

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.020

基于流域的沿海山地城市防洪排涝规划方案设计

杨海燕¹, 黄明阳², 周广宇², 孙广东², 明瑞涛³

(1. 北京建筑大学 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 3. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

摘要: 针对我国内涝灾害频发、防洪排涝规划思路缺乏系统性的现状,总结了从整体到局部3个层次的防洪排涝体系,并运用SWMM模型分析了多种降雨-洪水-潮水遭遇情况下,X省S市Y区现状水系及防洪排涝规划方案的排水能力,验证了该体系的科学合理性。通过65次模拟及方案调整,确定了Y区的最佳水系规模,并预留6座泵站。结果表明,在20年一遇最不利24 h降雨遭遇50年一遇洪水及50年一遇潮水条件下,Y区共形成 $3\,506\times 10^4\text{ m}^3$ 的径流量,其中 $2\,402\times 10^4\text{ m}^3$ 的径流量通过水系排至外江外海, $193\times 10^4\text{ m}^3$ 径流量通过泵站排至外江, $911\times 10^4\text{ m}^3$ 径流量被河流、滞涝区消纳,Y区内涝风险得以消除。

关键词: 防洪排涝规划; SWMM; 沿海山地城市; 大排水系统; 径流量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0133-06

Design of Flood Control and Drainage Planning Scheme for Coastal Mountainous Cities Based on Watershed

YANG Hai-yan¹, HUANG Ming-yang², ZHOU Guang-yu², SUN Guang-dong²,
MING Rui-tao³

(1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China; 3. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

Abstract: In view of the frequent occurrence of waterlogging disasters and the lack of systematic planning for flood control and drainage in China, the three levels of flood control and drainage system from the whole to the local were summarized, the drainage capacity of Y district, S city, X province and its current drainage system and flood control and drainage planning scheme were analyzed under a variety of rain-flood-tide scenarios by using SWMM model, and the scientific rationality of the system was verified. Through 65 simulations and scheme adjustments, the optimal drainage scale of Y district was determined, and 6 pumping stations were reserved. When the most unfavorable 24-hour rainfall with 20-year return period encountered the 50-year return period flood and 50-year return period tide, the runoff with a total volume of $3\,506\times 10^4\text{ m}^3$ was formed in Y district, of which the runoff with volume of $2\,402\times 10^4\text{ m}^3$ was

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001400); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X20066)

通信作者: 黄明阳 E-mail: 328999862@qq.com

discharged to the outer river through the water system, the runoff with volume of $193 \times 10^4 \text{ m}^3$ was discharged to the outer river through the pumping station, and the runoff with volume of $911 \times 10^4 \text{ m}^3$ was absorbed by rivers and detention areas. Therefore, the risk of waterlogging in Y district was eliminated.

Key words: flood control and drainage planning; SWMM; coastal mountainous city; large-scale drainage system; runoff volume

近年来,我国城市内涝频发,依据水利部发布的历年《中国水旱灾害公报》,2011年—2018年期间,平均每年有155个城市受到外来洪水灾害或内涝灾害,对当地人民生命财产安全及经济健康发展造成严重影响,城市内涝已经成为城市安全急需解决的问题。周宏等^[1]将造成城市内涝的主要因素归纳为自然、规划、工程和管理等方面,具体表现为:气候变化导致城市极端降雨事件发生;受地形地势及人为侵占河道等影响,水循环系统遭到破坏;传统的市政排水忽略了自然水体本身的调蓄作用,强调快排;管网设计的重现期标准及设计理念滞后于城市化发展进程。

X省S市为沿海山地城市,Y区南临宁远河、崖州湾,北靠南顶岭、凤岭、光头岭,其防洪排涝规划面临的困难包括阻止跨流域洪水的进入,以及流域内山洪和规划区域涝水的排放。高学琬等^[2]指出,山洪具有历时相对较短、洪水陡涨陡落、水位涨差较大的特点。此外,Y区水系排水还受到海水潮汐水位变化的影响,情况复杂。借助模型模拟的方法能够计算出多种方案在不同洪涝潮遭遇情况下的降雨径流去向,以及作为管道排水出口的水系水位变化情况,可为规划方案设计提供依据。SWMM模型可用于城市区域径流水量和水质的单一事件或连续模拟,已在国内外多个城市的防洪排涝分析中得到了广泛应用^[3-6]。

笔者从3个层次进行防洪排涝规划方案设计,以SWMM模型作为计算工具,验证了该防洪排涝设计方案的科学性和合理性。层次一以流域Y区作为研究区域,进行水系重构,确定水系排水方向,调节水系蓄排水能力;层次二以城市建设区域作为研究区域,构建雨水管道排水系统;在前面两个层次的基础上,层次三以易积水片区作为研究区域,有针对性地提出防洪排涝规划方案。在道路排水方面,李俊奇等^[7]进行了将道路作为大排水系统构成部分的理论研究及案例分析,但仍然缺乏相关规划标准

的支撑和广泛应用。

1 研究区域概况

S市位于X省南部,行政区域总面积为 346 km^2 。研究区域位于热带季风气候带,具有海洋性特征,区域内阳光充足,蒸发量大,年平均气温为 25.8°C 。该研究区域雨季为5月—10月,雨季雨量占全年雨量的90%,出现台风可能性大,雨急风大。外围山体资源丰富,由南山、五指山余脉(天子岭、马鞍山、双峰岭等)等山体环绕。

Y区水系分布情况如图1所示。Y区位于S市西南部,为基于地形地势划分出来的流域范围,北靠南顶岭、凤岭、光头岭(高程为 $180.0 \sim 200.0 \text{ m}$),东南临宁远河(50年一遇设计洪水位为 $5.4 \sim 12.1 \text{ m}$)、西南临崖州湾(50年一遇设计潮水位为 2.47 m),占地面积为 193 km^2 。规划范围位于Y区南部,占地面积为 37 km^2 。Y区内有4个小规模水库,水系分布稀疏,河网结构简单,规划区域位于河口冲击平原,研究区域内除龙潭河外,所有河流下游均流经规划区域;龙潭河及护城河排水方向为宁远河,其余河流排水方向为崖州湾。

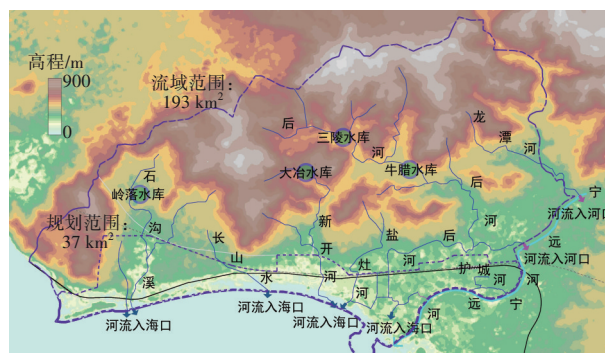


图1 Y区水系分布示意

Fig.1 Schematic diagram of water system distribution in Y district

2 研究区域SWMM模型构建

2.1 模型计算原理

SWMM模型将人为划分的子汇水区作为最小

计算单元,以各子汇水区域参数为依据,计算子汇水区域的产流过程,最后得出各子汇水区情况。本研究中,采用霍顿下渗公式计算SWMM下渗情况;采用圣维南方程组计算管道产流情况;采用非线性水库法计算地表产流。非线性水库的入流量包括来自上游子流域的径流和降水,出流量则包括下渗、地表径流和蒸发。最大洼地蓄水深度体现了水库的蓄水能力,当水深超过最大洼地蓄水深度时,产生地表径流。联立求解连续方程和曼宁方程^[8-9],见式(1)和式(2)。

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} = Ai - Q \quad (1)$$

$$Q = W \frac{1.49}{n} (h - h_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

式中: V 为地表积水量, m^3 ; h 为水深, m ; A 为子流域面积, m^2 ; i 为净雨量, mm ; Q 为出流量, m^3/s ; W 为子汇水区漫流宽度, m ; n 为曼宁系数; h_p 为蓄水深度, m ; S 为汇水区坡度。

2.2 模型概化

模型概化的对象主要为汇水分区及排水通道(水系、雨水管道、道路),概化的目的是生成模型计算所需的拓扑结构,汇水分区的划分要考虑地形地势、水系、水利工程布置、下垫面情况等。本研究建立了现状水系模型、规划管道模型与规划道路模型。绘制区域水系、雨水管道、道路图形,在水系、雨水管道、道路中各汇流及坡度变化处设置节点,并通过GIS软件将Y区水系、雨水管道、道路进行矢量化,将相应的宽、深和长度等信息导入SWMM模型中完成概化。河道模型概化结果如图2所示。

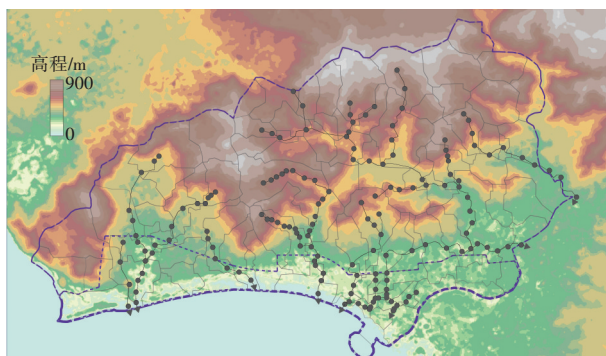


图2 Y区水系概化结果

Fig.2 Generalization result of water system in Y district

水系SWMM模型将Y区概化为92个汇水区,将水系概化为164个节点、159条河道。以降雨作

为上边界,以各条河下游入河口、入海口作为模型的出流边界,以其不同重现期的设计洪水位、设计潮水位作为模型的出流边界条件。

管道SWMM模型将规划区域概化为605个汇水区,将雨水管概化为441个节点、381条管段。以降雨作为上边界,以各雨水管道排口作为模型的出流边界,以其不同重现期的设计洪水位、设计涝水位作为模型的出流边界条件。管道模型概化结果如图3所示。

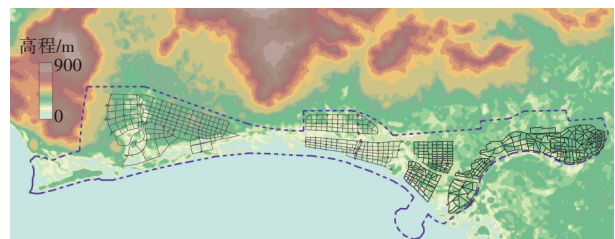


图3 建设区域管网概化结果

Fig.3 Generalization result of pipeline network in construction area

在道路SWMM建模过程中,将道路作为明渠,验证道路作为大排水系统组成部分的排水能力。行洪通道长宽取道路的长宽,行洪通道高度取0.15 m。道路SWMM模型将老城区概化为170个汇水区,将路网概化为142个节点、119条路段。以降雨作为上边界,以各条路坡向作为模型的出流边界,以其不同重现期的设计洪水位、设计潮水位作为模型的出流边界条件。道路模型概化结果见图4。

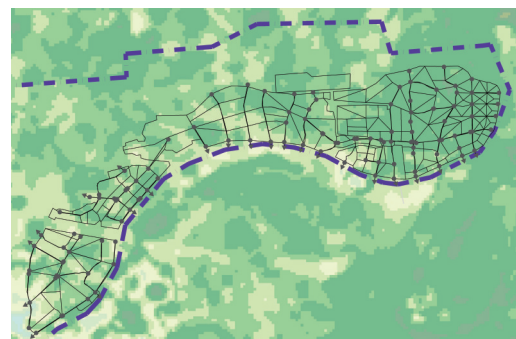


图4 老城区道路概化结果

Fig.4 Generalization result of road in ancient city area

2.3 模型参数选取

本研究中,SWMM模型不透水区糙率取0.015,透水区糙率取0.2。管道糙率依据排水规划取0.013,排洪沟及排水箱涵糙率取0.03^[10]。考虑到各河段防洪堤建成后,河道岸壁为防洪墙,且形成

宽度基本相等的规则河道,整治后河道糙率适当降低,因此河道糙率统一取 0.03。河道现状横断面根据实测成果输入模型。

根据 Y 区潮位站 1953 年—2015 年观测的数据,通过 P-Ⅲ 型曲线进行频率计算,Y 区 50 年一遇最高潮水位为 2.46 m,20 年一遇最高潮水位为 2.35 m。宁远河设计洪水位见表 1,20 年一遇设计降雨 24 h 逐时降雨量分别为 1.9、3.3、3.7、7.9、11.9、13.5、15.1、12.9、12.3、10.1、9.5、8.6、8.7、8.0、7.3、5.5、5.5、4.7、4.3、3.9、3.5、2.5、1.9、1.5 mm。

表 1 宁远河设计洪水位
Tab.1 Design flood level of Ningyuan River m

| 桩号 | 水位 | | | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| | 50 年一遇 | 20 年一遇 | 15 年一遇 | 10 年一遇 |
| 0+000(宁远河大桥) | 5.4 | 3.6 | 2.6 | 2.3 |
| 1+000 | 6.2 | 4.1 | 3.2 | 2.7 |
| 2+000 | 7.1 | 4.7 | 3.7 | 3.2 |
| 3+088(崖城大桥) | 8.3 | 5.6 | 4.3 | 3.8 |
| 4+000 | 9.4 | 6.1 | 4.9 | 4.4 |
| 5+000 | 10.2 | 6.5 | 5.1 | 4.7 |
| 5+508(铁路桥) | 10.6 | 6.8 | 5.4 | 4.7 |
| 6+000 | 11.0 | 7.1 | 5.7 | 5.0 |
| 7+000 | 11.5 | 7.5 | 6.0 | 5.4 |
| 8+000 | 11.7 | 7.9 | 6.3 | 5.7 |
| 9+000 | 12.1 | 8.2 | 6.6 | 6.0 |

2.4 模型参数率定

在 20 年一遇降雨条件下,将 Y 区水系实测流量过程与模型模拟结果进行对比,用纳什效率系数分析部分河道实测曲线与模拟曲线的拟合程度,结果见表 2。可知,纳什效率系数均在 0.75 以上,模拟结果能较为准确地反映实际情况。

表 2 河道设计洪水过程对比
Tab.2 Comparison of design flood process of river course

| 河道名称 | 洪峰流量 | | | 24 h 过流量 | | | 纳什效率系数 |
|------|------------------|------------------|------------|----------------|----------------|------------|--------|
| | 实测值/ (m³·s⁻¹) | 模拟值/ (m³·s⁻¹) | 相对误差/ % | 实测值/ 10⁴ m³ | 模拟值/ 10⁴ m³ | 相对误差/ % | |
| 石沟溪 | 205.8 | 213.6 | 3.8 | 935.0 | 956.2 | 2.3 | 0.79 |
| 长山水 | 88.3 | 85.4 | -3.3 | 326.7 | 342.6 | 4.9 | 0.87 |
| 新开河 | 118.2 | 123.1 | 4.1 | 568.3 | 583.9 | 2.7 | 0.76 |
| 盐灶河 | 58.0 | 57.4 | -1.0 | 239.5 | 231.1 | -3.5 | 0.83 |
| 后河 | 114.5 | 117.0 | 2.2 | 748.8 | 761.9 | 1.7 | 0.88 |

3 现状水系 SWMM 模拟及分析

在 20 年一遇 24 h 降雨遭遇 50 年一遇洪水与 50 年一遇潮水条件下,对 Y 区水系进行模拟,结果如图 5 所示。

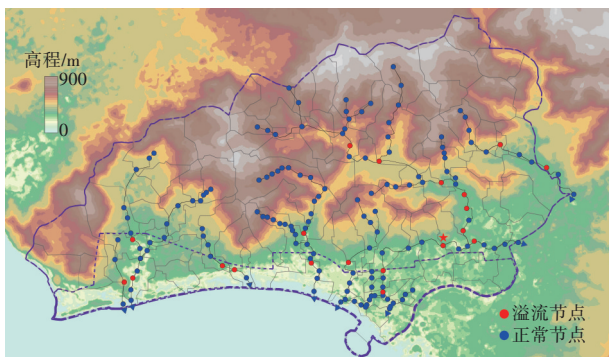


图 5 现状模拟结果
Fig.5 Simulation results under current conditions

以后河溢流节点 J109(图 5 红星处)为例进行分析,截取溢流河段纵断面图,如图 6 所示。水流方向为 J113 至 J116,蓝色部分表示水流,可以看出河道充满度几乎全程为 100%,河道行洪能力不足,工程方案为扩大河道规模。溢流节点 J109 至节点 J112 河段水流方向为逆坡,过水断面减小,出现溢流,工程方案为河道高程调整与修筑防洪堤。

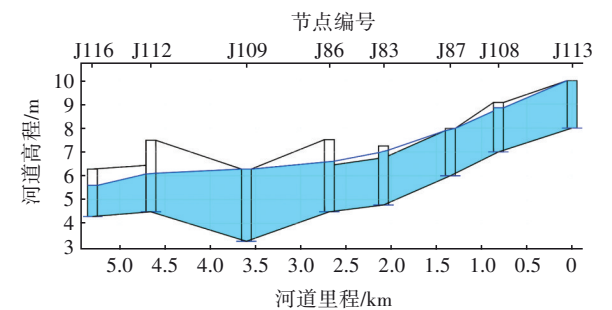


图 6 后河纵断面图
Fig.6 Profile view of Hou River

从流域层面分析,在降雨的 24 h 内,Y 区产生的降雨径流量为 3 506×10⁴ m³,共有 20 个节点有溢流,规划区域内有 8 个溢流点,总溢流量为 1 320×10⁴ m³,占总径流量的 37.65%,现状水系行洪能力不足。

从城市建设区域层面分析,该建设区域处于河流入海口,地势偏低,尤其是建设区域中部,地面高程仅高于海平面 1.0~2.5 m。城市建设区域现状雨水管道管径普遍偏小,区域面积仅占流域总面积的 19.17%,却承担了流域全部的排水压力。当发生降雨时,雨水将难以从管道进入容纳水体。

从易积水片区分析,Y区的易积水片区位于城市建设区域的东部,该区域为已建成的老区,排水方向为宁远河,区域内没有水系,导致雨水管道设计过程中管径大、管道长、埋深大。该区域内宁远河中下游防洪标准较低,以G98高速公路为节点,G98高速公路以上河道防洪标准达到20年一遇;G98高速公路以下至宁远河入海口,左岸防洪标准提高为50年一遇2级堤防,右岸防洪潮堤标准为20年一遇4级堤防,右岸堤防建设尚未完成,现状仅依靠大隆水库控泄洪水的功能来维持着宁远河下游的防洪能力。当遭遇到超过水库控泄能力的洪水时,该区域雨水不能实现自然排放。

4 规划方案设计及校核

4.1 规划方案设计

首先从流域方面进行设计。预留滞滞区,对后河上游山地的来水进行调蓄,对各河道宽深进行调整或新建河道,增强河道的行洪能力,同时也能充分发挥河道的调蓄能力。

其次对于城市建设区域,优先对竖向高程进行控制,尽可能实现雨水自然排放,对规划区域进行雨水管道设计计算,并使用SWMM模型进行验证,确保雨水最终通过管道顺利进入受纳水体。

最后对于易积水片区,该区域管道在洪水发生时不能将雨水自然排入受纳水体,故设置泵站进行强排,并根据实际情况安排泵站调度。同时发现,该区域整体北高南低,在雨水管道管径设计受限的条件下,有利用道路进行排水的条件。对易积水区域道路SWMM模型进行流量分析,筛选出具备道路排水能力的路径共10条。

方案调整过程中会出现新的溢流情况,运用SWMM模型对规划方案进行迭代模拟与调整,直至所有节点均无溢流,最终确定了防洪排涝规划方案,如图7所示。原入海口6处,规划增至9处,原入河口2处,规划增至7处(2处河口、5处泵排口);原河道里程90.6 km,规划增至100.2 km,其中梅山24.3 km、古城6.6 km、古城外铁路北69.3 km,同时整治拓宽河道40.8 km;围合约8.0 km²的农田作为规划预留滞滞区;预留排涝泵站6座(古城4座,排水量共计40 m³/s;保港2座,排水量共计10.7 m³/s)。在20年一遇24 h暴雨强度遭遇50年一遇洪水及50年一遇潮水的情况下,该规划方案可以保证规划范围内不发生内涝。

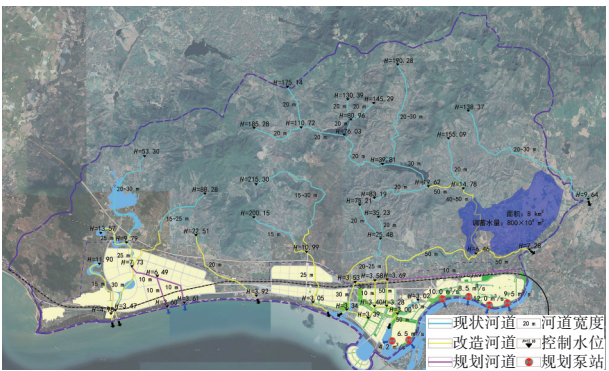


图7 规划方案布局

Fig.7 Layout of planning scheme

该防洪排涝体系有河道及道路排水的多重保障,因此采用较低标准进行建设区域内雨水管道规划设计,设计暴雨强度采用2年一遇2 h降雨,为115.9 L/(s·hm²)。规划范围内新建雨水管道104.3 km,其中渔港片区16.3 km、月亮岛2.8 km、保港4.7 km、临高-保平4.1 km、古城21.5 km、镇海29.2 km、梅山25.7 km。

4.2 规划方案校核

再次模拟12种雨洪潮遭遇条件下规划方案的溢流情况,并对规划方案进行校核。SWMM模拟结果显示,在30年一遇24 h降雨遭遇50年一遇洪水与潮水后,在古城-保港一带出现溢流,该区域依靠泵站强排,需要提高泵排流量,1#~6#泵站校核规模分别为4.2、6.5、10.0、8.5、12.0、9.5 m³/s;与设计规模相比,分别提高了0.7、1.0、1.6、1.5、2.0、1.5 m³/s。校核后,所有工程措施均满足防洪排涝要求,古城泵站、管道及道路排水量见表3。

表3 古城排水量

Tab.3 Displacement of the ancient city

| 设计暴雨强度 | 洪水重现期/a | 泵排水量/ 10 ⁴ m ³ | 管道自排水量/ 10 ⁴ m ³ | 道路自排水量/ 10 ⁴ m ³ |
|-----------|---------|---|---|---|
| 30年一遇24 h | 50 | 233 | 0 | 0 |
| | 20 | 189 | 27 | 17 |
| | 15 | 179 | 42 | 12 |
| | 10 | 155 | 78 | 0 |
| 20年一遇24 h | 50 | 193 | 0 | 0 |
| | 20 | 150 | 28 | 15 |
| | 15 | 138 | 41 | 14 |
| | 10 | 115 | 78 | 0 |
| 5年一遇24 h | 50 | 67 | 0 | 0 |
| | 20 | 52 | 11 | 4 |
| | 15 | 48 | 14 | 4 |
| | 10 | 40 | 27 | 0 |

5 结论

① 从流域-规划区域-积水片区3个层面对沿海山地城市进行防洪排涝规划设计,并运用SWMM模型进行模拟校核,使设计洪涝潮遭遇条件下产生的 $3\,506\times 10^4\text{ m}^3$ 径流量全部被消纳排出,现状条件下 $1\,320\times 10^4\text{ m}^3$ 涝水量全部消除,水系总排水能力提升35.8%。

② 利用山地城市地形优势,进行基于道路竖向调控的防洪排涝规划设计,满足了城市防洪排涝要求,验证了以道路作为大排水系统的可行性。

③ 首先防洪排涝规划设计思路从流域出发,寻找规划区域所处流域的总降雨径流排放出路;其次运用雨水管道解决规划建设区域排水问题;最后对于难解决的积水点、易涝点,将泵站建设作为最后的保障,既节省投资,又利于可持续发展。

参考文献:

- [1] 周宏,刘俊,高成,等.我国城市内涝防治现状及问题分析[J].灾害学,2018,33(3):147-151.
ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, *et al.* Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 147-151 (in Chinese).
- [2] 高学珑,陈奕,唐丽虹.非平原城市排洪规划技术路线研究[J].中国给水排水,2008,24(15):100-103.
GAO Xuelong, CHEN Yi, TANG Lihong. Study on technical route of flood control and waterlogging drainage planning for non-plain cities [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(15): 100-103 (in Chinese).
- [3] 王昊.基于SWMM的城市排涝能力评估与LID改造措施分析[D].大连:大连理工大学,2019:11-17.
WANG Hao. Assessment of Urban Drainage Capacity and Analysis of LID Reconstruction Based on SWMM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 11-17 (in Chinese).
- [4] KHALEGHI E, SADODDIN A, NAJAFINEJAD A, *et al.* Flood hydrograph simulation using the SWMM model: a semiarid zone watershed case study, Shiraz Khoshk River, Iran [J]. Natural Resource Modeling, 2020, 33(2): e12269.
- [5] RABORI A M, GHAZAVI R. Urban flood estimation and evaluation of the performance of an urban drainage system in a semi-arid urban area using SWMM [J]. Water Environment Research, 2018, 90: 2075-2082.
- [6] RAI P K, DHANYA C T, CHAHAR B R. Flood control in an urban drainage system using a linear controller [J]. Water Practice and Technology, 2017, 12 (4): 942-952.
- [7] 李俊奇,王耀堂,王文亮,等.城市道路用于大排水系统的规划设计方法与案例[J].给水排水,2017,43(4):18-24.
LI Junqi, WANG Yaotang, WANG Wenliang, *et al.* Urban roads for major drainage system planning-design methods and cases [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(4): 18-24 (in Chinese).
- [8] 裴斌,赵淑饶,郭银,等.基于能量方程和曼宁公式的断面平均水深计算[J].人民黄河,2019,41(2):10-13.
PEI Bin, ZHAO Shurao, GUO Yin, *et al.* Correlation of the cross-section average water depth based on energy and Manning formula [J]. Yellow River, 2019, 41(2): 10-13 (in Chinese).
- [9] 梁桂雄.相对论性流体的拉格朗日密度与运动方程及连续方程[J].大学物理,2020,39(9):27-30.
LIANG Guixiong. Agrange density, motion equation and continuous of relativistic fluid [J]. College Physics, 2020, 39(9): 27-30 (in Chinese).
- [10] 郭宇超.基于SWMM模型的低影响开发优化设计及雨洪控制效果的研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020:31-32.
GUO Yuchao. Optimal Design of Low Impact Development Based on SWMM Model and Study on the Effect of Rain and Flood Control [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020: 31-32 (in Chinese).

作者简介:杨海燕(1976-),女,北京人,博士,副教授,主要研究方向为水处理技术、节水及再生水回用技术。

E-mail:905841259@qq.com

收稿日期:2021-10-21

修回日期:2022-02-19

(编辑:任莹莹)