【专题：海绵城市 / Sponge City】

特邀专题策划：刘 建，任心欣

校园低影响开发渗蓄性能及成因模拟分析

杨亚红¹，闫俊江¹，蔚 阳²，胡家玮¹，张惠宁¹

1) 兰州理工大学土木工程学院，甘肃兰州 730050；2) 清华大学深圳研究生院，广东深圳 518055

摘 要：以中国兰州市某校区为例，借助雨洪管理-地理信息系统(stormwater management model with geographic information system, SWMM-GIS)模型对该片区在不同重现期降雨条件下，对绿色屋顶和透水铺装的雨水径流控制效果进行模拟。针对地表高程落差较大，管段埋设坡度较大等特点，分析有特殊地形的区域在低影响开发(low impact development, LID)前后，对历时长/短、强降雨的处理效果及可能相关的因素。结果表明，LID 设施对节点积水量的控制率随重现期的增加而减弱；在坡度较小、渗透能力良好（包括 LID 设施的渗透能力）的区域，对中、小重现期降雨形成的径流有较好的改善效果。对坡度较大，并添加透水铺装的子汇水区及邻近的雨水检查井进行局部 LID 性能分析，发现在特定降雨条件下，LID 设施最大入渗量所在时段与最大降雨量的时段可基本重合。研究成果可为水利部门及科研机构探究 LID 设施性能，以及中国许多城市旧城改造中内涝问题的解决等方面提供参考。

关键词：雨洪管理-地理信息系统模型；低影响开发；重现期；积水成因；积水量；降低率

中图分类号：X828

文献标志码：A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.04362

Simulation analysis of infiltration performance and cause of low impact development in university campus

YANG Yahong¹, YAN Junjiang¹, YU Yang²,
HU Jiawei¹, and ZHANG Huining¹

1) College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, P. R. China

2) Shenzhen Graduate School of Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Taking a campus in Lanzhou city of China as an example, we simulate the detention effects of green roofs and permeable pavement under different return periods rainfall conditions by the stormwater management model with geographic information system (SWMM-GIS), and analyze the treatment effect of long and short duration of heavy rainfall and the possible related factors before and after low impact development (LID) with higher elevation drop and bigger buried pipeline slope of pipe section. The results show that control rate of LID facilities on node water volume recedes with the increase of the recurrence period, the areas with small slope and good permeability (including permeability of LID facilities) have a better improvement effect on runoff formed by rainfall in the middle and small recurring periods. In addition, a local LID performance analysis is conducted for the sub-catchment area with a large slope and permeable pavement and the adjacent rain inspection well, and we find that the period of maximum LID

Received: 2019-12-06; **Accepted:** 2020-02-02

Foundation: Science and Technology Program of Gansu Province (TJ201-G01)

Corresponding author: Associate professor YANG Yahong. E-mail: yangyahong@lut.cn

Citation: YANG Yahong, YAN Junjiang, YU Yang, et al. Simulation analysis of infiltration performance and cause of low impact development in university campus [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 362-371. (in Chinese)

infiltration may coincide with the period of maximum rainfall under specific rainfall conditions. Our research results can be used as an effective value for relevant water conservancy departments and research institutions to explore the performance of LID facilities, as well as urban waterlogging and stormwater runoff.

Key words: stormwater management model with geographic information system; low impact development (LID); return periods; water causes; water accumulation quantity; reduction rate

目前,城市雨水和非点源污染的模拟是中国海绵城市规划设计中的一项关键支撑技术.该模型的应用使低影响开发(low impact development, LID)测量系统的设计和仿真更加有效^[1-2].LID 因具有调蓄和渗透的强大功能而被广泛应用于水处理行业,其中应用频率最高的是绿色屋顶和透水铺装^[3].它们的最大优势在于对管控历时短的强降雨非常有效,据统计,在气候温和区绿色屋顶和透水铺装每年累计减少 50% 的雨水径流^[4-6].透水铺装还可去除雨水中的沉淀与其他污染物,起到分散径流、减少流量和补给地下水的作用^[2].然而,LID 设施针对历时长强降雨和有特殊地形要求区域的处理能力却是有限的,如何通过分析特殊条件下 LID 渗蓄机理,促进 LID 设施的完善和性能发挥来指导工程实践成为必要.

本研究利用暴雨洪水管理模型(stormwater management model, SWMM)与 ArcGIS 工具,选取中国兰州市某校区作为研究对象,在现有城市雨水管网的数据(气象、管网、土地利用和数字高程模型(digital elevation model, DEM))存在的前提下,建立雨洪管理-地理信息系统(stormwater management model with geographic information system, SWMM-GIS)模型,模拟针对长/短历时强降雨与有特殊地形要求区域的 LID 处理效果,并分析了该区域可能有关的因素.

1 方法和材料

1.1 模型及计算参数

1.1.1 SWMM-GIS 模型

SWMM 模型由美国环保局(US Environmental Protection Agency, USEPA)资助开发,且不断更新,当前已发展到 SWMM5.1 版本^[7].SWMM 能较好地模拟各种降雨条件下的下渗、蒸发、地表径流及排水管网等一维水动力过程^[8].当降雨达到一定强度时,排水管网超负荷运行,部分节点水深大于井(雨水井)深,此时可用 ArcGIS 软件中的空间分析工具对溢出的水量进行二维地表积水模拟计算,同

时得到淹没水深和积水面积等信息^[9-11].

1.1.2 基于 GIS 的二维地表积水量统计

积水量统计包括节点积水量统计和栅格积水量统计.节点积水量统计是通过 ArcGIS 中添加 XY 坐标数据功能,将节点矢量化,并把坐标、井底高程和井深等相关属性通过连接功能导入属性表,然后按照 DEM 栅格行列编号方式对节点进行行列编号.最后通过调用 SWMM 动态库中的 Get SWMM 函数读取 SWMM 结果文件,统计出每个节点的积水总量.

栅格积水量计算采用种子蔓延算法.种子蔓延算法首先需要在研究区的 DEM 中设置种子点位置和种子点水位,然后基于 4 方向或 8 方向进行搜索.将种子点周围高程值与种子点水位进行比较,若种子点水位大于周围某点高程,则将该点加入连通域并判定其为已淹没,然后将该点作为新的种子点循环上述过程,直到没有新的种子点时停止循环^[12-14].

1.1.3 模型参数的率定和验证

根据汇水区实际情况,结合文献[14-17]资料和模型手册,利用 SWMM-GIS 耦合模型空间统计分析工具设定特征宽度和不渗透系数等确定性参数.并将不渗透/渗透曼宁系数、不渗透/渗透洼地蓄水、最大/最小入渗速率等不确定性参数作为校准参数.本研究中模型参数校准采用 2017 年 7 月、2018 年 6 月和 2019 年 5 月共 3 个月的降雨资料(降雨编号依次为 201707、201806 和 201905),这 3 场降雨均有详细的降雨特征、对应的流量数据以及市政部门统计的积水点,可以进行参数校准,完成校准后用得到的参数对 2019 年 7 月暴雨(降雨编号为 201907)进行率定和验证.通过对参数进行调整,使 3 场暴雨对应的模拟流量过程和实测流量过程的 Nash-Sutcliffe (N-S) 效率系数均大于 0.8 (表 1).参数计算结果如表 2.

1.2 数据获取

研究区径流模拟需要的基础数据包括气象、管网、土地利用和 DEM,如表 3.

表 1 实测降雨特征及参数校正误差

Table 1 Measured rainfall characteristics and parameter correction errors

降雨编号	降雨天数/d	降雨量/mm	降雨峰值/mm	洪峰流量误差/%	洪水总量误差/%	N-S 效率性系数
201707	6	35.6	13.9	5.7	-7.2	0.84
201806	6	11.4	3.6	6.3	3.1	0.87
201905	11	56.7	19.5	4.5	4.3	0.88
201907	11	51.1	19.8	4.6	5.2	0.85

表 2 率定参数计算值

Table 2 Calculated value of calibration parameters

参数类别	参数类型及单位	最终模拟值或范围	备 注
确定性参数	特征宽度/m	10.00 ~ 173.12	44.35
	不渗透性系数/%	4.50 ~ 90.00	70.81
	平均坡度/%	0.05 ~ 6.71	1.02
不确定性参数	不渗透性曼宁系数	0.01	加权平均值
	渗透性曼宁系数	0.10	加权平均值
	不渗透性洼地蓄水/mm	0.05	加权平均值
	渗透性洼地蓄水/mm	0.05	加权平均值
	最大入渗速率/(mm·h ⁻¹)	3.00	土质为壤土
	最小入渗速率/(mm·h ⁻¹)	0.50	饱和导水率
	衰减常数/h	4.00	范围为 2 ~ 7
	排干时间/d	7.00	范围为 2 ~ 14

表 3 建模基础数据

Table 3 Modeling basic data

类 型	描 述	来 源
气象	芝加哥雨型历时 120 min 和 720 min 逐分钟降雨数据	兰州市暴雨强度公式经芝加哥雨型生成器生成
管网	校园管网总图-雨水管网	校区建筑勘察设计院数字化绘制工程项目
土地利用	基于 LandsAT-7 卫星 0.6 m 分辨率高清影像解译得到 2018 年校区土地利用图	Google 地图
DEM	基于校园管网总图提取得到 4.8 m 分辨率的 DEM 模型	校区建筑勘察设计院数字化绘制工程项目

1.3 研究区域概况及 LID 布置

1.3.1 研究区域概况

研究区域地处兰州市地势南高北低靠近黄河南岸的七里河区。七里河区境内属大陆性半干旱气候。主要特征是：四季分明，冬夏长，春秋短。雨热同季，垂直气候变异显著。气温、热量和光照随海拔由南向北升高；年平均降雨量为 327 mm，由南到北逐渐降低。校区占地面积 87 hm²，如图 1 (a)。在建校之前，当地多为平顶屋面，数量少且占地面积有限；周围多分布山杨、桦树群体及少量

灌木。这类植物渗透系数高，对水分蒸散与入渗作用显著。建校后土地利用类型多样化，不渗透面积（包括新开发地块、建筑物、开阔空地和道路）占比将近 57%，特别是占比近 29% 的校园道路，不渗透面积占比达 70% 以上，如图 1 (b)。

校园汇水区及雨水管网经 ArcGIS 概化后，共由 226 个子汇水区、249 个节点（包括 3 个总排放口）和 241 段雨水管道组成。经统计，研究区域雨水管道总长 8 804.55 m，汇水区总面积 64.11 hm²。概化后的研究区域地图（如图 2 (a)）结合表 1 率

(a) 校园平面图

(b) 土地利用面积占比

图1 研究区域概况

Fig. 1 (Color online) Overview of the study area

定后的模型参数共同作为传统开发 (traditional development, TD) 模式进行径流模拟。

1.3.2 LID 布置

根据汇水区地形特征, 查阅文献[18-20]及《海绵城市建设评价标准》(GB/T51345—2018)^[21]相关规定, 研究区域经 LID 布置并作为 LID 模式进行径流模拟, 如图 2 (b)。黄色部分为添加了绿色屋顶的建筑区域, 红色部分为添加了透水铺装的道路区域。图 2 (b) 中百分比为 LID 处理对应子汇水区的面积占比范围。绿色屋顶与透水铺装的设置参数如表 4 和表 5。

(a) 校园子汇水区划分 (TD模式)

(b) LID模式

图2 研究区域概化结果平面图

Fig. 2 (Color online) Generalization results of the study area

1.4 暴雨强度公式的确定及设计降雨过程线

因兰州市缺乏历年降雨气象水文资料, 所以本次研究的降雨数据采用暴雨强度公式生成。该公式由王杰等^[22]基于兰州市国家基本气象站 1960—2014 年的降雨资料, 通过皮尔逊-III 型分布拟合得到。

表 4 绿色屋顶设置参数

Table 4 Setting parameters of green roofs

设施	表面				土壤						排水材料		
	护堤高度/mm	植被容 积率/%	粗糙度	坡度/ (°)	厚度/ mm	孔隙 率/%	含水率(体 积分数)/%	萎蔫点 占比/%	导水率/ (mm·h ⁻¹)	吸上水 头/mm	厚度/ mm	空隙 率/%	粗糙度
绿色屋顶	50	50	0.25	0.005	150	50	20	10	0.5	3.5	150	50	0.024

表 5 透水铺装设置参数

Table 5 Setting parameters of permeable pavement

设施	表面				路面			蓄水			渠下		
	护堤高度/mm	植被容 积率/%	粗糙度	坡度/ (°)	厚度/ mm	孔隙 率/%	渗透能力/ (mm·h ⁻¹)	厚度/ mm	孔隙 比/%	渗水速率/ (mm·h ⁻¹)	流量 系数	流量 指数	偏移高 度/mm
透水铺装	50	50	0.024	0.005	150	21	250	381	75	30	0.64	0.5	12

$$i = \frac{924 \times (1 + 3.918 \lg P)}{167 \times (t + 14.92)^{0.942}} \quad (1)$$

其中, i 为降雨强度 (单位: mm/min); P 为降雨重现期 (单位: 年); t 为降雨历时 (单位: min)。

皮尔逊-Ⅲ型分布具备推求参数少, 能够适应不同的降雨历时及 20 年以上的重现期, 拟合出的暴雨强度公式对暴雨模拟的效果更优^[22]。文献[22]根据式(1)拟合得到的平均绝对均方差为 0.036 mm/min, 小于 0.05 mm/min, 符合 2016 版的《室外排水设计规范》(GB50014—2006)规定^[23]。

在该模型中, 降雨过程的描述采用芝加哥降雨

模式。芝加哥降雨模式是一种基于强度持续频率关系的不均匀设计降水模式, 它将降水过程分为峰前和峰后两部分。这种降雨模式可以概括大多数降雨类型, 能反映出地表径流与出流量的最大值, 因此适用于区域和雨水系统设计的预评价^[24]。

本研究雨峰系数设为 0.291, 主要目的是分析早期降雨高峰对研究区域径流和积水的影响。结合暴雨强度公式和降雨过程, 研究中选取 1、2、5 和 7 年重现期 (降雨历时为 2 h, 历时短) 和 10、20、30 和 50 年重现期 (降雨历时为 12 h, 历时长) 绘制芝加哥降雨过程线如图 3。

图 3 不同重现期下芝加哥降雨过程线

Fig. 3 (Color online) The precipitation pattern of Chicago in different recurrence periods

2 模拟结果与分析

2.1 管网雨量节点积水

基于以上不同设计重现期降雨情景下, 模拟 TD 模式和 LID 模式得到雨量节点积水数量和积水量如表 6。

由表 6 可见, ① 在 $P = 1$ 年时就已经出现了节点积水, 经 LID 设施处理后积水量与节点积水降低率分别为 71.96% 与 37.50%, 且在处理后仍存在积水, 说明雨水管网系统设计标准偏低。② 两种模式下节点积水量与降雨重现期呈正相关, 降低率呈负相关。这种关系在节点积水量控制方面表现得尤为明显: 研究区域经 LID 模拟改造, 短历时降雨

事件 4 个重现期下节点积水量降低率分别为 71.96%、56.68%、48.96% 和 47.38%; 长历时降雨事件 4 个重现期下节点积水降低率分别为 45.45%、42.36%、40.9% 和 39.42%。结果表明,

LID 针对节点积水量的降低随着重现期的增加而减弱, 且减弱的程度随着重现期的增大愈加明显。可以推测, LID 对足够长历时、高重现期下降雨事件导致的节点积水量控制率将接近 0。

表 6 积水量及节点积水统计结果

Table 6 Statistical results of water accumulation and joint water accumulation

降雨类别	P/年	降雨量/mm	积水量 $\times 10^{-3}/\text{m}^3$		降低率/%	节点数量		降低率/%
			TD	LID		TD(占比)/%	LID(占比)/%	
短历时(2 h)	1	9.87	0.73	0.21	71.96	8(3.21)	5(2.01)	37.50
	2	14.32	3.29	1.42	56.68	30(12.05)	12(4.82)	60.00
	5	24.57	7.53	3.84	48.96	62(24.90)	26(10.44)	58.06
	7	28.33	9.25	4.87	47.38	73(29.32)	34(13.65)	53.42
长历时(12 h)	10	39.20	12.02	6.56	45.45	84(33.73)	36(14.46)	57.14
	20	48.60	16.15	9.31	42.36	92(36.95)	43(17.27)	53.26
	30	54.11	18.65	11.02	40.90	94(37.75)	46(18.47)	51.06
	50	61.03	21.88	13.25	39.42	102(40.96)	54(21.69)	47.06

此外, LID 在积水节点数量控制上的上升趋势也逐渐明晰, 其降低率基本平稳: 研究区域经过 LID 模拟控制后, 短历时降雨事件中积水节点占总节点的比例分别为 2.01%、4.82%、10.44% 和 13.65%, 对应降低率为 37.5%、60.00%、58.06% 和 53.42%。长历时降雨事件中, LID 模式下积水节点占总节点的比例分别为 14.46%、17.27%、18.47% 和 21.69%, 对应降低率为 57.14%、53.26%、51.06% 和 47.06%。

2.2 二维地表积水成因

为了探究导致高重现期 LID 设施出现“弱处理”效果的地形因素, 研究选取了降雨量较大 P 分别为 7 年和 30 年的降雨事件, 通过 ArcGIS 计算并可视化表达得到图 4。图 4 为 TD 和 LID 两种不同发展模式下校区雨水管网节点在同一积水范围内的积水量分布。圆形面积的大小代表积水量的多少。从图 4(a) 和(b) 可见, 当以重现期为 7 年降雨事件模拟时, LID 模式下对校园南北两端积水区域处理效果显著, 特别是对添加了绿色屋顶的建筑物(教学楼、宿舍楼和实验楼等), 大部分区域积水量范围从 $300 \sim 700 \text{ m}^3$ 降至 20 m^3 以下。对比图 4(c) 和(d) 可发现, 以重现期为 30 年降雨事件模拟时, LID 模式针对校园南北两端积水区域支流部分处理效果显著(积水量从 $700 \sim 1\,200 \text{ m}^3$ 降至 20 m^3 以下), 然而对支流汇集干流和管道转弯处及图书馆周围的积水区域, 其效果不够明显。

研究区域雨水管网铺设由南向北高度逐渐降

低。在低重现期($P = 7$ 年)降雨条件下坡度较缓的区域中, 来不及流入雨水管道的地表径流可能通过高渗透的湿陷性土壤结合绿色屋顶与透水铺装的渗透能力而处理, 使得管道中即时雨水量未达到管道雨量负荷, 检查井处可能不会出现积水。而在坡度较大的南端家属楼及图书馆附近由于高程落差较大, 且管段埋设坡度较大, 加上地表渗透能力有限, 可能使得高重现期($P = 30$ 年)的雨水大部分相互推动流入管道中形成瞬时流量, 使得管道检查井在短时间内形成地表积水。以上机理可以得出, 坡度较小、渗透能力良好(包括 LID 设施的渗透能力)的区域对中、小重现期降雨形成的径流改善效果较好; 而随着 LID 设施渗透能力达到饱和, LID 设施(特别是绿色屋顶)对高重现期降雨形成的径流处理效果明显变差, 这种处理效果在中、高重现期中, 降雨可能提前接近 0。

2.3 基于高重现期降雨下局部区域渗蓄的性能

为探讨 LID 模式的渗透、蓄水性能与高重现期降雨下节点积水控制的关系, 研究选取了坡度变化较大的典型检查井节点及子汇水区(图 5)进行重现期为 7 年和 30 年的降雨事件模拟。在图 5 所示的 LID 模拟布置中, 子汇水区 19 号为嵌入了绿色屋顶(LID 部分)的校内 B 座实验楼屋顶, 实验楼屋顶经汇集雨水立管连接至加了透水铺装(LID 部分)的 189 号子汇水区, 最终地面雨水汇集至雨水井 Y2 流至 Y1 进入校园雨水管网。

图4 研究区域积水分布

Fig. 4 (Color online) Distribution of rainstorm water logging in the study area

LID 的处理效果归结于将多余的地表径流进行有效的下渗和蓄存, 然后进行合理的排放^[25]. 基于此, 本次研究对比 7 年和 30 年重现期降雨模拟下 Y1 和 Y2 节点在 TD 和 LID 模式的积水及两个子汇水区的下渗情况, 并结合各自的降雨量进行分析, 如图 6. 对比图 6 (a) — (d) 可见, 在整个降雨过程中, Y2 雨水井积水趋势、LID 模式下道路

(子汇水区 189 号) 下渗与降雨历程基本一致. 在重现期为 7 年的短历时降雨条件下, 雨水井 Y2 的最高积水量由 0.25 m^3/s 降至 0.12 m^3/s , LID 模式下能够削减近 50% 的积水量. 添加了透水铺装的道路 (189 号) 的单位时间最大下渗量由 TD 模式下的 0.65 mm/h 上升至 LID 模式下的 26.5 mm/h , 如图 6 (e) — (h). 然而, 在重现期为 30 年的长历时降雨

图5 研究区域局部LID模拟布置

Fig. 5 Local LID simulation layout of the study area

条件下, 雨水井 Y2 的最高积水量由 $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低至 $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$, LID 模式削减近 54.3% 的积水量, 添加了透水铺装的道路 (189 号) 单位时间内最大下渗量由 TD 模式下的 $0.15 \text{ mm}/\text{h}$ 上升至 LID 模式下的 $27 \text{ mm}/\text{h}$. 与 7 年重现期相比, 积水削减增长仅 4.3%. 由此可见, 低影响开发对局部区域的处理效果随着重现期的增大或多或少有些减弱. 此外, 分别对比图 6 (i) 和 (j), 以及图 6 (k) 和 (l), 发现 189 号子汇水区单位时间最大下渗量所处时间段与

图6 两种模式下 Y1 和 Y2 的积水, 以及子汇水区 19 和 189 号的下渗情况

Fig. 6 (Color online) Water accumulation of Y1 and Y2 and the infiltration of no. 19 and no. 189 in the sub-catchment area under the two modes

雨水检查井 Y2 的最大积水量所处时间段基本和最大降雨所处时间段保持一致, 为 $P = 7$ 年时的 30 ~ 70 min, 以及 $P = 30$ 年时的 180 ~ 270 min. 这可能是由于在特定降雨下, 最大降雨量时 LID 设施的蓄水量达到饱和, 多余的雨水主要用于下渗与径流, 此时 LID 设施底部总的下渗量也可能达到最大, 最终使得子汇水区单位时间最大下渗量所处时间段与雨水检查井 Y2 的最大积水量所处时间段基本和最大降雨所处时间段保持一致. 可以看出在特定降雨条件下, LID 设施最大入渗量所在时段能够与最大降雨量的时段基本重合, 从而有效降低地表径流, 达到削减峰值的目的.

3 结 论

通过对中国兰州市某校园低影响开发水环境模拟效应的研究, 可得出如下结论:

1) 研究区域经过 LID 模拟控制后, 在短历时降雨事件 4 个重现期下节点积水量降低率分别为 71.96%、56.68%、48.96% 和 47.38%; 长历时降雨事件 4 个重现期下节点积水降低率分别为 45.45%、42.36%、40.9% 和 39.42%. 表明 LID 针对节点积水量的降低随着重现期的增加而减弱, 且减弱的程度随重现期增加愈加明显.

2) 坡度较小、渗透能力良好 (包括 LID 的渗透能力) 的区域对中、小重现期降雨形成的径流改善效果较好; 但随着 LID 设施渗透能力达到饱和, LID (特别是绿色屋顶) 对高重现期降雨形成的径流处理效果明显变差, 这种处理效果在中、高重现期降雨中可能提前接近 0.

3) 研究区域经过 LID 模拟控制后, 发现 189 号子汇水区单位时间最大下渗量与雨水检查井 Y2 的最大积水量所对应时间段, 均和最大降雨对应时间段一致, 为 $P = 7$ 年时的 30 ~ 70 min, 以及 $P = 30$ 年时的 180 ~ 270 min. 由此可见, 在特定降雨条件下, LID 设施最大入渗量所对应时段可能与最大降雨量的时段重合, 从而有效降低地表径流, 达到削减峰值的目的.

4) 针对地表高程落差较大、管段埋设坡度较大等特殊地形, 且容易出现积水的区域, 须合理分析地形、降雨及径流特征等, 选择合适的 LID 设施, 进行有效的低影响开发控制.

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目 (TJ201-G01)

作者简介: 杨亚红 (1976—), 兰州理工大学副教授、博士. 研究方向: 水质净化机理. E-mail: yangyahong@lut.cn

引 文: 杨亚红, 闫俊江, 蔚 阳, 等. 校园低影响开发渗蓄性能及成因模拟分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(4): 362-371.

参考文献 / References:

- [1] ANA E V, BAUWENS W. Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods [J]. Urban Water Journal, 2010, 7(1): 47-59.
- [2] KONG Fanhua, BAN Yulong, YIN Haiwei, et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 132-142.
- [3] 王红武, 毛云峰, 高 原, 等. 低影响开发 (LID) 的工程措施及其效果[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 99-103.
WANG Hongwu, MAO Yunfeng, GAO Yuan, et al. Engineering measures for low impact development (LID) and their effects [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(10): 99-103. (in Chinese)
- [4] 汪 涛. 基于 LID 的居住场地雨水系统径流量控制方案研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
WANG Tao. Research on rainwater runoff control scheme of residential site based on LID [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. (in Chinese)
- [5] 仇保兴. 海绵城市 (LID) 的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015, 51(3): 1-7.
QIU Baoxing. Sponge city (LID) connotation, approach and prospect [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(3): 1-7. (in Chinese)
- [6] 王建龙, 车 伍. 低影响开发与绿色建筑[J]. 中国给水排水, 2011, 27(20): 17-20.
WANG Jianlong, CHE Wu. Low impact development and green building [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(20): 17-20. (in Chinese)
- [7] 赵冬泉, 王浩正, 盛 政, 等. 城市暴雨管理数字化解决方案 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(20): 15-19.
ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, SHENG Zheng, et al. Digital solutions for urban storm management [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(20): 15-19. (in Chinese)
- [8] 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, 43.
WANG Huiliang, WU Zening, HU Caihong. Analysis of

- urban stormwater flooding based on GIS and SWMM Coupling [J]. Yellow River, 2017, 39 (8): 31-35, 43. (in Chinese)
- [9] ZHANG Shouhong, GUO Yiping. SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 20(8): 0601401001-0601401013.
- [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 urban stormwater accumulation based on GIS and SWMM models [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(4): 1-6. (in Chinese)
- [11] 刘 为. 基于 GIS 的城市暴雨积水模拟预测方法及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- LIU Wei. Research on GIS-based simulation and prediction method of urban stormwater and its application [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [12] 杨启贵, 王汉东. 一种大区域洪水淹没范围快速提取的分块种子蔓延算法[J]. 华中师范大学学报自然科学版, 2015, 49(4): 603-607.
- YANG Qigui, WANG Handong. A segmented seed spreading algorithm for quickly extracting large area flood inundation area [J]. Journal of Huazhong Normal University Natural Sciences, 2015, 49(4): 603-607. (in Chinese)
- [13] 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 (3): 335-340, 346.
- CHEN Hao, HONG Lin, MEI Chao, et al. Simulation of distributed urban rain and flood based on D8 algorithm [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016 (3): 335-340, 346. (in Chinese)
- [14] HUANG Minmin, JIN Shuanggen. A methodology for simple 2-D inundation analysis in urban area using SWMM and GIS [J]. Natural Hazards, 2019, 97(1): 15-43.
- [15] ZHANG Shanghong, WANG Taiwei, ZHAO Bohua. Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network [J]. Journal of Hydrology, 2014, 509: 406-415.
- [16] XU Zuxin, XIONG Lijun, LI Huaizheng, et al. Runoff simulation of two typical urban green land types with the stormwater management model (SWMM): sensitivity analysis and calibration of runoff parameters [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191 (6): 34301-34316.
- [17] 李伟雨. 基于 SWMM 模型的悦来会展城雨洪模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- LI Weiyu. Rainfall simulation of Yuelai convention and exhibition city based on SWMM model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [18] HUA Pei, YANG Wenyu, QI Xiaochen, et al. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118515.
- [19] LU Wei, QIN Xiaosheng. An integrated fuzzy simulation-optimization model for supporting low impact development design under uncertainty [J]. Water Resources Management, 2019, 33(12): 4351-4365.
- [20] LATIFI M, RAKHSHANDEHROO G, NIKOO M R, et al. A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 11832301-11832313.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T51345—2018 海绵城市建设评价标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T51345—2018 Assessment standard for sponge city construction effect [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [22] 王 杰, 杨 银, 吴 红, 等. 兰州市暴雨强度公式拟合方法研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36 (4): 23-27.
- WANG Jie, YANG Yin, WU Hong, et al. Study on the fitting method of Lanzhou rainstorm intensity formula [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36 (4): 23-27. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50014—2006 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50014—2006 Code for design of outdoor wastewater engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2016. (in Chinese)
- [24] LI J, DENG Chenning, LI H, et al. Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation Data-Lacked region [J]. Water Resources Management, 2018, 32 (10): 3271-3284.
- [25] 孙樱珊. 基于 Mike Urban 模型的北京市老城区合流制溢流污染控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- SUN Yingshan. Study on the pollution control of combined sewer overflow for the old urban in Beijing based on Mike Urban model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

【中文责编: 晨 兮; 英文责编: 之 聿】