

文章编号: 1008 - 2786 - (2011)5 - 633 - 08

CoLM 模型在高原多年冻土区的单点模拟适用性

肖瑶^{1,2,3}, 赵林^{1,2}, 李韧^{1,2}, 姚济敏^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 使用 CoLM 模型, 以青藏高原冰冻圈观测研究站设在唐古拉综合观测场的气象资料作为驱动资料, 在青藏高原多年冻土区的唐古拉地区开展了单点模拟试验。通过和该站点同期实测资料对比发现: CoLM 模型对高原多年冻土区的辐射通量各分量的模拟效果较好; 对潜热通量的模拟误差较大, 感热和地表热通量的模拟相对较好; 模型能够很好地模拟活动层浅层土壤温度, 但随着深度加深, 模拟的温度较观测值有所低估。研究表明 CoLM 模型能较好地模拟多年冻土区地表与大气的能水交换过程, 对其进行一些适应性改进后将能得到更好地应用。改进模型的土壤水热参数化过程尤其是添加未冻水参数化方案是将其应用到冻土区首先要解决的问题; 再者扩展模型的模拟深度也十分必要。

关键词: 青藏高原; 多年冻土区; CoLM 模型; 陆面过程; 单点模拟

中图分类号: P931.8

文献标识码: A

多年冻土与季节性冻土面积之和占北半球陆地面积高达 57%, 其中多年冻土占 24%^[1]。作为一类特殊的岩土, 冻土有很特殊也很复杂的物理过程。其中冰的存在不仅改变了土壤的水力学性质, 影响液态水在土壤表面和内部的迁徙和分配^[2], 还改变了土壤的热力学性质, 影响土壤热通量的上下输送, 改变能量在土壤中的传播。因为与非冻结土壤相比, 冻土的热传导率高, 热容量小。同时, 土壤冻结和融化时会释放或吸收大量的相变热, 从而影响能量在土壤层的分配。这样特有的性质极大地影响着陆地与大气的能量交换, 改变雨水、雪融水的入渗, 对地表径流和陆面水文循环起到调节作用。因此冻土过程的模拟对于地气相互作用、区域气候和全球气候的模拟极为重要^[3]。

已有大量的研究工作表明^[4-6], 冻土过程对气候变化的影响是不能忽视的。所以, 在陆面过程模

式和气候模式中加强和改进土壤的冻融过程已成为研究区域气候和全球气候变化的主要手段之一^[7]。

我国是世界第三大冻土国, 多年冻土约 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占北半球多年冻土总面积约 10%^[1]; 其中青藏高原多年冻土分布面积约 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占高原总面积的 $2/3$ ^[8-9]。因此, 对青藏高原多年冻土区陆面过程进行合理的描述和准确地模拟, 对提高通用陆面过程模型的在全球适用性十分重要。大多陆面过程模型发展于低海拔地区, 其关于冻土区的研究主要也来自于低海拔地区或者季节性冻土区^[10-13], 在高原多年冻土区开展的研究极少。青藏高原多年冻土区具有其特殊的下垫面特征, 一般陆面过程模式中物理过程及参数化方案, 在该区域的适用性有待进一步探讨。青藏高原冰冻圈观测研究站自 2004 年起, 在多年冻土区不同下垫面布设了 3 个综合监测场, 对陆面过程进行了高密度高精度的

收稿日期(Received date): 2011 - 05 - 12; 改回日期(Accepted): 2011 - 08 - 20。

基金项目(Foundation item): 本文得到了国家自然科学基金项目(40830533, 40871037, 40901042, 41101069)、冰冻圈与全球变化重点实验室自主课题(SKLCSS - ZZ - 2010 - 03)和青藏高原冰冻圈观测研究站的资助。[Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40830533, No. 4871037, No. 40901042, 41101069), SKLCSS - ZZ - 2010 - 03 and Cryosphere Research Station on Qinghai - Xizang Plateau, CAS.]

作者简介(Biography): 肖瑶(1985 -), 男, 河南省息县人, 博士研究生, 主要从事多年冻土区地气相互作用, 陆面过程及模式模型研究。[Xiao Yao(1985 -), male, born in Xi County of Henan, Ph D student, research field mainly covering land-atmosphere interaction, land surface process and model simulation.]E-mail: xiaoyao@lzb.ac.cn

观测,取得了宝贵的数据资料。

本文利用青藏高原冰冻圈观测研究站唐古拉综合观测场 2005—2006 年实测资料,对目前较先进的 CoLM 模型在青藏高原多年冻土下垫面下的适用性及其模拟结果进行初步探讨,以期在该模型基础上针对本地区特殊的冻土物理过程进行改进,为进一步发展适用高原多年冻土区的陆面过程模型做出贡献。

1 CoLM 模型、观测站点及资料介绍

CoLM 是由戴永久等^[14-15]发展的在国际上较为先进的第三代陆面模式,是由 Common Land Model 初始版本(CLM initial version)发展起来的。该模式结合了公认较好的 NCAR LSM、BATS 和中科院大气物理研究所发展的 IAP94 三个模式的特点,模式在雪盖、土壤湿度以及感热、潜热通量等方面的模拟都表现出了比较高的准确性。该模式被广泛的应用于气候模式中,与 NCAR CCM3 耦合,替换原

来的 NCAR LSM,结果表明对地表空气温度、地表径流的年循环以及雪盖等方面模拟结果明显优于 LSM^[16-17]。CoLM 模型综合了考虑大气-植被-雪盖-土壤间的相互作用,对于陆-气之间能量和水分传输有较好的描述。但同其他众多陆面过程模型一样,CoLM 模型对于土壤冻融过程的考虑较为粗糙,将其应用于青藏高原多年冻土区还需要进行必要的验证和改进。

试验站点唐古拉综合观测场^[18](33°04'N,91°56'E,海拔 5 100 m),位于唐古拉山垭口西南的一个平缓坡地上(图 1),地处连续多年冻土区,自然地带属高寒草甸地带,成团簇状,高度低矮,一年中最高高度约为 10 cm,植被覆盖度较高,在 20%~30% 左右。年均气温 -4.9℃,极端最高温度 17.6℃,极端低温 -29.6℃,年均气压为 538 hPa,年降水量 436.7 mm。该站点土壤质地以砂土为主,>30 cm 土壤砂土含量均在 65% 以上,<30 cm 土壤砂土含量在 85% 以上。唐古拉气象观测场于 2004—06 建立,迄今运行良好,每月有专人负责维护,在数据质量上给

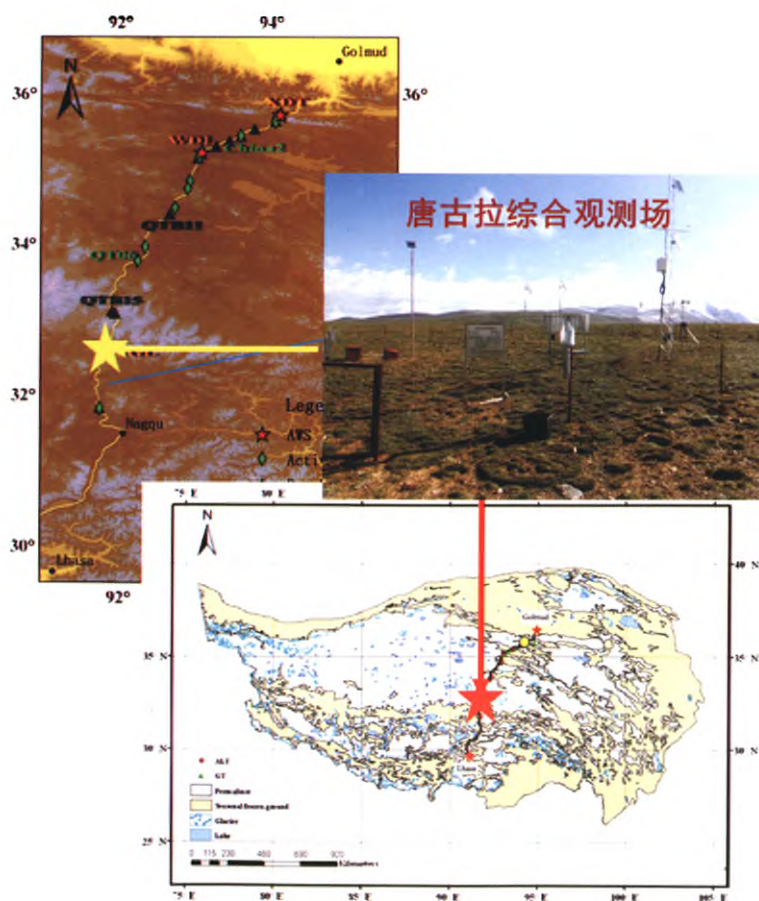


图 1 唐古拉综合观测场

Fig. 1 The observation site of TGL

予了保证。其主要观测项目如表1所示。

本文中使用2005-01-01—2006-12-31共2 a的常规相关气象观测数据作为模式的驱动场,时间步长为30 min。用站点的实际资料制作了模式需要的地表及土壤质地数据。用该站点的辐射通量观测数据、活动层温度和水分数据、钻孔地温数据及由涡动相关系统的观测资料计算得到的能量通量数据同模拟结果进行对比,分析探讨模型的模拟效果。

表1 唐古拉综合观测场观测项目

Table1 Observation projects at TGL site

观测系统	区间	主要观测项目
常规气象观测	2004 -	三层风、温、湿梯度观测 (2 m, 5 m, 10 m) 辐射四分量观测降水, 积雪厚度, 气压观测浅层土壤温度, 湿度, 热通量观测
活动层观测	2005 -	0 ~ 300 cm 14 层土壤温度观测
		0 ~ 300 cm 10 层土壤水分、盐分观测
钻孔地温观测	2010 -	红外地表温度, 0 ~ 300 cm 9 层热导率观测
涡动相关系统观测	2006 -	0 - 34.5 m 47 层地温观测
	2004 -	三维风速; H ₂ O, CO ₂ 通量观测

2 模拟结果与讨论

2.1 辐射通量模拟结果

在运行 CoLM 模型时发现, 模型中采用的积雪

覆盖度计算公式为

$$fsno = snowdp / (0.1 + snowdp) \quad (1)$$

式中 *snowdp* 表示积雪厚度。这个发展于低海拔地区的计算方案显然不适合青藏高原, 故采用较适用的积雪覆盖度计算方案^[19]

$$fsno = \min (snowdp / 0.02, 1) \quad (2)$$

修正前后 CoLM 模型模拟的向上短波辐射和地表反照率状况如图2所示。易见模型原采用的积雪覆盖度计算方案在计算地表反照率时, 严重低估了地表有积雪状况下的积雪覆盖度, 从而使该状况下地表反照率的模拟值极度偏低。在调整为较适用于高原的计算方案后, 积雪状况时地表反照率模拟效果有显著的提高。因此本文的模拟试验均为修正积雪覆盖度计算方案之后的结果。

从图2中地表反照率的模拟值同观测值对比可以看出, 由于植被盖度在冬半年减少, 夏半年增加; 加之地表水分含量冬半年因地表冻结较少, 夏半年雨季到来增多, 实际地表反照率呈现出冬半年高, 夏半年较低的现象。这一过程模型未能将其模拟出来, 对辐射通量和能量通量的模拟带来了部分误差, 好在高原上植被多较低矮, 腐殖质层相对较薄, 这种误差相对较小, 本研究中暂不考虑。当然引入更精确的动态植被过程模块也是陆面过程模型的重要发展方向。

图3所示为 CoLM 模型模拟的2005-10—2006-09的日平均辐射通量与实际观测值的比较。可见

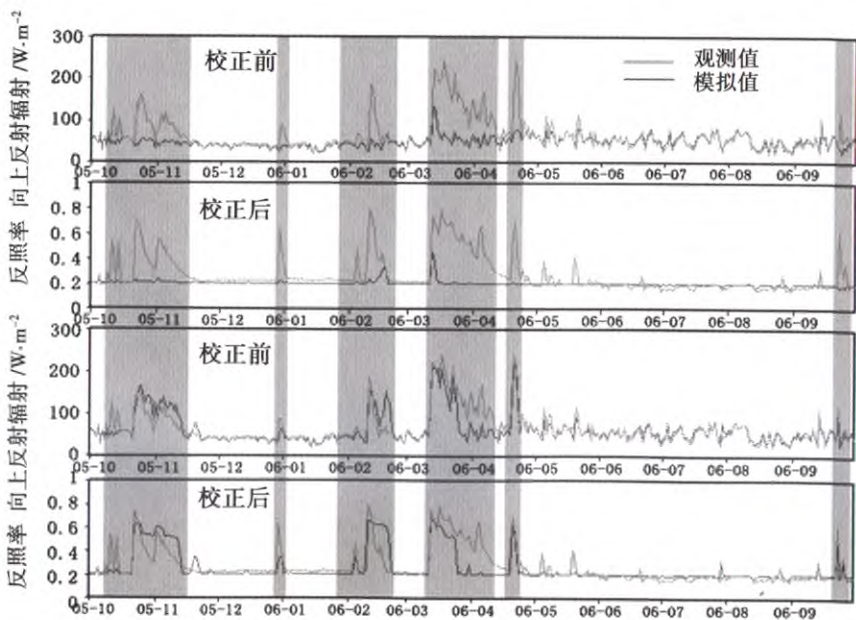


图2 修正积雪覆盖度前后的地表向上短波辐射(USR)和地表反照率(Albedo)

Fig. 2 USR and Albedo before and after snow coverage correction

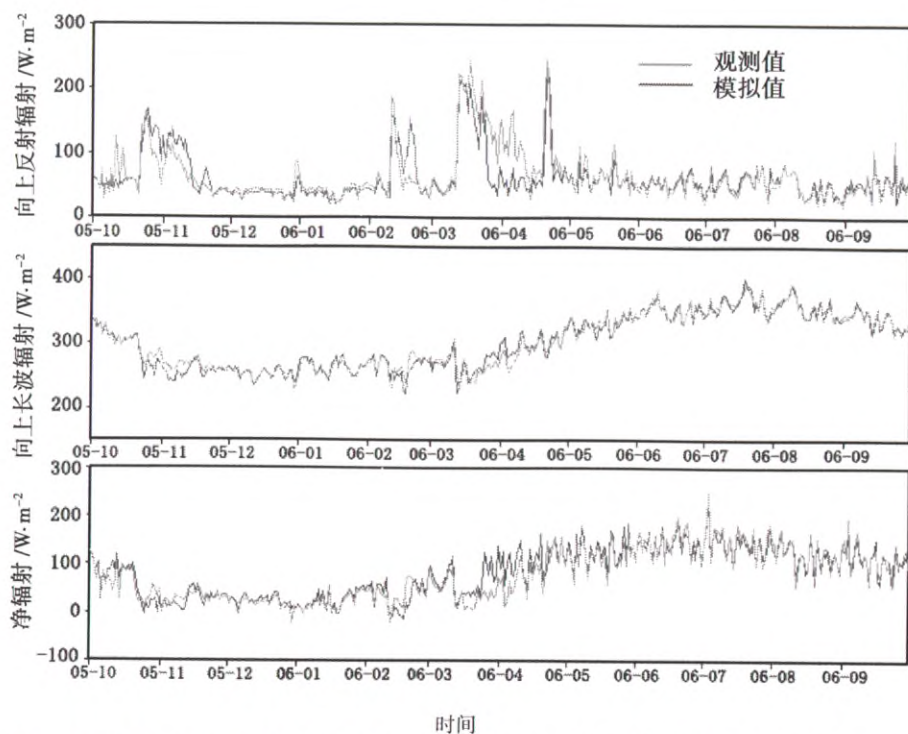


图3 日平均辐射通量的模拟效果(向上短波辐射 USR;向上长波辐射 ULR;净辐射 R_n)

Fig. 3 The daily modeled and measured radiation fluxes

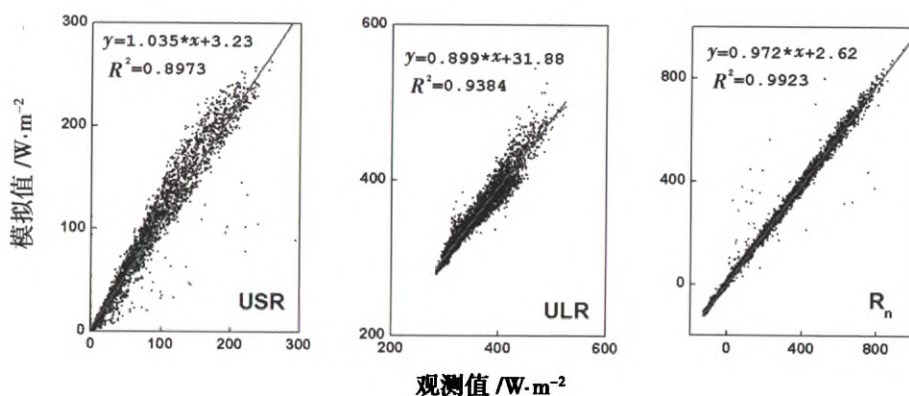


图4 辐射通量模拟值与观测值比较

Fig. 4 Comparison of modeled and measured radiation fluxes

模式对于辐射通量的模拟效果非常好,尤其是在地表无积雪覆盖的情况下。唐古拉地区的地表积雪多出现在冬半年,持续时间为1~30 d不等。图3中部分时段模拟的反射辐射量值显著偏低或偏高,对比观测反射辐射的量值可以看出这些时段出现的模拟偏差主要是由于地表积雪的模拟误差引起的。而积雪模拟的问题,一方面是由于模型的积雪过程描述与高原面上积雪的特殊性不完全相符,另一方面是由于高原上降水的观测(尤其在冬季)的一些客观因素造成的误差。因此,发展更加适合高原的积雪过程参数化方案和获取更加准确的高原降水数

据,是提高陆面过程模型在青藏高原上适用性的重要方向。

通过2005-06-15—09-30期间每半小时的模式模拟值同观测值的对比(图4)可以看出,净辐射的模拟值与观测值拟合度非常高,相关系数达到了0.99。向上长波辐射的模拟效果也很好,相关系数接近0.94。向上短波辐射的模拟结果略微离散些,但相关系数也达到了0.90左右。这充分说明了CoLM模型能够很好地模拟出青藏高原冻土区的辐射通量,尤其是在下垫面没有积雪时,模拟效果非常好。当地表同时模式能很好地模拟出辐射通量各分

量的日变化特征,各时刻的模拟值同观测值皆吻合地很好。

2.2 能量通量模拟结果

图5所示为2005年全年CoLM模型模拟的日平均能量通量与观测值的对比。易见模式能够模拟出能量通量各分量日均值在年内的变化过程。其中感热通量的模拟效果相对较好,潜热通量的模拟效果较差。特别在冬半年,潜热通量的模拟值多为0,出现明显地低估,主要是由于CoLM模型在冻结过

程的考虑上认为,土壤中的水分是全部参与相变的,即模型认为当土壤温度低于 0°C 时土壤中是没有未冻水存在的。而是实际上高原多年冻土中未冻水是普遍存在的,因此冻结状态下本应存在于土壤表层中未冻水被模型作为冰来计算,冬半年的地表潜热通量被显著地低估了;另外高原降雪过程较为复杂,模型对于地表积雪状况的模拟并没有太过精确也是冬半年潜热通量出现较大误差的重要原因。夏季潜热模拟误差较大可能是模型对于地表和大气之间潜

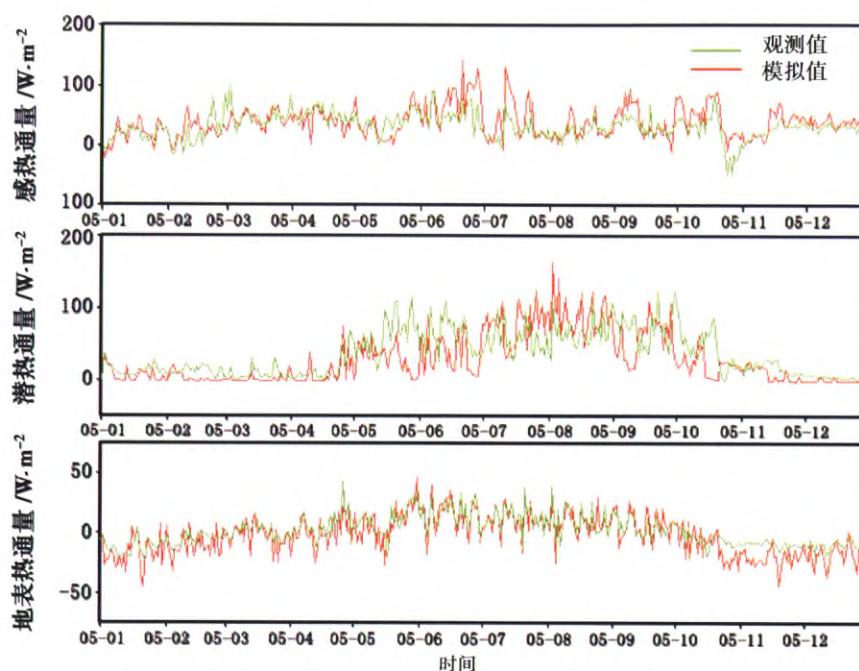


图5 日平均能量通量的模拟效果(感热H;潜热LE;地表热通量G0)

Fig. 5 The daily modeled and measured energy fluxes

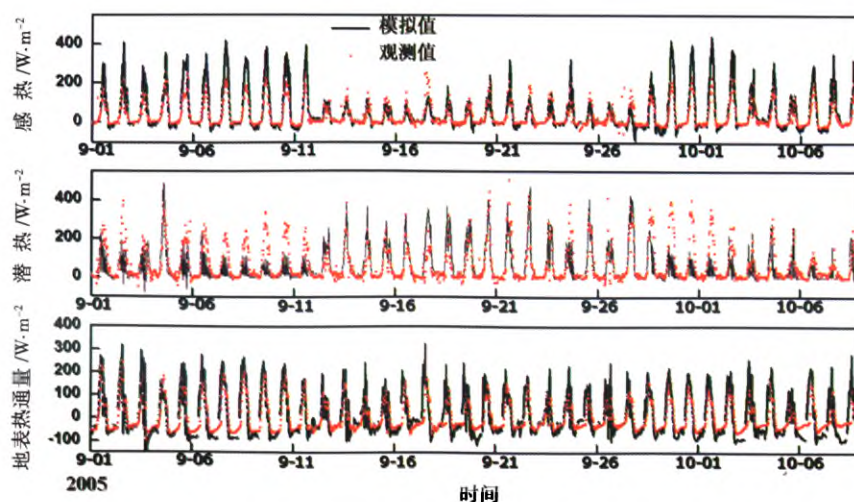


图6 辐射通量模拟值(实线)与观测值(点)比较

Fig. 6 The hourly modeled(solid line) and measured(dot) energy fluxes

热传输参数化过程在高原下垫面适用性的原因引起的。另外由于高原降雪和地面积雪的情况较低海拔地区更为复杂,模型对高原地面积雪过程尤其是高原夏半年中的短暂积雪状况模拟存在不足也是能量通量误差模拟较大的重要原因。

虽然 CoLM 模型未能在量值上完美地模拟出能量通量各分量,但从图 6 中可以看出,模型还是能够较好地模拟能量通量各分量日内的变化特征。夜间能量通量的量值较小时模拟与观测比较接近,而日间的偏差较大。在 2005-09-01—10-08 期间,模拟的感热通量值偏低,潜热通量值偏高,地表热通量值吻合较好。

2.3 土壤温度模拟效果

模拟结果显示 CoLM 模型可以很好地模拟出浅层地温的日变化过程,各个时刻的模拟值和观测值吻合地非常好。由 CoLM 模型模拟的 2006 年日均土壤温度与实测值的比较(图 7)可以看出,模型对于浅层土壤温度日均值的模拟效果非常好。2 cm、10 cm 和 20 cm 三层温度模拟值与观测值的二次项拟合指数极为接近,且相关系数高达 0.97 以上。但是随着土壤深度的增加,温度模拟值与观测值之间的误差增大,模拟值出现明显低估。尤其在较深层次,温度低估愈加明显。这可能是由于模型对于土壤冻融过程考虑不足的缘故。由于模型不考虑未冻

水过程,那么在冻融循环过程中作用于土壤中水分冻结和融化的能量即被过渡高估了,即在土壤冻结过程中本应有部分未冻水存留却被认为也需要冻结,则过多的能量应用于相变,则土壤的温度模拟就会偏低;而土壤融化过程中,未冻水本不需要参与相变却在模型计算时被当作冰参与了相变,也会导致土壤温度的模拟偏低。随着深度的加深,模型计算时土壤分层的厚度显著增加,土层中未冻水含量亦显著增加,上述因素的影响随即越来越大,因此温度模拟偏低的趋势越来越显著。图 7 中显示 60 cm、100 cm 和 175 cm 层次,越来越多的模拟值集中在 0℃ 附近即是上述影响的显著证据。因此,引进合适的未冻水过程参数化方案将是 CoLM 模型应用于高原多年冻土区的首先要解决的问题。

3 结论和讨论

综上所述,通过 CoLM 模型在青藏高原多年冻土区唐古拉地区开展单点陆面过程的模拟试验,将模拟值与观测值对比得出如下结论:

1. 在调整了适合高原状况的积雪覆盖度参数化方案之后,CoLM 模型对该点辐射通量的模拟效果很好,尤其是地表无积雪时。但模型中使用的通用积雪参数化过程在应用于青藏高原特殊下垫面时仍

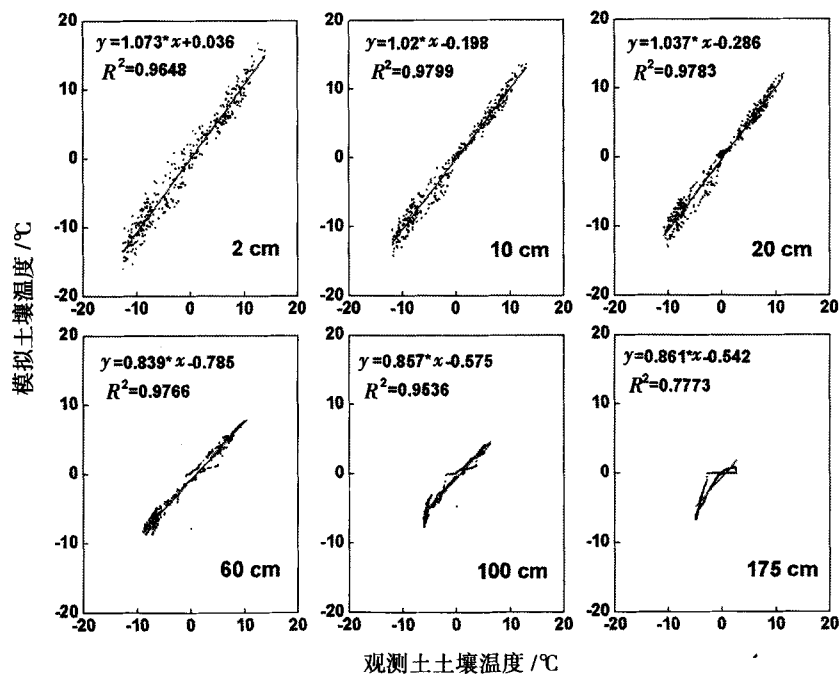


图 7 模拟土壤温度与观测值的比较

Fig. 7 Comparison of modeled and measured soil temperatures

有所欠缺。

2. 模型对能量通量各分量的模拟效果一般,尤其是潜热通量偏差较大。虽然能量通量的模拟在量值上同观测值吻合不佳,但模型能较好地模拟出各分量日内变化特征。

3. 模型能较好地模拟浅层土壤温度,极好地表述其日变化特征。但随着深度加深,温度低估明显。主要是由于模型对于土壤冻融过程考虑不够完善,未添加未冻水参数化过程的缘故。

通过模拟试验分析,我们认识到 CoLM 模型对于青藏高原多年冻土区的模拟效果整体不错。尤其是模型对于辐射过程和浅层温度的模拟效果很好,可以认为 CoLM 模型在研究区域具有较好的适用性。但 CoLM 模型定位于通用陆面过程模型,若使其在青藏高原取得更好的应用,对其进行相应的改进是极其必要和紧迫的。改进模型的土壤水热参数化过程,尤其是添加未冻水参数化方案是将其应用到冻土区首先要解决的问题;再者模型对于土壤温度模拟的深度不够,多年冻土区地温一般以 15 m 为年温度变化深度,因此扩展模型的模拟深度在本地区应用中十分必要。

致谢:感谢北京师范大学的戴永久教授和纪多颖老师提供了 CoLM 模型的源程序,并在本人学习和使用 CoLM 模型的过程中给予了大量的帮助和支持。

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), 147 - 169
- [2] Jame Y W, Norum D I. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium [J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 811 - 819
- [3] Larry D Hinzman, Douglas J Goering, Douglas L Kane. A distributed thermal model for calculating soil temperature profiles and depth of thaw in permafrost regions [J]. J Geophys Res, 1998, 103(D22): 28 975 - 228 991
- [4] Pitman A J, Slater A G, Desborough C E, et al. Uncertainty in the simulation due to the parameterization of frozen soil moisture using the Global Soil Wetness Project methodology [J]. J. Geophys. Res. 1999, 104 (D14), 16879 - 16888
- [5] Simmonds I, Lynch A H. The influence of pre2existing soil moisture content on Australian winter climate [J]. Int J Climate, 1992, 12: 33 - 54
- [6] Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Progress in the research on the relationship between soil moisture and climate change [J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(3): 299 - 304 [马柱国,魏和林,符凉斌.土壤湿度与气候变化关系的研究与进展 [J].地球科学进展, 1999, 14(3): 399 - 304]
- [7] Poutou E, Krinner G, Genthon C, et al. Role of soil freezing in future boreal climate change [J]. Climate Dynamics, 2004, 23(6): 621 - 639
- [8] Geocryology Research Institute of Siberia Branch of Soviet Union, translated by Guo Dongxin. General geocryology [M]. Beijing: Science Press, 1988 [苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所.郭东信,等译.普通冻土学 [M].北京:科学出版社,1988]
- [9] Guo Dongxin. China's frozen ground [M]. Lanzhou: Gansu Education Press, 1990. [郭东信.中国冻土 [M].兰州:甘肃教育出版社, 1990]
- [10] Koren V, J Schaake, K Mitchell, et al. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models [J]. J Geophys Res, 1999, 104 (D16): 19569 - 19585
- [11] Zhang Y, S H Lü. Development and validation of a simple frozen soil parameterization scheme used for climate model [J]. Adv Atmos Sci, 2002, 19: 513 - 527
- [12] Luo L F, A Robock, K Y Vinnikov, et al. Effects of frozen soil on soil temperature, spring infiltration and runoff: Results from the PILPS2(d) experiment at Valdai, Russia [J]. J Hydrometeor, 2003, 4(2): 334 - 351
- [13] Bowling L C, D P Lettenmaier, B Nijssen, et al. Simulation of high-latitude hydrological processes in the Torne Kalix basin: PILPS Phase: Experiment description and summary inter comparisons [J]. Global Planet Change, 2003, 38: 1 - 30
- [14] Dai Y J, X B Zeng, R E Dickinson, et al. The Common Land Model (CLM) [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2003, 84: 1013 - 1023
- [15] Dai Y J, Ji D Y. The Common Land Model User & Developer's Guide [R/OL]. <http://globalchange.bnu.edu.cn>, 2007
- [16] Zeng X B, M Shaikh, Y J Dai, et al. Coupling of the Common Land Model to the NCAR Community Climate Model [J]. J Climate, 2002, 15: 1832 - 1854
- [17] Steiner A L, J S Pal, F Giorgi, et al. The coupling of the Common Land Model (CoLM) to a regional climate model (RegCM) [J]. Theoretical and Appl Clim, 2005, 82(3-4): 225 - 243
- [18] Jimin Yao, L Z, Yongjian Ding, et al. The surface energy budget and evapotranspiration in the Tanggula region on the Tibetan Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 52: 326 - 360
- [19] Sun Shufen. Parameterization study of physical and biochemical mechanism in land surface process [M]. Beijing: China Meteorology Press, 2005 [孙蓓芬.陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 [M].北京:气象出版社, 2005]

Applicability of CoLM Model (Single-point) on Permafrost Regions of the Qinghai-Xizang Plateau

XIAO Yao^{1, 2, 3}, ZHAO Lin^{1, 2}, LI Ren^{1, 2}, YAO Jimin^{1, 2}

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, CAS, Lanzhou 730000, China;

3. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: Using meteorological data collected by Tanggula Comprehensive Observation site on the Qinghai-Xizang Plateau as force data, the applicability of CoLM model (single-point) on permafrost regions of Qinghai-Xizang Plateau was analyzed by comparison of simulated and observed values. Results show that: CoLM model is capable of providing good simulations of the evolution of surface radiation fluxes; simulated latent flux do not match well, but sensible flux and ground surface thermal flux are shown to be basically in agreement with observations; the model could simulate shallow soil temperature quite well with correlation coefficients over 0.97, but model underestimates simulated temperatures more with the deeper depth. It is indicated that CoLM model can simulate water and heat exchange process between land and atmosphere well, and will be better if several necessary improvements were developed. Improving model frozen soil hydrothermal parameterization scheme, especially adding supercool water process in frozen soil, is a top priority. Further expansion of simulation depth is also necessary.

Key words: the Qinghai-Xizang Plateau; permafrost region; CoLM model; land surface process; single-point simulation

作者: 肖瑶, 赵林, 李韧, 姚济敏, XIAO Yao, ZHAO Lin, LI Ren, YAO Jimin
作者单位: 肖瑶, XIAO Yao(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州730000; 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州730000; 中国科学院研究生院, 北京100039), 赵林, 李韧, 姚济敏, ZHAO Lin, LI Ren, YAO Jimin(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州730000; 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州730000)
刊名: 山地学报 ISTIC PKU
英文刊名: Journal of Mountain Science
年, 卷(期): 2011, 29(5)
被引用次数: 1次

参考文献(19条)

1. Zhang T; Barry R G; Knowles K Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere [外文期刊] 1999(02)
2. Jame Y W; Norum D I Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium [外文期刊] 1980(04)
3. Larry D Hinzman; Douglas J Goering; Douglas L Kane A distributed thermal model for calculating soil temperature profiles and depth of thaw in permafrost regions 1998(D22)
4. Pitman A J; Slater A G; Desborough C E Uncertainty in the simulation due to the parameterization of frozen soil moisture using the Global Soil Wetness Project methodology [外文期刊] 1999(D14)
5. Simmonds I; Lynch A H The influence of pre2existing soil moisture content on Australian winter climate 1992
6. 马柱国; 魏和林; 符焄斌 土壤湿度与气候变化关系的研究与进展 [期刊论文] - 地球科学进展 1999(03)
7. Poutou E; Krinner G; Genthon C Role of soil freezing in future boreal cli mate change [外文期刊] 2004(06)
8. 苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所; 郭东信 普通冻土学 1988
9. 郭东信 中国冻土 1990
10. Koren V; J Schaake; K Mitchell A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models [外文期刊] 1999(D16)
11. Zhang Y; S H Lü Development and validation of a simple frozen soil parameterization scheme used for climate model [期刊论文] - Advances in Atmospheric Sciences 2002(3)
12. Luo L F; A Robock; K Y Vinnikov Effects of frozen soil on soil temperature, spring in filtration and runoff: Results from the PILPS2 (d) experiment at Valdai, Russia [外文期刊] 2003(02)
13. Bowling L C; D P Lettenmaier; B Nijssen Simulation of high-latitude hydrological processes in the Tornme Kalix basin: PILPS Phase: Experiment description and summary inter comparisons 2003
14. Dai Y J; X B Zeng; R E Dickinson The Common Land Model (CLM) [外文期刊] 2003
15. Dai Y J; Ji D Y The Common Land Model User & Developer's Guide 2007
16. Zeng X B; M Shaikh; Y J Dai Coupling of the Common Land Model to the NCAR Community Climate Model [外文期刊] 2002
17. Steiner A L; J S Pal; F Giorgi The coupling of the Common Land Model (CoLM) to a regional climate model (RegCM) 2005(3-4)
18. Jimin Yao L Z; Yongjian Ding The surface energy budget and evapotranspiration in the Tanggula region on the Tibetan Plateau 2008
19. 孙菽芬 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 2005

引证文献(2条)

1. 肖瑶, 赵林, 李韧, 焦克勤, 乔永平, 姚济敏 唐古拉地区超声雪深传感器SR-50监测研究 [期刊论文] - 应用气象学报 2013(3)
2. 陈晓磊, 杨梅学, 万国宁, 王学佳, 罗小青, 梁小文 CLM3和SHAW模式在青藏高原中部NMQ站的模拟研究 [期刊论文] - 冰川冻土 2013(2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201105017.aspx