

施奇妙, 徐宗学, 卢兴超, 等. 基于局部和全局方法的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 58-71. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.005

SHI Qimiao, XU Zongxue, LU Xingchao, et al. Parameter sensitivity analysis of SWMM Model based on local and global methods [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 58-71. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.005

# 基于局部和全局方法的 SWMM 模型 参数敏感性分析

施奇妙<sup>1,2</sup>, 徐宗学<sup>1,2</sup>, 卢兴超<sup>1,2</sup>, 张萍<sup>3</sup>, 吴献平<sup>4</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 北京禹冰水利勘测规划设计有限公司, 北京 100161; 4. 成都市市政工程设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:**【目的】通过对模型参数开展敏感性分析,可进一步提升参数的优化效率、降低模型不确定性影响并提高模型精准度。【方法】以迁安市某居住小区为例,构建 SWMM 模型,并运用修正 Morris 筛选法和 Sobol 法,以洪峰流量与径流系数为优化目标,探究不同降雨情景下参数敏感度的分布特征,同时评估这两种方法的优劣。【结果】结果表明:修正 Morris 筛选法和 Sobol 法均能筛选出不同目标函数下敏感度较高的参数;对于洪峰流量,两种方法均识别出管道糙率系数为最敏感参数,敏感度分别为 $-0.563 \sim -0.157$ 和 $0.116 \sim 0.915$ ;对于径流系数,修正 Morris 筛选法识别出最大入渗率为最敏感参数,敏感度为 $-0.358 \sim 0$ ,Sobol 法识别出不透水区洼蓄量为最敏感参数,敏感度为 $0.238 \sim 0.961$ ;由 Sobol 法计算得到的二阶敏感度指标显示,参数间的相互作用主要表现为两个参数间的组合效应;修正 Morris 筛选法能对参数敏感性进行定性排序,计算高效便捷,Sobol 法能全面分析参数及其相互作用的影响机制。【结论】通过综合运用定性定量分析方法,对于深入解析模型参数敏感性、精准识别参数率定方向和提升模型可靠性具有重要的指导意义。

**关键词:** SWMM 模型; 敏感性分析; 修正 Morris 筛选法; Sobol 法; 洪峰流量; 径流系数; 降雨; 数值模拟

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV122.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0058-13



## Parameter sensitivity analysis of SWMM model based on local and global methods

SHI Qimiao<sup>1,2</sup>, XU Zongxue<sup>1,2</sup>, LU Xingchao<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping<sup>3</sup>, WU Xianping<sup>4</sup>

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Beijing Yubing Hydraulic Survey Planning Design Co., Ltd., Beijing 100161, China; 4. Chengdu Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, Sichuan, China)

收稿日期: 2024-09-21; 修回日期: 2024-11-06; 录用日期: 2024-11-09; 网络出版日期: 2024-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介: 施奇妙(2000—),女,硕士研究生,主要从事城市水文学研究。E-mail: shiqimiao@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 徐宗学(1962—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract:** [Objective] The sensitivity analysis of model parameters is conducive to enhancing the optimization efficiency of model parameters, reducing model uncertainty, and improving the model accuracy. [Methods] A residential community in Qian' an City was selected as an example, and the SWMM model was constructed. The analysis of parameter sensitivity was conducted by employing the modified Morris method and the Sobol method, with peak flow and runoff coefficient as optimization objectives under different rainfall scenarios. The advantages and disadvantages of these two methods were also evaluated. [Results] The result indicate that both the modified Morris method and Sobol method can identify high sensitivity parameters under different objective functions. For peak flow, both methods identify the roughness coefficient of the pipeline as the most sensitive parameter, with sensitivities of  $-0.563 \sim -0.157$  and  $0.116 \sim 0.915$ , respectively. For runoff coefficient, the modified Morris method identifies the maximum infiltration rate as the most sensitive parameter, with sensitivities of  $-0.358 \sim 0$ . The Sobol method identifies the storage capacity of impermeable areas as the most sensitive parameter, with sensitivities of  $0.238 \sim 0.961$ . The second-order sensitivity index calculated by the Sobol method shows that the interaction between parameters is mainly the combined effect between the two parameters. The modified Morris method can qualitatively sort the sensitivity of parameters, and the calculation is efficient and convenient. The Sobol method can comprehensively analyze the influence mechanism of parameters and their interactions. [Conclusion] The comprehensive application of qualitative and quantitative analysis method has important guiding significance for in-depth analysis of model parameter sensitivity, accurate identification of parameter calibration direction, and improvement of model reliability.

**Keywords:** SWMM model; sensitivity analysis; modified Morris method; Sobol method; peak flow; runoff coefficient; rainfall; numerical simulation

## 0 引言

在全球变暖与城镇化的共同作用下, 城市洪涝问题已成为 21 世纪以来, 最具有挑战性的自然灾害之一<sup>[1]</sup>。强降雨引发的城市洪涝灾害具有链式效应, 尤其是在人口众多且基础设施落后的发展中国家, 城市脆弱性高, 使得洪灾损失更为严重<sup>[2]</sup>。据统计, 2000—2019 年, 洪水占全球自然灾害的 44%, 中国是受洪灾影响最严重的国家, 期间发生了约 400 起洪水事件, 影响人数达 9 亿, 几乎是全球受影响总人口的 55%<sup>[3]</sup>。在过去 20 年中, 北京经历了至少八次导致人员伤亡的洪涝灾害<sup>[4]</sup>。今年汛期以来, 江西、广东、安徽、河南等地也相继发生了严重洪涝灾害, 这些灾害对居民生命财产和社会经济发展造成了严重影响。“城市看海”和“城市看江”已经成为城市之殇。

作为城市防洪排涝的重要手段之一, 城市暴雨洪涝模拟技术能对城市水循环过程及其相关效应进行模拟<sup>[5]</sup>。暴雨洪涝管理模型(SWMM)经技术更新升级, 功能不断完善, 目前已更新至 5.2.4 版本, 可用于城市动态降雨径流及排水系统的规划和评价<sup>[6]</sup>。该模型便捷易学, 可用于二次开发, 在城市地区具有广泛适用性。由于城市地表特征的复杂多变, 许多参数难以直接通过测量获得, 通常需要对参数进行识别、优化和率定, 以更好地符合实际水文过程<sup>[7]</sup>。在实际水文模型的构建过程中, 由于参数众多且影响效果各

异, 无法对每个参数进行细致优化, 因此需要筛选出敏感性参数, 为模型率定和验证提供方向指引, 有利于提高模拟效率<sup>[8]</sup>。在不同的下垫面条件、降雨过程和目标函数下, SWMM 模型参数的响应程度也各不相同, 参数的不确定性较高。

参数敏感性分析的方法通常可以归为两类: 局部分析法与全局分析法<sup>[9]</sup>。在局部分析领域中, 扰动分析法与 Morris 筛选法是常用的方法。郑震等<sup>[10]</sup>构建了 MIKE SHE 模型, 采用扰动分析法计算不同参数敏感性, 并基于 GLUE 法对径流进行不确定性分析。舒心怡等<sup>[11]</sup>运用 Morris 筛选法与互信息法分析参数的敏感性, 并探究不同下垫面条件下敏感性的分布特征。局部分析方法评估了单一参数对模型的作用, 简洁高效, 被广泛应用于各领域, 但此法未考虑“异参同效”现象, 具有局限性且不稳定<sup>[12]</sup>。全局敏感性分析方法有 Sobol 法、互信息法、区域灵敏度分析法、广义似然不确定性估计法等, 其中 Sobol 法是最常用的方法之一。常晓栋等<sup>[13]</sup>应用 Sobol 法对 SWMM 模型在多种降雨强度和目标函数下的参数敏感性进行了定量评估, 并比较参数间相互作用的影响效果。金梦潇等<sup>[14]</sup>采用 Morris 法、Sobol 法和 EFAST 法分析 SWMM 模型不同 LID 设施的模型参数敏感性, 并比较不同方法的结果。全局分析法能使参数在其全部取值区间内变动, 并且还涵盖了参数间交互作用对结果的影响。该方法综合评估了所有参数的响应, 具有较高的可靠性和稳健性, 适用于复杂的水文模型系

统<sup>[15]</sup>。综上所述, Morris 筛选法应用简便高效, 通过少量的计算可获得参数敏感性的定性排序。Sobol 法基于方差分解原理能定量评估参数及其组合对模型的响应, 被视为参数敏感性分析中最具代表性的方法之一。

虽然, 现有学者已经取得了较为丰富的研究成果, 但部分参数敏感性分析侧重研究单个参数的敏感性, 运用传统方法对参数敏感度进行排序筛选, 对参数间的作用机制研究较少, 缺乏不同类型分析方法的对比验证。并且各方法存在其固有的局限性, 如 GLUE 法某些参数阈值的设定较主观, 无法准确模拟全过程<sup>[16]</sup>; 互信息法的计算量较大, 且容易受输入数据误差和不确定性影响<sup>[17]</sup>。本文通过建立面向小区尺度的 SWMM 模型, 从局部及全局两方面出发, 运用修正 Morris 筛选法和 Sobol 法分析不同降雨强度下的参数敏感性, 识别出对目标函数敏感性高的参数, 对比两种方法的结果和优劣, 为提升模型参数的率定效率与模型模拟结果的可信度提供了科学依据。

## 1 研究思路与方法

### 1.1 城市洪涝模型

SWMM 模型是一种用于模拟降雨径流过程的水文模型, 它不仅能够模拟城市单场降雨的水量及水质状况, 还能开展长期水文模拟。SWMM 模型主要由进行水量水质模拟的计算模块和负责结果汇总、统计和图形绘制的服务模块构成, 能够追踪不同时间步长下每个区域的水文特征, 目前被广泛应用于低影响开发措施调控模拟、海绵城市建设评估、数字孪生水利建设等领域<sup>[18]</sup>。根据土地利用、建筑物分布、地形等因素可将研究区分为不同的子汇水区, 其接收降雨后经过下渗、填注等损失后形成径流, 然后径流经过管渠、调蓄设施、水泵等输送, 最终通过流量演算叠加得到流域出口的洪水过程<sup>[8]</sup>。子汇水区中可以选择

三种模型描述降雨渗入不饱土壤区的方式, 其中 Horton 模型公式参数较少, 通常被应用于城市小流域, 所以本文运用 Horton 模型来演算下渗过程。流量演算选用了动力波方法, 此方法通过求解圣维南方程组计算管道内的复杂水流状态, 能更真实地模拟实际水流过程, 使结果更精确<sup>[19]</sup>。

模型所需的参数可划分为两类: 物理参数和过程参数。物理参数一般可通过实测数据获得, 如子汇水区面积、特征宽度、不透水率和平均坡度等能通过 ArcGIS 分析计算推求。本文依据 SWMM 模型 5.0 版用户手册<sup>[20]</sup>及相关研究资料<sup>[21-22]</sup>确定了洼蓄量、地表曼宁系数、入渗速率、衰减常数和管道糙率系数等过程参数, 并在率定过程中对其进行了调整, 以验证其适用性。模型中排干时间设置为 7 d。SWMM 模型中各参数的编号、含义、取值范围及初始值的对应关系如表 1 所列。

### 1.2 参数敏感性分析

#### 1.2.1 修正 Morris 筛选法

本研究利用修正 Morris 筛选法来评估参数局部敏感性, 此方法在 1991 年提出, 随后在 2007 年被 CAMPOLONGO 等<sup>[23]</sup>改进。Morris 筛选法变量取值存在随机性, 该方法经过修正后, 集成了 OAT(one-factor-at-a-time)法采样, 具有相对较高的准确性, 在保持其他参数不变时对模型中某个参数在固定步长下进行扰动, 以观察参数变化对目标函数的影响。通过算法计算得出的敏感性系数, 可以有效地比较不同参数设置下模型的响应差异。参数敏感性系数  $SN$  的公式如下

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

式中,  $Y_i$  为参数第  $i$  次扰动时模型的结果;  $Y_0$  为初始参数运行下模型的结果;  $P_i$  为第  $i$  次参数扰动与初值相比的变化率;  $n$  为参数的样本数量。

表 1 模型参数的物理意义及其取值范围

Table 1 The physical meaning and ranges of model parameters

编号	参数	物理意义	取值范围	初始值
1	$N$ -Imperv	不透水区曼宁系数	0.005 ~ 0.05	0.02
2	$N$ -Perv	透水区曼宁系数	0.05 ~ 0.5	0.4
3	$S$ -Imperv	不透水区洼蓄量/mm	0.1 ~ 50	7
4	$S$ -Perv	透水区洼蓄量/mm	0.1 ~ 50	3
5	MaxRate	最大入渗率/mm · h <sup>-1</sup>	50 ~ 150	76
6	MinRate	最小入渗率/mm · h <sup>-1</sup>	0 ~ 50	3
7	Decay	衰减常数	2 ~ 7	0.6
8	Roughness	管道糙率系数	0.01 ~ 0.09	0.012

为确保参数扰动保持在合理区间内, 并且对模型结果产生显著影响, 本文设定恒定的 10% 变化幅度<sup>[24]</sup>, 对 SWMM 模型 8 个参数逐一扰动, 在保持其余参数固定的同时, 对每个参数施加 -30%、-20%、-10%、10%、20%、30% 的变化率。然后代入模型, 分析得到不同目标函数下参数变化对模型的影响, 如图 1 所示。参照相关学者的研究成果<sup>[25-26]</sup>, 基于敏感性系数绝对值, 对参数进行敏感性分级, 具体分类标准如表 2 所列。参数  $SN$  的绝对值越大, 说明该参数对目标函数越敏感,  $SN$  为正值说明参数与结果为正相关, 负值说明参数与结果为负相关。

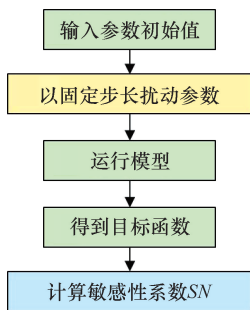


图 1 修正 Morris 筛选法分析流程

Fig. 1 Flow chart of modified Morris method analysis

表 2 参数敏感性的分级标准

Table 2 Classification criteria of parameter sensitivity

类别	取值范围	敏感性等级
I	$1 \leq  SN $	高敏感
II	$0.2 \leq  SN  < 1$	敏感
III	$0.05 \leq  SN  < 0.2$	中等敏感
IV	$0 \leq  SN  < 0.05$	不敏感

### 1.2.2 Sobol 法

Sobol 法作为一种全局分析法, 在 1993 年首次提出, 而后被广泛运用于各领域<sup>[27]</sup>, 类似的方法还有 FAST 法和 EFAST 法。该方法通过探究参数与目标函数的非线性关系能有效地评估参数灵敏度, 其基于方差分解原理, 将目标函数的总体方差分解为单一参数及其相互影响所贡献的方差部分<sup>[28]</sup>。它将模型表示为函数形式  $y=f(x)$ , 其中  $x$  为模型参数  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。对模型总方差进行分解, 其公式为

$$D = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \dots + D_{1, 2, \dots, n} \quad (2)$$

式中,  $D$  为模型总方差;  $D_i$  为第  $i$  个参数的方差贡献;  $D_{ij}$  为第  $i, j$  个参数之间的交互效应方差;  $D_{1, 2, \dots, n}$  为  $n$  个参数共同作用于模型的方差。

对以上公式进行归一化后, 计算模型参数的敏感度。

一阶敏感度为

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (3)$$

二阶敏感度为

$$S_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} \quad (4)$$

总敏感度为

$$S_{Ti} = 1 - \frac{D_{-i}}{D} \quad (5)$$

式中,  $S_i$  为第  $i$  个参数独立作用的敏感度;  $S_{ij}$  为第  $i, j$  个参数相互作用产生的敏感度;  $S_{Ti}$  为第  $i$  个参数及其与其余参数共同影响的综合敏感度;  $D_{-i}$  为不考虑第  $i$  个参数外其余参数综合效应所产生的方差。

总灵敏度不仅衡量了各参数对模型的独立作用, 也涵盖了不同参数组合的相互作用, 因此被视为评估参数对模型结果响应程度的重要标准。总体敏感度和一阶敏感度之差即交互敏感度, 用于反映参数间的协同效应。本文采用拉丁超立方抽样法生成样本, 通过分层随机抽样能均匀覆盖变量的取值范围, 既能保证结果精度又能节省时间<sup>[29]</sup>。Sobol 法下模型计算次数为  $(2m+2) \times n$  次,  $m$  为模型参数数目,  $n$  为样本个数, 其具体流程如图 2 所示。

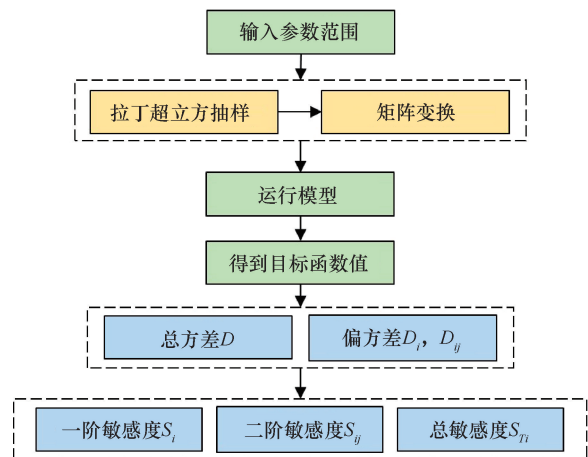


图 2 Sobol 法分析流程

Fig. 2 Flow chart of Sobol method analysis

## 2 以迁安某居住小区为例

### 2.1 研究区概况

本研究区属于迁安市某居住小区, 位于迁安市中部偏东, 小区北临惠安大街, 西接丰喜路, 东邻丰庆路, 总面积约 20.23 万  $m^2$ 。小区整体西高东低, 地

势较平坦, 平均坡度为 1.53%, 浅层土以粉土、细砂为主, 绿地下层土以粉质黏土为主。研究区呈现暖温带半湿润大陆性季风气候特征, 多年平均降雨量 681.4 mm, 汛期降雨主要在 6—9 月, 周围有龙形水系流经, 可作为调蓄设施接纳雨水。小区中的土地利用类型主要有房屋建筑、道路、绿化、停车场和铺装等, 小区绿化率较高, 运用景观水体作为雨水存储与调蓄设施, 能够有效缓解城市防洪排涝系统所承受的压力。研究区的位置和地形如图 3 所示。

## 2.2 SWMM 模型构建

建立 SWMM 模型需收集的数据资料包括研究区排水管网信息、数字高程数据、土地利用情况等。管网数据由检查井、排水口、管道三部分组成, 检查井属性包括点号、井底高程和井深, 管道属性有管段的流向、长度和形状大小, 排水口属性有井底高程等。降雨数据采用由河北省气候中心完成的《河北省主要城市城区暴雨强度公式修编》, 其中推荐迁安市的暴雨强度公式, 选用芝加哥雨型法推求重现期 1 a、5 a、10 a、20 a、50 a 下, 历时 2 h, 峰值比例 0.4 的设计暴雨, 计算公式如下

$$q = \frac{1\ 715.984 \times (1 + 0.997 \lg P)}{(t + 8.095)^{0.709}} \quad (6)$$

式中,  $q$  为设计暴雨强度 [ $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ];  $P$  为重现期 (a);  $t$  为设计暴雨历时 (min)。

本研究所使用的数字高程模型 (DEM) 经由 ArcGIS 软件对高程点进行插值, 形成数字高程三角模型 (TIN), 并由此转换而成, 地形数据较精细。子汇水区的不透率率是根据各类土地利用的不透性百分比设定的<sup>[30]</sup>。在构建 SWMM 模型前先对所有输入数据进行预处理, 检查管道连通性, 然后选用泰森多边形法划分子汇水区, 并结合地形高程手动修正子汇水区, 再根据土地利用和道路分布调整细化边界, 利用 ArcGIS 软件初步计算模型参数。最终, 概化后的研究区共有 209 个节点, 205 条管线, 209 个子汇水区和 4 个排水口, 排水口选用自由出流方式。利用 inp 文件向模型中导入节点、管道、子汇水区和出水口等信息, 再添加包含降雨序列的雨量站, 调整参数, 最终 SWMM 模型的总体结构如图 4 所示。

SWMM 模型的计算步长设置为 1 min, 有助于提高模拟结果的精度。在各种降雨情景和参数组合下, 模型在连续性误差分析中的地表径流误差和管道汇流误差均控制在 5% 以下, 模型计算结果收敛, 从而验证了模型的稳定性和可靠性。

由于研究区内实测降雨和径流监测数据的缺失, 选用综合径流系数法进行参数率定与验证<sup>[31]</sup>。研究区所属小区属新城, 该小区及绿地广场建设规格较高, 绿化覆盖广泛, 区域内的土地利用类型主要分为五种, 通过加权计算得出综合径流系数, 详细过程

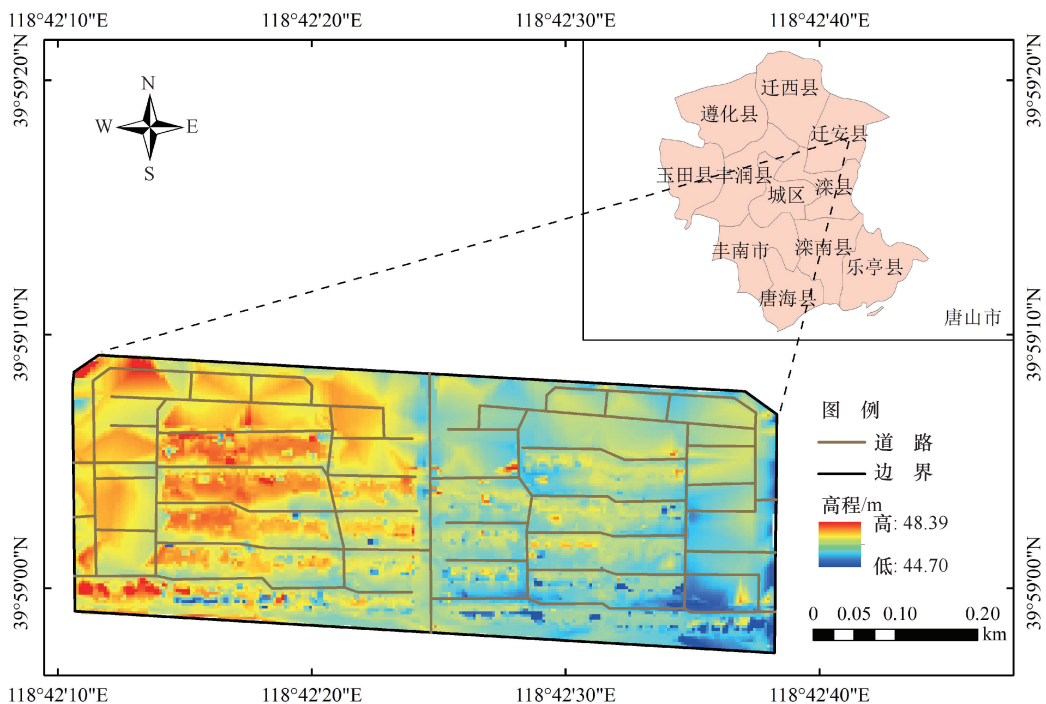


图 3 研究区概况

Fig. 3 Overview of the study area



图4 小区SWMM模型概化

Fig. 4 SWMM model generalization of community

如表3所列。研究区的实测综合径流系数是0.539, 利用模型模拟得到了研究区在不同降雨强度下的径流量, 通过将实际综合径流系数与模拟的径流系数进行对比, 具体结果如表4所列。为了分析模型模拟值和实际值的离散程度, 采用变异系数来量化二者的差异<sup>[32]</sup>, 计算公式为

$$C_v(\psi) = \frac{\Delta\psi}{\bar{\psi}} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $C_v(\psi)$  为变异系数;  $\Delta\psi$  为实际值与模拟值的差值;  $\bar{\psi}$  为实际值与模拟值的平均值。

表3 研究区综合径流系数计算表

Table 3 Calculation of comprehensive runoff coefficient of study area

下垫面类型	总面积 /hm <sup>2</sup>	总面积占比 /%	径流系数	综合径流系数
绿地	9.298	45.95	0.15	0.539
道路	4.249	21.00	0.9	
停车场	2.451	12.12	0.8	
硬化铺装	0.747	3.69	0.8	
建筑硬化屋顶	3.489	17.24	0.9	

表4 参数在各重现期暴雨下的变异系数

Table 4 The variation coefficient of parameters under different rainfall return periods

重现期/a	1	2	5	10	50
模拟径流系数	0.510	0.511	0.512	0.515	0.578
变异系数/%	5.51	5.40	5.32	4.66	6.80

由表4可知, 不同情景下模型模拟得到的径流系

数与实际值的变异系数都在10%合理范围内, 结果验证了模型的合理性。最终, 基于研究区域的下垫面条件和文献资料, SWMM模型率定后的参数设置为不透水区曼宁系数0.01, 透水区曼宁系数0.15, 不透水区注蓄量0.2 mm, 透水区注蓄量8.9 mm, 最大入渗率142 mm·h<sup>-1</sup>, 最小入渗率15 mm·h<sup>-1</sup>, 衰减常数2, 管道糙率系数0.012, 并将其作为后续敏感性分析的基准值。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 局部敏感性分析

本研究运用局部修正 Morris 筛选法识别敏感参数, 采用率定后的参数作为变量进行扰动, 选用1 a、5 a、10 a、20 a、50 a 重现期的设计暴雨, 计算排水口洪峰流量与径流系数作为目标函数的参数敏感性。利用 MATLAB 修改 inp 文件参数, 驱动 SWMM 动态链接库(.DLL), 读取输出文件并计算结果, 即可获得不同降雨强度下 SWMM 模型8个参数对排水口洪峰流量与径流系数的敏感性系数分布, 如图5所示。

由图5(a)可知, 以排水口洪峰流量为优化目标时, 发现管道糙率系数与不透水区曼宁系数是敏感参数, 且管道糙率系数的敏感性比不透水区曼宁系数的高, 其他参数|SN|值普遍低于0.05, 属于不敏感参数。同一暴雨重现期下参数分布存在差异, 在小雨强下各参数分布较均匀, 在大雨强下参数间的差异显著。管道糙率系数的敏感性随重现期的增加先降低后增加, 在50 a 重现期下|SN|值达到最大, 为0.563。

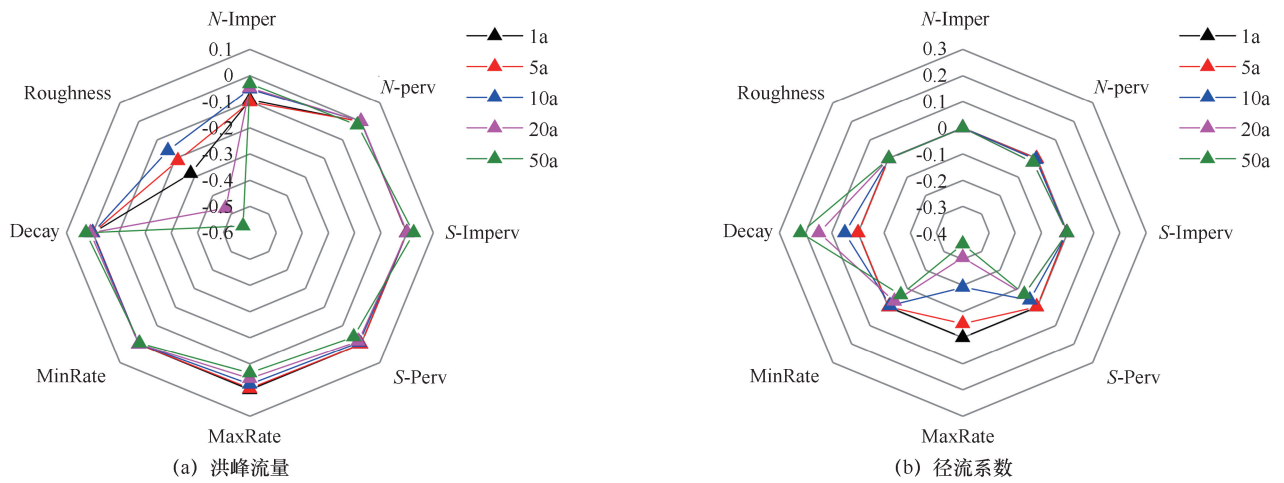


图5 不同重现期下参数对两个目标函数的敏感性系数

Fig. 5 Parameter sensitivity coefficients of two objective functions under different rainfall return periods

除 10 a 重现期下管道糙率系数属于中等敏感参数, 其他情况下  $|SN|$  值均大于 0.2, 属于敏感参数, 对洪峰流量影响起主要作用, 项子为<sup>[29]</sup>也得出了相同的结论。不透水区曼宁系数的敏感度随重现期的增加基本呈降低趋势,  $|SN|$  值从 0.093 1 降到 0.031 5, 其敏感性等级也由中等敏感转变为不敏感, 这是因为降雨强度增加时, 地表产流接近饱和和状态<sup>[33]</sup>, 从而降低了该参数对洪峰流量的影响。其他参数的敏感性变化与重现期表现出相同的趋势, 在 50 a 重现期下, 最大入渗率由不敏感参数转变为第二敏感参数, 可能是因为暴雨条件下更容易形成超渗产流, 下渗参数的贡献更大。就洪峰流量而言, 仅衰减常数和透水区注蓄量与结果表现为正向关联, 其余参数均显示负向相关关系。

根据图 5(b) 的数据显示, 对径流系数敏感性较高的参数有最大入渗率、衰减常数、透水区注蓄量, 且最大入渗率的敏感性最高, 衰减常数比透水区注蓄量敏感性高, 其余参数基本属于不敏感参数, 这与向代锋等<sup>[6]</sup>的结论一致。除不透水区曼宁系数与不透水区注蓄量, 其他参数的敏感度都随着重现期的增大而逐渐增加。最大入渗率和衰减常数在小重现期下属于中等敏感参数, 在大重现期下逐渐增强为敏感参数, 在 50 a 重现期下的  $|SN|$  值变为最高, 分别为 0.358 和 0.219。透水区注蓄量和最小入渗率由小重现期下的不敏感参数转变为大重现期下的中等敏感参数, 说明降雨强度较低时, 下渗过程与雨强相关, 而在高雨强下, 随着土壤含水率的增加, 透水区注蓄量与下渗参数也变得更敏感<sup>[34]</sup>。就径流系数而言, 衰减常数与其存在正相关关系, 而其余参数则呈现负

相关。

通过修正 Morris 筛选法可以快速有效地识别出 SWMM 模型中影响显著的参数, 并明确了各参数的敏感性等级。管道糙率系数和不透水区曼宁系数是洪峰流量的主要敏感参数, 最大入渗率、衰减常数、透水区注蓄量是径流系数的主要敏感参数, 其他参数对洪峰流量的影响较小。

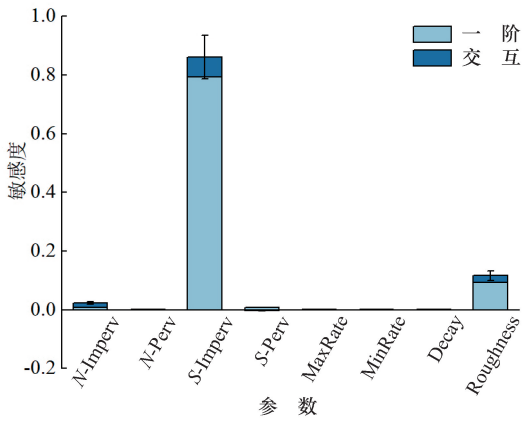
### 3.2 全局敏感性分析

本文采用 Sobol 法进行定量的全局敏感性分析, 分析 5 个重现期下 SWMM 模型 8 个参数对排水口洪峰流量及径流系数的敏感度分布。利用 MATLAB 拉丁超立方抽样方法随机抽取 1000 组样本, 然后将参数样本代入 SWMM 模型, 运行 18 000 次, 然后利用 Python 提取 rpt 输出文件目标值, 并应用 SALib 开源库开展 Sobol 法敏感性分析, 可得一阶、二阶和总敏感度。敏感性阈值设定为 0.01, 参数的总敏感度超过此值时属于敏感参数, 否则为不敏感参数。

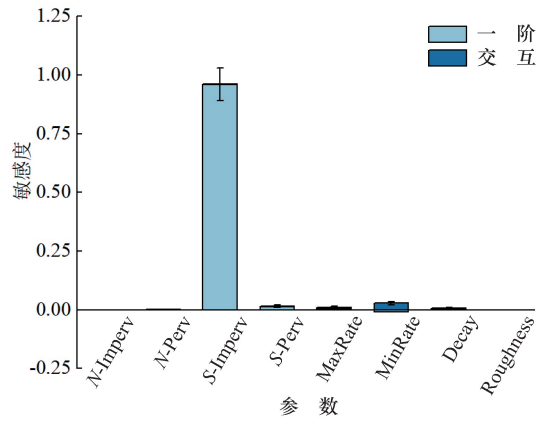
#### 3.2.1 一阶和总敏感度分析

不同降雨强度下模型参数对排水口洪峰流量与径流系数的一阶及总敏感度如图 6 所示, 图 6 中每一列表示在相同目标函数下模型参数在不同重现期降雨下的表现。浅蓝色表示一阶敏感度, 体现了各独立参数对模型结果的效应; 深蓝色表示交互敏感度, 体现了参数间互相影响的程度; 浅蓝色和深蓝色之和表示总敏感度, 体现了参数的单独作用及其相互作用对目标函数的综合影响。

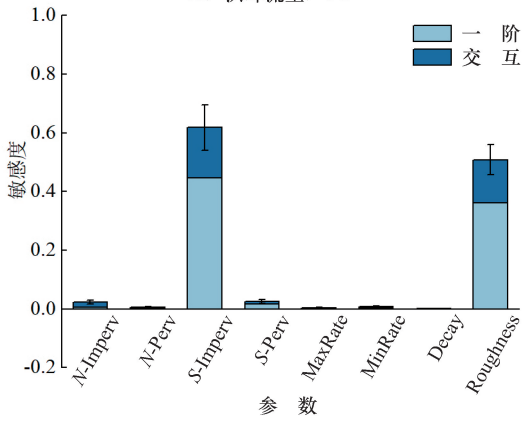
将洪峰流量设为优化目标时, 管道糙率系数、不透水区注蓄量、透水区注蓄量和不透水区曼宁系数表现出较强的敏感性, 且敏感度依次降低, 其他参数



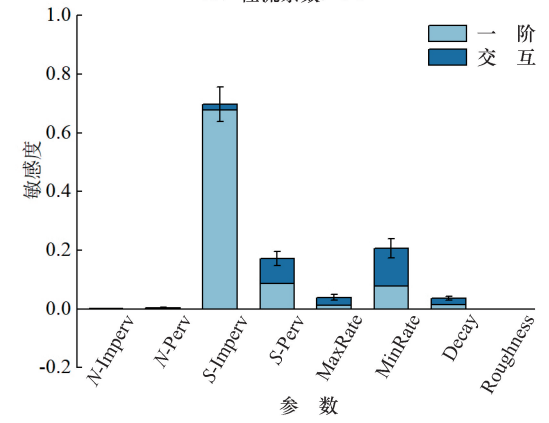
(a) 洪峰流量, 1 a



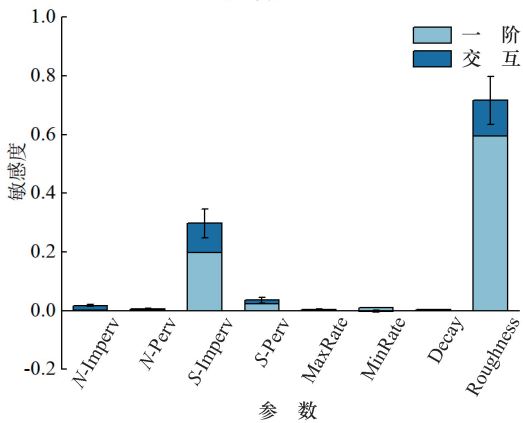
(b) 径流系数, 1 a



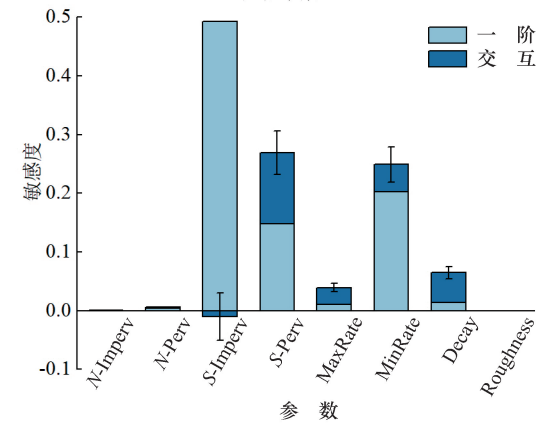
(c) 洪峰流量, 5 a



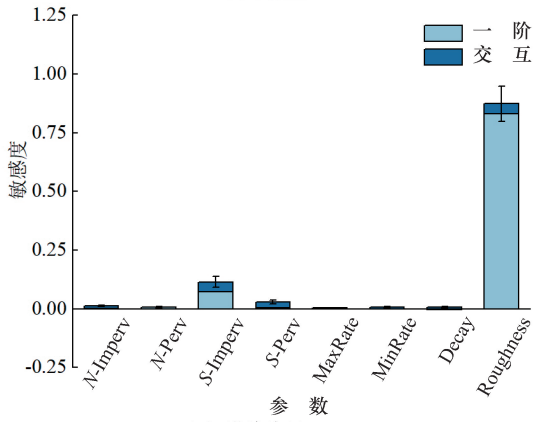
(d) 径流系数, 5 a



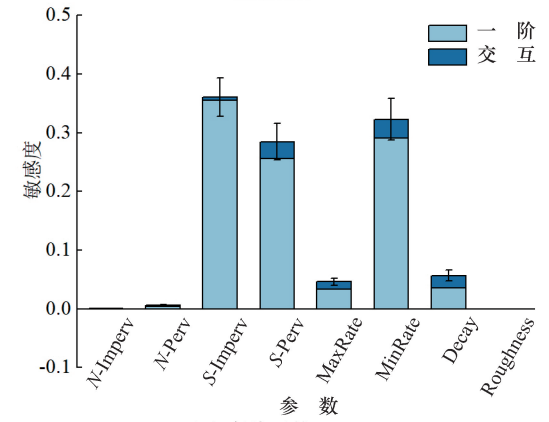
(e) 洪峰流量, 10 a



(f) 径流系数, 10 a



(g) 洪峰流量, 20 a



(h) 径流系数, 20 a

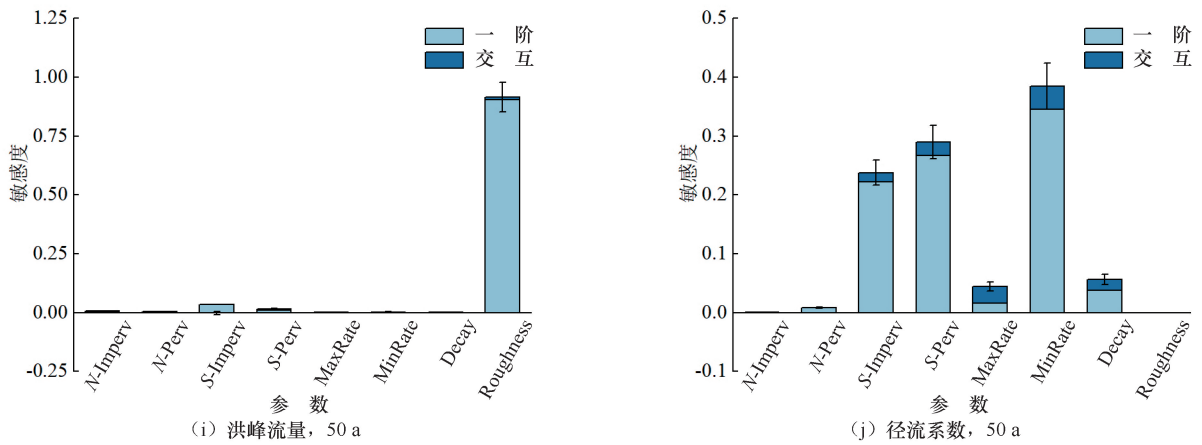


图6 不同重现期下参数对两个目标函数的一阶和总敏感度

Fig. 6 First order and total sensitivity of two objective functions under different rainfall return periods

均属于不敏感参数。在低重现期下,不透水区注蓄量的敏感性比管道糙率系数高,在高重现期下则反之。不同重现期下,管道糙率系数的总敏感度始终高于0.1,成为影响洪峰流量的最敏感参数,且敏感性随着重现期的增加而增加,从0.116增长为0.915。不透水区注蓄量在低重现期时敏感性较强,1 a 重现期下的敏感度最高,为0.862,随着重现期的增加敏感性呈递减趋势。这可能是由于小雨强下,径流受下垫面影响较大,产汇流参数敏感度较高;大雨强下,径流抗扰动性强,参数敏感性随之降低<sup>[13]</sup>。在所有敏感参数中,一阶敏感度占据了大部分比重,说明单个参数对模型结果具有显著影响。随着重现期的增加,参数间的交互敏感度普遍降低,尤其在强降雨情况下,这种相互作用的影响趋于减弱,管道糙率系数的交互敏感度占总敏感度比例从5 a 重现期的28.77%降为50 a 重现期的1.05%。

将径流系数设为优化目标时,敏感参数按其影响程度递减排列为不透水区注蓄量、最小入渗率、透水区注蓄量、衰减常数和最大入渗率,其他参数均属于不敏感参数。不透水区注蓄量在低重现期下敏感性最强,是径流系数的最敏感参数,随着重现期的增加其敏感性逐渐降低,从0.961 0降为0.238 0,这与项子为<sup>[29]</sup>的结论一致。随着重现期的增加,最小入渗率和透水区注蓄量对径流系数的响应逐渐增强。其中最小入渗率随着雨强的增加,敏感度从0.018 4增长为0.385 0,从第三敏感参数提升为第一敏感参数,成为影响径流系数的关键因素。这可能是由于小雨强下,降雨强度不大,经填注损失后下渗量不大,对产流发挥主要作用的是洼地蓄水参数<sup>[35]</sup>。参数的交互敏感度基本随着重现期的增加先增加后减小,霍顿下

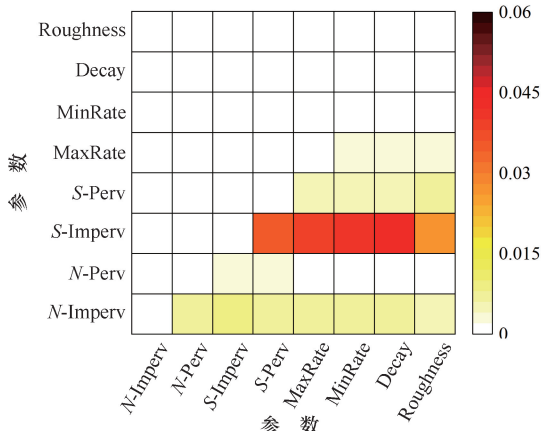
渗模型中的最大入渗率和衰减常数分别在中等雨强下达到各自敏感度的最高值,分别为20 a 重现期的0.046 1和10 a 重现期的0.064 9。

综合不同重现期的模拟情景,利用Sobol法分析SWMM模型的一阶及总敏感度,揭示其敏感性大小关系。管道糙率系数、不透水区注蓄量、透水区注蓄量和不透水区曼宁系数为洪峰流量的敏感参数,不透水区注蓄量、最小入渗率、透水区注蓄量、衰减常数和最大入渗率为径流系数的敏感参数。参数的总敏感度中以一阶敏感度为主,参数相对独立。

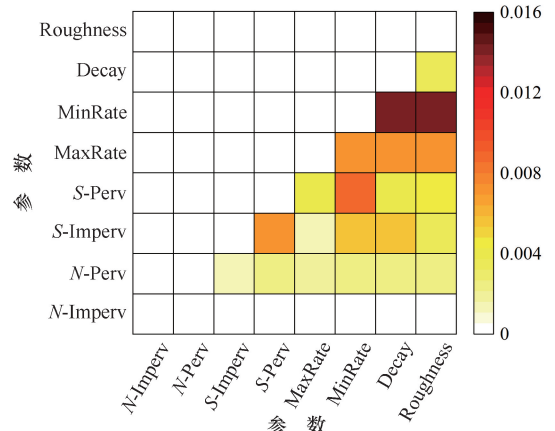
### 3.2.2 二阶敏感度分析

为清晰表示参数间相互作用的效果以深入理解水文模拟的各过程,计算了参数在不同重现期下对洪峰流量及径流系数的二阶敏感度,如图7所示,敏感度取绝对值,图7中各列表示在相同目标函数下参数在不同重现期降雨中的响应。图6的参数交互敏感度与图7的二阶敏感度分布相似,二阶敏感度所占比例较高,这表明参数间的相互影响重点体现在两两之间的组合效应上<sup>[36]</sup>。

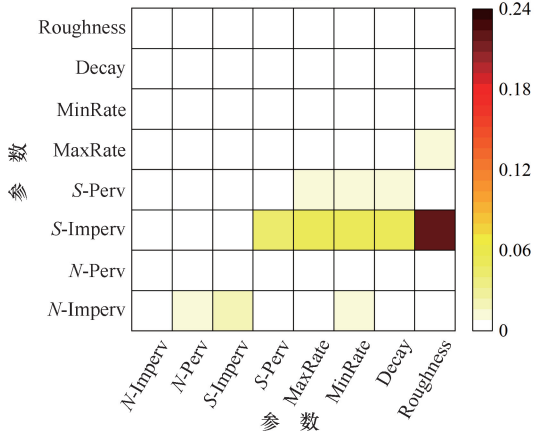
不同重现期下,不透水区注蓄量与透水区注蓄量、最大入渗率、最小入渗率、衰减常数和管道糙率系数之间的相互作用对洪峰流量具有显著影响,且敏感度基本随着雨强的增加而降低。在小规模洪水事件中,由于城市地表的复杂性和高密度的人类活动,径流容易受其影响,抗干扰能力较弱,从而使洪峰流量易受参数变化的影响;而当洪水量级较大时,产汇流增加,抵御干扰的能力较差,因此参数的影响逐渐减弱<sup>[12]</sup>。在敏感参数中,不透水区注蓄量与管道糙率系数的二阶敏感度最高,相互作用效果最为显著,5 a 重现期下,两个参数的二阶敏感度达到最大值,



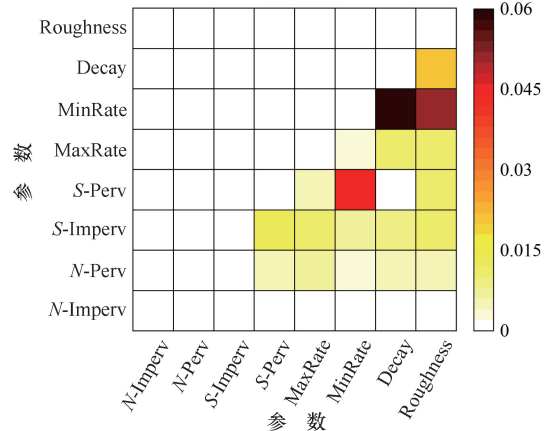
(a) 洪峰流量, 1 a



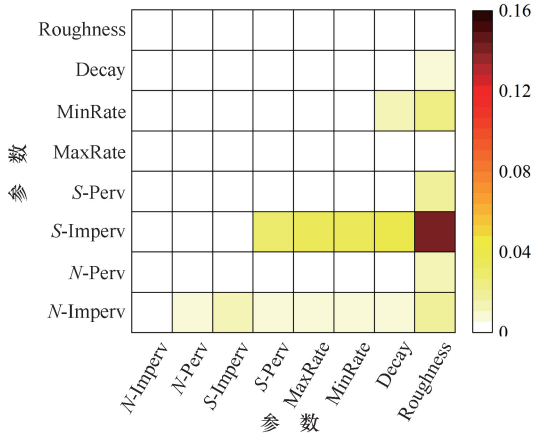
(b) 径流系数, 1 a



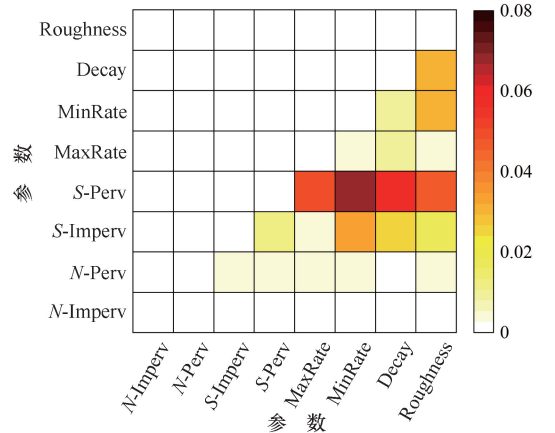
(c) 洪峰流量, 5 a



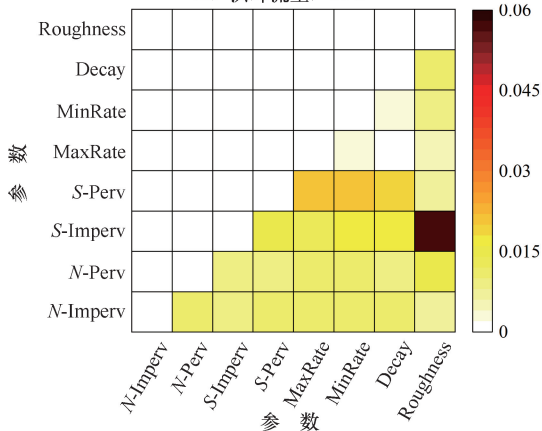
(d) 径流系数, 5 a



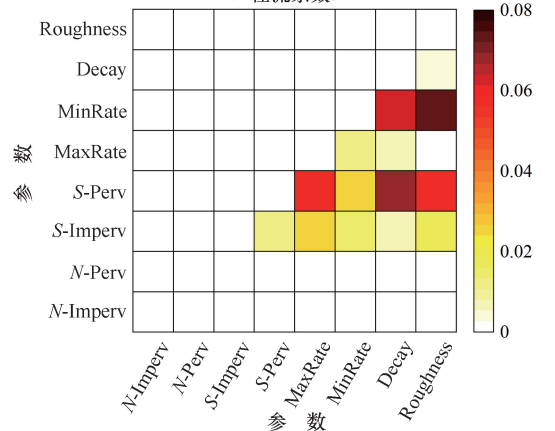
(e) 洪峰流量, 10 a



(f) 径流系数, 10 a



(g) 洪峰流量, 20 a



(h) 径流系数, 20 a

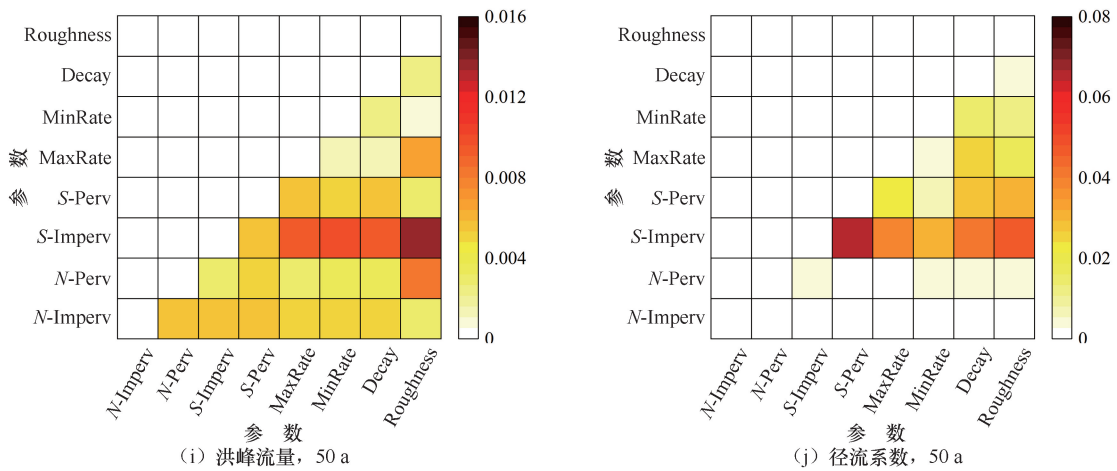


图 7 不同重现期下参数对两个目标函数的二阶敏感度

Fig. 7 Second order sensitivity of two objective functions under different rainfall return periods

为 0.221 0, 随着重现期的增大, 二阶敏感度逐渐降低为 0.013 7。同时这两个参数的一阶敏感度也是最高的, 表明其对洪峰流量具有主导作用。

在低、中重现期时, 最小入渗率与衰减常数、管道糙率系数和透水区注蓄量的相互作用对径流系数具有显著影响, 且二阶敏感度与重现期呈现一致的增长趋势。在 1 a 和 5 a 重现期下, 最小入渗率与衰减常数的二阶敏感度最高, 分别为 0.014 2 和 0.058 7。随着洪水量级的增加, 子汇水区注蓄量与衰减常数、管道糙率系数和最大入渗率的二阶敏感度逐渐增强, 注蓄量与下渗参数协同作用显著, 而地表曼宁系数与其他参数的相互作用效果均不显著。

### 3.3 结果对比分析

根据修正 Morris 筛选法与 Sobol 法分析得出的 SWMM 参数敏感度结果, 对其进行评估并排序, 具体结果如表 5 所列。

表 5 参数敏感性的排序结果

Table 5 Ranking of parameter sensitivity

参 数	洪峰流量		径流系数	
	修正 Morris	Sobol	修正 Morris	Sobol
N-Imperv	2	4	—	—
N-Perv	—	—	—	—
S-Imperv	—	2	—	1
S-Perv	—	3	3	3
MaxRate	3	—	1	5
MinRate	—	—	4	2
Decay	—	—	2	4
Roughness	1	1	—	—

由表 5 可知, 两种方法均识别出管道糙率系数和不透水区曼宁系数对洪峰流量具有敏感性, 且管道糙率系数是最敏感参数; 透水区注蓄量、衰减常数、最

大入渗率和最小入渗率对径流系数具有敏感性。因此, 两种方法的结论可以相互印证, 均能识别出重要敏感参数, 为模型应用奠定基础。SWMM 模型参数在不同重现期下对不同目标函数表现出差异, 说明参数存在一定的不确定性。

Sobol 方法确定的敏感参数范围更广, 涵盖了修正 Morris 筛选法所识别的敏感参数, 而且在部分参数的敏感性排序上也存在差异。Sobol 法识别出不透水区注蓄量为径流系数的敏感参数, 且敏感性最高, 而修正 Morris 筛选法判定其为不敏感参数。从水文过程的物理机制方面分析, 注蓄量指的是子汇水区地表在降雨初期所能截留的水量。在小雨强下, 由于洼地尚未饱和, 其变化对径流的形成具有显著影响, 表现出较高的敏感性, 这也与以往的研究结果相一致<sup>[37-39]</sup>, 注蓄量对径流量和峰值流量具有敏感性。由此可见, 修正 Morris 筛选计算简单且应用方便, 可快速识别模型主要敏感参数, 降低参数维度, 但其样本数量少, 忽略了参数间的关联性<sup>[40]</sup>, 易将一些敏感参数判定为不敏感参数。Sobol 全局敏感性分析方法采用拉丁超立方抽样, 样本覆盖更全面, 定量分析了各参数的敏感度以及参数间的相互作用, 适用于具有异参同效性的复杂模型<sup>[41]</sup>, 有助于提高模拟精度。但 Sobol 法需要大量抽样, 计算量较大且耗时, 应用较复杂。

目前模型参数敏感性分析方法种类繁多, 但应用时需综合考虑实际情况, 选择适宜的方法并进行组合优化、高效实施, 才能更有效地识别敏感参数。样本量的确定和不敏感因素阈值的设定是敏感性分析收敛性的关键。在面对结构复杂的模型时, 可以先采用筛选法等定性分析方法初步识别主要影响参数, 再运用

定量方法精确评估参数敏感性, 或利用代理模型简化模型结构。同时, 考虑不同的降雨条件和下垫面特征, 实施多目标优化的敏感性评估<sup>[7]</sup>, 有助于提升模型模拟的准确性。未来研究中可结合机器学习、云计算和分组策略<sup>[42]</sup>等新技术进行敏感性分析, 关注参数间的联合分布, 以更全面地采集参数样本, 探究多因素与结果的映射关系<sup>[43-44]</sup>, 从而提高模型参数优化的效率, 有助于更有效地应用于高维水文模型。

## 4 结论

本文以迁安市某居住小区为例, 利用局部修正 Morris 筛选法和全局 Sobol 法, 以洪峰流量与径流系数为优化目标, 研究不同重现期下 SWMM 模型参数的敏感性, 评估了单个参数及其相互作用对结果的影响, 并比较了两种方法的结果和优缺点, 主要结论如下。

(1) 修正 Morris 筛选法通过在设定的固定步长下扰动参数并将其代入模型, 进而计算敏感性系数。Sobol 法利用拉丁超立方抽样生成样本, 并将这些样本输入模型以计算总方差和偏方差, 从而得出各阶敏感度。修正 Morris 筛选法和 Sobol 法均能识别出 SWMM 模型的重要敏感参数, 且在不同重现期下有相似的变化趋势。洪峰流量的敏感参数为管道糙率系数和不透水区曼宁系数, 且管道糙率系数的敏感度最高, 敏感度随重现期的增加而增加。径流系数的敏感参数为透水区洼蓄量、衰减常数、最大入渗率和最小入渗率, 其余参数的影响较小。

(2) 两种方法在参数敏感性排序方面呈现出不同的结果, Sobol 法能够更深入地揭示参数敏感性的作用机制。修正 Morris 筛选法判定为管道糙率系数为洪峰流量的最敏感参数, 敏感性系数为  $-0.563 \sim -0.157$ , 不透水区曼宁系数是次敏感参数; Sobol 法也判定管道糙率系数为最敏感参数, 总敏感度为  $0.116 \sim 0.915$ , 不透水区洼蓄量为次敏感参数。修正 Morris 筛选法判定最大入渗率为径流系数的最敏感参数, 敏感性系数为  $-0.358 \sim 0$ , Sobol 法判定不透水区洼蓄量为最敏感参数, 总敏感度为  $0.238 \sim 0.961$ 。Sobol 法通过计算二阶敏感度得出, 参数间的相互作用主要体现在两两之间的组合效应上, 对洪峰流量不透水区洼蓄量与管道糙率系数的相互作用效果最显著, 且敏感度随雨强增大呈现减弱趋势; 对径流系数洼蓄量与下渗参数的相互作用显著。

(3) 修正 Morris 筛选法应用简单快速, 关注了单一参数对结果的贡献度, 能定性地对其敏感度排序。

Sobol 法基于样本评估输入数据的方差对结果分布的影响, 综合评估单个参数的敏感度和参数间的协同作用, 更全面地刻画了参数敏感性特征及其协同作用机制, 适合于多目标间的敏感性比较。未来开展参数敏感性研究时, 可以综合运用定性与分析方法, 或利用代理模型和机器学习、云计算等新技术, 多领域融合, 将促进参数影响机制的深刻理解, 识别关键参数, 提高模型率定优化的效率, 进而增加模型的精度和可靠性。

## 参考文献(References):

- [1] O'DONNELL E C, THORNE C R. Drivers of future urban flood risk [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2020, 378 (2168): 20190216.
- [2] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 757-768. CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 757-768.
- [3] UN Office for Disaster Risk Reduction. The Human Cost of Disasters: An Overview of the Last 20 Years (2000—2019) [Z]. Switzerland: UN Office for Disaster Risk Reduction Geneva, 2020.
- [4] MA Y, CUI Y T, TAN H G, et al. Case study: Diagnosing China's prevailing urban flooding—Causes, challenges, and solutions [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2022, 15(3): e12822.
- [5] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 381-392. XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: Principle, models and prospects[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392.
- [6] 向代锋, 程磊, 徐宗学, 等. 基于局部和全局方法的 SWMM 敏感参数识别[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(11): 71-79. XIANG Daifeng, CHENG Lei, XU Zongxue, et al. Identification of sensitive parameters of SWMM based on local and global methods[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(11): 71-79.
- [7] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(6): 105-112. SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review of methods of parameter sensitivity analysis in hydrologic modeling [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(6): 105-112.
- [8] 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.
- [9] 夏阳, 周苏芬, 邹俊, 等. 交汇区水流结构对底泥磷分布特征影响机制[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(3): 595-604.

- XIA Y, ZHOU S F, ZOU J, et al. Influence mechanism of flow structure on distribution characteristics of phosphorus on bed sediments at river confluences [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(3): 595-604.
- [10] 郑震, 张静, 宫辉力. MIKE SHE 水文模型参数的不确定性研究 [J]. *人民黄河*, 2015, 37(1): 23-26.
- ZHENG Zhen, ZHANG Jing, GONG Huili. Uncertainty analysis of MIKE SHE hydrologic model parameter [J]. *Yellow River*, 2015, 37(1): 23-26.
- [11] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 城市化下产汇流参数不确定性分析及洪涝模拟: 以晋城市金村区为例 [J]. *水力发电学报*, 2023, 42(5): 53-66.
- SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Uncertainty analysis of runoff generation and concentration parameters under urbanization and simulation of flooding and waterlogging: Case study of Jincun District, Jincheng [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(5): 53-66.
- [12] 肖渝, 孙若辰, 王琛, 等. 基于 UQ-PyL 的 SWAT 模型参数不确定性分析综合评估 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(2): 233-247.
- XIAO Y, SUN R C, WANG C, et al. Comprehensive evaluation of parameter uncertainty analysis of SWAT model based on UQ-PyL [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(2): 233-247.
- [13] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数敏感性分析 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(3): 59-68.
- CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Sensitivity analysis on SWMM model parameters based on Sobol method [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(3): 59-68.
- [14] 金梦潇, 田勇, LANCIA M, 等. 基于 Morris、Sobol 和 EFAST 的 LID 设施模型参数全局敏感性分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(6): 104-110.
- JIN Mengxiao, TIAN Yong, MICHELE L, et al. Global sensitivity analysis of LID facility model parameters based on Morris, Sobol and EFAST [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(6): 104-110.
- [15] SONG X M, ZHAN C S, XIA J, et al. An efficient global sensitivity analysis approach for distributed hydrological model [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(2): 209-222.
- [16] ZHONG B L, WANG Z M, YANG H B, et al. Parameter optimization of SWMM model using integrated Morris and GLUE methods [J]. *Water*, 2023, 15(1): 149.
- [17] JIANG P S, SON K, MUDUNURU M K, et al. Using mutual information for global sensitivity analysis on watershed modeling [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(10): e2022WR032932.
- [18] 范子武, 刘国庆, 杨光, 等. 数字孪生水网赋能多业务场景应用与实践 [J]. *水利发展研究*, 2024, 24(9): 59-66.
- FAN Ziwu, LIU Guoqing, YANG Guang, et al. Application and practice of multi-business scenarios empowered by digital twin water grid [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(9): 59-66.
- [19] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 98-105, 124.
- LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 98-105, 124.
- [20] ROSSMAN L. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0* [R]. Washington, D. C.: US Environmental Protection Agency, 2010.
- [21] 熊剑智. 城市雨洪模型参数敏感性分析与率定 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- XIONG Jianzhi. *Urban Stormwater Model Parameter Sensitivity Analysis and Calibration* [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [22] 唐清竹, 徐宗学, 王京晶, 等. 基于全局和局部方法的城市雨洪模型参数敏感性: 以济南市主城区为例 [J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 713-722.
- TANG Qingzhu, XU Zongxue, WANG Jingjing, et al. Parameter sensitivity of urban storm models based on global and local optimum methods: A case study in the main urban area of Jinan City, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(4): 713-722.
- [23] CAMPOLONGO F, CARIBONI J, SALTELLI A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(10): 1509-1518.
- [24] LIU Y, QI X T, WEI Y X, et al. Exploring the sensitivity range of underlying surface factors for waterlogging control [J]. *Water*, 2023, 15(17): 16.
- [25] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2002, 27(9/10): 645-654.
- [26] PENG J, ZHAO H C, LI R, et al. Parameter sensitivity analysis of SWMM: A case study of airport airfield area [J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(7): 6551-6568.
- [27] SOBOL I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models [J]. *Mathematical Modeling and Computational Experiments*, 1993, 1(4): 407-414.
- [28] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 55(1-3): 271-280.
- [29] 项子为. 基于 SWMM 的城市雨洪模拟参数敏感性分析及综合评价研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- XIANG Ziwei. *Research on the Parameter Sensitivity Analysis and Comprehensive Evaluation of Urban Stormwater Simulation Based on SWMM* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [30] 陈爽, 张秀英, 彭立华. 基于高分辨卫星影像的城市用地不透水率分析 [J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 41-46.
- CHEN Shuang, ZHANG Xiuying, PENG Lihua. Impervious surface coverage in urban land use based on high resolution satellite images [J]. *Resources Science*, 2006, 28(2): 41-46.
- [31] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响 [J]. *清华大学学报 (自然科学*

- 版), 2022, 62(1): 60-69.
- SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(1): 60-69.
- [32] 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, 45(11): 213-217.
- LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. Jishui Paishui/Water and Wastewater Engineering, 2009, 45(11): 213-217.
- [33] 付超. 基于 SWMM 模型的邯郸某区城市内涝模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- FU Chao. Simulation of Urban Waterlogging of Certain district in Handan Based on SWMM Model[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [34] 刘鹏霄, 马立山, 唐中楠, 等. 基于 Morris 与 Sobol 法的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2021, 39(1): 153-158, 163.
- LIU Pengxiao, MA Lishan, TANG Zhongnan, et al. Sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Morris and Sobol method[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2021, 39(1): 153-158, 163.
- [35] 周云峰. SWMM 排水管网模型灵敏参数识别与多目标优化率定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHOU Yunfeng. Sensitive Parameters Identification and Multi-Objective Optimization Calibration of SWMM Drainage Pipe Network Model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [36] 刘松, 余敦先, 张利平, 等. 基于 Morris 和 Sobol 的水文模型参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1296-1303.
- LIU Song, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Global sensitivity analysis of hydrological model parameters based on Morris and Sobol methods[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1296-1303.
- [37] SWATHI V, RAJU K S, VARMA M R R, et al. Automatic calibration of SWMM using NSGA-III and the effects of delineation scale on an urban catchment [J]. Journal of Hydroinformatics, 2019, 21(5): 781-797.
- [38] XU Z X, XIONG 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: 1-16.
- [39] GIUDICIANNI C, DI CICCIO I, DI NARDO A, et al. Variance-based global sensitivity analysis of surface runoff parameters for hydrological modeling of a real peri-urban ungauged basin [J]. Water Resources Management, 2024, 38(8): 3007-3022.
- [40] 郑菲, 施小清, 吴吉春, 等. 深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存数值模拟参数的全局敏感性分析: 以苏北盆地盐城组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 310-318.
- ZHENG Fei, SHI Xiaoqing, WU Jichun, et al. Global parametric sensitivity analysis of numerical simulation for CO<sub>2</sub> geological sequestration in saline aquifers: a case study of yancheng formation in subei basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 310-318.
- [41] SALTELLI A (Andrea). Global Sensitivity Analysis: The Primer [M]. Chichester, England: John Wiley, 2008.
- [42] SHEIKHOESLAMI R, RAZAVI S, GUPTA H V, et al. Global sensitivity analysis for high-dimensional problems: How to objectively group factors and measure robustness and convergence while reducing computational cost [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 111: 282-299.
- [43] 周妍, 白国营, 赵洪岩, 等. 分布式地表水-地下水耦合数值模型研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 435-446.
- ZHOU Y, BAI G Y, ZHAO H Y, et al. Research advances in distributed coupled surface-subsurface numerical model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 435-446.
- [44] 刘基盛, 计良, 李威, 等. 基于 FFD 方法的离心压气机叶片优化设计与试验[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(4): 354-362.
- LIU Jisheng, JI Liang, LI Wei, et al. Optimal design and experiment of centrifugal compressor blades based on FFD method[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(4): 354-362.

(责任编辑 王海锋)