

水力模型在排水防涝规划体系中的应用

刘小梅¹, 吴思远², 云海兰², 赵思东³, 廖 翌⁴

(1. 北京清控人居环境研究院有限公司, 北京 100083; 2. 北京清华同衡规划设计研究院有限公司, 北京 100085; 3. 昆明滇池投资有限责任公司, 云南 昆明 650000; 4. 昆明市滇池管理局, 云南 昆明 650500)

摘 要: 针对一个小流域范围的实际排水防涝规划案例, 分析在排水防涝规划尺度下, 如何科学、合理地应用水力模型分析手段, 有针对性地构建现状分析和规划评估模型, 系统地从城市地表、排水管网、受纳水体等方面逐一剖析内涝成因; 并基于水力模型对不同规划方案进行不断反馈试算、调试, 以最终确定既满足目标又更为合理的规划方案, 统筹实施从“源头”到“末端”的全过程控制, 以期城市防涝规划及管理提供参考。

关键词: 排水防涝规划; 水力模型; 内涝成因

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)11-0133-06

Application of Hydraulic Models in Drainage and Flood Control Planning Systems in Small Watersheds

LIU Xiao-mei¹, WU Si-yuan², YUN Hai-lan², ZHAO Si-dong³, LIAO Yi⁴

(1. Beijing Tsinghua Holding Human Settlement Environment Institute Co. Ltd., Beijing 100083, China; 2. Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning & Design Institute Co. Ltd., Beijing 100085, China; 3. Kunming Dianchi Investment Co. Ltd., Kunming 650000, China; 4. Dianchi Administration Bureau of Kunming, Kunming 650500, China)

Abstract: A drainage plan for a small watershed of a city was used to evaluate the application of hydraulic models in the urban drainage and flood control planning. The urban land surface, the drainage network, and the receiving water body were analyzed to identify causes of flooding. A legitimate plan was formed by testing hydraulic models of different planning scenarios. Thus, a comprehensive control from headwaters to outlets was implemented, which was able to provide helpful references for the urban drainage and flood control planning and the drainage system management.

Key words: drainage and flood control planning; hydraulic model; cause of flooding

近年来,随着城市化进程不断加快,加之极端天气频发,城市内涝灾害日益严重,已成为威胁城市安全的重大问题之一^[1]。为此,国务院办公厅和国务院分别于2013年4月和9月印发了《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》和《关于加强城市

基础设施建设的意见》,突出强调了要逐步提高城市防灾减灾能力和安全保障水平,加强城市排水防涝设施建设,并要求在2014年底,在摸清现状的基础上,编制完成城市排水防涝设施建设规划。

然而,城市水系统是一个复杂关联的网络系统,

涉及规划、市政、园林、河道等多方面,问题成因多样,如何更为全面、系统地进行排水系统的内涝成因分析,并科学地进行规划设计,一直是行业内亟待解决的难点问题。目前采用的恒定均匀流推理公式,在应用于较大规模排水系统的计算时会产生较大的误差,难以满足当前发展需求,而由于数学模型具备高效、系统和通用分析的特点,使之成为排水系统规划、改造、管理以及新建项目可行性评价的重要技术手段。美国环保局(USEPA)于1995年在《合流污水溢流监测和建模指南》中,以及欧盟在《室外排水与管渠系统》标准 EN 752 中,都明确指出计算机模拟技术结合长期流量监测是预测排水系统旱天/雨天运行情况的最有效工具,大型排水系统推荐采用计算机模型对管渠水力状况进行直接评价。而我国管网模型的应用仍处在探索阶段^[2~4]。

随着技术的进步,2013年住建部印发的《城市排水(雨水)防涝综合规划大纲》明确指出推荐使用水力模型评估城市现有排水能力与内涝风险,同时修编的2014版《室外排水设计规范》中也明确要求当汇水面积超过 2 km^2 时,宜采用数学模型法计算雨水设计流量。因此在新的形势下,水力模型已逐步取代传统的水力计算分析手段,广泛应用于排水系统服务性能总体评价和瓶颈识别,为排水防涝设施的升级改造方案设计及系统布局完善提供决策支持,从而为防涝综合规划编制提供科学依据。那么,如何更好地利用模型更为系统地分析问题成因,评估规划方案的合理性,以及在规划尺度上如何进行模型验证和把握模型的构建精度,亟需进行研究和应用,以更好地提升规划编制的合理性和系统性。

1 区域概况

研究区总面积为 12.29 km^2 ,西面主要为山体,东部为平原,区域范围内地势起伏较大,总体呈西高东低,地面高程在 $1\ 884\sim 2\ 236\text{ m}$ 。区域内支流沟渠纵横交错,大沙沟、小沙沟、马街沙沟、卖菜沟、污水沟、沙沟、扁担沟、郑和路沟8条支流自西向东汇入下游河道,大部分河道不仅要承担城区排涝的任务,而且要满足西面山体洪水行泄需求,因此,河道水位的涨落直接影响该流域内洪涝灾害的发生。同时该区域内主要道路包括春雨路、碧鸡路以及支路益宁路等,米轨铁路和成昆铁路穿片区而过,跨越区域内河道,过铁路沟渠由明渠变暗渠,且孔径较小,不能及时渲泄上游来水,形成卡口。

研究区内规划排水体制为分流制,雨水分片依靠重力就近排入河道,现状雨水系统不完善,雨水管道共计 12.67 km 。其中,春雨路西侧主要通过春雨路 $\text{DN}600\sim 1\ 500$ 雨水管收集雨洪水并沿途排入小沙沟、马街沙沟、污水沟;春雨路东侧雨水管网建设不完善,只有部分道路建设有雨水收集系统,益宁路 $\text{DN}1\ 000$ 和西苑浦路 $\text{DN}1\ 500$ 雨水管收集益宁路以北、华苑路以南的片区雨水排入小沙沟,碧鸡路 $\text{DN}600\sim 800$ 雨水管收集路面雨水排入大沙沟。由于上述现状,该片区历史内涝情况较为严重,主要集中在主干路春雨路沿线,最大历史积水深度约 60 cm ,因此对该片区进行内涝分析和规划改造非常必要和迫切。

2 现状水力模型的构建及验证

2.1 建模工具

本研究建模软件采用城市排水管网模拟系统(DigitalWater Simulation),该系统以国际上流行的排水管网计算原理为核心计算引擎,集排水管网和地表二维动态模拟计算功能与GIS空间管理分析功能于一体,实现管渠一维水动力和地表二维漫流之间的水量交换和动态演进仿真,并支持管线充满度、地表淹没水深等特征参数的动态计算与可视化展示^[5]。同时,利用该平台可建立排水管网与河道耦合模型,通过对内部河道进行合理的概化,将城市内部河道纳入排水管网模型,可以实现排水管网与内部河道的动态耦合模拟计算^[6]。

2.2 现状模型搭建

基于研究区的排水设施普查数据,完成排水管网尺寸、埋深、检查井底部高程等数据的录入和标准化处理工作,并进行拓扑检查与修正,修正管线错接、节点空间位置偏移、管线反向、连接管线缺失、管线逆坡、环状管网或断头管、管线重复等拓扑问题,在此基础上进行汇水区划分,根据地形、检查井及受纳水体位置离散为若干个子汇水区,基于模型骨架搭建成果,进行模型参数设置,包括旱季和雨季入流参数、管网汇流参数、模型边界条件等。

搭建完成的现状评估模型包括170个检查井(含5个排放口)、 12.67 km 雨水管道、211个子汇水区,同时将 13.87 km 河道概化为自然排水渠道纳入排水管网模型中进行计算。

2.3 降雨情景设置

由于缺乏长期的在线雨量监测数据以及详细的

雨型分析成果,本研究利用设计降雨对排水系统进行模拟分析,同时考虑城市降雨强度具有时间和空间分布的不均匀性,选取根据该区域所在的雨量站数据修编的暴雨强度公式,采用通用的芝加哥雨型,雨峰系数设置为0.35,时间间隔为1 min,生成重现期为1、2、3、5年一遇短历时降雨过程线(降雨历时为3 h)和50年一遇长历时降雨过程线(降雨历时为24 h),总降雨量分别为34.74、47.03、54.22、63.27、177.2 mm,降雨强度分别为75.51、102.22、117.84、137.52、226.25 mm/h。

2.4 模型参数率定及验证

由于该区域缺乏动态监测数据,同时考虑在防涝规划中水力模型主要作用是以整体评估和方案对比分析为主,且一般防涝规划的涉及范围为整个城市建成区,范围较大,大部分城市都缺乏完整的监测网络,因此在防涝规划中,采用历史积水资料对模型进行校核具有一定的合理性和科学性,同时采用人工率定法反复调试灵敏度较高的模型参数,直至模拟积水深度跟实测积水深度大致吻合为止,以保证模型的准确性,能满足防涝规划的需求。

基于获取的研究区域历史积水资料数据分析,该地区2013年7月19日的降雨是近年来影响较大的降雨事件,降雨历时长达约20 h,累积降雨量达215.6 mm,峰值降雨强度达39.6 mm/h,同时该场降雨对应的历史积水点资料收集最为全面,因此选用该场降雨的积水点进行模型校核,具有一定的典型性。

根据历史数据统计,该区域主要积水点包括马街社区、北师大附中益宁路段、春雨路石咀段、积善社区等,“7·19”降雨事件下最大积水深度分别为50、60、50、40 cm,而模拟最大积水深度分别为47、58、54、42 cm,模拟积水点位置和积水深度都与历史积水点基本吻合,因此基于本现状模型进行现状内涝成因分析具有一定的科学性、可靠性。

3 区域内涝成因分析

基于搭建的现状水力模型,进行研究区域的内涝成因分析,结果表明,研究区域的主要内涝问题是由于不透水地表比例高、局部区域管网排水不畅,同时下游行泄通道过流能力不足、对排水口存在明显顶托等多重原因造成的。

3.1 不透水地表比例高

基于获取的遥感数据,选用遥感软件 ENVI 分

析汇水区下垫面的组成比例,通过 ENVI 软件监督分类技术对研究区土地利用类型进行识别,得到屋顶、道路广场、绿地、水系、裸土五种土地利用类型的栅格图,其中,屋顶和道路广场为不透水地表,面积分别为4.87、3.72 km²,占比分别为39.63%、30.27%;绿地、水系和裸土面积分别为2.33、0.24、1.13 km²,占比分别为18.96%、1.95%、9.19%。分析可知,研究区现有建筑密度高达39.63%,不透水地表率较高,达到69.89%,综合径流系数为0.67。现状模型分析,5年一遇短历时降雨(降雨历时为3 h)事件下区域地表总产流量达6.49×10⁵ m³。因此,随着区域城市化进程不断加快,该区域硬化地表面积将会进一步扩大,改变雨水产汇流规律,区域内涝灾害会日益严重。

3.2 局部地区管网排水不畅

我国排水系统设计时管道内流态按满管均匀流考虑,计算设计流量时的设计水力坡度取管底坡度^[7]。重力管渠中,形成压力流但尚未溢出地面造成洪灾的水力状态定义为“超载”,一般当出现超载状态时,可认为管段流量超过设计能力。因此,本研究认为若管道出现超载状态,则视为该段雨水管道的排水能力不能满足相应重现期标准,具体采用“管道平均过载倍数”指标进行评估,对于平均过载倍数(峰值)大于1(不包括1)的雨水和合流制管道,均视为能力不足。管道过载倍数的计算公式如下:

$$\text{过载倍数} = \frac{\text{液位} - \text{管径} - \text{管底超高}}{\text{管径} + \text{管底超高}} \quad (1)$$

其中,管底超高是指管底高程与井底高程的差值。

$$\text{平均过载倍数} = (\text{上游节点过载倍数} + \text{下游节点过载倍数}) / 2 \quad (2)$$

通过现状一维管道水力模型模拟重现期为1、2、3、5年一遇四种情景下管道的运行状况,基于上述指标评估分析管道排水能力,为管道改造规划提供依据。评估结果见表1。

表1 现状排水管渠的排水能力评估

Tab.1 Assessment of drainage capacity of drainage pipe

项 目	P <1年	1年≤ P <2年	2年≤ P <3年	3年≤ P <5年	P ≥ 5年
管道长度/km	12.79	0.31	0.11	0.52	1.28
比例/%	85.22	2.06	0.72	3.49	8.51

由表1可知,该片区85.22%的管网排水能力低于1年一遇,通过现状分析、模型评估以及管道纵断面分析等可知主要原因如下:①局部管段存在管径过小、管道逆坡、大管接小管等问题,造成水力瓶颈(水力坡度大于管道坡度);②区域内主干路春雨路地势起伏不定,局部区域地势低洼,且东侧雨水管网建设不完善,造成局部区域淹水。

3.3 行泄通道过流能力不足

基于现状水力模型,通过设置5年一遇降雨组合50年一遇洪水入流的模拟情景,评估区域内8条主要行泄通道的实际过流能力,结果如表2所示。除马街沙沟外,其他7条支流沟渠的部分断面实际过流能力都达不到设计标准(50年一遇),排水能力不足的断面主要集中在穿春雨路、两条铁路的箱涵处,由于该段由原来的明渠改为暗渠,造成孔径较小,形成卡口。

表2 支流沟渠部分断面实际过流能力与50年一遇洪峰流量对比

Tab.2 Comparison between actual discharge capacity and peak flow of 50-year return period in partial section of canals $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

项 目	污水沟	卖菜沟	马街沙沟	小沙沟	大沙沟	扁担沟	郑和路沟
实际过流能力	3.2	5.2	2.7	3.6	2.8	5.2	3.4
50年一遇洪峰流量	12.1	11	2.6	6	7.4	34	6.1

同时,由于行泄通道不能满足超标雨水排放需求,当雨洪同期时,区域雨洪无法及时排入下游河道,对雨水排放口存在明显的顶托,进一步加剧了内涝灾害。通过对区域内26个雨水排放口对应连接的雨水管道模拟流量曲线分析表明,其中6个排放口对应连接的排水管道流量呈阶段负值,即存在明显顶托及河水倒灌的现象。

4 规划方案及效果评估

根据该区域的城市特性,整个城市的规划目标如下:规划范围内新建管渠标准为重现期不低于5年一遇,城市内涝防治标准为应能有效应对50年一遇的暴雨,改造区域随着城市建设逐步进行改造,规划期末达到上述目标。

因此,基于现状评估及城市内涝成因识别,采用“源-网-汇”一体化整治理念,从雨水径流控制规划、管道改造规划到内河水系整治规划,对该研究区域的规划方案进行系统地制定,并利用模型分析手

段,不断进行调整和反复试算,以最终满足整体规划目标。

4.1 规划方案及模型构建

① 雨水径流控制规划

根据当地气候、土壤、地形、地下水条件进行措施适用性分析,确定该区域的低影响开发适用措施,并根据用地类型建议优先采用不同措施,如居住用地优先采用下凹式绿地、透水铺装,有条件的小区设置渗排一体化的管网、雨水生态沟、模块渗透调蓄水池、雨水花园等。

根据上述分析,基本确定区域内的主要低影响开发工程措施,以雨水花园、下沉式绿地、绿色屋顶、透水路面、植草沟为主。而为评估规划实施后的径流控制效果,本模型主要通过汇水区的相关参数设置调整实现,基于下垫面的精确解析,确定每种措施的工程量,与子汇水区叠加得到逐个子汇水区低影响开发措施规模,再根据措施规模逐一进行汇水区参数赋值,参数赋值主要参考SWMM用户手册及相关文献,具体如表3所示。低影响开发措施的存水区植被覆盖百分比取0.15,配置土壤层孔隙率取0.18,田间持水率取0.1,枯萎点取0.3;土壤水力传导率,雨水花园取18 mm/h、绿色屋顶取36 mm/h、下沉式绿地取12 mm/h;路面层孔隙比取0.1,蓄水层孔隙比取0.43;入渗率,绿色屋顶取零,其他设施取1.8 mm/h;排水层中绿色屋顶和下沉式绿地按24 h、透水路面按6 h排空取值。

表3 LID设施参数设置

Tab.3 Parameters of LID facilities

项 目	表层/mm	路面层/mm	土壤层/mm	蓄水层/mm	排水层
绿色屋顶	50	—	150	—	有
透水路面	10	150	—	300	有
植草沟	300	—	—	—	无
下沉式绿地	200	—	500	300	有
雨水花园	100	—	900	—	无

② 区域管道改造规划

基于现状模型的评估结果,结合实际需求,确定5年一遇降雨条件下超负荷管段,主要集中在春雨路、兴苑路及益宁路,按照从下游向上游的改造顺序,逐一扩大管段直径,排除因下游壅水而把该管道误归为改造管段,并不断模拟校核^[8],从而将排水系统提升至5年一遇标准。具体改造方案见表4,共改造3.06 km管道。同时针对春雨路东侧雨水管

网建设不完善路段,规划新建 DN600 ~ 1 000 雨水支干管共 17.60 km。

表4 区域管道改造方案

Tab.4 Reconstruction project of drainage pipeline

所属路段	改造措施	改造管线长度/m
春雨路	西侧 DN600 管道改造为 DN1 100	665
春雨路	西侧 DN700 ~ 1 100 管道改造为 DN1 500,向东汇入扁担沟	895
春雨路	西侧 DN600 管道改造为 DN1 000,向西汇入扁担沟	235
春雨路	西侧 DN700 管道改造为 DN1 000,汇入马街沙沟	230
春雨路	西侧 DN700 管道改造为 DN1 000,汇入小沙沟	280
兴苑路	两侧 DN500 管道改造为 DN800,汇入益宁路干管	450
益宁路	东侧 DN800 管道改造为 1.0 m × 1.3 m 箱涵,汇入马街沙沟	310

③ 内河水系整治规划

根据现状评估结果,重点针对污水沟、卖菜沟、马街沙沟、小沙沟、大沙沟等 7 条支流沟渠过水能力不足的主要断面,包括过春雨路暗涵、米轨铁路暗涵、过成昆铁路暗涵等进行改造,利用水力模型在 5 年一遇降雨组合 50 年一遇洪水条件下反复校核沟渠河道过水能力能否满足规划目标,以确定最终改造方案,如表 5 所示。

表5 内河水系改造方案

Tab.5 Reconstruction project of canals

项 目	位置	现状尺寸/m	规划尺寸/m
污水沟	过春雨路、过米轨铁路处暗涵	1.5 × 1.0	4.0 × 2.2
	过成昆铁路处暗涵	1.5 × 1.0	4.0 × 2.2
卖菜沟	过春雨路、过米轨铁路处暗涵	3.0 × 1.5	4.0 × 2.2
	过成昆铁路处暗涵	3.0 × 1.5	4.0 × 2.2
小沙沟	过春雨路、过米轨铁路处暗涵	2.5 × 1.5	2.5 × 2.6
	过成昆铁路处暗涵	2.5 × 1.5	2.5 × 2.6
大沙沟	过春雨路、过米轨铁路处暗涵	3.0 × 1.0	3.0 × 2.5
	过成昆铁路处暗涵	3.0 × 1.0	3.0 × 2.5
沙沟	过石安公路处暗涵	3.5 × 1.0	18.8 × 0.8
扁担沟	过碧鸡路处暗涵	3.0 × 1.0	3.0 × 1.5
郑和路沟	过成昆铁路处暗涵	2.5 × 1.0	2.7 × 1.8

4.2 规划方案效果评估

针对上述最终确定的规划方案,进行规划模型构建并进行相关分析,以评估规划方案实施效果,具

体包括雨水径流控制效果评估、排水能力评估以及内涝风险评估,旨在为规划方案的最终确定提供参考依据。

① 雨水径流控制效果评估

为对比评估规划前后的雨水径流控制效果,将雨水排放口流量过程线累加得到整个区域排水系统的出流过程线,并统计分析 1 年一遇、5 年一遇短历时降雨(降雨历时为 3 h)条件下区域径流总量、峰现时刻、峰值流量等指标,结果如表 6 所示。可以看出,综合改造可显著提升雨水径流控制效果,1 年一遇降雨条件下区域降低了 38% 的径流总量及 41% 的流量峰值,并使雨峰延后 25 min;5 年一遇降雨条件下区域降低了 28% 的径流总量及 31% 的流量峰值,并使雨峰延后 15 min。

表6 规划前后雨水径流控制效果对比

Tab.6 Rainfall runoff control effect before and after planning

项 目	径流总量/ 10^4 m^3		峰现时刻		峰值流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
	$P=1$ 年	$P=5$ 年	$P=1$ 年	$P=5$ 年	$P=1$ 年	$P=5$ 年
规划前	14.94	52.10	1:25	1:30	13.19	57.51
规划后	9.22	38.88	1:50	1:45	7.69	42.03

② 排水能力评估

采用 3.2 节的排水能力评估方法,统计分析 5 年一遇短历时降雨(降雨历时为 3 h)条件下管道的平均过载倍数,进行区域排水管网能力评估,结果如图 1 所示。



图1 一维管道排水能力评估

Fig.1 Drainage capacity assessment of one-dimensional pipeline

由图 1 可以看出,改造后研究区的雨水管道整

体排水顺畅,当管渠排水量达到峰值时,主干管未发生瓶颈作用,过载情况明显改造,由改造前过载管道为14.18 km、占总管道长度的30.56%,减少为改造后的3.13 km、占总管道长度的6.76%,同时溢流节点也由改造前的21个减少为8个,区域内主要干管都达到了5年一遇的排放标准。

③ 内涝风险评估

内涝风险评估以50年一遇长历时(降雨历时为24 h)设计降雨情景下模拟结果作为评估依据,分析规划后区域是否满足50年一遇的防涝标准,规划后二维模拟结果如图2所示。改造后区域积水情况大为改善,淹没总面积由改造前的32.16 hm²减少为6.36 hm²,积水历时也由3.5 h减少为1.5 h,同时98%以上的区域最大淹没深度都小于15 cm,区域能有效应对50年一遇的降雨。

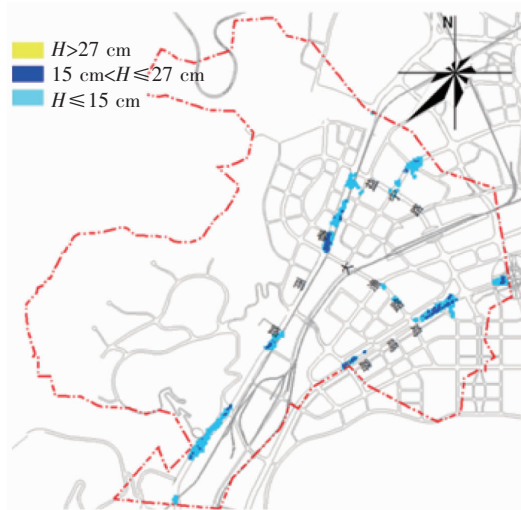


图2 二维地表内涝风险评估结果

Fig. 2 Waterlogging risk assessment of two-dimensional surface

5 结论

通过小流域范围的实际案例,研究如何在排水防涝规划尺度下,更为科学、合理地应用数学模型分析手段,一方面更为系统地识别整个排水系统内涝成因,为有针对性的规划方案制定提供依据;另一方面充分利用模型的系统性、通用性和可重复性的特点,通过对不同规划方案的反馈试算、调试,以最终确定既满足目标又更为合理的规划方案,统筹实施“源头”到“末端”的全过程控制,保证规划方案的系统性和科学性。

同时,对于规划尺度下数字模型构建存在的研

究范围广、动态监测缺乏、模型精度等问题,进行了经验探讨,如规划尺度下的模型验证在缺乏动态监测数据情况下可以通过典型场次的降雨历史积水点进行验证等,以期为其他相关研究和应用提供一定参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 胡坚,赵宝康,刘小梅,等. 镇江市主城区排水能力与内涝风险评估[J]. 中国给水排水,2015,31(1):1-5.
- [2] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等. 基于GIS构建SWMM城市排水管网模型[J]. 中国给水排水,2008,24(7):88-91.
- [3] 邝诺,王欢欢,李骥. 北京城市排水管网管理系统的设计与应用[J]. 中国给水排水,2011,27(8):71-73.
- [4] 郭玲懿. 基于神经网络的排水管网预测模型的研究及应用[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2011.
- [5] 陈小龙,赵思东,赵冬泉,等. 城市排水管网模拟系统介绍[J]. 中国给水排水,2015,31(1):104-108.
- [6] 陆露,赵冬泉,陈小龙,等. 城市排水管网与内部河道耦合模拟研究[J]. 给水排水,2014,40(10):103-107.
- [7] 汪翔. 给水排水管网工程[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [8] 董鲁燕,李田,钱静,等. 应用水力性能指数法制定排水管网达标改造方案[J]. 中国给水排水,2011,27(17):96-100.



作者简介:刘小梅(1985-),女,安徽安庆人,硕士,高工,主要从事GIS技术、模拟技术、监测技术等在水务行业中的应用研究,有多年行业应用及项目实施经验。

E-mail: lxm@digitalwater.cn

收稿日期:2016-11-16