

doi: 10.11707/j.1001-7488.20180703

# 修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应\*

汪 星<sup>1</sup> 高志永<sup>2</sup> 汪有科<sup>1,3</sup> 聂真义<sup>4</sup> 靳姗姗<sup>3</sup> 董建国<sup>3</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心 杨凌 712100; 2. 杨凌职业技术学院水利工程分院 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100)

**摘 要:** 【目的】探究修剪与覆盖对黄土丘陵区旱作枣林土壤水分的影响,为该区林地土壤干层修复提供科学依据。【方法】2012—2015 年,以典型黄土丘陵区枣林及农田为研究对象,设计 10 种试验处理:常规(PI-1)、轻度(PI-2)、中度(PI-3)、重度(PI-4)修剪;林下秸秆、石子覆盖、地膜覆盖、林下裸地;PI-4+塑料膜覆盖;农地。并采用中子水分仪定位监测土壤剖面水分含量,探讨不同处理下的土壤水分状况。【结果】与相似条件下的旱作农地相比,15 龄旱作山地枣林土壤干层深度达 560 cm,年均耗水量高出农地 19.7 mm;不同修剪处理间,枣林土壤含水量存在显著差异( $P < 0.05$ )。4 种修剪处理土壤含水量表现为 PI-1 < PI-2 < PI-3 < PI-4;在常规修剪情况下,采取林下秸秆、石子覆盖和地膜覆盖的枣林地土壤水分含量都显著增加( $P < 0.05$ ),分别比林下裸地土壤储水量增加 31.8~43.1、69.9~71.4 和 84.0~92.7 mm;地膜覆盖储水量在枣林休眠期达 339.45 mm,显著高于石子覆盖和林下秸秆处理( $P < 0.05$ );PI-4+塑料膜覆盖处理土壤水分与农地土壤水分在枣林生育期无显著差异( $P > 0.05$ ),但在休眠期枣林土壤含水量高于农地。【结论】增加枣树修剪强度可明显减少林地耗水;全年林地覆盖更有利于生育期土壤水分储存并可有效降低林地休眠期土壤水分损失;适度修剪+全年地膜覆盖可有效防治林地土壤干层加重或发生。

**关键词:** 枣林; 土壤干化; 黄土丘陵区; 土壤水分; 半干旱地区

中图分类号: S718.51 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2018)07-0024-07

## Effects of Pruning and Mulching on Soil Desiccation Remediation in Rain-Fed Jujube Plantation in the Semi-Arid Loess Hilly Gull Region

Wang Xing<sup>1</sup> Gao Zhiyong<sup>2</sup> Wang Youke<sup>1,3</sup> Nie Zhenyi<sup>4</sup> Jin Shanshan<sup>3</sup> Dong Jianguo<sup>3</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education Yangling 712100; 2. Department of Water Conservancy, Yangling Vocational & Technological College Yangling 712100;  
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University Yangling 712100;  
4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University Yangling 712100)

**Abstract:** 【Objective】Soil desiccation is a normal phenomenon in plantation forests in the Loess Plateau of China, which affects the growth and cultivation of plants. This study was conducted to analyze the impacts on soil water of different pruning and mulching treatments in jujube plantation in order to explore remediation technologies for soil desiccation in this region. 【Method】The study sites was located in Mizhi County, Shaanxi Province, and the jujube trees were grown under rain-fed conditions. Soil moisture under 10 types of land surface management practices(4 different pruning intensities: traditional, slight, moderate and heavy pruning; 3 mulching treatments using straw, gravel and plastic film; traditional pruning + no mulching; heavy pruning + plastic film mulching; and farmland) were measured with CNC100 neutron gauges in 2012—2015. 【Result】The soil desiccation in 15-year-old jujube plantation reached 560 cm in depth and annual water consumption was 19.7 mm more than the farmland. The degree of soil moisture improvement was increased with the increase of pruning intensity. The soil water storage within the top 300 cm soil layer of jujube plantations under straw, plastic film and gravel mulching treatments was 31.8–43.1, 69.9–71.4, and 84.0–92.7 mm respectively higher than that of no mulching jujube plantation. The combination of heavy pruning and plastic film mulching improved the soil moisture in growth periods and reduced the soil water loss in dormancy periods effectively, and under

收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2018-06-13。

基金项目: 国家支撑计划项目(2015BAC01B03); 陕西统筹项目(2014KTCC01-03)。

\* 汪有科为通讯作者。

thus treatment soil moisture within 0 – 300 cm depth could recover to the same level as farmland in rainy years.

**【Conclusion】** Practices combining pruning with mulching were more effective in conserving water in jujube plantation, thus, more helpful in preventing and mitigating the desiccation of deep soil in plantations in the semi-arid regions.

**Key words:** artificial jujube plantation; soil desiccation; Loess Hilly Gull Region; soil moisture; semi-arid area

干旱缺水和水土流失是制约黄土高原生态恢复和农业发展的两大瓶颈(Shi *et al.*, 2000)。自1999年退耕还林政策实施以来,黄土高原水土流失状况得到了显著改善;但随着退耕还林植被不断生长,对土壤水分需求量越来越大,林地土壤水分亏缺越来越严重,形成了大范围土壤干化,林地土壤水分调控作用降低,从而影响植被生长发育,甚至导致群落衰败和生态系统退化(Chen *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2015)。如何防治半干旱黄土丘陵区人工林地日趋严重的土壤水分生境恶化已成为必须面对的重大课题。

大枣(*Ziziphus jujuba*)是陕北地区重要的特色经济林树种,自退耕还林工程实施以来形成了大规模山地枣林,种植面积超过66 666.7 hm<sup>2</sup>。由于灌溉水源稀缺,多为旱作模式经营(Chen *et al.*, 2014),已有研究证明,12龄山地枣林林地干层接近6 m(汪星等, 2015)。为缓解枣林土壤干化程度,近年来实施了集雨微灌工程、截水沟、覆盖保墒等旱作节水技术,这些措施促进了枣树生长,提高了枣林产量和水分利用效率(员学锋等, 2006; 吴普特等, 2008; 汪有科等, 2008; 蔺君等, 2013);然而,并未完全遏制枣林地土壤干化,土壤干燥化仍在加重(Chen *et al.*, 2015)。

赵霞等(2012)提出了节水型修剪理念,试图通过修剪减少枣林耗水,以达到缓解土壤干化目的。随后的研究证明,修剪能减少枣树蒸腾耗水量(Liu *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014; 魏新光等, 2014; 2015)。覆盖处理也是提高土壤含水量的有效途径,覆盖能够减少地表土壤蒸发损失,提高作物水分利用效率(Chen *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009),但不同修剪强度对土壤水分影响如何,不同覆盖处理对枣林土壤水分影响如何,修剪技术与覆盖结合能否有效缓解林地土壤干化,这些关键问题鲜见报道。鉴于此,本研究以黄土丘陵半干旱区旱作枣林为对象,采用树高、冠幅及二次枝总长度为控制指标,设计10种试验处理:常规(PI-1)、轻度(PI-2)、中度(PI-3)、重度(PI-4)修剪;林下秸秆、石子覆盖地膜覆盖、林下裸地;PI-4+塑料膜覆盖;农地。采用中子水分仪定位监测土壤剖面水分含量,并对不同处

理下的土壤水分状况进行分析,探究枣林地干化土壤修复的新途径,以期为黄土丘陵区林地土壤干层修复提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市米脂县(109°49′—110°29′E, 37°39′—38°5′N)孟岔山地大枣节水示范基地。该区域属典型的黄土高原丘陵沟壑区,温带半干旱性气候区,气候干燥。年均降水量451.6 mm,主要集中在7—9月,年均气温8.4℃,年均日照时数2 761 h,日照百分率62%,年总辐射580.5 kJ·cm<sup>-2</sup>,平均海拔1 049 m。试验地土壤为黄绵土,0~1 m土层平均土壤密度为1.29 g·cm<sup>-3</sup>,田间持水量为23%,凋萎系数为5.2%。试验区枣树为2000年以来逐年栽植,株行距为2 m×3 m,分布在各个坡向,水平阶较多。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设置

试验区布设在25°坡面的水平阶上,立地条件相似,无灌溉处理,每种处理树龄相同。本试验设4种不同修剪强度处理、4种林下地表覆盖处理、1种修剪+覆盖处理和农地,共10种处理。

2.1.1 修剪处理 修剪处理设计4种修剪强度,分别为常规(PI-1)、轻度(PI-2)、中度(PI-3)和重度(PI-4)修剪,处理指标见表1。每种修剪处理3次重复,每块重复样地面积6 m×8 m,8株枣树,试验于2014-04-01—2015-11-01进行,在枣树生育期(4—11月)每隔5天复检,剪掉一些徒长枝条等,以控制修剪后表1中5个指标不变。

2.1.2 覆盖处理 4种覆盖处理分别为在林下设置玉米秸秆覆盖、地膜覆盖、石子覆盖及裸地(对照),每种处理3次重复,每块重复样地面积6 m×8 m,8株枣树。试验采用的玉米秸秆长5~7 cm,覆盖厚度为10~12 cm;石子粒径为0.5~1 cm,覆盖厚度为5 cm;地膜采用大棚膜,平铺在除去杂草的枣林地上;裸地处理为枣林下无任何覆盖。覆盖时间均为2012-03-01—2015-10-01。

表 1 修剪处理后枣树指标

Tab. 1 *Ziziphus jujuba* growth indices after pruning

修剪强度 Pruning intensity	树高 Tree height/cm	冠幅 Crown width/cm	主枝数 Shoot number	二次枝数 Secondary branch number	二次枝总长度 Length of secondary branches/cm
PI-1	220 ± 20	200 × 220	3	27	800 ± 20
PI-2	200 ± 18	200 × 200	3	24	600 ± 15
PI-3	180 ± 18	180 × 180	2	14	400 ± 12
PI-4	160 ± 14	160 × 160	1	6	300 ± 10

2.2.3 修剪 + 覆盖处理 实地调查发现 枣林地塑料膜覆盖土壤水分显著高于其他覆盖处理 结合赵霞等(2012)节水型修剪理念,为进一步探究枣林地覆盖和修剪结合对土壤干层的修复效应,本研究选择 PI-4 + 塑料膜覆盖作为 1 个处理,该处理 3 次重复,每块重复样地面积 6 m × 8 m 8 株枣树。试验时间为 2014-04-01—2015-11-01。

2.1.4 农地处理 为了对比常规 (PI-1) 修剪枣林干化程度,分析 PI-4 + 地膜覆盖处理土壤水分恢复情况,设计面积为 6 m × 8 m 的 3 块农地作为对照样地。

## 2.2 土壤水分监测

采用 CNC100 型中子水分仪对土壤水分监测,监测深度包括 0 ~ 300 和 0 ~ 1 000 cm,测定深度步长 20 cm,每 10 天测 1 次,测定始末时间与各处理试验时间同步,中子管布设在各小区枣树株间和农田中部位置。表层 20 cm 土壤水分含量用取土烘干法测定。为更准确地保证各处理下的土壤水分,本研究对每个处理小区周围 0 ~ 300 cm 深土层采用大棚膜进行隔离,以防止各处理间的根系与水分相互作用和流通。

## 2.3 数据处理

土壤储水量计算公式为:

$$W = 10H\theta \quad (1)$$

土壤储水量变化量计算公式为:

$$\Delta W = W_1 - W_0 \quad (2)$$

式中:  $W$  为土壤储水量 (mm);  $H$  为土层深度 (cm);  $\theta$  为土壤体积含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\Delta W$  为土壤储水量变化量 (mm);  $W_1$  为时段末储水量 (mm);  $W_0$  为时段始储水量 (mm)。

采用 Excel 2012 和 PASW Statistics 18.0 软件进行数据统计分析,采用 Origin 2016 和 AutoCAD 2010 软件作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 旱作枣林地土壤干化程度

2015 年 (15 龄) 枣林生育期 (4—10 月) 和同期附近的山坡农地平均土壤含水量对比情况如图 1 所

示。可清晰看出,15 龄枣林 0 ~ 560 cm 深度平均土壤含水量为 7.3%,较农地低 5.27%,土壤储水量较农地少 295.28 mm。当地农地栽培历史已有上千年,所以一般认为旱作农作物不形成土壤干层,土壤生态专家常用旱作农地土壤水分作为对照来分析其他土地利用方式的土壤干化程度。如以图 1 中农地土壤水分作对照,15 龄枣林 0 ~ 400 cm 深度平均土壤含水量为 6.18%,已形成重度干层,其中 400 ~ 560 cm 深度平均土壤含水量为 9.82%,为轻度干层,干化土壤深度达 560 cm,平均每年加深干层约 37 cm,15 龄枣林较农地多耗水 295.28 mm,平均每年约多消耗 19.69 mm 土壤水。

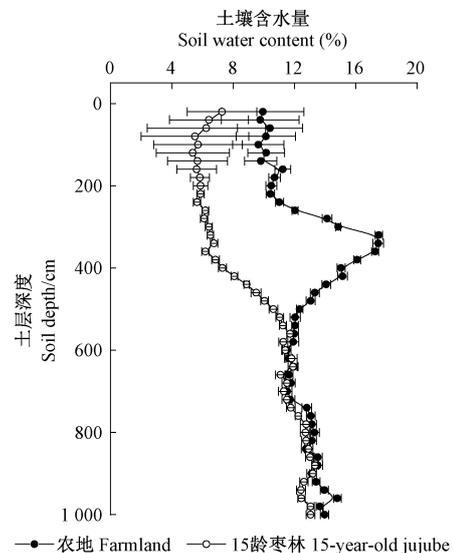


图 1 15 龄枣林与农地土壤含水量比较

Fig. 1 Comparison of soil water content of 15-year-old jujube plantation and farmland

### 3.2 修剪强度对土壤水分的影响

图 2 表明,不同修剪处理下枣林地土壤含水量存在显著性差异,土壤含水量随着修剪强度增加而增大 ( $P < 0.05$ ),其中 PI-4 处理土壤含水量较 PI-1、PI-2 和 PI-3 处理分别高 1.91%、1.30%、0.73% (2014 年) 和 2.31%、1.48%、0.79% (2015 年)。从土壤储水量变化量来看 (图 2),枣林地土壤储水量变化量随着修剪强度增加而增大,PI-3 和 PI-4 处理均显著大于其他处理 ( $P < 0.05$ ),PI-4 处理土壤储

水量变化量分别较 PI-1、PI-2 和 PI-3 处理多 54.36、46.75、22.88 mm (2014 年) 和 75.30、51.41、24.86 mm; 此外, PI-1 和 PI-2 处理的土壤储水量变化量分别为 -11.15、-3.54 mm (2014 年) 和

-33.04、-9.15 mm (2015 年), 说明 PI-1 和 PI-2 处理强度下, 降雨量不能满足枣林对水分的需求, 枣林只能通过消耗土壤水分来获取生长所需水量。

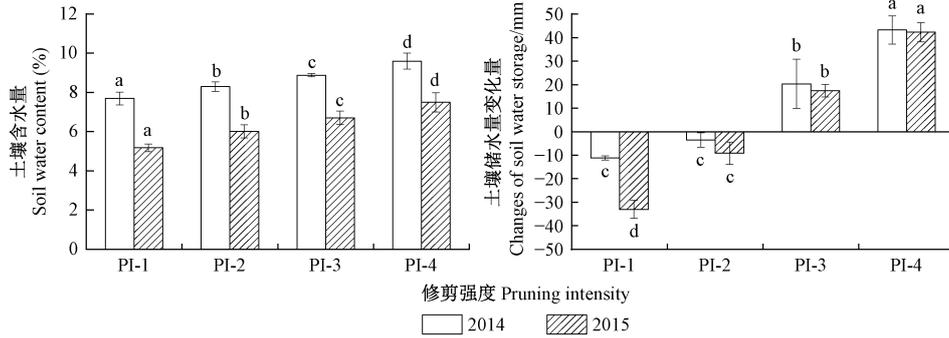


图 2 不同修剪强度下枣林生育期土壤含水量及土壤储水量变化量

Fig. 2 Soil moisture and the changes of soil water storage of jujube plantation under different pruning intensity

### 3.3 覆盖对土壤水分的影响

图 3 所示为 2012 年 3 月—2015 年 10 月不同覆盖措施下 0~300 cm 土层土壤储水量变化动态。可以看出 4 个生育期结束时, 秸秆覆盖土壤储水量分别比对照高 32.5、30.4、26.5 和 36.3 mm, 石子覆盖分别高 56.0、51.7、58.8 和 66.3 mm, 地膜覆盖分别高 68.7、75.6、69.2 和 83.1 mm。3 个休眠期结束时, 对照土壤储水量最低, 为 283.78 mm。秸秆覆盖土壤储水量较对照分别减少损失 21.9、30.1 和 24.8 mm, 石子覆盖减少损失 43.3、59.3 和 56.6 mm, 地膜覆盖减少损失 35.1、48.8 和 53.6 mm。3 种覆盖处理下, 林地土壤储水量均显著高于对照 (无覆盖) ( $P < 0.05$ ), 地膜覆盖和石子覆盖之间的土壤储水量差异不显著 ( $P < 0.05$ ); 与对照相比, 秸秆覆盖土壤储水量高 31.8~43.1 mm, 石子覆盖高 69.9~71.4 mm, 地膜覆盖高 84.0~92.7 mm。

在 2012—2015 年连续 3 年的生育期中, 对照土壤储水量均显著低于 3 种覆盖处理 ( $P < 0.05$ ); 枣林休眠期地膜覆盖储水量达 339.45 mm, 显著高于石子覆盖和秸秆覆盖 ( $P < 0.05$ ), 地膜覆盖储水量较石子覆盖高 23.85 mm, 较秸秆覆盖高 57.44 mm。

### 3.4 修剪 + 覆盖对土壤水分的影响

枣树修剪 + 覆盖同时进行的土壤含水量动态和农地土壤含水量动态见图 5。2014 年 4 月 0~300 cm 土层枣林土壤含水量只有 7.3%, 农地土壤含水量为 9.4%, 林地土壤含水量低于农地。在 4 月覆盖后由于时间短且缺少降雨, 覆盖效果还未能显现。随着降雨增加和时间延续, 到 9 月, 枣林土壤与农地基本接近。在枣树休眠期的 11 月至 2015 年 4 月期间, 土壤含水量整体下降, 枣林和农地土壤含水量无显著性差异 ( $P < 0.05$ )。但是, 由于这一时期农地土壤含水量下降快, 枣林土壤含水量下降慢, 在休眠期

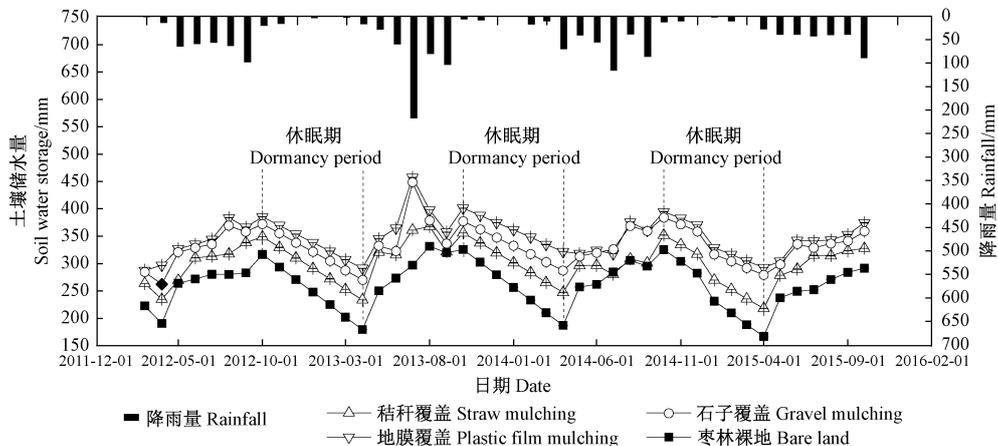


图 3 2012 年 3 月—2015 年 10 月不同覆盖措施下 0~300 cm 土层土壤储水量变化动态

Fig. 3 Dynamic average soil water storage of different mulching patterns under 0~300 cm soil layer from Mar., 2012 to Oct. 2015

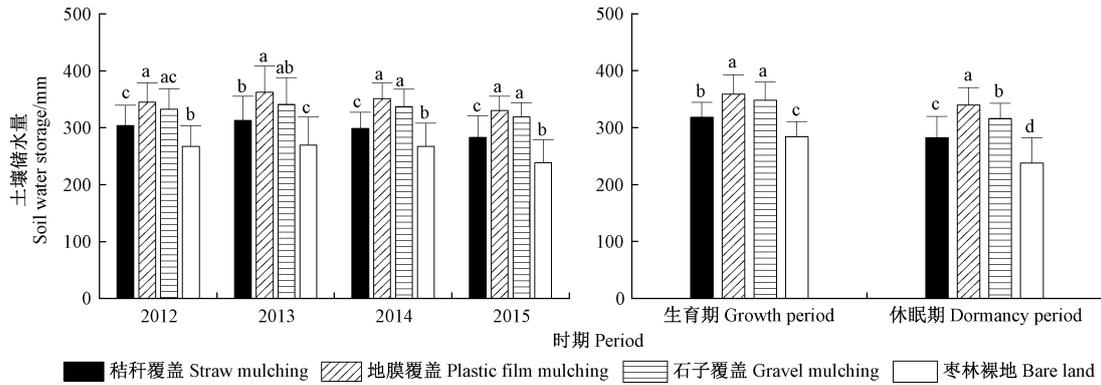


图4 2012—2015年枣林全年、生育期及休眠期土壤储水量

Fig. 4 Soil water storage of jujube plantation for the whole year( A) , growth and dormancy period( B) from 2012 to 2015

结束的3月农地土壤含水量为9.6% ,枣林土壤含水量为10.4% 枣林土壤含水量高于农地。2015年是少雨年份 枣林地和农地水分均不足 ,土壤含水量差异不明显 ,并且整个生育期土壤含水量虽低于2014年农地水平 ,但却高于2014年5月之前的枣林土壤含水量。此外 ,枣树2015年生育期(5—10月)期间 ,与农地土壤含水量差异显著 ( $P < 0.05$ ) ,枣林土壤储水量高于农地7.47 mm。由此看出 ,枣树采取修剪+地膜覆盖可实现0~300 cm土层土壤含水量与农地持平。试验结果显示 ,在枣树采取修剪情况下 ,覆盖对林地土壤水分修复有明显效果。土壤水分修复需要较长时间 ,在降水较多的2014年 ,0~300 cm土层土壤水分恢复到与农地相同水平差不多用了1个生育期的时间 ,如遇到少雨年份恢复的时间可能更久。试验也证明 ,在半干旱黄土丘陵山地枣林中采取修剪+地膜覆盖的模式可有效防治林地土壤干层加重或发生 ,但能否修复已出现的深度土壤干化还有待进一步研究。

#### 4 讨论

本研究表明 ,枣树修剪可显著提高林地土壤含水量 ,与已有苹果(*Malus pumila*) (Li *et al.* , 2003) 、梨(*Pyrus spp.*) (Lopez *et al.* , 2008) 、桉(*Eucalyptus robusta*) 树 (Shelden *et al.* , 2000) 修剪研究结果一致。修剪抑制冠层生长 ,减小木质部导管直径 ,减少水力学导度 ,减少树体蒸腾进而减缓了土壤水分亏缺 (Namirembe *et al.* , 2009) 。此外 ,矮化修剪能够降低枣树根系深度 ,影响其从土壤中获取水分的范围 ,降低耗水深度 ,缓解深层土壤干化(马理辉等 , 2012; 汪星等 , 2015) 。但如何实现修剪的可视化、数字化和精准化进而改善林地土壤水分状况有待进一步研究。

覆盖作为一种传统保墒措施 ,不仅能保蓄土壤水分 ,提高水分利用效率 (Sheng *et al.* , 2008) ,还可改善农田小气候 ,但未见有覆盖改善和治理林地土壤干层的报道 ,本研究采取枣树生长下的覆盖试验 ,清晰揭示了覆盖对土壤水分的作用 ,这一做法值得

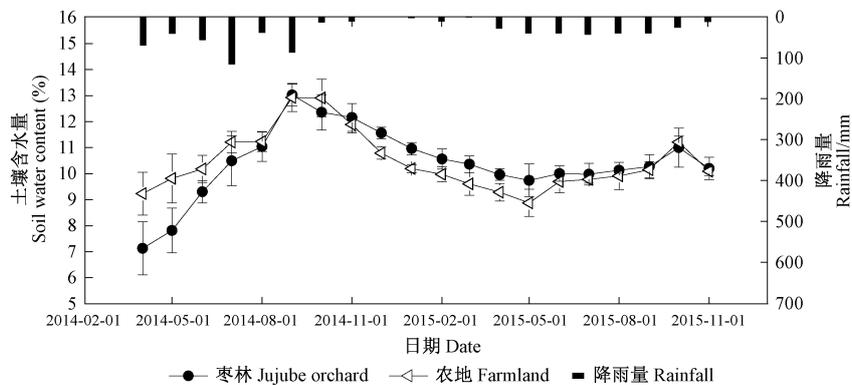


图5 修剪+覆盖处理枣林与农地在2014年4月至2015年11月的0~300 cm土层月均土壤含水量动态

Fig. 5 Dynamic of monthly average soil water content of pruning and mulching jujube plantations and farmland under 0~300 cm soil layer from April 2014 to November 2015

今后生产和研究中参考借鉴,但还需进行基于收益与成本关系分析的优化研究。虽然覆盖是一种传统的旱作技术措施,特别是膜覆盖在枣林休眠期具有显著的保墒效果,但目前生产中采用全面膜覆盖和全年覆盖十分少见,也未见有针对林地干层治理进行覆盖治理的应用研究。如何针对土壤干化问题将传统覆盖措施进行量化、标准化研究,尽快将覆盖技术应用于黄土高原人工林(草)地土壤干化治理是个具有理论和实际应用意义的重要课题。

关于半干旱黄土丘陵区人工植被造成土壤干化的研究很多,普遍认为人工植被造成的土壤干化特别是深层干化会对后续多年生植被生存产生不利影响(杨维西,1996;杨文治,2001;王力等,2004),目前还未见有在干化土壤环境再建多年生植物的研究报道,也少见对该区域深层干化土壤进行专门治理的研究报道。本研究初步结果显示,膜覆盖+修剪能明显改善0~300 cm土层的土壤水分状况,并且取得了当年土壤水分恢复到与附近农田相同的结果。0~300 cm土层是植物主要的水分和养分吸收范围,说明采用这种模式可防治枣林土壤干化加剧。但尚不能确定采用该模式是否能够防止和治理枣林地深层土壤干化,期待更多、更深入的研究成果。

本研究发现15龄枣林已形成近600 cm深度的干层,与农地对照计算得出枣林每年较农地多消耗土壤水分19.69 mm,是否意味着每年给枣林增加19.69 mm水分输入,或使枣林每年蒸散减小19.69 mm,就不会形成土壤干化,特别是深层(>2 m)土壤不发生干化,是个值得思考和进一步探索的课题。本试验在控制枣树高为160 cm,冠幅为160 cm×160 cm情况下进行了覆膜,丰水年林地休眠期土壤含水量高于农地,并且林地土壤水分恢复到与农地持平的水平,但缺乏大于300 cm深度的土壤水分监测与分析,所以还不能确定枣树修剪+膜覆盖对深层干化土壤修复作用,这个问题亦需继续深入研究。

#### 4 结论

研究表明,15龄山地旱作枣林地土壤干层深度达到560 cm。全年秸秆覆盖、石子覆盖和膜覆盖不但可增加枣林生育期土壤水分储量,而且能降低休眠期林地土壤水分损失量。4种枣树修剪强度下,随着修剪强度增加其林地土壤水分含量也有增加趋势。节水型修剪+全年覆盖更有利于林地土壤水分恢复,是修复枣林土壤干层的一种有效措施。

#### 参 考 文 献

- 蔺君,汪有科,卫新东,等. 2013. 黄土丘陵区竹节式聚水沟的蓄水特性. 应用生态学报, 24(12): 3373-3380.
- (Lin J, Wang Y K, Wei X D, et al. 2013. Water impounding characteristics of bamboo-shaped rainwater harvesting ditch in the hilly loess region. Chinese Journal of Applied Ecology, 24(12): 3373-3380. [in Chinese])
- 马理辉,吴普特,汪有科. 2012. 黄土丘陵半干旱区密植枣林随树龄变化的根系空间分布特征. 植物生态学报, 36(4): 292-301.
- (Ma L H, Wu P T, Wang Y K. 2012. Spatial pattern of root systems of dense jujube plantation with jujube age in the semiarid loess hilly region of China. Chinese Journal of Plant Ecology, 36(4): 292-301. [in Chinese])
- 王力,邵明安. 2004. 黄土高原退耕还林条件下的土壤干化问题. 世界林业研究, 17(4): 57-60.
- (Wang L, Shao M A. 2004. Soil desiccation under the returning farms to forests on the loess plateau. World Forestry Research, 17(4): 57-60. [in Chinese])
- 汪星,周玉红,汪有科,等. 2015. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究. 水利学报, 46(3): 263-270.
- (Wang X, Zhou Y H, Wang Y K, et al. 2015. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China. Journal of Hydraulic Engineering, 46(3): 263-270. [in Chinese])
- 汪有科,徐福利,辛小桂. 2008. 微灌技术在陕北山地红枣生产中的应用示范研究. 水土保持通报, 28(4): 198-200, 203-204.
- (Wang Y K, Xu F L, Xin X G. 2008. Research on the application of micro irrigation technology for hilly jujube in the north of Shaanxi. Bulletin of Soil and Water Conservation, 28(4): 198-200, 203-204. [in Chinese])
- 魏新光,陈滇豫, Liu Shouyang, 等. 2014. 修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用. 农业机械学报, 45(12): 194-202+315.
- (Wei X G, Chen D Y, Liu S Y, et al. 2014. Effect of trim on jujube transpiration in loess hilly region. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 45(12): 194-202. [in Chinese])
- 魏新光,聂真义,刘守阳,等. 2015. 黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响. 农业机械学报, 46(6): 130-140.
- (Wei X G, Nie Z Y, Liu S Y, et al. 2015. Soil moisture characteristics and its influence on Jujube tree transpiration in Loess hilly region. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 46(6): 130-140. [in Chinese])
- 吴普特,汪有科,辛小桂,等. 2008. 陕北山地红枣集雨微灌技术集成与示范. 干旱地区农业研究, 26(4): 1-7.
- (Wu P T, Wang Y K, Xin X G, et al. 2008. Maize yield-increasing mechanism of supplemental irrigation with harvested rainwater in semi-arid areas of the Loess Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 26(4): 1-7. [in Chinese])
- 杨维西. 1996. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. 林业科学, 32(1): 78-85.
- (Yang W X. 1996. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern region of China. Scientia Silvae

- Sinicae 32(1): 78-85. [in Chinese]
- 杨文治. 2001. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 16(5): 433-438.
- (Yang W Z. 2001. Soil water resources and afforestation in Loess plateau. Journal of Natural Resources, 16(5): 433-438. [in Chinese])
- 员学锋, 吴普特, 汪有科, 等. 2006. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究. 农业工程学报, 22(7): 22-26.
- (Yuan X F, Wu P T, Wang Y K, et al. 2006. Soil moisture conserving irrigation under straw mulch with no-tillage. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 22(7): 22-26. [in Chinese])
- 赵 霞, 汪有科, 刘守阳, 等. 2012. 两种新的旱作管理技术对山地梨枣树生长及结果的影响. 干旱地区农业研究, 30(4): 157-160, 171.
- (Zhao X, Wang Y K, Liu S Y, et al. 2012. Effects of two new dryland farming technologies on growth and fruit bearing of pear jujube trees in hilly regions. Agricultural Research in the Arid Areas, 30(4): 157-160, 171. [in Chinese])
- Bu L D, Liu J L, Zhu L, et al. 2013. The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region. Agricultural Water Management, 123(10): 71-78.
- Chen S, Zhang X, Pei D, et al. 2007. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain. Annals of Applied Biology, 150(3): 261-268.
- Chen D Y, Wang Y K, Liu S Y, et al. 2014. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China. Agricultural Water Management, 136(2): 23-33.
- Chen H S, Shao M A, Li Y Y. 2008. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. Geoderma, 143(1/2): 91-100.
- Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. 2015. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 8(10): 739-741.
- Li K T, Lakso A N, Piccioni R, et al. 2003. Summer pruning reduces whole-canopy carbon fixation and transpiration in apple trees. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 78(6): 749-754.
- Liu S Y, Wang Y K, Wei X D, et al. 2013. Measured and estimated evapotranspiration of Jujube (*Ziziphus jujuba*) forests in the Loess Plateau, China. International Journal of Agriculture & Biology, 15(5): 811-819.
- Lopez G, Arbones A, DelCampo J, et al. 2008. Response of peach trees to regulated deficit irrigation during stage 2 of fruit development and summer pruning. Spanish Journal of Agricultural Research, 6(3): 479-491.
- Namirembe S, Brook R M, Ong C K. 2009. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in a water limited environment in Kenya. Agroforestry systems, 75(3): 197-210.
- Shelden M, Sinclair R. 2000. Water relations of feral olive trees (*Olea europaea*) resprouting after severe pruning. Australian Journal of Botany, 48(5): 639-644.
- Sheng Z, Liang Y, Zhang X, et al. 2008. Effects of soil mulching on cucumber quality, water use efficiency and soil environment in greenhouse. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 24(3): 65-71.
- Shi H, Shao M A. 2000. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. Journal of Arid Environments, 45(1): 9-20.
- Tyree M T, Ewers F W. 1991. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. New Phytologist, 119(3): 345-360.
- Wang L, Wang Q J, Wei S P, et al. 2008. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas. Forest Ecology & Management, 255(7): 2467-2477.
- Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. 2009. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. Agricultural Water Management 96(3): 374-382.

(责任编辑 于静娴)