

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 2013

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)
最佳管理措施评估方法研究进展 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)
灌木年轮学研究进展 芦晓明, 梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 王兆国, 王传宽 (1456)
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 孟 舟, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)
第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)
中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208171160

王艳兵, 德永军, 熊伟, 王彦辉, 李振华, 刘千. 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局. 生态学报, 2013, 33(5): 1375-1385.

Wang Y B, De Y J, Xiong W, Wang Y H, Li Z H, Liu Q. The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1375-1385.

华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局

王艳兵^{1,2}, 德永军¹, 熊伟², 王彦辉^{2,*}, 李振华², 刘千^{2,3}

(1. 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所

国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要:在宁夏六盘山北侧半干旱区的叠叠沟小流域,采用热扩散探针法在2011年生长季监测了华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林的树干液流速率,分析了夜间树干液流和补水量的变化特征及与气象、土壤水分等环境因子的关系。结果表明:树干液流速率日变化表现为典型的单峰宽峰曲线,且整个生长季均存在微弱的夜间液流,一般表现为逐渐减小,特别是在晴天,且晴天的变幅显著大于雨天。除生长季中期雨天夜间液流平均速率显著高于晴天,生长季初期及末期雨天与晴天的差异并不显著。生长季内,夜间树干补水量为11.03 mm,占总蒸腾量的7.22%;5月份的树干补水量最大(4.19mm),其他月份的树干补水量明显减小,在0.9—1.7 mm的范围波动。但不同月份间的补水贡献率存在明显差异,表现为生长季末期(9、10月)>初期(5月)>中期(6—8月)。相关分析表明,日补水量与各气象因子关系不大,仅与降水量显著正相关($P<0.05$),与土壤含水率、日间蒸腾量、日蒸腾总量极显著正相关($P<0.01$)。夜间补水的月蒸腾贡献率与月均土壤含水率、月均气温、月均日间蒸腾量、月总蒸腾量等显著相关($P<0.05$);而夜间补水的日蒸腾贡献率与日最高气温、日均气温、日间蒸腾量、日均饱和水汽压差、日总蒸腾量、日均太阳辐射强度、日最低气温、日均空气相对湿度、日降水量、土壤含水率等极显著相关($P<0.01$),经逐步回归分析建立了日补水量蒸腾贡献率与环境因子的多元线性模型。

关键词:六盘山;华北落叶松;人工林;夜间液流;补水量;环境因子

The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation

WANG Yanbing^{1,2}, DE Yongjun¹, XIONG Wei², WANG Yanhui^{2,*}, LI Zhenhua², LIU Qian^{2,3}

1 Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University Huhhot 010019, China

2 Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry; Beijing 100091, China

3 College of Resource & Environment, Gansu Agricultural University Lanzhou 730070, China

Abstract: To fully understand the forest transpiration processes and evaluate the contribution of nocturnal sap flow to total transpiration in dryland region, the sap flow velocity in the stems of 4 sample trees of a 30m×30m *Larix principis-rupprechtii* plantation was continually monitored with thermal dissipation probes (TDP) during the growing season (May to October) of 2011, at the semi-arid area (with an annual precipitation of 449 mm, but mostly concentrated in the summer months from July to September) of the north part of Liupan Mountain, NW China. Then, the sap flow density data measured in individual sample trees were used to calculate the sap flow amount in daytime, nighttime and whole day, and up-scaled to the stand level by using the index of sapwood area. Then, the dynamics of nocturnal sap flow and stem water recharge as

基金项目:林业公益性行业科研专项(201104005-02, 200904056);“十二五”国家科技计划课题(2011BAD38B0503, 2012BAD22B030102);国家自然科学基金(41071023)

收稿日期:2012-08-17; 修订日期:2012-12-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

well as their relations with environmental factors were analyzed. The daily variation of sap flow demonstrated a typical wide single-peak curve. The nocturnal sap flow existed in the whole growing season. The sap flow velocity in nighttime was notably lower than that in daytime and always fluctuated above zero. Furthermore, the nocturnal sap flow velocity decreased with time, and was significantly higher in the first half of night than that in the second half of night, especially for sunny days with higher transpiration and stem water deficit. Thus, the variation of nocturnal sap flow was significantly larger in sunny days than that in rainy days. The total amount of nocturnal water recharge in the stand studied was 11.03 mm during the whole growing season, which accounted for 7.22% of the total transpiration. The monthly stem water recharge and its ratio to total transpiration differed obviously in the months observed. The absolute stem water recharge was highest in May, with a value of 4.19 mm; but obviously decreased in other months and fluctuated in the range of 0.9—1.7 mm. However, the ratio of nocturnal water recharge to total transpiration was higher in the later period (September and October) compared in the earlier period (May) and middle period (June to August) of the growing season. The correlation analysis showed a less dependency of daily nocturnal water recharge on the daily weather parameters, but it was significantly correlated with the precipitation ($P < 0.05$) and soil moisture ($P < 0.01$) as it indicates the soil water availability, and with the diurnal and daily total transpiration ($P < 0.01$) as they indicate the water demand pressure. The monthly ratio of stem water recharge to total transpiration was significantly correlated with the monthly averages of soil moisture, air temperature, diurnal and total transpiration ($P < 0.05$). But the ratio of stem water recharge to total transpiration in daily scale was influenced by more factors than in the month scale, it was significantly correlated with the daily parameters of maximum and minimum as well as mean air temperature, diurnal and total transpiration, mean air saturation vapor pressure deficit, mean solar radiation intensity, mean air humidity, daily precipitation, daily soil moisture ($P < 0.01$). Finally, the regression equation to relate the daily nocturnal water recharge's contribution to total transpiration with environmental parameters was established, for quantitatively predicting the behavior of nocturnal water recharge in *Larix principis-rupprechtii* plantation under changing environment.

Key Words: *Larix principis-rupprechtii*; plantation; nocturnal sap flow; stem water recharge; environmental factors; Liupan Mountain

由于树木夜间液流活动微弱,其占全天总量的比例较小,对整树蒸腾量的估计一直大都基于“夜间水分零消耗”的假设^[1-2]。事实上,树木夜间液流对蒸腾的贡献因树种而异,如桉属(*Eucalyptus*)植物为5%—7%,而柽柳(*Tamarix chinensis*)可多达36.6%^[3-6]。忽略夜间液流,会低估林木实际耗水量,进而影响水资源管理和决策。

夜间液流主要用于蒸腾或被动的呼吸作用^[7],以及树干补水^[3, 5]和养分运输^[7-8],以调节树体的水分养分生理平衡^[9-11]。有关研究表明,饱和水汽压差是影响夜间液流的最主要因子^[3-5, 12],其次为气温^[12]、风速^[4]、土壤水势^[6]等,其它环境因子影响较小。目前国内的树木夜间液流研究尚处起步阶段,陈立欣^[13]、胡兴波^[14]、王华^[15]、金鹰^[16]等人所研究树种均存在微弱的夜间液流,但是不同树种相互差异较大,陈立欣^[13]认为夜间液流与饱和水汽压差、风速显著相关,但胡兴波^[14]、王华^[15]等研究认为夜间液流与环境因子相关关系不显著;王华^[15]认为夜间水分补充量对于整树蒸腾量的贡献因季节与树木径阶不同而有明显差别,金鹰^[16]的研究表明树干储水对蒸腾的贡献因树种而不同,胡兴波^[14]的研究发现不同树种夜间液流对蒸腾的贡献对环境因子的敏感程度不同。但这些研究多集中于湿润半湿润地区,其结论可能难以解释干旱区树木的相关特征。

在我国西北广大干旱半干旱地区,降水少而不均,植被建设和生态恢复必须基于区域水资源承载能力和对林水关系的深刻认识^[17]。这就需要准确确定森林耗水能力和深入理解林木应对环境胁迫的调控机制。基于此,本文在六盘山北侧针对当地的主要造林树种华北落叶松,测定和分析了夜间树干液流特征及其与气象、

土壤水分等环境因子的关系,力图回答以下问题:1)当地华北落叶松夜间液流速率的变化规律及驱动因子;2)影响夜间与日间液流变化的环境因素差别;3)树干夜间补水量对生长季蒸腾的贡献。本研究的目的是深入揭示树木蒸腾耗水规律,为干旱缺水地区的植被建设和森林健康经营提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点为位于黄土高原中西部的六盘山北侧叠叠沟小流域($106^{\circ}4'55''-106^{\circ}9'15''E$, $35^{\circ}54'12''-35^{\circ}58'33''N$),隶属宁夏回族自治区固原市。海拔 $1\ 975-2\ 615\ m$ 。具典型大陆性季风气候,年均气温 $6-7\ ^{\circ}C$,无霜期130 d左右,年均降水量449 mm,主要集中在7—9月份。植被分区在水平带上位于温带草原区的南部森林草原地带,是森林草原向典型草原的过渡区。由于近代过度开垦和放牧,原始植被破坏严重,现有森林主要是华北落叶松人工林,多为20世纪80年代以后逐渐营造的;还有少量散生的榆树(*Ulmus pumila*)、杨树(*Populus*)和柳树(*Salicaceae willow*)等。土壤类型以灰褐土为主,黄土次之。

2 研究方法

2.1 样地设置

在叠叠沟小流域下游选择生长状况具有代表性的华北落叶松人工林,建立1个 $30\ m\times30\ m$ 的样地($35^{\circ}58'18''N, 106^{\circ}08'50''E$)。该样地的海拔 $2\ 055\ m$,位于阴坡(北偏西 30°)下部,坡度为 11° ;现存林分密度为 $1600\ \text{株}/\text{hm}^2$,林龄25a,林冠郁闭度0.95,平均树高 $10.1\ m$,平均胸径 $10.56\ cm$ 。林下灌木层不明显,盖度仅约2%,生长有极少量沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、绣线菊(*Spiraea sp.*)等。林下草本层发育较好,盖度80%,主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、羽叶风毛菊(*Saussurea maximowiczii*)、白颖苔草(*Carex rigescens*)等。土层较厚,大于 $2\ m$ 。

2.2 树干液流速率测定

在样地内选择4株生长良好、干形较直的华北落叶松优势木作为液流观测样树,其基本特征见表1。在树干北面胸高处(距地约 $1.3\ m$)各安装1组SF-L热扩散探针(德国Ecomatik公司产),于2011年生长季(5—10月份)期间连续测定树干液流速率,并由DL2e数据采集器(英国Delta-T公司产)每隔5 min自动采集1次数据。SF-L树干液流测定仪是基于热扩散原理,它由4个探针和1个恒流电源组成。各探针在树上的安装位置如2011年摄于六盘山(图1),探针长度 $2\ cm$ 。 S_0 和 S_1 两个探针插入树干上下不同部位, S_0 探针用恒流加温,两个探针之间形成温差。水流上升时,带走热量,两个探针之间温差变小。温差和树干流之间具有函数关系,通过测量温差算出树干液流通量。 S_2 和 S_3 两个探针测量树干横向温度梯度,用以修正 S_0 和 S_1 之间非树干液流带来的温差。为避免太阳辐射的影响,探头用铝箔覆盖。



图1 SF-L 树干液流仪
Fig. 1 SF-L sap flow instrument

表1 叠叠沟小流域内4株样树的基本特征

Table 1 Features of 4 sample trees growing in the small catchment of Diediegou

样树编号 Sample tree number	树高/m Height	胸径/cm DBH	边材厚度/cm Sapwood depth	边材面积 ^① /cm ² Sapwood area	冠幅直径/m Canopy diameter	冠长/m Canopy length
8	12.9	15.2	2.79	108.78	4.0	9.9
46	12.8	16.5	2.92	124.71	5.0	9.4
49	12.6	14.6	2.73	101.72	3.9	10.3
50	12.4	11.5	2.39	68.36	2.9	9.5

①边材面积计算公式为: $A_s = 1.17D^{1.6655}$ [18]

液流速率即液流通量密度(J_s , $\text{mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)的计算公式:

$$J_s = 0.714 \times [(d_{t_{\max}}/d_{t_{\text{act}}}) - 1]^{1.231} \quad (1)$$

其中:

$$d_t = T_{1-0} - (T_{1-2} + T_{1-3})/2 \quad (2)$$

式中, $d_{t_{\max}}$ 、 $d_{t_{\text{act}}}$ 均由式(2)计算得到, $d_{t_{\max}}$ 一般指夜间空气湿度为 100% 长达 2 d 或树干直径停止变化、处于相对稳定状态时算得的 d_t 值; T_{1-0} 、 T_{1-2} 、 T_{1-3} 分别为探头 S_0 与 S_1 间、 S_2 与 S_1 间、 S_3 与 S_1 间的温差(°C)。

由于本研究地区华北落叶松林刚进入中龄期,边材厚度较小(表1),探针长度基本能覆盖大部分边材,因此假设夜间液流速率随边材深度无明显变化。夜间树干补水量(夜间液流通量)是指当光合有效辐射为 0 时的时段液流通量;林分补水量是指样地内所有树木夜间液流通量与样地面积的比值。夜间液流提供的样树树干补水量(S_T , mL)和林分补水量(S_S , mm)计算公式^[15]为:

$$S_T = \sum J_{S_0} \times A_S \times t \quad (3)$$

$$S_S = \frac{\sum J_{S_0} \times A_S \times t}{1000 \times S} \quad (4)$$

式中, J_{S_0} 为光合有效辐射为 0 时的液流速率($\text{mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$); A_S 为样地内不同树木的树干边材面积(cm^2); t 为光合有效辐射为 0 的时段(min)(生长季初期、中期为 20:00—5:00, 生长季末期为 19:00—6:00); S 为样地面积(m^2)。树干补水量对蒸腾的贡献率(R_{tc} , %)的计算公式为:

$$R_{tc} = \frac{S_S}{T_t} \times 100\% \quad (5)$$

式中, T_t 为总蒸腾量即日液流总通量。

2.3 环境因子观测

在林外开阔处,架设 1 台 Weatherhawk- 232 自动气象站,对太阳辐射强度(S_r , W/m^2)、空气温度(T_a , °C)、空气相对湿度(RH , %)、风速(W_s , m/s)等进行同步监测,自记频率为 5 min/次,并利用 T_a 和 RH 计算空气饱和水汽压差(VPD , kPa),公式如下:

$$VPD = e_s - e_a = e_s - RH \cdot e_s = (1 - RH) \cdot e_s \quad (6)$$

其中:

$$e_s = 0.611 e^{\left(\frac{17.502T}{T+240.97}\right)} \quad (7)$$

另外,在样地内选取 5 处地点,安装专用的 PVC 管,采用 TRIME 管状土壤含水量测试仪测定 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层的体积含水率,每月 4 次,取其平均值为当月的土壤含水率,并采用 EQ15 型土壤水势仪连续测定样地内相同层次的土壤水势,自动采集频率为 5 min/次,利用相同层次的土壤水势与体积含水率之间的关系^[19],对体积含水率进行数值插补。并利用公式(8)计算生长季内各月份的水分亏缺度^[20]:

$$\text{土壤水分亏缺度} = (0.6 - \frac{\text{土壤含水率}}{\text{田间持水量}}) \times 100\% \quad (8)$$

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SAS 9.0 软件处理分析数据。

3 结果与分析

3.1 树干液流速率的日变化格局

树干液流的日变化为典型的单峰宽峰曲线(图 2),在 20:00 左右,光合有效辐射逐渐减弱至零后,树木停止了蒸腾,但仍能观测到明显的树干液流。依据 Goldstein 等^[21]的理论,此时的液流活动是树体在存储水分,以弥补日间蒸腾引起的水分亏缺^[15, 22-24]。

3.2 夜间液流特征及其影响因子

在生长季不同时期连续 3d 晴天时夜间液流速率均表现为前半夜(0:00 以前)大于后半夜(0:00 以后),特别是在生长季初期和中期(图 3)。这可能因为刚入夜时,经历了白天强烈蒸腾后的树木失水较多,体内水

势较低,根系与土壤间的水势差较大,因而前半夜树干液流速率较大;随着植物体内水分恢复,根系与土壤间的水势差逐渐减小,树干液流速率也随之降低。另外,生长季初期和中期前半夜液流速率的变化幅度比末期大,后半夜液流变幅很小且活动变弱。这种现象分别与生长季初期生理活动旺盛、生长季中期水热条件充沛导致日间蒸腾强烈、生长季末期植物逐渐停止生长使得蒸腾作用减弱有关。后半夜液流速率在生长季初期和末期分别为 $0.0096\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.0045\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 均明显高于中期 $0.0014\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。这可能与当地土壤水分的年内差别(表2)有关:生长季初期、末期的土壤含水率均高于中期,说明土壤水分不足是限制生长季中期夜间树干液流速率的重要因子。

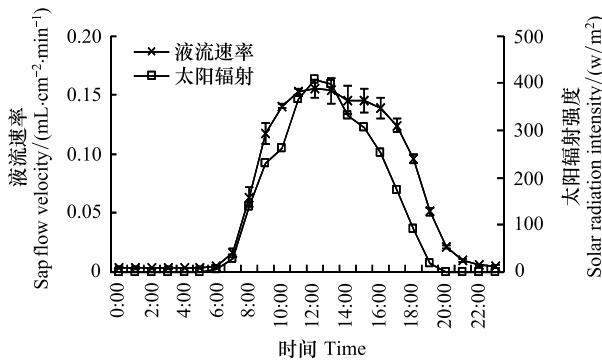


图2 2011年8月份华北落叶松树干液流速率及太阳辐射强度的日变化

Fig.2 Daily variations of averaged sap flow velocity of sample trees and solar radiation intensity in Aug. 2011

生长季不同时期雨天的夜间液流速率变化均较平缓(图4),这可能因降水后土壤水分状况得到改善,树干能相对容易地在白天吸收水分,加之雨天蒸腾减弱,从而造成树体水分亏缺较低。另外,雨天夜间液流速率生长季中期为 $0.0114\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 明显高于初期和末期 $0.0102\text{ 和 }0.0056\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$,这主要是由于生长季中期日间蒸腾较强,而土壤水分状况(表2)较差,导致树干水分亏缺严重,雨天时土壤水分状况迅速得到改善,土壤水分不再是夜间液流的限制因子,因此树干能够充分吸收水分。

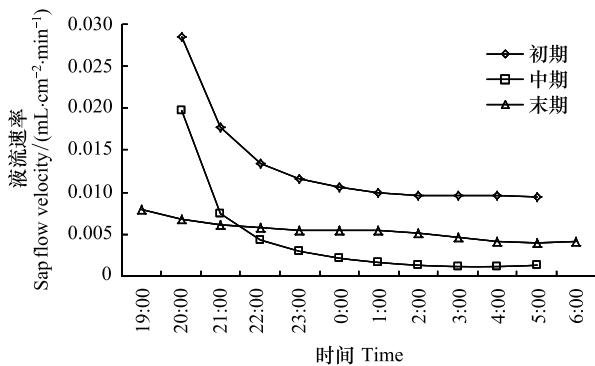


图3 生长期内不同生长时期晴天时的夜间液流速率变化

Fig.3 Variations of averaged sap flow velocity during nighttime of clear days in different periods of growing season

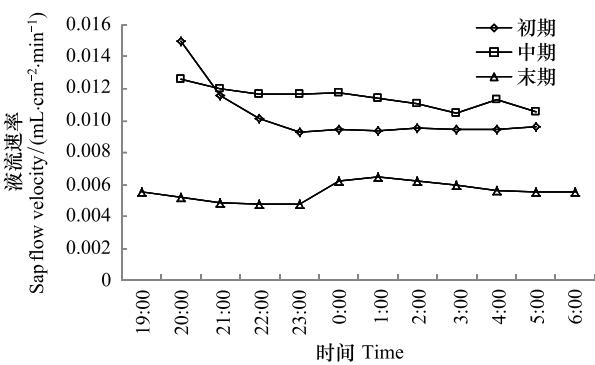


图4 生长期内不同生长时期雨天时的夜间液流速率变化

Fig.4 Variations of averaged sap flow velocity during nighttime of rainy days in different periods of growing season

表2 生长期内各月土壤体积含水率

Table 2 The monthly soil moisture in growing season

月份 Month	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October
土壤体积含水率 Soil moisture/%	24.34	19.10	21.53	21.52	29.43	32.57
土壤水亏缺度 Soil moisture deficit degree/%	8.67	19.72	14.60	14.62	2.06	-8.68

夜间液流速率均值除生长季中期雨天($0.0114\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)与晴天($0.0043\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)的差异较大外,初期及末期差异不大(图3,图4)。说明在生长季中期,树体水分长期处于亏缺状态,一旦土壤水分状况得到改善,树木就能充分发挥其强大的储水能力,及时补充树体水分,避免树干水分持续降低后产生气穴及

栓塞影响树体内的水分运输。

与日间液流速率和日间各影响因子均相关较好^[25]的情况不同,夜间液流速率仅与土壤含水率显著相关(表3)($P=0.022$),说明夜间液流速率的主要限制(驱动)因子是土壤含水率,这与日间液流速率显著不同。王华^[7]等对马占相思、胡兴坡^[14]等对白榆的夜间树干补水量与环境因子的关系研究也得出了相似结论。而其与饱和水汽压差相关关系并不显著,并不能解释夜间液流变化,说明此时的液流主要用于树干补水。

表3 夜间树干液流速率与环境影响因子的相关分析

Table 3 Correlation analysis between nocturnal sap flow velocity and environmental factors

影响因子 Impact factors	ESR	P	$T_{n\text{mean}}$	$T_{n\text{min}}$	$T_{n\text{max}}$	RH_n	$W_{n\text{mean}}$	VPD_n	SM
相关系数 Correlation coefficient ($n=171$)	0.003	0.141	-0.085	-0.090	-0.078	-0.036	0.063	0.011	0.175 *
显著水平 Significant degree	0.964	0.066	0.271	0.240	0.309	0.639	0.413	0.883	0.022

ESR: 日太阳辐射强度 Daily solar radiation intensity (W/m^2) ; P: 日内降雨量 Daily precipitation (mm) ; $T_{n\text{mean}}$: 夜间平均气温 Nocturnal mean air temperature ($^\circ\text{C}$) ; $T_{n\text{min}}$: 夜间最低气温 Nocturnal minimum air temperature ($^\circ\text{C}$) ; $T_{n\text{max}}$: 夜间最高气温 Nocturnal maximum air temperature ($^\circ\text{C}$) ; RH_n : 夜间空气相对湿度 Nocturnal air relative humidity (%) ; $W_{n\text{mean}}$: 夜间平均风速 Nocturnal mean wind speed (m/s) ; VPD_n : 夜间均饱和水汽压差 Nocturnal mean saturation vapor pressure deficit (kPa) ; SM: 土壤含水率(1m 均值) Soil moisture in 1 m layer(%)

3.3 生长季夜间补水量及对蒸腾的贡献

3.3.1 夜间补水量日际变化及日蒸腾季节变化

生长季内树干夜间补水量变动在 0.005—0.336 mm/d, 平均为 0.053 mm/d, 其变化趋势与降水量有很大关系(图5), 即除生长季初期土壤含水率较高的情况外, 每逢一场降水后, 树干夜间补水量都会出现一个明显的峰值, 而后逐渐恢复到降水前的水平。这说明, 降水对树干补水的影响也是通过提高土壤含水量来间接实现的。胡兴波^[14]等发现白榆的夜间补水量与日降雨量呈正相关; 陈立欣等^[13]对雪松、大叶榉、丝绵木、水杉的研究也发现, 降雨当天及之后的几天, 夜间液流总量均出现明显增长。

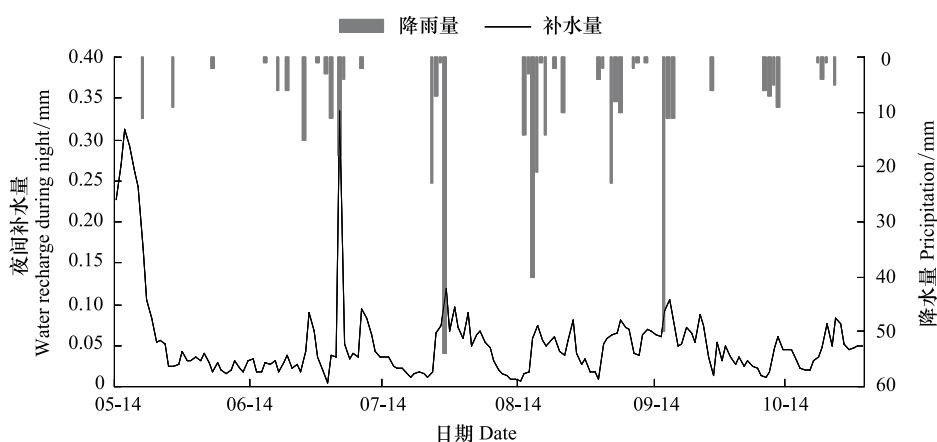


图5 生长季降水量与夜间补水量的变化

Fig. 5 Variations of precipitation and nocturnal water recharge in growing season

生长季内不同月份间样地日均蒸腾量波动较大(表4), 5月份最大(1.55 mm/d), 10月份最小(0.19 mm/d), 这是由年内树木生长发育规律及同时期土壤含水率(表2)决定的。生长季初期树木生理活动旺盛, 而且土壤水分较好, 因此5月份日均蒸腾量最大; 生长季中期(6—8月)虽然土壤水分较差, 但此时叶面积指数最大, 导致日均蒸腾量高于生长季末期(9、10月); 生长季末期土壤水分逐渐变好, 但随温度降低和针叶凋落及叶面积指数减小, 日均蒸腾量显著减小。

表4 生长期日均蒸腾量月际变化

Table 4 Monthly variation of the mean daily transpiration in growing season

月份 Month	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October
日均蒸腾量/(mm/d) Mean daily transpiration	1.55	0.83	0.75	0.98	0.60	0.19

3.3.2 影响夜间补水量的环境因子

夜间树干补水量与降水量显著正相关($P<0.05$)，与土壤含水率、日间蒸腾量、日蒸腾总量极显著正相关($P<0.01$)，但与其他环境因子的相关系数都很低(表5)，因为夜间液流速率仅与土壤含水率显著相关，而与太阳辐射强度、以及其他夜间气象因子相关性不大(表3)。可以认为，夜间树干补水量主要取决于日间蒸腾导致的树体水分亏缺程度及土壤含水率决定的补水能力。

表5 夜间树干补水量与可能影响因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis between nocturnal water recharge and possible influencing factors

影响因子 Effective factors	T_t	T_d	ESR	P	$T_{n\text{ amean}}$	$T_{n\text{ amin}}$	$T_{n\text{ amax}}$	RH_n	$W_{n\text{ mean}}$	VPD_n	SM
相关系数 Correlation coefficient ($n=171$)	0.480 **	0.401 **	-0.033	0.152 *	-0.135	-0.138	-0.130	-0.008	0.042	-0.029	0.224 **
显著水平 Significant degree	<0.0001	<0.0001	0.671	0.047	0.079	0.072	0.090	0.922	0.582	0.703	0.003

T_t : 日总蒸腾量 Daily total transpiration (mm); T_d : 日间蒸腾量 Diurnal transpiration (mm)

对不同层次土壤含水量与树干补水量的进一步分析发现树干补水量与0—10、10—20、20—40cm处的土壤含水量显著相关(表6)，这与华北落叶松的主要根系分布层一致，说明0—40cm土层的含水量是夜间树干液流的主要限制(驱动)因子。

表6 树干补水量与不同层次土壤含水量的相关分析

Table 6 Correlation analysis between nocturnal water recharge and soil moisture of different layers

	土壤层次 Soil layer/cm					
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
相关系数 Correlation coefficient ($n=171$)	0.066 **	0.060 **	0.074 **	0.033	0.023	0.000
显著水平 Significant degree	0.004	0.010	0.001	0.156	0.321	0.986

3.3.3 夜间补水量的月际变化

5月份夜间总补水量达到了4.19 mm，说明夜间补水很多；而6、7、8月份夜间总补水量明显减小(图6)，说明生长季中期受到了不同程度的干旱胁迫限制。生长季不同月份的夜间补水量差异受多种影响因素，包括树木生长发育物候期、土壤含水率、气象指标等。在生长季初期(5月)，华北落叶松新叶萌生、枝梢快速伸展、生长最为旺盛，对水分需求很大，而且此时土壤含水率较高，因此夜间补水量最大；在生长季中期(6—8月)，虽然植物蒸腾需求较大，但受到土壤含水率较低的限制，夜间补水量反而低于生长季初期；在生长季末期(9—10月)，由于温度降低，树木逐渐停止生长，生理活动减弱，树体水分亏缺较轻，所以虽然该时期土壤含水率高于生长季中期，但是夜间补水量却与之相差不大。

3.3.4 夜间补水量对日蒸腾的贡献

树干夜间补水量对日蒸腾的贡献率的月份变化(图7)显示，生长季初期和末期明显高于生长季中期，这主要由于生长季初期夜间补水量较大及生长季末期日间蒸腾量较小引起的(表4、图6)。其中，最大贡献率出现在10月份，达20.36%，最小值出现在6月份，仅3.65%，极差16.71%，说明不同月份间的贡献率差异显

著。在生长季初期的5月份,气温较低,水热条件较差,但树干夜间补水量对总蒸腾的贡献率达到了9.01%,即此时期树干夜间补水量对树木维持正常生长和应对早春干旱胁迫起到了重要作用。在整个生长季,夜间补水量对总蒸腾的贡献为7.22%,说明夜间补水量起着重要作用,在进行树木耗水和水分循环研究时不容忽视。

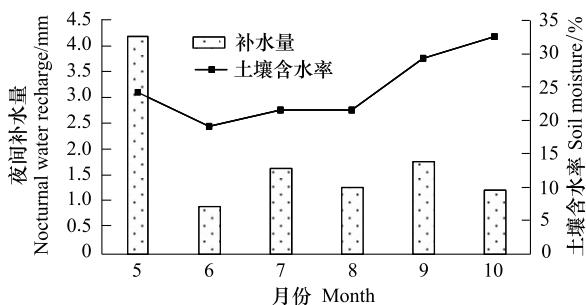


图6 不同月份夜间补水量与土壤体积含水率的变化

Fig. 6 Monthly variations of nocturnal water recharge and soil moisture

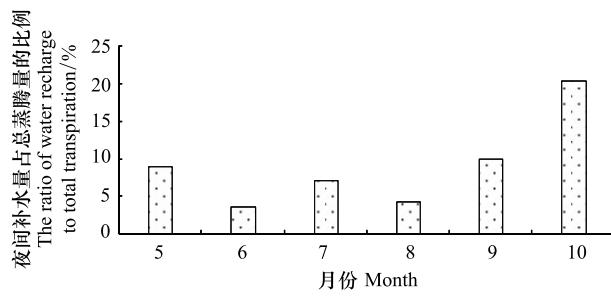


图7 夜间补水量占总蒸腾量百分比的月际变化

Fig. 7 Ratio of monthly nocturnal water recharge to monthly total transpiration

月均气温、土壤含水率、日间蒸腾量、总蒸腾量对夜间补水的月蒸腾贡献率的影响达到显著水平;与月均气温、饱和水汽压差、平均太阳辐射强度的相关系数为负值(表7),这是由于三者与日均液流速率正相关^[16]和对夜间补水量无显著影响,它们的升高导致日均液流速率、总蒸腾量、日间蒸腾量增大,因此导致蒸腾贡献率的减小。这与王华^[7]等对马占相思的研究结果基本一致,但影响因子排序存在一定差异,这与研究树种及研究地点气象特征差异有关。

表7 夜间补水量的月蒸腾贡献率与影响因子的相关分析

Table 7 Correlations between the ratio of monthly total nocturnal water recharge to total transpiration and effective factors

影响因子 Effective factors	$T_{m\text{mean}}$	RH_m	P_m	ESR_m	$W_{m\text{mean}}$	VPD_m	T_{mt}	T_{md}	SM_m
相关系数 Correlation coefficient ($n=6$)	-0.915*	0.283	-0.245	-0.611	0.075	-0.750	-0.851*	-0.872*	0.914*
显著水平 Significant degree	0.011	0.587	0.640	0.198	0.887	0.086	0.032	0.024	0.011

$T_{m\text{mean}}$:月均气温 Monthly mean air temperature(℃); RH_m :月均空气相对湿度 Monthly mean air humidity(%); P_m :月均降雨量 Monthly mean precipitation(mm); ESR_m :月均太阳辐强度 Monthly mean solar radiation intensity (w/m²); $W_{m\text{mean}}$:月均风速 Monthly mean wind speed (m/s); VPD_m :月均饱和水汽压差 Monthly mean saturation vapor pressure deficit (kPa); T_{mt} :月均日总蒸腾量 Monthly mean daily total transpiration (mm); T_{md} :月均日间蒸腾量 Monthly mean diurnal transpiration (mm); SM_m :月均土壤含水率 Monthly mean soil moisture (%)

夜间补水量对蒸腾贡献率的日际差异较大(图8),最小值为1.09%(8月12日),最大值为68.25%(10月20日)。总体上表现为生长季末期贡献率较大,与土壤含水率的变化趋势基本一致。在生长季中期,每当土壤含水率上升时,贡献率就明显增大,这说明生长季中期树木叶面积指数较大,日间蒸腾强烈,树木在遭受着剧烈的缺水胁迫,每当雨后土壤含水率增大时,树木就能充分发挥夜间液流的树干补水作用,导致贡献率明显变大。在生长季初期及末期,这种夜间补水量的蒸腾贡献率随土壤含水率增加而增大的变化较弱,这主要是由土壤水分状况和树木生长状况共同决定的。在生长季初期,虽然日均补水量较大,但树木迅速生长和土壤含水率较高导致日蒸腾量较大,因此蒸腾贡献率小于生长季末期;在生长季末期树木逐步停止生长,针叶也开始凋落,日蒸腾量较小,加之生长季末期土壤含水率一直维持在较高水平,造成夜间补水量的蒸腾贡献率较大。

除日均风速外,其他环境因子对夜间补水日蒸腾贡献率的影响均达到显著水平;其中与日最高气温、日均气温、日均饱和水汽压差、日均太阳辐射强度、日最低气温的相关系数为负值(表8),这是由于三者与日均液

流速率正相关^[26]和对夜间补水量无显著影响,它们的升高导致日均液流速率、日总蒸腾量、日间蒸腾量增大,因此导致蒸腾贡献率的减小。

通过对上述影响因子的逐步回归分析,建立了华北落叶松的树干补水量的日蒸腾贡献率(R_{tc} ,%)与主要影响因子的回归模型($R^2=0.6094$):

$$R_{tc} = -1.94759 T_{\text{amax}} + 0.62038 P + 1.51520 W_{\text{mean}} + 47.61393 \quad (9)$$

表8 夜间补水量的日蒸腾贡献率与影响因子的相关分析

Table 8 Correlations between the ratio of daily nocturnal water recharge to daily transpiration and effective factors

影响因子 Effective factors	T_{amean}	T_{amin}	T_{amax}	RH_d	P	ESR	W_{mean}	VPD	T_t	T_d	SM
相关系数	-0.683 **	-0.528 **	-0.729 **	0.519 **	0.419 **	-0.587 **	-0.111	-0.627 **	-0.605 **	-0.650 **	0.346 **
Correlation coefficient ($n=171$)											
显著水平	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.1466	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Significant degree											

T_{amean} : 日均气温 Daily mean air temperature(℃); T_{amin} : 日最低气温 Daily minimum air temperature(℃); T_{amax} : 日最高气温 Daily maximum air temperature(℃); RH_d : 空气相对湿度 Daily mean air relative humidity(%); P : 日内降雨量 Daily precipitation (mm); ESR : 日均太阳辐强度 Daily mean solar radiation intensity(w/m^2); W_{mean} : 日均风速 Daily mean wind speed (m/s); VPD : 日均饱和水汽压差 Daily mean saturation vapor pressure deficit (kPa); T_t : 日总蒸腾量 Daily total transpiration (mm); T_d : 日间蒸腾量 Diurnal transpiration (mm); SM : 土壤含水率 Soil moisture(%)

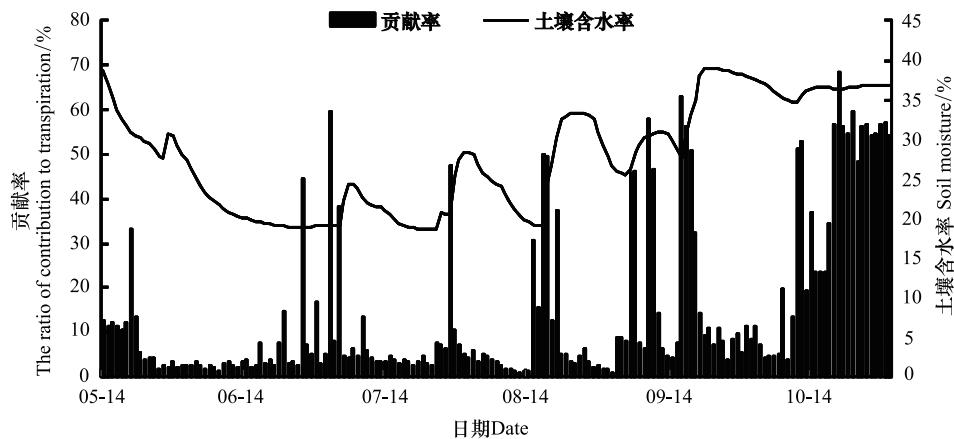


图8 夜间补水量蒸腾贡献率及土壤含水率的日变化

Fig. 8 Daily variations of ratio of nocturnal water recharge to total transpiration and soil moisture

4 讨论

4.1 华北落叶松夜间液流速率的驱动因子

Fisher^[12]、Moore^[3]、Phillips^[4] 和 Zeppel^[5]等对不同树种的研究发现,夜间树干液流与饱和水汽压差均显著相关,但本研究发现华北落叶松林夜间树干液流与饱和水汽压差并不相关,这可能是由于本研究地年降水量仅为449 mm,与上述研究地相比明显偏少;而且由于树种特性差异,一些树种夜间维持部分气孔开放,从而能够在出现足够的环境因子驱动的情况下进行夜间蒸腾^[27-28],而本研究的对象华北落叶松可能不存在夜间气孔蒸腾。Phillips^[4]研究发现桉属植物的夜间液流与风速显著相关,而本研究中夜间树干液流与风速不相关,这主要可能因本研究地属于半干旱区。Meinzer^[29]等认为风速在湿润环境中与液流显著相关,因为风速通过物理作用减弱了叶子及树冠的稳定边界层的作用,具有带走刚蒸腾出的水汽并同时用干燥空气代替的作用。由于本研究中饱和水汽压差和风速均不能解释华北落叶松的夜间液流变化,说明华北落叶松夜间液流主要用于树干补水。

4.2 华北落叶松夜间补水对蒸腾的贡献

树木茎干中储存的水分对调控冠层与大气水分交换通量有重要的作用,它对树木蒸腾总量的贡献变化较

大,Bucci^[6]、Moore^[3]、Phillips^[4]、Zeppel^[5]等研究发现,夜间液流通量对蒸腾的贡献为5%—36.6%,不同树种差异较大,但是所有研究均表明在估算植物耗水时不容忽视夜间液流通量。树干中贮存的水分对蒸腾的贡献与环境因子及树种特性相关,胡兴波^[14]等研究发现白榆夜间水分补充量对蒸腾的贡献与夜间湿度、日降雨量、光合有效辐射相关,但侧柏夜间水分补充量对蒸腾的贡献率几乎不受环境因子的影响;王华^[15]等研究表明马占相思干季夜间补水量对蒸腾的贡献与总蒸腾量、日间蒸腾量、水汽压亏缺、光合有效辐射、大气湿度等显著相关,但是湿季的贡献率仅与总蒸腾量及日间蒸腾量相关,几乎不受其他因子的影响。而本研究发现华北落叶松夜间补水量的日蒸腾贡献率与大部分环境因子均显著相关,这可能是由于生态因子的限定性作用,本研究区属于干旱区,树木蒸腾量较小,环境因子对贡献率的影响较明显。同时本研究建立了整个生长季夜间补水量的蒸腾贡献率与其影响因子的回归模型,为精确估算该地区华北落叶松耗水提供了科学的依据。

5 结论

(1) 华北落叶松林在整个生长季都存在微弱的夜间液流,此时的液流主要用于补充树体由于白天蒸腾造成的水分亏缺;随着树体水分恢复呈现逐渐降低并趋于平缓的趋势。

(2) 华北落叶松林夜间液流速率的主要影响因子是土壤含水率,而与其他影响因子相关性均较差。

(3) 华北落叶松林夜间补水量的日蒸腾贡献率与气温、日间蒸腾量、日均饱和水汽压差、日总蒸腾量、日均太阳辐射强度、日均空气相对湿度、降水量、土壤含水率等因子均显著相关,并通过逐步回归分析建立了日补水量蒸腾贡献率与主要影响因子的多元线性回归模型。

(4) 华北落叶松林夜间补水对整个生长季蒸腾的贡献率为7.22%,但是存在明显的季节差异及日际变化。

本研究仅在一个生长季内测定了夜间液流的日际及月际变化规律,尚未考虑年际气候波动及其对夜间液流的影响;也未涉及夜间液流的作用机理,有待继续观测研究。

References:

- [1] Toft C A. A 10-year demographic study of rabbitbrush (*Chrysothamnus nauseosus*): growth, survival and water limitation. *Oecologia*, 1995, 101(1): 1-12.
- [2] Oren R, Pataki D E. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. *Oecologia*, 2001, 127(4): 547-559.
- [3] Moore G W, Cleverly J R, Owens M K. Nocturnal transpiration in riparian *Tamarix* thickets authenticated by sap flux, eddy covariance and leaf gas exchange measurements. *Tree Physiology*, 2008, 28(4): 521-528.
- [4] Phillips N G, Lewis J D, Logan B A, Tissue D T. Inter-and intra-specific variation in nocturnal water transport in *Eucalyptus*. *Tree Physiology*, 2010, 30(5): 586-596.
- [5] Zeppel M, Tissue D, Taylor D, Macinnis-ng C, Eamus D. Rates of nocturnal transpiration in two evergreen temperate woodland species with differing water-use strategies. *Tree Physiology*, 2010, 30(8): 988-1000.
- [6] Bucci S J, Scholz F G, Goldstein G, Meinzer F C, Hinojosa J A, Hoffmann W A, Franco A C. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiology*, 2004, 24(10): 1119-1127.
- [7] Marks C O, Lechowicz M J. The ecological and functional correlates of nocturnal transpiration. *Tree Physiology*, 2007, 27(4): 577-584.
- [8] Scholz F G, Bucci S J, Goldstein G, Meinzer F C, Franco A C, Miralles-wilhelm F. Removal of nutrient limitations by long-term fertilization decreases nocturnal water loss in savanna trees. *Tree Physiology*, 2006, 27(4): 551-559.
- [9] Daley M J, Phillips N G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest. *Tree Physiology*, 2006, 26(4): 411-419.
- [10] McDonald E P, Erickson J E, Kruger E L. Can decreased transpiration limit plant nitrogen acquisition in elevated CO₂? *Functional Plant Biology*, 2002, 29(9): 1115-1120.
- [11] Yin X H, Cheng F, Zhang S X. Variation of stem sap flow of *Pinus tabulaeformis* and its impact factors. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(5): 24-29.
- [12] Fisher J B, Baldocchi D D, Misson L, Dawson T, Goldstein A. What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California. *Tree Physiology*, 2007, 27(4): 597-610.
- [13] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, Zhang W J, Zhang X F, Dong K Y, Wang G Y. Nocturnal sap flow of four urban greening tree species in Dalian, Liaoning Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 535-546.

- [14] Hu X B, Han L, Zhang D, He K N, Chen J, Liu J, Qin J, Yu Y. Analysis on the dynamics of nighttime sap flow of *Ulmus pumila* and *Platycladus orientalis* in semi-arid area of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(4) : 51-56.
- [15] Wang H, Zhao P, Wang Q, Cai X A, Ma L, Rao X Q, Zeng X P. Characteristics of nighttime sap flow and water recharge in *Acacia mangium* trunk. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4) : 476-482.
- [16] Jin Y, Wang C K, Sang Y. Contribution of stem water storage to daily transpiration of three temperate trees in northeastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(12) : 1310-1317.
- [17] Wang Y H, Xiong W, Yu P T, Shen Z X, Guo M C, Guan W, Ma C M, Ye B, Guo H. Study on the evapotranspiration of forest and vegetation in dryland. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4) : 19-25.
- [18] Cao G X. A Comparative Study on the Charateristics of Evapotranspiration of *Larix Principis-Rupprechtii* Plantation and *Pinus Armandii* Natural Forest in Liupan Mountains of Ningxia [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [19] Liu J L. A Study on the Hillslope Ecohydrological Processes and Vegetation Carrying Capacity in the Small Catchment of Diediegou, Liupan Mountains [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008.
- [20] Lei Z Y, Liu X L, Zhou K, Jiang T, Yan L F. Plant water deficit and moisture restoration in artificial forest of sandy land in Northwestern Liaoning Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4) : 86-90.
- [21] Goldstein G, Andrade J L, Meinzer F C, Holbrook N M, Cavelier J, Jackson P, Celis A. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21(4) : 397-406.
- [22] Wang H T, Ma L Y, Sun P S. Sap flow fluctuations of *Pinus Tabulaeforms* and *Platycladus Orientails* in late autumn. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(5) : 31-37.
- [23] Sun P S, Ma L Y, Wang X P. Temporal and special variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabutoeformis*). *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5) : 1-6.
- [24] Nie L S, Li J Y, Zhai H B. Study of the rate of stem sap flow in *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* by using the TDP method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8) : 1934-1940.
- [25] Liu J L, Wang Y H, Guan W, Xiong W, Yu P T, Chen L L. Stem sap flux velocity of individual trees of *Larix principis-rupprechtii* in rainy season in the North of Liupan Mountains. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(3) : 434-440.
- [26] Li H G, Li G T, Wang Y H, Guan W, Liu J L. Study on water consumption characteristics of *Larix principis-rupprechtii* Mayer in the north of Liupan Mountains. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2008, 29(3) : 72-76.
- [27] Assaf G, Zieslin N. Night water consumption by rose plants. *Journal of Horticultural Science*, 1996, 71(5) : 673-678.
- [28] Donovan L A, West J B, Pappert R A, Alder N N, Richards J H, Grise D J. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert shrubs. *Oecologia*, 1999, 120(2) : 209-217.
- [29] Meinzer F C, Goldstein G, Jackson P, Holbrook N M, Gutierrez M V, Cavelier J. Environmental and physiological regulation of transpiration in tropical forest gap species: the influence of boundary-layer and hydraulic-properties. *Oecologia*, 1995, 101(4) : 514-522.

参考文献:

- [11] 殷秀辉,程飞,张硕新.油松树干液流特征及其与环境因子的关系.西北林学院学报,2011,26(5) : 24-29.
- [13] 陈立欣,张志强,李湛东,张文娟,张晓放,董克宇,王国玉.大连4种城市绿化乔木树种夜间液流活动特征.植物生态学报,2010,34(5) : 535-546.
- [14] 胡兴波,韩磊,张东,贺康宁,陈静,刘静,秦景,于洋.黄土半干旱区白榆和侧柏夜间液流动态分析.中国水土保持科学,2010,8(4) : 51-56.
- [15] 王华,赵平,王权,蔡锡安,马玲,饶兴权,曾小平.马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析.生态学杂志,2007,26(4) : 476-482.
- [16] 金鹰,王传宽,桑英.三种温带树种树干储存水对蒸腾的贡献.植物生态学报,2011,35(12) : 1310-1317.
- [17] 王彦辉,熊伟,于澎涛,沈振西,郭明春,管伟,马长明,叶兵,郭浩.干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究.中国水土保持科学,2006,4(4) : 19-25.
- [18] 曹恭祥.宁夏六盘山华北落叶松人工林与华山松天然次生林蒸散特征对比研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [19] 刘建立.六盘山叠叠沟小流域坡面生态水文过程与植被承载力研究[D].北京:中国林业科学研究院,2008.
- [20] 雷泽勇,刘心玲,周凯,姜涛,阎丽凤.辽西北沙地人工林植物水分亏缺与恢复研究.水土保持学报,2009,23(4) : 86-90.
- [22] 王华田,马履一,孙鹏森.油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究.林业科学,2002,38(5) : 31-37.
- [23] 孙鹏森,马履一,王小平.油松树干液流的时空变异性研究.北京林业大学学报,2000,22(5) : 1-6.
- [24] 聂立水,李吉跃,翟洪波.油松、栓皮栎树干液流速率比较.生态学报,2005,25(8) : 1934-1940.
- [25] 刘建立,王彦辉,管伟,熊伟,于澎涛,程丽莉.六盘山北侧生长季内华北落叶松树干液流速率研究.华中农业大学学报,2008,27(3) : 434-440.
- [26] 李海光,李钢铁,王彦辉,管伟,刘建立.六盘山北侧华北落叶松耗水特性研究.内蒙古农业大学学报:自然科学版,2008,29(3) : 72-76.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade ...
..... MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
- Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment
..... LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
- Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated
nitrogen deposition LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
- Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields
..... WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)
- Resource and Industrial Ecology**
- Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection
..... YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
- Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle)
..... CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
- Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ... ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
- Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants
..... YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
- Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings
..... WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
- Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach
..... ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)
- Research Notes**
- Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain
..... ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
- Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing JIA Baoqun (1654)
- Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K.
..... WANG Rui long, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

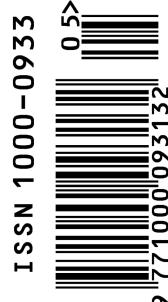
ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松
主 管	中国科学技术协会
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085
出 版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印 刷	北京北林印刷厂
发 行	科学出版社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044
广 告 经 营	京海工商广字第8013号
许 可 证	

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元