

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **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 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

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

DOI: 10.5846/stxb201110101482

梅婷婷, 赵平, 倪广艳, 王权, 曾小平, 周翠鸣, 蔡锡安, 余孟好, 曹庆平. 树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应. 生态学报, 2012, 32(22): 7018-7026.

Mei T T, Zhao P, Ni G Y, Wang Q, Zeng X P, Zhou C M, Cai X A, Yu M H, Cao Q P. Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7018-7026.

树木胸径大小对树干液流变化格局 的偏度和时滞效应

梅婷婷¹, 赵平^{1,*}, 倪广艳¹, 王权², 曾小平¹, 周翠鸣¹,
蔡锡安¹, 余孟好¹, 曹庆平¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 日本静冈大学农学部, 静冈 422-8529 日本)

摘要:通过分析具不同水力结构的马占相思、荷木和粉单竹液流变化格局的偏度和时滞,探讨液流的空间分布特征及对冠层蒸腾的影响。结果表明:荷木的液流格局偏度和时滞随树木胸径的增加呈减小的趋势,但马占相思由于冠层开阔和林分分化程度高而规律不明显,粉单竹液流偏度随胸径减少,由于冠幅较小,接受的光照较均匀,个体间的时滞差异不明显,但时滞值比胸径近似的荷木小。树干水分传输过程中存在液流再分配的现象,边材的导水效率可能是影响时滞的重要原因。冠层蒸腾的空间异质性与树木储存水有关,大树储存水较多,冠层蒸腾的异质性小;小树储存水较少,液流被优先分配到光照充足的东南方位,导致冠层蒸腾较高的异质性。旱季受土壤水分的限制,大树储存水对蒸腾的贡献大于湿季,而小树蒸腾由于受到储水容量的制约,储存水对蒸腾的贡献小于湿季。冠层接受光照的迟或早以及辐射量的大小是引起蒸腾时间变化格局和树干不同方位液流格局差异的重要原因,但液流的横向交换弱化了这种现象,往往是个体间的差异掩盖了方位的差异。湿季较小胸径的树木比偏值(枝下高与胸高处液流偏度的比值)大于旱季,而较大胸径的树木比偏值恰好相反,总体而言,比偏值随着胸径的增加而逐渐下降。

关键词:蒸腾;液流密度;偏度;时滞

Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag

MEI Tingting¹, ZHAO Ping^{1,*}, NI Guangyan¹, WANG Quan², ZENG Xiaoping¹, ZHOU Cuiming¹, CAI Xi'an¹,
YU Menghao¹, CAO Qingping¹

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 Faculty of Agriculture, Shizuoka University Shizuoka 422-8529 Japan

Abstract: In this article the skewness of sap flow pattern and the time lag between stem sap flow and canopy transpiration in *Acacia mangium*, *Schima superba* and *Bambusa chungii* which were characterized with different hydraulic structures were analyzed. The spatial variation in sap flow within tree trunk and its effect on transpiration were also investigated. The results showed that both skewness and time lag in *S. superba* decreased with the increment of stem diameter at breast height (DBH). However, similar changes in *A. mangium* were not significant because of open canopy of the stand and differentiation among individuals. The skewness of sap flow pattern in *B. chungii* increased with DBH, but no significant relation between time lag and DBH was observed because of its smaller canopy that evenly received radiation. However the

基金项目:国家基金项目(30871998, 41030638, 31170673)

收稿日期:2011-10-10; 修订日期:2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoping@scib.ac.cn

time lag in *B. chungii* was smaller than in *S. superba* with similar DBH. Re-allocation of sap flow within stem during water transport implied that hydraulic conductivity was an important factor affecting time lag. The spatial heterogeneity of canopy transpiration was related to water storage. Larger tree had relative more water storage and therefore lower heterogeneity. In smaller trees that normally had less water storage, sap flow was preferentially allocated to the east and south branches where more sunlight was received than in the other directions, which led to higher heterogeneity in canopy transpiration. Being restricted by soil moisture during dry season, the water storage in larger trees contributed more contribution to transpiration than in wet season. In contrast, contribution of water storage to transpiration in smaller trees was less in dry season than in wet season, since the transpiration was more restricted by the quantity of stored water. Being radiated earlier or later and the intensity of radiation on canopy may have caused differences in time pattern of sap flow and its azimuthal difference in tree stem. However, the transversal exchange of sap flow attenuated this difference and among-trees difference concealed the azimuthal difference of sap flow. The skewness ratio (the ratio value between skewness of sap flow at clear bore height and that at breast height) of tree with smaller DBH was higher in wet season than in dry season, but it was reverse for the trees with larger DBH. Generally the skewness ratio decreased with the increase in DBH.

Key Words: transpiration; sap flux density; skewness; time lag

蒸腾是植物与外界进行物质和能量交换的重要生理过程,为植物吸收矿物质、光合、呼吸等生理活动提供必要的代谢基础^[1]。随着树干液流测定系统在树木水分生理和森林水文研究中的广泛应用,整树水分利用的研究得以不断深入,由液流密度测定值经尺度扩展获得的整树总液流被认为最接近冠层蒸腾^[2],并可由此估算冠层气孔导度和碳吸收。然而,许多研究表明,树干胸高处测量的液流与冠层蒸腾之间存在一定的时滞^[3-5],影响人们对基于液流测定值计算的冠层蒸腾与环境因子关系的准确理解。时滞形成的原因有多种,主流观点认为水分被根系吸收传送至冠层的过程会遇到较大的阻力,树冠或树干上部的储存水被优先用于蒸腾而形成与液流之间的迟滞现象,高大树木的水分传输路径长,储存水较多,时滞也较大^[6-8]。对松杉类裸子植物的研究均支持这一观点,但是有学者发现高大热带树种(树高>50 m)的时滞小于 20 min,认为储存水不一定是时滞产生的最主要原因^[9]。此外,亦有学者指出,由于树木对自身水容和水力阻力的适应性调整,个体之间的时滞差异并不明显,或者不同季节时滞有所变化^[10-11]。本文选择华南地区常见的、在形态和边材结构有所不同的马占相思、荷木和粉单竹进行液流变化格局和时滞的观测研究。马占相思是当地引种的外来树种,树形高大,边材较薄,根系浅;荷木则是深根系的乡土树种,具有较厚的边材组织;粉单竹属单子叶植物,缺少次生生长期,竹壁薄。很显然,水力结构有明显差别的 3 个树种的液流格局和时滞必然会有所不同,那么差异的表现形式如何? 本文通过观测树干边材不同深度、方位和高度的液流,分析不同胸径树木液流的时滞和格局,以及储存水对时滞的影响,为准确理解时滞和冠层蒸腾的关系,阐明树木的水分吸收、传输和分配与生长的关系提供实验依据。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

马占相思(*Acacia mangium*)树干液流的观测在中国科学院鹤山丘陵综合试验站内的一片马占相思林内进行。该站位于广东省鹤山市境内,东经 112°53',北纬 22°40';年平均气温 21.7℃,1 月平均温度最低(13.1℃),7 月最高(28.7℃),年降雨量约 1700 mm,但降雨分配不均,有湿、旱季之分;全年太阳辐射强烈,年均辐射总量为 $4.35 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$ ^[10,12-13]。荷木(*Schima superba*)树干液流的监测在中国科学院华南植物园小青山地带性植被生态系统观测场的荷木林内进行,该实验样地地处广州市东北部,北纬 23°10',东经 113°21',年均气温 21.8℃,月均最低和最高气温分别出现在 1 月份(9.8℃)和 7 月份(32.7℃);年均降雨量 1700 mm,全年也有旱、雨季之分;全年太阳辐射强烈($4.35 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$),该地区雨热同季,植被生产力较高^[14-15]。粉单竹(*Bambusa chungii*)的液流监测样地位于华南植物园科研区内,气候条件与荷木林样地相同,立地条件中等。

1.2 实验材料

马占相思人工林种植规格 3 m × 3 m, 林龄 22a, 个体间的空间相对较大, 冠层开阔, 森林已进入生长后期并呈衰退趋势, 液流测定样树形态特征见 Zhao 等^[10,13]。荷木林为 20 世纪 80 年代中期种植的人工纯林, 正值生长成熟期, 冠层郁闭, 液流测定样树树形特征(包括边材不同深度液流监测实验的样树)见 Mei 等^[14]。马占相思林和荷木林均为成熟林, 马占相思样树的选择先将林内的树木按 5 个茎级(<15.0 cm, 15.0—20.0 cm, 20.0—25.0 cm, 25.0—30.0 cm, >30.0 cm)进行划分, 每个茎级选择 2—3 株棵数; 荷木也是分为 5 个茎级(6.1—10.0 cm, 10.0—14.0 cm, 14.0—18.0 cm, 18.0—22.0 cm, >22.0 cm), 每个茎级则选择 3—5 棵样树, 另外在最大茎级的荷木个体中选择 3 棵, 用于不同边材深度液流的监测; 粉单竹为丛生竹, 个体生长比较均匀, 形态大小差异不明显, 随机选择竹龄 2—6a 的 5 株样竹。

1.3 实验方法

1.3.1 树干液流和环境因子的监测

对马占相思(2003 年 8 月—2007 年 12 月)、荷木(2007 年 8 月—2010 年 12 月)和粉单竹(2010 年 7 月—12 月)液流进行连续观测, 本文只选择其中部分数据进行相关内容的分析。马占相思样树共 14 棵(树高 $h = (17.8 \pm 3.1)$ m; 胸径 $DBH = (29.30 \pm 6.68)$ cm), 在树干北方位胸高处安装热消散液流探针(TDP), 其中 4 棵在东南西北 4 个方位安装 TDP, 具体方法见 Ma 等^[16]。荷木样树共 21 棵($h = (10.6 \pm 2.4)$ m; $DBH = (15.54 \pm 5.89)$ cm), 均在北方位胸高处安装 TDP, 从中选择 6 棵胸径和树高中等的样树, 于枝下高处增加安装 TDP 针, 同步监测树干上下部位的液流密度值; 对用于不同边材深度液流的监测 3 棵荷木, 分别在边材 20, 40, 60 mm 处安装 TDP, 测量液流密度的径向变化, 实验方法见 Mei 等^[14]。对所选择的 5 株样竹($h = (8.1 \pm 0.7)$ m; $DBH = (7.26 \pm 0.57)$ cm), 同样于北方位胸高处安装长度为 10 mm 的 TDP 探针; 由于粉单竹的竹壁厚度为 9—12 mm, 10 mm 探针容易钻穿竹壁, 引起上方加热探针的热量以辐射形式损失, 造成测量误差, 参考 Lu 等提出的解决方案^[17], 将探针斜向 45° 插入竹壁, 水平垂直深度约 8 mm。上下探针之间以竹节相隔, 以防止上探针的热量在竹腔内传导而影响下探针。

马占相思林和荷木林冠层上方的光合有效辐射(PAR)、气温和相对湿度等环境因子的监测与液流的监测同步, 具体实验方法分别见 Ma 等^[16]和 Mei 等^[14], 粉单竹样地与荷木林相近, 环境因子取自荷木冠层上方的监测数据。

1.3.2 错位相关法求算时滞

气孔是水汽进出的通道, 在内外水汽压差的驱动下, 水汽由气孔扩散到大气。由于叶片表面甚至冠层上方存在一个边界层, 造成气孔活动与外界大气脱耦联, 蒸腾不再单纯地受气孔控制。Jarvis 等引入了一个无量纲的脱耦联系数(Ω , 0—1)描述水汽的耦联关系, Ω 越大气孔蒸腾与大气水汽压关联程度越低, Ω 越小则关联程度越高^[18]。Jarvis 等根据叶片表面能量守恒原理, 结合彭曼(P-M)公式推导出含有 Ω 的蒸腾公式: $E = \Omega \times E_{eq} + (1 - \Omega) \times E_{imp}$, 其中 E 为冠层蒸腾, E_{eq} 为平衡蒸腾速率, E_{imp} 为强制蒸腾速率。实验证明, Ω 随叶片面积的增大而升高, 并从单叶到整树再到林分水平不断上升。阔叶林的 Ω 接近 1.0, 气孔导度的小幅变化对林分蒸腾的影响几乎可以忽略, 控制蒸腾的不再是气孔而是 E_{eq} , 而后者主要受 PAR 的影响, 据此可将 PAR 和 E 的日变化格局看作是同步的。

按观测时间顺序, 将液流密度和对应的 PAR 两列数据排列, 逐次按 10 min 进行错位移动, 分析每次错位后两列数据的相关关系, 相关系数达到最大值时对应的错位时间即为液流对 PAR 的时滞^[19]。

2 结果与分析

2.1 树干液流格局的偏度和时滞

偏度是衡量观测值众数偏离平均数程度(大小)和偏向(正负)的无量纲数值, 反映正态分布曲线一个方向上尾部拉长的趋势^[14], 时滞则是指树干液流测定值与冠层蒸腾之间的时间迟滞现象, 受环境因子和自身水分利用特征的影响。本研究选择了第 11 号($DBH = 14.7$ cm)和 14 号($DBH = 16.6$ cm)荷木样树进行分析, 液

流密度(J_s)日变化格局的偏度分别为 1.187 和 1.005, 前者大于后者, 偏度小的个体液流日变化格局较宽, 偏度大的则较窄(图 1)。从生物学的角度来分析, 偏度大的个体液流上午启动后较迅速到达峰值并很快回落, 而偏度小的个体液流达到峰值的时间较迟, 回落比较缓慢。液流峰值一般在午间时刻, 树木水分亏缺最严重, 之后由于水汽应力减小和液流的持续进行, 树体水分亏缺得以缓解。偏度小的个体液流到达峰值后下降较慢的原因是蒸腾压力下降慢, 或者是水分亏缺较大而需要较多的补水, 使得树干下方液流活动维持在较高的水平。此外, 图 1 显示尽管偏度不同, 但两棵样树的 J_s 与 PAR 的时滞均为 60 min, 显示偏度和时滞在生理上可能没有必然的联系。

2.2 树干不同方位液流偏度和时滞

以马占相思为例。方差分析的结果显示, 树木个体之间($P=0.2911$)和树干内东南西北四个方位($P=0.8552$)的液流日变化格局的偏度差异均不显著。图 2 是 14 棵样树同一方位的液流偏度均值, 总体上西向的液流偏度最大, 北向最小, 旱季(1—3 月)东向偏度小于南向, 湿季南向偏度小于东向(4—7 月); 无论是哪个方位, 旱季偏度均大于湿季。对 14 棵样树个体之间以及 4 个方位液流时滞的方差分析显示, 个体间液流时滞差异极显著($P=0.0009$), 个体内不同方位液流的时滞差异则不显著($P=0.414$)(图 3)。总体上, 西向液流时滞最大, 东向最小, 湿季的液流时滞小于旱季。以上对液流格局的偏度、时滞以及液流在树干不同方位的分布特征的分析显示, 不同方位液流格局的差异是由于冠层接受光照时间的迟早、辐射量的不同、以及蒸腾时间格局的变化所引起的, 由于木质部内液流的横向交换, 不同方位液流格局的差异并不明显, 往往是个体间的差异掩盖了方位上的差异。

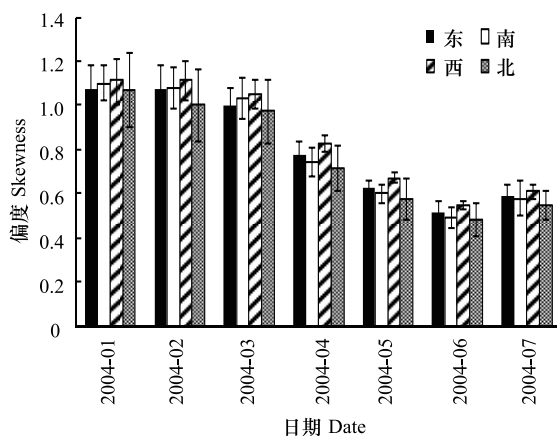


图 2 不同月份马占相思树干不同方位液流的偏度

Fig. 2 Skewness of different azimuthal sap flow of *Acacia mangium* in different months

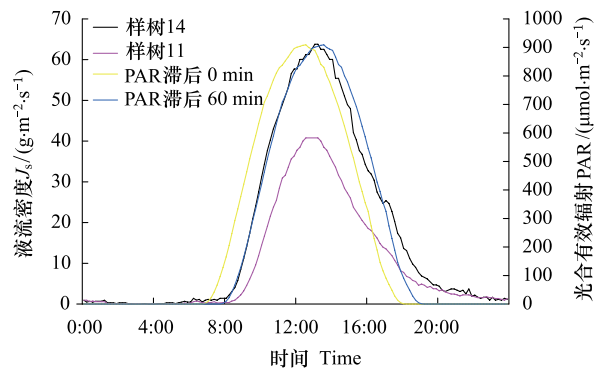


图 1 荷木液流昼夜变化与按时滞错位前后的光合有效辐射格局的比较(2009 年 12 月 1 日)

Fig. 1 Diurnal change of sap flow of *Schima superba* in comparison with photosynthetically active radiation before and after dislocation of time lag (December 1, 2009)

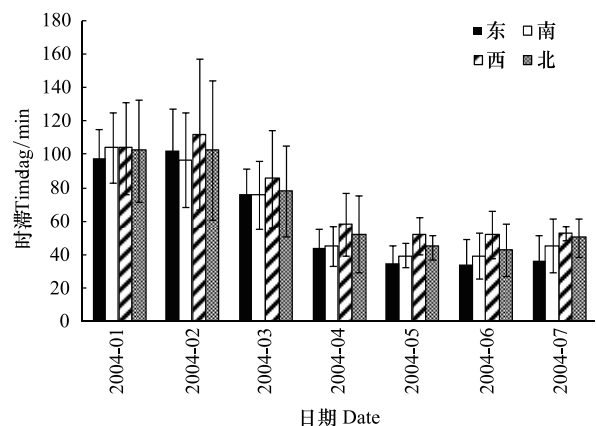


图 3 不同月份马占相思树干不同方位液流格局的时滞

Fig. 3 Time lag of different azimuthal sap flow of *Acacia mangium* in different months

2.3 边材不同深度的液流偏度和时滞

以荷木为例。树干液流的偏度以及边材不同深度间的差异均从湿季(9—10 月)到旱季(11—12 月, 1—3 月)逐渐增加(图 4), 时滞也呈现相似的趋势, 但边材不同深度液流时滞差异的增大却特别明显, 而且是由外至里增大(图 5), 意味着树干边材内部的水分横向传输主要是由外向里进行。由于湿季土壤水分供应充足,

边材外围液流启动较早,回落较慢,是主要的液流活动区;旱季随着土壤水分的下降,边材外围的液流启动时间较湿季晚,但比边材内部的液流启动早。边材内部液流下降慢,说明旱季边材内部液流对树木水分补充起到更重要的作用。由此可以理解,边材外部的导管主要为蒸腾输送水分,内部导管则主要起到补充储存水的作用。

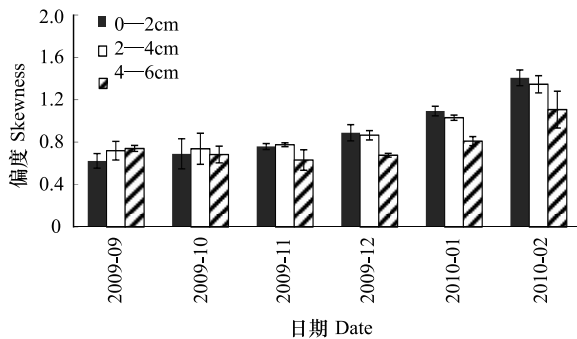


图4 荷木树干边材不同深度的液流偏度

Fig. 4 Skewness of sap flow in different sapwood depths of *Schima superba*

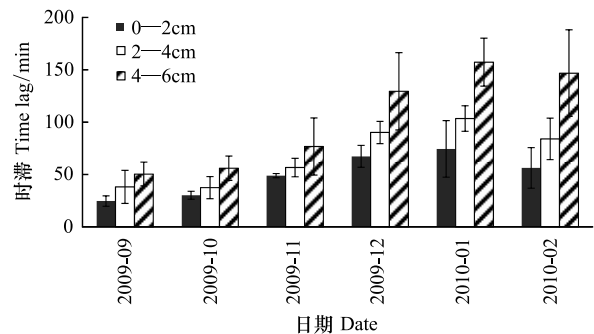


图5 荷木树干边材不同深度的液流时滞

Fig. 5 Time lag of sap flow in different sapwood depths of *Schima superba*

2.4 树干不同高度的液流特征

为了衡量树干储存水对蒸腾的贡献,引入了比偏值的概念,即枝下高与胸高两处液流偏度的比值。比偏值大于1表示枝下高处的液流偏度大于胸高处,若小于1,则枝下高处的液流偏度小于胸高处。比偏值大的个体树干储存水较少,对冠层蒸腾贡献小,比偏值小的个体树干储存水较多,对冠层蒸腾贡献大。依然以荷木为例,胸径较小的树木湿季的比偏值大于旱季,而较大胸径的荷木旱季比偏值大于湿季;随着胸径的增加,比偏值逐渐降低(图6)。图7显示树干上下液流时滞差的变异比较大,时滞差反映的是树干上下液流从启动到快速上升到峰值时间的差异,差值越大说明树干上部液流启动到快速上升至峰值所用的时间较胸高处的液流长。除了4号和5号样树,树干上下时滞差均在 ± 20 min以内,旱季与湿季时滞差的变异规律不明显。

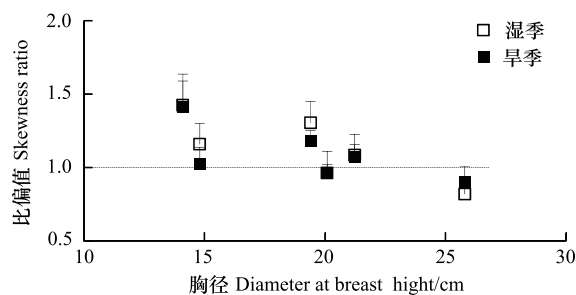


图6 旱季(11—12月, 1—3月)和湿季(9—10月)不同胸径荷木树干枝下高处和胸高处的液流比偏值

Fig. 6 Skewness ratio of stem sap flows at clear bole height and at breast height of *Schima superba* of different DBH in dry (Nov.—Dec., Jan.—Mar.) and wet (Sept.—Oct.) seasons

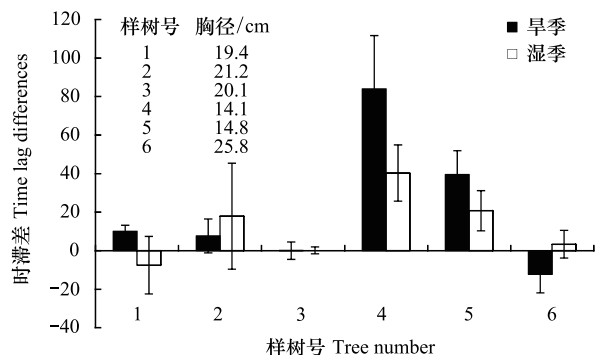


图7 不同荷木个体树干枝下高处和胸高处液流的时滞差

Fig. 7 Time lag difference between sap flows at clear bole height and at breast height of different *Schima superba* trees

上述结果表明,胸径越大的个体储存水对冠层蒸腾的贡献越大,胸径较小的个体不管在旱季还是湿季,体内储存水都不足以满足日间蒸腾所需,相比较而言湿季对冠层蒸腾的贡献要比旱季小。树干上下液流时滞差的变化说明储存水影响个体冠层蒸腾的异质性,这一点可以从图7中的4号和5号树(均为小树)旱季时滞差大于湿季得以证明。由于土壤水分的空间异质性,树干不同方位液流可能不同,但冠层不同方位枝条的蒸腾差异也有可能引起液流在输送过程中被重新分配,储存水较小的个体由于不能保证整个冠层叶片蒸腾的同步

性,光照较充足的枝条会优先得到液流供应,北向枝条光照条件弱于东南方向的枝条,因此胸径较小的个体在枝下高处液流的时滞比胸高处大。胸径较大的个体储存水较大,冠层蒸腾较均匀,树干上下时滞差较小。

2.5 不同树种液流格局和时滞的比较

图 8 显示,荷木液流偏度和时滞均随树木胸径的增加而减小,而马占相思这种规律不明显,原因是马占相思林分冠层比较开阔,个体的胸径较大,液流偏度和时滞均较小。荷木和粉单竹的液流偏度随着胸径的增大具有相同的规律,用幂函数拟合的曲线效果最好(图 9),粉单竹的时滞与胸径关系不明显,但比相同胸径荷木的小,原因是竹子冠幅较小,冠层接受光照比较均匀。不管偏度还是时滞,随着树龄的增加,小树液流的偏度和时滞增加,而大树液流的偏度和时滞减小。对以上 3 种树木的液流偏度和时滞的分析表明,不同树种的液流格局的偏度和时滞的变化规律性不完全一样,随着林分的分化,树木个体间的大小差异也会使得这两个特征的差异更明显。

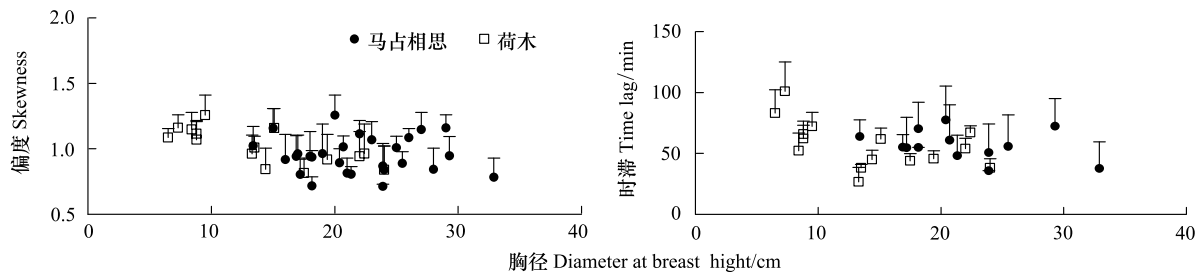


图 8 不同胸径马占相思和荷木的液流偏度和时滞的比较(数据取自 2007 年 7—10 月)

Fig. 8 Comparison of skewness and time lag of sap flow between *Acacia maingum* and *Schima superba* trees of different DBH (data obtained from July — October, 2007)

图 10 显示,荷木和马占相思日累计液流量(Q_a)随着胸径的增大而增加,但是马占相思个体间的差异较明显。图 11 中荷木的日累计液流量依然是随胸径增大而增加,粉单竹由于个体的胸径差异不大,未显示类似的关系。比较 2007 年和 2010 年荷木的 Q_a 发现随着树龄的增加,胸径较小的荷木个的日累计液流量的增加不明显,而胸径较大树木的液流量则显著上升。

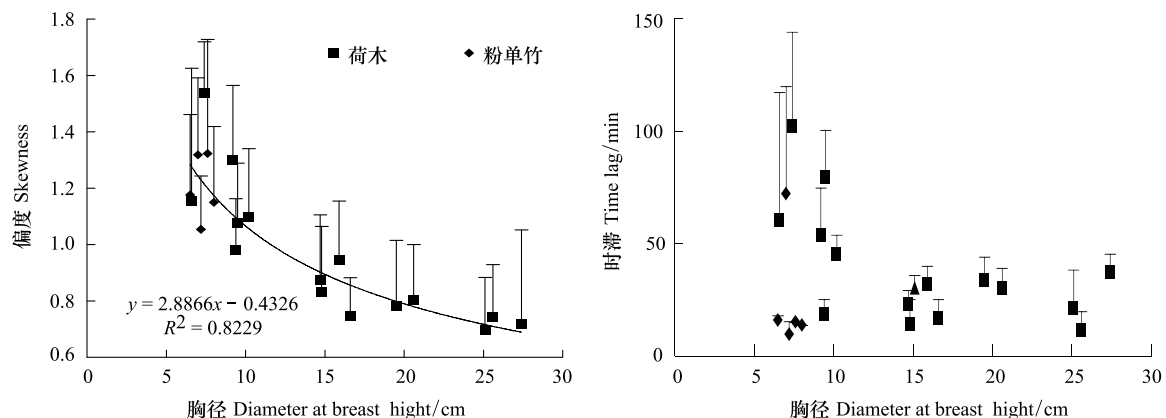


图 9 不同胸径荷木和粉单竹的液流偏度和时滞的比较(数据取自 2010 年 7—10 月)

Fig. 9 Comparison of skewness and time lag of sap flow between *Schima superba* and *Bambusa chungii* trees of different DBH (data obtained from July—October, 2010)

3 讨论

不少学者在针叶树种中观察到 40—180min 不等的液流与冠层蒸腾之间的时滞^[3-7],马占相思、荷木和粉单竹也都存在明显的时滞(在 25—160 min 之间)。尽管有学者强调储存水是时滞产生的主要原因,但是 Kume 等发现热带雨林上层树木(高 50 m)树干液流和冠层蒸腾之间的时滞小于 20 min^[9],本文对荷木液流的

观测也显示,时滞随树干胸径的增加而减小,但马占相思和粉单竹并没有显示这种明显关系,由于树形较大的树木往往有较多的储存水,说明储存水不一定是导致时滞的主要原因,本文和 Kume 等. 的研究结果未能完全支持目前流行的观点。

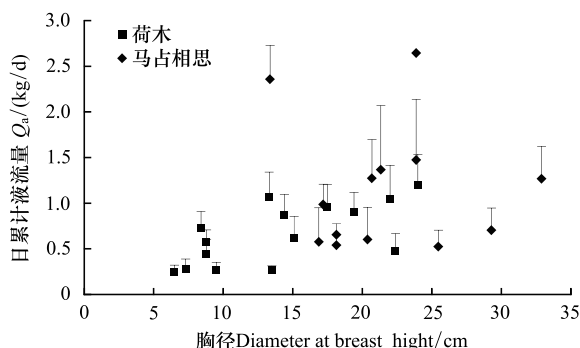


图 10 不同胸径荷木和马占相思日累计液流量(数据取自 2007 年 10—12 月)

Fig. 10 Daily cumulative sap flow per individual tree of *Schima superba* and of *Acacia mangium* of different DBH (data obtained from October—December, 2007)

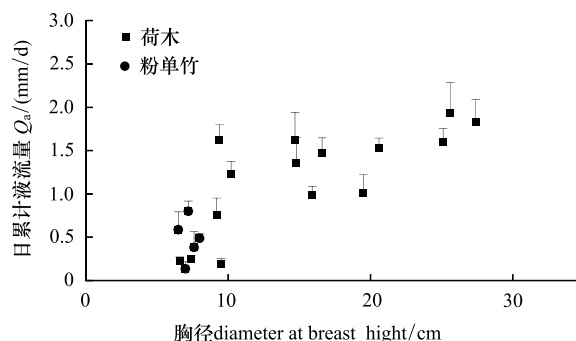


图 11 不同胸径荷木和粉单竹日累计液流量(数据取自 2010 年 10—12 月)

Fig. 11 Daily cumulative sap flow per unit sapwood area of *Schima superba* and *Bambusa chungii* trees of different DBH (data obtained from October—December, 2010)

冠层蒸腾的启动消耗树冠的水分,枝条水势下降的信息通过树干迅速传导到基部引发根系吸水,由于被吸收的水分要经过一段时间才能到达冠层,所以冠层蒸腾与树干液流之间的时滞并不完全由储存水引起,储存水对时滞的影响可能有限^[20]。本研究对时滞的比较分析显示,胸径较小的荷木与马占相思的时滞比较接近,但胸径较大的马占相思的时滞却比较高(图 8),荷木与粉单竹相比较,前者的时滞较高,而后者的较低(图 9)。一般来说,针叶树种的时滞较大,而热带和亚热带地区的阔叶树种时滞较小,不同方位液流的时滞相差比较明显(如图 3),不仅如此,边材不同深度的液流密度^[14]和液流的时滞变化(图 5)也较大,可以说是由于不同部位的输水结构及其导水能力的差异所造成的,所以,输导组织的类型和导水效率对时滞的影响比储存水的影响可能会更大。马占相思的平均胸径较大,但该林分已经接近老龄林^[13],与荷木林相比,林分生长已呈衰退的趋势,因此,马占相思导管的导水效率比相同胸径荷木要低,也可以理解马占相思的时滞为什么较高。竹子为单子叶植物,竹秆无次生生,竹壁横截面无径向排列的薄壁细胞群(即维管射线),水分的横向运输比较困难,由于竹秆中空,水分传输的有效面积较小,高效运输可能是竹子为维持较高的生长速率的水分利用策略。与相同胸径的荷木相比(图 9),粉单竹具有较小的时滞间接地说明了竹子以高效传输水分的方式弥补储存水较小的弱点。

树木日蒸腾耗水量一般在 0.5—5 mm 之间^[21-23],树干是一些树种主要的储水组织,对蒸腾的贡献明显^[24],如欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)树干储水对冠层蒸腾的贡献平均为 64%^[8],花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)树干提供的储存水是枝条的 18 倍^[5],Phillips 等认为大树通过提高体内的储存水,可以补偿由水力限制造成的气孔关闭和光合下降^[6],本文的研究也显示大树的储存水较多,在旱季对日间蒸腾的贡献最大。

本研究显示,胸径较大的荷木枝下高与胸高处的液流时滞差较小(图 7 中的 1、2、3、6 号树),它的冠层蒸腾较为均匀;而胸径较小的荷木冠层蒸腾不均匀,水分会优先分配给光照条件较充足、竞争力较强的枝条,因此,获取较少辐射的北向枝下高处的液流时滞较胸高处要大。Schulze 等对落叶松(*Larix gmelinii*)和云杉(*Picea abies*)的冠层蒸腾和树干液流监测显示,光照充足的枝条液流启动时间比光照不足的枝条要早,时滞较小^[4],这与本文马占相思树干不同方位的液流时滞观测结果相似(图 3),一般情况下西向和北向枝条获得的光照条件不如东向和南向枝条,图 3 中树干东南向的液流时滞较小。Schulze 等还认为遮阴枝条液流与树干基部液流的格局较一致,说明冠层储水对蒸腾的贡献很大,是导致冠层蒸腾和树干基部液流时滞小的原因,这

与本文的观点不同。与被子植物树木的输水组织导管不同, 松杉等裸子植物输水组织为管胞, 输水阻力较大, 因此需要消耗掉较多的冠层储存水才能积累足够的蒸腾拉力, 带动基茎处液流的上升。当光照较充足的枝条需要获得水分补充的时候, 水分是由主干提供还是由遮阴枝条水分回流提供, 目前也无法区分^[25-26]。荷木枝下高处液流滞后于胸高处液流表明光照较充足枝条的水分主要由主干提供, 可能存在主干的水分再分配现象, 同时说明导管的导水效率是影响时滞的重要原因。Phillips 等的研究认为树木通过对自身水力阻力和水容的适应性调整, 使得不同大小树木的树干液流和冠层蒸腾之间的时滞相差不明显, Meinzer 等对热带树种的研究也获得类似的结果^[5,27]。由于目前的技术还无法做到在小树树干的不同方向安装 TDP, 难以判断基茎处的不同方位的液流是否存在显著差异。基于观察到的小树存在液流的再分配现象, 假定小树胸高处不同方向的液流有明显差异, 那么, 大树和小树时滞的差异可能是由小树树体水分的再分配而不仅仅是储存水引起的。

References:

- [1] Zhang G P, Zhou W J. Plant Physiological Ecology. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005: 113-113.
- [2] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [3] Granier A, Bobay V, Gash J H C, Gelpe J, Saugier B, Shuttleworth W J. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 51(3/4): 309-319.
- [4] Schulze E D, Čermák J, Matyssek R, Penka M, Zimmermann R, Vasiček F, Gries W, Kučera J. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees—a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. Oecologia, 1985, 66(4): 475-483.
- [5] Phillips N, Nagchaudhuri A, Oren R, Katul G. Time constant for water transport in loblolly pine trees estimated from time series of evaporative demand and stem sapflow. Trees-Structure and Function, 1997, 11(7): 412-419.
- [6] Phillips N G, Ryan M G, Bond B J, McDowell N G, Hinckley T M, Čermák J. Reliance on stored water increases with tree size in three species in the Pacific Northwest. Tree Physiology, 2003, 23(4): 237-245.
- [7] 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.
- [8] Waring R H, Whitehead D, Jarvis P G. The contribution of stored water to transpiration in Scots pine. Plant, Cell and Environment, 2006, 2(4): 309-317.
- [9] Kume T, Komatsu H, Kuraji K, Suzuli M. Less than 20-min time lags between transpiration and stem sap flow in emergent trees in a Bornean tropical rainforest. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(6/7): 1181-1189.
- [10] Zhao P, Rao X Q, Ma L, Cai X A, Zeng X P. The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium*. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4050-4058.
- [11] Zhao P. Compensation of tree water storage for hydraulic limitation: research progress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1565-1572.
- [12] Zhao P, Rao X Q, Ma L, Cai X A, Zeng X P. Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2005, 13(6): 457-468.
- [13] Zhao P, Rao X Q, Ma L, Cai X A, Zeng X P. Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 655-665.
- [14] Mei T T, Zhao P, Wang Q, Cai X A, Yu M H, Zhu L W, Zou L L, Zeng X P. Effects of tree diameter at breast height and soil moisture on transpiration of *Schima superba* based on sap flow pattern and normalization. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2457-2464.
- [15] Mei T T, Wang C K, Zhao P, Cai X A, Liu X J, Zhang Q Z. Dynamics of trunk sap flux density of *Schima superba*. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1): 40-47.
- [16] Ma L, Zhao P, Rao X Q, Cai X A, Zeng X P, Lu P. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium*. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [17] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- [18] Jarvis P G, McNaughton K G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. Advances in Ecological Research, 1986, 15: 1-49.
- [19] Wang H, Zhao P, Cai X A, Ma L, Rao X Q, Zeng X P. Time lag effect between stem sap flow and photosynthetically active radiation, vapor pressure deficit of *Acacia mangium*. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 225-230.

- [20] Gonzalez-Benecke C A, Martin T A, Cropper W P. Whole-tree water relations of co-occurring mature *Pinus palustris* and *Pinus elliotii* var. *elliottii*. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(3): 509-523.
- [21] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(4): 291-308.
- [22] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78(1/2): 19-29.
- [23] Wang Y L, Liu G B, Kume T, Otsuki K, Yamanaka N, Du S. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China. Journal of Forest Research, 2010, 15(4): 241-251.
- [24] Kumagai T, Aoki S, Otsuki K, Utsumi Y. Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees. Hydrological Processes, 2009, 23(16): 2335-2344.
- [25] Lemoine D, Cochard H, Granier A. Within crown variation in hydraulic architecture in beech (*Fagus sylvatica* L): evidence for a stomatal control of xylem embolism. Annals of Forest Science, 2002, 59(1): 19-27.
- [26] Brooks J R, Schulte P J, Bond B J, Coulombe R, Domec J C, Hinckley T M, McDowell N, Phillips N. Does foliage on the same branch compete for the same water? Experiments on Douglas-fir trees. Trees-Structure and Function, 2003, 17(2): 101-108.
- [27] Meinzer F C, James S A, Goldstein G. Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees. Tree Physiology, 2004, 24(8): 901-909.

参考文献:

- [1] 张国平, 周伟军. 植物生理生态学. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 113-113.
- [10] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. 生态学报, 2006, 26(12): 4050-4058.
- [11] 赵平. 树木储存水对水力限制的补偿研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1565-1572.
- [12] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(6): 457-468.
- [13] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度. 植物生态学报, 2006, 30(4): 655-665.
- [14] 梅婷婷, 赵平, 王权, 蔡锡安, 余孟好, 朱丽薇, 邹绿柳, 曾小平. 基于液流格型特征值和标准化方法分析胸径和土壤水分对荷木液流的影响. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2457-2464.
- [15] 梅婷婷, 王传宽, 赵平, 蔡锡安, 刘晓静, 张全智. 木荷树干液流的密度特征. 林业科学, 2010, 46(1): 40-47.
- [16] 马玲, 赵平, 饶兴权, 蔡锡安, 曾小平, 陆平. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [19] 王华, 赵平, 蔡锡安, 马玲, 饶兴权, 曾小平. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应. 应用生态学报, 2008, 19(2): 225-230.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,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

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 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