

黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水

张文飞^{1,2}, 汪 星^{1*}, 汪有科^{1,3}, 张敬晓³, 惠 倩³

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘 要: 黄土丘陵区人工林地深层土壤干层是否影响后续植物的生长是众多学者关心的热点。该文在砍伐 23 a 生旱作山地苹果园地后休闲 4 a 又栽植枣树, 连续 3 a 观测干化土壤中枣树的生长及土壤水分变化, 研究采用节水型修剪的再植枣林的生长及耗水情况。结果表明, 前期 23 a 生苹果园地已使 0~1 000 cm 深土壤干化, 休闲 4 a 后 0~300 cm 土层水分得到恢复, 300~500 cm 范围为中度偏重亏缺, 500~700 cm 为中度亏缺, 700~1 000 cm 为轻度亏缺; 3 龄枣树时开始采取节水型修剪, 0~300 cm 土层有效水分被消耗 34.97%, 至 4 龄时 0~300 cm 范围内前期恢复的土壤水分已消耗殆尽; 在此情况下采取节水型修剪的枣树仍可保持良好生长, 产量及其水分利用效率均高于相同水分条件下的常规修剪枣树, 产量可达正常水分条件下枣树的 1.39 倍以上, 产量水分利用效率可达 1.52 倍以上。研究结果证明节水型修剪是半干旱区深层干化土壤中枣树克服雨量不足和土壤水分亏缺的一条有效途径。

关键词: 土壤; 水分; 果园; 干层; 枣树; 水分利用效率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.018

中图分类号: S152.7; S155.4⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0140-09

张文飞, 汪 星, 汪有科, 张敬晓, 惠 倩. 黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 140—148. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.018 http://www.tcsae.org

Zhang Wenfei, Wang Xing, Wang Youke, Zhang Jingxiao, Hui Qian. Growth and water consumption of jujube with water-saving pruning in deep dried soil of Loess Hilly Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 140—148. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.018 http://www.tcsae.org

0 引 言

黄土区地下水埋藏深, 降水是该地区土壤水分补给的主要来源。黄土区的林木普遍具有较深的根系, 根系通过吸收深层土壤水分以维持季节性干旱的蒸腾耗水, 进而造成深层土壤水分的不断消耗, 形成“利用型”土壤干层^[1-4]。由于黄土区降水入渗深度一般在 200 cm 以内且无深层渗漏, 因此干层一旦形成往往经过若干年也很难恢复, 故称之为永久性干层^[3]。目前研究表明多年生人工林草植被耗水深度可达 1 000 cm^[5-15]。王志强等^[16]在陕北绥德县的研究表明 7 龄人工紫花苜蓿草地、23 龄人工柠条灌木林和人工油松林的耗水深度分别达到 1 550、2 240、2 150 cm。曹裕等^[17]研究也表明黄土高原超过 15 a 生的旱作苹果园地耗水深度会达到甚至超过 1 180 cm。众多学者担心, 永久性干层的形成, 不仅会对现存植被

生长不利, 而且会给后续植被的选择和生存带来很大影响^[12,18-22]。在黄土高原大规模退耕还林还草的背景下, 研究干化土壤上后续植被的种植及其生长状况甚为重要。目前关于该问题的研究较为薄弱, 主要关注土壤水分的恢复及后续农作物种植^[23-26], 鲜见对人工林生长状况的研究。王志强等^[23]对陕北绥德地区林后坡耕地、放牧荒草地和保护草地的土壤水分恢复研究表明, 林后坡耕地的土壤含水率大约需要 40 a 才能恢复到持续农地土壤含水率的水平, 保护草地则至少需要 150 a, 而林后放牧荒坡的土壤水分长期不能恢复。梁一民等^[24]对陕北吴旗人工沙打旺衰败后土壤水分进行的研究表明, 3 m 土层内的水分在 5 a 内得到补偿, 其中 2 m 以内得到较好补偿。谢军红等^[25]从土壤水分恢复和土地生产力角度综合分析得出玉米是黄土高原区多年生苜蓿地土壤干层水分恢复的适宜后茬。王美艳等^[26]提出黄土高原半干旱区适宜的粮草轮作模式为 7 a 苜蓿-13 a 粮食作物。

枣树作为一种耐旱经济树种, 在黄土丘陵区大量的种植和推广, 截至 2010 年其种植面积已达 100 hm²^[27], 为推动当地经济发展起到了重要作用。目前对人工林砍伐或死亡后再植枣树尤其是采用节水型修剪枣树的生长及耗水研究还较少。因此本文以半干旱黄土丘陵区苹果林砍伐后采用节水型修剪的再植枣林为对象, 研究其生长及耗水情况, 以期对干化土壤后续植被建造及深入研究人工林耗水形成的干层治理提供参考。

收稿日期: 2016-08-06 修订日期: 2017-04-10

基金项目: 国家支撑计划项目“陕北水蚀区植被功能调控技术与示范”(2015BAC01B03); 陕西统筹项目“红枣优质高效生产关键技术集成与示范”(2014KTCG01-03)

作者简介: 张文飞, 山东滨州人, 博士生, 主要研究方向为土壤干层恢复。
杨凌 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 712100。

Email: zwfzwl1991@163.com

*通信作者: 汪 星, 陕西杨凌人, 副研究员, 主要从事林业水分高效利用方面的研究。杨凌 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 712100。Email: gjzwyk@vip.sina.com

1 研究区概况

研究区位于陕西省米脂县境内远志山红枣示范基地(37°12'N、109°28'E)，为典型黄土高原丘陵沟壑区；属中温带半干旱性气候，年平均气温 8.4℃，极端最高气温 38.2℃，极端最低气温-25.5℃。2012—2015 年降水量分别为 404.4、530.1、460.4、334.8 mm，年均降水量 451.6 mm，降雨主要集中在夏季，其中 7、8 月份降雨量占全年降水量的 49%。土壤以黄土母质发育的黄绵土为主，质地为粉质沙壤土，容重 1.24 g/cm³，田间持水率 22%。土层深厚，地下水埋深在 50 m 以下，对根系吸水影响可忽略。研究区 1984—2007 年间为旱作苹果园地，2007 年苹果林伐后休闲，2011 年栽植枣树。

2 研究方法

2.1 样地设置

2011 年 4 月完成造林后布设试验 5 个样地：样地 I（试验区）为土壤深层干化地，前期 23 a 生苹果林伐后再植枣树的节水型修剪观测区；样地 II（对照枣林 1）是土壤深层干化地，前期 23 a 生苹果林伐后再植枣树的常规矮化修剪观测区；样地 III（对照枣林 2）是土壤深层未干化地（退耕造林）再植枣林的常规矮化修剪观测区；样地 IV 是距样地 I 约 200 m 处的 15 a 生枣林地（前期退耕还林）土壤水分调查区；样地 V（农地）为位于距样地 I 约 150 m 处（属于 2 户，称为农地 A 和农地 B，农地 A 种植豆子，农地 B 种植糜子）的土壤水分调查区。样地均为梯田，面积在 520~740 m² 之间，观测点在梯田中央。各样地基本情况见表 1。

2.2 枣树修剪标准

样地 I、II、III 枣树栽植规格为高度（120±6）cm，地径（12±2）cm，密度 200 cm×300 cm，2013 年开始进入正常结果期，此时根据样地设计分别进行常规矮化修剪和节水型修剪，常规矮化修剪标准为高度 200 cm、冠幅 200 cm×200 cm，节水型修剪标准为高 160 cm、冠幅 160 cm×160 cm。本试验采用的节水型修剪^[28-29]技术首先是以提高枣树水分利用效率为目的，不是单纯追求产量。在前期研究基础上提出“以水定树，以树定产”的理念，即依据多年平均降雨量确定适合的树体规格，再根据树体规格大小确定适宜该树体的目标产量。实质是依靠修剪降低蒸腾耗水量，通过蒸腾调控实现枣树年耗水量和降雨量的相对平衡。在旱作枣林中，节水型修剪追求长久的水分平衡，避免为追求近期产量而造成土壤水分严重亏缺或树体蒸腾量过大减产。

2.3 土壤水分测定

土壤水分测定为人工取土烘干测定和中子仪定期测定，测定深度均为 1 000 cm，测定间隔 20 cm，测定时间见表 1。样地中部各设定 3 个取样点，测定前一周均无降雨及灌溉。人工利用洛阳铲在取样点取样，取样后装进铝盒并在 105℃下烘干 12 h，所测土壤含水率为质量含水率。本文所用含水率为体积含水率，换算公式为体积含水率=质量含水率×土壤容重，当地土壤容重为 1.24 g/cm³。土壤水分定期测定借助 CNC503B 型 NP 中子仪（北京渠道科学器材有限公司），测定周期为 10 d，如遇降雨，则在雨停后及时测定。土壤机械组成用 MS2000 型激光粒度仪（Malvern Instruments, Malvern, England）测定。

表 1 样地基本情况介绍
Table 1 Introduction of sampling sites

样地序号 Label of sampling site	样点名称 Sampling sites	枣树修剪类型 Jujube pruning type	土壤干化层 Dried soil layer	地貌部位 Geomorphologic positions	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	海拔高度 Altitude/m	土壤水分测定时间 Measurement time of soil moisture
I	试验区 Experiment plot	节水型	深层干化	塬坡中部	东坡	32	933	2011-04-21; 2013-01-01—2015-12-31
II	对照枣林 1 CK1	常规	深层干化	塬坡中下部	东坡	32	930	2014-01-01—2015-12-31
III	对照枣林 2 CK2	常规	无	塬坡中上部	东坡	31	947	2014-01-01—2015-12-31
IV	15 龄老枣林 15-yr jujube	常规	无	塬坡中上部	东坡	32	938	2015-01-01—2015-12-31
V	农地 Farmland	-	无	塬坡中部	东坡	28	954	2011-04-24

2.4 枣树生长指标测定

样地枣林中各选择 5 棵代表平均生长水平的枣树，测定生长指标。枣吊平均长度：在枣树的东、西、南、北 4 个方向各选 5 个枣吊，用卷尺每隔 7 d 定点测量 1 次。单果质量：在枣树果实成熟期末随机选择 30 个果实的平均质量。生物量包括修剪去除的全部枝条长度、枝条直径、枣吊长度、枣吊直径、单棵枣吊数目、叶片横纵径、单枝枣吊叶片数、果实横径、果实纵径、单棵果实数，然后用余檀等^[30]建立的模型计算生物量。

2.5 相关指标计算

土壤干化状况评价指标参考陈海滨等^[31-33]的划分方法，以土壤生长阻滞含水率（相当于 60%田间持水率）

为依据，计算土壤水分亏缺度，并在此基础上细化中度亏缺（表 2），公式如下：

$$K=(\theta_a-\theta)/\theta_a \cdot 100\% \quad (1)$$

式中 K 为土壤水分亏缺度，%； θ 为土壤体积含水率，%； θ_a 为生长阻滞体积含水率，%。 $K<0$ 时，表示土壤水分不亏缺。

土层储水量：根据土壤体积含水率计算。土壤储水量的公式为

$$W=10 \cdot \omega \cdot h \quad (2)$$

式中 W 为土壤储水量，mm； ω 为体积含水率，%； h 为土层深度，cm。

试验区枣树耗水量利用农田水量平衡法计算。试验

区枣树为雨养, 无灌水, 不发生深层渗漏, 无地下水补给, 试验期间未发生地表径流。因此, 枣树耗水量公式可简化为

$$ET=P_r+\Delta W \quad (3)$$

式中 ET 为枣树耗水量, mm; P_r 为降雨量, mm; ΔW 为计算时段初与计算时段末土壤储水量之差, mm。

表 2 黄土高原土壤干化水分状况评价指标

Table 2 Evaluation index of soil dried layer in loess plateau

亏缺状况 Deficit condition	土壤体积含水率 Soil moisture/%	水分亏缺度 Water deficit degree/%
轻度亏缺 Minor water deficit	$>75\theta_a$	<25
中度偏轻亏缺 Moderate light water deficit	$70\theta_a\sim 75\theta_a$	$25\sim 30$
中度亏缺 Moderate water deficit	$55\theta_a\sim 70\theta_a$	$30\sim 45$
中度偏重亏缺 Moderate heavy water deficit	$50\theta_a\sim 55\theta_a$	$45\sim 50$
重度亏缺 Severe water deficit	$<50\theta_a$	>50

注: θ_a 为生长阻滞体积含水率, 相当于 60%田间持水率。

Note: θ_a is critical moisture for growth and equals to 60% of field water holding capacity.

可用有效水量指高于枣树可用有效水下限的部分。

可用有效水总量为

$$W_{TAW}=W_{PO}-10h\cdot\theta_d \quad (4)$$

式中 W_{TAW} 为可用有效水总量, mm; W_{PO} 为伐后土壤储水量, mm; θ_d 为可用有效水下限, %。笔者课题组前期研究^[34-37]表明, 正常水分状况下 4 龄枣林耗水深度约 400 cm, 随树龄增加, 枣树根系生长速度减缓, 耗水深度增长减缓, 12 龄时耗水深度约 560 cm, 至 15 龄时约 600 cm。刘晓丽等^[36]研究表明采取常规矮化修剪的 9 a 生和 12 a 生枣林 200~400 cm 土层中水分已被耗尽, 其深层土壤水分消耗量趋于稳定。根据枣树生长实际情况, 本文取 15 a 老枣林 0~600 cm 土层平均体积含水率 6.15% 为枣树可用有效水下限。

剩余有效水量计算公式为

$$W_{RAW}=W_P-10h\cdot\theta_d \quad (5)$$

式中 W_{RAW} 为土壤剩余有效水量, mm; W_P 为目前土壤储水量, mm。

消耗可用有效水比例为

$$W_{PAWC}=(W_{TAW}-W_{RAW})/W_{TAW}\times 100\% \quad (6)$$

式中 W_{PAWC} 为消耗可用有效水的比例, %。

生物量为枣树地上各部分生物量之和, 采用余檀等^[30]建立的模型计算, 公式如下

$$B=B_1+B_2+B_3+B_4 \quad (7)$$

$$B_1=0.002D_1^{1.564}\cdot H_1^{1.016} \quad (8)$$

$$B_2=0.005D_2^{1.02}\cdot H_2^{1.078} \quad (9)$$

$$B_3=0.00004568Z_1^{1.374}\cdot T_1^{0.901} \quad (10)$$

$$B_4=0.631Z_2^{3.601E-8}\cdot T_2^{0.999} \quad (11)$$

式中 B 为枣树生物量, g; B_1 为枝条生物量, g; D_1 为枝条直径, mm; H_1 为枝条长度, mm; B_2 为枣吊生物量, g; D_2 为枣吊直径, mm; H_2 为枣吊长度, mm; B_3 为叶片生物量, g; Z_1 为叶片横径, mm; T_1 为叶片纵径, mm; B_4 为果实生物量, g; Z_2 为果实横径, mm; T_2 为果实纵径, mm。

枣树水分利用效率计算公式为

$$WUE_y=Y/ET \quad (12)$$

$$WUE_b=B/ET \quad (13)$$

式中 WUE_y 为产量水分利用效率, kg/m³; WUE_b 为生物量水分利用效率, kg/m³; Y 为枣树产量, kg/hm²; B 为枣树生物量, 单位换算为 kg/hm²; ET 为作物耗水量, 单位换算为 m³/hm²。

2.6 数据处理

用 SPSS 软件进行数据统计分析, 利用 Origin8.0 绘图软件作图。

3 结果与分析

3.1 前期土壤干化状况

研究区前期是已经生长 23 a 的山地旱作苹果园, 2007 年挖去全部苹果树后园地处于休闲状态, 2011 年 4 月 21 日—4 月 24 日测定伐后土壤和对照农地土壤水分 (农地 A 与农地 B 的平均体积含水率) 见图 1 和表 3 所示。将利用式 (1) 计算所得土壤水分达重度亏缺时相应体积含水率 6.6% 作为本文的干层指标。由图 1 及表 3 看出, 在 0~250 cm 层次土壤水分与农地基本一致, 二者在此层内土壤水分均值仅相差 0.5%, 这是苹果林伐后土地休闲 4 a 恢复的层次; 250~300 cm 层次土壤含水率随深度增加逐渐接近干层指标, 该层次土壤水分由上向下逐渐迁移, 属于雨水入渗迁移改善层, 故 0~300 cm 土层为短期可恢复层次。300~500 cm 土壤含水率最接近干层指标线即干化最为严重, 加之雨水入渗难以达到, 故称为难恢复层; 500~1 000 cm 土壤水分虽较 300~500 cm 层次有所提升, 但仍明显低于农地土壤含水率, 即前期苹果林消耗土壤水分深度已经达到 1 000 cm, 超过 300 cm 的干层被称为永久性干层^[3]。300~1 000 cm 土壤平均体积含水率为 8.71%, 储水量为 756.13 mm, 农地同层次土壤体积含水率平均为 14.14%, 土壤储水量为 1 206.62 mm, 伐后果园储水量较农地减少 37.33%, 这可看作苹果林 23 a 来逐渐消耗的土壤储水量。23 a 苹果林耗水深度达 1 000 cm, 与曹裕等^[17]对半湿润偏旱和半干旱黄土丘陵区多个旱作苹果园地的研究结果一致。

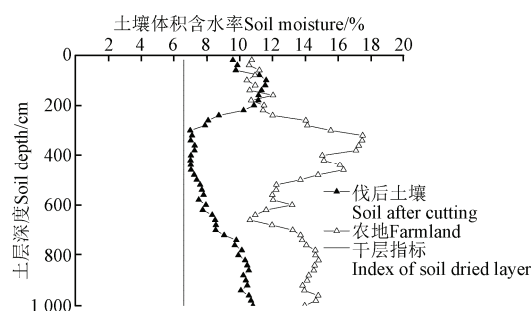


图 1 伐后果园与农地 0~1 000 cm 土壤含水率

Fig.1 Soil moisture at 0-1 000 cm after orchard cutting and farmland

考虑到 0~300 cm 土层水分受降雨和地表植物的影响波动较大, 又是受降雨已经有所恢复的层次, 在此分

析 300 cm 以下土壤干化程度, 如表 3 所示。伐后果园土壤水分亏缺程度随土层深度增加而减小, 其中 300~500 cm 为中度偏重亏缺; >500~700 cm 为中度亏缺; >700~1 000 cm 为轻度亏缺。300~500、>500~700、>700~1 000 cm 土壤储水量分别为农地同层次的 46.93%、66.82%、71.51%。农地在 300~500 cm 为不亏缺, >500~700 cm 为轻度亏缺, >700~1 000 cm 为不亏缺。一般认为农作物在旱作栽培中仅仅消耗当年降雨, 或者说消耗浅层土壤水分, 不会形成永久性干层。农地

500~700 cm 土层范围出现的土壤水分轻度亏缺现象可能是土壤颗粒组成差异造成, 未受作物耗水影响^[16]。表 3 中, 土壤水分亏缺程度与不同层次土壤水分差异出现不一致现象, 说明传统的土壤水分亏缺程度划分较统计学分析粗放, 如伐后果园土壤 500~600、>600~700 cm 同属于中度亏缺, 但 2 层次土壤含水率之间存在显著差异 ($P<0.05$), 农地 300~400、>400~500 cm 按土壤水分亏缺程度划分为无亏缺, 但 2 层次土壤含水率之间存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 3 伐后果园土壤与农地 300~1 000 cm 剖面土壤水分亏缺度
Table 3 Soil water deficit at 300-1 000 cm profile of soil in orchard after cutting and farmland

土层深度 Soil depth/cm	伐后土壤 Orchard after cutting					农地 Farmland			
	平均土壤体积含水率 Average soil moisture/%	水分亏缺度 Water deficit degree/%	亏缺程度 Deficit degree	储水量 Water storage/mm	占农地储水量 Proportion in farmland water storage/%	平均土壤体积含水率 Average soil moisture/%	水分亏缺度 Water deficit degree/%	亏缺状况 Deficit condition	储水量 Water storage/mm
300~400	7.14a	45.93a	中度偏重	88.50a	46.91	16.87a	-27.82a	无	188.65a
>400~500	7.14a	45.90a	中度偏重	88.55a	46.94	15.21b	-15.26b	无	188.65b
>500~600	7.71b	41.56b	中度	95.66b	62.51	12.34c	6.50c	轻度	153.04c
>600~700	8.34c	36.82c	中度	103.41c	71.38	11.68c	11.49c	轻度	144.88c
>700~800	9.73d	24.32d	轻度	120.6d	68.66	14.17b	-7.32b	无	175.66b
>800~900	10.39e	21.26e	轻度	128.89e	71.94	14.45b	-9.46b	无	179.16b
>900~1 000	10.53e	20.26e	轻度	130.52e	73.92	14.24b	-7.88b	无	176.58b

注: 不同字母表示土层间差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: Different letters mean significant difference among soil depths ($P<0.05$), same as below.

为进一步确定土壤颗粒与土壤水分的关系, 参考王志强等^[16,23]所用的方法将农地 A 300 cm 以下土壤含水率与土壤颗粒组成数据进行回归分析, 如表 4 所示。土壤含水率与黏粒 (<0.002 mm)、砂粒 (>0.05 mm) 含量均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与粉粒 (0.05~0.002 mm) 含量呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), 与土层深度的相关性不显著 ($P>0.05$), 说明深层土壤含水率均受砂粒、粉粒、黏粒的影响^[16,23], 含水率随土层深度变化主要受土壤质地的影响^[16]。将颗粒组成与土壤含水率进行回归分析发现, 土壤含水率随黏粒的增加呈对数曲线的形式增加, 结果如图 2 所示。

表 4 农地 A 土壤含水率与土层深度和颗粒组成的 Pearson 相关系数
Table 4 Pearson correlation coefficient of soil moisture, soil depth and particle composition for farmland A

指标 Index	土壤含水率 Soil moisture
土层深度 Soil depth	-0.318
砂粒含量 Sand content	0.621**
粉粒含量 Silt content	-0.751**
黏粒含量 Clay content	0.805**

注: **在 0.01 水平上显著。
Note: ** represents significant correlation at 0.01 level.

将农地 B 土壤剖面的黏粒含量数据代入图 2 中关系式计算其土壤含水率, 并与实测值进行比较, 如图 3a 所示, 农地 B 土壤含水率实测值与计算值曲线基本重合 (均方根误差为 0.28%), 说明用对数方程可有效地描述土壤颗粒与深层土壤水分之间的关系。将苹果林伐后土壤黏

粒含量代入图 2 中关系式得计算值, 与实测值比较可知 (图 3b), 伐后果园土壤实测与计算含水率之间存在明显差别, 300~1 000 cm 土层含水率平均计算值为 14.35%, 计算值比实测值 (8.66%) 高 65.7%, 表明苹果树可能已经严重消耗了深层土壤水分。

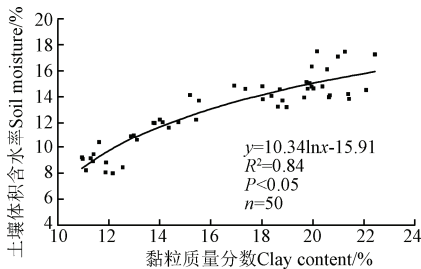


图 2 农地 A 黏粒与土壤含水率的关系
Fig.2 Relationship between soil moisture and clay content in farmland A

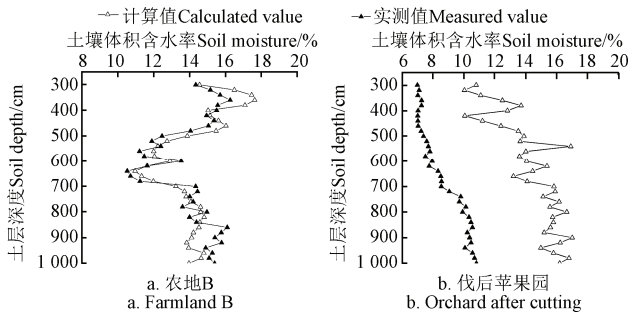


图 3 农地 B 及伐后苹果园土壤含水率实测值与计算值比较
Fig.3 Comparison of measured and calculated soil moisture in orchard after cutting and farmland B

3.2 再栽枣树后的干化土壤水分变化

将试验区枣林 2013—2015 年土壤水分及 2011 年 4 月 21 日测定的伐后果园土壤水分换算为枣林土壤有效水分作图 4 及表 5。

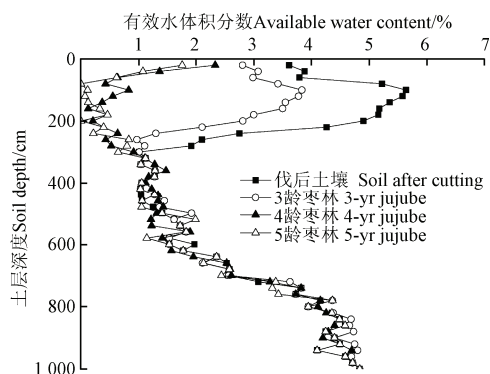


图 4 伐后果园土壤与试验区各龄枣林土壤有效水含量

Fig.4 Available water content of orchard after cutting and Jujube of every age

由表 5 看出, 0~1000 cm 伐后果园土壤可用有效水总量为 386.77 mm, 0~300 cm 土层土壤可用有效水总量为 149.71 mm, 枣树生长过程中剩余有效水量逐年递减, 分别为 334.22、262.05、252.21 mm, 消耗可用有效水为

13.59%、21.59%、3.64%; 由图 4 和表 5 看出枣林生长的几年间主要消耗 0~300 cm 土层的水分, 消耗可用有效水量为 131.2 mm, 3 龄枣林消耗可用有效水为 34.97%, 4 龄枣林消耗可用有效水为 83.04%, 5 龄时枣林由于缺乏有效水分只能消耗剩余有效水量的 4.59%。可见枣林在 4 龄后即基本失去土壤水分的有效供给。

将试验区 5 龄枣林土壤水分与 15 龄老枣林土壤水分作图 5。

由此推断, 15 龄老枣林 0~600 cm 土层的平均土壤含水率可作为枣树生长可利用水下限。15 龄老枣林 0~600 cm 土壤含水率低于干层指标线, 说明枣树较苹果树吸水能力更强。从图 5 可知, 15 龄老枣林 0~600 cm 范围土壤体积含水率为 6.15%, 试验区 5 龄枣林同层次平均土壤体积含水率为 6.88%, 二者仅相差 0.73%, 差异极小。也就意味着试验区 0~600 cm 土层土壤水分状况已接近 15 龄老枣林, 在这种情况下枣树根系不会向缺乏水分的土层延伸, 试验区再栽枣树缺乏深层土壤储水。通过以上分析, 推断深层土壤水分的缺乏可能抑制了试验区枣树根系的生长, 5 龄枣树耗水深度仅为 300 cm 左右, 只能依靠当年降水和降水在土壤浅层的入渗生长, “土壤水库”的功能已基本消失。

表 5 枣林生长过程中 0~1 000 cm 土壤有效水变化

Table 5 Change of available water content during growth of jujube in 0-1 000 cm

土层深度 Soil depth/cm	伐后果园土壤 Orchard soil after cutting	3 龄枣林 3-yr jujube		4 龄枣林 4-yr jujube		5 龄枣林 5-yr jujube	
	可用有效水总量 Available water content/mm	剩余有效水量 Remainder available water/mm	消耗可用有效水比例 Proportion of available water consumption/%	剩余有效水量 Remainder available water/mm	消耗可用有效水比例 Proportion of available water consumption/%	剩余有效水量 Remainder available water/mm	消耗可用有效水比例 Proportion of available water consumption/%
0~100	54.94a	39.98a	27.23	13.87a	47.52	8.87a	9.10
>100~200	64.90a	41.25a	36.44	4.29b	56.95	2.46b	2.82
>200~300	29.87b	16.12b	46.03	7.22c	29.79	7.18a	0.13
>300~1 000	237.06c	236.87c	0.08	236.67d	0.08	234.00c	1.13
全剖面 All profile (0~1 000)	386.77	334.22	13.59	262.05	21.59	252.21	3.64

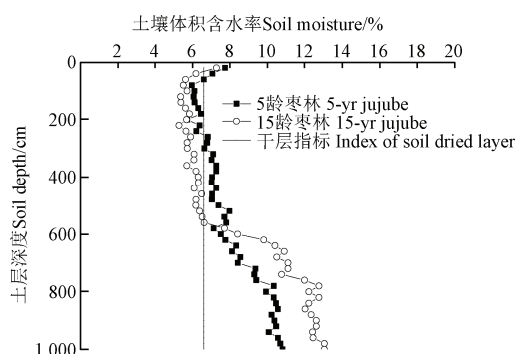


图 5 试验区 5 龄枣林与 15 龄老枣林土壤含水率

Fig.5 Soil moisture of 5-yr jujube in experiment plot and 15-yr jujube

3.3 干化土壤中枣树的生长及水分利用效率

将对照枣林 1 与试验区 4 龄枣树 (2014 年)、5 龄枣树 (2015 年) 枣吊平均长度、剪去枝条累积长度、单株生物量等变化作图 6 分析。从图 6 看出, 枣吊平均长

度、剪去枝条累积长度、单株生物量均随着时间增长, 达到一定值后趋于稳定。2015 年降雨量较 2014 年少, 各指标增长速度与最终值均小于 2014 年, 说明在半干旱黄土丘陵区降雨可显著影响枣树生长。由图 6 可知, 2015 年试验区与对照区 1 枣吊平均长度最终值较 2014 年分别减少 34.26 %、32.46 %, 2 a 中试验区枣吊平均长度最终值分别为对照区 1 的 1.08 倍、1.05 倍。试验区枣树采用节水型修剪, 修剪强度大于对照区, 在此情况下枣吊平均长度仍略高于对照区 1, 说明节水型修剪有利于枣树生殖生长, 这也是产量的基础。剪去枝条累积长度用来体现修剪量的大小, 2 a 间试验区修剪量均大于对照区 1, 且二者修剪量在 2015 年均有所减小。试验区单株生物量 2015 年较 2014 年减少 22.31%, 对照区 1 2015 年单株累计生物量较 2014 年减少 52.33%; 同时, 2014 年试验区单株生物量为对照区 1 的 56.77%, 2015 年试验区单株生物量为对照区 1 的 81.89%, 说明降雨量减少对对照区 1 枣树生物量的影响大于试验区, 试验区枣树因采用节水

型修剪降低蒸腾耗水量^[25-26]能一定程度减小降雨量对其生长的影响。

表 6 为试验区与对照枣林 1（以下简称对照 1）及对照枣林 2（以下简称对照 2）4 龄、5 龄枣树果实生长状况和单株生物量、产量、耗水量以及水分利用效率。追求较高的水分利用效率是缺水条件下农业得以持续稳定发展的关键所在^[38]。本文从生物量和产量来分析水分利用效率。

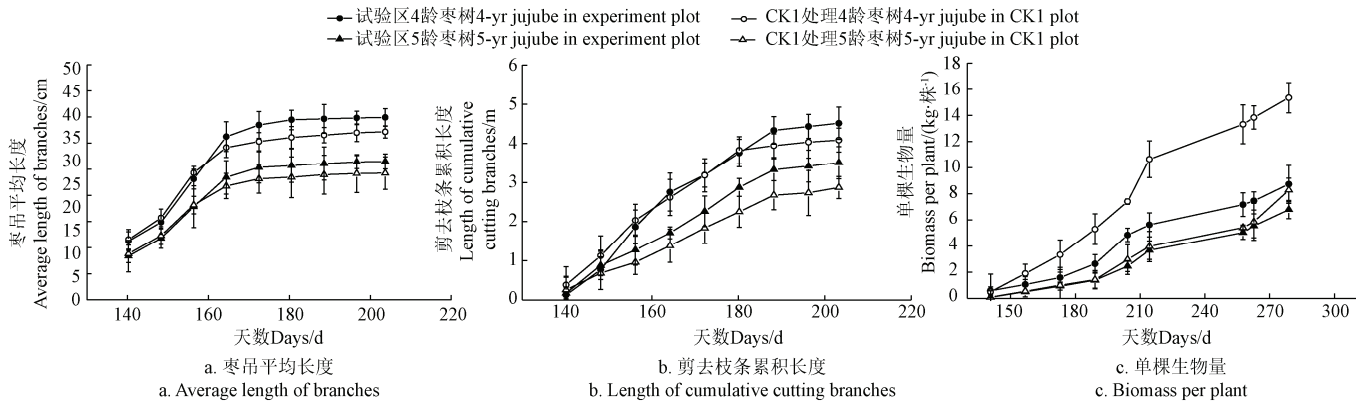


图 6 试验区与对照 1 枣林枣吊平均长度、剪去枝条累积长度、单棵生物量

Fig.6 Average length of branches, length of cumulative cutting branches and biomass per plant of jujube in experiment plot and CK1

表 6 不同处理枣树单果质量、果实个数、生物量、产量、耗水量及水分利用效率

Table 6 Average fruit weight (AFW), number of fruit (NF), biomass, yield, water consumption (WC) and water use efficiency (WUE) of jujube under different treatments

处 理 Treatment	4 龄枣树 4-yr jujube							5 龄枣树 5-yr jujube						
	单果 质量 AFW/g	果实 个数 NF	生物量 Biomass/ (kg·m ⁻²)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	耗水量 WC/ (m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE/(kg·m ⁻³)		单果 质量 AFW/g	果实 个数 NF	生物量 Biomass/ (kg·m ⁻²)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	耗水量 WC/ (m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE/(kg·m ⁻³)	
						产量 Yield	生物量 Biomass						产量 Yield	生物量 Biomass
试验区 Experiment plot	14.5	328	8.8	7 930.81	1 191.68	6.7	4.9	11.3	220	6.8	4 156.12	851.6	4.9	5.3
对照 1 CK1	14.1	98	9.1	2 300.70	1 200.5	1.9	5.1	11.1	76	7.3	1 404.60	881.3	1.6	5.5
对照 2 CK2	14.9	229	15.5	5 693.55	1 303.8	4.4	7.9	11.1	157	8.3	2 910.84	980.5	3.0	5.6

由表 6 可知，试验区 4 龄、5 龄枣树果实个数大于对照 1、对照 2，单果质量差异不大。2 a 中试验区枣树耗水量均低于对照区枣树。试验区 4 龄枣树生物量分别是其对照区 1 和 2 的 97%、57%，生物量水分利用效率分别是其对照区 1 和 2 的 96%、62%，5 龄枣树生物量分别是其对照区 1 和 2 的 93%、82%，生物量水分利用效率分别是其对照区 1 和 2 的 96%、95%，主要是试验区枣树采用节水型修剪限制了自身营养生长。试验区 4 龄枣树产量分别为对照区 1 和 2 的 3.45 倍、1.39 倍，产量水分利用效率分别是其 3.53 倍、1.52 倍。2015 年时枣树为 5 龄，一般来说 5 龄枣树较 4 龄枣树产量有所提高，而由于 2015 年降雨量减小，试验区与对照区产量均较 2014 年有所减小，但试验区 5 龄枣树产量仍为对照区 1 及 2 的 2.96 倍、1.43 倍，产量水分利用效率是其 3.06 倍、1.63 倍。试验区枣树 2 a 间的产量及其水分利用效率均远高于同处深层干化状况的对照区 1 枣树，此时二者土壤深层水分调节能力都较差，降雨成为枣树产量的主导因素。说明节水型修剪通过将枣树树体规格保持在较小范围内，使其在不同降雨条件下仍能保持较高的水分利用效率。

4 结 论

在半干旱黄土丘陵区种植 23 a 苹果林砍伐后，重新

栽植节水型修剪型枣林，研究其生长及耗水情况，结果表明：

- 1) 23 a 生苹果园 0~1 000 cm 深土层内已形成了干化层，其中 300~500、>500~700、>700~1 000 cm 范围土壤水分亏缺度分别为中度偏重亏缺、中度亏缺、轻度亏缺。在苹果树伐后休闲 4 a 0~300 cm 土层水分得到恢复，0~250 cm 土层水分与农地基本一致。
 - 2) 经过 4 a 休闲后的干化土壤中栽植枣树，此时 0~300 cm 层次土壤对枣树而言土壤可用有效水总量为 149.71 mm。枣树栽植前 3 a 不采取特殊措施能够正常生长，但第 3 年开始 0~300 cm 土层有效水分被枣树消耗 34.97%，第 4 年时 0~300 cm 范围内前期恢复的土壤水分被消耗殆尽，枣树生长只能依靠当年降水及其在浅层的入渗。
 - 3) 在 0~1000 cm 土层通体干化情况下，枣树采用节水型修剪仍可以保持良好生长，产量及其水分利用效率均高于相同水分条件下的常规修剪枣树，产量可达正常水分条件下枣树的 1.39 倍以上，产量水分利用效率可达 1.52 倍以上。
- 综上，在前期严重干化的土壤中，土壤水分已经失去调控枣树生长的功能，对枣树生长及产量作用甚微，枣树只能依靠当年降雨生长，而节水型修剪可以通过减

小蒸腾耗水提高水分利用效率,在一定程度上提高产量。但本文仅获得了干化土壤中常规修剪枣树的年度生物量和产量,在后续研究中还需完善更多生长指标的动态观测。

本试验研究仅为 5 a 生枣林,对于果树来讲属于幼树,在深层干化土壤中能否达到正常生长年限,能否持久获得稳定产量,以及深层干化土壤环境与修剪措施对枣树根系的影响等问题还需要更长时间的试验观测来确定。从理论上讲,土壤储水在枣树生长中起到一定的调节作用,虽然深层干化土壤的调节功能大大降低,但是加大枣树修剪强度又在一定程度上降低了枣树蒸腾耗水,可起到弥补土壤水分的作用,修剪强度适度则可以维持枣树持续生长和适宜产量,需进一步研究获得适宜的修剪强度,为生产实践提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Da Silva E V, Bouillet J P, de Moraes Conclaves J L. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths[J]. *Functional Ecology*, 2011, 25(5): 996—1006.
- [2] Nested D C, de Carvalho C R, Davidson E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures [J]. *Nature*, 1994, 372(6507): 666—669.
- [3] 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.
Wang Li, Shao Ming'an, Hou Qingchun. Preliminary research on measured indexes of dried soil layer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 87—90. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘晓丽, 马理辉, 汪有科. 滴灌密植枣林细根及土壤水分分布特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 63—71.
Liu Xiaoli, Ma Lihui, Wang Youke. Distribution characteristic of fine root and soil water of densely jujube plantation with drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(17): 63—71. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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.
Wang Li, Shao Ming'an, Hou Qingchun. Status of dried soil layer in the Yan'an experimental area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(3): 35—37. (in Chinese with English abstract)
- [6] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复[J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2979—2983.
Cheng Jimin, Wan Hui'e, Wang Jing, et al. Over depletion and recovery of soil moisture on *Astragalus adsurgens* grasslands in the loess hilly—gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2979—2983. (in Chinese with English abstract)
- [7] 樊军, 邵明安, 郝明德. 渭北旱塬苹果土壤深层干燥化与硝酸盐累积[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1213—1216.
Fan Jun, Shao Ming'an, Hao Mingde. Desiccation and nitrate accumulation of apple orchard soil on the Weibei dry land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1213—1216. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 75—89.
Li Jun, Chen Bing, Li Xiaofang, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 75—89. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘贤赵, 黄明斌. 渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应[J]. *果树学报*, 2002, 19(2): 75—78.
Liu Xianzhao, Huang Mingbin. Status of soil water environment in apple orchards located in the area of Loess Plateau[J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(2): 75—78. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王国梁, 刘国斌, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水分效应[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 339—334.
Wang Guoliang, Liu Guobin, Chang Xin, et al. A study on the effect of soil water on vegetation rehabilitation in watershed of loess hilly area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 339—334. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王志强, 刘宝元, 王晓岚. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响[J]. *地理研究*, 2005, 24(1): 113—120.
Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Wang Xiaolan. Effects of natural shrub of *Caragana opulens* Kom. on soil moisture in a semiarid area on the Loess Plateau[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 113—120. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王志强, 刘宝元, 徐春达, 等. 连续干旱条件下黄土高原几种人工林存活能力分析[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 25—29.
Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Xu Chunda, et al. Survival capability analysis of four kinds of artificial forests in Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨文治, 韩仕峰. 黄土丘陵区人工林草地的土壤水分生态环境[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1985(2): 20—30.
- [14] 陈洪松, 王克林, 邵明安, 等. 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, et al. A review soil the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. *Sciencia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 155—161. (in Chinese with English abstract)
- [15] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕峰, 等. 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(3): 11—14.
Hou Qingchun, Han Ruilian, Han Shifeng, et al. Preliminary study on dried soil layer about artificial forest grassland on the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1999, 5(3): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, 52(6): 835—842.
Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Liu Gang, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2009, 52(6): 835—842. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 72—79. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 Zhikuang, Han Qingfang, et al. Dry soil layer forming and soil moisture restoration of alfalfa grassland semi-humid region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1045—1051. (in Chinese with English abstract)
- [19] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 I. 小老树的分布及其生长特点[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 64—72.
- Hou Qingchun, Huang Xu, Han Shifeng, et al. Study on the forming of “small olded-tree” and the transforming way in the Loess Plateau I. The distribution and growth nature of the small olded-tree[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(1): 64—72. (in Chinese with English abstract)
- [20] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究: II. 土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 75—83.
- Hou Qingchun, Huang Xu, Han Shifeng, et al. The status of moistures and nutrients in small-old-tree stands and impact on tree growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 75—83. (in Chinese with English abstract)
- [21] 关秀琦, 邹厚远, 鲁子瑜, 等. 黄土高原草地生产持续发展研究: I. 沙打旺人工草地衰退后的草种更替[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 56—60.
- Guang Xiuqi, Zou Houyuan, Lu Ziyu, et al. Study on the sustainable development of the grassland production in Loess Plateau I. Grass varieties alternation in the declined artificial grassland of *Astragalus adsurgens*[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1994, 1(3): 56—60. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944—1950.
- Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Lu Bingjun. A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1944—1950. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 Zhiqiang, Liu Baoyuan, Wang Xuyan, et al. Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 77—83. (in Chinese with English abstract)
- [24] 梁一民, 李代琼, 从心海. 沙打旺草地产草量动态及水分利用研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 71—78.
- Liang Yimin, Li Daiqiong, Cong Xinhai. The biomass dynamics and water use of *Astragalus adsurgens* grassland on the semiarid loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(3): 71—78. (in Chinese with English abstract)
- [25] 谢军红, 柴强, 张仁陟, 等. 黄土高原区多年生苜蓿地土壤干层恢复的适宜后茬筛选[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 51—57.
- Xie Junhong, Chai Qiang, Zhang Renzhi, et al. Suitable succession crop screening after perennial Alfalfa for soil dedication restoration in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 51—57. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王美艳, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4526—4534.
- Wang Meiyan, Li jun, Sun Jian, et al. Soil desiccation characteristics of alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotations on the semi-arid areas of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4526—4534. (in Chinese with English abstract)
- [27] Liu Shouyang, Wang Youke, Wei Xindong, et al. Measured and estimated evapotranspiration of jujube (*Ziziphus jujuba*) forests in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2013, 15(5): 811—819.
- [28] 魏新光, 陈滇豫, Liu Shouyang, 等. 修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 194—202, 315.
- Wei Xinguang, Chen Dianyu, Liu Shouyang, et al. Effect of trim on Jujube transpiration in Loess Hilly Region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 194—202, 315. (in Chinese with English abstract)
- [29] 魏新光. 黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾耗水规律及其调控策略[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- Wei Xinguang. Low of Rain Fed Jujube Tree Transpiration and Water-saving Control Strategy in Semiarid Hilly Areas of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [30] 余檀, 汪有科, 高志永, 等. 陕北黄土丘陵山地枣树生物量模型[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 311—316.
- She Tan, Wang Youke, Gao Zhiyong, et al. Biomass models for Jujube in Loess Hilly Mountain of northwest Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 311—316. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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(10): 5—8.
- Chen Haibin, Liu Shuming, Dang Kunliang, et al. A Study on forest soil moisture features of gullied loess region of the Loess Plateau: Analyses on the soil moisture availability and deficit state[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(10): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [32] 易亮, 李凯荣, 张冠华, 等. 黄土高原人工林地土壤水分亏缺研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 5—9.
- Yi Liang, Li Kairong, Zhang Guanhua, et al. Soil moisture deficit in artificial forest land in Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘刚, 王志强, 王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 126—129.
- Liu Gang, Wang Zhiqiang, Wang Xiaolan. Analysis of dried

- soil layer of different vegetation types in Wuqi County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1): 126—129. (in Chinese with English abstract)
- [34] 马建鹏. 黄土丘陵区枣林水分测定关键因子及方法分析研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- Ma Jianpeng. Analysis and Research of Methods and Determination of Key Factors of Jujube Forestland Water in Loess Hilly Region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘晓丽. 黄土丘陵区枣林深层细根分布与土壤水分特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- Liu Xiaoli. Study on Spatial Distribution Characteristic of Deep Fine Root and Soil Water on Jujube Plantation in Loess Hilly Region[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘晓丽, 马理辉, 杨荣慧, 等. 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 139—145.
- Liu Xiaoli, Ma Lihui, Yang Ronghui, et al. Deep soil water depletion characteristic of jujube plantation in loess semiarid region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 139—145. (in Chinese with English abstract)
- [37] 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 with English abstract)
- [38] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99—104.
- Wang Huixiao, Liu Changming. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99—104. (in Chinese with English abstract)

Growth and water consumption of jujube with water-saving pruning in deep dried soil of Loess Hilly Area

Zhang Wenfei^{1,2}, Wang Xing^{1*}, Wang Youke^{1,3}, Zhang Jingxiao³, Hui Qian³

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil dried layers occur widely in years of trees plantation in orchards. It is important to study soil water restoration condition after tree cutting and effects of dried layers on subsequent vegetation construction and growth. This study aimed to investigate the growth and water consumption of jujube with water-saving pruning in deep dry soil of Loess Hilly Area. The study area was in Jujube Demonstration Base in Mizhi county, Shaanxi province (37°12'N, 109°28'E). The experiment plot had the silt sandy loam with bulk density of 1.24 g/cm³, field water holding capacity of 22% and groundwater depth of 50 m below. In 2011, 5 sampling sites (treatments) were designed. In the sampling site I (experiment plot), 23-yr apple trees were cleared and the jujube with water-saving pruning was planted in soil with dried layers after 4 years; In the sampling site II (CK1), 23-yr apple trees were cleared and the jujube with traditional pruning was planted in soil with dried layers after 4 years; In the sampling site III (CK2), the jujube with traditional dwarf pruning was planted in soil without dried layers; In the sampling site IV (15-yr jujube), the 15-yr jujube with traditional dwarf pruning in soil without dried layers was selected for soil moisture measurement; In the sampling site V (farmland), the farmlands without dried layers for soybean and millet cultivation was selected for soil moisture measurement. Soil moisture in 1 000 cm depth was determined by neutron probes. The jujube yield was determined. The 1-m soil water storage and water consumption were calculated. Available water content, remainder available water and proportion of available water consumption were calculated for orchard soil after cutting, 3-yr jujube soil, 4-yr jujube soil and 5-yr jujube soil. The results showed that 23 years of apple planting had caused soil dried layers in 0-1 000 cm depth. Among the depth, the soil was in the condition of moderate heavy water deficit, moderate water deficit and minor water deficit for 300-500, 500-700 and 700-1 000 cm, respectively. After 4 years of orchard cutting, the soil moisture was recovered in 0-300 cm and the soil moisture in 0-250 cm was almost consistent with the farmland. For the jujube planting after 4-yr of orchard cutting, the soil available water content was 149.71 mm. For the first 3 years, the jujube could growth well but the soil available water in 0-300 cm could be consumed by 34.97%. For the 4th year, the soil available water in 0-300 cm was nearly used up and the jujube had to depend on the precipitation in the same year. In the soil with deep dried layers in 0-1 000 cm, jujube with water-saving pruning could growth well with the yield more than 1.39 times and the yield water use efficiency up to 1.52 times of that with traditional pruning, respectively. The result indicates that the water-saving pruning is an effective way to overcome precipitation shortage and soil water deficit in semi-arid area.

Keywords: soils; water content; orchards; dried layer; jujube; water use efficiency