

核桃树干液流特征研究

马长明¹, 刘广营², 张艳华², 刘春鹏¹

(1. 河北农业大学 林学院,河北 保定 071000;2. 河北省木兰围场国有林场管理局,河北 围场 068450)

摘要:应用热脉冲技术对核桃树干液流进行了测定,探讨了核桃液流的日变化、月变化规律和水分的供求关系。结果表明:核桃树干液流速率存在明显的昼夜变化规律,呈单峰形曲线;典型晴天耗水大小顺序为8月>7月>5月>6月>9月>4月>10月,月总耗水大小顺序为5月>8月>6月>7月>9月>4月>10月;6~9月份降雨量与耗水量比>1,水分供大于求;4、5、10月份降雨量与耗水量比<1,水分供不应求,不利于土壤水分积累;大气温度、辐射强度与液流速率极显著正相关,相对湿度与液流速率呈极显著负相关。

关键词:核桃; 液流; 热脉冲

中图分类号:S715.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2010)02-0025-05

Stock Sap Flow Characters of *Juglans regia*

MA Chang-ming¹, LIU Guang-ying², ZHANG Yan-hua², LIU Chun-peng¹

(1. College of Forestry, Agriculture University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China;

2. State-Owned Forestry Administration Bereaumulan Weichang in Hebei, Weichang, Hebei 068450, China)

Abstract: The stock sap flow of *Juglans regia* was measured by the heat-pulse technique. Daily, monthly variations of the sap flow and the relationships with water supply were discussed. The results showed that the sap flow velocity clearly represented regularity day and night, exhibited an unimodal curve. Water consumption in a typical sunny day was in the order of August > July > May > June > September > April > October. The water consumption in one month was in the order of May > August > June > July > September > April > October. The amount of precipitation during June to September was more than that of water consumption, whereas, the later was more than former in April, May, and October, resulting in the demand exceeded the supply, unfavorable to soil water accumulation. The relationship between the atmosphere temperature, the solar radiation and the sap flow velocity were in significant opposite correlation, while the relative humidity thaws negatively correlated to sap flow velocity.

Key words: *Juglans regia*; sap flow; heat-pulse technique

我国自从开展退耕还林还草工程以来,退耕还林区生态环境得到了改善,农民的收入也有所增加,但仍然存在有诸多问题,其中最迫切的便是退耕还林区经济的长期稳定发展问题,即后续产业问题^[1-2]。解决此类问题的最好办法就是大力发展经济林。核桃(*Juglans regia*)是四大干果之一,营养价值丰富,药用价值高,并且对环境条件要求不严,尤其适合荒山荒坡种植,能够被退耕区人民普遍接

受,是目前退耕还林的理想经济林木。

我国北方存在严重的水资源短缺问题,干旱是制约其植被建设的主导因素^[3],特别对于没有灌溉条件的丘陵山区,确定耗水量和立地水分的合理承载能力,对于当地生态植被建设和管理具有重要的作用。因此,选择当前退耕区主要经济林木核桃为研究对象,通过对其耗水特性的研究,可为退耕树种的选择和退耕区经济的发展提供理论依据。

1 研究方法

试验地设在河北省平山县岗南镇寺家沟村,该区属于暖温带半干旱半湿润季风型大陆性气候,年平均气温 12.7°C ,年太阳辐射量为 $5.5 \times 10^5 \sim 5.7 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,全年有效辐射为 $2.7 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,多年平均日照时数 $2600 \sim 2750 \text{ h}$,年平均降水量 609 mm ,多年平均蒸发量 1815.4 mm ,年平均干燥度为 1.38 。多年平均风速 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,土壤为石灰性褐土。试验地核桃林为2001年栽植,株行距 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,直径 78 mm ,平均树高 2.7 m 。

该研究于2005年4—10月进行,在林中选择生长良好、无被挤压现象的3棵核桃样株作为研究对象,梯田样方面积 $38.2 \text{ m} \times 11.6 \text{ m}$,共37株,平均地径 85.4 mm 。在样木的 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 高处清理出光滑界面,采用特定钻头,依据仪器自带模具,钻取3个直径 2 mm 的孔洞(深度视边材宽度而定),将SF100茎流探针插入,另一端和数据采集系统相连,设置 15 min 记录1次脉冲值。在试验地同时安装自动气象站,同步监测太阳辐射、空气温度和空气湿度,土壤水分采用烘干法测定。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

由图1可以看出,试验期间的降水量为 436.1 mm ,总降雨次数50次,而单次降雨量 $<5 \text{ mm}$ 的降雨32次,合计 39.4 mm , $5 \sim 10 \text{ mm}$ 的降雨5次,合计 36.2 mm , $10 \sim 20 \text{ mm}$ 的降雨8次,合计 117.1 mm , $>30 \text{ mm}$ 的降雨5次达 243.4 mm , $20 \sim 30 \text{ mm}$ 的降雨没有出现。由图1中还可以看出,降水主要集中在7月下旬至8月,干湿季明显,8月份降水最多,7月23日以后共计有 311.7 mm 的降雨,占年总降雨量的 71.5% , $>30 \text{ mm}$ 的降雨有 75% 集中于此期间;而7月23日前则有24次,合计 124.4 mm 的降雨。

2.2 土壤水分特征

试验区无灌水补给,且试验期间未形成产流地降水过程,其土壤水分变化由降水和植被蒸散消耗两因素决定。由图2可知,7月中旬之前,降雨次数多而降雨量小,水分频繁湿润表层土壤,但由于无效蒸发损失,深层土壤水分得不到有效补给而降低了水分的有效性,土壤含水量均呈现一种缓慢降低的趋势,在7月13日,各层次含水量均达到低谷,成为旱季和雨季的分界线,而后进入雨季,受降雨量的影响,土壤含水量迅速上升,于8月份达到峰值,而后

呈现一种相对稳定状态至生长及结束。旱、雨季土壤含水量变化范围分别是 $4.41\% \sim 10.55\%$ 和 $12.74\% \sim 15.86\%$ 。

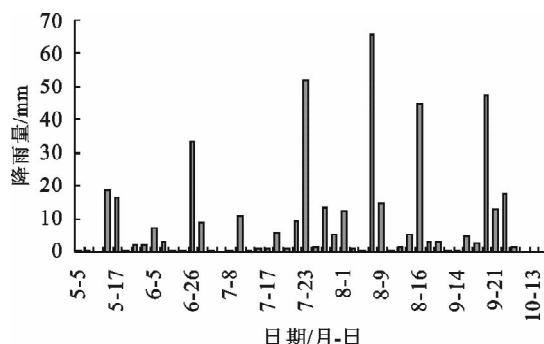


图1 降雨季节变化动态

Fig. 1 Seasonal variation of rainfall

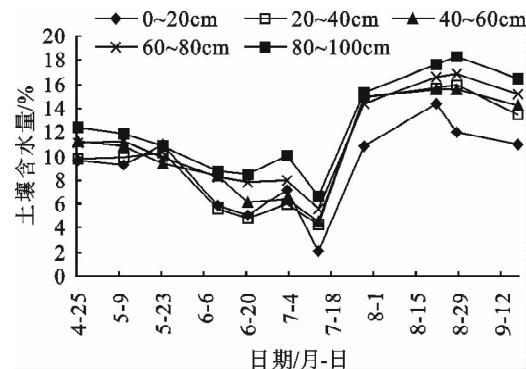


图2 土壤水分季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of soil water

2.3 核桃树干液流日变化

液流的日进程大致可以分为启动、高峰和停止3个阶段,从液流的启动时间来看,核桃树干液流的启动时间在05:00~07:00,图3A是2005年4月23日和24日连日的液流曲线图,以此2d测定结果为例可以看出,液流的启动时间和该日相应的气象因子的变化密切相关,特别是太阳辐射呈现变化的相对一致性。23日太阳辐射在06:00开始明显增强,树干液流在07:30开始进入持续上升状态,24日太阳辐射在05:45开始启动,树干液流的启动时间也相应提前,在06:45开始启动,比较太阳辐射和树干液流的启动时间,树干液流的启动时间相对于太阳辐射滞后 $30 \sim 120 \text{ min}$ 左右的时间,这说明液流的启动主要受到辐射的控制。

同样受到太阳辐射的影响,温度上升,湿度下降(图3B),使得液流速率不断上升,23、24日太阳辐射的峰值分别出现在14:00和11:30,树干液流的峰值分别出现在15:15和13:45,树干液流随着太阳辐射峰值出现时间的变化而变化,从整个生长季来看,树干液流峰值的出现时间受瞬态因子变化的影响较大,如太阳辐射,笔者在4—10月份观察到核

核桃树干液流的峰值出现时间为:13:45、14:05、15:45、13:30、13:00、13:15、13:30左右,基本呈现湿季较雨季峰值出现提前的规律。

受不同日期落日时间的影响,即太阳辐射的影响,核桃树干液流的停止时间一般在20:00~21:00之间,即在太阳落山后液流仍持续一段时间,然后才进入夜间缓慢的平稳状态。太阳辐射分别在19:30和19:15停止,而液流速率分别在20:30和21:00进入相对停止状态(图3A)。

夜晚液流的停止过程远没有启动过程那样有明显的时间界限,多数夜晚一直保持微弱的液流存在,而此时气孔关闭是肯定的,此时的液流并非用于蒸腾过程,分析其原因主要是用于恢复白天的亏缺。根据奚如春^[4]等的研究结果分析可知,白天树干液流的主要动力是蒸腾拉力,在其作用下拉动导管水分运动,耗水速率提高,枝条水势下降,并且随着树

干高度的降低而逐渐推迟,依次是叶片-枝条-树干上部-树干下部-根系。因为白天大量蒸腾耗水,引起树体内各部分组织的水容储水被释放出来,导致组织水容降低,发生导管空穴化,因此在水容作用下,根系仍处于缓慢吸水状态,吸收的水分用于恢复根系、树干及枝叶的水容,回填白天所产生的空穴。

由图3还可以看出,晴天的液流速率要明显大于阴天的液流速率,并且晴天液流启动相对较早,停止较晚,日变化幅度较大,图3是依据4月23日(阴)和4月24日(晴)所测液流数据作图。液流总量分别是28.42 L和47.17 L,测试材料为同一棵树,并且连续2 d测定,其土壤水分条件也没有太大变化,那么造成阴、晴2 d液流差距如此之大的非气象因子莫属。这就说明同一种植物,在土壤水分相同的条件下,气象因素是影响蒸腾耗水的主要因子^[4-5]。

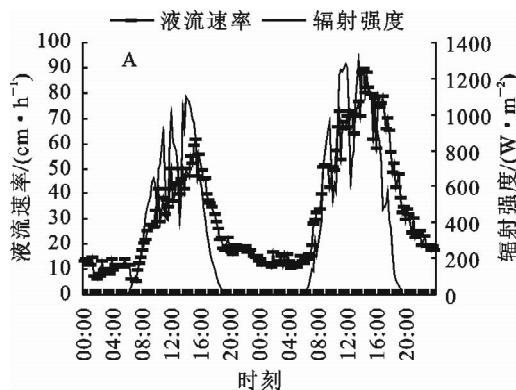


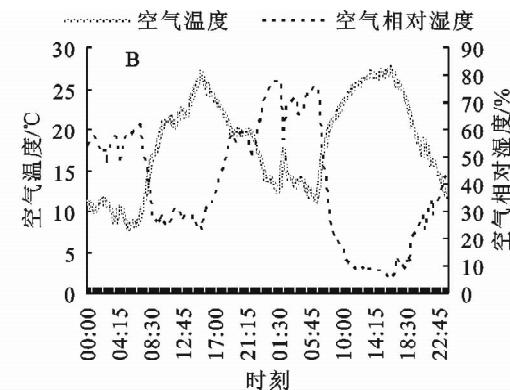
图3 液流速率与气象因子连日变化

Fig. 3 Diurnal fluctuation of sap flow velocity and meteorological factors

2.4 核桃树干液流月变化

图4可以看出,核桃花期的4月,液流已经启动,峰值达到 $40.48 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$;5月进入果实生长期,叶面积进一步增大,生殖生长和营养生长均旺盛,液流速率进一步提升,峰值达到 $53.47 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$;但6月和上7月的测定结果显示,尽管辐射强度等气象因子更加强烈,但液流速率反而有所下降,分析其原因可能是土壤水分条件胁迫所致(图2),进入下7月,随着降雨量的增加,土壤含水量迅速上升,液流速率也上升很大幅度,分析典型晴天耗水量可以看出,下7月与上7月相比,耗水量增加了1.9倍(表1),8月仍然保持较高的液流速率;9月果实已经基本成熟,耗水量相对较少;10月生命活动趋于缓慢,并且开始落叶,液流速率进一步下降。

综合分析各月的耗水量(表1)可以看出,以5月最高,8月其次,10月最低,那么为什么水分条件和气象条件均好的8月耗水量会小于5月,分析其原因除了5月生殖生长比较旺盛影响外,更重要的



是8月多数为阴雨天气,晴天仅7 d,而5月则有16个典型晴天,所以影响了该月总耗水量,单就典型晴天而言,8月要比5月高出很多。

蒸腾是植物耗水的主要方式,一般可以将蒸腾耗水视为植物的总耗水。在试验区,不存在灌水条件,降水是核桃林地水分的唯一来源,研究表明2005年核桃林地降水与蒸腾的比例为1.90,说明周年降水完全可以满足核桃蒸腾耗水的需求,但由于降水主要集中在7~9月,供求比各月间差异很大。在2005年,下7月和8、9月,降水量和蒸腾量比均大于3,说明降水能够充分满足此期核桃蒸腾所需,同时也说明有大量的水分被浪费掉;6月降水量与蒸腾量比略大于1,水分供求基本平衡;但4月、5月、上7月和10月降水量与蒸腾量比小于1,特别是4月和10月,不及蒸腾量的1/3,供不应求。

2.5 液流速率与气象因子之间的关系

建立气象因素与树干液流之间的相关关系,不仅可以揭示气象因子对树木水分平衡状况的影响,

而且还可以根据气象因素来估算树木的蒸腾耗水,

为水资源合理配置提供科学依据。

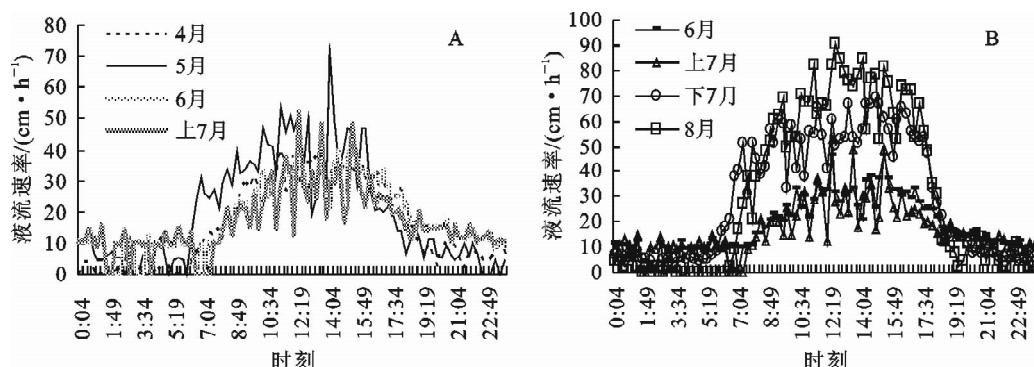


图 4 核桃树干液流速率月变化

Fig. 4 Monthly variation of sap flow velocity of *J. regia*

表 1 生长期(4—10月)蒸腾量和降雨量

Table 1 Comparison between of water consumption and rainfall

项目	4月	5月	6月	上7月	下7月	8月	9月	10月
蒸腾量/mm	21.74	46.42	39.85	16.47	14.97	43.75	26.58	20.90
降雨量/mm	11.0	41.0	43.3	12.1	90.2	152.3	85.5	3.3
降雨量:蒸腾量	0.56	0.88	1.09	0.73	6.03	3.48	3.22	0.16
典型晴天日耗水量/mm	1.68	2.17	2.05	1.73	3.28	3.18	1.78	1.03

通过对液流速率和辐射强度、空气温度、相对湿度之间进行相关分析(表 2),结果显示,液流速率与 3 个气象指标之间均达到了 0.01 水平相关,相关系数分别是 0.864、0.891、-0.870。考虑到气象因子之间的自相关性,因此取任一气象因子(而控制其他独立气象因子)与液流进行偏相关分析更能准确体现各因子对液流的影响。由表 2 可以看出液流速率与辐射强度、相对湿度和空气温度的偏相关系数 r 分别为 0.533 4、0.574 9、-0.489 7,偏相关系数的显著性概率均为 0.000,说明各气象因子对液流都有较大影响,尤其是空气温度和辐射强度。

表 2 液流速率与各气象因子变化的偏相关分析

Table 1 Analysis of partial correlations between sap flow and meteorological factors

控制变量	分析变量	液流速率	
		偏相关系数	Sig.
空气温度和相对湿度	辐射强度	0.533 4	0.000
辐射强度和相对湿度	空气温度	0.574 9	0.000
辐射强度和空气温度	相对湿度	-0.489 7	0.000

3 结论与讨论

平山县 2005 年总降雨次数达 50 次,降水量为 436.1 mm,降水主要集中在 7 月下旬至 8 月,干湿季明显,降雨量的 71.5% 集中于 7 月中旬以后,这和周金池^[6]对平山多年气象因子的分析一致。受降

水和植被蒸散的影响,7 月中旬之前,土壤含水量呈现一种缓慢降低的趋势,而后进入雨季,土壤含水量迅速上升,于 8 月达到峰值,而后呈现一种相对稳定状态至生长及结束。

树干液流存在明显的昼夜变化规律,并且因树种和环境因子的影响呈现单峰形或双峰形。如张小由^[7]等对胡杨(*Populus euphratica*)的研究结果指出胡杨白天液流呈明显单峰形曲线;马长明^[8]对官厅库区山杨(*P. davidiana*)树干液流研究表明,液流速率存在明显的昼夜变化规律,并且在根压作用下存在微弱的夜间液流。本研究结果显示,核桃树干液流速率存在明显的昼夜变化规律,呈单峰形曲线,白天液流速率较大,变化幅度大,夜晚存在一定的液流,与上述研究结果一致;并且研究还得出,晴天液流启动相对较早,停止较晚,日变化幅度较大,流量大。相关研究也得到类似结果,熊伟^[9]等对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)树干液流研究表明,阴、晴 2 种典型天气条件下,树干液流变化趋势一致,但晴天液流要明显大于阴天液流;严昌荣等^[10]对核桃楸(*Juglans mandshurica*)研究表明,白天的树干液流变化幅度较大,夜晚比较稳定;Pasquale^[11]等的研究也表明橄榄树(*Canarium album*)晴天树干液流变化幅度大,多云天气条件下液流变化幅度小。

从样方整体耗水量分析,耗水量大小顺序依次为 5 月 > 8 月 > 6 月 > 7 月 > 9 月 > 4 月 > 10 月,降水量大小顺序依次为 8 月 > 7 月 > 9 月 > 6 月 > 5 月

>4月>10月。5月核桃生命活动比较旺盛,生殖生长和营养生长竞争激励,耗水量较大,这和孟平^[12]对苹果的研究结果相一致。但以典型晴天耗水量来计算的话,仍然以水分条件和气象因子均较好的8月和7月耗水量较大,大小顺序依次为8月>7月>5月>6月>9月>4月>10月。

下7月和8、9月,降水量和蒸腾量比均大于3、6月降水量与蒸腾量比略大于1,但4、5月、上7月和10月降水量与蒸腾量比小于1。但降水量与蒸腾量比值更重要的是说明此期土壤水分的供求情况,不能完全靠其来定义是否对林木蒸腾造成胁迫,如在本研究中,4月和10月的降水量与蒸腾量比均小于1,但不能据此而言这2个月土壤水分对其胁迫比较严重,因为,这2个月的土壤水分基础较好,相反6、7月降水量与蒸腾量比大于1,也不能严格的说土壤水分能够满足林木需求,不存在胁迫情况。如果这样的话就需要降雨的合理分配和充足水分供应下的潜在耗水量2个条件来共同体现。

树干液流和气孔运动直接相关,影响气孔运动的环境因子对液流速率起着较大作用,直接影响着液流的启动和停止时间,本研究结果显示,核桃树干液流的启动、峰值和停止时间与太阳辐射相比要滞后0~2 h,即它们之间存在时滞效应,这在其他树木的树干液流研究中也发现类似规律,如徐军亮^[13]等对油松(*Pinus tabulaeformis*)的树干液流研究表明,树干液流滞后于太阳辐射0~3 h;赵平^[14]等的研究表明,马占相思(*Acacia mangium*)树干液流比太阳辐射滞后40~110 min;赵文飞^[15]等则进一步指出麻栎(*Quercus acutissima*)树干上、中和下部边材液流与太阳净辐射变化的滞后时间为80、20 min和30 min,与空气温度的滞后时间分别为60、130 min和110 min,与空气相对湿度的滞后时间分别为170、160 min和90 min。这和本研究结果基本一致。本研究通过对液流速率和辐射强度、空气温度、相对湿度之间进行相关分析和偏相关分析,相关系数分别是0.864、0.891、-0.870;偏相关系数分别为0.533 4、0.574 9、0.489 7,均达到0.01水平极显著性相关,相关性大小依次为空气温度、辐射强度、相对湿度。李海涛^[16]等对湿地松的研究也得到类似结果。

参考文献:

- [1] 孟全省,谭鹏,靳爱仙.对退耕还林后续产业发展问题的思考[J].西北林学院学报,2005,20(4):181-185.
MENG Q S, TAN P, JIN A X. On the Development of the Follow-up Industry in the Grain for Green[J]. Journal of northwest forestry university, 2005,20(4):181-185. (in Chinese)
- [2] 黄永青,麻保林,石长春,等.榆林市退耕还林后续产业发展研究[J].西北林学院学报,2006,21(6): 190-193.
HUANG Y Q, MA B L, SHI C C, et al. A Study on follow-up industrial development after conversion of cropland to forestland in Yulin[J]. Journal of northwest forestry university, 2006,21(6): 190-193. (in Chinese)
- [3] 马长明,翟明普,王海峰,等.退耕区主要树种苗木耗水特性的研究[J].西北林学院学报,2007, 22(1):15-19.
MA C M, ZHAI M P, WANG H F, et al. A seedling water consumption characteristics of the main trees in the "Green for grain project" areas[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007,22(1): 15-19. (in Chinese)
- [4] 奚如春.油松侧柏元宝枫蒸腾耗水的空穴栓塞和水容调节机制[D].北京:北京林业大学博士论文,2006.
XI R C. Studies on the modulation mechanisms of water consumption of water capacitance and xylem cavitation and embolism in three tree Species[D]. Beijing: Beijing Forestry University. 2006. (in Chinese)
- [5] 夏桂敏,康绍忠,李王成,等.甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J].生态学报,2006,26(4): 1186-1193.
XIA G M, KANG S Z, LI W C, et al. Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Caragana korshinskyi* on the arid desert region in Shiyang river basin of Gansu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(4): 1186-1193. (in Chinese)
- [6] 周金池.平山退耕还林区林地水肥状况及其改良技术的研究[D].北京:北京林业大学博士论文,2008.
ZHOU J C. Study on the Water-fertility and their improving technology on reusing farmland for forest in Pingshan[D]. Beijing: Doctoral dissertation of Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)
- [7] 张小由,龚家栋,周茅先,等.胡杨树干液流的时空变异性研究[J].中国沙漠,2004,24(4):489-792.
ZHANG X Y, GONG J D, ZHOU M X, et al. Spatial and temporal characteristics of stem sap flow of *populus euphratica* [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24 (4): 489-792. (in Chinese)
- [8] 马长明,管伟,叶兵,等.利用热扩散式边材液流探针(TDP)对山杨树干液流的研究[J].河北农业大学学报,2005,25(1):39-43.
MA C M, GUAN W, YE B, et al. Measurement of the sap-wood flow of *populus davidiana* with thermal dissipation sap flow probe(TDP) [J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2005,25(1):39-43. (in Chinese)
- [9] 熊伟,王彦辉,徐德应.宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J].林业科学,2003,39,(2):1-7.
XIONG W, WANG Y H, XU D Y. Regulations so water use for transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in southern ningxia hilly area[J]. Scientia Silvae Sinicae,2003,39,(2):1-7. (in Chinese)
- [10] 严昌荣,ALEC D,韩兴德,等.北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究[J].生态学报,1999,37(6):793-797.
YAN C R, ALEC D, HAN X G, et al. A study on sap flow of *Juglans mandshurica* of growth season in deciduous broadleaf forest Beijing Mountain area[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999,37(6): 793-797. (in Chinese)

(下转第49页)

- [37] 索茂荣,杨峻山.向日葵属植物倍半萜类化学成分及其生物活性研究概况[J].中草药,2006,37(1):157-137.
- [38] 吴新安,花日茂,岳永德,等.植物源抗菌、杀菌活性物质研究进展(综述)[J].安徽农业大学学报,2002,29(3):245-249.
- [39] 李玉平.菊科植物杀菌活性系统筛选的初步研究[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2001.
- [40] 范青山,肖小年,余世望.我国抗菌植物资源研究与开发利用[J].自然资源,1995,(16): 20-24.
- [41] 李玉平,冯俊涛,邵红军,等.25种菊科植物提取物对3种植物病原菌的药效试验[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(4):123-126.
- [42] 凌冰,张茂新,庞雄.飞机草挥发油对真菌和昆虫的生物活性及其化学成分研究[J].天然产物研究与开发,2003,15(3):183-187.
- [43] 冯俊涛.大花金挖耳杀菌作用研究[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2006.
- [44] 余鑫平.小花假泽兰杀菌活性成分研究[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2006.
- [45] 郝彩琴,杜晓峰,庄世宏.小花假泽兰精油化学成分及其抑菌活性初步研究[J].西北植物学报,2007,27(10):2097-2103.
- [46] 屠豫钦.天然农药的研究利用——机遇与问题[J].世界农药,1999,21(4):4-12.
- [47] 周红啼.高等植物源农药[J].农药译丛,1994,6(2):1-6.
- [48] ZOBEL A M. Identification of eight *Coumarinus* on leaf surfaces[J]. J. Chem. Ecology, 1996,17(9):1859- 1869.
- [49] 杨秀娟,何玉仙.国外利用杀线虫植物防治植物寄生线虫[J].世界农业,1998(4):37.
- [50] 杨玉萍,李艾莲.植物源杀菌剂研究进展[J].农药市场信息,2006(6):12-13.
- [51] 孙汉董,赵勤实.防治心脑血管疾病药物——灯盏细辛酚的研究与开发[J].化学进展,2009,21(1):77-83.
- [52] 张宏利,冯俊涛,陈安良,等.秦岭山区204种植物对粘虫生物活性测定[J].西北林学院学报,2004,19(3):92- 94.
- [53] 朱玮,贾夏,张鞍灵,等.刺楸属植物化学成分及生物活性研究进展[J].西北林学院学报,2004,19(3):119- 124.

(上接第29页)

- [11] PASQUALE G, GIOVANNI G. Sap flow of several olive trees estimated with heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49:9-20.
- [12] 孟平.苹果耗水特征及水分胁迫诊断预报模型研究[D].长沙:中南林学院博士论文,2005.
- MENG P. Characteristics of apple tree transpiration and models for prediction and diagnosis of water stress [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2005. (in Chinese)
- [13] 徐军亮,马履一,阎海平.油松树干液流进程与太阳辐射的关系[J].中国水土保持科学,2006,4(2): 103-107.
- XU J L, MA L Y, YAN H P. Relationship between process of sap flow of *Pinus tabulaeformis* sand solar radiation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 103-107. (in Chinese)
- [14] 赵平,饶兴权,马玲,等.马占相思树干液流密度和整树蒸腾的个体差异[J].生态学报,2006,26(12): 4050-4058.
- ZHAO P, RAO X Q, MA L, et al. The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4050-4058. (in Chinese)
- [15] 赵文飞,王华田,亓立云,等.春季麻栎树干边材木质部液流垂直变化及其滞后效应[J].植物生态学报,2007,31(2):320-325.
- ZHAO W F, WANG H T, QI L Y, et al. Spatial variation of sap flow of *Quercus acutissima* and its lag effect during spring[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version). 2007,31(2)320-325. (in Chinese)
- [16] 李海涛,向乐,夏军,等.应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究[J].林业科学,2006,42(10): 31-38.
- LI H T, XIANG L, XIA J, et al. Applying the heat dissipation technique to study the sap flow of *Pinus elliottii* in the red earth Area of Subtropical China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006,42(10):31-38. (in Chinese)