

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.028

# 黄土丘陵区旱作枣树规格与枣林耗水量关系研究

汪星<sup>1</sup> 高志永<sup>2</sup> 高建恩<sup>1,3</sup> 汪有科<sup>1,3</sup> 聂真义<sup>4</sup>

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

**摘要:** 以枣树为研究对象, 通过对自然生长枣林与矮化密植枣林、截干枣林、极端矮化的枣树及不同修剪强度枣林土壤水分进行监测, 采用水量平衡法分析上述情况下枣林耗水特点及枣树水分利用效率。结果表明: 自然生长枣林每年在土壤中耗水量较矮化密植枣林大 6.54 mm, 耗水深度较矮化密植枣林大 13.3 cm, 水分利用效率最小, 2014、2015 年分别为 2.1、1.8 kg/m<sup>3</sup>; 12 龄枣林实施截干处理 3 年, 其林下土壤水分恢复深度达 460 cm, 每年恢复深度达 153.3 cm, 是形成干层速度的 3.41 倍; 极端矮化枣树规格降低 1/2, 其耗水量为同龄枣林的 25%, 水分利用效率是同龄枣林的 1.26 倍; 枣树不同修剪强度与其蒸腾耗水关系紧密, 随着修剪强度加大枣树蒸腾耗水量减小, 林下土壤含水率可提高。研究显示, 枣林可以通过对枣树规格的缩小来实现枣林耗水量及水分利用效率的调控, 黄土高原半干旱区年降水量波动较大, 确定当地适宜修剪强度指标时, 建议参考多年平均降水量来制定。

**关键词:** 枣树; 旱作技术; 林地耗水; 黄土丘陵区

**中图分类号:** X152.7; S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0227-10

## Relationships between Tree Crown Size and Water Consumption of Rain-fed Jujube Plantation in Loess Hilly Region

WANG Xing<sup>1</sup> GAO Zhiyong<sup>2</sup> GAO Jian'en<sup>1,3</sup> WANG Youke<sup>1,3</sup> NIE Zhenyi<sup>4</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Department of Water Conservancy, Yangling Vocational and Technological College, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to investigate the relationships between tree crown size and water consumption of rain-fed jujube plantations, soil moisture under different conditions (natural planting, high-density dwarfing, stem-cutting, extreme dwarfing and pruning with different intensities) were measured by using the CNC100 neutron gauges, meanwhile, water balance method was used to calculate the water consumption and water use efficiency of above-mentioned jujube plantations. Results showed that compared with natural plantation, high-density dwarfed jujube trees reduced annual water consumption of 6.54 mm and water consumption depth of 13.3 cm, respectively. Moreover, it increased the water use efficiency to 1.8 kg/m<sup>3</sup> (the lowest for natural jujube plantation was 2.1 kg/m<sup>3</sup>). The soil moisture restoration of 12 years old cutting stem jujube plantation reached 460 cm depth in the third year (153.3 cm per year on average), which was 3.41 times faster than the formation of soil dry layer. Extremely dwarfed jujube with half of normal crown size decreased the water consumption by 25% and improved the water use efficiency by 1.26 times of natural jujube plantation, respectively. Pruning is an effective approach to improve soil water status and water use efficiency in jujube plantation because of the close relationship between crown size and jujube water usage. Furthermore, the reasonable pruning intensity, which aimed to obtain high yield and water use efficiency, should be determined based on local rainfall considering its high variability in the semi-arid Loess Plateau.

**Key words:** jujube; technique of dryland farming; water consumption of plantation; loess hilly region

收稿日期: 2016-09-16 修回日期: 2016-12-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAC01B03)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(2014KTCG01-03)

作者简介: 汪星(1984—),男,博士后,主要从事林地耗水研究, E-mail: WangXingSTR@163.com

通信作者: 高建恩(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事水资源高效利用研究, E-mail: gaojianen@126.com

## 引言

黄土高原由于降水不足,严重制约树木生长,所以长期以来对树木及林地耗水量的研究较多<sup>[1-5]</sup>,这些研究主要反映不同树木的抗旱性和耗水量特性评价,很少有涉及如何降低或调控林木与林地耗水量的研究报道。1999年实施国家退耕还林工程以来,由于经济林木具有生态和经济双重功能,所以成为当地主栽树种,如苹果、红枣、山杏、沙棘等形成黄土高原规模化人工林和区域特色林种。但是黄土高原人工林包括苹果林等<sup>[6-7]</sup>因蒸散耗水量大于当地降水量,造成土壤深层干化的不断加剧<sup>[4,8-11]</sup>,所以土壤含水率如何恢复一直是生态学、土壤水文学及林学专家学者关注的热点<sup>[8,12]</sup>。近年来,马理辉等<sup>[13]</sup>对12龄山地枣林土壤含水率研究已经确定有5.6 m深的干层,王志强等<sup>[14-15]</sup>近年研究得出人工林造成土壤的干化层可达到20 m以下,并认为人工林死后依靠自然降雨恢复土壤含水率需要150年以上,说明了林草地土壤干化的严重性和可怕程度。国家退耕还林(草)工程实施以来,黄土丘陵地面生态景观成效得到国内外普遍的认可<sup>[16]</sup>,但是也加剧了该区域林地土壤含水率生态恶化和后续植被建造的难度<sup>[16-20]</sup>。

黄土丘陵林草地深层土壤含水率恶化防治既存在多学科融合研究的科学问题,也存在环境治理的技术难题。林草地土壤深层干化主要是由于植物蒸腾耗水量过大所致。然而,多年来针对黄土高原林

草地土壤干化的研究主要集中在增加土壤含水率(如雨水集蓄利用)和降低土壤蒸发量(如覆盖保墒等)两方面。对于能否调控林木耗水量罕见报道。本文以旱作枣林为研究对象,分析枣林在自然状态生长、矮化密植管理生长、枣树截干处理和不同修剪强度下的林地土壤含水率变化与枣林耗水量关系,探讨枣林耗水量的可控性问题,以期降低枣林耗水量寻求依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验布设于陕西省榆林市米脂县(38°11'N、109°28'E)孟岔山地红枣节水示范基地。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。年平均降水量451.6 mm,主要集中在7—9月份,年平均气温8.4℃,年均日照时数2761 h,日照百分率62%,年总辐射量580.5 kJ/cm<sup>2</sup>,平均海拔高度1049 m。试验地土壤为黄绵土,0~1 m土层平均土壤容重为1.29 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量和凋萎系数分别为23%和5.16%(质量含水率)。研究区具有集中连片的枣树面积约180 hm<sup>2</sup>,全部属于国家退耕还林工程造林,其中采取矮化密植经营的枣林约140 hm<sup>2</sup>,自然生长的枣林约40 hm<sup>2</sup>,栽植枣树自2000年开始,一直处于不断发展之中,所以具有成片的1~15龄的枣树供试验研究,枣树品种为梨枣。研究区枣树生长情况如表1所示,研究期间降水量如图1所示。

表1 研究区枣树生长情况

Tab.1 Growth of jujube in study area

处理	因子水平	树高/cm	冠幅/(cm × cm)	主枝数	二次枝数	二次枝总长度/cm
自然生长	规格 I	480 ± 36	430 × 430	1 ~ 2	32 ~ 42	1 400 ~ 1 900
矮化密植	规格 II	220 ± 22	220 × 220	3 ~ 4	24 ~ 27	730 ~ 850
修剪 PI-1	规格 III	220 ± 20	220 × 220	3	27	800 ± 20
修剪 PI-2	规格 IV	200 ± 18	220 × 200	3	24	600 ± 15
修剪 PI-3	规格 V	180 ± 18	180 × 180	2	14	400 ± 12
修剪 PI-4	规格 VI	160 ± 14	160 × 160	1	6	300 ± 10
极端矮化	规格 VII	110 ± 3	100 × 100	1	4	160 ± 12
截干枣林	规格 VIII	120 ± 20	110 × 110	3	4	75 ± 8

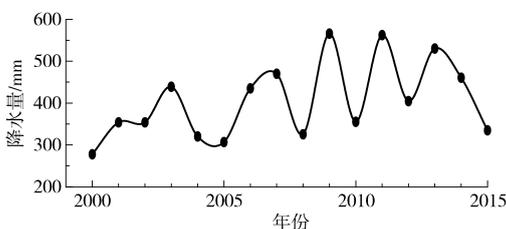


图1 枣树生长期降水量

Fig.1 Rainfall in growth period of jujube

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

为了探索枣树体积规格与其耗水量关系,本研究主要从树体规格考虑,树体由大到小分别为:自然生长的枣林(规格 I)、矮化密植枣林(规格 II)、4个修剪强度(规格 III、IV、V、VI)、极端矮化处理(规格 VII)和大树截干处理(规格 VIII),各研究区选择立地环境相似,设置在位于山坡上部的崩坡地带,坡

度约 20°,坡向偏东,除极端矮化处理(规格Ⅶ)外,各处理观测区设置在枣林面积不小于 3 000 m<sup>2</sup> 的林地中间,每个处理样地之间用厚塑料膜(0.15 mm)隔离,隔离深度 300 cm,同一处理样地设 3 个重复,不同年份视为增加重复试验。

(1)自然生长枣林是本研究中树体最大枣林,没有修剪,与常规矮化小区同年栽植,两者进行比较说明树体规格缩小后对林地规格耗水量的影响。此外,选择相似地形的坡耕地同期监测土壤含水率,比较有林地与无林地的耗水量。

(2)为了深化树体规格与其耗水量关系研究,增加树体规格分级,设置 4 个修剪强度枣林耗水量试验。由于枣树的树体规格决定于树高和冠幅,树高和冠幅主要由其主干和二次枝组成,叶片和枣吊基本全部着生在二次枝上,所以,结合树高和冠幅控制修剪强度,再进行二次枝总长度的最终控制标准,修剪强度的控制精度主要通过每 5 d 一次的复查修剪来实现。以修剪强度为控制因素,设置 4 水平的单因素试验,4 个修剪强度水平见表 1,每个小区对应一个修剪强度(PI),其中修剪强度 1(PI-1)是目前山地矮化密植枣林的基本标准,作为对照处理。并在各处理下枣树根区进行 0~300 cm 的隔离处理。采用热扩散法(CR1000 型,美国 Campbell 公司)监测枣树 2015 年全生育期树干液流,再通过液流计算枣树日蒸腾量。利用 CNC100 型中子水分管测定 2014 年和 2015 年枣树生育期 0~300 cm 土层土壤含水率(图 2)。

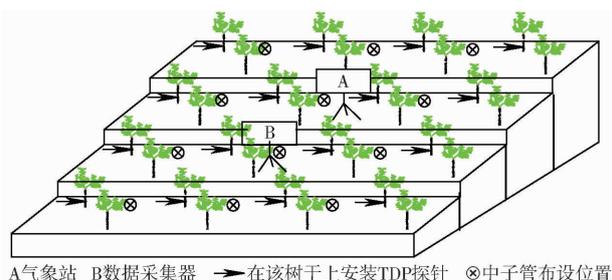


图 2 试验布设示意图

Fig. 2 Experimental layout

(3)极端矮化枣树试验根据土壤含水率控制树体规格,从另一个角度说明树体规格与耗水量的关系。该试验在 2009 年设置 4 种水分梯度的小区,各小区采用水泥砌墙与周围土壤隔离,底部用厚塑料膜防渗,使各小区形成封闭土壤环境,每个小区尺寸(长×宽×深)为 2 m×1 m×1 m,每个小区栽植一棵枣树,重复 3 次,共计 12 个小区。试验布设见图 3。试验区的枣树全部采取勤修剪办法保持规格一致,小区顶部建防雨棚阻挡雨水降入小区。2010—2013 年连续实施各小区控水,以土壤体积分

水率为控制因素,设置 4 水平的单因素试验。基于土壤含水率监测,结合 GPI 灌溉控制器实现小区土壤含水率的差异,控制的 4 水平土壤体积分含水率分别为:1 区((15.17±0.23)%)、2 区((13.33±0.31)%)、3 区((11.34±0.19)%)、4 区((8.61±0.14)%)。2014 年去除遮雨棚时试验区停止控水,试验开始在自然降雨下进行观测。树体规格控制在高度(110±3.3)cm,冠幅(100±1.8)cm×(100±2.4)cm,该规格约为大田密植枣树修剪规格的 1/2。为了保持试验树体规格相对稳定不变,每 7 d 检查一次树体规格变化并剪除多余的枝条长度。借助电子天平(精度 0.001 g)称取剪除单株枝条生物量,并利用卷尺测定枝条长度(精度 1 mm),试验监测时间为 2014 年和 2015 年枣树生育期。

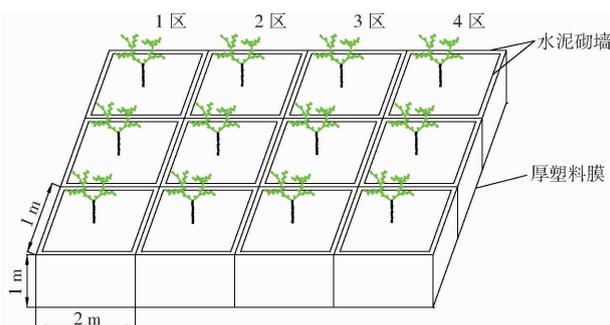


图 3 极端矮化枣树试验布设示意图

Fig. 3 Test arrangement for extremely dwarfed jujube

(4)大树截干处理枣林是目前常规枣林的最小规格处理。该处理是 2012 年因为枣树更新品种进行了大面积截干,截干高度 30~40 cm,试验地在更新林地中设置 300 m<sup>2</sup> 样地,样地中的枣树新发枝条保留 4 个,高度保持 120 cm,第 2 年和第 3 年春季发芽前进行平茬再次发新枝处理,保持每株试验树体具有较小规格。实际上在研究区周围约 16 000 m<sup>2</sup> 的更新枣林由于连续 2 年嫁接失败,造成连续 3 年枣树枝条长度不足 1.5 m,而且每棵枣树只保留 3 个枝条,在这种情况下枣林变为郁闭度由原来的 0.75 降至 0.30 左右的矮化枣林。

### 1.2.2 蒸腾监测

采用热扩散法监测全生育期枣树树干液流。为消除安装方位、高度等引起的观测误差,统一在选取的主要观测枣树树干北侧、距离地表 20 cm 处各安装 1 组热扩散式探针(Thermal diffuse probe, TDP-20 型,图 2)<sup>[21]</sup>,同时用 30 cm 宽的锡箔纸对探针进行包裹,以减少外界环境的影响。数据采集用美国 Campbell 公司生产的 CR1000 型数据采集器,采集频率为 10 min/次。枣树液流密度计算公式<sup>[22]</sup>为

$$J_s = 119 \left( \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中  $J_s$ ——液流密度,  $g/(m^2 \cdot s)$   
 $\Delta T_m$ ——液流量为零时测头温度与周围空气  
 温度差值,  $^{\circ}C$   
 $\Delta T$ ——有上升液流时测头温度与周围空气  
 温度差值,  $^{\circ}C$

枣树日蒸腾量计算公式为

$$T_A = \sum_{i=1}^{144} (J_{si} A_s \times 10^{-5}) \quad (2)$$

式中  $T_A$ ——日蒸腾量,  $mm/d$   
 $A_s$ ——边材面积,  $cm^2$   
 $J_{si}$ ——当日第  $10i$  分钟时的液流密度

通过在试验地周边调查同龄枣树, 获得枣树边材面积与胸径数据回归方程为

$$A_s = 0.8249 D_{BH} + 1.5634 \quad (R^2 = 0.8901) \quad (3)$$

式中  $D_{BH}$ ——枣树胸径,  $cm$

从而确定主要观测枣树的边材面积。

### 1.2.3 土壤含水率监测

对于自然生长、矮化密植、农地和截干处理枣林试验, 土壤含水率监测深度为  $0 \sim 1000$   $cm$ 。对于不同修剪强度处理试验, 为了更准确监测各个修剪强度处理下的土壤含水率, 本试验对每个处理小区  $0 \sim 300$   $cm$  土层进行了隔离, 隔离采用大棚膜以防止各处理之间的根系与水分相互作用和流通, 监测深度  $0 \sim 300$   $cm$ 。上述试验采用 CNC100 型中子水分测管对土壤含水率进行监测, 测定步长  $20$   $cm$ , 每  $10$   $d$  测定一次, 表层  $0 \sim 20$   $cm$  土壤含水率用取土烘干法测定, 中子管布设在各小区枣树株间位置(图 2)。对于极端矮化处理试验浅层  $0 \sim 100$   $cm$  土壤含水率采用 EQ15 型张力计(德国 Ecomatik)实时监测, 测定步长  $30$   $cm$ 。

### 1.2.4 土壤储水量

土壤储水量计算公式为

$$W = 10H\theta \quad (4)$$

式中  $W$ ——土壤储水量,  $mm$   
 $H$ ——土层深度,  $cm$   
 $\theta$ ——土壤体积含水率, %

### 1.2.5 枣林耗水量

枣林耗水量采用田间水量平衡法计算, 研究区设置常年山地枣林径流观测场未获得有效径流, 地下水位在  $50$   $m$  以下, 所以径流和地下水可忽略。枣林耗水量计算公式为

$$ET = P - \Delta S \quad (5)$$

式中  $ET$ ——枣林耗水量,  $mm$   $P$ ——降水量,  $mm$   
 $\Delta S$ ——土壤储水量变化量,  $mm$

### 1.2.6 水分利用效率

水分利用效率计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (6)$$

式中  $WUE$ ——水分利用效率,  $kg/m^3$   
 $Y$ ——产量,  $kg/hm^2$

## 1.3 数据处理

数据统计分析主要采用 Excel 2012 和 PASW Statistics 18.0 软件, 作图采用 SigmaPlot 12.5 和 AutoCAD 2010 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 自然生长与矮化密植枣林耗水量

山坡农地、山地自然生长枣林和矮化密植山地枣林 2015 年 12 个月  $0 \sim 1000$   $cm$  土壤含水率平均值如图 4 所示。当地农地种植土豆、糜子、豆类等传统作物已有上千年历史, 一般认为这些作物在旱作栽培中仅消耗当年降水量, 或者消耗浅层土壤含水率, 不会形成永久性干层。由图 4 看出, 枣林地土壤含水率较农地土壤含水率小很多, 15 龄矮化密植枣林出现深约  $600$   $cm$  的土壤干层, 自然生长枣林出现深约  $800$   $cm$  的干层。在  $0 \sim 1000$   $cm$  的土壤剖面农地土壤含水率最高, 其次是矮化密植枣林, 自然生长的枣林土壤含水率最低。计算  $0 \sim 1000$   $cm$  土层的储水量为农地  $1261.61$   $mm$ , 矮化密植枣林  $939.83$   $mm$ , 自然生长枣林  $841.66$   $mm$ 。与农地相比矮化密植枣林储水量减少  $321.78$   $mm$ , 年均多耗水  $21.45$   $mm$ ; 自然生长枣林减少  $419.95$   $mm$ , 年均多耗水  $28.00$   $mm$ 。如果旱作农地作物消耗当年降水量, 那么枣林消耗的水量则是降水量加上被消耗的土壤储水量。即 15 龄枣林耗水量为枣林生长期期间累计降水量加上较农地减少的土壤储水量。15 龄枣林生长期期间降水量为  $6215.9$   $mm$ , 加上同期土壤损失的水分可知 15 龄山地矮化密植枣林耗水量大约为  $6537.68$   $mm$ , 年均耗水量为  $435.84$   $mm$ ; 15 龄自然生长枣林耗水量大约为  $6635.85$   $mm$ , 年均耗水量为  $442.39$   $mm$ 。枣树生长期期间年均降水量  $414.39$   $mm$ , 矮化密植山地枣林每年平均耗水  $435.84$   $mm$ , 较同期降水量多  $21.46$   $mm$ ; 自然生长山地枣林每年平均耗水  $442.39$   $mm$ , 较同期降水量多  $28.00$   $mm$ 。由上述分析看出, 矮化密植枣林较同龄的自然生长枣林耗水量小, 造成的土壤干层也较浅, 自然生长枣林每年在土壤中耗水量较矮化密植枣林大  $6.54$   $mm$ , 耗水深度较矮化密植枣林大  $13.3$   $cm$ , 这说明矮化密植枣林具有降低枣林根系深度和减小耗水量的作用, 即矮化枣树具有调节树体耗水的功能, 这与马理辉等<sup>[23]</sup>对枣林根系研究的结果一致。

### 2.2 截干更新措施下的枣林耗水量

图 5 为  $12 \sim 15$  龄(2012—2015 年)枣树截杆后

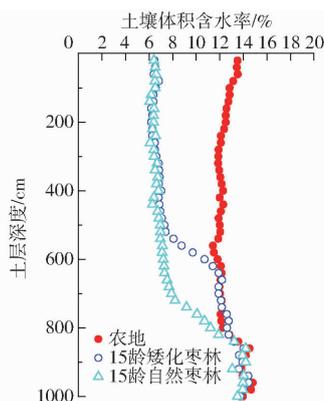


图4 农地、矮化枣林及自然生长枣林土壤含水率状况

Fig. 4 Soil water contents of farmland, dwarfed and natural jujube plantations

的年平均土壤含水率。由图5看出,12龄矮化密植枣林土壤耗水深度达540 cm,2013年春季枣林进行全面大树截干后土壤含水率恢复明显,0~100 cm土层含水率超过12%,恢复深度达300 cm。2014年地表土壤含水率较2013年低,但是降水入渗深度较大,土壤含水率恢复深度达400 cm,该入渗深度的土壤含水率部分来自上一年入渗水分在土壤中的迁移<sup>[24]</sup>。2015年是偏早年份,土壤剖面含水率整体减小,但是剖面土壤含水率恢复深度仍有增加,同上应该是前2年入渗水分在剖面向下迁移的结果。土壤恢复深度较以往研究报道要大<sup>[15,25]</sup>,可能原因有3个:①大树截干后当年发芽较晚,树枝保留只有3个枝条。②大树根系发达可能起到对降水的向下疏导作用。③枣林采取清耕方式,地面没有其他植物生长耗水。12龄矮化密植枣林由于消耗水分大于降水量形成540 cm深度的土壤干层,枣林生长造成每年约45 cm的干层,其中200 cm以下一般认为是永久性干层,对12龄枣林截干3年后土壤含水率恢复深度达460 cm,每年恢复深度达153.3 cm,是形成干层速度的3.41倍。已经恢复的土壤剖面储水量达489.07 mm,当地旱作农田同层次土壤储水量为573.38 mm,两者差异较大,说明枣林截干处理对林地土壤水分入渗具有较好的作用。

### 2.3 不同修剪强度下的枣林耗水量

枣林气态水损失主要由枣树蒸腾耗水和林地蒸发耗水两部分组成。一般认为蒸腾耗水是植物生长需求的有效耗水,地面蒸发视为无效耗水。由于黄土高原人工林地干层形成的直接原因是林地耗水量大于当地降水量,地面蒸发在造林之前就存在,实际土壤干层形成是林木蒸腾的结果。为了探索缓解枣林地深层土壤干化和防治途径,基于枣树修剪可以控制树体规格,树体规格可控制树体叶面积总量和生物量从而会影响枣树蒸腾耗水的思考,2012年赵

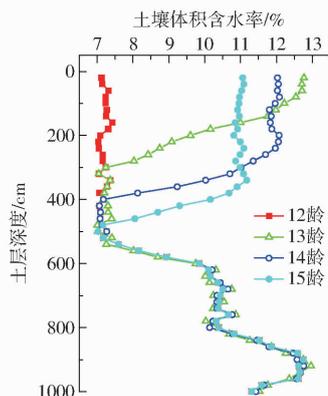


图5 12龄枣林截干后的土壤含水率恢复情况

Fig. 5 Soil water restoration for 12 years old jujube plantation of cutting stem

霞等<sup>[26]</sup>提出枣树节水型修剪的理念,并在近年进行了不同修剪强度与蒸腾耗水的试验研究,结果表明,增大修剪强度可以显著减少枣树蒸腾耗水,提高林地土壤含水率。

#### 2.3.1 不同修剪强度下枣树日蒸腾量分析

从图6可以看出,受气象因素、土壤含水率等环境因子的影响,全生育期内枣树逐日蒸腾耗水量有小范围波动现象,但变化趋势一致。5月份枣树解除休眠后,各修剪强度枣树日蒸腾量变化范围差异逐渐增大,修剪强度越大,枣树日蒸腾量上升趋势越缓慢,直到生育期达到最大幅度。修剪强度决定了各处理日蒸腾量的变化范围,枣树蒸腾耗水量逐日变化范围随修剪强度的增大而减小,对照(PI-1)、轻度(PI-2)、中度(PI-3)、重度(PI-4)修剪枣树日蒸腾量分别为2.64、2.51、2.10、1.65 mm/d。轻度修剪与对照处理的枣树日蒸腾量变化差异较小,中度、重度修剪与对照处理相比,逐日蒸腾量变化差异明显。8月份后轻度修剪与对照处理的枣树日蒸腾量变化差异较小,是由于雨季的到来,轻度修剪不能有效控制枣树树冠对土壤水分需求的缘故。9月底,不同修剪强度下枣树逐日蒸腾量开始呈现下降趋势,10月份之后大幅度下降直到休眠,这期间不断出现落叶现象,叶片活性降低,蒸腾作用放缓,各处理间枣树日蒸腾量变化差异并不明显。

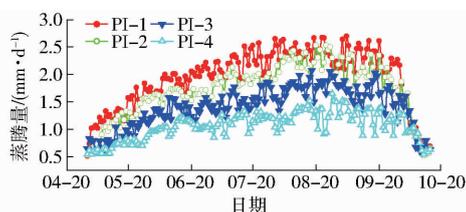


图6 2015年不同修剪强度下枣树日蒸腾量变化曲线

Fig. 6 Variation curves of daily transpiration under different pruning intensities in 2015

### 2.3.2 不同修剪强度下枣林地土壤含水率特性分析

2014年和2015年4种修剪强度下土壤含水率如图7所示。由图7可以看出,2014年土壤含水率高于2015年,这主要是由于2014年在枣树生育期降水量较多造成的。无论是2014年还是2015年4个修剪强度的土壤含水率均存在差异,均为随着修剪强度的增加土壤含水率在提高。在降水量多的2014年4个修剪强度造成的土壤含水率差异较大,在降水量较小的2015年4个修剪强度造成的土壤含水率差异较小。这种差异除了修剪直接减少枣树蒸腾耗水量外,可能还和修剪枣树对根系产生影响,即与产生根剪作用有关,马理辉等<sup>[23]</sup>和汪星等<sup>[27]</sup>研究发现矮化修剪能够降低枣树根系深度,张雪等<sup>[28]</sup>研究表明牧草修剪高度也可以降低其根系分布深度,本试验枣树修剪强度表现出的土壤含水率关系与上述研究结果一致。由图7还可以看出,2014年的土壤含水率波动比2015年明显较大,这是由于枣树生长和土壤含水率存在密切的互动关系,即土壤含水率高会促进枣树生长,枣树生长快又会消耗更多土壤含水率而降低土壤含水率。2014年整个枣树生育期土壤含水率均高于2015年,较高的土壤含水率下枣树生长与土壤含水率的相互作用也更加明显。2015年枣树整个生育期土壤含水率很低,枣树生长较弱,所以枣树生长与土壤含水率互相作用较2014年明显减弱。前期有研究表明,6%的土壤体积含水率是影响枣树蒸腾的一个阈值,当土壤含水率低于6%时会对枣树蒸腾耗水起到限制作用<sup>[29]</sup>,图7所示的2个生育期土壤含水率规律也再次证明了该结论。4种修剪强度下的2个生育期土壤含水率反映了1个多雨年和1个少雨年枣林土壤水分状况,生育期结束时多雨的2014年由修剪造成的土壤含水率最大差值为2.57%,少雨的2015年由修剪造成的土壤含水率最大差值为1.59%,无论少雨还是多雨年份,修剪均能体现出其对土壤含水率的作用,这种由修剪造成的土壤含水率差值可

缓解林地土壤干化的程度仍然是值得研究的关键。采用水量平衡法算得2014年4个修剪强度下枣林耗水量分别为434.85、426.24、405.72、393.24 mm,修剪造成枣树耗水量最大差值为41.61 mm;2015年4个修剪强度下的枣林耗水量分别为335.46、329.84、315.55、305.86 mm,修剪造成枣树耗水量最大差值为29.60 mm。说明无论降雨年份如何,修剪强度都会影响枣树的耗水量,降雨多的年份修剪强度降低耗水量作用较大。

### 2.3.3 极端矮化树体下的枣林耗水量

前期经过4年的遮雨和控制灌溉处理,试验区形成了4种土壤含水率差异明显的1区、2区、3区、4区,土壤储水量分别只有195.6、169.5、142.6、98.6 mm,加上试验小区深度与面积很小,意味着土壤补充水分和接收的降水量十分有限。连续2年的小区观测证明土壤含水率与枣树生长存在较好的互动关系,或双向调节作用,即土壤含水率高会促进枣树生长,枣树生长加快会降低土壤含水率。由图8结合图9来看,虽然试验区枣树全部实施统一的规格及时进行修剪,但是前期几年连续的土壤含水率差异处理使得高水分小区中的枣树整体健壮,后期修剪量会较大。2014年5月1日—7月9日之间除1区土壤含水率有所下降外,2区、3区、4区的土壤含水率均有所增加。对照各区生物量分析可以看出,生物量(单棵地上生物量,含修剪去除的枝量,下同)增加到一定值土壤含水率会降低(如1区),生物量低于一定值土壤含水率会上升或者保持不变(如2区、3区、4区)。特别是修剪去除的新增量与小区土壤含水率变化关系密切。本试验截至2014年7月9日各个小区剪去的枝条量为:1区0.72 kg、2区0.43 kg、3区0.40 kg、4区0.35 kg。1区的剪去生物量是2区的1.67倍,所以土壤含水率消耗相对较多,土壤含水率下降的快,1区土壤含水率在生长30 d后下降到低于2区土壤含水率,60 d后下降到4种小区的最低值。2区、3区、4区因为树体长势较

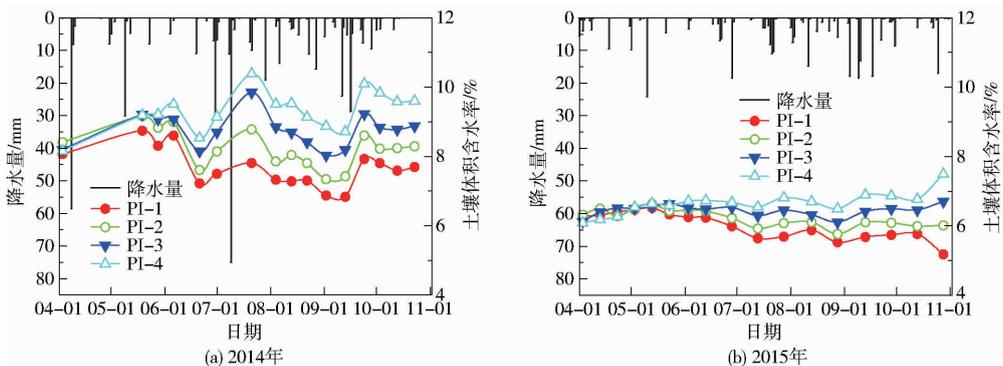


图7 2014年和2015年不同修剪强度下枣林地土壤含水率变化曲线

弱,新增生物量较小,耗水量也较小,在降水的补给下,5月30日之前土壤含水率均在增加,5月30日—7月10日之间土壤含水率保持不变说明枣树耗水量与同期降水量持平。7月10日—8月2日4种小区土壤含水率均处于增加阶段,该阶段主要是降水量大于枣树的生长耗水量需求,之后枣树果实膨大又进入生长耗水期,各小区土壤含水率开始降低,整个生育期生物量与土壤水分相互作用,互相促进又互相制约。经过2014年一年枣树生长和土壤含水率的互动调整后,2015年春季4种小区土壤含水率已经差异不大,生物量也没有显著性差异,在

这种情况下各小区的生物量和土壤含水率全部取决于降水量。在半干旱的黄土丘陵区一棵枣树在2 m<sup>3</sup>土体内生长,每棵树占据2 m<sup>2</sup>的小区仅仅为常规枣林每棵树占据面积6 m<sup>2</sup>的1/3,意味着用常规枣林1/3的降水量在维持生长,观测2年中2014年枣树生育期耗水量为119.3、115.9、112.3、108.8 mm,2015年枣树生育期耗水量为85.1、83.5、84.4、83.6 mm,枣树在严重缺乏水分的情况下仍具有很强的生存能力,说明枣树耗水量具有较大的降低空间,在低于当地多年平均降水量1/4的情况下仍然能够生存,可见限制供水量是降低枣树耗水量的一个途径。

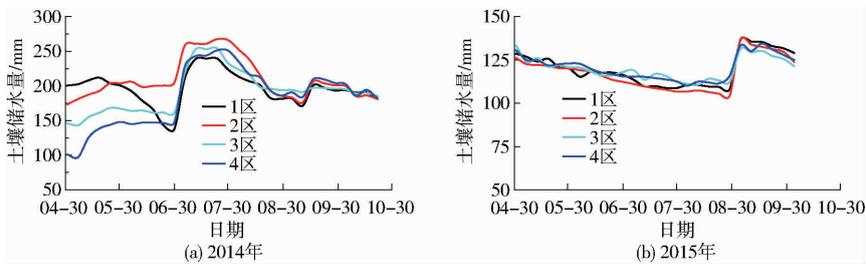


图8 极端矮化枣树林土壤储水量变化曲线

Fig.8 Changes of soil water storage under extremely dwarfed jujube plantation

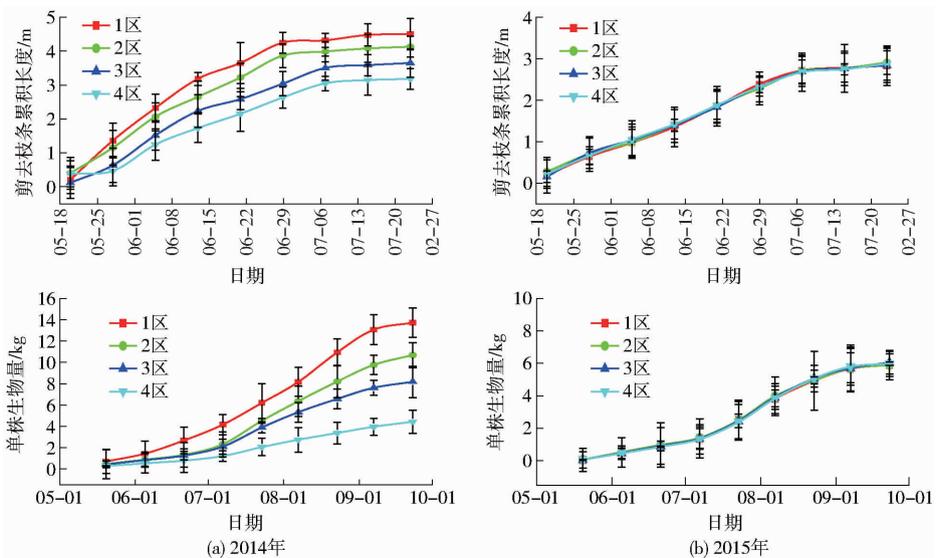


图9 不同干化土壤对剪去枝条累积长度和生物量的影响

Fig.9 Effects of different soil desiccations on length of cutting branches and biomass

2.4 不同规格枣树的枣林水分利用效率

表2为2014年和2015年8种不同树体规格下枣树耗水量。由表2看出,自然生长(规格I)下枣树耗水量显著高于其他处理( $p < 0.05$ ),极端矮化(规格VII)枣树耗水量显著低于其他处理( $p <$

0.05),最高耗水量是最低耗水量的4.02和5.34倍;不同修剪处理枣树耗水量无显著差异( $p < 0.05$ ),但随着修剪强度的增加,耗水量在逐渐降低,其中规格III(修剪PI-1)较规格VI(修剪PI-4)2年分别多耗水41.61 mm和29.60 mm;截干与不

表2 不同处理下枣树耗水量比较

Tab.2 Comparison of water consumption in different treatments

年份	规格 I	规格 II	规格 III	规格 IV	规格 V	规格 VI	规格 VII	规格 VIII
2014年	459.15 <sup>a</sup>	458.85 <sup>a</sup>	434.85 <sup>ab</sup>	426.24 <sup>ab</sup>	405.72 <sup>b</sup>	393.24 <sup>b</sup>	114.08 <sup>c</sup>	403.93 <sup>b</sup>
2015年	449.11 <sup>a</sup>	344.99 <sup>b</sup>	335.46 <sup>bc</sup>	329.84 <sup>bc</sup>	315.55 <sup>bc</sup>	305.86 <sup>c</sup>	84.15 <sup>d</sup>	333.98 <sup>bc</sup>

注:数值为不同年份不同处理枣树耗水量均值,不同小写字母表示同一年不同处理枣树耗水量均值差异显著( $p < 0.05$ )。

同修剪处理枣树耗水量无显著差异( $p < 0.05$ ),但其耗水量分别高于规格 VI (修剪 PI-4) 10.69 mm 和 28.12 mm。

降低耗水量不能作为经济林的最终目标,还必须考虑枣树水分利用效率。枣林的水分利用效率如表 3 所示。由表 3 看出,在 2014 年降水较多的年份和 2015 年干旱年份中,自然生长(没有人工修剪)的枣林树体最高,耗水量最大,2014 年和 2015 年枣树水分利用效率分别为 2.1、1.8 kg/m<sup>3</sup>,属于本研究中的最低水平;常规矮化密植枣林较同龄自然生长枣林树高降低,产量提高,耗水量也减少,枣树水分利用效率提高了 62% 和 72%;极端矮化下枣树的高度最低,耗水量也最低,尽管产量较同龄的常规矮化密植枣林有明显减少,但是 2014 年和 2015

年枣树水分利用效率达到 4.7 kg/m<sup>3</sup> 和 4.3 kg/m<sup>3</sup>;不同修剪强度措施下的枣树高度由 2.2 m 逐渐降低,实际操作中冠幅及枝条数量均有控制,树体耗水量随修剪强度逐渐下降,4 种修剪强度中修剪 PI-2 和修剪 PI-3 产量较高,水分利用效率也最高,说明合理的修剪是降低耗水量并提高枣树水分利用效率的有效途径。降水对于提高枣树产量和水分利用效率都有明显作用,但是无论降水量多少,合理修剪处理较自然生长有较高的水分利用效率。本试验证明,目前常规的矮化密植枣林,仍然有潜力可以提高产量、降低耗水量并提升水分利用效率。特别是极端矮化枣树,虽然产量不高,但是水分效率较高,这与大强度修剪有关,枣树树高只有 1.1 m,大幅降低了蒸腾耗水量。

表 3 不同处理下枣树水分利用效率比较

Tab.3 Comparison of water use efficiency in different treatments

处理	2014 年					2015 年				
	树高/ m	树龄/ 龄	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )	树高 /m	树龄/ 龄	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )
自然生长	4.8	14	9 642.2	4 591.5	2.1	5.1	15	7 937.9	4 491.1	1.8
矮化密植	2.2	14	15 648.4	4 588.5	3.4	2.2	15	10 694.7	3 449.9	3.1
矮化密植	2.2	11	17 333.7	4 561.5	3.8	2.2	12	11 790.2	3 476.7	3.4
修剪 PI-1	2.2	11	17 394.0	4 348.5	4.0	2.2	12	12 076.6	3 354.6	3.6
修剪 PI-2	2.0	11	20 307.8	4 262.4	4.7	2.0	12	14 842.8	3 298.4	4.5
修剪 PI-3	1.8	11	19 181.9	4 057.2	4.7	1.8	12	13 884.2	3 155.5	4.4
修剪 PI-4	1.6	11	17 695.8	3 932.4	4.5	1.6	12	12 846.1	3 058.6	4.2
极端矮化	1.1	5	5 361.8	1 140.8	4.7	1.3	6	3 618.5	841.5	4.3

### 3 讨论

枣林耗水是大气、植株和土壤三者共同作用的结果,3 个条件中任何一个条件改变都会对枣树耗水量产生影响。对于大田枣林来讲,大气变化是一个不可改变的条件,能够改变的是枣树本身和土壤环境。改变土壤的措施有耕作、施肥、集雨、覆盖等,把枣树规格和结构与枣林耗水联系起来的研究还未见报道。一般认为蒸腾量是植物维持正常生长需求的耗水量,但为了枣林长久可持续发展,防治枣林土壤深层干化,应该依据当地降水量来控制枣树规格。追求蒸腾耗水量更多转化在提高产量,比如自然生长的枣树个体高大,耗水量大于矮化密植枣林,产量较矮化密植枣林低。

本试验研究涉及到的 8 个不同树体规格处理已经证明,随着枣树树体规格的缩小其林下土壤含水率消耗也随之降低,也就是说控制枣树树体规格可以作为一种防治林下土壤干层的途径。从本试验期间的 8 个枣树规格中的耗水量看,截干处理(规格 VIII)下的林地土壤含水率逐渐提高,说明这种枣树

规格能够恢复已经干化的土壤,极端矮化处理(规格 VII)下的枣树生育期耗水量低于 2000—2015 年间枣树生育期平均降水量 405.9 mm 和最低降水量 277.6 mm,所以可以认为能够防止林下永久性干层的发生。4 个修剪强度(规格 III、规格 IV、规格 V、规格 VI)下的枣林耗水量在丰水年(生育期降水量 461.1 mm)均不会发生林下干层,在平水年(生育期降水量 393.3 mm)和生育期降水量 300 mm 以上的年份不会发生林下干层。如何基于降水预测来控制林下干层的研究还有待深入。

相同 15 龄自然生长的枣林和矮化密植枣林,林地土壤干化层深度相差超过 200 cm,说明矮化密植有利于降低土壤含水量消耗,该现象与马理辉等<sup>[23]</sup>曾经研究该区域矮化密植枣林与自然生长枣林根系分布特征十分吻合,根系分布研究表明同龄的自然生长枣林根系较矮化密植枣林根系深约 200 cm。但是,在生产中对于矮化密植技术更多关注的是产量,缺乏将矮化密植技术与枣树耗水量相联系,需要今后加大这方面的研究。

通常把林地 200 cm 以下的干层称为永久性干

层,即 200 cm 以下的干层很难恢复。12 龄枣树截干处理下的土壤含水率恢复深度超过以往研究认为 200 cm 以下需要多年恢复的结论<sup>[15]</sup>,该现象一方面可以证明大树截干以后耗水量很小,另一方面也说明截干后林地土壤有利于降水的入渗。

当地常规矮化密植枣林的株行距为 2 m × 3 m,即每株枣树占据的土地面积为 6 m<sup>2</sup>,本试验极端矮化枣树试验中每株枣树占据面积为 2 m<sup>2</sup>,另外,常规矮化密植枣树有深达数 10 m 的黄土作为枣树根系允许深度,而极端矮化试验的枣树根系深度不能超过 1 m。在这样极其有限的空间中,枣树依靠自然降水能够生长并有一定产量,充分说明枣树具有较强的抗旱性和耗水量的调控性。从该结果推理,枣树在降水量降低 1/3 时仍然可以获得一定产量,当然该结果是基于合理修剪基础上得出的,在自然生长状态不一定合理。换句话说,合理的修剪是枣树在降低耗水量情况下获得产量的保障。

修剪强度不同,枣树的耗水量也不同,修剪对于枣树耗水量的影响在上述试验中也已体现出来,如矮化密植枣林较自然生长枣林树木小耗水量小,其实还是修剪作用。修剪高度对于牧草根系深度和根长具有显著作用,可以通过修剪控制牧草地面高度来影响其对土壤含水率的消耗<sup>[28]</sup>,修剪也同样可以降低枣树根系深度从而减少对土壤含水率的消耗<sup>[23]</sup>,有研究发现修剪可以使得葡萄导管产生堵塞从而降低葡萄的耗水量<sup>[30]</sup>,这些研究从不同角度证明修剪具有节水作用。

由表 3 看出,本文涉及的几个枣树规格均不同程度降低了枣林耗水量,降低枣树耗水量也会降低枣树产量,但是枣树水分利用效率一般都有所提高,这是因为枣树得到精心修剪,控制了营养生长,实现了有限水分和养分向生殖生长转化,保证了试验区的枣树产量。其中修剪 PI-2 处理的产量最高,说明在一定的供水条件下存在一个合理修剪强度,该合理修剪强度不仅能够降低耗水量,也能提高枣树产量和水分利用效率。

## 4 结论

(1) 旱作枣林矮化密植栽培模式较以往传统的自然生长枣林耗水量减少。由枣林耗水量不同造成的林地土壤干层深度不同,12 龄自然生长枣林干层深度较同龄的矮化密植枣林干层增加 200 cm。

(2) 枣树截干处理下的林地土壤含水率恢复较快,12 龄枣林进行截干 3 年后土壤含水率恢复深度达 460 cm,每年恢复深度达 153.3 cm,是形成干层速度的 3.41 倍。

(3) 极端矮化枣树耗水量表明枣树规格具有一个较大可变范围,另外,枣树可以通过改变树体规格实现较大范围的耗水量调控。

(4) 不同修剪强度下的枣林耗水量呈现随着修剪强度增加而耗水量降低的趋势,要获得较高产量和枣树水分利用效率就需要确定合理的修剪强度,本研究中修剪 PI-2 和修剪 PI-3 可以作为当地枣树适宜修剪强度的参考指标。

## 参 考 文 献

- 1 梁宗锁,王俊峰. 简述沙棘抗旱性及其耗水特性研究现状[J]. 沙棘, 1997, 10(1): 28-31.
- 2 赵忠,李鹏,王乃江. 渭北主要造林树种根系抗旱性研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 92-94.  
ZHAO Zhong, LI Peng, WANG Naijiang. Studies on drought resistance of root system for major tree species planted in the Weiwei Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(1): 92-94. (in Chinese)
- 3 薛敏,张文辉,杜盛. 黄土高原刺槐群落优势植物水分生理生态研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 27-34.  
XUE Min, ZHANG Wenhui, DU Sheng. Water physio-ecology of 12 dominant species in the *Robinia pseudoacacia* community in Yan'an Gonglu Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(1): 27-34. (in Chinese)
- 4 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.  
FAN Jun, HAO Mingde, SHAO Ming'an. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 61-64. (in Chinese)
- 5 王晶,朱清科,刘中奇,等. 黄土丘陵区不同林地土壤水分动态变化[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 220-223.  
WANG Jing, ZHU Qingke, LIU Zhongqi, et al. Dynamics of soil water content under different forestland in the loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 220-223. (in Chinese)
- 6 曹裕,居玛汗·卡斯木,范鹏,等. 陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 388-396.  
CAO Yu, JUMAHAN Kasimu, FAN Peng, et al. Moisture and nutrient characteristics of deep layer soil in apple orchards on the Luochuan highland of Shaanxi, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 388-396. (in Chinese)
- 7 王延平,邵明安,张兴昌. 陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤水分生态环境[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3769-3778.  
WANG Yanping, SHAO Ming'an, ZHANG Xingchang. Soil moisture ecological environment of artificial vegetations in steep slope of loess region in North Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3769-3778. (in Chinese)
- 8 CAO S, WANG G, CHEN L. Questionable value of planting thirsty trees in dry regions[J]. Nature, 2010, 465(7294): 31.
- 9 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.

- CHEN Hongsong, WANG Kelin, SHAO Ming'an. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. *Cientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 155 - 161. (in Chinese)
- 10 曹裕, 李军, 张社红, 等. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 72 - 79.  
CAO Yu, LI Jun, ZHANG Shehong, et al. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones of Loess Plateau in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(15): 72 - 79. (in Chinese)
- 11 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.  
ZHANG Chencheng, SHAO Ming'an, WANG Yunqiang. Spatial distribution of dried soil layers under different vegetation types at slope scale in loess region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(17): 102 - 108. (in Chinese)
- 12 CHEN H, SHAO M, LI Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2008, 143(1): 91 - 100.
- 13 MA L H, WU P T, WANG Y K. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1 - 2): 57 - 68.
- 14 WANG Z Q, LIU B Y, LIU G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 835 - 842.
- 15 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 77 - 83.  
WANG Zhiqing, LIU Baoyuan, WANG Xuayan, et al. Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 77 - 83. (in Chinese)
- 16 CHEN H S, SHAO M G, LI Y Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1 - 4): 242 - 251.
- 17 LIU J, DIAMOND J. China's environment in a globalizing world[J]. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179 - 1186.
- 18 韩蕊莲, 侯庆春. 黄土高原人工林小老树成因分析[J]. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(4): 107 - 111.  
HAN Ruilian, HOU Qingchun. An analysis of genesis of small aged trees on the loess plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(4): 107 - 111. (in Chinese)
- 19 李玉山. 黄土区土壤水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.  
LI Yushan. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91 - 101. (in Chinese)
- 20 杨文治. 关于黄土高原生态环境建设问题的探讨[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(1): 1 - 8.  
YANG Wenzhi. Discussion on the problem of eco-environmental construction on the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12(1): 1 - 8. (in Chinese)
- 21 LU P, URBAN L, ZHAO P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(6): 631 - 646.
- 22 GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309 - 320.
- 23 马理辉, 吴普特, 汪有科. 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[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(4): 292 - 301.  
MA Lihui, WU Pute, WANG Youke. Spatial pattern of root systems of dense jujube plantation with jujube age in the semiarid loess hilly region of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(4): 292 - 301. (in Chinese)
- 24 白盛元. 黄土土柱降雨特征与土壤水分入渗过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
BAI Shengyuan. Study on progress of soil moisture changing in loess soil column[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- 25 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1045 - 1051.  
WAN Sumei, JIA Zhikuan, HAN Qingfang, et al. Dry soil layer for ming and soil moisture restoration of alfalfa grassland in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1045 - 1051. (in Chinese)
- 26 赵霞, 汪有科, 刘守阳, 等. 两种新的旱作管理技术对山地梨枣树生长及结果的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 157 - 160, 171.  
ZHAO Xia, WANG Youke, LIU Shouyang, et al. Effects of two new dryland farming technologies on growth and fruit bearing of pear jujube trees in hilly regions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 157 - 160, 171. (in Chinese)
- 27 汪星, 周玉红, 汪有科, 等. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 263 - 270.  
WANG Xing, ZHOU Yuhong, WANG Youke, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(3): 263 - 270. (in Chinese)
- 28 张雪, 董建国, 汪有科, 等. 刈割对牧草根系生长特征的影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(2): 416 - 424.  
ZHANG Xue, DONG Jianguo, WANG Youke, et al. Effect of cutting height on the root growth characteristic of forages[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2): 416 - 424. (in Chinese)
- 29 魏新光, 聂真义, 刘守阳, 等. 黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 130 - 140. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150619&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150619&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.019.
- WEI Xinguang, NIE Zhenyi, LIU Shouyang, et al. Soil moisture characteristics and its influence on jujube tree transpiration in Loess hilly region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 130 - 140. (in Chinese)
- 30 赵现华. 修剪对葡萄液流和光合同化物运输分配特性的扰动[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.  
ZHAO Xianhua. Pruning effecting on sap flow and transportation assignment of photosynthates in grapevine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)