

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0120

LI Fei, GUO Jiakai, ZHANG Shiqiang. Improvement of VIC-CAS algorithm for thermal conductivity and unfrozen water and its experimental study on simulation of hydrothermal process of permafrost[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1888-1903. [李飞, 郭佳楷, 张世强. VIC-CAS 导热率和未冻水算法改进及其对多年冻土水热过程模拟的实验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1888-1903.]

VIC-CAS 导热率和未冻水算法改进 及其对多年冻土水热过程模拟的实验研究

李 飞^{1,2}, 郭佳楷^{1,2}, 张世强^{1,2}

(1. 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要: 冻土水热过程的准确模拟对于理解和预估冰冻圈变化对水资源和生态的影响具有重要意义, 其中, 导热率和未冻水是多年冻土水热模拟中的两个关键参数。在 VIC-CAS 模型的基础上, 分别尝试用 EBM 的导热率算法和 CLM 5.0 的未冻水算法替换 VIC-CAS 模型中的导热率和未冻水算法, 并利用长江源区沱沱河站的观测数据进行了数值模拟对比试验, 分析了不同的导热率和未冻水算法对土壤分层温湿度模拟的影响。结果表明: EBM 导热率算法对浅层土壤的温度模拟优于原算法, 而在深层土壤的模拟效果变差; 对浅层土壤湿度模拟改进不明显, 而对深层土壤的模拟精度降低。CLM 5.0 未冻水算法对土壤温度模拟影响较小, 对浅层土壤的湿度模拟效果变差, 但在深层土壤上优于原算法。这两种算法的对比实验为进一步改进 VIC-CAS 模型中冻土水热过程的算法提供了借鉴。

关键词: 多年冻土; 水热模拟; VIC-CAS; 导热率; 未冻水

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1888-16

0 引言

据统计, 多年冻土约占北半球陆地面积的 24%^[1], 我国是世界第三冻土大国, 多年冻土主要分布在青藏高原、东北北部山区和西北高山区。冻土作为一类特殊的岩土, 与外界能量的交换会改变自身的热力学和水力学性质, 因此在冻融阶段的物理过程极其复杂。活动层内部土壤的水热迁移在大气交互和能水平衡中起着重要作用^[2], 影响冰冻圈生态环境^[3]和流域水文过程^[4]。

青藏高原多年冻土总面积约 $1.06 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占高原总面积的 40%^[5]。高海拔和复杂地形使青藏高原对全球气候变化极为敏感, 并通过能水交换与大气循环作用反馈到全球气候变化进程中^[6], 是全球气候的放大镜和调节器^[7], 而作为高原典型下垫面类型的多年冻土是影响全球气候变化的关键因子。近几十年, 在全球气候变暖的背景下, 青藏高

原的多年冻土呈现退化的趋势, 主要表现为多年冻土年平均地温升高, 活动层厚度加深, 冻土下限海拔上升, 多年冻土区面积减小^[8-11]。已有研究表明, 冻土退化使高原植被退化, 加速了高原草地荒漠化和盐渍化的速度^[3,12], 同时流域内夏季径流减少、冬季径流增加、年内径流过程变缓, 变化强度与流域多年冻土覆盖率有关^[13-16], 部分地区地下水储量增加^[17]等。研究冻土区土壤的水热变化可以为未来气候模式下更准确预估冻土的变化趋势, 为当地生态环境保护、水资源利用、下游社会经济发展提供重要决策依据。

在寒区陆面过程研究工作中, 土壤内部水热过程的准确描述一直是难点之一。国内外科学家基于不同的算法与需求开发大量陆面过程模型, 其中代表性的有 SHAW (Simultaneous Heat and Water Model)^[18]、CoupModel (Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere System)^[19]

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-09-03

基金项目: 国家重点研发计划专项(2019YFC1510503); 国家自然科学基金项目(41730751)资助

作者简介: 李飞, 硕士研究生, 主要从事冰冻圈冻土研究. E-mail: 996837003@qq.com

通信作者: 张世强, 教授, 主要从事寒区流域各水循环要素的观测、遥感反演与模拟研究. E-mail: zhangsq@lzb.ac.cn

和 VIC-3L (Variable Infiltration Capacity-3 Layer Model)^[20]等,这些模型通过耦合冻土模块,实现了冻土水热过程的模拟。

陆面模型为了便于描述陆面过程,通常将复杂的陆面过程参数化,在影响冻土水热模拟的参数中,土壤导热率影响土壤和大气的能量交换以及土壤内部间的能量传递,对土壤温度模拟的影响很大^[21]。很早就有国外学者对土壤热导率进行了相关研究^[22-23],Johansen^[24]在 Kersten^[22]研究的基础上于 1975 年首次提出了归一化导热系数的概念,建立了一个模拟非饱和土壤热导率的半理论模型,适用性较广。Côté 等^[25]、陆森等^[26]在 Johansen^[24]算法的基础上对土壤热导率进一步改进提高了模拟精度,扩大了适用范围。Yang 等^[27]结合全球土壤实测资料改进了 Johansen^[24]算法,提高了土壤在冻结状态下的导热系数精度。Bao 等^[28]在 EBM (Eaphy-Based Model)中借鉴了 Yang 等^[27]的成果,并嵌入了冰的导热算法^[29],在祁连山多年冻土区水热模拟方面取得了不错的进展。在国内冻土导热系数的研究中,李韧等^[30]基于野外实测数据推导出适用于青藏高原北部的计算公式。而罗斯琼等^[31]、王愚等^[32]在 Farouki^[33]、Johansen^[24]、Côté 等^[25]参数化方案的基础上发展了适用于青藏高原中部的导热系数方案并取得了较好的效果。刘为民等^[34]基于土体成分和特性等因素,任小鹏等^[35]考虑了土壤水分的相变和岩土的特点建立了各自的导热计算模型,但都存在局限性。未冻水含量对土壤热力学参数和物理性质有着重要意义^[36-37],影响冻融过程中水分的迁移^[38]。未冻水的计算模型包括经验模型和理论模型,部分模型如 GIPL2 (Geophysical Institute Permafrost Lab 2.0)^[39]采用徐敦祖等^[37]、Lovell^[40]基于实验数据提出的关于土壤温度的未冻水经验公式。VIC-3L、CLM (Community Land Model)^[41]、FE-FLOW (Finite Element Subsurface Flow System)^[42]等模型采用了在不同的冻融方案下的未冻水计算公式^[43-45]。张世强等^[46-47]、Pan 等^[48]和郭林茂等^[49]分别利用不同的陆面模型在青藏高原展开水热模拟研究,对各模型未冻水方案在水热模拟方面的适用性有着很好的参考作用。

已有研究者在青藏高原多年冻土区探究陆面模型中参数化方案对水热模拟的影响,Hu 等^[50]在唐古拉站和西大滩站对比了 Johansen^[24]、Farouki^[33]和罗斯琼等^[31]三种热导率方案,发现罗斯琼等^[31]的方

案在未冻结土壤中表现最好,而 Johansen^[24]方案在冻结土壤中表现最好。Yang 等^[51]在 CLM 5.0^[52]的基础上,在 6 种典型的植被下垫面下比较了 9 种标准化导热率方案对土壤热状态的模拟结果,结果表明选取的所有导热率方案的计算值都偏高并低估了冻结期的土壤温度,在这些方案中 Johansen^[24]方案及其派生方案在导热率的数值估算以及模拟土壤温度方面明显更优,其中 Balland 等^[53]的导热率方案在不同类型土壤的综合适用性最好。刘火霖等^[54]在那曲站评估了 Noah-MP (The Community Noah Land Surface Model with Multiparameterization Options)陆面模型^[55]下 Niu 等^[44]和 Koren 等^[56]两种未冻水参数化方案,结果表明未冻水方案对土壤湿度模拟的影响明显大于土壤温度,未冻水方案的差异显著影响冻融期土壤水分含量的变化。Hu 等^[57]基于土壤温度、土壤颗粒比表面积、水的类型和土壤水分曲线建立的未冻水计算公式,归纳并总结了共 34 种未冻水方案,并根据实地数据进行了评估,结果表明经验公式可用于计算未冻水含量,而物理模型具有更高的精度,但更为复杂,难以在实际应用中应用。在这些方案中, van Genuchten^[58]、Kozłowski^[59]、Zhang 等^[60]的方案表现较好。

本研究在 VIC-CAS 模型的基础上,综合比较了众多研究者在青藏高原水热模拟的结果,分别用 EBM 导热率算法和 CLM 5.0 未冻水算法替换原模型相应算法,利用长江源区的沱沱河站点观测资料进行为期一年的单点模拟试验,分析比较了不同算法下土壤冻融过程中温度和湿度的模拟效果,并针对模拟结果中存在的问题进行分析,为后续的模式改进提供支撑。

1 研究区概况与数据来源

沱沱河观测站(92°37' E, 33°57' N)位于长江源的多年冻土连续区^[61],海拔 4 533.1 m,地势平缓,气候干燥寒冷。地属高寒草甸地带,植被稀疏,植被覆盖度低。根据 1997—1998 年的观测,沱沱河站点的年平均气温达 -3.7℃,最低气温为 -32.9℃,最高气温为 24.3℃。流域内降水较少,年降水量在 300 mm 左右,降水集中在 6—9 月,约占年降水量的 85%,并在 9 月份降水量达到峰值。

本文观测数据来自“全球能水平衡试验-青藏高原亚洲季风试验”(Game-Tibet)项目 1994—1999 年的观测期内长江源区沱沱河站点的观测资料。

观测数据来自土壤温度和湿度观测系统(SMTMS)收集的土壤温、湿度数据。由于受限于当地的气候条件和仪器损耗等客观因素,观测数据时间序列不连贯且部分时段数据误差较大,因此选择1997年7月1日至1998年9月29日超过一年的观测数据,时间分辨率为1 h。

2 实验方法

2.1 VIC-CAS模型

VIC-CAS由赵求东等^[62]在VIC-3L的基础上耦合冰川模块构成。VIC-CAS模型以能量平衡和水量平衡为基础,在垂直方向上形成大气-植被-土壤的陆面模式,在单个格网上考虑植被、降雨、土壤、积雪等综合因素,输出单个格网的各模拟分量,并可通过汇流模型对流域内产流进行汇总。

模型的输入数据主要包括气象驱动数据、土壤参数数据、植被参数库和植被覆盖数据。模型的气象驱动数据包括气象站观测的逐时气温、风速、气压等和日降水资料作为模型的气象驱动数据输入。土壤参数数据来自国际地圈生物圈计划(IGBP)的全球土地覆盖特征数据集(GLCC)并参考了美国农业部土壤质地分类依据(USDA)和Cosby等^[63]的成果;植被参数库来自于GLCC的亚洲青藏高原植被库,部分参数参考了高原其他地区的研究资料^[64-65];植被分布来源于美国马里兰大学发布的全球陆面覆盖类型数据集(UMD)。

2.2 导热率算法

影响土壤导热率数值的因素有很多,如土壤孔隙度、粒径、饱和度、温度^[44,66-68]等。在对土壤导热率的众多算法中,VIC-CAS模型中导热率选择应用最为广泛的Johansen^[24]算法,导热率 K 可表示为:

$$K = K_{\text{dry}} + (K_{\text{sat}} - K_{\text{dry}}) K_e \quad (1)$$

式中: K_{dry} 为干土导热率,只与土壤块体密度 ρ_d 有关,可表示为:

$$K_{\text{dry}} = \frac{0.135\rho_d + 64.7}{2700 - 0.947\rho_d} \quad (2)$$

K_{sat} 为饱和土壤导热率,主要由土壤基质、水、冰的导热率及孔隙度决定,可表示为:

$$K_{\text{sat}} = \begin{cases} K_s^{1-n} K_{\text{liq}}^n, & T > T_f \\ K_s^{1-n} K_{\text{liq}}^n K_{\text{ice}}^{n-\theta_{\text{liq}}}, & T < T_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 和 T_f 分别为土壤温度和冰点温度; n 为土壤孔隙度; K_s 为土壤基质导热率; K_{liq} 为水的导热率,取值 $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; θ_{liq} 为土壤液态水含量; K_{ice} 为冰的导热率,取值 $2.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

K_e 是Kersten系数,是关于土壤饱和度 S_r 的函数,可表示为:

$$K_e = \begin{cases} \lg S_r + 1.0, & T > T_f \\ S_r, & T < T_f \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_r 与土壤中液态水含量 θ_{liq} 、含冰量 θ_{ice} 以及孔隙度 n 有关,可表示为:

$$S_r = \frac{\theta_{\text{liq}} + \theta_{\text{ice}}}{n} \quad (5)$$

本研究选择EBM导热率算法替换原模型算法,EBM中导热率 K 表示为:

$$K = K_{\text{dry}} + K_{\text{wet}} + K_i \quad (6)$$

式中: K_{dry} 为干土导热率,计算公式与式(2)相同。

K_{wet} ^[27]为湿土导热率,可表示为:

$$K_{\text{wet}} = (K_{\text{sat}} - K_{\text{dry}}) e^{0.36(1-1/w)} \quad (7)$$

式中: w 为土壤有效湿度,与土壤中液态水含量 θ_{liq} 和土壤饱和含水量 θ_{sat} 有关,可表示为:

$$w = \frac{\theta_{\text{liq}}}{\theta_{\text{sat}}} \quad (8)$$

K_i 为土壤中冰的总导热率,与土壤含冰量有关,可表示为:

$$K_i = K_{\text{ice}} \theta_{\text{ice}} \quad (9)$$

2.3 未冻水算法

VIC-CAS模型的最大未冻水含量公式^[43]如下:

$$\theta_{\text{liq,max}} = \theta_{\text{sat}} \left[\frac{1}{g\varphi_c} \left(\frac{L_f T}{T + 273.15} \right) \right]^{-B_p} \quad (10)$$

式中: θ_{sat} 为土壤饱和含水量; g 为重力加速度,取值 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; φ_c 为进气值; T 为土壤温度; L_f 为相变潜热,取值 $3.36 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_p 为土壤孔隙形状参数,是关于水力传导层指数函数,可表示为:

$$B_p = \frac{2}{e-3} \quad (11)$$

本研究选择CLM 5.0中的未冻水算法代替原模型算法,公式如下:

$$\theta_{\text{liq,max}} = \theta_{\text{sat}} \left[\frac{10^3 L_f (T - T_f)}{g\psi_{\text{sat}} (T + 273.15)} \right]^{-\frac{1}{B}} \quad (12)$$

式中: θ_{sat} 由土壤有机质和矿物质含量以及各自的孔隙度决定,可表示为:

$$\theta_{\text{sat}} = f_o \theta_o + (1 - f_o) \theta_m \quad (13)$$

式中: f_o 为土壤有机质含量; θ_o 为有机质孔隙度,取值 0.9 ^[63]; θ_m 为矿物土孔隙度,由含砂量 P_{sand} 决定,可表示为:

$$\theta_m = 0.489 - 0.00126 P_{\text{sand}} \quad (14)$$

ψ_{sat} 为饱和土壤基质势,由土壤有机质和矿物质含量以及各自的基质势决定,可表示为:

$$\Psi_{\text{sat}} = f_o \Psi_o + (1 - f_o) \Psi_m \quad (15)$$

式中: Ψ_o 为饱和有机质基质势, 取值 $-10.3 \text{ mm}^{[69]}$; Ψ_m 为饱和矿物土基质势, 由土壤中砂土含量 P_{sand} 决定, 可表示为:

$$\Psi_m = -10 \times 10^{1.88 - 0.0131 P_{\text{sand}}} \quad (16)$$

B 为 Clapp-Hornberger 经验系数^[63,70], 可表示为:

$$B = f_o B_o + (1 - f_o) B_m \quad (17)$$

式中: B_o 取 $2.7^{[69]}$; B_m 由土壤中黏土含量 P_{clay} 决定, 可表示为:

$$B_m = 2.91 - 0.159 P_{\text{clay}} \quad (18)$$

2.4 模型参数率定

本研究中 VIC-CAS 模型模拟的初始态文件根据站点的观测数据得到。模型的率定期选择 1997 年 7 月 31 日—1997 年 9 月 31 日, 验证期选择 1997 年 10 月 1 日—1998 年 9 月 29 日。率定后的主要参数如表 1 所示。

表 1 VIC-CAS 模型长江源区沱沱河站点
率定后主要参数

Table 1 Main parameters of VIC-CAS model after
calibration at Tuotuohe station in the
source area of Yangtze River

参数 符号	含义	单位	层数	取值
θ_s	孔隙度		3	0.25、0.030、0.25
B_d	土壤容重	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3	466.7、412.0、344.5
S_d	土壤比重	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3	666.69、1029.97、459.04
θ_r	残留含水量		3	0.040、0.075、0.075
B_p	进气值	mm	3	60.93、14.47、184.68
K_{sat}	饱和水力传导率	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	3	84.15、291.77、291.77
D_p	热阻深度	m		16

2.5 模型评估指标

利用率定后的模型进行土壤水热数值模拟, 将 1997 年 10 月 1 日—1998 年 9 月 29 日作为模型的验证期分析模型的模拟效果和可靠性。根据丁永建等^[71]对冻土区土壤水分含量变化的描述将模拟期土壤的温度和湿度变化分为四个阶段, 分别是秋季降温阶段, 1997 年 9 月 21 日到 10 月 21 日; 冬季冻结阶段, 1997 年 10 月 21 日到 1998 年 3 月 21 日; 春季升温阶段, 1998 年 3 月 21 日到 4 月 21 日; 夏季融化阶段, 1997 年 4 月 21 日到 9 月 21 日。

为了更直观地比较土壤温、湿度的模拟值和观测值, 将土壤温度模拟值线性插值到观测值所在的

深度。同时在分析土壤湿度时, 将每层包含的各个深度土壤湿度观测的平均值与模拟值进行比较。

本文采用纳什效率系数(NSE)和均方根误差(RMSE)来作为评价指标。

其中, NSE 是评价水文模型模拟结果好坏的常用指标, 计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_m^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2} \quad (19)$$

NSE 的取值范围从负无穷到 1。NSE 越接近 1, 模拟结果越好; 接近 0 表示模拟结果接近观测值的平均值水平, 即总体结果可信, 但模拟过程误差大; 远小于 0, 则模型不可信。

RMSE 作为评估预测模型精度的指标, 通常用来衡量真实值与模拟值之间的偏差, 公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_m^i)^2} \quad (20)$$

相关系数的取值范围从 0 到正无穷。RMSE 越接近 0, 真实值与模拟值的偏差越小, 模拟精度越高。

3 结果分析

3.1 导热率算法结果对比

图 1 为两种导热率算法下不同深度模拟的土壤逐时体积热通量对比。EBM 算法的热通量模拟值在 7 个深度均低于原算法, 热通量的减少表明 EBM 算法相较原算法阻碍了土壤冻融过程, 表现为土壤温度在降温冻结阶段会偏高, 在升温融化阶段会偏低。两者在 20~60 cm 深度冻结期的热通量差值低于融化期, 表明对冻结期土壤温度变化的影响小于融化期温度变化, 而在 60 cm 深度以下, 冻结期和融化期的差值接近, 对土壤温度变化影响差别较小。

图 2 为两种导热率算法下不同深度模拟与观测的土壤日均温度对比。在 80 cm 深度以上, VIC-CAS 算法温度模拟值在夏季融化期前 40 天左右接近观测值, 其余时段略低于观测值。在 80 cm 及 80 cm 深度以下, 从秋季降温至冬季土壤温度下降至 0℃, 模拟值接近观测值; 冬季土壤开始冻结至冻结期末, 模拟值高于观测值; 春季升温至夏季融化期末, 模拟值低于观测值。7 个深度模拟结果总体较好, 20~120 cm 深度模拟的土壤温度的 NSE 大于 0.9, 130~160 cm 深度模拟的土壤温度的 NSE 大于 0.8。

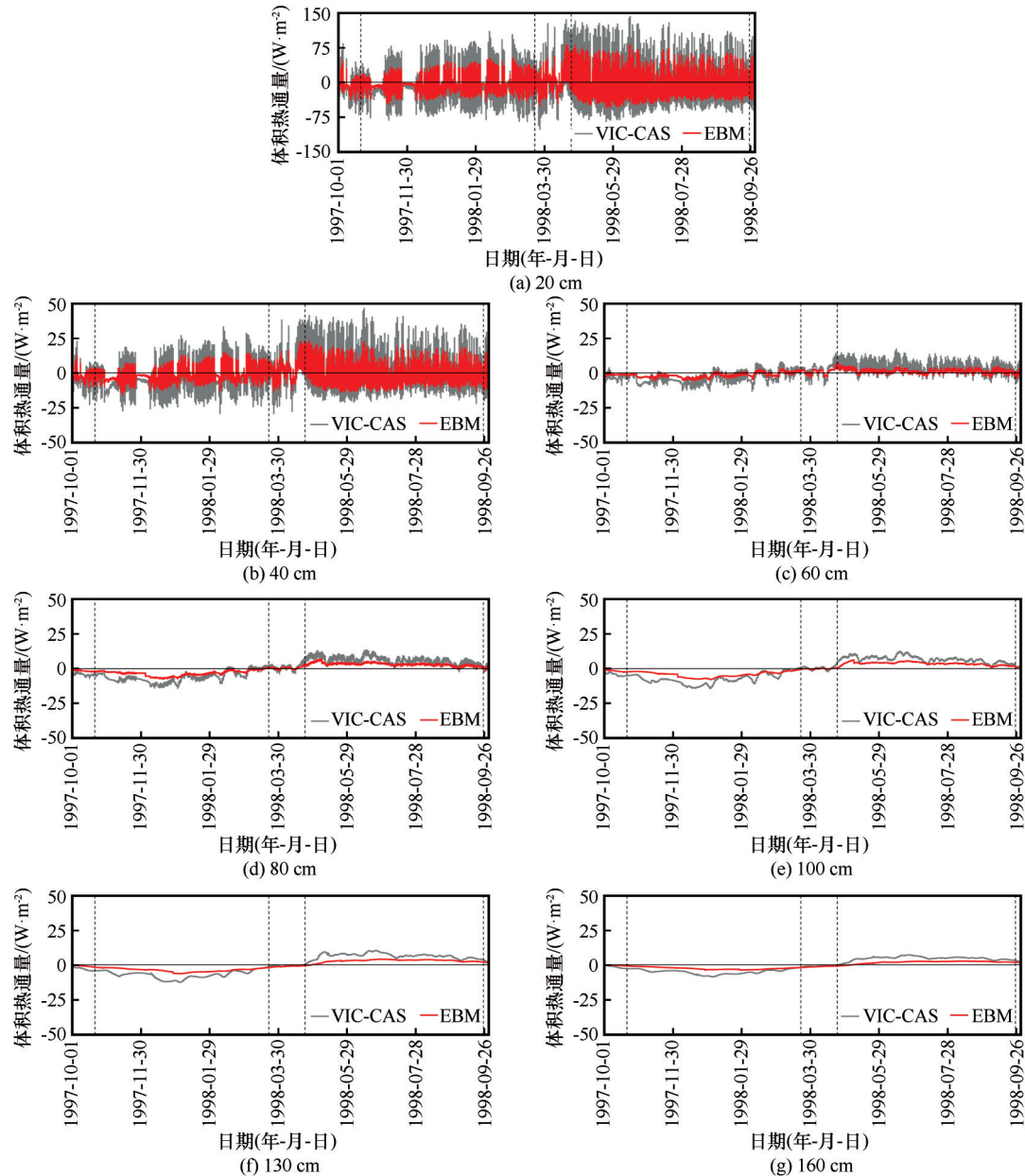


图1 沱沱河站 VIC-CAS算法和EBM算法模拟的7个深度土壤逐时热通量对比

Fig.1 Comparisons in hourly soil heat fluxes between simulated by VIC-CAS algorithm and EBM algorithm at seven depths in Tuotuohe station

EBM算法模拟值在20 cm和60 cm深度整体接近观测值,在40 cm深度,夏季融化期前三个月左右高于观测值,其余时段略低于观测值。在60 cm深度以下,从秋季降温至春季升温,模拟值高于观测值;从春季升温至夏季融化期末,模拟值低于观测值。20~80 cm,NSE大于0.9,模拟效果较好;在100~160 cm,NSE低于0.8,且随深度增加,NSE下降,模拟效果较差。

两种算法模拟的土壤温度趋势接近,从差值(EBM-VIC-CAS)上来看,在80 cm深度以上,两种

算法的差值在冬季冻结期和夏季融化期均为正值,原因是EBM算法对导热率的计算低于原算法,减缓了土壤的冻结过程,使冬季模拟的土壤温度偏高,这种影响持续到了夏季,尽管导热率的降低减缓了融化过程,但夏季模拟的温度仍高于原算法。冬季冻结期前两个月和夏季融化期前两个月差值较大,且冬季差值高于夏季,主要原因是土壤水分相变的初始阶段能量变化较大,对土壤的温度差异影响明显。同时在春末夏初土壤温度升至0值前后小段时间,差值表现为负值,在这段时间内土壤水分相变

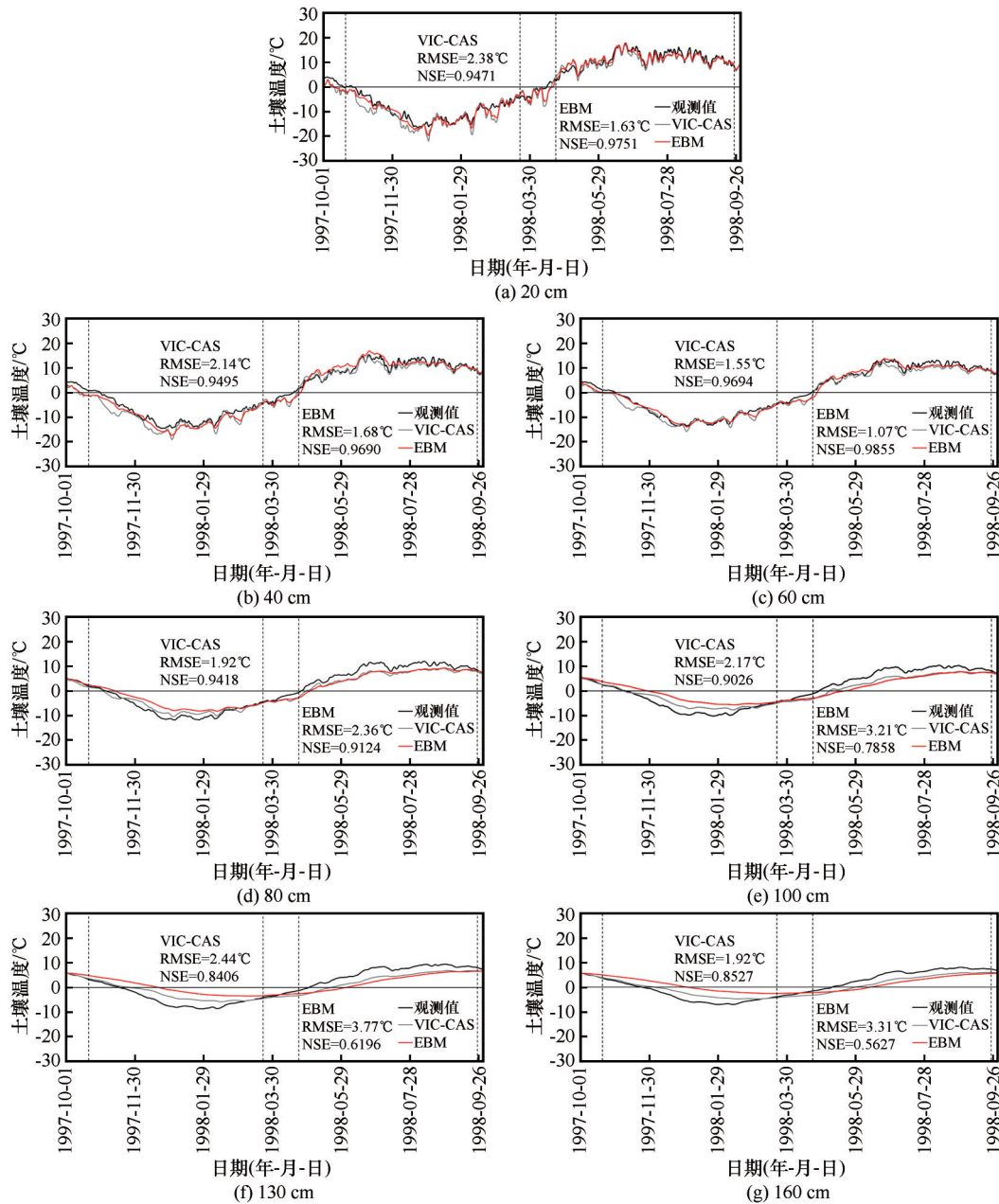


图2 沱沱河站观测与VIC-CAS算法和EBM算法模拟的7个深度土壤日均温度对比
Fig. 2 Comparisons in daily soil average temperature between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and EBM algorithm at seven depths in Tuotuohe station

吸收大量热量,短时间内使土壤迅速降温。在80 cm深度及以下,随深度增加,冬季模拟的土壤温度对夏季土壤温度的影响在减小,夏季融化期两者差值表现为负值。同时由于深层土壤能量传递的滞后性,冬季和夏季差值的峰值时间在推迟,发生在冻结期和融化期的中段。

在80 cm深度以上,EBM算法的NSE大于VIC-CAS方案,同时RMSE小于后者,EBM算法的效果较优。在80 cm深度,EBM算法的模拟效果下降,NSE小于VIC-CAS算法,但仍大于0.9。在80 cm

深度以下,两种算法的NSE随深度增加而下降,EBM算法在100 cm深度最高为0.7858,小于0.8;而VIC-CAS算法在3个深度的NSE均超过0.8。同时,3个深度EBM算法的RMSE也大于后者,EBM算法在深层土壤模拟效果较差。

图3为两种导热率算法下三层土壤模拟与观测各层的日平均土壤湿度对比。表层(0~0.1 m)和中层土壤(0.1~0.6 m)两种算法的模拟值接近,而在下层土壤(0.6~1.6 m)在冬季冻结期有明显差异。导热率差异引起的土壤水分含量变化在表层不明显。

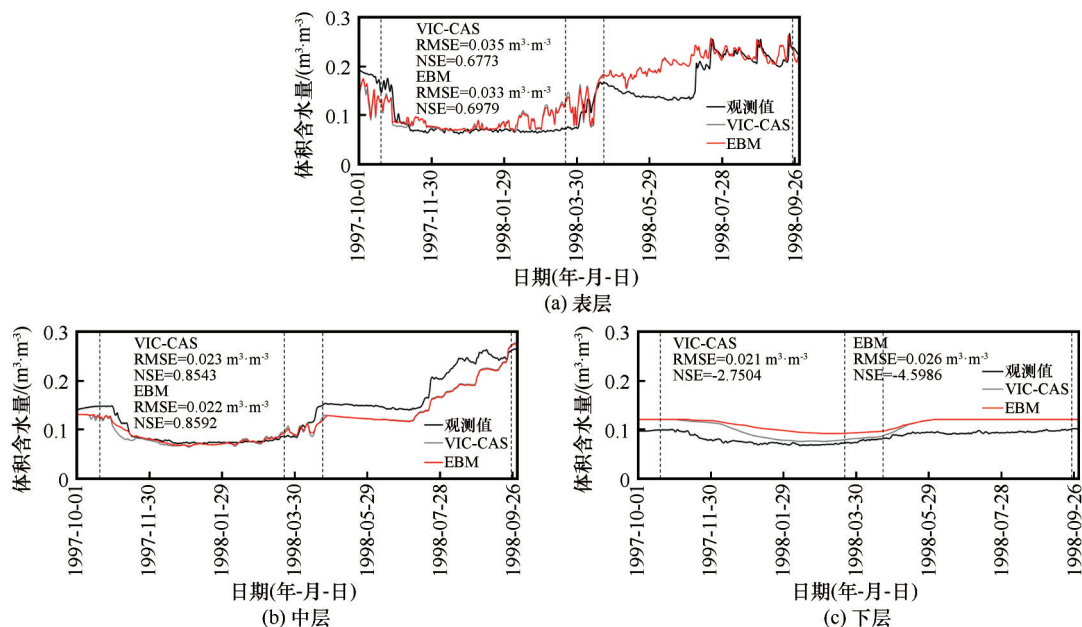


图3 沱沱河站观测与VIC-CAS算法和EBM算法模拟的三层土壤日均湿度对比
Fig. 3 Comparisons in daily soil average moisture between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and EBM algorithm at three layers in Tuotuohe station

两种算法在中层土壤的模拟值在冻结期整体接近观测值,模拟效果较好,而在其余时段低于观测值。两者的差值在冬季冻结期开始一个月内较明显,主要原因可能是导热率差异在冻结初期对土壤温度影响较明显,减缓了土壤水分的相变过程,使土壤中滞留的液态水含量较高。而在下层土壤,两种算法模拟结果皆高于观测值,VIC-CAS算法模拟值在冻结期后半段至夏初土壤开始融化这段时间低于EBM算法,更接近观测值。由于土壤能量传递的滞后性因素,下层土壤水分变化影响要延迟一段时间显现出来,土壤在冬季增加的水分是由于两种算法在冻结期土壤温度差值高于中层土壤,表明对土壤的冻结过程影响更大。在这种情况下,土壤水分的相变速率远小于中层土壤,滞留的液态水含量更高。

图4为三层土壤两种导热率算法下模拟的日均含冰量对比。两种算法在表层土壤的含冰量方面差别不大。EBM算法在冬季前两个月的中层土壤含冰量明显低于原算法,原因是EBM算法模拟的土壤温度在冻结初期略高于后者,表现出土壤水分相变过程减缓,使土壤含冰量计算偏低。EBM算法在下层土壤的含冰量低于原算法,时间正是下层土壤水分含量变化的时段,冬季含冰量降低会减小冻结土壤的整体导热率,进一步减缓冻结过程。

图5为两种导热率算法下模拟与观测的逐时融化深度对比。观测的最大融化深度5 m左右,VIC-

CAS算法的模拟最大融化深度8 m左右,约高于观测值3 m;而EBM算法模拟最大融化深度2.2 m左右,约低于观测值2.8 m。EBM算法模拟的融化深度变化趋势大于VIC-CAS算法,且在数值上更接近观测值。VIC-CAS算法对导热率的计算值较高,使融化期土壤的暖舌较深,EBM算法在融化期对土壤的水热变化速率弱于VIC-CAS算法,暖舌较浅,但更接近观测值。

3.2 未冻水算法结果对比

图6为两种未冻水算法下模拟的不同深度土壤逐时土壤热通量对比。总体上7个深度两种算法的体积热通量差异并不明显,模拟趋势相近,结果表明未冻水含量差异对土壤能量传递数值的影响很小,对土壤温度的变化影响有限。

图7为两种未冻水算法下模拟与观测的不同深度土壤日均温度对比。7个深度下两种算法模拟结果整体趋势接近,差异总体较小。两种算法的NSE和RMSE差异较小,CLM 5.0未冻水算法的NSE和RMSE在20 cm和40 cm深度稍优于VIC-CAS算法,NSE在0.9以上。在60 cm深度以下,稍差于原算法,但NSE仍大于0.8。

图8为两种未冻水算法下三层土壤模拟与观测的各层平均土壤湿度对比。CLM 5.0未冻水算法模拟的三层土壤的湿度均低于VIC-CAS算法。CLM 5.0算法模拟的表层和中层土壤湿度的RMSE

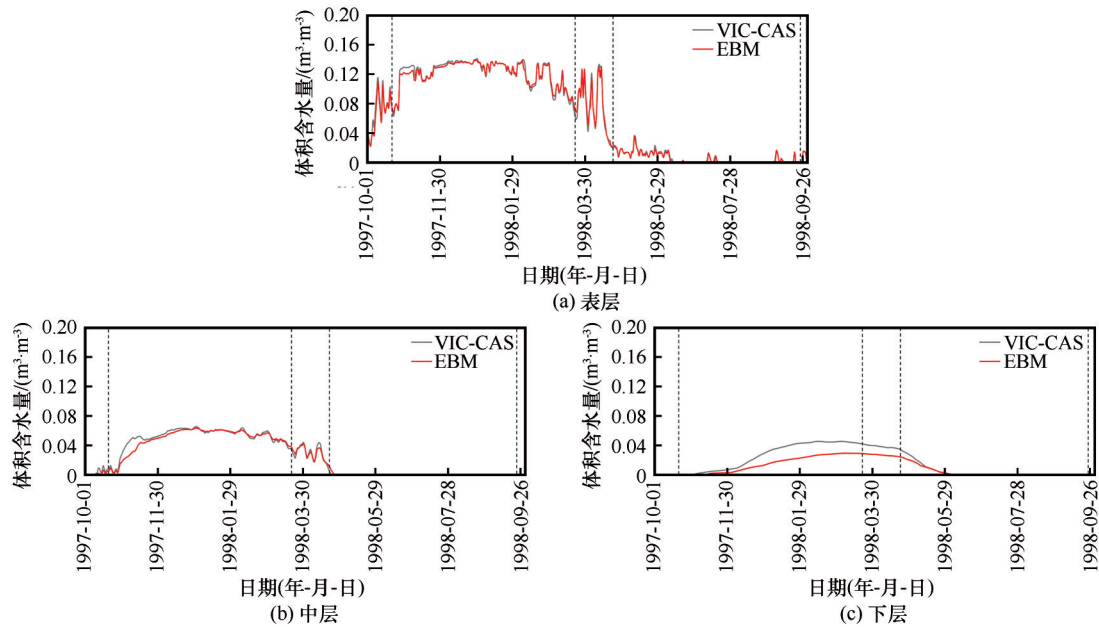


图4 沱沱河站 VIC-CAS算法和EBM算法模拟的三层土壤日均含冰量对比

Fig. 4 Comparisons in daily soil average ice content between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and EBM algorithm at three layers in Tuotuohe station

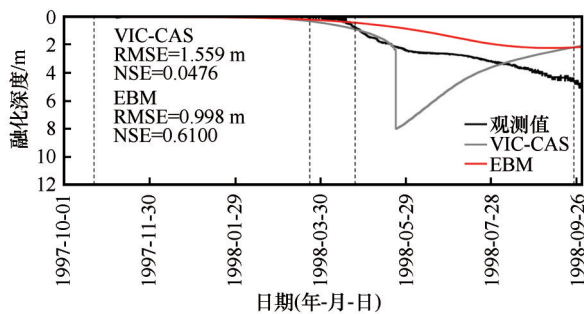


图5 沱河站观测与 VIC-CAS 算法和 EBM 算法模拟的土壤逐时融化深度对比

Fig. 5 Comparisons in hourly soil melting depth between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and EBM algorithm in Tuotuohe station

和NSE低于VIC-CAS算法,而下层土壤模拟效果优于后者。从差值(CLM 5.0-VIC-CAS)上来看,在表层和中层土壤,差异主要集中在冬季冻结期,原因是未冻水算法影响冬季土壤水分含量,且计算值较低。下层土壤差值低于前两层,主要原因是前两层土壤中的含冰量增加减少了下层土壤水分在冻结期的迁移,相比于原算法在下层土壤的模拟湿度偏高,在冬季更接近观测值。

图9为两种未冻水算法模拟的三层土壤日均含冰量对比。三层土壤模拟的含冰量变化趋势接近,且表现为随深度增加,土壤中冰的出现时间延迟。CLM 5.0算法在表层和中层土壤模拟的含冰量在冻结期高于VIC-CAS算法。而在下层土壤的含冰

量相差不大。土壤中冰含量差异主要受冬季土壤中未冻水含量的影响,模拟的土壤中含冰量变化引起的相变能量传递差异也是间接因素。

图10为两种未冻水算法模拟与观测的逐时融化深度对比。两种算法融化深度模拟的趋势接近,CLM 5.0算法融化深度略低于VIC-CAS算法。两种算法融化深度在融化期中期高于观测值,在末期低于观测值,数值变化较大。上述结果表明,CLM 5.0算法相较原算法对土壤中水热过程在土壤层中的能量传递速率和影响深度上变化不明显。

4 讨论

4.1 模型对土壤温度的模拟差异

多位研究者采用不同的陆面模型模拟了青藏高原多年冻土区的土壤温度,在唐古拉站高寒草甸区,刘洋等^[72]基于SHAW模型2007年的结果显示,50~150 cm深度土壤温度误差较大,而0~50 cm和150 cm深度以下模拟值和观测值拟合较好。胡国杰等^[73]基于CoupModel模型在2008年的结果显示,0~105 cm深度土壤模拟值和观测值吻合得较好,在105 cm以下深度土壤的误差增大。马启民等^[74]基于一维水热耦合模型2008年的结果表明,0~50 cm深度土壤温度模拟效果较好,但90 cm以下偏差增大。秦慧艳等^[75]基于GIPL2模型在可可西里站高寒草甸区2011—2012年的结果显示,0~100 cm模拟

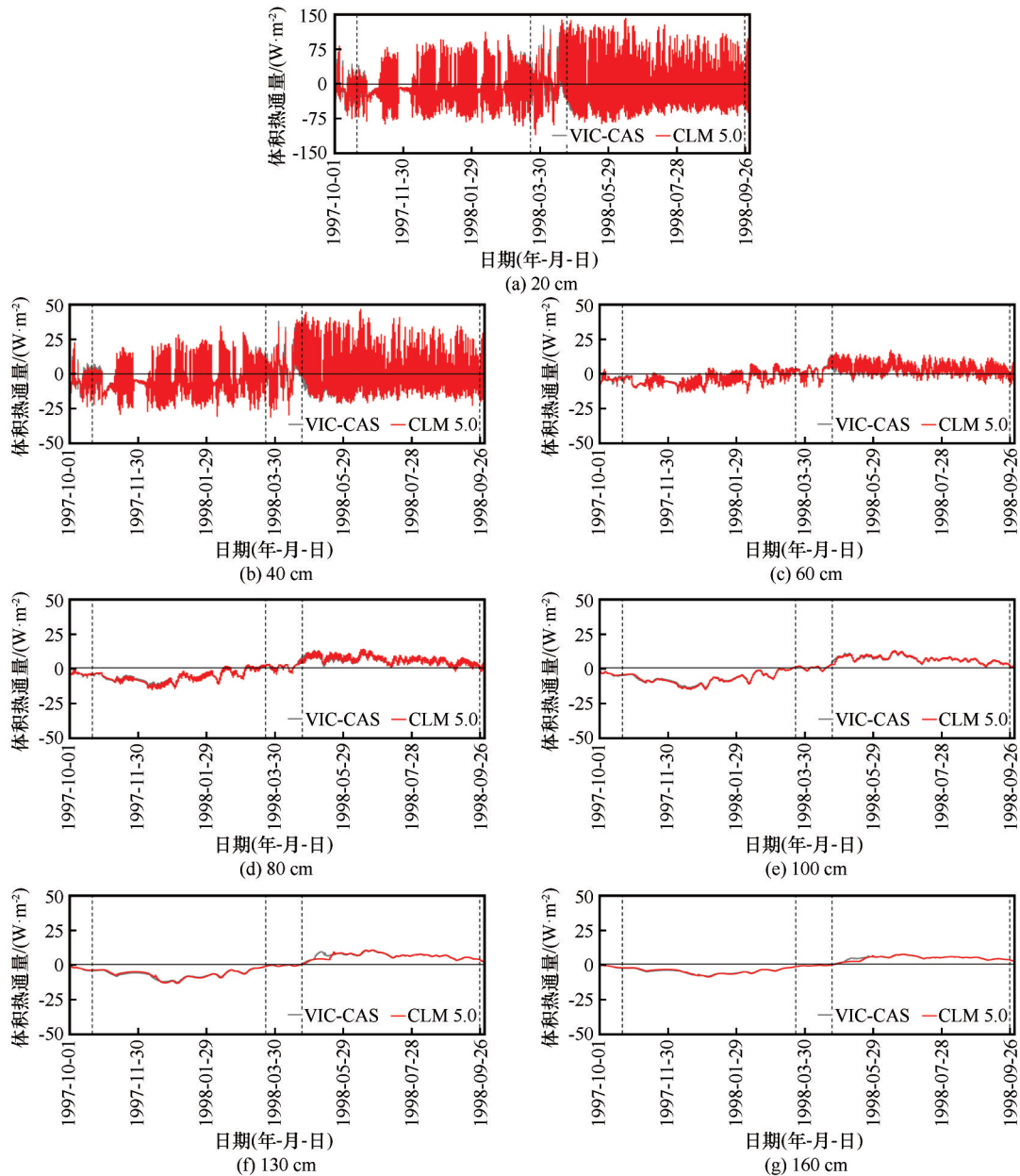


图6 沱沱河站 VIC-CAS算法和CLM 5.0算法模拟的7个深度土壤逐时热通量对比
Fig. 6 Comparisons in hourly soil heat fluxes between simulated by VIC-CAS algorithm
and CLM 5.0 algorithm at seven depths in Tuotuohe station

值与观测值相关性较高,120 cm深度以下两者偏差增大,且模拟值稍高于观测值。郭林茂等^[49]基于FEFLOW模型在风火山高寒草甸区2006—2008年的土壤温度模拟结果显示,0~20 cm深度土壤的模拟精度低于20 cm深度以下土壤。

本文替换EBM导热率算法后,在20~60 cm深度,模拟值与观测值间的误差减小;在60~160 cm深度,模拟值与观测值的误差增大。替换CLM 5.0未冻水算法后与原算法的结果差异较小。与上述结果对比可以看出,GIPL2、SHAW等模型与本文的模

拟结果较为接近,即整体趋势模拟上相关性较一致,浅层土壤的精度高于深层土壤,且深层土壤的精度随深度增加而较差,其中,刘洋等^[72]和马启民等^[74]的结果在深度上更接近本文。FEFLOW模型的结果与本文结果相反,在深层土壤温度模拟精度优于浅层。

造成这种结果可能的原因是:(1)各层输入的土壤水热参数存在误差。多年冻土区土壤存在异质性,不同深度土壤特性差异较大。本文模拟时将土壤柱划分为10 cm、50 cm、100 cm三层土壤;秦艳

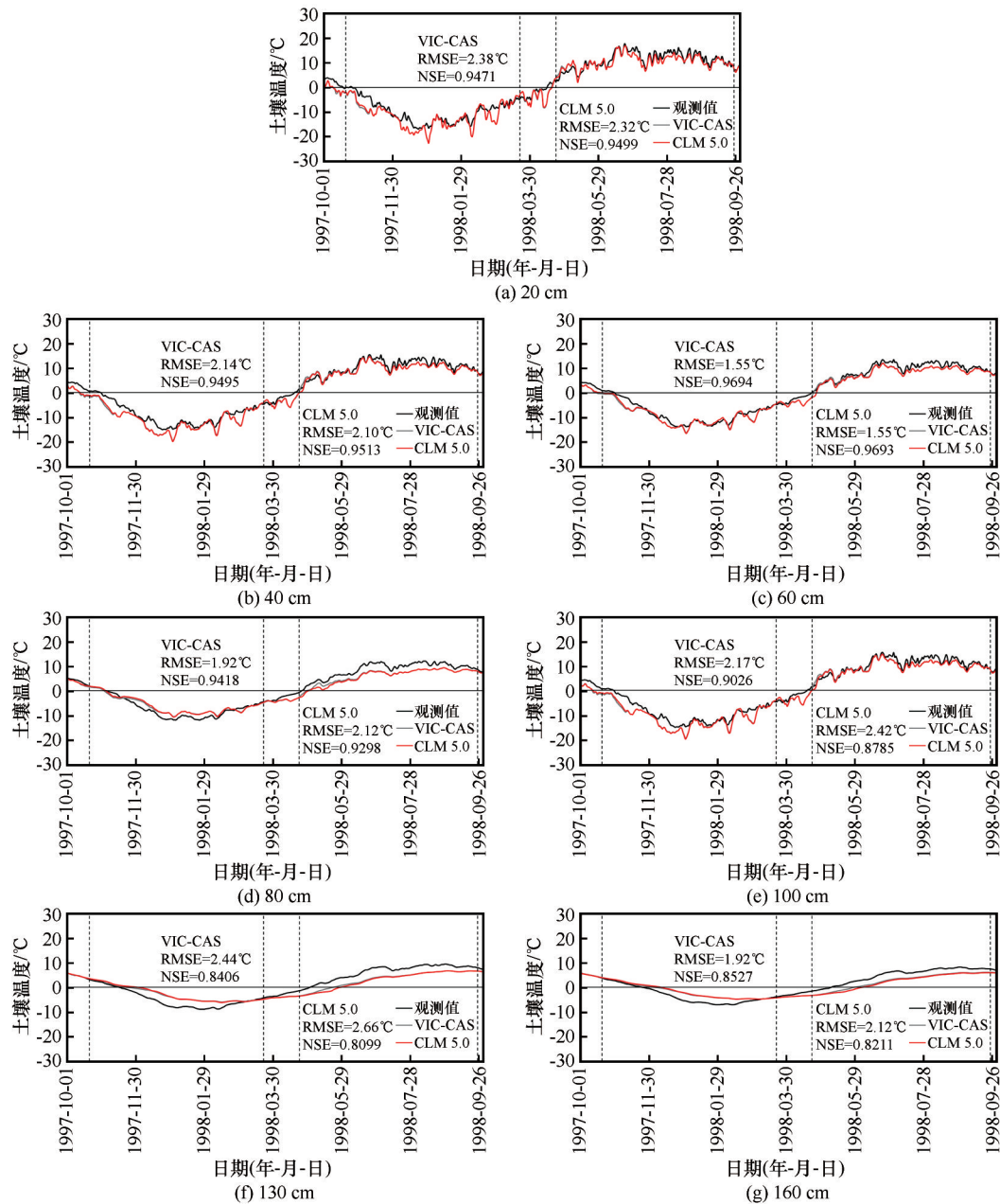


图7 沱沱河站观测与VIC-CAS算法和CLM 5.0算法模拟的7个深度土壤日均温度对比

Fig. 7 Comparisons in daily soil average temperature between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and CLM 5.0 algorithm at seven depths in Tuotuohe station

慧等^[75]根据文献[76]按5 cm、20 cm、大于100 cm划分土壤层;胡国杰等^[73]、马启民等^[74]按不同深度划分土壤厚度,在浅层土壤划分厚度较浅,而深层土壤划分较厚,输入的土壤参数不能代表各层的真实情况,这导致了浅层土壤的模拟精度高于深层土壤。(2)模型中冻土算法热量平衡方程大都来自于Stefan的热传导方程,在计算中各层土壤参数除因深度划分不均匀引起的误差外,自身与实际值也存在偏差,热传导方程再计算土壤中热量由上而下或

由下而上传递过程时,这种误差会不断累积。(3)研究区植被为高寒草甸,根系在0~30 cm左右,影响浅层土壤的热性质。相比较其他模型,郭林茂等^[49]认为FEFLOW模型缺少植被输入是影响浅层土壤的模拟结果的重要原因。

4.2 模型对土壤湿度的模拟差异

对青藏高原多年冻土湿度的模拟结果中,刘洋等^[72]的结果表明SHAW模型在5~20 cm土壤的模拟值低于观测值,而70~210 cm土壤冻融期模拟值

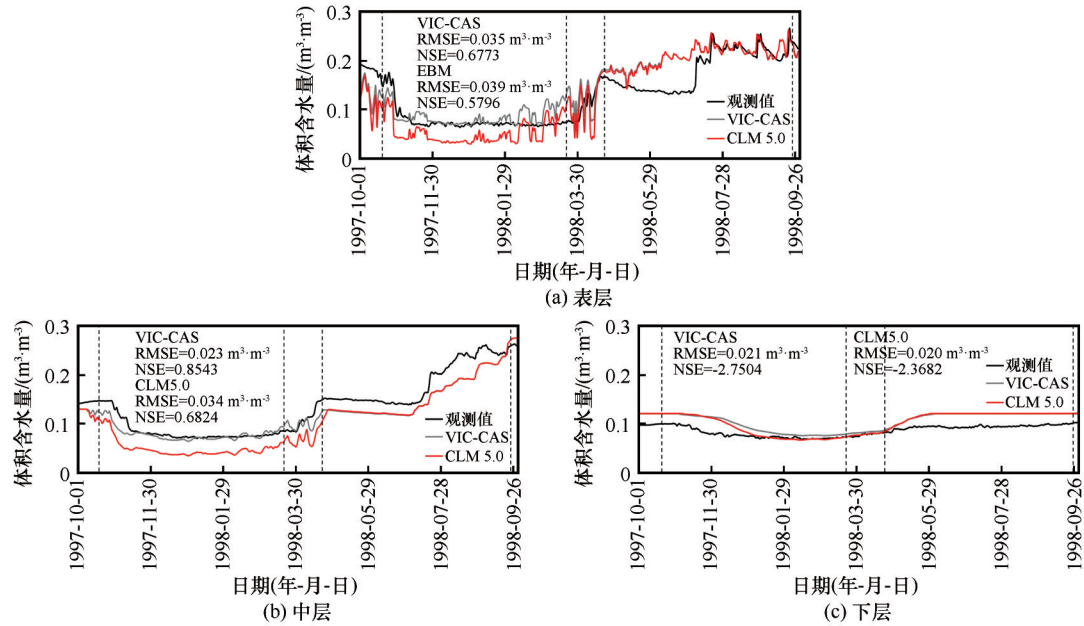


图8 沱沱河站观测与VIC-CAS算法和CLM 5.0算法模拟的三层土壤日均湿度对比

Fig. 8 Comparisons in daily soil average moisture between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and CLM 5.0 algorithm at three layers in Tuotuohe station

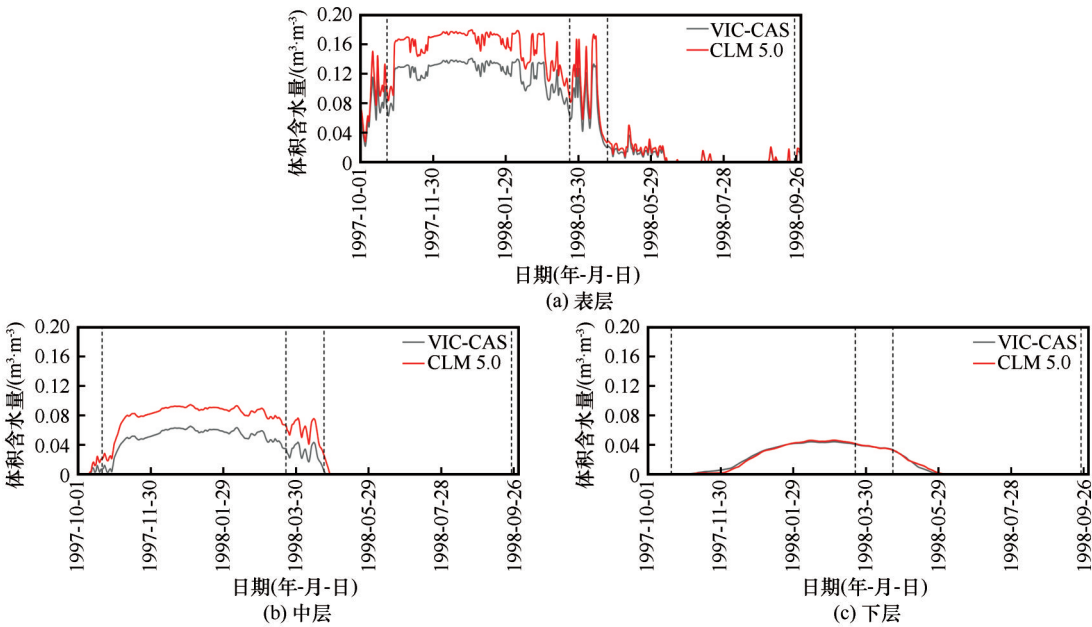


图9 沱沱河站VIC-CAS算法和CLM 5.0算法模拟的三层土壤日均含冰量对比

Fig. 9 Comparisons in daily soil average ice content between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and CLM 5.0 algorithm at three layers in Tuotuohe station

高于观测值。胡国杰等^[73]的结果表明 CoupModel 模型在5~20 cm的模拟值低于观测值,而在70 cm 以下接近观测值。马启民等^[74]的结果显示0~50 cm 的模拟值在冻结期接近观测值,而50 cm 以下的模拟值在冻结期高于观测值。

本文替换未冻水算法对土壤湿度的差异主要表现在土壤冻结期到融化期前,融化期湿度变化较

小,与刘火霖等^[54]未冻水参数化方案替换的结果基本一致。对比他人的模拟结果可以看出,替换EBM 导热率算法后,0~60 cm 土壤湿度在冻结期结果上优于上述三种模型;60~160 cm 冻结期的模拟值高于观测值,与刘洋等^[72]、马启民等^[74]的结果接近。替换CLM 5.0未冻水算法后,0~60 cm 土壤模拟值低于观测值,与刘洋等^[72]、胡国杰等^[73]、马启民等^[74]

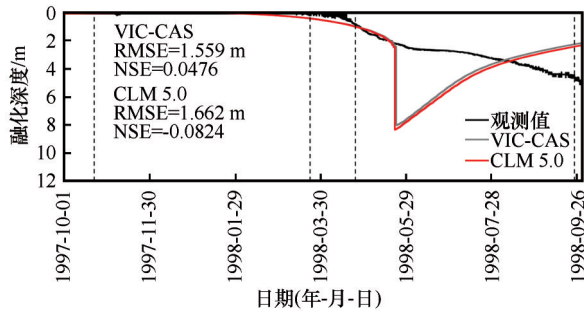


图 10 沱沱河站观测与 VIC-CAS 算法和 CLM 5.0 算法模拟的土壤逐时融化深度对比

Fig. 10 Comparisons in hourly soil melting depth between observed and simulated by VIC-CAS algorithm and CLM 5.0 algorithm in Tuotuohe station

的结果相同;60~160 cm 土壤模拟值接近观测值,与胡国杰等^[73]的结果接近。

出现上述差异的原因可能是:(1)VIC-CAS 模型输出的是三层土壤的平均湿度,反映的是三层土壤中各层整体的水分变化情况,不能表现出土壤水分随深度的变化及各深度间水分的差异性。而刘洋等^[72]、胡国杰等^[73]、马启民等^[74]利用的模型能够模拟各深度的土壤水分,与观测值的比较在结果上可能更好。(2)在替换两种算法前,VIC-CAS 模型默认的皮肤湿度模拟值在冻结期接近观测值,表现了 VIC-CAS 模型在冻结期能够较好模拟土壤水分的优点。替换 EBM 导热率算法主要对 60~160 cm 土壤有影响,使水分模拟偏高,表现出 SHAW 等模型在深层土壤模拟较差的缺点,原因可能是替换的导热率方案计算值相比原方案与实际值偏差增大,并在深层表现得更为明显。替换 CLM 5.0 未冻水算法,降低了 0~60 cm 土壤湿度的模拟精度,但提高了 60~160 cm 的模拟精度,与胡国杰等^[73]的结果接近。可能原因是 CLM 5.0 未冻水算法水分模拟自身的缺点,熊健胜等^[77]认为 CLM 模型模拟多年冻土时,冻结期含水量被低估,而含冰量被高估,但偏低的模拟值弥补了 VIC-CAS 模型在深层土壤模拟值较高的缺点,使下层土壤的模拟结果反而变好。胡国杰等^[73]利用的 CoupModel 模型的土壤水分模拟值整体偏低,且深层的土壤模拟精度高于浅层土壤,因此与本文的结果接近。

4.3 模型中冰含量对土壤热特性的影响

冰作为不透水面,显著减低土壤水分的迁移,同时冰的导热率是水的 4 倍,影响冻结土壤的总体导热性。本文在替换未冻水算法后,模拟结果图 9 中 0~60 cm 土壤含冰量有所增加,但图 6 和图 7 中,

20~160 cm 各深度替换未冻水方案前后模拟的热通量和温度的差异较小。

李振坤^[78]在改则地区的研究表明 CLM 3.0 参数化方案改进前后 0~80 cm 土壤温度模拟值间的相关系数大于 0.9,含冰量变化对浅层土壤温度变化较小。本文的结果对比上述结果的差异更小,两种未冻水方案下观测值与模拟值间相关系数差值最大在 0.03 左右,由 CLM 未冻水方案的缺点来看,实际的含冰量比模拟值更低,含冰量对土壤导热性能的影响可能更小。

5 结论

本研究分别用 EBM 导热率算法和 CLM 5.0 的未冻水算法替换以 VIC-CAS 模型为基础的导热率和未冻水算法,对长江源区沱沱河站进行了为期一年的单点数值模拟试验,主要结论如下:

(1)EBM 算法导热率低于原算法,会减缓土壤的冻融过程,对不同深度土壤温度影响较明显,在土壤湿度模拟上,对深层土壤计算数值较高,而浅层变化不大。算法提升了浅层土壤温度的模拟效果,但使深层土壤温度和湿度模拟效果变差。

(2)CLM 5.0 算法未冻水数值低于原算法,主要减少了冻结期土壤的水分,但土壤水分的变化对土壤能量传递影响有限,与原算法土壤温度较接近。算法对深层土壤湿度的模拟效果变好,但浅层土壤湿度模拟效果变差。

(3)本文虽然替换了两种土壤参数算法,但在土壤湿度的模拟效果上并没有显著的改进。通过对比可以看出两种算法与原算法各有优缺点,EBM 导热率算法需要改进误差产生的累积效应对深层土壤的影响,而 CLM 5.0 未冻水算法在对浅层土壤的湿度模拟上过低仍是个需要进一步考虑的问题。

参考文献(References):

- [1] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere[J]. Polar Geography, 1999, 23(2): 132-154.
- [2] Wang Genxu, Li Shengnan, Hu Hongchang, et al. Water regime shifts in the active soil layer of the Qinghai-Tibet Plateau permafrost region, under different levels of vegetation[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 280-289.
- [3] Zhang Senqi, Wang Yonggui, Zhao Yongzhen, et al. Permafrost degradation and its environmental sequent in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 1-6. [张森琦,王永贵,赵永真,等.黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J].冰川冻土,2004,26(1): 1-6.]
- [4] Zhao Lin, Hu Guojie, Zou Defu, et al. Permafrost changes

- and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1233-1246. [赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1233-1246.]
- [5] Zou Defu, Zhao Lin, Sheng Yu, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(6): 2527-2542.
- [6] Liu Xiaodong. Influences of Qinghai Xizang(Tibet) Plateau uplift on the atmospheric circulation, global climate and environment changes[J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 321-332. [刘晓东. 青藏高原隆升对亚洲季风形成和全球气候与环境变化的影响[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 321-332.]
- [7] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change—Ⅲ. the effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes[J]. *Journal of Lanzhou University*, 1996, 32(1): 108-115. [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器—Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报, 1996, 32(1): 108-115.]
- [8] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): F02S03.
- [9] Zhao Lin, Wu Qingbai, Marchenko S S, et al. Thermal state of permafrost and active layer in Central Asia during the international polar year[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21(2): 198-207.
- [10] Jin Huijun, Luo Dongliang, Wang Shaoling, et al. Spatiotemporal variability of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2011, 3(4): 281-305.
- [11] Pang Qiangqiang, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Active layer thickness calculation over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 57(1): 23-28.
- [12] Li Junhao, Yang Guojing, Wang Shaoping. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2109-2118. [李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2109-2118.]
- [13] Chen Rensheng, Zhang Shiqiang, Yang Yong. The impact of cryosphere changes on runoff in cold regions of Western China[M]. Beijing: Science Press, 2019. [陈仁升, 张世强, 阳勇. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [14] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Jiao Keqin, et al. The response of river discharge to climate warming in cold region over China[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 103-110. [叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 等. 我国寒区径流对气候变暖的响应[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 103-110.]
- [15] Wang Genxu, Mao Tianxu, Chang Juan, et al. Processes of runoff generation operating during the spring and autumn seasons in a permafrost catchment on semi-arid plateaus[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 307-317.
- [16] Song Chunlin, Wang Genxu, Mao Tianxu, et al. Linkage between permafrost distribution and river runoff changes across the Arctic and the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(2): 292-302.
- [17] Gao Bing, Yang Dawen, Qin Yue, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 657-673.
- [18] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. theory and development[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 565-571.
- [19] Jansson P E, Moon D S. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(1): 37-46.
- [20] Liang Xu, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D16): 21403-21422.
- [21] Wang Xian, Zhang Hongjiang, Du Shicai, et al. Modelling forest soil moisture and temperature in Three Gorges reservoir area with CoupModel and sensitivity analysis of parameters[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 295-301. [王贤, 张洪江, 杜仕才, 等. 基于CoupModel模型的三峡库区典型林地土壤水分和温度模拟以及参数敏感性分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 295-301.]
- [22] Kersten M S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils[R]. University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1949.
- [23] Devries D A. Thermal properties of soils[J]. *Physics of Plant Environment*, 1963: 210-235.
- [24] Johansen O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim, Norway, 1975.
- [25] Côté J, Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 443-458.
- [26] Lu Sen, Ren Tusheng, Gong Yuanshi, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 8-14.
- [27] Yang Kun, Koike T, Ye Baisheng, et al. Inverse analysis of the role of soil vertical heterogeneity in controlling surface soil state and energy partition[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D8): D08101.
- [28] Bao Huiyi, Koike T, Yang Kun, et al. Development of an enthalpy-based frozen soil model and its validation in a cold region in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10): 5259-5280.
- [29] Vafai K, Whitaker S. Simultaneous heat and mass transfer accompanied by phase change in porous insulation[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1986, 108(1): 132-140.
- [30] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Study on soil thermodynamic characteristics at different underlying surface in northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(6): 1076-1084. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏高原北部不同下垫面土壤热力特性研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 1076-1084.]
- [31] Luo Siqiong, Lu Shihua, Zhang Yu, et al. Soil thermal conductivity parameterization establishment and application in numerical model of central Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(4): 919-928. [罗斯琼, 吕世华, 张宇, 等. 青藏高原中部土壤热传导率参数化方案的确立及在数值模式中的应用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 919-928.]
- [32] Wang Yu, Hu Zeyong, Xun Xueyi, et al. Optimization and

- test of soil thermal conductivity parameterization schemes in northern Qinghai-Xizang plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(3): 646-653. [王愚, 胡泽勇, 荀学义, 等. 藏北高原土壤热传导率参数化方案的优化和检验[J]. *高原气象*, 2013, 32(3): 646-653.]
- [33] Farouki O T. Thermal properties of soils[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, 1981.
- [34] Liu Weimin, He Ping, Zhang Zhao. A calculation method of thermal conductivity of soils [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 770-773. [刘为民, 何平, 张钊. 土体导热系数的评价与计算[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 770-773.]
- [35] Ren Xiaopeng, Fan Honghui. Nonlinear law research of heat conductivity for frozen soil [J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2015, 34(1): 101-104. [任小朋, 樊红辉. 冻土导热系数的非线性规律研究[J]. *成都大学学报 (自然科学版)*, 2015, 34(1): 101-104.]
- [36] Kozłowski T. Soil freezing point as obtained on melting [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 38 (2/3): 93-101.
- [37] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2010. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [38] Watanabe K, Wake T. Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 59 (1): 34-41.
- [39] Tipenko G, Marchenko S, Romanovsky V, et al. Spatially distributed model of permafrost dynamics in Alaska [C]//AGU Fall Meeting, San Fancisio, CA, December 13-17, 2004.
- [40] Lovell C W. Temperature effects on phase composition and strength of partially-frozen soil [J]. *Highway Research Board Bulletin*, 1957, 168: 74-95.
- [41] Oleson K W, Dai Yongjiu, Bonan G B, et al. Technical description of the community land model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-461+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2004.
- [42] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model [M]. US: US Geological Survey, 1988.
- [43] Fuchs M, Campbell G S, Papendick R I. An analysis of sensible and latent heat flow in a partially frozen unsaturated soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(3): 379-385.
- [44] Niu Guoyue, Yang Zongliang. Effects of frozen soil on snow-melt runoff and soil water storage at a continental scale [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(5): 937-952.
- [45] Magnin F, Josnin J Y, Ravanel L, et al. Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11 (4): 1813-1834.
- [46] Zhang Shiqiang, Ding Yongjian, Lu Jian, et al. Simulative study of water-heat process in the Tibetan Plateau (I): Soil moisture [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26 (4): 384-388. [张世强, 丁永建, 卢健, 等. 青藏高原土壤水热过程模拟研究(I): 土壤湿度[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 384-388.]
- [47] Zhang Shiqiang, Ding Yongjian, Lu Jian, et al. Simulative study of water-heat process in the Tibetan Plateau (II): Soil temperature [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 95-99. [张世强, 丁永建, 卢健, 等. 青藏高原土壤水热过程模拟研究(II): 土壤温度[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 95-99.]
- [48] Pan Yongjie, Lyu Shihua, Li Suosuo, et al. Simulating the role of gravel in freeze-thaw process on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(3): 1011-1022.
- [49] Guo Linmao, Chang Juan, Xu Hongliang, et al. Simulation and prediction of permafrost active layer temperature based on BP neural network and FEFLOW model: Take the Fenghuoshan area on the Tibetan Plateau as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 399-411. [郭林茂, 常娟, 徐洪亮, 等. 基于BP神经网络和FEFLOW模型模拟预测多年冻土活动层温度——以青藏高原风火山地区为例[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 399-411.]
- [50] Hu Guojie, Zhao Lin, Wu Xiaodong, et al. Comparison of the thermal conductivity parameterizations for a freeze-thaw algorithm with a multi-layered soil in permafrost regions [J]. *CATENA*, 2017, 156: 244-251.
- [51] Yang Shuhua, Li Ren, Wu Tonghua, et al. Evaluation of soil thermal conductivity schemes incorporated into CLM 5.0 in permafrost regions on the Tibetan Plateau [J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115330.
- [52] Lawrence D M, Fisher R A, Koven C D, et al. The community land model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(12): 4245-4287.
- [53] Balland V, Arp P A. Modeling soil thermal conductivities over a wide range of conditions [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2005, 4(6): 549-558.
- [54] Liu Huolin, Hu Zeyong, Han Geng, et al. Assessment of freeze-thaw process simulation in Qinghai-Tibetan Plateau by different parameterization schemes based on Noah-MP land surface model [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(1): 1-14. [刘火霖, 胡泽勇, 韩赓, 等. 基于Noah-MP模式的影响青藏高原冻融过程参数化方案评估[J]. *高原气象*, 2020, 39(1): 1-14.]
- [55] Niu Guoyue, Yang Zongliang, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D12): D12109.
- [56] Koren V, Schaake J, Mitchell K, et al. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D16): 19569-19585.
- [57] Hu Guojie, Zhao Lin, Zhu Xiaofan, et al. Review of algorithms and parameterizations to determine unfrozen water content in frozen soil [J]. *Geoderma*, 2020, 368: 114277.
- [58] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [59] Kozłowski T. A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 49(3): 226-236.
- [60] Zhang Mingyi, Pei Wansheng, Li Shuangyang, et al. Experimental and numerical analyses of the thermo-mechanical stability of an embankment with shady and sunny slopes in a permafrost region [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 1478-1487.
- [61] Chen Jin. Water cycle mechanism in the source region of Yangtze River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research In-*

- stitute, 2013, 30(4): 1-5. [陈进. 长江源区水循环机理探讨[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 1-5.]
- [62] Zhao Qiudong, Ding Yongjian, Wang Jian, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60-81.
- [63] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 682-690.
- [64] Li Guoping, Duan Tingyang, Gong Yuanfa. The overall transport coefficient and ground flux in the western part of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(8): 865-869. [李国平, 段廷扬, 巩远发. 青藏高原西部地区的总体输送系数和地面通量[J]. 科学通报, 2000, 45(8): 865-869.]
- [65] Ma Yaoming, Ma Weiqiang, Hu Zeyong, et al. Similarity analysis of atmospheric turbulent intensity over grassland surface of Qinghai-Xizang plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(5): 514-517. [马耀明, 马伟强, 胡泽勇, 等. 青藏高原草甸下垫面湍流强度相似性关系分析[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 514-517.]
- [66] Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The development of study on the soil freezing-thaw process in land surface model[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(1): 44-52. [王澄海, 董文杰, 韦志刚. 陆面模式中土壤冻融过程参数化研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 44-52.]
- [67] Penner E. Thermal conductivity of frozen soils [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1970, 7(3): 982-987.
- [68] Chen Shanxiong. Thermal conductivity of sands [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 44(10): 1241.
- [69] Letts M G, Roulet N T, Comer N T, et al. Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2000, 38(1): 141-160.
- [70] Clapp R B, Hornberger G M. Empirical equations for some soil hydraulic properties[J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(4): 601-604.
- [71] Ding Yongjian. Introduction to cold region hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2017. [丁永建. 寒区水文导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [72] Liu Yang, Zhao Lin, Li Ren. Simulation of the soil water-thermal features within the active layer in tanggula region, Tibetan Plateau, by using SHAW model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 280-290. [刘杨, 赵林, 李韧. 基于SHAW模型的青藏高原唐古拉地区活动层土壤水热特征模拟[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 280-290.]
- [73] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. The water-thermal characteristics of frozen soil under freeze-thaw based on CoupModel [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 356-362. [胡国杰, 赵林, 李韧, 等. 基于COUPMODEL模型的冻融土壤水热耦合模拟研究[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 356-362.]
- [74] Ma Qimin, Huang Yingbing, Nan Zhuotong, et al. Simulating one dimensional water-heat processes in a typical permafrost region in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 341-350. [马启民, 黄滢冰, 南卓铜, 等. 青藏高原典型多年冻土区的一维水热过程模拟研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 341-350.]
- [75] Qin Yanhui, Wu Tonghua, Li Ren, et al. Thermal condition of the active layer on the Qinghai-Tibet Plateau simulated by using the Model of GIPL2[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1153-1166. [秦艳慧, 吴通华, 李韧, 等. 基于GIPL2模型的青藏高原活动层土壤热状况模拟研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1153-1166.]
- [76] Nicolsky D J, Romanovsky V E, Tipenko G S. Using *in situ* temperature measurements to estimate saturated soil thermal properties by solving a sequence of optimization problems[J]. *The Cryosphere*, 2007, 1(1): 41-58.
- [77] Xiong Jiansheng, Zhang Yu, Wang Shaoying, et al. Influence of soil moisture transmission scheme improvement in CLM 4.0 on simulation of land surface process in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 323-336. [熊建胜, 张宇, 王少影, 等. CLM 4.0土壤水分传输方案改进在青藏高原陆面过程模拟中的效应[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 323-336.]
- [78] Li Zhenkun. Improvement of parameterization of soil freezing and thawing process and its influence on climate simulation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2010. [李震坤. 土壤冻融过程的参数化改进及其对气候模拟的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010.]

Improvement of VIC-CAS algorithm for thermal conductivity and unfrozen water and its experimental study on simulation of hydrothermal process of permafrost

LI Fei^{1,2}, GUO Jiakai^{1,2}, ZHANG Shiqiang^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Accurate simulation of permafrost hydrothermal process is of great significance for understanding and predicting the impact of cryosphere changes on water resources and ecology, in which thermal conductivity and unfrozen water are two key parameters in permafrost hydrothermal simulation. On the basis of VIC-CAS model, this study attempts to replace the thermal conductivity and unfrozen water algorithm in VIC-CAS model with the thermal conductivity algorithm of EBM and unfrozen water algorithm of CLM 5.0, respectively, and carries out the numerical simulation contrast experiment using the observation data of Tuotuohe station in the source region of the Yangtze River, and analyzes the influence of different thermal conductivity and unfrozen water algorithms on the simulation of soil layered temperature and humidity. The results show that the EBM thermal conductivity algorithm is better than the original algorithm in simulating the temperature of shallow soil, but worse in deep soil; The improvement of the shallow soil moisture simulation is not obvious, and it becomes worse in the deep soil. CLM 5.0 unfrozen water algorithm has little influence on soil temperature simulation, and soil moisture simulation becomes worse in shallow soil, but it is better than the original algorithm in deep soil. The comparative experiments of the two algorithms in this study provide a reference for further improving the algorithm of frozen soil hydrothermal process in VIC-CAS model.

Key words: permafrost; hydrothermal simulation; VIC-CAS; thermal conductivity; unfrozen water

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 庞瑜, 周成林)