

# 黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征

缪凌<sup>1</sup>, 董建国<sup>1,2</sup>, 汪有科<sup>1,2</sup>, 蒋观滔<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**人工林草地土壤干化问题正在日益严重的威胁着黄土高原人工植被建设成效。利用2013年5月—2014年11月的定位监测0—900 cm深层土壤水分资料分析得出:(1)研究区四种不同土地利用类型剖面土壤水分均表现出上层波动剧烈,下层变化较小的特征。上层土壤含水量具有与明显的季节性波动变化特征,代表当年降水的入渗深度,枣林、苜蓿草地、杏林和农地降水入渗深度范围分别为0—240,0—180,0—200和0—120 cm。(2)深层土壤含水量年内变化较小,枣林、苜蓿草地和杏林土壤水分在根系吸水作用下有微弱减少,农地作物对深层土壤水分利用有限,得到降水补给土壤水分有所增加。土地利用方式对深层土壤水环境的影响大小依次为苜蓿草地>杏林>枣林>农地。(3)枣林、苜蓿草地和杏林深层土壤水分均存在一定的亏缺,苜蓿草地亏缺最为严重,平均亏缺度为67.7%,杏林和枣林平均亏缺度为55.4%和48.7%。深层土壤水分的变化规律能够反映长时段不同土地利用类型对土壤水分生态环境的深刻影响,对黄土高原植被的恢复、建设及评价具有重要意义。

**关键词:**黄土高原;土地利用;深层土壤水分;水分亏缺

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-00013-06

## Soil Water in Deep Layers Under Different Land Use Patterns in the Loess Hilly and Gully Region

MIAO Ling<sup>1</sup>, DONG Jianguo<sup>1,2</sup>, WANG Youke<sup>1,2</sup>, JIANG Guantao<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In the Loess Hilly and Gully Region where climatic conditions are dry with severe water shortage, several plants causes soil dessication and ecological degradation. In order to compare the differences and characteristics of deep soil water under different land use patterns, relevant water moisture data in 0—900 cm soil layers was analyzed through May 2013 to November 2014. Results showed that: (1) the soil profile under different land use patterns could be divided into two layers according to the vertical variation. The upper content changed dramatically, and the deep soil moisture was stable; the temporal variations of the upper soil water were accordance with the change of rainfall in the wet season, it represented the depths of rainfall infiltration and plant-root water uptake, the depths of rainfall infiltration for jujube, almond, alfalfa and farmland were 240, 200, 180 and 120 cm, respectively; (2) soil water in deep layers changed little within a year, soil water contents of alfalfa grassland, jujub and almonds decreased slightly, however, crops had a shallow root system, utilization of deep layer soil water was limited; the water environment in deep soil layers was significantly affected by plant types, and the effect degrees decreased in the order: alfalfa grassland>jujube>almonds>farmland; (3) alfalfa grassland had led to the serious soil moisture deficit, the average degree was 67.7%, and jujube and almonds were 55.4%, 48.7%, respectively. It is vital to investigate temporal variability of deep soil moisture for the restoration, reconstruction and evaluation of vegetation in the Loess Plateau.

**Keywords:** Loess Plateau; land use pattern; deep soil moisture; soil moisture deficit

土壤水分是影响黄土丘陵半干旱区植被生长发育和生态环境恢复的主要因子<sup>[1-2]</sup>。该区土层深厚,降水

不足,外加长期不合理的土地利用,致使土壤水分过度开发,出现了严重的土壤水分亏缺问题,土壤干层成为

黄土高原地区半干旱和半湿润环境条件下的一种特殊的水文现象<sup>[3-5]</sup>。20 世纪 80 年代以来,黄土高原地区人工林草地土壤干层现象越来越严重,干层厚度也在不断加深<sup>[6-7]</sup>。国内众多学者围绕土壤干层的特征、成因、分布、评价指标、危害及缓解对策进行了大量研究。李玉山<sup>[8]</sup>研究了黄土高原森林植被对陆地水循环的影响,分析阐明了土层干燥化的成因及其带来的影响。王进鑫等<sup>[9]</sup>定位监测了人工林地 0—320 cm 土层土壤水分亏缺与恢复特征。程积民等<sup>[10-11]</sup>定位测定了半干旱区沙棘和柠条林地土壤水分动态与水分过耗特征。李军等<sup>[12]</sup>比较分析了黄土高原南、中、北部 3 个植被类型区的苹果、刺槐、柠条等 23 种不同立地和树龄林地深层土壤水分,定量评价了各类林地深层土壤干燥化效应。以上研究结果表明,黄土高原人工林草地土壤干燥化效应已成为制约黄土高原退耕还林与植被恢复成效的严重生态隐患。目前黄土高原地区有关土壤水分的研究,多为一次调查取样研究,缺少长期定位研究,对林地土壤水分的观测深度不足(通常不超过 500 cm),未能反映人工林草地深层土壤水分利用特征。因此,本研究通过在陕西省米脂县远志山布设中子管长期定位监测 0—900 cm 深层土壤水分,分析不同土地利用类型对土壤深层水分环境的影响,有助于了解黄土高原丘陵沟壑区土壤水分亏缺状况,以期合理利用土壤水分,制定科学精确的植被布局及管理措施,缓解土壤干层提供科学的理论支撑。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于陕西省米脂县远志山西北农林科技大学试验基地(37°40′—38°06′N,100°15′—110°16′E)进行,研究区属典型的黄土高原丘陵沟壑区。该区属中温带半干旱气候,年均气温 8.8℃,日照时数 2 372.7 h,年均无霜期 165 d。年均降雨量 451.6 mm,降水多集中于 7—9 月,占全年降水量的 50%以上。研究区土壤属于粉质砂壤土,0—1 m 土壤容重平均为 1.30 g/cm<sup>3</sup>,1—5 m 土壤容重有所增加,平均为 1.31 g/cm<sup>3</sup>,环刀法测定田间持水量平均为 23.4%、饱和含水率平均为 39.8%(质量含水率)。有效 N,P,K 含量分别为 34.73,2.90,101.9 mg/kg,有机质含量为 2.1 g/kg,pH 为 8.6,土壤较贫瘠。该区土层深厚,土质均一,地下水埋深 50 m 以下。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验布置 在研究区立地条件基本一致的缓坡面(坡度<10°)上选择四种不同的土地利用方式(枣林、苜蓿草地、杏林和农地)安装中子管(铝管)监

测土壤水分(表 1)。其中枣林和杏林是每 4 棵树作为一块样地,在 4 棵树的中心位置安放铝管作为中子仪土壤水分测定点,并选择临近的 1 块样地作为重复。苜蓿草地与农地两块样地面积均为 10 m×10 m,在样地中心位置处安放 1 根中子管作为中子仪土壤水分测定点,并在水平间隔 2 m 处安放中子管作为重复。土壤水分观测深度为 1 000 cm,以 20 cm 为间隔测定。

表 1 土壤水分测定样地基本情况

土地利用	说明
7 年生枣林	行距×株距为 2 m×3 m,林下无杂草
20 年生苜蓿草地	不施肥,不刈割
15 年生杏林	行距×株距为 2 m×3 m,林下无杂草
农地	冬小麦—夏玉米轮作,定期施肥

1.2.2 数据采集与处理 本研究选择 2013 年 5 月至 2014 年 11 月的土壤水分观测数据进行分析。土壤水分利用 CNC503 DR 型中子土壤水分仪观测,测定深度为 0—1 000 cm,具体观测期为:2013 年 5 月至 2014 年 11 月每月观测两次,由于冬季土壤水分变化不大,监测次数有所减少。中子仪不定期校核可以提高土壤含水量的精度,试验区分别在 2013 年 10 月 3 日、2014 年 5 月 3 日和 2014 年 7 月 21 日对中子仪进行校核,中子仪标定公式分别为  $y=70.04x-0.500$ ,  $y=66.27x-0.132$ ,  $y=63.91x+0.359$ 。由于人为测量误差等原因,本文均采用 0—900 cm 的实际观测数据(苜蓿地由于仪器故障,采用 0—700 cm 观测数据)。降水量由试验区安装的自动气象站记录,每 30 min 记录一次数据。2013 年降水量为 521.6 mm,2014 年降水量为 444.2 mm,最大降雨为 2014 年 7 月 8 日,日降水量为 90.0 mm。数据分析和作图采用 Excel 2007,SPSS 21,Surfer 11 进行。

1.2.3 土壤水分亏缺度计算 土壤水分亏缺程度计算公式<sup>[9,13]</sup>:

$$D=\frac{D_a}{F} \quad (1)$$

$$D_a=F-W_c \quad (2)$$

式中: $D$ ——土壤水分亏缺度; $D_a$ ——植物水分亏缺量; $F$ ——土壤田间持水量; $W_c$ ——土壤实际储水量。当  $D<0$  时水分不亏缺, $D<25\%$  时水分轻度亏缺, $25\%\leq D\leq 50\%$  时水分中度亏缺, $D>50\%$  时水分严重亏缺。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型 0—900 cm 土层土壤水分剖面特征

因数据较多,本文选择具有代表性的 2013 年 5

月,8月,11月和2014年5月,8月,11月的土壤水分数据,绘制枣林、苜蓿草地、杏林和农地四种土地利用类型的土壤水分垂直剖面分布图。之所以这样选择,是因为一年当中的5月属于雨季到来之前,8月正值雨季,而11月雨季已过,对研究土壤水分年内变化特征具有一定意义。从图1中可以看出剖面土壤水分均表现出上部含水量随时间变化剧烈,下部含水量随时间变化较小的特征。土壤含水量在土壤剖面上的这种变化特征是由于降水量的时间差异和不同土地利用类型下降水入渗深度的不同所造成。垂直方向上,枣林和杏林土壤水分表现出先减小后增大的“S”型变化趋势,苜蓿草地土壤含水量在400—440 cm处虽略有增加,但总体趋势表现为随着深度的增加土壤含水量逐渐减少的变化规律。李玉山<sup>[14]</sup>认为黄土区

降水入渗深度与降水量相对应,降水愈丰入渗愈深,入渗深度多为1~2.5 m。在干湿季明显的季风条件下,黄土剖面上层土壤处于水分消耗、补充的交替过程之中,含水量波动剧烈,该层能够反映降水的入渗深度以及植物当年的吸水深度。不同土地利用方式下的降水入渗深度存在一定差异,枣林的降水入渗深度大约在0—240 cm土层,苜蓿草地约在0—180 cm土层,杏林大约在0—200 cm土层,农地大约在0—120 cm范围。农地的降水入渗深度最浅,是因为化肥的使用破坏了土壤的团粒结构,容易造成土壤板结,影响土壤水分的下渗。深层土壤难以有水分入渗补充,土壤含水量变化不大,枣林、苜蓿草地、杏林和农地深层土壤水分的含水量变异系数小,分别为3.03%,3.60%,6.19%,3.88%。

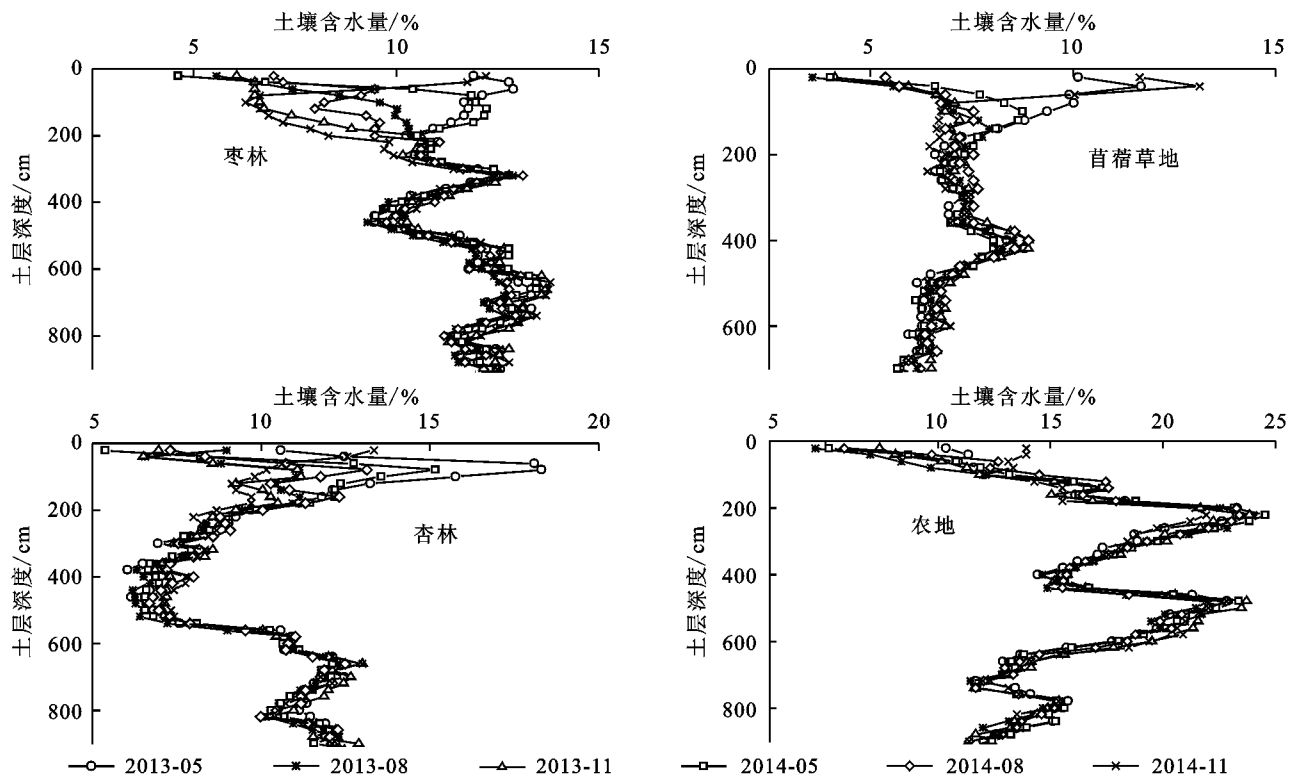


图1 不同土地利用方式下土壤水分剖面特征

## 2.2 不同土地利用类型土壤含水量年内变化特征

黄土区上层土壤含水量易受降水入渗补给和蒸散耗水的影响,因此该层的土壤含水量具有明显的季节性变化特征<sup>[15]</sup>。从图2中可以看出,四种土地利用方式上层的土壤含水量随时间变化可以划分为3个主要时期,平衡期(11月—翌年4月)、失水期(5—6月)和雨季蓄水期(7—10月)。2013年11月至翌年4月土壤水分基本没有发生变化,此时段降水极少,温度较低,植物耗水较少,土壤水分处于收支平衡;2014年5月下旬至6月底的降水量仅有26 mm,平均气温为21.7℃,土面蒸发作用强烈,土壤含水量迅速降低;7月至10月由于降水补给使得土壤水分逐渐累积。农地的土壤水分变化不仅

与降水有关,还与其种植的作物有关。冬小麦一般在9月中下旬至10月上旬播种,此时的土壤含水量处于年内最大值,有利于种子的发芽出苗。3月中旬小麦进入拔节展叶期,蒸散强度增加,土壤含水量逐渐下降,至7月土壤含水量降至全年最低。夏玉米成熟至冬小麦播种以前,土壤水分恢复较为迅速。

深层土壤接受降水补给较少,其土壤水分主要受植物利用影响,因而土壤含水量动态变化较小,且不同土地利用方式下深层土壤水分有着不同的动态变化特征。农地的深层土壤含水量最高,而且土壤水分略有增加,是因为农地作物的根系较浅,对深层土壤水分利用有限,降水的补给使得土壤含水量有所提

升。苜蓿具有极深的吸水根系,能够吸收利用深层土壤水分以供生长需要,因此苜蓿草地深层土壤水分随时间的延长逐渐减少。枣林和杏林的吸水根系也较深,在深层土壤内形成了稳定的低湿层(图 2),土壤

含水量也表现出随着时间逐渐减小的规律。以上分析结果表明农地深层土壤在经过降水再分配过程,土壤水分有所积累,枣林、苜蓿草地和杏林深层土壤平均含水量在植物根系吸水的作用下逐渐减少。

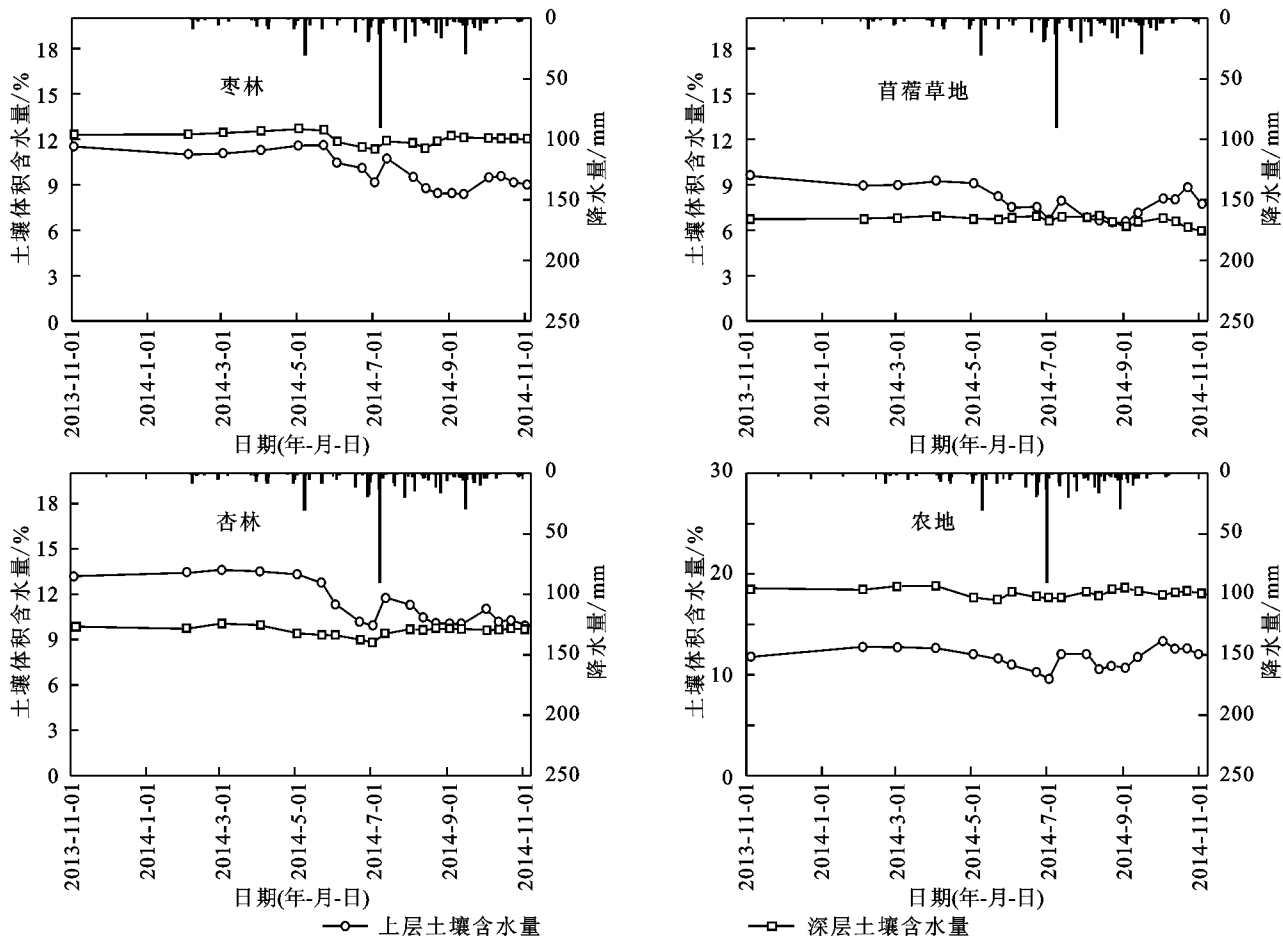


图 2 不同土地利用方式上层和深层土壤体积含水量动态变化

### 2.3 土壤水分亏缺及土壤干层

土壤水分亏缺量是指土壤储水量与田间持水量之间的差额。根据式(1)和(2),对四种不同土地利用深层土壤水分亏缺度进行计算并作图。图 3 中的三条直线分别表示不同的土壤水分亏缺程度。从图中可以看出四种土地利用类型降水入渗层均存在水分亏缺的情况,Liu 等<sup>[16]</sup>认为该层出现的水分亏缺在得到降水的补充后能够缓解。枣林、苜蓿草地、杏林和农地深层土壤水分均表现出不同程度的亏缺。其中,苜蓿草地土壤水分亏缺最为严重,平均亏缺度达到 67.7%,土壤干层深度达到 700 cm。杏林在 200—560 cm 处于严重亏缺,560 cm 以下为中度亏缺,杏林土壤水分平均亏缺度为 55.4%。枣林较杏林亏缺情况有所缓解,主要为中度亏缺,在 400—500 cm 处严重亏缺,平均亏缺度为 48.7%。农地土壤水分以轻度亏缺和中度亏缺为主,水分状况相对良好。由此可以看出,高耗水的人工林草的种植,使水分亏缺向深层发展,土壤水分处于负平衡状态,最终在土体某一深度范围形成厚度不等土壤

干层。这种土壤干层使得深层土壤水分的调蓄作用减弱甚至消失,地上植被转而依靠当年降雨进行生长,易受干旱气候条件的制约<sup>[6]</sup>。同时,巨大的水分亏缺层阻止了表层土壤水分向深土层运移,进而改变了降水—地表水—土壤水—地下水之间的循环过程<sup>[17]</sup>。

### 2.4 不同土地利用类型对深层土壤水分的影响

黄土区 0—2 m 土层处在水分消耗、补充的不断交替过程中,不能反映长时段土壤水分环境的变化趋势<sup>[18]</sup>。而 2 m 以下土壤水分很难得到降水入渗补充,可以反映土地利用方式对土壤水分生态环境的深刻影响。将每 100 cm 土壤平均含水量进行方差分析,结果如表 2 所示:在 0.01 显著性水平下,不同的土地利用类型土壤剖面每一层的平均含水量均表现出显著性差异,说明植被能够影响到深层的土壤水分。根据 0—900 cm 土层平均含水量大小可以看出,土壤含水量大小依次为:农地>枣林>杏林>苜蓿草地。苜蓿草地土壤含水量最低,仅为 7.2%。主要原

因是苜蓿在生长过程中长期剧烈耗水,年耗水量约为 300~1 450 mm<sup>[15]</sup>,其平均值远高于米脂县当地年降水量值,根系吸水层超过 10 m 深度<sup>[19-20]</sup>,能够吸收利用深层土壤水分,满足其生长所需。农地不同深度土壤平均含水量变化范围为 10.9%~21.3%,显著高于其他土地利用类型的土壤含水量。农作物在上一期收获下一期播种前为休闲期,蓄存的水分能够入渗到深层,且一般一年生的农作物根系较浅<sup>[21]</sup>,消耗的深层水分有限。研究表明农地作物根系直接吸水深度大约为 300 cm,从图 1 中发现,农地 300—450 cm 处土壤含水量仍在减少,该处土壤水分在土壤水

势梯度差的作用下能够向上运动而被农作物利用消耗,农地作物能够影响到的土层范围大约在 450 cm。从表 2 中可以发现,枣林与杏林 0—900 cm 范围内土壤平均含水量差别并不大,但在 200—600 cm 范围内,杏林平均含水量为 8.07%,远小于枣林的 11.25%,说明杏林对该范围内的水分消耗远大于枣林,结合图 1 土壤水分剖面特征分析得出,杏林吸水深度大约在 560 cm 处左右,枣林根系吸水深度大约在 500 cm 左右。以上分析结果表明,不同土地利用方式对深层土壤水环境的影响具有显著性差异,其影响的大小依次为苜蓿草地>杏林>枣林>农地。

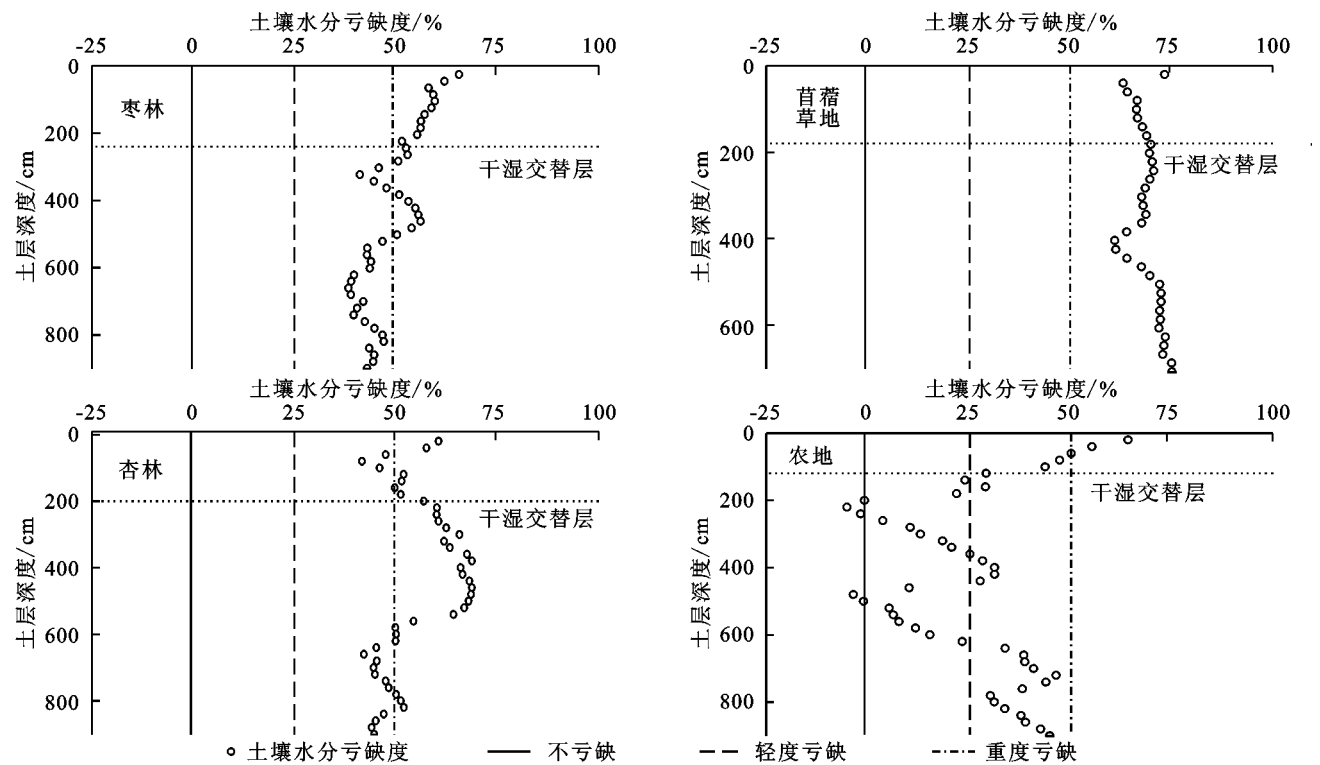


图 3 不同土地利用类型土壤水分亏缺度

表 2 不同土地利用方式下土壤含水量方差分析

土层深度/cm	枣林	苜蓿草地	杏林	农地
0—100	9.4±2.0b	8.2±1.7b	11.6±2.8a	10.9±1.2a
100—200	9.5±1.6c	7.2±0.5d	10.4±0.9b	17.9±1.3a
200—300	10.8±0.6b	7.0±0.3d	8.3±0.3c	21.3±0.8a
300—400	11.4±0.3b	7.7±0.3c	7.4±0.4d	16.8±0.6a
400—500	10.4±0.4b	7.4±0.3c	7.0±0.4d	19.7±1.0a
500—600	12.4±0.5b	6.5±0.2d	9.6±0.7c	19.9±0.7a
600—700	13.3±0.5c	6.2±0.2d	12.1±0.6b	14.4±0.7a
700—800	12.5±0.5b	—	11.2±0.4c	13.4±1.2a
800—900	12.2±0.4b	—	11.8±0.6c	13.7±0.4a
0—900	11.3±0.5b	7.2±0.2d	9.9±0.5c	16.4±0.2a

注:显著性水平均为  $\alpha=0.01$ 。

3 结论与讨论

(1) 黄土区上层土壤受降水入渗补给、蒸散等因

素影响,土壤水分变化剧烈,具有明显的季节性波动变化特征。该层反映的是降水的入渗深度以及植物当年的吸水深度,不同土地利用类型的降水入渗深度

不尽相同,枣林大约在0—240 cm范围,苜蓿草地大约在0—180 cm,杏林大约在0—200 cm,农地大约为0—120 cm。降水入渗层以下难有水分入渗补充,深层土壤水分随时间变化较小。

(2) 深层土壤接受降水补给较少,其土壤水分主要受植物根系吸水影响。枣林、苜蓿草地和杏林根系较深,能够利用深层的土壤水分以供生长需要。苜蓿草地吸水深度超过700 cm,枣林和杏林的影响范围接近600 cm,农地达450 cm。枣林、苜蓿草地和杏林深层土壤含水量随着年限的增加逐渐减少,农地作物根系较浅,深层含水量在降水的补给下有所增加。

(3) 不同土地利用方式对深层土壤水环境影响具有极显著差异,其影响的大小依次为苜蓿草地>杏林>枣林>农地。枣林、苜蓿草地、杏林对深层土壤水分过度消耗,表现出不同程度的水分亏缺,形成永久性干层。其中苜蓿草地水分亏缺最为严重,杏林次之,枣林土壤水分状况相对较好。

黄土丘陵区上层土壤含水量动态变化与当地降雨的季节性保持一致,因此,探讨土地利用方式对土壤水环境的影响必须要了解更深层次土壤水分变化规律。黄土丘陵区深层土壤水分亏缺现象是在气候干旱的环境背景下,不合理的人工植被配置导致植被蒸腾作用过度消耗土壤储水造成的。随着大规模退耕还林还草工程的实施,人工植被将成为该地区最主要的植被类型,倘若这种植被恢复模式以耗竭土壤水库为代价,必将对区域土壤水环境造成重大影响,危及当地生态安全和区域可持续发展。因此,必须依据当地土壤水分背景情况进行人工植被恢复,选择合适的植被类型,控制合理的植被密度,并辅以相应的水土保持措施,以拦蓄有限的降水补充土壤水分,改善严重土壤水分亏缺状况。本研究存在的不足及问题:(1) 土壤水分监测时间有限,研究深层土壤水分随时间动态变化仅靠一年的监测数据缺乏说服力;(2) 由于仪器故障,苜蓿草地的监测深度仅达到700 cm,而有研究表明苜蓿根系吸水深度能够延伸到1 000 cm以下。因此,为了更加深入地了解不同土地利用方式对深层土壤水分的影响,需要长期稳定的监测数据提供支撑。

#### 参考文献:

- [1] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 513-520.
- [2] 张哲,焦峰,梁宁霞,等. 延河流域不同植被带土地利用方式的土壤水分分析评价[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 74-77.
- [3] 陈洪松,王克林,邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 155-161.
- [4] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持, 1999(5): 13-16.
- [5] 王力,邵明安,王全九,等. 黄土区土壤干燥化研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 27-31.
- [6] 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.
- [7] 程立平,刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207.
- [8] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [9] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2395-2401.
- [10] 程积民,万惠娥,雍绍萍,等. 黄土丘陵区沙棘灌木林地土壤水分动态研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1352-1356.
- [11] 程积民,万惠娥,王静,等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [12] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [13] 李小英,段争虎,刘理臣,等. 黄土高原西部不同集雨保水措施下土壤水分变异特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 118-123.
- [14] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.
- [15] 程立平,刘文兆,李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1975-1983.
- [16] Liu W, Zhang X C, Dang T, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1133-1138.
- [17] 张晨成,邵明安,王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 102-108.
- [18] 樊军,郝明德,邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [19] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404-411.
- [20] 方新宇,李军,王学春,等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干燥化与草粮轮作水分恢复效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3348-3356.
- [21] 王燕培,柴守玺,陈玉章,等. 不同秸秆还田处理对旱地冬小麦土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 164-170.