

# 左云县店湾镇春季不同植被条件下土壤含水量研究

张秀伟<sup>1</sup>, 牛俊杰<sup>2</sup>, 赵景波<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 山西 晋中 030619)

**摘要:** 为了研究左云县店湾镇春季不同植被条件下0—600 cm深度范围内土壤垂直剖面水分变化特征, 分别对该区乔木(白榆和小叶杨)林地、灌木(柠条和沙棘)林地和草地5种不同植被条件下土壤水分进行了研究。结果表明: 研究区不同植被条件下土壤剖面含水量变化规律不同。左云县矿区春季各土层平均含水量草地最高, 柠条林地次之, 白榆林地最少。其中草地各土层平均含水量比柠条林地高0.3%, 比白榆林地高3.8%。该区各植被条件下土壤水分主要呈难效水状态。且各植被条件下土壤在200—400 cm深度范围内都存在干层, 有轻度干层、中度干层和重度干层发育。该区水循环主要是地表水循环, 地下水循环基本不存在, 形成了土壤—植物—大气的水分循环模式, 属于异常水分循环类型。

**关键词:** 土壤含水量; 土壤水分有效性; 土壤干层; 水循环与水平衡; 左云县

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0052-06

## Research on Soil Moisture Content in Different Vegetation in Dianwan Town of Zuoyun County

ZHANG Xiuwei<sup>1</sup>, NIU Junjie<sup>2</sup>, ZHAO Jingbo<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. Research Center for Scientific Development in Fenhe River Basin, Taiyuan Normal University, Jingzhong, Shanxi 030619, China)

**Abstract:** In order to investigate the changes of soil moisture in different soil layers within the depth of 0—600 cm under different vegetation in Zuoyun Town in spring, we determined the soil moisture of five different types of vegetation such as Arbor woodland (*Ulmus pumila* and *Populus simonii* Carr), shrub woodland (*Caragana Korshinsk* and *Hippophae rhamnoides*), and grassland. The results showed that soil moisture of different vegetation had different patterns. The average moisture content of grassland was the highest. *Caragana korshinskii* was lesser and *Ulmus pumila* was the least in spring in Zuoyun mining area, the average soil moisture of the grassland was 0.3% higher than *Caragana Korshinsk* while 3.8% higher than *Hippophae rhamnoides*. Soil water of the vegetation land in the area was the difficult unavailable water. Each profile of the vegetation land in the 200—400 cm soil layer existed dry soil layer which had developed mild dry soil layer, moderate dry soil layer and severe dry soil layer. Water cycle was mainly ground water cycle, and didn't exist basically groundwater circulation. Soil-plant-atmosphere water cycle model was formed and belonged to abnormal water cycle type.

**Keywords:** soil moisture; soil water availability; dry soil layer; water cycle and water balance; Zuoyun County

晋西北地区气候复杂, 大部分地区属大陆性气候, 年温差、日温差大, 是黄土高原的重要组成部分。现代地表景观以温带半干旱草原和半湿润森林草原为主, 是我国农牧交错带的一部分<sup>[1]</sup>。作为黄土高原半湿润半干旱典型地区, 既是生态过渡带又是环境脆弱区, 研究该区土壤含水量及其对植被的影响是非常重要的。水分是影响植物生长的重要因素, 不断地供

给植被水分营养, 植被才得以繁衍生长<sup>[2]</sup>。因此, 土壤水分高低是黄土高原晋西北地区生态建设和植被恢复要考虑的首要问题。现阶段黄土高原地区正在进行退耕还林、还草等生态环境建设工程, 研究土壤含水量的变化及其影响对这一工程的有效实施起着至关重要的作用, 查明黄土高原不同地区人工植被下土壤水分状况具有极其重要的意义。关于黄土高原

土壤含水量及其变化,已经进行过较长期的研究,取得了许多重要成果<sup>[3-13]</sup>。但对矿区土壤含水量的研究还比较少,本文根据对晋西北矿区左云县店湾镇乔木、灌木、草本植物等5种不同植被条件下土壤含水量的测定结果,讨论该区春季不同植被土层含水量的特点与土层的干化程度等问题。

## 1 数据来源与研究方法

本次取样地点位于左云县店湾镇西沟村,该区地处黄土高原,山丘起伏,沟壑纵横,是典型的黄土丘陵区,属北温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温6.1℃,多年平均降水量409 mm,蒸发量1 847.5 mm,无霜期119 d。四季分明,春季干旱多风,夏季较热多雨,秋季潮湿温热,冬季寒冷少雪。该镇蕴含着丰富的煤炭资源,已探明的煤炭储蓄量已达2.5亿t。

土壤样品用土钻采取,本文所选取的5种样地分别为白榆林地、小叶杨林地、柠条林地、沙棘林地、草地。每个采样点取样深度为600 cm,每个样品间距10 cm,每孔取土样60个,所取样品均装入事先称重并标号的铝盒并用胶带密封,避免日光照射,且尽快带回室内测定,尽量减少水分损失。含水量的测定采用烘干称重法,该方法操作简单,数据重复性好。样品置于恒温鼓风烘箱中,烘干温度为105℃。烘干10 h以上且在3 h内为恒重即可,烘干前后铝盒加土

重均用高精度电子天平称得。所测样品的土壤含水量 $W=(W_1-W_2)/W_2\times 100\%$ ,其中 $W$ 为所测样品的土壤含水量, $W_1$ 为烘干前土壤样品重量, $W_2$ 为烘干后土壤样品重量。

## 2 结果与分析

### 2.1 乔木林地土壤含水量

2.1.1 白榆林地土壤含水量 于2012年5月12日在左云县店湾镇西沟村对白榆林地进行两个剖面0—600 cm深度取样,该林地主要植被为白榆和草本植物。树冠径20~30 cm,树高500 cm左右,长势良好。为便于区别,将这两孔分别用A,B来表示。A孔:平均含水量为6.3%,变化范围为3.9%~13.4%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—100 cm,平均含水量为9.5%,变化范围为6.9%~13.4%;第2层在110—400 cm,平均含水量为6.2%,变化范围为3.9%~11.5%;第3层在410—600 cm,平均含水量为5.0%,变化范围为4.1%~6.5%(图1A)。B孔:平均含水量为6.4%,变化范围为4.2%~12.0%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—100 cm,平均含水量为8.6%,变化范围为5.9%~12.0%;第2层在110—400 cm,平均含水量为6.7%,变化范围为4.4%~10.2%;第3层在410—600 cm,平均含水量为4.9%,变化范围为4.2%~6.5%(图1B)。

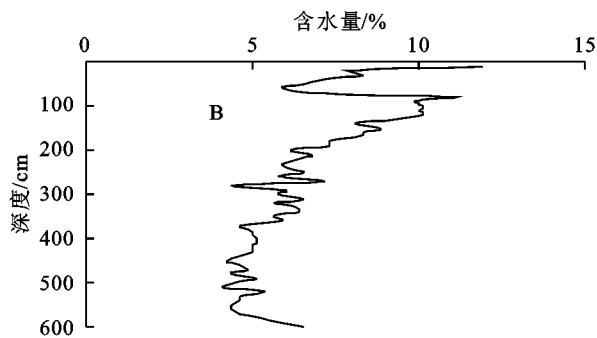
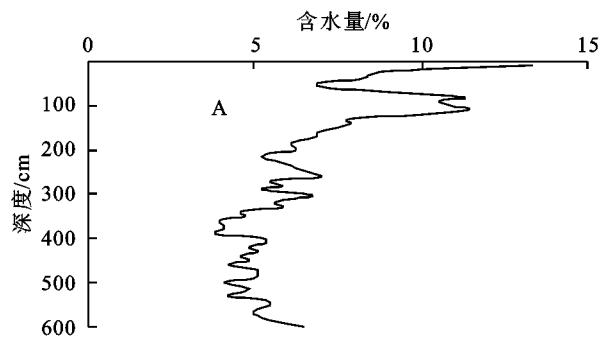


图1 左云县白榆林地土壤含水量

2.1.2 小叶杨林地土壤含水量 于2012年5月12日在左云县店湾镇西沟村对小叶杨林地进行3个剖面0—600 cm深度取样,该样地杨树密度较大,行距约2 m,株距约1.5 m,树冠径约3 m,树高约6 m,长势良好。为便于区别,将这3孔分别用A,B,C来表示。A孔含水量测定结果得知,45龄小叶杨林地土壤含水量变化为5.2%~13.3%,平均含水量为8.8%。根据土层含水量的纵向差异,可将剖面含水量分为3个层次:由上向下第1层为0—200 cm,含水量较高,变化范围为7.0%~13.3%,平均含水量为9.8%;第2层为210—400 cm,变化范围为6.9%~13.2%,平均含水量为10.2%,比第1层高0.4%;第3层位于410—600 cm,变

化范围为5.2%~8.1%,平均含水量为6.6%,比第1层低3.2%,比第2层低3.6%(图2A)。B孔土层含水量为5.1%~15.4%,平均含水量为9.2%。根据土层含水量纵向差异,可将剖面含水量分为3个层次:由上向下第1层为0—200 cm,含水量较高,变化范围为7.3%~15.4%,平均含水量为11.2%;第2层为210—400 cm,变化范围为6.8%~13.7%,平均值为9.8%,比第1层低1.4%;第3层位于410—600 cm,变化范围为5.1%~8.2%,平均含水量为6.6%,比第1层低4.6%,比第2层低3.2%(图2B)。C孔土层含水量范围为4.9%~18.8%,平均含水量为9.0%。根据土层含水量纵向差异,可将剖面含水量分为3个层次:由

上向下第1层为0—200 cm,含水量较高,变化范围为4.9%~18.8%,平均含水量为11.1%;第2层为210—400 cm,变化范围为7.1%~13.2%,平均含水量

为9.4%,比第1层低1.7%;第3层位于410—600 cm,变化范围为4.9%~9.2%,平均含水量为6.3%,比第1层低4.8%,比第2层低3.3%(图2C)。

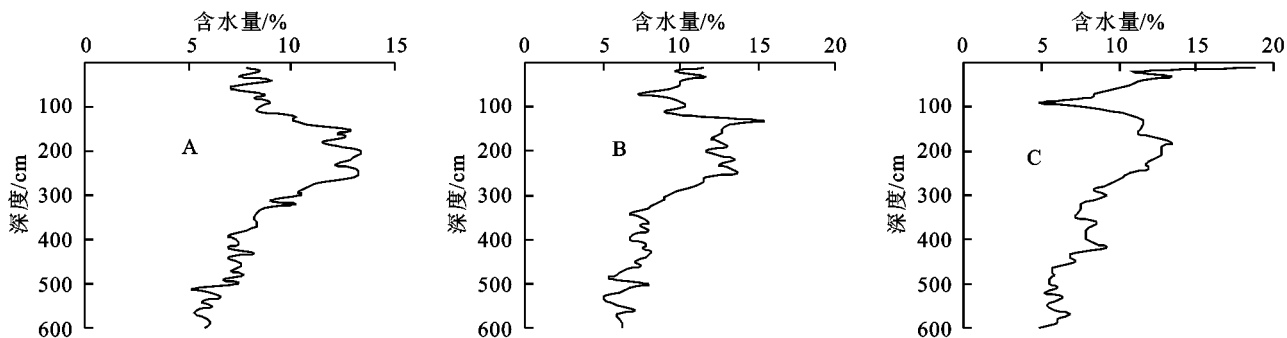


图2 左云县小叶杨林地土壤含水量

## 2.2 灌木林地土壤含水量

**2.2.1 柠条林地土壤含水量** 于2012年5月13日在左云县店湾镇西沟村对柠条林地进行了两个剖面0—600 cm深度取样。该样地树冠径1~2 m不等,树高1 m左右,长势良好。为便于区别,将这两孔分别用A,B来表示。A孔的平均含水量为10.1%,变化范围为4.3%~24.1%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—200 cm,平均含水量为10.0%,变化范围为6.6%~15.7%;第2层在210—400 cm,平均含

水量为5.7%,变化范围为4.3%~8.4%;第3层在410—600 cm,平均含水量为14.5%,变化范围为4.5%~24.1%(图3A)。B孔的平均含水量为9.7%,变化范围为5.5%~16.8%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—200 cm,平均含水量为9.0%,变化范围为7.0%~12.4%;第2层在210—400 cm,平均含水量为6.7%,变化范围为5.5%~11.9%;第3层在410—600 cm,平均含水量为13.6%,变化范围为10.9%~16.8%(图3B)。

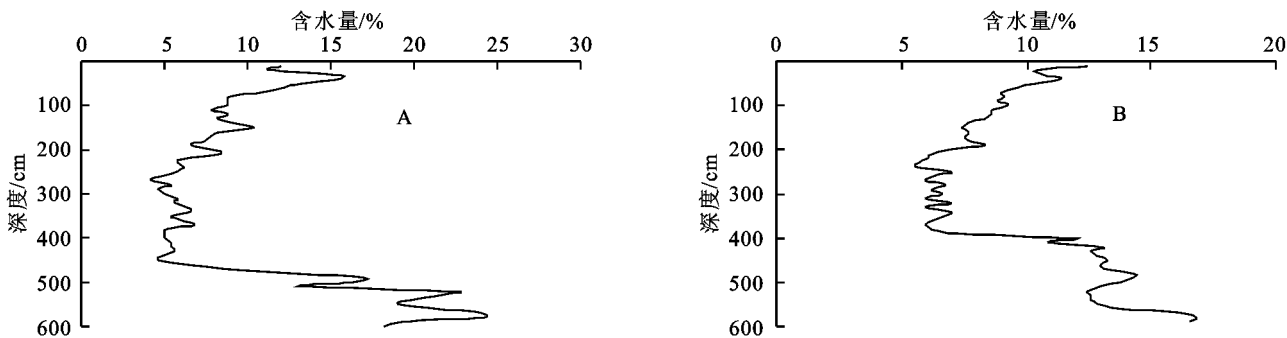


图3 左云县柠条林地土壤含水量

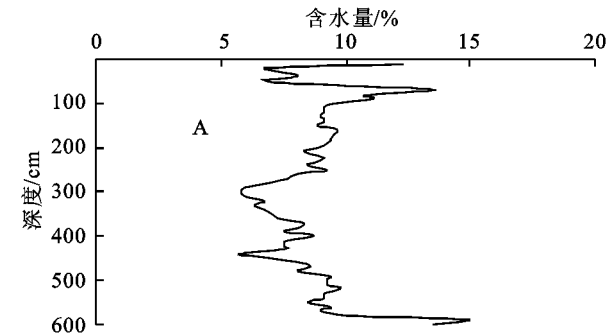
**2.2.2 沙棘林地土壤含水量** 于2012年5月12日在左云县店湾镇西沟村对沙棘林地进行了两个剖面0—600 cm深度的取样。该沙棘林地树冠径1~4 m不等,树高约1.5 m,长势一般。为便于区别,将这两孔分别用A,B来表示。A孔的平均含水量为8.7%,变化范围为5.6%~14.8%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—200 cm,平均含水量为9.5%,变化范围为6.9%~13.7%;第2层在210—400 cm,平均含水量为7.6%,变化范围为5.8%~9.2%;第3层在410—600 cm,平均含水量为9.1%,变化范围为5.6%~14.8%(图4A)。B孔平均含水量为7.5%,变化范围为3.9%~13.6%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—200 cm,平均含水量为8.2%,变化范围为4.4%~13.6%;第2层在210—400 cm,平均含水量为5.5%,变化范围为3.9%~6.7%。第3层

在410—600 cm,平均含水量为8.7%,变化范围为5.6%~13.5%(图4B)。

## 2.3 草地土壤含水量

于2012年5月14日在左云县店湾镇西沟村对草地进行两个剖面0—600 cm深度取样,草地密度大,长势一般。为便于区别,将这两孔分别用A,B来表示。A孔平均含水量为9.6%,变化范围为3.6%~15.8%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—150 cm,平均含水量为6.4%,变化范围在3.6%~10.4%;第2层在160—400 cm,平均含水量为8.9%,变化范围为7.5%~10.7%;第3层在410—600 cm,平均含水量为12.8%,变化范围在10.7%~15.8%(图5A)。B孔平均含水量为10.8%,变化范围为2.6%~18.1%。根据含水量垂直变化特点可分为3层:第1层在0—150 cm,平均

含水量为 5.8%,变化范围为 2.6%~10.7%;第 2 层在 160—400 cm,平均含水量为 10.5%,变化范围为



7.3%~13.5%;第 3 层在 410—600 cm,平均含水量为 14.9%,变化范围为 11.8%~18.1%(图 5B)。

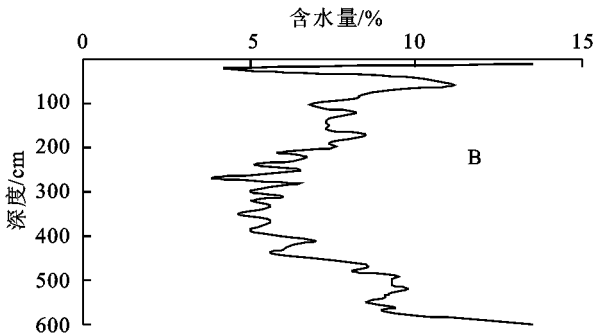


图 4 左云县沙棘林地土壤含水量

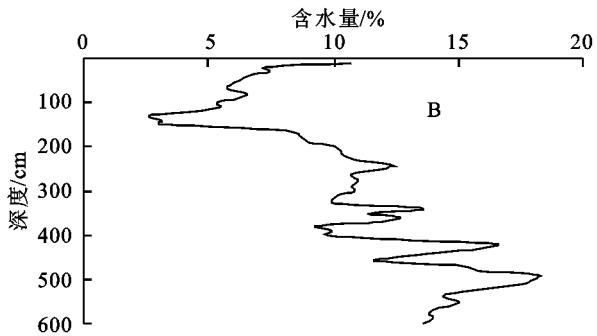
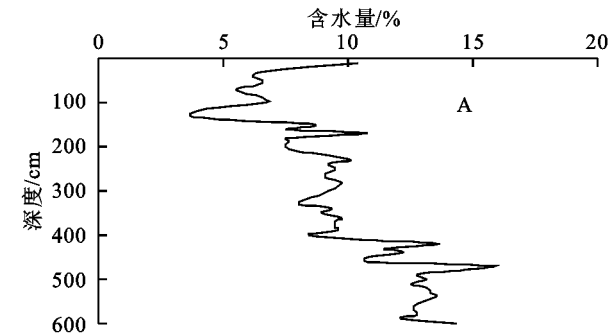


图 5 左云县草地土壤含水量

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 左云县矿区店湾镇不同植被条件下土壤含水量变化特点 由土壤含水量分析结果可知,白榆林地两个剖面的平均含水量为 6.4%,第 1 层、第 2 层、第 3 层的平均含水量分别为 9.0%,6.5%,5.0%;小叶杨林地 3 个剖面的平均含水量为 9.0%,第 1 层、第 2 层、第 3 层的平均含水量分别为 10.7%,9.9%,6.5%;柠条林地两个剖面的平均含水量为 9.9%,第 1 层、第 2 层、第 3 层的平均含水量分别为 9.5%,6.2%,14.0%;沙棘林地两个剖面的平均含水量为 8.1%,第 1 层、第 2 层、第 3 层的平均含水量分别为 8.9%,6.6%,8.9%;草地 3 个剖面的平均含水量为 10.2%,第 1 层、第 2 层、第 3 层的平均含水量分别为 6.1%,9.7%,13.9%。因此,各植被条件下土壤 0—600 cm 土层剖面上的平均土壤含水量为 6.4%~10.2%,具体表现为草地(10.2%)>柠条林地(9.9%)>小叶杨林地(9.0%)>沙棘林地(8.1%)>白榆林地(6.4%),且各植被条件下土壤平均含水量变化趋势不一致。即:研究区草地、柠条林地、沙棘林地的 0—600 cm 土层的平均含水量从上到下先减小后增大,且在 400 cm 以后都呈增大趋势,表明在 400 cm 以下的土层,随着植物根系到达这一层位越来越

少,消耗的水分也就越来越少,土壤含水量又呈现增加的趋势。而白榆林地 0—600 cm 土层的平均含水量从上到下先增大后减小,小叶杨林地 0—600 cm 土层的平均含水量从上到下先减小后增大再减小,且二者在 400 cm 以后都呈减小趋势。这是由于乔木植物比灌木植物、草本植物消耗更多的土壤水分,中下部土壤水分补充缓慢,并且乔木植物的根系比灌木植物、草本植物密集且消耗水分多<sup>[14]</sup>。因此,该区白榆林地、小叶杨林地中下部土层的含水量比草地、柠条林地、沙棘林地中下部土层的含水量低。由以上研究还可以得出,不同树种的林地土壤剖面含水量变化规律不同,白榆林地 0—600 cm 深度范围内土壤含水量呈现先增大后减小的规律,表明白榆吸收水分影响到了 600 cm 深度。小叶杨林地 0—600 cm 深度范围内土壤含水量呈现先减小后增加再减小的变化规律,这显示小叶杨所在地出现了较多降水,导致土壤剖面中部水分含量高,下部含水量低,指示小叶杨对土壤水分的吸收也达到了 600 cm 深度。柠条林地 0—600 cm 深度范围内土壤含水量呈现先减小后增加的变化规律,在 400 cm 左右以下含水量增高,指示柠条对水分的吸收达到 400 cm 左右深度。

3.1.2 土壤水分有效性研究 结合本研究实际情况及前人的研究<sup>[15-16]</sup>将该区土壤水分有效性划分为 5 级(表 1)。

表 1 左云县土壤水分有效性分级

分级	无效水	难效水	中效水	易效水	重力水
划分标准	<稳定凋萎湿度	稳定凋萎湿度— 田间持水量的 60%	田间持水量的 60%~80%	田间持水量的 80%~100%	>田间持水量
土壤含水量/%	<6.0	6.0~12.0	12.0~16.0	16.0~20.0	>20.0

结合上述土壤水分有效性分级,对研究区所选植被剖面水分的有效性进行研究,结果表明,白榆林地在 0—330 cm 属于难效水,在 330—600 cm 属于无效水;小叶杨林地在 0—600 cm 属于难效水,其中 130—250 cm 接近中效水,510—600 cm 接近无效水;草地在 0—460 cm 属于难效水,460—600 cm 属于中效水;沙棘 0—600 cm 属于难效水,其中 230—310 cm 接近无效水;柠条在 0—470 cm 属于难效水,480 cm 以下出现了中效水,甚至易效水。可见该区土层土壤水分主要属于难效水。

3.1.3 土壤干层分析 前人研究表明,我国北方地区尤其黄土高原存在着土壤干层现象<sup>[16-18]</sup>,土壤干层是指土壤水分的亏缺经过雨季降水仍不能得到补偿的土层。要查明研究区是否存在土壤干层,首先要确定土壤干层的判定依据。由于左云县比陕北黄土高原明显偏北,其黄土粒度成分比延安黄土要粗,所以可以利用王力<sup>[19-20]</sup>和何福红等<sup>[21]</sup>提出的陕北延安地区的土壤干层划分标准确定左云县土壤干层和干层等级,即以田间持水量的 60% 为确定土层为土壤干层的含水量标准。根据该标准可将该区土壤干层分为以下 3 个等级:(1) 重度干层。含水量低于 6%,严重影响着植物正常的生长发育,会导致植被枯萎甚至死亡;(2) 中度干层。含水量在 6%~9%,对植物生长影响较为严重,植物经常处于缺水状态,容易形成低产低效林;(3) 轻度干层。含水量在 9%~12%,对植物生长影响不大,土壤水分基本能满足植物正常生长发育。含水量高于 12% 为无干化层。

图 6 为该区不同植被下 200—400 cm 不同等级土壤干层的厚度。根据图 1—5 并结合表 1 可知,该区 11 个不同植被林地钻孔土壤 200—400 cm 深度土壤含水量集中在 5.4%~10.9%,平均含水量为 7.9%,含水量都低于 12%。由图 6 可知,各个钻孔剖面都存在干层,且轻度干层、中度干层和重度干层都有发育,只是在各个剖面干层发育强度不同。其中,白榆 A 孔全部发育为重度干层,柠条 B 孔、沙棘 A 孔全部发育为中度干层,草地 A 孔、草地 B 孔全部发育为轻度干层。白榆 B 孔、柠条 A 孔发育类似,上部发育为中度干层,发育厚度分别为 150,160 cm,下部发育为重度干层,发育厚度分别为 50,40 cm。小叶杨 A 孔、小叶杨 B 孔、小叶杨 C 孔发育类似,上部发育为轻度干层,发育厚度分别为 100,110,80 cm,下部

发育为中度干层,发育厚度分别为 100,90,120 cm。沙棘 B 孔上部发育中度干层,下部发育重度干层,发育厚度分别为 50,150 cm。

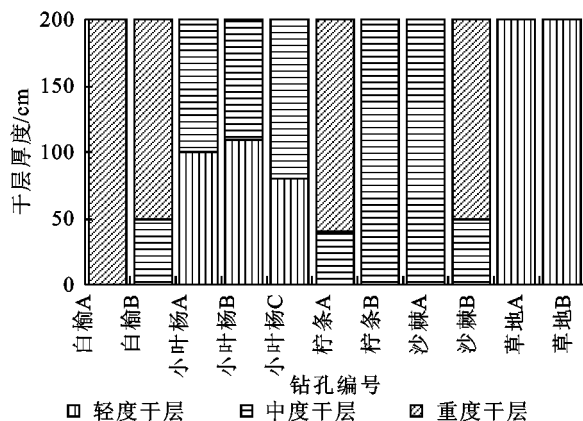


图 6 左云县店湾镇不同植被土壤剖面干层厚度差异

3.1.4 土壤干层对水循环和水分平衡的影响 水循环的过程包括蒸发、植被蒸腾、水汽输送、降水形成地表径流或下渗形成地下径流最后流入江河湖海或成为地下水<sup>[16]</sup>。黄土高原地区降水下渗环节与其他地区有明显不同,值得深入讨论。根据上述的研究,发现该区各植被林地 2.0 m 以下土层都有干层发育,说明研究区土壤水分输出量大于输入量,也就是说土壤干层是在土壤水分处于负平衡的条件下产生的<sup>[4]</sup>。负平衡是指大气降水经过蒸发、蒸腾、植物叶片截留和地表径流损失之后,已没有剩余的水分。同时,由于植物不断吸收利用深层的土壤水使得原来储存在深层土壤中的水分不断减少,导致地下水的埋藏深度加大。即土壤水分的负平衡指示大气降水一般不能通过入渗补给地下水,正常的水分下渗补给地下水的环节被切断,形成了土壤水分循环的隔离层—土壤干层,直接转化成了土壤水,一般不参与地下水循环。这表明研究区水循环主要是地表水循环,地下水循环基本不存在,形成了土壤—植物—地表径流—大气的水分循环模式,属于异常水分循环类型。所以该区不同植被林地土壤干层的出现,影响了该区的正常水循环和水分平衡,长期发展下去会导致该区地下水位的持续下降和地下水资源缺乏。因此,在该矿区生态林植被重建的过程中,应严格控制种植密度,并加强保水工程措施,最大可能地利用大气降水,增加土壤水分含量,以满足植被用水的需要,发挥生态效益。

### 3.2 结论

(1) 左云县矿区春季各土层平均含水量草地最

高,柠条林地次之,白榆林地最少。其中草地各土层平均含水量比柠条林地高0.3%,比白榆林地高3.8%。

(2) 左云县矿区春季不同植被条件下土层基本呈难效水状态,各植被吸收土壤水分受到抑制,若发生连续干旱,该区各植被正常的生长发育易受到不利影响。

(3) 左云县矿区春季不同植被条件下各土层在200—400 cm深度范围都存在土壤干层,有轻度干层、中度干层和重度干层发育。

(4) 左云县矿区春季各不同植被条件下土壤干层减缓了土壤水分的垂直移动性,切断了深层水分与上层的联系。水循环主要是地表水循环,地下水循环基本不存在,形成了土壤—植物—地表径流—大气的水分循环模式,属于异常水分循环类型。

#### 参考文献:

- [1] 马义娟,苏志珠.晋西北地区环境特征与土地荒漠化类型研究[J].水土保持研究,2002,9(3):124-126.
- [2] 林小梅.闽东柳杉人工林林分密度控制图的研究[J].福建林业科技,2002,29(3):75-77.
- [3] 李玉山,黄明斌,杨新民.黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J].地理学报,2001,56(1):7-13.
- [4] 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.
- [5] 赵景波,孙桂贞,岳应利,等.关中平原人工林地的干层及其成因[J].地理研究,2007,26(4):763-772.
- [6] 李瑜琴.西安地区不同降水年份人工林地土壤水分变化研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):143-147.
- [7] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [8] 赵景波,祁子云,魏君平,等.青海湖北土壤水分分布与

土壤干层恢复[J].地理科学进展,2012,31(7):853-858.

- [9] 张建军,张岩,张波.晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J].林业科学,2009,45(11):63-69.
- [10] 孙贵贞,赵景波.咸阳长武人工植被春季土壤含水量研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2008,36(2):97-101.
- [11] 牛俊杰,赵景波,王尚义.论山西褐土区农田土壤干层化问题[J].地理研究,2008,27(3):519-526.
- [12] 周萍,刘国彬,文安邦,等.黄土丘陵区不同林龄乔灌木地土壤水分及持水性能研究[J].水土保持研究,2010,17(1):188-193.
- [13] 李广文,孙虎,肖军.不同景观植被类型下土壤含水量对比研究:以西安南郊为例[J].安徽农业科学,2006,34(1):110-111.
- [14] 赵景波,牛俊杰,杜娟,等.咸阳市三原县新庄不同植被土层含水量研究[J].地理科学,2008,28(2):247-252.
- [15] 陈海滨,刘淑明,党坤良,等.黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(Ⅱ):土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J].西北林学院学报,2004,19(1):5-8.
- [16] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2002.
- [17] 王力,邵明安,张青峰.陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J].应用生态学报,2004,15(3):436-442.
- [18] 杨维西.试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J].林业科学,1996,32(1):78-85.
- [19] 王力,邵明安,侯庆春.土壤干层量化指标初探[J].水土保持学报,2000,14(4):87-90.
- [20] 王力,邵明安,侯庆春.延安试区土壤干层现状分析[J].水土保持通报,2000,20(3):35-37.
- [21] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J].自然资源学报,2003,18(1):30-36.

(上接第51页)

- [32] 陈慧,郝慧荣,熊君,等.地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2007,18(12):2755-2759.
- [33] 何跃军,钟章成,刘济明,等.石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J].应用生态学报,2005,16(6):1077-1081.
- [34] 赵萌,李敏,王森焱,等.西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J].微生物学通报,2008,35(8):1251-1254.
- [35] 郭士伟,夏士健,朱虹霞,等.水稻根系活力测定方法及超级稻两优九生育后期根系活力研究[J].土壤,2012,44(2):308-311.
- [36] Yao H Y, Jiao X D, Wu F Z. Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under pro-

tected cultivation on soil microbial community diversity[J]. Plant and Soil, 2006, 284(1):195-203.

- [37] 彭令发,郝明德,来璐.黄土旱塬长期连作条件下土壤氮素变化及管理[J].水土保持研究,2003,10(1):43-45.
- [38] 樊军,郝明德,王永功.旱地长期轮作施肥对土壤肥力影响的定位研究[J].水土保持研究,2003,10(1):31-36.
- [39] 黄益宗,冯宗炜,张福珠.化感物质对土壤硝化反应影响的研究[J].土壤与环境,1999,8(3):203-207.
- [40] 马云华,魏琨,王秀峰.日光温室连作黄瓜根区微生物区系及酶活性的变化[J].应用生态学报,2004,15(6):1005-1008.
- [41] 李春格,李晓鸣,王敬国.大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响[J].生态学报,2006,26(4):1144-1150.
- [42] 危锋,郝明德.长期氮磷化肥配施对不同种植体系土壤水分的影响[J].水土保持研究,2011,18(6):67-70.