

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.01.042

# 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟

陈昊荣, 金 生

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为建立可靠的水文水动力耦合模型, 首先探讨水文模型在汉江流域的适用效果。以汉江流域汉中水文站以上区域为研究范围, 以中国大气同化数据集(CMADS V1.0)为气象驱动, 建立分布式水文模型, 并以水文站实测日径流资料进行参数的率定及验证。结果表明: 模拟结果与实测值吻合较好, 日径流模拟在校准期(2010年—2013年)纳什效率系数和决定系数达到了0.77和0.78, 在验证期(2014年—2017年)纳什效率系数和决定系数分别为0.74和0.75, 表明 SWAT 模型在该地区有良好的适用性。

**关键词:** 径流模拟; SWAT 模型; CMADS; 参数率定

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)01—0245—06

## Runoff Simulation of Hanjiang River Basin Based on SWAT Model

CHEN Haorong, JIN Sheng

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** In order to establish a reliable hydrologic-hydrodynamic coupling model, the applicability of the model in the Hanjiang river basin was discussed first. The upper area of Hanzhong Hydrologic Station in Hanjiang River Basin was taken as the research area, the distributed hydrological model was established based on the China Meteorological Assimilation Driving Database for the SWAT model (CMADS1.0). And the parameters were calibrated and verified based on the measured daily runoff data of the hydrologic station. The results showed that the simulation results were in good agreement with the measured values. And the Nash - Suttcliffe efficiency coefficient and determination coefficient of daily runoff in the calibration period (2010—2013) reached 0.77 and 0.78. During the verification period (2014—2017), the Nash-Suttcliffe efficiency coefficient and the determination coefficient were 0.74 and 0.75 respectively, indicating that the SWAT model is applicable to this region.

**Keywords:** runoff simulation; SWAT model; CMADS; parameter calibration

SWAT (Soil And Aeseement Tool, SWAT) 模型是美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)研发的基于物理过程的流域尺度模型, 该模型应用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)分析流域内土壤类型和土地利用方式的空间分布, 从而反映了下垫面因素对流域水循环的影响<sup>[1]</sup>。SWAT 模型自开发以来, 已在国内外得到了广泛应用与验证, 如径流模拟、面源污染模拟、农业管理措施对水文水质的影响等。Srinivasan 等<sup>[2]</sup>运用 SWAT 模型分别对美国部分流域进行的径流模拟, 表明模型更适合模拟长期径流。Ganga 等<sup>[3]</sup>在亚洲东北部应用 SWAT 模型对月径流

和日径流进行模拟, 取得了良好的模拟精度。Vilay-sane 等<sup>[4]</sup>将 SWAT 模型应用于老挝南部 Xedone 流域的径流模拟, 结果表明其在该地区适用性良好。张雪松等<sup>[5]</sup>对黄河下游小浪底至花园口区间进行模拟, 选用实测月径流和泥沙数据对模型参数进行校准, 得到了较好的结果。李慧等<sup>[6]</sup>应用该模型对天山中段玛纳斯河流域进行日径流模拟, 结果表明 SWAT 模型在以雪冰融水为主要补给的流域模拟效果良好。骆月珍等<sup>[7]</sup>在 CMADS 气象数据的驱动下, 运用 SWAT 模型对富春江水库控制流域进行了水量平衡模拟, 其结果表明, SWAT 模型对富春江

库控制流域的径流模拟具有良好的效果。杨霞<sup>[8]</sup>应用 SWAT 模型对新疆乌伦古河流域进行径流模拟,也得到了良好的结果。

中国大气同化数据集(China Meteorological Assimilation Driving Database for the SWAT Model, CMADS)适用性已经在我国许多流域得到了验证<sup>[9-13]</sup>。本文选取汉江流域汉中水文站上游区域为研究区,采用 CMADS 气象数据驱动 SWAT 模型,并进行参数率定和验证,评价 SWAT 模型在该流域的适用性,以期为后续与水动力学模型的耦合提供有力支撑。

## 1 研究区概况

本文以汉江流域汉中水文站以上流域范围为研究区域。汉江是长江最大的支流,汉江流域面积 15.9 万 km<sup>2</sup>,流经湖北、陕西、河南等多个省市。汉江流域为亚热带季风气候,气候湿润,温和多雨,水资源丰富;但降雨年内分配不均,5 月至 10 月的径流量占全年径流量的 3/4 左右,年际变化较大。本研究区域包括漾家河、玉带河、沮水以及濂水河在内的上游流域范围,河流两岸峡谷与盆地交替出现,河床多为卵石、砾石与基岩组成,河道比降较大,是洪水灾害频发的地区。

## 2 数据预处理

### 2.1 数字高程处理

借助地理空间数据云平台获取本研究区域的数字高程(DEM)数据,空间分辨率为 30 m,参考坐标系为 CGS\_WGS\_1984。由于 ArcSWAT 模拟时需要数据投影,因此根据高斯克吕格 3 度带投影方式,将数字高程的投影坐标系设置为 Beijing\_1954\_3\_Degree\_GK\_CM\_108E。图 1 为研究区域的数字高程图。

### 2.2 土壤数据处理

建立土壤数据库是 SWAT 建模前处理中的关键步骤,土壤数据的质量对模拟计算结果有重要的影响。SWAT 模型采用 USDA 简化的美国标准作为土壤粒径级配标准,目前世界土壤数据库也采用了 USDA 标准,因此可直接用来构建 SWAT 模型中的土壤数据库。研究区土壤类型采用分辨率为 1 km 的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)中中国区的数据,该数据可以提供模型建立所需的土壤参数<sup>[14]</sup>,如不同土壤类型中各粒径的含量,有机碳含量等。而土壤湿密度(SOL\_BD)、土壤层有效持水量(SOL\_AWC)及饱和导水率

(SOL\_K)可通过土壤水特性软件(SPAW)计算得到。土壤类型分布见图 2,表 1 为各土壤类型所占面积比例。

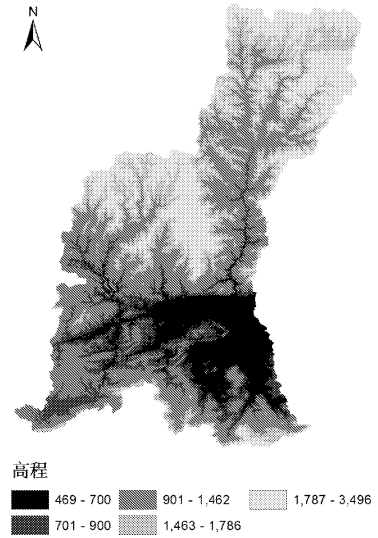


图 1 研究区域数字高程图

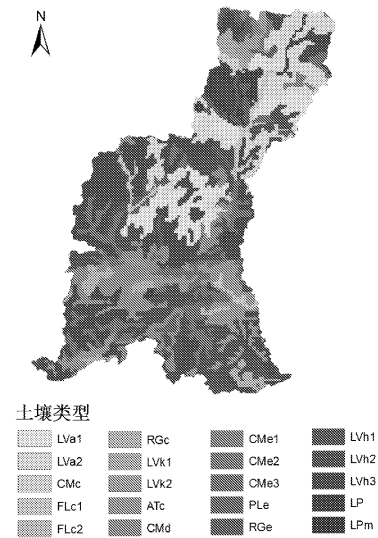


图 2 土壤类型分布图

### 2.3 土地利用数据处理

本文选用的土地利用数据为空间分辨率为 1 km 的 GLC2000,此数据为 2000 年全球土地覆盖数据集,由欧盟联系研究中心空间技术研究所与全球 30 多个国家和地区联合开发<sup>[15]</sup>。GLC2000 数据集中文土地利用类型包括落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿针叶林、灌木、河流、城市、农田、荒漠等 24 种,从中截取研究区域的数据,并按照 SWAT 标准进行重新分类。重分类后的土地利用图见图 3,各类型所占面积比例见表 2。

表 1 土壤类型及面积比例

土壤符号	土壤名称	所占比例/%	土壤符号	土壤名称	所占比例/%
LVa1	Albic Luvisols1	8.54	CMe1	Eutric Cambisols1	0.81
LVa2	Albic Luvisols2	10.43	CMe2	Eutric Cambisols2	0.28
CMe	Calcaric Cambisols	0.55	CMe3	Eutric Cambisols3	9.13
FLc1	Calcaric Fluvisols1	2.31	PLe	Eutric Planosols	0.41
FLc2	Calcaric Fluvisols2	0.23	RGe	Eutric Regosols	3.79
RGc	Calcaric Regosols	2.27	LVh1	Haplic Luvisols1	2.10
LVk1	Calcic Luvisols1	0.85	LVh2	Haplic Luvisols2	12.47
LVk2	Calcic Luvisols2	1.08	LVh3	Haplic Luvisols3	25.78
ATc	Cumulic Anthrosols	7.44	LP	LEPTOSOLS	3.41
CMd	Dystric Cambisols	8.09	LPm	Mollic Leptosols	0.06

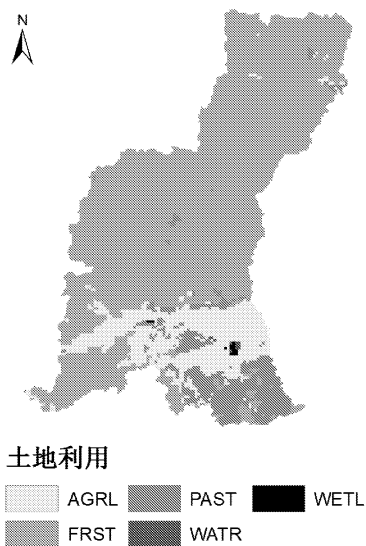


图 3 土地利用分布图

表 2 土地利用类型及面积比例

GLC 类型	重分类	SWAT 代码	所占比例/%
常绿阔叶林			
阔叶落叶林	林地	FRST	76.32
灌木			
高山和亚高山草甸	草地	PAST	8.82
斜坡草地			
河流	水域	WATR	0.12
湖泊			
沼泽	湿地	WETL	0.15
耕地	耕地	AGRL	14.58

2.4 气象数据处理

本文采用中国大气同化数据集 CMADS V1.0, 空间覆盖整个东亚(0°N - 65°N, 60°E - 160°E)空间分辨率为 1/3°, 时间序列为 2008 年至 2017 年, 包含了日最高最低气温、日 24 h 累计降水量、日平均风

速、日平均相对湿度和日平均太阳辐射数据。本文提取了数据集中的 36 个站点, 作为模型的气象输入数据, 站点分布如图 4 所示。

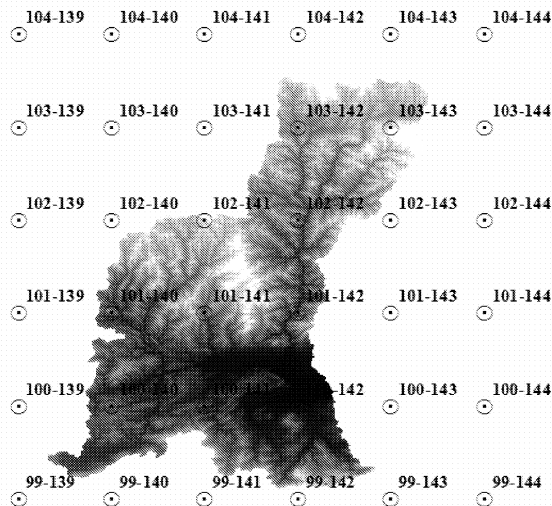


图 4 CMADS 气象站点分布

3 模型构建与结果分析

3.1 模型构建

SWAT 模型构建时, 选取 25 000 hm<sup>2</sup> 为集水区划分的阈值, 生成 21 个子流域<sup>[16]</sup>。汉中水文站所在的第 17 个子流域为整个流域的出口(见图 5)。为避免生成过多的水文响应单元, 影响计算效率, 故按照土地利用阈值 5%, 土壤类型阈值 5%, 坡度阈值 10% 划分水文响应单元, 模型共生成 358 个水文响应单元。选取具有实测日径流数据的汉水文站为率定和验证的站点, 选取 2008 年—2009 年为预热期, 2010 年—2013 年为率定期, 2014 年—2017 年为验证期, 采用 SCS 径流曲线法计算流域径流量<sup>[17]</sup>。

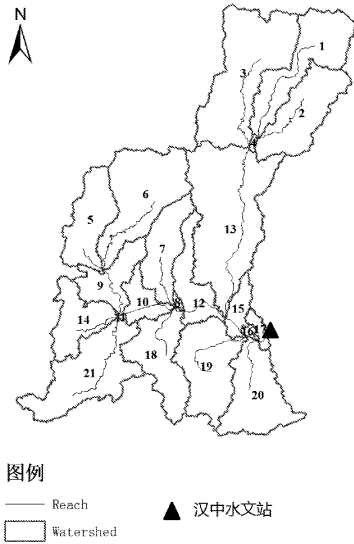


图 5 子流域分布图

### 3.2 模型参数率定

SWAT 模型参数众多,而不同参数对模拟结果的准确度有着不同程度的影响,相同参数的不同取值也会对模拟结果产生很大影响。因此,有必要对模型进行参数的敏感性分析,并对重要参数的取值进行率定。本文选用 SWAT - CUP<sup>[18]</sup> 中的最大似然法 (GLUE, Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 进行参数的敏感性分析、率定和验证<sup>[19-22]</sup>。该方法从模型中随机抽取多组参数,分别计算各组参数下的模拟结果,筛选得出最优参数组见表 4。

表 4 参数取值

参数	参数含义	最优值
r_CN2. mgt	SCS 径流曲线系数	-0.15
v_ALPHA_BF. gw	基流系数	0.66
v_GW_DELAY. gw	地下水延迟系数	423.14
v_GWQMN. gw	浅水层补给深	0.25
v_GW_REVAP. gw	地下水蒸发系数	0.08
v_ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	0.97
v_CH_N2. rte	河道曼宁系数	0.17
v_CH_K2. rte	河道水力传导度	36.18
v_ALPHA_BNK. rte	河岸调蓄量的基流系数	0.68
r_SOL_AWC(1). sol	土壤有效含水量	0.17
r_SOL_K(1). sol	土壤饱和水力传导度	-0.31
r_SOL_BD(1). sol	土壤密度	0.44
v_SFTMP. bsn	降雪温度	0.38

### 3.3 模型评价指标

本文选取纳什效率系数 (Nash - Sutcliff,  $E_{ns}$ ) 以及决定系数 ( $R^2$ ) 为评价指标<sup>[23]</sup>,其表达式如下:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

式中:  $Q_{m,i}$  为第  $i$  个实测流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{s,i}$  为第  $i$  个模拟流量,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_m$  为实测平均流量,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_s$  为模拟平均流量,  $m^3/s$ ;  $n$  为数据的个数。

纳什效率系数变化范围为  $(-\infty, 1)$ , 其值越接近于 1, 表明模拟效果越好; 决定系数越接近于 1, 表明模拟值与实测值越接近, 两者相关性越高<sup>[24]</sup>。具体评定标准见表 5。

表 5 评定标准

方案有效性	甲等	乙等	丙等
$E_{ns}$	>0.9	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.69

### 3.4 日径流模拟验证

本文以率定期 (2010 年—2013 年) 得到的参数值为基础, 选取了 2014 年—2017 年的日径流数据作为验证资料, 对率定期的最优参数组进行验证。由表 6 可知, 率定期的纳什效率系数和决定系数达到了 0.77 和 0.78, 验证期分别为 0.74 和 0.75。按照表 5 的评定标准可知, 模拟效果达到乙等标准。图 6 和图 7 分别是率定期和验证期日径流量模拟值与实测值的对比图, 可见其变化过程基本一致。整体而言, 模型对于日径流变化过程的模拟达到了较好效果。

表 6 校准期与验证期逐日径流模拟评价指标

时段	$E_{ns}$	$R^2$
率定期 (2010 年—2013 年)	0.77	0.78
验证期 (2014 年—2017 年)	0.74	0.75

## 4 结 论

本文以 GLC2000 土地利用数据和 HWSD 土壤数据为基础, 以 CMADS V1.0 气象数据为驱动将 SWAT 模型运用于汉江汉中以上流域的径流模拟, 并用实测数据对模型参数进行了率定和验证。结果表明, 模型在校准期纳什效率系数和相关系数分别为 0.77/0.78, 验证期纳什效率系数和相关系数为 0.74/0.75, 率定期和验证期都达到乙等水平, 说明

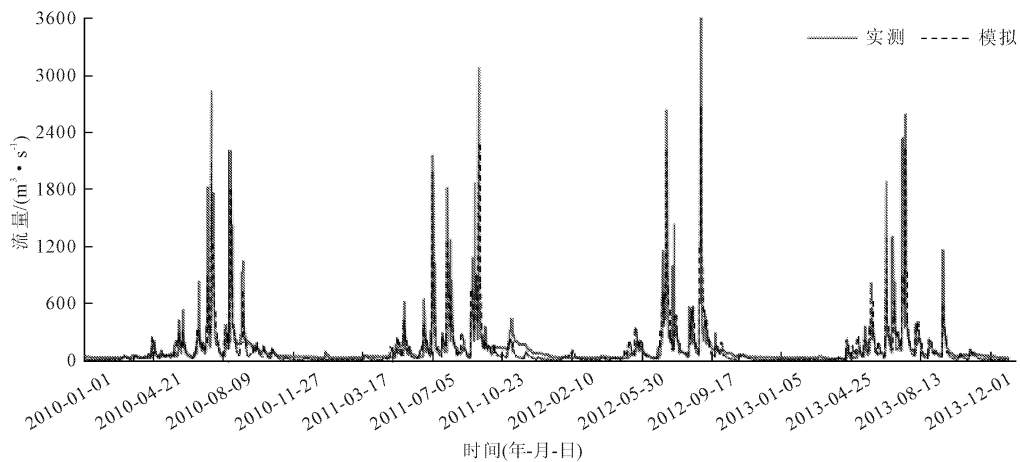


图 6 2010 年—2013 年日径流率定结果

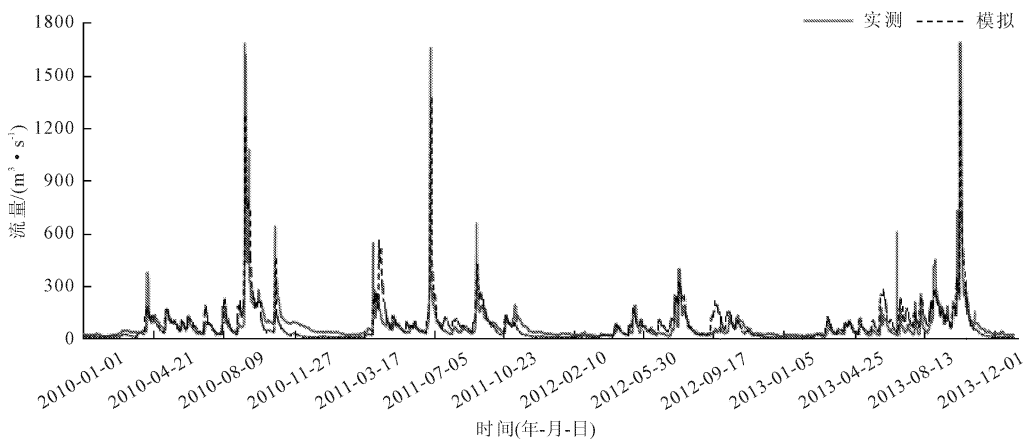


图 7 2014 年—2017 年日径流量验证结果

SWAT 模型能够较为准确地反映研究区域的水文过程,为后续与水动力模型的耦合提供了有力支撑。

由于本次模型建立采用的土地利用数据和土壤数据测量时间较早,土地利用类型等数据可能会发生一定变化,因此会对径流产生一定的影响,导致洪峰流量的模拟结果与实测值有所差距;且由于资料有限,模型未考虑位于褒河中游的石门水库调度所带来的影响,如果能够获取更为准确且详细的数据,整个模型模拟的准确度将进一步提高。

#### 参考文献:

[1] Arnold J G, Srinivasan R, Mutiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, part - model development [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1):73-79.

[2] Srinivasan R, Arnold J G, Jones C A. Hydrologic modeling of the United States with the soil and water assessment tool [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 1998, 4(3):315-325.

[3] Ganga Ram Maharjan, Youn Shik Park, Nam Won Kim, et al. Evaluation of SWAT sub-daily runoff estimation at small agricultural watershed in Korea [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, 7(1):109-119.

[4] Vilaysane B, Takara K, Luo P, et al. Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 28:380-390.

[5] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等.基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4):38-42.

[6] 李慧,雷晓云,包安明,等.基于 SWAT 模型的山区日径流模拟在玛纳斯河流域的应用[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(5):686-689.

[7] 骆月珍,顾婷婷,潘娅英,等.基于 CMADS 驱动 SWAT 模型的富春江水库控制流域水量平衡模拟[J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(4):106-110.

[8] 杨霞.基于 SWAT 的乌伦古河流域径流模拟研究

- [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(1): 121-125.
- [9] SWAT 模型中国大气同化驱动数据集 (CMADS V1.0) [Z]. 兰州: 寒区旱区科学数据中心, 2019.
- [10] 孟现勇, 王浩, 雷晓辉, 等. 基于 CMADS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析 [J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7115-7126.
- [11] Meng X Y, Wang H, Lei X H, et al. Hydrological modeling in the Manas River Basin using soil and water assessment tool driven by CMADS [J]. Tehnicki Vjesnik Technical Gazette, 2017, 24(2): 525-534.
- [12] 张春辉, 王炳亮. CMADS 与传统气象站数据驱动下的 SWAT 模型模拟效果评价——以苦水河流域为例 [J]. 中国农村水利水电, 2018(6): 52-56.
- [13] 张利敏, 王浩, 孟现勇. 基于 CMADS 驱动的 SWAT 模型在辽宁浑河流域的应用研究 [J]. 华北水利水电大学学报, 2017, 38(5): 1-9.
- [14] Nachtergaele F, Velthuisen H V, Verelst L, et al. Harmonized world soil database [M]. Rome: FAO, 2012.
- [15] 冉友华, 李新, 卢玲. 中国地区土地覆盖综合数据集 [DS]. 兰州: 寒区旱区科学数据中心, 2010.
- [16] 吴辉, 严志雁, 汪镇达. 基于 DEM 的自动河网提取方法——以江西省黎川县为例 [J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4): 27-30.
- [17] 王英, 黄明斌. 径流曲线法模型参数在黄土地区的优化研究 [J]. 水土保持通报, 2008(1): 54-58.
- [18] Abbaspour K C, Vejdani M, Hagha S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT [C]//Oxley L, Kulasiri D. Congress on modeling and simulation (MODSIM 07). Melbourne, Australia: Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2007: 1603-1609.
- [19] 张丽, 柳焯, 蔡朵朵, 等. SWAT 模型参数自动校准方法对比及适用性研究——以泾河中上游地区为例 [J]. 中国农村水利水电, 2016, (11): 76-81.
- [20] 宋晓猛, 张建业, 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): 105-110.
- [21] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用 [J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 8-13.
- [22] 李慧, 靳晟, 雷晓云, 等. SWAT 模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究——以玛纳斯河径流模拟为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 79-82.
- [23] Krause P, Boyle D P, Base F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences, 2005(5): 89-97.
- [24] 水文情报预报规范: SL 250—2000 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

(上接第 233 页)

- [6] 邵军, 司小东. 大跨度浅埋暗挖车站施工三维数值模拟研究 [J]. 住宅与房地产, 2017(21): 200-201.
- [7] 虞杨, 李洋溢, 吴秋军, 等. 某浅埋暗挖地铁车站施工沉降控制研究 [J]. 西部交通科技, 2017(4): 100-103.
- [8] 赵骏, 钱鑫, 洪亮. 浅埋暗挖地铁车站施工方案对比数值模拟研究 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018, 262(16): 187-188.
- [9] 陈峰. 盾构法与浅埋暗挖法结合修建地铁车站施工过程动态数值分析——以北京地铁 4 号线为例 [J]. 隧道建设, 2015, 35(4): 335-341.
- [10] 代维达. 北京地铁 6 号线浅埋暗挖法车站施工地表沉降规律研究 [J]. 铁道建筑, 2014(4): 63-67.
- [11] 骆建军, 张顶立, 王梦恕, 等. 浅埋暗挖车站施工地表沉降实测分析 [J]. 铁道建筑技术, 2006(3): 1-4.
- [12] 王春国. 浅埋暗挖隧道上穿既有地铁隧道施工过程力学研究 [J]. 工程技术研究, 2019(22): 19-21.
- [13] 何桥, 叶明亮, 田凯, 等. 浅埋暗挖隧道施工过程数值模拟分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 36-41.
- [14] 尚淑萍, 胡玉娇, 徐彦妮, 等. 基于既有线平顺性浅埋暗挖隧道地面沉降控制标准 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 95-99, 176.
- [15] 王正松. 徐州轨道交通 1 号线暗挖车站适应性研究 [J]. 铁道建筑, 2014(8): 31-34.