

【环境与能源 / Environment and Energy】

低影响开发小区降雨径流的滞留与滞后效应

银翼翔¹, 秦华鹏¹, 余淑琦¹, 郑妍妍², 何康茂¹

1) 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东深圳 518055;

2) 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东广州, 510060

摘要: 为解决海绵城市建设中低影响开发(low impact development, LID)小区降雨径流滞后效应量化研究不足的问题, 基于中国深圳市麻磡环保产业园内3种LID组合设施(停车场-雨水花园、屋面-高位生物滞留池-渗透铺装-植被草沟、屋面-高位生物滞留池-渗透铺装-植被草沟-雨水花园)的降雨径流连续观测数据, 系统评估了LID对径流的滞留和滞后效应, 分析了LID设施组合和降雨特征等对滞留和滞后效应的影响。结果表明, LID可滞留75.0%~86.5%的降雨量, 且在累计滞留降雨量达到2.2~9.9 mm后才开始产流; 相对于降雨过程, LID产流的结束时间、质心位置和峰值位置分别滞后100~115、30~68和13~34 min; LID设施的串联有助于提高径流滞后效应; 随着雨前干旱时间延长, LID开始产流时对应的累计雨量增加; 随着降雨量或降雨历时的增加, 产流停止时间和质心位置的滞后效应增强; 而降雨强度越小、峰值越靠前, 峰值位置的滞后效应越强。研究结果有助于提高LID对降雨径流滞后效应的认识。

关键词: 城市雨水; 海绵城市; 低影响开发; 径流; 滞留效应; 滞后效应

中图分类号: X52

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.02142

Retention and lag effects of rainfall runoff in a low impact development area

YIN Yixiang¹, QIN Huapeng¹, YU Shuqi¹,
ZHENG Yanyan², and HE Kangmao¹

1) School of Environment and Energy, Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, Guangdong Province, P. R. China

2) Guangzhou Urban Planning Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In view of the insufficient quantitative analysis of lag effect of rainfall runoff in low impact development (LID) areas in the construction of sponge city, we evaluate the retention and lag effects of runoff of three combinations of LID facilities including Parking lot-Rain garden, Roof-Elevated bioretention-Permeable pavement-Grass ditch, Roof-Elevated bioretention-Permeable pavement-Grass ditch-Rain garden in Shenzhen Maken Environmental Protection Industrial Park based on the observation data in 190 rainfall events, and comprehensively analyze the influences of rainfall characteristics and combination of LID facilities on the effects. The results show that LID facilities can retain 75.0%-86.5% of rainfall, and LID can retain 2.2-9.9 mm of accumulated rainfall before runoff generation. Compared with the rainfall process, the end time, centroid position and peak position of runoff in LID combinations lag 100-115 min, 30-68 min and 13-34 min, respectively. The series connection of LID facilities can

Received: 2021-04-05; **Accepted:** 2021-05-14; **Online (CNKI):** 2021-06-03

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52070003); Shenzhen Basic Research Foundation (JCYJ2020 0109120416654)

Corresponding author: Professor QIN Huapeng, E-mail: qinhp@pku.edu.cn

Citation: YIN Yixiang, QIN Huapeng, YU Shuqi, et al. Retention and lag effects of rainfall runoff in a low impact development area [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(2): 142-151. (in Chinese)



help to improve the lag effect of runoff. With the increase of drought time before rain, the LID combinations accumulate more rainfall before yielding runoff. With the increase of rainfall amount or rainfall duration, the lag effects of runoff end and centroid position increase. While the lag effect of peak position increases with the decrease of rainfall intensity and the advance of rainfall peak. The results are helpful to strengthen the understanding of the lag effect of LID on rainfall runoff.

Key words: urban rainwater; sponge city; low impact development; rainfall runoff; retention effect; lag effect

城镇化的快速发展使城市不透水下垫面不断增加, 造成降雨径流增加和峰值提前, 加剧了城市内涝风险^[1-3]. 低影响开发(low impact development, LID)是从源头调控城市降雨径流的重要措施, 已在中国的海绵城市建设中得到广泛应用^[2-5].

目前, 国内外已开展较多LID对降雨径流滞留效应的研究. 唐双成等^[6]连续4 a监测了雨水花园的入流与出流过程, 发现雨水花园对降雨的滞留率高达96.8%; SHRESTHA等^[7]发现美国佛蒙特州伯灵顿市的一个生物滞留池对降雨的滞留率为75%; 李海燕等^[8]发现植被草沟对中小强度降雨的滞留率达26.7%; DREELIN等^[9]证实在降雨量和降雨强度都较小的情况下, 透水路面产生的径流流量比沥青路面减少93%. 与单体LID设施相比, LID组合方式有可能带来更好的水文调控效果^[10]. 在中国台北居民社区, HUANG等^[11]以绿色屋顶和生物滞留池为主要设施布设LID组合, 使雨水峰值流量降低5.8%~29.8%; 段明印等^[12]对比了小区内LID组合和单体设施的雨水控制效果, 发现LID组合对降雨径流和峰值流量都具有更明显的削减效果.

除了滞留径流, LID还有迟滞径流的重要作用. XIA等^[13]发现在不同强度的人工降雨条件下, 生物滞留单元对降雨-径流峰值的延迟时间超过13 min; 景瑞瑛等^[14]通过现场监测和模型模拟, 发现不同场次降雨时雨水花园出流的峰值达到时间比降雨峰值延后12~40 min. 然而, LID对降雨径流的滞后效应不仅体现在峰值滞后, 还体现在径流过程整体的后移和径流结束时间的滞后等多方面. HOOD等^[15]对比了LID与传统开发的降雨径流, 发现LID能显著增加降雨-径流滞后时间. 与LID的径流滞留效应的研究相比, 中国针对LID的径流滞后效应的研究较少, 已有研究关于LID组合方式和降雨条件等对LID滞留和滞后效应的影响也很少^[16-17].

本研究以中国深圳市麻磡环保产业园低影响开发小区为例, 针对3种不同LID设施组合: 停车场-雨水花园(LID1)、屋面-高位生物滞留池-渗透铺装-草沟(LID2)、屋面-高位生物滞留池-渗透铺装-草

沟-雨水花园(LID3), 基于2016—2019年共计190场次降雨事件的连续水文监测数据, 归纳LID组合在降雨事件中表现出的径流滞留规律, 同时考虑降雨-径流过程中产流开始前累计雨量、产流结束时间滞后、质心位置和峰值位置后移等指标, 综合评估LID组合对降雨径流的滞留和滞后效应, 比较了不同的降雨量、降雨强度、降雨历时和降雨前干旱期(antecedent dry period, ADP)等降雨特征对LID组合效应的影响.

1 研究方法

1.1 监测方案

深圳市属亚热带季风气候, 夏季平均时长196 d, 年平均气温23 °C, 年降水量达1 935.8 mm, 全年86%的雨量出现在汛期(4~9月). 深圳是国家海绵城市建设试点城市, 目前已经建设了大量的LID设施. 研究区域位于深圳市南山区麻磡环保产业园的低影响开发示范区, LID设施组合平面图见图1. 该LID示范区于2014年建成, 由于新建的停车场纳入示范区, 2018年对小区雨水的排蓄进行了调整. 选择示范区改造前后3个LID区域为研究对象(图2). 研究区域LID3为改建前的情景, 来自屋顶的雨水经过高位生物滞留池的处理后, 与渗透路面汇集的雨水一起经过植被草沟和雨水花园的处理后排入市政管网, 其汇水区域的面积达到2 163 m², 见图2(c). LID1和LID2为改建后情景, 其中, LID1中屋顶雨水和停车场雨水一起汇入雨水花园后排入市政管网, 其汇水区域面积是1 280 m², 见图2(a); LID2中屋顶雨水经过高位生物滞留池的处理后与渗透路面雨水汇集, 通过植被草沟的滞蓄和运输排入市政管网, 其汇水区域面积是542 m², 见图2(b). 3种LID组合设施的相关参数与特点如表1.

本研究开展为期4 a的水文气象观测. 在研究区建筑屋顶设置Vantage Pro2型自动气象站, 采集气温、太阳辐射、风速、相对湿度和降雨量等数

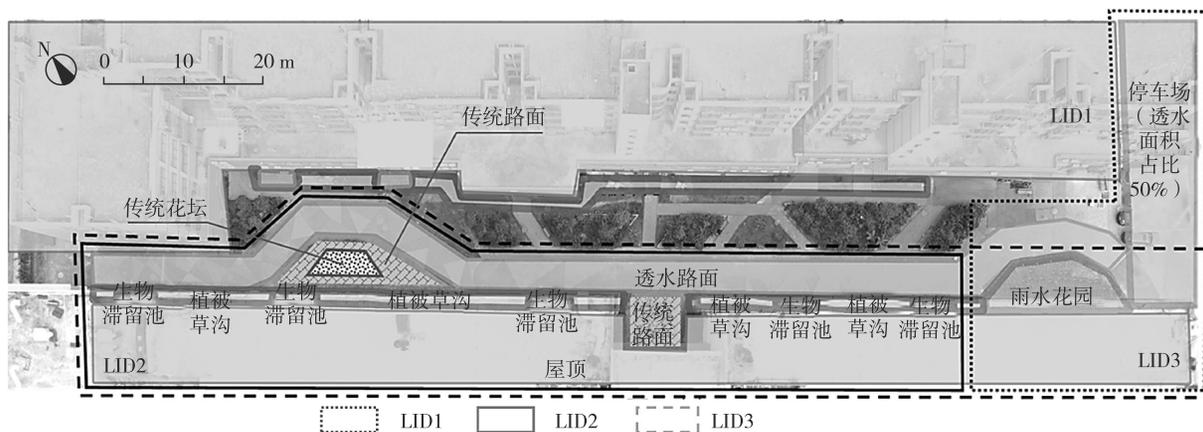


图 1 研究区域内LID设施与组合的平面布置图

Fig. 1 (Color online) Layout of LID facilities and combinations in the study area

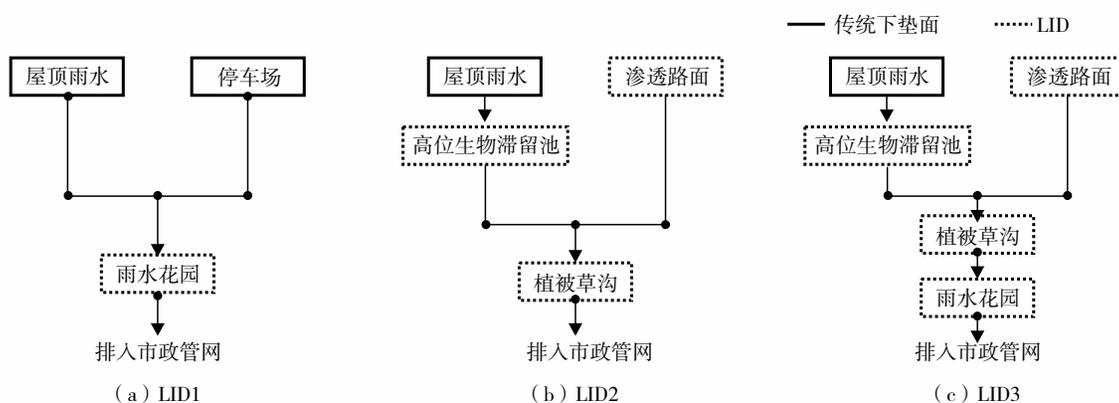


图 2 研究区域内 LID 组合设施的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of LID combinations in the study area

表 1 LID 组合设施的参数与特征

Table 1 Parameters and characteristics of LID combinations

组合设施	汇水区面积/m ²	透水区域面积占比/%	LID 设施面积占比/%	LID 特点	运行时间	有效监测总降雨量/mm
LID1	542	27.4	16.6	雨水花园收集屋顶雨水和停车场雨水	2018—2019年	1 278
LID2	1 280	28.3	21.8	高位生物滞留池收集屋顶雨水后与渗透路面并联,两者处理后的雨水一起汇入植被草沟	2018—2019年	921
LID3	2 163	35.9	30.5	高位生物滞留池收集屋顶雨水后与渗透路面并联,两者处理后的雨水先汇入植被草沟后一起汇入雨水花园	2014—2017年	1 628

据, 数据记录间隔时间为 1 min; 分别在 LID1 雨水花园排水管出口处和 LID2 植被草沟出口设置监测点, 采用多普勒超声流量计(DX-LSX-1)进行在线连续自动监测; 参照 CJ/T 3008.2—1993《城市排水流量堰槽测量标准》采用溢流堰法逐分钟记录

LID3 雨水花园出口处流量数据。

以雨前至少 30 min 无降雨且 LID 无径流流出作为区分新降雨事件的标准. 改建前选取 2016 年 1 月至 2017 年 9 月共计 98 场有效降雨事件作为 LID3 的分析对象; 改建后选取 2018 年 10 月至 2019 年 12 月

共计92场有效降雨事件作为LID1的分析对象, 选取2018年10月至2019年10月共计71场有效降雨事件作为LID2的分析对象.

1.2 分析方法

除了采用径流滞留量、滞留率等指标反映LID对径流的调节效应, 本研究还采用以下4项指标全面地反映LID对径流的滞留和滞后效应^[18](图3): ①降雨开始到LID产流开始的累积降雨量(Q_0), 表示降雨开始时刻 t_{A0} 到产流开始时刻 t_{B0} 之间 t_1 时间内的降雨量; ②停止产流的滞后时间(t_2), 表示降雨停止时刻 t_{A3} 到径流停止时刻 t_{B3} 之间的时长; ③降雨质心到径流质心的滞后时间(t_3), 表示降雨雨量质心时刻 t_{A2} 到径流流量质心时刻 t_{B2} 之间的时长; ④降雨峰值到径流峰值的滞后时间(t_4), 表示降雨雨量峰值时刻 t_{A1} 到径流流量峰值时刻 t_{B1} 之间的时长. 其中, 质心计算公式参考文献[18].

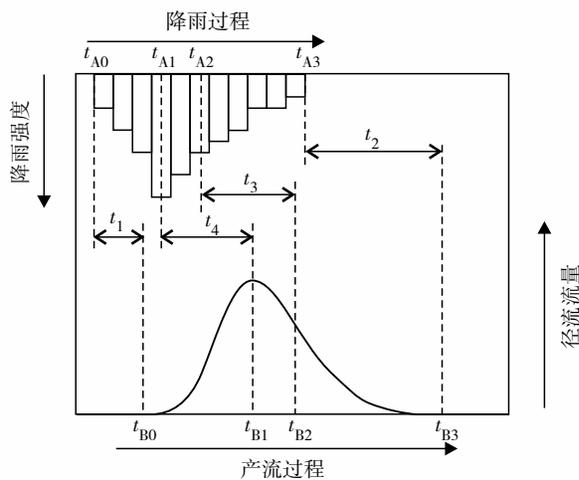


图3 降雨过程和径流过程滞后效应的相关指标
Fig. 3 Related indexes of lag effect in process of rainfall and runoff

$$t_{A2} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times t_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$t_{B2} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \times t_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

其中, W_i 为 i 时刻降雨强度; Q_i 为 i 时刻径流流量; n 分别为降雨过程和产流过程从开始至结束所经历的时间单元的总数量.

ADP被定义为上次降雨事件结束时刻至本次降雨事件开始时刻之间的时间差(单位: h), 本研究

记录了每场有效降雨事件前的雨前干早期ADP, 还分析了降雨峰值位置(δ)对LID径流滞后效应的影响. 其中, 每场降雨事件中雨量峰值位置定义为

$$\delta = \frac{t_{A3} - t_{A0}}{t_{A1} - t_{A0}} \times 100\% \quad (3)$$

本研究使用美国国际商业机器公司的Statistical Product and Service Solutions 18软件计算降雨事件特征与滞留滞后效应指标之间的相关性系数, 分析过程采用Pearson相关系数法进行双侧显著性检测.

2 结果与分析

2.1 径流滞留效应

本研究从滞留量、滞留率(总滞留率和不同降雨类型下的滞留率)、100%滞留下的降雨量及降雨开始到产流开始的累积雨量等4个方面, 分析LID对径流的滞留效应. LID1的92场降雨事件的总雨量为1 278.2 mm, 总滞留量为968.9 mm, 总径流滞留率为75.8%; LID2的71场降雨事件的总雨量为921.0 mm, 总滞留量为690.8 mm, 总径流滞留率为75.0%; LID3的98场降雨事件的总雨量为1 628.1 mm, 总滞留量为1 408.3 mm, 总径流滞留率为86.5%. 3种LID组合均能有效滞留降雨量, 其中LID3的滞留率高于LID1和LID2.

各LID组合的场次降雨量和径流滞留量(或滞留量)的关系如图4. 在3种LID组合中, LID1的最大滞留量为51.6 mm, 平均滞留量10.5 mm; LID2的最大滞留量为45.5 mm, 平均滞留量9.9 mm; LID3的最大滞留量为58.2 mm, 平均滞留量16.4 mm. 从图4可见, 在场次降雨量较小的条件下, 场次降雨量和滞留量基本相等, 相关性散点密集分布在图中1:1对角线上, 说明LID组合能对雨水100%滞留; 随着场次降雨量不断增大, 其滞留量开始逐渐小于降雨量, 且相对1:1对角线的偏离程度逐渐加大, 说明随着场次降雨量的增加, 滞留量和场次降雨量之间的差值逐渐增大; 当降雨量增加到一定程度, 滞留量不再增加, 说明LID的滞留能力达到饱和. 由图4还可以发现, LID1与LID2的滞留饱和量约为40~45 mm; LID3的滞留饱和量约为55~60 mm. 这表明, LID3具备更好径流滞留效果.

对降雨量的完全滞留情况是LID设施滞留效应

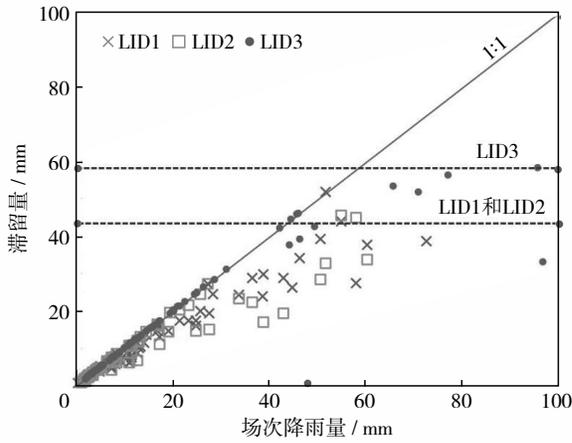


图4 LID组合场次降雨量和滞留量的离散分布
 Fig. 4 Discrete distribution of rainfall amount and retention in LID combinations

研究中的重点. 图5为100%降雨滞留率情况下3种LID组合的场次降雨量分布状况. LID1的92场降雨事件中, 100%滞留的降雨场次占31.5%, 最大场次降雨量为7.8 mm, 平均降雨量2.6 mm; LID2的71场降雨事件中, 100%滞留的降雨场次占32.4%, 最大场次降雨量10.8 mm, 平均降雨量3.5 mm; LID3的98场降雨事件中, 100%滞留的降雨场次占87.8%, 最大场次降雨量46.0 mm, 平均降雨量15.1 mm.

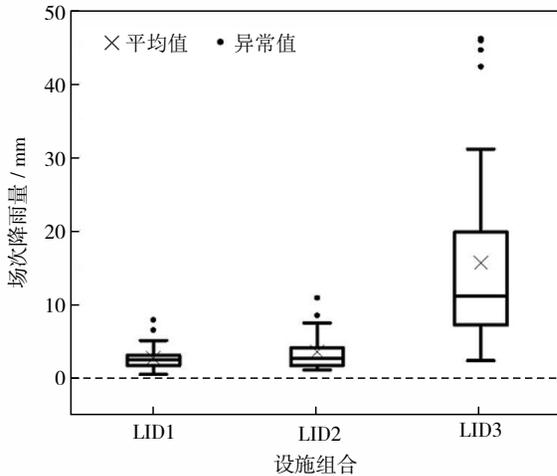


图5 三种LID组合完全滞留情况下的场次降雨量分布
 Fig. 5 Distribution of rainfall amount for three LID combinations when complete retention occurs

图6为进一步研究3种LID组合在不同雨型下的滞留情况. 从图6可见, 在小雨(0~10 mm)条件下, 3种LID设施均能滞留95%左右的雨量. 当降雨强度逐渐增大到中雨(24 h降雨强度达10~25 mm)和大雨(24 h降雨强度达25~50 mm)时, LID1

和LID2对雨水的滞留率下降明显, 而LID3对中雨和大雨的滞留率仍能维持在95%左右. 3种LID组合在暴雨(50~70 mm)条件下的滞留效率均降低到70%左右.

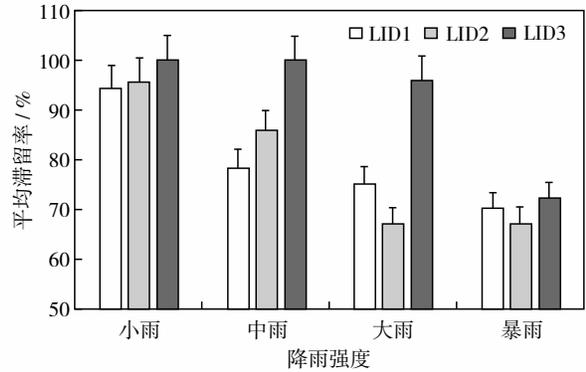


图6 三种LID组合在不同雨型下的滞留率
 Fig. 6 Retention rate of three LID combinations under different rainfall intensity

降雨开始到产流开始的累计降雨量(Q_0)可以反映降雨初期LID设施的滞留效应. 本研究中各LID组合的产流开始累积雨量分布如图7. 其中, LID1的产流开始前最大累积降雨量为20.4 mm, 平均累积降雨量2.2 mm; LID2的产流开始前最大累积降雨量为20.4 mm, 平均累积降雨量3.1 mm; LID3的产流开始前最大累积降雨量为17.3 mm, 平均累积降雨量9.9 mm. LID3的产流开始前累积降雨量均值分别是LID1的4.49倍和LID2的3.25倍, 表明LID3的初期雨水滞留效应强于LID1和LID2.

与LID1和LID2相比, LID3的降雨滞留率最

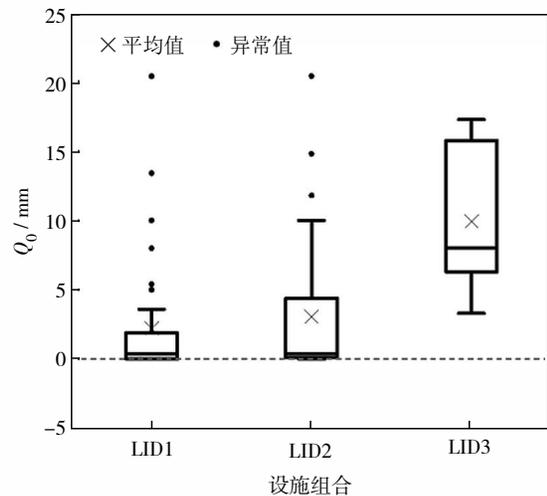


图7 三种LID组合的降雨开始到产流开始累积雨量分布
 Fig. 7 Distribution of cumulative rainfall from the beginning of rainfall to runoff in three LID combinations

高, 在更多的场次降雨中表现出95%左右的滞留效果滞留, 且LID3的产流前累积降雨量更大. LID3组合同时布设有渗透铺装、雨水花园、植被草沟和高位生物滞留池等LID设施, 其设施种类和数量均高于LID1和LID2, 且LID设施和透水区域的面积在汇水面积的占比均高于LID1和LID2. 当降雨事件发生时, 汇水区域内的降雨将经过多种LID设施的串联和并联处理, 使LID3表现出优于LID1和LID2的降雨滞留效应.

LID组合的滞留效应受多重因素的共同影响^[19]. BORTOLIN等^[20]探究不同汇水面积比对雨水花园地表径流削减功能的影响, 发现雨水花园面积在汇水面积中的占比越大, 滞留效应越明显, 这与本研究结果相似. 不同的LID组合方式也会对滞留效应造成影响^[21]. 有研究发现, 结构复杂的LID组合在面对不同强度的降雨冲刷时, 可以表现出更好的水文滞留效应^[22-23]. 组合内部的LID设施之间互相影响, 它们对地表径流的整体滞留效果往往更优于各单位滞留效果的简单叠加^[24].

2.2 滞后效应

本研究分别从降雨结束到产流结束的滞后时间(t_2)、质心位置的滞后时间(t_3)和峰值位置的滞后时间(t_4)3个方面评估LID组合对降雨事件的滞后效应.

t_2 表现为降雨过程结束后LID设施仍保持产流状态的时长. 降雨结束到产流结束时间的滞后对于蓄存雨水有缓释作用, 也能有效涵养城市水体和局部气候. 本研究中各LID组合降雨结束到产流结束的滞后时间分布如图8. 其中, LID1降雨结束到产流结束的滞后时间范围是11~290 min, 平均滞后101 min; LID2降雨结束到产流结束的滞后时间范围是12~289 min, 平均滞后102 min; LID3降雨结束到产流结束的滞后时间范围是34~259 min, 平均滞后116 min. 3种LID组合均能有效滞后降雨结束到产流结束的时间.

t_3 可以从降雨过程和产流过程的整体水平评估LID设施的滞后效应. 本研究中各LID组合质心位置的滞后时间分布如图9. 其中, LID1的质心位置滞后时间范围是9~118 min, 平均滞后39 min; LID2的质心位置滞后时间范围是-7~138 min, 平均滞后38 min. 统计中存在径流质心时刻提前于降雨质心时刻的情况, 这是因为该场次降雨事件的ADP较小, 本次径流过程还受到了前一场降雨事件的影

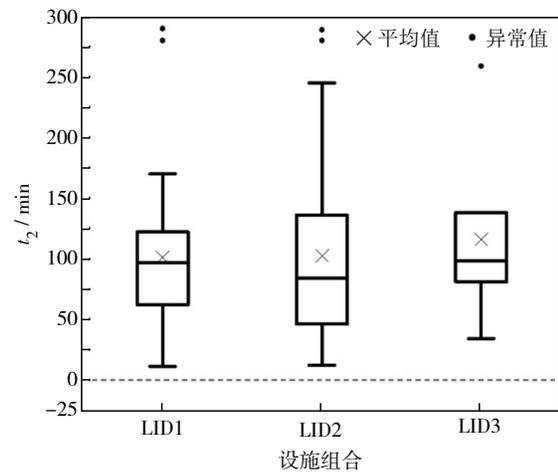


图8 三种LID组合的降雨-产流停止的滞后时间分布
Fig. 8 Distribution of lag times from the end of rainfall to runoff in three LID combinations

响; LID3的质心位置滞后时间范围是20~119 min, 平均滞后68 min. LID3质心位置平均滞后时间分别是LID1的1.76倍和LID2的1.80倍, 表明LID3对降雨过程整体的滞后时间比LID1和LID2的长.

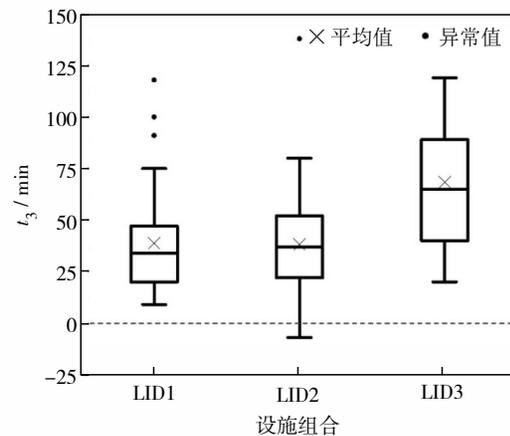


图9 三种LID组合的质心位置滞后时间分布
Fig. 9 Distribution of lag times for centroid position in three LID combinations

t_4 可以表征LID设施在不同瞬时降雨强度冲击下的滞后效应. 本研究中各LID组合峰值位置的滞后时间分布如图10. 其中, LID1的峰值位置滞后时间范围是-3~39 min, 平均滞后14 min; LID2的峰值位置滞后时间范围是-4~58 min, 平均滞后13 min. 统计中存在径流峰值提前于降雨峰值发生的情况, 这是因为该场次降雨事件中, 前期的平均降雨强度较大但是雨量峰值出现在降雨过程后期, 导致径流峰值主要响应的是前期的降雨过程而非后期的降雨峰值; LID3的峰值位置滞后时间范围是5~

75 min, 平均滞后 35 min. LID3 的峰值位置平均滞后时间分别高于 LID1 的 2.40 倍和 LID2 的 2.60 倍, 表明在应对降雨峰值冲击时, LID3 能更有效地延缓产流峰值的产生.

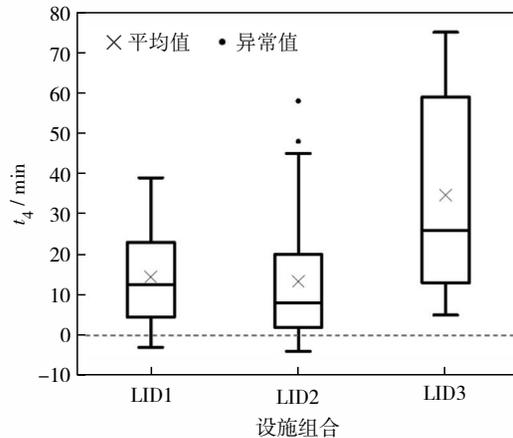


图 10 三种 LID 组合的峰值位置滞后时间分布
Fig. 10 Distribution of lag times for peak position in three LID combinations

研究还发现, 同一种 LID 组合的质心位置平均滞后时间大于其峰值位置平均滞后时间, 其中, LID1、LID2 和 LID3 的质心滞后效应分别是峰值滞后效应的 2.68、2.26 和 1.97 倍. 这是因为在降雨

事件中, 峰值属于瞬时量, 降雨的峰值效应在径流产流中反馈迅速, 通常当降雨出现峰值后, 径流中也将较快出现对应的产流峰值; 而质心是相对于整个降雨过程和产流过程而言, LID 设施对雨水的滞留效应明显, 降雨历时较短的暴雨, 其产流历时可能很长且质心位置偏后, 故质心位置滞后时间相比于峰值位置滞后时间更长. 而降雨结束到产流结束的滞后时间均值同样大于质心位置和峰值位置的滞后时间均值. LID 设施具备良好的滞蓄和排水功能, 产流结束时间的延长进一步放大了 LID 组合对雨水的滞后效应优势, 能够有效调节城市地区的水资源布局.

从图 1 至图 10 还可以发现, LID3 在降雨开始到产流开始的累积雨量、质心位置滞后时间、峰值位置滞后时间等滞后效应指标方面优于 LID1 和 LID2, 而 LID1 和 LID2 的滞后效应相差不大, 推测上述 3 种滞后效应指标与 LID 组合在汇水区域内的面积占比及其设施种类和数量等因素相关.

2.3 降雨条件对滞留和滞后效应的影响

以 LID1、LID2 和 LID3 三种 LID 组合共计 80 场降雨-产流事件为研究对象, 分析场次降雨条件对 LID 组合滞留效应和滞后效应的影响并作相关性分析, 结果分别见表 3 和表 4.

表 3 场次降雨条件与滞留效应的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between rainfall characteristics and retention effect

效应指标	LID 组合	降雨历时	场次降雨量	峰值位置	平均降雨强度	ADP
径流滞留量	LID1	0.278 ¹⁾	0.968 ¹⁾	0.305	-0.063	-0.109
	LID2	0.276	0.946 ²⁾	-0.073	-0.007	-0.119
	LID3	-0.151	0.620 ¹⁾	0.201	0.485	0.440
径流滞留率	LID1	-0.073	-0.599 ¹⁾	-0.210	0.145	0.216
	LID2	0.078	-0.592 ²⁾	0.255	-0.074	0.044
	LID3	-0.579 ¹⁾	-0.525 ¹⁾	-0.230	0.375	0.173
Q_0	LID1	-0.071	0.309	-0.406 ¹⁾	0.523 ²⁾	0.641 ²⁾
	LID2	0.202	0.457 ²⁾	-0.285	0.453 ²⁾	0.651 ²⁾
	LID3	0.378	0.831 ¹⁾	-0.066	-0.121	0.104

¹⁾在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ²⁾在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

LID 组合的滞留效应主要受场次降雨量影响. 这体现在 3 种 LID 组合中, 径流滞留量均与场次降雨量显著正相关, 而径流滞留率均与场次降雨量显著负相关. LID 组合的滞留效应受降雨历时、平均降雨强度和峰值位置等雨型特征的影响不显著.

降雨开始到产流开始的累计降雨量 Q_0 被认为和降雨事件发生前 LID 设施内部的干湿条件有关. 在

本研究中, Q_0 在 LID1 和 LID2 中与 ADP 显著正相关. ADP 越大表明 LID 组合内部的干旱条件越明显, 对下一场降雨事件初期雨水的滞留能力表现越强, 故当发生径流产流时, 产流前累积的降雨雨量越大. 降雨开始到产流开始的累积雨量与场次降雨量在 LID1 和 LID2 中均表现出显著正相关性, 在 LID2 中也与场次降雨量显著正相关, 表明 LID 组合

在强暴雨的条件下可以表现出更加显著的前期滞留效果. 在LID1中, 降雨开始到产流开始的累积雨量与降雨峰值位置显著负相关, 降雨过程中峰值位置越靠前, 初期累积雨量越大, 这可以理解为, 降

雨开始阶段LID组合内蓄水量尚未达到饱和水量因而蓄水空间更大, 此时面临峰值冲击能表现出更好的滞后效应.

表4 场次降雨条件与滞后效应的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between rainfall characteristics and lag effect

效应指标	LID组合	降雨历时	场次降雨量	峰值位置	平均降雨强度	ADP
t_2	LID1	0.525 ²⁾	0.258	0.410 ¹⁾	-0.091	-0.198
	LID2	0.610 ²⁾	0.488 ²⁾	0.446 ²⁾	0.082	-0.166
	LID3	0.794 ¹⁾	0.285	0.491	-0.617	-0.243
t_3	LID1	0.389 ¹⁾	0.517 ²⁾	0.349 ¹⁾	0.055	-0.225
	LID2	0.671 ²⁾	0.551 ²⁾	0.509 ²⁾	-0.021	-0.062
	LID3	0.842 ¹⁾	0.112	0.556	-0.904 ²⁾	-0.213
t_4	LID1	-0.214	-0.307	-0.473 ²⁾	-0.352 ¹⁾	0.081
	LID2	0.006	-0.023	-0.415 ¹⁾	-0.080	0.013
	LID3	0.409	-0.228	-0.320	-0.768 ¹⁾	0.518

¹⁾在0.05水平(双侧)上显著相关; ²⁾在0.01水平(双侧)上显著相关.

在3种LID组合中, 降雨结束到产流结束的滞后时间 t_2 均与降雨历时呈显著正相关, 表明在历时越长的降雨事件中, LID组合的产流延长时间也可能越长. 在LID1和LID2中, t_2 的滞后效应还与峰值位置呈显著正相关. 这可能是因为当峰值发生在降雨过程后期时, 原本蓄水已趋近饱和的LID设施为缓解峰值冲击需要持续延长产流过程, 导致降雨历时和产流历时的差值进一步增大. 在LID2中, 还发现 t_2 也与场次降雨量显著相关. 因此, LID组合在历时较长、雨峰靠后且雨量较大的降雨事件中能表现出更加优越的产流时间延长效益.

质心位置滞后效应可以从整体上评估LID组合对降雨过程的滞后效应. 在3种LID组合中, t_3 与降雨历时均呈显著正相关; 在LID1和LID2中, t_3 还与场次降雨量和峰值位置呈显著正相关. 因此, LID组合在历时较长、雨量较大且峰值位置靠后的降雨事件中可以表现出显著的整体滞后效果.

在LID1和LID3组合中, t_4 与降雨事件的平均降雨强度显著负相关, 表明LID组合在中小强度的降雨事件中能更加有效地滞后径流峰值的发生, 这与张曼等^[25]报道的LID措施在低重现期降雨条件下能更有效地延迟峰现时间的结论一致. 同时, 在LID1和LID2中, 峰值滞后效应也与峰值位置表现出显著正相关. 这可能是因为峰值发生在降雨前期时, LID组合内蓄水空间未饱和能更有效地缓解峰值冲击有关. 这与2.3节提及的降雨开始到产流开始的累积雨量与峰值位置负相关的原因一致.

3 结 论

针对深圳低影响开发小区内3种不同结构的LID组合, 开展2016—2019年190场次降雨事件的径流监测实验, 通过对降雨气象数据和径流流量数据的统计学分析, 评估了3种LID组合对降雨雨量的滞留作用, 并重点研究和比较了三者的径流滞后效应, 探究了降雨条件对滞后效应指标的影响. 研究得出:

1) 低影响开发小区内LID组合对降雨雨量有明显的滞留作用, 其对雨水径流的总滞留量为690.8~1408.3 mm, 总径流削减率为75.0%~86.5%, 完全削减降雨量为127~975 mm, 平均滞留2.2~9.9 mm的累计降雨量后才开始产流. 滞留效应受LID组合类型的影响, 在汇水区域内透水面积占比和LID设施面积占比更高、LID设施数量和种类更多的组合表现出更高的平均滞留率, 具有更高的雨水滞留饱和量, 在场次降雨量较大的降雨条件下仍能表现出较好的径流滞留效应;

2) LID组合对降雨事件的滞后效应显著, 能推迟径流产流的停止时间为101~116 min, 显著滞后降雨质心位置为39~68 min, 滞后降雨峰值位置为13~35 min;

3) 低影响开发组合的滞留效应和滞后效应与降雨条件有关. 在场次降雨量较大的降雨事件中, LID组合的径流滞留效应较明显; 雨前干旱期越

长, 降雨开始到产流开始的累积雨量越大; 降雨历时越长、场次降雨量越大, 停止产流时间和质心位置的滞后越明显; 而峰值的滞后效应在中小强度的降雨条件下表现显著, 且降雨过程中峰值位置越靠前, 峰值的滞后效应越明显.

从统计分析学角度评估低影响开发小区内 LID 组合对降雨雨量的滞留和滞后效应, 从径流的启动、达峰、结束和质心偏移等完整过程作系统分析. 研究结果可完善对 LID 组合滞后效应的理论与实践研究, 为低影响开发滞后效应的后续研究提供思路, 也为评估 LID 设施的滞后效应提供了方法参考. 由于 LID 的滞后效应受到多种复杂因素共同影响, 在下一步研究中需增加更多气候区和更多样点的观测, 以更加准确地描述各因素与滞后效应的关系.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52070003); 深圳市基础研究计划资助项目 (JCYJ20200109120416654)

作者简介: 银翼翔 (1995—), 北京大学硕士研究生. 研究方向: 海绵城市建设的生态理论与方法.
E-mail: 772596220@qq.com

引 文: 银翼翔, 秦华鹏, 余淑琦, 等. 低影响开发小区降雨径流的滞留与滞后效应[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(2): 142-151.

参考文献 / References:

- [1] 车 伍, 杨 正, 赵 杨, 等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(16): 13-19.
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China [J]. China Water and Wastewater, 2013, 29(16):13-19. (in Chinese)
- [2] 王建龙, 车 伍, 易红星. 基于低影响开发的都市雨洪控制与利用方法[J]. 中国给水排水, 2009, 25(14): 6-9, 16.
WANG Jianlong, CHE Wu, YI Hongxing. Low impact development for urban stormwater and flood control and utilization [J]. China Water and Wastewater, 2009, 25(14): 6-9, 16. (in Chinese)
- [3] 刘 建, 龚小强, 任心欣, 等. 深圳市海绵城市的建设与创新[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(4): 334-346.
LIU Jian, GONG Xiaoqiang, REN Xinxin, et al. Sponge city construction and innovation in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 334-346. (in Chinese)
- [4] 彭世瑾, 胡爱兵, 史敬华, 等. 基于深圳典型片区海绵城市监测评估的思考[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(1): 1-9.
PENG Shijin, HU Aibing, SHI Jinghua, et al. Reflection on the sponge city monitoring and evaluation in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 1-9. (in Chinese)
- [5] 杨亚红, 闫俊江, 蔚 阳, 等. 校园低影响开发渗透性能及成因模拟分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(4): 362-371.
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)
- [6] 唐双成, 罗 纨, 贾忠华, 等. 雨水花园对暴雨径流的滞留效果[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 787-794.
TANG Shuangcheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Effect of rain gardens on storm runoff reduction [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 787-794. (in Chinese)
- [7] SHRESTHA P, HURLEY S E, WEMPLE B C. Effects of different soil media, vegetation, and hydrologic treatments on nutrient and sediment removal in roadside bioretention systems [J]. Ecological Engineering, 2018, 112: 116-131.
- [8] 李海燕, 魏 鹏, 贾朝阳, 等. 渗排植被浅沟应用于处置路面径流案例分析[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 821-826.
LI Haiyan, WEI Peng, JIA Chaoyang, et al. Case analysis of grass swale-perforated pipe system in treating road runoff [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(3): 821-826. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] GAO Jie, WANG Rusong, HUANG Jinlou, et al. Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: case study in an industrial area [J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 177-183.
- [11] HUANG Tielan, WANG Yunpeng, ZHANG Jinlan. Simulation and evaluation of low impact development of urban residential district based on SWMM and GIS [C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, [s. l.]: IPO Publishing Ltd., 2017, 74(1): 012009.
- [12] 段明印, 李传奇, 韩典乘, 等. 基于暴雨管理模型

- (SWMM)的水生态小区低影响开发(LID)技术效果模拟及评估[J]. 净水技术, 2018, 37(2): 31-37.
- DUAN Mingyin, LI Chuanji, HAN Diancheng, et al. Simulation and assessment of LID technological benefit for water ecological community based on SWMM model [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(2): 31-37. (in Chinese)
- [13] XIA Jun, WANG Hongping, STANFORD R L, et al. Hydrologic and water quality performance of a laboratory scale bioretention unit [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2017, 12(1): 14.
- [14] 景瑞瑛, 卢巧慧, 黄奕龙, 等. 城市更新区海绵改造对降雨径流的控制研究[J]. 中国水利, 2021(5): 43-45, 39.
- JING Ruiying, LU Qiaohui, HUANG Yilong, et al. Study on control of rainfall runoff by sponge transformation in urban renewal zones [J]. China Water Resources, 2021(5): 43-45, 39. (in Chinese)
- [15] HOOD M J, CLAUSEN J C, WARNER G S. Comparison of stormwater lag times for low impact and traditional residential development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(4): 1036-1046.
- [16] HUANG C L, HSU N-S, LIU H-J, et al. Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 542-558.
- [17] GUO Xiaochen, GUO Qizhong, ZHOU Zikai, et al. Degrees of hydrologic restoration by low impact development practices under different runoff volume capture goals [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124069.
- [18] DINGMAN S L, Physical hydrology [M]. 2nd ed. New York, USA: Macmillan, 2002.
- [19] GOLDEN H E, HOGHOOGHI N. Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science [J]. Wires Water, 2018, 5(1): 1254.
- [20] BORTOLINI L, ZANIN G. Hydrological behaviour of rain gardens and plant suitability: a study in the Veneto plain (north-eastern Italy) conditions [J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2019, 37: 74-86.
- [21] 王金鑫. 基于SWMM住宅小区LID措施降雨径流削峰及控污功效研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- WANG Jinxin. Research for the effect of controlling pollution and peak runoff in residential area based on SWMM [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [22] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36.
- CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measure for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese)
- [23] 朱培元, 傅春, 肖存艳. 基于SWMM的住宅区多LID措施雨水系统径流控制[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 10-13.
- ZHU Peiyuan, FU Chun, XIAO Cunyan. Runoff control of multiple LID facilities rainwater drainage system in residential area based on SWMM [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3): 10-13. (in Chinese)
- [24] 周亚玲, 叶兴成, 王飞, 等. 低影响开发措施综合布设条件下区域径流削减效果[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4): 18-21.
- ZHOU Yaling, YE Xingcheng, WANG Fei, et al. Reduction effect of regional runoff under conditions of comprehensive layout of low impact development [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(4): 18-21. (in Chinese)
- [25] 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 Man, ZHOU Keke, ZHANG Ting, 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)

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 之聿】