

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0087

吴盈盈,余敦先,夏军,等.典型LID措施对城市降雨径流过程影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):833-842.
WU Y Y, SHE D X, XIA J, et al. Impact of LID on urban rainfall and runoff process[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 833-842. (in Chinese)

典型 LID 措施对城市降雨径流过程影响

吴盈盈^{1,2}, 余敦先^{1,2}, 夏军^{1,3}, 张印^{1,2}, 周延^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430072; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100010)

摘要:为探讨海绵城市建设中低影响开发(low impact development, LID)措施对城市降雨径流的影响,以深圳市光明区某居民小区为研究对象,通过建立区域 SWMM 模型,分析不同 LID 措施及其组合对城市雨洪过程的影响。利用研究区几场典型的降雨径流数据对模型校核验证,结果表明:构建的 SWMM 模型可以较好地模拟研究区降雨径流过程,纳什效率系数为 0.868,峰值流量相对误差 0.186,模型模拟效果较好;LID 对径流峰值和总量都有削减作用,并在一定程度上延缓峰现时间,且 LID 布设面积越大,LID 对径流的削减效果越明显;组合布设方案对径流的调控效果优于单独布设方案,单独布设方案中径流量削减效果最好的是透水铺装,峰值流量调控效果最好的是绿色屋顶,下沉式绿地的径流调控效果在三者中最差。因此,LID 布设结构以及布设面积均对城市降雨径流产生影响,合理布设 LID 在一定程度上可以有效缓解城市内涝。

关键词:城市降雨径流;海绵城市;低影响开发(LID);SWMM 模型;径流控制;城市内涝

中图分类号:P333.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



近年来,随着城市化的迅猛发展,在城市地表不透水面积不断扩大、城市排水设施建设落后于城市发展速度等综合因素的影响下,城市内涝灾害问题成为威胁城市水安全、影响城市正常运转、制约城市经济社会发展的首要灾害^[1]。近几年来,上海、北京、广州、武汉、杭州、天津等大城市接连遭受严重的城市内涝,其中:仅 2012 年北京“7·21”城市洪水就造成 200 多亿元的直接经济损失^[2];2016 年 7 月 6 日,暴雨灾害造成武汉全市 12 个区 75.7 万人受灾,直接经济损失达 22.65 亿元^[3];2020 年广州的“5·22”特大暴雨导致全市产生 433 处积水,13 号线地铁停运,造成巨大经济损失^[4]。城市化进程最突出的变化是城市下垫面硬化,不透水面积增加,导致降雨后产流速度加快、峰值流量增大、峰现时间提前^[5]。近十几年极端降雨事件频发,特别是城市“雨

岛效应”使得暴雨雨量和降雨强度增大^[6],形成城市内涝的可能性增加^[7]。

自 2013 年以来,我国大力推动海绵城市建设,其本质是充分发挥自然界对水体的调节作用,通过一系列措施减少城市内涝和水污染,并达到综合利用雨水资源的目的,实现城市水循环对环境变化的弹性适应^[8]。目前第一批和第二批海绵城市试点城市已经完成建设验收。低影响开发(low impact development, LID)措施及技术作为海绵城市的建设基础,改善了城市的下垫面状况,增加城市蓄洪能力,能有效地收集并利用雨水资源,显著减少城市地表径流^[9]。通过组合不同 LID 措施,对降雨径流产生的源头截流、蓄渗,对径流量和水质有明显的改善作用,可以有效缓解频发的城市内涝和城市水体污染等问题^[10]。综合评价不同 LID 措施的运行效果,研究其

收稿日期:2021-03-24 修回日期:2021-06-16 网络出版时间:2021-06-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210623.1101.002.html

基金项目:中国科学院美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23040304);国家自然科学基金项目(41890823)

作者简介:吴盈盈(1999—),女,湖北咸宁人,主要从事城市水文学研究。E-mail:yingyingwu@whu.edu.cn

通信作者:余敦先(1986—),男,安徽芜湖人,副教授,博士,主要从事全球变化与极端事件研究。E-mail:shedunxian@whu.edu.cn

对城市区域地表产汇流情况、降雨径流的水量削减以及水质改善情况的影响,对我国城市排水系统规划及城市雨水管理具有重要的理论价值和实践指导意义。

目前关于 LID 对于城市雨洪过程的影响研究主要是从单项 LID 措施以及不同类型 LID 组合措施 2 个方面考虑的^[11]。单项措施主要有雨水花园、绿色屋顶、下沉式绿地、透水铺装、生态调蓄池、雨水桶等^[12-13]。例如:Cipolla 等^[14]运用 SWMM 模型模拟分析了意大利博洛尼亚的一个小区的绿色屋顶效果,发现绿色屋顶可以通过减少径流量并净化水质恢复自然水体。此外,也有研究^[15]表明绿色屋顶措施的效果与区域的降水及气候条件有关。Viola 等^[16]通过实验证明绿色屋顶在潮湿的亚热带气候效率较高,而在地中海气候条件下效率最低;Dreelin 等^[17]的研究表明透水路面在降雨量级相对较小时能发挥较明显的效果,对径流总量的削减率可达 93%;晋存田等^[18]分析了北京某区域透水铺装和下沉式绿地的应用效果,结果表明下沉式绿地在降雨强度较大时作用效果明显,而透水铺装降雨强度较小时效果明显;程江等^[19]总结了影响下沉式绿地雨水渗蓄效率的主要影响因素,指出在一般情况下下沉式绿地设计下凹深度 100~300 mm 且面积比例为 10%~30%。除单一 LID 措施的雨洪调控效果研究外,也有较多研究开展了 LID 组合措施的分析。研究^[20-21]表明,LID 组合布设对城市雨洪的调控效果均优于单独布设,且组合布设对径流的削减效果不是单一措施的简单叠加。例如:章双双等^[22]以常州商务城为例,将 SWMM 模型与最优化目标函数耦合,计算出组合 LID 中经济效益最大化的 LID 面积配置方案;郭禹涵等^[23]以不透水面积占比与径流系数的关系为依据,将用地类型划分为“阈值型”和“渐变型”,分别针对 2 种用地类型的特征提出了相应 LID 布设方案;李春林等^[24]提出了组合 LID

“串联”“并联”布设方式,通过对组合 LID 并联布设情景下的水文水质过程的研究,发现 LID 措施削减的径流量随降雨重现期的增大而增大,但 LID 措施消减的污染量随雨强的增大而减小的结论。整体来看,国内相关研究^[25]集中在利用管网模型进行模拟,主要探究 LID 措施种类、布设面积及空间布局等因素对径流的影响。

自改革开放以来,深圳城市化发展迅速,其下垫面的显著变化给深圳市降雨径流规律变化带来诸多不确定性因素^[26]。2016 年深圳市成为我国第二批海绵城市试点城市,光明区是试点区域之一。作为海绵城市试点城市,为达到国务院制定 2030 年城市建成区 80% 以上的面积需达到海绵城市建设的要求,深圳市的下垫面未来将发生显著变化,继而改变该市的降雨径流规律。本文以深圳市光明区某一典型海绵小区为研究区域,通过评估不同 LID 措施(绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地)及其组合措施对区域降雨径流过程的影响,科学分析不同 LID 措施对城市内涝缓解等的影响,为深圳市海绵城市区域建设与规划提供支撑与参考。

1 研究区和数据

深圳市光明区海绵城市建设示范区位于光明区东南部,属于茅洲河流域。区域内以低山丘陵为主,水域广阔,青山环绕,有“深圳绿肺”之美誉。该区为典型亚热带海洋性季风气候,多年平均年降水量约为 1 600 mm,且年内分配不均,4—10 月降水量占全年降水量的 87.6%;多年平均径流深为 866 mm;多年平均气温约为 23 °C^[27]。自 2016 年以来,示范区内开展了海绵城市建设,主要采用人工湿地、透水铺装、雨水花园等措施来化解突出的黑臭和内涝问题,并确定规划目标为不低于 70% 的年径流总量控制率^[28]。示范区内共有雨量计 6 个、流量计 8 个,其空间分布位置见图 1。



图 1 光明区海绵城市建设示范区

Fig. 1 Guangming sponge City construction demonstration area

选择示范区内某典型海绵小区 A 为研究区域,见图 1(b)。该区域占地面积为 5.17 hm²。该小区下垫面类型以建筑屋顶、小区道路、广场透水路面和绿地为主。LID 设施主要有绿色屋顶、下沉式绿地和透水道路等 3 种,现状布局中绿色屋顶占地面积 11 808 m²,下沉式绿地占地面积 5 368 m²,透水道路占地面积 10 429 m²。

选择的数据包括雨量计 1 分钟间隔降雨数据、1 个排水口 5 分钟间隔的流量数据,时间范围为 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 8 月 31 日,用于模型的率定和验证,见图 1(b)。上述数据取自深圳市城市规划设计研究院有限公司/智慧海绵监测公司。根据数据情况和研究区域,在长降雨流量序列中筛选了 2019 年 4 月 11 日双峰型大雨(记编号为 20190411)、2019 年 6 月 11 日单峰型中雨(记编号为 20190611)、2020 年 3 月 7 日单峰型中雨(记编号为 20200307)和 2019 年 7 月 22 日单峰型暴雨(记编号为 20190722)等 4 场降雨及对应的完整流量过程数据,其中前 3 场降雨流量过程用于模型的率定,最后 1 场降雨流量过程用模型的验证。还搜集了土地利用数据、排水管网、检查井及海绵城市建设 LID 等数据,用于 SWMM 模型的构建。

2 研究方法

2.1 SWMM 模型

暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)由美国环境保护署(US EPA)设计开发^[29],是一种分布式降雨径流模型,包含了水文过程、水力过程和水质的模拟^[30],目前被广泛应用于城市雨洪过程模拟。利用 ArcGIS 对研究区进行雨水管网的概化,去除冗余管道及检查井,简化成以主干管线为主的管网图,见图 1。结合土地利用规划图,划分研究区的子汇水区,建立 SWMM 概化模型,见图 1(b)。经统计,研究区共包含 60 个子汇水区、123 个节点、123 条管段和 3 个末端排放口。

SWMM 模型参数分为率定参数和非率定参数。其中:非率定参数为模型特性参数,主要有子汇水区面积、平均坡度、特征宽度等,通过 ArcGIS 分析研究区数字高程数据获取子汇水区平均坡度,在图层属性中提取面积等信息;率定参数一般为经验参数,可通过 SWMM 应用手册^[31]及相关文献取值范围^[32]获取,见表 1。为提升模型的模拟效果,利用实测的 3 场降雨径流数据(编号 20190411、20190611、20200307)进行模型参数率定,采用实测

的 1 场降雨径流数据(编号 20190722)进行模型模拟效果检验。

表 1 模型参数取值范围

Tab. 1 Value range of model parameters

| 模型模块 | 参数 | 取值范围 | 率定取值 |
|------|-----------------------------|-------------|-------|
| 汇流模块 | 管道曼宁系数 | 0.008~0.018 | 0.013 |
| | 透水区曼宁系数 | 0.050~0.800 | 0.300 |
| | 不透水区曼宁系数 | 0.012~0.025 | 0.020 |
| 产流模块 | 透水区注蓄量/mm | 2.700~7.500 | 3.800 |
| | 不透水区注蓄量/mm | 1.270~2.540 | 1.270 |
| | 最大入渗率/(mm·h ⁻¹) | 25.4~127.0 | 80.0 |
| 产流模块 | 最小入渗率/(mm·h ⁻¹) | 0.5~25.0 | 25.0 |
| | 入渗衰减系数/h ⁻¹ | 2~7 | 2 |

选取纳什效率系数(E_{NS})和峰值流量相对误差(E_{PR})评估模型模拟效果,上述 2 个指标的具体计算公式为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,sim})^2}{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - \bar{q}_{obs})^2} \quad (1)$$

式中: $q_{t,obs}$ 为汇水区 t 时刻的实测流量, L/s; $q_{t,sim}$ 为汇水区 t 时刻的模拟流量, L/s; \bar{q}_{obs} 为实测径流量的平均值, L/s; N 为径流时段数。 E_{NS} 反映了模型模拟流量和实测流量的吻合程度,其值越接近 1,说明模拟效果越好。

$$E_{PR} = \frac{|q_{p,obs} - q_{p,sim}|}{q_{p,obs}} \quad (2)$$

式中: $q_{p,obs}$ 为实测径流的峰值流量, L/s; $q_{p,sim}$ 为模拟径流的峰值流量, L/s。 E_{PR} 反映了模型对瞬时速度的模拟精度,其值越小说明对洪峰的模拟效果越好。

2.2 不同 LID 措施布设情景

根据研究区土地利用类型在模型中布设 LID 设施,研究区内的 LID 措施主要采取绿色屋顶、透水道路和下沉式绿地。因此,设计 4 种 LID 布设情景方案(绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地、组合布设)以及 3 种 LID 布设面积情景方案(10%、20%、30%),并与传统无 LID 方案的模拟径流结果对比分析。绿色屋顶在城市建筑的广泛应用不仅能有效缓解雨水径流压力,而且绿色植物根系可以过滤净化雨水对屋顶冲刷产生的污染,同时也美化了城市景观。透水道路由于其特殊的结构和材质,雨水降落到地表后不同于硬化路面与地下土壤隔绝,透水砖中的孔隙给雨水入渗至土壤提供了通道。下沉式

绿地类似于小型调蓄池,在一定程度上可以起到滞洪减灾的作用。依据深圳市 LID 技术基础规范,设置绿色屋顶土壤层厚度 150 mm,孔隙率 0.45;透水道路表面及基层厚度 80 mm,孔隙比 0.10;蓄水层厚度 250 mm,孔隙比 0.43;下沉式绿地蓄水深度为 210 mm,植被覆盖率 0.5。在 LID 组合布设情景下,3 种 LID 布设的面积设置为相同的值,以 10% LID 面积占比进行组合布设为例,绿色屋顶、透水铺装和下沉式绿地的占地面积统一设置为 5 180 m²。

2.3 研究区典型雨型设计

采用芝加哥雨型设计雨型,结合暴雨强度公式设计不同重现期的降雨过程。根据《深圳市暴雨强度公式及查算图表(2015 版)》查得深圳市暴雨强度总公式形式为

$$i = \frac{8.701(1+0.594\lg P)}{(t+11.13)^{0.555}} \quad (3)$$

式中: i 为暴雨强度,mm/min; P 为重现期,a; t 为降雨历时,min。

许超峰^[33]的研究表明,当雨峰系数取 0.35 时,可以很好地刻画深圳的降雨雨型。本文取雨峰系数为 0.35(一般范围 0.35< r <0.45),设置降雨时间间隔为 5 min,降雨历时为 2 h 的典型暴雨。分别选取重现期为 1 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a 的设计降雨,得出降雨过程线见图 2。研究区 2 h 降雨量分别为 69.7、98.7、111.2、123.6、140.1、152.6 mm。

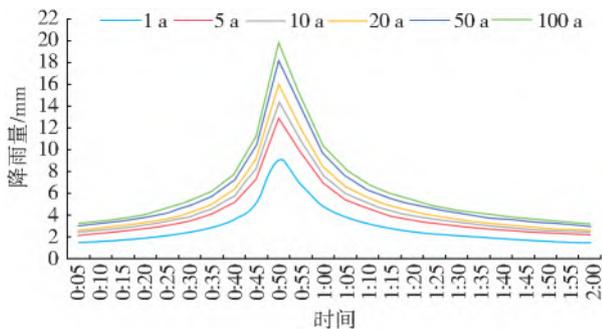


图 2 不同重现期的设计降雨

Fig. 2 Design rainfall with different return periods

2.4 雨洪过程评价指标

选取峰值流量和径流总量作为反映径流变化过程的特征指标,选取径流系数削减率和洪峰削减率反映 LID 对径流的削减效果。

峰值流量。一次降雨径流过程中最大的瞬时流量,也是径流过程线上的最高点流量。峰值流量的大小可以反映一场降水后研究区的基本内涝情况。

径流总量。一次降雨径流过程中通过研究区管网排水出口的总水量。径流总量的大小反映了径流过程的总体情况。

径流系数削减率和洪峰削减率。径流系数指一次降雨径流过程中研究区径流量与总降雨量的比值,可以反映该地区的产汇流特征。径流系数削减率 R_c 和洪峰削减率 R_Q 的计算公式为

$$R_c = \frac{\alpha_0 - \alpha_{LID}}{\alpha_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$R_Q = \frac{Q_0 - Q_{LID}}{Q_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: α_0 为传统布设方案下的径流系数; α_{LID} 为 LID 布设方案下的径流系数; Q_0 为传统布设方案下的洪峰流量,L/s; Q_{LID} 为 LID 布设方案下的洪峰流量,L/s。

3 模拟结果与分析

3.1 模型参数率定与验证

经率定模型参数值见表 1,率定及验证后的降雨径流过程见图 3。可以看出,3 场用于模型参数率定的降雨径流过程中,模拟与实测径流过程吻合较好, E_{NS} 均在 0.890 以上, E_{PR} 值均在 0.130 以下。用于验证的 1 场降雨径流模拟结果 E_{NS} 为 0.868, E_{PR} 值为 0.186。因此,构建的 SWMM 模型能精确模拟研究区降雨径流过程,可用于后续城市雨洪模拟径流的评估。

3.2 不同重现期设计降雨对雨洪过程的影响

将不同重现期下的设计降雨过程情景和不同的 LID 布设情景输入到已经构建好的 SWMM 模型中,统计分析降雨和 LID 布设对研究区雨洪过程的影响。表 2 给出了当 LID 布设面积为 30% 时,不同设计降雨重现期下研究区排口峰值流量和径流总量的变化。可以看出当 LID 布设面积相同时,设计降雨重现期越大,降雨强度越大,洪峰和径流总量越大。随着降雨强度变大,径流总量和径流峰值的上升趋势不同。在 20 年一遇降雨重现期以内,径流峰值的上升趋势相较于径流总量的上升趋势更陡,说明降雨重现期较小时,LID 对径流峰值的控制效果更为显著,而在较大重现期降雨时 LID 对径流总量的控制效果更为显著。

3.3 不同 LID 措施对雨洪过程的影响

图 4 为不同重现期设计降雨下,模型模拟小区 A 排水出口的径流过程,在不同 LID 布设情景下,布设面积均设置为 30%。每种布设情景的径流形

状呈单峰型,峰前变化陡峭,峰后变化平缓,说明 LID 对径流有明显的缓冲作用。对比不同的 LID 布置情景,不同重现期设计降雨对径流的影响程度与 LID 类型有关,在组合 LID 布置情景下降雨重现期不同导致的径流过程差异最显著,在 3 种单独布

设的 LID 中,绿色屋顶对径流的控制效果受降雨重现期影响最大,而在下沉式绿地单独布置时,径流过程变化最小,更接近传统无 LID 布置模式。综合说明组合布置对降雨强度最敏感,尤其是在较小降雨强度时。

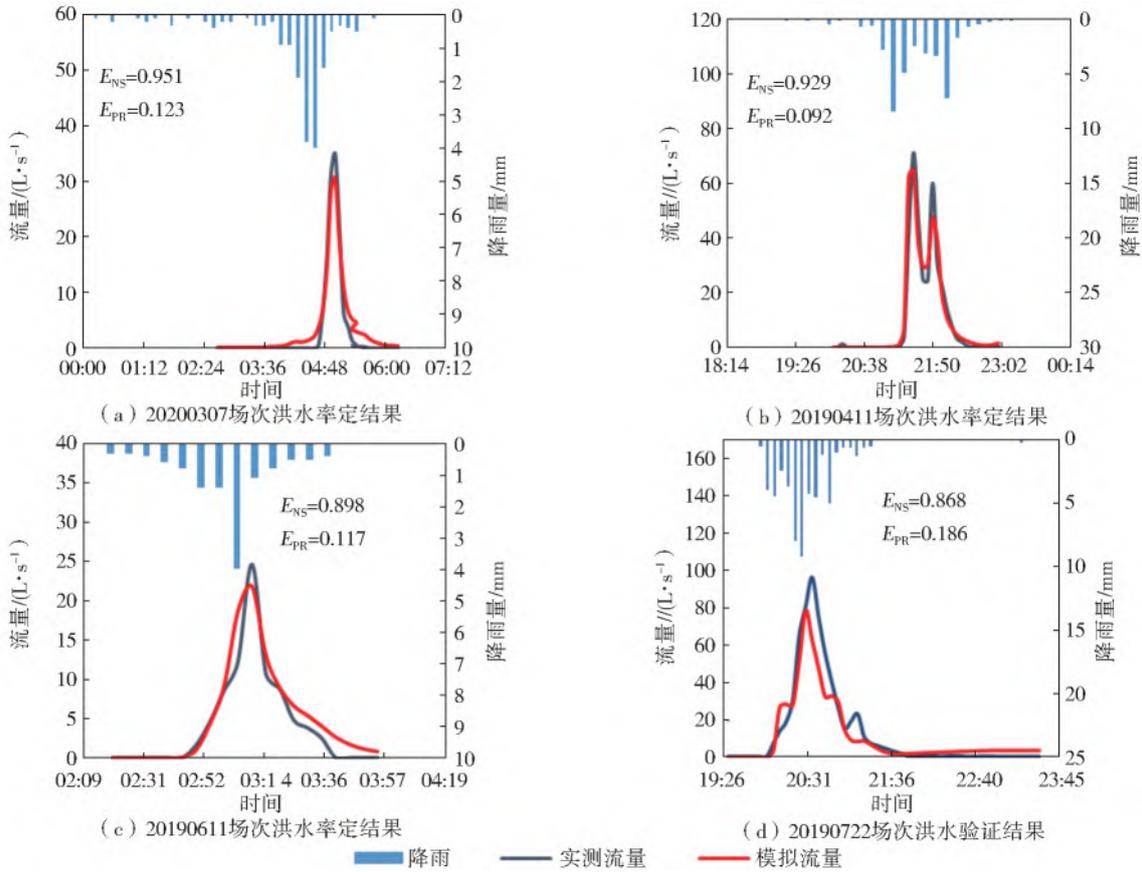


图 3 模型率定及验证结果

Fig. 3 Model calibration and verification results

表 2 30% LID 布置面积下地表径流模拟结果

Tab. 2 Simulation results under 30% LID layout area

| 布置方案 | 峰值流量/(L·s ⁻¹) | | | | | | 径流总量/m ³ | | | | | |
|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 a | 5 a | 10 a | 20 a | 50 a | 100 a | 1 a | 5 a | 10 a | 20 a | 50 a | 100 a |
| 传统 | 693 | 1 086 | 1 241 | 1 419 | 1 600 | 1 737 | 1 917 | 3 127 | 3 698 | 4 286 | 5 076 | 5 683 |
| 组合 | 79 | 367 | 688 | 1 069 | 1 402 | 1 649 | 370 | 1 250 | 1 819 | 2 406 | 3 204 | 3 816 |
| 绿色屋顶 | 443 | 708 | 945 | 1 181 | 1 520 | 1 691 | 1 462 | 2 521 | 3 107 | 3 706 | 4 508 | 5 122 |
| 透水铺装 | 459 | 855 | 1 050 | 1 200 | 1 435 | 1 577 | 1 293 | 2 369 | 2 907 | 3 470 | 4 240 | 4 835 |
| 下沉式绿地 | 556 | 883 | 1 034 | 1 193 | 1 375 | 1 496 | 1 502 | 2 726 | 3 321 | 3 927 | 4 735 | 5 355 |

结合表 2 中 30% LID 布置面积时径流总量和径流峰值结果:从径流总量的角度来看,组合的总径流量远远小于其他 4 部分,这表明海绵城市建设对城市降雨径流有一定的缓解作用,因此其在一定范围内可有效地缓解城市内涝问题;从洪峰角度来看,组合方案的洪峰峰值远远小于其他部分,可以看出完整的城市海绵体对城市治理洪水方面具有削峰

作用。

单独分析每种 LID 类型,对于小区 A 排水出口的控制范围内,见图 5,在 P=1 a 时绿色屋顶的调控效果最佳,透水铺装和下沉式绿地对径流的调控效果比较接近,但是 3 种 LID 单独布置时对径流的影响主要体现在削减洪峰方面,组合到一起布置时则出现了较明显的延缓峰现时间的作用。

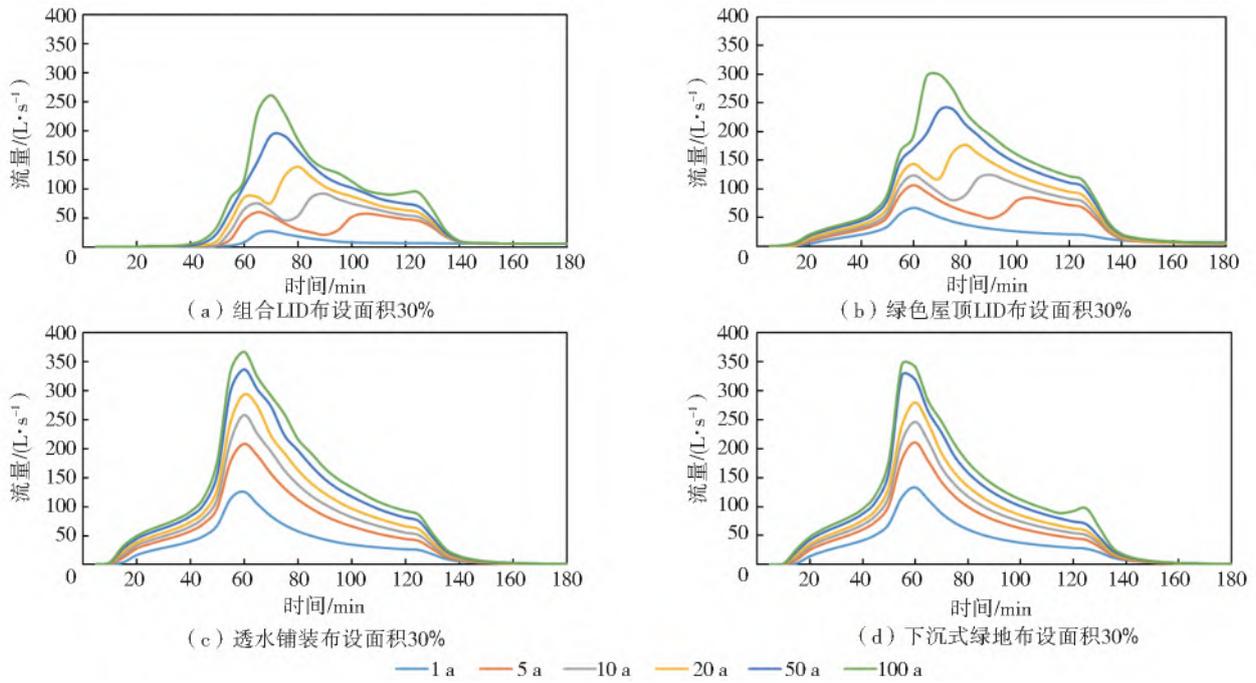


图 4 不同重现期设计降雨下径流过程

Fig. 4 Runoff process under designed rainfall with different return periods

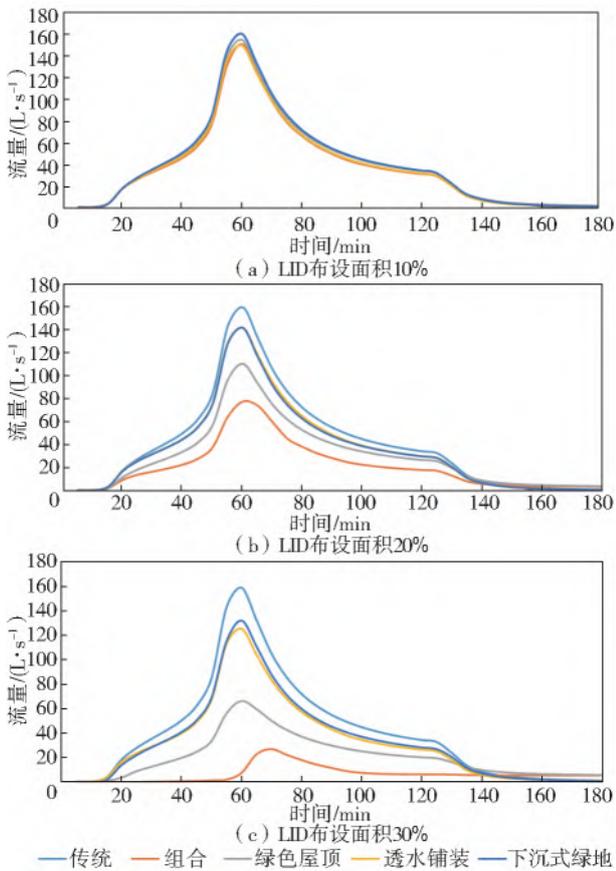


图 5 $P=1 a$ 时不同 LID 措施模拟结果

Fig. 5 Simulation results of different LID measures while $P=1 a$

在图 6 中,在设计降雨重现期相同时,径流系数的削减效果:组合 LID 布置 > 透水道路 > 绿色屋顶 > 下沉式绿地。由于该研究区为保障房居民小区,其中有 2 个大型广场和路边自行车停放区

铺设有透水砖,当暴雨来临时雨水下渗,不易发生内涝,而下沉式绿地的控制效果不太显著,原因主要是研究区内下沉式绿地一般为较小面积的浅凹式绿地,且结构较为简单,对径流的控制效果不太明显。降雨增大到 10 年一遇以后,随着降雨强度的增大,LID 措施对径流的削减效果减弱,LID 对径流的作用效果逐渐饱和,径流系数的主要影响因素为降雨规模,这表明海绵城市建设的承载能力是有限的。

对比传统无 LID 布置方案,分析 3 种 LID 单独布置以及 3 种 LID 组合布置这 4 种方案的洪峰削减率。对于组合 LID 布置模型,当降雨强度小于 10 年一遇设计降雨,LID 的削峰作用比较好,但设计降雨重现期增大到 20 年一遇以后,海绵措施影响径流的作用达到饱和甚至减弱,由此可见现有的海绵建设仍不能解决大暴雨引起的内涝问题,需针对大暴雨对布置方案进一步优化,例如,考虑灰绿措施的动态协调,提高海绵措施的饱和阈值,从城市生态系统的角度整体把握,实现对雨水径流的有效控制与利用。在相同降雨重现期下,不同于径流系数削减效果,4 种方案对洪峰的削减效果:组合 LID 布置 > 绿色屋顶 > 透水铺装 > 下沉式绿地。但是分析图中变化趋势可见,4 种方案对降雨强度变化的敏感性:组合 LID 布置 > 绿色屋顶 > 透水铺装 > 下沉式绿地,说明 LID 措施对于一般降雨强度下的调控效果明显,但针对大暴雨其调控效果很快达到饱和,这也从另一个角度反映海绵城市对降雨径流的调控是有“弹性”的。

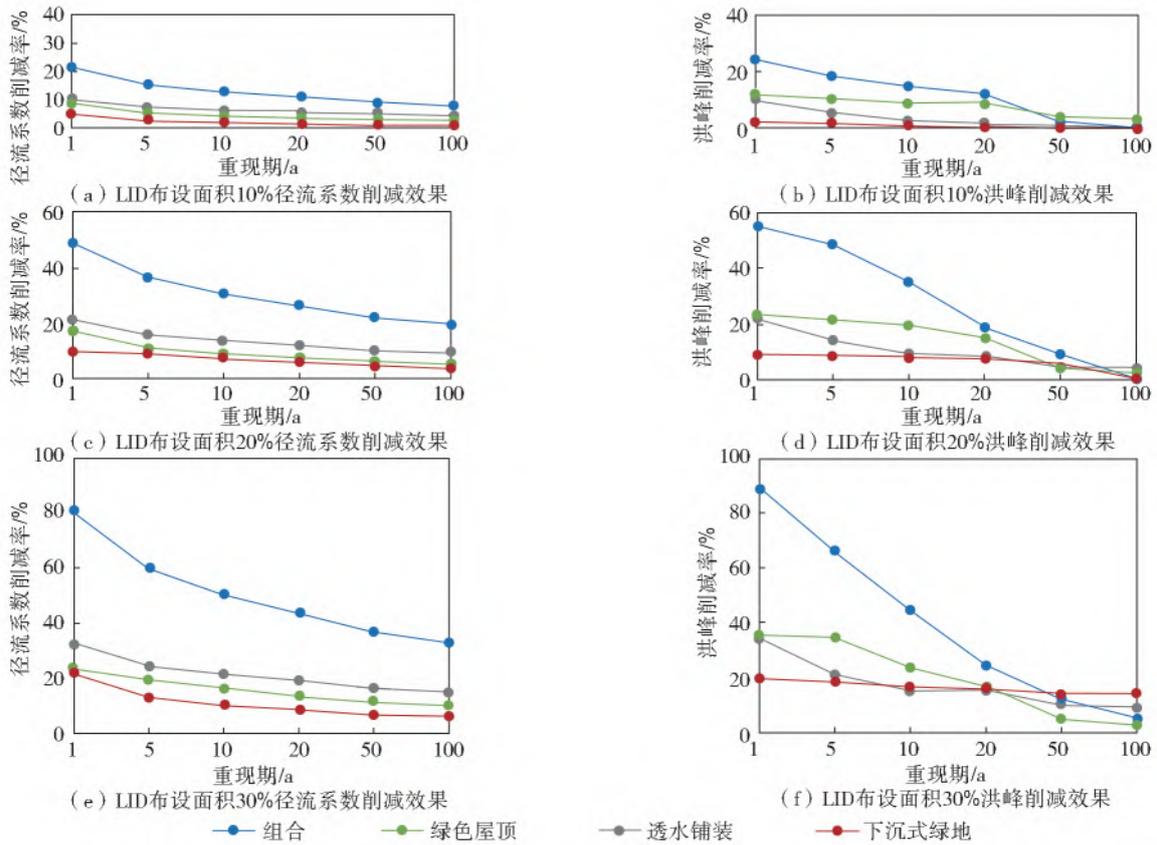


图 6 不同 LID 措施对径流的削减效果

Fig. 6 Effect of different LID facilities on runoff reduction

3.4 不同 LID 布置面积对雨洪过程的影响

设计降雨重现期 1 a 时,5 种布置方案下的排水出口的径流模拟过程见图 5,在 LID 布置面积为 10% 时,5 种模型的径流模拟结果差异较小,LID 措施对径流的调控效果并不明显,相比传统模式,其他 4 种 LID 方案仅有较小的削峰作用。在 LID 布置面积为 20% 时,相对于其他 4 种布置方案,组合 LID 模型的径流过程变化平缓,径流时间大大延长,对径流控制效果较好。在 LID 布置面积为 30% 时,LID 措施对径流的调控效果更为显著,说明 LID 布置面积是径流的影响因素之一。

在整个研究区域范围内,对比传统无 LID 措施的布置方案,4 种方案的径流系数削减率和洪峰削减率见图 6。在 LID 布置相同时,随 LID 布置面积的增大,相同降雨重现期下的径流系数和洪峰削减率都有一定程度的增大,且随降雨重现期增大而减小的趋势基本保持一致,这说明了 LID 布置面积影响径流调控效果,而对海绵设施的“弹性”影响较小。

4 结论

以深圳市光明新区某居民保障小区为研究对象,合理建立区域 SWMM 模型并用实测降雨径流

进行校验。然后模拟区域内不同重现期(1 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a)设计降雨下的降雨径流效应,并设计 4 种 LID 布置方案(绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地、组合布置)以及 3 种 LID 布置面积(10%、20%、30%),与传统无 LID 模型的模拟径流结果进行对比分析,得出以下结论。

(1)对比不同重现期设计降雨对雨洪过程的影响,结果显示,降雨强度越大,城市降雨径流的峰值和洪量越大,表明短历时高强度的降雨易形成较高洪峰、洪量的径流,这是导致城市内涝的原因之一。

(2)LID 布置面积的变化主要改变了不透水率,而城市下垫面不透水率的变化在很大程度上影响了城市降雨径流过程。LID 布置面积增大,LID 措施对径流的削减效果越明显。

(3)组合 LID 布置方案的雨洪调控效果最好,具体体现在径流过程趋于平缓,有明显的削峰作用,且对径流系数、洪峰流量的削减率比较高。

(4)当 $P > 10$ a 时,海绵措施对径流削减效果随降雨强度的增大而减弱,表明降雨重现期较大时降雨强度对径流起主导作用,海绵城市的建设在后期饱和,对城市内涝的缓解作用主要体现在较小强度降雨的情况下。

参考文献(References):

- [1] SHUSTER W D, BONTA J, THURSTON H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review[J]. *Urban Water Journal*, 2005, 2(4): 263-275. DOI:10.1080/15730620500386529.
- [2] 孔锋, 王一飞, 吕丽莉, 等. 北京“7·21”特大暴雨洪涝特征与成因及对策建议[J]. *人民长江*, 2018, 49(S1): 15-19. (KONG F, WANG Y F, LYU L L, et al. Genesis analysis and countermeasures on huge rainstorm and flooding on 21st July. in Beijing[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(S1): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.S1.004.
- [3] 周洪建, 王丹丹, 袁艺, 等. 中国特别重大自然灾害损失统计的最新进展:《特别重大自然灾害损失统计制度》解析[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(5): 530-538. (ZHOU H J, WANG D D, YUAN Y, et al. New advances in statistics of largescale natural disasters damage and loss: Explanation of "Statistical system of large-scale natural disasters"[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(5): 530-538. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.05.0530.
- [4] 陈文龙, 夏军. 广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J]. *中国水利*, 2020(13): 4-7. (CHEN W L, XIA J. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd, May, Guangzhou[J]. *China Water Resources*, 2020(13): 4-7. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2020)13-0004-04.
- [5] QIN H, LI Z, FU G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 577-585. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.026.
- [6] 刘家宏, 王佳, 王浩, 等. 海绵城市内涝防治系统的功能解析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 611-618. (LIU J H, WANG J, WANG H, et al. Effectiveness of urban inundation control system in sponge city construction[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 611-618. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.015.
- [7] HUONG H T L, PATHIRANA A. Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(1): 379-394. DOI: 10.5194/hess-17-379-2013.
- [8] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. *水利学报*, 2017, 48(9): 1009-1014. (WANG H, MEI C, LIU J H. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1009-1014. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170308.
- [9] ELLIOTT A, TROWSDALE S. A review of models for low impact urban stormwater drainage[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(3): 394-405. DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.12.005.
- [10] BEAK S, LIGARAY M, PYO J, et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124886. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124886.
- [11] POUR S H, WAHAB A K A, Shahid S, et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102373. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102373.
- [12] AHIABLAME L, SHAKYA R. Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 171: 81-91. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.01.036.
- [13] DAVIS A P, HUNT W F, TRAVER R G, et al. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(3): 109-117. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109).
- [14] CIPOLLA S S, MAGLIONICO M. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 876-887. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.07.009.
- [15] 孟雨婷. 海绵城市建设措施的内涝削减效果研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. (MENG Y T. Effect of low impact development measures on inundation reduction: [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese))
- [16] VIOLA F, HELLIES M, DEIDDA R. Retention performance of green roofs in representative climates worldwide[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 763-772. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.033.
- [17] DREELIN E A, FOWLER L, RONALD C C. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events[J]. *Water Research*, 2006, 40(4): 799-805. DOI: 10.1016/j.watres.2005.12.002.
- [18] 晋存田, 赵树旗, 闫肖丽, 等. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(1): 40-42. (JIN C T, ZHAO S Q, YAN X L, et al. Impacts of permeable brick and sunken lawn on urban stormwater[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(1): 40-

42. (in Chinese)) DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2010. 01. 013.
- [19] 程江,徐启新,杨凯,等. 下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素[J]. 给水排水,2007(5):45-49. (CHEN J, XU Q X, YANG K, et al. Rainwater infiltration and storage effect of sunken green space and its influencing factors[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007(5):45-49. (in Chinese)) DOI:10. 13789/j. cnki. wwe1964. 2007. 05. 012.
- [20] 张曼,周可可,张婷,等. 城市典型 LID 措施水文效应及雨洪控制效果分析[J]. 水力发电学报,2019,38(5):57-71. (ZHANG M, ZHOU K K, ZHANG T, et al. Hydrological responses and stormwater control effects of typical urban LID measures[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(5):57-71. (in Chinese)) DOI:10. 11660/slfdb. 20190507.
- [21] 王婷,刁秀媚,刘俊,等. 基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):39-43. (WANG T, DIAO X M, LIU J, et al. Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(4):39-43. (in Chinese)) DOI:10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 04. 007.
- [22] 章双双,潘杨,李一平,等. 基于 SWMM 模型的城市化区域 LID 设施优化配置方案研究[J]. 水利水电技术,2018,49(6):10-15. (ZHANG S S, PAN Y, LI Y P, et al. SWMM model-based study on optimal allocation of LID facilities in urbanized region[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(6):10-15. (in Chinese)) DOI:10. 13928/j. cnki. wrhe. 2018. 06. 002.
- [23] 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 Y H, WANG Z G, JIANG A H, 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)) DOI:10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2020. 0075.
- [24] 李春林,刘淼,胡远满,等. 基于暴雨径流管理模型(SWMM)的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2405-2412. (LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Simulation on the control effect of low impact development measures of sponge city based on storm water management model (SWMM)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8):2405-2412. (in Chinese)) DOI:10. 13287/j. 1001-9332. 201708. 002.
- [25] 刘滋菁. 深圳前海区域低影响开发设施布局优化研究[D]. 北京:清华大学,2017. (LIU Z Q. Optimization technique of the low impact development facilities in Shenzhen Qianhai District[D]. Beijing:Tsinghua University,2017. (in Chinese))
- [26] 袁艺,史培军. 土地利用对流域降雨-径流关系的影响:SCS模型在深圳市的应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2001(1):131-136. (YUAN Y, SHI P J. Effect of land use on the rainfall runoff relationship in a basin; SCS model applied in Shenzhen City[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2001(1):131-136. (in Chinese)) DOI:10. 3321/j. issn:0476-0301. 2001. 01. 029.
- [27] 深圳市气象局[EB/OL]. <http://weather.sz.gov.cn>. (Meteorological Bureau Shenzhen Municipality(in Chinese))
- [28] 谢进一. 深圳市光明新区海绵城市建设的策略分析[J]. 城市地理,2018(4):71. (XIE J Y. Strategy analysis of sponge city construction in Guangming new district, Shenzhen City [J]. *Cultural Geography*, 2018(4):71. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1674-2508. 2018. 04. 042.
- [29] GIRONA' S J, ROESNER L A, ROSSMAN L A, et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM)[J]. *Environmental Modeling & Software*, 2010, 25(6):813-814. DOI:10. 1016/j. envsoft. 2009. 11. 009.
- [30] 陈晓燕,张娜,吴芳芳,等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水,2013,29(4):4-7. (CHEN X Y, ZHANG N, WU F F, et al. Storm water management model (SWMM) :Principles, parameters and applications [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4):4-7. (in Chinese)) DOI:1000-4602(2013)04-0004-04.
- [31] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual[M]. Washington:USEPA,2009.
- [32] 孙波,谢水波,王志远,等. 基于多种 LID 模式的深圳市内涝防治研究[J]. 人民长江,2020,51(6):17-22. (SUN B, XIE S B, WANG Z Y, et al. Shenzhen City waterlogging prevention based on multiple LID schemes[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(6):17-22. (in Chinese)) DOI:10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2020. 06. 004.
- [33] 许超峰. 深圳市城市设计暴雨雨型分析研究[D]. 河南:华北水利水电大学,2018. (XU C F. Design storm pattern analysis in the city of Shenzhen[D]. Henan: North China University of Water Resources and Electric Power,2018. (in Chinese))

Impact of LID on urban rainfall and runoff process

WU Yingying^{1,2}, SHE Dunxian^{1,2}, XIA Jun^{1,3}, ZHANG Yin^{1,2}, ZHOU Yan^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 2. *Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China*; 3. *Key Laboratory of Water Cycle and Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100010, China*)

Abstract: Urbanization can greatly change the underlying surface and thus have a large influence on the urban runoff process. Recently, most big cities in China have undergone serious waterlogging problems which are caused by many factors, such as the "July 21" urban flood in Beijing, the heavy rain in Wuhan on July 6, 2016 and the "May 22" torrential rain in Guangzhou in 2020 all caused huge economic losses. Since 2013, China has promoted the construction of sponge cities to play the role of nature in regulating water bodies, reducing urban waterlogging and water pollution through a series of measures. Low impact development (LID) is considered as a useful practice for sponge city construction and can reduce urban surface runoff to a certain extent.

To evaluate the influence of LID on urban runoff generation in sponge city construction, this work takes Guangming District of Shenzhen as the study area and analyzes the impact of different LID measures and their combinations on the urban rain-water process by establishing a regional SWMM model. After the verification by the observed rainfall-runoff, a reasonable and effective model is obtained to simulate the runoff process. The different return period of design rainfall (1 a, 5 a, 10 a, 20 a, 50 a, 100 a) was input into the model, four LID layout schemes (green roof, permeable pavement, sunken green space, and combined layout) were designed, and three LID areas (10%, 20%, 30%) were laid into the model at the same time. Their simulated runoff results were compared with those of traditional NO-LID, respectively.

The results show that the SWMM model constructed can well simulate the rainfall-runoff process in the study area, with Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.868 and relative error of 0.186. The greater the rainfall intensity is, the greater the peak value and flood amount of urban rainfall-runoff are under the design rainfall of different return periods, which indicates that the short-duration and high-intensity rainfall tends to form higher flood peak and flood amount of runoff, which is one of the causes of urban waterlogging. With the same rainfall intensity and LID type, it becomes more obvious for the reduction effect of LID measures on runoff with the increase of LID layout area. The impervious rate of urban underlying surface was changed by LID layout area, which could greatly affect the urban rainfall-runoff process. LID can reduce both the peak value and total amount of runoff, and delay the peak time to some extent. Besides, the larger the area of LID is, the more obvious the effect of LID on runoff reduction is. The combined layout scheme has a better regulation effect on runoff than the single layout scheme. While in the single layout scheme, the best runoff reduction effect is permeable pavement, the best peak runoff regulation effect is green roof, and the sunken green space has the worst runoff regulation effect among the three. Sponge measures on runoff coefficient and peak flow reduction effect is abate in designed rainfall with a return period of more than 10 years, meaning that the sponge measures reach saturation later, the urban waterlogging relief mainly reflected in the case of the small intensity of rainfall.

Both the structure and area of the LID layout have an impact on urban rainfall and runoff, and the reasonable layout of LID can effectively alleviate urban waterlogging to a certain extent. The regulation effect of LID measures under low rainfall intensity is obvious, but its regulation effect quickly reaches saturation in view of heavy rain, and the regulation of urban rain and flood in sponge city is "elastic", so it is necessary to further optimize the layout scheme in view of heavy rain, such as considering the dynamic coordination of grey-green measures, increasing the saturation threshold of sponge measures, and grasping the whole from the perspective of urban ecosystem to realize the effective control and utilization of rainwater runoff.

Key words: urban rainfall runoff; sponge city; low impact development; SWMM model; runoff regulation; urban waterlogging