

流域水文模型的参数全局敏感性分析

蔡开奎¹ 李金城¹ 胡梦辰¹ 马文静² 叶瑞² 刘永^{1,†}

1. 北京大学环境科学与工程学院, 国家环境保护河流全物质通量重点实验室, 北京 100871; 2. 南京智水环境科技有限公司, 南京 210012; † 通信作者, E-mail: yongliu@pku.edu.cn

摘要 基于LSPC构建内蒙大余太流域水文模拟模型, 利用Morris和Sobol两种全局敏感性分析方法, 识别水文敏感参数及敏感下垫面类型, 评估不同敏感性分析方法和模型输出度量方法对敏感性分析结果的影响。主要结论如下: 1) 模型对日、月两尺度的径流模拟效果好, 模拟值与观测值的决定系数 $R^2 > 0.6$, 纳什系数NSE > 0.5 , 说明LSPC模型适用于对内陆干旱半干旱地区的流域水文模拟; 2) 两种敏感性分析方法对参数敏感指数排序和敏感参数识别均有影响, 而MAE和MSE两种度量方法的影响主要体现在敏感参数识别方面; 3) 敏感水文参数为下层土壤含水量(LZSN)和地下水蒸发系数(AGWETP), 敏感下垫面类型为草地、耕地、林地和水域, 与大余太流域的降水和土地利用类型有关。

关键词 全局敏感性分析; 水文参数; LSPC模型; 大余太流域

Global Sensitivity Analysis of Hydrological Parameters of the Watershed Simulation Model

CAI Kaikui¹, LI Jincheng¹, HU Mengchen¹, MA Wenjing², YE Rui², LIU Yong^{1,†}

1. College of Environmental Sciences and Engineering, State Environmental Protection Key Laboratory of All Material Flux in Rivers, Beijing 100871; 2. Nanjing Innowater Co. Ltd., Nanjing 210012; † Corresponding author, E-mail: yongliu@pku.edu.cn

Abstract A hydrological simulation model was developed for the Dashedai watershed in the Inner Mongolia Autonomous Region with LSPC (Loading Simulation Program in C++). Two global sensitivity analysis (GSA) methods, Morris and Sobol, were applied to identify hydrological sensitive parameters and sensitive surface landuse types. The impacts of two GSA methods and model output measures on sensitivity analysis results were also evaluated. The main conclusions are as follows. 1) The model has a good fit for daily and monthly runoff simulation. The R^2 of the simulated value and the observed value is greater than 0.6, and NSE between them is greater than 0.5, which indicates that LSPC model is suitable for hydrological simulation of inland arid and semi-arid areas. 2) The two GSA methods have impacts on the identification of sensitive parameters and the ranking of sensitive indexes; while the impact of the two measurement methods of MAE and MSE is mainly reflected in the identification of sensitive parameters. 3) The sensitive hydrological parameters are lower zone nominal storage (LZSN) and active groundwater evapotranspiration (AGWETP), and the sensitive underlying landuse types are grassland, farmland, forest and water. All have close relationships with precipitation and landuse types in the study area.

Key words global sensitivity analysis; hydrological parameters; LSPC model; Dashedai watershed

面源污染是当前我国水环境治理中的突出难点^[1], 可根据水文过程将其产生过程分为两种: 在水文产流过程中产污与在汇流过程中汇入河道。流域模型可以精准地模拟产流和汇流过程, 是研究面

源污染的有效手段, 其中LSPC(Loading Simulation Program in C++)是应用较为广泛的模型之一。Estes等^[2]利用LSPC模型, 模拟墨西哥湾两种降雨模式、4种土地利用类型下的水文-水质过程, Sahoo

等^[3]探究气候变化对 Tahoe 湖流域湖库的影响。在最大日负荷总量(TMDL)计划中,美国 EPA 将其运用于 Helena 湖流域^[4], Flynn 等^[5]运用于 Flathead 湖流域,制定出最佳管理措施(BMPs)。

流域模型的参数众多,不同参数对模型输出的影响程度不同。同时率定所有参数的成本过高,借助全局敏感性分析方法识别关键参数是模型构建和应用中不可或缺的环节^[6-8],常用的敏感性分析方法有 Morris 法和 Sobol 法等^[9]。其中, Morris 法能以较小的计算成本,快速地求出参数的敏感指数,实现参数敏感性排序^[10-11],已广泛应用于水文水质模拟中,如新安江模型^[12]和 SWMM 模型^[13-15]。Sobol 法不易受模型结构影响,可遍历所有样本空间,具有适用性强和敏感性分析结果更加稳健等优点^[9,16],在水文水质模型中也得到较广泛的运用。例如, Leimgruber 等^[17]、常晓栋等^[18]和陈建等^[19]利用 Sobol 法评估 SWMM 模型参数敏感性, Zadeh 等^[20]、Yan 等^[21]和 Zhang 等^[22]将 Sobol 法运用于 SWAT 模型,刘松等^[12]将其运用于新安江模型。虽然对流域模型进行参数敏感性分析的研究较多,但关于敏感性分析方法对参数敏感性结果的影响却鲜有关注。同时,流域模型的输出结果和观测数据都为时间序列,比较和评估两个时间序列的方法很多,方法的不同对敏感性分析结果可能产生影响。

目前,流域模型研究集中于水资源充足的区域,对蒸散发强、河流主要由地下水补给的干旱半干旱地区的适用性研究较少。本研究以内蒙大余太流域为研究对象,基于 LSPC 模型构建流域模型,利用全局敏感性分析方法识别水文敏感参数和敏感下垫面,评估不同敏感性分析方法和模型输出的不同度量方法对参数敏感性结果的影响,以期测试 LSPC 模型在我国干旱半干旱地区的适用性,为水文模型参数率定、模型校准和不确定性分析提供借鉴。

1 研究区域概况

大余太流域位于内蒙乌梁素海东部(图 1),流域地势东北高西南低,海拔 1170~2005 m(图 2(b)),坡度 0.20°~51.89°(图 2(c)),流域面积为 3459 km²,流域出口为大余太水库。流域内主要有大余太和小余太两乡镇,是典型的农牧区。流域中草地面积为 2103.83 km²,占 60.82%;耕地面积为 1231.00 km²,占 35.59%;建筑用地、林地、水域和其他 4 种土地利用类型面积占 3.59%。流域降水少而蒸散发强,

年降水量为 172 mm,年蒸发量高达 2365 mm。年均温 3.5°C,年平均风速为 1.6 m/s。流域水资源具有时空分配不均和年际变化大等特点,乌苏图勒河为主要河流,全长 116.5 km^[23]。

2 数据与方法

2.1 数据

土地利用数据来自 GlobeLand30(2020 版),空间分辨率为 30 m,包括耕地、林地和草地等共 10 个一级类型数据,本研究将其合并为林地、草地、耕地、水域、建筑用地和其他 6 类(图 2(a))。DEM 数据为 ASTER GDEM 数字高程数据,空间分辨率为 30 m,来源于地理空间数据云,利用其提取水系、确定流域边界和划分子流域等。气象数据来源于中国气象局官网,包括降雨量、气温和风速等。潜在蒸散发采用 Hamon PET 法^[24]计算得到,露点计算采用 Bosen^[25]和 Jensen 等^[26]总结的经验公式得到。水文数据来源于水文年鉴,主要指标有流量和水位等。

2.2 流域水文模型构建

基于 LSPC 构建大余太流域水文模型,包括以下 3 个步骤。

1) 划分子流域。根据流域的地形特征对流域进行空间离散,是分布式水文模型的重要步骤,直接影响模拟结果^[27]。首先利用 DEM 数据确定水系,将大余太水库作为流域出口,并借助 ArcGIS,将研究区域划分为 17 个子流域(图 2(d))。为了便于计算机识别,对子流域进行编码。

2) 确定水文响应单元(hydrologic response unit, HRU)。HRU 指按照土地利用类型和降雨等将流域空间离散后的计算单元^[28],可降低土地利用方式和降雨等的空间差异对模型的影响。本研究主要考虑土地利用类型的空间异质性,根据土地利用类型,将流域划分为 6 类 HRU。

3) 流域建模。首先制作输入文件。气象数据是逐小时数据,存储在.WDM 文件内,可直接读取;基础地理数据利用 ArcGIS 编辑为.WSD 和.RCH 等文件格式。其中,.WSD 文件包含土地利用方式和透水地块占比等流域特征信息,.RCH 文件包含水系编号等河道特征数据。在此基础上,生成主程序文件。根据流域水文过程,将基础地理数据和气象水文数据制成模型的主控文件,文件中包含模型结构和参数等内容。其中,模型参数取值范围主要参考

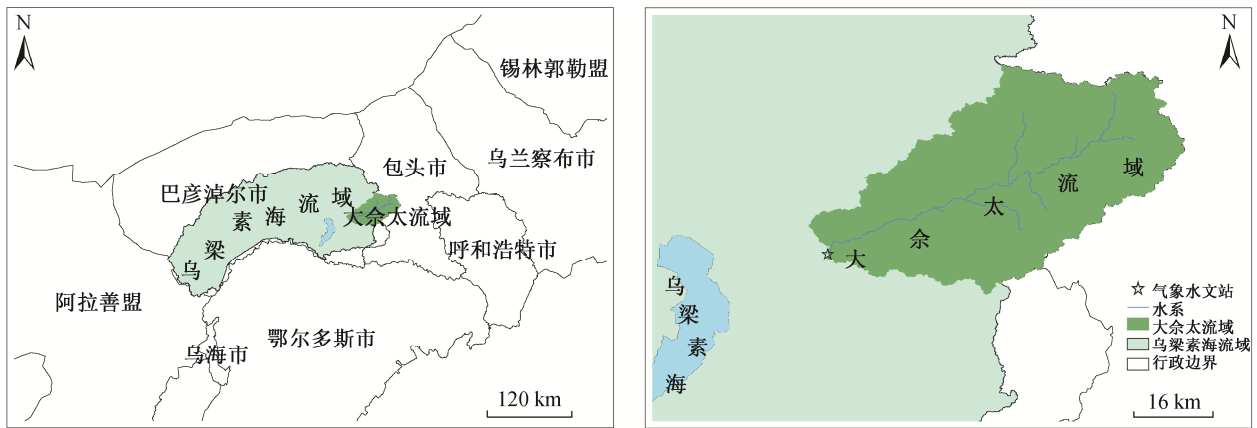


图1 内蒙大余太流域地理位置
Fig. 1 Location of the Dashetai watershed

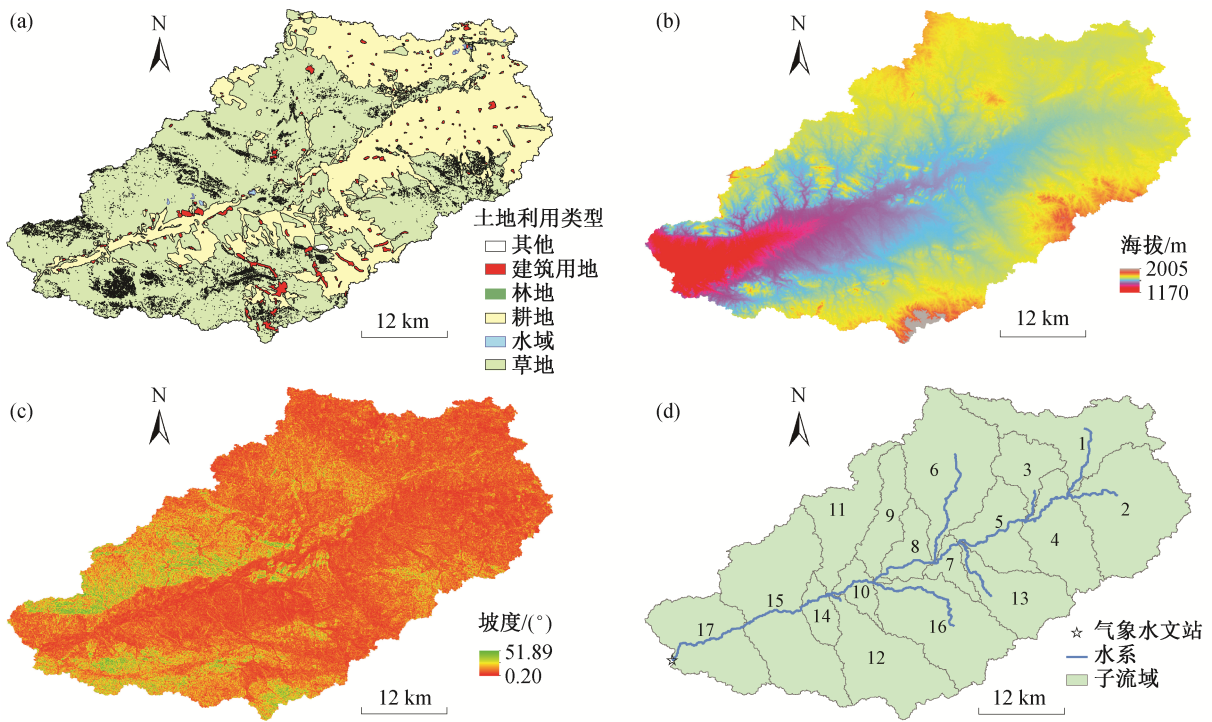


图2 大余太流域基础地理数据((a)~(c))、水系和子流域(d)
Fig. 2 Basic geographic data ((a)~(c)), water system and sub-basin (d) of the Dashetai watershed

文献[29-30](表1)。

2.3 敏感性分析方法

Morris法的原理与局部敏感性分析方法中“一次变化一个因子”方法(one-factor-at-a-time, OAT)相近,即以基效应(elementary effect, EE)为指标^[11],如式(1)所示,对初始状态进行多次反复采样,求各次采样的基效应,并用式(2)求其均值 μ_i ,衡量每个参数对模型输出的全序影响。

$$EE_i = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta_i, \dots, x_m) - f(x)}{\Delta_i}, \quad (1)$$

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j, \quad (2)$$

式中, EE_i 为第*i*个参数的基效应, $f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta_i, \dots, x_m)$ 为参数 x_i 受扰动后的状态, $f(x)$ 为初始状态, m 为参数个数, Δ_i 为 x_i 的变化量, EE_i^j 为第*i*个参数第*j*次采样的基效应。

表 1 大余太流域模型主要水文参数及取值范围
Table 1 Main hydrological parameters and value ranges of the Dashedai watershed model

模型参数	参数含义	单位	取值	文献
LZSN	下层土壤含水量	Inch	3~15	[29~30]
INFILT	土壤渗透率	Inch/h	0.001~0.500	[29]
AGWRC	地下水基流消退系数	d ⁻¹	0.92~0.99	[30]
INFEXP	下渗计算公式中的指数	-	1~3	[29]
INFILD	可渗透地下渗透率最大值与中间值的比例	-	1~3	[29]
DEEPPFR	地下水对潜在蒸发量贡献比例	-	0~0.5	[30]
BASETP	基流对潜在蒸发量贡献比例	-	0~0.2	[29]
AGWETP	地下水蒸发系数	-	0.001~0.4	本文
CEPSC	地表植被等截留能力	Inch	0.01~0.40	[29]
UZSN	上层土壤额定蓄水空间	Inch	0.05~2.00	[30]
NSUR	地表曼宁系数	-	0.1~0.5	[29]
INTFW	壤中流入流参数	-	1~10	[29]
IRC	壤中流消退参数	-	0.3~0.85	[29]
LZETP	下层土壤蒸发参数	-	0.1~0.9	[29]
CEPS	初始地表植被等截留深度	Inch	0~100	[29]
UZS	初始上层土壤蓄水空间	Inch	0~100	[29]
LSUR	坡面漫流平均坡面长度	ft	200~500	[29]

Sobol 法的核心是方差分解^[12], 计算公式如下:

$$V(y) = \sum_{i=1}^m V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,m} \quad (3)$$

各阶敏感度为各阶方差除以总方差。其中, 一阶敏感度刻画单一模型参数对模型输出的影响, 计算公式为

$$S_i = \frac{V_i}{V(y)} \quad (4)$$

式(3)和(4)中, $V(y)$ 为总方差, V_i 为参数 x_i 的一阶方差, V_{ij} 为 x_i 和 x_j 的二阶方差, ..., $V_{1,2,\dots,m}$ 表示 m 个参数的 m 阶方差。

敏感性分析利用 Python 的 SALib 模块实现, 采样方法设定至关重要。Sobol 法大多采用蒙特卡洛随机采样法生成样本^[31]。Morris 方法则因计算敏感性指数时需保证输入样本与模型输出值一一对应, 对采样方法的要求更严格, 大多采用可实现多维分层抽样的拉丁超立方采样法^[32]。此外, 为获得可靠的结果, 本研究利用蒙特卡洛随机采样法重采样 2000 次, 获得 Sobol 法的样本; 利用拉丁超立方采样法重采样 2000 次, 获得 Morris 法的样本。

有研究表明, 流域模型的水文参数中 LZSN 和

INFILT 为敏感水文参数^[29-30], 在手动校准模型时, 发现模型输出结果对 AGWETP 的变化比较敏感。LSPC 模型是一个复杂的非线性流域模型, 水文模块涉及的参数众多。本研究设置 6 种 HRU, 由于每种 HRU 的参数取值不同, 待率定的参数增加 6 倍。同时模型输入仅对极少数参数敏感, 对所有参数进行敏感性分析的时间成本过高且没必要。因此, 本研究选取 LZSN, INFILT 和 AGWETP 这三类水文参数和 6 种 HRU, 共 18 个参数(表 2)进行全局敏感性分析。

2.4 评价方法与指标

本研究采用均方误差(MSE)、纳什效率系数(NSE)、平方绝对误差(MAE)、Q-Q 图(Quantile-Quantile Plot)、时间序列图和碎石图等指标评估模型稳健性和参数敏感性。各指标的计算公式为

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2, \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}, \quad (6)$$

表 2 用于大余太流域模型敏感性分析的 18 个参数
Table 2 18 parameters used in the sensitivity analysis of the Dashedai watershed model

编号	水文参数	水文响应单元类型	命名
1	LZSN	林地	LZSN_林地
2		草地	LZSN_草地
3		耕地	LZSN_耕地
4		水域	LZSN_水域
5		建筑用地	LZSN_建筑
6		其他	LZSN_其他

7	INFILT	林地	INFILT_林地
8		草地	INFILT_草地
9		耕地	INFILT_耕地
10		水域	INFILT_水域
11		建筑用地	INFILT_建筑
12		其他	INFILT_其他

13	AGWETP	林地	AGWETP_林地
14		草地	AGWETP_草地
15		耕地	AGWETP_耕地
16		水域	AGWETP_水域
17		建筑用地	AGWETP_建筑
18		其他	AGWETP_其他

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i^{sim} - Y_i^{obs}|, \quad (7)$$

式中, Y_i^{sim} 为模型模拟值, Y_i^{obs} 为观测值, $\overline{Y^{obs}}$ 为观测值的均值。

3 结果

3.1 日径流量和月径流量模拟

从日流量模拟时间序列(图 3)可以看出, 模拟值与观测值的变化趋势整体上一致, 但模拟值曲线波动较大。两者断流时间相近, 出现在 12 月至次年 3 月。峰值出现时间也相近, 但模拟值与观测值的差异较大, 未出现峰值时模拟效果更理想。 $R^2 = 0.6482 > 0.6$ (图 4(a)), 结合日径流量 Q-Q 图(图 4(b)), 可知模拟值与观测值的相关关系较强。同时, $NSE = 0.5316$, 根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)对水量模拟方面的规定, 校准后的模型对

日径流量的模拟结果介于可接受($NSE > 0.5$)与较好($NSE > 0.7$)之间。

月径流量模拟时间序列(图 5)显示, 模拟值与观测值的变化趋势整体上一致, 波峰和波谷出现时间相近。 $R^2 = 0.8197 > 0.6$ (图 6(a)), 结合月径流量 Q-Q 图(图 6(b)), 可知模拟值与观测值月尺度的相关性强于日尺度。同时, $NSE = 0.7794$, 根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)在水量模拟方面的规定, 校准后的模型对日径流量的模拟结果介于较好($NSE > 0.7$)与好($NSE > 0.9$)之间。

总之, 校准后的模型对日和月两个尺度的径流量模拟效果较理想, 模型较稳健, 说明 LSPC 模型适用于位于干旱半干旱地区的大余太流域。

3.2 敏感性分析

为确定敏感性参数选取标准, 根据各敏感性指标大小的排序绘制碎石图(图 7 和 8)。

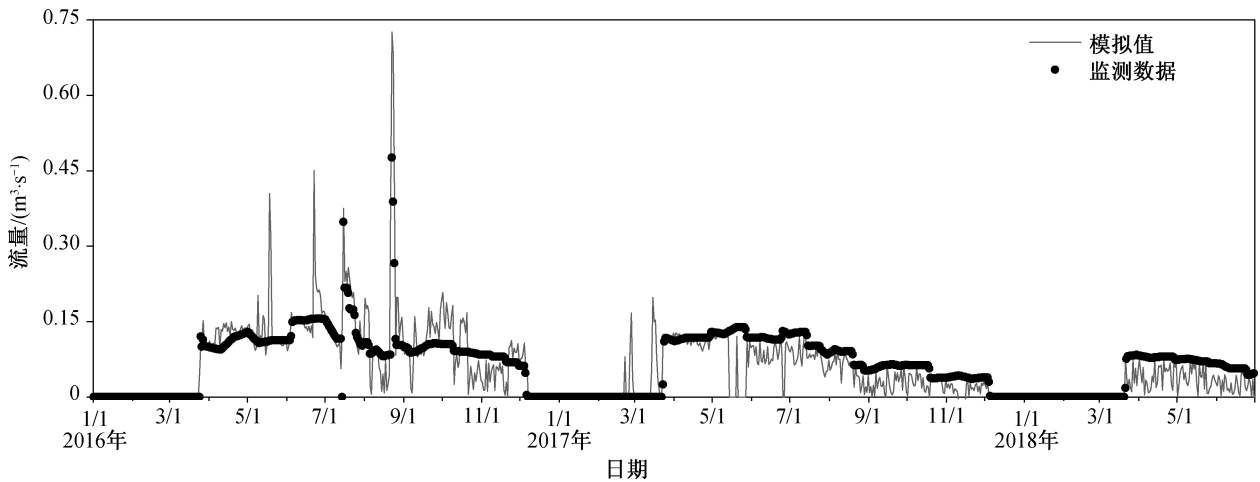


图 3 日径流量模拟值与观测值时间序列对比

Fig. 3 Comparison of the time series of simulated and observed daily runoff values

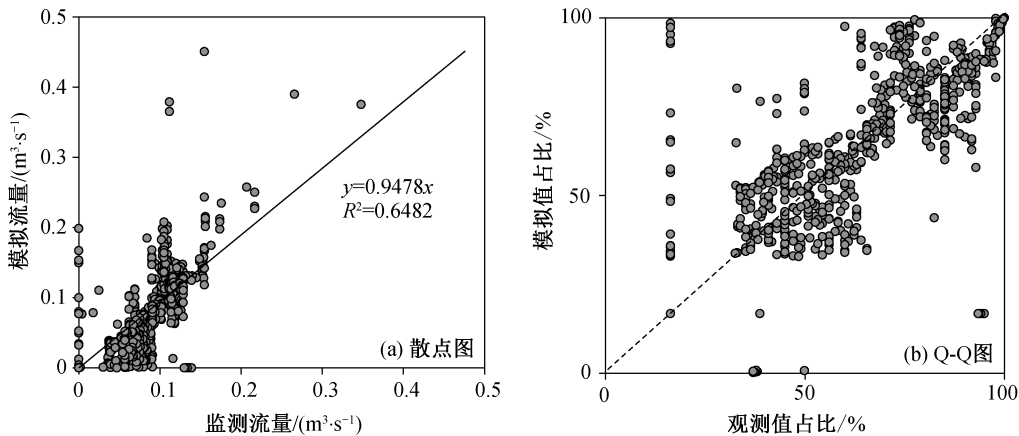


图 4 日尺度径流模拟值与观测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and observed daily runoff values

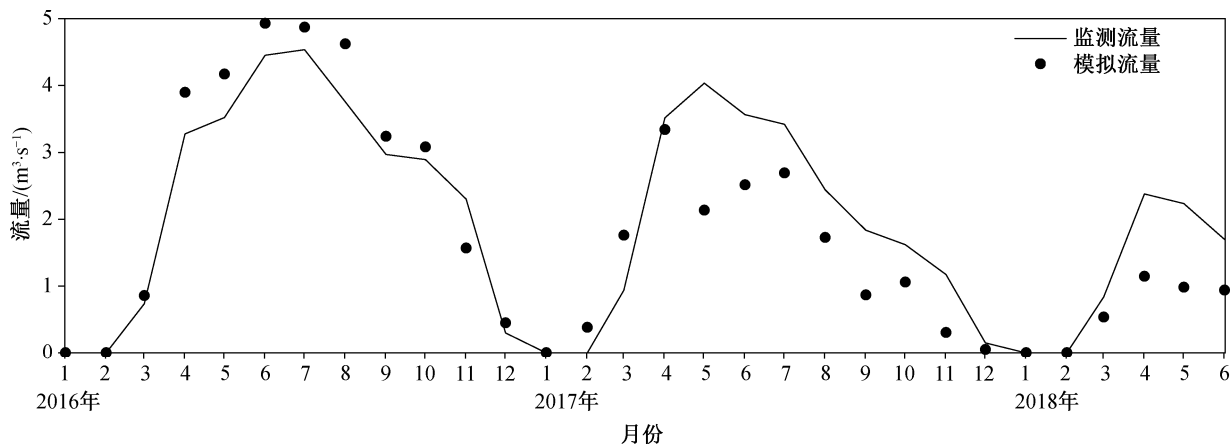


图 5 月径流量模拟值与观测值时间序列对比

Fig. 5 Comparison of the time series of simulated and observed monthly runoff values

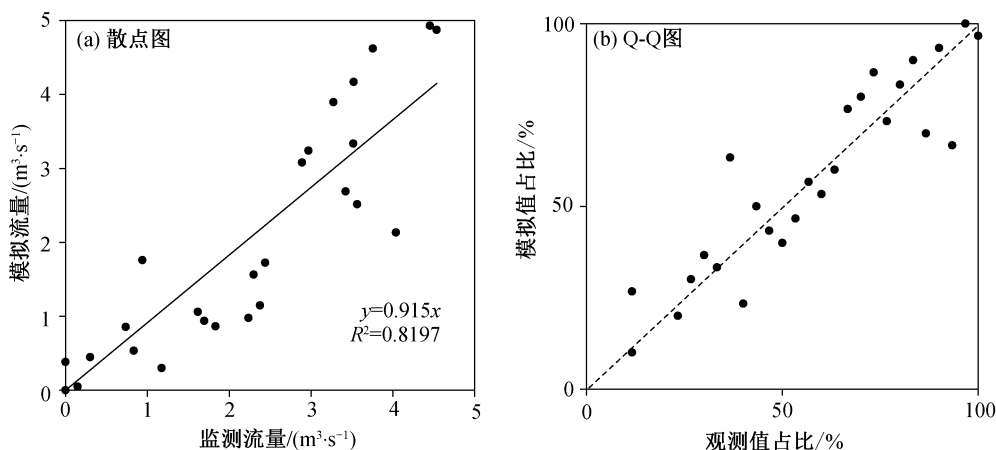


图 6 月尺度径流模拟值与观测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and observed monthly runoff values

3.2.1 Morris 法

根据 Morris 指数排序结果(图 7), 当模型输出度量方法为 MAE 时, LZSN_草地、LZSN_水域、AGWETP_草地、AGWETP_水域和 LZSN_林地这 5 个参数的敏感性最突出, 能够解释 62.36% 的输出变化, 敏感水文参数主要为 LZSN 和 AGWETP, 敏感 HRU 主要为草地、水域、林地 3 类。当模型输出度量方法为 MSE 时, LZSN_草地、AGWETP_草地、LZSN_水域和 AGWETP_水域这 4 个参数的敏感性最突出, 能够解释 68.59% 的输出变化, 敏感水文参数主要为 LZSN 和 AGWETP, 敏感 HRU 主要为草地和水域两类。

度量方法对敏感参数的影响主要体现在两个方面。1) LZSN_水域和 AGWETP_草地两个参数的敏感指数排列顺序不同。比较两种度量方法的敏感指数排序结果, 除 LZSN_水域和 AGWETP_草地两个

参数外, 其余 16 个参数排列顺序一致, 当度量方法为 MAE 时, LZSN_水域排名第二, AGWETP_草地排名第三, 当度量方法为 MSE 时, 两参数排列顺序相反。2) 根据碎石图确定的敏感参数不同。度量方法为 MSE 时, 筛选出 4 个敏感参数, 而度量方法为 MAE 时多筛选出 LZSN_林地一类, 敏感 HRU 也多出林地一类。

为避免度量方法对敏感参数排序结果的影响, 取两种度量方法下敏感参数的并集作为敏感参数集合, 即敏感水文参数主要为 LZSN 和 AGWETP, 敏感下垫面主要为草地、水域和林地。

3.2.2 Sobol 法

根据 Sobol 指数排序结果(图 8), 当模型输出度量方法为 MAE 时, LZSN_草地、AGWETP_草地、LZSN_耕地和 AGWETP_耕地这 4 个参数的敏感性最为突出, 能够解释 85.5% 的输出变化, 敏感水文

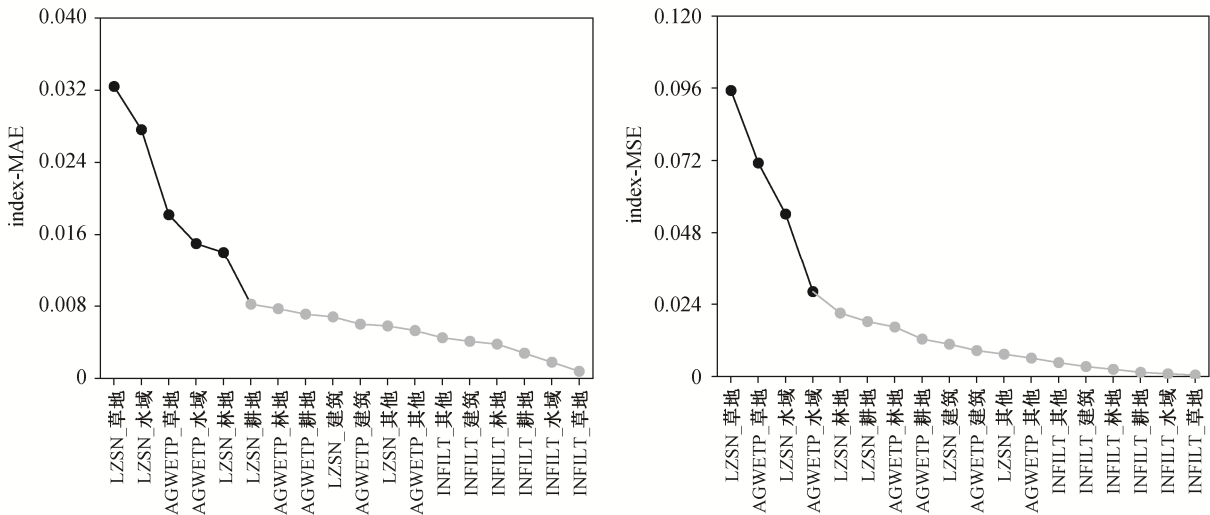


图7 Morris敏感指数排序结果
Fig.7 Morris sensitivity index sorting results

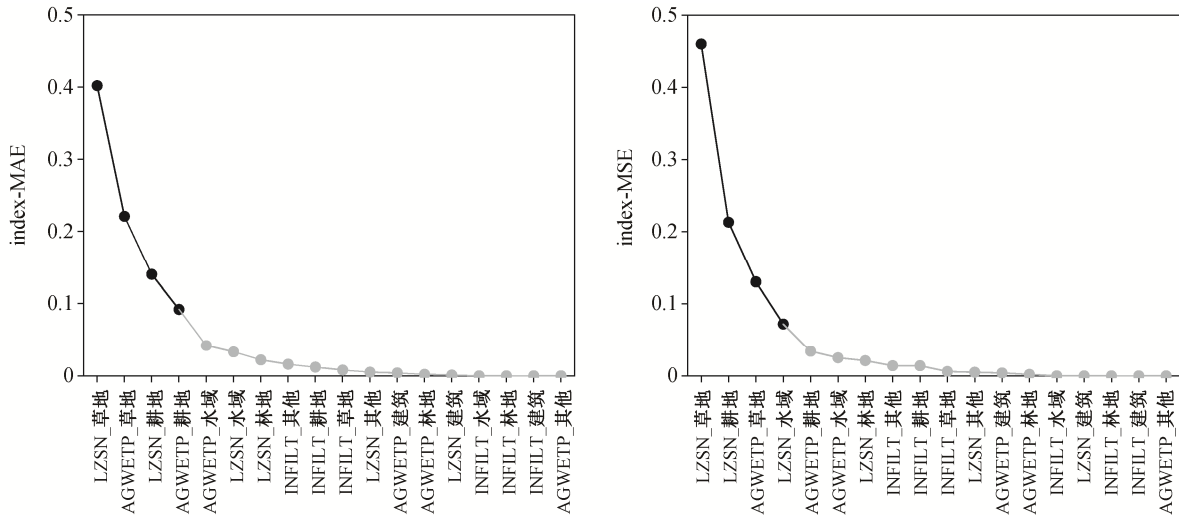


图8 Sobol敏感指数排序结果
Fig. 8 Sobol sensitivity index sorting results

参数主要为LZSN和AGWETP，敏感HRU主要为草地和耕地两类；当模型输出度量方法为MSE时，LZSN_草地、LZSN_耕地，AGWETP_草地以及AGWETP_水域这4个参数的敏感性最为突出，能够解释87.5%的输出变化，敏感水文参数主要为LZSN和AGWETP，敏感HRU主要为草地、耕地和水域。

度量方法对敏感参数的影响主要体现在两方面。1) 敏感指数排列顺序存在差异，主要体现在排名2~6位的参数，排名在第7位之后的参数除LZSN_建筑和INFILT_水域的相对位置不同外，其余参数排名一致。排名差异较大的参数为INFILT_

水域，当度量方法为MAE时此参数排第4位，当度量方法为MSE时排第6位。2) 根据碎石图确定的敏感参数不同。度量方法为MSE时多筛选出参数AGWETP_水域，度量方法为MSE时多筛选出参数AGWETP_耕地，因此度量方法为MSE时确定的敏感HRU也多出水域这一类。

为避免度量方法对敏感性分析结果的影响，取两种度量方法下敏感参数的并集作为敏感参数集合。此时，敏感水文参数主要为LZSN和AGWETP，敏感下垫面主要为草地、耕地和水域。

3.2.3 Morris法与Sobol法的对比

度量方法相同时，两类敏感指数中参数LZSN_

草地都是最敏感的, 其余 17 个参数的敏感指数排列顺序有较大的差异。当度量方法为 MAE 时(图 9), 排名差异较大的是 INFILTT_草地、INFILTT_耕地和 AGWETP_林地, 在 Morris 指数中其排名分别是第 18, 16 和 7 位, 在 Sobol 指数中其排名分别是第 10, 9 和 13 位; 当度量方法为 MAE 时(图 10), 排名差异较大的也是 INFILTT_草地、INFILTT_耕地和 AGWETP_林地。

两种敏感分析方法筛选出的敏感水文参数都为 LZSN 和 AGWETP, 而敏感 HRU 有差异。对于 Morris 法, 敏感 HRU 主要为草地、水域和林地; 对于 Sobol 法, 敏感 HRU 主要为草地、耕地和水域。为避免分析方法产生的影响, 取其并集作为敏感 HRU 集合, 即为草地、耕地、林地和水域。

大余太流域位于 400 mm 等降水线附近, 蒸发量远大于年降水量, 年内断流时间长, 上层土壤干

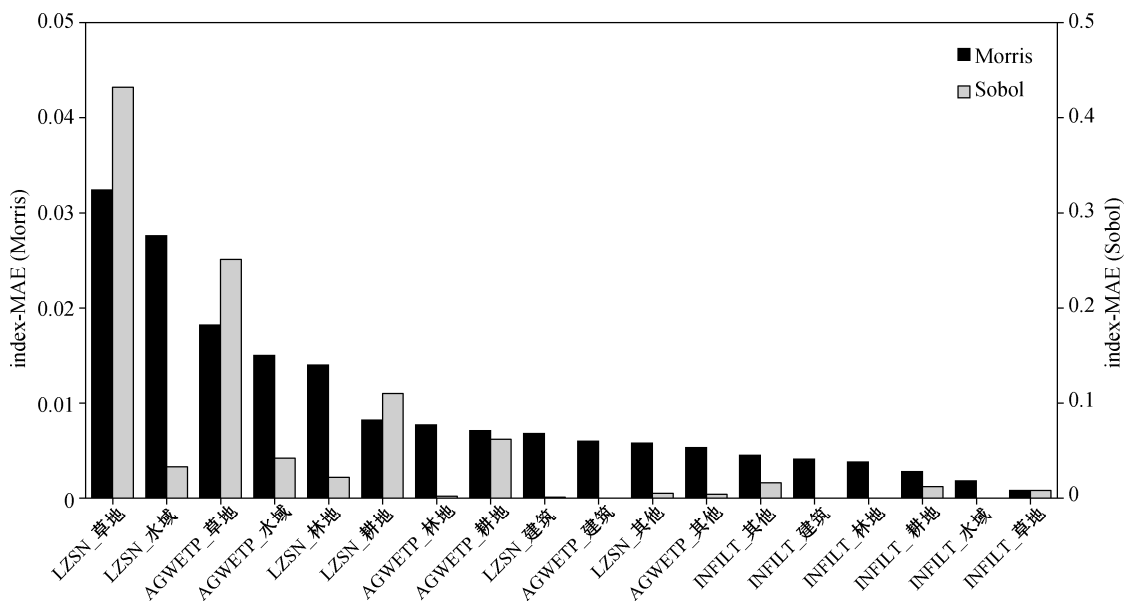


图 9 度量方法 MAE 下 Morris 和 Sobol 的敏感指数排序比较

Fig. 9 Morris and Sobol sensitivity index ranking comparison when the measurement method is MAE

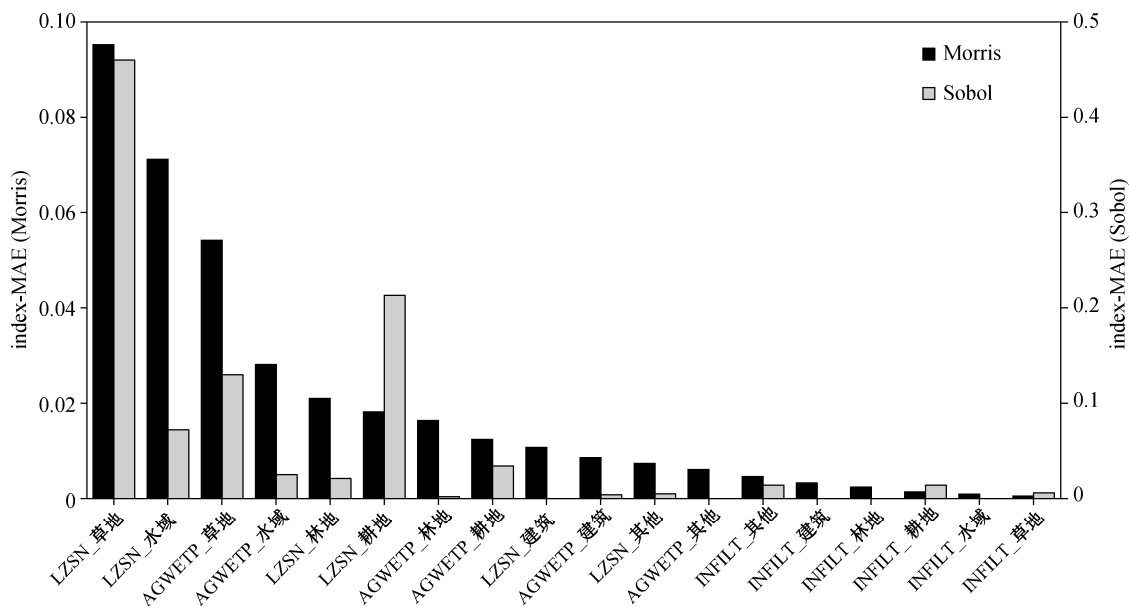


图 10 度量方法 MSE 下 Morris 和 Sobol 敏感指数排序比较

Fig. 10 Morris and Sobol sensitivity index ranking comparison when the measurement method is MSE

燥, 径流主要由下层土壤和地下径流补充, 在模型中直接与下层土壤含水量(LZSN)和地下水蒸发系数(AGWETP)相关, 因此LZSN和AGWETP为模型的敏感参数。大余太流域地表主要被草地(占比60.85%)、农作物(35.55%)和林地(1.53%)覆盖, 草地、耕地和林地成为影响模型的敏感下垫面, 水域可能是因为影响水循环过程而成为敏感下垫面。

4 结论

本研究基于LSPC模型构建内蒙大余太流域模型, 利用全局敏感性分析方法识别水文敏感参数和敏感下垫面, 并评估敏感性分析方法和模型输出的度量方法对参数敏感性结果的影响, 得到如下主要结论。

1) 大余太流域模型对日和月两个尺度的径流模型效果好, 模拟值与观测值的决定系数 $R^2 > 0.6$, 纳什系数NSE > 0.5 , 满足模型适用性要求, LSPC模型适用于位于内陆干旱半干旱地区的大余太流域。

2) Morris和Sobol两种敏感性分析方法对敏感参数识别和敏感指数排序都有较大的影响, 体现在两个方面: 第一, 对于同一度量方法, 两类敏感指数的相对排名差异较大; 第二, 筛选出的敏感参数有互不包含的, 当度量方法为MSE时多筛选出AGWETP_水域这一参数, 当度量方法为MSE时多筛选出AGWETP_耕地这一参数, 直接影响敏感下垫面识别。

3) MAE和MSE两种度量方法对参数敏感性结果的影响主要体现在敏感参数识别方面, 对敏感指数排序影响不大。但是, 这也影响敏感下垫面类型的识别, 即当度量方法为MAE时, 林地可能被误识别为敏感下垫面。

4) 为降低度量方法和敏感性分析方法对结果的影响, 取其各自的并集作为敏感水文参数和下垫面的集合。此时, 敏感水文参数为下层土壤含水量(LZSN)和地下水蒸发系数(AGWETP), 敏感下垫面类型为草地、耕地、林地和水域。这是因为大余太流域位于干旱半干旱区, 蒸散发量远大于降水量, 河流水量主要由地下水 and 下层土壤含水补充, 且地表主要被草地、农作物和林地覆盖。

参考文献

[1] 奚磊, 侯明明, 张胜伟. 水环境中磷的农业非点源污染研究. 安徽农学通报, 2007, 13(10): 42-44

- [2] Estes M G, Al-Hamdan M, Thom R, et al. Watershed and hydrodynamic modeling for evaluating the impact of land use change on submerged aquatic vegetation and seagrasses in Mobile Bay [C] // OCEANS. Biloxi, MS, 2009: M10-0044
- [3] Sahoo G B, Schladow S G, Reuter J E, et al. Effects of climate change on thermal properties of lakes and reservoirs, and possible implications. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2011, 25 (4): 445-456
- [4] EPA. Water quality restoration plan and total maximum daily loads (TMDLs) for the Lake Helena watershed planning area [EB/OL] (2004) [2021-06-01]. https://www.researchgate.net/publication/335681862_Water_Quality_Restoration_Plan_and_Total_Maximum_Daily_Loads_TMDLs_for_the_Lake_Helena_Watershed_Planning_Area_Volume_I_-_Watershed_Characterization_and_Water_Quality_Status_Review
- [5] Flynn K F, Steg R F, Bond J I, et al. Identification of a management framework for TMDL source allocations in the Flathead Lake Basin, Montana // Watershed Management to Meet Water Quality Standards and TMDLS (Total Maximum Daily Load). San Antonio, TX: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007: 701P0207
- [6] 周云峰, 周永潮, 郑春华, 等. 采用 Sobol 方法的暴雨径流管理模型参数灵敏度分析. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(2): 146-153
- [7] Ascough II J C, Green T R, Ma L, et al. Key criteria and selection of sensitivity analysis methods applied to natural resource models [EB/OL]. (2005) [2021-06-01]. https://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/ascough_2.pdf
- [8] Herman J D, Kollat J B, Reed P M, et al. Technical note: method of Morris effectively reduces the computational demands of global sensitivity analysis for distributed watershed models. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2893-2903
- [9] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述. 环境科学, 2017, 38(11): 4889-4896
- [10] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174
- [11] Campolongo F, Saltelli A. Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods. Reliability Engineering & System Safety, 1997, 57(1): 49-69

- [12] 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. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 46–53
- [13] 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. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 117–122
- [14] 张伟, 张江, 张曼. 基于 Morris 筛选法的 SWMM 参数敏感性分析. 江苏水利, 2021(3): 35–39
- [15] 黄金良, 杜鹏飞, 何万谦, 等. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析. 中国环境科学, 2007, 27(4): 549–553
- [16] Tang Y, Reed P, Wagener T, et al. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(2): 793–817
- [17] Leimgruber J, Krebs G, Camhy D, et al. Sensitivity of model-based water balance to low impact development parameters. *Water*, 2018, 10(12): 1838
- [18] 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. 水力发电学报, 2018, 37(3): 59–68
- [19] 陈建, 梁川, 陈梁. SWAT 模型的参数灵敏度分析——以贡嘎山海螺沟不同植被类型流域为例. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 41–45
- [20] Zadeh F K, Nossent J, Sarrazin F, et al. Comparison of variance-based and moment-independent global sensitivity analysis approaches by application to the SWAT model. *Environmental Modelling and Software*, 2017, 91: 210–222
- [21] Yan X, Lu W, An Y, et al. Uncertainty analysis of parameters in non-point source pollution simulation: case study of the application of the Soil and Water Assessment Tool model to Yitong River watershed in northeast China. *Water and Environment Journal*, 2019, 33(3): 390–400
- [22] Zhang C, Chu J, Fu G. Sobol's sensitivity analysis for a distributed hydrological model of Yichun River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 480: 58–68
- [23] 石岚, 徐丽娜, 郝玉珠. 一种水动力与统计模型相结合的动态临界雨量方法研究及应用. 内蒙古气象, 2016(5): 31–34
- [24] Hamon W R. Estimating potential evapotranspiration. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1963, 128(1): doi:10.1061/TACEAT.0008673
- [25] Bosen J F. An approximation formula to compute relative humidity from dry bulb and dew point temperatures. *Monthly Weather Review*, 1958, 86(12): 486
- [26] Jensen D T, Hargreaves G H, Temesgen B, et al. Computation of ETo under nonideal conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(5): 394–400
- [27] 张峰, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 分布式水文模型子流域划分方法. 南水北调与水利科技, 2011(3): 101–105
- [28] 邹强, 唐建喜, 李淑松, 等. 基于水文响应单元的泥石流灾害易发性分区方法. 山地学报, 2017(4): 496–505
- [29] 罗川, 李兆富, 席庆, 等. HSPF 模型水文水质参数敏感性分析. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1995–2002
- [30] 李燕, 李兆富, 席庆. HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究. 环境科学, 2013, 34(6): 2139–2145
- [31] 刘欢, 吴琼莉, Cournède P H. 不同抽样算法对 Sobol 敏感性分析影响的研究. 数学物理学报, 2018, 38(2): 372–384
- [32] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 1979, 21(2): 239–245