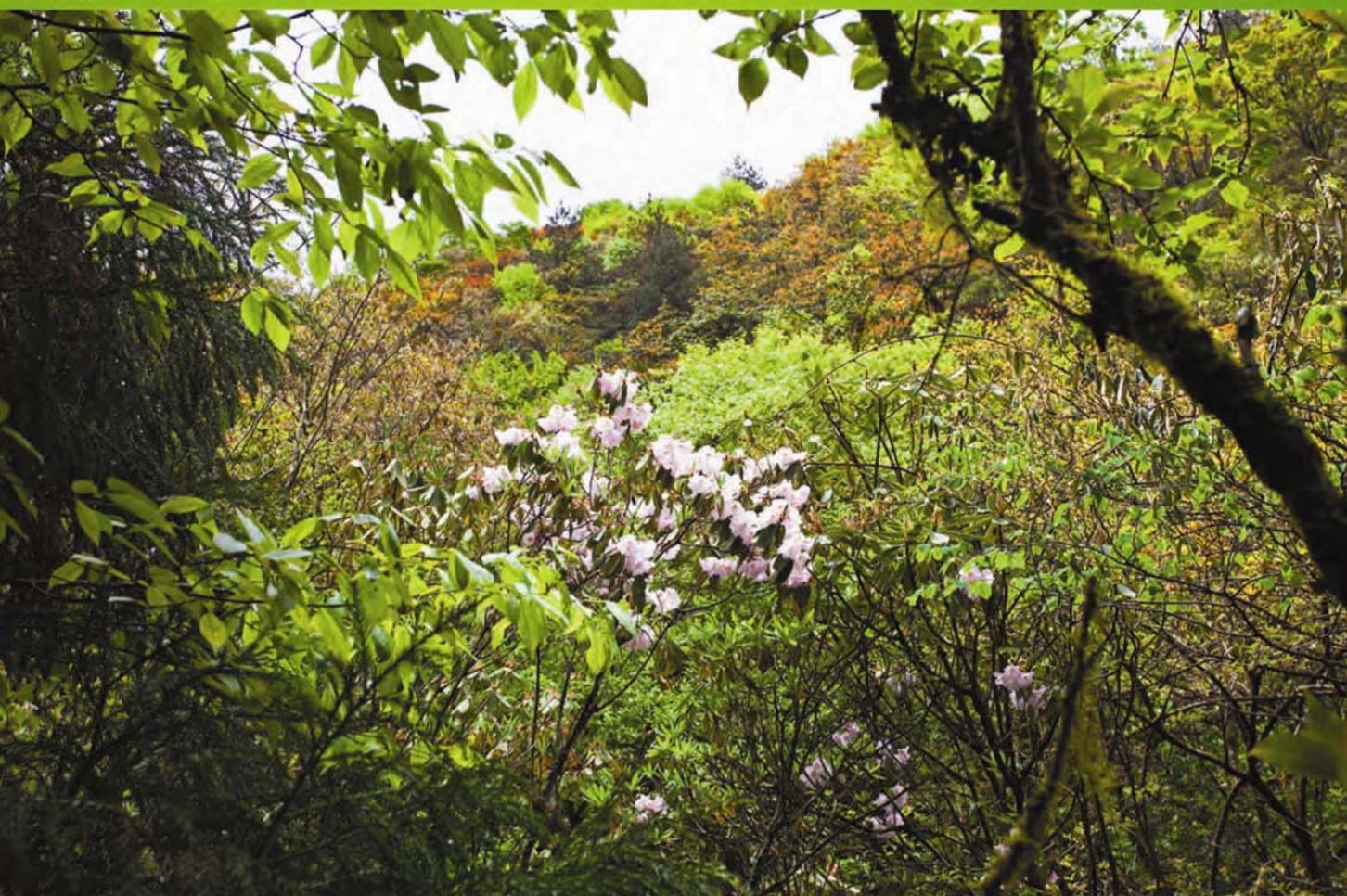


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 21 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究····· 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展····· 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展····· 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响····· 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析····· 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响····· 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点····· 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究····· 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔河沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险····· 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响····· 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响····· 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性····· 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响····· 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘦对盐肤木光合特性和总氮含量的影响····· 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性····· 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应····· 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价····· 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征····· 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系····· 朱先进,于贵瑞,王秋风,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响····· 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性····· 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响····· 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性····· 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究····· 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 马赞花,张铜会,刘新平 (6984)

SWAT 模型融雪模块的改进 余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)

科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应 常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)

三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素 吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例 黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)

学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 刘某承 (7044)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207110977

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.

Yu W J, Nan Z T, Zhao Y B, Li S. Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6992-7001.

SWAT 模型融雪模块的改进

余文君^{1,2}, 南卓铜^{1,*}, 赵彦博³, 李 硕²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210046;

3. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730030)

摘要:水土评价工具模型(SWAT)是一个具有物理基础的分布式水文模型,利用 SCS 径流曲线数方法计算地表径流,而采用相对简单的度日因子方法计算融雪径流。因此在湿润半湿润、雨量丰富的平原地区应用 SWAT 模型进行径流模拟时可以得到较好的模拟结果,但是在干旱半干旱、降水稀少,且春汛期间融雪径流是重要补给来源的高寒山区,模拟的融雪径流明显偏小,不能很好的反映这些地区的融雪过程,导致河道径流模拟精度偏低。FASST 模型是具有物理机制的陆面过程模型,其采用能量平衡的方法计算融雪径流,能够较好的模拟复杂地形山区流域的融雪径流。以黑河山区流域为研究区,将 FASST 模型集成到 SWAT 模型,改善 SWAT 模型融雪径流的计算方法。通过对比 SWAT 模型集成前后莺落峡出口口的河道月径流、融雪径流和地表径流对河道的贡献等几个方面,表明了集成 FASST 融雪模块的 SWAT 模型能更好的反映黑河山区流域的融雪径流过程,从而提高河道径流的整体模拟精度。

关键词:SWAT; FASST; 模型集成; 融雪径流; 黑河流域

Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model

YU Wenjun^{1,2}, NAN Zhuotong^{1,*}, ZHAO Yanbo³, LI Shuo²

1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China

2 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, 210046, China

3 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, 730030, China

Abstract: SWAT is a physically explicit distributed hydrologic model, which could simulate hydrological processes such as surface runoff, snowmelt runoff and infiltration with geographic information system (GIS). The surface runoff component in SWAT is implemented by using the SCS curve number and snowmelt is calculated by a relatively simple, empirical degree-day method. Those approaches work well in humid and semi-humid areas where precipitation dominantly controls runoff. In cold and arid regions, for example, in a case study in the Heihe river basin (HRB) of northwest China, however, it revealed those implementations cannot represent the effects of snowmelt in springs and thus impact surface runoff simulations. At large, snowmelt in such areas is underestimated and more discrepancies are consequently introduced to the overall simulation accuracy. The FASST model is a surface process model with explicit physical base, including a snowmelt runoff component that makes use of mass and energy balance equations. There is a snowmelt implementation in FASST, which takes topography, vegetation, soil type, and snow physical properties into account. Existing applications of FASST show good simulations of snowmelt in terrain-complex mountainous watershed and its applicability is also confirmed by an application to the Tangula site of northwest China located in a similar cold and alpine area. This paper proposes a coupling approach to improve the simulation of snowmelt by integrating FASST snowmelt to SWAT. In this approach, when the

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(91125006);国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFSE201009)

收稿日期:2012-07-11; **修订日期:**2013-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nztong@lzb.ac.cn

snowmelt begins to be calculated in SWAT, it will call FASST snowmelt to calculate, return its value to the SWAT corresponding variable and continue remainder SWAT logics. The technical implementation is presented in detail. An application to the upper mountainous HRB is set up to test its performance. There are abundant snow falls in Upper HRB in winters and snowmelt is the primary water source to river in springs that cannot be simulated well by original SWAT. The improvements in comparison to the original were examined from three aspects, namely, streamflow, snowmelt runoff and surface runoff contribution to streamflow. Both snowmelt and surface runoff estimates with the coupled model were increased so that streamflow estimate was more close to that observed. An improvement of monthly streamflow estimation by 0.11 in Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) can be achieved. Examination of surface runoff contribution to streamflow also supports its feasibility in estimating snowmelt by the coupled approach. Moreover, by using optimized parameter sets, the monthly streamflow simulation accuracy in the validation period of 2000—2009 can be up to 0.83 in NSE. The results confirm the applicability of the SWAT-FASST coupled approach in cold and alpine watersheds where snowmelt should be taken into account and suggest its significance in improving the simulations in such areas.

Key Words: SWAT (Soil and Water Assessment Tool); FASST; model integration; snowmelt runoff; Heihe River Basin (HRB)

水土评价工具模型(SWAT, Soil and Water Assessment Tool)^[1]是美国农业部在(SWRRB)模型基础上开发的具有物理机制的大、中流域尺度的分布式流域水文模型,可以模拟和预测地表径流、融雪径流等多种物理过程。

SWAT 模型功能强大,在国内外都得到了广泛的应用研究。比如 Pradhanang 等应用 SWAT 模型模拟了美国 Cannonsville 流域的雪盖变化和河道径流量^[2];van Liew 和 Grabrecht 对美国 Little Washita 流域不同气候条件下进行水文模拟取得了较好的模拟效果^[3]。但是 SWAT 模型的功能和参数是针对气候湿润、雨量丰富的流域设置的,在其他流域应用时,模型应该根据地区的流域水文特征进行适当的调整和改进,例如 Ahl 等在 Rocky 山区流域应用中指出通过参数率定可以使 SWAT 模型模拟的融雪径流效果得到一定提高^[4];德国波茨坦气候研究所结合 SWAT 模拟水文过程和 MATSALU 水质估量的优势开发了中尺度分布式(SWIM, Soil and Water Integrated Model)模型^[5];Luo 和 Sophocleous 将 SWAT 模型和 MODFLOW 模型耦合,改善了 SWAT 模型地下水和地表交互过程的模拟^[6];Eckhardt 等在 SWAT99.2 模型的基础上改进了的入渗和壤中流的计算方法,发展了适合于低山区的 SWAT-G 模型^[7]。国内郑捷等对 SWAT 模型的农作物耗水量计算模块计算改进,在平原型灌溉区应用时取得了较好的模拟^[8];张永勇等根据中国流域特征对 SWAT 模型水质模块进行了改进,月径流模拟的相关系数和效率系数均达到 0.8 以上^[9]。

位于我国西北的黑河山区流域是一个典型的干旱半干旱地区,降水稀少,春汛期间融雪径流是其主要补给来源。黄清华和张万昌在黑河山区流域应用 SWAT 模型进行了 11a 的月径流模拟,认为在该区融雪径流和地下径流参数是精确 SWAT 模拟的关键^[10]。而 SWAT 模型的融雪模块采用了相对简单的度日因子方法计算融雪径流,应用 SWAT 模型在黑河山区流域进行模拟时,发现该流域的融雪过程不能得到很好的模拟,严重影响了流域的径流模拟精度,因此需要对 SWAT 模型的融雪模块进行改进以提高 SWAT 模型的整体模拟精度。FASST(Fast All-season Soil Strength model)模型是一个基于物理过程的模型,采用能量平衡的方法计算融雪径流,能够更好的反映和模拟黑河山区流域的水文过程,因此本文采用模型集成的方法将 FASST 模型集成到 SWAT 模型,以改进 SWAT 模型的模拟效果。

1 模型改进方法

1.1 SWAT 模型的融雪算法

SWAT 模型是一个具有物理机制、以日为时间步长,可以连续长时间段模拟的分布式水文模型。它可以根据日降水数据、日气温数据、日相对湿度和风速,模拟流域内地表径流、融雪径流、侧向流和下渗等水文过程,通过汇流作用,流入河道。融雪径流是通过地表径流贡献给河道,进而影响模型的总径流模拟精度。

SWAT 模型水循环基本水量平衡方程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - w_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中, SW_t 为最终土壤含水量 ($\text{mm H}_2\text{O}$), SW_0 为第 i 天的初始土壤含水量, t 为时间 (天), R_{day} 为第 i 天的降水量 ($\text{mm H}_2\text{O}$), Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量 ($\text{mm H}_2\text{O}$), E_a 为第 i 天的蒸散发 ($\text{mm H}_2\text{O}$), w_{seep} 为第 i 天通过土壤剖面进入包气带的水量 ($\text{mm H}_2\text{O}$), Q_{gw} 为第 i 天地下水回归流量 ($\text{mm H}_2\text{O}$)。

融雪径流根据雪盖情况以及产生融雪径流的温度阈值, 通过一个气温的线性函数计算, 即采用度日因子的方法计算融雪径流, 即设定一个雪融化的温度阈值, 当温度升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$, 融化的雪水当量值 (当积雪完全融化后, 所得到的水形成水层的垂直深度) 为一个固定值。雪盖消融曲线计算方程如下:

$$\text{sno}_{\text{cov}} = \frac{\text{SNO}}{\text{SNO}_{100}} \cdot \left(\frac{\text{SNO}}{\text{SNO}_{100}} + \exp(\text{cov}_1 - \text{cov}_2 \cdot \frac{\text{SNO}}{\text{SNO}_{100}}) \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, sno_{cov} 是 HRU 上雪盖面积的百分数; SNO 是单位时间的雪水当量 ($\text{mm H}_2\text{O}$); SNO_{100} 是 100% 雪盖时的雪水当量 ($\text{mm H}_2\text{O}$); cov_1 和 cov_2 是系数, 由雪盖消融曲线上两点 (95% 的覆盖和 50% 的覆盖) 计算。融雪径流的计算方程如下:

$$\text{SNO}_{\text{melt}} = b_{\text{melt}} \cdot \text{sno}_{\text{cov}} \cdot \left[\frac{T_{\text{snow}} + T_{\text{mx}}}{2} - T_{\text{melt}} \right] \quad (3)$$

式中, SNO_{melt} 是单位时间内的融雪量 ($\text{mm H}_2\text{O}$); b_{melt} 是融雪因子 ($\text{mm H}_2\text{O d}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); sno_{cov} 是 HRU 上雪盖面积的百分数; T_{snow} 是雪盖温度 ($^\circ\text{C}$); T_{mx} 当天最高气温 ($^\circ\text{C}$); T_{melt} 雪融化的温度阈值 ($^\circ\text{C}$)。

1.2 融雪模块的改进

SWAT 模型融雪径流的计算主要考虑空气温度的影响, 度日因子的方法适用于雨量丰富、地形平坦的平原地区, 而在黑河山区这种高海拔、气候寒冷、降雨稀少的流域, 融雪径流不仅受温度影响严重, 地形、气候变化和太阳辐射对融雪径流也有很大的影响, 导致 SWAT 模型度日因子的方法模拟的融雪径流精度较低。本文采用集成的方法将具有物理基础的 FASST 模型集成到 SWAT 模型, 以提高 SWAT 模型在高海拔干旱地区的整体模拟精度。

1.2.1 FASST 模型的融雪算法

FASST 模型是一个基于物质能量平衡的陆面过程模型。FASST 模型的输入数据包括日平均降水、日平均温度、风速、相对湿度和太阳辐射数据、地形参数 (坡度和坡向)。

FASST 模型的融雪模块以融雪的物理过程为基础, 当已知降雪量或者温度在水冻结点以下降水发生时, 此时降水量被转化为降雪量, 开始积雪, 采用雪盖表面能量平衡的方法计算融雪径流, 考虑了雪颗粒生长、雪深度、下渗率、太阳辐射等因子, 这些因素的考虑与 SWAT 模型融雪计算有着本质的区别 (式 (5) 和 (6))。Frankenstein 等将 FASST 和另一个成熟的融雪模型 SN THERM 计算的融雪径流进行对比, 研究结果表明在山区流域 FASST 模型比 SN THERM 模型径流模拟的结果好^[11]。因此本文选择将 FASST 模型集成到 SWAT 模型, 以改善 SWAT 模型的融雪模块, 提高 SWAT 模型径流的模拟精度。FASST 模型融雪径流基本计算方程如下^[12]:

$$U = \frac{\rho_w k g}{\mu_w} \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^n \quad (4)$$

式中, U 是融雪径流 (m^3/s); ρ_w 是水密度 (kg/m^3); k 是总渗透率 (m^3/s); g 是重力加速度 (m/s^2); μ_w 是水粘度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$); S_w 是饱和含水量 (%); S_{wi} 是凋萎含水量 (%); n 是固定值, 取 2.16—4.59, 默认 3.3。该方程采用变量分离度方法进行计算^[12]。

FASST 模型考虑到冰晶的增加, 方程如下^[12]:

$$V(t) = V_0 + V't \quad (5)$$

$$V' = V'_0 + V'_1 L^3$$

式中, $V(t)$ 是 t 时刻的冰晶体积 (mm^3); V_0 是初始等球体积 (mm^3); t 是时间 (s); V' 是冰晶体积随时间变化量 (mm^3/s); V'_0 为固定值, $1.25 \times 10^{-8} \text{mm}^3/\text{s}$; V'_1 为固定值, $4.22 \times 10^{-10} \text{mm}^3/\text{s}$; L 是液态水百分含量 (%)。

FASST 模型考虑到雪孔隙下渗的影响, 方程如下^[12]:

$$k = 0.077d^2 \exp(-7.8\rho_s)$$

$$d = 2 \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V_{av}} \quad (6)$$

式中, d 是冰晶的直径 (m); ρ_s 是雪的密度 (kg/m^3); V_{av} 是晶体的平均体积 (m^3)。

1.2.2 FASST 模型的适用性

尽管 FASST 模型在国外有较多的应用, 均表明有较好的融雪模拟精度, 然而在如黑河山区流域这样的高寒区域并没有直接的应用, 因此在把 FASST 集成到 SWAT 前, 需要对其在高寒山区的适用性进行基本的验证。黑河山区流域的大冬树垭口布设有积雪观测场, 但检查表明, 该站点的雪深数据质量欠佳。因此选用有类似高寒山区环境的唐古拉站点进行融雪量模拟, 模拟时间段为 2008 年 1 月 1 日—2008 年 12 月 31 日, 时间步长为逐日。输入数据包括空气温度、相对湿度、风速、降雨量, 土壤数据和土地利用数据通过 Google Earth 上目视解译获得。模拟结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, FASST 模型在青藏高原唐古拉站模拟的雪深数据与观测数据对比, 虽然差异较大, 但在趋势上基本保持一致。春季模拟的雪深明显偏大主要是受风速的严重影响。因为青藏高原春季风速最大, 冬、夏季次之, 秋季风速最小^[13], 风吹雪因而观测的雪深值较小, 这种现象也被现场观测人员证实。而本文采用的是日平均风速, 模型输入的春季风速明显减小, 导致模拟的雪深明显偏大。在秋冬季节 FASST 对雪深有较好的模拟, 表明了 FASST 融雪模块在寒冷高山地区的一定适用性。模拟的偏差同时也有测量雪深仪器和系统的误差即雪深观测数据误差的原因, 同时本文土壤植被等参数的取值可能也不是最佳。然而总体而言, 认为 FASST 模型在青藏高原唐古拉站的模拟结果能够反映研究区的积雪情况。

1.2.3 集成的技术实现

本文选择 ArcView 3.2 作为 SWAT 模型的可视化平台, 即 AVSWAT 模型, 为 SWAT 模型准备和处理模型的输入输出数据。其中 AVSWAT 计算的流域平均坡长存在较大的误差, 对径流量的模拟有显著影响^[14], 本文采用修正之后的流域平均坡长进行模拟。

SWAT 模型的输入数据包括地形河道数据 (数字高程模型 (DEM) 和数字河网)、气象水文观测数据 (日均最高/最低气温、太阳辐射、风速和相对湿度)、土壤数据和土地利用数据。SWAT 模型利用 DEM 数据、数字河网、土壤类型和土地利用类型, 采用流域-子流域-水文响应单元 (HRU) 的空间离散化方法。FASST 模型使用和 SWAT 模型相同的基础数据 (图 2) 作为输入数据, 包括土壤、土地利用数据和气象水文数据; SWAT 模型的每个 HRU 有对应的属性数据, 包括空间单元面积、坡长、坡度、植被类型、土壤类型、土壤含水量、土壤厚度等,

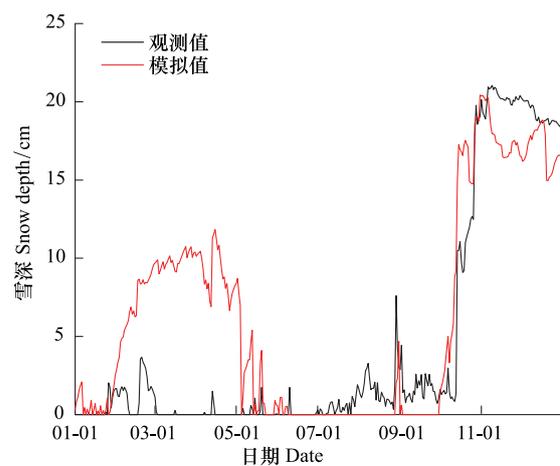


图 1 FASST 青藏高原唐古拉站点雪深模拟值和观测值对比以及降水量观测值

Fig.1 Measured snowmelt runoff at the Tanggula site on Tibet Plateau and the simulated snowmelt by the FASST model, together with precipitation records in 2008

根据这些属性表数据得到 FASST 对应的参数数据(图 2),作为 FASST 模型的外部输入数据。

SWAT 模型按照时间-空间(HRU)循环,FASST 模型在单点上进行时间循环;去掉 FASST 模型的时间循环,由 SWAT 模型的时间循环控制;当 SWAT 模型运行到每一个 HRU 时,调用 FASST 模型,将 FASST 模型计算的融雪量返回给 SWAT 模型,技术路线如图 2 所示。

分解 FASST 模型的时间循环,将其融雪模块、植被模块和土壤模块等核心计算过程编译成一个动态链接库嵌入到 SWAT 模型最小时空循环里,即 SWAT 模型的融雪模块。SWAT 模型计算到融雪模块时,将 SWAT 模型计算的土壤温度变量赋值给 FASST 模型,然后调用 FASST 模型。初次调用 FASST 模型时,需要对模型进行初始化,然后每次调用 FASST 模型时都会生成对应的模型状态变量和融雪变量值,需要将这些变量保存起来,作为下一次调用时的输入数据,并且将融雪变量值替换 SWAT 模型计算的融雪变量值。

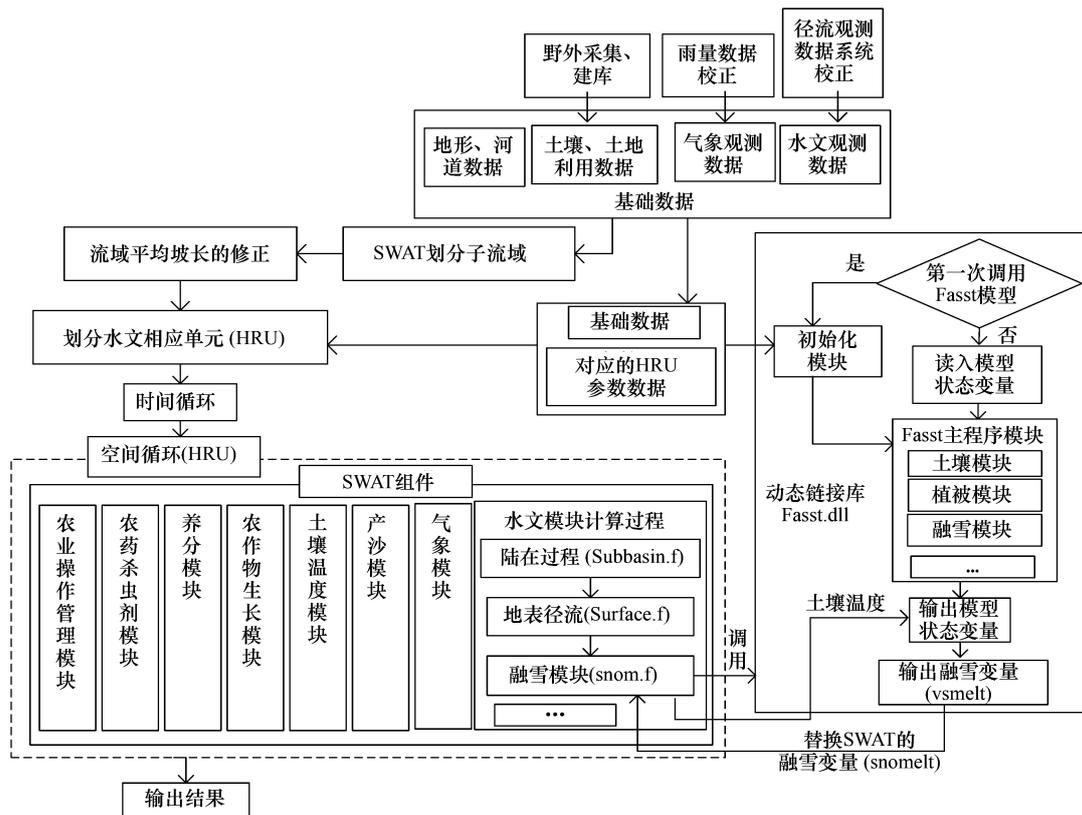


图 2 技术路线

Fig.2 Technical implementation schema

1.3 研究区与数据

1.3.1 研究区概况

黑河山区流域介于东经 98°34'—101°09'E、北纬 39°06'—37°43'N 之间,出山口站点是莺落峡水文站,流域面积约为 10 000 km²,河道长 303 km,源头为冰川,海拔范围为 1674—5076 m,流域内景观垂直分布明显,水文地理及水文地质条件十分复杂。上游海拔 4 500 m 以上为永久冰川积雪带,年平均气温 3—7 °C,降水约在 300—700 mm;海拔 2 600—4 500 m 的地区年平均气温 2.0—1.5 °C,年降水量在 200 mm 以上,最高达 700 mm,蒸发量约 700 mm。该地区降水量由东向西递减,雪线高度由东向西逐渐升高,水资源主要来源于祁连山区的降水和冰雪融化。上游山区植被属温带山地森林草原,由高到低依次分布:高山垫状植被带、高山草甸植被带、高山灌丛草甸带;主要土类有寒漠土、高山草甸土、高山灌丛草甸土、高山草原土、亚高山草甸土、亚高山草原土等。

1.3.2 数据准备

DEM 数据来源于 90 m 空间分辨率(图 3)。数字河网是从 1:10 万地形图上将水系手工数字化得到(图 3)。水文气象站数据、土地利用数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。水文数据采用扎马什克、祁连、莺落峡 3 个站点的 1990 年 1 月—2009 年 12 月的日观测径流和降雨量数据(图 3);气象数据采用张掖、野牛沟、祁连、俄博和托勒 5 个站点(图 3)的 1990 年 1 月—2009 年 12 月的日观测数据,包括温度(日均最高/最低气温)、太阳辐射、风速和相对湿度。为了提高 SWAT 模型气象发生器模拟精度,在流域内部选择了不同高度的点,根据高程和周边雨量站数据进行插值计算^[15],获得补插的雨量站点(图 3)。土地利用根据 2000 年全国土地利用图剪裁得到;土壤图剪裁于全国第二次土壤调查产出的 1:100 万土壤图。土壤颗粒分、含水量、容重、有机质、导水系数等基本属性数据是 2010 年 8—9 月通过野外采样试验和室内分析获得。本文图件和相关点位坐标(水文站、气象站)都采用了高斯-克吕格投影系统。

黑河上游山区自 2000 年以后兴建水库,导致控制站点莺落峡站的观测数据受水库蓄水等因素影响,不代表自然径流。本文采用的是利用系统水文模型^[16]的方法还原莺落峡站的 2000—2009 年的逐日自然径流量作为径流观测数据。

1.3.3 基本参数设定

根据经验,本文将集水区面积阈值设置为 1000 hm²,共划分了 43 个子流域;土地利用面积阈值设置为 5%,土壤类型面积阈值设置为 10%,划分了 256 个 HRU。控制站莺落峡站为流域的总出口,以月为时间步长,模拟的时间段为 1990—2009 年,其中 1990—1999 年为率定期,2001—2009 年为验证期。

FASST 模型的基础数据和参数数据除了 SWAT 模型提供的以外,太阳辐射和云层数据由 FASST 模型自带独立的气象数据处理工具根据站点经纬度、高程和基本气象数据计算;土壤数据则由 FASST 模型提供的独立土壤数据处理工具根据 SWAT 的土壤属性数据转换得到。

2 结果与讨论

SWAT 模型模拟的河道径流成分主要包括地表径流、壤中流和地下径流,而融雪径流的计算过程直接影响地表径流,进而影响河道径流的模拟精度。

2.1 莺落峡出山口河道月径流对比分析

在采用修正后的平均坡长^[14]、其他参数为 SWAT 模型默认参数组的情况下,应用 SWAT 模型在黑河山区进行模拟,纳什系数为 0.61,结果如图 4 所示。从图中可以看出,无论坡长修改前后,融雪期 3—5 月,模拟值均明显偏小,几乎为 0。说明流域平均坡长的修正对丰水期的径流有显著影响,而对融雪径流没有任何影响,从而排除了流域平均坡长的修正方法对集成后 SWAT 模型融雪模块的模拟结果的影响。

将 FASST 模型集成到 SWAT 模型后,采用 SWAT

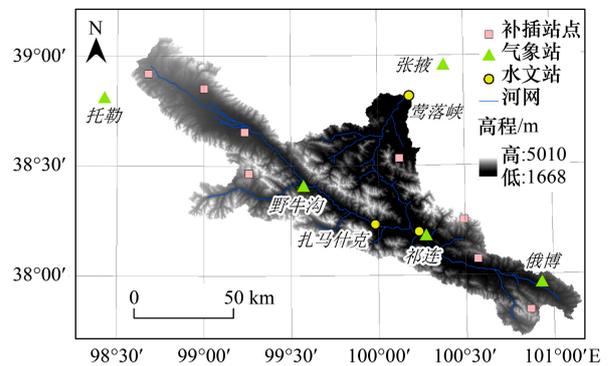


图 3 黑河山区流域 DEM 和气象水文站点示意图

Fig. 3 Study area, the upper HRB, and the locations of meteorological and hydrological stations within this area

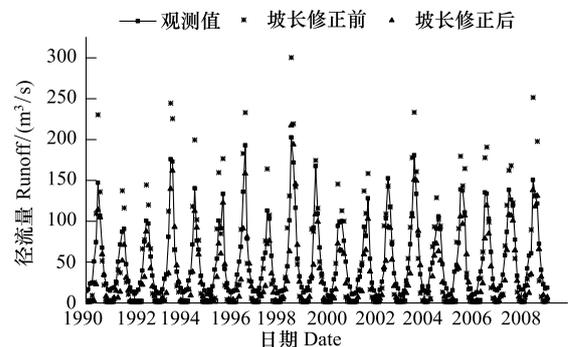


图 4 坡长修改前后的 1990—2009 年径流值对比图(其他参数为 SWAT 模型默认设置)

Fig. 4 Measured and SWAT simulated monthly streamflow of the period of 1990—2009 (Simulations with cross marks are with corrected average slope lengths inputs, and those with triangular marks are with SWAT originally computed average slope lengths)

和 FASST 模型默认参数组,对黑河山区流域进行径流模拟,模拟期为 1990—1999 年,结果如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,集成 FASST 后的 SWAT 模型,融雪期 3—5 月的模拟值有所增加,总径流量值也增加了,纳什系数为 0.72,提高了 0.11。表明集成后的 SWAT 模型改善了融雪模块的计算方法,模拟精度得到了提高。

总体而言,SWAT 模型的模拟精度依然不是很高,需要对 SWAT 模型的其他参数(土壤属性等)进行优化。本文对集成后的 SWAT 模型的模拟值进行敏感性分析,CN2(径流曲线数)、Alpha_Bf(地下水径流系数)、Esco(土壤蒸发补偿系数)、Gwqmn(浅层地下水回流阈值)、Revapmn(浅层地下水下渗阈值)、Sol_Z(土壤深度)等为主要的敏感参数,这些参数主要是地下水相关参数,在黑河山区流域地下水补给也是水资源来源,因此本文根据黑河山区的实际情况对这些参数进行相关优化,从图 5 看出,模拟的峰值和基流偏小,退水期偏低,因此增加 CN2、Gwqmn、Revapmn,减小 Alpha_Bf、ESCO。1990—1999 年的模拟结果如图 7 所示,纳什系数为 0.86,提高了 0.14。本文应用集成后的 SWAT 模型和同样的参数对 2000—2009 年的径流进行模拟,如图 8 所示,纳什系数为 0.83,表明对这些参数的优化以及将 FASST 集成到 SWAT 模型以改善 SWAT 模型融雪计算方法是合理的。

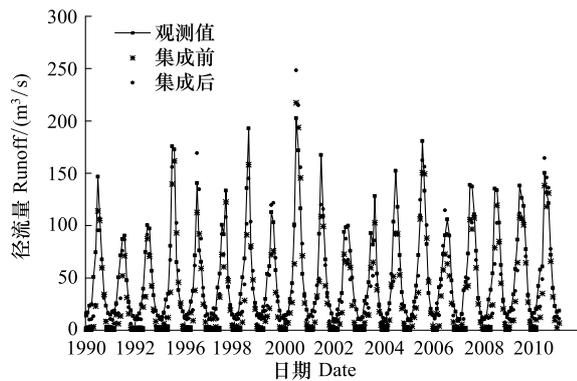


图 5 集成前后 1990—1999 年月径流值对比图(使用改进的流域平均坡长和其他默认参数)

Fig.5 Monthly streamflow simulations of the period of 1990—2009 with original SWAT and coupled FASST-SWAT with the default parameter set coming with SWAT and corrected average slope lengths, together with measured streamflow for evaluation purpose

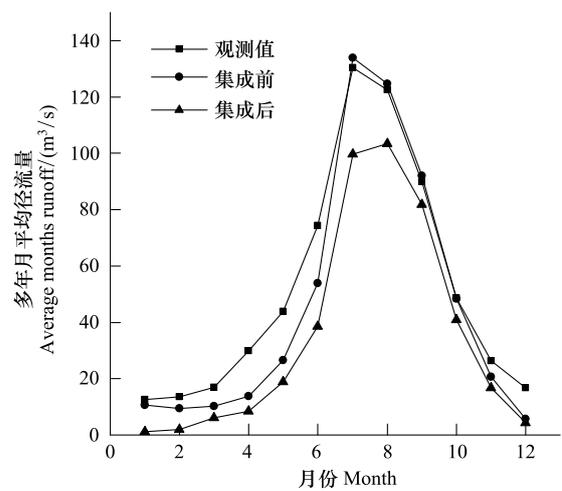


图 6 集成前后 1990—2009 年月平均径流值对比图

Fig.6 Monthly average streamflow simulations of the period of 1990—2009 with original SWAT and coupled FASST-SWAT

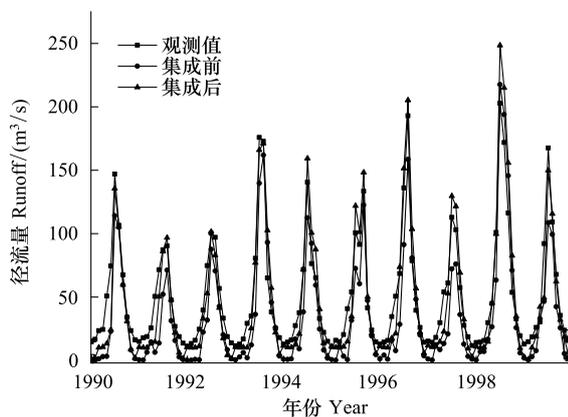


图 7 参数优化后 SWAT 模型 1990—1999 年径流模拟值对比
Fig.7 Simulated monthly streamflow in the calibration period of 1990—1999 using optimized parameters versus measured streamflow

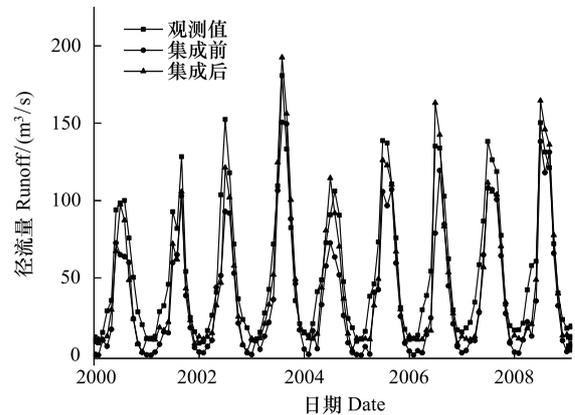


图 8 参数优化后 SWAT 模型 2000—2009 年径流模拟值对比
Fig.8 Simulated monthly streamflow in the validation period of 2000—2009 using optimized parameters versus measured streamflow

2.2 融雪径流对比分析

在 SWAT 模型中参数不变情况下(默认参数),将集成 FASST 模型前后的 SWAT 模型模拟的黑河山区流域 1990—2009 年的融雪径流进行对比,如图 9 所示,图中的融雪值为黑河山区流域模拟时间段内不同时刻全部子流域计算的融雪值的累加。从图中可以看出,集成后的 SWAT 模型模拟的融雪径流有所增加,融雪期 3—5 月的模拟值有一定的增加。这也进一步说明了集成后的 SWAT 模型更适合在高寒山区进行模拟。

将 SWAT 模型集成前后模拟的河道流量的进行差值计算,如图 10 所示。从图中可以看出,集成 FASST 模型的 SWAT 模型模拟的河道径流明显增加。根据图 11 看出祁连、野牛沟、莺落峡、扎马什克在 1993、1994、1998、1999、2003 和 2008 年降雨量出现明显的峰值。降水量的增加,导致积雪增加,同时受温度影响,融雪径流增加,补给河道径流。集成后的 SWAT 模型模拟的河道径流增加量也出现了峰值,如图 10 所示。由于融雪径流要经过一段时间的汇流过程才能达到河道,经过下渗和蒸散发等作用,融雪径流在到达河道前消耗量较大,因此融雪径流深度要大于对河道径流的补给。总体而言,表明集成后的 SWAT 模型能在一定程度上提高了模拟精度。

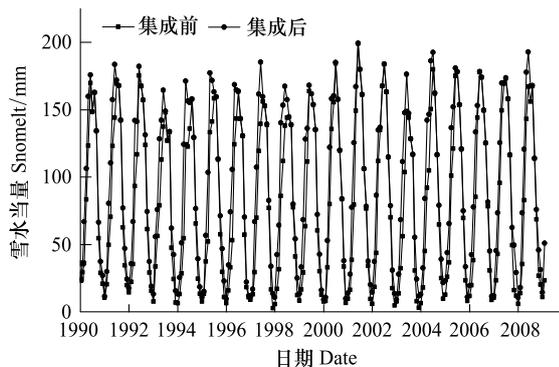


图 9 集成前后 SWAT 模型模拟的 1990—2009 年的融雪径流对比图(无参数优化)

Fig.9 Comparison of snowmelt runoff simulated by original SWAT and coupled SWAT with default parameters in 1990—2009

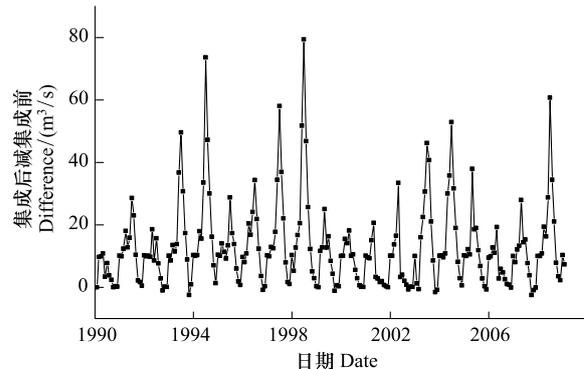


图 10 集成前后 SWAT 模型模拟 1990—2009 年径流量差值(无参数优化)

Fig.10 Difference of yearly streamflow simulations by original and coupled SWAT model with default parameters in 1990—2009

2.3 地表径流对河道的贡献

SWAT 模型的地表径流是利用改进的美国农业部径流曲线数方法计算,即根据降雨量与径流关系的经验公式计算,径流曲线数(CN)取决于土壤水文组,土地利用类型和土壤含水量,是 SWAT 模型重要的水文参数。因为 SWAT 模型模拟的融雪径流在计算过程中并不是直接贡献给河道径流,而是通过影响地表径流,从而影响河道径流量。将 FASST 模型集成到 SWAT 模型,只是改变了 SWAT 模型融雪径流的计算方法,并不影响 SWAT 模型地表径流和河道径流量的计算方法。因此地表径流对河道的贡献也间接反映融雪量对河道径流的影响,从而间接证实了 FASST 模型集成到 SWAT 模型对模拟精度的提高。

本文将 FASST 模型集成到 SWAT 模型前后计算的地表径流对河道径流量的贡献进行分析,如图 12 所示。从图中可以看出,春汛期间,地表径流对河道贡献量的模拟值增加并不显著,这是因为春季气温低,融雪速度缓慢,融雪径流的汇流过程和下渗作用时间长,融雪径流对壤中流和地下水进行补给;而夏季空气温度高,春季累积的积雪融化加速,地表径流对河道贡献量明显增加,对比于观测数据,对河道的增加量是合理的,从而进一步说明了集成后的 SWAT 模型能更好的模拟黑河山区的水文过程。

3 结论

SWAT 模型的融雪模块采用的是基于空气温度的线性函数计算,根据融雪因子的方法计算融雪量,在干旱半干旱、降水量较少的地区,以融雪径流、地下水和地表径流为补给来源,其中春汛期间融雪径流是主要补

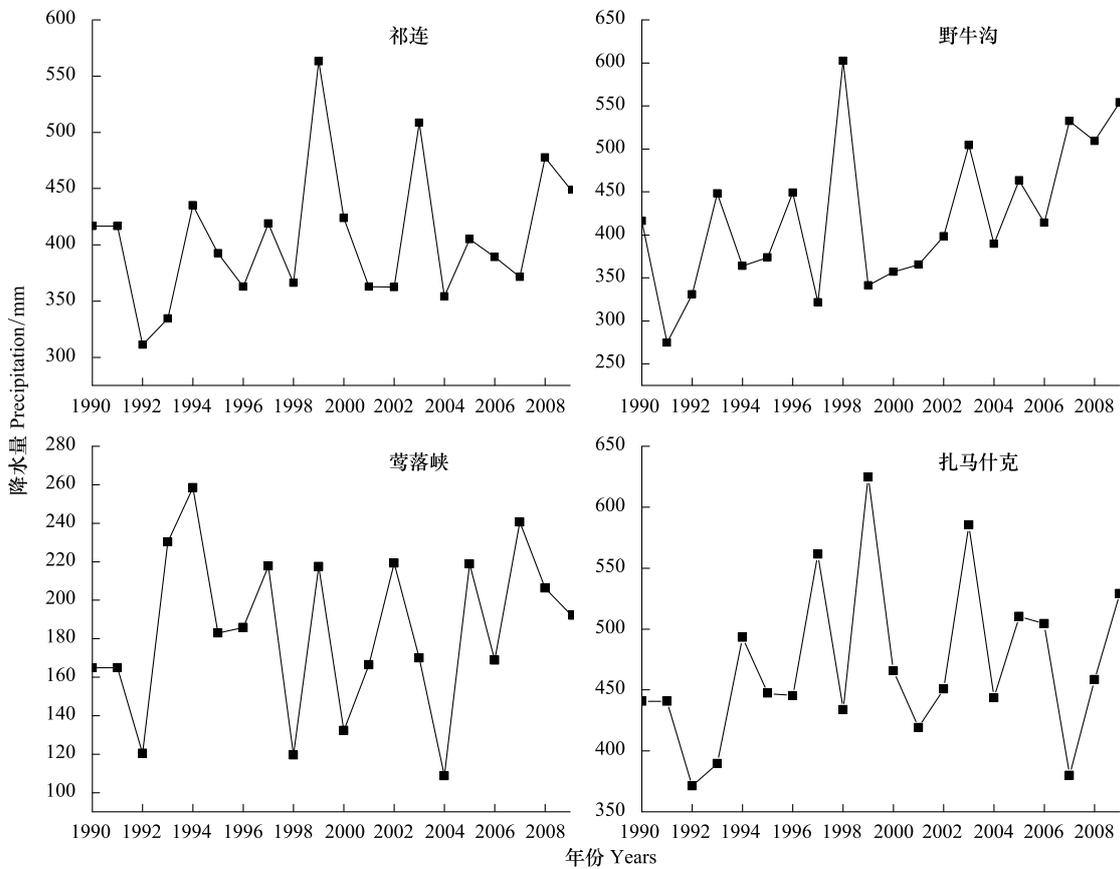


图 11 各站点 1990—2009 年降水量
 Fig.11 Measured yearly precipitation of stations in 1990—2009

给来源。应用 SWAT 模型在这些地区进行径流模拟时,不能很好的反映高寒山区的融雪过程,影响了地表径流的模拟。本文针对该问题,将具有融雪物理机制的 FASST 模型集成到 SWAT 模型,改善 SWAT 模型的融雪计算方法,从而提高 SWAT 模型的模拟精度。

本文以黑河山区流域为研究区,对比分析了集成前后 SWAT 模型的河道径流、融雪径流、融雪深度和地表径流对河道的贡献量的模拟结果,说明了集成了 FASST 模型的 SWAT 模型能更好的反映高寒山区的融雪径流,径流模拟精度也得到了提高,取得了较好的模拟结果,从而验证了本文的通过将 FASST 模型集成到 SWAT 模型的方法提高模拟精度是可行的。后期工作希望将集成后的 SWAT 模型进行模块拆分,并集成到建模环境,更大的发挥 SWAT 模型的优势。

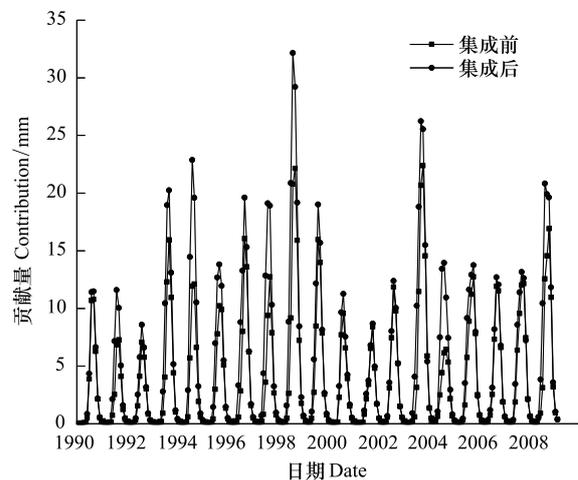


图 12 集成前后 SWAT 模型模拟 1990—2009 年地表径流对河道的贡献
 Fig.12 Surface runoff contributions to streamflow simulated by original and coupled SWAT model in 1990—2009

References:

[1] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, Arnold J G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250.
 [2] Pradhanang S M, Anandhi A, Mukundan R, Zion M S, Pierson D C, Schneiderman E M, Matonse A, Frei A. Application of SWAT model to

- assess snowpack development and streamflow in the Cannonsville watershed, New York, USA. *Hydrological Processes*, 2011, 25(21): 3268-3277.
- [3] van Liew M W, Garbrecht J. Hydrologic simulation of the Little Washita river experimental watershed using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(2): 413-426.
- [4] Ahl R S, Woods S W, Zuuring H R. Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain Watershed, Montana, U. S. A. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(6): 1411-1430.
- [5] Krysanova V, Müller-Wohlfeil D I, Becker A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling*, 1998, 106(2/3): 261-289.
- [6] Luo Y, Sophocleous M. Two-way coupling of unsaturated-saturated flow by integrating the SWAT and MODFLOW models with application in an irrigation district in arid region of West China. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(3): 164-173.
- [7] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, Frede H G. SWAT-G, a version of SWAT99. 2 modified for application to low mountain range catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27(9/10): 614-644.
- [8] Zheng J, Li G Y, Han Z Z, Meng G X. Application of modified SWAT model in plain irrigation district. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 88-97.
- [9] Zhang Y Y, Wang Z G, Yu L, Xia J, Chen X D. Extended water quality module of SWAT Model and its application to Hai River Basin. *Resources Science*, 2009, 31(1): 94-100.
- [10] Huang Q H, Zhang W C. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River Basin, China. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2004, 28(2): 22-26.
- [11] Frankenstein S, Sawyer A, Koeberle J. Comparison of FASST and SNTherm in three snow accumulation regimes. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(6): 1443-1463.
- [12] Frankenstein S, Koenig G. *Fast All-season Soil Strength (FASST)*. Washington: U. S. Army Corps of Engineers Washington, 2004: 58-69.
- [13] You Q, Kang S, Flügel W A, Pepin N, Yan Y, Huang J. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau. *Climate Research*, 2010, 42(1): 57-64.
- [14] Yu W J, Nan Z T, Li S, Li C G. Average slope length calculation and runoff simulation. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(1): 41-48.
- [15] Li S, Sun B, Zeng Z Y, Zhao Q G. Study on spatial discretization in basin simulation aided by RS and GIS. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 183-189.
- [16] Hu X L, Chang J J, Yao Z Z, Jia H S. Study and application of hydrology forecast model in the arid and semi-arid regions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 409-413.

参考文献:

- [8] 郑捷, 李光永, 韩振中, 孟国霞. 改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用. *水利学报*, 2011, 42(1): 88-97.
- [9] 张永勇, 王中根, 于磊, 夏军, 陈向东. SWAT 水质模块的扩展及其在海河流域典型区的应用. *资源科学*, 2009, 31(1): 94-100.
- [10] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(2): 22-26.
- [14] 余文君, 南卓铜, 李硕, 李呈罡. 黑河山区流域平均坡长的计算与径流模拟. *地球信息科学*, 2012, 14(1): 41-48.
- [15] 李硕, 孙波, 曾志远, 赵其国. 遥感、GIS 辅助下流域空间离散化方法研究. *土壤学报*, 2004, 41(2): 183-189.
- [16] 胡兴林, 畅俊杰, 姚志宗, 贾怀森. 干旱半干旱地区水文预报模型研究及应用——以洮河流域为例. *冰川冻土*, 2003, 25(4): 409-413.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Gross ecosystem product: theory framework and case study OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

Autecology & Fundamentals

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China
Sea in spring MENG Zhaoctui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River
Delta LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia
obovata* seedling ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa*
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

Population, Community and Ecosystem

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting
 CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes
 JI Zijiang, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland
 ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land
 MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinpeng (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land
 CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island
 XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir
 WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

Resource and Industrial Ecology

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area
 HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 余新晓

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元