

稳定积雪覆盖下的季节性冻土水分特征及其数值模拟

付强^{1,2}, 马效松¹, 王子龙^{1,2}, 李天霄^{1,2}

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030;
2. 黑龙江省普通高等学校节水农业重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了深入研究积雪覆盖边界条件下的土壤水分迁移规律, 通过冬季野外土壤水分观测试验, 利用土壤水动力学理论, 建立了稳定积雪覆盖条件下季节性冻土水分迁移模型。研究表明, 积雪覆盖土壤比裸地平均地温高出 1℃, 土壤体积分水率(土壤剖面 0~100 cm 内)高出 2%, 体现了积雪覆盖不仅能够阻碍土壤热量散失, 而且能保持土壤墒情; 建立的水分迁移模型能够精准的模拟积雪覆盖条件下冻结土壤水分迁移动态, 其相对平均误差仅为 3.51%。研究结果对于丰富和完善冻土水分迁移理论, 解决春旱和冬小麦“冷拔”等问题具有重要的理论和实践意义。

关键词: 积雪覆盖; 水分迁移; 季节性冻土; 有限差分法

中图分类号: S161; P641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0151-04

Characteristics and Numerical Simulation of Moisture in Seasonal Frozen Soil under the Stable Snow Cover

FU Qiang^{1,2}, MA Xiaosong¹, WANG Zilong^{1,2}, LI Tianxiao^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Key Laboratory for Water saving Agriculture, colleges and universities in Heilongjiang Province, Harbin 150030, China)

Abstract: For an in-depth study on the movement characteristics of soil moisture under the snow covered boundary conditions, a moisture transfer model of the seasonal frozen soil under the stable snow covered conditions was established based on the field measurements of soil moisture in the winter and the soil hydrodynamics theory. The results showed that the average temperature of soil covered with snow is 1℃ higher than the bare soil and the water content of unit volume (between 0 and 100 cm of the soil profile) is 2% higher, which suggested that the snow cover can not only prevent the loss of soil heat but also maintain the soil moisture content. The model can simulate accurately the transfer dynamics of frozen soil under the snow cover, and the relative average error is only 3.51%. The research results have important theoretical and practical significances to improve the moisture transfer theory of frozen soil and to solve the spring drought and "cold drawing" of winter wheat problems.

Key words: snow cover; moisture transfer; seasonal frozen soil; finite difference method

我国有 54% 的国土面积位于季节性冻土地区^[1], 其中东北、西北和西南等地区在冬季普遍存在季节性冻土表面覆盖一层积雪的现象。积雪改变了土壤与大气之间的水热传递规律, 导致积雪覆盖条件下土壤的水热状况也发生了改变^[2], 进而影响“冬小麦”的生长发育和来年春季的土壤墒情。因此, 国内外学者对该问题进行了大量研究。Philip 和 DeVries^[3] 提出了水热耦合迁移理论; Kane^[4] 使用了一个伴随相变的二维热传导模型来说明气候变暖对活动层温度和融化深度的影响; 雷志栋^[5] 等模拟了冻结条件下土的水热耦合迁移规律及对潜水蒸发的影响; 康绍忠^[6] 对于作物覆盖条

件下田间水热运移的模拟研究; 任理^[7] 对条带覆盖下土壤水热耦合状况进行了研究。上述学者虽然取得了一些突出的研究成果, 但由于地域限制, 无法充分考虑积雪对于土壤水分状况的影响, 特别是高寒地区“冬小麦”冬季生长发育期间的水热状况。

为此, 本文以哈尔滨为例, 通过不同积雪覆盖下的冬季冻结土壤大田试验, 采用土壤水动力学理论分析了稳定积雪覆盖对土壤水分迁移状况的影响。研究成果对于揭示稳定积雪覆盖下的水分迁移规律, 指导农业生产实践具有重要理论和实践意义。

收稿日期: 2012-11-28 修回日期: 2012-12-18 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1131.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279031; 51209039); 黑龙江省自然科学基金(E201241); 哈尔滨市科技创新人才专项资金(2010RFXN043); 教育部新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 付强(1973-), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术、冻融土壤水热作用机理等方面研究。E-mail: fuqiang100@371.net, fuqiang@neau.edu.cn

1 材料与方法

试验于 2008 年 10 月至 2009 年 6 月在黑龙江省水利科学研究院哈尔滨综合试验站进行, 试验仪器采用中子仪和时域反射仪(TDR)分别观测季节性冻土总含水量与液态含水量, 采用 H8 多点土壤温度测定系统测定土壤剖面温度, 其中: 中子测管 10 根、TDR 测管 10 根, 观测深度为 20 cm、40 cm、80 cm、100 cm、140 cm、180 cm、220 cm、260 cm。为了避免中子管相互影响, 根据中子仪和时域反射仪的原理^[8-9], 确定相邻两根中子管距离为 200 cm; 为了保证中子管和 TDR 管测量的数据为同一剖面上的同一测点, 确定中子管和 TDR 管间距为 60 cm。本试验分为两个小区: 1 号- 5 号测管为 1 区, 自然积雪覆盖; 6 号- 10 号测管为 2 区, 开放式挡雨棚挡雪区。具体方案布置见图 1。

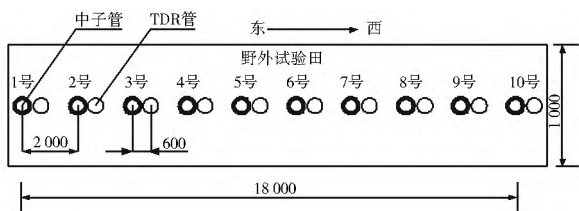


图 1 测管布设示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of layout of test tubes (Units: mm)

自然降雪后, 选择积雪不融化能够稳定存在的雪层, 每隔 3 天收集一次数据, 连续收集数据直至第二次降雪(平均一个测量周期收集 4 次)。对两个小区的各点数据取平均值分析积雪对于土壤水分迁移状况的影响。

2 试验数据分析

2.1 稳定积雪覆盖对于季节性冻土温度的影响

图 2 为一天不同时刻土壤剖面深度为 20 cm 处的温度随时间变化曲线, 由图 2 可看出: 土壤剖面深度为 20 cm 时, 有积雪覆盖的土壤比无积雪覆盖平均剖面温度高出 0.5 °C; 图 3 为地表土壤温度随时间的变化图, 有积雪覆盖比无积雪覆盖土壤平均剖面温度高出 1 °C, 体现了积雪对土壤的保温作用。由图 2 和图 3 对比可知: 积雪对土壤剖面温度的保温效应随着土壤剖面深度增加而减小。

已有研究结果表明, 积雪覆盖对冻土的热状况具有显著的影响: 一方面, 积雪的存在阻隔了冻土层的热能散失, 提高了地温^[10-11]; 另一方面, 积雪本身所具有的低导热性和较大体积热容量等特性, 延滞了外部气候条件对冻土热状

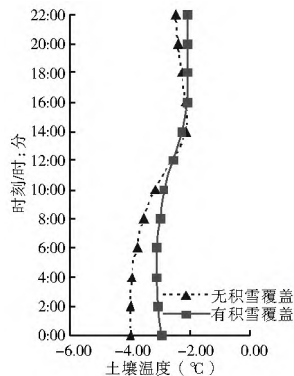


图 2 土壤剖面 20 cm 温度变化曲线

Fig. 2 Variation curve of temperature in the 20 cm soil profile

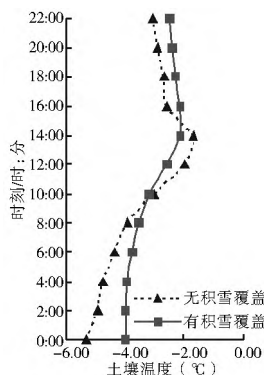


图 3 土壤地表温度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of surface soil temperature

况的影响^[12-13]。

2.2 稳定积雪覆盖对于季节性冻土总含水量率的影响

11 月 21 日下雪后日平均气温达到最高, 为 -4.8 °C, 积雪不融化, 其平均厚度为 5 cm, 没有融雪水补充土壤。根据下雪后收集的数据绘制稳定积雪覆盖下不同时间土壤不同剖面含水量变化图(见图 4), 可以看出: 一个测量周期范围内, 积雪覆盖条件下相对于裸地土壤增加了体积含水量, 在 0~ 100 cm 之间平均增加了 2%; 积雪对于土壤体积含水率的影响范围在土壤的剖面深度 100 cm 以内, 超过 100 cm 后影响十分微弱; 同一剖面同一测点随着时间的变化土壤体积含水量平均变化率为 0.03%。由于积雪覆盖减缓了土壤热量散失, 减缓了土壤冻结速度, 改变了土壤水分运动规律, 进而影响了土壤剖面水分在时间和空间上的分布规律。

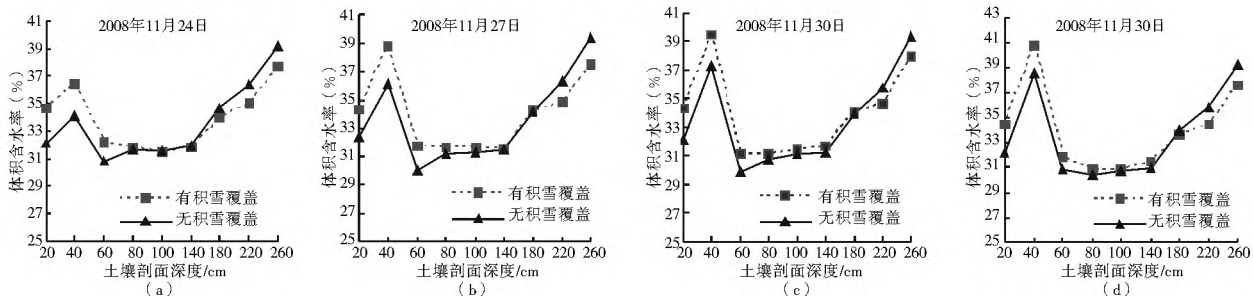


图 4 不同时间土壤剖面含水量变化曲线

Fig. 4 Variation curves of water contents of the soil profile under different time periods

3 稳定积雪覆盖的水分迁移模型构建和数值模拟

3.1 模型构建

考虑均质各向同性的垂向一维土壤冻结问题。在忽略水汽迁移、热量对流作用的情况下,非饱和土壤水分运动方程为^[14]:

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta_u) \frac{\partial \theta_u}{\partial z}] - \frac{\partial k(\theta_u)}{\partial z} - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_l}{\partial t} \quad (1)$$

式中: θ_u 、 θ_l 分别为土壤未冻水、冰的体积含量; t 、 z 分别为时间、空间坐标(垂直向下为正); $D(\theta_u)$ 、 $k(\theta_u)$ 分别为非饱和土壤水分扩散率、导水率; ρ_i 、 ρ_w 分别为冰、水密度。

3.2 水分迁移差分求解

取时段末的结点分析方程(1)。基本方程中的 $\frac{\partial \theta_u}{\partial t}$ 取后

向差商,而 $\frac{\partial}{\partial z}(D(\theta_u) \frac{\partial \theta_u}{\partial z})$ 相应地取时段末的差商,则任意内

结点($u, k+1$)处原方程的差分方程为:

$$\frac{\theta_u^{k+1} - \theta_u^k}{\Delta t_{k+1}} = \frac{1}{(\Delta z_u + \Delta z_{u+1})/2} \cdot \left[\frac{D_{u+1/2}^{k+1}(\theta_{u+1}^{k+1} - \theta_u^{k+1})}{\Delta z_{u+1}} - \frac{D_{u-1/2}^{k+1}(\theta_u^{k+1} - \theta_{u-1}^{k+1})}{\Delta z_u} \right] - \frac{K_{u+1}^{k+1} - K_{u-1}^{k+1}}{\Delta z_u + \Delta z_{u+1}} \quad (2)$$

将方程(2)整理为可用追赶法求解的形式如式(3),方程

(3)的系数为式(4)

$$a_u \theta_{u-1}^{k+1} + b_u \theta_u^{k+1} + c_u \theta_{u+1}^{k+1} = h_u \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_u = -\frac{2\Delta t_{k+1} D_{u-1/2}^{k+1}}{\Delta z_u (\Delta z_u + \Delta z_{u+1})} \\ c_u = -\frac{2\Delta t_{k+1} D_{u+1/2}^{k+1}}{\Delta z_{u+1} (\Delta z_u + \Delta z_{u+1})} \\ b_u = 1 - a_u - c_u = 1 + \frac{2\Delta t_{k+1} D_{u-1/2}^{k+1}}{\Delta z_u (\Delta z_u + \Delta z_{u+1})} + \frac{2\Delta t_{k+1} D_{u+1/2}^{k+1}}{\Delta z_{u+1} (\Delta z_u + \Delta z_{u+1})} \\ h_u = \theta_u^k - \frac{\Delta t_{k+1}}{\Delta z_u + \Delta z_{u+1}} (K_{u+1}^{k+1} - K_{u-1}^{k+1}) \end{cases} \quad (4)$$

3.3 水分迁移方程参数

土壤水分特性参数采用 van Genuchten Mualem 模拟计算^[15],即:

$$\Psi = \{ [(\theta_u - 0.01)/0.47]^{-2} - 1 \}^{0.5} / 0.014 \quad (5)$$

$$K(\theta_u) = 0.02 \{ 1 - (0.014 |\Psi|)^1 \} \cdot \quad (6)$$

$$[1 + (0.014 |\Psi|)^2]^{-0.5} / [1 + (0.014 |\Psi|)^2]^{0.25} \quad (6)$$

$$C = (\theta_u - 0.01) \{ 1 - [(\theta_u - 0.01) / 2.13]^2 \} / |\Psi| \quad (7)$$

$$D(\theta_u) = K(\theta_u) / C \quad (8)$$

公式(5)–(8)内的经验系数根据已有实测数据拟合获得。

系数方程中半结点处的参数取值为相邻上下结点参数的平均值。方程(3)为三对角方程,用追赶法及 Mat lab 编程求解。空间步长取 1 cm;时间步长取 1s。积雪覆盖条件下的土壤体积含水率真实值和计算机模拟值对比见图 5。

由图 5 可知,真实值和模拟值在土壤剖面 40 cm 处差异较大,绝对误差达到了 5.21%。经实际取土发现 40 cm 剖面土壤均一性相对较差,而且存在部分小石块,在一定程度上

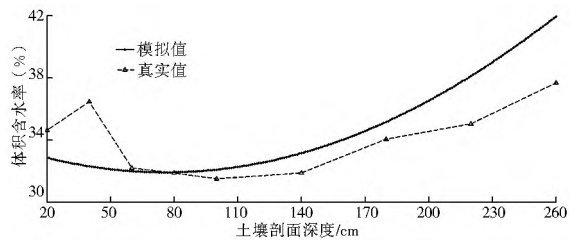


图 5 模型精度对比

Fig. 5 Comparison of the simulated and observed water contents of unit volume

影响了中子仪和时域反射仪的工作,导致测量值不准确。分析图 5 中的其它模拟值发现:模拟值和真实值各点的最大绝对误差为 2.67%,最大相对误差为 6.83%,平均相对误差仅为 3.51%,可见所建的水分迁移模型可以很好的模拟有积雪覆盖边界条件下的土壤水分状况。

4 结论

(1) 积雪的低热导率特性能够影响土壤温度变化,在土壤表层有积雪覆盖的土壤日平均温度相对于无积雪覆盖的高出 1℃,土壤剖面为 20 cm 时高出 0.5℃。

(2) 稳定积雪覆盖能够增加土壤剖面体积含水率的范围为 0~100 cm。平均增加体积含水率 2%。这主要是由于稳定积雪覆盖减缓了土壤热量散失和土壤冻结速度,进而影响土壤的剖面含水率。

(3) 通过模拟值和真实值对比可知本文应用的数学模型和计算方法可以很好的模拟积雪边界条件下的土壤水分迁移状况。

参考文献(References):

- [1] 徐学祖,邓友生.冻土中水分迁移的试验研究[M].北京:科学出版社,1991:83-86. (XU Xu e zu, DENG You sheng. Experimental Study on Water Migration in Freezing and Frozen Soil [M]. Beijing: Science Press, 1991: 83-86. (in Chinese))
- [2] 邢志彦,郑秀清.积雪中水热耦合迁移模型的建立[J].太原理工大学学报,2003,34(6):647-650. (XING Shi yan, ZHEGN Xiu qing. The Coupled Numerical Model of Water and Heat Transfer in Snow Layer [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(6): 647-650. (in Chinese))
- [3] Philip J R, deVries DA. Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients [J]. Transactions American Geophysical Union, 1957, 32(2): 222-232.
- [4] Kane D L, Hinkel K M, Goering D J, et al. Nonconductive Heat Transfer Associated with Frozen Soils [J]. Global and Planetary change, 2001, 29: 275-292.
- [5] 雷志栋,杨诗秀.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:264-317. (LEI Zhi dong, YANG Shi xiu. Soil Water Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 264-317. (in Chinese))
- [6] 康绍忠,刘晓明.作物覆盖条件下的田间水热运移的模拟研究[J].水利学报,1993,(3):1F-17. (KANG Shao zhong, LIU Xi aoming. Simulation of Soil Water and Heat Movement with Crop Canopy Shading [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, (3): 1F-17. (in Chinese))
- [7] 任理,张瑜芳.条带覆盖下土壤田间试验与模型建立[J].水利

- 学报, 1998, (1): 76-84. (REN Li, ZHANG Yur fang. Field Experiments and Numerical Simulation of Soil Water and Heat Regimes under the Condition of Summer Corn Partially Covered by Mulch Strips[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (1): 76-84. (in Chinese))
- [8] 倪广恒, 段新杰, 薛迎洲. 使用中子仪测量土壤含水率的试验研究[J]. 水利水电技术, 1991, (12): 47-51. (NI Guang heng, DUAN Xin jie, XU E Ying-zhou. Use Neutron Gauge Measurement of the Moisture Content of the Soil Test Research[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1991, (12): 47-51. (in Chinese))
- [9] 尹志芳, 刘恩民, 陈炳新, 等. 时域反射仪与中子仪测定土壤含水量标定试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 161-165 (YIN Zhi fang, LIU En min, CHEN Bing-xin, et al. Calibration Experiments of Soil Moisture by the Methods of Time Domain Reflectometry and Neutron Probe[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 161-165. (in Chinese))
- [10] 马虹, 胡汝骥. 积雪对冻土水热状况地影响[J]. 干旱区地理, 1995, (4): 23-27. (MA Hong, HU Ru ji. Effect of Snow Cover on Thermal Regime of Frozen Soil[J]. Arid Land Geography, 1995, (4): 23-27. (in Chinese))
- [11] Goodrich L E. The Influence of Snow Cover on the Ground Thermal Regime[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(4): 421-432.
- [12] 王子龙. 季节性冻土区雪被-土壤联合体水热耦合运移规律及数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010. (WANG Zi long. Study on Water-Heat Coupling Movement and Numerical Simulation in Snow Cover Soil Union of Seasonal Frozen Soil Region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. (in Chinese))
- [13] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, et al. Snow Depth Manipulation and its Influence on Soil Frost and Water Dynamics in A Northern Hardwood Forest[J]. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 151-174
- [14] 尚松浩, 雷志栋. 冻结条件下土壤水热耦合迁移数值模拟的改进[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(8): 62-64. (SHANG Song hao, LEI Zhi dong. Numerical Simulation Improvement of Coupled Moisture and Heat Transfer during Soil Freezing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1997, 37(8): 62-64. (in Chinese))
- [15] 尚松浩, 雷志栋. 土壤水分动态模拟模及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 61-79. (SHANG Song hao, LEI Zhi dong. Soil Water Dynamic Simulation Model and its Application[M]. Beijing: Science Press, 2009: 61-79. (in Chinese))

(上接第 139 页)

- [11] (美) Jensen 著, 陈晓玲译. 遥感数字影像处理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (Jensen. Remote Sensing Digital Processing [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [12] 马小峰, 赵东至, 刑小罡, 等. 海岸线卫星遥感提取方法研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 185-189. (MAO Xiaofeng, ZHAO Dong zhi, XING Xiaogang, et al. The Means of Withdrawing Coastline by Remote Sensing[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(2): 185-189. (in Chinese))
- [13] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报, 1984, 51(2): 173-184. (ZHANG Ren shun. Landforming History of the Huanghe River Delta and Coastal Plain of North Jiangsu[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 51(2): 173-184. (in Chinese))
- [14] 杨晓梅, 周成虎, 杜云艳, 等. 海岸带遥感综合技术与实例研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. (YANG Xiaomei, ZHOU Cheng hu, DU Yur yan, et al. Remote Sensing of Island and Coast Environment[M]. Beijing: Ocean Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 蔡则健, 吴曙光. 江苏海岸线演变趋势遥感分析[J]. 国土资源遥感, 2002(3): 19-23. (CAI Ze jian, WU Shu liang. Remote Sensing Analysis of the Coastline Development in Jiangsu Province[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002(3): 19-23. (in Chinese))