

# 土壤冻结期湿度特征研究及其表层模拟

张波<sup>1,2</sup>, 刘志辉<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 干旱生态环境研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 利用 EM<sub>50</sub> 数据采集系统, 在新疆天山北坡呼图壁县军塘湖流域采集冻结期和融雪期土壤湿度、土壤温度数据, 利用 SPSS 19.0, Excel, Surfer 8 等软件处理采集到的数据, 并对其进行分析、制图。另外利用表层土壤温度模拟土壤湿度变化。结果表明, 土壤湿度存在垂直分布规律: 冻结期, 在土壤层的 10, 32, 48 cm 处存在极小值; 冻结期, 土壤湿度日变化较小, 融雪期, 土壤湿度有显著变化, 17:00—19:00 时达到土壤湿度变化的峰值; 利用表层土壤温度可以很好地模拟土壤湿度, 在温度上升和下降阶段均有较好的模拟效果。

**关键词:** 冻结期; 军塘湖流域; 土壤湿度; 土壤温度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0247-05

中图分类号: S157

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.049

## Characteristics of Soil Moisture and Its Simulation in Surface Soil Layer in Freezing Period

ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-hui<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology of the Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 4. International Center for Desert Affairs—Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

**Abstract:** By Using EM<sub>50</sub> data collection system, soil moisture and temperature in the Juntanghu watershed situated on the northern slope of Tianshan Mountains, Hutubi County, Xinjiang Autonomous Region. The software, such as SPSS 19.0, Excel and surfer 8, was used to process the collected data. Meanwhile, change of surface soil moisture was simulated by soil temperature. The results indicated that there was a vertical distribution of soil moisture. In the freezing period, the minimum soil moisture was observed at the depths of 10, 32, and 48 cm; in the freezing period, the daily change of soil moisture was relatively little; and in the snowmelt period, the change was obvious, reaching a peak value at 17 to 19 o'clock. The temperature of surface soil layer is able to simulate the soil moisture very well and the simulation has a better result both in temperature-rise and temperature-fall periods.

**Keywords:** freezing period; Juntanghu Basin; soil moisture; soil temperature

冻土是指温度在 0 °C 以下, 且含有冰的土体<sup>[1]</sup>, 在积雪期间, 土壤湿度是影响陆面水文过程的众多因素中比较难以测定的量<sup>[2]</sup>, 同时土壤湿度的变化对于气候变化也有一定的影响<sup>[3-5]</sup>。目前众多的研究比较侧重于土壤未冻期和融雪期, 包括了土壤的蒸发研究<sup>[6]</sup>, 土壤湿度与地温、气温和植被覆盖的关系<sup>[7-10]</sup>, 还有一些学者通过模拟的方式来研究土壤水分变化<sup>[11]</sup>, 以期研究土壤层的水热运移。土壤冻结期, 由

于土壤温度比较低, 雪层的温度也比较低, 土壤层获得来自上层的能量较少, 而研究此时的土壤湿度变化, 将从另一个侧面反映土壤层在冻结期间的水热变化情况, 也可为融雪期提供冻结期间土壤层的热量累积情况, 更方便确定融雪期土壤湿度的初始值。

本文选择新疆天山北坡军塘湖河流域为典型研究区, 通过对土壤湿度近 4 个月的观测获得了比较详实的土壤湿度(未冻水含量)和土壤温度数据。利用

收稿日期: 2013-06-15

修回日期: 2013-06-29

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“天山北坡典型流域积雪—冻土水热耦合中融水产汇流机制研究”(41171023)和水利部公益性行业科研专项经费项目“内陆干旱区最严格水资源管理”(201301103)

作者简介: 张波(1987—), 男(汉族), 河南省信阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: bozhang\_1988@163.com。

通信作者: 刘志辉(1957—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区石河子市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源、资源环境与空间决策支持、GIS 等研究。E-mail: lzh@xju.edu.cn。

这些数据进行相关性分析和回归分析,并建立回归模型,利用土壤温度来模拟表层土壤湿度,并取得较好的模拟效果。

## 1 试验与数据

### 1.1 试验区概况

试验选择天山北坡呼图壁县境内的军塘湖河流域一个封闭小流域( $43^{\circ}54'N, 86^{\circ}29'E$ )作为典型试验场。军塘湖河是天山西段呼图壁县境内的一条小河,发源于天山北坡的特尔斯盖南缘三道马场以西的特力斯喀达坂,河网在低山带的玛札尔汇合,流经呼图壁西部的前山丘陵后进入平原。试验场所在区域为整个山脊线所围成的封闭区域,整个汇流区域正好是实验场的边界线所围成的面积,可以较好地反映整个大流域的情况。流域平均海拔 1 503 m,试验场所在区海拔高度为 1 200 m,河水经出山口的拦河水库(红山水库)拦蓄,从源头至红山水库河长 47 km,水库以上集水面积 861 km<sup>2</sup>。具有明显的干旱区河流水文特征。

### 1.2 试验设计

数据采集时间为 2012 年 11 月至 2013 年 3 月 16 日,历经冬季积雪期和春季的融雪期,数据采集仪器为 EM<sub>50</sub> 数据采集系统,可采集数据为土壤湿度、土壤温度和土壤电导率 3 组数据,仪器传感器将感应信号转化为电压信号,通过其自身携带的转换程序将电信号分别转化为温度数据、土壤湿度数据和电导率数据。电压输入为 0~3 000 mv,所得结果的精度分别为温度为 0.000 1 °C,土壤湿度为 0.001%,电导率为 0.01 ms/cm。

试验区的土壤特性相对较稳定,2008—2012 年的研究结果显示,此地土壤特性与所采集的土壤特性数据几乎一致<sup>[8,10]</sup>,这也说明此区域土壤的时空变异性不强。在土壤冻结期,影响土壤性质差异的主要因素为土壤含水量和温度。因此,在冻结期,由于土壤温度和含水量不同,土壤层会表现出一定差异的物理特性。

本次试验选择试验场坡度较为平缓的区域将 2 套 EM<sub>50</sub> 采集器串联使用(即每套的 5 个探头从上而下依次插入),埋设深度从地表往下依次为 5,10,15,20,25,30,40,50,60 及 70 cm 共为 10 层。其中冬季积雪期为 30 min 采集一次数据,到春季融雪期中,数据采集步长为 10 min。

### 1.3 数据处理与利用

将数据进行初步整理,其中温度数据保留到 0.000 1 °C,土壤湿度保留到 0.001%。采用 Excel, SPSS 19.0, Surfer 8 等数据统计及地统计软件对采

集到的数据进行统计分析、相关性和回归分析,并利用分析结果制作相关的图和表,利用所得结果分析土壤湿度变化规律,并对土壤冻结期的土壤湿度进行建模模拟,并利用 2013 年 3 月初采集到的数据对模型进行检验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤湿度变化特征

2.1.1 土壤湿度垂直分布特征和时间变化规律 在土壤冻结期,土壤湿度的初始值与土壤冻结前的含水率有很大关系。在研究过程中,以仪器初始采集的湿度、温度数据为初始值,待一段时间后,数值变化基本稳定呈现某种规律时,将此时的数据作为初始状态值。土壤表层温湿度至 2012 年 11 月 22 日基本呈现稳定,采用 11 月 22 日的平均土壤温度和平均土壤湿度作为初始值。图 1 分别取每日土壤湿度平均值,利用 Surfer 8 制作成等值线图。从图 1 可以看出土壤湿度的垂直分布和时间分布特征。在土壤冻结期,随着深度的加深,土壤湿度会呈现出减少—增加—减少—增加的波浪式变化趋势。图 1 中也显示在地表以下 10,32 和 48 cm 附近会出现 3 个极小值,这种趋势从仪器初始放入一直到 2013 年 2 月结束都存在。

在 10 cm 处出现极小值是因为 10 cm 处不仅受到来自上层土壤水分的影响还受温度的影响<sup>[12-13]</sup>,这种现象与冻结期开始的时候土壤层的初始含水率有较大关系,因为实验区在降雪之前土壤水分补给较少,在上层土壤水源不足的情况下,上层土壤的蒸发是由下层土壤补给的,因此,10 cm 土层的自由水要补充地表,进行蒸发。在冻结期,土壤层会有极少量的水分进入土壤层,但是由于土壤处于冻结状态,水会停留在表层;从 10 cm 往下,由于土壤温度不断升高,土壤中冻结的水量减少,会呈现增加的趋势。因此,在 10 cm 土层附近既要向上输送水分,又无水源补给,因而,该处的土壤湿度会低于其上部和下部。

从整个冻结期土壤温度数据来看,土壤冻结期的最大冻深小于 30 cm。从 30 cm 往下,由于土壤温度为正温,土壤湿度变化与土壤初始湿度关系密切。因此,在 32 和 48 cm 处出现的极小值与土壤质地有较大关系。并且,冻结期 30 cm 以下土壤层并没有冻结,与实验研究的内容关系不大,因此,在这里不做详细探讨。

2.1.2 土壤湿度日变化特征 在积雪区域,土壤湿度受土壤温度、积雪消融、土壤质地影响较大。

在冻结期间,一日之内受影响较大的只有土壤温度和积雪消融。图 2 所显示的是 2013 年 1 月 8 日冻结期间和 3 月 11 日融雪期全天的土壤湿度和温度分布情况。

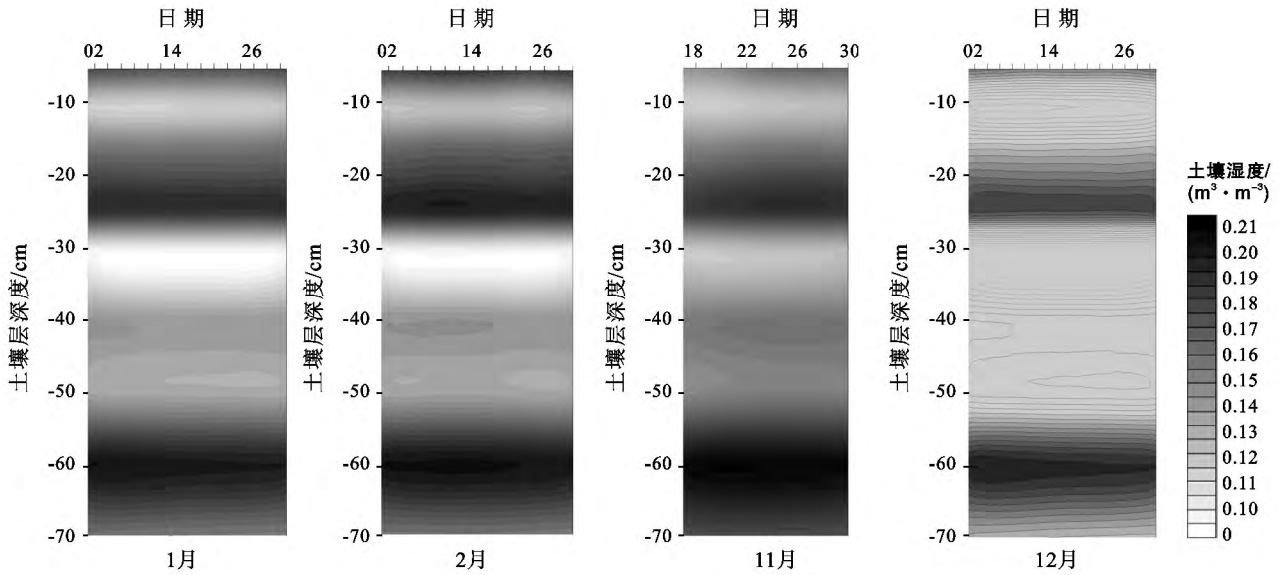


图 1 土壤湿度的垂直分布特征

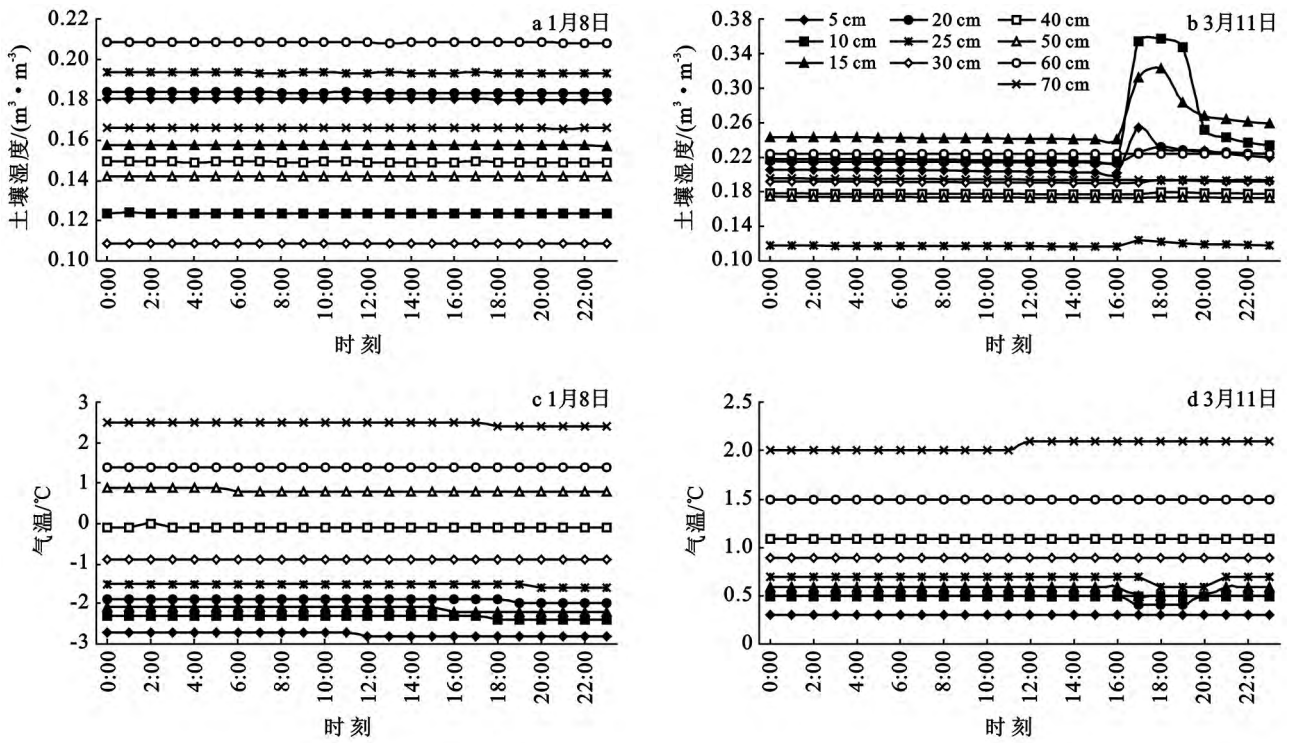


图 2 冻结期和融雪期全天土壤湿度和气温变化

其中图 2a 和图 2b 为湿度变化,图 2c, 2d 为土壤温度变化。从图 2a 中可以明显看出,土壤冻结期间,土壤湿度在同一深度下基本上全天没有变化,停留在某一值附近,这也从另一个侧面反映出了图 1 所出现的情况,在土壤冻结期,土壤湿度并不是随着深度的变化而发生规律性的变化的。

图 2a 是融雪期土壤层 5—70 cm 土壤湿度的变化,融雪期由于积雪消融,有部分融雪水在重力作用下发生下渗,融雪水进入到土壤中使得土壤湿度增加;同时由于地温上升,使得下层冻结的土壤开始融

化,这是土壤湿度增加的第 2 个原因。图 2 中也反映出来,在 17:00—19:00,土壤湿度会出现峰值,之后会随之下降并最终停留在某一值附近,这一点与杨绍富等<sup>[8]</sup>2006 年的研究成果相吻合。

土壤湿度的日变化在冻结期并不明显,这一点与赵逸舟等<sup>[14]</sup>研究所得到的结果一致。但是在融雪期变化特别明显,结合图 2a, 2b 也可知道,融雪期土壤温度较高,湿度变化主要与融雪水的下渗关系密切,同时,每层呈现出不同的变化趋势,也说明融雪水下渗影响的土壤深度和影响程度,同时,融雪期土壤湿

度与各层所处的位置和土壤质地也有关系。因此,对于融雪期土壤湿度变化的影响是多因素的,研究其变化趋势比较困难。

从获取的土壤温湿度数据来看,在整个冻结期,土壤层的最大冻土深度约为 30 cm,但是随着冻结期向融冻期过渡,冻结层面不断向上移动。因此,在整个冻结期间,只有在地表附近的土壤层是一直处于冻结状态的,因而,在研究冻结状态下的土壤温湿度的关系,只能选择土壤表层约 5 cm 处的数据进行分析。

### 2.2 土壤表层湿度与土壤温度相关性分析

在冻结期,土壤湿度变化幅度较小,在这期间没有积雪消融,相反由于上覆积雪的作用,对土壤层起到一定的保温作用,此时对于土壤湿度变化影响最大的为土壤温度。在此期间,土壤湿度的增减与土壤中冻结水的增减关系密切。

图 3 为整个冻结期间土壤表层湿度逐日变化趋势。此期间表层土壤湿度变化幅度在小范围内波动明显,变化幅度范围为 3%~8%。

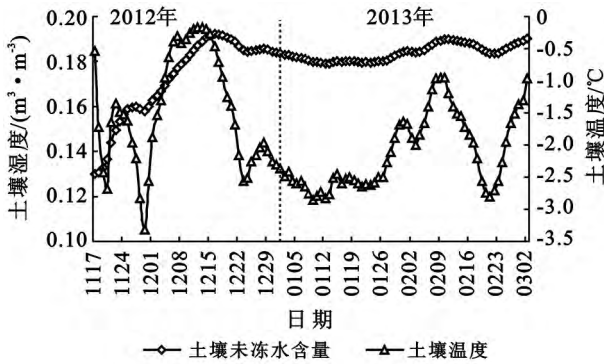


图 3 土壤表层湿度与温度逐日变化

表 1 是对整个冻结期(2012 年 11 月 17 日至 2013 年 2 月 28 日)的 5 cm 处的表层土壤湿度和土壤温度做相关性分析所得的结果。其中用于分析的数据量是选取连续观测期的土壤温度和土壤湿度的平均值。

表 1 显示二者的相关性不显著。这主要是在冻结期,同时存在土壤温度上升和下降的过程,说明了土壤湿度在土壤温度上升和下降的过程中所遵循的规律并不是一样的,两个过程并不能简单地认为是一个可逆的过程。

表 1 冻结期土壤湿度与土壤温度相关分析

数据量	$p=0.01$ 临界值	相关系数	相关性
60 组	0.324 8	0.156 6	不显著

因此,分别对冻结期土壤温度连续上升阶段(2013 年 1 月 12 日至 2013 年 2 月 9 日)和连续下降阶段(2012 年 12 月 14 日至 2013 年 1 月 12 日)做相关性分析,结果如表 2 所示。选取这两个时期是因为,仪器安装的时间为 11 月份,仪器仍处在适应周围环境的时期,土壤温度的升降趋势不明确,因此,选取变化趋势相对稳定的时间段进行分析。从得到的结果可知,在冻结期表层土壤湿度和土壤温度呈现出极显著相关性。通过二者这种显著的相关性可以利用二者数据进行定量化分析,利用冻结期土壤表层温度对土壤湿度变化进行建模模拟。

表 2 冻结期不同阶段土温与土壤湿度相关性分析

类别	样本数量	$p=0.001$	相关系数
降温阶段	30	0.554 1	0.934 1***
升温阶段	29	0.554 1	0.985 7***

注:\*\*\*表示在  $p=0.001$  水平下相关显著。下同。

### 2.3 模拟模型建立与讨论

分别利用冻结期土壤表层温度上升阶段(2013 年 1 月 12 日至 2013 年 2 月 9 日)的 29 组数据和下降阶段(2012 年 12 月 14 日至 2013 年 1 月 12 日)的 30 组数据,建立基于土壤温度的湿度回归方程,分别进行线性、二次多项式和指数回归模拟(表 3)。从模拟结果看,所有的回归方程都呈现出显著正相关关系,且从其确定性系数上看,模拟的效果似乎都很好,并且对其开方后所得的值差别并不大,因此,需要对 3 种回归方式所得到的方程都进行检验。

### 2.4 模型检验

对于所建立的模拟模型进行模拟值与实测值的检验,分别用冻结期另外的升温阶段(2 月 24 日至 3 月 2 日)和降温阶段(2 月 10 日至 2 月 21 日)对结果进行检验。这段时间内的升温阶段和降温阶段,在时间上比较连续,并且仪器在这一时间段内相对稳定。利用这两个时间段内的数据分别计算所得模型预测值和模拟值的平均相对误差、均方根误差( $\sigma$ )、模拟值与真实值拟合斜率及拟合相关系数(表 4)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{(d_1^2 + \dots + d_i^2 + \dots + d_n^2)}{n-1}}$$

式中: $\sigma$ ——均方根误差; $d_i$ ——一组测量值与平均值的偏差。

对照表 3 和表 4 可得出,即使拟合方程的确定性系数高也不一定能说明模拟的效果好,升温阶段的二次多项式模拟确定性系数最高,但是其模拟效果却远不如线性模拟和指数模拟。从表 4 中也可以看出,在升温阶段线性和指数回归模拟的精度很类似,并且拟

合相关系数较二次多项式高,但是线性方程与指数回归方程相比较,线性方程的斜率更接近 1,平均相对误差和均方根误差也稍微小一些,因此,在升温阶段选用

线性回归模拟方程进行回归模拟的精度要更高一些。其拟合相关系数为 0.981 2,斜率为 1.168 0,模拟值模拟真实值的模拟精度为 85.6%(1/1.168)。

表 3 冻结期表层土壤湿度的回归模拟方程

模拟阶段	连续时间段	回归方程	确定性系数 $R^2$
升温阶段	20130112—20130209	$W=0.0048T+0.1949$	0.8726***
		$W=-0.0022T^2-0.0022T+0.1911$	0.9574***
		$W=0.195e^{0.0259T}$	0.8682***
降温阶段	20121214—20130112	$W=0.0054T+0.1938$	0.9716***
		$W=0.0006T^2+0.0079T+0.196$	0.9750***
		$W=0.1941e^{0.0297T}$	0.9723***

注:W 表示表层土壤湿度; T 为土壤摄氏温度。下同。

表 4 模拟模型检验的误差

模拟阶段	拟合方程	平均相对误差 $\delta$	均方根误差	拟合相关系数	真实值与模拟值拟合斜率
升温阶段	$W=0.0048T+0.1949$	0.00240	0.00272	0.9812	1.1680
	$W=-0.0022T^2-0.0022T+0.1911$	0.00305	0.00350	0.9145	1.4495
	$W=0.195e^{0.0259T}$	0.00241	0.00273	0.9826	1.1714
降温阶段	$W=0.0054T+0.1938$	0.00229	0.00254	0.9876	1.3269
	$W=0.0006T^2+0.0079T+0.196$	0.00234	0.00278	0.9800	1.3317
	$W=0.1941e^{0.0297T}$	0.00237	0.00281	0.9875	1.3504

注: $\delta=\Delta/L\times 100\%$ ;  $\delta$  为平均相对误差;  $\Delta$  为绝对误差; L 为真值。在模拟效果评价中,斜率值越接近于 1,模拟效果越好。

在降温阶段,同样存在和升温阶段的情况,线性回归方程不论是在拟合相关系数、平均相对误差、均方根误差及真实值与模拟值拟合斜率均要好于多项式回归和指数回归。因此,降温阶段同样也选用线性回归方程进行模拟,其模拟值与真实值的拟合相关系数为 0.987 6,二者拟合的斜率为 1.326 9,那么其模拟效果依据斜率来计算为 75.36%(1/1.326 9)。

总的来说,在土壤冻结期的升温 and 降温阶段均可采用线性回归进行模拟,升温阶段的模拟精度较高,模拟效果较好,降温阶段的模拟也有一定的指示效果。

### 3 结论

(1) 冻结期土壤湿度分布存在垂直变化,湿度值与初始土壤含水率关系密切,土壤层从上至下并不是逐渐递增的,而是在 10, 32 和 48 cm 附近存在极小值。

(2) 冻结期,土壤湿度日变化较小,融雪期,土壤湿度日变化较大,土壤温度上升和融雪水下渗是引起湿度增加的原因,土壤湿度峰值出现在 17:00—19:00,与前人研究成果相符。

(3) 表层土壤湿度与土壤温度关系十分密切。分别对土壤表层升温阶段和降温阶段建模模拟,模型

模拟精度高,模拟方程分别如下:

$$W=0.0048T+0.1949$$

$$W=0.0054T+0.1938$$

对模型进行检验,利用模拟值与真实值进行检验,检验结果显示升温阶段模拟精度高,而降温阶段模拟的精度一般,但是所有的模拟结果离散程度低,有一定的参考价值。

土壤湿度的模拟与土壤初始湿度存在一定的关系,对于不同的含水率情况,其截距不同,但是变化趋势应该是一样的。此次试验,没有对深度做过多研究,在深度数据上还存在不足,同时对于融雪期间的土壤温度和土壤湿度已有前人研究<sup>[8,10]</sup>,此次涉及的也不多。对于几个特殊深度的土壤湿度出现极小值需要进一步从土质、初始含水率方面进行研究。

#### [参 考 文 献]

[1] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2010.  
 [2] 陈斌,丁裕国,刘晶森. 土壤湿度的一种统计预报模型初步试验[J]. 气象科学,2005,25(3):231-237.  
 [3] 王磊,文军,韦志刚,等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. 高原气象,2008,27(6):1257-1266.

(下转第 256 页)

豆间作系统土壤养分空间分布特征,进一步丰富和完善了果农间作系统土壤养分的研究。但不同树龄果农间作系统土壤养分空间分布特征及其差异是由果树密度、类型、施肥管理以及果树和作物的物候期吸收养分状况等因素共同决定的。因此,下一步研究重点应是综合各种因素开展果农间作系统土壤养分特征,结合土壤水分、地下根系特征、光环境等数据对果农间作系统继续进行深入研究,从而为果农间作系统配置、可持续经营管理提供一定的理论依据,实现系统综合收益最大化。

#### [参 考 文 献]

- [1] 宋西德,刘粉莲,张永. 黄土丘陵沟壑区农林复合生态系统立体经营模式研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(4):43-46.
- [2] 张斌,张桃林. 低丘红壤区农林间作系统的水分生态特征及生产力[J]. 生态学杂志,1997,16(4):1-5.
- [3] Lowan T L, Kang B T. Yield of maize and cowpea in alley cropping system in relation to available light[J]. Agric. For. Meteorol., 1990,52(3/4):347-350.
- [4] 王兴祥,何园球,张桃林,等. 低丘红壤花生南酸枣间作系统研究(Ⅳ):光能竞争与剪枝作用[J]. 土壤,2003,35(4):320-324.
- [5] Peng Xiaobang, Zhang Yuanying, Cai Jing, et al. Photosynthesis, growth and yield of soybean and maize in a tree-based agroforestry intercropping system on the Loess Plateau[J]. Agroforestry Systems, 2009,76(3):569-577.
- [6] 云雷,毕华兴,任怡,等. 晋西黄土区核桃玉米间作界面土壤水分变化规律及其对玉米产量的影响[J]. 西北林学院学报,2010,25(1):47-51.
- [7] 王兴祥,张桃林,张斌,等. 低丘红壤花生南酸枣间作系统研究(Ⅱ):氮素竞争[J]. 土壤,2003,35(1):66-68.
- [8] Monteith J L, Ong C K, Corlett J E. Microclimatic interactions in agroforestry systems[J]. Forest Ecology and Management, 1991,45(1):31-44.
- [9] 蔡崇法,王峰,丁树文,等. 间作及农林复合系统中植物组分间养分竞争机理分析[J]. 水土保持研究,2000,7(3):219-222.
- [10] Jose S, Gillespie A R, Pallardy S G. Interspecific interactions in temperate agroforestry[J]. Agroforestry Systems, 2004,61(1):237-255.
- [11] 叶彦辉,宋西德,张永,等. 黄土丘陵林区草景观界面土壤养分分布特征和空间变异性研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(3):1-6.
- [12] Thevathasan N V, Gordon A M. Ecology of tree intercropping systems in the north temperate region: Experiences from Southern Ontario, Canada[J]. Agroforestry Systems, 2004,61(1/3):257-268.
- [13] 赵英,张斌,王明珠. 农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价[J]. 生态学报,2006,26(6):1792-1801.
- [14] Ong C K, Wilson J, Deans J D, et al. Tree-crop interactions; manipulation of water use and root function[J]. Agricultural Water Management, 2002,53(1/3):171-186.
- [15] 许华森,云雷,毕华兴,等. 核桃—大豆间作系统细根分布及地下竞争[J]. 生态学杂志,2012,31(7):1-5.
- [16] 张劲松,孟平,尹昌东. 果农间作系统中果树根系空间分布特征[J]. 林业科学,2002,38(4):30-33.
- [17] 杨培岭,罗元培,石元春. 土壤—植物根系的水分传输[J]. 中国农业大学学报,1993,19(2):25-30.
- [18] 史晓丽,郭小平,毕华兴,等. 晋西果农间作光竞争及产量研究[J]. 北京林业大学学报,2009,31(2):115-118.

(上接第 251 页)

- [4] 马柱国,符凉斌,谢力,等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展,2001,16(4):563-568.
- [5] Chahine T M. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992,359(11):373-380.
- [6] 孟春雷,崔建勇. 干旱区土壤蒸发及水热耦合运移模式研究[J]. 干旱区研究,2007,24(2):141-145.
- [7] 孙中峰,张学培,刘卉芳,等. 晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究[J]. 干旱区研究,2004,21(4):343-347.
- [8] 杨绍富,刘志辉,闫彦,等. 融雪期土壤湿度与土壤温度、气温的关系[J]. 干旱区研究,2008,25(5):642-646.
- [9] 高红贝,邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展,2011,22(4):484-494.
- [10] 杨与广,刘志辉,乔鹏. 天山北坡融雪期土壤湿度特征及其影响因子[J]. 干旱区研究,2012,29(1):173-178.
- [11] 汪志荣,张建丰,王文焰,等. 温度影响下土壤水分运动模型[J]. 水利学报,2002(10):46-50.
- [12] 汤家法,蒋家沟流域土壤湿度变化模拟[J]. 山地学报,2009,27(2):217-222.
- [13] 张婕,张文煜,王晓妍,等. 半干旱地区土壤湿度变化特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2012,48(2):57-61.
- [14] 赵逸舟,马耀明,马伟强,等. 藏北高原土壤温湿度变化特征分析[J]. 冰川冻土,2007,29(4):578-583.