

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.017

利用 SWMM 进行低影响开发模拟的模型误差分析

陈 刚^{1,2}, 王 琳¹, 张 寒^{1,2}

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 利用雨洪管理模型(SWMM)对低影响开发(LID)设施进行效果评估已经成为一种普遍的技术方法,但在向子汇水区添加 LID 设施时,若 LID 设施未占据整个子汇水区,则会引起子汇水区的渗透子面积、洼地蓄水不渗透子面积、无洼地蓄水不渗透子面积的重分割,随之产生模型误差。利用 SWMM 子汇水区等效分割基本原理,研究向汇流方式为 Outlet 的子汇水区中添加 LID 设施的模拟误差特点。结果发现,所添加 LID 设施状态为出流不进入渗透子面积时,随着子汇水区重分割而产生的模型误差较小,这种误差随着子汇水区的最大地表漫流路径长度属性以及 LID 设施面积比例的增加而增加。

关键词: 低影响开发(LID); 雨洪管理模型(SWMM); 误差分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0098-05

Model Error Analysis of Low Impact Development Simulated by SWMM

CHEN Gang^{1,2}, WANG Lin¹, ZHANG Han^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology <Ministry of Education>, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Application of storm water management model (SWMM) to evaluate the performance of low impact development (LID) facilities has become a common technical method. However, when LID facilities are constructed in a subcatchment area and the facilities do not occupy the whole area, it will cause re-partitioning of pervious area, impervious area and zero-impervious area, resulting in model errors. Based on the basic principle of subcatchment area equivalent partitioning of SWMM, simulation error characteristics of adding LID facilities to subcatchment area with catchment mode of Outlet were explored. When the LID facilities outflow did not enter the pervious area, the model error caused by the re-partitioning of the subcatchment area was smaller, and this error increased with the increase of the maximum surface overflow path length and the proportion of LID facility area in the subcatchment area.

Key words: low impact development (LID); storm water management model (SWMM); error analysis

基金项目: 山东省社会科学重点项目(18BDCJ01); 2017 年济南市社会民生重大专项(201704135); 国家科技部重点研发计划项目(2018YFC0408004)

低影响开发(LID)是我国海绵城市建设的主要途径之一,对LID设施进行效果评估是海绵城市系统构建过程的关键环节,评估结果影响着LID设施及组合系统的选择,决定工程能否达到预期控制效果。目前,雨洪管理模型(SWMM)已经成为LID设施水文水质控制效果评估的典型模型,在LID设施规划设计中得到广泛应用。

SWMM目前已更新至SWMM 5.1.013版,新版新增了LID设施去除污染物的模拟,可设置LID去除污染物比例、占用渗透子面积比例。SWMM中LID的设置有两种方式,一是将子汇水区一定比例的非LID面积由LID设施取代,二是单独设置一个全部由LID设施占据的子汇水区^[1]。第1种方法由于添加LID设施后对子汇水区分割的影响,导致模拟结果反映的是子汇水区重分割和LID设施本身造成的水文过程变化的叠加^[2]。这种由于子汇水区重分割带来的水文影响与是否添加LID设施无关,SWMM模型使用手册没有明确这种影响对模拟结果的干预强度,也没有明确两种LID设置方式的选择标准。

目前,关于SWMM的研究主要集中在模型应用方面,针对SWMM工作原理、模拟效果方面的研究很少,应用中出现无法正确解读模拟结果等问题。因此,笔者根据SWMM基本原理,探究在LID设施未占据全部子汇水区的情景下,伴随子汇水区重分割带来的水文影响特点,以期对SWMM的应用与理解提供参考。

1 模型基本原理

SWMM水文模块主要模拟地表径流的产流与汇流两个过程,地表产流计算前SWMM根据每个子汇水区的渗透性与蓄水能力划分子汇水区,分别划分为渗透子面积(记作P1)、洼地蓄水不渗透子面积(记作P2)、无洼地蓄水不渗透子面积(记作P3)。产流根据下渗模型结合降雨量、蒸发量,通过求差值确定。汇流过程则将P1、P2、P3的产流通过非线性水库模型演算转化为出流量。SWMM中汇流演算方式有Outlet、Impervious、Pervious三种。Outlet状态下子汇水区的P1、P2、P3产流直接汇集于子汇水区出口;Impervious状态下子汇水区的P1产流需汇入P2,P2接受P1产流后分别与P3演算至子汇水区出口;Pervious状态下子汇水区的P2、P3产流汇入P1后经P1演算至子汇水区出口。

2 等效子汇水区分割

根据SWMM的基本原理对子汇水区进行分割,可以将包含P1、P2、P3的子汇水区P分割为渗透子面积比例为100%的子汇水区A、渗透子面积比例为0且无洼地蓄水不渗透子面积比例为0的子汇水区B、无洼地蓄水不渗透子面积比例为100%的子汇水区C。子汇水区A、B、C的面积根据子汇水区P及其渗透性比例、无洼地蓄水不渗透子面积比例属性计算。子汇水区A、B、C的宽度属性在子汇水区P基础上根据面积按比例计算。子汇水区P的分割结果见图1,分割属性见表1。

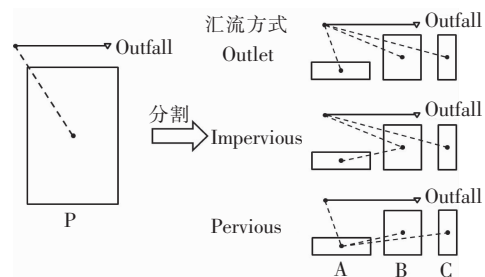


图1 子汇水区分割与汇流方式示意

Fig.1 Partition and confluence mode of subcatchment area

表1 分割子汇水区属性

Tab.1 Property of partitioning subcatchment area

项 目	子汇水区			
	P	A	B	C
面积/hm ²	W	$W \cdot (1 - Y)$	$W \cdot Y \cdot (1 - Z)$	$W \cdot Y \cdot Z$
宽度/m	X	X	$X \cdot (1 - Z)$	$X \cdot Z$
不渗透子面积比例	Y	0	1	1
无洼地蓄水不渗透子面积比例	Z	—	0	1
注: W 、 X 为子汇水区P的面积、宽度属性, Y 、 Z 为P中不渗透子面积、无洼地蓄水不渗透子面积比例。				

对表1中 W 、 X 、 Y 、 Z 分别取值1 hm²、100 m、0.7、0.25计算各子汇水区属性。坡度、不渗透子面积粗糙系数、渗透子面积粗糙系数、不渗透子面积蓄水深度、渗透子面积蓄水深度属性分别取值0.005、0.015、0.24、1.95 mm、7.5 mm。下渗模型选用Horton模型,最大渗入速率、最小渗入速率、衰减常数分别为110 mm/h、7 mm/h、6 h⁻¹。在相同降雨条件下,在SWMM中分别按照图1结构运行子汇水区P及其等效分割子汇水区A、B、C,模拟结果显示两者计算水文数据完全相同,子汇水区A、B、C与子汇

水区 P 在 SWMM 模型中完全等效。

3 添加 LID 的子汇水区分割

当子汇水区 P 中加入 LID 设施之后, P 等效分割子汇水区 A、B、C 的属性将发生变化, A、B、C 的

一部分面积转化为 LID 面积, 其相应的宽度属性在原基础上按照面积变化等比例缩小^[1]。P 等效分割子汇水区由 A、B、C 变为子汇水区 A-LID、B-LID、C-LID、LID, 其属性变化见表 2。

表 2 添加 LID 设施后分割子汇水区属性

Tab. 2 Property of partitioning subcatchment area after adding LID facilities

项 目	LID	A-LID	B-LID	C-LID
面积/hm ²	V	$W \cdot (1-Y) - V \cdot (1-N)$	$(W \cdot Y - V \cdot N) \cdot (1-Z)$	$W \cdot Y \cdot Z - V \cdot N \cdot Z$
宽度/m	$X \cdot \frac{V}{W-V}$	$X \cdot \frac{W-2V}{W-V}$	$(1-Z) \cdot X \cdot \frac{W-2V}{W-V}$	$Z \cdot X \cdot \frac{W-2V}{W-V}$
不渗透子面积比例	N	0	1	1
无洼地蓄水不渗透子面积比例	Z	—	0	1

注: V 为添加 LID 设施的面积, N 为添加 LID 设施所占总面积中的不渗透子面积比例。

5.1.013 版 SWMM 中对子汇水区添加 LID 设施, 不但可以设置 LID 面积及其对不渗透子面积的占用比例, 还可选择 LID 是否出流至渗透子面积 A。采用上述子汇水区分割方法获取添加 LID 前后的等效水文过程, 分析子汇水区重分割带来的模拟误差。A、B、C 三个子汇水区的综合汇流演算结果反映出不考虑 LID 设施时子汇水区 P 的水文效应, A-LID、B-LID、C-LID、LID 四个子汇水区的综合汇流演算结果反映出未添加 LID 设施但按照 LID 设施添加后子汇水区分割原理处理的水文效应, 两者的偏差即反映了在子汇水区中设置部分 LID 面积进行模拟时, 模型因子汇水区重分割带来的系统误差。

4 结果与分析

4.1 添加 LID 面积比例对模拟误差的影响

根据式(1)所示的暴雨强度公式, 利用芝加哥雨型, 模型获取降雨历时 2 h、时间步长 1 min、峰值比例 r 为 0.4、重现期为 10 年的降雨情景。假设子

汇水区属性 W、X、Y、Z、N 分别为 1 hm²、100 m、0.7、0.25、0.6, 汇流演算方式使用 Outlet, 设置不同的 LID 面积, 分别模拟添加 LID 前后分割子汇水区的水文指标。

$$q = \frac{4\,700(1+0.753\lg P)}{(t+17.5)^{0.898}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, L/(s·hm²); P 为降雨重现期, 年; t 为降雨历时, min。

由于研究区整体的径流峰值参数无法从模型的“状态报告”中直接获得, 只能以出水管道的最大流量演算结果来表示, 而管道最大流量参数涉及到模型的流量演算模块, 在本研究的各种变量条件下运行模型, 发现模拟的流量演算连续性误差从 0.05% 到 15% 不等, 浮动的流量演算连续性误差将直接影响子汇水区重分割偏差变化趋势的分析。故使用可以在“状态报告”中直接获得, 且只涉及径流演算模块的径流总量参数进行研究发现, 模拟结果见表 3。

表 3 LID 面积占比对径流总量模拟的影响

Tab. 3 Effect of LID area proportion on total runoff simulation

LID 面积/ hm ²	LID 面积 占比/%	径流总量				
		未添加 LID 等效分割/mm	添加 LID 后等效分割			
			出流至渗透 子面积/mm	偏差/%	不出流至渗透 子面积/mm	偏差/%
0.05	5	53.966	53.142	-1.527	53.960	-0.011
0.10	10	53.966	52.490	-2.735	53.954	-0.022
0.15	15	53.966	51.997	-3.649	53.946	-0.037
0.20	20	53.966	51.647	-4.297	53.938	-0.052
0.25	25	53.966	51.422	-4.714	53.928	-0.070
0.30	30	53.966	51.307	-4.927	53.916	-0.093
0.35	35	53.966	51.285	-4.968	53.902	-0.119
0.40	40	53.966	51.344	-4.859	53.884	-0.152
0.45	45	53.966	51.468	-4.629	53.863	-0.191
0.50	50	53.966	51.645	-4.301	53.836	-0.241

由表3可知,当LID未占据整个子汇水区,而是作为子汇水区的一个组成部分进行SWMM模拟时,模拟结果反映的LID设施水文控制效果中存在子汇水区重分割工作原理而带来的误差。这种误差随着LID在子汇水区中面积占比的增加而增加。当LID在子汇水区中的面积占比不超过50%,子汇水区重分割带来的系统误差将小于5%,在子汇水区汇流演算方式为Outlet情况下,将所添加LID的出流方式设置为不进入渗透子面积,能够显著降低LID添加过程中由于子汇水区重分割而带来的模拟误差。

通过设置LID所占总面积中不渗透子面积的比例 N 值进行模拟发现,当 N 值与未添加LID子汇水区的不渗透子面积比例 Y 值相同时(例如子汇水区不渗透子面积比例为40%,添加LID设施占用子汇水区的不渗透子面积 40 m^2 ,占用子汇水区的渗透子面积 60 m^2 的情景),LID出流不进入渗透子面积条件下的水文模拟结果与子汇水区采用Outlet汇

流方式的水文模拟结果完全一致,此条件下子汇水区重分割而带来的误差为0,这种特殊条件的设定可用于工程师对特定LID设施布置条件下水文控制效果的定量分析。

4.2 最大地表漫流路径长度对系统误差的影响

SWMM中子汇水区的宽度是指子汇水区面积与最大地表漫流路径长度的比值,最大地表漫流路径长度与子汇水区的产流过程密切相关,其取值一般不超过 $152\text{ m}^{[3]}$ 。通过设定不同的子汇水区面积与宽度进行最大地表漫流路径长度对子汇水区添加LID模拟的误差影响分析。

在上述重现期为10年的降雨情景下,保持子汇水区宽度、LID面积占比、LID占用不渗透子面积比例分别为 100 m 、 0.2 、 0.6 不变,调整子汇水区总面积,模拟在不同最大地表漫流路径长度条件下,由于在子汇水区中添加LID而导致的模型误差的变化情况,结果见表4。

表4 最大地表漫流路径长度对径流总量模拟的影响

Tab.4 Effect of maximum surface flow path length on total runoff simulation

子汇水区面积 W/hm^2	最大地表漫流长度/ m	径流总量				
		未添加LID等效分割/ mm	添加LID后等效分割			
			出流至渗透子面积/ mm	偏差/ $\%$	不出流至渗透子面积/ mm	偏差/ $\%$
0.10	10	58.349	57.694	-1.123	58.324	-0.043
0.20	20	57.376	56.469	-1.581	57.345	-0.054
0.40	40	56.061	54.740	-2.356	56.027	-0.061
0.60	60	55.166	53.482	-3.053	55.133	-0.060
0.80	80	54.496	52.481	-3.698	54.465	-0.057
1.00	100	53.966	51.647	-4.297	53.938	-0.052
1.20	120	53.533	50.932	-4.859	53.506	-0.050
1.40	140	53.169	50.308	-5.381	53.144	-0.047
1.60	160	52.857	49.754	-5.871	52.835	-0.042
1.80	180	52.586	49.256	-6.332	52.565	-0.040
2.00	200	52.348	48.806	-6.766	52.328	-0.038

由表4可知,当LID未占据整个子汇水区而是作为子汇水区的一个组成部分进行SWMM模拟时,由于子汇水区重分割原理而导致的模拟误差会受到子汇水区最大地表漫流路径长度的影响。当子汇水区采取Outlet的汇流方式时,若所添加LID的出流方式为进入子汇水区的渗透子面积,则进行LID水文模拟时由于汇水区分割原理导致的模型误差会随着子汇水区最大地表漫流路径长度的增加而增加,在最大地表漫流路径长度合理的情况下误差不会超过7%。相同条件下,若所添加LID的出流方式为

不进入子汇水区的渗透子面积,则模型误差随子汇水区最大地表漫流路径长度的增加先增大后减小,模型误差的峰值可能出现在最大地表漫流路径长度为 $20\sim 60\text{ m}$ 之间。

5 结论

采用模型模拟LID措施的水文、水质控制效果,既可以节省大量实验验证时间,提高设计效率,还可以减少实验设施的构造成本。但由于对模型运行原理、运行结果的理解不充分,在模型的运用过程中存在着很多问题,导致模拟结果的准确性、模拟手段的

认可度被普遍质疑。掌握在子汇水区中添加 LID 设施的模拟原理,了解影响 LID 模拟误差的主要因素、模拟误差范围对于提高 LID 模拟的准确度、理解 LID 模拟结果具有重要作用。

在子汇水区的汇流方式为 Outlet 情况下,利用 SWMM 的子汇水区分割基本原理,分析 LID 在子汇水区中的面积占比、最大地表漫流路径长度两个因素对 LID 水文控制模拟的影响,得出结论如下:

① 根据 SMMM 产汇流工作原理分析,向子汇水区所添加 LID 设施未占据整个子汇水区面积时,LID 模拟的水文结果是 LID 本身控制效果与子汇水区重分割而引起的模型误差的叠加,这个误差受到子汇水区中 LID 面积占比以及最大地表漫流路径长度属性的影响。

② 在子汇水区的汇流方式为 Outlet 时,当所添加 LID 设施状态为出流不进入渗透子面积时,因模型中子汇水区重分割而带来的模型误差较小。在 LID 设施出流不进入渗透子面积状态下,模型误差会随着子汇水区中 LID 面积占比、最大地表漫流路径长度的增加而增加。

③ 当子汇水区中被 LID 设施所占用的渗透子面积和不渗透子面积之比与子汇水区初始渗透性和不渗透性面积之比一致时,模型因为子汇水区重分割而带来的误差为 0。实际工程中一般所添加的

LID 主要占用子汇水区的渗透子面积,很少按比例占用子汇水区面积,因此进行 LID 模拟时因子汇水区重分割而带来的误差普遍存在。

参考文献:

- [1] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.1) [M]. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2015.
- [2] 梁小光,武治国,任俊雯. 子汇水区分割对 SWMM 低影响开发模拟的影响研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 1-5.
LIANG Xiaoguang, WU Zhiguo, REN Junwen. Influence of subcatchment partitioning on SWMM's low impact development simulation[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 1-5 (in Chinese).
- [3] ROSSMAN L A. 雨水管理模型 SWMMH(5.0 版)使用手册[M]. 李树平,译. 上海:同济大学,2010.
ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.0) [M]. LI Shuping, translated. Shanghai: Tongji University, 2010 (in Chinese).

作者简介:陈刚(1993 -),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事水资源利用与规划研究。

E-mail: 18671313832@163.com

收稿日期:2019-07-11

修回日期:2019-08-20

(编辑:刘贵春)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命