

基于 SHAW 模型的科尔沁草甸地冻融期 土壤水热盐动态模拟研究

王 驰, 刘小燕, 刘巧玲, 刘廷玺

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要: [目的] 探讨季节性冻融期土壤水热盐动态变化及其机理, 对干旱半干旱地区土壤盐渍化防护与治理提供一定的理论依据。[方法] 以科尔沁草甸地为研究对象, 利用 2013 年 11 月至 2014 年 5 月科尔沁左翼后旗阿古拉生态水文试验站草甸地试验点的水热盐观测资料, 通过 SHAW 模型进行仿真模拟分析。[结果] 模型对土壤热量和盐分的模拟结果较好, 模拟期土壤水分模拟的标准偏差 (root mean square error, RMSE) 为 0.02~0.07。受草甸地地下水水位影响, 模型对含水率的模拟结果偏差较大, 但其标准偏差及平均偏差均处于允许范围内。[结论] 将 SHAW 模型作为相关研究仿真模拟的优选模型, 可以弥补人工观测数据间断或缺失的不足, 可以被借鉴定量模拟预测农田在自然条件下的垂向一维冻土—非冻土系统内的水热盐迁移状况。

关键词: SHAW 模型; 季节性冻土; 参数率定; 模型评估

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0322-06

中图分类号: S812.2

文献参数: 王驰, 刘小燕, 刘巧玲, 等. 基于 SHAW 模型的科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态模拟研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 322-327. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.054; Wang Chi, Liu Xiaoyan, Liu Qiaoling, et al. Dynamic simulation analysis of soil hydrothermal salt of Horqin meadow ground in freezing and thawing period based on SHAW model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 322-327. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.054

Dynamic Simulation Analysis of Soil Hydrothermal Salt of Horqin Meadow Ground in Freezing and Thawing Period Based on SHAW Model

WANG Chi, LIU Xiaoyan, LIU Qiaoling, LIU Tingxi

(College of Water Conservancy and Civil Engineering,

Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] To explore the dynamic changes of soil hydrothermal and salt in seasonal freezing and thawing period and its mechanism in order to provide some theoretical basis for soil salinization protection and administer in arid and semi arid areas. [Methods] Horqin meadowland was taken as a research area. Where the hydrothermal and salt observation data of meadow in the Aruga Eco-hydrological Experimental Station of Horqin left-wing post in November 2013—2014, were simulated and analyzed by SHAW model. [Results] The simulated results of soil heat and salt were better, and the root mean square error (RMSE) was 0.02~0.07. Due to the influence of meadow groundwater level, the model has a large deviation from the simulation results of water content, but its standard deviation and mean deviation are within allowable range. [Conclusion] The SHAW model can be used as the optimal model for the simulation of the study. It can compensate for the shortage of artificial observation data intermittent or missing, and can quantitatively predict the migration

收稿日期: 2017-03-01

修回日期: 2017-04-06

资助项目: 国家自然科学基金地区 and 重点资助项目“科尔沁沙地(沙丘—草甸地)冻融期土壤水—热—盐耦合运移机理及其模拟方法”(51169012, 51139002, 51369016); 教育部创新团队发展计划(IRT13069); 内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队项目(NDTD2010-6)

第一作者: 王驰(1992—), 男(汉族), 安徽省马鞍山人, 硕士, 主要从事土壤水热盐运移研究。E-mail: 1171785097@qq.com。

通讯作者: 刘小燕(1966—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事冻土物理学研究。E-mail: Liuxy6675@yahoo.com.cn。

of hydrothermal salt in the vertical one-dimensional permafrost and free permafrost system under natural conditions.

Keywords: SHAW model; seasonal frozen soil; parameter; model evaluation

土壤冻融作为季节性冻融地区一种常见的自然现象,过程较为复杂,包括水分运动、水分相变、热量传输和溶质的迁移。中国季节性冻土主要分布在北纬 30°以北地区。而这些地区又大多属于干旱、半干旱的缺水地区。由于灌溉管理不当和冬春季土壤的冻融等的影响,形成大面积的土壤盐碱化^[1-6]。受温带大陆季风气候影响^[7],春冬季节土壤均经历周期性的冻融过程,该时期土壤水热盐运移特点与非冻结期存在较大差异,特殊的运移机理导致了区域荒漠化与盐碱化现象^[8]。近 40 a 来,科尔沁草甸地沙化面积日趋扩大,成为荒漠化最为严重的地区之一。因此,通过模型模拟冻融期土壤水热盐变化,有助于进一步认识科尔沁草甸地在地下水浅埋条件下土壤水热盐在空间和时间上的运移特征,为科尔沁草甸地盐碱化、次生盐碱化以及荒漠化预防与治理工作提供理论依据。

如今,将 SHAW(simultaneous heat and water)模型应用于草甸地上的还不多见,考虑到 SHAW 模式对土壤水热盐运移耦合解决的优越性^[9-13]。本文拟利用 2013—2014 年科尔沁草甸地阿古拉生态水文试验站的观测资料,结合 SHAW 模型进行单点的数值模拟试验,通过统计分析来评估模拟值与观测值的差异,以期验证 SHAW 模型对科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态模拟的效果。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处科尔沁沙地东南部,行政区划为内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇。阿古拉生态水文试验站(122°36′—122°38′E,43°19′—43°21′N),面积约 55 km²,地貌特点为沙丘、草甸地、湖泊相间分布,属典型的半干旱荒漠化地区。所选试验点植被群落类型多样,且以草本植被为主,主要有天然羊草,芦苇、苦菜、野古草等,以 10 m×10 m 栅栏圈围,栅栏内保持原有草甸地植被类型。受温带大陆性季风气候影响,每年的 10 月下旬或 11 月上旬至翌年 4 月下旬或 5 月上旬(受每年气温变化而波动)之间有长达 5~6 个月季节性冻土分布,最大冻深为 1.0 m。据统计,从 2013 年 11 月到翌年 4 月,冻融期日蒸发量

为 4.82~5.63 mm/d,日平均气温小于 0℃的天数约为 134 d,日平均地表(10 cm)温度小于 0℃的天数约为 125 d。试验点内主要仪器设备有自动气象站观测系统和人工观测设备。

1.2 试验设计

试验时间为 2013 年 10 月至 2014 年 5 月,将自动气象站监测的土壤、气象数据、人工观测数据及土钻取土试验数据相结合进行分析。具体监测项目:自动气象站记录气温、降水数据;埋设热敏电阻探头长期监测土壤剖面地温变化情况;采用中子仪,结合烘干称重法测定土壤全含水率(体积含水率),观测时间为每 2 日 1 次,埋深深度与地温探头埋深深度一致;布置丹尼林冻深器^[14]监测土壤冻深,监测最大深度为 160 cm。HOBO 自记地下水位计监测地下水位。

在整个冻融期内进行人工实地分期取土试验,测定土壤含水率和电导率,将取回的土样用电导仪测定土壤电导率。

1.3 模型简介及参数确定

SHAW 模型为美国农业部北方流域研究中心建立的一维水热耦合模型^[15]。该模型已经被证明能够较精确地模拟土壤、气候和地表面很大范围内的冻结深度以及冻土中的水热迁移状况,为研究季节性冻融土壤的水热迁移规律提供了理论和方法的借鉴,是目前研究融雪和土壤冻结、融化比较有效和详细的模型之一。

本次模拟选用以日为时间步长的气象资料作为上边界气象条件,土壤含水率、温度以及气象数据输入的同时还应输入对应的儒略日、输出频率和所属年份。试验点的一般信息即为用来确定试验点的具体地理位置、海拔、坡向等,具体信息为 122°37′E,43°20′N,坡度和坡向为 0,高程 198 m,干土反照率 0.3,湿土反照率 0.35。

由于草甸地每年地表植被、土壤含水量和地下水位区别较大,利用公式计算试验草甸地水利特性参数,如标准容重、空隙大小分布指数、空气进入势、饱和导水率等^[16],并选用 2013 年 11 月到 2014 年 5 月间部分土壤水热盐和气象等数据对 SHAW 模型的有关参数进行率定,根据两者拟合的结果调整具体参数,最大可能地实现模拟值与实测值拟合。率定后确定的基本水力特性参数值如表 1 所示。

表 1 试验点草甸地水力特性参数

深度/ cm	几何平均 直径/mm	颗粒几何 标准差/mm	标准容重/ ($g \cdot m^{-3}$)	孔隙大小 分布指数 b	空气 进入势/m	饱和导水率/ ($cm \cdot h^{-1}$)
0	0.09	5.81	0.06	1.04	-0.06	0.46
10	0.11	6.14	0.07	1.09	-0.06	0.41
20	0.13	6.34	0.07	1.12	-0.05	0.37
30	0.08	5.56	0.06	1.00	-0.07	0.34
40	0.11	6.12	0.07	1.09	-0.07	0.28
50	0.15	6.32	0.08	1.11	-0.06	0.31
60	0.11	6.12	0.07	1.09	-0.07	0.26
70	0.14	6.28	0.08	1.11	-0.06	0.25
80	0.18	6.32	0.08	1.09	-0.06	0.24
90	0.27	5.89	0.10	0.97	-0.05	0.25
100	0.15	6.34	0.08	1.11	-0.07	0.23
140	0.08	5.63	0.06	1.01	-0.09	0.23
160	0.05	3.93	0.04	0.70	-0.11	0.26

1.4 模型评估方法

模型模拟效果可以利用统计学参数进行评价,如模型效率(model efficiency, ME),标准偏差(root mean square error, RMSE),和平均偏差(mean bias error, MBE),平均绝对误差(relatively mean absolutely error, RMAE)等用来评价模型的精度。

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (1)$$

式中: \hat{Y}_i ——模拟值; Y_i ——观测值; \bar{Y}_i ——观测平均值; N ——观测样本数。下同。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (3)$$

$$RMAE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(Y_i - \hat{Y}_i)|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与分析

冻融过程中,土壤冻结融化的主导因素是温度。从图 1 中可以看出,30 cm 以上土壤温度受气温影响变化剧烈,且变化趋势与气温变化趋势相一致,而 30 cm 以下土壤受气温变化影响较小,变化相对平缓。

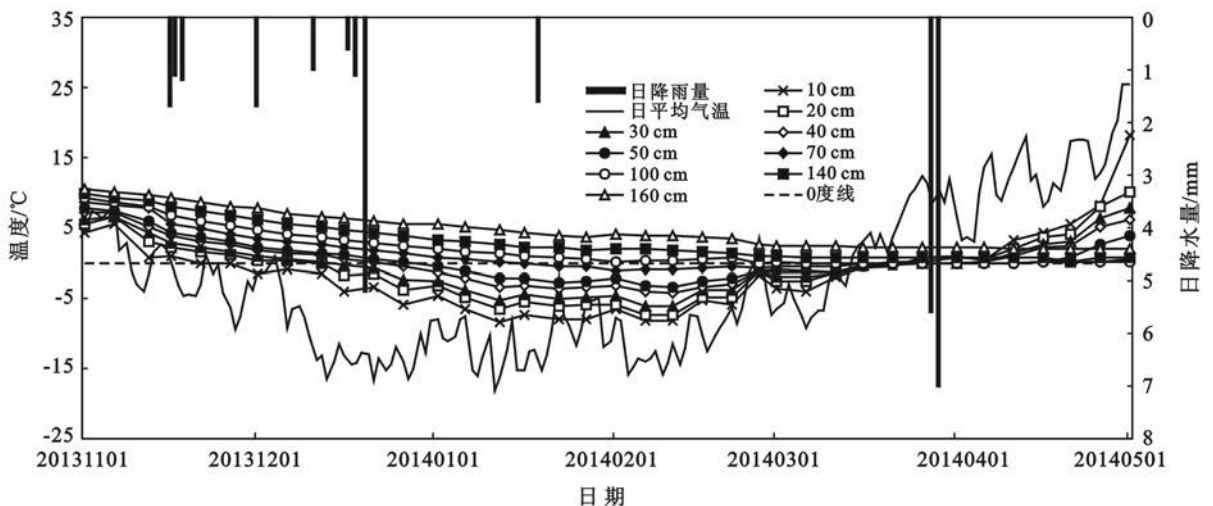


图 1 冻融期降雨量与不同深度土壤温度日动态变化

根据气温的变化幅度及土壤冻结变化特征可以将整个冻融期划分为 3 个阶段:11 月 9 日开始出现负温起到 12 月 4 日,气温昼夜正负波动,表层土壤出现昼融夜冻现象,土壤水发生水—冰、冰—水的交替相变过

程,这一时期为初始冻结期;12 月 5 日起气温从 0℃持续下降,直到 1 月 11 日达到最低气温 -18.2℃,此段时间,土壤冻结速度较大,冻深增长较快,土壤中仅发生水—冰的相变过程。随后气温变化相对稳定,1 月

14 日到 2 月 11 日之间,随气温的平缓变化,土壤温度的变幅几乎为 0,表层土壤这一现象尤为明显,此时冻深达到 91 cm 左右,这段时间为稳定冻结期。

2.1 土壤温度的模拟

对土壤温度模拟值和实测值做线性回归分析,整个冻融期各层土壤温度实测值与模拟的相关关系较好,结合散点分布图可以直观的显示出模拟值和实测

值之间的拟合效果。

以 10,50,100 cm 深度的土壤参数为代表,作模型模拟结果验证(如图 2 所示)。由图 2 可见,表层散点分布相对较稀疏,中间层和下层拟合效果较好,相关性均较高,这说明深层土壤模拟效果比浅层土壤模拟效果好,浅层土壤模拟受气候环境、土壤热参数影响较大。

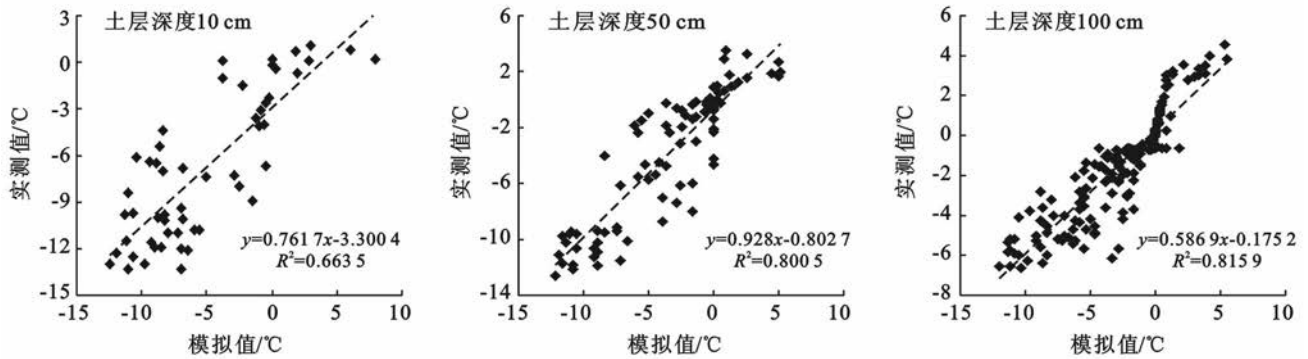


图 2 冻融期土壤温度模拟值和实测值相关性分析

整个时期,温度变化较为平缓,剖面温度渐变过程呈现“U”型分布,30 cm 以上土层温度变化幅度较大,冻结期开始,温度平滑下降,进入解冻时期,表层地温迅速升高,并于 4 月底就达到 18 °C 之上。出现这种变化的原因可能是浅层土壤受地表气温变化的影响较大。

根据冻融期间草甸地土壤温度模拟结果统计分析,采用标准偏差(RMSE)、平均偏差(MBE)、平均绝对误差(RMAS)来综合衡量模拟数据的分散程度、模拟值自身随机变量均值的波动性以及模拟值与实测值的平均相差值,由模型效率(ME)显示模型总体的模拟效果(下同)。如表 2 所示,从分析的结果可以看出,对于土壤温度的模拟,层位越深,模拟效果越好,可能因为浅层土壤受外界影响较大,土壤热参数取值存在一定的误差。模拟值与观测值标准偏差在 0.02~0.06,由此表明模拟结果精度较高。

表 2 冻融期草甸地土壤温度模拟结果统计分析

深度/cm	模型效率 ME	标准偏差 RMSE	平均偏差 MBE	平均绝对误差 RMAE
5	0.63	0.06	0.02	0.02
10	0.59	0.06	0.03	0.03
20	0.87	0.02	0.02	0.00
30	0.90	0.03	0.01	0.01
40	0.84	0.02	0.00	0.01
50	0.72	0.02	0.01	0.01
60	0.84	0.02	0.01	0.01
70	0.84	0.02	0.01	0.01

2.2 土壤含水率的模拟

分别选择初始冻结期、稳定冻结期和消融解冻期任意日的土壤剖面实测值和模拟值进行比较(图 3)。由图 3 可知,整个冻融期不同时间土壤含水量的实测值和模拟值变化趋势基本一致,且消融解冻期的拟合效果最佳。

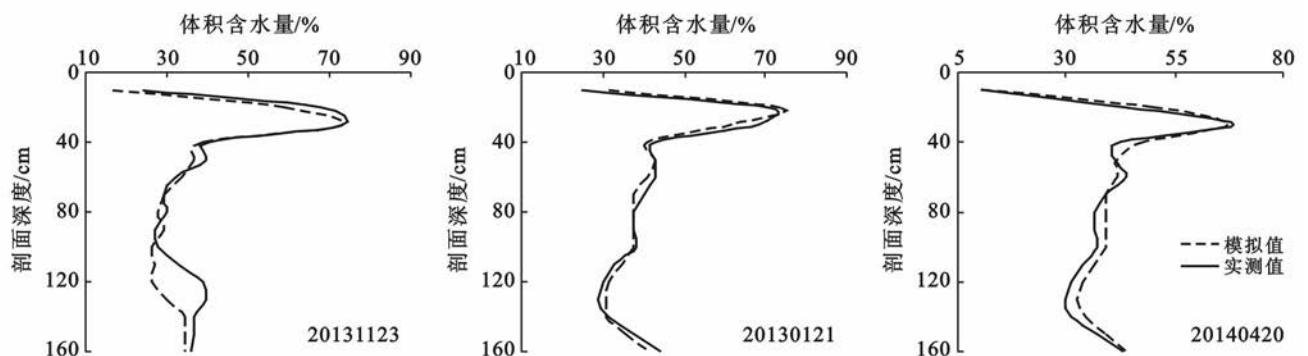


图 3 冻融期土壤含水率模拟值和实测值比较

模拟结果与中子仪观测情况基本接近,20 和 30 cm 土壤含水量较高,集中于 72.16%~49.66%。草甸地各土层含水量随时间的变化波动比不是很大,除初始冻结期略有升高外,其他时期水分运移均不是很活跃。其原因可能是地下水位较高,草甸地土壤剖面含水量均较高,全含水量随冻融过程变幅不是很明显。

相较于温度的模拟效率,含水率模拟效率要稍微差一些。这可能与影响土壤含水率的因素较多,包括降水量、地表植被、土壤质地、土壤温度等,而且水分本身具有复杂的相态变化有关,对模型模拟含水率结果影响较大。从 30 cm 深度以下,模拟值与实测值基本吻合,这可能因为研究区于 2013 年 8 月 15,16 日有特大降水(122.3 mm),土壤含水率对天气变化极为敏感。如表 3 所示,但总体来看,标准偏差在 1.75~6.30,平均值 3.20。说明模拟结果与观测结果之间误差可以接受,此次模拟结果可以反映实际结果。

2.3 土壤含盐量的模拟

同样选用 3 个时期任意日不同层位的含盐量实

测值与模拟值进行比较,验证模拟结果(图 4)。从图 4 中可以看出,所有层位的模拟值与实测值变化趋势基本一致。

表 3 冻融期草甸地土壤水分模拟结果统计分析

深度/cm	模型效率 ME	标准偏差 RMSE	平均偏差 MBE	平均绝对误差 RMAE
10	0.78	2.97	8.80	0.39
20	0.79	5.58	11.18	0.49
30	0.69	6.30	9.69	0.60
40	0.85	2.17	4.71	0.12
50	0.87	1.75	3.07	0.08
60	0.84	1.64	2.67	0.07
70	0.89	2.92	8.54	0.26
80	0.91	2.03	4.14	0.14
90	0.86	1.81	3.28	0.11
100	0.84	1.78	3.15	0.11
120	0.68	3.96	5.72	0.50
140	0.78	6.13	7.63	0.90
160	0.74	2.53	6.38	0.17

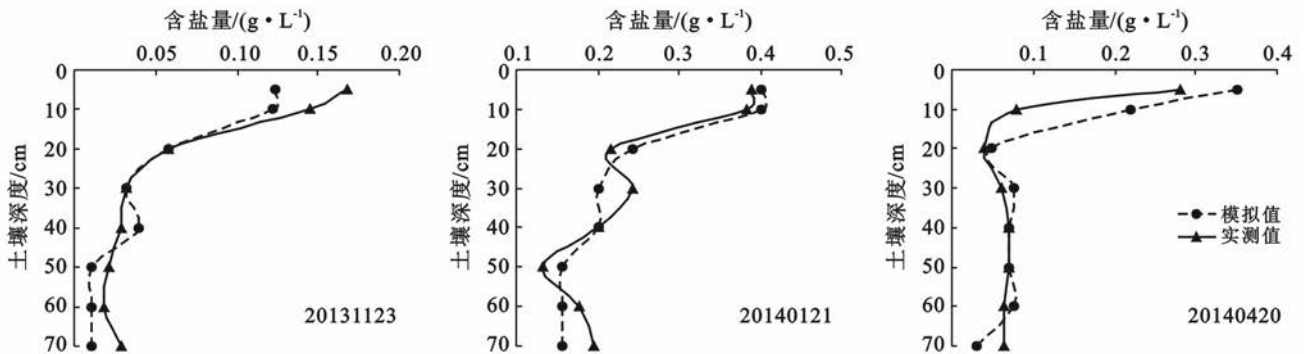


图 4 冻融期土壤含盐量模拟值和实测值比较

草甸地盐分运移过程既特殊又复杂^[17],通过 SHAW 模型模拟草甸地冻融期土壤含盐量的变化趋势,从中可看出 100 cm 土壤深度之上的土壤含盐量随着土壤的冻结融化过程呈现先上升后下降的过程,其中表层的含盐量变化较大,变化现象较明显。土壤深度 100 cm 之下的土壤含盐量较小,整个冻融期变幅较小,含盐量基本保持不变。这种现象可能成因是水分和盐分之间具有强烈的耦合作用,并且盐分的时空变异性要远远大于水分的时空变异性。

从表 4 可以看出,模型对于盐分的模拟效率依然为下层优于上层,标准偏差与平均绝对误差分析的值均为表层高于下层,因此可以说明,模型对于土壤盐分的模拟也是随土层深度的增加模拟效果越好。这可能是由于土壤盐分受水分在温度梯度下的运动影响较大,土壤盐分运移方程中的参数难以确定等因素影响。各层土壤模型效率均大于 0.55,并且最优效

果可以达到 0.90,由此可见 SHAW 模型对于土壤盐分的模拟效果能基本反应土壤盐分的变化情况。

表 4 冻融期草甸地土壤盐分模拟结果统计分析

深度/cm	模型效率 ME	标准偏差 RMSE	平均偏差 MBE	平均绝对误差 RMAE
5	0.63	0.06	0.02	0.02
10	0.59	0.07	0.01	0.03
20	0.87	0.02	0.02	0.01
30	0.90	0.03	0.01	0.01
40	0.84	0.02	0.00	0.01
50	0.72	0.02	0.01	0.01
60	0.84	0.02	0.00	0.01
70	0.84	0.02	0.00	0.01

3 讨论与结论

(1) SHAW 模型能够较为成功地模拟科尔沁草

甸地土壤温度和土壤含盐量。对8个不同深度土壤温度、土壤盐分的模拟值和观测值对比统计,模型效率都在0.59以上,平均偏差在0.03以下。随着土壤深度增加,土壤温度、盐分的模拟效果变好。

(2) 相较于草甸地温度和盐分的模拟,土壤含水率的模拟结果存在一定的偏差,但对不同深度的土壤含水量模拟结果的总体趋势与中子仪观测情况基本接近,模拟结果仍具有一定的可信度。30 cm以上土壤含水率模拟结果稍差的原因可能是由于参数不确定性,一些参数需要通过室内试验与经验值进行判断。

(3) 利用 SHAW 模型模拟科尔沁草甸地土壤水热盐耦合变化是基本可行的,其输出结果相对较好。但模型中多数公式均为经验性的,需通过更多的观测试验改进和完善相关参数,以提高模型适用性。

因此,SHAW 模型可用于科尔沁草甸地水热盐动态变化规律研究。模拟结果可为该地区冬春作物的播种和预防冻害等提供参考依据,可以被借鉴定量模拟预测农田在自然条件下的垂向一维冻土—非冻土系统内的水热盐迁移状况。

[参 考 文 献]

- [1] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展,2005,13(3):298-302.
- [2] 王生廷,盛煜,吴吉春,等. 祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J]. 冰川冻土,2015,37(1):27-37.
- [3] 赵显波,刘铁军,许士国,等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J]. 冰川冻土,2015,37(1):233-240.
- [4] 焦永亮,李韧,赵林,等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. 冰川冻土,2014,36(2):237-247.
- [5] 张泉,刘咏梅,杨勤科,等. 祁连山退化高寒草甸土壤水分空间变异特征分析[J]. 冰川冻土,2014,36(1):88-94.

- [6] 吴谋松,王康,谭霄,等. 土壤冻融过程中水流迁移特性及通量模拟[J]. 水科学进展,2013,24(4):543-550.
- [7] 胡列群,武鹏飞,梁凤超,等. 新疆冬春季积雪及温度对冻土深度的影响分析[J]. 冰川冻土,2014,36(1):48-54.
- [8] 陈晓飞,田静,张雪萍,等. 积雪融雪过程中水、热、溶质耦合运移规律的研究进展[J]. 冰川冻土,2006,28(1):287-292.
- [9] 赵林,李韧,丁永建. 唐古拉地区活动层土壤水热特征的模拟研究[J]. 冰川冻土,2008,30(6):930-937.
- [10] 陈晓磊,杨梅学,万国宁,等. CLM3 和 SHAW 模式在青藏高原中部 NMQ 站的模拟研究[J]. 冰川冻土,2013,35(2):291-300.
- [11] 郭东林,杨梅学. SHAW 模式对青藏高原中部季节冻土区土壤温、湿度的模拟[J]. 高原气象,2010,29(6):1369-1377.
- [12] Kang Ersi, Cheng Guodong, Song Kechao, et al. Simulation of energy and water balance in soil-vegetation-atmosphere transfer system in the mountain area of Heihe river basin at Hexi corridor of northwest China [J]. Science in China(D),2005,48(4):538-548.
- [13] 罗斯琼,张宇,吕世华. 黄土高原土壤冻融过程的观测和模拟[J]. 冰川冻土,2008,30(2):234-243.
- [14] 常龙艳,戴长雷,商允虎,等. 冻融和非冻融条件下包气带土壤墒情垂向变化的试验与分析[J]. 水科学进展,2014,36(4):1031-1041.
- [15] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system (D): Theory and development [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(2):565-0571.
- [16] 成向荣,黄明斌,邵明安. 基于 SHAW 模型的黄土高原半干旱区农田土壤水分动态模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(11):1-7.
- [17] 郑冬梅,许林书,罗金明,等. 松嫩平原盐沼湿地冻融期水盐动态研究:吉林省长岭县十三泡地区湖滩地为例[J]. 湿地科学,2005,3(1):48-53.

(上接第 321 页)

- [11] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2001:1-12.
- [12] 宋光齐,李云贵,钟沛林. 地质灾害气象预报预警方法探讨:以四川省地震灾害气象预报预警为例[J]. 水文地质工程地质,2004,31(2):33-36.
- [13] 麻土华,郑爱平,李长江. 降雨型滑坡的机理及其启示[J]. 科技通报,2014,30(1):39-43.
- [14] 徐晶,张国平,张芳华,等. 基于 Logistic 回归的区域地

- 质灾害综合气象预警模型[J]. 气象,2007,33(12):3-8.
- [15] 饶传新. 基于 WebGIS 的宜宾市地质灾害气象监测预警服务系统的研发[D]. 成都:电子科技大学,2014:16-17.
- [16] 程晓露,张华莉. 陕西省地质灾害气象预报预警系统的应用与现状[J]. 陕西地质,2005,23(2):84-89.
- [17] 王卫东,钟晟. 基于 GIS 的 Logistic 回归模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 工程勘察,2009,37(11):5-10.