

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第12期 Vol.32 No.12 **2012**

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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 12 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

- 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例..... 孙永光,赵冬至,吴 涛,等 (3645)
- 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征..... 张全军,于秀波,钱建鑫,等 (3656)
- 青岛市湿地生态网络评价与构建..... 傅 强,宋 军,毛 锋,等 (3670)
- 大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例..... 叶 春,李春华,王秋光,等 (3681)
- 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态..... 王书敏,何 强,张峻华,等 (3691)
- 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响..... 何先进,吴鹏飞,崔丽巍,等 (3701)
- 枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系..... 姚艳霞,赵文霞,常聚普,等 (3714)
- 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价..... 邹丽丽,陈晓翔,何 莹,等 (3722)
- 温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应 朱晓闻,王 辉,刘 进,等 (3729)
- 鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险..... 赵丽平,杨贵明,赵同科,等 (3737)
- 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系 张俊华,李国栋,南忠仁 (3745)
- DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响 邱临静,郑粉莉,Yin Runsheng (3754)
- 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响..... 郭冠华,陈颖彪,魏建兵,等 (3764)
- 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例 陈 杰,梁国付,丁圣彦 (3773)
- 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例..... 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等 (3782)
- 高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例..... 王录仓,高 静 (3795)
- 太湖湖滨带生态系统健康评价..... 李春华,叶 春,赵晓峰,等 (3806)
- 秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量..... 党坤良,陈俊娴,孙飞翔,等 (3816)
- 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响..... 尤 佳,王文瑞,卢 金,等 (3825)
- 海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择..... 刘晋仙,陶建平,何 泽,等 (3834)
- 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应..... 王振兴,朱锦懋,王 健,等 (3841)
- 基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究 金则新,顾婧婧,李钧敏 (3849)
- 不同径级油松径向生长对气候的响应..... 姜庆彪,赵秀海,高露双,等 (3859)
- 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布..... 袁春明,孟广涛,方向京,等 (3866)
- 巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较..... 胡红玲,张 健,万雪琴,等 (3873)
- 银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响..... 黄激激,胡庭兴,张念念,等 (3883)
- 基于氡示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究..... 孙守家,孟 平,张劲松,等 (3892)
- 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性..... 张显强,曾建军,湛金吾,等 (3902)
- 含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈 琳,谷 洁,高 华,等 (3912)
- 钝叶枧不同性别花的花部形态与传粉特征比较..... 王 茜,邓洪平,丁 博,等 (3921)
- 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性..... 何奇瑾,周广胜 (3931)
- 烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响..... 樊高琼,杨恩年,郑 亭,等 (3940)

专论与综述

- 中国产业共生发展模式的国际比较及对策 石 磊,刘果果,郭思平 (3950)

研究简报

- 吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化 张国坤,卢京花,宋开山,等 (3958)
- 杨树人工林生态系统通量贡献区分析..... 金 莹,张志强,方显瑞,等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-06



封面图说: 鸳鸯——在分类上属雁形目,鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟,鸯指雌鸟,故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处,雌雄偶居,以植物性食物为主,也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间,雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中,用干草和绒羽铺垫,每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟,中国传统文化又赋予它很多美好的寓意,因此,在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

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

DOI: 10.5846/stxb201201080040

孙守家, 孟平, 张劲松, 贾长荣, 任迎丰. 基于氘示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究. 生态学报, 2012, 32(12): 3892-3901.

Sun S J, Meng P, Zhang J S, Jia C R, Ren Y F. Water transport velocity and efficiency in *Quercus variabilis* detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3892-3901.

基于氘示踪剂和热扩散技术的栓皮栎 水分运输速率与效率研究

孙守家¹, 孟平¹, 张劲松^{1,*}, 贾长荣², 任迎丰²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091; 2. 济源市国有大沟河林场, 济源 454650)

摘要: 利用同位素示踪和热扩散技术研究了不同胁迫处理栓皮栎的水分运输和储存差异。结果表明, 注射氘同位素后, 充分灌溉、轻度和重度胁迫处理的最大氘同位素比率分别升高到 586.67‰、997.33‰ 和 1364.89‰, 处理间差异显著。轻度和重度胁迫处理的示踪速率分别为 0.10 m/h 和 0.07 m/h, 显著低于充分灌溉处理, 但半减期和残留期显著高于充分灌溉。轻度和重度胁迫处理的枝条栓塞程度 (PLC) 比充分灌溉显著增加, 液流通量、水势和蒸腾速率则显著减小。统计分析表明蒸腾作用强弱决定树体水分运输速率, PLC 的增加和枝条水势的降低阻碍木质部水分运输。半减期和残留期内, 轻度和重度胁迫处理的累积液流量显著高于充分灌溉处理, 运载相同体积的示踪剂, 胁迫处理栓皮栎需要的水量增加, 表明胁迫环境下受到 PLC、蒸腾以及与树体储水交换的影响, 水分运输效率下降。栓皮栎通过栓塞和储水交换来降低水分运输速率和效率, 调控水分的收支平衡来适应干旱的环境。

关键词: 栓皮栎; 稳定同位素; 示踪速率; 栓塞; 蒸腾

Water transport velocity and efficiency in *Quercus variabilis* detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique

SUN Shoujia¹, MENG Ping¹, ZHANG Jinsong^{1,*}, JIA Changrong², REN Yingfeng²

1 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Dagou-he National Forest Farm, Jiyuan 454650, China

Abstract: Trees, especially big ones, have huge and complicated vascular systems which make the long-distance water transport difficult to study. We used the heat dissipation method and deuterated water as tracers to characterize water transport and storage properties of *Quercus variabilis* trees under the different water stress treatment. The transit time for D₂O transport from the trunk base to the upper branches and the tracer residence time were determined by measuring hydrogen isotope ratios in water extracted from branches sampled in regular intervals. The result indicated that the maxima δD of full irrigation (FI), mild water stress (LWS) and severe water stress (SWS) respectively increased to 586.67‰, 997.33‰ and 1364.89‰ after injecting deuterium tracer. There were significant differences in maxima δD among the three treatments. The tracer velocities with LWS and SWS were significantly lower than FI treatment but the tracer half-life and residence time were longer than FI treatment. The branch PLC, sapflow rate, water potential and transpiration rate were also observed. The branch PLC treated with LWS and SWS was significantly higher than FI treatment and the sapflow rate, water potential and transpiration rate were lower. There significantly positive correlations between tracer velocity and leaf transpiration rate ($P < 0.01, n = 27$), and between tracer velocity and sapflow rate ($P < 0.01, n = 9$). The results indicated

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31000182); 林业公益性行业科研专项课题 (201104009-04)

收稿日期: 2012-01-08; **修订日期:** 2012-04-06

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

that water transport was determined by transpiration rate. The PLC and branch water potential were inversely correlated with tracer velocity ($P < 0.01, n = 27$), suggesting that drought stress-induced embolism and lower water potential should increase resistance to water transport. Tracer half-life and residence time increased as water stress increased. Tracer half-life and residence time were significant exponential functions with the branch PLC ($P < 0.01, n = 27$), but power functions with the leaf transpiration rate. The times needed for transporting the same volume tracer were increased, indicating that water transport efficiencies were reduced because of PLC, transpiration and storage water variations under water-stress condition. Analyses of sapflow showed that the calculative fluxes of drought treatments within tracer half-life and residence time were significantly higher than FI treatment. The amounts of water carrying the same volume tracer were increased as stress degree increased. The results indicated that the increased water was possibly stored in the sapwood and re-exchanged to transpiration stream when transpiration was strong in the daytime. *Quercus variabilis* trees should reduce the water transport velocity and efficiency to adapt water stress environment by xylem embolism and storage-water exchange.

Key Words: *Quercus variabilis*; stable isotope; tracer velocity; embolism; transpiration

树木从土壤中吸收水分经木质部输到其他组织,来满足正常生长需要,但由于距离长,水分运输的速率和效率受内外环境的影响较大^[1]。在水分亏缺的情况下,导管内的水柱容易被打断快速形成气穴^[2],堵塞导管,阻碍水分运输^[3]。此外,树木边材具有较大的容量,在蒸腾强烈时树木会通过边材组织储水与导管内水分的交换来为蒸腾提供水分补充^[4-5],这种水分交换会影响水分运输速率和效率。尽管液流速率可以用来表示探针位点水流的瞬时速率,但液流速率与水分运输速率并不完全相等^[6]。水分从大树根部运输到叶片可能需要几天,期间受到木质部栓塞和边材储水的影响,水分运输常以不同的速率运行并产生滞后效应^[7]。由于观测方法的限制,树体水分运输、储存、交换^[5,8]和利用^[9]多采用模型间接推算,模型不同得出的结果不尽相同。氢氧稳定同位素被认为是水的指纹,为研究水分运输和分配提供了新的观测手段^[10]。氡示踪剂的 δD 值远远高于树木枝条水中的氡同位素,微量的示踪剂就能够显著提高枝条水的 δD 值,这为追踪树体水分运输提供了基础。近年来,研究者将氡同位素示踪剂应用到对整株树木水分流动^[11-12]、边材水分运输和储存动态变化^[6]、液流和蒸腾估计^[13-14]的研究中,取得较多成果,但因树木个体大,研究起来比较困难,先前的研究仅局限于单株自然生长树木,对于控制水分条件下的树木水分运输速率、效率和储水交换尚未见报道。

栓皮栎是华北石质山地的典型优势树种,生长较好,在有限的水分条件下形成稳定的自然群落,表现出较强的生态适应性,而长距离水分运输的速率和效率关系到树体水分平衡、气孔调节和光合作用,对于研究栓皮栎的生态适应机制^[15]意义重大。本项目以盆栽栓皮栎为试材,控制水分以形成不同的胁迫梯度,同时外加氡示踪剂来追踪树体水分的运输,其主要目的旨在:(1)获得不同处理的栓皮栎体内氡示踪同位素比率的差异;(2)分析水分运输速率和效率与部分生理指标之间的关联,来获得栓皮栎在不同条件下的水分运输、分配格局及其调控机制,进而为该地区林地土壤旱化防治、植被恢复和林业生态工程建设提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2010年6月在中国林业科学研究院黄河小浪底森林生态站进行,该站隶属于中国森林生态系统定位研究网络(CFERN),地处河南省济源市境内的太行山南段与黄河流域的交界处,定位站中心地区海拔410 m,属于暖温带大陆性季风气候,年均气温12.4—14.3℃,年日照时数2367.7 h,年日照率54%,历年平均降水量641.7 mm,其中,6—9月为438.0 mm,占全年的68.3%。

1.2 试验材料及处理

从人工林中选择干形相似的10年生栓皮栎作为试验材料,于2009年3月移植并种在60 cm×60 cm的铁皮容器中,容器四周用草绳缠绕防止高温灼伤根系,基质是以壤土、细沙和草炭按照7:2:1比例混合均匀,容重为1.34 g/cm³。试验分充分灌溉(Full irrigation,以下简称FI)、轻度(Light water stress,以下简称LWS)和重度

水分胁迫 (Severe water stress, 以下简称 SWS) 3 组进行, 每天晚上分别浇水 4 kg、1.8 kg 和 0.9 kg, 浇水后塑料薄膜覆盖, 每个处理重复 3 次, 每重复 3 株树。6 月 10 日早晨 6:00—7:00 在距地表 10 cm 的树干东南西北四个方向上各去除 1 cm×1 cm 树皮, 露出木质部, 使用 4 mm 钻头与水平方向成 45° 夹角在木质部上打孔, 深度为 3 cm, 用医用注射器注射 0.3 mL 氙水, 每棵树共注射 1.2 mL, 用帕拉胶缠绕封住处理孔。氙示踪剂来自于美国 CIL 公司, 浓度 99.9%, 分别在 6 月 11 日—15 日的 8:00、12:00、16:00 和 20:00 对枝条取样测定氙同位素、栓塞程度、蒸腾和水势, 16 日—24 日 10:00 取样测定相应指标。

1.3 试验方法

1.3.1 液流测定

在距地面 30 cm 处的树干南北两侧安装长 10 mm 粗 1 mm 的 TDP 探针, 连接到数据采集器上 (CR10X, Campbell 公司, 美国), 设定每 1 min 采集 1 次, 每 10 min 输出 1 组平均值, 树干液流速率和液流量使用 Granier^[16] 的经验公式计算:

$$F_s = 0.0119 \left[\frac{D_{TM} - D_T}{D_T} \right]^{1.231} \times A_s \times 3.6 \quad (1)$$

式中, F_s (L/h) 是液流速率, A_s (cm²) 是边材面积, D_{TM} 为一日内最大温差值, D_T 为某时刻温差值。因 TDP 探针所限, 本试验只能同时测定 9 棵栓皮栎, 即每个重复只测 1 棵树, 测定时间是 6 月 6 日至 30 日。

1.3.2 同位素测定

剪取栓皮栎树冠上部的 1—2 年生枝条, 剥去树皮, 装入带聚乙烯盖子的 10 mL 小瓶中并用帕拉胶密封, 0—5 °C 储藏在便携式冷藏包内, 带回林木遗传育种国家重点实验室, 低温真空抽提枝条中的水^[17], 抽提水的氙同位素用 DLT-100 液态水同位素分析仪 (Los Gatos 公司, 美国) 测定, 输出结果是以相对于 V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) 的千分率 (‰) 给出, δD 的测量精度是 $\pm 0.1‰$, 计算方程为:

$$\delta D = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (2)$$

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别表示样品和国际通用标准物的 D/H 的比值。

采用氙同位素比率、示踪速率、半减期和残留期 4 个指标来描述示踪剂在栓皮栎中的运输和储存特性。将注射前枝条中氙同位素比率作为基线, 根据氙同位素最大值对同位素数据进行标准化, 标准化后基线值为 0, 最大值为 1。连续测定枝条中氙同位素比率, 当同位素比率明显升高超过基线 10% 时记录为时间 h , 同时测量采样点与注射点的距离 D , 示踪速率 (m/h) = D/h 。半减期 Δt 是氙同位素从最大值降为一半时的时间, 通过修正的指数衰减方程 $Y = Y_0 e^{-\lambda t}$ 进行计算^[6], 将氙同位素比率最大值的时间设为 0, Y_0 和 Y 是 0 和 t 时的氙同位素比率, λ 为衰变常数, 残留期是同位素比率从最大值降低到基线水平所经历的时间。

1.3.3 枝条水势和栓塞程度测定

剪取的 1—2 年生枝条分为 2 部分, 一部分用 SAPS II 便携式植物水势压力室 (SEC 公司, 美国) 测定枝条水势, 另一部分在水中剪成 5—6 cm 枝段, 根据 Sperry 等^[18] 冲洗方法进行改进, 冲洗液为 50 mmol/L KCl 溶液, 用 5 kPa 水压下获得枝条的初始导水率 K_i , 然后用 100 kPa 水压冲洗 10—15 min 清除导管内气泡, 再用 5 kPa 水压冲洗, 获得最大导水率 $K_{\max}$, 气穴栓塞程度用导水率损失百分数 (Percentage loss of hydraulic conductance, 以下简称 PLC) 表示, $PLC = (1 - K_i/K_{\max}) \times 100$ 。

1.3.4 叶片蒸腾测定

蒸腾测定选择树冠中上部长势一致 1—2 年生枝条上的成熟叶片, 使用 Li-6400 (LI-COR 公司, 美国) 测定蒸腾速率, 外加红光 LED 光源, 光照强度为 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 每株树测定 6 片。

1.3.5 气象因子测定

在试验地旁设定自动气象站, 连续观测空气温度 (T_a)、相对湿度 (HR) 和太阳辐射 (R_a), 所采用的传感器分别为 05103 (RM Young 公司, 美国)、HMP45C (Campbell 公司, 美国) 和 LI190SB (LI-COR 公司, 美国),

数据采集器为 CR10X, 设定每 2 min 采集 1 次, 每 10 min 输出 1 组平均值。

蒸汽压亏缺 (Vapor pressure deficit, 简称 VPD) 采用以下公式计算:

$$VPD = \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \times 0.611 \times e^{\frac{17.27 \times Ta}{Ta + 237.3}} \quad (3)$$

式中, RH 为空气相对湿度 (%); Ta 为空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.4 数据处理

使用 Excel 2010 整理试验所得数据并作图, 用 PASW Statistics 18 分析软件进行统计分析, 对不同胁迫处理的栓皮栎进行 One-way ANOVA 分析并用最小显著差数法 (LSD) 进行多重比较, 统计显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 气象因子变化

图 1 显示 6 月 10 日—26 日期间内, 温度相对稳定, 日际间的最高气温和最低温度相差幅度分别在 8°C 和 6°C 之内, 而相对湿度变化幅度较大, 日际间的最高和最低相对湿度分别在 50%—80% 和 20%—40% 之间变化 (图 1)。VPD 最大值在 2.6—6.0 kPa 之间变化, 而最小值在 0.4—1.2 kPa 变化, 相对稳定 (图 1)。试验期间均为晴天, 太阳辐射从 7:00 开始迅速增加, 19:00 后太阳辐射降为零, 日际间的最大值在 $650\text{—}840\text{ W/m}^2$ 变化。温度和太阳辐射相对一致, 有利于降低栓皮栎日际间的水分变化幅度, 减少实验误差。

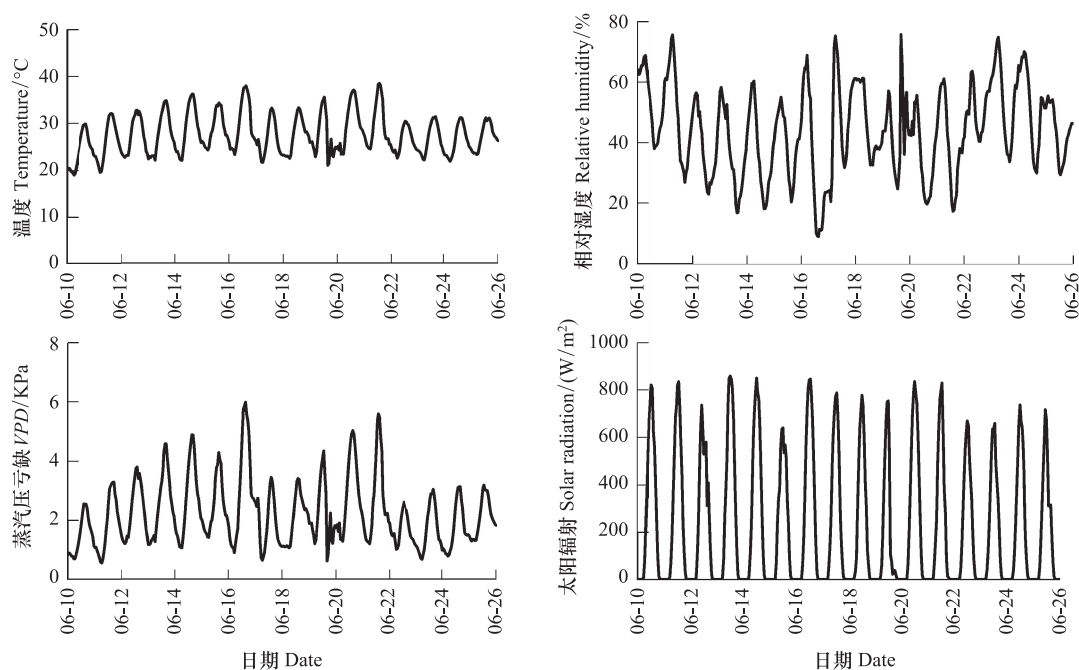


图 1 试验期间温度、相对湿度、VPD 和太阳辐射变化

Fig. 1 Variations of temperature, relative humidity, VPD and solar radiation during the experiment time

2.2 注射后不同处理的氙同位素示踪速率和比率差异

图 2 结果显示, 轻度和重度胁迫处理的示踪速率分别为 0.10 m/h 和 0.07 m/h , 低于充分灌溉处理约 65.11% 和 74.73%, 差异显著, 但轻度与重度胁迫之间的示踪速率差异不显著。标准化后的结果显示, 充分灌水、轻度和重度胁迫处理的氙同位素比率在注射后均明显增加, 分别在注射后的 9.78、27.56 h 和 36.89 h 升至最大值, 随后时间内充分灌溉处理的氙同位素比率下降速率较快, 轻度和重度胁迫处理的氙同位素比率下降速度相对缓慢 (图 2)。

2.3 不同处理氙示踪剂的最大值期、半减期和残留期差异

注射前的栓皮栎枝条中氙同位素比率在 -56.12‰ — -48.11‰ 之间波动, 三者之间无显著差异。但注射

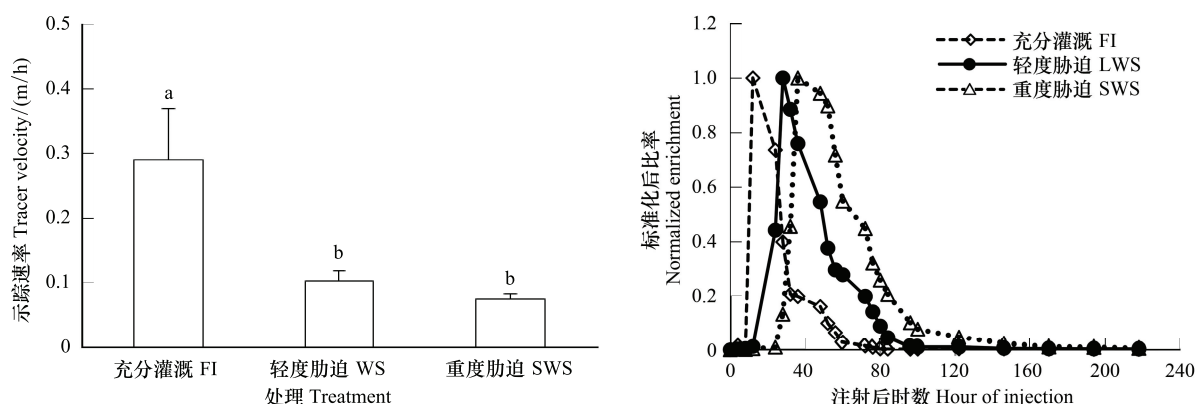


图2 不同处理的示踪速率和标准化后的氘同位素变化的时间进程

Fig. 2 The tracer velocities of different treatments and the time courses of normalized δD of water extracted from the branch

后氘同位素比率明显升高,充分灌溉、轻度和重度胁迫处理的栓皮栎最大氘同位素比率分别增加到 586.67‰、997.33‰和 1364.89‰,三者之间差异显著。注射后,充分灌溉栓皮栎的氘同位素达到最大值的时间最短,约为 9.78 h,轻度胁迫处理次之,比充分灌溉处理增加了约 1.82 倍,重度处理的时间最长,比充分灌溉处理增加了约 2.77 倍,三者差异显著(图 3)。充分灌溉的示踪半减期为 10.71 h,轻度和重度胁迫处理的示踪半减期比充分灌溉处理分别增加了 55.73% 和 88.35%,三者之间差异显著(图 3)。充分灌溉处理栓皮栎树体内示踪剂残留期为 76.89 h,胁迫处理后示踪剂残留期明显延长,轻度和重度胁迫处理分别比充分灌溉处理增加了 31.21% 和 92.49%,三者之间差异显著(图 3)。

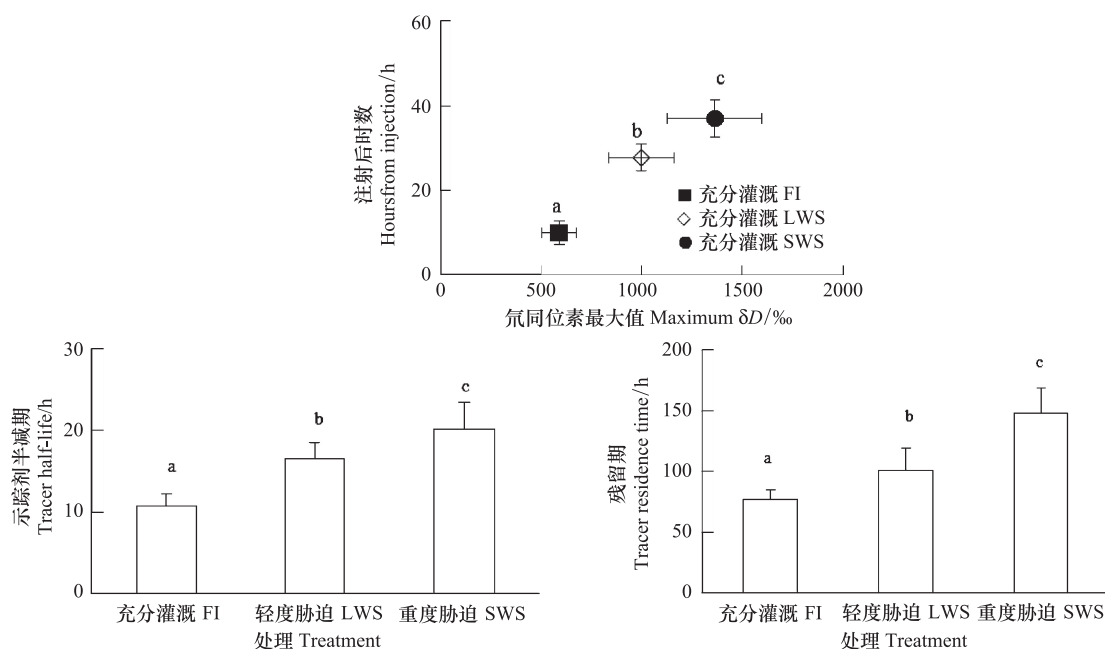


图3 注射后不同处理的氘同位素最大比率变化、示踪半减期和残留期的差异

Fig. 3 The differences of maximum δD after injection, tracer half-life and tracer residence time among the different treatments

2.4 注射氘示踪剂前后的液流变化及不同处理之间的液流量差异

图 4 结果显示注射氘示踪剂后,不同处理栓皮栎液流量与注射前相比没有明显增大。统计显示充分灌溉、轻度和重度胁迫处理栓皮栎日均液流总量分别为 2.59、2.12 kg 和 1.66 kg,相对于液流总量,注射的示踪剂量非常小,不会影响到树体液流变化。但是由于控制浇水,充分灌溉、轻度和重度胁迫处理的栓皮栎液流通

量之间差别明显,充分灌溉处理最大液流通量在 25.91—35.65 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间变动,轻度和重度胁迫处理的最大液流通量分别在 15.67—24.48 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 11.23—17.38 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间变化,且随着处理时间增加而逐渐降低(图 4)。表 1 统计显示示踪最大值期、半减期内和残留期内轻度和重度胁迫处理的液流速率比充分灌水处理分别减小了 47.62% 和 57.14%、50.00% 和 63.64%、60.00% 和 72.00%,差异显著。胁迫处理后,示踪最大值期和半减期内的轻度与重度胁迫处理之间差异不显著,但随着处理时间延长,残留期内轻度与重度胁迫处理之间差异显著。树液是示踪同位素载体,不同时期内累积液流量是各个时期内的载体流量总和,表 1 统计显示示踪最大值期内充分灌溉和轻度胁迫的累积液流量比重度胁迫处理少 20.41% 和 15.38%,差异显著。在示踪半减期和残留期内,轻度和重度胁迫的累积液流量比充分灌溉处理分别增加了 18.82% 和 33.33%、23.70% 和 28.41%,充分灌水与胁迫处理之间差异显著。

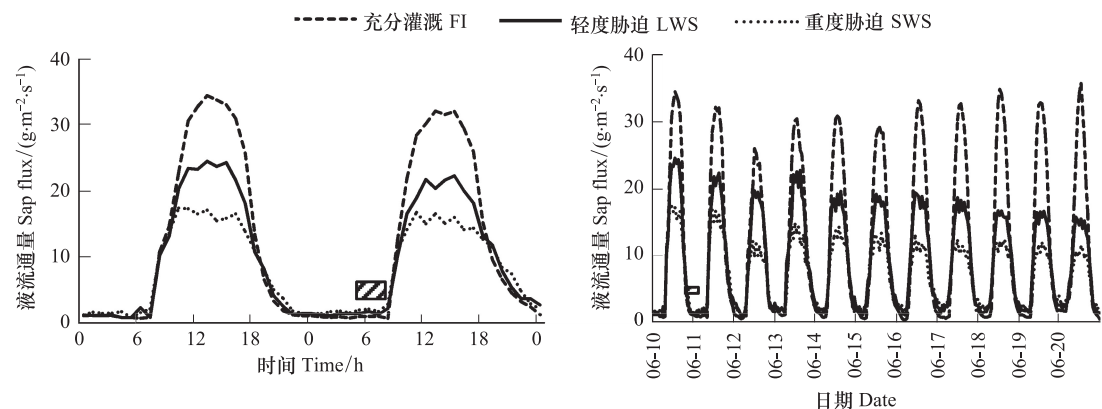


图 4 注射前后液流通量变化和试验期间液流通量日变化

Fig.4 Variations of sapflow flux before and after injection and daily changes of sapflow flux during the experimental time
黑条表示氡同位素注射持续时间

表 1 示踪最大值期、半减期、残留期内不同处理栓皮栎的液流速率、累积液流量、栓塞程度、枝条水势和蒸腾速率的差异

Table 1 The differences of sapflow velocity, calculative flux, PLC, branch water potential and transpiration rate during the tracer maximum value time, tracer half-life and tracer residence time

时期 Time	处理 Treatment	液流速率 Sapflow velocity /(L/h)	累积液流量 Calculative flux /L	栓塞程度 PLC /%	枝条水势 Water potential /MPa	蒸腾速率 Transpiration rate /(mmol m ⁻² s ⁻¹)
示踪最大值期 Tracer maximum time	充分灌溉 FI	0.21±0.03 b	2.69±0.19 a	36.03±3.19 a	-0.91±0.12 c	4.76±0.48 c
	轻度胁迫 LWS	0.11±0.02 a	2.86±0.18 a	43.78±3.30 b	-1.26±0.16 b	3.80±0.26 b
	重度胁迫 SWS	0.09±0.01 a	3.38±0.40 b	47.72±2.82 c	-1.44±0.16 a	3.41±0.32 a
示踪半减期 Tracer half-life time	充分灌溉 FI	0.22±0.07 b	1.86±0.15 a	35.31±3.13 a	-0.88±0.14 c	4.99±0.50 c
	轻度胁迫 LWS	0.11±0.04 a	2.21±0.19 b	45.21±2.19 b	-1.30±0.19 b	3.68±0.21 b
	重度胁迫 SWS	0.08±0.02 a	2.48±0.30 b	50.11±3.96 c	-1.51±0.21 a	3.10±0.28 a
残留期 Tracer residence time	充分灌溉 FI	0.25±0.02 c	6.16±0.45 a	34.95±2.19 a	-0.89±0.10 c	5.16±0.41 c
	轻度胁迫 LWS	0.10±0.02 b	7.62±0.74 b	45.99±2.60 b	-1.33±0.12 b	3.66±0.16 b
	重度胁迫 SWS	0.07±0.01 a	7.91±0.93 b	53.52±3.20 c	-1.56±0.15 a	2.99±0.22 a

2.5 枝条栓塞程度、水势和叶片蒸腾速率变化

表 1 显示在示踪最大值期、半减期和残留期内,充分灌溉的枝条栓塞程度分别是 36.03%、35.31% 和 34.95%,轻度和重度胁迫处理的枝条栓塞程度比充分灌溉处理分别增加了 21.49% 和 32.44%、28.02% 和 41.90%、28.72% 和 53.11%,3 个处理之间差异显著。胁迫处理使得枝条水势和蒸腾速率均下降,示踪最大值期、半减期和残留期内轻度和重度胁迫处理的枝条水势比充分灌溉处理分别降低了 38.95% 和 58.12%、46.04% 和 69.41%、51.38% 和 77.11%,蒸腾速率分别降低了 20.18% 和 28.38%、26.26% 和 37.93%、

29.09% 和 42.09%, 3 个处理之间差异显著。

3 讨论

3.1 水分运输速率受到蒸腾、栓塞和水势等多因素影响

长距离水分运输的速率是影响树木体内水分平衡、气孔调节^[19]以及对不同环境适应^[15,20]的重要因素,水分在树体内流动,需要有足够的动力。水分是氙示踪剂的载体,示踪速率越大则代表树体内水分运输的越快,表 1 统计显示充分灌水、轻度和重度胁迫处理的叶片蒸腾速率逐渐降低,三者间差异显著,叶片蒸腾速率与示踪速率成正相关,相关系数为 0.8242 (图 5),方程达到极显著水平 ($P < 0.01, n = 27$),这表明较强的蒸腾是树体水分快速流动的驱动力。蒸腾容易受到栓塞产生的水力信号影响,蒸腾速率减小与枝条栓塞增大在小时尺度上基本同步,气孔关闭对水力信号响应的时间较短^[21],但表 1 结果显示胁迫处理后的较长时间内轻度和重度胁迫处理的蒸腾速率均显著下降,并随着时间延长下降程度越大,造成这种差别的原因可能是水分胁迫诱导根部产生 ABA 化学信号传导到叶片导致气孔关闭^[22-23]。ABA 从根部传导到叶片需要时间,图 2 显示充分灌溉同位素比率增加到 10% 的时间一般在注射同位素后的 8—12 h,胁迫处理栓皮栎的时间则需要更长,说明根部产生的 ABA 运输到叶片时间至少要滞后 8—12 h 以上。由于根部持续受到水分胁迫,不断产生 ABA 运输到叶片导致胁迫处理栓皮栎气孔部分关闭,因此示踪最大值期、半减期和残留期内蒸腾速率下降的原因是 ABA 化学信号和栓塞的水力信号共同作用的结果。水分在树体内快速运输,运输通道必须保持通畅^[9,24],但水分亏缺时导管中的水柱容易被打断发生气穴栓塞^[1-2],表 1 显示示踪速率随着栓塞程度的增加而减小,图 5 统计发现示踪速率与栓塞程度成显著的负相关 ($P < 0.01, n = 27$),表明栓塞严重阻碍了木质部水分运输。水分在树体内连续流动形成液流,是反映植物蒸腾耗水和水分运输规律的重要指标之一^[25-26]。表 1 显示充分灌水、轻度和重度胁迫处理栓皮栎的液流速率逐渐降低,统计表明液流速率与示踪剂速率成正相关的正相关 ($P < 0.01, n = 9$),相关系数达到 0.9789 (详见图 5)。有研究证实示踪速率和液流速率成线性相关^[6],且这种关系不受树木种类和大小的影响。由于计算方法差异,本试验中示踪速率与液流速率单位不同,无法对其进行大小比较,但 Meinzer 等研究发现示踪速率并不等于液流速率,二者大小相差 5 倍左右,这可能是与

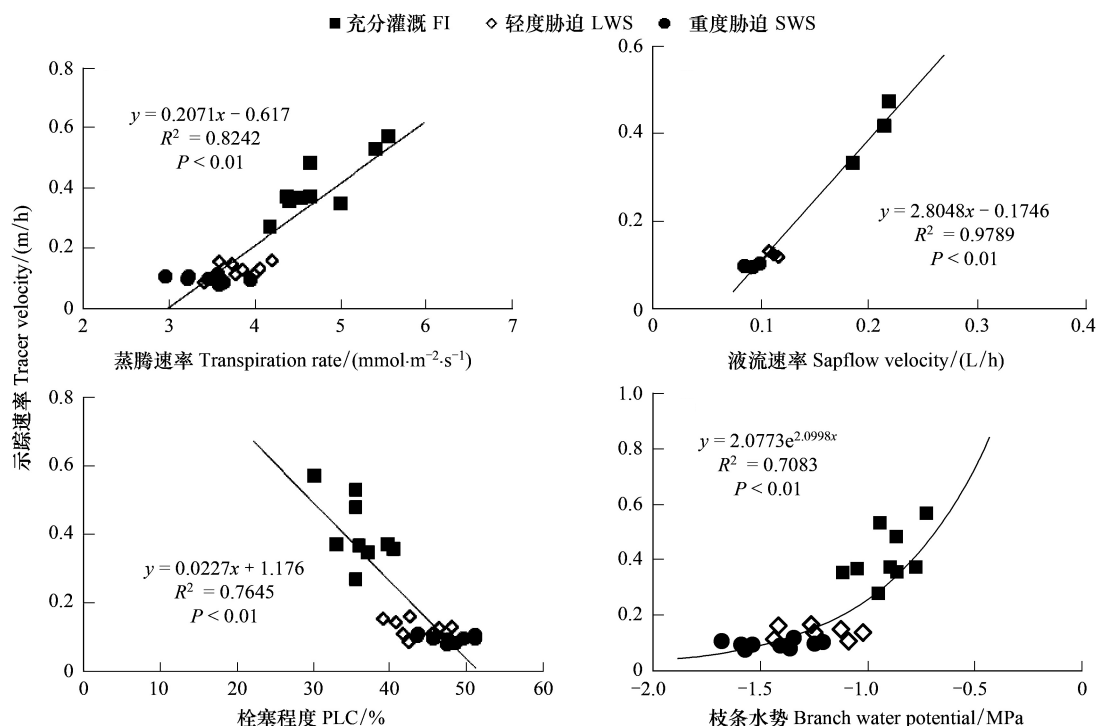


图 5 示踪速率与蒸腾速率、液流速率、栓塞程度和枝条水势的关系

Fig. 5 Relationships of the tracer velocity with transpiration rate, sapflow velocity, PLC and branch water potential

插入热扩散探针的位置有关。轻度和重度胁迫处理造成枝条水势下降,图 5 显示示踪速率与枝条水势成显著的指数函数关系($P < 0.01, n = 27$),这与 Sperry 等^[27]发现的枝条水势与枝条相对水分亏缺成典型的曲线关系相似,示踪速率随着枝条水势降低而降低,表明胁迫造成的低水势影响了树体内水分的运输,栓皮栎通过调整水势的变化来适应干旱环境变化^[24]。

3.2 水分运输效率与栓塞和树体储水交换的关联

示踪残留期是运输相同体积示踪剂所需要的时间,其长短决定水分运输效率在时间尺度上的高低。图 6 显示随着栓塞程度增加,半减期和残留期延长,二者成极显著的指数函数关系($P < 0.01, n = 27$),表明木质部栓塞不可避免地造成水分运输功能失常,导致氡同位素运输受阻,造成运输效率下降。已有的研究成果^[2,28]认为木质部栓塞随着干旱胁迫的程度快速地变化,栓皮栎正是通过部分木质部栓塞降低水分运输的效率,以减少水分的耗散来适应水分亏缺的环境^[29,30]。随着栓塞程度增加,树干输水功能紊乱会导致气孔关闭和蒸腾速率下降^[31],图 6 结果显示蒸腾速率与液流速率成正相关($P < 0.01, n = 9$),蒸腾的减小降低了水分运输速率,造成示踪半减期和残留期增加。但是,统计发现示踪半减期和残留期与蒸腾速率成极显著的幂函数关系($P < 0.01, n = 27$),相关系数要高于线性关系(图 6),可能原因是氡示踪剂除了进入液流参与蒸腾外,还有部分示踪剂与树体储水发生交换进入边材。边材在树木水分储存与交换中具有重要作用,Domec 等^[32]发现同种树木的边材储水能力没有显著差异,但干旱或者剧烈蒸腾会造成边材组织水分亏缺,为了弥补水分

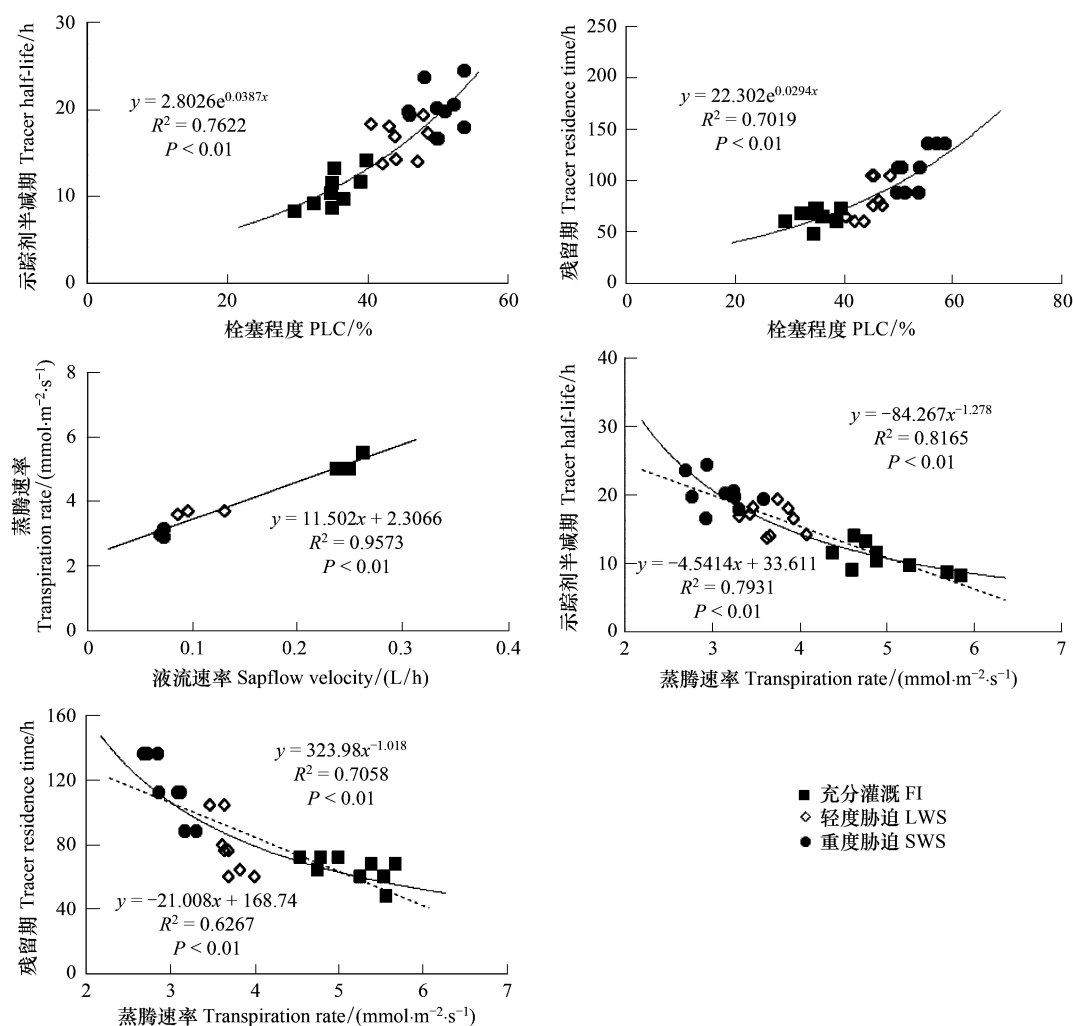


图 6 示踪半减期、示踪残留期与枝条栓塞程度的关系,蒸腾速率与液流速率的关系,示踪半减期、示踪残留期与蒸腾速率的关系

Fig. 6 The relationships of tracer half-life versus branch PLC, tracer residence time versus branch PLC, transpiration rate versus sapflow rate, tracer half-life versus transpiration rate and tracer residence time versus transpiration rate

亏缺夜晚从土壤中吸收更多的水分储存在边材,交换过程增加了示踪剂在树体内残留的时间。图 4 中轻度和重度胁迫的液流速率在夜晚略高于充分灌水处理也佐证了这一点。当白天蒸腾需求较大时,进入边材的示踪剂又重新交换进入液流中为树木蒸腾提供水分补给^[8,33],这种边材容量对蒸腾流的缓冲作用对于栓皮栎干旱胁迫具有重要作用。

表 1 结果显示在示踪半减期和残留期内,轻度和重度胁迫处理的累积液流量明显高于充分灌水处理,差异达到显著水平,这表明胁迫处理栓皮栎运载相同体积示踪剂比充分灌溉处理所需总水量增加,增加量随着胁迫程度增加而增大,从而导致胁迫处理的栓皮栎水分运输效率在数量尺度上也明显下降。与充分灌溉相比,胁迫处理多用的水量一部分由于残留期的增加而蒸腾散失,另一部分可能进入边材进行水分的回补和储存^[11]。木质部栓塞导致运输阻力增加,迫使气孔关闭从而降低蒸腾量,是栓皮栎对水分胁迫的被动响应,而边材储水与蒸腾流交换则是对水分胁迫的主动响应过程^[8]。栓皮栎通过被动和主动响应过程来降低水分运输速率和效率,调控水分的收支平衡来适应干旱的环境。

4 结论及其展望

综上所述,水分胁迫环境下树体内氘示踪剂比率明显升高、木质部栓塞程度增加、枝条水势下降和叶片蒸腾作用减弱,造成栓皮栎水分运输速率减小,同时由于受到栓塞程度、蒸腾以及与树体储水交换的影响,水分运输效率降低。栓皮栎通过栓塞和储水交换来降低水分运输速率和效率,调控体内水分平衡来适应水分胁迫的环境。

尽管同位素示踪法是研究树木水分运输的重要方法之一,但也存在许多需要探讨和改进的地方。例如,自然条件下示踪后采样间隔以小时尺度则易受到昼夜环境的影响,以日尺度则对于小树来说间隔时间长精度差,如何进行优化以减少误差? 示踪速率表明根部水分运输到叶片需要一定时间,在气孔调节过程中干旱产生的 ABA 化学信号和栓塞产生的水力信号哪一个发挥的作用更大? 示踪残留时间和运输所需的累积液流量能够定性证明边材储水交换,如何利用示踪剂定量区分边材储水和蒸腾流的比例? 这些问题还需要通过更准确的控制试验来进一步验证。

References:

- [1] Meinzer F C, Clearwater M J, Goldstein G. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45(3): 239-262.
- [2] Tyree M T, Sperry J S. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Biology*, 1989, 40(1): 19-36.
- [3] Sperry J S, Pockman W T. Limitation of transpiration by hydraulic conductance and xylem cavitation in *Betula occidentalis*. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16(3): 279-287.
- [4] Čermák J, Kučera J, Bauerle W L, Phillips N, Hinckley T M. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 2007, 27(2): 181-198.
- [5] Verbeeck H, Steppe K, Nadezhdina N, de Beeck M O, Deckmyn G, Meiresonne L, Lemeur R, Čermák J, Ceulemans R, Janssens I A. Stored water use and transpiration in Scots pine: a modeling analysis with ANAFORE. *Tree Physiology*, 2007, 27(12): 1671-1685.
- [6] Meinzer F C, Brooks J R, Domec J C, Gartner B L, Warren J M, Woodruff D R, Bible K, Shaw D C. Dynamics of water transport and storage in conifers studied with deuterium and heat tracing techniques. *Plant, Cell and Environment*, 2006, 29(1): 105-114.
- [7] Xi R C, Ma L Y, Fan M, Li L P, Kong J J, Wang R H. Water capacity of branches and stems of *Pinus tabulaeformis* and its impact on transpiring water consumption. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 160-165.
- [8] Sun L, Xiong W, Guan W, Wang Y H, Xu L H. Use of storage water in *Larix principis-ruprechtii* and its response to soil water content and potential evapotranspiration: a modeling analysis. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(4): 411-421.
- [9] Hölltä T, Mencuccini M, Nikinmaa E. A carbon cost-gain model explains the observed patterns of xylem safety and efficiency. *Plant, Cell and Environment*, 2011, 34(11): 1819-1834.
- [10] Sun S J, Meng P, Zhang J S, Huang H, Wan X C. Deuterium isotope variation and water use in an agroforestry system in the rocky mountainous area of North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3717-3726.
- [11] James S A, Meinzer F C, Goldstein G, Woodruff D, Jones T, Restom T, Mejia M, Clearwater M, Campanello P. Axial and radial water transport and internal water storage in tropical forest canopy trees. *Oecologia*, 2003, 134(1): 37-45.
- [12] Meinzer F C, James S A, Goldstein G, Woodruff D. Whole-tree water transport scales with sapwood capacitance in tropical forest canopy trees.

- Plant, Cell and Environment, 2003, 26(7): 1147-1155.
- [13] Marc V, Robinson M. Application of the deuterium tracing method for the estimation of tree sap flow and stand transpiration of a beech forest (*Fagus sylvatica* L.) in a mountainous Mediterranean region. Journal of Hydrology, 2004, 285(1/4): 248-259.
- [14] Dawson T E, Burgess S S O, Tu K P, Oliveira R S, Santiago L S, Fisher J B, Simonin K A, Ambrose A R. Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems. Tree Physiology, 2007, 27(4): 561-575.
- [15] Barnard D M, Meinzer F C, Lachenbruch B, McCulloh K A, Johnson D M, Woodruff D R. Climate-related trends in sapwood biophysical properties in two conifers: avoidance of hydraulic dysfunction through coordinated adjustments in xylem efficiency, safety and capacitance. Plant, Cell and Environment, 2011, 34: 643-654.
- [16] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [17] Jeschke W D, Pate J S. Mineral nutrition and transport in xylem and phloem of *Banksia prionotes* (Proteaceae), a tree with dimorphic root morphology. Journal of Experimental Botany, 1995, 46(8): 895-905.
- [18] Sperry J S, Donnelly J R, Tyree M T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. Plant, Cell and Environment, 1988, 11(1): 35-40.
- [19] Tyree M T, Ewers F W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. New Phytologist, 1991, 119(3): 345-360.
- [20] Mencuccini M. The ecological significance of long-distance water transport: short-term regulation, long-term acclimation and the hydraulic costs of stature across plant life forms. Plant, Cell and Environment, 2003, 26(1): 163-182.
- [21] Domec J C, Meinzer F C, Gartner B L, Woodruff D. Transpiration-induced axial and radial tension gradients in trunks of Douglas-fir trees. Tree Physiology, 2006, 26(3): 275-284.
- [22] Barbour M M, Farquhar G D. Relative humidity - and ABA-induced variation in carbon and oxygen isotope ratios of cotton leaves. Plant, Cell and Environment, 2000, 23(5): 473-485.
- [23] Liang J H, Zhang J H. The relations of stomatal closure and reopening to xylem ABA concentration and leaf water potential during soil drying and rewetting. Plant Growth Regulation, 1999, 29(1/2): 77-86.
- [24] Liu J J, Li J Y, Zhang J G. Influences of drought stress on hydraulic safety and efficiency in the saplings of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis*. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2507-2514.
- [25] Wullschlegel S, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees. Tree Physiology, 1998, 18: 499-512.
- [26] Liu Q X, Meng P, Zhang J S, Gao J, Huang H, Sun S J, Lu S. Potential errors in measuring tree transpiration based on thermal dissipation method. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3343-3350.
- [27] Sperry J S, Meinzer F C, McCulloh K A. Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees. Plant, Cell and Environment, 2008, 31(5): 632-645.
- [28] Saliendra N Z, Sperry J S, Comstock J P. Influence of leaf water status on stomatal response to humidity, hydraulic conductance, and soil drought in *Betula occidentalis*. Planta, 1995, 196(2): 357-366.
- [29] Fan D Y, Xie Z Q. Several controversial viewpoint in studying the cavitation of xylem vessels. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 126-132.
- [30] Wan X C, Meng P. Physiological and ecological mechanisms of long-distance water transport in plants: a review of recent issues. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5): 804-813.
- [31] Johnson D M, McCulloh K A, Meinzer F C, Woodruff D R, Eissenstat D M, Phillips N, Editor H. Hydraulic patterns and safety margins, from stem to stomata, in three eastern US tree species. Tree Physiology, 2011, 31(6): 659-668.
- [32] Domec J C, Pruyn M L, Garter B L. Axial and radial profiles in conductivities, water storage and native embolism in trunks of young and old-growth ponderosa pine trees. Plant, Cell and Environment, 2005, 28(9): 1103-1113.
- [33] Meinzer F C, Johnson D M, Lachenbruch B, McCulloh K A, Woodruff D R. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. Functional Ecology, 2009, 23(5): 922-930.

参考文献:

- [7] 奚如春, 马履一, 樊敏, 李丽萍, 孔俊杰, 王瑞辉. 油松枝干水容特征及其对蒸腾耗水的影响. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 160-165.
- [8] 孙林, 熊伟, 管伟, 王彦辉, 徐丽宏. 华北落叶松树体储水利用及其对土壤水分和潜在蒸散的影响: 基于模型模拟的分析. 植物生态学报, 2011, 35(4): 411-421.
- [10] 孙守家, 孟平, 张劲松, 黄辉, 万贤崇. 华北石质山区核桃-绿豆复合系统氡同位素变化及其水分利用. 生态学报, 2010, 30(14): 3717-3726.
- [24] 刘娟娟, 李吉跃, 张建国. 干旱胁迫对油松和侧柏水分运输安全性和有效性的影响. 生态学报, 2010, 30(9): 2507-2514.
- [26] 刘庆新, 孟平, 张劲松, 高峻, 黄辉, 孙守家, 陆森. 基于热扩散方法测定树木蒸腾的潜在误差分析. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3343-3350.
- [29] 樊大勇, 谢宗强. 木质部导管空穴化研究中的几个热点问题. 植物生态学报, 2004, 28(1): 126-131.
- [30] 万贤崇, 孟平. 植物体内水分长距离运输的生理生态学机制. 植物生态学报, 2007, 31(5): 804-813.

CONTENTS

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland	ZHANG Qunjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphor in stormwater runoff from green roofs	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker)	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration: a case study of Gongyi City	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level: a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathcartii</i>	YUAN Chunming, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i>	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat	FAN Gaoqiong, YANG Ennian, ZHENG Ting, et al (3940)
Review and Monograph	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
Scientific Note	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元