

# 黑龙江省西部防护林地土壤水分动态及其预报

崔琳, 王力刚, 张玉柱, 毕广有, 俞冬兴, 曹志伟

(黑龙江省森林与环境科学研究院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

**摘要:** [目的] 研究黑龙江省西部地区“三北”工程区不同类型土壤的水分动态特征及其与气象因子的相关性, 为该地区土壤墒情预测提供科学参考。[方法] 通过建立小型基准气象观测站定点观测土壤水分含量及气象因子, 并利用回归分析建立了无降雨条件下土壤水分的预测模型。[结果] (1) 生长季土壤水分变化均呈现消退期的现象, 其中以黑土和黑钙土表现最为显著。3 种土壤类型水分含量的变异系数都随土壤深度增大呈递减趋势。(2) 相关分析结果表明, 土壤水分含量与光照强度和大气温度均表现为负相关, 与空气湿度表现为正相关, 与降雨量和风速相关系数较小。(3) 黑土和黑钙土的土壤水分日消耗量可由光照强度( $X_1$ )、湿度( $X_2$ )、风速( $X_3$ )和大气温度( $X_4$ )的变化来解释。[结论] 土壤水分受气象因子综合调控, 根据气象因子建立的模型可以用来预测无降雨条件下土壤水分的变化。

**关键词:** 土壤类型; 气象因子; 土壤水分; 统计模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)04-0040-07

**中图分类号:** S152.7

**文献参数:** 崔琳, 王力刚, 张玉柱, 等. 黑龙江省西部防护林地土壤水分动态及其预报[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4):40-46. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.007; Cui Lin, Wang Ligang, Zhang Yuzhu, et al. Soil water dynamics and prediction of Three-north shelterbelt system project of Western Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4):40-46. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.007

## Soil Water Dynamics and Prediction of Three-North Shelterbelt System Project of Western Heilongjiang Province

CUI Lin, WANG Ligang, ZHANG Yuzhu, BI Guangyou, YU Dongxing, CAO Zhiwei

(Academy of Forest and Environment of Heilongjiang Province, Qiqihar, Heilongjiang 161005, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamics of soil moistures of different soil types and its relation to meteorological factors were studied in the Three-North Shelterbelt System Project of Western Heilongjiang Province, to provide reference for soil moisture prediction. [Methods] Using miniature meteorological station, soil moisture and relevant meteorological factors were monitored in situ. Their relationships were analyzed using multiple regression and correlation analysis methods. [Results] (1) Soil moisture showed a decrease trend in growing season for all the monitored soils, of which Phaeozem, Chernozem behaved more obvious. The variation coefficient of soil moisture for all the 3 soil types decreased with the increase of soil depth. (2) The correlation analysis showed that the soil moisture content was negatively correlated with light intensity and atmospheric temperature, but positively correlated with the air humidity. The correlation coefficients with rainfall and wind speed were comparatively smaller. (3) The multiple regression analysis showed that daily soil moisture consumptions of Phaeozem, Chernozem could be explained by illumination intensity ( $X_1$ ), humidity ( $X_2$ ), wind speed ( $X_3$ ) and air temperature ( $X_4$ ). [Conclusion] Soil moisture was regulated comprehensively by meteorological factors. The established multiple regression models could be used to forecast the changes of soil moisture in upland soil.

**Keywords:** soil type; meteorological factors; soil moisture; statistical model

土壤水分作为调控地—气反馈过程的重要参数之一,是土壤系统养分循环和流动的载体,它不仅直接影响土壤特性和植物的生长,还间接影响植物分布以及生态系统小气候的变化<sup>[1-2]</sup>。以往研究<sup>[3-7]</sup>表明土壤水分变化不仅受地表覆盖和土壤类型、质地影响,且与降水、气温等气象因素在大尺度上存在强烈的耦合关系,是季节性降水预报的重要指标。黑龙江省西部生态环境相对较差,是该省三北工程建设核心区,土壤水分是影响该区域生态建设的重要限制性因子<sup>[8]</sup>。通过对土壤水分动态特征研究有助于预测土壤水分过程,也为研究该区域生态建设中水分管理提供了科学依据<sup>[9]</sup>。近年来,很多学者开展了气象因子对土壤水分影响的研究。例如,张聪聪<sup>[10]</sup>利用通径分析和逐步回归分析,探讨了气象因子与旱田土壤水分的关系,并建立了旱田土壤水分的气象因子多元回归模型;唐振兴<sup>[11]</sup>对祁连山土壤水分和气象因子关系研究表明,20—80 cm 土层土壤水分易受外界降水过程影响。国内学者关于气象因子对土壤水分影响的研究较多,但研究的时间尺度多为年、月尺度,对于逐日尺度上的研究却较少。本研究通过对黑龙江省西部地区3种主要土壤类型水分及相关气象因子的连续定位监测,综合分析气象因子对土壤水分的影响,旨在揭示不同土壤类型下土壤水分时空的分布规律,并通过多元回归模型的建立对无降雨条件下的土壤墒情进行预测,为该区农林业生产及生态建设提供重要参考。

## 1 研究区概况

研究区域是黑龙江三北工程最早规划及建设区,位置位于东经 122°24′—128°19′ 北纬 44°04′—48°58′,包括哈尔滨、齐齐哈尔、大庆和绥化全部或部分,涵盖面积  $1.04 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全省幅员面积 22.9%。研究区属于中温带大陆性季风气候,年平均气温 3.5℃,极端最高气温 38.1℃,极端最低气温 -34.9℃,多年平均降水量 470.5 mm。热量分布以西南向东北递减,水分由西向东递减,是黑龙江省热量最高而降水较少的区域,具有半干旱区域特征。土壤主要为黑土、黑钙土、草甸土、风沙土等。本研究选择杜尔伯特蒙古族自治县(大庆地区)、青冈县(绥化地区)和富拉尔基区(齐齐哈尔地区)作为具体试验区。这3个试验区从东向西分布于黑龙江西部三北工程核心区,分别代表了该区3个典型的土壤类型,即风沙土、黑土、黑钙土。观测区林分主要为人工纯林,主要乔木为小

黑杨和樟子松,林下伴生草本有羊草、贝加尔针茅、防风、紫胡、知母等。林分密度为 1 200 株/hm<sup>2</sup>,胸径范围 8.0~15.9 cm,树高范围为 5.1~12.4 m,树龄范围为 11~26 a。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤水分及气象因子的测定

在3个试验区选择典型空旷地,分别建立小型基准气象观测站(ECA-YW0 501 田间环境记录仪),逐日观测当地主要气象因子,采集数据包括逐日雨量 0~100 mm(±4%),大气温度 0~50℃(±0.2℃),光照强度 0~2 200 μmol·m<sup>2</sup>/s(<5 μmol·m<sup>2</sup>/s),风速 0~60 m/s(±5%),空气湿度 0%~100%(±3%~5%)。同时,在观测区挖深度 1 m 的土壤剖面,在深度 20,40,60,80 和 100 cm 处分别埋入传感器自动观测土壤水分含量。气象数据和土壤水分数据的测定频率均为每 10 min 测定 1 次,一日取得的某指标数据的平均值即为该日该指标的数据,上述数据采集时间为 2012 年 6 月初至 9 月末。

### 2.2 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 对试验数据进行统计分析、相关分析。

根据水量平衡原理,某地在给定的时段内,其地表土壤含水量的变化  $\Delta W$  可表示为:

$$P - E - F = \Delta W \quad (1)$$

式中: $P$ ——时段内的总降水量(mm); $E$ ——时段内的蒸发量(mm); $F$ ——时段内的径流量(mm)。由于水文资料一般很难获取,故式中径流量一般均忽略不计。蒸发资料一般也较难获取,可以考虑选取与蒸发密切相关的光照强度( $X_1$ )、湿度( $X_2$ )、风速( $X_3$ )和大气温度( $X_4$ )来代替蒸发。现假定某个时段末期土壤含水量为  $W$ ,光照强度为  $X_1$ ,湿度为  $X_2$ ,风速为  $X_3$ ,大气温度为  $X_4$ ,由于各变量均假定为标准化变量,若未经标准化处理,需加上常数项  $\eta$ ,由此可建立如下统计模型:

$$W = \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3 + \delta X_4 + \eta \quad (2)$$

然后按时间序列利用逐步回归分析求解回归系数,确立模型。

在模型验证时,通过建立的模型,求出理论土壤水分  $W_1$ ,再通过与实测土壤水分  $W_2$  进行比较,采用最小二乘法原理,求出计算值的中误差  $m$ ,然后再计算其计算值的相对误差值  $k$ ,最后可得模型的精度  $Q$ 。精度分析计算公式为:

$$\Delta_i = W_1 - W_2 \quad (3)$$

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (4)$$

$$k = \frac{m}{p} \quad (5)$$

$$Q = 1 - k \quad (6)$$

$$k_{\max} = \frac{|\Delta_{\max}|}{p} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $W_1$ ——土壤水分理论计算值(%);  $W_2$ ——土壤水分实际测定值(%);  $\Delta_i$ ——土壤水分计算值与实测值的误差值(%);  $\Delta_{\max}$ ——土壤水分计算值与实测值的误差值的最大值(%);  $n$ ——进行土壤水分精度分析的样点个数(个);  $p$ ——各样点实测土壤水分平均值(%);  $k_{\max}$ ——计算值最大相对误差值(%).

### 3 结果与分析

#### 3.1 试验区域主要气象因子变化特征

东北大部分地区的年均降水量为 400~600 mm,且 5—9 月的生长季占 70%以上。通过对杜尔伯特蒙古族自治县、青冈县和富拉尔基区 3 个试验区 2012 年 6—9 月降雨数据统计(表 1),结果表明 3 个研究区域研究时间段内总降雨量差异显著,分别为 225.2、297.6 和 317.10 mm,均以 7 月降雨量最大。从取得的数据可知,3 个研究区域的光照强度、温度、湿度等气象因子随月份的变化特征相似,均以 7 月最大,9 月最小,且变化幅度较大。风速变化幅度较小。尽管 3 个研究区域降雨总量差异显著,但降雨特征、空气湿度、大气温度、光照强度在生长季变化趋势上的相似性,会弱化降雨量对土壤水分变化的影响。

表 1 不同研究区域 2012 年 6—9 月小气候特征月变化(日平均值,  $n=30$ )

试验区域	项目	6 月	7 月	8 月	9 月
杜尔伯特蒙古族自治县	光照强度	611.91±50.41 <sup>b</sup>	635.21±33.37 <sup>b</sup>	469.82±31.01 <sup>a</sup>	399.92±20.19 <sup>a</sup>
	温度/℃	23.36±0.83 <sup>bc</sup>	24.10±0.39 <sup>c</sup>	21.62±0.34 <sup>b</sup>	15.81±1.18 <sup>a</sup>
	相对湿度/%	62.32±2.40 <sup>b</sup>	76.42±1.38 <sup>c</sup>	74.48±1.75 <sup>c</sup>	53.99±1.63 <sup>a</sup>
	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.63±0.09 <sup>a</sup>	0.50±0.05 <sup>a</sup>	0.44±0.04 <sup>a</sup>	0.54±0.09 <sup>a</sup>
	月总降雨量/mm	27.40	156.20	18.20	23.40
青冈县	光照强度	523.47±37.69 <sup>a</sup>	720.23±29.45 <sup>b</sup>	565.95±36.33 <sup>a</sup>	564.81±24.69 <sup>a</sup>
	温度/℃	23.41±0.36 <sup>bc</sup>	24.94±0.54 <sup>c</sup>	21.83±0.42 <sup>b</sup>	15.21±0.97 <sup>a</sup>
	相对湿度/%	54.2±21.96 <sup>a</sup>	77.7±1.76 <sup>c</sup>	77.5±1.8 <sup>c</sup>	65.68±1.89 <sup>b</sup>
	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.45±0.07 <sup>b</sup>	0.23±0.02 <sup>a</sup>	0.28±0.03 <sup>a</sup>	0.26±0.03 <sup>a</sup>
	月总降雨量/mm	98.40	100.60	69.60	29.00
富拉尔基区	光照强度	586.65±32.47 <sup>b</sup>	615.84±38.81 <sup>b</sup>	533.64±40.52 <sup>b</sup>	464.7±27.8 <sup>ab</sup>
	温度/℃	22.29±0.64 <sup>b</sup>	23.72±0.39 <sup>b</sup>	22.04±0.41 <sup>b</sup>	17.39±1.3 <sup>a</sup>
	相对湿度/%	62.68±3.06 <sup>a</sup>	75.3±2.09 <sup>b</sup>	74.47±2.36 <sup>b</sup>	57.16±1.77 <sup>a</sup>
	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.58±0.08 <sup>a</sup>	0.40±0.05 <sup>a</sup>	0.51±0.05 <sup>a</sup>	0.53±0.07 <sup>a</sup>
	月总降雨量/mm	30.40	166.80	103.80	16.10

注:不同小写字母表示行间粒级之间差异显著( $p<0.05$ )。

#### 3.2 生长季土壤水分变化特征

3.2.1 风沙土土壤水分变化特征 风沙土土壤含水量变化特征如图 1 所示。土壤水分含量变化范围为 2.75%~15.67%。在无降水条件下,土壤水分含量表现为 40 cm 处最高,60 cm 处最低,其余 3 层之间差异并不显著。整个生长季过程中,80 cm 处和 100 cm 处土壤水分含量受降雨影响并不显著,变异系数分别为 0.02,0.03;而前 3 层土壤水分受降雨影响较为明显,变异系数分别为 0.54,0.30,0.19。由此可以看出,降雨会对 60 cm 以上土层土壤水分产生较为明显的影响,以 40 cm 以上最为显著,之后随土层深度的增加,降雨对土壤水分的影响趋近于无。杜尔伯特蒙

古族自治县 7 月中旬的降雨总和达到 133.6 mm,占总降雨量的 60%,其中最大降雨量为 61.8 mm。从图 1 可以看出,最大降雨量当日,20 cm 处土壤含水量显著增大,增幅达到 171.87%,随后由于持续降雨,土壤水分一直升高,在降雨补给停止后土壤水分开始下降;40 cm 处在持续性降雨的最后一天显著增大;60 cm 处则在此次连续性降雨的 4 d 后出现小幅度增大,后两层土壤水分并无明显变化。降雨量的大小和土壤水分的损失共同决定了土壤水分含量,相较于深层土壤,表层土壤能得到更多的水分补给,入渗雨量迅速提高了表层砂土的土壤水分,同时降雨结束后,也更容易通过蒸发损失土壤水分<sup>[12-13]</sup>。

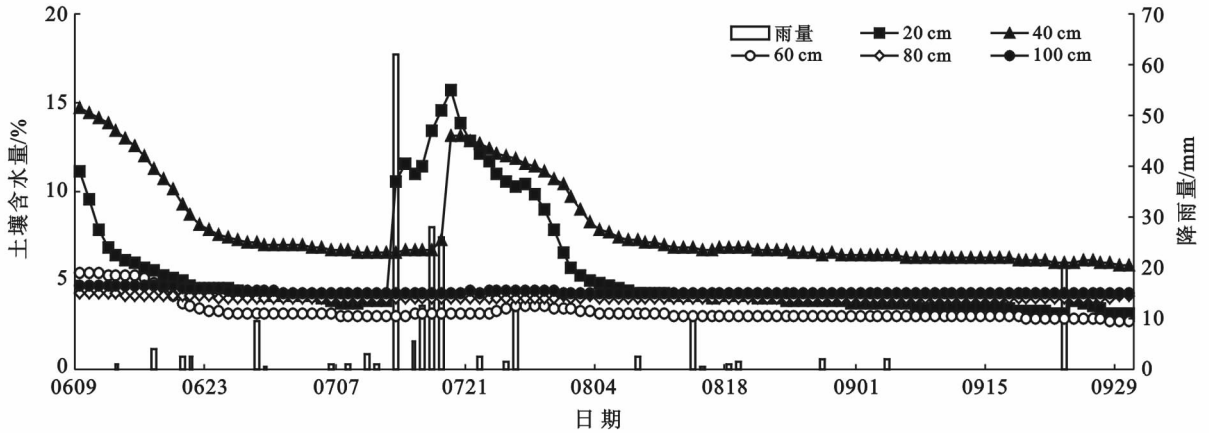


图 1 杜尔伯特蒙古族自治县 2012 年 6—9 月降雨量及风沙土土壤水分日变化

3.2.2 黑土土壤水分变化特征 研究期内黑土土壤水分含量变化范围为 16.27%~42.73%，各土壤层水分含量总体上随时间呈现降低趋势(图 2)。土壤含水量的变异系数从上层到下层依次为 0.08,0.06,0.06,0.06,0.03。

不同土层土壤水分含量呈相同变化规律,大小顺序依次为:60 cm>100 cm>40 cm>20 cm,80 cm。

在研究时间段内,由于气温的逐渐升高,土壤水分持续下降,虽然 6,7,8 月均有较大降雨量使土壤水分有所回升,但之后仍然持续下落。青冈地区在 7,8 月都出现较大降雨量,分别为 44.8 和 44.4 mm。每次降水后第 2 日,各层土壤水分都会出现显著提升,以 20 cm 处土层土壤含水量提升幅度最大,100 cm 处土层土壤含水量提升幅度最小。

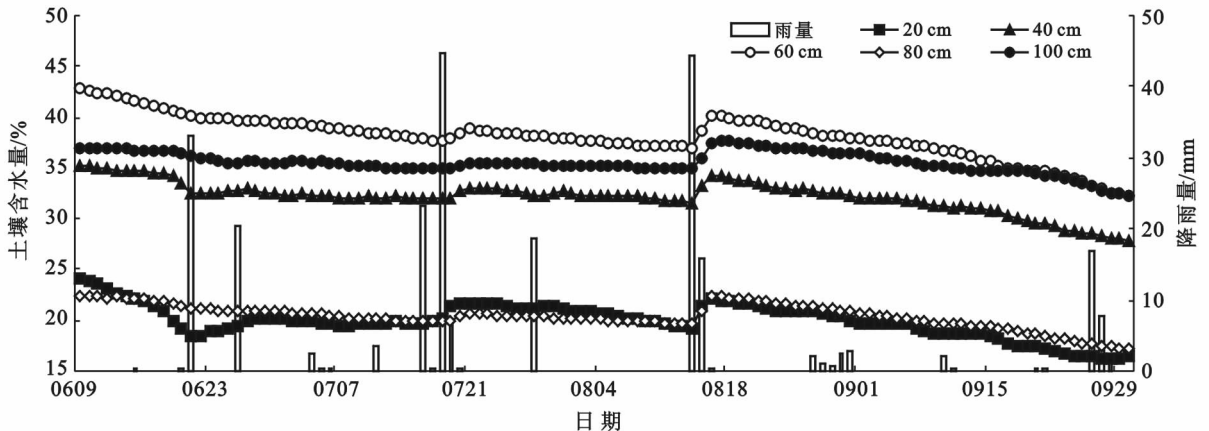


图 2 青冈县 2012 年 6—9 月降雨量及黑土土壤水分日变化

3.2.3 黑钙土土壤水分变化特征 研究期内黑钙土土壤水分含量变化范围为 8.45%~25.96%，各土壤层水分含量总体上随时间呈现降低趋势(图 3)。土壤含水量的变异系数从上层到下层依次为 0.14,0.11,0.11,0.07,0.07。不同土层土壤水分含量呈相同变化规律,大小依次为:40 cm>100 cm>80 cm>20 cm>60 cm。富拉尔基区最大降雨量达到 73.8 mm,降水后第 2 天 20,40,60 cm 处土壤含水量出现显著提升,而 80,100 cm 处土壤含水量变化不显著。以往的研究曾将土壤水分季节变化划分为 4 个时期,分别为土壤水分消耗期、土壤水分积累期、土壤水分消退期和土壤水分稳定期<sup>[14]</sup>。从图 1—3 可以看出,

3 种类型土壤的水分含量在生长季均表现出消退期的现象,即虽然有降雨补给,但因温度高,土壤水分易蒸散消耗,致使土壤水分一直持续降低,虽然单次降雨后,土壤水分含量会升高,但之后都会重新回落。其中黑土和黑钙土土壤水分的消退期表现的非常明显,而风沙土土壤水分的消退期表现则不明显。这主要是由于风沙土孔隙多,土温易升高,不易保水,水分含量提高快,损失也快;而黑土和黑钙土两者土壤孔隙比例适宜,保水能力好。图 1—3 还表明,3 种土壤类型土壤水分的变异系数都是随土壤深度增大呈递减的变化趋势。这说明降雨或是蒸发都主要影响土壤表层水分,对深层水分含量影响较小。蒸发蒸腾深

度是影响土壤水分循环强度的主要因子,降雨只有超过蒸发蒸腾深度才能形成深层渗漏,达不到该深度的

降雨会通过蒸发蒸腾作用重新返回大气层中,无法发挥补充调节深层土壤水分的功能<sup>[15-16]</sup>。

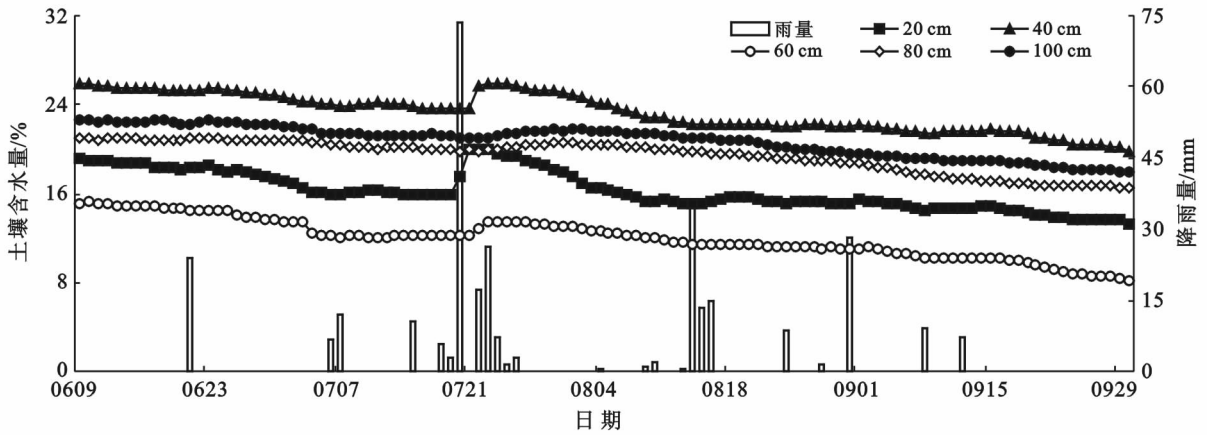


图 3 富拉尔基区 2012 年 6—9 月降雨量及黑钙土土壤水分日变化

### 3.3 气象因子与土壤水分的相关分析

大气温度、光照强度、风速、空气湿度等气象因子通过影响植被蒸腾和地表蒸发,而间接影响到土壤水分含量,它们与降雨共同影响土壤水分循环<sup>[17-19]</sup>。在土壤水分循环的微环境中,光照强度、风速和大气温度的提高都会加速水分的扩散速度,加剧土壤水分的损失;降雨则是直接给土壤补充水分。土壤水分含量受到气象因子的综合调控,其中影响土壤水分最重要的因子就是降雨量<sup>[20]</sup>。然而由表 2 可知,降雨量和土壤水分的相关性并不显著,这主要是由于降水数据作为非连续型数据,与连续数据的土壤水分之间的必定会产生巨大差距,这直接影响了统计结果。表 2 还表明,风沙土、黑土和黑钙土土壤水分与光照强度和大气温度之间均表现为极显著负相关( $p < 0.01$ ),与空气湿度之间则表现为显著正相关( $p < 0.05$ ),其中风沙土的土壤水分与空气湿度的相关性达到极显著显著水平( $p < 0.01$ )。3 种土壤类型土壤水分与风速之间相关性并不显著。

表 2 不同深度土壤水分(日平均值)与气象因子(日平均值)的相关系数

相关系数 ( $n=114$ )	风沙土 土壤水分/%	黑土土壤 水分/%	黑钙土 土壤水分/%
降雨量/mm	0.074	0.050	0.090
光照强度	-0.372**	-0.442**	-0.385**
空气湿度/%	0.315**	0.201*	0.220*
风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	-0.140	0.029	-0.040
大气温度/ $^{\circ}C$	-0.424**	-0.720**	-0.554**

注: \*\* 表示相关性达到极显著水平  $p < 0.01$ , \* 表示相关性达到显著水平  $p < 0.05$ 。

### 3.4 无降雨影响下土壤水分消耗的回归模型

多元回归过程可以较好解释不同自变量对因变量的作用大小。选取一次降雨后土壤水分达到最高值开始直至土壤水分下降趋势结束为止的时间段作为研究时间段,将 20, 40 cm 处土壤水分日消耗量( $Y$ ) (即当日土壤水分与第 2 日土壤水分之差)作为因变量,光照强度( $X_1$ )、湿度( $X_2$ )、风速( $X_3$ )和大气温度( $X_4$ )作为自变量,分别对黑土和黑钙土土壤水分的数据进行多元逐步回归,通过回归结果建立无降水条件下气象要素对土壤水分日消耗的多元回归预报模型。而风沙土由于降雨条件下土壤水分消耗和无降雨条件下土壤水分消耗差异较大,表现为速升速降,故无法利用气象因子模拟(图 1)。

得出黑土和黑钙土 2 个土壤类型土壤水分日消耗量与气象要素的回归模型为:

$$Y_{\text{黑土}1} = 1.590 - 0.547 X_1 - 0.009 X_2 + 0.077 X_3 - 0.022 X_4 \quad (R^2 = 0.824)$$

$$Y_{\text{黑土}2} = 0.551 - 0.257 X_1 + 0.002 X_2 + 0.206 X_3 - 0.022 X_4 \quad (R^2 = 0.605)$$

$$Y_{\text{黑钙土}1} = 1.437 - 0.062 X_1 - 0.006 X_2 - 0.078 X_3 - 0.029 X_4 \quad (R^2 = 0.672)$$

$$Y_{\text{黑钙土}2} = 0.941 - 0.269 X_1 + 0.003 X_2 + 0.091 X_3 - 0.038 X_4 \quad (R^2 = 0.868)$$

从回归模型上看,黑土和黑钙土的决定系数分别为 0.824, 0.605, 0.672, 0.868,  $0 \leq R^2 \leq 1$  (其比值越接近于 1,说明模型对数据的拟合程度越好),以上结果说明在无降雨影响下,黑土和黑钙土的土壤水分日消耗量可由光照强度( $X_1$ )、湿度( $X_2$ )、风速( $X_3$ )和大气温度( $X_4$ )的变化来解释,回归模型数据拟合程度较好。

### 3.5 模型效果检验

通过上述拟合出的公式,求出理论上无降雨条件下土壤水分的值  $W_1$ ,再通过与实测土壤水分  $W_2$  进行比较,计算测定值和预测值的中误差,然后计算其相对误差,最后可得模型的精度。从图 4—7 可以看出,黑土土壤水分的预测值和测定值吻合程度很高,而黑钙土土壤水分预测值和实测值的变化趋势是一

样的,但数值间存在一定差异。表 3 也表明,黑土模型的精度达到 99% 以上,而黑钙土略低于黑土,但最大相对误差也没超过 10%。以上结果说明,可以利用建立的模型根据气象因子的变化情况预测无降雨条件下黑土和黑钙土土壤水分的变化情况,以便于在干旱情况下估算土壤水分,进行合理的灌溉措施。但上述结论还需要更多监测和更多的数据结果来验证。

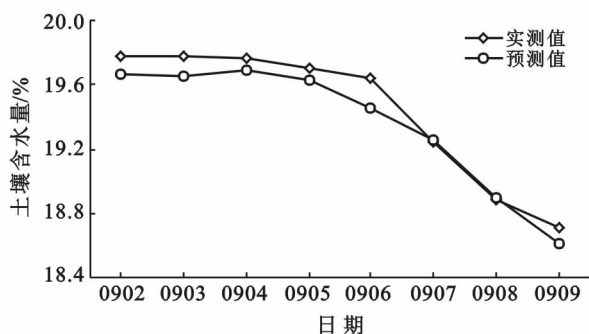


图 4 黑土土壤水分 1 的实测值与预测值

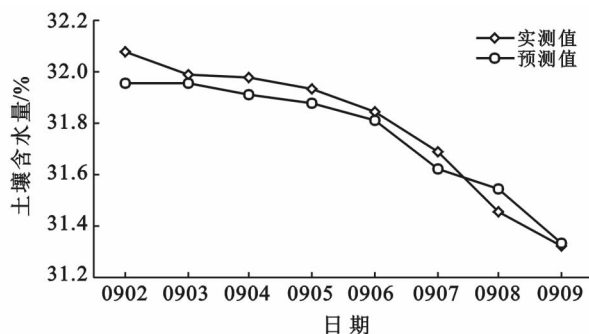


图 5 黑土土壤水分 2 的预测值与实测值

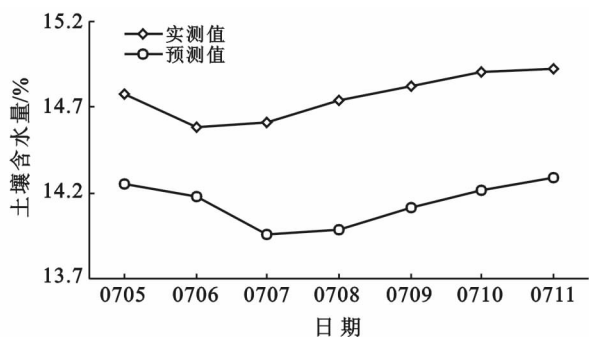


图 6 黑钙土土壤水分 1 的实测值与预测值

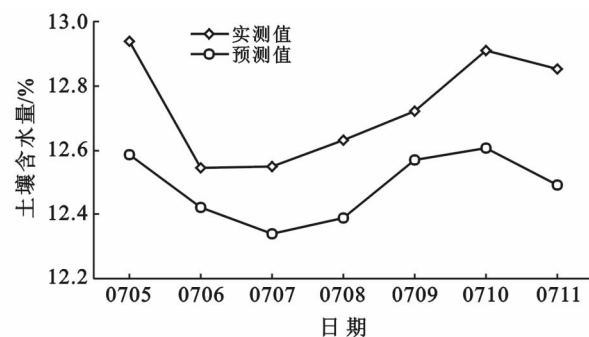


图 7 黑钙土土壤水分 2 的预测值与实测值

表 3 研究区土壤水分精度分析

%

样地	中误差	平均值	相对误差	精度	最大差值	最大相对误差
黑土 1	0.10	16.19	0.65	99.35	0.19	0.74
黑土 2	0.07	17.89	0.37	99.63	0.12	1.17
黑钙土 1	0.63	14.76	4.30	95.70	0.76	5.11
黑钙土 2	0.26	12.74	2.07	97.93	0.36	2.84

## 4 结论

(1) 3 种类型土壤水分变化均表现出消退期的现象,即土壤水分含量随时间变化呈减小趋势,虽然单次降雨后土壤水分含量出现短暂升高,但随后重新回落,其中黑土和黑钙土表现更为显著。土壤水分的变异系数变化存在相似性,都是随土壤深度增大呈递减趋势。表明降雨或是蒸发都主要影响土壤表层水分,对深层水分含量影响较小。

(2) 日尺度下,3 种土壤类型土壤水分含量与光照强度和大气温度表现为负相关,与空气湿度表现为

正相关,与降雨量和风速相关系数较小。土壤水分受气象因子综合调控,大气温度是其最直接的影响因子。

(3) 由逐步回归分析的结果可知,无降雨影响下,黑土和黑钙土的土壤水分日消耗量可由光照强度 ( $X_1$ )、湿度 ( $X_2$ )、风速 ( $X_3$ ) 和大气温度 ( $X_4$ ) 的变化来解释,回归模型数据拟合程度较好。利用模型得出预测值与实测值的相对误差在 0.74%~5.11%。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 黄志刚,李锋瑞,曹云,等.南方红壤丘陵区杜仲人工林土壤水分动态[J].应用生态学报,2007,18(9):1937-

- 1944.
- [2] He Qihua, He Syonghua, Bao Weikai. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 149-156.
- [3] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [4] 刘宏伟,余钟波,崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(7): 822-829.
- [5] 刘鹤,赵文智,何志斌,等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2389-2394.
- [6] 胡相明,赵艳云,程积民. 云雾山自然保护区环境因素对土壤水分空间分布的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 2964-2971.
- [7] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(10): 2491-2498.
- [8] Nyberg L. Spatial variability of soil water content in the covered catchment at Gårdsjön, Sweden[J]. *Hydrological Processes*, 1999, 10(1): 89-103.
- [9] 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.
- [10] 张聪聪,陈孝民,张勇,等. 气象因子对太湖地区旱作农田土壤水分动态的影响[J]. *中国农业学*, 2013, 46(21): 4454-4463.
- [11] 唐振兴,何志斌,刘摇鹄,祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1056-1065.
- [12] 张玉柱,俞冬兴,毕广有,等. 黑龙江省西部地区生态林建设技术研究[J]. *防护林科技*, 2014(7): 27-29, 39.
- [13] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 100-107.
- [14] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. *生态学报*, 1995, 15(2): 178-184.
- [15] 黄志刚,欧阳志云,李峰瑞,等. 南方丘陵区不同坡地利用类型方式土壤水分动态[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3136-3147.
- [16] 李谦,郑锦森,朱青,等. 太湖流域典型土地利用类型土壤水分对降雨的响应[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 6-11.
- [17] 刘宏伟,余钟波,崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(7): 822-829.
- [18] 徐庆华,刘勇,马履一,等. 东北农田黑土蒸发量与土壤水分及气象因子的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(11): 82-83, 95.
- [19] 张卫强,贺康宁,朱艳艳,等. 黄土半干旱区油松苗木蒸腾特性与影响因子的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 49-54.
- [20] 韩湘云,景元书,李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2368-2374.

(上接第 39 页)

- [6] Stern R, Van Der Merwe A J, Laker M C, et al. Effect of soil surface treatment of runoff and when yields under irrigation[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 84(1): 114-119.
- [7] Entry J A, Sojka R E. The efficacy of polyacrylamide to reduce nutrient movement from an irrigated field[J]. *Transactions of the ASABE*, 2003, 46(1): 75-83.
- [8] Rodrick D L, Robert E S, Charles W R, et al. Polyacrylamide for surface irrigation to increase nutrient-use efficiency and protect water quality[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7/8): 1203-1220.
- [9] 林琪,侯立白,韩伟. 不同肥力土壤下施氮量对小麦子粒产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 561-567.
- [10] 沈善敏. 论我国磷肥的生产与应用[J]. *土壤通报* 1985(3): 97-103.
- [11] 柳金来,宋继娟,周柏明,等. 钾肥施用量与土壤肥力和植株养分及水稻产量的关系[J]. *土壤肥料*, 2003(2): 21-24.
- [12] 王旭东,杨雪芹. 聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附—解析与迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 02: 300-305.
- [13] 杨雪芹,胡田田,王旭东,等. 聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附—解吸的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 87-90.
- [14] 龙明杰,张宏伟,谢芳,等. 高聚物土壤结构改良剂的研究(II): 高聚物对土壤肥料的作用[J]. *土壤肥料*, 2000(5): 13-18.
- [15] 杜建军,苟春林,崔英德,等. 保水剂对氮肥挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1296-1301.
- [16] 冯建,赵玉安,丁晋丽. 塬土和黑土小同层次钾运移研究[J]. *甘肃农业科技*, 2006(12): 6-8.
- [17] 徐晓燕,马毅杰. 土壤矿物钾的释放及其在植物营养中的意义[J]. *土壤通报*, 2001, 32(4): 173-176.
- [18] Cassman K G, Roberts B A. Soil potassium balance and cumulative cotton response to annual potassium additions on a vermiculitic soil [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1989, 53(3): 805-812.