

南京市鼓楼区 LID 空间配置与雨洪调控效益研究

李沐寒¹, 尹海伟¹, 孔繁花², 刘佳³, 仇是¹

(1. 南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023; 3. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 低影响开发(LID)能够实现源头径流控制,已成为缓解城市内涝的重要策略。以南京市鼓楼区为例,运用GIS和SWMM模型构建LID的空间配置方案,并在城市尺度上模拟分析5个降雨事件下LID组合方案的雨洪调控效应,最后基于费效比方法定量评价成本效益。结果表明:研究区LID的适建面积占总面积的16.33%,其结果可为LID规划建设所参考;LID建设后地表径流系数平均可减少0.26,但随降雨重现期的增加径流削减率总体呈递减趋势;LID的雨洪调控效应受诸多降雨特征及LID自身属性特性的多重交互影响;屋顶绿化+透水铺装组合的成本效益最好,包含生物滞留池的方案成本效益相对偏低,综合来看屋顶绿化+透水铺装+生物滞留池+植草沟方案建设潜力最大。研究结果可为城市尺度上LID的空间规划、海绵城市建设和城市雨洪管理提供决策参考和案例借鉴。

关键词: 海绵城市; SWMM; LID空间配置; 雨洪调控效应; 成本效益

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0030-09

Research on spatial distribution and stormwater regulation benefits of low impact development in Gulou District, Nanjing, China

LI Muhān¹, YIN Haiwei¹, KONG Fānhua², LIU Jia³, QIU Shi¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Low impact development (LID) can control the source flow and has been one of the most important strategy to release urban flood disasters. This study used the Stormwater Management Model (SWMM) as a modelling tool to assess the spatial distribution of LID for stormwater runoff control in Gulou District, Nanjing City. The simulation results indicated that: the suitable area of LID accounted for 16.33% of the total area, which have a significant impact on runoff; The net flow coefficient can be reduced by an average of 0.26. With the increase of rainfall period, the efficiency of runoff reduction was decreasing. The flood peak increases with the increase of rainfall intensity and the scale of LID in general. With the increase of rainfall period, the efficiency of flood peak reduction was decreasing slowly. The combination of green roof and permeable pavement has the best cost-effectiveness, while the scheme including bio-detention pool has relatively low cost-benefit. In general, the scheme of green roof + permeable pavement + bio-detention pool + grass ditch has the greatest potential. This study can provide decision-making references and case references for LID's spatial planning, sponge city construction and urban storm water management on an urban scale.

Key words: Sponge City; SWMM (stormwater managemet model) model; LID spatial distribution; stormwater control effect; cost-effectiveness

收稿日期: 2019-01-19; 修回日期: 2019-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670470, 51878328, 51478217)

作者简介: 李沐寒(1995-), 女, 河北邯郸人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为城市生态规划与海绵城市规划。

通讯作者: 尹海伟(1978-), 男, 山东青州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为城市生态规划。

1 研究背景

快速城市化导致区域气候与自然地表发生明显变化,引起更为频繁的降雨,不仅增加了城市洪涝灾害发生的风险,也加剧了城市水污染程度,已严重影响城市居民的生活品质^[1]。为应对城市雨洪带来的一系列生态环境问题,反思基于灰色基础设施(Gray Infrastructure)“以排为主、视雨洪为灾害”的传统管理理念,许多国家提出了“将雨水转化为资源”的新型城市雨洪管理理念^[2-5]。其中,LID 因具有规模小、布置分散、种类丰富和可行性高等特点和模仿地表天然水文状态、增加透水面、减少地表径流、增加城市水系统弹性的功能^[6-8],目前已在美国、加拿大和我国等许多国家得到广泛应用与发展^[9-10]。

大量研究均表明,通过减少不透水面规模可有效调控城市地表径流^[11-13]。Kong 等^[14]基于 SWMM 模型对巴中新城多种开发建设情景下雨洪径流的模拟表明,减少直接连接不透水面(Directly Connected Impervious Area, DCIA)可有效降低地表径流量,但难使地表径流特征恢复到未开发水平。李春林等^[15]研究发现随着降雨重现期增大,LID 措施对径流的削减量逐渐增加。Tredway 等^[16]分析了 LID 建设方案对地表径流的渗透、蒸发和储存作用,结果表明适当的 LID 措施可显著减少洪峰流量。我国海绵城市研究历程较短,且相关研究多关注于实验场地或街区尺度的 LID 工程实施及水文环境效益评价,尚缺乏对较大尺度上 LID 雨洪调控效应的深入理解。美国环境保护署(USEPA)于 2009 年研发的城市降雨径流控制的模拟与分析整合系统(System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration, SUSTAIN)内置 BMP 选址工具,可根据 LID/BMP 环境约束条件对用地空间进行适应性选择,实现 LID 措施的空间优化配置^[17],解决了多数研究按照用地性质来确定 LID 的面积占比的不精确和难以有效指导空间规划的弊端^[18-19]。

此外,海绵城市建设涉及到工程、技术、预算、材料等多方面^[20],进入 21 世纪后关于 LID 建设成本与效益之间的讨论逐渐增多。李俊生等^[21]通过生命周期法计算了屋顶绿化的成本效率和费效比分别为 12.51 元/m³ 和 5/12,由此证明了屋顶绿化的建设潜力与价值。Huang 等^[22]将算法与 SWMM 模型结合,通过水文模拟和经济优化分析得到各 LID 技术的平均效率(单位成本的径流削减量)顺序为:屋顶绿化>生物滞留池>乔木箱>透水铺装>雨水桶>植草沟>渗透沟渠。然而,大多数研究局限于单

个 LID 设施的成本效益对比,对于城市片区 LID 组合应用的成本效益缺乏探讨。

基于此,本研究以南京市鼓楼区为例,根据研究区现状情况和 LID 实施的难易程度,选取了屋顶绿化(Green Roof)、生物滞留池(Biorentention)、透水铺装(Porous Pavement)和植草沟(Grass Swale)4 种 LID 措施,并基于 GIS 平台和 SUSTAIN BMP 选址工具,采用内置与自定义相耦合的约束条件设计了 4 种 LID 措施的空间优化配置方案,进而利用 SWMM 模型模拟分析了不同降雨事件下不同 LID 组合方案的雨洪调控效应,最后基于费效比(Return On Investment, ROI)方法评估了 LID 方案的成本效益,期为城市尺度上的海绵城市建设和城市雨洪管理提供决策参考和案例借鉴。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

鼓楼区位于南京市西北部,总面积 54.18 km²。根据研究区现状与研究目的,研究区下垫面被划分为水域、绿地、建筑、道路和其它用地 5 类(图 1),其中透水面面积(绿地和水域)占 35.3%,不透水面面积(建筑、道路和其它用地)占 64.7%。作为开发较早的城区之一,鼓楼区可利用土地资源十分紧张且现状各类用地高度混合。随着气候变化和不透水面持续增加,研究表明鼓楼区洪涝风险发生机率将会同步增加^[23]。因而,既能节约土地资源、提高城市景观品质,又可降低建设成本的 LID 措施成为缓解城市洪涝灾害问题的重要选择。

2.2 数据来源与预处理

研究数据主要包括 BMP 选址工具所需的各项基础数据(表 1),SWMM 模型水文模拟所需的降雨数据(表 2),以及南京市鼓楼区总体规划(2013-2030)中的道路和雨水管网等。

首先,基于 ArcGIS 软件平台,将表 1 中的相关数据进行配准、格式转换和数字化,建立具有统一坐标系的地理数据库。然后,为保证降雨数据的真实性,本研究采用自设的 HOBO U30 小型自动气象观测站 2016 年 5 月至 2017 年 4 月的实测降雨数据(原始数据存储间隔为 1 min,为缩短模拟计算的时间,将降雨数据采样步长处理为 10 min)。根据降雨事件间隔超过 6 h 作为独立降雨事件的划分标准^[24],观测时段内共有 79 个降雨事件。最后,根据南京市城市管理局公布的南京市暴雨强度公式(式 1),计算每场降雨的重现期(P),并综合考虑总降雨量、降雨强度、降雨

历时和重现期等降雨特征,遴选了 5 个降雨事件作为本文的降雨情景:S1($P < 1a$)、S2($2a < P < 3a$)、S3($3a < P < 4a$)、S4($4a < P < 5a$)和 S5($P > 5a$),各场降雨事件特征如表 2 所示。

$$i = \frac{64.300 + 53.800 \log P}{(t + 32.900)^{1.011}} \tag{1}$$

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

表 1 模型所需的数据及来源^[17]

数据类型	数据格式	数据来源及描述
研究区范围	Shapefile	南京市行政区划中的鼓楼区范围
影像地图	TIFF	研究区高空间分辨率的影像图(1m×1m)
DEM	GRID	15m×15m 的数字高程模型,用于计算排水区及排水坡度大小,选择适宜 LID 布置的场地
土地利用性质	GRID	由鼓楼区总体规划中的现状用地加实地调查所得,用于选择适宜 LID 布置的土地利用类型
透水率数据	GRID	由不同土地利用类型决定,用于选择适宜 LID 布置的场地透水率大小
道路分布	Shapefile	根据道路缓冲区选择 LID 适宜布置的场地
水流分布	Shapefile	根据水流缓冲区选择 LID 适宜布置的场地,减小对水流的影响
下垫面类型数据	Shapefile	城市下垫面类型数据包含建筑物的边界和为确定 LID 适宜位置所需的不透水区域

表 2 降雨情景及降雨特征

降雨情景	总降雨量/mm	平均降雨强度/(mm·min ⁻¹)	最大降雨强度/(mm·(10min) ⁻¹)	降雨历时/min	重现期 P/a
S1	40.1	0.035	2.0	1140	$P < 1$
S2	71.5	0.112	12.7	640	$2 < P < 3$
S3	88.1	0.022	2.1	4329	$3 < P < 4$
S4	91.4	0.025	9.6	3587	$4 < P < 5$
S5	103.2	0.043	6.8	2403	$P > 5$

2.3 研究方法

2.3.1 基于 BMP 选址工具的 LID 空间配置方案选择 SUSTAIN 中的 BMP 选址工具内嵌在 ArcGIS 软件平台中运行,因而其本质上是基于 GIS 空间分析

技术的用地适应性分析。首先,将研究区基础数据按照模型所需格式加载到 BMP 选址工具中。然后,采用模型内置参数和约束条件,进行 4 种 LID 措施的空间用地适宜性评价,得到其空间位置和用地规模分布图。最后,根据鼓楼区实际情况与相关研究,设置了 3 种自定义的约束条件(单体面积、单体宽度、用地性质)^[25-26],利用 GIS 空间分析工具对 4 种 LID 措施的空间配置进行进一步优化(表 3),实现内置与自定义约束条件的耦合,得到 4 种 LID 措施的最终空间优化配置方案(图 2(a)~2(d))。为了更清晰地说明空间优化配置方案对研究区具体 LID 措施规划建设的指导作用,选取汉中路与虎踞路交叉口地块作为案例进行了 LID 空间优化配置方案的详细说明(图 2(e))。

表 3 LID 位置选择适宜性特征参数

LID 类型	模型内置约束参数							自定义约束条件		
	排水区面积/hm ²	排水区坡度/%	不透水比例/%	道路距离/m	水系距离/m	建筑距离/m	土壤类型	单体面积/m ²	单体宽度/m	用地性质(其他条件)
屋顶绿化		<17.6						≥400	≥10.0	高度小于 12 层、非历史保护建筑、竣工时间小于 20 a
透水铺装	<1.21	<1.0	>0.0			>3.05	A~B	≥400	≥10.0	居住、商业、教育、工业类用地中铺装、广场、停车场用地
生物滞留池	<0.809	<5.0	>0.0	<30.5	>30.5	>3.05	A~D	≥400	≥10.0	公园、绿地
植草沟	<2.02	<4	>0.0	<30.5			A~D	≥1600	≥20.0	居住、教育用地等中等密度区

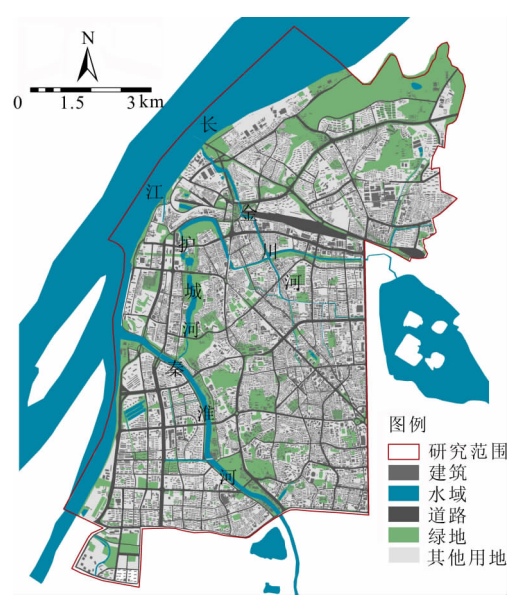


图 1 研究区下垫面概况图

2.3.2 SWMM 模型构建与参数率定 传统的城市开发建设方式会显著改变地表的微地形特征,进而对子汇水区的划分与地表径流特征产生重要影响。因而,科学划定汇水分区、快速提取相关水文参数是城市水文模型构建的重要基础。首先,由于长江与秦淮河的划分可将研究区分为 4 个汇水区(图 3a),基于研究区 1: 10000 地形图制作的 DEM,采用 ArcGIS 中的水文分

析工具进行流域分析,得到子汇水区初步划分结果。然后,综合考虑道路和排水管网建设(图 3(b))对微地表汇流特征的潜在影响,进一步细化和优化调整汇水区的初步划分结果,最终得到 230 个子汇水区(图 3(c))。其次,进行研究区 SWMM 水文模型的构建以及时间序列、汇水区属性和管网等参数的设置。模型下渗模式选择 Horton,汇水区汇流模式采用 Outlet 模式。最后,进行模型相关参数的率定。由于缺少降雨径流的实测数据而无法通过排放口出流实测值与模拟值进行参数校准和验证,因而本研究参考刘兴坡^[27]基于径流系数的城市降雨径流模型参数率定方法。根据《室外排水设计规范(2006)》^[28],建筑较密的居住区不透水面积百分率的参考值为 50% ~ 70%,综合径流系数的参考值为 0.5 ~ 0.7。鼓楼区不透水面占 64.7%,故本文取 0.6 作为综合径流系数校准结果。具体参数率定过程为:首先根据 SWMM 使用手册和相关文献的经验值预设参数初始值^[29];然后用 S3 情景的降雨数据进行模型模拟,将模拟后的径流系数与校准参数值进行对比,并不断调整参数至理想值(本文为 0.6,表 4);最后,为验证参数的稳定性,进行其余 4 个降雨情景的模拟,得到的径流系数分别为 0.525 (S1)、0.592 (S2)、0.610 (S4)和 0.614 (S5),均在参考值范围内,表明校准后的参数具有较好的稳定性和合理性。

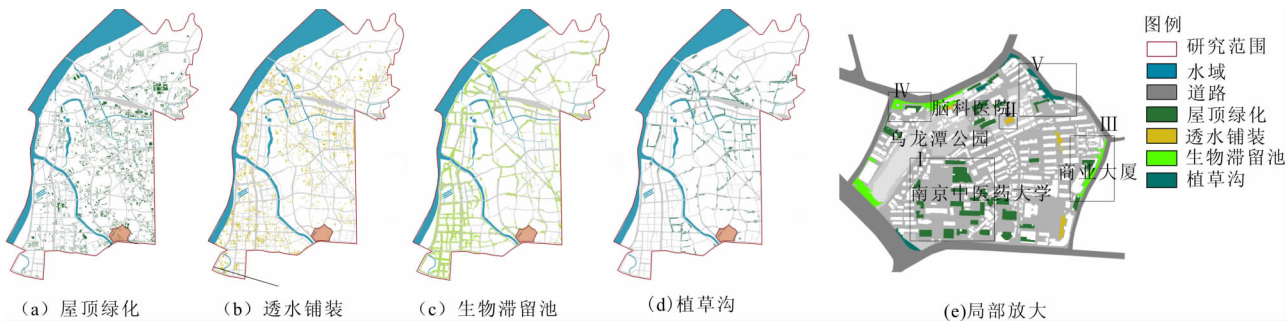


图 2 4 种 LID 措施的空间优化配置方案

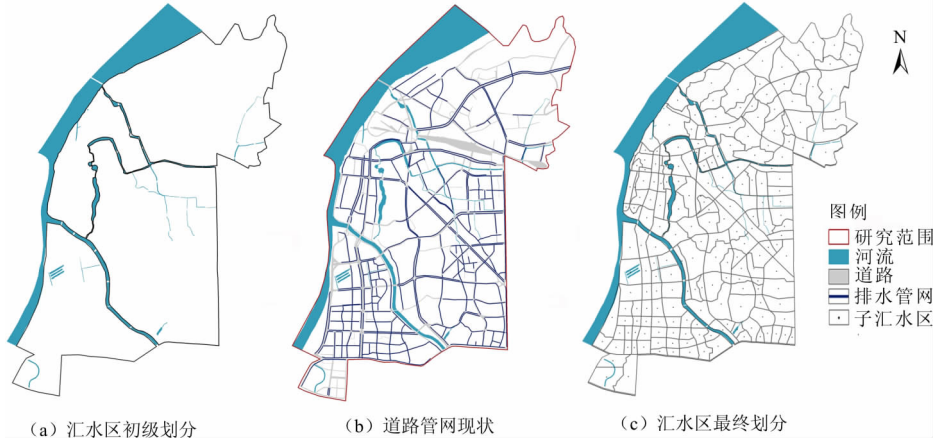


图 3 研究区汇水区划分

表 4 模型参数率定过程

参数类型	参数	初始值	第一次校准值	第二次校准值	第三次校准值	最终校准值
子汇水区	不渗透面积的曼宁系数	0.01	0.01	0.01	0.015	0.015
	渗透面积的曼宁系数	0.15	0.2	0.25	0.3	0.3
	不渗透性洼地蓄水深度/mm	1.27	1.5	1.6	1.7	1.8
	透性洼地蓄水深度/mm	2.54	2.5	2.8	3.5	3.8
	最大下渗速率/(mm·h ⁻¹)	59.5	60	60	60	60
	最小下渗速率/(mm·h ⁻¹)	3.5	3.0	2.5	2.5	2.2
	衰减常数	3	3	2	2	2
	排干时间/d	7	7	7	7	7
管段	曼宁系数	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
模拟径流系数		0.793	0.754	0.685	0.651	0.601

2.3.3 不同 LID 组合方案的雨洪调控效应模拟与评价 首先,根据 BMP 选址得到的研究区 LID 空间优化配置方案,结合不同 LID 措施的主要功能和研究区 LID 措施实施的难易程度,构建了 4 种 LID 措施的组合方案:(1)屋顶绿化+透水铺装、(2)屋顶绿化+生物滞留池+植草沟、(3)透水铺装+生物滞留池+植草沟、(4)全部 LID。然后,结合 SWMM 用户手册、相关文献及实际工程^[30-31],进行 4 类 LID 措施的参数设置(表 5)。最后,基于水文模型,进行不同降雨情景下 4 种 LID 组合方案的降雨径流模拟,并分析了其径流响应过程(图 4),同时对总径流削减量和径流峰值削减量进行了统计分析(图 5~6)。

2.3.4 基于费效比方法的 LID 方案成本效益计算 费效比(Return on Investment, ROI)方法在国内外研究中较常见,通过分别计算 LID 建设成本和效益进而根据比值评估其成本效益。本文费效比的计算公式如下^[32]:

$$ROI = C/B \tag{2}$$

式中:C 为 LID 方案的建设成本;B 为项目的产出效益。

表 5 LID 措施主要参数设置

措施	参数	参数值	措施	参数	参数值
屋 顶 绿 化	土壤厚度/mm	100	生 土	土壤厚度/mm	900
	孔隙率	0.5	物 孔	孔隙率	0.5
	产水能力	0.2	滞 产	产水能力	0.2
	导水率/(m·h ⁻¹)	0.5	留 导	导水率/(m·h ⁻¹)	10
透 水 铺 装	曼宁系数	0.1	池 曼	宁系数	0.1
	路面厚度/mm	150	护 堤	高度/mm	500
	孔隙比	0.15	植 植	被容积分数	0.2
	渗透性/(m·h ⁻¹)	100	草 曼	宁系数	0.1
装	蓄水厚度/mm	20	沟 草	洼边坡	5
	流量指数	0.5			

首先,根据海绵城市建设指南及地方建设实例核算各类 LID 设施的建设成本,进而得到 LID 组合方案的建设成本。然后,根据文献中的传统灰色基础设施估算方法^[21]使用蓄水池概化地下调蓄设施,建设蓄水池的费用参考江苏省水利厅关于发布江苏省水利工程人工预算工时标准的通知(苏水基[2015]32 号)及 2017 年省水利工程施工机械台费概算基价预算表等资料。然后将相同径流削减量下蓄水池与 LID 建造成本的差值作为产出效益,最终得到各 LID 组合方案的费效比。

3 结果分析

3.1 4 种 LID 措施的空间优化配置方案及其规划建设指导

本文采用内置与自定义相耦合的约束条件得到了研究区 LID 措施的空间优化配置方案(图 2(a)~2(d)),可得 LID 适建面积共计 8.8 km²,占研究区总面积的 16.33%。其中:屋顶绿化 2.56 km²,占鼓楼区屋顶总面积的 18%,占研究区总面积的 4.77%;透水铺装 2.23 km²,占研究区总面积的 4.16%;生物滞留池 2.98 km²,占研究区总面积的 5.54%;植草沟 1.03 km²,占研究区总面积的 1.91%。

图 2(e)所示地块的建设环境复杂多样,包含教育、医疗、公园、商业和居住等用地。本文根据 LID 空间优化配置方案的模拟结果,将该地块作为案例提出以下具体规划建议:(1)屋顶绿化:地块西南侧教育用地因建筑层数较低,建设年代较近,适宜在体育馆、综合楼及教学楼顶铺设屋顶绿化(区域 I),可达到节约土地资源与调控雨洪的双重效果。(2)透水铺装:地块北侧医院的停车场现状全为硬质铺地,

透水铺装作为城市停车场常用的 LID 措施适宜在此建设(区域 II),有切断城市透水面连接、延长雨水滞留时间和减少地表径流量的作用。(3)生物滞留池与植草沟:地块东侧沿街为临街商业建筑群,可在裙房设置屋顶绿化,同时沿街建设生物滞留池吸收屋面及地面径流,既增加景观效果又可减轻内涝风险(区域 III);西北角公园的临街绿地,可进行生物滞留池建设,吸收过滤道路雨水径流(区域 IV);东北角的居住社区绿化率较低,植草沟占地面积小,可结合生物滞留池在路旁设置(区域 V)。

由此可见,本文模拟所得 LID 空间配置结果与鼓楼区现状基本吻合,具有合理性,故可为 LID 空间规划建设作指导。

3.2 不同 LID 组合方案的雨洪调控效应评价

由图 4~5 可见,不同 LID 组合方案均对总径流量和洪峰流量具有明显的削减作用,但不同 LID 方案下的雨洪调控效果差异显著,5 个降雨情景下的地表总径流量为现状 > 方案①(屋顶绿化 + 透水铺装) > 方案②(屋顶绿化 + 生物滞留池 + 植草沟) > 方案③(透水铺装 + 生物滞留池 + 植草沟) > 方案④(全部 LID)。现状情景下的地表总径流量最大,5 个降雨情景下(S1~S5)的总径流量分别为 16.8×10^6 、 33.4×10^6 、 42.2×10^6 、 44.0×10^6 、 50.2×10^6 m^3 ,径流系数分别为 0.525、0.592、0.601、0.610、0.614;进行 LID 措施空间配置之后,由于植被截留、透水面增加,使得地表渗透吸纳雨水的能力变强,总径流量和径流系数显著减小(径流总量平均削减率为 32.68%,径流系数平均减小 0.26)。例如,方案④(全部 LID)在 5 个降雨情景下的总径流量分别为 9.1×10^6 、 20.1×10^6 、 24.1×10^6 、 25.0×10^6 、 30.0×10^6 m^3 ,径流系数分别为 0.296、0.357、0.346、0.347、0.369,均显著小于现状情景,基本达到城市化初期的径流水平,表明 LID 组合方案能够有效应对研究区 10 年一遇以内的降雨事件。

尽管随着降雨重现期的增加,不同 LID 组合方案的径流削减量有逐渐增加的趋势(图 5(a)),但在降雨情景 S3 处存在明显拐点,表明 LID 组合方案的雨洪调控能力存在一定的阈值,当降雨量和降雨强度较大导致地表径流较大、超过了 LID 措施的雨洪吸纳能力时,其调控能力趋于饱和,地表径流的削减量将趋于稳定,致使随着降雨重现期的增加,LID 的径流削减率总体上呈递减趋势,5 个降雨情景下(S1~S5)的平均径流削减率分别为 35.7%、30.5%、33.3%、33.1%、30.8%,(见图 5(b))。S2

的平均径流削减率最低,这与此次降雨的降雨时间短、高度集中、雨强大等降雨特征有关(图 4(b),表 2),表明降雨特征特别是雨强会对 LID 的径流削减率产生重要影响,由于在雨强较大时,降雨量远超植被、土壤和 LID 的瞬时截留和下渗能力,致使未吸纳的降雨快速形成了地表径流。

5 个降雨情景下的 LID 径流峰值削减量总体上随最大降雨强度的增加而增加(图 6(a)),而径流峰值削减率则随降雨重现期的增加总体上呈缓慢下降的趋势,且 LID 措施应用越多其削减率越大(图 6(b)),表明峰值削减量主要受降雨雨强(降雨雨强又与总降雨量和降雨历时相关)的影响,而削减率则主要受降雨重现期(降雨重现期又与降雨强度和降雨历时相关)以及 LID 措施的数量和面积的影响。这与 LID 的径流削减能力具有一定的累积效应且吸纳能力存在阈值有关,当雨强未达到 LID 的最大吸纳能力时,LID 的洪峰流量削减率相对较大,但当雨强明显高于其吸纳能力时,其洪峰的削减率则会降低。其中,S3 降雨情景下 LID 的径流峰值削减率最低,这与此次降雨雨型呈双峰分布且峰时降雨量较为集中有关,在第一次洪峰时 LID 就已接近其吸纳能力的阈值,致使在第二次洪峰时其已无法起到较好的削峰效果(图 4(c))。由此可见,LID 的径流峰值削减量与削减率受到雨强、降雨重现期、降雨历时、总降雨量和降雨雨型等诸多降雨特征的多重与交互影响。

3.3 基于费效比的 LID 方案的成本效益分析

由图 5(a)可得,LID 组合方案的平均总径流量削减量为:屋顶绿化 + 透水铺装 10.0×10^6 m^3 ;屋顶绿化 + 生物滞留池 + 植草沟 11.1×10^6 m^3 ;透水铺装 + 生物滞留池 + 植草沟 11.5×10^6 m^3 ;全部 LID 15.7×10^6 m^3 。通过计算得出不同 LID 方案相对应的蓄水池建设所需费用与费效比(表 6)。结果可知,同样的径流调控效果下传统灰色基础设施(蓄水池)的建设成本明显高于 LID 措施。费效比大小表示 LID 措施投入与产出的关系,费效比越低则成本效益越高。通过对比不同 LID 组合方案的费效比,可知屋顶绿化 + 透水铺装的组合较经济且成本效益最好(费效比为 0.197),而包含生物滞留池和植草沟的方案成本效益相对偏低,这是由于生物滞留池建设成本较高造成的(达 500 元/ m^2)。结合图 5 和 6 中 LID 组合方案的径流调控效果比对,屋顶绿化 + 透水铺装 + 生物滞留池 + 植草沟的组合即全部 LID 效果最好且经济性优于②、③方案,故建设潜力较好。

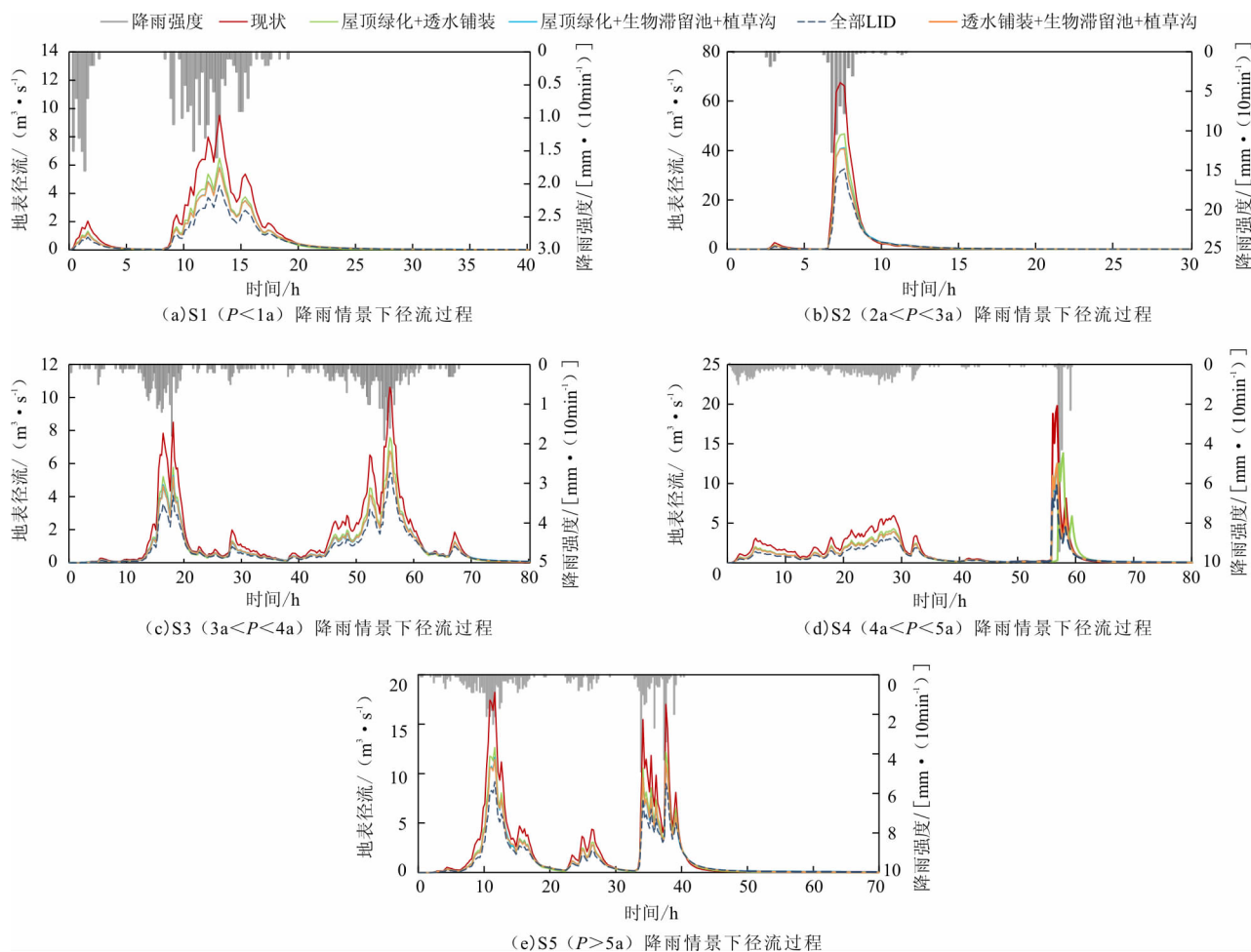


图4 不同降雨情景下LID布置方案的地表径流过程曲线

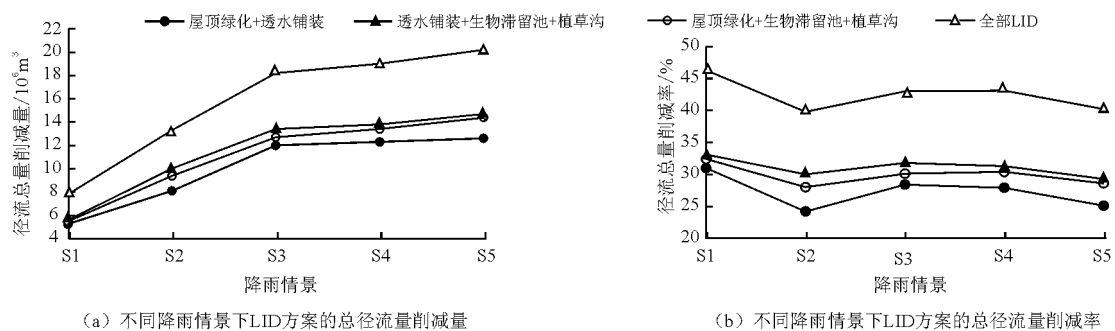


图5 不同降雨情景下LID方案的总径流量削减量和削减率

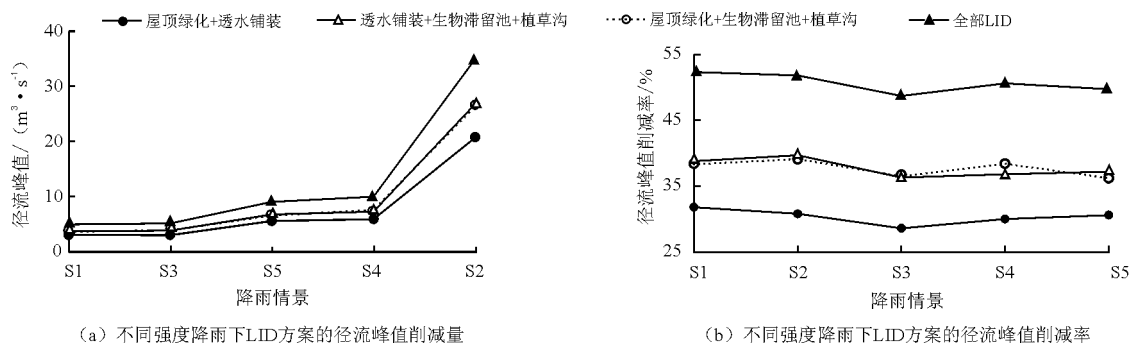


图6 不同降雨情景下LID方案的径流峰值削减量和削减率

表 6 不同 LID 方案的产出效益和费效比 10⁴ 元

LID 组合方案	建设成本	蓄水池建设成本	LID 产出效益	费效比
①屋顶绿化 + 透水铺装	84650	514620	429970	0.197
②屋顶绿化 + 生物滞留池 + 植草沟	220800	569620	348820	0.633
③透水铺装 + 生物滞留池 + 植草沟	203050	589620	386570	0.525
④屋顶绿化 + 透水铺装 + 生物滞留池 + 植草沟	254250	799620	545370	0.466

4 结论与讨论

研究表明:(1)利用 GIS 与 SUSTAIN 内置的 BMP 选址工具并采用内置与自定义相耦合的约束条件,得到的城市尺度下 LID 空间配置方案具有合理性,可为研究区 LID 的空间规划提供重要的科学依据;(2)LID 对总径流量和洪峰流量具有明显的削减作用,但不同 LID 方案下的雨洪调控效果差异显著;随着降雨重现期的增加,不同 LID 组合方案的径流削减量有逐渐增加的趋势且在降雨情景 S3 处存在明显拐点,而 LID 的径流削减率总体上则呈递减趋势;LID 径流峰值削减量总体上随最大降雨强度的增加而增加,且 LID 措施应用越多其削减率越大,而径流峰值削减率则随降雨重现期的增加总体上呈缓慢下降趋势;(3)LID 的雨洪调控效应受到降雨强度、降雨重现期、降雨历时、降雨量和降雨雨型等诸多降雨特征的多重与交互影响,同时也受到 LID 的面积、空间分布、截留与渗透率等自身属性特性的重要影响。(4)屋顶绿化 + 透水铺装的组合成本效益最好,包含生物滞留池的方案成本效益相对偏低,综合来看屋顶绿化 + 透水铺装 + 生物滞留池 + 植草沟方案建设潜力最大。

本文基于研究区的真实降雨数据,在较大尺度上构建了 LID 具体措施的空间优化配置方案,解决了目前多数研究中普遍存在的以设计降雨数据、尺度过小、采用用地性质来确定 LID 的面积占比等问题,有助于对较大尺度上 LID 雨洪调控累积效应的深入理解;对城市区域 LID 组合方案进行了成本效益分析,研究结果可为我国城市尺度上 LID 的空间规划、海绵城市建设和城市雨洪管理提供决策参考和案例借鉴。

参考文献:

[1] SCHMID P E, NIYOGI D. Impact of city size on precipitation modifying potential[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(19):5263 – 5267.
[2] POMEROY C A. Evaluating the impacts of urbanization

and stormwater management practices on stream response [M]. Colorado State;Colorado State University, 2007.
[3] 仇保兴. 重建城市微循环——一个即将发生的大趋势 [J]. 城市发展研究, 2011,18(5):1 – 13.
[4] 桑万琛. 基于城市安全的杭州市雨洪控制发展研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
[5] 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.
[6] SOHN W, KIM J H, LI M H. Low impact development applications in urban watersheds: Efficacy evaluation by imperviousness connectivity estimations [C] //8th Conference of the International Forum on Urbanism, 2015.
[7] VOGEL J R,MOORE T L,COFFMAN R R, et al. Critical review of technical questions facing low impact development and green infrastructure: A perspective from the Great Plains [J]. Water Environment Research, 2015, 87(9), 849 – 862.
[8] 俞孔坚,许涛,李迪华,王春连. 城市水系统弹性研究进展 [J]. 城市规划学刊. 2015(1):75 – 83.
[9] PYKE C, WARREN M P, JOHNSON T, et al. Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change [J]. Landscape and Urban Planning, 2011,103(2):166 – 173.
[10] AHIABLAKE L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012,223(7):4253 – 4273
[11] EARLES T A, GUO J, MACKENZIE K, et al. A Non-dimensional modeling approach for evaluation of low impact development from water quality to flood control [J]. American Society of Civil Engineers, 2010:362 – 371.
[12] 占红,臧淑英,吴长山,等. 城市不透水面扩张对地表径流量的影响 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6):54 – 60.
[13] 班玉龙,孔繁花,尹海伟,等. 土地利用格局对 SWMM 模型汇流模式选择及相应产流特征的影响 [J]. 生态学报, 2016,36(14):4317 – 4326.
[14] KONG F H, BAN Y L, YIN H W. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development [J]. Envi-

- ronmental Modelling & Software, 2017, 95 :132 – 142.
- [15] 李春林, 刘 森, 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.
- [16] TREDWAY J C, HAVLICK D G. Assessing the potential of low-impact development techniques on runoff and streamflow in the Templeton Gap Watershed, Colorado [J]. The Professional Geographer, 2016, 69(3) :372 – 382.
- [17] U. S. Environmental Protection Agency. SUSTAIN – programmer's manual: simulation engine [Z]. 2012.
- [18] WU J Y, THOMPSON J R, KOLKA R K, et al. Using the storm water management model to predict urban headwater stream hydrological response to climate and land cover change [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(12) :4743 – 4758.
- [19] CARTER T, JACKSON C R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. Landscape and urban planning, 2007, 80(1 – 2) :84 – 94.
- [20] 邵 明, 李 雄, 戈晓宇, 等. 海绵城市视角下 SUSTAIN 模型在城市绿地设计中的应用 [J]. 工业建筑. 2017, 47(5) :56 – 61.
- [21] 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 等. 绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 [J]. 环境科学, 2019(4) :1803 – 1810.
- [22] 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.
- [23] 王晓莹, 杨 丹, 邵银龙. 南京市近 60 年气候变化特征分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4) :119 – 124.
- [24] WONG G K L, JIM C Y. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime [J]. Ecological Engineering, 2014, 70 :366 – 378.
- [25] 杨天翔. 基于 SUSTAIN 模型的海绵城市最佳管理实践探究——以盐城市中心排水片区为例 [C] // 持续发展理性规划——2017 中国城市规划年会论文集, 2017.
- [26] U S Environmental Protection Agency. BMP siting tool: step – by – step guide [Z]. 2013.
- [27] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法 [J]. 给水排水, 2009, 45(11) :213 – 217.
- [28] 中华人民共和国建设部. 室外排水设计规范: GB50014 – 2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [29] 徐慧珺. 基于 SWMM 模型的南京典型区雨洪模拟研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [30] 李 研. 基于 SUSTAIN 与 SWC 的城市雨水 LID 设施评价方法研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
- [31] 车 伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [32] ERDOGMUS H, FAVARO J, STRIGEL W. Return on investment [J]. IEEE Software, 2004, 21(3) :18 – 22.

(上接第 29 页)

- [43] BIEBLER K E, WODNY M. Compartment models and associated residence time distributions [M]. Splines and Compartment Models: An Introduction. 2014.
- [44] MELANSON A, MEJIAS J F, JUN J J, et al. Nonstationary stochastic dynamics underlie spontaneous transitions between active and inactive behavioral states [J]. Eneuro, 2017, 4(2) :167 – 187.
- [45] OZYURT N N, BAYARI C S. LUMPED Unsteady: a Visual Basic code of unsteady – state lumped – parameter models for mean residence time analyses of groundwater systems [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(3) :329 – 341.
- [46] 李 婷, 胡伟伟, 马致远, 等. 基于活塞—指数混合模型的地下水可更新性研究 [J]. 地下水, 2011, 33(3) :1 – 2 + 10.
- [47] TOTH D J, KATZ B G. Mixing of shallow and deep groundwater as indicated by the chemistry and age of karstic springs [J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6) :1060 – 1080.
- [48] SÁNCHEZ – MURILLO R, BROOKS E S, ELLIOT W J, et al. Isotope hydrology and baseflow geochemistry in natural and human-altered watersheds in the Inland Pacific Northwest, USA [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2015, 51(2) :231 – 254.
- [49] JURGENS BC, BÖHLKE JK, EBERTS SM. TracerLPM (Version 1): An Excel® workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data [M]. Createspace Independent Pub, 2014.