

DOI: 10.5846/stxb202108092181

董力轩, 常顺利, 张毓涛. SWAT 模型在天山林区林冠截留过程中的改进应用. 生态学报, 2022, 42(18): 7630-7640.

Dong L X, Chang S L, Zhang Y T. Improvement and application of SWAT Model in canopy interception in Tianshan forest area. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7630-7640.

# SWAT 模型在天山林区林冠截留过程中的改进应用

董力轩<sup>1</sup>, 常顺利<sup>1,\*</sup>, 张毓涛<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 新疆大学资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

<sup>2</sup> 新疆林科院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063

**摘要:**林冠截留是森林生态水文的重要环节, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型对其模拟过程还较为粗糙, 为了在流域水文模拟中更精细的刻画林冠截留过程从而得到更佳的模拟结果, 以 SWAT 模型为基础, 使用半理论林冠截留模型 (Gash 模型) 与 SWAT 模型进行耦合, 以天山林区为研究区对 SWAT 模型林冠截留模块进行优化改进。通过对改进前后的模拟结果进行对比分析, 结果表明: 1) SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型的  $R^2$  分别为 0.59—0.83 和 0.65—0.86, NSE 值分别为 0.58—0.82 和 0.63—0.85, 两种模型 PBIAS 为 7.2%—17.1%, 证明 SWAT-Gash 模型具有更好的适用性; 2) 相较于出山口径流数据, SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型的 RMSD 值分别为 3.49—7.80  $\text{m}^3/\text{s}$  和 3.22—4.68  $\text{m}^3/\text{s}$ , SWAT-Gash 模型在校准期和验证期的皮尔逊相关系数分别为 0.93 和 0.81, 高于 SWAT 模型的 0.91 和 0.77; 3) 基于分位数回归 (QR) 的不确定性分析表明, SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型验证期的 P 因子分别为 0.93 和 0.96, R 因子为 1.26 和 1.19, 95% 不确定性置信区间平均宽度分别为 13.50  $\text{m}^3/\text{s}$  和 12.86  $\text{m}^3/\text{s}$ ; 4) SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型在验证期的月平均地表径流量分别为 6.55  $\text{m}^3/\text{s}$  和 8.50  $\text{m}^3/\text{s}$ , 表明在该流域内原始 SWAT 模型会高估林冠截留量。以天山北坡中段林区为例对云杉森林的林冠截留进行精细化模拟, 虽然对模型输入数据要求提高, 林冠截留数据的收集增加了模型模拟的不确定性, 但对本研究区基于物理过程的水文模拟精度提升明显, 改进后模型与出山口实测径流数据一致性更强, 可以为天山林区小流域水资源管理提供更可靠的依据。

**关键词:** Gash 模型; 林冠截留; SWAT 模型; 径流模拟; 云杉森林

## Improvement and application of SWAT Model in canopy interception in Tianshan forest area

DONG Lixuan<sup>1</sup>, CHANG Shunli<sup>1,\*</sup>, ZHANG Yutao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Oasis Ecology under the Ministry of Education, Collage of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

<sup>2</sup> Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China

**Abstract:** Canopy interception is an important part of forest ecological hydrology. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is relatively rough in its simulation process. In order to describe the canopy interception process more precisely in the hydrological simulation of the watershed, a semi-theoretical canopy interception model (Gash model) is used to couple with the SWAT model, and the forest canopy interception module of the SWAT model is optimized and improved with the Tianshan forest area as the research area. Through comparative analysis of the simulation results before and after the improvement, the results show that: 1) the coefficient of determination ( $R^2$ ) of the SWAT model and the SWAT-Gash model are 0.59—0.83 and 0.65—0.86, respectively. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) values are 0.58—0.82 and 0.63—0.85, respectively. The percent bias (PBIAS) of the two models is 7.2%—17.1%. These results reveal the improved

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1503187)

收稿日期: 2021-08-09; 采用日期: 2021-12-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecocsl@163.com

performance of the proposed SWAT-Gash approach over the existing approach for catchment-scale streamflow estimation; 2) Compared with the outfall runoff data, the root-mean-square difference (RMSD) values of the SWAT model and the SWAT-Gash model are 3.49—7.80 m<sup>3</sup>/s and 3.22—4.68 m<sup>3</sup>/s. Pearson correlation coefficients of the SWAT-Gash model during the calibration period and the verification period are 0.93 and 0.81, respectively, which are higher than the SWAT model's 0.91 and 0.77; 3) Uncertainty analysis based on quantile regression (QR) shows that the P factors of SWAT model and SWAT-Gash model verification period are 0.93 and 0.96, R factors are 1.26 and 1.19, and the average width of 95% uncertainty confidence interval is 13.50 m<sup>3</sup>/s and 12.86 m<sup>3</sup>/s, respectively; 4) The monthly average surface runoff of the SWAT model and the SWAT-Gash model during the verification period are 6.55 m<sup>3</sup>/s and 8.50 m<sup>3</sup>/s, respectively, indicating that the original SWAT model would overestimate the canopy interception in this watershed. This paper takes the forest area in the middle section of the northern slope of Tianshan Mountain as an example to simulate the canopy interception of spruce forest. Although the requirements for model input data are increased and the collection of canopy interception data increases the uncertainty of model simulation, the accuracy of hydrological simulation based on physical processes in this study area is improved significantly, and the improved model is more consistent with the measured runoff data at the mountain pass. It can provide a more reliable basis for water resources management in small watersheds in Tianshan forest area.

**Key Words:** Gash model; canopy interception; SWAT model; runoff simulation; spruce forest

在森林生态系统中,降水量被分为林冠截留量、穿透降雨量和树干茎流量三部分,其中林冠截留量在该系统的水文循环和水量平衡中占有重要地位,约占降水量的 20%—40%<sup>[1-3]</sup>。因此,在应用 SWAT 模型<sup>[4-5]</sup>模拟森林生态水文过程时,林冠截留对地表径流的影响不可忽视。

对林冠截留水文过程的模型化主要可以分为三类,即经验模型、半理论模型和理论模型<sup>[6-8]</sup>。虽然经验模型可以根据实测数据运用统计学方法直接推求林冠截留量和降雨量之间线性或非线性关系,但不能刻画水文物理过程。因运算繁琐,不易求解,如结合光线与林冠分配降雨规律形成的理论模型在实例中运行困难<sup>[6]</sup>。以 Gash 模型为代表的半理论模型相较于前两者工作量小,参数易确定且运算求解方便,显现了一定的优势<sup>[9]</sup>。Gash 模型的适用性较强,能够广泛使用在不同气候类型或林分类型的研究中,如海洋性气候森林<sup>[9]</sup>,热带与亚热带森林<sup>[10]</sup>、干旱半干旱区灌木林<sup>[11]</sup>、地中海气候森林等<sup>[12]</sup>。在国内,Gash 模型应用在大兴安岭地区落叶松林<sup>[13]</sup>、热带季雨林<sup>[14]</sup>、华北油松人工林<sup>[15]</sup>、贡嘎山暗针叶林<sup>[16]</sup>和黄土区人工刺槐林<sup>[17]</sup>等区域并获得了比较合理的模拟效果。SWAT 模型与 Gash 模型在计算平均蒸发速率时都选择了 Penman-Monteith 公式,这为两种模型的耦合提供了便利条件<sup>[4,9]</sup>。因此,将林冠截留的物理过程引入 SWAT 模型的流域模拟中意义重大。

本文以天山北坡中段雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林为研究对象,结合气象观测、林下穿透雨实测数据和野外调查获得模型所需参数进行建模。考虑到研究区潜在蒸发远远大于实际蒸发<sup>[18]</sup>,林冠截留作用明显,符合 Gash 模型对每次降雨事件发生时初始条件的要求,进行基于物理过程的林冠截留模拟可以提高模型精度,为水资源管理提供更可靠的依据。

## 1 研究区概况

研究区位于乌鲁木齐县境内的乌鲁木齐河流域(86°45′—87°56′E, 43°00′—44°07′N),山区流域面积 1070 km<sup>2</sup>,属于中型流域,见图 1。河源位于天山乌鲁木齐河源 1 号冰川,自南流向东北,出山口位于英雄桥。根据世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD),土壤类型有筒育灰色土、钙积黑钙土、粘化栗钙土、筒育栗钙土、粘化钙积土、永冻薄层土、松软薄层土和冰川。研究区属于温带大陆性气候<sup>[18]</sup>,春秋短暂,夏季昼夜温差大,冬季漫长且多雪。日照时间长且日照辐射大,年平均气温为 2—3℃,极端最高气温 30℃

(7月),极端最低气温 $-38^{\circ}\text{C}$ (1月)。降水量少,年降水量400—600 mm,年内降水多集中在6—8月;蒸发量大,年蒸发量980—1150 mm<sup>[19]</sup>;年均相对湿度64%—66%;干燥度1.2—1.6。该区域植被类型是以雪岭云杉纯林为主的温带针叶林,占流域面积的10%左右,研究区内云杉分布广泛且林冠截留作用明显,流域特征符合研究需求,见图1。

## 2 研究方法

### 2.1 模型的输入数据

#### 2.1.1 气象数据

选择研究流域范围内的大西沟、英雄桥和小渠子三站1993—2012的日降水、日最高温、日最低温、平均风速等气象数据构建天气发生器,整理后输入气象数据库。

#### 2.1.2 数字高程数据

由地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/> 下载研究区 DEM 数字高程数据,选择30 m 分辨率数字高程数据并且转为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_45N 地理投影(图1)。

#### 2.1.3 土地利用数据

选择对地物分类更好的哨兵数据,经最大似然分类法得到精度为10 m 的土地利用数据(图1)。

#### 2.1.4 土壤数据

本研究采用世界土壤数据库,裁剪出研究区,根据SAWT内置土壤类型进行重分类和重采样处理以满足模型的精度要求,使用SPAW软件计算建模所需参数建立土壤数据库。

#### 2.1.5 林冠截留观测区布设

依托天山森林生态系统定位站于2010年7—8月设立林冠截留观测区(东经 $87^{\circ}27'$ ,北纬 $43^{\circ}25'$ )。该观测区内主要植被为雪岭云杉,无灌木分布。在林间空地布设自记数字雨量仪测定总降水量和降雨强度,在林下设置接雨篷链接集水桶收集穿透雨量后换算为降雨量深度(mm),具体数据见表1。

表1 林冠层对降雨的分配

Table 1 Distribution of rainfall in forest canopy layer

时间 Date	降雨量 Precipitation/mm	穿透雨 Throughfall/mm	截留量 Interception/mm	时间 Date	降雨量 Precipitation/mm	穿透雨 Throughfall/mm	截留量 Interception/mm
7.17	3.44	0.14	3.30	8.2	9.6	1.63	7.97
7.20	7.26	2.06	5.20	8.12	15.39	4.81	10.58
7.24	24.49	6.91	17.58	总量 Total	66.99	17.14	49.85
7.28	6.81	1.59	5.22				

### 2.2 SWAT 林冠截留模型

当使用SCS曲线法计算地表径流时,不会对林冠截留进行具体物理过程的模拟,估计为产流前地表蓄水量和入渗量的20%。当使用Green & Ampt入渗方程计算地表径流和入渗时,必须额外计算林冠截留量<sup>[20]</sup>。SWAT允许林冠截留的最大水量每天在变化,该方法根据叶面积指数函数来计算其值。公式如下:

$$\text{can}_{\text{day}} = \text{can}_{\text{mx}} \times \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}_{\text{mx}}} \quad (1)$$

式中, $\text{can}_{\text{day}}$ 为当日林冠截留的最大水量(mm), $\text{can}_{\text{mx}}$ 为树冠充分发育时的林冠截留量(mm),该参数需要使用者手动输入。LAI为该植被当日的叶面积指数, $\text{LAI}_{\text{mx}}$ 为该植被的最大叶面积指数。

在SWAT模型中,得到给定日的降雨数据,模型会通过降雨量的大小来判断是否会有穿透雨形成。公式如下:

当  $R'_{\text{day}} \leq \text{can}_{\text{day}} - R_{\text{INT}(i)}$  时:

$$R_{\text{INT}(j)} = R_{\text{INT}(i)} + R'_{\text{day}} \text{ and } R_{\text{day}} = 0 \quad (2)$$

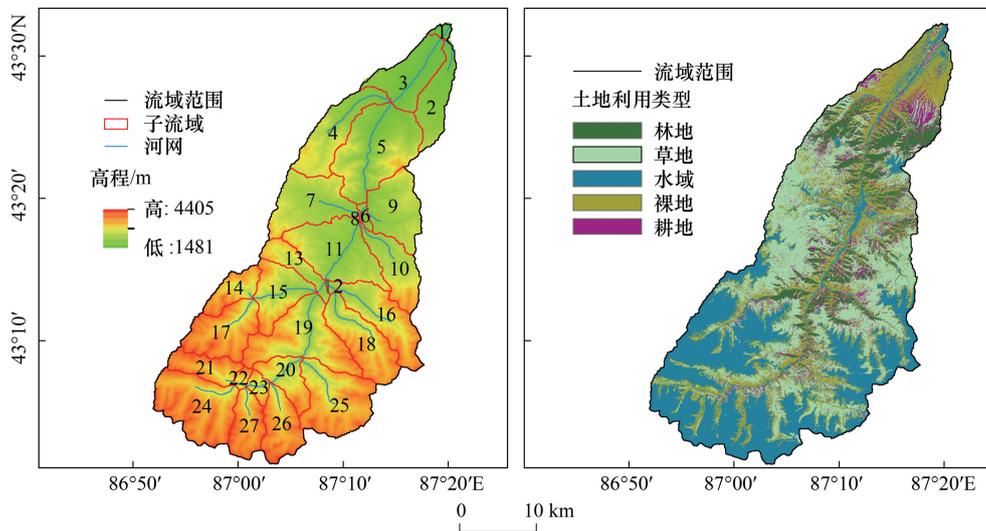


图 1 乌鲁木齐河流域示意图

Fig.1 Sketch map of Urumqi River basin

当  $R'_{day} > can_{day} - R_{INT(i)}$  时:

$$R_{INT(j)} = can_{day} \text{ and } R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{INT(i)}) \quad (3)$$

式中,  $R_{INT(i)}$  为初始林冠蓄水量 (mm),  $R_{INT(j)}$  为最终林冠蓄水量 (mm),  $R'_{day}$  为当日单次降雨事件降雨量 (mm),  $R_{day}$  为穿透雨量 (mm)。

### 2.3 Gash 模型

Gash 模型描述的是一系列彼此分离的降雨事件,每个降雨事件都包含林冠加湿、林冠饱和、以及降雨停止后林冠干燥的过程,且假定每次降雨事件之间有足够的让林冠完全恢复到降雨前的干燥程度<sup>[9, 21]</sup>。模型将整个林冠在降雨过程中各个阶段的截留损失相加得到总的林冠截留量。因为 SWAT 模型对于林冠截留的计算采用了单次降雨事件单独计算的模式,并且根据降雨量的大小分为林冠截留量未饱和与林冠截留量饱和两种情况,故将 Gash 模型拆解为分段函数以更好的与 SWAT 模型拟合。单一降雨事件发生时公式如下:

当林冠截留量未达到饱和时 ( $R'_{day} < P'_c$ ):

$$I = (1 - p - p_t) \cdot P'_c \quad (4)$$

当林冠截留量达到饱和时 ( $R'_{day} > P'_c$ ):

$$I = (1 - p - p_t)P'_c + \left(\frac{\bar{E}}{R}\right)(R'_{day} - P'_c) \quad (5)$$

式中,  $p$  为自由穿透雨系数;  $p_t$  为树干茎流系数;  $\bar{R}$  为平均降雨强度 (mm/h);  $\bar{E}$  为饱和林冠的平均蒸发速率 (mm/h);  $P'_c$  为使林冠达到饱和的降雨量 (mm)。

使林冠达到饱和的降雨量  $P'_c$  的计算公式如下:

$$P'_c = (-\bar{R}S/\bar{E}) \ln[1 - (\bar{E}/\bar{R})(1 - p - p_t)^{-1}] \quad (6)$$

式中,  $S$  为林冠枝叶持水能力 (mm)。

### 2.4 Gash 模型参数的确定

饱和林冠的平均蒸发速率  $\bar{E}$  (mm/h),可通过实测数据中降雨量  $R'_{day}$  与林冠截留量  $I$  之间的回归关系确定。Gash 模型假设在单次降雨事件期间平均蒸发速率  $\bar{E}$  (mm/h) 与平均降雨强度  $\bar{R}$  (mm/h) 的比值是恒定的<sup>[9]</sup>,因此可以通过回归关系的斜率来确定  $\bar{E}$ 。但该方法会高估饱和林冠蒸发速率,所以使用 SWAT 模型内

嵌 Penman-Monteith 公式输出结果作为饱和林冠的平均蒸发速率,最终确定  $\bar{E} = 0.15 \text{ mm/h}$ 。本研究区平均降雨强度为  $1.54 \text{ mm/h}$ 。

林冠枝叶持水能力  $S$  (mm),可以通过穿透雨量和降雨量  $R'_{\text{day}}$  的关系方程来确定<sup>[22]</sup>,  $x$  轴上的截距即为林冠枝叶持水能力  $S$ ,得出  $S = 2.29 \text{ mm}$ (图 2)。

自由穿透雨系数  $p$ ,为林内测得的平均可见天空率<sup>[23]</sup>,经过野外实地调查郁闭度后确定为 0.2。

树干茎流系数  $p_t$ ,可以根据树干茎流量与降雨量  $R'_{\text{day}}$  之间的关系方程来确定<sup>[12]</sup>,方程的斜率即为  $p_t$ ,结合前人研究结果表明天山中段山区树木树皮干裂,对树干茎流产生很大的吸收滞流作用,从而较少有树干茎流出现<sup>[24]</sup>,所以此处取值 0.01。根据上述各参数代入公式(6)计算研究区内主要树种雪岭云杉的  $P'_c$  为  $3.09 \text{ mm}$ 。

## 2.5 对 SWAT 模型子程序的修改

为了对林冠截留过程进行改进,本研究根据 SWAT 官网下载的 Arcswat 源代码 Rev.681 版本,使用 Inter Visual Fortran 对其进行编译和调试后形成可执行文件。SWAT 模型由 311 个子程序构成,其中每个子程序文件都会对单个或多个过程进行建模。需要修改的部分集中在模型的两个子程序文件中,在“modparm.f”子程序文件中添加使林冠达到饱和的降雨量  $P'_c$  为新的变量,将公式(4)—(6)在“conopyint.f”文件中进行编译,带入 Gash 模型所需要的参数来完成林冠截留物理过程的描述。各子程序文件编译完成后,主程序“main.f”读取所有输入数据并且调用链接的子程序文件从而进行后续的建模过程。全部子程序运行成功并且生成 64 位发布模式可执行文件,将此可执行文件改名“swatUser.exe”放入“TxtInOut”文件中等待调用即可。

## 2.6 模型校准和验证

模型的校准和验证均在英雄桥出水口进行,本文通过决定系数  $R^2$ 、效率系数 NSE、相对偏差系数 PBIAS 和均方根误差 RMSD 来对模拟值和实测值的拟合度做出评价。决定系数  $R^2$  的表达式<sup>[25]</sup>为:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{omean}}) - (Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}})}{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{omean}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}})^2]^{\frac{1}{2}}} \right\}^2 \quad (7)$$

Nash-Sutcliffe 模型效率系数(NSE)的表达式<sup>[26]</sup>为:

$$\text{NSE} = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{omean}})^2} \right] \quad (8)$$

偏差系数(PBIAS)的表达式为:

$$\text{PBIAS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2 \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{obs}}} \right] \quad (9)$$

均方根误差(RMSD)的表达式为:

$$\text{RMSD} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}}) - (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{omean}})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

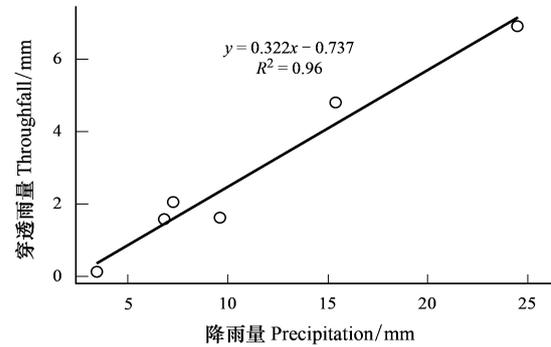


图 2 降雨量与穿透雨量的回归关系

Fig.2 The relationship between throughfall and precipitation

标准差与皮尔逊相关系数的表达式为:

$$\sigma_{\text{sim}} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{obs}} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{omean}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}}) - (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{omean}})}{\sigma_{\text{sim}} \sigma_{\text{obs}}} \quad (13)$$

式中,  $Q_i^{\text{obs}}$  为第  $i$  个观测径流值 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $Q_i^{\text{sim}}$  为第  $i$  个模拟值 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $Q^{\text{omean}}$  为观测流量平均值 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $Q^{\text{smean}}$  为模拟流量平均值 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\sigma_{\text{sim}}$  和  $\sigma_{\text{obs}}$  是模拟值和观测值的标准差 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )。这些指标的可接受范围一般是  $\text{NSE} \geq 0.6$ ,  $R^2 > 0.6$ ,  $|\text{PBIAS}| \leq 20\%$ 。通过泰勒图的形式以 RMSD、标准差和皮尔逊相关系数三个指标来量化两种不同 SWAT 模型观测值与模拟值流量间的一致性。

### 2.7 不确定性分析

SWAT 模拟的流量不确定性主要是由于输入数据的偏差,建模者的专业知识不足或改进模型的结构不合理等原因导致。本文中使用了分位数回归方法,通过计算不同分位数的条件分布来进行非参数不确定性分析<sup>[27-29]</sup>。确定置信区间后,使用  $P$  因子和  $R$  因子来量化不确定性。 $P$  因子代表了 95% 的预测不确定性 (95PPU),是落在 95PPU 范围内数据的数量与总数据数量的比值。评价校准质量的另一个参数是  $R$  因子,表示 95PPU 范围的平均宽度与观测数据的标准差的比值。在理想情况下, $P$  因子的取值在 0—100% 之间, $R$  因子介于 0— $\infty$ ,当  $R < 1.5$  时认为可接受,在  $P$  因子为 1 且  $R$  因子为 0 是模拟值与观测值完全一致。

## 3 结果与分析

### 3.1 参数的敏感性分析

SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型均使用 SWAT-CUP 内 SUFI-2 算法进行模拟值的敏感性分析。首先根据类似研究区常用的 25 个参数<sup>[30-31]</sup>对 SWAT 模型进行 1000 次模拟,发现其中 13 个参数对 SWAT 模型模拟结果影响明显(表 2),再将其进行 500 次迭代得到最优校准。同理,对 SWAT-Gash 模型进行参数的敏感性分析后选择以下 16 个参数。经分析发现两种模型均对 SCS 径流曲线系数、土壤饱和和水力传导系数、土壤可利用有效水、浅层含水层水位、融雪基温和平均坡长等参数体现出更高的敏感性。

### 3.2 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型在径流模拟中的性能对比

考虑到气象数据的年际变化,设置 1993—1996 年为模型的预热期,以减少由于气象数据而导致的潜在不确定性。1997—2004 为校准期,2005—2012 为验证期。如图 3 和图 4 是 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型在校准期和验证期的径流模拟过程线,SWAT-Gash 模型的模拟值优于 SWAT 模型的模拟值,体现在 SWAT-Gash 模型更好的重现了高流量与低流量,SWAT 模型会低估高流量。在校准期与验证期,SWAT-Gash 模型与 SWAT 模型在出山口位置的月平均径流量分别为 8.45—8.50  $\text{m}^3/\text{s}$  和 6.55—6.86  $\text{m}^3/\text{s}$  之间;NSE 值分别在 0.63—0.85 和 0.58—0.82 之间; $R^2$  值分别在 0.65—0.86 和 0.59—0.83 之间;PBIAS 值分别在 9.7%—11.5% 和 9.2%—17.1% 之间(表 3);表明在该研究区 SWAT-Gash 模型的适用性高于 SWAT 模型。

校准期和验证期两种模型的均方根误差 (RMSD)、标准差 (SD) 和相关系数等均在泰勒图中体现(图 5)。图中各点与  $x$  轴上实测值点之间的径向距离表示 RMSD 的大小,反映了各模型的模拟能力。SWAT-Gash 模型得出的 RMSD 更低,在校准期和验证期的值分别为 3.22  $\text{m}^3/\text{s}$  和 4.68  $\text{m}^3/\text{s}$ 。使用 SWAT 模型时,RMSD 值分别为 3.49 和 7.80  $\text{m}^3/\text{s}$ ,说明与 SWAT-Gash 模型相比 SWAT 模型在干旱半干旱区的径流模拟效果欠佳。各点到原点之间的距离表示各组模拟值与观测值的标准差。在校准期 SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型的标准差分别为 7.59 和 7.33,验证期标准差分别为 6.45 和 6.54。SWAT-Gash 模型在验证期标准差较大,可能是因为敏

表 2 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型敏感性参数

Table 2 Sensitive parameters of SWAT model and SWAT-Gash medel

序号 Order	参数名称 Parameter name	取值范围 Value range	SWAT 取值 Fitting value of SWAT model	SWAT-Gash 取值 Fitting value of SWAT-Gash model
1	CH_K2	(5,130)	26.97	
2	CN2	(-0.2,0.2)	0.05	0.09
3	SOL_K	(-0.5,0.5)	0.46	0.19
4	SOL_AWC	(-0.5,0.5)	0.40	1.40
5	ALPHA_BF	(0,1)	0.71	
6	REVAPMN	(0,500)	68.53	
7	GWQMN	(0,2000)	1437.05	194.98
8	GW_DELAY	(0,500)	298.70	
9	SMTMP	(-5,5)	4.82	-2.21
10	SFTMP	(-5,5)	2.39	
11	SURLAG	(0.05,24)	10.67	
12	TLAPS	(-8,0)	-3.43	
13	SLSUBBSN	(-0.2,0.2)	0.20	0.02
14	ALPHA_BNK	(0,1)		0.69
15	CH_N2	(0,0.3)		0.11
16	GW_REVAP	(0.02,0.2)		0.06
17	TIMP	(0,1)		0.03
18	PLAPS	(30,150)		18.30
19	CH_K1	(0,300)		115.24
20	CH_N1	(0,30)		23.53
21	DEP_IMP	(0,6000)		5308.73
22	EVPOT	(0,2)		0.95
23	EPCO	(0,1)		0.15

SWAT: 水土评估工具 Soil and water assessment tool; CH\_K2: 主河道有效渗透系数 Effective hydraulic conductivity in main channel; CN2: 径流曲线数 Curve number of moisture condition II; SOL\_K: 饱和渗透系数 Hydraulic conductivity of the soil; SOL\_AWC: 土壤有效含水率 Available water capacity of soil layer; ALPHA\_BF: 基流  $\alpha$  因子 Baseflow alpha factor; REVAPMN: 发生再蒸发的浅层含水层水位阈值 Threshold depth of water in the shallow aquifer to "revap" to occur; GWQMN: 发生回归流的浅层含水层水位阈值 Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur; GW\_DELAY: 地下水时间延迟 Groundwater delay; SMTMP: 融雪基温 Snow melt base temperature; SFTMP: 降雪基温 Snowfall temperature; SURLAG: 地表径流滞后系数 Surface runoff lag time; TLAPS: 气温垂直变率 Temperature laps rate; SLSUBBSN: 平均坡长 Average slope length; ALPHA\_BNK: 河岸调蓄基流  $\alpha$  因子 Baseflow alpha factor for blank storage; CH\_N2: 主河道曼宁系数 Manning's "n" value for the main channel; GW\_REVAP: 地下水再蒸发系数 Groundwater "revap" coefficient; TIMP: 积雪温度滞后因子 Snow pack temperature lag factor; PLAPS: 降水垂直变率 Precipitation laps rate; CH\_K1: 支流有效渗透系数 Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium; CH\_N1: 支流曼宁系数 Manning's "n" value for the tributary channels; DEP\_IMP: 土壤不透水层深度 Depth to impervious layer in soil profile; EVPOT: 壅穴蒸发系数 pothole evaporation coefficient; EPCO: 植物吸收补偿因子 Plant uptake compensation factor

表 3 模型径流模拟评价指标

Table 3 Evaluation index of model runoff simulation

模型 Model	校准期 Calibration			验证期 Validation		
	NSE	$R^2$	PBIAS	NSE	$R^2$	PBIAS
SWAT	0.82	0.83	11.5%	0.58	0.59	9.7%
SWAT-Gash	0.85	0.86	-9.2%	0.63	0.65	-17.1%

NSE: 效率系数 Nash-Sutcliffe efficiency;  $R^2$ : 决定系数 coefficient of determination; PBIAS: 相对偏差系数 percent bias

感性参数更多,但总体上该模型仍有更好的表现。相关系数表示出山口实测径流数据和模型模拟值之间的关系,表明地表径流在时间序列上的相似性。SWAT-Gash 模型在校准期与验证期的相关系数分别为 0.93 和 0.81,高于 SWAT 模型的 0.91 和 0.77。相较于 SWAT 模型,改进模型在校准期和验证期模拟高流量的能力更加突出。

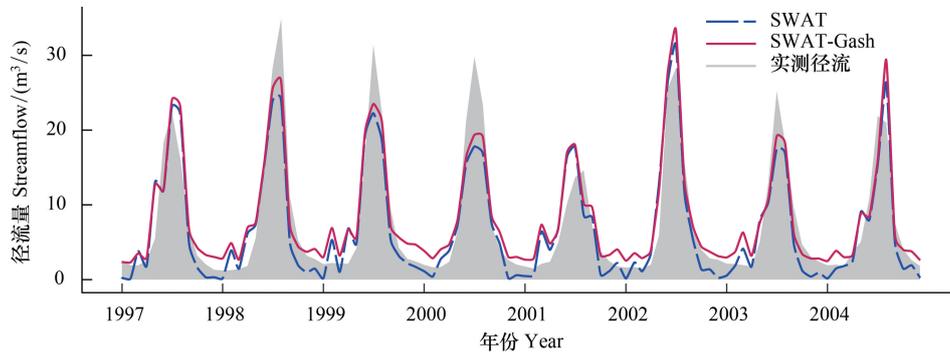


图3 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型校准期径流模拟预测对比

Fig.3 Comparison of runoff simulation prediction between SWAT model and SWAT gash model in calibration period

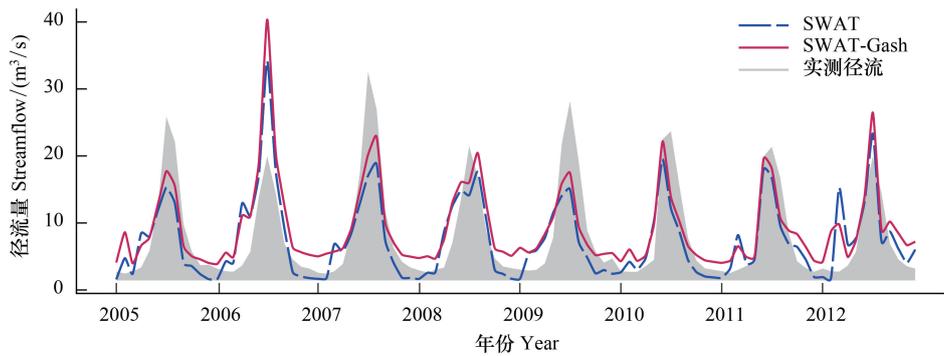


图4 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型验证期径流模拟预测对比

Fig.4 Comparison of runoff simulation prediction between SWAT model and SWAT gash model in validation period

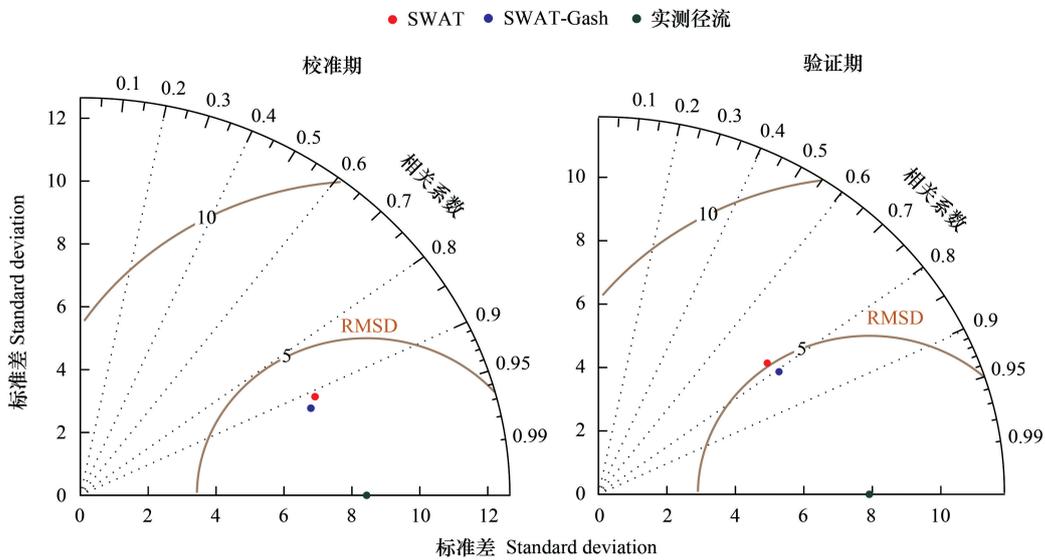


图5 SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型在校准期和验证期的泰勒图

Fig.5 Taylor diagram of calibration period and validation period for SWAT model and SWAT-Gash model

### 3.3 基于分位数回归的不确定性分析

本文中定义了 95% 的置信区间  $\beta \in [0.025, 0.975]$ , 使用两种模型的验证期径流量与观测流量进行基于分位数回归的不确定性分析。如图 6 所示, 在验证期 SWAT 模型的 95% 置信区间的平均厚度为  $13.50 \text{ m}^3/\text{s}$ , SWAT-Gash 模型为  $12.86 \text{ m}^3/\text{s}$ , 表明 SWAT-Gash 模型在本研究区的模拟表现更佳。SWAT-Gash 模型的 P 因子为 0.96, 即 96% 的观测值可以被该模型 95% 置信区间所包括, 略高于 SWAT 模型 (0.93)。此外, SWAT-Gash 模型的 R 因子 (1.19) 低于 SWAT 模型 (1.26), 表明前者的不确定度范围相对更窄。

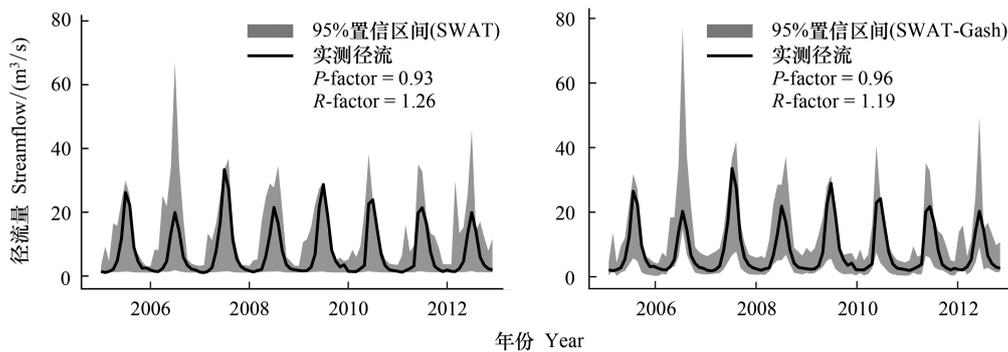


图 6 SWAT 模型和 SWAT-Gash 模型月径流模拟的不确定性分布

Fig.6 Uncertainty distribution of SWAT model and SWAT-Gash model in monthly runoff simulation

## 4 讨论与结论

### 4.1 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型在乌鲁木齐河流域的应用

本文将 Gash 林冠截留模型与 SWAT 模型耦合后的模拟结果与原始 SWAT 模型的模拟结果进行对比分析, 经过校准和验证后发现 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型在该流域的应用均取得了较好的效果, 该结论与前人在乌鲁木齐河流域的建模结果一致<sup>[30-32]</sup>, 但 SWAT-Gash 模型表现出更高的模拟精度。当使用 SWAT 模型在乌鲁木齐河流域模拟时, 校准期径流重现表现较好, 验证期表现不佳, 造成这种现象的原因可能是模型结构复杂, 敏感性参数对模拟结果的影响较大<sup>[33-35]</sup>。该流域内坡面汇流过程、地下水与河道的补给排泄过程和融雪过程<sup>[36-37]</sup>是影响山区地表径流的主要因素, 仅通过调整描述水文过程的参数无法进一步提升模型在该区域的适用性。与 SWAT 模型相比, SWAT-Gash 模型会高估该流域的低流量, Gash 模型输入数据的误差也会影响 SWAT-Gash 模型地表径流的预测。Gash 模型计算时要求参数较多, 虽然这些参数的确定方法经过国内外前人研究的验证<sup>[9, 12, 17, 22-23]</sup>, 可以得到较好的结果, 但王艳萍等人<sup>[17]</sup>研究表明本文方法得出的参数模拟值偏高。Gash 模型与 SWAT 模型耦合时, 对林冠截留物理过程的描述更加详细, 结合雪岭云杉林下穿透雨实测数据得出满足 Gash 模型的参数, 使 SWAT-Gash 模型在该研究区的模拟表现更佳。

### 4.2 SWAT 模型与 SWAT-Gash 模型的不确定性分析

本文采用了基于分位数的不确定性分析。与 SWAT 模型相比 SWAT-Gash 模型在基于分位数回归的不确定性分析中的表现更佳, 也表明 Gash 林冠截留模型对 SWAT 模型在乌鲁木齐河流域的模拟改进效果明显。通常在 SWAT 模型的建模中, 将许多复杂水文过程用简单的经验系数进行参数化, 增加了模型的不确定性<sup>[27]</sup>。而本研究提出的 SWAT-Gash 模型中, 将林冠截留过程和最大冠层截留量参数替换为基于物理过程的方程, 从而提高了模型的适用性。SWAT-Gash 模型的改进方法可以提高天山北坡中段中小型流域的水文模拟精度, 为该区域水资源管理提供更可靠的依据。此外, 本研究的降雨量分配数据代表性有所欠缺, 还需要在不同地形条件下收集时间尺度更长的降雨分配数据, 使用更多样的方法验证 Gash 模型所需参数, 从而在该流域进行更精细化的建模。

### 4.3 结论

Gash 模型参数易于获取,能够通过降雨量、穿透雨量和林冠截留量等数据推求,可以较好的在天山林区进行林冠截留过程的模拟。本文基于 SWAT 模型,将 Gash 模型方程代替经验公式提出新的 SWAT-Gash 模型。此方法可以提高乌鲁木齐河流域水文模拟的精度。同时使用基于分位数的不确定分析发现改进后模型与出山口处实测地表径流数据的相似性更高,适用性高于原始 SWAT 模型。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Zheng C L, Li J. Global canopy rainfall interception loss derived from satellite earth observations. *Ecohydrology*, 2020, 13(2): e2186.
- [ 2 ] 韩春, 陈宁, 孙杉, 赵长明. 森林生态系统水文调节功能及机制研究进展. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2191-2199.
- [ 3 ] 赵文玥, 吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望. *地球科学进展*, 2021, 36(8): 862-879.
- [ 4 ] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 1993, 142(1/4): 47-69.
- [ 5 ] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [ 6 ] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367-384.
- [ 7 ] 刁一伟, 裴铁璠. 森林流域生态水文过程动力学机制与模拟研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2369-2376.
- [ 8 ] Liu J G. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 1988, 42(2): 111-123.
- [ 9 ] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, 105(443): 43-55.
- [ 10 ] Wallace J, McJannet D. On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3/4): 477-488.
- [ 11 ] Nívar J, Bryan R B. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 68(3/4): 133-143.
- [ 12 ] Llorens P. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area II. Assessment of the applicability of Gash's analytical model. *Journal of Hydrology*, 1997, 199(3/4): 346-359.
- [ 13 ] 刘玉杰. 天然落叶松林冠截留及林内雨延滞效应研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [ 14 ] 王馨, 张一平, 刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用. *生态学报*, 2006, 26(3): 722-729.
- [ 15 ] 魏曦, 毕华兴, 梁文俊. 基于 Gash 模型对华北落叶松和油松人工林冠层截留的模拟. *中国水土保持科学*, 2017, 15(6): 27-33.
- [ 16 ] 季冬. 贡嘎山暗针叶林林冠截留的 Gash 模型[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [ 17 ] 王艳萍, 王力, 卫三平. Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用. *生态学报*, 2012, 32(17): 5445-5453.
- [ 18 ] 阿茹·苏里坦, 常顺利, 张毓涛. 天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟. *生态学报*, 2019, 39(24): 9111-9118.
- [ 19 ] 刘琳, 张正勇, 颜巧. 天山北坡潜在蒸发量时空分布特征. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 306-311.
- [ 20 ] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R, King K W. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas: Texas Water Resources Institute, 2002: 781.
- [ 21 ] De Carvalho Lopes D, Neto A J S, De Queiroz M G, De Souza L S B, Zolnier S, Da Silva T G F. Sparse gash model applied to seasonal dry tropical forest. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125497.
- [ 22 ] Leyton L, Reynolds E R C, Thompson F B. Rainfall interception in forest and moorland//Sopper W E, Lull H W, eds. *International Symposium on Forest Hydrology*. New York: Pergamon Press, 1967: 163-178.
- [ 23 ] 陈书军. 秦岭天然次生油松林生态水文功能研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [ 24 ] 王丙超, 刘萍, 张毓涛, 郝帅, 杨根辉. 天山中段天山杉柏林冠降雨截留特征研究. *新疆农业大学学报*, 2008, 31(2): 76-80.
- [ 25 ] Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, Nash M S, Jackson M, Erickson C. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/4): 105-114.
- [ 26 ] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.

- [27] Dash S S, Sahoo B, Raghuwansi N S. A novel embedded pothole module for Soil and Water Assessment Tool (SWAT) improving streamflow estimation in paddy-dominated catchments. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125103.
- [28] Nanda T, Sahoo B, Chatterjee C. Enhancing real-time streamflow forecasts with wavelet-neural network based error-updating schemes and ECMWF meteorological predictions in Variable Infiltration Capacity model. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 890-910.
- [29] Weerts A H, Winsemius H C, Verkade J S. Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression: examples from the National Flood Forecasting System (England and Wales). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 255-265.
- [30] 赵杰, 徐长春, 高沈瞳, 李佳秀. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河流域径流模拟. *干旱区地理*, 2015, 38(4): 666-674.
- [31] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 张润. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响. *生态学报*, 2018, 38(14): 5149-5157.
- [32] 李伯驩, 常顺利, 张毓涛. SCS 模型中 CN 值的优化率定方法——以天山北坡云杉森林为例. *中国农村水利水电*, 2018, (8): 72-76.
- [33] Piniewski M, Bieger K, Mehdi B. Advancements in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for ecohydrological modelling and application. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, 19(2): 179-181.
- [34] Ouyang W, Wei P, Gao X, Srinivasan R, Yen H, Xie X H, Liu L H, Liu H B. Optimization of SWAT-Paddy for modeling hydrology and diffuse pollution of large rice paddy fields. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 130: 104736.
- [35] Zhang X S, Srinivasan R, Debele B, Hao F H. Runoff simulation of the headwaters of the Yellow River using the SWAT model with three snowmelt algorithms. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(1): 48-61.
- [36] 余文君, 南卓铜, 赵彦博, 李硕. SWAT 模型融雪模块的改进. *生态学报*, 2013, 33(21): 6992-7001.
- [37] Liu Y, Cui G, Li H Y. Optimization and application of snow melting modules in SWAT model for the alpine regions of northern China. *Water*, 2020, 12(3): 636.