

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.020

基于SWMM和GIS的城市内涝4D可视化研究

康得军^{1,2}, 温儒杰^{1,3}, 邱福杰^{1,4}, 赖李保壹^{1,2}, 吴端炜^{1,5}, 赵颖⁶

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学晋江科教园, 福建 晋江 362251; 3. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176; 4. 华东勘测设计院<福建>有限公司, 福建 福州 350001; 5. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 6. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 为了解决SWMM模型中城市内涝积水无法多维显示的问题,提出了一种基于地理信息系统GIS空间分析的城市内涝4D可视化方法。以福建省某城市片区为例,对研究区域排水管网进行概化,构建了该片区的SWMM水力模型,并采用实测降雨进行模拟对比分析。基于GIS空间分析对模拟积水结果进行4D可视化,研究得到的不同降雨历时下城市内涝淹没范围与实际调研结果基本相符,表明提出的城市内涝4D可视化方法具有良好的实用性。该方法将GIS空间分析工具和空间制图相结合,实现了暴雨情景下城市内涝区域的直观多维表达。

关键词: SWMM; 地理信息系统(GIS); 城市内涝; 4D可视化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0133-06

4D Visualization of Urban Waterlogging Based on SWMM and GIS

KANG De-jun^{1,2}, WEN Ru-jie^{1,3}, QIU Fu-jie^{1,4}, LAI Li-bao-yi^{1,2}, WU Duan-wei^{1,5}, ZHAO Ying⁶

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fuzhou University Jinjiang Science and Education Park, Jinjiang 362251, China; 3. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China; 4. Huadong Engineering <Fujian> Corporation, Fuzhou 350001, China; 5. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 6. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: This paper proposed a 4D visualization method of urban waterlogging based on geographic information system (GIS) spatial analysis, so as to solve the problem that urban waterlogging cannot be displayed in multiple dimensions in SWMM model. The drainage network in the study area of a city in Fujian Province was generalized to construct the SWMM hydraulic model, and the measured rainfall was simulated and analyzed. The simulated waterlogging was visualized in 4D based on GIS spatial analysis, and the submerged area under different rainfall durations was basically consistent with the actual investigation results, indicating that the proposed method for 4D visualization of urban waterlogging was of good practicability. This method combined GIS spatial analysis tools with spatial

基金项目: 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心开放课题(UDC2017032512)

通信作者: 康得军 E-mail: dj kang@fzu.edu.cn

mapping, and realized the visual multi-dimensional representation of urban waterlogging areas under rainstorm scenarios.

Key words: SWMM; geographic information system (GIS); urban waterlogging; 4D visualization

城市地区的水管理是维持其可持续发展的一个重要方面^[1],城市在建设过程中存在过度使用混凝土、沥青和“灰色建筑”等问题,造成地表下垫面的不透水率增加,地表径流汇集速度加快,导致城市内涝频发^[2-4]。针对城镇化持续提升所带来的内涝问题,许多水力模型如SWMM、MIKE FLOOD、MIKE URBAN、HEC-RAS等被广泛应用于城市雨洪模拟中^[5-6]。SWMM模型能计算不同暴雨情景下研究区域的地表径流经下渗、蒸发、排放口输出后各个节点的溢流量,但存在不能显示节点溢出水量产生的城市内涝积水深度及空间范围的问题^[7],而通过将地理信息系统(GIS)和SWMM模型相结合,能有效解决此问题。石赞赞等^[8]利用GIS技术,构建了淹没分析模块,结合SWMM实现了对城市内涝淹没范围和淹没深度的分析。陈浩等^[9]基于D8算法建立了城市雨洪模型,对武汉市汤逊湖流域的积水进行了计算与验证,结果良好。虽然目前对SWMM模型中节点溢流的积水淹没深度和淹没范围已经有了一定的研究,但仍无法直观地显示出具体的内涝空间范围。针对上述问题,笔者结合SWMM模型、GIS的空间分析功能和数字高程模型(DEM),利用历史实测降雨数据,对城市内涝进行4D可视化,将地形和内涝用DEM转化为三维图像,并相对于时间变化进行空间变化分析,得到了不同降雨历时下城市内涝的动态结果,并以福建省某城市片区为应用案例进行验证。

1 城市内涝4D可视化方法

SWMM作为一维水文动力模型,能够模拟不同降雨情景下的地表径流、下渗、蒸发及排水管网水文动力过程。当降雨强度较大时,排水管网超载运行,部分检查井节点水位高出上边界,造成节点积水溢流到地表的现象,然而SWMM模型只能统计出节点溢流的水量,无法对溢流出的水进行多维的地表积水模拟计算^[10]。针对该问题,本研究利用GIS强大的空间分析功能,结合真实地表DEM和SWMM模拟节点溢流量,基于ArcGIS、Python和VS

2017平台开发了城市内涝可视模块,能够较好地模拟城市区域内暴雨情景下受内涝影响的空间范围,实现暴雨过程中城市内涝的动态模拟。主要步骤包括地表DEM构建、分水岭划分、溢流量统计、积水范围确定和积水动态显示等5个部分,具体如下:

① 地表DEM构建。地表DEM构建是城市内涝可视的基础,地表DEM的构建精度决定了可视化结果的准确性。城市暴雨条件下,节点溢流积水在地表汇流,形成内涝区域。借助地表DEM能够准确反映积水的实际变化。利用规划院提供的高程点创建TIN(不规则三角网)转化为研究区域地表DEM。为了使地表DEM更加符合实际,需要对DEM进行一些后期处理,如填洼等。另外由于研究区域仍有一部分属于开发阶段,因此忽略建筑物对积水扩散的影响。通过上述处理,可以得到较为真实的地表DEM栅格数据。

② 分水岭划分。ArcGIS中水文应用工具箱可以对研究区域进行水文分析,基于填洼后的DEM,利用D8算法确定了水文流向格栅及积累量的格栅。通过分水岭的划分,可以确定不同分水岭在不同节点溢流量时的水文流向及汇流区域^[11]。

③ 溢流量统计。构建研究区SWMM模型后,利用VS 2017调用SWMM动态库中的Get Swmm Result函数读取不同时刻SWMM节点溢流量数据,将每个分水岭中的节点溢流量统计出来,并将数据通过ArcGIS中的连接功能导入到节点属性表中。

④ 积水范围确定。通常计算积水淹没范围的方式分为有源淹没和无源淹没分析,本研究采用有源淹没分析。有源淹没是指在流域中某特定位置给定一个水位,根据水流的重力特性计算水会流向哪些区域,比较符合水流的自然规律^[12]。有源淹没分析可以根据溢流量及集水区的水位容积曲线,找到对应水位。利用ArcGIS中的表面体积功能,确定每个分水岭的水位容积曲线,根据确定的溢流量,得到淹没水位及范围。

⑤ 积水动态显示。使用ArcGIS地图代数中

栅格计算器创建对应时刻的特定水深及范围的不同形状文件,并转化为栅格文件,然后将地表DEM及内涝栅格文件创建为三维淹没动画,利用ArcGIS中时间滑块工具完成城市内涝4D可视化。

方法流程如图1所示。

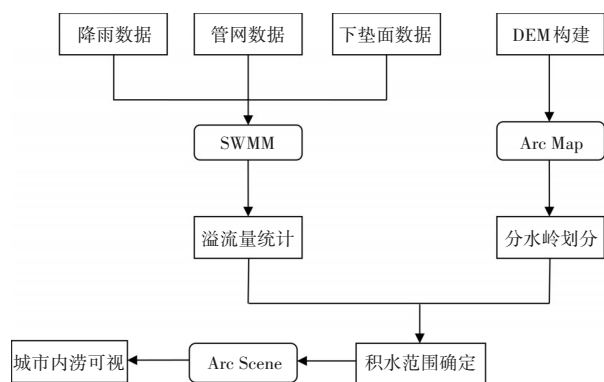


图1 城市内涝4D可视化方法流程

Fig.1 Flow chart of 4D visualization method for urban waterlogging

2 模型构建

2.1 研究区域概况

研究区域位于福建省某城市片区,该片区依山面海,属于亚热带季风气候,存在梅雨(4月—6月)和风暴雨(7月—9月)两种类型的降雨。该片区地处晋江入海处,多处地势低洼,受到东南沿海台风和潮水顶托双重影响,在台风季节短历时强降雨情景下,经常造成局部性的城市内涝。该片区管辖面积为28.6 km²,人口密度较大,其中研究区域面积为7.12 km²,建筑用地、不透水路面和广场占33.3%,绿地、水体占27.2%,半透水洼地占39.5%。

2.2 SWMM模型概化

研究区域的模型概化结果如图2所示。

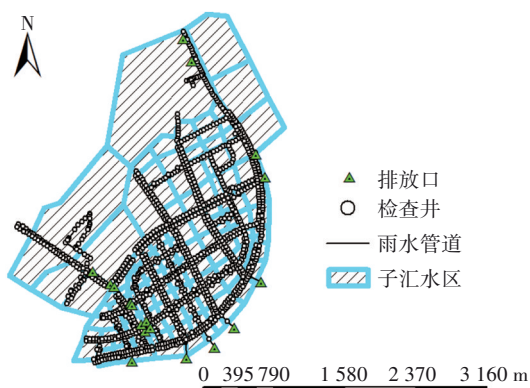


图2 研究区域概化

Fig.2 Generalization of study area

根据当地规划院提供的研究区域雨水管网CAD图纸、地形图等资料,利用ArcGIS完成管网概化、子汇水区划分、下垫面数据提取等过程,并将结果导入SWMM中完成模型构建。研究区域被划分为165个子汇水区、1232个节点、1231个管渠和19个排放口。

2.3 模型参数选取

子汇水区模型参数可以分为确定性参数和经验性参数,确定性参数一般都有明确的物理意义,可以从GIS中直接提取;经验性参数一般通过参考文献、实际工程得到取值范围,并在此基础上进行优化率定,确定模型参数^[13]。本研究得到的参数如下:N-Perv(透水区曼宁系数)为0.2, N-Imperv(不透水区曼宁系数)为0.009, Des-Perv(透水区洼蓄水深度)为9 mm, Des-Imperv(不透水区洼蓄水深度)为2 mm, Max Infil Rate(最大下渗率)为70 mm/h, Min Infil Rate(最小下渗率)为3.1 mm/h, %Zero-Imperv(不透水区无洼地所占百分比)为25%, Con-Roughness(管道曼宁系数)为0.014, Decay constant(渗透衰减系数)为3.5。

2.4 实测降雨数据

选取近年降雨强度较大的实测暴雨(2018年8月28日)作为输入雨型,其降雨量为135.7 mm、降雨历时为3.5 h,如图3所示。

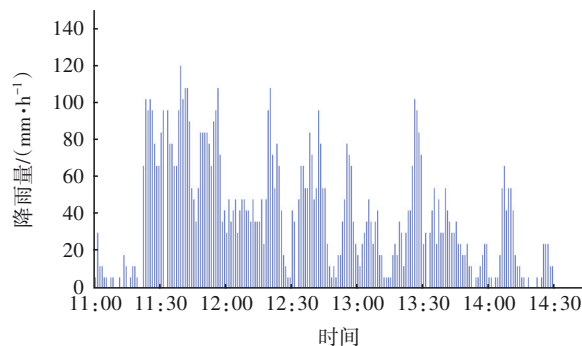


图3 2018年8月28日实测降雨

Fig.3 Measured rainfall on August 28, 2018

3 基于ArcGIS的内涝积水可视化

3.1 分水岭划分

ArcGIS中水文分析工具用于为地表水流建立运动模型,可以了解区域中水的流动方向及汇集区域,需要从DEM中提取水文信息并进行水文分析。提取研究区域的高程点(由规划院提供),创建研究区域的DEM。利用ArcGIS中Spatial Analyst工具的

水文分析功能中的填洼、流量、流向和分水岭计算功能对研究区域完成分水岭的划分,并结合实际地形对分水岭进行调整,确定研究区域水流流向及汇流区域。分水岭划分如图4所示。

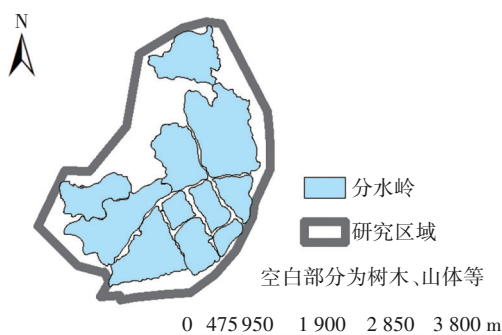


图4 分水岭划分

Fig.4 Watershed division

3.2 溢流量统计

在构建研究区域的SWMM模型后,利用VS 2017调用Get Swmm Result函数,计算输出不同时刻各管网节点的溢流量,并通过ArcGIS中的连接功能导入到各分水岭中,统计出各分水岭的溢流总量,并以该溢流量作为积水范围确定主要的输入数据。实测暴雨条件下,发生溢流的节点共253个,最大溢流量为115 597 m³,最长溢流时间为3.46 h,溢流总量为795 736 m³,部分节点的溢流过程曲线如图5所示。

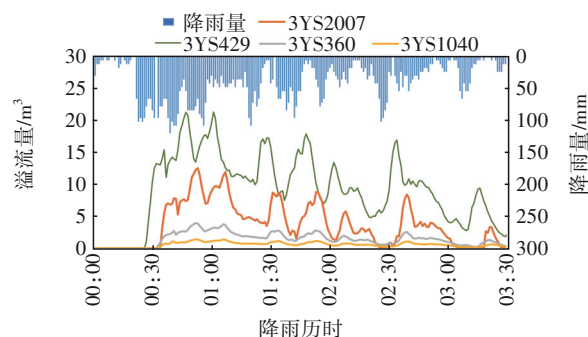


图5 部分溢流节点的溢流过程曲线

Fig.5 Overflow process curve of some overflow nodes

不同节点的溢流量会随着降雨的进行而波动,这些都是导致研究区域积水面积及积水深度增加进而引发城市内涝的主要因素。为了更好地区分研究区域的溢流量大小,设置3个节点溢流风险等级,一级表示节点溢流量在 $(0\sim10)\times10^6$ L之间,二级表示溢流量在 $(10\sim50)\times10^6$ L之间,三级表示溢流量 $>50\times10^6$ L。实测暴雨条件下节点溢流风险等级

空间分布如图6所示。

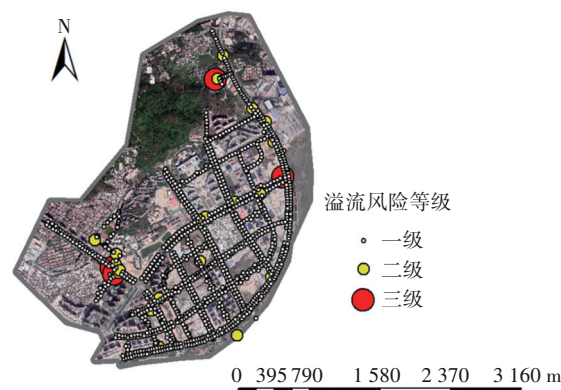


图6 节点溢流风险等级空间分布

Fig.6 Spatial distribution of node overflow risk level

3.3 积水范围确定

本研究采用有源淹没分析方法计算积水范围。有源淹没分析分为给定积水深度计算积水范围和给定积水水量计算积水范围两类。本研究利用SWMM节点溢流量作为输入数据,根据节点溢流量和分水岭的水位库容曲线,找到对应的积水深度,进而得到积水范围。利用ArcGIS中3D Analyst工具的表面积功能,该功能可以计算表面和参考平面之间的体积,原理如图7所示,蓝线表示某一参考平面,红色部分则为蓝线与地表表面之间的体积。利用此功能,依次以某一精度从分水岭的最低高程计算与最高高程之间的体积,即可确定分水岭的水位容积曲线。

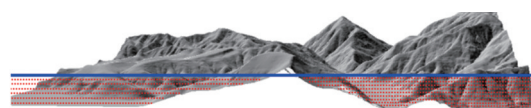


图7 表面体积计算功能

Fig.7 Surface volume calculation function

为了更加精确地获得积水深度与溢流量之间的关系,利用Python对ArcGIS进行二次开发。通过ArcGIS已有接口,调用表面体积功能,以0.01 m的精度依次计算与地表表面之间的体积,确定各分水岭的库容曲线。通过上述方法确定了研究区域溢流量与积水深度的关系,如图8所示。可以看出,随着溢流量的不断增加,积水深度不断增大,但水深的增长速率逐渐减慢,这是由于积水范围变大,相同水量转化为的水深逐渐减小。通过各分水岭统计的节点溢流量,对应溢流量和积水深度的关系曲线确定积水深度及积水范围。

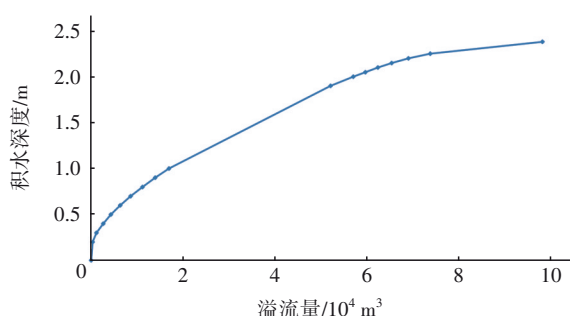


图8 溢流量与积水深度的关系曲线

Fig.8 Relationship curve between overflow quantity and submergence depth

3.4 积水动态显示

通过不同时刻的节点溢流量对应的积水深度结果,使用ArcGIS中的栅格计算器创建特定水深相对时间的不同形状文件。再将这些形状文件根据水深的变化转化为栅格文件,利用ArcGIS时间滑块功能完成城市内涝三维模型随时间变化的4D过程。

选取2018年8月28日的大暴雨,在降雨前及降雨1、2、3 h后该片区的内涝积水范围动态变化如图9所示。可以看出,随着降雨的进行,内涝积水范围及深度不断增加。发生内涝的主要区域集中在滨海大街与东海大街路段、滨海路与府东路及府西路交汇处、东海大街和港湾街交叉口处、滨海街行政服务中心路段等。经过与现场对比,发现该区域部分片区目前正在开发建设,某些地表植被被破坏,雨水泥沙含量大,下游雨水管道经常堵塞淤积,上游区域内管道建设尚未完全,内部管道超负荷,雨水沿地面漫流至街道发生城市内涝,可见模拟内涝区域与实际调研内涝区域基本一致。

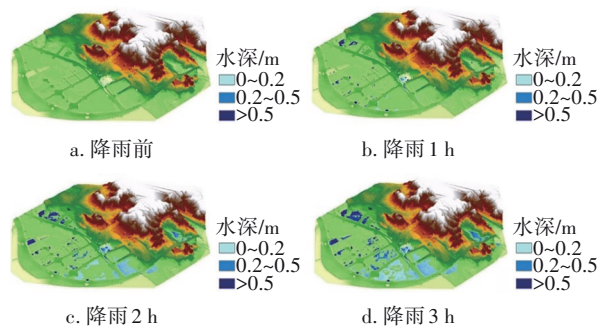


图9 不同降雨历时下的城市内涝积水范围

Fig.9 Urban waterlogging inundation range map under different rainfall durations

4 结论

① 基于GIS空间分析和SWMM积水模拟结

果,提出了一种将城市内涝进行4D可视化的方法,将SWMM中溢流量和GIS空间分析工具相结合,确定了不同降雨历时条件下可能发生内涝积水的区域,模拟得到的城市内涝积水范围图较为准确地反映了实际内涝情况,表明本研究提出的城市内涝4D可视化方法具有一定的实用性。该方法将GIS空间分析工具和空间制图技术相结合,实现了城市内涝区域的直观多维表达。

② 在研究区域绘制了城市内涝随时间变化的动态图,有助于直观了解城市内涝蔓延过程,借助于对确定的内涝区域提高防洪排涝标准,采用非工程及工程措施相结合的治理方式,可减少城市内涝的风险。

参考文献:

- [1] 游宇,车伍,闫攀,等. 美国雨水管理体系中树木的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 30-35.
YOU Yu, CHE Wu, YAN Pan, *et al.* Application of trees in rainwater management system in America [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 30-35 (in Chinese).
- [2] 王俊佳,王川涛,曾胜. 基于情景模拟的城市排水能力及内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 115-120.
WANG Junjia, WANG Chuantao, ZENG Sheng. Assessment of urban drainage capacity and waterlogging risk based on scenario simulation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 115-120 (in Chinese).
- [3] 王成坤,黄纪萍,曾胜,等. 基于积水特征和暴露脆弱性的城市内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2019, 35(5): 125-130.
WANG Chengkun, HUANG Jiping, ZENG Sheng, *et al.* Urban flooding risk assessment based on coupling of waterlogging characteristics and exposed vulnerability [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(5): 125-130 (in Chinese).
- [4] ZHAO G, PANG B, XU Z X, *et al.* Urban flood susceptibility assessment based on convolutional neural networks [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125235.
- [5] 王川涛,黄丽娇,王俊佳. 基于MIKE FLOOD模型的老城区内涝防治研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(15): 128-132.
WANG Chuantao, HUANG Lijiao, WANG Junjia.

- Prevention and control of waterlogging in old urban district based on MIKE FLOOD model[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(15): 128-132 (in Chinese).
- [6] 徐雷, 吴正松, 邵知宇, 等. 基于SWMM耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 114-120.
- XU Lei, WU Zhengsong, SHAO Zhiyu, *et al.* Design method and application of roadway drainage path based on coupled hydraulic SWMM model[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 114-120 (in Chinese).
- [7] 王慧亮, 吴泽宁, 胡彩虹. 基于GIS与SWMM耦合的城市暴雨洪水淹没分析[J]. *人民黄河*, 2017, 39(8): 31-35.
- WANG Huiliang, WU Zening, HU Caihong. Rainstorm waterlogging and submergence model and its application in urban areas based on GIS and SWMM [J]. *Yellow River*, 2017, 39(8): 31-35 (in Chinese).
- [8] 石赟赟, 万东辉, 陈黎, 等. 基于GIS和SWMM的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(6): 57-60, 12.
- SHI Yunyun, WAN Donghui, CHEN Li, *et al.* Simulation of rainstorm waterlogging and submergence in urban areas based on GIS and SWMM [J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(6): 57-60, 12 (in Chinese).
- [9] 陈浩, 洪林, 梅超, 等. 基于D8算法的分布式城市雨洪模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(3): 335-340.
- CHEN Hao, HONG Lin, MEI Chao, *et al.* Distributed simulation of urban storm water based on D8 algorithm [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(3): 335-340 (in Chinese).
- [10] 黄国如, 黄维, 张灵敏, 等. 基于GIS和SWMM模型的城市暴雨积水模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 1-6.
- HUANG Guoru, HUANG Wei, ZHANG Lingmin, *et al.* Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 1-6 (in Chinese).
- [11] 刘春雨, 赵延, 李强. 基于ArcGIS的流域水文分析及区域洪水淹没研究[J]. *电力勘测设计*, 2019, 31(S1): 81-85.
- LIU Chunyu, ZHAO Yan, LI Qiang. Study of the watershed hydrological analysis and regional flood submergence based on ArcGIS [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2019, 31(S1): 81-85 (in Chinese).
- [12] 朱祖乐. 基于WebGL的郑州市区积水路段暴雨洪水三维场景模拟[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- ZHU Zule. Three Dimensional Scene Simulation of Rainstorm Flood in Ponding Areas of Zhengzhou Urban Roads Based on WebGL [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016 (in Chinese).
- [13] 刘兴坡, 王志强, 李璟. 基于BP神经网络的SWMM参数全局灵敏度分析方法[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 122-129.
- LIU Xingpo, WANG Zhiqiang, LI Jing. Global sensitivity analysis method for parameters of storm water management model based on BP neural network [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 122-129 (in Chinese).

作者简介: 康得军(1981-), 男, 湖北十堰人, 博士, 副教授, 主要从事海绵城市建设理论与技术等方面的研究。

E-mail: dj kang@fzu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-12

修回日期: 2022-09-03

(编辑: 刘贵春)

实施国家节水行动, 建设节水型社会