

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0015

Chen Hao, Nan Zhuotong, Wang Shugong, *et al.* Simulating the water-heat processes on typical sites in the mountainous areas of the upper reaches of the Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 126–137. [陈浩, 南卓铜, 王书功, 等. 黑河上游山区典型站的水热过程模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 126–137.]

黑河上游山区典型站的水热过程模拟研究

陈 浩¹, 南卓铜^{1, 2*}, 王书功¹, 赵 林¹

(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 寒区旱区环境与工程研究所
冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: Noah LSM 陆面过程模型在国际上被广泛应用于陆面的水热过程模拟, 但在高寒山区的适用性研究并不充分, 目前还没有在黑河上游高寒山区应用的案例. 利用 Noah 和黑河上游两个典型站(大冬树山垭口站和阿柔站)2008—2009 年的观测数据, 对两站的水热过程进行了模拟. 通过比较模拟结果和实测的地温和液态水含量, 表明 Noah 能够较真实地反映该地区的水热过程. Noah 对观测站的地温模拟较好, 但冬季存在一定偏差; 液态水含量的模拟总体偏低, 表层液态水含量在春季土壤融化期的模拟偏差较大. 以上现象与该地区土壤异质性较大、春季融化期土壤冻融过程中土壤含冰量判定存在偏差、冬季降水量观测不准等有关. 此外, 结合模拟结果, 讨论了观测数据的质量问题.

关键词: Noah LSM; 陆面过程; 水热过程; 黑河上游

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A

0 引言

黑河流域是典型的干旱区内陆河流域, 其上游祁连山区的海拔范围在 2 000~5 500 m, 是黑河流域的产流区^[1]. 海拔 3 000 m 以上的区域, 年平均气温在 0 °C 以下, 植被类型依次为草原、高山草甸和寒漠, 是重要的水源涵养地. 查清黑河流域上游高寒山区水热过程的变化规律, 对于了解高寒山区流域的能量、水量平衡过程, 进行水情预测, 合理利用流域水资源具有重大意义.

目前, 对于高寒山区的水热过程模拟, 国内外一些学者进行了研究. 陈仁升等^[2-4]建立了内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型, 并利用地面观测资料和中尺度大气模型 MM5 作为输入数据对黑河干流区域的水热状况进行了模拟, 该模型侧重于产流机制等水文过程的模拟, 对于陆面水热耦合的情况讨论较少; Wang 等^[5]应用改进冻土参数的 WEB-DHM 模型对黑河上游大冬树垭口站的水热状况进行了短期的模拟, 模拟长度为 2007 年 11 月

21 日至 2008 年 4 月 20 日, 结果表明合适的冻土参数化方案能提高对高寒山区水热模拟的精度; 高艳红等^[6]通过改进 Noah 模型的地表积水和积水蒸发、坡面汇流方案、次表面流方案, 耦合了大气中尺度模式 MM5, 对黑河流域中上游个别日(2003 年 6 月 23—25 日)的典型降水过程进行了模拟, 此研究侧重于近地层大气和 Noah 模拟的水文过程之间的相互作用. 受限于当时的数据条件, 以上研究模拟长度均比较短, 甚至不足一个完整年份. 近年来, 李新等^[7]、Li 等^[8]通过开展黑河流域上游寒区水文遥感-地面同步观测试验(以下简称遥感飞行试验), 布置了一系列的水文生态观测站, 取得了较多的观测资料, 为进一步深化黑河上游山区的陆面过程研究奠定了基础.

由于高寒山区存在较厚的积雪层、较为致密的表面腐殖质层和冻土层, 在这种特殊的地理环境下, 积雪层和表面土层之间不确定的温度梯度^[9]、冻土冻融过程中复杂的热量平衡和水分迁移^[10]、以及土壤异质性导致的土壤水热参数的变化^[11]都

收稿日期: 2012-08-28; 修订日期: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(91125006); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201009)资助

作者简介: 陈浩(1978—), 男, 陕西宝鸡人, 2002 年在中国药科大学获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事陆面过程模型的研究. E-mail: hawer_chen@hotmail.com

* 通讯作者: 南卓铜, E-mail: nztong@lzb.ac.cn

对陆面过程模型的准确模拟造成了一系列的挑战。Noah LSM 陆面模型具有参数量较少、结构清晰、计算快捷、模拟准确度高的特点,是目前国际上广为应用的陆面过程模型。Barlage 等^[12]通过对 Noah 模型在美国落基山区积雪模拟的改进,表明模型对高寒山区大积雪情况的适用性。Yang 等^[13-15]应用 Noah 模型对青藏高原荒漠和草甸区的陆面过程进行了模拟,着重研究了高寒干旱荒漠区模拟的参数改进。van der Velde 等^[16]利用青藏高原那曲河流域的那曲站 7 d 的观测资料,研究了 Noah 模型的土壤类型、植被类型参数对土壤热通量和地温模拟的影响。目前还没有人评价 Noah 对黑河上游高寒山区水热过程的模拟性能。本文利用黑河上游山区流域两个典型站(大冬树山垭口站和阿柔站)在遥感飞行试验期间得到的观测资料,应用 Noah 模拟了高寒山区流域的水热过程,讨论了影响 Noah 模拟精度的参数,明确了 Noah 在模拟黑河上游水热状况存在的问题,同时根据模拟结果也对观测数据质量进行了探讨。

1 实验设计

2007 年启动的黑河流域水文遥感-地面同步观测试验在上游寒区布置了一系列水文生态观测站,大冬树山垭口站和阿柔站是其中较为典型的两个站。本文采用最新的 Noah v3.3, 驱动数据来自以上两个站 2008 年 1 月 1 日至 2009 年 7 月 17 日共 564 d 的观测资料^[17-18]。

1.1 观测站

大冬树山垭口站位于青海省祁连县南部地区(图 1)。观测点的经纬度为 100°14' E, 38°01' N, 海拔为 4 101 m。地表由嵩草、杂类草高寒草甸和块石构成,秋、冬、春季常被积雪覆盖。根据中国

西部生态和环境科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>, 中国西部数据中心)提供的中国 1:100 万土壤数据库的信息,该地区的土壤类型为草毡土。

阿柔站位于青海省祁连县中东部地区的阿柔乡草大板村瓦王滩牧场(图 1),经纬度为 100°28' E, 38°03' N, 海拔为 3 033 m。植被以亚高山落叶阔叶灌丛为主,高度在 20~30 cm 之间。根据中国 1:100 万土壤数据库的信息,该地区的土壤类型为暗冷钙土,分布较为均一,在 1~2 m 的土壤覆盖下即有相当数量的碎石层。

两站均具有明显的大陆性气候特征,年降水量 400~600 mm 之间,数据采集频率为 10 min。两个站的观测项目列于表 1。

由于两站均位于高寒地区,极端温度有可能低至 -40 °C,仪器在观测期间会受到极端天气的影响而出现某些故障和误差。站数据的绝大部分均可以通过气候学界限值检查和台站极值检查,错误检出率比较高的部分集中在多层土壤热通量、土壤温度以及体积含水量等观测值^[19]。

1.2 Noah 模型

Noah LSM 是国际上应用广泛的陆面过程模型,长期被美国国家环境预测中心(NCEP)用于实际的气候、气象预报中。它由一维 PBL 模型^[20]发展而来,联接了 Mahrt 等^[21]提出的彭曼潜在蒸发计算方法, Mahrt 等^[22]和 Pan 等^[23]提出的多层土壤模型和冠层蒸散发公式。后又加入了简单水量平衡模型^[24]、积雪与冻土参数^[25-26]等,目前最新为 3.3 版。在默认情况下, Noah 将模拟的土柱分为 4 层,厚度分别为 0.1 m、0.3 m、0.6 m 和 1.0 m,土层之间的热传导过程遵循热传导方程,水力传导过程遵循 Richard 方程。在进行模拟之前,需要为

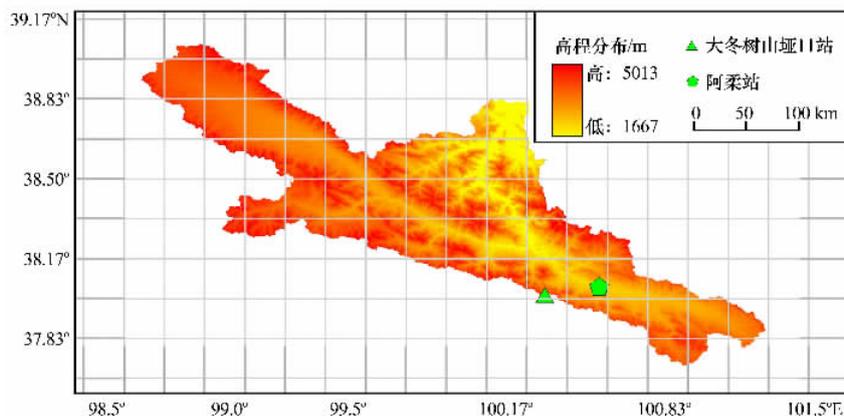


图 1 黑河上游流域以及大冬树山垭口站和阿柔站位置示意图

Fig. 1 Map showing the upper reaches of the Heihe River and the locations of Dadongshu Pass Site and Arou Site

表 1 大冬树山垭口站和阿柔站的观测项目列表

Table 1 The observation items in Dadongshu Pass Site and Arou Site

观测项目	大冬树垭口站	阿柔站
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测高度 2, 10m	观测高度 2, 10 m
风向/($^{\circ}$)	观测高度 2, 10 m	观测高度 2, 10 m
气温/ $^{\circ}\text{C}$	观测高度 2, 10 m	观测高度 2, 10 m
相对湿度/%	观测高度 2, 10 m	观测高度 2, 10 m
气压/hPa	✓	✓
降水量/mm	✓	✓
辐射四分量(DSR, DLR, USR, ULR) /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	✓	✓
土壤热通量/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	深度 0.05, 0.15 m	深度 0.05, 0.15 m
土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	深度 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 m	深度 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 m
土壤液态水含量/%	深度 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 m	深度 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 m
雪深/m	✓	—

注：✓表示有此项观测；—表示无此项观测。

每一层定义相应的土壤温度、土壤液态水含量和土壤总含水量等初始化参数，同时还需要根据实际情况定义一系列的土壤热力和水力参数、植被参数、地形参数和气候参数。与其他陆面过程模型相比，Noah 陆面模型具有结构简明、参数量较少的特点，但是考虑水热耦合的过程比较完整全面，计算快捷，模拟效果也较为准确。

1.3 初始参数和驱动数据

为了进行参数率定，在参数的变化范围之内，对 Noah 模型中所有可以进行调整的参数进行了单因素敏感性分析，即每次只变动一个参数，而其他参数保持不变，观察该参数取值对模拟结果的影响，从而确定模型模拟过程中的敏感性参数^[27]。表 2 列出了对大冬树山垭口和阿柔站的水热过程模拟较为敏感的参数。

表 2 中地温年变化深度和年平均地温可调整的范围较小，与其他参数相比，对水热模拟结果的影响也较小。高寒山区存在冻土层的区域，其地温年

变化深度一般在 8~10 m^[28]，本文在计算中取地温年变化深度为 8 m。根据 Noah LSM 用户手册的建议，年平均地温取当年的近地表年平均气温^[29]，大冬树山垭口和阿柔站分别为 267.7048 K 和 272.1980 K(模型参数取值小数点位数只是平均后保留 4 位，并非观测精度)。

Noah 模型的土壤类型共给定 19 类，植被类型共给定 27 类，每一种土壤或植被类型都对应一系列数值不同的参数，基于中国 1:100 万土壤数据库中给出的模拟地点的土壤信息，以及中国 1:100 万植被数据集给出的模拟地点的植被信息，并考虑到 Noah 模拟的是理想状态下一维的平均水热状态，与数据集给出的模拟地点的土壤、植被参数可能存在差异的可能，因此通过一系列对比模拟来最终确定模拟地点的植被和土壤类型。给定其余参数不变，参与对比实验的有砂土、壤质砂土、砂质壤土、粉质壤土、粉土、壤土、砂质黏壤土、粉质黏壤土、黏壤土、砂质黏土、粉质黏土、黏土、白砂和有机

表 2 影响高寒山区水热模拟的 Noah 敏感参数

Table 2 The Noah sensitive parameters which control the water-heat process simulation in cold alpine area

名称	变量名	说明
土壤类型参数	Soil_Type_Index	对土层温度模拟有一定影响，对含水量模拟的影响较大
植被类型参数	Vegetation_Type_Index	对土层温度和含水量模拟的影响较大
地面冻结参数	FRZK	对春季近地表土层的含水量模拟影响较大
地温年变化深度	ZBOT	对底层土层水热模拟有一定影响，影响随着模拟深度降低而降低
年平均地温	Deep_Soil_Temperature	对底层土层水热模拟有一定影响，影响随着模拟深度降低而降低等 14 种土壤类型，以及草地、灌木丛、草地/灌木丛、草本湿地、裸地/稀疏植被、草本苔原、木本

表 3 大冬树山垭口站和阿柔站土层温度、液态水含量和含水量初值
Table 3 Initial values of soil temperature, soil liquid water content and total soil moisture in Dadongshu Pass Site and Arou Site

	大冬树山垭口				阿柔			
	层 1	层 2	层 3	层 4	层 1	层 2	层 3	层 4
土层厚度/m	0.10	0.30	0.60	1.00	0.10	0.30	0.60	1.00
土层温度/K	258.27	260.37	264.34	269.95	265.47	268.61	273.12	275.03
土层液态水含量/%	1.84	2.29	4.31	0.89	8.99	10.23	22.26	12.22
土层总含水量/%	42.77	12.35	10.56	10.36	48.16	34.83	27.45	12.22

苔原、混合苔原、裸地苔原等 9 种植被类型, 选择有较好模拟结果的土壤和植被类型. Noah 土壤植被类型列表中的其余 5 种土壤类型和其余 16 种植被类型因为与实际地理环境差异太大, 不参加对比模拟. 地面冻结参数 FRZK 默认值为 0.15, 我们同时也对比了 FRZK 值为 0.1、0.05 和 0.2 等情况. 通过对比分析最终确定的两站的合适的土壤、植被类型和 FRZK 的取值, 用于水热状况的实际模拟和分析.

模拟时间段从 2007 年 12 月 31 日 16:00(UTC 时间)开始, 至 2009 年 7 月 17 日 15:00 结束. 模拟和输出时间步长均为 1 h.

土壤划分为 4 层(表 3), 各层土壤和温度、液态水含量及总含水量的初值均取自观测值. 考虑到冬季降水量很少, 总含水量取春季刚解冻时的液态水含量近似得到. 设置 Noah 预热参数为真, 以便使驱动数据在进行模拟时经过充分的预热, 消除四层土层初值不准的影响.

驱动数据包括: 向下短波辐射、向下长波辐射、相对湿度、空气温度、表面气压、水平风速和降水量, 来自两站的观测数据. 其中, 大冬树山垭口 1 月底到 3 月初的表面气压出现异常, 在 500 hPa 以下, 不符合实际情况, 对此进行了校正, 取前一时刻和后一时刻的平均值为当前时刻的值. 大冬树山垭口 2009 年 5 月 26 日至 2009 年 5 月 29 日的驱动数据缺失, 采用 MicroMet 软件^[30]进行了插值补足.

2 结果与讨论

2.1 土壤、植被类型参数和地面冻结参数(FRZK)的对比分析

测试了 14 种土壤类型参数, 对比了土壤类型参数更换之后的地温和液态水含量的模拟情况. 以大冬树山垭口站为例, 由图 2(a)和图 2(c)可以看出, 土壤类型参数从壤质砂土更换为砂土之后, 地温变化不是很明显, 这与两种土质导热系数相近有

关. 而图 2(b)和图 2(d)显示, 以砂土为参数模拟的液态水含量明显偏低, 这是因为砂土的导水率比壤质砂土高, 导致以砂土模拟的液态水含量与观测值的误差加大. 经过对 14 种土壤类型参数的测试, 选择壤质砂土为土壤类型参数时模拟值与观测值的误差最小. 同时, 根据中国西部生态与环境科学数据中心提供的中国 1:100 万土壤数据库的信息, 大冬树山垭口的土壤属性为草毡土. 综合以上信息及实际地理环境, 最终选择壤质砂土作为土壤类型参数.

测试了 9 种植被类型参数, 对比了植被类型参数更换之后的地温和液态水含量的模拟情况. 以大冬树山垭口站为例, 由图 3(a)~(d)可以看出, 植被类型参数从稀疏植被更换为草地之后, 地温和液态水含量的模拟均出现了较大误差, 这与两种植被的叶面积指数、地表反照率均相差较大有关, 经过对 9 种植被类型参数的测试, 选择稀疏植被为植被类型参数时模拟值与观测值的误差最小. 同时, 根据西部数据中心提供的中国 1:100 万植被数据集的信息, 大冬树山垭口的植被属性为高寒草甸. 综合以上信息及实际地理环境, 最终选择稀疏植被/裸地为植被参数.

地面冻结参数(FRZK)是 Noah 模型定义的一个与土壤性质相关的参数, 其数值为土壤含冰量的阈值, 如果土壤含冰量在此阈值之上, 则冻土的表面是不可渗透的. FRZK 是 Noah 模型中确定冷季地表导水率的重要参数, 对陆面水文过程和水热过程的准确模拟具有重要影响. FRZK 值越小, 则表明在土壤冻结过程中, 含冰量达到较小的数值时, 地表就已经不可渗透, 此时地表有较多的液态水会转化成径流, 从而降低了土层之中的液态水含量. 测试了 0.05、0.1、0.15 和 0.2 等 4 种 FRZK 参数, 从图 4(b)、(d)可以看出, 将 FRZK 值从默认值 0.15 更换为 0.1 后, 春季融化期液态水含量的模拟明显下降. 通过对比 FRZK 值的测试结果, 发现

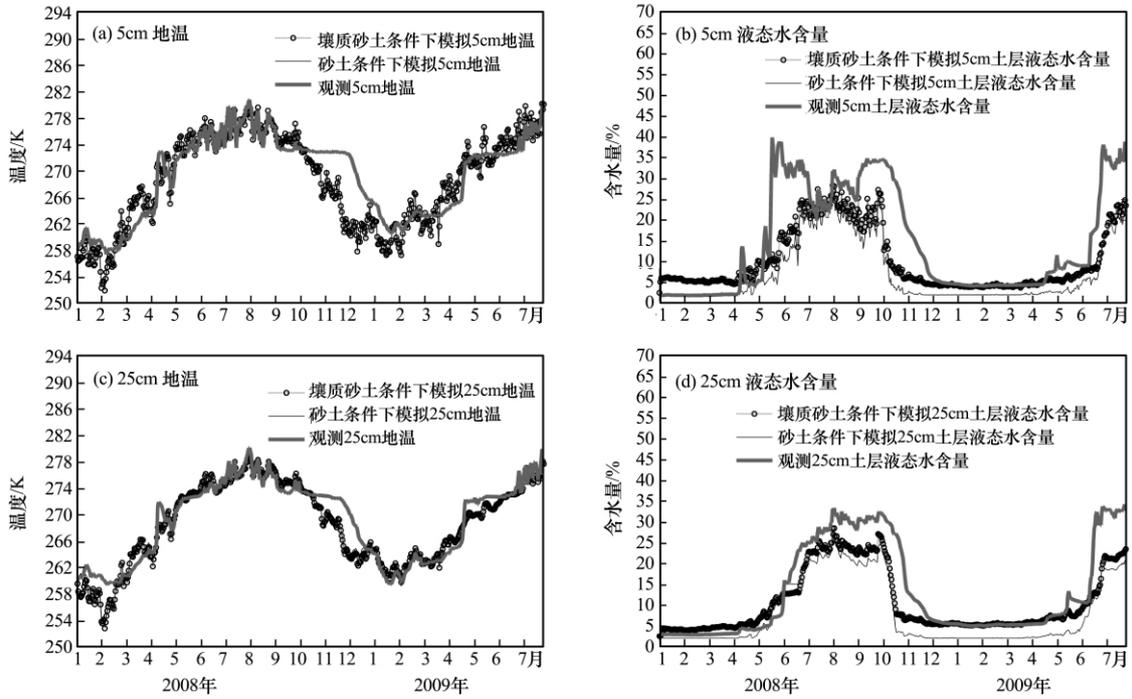


图 2 大冬树垭口站(2008-01—2009-07)不同土壤类型下的地温和液态水含量

Fig. 2 Variations of soil temperatures (a and c) and soil liquid water contents (b and d) with soil types in Dadongshu Pass Site (2008-01—2009-07)

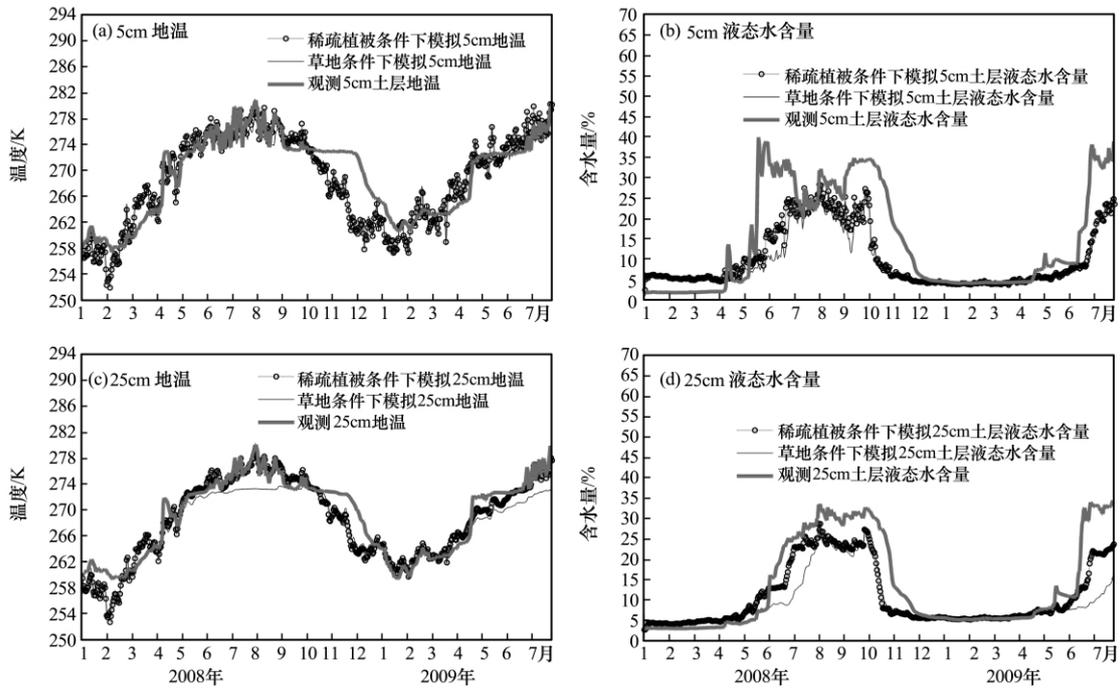


图 3 大冬树垭口站不同植被类型下土层地温和液态水含量

Fig. 3 Variations of soil temperatures (a and c) and soil liquid water contents (b and d) with vegetation types in Dadongshu Pass Site

FRZK 值为 0.15 时地温和液态水含量的模拟情况与观测值最为接近, 最终 FRZK 值率定为 0.15.

2.2 观测资料问题

受极端天气的影响, 高寒地区部署的观测仪

器, 尤其是埋入土层的地温、含水量和热通量等观测仪器, 需要长期的维护和验证以保证数据的连续性和准确性. 由于人力、物力、仪器性能和仪器误差范围的限制, 在观测时间段内出现部分观测数据

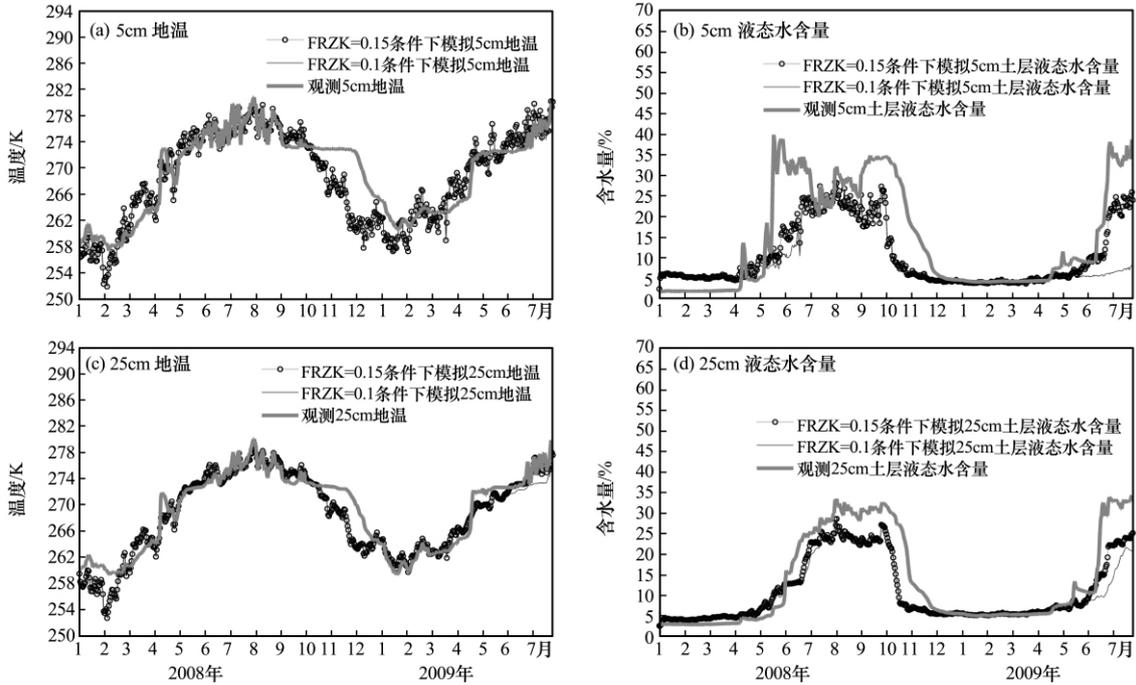


图 4 大冬树垭口站不同地面冻结参数 (FRZK) 下土层地温和液态水含量

Fig. 4 Variations of soil temperatures (a and c) and soil liquid water contents (b and d) with FRZK in Dadongshu Pass Site

缺失, 部分观测资料存在明显的误差, 数据的连续性和准确度受到一定的影响. 所以, 一方面需要考察模拟与观测值的拟合情况; 另一方面也必须根据观测数据存在的问题对模拟进行具体分析. 典型站的数据质量问题也是导致本文纳什系数不理想的原因之一.

图 5(a)显示大冬树垭口的 5 cm 土层地温观测自 9 月至 11 月均呈现平缓不变, 而在 3—4 月之间却有在数日之内发生突变的情况, 这与常理不合. 图 5(b)显示 2008 年 10 月 1 日大冬树垭口的 5 cm 土层地温观测在一日之内变化在 0.2 摄氏度之内, 这与常理不合. 显示 5 cm 土层的地温传感器经常不能正常工作, 仪器部署的选址、传感器的保护需要进一步完善, 以使野外观测中仪器测量的准确度

得到进一步提高.

从图 6(a)、图 6(b)和图 7 可以看出, 阿柔和大冬树山垭口站观测的冬季降水量明显偏少, 尤其是大冬树山垭口作为一个积雪观测站, 在春秋冬三季基本都有积雪覆盖, 冷季的积雪雪深变化可从 1 月 1 日的 0.08 m 达到 2 月峰值的 0.32 m, 但是观测数据中却没有相对应的足够降水量, 这与实际观测中采用的雨雪量计受观测地点的风速、太阳辐射等因素影响, 收集雪量偏少, 且不能避免雪在融化过程中的升华造成的损失有关^[31-32].

2.3 大冬树山垭口站和阿柔站的水热过程模拟研究结果

图 8 和图 9 显示了对大冬树山垭口站和阿柔站

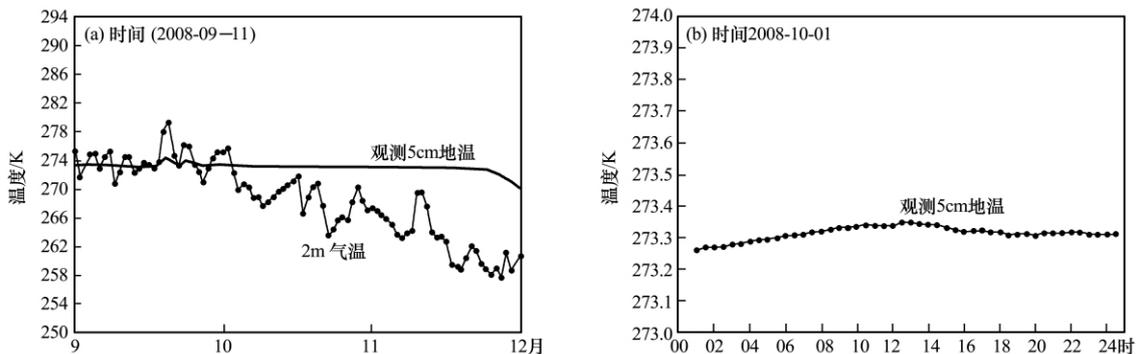


图 5 大冬树山垭口地温变化与气温变化对比

Fig. 5 Variations of air temperature and soil temperature in Dadongshu Pass Site

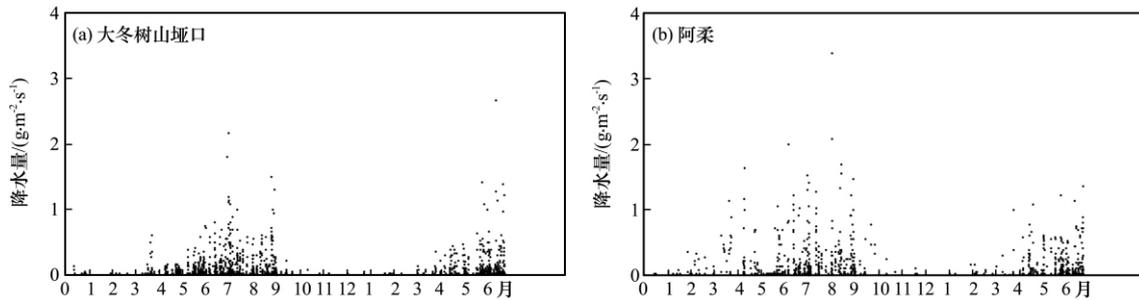


图 6 大冬树山垭口(a)和阿柔(b)的降水观测数据(2008-01-01—2009-07-17)

Fig. 6 Precipitation observed in Dadongshu Pass Site (a) and Arou Site (b) in the period of Jan 1st, 2008 to Jul 17th, 2009

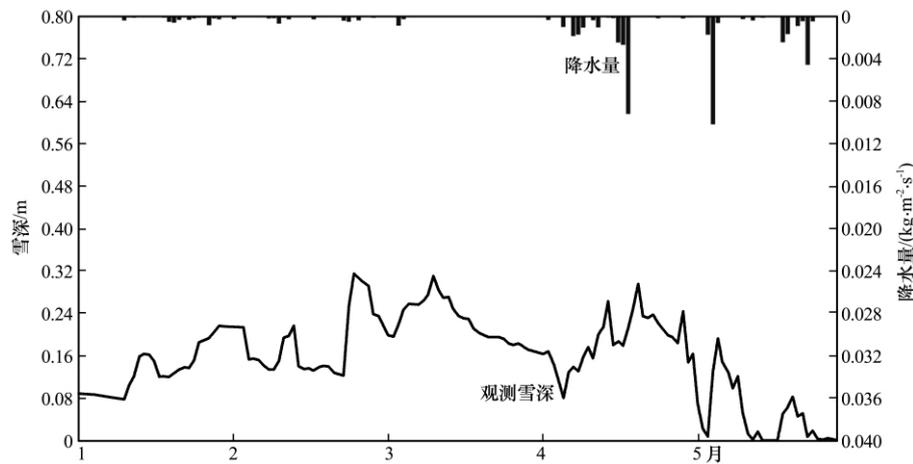


图 7 大冬树山垭口观测雪深和降水的对比(2008-01-01—2008-05-31)

Fig. 7 Observed snow depth and precipitation in Dadongshu Pass Site in the period of Jan. 1st to May 31st, 2008

水热模拟的基本情况, Noah 模拟的是该土层厚度的平均温度和平均液态水含量, 该平均值也往往被认为是土层中间位置处的温度和液态水含量。因此, 本文采用土层中间位置处的土层深度为模拟结果的土层深度, 最终的结果对应于 5 cm, 25 cm 和 70 cm 土层深度处土壤温度、液态水含量的模拟, 模型模拟输出为每半小时的模拟结果, 将每日的逐 0.5 h 模拟结果进行平均得到日均值结果。

从图 8 可以看出, Noah 对大冬树山垭口地温的模拟较好, 而液态水模拟的准确度不高。图 8 (a)、(c)、(e)显示, 土层温度模拟的纳什系数 NSE 均在 0.7 以上, 主要误差出现在 2008 年的冷季 1—3 月, 此时间段内地温模拟偏差较大。地温变化的模拟主要受上边界的气象因素影响, 一般来说随着土层深度的增加, 精度逐渐降低, 如在阿柔站的模拟情况所示。但是在地表的积雪层、植被等因素比较复杂时, 地表土层观测地温也会出现较大的起伏变化, 出现地表土层模拟的精度较其他深度为低的现象, 如大冬树山垭口站的情况所示。

从图 9 可以看出, Noah 对阿柔站的模拟也是地温的模拟情况好于液态水含量的模拟。图 9(a)、

(c)、(e)显示, 阿柔站地温的模拟较大冬树山垭口为差, 因为阿柔的植被类型为草地, 与大冬树山垭口的植被类型稀疏植被/裸地相比, 草地的植被枯萎凋落后形成的腐殖质层, 在低温情况下腐化缓慢, 导致高寒山区表层土壤混有大量植物根茎, 土壤测出的孔隙度偏大。Yang 等^[33]指出在青藏高东部和中部的地表土壤孔隙度实测值可达到 0.6 左右。而且根茎的存在会加大腐殖质层的土壤持水能力, 增大了腐殖质层与下面土壤的异质性。由于阿柔站有较厚的腐殖质层, 而 Noah 模型本身采用同质的土壤热力、水力参数, 最终模型的土壤类型参数肯定是介于表层和深层土壤类型参数实际值之间, 导致土层的液态水含量模拟的普遍不准确。因此在土壤异质性比较强的情况, 需要考虑为不同土层设置不同土壤水力和热力参数。

图 8(b)、(d)、(f)和图 9(b)、(d)、(f)显示, 液态水含量的模拟准确度总体不高, 尤其是 2008 年 4 月中旬到 6 月的春季融化期, 两个站均出现了表层液态水含量的峰值, 而在模拟中未得到很好的体现。从图 8(a)、(b)可以看出, 在 2008 年 4 月中旬到 6 月底的春季融化期, 大冬树山垭口 0~5 cm

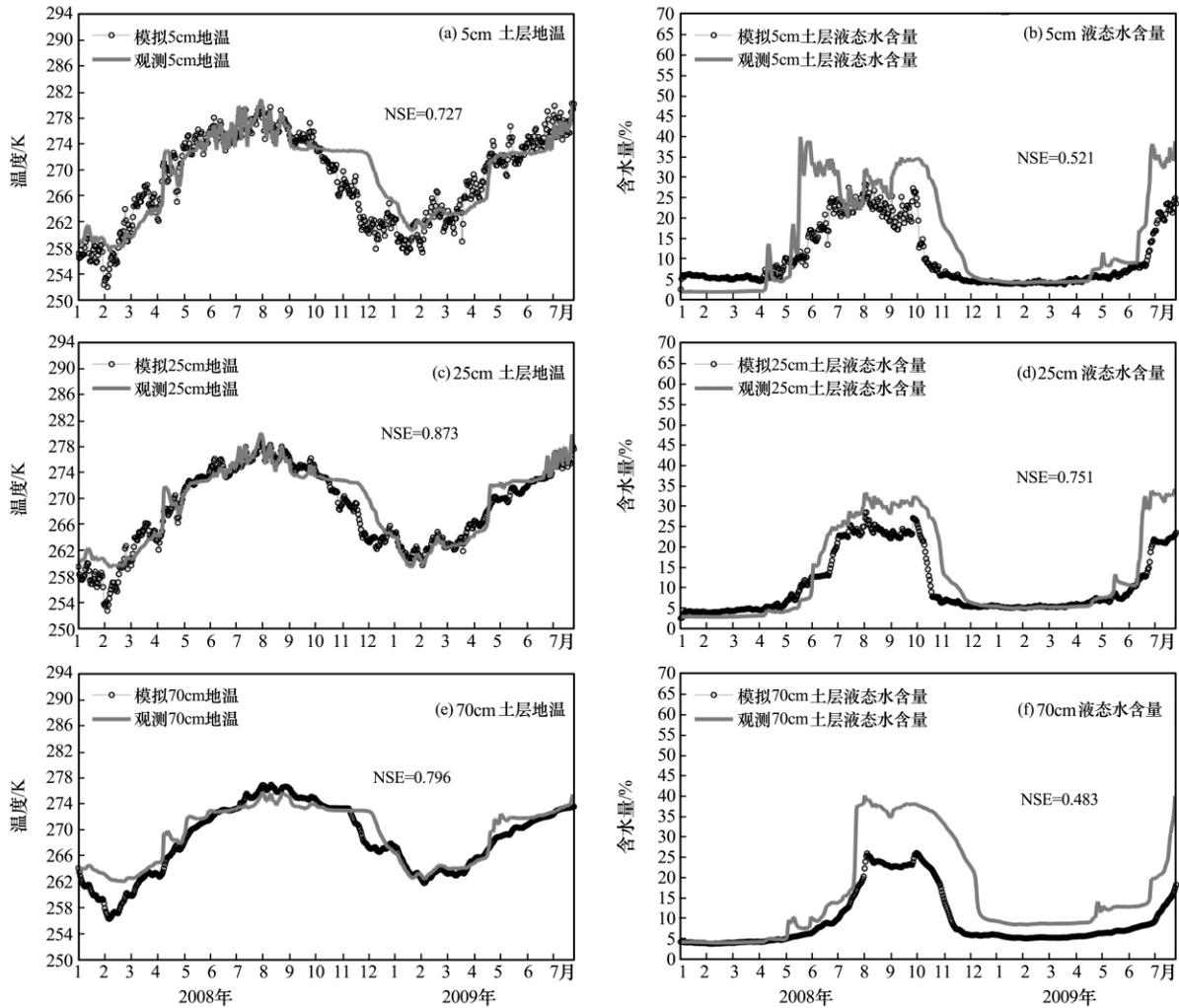


图 8 大冬树山垭口站土层地温和液态水含量的模拟值和观测值对比

Fig. 8 Variations of soil temperatures (a, c and e) and soil liquid water contents (b, d and f), observed and simulated, in Dadongshu Pass Site

土层的观测平均地温从 272 K 起波动式缓慢上升至 276 K 左右，因此表层土壤水处于融化的过程，而此时 5~25 cm 处的观测平均地温仍然在 273 K 左右，基本处于冻结状态，由于表层土壤水分不能下渗，导致表层的液态水富集，含量出现峰值，而模拟值在 0~5 cm 表层处与观测值偏差不大，模拟的表层土壤水也在融化过程中，但是在 5~25 cm 处模拟的平均地温略高于观测值 1 K 左右，基本在 274 K 左右，土层长期处于融化状态，因此模拟的表层土壤水大量下渗，导致模型不能模拟出观测值出现的峰值情况。由此，对比 2009 年的 4 月中旬到 6 月底之间，地温观测值较 2008 年同一时段偏低，表层处于冻结状态，后在 6 月底在较短时间内上升至正温，因此，2009 年 4 月中旬到 6 月底之间未出现 2008 年的液态水含量达到峰值的情况。

从图 9(a)、(c)、(e)可以看出，在 4 月中旬到 6

月初的春季融化期，阿柔站的 0~5 cm 土层的观测平均地温从 272 K 起波动式缓慢上升至 276 K 左右，5~25 cm 土层的温度在 4 月中到 5 月中仍然处于 273 K 左右的冻结状态，故而在此期间形成了 0~5 cm 土层的观测液态水含量峰值。而 5~25 cm 土层在 5 月中到 6 月初之间气温上升，处于融化状态，25~70 cm 土层仍然处于 273 K 左右的冻结状态，故而在此期间的观测液态水含量也形成了较小的峰值。因为模拟地温在表层波动较大，而阿柔土壤异质性导致了液态水含量模拟的普遍不准确，因而模拟值并未显示出 0~5 cm 土层的液态水含量峰值。

以上情况说明当春季融化期地温在 0℃ 左右波动时，由于冻土层的存在，形成地表液态水的峰值的情况比较普遍^[34]，要模拟出这一现象，对 Noah 的水热过程模拟有较高的精度要求。

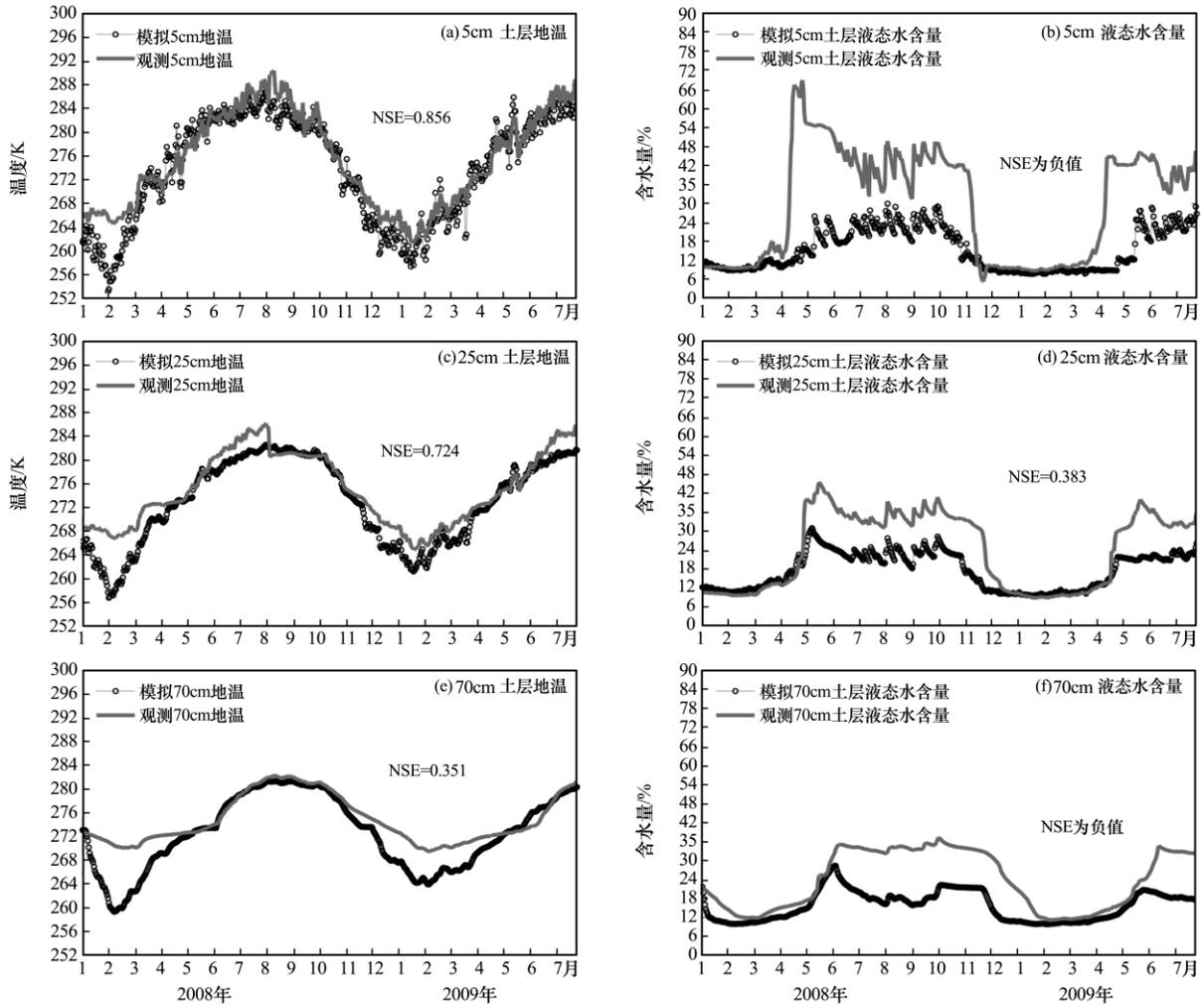


图 9 阿柔站土地温 and 液态水含量的模拟值和观测值对比

Fig. 9 Variations of soil temperatures (a, c and e) and soil liquid water contents (b, d and f), observed and simulated, in Arou Site

从图 8(a)、(c)、(e)和图 9(a)、(c)、(e)可以看出,冷季的地温模拟偏差较大,模拟地温波动较大,而观测地温波动比较平缓,直到进入 4 月底 5 月初的融化期之后,模拟地温和观测地温的偏差才逐渐减少。这是因为冷季的降水量观测偏小,因此,模型模拟的积雪量也偏小。以大冬树山垭口为例,整个冷季积雪模拟的最大值为 0.04 m,而此时站观测的积雪量在 0.1~0.3 m 之间。Koren 等^[25]指出在较大的积雪量下,表层土壤的温度与气温的相关性并不好。而从图 10 可以看出,大冬树山垭口 2 m 气温与模拟地表温度的相关性很好,这说明在积雪模拟与实际相比偏差较大的情况下,得到的地温模拟是不准的。

3 结论

本文利用 Noah v3.3 对黑河上游高寒山区的典

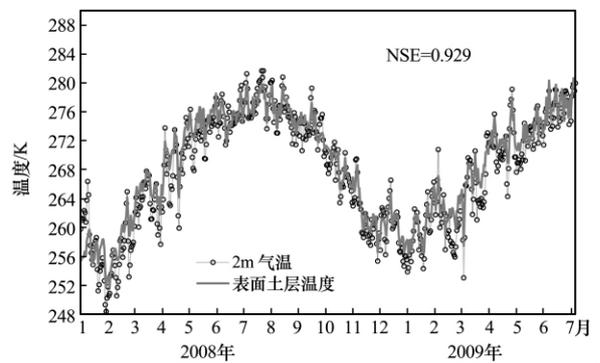


图 10 大冬树山垭口站 2 m 气温和模拟地表温度的对比

Fig. 10 Variations of simulated surface temperature and observed 2-m air temperature

in the Dadongshu Pass 型站 (大冬树山垭口站和阿柔站)2008 年 1 月至 2009 年 7 月的水热过程进行了模拟,得到以下几点结论:

(1) Noah 在黑河上游高寒山区对地温的模拟较好, 但对液态水含量模拟偏差较大, 尤其是腐殖质层较厚的地点, 如植被类型为草地的阿柔站与植被类型为稀疏植被的大冬树山垭口站相比, 液态水含量模拟偏差较大. 这与模拟过程中对土壤异质性处理的不够充分有关.

(2) 由于雨雪量计受观测地点风速和太阳辐射等因素的影响, 造成冷季降水观测偏小, 导致模拟的积雪量偏小, 故而冷季的地温模拟偏低.

(3) 在春季融化期, 如果土层温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右波动时间较长, 由于表层土壤已经融化, 而下层土壤仍然处于冻结状态, 会形成地表液态水含量的峰值. 此时若模型模拟的土壤温度精度不够, 就不能模拟出融化期下层土壤的冻结状态, 则融化期液态水含量峰值的情况就不能出现. 可见高寒地区特殊的土壤冻融过程对模型的模拟精度提出了更高的要求.

(4) 观测仪器在某些时段、某些地点会因各种原因造成观测值一定的误差. 因此, 在高寒山区的气候环境下, 对观测数据的评价分析是十分必要的.

(5) 通过仔细考虑高寒地区积雪层、冻土层、腐殖质层和植被等因素对水热过程的影响, 据此对模拟过程作进一步的优化, Noah 对高寒山区水热过程的模拟精度可以得到进一步的提高.

致谢: 本文的观测数据全部来自中国西部生态和环境科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>), 由“黑河综合遥感联合试验”产生. 土壤属性数据集和植被数据集也来自该数据中心, 在此对西部数据中心对我们工作的支持表示诚挚的感谢.

参考文献 (References):

- [1] Lu Ling, Li Xin, Cheng Guodong, *et al.* Analysis on the landscape structure of the Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(8): 1217–1224, 1393. [卢玲, 李新, 程国栋, 等. 黑河流域景观结构分析[J]. *生态学报*, 2001, **21**(8): 1217–1224, 1393.]
- [2] Chen Rensheng, Lü Shihua, Kang Ersi, *et al.* A distributed water-heat coupled(DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin(I): Model structure and equations[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(8): 806–818. [陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(I): 模型原理[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(8): 806–818.]
- [3] Chen Rensheng, Lü Shihua, Kang Ersi, *et al.* A distributed water-heat coupled(DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin(II): Model results using the measured data at the meteorological & hydrological stations[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(8): 819–829. [陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(II): 地面资料驱动结果[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(8): 819–829.]
- [4] Chen Rensheng, Gao Yanhong, Kang Ersi, *et al.* A distributed water-heat coupled(DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin(III): Model results using the results from MM5 model[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(8): 830–837. [陈仁升, 高艳红, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(III): MM5 嵌套结果[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(8): 830–837.]
- [5] Wang L, Koike T, Yang K, *et al.* Frozen soil parameterization in a distributed biosphere hydrological model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, **14**: 557–571.
- [6] Gao Yanhong, Cheng Guodong, Cui Wenrui, *et al.* Coupling of enhanced land surface hydrology with atmospheric mesoscale model and its implement in Heihe River Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(12): 1283–1292, 1394. [高艳红, 程国栋, 崔文瑞, 等. 陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(12): 1283–1292, 1394.]
- [7] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(9): 897–914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感-地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(9): 897–914.]
- [8] Li X, Li X W, Li Z Y, *et al.* Watershed allied telemetry experimental research[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D22103), doi: 10.1029/2008JD011590.
- [9] Chen F, Janjić Z, Mitchell K. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, **85**(3): 391–421.
- [10] Kato H, Rodell M, Beyrich F, *et al.* Sensitivity of land surface simulations to model physics, land characteristics, and forcings, at four CEOP sites[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, **85A**: 187–204.
- [11] Ma Yaoming, Tsukamoto O, Wang Jiemin, *et al.* Analysis of aerodynamic and thermodynamic parameters on the grassy marshland surface of Tibetan Plateau[J]. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(1): 36–40.
- [12] Barlage M, Chen F, Tewari M, *et al.* Noah land surface model modifications to improve snowpack prediction in the Colorado Rocky Mountains[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2010, **115**(D22), doi: 10.1029/2009JD013470.
- [13] Yang K, Chen Y Y, Qin J. Some practical notes on the land surface modeling in the Tibetan Plateau[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13**(5): 687–701.
- [14] Yang K, Koike T, Ishikawa H, *et al.* Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: Characteristics and parameterization[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, **47**(1): 276–290.
- [15] Chen Y, Yang K, Zhou D, *et al.* Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameter-

- ization of the thermal roughness length [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, **11**(4): 995–1006.
- [16] van der Velde R, Su Z, Ek M, *et al.* Influence of thermodynamic soil and vegetation parameterizations on the simulation of soil temperature states and surface fluxes by the Noah LSM over a Tibetan plateau site[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13**(6): 759–777.
- [17] Wang Jian, Che Tao, Li Hongyi, *et al.* WATER: Dataset of automatic meteorological observations at the Dadongshu mountain pass snow observation station[DB/OL]. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2008, doi: 10.3972/water973.0295.db. [王建, 车涛, 李弘毅, 等. 黑河综合遥感联合试验: 大冬树山垭口积雪观测站自动气象站数据集[DB/OL]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008, doi: 10.3972/water973.0295.db.]
- [18] Hu Zeyong, Ma Mingguo, Jin Rui, *et al.* WATER: Dataset of automatic meteorological observations at the A'rou freeze/thaw observation station[DB/OL]. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2008, doi: 10.3972/water973.0279.db. [胡泽勇, 马明国, 晋锐, 等. 黑河综合遥感联合试验: 阿柔冻融观测站自动气象站数据集[DB/OL]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008, doi: 10.3972/water973.0279.db.]
- [19] Huang Guanghui, Ma Mingguo, Tan Junlei, *et al.* Data quality control and products of automatic weather stations for watershed allied telemetry experimental research[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, **25**(6): 814–820. [黄广辉, 马明国, 谭俊磊, 等. 黑河综合遥感联合试验自动气象站数据质量控制与产品生成[J]. *遥感技术与应用*, 2010, **25**(6): 814–820.]
- [20] Ek M, Mahrt L. OSU 1-D PBL Model User's Guide[M]. Dep. of Atmos. Sci., Oreg. State Univ., Corvallis, 1991.
- [21] Mahrt L, Ek M. The influence of atmospheric stability on potential evaporation[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, **23**: 222–234.
- [22] Mahrt L, Pan H. A two-layer model of soil hydrology[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1984, **29**(1): 1–20.
- [23] Pan H-L, Mahrt L. Interaction between soil hydrology and boundary-layer development[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1987, **38**(1–2): 185–202.
- [24] Schaake J C, Koren V I, Duan Q Y, *et al.* Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 1996, **101**(D3): 7461–7475.
- [25] 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*, 1999, **104**(D16): 19569–19585.
- [26] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, *et al.* Implementation of Noah land surface model advancements in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2003, **108**(D22), doi: 10.1029/2002JD003296.
- [27] Bao Yan, Lü Shihua, Zuo Hongchao, *et al.* Application of Regional Climate Model (RegCM3) in Northwest China II: Sensitivity experiment for domain choice and cumulus convection parameterization[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(2): 175–182. [鲍艳, 吕世华, 左洪超, 等. RegCM3 模式在西北地区的应用研究 II: 区域选择及参数化方案的敏感性[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(2): 175–182.]
- [28] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Liu Yongzhi. Mean annual ground temperature distribution on the Tibetan Plateau: Permafrost distribution mapping and further application[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(2): 142–148. [南卓铜, 李述训, 刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(2): 142–148.]
- [29] Mitchell K. The Community Noah Land-surface Model (LSM), User's Guide, Public Release Version 2.7.1[M]. NCEP/EMC, USA, 2005. <http://wenku.baidu.com/view/90918568a45177232f60a2b9.html>.
- [30] Liston G E, Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet)[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, **7**: 217–234.
- [31] Li Hongyi, Wang Jian, Hao Xiaohua. Influence of blowing snow on snow mass and energy exchanges in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(5): 1084–1090. [李弘毅, 王建, 郝晓华. 祁连山区风吹雪对积雪质能过程的影响[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1084–1090.]
- [32] Yang Junhua, Qin Xiang, Wu Jinkui, *et al.* Distribution and variation of spring snow cover in Laohugou watershed of the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(5): 1091–1098. [杨俊华, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟流域春季积雪属性的分布及变化特征[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1091–1098.]
- [33] Yang K, Koike T, Ye B, *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* (1984–2012), 2005, **110**(D8), doi: 10.1029/2004JD005500.
- [34] Jin Ming, Li Yi, Liu Xiande, *et al.* Interannual variation characteristics of seasonal frozen soil in upper middle reaches of Heihe River in Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(5): 1068–1073. [金铭, 李毅, 刘贤德, 等. 祁连山黑河中游季节冻土年际变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(5): 1068–1073.]

Simulating the Water-Heat Processes on Typical Sites in the Mountainous Areas of the Upper Reaches of the Heihe River

CHEN Hao¹, NAN Zhuo-tong^{1, 2}, WANG Shu-gong¹, ZHAO Lin¹

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The Noah land surface model (LSM) is widely used to simulate water-heat processes in global or regional land surface studies. However, there are few studies on its applicability in cold alpine area characterized by high elevation and cold climate condition. So far, no study has been conducted using Noah LSM in the upper reaches of the Heihe River, a typical cold alpine area. In this paper, based on the observation from 2008 to 2009, Noah LSM was applied to simulate water-heat processes in two typical sites, e. g., Dadongshu Pass Site and Arou Site, located in the upper reaches of the Heihe River. A comparison between simulated and observed soil temperatures and soil liquid contents shows that Noah LSM is able to de-

scribe the actual water and heat processes in such alpine cold regions. Soil temperature is simulated generally well, with a few biases in winter. Simulated soil liquid content is generally lower than observed one. Large biases in soil liquid simulation in the upper layers can be seen obviously in spring, when frozen soil begins to thaw. Abovementioned simulation problems are largely related with the insufficient considerations of Noah LSM in soil profile heterogeneity, resulting in incorrect estimating ice content in spring, as well as with the inaccurate precipitation observation, especially in winter. Apart from the applicability of Noah LSM, observation quality is also discussed in this paper.

Key words: Noah land surface model; land surface processes; water and heat processes; Heihe River basin