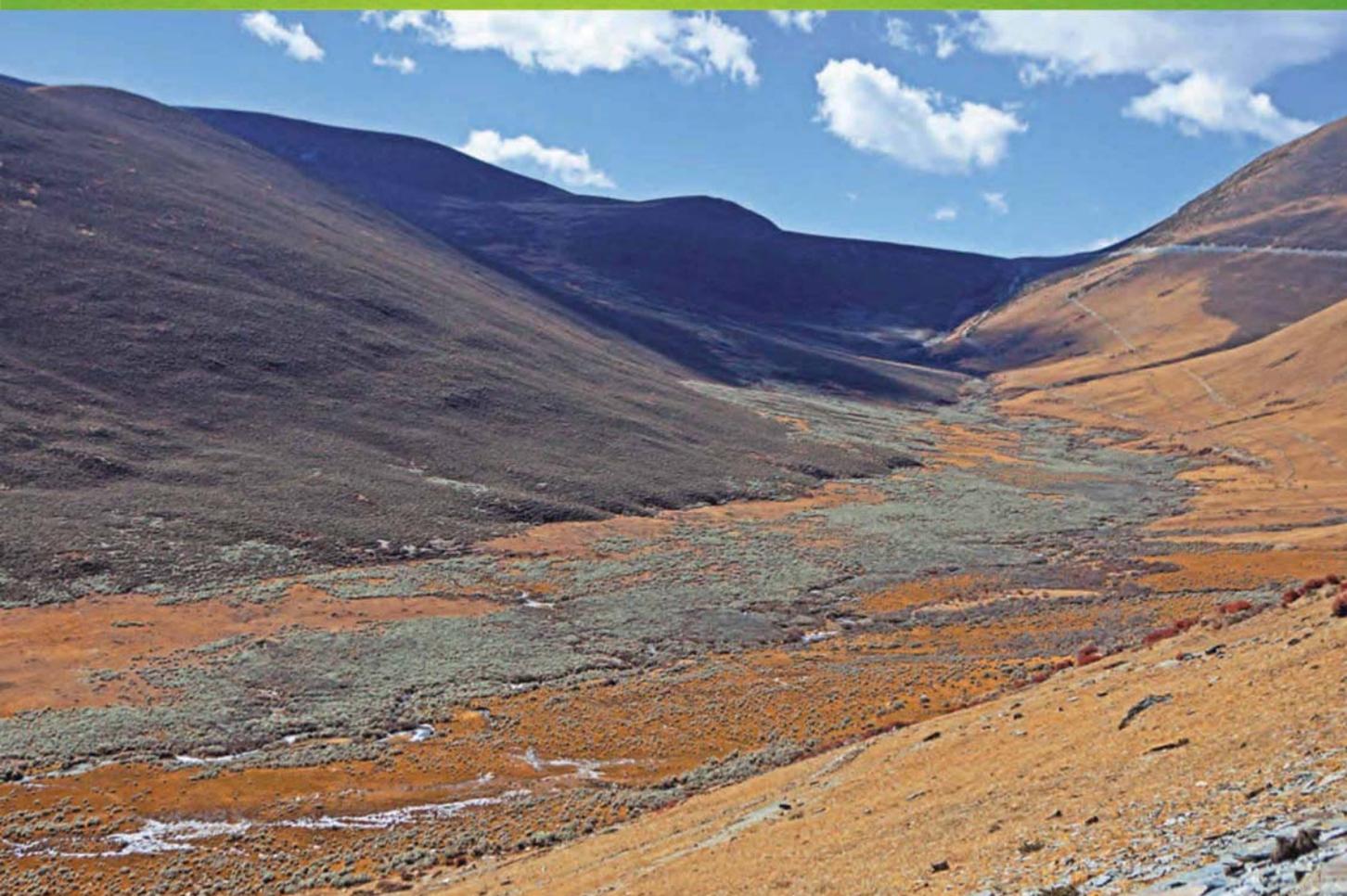


ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会  
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 33 卷 第 18 期      2013 年 9 月 (半月刊)

## 目 次

### 中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

美国农业生态学发展综述 .....	黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
水足迹研究进展 .....	马 晶, 彭 建 (5458)
江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 .....	孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 .....	董 蕾, 李吉跃 (5477)
生态化学计量学特征及其应用研究进展 .....	曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 .....	王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 .....	付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 .....	王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 .....	施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 .....	申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 .....	吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 .....	杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 .....	秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH <sub>3</sub> 挥发及氮肥利用率的影响 .....	马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 .....	孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 .....	赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 .....	王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 .....	汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 .....	陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 .....	邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 .....	赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 .....	郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 .....	王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 .....	黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 .....	何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
干旱荒漠区银白杨树干液流动态 .....	张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 .....	刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 .....	闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 .....	张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 .....	吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 .....	高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 .....	王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应 .....	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征 .....	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联 .....	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系 .....	王文君, 杨万勤, 谭波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态 .....	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征 .....	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征 .....	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响 .....	陈纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构 .....	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律 .....	潘影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征 .....	姚昕, 朱广伟, 高光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究 .....	王传辉, 吴立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应 .....	李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应 .....	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征 .....	王超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力 .....	贾宝全, 王成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化 .....	秦纪洪 王琴 孙辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例 .....	周健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究 .....	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析 .....	夏富强, 唐宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例 .....	魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性 .....	梁君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化 .....	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例 .....	刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例 .....	徐飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿 .....	李惠梅, 张安录, 王珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应 .....	李春林, 刘森, 胡远满, 等 (5952)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 514 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 59 \* 2013-09



**封面图说:** 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

**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/stxb201304020586

何春霞, 李吉跃, 孟平, 张劲松. 4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化. 生态学报, 2013, 33(18): 5644-5654.

He C X, Li J Y, Meng P, Zhang J S. Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5644-5654.

## 4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化

何春霞<sup>1,3</sup>, 李吉跃<sup>2,3,\*</sup>, 孟平<sup>1</sup>, 张劲松<sup>1</sup>

(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. 华南农业大学林学院, 广州 510642; 3. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了解西双版纳北热带雨林高大树木树顶叶片性状对通道阻力增长引起的水力限制增强及高光和季节性干旱等气候条件的响应, 对该区乔木浆果乌桕 (*Sapium baccatum* Roxb)、思茅木姜子 (*Litsea pierrei* var. *szemois liou*)、小叶藤黄 (*Garcinia cowa* Roxb) 及共生木质藤本黑风藤 (*Fissisfigma polyanthum* (Hook. f. et Thoms.) Merr.) 的叶片形态解剖结构、光合色素、水分利用效率 (WUE) 等随冠层高度的变化及种间差异进行了研究。结果表明: 小叶藤黄和思茅木姜子的叶片 (310.14, 319.73  $\mu\text{m}$ ) 和角质层 (6.06, 5.13  $\mu\text{m}$ ) 都较厚, 细胞较大 (21.48, 27.09  $\mu\text{m}$ ), 光合色素含量则较低; 黑风藤栅栏组织所占的比例最大, 光合色素含量也最高, 但叶片薄、WUE 最低; 浆果乌桕的 WUE 最高。随着冠层高度的增加, 4 种树木的叶厚、栅栏组织及角质层厚度、LMA、P/S 和 TPM/LT 均增加, 细胞变小, 其中黑风藤的变幅最大。4 树种的叶绿素和类胡萝卜素含量均随冠层的增高而减少,  $\delta^{13}\text{C}$  和 WUE 则随树冠增高而增大 (黑风藤的变幅小于 3 种乔木);  $\Delta$  则相反。上述结果表明 4 种树木冠层上部叶片偏向旱生结构和水分利用效率增加, 暗示树顶叶片可能受到了水分胁迫, 从而在结构上偏向于减少水分散失、功能上提高对水分的利用效率以适应水分亏缺; 同时, 随冠层增加光合色素含量减少, 暗示其光合碳同化能力也降低。上述结果支持了水力限制假说中由于通道阻力增大引起树顶水力限制增强, 大树可能会通过减少光和碳的获得而减慢树高生长的假设。

**关键词:** 热带雨林; 解剖结构; 光合色素; 稳定碳同位素; WUE

## Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species

HE Chunxia<sup>1,3</sup>, LI Jiyue<sup>2,3,\*</sup>, MENG Ping<sup>1</sup>, ZHANG Jinsong<sup>1</sup>

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

2 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China

3 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China

**Abstract:** Leaves as the main photosynthetic organs are sensitive to exterior environments. Generally the structure and physiological characteristics of leaves are influenced by water deficiency significantly. In the northern rainforest of Xishuangbanna in China, strong radiation and seasonal drought occur frequently. With the increasing of tree height, the xylem pathways increase, resulting in the increasing of water gravity and pathway resistance. In the rainforest, tree is higher and is liable to be influenced by hydraulic limitation. The response of treetop leaves to hydraulic limitation and seasonal drought in higher trees is particularly important to the study of seasonal rainforest. In order to understand the adaptation strategies of rainforest trees, the changes of leaf anatomical structure, pigment content, and water use efficiency (WUE) under varied tree heights of a liana plant *Fissisfigma polyanthum* (Hook. f. et Thoms.) Merr. and three co-existing arbors of *Sapium baccatum* Roxb, *Litsea pierrei* var. *szemois liou* and *Garcinia cowa* Roxb were studied in the rainforest of Xishuangbanna, China. Differences in leaf structure, pigment content and WUE were compared among the four tree species. The results showed that the *G. cowa* and *L. pierrei* have thicker leaf (310.14, 319.73  $\mu\text{m}$ ), thicker cuticle (6.06, 5.13  $\mu\text{m}$ ) and bigger cells (21.48, 27.09  $\mu\text{m}$ ). In addition, their photosynthetic pigments content were lower compared to the other two species. The palisade tissue occupied larger proportion of the leaf transverse section, and the pigments content

**基金项目:** 教育部博士点基金资助项目 (20124404110007); 中国林科院林业所所长基金资助项目 (RIF2013-08)

**收稿日期:** 2013-04-02; **修订日期:** 2013-07-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

were higher in the *F. polyanthum* than three arbor species. However, the *F. polyanthum* had thinner leaf (147.67  $\mu\text{m}$ ) and lowest WUE, and the *S. baccatum* had the highest WUE. The leaf thickness, palisade tissue and cuticle thickness, LMA, P/S, and TPM/LT of measured four tree species increased with the increasing of crown height, and the *F. polyanthum* had the largest increasing. Meanwhile, the leaf chlorophyll and carotenoid content of four tree species reduced with the increasing of crown height. The leaf  $\delta^{13}\text{C}$  value and WUE of four tree species increased with the tree height, where the  $\Delta$  value has an opposite trend. The WUE of *F. polyanthum* had a small change along tree height than the arbor species. The above results showed that the upper crown leaves of four tree species exhibited xeromorphic structure and high WUE. These xeromorphic structure and physiological characters suggests that the trees may suffer from water stress. In order to reduce the influences of relative water shortage, the water loss of treetop leaves was minimized through reducing stomatal conductance, and the WUE was increased resultantly. Simultaneously, the reduced stomatal conductance led to the decreasing of photosynthesis. The fact of low photosynthetic pigment contents in the upper crown leaves indicates the reduced ability of photosynthetic carbon assimilation in treetop leaves. Xeromorphic structure may limit cell division and expansion, then the gas exchange and carbon assimilation capability are restricted resultantly. However, respiration consumption increases with the spread of tree crown. The nutrient shortage limits carbon investment on new leaf growth, and the tree growth is limited ultimately. These findings support the hypothesis of hydraulic limitation that the height growth of big trees slowed down through reduced absorption of irradiance and carbon, which is caused by the hydraulic limitation at treetop arising from increased pathway resistance.

**Key Words:** Rainforest; anatomical structure; photosynthetic pigment; stable carbon isotope; WUE

树木生长到一定高度后便不再增长,目前对于树高生长限制以 Ryan 和 Yoder<sup>[1]</sup>提出的水力限制假说广为接受<sup>[2]</sup>,即随着树木不断长高,由于重力作用和木质部通道对水分运输的阻力增加会导致输送到树顶叶片的水分减少,叶片会降低气孔导度以减少内部水分散失,同时也限制了外部  $\text{CO}_2$  进入叶片,使得光合碳同化能力降低,最终使生长受限。对此,有学者对北美红杉<sup>[3]</sup>、桉树<sup>[4]</sup>、望天树<sup>[5]</sup>等群落顶层树种进行了研究,而水力限制假说需要在不同的群落类型中进行验证<sup>[6]</sup>。西双版纳北热带雨林树种丰富,长势高大茂密。由于树冠高大,冠层上下部的水分、光照及小气候等差异较大,树木在叶片结构和功能上如何适应、树顶枝叶是否也受到水力限制的影响值得研究。叶片是植物的主要光合器官,其对环境变化的响应包括解剖结构<sup>[7-9]</sup>、光学特性<sup>[10]</sup>、气体交换特性以及水分利用状况等的改变。小而厚的叶片、栅/海比值高、较厚的角质层、气孔小而密且下陷等特征,是为了适应水分胁迫<sup>[11]</sup>而形成的旱生结构。叶片光合色素含量、稳定碳同位素分馏和水分利用效率则是反映植物体光合能力及对环境条件适应性的有效指标。因此,本文拟通过研究西双版纳北热带雨林大乔木浆果乌桕(*Sapium baccatum* Roxb, jgwj)、思茅木姜子(*Litsea pierrei* var. *szemois liou*, smmjz)、小叶藤黄(*Garcinia cowa* Roxb, xyth)以及共生木质藤本黑风藤(*Fissisfigma polyanthum* (Hook. f. et Thoms.) Merr., hft)的叶片解剖结构、光合色素含量、水分利用效率(WUE)等随冠层高度的变化,在叶片水平上探讨4种树木对沿树高水力限制增强以及水分、光照等因子变化的适应策略,从而进一步完善和补充树高限制机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况和试验材料

研究地位于西双版纳勐腊县东南部 15 km 处的补蚌望天树林内(101°34' E, 21°29' N),属北热带西南季风气候。一年中有干季(雾凉季 11—2 月和干热季 3—4 月)和雨季(5—10 月)之分。年均温 21.1  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 80%。年降雨量 1500—1600 mm,主要分布在雨季(占 83%)。望天树为群落上层优势种,高 40—60 m,散生在冠层上层。小叶藤黄、浆果乌桕、思茅木姜子等组成第 2 冠层,高约 20—30 m,冠层连接。林内大型木质藤本和维管附生植物丰富。群落结构特征详见文献<sup>[12]</sup>。

本研究取样点周围无优势种望天树分布,浆果乌桕等组成第 1 冠层,平均高 29 m。取样的小叶藤黄被黑风藤攀援。黑风藤除接近地面处生长有少许枝叶,一根藤直达冠层上层,从 20 m 高处才有枝叶分布,最高达 26 m,枝叶茂密,覆盖在小叶藤黄的冠层外围。小叶藤黄平均树高 26 m、枝下高约 8 m,浆果乌桕和思茅木姜子平均树高为 29 m、枝下高为 19—20 m。4 种树木均为常绿阔叶植物、成熟株。

由于高大树木取样困难,本研究借助高 30 m 的观景塔和高枝剪进行取样。于 2008 年 4 月底的 9:00—11:00,根据各树木的冠层高度和枝下高,对树冠下层、中层和上层枝叶按树高间隔约 5—9 m 进行取样,其中黑风藤、小叶藤黄、浆果乌桕和思茅木姜子的取样高度分别为 1、20、26 m; 8、15、20、27 m; 20、29 m; 19、24、29 m,分别用于形态解剖结构、光合色素含量、稳定碳同位素测定。对同一树种取冠层外围同一方位的成熟叶片。取样株数为:小叶藤黄 3 株,其他 3 树种每种 2 株。

## 1.2 叶片形态解剖结构

对每树种不同冠层高度取5—10片成熟叶片,在叶片中部迅速切取约1 cm<sup>2</sup>的小块投入FAA固定液(酒精:福尔马林:冰醋酸=90:5:5)中固定用于石蜡制片,用番红-固绿对染法将材料经系列酒精脱水、透明、浸蜡、包埋、切片,最后用阿拉伯树胶封片<sup>[13]</sup>。在光学显微镜下观察拍照。观察指标包括角质层厚度(TC)、上表皮厚度(TDE)、下表皮厚度(TBE)、叶片厚度(TL)、栅栏组织厚度(TPT)、海绵组织厚度(TST)、细胞直径(CD),计算栅栏组织与海绵组织及叶片厚度的比值(P/S和TPT/LT),每项指标观测60次,取平均值。

各冠层高度另取约12片叶片,迅速用扫描仪(Regent instrument INC, Canada)测定叶片面积(LA),然后将样品置于60℃恒温烘箱内烘干48 h至恒重,干重除以叶面积得到比叶重(LMA)。

## 1.3 叶片稳定碳同位素分馏和水分利用效率

每树种不同冠层高度取叶片15—20片,装入纸质信封带回实验室。用清水洗净、105℃杀青,然后置于恒温干燥箱中烘干(60℃,连续烘干48 h),粉碎过100目筛制成备用样品。在中国科学院植物研究所质谱仪分析室进行稳定碳同位素分析,取3—5 mg样品封入真空燃烧管,加入催化剂和氧化剂,燃烧产生的CO<sub>2</sub>经结晶纯化后用DELTA<sup>plus</sup> XP质谱仪和FLASH EA固体分析仪(Thermo Finniga公司, Germany)测定稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ ), (精确度 $\pm 0.2$ )‰。以PDB(Pee Dee Belemnite)为标准,根据下式计算稳定碳同位素组成<sup>[14]</sup>:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} (\text{‰})$$

根据Farquhar等<sup>[14-17]</sup>的研究通过下面公式来计算叶片的稳定碳同位素辨别值( $\Delta$ )和WUE:

$$\Delta = \frac{\delta_a - \delta_p}{1 + \delta_p} (\text{‰})$$

$$\text{WUE} = \frac{C_a(b - \Delta)}{(b - a)1.6\text{VPD}/P} \text{ mmol C} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$$

式中, $a$ 、 $b$ 分别为CO<sub>2</sub>扩散和羧化过程中的同位素分馏系数,其中 $a = 4.4$ ‰,  $b = 27$ ‰;  $\delta_a$ 和 $C_a$ 分别为空气的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和CO<sub>2</sub>浓度,通过气体采样袋采取不同冠层高度的空气样品分别通过质谱仪和气相色谱仪(Agilent6820)、火焰离子化检测器(FID)测定;  $\delta_p$ 为植物材料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;数值1.6为水蒸汽和CO<sub>2</sub>在空气中的扩散比率。VPD和 $P$ 分别为叶片内外蒸汽压差和大气压,由树木生长过程中取样日期前一段的距离采样点最近的景洪(101°34'E, 21°29'N)观测站的气象数据<sup>[18]</sup>计算得出<sup>[19-20]</sup>:

$$\text{VPD} = 0.611 \times 10^{17.502 T / (240.97 + T)} \times (1 - \text{RH}) \text{ (kPa)}$$

式中, $T$ 为大气温度, RH为大气相对湿度;0.611为 $t = 0^\circ\text{C}$ 时纯水平面上的饱和水汽压。

## 1.4 叶片的光合色素含量

取各树木不同冠层高度的成熟叶片,洗净擦干、称取0.2 g,用研钵研成匀浆,用丙酮法<sup>[21-22]</sup>提取光合色素,包括叶绿素a(chlorophyll a, chl a)、叶绿素b(chl b)、总叶绿素(chl(a+b))、类胡萝卜素(car)、叶绿素a与b的比值(chl a/b)以及总叶绿素与类胡萝卜素的比值(chl/car)。

## 1.5 数据处理

采用spss18.0软件对每树种不同冠层高度以及不同树种间的解剖结构、光合色素含量和WUE等指标进行方差分析和多重比较;对所有树木的解剖结构、光合色素含量和WUE等进行两两相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 4种树木叶片形态解剖结构

4树种均为异面叶、叶片结构差异较大(图1)。黑风藤的冠层上下部的叶片结构差异明显:林冠下层的叶片薄,栅栏组织不明显,细胞稀疏;顶部的叶片则明显增厚,栅栏细胞2—3层、长而排列紧密(图1:a1—a3)。浆果乌桕的栅栏细胞1层,海绵细胞稍大、椭圆形,横向排列、整齐紧密,上表皮较厚、排列平整,下表皮稍薄,树冠上层叶片细胞较下层小而多(图1:b1—b2)。小叶藤黄的细胞排列较密,栅栏组织2层、粗短,上下表皮均较薄、角质层较厚。思茅木姜子叶肉细胞稀疏,栅栏组织1层且排列疏松,表皮薄而角质层厚。小叶藤黄和思茅木姜子的冠层上下部叶片结构差异不明显,但上部细胞明显比下部的要小(图1:c1—c3; d1—d3)。

4树种的LMA的变化范围为65.80—184.14 g/m<sup>2</sup>,思茅木姜子显著大于其他3树种,浆果乌桕最小。4树种的叶片结构除栅栏组织和下表皮厚度、栅栏与总叶厚比值、叶面积等4个指标差异不显著外,其他指标均差异显著(表1)。小叶藤黄和思茅木姜子的叶片(310.14和319.73 μm)和角质层(6.06和5.10 μm)都较厚、细胞也较大。黑风藤和浆果乌桕细胞最小(13.74 μm和13.23 μm)。黑风藤叶片(147.67 μm)和角质层(1.77 μm)均最薄、栅栏组织所占的比例最大。

如表2和图1所示,4种树木的叶厚和栅栏组织厚度均随树冠高度的增高而显著增厚,其中黑风藤差异最显著( $P < 0.001$ ),小叶藤黄和浆果乌桕则增厚较少。黑风藤的海绵组织厚度随着冠层增高而变薄,3种乔木则差异不明显。除小叶藤黄,其他3

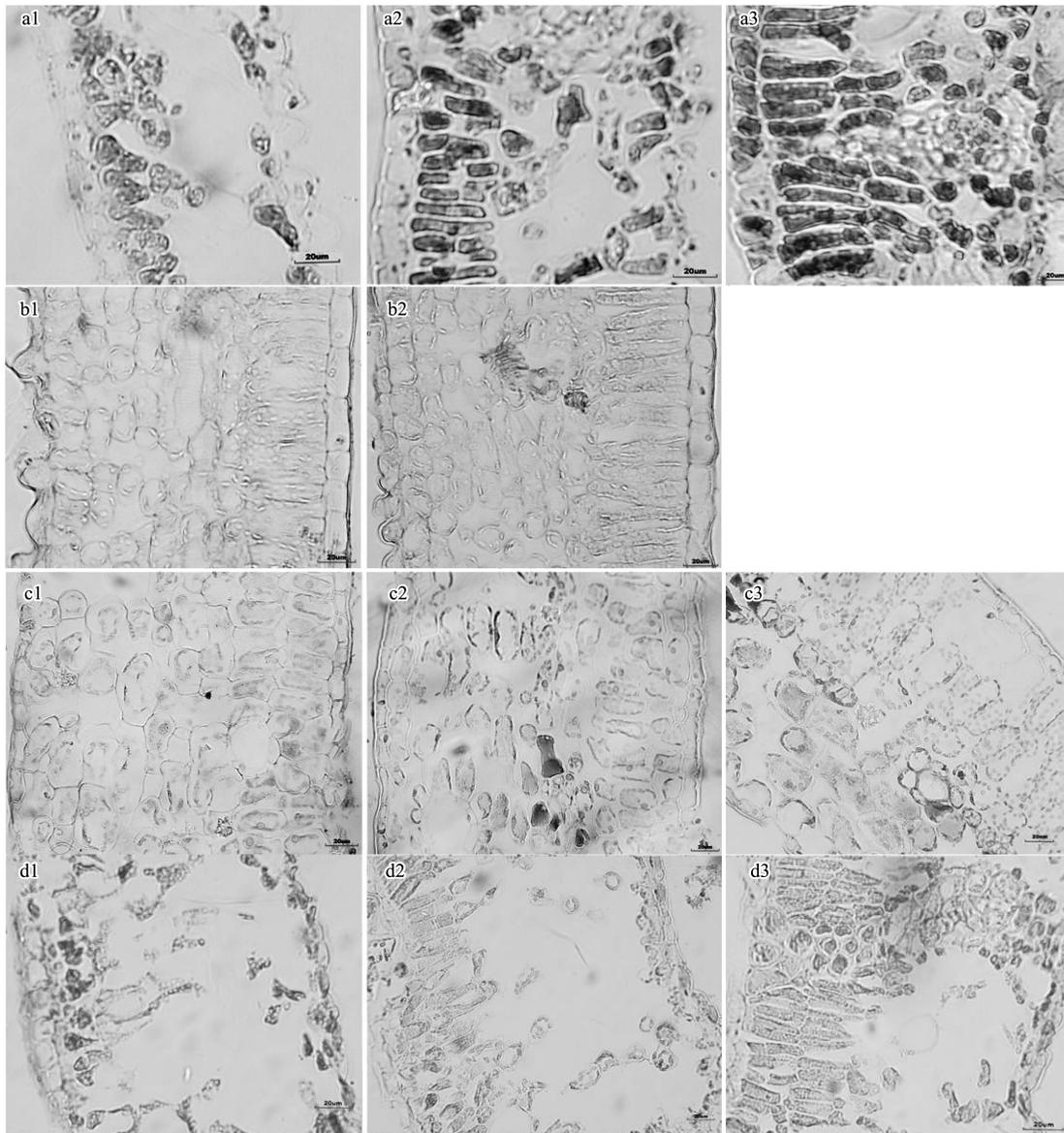


图 1 4 种树木不同冠层高度的叶片解剖结构特征

Fig.1 Changes of leaf anatomical structure with the crown height of four tree species

图版说明 a1— a3:黑风藤 1 m、20 m、26 m; b1— b2:浆果乌柏 20 m、29 m; c1— c3:小叶藤黄 8 m、20 m、27 m; d1— d3:思茅木姜子 19 m、24 m、29 m; 刻度尺:20  $\mu\text{m}$

种树木的叶片 P/S 和 TPT/LT 均随着冠层高度增加而显著变大,以黑风藤变化最大。除思茅木姜子外,其他 3 树种的角质层均为上部叶片比下部显著增厚(增厚幅度为黑风藤>浆果乌柏>小叶藤黄)。4 种树木的上下表皮厚度随着树冠高度的变化规律不一致。细胞直径除浆果乌柏随冠层增高而变大外,其他 3 树种均显著变小。4 树种冠层上部的 LMA 显著高于下部(均为  $P < 0.05$ ),黑风藤、小叶藤黄、思茅木姜子、浆果乌柏分别增大了 24.97%、18.57%、34.76%、6.31%。

## 2.2 叶片光合色素含量

4 树种叶片的 chl<sub>a</sub>、chl<sub>b</sub>、chl(a+b)、car 和 chl<sub>a</sub>/b、chl/car 的平均值变化范围分别为 0.44—1.59、0.14—0.49、0.58—1.98、0.13—0.58 mg/g 和 3.04—4.87、2.74—4.67(表 3)。黑风藤和浆果乌柏的叶绿素和 car 含量最高、小叶藤黄的最低,且差异显著(均为  $P < 0.001$ )。浆果乌柏的 chl<sub>a</sub>/b 显著大于其他树种。小叶藤黄和浆果乌柏的 chl/car 最大、思茅木姜子的最小。

如图 2 所示,随着 4 树种的冠层增高,除了小叶藤黄的 chl<sub>a</sub> 和总叶绿素变化不显著( $P = 0.354, 0.234$ ),其他树种的叶绿素和类胡萝卜素含量均明显减少( $P < 0.05$ );黑风藤和思茅木姜子的 chl<sub>a</sub>/b 明显增大( $P < 0.001$ )、浆果乌柏的 chl<sub>a</sub>/b 显著减小( $P < 0.001$ )、小叶藤黄的差异不显著( $P = 0.256$ );3 种乔木的 chl/car 显著减小,黑风藤变化较小。

表 1 4 种树木叶片结构差异性比较

Table 1 The morphological and anatomical structures of four tree species (means  $\pm$  SE)

树种/指标 Species/indices	叶厚 Thickness of lamina / $\mu\text{m}$	栅栏组织厚 Thickness of palisade tissue/ $\mu\text{m}$	海绵组织厚 Thickness of spongy tissue/ $\mu\text{m}$	角质层厚 Thickness of cuticle/ $\mu\text{m}$	上表皮厚度 Thickness of adaxial epidermis / $\mu\text{m}$	下表皮厚度 Thickness of abaxial epidermis / $\mu\text{m}$	细胞直径 Cell diameter / $\mu\text{m}$	栅栏/海 绵组织 Palisade/ sponge	栅栏组织 /叶厚 Palisade/ leaf thickness	比叶重 Leaf mass per area /( $\text{g}/\text{m}^2$ )	叶面积 Leaf area / $\text{cm}^2$
黑风藤 <i>F. polyanthum</i>	147.67 $\pm$ 26.55a	65.20 $\pm$ 29.74a	51.35 $\pm$ 7.39a	1.77 $\pm$ 0.78a	15.29 $\pm$ 0.65a	14.95 $\pm$ 1.39a	13.74 $\pm$ 2.78a	1.47 $\pm$ 0.81a	0.47 $\pm$ 0.18a	93.59 $\pm$ 21.00a	38.25 $\pm$ 12.48a
浆果乌桕 <i>S. baccatum</i>	161.37 $\pm$ 6.68a	48.66 $\pm$ 6.02a	82.25 $\pm$ 1.13b	3.07 $\pm$ 1.07a	12.83 $\pm$ 0.87a	15.83 $\pm$ 1.71a	13.23 $\pm$ 0.42a	0.62 $\pm$ 0.08b	0.31 $\pm$ 0.03a	65.80 $\pm$ 2.15a	40.89 $\pm$ 5.31a
思茅木姜子 <i>L. pierrei</i>	319.73 $\pm$ 6.55b	93.91 $\pm$ 14.97a	153.72 $\pm$ 8.18c	6.06 $\pm$ 0.41b	19.24 $\pm$ 0.77b	14.93 $\pm$ 0.70a	21.09 $\pm$ 6.21b	0.62 $\pm$ 0.09b	0.29 $\pm$ 0.04a	184.14 $\pm$ 20.14b	36.17 $\pm$ 7.34a
小叶藤黄 <i>G. cowa</i>	310.14 $\pm$ 5.36b	92.80 $\pm$ 2.95a	176.02 $\pm$ 1.82d	5.13 $\pm$ 0.14b	15.25 $\pm$ 0.64a	16.03 $\pm$ 0.51a	27.48 $\pm$ 3.18c	0.84 $\pm$ 0.04b	0.30 $\pm$ 0.01a	102.40 $\pm$ 5.48a	46.42 $\pm$ 6.59a
Sig.	0.000	0.283	0.000	0.001	0.002	0.760	0.000	0.025	0.110	0.003	0.811

Sig. 显著性水平

表 2 4 种树木不同冠幅高度叶片解剖构造差异

Table 2 Changes of leaf morphological and anatomical characteristics with the crown heights of four tree species (means $\pm$ SE)

树种/指标 Species/indices	高度 Height H/m	叶厚 Thickness of lamina / $\mu\text{m}$	栅栏组织厚 Thickness of palisade tissue/ $\mu\text{m}$	海绵组织厚 Thickness of spongy tissue/ $\mu\text{m}$	角质层厚 Thickness of cuticle / $\mu\text{m}$	上表皮厚度 Thickness of Adaxial epidermis / $\mu\text{m}$	下表皮厚度 Thickness of abaxial epidermis / $\mu\text{m}$	细胞直径 Cell diameter / $\mu\text{m}$	栅栏/海 绵组织 Palisade/ sponge	栅栏组织 /叶厚 Palisade/ leaf thickness	比叶重 Leaf mass per area /( $\text{g}/\text{m}^2$ )
浆果乌桕 <i>S. baccatum</i>	20	154.69 $\pm$ 10.73	42.64 $\pm$ 6.69	83.38 $\pm$ 13.94	2.00 $\pm$ 0.48	13.70 $\pm$ 2.67	14.12 $\pm$ 2.61	13.39 $\pm$ 0.10	0.54 $\pm$ 0.18	0.28 $\pm$ 0.05	63.65 $\pm$ 0.36
	29	168.05 $\pm$ 13.14	54.68 $\pm$ 4.89	81.12 $\pm$ 16.25	4.14 $\pm$ 0.54	11.96 $\pm$ 2.03	17.54 $\pm$ 2.74	13.09 $\pm$ 0.60	0.70 $\pm$ 0.17	0.33 $\pm$ 0.04	67.94 $\pm$ 2.13
	Sig.	0.002	0.000	0.657	0.000	0.037	0.001	0.446	0.008	0.006	0.000
小叶藤黄 <i>G. cowa</i>	8	301.18 $\pm$ 12.03a	81.53 $\pm$ 17.72a	178.95 $\pm$ 11.86a	4.28 $\pm$ 0.45a	13.70 $\pm$ 2.32a	12.72 $\pm$ 1.74a	29.14 $\pm$ 0.43b	0.75 $\pm$ 0.17a	0.32 $\pm$ 0.06b	91.77 $\pm$ 0.85a
	15	296.12 $\pm$ 15.02a	86.89 $\pm$ 10.16ab	171.36 $\pm$ 15.27a	5.08 $\pm$ 0.65b	14.77 $\pm$ 1.74a	16.60 $\pm$ 3.47a	31.22 $\pm$ 1.53a	0.73 $\pm$ 0.17a	0.27 $\pm$ 0.06a	94.44 $\pm$ 0.12a
	20	322.22 $\pm$ 29.14b	88.64 $\pm$ 8.55bc	179.33 $\pm$ 20.50a	5.15 $\pm$ 0.85b	17.17 $\pm$ 1.94b	16.21 $\pm$ 3.63a	25.90 $\pm$ 0.92c	0.78 $\pm$ 0.19a	0.29 $\pm$ 0.04a	109.53 $\pm$ 18.59b
	27	312.50 $\pm$ 12.65b	98.74 $\pm$ 15.35c	174.94 $\pm$ 13.85a	5.50 $\pm$ 0.76b	14.40 $\pm$ 1.77a	16.77 $\pm$ 4.07a	23.66 $\pm$ 1.23d	0.90 $\pm$ 0.27a	0.28 $\pm$ 0.04a	112.70 $\pm$ 1.39c
	Sig.	0.002	0.019	0.670	0.000	0.004	0.076	0.000	0.945	0.121	0.001
思茅木姜子 <i>L. pierrei</i>	19	288.83 $\pm$ 6.33a	60.00 $\pm$ 26.14a	150.00 $\pm$ 14.73a	6.60 $\pm$ 0.60a	19.50 $\pm$ 1.79a	13.74 $\pm$ 1.83a	27.60 $\pm$ 6.72a	0.39 $\pm$ 0.14a	0.20 $\pm$ 0.08a	150.45 $\pm$ 5.21a
	24	351.33 $\pm$ 5.17b	103.23 $\pm$ 13.33b	169.80 $\pm$ 22.31a	6.51 $\pm$ 0.66b	18.27 $\pm$ 2.31a	15.28 $\pm$ 2.56a	19.20 $\pm$ 2.84a	0.59 $\pm$ 0.11ab	0.28 $\pm$ 0.02ab	205.07 $\pm$ 7.11ab
	29	378.42 $\pm$ 8.91b	130.20 $\pm$ 27.38b	162.60 $\pm$ 42.86a	6.28 $\pm$ 0.56b	17.88 $\pm$ 1.53a	16.76 $\pm$ 3.56a	16.48 $\pm$ 0.08b	0.83 $\pm$ 0.20b	0.37 $\pm$ 0.08b	230.61 $\pm$ 4.89b
	Sig.	0.000	0.001	0.257	0.010	0.032	0.393	0.041	0.021	0.041	0.031
黑风藤 <i>F. polyanthum</i>	1	107.52 $\pm$ 8.08a	26.09 $\pm$ 6.15a	48.48 $\pm$ 7.07a	0.37 $\pm$ 0.83a	15.40 $\pm$ 2.45ab	17.41 $\pm$ 4.37a	15.36 $\pm$ 1.07a	0.55 $\pm$ 0.15a	0.24 $\pm$ 0.05a	93.64 $\pm$ 1.12a
	20	137.65 $\pm$ 8.25b	45.93 $\pm$ 13.44b	65.34 $\pm$ 14.66c	1.85 $\pm$ 0.87b	14.12 $\pm$ 1.75a	12.61 $\pm$ 1.89a	14.10 $\pm$ 0.59a	0.77 $\pm$ 0.37b	0.34 $\pm$ 0.10b	102.31 $\pm$ 14.22a
	26	197.85 $\pm$ 11.51c	113.57 $\pm$ 10.52c	50.23 $\pm$ 10.01b	3.08 $\pm$ 0.58c	16.36 $\pm$ 2.68b	14.84 $\pm$ 6.91a	7.81 $\pm$ 1.63b	2.26 $\pm$ 0.25c	0.57 $\pm$ 0.04c	124.81 $\pm$ 7.02b
Sig.	0.000	0.000	0.000	0.038	0.046	0.133	0.004	0.000	0.001	0.015	

表 3 4 种树木叶片光合色素含量的差异  
Table 3 Difference of photosynthetic pigment between the 4 tree species

树种/指标 Species/indices	叶绿素 a Chlorophyll a /(mg/g)	叶绿素 b Chlorophyll b /(mg/g)	总叶绿素 Total chlorophyll /(mg/g)	类胡萝卜素 Carotenoid /(mg/g)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	总叶绿素/ 类胡萝卜素 Chlorophyll/ carotenoid
黑风藤 <i>F. polyanthum</i>	1.49(0.62) a	0.49(0.27) a	1.98(0.89) a	0.58(0.28) a	3.29(0.45) b	3.45(0.27) bc
浆果乌柏 <i>S. baccatum</i>	1.59(0.61) a	0.32(0.07) b	1.90(0.68) a	0.40(0.06) b	4.87(0.87) a	4.67(0.98) ab
思茅木姜子 <i>L. pierrei</i>	0.74(0.11) b	0.26(0.09) b	1.01(0.19) b	0.36(0.05) b	3.04(0.65) b	2.74(0.17) c
小叶藤黄 <i>G. cowa</i>	0.44(0.18) b	0.14(0.04) c	0.58(0.22) c	0.13(0.02) c	3.17(0.17) b	4.75(0.74) a
Sig.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008

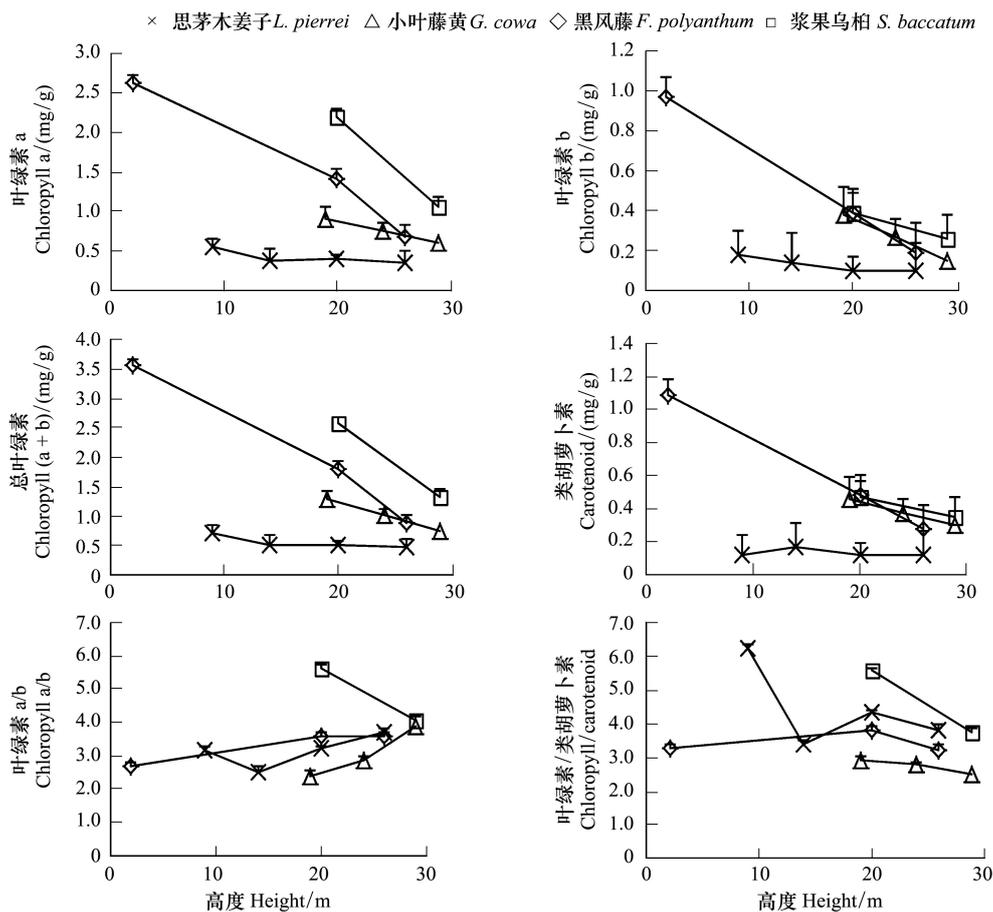


图 2 4 种树木叶片光合色素含量随树高的变化

Fig.2 Changes of Photosynthetic pigments with the crown height of four tree species

2.3 叶片稳定碳同位素组成和水分利用效率

4 树种的叶片  $\delta^{13}C$  和  $\Delta$  的变化范围分别为 -30.25—26.93 ‰ 和 17.48—20.38 ‰, 其中  $\delta^{13}C$  以浆果乌柏的最高、小叶藤黄次之、黑风藤的最低,  $\Delta$  则相反(表 4)。

随着树冠高度增加, 4 树种的叶片  $\delta^{13}C$  值均显著增大、叶片  $\Delta$  值则相反(图 3)。树高每增加 1 m, 黑风藤、浆果乌柏、思茅木姜子和小叶藤黄的叶片  $\delta^{13}C$  值分别增加 0.087 ‰、0.145 ‰、0.229 ‰ 和 0.122 ‰, 叶片  $\Delta$  值则分别减少 0.184 ‰、0.319 ‰、0.408 ‰ 和 0.247 ‰。4 树种的叶片 WUE 也随着冠层增高而显著增大, 树高每增加 1 m, 黑风藤、浆果乌柏、思茅木姜子和小叶藤黄的 WUE 分别增加 0.090、0.319、0.323 和 0.154 mmolC/mol  $H_2O$ 。黑风藤的叶片  $\delta^{13}C$ 、 $\Delta$  和 WUE 随树高的变幅小于 3 种乔木。

表 4 4 种树木叶片稳定碳同位素分馏和 WUE 的差异

Table 4 Differences of the carbon isotope fractionation and WUE among four tree species

树种/指标 Species/indices	碳同位素组成 Carbon isotope ratio/‰	碳同位素分辨率 Carbon isotope discrimination/‰	水分利用效率 Water use efficiency /(mmol C/mol H <sub>2</sub> O)
黑风藤 <i>F. polyanthum</i>	-30.25 (0.89) a	19.74 (0.53) ab	14.70 (1.27) a
浆果乌柏 <i>S. baccatum</i>	-26.93 (0.65) b	17.48 (0.67) c	20.38 (2.32) c
思茅木姜子 <i>L. pierrei</i>	-29.80 (0.44) a	20.38 (0.73) a	14.63 (1.89) a
小叶藤黄 <i>G. cowa</i>	-28.47 (0.49) ab	18.67 (0.53) bc	17.42 (1.90) b
Sig.	0.031	0.002	0.000

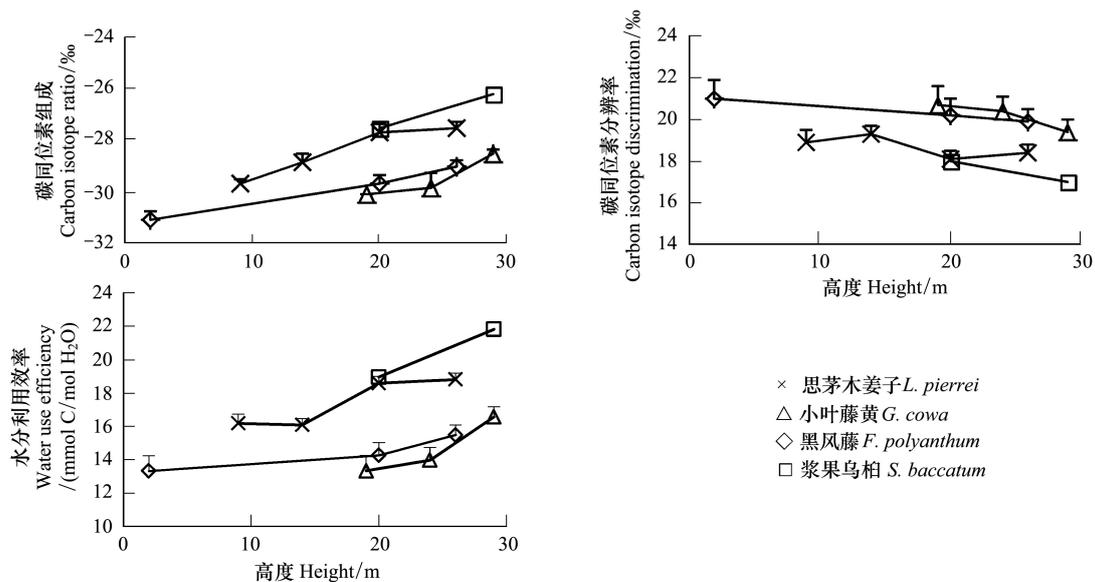


图 3 4 种树木叶片稳定碳同位素分馏和 WUE 随树高的变化

Fig.3 Changes of leaf carbon isotope fractionation and WUE with the crown height of 4 tree species

#### 2.4 叶片结构和生理指标的相关关系

将 4 种树木的各个叶片性状及所在冠层高度进行两两相关分析,以综合比较叶片结构与生理指标及与树高等之间的相关性,结果如表 5 所示。冠层高度  $H$  与  $\delta^{13}\text{C}$  和 WUE 显著正相关(分别为  $r=0.620, 0.366, P<0.001, 0.05$ ),与 chl<sub>b</sub>、chl(a+b) 及 chl/car 呈显著负相关(分别为  $r=-0.469, -0.321, -0.326, P<0.001, 0.05, 0.05$ ),而与 chl<sub>a</sub>/b 呈显著正相关( $r=0.369, P<0.05$ ),与栅栏组织厚度  $TPT$ 、角质层厚度  $TC$ 、栅栏组织与总叶厚的比值( $P/TL$ )及  $LMA$  呈显著正相关(分别为  $r=0.468, 0.417, 0.385, 0.457, P<0.001, 0.05, 0.05, 0.001$ )、与其他指标相关性不显著。

WUE 与  $\Delta$  呈极显著负相关( $r=-0.834$ )、与  $\delta^{13}\text{C}$  呈极显著正相关( $r=0.822$ );与光合色素含量呈不显著负相关、而与 chl<sub>a</sub>/b、chl/car 呈显著正相关(分别为  $r=0.599, 0.419, P<0.001, 0.05$ )。WUE 与下表皮厚度  $TBE$  呈显著正相关( $r=0.380, P<0.05$ )、上表皮厚度  $TDE$  和  $LMA$  呈显著负相关(分别为  $r=-0.552, -0.388, P<0.001, 0.05$ )、而与其他结构指标相关性不显著。

chl<sub>a</sub>、chl<sub>b</sub>、总叶绿素和类胡萝卜素含量两两呈显著正相关,且 4 指标均与叶片结构指标中的总叶厚、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、下表皮厚度、角质层厚度和细胞直径呈极显著负相关。chl<sub>a</sub>/b 与 chl<sub>a</sub>、chl(a+b) 和 chl/car 呈显著正相关(分别为  $r=0.429, 0.332, 0.500, P<0.001, 0.05, 0.001$ )、与细胞直径和上表皮厚度呈显著负相关(分别为  $r=-0.511, -0.412, P<0.001, 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 4 种树木叶片性状及 WUE 的差异

叶片的结构特征基本能反映其对水热的适应情况。浆果乌柏虽叶肉细胞较大,但其结构致密、胞间隙小能增大边界层阻力从而更好的减少水分散失,因此 WUE 最高。小叶藤黄较厚的叶片、角质层和密实的结构能有效弥补其叶面积和叶肉细胞较大在保持水分上的不足, WUE 也较高。思茅木姜子较厚的表皮和角质层以及  $LMA$  最大能防止强光穿透叶片,调节叶片对光的吸收,但由于其叶肉结构疏松保水性差,因而 WUE 最低。黑风藤较小的细胞及发达的栅栏组织能增加水分从维管束到表皮的运

表 5 4 树种叶片结构和生理指标的相关关系  
Table 5 Pearson correlation of the leaf structures, photosynthetic pigments, stable carbon fractionation, and WUE in four tree species

相关系数 Correlation coefficient	$\Delta$	$\delta^{13}\text{C}$	WUE	chla	chlb	chl(a+b)	car	chla/b	chl/car	TL	TPT	TST	TC	TDE	TBE	CD	P/S	P/TL	LMA
H	-0.117	0.620**	0.366*	-0.267	-0.469**	-0.321*	-0.257	0.369*	-0.326*	0.297	0.468**	0.093	0.417*	0.038	0.027	-0.299	0.310	0.385*	0.457**
$\Delta$	1	-0.794**	-0.834**	-0.072	0.188	-0.010	0.236	-0.583**	-0.558**	0.110	0.222	-0.053	0.071	0.674**	-0.384*	0.140	0.233	0.225	0.566**
$\delta^{13}\text{C}$	1	0.822**	-0.210	-0.560**	-0.300	-0.300	-0.521**	0.686**	0.418*	0.127	0.082	0.174	0.194	-0.482**	0.243	-0.147	-0.069	-0.007	-0.206
WUE	1	0.309	-0.031	-0.309	-0.099	-0.099	-0.309	0.599**	0.419*	-0.033	-0.075	0.093	0.065	-0.552**	0.380*	-0.109	-0.167	-0.115	-0.388*
chla	1	0.880**	0.993**	0.862**	0.429**	0.108	-0.802**	-0.754**	-0.763**	-0.793**	-0.229	-0.098	-0.640**	-0.067	-0.092	-0.435**	-0.092	-0.092	-0.435**
chlb	1	0.928**	0.962**	-0.011	-0.082	-0.709**	-0.679**	-0.689**	-0.671**	-0.006	-0.006	-0.006	-0.438**	-0.076	-0.123	-0.316	-0.123	-0.123	-0.316
chl(a+b)	1	0.906**	0.932**	0.063	-0.800**	-0.755**	-0.765**	-0.783**	-0.180	-0.084	-0.084	-0.180	-0.607**	-0.070	-0.102	-0.416*	-0.102	-0.102	-0.416*
car	1	0.009	-0.291	-0.685**	-0.590**	-0.740**	-0.624**	0.029	-0.020	-0.020	-0.020	-0.560**	0.019	-0.011	-0.180	-0.180	-0.011	-0.011	-0.180
chla/b	1	0.500**	-0.231	-0.190	-0.212	-0.271	-0.412*	0.004	-0.511**	0.017	0.030	-0.267	-0.267	-0.267	-0.267	-0.267	-0.267	-0.267	-0.267
chl/car	1	-0.030	-0.223	0.175	-0.166	-0.273	-0.045	0.144	-0.207	-0.246	-0.493**	-0.493**	-0.493**	-0.493**	-0.493**	-0.493**	-0.493**	-0.493**	-0.493**
TL	1	0.827**	0.899**	0.924**	0.456**	0.057	0.579**	-0.098	-0.063	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**	0.668**
TPT	1	0.612**	0.781**	0.431**	0.016	0.374*	0.405*	0.457**	0.457**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**	0.677**
TST	1	0.832**	0.250	0.033	0.753**	-0.386*	-0.305	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*	0.378*
TC	1	0.396*	0.083	0.467**	-0.120	-0.050	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**	0.680**
TDE	1	-0.059	0.349*	0.116	0.071	0.071	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**	0.643**
TBE	1	0.095	0.027	-0.086	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226	-0.226
CD	1	-0.315	-0.311	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
P/S	1	0.896**	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142
P/TL	1	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159

H 树高;  $\Delta$  稳定碳同位素分馏率;  $\delta^{13}\text{C}$  稳定碳同位素比率; WUE 水分利用效率; chla 叶绿素 a; chlb 叶绿素 b; chl(a+b) 总叶绿素含量; car 类胡萝卜素; chla/b 叶绿素 a/b; chl/car 叶绿素/类胡萝卜素; TL 叶厚; TPT 栅栏厚度; TST 海绵厚度; TC 角质层厚度; TBE 上表皮厚度; TDE 下表皮厚度; CD 细胞直径; P/S 栅栏/海绵; P/TL 栅栏/叶厚; LMA 比叶重; \*\* 和 \* 分别表示在 0.001 和 0.05 水平上相关性显著

移效率,因此具有较高的输水效率,此外木质藤本导管粗大储水能力强,能长期高效地为叶片输送水分<sup>[23]</sup>,补偿叶片蒸腾引起的水分亏缺<sup>[24]</sup>。但黑风藤叶片和角质层薄则不利于保持水分散失,因此水分利用效率较低,可见输水效率和水分利用效率不可兼得。

光合色素是光合作用的物质基础,植物通过调整色素含量来响应光环境的变化<sup>[25-26]</sup>。低浓度的叶绿素直接限制光合作用能力<sup>[27]</sup>。而类胡萝卜素具有光能捕获和光破坏防御两大功能,光照不足时协助叶绿素捕获光能,光照过强时则对热能耗散<sup>[28]</sup>。黑风藤的叶绿素和类胡萝卜素含量均最高,由于其茎的横向增粗很慢,纵向生长<sup>[29]</sup>极快,以避免像乔木那样因为长高而投入较多的碳用于支撑结构<sup>[30]</sup>,并能使叶片在短时间内到达冠层上部,以最大限度地利用光能<sup>[31]</sup>,因此相比3种共生乔木能最大化其光能捕获效率和具有较强的光合能力。Avalos 和 Mulkey<sup>[32]</sup>等人的研究也表明在湿季木质藤本和乔木的光合、蒸腾等气体交换特性无显著差异,但在干季,木质藤本则比乔木的光合能力更强<sup>[33-34]</sup>。小叶藤黄和思茅木姜子则由于叶片内部细胞较少和结构稀疏而叶绿素含量较少。小叶藤黄 chl/car 最高可能是由于其被黑风藤覆盖,通过提高叶绿素比率来增强光合速率,此外其较大的叶面积也有助于捕捉光能、弥补了其光合色素含量低的不足。Niinemets 等<sup>[35]</sup>认为强光下生长的叶片一般 chl/a/b 比较高,以减少强光对叶绿体的分解破坏。浆果乌桕除了叶片 chl/a/b 最高,其叶绿素、类胡萝卜素含量和 chl/car 以及 WUE 都较高,表明其对高光、干旱的适应能力强。上述结果表明4种树木通过改变不同的结构或生理指标适应水热环境。

### 3.2 4 树种叶片性状及 WUE 随树冠高度的变化

4 树种的形态解剖结构沿着树高的变化反映了叶片对上下冠层的水分及周围小气候的适应。树顶部通过形成小而厚的叶片、发达的栅栏组织、细胞排列紧密、高栅/海比、厚的角质膜和表皮层等旱生结构,而较好的适应体内因水力通道阻力变长引起的水分胁迫<sup>[11]</sup>或外部的强光生境<sup>[4]</sup>,这些结构都能使水蒸汽扩散出去的通道变长、阻力变大,从而减少水分蒸腾散失<sup>[36-37]</sup>,还可以减少对冠层上部强光的吸收。随着树高增加,4 树种的叶片结构指标的改变不一致,小叶藤黄、思茅木姜子通过增加组织厚度,而黑风藤和浆果乌桕分别通过增加栅栏组织比例和细胞数目来适应随树高各因子的变化。黑风藤林冠上下层叶片结构差异明显,而3种乔木的则上下差异相对较小,可能是由于黑风藤对叶生物量的投入要比乔木的大很多、茎生物量却很少<sup>[38]</sup>,叶片分布在树冠外围以最大限度地利用光能和同化有机物<sup>[11]</sup>,从而保持较快的生长速率。

叶绿素受光的影响最为明显。遮荫的叶片增加叶绿素含量有助于在林内弱光环境下提高光能利用率,而强光会引起叶绿素的漂白<sup>[38]</sup>、不利于光合。越往冠层上部,4 树种在降低叶绿素含量的同时也降低 car 含量,应该是对林冠上层强光的响应。另外相关分析结果也显示,光合色素含量与叶片结构中各组织厚度呈极显著负相关。随冠层高度的增加,角质层、栅栏和海绵组织变厚以及细胞变密等这些结构特征能大大减少透过叶片的光和叶肉细胞接触光的面积,叶绿体的数目和含量也因而减少。光合色素含量的减少也意味着树顶叶片的光合能力降低。小叶藤黄冠层上下部的的光合色素含量差异不显著,可能是由于其冠层上部被黑风藤攀援和覆盖,与下部叶片的光环境差异小,因而光合色素差异也小。

chl/a/b 值是植物耐荫性的重要指标之一,chl/a/b 低有利于植物充分利用弱光进行光合。所以黑风藤和思茅木姜子的叶片 chl/a/b 值越往林冠上层越高应该是对强光的适应。3 种乔木的 chl/car 随树高减小表明 car 随冠层增高减小的幅度小于叶绿素减小的幅度,car 所占比重增大能增强3种乔木对冠幅上层强光的热能耗散作用。黑风藤的 chl/car 则随冠层高度变幅不大,可见其叶片对强光的适应能力较强。浆果乌桕树冠各层的 chl/a/b 均高于其他3树种,其冠层上部 29 m 处的 chl/a/b 和 chl/car 均低于冠层 20 m 处的,可能是由于其冠层上部叶片通过提高 chl/b 和 car 的比重,在抵御强光伤害的基础上来充分的捕获和传递光能以提高光合能力。

4 树种的冠层高度与叶片  $\delta^{13}\text{C}$  呈显著正相关。严昌荣<sup>[39]</sup>等研究的辽东栎林分冠层叶片的  $\delta^{13}\text{C}$  值从 0—2 m 到 12—14 m 共约增大了 10.5 ‰; Koch<sup>[7]</sup>等研究的北美红杉的  $\delta^{13}\text{C}$  值从冠层高度约 40 m 到 110 m 增大了约 5 ‰。He<sup>[9]</sup>等对西双版纳热带雨林望天树的研究得出从 35 m 到 50 m 叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值增大了约 1.368 ‰。Sala & Hoch<sup>[40]</sup>也发现干旱生境下树木存储的非结构碳水化合物随树高增加的更多, $\delta^{13}\text{C}$  也要更大。上述结果表明冠层上部叶片同化的  $^{13}\text{C}$  较多,这也与叶片的结构和光合特性等随树高的改变有关<sup>[41]</sup>。随树高增加叶片、角质层和表皮厚度增加、叶肉细胞排列致密,这些结构使得气孔阻力和细胞边界层阻力增大,扩散进入叶片中的  $\text{CO}_2$  的量大大减少。低浓度的胞间  $\text{CO}_2$  使叶片来不及分馏  $^{13}\text{C}$ 、造成上部叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值增大。

4 种树木冠层上部叶片 WUE 较高意味着其相对下部叶片受到了水分胁迫。浆果乌桕和思茅木姜子的 WUE 随树高变幅较大表明2者树冠上层受到的水分胁迫较大。黑风藤的叶片 WUE 小于3种乔木,且随树高的变幅也较3种乔木小,暗示其内部水分状况相对3种乔木要好。可能是黑风藤的水分利用机理与3种乔木不同。因为藤本植物木质部导管粗大、储水能力强、输水效率高<sup>[23]</sup>、但安全性差,这也需要进一步的研究。尽管由于黑风藤的遮荫,小叶藤黄冠层上下部的的光环境差异较小,但是其叶片结构、光合色素含量、稳定碳同位素分馏、WUE 等都随树高表现出与其他3种树类似的规律,进一步证实了除光照外,随冠层高度增加,重力作用和输水结构的摩擦阻力增大而产生的水力限制确实对冠层顶部叶片的结构、生理性状等产生了影响。

总的来说,基本形态结构与生理机能的统一是树木适应不同环境的生物学基础。在干湿季节分明的西双版纳热带雨林,植物通过综合改变叶片结构和生理功能来适应树冠上层光照和水分状况的变化。树顶叶片形成偏向旱生的结构,减少叶肉细胞接触光的面积及光合色素含量;这些结构改变也使得气孔阻力和细胞边界层阻力增大,造成扩散进入叶片中的  $\text{CO}_2$  的量和扩散

出去的水蒸气均大大减少,从而使得树冠上层叶片的光合能力降低,保持水分散失的能力却随之增强和 WUE 增大。上述结果都证实了水力限制假说中<sup>[5]</sup>随着树木长高,为了维持有利的水分状况,树木会通过减少光和碳的获得而减慢树高生长的假设。

## References:

- [ 1 ] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth. *Bioscience*, 1997, 47(4): 235-242.
- [ 2 ] Fan Z X, Cao K F. Hypothesis on the limitation of tree height growth. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5): 632-640.
- [ 3 ] Koch G W, Sillett S C, Jennings G M, Davis S D. The limits to tree height. *Nature*, 2004, 428(6985): 851-854.
- [ 4 ] England J R, Attiwill P M. Changes in leaf morphology and anatomy with tree age and height in the broadleaved evergreen species, *Eucalyptus regnans* F. Muell. *Trees*, 2006, 20(1): 79-90.
- [ 5 ] He C X, Li J Y, Zhou P, Guo M, Zheng Q S. Changes of leaf morphological, anatomical structure and carbon isotope ratio with the height of the Wangtian tree (*Parashorea chinensis*) in Xishuangbanna, China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(2): 168-173.
- [ 6 ] Ryan M G, Binkley D, Fowness J H, Giardina C P, Senock R S. An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. *Ecological Monographs*, 2004, 74(3): 393-414.
- [ 7 ] Jackson L W R. Effect of shade on leaf structure of deciduous tree species. *Ecology*, 1967, 48(3): 498-499.
- [ 8 ] Fang J Y, Fei S L, Fan Y J, Cui K M. Ecological patterns in anatomic characters of leaves and woods of *Fagus lucida* and their climatic control in Mountain Fanjingshan, Guizhou, China. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(6): 636-642.
- [ 9 ] Cai Y L, Song Y C. Adaptive ecology of lianas in Tiantong evergreen broad-leaved forest, Zhejiang, China I. Leaf anatomical characters. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1): 90-98, 130-131.
- [ 10 ] Lee D W, Bone R A, Tersis S, Storch D. Correlates of leaf optical properties in tropical forest sun and extreme-shade plants. *American Journal of Botany*, 1990, 77(3): 370-380.
- [ 11 ] Esau K. *Anatomy of Seed Plants*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Press, 1977: 351-372.
- [ 12 ] Zhu H. On the classification of forest vegetation in Xishuangbanna, southern Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 2007, 29(4): 377-387.
- [ 13 ] Li Z L, Zhang X Y. *Plant Anatomy*. Beijing: Higher Education Press, 1984.
- [ 14 ] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9(2): 121-137.
- [ 15 ] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40: 503-537.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Chen J, Chang S X, Anyia A O. The physiology and stability of leaf carbon isotope discrimination as a measure of water-use efficiency in barley on the Canadian prairies. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2011, 197(1): 1-11.
- [ 18 ] Data source: China Meteorological Data Sharing Services System; <http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx/>.
- [ 19 ] Abbate P E, Dardanelli J L, Cantarero M G, Maturano M, Melchiorri R J M, Suero E E. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Science*, 2004, 44(2): 474-484.
- [ 20 ] Hu J, Moore D J P, Riveros-Iregui D A, Burns S P, Monson R K. Modeling whole-tree carbon assimilation rate using observed transpiration rates and needle sugar carbon isotope ratios. *New Phytologist*, 2010, 185(4): 1000-1015.
- [ 21 ] Wang X Q. *Plant Physiology and Biochemistry Experimental Principles and Techniques*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 134-136.
- [ 22 ] He C X, Li J Y, Zhang Y X, Zheng Q S, Xie B, Ding Y T. Differences in leaf mass per area, photosynthetic pigments and  $\delta^{13}\text{C}$  by orientation and crown position in five greening tree species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 134-143.
- [ 23 ] Fisher J B, Tan H T W, Toh L P L. Xylem of rattans: vessel dimensions in climbing palms. *American Journal of Botany*, 2002, 89(2): 196-202.
- [ 24 ] Gartner B L, Bullock S H, Mooney H A, Brown V, Whitbeck J L. Water transport properties of vine and tree stems in a tropical deciduous forest. *American Journal of Botany*, 1990, 77(6): 742-749.
- [ 25 ] Kenzo T, Ichie T, Watanabe Y, Yoneda R, Ninomiya I, Koike T. Changes in photosynthesis and leaf characteristics with tree height in five dipterocarp species in a tropical rain forest. *Tree Physiology*, 2006, 26(7): 865-873.
- [ 26 ] Stylinski C D, Gamon J A, Oechel W C. Seasonal patterns of reflectance indices, Carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia*, 2002, 131(3): 366-374.
- [ 27 ] Mi H L, Xu X, Li S H, He J, Zhang Y P, Zhao T C, Ma Y M. Effects of soil water stress on contents of chlorophyll, soluble sugar, starch, C/N of two desert plants (*Cynanchum komarovii* and *Glycyrrhiza uralensis*). *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(10): 1816-1821.
- [ 28 ] Sun X L, Xu Y F, Ma L Y, Zhou H. A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 989-999.
- [ 29 ] Putz F E, Mooney H A. *The Biology of Vines*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 1-353.

- [30] Hartmann H. Will a 385 million year-struggle for light become a struggle for water and for carbon? -How trees may cope with more frequent climate change-type drought events. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 642-655.
- [31] Schnitzer S A, Bongers F. The ecology of lianas and their role in forests. *Trends Ecology*, 2002, 17(5): 223-230.
- [32] Avalos G, Mulkey S S. Seasonal changes in liana cover in the upper canopy of a neotropical dry forest. *Biotropica*, 1999, 31(1): 186-192.
- [33] Castellanos A E. Photosynthesis and gas exchange in vines // Putz F E, Mooney H A, eds. *The Biology of Vines*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 181-203.
- [34] Schnitzer S A, Kuzee M E, Bongers F. Disentangling above- and below-ground competition between lianas and trees in a tropical forest. *Journal of Ecology*, 2005, 93(6): 1115-1125.
- [35] Niinemets Ü. Photosynthesis and resource distribution through plant canopies. *Plant, Cell and Environment*, 2007, 30(9): 1052-1071.
- [36] Fahh A. *Plant Anatomy*. 3rd ed. England: Pergamon Press, 1982.
- [37] Larcher W. *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. 3rd ed. New York, Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [38] Shen Y K. Some factors limiting photosynthesis in nature // Baltschefsky M, Baltschefskey M, eds. *Current Research in Photosynthesis*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1990, 4: 843-843.
- [39] Yan C R, Han X G, Chen L Z, Huang J H, Su B. Foliar  $\delta^{13}\text{C}$  within temperate deciduous forest: Its spatial change and interspecies variation. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(9): 853-859.
- [40] Sala A & Hoch G. Height-related growth declines in ponderosa pine are not due to carbon limitation. *Plant, Cell and Environment*, 2009, 32(1): 22-30.
- [41] O'Leary M H. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 1981, 20(4): 553-567.

#### 参考文献:

- [2] 范泽鑫, 曹坤芳. 树木高生长限制的几个假说. *植物学通报*, 2005, 22(5): 632-640.
- [8] 方精云, 费松林, 樊拥军, 崔克明. 贵州梵净山亮叶水青冈解剖特征的生态格局及主导因子分析. *植物学报*, 2000, 42(6): 636-642.
- [9] 蔡永立, 宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林藤本植物的适应生态学 I. 叶片解剖特征的比较. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 90-98, 130-131.
- [12] 朱华. 论滇南西双版纳的森林植被分类. *云南植物研究*, 2007, 29(4): 377-387.
- [13] 李正理, 张新英. *植物解剖学*. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- [18] 来源于中国气象科学数据共享服务网: <http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjgx/>.
- [21] 王学奎. *植物生理生化实验原理和技术* (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006: 134-136.
- [22] 何春霞, 李吉跃, 张燕香, 郑泉水, 谢博, 丁映婷. 5种绿化树种叶片比叶重、光合色素含量和  $\delta^{13}\text{C}$  的开度与方位差异. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 134-143.
- [27] 米海莉, 许兴, 李树华, 何军, 张源沛, 赵天成, 马有明. 水分胁迫对牛心朴子、甘草叶片色素、可溶性糖、淀粉含量及碳氮比的影响. *西北植物学报*, 2004, 24(10): 1816-1821.
- [28] 孙小玲, 许岳飞, 马鲁沂, 周禾. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 989-999
- [39] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝, 黄建辉, 苏波. 暖温带落叶阔叶林主要植物叶片中  $\delta^{13}\text{C}$  值的种间差异及时空变化. *植物学报*, 1998, 40(9): 853-859.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013 ( Semimonthly )**  
**CONTENTS**

Development of agroecology in USA ..... HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)

Research progress on water footprint ..... MA Jing, PENG Jian (5458)

Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China .....  
..... SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)

Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality ..... DONG Lei, LI Jiyue (5477)

Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications .....  
..... ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)

Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reser-  
voir Region ..... WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)

Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas ..... FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)

Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China .....  
..... WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)

The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species *Eremosparton songoricum* (litv.) Vass.(Fabaceae) .....  
..... SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)

Competitive effect of *Pistia stratiotes* to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients ..... SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)

Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants *Bletilla striata* .....  
..... WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)

Photosynthetic responses to Solar UV radiation of *Gracilaria lemaneiformis* cultured under different temperatures and CO<sub>2</sub>  
concentrations ..... YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)

The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field .....  
..... QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)

Effects of nitrogen management on NH<sub>3</sub> volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields .....  
..... MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)

Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear .....  
..... SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)

Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of *Agriophyllum squarrosum* seedlings .....  
..... ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)

Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a  
semi-arid area in drylands of Gansu, China ..... WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)

Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method .....  
..... WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)

Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under *Phyllostachy praecox* stands .....  
..... CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)

Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully  
region, China ..... XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)

Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area .....  
..... ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)

Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in *Phyllostachys praecox* stand .....  
..... GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)

Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe .....  
..... WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)

Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring  
method ..... HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)

Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species ..... HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)

Sap flow dynamics of *Populus alba* L.×*P.talassica* plantation in arid desert area ... ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jianguo, et al (5655)

Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition .....  
..... LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)

The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China .....  
..... YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)

Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species .....  
..... ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)

Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar, nicotine ratio, and organic potassi-  
um index of flue-cured tobacco ..... WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)

Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female *Apodemus chevrieri* .....  
..... GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)

Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of *Litopenaeus vannamei* .....  
..... WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ..... ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi ..... WEN Yuanguang, LEI Liquan, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain ..... LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin ..... WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession ..... FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert ..... LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake ..... DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community ..... CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China ..... LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem ..... PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China ..... YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China ..... WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years ..... LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands ..... XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta ..... WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 ..... JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China ..... QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ..... ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert ..... FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city ..... XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong ..... WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) ..... LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season ..... JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian ..... LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example ..... XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China ..... LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city ..... LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

# 《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工作者,探索生态学奥秘,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

本期责任副主编 陈利顶 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 33 卷 第 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 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