

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.005

流域治理视角下排水系统匹配性评估方法

刘龙志¹, 王浩正¹, 黄 荣¹, 董 松², 刘智晓³, 许申来⁴

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 昆明滇池投资有限责任公司, 云南 昆明 650000; 3. 北京首创股份有限公司, 北京 100044; 4. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘 要: 以城市化和气候变化为驱动的外部复杂性和不确定性对流域排水系统匹配性提出更高的要求,流域治理方案需要对排水系统匹配性进行系统分析,国外采取单体设施规模适度冗余设计、设施间的空间布局优化和系统联调联控技术,取得了很好的效果。以城市排水系统中的厂-池-站-网等主要排水设施为研究对象,提出流域厂-池-站-网匹配性指标体系、技术路线、评估内容与评估方法。根据厂-池-站-网排水系统匹配性评估结果,设计工程改造方案和联调联控方案,减少不必要工程投资的同时最大程度发挥各设施的调蓄、协同和处理能力,为城市排水系统优化提供参考和借鉴。

关键词: 排水系统; 匹配性; 评估指标体系; 联调联控

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0024-08

Evaluation Methods of Drainage System Matching from the Perspective of Watershed Management

LIU Long-zhi¹, WANG Hao-zheng¹, HUANG Rong¹, DONG Song², LIU Zhi-xiao³, XU Shen-lai⁴

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Kunming Dianchi Investment Co. Ltd., Kunming 650000, China; 3. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China; 4. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: The complexity and uncertainty driven by urbanization and climate change put forward higher requirements for the matching of urban drainage system. The drainage systems need to be systematically analyzed under the governance scheme of watershed treatment. Good results have been achieved by adopting appropriate redundancy design of single facility scale, optimization of spatial layout, and system joint dispatching and control technology abroad. Taking a plant-tank-pump station-network in an urban drainage system as the research object, a watershed plant-tank-pump station-network matching index system, technical route, evaluation content and evaluation method are proposed. According to the matching results of the plant-tank-pump station-network drainage system, the

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2019-K-174); 中国建设科技集团科技创新基金资助项目(Z2019J02); 中国市政工程华北设计研究总院科研课题(ZHY-2020-44-ZHSW)

通信作者: 刘龙志 E-mail: hbyllz@126.com

project transformation plan as well as the system joint dispatching and control technology can reduce unnecessary project investment and maximize the storage, coordination and treatment capacity of various facilities, which can provide reference for the optimization of urban drainage system.

Key words: drainage system; matching; evaluation index system; joint dispatching and control

城市排水系统是复杂的市政基础设施系统,具备包括雨/污水的收集、传输、储存和净化在内的较为完备的雨/污水处理能力^[1]。现代化的排水设施和成熟的设计提高了城市排水系统的处理能力,但是面对日益严重的气候变化、基础设施老化、城市规模及人口的不断扩张和城市透水面积的不断缩减,出现了城市内涝、污水管网溢流(SSO)和合流制管网溢流(CSO)等问题^[2-3]。解决城市排水系统问题的传统方法是通过不断地扩建(修复)管网、污水处理厂、泵站、调蓄池等灰色基础设施,来提高整个系统的收集和处理能力^[4]。修建以低影响开发(LID)设施为代表的绿色基础设施,以提高源头降雨径流控制能力。

上述“灰绿”结合的设施共同组成了现代城市排水系统,随着城市的发展,排水系统日益复杂。国内近几年在内涝防治、黑臭水体治理、污水系统提质增效等工作中也逐步意识到了排水系统的复杂性和排水设施之间的关联性,提出了“厂-网-河”一体化等思路。为了充分发挥排水设施的能力,提升系统的可靠性,有两种思路:一是分析系统瓶颈,提出工程改造方案;二是采用实时控制技术(RTC)实现在动态运行环境下充分利用系统能力^[5-6],减少内涝、CSO和工程投资的目标^[7]。通常情况下,两种思路需要结合使用。无论采用哪种思路首先都需要对现有系统设施间的匹配性进行系统分析、诊断、评估,以系统掌握不同排水设施的工程瓶颈、运行问题和联动特征。

1 匹配性评估的目的

城市排水系统通常由管网、泵站、调蓄/净化设施、污水处理厂以及受纳水体等要素组成,这些设施之间相互连通,联动运行,共同执行城市内涝防治和污水处理的任务。但是城市排水系统设施间的匹配性不足,会带来一系列问题,例如旱天污水直排、雨天合流制溢流污染、管网高水位运行等,具体如图1所示。

排水设施匹配性评估的主要目的在于:①基于

不同目标,定量评估排水系统整体及局部的匹配性,客观反映系统目前建设和运行水平,对不匹配的情况制定尽可能低成本的改造方案,为提高单体设施的总体效能(满足目标的能力以及高使用频率等)和系统的运行效果(如CSO溢流频率、排涝能力、水环境治理达标程度等)提供决策依据;②根据现有设施的匹配情况评估,开展实时控制的可行性分析,提出优化系统运行策略和调度规则,预测调度策略实施后系统匹配性的提升情况,并基于现有设施改造和新增设施的情况,不断迭代调整模型优化运行规则,为逐步实现排水系统实时控制提供控制执行器(泵站、闸门、堰、阀门等)改造方案、在线监测布点方案和基础的控制规则。

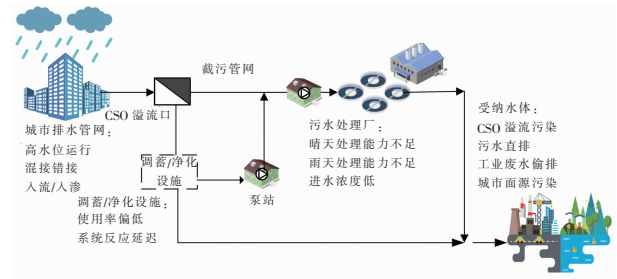


图1 城市排水系统的组成及典型问题

Fig. 1 Components and typical problems of urban drainage system

2 匹配性评估技术路线

排水系统匹配性评估建议由简入繁,主要分三步进行:单体设施匹配性评估、设施间匹配性评估和系统匹配性评估。由于各地排水系统的差异、数据完备程度的差异,在开展评估时,可根据具体情况确定评估内容和流程。

① 单体设施匹配性评估

通过资料收集和现场调研,结合城市排水系统目标,制定排水系统评估指标体系,对单体设施现有的结构性缺陷和功能不足及现状是否满足规划目标进行评估,并对不匹配的地方提出初步改造方案。比如,对管网的瓶颈问题进行评估;对现阶段、规划后城市人口产污量与排水系统污水处理能力进行匹

匹配性评估,对不匹配的地方提出修补、扩容、新建单体排水设施的改造方案。

② 设施间匹配性评估

制定监测方案,构建排水系统模型,利用监测数据对模型进行率定和验证。污水厂与管网间的匹配性评估通过监测数据(液位、流量)与模型预测曲线综合评估。泵站、调蓄/净化设施与管网间的匹配性评估通过对设施启闭、排空时间等运行记录进行合理性评估。

若发现不匹配的情况可通过工程改造或优化运行方案提升设施间匹配性,并将工程改造方案或优化后的控制规则概化到模型中,对改造实施后效果进行模拟预测。设施间匹配性评估完成后,宜对单体匹配性评估结果进一步完善、细化。

③ 系统匹配性评估

在不同降雨条件下,通过对主要的污水厂、调蓄

池、泵站等调蓄、处理、提升排水设施的流量、液位、水质关系图的绘制,进行不同片区整体排水系统的匹配性空间分析,对末端水体的水环境容量与排水系统和地表径流的污染物出流量进行匹配性评估,若旱天或雨天排水系统出现不匹配情况,结合城市规划和末端水体治理目标,提出近远期的厂-池-站-网联调联控方案,在矛盾点突出的地方可辅助工程改造措施进行系统匹配性的优化,并对优化结果进行目标可达性分析,使排水系统最终达到单体设施、设施间、系统与末端水体匹配的状态。并随着工程实施需要对排水系统匹配性进行跟踪评估和持续优化。对于较小、复杂程度不高的系统,可直接进行系统性评估。系统匹配性评估完成后,宜针对系统性评估结果,对设施间匹配性和单体匹配性评估结果进一步完善、细化。

城市排水系统匹配性评估技术路线见图2。

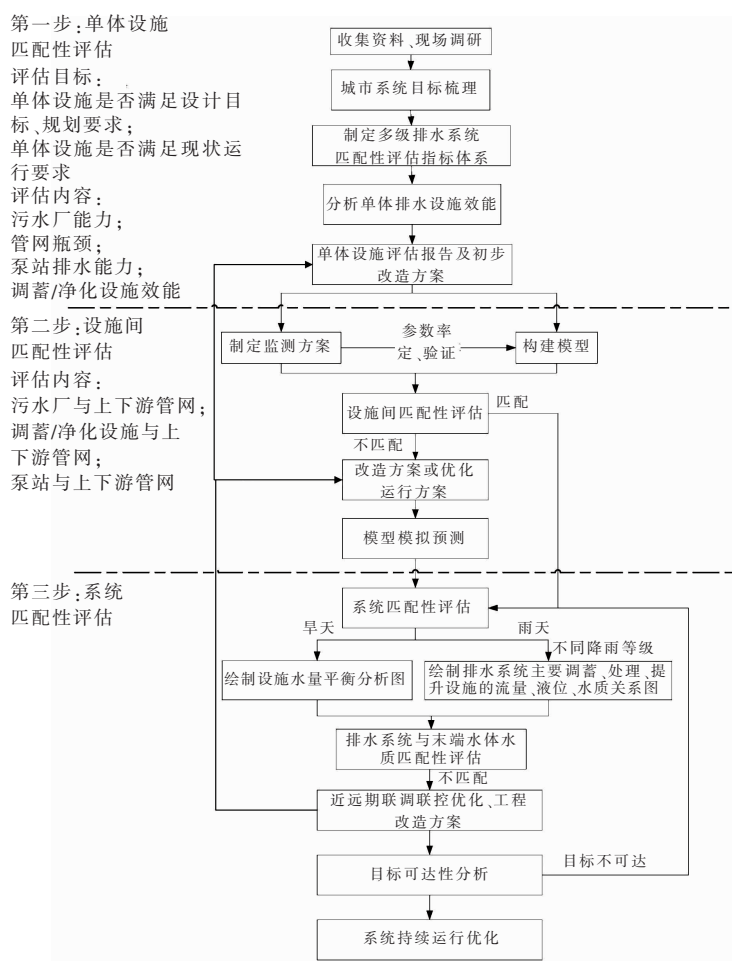


图2 城市排水系统匹配性评估技术路线

Fig.2 Technical route of urban drainage system matching evaluation

3 匹配性评估内容和方法

3.1 匹配性评估总体目标和指标体系

① 总体目标

近些年,在不确定条件下构建可靠、弹性、可持续的城市排水系统是行业关注和讨论的热点,可靠性是指在标准设计条件下,排水系统在其设计生命周期内将服务故障(内涝、溢流等)频率降到最低的程度;弹性是指在特殊情况下,排水系统在设计生命周期内的服务失效程度和持续时间最小化的程度,目标是减少故障的时间和强度。可持续性是指排水系统在实现社会、经济和环境目标最大化的同时,故障风险长期保持较低水平的程度。

开展匹配性评估也可从可靠性、弹性、可持续性三个总体目标展开。可靠性主要包括设计条件下管网、污水处理厂、管网/泵站、调蓄设施的运行能力等目标;弹性主要包括雨天设施控制内涝、CSO 和设施净化能力等目标;可持续性主要包括受纳水体水质达标、排水系统低风险低能耗稳定运行水平、排水设施低成本建设、绿色设施调蓄净化水平、提高再生水回用比例等目标。

城市排水系统总体目标见图 3。

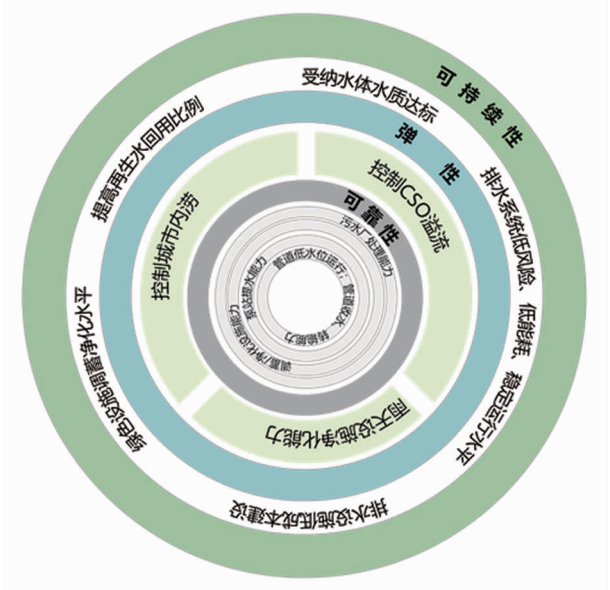


图 3 城市排水系统总体目标

Fig. 3 Overall objective of urban drainage system

② 指标体系

表 1 为实现以上目标需要开展的排水设施匹配性评估的主要参考指标,包含系统指标、污水处理厂、管网/泵站、调蓄/净化设施、受纳水体共 5 大类,29 小项指标。

表 1 排水系统匹配性评估指标体系

Tab. 1 Matching evaluation index system of urban drainage system

考核分类	序号	指标名称	指标分类
系统	1	污水、雨水收集率	可靠性
	2	年径流总量控制率	弹性
	3	系统负荷削减总量(率)	弹性
	4	系统溢流总量	弹性
	5	系统溢流负荷总量	弹性
污水处理厂	6	污水处理率	可靠性
	7	污水厂处理量峰值系数	弹性
	8	污水厂进、出水污染物浓度	可靠性
	9	污水厂外溢情况	弹性
	10	污水厂尾水水质达标率	可靠性
	11	污水厂单位处理水量成本(能耗、物耗)	可持续性
管网/泵站	12	市政道路管网覆盖率	可靠性
	13	旱天时,污水管网过流能力	可靠性
	14	雨天时,雨水管网排水能力	弹性
	15	旱天时,污水泵站日提升流量	可靠性
	16	雨天时,排涝泵站提升流量	弹性
	17	雨天时,合流制管道溢流频次	弹性
	18	单位收水面积入渗流量	可靠性
	19	旱天时,调蓄池排空时间	可靠性
调蓄/净化设施	20	雨天时,调蓄池接纳雨污水量	可靠性
	21	雨天时,调蓄池控制排口溢流量控制率	弹性
	22	雨天时,调蓄池接纳污染负荷总量	弹性
	23	旱天时,净化设施处理污染量	可靠性
	24	雨天时,净化设施处理污染量	弹性
	25	小雨水质达标率;中雨停止后 2 d 水质达标率;大雨停止后 3 d 水质达标率	可靠性
受纳水体	26	重点排河断面的水质达标率	可持续性
	27	排口/河口负荷削减率	可持续性
	28	重点排口/河口对断面贡献率	可持续性
	29	合流制排口溢流控制率	弹性

3.2 单体设施匹配性评估

单体设施匹配性评估主要采用监测和推理计算等基本方法,对厂、池、站、网等设施是否满足现状及规划设计要求进行评估。单体设施的匹配性主要评估内容为已建排水设施规模及运行情况是否能满足规划设计的要求,因各设施间联动关系所造成的设施功能不足在设施间匹配性进一步评估。依据评估发现的问题及技术瓶颈,对单体设施的改造升级提出初步方案。

单体排水设施匹配性评估指标体系见表 2。

表2 单体排水设施匹配性评估内容

Tab.2 Matching evaluation content of single drainage facility

评估层级	评估单元	评估内容	评估指标	评估方法
单体设施匹配性	管网能力	大管套小管	—	上游管网管径大于下游管网管径
		逆坡	—	管网坡度小于最小设计坡度:塑料管为0.002,其他管为0.003
		管网入渗入流	单位收水面积入渗入流量	旱天管网内流量监测数据与收水范围内人畜产污量进行对比,判断是否存在入渗入流情况,并配合潜望镜设备进行管网破损点定位分析
		管网排水能力是否满足现状及规划要求	市政道路管网覆盖率、旱天污水管网过流能力、雨天雨水管网排水能力	市政道路管网覆盖率、旱天污水管网排水能力、雨天雨水管网排水能力是否满足设计及规划要求
		雨水算子收水能力与径流量的匹配性	雨天雨水管网排水能力	是否存在雨天因雨水算子堵塞或尺寸不合适造成地面积水现象
	泵站排水能力	泵站排水能力是否满足现状及规划要求	旱天污水泵站日提升流量、雨天排涝泵站提升流量	水泵流量、扬程与设计、规划要求对比
	调蓄/净化设施效能	蓄水规模是否满足现状及规划要求	雨天调蓄池受纳雨污水量、雨天调蓄池控制排口溢流量控制率、雨天调蓄池受纳污染负荷总量	调蓄池受纳雨污水量与设计、规划要求对比
		调蓄池进水、排空规则是否合理	旱天调蓄池排空时间	设计调蓄池灌满时间为0.5~1h,降雨间隔时间大于排空时间
		净化处理能力是否满足设计要求	净化设施处理污染物量	出水水质采样数据是否满足设计要求、国标、地标及当地规划要求
	污水厂能力	出水水质达标情况	污水厂进出水污染物浓度、尾水水质达标率	污水厂尾水水质达标率是否满足设计要求
		污水收集范围及处理率	污水处理率	污水厂收水范围、处理量、进水污染物浓度是否满足设计、规划要求
		合流制地区,雨天是否存在除最大变化系数以外的处理能力	雨天合流制管道溢流频次、污水厂外溢情况	综合生活污水量变化系数、雨季峰值流量系数
		处理工艺管道的旱季/雨季切换能力	污水厂处理量峰值系数	雨季峰值流量下过流能力、是否存在水力改善(如二沉池)可能及潜力等

污水厂的旱天和雨天处理能力是单体设施的匹配性评估的重要内容,主要通过与设计文本中的要求进行对比以及实际性能测试等手段进行。在英美发达国家,不论排水体制采用合流制还是分流制,污水干管和污水厂的设计中都有在处理旱季流量之外,预留部分雨季流量处理的能力,根据当地不同环保要求和污水厂规模,雨季和旱季流量差异可高达3~8倍。

例如,美国明尼苏达州对污水处理厂设计流量指标根据不同情况,采取如下不同指标:干季平均流量(ADW),湿季平均流量(AWW),湿季峰值流量(PHWW)和湿季瞬间峰值流量(PIWW)等,且如果 $PHWW/ADW > 3$,则需要考虑进水流量调蓄或处理工序的均衡措施。污水处理厂峰值系数越高,意味

着雨季处理能力越高,则排水系统应对极端气候条件的弹性越强。

3.3 设施间匹配性评估

以排水分区为单位,评估排水分区内各排水设施间的匹配性,包括泵站、调蓄池、污水厂与自身服务范围内的上下游管网的匹配性,即具有调蓄/净化功能的单体设施是否存在因上下游管网转输能力不足所造成的不匹配情况,针对该情况提出改造方案和优化调度方案。设施间的匹配性评估内容如表3所示。

排水设施间的匹配性评估,通常是在单体设施评估后并初步提出改造方案后进行,虽然只考虑设施与上下游关联设施之间的匹配性,但通常也需要构建排水系统的模型,以及通过不同工况运行参数

的监测(如液位、流量等)来辅助评估设施之间的匹配性。

表 3 排水设施间匹配性评估内容

Tab. 3 Matching evaluation content among drainage facilities

评估层级	评估单元	评估内容	评估指标	评估方法
设施间匹配性	污水处理厂与上游管网的匹配性	污水厂出水水质旱天达标的最大处理能力与上游管网旱天的最大输送能力的匹配性	污水厂进出水污染物浓度、尾水水质达标率	旱天主干管网流量监测数据与污水厂处理能力匹配,在部分流量不匹配的区域可采用模型手段辅助分析
		污水厂出水水质满足雨天排放标准的最大处理能力*与上游管网雨天最大输送能力的匹配性	污水外溢情况	通过监测、检测手段掌握管网旱天运行情况,将旱天管网 DWF 和 RDⅡ数据反馈到模型中,模拟设计重现期降雨情景下污水厂上游管网的来水量与污水厂雨天处理能力的关系
	调蓄/净化设施与上下游管网的匹配性	调蓄设施蓄水能力与上游管网输送能力的匹配性	雨天调蓄池受纳雨污水量、雨天调蓄池控制排口溢流量控制率、雨天调蓄池受纳污染负荷总量	模拟典型年不同降雨场次下调蓄池控制排口溢流量控制率、合流制管网溢流频次
		调蓄设施排空能力与下游管网排水能力的匹配性	旱天调蓄池排空时间	模拟典型年不同降雨场次下调蓄池蓄水量、溢流量与下游管网排水流量的关系
		净化设施净化能力与上游管网输送能力的匹配性	净化设施处理污染物量	监测不同降雨场次下净化设施出水水质和流量与上游管网来水流量、水质、充满度的关系
		净化设施净化及排水能力与排空时间的匹配性	雨天时净化设施处理污染物量	监测不同降雨场次下净化设施出水水质和流量与下游管网排水流量的关系
	泵站与上下游管网的匹配性	接纳的雨水、污水、雨污混合水的抽排能力是否匹配上游收集到的污水、雨水、雨污混合水的峰值水量要求	污水提升泵站提升流量、排涝泵站提升流量、管网过流能力	模拟设计重现期降雨情景下上游管网来水量与泵站抽排能力关系
		下游管网输送能力与泵站排水峰值排水能力的匹配性	雨天排涝泵站提升流量、管网过流能力	模拟设计重现期降雨情景下泵站抽排能力与下游管网输送流量的关系
		水泵控制规则与上游管网来水水量的匹配性	污水泵站日提升流量、排涝泵站提升流量、管网过流能力	将旱天管网 DWF 和 RDⅡ数据反馈到模型中,模拟水泵现有控制规则(运行曲线和启停液位)与上游管网来水流量的关系,是否存在频繁启停水泵和上游管网高水位运行现象
	转输泵站与下游泵站的匹配性	管网具有转输功能的泵站与下游泵站能力的匹配性(用水高峰、低谷及雨季)	管网过流能力、泵站提升能力	监测不同降雨场次下转输泵站流量、液位与下游泵站排水流量的关系,水泵启停次数
注: * 目前国内只有少部分城市,如昆明市编制了针对雨天峰值流量的污水处理排放标准。				

3.4 排水系统匹配性评估

对于复杂的系统,比如有多个调蓄池,或多个泵站逐级提升,或多个污水厂之间存在水量调度联系的排水系统,还需要从整体上进一步评估排水系统的匹配性,为工程建设方案的系统优化和开展厂-网-河一体化运行提供决策支持。系统评估主要包括厂-池-站-网整体是否满足规划目标的能力评估和排水系统与受纳水体水质间的匹配性评估。系统匹配性评估的主要内容见表 4。

城市排水系统是一个动态运行开放系统,系统的匹配性评估需要考虑时空变化特征,因此,系统的匹配性评估需要采用实测和模型结合等手段。对于厂-池-站-网整体是否满足规划目标的能力评估

通常需要建立排水管网模型,相关工作已广泛应用于国内水环境治理。但是排水系统与受纳水体水质间的匹配性评估需要建立污染物排放(包含点源和面源)和水环境质量之间的响应关系,国内只有少数案例研究。这一工作通常需要大量的基础数据和连续监测,在不具备条件的地区可参照国内外相关案例中的控制指标和具体做法。另外,系统评估阶段需要对前两个步骤提出的定性的解决方案进行完善和量化,并结合经济效益分析,确定排水系统改造或优化运行方案。通常情况下,在工程改造预算有限的情况下,采用基于实时控制技术的优化运行方案是更经济的选择,尤其是在较高不确定性的气候条件下。

表4 排水系统(厂-池-站-网)匹配性评估内容

Tab.4 Matching evaluation content of drainage system (plant-tank-pump station-network)

评估层级	评估单元	评估内容	评估指标	评估方法
系统匹配性	厂-池-站-网的系统匹配性	系统内旱天收集处理能力是否与服务范围产生污水量匹配	污水收集率、污水厂外溢情况、污水厂进出水污染物浓度	应用监测和模型手段分析系统污水收集率、处理量与服务范围内产污量的关系
		雨天最大收集、调蓄与处理设施(不同处理标准的出水水质条件下)接纳的雨污水量与CSO控制目标的匹配性	系统负荷削减总量(率)、系统溢流总量、系统溢流负荷总量	应用监测和模型手段分析系统调蓄、处理能力是否满足设计、规划的年径流总量控制率、溢流总量/频次控制要求
		污水厂旱季、雨季不同运行模式及出水水质标准;不同过流能力和处理能力、排放标准的匹配性	污水厂处理量峰值系数	应用监测和模型手段,分析不同工况下实际运行情况;净化设施处理能力是否满足设计、规划的系统负荷削减总量,以及系统溢流总量/频次的要求
		调蓄设施调蓄能力、放空周期及间隔与下游的污水厂错峰接纳能力的匹配性	系统负荷削减总量(率)、系统溢流总量	根据调度规则或应用片区系统模型模拟典型年不同降雨场次下厂-池-站-网的系统运行状态,并辅助实测降雨、流量数据对模型结果进行定期校核
		不同降雨雨型下源头、中途及末端下泄流量可控性	年径流总量控制率、雨水收集率	应用片区系统模型模拟典型年不同降雨场次厂-池-站-网的系统运行状态,并辅助实测降雨、流量数据对模型结果进行定期校核
	排水设施与受纳水体水环境质量的匹配性	不同排放口(雨水、截流井溢流等)与受纳水体水位关系、是否存在倒灌或顶托效应	—	应用片区系统模型模拟典型年不同降雨场次排水管网及受纳水体运行状态,并辅助实测降雨、流量数据对模型结果进行校核
		CSO溢流与受纳水体水环境承受能力的匹配性	合流制排口溢流控制率	应用监测和模型计算合流制排口溢流控制率、排口/河口负荷削减率、重点排口/河口对断面贡献率是否满足受纳水体要求
		污水处理设施排放与水环境的匹配性	重点排口/河口对断面贡献率、排口/河口负荷削减率	应用监测和模型计算尾水排放对水环境容量影响,对断面贡献率是否满足受纳水体要求
		雨水管网排放与水环境的匹配性	排口负荷削减率	应用片区系统模型模拟典型年不同降雨场次下雨水管网污染物排放量与受纳水体水环境容量的关系,并辅助实测降雨、流量数据对模型结果进行定期校核
		排水系统污染物排放与受纳水体水环境承受能力的匹配性	重点排河断面的水质达标率、小雨水质达标率;中雨停止后2 d水质达标率;大雨停止后3 d水质达标率	旱天应用监测数据统计受纳水体中重点排河断面的水质达标率;雨天应用监测和模型模拟雨水管、污水处理设施、CSO溢流的污染物出流量是否满足不同降雨等级雨后受纳水体水质达标率要求

4 结论与建议

厂-池-站-网匹配性评估是排水系统联动运行,实现提质增效的基础。精准的厂-池-站-网GIS数据库、适量的监测数据和科学的数学模型是进行匹配性评估的关键。厂-池-站-网匹配性评估应是逐渐完善的工作,城市匹配性初始评估时很难获取完整的数据,可根据设施设计规模等基础资料进行初步的匹配性评估,随着监测数据的增加,不断率定模型,更新、完善城市匹配性评估结论,为城市远期规划建设提供理论依据。

此外,根据排水系统匹配性评估结果,应制定下

一步具有符合流域特征的排水系统近、远期规划。近期应根据流域匹配性结果,以缓解入流入渗和CSO溢流为控制目标,制定各类排水设施的控制策略。远期,以末端水体水质达标为控制目标,结合成本效益分析,制定城市灰、绿基础设施比例和雨污分流率等排水系统长期建设方案。

参考文献:

- [1] GARCIA L, BARREIRO-GOMEZ J, ESCOBAR E, et al. Modeling and real-time control of urban drainage systems: a review[J]. Advances in Water Resources, 2015, 85: (下转第37页)