

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.001

城市排水系统模型综述

王浩正¹, 冯 宇¹, 孙文超², 邱 勇³, 刘智晓⁴, 黄 霞³

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 3. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 4. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044)

摘 要: 概述了城市排水系统的模型发展,从面向过程和面向控制两个角度对城市排水系统模型进行分类,并分别介绍了集水区、排水管网、污水处理、地表水和城市排水系统的集成模型。梳理了产流、水力传输和水质模拟的常见原理,对城市排水系统模型的主要应用方向和面临的挑战进行了论述。从源-网-厂-河一体化、机理-概念性模型混合应用、网络物理系统和排水系统数字孪生等方面,对城市排水系统模型的应用和发展进行了展望。

关键词: 城市排水系统模型; 机理模型; 概念性模型; 模型原理; 模型应用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0001-10

Review of Urban Drainage System Models

WANG Hao-zheng¹, FENG Yu¹, SUN Wen-chao², QIU Yong³, LIU Zhi-xiao⁴, HUANG Xia³

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: The development of urban drainage system (UDS) models is briefly stated. Based on simulation-oriented and control-oriented types, UDS models were classified, and the catchment models, sewer models, wastewater treatment models, surface water models and integrated urban drainage models were introduced, respectively. Furthermore, we summarized typical principles used in UDS models in perspective of hydrologic routing, hydraulic transporting and water quality modeling. The application direction and challenges in UDS models were discussed. From the aspects of the integrated UDS modeling (source-network-plant-river integration), physical-conceptual integrated modeling, cyber-physical system (CPS) and digital twin (DT) technology, the application and development of UDS models was suggested.

Key words: urban drainage system model; physical-based model; conceptual model; model principle; model application

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406502); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司项目(HJ-2021-27-ZHSW); 中国建设科技集团股份有限公司项目(Z2019J02)

通信作者: 王浩正 E-mail: haozheng_bnu@hotmail.com

1 城市排水系统及模型概述

随着城市化的发展和水环境要求的提高,城市排水系统的组成、功能和运行日趋复杂和系统化。城市排水系统从水环境治理工程的角度可分成源、网、厂、河四大部分,源主要包括以低影响开发(LID)为代表的具有降雨径流削峰和径流污染控制作用的源头绿色基础设施;网是以传统排水管网及其附属设施(包括泵站、调蓄池等)为代表的传统灰色基础设施;厂为传统的城市水质净化厂和各类城市排水过程中的灰色处理设施;河主要指各类具有蓄水、排水能力和自净功能的末端水体及其岸边和水体中的处理设施。现代城市排水系统组成如图 1 所示,这些工程共同形成了“源-网-厂-河”的治理体系,既包含自然调蓄净化工艺,也包括灰色的调蓄净化工艺,并且需要上下游联合调度。

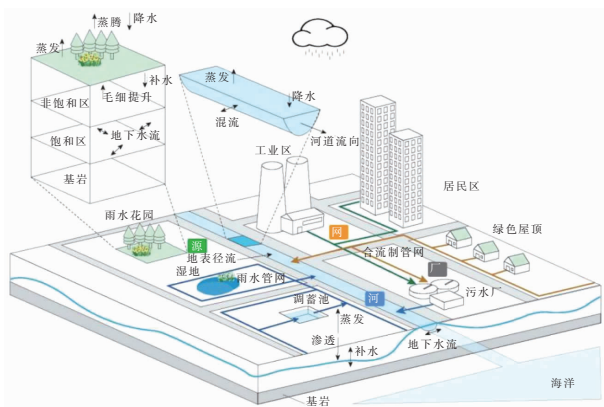


图 1 现代城市排水系统组成

Fig. 1 Contents of urban drainage system

20 世纪 70 年代美国环保署发布暴雨管理模型,成为城市排水系统水动力模型开发的开端,主要包含对城市降雨径流和排水管网输送过程的模拟。20 世纪 80 年代随着个人计算机的问世和普及,城市排水水动力模型得到推广,开始出现大量的商业软件包。同时 80 年代对污水厂动态模拟模型的研究,突破了 50 年代—70 年代活性污泥法静态模型无法模拟动态现象的局限。90 年代对污泥传输和水质模拟的理论和方法的研究,促进了水动力模型与水质模型的耦合。这一时期以低影响开发为代表的绿色基础设施得到推广,出现了辅助 LID 设计和评估的模拟软件及工具。其后的 10 年,地理信息系统(GIS)被融合到城市洪水模拟中。进入 21 世纪后,城市排水系统模型操作更加简单,图形界面展示更加直观,模型得到了更广泛的应用。2000 年欧盟

提出的以整个水流域为研究对象的水标准指南,进一步推进了管网-污水厂-河道模型的集成发展。近十几年来,随着水环境治理要求的提高和对模型应用要求的提高,城市排水系统混合模型、实时控制(RTC)模型和基于数据的模型在城市排水系统管理中得到广泛研究和应用。

2 城市排水系统模型分类

城市排水系统模型有多种分类方式,按模拟对象可分为集水区模型、排水管网模型、污水处理模型和地表水模型。按模拟输出结果的确定性可分为确定性模型和随机模型,其中确定性模型是当前城市排水系统模拟所采用的主流模型。根据模型对空间异质性的描述水平,分为集总式模型、半分布式模型和分布式模型。在介绍城市排水系统模型和 RTC 技术应用的文献^[1-3]中,通常将城市排水系统模型分为面向过程的模型和面向控制的模型,其中 RTC 技术应用以面向控制的模型为主。这种分类突出了城市排水系统模型的实时控制功能,明确了实时控制和系统设计的不同需求,具有重要的实践意义。

2.1 面向过程的模型

面向过程的模型,是指以模拟、评估城市排水过程为目标的模型,大多为机理模型,常用数学方程式描述输入量和输出量之间的主要物理过程。

2.1.1 集水区模型

集水区模型主要用于集水区水文模拟分析,如低影响开发(LID)等雨洪管理工程对集水区径流和污染物传输的影响,包括量化分析进入下游管网或水体的径流量和模拟范围内整体水质的情况。集水区模型可以模拟降雨-径流过程,通常包含从地表到河流间的点源和非点源污染物降解和转化过程的模块,是整个排水系统的降雨产汇流流量和污染物的“源”。

2.1.2 排水管网模型

排水管网模型模拟城市雨污水以及污染物在排水系统中的传输过程。在水文过程方面,排水管网模型考虑了集水区不同土地利用类型的产流特征、洼蓄存水、下渗等过程,模拟从降雨到地表径流进入管网的过程。在水动力计算方面,模拟包括检查井、地下管网、天然和人工明渠、涵洞、蓄水池和出水口等城市排水管网系统内的水流过程,并通过遵循质量和能量守恒关系的圣维南方程组(SVE)计算得到管网中的流速和水深。

2.1.3 污水处理模型

污水处理模型模拟污水处理工艺中污染物的转化过程。根据实际工艺流程,可对模拟模块进行组合,包括初沉池、不同类型的生物反应池(如A/O、AAO、SBR、Bardenpho、氧化沟等)和二沉池等。污水处理模型是以国际水协(IWA)发布的活性污泥数学模型ASM(ASM1、ASM2、ASM2d及ASM3、ASM2+TUD)为基础开发的,能较为准确地预测出水效果,一般用于污水处理构筑物的辅助设计。

2.1.4 地表水模型

地表水模型模拟河流、湖泊、水库、湿地、河口、海岸、海洋等水体中的水动力、水质和水生态变化过程。在城市排水系统模拟中,比较常用的河道水动力及水质模型包括HEC-RAS、Mike 11等,可进行河道一维或二维水动力及水质模拟。常用的水库水动力及水质模型包括EFDC、Mike 21和CE-QUAL-W2等,可进行二维或三维水动力及水质模拟。流域水文水质模型(HSPF)可以综合模拟流域内连续的水文过程和水质变化过程。

2.2 面向控制的模型

面向控制的模型是指通过模拟城市排水系统中可操控设施对排水系统的影响,进而辅助管理决策的模型。不同模拟对象中的可控设施如表1所示。

表1 城市污水系统的控制组成部分

Tab.1 Control components of the urban wastewater system

子系统	设备或参数	控制目标	决策方法
排水管网系统	泵、堰、闸门	减少内涝、减少CSO(频率、体积、负荷)平衡流量	启发式,直觉;自学习型专家系统;离线优化;在线优化;基于模型的控制;控制理论应用
污水处理设施	堰、闸门、污泥回流率、污泥损失率、曝气、湿地处理系统	维持出水标准、维护工艺正常进行	
受纳水体	堰、闸门	改善水质、防洪	

2.2.1 排水管网模型

为了提升模型运算效率辅助实时决策,排水管网系统面向控制的模型一般复杂性较低,可分为线性圣维南方程组模型、数据驱动模型和概念性模型^[2-3]。

① 线性圣维南方程组模型

在稳态条件下,圣维南方程组以线性化的方式概化流量和液位之间的关系,进而提升运算效率,但是不能捕捉包含突然入流的系统内的动态情况^[2]。

一种常用的圣维南方程组线性化方式是使用时矩匹配法从Hayami方程中得到一个简单的线性模型^[3]。

② 数据驱动模型

数据驱动模型可在对城市排水系统物理连接关系了解较少的情况下,只通过对城市排水系统监测数据的分析,模拟城市排水系统在不同工况下的水流动态情况。常用的数据驱动模型分析方式包括模糊逻辑法、神经网络法、进化计算法、机器学习法和概率推算法等。

③ 概念性模型

概念性模型对排水管网、河道等对象进行概念化模拟,并对概念化后的设施参数根据监测数据进行调整,以达到能够准确模拟城市排水系统状态和用于模型预测控制的功能。根据概念化方式的不同,概念性模型主要包括虚拟水箱模型、纳什模型、马斯京根模型和积分器-延迟模型^[2],具体见表2。

表2 概念性模型简述

Tab.2 Introduction of conceptual models

概念性模型	模型概念化简述
虚拟水箱模型	基于细分排水系统的思想,对排水系统元素进行分组并用相互连接的虚拟水箱进行替换,所有元素中的蓄水量用相应虚拟水箱中包含的水量代表
纳什模型	将排水管道概念化为多个串联的层叠瀑布式水箱,每个水箱的输出是下一个水箱的输入
马斯京根模型	通过一种管道存水体积与管道流入和流出量之间的假设线性关系,计算管道、河道或集水区汇流的流量
积分器-延迟模型	通过考虑延迟条件和回水作用,描述管道下游出流和上游入流的一阶关系

2.2.2 污水处理模型

目前直接用于污水处理工艺控制的模型,主要是经典的自控过程模型。很多学者尝试研究专家系统、人工神经网络、模糊控制等模型,但在实际工程中很少能得到持续和有效的应用^[4]。这与污水处理工艺的对象复杂性有关,仍有待深入研究。

随着现代电极法和UV法等高灵敏传感器的发展,以及可编程逻辑控制器(PLC)和精准执行器的发展,控制模型商业软件和控制系统的被越来越多地应用到污水处理过程中,如Krüger公司的STAR Control[®]等。这种模型融合了经典过程控制的方法,脱离了系统机理模型的框架,计算复杂度显著降低。欧盟的SMAC项目对将STAR Control[®]的经验控制

改为以模型模拟为基础的控制方式进行了探讨。Langeveld 等^[4]基于对污水处理厂进水水量和水质的监测数据,构建了污水厂入流水质与入流量相关的数据驱动模型。

2.2.3 地表水模型

受纳水体是城市排水系统的最末端,在城市排水系统模型模拟中很少作为被控对象,但在水利学调控方面有所应用。例如,在河道防洪实时控制和河渠灌溉管理控制方面,有模型预测控制(MPC)应用的成功案例^[5-8]。Galelli 等^[9]通过控制水库来优化防洪、泵站使用和水库供水。CMD (Conceptual Model Developer) 软件包以 Matlab 为平台,被用于洪水实时控制与预测^[10]。

2.2.4 城市排水系统集成模型

城市排水系统主要由城市排水管网、污水厂和受纳水体组成。鉴于水量、水质时空变化的复杂性,将管网-水厂-受纳水体整合为一体的城市排水集成模型能够更加简单和直观地分析整个系统的运行情况。

城市排水系统集成模型,尤其是集成了 RTC 技术的模型,其优势已在 Vanrolleghem 等^[11]的实例研究中得到体现。Fu 等^[12]的研究展示了使用多目标优化的方式控制集成模型的优越性。Benedetti 等^[13]提出并总结了以污水厂入流产生器(WWTP influent generator)代替城市排水管网部分的方法。

城市排水系统集成模型主要有两种集成方式:①将模拟不同部分的单独模型整合到同一个平台,平台中一个模型的输出为另一个模型的输入;②在一个模型软件中构建包含不同部分的整个模型(如 CityDrain、SIMBA#等),这些模型软件通常包含排水管网、污水处理设施和受纳水体等。Zacharof 等^[14]的研究介绍了第一种方式:在 SYNOPSIS 模拟平台将基于 KOSIM 的连续型线性水库排水管网系统、基于 ASM1 的污水厂模型和基于 DUFLOW 的河道模型整合成综合系统基础模型。排水管网系统和污水厂系统并列模拟,两者的结果作为河道模型的输入,河道模型接收上游模型的来水并于前两个模型模拟后单独模拟运算。

2.3 城市排水系统模型的常用软件

常用于模拟城市排水系统的模型软件如表 3、4 所示。更多城市雨洪模型和水环境水质模型的软件介绍与对比可参见相关文献^[15-16]。

表 3 面向过程的城市排水系统软件

Tab. 3 Overview of simulation-oriented UDS software

模型分类	模型对象	软件名称	时间	公司
面向过程模型	集水区模型	HydroCAD	1986 年	HydroCAD Software Solutions LLC
		GIFMod	2017 年	开源
	排水管网模型	SWMM	1971 年	EPA(开源)
		PCSWMM	1984 年	CHI
		Mike Urban	2004 年	DHI
		InfoWorks ICM	2010 年	Innovyze
	污水处理模型	BioWin	1997 年	EnviroSim
		STOAT	1994 年	WRe(免费)
		ASIM	2008 年	EWAG(免费)
		BSM	1998 年	开源
	地表水模型	HSPF	1970s 年代	EPA, USGS
		WASP	1983 年	EPA
		HEC-RAS	1995 年	美国陆军工程兵团水文工程中心、EPA
		EFDC	1996 年	美国弗吉尼亚海洋科学研究所、Tetra Tech, Inc.、EPA

表 4 面向控制的城市排水系统软件

Tab. 4 Overview of control-oriented UDS software

模型分类	模型对象	软件名称	时间	公司
面向控制模型	排水管网模型	C-soft	2002 年	Tetra Tech, Inc.
		MatSWMM	2015 年	开源
		PySWMM	2017 年	开源
	污水处理模型	GPS-X	1991 年	Hydromantis ESS, Inc.
		WEST	1995 年	Hemmis
		SUMO	2019 年	Dynamita
	城市排水系统集成模型	CityDrain	2005 年	开源
		SIMBA	1994 年	Ifak
		Simuwater	2020 年	中国市政工程华北设计研究院有限公司

3 城市排水系统模型原理

3.1 产流过程模拟

在城市排水系统模型中,水文过程模拟指的是由降雨形成的地表漫流在进入排水管道之前的水文过程^[17]。机理性水文模拟完全根据物理定律描述降雨径流过程,通过理查德方程描述土壤水运移,通过圣维南方程组描述地表漫流和河道汇流过程。

对于以排水管网内水流运动模拟为主的城市排水系统模型,通常采用基于经验关系的非机理性描

述方法或概念性模型,相对于机理模型被称作“白箱模型”,这两者分别被称为“黑箱模型”和“灰箱模型”。常用的产流过程原理如下:

① 径流系数法

径流系数法是一种最简单的由降雨推算径流量的方法,为经验模型,其计算如式(1)所示。该方法一般用于推算最大瞬时流量,以确定排水管道设计参数。CityDrain模型和COSIMAT模型使用该方法模拟产汇流过程。

$$Q_0 = \varphi \cdot i^* \cdot A \quad (1)$$

式中: Q_0 为径流量, m^3/s ; φ 为产流系数,表示从净雨到产流的比例,取值范围为0~1,一般根据历史经验数据取值; i^* 为净雨强度, m/s ,是降雨强度扣除蒸发和入渗强度的差值; A 为集水面积, m^2 。

② 单位线(UH)法

UH法是一种经验水文模拟方法。根据所选流域的历史实测水文资料,整理单位时段内均匀分布的单位净雨下流域出流断面处的径流过程线,即单位线,作为计算该流域未来净降雨和径流关系的经验依据,其计算如式(2)所示。改进的UH法如Snyder UHM、SCS UHM、Clark UHM等在HEC-HMS和MOUSE中都有使用。

$$Q_{(t)} = \frac{1}{K_p} \cdot e^{-\frac{t}{K_p}} \quad (2)$$

式中: $Q_{(t)}$ 为时间 t 的瞬时产流量, m^3/s ; K_p 为集水区固定蓄水系数, $K_p > 1$ 。

③ SCS-CN模型法

美国水土保持局(SCS)的径流虚线数值模型(SCS-CN模型),是一种适用于中小流域以及城市水文学计算的的经验模型,其计算如式(3)、(4)所示。早期的TR-20、TR-55模型,HydroCAD模型,美国陆军工程兵团水利工程实验室的STORM、HEC-HMS模型和SWAT模型的水文模拟部分,都提供了SCS-CN模型的使用选项。

$$Q_0 = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P \geq I_a \quad (3)$$

$$Q_0 = 0 \quad P < I_a \quad (4)$$

式中: P 为降雨量, mm ; I_a 为初始洼蓄量(可简化为 $I_a = 0.2S$), mm ; S 为最大可蓄水量,与CN有关, mm ,CN值是是与集水区属性有关的经验参数。

④ 非线性/线性水库法

地表径流也可采用非线性的概念性水库法模拟,并采用曼宁方程描述汇流过程。非线性水库模

型将每一个子集水区概化为一个水深很浅的非线性水库,降雨是水库的输入,下渗和地表径流是水库的输出。排水管网模型如SWMM、InfoWorks ICM、PCSWMM等水文模拟部分用的是非线性水库模型。

非线性水库模型的连续方程为:

$$\frac{dV_s}{dt} = A_s \cdot \frac{dd}{dt} = A_s \cdot i^* - Q_0 \quad (5)$$

式中: V_s 为子集水区的总水量, m^3 ; A_s 为子集水区的表面积, m^2 ; d 为水深, m ; t 为时间, s 。

其中,径流量采用曼宁公式计算,即:

$$Q_0 = W_s \cdot \frac{1.49}{n_s} \cdot (d - D_e)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (6)$$

式中: W_s 为子集水区的宽度, m ; n_s 为子集水区的曼宁粗糙系数; D_e 为排水水位以下防渗层的等效深度, m ; S 为子集水区坡度。

对于下渗过程模拟主要有三种方法,即Horton模型、Green-Ampt模型和CN法。这里的CN法,只考虑土壤下渗过程。

如果概念水库的出流和集水区的蓄水量呈线性关系,则构成线性水库模型。在Mike Urban中包含一种结合Horton下渗模型的线性水库汇流模型,其连续方程与非线性水库法相同,其径流量计算为:

$$Q_0 = C' \cdot (d - D_e) \quad (7)$$

式中: C' 为线性水库常数。

由 n 个相同线性水库串联构成的纳什模型也是集水区产汇流模拟的方法之一,是KOSIM模型和SIMBA#中水文模拟的方法。纳什连续水箱模型^[18]见图2。

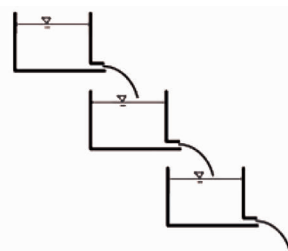


图2 纳什连续水箱模型示意

Fig. 2 Nash cascade model

⑤ 概率分布模型(PDM)法

概率分布模型法假设集水区土壤湿度根据概率分布,并且每个时刻的有效降雨为除去蒸发、土壤蓄水后的地表蓄水和地下水蓄水。地表蓄水和地下水蓄水这两条通路可用非线性水库或线性水库的方式模拟。模型出流为两个通路的结合^[19],具体如图3

所示。InfoWorks RS 中水文模拟使用的是 PDM 模型。

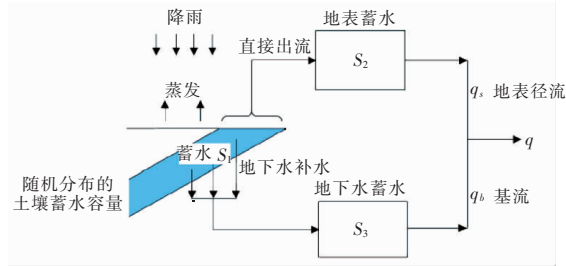


图 3 PDM 模型示意

Fig. 3 PDM rainfall-runoff model

3.2 水力传输过程模拟

机理的水力传输过程常采用圣维南方程组描述自由表面水体流动；对于超载和压力管流，常使用 Extran 模块中超载情况下根据流量守恒对节点水头调整的方法或引入普雷斯曼狭缝的方法，求解圣维南方程模拟超载管道中水体流动。非机理的水力传输过程常使用马斯京根法、静态-动态体积法和连续概念水库法模拟水力传输过程。

① 圣维南方程组

一维排水管网传输系统一般按“节点-管线”的结构表示，通常采用圣维南方程组（属于机理模型）求解管道中的流速和水深，即对连续方程和动量方程联立求解来模拟渐变非恒定流。SWMM 模拟引擎中水文部分采用显示差分法求解圣维南方程组，水力部分（动态波）采用隐式差分法求解圣维南方程组。在模拟压力管道方面，InfoWorks ICM 软件使用了 4 点普雷斯曼格式离散求解圣维南方程组。求解过程中可将圣维南方程组简化为动力波、扩散波或运动波模式^[3]。表 5 总结了不同圣维南方程组简化模式在应用效果上的区别^[3]。

表 5 圣维南方程的简化

Tab. 5 Simplification of the De Saint-Venant Equations

项 目	动力波	扩散波	运动波
回水效果和水流反转效果	有	有	有
洪峰叠加效果	有	有	无
水流加速效果	有	无	无

以一维水流模型为例，圣维南连续性方程和运动方程的结构如下：

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A'}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) + \frac{\partial h}{\partial s} = J_{\text{渠}} - J_f \quad (9)$$

式中： s 为沿流程的距离，m； A' 为断面面积， m^2 ；

h 为断面水深，m； v 为断面平均流速， m/s ； $J_{\text{渠}}$ 为渠底坡度； J_f 为摩阻比降。

② 马斯京根法

马斯京根模型为概念性模型，最初被用于河道水流模拟，其原理是假设河道中的存水量由柱状蓄水和楔状蓄水两部分组成，如图 4 所示。

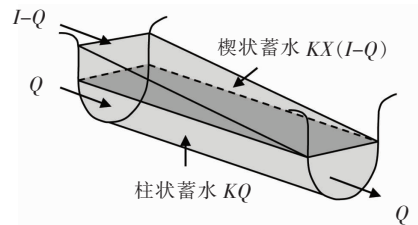


图 4 马斯京根模型示意

Fig. 4 Muskingum model

存水量 S' 计算如下：

$$S' = K \cdot Q + K \cdot X \cdot (I - Q) = K \cdot [X \cdot I + (1 - X) \cdot Q] \quad (10)$$

$$Q_t = C_1 \cdot I_{t-\Delta t} + C_2 \cdot I_t + C_3 \cdot Q_{t-\Delta t} \quad (11)$$

式中： I 为入流量； Q 为出流量； K 和 X 为没有物理意义的参数； C_1 、 C_2 、 C_3 为与 K 和 X 有关的参数。

CityDrain 模型的管道传输使用的是简化后的马斯京根模型，即：

$$Q_{E,i} = C_X \cdot Q_{I,i} + C_Y \cdot V_{i-1} \quad (12)$$

式中： $Q_{E,i}$ 为 i 时刻管道出流量， m^3/h ； $Q_{I,i}$ 为 i 时刻管道入流量， m^3/h ； C_X 、 C_Y 为关于 K 、 X 的系数。

③ 静态-动态蓄水体积分法

将河道支流中的蓄水量分成静态蓄水和动态蓄水两部分。其中，静态蓄水表示的是给定出流下的最小蓄水体积分，动态蓄水表示的是根据进水量而变化的河道总蓄水体积分与静态蓄水体积分的差值。因此 t 时刻的静态蓄水体积分 $S_{\text{stat},t}$ 与出流量 Q_t 有关，动态蓄水体积分 $S_{\text{dyn},t}$ 与入流量 I_t 有关。其表示方式如下：

$$S_{\text{stat},t} = r_s \cdot Q_t \quad (13)$$

$$S_{\text{dyn},t} = r_d \cdot I_t \quad (14)$$

式中： r_s 和 r_d 为与时间无关的系数。

河道支流静态-动态蓄水体积分见图 5。



图 5 河道支流静态-动态蓄水体积分示意

Fig. 5 Static storage and dynamic storage of a river reach

静态-动态蓄水体积分的简化方式[见式

(15)]可理解为两个平行的线性水库,其中第二个线性水库有一个时间步长的延时,此方法也可被看作是积分器-延迟模型^[20]。通过更改动态蓄水体积与入流量的关系,可使此方法更具灵活性。CMD软件包根据此方法模拟河道和排水管网中的水力传输^[21],具体原理可见文献^[22]。

$$Q_t = \frac{-\frac{r_d}{r_s} + \left(\frac{r_d + \Delta t}{r_s}\right)z^{-1}}{1 - \left(1 - \frac{\Delta t}{r_s}\right)z^{-1}} \cdot I_t \quad (15)$$

式中: z 是后移算子,定义为 $z^{-1} Q_t = Q_{t-1}$ 。

④ 连续概念水库法

在模拟明渠流水力传输时,概念水库法可分为连续线性概念水库和连续非线性概念水库。连续线性概念水库的Kalinin-Miljukov法在KOSIM、COSIMAT等模型中模拟水力传输过程;连续非线性概念水库法在SIMBA#中模拟水力传输过程。一种更新的连续线性概念水库法为Combiner-Splitter方法,在WEST平台的KOSIM模型中被使用,通过模拟洪水情况下水流在洪水节点被分流,然后再回流到上一个节点的方式,模拟回水效应^[23]。

3.3 水质模拟

① 污染物累积与冲刷模拟方法

污染物累积过程是指晴天时污染物在集水区地表的累积变化状况。对累积过程的模拟主要有三种方法:幂函数法、指数累积法和饱和函数法。各污染物累积方法的区别是污染物的累积与时间呈不同的函数关系,累积至最大量时即停止。污染物冲刷过程是指降雨情况下污染物从集水区表面侵蚀、流动和/或分解过程。对冲刷过程的模拟主要有三种方法:指数冲刷法、流量关系曲线法和场次平均浓度法。

② 污染物传输模拟方法

污染物在管网系统中的传输通常采用连续流完全混合反应器(CSTR)进行模拟^[17],即完全混合的一阶衰减方程,具体如下:

$$\frac{dVC}{dt} = \frac{V \cdot dC}{dt} + \frac{C \cdot dV}{dt} = Q_i \cdot C_i - Q_e \cdot C - k \cdot C \cdot V \pm L_0 \quad (16)$$

式中: C 为管道中及排出管道的污染物浓度,kg/m³; V 为管道中的水体积,m³; Q_i 为管道的入流量,m³/s; C_i 为入流的污染物浓度,kg/m³; Q_e 为管

道的出流量,m³/s; k 为一阶衰减系数,s⁻¹; L_0 为管道中污染物的源汇项,kg/s。

地表水水质模型模拟污染物在水体中的平移、扩散、吸附或沉淀等物理过程,以及降解、衰减和转化等化学过程。根据污染物浓度梯度在空间的分布,可将水质模型分为零维、一维、二维和三维模型,分别求解对应维数的污染物对流弥散方程。在进行多组分水质综合模拟时,会同时考虑水质组分间的相互作用、组分外部源及其对组分浓度的影响,如QUAL系列模型。

③ 污水处理过程模拟方法

污水处理过程的机理模型包括Andrew模型、WRc模型和ASM模型等。由于ASM模型概念清晰、描述全面,因此在科学研究和工程设计运行中得到了广泛应用。从1985年的ASM1模型到1998年的ASM3模型,模拟过程从含氮物质的硝化和反硝化过程、碳的氧化过程及微生物生长、衰减和水解过程,扩展到了化学除磷和生物除磷等过程。一般将污水处理过程简化为多个CSTR的组合,并采用生物反应模型来描述每个CSTR的效果。除此之外,一般还需要零维或一维的二次沉淀池模型(如Takács模型)配合,才能实现工艺过程的模拟。随着厌氧技术的快速发展,厌氧消化过程模型(ADM1)也成为污水处理过程的关键单元模型。由于ASM等机理模型的结构复杂、参数众多,很难在过程控制中有效使用。因此,在过程控制系统设计中,一般都需要简化上述模型,常用的方法有一级动力学、传递函数、人工神经网络等。Bechmann等^[24]探讨了以控制污水系统和污水处理厂为导向的模拟,提出了连续时间-随机状态模式的灰箱模型,模拟污水厂进水COD和SS浓度并以其为依据控制污水厂进水,同时还模拟了曝气池的SS浓度以控制曝气过程。

4 城市排水系统模型应用与挑战

4.1 城市排水系统模型的应用情景

4.1.1 辅助规划和设计

城市排水系统模型在分析系统现状、验证规划设计方案可行性方面都发挥了作用,它不仅可以系统地评估规划方案对城市水环境的影响,为规划方案的调整和优化提供理论指导,还可用于项目设计,如积水原因分析及改造方案设计、海绵规划与设计、合流制溢流污染方案设计、调蓄池的设计与运行评

估等。

4.1.2 源-网-厂-河联合调度

通过完善源、网、厂、河的水量、水位、水质在线监测系统,建立源-网-厂-河系统模型,实现流域设施科学调度,为智慧水务调度平台提供模型支撑。此外,模型系统还可以为资产管理和考核评价系统提供数据支撑。

4.1.3 预测预警

① 内涝预警

通过天气预报系统的降雨预测,结合雨量计、流量计等监测仪器的实时数据传输,使用准确率定后的城市排水系统数学模型,可以实现实时水量预测预警。通过预报未来一段时间内流域范围降雨变化趋势、模拟并分析模型内涝情况,提取重点关注区域范围,建立城市暴雨内涝风险空间分布的直观表达,实现城市内涝风险等级预报预警。

② 水质变化预警

评估现状、新建、改建设施(包括截污管道、雨污泵站、调蓄池、污水厂等)的排放、处理能力,分析受纳水体最大容许纳污量。模拟并分析预测降雨或规划控制条件下,城市排水系统进入受纳水体的污染量与水体容许纳污能力之间的关系。预测可能出现的水质污染情况,实现城市水体水质超标预报预警。

4.2 城市排水系统模拟的挑战

4.2.1 基础数据难于获取

基础数据质量决定了模型的质量,从SWMM发布以来,采用传统方法构建城市排水系统模型通常需要大量的数据,但这些数据在我国现阶段很难获取,如数量众多的排水管网数据,即便对很多城市进行了普查,但大量拓扑错误影响建模可靠性的问题依然广泛存在。

4.2.2 模型参数难以准确获取

参数是决定模型质量的另一个重要因素,但是有些参数通常很难获取,虽然有文献认为机理模型的重要特点是所有参数都可以通过实际测量得到,但常用的排水系统模型中依然有很多参数无法通过实际测量获取,比如SWMM中汇水区特征宽度、洼地蓄积量等。

4.2.3 复杂模型的不确定性

模型模拟结果的不确定性一方面来源于模型结构的不确定性,即建模过程中由于对现实系统认识

的局限性,在概化和抽象过程中增加了不确定性。另一方面来源于输入数据的不确定性,模型边界条件和初始条件的不确定、监测数据的观测精度不足、监测数据与模型模拟时空尺度不匹配都会带来数据的不确定性。此外,来源于模型参数的不确定性,对于基于机理的城市排水系统模型,描述过程复杂,参数众多,且许多参数会随着流域产汇流过程以及排水管网状态发生变化,而模型参数却被设定为固定值。因此,模型模拟的不确定性会影响排水系统决策分析或实时控制的精准性。

5 城市排水系统模型发展趋势

5.1 厂-网-河集成模型

目前,研究人员和从业人员已经逐渐认识到综合管理城市水系统的重要性。相比对城市污水循环的各个组成部分(水处理、分配、污水和雨水排放、污水处理和环境区划)进行单独建模,将城市系统作为一个整体来表现和理解,尤其是集成污水处理厂、排水管网和受纳水体,可能会设计出更好、更具成本效益的方案。

同时,厂-网-河集成模型的应用有利于控制整个系统的性能,为实现目标一体化和信息一体化创造条件。目标一体化是指一个子系统控制目标可以基于其他子系统的测量标准(如排水系统中泵的运行旨在使受纳水体中的耗氧量最小);而信息一体化是指在一个子系统中做出的控制决策可能基于其他子系统状态的信息(如排水系统中泵的运行基于污水处理厂的污水数据)。因此,在对厂-网-河集成模型开展实时控制时,会充分考虑整个系统的状态。

5.2 不同原理模型的混合应用

机理模型通常需要较长的模拟运算时间,无法满足实时控制的要求。概念性模型是一类面向控制的模型,其总体复杂性的降低显著减少了计算时间。但由于概念性模型只关注主导过程,其概化程度会影响模型模拟的精确性。基于两者各自的优、缺点,将机理模型与概念性模型集成于同一模拟平台构建混合模型,是一种优势互补的先进技术。

混合模型建模时,可在设施连接关系简单的区域构建概念性模型;在设施连接关系复杂,概念性模型无法准确模拟的区域,使用机理模型进行精细化模拟。混合模型的关键在于关系连接和信号传输,应全面对接机理模型的入流/出流与概念性模型的

出流/入流相对应的关系节点或管道,传导各关系节点、管道的水量、水位和水质信息。由此,混合模型能在保证一定精度的前提下,大幅提高运算速度,实现高效、全局、多目标的排水系统优化控制。

国外的 SIMBA#软件可在其平台上结合 SWMM 模块和概念化模块,实现城市排水系统的混合模拟。同时,国内的水系统控制仿真模型(Simuwater)软件也实现了此类功能。

5.3 网络物理系统

网络物理系统(Cyber-Physical System, CPS)是研究计算机系统与实际物理系统之间相互作用的系统。该系统具有嵌入式传感器、处理器和执行器等物理设施,可以由计算机控制或监视,同时该系统具有反馈回路,物理设施的状态也会影响计算过程。

德国水工业协会编写的 WATER 4.0 中也提到了网络物理系统可在虚拟水系统和实际水系统之间产生最佳联系。在整个规划、建设和运营阶段使用软件工具,建立一个智能网络,将水用户(即农业、工业和家庭)与可持续水基础设施联系起来,同时也可利用环境和水循环中的数据,采取整体措施。Sun 等^[25]分析了城市水循环设施在 CPS 框架下的运行情况,提出了一种基于多层网络物理系统的监督管理结构,运用了基于 MPC 的集成优化算法,证明了多个子系统在水循环中的监督控制作用和互操作性。其应用结果表明,在使用 CPS 概念操作后,获得了全局最优策略。

5.4 数字孪生

数字孪生(Digital Twin, DT)技术是指一种基于真实物理系统,并对该物理系统进行动态计算机模拟的方法,能够通过分散信息管理、虚拟强化现实功能来监测物理系统,并分享和更新虚拟与现实产品间的离散数据。DT 的三个组成部分分别为:对应真实物理系统的数学模型、对系统持续观察的数据以及根据这些数据动态更新和纠正数学模型的方法^[26]。对于根据时间变化的复杂物理系统,使用 DT 技术能够得到更大的收益。DT 技术能根据最新的数据快速预测出真实物理系统的运行效果,对于监测点位布置不足的城市排水系统,能及时有效地从监测数据中学习并更新模型,因此 DT 技术也是城市排水系统模型应用和发展的方向。

6 结论和展望

城市排水系统模型在城市水环境治理过程中发

挥了重要的辅助评估作用,并随着水环境治理要求的提高得到逐步发展。市场上成熟的城市排水系统模拟软件被广泛地应用到城市排水系统模拟中,根据应用目的可分为面向过程的模型和面向控制的模型。模型应用过程中的基础数据问题和模型参数不确定性问题,都对模型的可靠性提出了挑战。随着厂-网-河集成模型、机理和概念性混合模型以及网络物理系统和数字孪生技术的发展,城市排水系统的合理简化与关键细化的平衡建模方法、计算机实时模拟和优化控制将是一个重要的发展方向。

参考文献:

- [1] BACH P M, RAUCH W, MIKKELSEN P S, *et al.* A critical review of integrated urban water modelling - urban drainage and beyond [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 54: 88 - 107.
- [2] GARCIA-GUTIERREZ L, ESCOBAR E, BARREIRO-GOMEZ J, *et al.* On the modeling and real-time control of urban drainage systems: a survey [C] // HIC. *Proceedings of 11th International Conference on Hydroinformatics*. USA: HIC, 2014: 1 - 8.
- [3] GARCÍA 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: 120 - 132.
- [4] LANGEVELD J, VAN DAAL P, SCHILPEROORT R, *et al.* Empirical sewer water quality model for generating influent data for WWTP modelling [J]. *Water*, 2017, 9 (7): 491.
- [5] BLANCO T B, WILLEMS P, CHIANG P K, *et al.* Flood regulation using nonlinear model predictive control [J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18 (10): 1147 - 1157.
- [6] BOLEA Y, PUIG V, BLESJA J. Linear parameter varying modelling and identification for real-time control of open-flow irrigation canals [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 53: 87 - 97.
- [7] TIAN X, VAN OVERLOOP P J, NEGENBORN R R, *et al.* Operational flood control of a low-lying delta system using large time step model predictive control [J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 75: 1 - 13.
- [8] VERMUYTEN E, MEERT P, WOLFS V, *et al.* Combining model predictive control with a reduced genetic algorithm for real-time flood control [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018,

- 144(2):04017083.
- [9] GALELLI S, GOEDBLOED A, SCHWANENBERG D, *et al.* Optimal real-time operation of multipurpose urban reservoirs: case study in Singapore[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140(4): 511–523.
- [10] VERMUYTEN E, VAN UYTVEN E, MEERT P, *et al.* Real-time river flood control under historical and future climatic conditions: Flanders case study[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(1): 05019022.
- [11] VANROLLEGHEM P A, BENEDETTI L, MEIRLAEN J. Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20: 427–442.
- [12] FU G T, BUTLER D, KHU S T. Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, 23: 225–234.
- [13] BENEDETTI L, LANGEVELD J, COMEAU A, *et al.* Modelling and monitoring of integrated urban wastewater systems: review on status and perspective[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68: 1203–1215.
- [14] ZACHAROF A I, BUTLER D, SCHÜETZE M, *et al.* Screening for real-time control potential of urban wastewater systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 299: 349–362.
- [15] ZOPPOU C. Review of urban storm water models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16: 195–231.
- [16] 美国环境保护局. 美国 TMDL 计划管理模型实施实践[M]. 王东, 赵越, 徐敏, 等译. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- US EPA. TMDL Model Evaluation and Research Needs[M]. WANG Dong, ZHAO Yue, XU Min, *et al.* translated. Beijing: China Environmental Science Press, 2012 (in Chinese).
- [17] 陈吉宁, 赵冬泉. 城市排水管网数字化管理理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- CHEN Jining, ZHAO Dongquan. Digital Management of Urban Drainage Network: Theory and Applications[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).
- [18] REGNERI M, KLEPISZEWSKI K, SEIFFERT S, *et al.* Transport sewer model calibration by experimental generation of discrete discharges from individual CSO structures[C]//SEPPELT R, VOINOV A A, LANGE S, *et al.* Proceedings of the International Environmental Modelling & Software Society. Germany: iEMSs, 2012: 1–8.
- [19] MOORE R J. The PDM rainfall-runoff model[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2007, 11(1): 483–499.
- [20] CHIANG P K, WILLEMS P. Model conceptualization procedure for river (flood) hydraulic computations: case study of the Demer River, Belgium[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27: 4277–4289.
- [21] VINCENT W, PIETER M, PATRICK W. Modular conceptual modelling approach and software for river hydraulic simulations[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 71: 60–77.
- [22] VINCENT W, VILLAZON M F, PATRICK W. Development of a semi-automated model identification and calibration tool for conceptual modelling of sewer systems[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68: 167–175.
- [23] REBECCA J A, ALBERT S C, DRAGAN A S, *et al.* Quick and accurate cellular automata sewer simulator[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(6): 1359–1374.
- [24] BECHMANN H. Modelling of Wastewater Systems[R]. Denmark: The Technical University of Denmark, 1999.
- [25] SUN C C, PUIG V, CEMBRANO G. Real-time control of urban water cycle under cyber-physical systems framework[J]. *Water*, 2020, 12(2): 406–422.
- [26] PEDERSEN A N, BORUP M, BRINK-KJÆR A, *et al.* Living and prototyping digital twins for urban water systems: towards multi-purpose value creation using models and sensors[J]. *Water*, 2021, 13: 592.
- 作者简介:**王浩正(1980–),男,河北涿州人,硕士,高级工程师,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。
- E-mail:** haozheng_bnu@hotmail.com
- 收稿日期:** 2021–06–23
- 修回日期:** 2021–07–14

(编辑:丁彩娟)