

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.05.08

DEM和土地利用分辨率对SWAT水沙模拟效果的影响 ——以泾河流域为例

李睿智^{1,3}, 吴磊^{1,2,3}, 杜佰林^{1,3}, 郭宗俊^{1,3}, 王妍^{1,3}, 许鑫佳^{1,3}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: DEM和土地利用的数据精度影响水文模型的模拟效果。以泾河流域为对象, 选取毛家河、杨家坪和张家山3个水文站作为控制站, 分别利用9组不同分辨率的DEM和土地利用数据(分辨率范围均为30~3000 m)构建了100个SWAT模型, 探究输入数据精度对水沙模拟效果的影响, 并采用TOPSIS理论方法对模型进行综合评价。研究表明: DEM分辨率会影响流域的边界和河网提取, 且流域特征信息会随分辨率的降低而发生丢失; 当DEM分辨率低于1000 m时, 需使用SWAT中的Burn in工具, 才能完成流域边界与河网的准确提取; HRU的数量随DEM分辨率的下降而减少, 而土地利用分辨率对HRU数量的影响不显著; 当分辨率变化较大时, DEM对参数敏感性造成的影响要大于土地利用; 在构建的毛家河、杨家坪和张家山3个站点的模型中, DEM和土地利用分辨率的最优组合分别为750和300 m、30和90 m以及150和3000 m。该研究可为流域水沙模型构建与模拟精度提升提供方法与技术参考。

关键词: DEM; 土地利用分辨率; SWAT模型; 水沙模拟效果; TOPSIS; 泾河流域

中图分类号: P333; TV11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)05-0070-10

Impact of DEM and land cover resolution on the simulation of runoff and sediment in SWAT Model: A case study of Jinghe River Basin

LI Ruizhi^{1,3}, WU Lei^{1,2,3}, DU Bailin^{1,3}, GUO Zongjun^{1,3}, WANG Yan^{1,3}, XU Liuji^{1,3}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The data accuracy of the DEM and land cover affects the simulation performance of hydrological models. In this study, three hydrological stations, i. e. Maojiahe, Yangjiaping and Zhangjiashan, were selected as the control sites to investigate the influence of the accuracy of the input data on the simulation effect of runoff and sediment. 100 SWAT models were constructed using nine different resolutions of DEM (30–3000 m) and land cover data (30–3000 m) and the TOPSIS method was used to evaluate the model's performance in a comprehensive manner. The results shows that the DEM resolution affects the extraction of watershed boundary and river network, and the watershed feature information will be lost with the decrease of resolution; when the DEM resolution is lower than 1000 m, the "Burn in" tool in SWAT needs to be used to complete the accurate extraction of watershed boundary and river network; the number of HRU decreases with the decrease of DEM resolution, whereas the influence of land cover resolution on the number of HRU is not significant; DEM causes a greater impact on parameter sensitivity than land cover when there is a large change in resolution; the optimal resolution combinations of DEM and land cover for the three models of Maojiahe, Yangjiaping and Zhangjiashan are 750 m and 300 m, 30

收稿日期: 2023-02-12; 修回日期: 2023-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277073、52070158)

作者简介: 李睿智(1998—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事水文模拟研究。

通讯作者: 吴磊(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水土环境过程与跨介质调控研究。

m and 90 m, 150 m and 3 000 m respectively. This study can provide theoretical and technical support for the construction of watershed models and the improvement of simulation accuracy.

Key words: DEM; land cover resolution; SWAT model; simulation effect of runoff and sediment; TOPSIS; Jinghe River Basin

1 研究背景

21世纪以来,随着地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术与遥感(remote sensing, RS)技术的广泛应用,各种水文模型被广泛应用于水文和产沙机理过程模拟^[1]以及水土保持措施的规划与实施^[2]研究中,如RUSLE(revised universal soil loss equation)模型^[3]、WEPP(Water Erosion Prediction Project)模型^[4]、DYRIM(digital Yellow River integrated model)模型^[5]以及SWAT(soil and water assessment tool)模型^[6]等。水文模型的模拟精度很大程度上取决于输入数据的空间精确度,不同空间分辨率的数字高程数据(digital elevation model, DEM)和土地利用数据会对模型模拟结果造成一定的影响^[7-8]。因此,有必要探究输入数据的空间精度与模拟结果之间的关系,以提高模型的模拟精度。

基于此,国内外学者开展了与DEM分辨率相关的研究,发现DEM的分辨率会对流域地形细节的提取造成影响,一般而言,随着分辨率的增加,地形细节会更加精确^[8],然而高精度的数据并不总能提高模型性能。比如,郭伟玲等^[9]通过研究发现高精度的DEM数据并不能提取出更准确的坡长;Gautam等^[10]研究表明在尼泊尔的两个流域使用分辨率为30 m或更精细的DEM数据能获得最佳的径流模拟性能;Tan等^[11]在Kelantan River流域研究发现不同分辨率的DEM数据以及流域阈值均会对模型性能产生影响,DEM分辨率为20~60 m时可以取得更好的月径流模拟效果;蔡朵朵等^[12]发现过低的DEM分辨率会降低北洛河流域的径流模拟效果。陈海涛等^[13]发现DEM分辨率对潮河流域SWAT径流模拟效果影响并不显著,但会对总氮的模拟结果产生较大影响。另外,有研究发现土地利用数据质量对流域水文建模较为重要^[7],Jin等^[14]研究发现高分辨率的土地利用数据会提高1.1%~6.9%的径流模拟性能,而Fisher等^[15]研究表明过于精细的土地利用数据会大幅度增加经济和时间成本。但也有部分研究表明,土地利用精度与模型模拟结果的相关性不强^[16]。综上,不同分辨率的输入数据会对流域边界、河网和坡度等基本参数产生影响^[17],导致模型水沙的模拟计算过程产生偏差。现关于输入

数据对模型模拟效果方面的研究多集中在DEM或土地利用等单因素对流域SWAT模型模拟的影响,且输入数据分辨率选取的数量不足,鲜有对嵌套流域多分辨率DEM和土地利用数据交互影响的多模型模拟效果的评价研究。

泾河是黄河流域十大水系之一,针对泾河流域开展水沙研究对于黄河流域的生态保护和高质量发展具有重要意义^[18]。因此,本研究通过构建泾河流域的SWAT模型,探究DEM与土地利用分辨率对模型性能的交互影响,并利用TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)优选理论模型针对水沙模拟结果的多个指标进行综合评价,评选出泾河流域及其嵌套流域(蒲河流域、泾河南支干流流域)DEM与土地利用分辨率最佳组合的SWAT水沙模拟模型,该结果可为后期泾河流域的水沙研究提供技术参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

泾河流域(106°14'~108°42'E, 34°46'~37°19'N)位于黄土高原中部,流经陕、甘、宁部分地区,流域面积约为45 000 km²,河网长度为455 km,地势西北高、东南低。泾河发源于宁夏回族自治区泾源县六盘山东麓,在陕西省高陵县注入渭河,是渭河的一级支流、黄河的二级支流。流域内地形复杂,最小高程为219 m,最大高程为2 890 m,是黄土高原水土流失最严重的区域之一。流域处于半湿润半干旱气候的过渡地带,为典型的温带大陆性气候,多年平均气温为8℃,年降雨量在350~600 mm之间,降雨大多集中在7、8月份,径流年际变化明显。流域土地利用类型以草地和耕地为主,土壤以石灰性雏形土和钙积潜育土为主。泾河流域的地理位置及水系、高程分布如图1所示。

2.2 研究数据及来源

2.2.1 DEM数据 在本研究中,选用了ASTER GDEM V2 DEM数据,数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30 m×30 m。为获得研究所需的不同分辨率的数据,基于最邻近分配法将DEM数据分别重采样至60、90、150、300、500、750、1 000、2 000、3 000 m共9组不同空间

分辨率的 DEM 数据。其中,3 种不同量级(30、300、3 000 m)分辨率的 DEM 数据如图 2 所示,图中还显示了同一局部位置的放大图。

2.2.2 土地利用数据 土地利用数据来源于地理国情监测云平台(<http://www.geodata.cn/>),空间分辨率为 30 m × 30 m。自 20 世纪 80 年代起,泾河流域开始实施大规模的水土保持措施,为降低淤地坝、水库等客观因素对模拟结果的影响,本研究选用 1980 年的土地利用数据。与 DEM 数据处理方法一致,采用最邻近分配法将土地利用数据分别重采样至 60、90、150、300、500、750、1 000、2 000、3 000 m 共 9 组不同空间分辨率的土地利用数据,其中,不同量级(30、300、3 000 m)分辨率的土地利用数据如图 3 所示,图中也显示了同一局部位置的放大图。

2.2.3 土壤数据 本研究所需的土壤数据来源于 HWSD(Harmonized World Soil Database)数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),空间分辨率为 1 km × 1 km。

2.2.4 气象与水文数据 泾河流域内固原、长武、西峰、环县 4 个气象站的逐日气象数据来源于中国气象数据网,毛家河、杨家坪及张家山水文站逐日径流泥沙数据来源于水文年鉴及黄土高原科学数据中心,该 3 个水文站分别为蒲河流域、泾河南支干流以

及整个泾河流域的控制站。为降低人类活动等客观因素造成的影响,并与土地利用数据的年份相匹配,采用 1972—1986 年的水文数据校准 SWAT 模型。

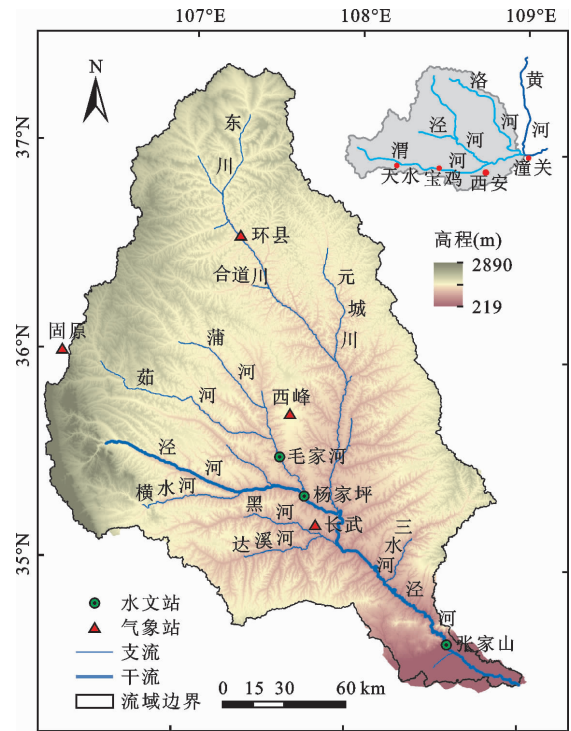


图 1 泾河流域高程、水系及水文气象站点分布

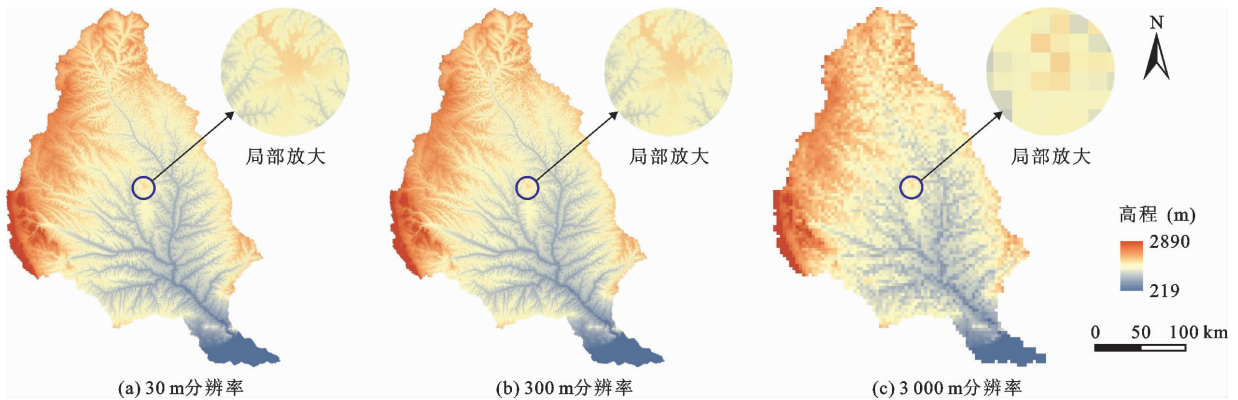


图 2 泾河流域 3 种不同量级分辨率的 DEM 数据图

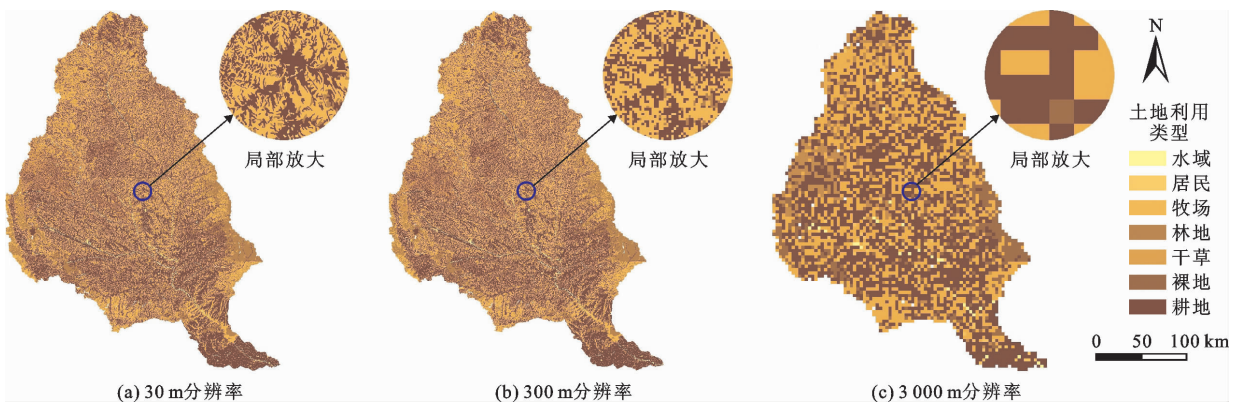


图 3 泾河流域 3 种不同量级分辨率的土地利用数据图

2.3 SWAT模型的构建与校准

SWAT模型是一个基于物理的半分布式流域水文模型,该模型可从DEM数据中提取坡度、河流的长度与宽度等水文参数。当流域内不同栅格的土地利用、土壤以及坡度类型相匹配时,SWAT会将这些栅格划分为一个水文响应单元(hydrological response unit,HRU)进行处理。并计算HRU水平上的水文参数、径流量、产沙量等水文水质信息,HRU的数量以及分布与输入数据的空间分辨率相关。该模型被广泛应用于评估土地管理和气候变化对流域水质水量的影响^[19]。

本研究基于土壤、气象数据以及不同分辨率的DEM和土地利用数据构建了SWAT模型,并根据张家山站实测的水沙数据来确定模型参数。在分析DEM与土地利用分辨率对模型的影响时,控制土壤、气象数据以及模型的参数类型保持不变。在建模的过程中,面积阈值统一设定为80 000 hm²,坡度统一划分为3个等级(0°~7°,7°~25°,大于25°),HRU定义阈值统一设定为土地利用5%、土壤10%、坡度10%。使用SUFI-2算法程序对模型的参数进行校准,并选取该程序中的全局敏感性分析方法对模型的参数进行敏感性分析,其中*t-Stat*代表参数敏感性程度,*P-Value*代表参数敏感的显著性程度,*t-Stat*越大、*P-Value*越接近于0,则参数的敏感性越强。

选取毛家河、杨家坪和张家山站实测的径流、泥沙数据对模型逐一进行水沙同步校准。选取纳什效率系数*NSE*和决定系数*R²*作为3个水文站点的模拟结果评价指标。其中,*NSE*为小于1的数值,可为负值;*R²*为小于1的正数,该两个值的上限值均为1,两者数值大小越接近上限值1则模型的模拟结果越好,模拟值与实测值越接近。所构建的100个校准和不确定分析程序(calibration and uncertainty programs, CUP)工程均包含3个水文站的率定,每个站点均迭代3 000次,并对校准后的结果进行讨论分析。

2.4 TOPSIS模型优选评价

TOPSIS是多目标决策方法的一种,其基本原理是计算评价对象到正理想解和负理想解的距离,然后根据正、负理想解的距离计算出相对贴近度并进行排序^[20]。该方法的计算步骤如下:

首先采用平方和归一化对原始数据进行无量纲处理并构建评价矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$; z_{ij} 为第*i*个评估对象的第*j*个评价指

标。平方和归一化的公式如下:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第*i*个评估对象第*j*个评价指标的原始数据。

然后确定模型的正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- ,其分别代表理想中的最优方案和最差方案,计算公式如下:

$$Z^+ = (\max z_{i1}, \max z_{i2}, \dots, \max z_{in}) \quad (2)$$

$$Z^- = (\min z_{i1}, \min z_{i2}, \dots, \min z_{in}) \quad (3)$$

式中: $\max z_{ij}$ 、 $\min z_{ij}$ 分别为第*j*个评价指标中的最大值、最小值。

计算每个待选方案到正理想解 Z^+ 的距离 D_i^+ 和负理想解 Z^- 的距离 D_i^- ,计算公式为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\max z_{ij} - z_{ij})^2} \quad (4)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\min z_{ij} - z_{ij})^2} \quad (5)$$

计算每个待选方案的相对贴近度 C_i ,计算公式如下:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (6)$$

最终根据相对贴近度 C_i 值的大小对待选方案进行排序,评选出最优的模型。

3 结果与分析

3.1 水文边界与河网

受空间分辨率的影响,基于较低空间分辨率的DEM数据生成的河网和水文边界可能与实际有所偏差。为解决建模中DEM空间分辨率低于1 000 m时河网提取与实际差别较大、不连续等问题,本研究采用SWAT模型中自带的Burn in工具,对1 000 m分辨率DEM数据产生的河网文件进行修正,以获得连续河网。不同分辨率DEM数据提取的河网与流域边界如图4所示。由图4可以看出,当DEM分辨率在1 000 m及以下时,泾河流域水文边界的划分并未产生较大的差异,提取的河网接近实际河网。而当DEM的分辨率在2 000和3 000 m时,北支泾河流域河网的提取在部分支流中出现了较大的偏差,产生了一些伪河道(图4(a)、4(b)),流域西南部部分边界发生明显的凹陷(图4(c))。DEM分辨率的降低会减弱水文边界以河网的提取能力,在泾河流域,30~1 000 m分辨率的DEM数据提取河网的能力能基本满足SWAT建模的需要。

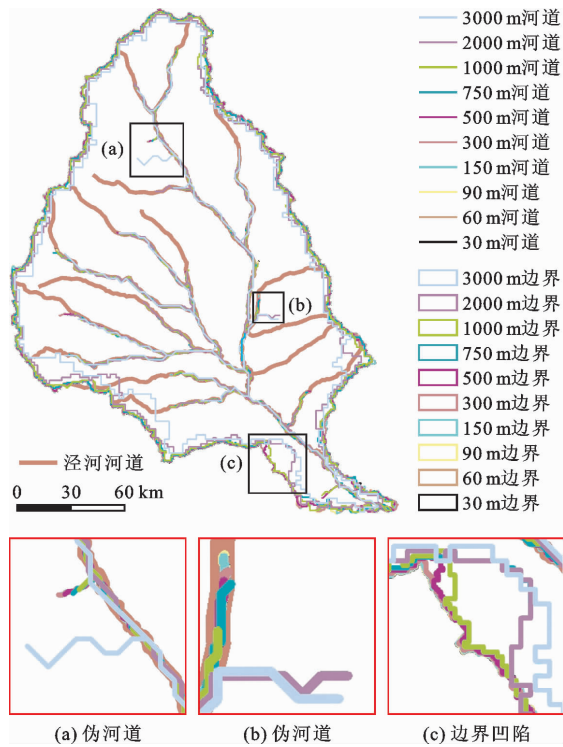


图4 泾河流域不同分辨率DEM数据提取的
河网与流域边界

3.2 水文特征与HRU数量分析

为进一步表明泾河流域在不同DEM分辨率下

的水文特征情况,在土地利用数据分辨率为30 m的条件下,针对建模过程中所提取的子流域数量、流域面积、坡度及高程等展开分析,如表1所示。

由表1可知,DEM分辨率的变化对流域面积有着显著的影响,模型中泾河流域的计算面积与DEM分辨率呈负相关关系。当DEM分辨率由30 m降低至3 000 m时,流域面积由44 420 km²减小至38 970 km²,面积减少了12.27%。当DEM的分辨率为30~150 m时,子流域数量稳定不变,当DEM的分辨率低于150 m时,子流域数量呈现减少趋势。更粗糙的DEM分辨率会导致高程信息的误差增加,与30 m分辨率的DEM数据相比,3 000 m分辨率的DEM最大高程低估了312 m,最小高程高估了139 m,平均高程降低了14.54 m,标准差降低了29.02 m。DEM分辨率的降低会导致高程范围以及标准差的减小,这是由地形特征信息的丢失所导致的。DEM分辨率对于坡度的影响更为显著,在30 m分辨率DEM的模型中,46.63%的地区的坡度在25°以上,仅有11.31%的地区的坡度比较平坦,坡度在7°以下。而当分辨率低于500 m时,25°以上的坡度信息几乎完全丢失,当分辨率低于2 000 m时,所有的坡度信息几乎完全丢失,99%以上地区的坡度均呈现为7°以下。

表1 泾河流域不同DEM分辨率数据提取的流域水文特征

DEM 分辨率/m	子流域 个数	流域面积/ 10 ⁴ km ²	不同坡度面积占比/%			高程/m			
			>25°	7°~25°	0°~7°	最小高程	最大高程	平均高程	标准差
30	39	4.442	46.63	42.06	11.31	219	2884	1393.33	285.37
60	39	4.440	42.96	44.57	12.47	219	2882	1392.71	285.57
90	39	4.436	37.55	48.71	13.74	224	2881	1392.72	284.85
150	39	4.431	23.87	59.45	16.68	220	2878	1391.47	285.36
300	37	4.401	0.85	70.98	28.17	247	2808	1391.19	281.87
500	37	4.370	0.10	54.09	45.81	272	2809	1389.39	280.79
750	37	4.282	0	31.35	68.65	268	2766	1392.48	275.24
1000	37	4.288	0	13.95	86.05	301	2735	1385.15	276.98
2000	31	4.088	0	0.61	99.39	295	2659	1381.97	268.51
3000	27	3.897	0	0.12	99.88	358	2572	1378.79	256.35

此外,DEM和土地利用的分辨率还会对HRU数量产生交互影响,图5给出了两者分辨率对HRU数量的交互影响结果。图5表明,在相同的土地利用分辨率下,随着DEM分辨率的降低,HRU数量呈明显的减少趋势,但在相同的DEM分辨率下,土地利用分辨率的变化对HRU数量的影响有限。

3.3 参数敏感性分析

采用SWAT-CUP的SUFI-2算法,对不同分辨率的DEM和土地利用数据构建的SWAT模型进行参数敏感性分析,探究DEM和土地利用数据对参数敏感性的影响。本研究以5个模型为例,分别对每个模型最敏感的前8个参数进行分析,各参数及

其物理意义见表 2,不同模型的敏感性参数汇总如表 3 所示。

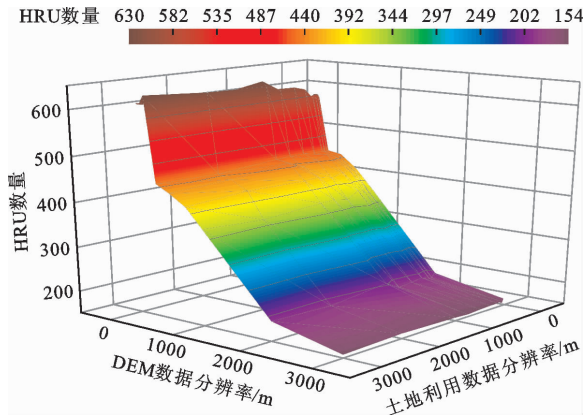


图 5 DEM 和土地利用数据的分辨率对 HRU 数量的交互影响

由表 3 可知,在所有 5 个模型中,USLE_C、EPCO、ALPHA_BNK 以及 CN2 均为最敏感的参数。对比模型 30D30L、90D30L、3000D30L 来探究 DEM 分辨率对参数敏感性的影响,DEM 分辨率变化较小时,参数的敏感性几乎不发生变化,当 DEM 分辨率下降到 3 000 m 时,3 个产汇流参数 OV_N、SMTMP、

表 2 模型各参数及其物理意义

参数	物理意义
OV_N	曼宁系数
USLE_P	水土保持措施因子
USLE_C	USLE 方程土地覆盖 C 因子
EPCO	植物吸收补偿因子
SMTMP	融雪基温
SURLAG	地表径流滞后系数
ALPHA_BNK	河岸调蓄的基流 α 因子
CN2	SCS 径流曲线数
BIOMIX	生物混合效率
CH_N1	支流的曼宁系数 n 值
LAT_SED	侧向流和地下径流含沙量
USLE_K	USLE 方程土壤侵蚀 K 因子

SURLAG 以及一个产沙参数 USLE_P 不再是最敏感的参数,此时新增的敏感性参数包括 3 个产沙参数 BIOMIX、LAT_SED、USLE_K 和一个汇流参数 CH_N1。对比模型 30D30L、30D90L、30D3000L 可发现土地利用分辨率的变化对参数敏感性的影响不大,仅个别参数的敏感性排序略有改变。

表 3 不同分辨率模型的参数敏感性分析结果汇总

参数	30D30L			90D30L			3000D30L			30D90L			30D3000L		
	<i>P-Value</i>	<i>t-Stat</i>	排序	<i>P-Value</i>	<i>t-Stat</i>	排序	<i>P-Value</i>	<i>t-Stat</i>	排序	<i>P-Value</i>	<i>t-Stat</i>	排序	<i>P-Value</i>	<i>t-Stat</i>	排序
OV_N	-0.004	0.996	1	-0.019	0.985	1				0.020	0.984	2	0.013	0.990	3
USLE_P	-0.005	0.996	2	-0.020	0.984	2				-0.015	0.988	1	-0.004	0.997	2
USLE_C	0.008	0.993	3	-0.034	0.973	3	0.054	0.957	2	0.037	0.970	3	0.003	0.997	1
EPCO	0.085	0.933	4	0.084	0.933	5	0.146	0.884	5	0.051	0.959	5	0.077	0.938	4
SMTMP	-0.104	0.917	5	-0.073	0.942	4				-0.041	0.967	4	-0.132	0.895	6
SURLAG	-0.119	0.905	6	-0.118	0.906	6				-0.110	0.913	7	-0.12	0.904	5
ALPHA_BNK	-0.126	0.900	7	-0.128	0.898	7	-0.164	0.87	7	-0.077	0.939	6	-0.151	0.880	8
CN2	0.159	0.873	8	-0.163	0.870	8	-0.078	0.938	3	-0.154	0.878	8	0.146	0.884	7
BIOMIX							-0.022	0.983	1						
CH_N1							-0.123	0.902	4						
LAT_SED							-0.153	0.879	6						
USLE_K							0.165	0.869	8						

注:表内模型 D 前的数字代表 DEM 的分辨率,L 前面的数字代表土地利用分辨率,单位均为 m。

3.4 DEM 和土地利用分辨率对水沙模拟效果的交互影响

利用不同分辨率的 DEM 和土地利用数据共构建了 100 个 SWAT 模型,经过参数校准后不同水文站点的径流或泥沙较优模拟效果(*NSE* 系数较高)的分

率组合如表 4 所示。在所有的模型中毛家河站径流和泥沙的 *NSE* 系数均大于 0.63,均能满足模拟精度要求。由表 4 可见,毛家河站径流模拟的 *NSE* 系数最佳为 0.80,此时 DEM 和土地利用分辨率分别为 2 000 和 150 m;泥沙模拟的 *NSE* 系数最佳为 0.81,此

时 DEM 和土地利用分辨率分别为 500 和 2 000 m。杨家坪站径流模拟的 NSE 系数最佳为 0.76, 此时 DEM 和土地利用分辨率分别为 30 和 90 m; 泥沙模拟的最佳 NSE 系数为 0.79, 此时 DEM 和土地利用分辨率分别为 30 和 2 000 m, 有 3 个 SWAT 模型径流或泥沙模拟的 NSE 系数小于 0.50, 不满足模拟要求。张家山站径流模拟的最佳 NSE 系数为 0.73, 此时 DEM 分辨率为 90 m、土地利用分辨率分别为 30、60、90 m; 泥沙模拟的 NSE 系数最佳为 0.66, 此时 DEM 和土地利用的分辨率均为 2 000 m, 该站共有 22 个 SWAT 模型泥沙模拟的 NSE 系数小于 0.50。与其他两个水文站点相比, 张家山站的模拟效果较差, 这是由于建模所用到的 4 个气象站多分布在西南部, 无法有效覆盖北部支流, 因而降低了北部支流的模拟精度, 影响了张家山站的模拟结果。

以张家山站为例, 径流和泥沙模拟的 NSE 系数

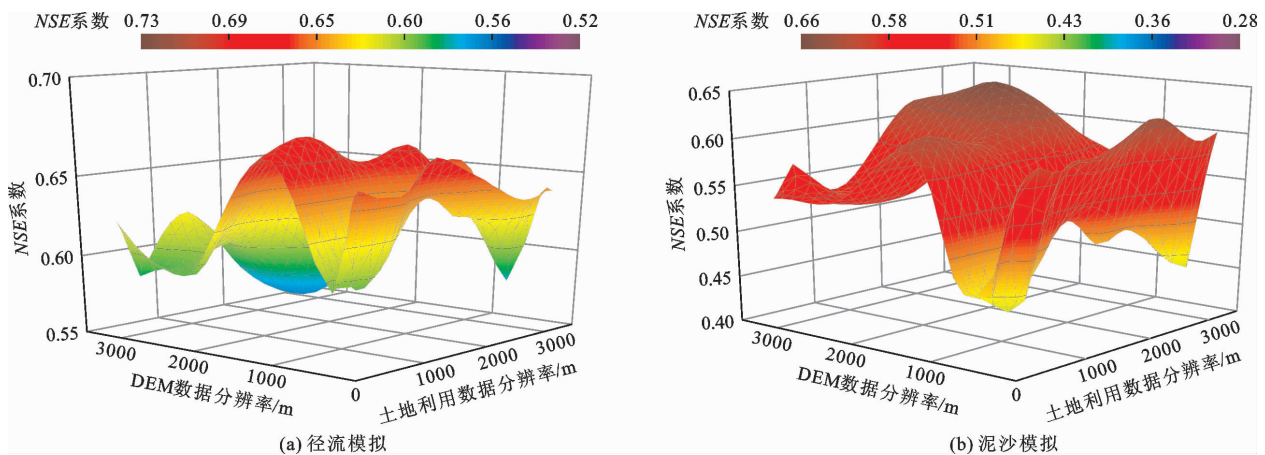


图6 径流和泥沙模拟的 NSE 系数与 DEM 及土地利用分辨率的交互影响关系(以张家山站为例)

3.5 模型综合优选评价

采用 TOPSIS 对泾河流域 3 个水文站模型模拟效果进行综合评价与方案优选。取径流和泥沙模拟的 NSE 和 R^2 共 4 个参数作为评价指标。对评价指标进行平方和归一化处理, 计算出正理想解距离、负理想解距离和相对贴近度 C , 据此对模型进行排序, 相对贴近度越大, 表明该模型的模拟效果越好, 3 个水文站点的相对贴近度计算结果如图 7 所示。

由图 7 可见, 张家山站模拟效果最好的 DEM 和土地利用分辨率分别为 150 和 3 000 m, 相对贴近度为 0.85 (径流模拟: $R^2 = 0.71$ 、 $NSE = 0.69$; 泥沙模拟: $R^2 = 0.64$ 、 $NSE = 0.62$), 模拟效果最差的 DEM 和土地利用分辨率分别为 300 和 30 m。采用 DEM 和土地利用均为 30 m 分辨率的数据构建的模型排序仅为 49, 这也进一步说明并非 DEM 和土地利用

与 DEM 及土地利用分辨率的交互影响关系如图 6 所示。通常模拟结果随着 DEM 和土地利用分辨率的降低而变差, 然而图 6 显示出径流和泥沙的模拟结果随着土地利用分辨率的变化并没有发生明显的改变, 而随着 DEM 的分辨率的降低呈现了“增大→降低→增大→降低”的不规则变化。

表4 泾河流域不同水文站点水沙模拟效果较优的分辨率组合

水文站	DEM 分辨率/m	土地利用分辨率/m	径流模拟		泥沙模拟	
			R^2	NSE	R^2	NSE
毛家河	2000	150	0.80	0.80	0.77	0.76
毛家河	500	2000	0.81	0.67	0.82	0.81
杨家坪	30	90	0.76	0.76	0.79	0.77
杨家坪	30	2000	0.67	0.67	0.80	0.79
张家山	90	30、60、90	0.74	0.73	0.57	0.55
张家山	2000	2000	0.66	0.57	0.69	0.66

的分辨率越高模型的模拟效果越好。毛家河站和杨家坪站模拟效果最优的 DEM 和土地利用分辨率组合分别为 750 和 300 m 以及 30 和 90 m, 相对贴近度分别为 0.86 (径流模拟: $R^2 = 0.81$ 、 $NSE = 0.78$; 泥沙模拟: $R^2 = 0.79$ 、 $NSE = 0.78$) 和 0.95 (径流模拟: $R^2 = 0.76$ 、 $NSE = 0.76$; 泥沙模拟: $R^2 = 0.79$ 、 $NSE = 0.77$)。

4 讨论

本研究表明, 随着 DEM 数据分辨率的降低, 水文边界的提取会产生偏差。这是由于 DEM 数据的分辨率会对地形参数的垂直精度产生影响^[21], 低分辨率的 DEM 数据会对高程信息产生概化作用^[13], 降低了提取数据的准确性, 导致流域边界的偏移及流域面积的缺失^[22]。另外, SWAT 模型中河道的提

取基于D8算法^[23],高程信息的偏差会对水流方向的计算产生较大影响。而且,DEM数据分辨率的降

低会造成黄土丘陵区及残塬区为主的泾河流域中部和北部地区^[24]地形细节损失,更容易产生伪河道。

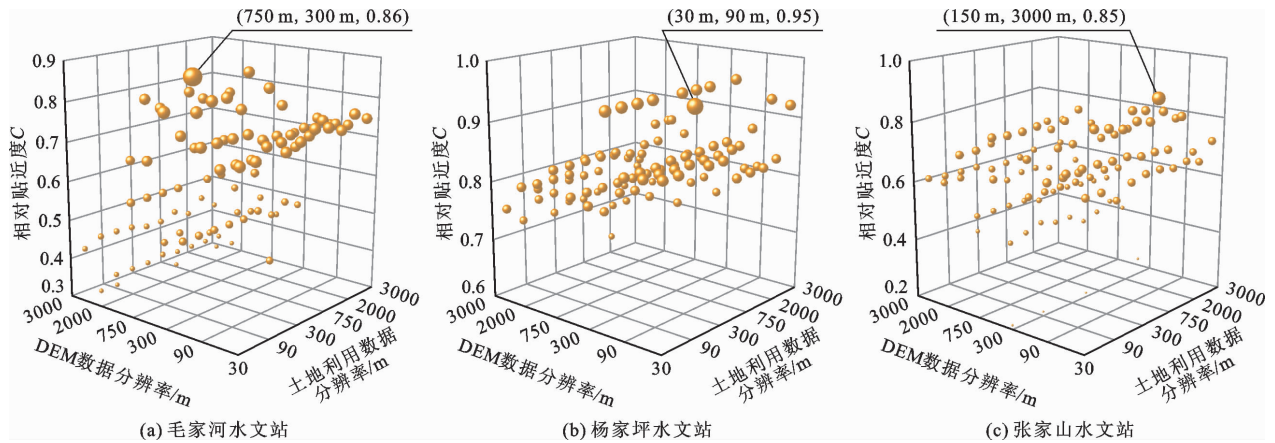


图7 基于TOPSIS理论的模型综合优选评价

在相同的土地利用、土壤类型及坡度划分阈值下,HRU的数量与流域栅格数、子流域数量和子流域中土地利用、土壤类型及坡度的分类数有关^[25]。本研究中,DEM分辨率对HRU数量的影响占主导作用,这是由三方面原因导致的。第一,整个流域的栅格数量是由DEM分辨率决定的,DEM的分辨率越高则栅格的数量越多,HRU划分的过程就会越精细。第二,DEM分辨率的降低会导致子流域数量减少,从而引起HRU数量的降低。第三,土地利用数据和土壤数据会被投影在DEM图形栅格上,DEM分辨率的降低还会导致土地利用、土壤以及坡度的分类丢失^[26],这也导致HRU数量受DEM分辨率的影响更大。此外,由于泾河流域的地形较为复杂,相较于地形特征的变化,相邻栅格数据之间的土地利用变化较为平滑,从而导致了土地利用分辨率的变化对HRU数量的影响远小于DEM。当DEM分辨率为30 m时,HRU的数量多达612个;当DEM分辨率为3000 m时,HRU的数量减少至154个,同比减少了74.8%。

DEM数据分辨率的降低会造成坡度信息的丢失,地形趋于平缓,汇流时间增加,从而导致了部分参数的敏感性发生变化。曼宁系数 OV_N 和水土保持措施因子 $USLE_P$ 的敏感性均与坡度相关,坡度越大则敏感性越强,而地表径流滞后系数 $SURLAG$ 会随汇流时间的增大而更加敏感^[27]。在DEM分辨率变化较小时,坡度和汇流时间变化幅度也较小,对参数的敏感性影响有限;当DEM分辨率变化较大时, OV_N 、 $USLE_P$ 以及 $SURLAG$ 等参数的敏感性降低。

土地利用分辨率对模型水沙模拟效果和模型参数的敏感性的影响要小于DEM分辨率。具体来说,土地利用分辨率的变化会影响土地利用的类型及空间分布,但对土地利用类型的面积变化影响有限,在由30 m分辨率DEM数据构建的所有模型中,土地利用数据分辨率由30 m降低至3000 m时,仅造成土地利用类型“牧草”的面积占比减少了1.57%以及土地利用类型“耕地”的面积占比增加了1.26%,其余土地类型的变化幅度均不超过0.2%。因此对整个流域的水沙模拟结果及参数的敏感性影响并不显著。然而,DEM的分辨率会影响模型水文参数的提取,导致水文循环及泥沙侵蚀的模拟过程产生变化,从而对水沙模拟效果产生较大的影响。另外,30 m分辨率的DEM数据并未构建出精度最高的模型。这是因为过于精细的DEM数据会生成更多数量的HRU,导致SWAT-CUP的运算量大幅度增加,不仅延长了模型运行时间,还有可能导致优化算法陷入局部最优解,无法计算出最佳参数^[28-29]。低分辨率数据构建的模型也可能具有良好的适用性,比如,在模型综合评价中,毛家河站与张家山站最优模型的DEM和土地利用分辨率组合为750和300 m以及150和3000 m,在水沙模拟的过程中均具有较好的适用性,这也与韩振宇等^[30]的研究结果一致。

本研究基于TOPSIS理论优选出泾河流域SWAT水沙模拟模型的DEM和土地利用分辨率组合,可为泾河流域的生态保护和水土治理提供技术参考。然而,由于各流域的下垫面情况不尽相同,该流域的建议输入数据不一定适用于其他流域,各流域可根据自身条件进行模型模拟评价,优选出不同分辨率输入数据的

最佳组合。此外,后续研究可以考虑数据源和土壤数据的分辨率对模拟效果的影响。

5 结 论

(1) DEM 分辨率的变化会影响水文边界与河网的提取,30 ~ 1 000 m 分辨率的 DEM 均能满足建模需求。当 DEM 分辨率低于 1 000 m 时,会产生伪河道和不连续的河网,河网边界也会发生凹陷。随着 DEM 的分辨率的降低,流域的计算面积累积减少了 12.27%,最大高程低估了 312 m,最小高程高估了 139 m。坡度受分辨率变化的影响更大,当分辨率低于 2 000 m 时,坡度信息几乎全部丢失。HRU 的数量会随着 DEM 分辨率的降低而明显减少,土地利用对 HRU 数量的影响较小。

(2) 泾河流域毛家河和杨家坪水文站的模拟效果优于张家山站,这与气象站的坐标以及流域面积有关,参数自身的不确定性会影响模型的模拟效果。因此,低分辨率的模型也可能具有较好的适用性。在所有的模型中,USLE_C、EPCO、ALPHA_BNK 以及 CN2 均为最敏感的参数,DEM 对参数敏感性的影响大于土地利用。

(3) 由于模型和参数的不确定性,DEM 和土地利用数据的分辨率对模型水沙模拟效果的影响并不明显。不同流域的最佳模型的 DEM 和土地利用分辨率组合不同,蒲河流域、泾河南支干流流域以及整个泾河流域的最佳模型 DEM 和土地利用分辨率组合分别是 750 和 300 m、30 和 90 m 以及 150 和 3 000 m。

参考文献:

- [1] 陆文,唐家良,章熙锋,等.山地流域水文模拟研究进展与展望[J].山地学报,2020,38(1):50-61.
- [2] YANG Zhifeng. Watershed ecology and its applications [J]. Engineering, 2018, 4(5): 581-583.
- [3] KUMAR M, SAHU A P, SAHOO N, et al. Global-scale application of the RUSLE model: a comprehensive review[J]. Hydrological Sciences Journal, 2022, 67(5): 806-830.
- [4] SRIVASTAVA A, BROOKS E S, DOBRE M, et al. Modeling forest management effects on water and sediment yield from nested, paired watersheds in the interior Pacific Northwest, USA using WEPP[J]. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134877.
- [5] 王晨洋,傅旭东,张生,等.黄土高原植被作用下黄河数字流域模型坡面侵蚀模块改进[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(12):1953-1963.
- [6] BHATTACHARYA R K, CHATTERJEE N D, DAS K. Sub-basin prioritization for assessment of soil erosion susceptibility in Kangsabati, a plateau basin: a comparison between MCDM and SWAT models[J]. Science of the Total Environment, 2020, 734: 139474.
- [7] FAN Jihui, GALOIE M, MOTAMEDI A, et al. Assessment of land cover resolution impact on flood modeling uncertainty [J]. Hydrology Research, 2021, 52(1): 78-90.
- [8] ZHANG Peipei, LIU Ruimin, BAO Yimeng, et al. Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed[J]. Water Research, 2014, 53: 132-144.
- [9] 郭伟玲,樊宇,杨勤科.基于不同分辨率 DEM 提取坡长的统计分布[J].水土保持研究,2019,26(3):72-76+85.
- [10] GAUTAM S, DAHAL V, BHATTARAI R. Impacts of DEM source, resolution and area threshold values on SWAT generated stream network and streamflow in two distinct Nepalese catchments[J]. Environmental Processes, 2019, 6: 597-617.
- [11] TAN M L, RAMLI H P, TAM T H. Effect of DEM resolution, source, resampling technique and area threshold on SWAT outputs [J]. Water Resources Management, 2018, 32: 4591-4606.
- [12] 蔡朵朵,马孝义,张丽. DEM 分辨率对葫芦河流域径流模拟的影响[J].人民黄河,2017,39(6):7-11.
- [13] 陈海涛,王晓燕,南哲,等.输入数据精度与准确性对 SWAT 模型模拟的影响[J].中国环境科学,2021,41(5):2151-2160.
- [14] JIN Xin, JIN Yanxiang, YUAN Donghai, et al. Effects of land-use data resolution on hydrologic modelling, a case study in the upper reach of the Heihe River, northwest China[J]. Ecological Modelling, 2019, 404: 61-68.
- [15] FISHER J R B, ACOSTA E A, DENNEDY - FRANK P J, et al. Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality [J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2018, 4(2): 137-149.
- [16] HARRAKI W E, OUAZAR D, BOUZIANE A, et al. Streamflow prediction upstream of a dam using SWAT and assessment of the impact of land use spatial resolution on model performance[J]. Environmental Processes, 2021, 8: 1165-1186.
- [17] ORTIZ - RODRIGUEZ A J, MUNOZ - ROBLES C, RODRIGUEZ - HERRERA J G, et al. Effect of DEM resolution on assessing hydrological connectivity in tropical and semi-arid basins of central Mexico [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612(Part A): 128104.
- [18] ZHANG Jinliang, SHANG Yizi, LIU Jinyong, et al. Cau-

- ses of variations in sediment yield in the Jinghe River Basin, China[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18045.
- [19] 荣易,秦成新,孙傅,等. SWAT模型在我国流域水环境模拟应用中的评估验证过程评价[J]. 环境科学研究,2020,33(11):2571-2580.
- [20] 缪子梅,李竞春,陈栋. 基于熵权TOPSIS模型评价涝渍条件下冬小麦水位管理方案[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(12):1306-1311.
- [21] CARRERA-HERNANDEZ J J. Not all DEMs are equal: an evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 261: 112474.
- [22] 姜婧婧,杜鹏飞. SWAT模型流域划分方法在平原灌区的改进及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019,59(10):866-872.
- [23] 高玉芳,陈耀登,蒋义芳,等. DEM数据源及分辨率对HEC-HMS水文模拟的影响[J]. 水科学进展,2015, 26(5):624-630.
- [24] 张耀文,张勃,姚荣鹏,等. 2000-2020年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. 中国沙漠,2022,42(2):223-233.
- [25] 蓝雪春,完颜晟,张真奇. SWAT模型在浙江小流域径流计算中的应用[J]. 人民珠江,2020,41(12):27-31+52.
- [26] SINGH A, JHA S K. Identification of sensitive parameters in daily and monthly hydrological simulations in small to large catchments in central India[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126632.
- [27] 张同,张承明,夏安全,等. 不同分辨率下SWAT模型在大汶河径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2017,35(8):27-30+44.
- [28] AL-KHAFAJI M, SAEED F H, AL-ANSARI N. The interactive impact of land cover and DEM resolution on the accuracy of computed streamflow using the SWAT model[J]. Water Air and Soil Pollution, 2020, 231: 416.
- [29] KHOI D N, THOM V T. Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam[J]. Global Ecology and Conservation, 2015, 4: 538-548.
- [30] 韩振宇,高学杰,徐影. 多区域模式集合的东亚陆地区域的平均和极端降水未来预估[J]. 地球物理学报, 2021,64(6):1869-1884.

(上接第69页)

- [39] 廖雯,胡砚霞,于兴修,等. 丹江口库区2010—2020年土壤保持功能时空特征及其影响因素[J]. 水土保持通报,2021,41(6):288-294+376.
- [40] 王慧勇,遆超普,王良杰,等. 基于SWAT模型的典型农业小流域氮污染时空分布特征及关键源解析[J]. 湖泊科学,2022,34(2):517-527.
- [41] 张展羽,司涵,孔莉莉. 基于SWAT模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. 农业工程学报,2013,29(2):93-100.
- [42] 李倩楠,张静,宫辉力. 基于SWAT模型多站点不确定性评价方法的比较[J]. 人民黄河,2017,39(1):24-29.
- [43] ZEIGER S J, OWEN M R, PAVLOWSKY R T. Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: a SWAT modeling application[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147295.

