

“低影响开发”对暴雨径流影响模拟分析： 以三亚某海绵小区为例

■ 朱梅 何君涛 黎江少 冯志挺 高芳嘉 方勉

以三亚市某采用低影响开发（LID）建设的小区为研究对象，采用暴雨洪水管理模型（SWMM）模拟了研究区域在开发建设前、传统开发和采用低影响开发设施3种不同场景下，面对不同重现期设计暴雨条件下的径流过程，结果表明，采用LID措施后，不同重现期下的径流量及高峰径流值较传统开发均有所减小，但是随着重现期的增加，径流削减率和高峰径流削减率均呈现减小趋势。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.025

城市化的快速发展造成下垫面性质的改变，硬化路面面积的增加和不透水面积的增加成为影响城市水文过程的重要因素，同时也使城市在遭受暴雨袭击时，易出现“径流大、洪峰早、峰值高”的特点，加之我国城市排水设计标准较低，当雨水流量超过城市排水系统的排水能力时，就出现了城市“看海”的窘境，严重影响人民的生产和生活正常运行。

国外对此类问题的探索研究始于20世纪60年代，如澳大利亚的“水敏感性城市设计”、美国的“低影响开发”雨水综合利用、日本的“雨水贮留渗透计划”等。我国在总结国外城市雨洪管理经验的基础上，结合我国基本国情提出了一种可持续发展的城市建设理念——海绵城市，通过运用渗、滞、蓄、净、用、排等工程和非工程措施，提高城市对雨水径流的下渗、滞蓄、净化、利用和排放能力，实现城市水文系统的良性循环，维持或恢复城市的海绵功能。

本文选取三亚市某海绵小区为研究对象，利用暴雨洪水管理模型（SWMM）研究该小区在开发建设前、传统开发、采用低影响开发（LID）措施三种情景，设计不同暴雨条件下对城市雨洪的控制效果，以期三亚海绵城市建设提供理论依据和技术指导。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

2016年，三亚市入选第二批全国海绵城市建设试点城市，这与三亚市打造全国生态文明示范城

市相辅相成，也为保护三亚市绿水青山、生态环境助力。三亚市属热带海洋性季风气候，年均降雨量1392.2 mm，降雨主要集中在5—10月，占全年降雨量90%。6—11月受热带气旋影响较多，易出现强降水并造成城市内涝。研究区是三亚市海绵城市试点区域，位于三亚市中心城区，具有较好的代表性。该新建小区总用地面积为39811.5 m²，图1为该小区平面图。



图1 研究区平面图

1.2 研究方法

SWMM是美国环境保护署（EPA）于20世纪70年代为解决日益严重的城市非点源污染而推出的城市暴雨水量水质预测和管理模型，SWMM是一个基于手动

收稿日期：2019年9月4日；修回日期：2020年6月11日

第一作者：朱梅（1988—），Email: 894855279@qq.com

通信作者：何君涛（1975—），Email: 2924933876@qq.com

资助信息：海南省气象局青年基金项目（HNQXQN201804）

力学的降雨-径流模拟模型，主要用于城市区域内单一或长期降雨序列的径流量和水质的模拟，后续经过不断地更新完善，SWMM如今可以通过对不同LID设施进行参数设置，实现对径流流量、径流峰值及水质影响的研究。目前，应用SWMM进行低影响开发设施计算模拟已相当广泛。

2 模型构建

2.1 研究区域概化

对研究区域模型概化时，可分三个步骤进行：确定研究区域范围、排水管网概化和子汇水区划分。根据这一方法，结合研究区域红线、地形及室外排水管网图，综合考虑屋面、绿地、室外硬质路面等下垫面的径流特征后将研究区概化为242个汇水子区域，45个节点，45个管段和5个排放口（图2）。

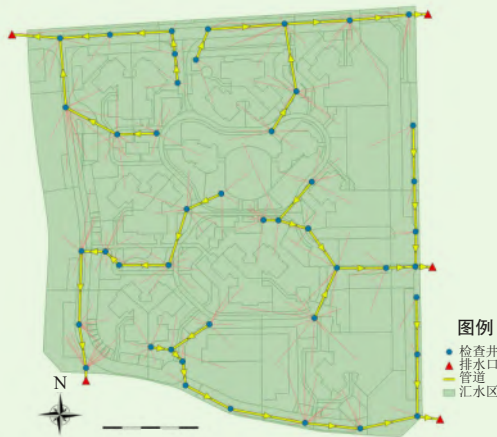


图2 研究区概化图



图3 海绵设施分布平面图

2.2 LID设施布设

SWMM5.1模型中LID模块提供了渗透铺装、生物滞留设施、渗透渠、雨水罐、雨水花园、绿色屋顶、植草沟等七种不同的雨水处理技术。本文根据低影响开发尽量减少不透水表面积的原则，结合研究区域土壤特性、坡度、汇水面积等特征，并参考各LID设施的适用范围，最终确定的LID设施为：生物滞留带、透水铺装、下凹式绿地、生态停车场和植草格。各低影响设施规模如表1所示。各低影响设施布局如图3所示。

表1 各LID设施规模

LID设施	生物滞留带	透水铺装	下凹式绿地	生态停车场	植草格
面积/m ²	986	4973	2681	2310	2233

2.3 模型参数设置

基于SWMM模型，对模型中基本参数进行设置，其中入渗模型、产流模型、汇流模型、水力模型等相关设定见表2。

低影响相关参数如汇水区的面积、坡度、渗透性N值、不透水性洼地蓄水、渗透性洼地蓄水、无洼地蓄水等参数来源于项目的设计资料，其他参数借鉴SWMM用户手册。

2.4 设计降雨过程线

不同雨型（即不同降雨强度过程）对地面径流过程有重要影响。目前，常用的计算雨型的方法有芝加哥雨型、Huff雨型、Pilgrim & Cordery雨型和三角雨型等。其中，应用芝加哥雨型在城市雨水径流模拟中取

表2 SWMM模型参数取值

参数名称	参数取值
坡度/%	0.5
不透水区/%	60
不透水曼宁系数	0.03
透水曼宁系数	0.015
不透水区注蓄量/mm	3.5
透水区注蓄量/mm	6.5
最大下渗速率/(mm·h ⁻¹)	76.2
最小下渗速率/(mm·h ⁻¹)	3.81
衰减常数/h ⁻¹	0.75
排干时间/d	4

得的效果较好，因此本文采用芝加哥雨型法对三亚市短历时暴雨雨型进行设计。

模拟需要的降雨数据根据芝加哥雨型方法，结合三亚市暴雨强度公式得到不同重现期的芝加哥雨量过程线。本研究中取降雨重现期(P)选择1、3、5、10 a，降雨历时选择1 h，雨峰系数选择0.4，降雨时间间隔选择1 min，得到芝加哥降雨过程线(图4)。

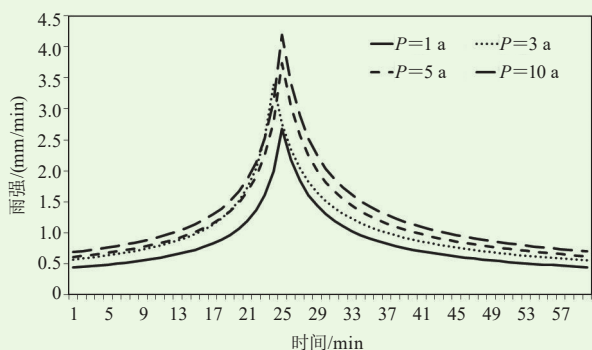


图4 不同重现期下芝加哥雨型降雨过程线

3 结果

本研究分三种情景方案进行模拟分析，分别是开发前、传统开发和采用LID设施。开发前的方案是将研究区的下垫面类型设定为绿地，模拟其在开发前的原始水文过程。传统开发方案是研究区域未采取LID方案进行建设、采用LID设施方案为按照预先设计的LID措施，在SWMM模型中布设生物滞留带、透水铺装、下凹式绿地、生态停车场和植草格等5种LID组合措施。

模拟过程采用动力波进行流量演算。模型参数主要包括汇水区、管段、节点以及低影响设施相关参数。汇水区的面积、坡度、不渗透性N值、渗透性N值、不渗透性洼地蓄水、渗透性洼地蓄水、无洼地蓄水、子面积演算等参数源于项目的设计资料，具体取值见表2。产流计算过程选用Horton入渗模型。LID设施中的下凹式绿地、生物滞留带的蓄水层深度分别设

定为150、300 mm。

通过SWMM模拟发现，重现期为1年一遇、3年一遇、5年一遇和10年一遇不同降雨情况下(图5)，研究区域在开发建设前的径流量依次为303.71、630.13、833.00和1120.00 m³；而在传统开发模式下，由于不透水面积的增加，降雨径流的下渗随之减小，径流量分别增加至864.79、1262.60、1439.00和1679.96 m³，相对开发建设前分别增加了2.85、2.00、1.73和1.50倍；采用LID措施后径流量分别是389.98、763.0、953.87和1200.01m³，相对于开发前来说，径流量分别增加了28.40%、21.09%、14.51%和7.17%。相较于传统开发，径流量分别降低了54.91%、39.57%、33.71%和28.56%，这表明随着雨强的增加，LID设施的布设对径流量的削减有所增加，但是径流削减率却不断降低，这表明LID措施对雨洪的调蓄作用有限，其对重现期较低的暴雨雨洪控制作用更加明显，而在高重现期暴雨条件下，LID设施对雨水的下渗、滞留达到饱和状态后，溢流的雨水同样会对排水管网带来压力。

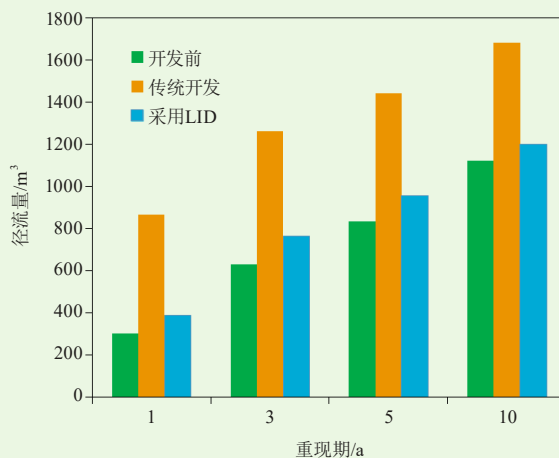


图5 不同重现期下径流量

图6所示为不同重现期设计暴雨情况下，研究区域出流总量过程线，结合表3可以发现，重现期为1、3、5、10 a时，在传统开发条件下，峰值流量分别为577.74、943.15、1062.1、1194.66 L/s，采用LID设施后的峰值流量分别为175.3、412.93、597.19、824.43 L/s，峰值削减率分别为69.66%、56.22%、43.77%、31.00%，既随着重现期的增加，峰值削减率逐渐减小。重现期为1、3、5、10 a时，传统条件下流量峰值出现在27、27、27、26 min，采用LID措施后的流量峰值出现在45、37、34、32 min，较传统开发的峰值时间延迟了6~18 min。由此可见，研究区域在传统开发条件下，不透水硬化面积的增加，水文过程

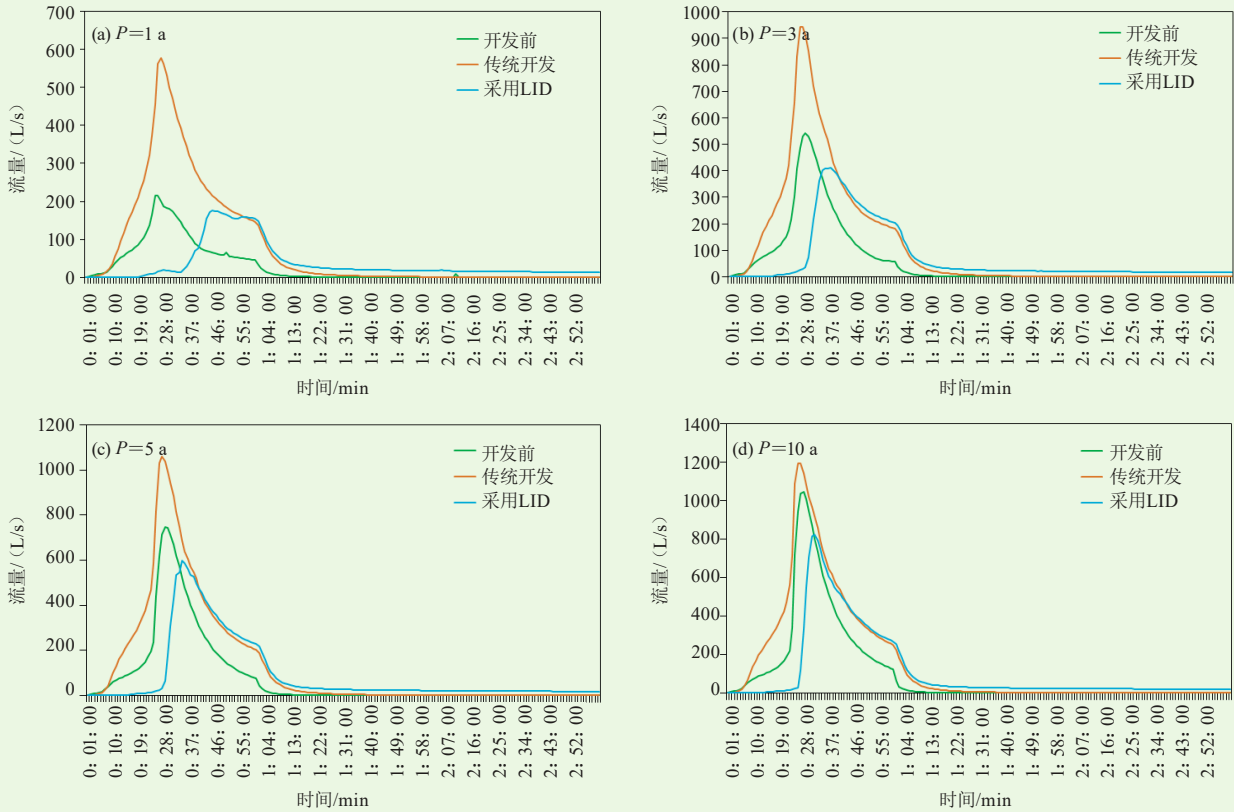


图6 不同重现期3种情景下总径流过程线

表3 有无LID设施下的峰值流量削减效果

重现期/a	有无LID	降雨量/mm	峰值流量 / (L/s)	最大峰值时刻	峰值削减率 /%
1	无	50.08	577.74	00:27	69.66
	有	50.08	175.3	00:45	
3	无	63.65	943.15	00:27	56.22
	有	63.65	412.93	00:37	
5	无	69.96	1062.1	00:27	43.77
	有	69.96	597.19	00:34	
10	无	78.52	1194.66	00:26	31.00
	有	78.52	824.43	00:32	

随之改变，排放口的峰值流量迅速增加，从而增加了排放口排水压力。采用LID设施后，暴雨前期的雨水通过LID设施下渗滞留，排放口的流量过程线峰值出现时间较传统开发明显滞后，且流量峰值已经明显削弱。但是随着重现期的增加，降雨量的增大，LID设施对峰值削减率降至31.00%，这与研究区域的产流量超过排水管网的排水能力有关。因此，在采取LID设施进行雨洪控制的同时，对排水管网的优化也是行之有效的方之一。

以上分析表明，生物滞留带、透水铺装、下凹式绿地、生态停车场和植草格这5种LID组合措施，不仅能依靠植物根系截留吸收一部分径流，从而起到截

留、储蓄作用；还可以通过增大透水面积，从而增加下渗率、延长径流时间、增大径流下渗量。LID设施的布设有效降低了场地径流量和径流峰值量，从而使城市传统雨水管网系统的排水压力降低。尤其是在重现期较低的情况下，LID措施对城市雨洪的削减、滞留效果更加明显。

深入阅读

- Gironas J, Roesner L A, Rossman L A, et al, 2010. Analyses of urban drainage network structure and its impact on hydrologic response. *Journal of the American Water Resource Association*, 46(5): 932-943.
- 胡爱兵, 任心欣, 裴古中, 2015. 采用SWMM模型模拟LID市政道路的雨洪控制效果. *中国给水排水*, 31(23): 130-133.
- 康宏志, 郭祺忠, 练继建, 等, 2017. 海绵城市建设全生命周期效果模拟模型研究进展. *水力发电学报*, 36(11): 82-93.
- 刘洁, 张翔, 陈华, 等, 2018. 基于SWMM低影响开发模块的城市雨洪模拟与分析. *水资源研究*, 7(2): 182-189.
- 马箭, 沙晓军, 徐向阳, 等, 2015. 基于SWMM模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟. *水电能源科学*, 33(9): 53-57.

(作者单位: 朱梅, 何君涛, 高芳嘉, 方勉, 海南省三亚市气象局, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室; 黎江少, 海南华科博创环境技术有限公司; 冯志挺, 海南省屯昌县气象局, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室)