

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.021

# 基于SWMM的LID参数局部与全局敏感性分析

康得军<sup>1,2</sup>, 邱福杰<sup>1,3</sup>, 温儒杰<sup>1,4</sup>, 吴端炜<sup>1,5</sup>, 赖李保壹<sup>1,6</sup>, 赵颖<sup>7</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学晋江科教园, 福建 晋江 362251; 3. 华东勘测设计院<福建>有限公司, 福建 福州 350001; 4. 中冶京诚工程技术  
有限公司, 北京 100176; 5. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉  
430010; 6. 福建省龙岩市长汀县濯田镇政府, 福建 龙岩 366300; 7. 中国环境科学研究  
院, 北京 100012)

**摘要:** 针对SWMM模型LID(低影响开发)参数的敏感性编程分析及其取值对模拟的影响, 编写了MATLAB、Visual Basic.NET代码, 选用修正的Morris筛选法与多元逐步回归法, 分析了福州大学晋江科教园SWMM模型透水铺装、绿色屋顶、生物滞留带29个经验参数的敏感性。结果表明, 对径流总量与COD总量显著敏感的是LID利用模块参数: 处理不渗透面积百分比, 其是LID模拟关键参数; 透水铺装参数对径流总量的敏感性与降雨强度呈负相关, 绿色屋顶、生物滞留带参数对径流总量的敏感性与降雨强度呈正相关, 3种LID设施参数对COD总量的敏感性较为稳定, 表明LID控制模块参数对不同目标变量呈现不同的敏感性; 多元逐步回归法的敏感性参数多于修正的Morris筛选法, 前者能全面探究参数与目标变量的线性关系以及参数相互作用对结果的影响。

**关键词:** SWMM; LID(低影响开发)参数; 敏感性分析; MATLAB

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0131-08

## Analysis on Local and Global Sensitivity of LID Parameters Based on SWMM

KANG De-jun<sup>1,2</sup>, QIU Fu-jie<sup>1,3</sup>, WEN Ru-jie<sup>1,4</sup>, WU Duan-wei<sup>1,5</sup>, LAI Li-bao-yi<sup>1,6</sup>,  
ZHAO Ying<sup>7</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Jinjiang Science and Education Park of Fuzhou University, Jinjiang 362251, China; 3. Huadong Engineering <Fujian> Corporation, Fuzhou 350001, China; 4. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China; 5. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 6. Zhuotian Town Government of Changting County in Longyan City of Fujian Province, Longyan 366300, China; 7. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Aiming at the sensitivity programming analysis of LID (low impact development) parameters of SWMM (storm water management model) and its impact on simulation, MATLAB and Visual Basic.NET code were compiled, and the modified Morris screening method and multiple stepwise regression method were used to analyze the sensitivity of 29 empirical parameters of PP (permeable

基金项目: 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心开放课题(UDC2017032512)

通信作者: 康得军 E-mail: dj kang@fzu.edu.cn

pavement), GR (green roof) and BC (bioretention cell) in the SWMM of Jinjiang Science and Education Park of Fuzhou University. The parameter that showed great sensitivity to the total runoff and COD was the LID usage module parameter: % of Impervious Area Treated, indicating that it was the key parameter for LID simulation. The sensitivity of PP parameters to total runoff decreased with the increase of rainfall intensity, but the sensitivity of GR and BC parameters to total runoff increased with the increase of rainfall intensity, and the sensitivity of the three LID parameters to the total COD was relatively stable, indicating that the LID control module parameters showed different sensitivities to different target variables. Multiple stepwise regression method showed more sensitive parameters than modified Morris screening method, indicating that the former could explore the linear relationship between parameters and target variables and the impact of parameter interaction on the results.

**Key words:** SWMM (storm water management model); LID (low impact development) parameters; sensitivity analysis; MATLAB

近年来洪涝灾害、径流污染等城市雨水环境问题日益严峻<sup>[1]</sup>。为直观模拟降雨及评估低影响开发(LID)设施的雨洪调控效果,暴雨洪水管理模型(SWMM)应运而生<sup>[2-3]</sup>。SWMM存在影响模拟准确性的经验参数,通过敏感性分析甄别出对结果影响显著的参数尤为重要<sup>[4]</sup>。针对SWMM的参数敏感性,李美水等<sup>[5]</sup>利用自主研发的SWMM-UQ模块,采用Sobol法分析SWMM水量与水质参数全局敏感性,从而有效识别参数;李伟雨<sup>[6]</sup>利用MATLAB,采用多元逐步回归法分析SWMM水量参数全局敏感性,从而有效降低不确定性。以往SWMM参数敏感性研究主要针对水量与水质参数,而对LID参数的敏感性研究有待完善<sup>[5-11]</sup>。为此,笔者以福州大学晋江科教园为研究对象,编写基于MATLAB、Visual Basic.NET的分析流程代码,在不同重现期降雨条件下,使用修正的Morris筛选法与多元逐步回归法开展SWMM的透水铺装(PP)、绿色屋顶(GR)、生物滞留带(BC)29个经验参数对径流总量、COD总量敏感性对比研究,以期利用计算机高级语言编程实现敏感性分析流程自动化,为SWMM的LID参数合理设置与LID模块的应用提供依据。

## 1 模型构建

### 1.1 研究区域概况

福州大学晋江科教园位于福建省晋江市,晋江降雨时空分布不均,6月—8月降雨量大,台风、洪涝等灾害天气时有发生<sup>[12]</sup>。研究区域总面积为23.6 hm<sup>2</sup>,添加LID设施前后不透水下垫面面积占比分别为90.15%、34.97%,将土地类型分成路面、屋面、绿

地,面积占比分别为44.52%、21.34%、34.14%,透水铺装、绿色屋顶、生物滞留带面积占比分别为20.22%、10.67%、24.29%。

### 1.2 暴雨过程设计

根据福建省气候中心与晋江市城乡规划局共同编制的最新版《晋江市暴雨强度公式修编技术报告(2015)》成果,确定晋江市暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{1517.455(1 + 0.763\lg P)}{(t + 11.302)^{0.612}} \quad (1)$$

式中: $q$ 为暴雨强度, L/(s·hm<sup>2</sup>); $P$ 为重现期,a; $t$ 为降雨历时,min。

采用芝加哥雨型,基于公式(1)获得历时2 h、雨峰系数为0.4的不同重现期降雨,降雨曲线见图1。

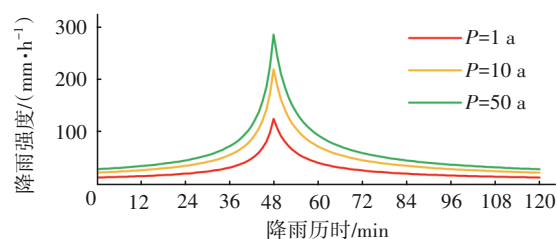


图1 不同重现期的降雨过程曲线

Fig.1 Rainfall process curves with different return periods

### 1.3 SWMM模型概化

根据雨水管网、地形景观CAD,基于ArcGIS完成雨水管网概化、子汇水区划分与确定性参数提取,借助GIS to Excel to SWMM生成SWMM的inp输入文件,完成建模。将研究区域概化为92个子汇水区、229个节点、232条雨水管道、12个排放口,研究区域的SWMM模型如图2所示。

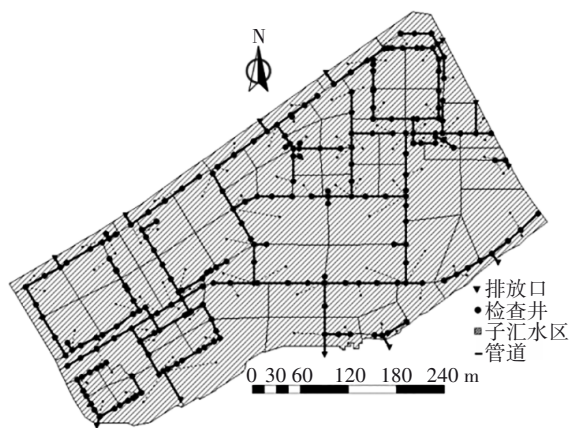


图2 研究区域概化  
Fig.2 Generalized distribution of study area

1.4 模型经验参数选择

最大、最小入渗率分别取48.7、3.5 mm/h,衰减系数取6.0 h<sup>-1</sup>,透水区、不透水区曼宁系数分别取

0.16、0.012,透水区、不透水区洼蓄深度分别取3.58、1.43 mm,无洼地不透水面积比取25%,管道曼宁系数取0.014。由综合径流系数法<sup>[13]</sup>可知,重现期为1、10、50 a的3场降雨在峰现时间的综合径流系数分别为0.625、0.706、0.739,均位于经验值范围内,故上述水量参数取值可用于模拟分析。选择饱和模型与指数模型模拟COD的累积与冲刷,路面、屋面、绿地的最大累积量分别取68、53、26 kg/hm<sup>2</sup>,半饱和累积时间分别取1.3、1.3、2.7 d,冲刷系数分别取0.014、0.010、0.007,冲刷指数分别取1.6、1.2、2.6,雨前干旱天数取5 d,路面污染物清洁去除效率取70%,其余土地类型取0。根据SWMM手册与相关文献<sup>[6,14-15]</sup>获取SWMM的透水铺装(PP)、绿色屋顶(GR)、生物滞留带(BC)29个经验参数取值,如表1所示。

表1 SWMM模型LID模块主要经验参数

Tab.1 Major empirical parameters with respect to SWMM LID module

编号	参数名称	物理意义	取值范围	初始值
1	PP Berm Height	PP表面蓄水深度/mm	1~10	5.5
2	PP Surface Roughness	PP表面粗糙系数	0.01~0.15	0.08
3	PP Surface Slope	PP表面坡度/%	0.2~5.0	2.6
4	PP Thickness	PP路面层厚度/mm	100~150	125
5	PP Void Ratio	PP路面层孔隙比	0.12~0.21	0.165
6	PP Impervious Surface	PP路面层不透透表面系数	0~0.2	0.1
7	PP Clogging Factor	PP蓄水层堵塞因子	100~250	175
8	PP Flow Coefficient	PP排水系数	200~500	350
9	GR Berm Height	GR表面蓄水深度/mm	50~150	100
10	GR Vegetation Volume Fraction	GR植被覆盖系数	0.5~0.9	0.7
11	GR Thickness	GR土壤层厚度/mm	75~150	112.5
12	GR Porosity	GR土壤层孔隙率	0.4~0.6	0.5
13	GR Field Capacity	GR土壤层产水能力	0.2~0.3	0.25
14	GR Wilting Point	GR土壤层枯点	0.02~0.15	0.085
15	GR Conductivity	GR土壤层导水率/(mm·h <sup>-1</sup> )	30~160	95
16	GR Conductivity Slope	GR土壤层导水率坡度	5~15	10
17	GR Suction Head	GR土壤层吸水头/mm	30~110	70
18	BC Berm Height	BC表面蓄水深度/mm	50~150	100
19	BC Vegetation Volume Fraction	BC植被覆盖系数	0.5~0.9	0.7
20	BC Thickness	BC土壤层厚度/mm	400~600	500
21	BC Porosity	BC土壤层孔隙率	0.4~0.6	0.5
22	BC Field Capacity	BC土壤层产水能力	0.2~0.3	0.25
23	BC Wilting Point	BC土壤层枯点	0.06~0.16	0.11
24	BC Conductivity	BC土壤层导水率/(mm·h <sup>-1</sup> )	30~80	55
25	BC Conductivity Slope	BC土壤层导水率坡度	5~15	10
26	BC Suction Head	BC土壤层吸水头/mm	30~100	65
27	BC Void Ratio	BC蓄水层孔隙比	0.5~0.7	0.6
28	Surface Width per Unit	单元表面宽度/m	0~100	50
29	% of Impervious Area Treated	处理不透透面积百分比/%	0~33	16.5



## 2 LID参数敏感性分析

### 2.1 修正的 Morris 筛选法原理

修正的 Morris 筛选法属于局部敏感性分析法<sup>[16]</sup>,其计算公式如下:

$$SN = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (Y_{i+1} - Y_i)/Y_0}{n(P_{i+1} - P_i)/100} \quad (2)$$

式中:SN为敏感性判别因子; $Y_0$ 为初始值对应的运行结果; $Y_i$ 、 $Y_{i+1}$ 分别为第*i*、*i*+1次运行结果; $P_i$ 为第*i*个扰动值与初始值之间的变化率(第0个扰动值即为初始值); $P_{i+1}$ 为第*i*+1个扰动值与初始值之间的变化率;*n*为扰动个数。

当参数的|SN|>1时认为其极敏感,在0.2~1之间时认为其高敏感,在0.05~0.2之间时认为其中等敏感,在0~0.05之间时认为其不敏感。

### 2.2 多元逐步回归法原理

多元逐步回归法属于全局敏感性分析法,分析前需要对参数进行随机抽样,其原理是根据 $R^2$ 大小顺序依次将参数引入回归方程,最终剔除对目标变量影响较小的不敏感参数,保留对目标变量影响较大的敏感性参数,得到最优方程,通过比较各个参数的标准回归系数(SRC)以判别其敏感性<sup>[17]</sup>。

### 2.3 分析流程自动化

基于MATLAB、Visual Basic、NET(VB、NET)的计算机编程可使数学运算分析自动化,大大提高试验次数,使试验结果更可靠<sup>[18-19]</sup>。SWMM的核心源代码提供了基于VB、NET等语言的API函数,可对其进行定制开发<sup>[20]</sup>。以重现期为1 a的LID参数敏感性分析为例,其流程为:①根据表1中29个LID参数初始值,保持扰动目标参数以外的其他参数不变,以10%作为固定步长,依次对各个参数进行百分率为70%、80%、90%、100%、110%、120%、130%的扰动,得到修正的 Morris 筛选法203组模型参数扰动组合;根据表1中LID参数经验范围,采用Latin超立方抽样法得到1 000组LID参数的随机组合,两种方法的参数组合生成过程均由MATLAB编程实现。②借助MATLAB替换初始inp输入文件的对应参数,分别获得两种方法的203、1 000组新inp输入文件。③基于Microsoft Visual Studio(VS) 2019平台,调用接口程序中的swmm\_run函数实现模拟结果的批量自动生成,分别得到两种方法的203、1 000组rpt报告文件。④借助MATLAB分别提取两种方法rpt报

告文件内的径流总量、COD总量数据,进行相关分析。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 修正的 Morris 筛选法

通过MATLAB、VB、NET编程联合处理,得到重现期为1、10、50 a时29个LID参数对径流总量、COD总量的敏感性判别因子SN(共计174个)。扰动百分率为100%时子汇水区S0的PP、S2的GR、S0的BC性能曲线见图3。

从图3(a)~(c)可以看出,在3场降雨条件下PP表面层的下渗能力均很快饱和,随后由PP路面层滞蓄径流,随着降雨强度的增大,PP路面层的下渗能力趋于饱和。GR Vegetation Volume Fraction、BC Berm Height、BC Vegetation Volume Fraction、BC Conductivity在重现期为1和10 a时为不敏感参数,在重现期为50 a时为中等敏感参数,原因是GR、BC在降雨强度较小时能有效吸纳进入设施的径流。由图3(d)可知,在重现期为1 a时GR总入渗速率与表面层入渗速率始终相等,不产生表面层溢流。由图3(g)可知,在重现期为1 a时BC土壤层尚未达到其产水能力值0.25,此时入渗水完全被表面层、土壤层滞蓄。由图3(e)、(f)、(h)、(i)可知,在重现期为10和50 a时,GR、BC总入渗速率逐渐大于表面层入渗速率,系统产生表面层溢流,降雨强度较大时GR、BC部分参数的大小决定其对径流滞蓄能力的大小。% of Impervious Area Treated在重现期为1 a时为高敏感参数,在重现期为10和50 a时为中等敏感参数,这是由于% of Impervious Area Treated表征的是LID设施处理的子汇水区非LID不渗透面积占非LID不渗透总面积的百分比,随降雨强度的增大,未进入LID设施处理的非LID不渗透区域的径流量增大。

LID参数中对COD总量存在敏感性的参数有PP Berm Height、PP Thickness、PP Void Ratio、GR Thickness、GR Porosity、% of Impervious Area Treated、BC Vegetation Volume Fraction。就PP而言,PP Berm Height在重现期为1 a时为中等敏感参数,在重现期为10和50 a时为不敏感参数,PP Thickness、PP Void Ratio均为中等敏感参数,这是由于PP表面层较浅,在降雨强度较小时对COD尚有一定截留作用,随着降雨强度的增大,PP表面层下渗能力趋于

饱和,COD更易随渗流进入路面层,3场降雨条件下由PP路面层截留净化COD,PP Thickness、PP Void Ratio直接决定路面层截留净化COD的能力。就GR而言,GR Thickness、GR Porosity均为中等敏感参数,这是由于在3场降雨条件下由GR土壤层对COD总量产生影响,GR Thickness、GR Porosity对截留净化COD起决定作用。就BC而言,BC Vegetation Volume Fraction在重现期为1和10 a时为不敏感参数,在重

现期为50 a时为中等敏感参数,原因是BC在降雨强度较小时对COD具有极强的截留净化能力,随降雨强度的增大,参数对COD总量逐渐表现出敏感性。% of Impervious Area Treated均为中等敏感参数,与其对径流总量的影响类似,其对COD总量敏感性随降雨强度的增加而降低,这是由于随降雨强度的增大,未进入LID设施处理的非LID不透透区域的COD总量增大。

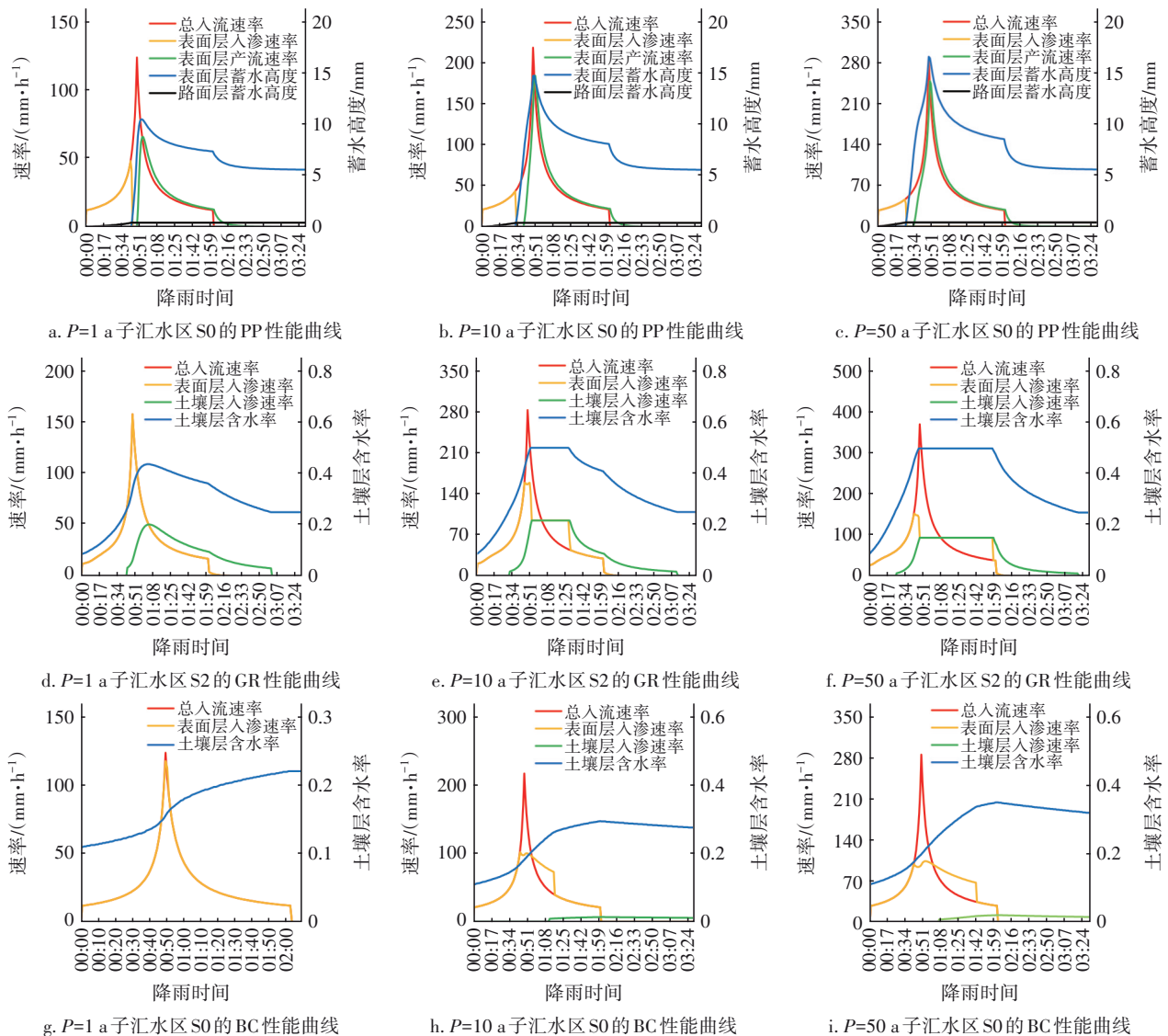


图3 LID性能曲线

Fig.3 LID performance curve

### 3.2 多元逐步回归分析法

通过MATLAB、VB、NET编程联合处理,得到重现期为1、10、50 a各1 000组LID参数随机组合对应的径流总量和COD总量(共计6 000个),将每场降雨的1 000组LID参数组合与对应组合下的目标变量

数据导入IBM SPSS Statistics 22,LID参数对径流总量的多元逐步回归分析结果如表2所示。

3场降雨条件下对径流总量与COD总量最敏感的均为% of Impervious Area Treated,其SRC值为负数,说明参数对目标变量的影响呈负相关,这是由

于% of Impervious Area Treated增大,使进入LID设施处理的非LID不透透区域的径流量与COD总量增加,导致径流总量与COD总量减小。由表2可知,在重现期为1和10 a时% of Impervious Area Treated对径流总量的SRC绝对值分别为0.942、0.907,敏感性极强,在重现期为50 a时其SRC绝对值降至0.749,敏感性减弱。在重现期为1和10 a时% of Impervious Area Treated的 $R^2$ 分别为0.887、0.840,其对径流总量所起的作用较大,在重现期为50 a时 $R^2$ 降至0.545,说明此时其对径流总量不起决定作用,继续依次引入BC Conductivity、GR Conductivity等回归次序位于2~6的参数后 $R^2$ 达到0.794,证实这些参数共同对目标变量起决定作用。最终 $R^2$ 分别为0.965、0.915、0.850,证实参数与目标变量线

性关系突出。% of Impervious Area Treated对COD总量的SRC绝对值分别为0.796、0.789、0.760,敏感性较强, $R^2$ 分别为0.667、0.656、0.596,说明其对COD总量不起决定作用,在重现期为1 a时继续依次引入PP Berm Height、Surface Width per Unit等回归次序位于2~10的参数后 $R^2$ 达到0.923,在重现期为10 a时继续依次引入Surface Width per Unit、PP Berm Height等回归次序位于2~10的参数后 $R^2$ 达到0.896,在重现期为50 a时继续依次引入Surface Width per Unit、GR Thickness等回归次序位于2~13的参数后 $R^2$ 达到0.888,说明回归次序靠前的参数共同对COD总量起决定作用。最终 $R^2$ 分别为0.945、0.925、0.908,说明模型参数与COD总量存在显著的线性关系。

表2 LID参数对径流总量的多元逐步回归分析

Tab.2 Multiple stepwise regression analysis of LID parameters to total runoff

回归次序	P=1 a			P=10 a			P=50 a		
	参数名称	SRC	$R^2$	参数名称	SRC	$R^2$	参数名称	SRC	$R^2$
1	% of Impervious Area Treated	-0.942	0.887	% of Impervious Area Treated	-0.907	0.840	% of Impervious Area Treated	-0.749	0.545
2	PP Berm Height	-0.170	0.920	GR Conductivity	-0.113	0.854	BC Conductivity	-0.286	0.622
3	PP Void Ratio	-0.138	0.941	PP Berm Height	-0.117	0.868	GR Conductivity	-0.281	0.698
4	PP Thickness	-0.111	0.952	PP Void Ratio	-0.097	0.879	BC Vegetation Volume Fraction	0.215	0.738
5	PP Impervious Surface	0.069	0.957	BC Conductivity	-0.111	0.889	BC Berm Height	-0.217	0.783
6	Surface Width per Unit	0.069	0.962	BC Vegetation Volume Fraction	-0.080	0.896	BC Porosity	-0.094	0.794
7	PP Surface Roughness	-0.033	0.963	BC Berm Height	-0.075	0.902	PP Berm Height	-0.097	0.803
8	GR Conductivity	-0.027	0.964	PP Thickness	-0.074	0.906	GR Vegetation Volume Fraction	0.105	0.812
9	BC Conductivity	-0.026	0.965	Surface Width per Unit	0.062	0.910	GR Berm Height	-0.089	0.819
10	PP Surface Slope	0.018	0.965	GR Vegetation Volume Fraction	0.044	0.912	PP Void Ratio	-0.087	0.827
11	GR Vegetation Volume Fraction	0.014	0.965	GR Berm Height	-0.029	0.912	Surface Width per Unit	0.069	0.831
12	BC Porosity	-0.013	0.965	PP Impervious Surface	0.031	0.913	BC Suction Head	-0.067	0.835
13				BC Suction Head	-0.030	0.914	PP Thickness	-0.057	0.839
14				BC Porosity	-0.029	0.915	GR Porosity	-0.066	0.842
15				PP Surface Roughness	-0.019	0.915	GR Thickness	-0.054	0.846
16				GR Thickness	-0.019	0.915	PP Impervious Surface	0.042	0.847
17							PP Clogging Factor	-0.036	0.848
18							BC Wilting Point	0.033	0.849
19							BC Void Ratio	0.026	0.850

对比不同降雨强度下参数的敏感性,随降雨强度的增大,保留引入回归方程的参数增加,表明降雨强度增大对参数敏感性有一定的激发作用。针对径流总量,PP Berm Height、PP Surface Roughness

等参数的回归次序随降雨强度的增大而下降,GR Conductivity、BC Conductivity等的回归次序随降雨强度的增大而上升,这是由于PP在降雨强度较小时对其设施参数的设置直接决定设施层次结构,影响



其对径流滞蓄能力的大小,当降雨强度较大时PP的径流滞蓄能力趋于饱和。而GR、BC在降雨强度较小时能够有效地滞蓄径流,当降雨强度较大时由设施参数具体设置决定的设施层次结构对径流总量所起作用逐渐表现出来。针对COD总量,PP Berm Height、PP Void Ratio、GR Thickness等在3场降雨条件下均表现出较高的敏感性,这是由于PP、GR层次结构直接影响其对COD截留净化能力的大小,而BC在3场降雨条件下均能够有效地截留净化COD。

### 3.3 对比分析

#### 3.3.1 相同点

两种分析方法均表明,% of Impervious Area Treated对径流总量表现出显著且稳定的敏感性;PP参数对径流总量的敏感性随降雨强度的增大而减小,GR、BC参数对径流总量的敏感性随降雨强度的增大而增大。

#### 3.3.2 不同点

PP Impervious Surface、Surface Width per Unit等在多元逐步回归法中被保留引入回归方程,而这些参数在修正的Morris筛选法中被认为不敏感。原因可能是修正的Morris筛选法无法反映参数相互作用对结果的影响,掩盖了部分参数的敏感性,而多元逐步回归法弥补了这一缺陷。

## 4 结论

① 修正的Morris筛选法表明,PP Thickness、PP Void Ratio、GR Vegetation Volume Fraction、BC Berm Height、BC Vegetation Volume Fraction、BC Conductivity、% of Impervious Area Treated对径流总量表现出敏感性;PP Berm Height、PP Thickness、PP Void Ratio、GR Thickness、GR Porosity、BC Vegetation Volume Fraction、% of Impervious Area Treated对COD总量表现出敏感性。其中,% of Impervious Area Treated对目标变量表现出显著且稳定的敏感性。

② 多元逐步回归分析法表明,对径流总量与COD总量最敏感的参数均为% of Impervious Area Treated,其对径流总量起的作用从作用较大转变为与回归次序靠前参数共同起决定作用,其对COD总量不起决定作用,而是与之后保留引入回归方程的Surface Width per Unit等回归次序靠前参数共同起决定作用。

③ 两种方法的结论总体一致,均表明当径流总量为目标变量时PP参数敏感性与降雨强度呈负相关,GR、BC参数与其呈正相关。不同点是修正的Morris筛选法认为PP Impervious Surface等不敏感,而多元逐步回归法将其保留引入至回归方程,表明后者分析更周详。

### 参考文献:

- [1] WU H C, HUANG G R, MENG Q Q, *et al.* Deep tunnel for regulating combined sewer overflow pollution and flood disaster: a case study in Guangzhou City, China[J]. *Water*, 2016, 8(8): 329-342.
- [2] HUANG M M, JIN S G. A methodology for simple 2-D inundation analysis in urban area using SWMM and GIS [J]. *Natural Hazards*, 2019, 97(1): 15-43.
- [3] 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).
- [4] KREBS G, KOKKONEN T, VALTANEN M, *et al.* Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 482-497.
- [5] 李美水,杨晓华. 基于Sobol方法的SWMM模型参数全局敏感性分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 95-102.  
LI Meishui, YANG Xiaohua. Global sensitivity analysis of SWMM parameters based on Sobol method[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(17): 95-102 (in Chinese).
- [6] 李伟雨. 基于SWMM模型的悦来会展城雨洪模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.  
LI Weiyu. Study on Stormwater Simulation in Convention and Exhibition City of Yuelai Based on SWMM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018 (in Chinese).
- [7] KNIGHTON J, LENNON E, BASTIDAS L, *et al.* Stormwater detention system parameter sensitivity and uncertainty analysis using SWMM [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(8): 1-37.
- [8] XU Z X, XIAO L J, LI H Z, *et al.* Runoff simulation of two typical urban green land types with the stormwater

- management model (SWMM): sensitivity analysis and calibration of runoff parameters [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(6): 1-16.
- [9] TSAI L Y, CHEN C F, FAN C H, *et al.* Using the HSPF and SWMM models in a high pervious watershed and estimating their parameter sensitivity [J]. *Water*, 2017, 9(10): 780-795.
- [10] 赵月, 张建丰, 李涛, 等. 降雨径流模型的参数敏感性分析与方法比较[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(7): 114-120.
- ZHAO Yue, ZHANG Jianfeng, LI Tao, *et al.* Parameter sensitivity analysis and method comparison of rainfall runoff model [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7): 114-120 (in Chinese).
- [11] 代文江, 李江云. 城市雨洪模型参数不确定性分析及应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(3): 109-113.
- DAI Wenjiang, LI Jiangyun. Analysis and application of parameter uncertainty of urban storm water model [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(3): 109-113 (in Chinese).
- [12] 刘畅, 陈兴伟, 刘传铭. 晋江流域HEC-HMS模型关键参数的分区率定[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 40-47.
- LIU Chang, CHEN Xingwei, LIU Chuanming. The determination of key parameters of HEC-HMS based on multi-sites calibration and validation in Jinjiang River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(3): 40-47 (in Chinese).
- [13] 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, 35(11): 213-217.
- LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(11): 213-217 (in Chinese).
- [14] 付晓弘. 基于海绵模块的年径流控制率评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- FU Xiaohong. Research on Annual Runoff Control Rate Evaluation Method Based on Sponge Module [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese).
- [15] 曾家俊. 基于解析概率方程与模型模拟的LID措施径流控制效应综合评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- ZENG Jiajun. Comprehensive Evaluation of Runoff Control Effect of LID Measures Based on Analytical Probability Equation and Model Simulation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [16] CHEN Q S, XIE X H, DU Q Y, *et al.* Parameters sensitivity analysis of DO in water quality model of QUAL2K[J]. *Earth and Environmental Science*, 2018, 191(1): 1-8.
- [17] JIA R F, FANG S B, TU W R, *et al.* Driven factors analysis of China's irrigation water use efficiency by stepwise regression and principal component analysis [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016, 2016: 8957530.
- [18] YANG Y, CHUI T F M. Rapid assessment of hydrologic performance of low impact development practices under design storms [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018, 54(3): 613-630.
- [19] XING W, LI P, CAO S, *et al.* Layout effects and optimization of runoff storage and filtration facilities based on SWMM simulation in a demonstration area[J]. *Water Science and Engineering*, 2016, 9(2): 115-124.
- [20] ESTEBAN S, LUIS C, JERONIMO P. Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models Iber and SWMM[J]. *Water*, 2020, 12(9): 2647-2661.

作者简介: 康得军(1981- ), 男, 湖北十堰人, 博士, 副教授, 主要从事海绵城市建设理论与技术研究。

E-mail: dj kang@fzu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-20

修回日期: 2021-09-02

(编辑: 刘贵春)