

# 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析

黄金良<sup>1</sup>,杜鹏飞<sup>1\*</sup>,何万谦<sup>1</sup>,欧志丹<sup>2</sup>,王浩昌<sup>1</sup>,王志石<sup>2</sup> (1.清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2.澳门大学科技学院,澳门)

**摘要:** 运用 Morris 筛选法对城市降雨径流模型 SWMM 的水文水力模块的相关参数进行局部灵敏度分析,以便对模型灵敏参数识别和不确定性分析.结果表明,影响3场降雨径流深的最灵敏度参数均为不透水率,灵敏度分别是 0.88,0.98 和 0.43.影响峰值流量的灵敏参数因不同雨强的降雨场次存在波动,雨强最大的降雨最灵敏参数为管道曼宁糙率,雨强最小的降雨最灵敏参数为无低洼地不透水区所占百分比.不同降雨强度 SWMM 模型水文水力模块的灵敏参数有所差异,尤其是下渗率相关的参数.

**关键词:** Morris 筛选法; SWMM 模型; 局部灵敏度分析

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2007)04-0549-05

**Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling.** HUANG Jin-liang<sup>1</sup>, DU Peng-fei<sup>1\*</sup>, HO Man-him<sup>1</sup>, Ao zhi-dan<sup>2</sup>, WANG Hao-chang<sup>1</sup>, WANG Zhi-shi<sup>2</sup> (1.Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, China). *China Environmental Science*, 2007,27(4): 549~553

**Abstract:** Sensitivity analysis (SA) is a crucial procedure for parameter identification and uncertainty analysis. Local sensitivity analysis using Morris screening method was carried out for urban rainfall runoff modeling based on Storm Water Management Model (SWMM). The most sensitive parameter for runoff depth of three rainfall events all was the percentage of imperviousness, with sensitivity indices of 0.88, 0.98 and 0.43 respectively. In comparison, sensitivity indices (Morris) ranking for peak flow varies of rainfall events with different rainfall intensity, namely, the most sensitive parameter was conduit Manning coefficient for the rainfall event with the largest rainfall intensity, whereas the most sensitive parameter was %zero-imperviousness for the rainfall event with the lowest rainfall intensity. Additionally, sensitivity indices rankings of parameters especially with respect to the infiltration rate of SWMM model also relates greatly to the rainfall intensity. Sensitivity analysis was used to identify the important parameters for runoff depth and peak flow, which proved to be a beneficial tool to aid for the calibration and uncertainty analysis of SWMM model.

**Key words:** Morris screening method; SWMM; local sensitivity analysis

由于城市暴雨径流的随机性、复杂性以及现场监测的耗时费力等,模型成为研究城市暴雨径流污染管理和控制的重要手段.模型参数识别是城市暴雨径流模拟的关键步骤.作为参数识别的有效辅助工具,灵敏度分析通过研究模型输入变化引起的模型结果变化,定量识别影响某一状态变量模拟输出的重要参数,以便对相应的灵敏参数进行有效识别和不确定性分析,可提高参数率定效率和模型预测的可靠性<sup>[1-3]</sup>.

SWMM 是美国环境保护署开发于 20 世纪 70 年代的暴雨管理模型<sup>[4]</sup>,是目前较为流行的城市暴雨径流管理模型.近年来国内也陆续开展了

SWMM 模型的应用研究<sup>[5-6]</sup>,但有关 SWMM 模型的参数灵敏度分析鲜见报道.本研究将灵敏度分析作为 SWMM 模型参数率定前的工具,立足于参数取值方法存在的观测误差等不确定性,选用 Morris 筛选法进行 SWMM 模型水文模块状态变量即径流深和峰值流量的局部灵敏度分析.通过澳门半岛 2005~2006 年 3 场雨强不同的降雨,分别进行灵敏性分析试验,观测灵敏参数的稳定性,识别影响径流深和峰值流量的灵敏参数,为 SWMM

收稿日期: 2006-11-02

基金项目: 国家“973”项目(2006CB403407)

\* 责任作者,副教授, dupf@tsinghua.edu.cn

模型参数识别与不确定性分析提供支持.

1 研究材料与方法

1.1 流域概况及采样

澳门半岛雅廉访小流域,面积 13.65hm<sup>2</sup>,不透水率 60%左右.土地利用构成中,商住混合、住宅区共占 55.2%,绿地面积占 34.8%,其他用地约占 10%.管道类型为分流制.采用雨量筒和流量计获取场次降雨的雨量和流量数据.选取 2005~2006 年 3 场不同降雨强度的降雨分别进行灵敏度分析试验,降雨特征如表 1 所示.

表 1 用于模型参数灵敏度分析的场次降雨特征  
Table 1 Characteristics of rainfall events used for local sensitivity analysis

| 降雨时间<br>(年-月-日) | 径流深<br>(mm) | 持续时间<br>(min) | 平均雨强<br>(mm/h) | 雨前干期<br>(h) |
|-----------------|-------------|---------------|----------------|-------------|
| 2005-08-24      | 2.4         | 80            | 1.8            | 56.7        |
| 2005-11-14      | 11.4        | 121           | 5.65           | 1072.5      |
| 2006-04-28      | 25          | 134           | 11.19          | 735.9       |

1.2 局部灵敏度分析方法

Morris 筛选法为目前应用较广的一种局部灵敏度分析方法<sup>[7-8]</sup>.Morris 筛选法选取模型其中一变量  $x_i$ ,其余参数值固定不变,在变量阈值范围内随机改变  $x_i$ ,运行模型得到目标函数  $y(x)=y(x_1,$

$x_2, x_3, \cdots, x_n)$ 的值,用影响值  $e_i$  判断参数变化对输出值的影响程度<sup>[7-9]</sup>,如式(1):

$$e_i = (y^* - y) / \Delta_i \tag{1}$$

式中:  $y^*$  为参数变化后的输出值; $y$  为参数变化前的输出值; $\Delta_i$  为参数  $i$  的变幅.

修正的 Morris 筛选法采用自变量以固定步长变化,灵敏度判别因子取 Morris 多个平均值<sup>[9]</sup>,如式(2):

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

式中:  $S$  为灵敏度判别因子; $Y_i$  为模型第  $i$  次运行输出值; $Y_{i+1}$  为模型第  $i+1$  次运行输出值; $Y_0$  为参数率定后计算结果初始值; $P_i$  为第  $i$  次模型运算参数值相对于率定参数后参数值变化的百分率; $P_{i+1}$  为第  $i+1$  次模型运算参数值相对于率定后初始参数值的变化百分率; $n$  为模型运行次数.

1.3 模型概化与参数取值

根据流域地形、土地覆盖和管网特征调查,将流域概化为 25 个汇水单元,并建立模型参数输入文件.SWMM 模型水文、水力模块相关参数取值方法大致有 3 类:GIS 测量的参数;现场调查与文献调研、模型手册确定估算的参数;监测的数据,雨量与流量数据.参数及其取值范围、方法见表 2.

表 2 SWMM 模型水文水力模块主要参数及其取值范围、取值方法  
Table 2 Major parameters with respect to SWMM hydrology and hydraulic module

| 参数编号  | 参数名称         | 物理意义                     | 参数取值范围      | 参数取值方法  |
|-------|--------------|--------------------------|-------------|---------|
| 参数 1  | Width        | 汇水单元坡面漫流宽度(m)            | 52~250      | GIS     |
| 参数 2  | %imperv      | 汇水单元不透水率(%)              | 30~80       | 调查      |
| 参数 3  | N-imperv     | 汇水单元不透水区曼宁糙率             | 0.011~0.015 | 调查,模型手册 |
| 参数 4  | N-perv       | 汇水单元透水区曼宁糙率              | 0.014~0.8   | 调查,模型手册 |
| 参数 5  | Des-imperv   | 汇水单元不透水区贮水深度(mm)         | 1.27~2.56   | 调查,模型手册 |
| 参数 6  | Des-perv     | 汇水单元透水区贮水深度(mm)          | 2.56~7.62   | 调查,模型手册 |
| 参数 7  | %zero-imperv | 汇水单元无低洼地不透水区所占百分比(%)     | 40~85       | 调查,模型手册 |
| 参数 8  | Max. Infilt  | 最大下渗率(mm/h)              | 3.3~50.8    | 模型手册    |
| 参数 9  | Min. Infilt  | 最小下渗率(mm/h)              | 1.0~3.3     | 模型手册    |
| 参数 10 | Decay con    | 衰减系数                     | 2~7         | 模型手册    |
| 参数 11 | %slope       | 汇水单元坡度(%)                | 0.50~22.48  | GIS     |
| 参数 12 | Area         | 汇水单元面积(hm <sup>2</sup> ) | 0.07~1.48   | GIS     |
| 参数 13 | Con-Mann     | 管道曼宁糙率                   | 0.011~0.015 | 模型手册    |
| 参数 14 | Con-length   | 管道长度(m)                  | 5~194       | GIS     |

2 结果与分析

采用前面提及的参数取值方法,通过表 1 所列 3 场降雨实测数据对模型水文模块参数进行初步率定,手工调试参数获取一组水文模拟参数,率定结果见表 3.

3 场降雨的模拟模型参数中除了降雨数据不同,其余参数一致.在此基础上,采用修正的 Morris 筛选法对 3 场降雨的局部灵敏度分析结果进行定量表达,以 5%为固定步长对某一参数值进行扰动,分别取其值的-20%,-15%,-10%,-5%,5%,10%,15%和 20%,而其他参数值固定不变.观测不同降雨强度下径流深和峰值流量的水文、水力模块相关参数的灵敏度(表 4).

参照文献[10]对灵敏度的分级,即: $|S_i| \geq 1$  为高灵敏参数; $0.2 \leq |S_i| < 1$  为灵敏参数; $0.05 \leq |S_i| < 0.2$  为中等灵敏参数, $0 \leq |S_i| < 0.05$  为不灵敏参数( $i$  为模型的第  $i$  个状态变量).进行灵敏

度分析说明.

由表 4 和图 1 可见,3 场降雨试验影响模型径流深的最灵敏参数均为%imperv.Width 对于 2 场雨强较大的降雨,为灵敏参数.%Zero-imperv 对于雨强最大的 2006-04-28 降雨为不灵敏参数,对于另外 2 场雨却是灵敏参数.

%slope、Area、width 和 N-imperv 灵敏度均在中等或以上.Horton 方程的参数,包括最大和最小下渗率,衰减系数,除了雨强最大的降雨外,灵敏度均为 0.而 Con-Mann 在 3 场降雨中的灵敏度均为 0.

影响峰值流量的灵敏参数排序存在较大波动.2005-08-24 降雨的灵敏参数仅有%Zero-imperv 和 Area,其中前者的灵敏度达 1.4286,为高灵敏参数.其余参数为不灵敏参数.2005-11-14 降雨的灵敏参数包括 Width、%imperv、Area 和 N-imperv,其余参数为不灵敏参数.2006-04-28 降雨的灵敏参数为 Con-Mann 和 Con-length,Area 为中等灵敏参数.

表 3 三场降雨的水量模拟值与实测值对照

Table 3 Simulated and measured value for surface runoff flow during three rainfall events

| 降雨时间<br>(年-月-日) | 流量峰值(m³/s) |      |         | 径流深(mm) |       |         |
|-----------------|------------|------|---------|---------|-------|---------|
|                 | 实测值        | 模拟值  | 偏差(%)   | 实测值     | 模拟值   | 偏差(%)   |
| 2005-08-24      | 0.061      | 0.04 | 34.32   | 0.733   | 0.736 | -0.41   |
| 2005-11-14      | 0.032      | 0.11 | -243.75 | 0.666   | 1.351 | -102.85 |
| 2006-04-28      | 4.595      | 1.89 | 58.87   | 16.65   | 7.739 | 53.52   |

表 4 SWMM 模型水文模块参数局部灵敏度分析结果

Table 4 Results of sensitivity analysis on parameters of Runoff module of SWMM model

| 参数<br>编号 | 参 数          | 3 场降雨径流深灵敏度 $S_1$ |            |            | 3 场降雨峰值流量灵敏度 $S_2$ |            |            |
|----------|--------------|-------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
|          |              | 2005-08-24        | 2005-11-14 | 2006-04-28 | 2005-08-24         | 2005-11-14 | 2006-04-28 |
| 参数 1     | Width        | 0.1090            | 0.2284     | 0.2567     | 0                  | 0.7792     | 0.0302     |
| 参数 2     | %imperv      | 0.8797            | 0.9834     | 0.4317     | 0                  | 0.7792     | 0.0302     |
| 参数 3     | N-imperv     | 0.1090            | -0.1607    | -0.1247    | 0                  | -0.5195    | -0.0151    |
| 参数 4     | N-perv       | 0                 | 0          | -0.1289    | 0                  | 0          | -0.0151    |
| 参数 5     | Des-imperv   | -0.2018           | -0.1142    | -0.0015    | 0                  | 0          | 0          |
| 参数 6     | Des-perv     | 0                 | 0          | -0.0031    | 0                  | 0          | 0          |
| 参数 7     | %Zero-imperv | 0.8717            | 0.4864     | 0.0031     | 1.4286             | 0          | 0          |
| 参数 8     | Max Infil    | 0                 | 0          | -0.0623    | 0                  | 0          | 0          |
| 参数 9     | Min Infil    | 0                 | 0          | -0.0503    | 0                  | 0          | 0          |
| 参数 10    | Decay con    | 0                 | 0          | 0.0410     | 0                  | 0          | 0          |
| 参数 11    | %slope       | 0.0526            | 0.0825     | 0.1282     | 0                  | 0          | 0.0151     |
| 参数 12    | Area         | -0.1090           | -0.1607    | -0.2540    | 0.7143             | 0.7792     | 0.1814     |
| 参数 13    | Con-Mann     | 0                 | 0          | 0          | 0                  | 0          | -0.7105    |
| 参数 14    | Con-length   | 0                 | 0          | 0          | 0                  | 0          | -0.4989    |

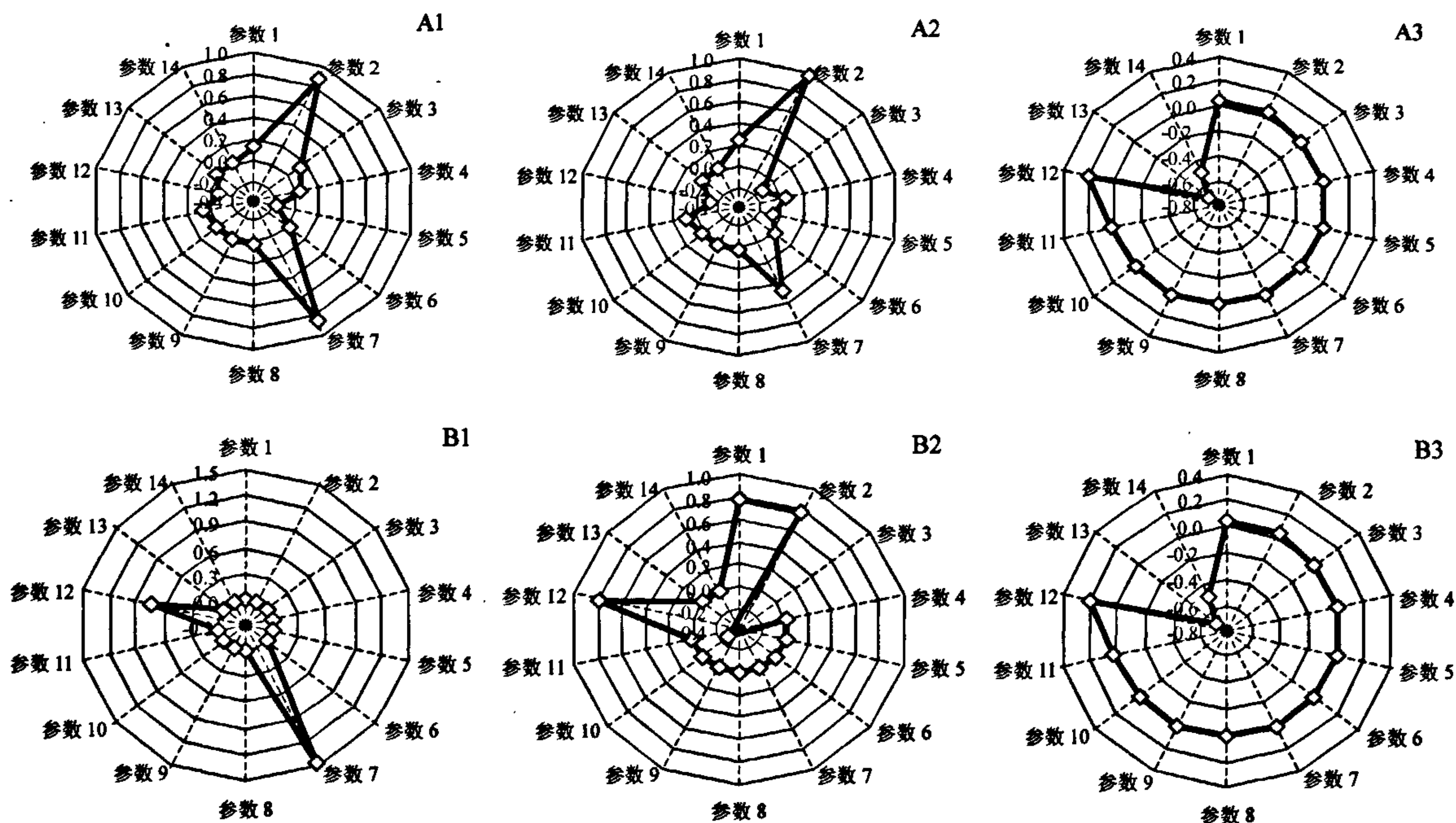


图1 3场降雨灵敏度参数分布

Fig. 1 Sensitivity analysis of the parameters with respect to runoff depth and peak flow

(A: 径流深; B: 峰值流量; 1~3 分别表示 2005-08-24、2005-11-14 和 2006-04-28 3 场降雨)

### 3 讨论

#### 3.1 影响灵敏度分析的因素

Zaghloul<sup>[11]</sup>在一假定流域(划分为 25 个面积大小同为 11.48 英亩的汇水单元),采用模拟历时 1h,最大雨强 101.6mm/h 的降雨事件下影响径流深和流量峰值和流量过程线的各参数灵敏度.结果表明,SWMM 模型水文模块最灵敏的参数为 %imperv,其次是 width,Con-Mann 和 Con-length,Con-Mann 对于各种扰动径流深均不变.

本研究结果表明,影响径流深的灵敏参数 3 场降雨有所波动,但却大致相同,灵敏参数包括 %imperv 和 Width.与文献[11]在假想状态下的灵敏度分析结果基本相同.

雨强对于 SWMM 模型水文水力模块参数的灵敏度分析影响较大,尤其是 SWMM 模型下渗率相关的参数.2005 年 2 场降雨 Horton 方程下渗率相关的参数:Max Infiltration,Min Infiltration 和 Decay coefficient 均为不灵敏参数,灵敏系数为 0.2006-04-28 降雨下渗率相关参数灵敏度稍高,但也仅为  $\pm 0.05$  左右.该结果与文献[11]在假想条件下的灵敏度分

析结果不同.造成研究流域降雨径流模拟中下渗率参数不灵敏的原因可能与选用的 3 场降雨的雨强均较小有关.这也反映了城市降雨径流模拟在现实环境系统的复杂性,佐证了 Drechsler<sup>[12]</sup>的相关研究结果.另外,径流深与峰值流量的灵敏参数不同.尤其是对于雨强最大的降雨场次 Con-Mann 和 Con-length 是峰值流量的灵敏参数,对于径流深灵敏度却为 0.对此,Lei 等<sup>[13]</sup>有类似的结论,认为参数的灵敏度取决于状态变量的类型.

#### 3.2 Morris 筛选法灵敏度系数的稳定性

Morris 筛选法获得的参数灵敏度排序的稳定性,需要多次试验研究才可获得<sup>[7]</sup>.本研究结果表明,影响径流深的灵敏参数 3 场降雨有所波动,灵敏参数较为稳定(表 4).而影响峰值流量的灵敏参数 3 场差异较大,表现不稳定.

### 4 结论

4.1 SWMM 模型不同状态变量—径流深度和峰值流量的灵敏参数不同.影响模型径流深度的最灵敏参数为 %imperv;影响峰值流量最灵敏参数因不

同雨强而存在较大波动.灵敏参数有%Zero-imper、Con-Mann、Con-length、width 管道曼宁糙率和 Area.Con-Mann 及 Con-length 对于径流深度为不灵敏参数,而对于峰值流量则为最灵敏参数.

4.2 不同降雨强度 SWMM 模型水文水力模块的灵敏参数有所差异,尤其是与下渗率相关的参数,雨强最大的降雨,最大和最小下渗率为中等灵敏参数,而雨强较小的降雨则为不灵敏参数.

#### 参考文献:

- [1] Chen J, Beck M B. Quality assurance of multi-media model for predictive screening tasks [R]. USEPA, EPA/600/R-98/106, 1999.
- [2] Sieber A, Uhlenbrook S. Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure [J]. Journal of Hydrology, 2005,310:216-235.
- [3] Crosetto M, Tarantola S, Saltelli N. Sensitivity and uncertainty analysis in patial modelling based on GIS [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000,81(2):71-79.
- [4] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model, version 4, user's manual [R]. Report EPA-600/3-88-001a. Athens, GA, USA: US Environmental Protection Agency, 1988.
- [5] 董 欣,陈吉宁,赵冬泉.SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用 [J]. 给水排水, 2006,32(5):106-109.
- [6] 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等.基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析 [J]. 水利水电技术, 2006,37(4):64-67.
- [7] Francos A. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models:understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale [J]. Reliability Engineering and System Safty, 2003,79(2):205-218.
- [8] Zador J, Zsely I G, Turanyi T. Local and global uncertainty analysis of complex chemical kinetic systems [J]. Reliability Engineering System Safety, 2006, 91: 1232-1240.
- [9] 郝芳华,任希岩,张雪松,等.洛河流域非点源污染负荷不确定性的影响因素[J]. 中国环境科学, 2004,24(3):270-274.
- [10] Lenhart L, Eckhardt K, Fohrer N, *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002,27:645-654.
- [11] Zaghloul N Z. Sensitivity analysis of the SWMM runoff-transport parameters and the effects of catchment discretisation [J]. Advance in Water Resources, 1983,6:214-223.
- [12] Drechsler M. Sensitivity analysis of complex models [J]. Biological Conservation, 1998,86(3):401-412.
- [13] Lei J, Schilling W. Parameter uncertainty propagation analysis for urban rainfall runoff modeling [J]. Water Science and Technology, 1994,29(1-2):145-154.

作者简介: 黄金良(1975-),男,福建泉州市人,副教授,博士,研究方向为流域与城市非点源污染.发表论文近 30 篇.

## 各方携手促使洗涤剂行业变绿

现在从清洗剂行业、零售到消费者都关注清洗剂使用带来的环境影响.在美国,过去一年清洗剂产品从只是环境保护积极分子关注变为生产商如宝洁公司到零售巨头沃尔玛以及消费者共同关注的问题.由于洗涤剂的使用量大又和大量水混合,使用后直接进入下水道,必然要成为环境保护要讨论的一个重点问题.

宝洁公司是全球最大的洗涤剂公司.该公司现在提倡用冷水洗涤,他说如果纽约市每一个人即使仅用冷水洗衣服一天,其节省的能源足以使帝国大厦照明一个月.现在,表面活性剂供应商正在设计一种憎水表面活性剂系统,可以在冷水中去除油渍.

另一方面,沃尔玛公司说他准备在今后 2 年内和供应商谈判要取代 20 种受环境保护关注的化学物质,他在 2006 年 10 月宣布将首先考虑取代 3 种,其中之一是环氧壬酚(NPE<sub>9</sub>),是许多洗涤剂中存在的一种表面活性剂.沃尔玛作出声明是由于欧、美出台了一系列措施,其中有欧盟的洗涤剂指令和 REACH 计划,美国环境保护局(EPA)为环境设计项目(Design for Environment Program)要求在全国自动洗碗机使用的洗涤剂中禁用磷酸盐.

江 年 摘自《Chemical & Engineering News》, January 29, 14(2007)