

海绵城市

子汇水区分割对 SWMM 低影响开发模拟的影响研究

梁小光¹, 武治国², 任俊雯³

(1. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 2. 武汉新烽光电股份有限公司, 湖北 武汉 430073; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 低影响开发(LID)设施在我国海绵城市建设中被广泛使用,在规划和设计阶段利用雨水管理模型(SWMM)评价其效果是工程界普遍做法。SWMM 可以采用两种方法实现 LID 设施的模拟,一是在子汇水区内添加一种或者多种 LID 设施,取代等量的子汇水区内非 LID 面积,二是用单一的 LID 设施占据全部的子汇水区。基于 SWMM 地表径流演算原理,通过分析单个子汇水区在不同情况下分割形成的子面积几何属性差异所造成的水文过程变化,发现前一种方法的子汇水区分割会影响到整体水文效应,进而干扰对 LID 设施效果的定量分析。后一种方法不存在子面积调整的问题,但也应确保 LID 添加前后模型网络结构不变,排除由于子汇水区调整可能带来的不利影响。

关键词: 雨水管理模型(SWMM); 低影响开发(LID); 子汇水区分割; 子面积

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)06-0001-05

Influence of Subcatchment Partitioning on SWMM's Low Impact Development Simulation

LIANG Xiao-guang¹, WU Zhi-guo², REN Jun-wen³

(1. Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. Wuhan Newfiber Optoelectronics Co. Ltd., Wuhan 430073, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Low impact development (LID) facilities are widely used in the sponge city construction of China. In the stage of planning and design, it is a common practice to use Storm Water Management Model (SWMM) to evaluate the performance of LID facilities. There are two different approaches in SWMM to simulate the LID facilities within a subcatchment. One is to place one or more controls in an existing subcatchment in order to displace an equal amount of non-LID area from the subcatchment. The other is to create a new subcatchment devoted entirely for just a single LID practice. Based on the principle of surface runoff calculation of SWMM, the variation of hydrologic process which was caused by the difference of geometrical properties of subarea due to the division of a single subcatchment under different conditions was analyzed. It was found that the former approach's subcatchment partitioning would affect the overall hydrological effect and then interfere with the quantitative analysis of the performance of LID facilities. The latter approach did not have the problem of subarea adjustment, but it should also ensure that the structure of the model network was unchanged before and after the addition of LID controls, and avoid the potential adverse effects caused by the

adjustment of subcatchment.

Key words: storm water management model (SWMM); low impact development (LID); subcatchment partitioning; subarea

低影响开发 (Low Impact Development, 以下简称 LID) 设施在我国海绵城市建设中被广泛使用, 它可以从源头削减径流总量和径流峰值, 并对初期雨水径流污染进行处理。在海绵城市建设过程中, 如何评价海绵城市建设效果一直是热点话题。目前, 在规划和设计阶段利用计算机模型对方案进行效果评估是工程界的普遍做法。其中, 使用最多的计算机模型软件为 EPA SWMM (以下简称 SWMM), 它由美国环保局推出, 是目前世界范围内使用最广泛的排水模型软件之一。

SWMM 从 5.0.019 版本开始, 加入了 LID 模块, 并在后续版本中不断更新和完善 LID 设施模拟的相关功能。SWMM 可以采用两种方法实现 LID 设施的模拟, 一是在子汇水区内添加一种或者多种 LID 设施, 取代等量的子汇水区内非 LID 面积, 二是用单一的 LID 设施占据全部的子汇水区^[1]。前一种方法需要考虑添加 LID 设施后对子汇水区分割的影响, 按照一定规则人工调整子汇水区面积和宽度属性后, SWMM 将自动完成子汇水区分割的工作。

由于我国海绵城市建设和排水模型应用都处于起步阶段, 现有的公开研究成果普遍深度不足, 甚至存在低级错误。因此, 从 SWMM 基本原理出发, 探究 LID 模拟的关键细节, 对提高我国海绵城市建设的模型应用水平有重要意义。

1 子汇水区分割

SWMM 是一个分布式模型, 它允许将整个研究区域划分为任意数量的不规则形状的子汇水区, 并采用非线性水库模型计算降雨在子汇水区上产生的地表径流。SWMM 将子汇水区分成渗透面积和不渗透面积, 渗透面积允许降雨下渗到土壤, 不渗透面积则不发生下渗。根据是否存在洼地蓄水, SWMM 进一步将不渗透面积分为有洼地蓄水不渗透面积和无洼地蓄水不渗透面积。因此, SWMM 的一个子汇水区在计算时将被分割为三个子面积, 分别为渗透面积 A1、有洼地蓄水的不渗透面积 A2 和无洼地蓄水的不渗透面积 A3^[2], 如图 1 所示。

SWMM 提供了三个子面积演算选项, 分别为 outlet, impervious 和 pervious。outlet 选项代表三个

子面积 A1、A2 和 A3 均直接演算到子汇水区出口。impervious 选项代表子面积 A1 演算到子面积 A2, 子面积 A2 和 A3 演算到子汇水区出口。pervious 选项代表子面积 A2 和 A3 演算到子面积 A1, 子面积 A1 演算到子汇水区出口。在 SWMM 没有 LID 模块之前, impervious 和 pervious 选项可以实现部分 LID 模拟功能。

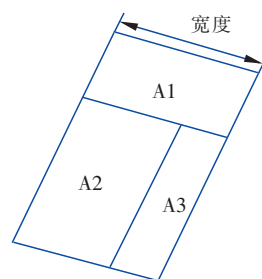


图 1 子汇水区分割示意

Fig. 1 Sketch map of subcatchment partitioning

用一个例子说明子面积演算选项对模拟结果的影响。假设只有 1 个子汇水区 A, 面积为 10 000 m², 宽度为 100 m, 坡度为 0.005, 不渗透面积比为 70%, 渗透面积和不渗透面积地表粗糙系数分别为 0.1 和 0.02, 渗透面积和不渗透面积洼地蓄水深度分别为 5 mm 和 2 mm, 无洼地蓄水的不渗透面积比为 25%, 子面积之间径流演算比为 100%, 下渗模型选择 Horton 模型, 初始下渗速率为 100 mm/h, 稳定下渗速率为 5 mm/h, 衰减常数为 4 h⁻¹, 设计降雨过程线见图 2, 模拟结果见表 1。

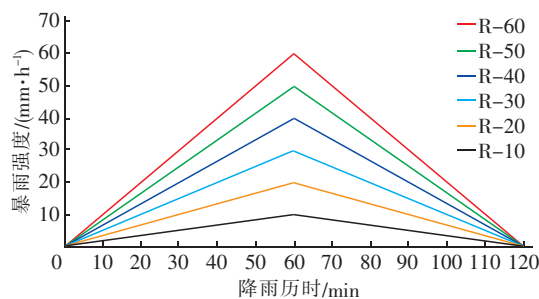


图 2 设计降雨过程线

Fig. 2 Design rainfall distribution

观察表 1 可得到以下结论: ①雨量径流系数非固定值, 而是随着降雨量的增加而增大; ②子面积演

算选项为 pervious 时雨量径流系数比子面积演算选项为 outlet 和 impervious 时小,这是因为不渗透面积 A2 和 A3 的径流没有直接排向子汇水区出口,而是要先经过渗透面积 A1,导致下渗量增大;③子面积

演算选项为 pervious 时峰值流量比子面积演算选项为 outlet 和 impervious 时大,这是因为渗透面积 A1 的宽度比 A2 和 A3 的宽度大,非线性水库模型计算得到的径流峰值也相应变大。

表 1 不同子面积演算选项时模拟结果

Tab. 1 Simulation results for different subarea routing options

子面积演算	参数名称	设计降雨过程线					
		R-60	R-50	R-40	R-30	R-20	R-10
outlet	径流总量/mm	47.37	37.53	27.86	19.93	12.92	5.91
	雨量径流系数	0.79	0.75	0.70	0.66	0.65	0.59
	径流峰值/(L·s ⁻¹)	121.82	91.77	72.35	53.35	34.76	15.65
impervious	径流总量/mm	47.37	37.53	27.86	19.93	12.92	5.91
	雨量径流系数	0.79	0.75	0.70	0.66	0.65	0.59
	径流峰值/(L·s ⁻¹)	111.68	91.45	72.35	53.35	34.76	15.65
pervious	径流总量/mm	46.13	36.19	26.29	16.46	6.75	0
	雨量径流系数	0.77	0.72	0.66	0.55	0.34	0
	径流峰值/(L·s ⁻¹)	140.98	113.31	84.48	55.20	24.78	0

注: 考虑到模拟结果口径一致,径流峰值为子汇水区出水管道的最大流量,它和子汇水区本身的径流峰值有细微的差别。

海绵城市建设中的“断接”理念可以通过将子面积演算选项设置为 pervious 来实现,模拟得出的径流总量削减效果符合预期,但径流峰值削减效果和预期相反,这是由 SWMM 地表径流演算的基本原理决定的。

2 等效水文过程

将不可见的子面积 A1、A2 和 A3 转换为可见的子汇水区 A₁、A₂ 和 A₃,并对相应的子汇水区属性进行修改(见表 2),其他属性不变。

表 2 属性修改

Tab. 2 Property modification

属性	子汇水区			
	A	A ₁	A ₂	A ₃
面积/m ²	10 000	3 000	5 250	1 750
宽度/m	100	100	75	25
不渗透面积比/%	70	0	100	100
无洼地蓄水的不渗透面积比/%	25	—	0	100
子面积演算	根据情况选择	outlet	outlet	outlet
出口	outlet	J1	J1	J1
	impervious	J1	A ₂	J1
	pervious	J1	J1	A ₁

子汇水区 A₁ 全部为渗透面积,子汇水区 A₂ 全部为有洼地蓄水的不渗透面积,子汇水区 A₃ 全部为无洼地蓄水的不渗透面积,因此,它们都只有 1 个子面积,且子面积演算选项为 outlet。当子汇水区 A

的子面积演算选项为 outlet 时,子汇水区 A₁、A₂ 和 A₃ 的出口均为 J1。当子汇水区 A 的子面积演算选项为 impervious 时,子汇水区 A₁ 的出口为 A₂,子汇水区 A₂ 和 A₃ 的出口为 J1。当子汇水区 A 的子面积演算选项为 pervious 时,子汇水区 A₂ 和 A₃ 的出口为 A₁,子汇水区 A₁ 出口为 J1,图 3 为该情况下的模型网络。

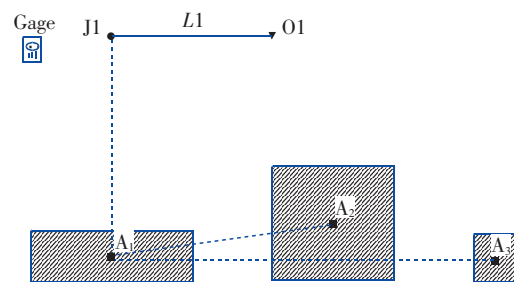


图 3 pervious 选项时模型网络

Fig. 3 Model network of “pervious” option

经模拟后发现,按照表 2 数据建立的模型网络计算结果和表 1 完全相同,两种模型水文过程等效,这种等效性是由 SWMM 的计算原理所决定的。

3 添加 LID 后的子汇水区分割及水文影响

将 LID 设施加入子汇水区后,需要调整子汇水区的不渗透面积比和宽度属性,不渗透面积比应为扣除 LID 所占面积后重新计算的剩余部分不渗透面积比,宽度应在原宽度基础上按比例缩小^[1],具体

如图4所示。若子汇水区A中有2 000 m² 渗透面积改造为生物滞留设施,该设施服务全部的不渗透面积(7 000 m²),但不服务剩余的1 000 m² 渗透面积,则调整后的子面积属性见表3。

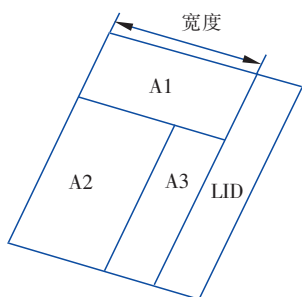


图4 添加LID后子汇水区分割示意

Fig.4 Sketch map of partitioning after placing LID controls within a subcatchment

表3 添加LID后子面积属性变化

Tab.3 Subarea property modification after placing LID controls within a subcatchment

属性	A ₁	A ₂	A ₃	LID
面积/m ²	添加LID前	3 000	5 250	1 750
	添加LID后	1 000	5 250	1 750
宽度/m	添加LID前	100	75	25
	添加LID后	80	60	20

子面积LID的出口可以为子汇水区A的出口,也可以为子面积A1^[3]。如上所述,未添加LID时子面积演算有3种情况,因此,添加LID后,子面积出口设置共有6种可能组合。采用上述等效水文过程处理方法,将子面积A1、A2、A3和LID转换为子汇水区A-1、A-2、A-3和A-LID(面积和宽度采用表3数据,子汇水区A-LID的其他属性和子汇水区A₁相同),则6种组合的出口设置见表4。图5为组合五时的模型网络。

表4 子汇水区出口设置

Tab.4 Outlets of subcatchment

项目	A-1	A-2	A-3	A-LID
组合一	J1	J1	J1	J1
组合二	A-2	J1	J1	J1
组合三	J1	A-1	A-1	J1
组合四	J1	J1	J1	A-1
组合五	A-2	J1	J1	A-1
组合六	J1	A-1	A-1	A-1

降雨过程线选择R-60,6种组合的模型模拟结果见表5,表中期望值来自于表1。组合一和组合四期望值与表1中子面积演算选项为outlet时相

同,组合二和组合五期望值与表1中子面积演算选项为impervious相同,组合三和组合六期望值与表1中子面积演算选项为pervious相同。

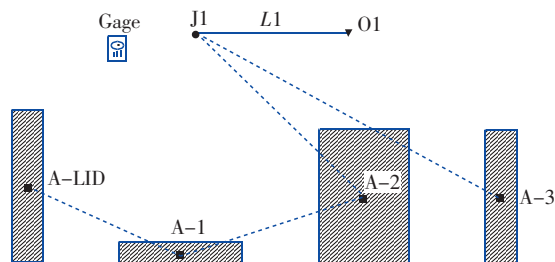


图5 组合五时的模型网络

Fig.5 Model network of combination 5

表5 模拟值和期望值

Tab.5 Simulation values and expectation values

项目	径流总量			径流峰值		
	模拟值/mm	期望值/mm	偏差/%	模拟值/(L·s ⁻¹)	期望值/(L·s ⁻¹)	偏差/%
组合一	46.78	47.37	-1.25	118.79	121.82	-2.49
组合二	46.78	47.37	-1.25	113.30	111.68	1.45
组合三	45.99	46.13	-0.30	125.18	140.98	-11.21
组合四	46.41	47.37	-2.03	116.12	121.82	-4.68
组合五	46.40	47.37	-2.05	109.96	111.68	-1.54
组合六	45.97	46.13	-0.35	122.59	140.98	-13.04

表5中模拟值反映的是未添加LID设施但按照LID设施添加后的子汇水区分割原理处理后的水文效应,而期望值反映的是不考虑LID设施时的水文效应。从理论上讲,只有模拟值和期望值相同,才能在LID设施模拟中真实反映LID设施本身带来的水文过程变化。可以看出,6种组合的径流总量和径流峰值都存在偏差,反映了子汇水区分割本身所带来的水文过程变化。当进行实际LID模拟时,模型结果反映了子汇水区分割和LID设施本身造成的水文过程变化的叠加,导致模型工程师无法通过模型模拟结果定量判断LID设施本身对水文过程的影响。因此,当LID设施未占据全部子汇水区时,子汇水区需要根据LID的基本参数重新分割子面积,这种子面积调整将对子汇水区的水文过程造成一定影响,并且这种影响和LID设施是否添加无关。由于SWMM软件中LID模拟功能的不断完善,最新版本(5.1.013)的LID设施已经可以同时占用和服务一定比例的渗透面积和一定比例的不渗透面积,这使得子汇水区分割变得更加复杂。从基本原理出发,通过修改SWMM软件源代码解决此问题,将是一个

极富挑战性的工作。

4 子汇水区划分与LID模拟

当研究区域范围较大时,无法将子汇水区细分到LID设施尺度,而是将LID设施作为子汇水区的一个组成部分来模拟。如前所述,此种情况下,模拟结果无法帮助模型工程师定量分析LID设施径流总量削减和径流峰值控制效果。

当研究区域范围较小且LID设施平面布置及主要参数确定的情况下,可以将每个LID设施都作为一个独立的子汇水区模拟。这种情况下,不会出现由于LID设施的加入而导致子汇水区重新分割的问题,但可能会出现子汇水区重新划分的问题。例如:有一块草地,在未考虑海绵理念时,是作为1个子汇水区进行模拟,当把其中一部分改造为生物滞留设施时,必须分成2个子汇水区,其中1个子汇水区由生物滞留设施全部占据。在子汇水区由1个变为2个的过程中,水文过程会发生变化,这种变化将对LID设施自身功能的模拟产生干扰。要排除这种干扰,必须保证含LID设施的模型和不含LID设施的模型在网络结构上保持一致,这就要求在未考虑海绵理念时的模型也必须把这块草地划分成2个子汇水区,其面积和宽度等属性与考虑海绵理念后一致。因此,用单一的LID设施占据全部的子汇水区来实现LID模拟时,应保证LID设施添加前和添加后的模型网络结构一致。

5 结论和建议

目前,采用计算机模型模拟海绵城市规划和设计方案效果越来越受到行业重视,但相关专业人才的匮乏,相当多的LID模型存在问题,导致老一辈工程师普遍质疑模型的价值,行业发展也因此受到了影响。欲改变此状况,很重要的一点是要加强对模型基本原理的理解和掌握。对于LID模拟,理解和掌握单个子汇水区情况下由于LID设施加入而带来的水文过程变化是保证模拟结果可信的基本前提。

通过分析不同子面积演算选项和添加LID设施前后的子汇水区分割以及等效水文过程模型模拟结果的差异,并结合SWMM模拟LID的两种处理方式,得出主要结论和建议如下:

① 由于SWMM采用非线性水库模型计算地表径流,子汇水区宽度对计算结果影响很大。当子面积演算选项为pervious时,可以认为落实了海绵城市中的“断接”理念,但是由于渗透面积的子汇水

区宽度比不渗透面积大,计算得到的径流峰值反而变大,与预期不符。

② 当LID设施未占据全部子汇水区时,LID设施添加后子汇水区需要重新分割,造成子面积几何属性发生改变,进而引起水文过程发生变化,这种变化使得模型工程师难以定量分析LID设施本身对水文过程的影响。这种由于子汇水区重新分割所造成的干扰是SWMM软件本身缺陷所致,在不修改源代码的情况下,暂时无法解决。因此,应尽量避免采用此种方式模拟LID设施。

③ 当LID设施占据全部子汇水区时,LID设施的添加不会导致子汇水区的重新分割,但应保证模型网络结构不变。

参考文献:

- [1] Rossman L. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.1) [M]. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2015.
- [2] Rossman L. Storm Water Management Model Reference Manual Volume I—Hydrology (Revised) [M]. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2016.
- [3] Rossman L, Huber W. Storm Water Management Model Reference Manual Volume III—Water Quality [M]. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2016.



作者简介:梁小光(1985—),男,江西抚州人,硕士,工程师,武汉大学海绵城市研究中心学术委员会委员,主要从事城市水系统规划设计和理论研究。

E-mail: liangxiaoguang07@163.com

收稿日期:2018-09-14