

# 修剪强度对枣林地耗水及水分利用效率的影响

白永红<sup>1</sup>, 高志永<sup>2</sup>, 汪有科<sup>3,4</sup>, 马建鹏<sup>3</sup>, 聂真义<sup>5</sup>, 陆静<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 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. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为了探索修剪强度对枣林地耗水及水分利用效率的影响,以控制树高、冠幅、二次枝总长度等为手段,由轻到重设置了 4 个修剪强度,2014—2016 年连续 3 年对枣树规格进行了控制,定期测量了枣树生长指标并计算生物量,同时利用 TDP 液流测定系统监测了枣树液流,中子水分仪监测了土壤水分,气象站测量了各气象要素。结果表明:(1) 枣树通过修剪强度的增加可以实现降低枣树蒸腾耗水的效果,蒸腾耗水量的减小有利于林地土壤水分的提升,可以缓解林地土壤干化现象;不同降雨年份,修剪对于降低枣树蒸腾耗水效果不同,在降雨充沛的年份效果更为显著。(2) 不同修剪强度间枣树蒸腾效率差异较小(变异系数 $<10\%$ ),适度的修剪能够较好地控制树体枝叶生物量,而对果实产量影响较小,各修剪强度间枣树产量无显著性差异,且枣树水分利用效率随着修剪强度的增大得到了显著性提高,试验修剪强度 4 处理下的枣树较强度 1 相比 3 年平均水分利用效率提高了 11.99%。该研究对中国黄土高原旱作枣林及其他旱作经济林防治林下土壤干化具有较强的参考意义。

**关键词:**修剪强度; 枣树; 蒸散; 土壤水分; 土壤干层

**中图分类号:**S161.4; S152.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2018)04-0206-09

## Effects of Pruning Intensity on Water Consumption and Water Use Efficiency of Jujube Plantation

BAI Yonghong<sup>1</sup>, GAO Zhiyong<sup>2</sup>, WANG Youke<sup>3,4</sup>, MA Jianpeng<sup>3</sup>, NIE Zhenyi<sup>5</sup>, LU Jing<sup>2</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Department of Water Conservancy, Yangling Vocational & Technological College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of pruning intensity on water consumption and water use efficiency of jujube plantation, plant height, crown width and total length of secondary branch were controlled. Four treatments of pruning intensity which varied from light to heavy levels, were conducted at the Mizhi Experimental station of the Northwest A&F University during the period from 2014 to 2016. Jujube growth was measured by using vernier calipers, measuring tape and balance, meanwhile Jujube sap flow was observed by TDP liquid flow measuring system, soil moisture of jujube plantation was determined by using neutron probe, and meteorological station was used to measure the meteorological factors. The results showed that: (1) pruned jujube trees could reduce the water consumption, the decrease of transpiration water consumption was beneficial to the rise of soil moisture in jujube plantation, therefore, it could alleviate the soil desiccation in jujube plantation; however, in different rainfall years, pruning had different effects on reducing water consumption of jujube trees, and it was more effective in the abundant rainfall year; (2) the transpiration of jujube under different pruning intensities was less ( $CV < 10\%$ ); moderate pruning could better control the biomass of jujube branches and leaves, but had little effect on jujube fruit yield; and there was no significant

收稿日期: 2017-08-07

修回日期: 2017-09-01

资助项目: 陕西省自然科学基金“陕北风沙区设施枣树节水提质增效技术研究”(2016KTZDNY-01-05); 国家自然科学基金“陕北水蚀区植被功能调控技术与示范”(2015BAC01B03); 陕西省自然科学基金“红枣优质高效生产关键技术集成与示范”(2014KTCG01-03)

第一作者: 白永红(1969—), 男, 陕西米脂人, 农艺师, 主要从事生态经济林栽培技术研究。E-mail: byhx0123@163.com

通信作者: 汪有科(1956—), 男, 甘肃民勤人, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用研究。E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

difference for jujube yield of different pruning intensities, but water use efficiency of jujube trees increased significantly with the increase of pruning intensity, the average water use efficiency of jujube of pruning intensity 4 was 11.99% higher than that of intensity 1. The results of this study are critical for relieving soil desiccation, and improving water use efficiency for rainfed jujube plantation and rainfed economic forest on the Loess Plateau.

**Keywords:** pruning intensity; jujube; transpiration; soil moisture; dried soil layer

干旱缺水 and 水土流失是限制黄土高原生态恢复和农业发展的两大瓶颈<sup>[1]</sup>。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显著改善。但与此同时,退耕还林的植被不断生长,对土壤水分需求量越来越大,导致黄土高原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,甚至导致群落的衰败和生态系统退化<sup>[2-4]</sup>。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态环境恶化已经成为生态学界不可逾越的重大课题。

红枣(*Zizyphus jujuba*)是陕北重要特色经济产业,种植面积超过6.67万hm<sup>2</sup>,且多为山地枣林,灌溉水源稀缺,以旱作模式为主<sup>[5]</sup>。为了保护当地脆弱的生态环境,前人进行了大量研究,并提出了集雨微灌工程、截水沟、覆盖保墒等各种旱作节水技术,在一定程度上增加降雨入渗,减少地表蒸发,提高了枣林产量和水分利用效率<sup>[6-9]</sup>。然而,枣树单株耗水与林地总耗水量随着树龄的增加不断增大<sup>[10]</sup>,土壤干燥化仍在加重<sup>[4]</sup>,传统旱作节水技术并不能很好地解决这一问题。

在苹果树、芒果树的修剪试验中,发现修剪能调节果树冠层光照情况,使树体健壮生长、果品优质<sup>[11-12]</sup>;在苹果林、桉树林的修剪研究中,表明修剪能减少树体蒸腾,改善林地土壤水分<sup>[13-15]</sup>。由此,有研究者于2012年提出了节水型修剪理论,试图通过修剪减少枣林地耗水,以当地自然降雨与土壤水分为依据确定目标产量,以达到缓解土壤干燥化,或防止生态恶化的目的<sup>[16-17]</sup>。近几年我们已经对旱作枣树蒸腾耗水机制<sup>[5,10,18-20]</sup>、枣树生物量模型<sup>[21]</sup>、主枝修剪对枣树蒸腾影响<sup>[22]</sup>等方面开展了一系列研究,但由于受到观测手段和分析方法的制约,仍然存在修剪指标数字化程度不够、修剪控制指标精度偏低等问题。本研究以黄土丘陵半干旱区旱作枣林为研究对象,在以往的研究基础上设计合理的修剪标准,研究修剪强度与枣林地耗水及水分利用效率的关系,探索适宜陕北地区矮化密植枣林地可持续发展的修剪强度,为改善土壤干燥化,完善节水型修剪理论,开发新型经济林旱作节水技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

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。年平均降雨量451.6mm,主要集中在7—9月,年平均气温8.4℃,年均日照时数2761h,日照百分率62%,年总辐射580.5kJ/cm<sup>2</sup>,平均海拔1049m。试验地土壤为黄绵土,最上部1m土层平均土壤容重为1.29g/cm<sup>3</sup>,田间持水量和凋萎系数分别是23%和5.16%(质量含水量)。

### 1.2 试验布设

如图1所示,试验区枣树于2008年按株行距2m×3m种植于东向坡(25°)的水平阶上,枣树品种为梨枣。在水平阶上选取16棵树体形态相似的枣树,划分为4各小区,每个小区对应一个修剪强度。依靠天然降雨,3a内旱作矮化密植枣林地土壤水分变化主要集中在2.6m土层内,一年内2.6m以下土壤水分变异极低<sup>[20]</sup>,因此,每个小区边界都采用防水膜隔离3m土层,以防止各小区内土壤水分受到外部土壤的影响。

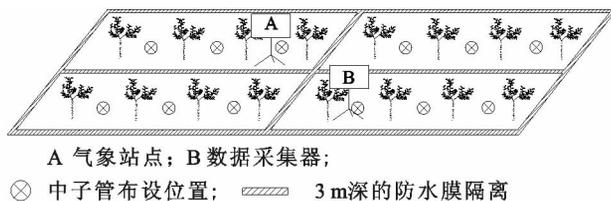


图1 试验布设示意图

### 1.3 修剪处理

修剪是在考虑到光照与密度的条件下,以尽量保留结果枝为原则,控制树高、冠幅、主枝数等指标,设置4个修剪强度(表1),其中修剪强度1参考的是往年保证旱作密植枣园最大产量的修剪强度。考虑到枣树的枣吊、叶片主要着生于二次枝上,二次枝也是主要的结果枝,因此,将二次枝总长度也纳入修剪控制指标中。试验布设中的每个小区对应一个修剪强度,每年5月枣树萌芽展叶后进行动态控制,平均每5~7d修剪1次。

### 1.4 指标测定

1.4.1 枣树生长指标监测利用游标卡尺、卷尺等工

具测量各枣树生长指标,包括:主枝数、主枝长度及直径、侧枝数、侧枝长度及直径、枣吊数、枣吊长度及直径、果实数量、果实横纵径、叶片数量、叶片横纵径,枣树生育期内每 5~7 d 测量 1 次。采用枣树生物量模型<sup>[21]</sup>进行枣树各部分生物量的计算,公式如下:

$$B_{\text{枝条干重}} = 0.0008 \times D^2 \times H - 1.5122 \quad (1)$$

$$B_{\text{枣吊干重}} = 0.013 \times (D^2 \times H)^{0.711} \quad (2)$$

$$B_{\text{叶片干重}} = 1.354 \times 10^{-5} \times Z^{1.436} \times T^{0.869} \quad (3)$$

$$B_{\text{果实鲜重}} = 0.631 \times D_1^{3.601 \times 10^{-8}} \times D_2^{0.999} \quad (4)$$

式中: $B$  为各器官生物量(g); $D, H$  为枝条、枣吊枝条(mm)和长度(mm); $T, Z$  为叶片横径(mm)和纵径(mm); $D_1, D_2$  为果实横径(mm)和纵径(mm)。通过采集并统计枣树果实干重与鲜重,获得枣树果实干重与鲜重的回归方程: $B_{\text{果实干重}} = 0.4123 \times B_{\text{果实鲜重}}, R^2 = 0.8671$ ,因此,枣树生物量(干重)计算公式为:

$$B_{\text{枣树干重}} = B_{\text{枝条干重}} + B_{\text{枣吊干重}} + B_{\text{叶片干重}} + B_{\text{果实干重}} + B'_{\text{干重}} \quad (5)$$

式中: $B'_{\text{干重}}$  为枣树剪去的枝叶生物量(g),通过收集剪去枝叶并进行烘干获得。

表 1 各修剪强度具体修剪标准

修剪强度	树高/cm	冠幅/cm×cm	主枝数	二次枝数	二次枝总长度/cm
1	220±20	220×220	3	27	800±20
2	200±18	220×200	3	24	600±15
3	180±18	180×180	2	14	400±12
4	160±14	160×160	1	6	300±10

1.4.2 蒸腾监测 本试验采用热扩散方法监测全生育期枣树树干液流,2015 年液流数据由 4 月 30 日记录至 10 月 15 日生育期结束。为消除安装方位、高度等引起的检测误差,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)<sup>[23]</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。数据的采集利用美国 Campbell 生产 CR1000 数据采集器,采集频率为 10 min/次。枣树液流密度计算公式<sup>[24]</sup>为:

$$J_s = 119 \frac{\Delta T_m - \Delta T^{1.231}}{\Delta T} \quad (6)$$

式中: $J_s$  为液流密度[g/(m<sup>2</sup>·s)]; $\Delta T_m$  为液流量为零时测头温度与周围空气温度的温度差(°C); $\Delta T$  为有上升液流时测头温度与周围空气温度之间的温度差(°C)。因此,枣树日蒸腾量计算公式为:

$$A_T = \sum_{i=1}^{144} (J_{si} \times A_s \times 10^{-5}) \quad (7)$$

式中: $A_T$  为日蒸腾量(mm/d); $A_s$  为边材面积(cm<sup>2</sup>); $J_{si}$  为当日第 10× $i$  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: $A_s = 0.8249 \times DBH + 1.5634, R^2 = 0.8901$ ,其中  $A_s$  为边材面积(cm<sup>2</sup>);DBH 为枣树胸径(cm),从而确定主要观测梨枣树的边材面积。

蒸腾效率( $T_E$ )表示每蒸腾消耗 1 kg 水能产生的干物质量,作为狭义的水分利用效率,在降低植物蒸腾耗水量、追求高效用水的相关研究中,是衡量节水效果的度量指标<sup>[25-26]</sup>。其计算公式为:

$$T_E = \frac{\Delta B_{\text{枣树干重}}}{T} \quad (8)$$

式中: $\Delta B_{\text{枣树干重}}$  为生育期某时段枣树干物质量增量(g); $T$  为对应时段内枣树蒸腾耗水量(kg)。

1.4.3 土壤水分监测 一般 10 龄以上根系茂密的人工林,其根系可以穿透将近 10 m 深的土层<sup>[27]</sup>,根据试验前期调查发现试验区枣树根系最深可达 7 m 左右,在试验地布设 10 m 深中子管监测土壤水分,发现 3 a 内旱作矮化密植枣林地土壤水分变化主要集中在 2.6 m 土层内,一年内 2.6 m 以下土壤水分变异极低<sup>[20]</sup>,通过水量平衡原则,默认枣林地生育期蒸发量与蒸腾量总和等于生育期降雨量减去土壤储水量增量。为研究枣树修剪对土壤水分的影响,分别在各小区枣树株间 3 个位置布设 3 m 深中子管(图 1),利用中子仪(CNC503B, China)监测土壤体积含水量,步长为 20 cm,采集频率为 10 d/次。土壤储水量计算公式为:

$$W = \theta_v \times h \quad (9)$$

式中: $W$  为土壤储水量(mm); $\theta_v$  为土壤体积含水量(%); $h$  为土层深度(cm)。此外,由于枣树是陕北地区主要经济树种之一,在研究中还应考虑枣树产量,分析修剪强度对枣树果实的水分利用效率的影响,枣树果实水分利用效率计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{10(P - \Delta W)} \quad (10)$$

式中: $WUE$  为枣树果实水分利用效率(kg/m<sup>3</sup>); $Y$  为枣树产量(kg/hm<sup>2</sup>); $P$  为生育期降雨量(mm); $\Delta W$  为生育期枣林地土壤储水量增量(mm)。

1.4.4 气象监测 在试验点附近布设小型气象站(RR-9100, UK),监测步长为 10 min。监测要素包括:降雨量(mm)、总辐射(W/m<sup>2</sup>)、净辐射(W/m<sup>2</sup>)、光合有效辐射[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、风速(m/s)、温度(°C)和相对湿度(%)。

## 1.5 数据分析

数据的统计分析主要采用 Excel 2012 和 PASW Statistics 18.0 软件,作图采用了 Sigmaplot 12.5 和 AutoCAD 2010 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 修剪强度对枣树蒸腾耗水的影响

2.1.1 修剪强度对枣树逐日蒸腾耗水的影响 陕北枣树每年5月初解除休眠,液流逐步上升,到10月树叶掉落后进入休眠,每年液流启动的日期不一,根据液流变化规律确定枣树生育期的方法<sup>[20]</sup>,确定2014—2016年枣树生育期分别为:5月6日—10月14日,5月8日—10月11日,5月1日—10月13日,各持续了162,157,165 d。从图2可以看出,在气象、土壤水分等影响因子作用下,2014—2016年每年各个修剪强度下枣树生育期内逐日蒸腾耗水都有小范围波动现象,但变化趋势一致。总体来说,5月初枣树解除休眠后,各修剪强度下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7月达到生育期最大幅度。9月底,不同修剪强度下枣树逐日蒸腾开始呈现下降趋势,10月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逐渐减弱。

修剪强度决定了各处理日蒸腾量的变化范围,同一生育期,枣树蒸腾耗水逐日变化范围随修剪强度的增大而减小。同时,枣树日蒸腾量变化范围还受到降雨、土壤水分等环境因素的影响。2014—2016年全年降雨分别为460.4,380.8,590.8 mm,生育期内地下3 m土层平均土壤体积含水量分别为8.47%,6.31%,8.80%,生育期内平均光合有效辐射分别为192.2,179.3,198.7  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。如图2所示,在降雨和光合有效辐射相对充沛的年份(2014年和2016年),枣树可利用的土壤水分较多,蒸腾作用更强烈,不同修剪强度下枣树逐日蒸腾耗水变化差异较大,而在降雨量较少、土壤极度干旱的2015年,土壤中可利用水分太少,枣树生长发育也受到一定程度的影响,不同修剪强度下枣树逐日蒸腾耗水变化差异也较小。同时,较轻的修剪强度下枣树蒸腾量更容易受到环境因素的影响,2014年和2016年枣树的蒸腾耗水量平均水平明显大于2015年,3 a修剪强度1处理下的枣树日蒸腾量平均为1.73 mm,修剪强度4处理下的枣树日蒸腾量平均为1.10 mm,说明在较重的修剪强度下,枣树蒸腾耗水能够得到更有效的控制,树体规格较小的枣树在水分充足的年份里仍然能够保持较低的蒸腾耗水量。

2.1.2 修剪强度对枣树生育期蒸腾耗水的影响 从表2可以看出,在不同的年降雨条件下,增大修剪强度均能显著减少枣树的蒸腾耗水量。修剪强度2,修

剪强度3,修剪强度4处理下枣树较修剪强度1在2014年分别降低了10.84%,22.06%,39.15%,在2015年分别降低了7.35%,12.93%,23.77%,在2016年分别降低了11.19%,27.19%,41.46%。降雨充沛的年份,增大修剪强度减小枣树蒸腾耗水的效果尤为明显,2015年强度4处理下的枣树较强度1蒸腾耗水量减少41.74 mm,而2014年和2016年强度4处理下的枣树较强度1蒸腾耗水量分别减少89.03 mm和128.26 mm。2015年强度1与强度2,强度2与强度3之间的蒸腾耗水量没有显著性差异( $p>0.05$ ),很可能是由于当年生育期降雨量较少(仅为254.4 mm),生育期内地下3 m土层平均土壤体积含水量只有6.31%,根据之前研究,6%的土壤水分体积含水量是影响枣树蒸腾的一个阈值,当土壤水分低于6%时会对枣树蒸腾耗水起到限制作用<sup>[20]</sup>。由此可以推测,在这样的干旱条件下,枣树的蒸腾耗水量已经接近其维持正常生命活动所能承受的最低值,只有较大程度地减小枣树树体规格,才能够显著减少枣树蒸腾耗水量。

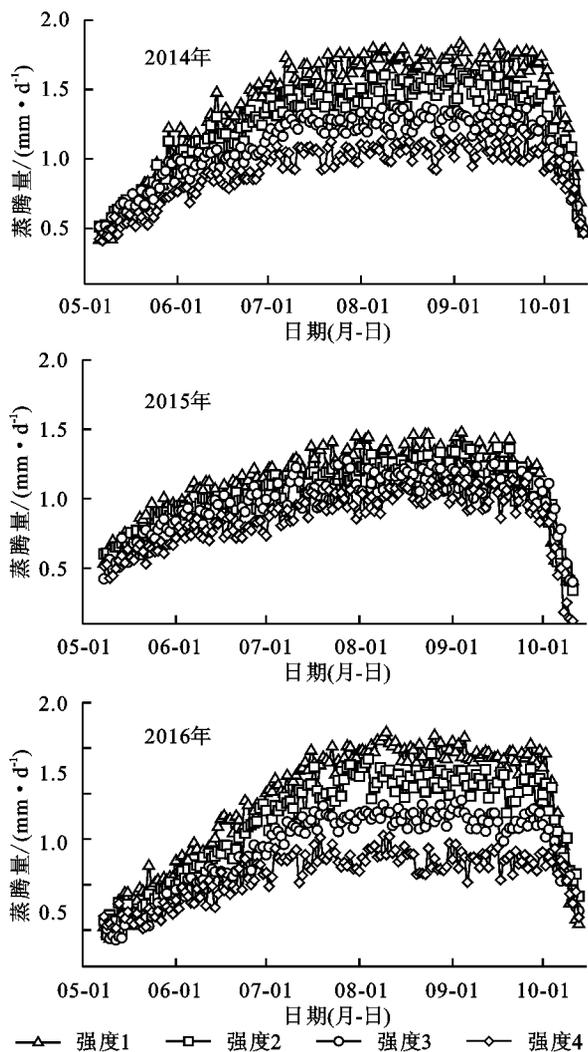


图2 不同修剪强度下枣树逐日蒸腾耗水变化曲线

表2 不同修剪强度下全生育期枣树蒸腾量 mm

年份	年降雨量	生育期降雨量	生育期蒸腾量			
			强度1	强度2	强度3	强度4
2014	460.6	330.0	227.39a	202.75b	177.22c	138.35d
2015	380.8	254.4	175.67a	162.76ab	152.96b	133.91c
2016	590.8	480.6	309.34a	274.74b	225.22c	181.08d

注:不同字母表示修剪强度间差异显著( $p < 0.05$ ),下表同。

### 2.1.3 修剪强度对枣树生物量及蒸腾效率的影响

统计并计算2014—2016年各修剪强度下枣树生物量与蒸腾效率变化规律,结果见图3。可以看出,不同年份不同修剪强度下枣树生育期生物量变化趋势相似,呈缓慢上升—快速上升—缓慢上升的增长模式。每年生育期开始至6月中旬是枣树萌芽展叶主要时

期,叶片与新长出的枝条量较少,9月中旬至生育期结束是枣树果实糖分生成的主要时期,枝叶与果实在重量上增长缓慢,这两段时间内枣树生物量增长极为缓慢。6月中旬到9月中旬是枝叶量快速增大伴随果实快速生长的时期,因此枣树生物量增长速度较快。本研究设置的修剪标准,不仅能够直接控制树高、冠幅,拉开树体规格的差距,更能有效控制各个修剪强度生物量,枣树生物量明显随修剪强度的增大而减小。受气候与土壤因素等影响,同一修剪强度下枣树生物量基本是2015年<2014年<2016年,这说明相同树体规格的枣树在降雨充沛、土壤水分较高的年份,其枝叶、果实的繁茂程度也要高于降雨量少、土壤水分低的年份。

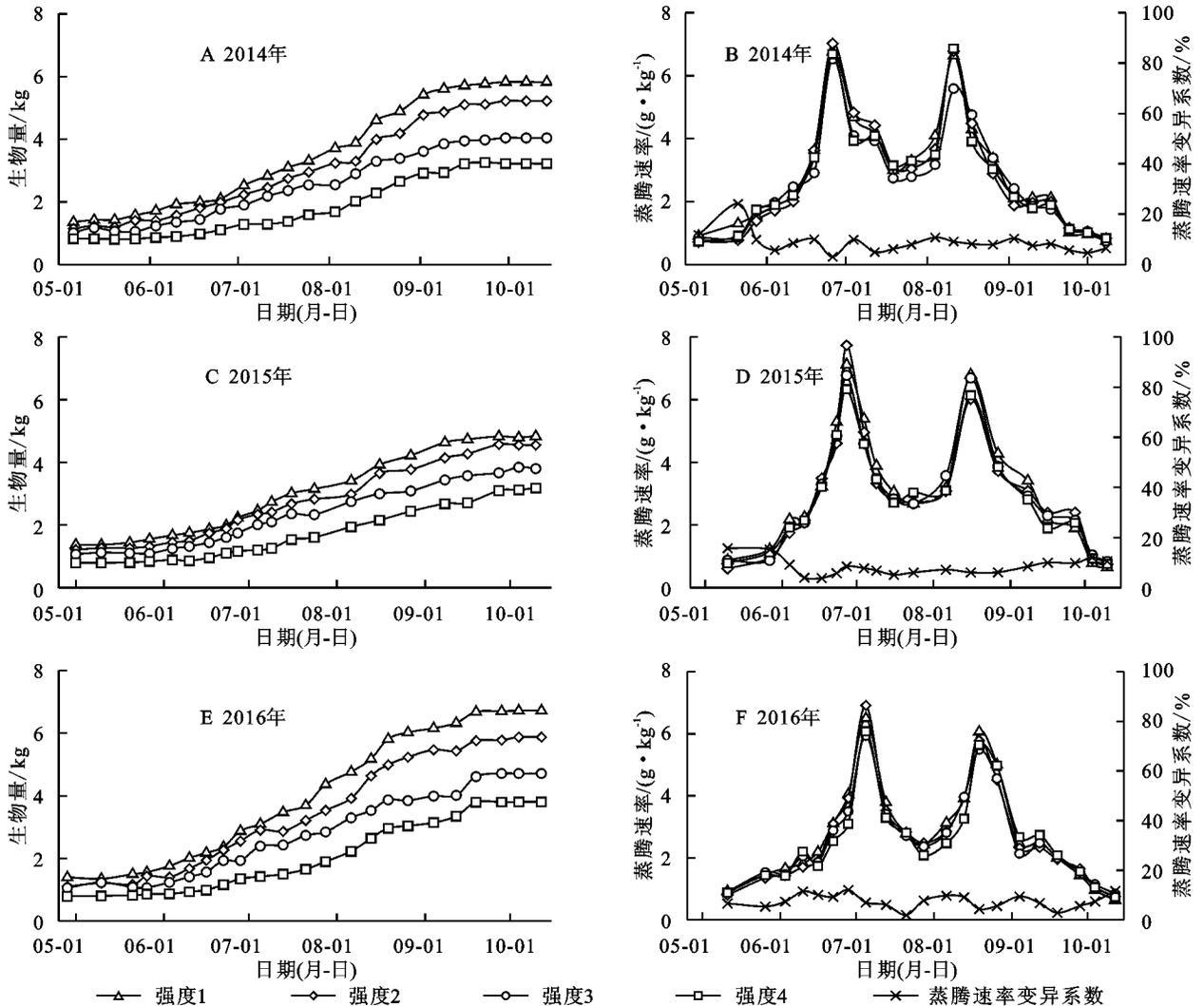


图3 不同修剪强度下枣树生物量及蒸腾效率变化

其次,通过枣树生育期各时段蒸腾效率可以看到(图3B、图3D、图3F),不同年份各修剪强度下蒸腾效率差异较小,其变异系数基本保持在较低水平(低于10%),表示蒸腾效率基本不随修剪强度发生变化。各修剪强度下的枣树蒸腾效率变化趋势一致,呈

双峰曲线形式。枣树蒸腾效率大约在每年6月至9月处于较高水平(大于2 g/kg),并且在6月至7月中旬、8月,这两段时间内处于较高水平,主要是因为前者是萌芽展叶的中后期,后者是果实膨大主要时期,枣树生物量迅速增长的缘故,而7月中下旬枣树处于

开花坐果期,生物量增长较萌芽展叶期慢,因此蒸腾效率较前期有所下降。

### 2.2 修剪强度对枣林地土壤水分的影响

图 4 为 2014—2016 年不同修剪强度下枣林地 3 m 土层土壤水分变化及其降雨情况。就每个生育期来看,随着 5 月枣树萌芽之后不断生长,各个修剪强度间枣树耗水差异不断增大,直接表现在土壤水分动态变化上。一般来说,修剪强度越大,枣树耗水越少,随着降雨对土壤水分的补充,土壤水分越高。2014 年修剪强度 1—4 处理下的枣林地生育期土壤储水量分别提高了一 16.76, -2.64, 17.27, 42.54 mm, 2015 年修剪强度 1—4 处理下的枣林地生育期土壤储水量分别提高了一 20.45, -12.14, -6.08, 2.98 mm, 2016 年修剪强度 1—4 处理下的枣林地生育期土壤储水量分别提高了一 19.31, 3.70, 46.22, 68.38 mm。也就是说,在修剪强度 1 处理下的枣林地,2014—2016 年生育期枣林地 3 m 土层土壤水分处于负增长状态,即使降雨对土壤水分有所补充,也会迅速被旺盛的枣树蒸腾消耗掉,土壤水分被枣树透支。但是在修剪强度 4 处理下的枣树,生育期枣林地 3 m 土层土壤水分处于增长状态,即使在年降雨量只有 380.8 mm 的 2015 年,也能够使枣树生育期耗水量与年降雨量达到平衡,没有进一步透支林地的土壤水分。

### 2.3 修剪强度对枣树产量和水分利用效率的影响

表 3 为不同修剪处理下枣树产量与其水分利用效率对比情况,可以看出,不同年份间枣树产量与水分利用效率差异较大,降雨较多的 2016 年枣树产量普遍较高,最高产量可达 15.57 t/hm<sup>2</sup>;而降雨量少的 2015 年枣树产品普遍较低,最高产量仅为外 9.75 t/hm<sup>2</sup>,是 2016 年的 71.4%,由此可见气候条件对旱作经济枣树产量影响巨大。与此同时,同一修剪强度下枣树水分利用效率 2015 年 > 2014 年 > 2016 年,主要是由于降雨越多,枣林地蒸发蒸腾量越大的缘故。总体上说,不同年份均是强度 1 处理下的枣树产量最高,强度 4 处理下的枣树水分利用效率最高,枣树产量随着修剪强度的增大而减小,枣树水分利用效率随修剪强度的增大而升高,增大修剪

强度有利于陕北黄土高原有限的水资源高效利用。对不同修剪强度下枣树产量与水分利用效率进行显著性分析,发现各修剪强度间枣树产量没有显著性差异,这可能是在修剪过程中合理保留结果枝的效果。同时,枣树水分利用效率随修剪强度的增大而升高,而图 3 中显示各修剪强度间蒸腾效率差异较小,应该是增大修剪强度并尽量保留结果枝以后,枣树生殖生长比重加大,营养生长比重减小的缘故。

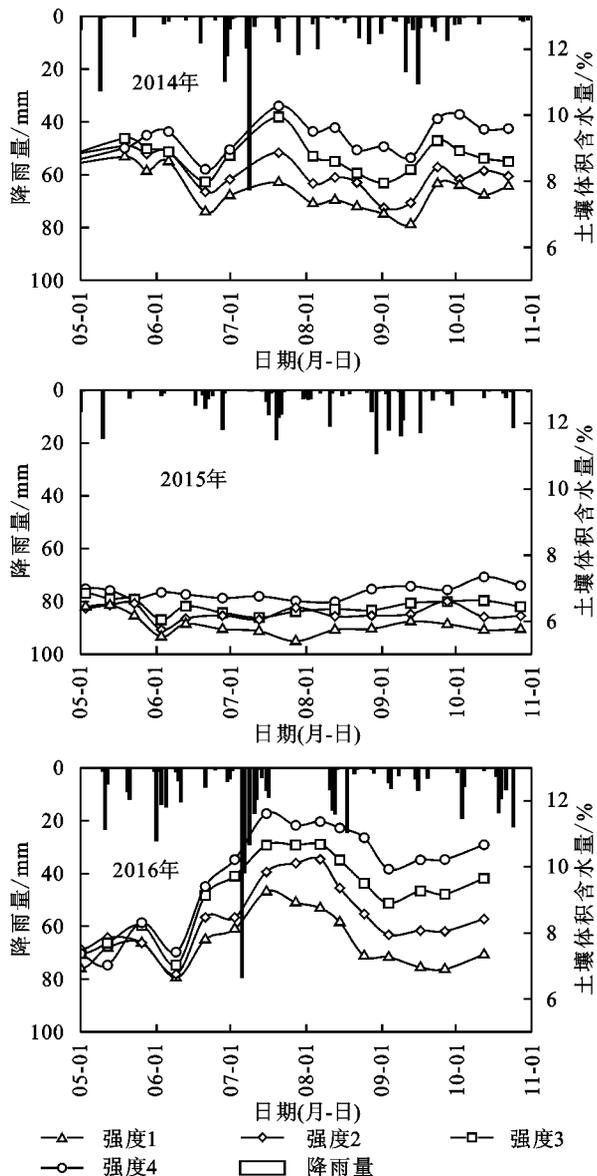


图 4 不同修剪强度下枣林地土壤水分变化曲线

表 3 不同修剪强度下枣树产量与水分利用效率

年份	产量/(t · hm <sup>-2</sup> )				水分利用效率/(kg · m <sup>-3</sup> )			
	强度 1	强度 2	强度 3	强度 4	强度 1	强度 2	强度 3	强度 4
2014	12.3a	12.77a	12.65a	12.01a	3.69a	3.84ab	4.04b	4.17b
2015	11.25a	11.13a	11.05a	10.80a	4.09a	4.17ab	4.25b	4.29b
2016	15.75a	15.15a	14.70a	14.70a	3.15a	3.17a	3.38b	3.56c

### 3 讨论

#### 3.1 修剪强度对枣林地耗水的影响

在前人的研究中, 树木蒸腾影响因素可以分为两类, 一类是辐射、温度等环境外部因素<sup>[28-29]</sup>, 一类是树木种类、规格、基因、生理变化等内部因素<sup>[25,30]</sup>。目前关于枣树不同修剪强度对树木生理指标影响及修剪对枣树根系影响还缺乏相关研究。Namirembe 等<sup>[31]</sup>在水资源有限的环境中研究发现, 修剪使 4 a 生的美丽决明 (*Senna spectabilis*) 木质部导管直径变窄, 树干导水率降低, 抑制了树冠的蒸腾速率并减少土壤水分的消耗。在葡萄修剪试验中发现, 修剪后葡萄枝条导管腔内产生侵填体, 降低了其水分输送性能, 最大可降低液流速率 21.10%<sup>[32]</sup>。除了修剪导致的生理变化能够减少林木蒸腾耗水以外, 树木蒸腾耗水还与叶面积显著相关<sup>[33-34]</sup>。一般认为, 植株蒸腾量与单株总叶面积显著相关, 蒸腾量随着叶面积增加而增大, 但叶面积增加至一定程度后, 蒸腾增幅会变缓甚至不再增加<sup>[22,35-36]</sup>。

枣树生育期内同一时段各修剪强度蒸腾效率变异系数基本不超过 10%, 各个修剪强度间枣树蒸腾效率差异很小, 说明研究树种在各修剪强度下蒸腾效率稳定。采用的修剪标准能够有效拉开各个修剪强度处理下枣

树生物量的差距(图 3), 也就是说, 修剪一旦能够有效控制树体的生物量, 就能够显著减少树体的蒸腾耗水量, 可以认为本研究中通过增大修剪强度降低枣树蒸腾耗水量(表 2)是一种有效的管理技术手段。

枣树修剪降低蒸腾耗水的同时也影响林下的土壤水分, 有利于土壤水分的提升, 但是会一定程度的增加枣林地蒸发量。由于陕北黄土高原旱作矮化密植枣林地土壤水分 3 a 内的变化主要集中在 2.6 m 土层内, 1 a 内 2.6 m 以下土壤水分变异极低<sup>[20]</sup>, 由此通过水量平衡, 计算得各修剪强度下枣林地蒸发量。2014—2016 年各修剪强度下枣林地蒸散量见表 4, 由于枣林地表没有任何覆盖措施, 修剪强度越大, 枣树规格越小, 暴露在外的土地面积越多, 枣林地蒸发量也随修剪强度的增大而升高。此外, 枣林地蒸发量占蒸散总量的比例也随修剪强度的增大而增大, 尤其是修剪强度 4 处理下枣林地蒸发量占蒸散总量的比例明显高于强度 3。可以推断, 虽然增大修剪强度减少了枣树蒸腾耗水量, 但节约下来的蒸腾量并不能完全用于改善土壤水分, 其中有一部分被蒸发掉了, 并且这部分蒸发量也随修剪强度的增大而增大。2014—2016 年强度 4 处理下的枣树较强度 3 蒸腾量分别减少 38.86, 19.04, 44.14 mm, 蒸发量增大了 13.60, 9.98, 21.98 mm。

表 4 不同修剪强度下枣林地蒸发量变化

年份	林地蒸发量/mm				蒸发量占蒸散总量比例/%			
	强度 1	强度 2	强度 3	强度 4	强度 1	强度 2	强度 3	强度 4
2014	119.37	129.89	135.50	149.10	36.17	39.36	41.06	45.18
2015	99.18	103.78	107.52	117.51	38.99	40.79	42.27	46.19
2016	190.57	202.16	209.16	231.14	39.65	42.06	43.52	48.09

#### 3.2 陕北地区枣林适宜土壤水分及水分利用效率与其修剪强度的探讨

近年来有果树修剪影响土壤水分的研究报道, 李明霞等<sup>[15]</sup>发现较传统长放修剪而言, 修剪强度更大的更新修剪林地 2.4 m 深土层土壤水分得到了明显的改善。通过本研究的结果可以看到, 增大修剪强度可以显著降低枣树蒸腾耗水量(图 2), 改善林地土壤水分(图 4), 与强度 1 相比, 2014—2016 年强度 4 处理下的枣树蒸腾耗水分别减少了 89.03, 41.75, 128.26 mm, 生育期 3 m 土层土壤储水量增量分别增加了 59.30, 23.42, 87.69 mm, 在降雨充沛的年份, 增大枣树修剪强度的节水效果更为显著。魏新光等<sup>[22]</sup>也在其研究中发现, 修剪强度最大(留有一个主枝)的枣林地土壤水分有所改善, 2 a 累计增加土壤储水量 40.5 mm, 与本研究的研究结果相似。2015 年强度 2 处理下的枣树蒸腾耗水量较强度 1 相比, 并没有显著性的降低, 这可能是由于年降雨量大

小, 土壤可利用水分少, 轻度修剪的枣树无法控制树冠对土壤水分需求的缘故, 这与 Jackson 等<sup>[36]</sup>在研究修剪对银桦 (*Grevillea robusta*) 坡地农林复合系统的影响时得到的结论相符。

增大修剪强度虽然能够降低枣树蒸腾耗水量, 改善林地土壤水分, 但也在一定程度上降低了枣树产量(表 3)。众多国内外学者提出, 目前黄土高原土壤干燥化日益加重, 并为该区域大规模人工林带来的土壤水环境恶化所担忧<sup>[2,4,37]</sup>。因此, 一味追求产量、透支林地土壤水分是不可取的, 只有考虑到当地环境承载力, 以可持续发展为目标, 追求水土资源高效利用, 才能避免生态系统遭到进一步的破坏。研究结果表明, 强度 4 处理下的枣树产量虽然较其他强度而言有所下降, 但各修剪强度间枣树产量在统计学上没有显著性差异(表 3)。此外, 各修剪强度中, 强度 4 处理下的枣树蒸腾耗水量显著低于其他各修剪强度(表 2),

水分利用效率也最高(表3),综合枣林地耗水、枣树产量与水分利用效率等各方面考虑,在研究范围内,修剪强度4处理下枣林产量没有显著性降低,又能达到高效用水的目的,可以作为当地旱作枣林可持续发展的修剪管理参考标准。同时,由于增大修剪强度,减少枣树蒸腾耗水的同时也促进了林地蒸发,与强度1相比,强度4处理下的枣树3a平均蒸腾量降低86.35mm,蒸发量升高了29.54mm,节约下来的蒸腾量并不能完全用于改善土壤水分,因此,建议陕北旱作枣林地进行节水型修剪的同时,采取地面覆盖等抑制地表蒸发的措施,以减少林地蒸发量。

## 4 结论

(1) 枣树可以通过修剪强度的增加来控制树体规格,从而可以实现降低枣树蒸腾耗水的效果,蒸腾耗水量的减小有利于林地土壤水分的提升,可以缓解林地土壤干化现象,是一条黄土高原林地防治干化的新途径。不同降雨年份,修剪对于降低枣树蒸腾耗水效果不同,在降雨充沛的年份效果更为显著。但修剪也在一定程度上促进了枣林地蒸发,建议将适度修剪与传统的覆盖保墒结合以提高土壤水分环境的保护与修复。

(2) 各修剪强度间枣树蒸腾效率差异较小(变异系数 $<10\%$ ),本研究采用的修剪标准证明,合理的修剪能够较好地控制树体枝叶生物量,而对于果实产量影响较小,各修剪强度间枣树产量无显著性差异,且枣树水分利用效率随着修剪强度的增大得到了显著提高,与修剪强度1相比,修剪强度4处理下的枣树3a平均水分利用效率提高了11.99%,由此证明试验提供的修剪标准对于旱作枣林生产具有较强的参考意义。

### 参考文献:

- [1] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments, 2000,45(1):9-20.
- [2] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008,143(1/2):91-100.
- [3] Wang L, Wang Q J, Wei S P, et al. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas[J]. Forest Ecology & Management, 2008,255(7):2467-2477.
- [4] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015,8(10):739-741.
- [5] Chen D Y, Wang Y K, Liu S Y, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014,136(2):23-33.
- [6] 员学锋,吴普特,汪有科,等.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[J].农业工程学报,2006,22(7):22-26.
- [7] 吴普特,汪有科,辛小桂,等.陕北山地红枣集雨微灌技术集成与示范[J].干旱地区农业研究,2008,26(4):1-6,12.
- [8] 汪有科,徐福利,辛小桂.微灌技术在陕北山地红枣生产中的应用示范研究[J].水土保持通报,2008,28(4):198-200,203-204.
- [9] 蔺君,汪有科,卫新东,等.黄土丘陵区竹节式聚水沟的蓄水特性[J].应用生态学报,2013,24(12):3373-3380.
- [10] 魏新光,王铁良,刘守阳,等.种植年限对黄土丘陵旱区山地枣树蒸腾的影响[J].农业机械学报,2015,47(7):171-180.
- [11] 宋凯,魏钦平,岳玉苓,等.不同修剪方式对“红富士”苹果密植园树冠光分布特征与产量品质的影响[J].应用生态学报,2010,21(5):1224-1230.
- [12] Ram A, Vishwa Patel B, Kalyan B, et al. Pruning affects fruit yield and postharvest quality in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Amrapali[J]. Fruits, 2013,68(5):367-381.
- [13] Li K T, Lakso A N., Richard P, et al. Summer Pruning Reduces Whole-canopy Carbon Fixation and Transpiration in Apple Trees [M]. Ashford, Royaume-Uni; Headley, 2003.
- [14] Forrester D I, Collopy J J, Beadle C L, et al. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on transpiration, photosynthesis and water-use efficiency in a young Eucalyptus nitens plantation [J]. Forest Ecology & Management, 2012,266:286-300.
- [15] 李明霞,杜社妮,白岗栓,等.苹果树更新修剪对土壤水分及树体生长的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(4):467-476.
- [16] 汪有科,周玉红,魏新光,等.一种枣树节水型修剪方法:中国,2014104396690[P].2014-09-01.
- [17] 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.
- [18] Liu S Y, Wang Y K, Wei X D, 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.
- [19] 魏新光,陈滇豫,汪星,等.山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应[J].农业工程学报,2014,30(17):149-156.
- [20] 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].农业机械学报,2015,46(6):130-140.
- [21] 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.
- [22] 魏新光,陈滇豫, Liu S Y,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.
- [23] Lu P, Laurent U, 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.
- [24] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987,3(4):309-320.
- [25] Coupel-Ledru A, Lebon E, Christophe A, et al. Reduced nighttime transpiration is a relevant breeding target for high water-use efficiency in grapevine[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016,113(32):8963.
- [26] 王进鑫,黄宝龙,王明春,等. 侧柏幼树不同生长阶段对水分的敏感性与蒸腾效率[J]. *生态学报*, 2005,25(4):711-718.
- [27] 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 Soil*, 2012,354:57-68.
- [28] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,402(3):388-400.
- [29] Rocuzzo G, Francisco J, Villalobos, et al. Effects of water deficits on whole tree water use efficiency of orange[J]. *Agricultural Water Management*, 2014,140(3):61-68.
- [30] Link P, Simonin K, Maness H, et al. Species differences in the seasonality of evergreen tree transpiration in a Mediterranean climate: Analysis of multiyear, half-hourly sap flow observations [J]. *Water Resources Research*, 2014,50(3):1869-1894.
- [31] Namirembe S, Brook R M, Chin K O. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in a water limited environment in Kenya[J]. *Agroforestry Systems*, 2009,75(3):197-210.
- [32] 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]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [33] 桑玉强,郭芳,张劲松,等. 毛乌素沙地新疆杨蒸腾变化规律及其影响因素[J]. *林业科学*, 2009,45(9):66-71.
- [34] 姚勇哲,李建明,张荣,等. 温室番茄蒸腾量与其影响因子的相关分析及模型模拟[J]. *应用生态学报*, 2012,23(7):1869-1874.
- [35] 高照全,张显川,王小伟. 桃树冠层蒸腾动态的数学模拟[J]. *生态学报*, 2006,26(2):489-495.
- [36] Jackson N A, Wallace J S, Ong C K. Tree pruning as a means of controlling water use in an agroforestry system in Kenya[J]. *Forest Ecology & Management*, 2000,126(2):133-148.
- [37] Jiang W Y, Yang S L, Yang X X, et al. Negative impacts of afforestation and economic forestry on the Chinese Loess Plateau and proposed solutions[J]. *Quaternary International*, 2015,399(5):165-173.

~~~~~

(上接第 205 页)

- [13] 张淑杰,张玉书,隋东,等. 东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析[J]. *自然资源学报*, 2010,25(10):1750-1761.
- [14] 蔡甲冰,刘钰,许迪,等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. *水利学报*, 2008,39(1):83-90.
- [15] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. *农业工程学报*, 2015,31(13):142-148.
- [16] 赵乾坤. 山西省水土保持功能分区及生态脆弱性评价[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2014.
- [17] 朱晓磊,辛存林,卢李朋,等. 山西省粮食生产的时空变化和驱动因子分析[J]. *中国农学通报*, 2014,30(8):82-88.
- [18] 张立生,温辉芹,程天灵,等. 山西省小麦生态区划研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010,18(2):410-415.
- [19] Rockstr M J, Falkenmark M, Karlberg L, et al. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7):142-143.
- [20] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2008,24(5):1-5.
- [21] 马少先. 农业机械在现代农业生产中的地位与作用探析[J]. *北京农业*, 2012(3):172-173.
- [22] Shi J, Liu J, Pinter L. Recent evolution of China's virtual water trade: analysis of selected crops and considerations for policy [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2014,18(4):1349-1357.
- [23] Ruttan V W. The transition to agricultural sustainability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999,96(11):5960-5967.