

## 陕北黄土区人工刺槐林地土壤水势特征

肖恩邦, 孙保平, 陈串, 陈艺超, 马晓彤

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了研究黄土区人工林地土壤水分特征曲线及土壤水势特征, 以陕北黄土区人工刺槐林地为研究对象, 利用中子水分仪和中国科学院地理科学与资源研究所设计的负压计, 对其 2015 年 4 月 1 日—2015 年 10 月 31 日 0—200 cm 土层的土壤含水量和土壤水势进行了连续观测, 并运用灰关联法分析了表层(0—40 cm)、中层(50—120 cm)、深层(130—200 cm)及 4—10 月土壤水势灰关联度。结果表明: (1) 陕北黄土区人工刺槐林地各土层土壤水分特征曲线可用 Gardner 模型幂函数方程  $\theta = aS^{-b}$  进行拟合, 拟合参数  $a$  值大小为表层土壤(0.103 8) > 中层土壤(0.094 4) > 深层土壤(0.086 0);  $b$  值大小为表层土壤(0.284) < 中层土壤(0.291) < 深层土壤(0.298)。 (2) 通过土壤水分特征曲线求得人工刺槐林地土壤水分常数, 田间持水量和凋萎系数的平均值分别为 25.53% 和 8.42%, 最大有效水范围平均达 17.11%。通常用土壤水吸力为 0.1 MPa 时, 比水容量值来表征土壤供水能力, 人工刺槐林地该值的大小表现为表层土壤(56.73%) > 中层土壤(53.74%) > 深层土壤(50.84%)。 (3) 人工刺槐林地土壤水势垂直空间分布表现为表层土壤水势从 -0.21 MPa 逐层增加到 -0.08 MPa, 中层土壤水势动态波动较大, 整体呈下降趋势, 深层土壤水势稳定在 -1.14 MPa 附近。灰关联度分析得出  $R_{12}$  (0.899 8) >  $R_{23}$  (0.711 5) >  $R_{13}$  (0.702 8), 人工刺槐林地土壤水势表层与中层关系较为密切, 深层与中层关系次之, 表层与深层关系最差。 (4) 人工刺槐林地 0—200 cm 土层土壤水势, 4—6 月呈下降趋势, 7—8 月显著上升, 9—10 月再次下降。从各月土壤水势灰关联度来看,  $R_{10}$  (0.868 9) >  $R_{05}$  (0.806 7) >  $R_{09}$  (0.780 4) >  $R_{07}$  (0.676 3) >  $R_{06}$  (0.654 8) >  $R_{08}$  (0.611 4), 人工刺槐林地土壤水势 10 月, 5 月, 9 月变化态势与 4 月关联度较高; 土壤水势 7 月, 6 月, 8 月与 4 月关联度较差。

**关键词:** 黄土区; 刺槐林地; 土壤水势; 灰关联度

**中图分类号:** S715.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2017)03-0129-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.023

## A Study on Soil Water Potential Characteristics of *Robinia pseudoacacia* in North Shaanxi Loess Region

XIAO Enbang, SUN Baoping, CHEN Chuan, CHEN Yichao, MA Xiaotong

(School of Soil and Water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** Soil water content and potential of the 0—200 cm soil profile in *Robinia pseudoacacia* forest land were observed continuously with a neutron moisture meter and a negative pressure meter to study the soil water characteristic curve (SWCC) and soil water potential characteristics in the Loess Hilly Region from April 1, 2015 to October 31, 2015, and the gray relational grade of soil water potential in different soil depths and months were analyzed by gray relational analysis. The results showed that: (1) Soil water characteristic curve (SWCC) at different soil depths could be well described by the Gardner power function. The fitting parameter  $a$  was in the order of the surface layer (0.1038) > the middle layer (0.0944) > the deep layer (0.0860), while parameter  $b$  followed the order of the surface layer (0.284) < the middle layer (0.291) < the deep layer (0.298). (2) According to the SWCC, soil water constant of the artificial *R. pseudoacacia* forest land was as follows: average field capacity and wilting coefficient was 25.53% and 8.42%, respectively, and the maximum effective water range was 17.11%. Normally, when the soil water suction was 0.1 MPa, soil water supply capacity was characterized by the specific water capacity. The value was in the order of surface layer (56.73%) > middle layer (53.74%) > deep layer (50.84%) in the artificial *R. pseudoacacia* forest land. (3) The vertical spatial distribution of soil water potential of the artificial *R. pseudoacacia* showed that the water potential of the surface soil layer increased from -0.21 MPa to -0.08 MPa, the middle layer soil water potential fluctuated greatly, and the deep layer soil water potential was stable, being around -1.14 MPa. The grey relational grade analysis showed the order of  $R_{12}$  (0.899 8) >  $R_{23}$  (0.711 5) >

收稿日期: 2016-12-04

资助项目: 国家林业局公益性行业科研专项经费项目“南方退耕还林工程建设效益监测评价研究”(201004018)

第一作者: 肖恩邦(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持、生态工程研究。E-mail: xiaoenbang@bjfu.edu.cn

通信作者: 孙保平(1956—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: sunbp@163.com

$R_{13}(0.702\ 8)$ ). The results showed that the relationship between the surface layer and the middle layer of the artificial *R. pseudoacacia* forest land was close, the relationship between the deep layer and the middle layer was the second, and the relationship between the surface layer and the deep layer was the worst. (4) Soil water potential of the 0—200 cm soil layers in the artificial *R. pseudoacacia* forest land decreased from April to June, then increased significantly from July to August, and decreased again from September to October. The grey relational grade of soil water potential in each month showed the order of  $R_{10}(0.868\ 9) > R_{05}(0.806\ 7) > R_{09}(0.780\ 4) > R_{07}(0.676\ 3) > R_{06}(0.654\ 8) > R_{08}(0.611\ 4)$ . The soil water potential variation trends in May, September, and October were similar to that in April. In contrast, the soil water potential variation trends in June, July, and August were different from that in April.

**Keywords:** loess hilly region; *Robinia pseudoacacia* forest land; soil water potential; grey relational analysis

黄土高原大部分地区水资源匮乏,陕北黄土丘陵沟壑区尤为突出,土壤水分是该地区植被生长和重建的主要限制因子<sup>[1-2]</sup>。影响土壤水运动、分布的因素很多,其中降水、蒸散、土壤孔隙度、植物根系分布等是最重要的因素<sup>[3-4]</sup>。土壤水分状况有 2 种表述方法即含水量和水势,分别表征土壤水分的数量和能量。目前,对于黄土高原地区土壤水分的研究较多,主要集中在对黄土高原地区土壤水分时空动态变化<sup>[5]</sup>、植物群落水分生态环境<sup>[6]</sup>、不同植被类型土壤水分生态功能<sup>[7]</sup>及人工植被的土壤干化等问题的研究<sup>[8-9]</sup>。以上这些研究都是用土壤含水量来表述土壤水分。土壤水势在关于植物和水分,及土壤中水分运动的研究中至关重要,它是判断土壤水分保持和供给的重要指标。对于用土壤水势表征土壤水分的研究,主要集中在土壤水势时空动态变化特征<sup>[10]</sup>,土壤水势对不同降雨类型的响应<sup>[11]</sup>,土壤结构及根系分布对土壤水势的影响等<sup>[12]</sup>方面。基于前人研究的基础和对以上研究的充分认识,本文以陕北黄土区人工刺槐林地为研究对象,利用中子水分仪和中国科学院地理科学与资源研究所设计的负压计,对其 2015 年 4—10 月 0—200 cm 土层的土壤含水量和土壤水势进行了连续观测,运用灰关联法分析了不同土层深度、不同月份土壤水势灰关联度,以此确定和探究该地区人工林地土壤水分特征曲线及土壤水势的时空动态变化特征。旨在为该地区人工林营造提供土壤水分依据。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市西北部的吴起县,地处东经 $107^{\circ}38'57''$ — $108^{\circ}32'49''$ ,北纬 $36^{\circ}33'33''$ — $37^{\circ}24'27''$ 之间。吴起县地处中纬地带,属于东部季风湿润区与内陆干旱区的过渡地带,海拔在 1 200~1 800 m 之间。吴起县境内有无定河与北洛河 2 大流域,地形主体结构可概括为“八川二涧两大山区”。地势呈东北高西南低,地势起伏不大,土层较厚,属于典型的黄土高原梁状丘陵沟壑区。多年平均降水量为 460 mm,降水年际变化大且时空分布不均,其中 80% 的降雨量集中在 5—10 月,年均气温  $7.8\ ^{\circ}\text{C}$ ,干

燥指数约为 1.5。多年平均蒸发量为 430 mm。1999 年吴起县率先开始退耕还林,生态环境得到改善,植被覆盖度达到 65%。营造的人工林主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* C.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤水分监测

在研究区内选择有代表性的人工刺槐林地作为观测样地,样地坡度  $20.7^{\circ}$ ,坡向  $N\ 67^{\circ}$ ,人工刺槐树龄 18 a,平均树高 13.5 m,平均胸径 10.5 cm,栽植密度为 1 000 株/hm<sup>2</sup>,林下主要植被有三裂绣线菊、蒿类、白草。在样地中心附近水平安置 1 根长度为 200 cm 的中子仪铝合金套管,用智能中子水分仪进行剖面土壤含水量的监测,同时在附近埋设中国科学院地理科学与资源研究所设计的负压计,对土壤水势进行监测。以每 10 cm 为一个土层,测定深度为 200 cm。测定时间为 2015 年 4—10 月,每天观测 2 次(8:00, 17:00),把 2 次观测的平均值作为当天观测数值。降雨量采用美国产翻斗式雨量计及 HOBO 数据采集器自动记录。以上监测点位于试验站长期监测的刺槐林地径流小区内,以确保监测得到的数据具有典型性和代表性。利用中子仪监测土壤水分时,要分别对表层和深层进行数据标定。对采样烘干测试法得到的体积含水量和中子仪读数进行标定,得到回归方程如下,利用标定方程可将中子仪读数全部转换为土壤体积分含水量。

表层(0—40 cm)土壤体积分含水量:

$$\theta = 0.1141a + 1.5821 \quad (R^2 = 0.958\ 4) \quad (1)$$

中层及深层(40—200 cm)土壤体积分含水量:

$$\theta = 0.0482a + 1.6934 \quad (R^2 = 0.967\ 8) \quad (2)$$

式中: $\theta$  为土壤体积分含水量(%); $a$  为中子仪读数。

### 2.2 数据处理

用 Gardner 幂函数方程对各土层水分特征曲线进行拟合。

$$\theta = aS^{-b} \quad (3)$$

对 Gardner 方程求导得出比水容量:

$$c(\theta) = \frac{d\theta}{d\varphi} = -\frac{d\theta}{dS} = abS^{-(b+1)} \quad (4)$$

式中: $\theta$  为土壤容积含水量(%) ;  $S$  为土壤水吸力(MPa) ;  $a, b$  为参数 ;  $\varphi$  为土壤水势(MPa) ,  $\varphi = -S$ 。

土壤水吸力为 0.033 MPa 和 1.5 MPa 时的土壤容积含水量分别对应土壤田间持水量和凋萎系数,二者差值即土壤最大有效含水量。

用 Excel 2010 软件进行数据整理和图表绘制。并运用灰度关联法进行数据分析。灰度关联法是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,作为衡量因素间关联程度的一种方法。在进行数据分析时,设  $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$  为参考数列,  $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\} (i = 1, 2, \dots, m)$  为比较数列,则  $X_i(k)$  和  $X_0(k)$  的关联系数为:

$$\epsilon(k) = \frac{\min_i \min_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}| + \rho \max_i \max_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|}{|x_{0(k)} - x_{i(k)}| + \rho \max_i \max_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|} \quad (5)$$

式中: $\rho$  为分辨系数,一般取  $\rho = 0.5$  ;  $|x_{0(k)} - x_{i(k)}|$  为  $X_0$  与  $X_i$  第  $k$  个指标的绝对差 ;  $\min_i \min_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|$  和  $\max_i \max_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|$  为极小差和极大差。

据此可求出  $X_i(k)$  与对应的  $X_0(k)$  关联系数:

$$\epsilon = \{\epsilon(k) | k = 1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

比较数列对参考数列的灰关联度记作  $r(x_0, x_i)$ , 简记为  $r_i$ 。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon(k) \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线描述了土壤在非饱和状态下土壤水的能量和数量之间的关系,是表征土壤基本水力特性的重要指标,对研究土壤水的保持与供给有十分重要的作用。以土壤水吸力为横坐标,不同水吸力下对应的土壤容积含水量的为纵坐标,作人工刺槐林地表层(0—40 cm)、中层(40—120 cm)、深层(120—200 cm)的土壤水分特征曲线。由图 1 可知,人工刺槐林地各层土壤水分特征曲线形状较为接近,随土壤水吸力的增加土壤含水量整体变化趋势均表现为先快速下降,再缓慢下降,最后基本平稳。但在相同土

壤水吸力下,各土层土壤含水量不同,表现为土层越深,各土壤水吸力对应的土壤含水量越小。用 Gardner 模型对图 1 中曲线进行拟合,得到人工刺槐林地各土层土壤水分特征曲线的拟合方程(表 1),其中参数  $a$  表征土壤持水能力的大小, $a$  值越大则持水能力越强;参数  $b$  表征土壤含水量随土壤水吸力增加而递减的快慢, $b$  值越大则变化越快<sup>[13]</sup>。本研究中  $a$  值:表层(0.103 8)>中层(0.094 4)>(0.086 0); $b$  值:表层(0.284)<中层(0.291)<(0.298)。在 0—200 cm 土层内,人工刺槐林地土壤持水能力随土层的增加而减小。这主要是因为随土层深度增加,土壤容重增大,孔隙度减小。土壤表层因为枯落物和腐殖质较厚,土壤物理结构较好,所以持水能力较强。

土壤水分特征曲线的斜率称为比水容量,表示单位土壤吸力变化时单位质量土壤可释放或吸收的水量<sup>[14]</sup>。其数值的大小在一定程度上表示土壤的释水性和供水能力,是表征土壤供水性和耐旱性的重要指标<sup>[15]</sup>。由表 1 可知,随着土壤水吸力的增加,其比水容量也呈现递减趋势。已有研究表明,土壤水吸力为 0.1 MPa 时的比水容量值可很好地表征土壤供水能力<sup>[16]</sup>,人工刺槐林地该值的大小为表层(56.73%)>中层(53.74%)>深层(50.84%),且各土层之间差异性显著。说明人工刺槐林地,表层土壤的供水能力要高于深层土壤。这是因为表层土壤吸持水量较其他土层高很多,加之土壤团粒结构性较好,更有利土壤水分供应。

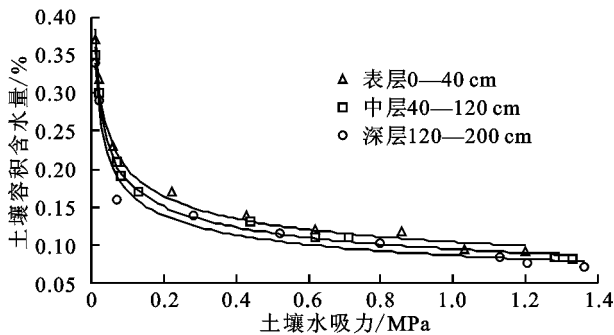


图 1 不同土层土壤水分特征曲线

表 1 不同土层土壤水分特征曲线及比水容量表达式

| 土层深度/cm | 土壤水分特征曲线 $\theta = aS^{-b}$ | 拟合系数 $R^2$ | 比水容量表达式                     | 比水容量( $S = 0.1$ MPa)/% |
|---------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------------------|
| 0—40    | $\theta = 0.1038S^{-0.284}$ | 0.9856     | $\theta = 0.0295S^{-1.284}$ | 56.73a                 |
| 40—120  | $\theta = 0.0944S^{-0.291}$ | 0.9915     | $\theta = 0.0275S^{-1.291}$ | 53.74b                 |
| 120—200 | $\theta = 0.086S^{-0.298}$  | 0.9699     | $\theta = 0.0256S^{-1.298}$ | 50.84c                 |

注:同列数据后不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

3.2 土壤水分常数

土壤水分常数主要包括反映土壤水物理特征及其对植物有效程度的各种特征值,可用来评价土壤中水分的保持和运动的状况,也可以用来评价土壤中水分被植物吸收和利用的程度<sup>[17]</sup>。由表 2 可知,在 0—200 cm 土层内,人工刺槐林地田间持水量、凋萎系

数、最大有效含水量均随土层深度的增加而减小,且各土层之间差异性显著。田间持水量和凋萎系数的平均值分别为 25.53%和 8.42%,最大有效水范围相对较宽,平均达 17.11%。这些水分性质表明,陕北黄土区人工刺槐林地土壤具有较大的有效水库容,涵养水源能力较强,可很好地调控对植物的水分的供给。

表 2 不同土层土壤主要水分常数

| 土层<br>深度/cm | 田间<br>持水量/% | 凋萎<br>系数/% | 最大有效<br>含水量/% |
|-------------|-------------|------------|---------------|
| 0—40        | 27.35a      | 9.25a      | 18.10a        |
| 40—120      | 25.47b      | 8.39b      | 17.08b        |
| 120—200     | 23.77c      | 7.62c      | 16.15c        |

注:水分常数均为体积含水量。

### 3.3 土壤水势垂直空间变化

由图 2 可知,在表层(0—40 cm)土壤水势从 $-0.21$  MPa 逐层增加到 $-0.08$  MPa,中层(40—120 cm)土壤水势动态波动较大,整体呈减小趋势,深层(120—200 cm)土壤水势稳定在 $-1.14$  MPa 附近。这是因为 0—40 cm 土层降雨入渗补给作用较强,土壤水分蒸发消耗强烈,随土层深度的增加,土壤水分蒸发量减小,土壤含水量增大,土壤水势升高;40—120 cm 土层由于降雨补偿作用的逐层递减,以及刺槐毛细根系的吸水作用,土壤含水量减小,土壤水势呈降低趋势,同时,由于根系在各土层的不均匀分布,根系在各土层的吸水量不同,所以土壤水势动态波动较大。120—200 cm 土层,由于降雨入渗补偿作用甚微,植物根系分布较少,根系耗水较小,所以土壤水势较为稳定。

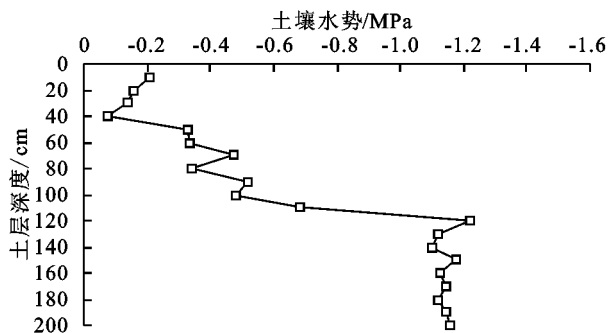


图 2 土壤水势垂直变化

对人工刺槐林地的表层(0—40 cm)、中层(40—120 cm)和深层(120—200 cm)进行灰关联度分析,各层 4—10 月土壤水势数列分别设为  $X_1 = \{x_1(k) | k = 4, 5, \dots, 10\}$ 、 $X_2 = \{x_2(k) | k = 4, 5, \dots, 10\}$  和  $X_3 = \{x_3(k) | k = 4, 5, \dots, 10\}$ 。以表层为参考数列,中层和深层为比较数列,分别记为  $R_{12}$  和  $R_{13}$ ,以中层为参考数列,深层则为比较数列,记为  $R_{23}$ ,根据公式(3)、公式(4)和公式(5)计算其灰关联度,其中人工刺槐林地表层与中层的土壤水势关联度  $R_{12}(0.899\ 8)$  大于表层与深层  $R_{13}(0.702\ 8)$ ,表明刺槐林地土壤水势表层与中层关系较为密切。中层与深层的土壤水势关联度  $R_{23}(0.711\ 5)$  大于表层与深层  $R_{13}(0.702\ 8)$ ,表明土壤水势深层与中层关系密切,其关联性好于表层与深层。这主要是因为人工刺槐林地土壤水分的主要来源为降雨入渗补偿,降雨产生的表层渗流优先补偿中层(120 cm)土壤水分,只有部分到达深层(120 cm 以下);深层土壤水分主要来自中层土壤水的二次渗

流,只有部分来自表层渗流,且深层土壤水分的蒸发消耗也要先经过中层再到表层,同时降雨的入渗量和入渗深度均随土层深度的增加而减小。这与白盛元等<sup>[18]</sup>、刘新平等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。

### 3.4 土壤水势月动态变化

由图 3 可知,刺槐林地 4—6 月土壤水势下降,7—8 月土壤水势上升;进入 9 月水势又开始下降。土壤水势变化曲线在一个生长季内呈现“先下降—然后上升—最后又下降”的季节性变化规律。这主要是因为 4—6 月气温回升,地表蒸发逐渐加强,植被开始展叶开花,土壤水分由于蒸散作用而被大量消耗,虽然降雨开始增加,在一定程度上对土壤水分进行补充,但在此期间土壤水分的消耗大于补给,土壤含水量不断降低,所以土壤水势降低;在 7—8 月气温达到全年最高值,植被生长最为旺盛,蒸散作用最为强烈,同时降雨量也为全年最大。降雨一部分用于蒸散,一部分渗入土壤,补充土壤水分,所以土壤水势上升。9—10 月气温较高,蒸散作用较为强烈,虽然仍有少量降雨发生,但降雨渗入土壤中的水分不能弥补因蒸散作用消耗掉的土壤水分,土壤水分减少,所以土壤水势下降。

用灰关联方法进行具体分析。在整个生长季,由于 4 月处于土壤水分稳定期之后<sup>[20]</sup>,其土壤水势的变化可以看作生长季内土壤水势的初始值,所以在计算各月土壤水势灰关联度时,以 4 月为参考数列  $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, 20\}$ , $k$  表示 0—200 cm 划分为 20 个层次。5—10 月土壤水势作为比较数列  $X_5, X_6, \dots, X_{10}$ ,根据公式(3)、公式(4)和公式(5)式计算得灰关联度: $R_{10}(0.868\ 9) > R_{05}(0.806\ 7) > R_{09}(0.780\ 4) > R_{07}(0.676\ 3) > R_{06}(0.654\ 8) > R_{08}(0.611\ 4)$ 。土壤水势 10,5,9 月变化态势与 4 月份较为接近;7,6,8 月与 4 月接近程度较差。这是因为土壤水势的变化受降雨量、气温变化以及植被的生长过程影响。5 月降雨稀少,气温较低,土壤水分蒸发较小,植被刚开始发育,蒸腾作用较小,土壤含水量缓慢减小,土壤水势虽然减小,但变化不大;6 月气温迅速升高,植被开始快速生长,土壤水分蒸发及植物蒸腾作用较强,此时虽然进入雨季,但降雨量相对 7 月和 8 月较小,土壤水势下降较大;7—8 月进入雨季,降雨量达到全年最大,降雨对土壤水分的入渗补偿作用大于气温升高引起的土壤蒸发和植被旺盛生长引起的蒸腾作用,土壤水势上升显著;9—10 月降水量明显减少,气温开始下降,植被生长虽然放缓并开始枯萎,但生命活动仍维持较高水平,蒸腾量较大,土壤水势下降,大小和 4 月较为接近。可见,通过灰关联度分析土壤水势的月动态变化,与通过试验数据作图分析,得到了相同的结论,说明可以用灰关联法分析土壤水势年内变化趋势。

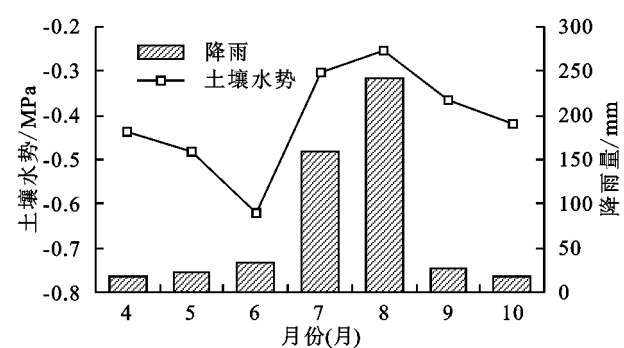


图 3 土壤水势月动态变化

4 结论

(1)陕北黄土区人工刺槐林地各土层土壤水分特征曲线可用 Gardner 模型幂函数方程进行拟合。在相同土壤水吸力下,各土层土壤含水量不同,表现为土层越深,各土壤水吸力对应的土壤含水量越小。0—200 cm 土层,人工刺槐林地土壤的持水和供水能力均随土层的增加而减小。

(2)通过土壤水分特征曲线求得人工刺槐林地土壤水分常数来表征土壤水分性质,陕北黄土区人工刺槐林地土壤具有较大的有效水库容,涵养水源能力较强,可很好地调控对植物的水分的供给。

(3)陕北黄土区人工刺槐林地土壤水势垂直空间分布表现为表层(0—40 cm)土壤水势逐层增加,中层(40—120 cm)土壤水势动态波动较大,整体呈下降趋势,深层(120—200 cm)土壤水势比较稳定。通过灰关联度分析可知,人工刺槐林地土壤水势表层与中层关系较为密切,深层与中层关联性次之,表层与深层关联性最差。

(4)陕北黄土区人工刺槐林地 0—200 cm 土层土壤水势,4—6 月呈下降趋势,7—8 月显著上升,9—10 月再次下降。从各月土壤水势灰关联度来看,人工刺槐林地土壤水势 10 月,5 月,9 月变化态势与 4 月关联度较高;7 月,6 月,8 月与 4 月关联度较差。

(5)本研究通过灰关联度分析了陕北黄土区人工刺槐林地土壤水势的月动态变化规律,得到的结论与通过试验数据作图得出的结论一致,说明可以用灰关联法分析土壤水势年内变化趋势。此外,本文仅对研究区 0—200 cm 土层土壤水势的变化规律进行了研究,在土层深度上存在一定局限性,研究对象也只选择了人工刺槐林地,略显单一。对于不同树种及更深土层土壤水势的变化规律有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Chen L, Huang Z, Gong J, et al. The effect of land cover / vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. Catena, 2007, 70(2): 200-208.  
[2] Moreno-de las Heras M, Espigares T, Merino-Martín

L, et al. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes [J]. Catena, 2011, 84(3): 114-124.  
[3] 卫新东,汪星,汪有科,等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 88-97.  
[4] 冯永建,马长明,王彦辉,等. 华北落叶松人工林蒸腾特征及其与土壤水势的关系[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 93-98.  
[5] 张建军,李慧敏,徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7056-7066.  
[6] 贾小旭. 典型黄土区土壤水分分布及其对草地生态系统碳过程的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.  
[7] 尹秋龙,焦菊英,寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 459-469.  
[8] 王力,邵明安,王全九,等. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比[J]. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1279-1286.  
[9] 杨磊,王伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 71-81.  
[10] 孟薇,陈洪松,王克林,等. 红壤坡地油茶林及自然恢复植被下土壤水势动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 90-95.  
[11] 王鹏,宋献方,侯士彬. 太行山区典型植被对土壤水势动态的影响研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1467-1476.  
[12] 吴淑杰,韩喜林,李淑珍. 土壤结构、水分与植物根系对土壤能量状态的影响[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(3): 24-26.  
[13] 谢静,关文彬,崔国发,等. 锡林郭勒草原不同植被类型的土壤水分特性[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 45-48.  
[14] 白一茹,邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式坡面土壤水分特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 122-129.  
[15] 马爱生,刘思春,吕家珑,等. 黄土高原地区几种土壤的水分状况与能量水平[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(11): 117-120.  
[16] 宁婷,郭忠升,李耀林. 黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 166-170.  
[17] 蒲金涌,冯建英,姚晓红,等. 甘肃黄土高原土壤农业水分常数分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 205-209.  
[18] 白盛元,汪有科,马建鹏,等. 黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 218-223, 231.  
[19] 刘新平,张铜会,赵哈林,等. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 166-171.  
[20] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 178-183.