

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 07. 020

# 基于GIS和SWMM的精细化水文表征方法

周倩倩<sup>1</sup>, 冯军满<sup>1</sup>, 覃 钊<sup>1</sup>, 廖晓婷<sup>1</sup>, 张建良<sup>2</sup>, 葛晓光<sup>2</sup>,  
陆宗雷<sup>3</sup>

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 3. 格兰富水泵<上海>有限公司, 上海 201106)

**摘 要:** SWMM是模拟城市降雨径流响应的动态模型,其汇水区的空间元素细分方式和水文表征直接影响模拟结果。为此,提出了基于GIS对汇水区的土地利用进行精细化分类的方法,并将下垫面信息通过物理水文定义,反馈、模拟到SWMM的汇水区水文表征和低影响开发(LID)模块描述中,直接影响水文汇流过程。与常规水文构建方法相比,精细化模型中增加的缓冲渗透区可以接收来自间接不透水区的径流,更符合实际径流走向,提高了模型精度。在相同降雨重现期下,精细化模型模拟得到的径流总量、径流峰值和溢流总量均比常规模型要小。同时,该方法可以更合理地模拟LID措施的水文作用,可为LID措施提供因地制宜的布设空间和比例。

**关键词:** 暴雨洪水管理模型(SWMM); 地理信息系统(GIS); 土地利用; 汇水区

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0126-07

## Refined Hydrological Characterization Method Based on GIS and SWMM

ZHOU Qian-qian<sup>1</sup>, FENG Jun-man<sup>1</sup>, QIN Zhao<sup>1</sup>, LIAO Xiao-ting<sup>1</sup>,  
ZHANG Jian-liang<sup>2</sup>, GE Xiao-guang<sup>2</sup>, LU Zong-lei<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co. Ltd., Guangzhou 510507, China; 3. Grundfos Pump <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 201106, China)

**Abstract:** SWMM is a dynamic model to simulate urban rainfall runoff response, and its spatial element subdivision and hydrological characterization of catchment area directly affects the simulation results. Therefore, this paper proposed a method for refined land use classification in catchment area based on GIS, and fed back and simulated the underlying surface information into the catchment area hydrological characterization and low impact development (LID) module description of SWMM through physical hydrological definition, so as to directly affect the hydrological confluence process. Compared with the conventional hydrological modeling method, the buffer infiltration area added in the refined model received runoff from the indirect impervious area, which was more consistent with the actual runoff trend and improved the model accuracy. Under the same rainfall return period, the total runoff, peak

基金项目: 广东省自然科学基金青年提升项目(2023A1515030126); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51809049)

runoff and overflow of the refined model were all smaller than those of the conventional model. In addition, this method can more reasonably simulate the hydrological performance of LID measures, and provide layout space and proportion for LID measures according to local conditions.

**Key words:** SWMM; GIS; land use; catchment area

随着城市化进程的推进,城市不透透面积增多,城市地下管网系统(简称管网)无法及时排放暴雨带来的径流,导致城市内涝愈发严重<sup>[1-2]</sup>。为解决这一系列问题,不少国家提出借助低影响开发(LID)措施,将雨水通过分散式设施从源头和路径过程进行削减和控制,把雨水转化为资源的新管理理念<sup>[3-4]</sup>。随着计算机技术的普及,相关的地理信息管理工具如地理信息系统(GIS),以及雨洪模拟方法如暴雨洪水管理模型(SWMM)得到了发展和广泛应用,可实现对管网和地表径流的信息处理、物理模拟和动态评估,为城市雨洪管理和LID规划提供技术上的支持<sup>[5-6]</sup>。

模型的计算精度取决于汇水区的空间元素细分程度<sup>[7]</sup>,因此需要合理、科学地提高土地利用分类及水文表征精细度。至今鲜有研究土地利用的构建方法及其改善式水文表征对汇流和径流特征的响应情况<sup>[8-9]</sup>。同时,目前关于LID的研究主要分析不同措施在不同降雨条件和汇水区常规水文属性下的地表径流特征差异<sup>[6,10]</sup>,大部分研究均采用常规汇水区的水文设置,且在LID的设定上较理想化,很少依据研究区域的详细用地方案和措施连接方式进行设置,致使模拟方案与实际措施相差较大,运行起来困难重重。

鉴于此,笔者提出了融合GIS和SWMM的精细化水文表征模型,通过改善土地类型的分类方式及汇水区水文属性的布局 and 连接方式,精细化表征汇流-径流连接过程,提升汇水区水文表征的准确性,在精细化的基础上可使LID措施布设分配和比例更符合实际,做到因地制宜。同时,将其与常规建模进行对比,进一步探究不同重现期下径流特征的响应情况,以期更好地指导、模拟和评估不同降雨情景下LID措施的布局 and 设计方案。

## 1 方法论

精细化水文表征的技术路线如图1所示。通过在GIS中进行精细化的下垫面分类,为后续的水文表征做基础数据分析和输入。精细化模型对径流

表征方式和过程进行补充和优化,增加了径流的下渗出路,提高模型的准确性。主要流程如下:将原始资料中的用地类型、管网数据和遥感图像等信息导入ArcGIS中,运用ArcGIS的空间分析和数据管理能力,对遥感图像进行解译识别,实现研究区域的土地利用精细化分类;基于地形和管道走向,进行汇水区概化和划分,并依据用地分类和区域空间条件,构建改善式的汇水区水文表征模型,将常规土地利用与渗透区做进一步细化,增加汇水区水文表征的多样性,同时结合暴雨模型和产流模型构建管网模型。

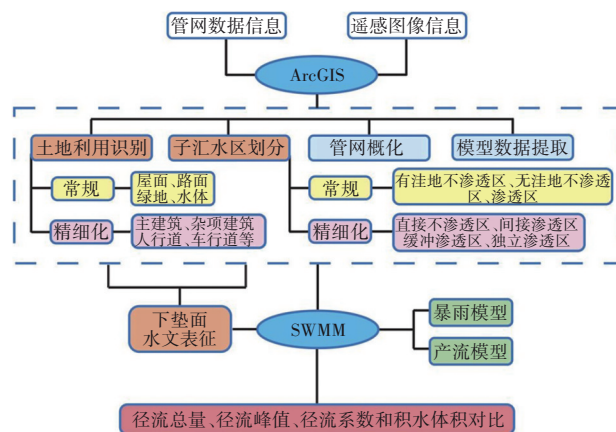


图1 基于精细化土地利用构建SWMM模型的方法

Fig.1 SWMM building method based on refined land use

### 1.1 土地利用分类与识别

土地利用分类是区分土地利用空间地域组成单元的过程,可反映土地的利用形式和功能。常规土地利用划分为以下4类:屋面、路面、绿地和水体。本研究在此基础上进行细分,将屋面划分为主建筑和杂项建筑,路面划分为主道路、人行道、单车道和停车区域,同时将绿地划分为草坪、森林和农业区,水体划分为湿塘和游泳池<sup>[7]</sup>。细分土地利用分类能更准确地表征区域内下垫面的水文状态,方便后续计算汇水区水文表征以及添加LID的布设位置与比例。

研究区域的土地利用识别主要依据遥感影像

资料进行区分,从AutoCAD软件中导出原始底图至ArcGIS中,将遥感图像与原始资料的Shapefile形状文件进行地理配准,根据图像资料的目标信息影像

特征建立判读标志,帮助鉴别遥感影像的目标地物<sup>[11]</sup>。构建的研究区域各地类型判读标志见表1。因研究区域无游泳池,故暂不考虑其判读标志。

表1 研究区域各地类型判读标志

Tab.1 Type interpretation marks in study area

土地利用类型	判读标志	土地利用类型	判读标志
主道路	线状分布,颜色较亮	草坪	基本为绿色和褐色,条理明显,形状不规则
人行道	线状分布,多位于主道路与草坪间	森林	颜色多为深绿色,有明显树木结构
单车道	线状分布,分布在建筑、停车场出入口	农业区	颜色基本为褐色,条纹规律分布
停车区	形状规则,停放车辆较多	湿塘	主要分布在公园,有树木包围,形状多不规则
主建筑	形状规则,易于辨认,分布密集	杂项建筑	形状不规则,多为独立建筑

## 1.2 汇水区分割

基于SWMM,可将研究区域分割为数量不限、形状不一的子汇水区,并演算子汇水区的径流、下渗过程<sup>[12]</sup>。主流文献中的常规方法将每个汇水区分为两种区域:渗透区域(PA)和不渗透区域(IA),其中不渗透区域进一步分为有洼地不渗透区域(A1)和无洼地不渗透区域(A2)。SWMM在运算时,对各类区域进行降雨径流过程演算,演算结果进行叠加后得到子汇水区的径流出流量。常规方法粗略地将用地类型分割为两类,未考虑与渗透区接壤的不渗透区的径流实际流向,将不渗透区中的降雨设定为经汇流直接排入管网,导致计算的径流总量虚高。

本研究在土地利用精细化的基础上,对汇水区分割方式和水文表征进行改善,细分为4类区域:直接不渗透区(DCIA)、间接不渗透区(ICIA)、缓冲渗透区(BPA)和独立渗透区(SPA)。直接不渗透区指不经过任何控制的情况下,径流直接排向出水口;间接不渗透区指径流优先流向缓冲渗透区至其饱和后再排向出水口;缓冲渗透区指该区域可以接收来自间接不渗透区的径流;独立渗透区指不接收不透水区域的径流,仅当该区域土壤下渗饱和后才会产生径流。

## 1.3 汇水区水文表征

常规水文表征将1.1节中的绿地定义为渗透区域,其他用地类型全部定义为不渗透区域,不渗透区域覆盖广泛,汇水区径流流向单一,与实际流向相差较大。而精细化水文表征则明确定义了各区域的范围,将主建筑、主道路等用地类型定义为DCIA,杂项建筑、人行道与部分单车道定义为ICIA,接收ICIA的绿地区域设定为BPA,剩余的渗透区域

则为SPA。

精细化模型考虑了实际的径流流向。例如,在常规模型中,通常将屋面设为不渗透区IA,雨水全部由雨水沟收集,经由雨水管直接排入城市地下管网系统中,在区域分类中过于绝对,没有考虑实际排水情况。在精细化模型中,建有完善的雨水收集系统的主建筑为直接不渗透区DCIA,与常规模型设置相同;如果是雨水管断接以及斜屋面等建筑情况,则设置为间接不渗透区ICIA,水流经由雨水管排入附近的缓冲渗透区BPA进行下渗,至其下渗能力饱和,地表汇流排入就近雨水口。这些区别在常规模型中不进行区分,就会导致对用地类型的水文表征判断不够全面,从而降低模拟的准确度。

由于ICIA的径流经BPA进行下渗,故可以考虑通过设置LID措施加强这两个区域间的径流连接和下渗功能,以进一步减少地表径流的产生。需要注意的是,常规和精细化模型均可根据模拟需求添加LID模块。

精细化模型增加了汇水区不同水文属性的划分类型和径流连接方式,为LID的布设提供了更多的方案选择,更加明确LID的布设位置与比例,提高了LID措施实施的可行性。具体来说,LID布设主要有两种方式:汇水区占比布设和汇水区分割布设。若以占比方法进行布设,经精细化水文表征过程后,可对占比进行更加精确的计算,而不是简单地以经验值进行占比分配;若采用分割方法进行布设,在精细化模型上可实现更精细的汇水区域和不同水文属性的分割。同时,精细化模型的径流路由更符合实际情况。

汇水区中4类区域的参数通过加权平均的方法,得出精细化模型汇水区的下垫面水文表征,漫



流长度加权平均公式如式(1)所示,其他参数加权平均公式类似,其中本研究区域精细化土地利用后选取的相关参数见表2。

$$l_{\text{漫流}} = \frac{\sum(l \times S)}{S_{\text{总}}}$$

(1)

表2 研究区域精细化水文表征

Tab.2 Hydrographic characterization of refined classification in study area

项 目		漫流长度/m	粗糙系数	最大入渗率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	最小入渗率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	洼地储蓄DS/ mm
DCIA 和 ICIA	建筑	75	0.013	—	—	2.5
	单车道	55	0.014	—	—	2.5
	主道路	100	0.011	—	—	2.0
	人行道	80	0.024	—	—	2.5
	停车区域	70	0.014	—	—	2.5
	其他区域	75	0.014	—	—	3.0
SPA 和 BPA	农业区域	80	0.350	50	10	5.0
	森林	70	0.600	65	15	7.5
	草坪	60	0.300	50	10	3.5

1.4 SWMM 模型构建及方法对比

在常规建模方法中,结合当地地形、河道、街道、管线分布和实地考察等情况,对各子汇水区的边界进行划分;根据子汇水区划分以及管网分布等因素,将多段管段简化为一段,多个检查井合并为一个节点,完成管网概化任务;同时,依据子汇水区中不渗透土地利用面积占子汇水区总面积的比值,来确定子汇水区的不渗透率。相关参数例如渗透区和不渗透区的粗糙系数等,可以根据地理信息库、雨情数据库和SWMM用户手册确定。本研究的常规模型演算方式设置为 outlet,演算百分比为100%,即不渗透区和渗透区产生的径流各自直接排向汇水节点。

在精细化建模方法中,子汇水区划分、管网概化、子汇水区面积和坡度提取、不渗透率的获取方法与常规建模方法相同;其他参数(例如子汇水区的特征宽度、渗透区和不渗透区的粗糙系数等)参考SWMM用户手册后,通过加权平均得到最终数据。在本研究中,精细化模型的演算方式设置为 perious,根据间接不渗透区所占不渗透区域的比例设置演算百分比,增加了部分不渗透区径流的下渗出路(如图2所示),即间接不渗透区的径流优先排向邻近的缓冲渗透区进行下渗,饱和后再由管网收集排放,以减少径流总量,推后管网径流峰值,减轻管网压力。

式中: $l_{\text{漫流}}$ 为子汇水区的漫流长度; $l$ 为各土地利用的漫流长度; $S$ 为各土地利用所占子汇水区面积; $S_{\text{总}}$ 为子汇水区总面积。最大漫流长度是子汇水区最远点到集水点的距离,子汇水区特征宽度为最大漫流长度与子汇水区面积的比值。

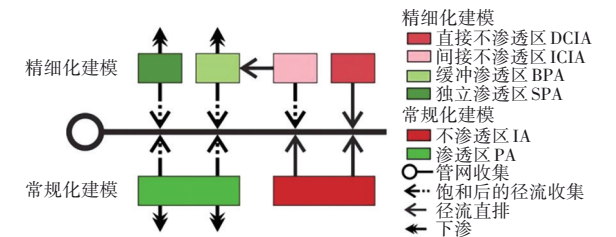


图2 精细化模型与常规模型的径流路由示意

Fig.2 Runoff routing diagram of refined model and conventional model

2 研究区域概况及模型构建

研究区域位于华北北部某城市,地处北温带大陆性气候区,全年降雨不均匀,年均降雨量为398 mm,降雨集中在夏秋季节,占年降雨总量的80%,易出现春旱夏涝现象。研究区域地势东北高、西南低,面积为15.17 km<sup>2</sup>。常规土地利用中,屋面占48.82%、路面占21.24%、绿地占29.64%、水体占0.3%。精细化土地利用后,主建筑占47.79%、停车区域占4.4%、人行道占1.99%、主道路占13.34%、单车道占1.51%、其他不渗透区域占1.03%,其中不渗透比例为70.36%;草坪占18.91%、森林占6.03%、农业区域占4.7%、湿塘占0.3%。常规建模水文表征见图3(a),精细化建模水文表征见图3(b)。

研究区域的汇水区边界划分为47个子汇水区,概化管网得到排水管段共48段,排水节点为50个,

其中出水口3个、一般节点47个,SWMM模型见图3(c)。两类模型中的衰减常数、管道曼宁系数、管道损失系数等取相同值,改变渗透区与不渗透区相应

参数取值,常规建模的相关参数多基于用户手册与经验值进行选取,而精细化模型采用土地利用参数加权平均法取得,具体见表2。

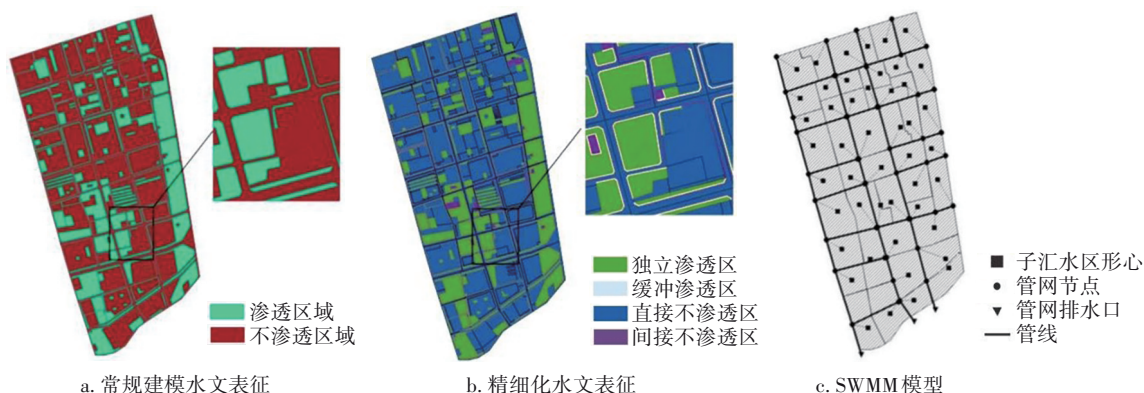


图3 常规建模和精细化建模的水文表征以及SWMM模型示意

Fig.3 Hydrological characterization of conventional and refined models and schematics of SWMM model

图4截取了研究区域内公园的杂项建筑进行径流路由展示。在常规建模中,直接将所有建筑与道路定义为IA,产生的径流经汇流后全部排入管网中,当管网饱和和无法容纳新径流时,逐渐形成城市

内涝;绿地为PA,大部分降雨能直接下渗,少部分降雨形成地表蓄洼后随时间缓慢下渗,随着绿地下渗量达到饱和,PA将无法提供额外的径流控制,经过蓄洼后形成地表径流。

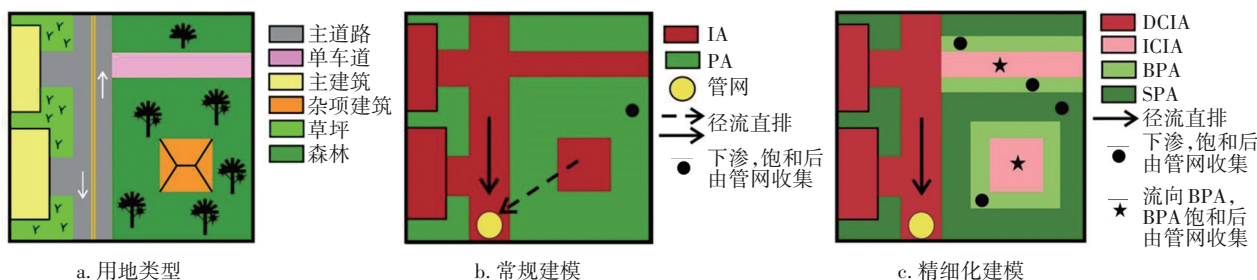


图4 研究区域的水文表征与径流流向示意

Fig.4 Hydrological characterization and runoff direction in study area

在精细化建模中,建有完善雨水收集系统的主建筑,与建筑两边的草坪不存在径流交换,故仍为DCIA;杂项建筑与公园间的单车道设为ICIA,在小重现期下来自ICIA的径流完全由BPA控制,在大重现期下BPA渗透饱和后径流由管网收集。本研究中精细化模型通过人工定义确定4种区域的范围,并用ArcGIS绘制5~10 m缓冲带确定缓冲渗透区。

研究区域当地的暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{635 \times (1 + 0.841 \times \lg P)}{t^{0.61}} \quad (2)$$

式中: $q$ 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $t$ 为降雨历时,min; $P$ 为降雨重现期,a。选用芝加哥雨型,通过暴雨强度公式计算得到短历时降雨分布情况。依据研究区域的城市尺度,降雨历时选择120 min,降

雨重现期选取1、2、5、10和15年一遇。

### 3 模拟结果与分析

如图5所示,在相同重现期条件下,精细化模型模拟得到的径流总量、径流峰值和溢流总量均比常规模型要小。随着重现期的增大,两类模型的径流指数亦增大,其水文表征的差异性对径流响应的影响逐渐减小。精细化模型与常规模型相比,径流总量最小值减少34.91%~65.03%,径流峰值最小值减少52.71%~67.24%,溢流总量减少7.29%~24.76%。主要原因是汇水区存在下渗饱和的情况,当汇水区下渗饱和时,雨水将不再下渗而形成地表径流;随着降雨量的增加,两个模型下渗部分的体积变化不大,但径流变化较大,导致两个模型的计算结果差距缩小。同样地,两个模型的设置对产流

较多的子汇水区影响较小,反之亦然。

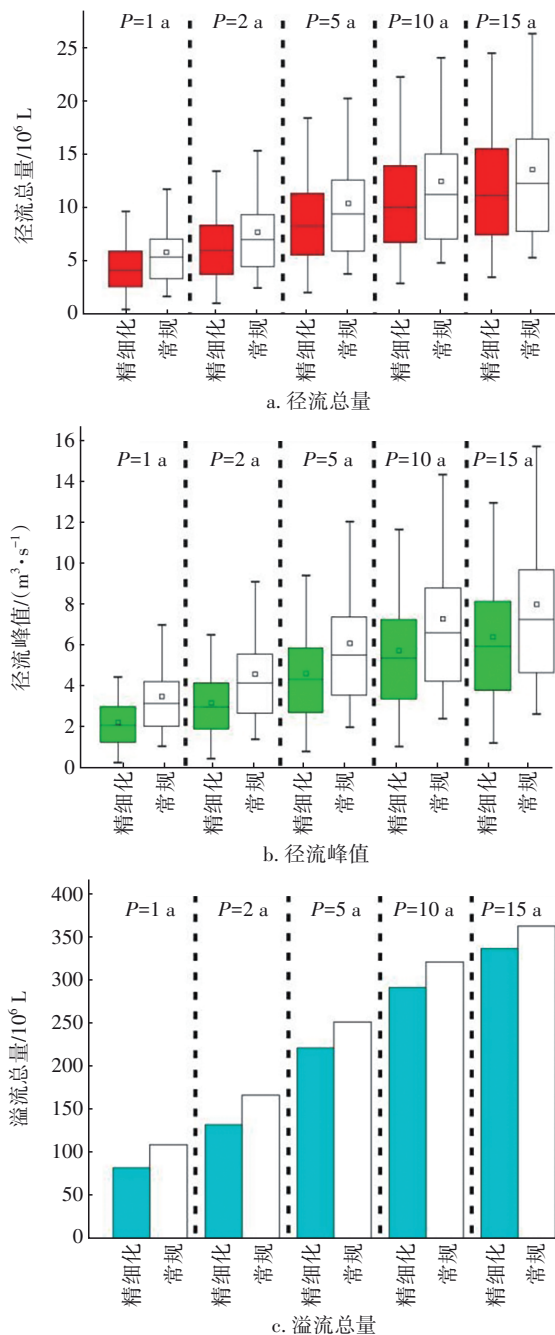


图5 常规模型和精细化模型模拟得到的汇水区径流总量、径流峰值和溢流总量对比

Fig.5 Comparison of total runoff, peak runoff and total overflow in catchment area simulated by conventional model and refined model

在重现期为1年的情况下,精细化模型与常规模型相比,径流总量的最小值、中位数和最大值分别减少65.03%、22.95%和17.76%,径流峰值分别减少67.24%、32.72%和35.56%;随着重现期的增

大,减少的幅度不断缩小。主要原因在于,在小重现期下BPA可以完全控制ICIA产生的径流,仅DCIA产生的径流直接进入管网。

#### 4 结论

① 在相同降雨重现期下,精细化模型模拟得到的径流总量、径流峰值和溢流总量均比常规模型要小;随着重现期的增大,两种模型的水文表征差异性对径流响应的影响不断减小。

② 水文表征的差异性对产流较多的子汇水区影响较小,对产流较少的子汇水区影响较大。在大尺度的城市区域中,能精确概化间接不渗透区占不渗透区百分比的情况下,构建精细化模型能更准确反映研究区域的水文情况,提高模拟的准确率,可以更好地指导、模拟和实施LID措施,为海绵城市建设和城市雨洪管理提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 罗鸣,叶兴成,王以超,等. 河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 169-174.  
LUO Ming, YE Xingcheng, WANG Yichao, *et al.* Impact analysis of river boundary water level on drainage capacity of pipeline [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29 (3) : 169-174 (in Chinese).
- [2] 史潇,李玉涛,黄亮,等. 南京城市降雨淹没模拟及径流分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(9): 179-185.  
SHI Xiao, LI Yutao, HUANG Liang, *et al.* Waterlogging simulation and runoff analysis of urban rainstorm for Nanjing [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(9): 179-185 (in Chinese).
- [3] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.  
YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, *et al.* “Sponge city”: theory and practice [J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26-36 (in Chinese).
- [4] 李沐寒,尹海伟,孔繁花,等. 南京市鼓楼区LID空间配置与雨洪调控效益研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 30-38.  
LI Muhan, YIN Haiwei, KONG Fanhua, *et al.* Research on spatial distribution and stormwater regulation benefits of low impact development in Gulou District, Nanjing, China [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(3): 30-38 (in Chinese).



- [5] 周思斯, 杜鹏飞, 逢勇. 城市暴雨管理模型应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 89-97.  
ZHOU Sisi, DU Pengfei, PANG Yong. Progress on application of storm water management model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 89-97 (in Chinese).
- [6] 何福力, 胡彩虹, 王民, 等. SWMM模型在城市排水系统规划建设中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 48-53.  
HE Fuli, HU Caihong, WANG Min, *et al.* Application of SWMM in planning and construction of urban drainage system [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 48-53 (in Chinese).
- [7] LEE J G, NIETCH C T, PANGULURI S. Drainage area characterization for evaluating green infrastructure using the storm water management model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017. DOI: 10.5194/HESS-2017-166.
- [8] 郭禹含, 王中根, 姜爱华, 等. 济南主城区不透水地表分布分析及其水文效应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 87-96.  
GUO Yuhan, WANG Zhonggen, JIANG Aihua, *et al.* Analysis of the impervious land surface pattern distribution and its hydrological effects in the main urban area of Jinan [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 87-96 (in Chinese).
- [9] 刘梦茜, 尹海伟, 孔繁花, 等. 不同土地利用格局下地表径流对降水特征的响应[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 5-8, 43.  
LIU Mengqian, YIN Haiwei, KONG Fanhua, *et al.* Impacts of different precipitations on runoff characteristics under different land use pattern [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12): 5-8, 43 (in Chinese).
- [10] 周倩倩, 黄冕眉, 刘青, 等. 基于内涝风险评估的城市低冲击径流控制指标布设[J]. 中国给水排水, 2017, 33(17): 125-129.  
ZHOU Qianqian, HUANG Mianmei, LIU Qing, *et al.* A flood risk indicator-based framework for allocation of low impact development runoff control indices [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(17): 125-129 (in Chinese).
- [11] 王海潮, 陈建刚, 孔刚, 等. 基于GIS与RS技术的SWMM构建[J]. 北京水务, 2011(3): 46-49.  
WANG Haichao, CHEN Jiangang, KONG Gang, *et al.* SWMM construction based on GIS and RS technology [J]. Beijing Water, 2011(3): 46-49 (in Chinese).
- [12] 梁小光, 武治国, 任俊雯. 子汇水区分割对SWMM低影响开发模拟的影响研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 1-5.  
LIANG Xiaoguang, WU Zhiguo, REN Junwen. Influence of subcatchment partitioning on SWMM's low impact development simulation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 1-5 (in Chinese).

作者简介: 周倩倩(1984—), 女, 浙江乐清人, 博士, 副教授, 研究方向为市政排水。

E-mail: qiaz@foxmail.com

收稿日期: 2021-12-14

修回日期: 2022-02-28

(编辑: 刘贵春)

大力推进水利薄弱环节建设,  
提高防灾减灾能力