不同类型的技术措施并进行系统优化,实现更为经济有效的溢流污染控制,是一项非常复杂和有难度的工作。既要考虑技术体系上的基本关系及统筹衔接,把握溢

流控制关系的基本逻辑、重要环节和主要方法,也要充分考虑现阶段非技术因素(如前述合流制及相关排水系统的复杂特征、政策、技术导则、规范标准、城市管理)对CSO控制决策所产生的重要影响,并在瓶颈环节取得突破。

2 “源头、过程及末端”之间的协同关系

源头控制既包括同时具有径流总量减排和径流污染物处理作用的低影响开发设施的实施和改造,

也包括场地内雨污分流改造。其中,低影响开发(LID)或绿色基础设施(GI)能直接减少雨水排入合流制或分流制管网系统,同时提供雨水径流净化处理的功能。源头LID改造/建设主要从以下2个层面达到CSO控制效果:①削减进入合流制排水系统的雨水径流及污染负荷总量,为污水处理厂雨天腾出更多处理余量;②改善下垫面不透水特性,削减峰值流量,延迟峰现时间,降低溢流频率和总量。“雨污分流改造”则主要是减少进入合流制管网系统的雨水径流,但雨水径流仍然需要进行处理,且需要同时建设覆盖建筑小区和市政道路的雨污分流管网,才能有效减少污染物排放总量。

源头控制措施的实施,能有效缓解下游控制系统的压力;反之,下游调蓄及处理设施的合理设计,也能在一定程度上分担老城区海绵化改造的源头减排目标。总体上,由于源头控制是CSO控制的最初始环节,受其他子系统的干扰较少。基于这种特性,在美国、日本等国家,局部区域的雨污分流改造与低影响开发已经被作为CSO控制的重要组成,费城、纽约、西雅图等城市已逐步将低影响开发作为CSO控制的重要手段之一,并纳入长期规划,持续推进建设。我国在海绵城市试点建设推动下,已逐步在试点城市建成连片规模化的低影响开发项目,部分城市也将源头控制纳入到规划建设管控流程当中,作为新、改(扩)建项目的基本要求,对老城合流制区域的CSO控制将产生有利的影响。

虽然源头控制能较有效地削减CSO,但也应充分认识其比较苛刻的实施条件和大规模改造的难度。一方面,源头减排项目要实现对合流管网总体入流量及入流污染的明显削减作用,需要尽可能地系统连片或规模化改造。另一方面,合流制区域一般处于高密度中心城区,改造条件复杂、地面和地下空间受限,部分城市还面临建筑及文物保护、大面积地下结构防护等要求,国内外的经验都充分证明,大范围实施源头减排改造的难度和代价其实都比较大。从美国费城、纽约、华盛顿等城市推行绿色基础设施控制CSO的经验看,虽然大部分地区将GI控制作为CSO控制系统不可或缺的一部分,但总体实施比例<20%,灰色设施仍然承担了大部分CSO控制任务^[3]。这与当地实施条件和代价有关,也受前期灰色设施完善程度、CSO控制目标的达标要求等因素影响。不过总体而言,合理规划实施源头控制

措施往往可以弥补灰色设施的不足,减少项目投资,提高整体效益。

需要强调,由于国内排水系统的建设管理能力地区差异明显、复杂程度高,接纳水体既受到各类溢流口的影响,也受到管网长期形成的漏损、高水位运行、直排漏排等各种影响,导致不完善的基础管网短时间内全面改造难度大、见效慢,也导致部分城市在短期内实施的高投资截流系统提升改造、调蓄及处理系统建设难以发挥其设计能力和实现应有效能。相比之下,源头改造和低影响开发控制措施具有更高的普适性,在某些城市或地区有可能起到更为重要的污染减量作用。

3 “截流-处理-调蓄”之间的制约与匹配

3.1 截流与处理能力的衔接

由于对截流和处理系统的匹配关系理解或重视不足,污水处理厂设计、排放标准限制,以及建设管理过程中人为因素的复杂影响,截流能力与污水处理厂处理能力、处理工艺的不匹配是国内城市合流制系统普遍存在的突出问题。一些城市花大力气进行截污或分流改造,但往往实际截流效果不佳,下游处理系统能力不匹配,造成污染物转移排放,实际的去除效率不高,投资效益低,这必须引起足够重视并妥善解决。

完善的截流式合流制排水系统中,系统截流能力应与处理能力相匹配,这也是影响CSO控制效果和工程决策的基础关系。对截流和处理系统的关系而言,截流倍数是最重要的控制或影响参数之一,我国规范标准给出的推荐截流倍数是2~5,在这个范围究竟如何取值是一个很关键的问题,因为大小差一位就会带来整个系统巨大的工程改造和投资,因此千万不能盲目。事实上,发达国家也并不都是采用高截流倍数,即使采用较大的截流倍数也是有充分的理由和合理的系统衔接。而脱离了处理能力的匹配探讨截流倍数的取值大小其实是一个伪命题,不仅没有意义,还可能成为设计和工程败笔,造成投资浪费。即使污水处理厂有一定的接纳截流污水的能力,也必须清楚,由于污水处理系统尤其生物处理单元承受雨天流量和污染物负荷变化的能力有限(一般不超过3倍旱季平均流量),截流干管的截流倍数一旦偏高,污水处理厂就难以应对超量合流污水,甚至对生物处理工况造成破坏。通常情况,需要通过调整雨天处理流程、增设雨天处理工艺或增加

就地处理措施等方式应对水量、水质变化,或通过调蓄设施临时储存合流污水,并在雨后送回到处理设施处理后排放。

发达国家在CSO控制长期研究与实践过程中,不同城市根据空间条件、既存截流管网的截流能力、污水处理厂处理能力等,选择不同的CSO控制方式。很重要的是,这些国家一般都有与技术路线相匹配的管理制度和排放标准。有些城市中心区域密集,但城郊空间广袤,选择了高截流倍数的截流干管转输合流污水至污水处理厂集中处理,并设置不同处理能力的一级、二级处理系统,兼顾旱天、雨天不同进水流量及水质的影响,典型的如西雅图West Point污水处理厂。也有城市采取限制截流倍数的控制策略,通过强化污水处理厂全流程处理能力,以及调蓄设施和生态处理设施的联用,综合控制溢流污染,典型如德国杜塞尔多夫、慕尼黑等城市,都采取了类似的处理策略,而没有为截污干管设置高截流倍数。上述不同城市的技术策略选择,都是长期研究、持续评估技术路线可行性和系统效率后做出的优化选择,需要透彻理解基于特定条件下的截流与处理能力的关系,并根据城市实际条件和技术经济分析综合选取策略和技术手段。

当前我国较多城市合流制排水系统普遍面临截流能力低、污水处理厂处理余量小以及截流处理能力不匹配等客观事实,既有历史及人为原因,也有客观现实条件的制约影响。主要包含:①对截流系统实际截流能力及污染物转输效率评估不足;②配套法规政策、标准规范等方面存在不完善;③管网流量及污水处理厂规模、工艺设计,对入流入渗、合流污水的变化影响等考虑不足。

截流干管高水位运行、断路、漏损等问题,以及合流污水转输过程中污染物外渗、沉积、冲刷、外源水入流入渗等特征,已经比较明显地反映了截流系统运行工况对实际截流能力及污水处理厂实际进水负荷等所造成的影响。这些实际条件的影响,是具体工程项目里判断是否额外增设截流系统、是否改造干管/渠提高截流倍数以及如何有效提高实际截流能力等应首要考虑的问题。

我国《中华人民共和国水污染防治法》《排污许可管理办法(试行)》等法规政策以及国家标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中,未明确合流制系统溢流排放、污水处理厂预处理

后溢流排放相关的处罚或豁免规定,也缺乏相应的污水处理厂雨天排放标准作为支撑,难免造成环保执法时不去触碰这些“真空地带”,而以较严苛的方式进行管理,进而导致污水处理厂雨天厂前溢流或憋高管网水位等现象。这也致使污水处理厂在提标改造时难以充分考虑雨天处理工艺及处理规模的提升。这些重大问题不解决,而一味提高城镇污水处理厂常规污水处理水质标准,很难从根本上缓解CSO及水质污染问题。但值得一提的是,昆明市新发布的《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)中,对污水处理厂雨天CSO排放制定了单独的水质排放标准,要求超量合流污水经一级强化处理并达到E级标准后通过单独排放口进行排放,而环保部门对此排放口进行单独审批和监督管理。虽然对于E级标准执行的难易程度、监管方式等尚未形成成熟经验,相对于美国等发达国家合流制排放管理仍有较大差距,但至少走出了较为开创性的一步,值得业内重视及其他城市学习借鉴。

从基础设计看,由于对管网漏损及其他原因导致的入流入渗水量重视不足,对合流污水的流量及水质变化考虑不充分,大部分污水处理厂按分流制系统进行建设和管理,进水水质按生活污水及工业废水考虑,导致污水处理厂规模本身偏低,且难以应对雨天进水流量及负荷变化。《排水工程》(第五版)下册中对于合流制污水处理厂要求“进水泵房前的设计流量为雨天截流量,预处理后超过旱流高峰流量部分溢流排放,后续处理构筑物均以旱流高峰流量作为设计流量”^[4],基本限定了污水处理厂雨天合流污水的最大处理规模,且受前述政策及标准影响,污水处理厂内预处理后的溢流排放也难以实现,截流与处理系统不匹配、污水处理厂自身应对合流污水处理能力不足等问题很难不存在。《排水工程》(第五版)上册中对于污水流量计算要求“宜适当考虑地下水渗入量,具体取值可按10%~20%的经验数据”,但实际国内各城市差异巨大,部分南方水网城市地下水水位高、河湖水倒灌风险较大,管网入流入渗水平可达20%以上^[5-6]。在此基础上,对比同等人口、面积条件下日本、美国等典型发达国家合流制区域污水处理厂,发现我国污水处理厂处理规模相对偏小,一些污水处理厂甚至旱天即满负荷或超负荷运转,雨天的处理能力更无从谈起。以

某南方城市的合流制区域污水处理厂为例,其服务面积为 26.9 km^2 ,服务人口为 27.8 万人,现状处理能力为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。而处于近似降雨条件下的日本大阪平野污水处理厂,服务面积为 24.86 km^2 ,服务人口为 29.83 万人,现状处理能力为 $27 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,即便两地区居民用水习惯差距较大,仍然存在数倍的处理规模差异。

3.2 调蓄与截流、处理能力的匹配

调蓄设施主要包括 CSO 调蓄池、深层调蓄隧道及管道调蓄等形式,是基于 CSO 控制系统在“截流—处理”这一基本关系上延伸出的主要技术措施。

是否要增设 CSO 调蓄设施以及如何确定 CSO 调蓄设施的规模、位置等,均应建立在统筹考虑截流、处理能力及充分评估系统实际状况的前提下,包括对未来污水处理厂提标改造机会的考虑。如图 1、图 2 所示,在基本确定污水处理厂近、远期实际处理能力后,评估系统所能承担的最大截流倍数。当污水处理厂雨天处理能力相对富余但系统截流能力不足时,尽可能通过既有系统的优化(如管网清淤、修复等)提高实际截流能力,在此基础上评估截流系统改造的可能性。当截流干管截流能力与污水处理厂处理能力基本匹配或截流能力明显偏高时,可在干管截流井、污水处理厂内等处设置调蓄设施,临时储存合流污水,雨后或高峰流量过后及时送回污水厂进行处理;当增设的 CSO 调蓄设施规模进一步超过污水厂处理能力时,应考虑额外增加其他就地处理措施。除系统上下游衔接关系外,当地汛期降雨频率及平均降雨间隔等,也是影响调蓄设施的设计规模、布局的重要因素^[7]。总体上,污水处理厂旱天处理余量及截流干管旱天输送能力越充足,汛期的平均降雨间隔越长,越有利于调蓄后回送污水厂进行处理;当污水厂日常处理能力饱和、汛期连续降雨时,CSO 调蓄设施往往面临更高的排空压力,此时因地制宜地选择就地、分散处理设施,污染控制效率可能更高。

此外,对调蓄系统而言,优化调蓄设施的位置极其重要,当 CSO 调蓄设施位于源头、支线合流管网、截流干管,甚至污水厂内等不同位置时,其所能起到的作用、对系统的贡献等各不相同,需要综合评估^[8]。由于一些地区管网系统建设标准较高,或城市改造过程中汇水面积发生变化,也可以利用既有管网进行错峰调节,如德国的水力自动控制阀、浮控

调流阀、拦蓄截止阀等都是专用于管道调蓄的设备,近年来我国北京等城市也考虑利用暗渠进行管道内调蓄。实时控制(RTC)则是基于管道调蓄和其他调蓄系统衍生出来的智能调控系统,当前国内相关研究和关注也开始增多,一些发达国家也进行了较多的探索实践^[2],旨在更高效地利用管道调蓄空间,使管网系统内上下游调蓄、排放能力与污水厂处理能力建立更良性的匹配关系。但需要强调,构建管道调蓄及实时控制系统的重要前提是排水系统基础数据应全面且真实,管网/渠本身处于相对较好的运行状态,同时不能降低区域排水防涝能力。

经过多年发展,调蓄设施在美国、德国、日本等发达国家的系统应用比较广泛,既包括地上、地下调蓄池,也包括一些兼具调节、调蓄功能的深层隧道^[9],并根据城市条件和特点、调蓄与截流处理系统之间的关系等,发展出多种不同的“截流—调蓄—处理”技术路线。芝加哥深隧与保护区建设计划主要对芝加哥主城区的合流污水进行截流处理,减少 CSO 对芝加哥河的影响。该项目自 1975 年开始建设,已经建成 175.4 km 长的深隧截流设施,2015 年、2017 年分别建成 Thornton、MacCook 一阶段地面调蓄工程,调蓄总容积超过 $7\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ (折合约 $20 \text{ m}^3/\text{人}$)。波特兰市 RM Clayton 污水厂服务的合流制区域,在污水厂雨天处理能力下,对应可实现的最大截流倍数约为 2。超过 RM Clayton 污水厂处理能力的合流污水进入调蓄深隧,并分别输送至 4 座 CSO 处理站进行分散处理后排入查特胡奇河。

近 10 年来,我国上海、昆明、广州、镇江、长春、常德、池州等城市也先后在水系治理、海绵城市建设、黑臭水体整治等相关工作中,开展了较多 CSO 调蓄设施的工程实践^[3]。这些调蓄工程有些起到了预期效果,有些则因为对系统关系和技术路线缺少深入分析和妥善处理,或规划设计阶段缺乏对管网和处理厂系统真实运行条件的评估,导致调蓄设施运行效率不高或引发新的问题。例如,截流的合流污水因无法及时回送、污水厂处理能力不足或处理工艺不匹配而只能原位排放或长时间贮存;截流干管运行水位高,再加上进水、回流、溢流设计不合理,导致调蓄设施长时间处于满水状态;CSO 调蓄设施建设时未经评估而大量封堵上游溢流排口,进而导致区域内涝风险提升。总而言之,CSO 调蓄设施投资巨大、系统匹配性和空间要求高,工程决策时,

应对系统衔接关系及真实运行工况进行全面评估,尽可能科学合理地进行规划设计或系统优化改造,减少低效投资项目。

4 基于溢流控制目标的系统优化组合

评估、分析 CSO 控制系统的衔接关系及不同技术措施的适用性、可行性和经济性,核心目的在于通过子系统优化配置有效实现溢流控制目标及溢流污染的削减,最终实现受纳水体的水质管理要求。

① 溢流控制目标的确定

CSO 控制目标的制定,直接影响控制措施的选择及子系统优化组合,以及下一步详细方案的制定。我国 CSO 溢流控制目标的研究偏滞后,近年来逐渐开始在相关规范或规划中予以明确,主要包括溢流频次、溢流体积削减率、溢流污染物浓度及总量控制等指标,如《海绵城市建设评价标准》(GB 51345—2018)中要求“CSO 排放口的年溢流体积控制率不应小于 50%,且处理设施悬浮物排放浓度的月平均值不应大于 50 mg/L”。但不得不提,在水质管理目标、水质排放标准及 CSO 控制目标之间欠缺科学合理的量化关系研究,CSO 控制目标缺乏考量不同城市真实条件下的弹性要求等,是当前 CSO 控制系统

及其他水污染防治工程合理性、有效性的重要阻碍之一,而这既需要务实的基础理论研究,也需要环保、城建、规划等部门共同作为。此外,我国不同城市受纳水体污染状况已然不容乐观,即使实现溢流控制目标,也并不一定能在短期内完全有效解决水质污染问题及达到相对严苛的水质标准,需要客观理性地对待。

② 方案的技术经济分析与系统的优化组合

有了明确的 CSO 控制目标后,应进一步确定采用哪些控制措施,以及这些措施的规模、布局、计划实施时间等,提出实现 CSO 控制目标可能的不同组合方案。组合方案的技术经济分析和优化比选,需要综合考虑系统衔接关系的合理性,衡量经济因素及其他制约因素,如:组合方案的投资、实施难度、有效性、真实运行条件下影响后期运行管理保障等。在此基础上,明确源头、截流、调蓄、处理等子系统最优组合方案,通过科学、合理的评估计算方法、设计工况与实际运行工况的严谨推敲等,对组合方案进一步细化要求,并结合非工程性保障措施,形成本地区 CSO 控制清晰的技术路线及实施计划。基于溢流控制目标的系统组合与优化关系详见图 3。

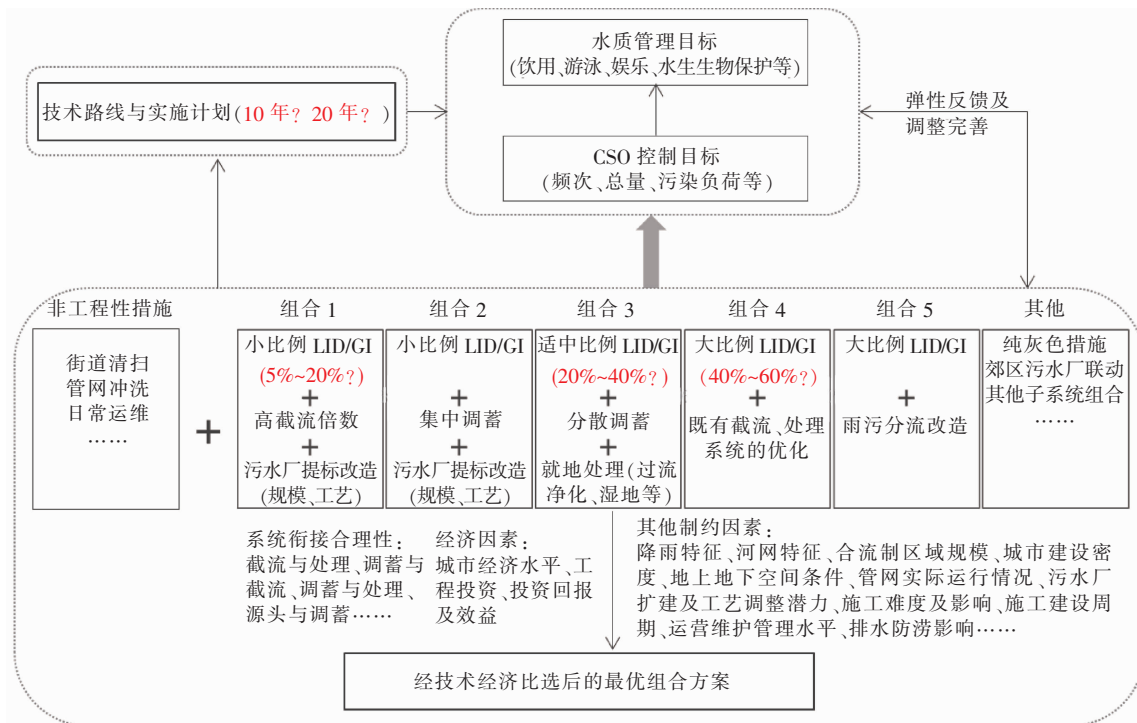


图3 基于溢流控制目标的系统组合与优化关系示意

Fig. 3 Illustration of the relationship between system combination and optimization based on CSO control objectives

从发达国家经验看,实现一个城市 CSO 控制系统的基本完善,往往需要 10~50 年,而这期间,水质

管理目标可能愈发严格、适用技术措施也在发展,也面临城市规划及用地的调整,加上对现有系统的准确把握很难达到尽善尽美,因此,在把握系统衔接关系及CSO控制基本规律的基础上,也应根据未来可能出现的变化,给规划及方案在具体执行过程中留有调整和优化的余地。

不同开发强度的城市区域,源头海绵化改造、污水处理厂提升改造的大致比例及规模基本可确定,进而可对截流或调蓄的设施规模进行推测,但同时也可结合城市发展情况考虑大范围旧城改造或基础设施提升改造的可能。受类似基础建设条件、地理及气候特征、经济水平等方面真实存在的差异性影响,以及不同CSO控制子系统所存在的明显优势和局限,不同地区和城市在进行CSO控制措施选择及系统组合时,具有一定倾向性或有一定规律可循。

有些城市人口规模及经济体量巨大,CSO污染情况影响重大,开发密度又极高,城市污水处理厂规模大、相对完善,在一定程度源头控制的基础上,主要采用高截流倍数或大型CSO调蓄设施的倾向可能更明显,形成如图3中组合1、2形式的决策方案。截流或调蓄的超量合流污水通过污水处理厂一级处理或其他单独工艺处理,或通过截流到其他郊区污水处理厂全流程处理后排放。典型城市案例如芝加哥、西雅图、东京等,国内广州、上海等也在探索这种模式。

有些城市人口规模和经济体量适中,CSO污染情况影响明显,具备一定的空间改造条件,出于最大限度利用城市既存设施的考量,侧重保留和利用现有截流系统的截流能力和处理系统的常规处理能力,不盲目提高截流倍数,倾向于适中比例的源头海绵化改造再加分散调蓄及处理,形成如图3中组合3形式的决策方案,典型案例如杜塞尔多夫、池州、常德等城市。

而在一些经济欠发达、规模小且城市建设密度相对较低的地区,既有系统的更新完善以及海绵化的持续改造效益更高也更为迫切;还有一些城市合流制区域较小、城市更新改造速度快、后期运维管理水平也较好,则高比例的海绵化改造以及完整的雨污分流改造可能更为适宜,分别形成如图3中组合4、5形式的决策方案。

当然,这种模式化的组合分析仅仅为一般性规律总结和方法论上的阐述,具体还应结合各城市实

际情况因地制宜地进行系统分析。但总体而言,大城市、超大城市由于涉及更多的排水分区,空间条件复杂且多样,相对于中小城市,会更明显地呈现出多种模式或多种技术措施综合应用的特点,一般也具有更大的难度和需要更长的实施时间,做长期规划也显得更为重要和迫切。

5 结语

科学合理地制定CSO控制策略、长期规划及实施方案,必须深刻理解我国城市合流制及其相关系统中各子系统之间的相互联系和制约关系,把握各系统和子系统的本质特征、主要功能、适用场景,以及其在实施中所需要耗费的投资、时间、能产生的效果等不同方面的优势和劣势。在明确污染物控制目标与控制系统之间对应关系的基础上,结合城市更新改造、污水处理厂网的提质增效、流域水环境保护与治理等重大机遇,基于各城市合流制及其相关排水系统的现状及基本特征、真实运行工况、制约因素和其他相关条件,通过技术经济分析进行系统组合和实施方案的优化,统筹各种工程及非工程性措施。现阶段尤其应重视现状排水系统的调查与评估、污水处理厂雨天排放标准的研究与合理制定、污水处理厂雨天处理流程及工艺的技术探索与创新实践、建成区大型灰色调蓄设施和绿色基础设施的技术经济比较分析等方面的重要工作。

参考文献:

- [1] 唐磊,车伍,赵杨,等. 合流制溢流污染控制系统决策[J]. 给水排水,2012,38(7):28-33.
Tang Lei, Che Wu, Zhao Yang, et al. Study on the systematic decision-making of combined sewer overflow pollution control[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012,38(7):28-33(in Chinese).
- [2] 车伍,唐磊. 中国城市合流制改造及溢流污染控制策略研究[J]. 给水排水,2012,38(3):1-5.
Che Wu, Tang Lei. Research on strategy of China combined sewer system retrofitting and combined sewer overflow control[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012,38(3):1-5(in Chinese).
- [3] 赵泽坤,车伍,赵杨,等. 美国合流制溢流污染控制灰绿设施结合的经验[J]. 中国给水排水,2018,34(20):36-41.
Zhao Zekun, Che Wu, Zhao Yang, et al. Experiences of combination of gray-green infrastructure for combined

- sewer overflow control in the United States [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34 (20): 36 - 41 (in Chinese).
- [4] 张自杰,林荣忱,金儒霖. 排水工程(下册)[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
Zhang Zijie, Lin Rongchen, Jin Rulin. *Drainage Engineering (Volume 2)* [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).
- [5] 张智. 排水工程(上册)[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
Zhang Zhi. *Drainage Engineering (Volume 1)* [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).
- [6] 林家森. 城市污水管道地下水渗入量研究[J]. *中国市政工程*, 2004(4): 38 - 41.
Lin Jiasen. A study on infiltration capacity of underground water in urban sewers [J]. *China Municipal Engineering*, 2004(4): 38 - 41 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 车伍,武彦杰,杨正,等. 海绵城市建设指南解读之城市雨洪调蓄系统的合理构建[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(8): 13 - 17, 23.
Che Wu, Wu Yanjie, Yang Zheng, *et al.* Explanation of sponge city development technical guide: Rational building of urban stormwater detention and retention system [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8): 13 - 17, 23 (in Chinese).
- [9] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(24): 35 - 40, 48.
Lu Zhaoyang, Che Wu, Tang Lei, *et al.* Application of stormwater tunnel to control of urban flooding and combined sewer overflow [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(24): 35 - 40, 48 (in Chinese).



作者简介:闫攀(1989 -),男,湖北宜昌人,硕士,工程师,主要研究方向为城市雨洪管理。

E-mail: hereyanpan@139.com

收稿日期:2020 - 06 - 02

实施国家节水行动,

统筹山水林田湖草系统治理