

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.008

SWMM 模型径流参数全局灵敏度分析*

孙艳伟¹ 把多铎² 王文川¹ 姜体胜³ 王富强¹

(1. 华北水利水电学院水利学院, 郑州 450011; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 北京市水环境监测中心, 北京 100089)

【摘要】 选取基于 Horton 和 Green - Ampt 入渗模型的入渗参数, 以及区域坡度、区域宽度、透水性区域的曼宁系数和可积水深度共 7 个 SWMM 模型参数, 采用 Morris 方法进行全局灵敏度分析。并分别采用不同降水类型、不同重现期的单个降水事件及长期降水序列, 分析各模型参数对总产流量、洪峰流量及径流系数 3 个输出变量的全局灵敏度。结果表明: T1 和 T2 型降水的参数灵敏度分析结果呈现较大差异, T2 型较小降水事件不适宜用于参数校核; 对 Horton 入渗模型而言, 可利用 T1 型较大降水事件的洪峰流量对区域形状系数进行校核, 利用 T2 型较大降水事件的总产流量对最小入渗速率、消减系数 K 进行校核; 对 Green - Ampt 入渗模型而言, 可利用 T1 型较小降水事件的洪峰流量对区域宽度和坡度进行校核及总产流量对透水性区域的曼宁系数进行校核, 利用 T2 型较大降水事件的洪峰流量对最小入渗速率和缺水率进行校核; 对径流系数而言, 采用 Horton 和 Green - Ampt 入渗模型的结果一致, 最大入渗速率和最小入渗速率是最灵敏的两个参数, 透水性表面的可积水深度和曼宁系数为最不灵敏的两个参数。

关键词: SWMM 模型校核 全局灵敏度 Morris 方法 Horton 模型 Green - Ampt 模型

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0042-08

Global Sensitivity Analysis of Runoff Parameters of SWMM Model

Sun Yanwei¹ Ba Duoduo² Wang Wenchuan¹ Jiang Tisheng³ Wang Fuqiang¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China
2. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Beijing Water Environment Monitoring Center, Beijing 100089, China)

Abstract

Based on practicability analysis of SWMM model parameters in the calibration process, four parameters of subcatchment slope, subcatchment width, Manning coefficient and depression depth on pervious area and three infiltration parameters were selected. Two popular infiltration models of Horton and Green - Ampt were examined respectively. Global sensitivity analysis method of Morris was used. Flow metrics of total rainfall depth and peak discharge were simulated for single rainfall events with different rainfall types and return periods while runoff coefficient was examined for the long-term rainfall data. Main results were: sensitivity analysis results for T1 and T2 rainfall events indicated great differences and T2 rainfall event with small return period was not suitable for parameters calibration; for Horton model, peak discharge of large T1 rainfall can be used for calibrating subcatchment width and slope while total runoff of large T2 can be used for calibrating infiltration parameters; for Green - Ampt model, peak discharge of small T1 rainfall can be used to calibrate subcatchment width and that of large T2 rainfall can be used to calibrate minimum infiltration rate and water deficiency; for the runoff coefficient, sensitivity analysis results of the two methods are similar.

Key words SWMM, Model calibration, Global sensitivity, Morris method, Horton model, Green - Ampt model

收稿日期: 2011-08-30 修回日期: 2011-10-08

* 国家自然科学基金资助项目(50879071, 51009065)

作者简介: 孙艳伟, 博士生, 主要从事低影响发展、水资源高效利用和生态水文学研究, E-mail: sunyanwei@yahoo.com.cn

通讯作者: 把多铎, 教授, 主要从事水利水电工程研究, E-mail: Baduoduo59@tom.com

引言

SWMM (storm water management model) 是由美国环境保护署 (EPA) 开发的模拟和管理降水径流的模型, 该模型可对长期降水径流过程进行动态模拟, 为雨洪资源利用提供计算依据, 因此, 在降雨径流模拟中得到了广泛应用^[1-2]。不同学者从不同角度探讨了 SWMM 模型各参数的灵敏度, 但目前对 SWMM 模型参数灵敏度的分析多基于单个降水事件, 对长期降水序列的分析尚不多见, 而利用长期降水序列对模型进行校核, 可显著提高模型精度^[3]。因此, 本文在对 SWMM 模型参数分析的基础上, 从模型校核可操作性的角度出发, 结合参数识别的具体要求, 选择实际的可操作的 SWMM 模型参数, 并分别利用不同降水类型和降水强度的单个降水事件及长期降水序列对其进行全局灵敏度的分析, 从而为 SWMM 模型参数校核提供理论依据。

1 研究区概况和降水序列

研究区位于美国 Kansas 州 Lenexa 市内的某个独立汇水区, 其面积为 0.044 km²。由于该研究区为《Lenexa 市滞留池分析报告》中的一个 SWMM 子区域, 因此, 选取该区作为研究区可以节约大量的资料收集及建模时间^[4]。

单个降水事件可分为两种类型: 一种是短历时、高强度的 T1 型降水, 另一种是长历时、低强度的 T2 型降水。一般来讲, 对 T1 型降水而言, 区域的入渗量小, 汇流时间短, 因此, 区域的形状参数 (区域宽度、坡度等) 对径流过程影响较大; 相反地, 对 T2 型降水而言, 区域透水性和入渗系数有关的参数对径流过程影响较大。基于以上分析, 并考虑到总降水量的影响, 本文针对单个降水事件设定两种不同的降水类型, 一种为 SCS II 型分布的 T1 型曲线, 其重现期为 2、10 和 100 a 的降水分布如图 1 所示。将 T1 型降水所产生的降水量均匀分布在整个降水区间以产生 T2 型降水。对于 2、10 和 100 a 重现期的 T2 型降水, 其降水强度分别为 0.38、0.56 和

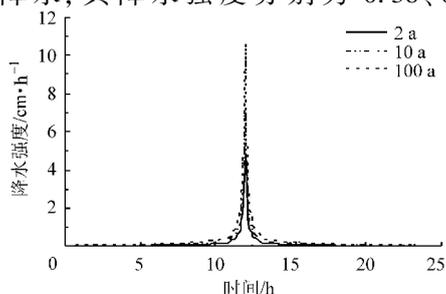


图 1 T1 型设计降水事件

Fig. 1 T1 design storm used for the simulation

0.83 cm/h。

经过对降水序列的分析, 并考虑到数据序列的完整性和代表性, 本文选取研究区 1968 ~ 1977 年的降水序列作为长期降水序列进行模拟计算。该段序列不仅包含了所有降水记录中降水量最大的两次降水事件, 而且年平均降水量 (94.84 cm) 接近多年平均降水量 (92.22 cm), 因此, 选取的降水序列可以代表长期降水序列的基本特征。

2 研究方法

2.1 全局灵敏度分析技术和 Morris 方法

灵敏度分析通过研究模型输入参数对其结果的影响程度, 识别关键参数, 从而为模型识别重要参数提供参考^[5-6]。Saltelli 将灵敏度分析方法分成两类: 局部灵敏度分析和全局灵敏度分析^[7]。相对局部灵敏度分析, 全局灵敏度分析对全部的参数在其定义的变化范围内, 通过改变参数的输入值, 分析模型全部的可能输出结果, 从全局的角度出发衡量各个参数在整个取值空间对模型输出结果的灵敏度以及由模型输入参数的不同所导致的不确定性, 即输入参数之间的相互作用和共同作用^[8]。由于全局灵敏度分析具有显著优点, 因而逐渐代替局部灵敏度分析而在模型参数识别、模型校核中得到广泛的应用。全局灵敏度分析的方法较多, 如多元回归法^[9]、傅里叶幅度灵敏度检验法 (FAST)^[10-11] 以及基于方差分析的 Sobol 法^[12-13] 等。其中, Morris 方法是一种基于筛选分析的全局灵敏度分析方法, 由于其计算量小, 易于操作而被广泛应用于模型的校核及参数识别中^[14-16]。本文采用 Morris 方法对 SWMM 模型参数的灵敏度进行分析。典型的 Morris 设计如图 2 所示, 其中灰色方框代表取值发生改变的参数^[17]。

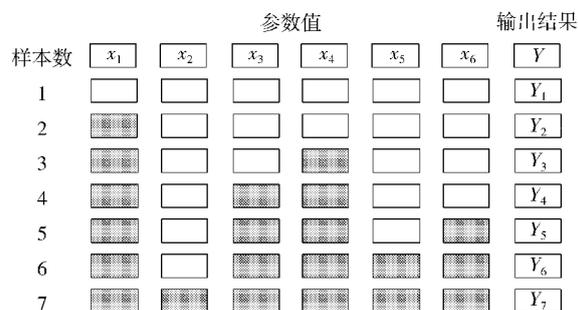


图 2 Morris 设计图

Fig. 2 Morris' s design

由图 2 可以看出, Morris 方法是利用 OAT (one factor at a time) 的搜索途径, 通过计算输入参数对输出结果的基础效应进行灵敏度分析。假设模型需要进行灵敏度分析的参数为 k 个, X 为包含 k 个因

素的向量 (x_1, x_2, \dots, x_k) , 假设产生的样本数为 n 个, 定义 Ω 为包含了 n 个样本的 k 维 n 阶的样本域。

设 Y 为模型的输出结果, 则第 i 个因素的基础效应计算公式为

$$E_{Ei}(X) = \frac{Y(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - Y(X)}{\Delta} \quad (1)$$

式中, X 是样本域 Ω 内的任何一个样本, 且 $X + \Delta$ 仍然位于 Ω 内; Δ 代表第 i 个变量的变幅。

将样本域 Ω 内的所有样本 X 逐个进行计算, 即可得到第 i 个参数独立作用及其他参数共同作用下的基础效应的分布数列 F_i 。其中, μ 为该数列的平均值, σ 为方差。 μ 值越大, 表明该参数对输出结果的综合影响程度越大, 即灵敏度越高; σ 值越大, 表明该参数对结果的影响为非线性或者与其他参数互相影响的程度越高。为了避免由于参数意义的不同而造成结果正负的不同, 本文采用基础效应绝对平均值 μ^* 表示参数对输出结果的综合效应, 即全局灵敏度。

2.2 参数选择

灵敏度分析的目的是为模型校核提供理论依据, 本文在对SWMM模型参数进行分析的基础上, 结合已有文献的模型校核方法和经验, 选择适宜于进行校核的参数。SWMM模型参数从整体上可以分为3个模块, 分别为地表径流模块、传输模块和地下水模块。由于先前文献已经对地下水模块的各个参数进行了详细的灵敏度分析, 因此, 本文仅对地表径流模块和传输模块中的参数进行灵敏度分析。表1列出了地表径流模块和传输模块中的主要参数。

2.2.1 地表径流模块

区域面积和不透水性系数是对径流影响最大的两个因素。由于GIS、RS、DEM等技术以及测量技术的发展增加了这两个参数的获得途径, 并使其误差越来越小, 所以, 通过大幅度地改变这两个值而得到模型所需要的精度已无实际意义, 因此未选取区域面积和不透水性系数进行灵敏度分析。尽管区域坡度获取的途径和区域面积一样, 但是受地形复杂条件的影响, 不同的测量角度及计算方法可能会得到不同的坡度, 因此, 坡度可用于模型的校核。区域宽度从整体上反映了区域的形状, 模型校核的实践证明, 区域宽度是SWMM模型校核中重要的参数, 所以, 选取区域坡度与区域宽度作为区域的形状系数进行灵敏度分析。透水性区域的可积水深度及曼宁系数受透水性表面覆盖的影响, 当区域面积较大

时, 该参数值的误差可能很大, 因此, 可用于进行模型参数的校核; 相反, 不透水性区域的可积水深度和曼宁系数, 不论是对城市区域还是发展中的乡村地区来说, 其差值均不大, 因此, 将这两个参数值用于参数校核没有实际意义。入渗系数是地表径流中的重要系数, 一般通过实验获得, 当区域面积较大、土壤类型分布较多时, 入渗系数具有空间变异性, 因此, 必须考虑入渗系数对模型的影响。

表1 SWMM地表径流模块和传输模块的主要参数

Tab.1 Main runoff and transport parameters of SWMM

模块	参数	来源
地表径流	区域面积	实际测量或者ArcGIS、RS辅助工具
	区域不透水性系数	实地测量或者ArcGIS、RS辅助工具
	区域坡度	辅助工具
	区域宽度	计算或经验
	透水性区域的可积水深度	实验或经验
	透水性区域的曼宁系数	实验或经验
	不透水性区域的可积水深度	实验或经验
	不透水性区域的曼宁系数	实验或经验
	入渗系数	实验或经验
传输	管道长度	实际测量
	管道坡度	实际测量或计算
	管道的曼宁系数	经验值
	管道形状	实际测量
	管道最大深度	实际测量或者经验值
	管道入口损失系数	经验值
	管道出口损失系数	经验值
	管道平均损失系数	经验值

为了研究不同入渗模型的灵敏程度, 分别选取SWMM模拟中最常用的Horton入渗模型和Green-Ampt入渗模型进行灵敏度分析。其中, Horton模型的参数包括最大入渗速率、最小入渗速率和消减系数; Green-Ampt模型的参数包括吸湿水头、水力传导系数(最小入渗速率)以及初始土壤含水率与饱和含水率之差(简称缺水率)。

基于以上分析, 在地表径流模块中, 选取区域坡度、区域宽度、透水性区域的可积水深度、透水性区域的曼宁系数及入渗系数进行灵敏度分析, 其中, 入渗系数因入渗模型的不同而有所不同。

2.2.2 传输模块

传输模块在SWMM中被用来模拟城市管道、天然河流以及人工渠道等。由表1可以看出, 传输模块的参数多为实际测量或者经验值。对于城市管道

而言,传输模块的参数多为其固有值,如管道长度、坡度、曼宁系数等。而对于天然河流来说,由于其形状及深度的多变性,很难用一组参数来反映整段河流形态的变化,所以往往根据河流断面特征将其划分为若干段,并赋予每一段以特定的形状及参数。模型建立及校核的经验表明,SWMM 在模拟天然河道及人工渠道方面具有一定的局限性,因此往往需要借助于其他专用模拟软件,如 HEC-RAS (hydrologic engineering centers river analysis system) 等获得所需要的参数。以《Lenexa 市滞留池分析报告》的 SWMM 模型为例,该模型共有 76 个子区域,却有 217 条管道。若是通过对管道的系数进行校核而达到满意的结果,非常耗时耗力,而且也不现实。因此,本文采用第三方软件 HEC-RAS 对 SWMM 传输模块的参数先进行计算和校核,而不在 SWMM 中直接对该参数进行校核。

综上所述,基于模型实际校核可操作性的考虑,共选取区域坡度、区域宽度、透水性区域的可积水深度、透水性区域的曼宁系数以及与人渗有关的 3 个参数,共 7 个参数进行灵敏度分析。

2.3 参数区间及样本生成

为了避免因参数选择区间不同对模拟结果的影响,采用校核后参数值的 50% 和 150% 的值作为灵敏度分析参数区间的下限和上限。选定不同历时和强度的降水事件对模型进行校核,使校核后的结果在总流量、洪峰流量的相对误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,洪峰流量的到达时间依据降水历时的不同控制在 15 ~ 30 min 以内。校核后模型区域面积为 0.044 km²,区域不透水性系数为 0.48,不透水性区域的可积水深度为 0.13 cm,曼宁系数为 0.01。采用 Horton 和 Green - Ampt 入渗模型进行灵敏度分析时参数的校核值及校核区间如表 2 所示。

表 2 参数选择的区间
Tab.2 Range of parameters

参数	校核值	最小值	最大值	
区域坡度 S	2.50	1.25	3.75	
区域宽度 W/m	28.850	14.478	43.434	
透水性区域的可积水深度 D_p/cm	0.510	0.254	0.762	
透水性区域的曼宁系数 D_N	0.10	0.05	0.15	
Horton 入渗	最大入渗速率 $f_{max}/cm \cdot h^{-1}$	9.144	0.572	13.716
	最小入渗速率 $f_{min}/cm \cdot h^{-1}$	0.533	0.267	0.800
	消减系数 K/h^{-1}	4.14	2.07	6.21
Green - Ampt 入渗	吸湿水头 h/cm	15.24	7.62	22.86
	最小入渗速率 $f_{min}/m \cdot h^{-1}$	0.533	0.267	0.800
	缺水率 θ	0.150	0	0.231

由于各参数的分布概率未知,这里假定所有的参数服从均匀分布。采用蒙特卡洛方法对参数进行随机取样,采用 Horton 入渗模型和 Green - Ampt 入渗模型时,分别产生样本 40 个。

3 结果与讨论

总产流量、洪峰流量及峰值发生时间是单个降水事件重要的输出变量,由于本文的研究对象为一单一区域,因此,对于 T1 型降水而言,其洪峰流量出现的时刻与降水强度最大的时刻一致;而对于 T2 型降水而言,其洪峰流量出现在降水结束的时刻。从理论上讲,洪峰流量出现的时间主要受传输模块各参数的影响,因此,本文未对洪峰流量出现的时间进行灵敏度分析。径流系数是区域地表径流深与雨量深的比值,是区域对地形、土壤和降水的综合反映,因此,选取径流系数作为模拟的输出结果,并分析各

参数对径流系数影响的灵敏度。其中,单个降水事件的模拟时间为 48 h,模拟时间步长为 5 min;长期序列的模拟时间步长为 15 min。

根据上述所产生的样本,修改 SWMM 参数,并分别对单个降水事件及长期降水序列进行模拟,得到各样本的总产流量 R (表现为分配在整个区域的深度,单位 cm)、洪峰流量 Q_p (m³/s) 以及径流系数 C 。由于研究区面积较小,输出参数值的变异性也比较小,因此,在进行灵敏度计算时,为了避免失去有效信息,将总产流量、洪峰流量以及径流系数分别扩大 100 倍、10 倍和 100 倍,并在此基础上进行灵敏度的分析和计算。计算结果表明 σ 的排序规律与 μ^* 的排序规律基本上是一致的,原因在于某一参数的灵敏度越大,当与其他因素共同作用时,所产生的灵敏度系数也越高,影响程度也就越大。因此,本文采用 μ^* 对各参数的灵敏度进行分析,并用数字

1~7 来直观表示各参数对输出变量灵敏程度的高低,1 为最灵敏,7 为最不灵敏。对于排序相同的指标,均采用其较低的灵敏度。

3.1 Horton 入渗模型

基于 Horton 入渗模型各参数全局灵敏度计算结果及排序如表 3 所示。分析表 3 可知,对不同的输出变量而言,各参数灵敏度的排序亦不同。对 T1 型降水而言,不同重现期降水对参数灵敏度

的影响不大。对于总产流量来讲,最小入渗速率和消减系数是最灵敏的两个参数,坡度和透水性区域的可积水深度为最不灵敏的两个参数;对于洪峰流量来讲,区域宽度和坡度是最灵敏的两个参数,而消减系数和透水性区域的可积水深度是最不灵敏的两个参数。总产流量主要受与入渗相关参数的控制,洪峰流量主要受区域形状参数的控制。

表 3 基于 Horton 入渗模型各参数灵敏度计算结果及排序

Tab.3 Global sensitivity analysis results and ranking with Horton infiltration method

降水类型	重现期/a	输出变量	SWMM 模型参数						
			S	W	D_p	D_N	f_{max}	f_{min}	K
T1 型降水	2	R	1.52(7)	2.77(5)	2.41(6)	3.24(4)	6.29(3)	9.98(1)	7.89(2)
		Q_p	11.49(2)	22.50(1)	2.76(7)	5.99(5)	9.55(3)	4.14(6)	6.58(4)
	10	R	1.79(7)	3.08(5)	2.56(6)	4.01(4)	4.15(3)	18.41(1)	5.11(2)
		Q_p	20.81(2)	38.98(1)	5.66(6)	12.75(3)	8.29(4)	8.09(5)	5.89(7)
	100	R	1.79(7)	2.88(5)	2.63(6)	4.14(2)	3.05(4)	29.55(1)	3.42(3)
		Q_p	67.61(2)	114.21(1)	3.14(7)	28.90(3)	3.83(5)	15.72(4)	3.68(6)
T2 型降水	2	R	0.06(4)	0.12(3)	0.01(7)	0.30(1)	0.01(7)	0.02(5)	0.29(2)
		Q_p	0(7)	0(7)	0(7)	0.01(3)	0(7)	0.03(1)	0.01(3)
	10	R	0.37(6)	0.92(5)	0.02(7)	0.97(4)	1.27(2)	12.49(1)	1.24(3)
		Q_p	0.02(4)	0.03(3)	0(7)	0.47(2)	0.01(6)	1.17(1)	0.01(6)
	100	R	1.40(7)	2.11(6)	2.65(5)	3.17(4)	4.45(3)	52.84(1)	5.03(2)
		Q_p	0(7)	0(7)	0.80(2)	0.04(4)	0(7)	3.32(1)	0.78(3)
长期降水序列		C	1.40(5)	1.72(3)	0.60(7)	0.80(6)	9.76(1)	3.04(2)	1.68(4)

对于 T2 型降水而言,各输出变量的灵敏度排序与 T1 型降水相比有显著的不同。不同重现期降水下各参数灵敏度的排序也有明显差异。对于 2a 重现期降水,在总产流量和洪峰流量分别扩大 10 倍和 100 倍之后,其灵敏度的计算结果仍然很小,几乎接近于零,表明参数区间的取值变化未能对其结果产生明显的影响,因此,不适于进行灵敏度分析。对于重现期 10 a 和 100 a 的降水来讲,最小入渗速率既是对总径流最灵敏的参数,又是对洪峰流量最为灵敏的参数,而这与 T1 型降水有明显的区别。对于重现期为 100 a 的降水来说,与入渗有关的系数,如最小入渗速率和消减系数对总产流量和洪峰流量均比较灵敏,而区域形状系数参数如坡度和宽度等,对总产流量和洪峰流量的影响不灵敏。除此之外,与 T1 型降水不同,透水性区域的可积水深度是除最小入渗速率之外对洪峰流量最灵敏的参数,因此可用于该参数的校核。

对长期降水系列的模型校核而言,在以径流系数为目标进行校核时,通过改变 Horton 入渗系数和区域宽度可以有效地达到理想的校核目的。

以上分析表明,T1 型降水和 T2 型降水的参数灵敏度分析结果呈现较大差异。对于 T1 型降水而言,入渗系数对区域总的径流量影响较大,区域形状系数对降水事件的洪峰流量更加灵敏,而透水性区域的可积水深度及曼宁系数以及最大入渗速率,对各输出结果均没有显著的影响。对于 T2 型降水而言,较小的降水事件,由于产生径流的差异性不大,所以,不适于进行灵敏度分析。最小入渗速率不仅影响区域总产流量,也是对洪峰流量最灵敏的参数,而与区域形状有关的参数均对区域总产流量和洪峰流量不灵敏。总体而言,T1 型降水更加适宜于进行灵敏度分析以及参数校核,并在此基础上采用较大降水量的 T2 型降水曲线进行透水性区域的可积水深度的校核,以及采用径流系数对最大入渗速率进行校核。

3.2 Green - Ampt 入渗模型

采用 Green - Ampt 入渗模型时,各参数对总产流量、洪峰流量以及径流系数的灵敏度计算结果及其排序如表 4 所示。由表 4 可以看出,对于 T1 型降水而言,不同重现期的降水对参数的灵敏度有明显

的影响。对于 2 a 和 10 a 重现期的降水来说,最小入渗速率和透水性区域的曼宁系数是影响总产流量最灵敏的参数,区域坡度和宽度是影响洪峰流量最灵敏的系数;该结果与基于 Horton 入渗模型的结果一致。对于 100 a 重现期的降水来说,最小入渗速

率和缺水率是对总产流量影响最灵敏的参数,流域宽度和透水性区域的曼宁系数是影响其洪峰流量最灵敏的参数;相比较 Horton 入渗模型,2 a 和 10 a 重现期的降水事件的灵敏度排序基本一致;对较大降水事件而言,透水性区域的曼宁系数的灵敏度有所增加。

表 4 基于 Green - Ampt 入渗模型的各参数灵敏度计算结果及排序

Tab. 4 Global sensitivity analysis results and ranking with Green - Ampt infiltration method

降水类型	重现期/a	输出变量	SWMM 模型参数						
			S	W	D_p	D_N	f_{max}	f_{min}	K
T1 型降水	2	R	1.68 (5)	2.91 (3)	2.42 (4)	3.36 (2)	0.50 (6)	7.08 (1)	0 (7)
		Q_p	8.84 (2)	24.32 (1)	2.83 (5)	7.01 (4)	0.13 (6)	8.54 (3)	0 (7)
	10	R	1.91 (5)	3.10 (3)	2.57 (4)	3.91 (2)	0.66 (6)	11.41 (1)	0 (7)
		Q_p	16.07 (2)	40.14 (1)	3.37 (5)	14.03 (3)	0.26 (6)	13.62 (4)	0 (7)
	100	R	2.06 (7)	2.95 (5)	2.63 (6)	4.16 (3)	3.49 (4)	9.81 (1)	4.21 (2)
		Q_p	28.31 (3)	53.52 (1)	4.35 (6)	29.02 (2)	7.82 (4)	7.20 (5)	2.86 (7)
T2 型降水	2	R	0.30 (4)	0.67 (2)	0 (7)	0 (7)	0.80 (1)	0.46 (3)	0 (7)
		Q_p	0(7)	0.07 (2)	0 (7)	0 (7)	0 (7)	0 (7)	0.07 (2)
	10	R	0.42 (4)	1.01 (3)	0 (7)	0.02 (5)	1.64 (2)	8.41 (1)	0 (7)
		Q_p	0.02 (4)	0.05 (3)	0 (7)	0.01 (5)	0.16 (2)	1.01 (1)	0 (7)
	100	R	1.65 (6)	2.45 (4)	0.72 (7)	2.28 (5)	8.32 (3)	48.54 (1)	13.51 (2)
		Q_p	0.26 (4)	0.01 (7)	0.08 (5)	0.04 (6)	0.28 (3)	3.47 (1)	0.71 (2)
长期降水序列		C	1.40 (5)	1.72 (3)	0.60 (7)	0.80 (6)	9.76 (1)	3.04 (2)	1.68 (4)

对于 T2 型降水而言,各参数针对不同输出参数的灵敏度排序与 T1 型降水相比有显著的不同。与 Horton 入渗模型一致,对于 2 a 重现期降水而言,其灵敏度的计算结果仍然很小,并接近于零,表明参数区间的取值变化未能对其结果产生明显的影响,因此,不适宜采用该降水事件进行灵敏度分析。对于重现期为 10 a 的降水而言,影响总产流量和洪峰流量的参数的灵敏度参数排序完全相同,最大入渗速率和最小入渗速率为最灵敏的参数;透水性区域的可积水深度和缺水率为最不灵敏的参数;对于重现期为 100 a 的降水而言,最大入渗速率和缺水率均为影响总产流量和洪峰流量最灵敏的参数,透水性区域的可积水深度和区域坡度是总产流量最不灵敏的参数;而区域宽度和透水性区域的曼宁系数是对洪峰流量最不灵敏的参数。

对于径流系数而言,采用 Horton 入渗模型和 Green - Ampt 入渗模型的结果一致,最大入渗速率和最小入渗速率是最灵敏的两个参数,而透水性区域的可积水深度和曼宁系数是最不灵敏的两个参数。

总体而言,对于 Green - Ampt 入渗模型来讲,T1 型降水和 T2 型降水以及不同重现期降水的参数灵敏度分析结果均呈现较大差异。采用 T1 型降水时,

对于 2a 和 10a 重现期降水而言,入渗系数对区域总产流量的影响比较灵敏,而形状系数对洪峰流量影响较大;对于重现期为 100a 的降水而言,透水性区域的曼宁系数的灵敏度有所增加。对于 T2 型降水而言,透水性区域的曼宁系数、最小入渗速率和衰减系数是对输出结果影响比较显著的参数。

3.3 讨论

由表 3 和表 4 可知,各输出变量的灵敏度值是不同的。当采用重现期为 2a 的 T2 型降水时,其灵敏度结果接近于零,从而表明各参数的变化未对输出结果产生明显的影响。由 Morris 灵敏度分析的计算方法可知,输出结果的变化越大,即方差越大,灵敏度值也越大,越容易进行灵敏度的分析比较。因此,为了比较不同降水及长期模拟下的输出结果的变化情况,采用标准方差对基于 Horton 和 Green - Ampt 入渗模型下的各输出结果进行分析,从而为选择参数校核降水事件提供理论支持。

由于各输出变量的意义和单位均不相同,难以直接采用各输出参数的标准方差进行比较。因此,采取数据归一化处理,即将原始数据同除以它的平均值得到新的数据序列 $x'_i = x_i/\bar{x}$,该组数据的平均值为 1,并将归一化后数据系列的标准方差定义为相对标准方差 σ' ,即

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - 1)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \left/ \bar{x} \right. \quad (2)$$

依据相对标准方差可进行不同组数据之间离散程度的比较。在 Horton 和 Green - Ampt 入渗模型下,各样本产生的降水事件的总产流量、洪峰流量及径流系数的相对标准方差计算结果及其排序如表 5 所示。

由表 5 可以看出,对于 Horton 入渗模型和 Green - Ampt 入渗模型来讲,各降水事件的总产流量、洪峰流量及径流系数的相对标准方差及排序在数值上呈现出较大的差异,洪峰流量的相对标准方差大于总产流量,从而表明洪峰流量对各参数的灵敏度更高;除此之外,T2 型降水的 2a 重现期降水和 10a 重现期的降水的总产流量和洪峰流量的相对标准方差均比较小,进而证实了小的 T2 型降水不适宜进行灵敏度分析和参数校核。Green - Ampt 入渗模型各输出量的相对标准方差小于 Horton 入渗模型,表明当采用 Green - Ampt 入渗模型时,改变参数取值对输出结果的影响不如 Horton 入渗模型显著。

表 5 Horton 和 Green - Ampt 模型输出结果相对标准方差

Tab.5 Relative standard variation of outputs for Horton and Green - Ampt infiltration methods

降水类型	重现期/a	输出变量	相对标准方差及排序	
			Horton	Green - Ampt
T1 型降水	2	R	0.075 (8)	0.040(8)
		Q _p	0.139 (3)	0.145(2)
	10	R	0.069 (9)	0.034(10)
		Q _p	0.135 (4)	0.124(3)
	100	R	0.065 (10)	0.025(12)
		Q _p	0.204 (1)	0.112(5)
T2 型降水	2	R	0.003 (13)	0.009(13)
		Q _p	0.006 (12)	0.045(7)
	10	R	0.050 (11)	0.039(9)
		Q _p	0.110 (5)	0.088(6)
	100	R	0.108 (6)	0.117(4)
		Q _p	0.142 (2)	0.149(1)
长期模拟		C	0.084 (7)	0.031(11)

4 结论

(1) 对于 Horton 入渗模型来讲,采用 T1 型降水和 T2 型降水时,参数灵敏度分析结果呈现较大差异。采用 T1 型降水时,入渗系数对区域总产流量的灵敏度较大,而区域形状系数对洪峰流量更加灵敏。采用 T2 型降水时,透水性区域的曼宁系数、最小入渗速率和消减系数对输出变量影响比较显著。从模型参数校核的角度出发,可采用 T1 型较大降水事件的洪峰流量对区域坡度和宽度进行校核;采用 T2 型较大降水事件的总产流量对最小入渗速率、消减系数 K 进行校核及其洪峰流量对透水性区域的可积水深度进行校核。

(2) 对于 Green - Ampt 入渗模型来讲,T1 型降水和 T2 型降水时,参数灵敏度分析结果均呈现较大差异。采用 T1 型重现期为 2 a 和 10 a 的降水事件时,入渗系数对区域总产流量的影响比较灵敏,而区域形状系数对洪峰流量影响较大,该结果与 Horton 入渗模型的结果一致;对于重现期为 100 a 的降水而言,透水性区域的曼宁系数对输出变量的灵敏度有所增加。采用 T2 型降水时,透水性区域的曼宁系数、最小入渗速率和衰减系数是对输出结果影响比较显著的参数。从模型参数校核的角度出发,利用 T1 型较小降水事件的洪峰流量对区域宽度和坡度进行校核及其总产流量对透水性区域的曼宁系数进行校核;利用 T2 型较大降水事件的洪峰流量对最小入渗速率和缺水率进行校核。

(3) 对于径流系数来讲,采用 Horton 入渗模型和 Green - Ampt 入渗模型的结果一致,最大入渗速率和最小入渗速率是最灵敏的两个参数,透水性表面的可积水深度和曼宁系数是最不灵敏的两个参数。因此,可采用径流系数对最大入渗速率和最小入渗速率进行校核。

(4) 通过对各样本下所产生的降水事件的总产流量和洪峰流量以及径流系数的数据系列的相对标准方差进行计算及排序,可以高效地选取离散程度较大,对参数变化反应显著的降水事件作为校核降水事件对参数进行校核,从而可以节约参数的校核时间,提高模型的校核效率。

参 考 文 献

- Hsu M H, Chen S H, Chang T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(1~2):21~37.
- Peterson E W, Wicks C M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM) [J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(1~2):294~305.

- 3 Davis J P, Rohrer C A, Roesner L A. Calibration of rural watershed models in the North Carolina piedmont ecoregion [C]// Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat. Reston: ASCE, 2007:1 ~ 10.
- 4 Karuppasamy E, Postel N, Pomeroy C A, et al. The impact of smaller detention basins on flood hazard areas in Lenexa, Kansas [C]// Proceedings of the 2009 World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers. Kansas: ASCE Press, 2009: 845 ~ 849.
- 5 谷良贤,仇理宽,龚春林. 全局灵敏性分析方法研究[J]. 航空计算技术,2011,41(1):1 ~ 4,13.
Gu Liangxian, Qiu Likuan, Gong Chunlin. Study on global sensitivity analysis method [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011,41(1):1 ~ 4,13. (in Chinese)
- 6 Mishra S, Deeds N, Ruskauff G. Global sensitivity analysis techniques for probabilistic ground water modeling [J]. Ground Water, 2009, 47(5): 730 ~ 747.
- 7 Saltelli A, Chan K, Scott M. Sensitivity analysis [M]. New York: John Wiles & Sons Ltd., 2000.
- 8 Cloke H L, Pappenberger F, Renaud J P. Multi-method global sensitivity analysis (MMGSA) for modeling flood plain hydrological processes [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(11): 1 660 ~ 1 674.
- 9 王浩昌,杜鹏飞,赵冬泉,等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. 中国环境科学,2008,28(8):725 ~ 729.
Wang Haochang, Du Pengfei, Zhao Dongquan, et al. Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model [J]. China Environmental Science, 2008, 28(8): 725 ~ 729. (in Chinese)
- 10 Brockmann D, Morgenroth E. Comparing global sensitivity analysis for a biofilm model for two-step nitrification using the qualitative screening method of Morris or the quantitative variance-based Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) [J]. Water Science and Technology, 2007, 56(8): 85 ~ 93.
- 11 Varella H, Guérif M, Buis S. Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: the case of soil parameters and a crop model [J]. Environmental Modeling and Software, 2010, 25(3): 310 ~ 319.
- 12 Sobol' I M, Tarantola S, Gatelli D, et al. Estimating the approximation error when fixing unessential factors in global sensitivity analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(7): 957 ~ 960.
- 13 DiMaggio J, DiazRicci J C, Diaz M S. Global sensitivity analysis in dynamic metabolic networks [J]. Computers and Chemical Engineering, 2010, 34(5): 770 ~ 781.
- 14 Cropp R A, Braddock R D. The new Morris method: an efficient second-order screening method [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 78(1): 77 ~ 83.
- 15 Francos A, Elorza F J, Bouraoui F, et al. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behavior in hydrological studies at the catchment scale [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(2): 205 ~ 218.
- 16 Nguyen T G, DeKok J L. Systematic testing of an integrated systems model for coastal zone management using sensitivity and uncertainty analyses [J]. Environmental Modeling and Software, 2007, 22(11): 1 572 ~ 1 587.
- 17 Xu Y, Mynett A E. Application of uncertainty and sensitivity analysis in river basin management [J]. Water Science & Technology, 2006, 53(1): 41 ~ 49.

(上接第 78 页)

- 18 杨忠山,窦艳兵,王志强. 北京市地下水水位下降严重原因分析及对策研究[J]. 中国水利,2010(19):52 ~ 54.
Yang Zhongshan, Dou Yanbing, Wang Zhiqiang. Analysis on the reasons of the decline of ground water level in the primary water supply source area of Beijing and the countermeasures [J]. China Water Resources, 2010(19):52 ~ 54. (in Chinese)
- 19 辛术贞,武丹,武爽,等. 单施尿素和有机肥对温室油菜产量的影响[J]. 北方园艺,2009(9):124 ~ 125.
Xin Shuzhen, Wu Dan, Wu Shuang, et al. Effects of urea and organic fertilizer on the yield of greenhouse rape [J]. Northern Horticulture, 2009(9):124 ~ 125. (in Chinese)
- 20 唐莉莉,陈竹君,周建斌. 蔬菜日光温室栽培条件下土壤养分累积特性研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):70 ~ 74.
Tang Lili, Chen Zhujun, Zhou Jianbin. Characteristics of soil nutrient accumulations under solar greenhouse cultivation condition [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2):70 ~ 74. (in Chinese)
- 21 杨合法,范聚芳,梁丽娜,等. 长期不同施肥模式对日光温室土壤硝态氮时空分布及累积的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):246 ~ 252.
Yang Hefa, Fan Jufang, Liang Li' na, et al. Effects of long-term fertilization modes on spatio-temporal distribution and accumulation of soil nitrate nitrogen in solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2):246 ~ 252. (in Chinese)