

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.019

# 基于精细化水文表征的LID竖向模型构建方法

周倩倩<sup>1</sup>, 冯婉恩<sup>1</sup>, 冯军满<sup>2</sup>, 徐心怡<sup>1</sup>, 肖静<sup>1</sup>, 袁一顺<sup>1</sup>,  
徐柯南<sup>3</sup>, 刘立凡<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600; 3. 深圳市龙岗排水有限公司, 广东 深圳 518172)

**摘要:** 传统低影响开发(LID)仿真建模通常基于粗略土地分类和水文特征进行平面布设, 导致海绵措施无法在竖向立体空间进行精细化布设建模, 其协同组合效应对径流控制的影响往往被忽略或低估。为此, 提出了一种基于精细土地利用分类和改进式水文表征的竖向LID模型构建方法, 通过在LID仿真模型中建立径流连通路和流量通量计算, 实现不同海绵措施径流的相互连接和转移, 以进一步进行渗透、储存和运输。研究结果表明, 基于竖向布设的海绵措施组合对总出流量和峰值有更高的控制效果, 比平面布设下的指标分别降低了12.83%~26.30%和17.14%~21.62%, 可为后续海绵城市建设提供新的思路和技术支撑。

**关键词:** 海绵措施; 竖向布设; 低影响开发(LID); 精细化模型; 径流交互; 水量平衡公式

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2024)19-0122-05

## Construction Method of LID Vertical Model Based on Refined Hydrological Characterization

ZHOU Qian-qian<sup>1</sup>, FENG Wan-en<sup>1</sup>, FENG Jun-man<sup>2</sup>, XU Xin-yi<sup>1</sup>, XIAO Jing<sup>1</sup>,  
YUAN Yi-shun<sup>1</sup>, XU Ke-nan<sup>3</sup>, LIU Li-fan<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China;  
3. Shenzhen Longgang Drainage Co. Ltd., Shenzhen 518172, China)

**Abstract:** The traditional simulation modeling of low impact development (LID) is typically based on rough land classification and hydrological characteristics for planar layout, which leads to the inability to conduct refined layout modeling of sponge measures in the vertical three-dimensional space, and the synergistic combination effect on runoff control is frequently ignored or underestimated. Therefore, a vertical LID model construction method based on refined land use classification and enhanced hydrological characterization was proposed. By establishing the connected route of runoff and the calculation of flow flux in the LID simulation model, the interconnection and transfer of runoff from

基金项目: 广东省自然科学基金资助青年提升项目(2023A1515030126); 广东省自然科学基金资助面上项目(2024A1515011791)

通信作者: 刘立凡 E-mail: lifan\_liu@126.com

diverse sponge measures were accomplished, thereby facilitating further infiltration, storage and transportation. The combination of sponge measures based on vertical layout exhibited a superior control effect on the total runoff and peak value, being 12.83%–26.30% and 17.14%–21.62% lower than that under the planar layout, and could offer novel ideas and technical support for the subsequent construction of sponge cities.

**Key words:** sponge measure; vertical layout; low impact development (LID); refined model; runoff interaction; water balance formula

随着城市化的发展,城市不透水面积逐步扩大,导致地表径流增加,热岛效应引起的极端天气事件频发且强度增大<sup>[1]</sup>。传统排水系统应对极端天气的韧性不足,而基于低影响开发(LID)的可持续发展雨水管理方法,通过渗蓄和滞留等方式调控雨水径流,与现有排水系统进行结合,可以有效降低城市洪涝风险<sup>[2]</sup>。然而,当前LID研究主要基于现有仿真模型或建模算法直接进行案例应用和效能评估,针对计算方法和模型改良的探索十分有限<sup>[3]</sup>。主流LID仿真主要依赖传统土地利用分类方法,水文表征粗糙,忽略了相似类型之间的差异及其对雨水径流的调节作用<sup>[4]</sup>。同时,LID布设只能基于平面布局进行建模,影响了仿真和评估的准确性和有效性。

早期对海绵措施的模拟主要通过调整汇水区的径流系数<sup>[5]</sup>或者对LID设施进行水文仿真<sup>[6]</sup>来大致反映调控效果。随着物理模型和计算机算法的发展,各类独立的LID仿真模块(如:雨水花园、绿色屋顶)被相继提出,用于更加准确地模拟不同类型、区域和布设程度/面积的海绵措施效果<sup>[7]</sup>。然而,当前海绵措施仿真主要局限在平面布局上,未考虑不同措施在空间层面的重叠布局和功能组合。针对此局限,一些研究和模拟软件(如SUSTAIN)尝试将LID模块进行串联<sup>[6]</sup>,模拟多级措施的组合效果,但均无法反映复杂立体空间布局下海绵措施的精细化布局方式及其径流的传输路径。为此,笔者提出了一种基于精细土地利用分类和改进式水文表征的竖向LID模型构建方法,在同一地块上实现多种措施的重叠组合,并计算其间的径流交换以及每个措施内的水量和水深变化;通过增加海绵措施出流、入渗和储存的模拟路径,提高对其布设位置及组合方式模拟和优化的准确性和灵活性。

## 1 方法论

### 1.1 基于精细化水文表征的海绵措施布设

常见的城市下垫面土地分类包括屋面、路面、绿地和水体等几大类型。在常规的水文表征模型中,绿地归类为渗透区域,其他土地类型定义为不渗透区域,导致城市不渗透区域范围广泛,海绵措施布设场景定义不精确、约束条件多、汇水区的径流流向与实际流向存在较大差异等问题。本研究的精细化水文表征基于高精度遥感图像识别和GIS空间统计分析,对城市各区域进行了明确定义,将下垫面细化为主建筑、杂项建筑、主道路、人行道、单行道、草坪、森林、农业区、湿塘和游泳池等多个类型。其中,主建筑、主道路等土地类型被定义为直接不渗透区,杂项建筑、人行道和部分单行道被定义为间接不渗透区,接收间接不渗透区的绿地区域被设定为缓冲渗透区,而剩余的渗透区域则被归类为独立渗透区(见图1)。间接不渗透区和缓冲渗透区之间的径流连接和下渗功能对于减少地表径流的产生具有重要作用,因此可以通过布设海绵措施来加强这两个区域之间的径流连接和下渗功能,进而减少地表径流,增强雨水径流调控能力。

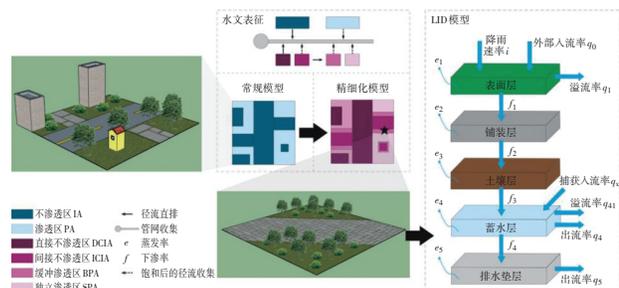


图1 精细化水文表征和LID理论仿真模型

Fig.1 Refined hydrological characterization and LID theoretical model

本研究选择了4种常见的LID措施作为主要研究对象:生物滞留池(BC)、绿色屋顶(GR)、透水铺

装(PP)和雨水桶(RB),其通用的理论仿真模型见图 1。仿真模型根据海绵措施竖向结构的物理特性具体分为 5 种通用结构层,包括覆盖植被的表面层、可快速透水的铺装层、作为生长介质的土壤层、储存土壤层下渗量的蓄水层和用以输出土壤层无法容纳水量的排水垫层。不同海绵措施各结构层的入流和产流关系如表 1 所示,除雨水桶在蓄水层实现入流外,其他措施的入流层均为表面层;出流层的位置因海绵措施不同而不同,主要集中在表面层、蓄水层和排水垫层。

表 1 LID 措施与结构层关系矩阵

Tab.1 Relationship matrix between LID measures and structural layers

项 目		表面层	铺装层	土壤层	蓄水层	排水垫层
透水铺装	入流层	★				
	出流层	★			★	
	其他层		★	★		
生物滞留池	入流层	★				
	出流层	★			★	
	其他层			★		
雨水桶	入流层				★	
	出流层				★	
	其他层					
绿色屋顶	入流层	★				
	出流层	★				★
	其他层			★		

各结构层的水量平衡计算公式如式(1)~(5)所示,各项参数的具体说明见表 2。通过对不同参数进行赋值定义,即可实现对该种措施径流调控的模拟计算。输出结果包含了海绵措施各层的水量和水深变化、整体的出流过程和峰值等。

表面层:

$$\zeta_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad (1)$$

铺装层:

$$H_2(1 - F_2) \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad (2)$$

土壤层:

$$H_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 \quad (3)$$

蓄水层:

$$\zeta_4 \frac{\partial h_4}{\partial t} = f_3 + q_x - e_4 - f_4 - q_4 - q_{41} \quad (4)$$

排水垫层:

$$\zeta_5 \frac{\partial h_5}{\partial t} = f_4 - e_5 - q_5 \quad (5)$$

表 2 各结构层的参数说明

Tab.2 Parameters description of each structure layer

结构层	参数符号	参数含义	BC	PP	GR	RB
表面层	$\zeta_1$	表面孔隙率	√	1	√	—
	$h_1$	地表注蓄水深	√	√	√	—
	$i$	降雨速率	√	√	√	—
	$q_0$	外部入流率	√	√	—	—
	$e_1$	蒸发率	√	√	√	—
	$f_1$	渗透率	√	√	√	—
	$q_1$	溢流率	√	√	√	—
铺装层	$H_2$	铺装层厚度	—	√	—	—
	$F_2$	不渗透比	—	√	—	—
	$\theta_2$	铺装含水量	—	√	—	—
	$e_2$	铺装层蒸发率	—	√	—	—
	$f_2$	渗透率	—	√	—	—
土壤层	$H_3$	土壤层厚度	√	√	√	—
	$\theta_3$	土层含水量	√	√	√	—
	$e_3$	蒸发率	√	√	√	—
	$f_3$	渗透率	√	√	√	—
蓄水层	$\zeta_4$	孔隙率	√	√	—	1
	$h_4$	蓄水水深	√	√	—	√
	$e_4$	蒸发率	√	√	—	—
	$f_4$	渗透率	√	√	—	—
	$q_4$	出流率	√	√	—	√
	$q_x$	捕获入流率	—	—	—	√
	$q_{41}$	溢流率	—	—	—	√
排水垫层	$\zeta_5$	孔隙率	—	—	√	—
	$h_5$	排水垫层水深	—	—	√	—
	$e_5$	蒸发率	—	—	√	—
	$q_5$	出流率	—	—	√	—

注:“√”表示 LID 理论模型有对应参数且通过计算得出;“—”表示 LID 理论模型无对应参数;“1”表示为特殊值。

### 1.2 LID 模型竖向径流构建方法

各结构层间通过求解一系列水量平衡公式进行水量交换计算:海绵措施总入流率为区域降雨速率  $i$  及附近区域流入的外部入流率  $q_0$ ,除表面层外其余结构层的入流率均来自上层结构层的下渗率  $f$ ,海绵措施总出流率包括各层的蒸发率  $e$ 、表面层溢流率  $q_1$ 、雨水桶蓄水层溢流率  $q_{41}$ 、蓄水层出流率  $q_4$  和排水垫层出流率  $q_5$ 。需注意,当海绵措施为雨水桶时无表面层,入流率为外部捕获入流率  $q_x$ 。在平面布

设中,LID的所有出流量汇集成 $q_i$ 直接排入管网。本研究提出的竖向布设经由LID仿真模型嵌套编程计算,增加了上下级措施间的连接通量 $q_{lid}$ ,即来自附近所有上级LID的总入流率,其计算方法如下:

$$q_{lid} = \frac{\sum q_i A_i}{A_{lid}} \quad (6)$$

$$q_i = q_1 + q_4 + q_5 \quad (7)$$

式中: $i$ 表示流入的上级LID(如BC、GR、PP、RB); $q_i$ 为上级LID出流率; $A_i$ 为上级出流的LID面积; $A_{lid}$ 为接收入流率的LID面积; $q_1$ 为表面层溢流率、 $q_4$ 为蓄水层出流率、 $q_5$ 为排水垫层出流率,若无对应结构层,则取值为0。以图2设置的雨水花园为例,其接收的径流来自绿色屋顶和透水铺装,则 $q_{lid} = (q_{PP} \times A_{PP} + q_{GR} \times A_{GR})/A_{lid}$ ,其中, $q_{PP}=q_1+q_4$ , $q_{GR}=q_1+q_5$ 。

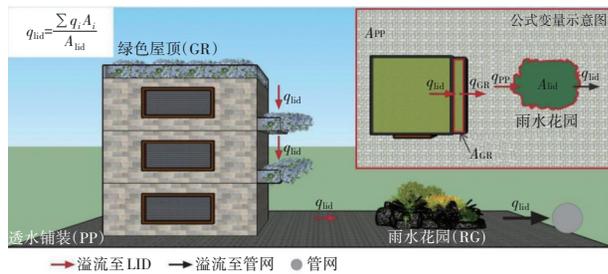


图2 竖向模型径流链接示意

Fig.2 Schematic diagram of runoff link in vertical model

## 2 结果与讨论

研究案例位于中国北部H市,属于温带大陆性气候,年均降雨量为398 mm,大多数降雨集中在夏季和秋季,约占全年降雨量的80%。该地区地势东北高、西南低,总集水区面积约为37 hm<sup>2</sup>。区域主要用地类型包括住宅楼、大型科技馆、绿地和农田。在精细化水文表征的基础上,比较了平面与竖向布设方式对雨水径流的调控效果。采用持续时间为120 min的6个降雨事件(即3、5、10、20、50和100年一遇)进行情景模拟和比较分析。

图3展示了海绵措施在平面和竖向布局中的布设差异,包括布设位置、面积和组合差异。在平面模式下,海绵措施无法在模型中设置重叠组合,因此措施之间没有径流传送和相互作用,各个措施排出的径流直接由管网系统进行收集。竖向构建方法在空间上实现了多维LID排列和组合,比如绿色屋顶下的大量空间可用于配置透水路面。

另外,为进一步说明竖向布设的可行性,增加

了对绿色屋顶和雨水花园两种措施及其竖向组合(共3组实验)的实验场景测试和仿真模拟。图4展示了3组实验的具体模拟场景,即现实中设有阳台的建筑,分别采用平面布设的绿色屋顶[见图4(a)]和雨水花园[见图4(b)],以及两种措施的竖向组合[见图4(c)]。图4(d)显示了3种场景对应的实验出流和仿真模拟出流情况,并采用拟合指数 $R^2$ 对LID模型的仿真效果进行检验, $R^2$ 越接近1,表明仿真模拟的准确度越高。平面布局下雨水花园和绿色屋顶的 $R^2$ 分别为0.906和0.990,在竖向组合下 $R^2$ 为0.896。结果首先论证了LID仿真模拟的可靠性,另外可以看到,竖向组合的出流量与平面布设相比显著降低,表明竖向多维LID布设对径流调控具有增强作用。



图3 LID平面与竖向布设对比

Fig.3 LID Plane and vertical layout comparison

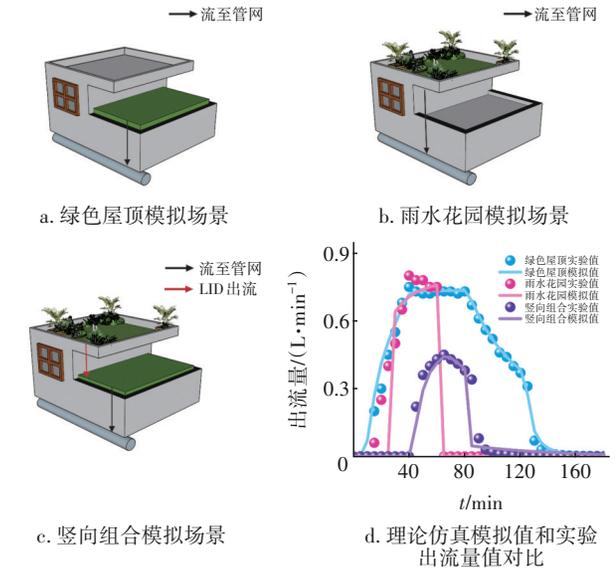


图4 绿色屋顶、雨水花园及其竖向组合的模拟场景和模拟结果对比

Fig.4 Simulation scene diagram of green roof, rain garden and vertical combination, and their simulation results comparison

研究区域平面和竖向布局对流域径流的影响

差异见图5。在降雨输入相同的情况下,竖向布局的溢流持续时间和峰值均小于平面布局,溢流总量和峰值分别减少了12.83%~26.30%和17.14%~21.62%。溢流削减率随着降雨量的增大而增加,表明合理的竖向布局方式可以有效利用多维立体空间上的多类LID调控雨水径流。对于本案例,在较小降雨事件下,竖向布设甚至可以实现径流零排放,因为其空间组合方式大大增加了LID的作用面积,同时多层空间叠加的LID措施增加了径流路径、延长了汇流时间,有效减少了区域产生的径流量。模拟结果同时验证了平面布设方法的局限性,即忽略了LID措施在同一地块上空间的重叠性和径流的交互性。

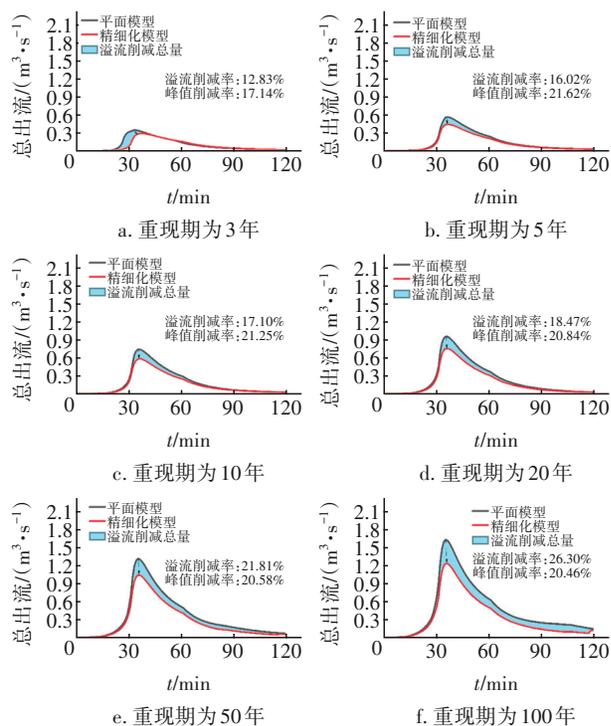


图5 不同重现期下平面与竖向布设总出流、溢流削减率和峰值削减率

Fig.5 Total output, overflow reduction rates and peak reduction rates for planar and vertical layouts at different recurrence periods

### 3 结论

提出了一种基于精细土地利用分类和改进式水文表征的竖向LID模型构建方法,明确了海绵措施竖向结构的径流连接路径和计算方式,实现对多维立体空间海绵措施的组合布设和仿真模拟。结果表明,精细化表征可以区分直接不渗透区和间接

不渗透区的空间位置、面积和比例,更准确地反映子区域划分和流动方向,科学指导海绵措施的空间分配。竖向模型增加了海绵措施的流动联系,实现在同一地块充分利用空间,使径流进行多次渗透、储存和输送,以达到有效调控径流的目的,为海绵措施的规划、评估和实施提供了技术支撑。

### 参考文献:

- [1] ROSENBERGER L, LEANDRO J, PAULEIT S, *et al.* Sustainable stormwater management under the impact of climate change and urban densification [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596(1): 11.
- [2] FERRANS P, TORRES M N, TEMPRANO J, *et al.* Sustainable urban drainage system (SUDS) modeling supporting decision-making: a systematic quantitative review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(1): 14.
- [3] LI J, LI Y, LI Y J. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1): 14.
- [4] ZHOU Q Q, LUO J H, QIN Z, *et al.* Conceptual planning approach of low impact developments for combined water quality-quantity control at an urban scale: a case study in southern China [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2022, 15(1): 16.
- [5] YAO L, WEI W, CHEN L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60(1): 893-905.
- [6] LIU Y Z, AHIABLAME L M, BRALTS V F, *et al.* Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 147(1): 12-23.
- [7] KONG F H, BAN Y L, YIN H W, *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(1): 132-142.

作者简介:周倩倩(1984-),女,浙江乐清人,博士,教授,研究方向为市政排水。

E-mail: qiaz@foxmail.com

收稿日期:2023-10-19

修回日期:2023-12-29

(编辑:刘贵春)