

修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用*

魏新光¹ 陈滇豫¹ Liu Shouyang² 汪星¹ 高志永¹ 汪有科^{1,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 法国国家农业科学研究院地中海气候与农业水利系统模拟实验室, 阿维尼翁 84914;

3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 对枣树树体进行梯度修剪, 采用热扩散探针(TDP)液流监测系统和 neutron 水分仪对枣树的蒸腾和土壤水分进行同步动态监测, 通过2年连续监测发现: 修剪对枣树不同时间尺度上的蒸腾均有显著影响。修剪可以显著降低枣树开花坐果期和果实膨大期的树体蒸腾, 降低对土壤水分的消耗。与对照处理相比, 轻度、中度和重度修剪的枣树全生育期蒸腾总量分别下降31.7%、52.0%和68.6%。通过线性和非线性的分析方法, 分析了蒸腾和树体规格指标之间的关系, 构建了自然降水量和修剪目标产量的数学模型。提出适宜的陕北枣林可持续经营的目标产量为 $1.2 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$, 适宜的节水型修剪调控树体指标为冠幅体积和新梢长度。

关键词: 节水型修剪 蒸腾 树体结构 土壤干层 灰色关联度

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0194-09

引言

红枣是陕北地区的传统树种, 种植面积超过 $1.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 干旱缺水一直是制约当地红枣产业持续健康发展的瓶颈^[1]。由于长期粗放的种植经营方式和林地对土壤水分的过度消耗, 导致该区域形成永久性的土壤水分干层。这种干层一旦形成就很难消除, 而且对生态环境的负面影响很大^[2-3]。为保护陕北地区脆弱的生态环境, 前人做了大量的工作, 各种工程节水, 设施节水、农艺节水措施的推广和应用, 使得林地的产量和水分利用效率都有了较大的提高^[4-8], 但当地水分状况仍不能满足林地耗水需求。赵霞等^[4]根据枣树的生理特性结合当地生态和气候条件, 提出了一种全新的节水措施: 节水型修剪技术。该技术的核心思想是“以水定产, 以产定树”。以水定产是根据当地自然降水和土壤水分状况, 结合枣树的生理特性, 确定枣树在该水分供应条件下的目标产量。以产定树是根据确定的目标产量对树体的冠层结构和树体规格(枝条、叶片规模等)进行适当调控, 使树体结果能力能够达到目标产量即可。该方法不片面追求树体产量的最大化, 而是通过修剪将树体规格控制在合理范围, 抑制树体的过旺蒸腾, 使当地的自然降水可以满足树体

的水分需求, 从而避免树体对土壤水分的过度消耗和土壤干层的出现, 进而实现山地枣林的可持续经营和黄土高原生态的可持续发展。

枣树的蒸腾受气象、土壤和自身生长状况的综合影响^[9]。前期研究表明, 枣树在较小时间尺度上主要受辐射、气温、相对湿度等气象因子的影响^[10-12]; 在中尺度上主要受降雨和树体自身生物学特性的影响^[13]; 在大尺度上则主要受年降水量和土壤储水量变化的影响^[10, 14]。节水型修剪的实质是通过蒸腾调控实现枣林年耗水量和降水量的相对平衡。以往研究表明, 合理的修剪可以调控树形和树势, 提高果树产量^[15]。但此类研究主要集中在最优修剪方式和修剪强度的定性研究方面^[15-17], 缺乏对修剪较为精准的数字化描述^[18]。因此, 本文通过不同修剪强度下枣树树体形态、产量、蒸腾量等指标的定量分析, 以期对节水型修剪树体调控指标及参数确定提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验在陕西省榆林市米脂县孟岔山地红枣节水试验基地进行。米脂县位于陕西省北部, 黄土高原腹地(109°28'E、37°12'N), 属于典型的黄土高原丘

收稿日期: 2014-08-04 修回日期: 2014-09-02

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04、2013BAD20B03)、林业公益性行业科研专项资助项目(20140470)和陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2013KTZB02-03-02)

作者简介: 魏新光, 博士生, 主要从事经济林高效用水研究, E-mail: weixg_wi@163.com

通讯作者: 汪有科, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水和水土保持研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

陵沟壑区,气候干燥,蒸发强烈。年均日照时数 2 761 h,日照百分率 62%,年总辐射量 580.5 kJ/cm²,年平均气温 8.4℃。年均降水量 451.6 mm,其中 7—8 月降雨占全年降水量的 49%。试验基地土壤为黄绵土,容重为 1.29 ~ 1.31 g/cm³,平均坡度为 25°。

1.2 试验布置与指标测定

试验布设在山地红枣基地东南坡的水平阶地上

(图 1),阶地宽度 4 m,阶高 2 m。被试树种为 14 年生(2000 年种植)梨枣树(*Ziziphus jujube* Mill.),栽植密度为 1 666 株/hm²。株行距为 2 m × 3 m,综合考虑光照、树势、仪器布设和林间水分状况的影响,将试验树选择在连续的 3 个水平阶地上,每个阶地取 8 株。枣树原始树形均为矮化密植的三主枝树形,树体平均高度(2 ± 0.12) m,冠幅直径(1.8 ± 0.25) m。

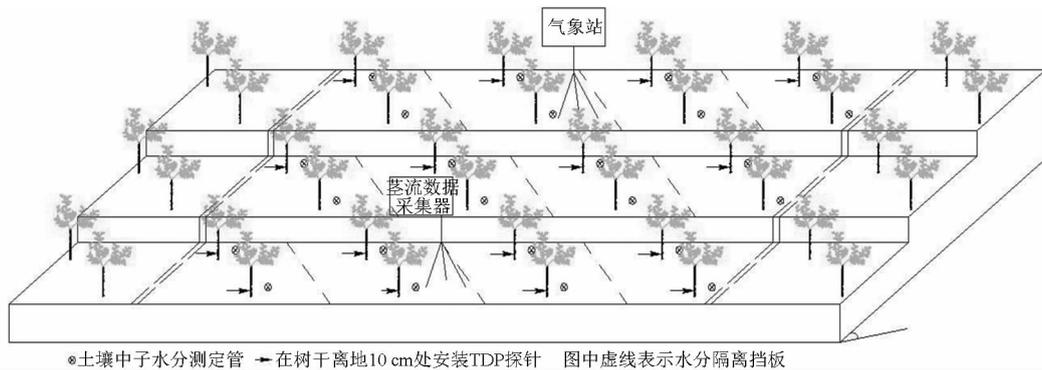


图 1 试验布设示意图

Fig. 1 Test arrangement

1.2.1 修剪处理

对所选三主枝树形进行梯度修剪控制。主枝控制分为单主枝、双主枝和三主枝 3 种类型,分别置于试验阶地的上阶、中阶和下阶。由于各树体冠层高度基本相同,通过设置不同的冠幅直径大小,对树冠规模进行控制(表 1),每个水平设置 2 组重复(相

邻 2 株)并用硬塑料板进行水分隔离(图 1)。在不同的冠幅直径下,树体冠幅体积、枝条量(新梢)、枣股数、枣吊数、叶片面积等生长指标也形成梯度。对全生育期内的新增枝条数量进行控制,并对叶面积、叶面积指数和最终产量进行统计。

表 1 试验分组与修剪梯度控制

Tab. 1 Test group and trim boundary control

单主枝			双主枝			三主枝		
控制冠幅直径/m	树木编号	实际冠幅直径/m	控制冠幅直径/m	树木编号	实际冠幅直径/m	控制冠幅直径/m	树木编号	实际冠幅直径/m
0.20	1	0.19	0.70	9	0.74	1.30	17	1.30
	2	0.21		10	0.68		18	1.34
0.30	3	0.33	0.85	11	0.87	1.55	19	1.45
	4	0.30		12	0.86		20	1.54
0.45	5	0.45	1.00	13	0.96	1.85	21	1.68
	6	0.46		14	1.03		22	1.78
0.60	7	0.63	1.15	15	1.16	2.00	23	1.95
	8	0.59		16	1.19		24	2.10

1.2.2 蒸腾监测

在 24 株试验树上安装树干茎液流监测系统。为防止安装高度、方位等引起的监测系统误差,避免地表积水和太阳辐射对监测精度的综合影响,热扩散式探针(TDP-20, Thermal diffuse probe)统一安装在离地 10 cm 的树干北侧(图 1),并用防晒膜对探针进行包裹,利用美国 Campbell 公司生产的 CR1000 型数据采集器收集数据,监测频率为 10 min/次(144 次/d)。采用 Granier 经验公式^[19]计

算树干液流密度和蒸腾速率

$$v_i = 1.19 \times 10^{-4} (\Delta T_{\max} - \Delta T_i) / \Delta T_i^{1.231} \quad (1)$$

$$T_c = \sum_{i=1}^{144} \frac{0.6v_i A}{L_{\text{col}} L_{\text{row}}} \quad (2)$$

式中 v_i ——液流密度, g/(cm²·s)

T_c ——日蒸腾量, mm/d

ΔT_i ——监测探针两测头之间的实时温差,℃

ΔT_{\max} ——整个监测时段内监测探针两侧头之间的最大温差,℃

i ——测定次序

L_{col} ——株距, 3 m L_{row} ——行距, 2 m

A ——边材面积, cm^2

其中,边材面积 A 的确定需根据边材面积和胸径关系转化而得到,具体确定步骤参照文献[20]。

数据监测过程中的2012年9月11—20日,监测系统遭遇雷击损坏,造成数据缺失,该阶段数据根据损坏前后数据线性插值获得。2012年第15号、24号监测树的探针损坏,2013年22号树的监测探针损坏,因此采用剩余21棵树的数据进行分析。限于篇幅,测定数据未予列出。

1.2.3 气象、土壤水分状况监测

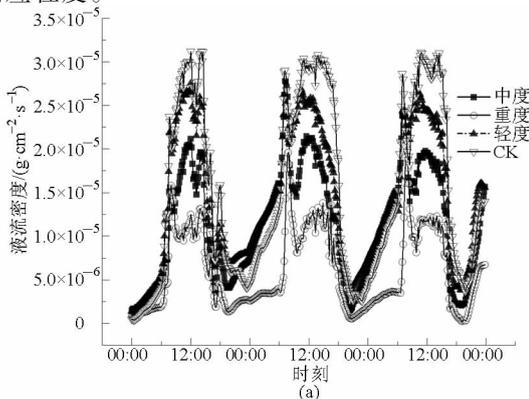
气象数据由安装在监测小区中部的小型气象站(SQ2010)测得。监测要素包括:降水量(P , mm)、总辐射(R , W/m^2)、净辐射(R_n , W/m^2)、光合有效辐射(PAR, W/m^2)、风速(V , m/s)、温度(T , $^{\circ}C$)和相对湿度(RH, %)。

各试验处理在整个试验期间不进行补充灌溉,土壤水分的补给全部来自自然降雨。各试验处理的土壤水分数据采用CNC100型中子水分测定仪进行监测,中子水分测管统一安装在树干西侧30 cm深,测管安装有效监测深度为3 m。利用中子仪隔10 d测定一次体积含水率,监测深度的步长为20 cm。

2 结果与分析

2.1 典型修剪强度下枣树的蒸腾量

为分析树体修剪后冠层指标和蒸腾的关系,先选取修剪梯度差异较大的4棵样树(1、8、16、23号树)进行重点分析,并和本试验的极大处理(23号树,三主枝不修剪,CK)作对照。CK的冠幅直径约2 m,其他3棵树的冠幅直径分别约为对照处理的60%、30%和10%,简称轻度(16号)、中度(8号)、重度修剪(1号)。分析各处理在不同时间尺度上的水分响应程度。



2.1.1 瞬时尺度下(10 min)蒸腾差异

为了减少极端天气条件对蒸腾结果的影响,在2012年枣树生育比较旺盛的7月选取3个连续晴天(1日—3日)对瞬时尺度上液流密度进行比较。同时选取6月26日—7月25日30 d的连续数据,在日尺度上对不同修剪强度下的蒸腾量进行对比分析。

在瞬时尺度上(图2a),不同修剪强度下树体液流密度(瞬时蒸腾强度)的响应规律基本相似,但响应程度差异明显。重度处理的树体冠幅最小,其相应的液流密度也最低,树干液流变化最为剧烈的是CK,在不同修剪处理下,1 d内的液流密度基本呈现单峰变化趋势。蒸腾均在夜间较为缓慢,早晨06:00—07:00液流迅速增加,在09:00—16:00蒸腾速率较大,白天蒸腾速率呈现不规则的波动变化,这些波动主要是受气象因子的影响所致^[10,12]。

在日尺度上(图2b),不同修剪强度下各处理日蒸腾量的差异也比较显著。虽然各处理的变化规律比较相似,但是波动幅度不同。随着修剪强度的加大,日蒸腾的波动幅度在减小,可见修剪对树体蒸腾的调控作用非常显著。但是在6月28日、7月8日、16日和24日前后,各处理蒸腾的差异性却非常小,这主要是因为在这几个时段内试验区各经过一次明显的降雨过程,空气湿度大,辐射强度低,降低了叶片气孔导度,抑制了叶片蒸腾^[13]。在此后的几天内,各处理的蒸腾耗水差异性显著增加,这主要是由于降雨过后,土壤水分充足,枣树蒸腾作用加强,但是在降雨过后的5~7 d,土壤含水量在蒸发蒸腾双重作用下迅速降低,其对枣树耗水的抑制作用也开始增强。

2.1.2 各生育期蒸腾量差异性

由表2可以看出,修剪对枣树不同生育期的蒸腾量均能产生一定影响。但是各个生育期差异的显著性不尽相同。在整个生育期的不同阶段,各处理

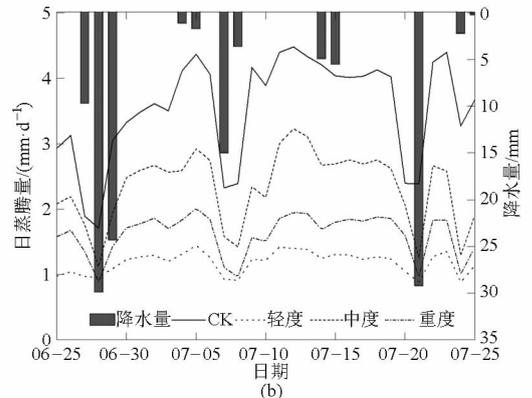


图2 典型修剪强度下液流密度和日蒸腾动态

Fig. 2 Sapflow density and transpiration under typical pruning intensity

间蒸腾的差异性呈现为由小变大,再由大变小的趋势。在萌芽展叶期,不同的修剪强度使得蒸腾量分别较 CK 减少了 39.6%、50.9% 和 64.0%,可见该措施能够有效的减少树体蒸腾,但是各个处理之间的差异性并不显著,这主要是因为在这个时期,各修剪处理的新稍生长量和枝叶量绝对数值并不是很大,特别是经过修剪以后,各个树体的蒸腾均受到不同程度抑制,蒸腾耗水的绝对数值进一步减小,从而弱化了这种差异性。

表 2 不同生育阶段枣树蒸腾量

Tab. 2 Water consumption at different growth

修剪强度	stages of jujube tree				mm
	萌芽展叶期	开花坐果期	果实膨大期	成熟落叶期	全生育期
CK	87.7 ^a	153.8 ^a	193.6 ^a	74.6 ^a	512.7 ^a
轻度	53.0 ^b	95.1 ^b	138.4 ^b	52.9 ^{ab}	350.4 ^b
中度	43.0 ^b	68.5 ^{bc}	83.3 ^c	30.3 ^{bc}	246.1 ^c
重度	31.5 ^b	43.8 ^c	52.4 ^c	25.0 ^c	160.7 ^d

在枣树开花坐果期和果实膨大期,各个处理之间蒸腾量的差异均比较显著,除开花坐果期的轻度修剪和中度修剪处理,以及果实膨大期的中度修剪和重度修剪处理之间差异性不显著以外,其他各个修剪处理差异性都十分显著。这主要是因为,这 2 个生育期正好处于枣树生长的旺盛阶段,气温较高,土壤水分条件较好,不同处理使得枣树叶面积差异明显。

在枣树的成熟落叶期,各处理蒸腾量的差异性逐渐缩小,相邻 2 个处理(CK 和轻度、轻度和中度、中度和重度)间差异均不明显,但梯度较大的处理(CK 和重度、CK 和重度、轻度和重度)间则有显著性差异。这主要是因为,在果实成熟落叶期,叶片的活性在降低,蒸腾作用放缓,有的甚至开始落叶,蒸腾几乎为零,使得各个处理之间的差异性逐渐减弱。

对于枣树的全生育期而言,不同修剪强度下,全

生育期的蒸腾量差异均十分显著,轻度、中度和重度处理较 CK 的蒸腾量分别减小了 31.7%、52.0% 和 68.6%。可见修剪对于枣树蒸腾量的调控作用非常明显,从而为下一步确定合理的树体指标提供了理论依据。

2.1.3 典型修剪强度下土壤水分和蒸腾的关系

图 3 为典型修剪强度处理下 3 m 土层的土壤水分动态。以 2012 年 5 月 10 日—2013 年 5 月 31 日和到 2014 年 5 月 1 日分别作为 1 年和 2 年土壤水分比较的时间节点。可以看出,不同的修剪处理,其土壤水分虽变化规律相似,但各个处理间差异仍然比较显著。土壤水分的变化受降雨的影响非常强烈。2 年间降雨差异很大,这种年际降水量的较大变化,导致了年际土壤水分剧烈波动。但是不同修剪处理的土壤水分仍有较为显著的差异。与多年平均降水量(451.6 mm)相比较,2012 年降水量较小,不同处理土壤含水率均有不同程度的下降,重度、中度、轻度和对照处理的土壤含水率分别下降了 0.67、0.76、0.94 和 1.22 个百分点。2013 年,随着降水量的增加各处理土壤含水率分别回升了 0.60、0.83、1.83 和 1.95 个百分点。各处理的土壤水分差距进一步拉大。和 CK 相比,重度修剪处理 2 年累计增加土壤储水量 40.5 mm。对于降雨年际不均的陕北地区,要实现山地果园的可持续经营,就必须实现土壤水分的动态平衡,但这个平衡的周期不一定正好是一年。基于此,枣林蒸散量控制的调控目标应为多年平均降水量 451.6 mm 左右为宜。

2.2 树体规格和树体蒸腾的关系

树体的蒸腾主要通过叶片来完成,但是如果直接通过修剪叶片来调节树体蒸腾量,不仅工作量非常大,而且可操作性和稳定性不强。因此必须通过调控树体其他生长、形态指标,间接调控树体叶片规模,从而实现节水型修剪的目的。为此我们探讨了

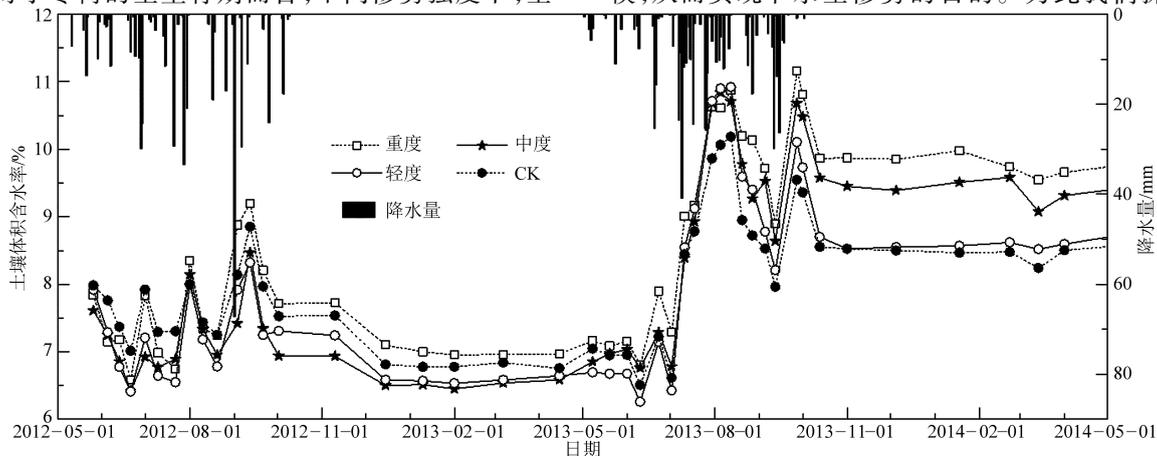


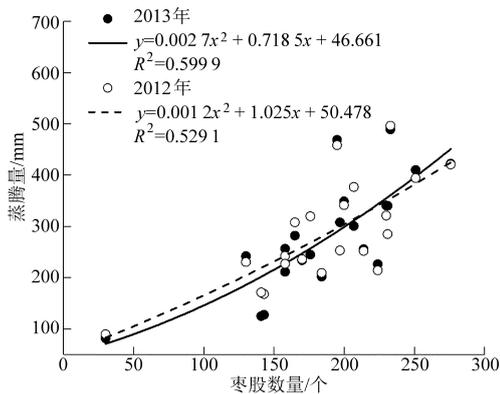
图 3 典型修剪强度下土壤水分动态

Fig. 3 Soil moisture dynamic under typical pruning intensity

枣树的树体规格(生长、形态指标)和蒸腾的关系。

2.2.1 枣股、枣吊与蒸腾的关系

枣股和枣吊构成了枣树最基本的结果枝组^[16],由图4可以看出,枣树的蒸腾和枣股、枣吊数量间均呈现极显著的正相关关系。随着枣股和枣吊数量的增加,枣树蒸腾显著增加,而且枣吊数量对蒸腾的影响大于枣股数量(2012年和2013年 R^2 分别为



0.88、0.94、0.60、0.52)。这主要是因为枣股上着生枣吊,叶片则直接着生在枣吊上,所以枣吊的数量对叶片的影响最为直接,枣股的改变能够引起枣吊数量的变化,但是单位枣股上着生的枣吊数量受到树体本身和外界环境的影响而发生波动,枣吊数量和枣股数量并非严格意义的线性关系,所以枣股数量对树体蒸腾的影响小于枣吊数量。

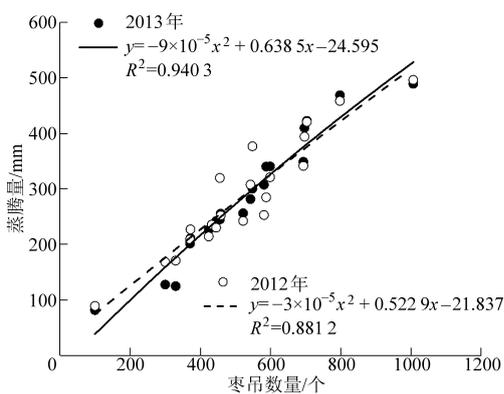


图4 2012和2013年枣树蒸腾量和枣股、枣吊之间的关系

Fig. 4 Relationship between jujube shares, jujube hanging and tree transpiration in 2012 and 2013

2.2.2 冠幅体积、新梢长度和蒸腾的关系

冠幅体积、新梢长度和枣树蒸腾的关系也十分密切(图5a、5b),但是二者和蒸腾的关系略有不同,树体的蒸腾量和新梢长度基本呈线性相关关系,但

和冠幅体积的增加呈二次曲线相关关系。这主要是因为随着冠幅体积的增加,树体生长趋于分散,使单位冠幅体积内的枝条数量、枣股、枣吊数量和叶面积(叶面积指数)都有一定的下降趋势所导致。

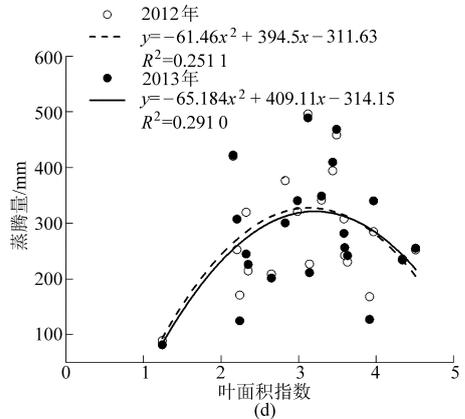
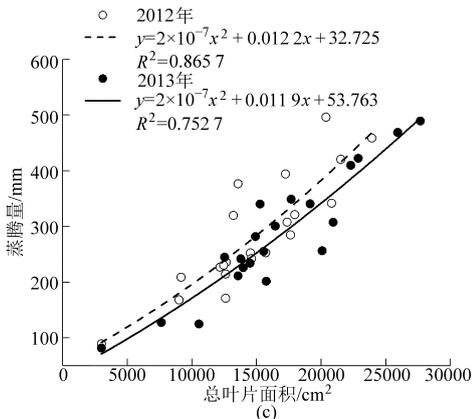
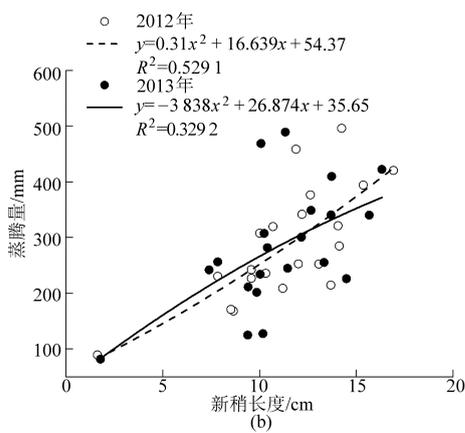
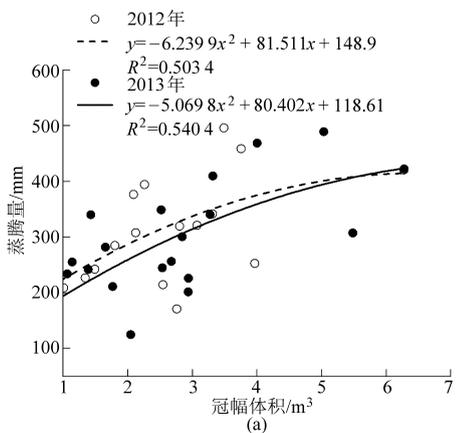


图5 2012和2013年枣树树体规格与树体蒸腾的相关关系

Fig. 5 Relationship between crown, length of shoot, leaf area, leaf area index and jujube tree transpiration in 2012 and 2013

2.2.3 叶面积、叶面积指数和蒸腾的关系

叶片是枣树蒸腾最主要的器官,枣树蒸腾绝大部分通过叶片进行,所以枣树的叶面积和蒸腾的关系最直接也最密切(图 5c),二者在 2012 年和 2013 年的决定系数 R^2 分别达到了 0.865 7 和 0.752 7。蒸腾和叶面积指数呈现二次曲线关系(图 5d),随着叶面积指数的增加,枣树蒸腾耗水量呈现出先增加后减小的趋势,这可能是因为当叶面积指数较小时,叶面积指数的增加可以显著增加叶片规模,促进叶片蒸腾,但当叶面积指数较大时(LAI 为 3 左右)树体叶片相互遮蔽效应明显,叶片接受辐射、风等蒸腾主要气象因子的能力减弱,单位叶片呼吸、蒸腾能力下降造成的^[20],此外叶面积指数和蒸腾作用还受其他因子影响,所以相关关系不是特别显著。

2.3 产量和蒸腾的关系

枣树的产量和蒸腾量之间有非常显著的相关关系(图 6),极端处理单株枣产量为 2.0 kg 时,2 年的蒸腾量均小于 100 mm,但随着产量的增加蒸腾量的增加越来越剧烈。对于干旱缺水的黄土高原地区而言,片面追求高产导致水分利用效率大幅度下降,是十分不经济的,同时还会带来土壤水分的过度消耗和生态环境的恶化。可见适度调控枣树的产量,可以有效减小树体蒸腾。山地枣林的蒸腾耗水不仅和树体结构密切相关,还和气象、降水、土壤储水量变化密切相关,2 年同期产量和蒸腾的差异主要是这些原因造成的。

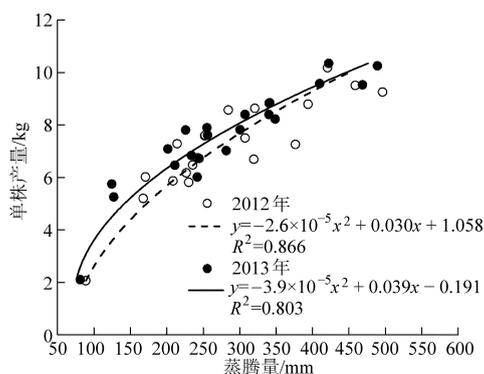


图 6 2012 和 2013 年枣树单量与树体蒸腾相关关系

Fig. 6 Relationship between yield and transpiration of jujube tree in 2012 and 2013

根据前期 Dual-Source Shuttleworth-Wallace (DSSW)模型计算结果^[20],枣树蒸发量约占蒸发蒸腾量的 55%,依据枣树蒸腾量和修剪目标产量的关系,确定枣林目标产量 Y (kg/hm^2) 和总需水量 X (蒸发蒸腾量, mm) 的关系模型为

$$Y = -1.609 \times 10^{-5} X^2 + 31.457X + 903.73 \quad (R^2 = 0.8293) \quad (3)$$

为防止枣树对土壤水分的过度消耗,必需实现

年际之间水分供需平衡。陕北降雨年际差异很大,但各处理年际蒸腾总量差异并不显著。由此可见,用树体规格调控枣树耗水是一个比较稳定的措施。陕北地区降雨年际波动较大,所以应该以多年平均降水量作为水量供应量的上限,来调控树体耗水。在自然降雨条件下,有效降水量对枣树耗水影响最为直接,但是有效降水量受到土壤类型、气候条件、降雨过程等的综合影响,确定过程比较复杂。在生产实践中,为了简化确定过程以便技术推广,直接采用降水量作为输入参数。试验区域多年平均降水量 450 mm,根据式(3)确定目标产量为 11 801 kg/hm^2 。即本地适宜的目标产量约为 $1.2 \times 10^4 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

2.4 合理树体调控指标的确定

为全面客观的评价各个因子对树体蒸腾的影响作用,科学合理地制定节水型修剪模式的评价指标,选用线性和非线性的分析方法,对影响枣树蒸腾的各个因子之间的相关关系,以及诸因子对枣树蒸腾的影响作用进行综合分析和评价。

2.4.1 皮尔逊相关分析

通过构建枣树蒸腾和其生长指标、形态指标、产量之间的皮尔逊相关系数矩阵(表 3)可以看出,2012 年各因子和枣树蒸腾响应关系依次为:枣吊数量 > 总叶面积 > 产量 > 新梢长度 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 平均枣吊长度。2013 年响应关系依次为:枣吊数量 > 总叶面积 > 产量 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 新梢长度。2 年数据综合分析的结果和 2013 年的响应结果排序完全一致,只是相关系数的值不同。上述结果表明,不论是 2012、2013 年还是 2 年的综合数据分析,在各因子和蒸腾量的关系中,枣吊数量和蒸腾量的相关性最为密切,相关系数 R 分别达到 0.94、0.97 和 0.95。其次是枣产量,其相关系数分别为 0.86、0.91 和 0.88。此外蒸腾量和新梢长度、枣股数量和冠幅体积也有较为密切的关系。树体的平均枣吊长度是一个不稳定的指标,仅在 2012 年以及 2 年数据综合计算时和枣蒸腾量显著相关 ($p < 0.05$),叶面积指数和蒸腾量则无显著的线性关系。

2.4.2 灰色关联度分析

将 7 个变量因子作为比较序列,蒸腾量作为应变量。采用 Matlab 7.1 软件包进行计算,确定 2012、2013 年以及 2 年综合数据的灰色关联度。为了提高计算结果的精度和计算效率,在进行关联度分析前,对原始数据进行标准化处理,关联度分辨系数取 0.5。

构建枣树蒸腾量和各影响因子之间的灰色关联度分析模型,结果如表 4 所示。枣吊数量和蒸腾量的关系最为密切,灰色关联度系数在 2012、2013 年

表3 枣树蒸腾量、树体规格指标和产量的皮尔逊相关系数矩阵

Tab.3 Pearson correlation matrix among tree index, yield and transportation of jujube tree

	枣吊数量	枣股数量	平均枣吊长度	叶面积指数	叶面积	产量	冠幅体积	新梢长度	蒸腾量
2012年	枣吊数量	1							
	枣股数量	0.74**	1						
	平均枣吊长度	-0.48*	-0.30	1					
	叶面积指数	0.24	0.23	-0.03	1				
	叶面积	0.91**	0.74**	-0.12	0.28	1			
	产量	0.90**	0.91**	-0.20	0.28	0.95**	1		
	冠幅体积	0.68**	0.64**	-0.04	-0.35	0.76**	0.75**	1	
	新梢长度	0.74**	0.97**	-0.30	0.23	0.74**	0.90**	0.64**	1
	蒸腾量	0.94**	0.72**	-0.46*	0.16	0.86**	0.86**	0.68**	0.73**
2013年	枣吊数量	1							
	枣股数量	0.74**	1						
	平均枣吊长度	-0.19	0	1					
	叶面积指数	0.24	0.23	-0.11	1				
	叶面积	0.93**	0.75**	0.16	0.20	1			
	产量	0.90**	0.93**	0.04	0.25	0.93**	1		
	冠幅体积	0.71**	0.65**	0.23	-0.35	0.81**	0.76**	1	
	新梢长度	0.54**	0.93**	-0.17	0.26	0.49*	0.77**	0.43*	1
	蒸腾量	0.97**	0.77**	-0.15	0.21	0.93**	0.91**	0.72**	0.57**
2年综合	枣吊数量	1							
	枣股数量	0.74**	1						
	平均枣吊长度	-0.31*	-0.13	1					
	叶面积指数	0.24	0.23	-0.07	1				
	叶面积	0.91**	0.73**	0.09	0.23	1			
	产量	0.90**	0.92**	-0.04	0.27	0.93**	1		
	冠幅体积	0.69**	0.64**	0.15	-0.35	0.78**	0.76**	1	
	新梢长度	0.64**	0.97**	-0.23	0.25	0.59**	0.83**	0.51**	1
	蒸腾量	0.95**	0.75**	-0.28	0.19	0.89**	0.88**	0.69**	0.65**

注: * 和 ** 分别表示在 $p < 0.01$ 水平和 $p < 0.05$ 水平显著相关。

表4 枣树蒸腾量和各影响因子的灰色关联度

Tab.4 Grey relational grade of jujube transpiration and influence factor

树体指标	2012年		2013年		2年综合	
	灰色关联度	关联度排序	灰色关联度	关联度排序	灰色关联度	关联度排序
枣吊数	0.683 1	1	0.687 3	1	0.712 2	1
枣股数	0.494 3	5	0.469 8	4	0.514 1	4
平均枣吊长度	0.403 2	7	0.278 7	8	0.370 9	8
叶面积指数	0.388 0	8	0.303 5	7	0.377 5	7
叶面积	0.589 1	3	0.601 0	2	0.640 1	2
产量	0.594 1	2	0.571 4	3	0.601 7	3
冠幅体积	0.527 4	4	0.415 4	5	0.494 6	5
新梢长度	0.494 3	6	0.460 9	6	0.478 7	6

以及2年的综合分析中分别达到0.683 1、0.687 5和0.712 2;其次是叶面积和产量,关联度排名分别为第2和第3,这2个因子和蒸腾量的关联度系数较为接近,排名略有波动,但均在0.57以上,2012年的关联度系数产量略高于叶面积(0.594 1 > 0.589 1),2013年和2年数据的综合分析则是后者大于前者;再次,冠幅体积、枣股数量、新梢长度与蒸腾量的关联度也较高,关联度系数也均在0.5左右波

动,关联排序分别为第4~第6,可见他们和蒸腾量的关系也较为密切;最后,枣吊长度和叶面积指数与蒸腾量的关联系数最低,关联系数排名分别为最后2位。

2.4.3 评价指标的构建

对比线性和非线性2种分析方法,得出的枣树蒸腾量主要影响因子的排序基本类似。影响作用极为显著($p < 0.01$)且较为稳定的因子依次为:枣吊

数量、叶面积、产量、枣股数量、冠幅体积和新稍长度等。从理论上讲,这些指标均可以作为节水型修剪的调控指标,而且影响作用越大的因子,调控效果越明显。但在生产实践中,从修剪调控的实现难易程度来说,则正好相反。这主要和树体的生长特性有关。枣树的蒸腾主要通过叶片来实现,叶片着生在枣股上,枣股主要分布在枝条上(特别是当年新生枝条、新稍)。从理论上讲,对枣吊数量和叶片的调控虽然最为有效,但是若直接对其进行调控,不仅费时费力,而且可操作性和调控的稳定性均比较差,所

以并不是理想的节水型修剪调控指标。枣股数量、冠幅体积和新稍生长量这 3 个因子与树体蒸腾量的相关系数虽然略逊于前述两者,但仍有极显著的相关性($p < 0.01$)。对它们进行调控,依然可以达到很好的效果。另外枣股主要着生在新稍(枝条)上,用新稍长度来调控枣股数量非常有效(表 2, $r = 0.93$, 2012 年; $r = 0.97$, 2013 年)。所以,综合各因子对枣树蒸腾量的影响程度(表 2、表 3、表 4)和修剪实现的难易程度,推荐冠幅体积和新稍长度 2 个指标作为调控蒸腾量的主要指标。

表 5 各影响因子对枣树蒸腾作用的影响排序

Tab. 5 Ranking of influence factors to tree transpiration

皮尔逊相关分析(R)	2012 年	枣吊数量 > 叶面积 > 产量 > 新稍长度 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 枣吊长度
	2013 年	枣吊数量 > 叶面积 > 产量 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 新稍长度
	2 年综合	枣吊数量 > 叶面积 > 产量 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 新稍长度 > 枣吊长度
灰色关联分析(GM)	2012 年	枣吊数量 > 产量 > 叶面积 > 冠幅体积 > 枣股数量 > 新稍长度 > 枣吊长度 > 叶面积指数
	2013 年	枣吊数量 > 叶面积 > 产量 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 新稍长度 > 枣吊长度 > 叶面积指数
	2 年综合	枣吊数量 > 叶面积 > 产量 > 枣股数量 > 冠幅体积 > 新稍长度 > 枣吊长度 > 叶面积指数

注:皮尔逊相关分析中,不显著相关因子未予以列出。

节水型修剪的核心是以水定产,以产定型,通过有目的的修剪,合理的控制枣树冠幅体积和叶片规模的扩张,而不一味追求枣树高产潜力,使得当地水分状况可以满足枣林的耗水需求。对于大部分山地枣林而言,既缺乏有效的灌溉条件又没有地下水的补给,水分的来源只能靠自然降水。在有限的水资源条件下,要实现降水利用效率的最大化,一方面要通过节水型修剪来抑制树体过分耗水,另一方面要最大限度地减少无效的土面蒸腾,实现最优的蒸腾蒸发比。节水型修剪措施的实施,要和一定的保墒措施相结合,才能最大程度利用水资源,节约水资源,减少林地土壤水分的过分消耗,避免和抑制黄土高原土壤水分干层的发生和发展,防止陕北生态脆弱区环境的恶化,实现山地红枣经济林的可持续经营。

3 结论

(1)修剪对不同时间尺度上的枣树蒸腾均有显

著影响,修剪造成的瞬时蒸腾的差异白天大于夜间,日蒸腾差异晴天大于阴天。在不同生育阶段,修剪造成蒸腾耗水的差异在萌芽展叶期差异不显著,开花坐果期、果实膨大期、成熟落叶期以及全生育期均差异显著。

(2)节水型修剪调控枣树林蒸散量应以多年平均降雨为控制上限。通过修剪可以显著减少树体对土壤水分的过度消耗,增加土壤储水量。

(3)以多年平均降水量为基础,结合枣树的蒸腾和生物学特性,确定适合当地枣林可持续发展的枣林目标产量为 $1.2 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$,可初步实现以水定产。

(4)运用线性和非线性的分析方法,分析各个影响因子和蒸腾量的关系,综合比较分析,得出对枣树蒸腾量影响显著且较为稳定的影响因子依次为:枣吊数量、叶面积、产量、枣股数量、冠幅体积、新稍长度。结合生产实践,提出适合节水型修剪模式的 2 个调控指标为冠幅体积和新稍长度。

参 考 文 献

- 1 吴普特,冯浩. 中国节水农业发展战略初探[J]. 农业工程学报,2005,21(6):152-157.
Wu Pute, Feng Hao. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 152-157. (in Chinese)
- 2 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 CSAE, 2007, 23(11): 77-83. (in Chinese)
- 3 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]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 155-161. (in Chinese)

- 4 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.
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. (in Chinese)
- 5 马福生,康绍忠,胡笑涛,等. 不同阶段亏水处理对温室栽培梨枣树茎液流变化影响的研究[J]. 农业工程学报,2006, 22(4): 6-14
Ma Fusheng, Kang Shaozhong, Hu Xiaotao, et al. Effects of water deficit at different growth stages on stem sap flux of pear-jujube trees in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 6-14. (in Chinese)
- 6 许迪,龚时宏,李益农,等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J]. 水利学报,2010,41(6):631-639.
Xu Di, Gong Shihong, Li Yinong, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 631-639. (in Chinese)
- 7 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊1): 238-243.
Cai Taiyi, Jia Zhikuan, Huang Yaowei, et al. Effects of different straw mulch rates on soil water conservation and water-saving benefits in spring maize field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.1): 238-243. (in Chinese)
- 8 雷波,刘钰,许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. 农业工程学报,2011,27(1):10-14.
Lei Bo, Liu Yu, Xu Di. Estimating theory and method of irrigation water-saving potential based on irrigation district scale[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):10-14. (in Chinese)
- 9 Dierick D, Hölscher D. Species-specific tree water use characteristics in reforestation stands in the Philippines[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2009,149(8): 1317-1326.
- 10 O'brien J J, Oberbauer S F, Clack D B, et al. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest[J]. Plant, Cell & Environment, 2004, 27(5): 551-567.
- 11 Du Sheng, Wang Yilong, Kume T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2011,151(1): 1-10.
- 12 Liu Chunwei, Du Taisheng, Li Fusheng, et al. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 193-202.
- 13 李小英,段争虎. 黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J]. 土壤通报,2012,43(6):1508-1514.
Li Xiaoying, Duan Zhenghu. Review on the interaction between soil moisture and vegetation on the loess plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1508-1514. (in Chinese)
- 14 陈皓锐,黄介生,伍靖伟,等. 冬小麦根层土壤水量平衡的系统动力学模型[J]. 农业工程学报,2010,27(10):21-28.
Chen Haorui, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, et al. Soil water balance model in root zone of winter wheat based on system dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2010,27(10):21-28. (in Chinese)
- 15 张显川,高照全,付占方,等. 苹果树形改造对树冠结构和冠层光合能力的影响[J]. 园艺学报,2007,34(3):537-542.
Zhang Xianchuan, Gao Zhaoquan, Fu Zhanfang, et al. Influences of tree form reconstruction on canopy structure and photosynthesis of apple[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(3): 537-542. (in Chinese)
- 16 马婧,汪有科,杨荣慧,等. 不同树形结构梨枣的冠层特性及节水性分析[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):138-143.
Ma Jing, Wang Youke, Yang Ronghui, et al. Analysis on canopy characteristics and water saving of pear jujube in different training systems [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011, 29(3):138-143. (in Chinese)
- 17 吴伟斌,洪添胜,李震,等. 基于 LAI 测试的精确人造果树模型[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊2):118-122.
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Precision manmade fruiter model based on LAI test[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 118-122. (in Chinese)
- 18 俞龙,黄健,赵祚喜,等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(8): 224-228.
Yu Long, Huang Jian, Zhao Zuoxi, et al. Laser measurement and experiment of hilly fruit tree canopy volume[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 224-228. (in Chinese)
- 19 Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- 20 Liu Shouyang, Wang Youke, Wei Xindong, et al. Measured and estimated evapotranspiration of jujube forests in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2013, 15(5): 811-819.
- 21 魏瑞锋,庄飞,刘西平,等. 土壤水分对枣树光合特性及耗水量的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(2):107-111.
Wei Ruifeng, Zhuang Fei, Liu Xiping, et al. Effect of soil water content on photosynthetic characteristics and transpiration water consumption of jujube[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 107-111. (in Chinese)

proposed algorithm was presented, along with a design procedure and experimental results. Comparison of obtained results from classical methods and three-dimensional laser measurement was made. The point cloud data were acquired by non-prism total station and a coordinate grid of canopy surface was built, and then the crown volume can be computed with a square grid-based method. Analysis of the parameters had been made with satisfactory precise and the results showed that the relative error of square grid method was 4.13% and the average accuracy was 95.75%. There was no significant difference between calculation value and actual measurement for crown volume under confidence level of 0.05. Moreover, compared to the traditional manual measurement, only one-third of time was consumed by square grid method, which costed 2% of those by three-dimensional laser scanning, therefore, the expenditure was extremely reduced and efficiency was increased.

Key words: Crown volume Total station Point cloud data Square grid method Algorithm

(上接第 202 页)

Effect of Trim on Jujube Transpiration in Loess Hilly Region

Wei Xinguang¹ Chen Dianyu¹ Liu Shouyang² Wang Xin¹ Gao Zhiyong¹ Wang Youke^{1,3}

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China

2. Unite of Modelling Agricultural and Hydrological Systems in the Mediterranean Environment,
French National Institute of Agronomic Research (INRA), Avignon 84914, France

3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: In order to alleviate the soil drying of the jujube forest in semiarid loess area, we took the gradient control on jujube tree specifications by pruning, using the TDP tree rod liquid flow monitoring system to monitor the jujube tree transpiration and CNC100 neutron moisture meter to monitor soil moisture. It was found that the pruning on jujube had a significant influence on the transpiration and water consumption at different time scales through the research for two consecutive years. Pruning can significantly reduce the tree transpiration in flowering period of fruit and fruit enlargement period of jujube, and reduce the consumption of soil moisture. Compared with the control treatments, the tree transpiration with mild, moderate and severe pruning of the whole growth period decreased by 31.7%, 52.0% and 68.6%, respectively. The relationship between tree transpiration and specifications were analyzed by linear and nonlinear analysis method, and then a mathematical model of natural precipitation and trim production target was built. The suitable target yield for the sustainable management of jujube forest in northern Shaanxi was 1.2×10^4 kg/hm², and the tree index for water-saving trim regulation was the crown and the new length. The new mode was formed that the production of jujube was determined by soil moisture and jujube specifications were determined by production.

Key words: Water-saving trim Transpiration Tree specification Dried soil layer Grey correlation