

潜在蒸散量对 SWAT 模型寒区典型流域径流模拟的影响

徐淑琴¹ 丁星臣¹ 王 斌^{1,2} 彭 莉¹

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 以目前广泛应用的 SWAT 模型为例, 利用对比研究方法, 以欧根河流域作为典型研究区域, 采用 Penman - Monteith 模型、Priestley - Taylor 模型、Hargreaves 模型、Shuttleworth - Wallace 模型及修正的 20 cm 蒸发皿观测数据计算潜在蒸散量 (PET)。研究不同 PET 驱动的 SWAT 模型对模拟结果的影响, 研究结果表明: SWAT 模型以子流域为尺度对 PET 计算结果进行插值的方式较粗略, 不能较好反映 PET 的空间分布情况, 在大面积森林覆盖的不同子流域, 月平均 PET 值随不同子流域内森林物种的种类和分布不同数值变化较小, 并非在考虑地形影响下 SWAT 模型模拟的日径流量结果均好, 在未考虑地形影响下 Penman - Monteith 模型与考虑地形影响下的 Hargreaves 模型、Shuttleworth - Wallace 模型模拟结果较好, 其中 Penman - Monteith 模型拟合的效果最好, 率定期与验证期的 E_{ns} 值分别为 0.651、0.686, 说明 Penman - Monteith 模型更适合用于高寒森林地区的潜在蒸散量计算。

关键词: SWAT 模型; 潜在蒸散量; Penman - Monteith 模型; 地形; 高寒森林地区

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0261-09

Influence of Potential Evapotranspiration on Runoff Simulation using SWAT Model in Alpine Typical Watershed Region

XU Shuqin¹ DING Xingchen¹ WANG Bin^{1,2} PENG Li¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the influence of potential evapotranspiration on daily flow simulation results for hydrological models in the northeast alpine region, the widely applied SWAT model was chosen as an example, through comparative study on Ougen River Basin, using Penman - Monteith model, Priestley - Taylor model, Hargreaves model, Shuttleworth - Wallace model and modified 20 cm evaporating dish observed data to compute the potential evapotranspiration (PET), then the influence of SWAT models on the simulation results was studied by different PET drivers. Research results showed that adopting subbasin scale for SWAT model to PET interpolation was quiet rough, and the calculated results cannot reflect the spatial distribution of PET specifically, the average temperature of alpine forest areas was less than 17.8℃ from January to February and also in December every year, including March sometimes. In different subbasins covered by large forest, the change of monthly average PET was little with the variation of forest species types and distribution areas, although differences of terrain on SWAT model were considered, it didnt show a high daily flow precision. Penman - Monteith model without consideration of terrain pattern, and Hargreaves model and Shuttleworth - Wallace model considered terrain pattern had good simulation results, while Penman - Monteith model fitted the best with E_{ns} values of 0.651 and 0.686 in calibration and validation periods, respectively, which showed that the Penman - Monteith model suited better in alpine forest areas to calculate the potential evapotranspiration.

Key words: SWAT model; potential evapotranspiration; Penman - Monteith model; terrain; alpine forest areas

收稿日期: 2016-07-06 修回日期: 2016-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009026)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531024)、农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题项目(2015002)和东北农业大学农业水土工程创新团队项目

作者简介: 徐淑琴(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事流域数字水文模型和水库优化调度研究,E-mail: 1210569246@qq.com

通信作者: 王斌(1976—),男,副教授,博士,主要从事水文过程模拟研究,E-mail: wangbin@neau.edu.cn

引言

SWAT(Soil and water assessment tool)是美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)农业研究中心(Agricultural Research Service, ARS)ARNOLD等^[1]开发的半分布式流域水文模型,模型开发的最初目的是在具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的复杂流域,预测长期土地管理措施对水、泥沙和农业化学污染物产生的影响^[2]。魏冲等^[3]考虑到SWAT概化了土地利用方式CN值的坡度和空间差异以及林地对汇流的调节作用,对SWAT进行改进,提高了不同土地利用方式变化下模型的敏感性和模拟径流的能力;代俊峰等^[4]利用改进的SWAT定量研究了不同水管理措施对灌区小尺度流域水量平衡评价指标的影响,分析了不同尺度间水量平衡评价指标的变化特点;郑捷等^[5]针对SWAT在处理平原灌区空间结构以及计算作物实际蒸散量等方面存在的问题,在河网提取、水文响应单元(Hydrological response units, HRU)划分方法等方面对SWAT进行了改进,构建了适用于平原灌区的分布式水文模型;刘博等^[6]应用SWAT研究了不同水文条件、土地利用和管理措施对流域非点源污染的影响;耿润哲等^[7]应用SWAT分析了流域土地利用格局变化对面源污染的影响;NOORI等^[8]将耦合了人工神经网络方法的SWAT应用于无资料地区的日流量预报;MEAURIO等^[9]评估了SWAT对森林覆盖流域水文过程的模拟能力,并应用土壤电导率划分地面径流与地下基流。可见,在流域或灌区尺度,国内外学者已将SWAT应用在水文过程模拟、非点源污染、水资源管理与评价、土地利用方式变化等较多研究中。然而,关于不同方法计算的潜在蒸散量(Potential evapotranspiration, PET)对SWAT模拟结果影响的研究很少,尤其是在黑龙江省这样的高寒区典型流域研究更为少见。

黑龙江省是我国纬度最高、最冷的寒区省份,冬季寒冷漫长,降雪、积雪、融雪、冻土、河道冰封、河水断流等水文现象普遍,这些不利因素增加了研发水文模型的难度^[10-11]。截至目前,虽然已有较多的PET计算方法,但不同方法计算的PET数值差别较大,在实际应用中各有其局限性。针对这些问题,本文以欧根河流域为例,考虑降雪、融雪等寒区水文过程以及下垫面空间不均匀性等自然地理条件,在分析多种PET计算方法特点的基础上,研究在高寒区流域不同方法计算的PET对SWAT模拟径流量过程的影响,以期寻找适宜我国高寒区的潜在蒸散量计算方法,为在我国高寒区应用SWAT提供借鉴。

1 研究区概况

欧根河水系位于黑龙江省中部,处于 $127^{\circ}33' \sim 128^{\circ}21'E$ 、 $47^{\circ}02' \sim 47^{\circ}38'N$ 之间,上游为山区,中游和下游相对平坦,全流域面积为 $2\,002\text{ km}^2$ 。欧根河属松花江二级支流,发源于小兴安岭南侧,流经庆安县北部,在致富乡南部注入呼兰河,全长 174 km ,河宽 $12 \sim 80\text{ m}$,水深 $0.5 \sim 4.0\text{ m}$ 。流域多年平均气温为 1.8°C ,月平均最低气温为 -22.5°C ,月平均最高气温为 21.6°C ;日最低气温为 -37.4°C ,日最高气温为 28.2°C ;日、月的最低气温多出现在1月份,而最高气温常出现在7月份。选择发展站($127^{\circ}34'E$ 、 $47^{\circ}06'N$)断面以上的 $1\,704\text{ km}^2$ 集水区作为研究流域(以下称欧根河流域),该流域内有4个雨量站,多年平均降水量为 670 mm , 20 cm 蒸发皿观测的多年平均水面蒸发量为 749 mm ,每年11月中旬至次年4月上旬为结冰期。

2 构建 SWAT 数据库

SWAT模拟径流需要空间和属性2种数据:空间数据包括数字高程模型(Digital elevation model, DEM)数据、土地覆被/利用数据、土壤数据;属性数据包括气象数据和水文数据。SWAT要求空间数据具有一致的投影坐标系,本文将具有相同地理坐标系GCS_WGS_1984的空间数据投影至WGS_1984_UTM_Zone_47N投影坐标系。

2.1 地形数据

DEM数据用于获取流域坡度、坡向、水流方向、河网以及划分子流域和设置HRU。本文采用中科院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的NASA和METI共同推出的最新地球电子地形ASTER GDEM 30 m 分辨率的数字高程数据,欧根河流域位于第27、28条带。利用ArcGIS栅格镶嵌工具拼接DEM条带,并将拼接后的DEM图加载进ArcSWAT2012,从而获取流域河网、划分子流域及计算地形参数。根据流域水系和地形实际情况,设定最小汇水面积阈值为 60 km^2 ,研究流域被划分为15个子流域和71个HRU。流域地形及子流域的划分结果如图1所示。欧根河流域上游至下游高程变化较大,为定量考虑地形对降水量和气温产生的影响,以 200 m 为间距依次对研究区15个子流域划分高程带,并考虑不同递减率和测站高程与高程带高程之差函数来计算不同高程带的降水量和最高、最低气温,最后通过加权平均得到每个子流域的降水量和气温。高程带降水量和气温的计算及子流域降水量和气温的计算参照文献[12]。

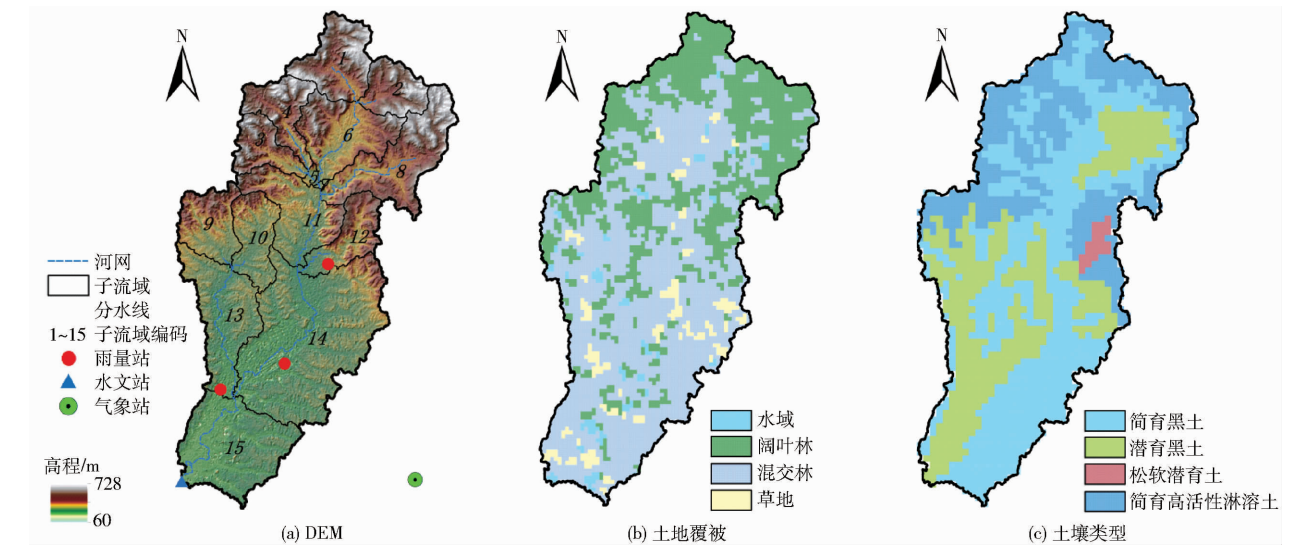


图 1 欧根河流域遥感数据分布图

Fig. 1 Remote sensing data distribution maps of Ougen River Basin

2.2 土地覆被/利用数据

土地利用方式影响降水在陆面的产汇流过程，对模拟结果有重要影响。SWAT 需要的土地覆被/利用数据包括空间分布图及索引表。本文采用美国马里兰大学 (UMD) 的 1 km 分辨率土地覆被数据 (<http://glcf.umd.edu>)，研究区域共有水域、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、林地、草原 7 种土地覆被类型，除水体外，各种植被面积合计占全流域的 97.50%。由于植被参数较难获取，本文通过索引表建立 7 种 UMD 土地覆被数据与 SWAT 土地利用/作物分类数据库中同种土地利用类型之间的联系，重分类后的欧根河流域土地覆被对应的 SWAT 土地利用代码为 WATR (水域)、FRSD (阔叶林)、FRST (混交林)、PAST (草地)，在流域中面积所占比例分别为 2.50%、33.16%、59.34%、5.01%，如图 1 所示。

2.3 土壤数据

采用联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 构建的世界和谐土壤数据库 (Harmonized world soil database, HWSD) 描述欧根河土壤属性，HWSD 的分辨率为 1 km，欧根河流域共有 4 种土壤类型，如图 1 所示。由于 HWSD 数据采用 USDA 分级制，因此不必再对其土壤粒含量进行转换。本文土壤分为 2 层，即 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 100 cm，各土层底层到土壤表层的深度 SOL_Z、土壤剖面的最大根系深度 SOL_ZMX、有机碳含量 SOL_CBN、电导率 SOL_EC 等参数可从 HWSD 数据库获取，土壤的湿容重 SOL_BD、土壤的有效含水量 SOL_AWC、饱和渗透系数 SOL_K 由 SPAW 软件计算，土壤水文单元 HYDGRP 划分采用车振海^[13]的研究方法计算土壤稳定下渗率，砂粒含量取 2 层土壤平均

值，USLE 方程中的土壤侵蚀 K 因子采用 WILLIAMS 等^[14]在 EPIC 模型中提供的计算方法。

2.4 气象数据与水文数据

气象数据采用距离欧根河流域最近的铁力气象站 1974—1981 年的逐日气象数据，主要包括日照时数、最高气温、最低气温、平均气温、水汽压、风速、20 cm 蒸发皿水面蒸发量等。由于缺乏太阳辐射量实测资料，采用曹雯等^[15]的计算方法，太阳常数取 118.109 MJ/(m²·d)。发展站的逐日流量和逐日水面蒸发量数据以及 4 个雨量站的逐日降水量数据均摘自《中华人民共和国水文年鉴》第 1 卷第 3 册。

2.5 归一化植被指数数据

为比较分析，另引入 Shuttleworth - Wallace (S - W) 模型计算 PET，该模型需要的叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 数据利用归一化植被指数 (Normalized differential vegetation index, NDVI) 数据和简单生物圈模型 (SiB2) 推求^[16]。采用 NOAA - AVHRR 提供的 NDVI 月数据集，该数据集空间分辨率为 8 km，在利用这些数据时将其分辨率转换为 1 km。

3 潜在蒸散量计算

在流域降水产流过程中，只有较小比例的降水形成径流，而大部分降水通过地表土壤水分蒸发、植被截留蒸发和植被散发返回到大气，因此，蒸散量的准确计算对流域水循环与水量平衡具有重要影响。PET 是驱动水文模型的重要变量之一，STANNARD^[17]和 VÖRÖSMARTY 等^[18]的研究表明，在湿润地区水文模型对 PET 尤为敏感。为了研究高寒区流域不同方法计算的潜在蒸散量对 SWAT

模拟日流量过程的影响,找出适宜高寒区潜在蒸散量计算方法,选用 Penman - Monteith (P - M) 模型、Priestley - Taylor (P - T) 模型、Hargreaves (H) 模型、Shuttleworth - Wallace (S - W) 模型以及 20 cm 蒸发皿观测的水面蒸发量数据计算潜在蒸散量。

P - M 模型综合了太阳辐射和空气动力学等多种因素的影响,具有较好的水文气象物理基础,在全球得到了广泛应用,被 FAO 修正后作为计算参考作物蒸散量的首选方法^[19],但其将下垫面看成一个整体,忽略土壤蒸发,不适用于计算稀疏植被和植物全生育期的蒸散计算^[20-22]。目前,应用 P - M 模型对森林蒸散的研究落后于农田蒸散^[23]。程根伟等^[24]利用修正的 P - M 模型对贡嘎山森林区地面和冷杉林进行了模拟,研究表明森林地区蒸发与非森林地面蒸发的差别具有季节变化,在非生长季节森林蒸散发低于非森林地面,而在森林生长季节的蒸散发比非林地要高,其变化差异在 ±25% 范围内。杨林山等^[22]采用 P - M 模型和 Beven 敏感性公式对洮河流域潜在蒸散发对关键气候因素的敏感性分析研究表明 PET 的变化受净辐射、最高气温和风速的影响最大。虽然 P - M 模型在蒸散研究中被广泛应用,但该公式需要的气象数据较多,在气象资料不齐全的地区应用时受到限制。P - T 模型是对 Penman 公式的修正式,由于所需参数较少而应用广泛,但流域下垫面总是呈现一定的不均匀性,其无平流的假设条件在现实中很难满足,尤其是忽略了空气动力学项影响,导致其估算的准确度会有所下降^[25-26],刘晓英等^[27]的研究还表明,空气动力项与辐射项之比是影响 P - T 模型应用效果的重要因子,在湿润气候条件下 P - T 模型应用效果较好,但在干旱半干旱气候条件下应用效果较差甚至很差。H 模型只考虑气象因素影响,忽略了陆面土壤和植被对蒸散量的控制作用,当平均气温低于 -17.8℃ 时,其计算的 PET 将为负值,在高寒地区应用时具有局限性^[28]。虽然 SWAT 会自动将 H 模型计算的负值 PET 赋值为 0,能够保证程序正常运行,但与实际蒸散情况并不相符。SHUTTLEWORTH 等^[29]发展了 P - M 方法,建立了耦合植被冠层散发和裸土土壤蒸发的 S - W 模型,ZHOU 等^[20]进一步发展了 S - W 模型,提出了利用 DEM、气象、土地覆被、NDVI 等数据估算 PET 的方法,并用其估算的 PET 驱动 BTOPMC 模型研究了湄公河流域的水文过程,研究表明:与 P - M 模型相比,S - W 模型能很好地反映气候变化和植被覆盖变化对 PET 的影响^[20]。这 4 种 PET 计算模型的公式分别为

$$\lambda ET_{P-M} = \frac{\Delta (H_{net} - G) + \frac{\rho c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (1)$$

$$\lambda ET_{P-T} = \alpha_{pet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (H_{net} - G) \quad (2)$$

$$\lambda ET_H = 0.0023 H_{net} (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17.8) \quad (3)$$

$$\lambda ET_{S-W} = C_c ET_c + C_s ET_s \quad (4)$$

其中

$$ET_c = \frac{\Delta (R_n - G) + \frac{24 \times 3600 \rho c_p (e_s - e_a) - \Delta r_a^c (R_n^s - G)}{r_a^a + r_a^c}}{\Delta + \lambda \left(1 + \frac{r_s^c}{r_a^a + r_a^c}\right)} \quad (5)$$

$$ET_s = \frac{\Delta (R_n - G) + \frac{24 \times 3600 \rho c_p (e_s - e_a) - \Delta r_a^s (R_n - R_n^s)}{r_a^a + r_a^c}}{\Delta + \lambda \left(1 + \frac{r_s^s}{r_a^a + r_a^c}\right)} \quad (6)$$

- 式中
- λ ——蒸发潜热, MJ/kg
- ET_{P-M} 、 ET_{P-T} 、 ET_H 、 ET_{S-W} ——P - M、P - T、H、S - W 模型计算的 PET, mm/d
- ET_c ——郁闭冠层散发量, mm/d
- ET_s ——裸土地面蒸发量, mm/d
- Δ ——饱和水汽压-温度关系曲线的斜率, kPa/℃
- H_{net} ——净辐射量, MJ/(m²·d)
- ρ ——平均空气密度, kg/m³
- R_n 、 R_n^s ——冠层、土壤表面净辐射量, MJ/(m²·d)
- G ——土壤热通量, MJ/(m²·d)
- e_s 、 e_a ——饱和水汽压、实际水汽压, kPa
- c_p ——空气定压比热
- γ ——空气湿度常数, kPa/℃
- C_c 、 C_s ——权重系数 α_{pet} ——系数
- T_{max} ——最高气温, ℃
- T_{min} ——最低气温, ℃
- T ——平均气温, ℃
- r_c ——植物冠层的阻抗, s/m
- r_a ——空气层的扩散阻抗, s/m
- r_s^c ——冠层气孔阻力, s/m
- r_a^c ——冠层边界层阻力, s/m
- r_a^s ——土壤表面到冠层空气动力学阻力, s/m
- r_a^a ——冠层到参考高度间的空气动力学阻力, s/m
- r_s^s ——土壤表面阻力, s/m

利用 SWAT 自带的 P-M 模型、P-T 模型、H 模型功能模块计算其 PET, S-W 模型的详细计算公式参照文献[20]。在我国,水面蒸发量数据相对容易获取,也是广泛采用的水文模型输入数据,一般需经过植被、高程、蒸发皿折算系数等多方面因素修正后,作为潜在蒸散量使用。S-W 模型计算得到的流域平均 PET 和修正后的水面蒸发量数据(记为 ET_{pan})利用 ArcSWAT 自带的 Read-In PET 功能导入,SWAT 根据流域地形与气候差异,将 PET 插值到每一个子流域。限于篇幅,仅以处于欧根河流域上、中、下游的 1、11、15 子流域为例,绘制的 5 种 PET 月平均计算结果如图 2~4 所示。为便于比较分析,统计出 5 种方法计算的 3 个子流域 PET 多年平均值见表 1。从图 2~4 可以看出,在 1974—1981 年间,当采用相同的计算方法时,3 个子流域的 PET 数值差别不大,变化趋势几乎完全一致,分析产生这一现象的原因,是因为 SWAT 以子流域为尺度对 PET 计

算结果进行插值的方式较粗略,还不能较好反映 PET 的空间分布情况。我国蒸发站平均密度为 $5\,800\text{ km}^2/\text{站}$,黑龙江省仅为 $7\,166\text{ km}^2/\text{站}$ ^[10],当利用这些稀疏站点观测的水面蒸发量修正值作为 PET 驱动 SWAT 时,无疑更难描述流域内 PET 的空间变异性。相反,我国气象站点相对充足,县级以上单位一般均长期布设了气象观测站,因此,应首先考虑利用气象数据,采用适宜模型计算 PET。此外,还应考虑发展 SWAT 模型,改进其只将 PET 计算结果插值到各子流域的缺陷。

表 1 5 种方法计算所得的 PET 多年平均值

Tab.1 Years averaged PET values calculated by five methods

子流域编号	five methods					mm
	ET_{P-M}	ET_{P-T}	ET_H	ET_{S-W}	ET_{pan}	
1	642	451	774	542	688	
11	673	469	811	567	720	
15	646	449	778	543	689	

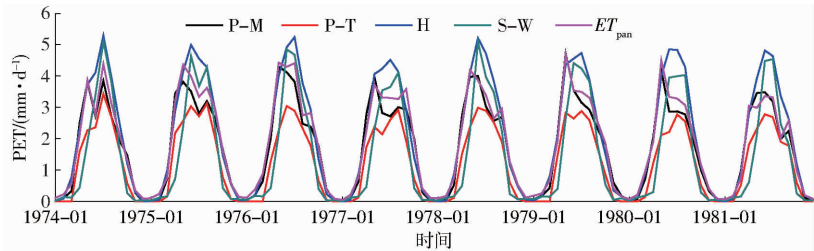


图 2 欧根河第 1 子流域 1974—1981 年月平均 PET 年内变化

Fig. 2 Average monthly PET annaral-intra changes during 1974—1981 in Ougen River subbasin 1

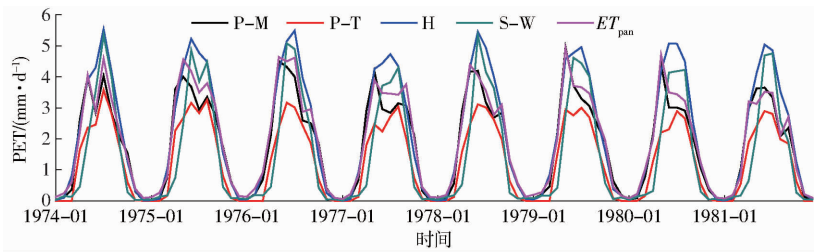


图 3 欧根河第 11 子流域 1974—1981 年月平均 PET 年内变化

Fig. 3 Average monthly PET annaral-intra changes during 1974—1981 in Ougen River subbasin 11

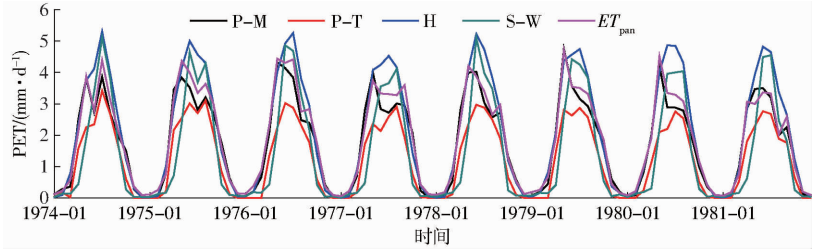


图 4 欧根河第 15 子流域 1974—1981 年月平均 PET 年内变化

Fig. 4 Average monthly PET annaral-intra changes during 1974—1981 in Ougen River subbasin 15

然而,在同一个子流域,5 种方法所得的多年平均 PET 数值差别较大。从表 1 可以看出,基于 H 模型计算得到的 PET 最大,P-T 模型计算的 PET 最小,P-M 模型、S-W 模型、 ET_{pan} 计算结果介于两者

之间。这些数据表明,虽然各种 PET 计算方法(除修正的水面蒸发量)均具有一定的物理意义,但其计算结果间差异较大,由于当前很难在流域尺度测定 PET,因此,很难确定哪种 PET 方法更优,也很难

验证哪种方法计算的 PET 更接近于流域实际情况。因此,本文利用各种方法计算的 PET 驱动 SWAT,依据 SWAT 对日流量过程的模拟结果来分析和评价更适于高寒区流域的 PET 计算方法。从图 2~4 还可以看出,在大面积森林覆盖的不同子流域,月平均 PET 值随不同子流域内森林物种的种类和分布不同变化较小。对于月平均 PET 的峰值各模型由大到小表现为:H、S-W、 ET_{pan} 、P-M、P-T。在每年的 1 月份由大到小表现为: ET_{pan} 、S-W、H、P-M、P-T,2、12 月份由大到小表现为: ET_{pan} 、S-W、P-M、H、P-T,3 月份由大到小表现为:H、 ET_{pan} 、P-M、S-W、P-T,4 月份由大到小表现为:P-M、H、 ET_{pan} 、P-T、S-W,5 月份由大到小表现为: ET_{pan} 、P-M、H、P-T、S-W,6—8 月份由大到小表现为:H、S-W、 ET_{pan} 、P-M、P-T,9 月份由大到小表现为:H、 ET_{pan} 、P-M、S-W、P-T,10 月份由大到小表现为:P-M、 ET_{pan} 、H、P-T、S-W,11 月份由大到小表现为: ET_{pan} 、H、P-M、S-W、P-T,每年的 1、2、12 月份 P-T 计算的 PET 为零。

4 模型率定与验证

将 1974—1977 年作为率定期,1978—1981 年作为验证期,采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E_{ns}) 评价 SWAT 对发展站日流量的模拟效果。 E_{ns} 计算式为

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \tag{7}$$

式中 Q_{obs} ——第 i 日观测值, m^3/s
 Q_{sim} ——第 i 日模型模拟值, m^3/s
 $\bar{Q}_{obs}$ ——观测值的平均值, m^3/s

对于日流量过程模拟,根据水文情报预报规范,当 $E_{ns} \geq 0.7$ 时,可以认为模型模拟的效果很好;当 $0.5 \leq E_{ns} < 0.7$ 时,模拟效果较好^[30]。

4.1 率定参数选取

SWAT 涉及的水文物理过程主要包括:地表径流产流过程、土壤水与地下水运动过程、蒸散发及融雪过程等,本文选取与上述过程相关的 25 个参数,利用 SWAT-CUP 中的全局敏感性分析模块,采用拉丁超立方体抽样法,生成 1500 组变量样本用于模型的初次运算,以 t 检验方法确定参数的敏感性。 t 检验表示对各参数值的改变引起目标函数值变化的平均估计,SWAT-CUP 中以 t 和 p 值评价参数的敏感性程度, t 绝对值越大、 p 值越接近于 0,表示参数越敏感。通过计算,最终确定的参数及敏感性值如图 5 所示。

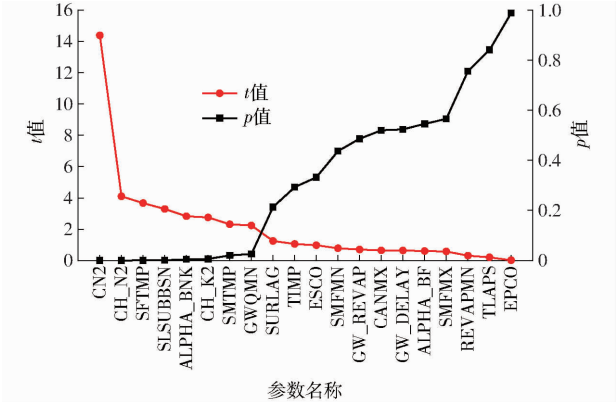


图 5 敏感性分析结果

Fig. 5 Results of sensitivity analysis

从图 5 中可以看出,最敏感的参数分别为 SCS 径流曲线数 CN2、主河道河床曼宁系数 CH_N2、降雪气温 SFTMP(℃)、平均坡长 SLSUBBSN(m)、河岸调蓄的基流 α 因子 ALPHA_BNK、主河道河床有效水力传导度 CH_K2(mm/h)、融雪基温(℃)等。为得到精确度较高的模拟结果,考虑到研究区森林截留量较大以及坡度变化显著,本文将子流域分成 5 部分,即对应编号为 1~8、9~12、13、14、15 的子流域,分别对参数 SCS 径流曲线数 CN2、平均坡长 SLSUBBSN(m)、最大冠层截留量 CANMX(mm) 进行率定,参数的改变类型全部采用 v,即将参数初始值赋予给定值,避免了采用 r 与 a 率定一定次数后,参数值超出合理的范围。模型率定采用 SUFI-2 算法。

4.2 模型模拟结果分析

为对比不同方法计算的 PET 对 SWAT 模拟日径流量的影响,分是否考虑地形 2 种情况,不同影响因素下,均采用相同参数组合率定。率定期 1974—1977 年与验证期 1978—1981 年各年模拟结果的 E_{ns} 值见图 6,均值见表 2,可以看出,未考虑地形影响下,S-W 模型对 1978 年流量模拟效果较差,H 模型模拟效果最好, E_{ns} 整体呈现增加趋势,P-M 模型模拟的效果最好,在率定期与验证期 E_{ns} 均值分别为 0.645、0.609,模拟效果较好。在考虑地形影响下,5 种 PET 模型对 1978 年模拟的结果均较差,H 模型

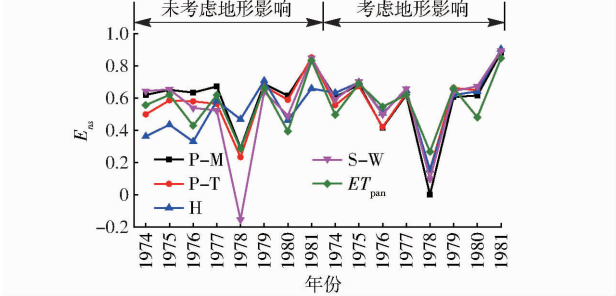


图 6 欧根河流域日径流量模拟 1974—1981 年 E_{ns} 值

Fig. 6 Nash-Sutcliffe values of daily runoff simulation for Ougen River Basin during 1974—1981

表 2 率定期与验证期 E_{ns} 的均值

Tab.2 Average Nash – Sutcliffe value in calibration and verification periods						
地形影响	模拟期	P – M 模型	P – T 模型	H 模型	S – W 模型	ET_{pan} 模型
未考虑	率定期	0.645	0.558	0.428	0.591	0.557
	验证期	0.609	0.588	0.575	0.457	0.545
考虑	率定期	0.582	0.570	0.622	0.614	0.589
	验证期	0.527	0.592	0.581	0.579	0.565

对于 1981 年模拟的 E_{ns} 值达到了 0.905, P – M、P – T 和 S – W 模型 E_{ns} 值分别为 0.884、0.898、0.896。H、P – T、S – W 模型的 E_{ns} 均值与未考虑地形影响相比,考虑地形影响下验证期与率定期的数值均增加。H 模型与未考虑地形影响相比在 1980 年 E_{ns} 值显著增加。验证期与率定期的 E_{ns} 值如图 7 所示,可以看出,在考虑地形影响下,H、P – T、 ET_{pan} 、S – W 模型的 E_{ns} 值在验证期与率定期均大于未考虑地形影响时的 E_{ns} 值,而 P – M 模型 E_{ns} 值减小。综合不同因素影响下模拟的结果,在率定期 P – M、H、S – W 模型模拟效果较好, E_{ns} 值为 0.651、0.644、0.635,在验证

期 5 种 PET 模型模拟的效果均较好, E_{ns} 值分别为 0.686、0.679、0.657、0.666、0.657。P – T 模型在率定期模拟结果均较差, E_{ns} 值分别为 0.561、0.597,而在验证期效果很好, E_{ns} 值为 0.673、0.679。从整体来看,在未考虑地形影响下 P – M 模型与考虑地形影响下的 H、S – W 模型模拟结果较好,P – M 模型拟合的效果最好,模拟结果见图 8,参数率定结果见表 3。

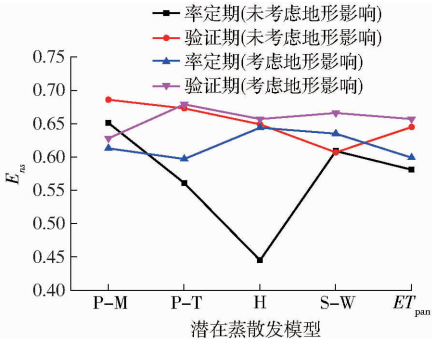


图 7 欧根河流域率定期与验证期 E_{ns} 值

Fig.7 Nash – Sutcliffe values of Ougen River Basin in calibration period and verification period

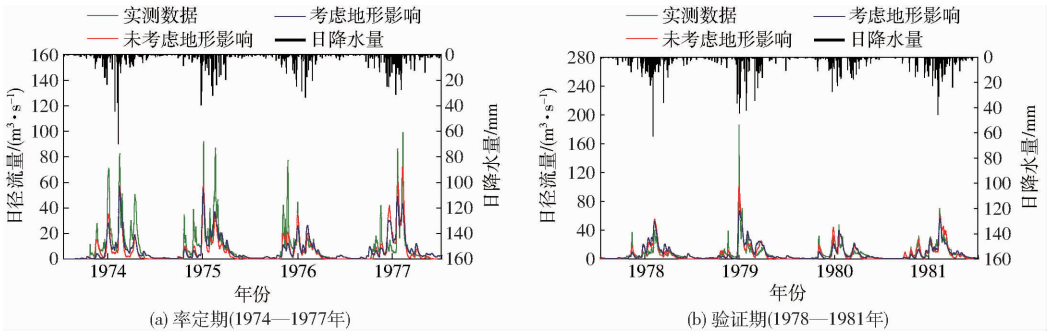


图 8 采用 P – M 模型的日径流量模拟结果

Fig.8 Results of daily runoff simulation using P – M model

表 3 率定的参数及其取值范围

Tab.3 Calibrated parameters and their final values							
参数名称	物理意义	适用子流域	初始范围		最终范围		最优值
			最小值	最大值	最小值	最大值	
CH_N2. rte	主河道河床曼宁系数	1 ~ 15	-0.01	0.3	0.22	0.23	0.22
CH_K2. rte	主河道冲击物的有效渗透系数/(mm·h ⁻¹)	1 ~ 15	-0.01	500	60.84	67.01	63.93
ALPHA_BNK. rte	河岸调蓄的基流 α 因子	1 ~ 15	0	1	0.41	0.43	0.42
		1 ~ 8	35	98	55.37	56.52	56.02
		9 ~ 12	35	98	40.91	44.10	41.50
CN2. mgt	SCS 径流曲线数	13	35	98	51.40	52.14	51.88
		14	35	98	71.02	72.18	71.82
		15	35	98	54.89	55.81	55.00
ALPHA_BF. gw	基流 α 因子	1 ~ 15	0	1	0.92	0.94	0.93
GW_DELAY. gw	地下水延迟时间	1 ~ 15	0	500	47.76	113.48	71.62
GWQMN. gw	发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值	1 ~ 15	0	5 000	4 351.53	4 424.93	4 396.67
GW_REVAP. gw	地下水的 revap 系数	1 ~ 15	0.02	0.2	0.12	0.13	0.12
REVAPMN. gw	浅层地下水再蒸发系数	1 ~ 15	0	500	210.11	221.52	216.19
SFTMP. bsn	降雪气温/℃	1 ~ 15	-20	20	-13.20	-12.59	-12.71
SMTMP. bsn	融雪基温/℃	1 ~ 15	-20	20	0.43	1.36	0.88
SMFMX. bsn	6 月 21 日的融雪因子/(mm·℃ ⁻¹ ·d ⁻¹)	1 ~ 15	0	20	0.41	0.90	0.48

续表 3

参数名称	物理意义	适用子 流域	初始范围		最终范围		最优值
			最小值	最大值	最小值	最大值	
SMFMN. bsn	12 月 21 日的融雪因子/(mm·℃ ⁻¹ ·d ⁻¹)	1 ~ 15	0	20	17.50	18.06	17.95
TIMP. bsn	积雪温度滞后因子	1 ~ 15	0	1	0.36	0.39	0.36
SURLAG. bsn	地表径流滞后系数	1 ~ 15	0.05	24	10.12	10.57	10.25
SLSUBBSN. hru	平均坡长/m	1 ~ 8	10	150	41.35	48.27	41.92
		9 ~ 12	10	150	103.71	106.71	105.53
		13	10	150	92.89	106.40	101.90
		14	10	150	25.89	29.21	26.20
ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	15	10	150	112.08	116.63	112.69
		1 ~ 15	0	1	0.08	0.10	0.09
		1 ~ 15	0	1	0.04	0.04	0.04
EPCO. hru	植物吸收补偿因子	1 ~ 8	0	100	0.00	0.31	0.10
		9 ~ 12	0	100	98.47	99.09	98.88
		13	0	100	97.54	99.75	99.11
CANMX. hru	最大冠层截留量/mm	14	0	100	99.20	100.00	99.86
		15	0	100	45.16	47.31	45.66
		1 ~ 15	-10	10	6.11	6.30	6.22
TLAPS. sub	气温直减率/(℃·km ⁻¹)	1 ~ 15	-10	10	6.11	6.30	6.22

5 结 论

(1)SWAT 模型以子流域为尺度对 PET 计算结果进行插值的方式较粗略,不能较好反映 PET 的空间分布情况。在大面积森林覆盖的不同子流域,月平均 PET 值随不同子流域内森林物种的种类和分布不同数值变化较小。在同一个子流域,5 种方法所得的多年平均 PET 数值差别较大,基于 H 模型计算得到的 PET 最大,P-T 模型计算的 PET 最小,P-M 模型、S-W 模型、 ET_{pan} 计算结果介于两者之间。

(2)参数敏感性分析结果表明:SCS 径流曲线

数、主河道河床曼宁系数、降雪气温、平均坡长、河岸调蓄的基流 α 因子、主河道河床有效水力传导度、融雪基温等是对高寒地区日径流量模拟最敏感的参数。

(3)在考虑地形影响下,并非 SWAT 采用 5 种 PET 计算方法最终模拟的日径流量结果均好,P-T 模型、H 模型、S-W 模型、修正的 20 cm 蒸发皿观测数据的 E_{ms} 值在验证期与率定期均大于未考虑地形影响时的 E_{ms} 值,而 P-M 模型 E_{ms} 值减小。P-M、H、S-W 模型模拟的日径流量结果较好,而 P-M 模型模拟的结果最好,说明 P-M 模型更适合用于高寒森林地区的潜在蒸散量计算。

参 考 文 献

1 ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.

2 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-35.

PANG Jingpeng, XU Zongxue, LIU Changming. SWAT model application: state-of-the-art review[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 31-35. (in Chinese)

3 魏冲, 胡彩虹, 陈杰, 等. SWAT 模型基于不同坡度林地径流调节作用的实现与应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 98-105, 111.

WEI Chong, HU Caihong, CHEN Jie, et al. Application of SWAT model and realization of hydrological adjusting function of forests on different slopes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 98-105, 111. (in Chinese)

4 代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型——Ⅱ. 模型应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 311-318.

DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT Ⅱ. model application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 311-318. (in Chinese)

5 郑捷, 李光永, 韩振中, 等. 改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 88-97.

ZHENG Jie, LI Guangyong, HAN Zhenzhong, et al. Application of modified SWAT model in plain irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 88-97. (in Chinese)

6 刘博, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 52-61.

LIU Bo, XU Zongxue. Simulation of non-point source pollution in the Shahe Reservoir catchment in Beijing by using SWAT model [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 52-61. (in Chinese)

7 耿润哲, 李明涛, 王晓燕, 等. 基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 241-250.

GENG Runzhe, LI Mingtao, WANG Xiaoyan, et al. Effect of land use/landscape changes on diffuse pollution load from watershed based on SWAT model[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 241-250. (in Chinese)

8 NOORI N, KALIN L. Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 141-151.

- 9 MEAURIO M, ZABALETA A, URIARTE J A, et al. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed[J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 326 – 334.
- 10 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36 – 42. WANG Bin, WANG Guizuo, HUANG Jinbai, et al. Distributed hydrological model based on grid and its application to daily runoff simulation for high-cold region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 36 – 42. (in Chinese)
- 11 王斌, 黄金柏, 宫兴龙, 等. Free Search 算法率定的 Sacramento 模型在东北寒旱区的应用[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 171 – 177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160622&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.022. WANG Bin, HUANG Jinbai, GONG Xinglong, et al. Application of Sacramento model calibrated by free search algorithm in cold and arid region of Northeast China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 171 – 177. (in Chinese)
- 12 郝振纯, 张越关, 杨传国, 等. 黄河源区水文模拟中地形和融雪影响[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 311 – 318. HAO Zhenchun, ZHANG Yueguan, YANG Chuanguo, et al. Effects of topography and snowmelt on hydrologic simulation in the Yellow River's source region[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 311 – 318. (in Chinese)
- 13 车振海. 试论土壤渗透系数的经验公式和曲线图[J]. 东北水利水电, 1995(9): 17 – 19. CHE Zhenhai. On the empirical formula and curves of soil permeability coefficient[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 1995(9): 17 – 19. (in Chinese)
- 14 WILLIAMS J R, SINGH V P. The EPIC model[M]//SINGH V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, LLC, 1995: 909 – 1000.
- 15 曹雯, 申双和. 我国太阳日总辐射计算方法的研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 587 – 591. CAO Wen, SHEN Shuanghe. Estimation of daily solar radiation in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(4): 587 – 591. (in Chinese)
- 16 王斌, 魏永霞, 黄金柏, 等. 呼兰河流域叶面积指数的变化特征与估算方法[J]. 黑龙江省大学工程学报, 2015, 6(4): 1 – 5, 22. WANG Bin, WEI Yongxia, HUANG Jinbai, et al. Estimation and analysis of leaf area index in Hulan River basin[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2015, 6(4): 1 – 5, 22. (in Chinese)
- 17 STANNARD D I. Comparison of Penman – Monteith, Shuttleworth – Wallace, and modified Priestley – Taylor evapotranspiration models for woodland vegetation in semiarid rangeland[J]. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1379 – 1392.
- 18 VÖRÖSMARTY C J, FEDERER C A, SCHLOSS A L. Potential evaporation functions compared on US watersheds: possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling[J]. Journal of Hydrology, 1998, 207(3): 147 – 169.
- 19 刘钰, 蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, 28(6): 28 – 34. LIU Yu, CAI Lin'gen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(6): 28 – 34. (in Chinese)
- 20 ZHOU M C, ISHIDAIRA H, HAPUARACHCHI H P, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth – Wallace model and NOAA – AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1): 151 – 173.
- 21 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 基于 Penman – Monteith 公式的双源模型的改进[J]. 水利学报, 2000, 31(5): 6 – 11. MO Xingguo, LIN Zhonghui, LIU Suxia. An improvement of the dual-source model based on Penman – Monteith formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(5): 6 – 11. (in Chinese)
- 22 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102 – 109. YANG Linshan, LI Changbin, WANG Shuaibing, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 102 – 109. (in Chinese)
- 23 焦醒, 刘广全, 匡尚富, 等. Penman – Monteith 模型在森林植被蒸散研究中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 245 – 252. JIAO Xing, LIU Guangquan, KUANG Shangfu, et al. Review on application of Penman – Monteith equation to studying forest vegetation evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 245 – 252. (in Chinese)
- 24 程根伟, 陈桂蓉. 贡嘎山暗针叶林区森林蒸散发特征与模拟[J]. 水科学进展, 2003(5): 617 – 621. CHENG Genwei, CHEN Guirong. Study on the evapotranspiration simulation of sub-alpine forest area in Gongga Mountain[J]. Advances in Water Science, 2003(5): 617 – 621. (in Chinese)
- 25 赵玲玲, 王中根, 夏军, 等. Priestley – Taylor 公式的改进及其在互补蒸散模型中的应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 805 – 810. ZHAO Lingling, WANG Zhonggen, XIA Jun, et al. Improved Priestley – Taylor method and its application in complementary relationship evapotranspiration model[J]. Progress in Geography, 2011, 30(7): 805 – 810. (in Chinese)
- 26 李菲菲, 饶良懿, 吕琨珑, 等. Priestley – Taylor 模型参数修正及在蒸散发估算中的应用[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 748 – 754. LI Feifei, RAO Liangyi, LÜ Kunlong, et al. Parameter corrections for the Priestley – Taylor Model and applications in evapotranspiration estimation[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30(5): 748 – 754. (in Chinese)
- 27 刘晓英, 林而达, 刘培军. 干旱气候条件下 Priestley – Taylor 方法应用探讨[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 31 – 38. LIU Xiaoying, LIN Erda, LIU Peijun. Study on application of Priestly – Taylor method to dry climate condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9): 31 – 38. (in Chinese)
- 28 王斌, 付强, 张金萍, 等. Hargreaves 公式的改进及其在高寒地区的应用[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 82 – 85. WANG Bin, FU Qiang, ZHANG Jinping, et al. Modified Hargreaves equations and their application in high-cold area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 82 – 85. (in Chinese)
- 29 SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839 – 855.
- 30 GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S]. 2008.