

DOI: 10.5846/stxb201505050911

于洋, 王伟, 陈利顶, 冯天骄, 杨磊, 张涵丹. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征. 生态学报, 2016, 36(11): - .  
Yu Y, Wei W, Chen L D, Feng T J, Yang L, Zhang H D. Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

## 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征

于 洋<sup>1</sup>, 卫 伟<sup>1,\*</sup>, 陈利顶<sup>1</sup>, 冯天骄<sup>1,2</sup>, 杨 磊<sup>1</sup>, 张涵丹<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**水分是干旱半干旱地区植被恢复的主要环境制约因子。在黄土高原小流域,合理整地能够有效截留降雨补给土壤水,进而促进植被恢复。选择地处甘肃定西的半干旱黄土小流域为研究区,基于野外实测数据,分析不同植被和整地方式(柠条水平阶、山杏水平沟、侧柏反坡台、油松反坡台)综合影响下的土壤水分特征。采用最优分割法将不同整地方式土壤水分垂直层次划分为活跃层、次活跃层和相对稳定层。结果表明:生长季不同整地方式土壤水分的变化与降水量的变化密切相关,不同月份以及不同深度各整地方式土壤水分之间差异显著( $P < 0.05$ )。根据土壤水分垂直变化特征,山杏水平沟水分活跃层与次活跃层为0—80cm,其深度范围均大于其他三种整地方式,而柠条水平阶土壤水分均在30 cm以下较为稳定,其深度范围均小于其他三种整地方式。不同整地方式土壤水分含量具体表现为:山杏水平沟>侧柏反坡台>柠条水平阶>油松反坡台。

**关键词:**整地方式;土壤水分;植被类型;黄土小流域

## Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess hilly region

YU Yang<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1,\*</sup>, CHEN Liding<sup>1</sup>, FENG Tianjiao<sup>1,2</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Handan<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Soil moisture is the main environmental factor affecting vegetation restoration in the arid and semi-arid regions. In the small watershed of the Loess Plateau, reasonable land preparation methods can be utilized the surface runoff effectively and thus supply for the soil moisture during the vegetation restoration processes. In the present study, a small watershed located in Dingxi City Gansu Province was selected, based on the field survey data in the growing season. Different land preparation methods combined with various vegetation types (Level bench-*Caragana korshinskii*, Level ditch-*Prunus armeniaca*, Adverse grade tableland-*Platycladus orientalis*, Adverse grade tableland-*Pinus tabulaeformis*) were used to investigate the soil moisture dynamics during the re-vegetation. Time domain reflectometry was applied to record volumetric soil moisture in the research plots at 12 different soil depths below the ground surface (0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120, 120—140, 140—160, 160—180 cm) during the growing season of 2014. Meanwhile, the vertical soil moisture layer could be divided into the active layer, the second active layer and the stable layer according to the optimal segmentation method. The results indicated that: soil moisture variation exhibited closed relationship with the changes of precipitation, the rainfall events were scattered during the growing season, the precipitation with a small amount with more frequency and large amount with small frequency can led to different effects

基金项目:国家自然科学基金项目(41371123, 41401209, 41501091)

收稿日期:2015-05-05; 修订日期:2015-08-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

to different vegetation types. In addition, soil moisture content was relative lower from May to June, whereas higher soil moisture content exhibited from September to October. Moreover, soil moisture showed significant differences between different months and soil depths ( $P < 0.05$ ). Different land preparations showed different hierarchy partition. The depth of the active layer and second active layer can reach 80 cm of the level ditch with *Prunus armeniaca*, which was higher than the other land preparation types, while the stable layer was below 30 cm of the level bench-*Caragana korshinskii*, which was lower than the other land preparation types. The active layer, second active layer and stable layer of the Level bench-*Caragana korshinskii* were 0—10, 10—30 and 30—180 cm, of the Level ditch-*Prunus armeniaca* were 0—40, 40—80 and 80—180 cm, of the adverse grade tableland-*Platycladus orientalis* were 0—30, 30—60 and 60—180 cm, and of the adverse grade tableland-*Pinus tabulaeformis* were 0—10, 10—60 and 60—180 cm, respectively. In conclusion, during the growing season, different soil moisture variation showed as the followed order, Level ditch-*Prunus armeniaca* > Adverse grade tableland-*Platycladus orientalis* > Level bench-*Caragana korshinskii* > Adverse grade tableland-*Pinus tabulaeformis*.

**Key Words:** land preparation; soil moisture; vegetation types; small Loess watershed

水资源是制约干旱半干旱地区经济发展与生态环境建设的主要因素,干旱半干旱生态系统的降水量少且蒸发较强,土壤水分较低,所以土壤水分是影响植物生长和发育的最重要环境因子,在植被恢复与生态重建过程中发挥着关键作用。土壤水作为地表水、地下水与大气水之间相互转化的纽带,是开展退耕还林的决定性要素。土壤层充当水库的作用,能够保持水分并缓解植被应对较少的或是多变的降水<sup>[1]</sup>。在半干旱黄土高原大规模植被恢复的背景下,土壤水分影响种子库与种子萌发、植物生长发育、养分循环、生态系统生产力、水土流失与土壤侵蚀、小气候改变等诸多生态过程<sup>[2-8]</sup>。因此,要综合评价植被恢复引起的生态系统结构与功能的具体变化,需重点从土壤水分动态变化入手,围绕水量平衡进行水文过程的深入研究。

微地形改造是指人类根据科学研究或改造自然的实际需要,有目的的对地表下垫面结构进行二次改造和整理,从而形成多样的微地形单元<sup>[9]</sup>。坡面整地通过改变微地形,有效增加景观异质性并改变物质迁移路径。由于水土流失防治的核心是促进水分就地入渗,为了实现有限水分的持续利用,黄土高原地区曾开展大范围流域治理,在植被恢复过程中,水平沟、鱼鳞坑、水平沟和反坡台等整地方式被广泛应用,原始坡面自然景观在整地后形成了微地形与植被恢复耦合下的新景观。不仅仅在黄土高原,微地形改造同样开展在世界范围内的其他干旱半干旱生态系统,但对整地方式改变影响水文过程的相关结论并不一致。相关结果表明,通过对下垫面的改造,雨季和旱季时不同坡位土壤水分水平台较坡面高<sup>[10]</sup>,还有报道说明在同一降雨条件下,水平沟整地后可使径流发生的时间得到有效延迟<sup>[11]</sup>。诸多学者围绕黄土丘陵沟壑区植被恢复过程中土壤水分动态变化,植被生产力与土壤水分之间的关系,土壤侵蚀,林木蒸腾耗水等方面开展了多尺度的研究<sup>[12-16]</sup>。然而对植被恢复过程中,围绕坡面整地和植被耦合的水文效应相关报道较少。基于此,本研究选择黄土丘陵沟壑区典型小流域,通过定位监测,分析坡面整地和植被耦合作用下土壤水分的变化,为植被恢复与生态环境保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于甘肃定西龙滩流域(104°27'—104°31' E, 35°43'—35°46' N),海拔 1840—2260 m,属于典型半干旱黄土丘陵区,流域面积 16.1 km<sup>2</sup>,多年平均降水量 386.3 mm,降水量季节分配不均,春季降水较为稀少,主要集中在 7—9 月份,且多暴雨事件发生。流域年均气温为 6.8℃,平均无霜期 152 d,潜在蒸发量为 1649.0 mm,年均相对湿度 72%。流域土壤类型为黄绵土,土质均一。流域内主要土地利用类型包括撂荒地、灌木林地、乔木林地、农地、人工草地。同时分布着零星的天然草地。流域内的人工植被以柠条(*Caragana korshinskii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山杏(*Prunus armeniaca*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)为主,天然植被则以多年生草本为主,主要种类包括赖草(*Leymus secalinus* (Georgi)

Tzvel)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.)等。水分是制约流域植被生长以及作物产量的主要因素。

## 2 研究方法

### 2.1 试验地基本特征

于2014年生长季(5月—10月),根据流域内所开展的不同整地方式并结合不同植被类型进行样地布设,所选整地方式与植被类型分别为柠条水平阶,山杏水平沟,侧柏反坡台和油松反坡台。柠条水平阶整地造林时间为1984年,山杏水平沟造林整地为2003年,油松反坡台和侧柏反坡台整地造林时间为1972年。整地措施均已逾十年以上,土壤结构稳定且受干扰较少。采用微创式零干扰径流小区搭建技术,搭建完毕后进行土壤水分的定位监测。同时,调查记录每个样地的坡向、坡度、坡位等地形因子<sup>[17]</sup>,并采用每木检尺对植被进行调查,记录不同植被的树高、基径、冠幅,试验地基本特征见表1。

表1 试验地基本特征

Table 1 General situation of the experimental site

整地方式 Land preparation types	柠条水平阶 Level bench <i>Caragana korshinskii</i>	山杏水平沟 Level ditch <i>Prunus armeniaca</i>	侧柏反坡台 Adverse grade tableland <i>Platycladus orientalis</i>	油松反坡台 Adverse grade tableland <i>Pinus tabulaeformis</i>
地形 Topography				
坡度 Slope/(°)	26	18	24	16
坡向 Aspect	西偏南	东	东偏南	东偏北
植被 Vegetation				
树高 Height	1.14±0.30	1.97±0.60	2.70±0.48	5.71±0.41
胸径 Diameter at breast height (DBH)	东西 1.40(±0.54) 南北 1.09(±0.33)	4.25±0.66	4.72±1.02	8.71±0.49
冠幅 Crown Diameter				
东西 East&West	1.40±0.54	1.47±0.71	1.70±0.72	1.67±0.19
南北 South&North	1.09±0.33	1.50±0.45	1.60±0.46	1.59±0.35
整地描述 Land preparations description	将3.5—4.0 m长的坡面径流集中到1.0—1.5 m的阶面 反坡3—5°	将3.5—4.0 m长的坡面径流集中到1.0—1.5 cm的沟面 沟面宽1.5 m长1.8m	将4.0 m长的坡面径流集中到0.6—1.0 m的台面 反坡5—8°	将1.5—2.0 m长的坡面径流集中到1.0—1.5m的台面 反坡5—8°
地表植被 Understory vegetation	长芒草( <i>Stipa bungeana</i> ) 阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> (Willd.) Novopokr.) 大黄花( <i>Cymbaria dahurica</i> Linn.) 骆驼蓬( <i>Peganum harmala</i> Linn.)	苜蓿( <i>Medicago sativa</i> ) 茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> Thunb.) 长芒草( <i>Stipa bungeana</i> ) 铁杆蒿( <i>Artemisia vestita</i> Wall. ex Bess.)	百里香( <i>Thymus mongolicus</i> Ronn.) 长芒草( <i>Stipa bungeana</i> ) 披针叶黄华( <i>Thermopsis lanceolata</i> R.Br.)	中华隐子草( <i>Cleistogenes chinensis</i> (Maxim.) Keng) 长芒草( <i>Stipa bungeana</i> Trin.) 阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> (Willd.) Novopokr.)
盖度 Understory layers cover	55	40	40	30
土壤 Soil				
土壤容重 g/cm <sup>3</sup> (0—100cm)	1.22±0.04	1.21±0.03	1.19±0.05	1.13±0.04
Bulk density				
土壤孔隙度 Porosity 53.78±1.17	53.95±1.13	54.77±1.55	56.76±1.41	
砂粒% Sand	20.75±4.03	17.38±3.89	21.96±3.70	18.38±6.87
粉粒% Silt	69.53±3.26	71.84±2.96	67.79±2.95	71.94±5.18
粘粒% Clay	9.72±1.37	10.77±1.19	10.25±0.88	9.68±1.92

数值表现为平均值±标准差,柠条水平阶为丛径。Values are Mean±S.D, Ground diameter for the Level bench-*Caragana korshinskii*

## 2.2 土壤水分测定方法与仪器校正

土壤水分含量采用便携式时域反射仪 (Time Domain Reflectometry, TDR, 型号 TRIME-FM) 分不同土壤深度 (0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120, 120—140, 140—160, 160—180cm) 在生长季内 (2014 年 5 月 1 日—10 月 31 日) 进行测定, 每两周测定一次。分别在不同整地方式样地内沿坡面布设监测样点, 每个样地每层测定 3 个样点作为重复。各样点于生长季前布设 2 m 长的聚碳酸酯管, 同时, 在用便携式时域反射仪进行测定前, 采用烘干法对 TDR 测定的土壤含水量进行校正<sup>[18-19]</sup>, 通过烘干法实测土壤质量含水率, 并根据土壤剖面容重换算为体积含水率, 与 TDR 的介电常数进行拟合, 得出二者的回归方程  $Y=1.1805x-0.3851, R^2=0.99$ 。Y 为采用烘干法测定的土壤含水量乘以土壤容重, x 为时域反射仪的介电常数。与此同时, 在流域内布设自动气象站 (Vantage Pro 2) 记录生长季内的降水量。

## 2.3 数据统计分析

采用 SAS9.2 软件 PROC MIXED (混合线性模型) 程序进行数据处理与分析, 混合线性模型可不依赖方差分析表计算均方, 而直接估算各项影响因素的方差分量。相关数据采用平均值±标准差 (Mean±SD) 来表示, 同一因素不同水平间差异显著性采用最小显著差数法 (LSD) 进行检验 (显著性水平  $P=0.05$ ), 同时, 结合有序分类法中的最优分割法, 将土壤水分变化层次根据土壤深度进行排序, 采用标准差 (S) 和变异系数 ( $C_v$ ) 为指标, 按土壤水分含量进行聚类, 进而确定土壤水分的垂直变化层次<sup>[20-21]</sup>。标准差和变异系数的计算方法见如下计算公式:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SM_i - \overline{SM})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

$$C_v = \frac{s}{\overline{SM}} \quad (2)$$

式中,  $\overline{SM}$  为土壤水分观测样本的平均值; n 为样本总个数;  $x_i$  为第 i 次土壤水分含量观测值。最优分割算法在 Matlab (R2010a) 中实现, 采用 Sigmaplot12.5 软件绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 降水特征

流域内 2014 年 5 月 1 日至 10 月 31 日降水分布情况如图 1 所示, 研究期间共记录降水事件 40 次, 累积降水量 222.6mm, 占多年平均降水量的 57.6%, 其中最小降水量为 0.20mm, 最大降水量为 25.8mm。7 月至 9 月降水量为 154.00 mm, 占生长季降水量的 69.2%。在 40 次降水事件中, 降水量大于 20mm 的有 4 次, 占生长季总降水量的 41.4%, 分别发生在 6 月 28 日, 7 月 8 日, 8 月 21 日和 8 月 23 日, 降水量大于 5mm 而小于 20mm 的降水事件有 13 次, 占生长季总降水量的 40.1%, 降水量小于 5mm 的事件有 23 次, 占生长季降水量的 18.5%。

流域内降雨主要以中到大雨为主, 主要集中在 7 月—9 月。

### 3.2 土壤水分时空变化

不同整地方式土壤水分动态变化与降水量大小关系密切, 以 7 月的水分变化为例, 如图 2 所示, 0—20cm 柠条水平阶在该月份的水分变化较为剧烈, 而油松反坡台水分变化受降水干扰较小。而侧柏反坡台与山杏水

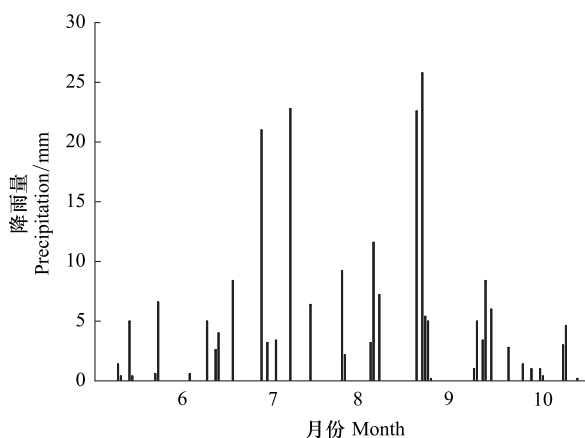


图 1 研究区生长季降水分布情况 (5—10 月)

Fig.1 Rainfall distribution in the study area during the growing season (May-October)



平沟的剖面水分变化较为接近。虽然柠条水平阶在 7—8 月 0—20cm 水分变化较为剧烈,综合该月份各整地方式的水分含量,仅油松反坡台的水分含量显著低于其他三种整地方式( $P<0.05$ ),这说明不同整地方式土壤水分对次降水事件的响应不同。如表 2 所示,各月份各整地方式之间土壤水分含量差异显著( $P<0.05$ )。具体来说,5 月份,山杏水平沟土壤水分含量显著高于油松反坡台和柠条水平阶( $P<0.05$ ),但与侧柏反坡台无显著差异( $P>0.05$ )。6 月份,山杏水平沟土壤水分显著高于油松反坡台( $P<0.05$ ),但与柠条水平阶和侧柏反坡台之间差异不显著( $P>0.05$ )。7 月份,油松反坡台土壤水分含量显著低于其他三种整地方式( $P<0.05$ ),而其他三种整地方式之间土壤水分无显著差异( $P>0.05$ )。8 月份,山杏水平沟与侧柏反坡台之间差异不显著( $P>0.05$ ),但两者显著高于油松反坡台和柠条水平阶( $P<0.05$ )。9 月份,侧柏反坡台水分含量显著高于油松反坡台和柠条水平阶( $P<0.05$ ),但是山杏水平沟与柠条水平阶之间无显著差异( $P>0.05$ )。10 月份,山杏水平沟与侧柏反坡台之间无显著差异( $P>0.05$ ),但两者显著高于柠条水平阶和油松反坡台( $P<0.05$ ),而柠条水平阶和油松反坡台之间土壤水分含量无显著差异( $P>0.05$ )。综合对比不同整地方式土壤水分含量可排序为,山杏水平沟 > 侧柏反坡台 > 柠条水平阶 > 油松反坡台。

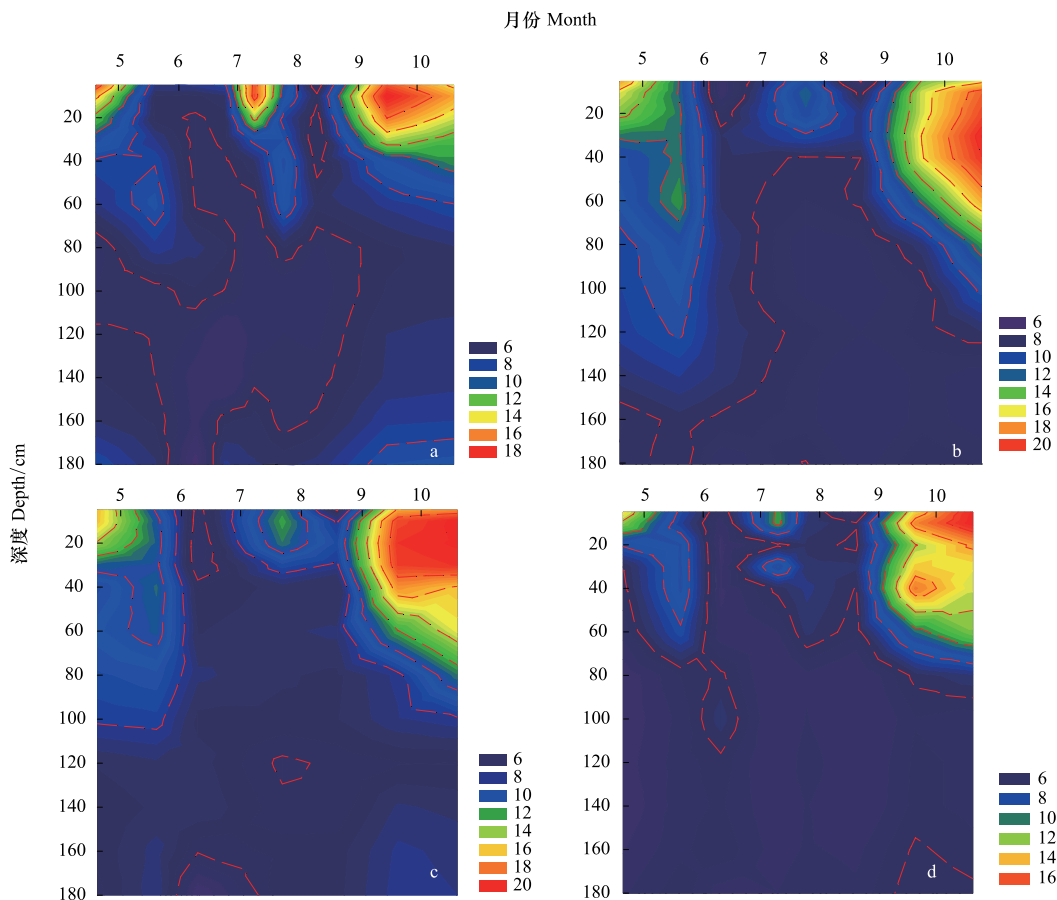


图 2 不同整地方式土壤水分随时间的动态变化 (%) (a) 柠条水平阶 (b) 山杏水平沟 (c) 侧柏反坡台 (d) 油松反坡台

Fig.2 Soil moisture dynamics of different land preparation over time (a) Level bench-*Caragana korshinskii*; (b) Level ditch-*Prunus armeniaca*; (c) Adverse grade tableland-*Platycladus orientalis*; (d) Adverse grade tableland-*Pinus tabulaeformis*

### 3.3 不同整地方式土壤水分垂直变化

同一深度不同整地方式之间土壤水分差异显著( $P<0.05$ ),不同深度之间表现不同。如表 3 所示,0—5cm,油松反坡台土壤水分含量显著低于其他三种整地类型( $P<0.05$ ),而另外三种整地类型之间无显著差异。5—10cm,侧柏反坡台显著高于油松反坡台( $P<0.05$ ),但是与柠条水平阶和山杏水平沟之间无显著差异( $P>$

0.05)。10—20cm,油松反坡台与柠条水平阶水分含量无显著差异( $P>0.05$ ),但显著低于山杏水平沟与侧柏反坡台( $P<0.05$ )。而在20—30cm山杏水平沟与侧柏反坡台之间无显著差异( $P>0.05$ ),但显著高于油松反坡台和柠条水平阶( $P<0.05$ ),同时,油松反坡台与柠条水平阶之间无显著差异( $P>0.05$ ),这也与30—40cm、40—60cm和60—80cm深度相同。80—100cm和100—120cm山杏水平沟与侧柏反坡台之间无显著差异( $P>0.05$ ),但显著高于柠条水平阶和油松反坡台( $P<0.05$ )。120—160cm,山杏水平沟、柠条水平阶与侧柏反坡台之间水分含量无显著差异( $P>0.05$ ),但山杏水平沟显著高于油松反坡台( $P<0.05$ )。同时油松反坡台、侧柏反坡台和柠条水平阶之间无显著差异( $P>0.05$ )。不同整地方式土壤水分垂直变化特征也呈现出显著的层次性,对柠条水平阶来说0—5cm和5—10cm显著高于30—180cm各深度( $P<0.05$ )。山杏水平沟0—40cm之间无显著差异( $P>0.05$ ),但显著高于60—180cm各深度( $P<0.05$ ),同时60—180cm各深度之间无显著差异( $P>0.05$ )。侧柏反坡台80—180cm各深度之间无显著差异( $P>0.05$ ),但显著低于0—60cm各深度( $P<0.05$ )。对油松反坡台来说,0—5cm和5—10cm显著高于10—60cm各深度( $P<0.05$ ),同时60—180cm各深度之间无显著差异( $P>0.05$ )。

表2 不同整地方式土壤水分逐月变化 (%)

Table 2 Soil moisture monthly variation of different land preparation

月份 Month	柠条水平阶 Level bench <i>Caragana korshinskii</i>	山杏水平沟 Level ditch <i>Prunus armeniaca</i>	侧柏反坡台 Adverse grade tableland <i>Platycladus orientalis</i>	油松反坡台 Adverse grade tableland <i>Pinus tabulaeformis</i>
5	5.81±0.58 Cc	10.89±2.65 Aabc	9.05±0.58 Ab	6.88±0.05 BClb
6	6.10±0.86 ABc	7.89±1.85 Acd	6.09±0.52 ABd	5.35±0.29 Bc
7	7.94±0.20 Ab	8.70±0.75 Abcd	7.98±0.69 Ac	6.14±0.39 Bbc
8	5.80±0.42 Bc	7.38±0.64 Ad	6.89±0.44 Ad	5.25±0.66 Bc
9	10.23±0.91 BCa	11.32±1.32 ABab	12.29±0.29 Aa	9.44±0.68 Ca
10	9.61±0.96 Ba	13.63±2.06 Aa	12.94±0.35 Aa	10.01±0.73 Ba
5—10	7.58±1.96 C	9.97±2.67 A	9.21±2.69 B	7.17±1.99 D

不同大写字母表示同一月份不同整地方式之间差异显著,不同小写字母表示同一整地方式不同月份差异显著。Different uppercase letters indicate significant difference in different land preparations, different lowercase letters indicate significant difference in different months ( $P<0.05$ ).

表3 不同整地方式土壤水分垂直变化 (%)

Table 3 Vertical variation of soil moisture of different land preparation types

深度 Depth	柠条水平阶 Level bench <i>Caragana korshinskii</i>	山杏水平沟 Level ditch <i>Prunus armeniaca</i>	侧柏反坡台 Adverse grade tableland <i>Platycladus orientalis</i>	油松反坡台 Adverse grade tableland <i>Pinus tabulaeformis</i>
0—5	12.21±4.85 Aa	11.74±4.72 Aa	12.03±5.24 Abc	10.13±5.22 Ba
5—10	12.25±4.91 ABa	12.62±4.77 ABa	13.34±5.88 Aa	10.39±5.24 Ba
10—20	10.42±4.02 BCab	12.84±4.67 ABa	13.07±5.86 Aab	8.47±4.27 Cb
20—30	8.86±3.29 Bbc	12.64±4.75 Aa	11.85±5.82 Ac	8.45±3.82 Bb
30—40	7.83±2.31 Bcd	11.85±4.94 Aa	10.18±4.75 Ad	8.38±4.01 Bb
40—60	7.00±1.22 Bcd	10.61±3.75 Aab	9.58±3.21 Ad	7.13±2.82 Bb
60—80	6.06±1.00 Bc	8.92±2.75 Abc	8.06±1.70 Ae	5.43±1.19 Bc
80—100	5.85±1.32 Bc	8.30±2.43 Abc	7.27±0.71 ABef	5.15±1.11 Bc
100—120	6.01±1.20 Bc	8.19±1.71 Abc	6.43±1.11 ABf	5.16±1.29 Bc
120—140	6.06±1.15 ABc	7.57±1.82 Ac	6.71±0.81 ABf	5.11±0.99 Bc
140—160	6.63±1.12 ABc	7.26±1.36 Ac	6.81±0.99 ABf	5.40±0.86 Bc
160—180	7.37±1.42 Acd	7.49±1.61 Ac	6.56±1.38 ABf	5.51±1.19 Bc

不同大写字母表示同一深度不同整地方式之间差异显著,不同小写字母表示同一整地方式不同深度差异显著。

为了能够更加直观的理解不同整地方式土壤水分的垂直变化特征,我们采用有序分类法中的最优分割

法,将土壤水分变化层次根据土壤深度进行排序,采用标准差( $S$ )和变异系数( $C_v$ )为指标,按土壤水分含量进行聚类,进而确定土壤水分的垂直变化层次。如图3所示,将不同整地方式180cm以内土壤水分的垂直变化划分为三个层次,活跃层、次活跃层与相对稳定层。不同整地方式土壤水分层次划分结果不同,柠条水平阶水分活跃层为0—10cm( $S = 4.85—4.91$ ,  $C_v = 39.71\%—40.10\%$ )、次活跃层为10—30cm( $S = 3.29—4.03$ ,  $C_v = 37.18\%—38.67\%$ )、30cm以下为相对稳定层( $S = 0.95—2.32$ ,  $C_v = 15.69\%—29.62\%$ );山杏水平沟水分活跃层为0—40cm( $S = 4.67—4.94$ ,  $C_v = 36.39\%—41.70\%$ )、次活跃层为40—80cm( $S = 2.74—3.75$ ,  $C_v = 30.80\%—35.36\%$ ),80cm以下为相对稳定层( $S = 1.35—2.43$ ,  $C_v = 18.67\%—24.10\%$ );侧柏反坡台水分活跃层为0—30cm( $S = 5.25—5.88$ ,  $C_v = 43.62\%—49.13\%$ ),次活跃层为30—60cm( $S = 3.21—4.76$ ,  $C_v = 33.51\%—36.71\%$ ),60cm以下为相对稳定层( $S = 0.71—1.70$ ,  $C_v = 9.78\%—21.09\%$ );油松反坡台活跃层为0—10cm( $S = 5.22—5.24$ ,  $C_v = 50.41\%—51.49\%$ ),次活跃层为10—60cm( $S = 2.82—4.27$ ,  $C_v = 39.63\%—45.26\%$ ),60cm以下为相对稳定层( $S = 0.86—1.28$ ,  $C_v = 15.98\%—24.97\%$ )。山杏水平沟水分活跃层与次活跃层为0—80cm,其深度范围均大于其他三种整地方式,而柠条水平阶土壤水分均在30cm以下较为稳定,其深度范围均小于其他三种整地方式。

#### 4 讨论与结论

降水是流域内植被生长的主要水源,基于水量平衡,对于不同整地方式的水文效应,需结合不同植被类型研究土壤水分的垂直分布特征,黄土高原地区不同植被类型的水分循环是单纯的降雨入渗,地表蒸发和植物蒸腾过程,土壤水分垂直剖面的层次性特征是其具体的体现<sup>[22]</sup>。不同植被类型的水分收支特征主要取决于降水输入、径流和蒸散发,同时在水平沟,水平阶,反坡台等工程措施的作用下,工程措施的开展和应用一方面能够有效的拦截径流和泥沙,另一方面也使得降水得到再分配,植被能够通过拦截到的径流强化自身的水分供应。

生长季内,降水量的大小是影响水分补给深度的重要因素之一,水分的变化主要取决于降水量的变化。降水的季节分布格局(降水频率、持续时间、降水强度)也直接影响着不同整地方式土壤水分的动态<sup>[23]</sup>。在降水量恒定的前提下,多次少量的降水与少次大量的降水对不同植被的影响并不相同,这也与沙地生态系统的的结果一致<sup>[24]</sup>。综合整个生长季,不同整地方式5—6月的土壤水分较低,9—10月的土壤水分较高。降水的季节分布格局是影响水分变化的因素之一。7—9月是降水集中的时期,7月至8月间虽发生了次降水量较大的降水事件,但次数较少,不同整地方式仅在浅层对降水事件的响应较强。在9月下旬至10月底,虽未发生降水量大于20mm的次降水事件,但正是在多次少量的降水事件影响下,降水对土壤水分形成了有效的补给,不同整地方式的土壤水分变化较为剧烈。

除降水季节分布格局外,植被自身的属性也是影响水分变化的重要因素。冠层截留,树干茎流,植被蒸腾耗水等关键水文循环过程也会影响土壤水分的动态变化。冠层截留作为影响降水进入土壤中的第一个环节,影响着降水的再分配过程,相关报道说明乔木冠层能够截留小的降水事件产生的降水,使乔木的土壤水分动态几乎不受小降水事件的作用<sup>[25]</sup>,所以油松反坡台的水分较低。由于在侧柏的高度较低,冠幅较小,冠层截留的效应不及油松显著且可以利用的坡面径流比油松多,所以同为反坡台整地,侧柏反坡台的水分显著高于

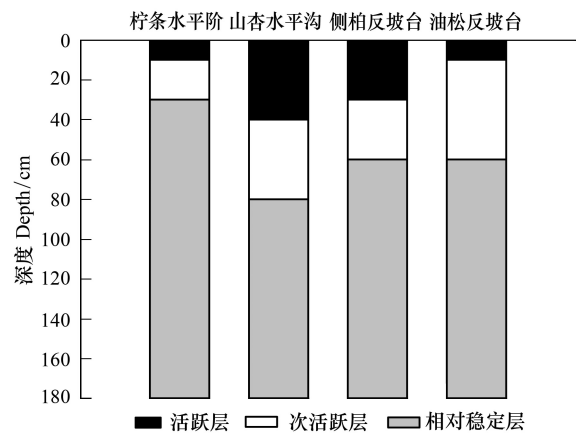


图3 不同整地方式土壤水分垂直层次划分

Fig. 3 Vertical soil moisture level division of different land preparation

油松反坡台。另一方面,5月过后进入夏季,伴随着温度的逐渐升高,植被的蒸发散作用也会增加,降水不仅不能够及时的形成补给,再加上受植被截留的影响,使得进入土壤中的水分更加有限,进而导致土壤含水量逐渐降低。8月后步入秋季,秋季的温度较夏季低,温度低植被的蒸散作用会减弱,降水能够有效的形成补给,使土壤含水量逐渐增加,不同整地方式的土壤水分在9月和10月均较高。

植物通过根系进行水分的吸收与利用,相关研究表明黄土高原地区降水入渗深度一般为1—3m<sup>[26]</sup>,不同植被类型根系的分布特征决定着不同深度土壤水分的动态变化,也使得不同植被类型土壤垂直剖面水分变异程度不同。相关研究将柠条植物篱土壤水分垂直变化按照深度划分为弱利用层、利用层和调节层,其中利用层主要指植被根系的主要分布区,也是降雨入渗到土壤中的水分储存的层次<sup>[27]</sup>,还有学者将高寒干旱针茅的草原土壤水分划分为敏感层、活跃层和稳定层<sup>[28]</sup>,本研究采用最优分割法,根据不同层次土壤水分的变异程度依照前人研究的划分方式<sup>[22]</sup>,将不同整地方式的土壤水分划分为活跃层、次活跃层和相对稳定层。活跃层在降水入渗以及蒸散发的作用下,水分含量变化较为剧烈,次活跃层是降水-植被-深层土壤水分进行水分交换的缓冲区,也是植被根系主要的分布区,对植被生长所需水分提供保障。随着深度的增加,水分的变化逐渐减弱,变异强度较活跃层和次活跃层低。不同植被类型的活跃层、次活跃层与稳定层分布不同。相关报道说明柠条水平阶在生长14a以后即进入老龄期<sup>[29]</sup>,根系深度可达地下5m,土壤水库已失去调节功能,柠条的生长受不同程度的抑制,生长主要靠天然降水来维持,地上部分的生长主要利用发达的主根吸收土壤水分,由于我们的研究中测定的土壤深度最深为180cm,这个深度的变化从对土壤层次划分的结果看,既包含降水及工程措施对土壤水分的补充,也包含根系对深层水分的利用,所以深入研究根系分布特征与土壤水分变化的关系,也能够为研究水分沿垂直剖面的分层划分以及土壤干层的分布提供新的思考。研究区的柠条栽植已有三十年,已步入老龄期,相关研究表明在一定区域,较高的群落盖度下。柠条土壤容积含水率一般较低<sup>[30]</sup>,监测结果显示侧柏反坡台的土壤容积含水率显著高于柠条水平阶,一方面是由柠条自身盖度较高,另一方面也说明反坡台整地通过对径流的利用对水分进行调节的效果更好。山杏水平沟土壤活跃层与次活跃层集中在0—80cm,生长季中山杏水平沟整地对水分的补充和调节作用体现的最为明显,使山杏水平沟的土壤容积含水率显著高于其他3种整地类型。

综合不同整地方式土壤水分含量的分析结果,在工程措施与植被类型的耦合作用下,不同整地方式生长季的土壤水分含量呈现显著差异( $P < 0.05$ )。山杏水平沟整地方式的土壤水分含量显著高于其他三种整地方式,侧柏反坡台其次,柠条水平阶和油松反坡台较低。根据当前的监测结果,水分垂直变化可划分为活跃层、次活跃层和相对稳定层三个层次,山杏水分的活跃层与次活跃层分布在0—80cm,其深度范围均大于其他三种整地方式。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Monger C, Sala O E, Duniway M C, Goldfus H, Meir I A, Poch R M, Throop H L, Vivoni, E R. Legacy effects in linked ecological-soil-geomorphic system of drylands. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015, 13(1): 13-19.
- [ 2 ] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [ 3 ] Bochet E. The fate of seeds in the soil: A review of the influence of overland flow on seed removal and its consequences for the vegetation of arid and semiarid patchy ecosystems. *SOIL*, 2015, 1: 131-146.
- [ 4 ] Potts D L, Scott R L, Bayram S, Carbonara J. Woody plants modulate the temporal dynamics of soil moisture in a semi-arid mesquite savanna. *Ecohydrology*, 2010, 3(1): 20-27.
- [ 5 ] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7039.
- [ 6 ] Chen L D, Huang Z L, Gong J, Fu B J, Huang Y L. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena*, 2007, 70(2): 200-208.
- [ 7 ] Wang Y Q, Shao M A, Zhang C C, Han X W, Mao T X, Jia X X. Choosing an optimal land-use pattern for restoring eco-environments in a



- semiarid region of the Chinese Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 213-222.
- [ 8 ] 屈振江, 张勇, 王景红, 张焘, 杨芳, 高峰. 黄土高原苹果园不同生长阶段的小气候特征. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 399-405.
- [ 9 ] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [ 10 ] 李艳梅, 王克勤, 刘芝芹, 王建英, 周祥. 云南干热河谷不同坡面整地方式对土壤水分环境的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 15-19.
- [ 11 ] 穆兴民, 徐学选, 陈雯巍. 黄土高原生态水文研究. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [ 12 ] 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. *生态学报*, 2011, 31(23): 7056-7066.
- [ 13 ] 张雷明, 上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系. *干旱区研究*, 2002, 19(4): 59-63.
- [ 14 ] 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. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [ 15 ] Chen L D, Wang J P, Wei W, Fu B J, Wu D P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [ 16 ] Zhang J G, Guan J H, Shi W Y, Yamanaka N, Du S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 137-147.
- [ 17 ] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 715-720.
- [ 18 ] Zhu H D, Shi Z H, Fang N F, Wu G L, Guo Z L, Yang Y. Soil moisture response to environmental factors following precipitation events in a small catchment. *Catena*, 2014, 120: 73-80.
- [ 19 ] 蔡燕, 王会肖. 黄土高原丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分动态. *水土保持研究*, 2006, 13(6): 79-81.
- [ 20 ] 李俊, 毕华兴, 李笑吟, 郭梦霞, 刘鑫, 林靛靛, 郭超颖. 有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 98-101.
- [ 21 ] 王信增, 焦峰. 基于有序聚类法的土壤水分剖面划分. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(2): 191-196, 201-201.
- [ 22 ] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多峰, 戚建莉. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. *生态学报*, 2013, 33(13): 4011-4020.
- [ 23 ] 赵文智, 刘鹤. 干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 243-249.
- [ 24 ] 张军红, 吴波, 杨文斌, 雷亚凯, 李秀梅. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1597-1603.
- [ 25 ] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W. K., Belnap J. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [ 26 ] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 杨磊, 党宏忠, 王多峰, 薛睿. 半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [ 27 ] 党汉瑾, 党宏忠, 王玉魁, 周泽福. 半干旱区柠条植物篱水分再分配格局研究. *林业科学研究*, 2014, 27(6): 745-751.
- [ 28 ] 朱宝文, 郑有飞, 陈晓光. 高寒针茅草原植物生长季土壤水分动态变化规律. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(3): 96-100.
- [ 29 ] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 半干旱区不同整地方式与灌草配置对土壤水分的影响. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 10-14.
- [ 30 ] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究. *林业科学*, 2005, 41(2): 37-41.