

冻融期积雪覆盖下土壤水热交互效应

付 强, 侯仁杰, 王子龙, 李天霄

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 为了研究季节性冻土区土壤水热时空分异特征, 揭示冻融过程中的水热相互作用机理及其复杂性。在松嫩平原黑土区, 以野外实测试验数据为基础, 分别建立裸地、自然降雪、积雪压实和积雪加厚覆盖处理条件下 20 cm 土层土壤含水率和温度的耦合模型, 并通过对比模型的预测效果研究土壤水热变化的复杂程度, 采用差异性分析和基于小波变换的分形理论方法定量研究含水率与温度序列的变异波动性和分维指标, 进而验证不同覆盖处理条件对于土壤水热空间变异复杂性的影响。结果表明: 冻结期, 积雪阻碍了环境因素对于土壤水热迁移过程的影响, 土壤含水率和温度的耦合效果较好, 并且预测值与实测值能够较好的吻合, 裸地、自然降雪、积雪压实、积雪加厚处理条件下的相对误差分别为 0.42%、0.31%、0.13%和 0.06%, 随着积雪厚度的增加和密度的增大, 含水率和温度的差异性减弱, 复杂程度逐渐降低; 融化期, 积雪覆盖区的融雪水入渗抑制了土壤温度稳定提升, 含水率出现骤然升高的现象, 自然降雪、积雪压实、积雪加厚条件下的含水率变化分别为 14.31%、15.90%和 16.91%, 土壤温度变化范围分别为-5.9~5.3、-3.6~6.9 和-3.1~3.8℃, 二者的互作效应减弱, 并且随着积雪覆盖量的增加, 土壤的水热时空迁移复杂程度逐渐增强。同时, 采用基于小波变换的分形理论研究土壤含水率和温度的时间序列复杂性精度较高、结果可靠。该研究对于揭示冻土区土壤水热迁移动态规律, 准确预测春播期土壤温度和墒情, 合理高效地利用松嫩平原的土壤水资源具有重要的理论价值和现实意义。

关键词: 分形; 积雪; 土壤; 冻融期; 复杂性; 土壤水热互作效应

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.014

中图分类号: S152.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0101-07

付 强, 侯仁杰, 王子龙, 李天霄. 冻融期积雪覆盖下土壤水热交互效应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 101—107.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.014 http://www.tcsae.org

Fu Qiang, Hou Renjie, Wang Zilong, Li Tianxiao. Soil moisture thermal interaction effects under snow cover during freezing and thawing period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 101—107. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.014 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国的季节性冻土面积约占全国国土面积的 54%, 主要分布在中国的东北、西北及华北地区, 这些地区多属于干旱、半干旱的水资源短缺区^[1-4]。积雪作为冻土区一种特殊的下垫面, 其存在形式依赖于环境温度、湿度以及大气辐射而变化^[5-6]。由于其高反射性、低导热性以及融雪水文效应, 对气候环境和地表的水热状况都会产生深刻的影响^[7-8]。积雪覆盖下的土壤水热运动会呈现出特殊规律和空间分配特性, 冻融过程中, 土壤水热在垂直剖面上的呈现出一定的复杂性^[9-10]。冻结期雪被的覆盖以及融化期融雪水的入渗在一定程度上影响着土壤的水热互作效应, 进而影响着“冬小麦”的生长发育和来年土壤墒情的预测^[11-12]。

目前, 国内外针对于冻融期土壤水热状况已进行了大量的理论和试验研究。徐学祖等^[13]针对于土壤的冻胀及盐胀问题进行了室内模拟研究, 雷志栋等应用冻融过

程中土壤水热耦合迁移模型对地下水浅埋条件下的土壤冻融过程进行了模拟^[14], 张小磊等以野外实测数据为基础, 分析了积雪消融期浅层土壤的温度变化情况^[15]; Sharratt 等^[16]研究了不同覆盖处理对于季节性冻土的冻结深度、冻结速率、冻结周期的影响, Kane^[17]使用了一个伴随相变的二维热传导模型证实了气温的变暖对于土壤融化深度的影响。纵观之前学者研究成果, 主要侧重于土壤冻融期土壤水热的变化规律以及水热迁移的数值模拟, 而对于积雪覆盖条件下土壤水热互作效应机理及其复杂性研究甚少。

本文主要针对松嫩平原黑土地区季节性冻土的水热变异特性, 在野外大田试验的基础上, 构建了不同积雪覆盖条件下土壤水热互作响应函数, 对比函数模拟效果, 并且对各处理区域的土壤水热时间序列变化特征进行了复杂性评价。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于哈尔滨市香坊区东北农业大学综合试验场, 该地区位于松嫩平原南部, 地理位置为 126°45'32"E、45°44'41"N。该地区受季风气候的影响, 冬季严寒干燥, 夏季温热湿润, 年平均降水量为 529 mm, 降水主要集中在 7、8 月份, 约占全年总降水量的 65%。年最低气温为 -37.3℃, 最高气温为 36.3℃。多年平均积雪覆盖期为

收稿日期: 2015-04-14 修订日期: 2015-07-10

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); 黑龙江省杰出青年基金(JC201402)

作者简介: 付 强, 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、冻融土壤水热作用机理等方面研究, 哈尔滨 东北农业大学水利与建筑学院, 150030. Email: fuqiang0629@126.com.

110 d, 最大冻深 180 cm。试验区位于平原腹地, 地势平坦, 无植被覆盖, 经人工取样分析可知, 该地区 0~30 cm 土层为黑色壤土, 30 cm 以下为黑色黏土。由于松嫩平原地区的犁底层为 0~20 cm, 其含水率和温度状况将直接影响作物的生长发育, 因此, 本文针对于 0~20 cm 土层的水热复杂性状况展开深入研究。

1.2 试验方案

2013 年试验场地划分为 4 个规格为 10 m×10 m 的试验区域。裸地处理试验区埋设冻土器(锦州利诚 LQX-DT) 1 根, 用以测定冻融期土壤冻深变化过程。各试验样地分别埋设 DL-04 土壤温度记录仪, 测定 5、10、15、20 cm 深度处的温度值, 并且取其平均温度作为 20 cm 的土层温度, 温度记录仪设置为每天 09:00 自动读取数据。同理, 各样地埋设 2 根时域反射仪 (time domain reflectometry,

TDR) 用以测定 5、10、15、20 cm 深度的土壤液态含水率, 求其平均值。无降雪或降雪厚度在 2 cm 以下时, 测量间隔为 1 周, 当降雪厚度超过 2 cm 时, 在降雪后的第 1、3、5 天进行测量, 不同深度的含水率进行 3 次测量取平均值。冻融期, 4 个试验样地分别设置成为裸地、自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理。其中, 裸地区域通过人工除雪完成; 自然降雪区域不做任何处理, 保持自然状态, 密度为 0.157 g/cm³; 积雪压实相对于自然降雪处理, 雪深无明显差异, 密度增大为 0.256 g/cm³; 积雪加厚相对于自然降雪处理, 雪深增加, 但密度为 0.161 g/cm³, 与自然降雪保持相近。积雪的密度由荷兰赫尔辛基大学研制的 Snow Fork 雪特性分析仪测定。在冻结期, 一次性通过人工取样测定 20 cm 深度土壤干容重、田间持水率以及土壤的机械组成等物理指标, 如表 1 所示。

表 1 各试验区土壤物理参数
Table 1 Soil physical parameters of test area

处理方式 Treatments	干容重 Dry density/(g·cm ⁻³)	黏粒 Clay (<0.002 mm)/%	粉粒 Silt (0.002~ 0.02 mm)/%	砂粒 Sand (>0.02 mm)/%	饱和含水率 Saturated moisture content/%	自然含水率 Natural moisture content/%	田间持水率 Field capacity/%
裸地处理 Bare land	1.41	14.34	36.90	48.76	47.67	23.98	34.25
自然降雪 Natural snow	1.57	14.27	35.89	49.84	43.54	23.59	32.21
积雪压实 Snow compacted	1.51	14.45	36.13	49.42	45.89	23.05	32.92
积雪加厚 Snow thickened	1.59	14.37	37.12	48.51	42.15	23.28	31.57

1.3 研究方法

在数据处理过程中, 采用统计分析软件 SPSS(2000)、MATLAB (2010b) 中的数据回归分析工具, 对不同积雪覆盖条件下 20 cm 土层处 1 号 TDR 中测定的含水量和土壤温度数据建立了回归模型, 将 2 号 TDR 和土壤温度记录仪测定的实际数据与冻融阶段水热耦合模型预测得出的结果进行对比, 并根据其耦合效果的相对误差, 判定其复杂程度的大小。同时, 利用连续小波变换与分形理论中的频谱指数 α 和分维值 D 对该土层土壤含水率和温度变异过程复杂性进行评价, 验证上述分析的准确性。根据定义要求, 连续小波变换与分形理论的表达式为^[18-21]:

$$W(a, b) = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$$\Gamma(a) \propto a^\alpha \quad (2)$$

$$\Gamma(a_j) = \sum_{b=1}^n \frac{[W(a_j, b)]^2}{n} \quad (3)$$

$$\lg[\Gamma(a_j)] = \alpha \lg a_j + c_0 \quad (4)$$

$$H = \begin{cases} \frac{\alpha+1}{2} & -1 < \alpha < 1 \\ \frac{\alpha-1}{2} & 1 < \alpha < 3 \end{cases} \quad (5)$$

$$D = 2 - H \quad (6)$$

式中: $W(a, b)$ 为小波变换系数; $\langle \cdot \rangle$ 为内积; $x(t)$ 为温度、含水率时间序列; $\psi_{a,b}(t)$ 为由 $\psi(t)$ 伸缩和平移而形成的子

小波; $\bar{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的共轭函数; $\Gamma(a)$ 为能量谱; H 为序列自相似指数; a 为尺度伸缩因子; b 为时间平移因子; α 为频谱指数; c_0 为常数; j 为最大分解次数。

利用分维估计的主要内容在于小波变换系数的求解和回归曲线的拟合, 其具体步骤如下:

1) 计算小波变换系数。选用 MATLAB 系统中 db4 小波函数, 利用式 (1) 对不同覆盖处理条件下的土壤含水率和温度时间序列进行分解, 得到不同尺度 a_j 的小波变换系数。

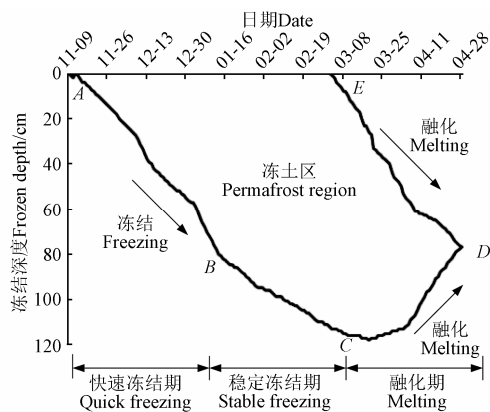
2) 利用式 (3) 计算尺度 a_j 下的小波变换能量谱 y_j , $y_j = \Gamma_x(a_j)$ 。

3) 建立 $\lg y_j$ 和 $\lg a_j$ 的回归方程, 采用最小二乘法拟合回归直线, 由式 (4) 可知, 直线的斜率即为频谱指数 α , 通过式 (5) ~ (6) 求得含水率和温度序列的分维值 D 。

2 结果与分析

2.1 冻融时期的划分

整个试验期(2013 年 11 月 8 日—2014 年 4 月 28 日)裸地处理区域土壤逐日冻结深度数据绘制成冻深变化过程曲线, 如图 1 所示。土壤从 11 月 8 日进入稳定的冻结阶段到次年的 4 月 28 日土壤融通, 土壤整个冻结期历时 170 d。在 3 月 1 日, 土壤冻深达到最大值, 且最大冻深为 118 cm。随后, 随着大气温度的回升以及土壤的热传导作用, 土壤的表层和深层同时出现融化现象, 整个冻土区域呈现出表层自上而下以及深层自下而上的“双向”融解状态。



注：A 为冻结点；B 为分界点；C 为最大冻深；D 为融通点；E 为融化点。
Note: A is freezing point; B is demarcation point; C is maximum frozen depth; D is accommodation point; E is melting point.
图 1 土壤冻深变化过程曲线

Fig.1 Frozen soil depth curve change process

冻结期，试验区 0~80 cm 冻深范围内的土壤冻结速率较快，A-B 的冻结速率为 1.23 cm/d，B-C 段的冻结速率为 0.58 cm/d，因此在时段划分过程中定义 A-B 段为快速冻

结期，B-C 段为稳定冻结期。在融化期，C-D-E 段呈现出双向融解的现象，融解速率为 2.18 cm/d。在土壤水热耦合效应的分析过程中，为了确保分析效果的精确度，分别从冻结阶段 A-B-C 和融化阶段 C-D-E 建立其回归模型。

2.2 不同积雪覆盖下土壤水分和温度耦合变化

土壤水分迁移主要受到土壤温度和土质的影响^[22]。根据取土试验，4 种不同处理地块的浅层土质均为黑色壤土。并由表 1 中显示的数据可知，土壤的干容重、机械组成、饱和含水率、田间持水量等物理指标差异较低，并且试验区未进行施肥处理，土壤的理化性质具有较强的均一性。因此，本文忽略土质对于土壤水分迁移的影响，着重研究土壤水热互作机理。

采用 20 cm 土层处 1 号 TDR 中测定的土壤含水率(液态)和温度数据建立的回归模型如表 2 所示，在冻结过程中，土壤含水率和温度之间的耦合模型能够用较统一的回归方程来表示，而融化阶段的 $\theta_v \sim T_s$ 耦合模型则采用不同形式的模型来表示，表明冻结阶段的土壤含水率和温度的变化趋势相对稳定，二者之间的互作效应受外界环境的影响作用较小，两参数之间的耦合效应明显。

表 2 不同积雪覆盖条件下土壤水分与温度回归分析
Table 2 Regression analysis of soil moisture and temperature under conditions of different snow cover

分类 Classification	处理方式 Treatments	建模 Model establishment			模型验证相对误差 Relative error of model validation/%
		土壤水分 θ_v 与温度 T_s 关系回归模型 Regression model between soil moisture θ_v and temperature T_s	决定系数 Determination coefficient R^2	平均误差 Average error/%	
冻结阶段 Freezing phase	裸地处理 Bare land	$\theta_v=8.39+28.45/(1+\exp(-T_s+2.94)/1.72)$	0.898	0.31	0.42
	自然降雪 Natural snow	$\theta_v=12.26+30.17/(1+\exp(-T_s+2.90)/0.95)$	0.927	0.27	0.31
	积雪压实 Snow compacted	$\theta_v=18.2+31.34/(1+\exp(-T_s-0.99)/1.52)$	0.946	0.15	0.13
	积雪加厚 Snow thickened	$\theta_v=18.9+35.29/(1+\exp(-T_s-0.94)/0.77)$	0.978	0.07	0.06
融化阶段 Melting phase	裸地处理 Bare land	$\theta_v=24.5\exp(-((T_s-10.43)/12.34)^2)$	0.904	0.35	0.47
	自然降雪 Natural snow	$\theta_v=-4.412\exp(-0.28 T_s)+20.58 \exp(0.015 T_s)$	0.843	0.73	0.81
	积雪压实 Snow compacted	$\theta_v=-0.006 T_s^3-0.055 T_s^2+1.57 T_s+19.06$	0.785	1.23	1.21
	积雪加厚 Snow thickened	$\theta_v=0.02 T_s^4-0.13 T_s^3-0.44 T_s^2+2.88 T_s+23.95$	0.739	2.78	2.73

在冻结阶段，不同积雪覆盖处理条件下的土壤含水率和温度之间的耦合效应也存在着一定的差异。由表 2 中建立的耦合模型可以得知，在裸地处理条件下，土壤水分率与温度之间的决定系数 R^2 为 0.898，积雪加厚处理条件下土壤水热之间的 R^2 达到 0.978，另外积雪压实和积雪加厚处理条件下的土壤含水率和温度之间的相关性相对于裸地处理也出现不同程度的增加现象。融化期阶段，环境温度的升高促使积雪不断的融化，融雪水大量的入渗，水分的扩散带动了热量的迁移，此时的土壤含水率与温度的耦合效应明显弱于冻结期。融化期裸地处理条件下二者之间的 R^2 变为 0.904，同时，自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下的土壤含水率和温度之间的决定系数均低于裸地处理条件，整体呈现出随着积雪厚度的增加和密度的增大，二者之间的耦合效应呈减弱的趋势。

统计不同积雪覆盖条件下 2 号测点的土壤含水率和温度数据，将土壤温度的观测值与使用 $\theta_v \sim T_s$ 耦合模型得出的温度预测值相对比，得出预测值的相对误差。分析结果可知：季节性冻土区，土壤含水率随着温度的升降而发生一定的变化，土壤冻结过程中，冻结锋面的迁移

为土壤水分的运动提供了驱动力。冻结期，土壤含水率随着温度的降低而呈现减小的趋势；融化期，土壤温度回升的同时促使含水率增加。另外，不同覆盖处理对于土壤水热耦合模型的预测效果也会产生不同的影响^[23]。

冻结期，对比 4 种不同覆盖处理条件下的预测效果可知，在裸地处理条件下，随着土壤温度的降低，其预测结果的差异越大，其预测值与实测值之间的相对误差为 0.42%，在自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件的相对误差分别相对于裸地处理有所降低，积雪覆盖条件下的预测效果要优于裸地处理。融化期，裸地处理条件下的相对误差为 0.47%，自然降雪处理条件下的相对误差为 0.81%，另外，随着积雪厚度的增加和密度的增大，积雪压实和积雪加厚处理条件下的土壤水热耦合模型的预测误差增强，具体表现为积雪加厚>积雪压实>自然降雪>裸地处理。

综上所述可知，冻结期，土壤温度和含水率受到冻结过程的影响，二者的变化呈现出较强的耦合效果，积雪的覆盖降低了外界不确定因素对于土壤含水率和温度变化规律的影响，导致土壤含水率和土壤温度互作效应

明显。融化期,随着积温的升高土壤温度逐渐回升,融雪水的下渗促使土壤含水率的增加,导致土壤水热的耦合效果降低,且随着积雪覆盖量的增加,其耦合及预测效果误差增大,水分和温度变化规律复杂性增强。

2.3 不同积雪覆盖下土壤水分和温度复杂性分析

2.3.1 土壤水分和温度的变异特征分析

在试验过程中,统计冻结初始(11月8日)至融化结束(4月28日)20 cm土层处的含水率和温度数据,绘制不同雪被覆盖条件下的土壤含水率、温度变化过程线。

分析图2a土壤温度变化过程线可知,在冻结过程中,不同积雪覆盖处理条件下的土壤温度出现不同程度的变化。其中,裸地处理条件下的土壤温度的变化幅度较为剧烈,温度变化范围为 $-13.3\sim 5.2^{\circ}\text{C}$,自然降雪区域的温度变化范围为 $-5.9\sim 5.3^{\circ}\text{C}$,积雪压实和积雪加厚处理条件下的温度变化范围分别为 $-3.6\sim 6.9^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.1\sim 3.8^{\circ}\text{C}$ 之间,温度的变化范围在逐渐的缩小。由表3中的统计数

据可知,裸地处理条件下的土壤温度序列温度标准差为5.82,积雪加厚处理条件下的温度序列标准差为1.89,自然降雪、积雪压实处理条件下的温度序列标准差相对于裸地处理都有所减小。由此可知,积雪覆盖条件下的温度变化波动性相对于裸地处理有所降低,并且随着积雪覆盖厚度的增加和密度的增大,温度序列的稳定性更强。而在融化过程中,各种覆盖处理条件下的土壤温度的变化范围趋于一致。由表3和图2a可知,4种处理条件下的平均温度保持在 $3.15\sim 4.45^{\circ}\text{C}$ 之间,对比温度的变化趋势可知,裸地处理条件的土壤温度随着环境温度的升高而平稳的提升,而积雪覆盖条件下的土壤温度受到融雪水下渗的影响,在变化过程中会出现骤升的现象,其变化规律相对复杂。同时,自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下的温度序列标准差分别相对于裸地处理条件下的标准差3.98出现不同程度的升高,变化幅度较为剧烈。

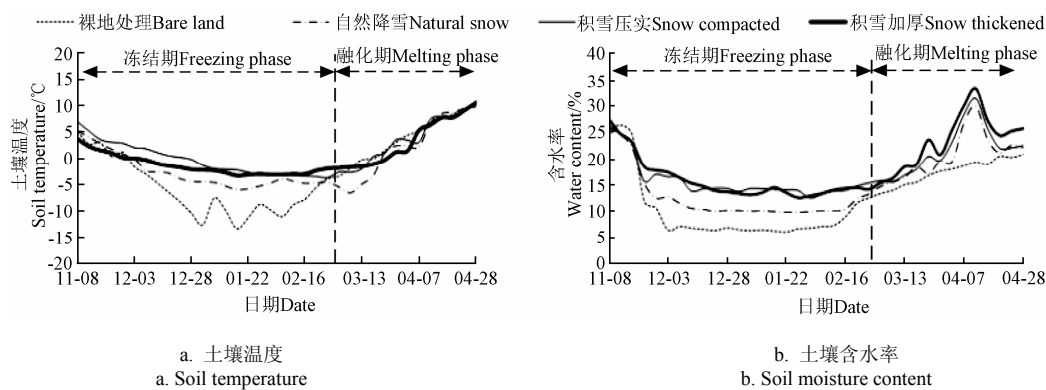


图2 不同雪被覆盖条件下土壤水分、温度变化过程

Fig.2 Soil moisture, temperature change process under the condition of different snow cover

表3 冻、融期土壤温度、含水率变异特征统计

Table 3 Characteristics statistics of soil temperature and moisture content variation on freezing and melting period

指标 Indicator	处理方式 Treatment	冻结阶段 Freezing phase				融化阶段 Melting phase			
		最大值 Maximum value	最大值 Maximum value	最大值 Maximum value	标准差 SD	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	均值 Average value	标准差 SD
土壤温度 Soil temperature/ $^{\circ}\text{C}$	裸地处理 Bare land	5.2	5.2	5.2	5.28	10.1	-1.7	4.45	3.98
	自然降雪 Natural snow	5.3	5.3	5.3	3.31	9.9	-6.5	3.15	4.75
	积雪压实 Snow compacted	6.9	6.9	6.9	3.04	10.7	-2.6	4.18	4.38
	积雪加厚 Snow thickened	3.8	3.8	3.8	1.89	10.5	-1.4	3.85	4.42
土壤含水率 Soil moisture/%	裸地处理 Bare land	26.54	6.03	11.56	6.34	21.00	14.03	18.08	2.27
	自然降雪 Natural snow	26.37	9.83	13.01	4.77	29.86	15.55	21.06	4.23
	积雪压实 Snow compacted	25.83	12.54	15.89	3.54	31.46	15.66	22.22	4.61
	积雪加厚 Snow thickened	27.76	12.63	16.03	3.34	33.27	16.36	23.78	5.18

由图2b可知,冻结期,土壤含水率大幅度地减少。其中,裸地处理条件下的土壤含水率变化较为剧烈,在稳定冻结期,其含水率的最小值为6.03%,而自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下的土壤含水率最小值分别相对于裸地处理增加3.8%、6.51%和6.6%,而4种处理条件下的土壤初始含水率基本相同,由此可知,随着积雪覆盖厚度的增加和密度的增大,土壤含水率的变幅逐渐减小。另外,裸地处理条件下的含水率序列标准差为6.34,自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下的标准差相对于裸地处理依次呈现降低的趋势。

融化期,分析图2b和表3中的数据可知,雪被覆盖条件下,土壤含水率随着环境温度的提升会出现骤升升高的现象,由于积雪覆盖量的不同,含水率的变化也存在一定的差异。其中,自然降雪处理条件下土壤含水率变化差值 $\Delta\theta_v$ 为14.31%,积雪压实和积雪加厚处理条件下的土壤含水率差值 $\Delta\theta_v$ 分别为15.90%和16.91%,同时,融雪水不断的下渗,土壤含水率呈现出较强的波动性,并且该波动性的随机性较强。通过分析含水率时间序列的标准差可知,裸地处理条件下的含水率序列标准差为2.27,随着积雪覆盖量的增加,积雪加厚处理条件

下的标准差增至 4.88，表明土壤含水率在升高的同时，序列的差异性也在增大。

经过上述分析可知，在土壤冻结过程中，由于积雪的大热容量性和强反射性，其阻碍了外界环境温度、水汽压、环境净辐射等因素对于土壤的影响。因此，土壤温度和含水率会随着积雪覆盖厚度和密度的增加，其变化过程的差异性逐渐减弱，具体差异性表现为裸地处理>自然降雪>积雪压实>积雪加厚。而融化过程则与之相反，

融雪水的入渗影响了土壤温度的回升，导致土壤含水率和温度的变化规律受到干扰，并且随着雪被覆盖量的增加，干扰性逐渐的增强，复杂程度逐渐的加剧。

2.3.2 土壤水分和温度的分维统计

在统计分析的基础之上，通过前述的基于小波变换的分形理论对土壤冻融期的含水率和温度进行分维估计，以此来判定各序列的复杂程度的高低，计算结果见表 4。

表 4 土壤温度、含水率序列的分维值
Table 4 Fractal dimensions of soil temperature and moisture content series

指标 Indicator	处理 Treatment	冻结期 Freezing phase			融化期 Melting phase		
		分维数 Fractal dimension <i>D</i>	决定系数 Decision coefficient <i>R</i> ²	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	分维数 Fractal dimension <i>D</i>	决定系数 Decision coefficient <i>R</i> ²	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
土壤温度 Soil temperature	裸地处理 Bare land	1.6019	0.9895	0.0141	1.4621	0.9988	0.0039
	自然降雪 Natural snow	1.4620	0.9962	0.0031	1.5394	0.9966	0.0133
	积雪压实 Snow compacted	1.4160	0.9989	0.0023	1.5610	0.9925	0.0123
	积雪加厚 Snow thickened	1.4149	0.9989	0.0019	1.5775	0.9969	0.0131
土壤含水率 Soil moisture	裸地处理 Bare land	1.5973	0.9900	0.0074	1.5470	0.9964	0.0109
	自然降雪 Natural snow	1.5634	0.9877	0.0045	1.5919	0.9923	0.0128
	积雪压实 Snow compacted	1.5568	0.9929	0.0052	1.6001	0.9920	0.0133
	积雪加厚 Snow thickened	1.5047	0.9926	0.0025	1.6607	0.9905	0.0199

分析表 4 所示的结果，各组序列之间的决定系数 *R*² 均大于 0.95，并且显著性检验 *P*<0.05，变量之间关联度较高。在土壤冻结阶段，裸地处理条件下土壤温度的序列分维数为 1.6019，而积雪加厚处理条件下的温度序列分维数则降为 1.4149，温度序列的复杂性排序为：裸地处理>自然降雪>积雪压实>积雪加厚处理。融化阶段，不同处理条件下的土壤温度序列复杂性同样会体现出一定的差异，其中裸地处理条件下的温度序列复杂程度相对较低，其分维数为 1.4621，在 3 种积雪覆盖条件下，分维数分别相对于裸地处理有所提高，积雪加厚处理条件下的分维数最大，表明其复杂程度最为明显。

土壤冻结阶段，由分维小波估计对土壤含水率序列处理得到结果如下，裸地处理条件下的序列分维数为 1.5973，而积雪加厚处理条件下的序列分维数为 1.5047，自然降雪、积雪压实处理条件下的序列分维数介于裸地和积雪加厚处理之间，并且随着积雪覆盖量的增加，序列复杂程度降低。而在融化阶段，与上述温度状况相同，积雪覆盖处理条件下的土壤含水率变化过程复杂度呈现出升高的趋势，具体表现为积雪加厚>积雪压实>自然降雪>裸地处理。结果表明：土壤含水率和温度的分维处理所得结果与上述水热耦合效应研究以及序列差异性分析保持一致，进一步从理论上验证了不同积雪覆盖条件下土壤水分复杂度的差异关系。

综上所述，结合基于连续小波变化与分形理论的方法对于不同时期土壤含水率和温度的复杂性

评价结果可知，在冻结时期，由于积雪的覆盖阻碍了土壤含水率、温度与环境之间的能量交换，减小了含水率和温度的变化幅度，二者之间的相互作用受外界环境的影响较低，因此，土壤含水率和温度在积雪覆盖条件的耦合效果要优于裸地处理条件。同时，随着积雪覆

盖厚度的增加和密度的增大，土壤水热的复杂性呈现依次减弱现象；在融化阶段，积雪的融化导致大量的融雪水入渗，由于水的比热容大于土壤，土壤含水率的增加影响了土壤温度的提升，二者之间的耦合效应受到严重的影响，随着积雪覆盖量的增加，二者的复杂性均表现为增强效应。

3 结论与讨论

1) 土壤的温度能够影响土壤含水率的变化幅度和趋势，二者在不受外界环境影响的条件下具有良好的互作关系。冻结阶段，积雪作为一种多孔介质，阻碍了气象因素对于土壤水热迁移状况的干扰。积雪覆盖处理条件下的土壤水热耦合效果优于裸地处理条件，其中，裸地处理条件下的相对误差为 0.42%，积雪加厚条件下的误差为 0.06%，随着积雪覆盖量的增大，土壤含水率和温度的预测值与实际值之间的误差降低。融化阶段，积雪覆盖条件下的土壤含水率大幅度提升，温度变化的规律性减弱，二者耦合效应减弱，积雪加厚处理条件的相对误差为 2.73%，相对于裸地处理的误差 0.47%明显增加，土壤水热变异的复杂性增强。

2) 冻结阶段，积雪的存在有效的降低了土壤水热变化的波动性，保持了土壤温度和含水率的稳定性。裸地处理条件下的土壤温差 ΔT 为 18.5℃，自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下的土壤温度的变化范围分别为 -5.9~5.3、-3.6~6.9 和 -3.1~3.8℃，稳定性逐步提升。同时，随着积雪覆盖量的增加，含水率序列的标准差呈减弱趋势，自然降雪、积雪压实和积雪加厚相对于裸地处理条件的标准差 6.34 均有不同程度的降低。在融化阶段，随着积雪覆盖量的增加，土壤的含水率和温度波动性增加，并且差异性增强。

3) 基于连续小波变换的土壤含水率与温度序列的分维估计方法稳定、结果可靠, 从理论上验证了冻融期不同积雪覆盖处理条下土壤水热变化的复杂性。表明季节性冻土区, 积雪对于土壤水热动态变化具有“双重效应”, 即冻结阶段, 积雪覆盖条件下土壤含水率和温度序列的分维数降低, 水热复杂性程度较低; 融化阶段, 融雪水的大量补给影响了土壤水热迁移规律变化, 时间序列的复杂程度增加。

本文在研究过程中仅考虑了积雪覆盖对于土壤水热交互效应的影响, 在今后的研究中要综合考虑秸秆、草皮、砂砾等覆盖物对于土壤水热空间变异过程的作用效果。另外, 在土壤水热复杂性评价方法中, 尝试使用近似熵理论、符号动力学理论等方法, 分析不同理论对土壤水热复杂特征评价的差异, 进而确定不同理论评价土壤水热复杂特征的适应性。

参考文献

- [1] 樊贵盛, 郑秀清, 贾宏骥. 季节性冻融土壤的冻融特点和减渗特性的研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 24—32.
Fan Guisheng, Zheng Xiuqing, Jia Hongji. Experimental study on the freezing and thawing features and reduction infiltration characteristics of seasonal freezing and thawing soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 24—32. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈军锋, 郑秀清, 邢述彦, 等. 地表覆膜对季节性冻融土壤入渗规律的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 18—21.
Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Xing Shuyan, et al. Influence of plastic film mulching on infiltration into seasonal freezing-thawing soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(7): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈军锋, 郑秀清, 秦作栋. 冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 102—112.
Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Qin Zuodong. Effects of maize straw mulch on spatiotemporal variation of soil profile moisture and temperature during freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 102—110. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李瑞平, 史海滨, 付小军, 等. 干旱寒冷地区冻融期土壤水分和盐分的时空变异分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 86—90.
Li Ruiping, Shi Haibin, Fu Xiaojun, et al. Temporal and spatial variation analysis of freezing thawing soil moisture and salinity on arid and cold region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 86—90. (in Chinese with English abstract)
- [5] 严晓瑜, 赵春雨, 缙晓辉, 等. 东北林区积雪空间分布与变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 154—162.
Yan Xiaoyu, Zhao Chunyu, Guo Xiaohui, et al. Spatial distributions and variations of the snow cover in the forests of North-east China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 154—162. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡铭, 刘志辉, 陈凯, 等. 雪盖影响下季节性冻土消融期的土壤温度特征分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 39—43.
Hu Ming, Liu Zhihui, Chen Kai, et al. Characteristics of soil temperature analysis under the influence of snow cover in the ablation period of seasonal frozen soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 39—43. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李栋梁, 王春学. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展[J]. 大气科学学报, 2011, 34(5): 627—636.
Li Dongliang, Wang Chunxue. Research progress of snow cover and its influence on China climate[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(5): 627—636. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hardy J P, Uroflman 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.
- [9] Kang Shaozhong, Zhang Lu, Liang Yinli, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Manaement, 2002, 55(3): 203—216.
- [10] 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 青藏高原多年冻土区植被覆盖度变化对活动层水热过程的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 89—95.
Liu Guangsheng, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. Influence of vegetation coverage on water and heat processes of the active layer in permafrost regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 89—96. (in Chinese with English abstract)
- [11] 屈忠义, 陈亚新, 杨靖宇. 人工神经网络在冻土水盐空间变异与条件模拟中的应用比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 48—53.
Qu Zhongyi, Chen Yaxin, Yang Jingyu. Application and canparison research of artificial neural network on conditional sinulation and space variability of water-salt for frozen earth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(7): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王子龙, 付强, 姜秋香, 等. 季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2010, 30(5): 772—776.
Wang Zilong, Fu Qiang, Jiang Qiuxiang, et al. Spatial variability of soil moisture profile in seasonal frozen soil region in different stages[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(5): 772—776. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 雷志栋, 尚松浩, 杨诗秀, 等. 地下水浅埋条件下越冬期土壤水热迁移的数值模拟[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 51—54.
Lei Zhidong, Shang Songhao, Yang Shixiu, et al. Numerical simulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under shallow ground water table in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 51—54. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张小磊, 周志民, 刘继亮. 季节性积雪消融对浅层土壤热状况的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 91—95.
Zhang Xiaolei, Zhou Zhimin, Liu Jiliang. Melting of seasonal snow cover and its influence on soil temperature conditions of shallow layer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 91—95. (in Chinese with English abstract)
- [16] Sharratt B S, Benoit G R, Voorhees W B. Winter soil microclimate altered by corn residue management in the northern Corn Belt of the USA[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 49(3): 243—248.
- [17] Kane D L, Hinkel K M, Goering D J, et al. Non-conductive heat transfer associated with frozen soils[J]. Global and Planetary Change, 2001, 29(3): 275—292.
- [18] 刘东, 张健, 付强. 基于连续小波变换与分形理论的三江平原井灌区地下水埋深序列复杂性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 116—120.
Liu Dong, Zhang Jian, Fu Qiang. Study on complexity of groundwater depth series in well irrigation area of sanjiang plain based on continuous wavelet transform and fractal theory[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 116—120. (in Chinese with English abstract)

- [19] 王立权. 雪被-农田土壤复合系统复杂性分析及水热互作效应研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
Wang Liquan. Study on the Complexity of Snow-Soil Composite System and Relationship between Soil Water and Heat[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张娜, 姚荣. 基于分形理论的区域降雨时间序列特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(5): 53—55.
Zhang Na, Yao Rong. Time series characteristic analysis of regional rainfall based on fractal theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(5): 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘路广, 崔远来, 吴瑕. 基于分形理论的地下水位时间序列特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 16—20.
Liu Guanglu, Cui Yuanlai, Wu Xia. Time-series characteristic analysis of groundwater level based on fractal theory[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王璐璐, 陈晓飞, 马巍, 等. 不同土壤冻融特征曲线的试验研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 1004—1011.
Wang Lulu, Chen Xiaofei, Ma Wei, et al. Experimental study of the freezing and thawing characteristic curves of different soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 1004—1011. (in Chinese with English abstract)
- [23] 付强, 马梓昇, 李天霄, 等. 北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 152—159.
Fu Qiang, Ma Ziao, Li Tianxiao, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 152—159. (in Chinese with English abstract)

Soil moisture thermal interaction effects under snow cover during freezing and thawing period

Fu Qiang, Hou Renjie, Wang Zilong, Li Tianxiao

(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Seasonal frozen soils accounts for 54% of Chinese total acreage, mostly distributed in Northeast China where snowing is frequent. Soil moisture under snow cover may interact with temperature, both affecting many processes of biogeochemistry. However, few studies have focused on soil moisture and temperature interaction under snow covers. Therefore, this study investigated the soil moisture and temperature characteristics under seasonal frozen soils in field experiments. The experiment was set up in an experiment field of Northeast Agricultural University, Harbin, China. It was located in south Songnen Plain. During November 8 of 2013-April 28, 2014, four treatments were designed including bare land, natural snow cover land, snow compacted land, and snow thickened land. Each treatment was repeated three times. In bare land, snow was removed by hand. In snow compacted land, snow density was manually increased to 0.256 g/cm^3 . In the snow thickened land, snow depth was increased but snow density was similar with natural snow cover land. During the experiment, soil temperature was measured by thermometers at 5, 10, 15 and 20 cm soil depth, and soil moisture was measured by time domain reflectometry at same depth. Soil moisture data were divided into two parts: one for model establishment and the other for model validation. Relationship between soil moisture and temperature was described by exponential models. Fractal dimensions were used to evaluate complexity of soil moisture and temperature. The results showed that: 1) The whole experiment duration could be divided into rapid freezing stage, stable freezing stage, and melting stage; On March 1, the freezing depth reached the highest value of 118 cm; 2) Soil moisture and temperature could be well described by exponential models with determination coefficient about 0.9 and relative errors less than 5% for the model establishment and relative error less than 3% for the model validation; 3) The complexity of soil moisture and temperature interaction was simpler during freezing phase than the melting phase since the relative errors of the former were less than that of the latter; The relative errors decreased with increasing snow density and thickness during the freezing phase, but the contrast was observed during the melting phase, indicating the interaction of soil temperature and moisture is greatly affected by freezing-thawing process; 3) During melting stage, soil moisture was 14.31%, 15.9%, and 16.91% for natural snow, snow compacted, and snow thickened treatments, respectively, and soil temperature ranged -5.9 – -5.3 , -3.6 – -6.9 and -3.1 – -3.8°C for natural snow, snow compacted, and snow thickened treatments, respectively, and the interaction between soil moisture and temperature weakened; The complexity of soil temperature and moisture interaction increased with snow cover; and 4) The fractal dimension of soil temperature under different treatments lied between 1.4149–1.6019 during the freezing phase and 1.4621–1.5775 during the melting phase, revealing a downward trend with snow thickness and compactness during the freezing phase but an opposite trend during the melting phase; The fractal dimension of soil moisture ranged from 1.5047 to 1.5973 and from 1.547 to 1.6607 during the freezing and melting phases, respectively, with a similar trend with soil temperature changes among different snow cover treatments. The results are helpful in predicting soil temperature and moisture in sowing stage, and revealing soil moisture and temperature dynamics.

Key words: fractals; snow; soils; freezing and thawing period; complexity; moisture thermal interaction effects