

陈渤黎, 罗斯琼, 吕世华, 等. 2014. 陆面模式 CLM 对若尔盖站冻融期模拟性能的检验与对比 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 649–658.
doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13013. Chen Boli, Luo Sijiong, Lü Shihua, et al. 2014. Validation and comparison of the simulation at Zogê station during freezing and thawing with land surface model CLM [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 649–658.

陆面模式 CLM 对若尔盖站冻融期模拟性能的检验与对比

陈渤黎^{1,2} 罗斯琼¹ 吕世华¹ 张宇¹

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 陆面模式 CLM (Community Land Model) 是目前国际上发展较为完善并被广泛应用的陆面过程模式。本文使用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所位于青藏高原东部的若尔盖高原湿地生态系统研究站的观测资料, 对 CLM3.0 版本及 CLM4.0 版本在上述地区的模拟性能进行了检验与对比。通过比较观测值与模拟值, 验证了模式在高原季节性冻土地区的适用性, 发现 CLM4.0 较 CLM3.0 在模拟结果上有了一定提高。CLM4.0 加入了未冻水参数化方案, 使模式可以模拟到冬季土壤冻结后存留的未冻水, 显著增加了冻融期间土壤含水量的模拟, 同时减小了土壤含冰量的模拟值。并因此增大了模拟的冻土热容量, 减小了热导率, 使冻融期间土壤温度的模拟也有了一定改善。但是模拟中也发现对于较深层土壤, 温度模拟值在冻融期间较观测显著偏低。另外, 在消融(冻结)过程阶段 CLM4.0 模拟的土壤含水量骤增(骤降)的时间均较观测提前。消融过程、冻结过程阶段模拟时间偏短, 而完全冻结、完全消融阶段模拟时间偏长。因此 CLM 对于高原冻土地区的模拟仍是其需要重点改进的地方之一。

关键词 CLM 模式 陆面过程 土壤冻融 模拟试验

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0649-10

中图分类号 P437

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13013

Validation and Comparison of the Simulation at Zogê Station during Freezing and Thawing with Land Surface Model CLM

CHEN Boli^{1,2}, LUO Sijiong¹, LÜ Shihua¹, and ZHANG Yu¹

1 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The community land model (CLM) is a highly developed and widely used land surface model. Two sets of simulation experiments were respectively conducted with model versions 3.0 and 4.0 by using observational data of Zogê station of the Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences. A comparison of the observation and simulation results of soil physical quantities such as temperature and moisture verified the applicability of the model in the seasonal frozen soil area of the plateau. Simulations of CLM4.0 showed a significant improvement over CLM3.0. CLM4.0 includes a parameterization scheme of unfrozen water. Therefore, the model can simulate the unfrozen water in frozen soil, which improves the simulation of soil water content during freezing and

收稿日期 2013-01-16 收到, 2013-06-04 收到修定稿

资助项目 全球变化研究国家重大科学计划项目 2010CB951402, 国家自然科学基金项目 41375077、41130961、40905032

作者简介 陈渤黎, 男, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与数值模拟研究。E-mail: cbllbc824@hotmail.com

通讯作者 罗斯琼, E-mail: lsq@lzb.ac.cn

thawing while reducing the soil ice content. Because unfrozen water increases the heat capacity and decreases the thermal conductivity of frozen soil, the simulation of soil temperature is correspondingly improved. However, the simulated temperature of the deeper soil was significantly lower than observation during the freeze-thaw period. The number of simulated soil water surges in the ablation stage and decreases in the freezing stage were both improved compared with observation. In addition, the simulated time of ablation and freezing processes were both shorter than those of observation, whereas the time of complete frozen and complete ablation were longer. Therefore, the simulation ability of CLM for frozen soil areas of the plateau requires improvement.

Keywords Community land model (CLM), Land surface process, Freezing and thawing, Simulation experiment

1 引言

陆地表面是一个复杂的系统，陆面与近地面大气之间相互作用交换水分和能量从而对天气及气候产生重大影响。目前，陆面过程的重要性已经得到了充分的认识(胡隐樵等, 2004; 张强等, 2009)，但由于陆面观测资料的缺乏和陆面过程的复杂性，其研究工作一直落后于诸如海气相互作用的研究。加上目前台站观测数据通常离散难以满足研究需求，因此陆面过程模式成为深入认识陆面异常变化及其影响的重要手段(陈海山等, 2010)。现有的陆面过程模式在近几十年的陆气相互作用研究中发挥了极大的作用(孙菽芬, 2002)。改进和完善与大气环流模式相耦合的陆面模式是提高大气模式模拟和预报能力的主要方面之一，其发展对于地球科学具有极其重要的作用。随着计算机技术的日新月异，陆面过程模式发展迅速。过去模拟效果不甚理想的冻土、积雪等下垫面，近年来其陆面过程也已有了较为完善的参数化方案(Lawrence et al., 2011)。

土壤是陆面过程的主体，是连接地球系统多个圈层的纽带，土壤的冻融状态是陆面过程的重要参数。冻融过程的复杂性是陆面模式对冻土下垫面模拟效果不够理想的重要原因之一。土壤冻融可以改变地表反照率、土壤热容量、地表蒸发和植被的生长状况，从而改变地表与大气间的感热、潜热、动量交换与辐射，对区域气候产生显著的影响(王澄海等, 2002)。且冻融过程通过改变水导系数、土壤含水量含冰量、土壤径流和土壤渗透，影响土壤层的水文过程(张艳武等, 2003)。土壤还与其上覆盖的积雪相互作用，积雪阻隔了土壤层热量的散失，对土壤冻融过程起到“保温作用”(马虹和胡汝骥, 1995)。与非冻土地区相比，冻融过程使土壤与大气间的能量交换强度大大增强(李述训等,

2002a、2002b)。故土壤冻融是一个大气、积雪、土壤等相互作用的复杂过程。大约35%的地球表面受到冻融过程的作用，冻融过程模拟的不准确制约着陆面模式的发展。

陆面过程参数化方案比较计划(PILPS)第二阶段中第四部分采用苏联水文站Valdai的观测资料作为检验依据，其目的便是验证和比较陆面过程模式中的季节性冻融参数化方案(Luo et al., 2003)。其研究结果表明，当陆面模式中包含了冻融过程的参数化方案时，模拟土壤温度的季节和年际变化都有显著改善。尽管参加PILPS计划的21个模式中仅有12个包含了冻融参数化方案且方案相对简单，但正是该计划的实施让人们认识到了土壤冻融对陆气相互作用的重要性，极大地推动了陆面模式的发展，促进了新一代陆面模式(如CLM等)的开发研究。

陆面过程模式CLM(Community Land Model)是目前世界上发展较为完善并被广泛应用的陆面模式之一。已有很多工作验证了该模式在我国不同区域的适用性。如，黄伟等(2004)在淮河流域做了模拟试验；刘少峰和林朝晖(2005)在我国森林、水田下垫面分别做了模拟研究；辛羽飞等(2006)验证了模式在西北干旱区的适用性；宋耀明等(2009)在长白山区森林下垫面做了模拟分析，均表明该模式在这些区域具有良好的模拟能力。但上述试验或模拟时间较短，或使用模式版本较老，且由于高原季节性冻土地区资料匮乏，使用新版本CLM模式在高原地区所做的模拟研究工作还相对较少。本文使用CLM模式及若尔盖站的观测资料进行了为期一年的单点数值模拟试验。通过对比观测资料及CLM3.0、CLM4.0在土壤温湿度等物理量的模拟结果，验证模式在高原季节性冻土地区的适用性，指出模式不同版本之间的改进提高之处，同时发现模拟中依然存在的一些问题，为模式的发展提供一定的依据。

2 模式简介及资料说明

2.1 模式简介

CLM (Community Land Model) 是 NCAR 发布的新一代陆面过程模式, 是气候系统模式 CCSM (Community Climate System Model) 的陆面模块。该模式是在 BATS (Dickinson et al., 1993)、IAP94 (Dai and Zeng, 1997)、LSM (Bonan, 1996) 等陆面模式的基础上发展起来的, 综合了上述几个模式的优点。模式的最新版本为 CLM4.5。CLM3.0 于 2004 年 6 月发布, 模式主要分为 3 个部分: 1) 生物地球物理过程: 主要描述了地气系统在能量、水分和动量等方面交换, 例如辐射通量、土壤水热属性、积雪物理性质等。2) 生物地球化学过程: 主要描述了地气系统在化学成分方面的交换, 包括植被动态演变及相关碳循环过程。3) 水循环过程: 主要描述了植被冠层截留、地表地下径流、土壤蓄水下渗等水文过程 (Oleson et al., 2004)。CLM3.5 于 2007 年 5 月发布, 模式在 CLM3.0 的基础上主要做了以下改进: 采用了基于 MODIS 产品新的地表资料集; 改进了植被冠层集水截留参数化方案; 加入了一个基于 TOPMODEL 的地表地下径流模型; 采用了一个新的冻土参数化方案等 (Oleson et al., 2007)。CLM4.0 于 2010 年 9 月发布, 模式完全耦合进了 NCAR 的地球系统模式 CESM (Community Earth System Model) 之中, 而不再单独发行陆面模块。模式在 CLM3.5 的基础上主要做了以下改进: 对水文过程中的 Richards 方程的数值算法进行了修正; 雪盖模型做了重大改进, 包括修改了雪盖与密度的关系算法, 低矮植被的积雪覆盖率及积雪压实的算法; 加入了碳-氮生物化学模型; 加入了城市模型; 在土壤层中加入了有机质的参数化方案, 并在 10 层土壤下加入了 5 层基岩, 使得岩石圈层从 3.4 m 延伸到了 50 m 等 (Oleson et al., 2010)。

2.2 冻融参数化方案

对于土壤冻融过程, CLM3.0 中当 $T > T_f$ 且 $\theta_{ice} > 0$ 时发生消融, 当 $T < T_f$ 且 $\theta_{iq} > 0$ 时发生冻结, 其中 T 为土壤温度 (单位: K), T_f 为冰水间的相变温度 (单位: K), θ_{iq} 和 θ_{ice} 分别为土壤液态水和冰的含量, 并假设当土壤完全冻结后为不可渗透。

CLM4.0 沿用 CLM3.5 中加入的未冻水参数化方案 (Niu and Yang, 2006)。当土壤冻结后, 并非

所有的液态水都全部转化为固态冰, 由于土壤颗粒表面能的作用, 其中始终保持一定数量的液态水称作未冻水。CLM4.0 中当 $T > T_f$ 且 $\theta_{ice} > 0$ 时发生消融; 当 $T < T_f$ 且 $\theta_{iq} > \theta_{iq, max}$ 时发生冻结。其中 $\theta_{iq, max}$ 为未冻水含量, 由

$$\theta_{iq, max} = \theta_{sat} \left[\frac{103L_f(T_f - T)}{gT\psi_{sat}} \right]^{-1/b} \quad (1)$$

计算。其中, θ_{sat} 为饱和土壤含水量, ψ_{sat} 为饱和土壤水势 (单位: mm), $L_f = 3.36 \times 10^5$ J/kg 为相变潜热, b 为 Clapp-Hornberger 常数, g 为重力加速度 (单位: m/s²)。当相变发生后, 将土壤温度设为冰点温度, 然后计算相变过程中盈余 (缺失) 的能量, 再计算发生相变的质量以及相变后的土壤温度。当土壤发生冻结后, 根据冻土中水、冰的比例计算冻土的可渗透率, 并相应改变冻土的导水率。

2.3 资料

观测资料来源于中国科学院若尔盖高原湿地生态系统研究站 (下称“若尔盖站”, 33°53'N, 102°08'E, 海拔 3423 m)。该站位于甘南藏族自治州若尔盖草原, 年平均温度 1.2 °C, 年平均降水量约 595 mm, 属高寒湿润气候。观测场周围地形开阔平坦, 地表植被为高寒草甸, 总植被覆盖度 92% 左右。观测系统包含一套微气象要素梯度观测系统和开路涡动相关系统。分别在观测塔 2.35 m、4.20 m、7.17 m、10.13 m、18.15 m 进行 5 层风温湿观测, 分别在 5 cm、10 cm、20 cm、40 cm、80 cm、160 cm 进行 6 层土壤温湿度观测。本试验采用该站 2009 年 10 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日共计 15 个月的观测资料。CLM 模式所需大气强迫场为温度、风速、湿度、气压、降水、向下长短波辐射 (Vertenstein et al., 2012), 其中风速、温度、湿度取用观测塔 10.13 m 的资料, 气压观测所在高度为 2 m, 辐射分量和降水观测高度 1.5 m。大气强迫数据的时间分辨率为 30 min, 并按模式需要制作成 NetCDF 格式。对于单点 offline 模拟试验, 考虑到模式对初值的敏感性, 舍弃 2009 年的模拟数据, 只分析 2010 年的模拟结果, 相当于对模式进行了 3 个月的初始化 (spin-up)。地表资料 (土壤颜色、植被覆盖度、叶面积指数等) 采用根据经纬度从全球数据 (CLM 自带的一套全球地表资料数据) 中提取的单点值, 其中与土壤含水量关系密切的土壤成分比例, 采用了 Luo et al. (2009) 实测的若尔盖站土壤数据值。

3 模拟结果与分析

3.1 土壤冻融时间

通常可将全年分为 4 个不同的冻融阶段(不考虑盐分对冰点降低的影响): 完全冻结(日最低土壤温度大于 0 °C); 完全消融(日最高土壤温度小于 0 °C); 冻结过程(土壤剖面处于冻结过程中); 消融过程(土壤剖面处于消融过程中)。其中冻结过程及消融过程阶段表层土壤日最低温度小于 0 °C, 日最高温度大于 0 °C, 其显著特征是表层土壤存在着昼夜冻的冻融循环。然而由于受随机天气过程的影响, 土壤状态从一个冻融阶段向下一个冻融阶段转变过程中, 不能认为满足下一个冻融阶段判定条件的日期即为下一个冻融阶段的开始日, 因为此日期后的很多天可能仍属上一冻融阶段, 为了更合理地确定冻融状态的起止日期, 在状态转变时若连续 3 天均满足下一冻融阶段的判定条件, 即认为这 3 天中的第一天为下一冻融阶段的起始日(Guo et al., 2011)。通过这一方法, 分别根据若尔盖站观测和模拟的表层 5 cm 土壤日最高、最低温度确定了 4 个冻融阶段的时间范围和天数(表 1、图 1)。由观测可见 1 月 1 日至 2 月 6 日共 37 d 处于完全冻结阶段; 2 月 7 日至 5 月 5 日共 88 d 处于消融过程阶段; 5 月 6 日至 10 月 5 日共 153 d 处于完全消融阶段; 10 月 6 日至 12 月 31 日共 87 d 处于冻结过程阶段。各冻融阶段模拟的起止时间较观测差异很大。其中完全冻结阶段、完全消融阶段的模拟时间显著长于观测, 而完全消融过程及完全冻结过程的模拟时间较观测短, 即说明模拟的冻融速率偏大导致冻融过程较真实情况更快完成。CLM4.0 较 CLM3.0 冻融过程的起始时间略早, 各阶段天数差别不大。冻融过程的模拟偏差在下文土壤含水量的模拟中将有更直观的体现。

表 1 根据若尔盖站 5 cm 土壤日最高、最低温度确定的观测和模拟的 4 个冻融阶段

Table 1 Four freezing and thawing stages determined by daily maximum and minimum soil temperatures in the 5-cm soil layer at Zoigé station

	完全冻结阶段	消融过程阶段	完全消融阶段	冻结过程阶段
观测	1月1日至2月6日(共37 d)	2月7日至5月5日(共88 d)	5月6日至10月5日(共153 d)	10月6日至12月31日(共87 d)
CLM4.0	1月1日至2月23日, 12月7~31日(共79 d)	2月24日至4月9日(共45 d)	4月10日至11月2日(共207 d)	11月3日至12月6日(共34 d)
CLM3.0	1月1日至3月2日, 12月6~31日(共87 d)	3月3日至4月13日(共42 d)	4月14日至11月6日(共207 d)	11月7日至12月5日(共29 d)

3.2 土壤含水量、含冰量

冻融作用对地气系统能量交换的影响, 主要由相应过程地层内水分相变引起。在冻融期间, 大气通过地面与地层间热交换量的大部分用于水(冰)的相变, 从而改变了地温的分布特征及随时间的变化规律, 同时也改变了大气与地层间的热交换量。此外, 冻结土层的透水能力减弱, 使季节冻结层与下伏非冻土的水力联系减弱, 从而有可能减小季节冻土区地面的水分蒸发。图 2 为各层土壤含水量观测与模拟对比(完全冻结期为未冻水含量)。160 cm 土壤层已不发生冻结, 含水量年变化不显著, 故仅给出 10 cm、20 cm、40 cm、80 cm 层的含水量。CLM4.0 可以模拟冻结后土壤中的未冻水, 而冻结后 CLM3.0 模拟的土壤含水量保持 0 值, 即土壤中所有水都冻结成冰, 与实际观测不符。浅层 10 cm 土壤层含水量受降水影响明显, 呈现较为剧烈的波动。CLM4.0 模拟的土壤含水量完全冻结期与观测较接近, 完全消融期较观测略偏低且波动幅度小于观测。而 CLM3.0 模拟的土壤含水量较观测偏差很大, 完全冻结期无法模拟未冻水含量。这种偏差一直维持到消融过程末期, 在完全消融阶段两模式的模拟差异才逐渐减小。CLM3.0 中假设冻土为不可渗透, 而 CLM4.0 中冻土是可渗透的, 故冻融期间两模式模拟的冻土导水性质不同。当消融过程率先

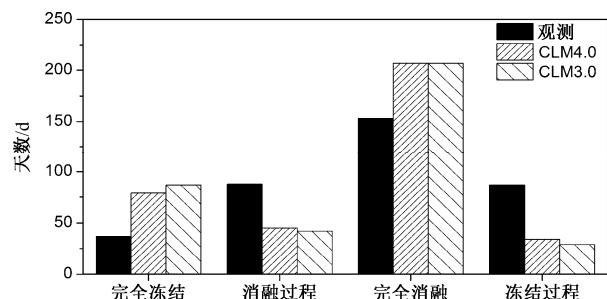


图 1 观测与模拟的各冻融阶段的天数

Fig. 1 Observed and simulated days in each freezing and thawing stage

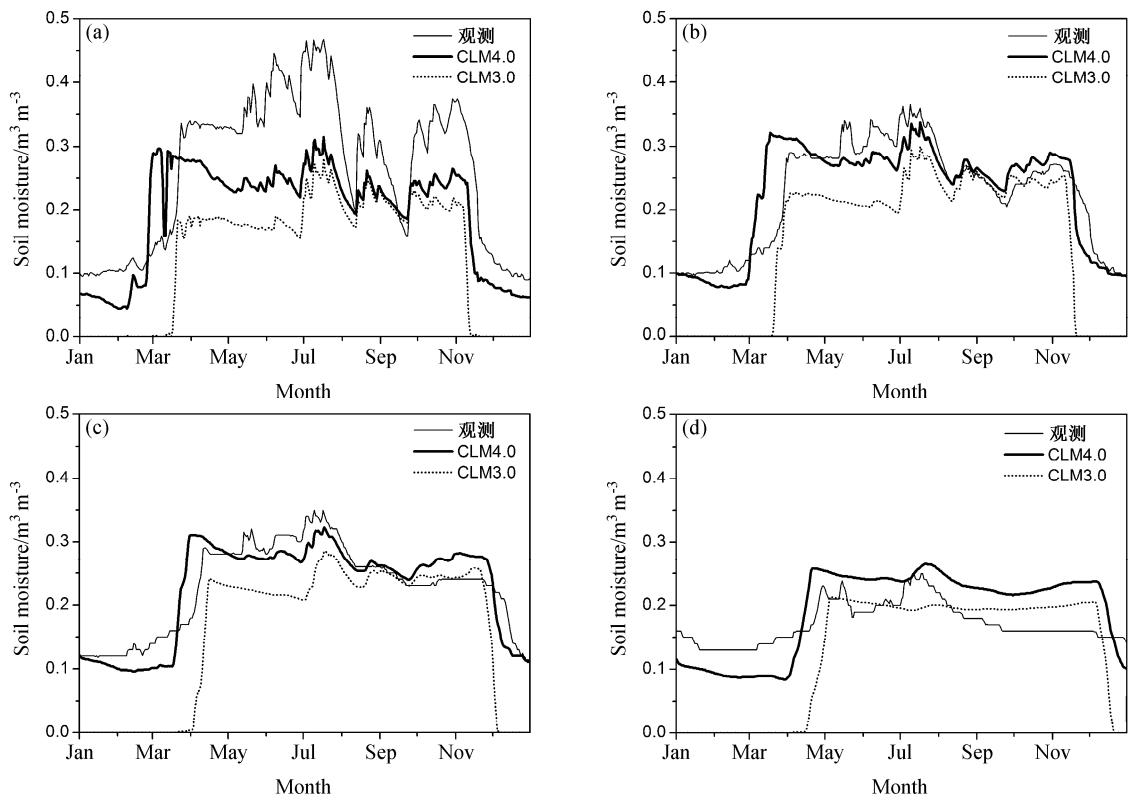


图 2 观测与模拟的 (a) 10 cm、(b) 20 cm、(c) 40 cm、(d) 80 cm 土壤含水量日平均值比较

Fig. 2 Comparisons of the observed and simulated daily mean soil moistures in (a) 10-cm, (b) 20-cm, (c) 40-cm, and (d) 80-cm soil layers

在土壤表层发生时, CLM3.0 中地表积雪及表层冻土融水大部分成为地表径流而未下渗入土壤, 而 CLM4.0 中部分融水渗入土壤, 故在消融过程阶段 CLM4.0 模拟的浅层含水量较 CLM3.0 高。进入完全消融期后, 两模式模拟的土壤导水率近似相等, 故各层含水量相差不大。另外, 观测值显示在消融过程阶段自 3 月初至 3 月底 10 cm 土壤含水量发生骤增过程; 在冻结过程阶段自 11 月初至 11 月底 10 cm 土壤含水量发生骤降过程。CLM4.0 模拟的土壤含水量在突变时间上均有所提前, 尤其在消融过程阶段含水量骤增的时间提前了约 15 d。在这一阶段的模拟上反而是 CLM3.0 模拟的时间较符合观测。当引入未冻水参数化方案后, CLM4.0 模拟的含冰量减少, 可能使冻土更容易发生消融因而消融速率更快。20 cm 及以下土壤层, CLM4.0 模拟的含水量在各冻融阶段都与观测符合较好, 尤其完全冻结期未冻水的含量与观测值偏差很小, 较 CLM3.0 有了显著改善, 但在消融及冻结过程阶段模拟的含水量骤增及骤降的时间均较观测提前, 且在消融过程阶段尤为明显。图 3 为各层土壤含冰量的模拟对比。由于缺乏含冰量观测资料, 仅比较两模式的模拟结

果。加入未冻水参数化方案后, CLM4.0 含冰量的模拟值较 CLM3.0 显著降低。在消融过程阶段各层含冰量骤降过程对应着含水量骤增; 在冻结过程阶段各层含冰量骤增过程对应着含水量骤降, 故可从含水量的模拟推测 CLM4.0 模拟的土壤冰消融时间较真实情况是提前的, 同时也可以推测 CLM4.0 模拟的土壤含冰量值较 CLM3.0 更接近实际。

3.3 土壤温度

土壤温度的模拟取决于土壤热导率、热容量的计算。水与冰在物理性质上存在巨大差异: 水的热导率为 $0.57 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 冰的热导率为 $2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 冰的热导率约为水的 4 倍, 则土壤冻结后比未冻结时具有更高的热导率; 水的热容量为 $4.2 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, 冰的热容量为 $1.9 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, 水的热容量约为冰的 2 倍, 则土壤冻结后比未冻结时热容量小。故冻融期间土壤含水量、含冰量的模拟会影响土壤热导率、热容量的计算, 进一步影响土壤温度的模拟。CLM4.0 中加入了对土壤有机质的描述, 也在一定程度上增大了土壤热容量。图 4 为各层土壤温度观测与模拟对比。模式能较好地反映土壤温度随季节的变化, CLM4.0 较 CLM3.0 有了一定改善。

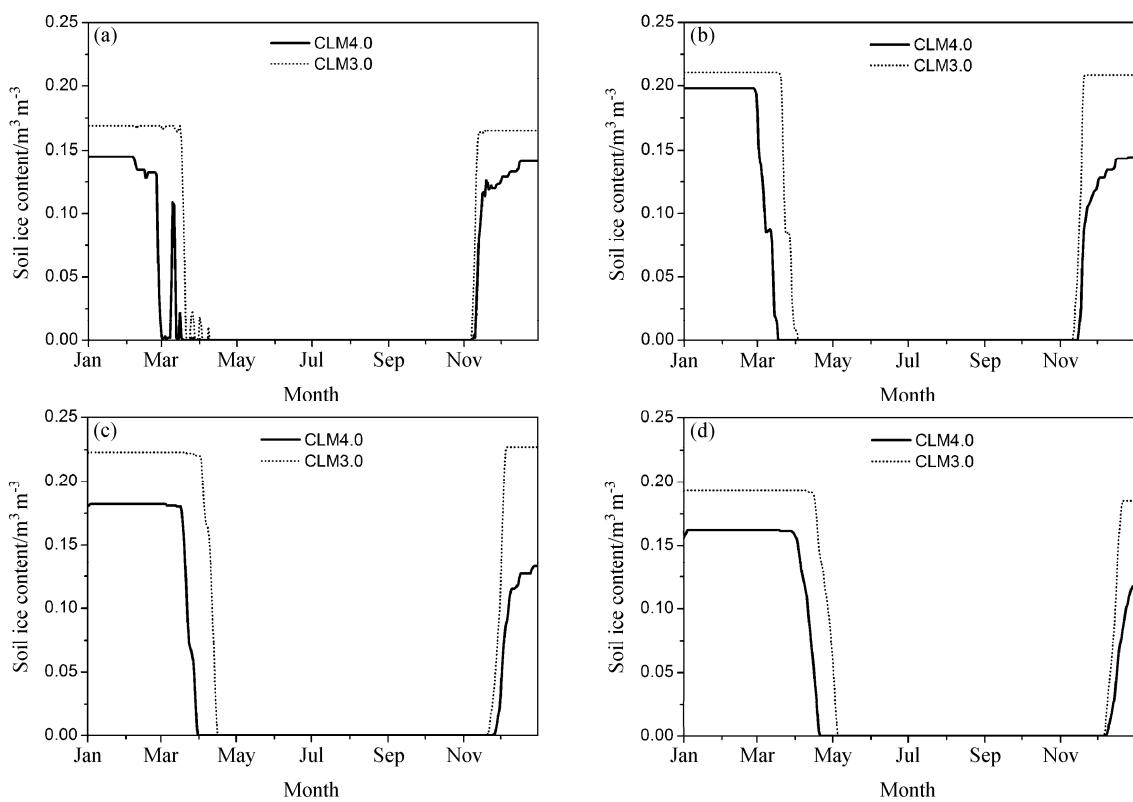


图 3 模拟的 (a) 10 cm、(b) 20 cm、(c) 40 cm、(d) 80 cm 土壤含冰量日平均值比较

Fig. 3 Comparisons of the simulated daily mean soil ice contents in (a) 10-cm, (b) 20-cm, (c) 40-cm, and (d) 80-cm soil layers

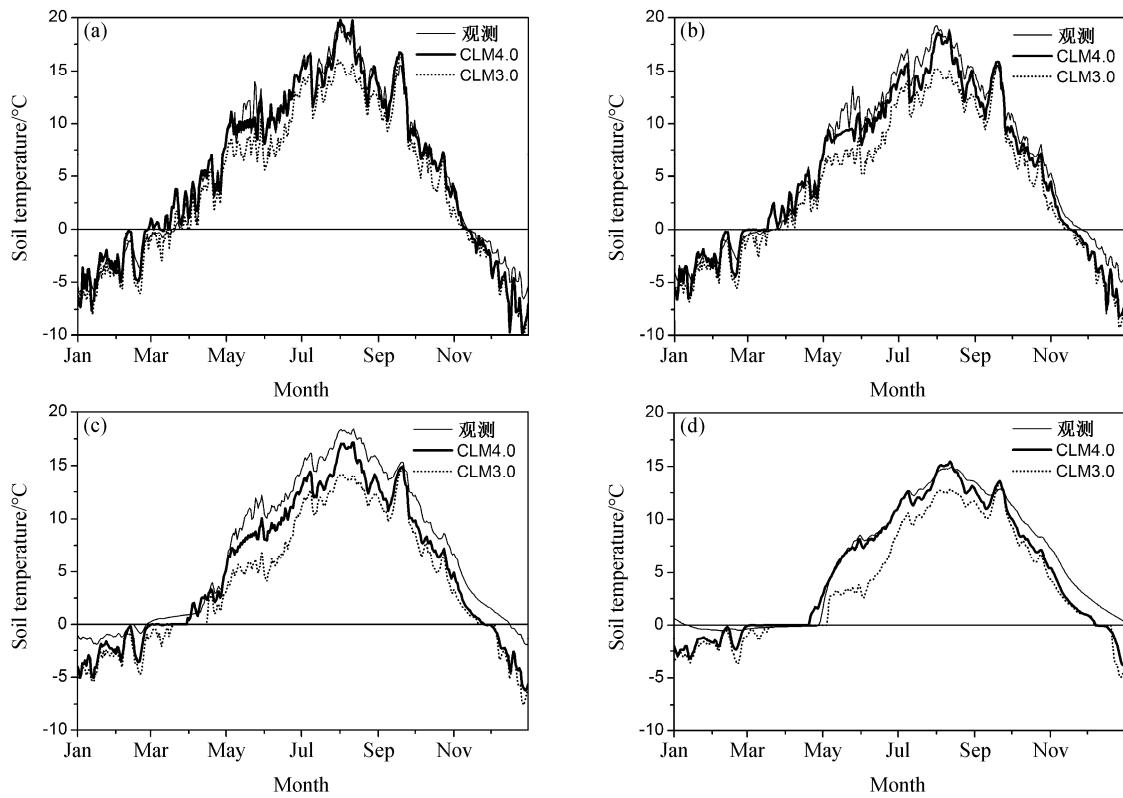


图 4 观测与模拟的 (a) 10 cm、(b) 20 cm、(c) 40 cm、(d) 80 cm 土壤温度日平均值比较

Fig. 4 Comparisons of the observed and simulated daily mean soil temperatures in (a) 10-cm, (b) 20-cm, (c) 40-cm, and (d) 80-cm soil layers

浅层 10、20 cm, CLM4.0 模拟的土壤温度各季节均较好。浅层温度受气温影响明显, 呈现较为剧烈的波动, 模拟温度波峰谷时间与观测均能较好对应。完全冻结期模拟温度较观测稍偏低。40、80 cm 模拟效果夏季较好、冬季较差, 土壤完全冻结后模拟温度平均偏低于观测 2~3 °C。而 CLM3.0 模拟的土壤温度在各层次均偏低, 尤其完全消融期偏差很大。图 5 为 10 cm 层土壤温度各冻融阶段日变化对比 (40 cm 及以下层土壤温度日变化已不显著, 故仅以 10 cm 层为例)。4 个冻融阶段各取 31 d, 完全冻结阶段以 1 月为例; 消融过程阶段以 2 月 21 日至 3 月 23 日为例; 完全消融阶段以 7 月为例; 冻结过程阶段以 11 月 1 日至 12 月 1 日为例。模式在各冻融阶段均能较好地模拟土壤温度的日变化。总体来看, 当加入未冻水参数化方案后, CLM4.0 模拟的土壤含水量提高, 含冰量减小, 冻土热容量增大, 故 CLM4.0 模拟的土壤温度日变化在冻融期间较 CLM3.0 略有减小。其中, 完全冻结期和完全消融期 CLM4.0 模拟的土壤温度比较理想, 日最高、最低温度, 日较差都与观测值接近。在冻融过程阶段模拟值较观测有较大的偏差。由观测值可见, 在

消融过程阶段中 3 月 1~20 日及冻结过程阶段中 11 月 10~20 日期间内, 土壤温度稳定维持在 0 °C 上下, 日变化很小, 但模拟的土壤温度日变化偏大, 且在消融过程阶段偏差更为显著。由图 5b 可知, 3 月初 CLM4.0 模拟的 10 cm 土壤层日温度便已出现高于 0 °C 的情况, 较观测与 CLM3.0 模拟值均提前, 这就造成了消融过程阶段 10 cm 层土壤含水量骤增时间较观测提前 (图 2a), 10 cm 层土壤含冰量骤降时间也提前 (图 3a), 当土壤日最高温度超过 0 °C 时, 该土壤层中的冰便发生消融, 土壤含水量迅速增大, 因此 CLM4.0 模拟的土壤温度达到和超过 0 °C 的时间较观测提前导致了土壤含水量骤增时间提前。其原因一方面是冻土中水冰含量模拟偏差导致热导率计算偏大, 另一方面也与各陆面能量模拟不准确导致进入土壤的热通量的计算存在偏差有关。

3.4 积雪覆盖率与雪深

CLM4.0 较 CLM3.0 在冻融期的另一不同为积雪方案的改进, 主要体现在积雪覆盖率的变化上。这部分非本文重点只做简单讨论, 另考虑到缺乏积雪观测资料, 仅比较模拟结果。CLM3.0 中积雪覆盖率计算公式为

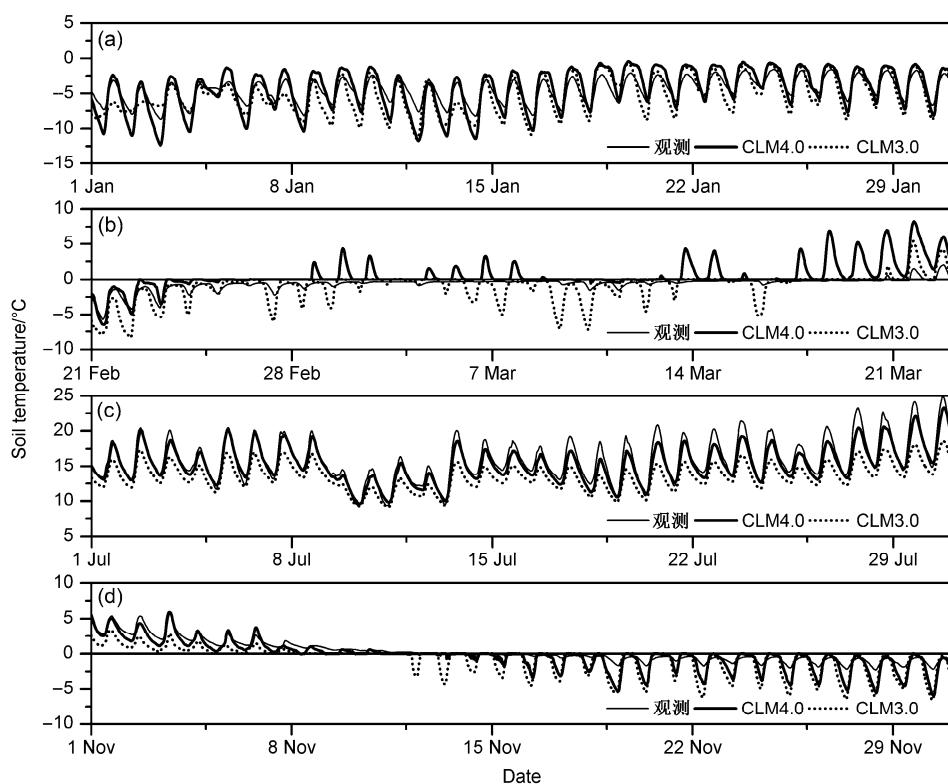


图 5 观测与模拟的 (a) 完全冻结阶段、(b) 消融过程阶段、(c) 完全消融阶段、(d) 冻结过程阶段 5 cm 土壤温度的日变化

Fig. 5 Observed and simulated diurnal variations of soil temperatures in 5-cm soil layers in (a) stage of completely frozen, (b) stage of ablation process, (c) stage of completely ablation, and (d) stage of freezing process

$$f_{\text{sno}} = \frac{z_{\text{sno}}}{10z_{0m,g} + z_{\text{sno}}}, \quad (2)$$

其中, z_{sno} 为雪深 (单位: m), 土壤动量粗糙长度 (单位: m) $z_{0m,g} = 0.01$ 。积雪覆盖率仅是雪深的函数。CLM4.0 采用了 Niu 和 Yang (2007) 的研究工作, 积雪覆盖率计算公式为

$$f_{\text{sno}} = \tanh \left\{ \frac{z_{\text{sno}}}{2.5z_{0m,g} [\min(\rho_{\text{sno}}, 800)/\rho_{\text{new}}]^m} \right\}, \quad (3)$$

其中, 新雪密度 (单位: kg/m³) $\rho_{\text{new}} = 100$; ρ_{sno} 为陈雪的密度 (单位: kg/m³); m 为一可调常数, 模式中取值 1。积雪覆盖率是雪深、雪密度的复杂函数。图 6 为模拟的积雪覆盖率、雪深比较。CLM4.0 模拟的积雪覆盖率大于 CLM3.0 的模拟值, 模拟的积雪深度小于 CLM3.0 的模拟值。这说明新的积雪方案在模拟雪深减小的情况下增大了模拟的积雪覆盖率。对于离线试验, 降雪总量相等, 积雪覆盖率与雪深的变化是两者相互调整的结果。积雪的上述变化对土壤温湿度的模拟可能亦有一定影响。

3.5 误差分析

为了更好地评价 CLM 的模拟效果, 采用以下两种误差分析方法, 分别为模拟值相对观测值的标

准差 (Standard Error of the Estimate, SEE) 和归一化标准差 (Normalized Standard Error of the Estimate, NSEE)。表 2 为根据 2010 年若尔盖站各层土壤温度、土壤含水量各时次模拟值和观测值计算的 SEE、NSEE 统计结果。可见 CLM4.0 较 CLM3.0 在土壤温度、土壤含水量的模拟上均有一定改善。各层土壤温度模拟值相对观测值的标准差分别减小了 0.95 °C、1.27 °C、1.38 °C、1.11 °C, 各层土壤含水量模拟值相对观测值的标准差分别减小了 9.49%、4.32%、3.45%、5.02%。

4 结论与讨论

分别使用 CLM4.0、CLM3.0 模式对位于青藏高原东部的若尔盖站进行了为期一年的数值模拟试验, 通过比较观测值与模拟值在土壤温湿度等物理量的差别, 检验了模式对高原季节性冻土地区的模拟能力, 证实了 CLM4.0 较 CLM3.0 在土壤冻融过程中的改进之处, 得到了以下结论:

(1) CLM4.0 及 CLM3.0 模式模拟的各冻融阶段起止时间与观测有一定差别。完全冻结阶段、完

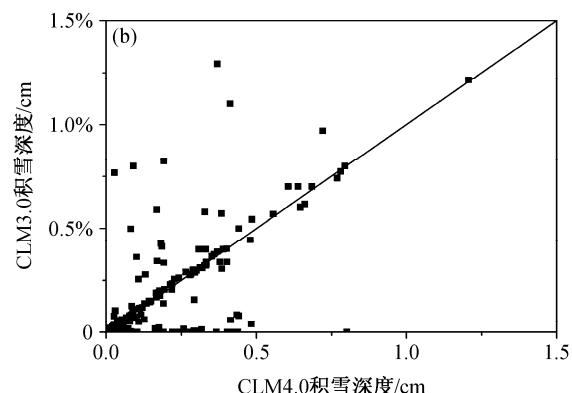
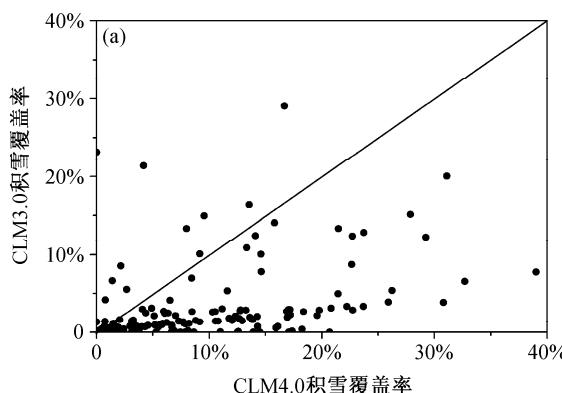


图 6 CLM3.0 和 CLM4.0 模拟的 (a) 积雪覆盖率与 (b) 积雪深度比较

Fig. 6 Comparisons of simulated (a) fractions of snow cover and (b) snow depths from CLM3.0 and CLM4.0

表 2 2010 年若尔盖站各层土壤温度、土壤含水量观测值与模拟值的标准差和归一化标准差

Table 2 Standard Error of the Estimate (SEE) and Normalized Standard Error of the Estimate (NSEE) of the observed and simulated soil temperatures and soil moistures at Zoigê station in 2010

	土壤温度				土壤含水量			
	SEE/°C		NSEE		SEE		NSEE	
	CLM4.0	CLM3.0	CLM4.0	CLM3.0	CLM4.0	CLM3.0	CLM4.0	CLM3.0
10 cm 土层	1.13	2.08	0.12	0.22	9.49%	14.55%	0.33	0.50
20 cm 土层	1.34	2.61	0.14	0.27	4.32%	9.12%	0.18	0.38
40 cm 土层	1.97	3.35	0.20	0.35	3.45%	9.80%	0.14	0.41
80 cm 土层	1.34	2.45	0.17	0.30	5.02%	8.81%	0.29	0.50
平均	1.45	2.62	0.16	0.29	5.57%	10.57%	0.24	0.45

全消融阶段模拟时间较观测偏长; 而冻结过程、消融过程阶段时间较观测偏短。这说明模拟的冻融速率偏大, 冻融过程较真实情况进行得更快。

(2) CLM4.0 能够模拟土壤含水量随季节的变化及对降水的响应, 各层含水量模拟值与观测值相差不大。CLM4.0 中加入了未冻水参数化方案, 使模式可以模拟到冻结后土壤中存留的未冻水, 冻融期间土壤含水量的模拟较 CLM3.0 有了显著改善, 同时土壤含冰量的模拟值较 CLM3.0 减小。但在冻融过程阶段土壤含水量骤降骤增的模拟时间较观测值提前。

(3) CLM4.0 能够模拟土壤温度随季节的变化, 各层温度模拟效果均较理想。但 40 cm 及以下层次冻融期模拟温度较观测值偏低。在完全冻结和完全消融阶段土壤温度日变化的模拟与观测较接近, 但在冻融过程阶段日变化的模拟与观测有所偏差。加入未冻水方案后, 冻土热容量的模拟值增大, 热导率的模拟值减小, 使冻融期间土壤温度的模拟较 CLM3.0 有了一定程度的改善。另外 CLM4.0 积雪方案也有所改进, 对土壤温湿度的模拟可能也有影响。

尽管本文所做试验仅在若尔盖站一个站点进行, 模拟时间也相对较短, 但与其他学者使用该陆面模式在高原不同站点所进行的模拟试验所得结论类似。如罗斯琼等 (2009) 采用 CLM 模式的姊妹版本 CoLM 模式对青藏高原中部布交站进行了模拟研究, 同样发现冻结期模拟土壤温度偏低, 并指出高原土壤中富含砾石, 而模式参数化方案中只有对砂土、粘土的描述, 故将该模式用于高原地区站点时其热导率、水导率的计算必然会受到一定影响。夏坤等 (2011) 在 CLM3.0 中加入了未冻水方案 (其方案与 CLM4.0 类似), 并对青海苏里站进行了模拟试验, 同样发现加入未冻水方案后冻融期含水量突变的时间有所提前, 并指出模拟中存在相变速率过快的现象, 而真实的冻融速率可能只有模拟中的 0.5 倍。李燕等 (2012) 使用 CoLM 模式对高原地区藏东南站、纳木错站、珠峰站分别进行了模拟, 发现在冻结期 40 cm 以下土壤温度的模拟值均偏低。

另外, 李倩和孙菽芬 (2007) 指出真实的冻融过程是一个连续缓慢的变化过程, 不存在固定的冻融临界温度 (或范围), 必须根据平衡态情况下土壤水势和温度之间的热力学平衡关系以及固有的

土壤水力学特征本构关系来确定土壤含水量、含冰量和温度之间的定量关系。故 CLM 中假定相变只发生在 0 °C 可能是不合理的。综上, 陆面过程模式 CLM 对高原冻土地区的模拟仍是其需重点改进的方面之一。

致谢 感谢中国科学院若尔盖高原湿地生态系统研究站提供的观测数据。两位审稿专家给本文提出了宝贵的意见, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- Bonan G B. 1996. The NCAR land surface model (LSM version 1.0) coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note TN-429+ STR. Boulder, Colorado.
- 陈海山, 熊明, 沙文钰. 2010. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 I: 土壤温度 [J]. 气象科学, 30 (5): 621–630. Chen Haishan, Xiong Mingming, Sha Wenyu. 2010. Simulation of land surface processes over China and its validation, Part I: Soil temperature [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 30 (5): 621–630.
- Dai Y J, Zeng Q C. 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies part I: Formulation and validation in off-line experiments [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 14 (4): 433–460.
- Dickinson R E, Kennedy P J, Henderson-Sellers A. 1993. Biosphere–atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. National Center for Atmospheric Research, Climate and Global Dynamics Division.
- Guo D, Yang M, Wang H. 2011. Sensible and latent heat flux response to diurnal variation in soil surface temperature and moisture under different freeze/thaw soil conditions in the seasonal frozen soil region of the central Tibetan Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 63 (1): 97–107.
- 胡隐樵, 孙菽芬, 郑元润, 等. 2004. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展 [J]. 高原气象, 23 (3): 281–296. Hu Yinqiao, Sun Shufen, Zheng Yuanrun, et al. 2004. Review of study on interaction between underlying surface with sparse vegetation and atmosphere [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (3): 281–296.
- 黄伟, 郭振海, 宇如聪. 2004. CLM 在淮河流域数值模拟试验 [J]. 气象学报, 62 (6): 764–775. Huang Wei, Guo Zhenhai, Yu Rucong. 2004. Numerical simulation of CLM over Huaihe basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (6): 764–775.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 3 (3), doi:10.1029/2011MS00045.
- 李述训, 南卓铜, 赵林. 2002a. 冻融作用对地气系统能量交换的影响分析 [J]. 冰川冻土, 24 (5): 506–511. Li Shuxun, Nan Zhuotong, Zhao Lin. 2002a. Impact of soil freezing and thawing process on thermal exchange between atmosphere and ground surface [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (5): 506–511.
- 李述训, 南卓, 赵林. 2002b. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响

- [J]. 冰川冻土, 24 (2): 109–115. Li Shuxun, Nan Zhuotong, Zhao Lin. 2002b. Impact of freezing and thawing on energy exchange between the system and environment [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (2): 109–115.
- 李燕, 刘新, 李伟平. 2012. 青藏高原地区不同下垫面陆面过程的数值模拟研究 [J]. 高原气象, 31 (3): 581–591. Li Yan, Liu Xin, Li Weiping. 2012. Numerical simulation of land surface process at different underlying surfaces in Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (3): 581–591.
- 李倩, 孙菽芬. 2007. 通用的土壤水热传输耦合模型的发展和改进研究 [J]. 中国科学 (D辑), 37 (11): 1522–1535. Li Qian, Sun Shufen. 2007. Development of a simplified frozen soil model [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 37 (11): 1522–1535.
- 刘少峰, 林朝晖. 2005. 通用陆面模式 CLM 在东亚不同典型下垫面的验证试验 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 684–699. Liu Shaofeng, Lin Zhaohui. 2005. Validation of common land model using field experiment data over typical land cover types in East Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 684–699.
- Luo L, Robock A, Vinnikov K Y, et al. 2003. Effects of frozen soil on soil temperature, spring infiltration, and runoff: Results from the PILPS 2 (d) experiment at Valdai, Russia [J]. Journal of Hydrometeorology, 4 (2): 334–351.
- Luo S, Lü S, Zhang Y. 2009. Development and validation of the frozen soil parameterization scheme in Common Land Model [J]. Cold Regions Science and Technology, 55 (1): 130–140.
- 罗斯琼, 吕世华, 张宇, 等. 2009. 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, 52 (4): 919–928.
- Luo Siqiong, Lü Shihua, Zhang Yu, et al. 2009. Soil thermal conductivity parameterization establishment and application in numerical model of central Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52 (4): 919–928.
- 马虹, 胡汝骥. 1995. 积雪对冻土热状况的影响 [J]. 干旱区地理, 18 (4): 23–27. Ma Hong, Hu Ruji. 1995. Effects of snow cover on thermal regime of frozen soil [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 18 (4): 23–27.
- Niu G Y, Yang Z L. 2006. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale [J]. Journal of Hydrometeorology, 7 (5): 937–952.
- Niu G Y, Yang Z L. 2007. An observation-based formulation of snow cover fraction and its evaluation over large North American river basins [J]. J. Geophys. Res., 112 (D21): D21101, doi: 10.1029/2007JD008674.
- Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the community land model (CLM) [R]. NCAR Tech. Note TN-461+ STR, Boulder, Colorado.
- Oleson K W, Niu G Y, Yang Z L, et al. 2007. CLM3.5 documentation [R]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 34pp.
- Oleson K W, Lawrence D M, Gordon B, et al. 2010. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Tech. Note TN-478+ STR, Boulder, Colorado.
- 宋耀明, 郭维栋, 张耀存, 等. 2009. 陆面过程模式 CoLM 和 NCAR_CLM3.0 对中国典型森林生态系统陆气相互作用的模拟 I: 不同模式模拟结果的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (3): 229–242. Song Yaoming, Guo Weidong, Zhang Yaocun, et al. 2009. Performances of CoLM and NCAR_CLM3.0 in simulating land-atmosphere interactions over typical forest ecosystems in China. Part I: Preliminary analysis of the simulations based on different models [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 14 (3): 229–242.
- 孙菽芬. 2002. 陆面过程研究的进展 [J]. 新疆气象, 25 (6): 1–6. Sun Shufen. 2002. Advance in land surface process study [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 25 (6): 1–6.
- Vertenstein M, Craig T, Middleton A, et al. 2012. CESM1.0.4 user's guide [R]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO [OL]. Available from: http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cesm/cesm_doc_1_0_4/book1.html [Accessed 4 May 2012].
- 王澄海, 董文杰, 韦志刚. 2002. 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, 17 (1): 44–52. Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. 2002. The development of study on the soil freezing-thaw process in land surface model [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), 17 (1): 44–52.
- 夏坤, 罗勇, 李伟平. 2011. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟 [J]. 科学通报, 56 (22): 1828–1838. Xia Kun, Luo Yong, Li Weiping. 2011. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 56 (20): 2145–2155.
- 辛羽飞, 卞林根, 张雪红. 2006. CoLM 模式在西北干旱区和青藏高原区的适用性研究 [J]. 高原气象, 25 (4): 567–574. Xin Yufei, Bian Lingen, Zhang Xuehong. 2006. The application of CoLM to arid region of northwest China and Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (4): 567–574.
- 张强, 王胜, 张杰, 等. 2009. 干旱区陆面过程和大气边界层研究进展 [J]. 地球科学进展, 24 (11): 1185–1194. Zhang Qiang, Wang Sheng, Zhang Jie, et al. 2009. The progresses on land surface processes and atmospheric boundary layer in arid regions [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), 24 (11): 1185–1194.
- 张艳武, 吕世华, 李栋梁, 等. 2003. 初冬青藏高原冻土过程的数值模拟 [J]. 高原气象, 22 (5): 471–477. Zhang Yanwu, Lü Shihua, Li Dongliang, et al. 2003. Numerical simulation of freezing soil process on Qinghai-Xizang Plateau in early winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (5): 471–477.