

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.018

低影响开发设施组合的水文模拟及不确定性分析

郑妍妍, 秦华鹏

(北京大学深圳研究生院环境与能源学院 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 在海绵城市建设中,通过多种低影响开发(LID)设施的组合应用可实现对城市雨径流的调控。针对LID设施组合的水文模拟存在高维参数估值不确定性分析的难题,以深圳环保产业园LID示范区为例,构建LID组合设施的暴雨洪水管理模型(SWMM),结合Morris筛选法与DREAM算法,对不同降雨条件下模型中不同设施、不同类型参数的灵敏度和不确定性进行分析。结果表明,位于下游的设施参数灵敏度普遍高于上游设施,排水及导水相关参数灵敏度相对较高;下游设施的排水参数后验分布峰值明显,参数不确定性小;中等强度降雨事件模拟结果的不确定性比高强度降雨事件要小。

关键词: 低影响开发; 暴雨洪水管理模型(SWMM); 水文模拟; 不确定性分析; 海绵城市

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2022)01-0114-08

Hydrological Modeling of Low Impact Development Combined Facilities and Its Uncertainty Analysis

ZHENG Yan-yan, QIN Hua-peng

(Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In the construction of sponge city, the low impact development (LID) combined facilities can be used to control the rainfall runoff. But there is a large uncertainty of high-dimensional modeling with combined LID facilities. The storm water management model (SWMM) of LID combined facilities in a LID demonstration area of Shenzhen Environmental Protection Industrial Park was constructed, and the sensitivity and uncertainty of different facilities and different types of parameters in the model under different rainfall conditions were analyzed by the Morris screening method and differential evolution adaptive metropolis (DREAM) algorithm. The sensitivity of the downstream facilities parameters was generally higher than that of the upstream facilities parameters, and the sensitivity of drainage and conductivity related parameters was relatively high. The parameters of the downstream facilities had obvious peak posterior distribution and the parameter uncertainty was small. The uncertainty of the simulation results of moderate rainfall events was less than that of heavy rainfall events.

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20170818090113750)

通信作者: 秦华鹏 E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

Key words: low impact development; storm water management model (SWMM); hydrological modeling; uncertainty analysis; sponge city

低影响开发(LID)作为国家海绵城市建设的重要手段之一,具有减少地表径流、削减污染物、降低峰值等调控城市水文效果^[1]。LID设施类型多样,包括生物滞留池、绿色屋顶、植被草沟、渗透铺装等。研究表明,多类型组合LID设施比单体LID设施具有更好的径流控制及污染削减效果^[2-3]。国内外越来越多的管理者在建设前采用模型进行估算。近年来,关于单体LID设施及流域尺度低影响开发的水文响应模拟研究十分广泛^[4],SWMM、MIKE、SUSTAIN等雨洪管理模型已经广泛用于LID的水文分析^[5]。但由于模型常用相对简单的数学公式描述复杂的水文过程,往往会导致水文模型“失真”,即预测结果存在不确定性^[6]。

现在常用的水文模型不确定性研究方法主要有马尔可夫链蒙特卡罗模拟(MCMC)、拉丁超立方体(Latin Hypercube)、广义似然不确定性估计(GLUE)等。其中,以贝叶斯理论为基础的MCMC方法将模型参数的先验信息和后验信息相联系,使得模拟过程既充分利用数据隐含信息,又能与实际经验结合,减少了参数识别的风险^[7-8]。已有不少学者将MCMC方法用于水文模型的不确定性分析,例如,桑燕芳等^[9]采用基于贝叶斯理论的不确定性分析方法验证了水文线型参数不确定性的客观存在,并论证了该方法的有效性;Avellaneda等^[10]研究了LID设施在街区尺度的径流调控长期效果,使用MCMC方法分析了模拟的不确定性。

当LID设施采用组合连接时,参数维度升高,会对模拟结果带来更大的不确定性。因此,需要对组合连接型LID设施的模拟不确定性展开深入的研究。笔者以深圳环保产业园LID示范区为例,利用暴雨洪水管理模型(SWMM)构建组合型LID模型,结合Morris筛选法与DREAM(Differential Evolution Adaptive Metropolis)算法,对不同降雨条件下模型中不同设施、不同类型参数的灵敏度和不确定性进行分析,旨在以场地实际监测数据为基础,分析SWMM中组合型LID设施的参数灵敏度及不确定性规律,以提高LID水文效应模拟的科学性。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

研究区域为深圳市环保产业园内两栋办公楼间的走廊,汇水面积为4 098 m²,自西北向东南微微倾斜,坡度极缓,地面平均高程在50 m左右。研究区域内主要建有渗透铺装、生物滞留单元、植被草沟、雨水花园4种LID设施(分别记作PP、BR、VS、RG),不同的LID设施通过串联或并联的方式连接,具体连接方式如图1所示。在降雨事件中,屋顶和路面产生的径流将依次流经组合连接的LID设施,最终流出研究区域。

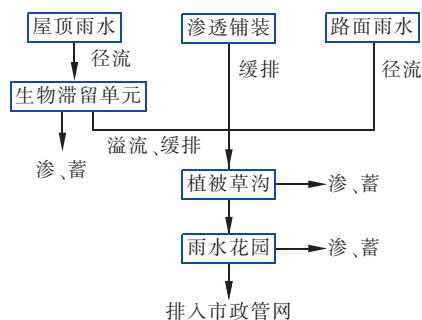


图1 研究区低影响开发设施连接方式

Fig.1 Layout plan of LID facilities in study area

1.2 降雨径流监测

监测数据主要包括气象数据和径流流量数据。气象站设置于研究区南侧办公楼屋顶(位于研究区域汇水范围内),数据记录间隔时间为1 min,生成了2016年1月—2019年10月的气象数据记录。气象数据包括气温、太阳辐射、风速、相对湿度和降雨量,适用于各种降雨事件。径流流量监测点位于研究区南北侧两个总出水口,采用溢流堰法逐分钟记录流量数据。

在整理降雨径流数据过程中发现,产业园区在40 mm以下的降雨事件中基本不产流。故本研究选择2016年5月20日和10月21日两场降雨作为输入条件,两场降雨的基本信息如下:5月20日总降雨量为106.2 mm,降雨历时20 h,雨前干旱时间为1 d;10月21日总降雨量为63.2 mm,降雨历时4 h,雨前干旱时间为1 d。参考深圳市历年的降雨统计数据,对比两场降雨的特性,可以认为2016年5月20日的

降雨代表大雨,2016年10月21日的降雨代表中雨。本研究将基于两场降雨的特性及区别进行分析与比较。

1.3 LID设施组合的水文模型

基于研究区域的地形、水文和产业园区建设资料等,使用SWMM模型将研究区域概化为52个子汇水区以及2个出口,如图2所示。对于每个子汇水区,特征宽度、曼宁系数、坡度等参数通过可用的GIS数据等确定,不作为本研究的主要分析对象。选择Horton下渗方程来估算渗透损失,降雨期间认为蒸发量为0。

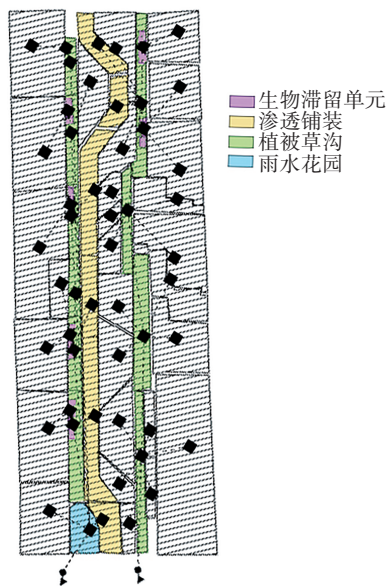


图2 研究区域的SWMM概化示意

Fig.2 SWMM generalization of study area

由于园区尺度研究的区域面积较小,模拟中将每个LID设施单独作为一个汇水区考虑,以保证模拟的精度,同时便于对不同设施的参数进行研究。模型中共考虑了4种类型的LID设施,其中,生物滞留单元、植被草沟、雨水花园皆设置了表面层、土壤层、蓄水层和排水管四层结构;渗透铺装以铺装层代替土壤层,其他层的结构类型与其他设施相似。园区内LID设施共设置了70个参数,其中含有19个根据设计结构确定的固定参数和51个可调节参数。可调节参数按照功能又可分为3个滞水参数、13个持水参数、12个排水参数、7个导水参数、3个蓄水参数和13个初始含水参数。查阅相关文献,并根据深圳地区模拟经验进行初步调试后,确定可变参数的初始值及参数信息如下:

生物滞留单元(BR):共14个可变参数,分别为土壤层孔隙率(BR-soilPor)、土壤层田间持水量(BR-soilFC)、土壤层凋萎点(BR-soilWP)、土壤层导水率(BR-soilCon)、土壤层导水率坡度(BR-soilCS)、土壤层吸水头(BR-soilSH)、蓄水层孔隙率(BR-stoVR)、蓄水层下渗速率(BR-stoCon)、排水管排水系数(BR-udDC)、排水管排水指数(BR-udDE)、1#滞留池初始含水率(SB1-S0)、2#滞留池初始含水率(SB2-S0)、3#滞留池初始含水率(SB3-S0)、4#滞留池初始含水率(SB4-S0),编号依次为1~14,初始值分别为0.437、0.19、0.09、35 mm/h、45、110 mm、0.7、6 mm/h、1 mm/h、0.5、9%、9%、9%、9%。

渗透铺装(PP):共12个可变参数,分别为表面层曼宁系数(PP-surN)、表面层坡度(PP-surS)、铺装层孔隙率(PP-pavVR)、铺装层渗透率(PP-pavPer)、蓄水层孔隙率(PP-stoVR)、蓄水层下渗速率(PP-stoCon)、排水管排水系数(PP-udDC)、排水管排水指数(PP-udDE)、3#铺装初始含水率(PP3-S0)、4#铺装初始含水率(PP4-S0)、5#铺装初始含水率(PP5-S0)、6#铺装初始含水率(PP6-S0),编号依次为15~26,初始值分别为0.2、0.1%、0.18、400 mm/h、0.7、25 mm/h、0.8 mm/h、0.5、9%、9%、9%、9%。

植被草沟(VS):共16个可变参数,分别为表面层曼宁系数(VS-surN)、土壤层孔隙率(VS-soilPor)、土壤层田间持水量(VS-soilFC)、土壤层凋萎点(VS-soilWP)、土壤层导水率(VS-soilCon)、土壤层导水率坡度(VS-soilCS)、土壤层吸水头(VS-soilSH)、蓄水层孔隙率(VS-stoVR)、蓄水层下渗速率(VS-stoCon)、排水管排水系数(VS-udDC)、排水管排水指数(VS-udDE)、1#草沟初始含水率(SS1-S0)、2#草沟初始含水率(SS2-S0)、3#草沟初始含水率(SS3-S0)、4#草沟初始含水率(SS4-S0)、5#草沟初始含水率(SS5-S0),编号依次为27~42,初始值分别为0.24、0.5、0.19、0.09、40 mm/h、35、110 mm、0.8、25 mm/h、2 mm/h、0.5、9%、9%、9%、9%、9%。

雨水花园(RG):共9个可变参数,分别为土壤层孔隙率(RG-soilPor)、土壤层田间持水量(RG-soilFC)、土壤层凋萎点(RG-soilWP)、土壤层导水率(RG-soilCon)、土壤层导水率坡度(RG-soilCS)、土壤层吸水头(RG-soilSH)、蓄水层下渗速率(RG-stoCon)、排水管排水系数(RG-udDC)、排水管排水

指数(RG-udDE),编号依次为43~51,初始值分别为0.5、0.19、0.09、40 mm/h、30、110 mm、40 mm/h、0.35 mm/h、0.3。

1.4 模型不确定性评估方法

本研究对模型的不确定性评估主要分为参数分类、参数灵敏度分析、马尔可夫链蒙特卡罗模拟(MCMC)和不确定性区间评估共4个步骤,具体如图3所示。

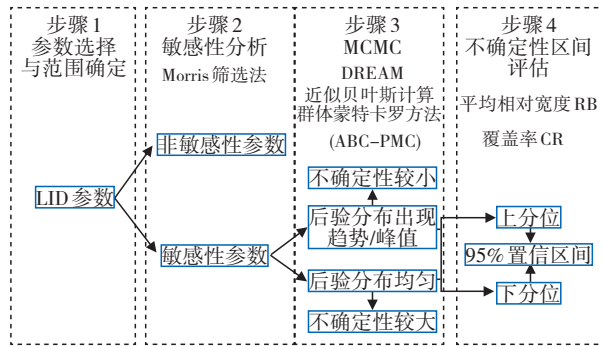


图3 参数不确定性评估方法流程

Fig.3 Flow chart of parameter uncertainty assessment

1.4.1 参数灵敏度评估方法

Morris 筛选法是一种广泛应用的参数灵敏度评估方法,常被用于水文模型参数敏感性的比较^[11]。Morris 筛选法通过选取模型中某一个参数进行微小的变化,保证其他参数不变,以此评估该参数对全局结果的影响。用 S 表示参数灵敏度,则:

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

式中: Y_i 为参数第 i 次变化后的出口流量值; Y_0 为参数未变化时的出口流量值; P_i 为参数第 i 次变化的百分比; n 为参数变化次数。

灵敏度 S 的绝对值越大则参数灵敏度越高。Morris 筛选法可以快速筛选出敏感性高的参数。虽然 Morris 筛选法类似于一次一个变量法,但由于它可以最大化地探索参数空间,所以常被视为全局敏感性分析方法。

1.4.2 参数不确定性评估方法

DREAM 是近年来提出的应用马尔可夫链蒙特卡罗理念的高效计算方法,已经成功用于不同领域的不确定性问题研究中^[12]。本研究使用 DREAM 算法中的近似贝叶斯计算群体蒙特卡罗方法(ABC-PMC),即 DREAM(ABC),进行模型参数不确定性

分析^[13-14]。

首先,通过参考其他文献中的参数或开展实地测量,确定重要参数的取值范围。在取值范围中按照均匀分布,由多条链同时进行随机抽样,分别代入模型计算得到结果。然后,对抽样进行略微扰动,得到下一组参数组,并将参数组代入模型试算。若得到的结果小于提前设置的容差参数或优于上一步结果,则接受该组结果;否则,记录上一步结果,再次对抽样进行略微扰动,跳到另一参数组进行计算。反复迭代直至多条链互相绞合且全部符合收敛条件,得到最后可接受的若干参数组,分析每个参数的后验分布情况。本研究采用 Gelman 等^[15]提出的比例缩小得分因子 S_R 判断 DREAM 采样过程的收敛性。当 $S_R < 1.2$ 时,参数收敛于稳定的后验分布。

本研究中,将出口流量观测值 Q_{obs} 和模型估算流量值 Q_{est} 用于计算给定的一组参数 θ 的边际后验概率分布 $p(\theta|Q_{obs})$:

$$p(\theta|Q_{obs}) \propto p(\theta) \int p(Q_{obs}|\theta) I[d(Q_{est}, Q_{obs}) \leq \epsilon] \cdot dQ_{est} \quad (2)$$

式中: $I(\cdot)$ 为指示函数,当 $d(Q_{est}, Q_{obs})$ 的值 \leq 容差参数 ϵ 时,则接受从参数组 θ 中抽取的这个样本;距离函数 $d(\cdot) = 1 - \text{NSE}$,其中, NSE 为纳什效率系数; $p(\theta)$ 表示参数集 θ 的先验分布。

1.4.3 模拟结果不确定性评估方法

学界认可的评估模型模拟结果不确定性的方法较多^[16]。其中,以覆盖率 CR、平均相对宽度 RB 为代表的指标具有计算便捷、评估直观有效等优良特性,被广泛应用于模型模拟不确定性的评估。

覆盖率 CR 表示观测值落于不确定性区间内的概率,可用下式表示:

$$\text{CR} = \frac{n_{Q_m}}{n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: n_{Q_m} 为落在置信区间内的观测值个数; n 为流量过程序列点的个数。

在覆盖率接近的情况下,为了评估带有 95% 置信区间的模拟效果,可用置信区间上下限及观测值 Q_o 计算平均相对宽度 RB:

$$\text{RB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{s,upper}^i - Q_{s,lower}^i}{Q_o^i} \quad (4)$$

式中: $Q_{s,upper}^i$ 为 i 时刻模拟区间的上限值; $Q_{s,lower}^i$

为 i 时刻模拟区间的下限值; Q_i^o 表示 i 时刻的观测值。覆盖率接近的情况下,平均相对宽度越小,则表示模拟精度越高,结果不确定性越小。

2 结果与分析

2.1 参数灵敏度分析

为了更高效地研究参数的不确定性,首先通过Morris筛选法选择灵敏度高的重要参数。以10%为固定步长对某一参数进行扰动,扰动范围[即式(1)中的 P 值]分别为-30%、-20%、-10%、10%、20%和30%,并保证其他参数固定不变。分别计算可变参数对两场降雨中径流峰值的灵敏度 S_1 与径流总量的灵敏度 S_2 ,结果如图4所示。

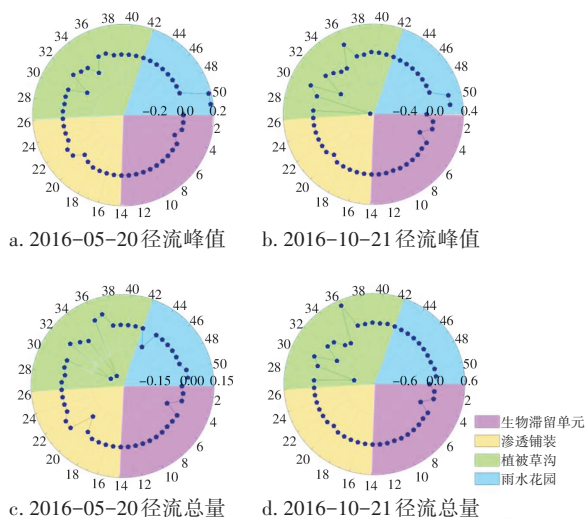


图4 参数灵敏度分析结果

Fig.4 Parameter sensitivity analysis

综合分析可变参数的两个灵敏度指标,可选定VS-soilPor ($S_1=-0.38$, $S_2=-0.40$)、VS-soilCon ($S_1=-0.21$, $S_2=-0.28$)、RG-udDC ($S_1=0.20$, $S_2=0.03$)、RG-udDE ($S_1=0.20$, $S_2=0.03$)、VS-udDC ($S_1=0.11$, $S_2=0.27$)、VS-stoCon ($S_1=-0.09$, $S_2=-0.25$)、BR-soilCon ($S_1=-0.09$, $S_2=-0.14$)、VS-stoVR ($S_1=-0.05$, $S_2=-0.13$)、PP-stoCon ($S_1=-0.04$, $S_2=-0.07$)共9个灵敏度明显高于其他参数的高灵敏参数作为下一步分析的主要目标参数。

高灵敏参数多出现在植被草沟和雨水花园设施中,生物滞留单元和渗透铺装的参数灵敏度普遍较小。结合研究区域的LID分布可知,相比于渗透铺装和生物滞留单元,植被草沟和雨水花园位于LID链下游。下游设施在降雨中不仅接纳自身汇水

面积的降雨,还需接收上游设施来水,且设施出水直接排至出口,从而导致该设施对出口流量的影响较大,参数更为敏感。

同时,高灵敏参数中与设施排水能力相关的有5个、与导水相关的有2个、与持水相关的有2个。可以发现,在本研究中,参数的灵敏度在一定程度上也受到参数自身功能特性的影响。大部分参数灵敏度偏低,而与排水和蓄水相关的参数灵敏度较高。因为两次模拟都是场次降雨,降雨期间,设施蓄水和排水是调控径流的主要方式,故与其相关的参数灵敏度更高。

2.2 参数不确定性分析

查阅相关文献并结合深圳模拟经验,确定各参数的最小值与最大值,并在两值之间取均匀分布作为9个参数的先验分布,采用DREAM算法对参数进行不确定性分析。参数BR-soilCon、PP-stoCon、VS-soilPor、VS-soilCon、VS-stoVR、VS-stoCon、VS-udDC、RG-udDC、RG-udDE取值范围分别为20~40 mm/h、10~30 mm/h、0.4~0.6、0~60 mm/h、0.6~0.9、0~40 mm/h、0~5 mm/h、0~0.2 mm/h、0~0.4。

将DREAM的参数设置为:马尔可夫平行链数量 $N=8$,平行链代数 $T=5000$ 。由于学界普遍认为 $NSE \geq 0.6$ 可作为模型表现较优的判断标准,故将可接受条件设置为 $NSE \geq 0.6$ 。在进行了40000次模型模拟后,获得LID参数的后验概率分布,如图5所示(限于篇幅,此处只列出2016年5月20日降雨事件的相关数据)。灰色直方为参数后验概率密度分布,红色圆点为模拟最优值对应的“最优”参数值。

图6展示了两场降雨DREAM算法采样的收敛过程,横坐标为马尔可夫链的进化代数,纵坐标为收敛性判断因子(比例缩小得分因子 S_R),不同颜色的折线代表不同参数采样结果的收敛性变化过程。可以看出,当马尔可夫链进化代数达到1000代以后,各参数的收敛性判断因子 S_R 均小于1.2,说明所有参数都已收敛于稳定的后验分布。

在DREAM算法中,一般将模拟“最优”参数值认为是“真值”,若后验分布图显示出峰值,且“真值”位于峰值附近,则说明该参数不确定性较小;若无明显峰值,接近于均匀分布,则说明该参数不确定性较大^[17]。

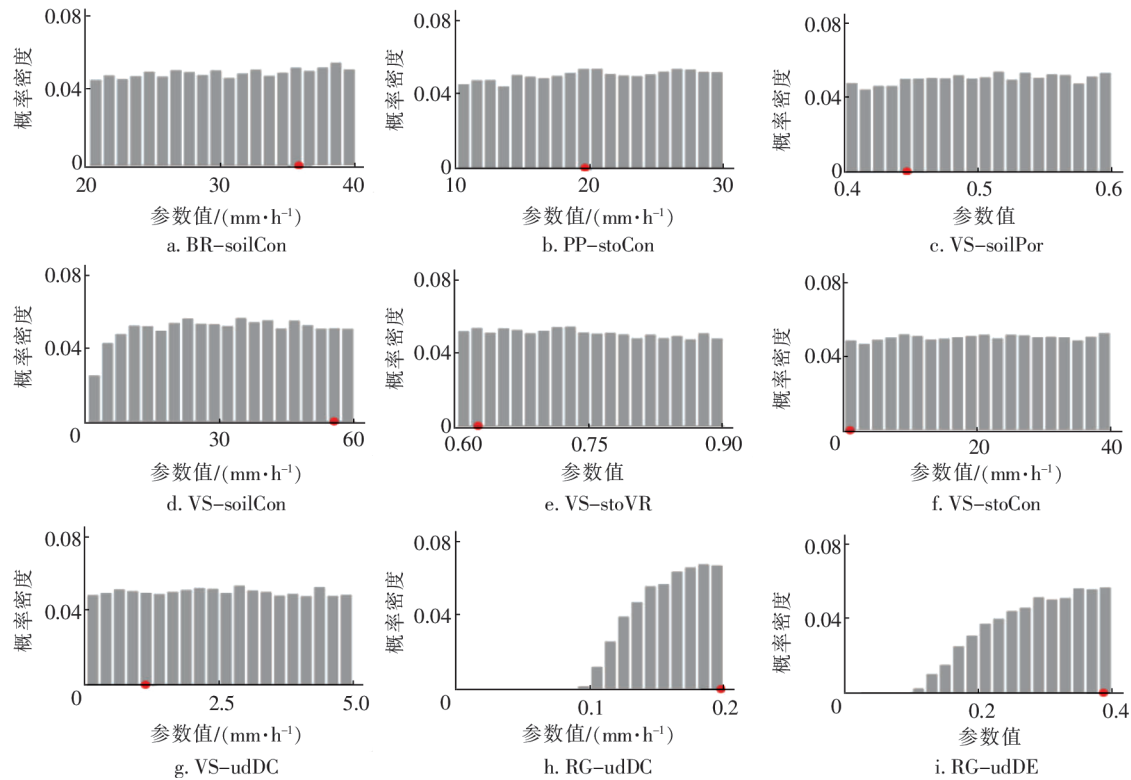


图5 参数后验概率分布情况(2016-05-20降雨事件)

Fig.5 Parameters posteriori probability distribution (2016-05-20 rainfall event)

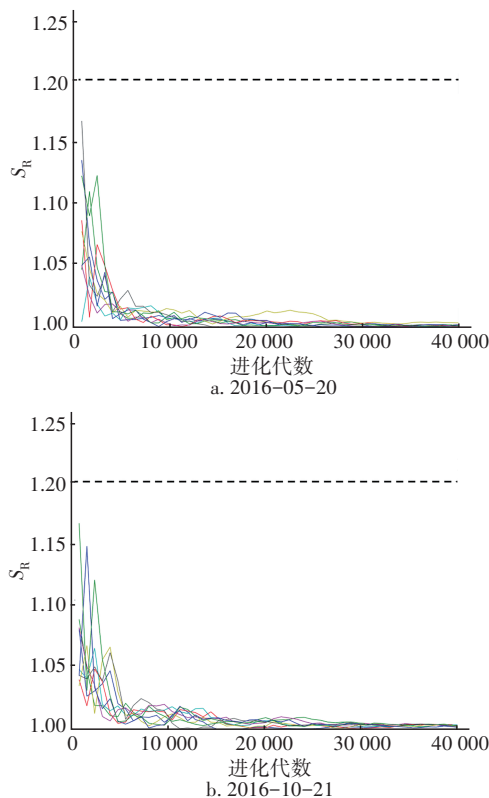


图6 研究区域DREAM算法采样过程收敛性

Fig.6 Convergence for DREAM realizations in study area

在大雨事件中, RG-udDE 和 RG-udDC 两个参数在取值范围内分布出现明显的峰值, 且“真值”位于峰值附近, 参数不确定性较小。其余参数在取值范围内均无明显峰值, 接近于均匀分布, 参数不确定性较大。在中雨事件中, VS-soilCon、VS-stoCon、RG-udDC 和 RG-udDE 四个参数都出现明显峰值, 且“真值”位于峰值附近, 表明这四个参数的不确定性均较小。另有部分参数的分布呈现一定趋势, 当限制条件严格时可能可以呈现较小的不确定性。对比两场降雨的参数后验分布结果, 可以认为在该研究区域中, 大雨条件下总体参数不确定性大于中雨条件。可能是由于在大雨事件中 LID 设施接近饱和, 大部分参数对出口调控效果不明显, 故不确定性较大。

2.3 模拟结果不确定性分析

在参数优化收敛后的参数组中, 对同一时间序列点的模拟结果设定 2.5% 和 97.5% 的分位数, 以此研究参数不确定性导致的输出不确定性, 结果如图 7 所示, 上方黑色直方表示降雨量, 红色空心圆点表示园区出口流量监测值, 灰色区域表示参数置信度为 95% 的出口流量模拟不确定性区间, 蓝色曲线

表示不确定性模拟中NSE最优的模拟序列值。两场降雨中NSE最优值分别达到0.90和0.97。为评估模拟结果不确定性,分别计算两场降雨的覆盖率,得到大雨事件覆盖率约为85%,中雨事件覆盖率约为83%。在覆盖率相近的情况下,计算两场降雨模拟的平均相对宽度分别为67.8和42.4。由此可以认为,在本研究区域中,大雨事件模拟的不确定性大于中雨事件模拟的不确定性。

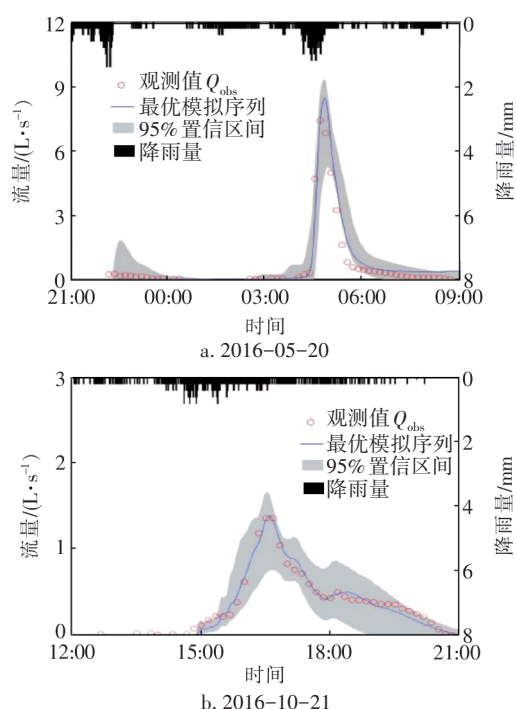


图7 模拟结果95%置信区间

Fig.7 Model output with 95% uncertainty interval

3 结论

① 由于参数复杂、设施种类繁多,用SWMM模拟园区尺度下组合型LID设施的水文效应存在较大的不确定性。本研究案例分析表明,采用Morris与DREAM相结合的方法研究SWMM的LID模块参数不确定性是可行的。

② 不同LID设施及不同功能的参数灵敏度都存在差异。在本研究中,位于下游的设施不仅要接收自身汇水面积汇流,还需要接收上游设施来水,参数灵敏度较上游设施更大。与LID设施排水和导水功能相关的参数相较于与蓄水和持水等功能相关的参数更为敏感。

③ 参数后验分布显示,中等强度降雨事件中LID参数的不确定性总体上小于较大强度降雨事

件。可能是由于大雨事件中LID设施接近饱和,大部分参数在一定范围内对出流调节效果不明显。建议在含有LID模块的模型参数率定过程采用中等强度降雨进行率定,可以在一定程度上提高LID参数率定的准确性。

④ 从带有95%置信区间的模拟结果来看,以2016年10月21日为代表的中雨模拟与以2016年5月20日为代表的大雨模拟覆盖率相近,但中雨的平均相对宽度小于大雨。可以认为在本研究情景中,中雨模拟的不确定性较小,精确度较高。

⑤ 本研究主要针对LID设施的参数进行了分析,并对比分析了不同特征降雨事件的模拟不确定性,总结出了一定规律。后续研究将进一步考虑模型其他模块参数与LID参数之间可能存在的协同效应,考虑不同雨型对结果造成的影响,并增加对不同场次同类型降雨的检验,以增强研究结果的科学性。

参考文献:

- [1] 王建龙,车伍,易红星. 基于低影响开发的都市雨洪控制与利用方法[J]. 中国给水排水,2009,25(14): 6-9,16.
WANG Jianlong, CHE Wu, YI Hongxing. Low impact development for urban stormwater and flood control and utilization [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25 (14): 6-9,16 (in Chinese).
- [2] HU M, SAYAMA T, ZHANG X, *et al.* Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 430-438.
- [3] GUAN M, SILLANPÄÄ N, KOIVUSALO H. Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland [J]. Water Science and Technology, 2015, 71(10): 1485-1491.
- [4] PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 361-368.
- [5] 张蓓,李家科,李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (8): 87-95.
ZHANG Bei, LI Jiake, LI Yajiao. Study on urban storm water and non-point source simulation under different development patterns [J]. Environmental Science &

- Technology, 2017, 40(8): 87-95(in Chinese).
- [6] 李美水,杨晓华. 基于MCMC方法的SWMM模型参数不确定性分析[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 25-30.
- LI Meishui, YANG Xiaohua. Parameter uncertainty analysis for SWMM model based on MCMC method[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(4): 25-30(in Chinese).
- [7] 张平,夏军,邹磊,等. 基于物理水文模型的不确定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(4): 481-486.
- ZHANG Ping, XIA Jun, ZOU Lei, *et al.* Uncertainty analysis of geological models based on physical hydrological mode[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(4): 481-486(in Chinese).
- [8] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 45-51.
- ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, *et al.* Parameters uncertainty analysis of urban rainfall-runoff simulation [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 45-51(in Chinese).
- [9] 桑燕芳,王栋,吴吉春. 基于贝叶斯理论的水文线型参数不确定性分析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 15-19.
- SANG Yanfang, WANG Dong, WU Jichun. Parameter uncertainty analysis on hydrologic frequency models based on Bayesian theory [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 15-19(in Chinese).
- [10] AVELLANEDA P M, JEFFERSON A J, GRIESER J M, *et al.* Simulation of the cumulative hydrological response to green infrastructure [J]. Water Resources Research, 2017, 53(4): 3087-3101.
- [11] 谭明豪,姚娟娟,张智,等. 基于Morris的SWMM水质参数灵敏度分析与应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 117-122.
- TAN Minghao, YAO Juanjuan, ZHANG Zhi, *et al.* Analysis and application of sensitivity of water quality parameter based on SWMM of Morris [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(6): 117-122 (in Chinese).
- [12] 杨运,吴吉春,骆乾坤,等. DREAM算法分析地下水数值模拟不确定性的影响因素[J]. 地质论评, 2016, 62(2): 353-361.
- YANG Yun, WU Jichun, LUO Qiankun, *et al.* Analysis of the uncertainty of groundwater numerical simulation based on the DREAM algorithm [J]. Geological Review, 2016, 62(2): 353-361 (in Chinese).
- [13] VRUGT J A, SADEGH M. Toward diagnostic model calibration and evaluation: approximate Bayesian computation [J]. Water Resources Research, 2013, 49(7): 4335-4345.
- [14] VRUGT J A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: theory, concepts, and MATLAB implementation [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 75: 273-316.
- [15] GELMAN A, RUBIN D B. Inference from iterative simulation using multiple sequences [J]. Statistical Science, 1992, 7(4): 457-472.
- [16] XIONG L H, WAN M, WEI X J, *et al.* Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalized likelihood uncertainty estimation [J]. Hydrological Science Journal, 2009, 54(5): 852-871.
- [17] 曹玉涛,郭向红,杨玫. 基于DREAM算法的双超模型参数不确定性研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(9): 13-16.
- CAO Yutao, GUO Xianghong, YANG Mei. Research on parameter uncertainty of Shuangchao model based on DREAM algorithm [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(9): 13-16(in Chinese).

作者简介:郑妍妍(1994-),女,福建漳州人,硕士研究生,研究方向为雨水资源管理。

E-mail:zhyy_dozingcat@163.com

收稿日期:2019-11-19

修回日期:2020-02-20

(编辑:刘贵春)