流域治理视角下构建弹性城市排水系统实时控制策略[1]

王浩正[1]，刘智晓[2]，刘龙志[1]，韩冠宇[1]，王海玲[3]，孙聪聪[4]

（1．中国市政工程华北设计研究总院有限公司 天津 300074；2. 北京首创股份有限公司 北京 100044；3．昆明滇池投资有限责任公司 650000；4. 加泰罗尼亚理工大学智能控制研究所，西班牙）

摘 要:在雨季面对水环境和水安全双重压力下，如何提升城镇排水系统的可靠性、弹性与可持续性，对保障城镇水系统安全性日益重要。城市排水系统具有动态性、多目标性和不确定性特征。从面向流域治理的角度，进一步削减合流制溢流污染、最大程度发挥排水系统“源头-过程-末端”能力等多目标协同下，系统运行控制日益复杂且控制难度日益增大。实时控制技术（Real Time Control，简称 RTC）根据实时监测数据动态调整控制策略，对排水管网附属设施及污水处理厂进行干预，以最大程度挖潜和发挥排水设施的调蓄和处理能力，为排水系统运行提供了智能化解决方案。因此该文总结了实时控制技术的研究历程以及控制工艺和策略、控制模型和控制算法等关键技术的发展及对我国开展实时控制的启示。

关键词：城市排水系统，实时控制，控制策略，控制模型，控制算法

Real Time Control Solutions for Urban Drainage System Under Watershed Treatment

WANG Hao-zheng[1], LIU Zhi-xiao[2], LIU Long-zhi[1], HAN Guan-yu[2], WANG Hai-ling[3], SUN Cong-cong[4]

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd, Tianjin 300074, China;2. Beijing Capital Co., Ltd, Beijing 100044, China; 3. Kunming Dianchi Investment Co., Ltd, Kunming 650000, China; 4. Technical University of Catalunya, Institute of Robotics and Information Industry, Spain)

Abstract: Under the dual pressure of water environment and water safety in wet weather, how to improve the reliability, flexibility and sustainability of urban drainage system is increasingly important to ensure the safety of urban water system. The urban drainage system has characteristics of dynamic, multi-objective and uncertainty. From the perspective of watershed treatment, under the multi-objective coordination of further reducing the combined system overflow pollution and maximizing the "source -process-end" capacity of drainage system, the operation and control of the system become increasingly complex and difficult. Real time control (RTC) maximizes the storage and treatment capacity of facilities, by dynamically adjusting the control strategy according to the real-time monitoring data, and intervening in the ancillary facilities of drainage system and wastewater treatment plant, in order to provide an intelligent solution for the operation of urban drainage system. Therefore, this paper summarizes the research progress of RTC, the development of control process and strategy, control model and control algorithm, and the inspiration for applying RTC in China.

Key words: urban drainage system, real time control (RTC), control strategy, control model, control algorithm

提升排水防涝、减少管网沿途溢流污染、最大限度发挥管网调蓄能力和末端污水处理能力一直是集中式城镇排水系统追求的方向。尤其是随着全球气候变化，极端降雨事件增加，传统排水系统面临日益严峻的挑战，城镇水系统安全成为城市管理最基础性要素。而通过基础设施建设增加排水系统处理能力，不仅投资成本高回报期长[1][2]，并且受土地使用等问题限制[1]，而不能广泛应用于城镇地区。为了应对上述复杂情况，如何在现有硬件设施基础上，

[1] 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）

构建具有弹性、可靠性和可持续的现代排水系统架构，是传统排水系统面临的和必须寻求突破的课题。同时，随着城市水环境治理体系的日益复杂，排水系统的动态性[3]、多目标[4]和不确定性[5]逐渐被认识，但是排水系统通常是在静态条件下设计，并在静态规则下运行的，这就造成了传统的运行方式在应对复杂多变的环境时，要么设施无法充分发挥作用造成资源浪费[6]；要么设施能力不足导致合流制管网溢流（Combined Sewer Overflow, 简称 CSO）和内涝[7]；也有些情况是在同一系统内，部分设施不能充分发挥作用的同时其他设施已超出负荷。因此，找到一种动态的控制方式，充分利用现有设施实现 CSO 消减和内涝控制等目标，为解决城市排水问题提供了智能化方案。排水系统实时控制（Real Time Control, 简称 RTC）是优化城市排水系统运行的可行方式[8]。

1　实时控制及发展历程

1.1 实时控制定义

很多文献都对排水系统实时控制进行过定义[9-12]。通常认为，排水系统的实时控制为：在排水系统运行过程中，在线监测重要的过程变量（雨量、液位、流量、水质等），依据监测数据、在线模型动态调整控制策略，通过控制设备（阀门、水泵等执行器）对排水设施及污水处理厂运行进行实时干预，实现厂-网、厂-网-河最优能力匹配，进而提高整个排水系统运行效率的优化控制方式。实现可靠的实时控制有以下要点：（1）要有优化点位的过程变量在线监测；（2）需要动态制定控制策略以及具有可靠过程控制系统；（3）管网-处理厂等调节设施具有协同可控性、硬件设施能力有匹配度；（4）排水系统快速实时的响应特性及反馈控制机制。这一定义明确了排水系统实时控制的基本架构、建设内容、方法和目标。

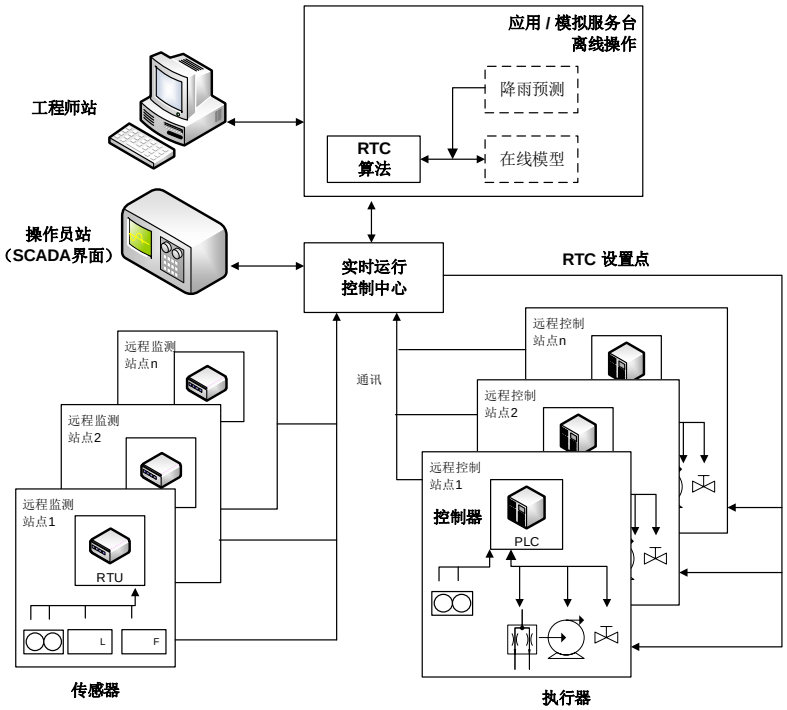

图 1　实时控制系统的组成[10-12]

Fig.1　System overview of RTC Components

实时控制系统由传感器、控制器、执行器和控制中心等硬件要素[12]和控制模型、控制算法以及降雨预测等软件要素组成[10]。传感器负责监测排水过程，包括流量、水位、水质和降

雨量等，并将数据传送给控制器；控制器主要执行传感器测量数据获取、数据预处理/校正、控制动作计算，与控制中心进行数据交换并将控制策略（动作）传送至执行器；执行器是执行控制动作的设备，用来调节流量或液位，通常包括：水泵、可调堰、可调闸门、充气坝、阀门和分流设施等。一些执行器也可以对水质进行调节，如化学加药设备和曝气设备。控制中心是实时控制的中央处理模块。主要通过协调传感器、控制器和执行器等子模块完成监测数据的收集、处理，控制指令的计算和远端设备的数据交换，从而实现监督和控制整个排水系统的作用。其中控制指令的计算涉及控制模型和控制算法两个核心元素。控制模型是用于实时控制系统规划设计和运行优化的数学模型，是设计和执行实时控制的重要预测工具。控制模型常使用简化模型（尤其针对复杂的大规模排水系统），以足够快的计算效率满足实时控制的时间需求[13][14]。控制算法是执行实时控制策略的另一核心元素，通过预先设定优化目标在策略计算过程中实现从控制目标到执行器控制命令的转化。控制算法也可称为控制程序（Control Procedure）。另外，降雨预测也是实时控制系统执行的关键环节。但是，不是所有的实时控制系统都需要包含降雨预测和模型。

1.2 实时控制系统的级别

借鉴国外相关经验，按照系统实际控制(管理)的范围，将实时控制系统分成局部响应控制、全局优化控制和流域联合调度三种级别。

（1）局部响应控制:定位于单个汇水分区，实现本区域厂-网就地响应控制，只利用本地或相邻传感器的实时监测数据，通过内置的控制算法计算出控制动作，进而通过执行器实现对受控过程的控制。这种控制方式一般适用于规模较小的排水系统、单一“厂-网”设施或单一绿色设施。

（2）全局优化控制：定位于跨排水分区或者整个城市层面的排水系统联调联控，这种情况下对实时控制系统要求较高，要求相互关联的执行器具备更高的执行效率，或者执行器间必须联合运行，此时需考虑采用全局控制策略。相比于局部响应控制，全局优化控制覆盖设施更广，考虑的过程变量更多，能够对排水系统进行整体优化控制。

（3）流域联合调度：针对大流域管理尺度，实现城镇排水系统、水资源、洪涝灾害防控。这种情况下排水系统的组成跨越多个城市、管理单位之间，需要不同城市、单位、系统之间联合调度，并制定流域联合调度策略。流域联合调度能够实现大流域尺度下的整体最优，但因涉及技术、管理、地域政策等方面的融合而给系统建模、集成方法，协调策略以及计算效率带来不小的挑战。

实际应用层面，不同的控制级别可以在一个系统当中同时耦合存在。

1.3 实时控制发展历程

协同于实时控制系统的级别变化，实时控制的发展历程大致可以分成三个阶段：管网CSO 控制阶段，厂网联合优化控制阶段和水系统综合控制研究阶段，见图 2。

实时控制研究从上世纪 60 年代末开始，以 SWMM（Storm Water Management Model）为代表的排水管网模型也同时出现。到上世纪八十年代，欧美发达国家的排水系统日趋完善，CSO 成为水污染的主要原因。因此，早期的合流制排水系统的运行以充分发挥管网系统在线调蓄能力，尽量避免和减少 CSO 为主要目标，实时控制算法则以规则控制（Rule Based Control，简称 RBC）为主。随着对水环境质量改善的要求越来越高，发现仅仅依靠发挥管网能力进行 CSO 的削减还不能充分发挥整个排水系统及处理单元的综合效率，因此实时控制逐渐发展到“厂-网”联调联控阶段。EPA 1994 年出台的 CSO 控制政策中提出了九项基

本控制措施（Nine Minimum Control），要求“最大化收集系统的调蓄能力；最大化污水厂的处理能力”，这就为“厂-网”的联动运行提出了要求。同时，随着欧美国家对 CSO 管控标准要求的逐步提高，治理工艺出现了以调蓄池为代表的过程调蓄策略，和以污水厂雨天处理工艺为代表的末端处理工艺，硬件设施进一步丰富和完善，排水系统运行工况也日趋复杂。厂网联动控制成为第二阶段实时控制研究和应用的主要内容，控制目标也更加多样化。如在瑞典克拉格斯港[15]，采用实时控制系统不但充分利用了管道的在线蓄水能力，得到了 4,000-5,000m^3 的额外在线蓄水空间，还避免了污水厂雨季活性污泥从二沉池的大幅溢出。这一阶段有很多实时控制案例实施，出现了多个用于排水系统实时控制的软件，如 C-Soft[16]，CORAL[14]，Simba[17]等，污水处理厂模型[18]也日渐成熟，各种基于（模糊）规则的优化算法也开始应用于排水系统的实时控制[19, 20]。

随着 CSO 治理效果的进一步体现，源头-过程-末端体系的完善，欧美水环境治理的要求进一步提高，厂-网-河的集成化综合控制逐渐成为近几年的研究热点。对哥伦比亚波哥大[21]，丹麦伦多特[22]和比利时莫斯奈特[23]几个案例的研究表明，厂网河联合调度可以改善 CSO 问题和城市内涝问题，也有助于提高河道水质的达标率。同时，在这一阶段，通讯技术日趋发达、监控成本降低、排水系统实时控制的技术日趋成熟。

这三个阶段并没有明显的时间界限区分，内容也存在交叉。比如，早在 90 年代就有研究人员开始研究城市排水系统的综合控制技术，在第三阶段也有基于规则的控制算法的应用。但从整个发展历程，实现实时控制的关键技术研究可明显分为工艺和策略、控制模型以及控制算法三个方面，见图 2。

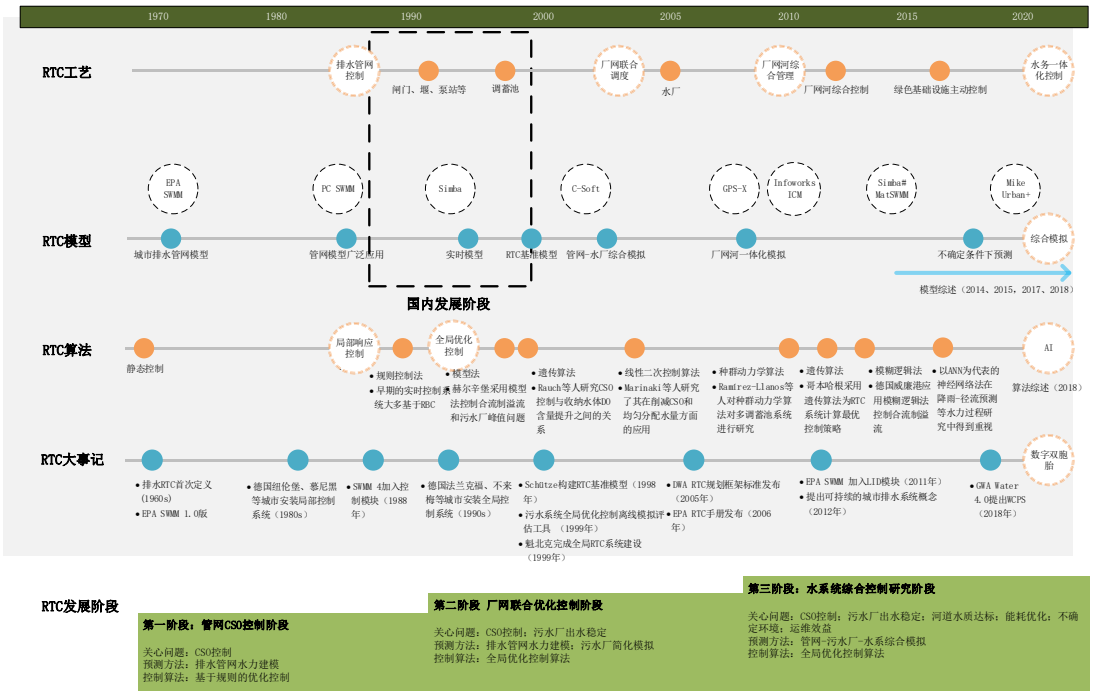

图 2　实时控制技术发展历程

Fig.2　History of RTC technologies

表 1 实时控制研究和应用案例

Tab.1 Case studies of RTC

		发表时间	系统问题	控制算法	验证方式	控制效果
管网CSO控制阶段	赫尔辛堡[24]	1998 年	合流制溢流及其带来的严重污染问题；污水厂峰值过高。	模型预测法	理论证明	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。
	罗马[25]	2000 年	降雨时污水厂峰值过高；存在合流制溢流问题。	规则控制法	理论证明	就地控制，1-46%溢流量削减；全局 RTC，2-100%单体溢流量削减。
	魁北克[26-28]	2001-2005 年	合流制溢流问题。	模型预测法	实际监测	70%系统溢流量削减；40-100%单体溢流量削减潜力。
	维也纳[29]	2005 年	合流制溢流及其带来的污染问题；	规则控制法	实际监测	区域性降雨 13.26%溢流量削减；大范围降雨 2.4%溢流量削减，6.2%溢流负荷削减。
厂网联合优化控制阶段	科灵[30]	2010 年	降雨强度逐年增加；强降雨下内涝和合流制溢流问题严重。	规则控制法	理论证明	35%溢流频次削减，少于 10 次/年；40%污水厂溢流量削减；减少中心城区调蓄池规模。
	克拉格斯港[15]	2010 年	系统北侧的合流制溢流问题；污水厂的污泥损失问题。	模型预测法	实际监测	充分利用管道的在线蓄水能力，约 4,000-5,000m^3； 污泥损失频率降低至 4 次/年。
	哥本哈根[19, 31, 32]	2011-2013 年	合流制溢流问题严重；内涝问题；现有设施的利用率不高。	规则控制法 遗传算法	实际监测	50%以上的溢流量削减。
	威廉港[20]	2013 年	合流制溢流问题。	模糊逻辑法	实际监测	23%极端情况溢流频次削减；25%极端情况溢流量削减；40%单场次溢流量削减潜力。
水系统综合控制研究阶段	多梅尔河[33]	2013 年	CSO 受水体水质污染问题；污水厂出流污染问题。	模型预测法	理论证明	受水体溶解氧含量上升；总氨含量峰值下降；水质得到明显改善。
	莫斯奈特河[23]	2015 年	CSO 受水体水质污染问题。	模型预测法	理论证明	系统联合调度控制显著改善体水质；实现 99%场次的受水体水质达标率。
	伦多特[33]	2016 年	溢流带来的环境影响问题；城市内涝问题。	模型预测法 规则控制法	理论证明	RBC 和 MPC 均可减少调蓄设施容积；RBC 削减 10.2%的溢流量；MPC 削减 11.2%的溢流量；RBC 可以作为 MPC 的后备方案。
	厂网河联合调度基准模型研究[34]	2020 年	以第九十百分位数，第九十九百分位数河道氨氮浓度，以及能源成本为控制目标，分析不同控制策略下的系统表现。	模型预测法 规则控制法	理论证明	基于上游状态的控制策略（upstream-based permitting）具有较高的灵活性和较少的执行器管理负担；基于规则的 RTC 策略（means-based permitting）可以降低运行和环境风险，是更为可行的联合调度方式

2 实时控制工艺及策略

实时控制工艺指系统采用的设施和设施之间的联动关系，通过控制工艺实现排水系统的可靠性和弹性；控制策略指系统执行控制达到预定目标的描述性方法，通过控制策略提升排水系统的弹性。控制工艺和策略是执行实时控制的重要基础。

2.1 在线控制工艺和策略

排水系统中的在线调蓄和处理主要利用具有雨天调蓄能力的常规管道或深邃等管网设施，雨天快速、持续存储设施和超量混合污水处理设施等构成。

（1）管道在线调蓄

管道在线控制主要是充分利用管网剩余空间进行水量调度，适用于管网存在充分可用空间的情况，尤其是在下游存在瓶颈的情况下，对上游设施进行流量动态控制，实现削减 CSO 和城市内涝的目标。在实时控制改造项目中，在线控制通常作为优先考虑选项。

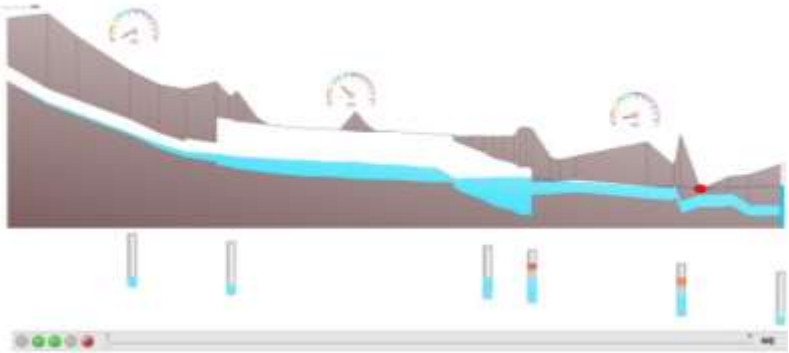

图 3　管道在线控制原理示意图

Fig.3　Function of online storage control

上世纪 90 年代，哥本哈根在管道关键部位安装闸门和带有逻辑运算能力的控制器，根据降雨量和下游管网水位来控制闸门启闭，尽可能使下游不发生溢流。第一阶段实时控制实施后，CSO 削减 80%，排空时间由 40 小时减少到 2-3 小时[32]。加拿大魁北克 Westerly 排水系统对三条截流干管和两条地下隧道[27]进行在线控制。控制中心接受来自 17 个传感器的数据，并将制定好的设定值下发至 5 个可控闸门的控制站，系统 CSO 削减可达 70%[28]。

目前我国很多城市已建成的排水管网存在大量混错接、管线淤积、腐蚀破损等情况，由此带来的高水位运行问题十分严重，很多城市管网系统可用剩余空间有限。因此，应优先开展排水管网的提质增效工作，清污分流，降低城市河道水系水位，腾出管网容量，在此基础上逐步实现运行调度的优化。另外，也有一些城市的地下箱涵具备较大的调蓄和排水能力，可作为管网在线调蓄空间使用。

（2）污水厂雨天处理工艺

实现“厂-网”能力匹配，使实时控制真正发挥有效作用，前提条件是下游污水厂要具有承接上游管网流量的能力。因此，对雨季合流制系统，污水厂必须具有雨季超量混合污水的处理能力，而我们国家绝大多数污水厂设计时并没有考虑雨季超量混合流量的处理。流域治理视角下，为建立厂池站网的联调联控机制，我们国家必须补足污水厂雨季处理设施及处理能力。污水厂雨天峰值流量处理策略和工艺主要有：雨天一级强化处理、分点进水工艺（Step-feed）、侧流活性污泥工艺、活性污泥快速生物吸附-高效澄清工艺（Biologically

Enhanced High Rate Clarification）等。

雨天物理-化学处理工艺主要是指干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[35]。近些年还出现将高负荷活性污泥法与高效固液分离技术融合的工艺，目前商业化的工艺包如威立雅的 BioActiflo®，BioMag™ 等。分点进水工艺通过生物池沿程多点配水方式实现雨季峰值流量的提升，同时避免了峰值流量期间，因采用生物池首端单点进水的传统工艺，导致随二沉池固体负荷陡升可能出现的大量活性污泥溢出。俄亥俄州 Akron 市再生水厂采用的 Step-feed 工艺，日本的“3W”法本质上也是分点进水工艺，可实现雨天 2-3 倍旱天流量的处理能力。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技术优势，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%（个别项目处理能力提升达 100%）的处理能力。

（3）厂-网集成控制

实时控制系统将管网的控制和污水厂的控制相结合，使污水厂处理能力与管网系统出水量相匹配，可进一步提升排水系统的效能。例如，瑞典克拉格斯港通过使用实时控制系统有效利用厂前管网在线调蓄空间来实现 CSO 削减以及调节污水厂的入流量的目标。污水厂根据入流量在线监测数据调整运行状态，启用分点进水工艺，在保证出流水质的前提下，降低运行成本，将污泥损失频率从平均 27 次/年下降到 4 次/年[15]。

2.2 离线控制工艺和策略

排水系统中应用较多的离线调蓄处理设施主要为调蓄池和具有强化处理功能的设施。

（1）离线调蓄设施控制

从 80 年代末开始，德国混和污水的滞留开始通过合流制排水系统中的调蓄池实现以达到 CSO 排放要求[36]。调蓄池在管网负荷达到一定条件时开启，收纳合流制污水，在管网恢复输送能力时将污水排回管网或者用于其它用途。按调蓄池所处管网位置可分为分散处理调蓄池和集中处理调蓄池两种。如上世纪 90 年代开始，哥本哈根兴建了大量的调蓄池和泵站，数量达到了 80 个[32]。在这一阶段，通过实时控制项目提升了管道和调蓄池的利用率，缩短了调蓄池的排空时间，还降低了泵站在旱天的电耗[31]。又如昆明市曾在主城区修建多个调蓄池，对城市内涝和溢流控制起到了重要作用，同时建立了系统的监控网络，开展了一池一策的控制策略研究，总结了成套的运行规则，正在开展联合调度研究。

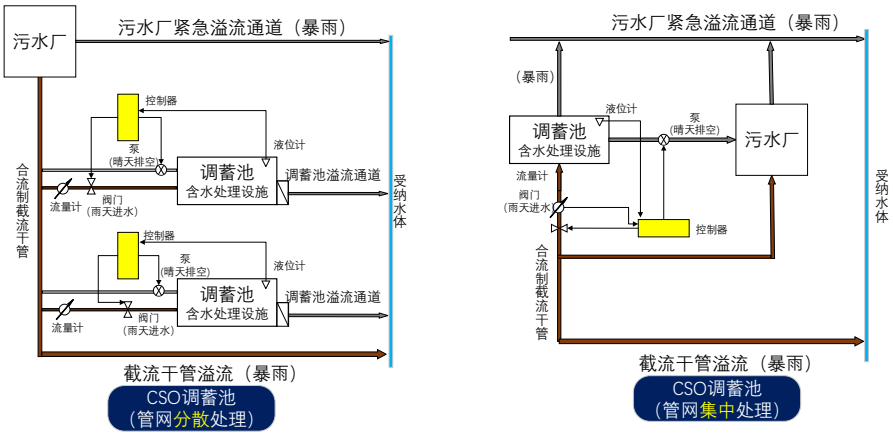

图 4　CSO 调蓄池主要控制机制

Fig.4　Main control mechanisms of CSO storage tanks

（2）分散式绿色基础设施控制

绿色基础设施，尤其是随着源头雨水控制、雨水就地回用技术的推广，可以大幅度削减雨季上游超量雨水对下游排水管网的流量冲击，同时绿色基础设施可以实现对雨水的就地利用。实时控制系统可采用基于降雨预测的主动控制策略来最大程度利用系统的净化能力和调蓄空间。如 Bolivar Park 雨水管理项目建设径流收集、净化、存储系统，使用实时控制系统对水质-流量进行控制，控制雨水径流净化效果，为灌溉提供干净水源，同时提升受纳水体水质。该项目通过构建水质模型，评估系统对污染物的净化潜力；通过监测蓄水池水质，实时调整入流量，保证水质净化效果；通过监测蓄水池水位，判断上游预测降雨-径流量与蓄水池剩余能力的关系。当预测蓄水池能力即将不足时，通过降低分流率，提升灌溉量、地下水补水量，或排回 Los Cerritos 渠的方式，为预测径流提供处理空间。该项目的实施每年可以节约 400 万加仑饮用水，提升了超过 50%的污染物去除率[37]。

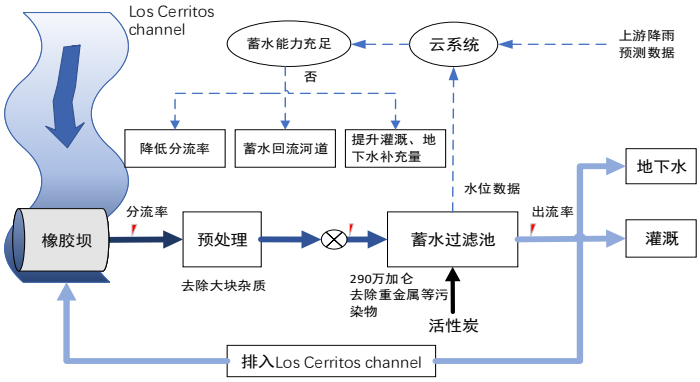

图 5　Bolivar Park 雨水管理项目工艺

Fig.5　Structure of stormwater management project in Bolivar Park

随着海绵城市的推广，人工湿地等绿色基础设施在我国也逐步得到了应用，如镇江海绵公园多级生物滤池、玉溪出水口湿地等。对这些设施采用实时控制技术可最大限度提高设施利用效率。

2.3 “厂-网-河”综合控制

厂-网-河系统的联合控制，进一步将受纳水体水质信息纳入监测系统。基于对系统内涝、CSO、污水厂运行以及河道水质的综合影响，厂-网-河综合控制通过模拟预测和过程控制规则，为各控制单元和模块、控制机构如闸阀、孔口、堰门、处理单元设施及设备提供输出指令，为管网-调蓄池-泵站-污水厂的各个组成单元存储及处理工艺制定最优运行控制规则。

早在 90 年代后期，Schütze 等就开始开展污水系统综合控制的研究[38]，提出并构建了实时控制基准模型（Baseline Model）。基准模型中的管网部分由来自德国合流制管道设计指南的真实案例概化而来，污水处理厂部分来自于英国诺维奇污水处理厂，并添加 45 公里虚拟河流。该基准模型可实现排水系统水量和水质的优化模拟，结构如图 6 所示。

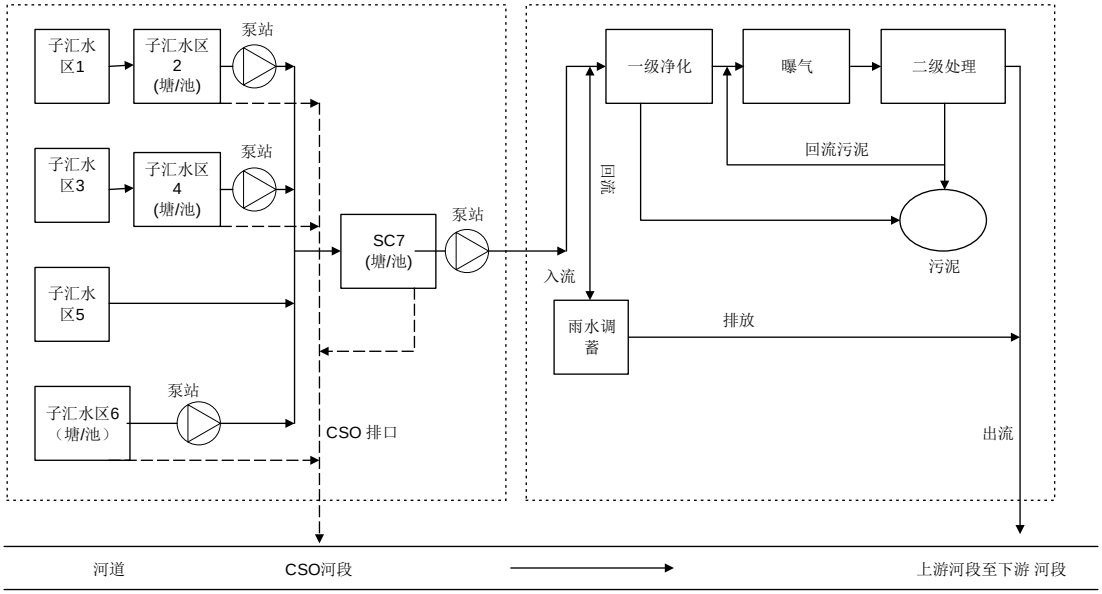

图 6　城市排水系统实时控制基准模型框架[38]

Fig.6　Baseline model framework

该基准模型涵盖了城市排水系统中的基本控制要素、结构和运行模式，为日后的厂-网-河联合控制研究提出了一个概化的、综合的、有代表性的研究框架。多个研究团队基于基准模型开展了以污水系统综合管理为目标的实时控制相关策略和算法的研究[4, 17, 39]。例如，Fu,Gao 等人[40]利用基准模型为研究对象，利用 Simba 软件通过分析 3,400 场降雨下 CSO、污水厂尾水与河道水质指标（NH_3，DO）以及降雨强度的关系。为不同降雨条件下，污水厂处理量控制、CSO 控制方案和河道水质达标控制提供了决策依据。

3　实时控制模型及算法

3.1 模型研究

模型是进行状态预测的重要工具，排水系统实时控制使用到的模型可分为面向过程的模型和面向控制的模型。最常见的面向过程的模型主要是排水管网模型，以 EPA-SWMM 模型应用最为广泛。SWMM 模型主要使用圣维南方程（De Saint-Venant Equations），模拟管道中水流质量和能量的守恒关系。圣维南方程精确描述了城市排水管网及附属设施中的水力过程，但是计算的复杂性决定了这类模拟需要消耗较长的运算时间。此外，也有一些案例中用到了污水处理厂模型与管网模型综合分析。污水处理厂模型可以模拟包括生物反应池、生物膜工艺、厌氧反应工艺、初沉池、二沉池等处理过程。

与面向过程的模型不同，面向控制的模型复杂性低，从而减少了计算时间，主要适用于复杂的大规模排水系统。面向控制的模型主要是简化模型和概念模型。 由于简化了一部分系统动态，所以面向控制的模型计算精度降低。

（1）简化模型：圣维南方程在稳态条件下可以线性化表示流量和液位的关系，以此为基础的线性化简化模型可以模拟出相似的结果。

（2）概念模型主要包括虚拟水箱模型(Virtual-tank Based Model)、纳什模型、马斯京根模型和积分器-延迟模型等，主要原理是对城市排水系统中主要设施进行概化，可根据监测数据进行参数调整，以提高模拟结果的可靠性。在实际应用中，模型预测控制（Model

Predictive Control, 简称 MPC）常与众多优化算法结合，为系统计算出最佳的控制指令。而 MPC 特有的有限时域滚动优化机制，可以抵消因模型简化而带来的不精确。以 MPC 为控制核心的实时控制系统在欧洲[13-14, 41-42]、加拿大[16, 26-28, 43]、美国[41]等地都有广泛的研究和应用。

3.2 控制算法研究

控制算法将预先设定的目标转换为执行器的控制命令。排水系统常用的实时控制算法，可以分为启发式算法（Heuristic Algorithm）和基于优化的算法（Optimization-Based Algorithm）[3]两类。

启发式算法是基于经验或知识的算法，复杂性程度低，但无法保证得到最优解。启发算法主要包含规则控制法 RBC 和模糊逻辑控制法（Fuzzy Logic Control, 简称 FLC）。RBC 是最简单的实时控制实现方式，但是规则设计、运行效果和维护都依赖专家经验。与 RBC 相比，FLC 可以为系统的优化运行提供更多控制方案。在德国的威廉港，FLC 系统根据在线监测数据实时控制两座泵站的抽水量，从而充分利用管网调蓄能力，在稳定控制污水进水量的同时降低了 40%的溢流量[20]。

常见的优化控制算法主要包括种群动力学控制算法（Population Dynamics）、进化策略（Evolutionary Strategy，简称 ES）和线性二次型最优控制（Linear Quadratic Regulator，简称 LQR）等。Ramírez-Llanos 等[44]应用种群动力学控制算法在调蓄池进水过程中根据各调蓄池的剩余蓄水能力, 分配调蓄池进水量，结合 PID 控制调节各调蓄池的水位达到动态平衡；调蓄池排空时，根据下游管网最大能力，分配各调蓄池的出水量。丹麦哥本哈根排水系统进行实时控制系统升级改造时，采用了遗传算法对复杂的目标函数求解，为系统各受控位置计算设定值[19]。Marinaki 等人[45]研究了 LQR 在排水系统削减 CSO 和均匀分配水量方面的效果。

实时控制的算法有很多种，不存在绝对的适用任何项目实时控制应用的最佳算法，也不是越复杂先进的算法就越是好的。每个实时控制系统的应用都面临具体的挑战，选择合适的算法受污水系统的规模和复杂性，污水系统的拓扑特征，在线存储空间，已有监测、控制系统现状以及管理因素等影响。

3.3 降雨预测模型与实时控制的耦合

降雨预测也是实时控制系统执行的关键环节之一。通过未来一段时间内的降雨强度预测数据，可以预测未来各子汇水区的径流量，进而预测排水系统各位置的水量和水质状态，为优化控制提供重要的决策信息[46]。常见的降雨预测可以通过降雨雷达预测或数学模型预测实现[47]。在哥本哈根的实时控制系统中，利用雷达提供降雨预测数据，利用雨量计监测数据进行动态校准，从而为实时控制系统提供可靠的雨量输入信息[19]。基于模型的降雨预测可以使用自回归滑动平均模型（Autoregressive Moving Average Model，简称 ARMA 模型）等方式实现[48, 49]。不同项目对降雨预测的精度要求不同，在使用中也可以根据实际获取的数据条件和要求选择预测方法。

4 建设实时控制系统的效益

4.1 提升系统弹性和设施效能

实时控制系统最主要目标就是实现排水系统各要素能力的协同与匹配，发挥各单元最大效率，进而降低洪涝、削减 CSO 并改善污水厂运行效率，最终实现最低代价下对受纳水体

水质的改善，也就是通过硬件设施与软件控制系统协同构建高效、稳定和可持续的排水系统。欧美几十年来已经有大量案例证明了实时控制对提升系统弹性和设施效能的效果，如魁北克Westerly 排水系统从 1999 年建成之初就是一个多目标的全局优化实时控制系统[27]。通过截污干管、深隧和污水处理厂流量的优化，实时控制系统在 2000 年单场降雨的单体设施溢流量削减率可达 40-100%[28]。又如在丹麦的伦多特，实时控制系统可以削减 10%以上的合流制溢流，提升调蓄设施利用率[22]。西班牙的巴达洛纳，通过实时控制过程中对系统流量和水质的同时考量，不仅使污水厂的处理能力提高 33%，减少 28%的城市内涝，并能减少 20%的污染负荷，从而更好的保护水体环境[42]。在奥地利维也纳，利用闸门和泵站对合流制系统的调蓄区域进行全局优化控制，不但稳定了污水厂前泵站流量，也削减了全系统的合流制溢流。在区域性降雨条件下可实现 13.26%溢流量削减，大范围降雨条件下可实现 2.4%溢流量削减[29]。

4.2 建设和运维成本削减

与传统的控制方式相比，在相同的系统运行目标下，采用实时控制可以显著缩减调蓄池、泵站、污水厂等设施的新建规模，减少管网改造成本。Dirckx, G 等[50]比较了不同升级改造方案下溢流量削减率与投资成本的关系，实时控制的成本效益优势十分明显。魁北克Westerly 排水系统，通过建设实时控制系统，在同一控制目标下，建设投资降低了 83.2%[28]。

实时控制系统的长期运维成本与传统控制方案相比也具有优势。一方面，实时控制降低了内涝和溢流频率，从而降低了设施维修成本；另一方面，实时控制长期运行积累的数据可以帮助运维人员及时发现问题，由“事后补救”转变为“事前预防”，从而提升了运维效率和质量。例如魁北克的实时控制系统的长期运维投资相较传统方案节约 22%[51]。

4.3 改善受纳水体水质

研究表明，通过厂-网-河的联合调度，实时控制系统可以削减合流制溢流量，改善溢流对受纳水体的负面影响[23, 34, 40, 52]，实时控制系统耦合污水处理模型和污染物河道扩散模型可以对受纳水体水环境指标和污染物浓度进行提前预测，如 DO、NH_3-N 等，甚至可以建立起不同等级降雨事件对受纳水体水质的影响，进而可以进行降雨事件对受纳水体的生态及毒理学评估。实时控制的短期运行可能对水体水质的提升效果有限，但是在长期运行条件下，实时控制系统可以有效提升水环境质量，有助于实现受纳水体水质稳定达标。

5 讨论和展望

（1）实时控制具有明显的经济和环境效益。

大量实际的工程案例已经证明了实时控制系统具有提高单体设施使用效能、减少系统污染水平、降低城市内涝风险、提升污水处理厂运行稳定性、减少系统建设和运维投资、提升水体水质等综合效应。

（2）在我国，实时控制应在做好污水系统提质增效的基础上逐步开展，并同步开展实时控制的评估和设计。

尽管选择实时控制系统会带来许多优势，但是针对我国的排水系统现状，尤其是排水管网高水位运行的问题，实时控制的实施仍面临一些挑战，因此污水系统的提质增效工作是大部分城市开展实时控制的前提。其次，无论是从系统的运行表现、生态环境效益还是投资成本控制方面考虑，实时控制的设计工作都应该尽早启动，从而避免不合理的排水系统建设方

案对日后实时控制的设计和实施造成困难，增加改造成本。然后，对城市排水系统的实时控制改造，应先进行现有排水系统设施的匹配性评估，以分析排水系统的瓶颈和实时控制实施的可行性。整体策略的制定应由单体设施的优化控制逐步扩展到全局的联合调度。

（3）实时控制下一步研究重点将以基于水质目标管理的排水系统综合控制和相关实施技术为主。

随着水环境治理要求的提高和实时控制技术的成熟，以水质优化为目标的实时控制策略逐步得到重视。基于水质目标管理的城市排水系统综合实时控制相关技术，如策略研究和综合模型研究将是未来一段时间的研究重点。在基于水质目标管理的实时控制项目实施中，合流制系统中严苛环境下的污染物在线监测仍然是巨大的挑战，传感器的选择、安装和维护，管道沉积物的模拟和管理也需要创新的概念来实现。

（4）实时控制也需要进一步探索数据驱动给系统建模和优化计算带来的改进空间。

随着传感和通信技术的快速发展，大量数据的获取使系统识别和优化计算方面取得突破性进展。排水系统的实时控制可以通过结合先进的数据处理和分析方法来探索进一步提高排水系统性能的建模和优化方法。

参考文献

[1] EPA, 2015. Wastewater Management: Controlling and Abating Combined Sewer Overflows. Inspector General Evaluation Report. Washington, D.C, USA. [viewed Sept. 2018] https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/csofinal.pdf.

[2] Meng, F.L., Fu, G.T., Bulter, D., 2017. Cost-effective river water quality management using integrated real-time control technology. Environmental Science Technology. 51, 9876-9886. doi.org/10.1021/acs.est.7b01727.

[3] 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(NOV.): 120-132.

[4] Fu G, Butler D and Khu S-T. Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(2): 225-234.

[5] Casal-Campos A, Sadr S M K, Fu G, *et al*. Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: An analysis of robustness under deep uncertainty[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(16): 9008-9021.

[6] Colas H, Pleau M, Lamarre J, *et al*. Practical perspective on real-time control[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2004, 39(4): 466–478.

[7] Garofalo G, Giordano A, Piro P, *et al*. A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 78: 30-42.

[8] Borsanyi P, Benedetti L, Dirckx G, *et al*. Modelling real-time control options on virtual sewer systems[J]. Journal of environmental engineering and science, 2008, 7(1-6): 395-410.

[9] Framework for planning of real time control of sewer networks[S]. Germany:German Association for Water, Wastewater and Waste,2005

[10] Real time control of sewers: US EPA Manual[S]. USA:EPA,2006

[11] Schütze M, Butler D and Beck M B. Development of a framework for the optimisation of runoff, treatment and receiving waters[J]. 7th International Conference on Urban Storm Drainage, 1996: 1419-1425.

[12] Schütze M and Campisano A. Real-time control of urban water systems[J]. International Conference on Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water

Management, 2003.

[13] Sun, C.C., Joseph-Duran, B., Maruejouls, J., Cembrano, G., Muñoz, E., Meseguer, J., Montserrat, A., Sampe, S., Puig, V., Litrico. X., 2017. Efficient integrated model predictive control of urban drainage systems using simplified conceptual quality models, 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, Prague, Czech Republic, 10-15, Sept., 2017, pp. 1848-1855.

[14] Puig, V., Cembrano, G., Romera, J., Quevedo, J., Aznar, B., Ramón, G., Cabot, J., 2009. Predictive optimal control of sewer networks using CORAL tool: application to Riera Blanca Catchment in Barcelona. Water Science & Technology, 60(4): 869-878. doi:10.2166/wst.2009.424

[15] Schilling W, Andersson B, Nyberg U, *et al*. Real time control of wastewater systems[J]. Journal of Hydraulic Research, 2013, 34(6): 785-797.

[16] Fradet O, Pleau M, Desbiens A, *et al*. Theoretical and field validation of solutions based on simplified hydraulic models for the real-time control of sewer networks[J]. NOVATECH, 2010, 1: 10-20.

[17] Butler D and Schütze M. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(4): 415-426.

[18] Nasr M S, Moustafa M A E, Seif H A E, *et al*. Modelling and simulation of German BIOGEST/EL-AGAMY wastewater treatment plants – Egypt using GPS-X simulator[J]. Alexandria Engineering Journal, 2011, 50(4): 351-357.

[19] Grum M, Thornberg D, Christensen M, *et al*. Full-scale real time control demonstration project in Copenhagen's largest urban drainage catchments[J]. 12th International Conference on Urban Drainage, 2011.

[20] Seggelke K, Löwe R, Beeneken T, *et al*. Implementation of an integrated real-time control system of sewer system and waste water treatment plant in the city of Wilhelmshaven[J]. Urban Water Journal, 2013, 10: 330-341.

[21] J.M G, S L, Diazgranados M, *et al*. Nonlinear optimization for improving the operation of sewer systems: the Bogota Case Study[J]. 5th International Congress on Environmental Modelling and Software, 2010.

[22] Meneses E, Gaussens M, Jakobsen C, *et al*. Coordinating rule-based and system-wide model predictive control strategies to reduce storage expansion of combined urban drainage systems: The case study of Lundtofte, Denmark[J]. Water, 2018, 10.

[23] Keupers I, Wolfs V, Kroll S, *et al*. Impact analysis of CSOs on the receiving river water quality using an integrated conceptual model[J]. 10th International Urban Drainage Modelling Conference, 2015.

[24] Magnusson P, Hernebring C and Gustafsson L G. An integrated RTC-strategy for the sewer system and WWTP in Helsingborg - II[J]. WaPUG Autumn Meeting, 1998.

[25] Campisano A, Schilling W and Modica C. Regulators' setup with application to the Roma–Cecchignola combined sewer system[J]. Urban Water, 2000, 2: 235-242.

[26] Pleau M, Pelletier G, Colas H, *et al*. Global predictive real-time control of Quebec urban community's westerly sewer network[J]. Water Science & Technology, 2001, 43(7): 123-130.

[27] Pleau M, Colas H, Lavallée P, *et al*. Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(4): 401-413.

[28] Schütze M, Campisano A, Colas H, *et al*. Real time control of urban wastewater systems—

where do we stand today?[J]. Ninth International Conference on Urban Drainage, 2002.
[29] Fuchs L and Beeneken T. Development and implementation of a real time control strategy for the sewer system of the city of Vienna[J]. Water Science & Technology, 2005, 52(5): 187-194.
[30] Nielsen N H, Ravn C, Mølbye N, *et al*. Implementation and design of a flexible RTC strategy in the sewage system in Kolding, Denmark[J]. NOVATECH, 2010, 10(5): 342-353.
[31] 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 Engineering, 2013, 70: 1707-1716.
[32] Mollerup A L, Thornberg D, Mikkelsen P, *et al*. 16 Years of experience with rule based control of copenhagen's sewer system[J]. 11th Int. IWA Conf. on Instrumentation, Control and Automation (ICA), 2013.
[33] Langeveld J G, Benedetti L, de Klein J J M, *et al*. Impact-based integrated real-time control for improvement of the Dommel River water quality[J]. Urban Water Journal, 2013, 10(5): 312-329.
[34] Meng F, Fu G and Butler D. Regulatory implications of integrated real-time control technology under environmental uncertainty[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(3): 1314-1325.
[35] Schütze M and Erbe V. Integrated simulation of the Dhuenn river catchment – supported by a matrix-based model notation for the entire urban wastewater system[J]. International Conference on Sewer Processes and Networks, 2002.
[36] Weyand M. Real-time control in combined sewer systems in Germany - Some case studies[J]. Urban Water, 2002, 4(4): 347-354.
[37] TetraTech. Bolivar park stormwater capture project. Available from: https://www.tetratech.com/en/projects/bolivar-park-stormwater-capture-project.
[38] Schütze M. Integrated simulation and optimum control of the urban wastewater system[D]. UK:Imperial College London 1998
[39] Schütze M, Lange M, Pabst M, *et al*. Astlingen - a benchmark for real time control (RTC)[J]. Water Science & Technology, 2018, 2017(2): 552-560.
[40] Fu G and Butler D. Frequency analysis of river water quality using integrated urban wastewater models[J]. Water Science & Technology, 2012, 65: 2112-7.
[41] Stinson M. Benefits of sewerage system real-time control[M]. USA:EWRI,2005
[42] Sun, C.C., Romero, L.B., Joseph-Duran, B., Meseguer, J., Craviotto, E.M., Guasch, R.P., Martinez, M.P., Puig, V., Cembrano, G. Integrated Pollution-based Real-time Control of Sanitation Systems. Journal of Environmental Management, 269: 110798, 2020.
[43] Fradet O, Pleau M and Marcoux C. Reducing CSOs and giving the river back to the public: innovative combined sewer overflow control and riverbanks restoration of the St Charles River in Quebec City[J]. Water Science & Technology, 2011, 63: 331-8.
[44] Ramírez-Llanos E and Quijano N. A population dynamics approach for the water distribution problem[J]. International Journal of Control, 2010, 83(9): 1947-1964.
[45] Marinaki M and Papageorgiou M. Linear-quadratic regulators applied to sewer network flow control[J]. European Control Conference, 2003.
[46] Kraemer S, Fuchs L and Verworn H R. Aspects of radar rainfall forecast and their effectiveness for real-time control – The example of the sewer system of the city of

Viennna[J]. Water Practice & Technology, 2007, 2.
[47] Burlando P, Rosso R, Cadavid L, *et al*. Forecasting of short-term rainfall using ARMA models[J]. Journal of Hydrology, 1993, 144: 193-211.
[48] Novotny V and Zheng S. Rainfall-runoff transfer function by ARMA modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(10): 23995.
[49] Weeks W D and Boughton W C. Tests of ARMA model forms for rainfall-runoff modelling[J]. Journal of Hydrology, 1987, 91: 29-47.
[50] Dirckx G, Schütze M, Kroll S, *et al*. RTC versus static solutions to mitigate CSO's impact[J]. 12nd International Conference on Urban Drainage, 2011.
[51] Stinson M K, Field R, Jacque G, *et al*. Optimized real-time control of combined sewerage systems: Two Case Studies[J]. 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, 2000.
[52] Shishegar S, Duchesne S and Pelletier G. An integrated optimization and rule-based approach for predictive real time control of urban stormwater management systems[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 124000.

作者简介：王浩正（1980-），河北涿州人，主要从事城市排水系统数字化、智能化管理技术研究和开发，城市水环境及治理方案综合模拟研究相关工作。