

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

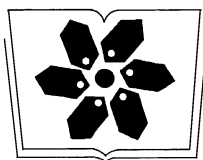
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 10 期 Vol.33 No.10 **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 10 期 2013 年 5 月 (半月刊)

目次

福建长汀水土保持专题

- 福建省长汀县水土流失区的时空变化研究——“福建长汀水土保持”专题序言 徐涵秋 (2945)
- 福建省长汀县河田盆地近 35 年来地表裸土变化的遥感时空分析 徐涵秋 (2946)
- 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应 徐涵秋, 何 慧, 黄绍霖 (2954)
- 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态 何圣嘉, 谢锦升, 曾宏达, 等 (2964)
- 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究 杨冉冉, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2974)
- 南方红壤水土流失区土地利用动态变化——以长汀河田盆地为例 林 娜, 徐涵秋, 何 慧 (2983)
- 亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例 黄绍霖, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2992)
- 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例 陈志强, 陈志彪 (3002)

前沿理论与学科综述

- 土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展 沈征涛, 施 斌, 王宝军, 等 (3011)
- 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等 (3020)

个体与基础生态

- 岩溶区不同植被下土壤水溶解无机碳含量及其稳定碳同位素组成特征 梁 轩, 汪智军, 袁道先, 等 (3031)
- 黄脊雷鳉越冬卵的滞育发育特性 朱道弘, 陈艳艳, 赵 琴 (3039)
- 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等 (3047)

种群、群落和生态系统

- 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类群落结构与多样性 王 斌, 彭波涌, 李晶晶, 等 (3056)
- 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响 齐 麟, 于大炮, 周旺明, 等 (3065)
- 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性 徐宾铎, 曾慧慧, 薛 莹, 等 (3074)
- 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价 王耀平, 白军红, 肖 蓉, 等 (3083)
- 不同起始状态对草原群落恢复演替的影响 杨 晨, 王 炜, 汪诗平, 等 (3092)
- 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响 王长庭, 王根绪, 刘 伟, 等 (3103)
- 高寒退化草地狼毒种群株丛间格局控制机理 高福元, 赵成章 (3114)
- 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究 马和平, 郭其强, 刘合满, 等 (3122)
- 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶属性因子的相关性 王英姿 (3129)
- 西门岛人工秋茄林恢复对大型底栖生物的影响 黄 丽, 陈少波, 仇建标, 等 (3138)
- 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等 (3148)
- 青藏高原高寒草甸植被特征与温度、水分因子关系 徐满厚, 薛 娴 (3158)

景观、区域和全球生态

近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化..... 赵 亮,刘吉平,田学智 (3169)

基于系统动力学的雏菊世界模型气候控制敏感性分析..... 陈海滨,唐海萍 (3177)

资源与产业生态

主要气候因子对麦棉两熟棉花产量的影响..... 韩迎春,王国平,范正义,等 (3185)

低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应..... 姜丽娜,杨文斌,卢 琦,等 (3192)

不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素..... 蓝家程,傅瓦利,彭景涛,等 (3205)

农地保护的外部效益测算——选择实验法在武汉市的应用 陈 竹,鞠登平,张安录 (3213)

研究简报

温度、投饵频次对白色霞水母无性繁殖与螅状体生长的影响 孙 明,董 婧,柴 雨,等 (3222)

内蒙古达赉湖西岸地区大鸕巢穴特征和巢址选择..... 张洪海,王 明,陈 磊,等 (3233)

红外相机技术在鼠类密度估算中的应用..... 章书声,鲍毅新,王艳妮,等 (3241)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-05



封面图说: 色季拉山的长苞冷杉和高山杜鹃林——色季拉山高海拔处的植被主要有长苞冷杉、林芝云杉和高山杜鹃等,再高海拔地区则分布有高山灌丛、草甸等。长苞冷杉为我国特有种,属松科常绿乔木,分布于西藏东南部高山地带。树高可达 40m,树皮暗褐色,针叶较短;其球果圆柱形,直立。长苞冷杉的形态独特,与分布区内多种冷杉有密切的亲缘关系,和云杉、杜鹃的分布也彼此交叠。随着色季拉山体海拔的升高,区域气候对于山地土壤从黄壤至棕色森林土、直至高山草甸土的完整发育,以及对森林生态系统类型的形成都产生直接而深刻的影响。

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/stxb201202170209

王英姿. 灵石山不同海拔米楮林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶属性因子的相关性. 生态学报, 2013, 33(10): 3129-3137.

Wang Y Z. Correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3129-3137.

灵石山不同海拔米楮林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 叶属性因子的相关性

王英姿*

(福州市林业局, 福州 350005)

摘要:对灵石山海拔 157—842 m (分 9 个海拔梯度, 分别记为 A1—A9) 的米楮林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特征及其与属性因子的关系进行分析, 结果表明, 灵石山米楮林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布范围为 $(-28.806\text{‰}—-34.399\text{‰})$, 平均值为 $(-30.885 \pm 1.205)\text{‰}$, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与比叶面积 (SLA)、叶片 N 含量、2 年生 K 含量、Na 含量、Mg 含量、Ash (灰分) 含量呈显著负相关, 与 2 年生叶片 Chl (叶绿素) 含量、叶片 P 含量、叶片 Ca 含量、叶片干物质含量 (LDMC) 含量呈显著正相关, 与不同叶龄 Fe、Zn 含量相关性不显著, 与 1 年生和 2 年生叶片 Mn 含量分别呈负相关和正相关。不同优势种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度差异可以反映植物生理状况的变化。不同海拔梯度上叶片属性特征在一定程度上反映和影响了以米楮为建群种和优势种的灵石山常绿阔叶林叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征。

关键词:优势种; 稳定性碳同位素; 叶属性因子; 叶龄; 米楮林; 灵石山

Correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park

WANG Yingzi*

Fuzhou Forestry Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350005, China

Abstract: Foliar $\delta^{13}\text{C}$ is an important parameter for researching the adaptive strategy of plants to environment. It was analyzed that the foliar $\delta^{13}\text{C}$ value and its correlation with foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park. Taking the growing situation of *Castanopsis carlessii* forests and environmental conditions together, nine elevation gradients were divided, which were remarked as A1 to A9 respectively. The dominant species were *C. carlessii*, *Machilus minkweiensis*, *Schefflera octophylla*, *Schima superba*, *Eurya hebeclados* Ling, *Enitida Korthals*, *Castanopsis fabri*, *Rhododendron simisii* Planc, *Psychotria rubra*, *Ardisia quinqueгона*, *Pithecellobium. clypearia*, *Radix Syzyg buxifolium*, *Cyclobalanopsis glauca*, *Rapanea neriifolia*, *Lindera aggregata*, *Camellia oleifera*, *Lithocarpus glabra*, *Blastus cochinchinensis*, *Sarcosperma laurinum*, *Lindera megaphylla*, *Ilex elmrilliana*, *Tricalysia dubia*, *Camellia octopetala*. Results showed that the range of foliar $\delta^{13}\text{C}$ value was between -28.806‰ and -34.399‰ with average of $(-30.885 \pm 1.205)\text{‰}$. And foliar $\delta^{13}\text{C}$ was negatively correlated with SLA, content of N, K, Na, Mg, Ash and positively correlated with chlorophyll content of one-year-old leaf, content of Ca, leaf dry matter. There was no significant correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and content of Fe and Zn. The foliar $\delta^{13}\text{C}$ was negatively correlated with Mn content of one-year-old leaf, and positively with content of two-year-old leaf. Different $\delta^{13}\text{C}$ in different dominant species reflects change of physiological status in plant. The characteristics of foliar traits of different elevation gradients reflected and affected foliar $\delta^{13}\text{C}$ properties

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30671664)

收稿日期: 2012-02-17; 修订日期: 2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yingzi_wang@126.com

of broad-leaved evergreen forests in Lingshishan.

Key Words: dominant species; stable carbon isotope; foliar trait factors; foliar age; *Castanopsis carlessii* forests; Lingshishan

植物组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 提供了整合分析植物固碳过程中内部生理特征和外部影响光合气体交换的环境因子的途径^[1-2], 稳定性碳同位素技术的使用对于了解植物养分含量和生理生态过程的相互作用提供了重要的视角^[3], 可以揭示与植物生理生态过程相联系的一系列气候环境信息。稳定同位素技术已成为解释植物与环境相互作用的有力工具, 被广泛应用于全球变化、地球科学和植物生理生态学等研究领域^[4-6]。植物是环境变化的指示器, 叶片是植物对环境变化较为敏感的营养器官, 其特征能体现环境因子变化的影响或植物对环境的适应。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值、比叶面积 (SLA)、叶片干物质含量 (LDMC)、营养元素含量等叶属性特征体现了物种本身的生物学特性, 是决定其在群落中地位的重要因素, 这些叶片性状共同体现了植物为获取最大碳收获所采取的生存适应策略, 具有重要的生态学和生物进化意义^[7-8]。阔叶树种的叶片特征在不同生境之间会有很大的变化^[9], 在同一生境内叶片特征也会随叶片年龄的变化而变化, 研究叶片特征之间的关系, 找出不同性状之间的联系, 然后确定形成植物生态策略某一维度的性状组合, 是生态学研究非常重要的内容^[10-11]。

海拔是一个重要的地形因子, 各种环境因子如气温、气压、 CO_2 分压、光照等在海拔梯度上也表现出梯度性变化, 这为研究植物生理形态对环境的响应提供了很好的条件^[12]。目前较多的研究集中在运用稳定性碳同位素技术探讨单一植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征与环境因子的关系^[6,13-14], 有关植物特别是优势种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的环境响应规律还缺乏系统研究^[15]。

米槠 (*Castanopsis carlessii*) 是我国东部湿润亚热带地区常绿阔叶林的重要建群种, 也是世界上罕见的植被类型^[16]。米槠适应性强, 分布广, 培肥土壤、涵养水源的能力较强, 米槠林群落结构较为复杂, 物种相对丰富, 近年来笔者所在课题组首次对米槠林优势种叶片养分结构、叶绿素等叶属性特征沿海拔的变化进行研究并报道^[17-19], 表明叶属性是植物长期适应环境的结果, 本文进一步对不同海拔米槠林叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各叶属性因子的关系进行分析, 进而探讨不同生境下植物叶片生理生态特性, 以期为中亚热带相对贫瘠的森林立地上常绿阔叶植物的生态适应策略和环境响应机制以及生态系统的保护提供理论依据。

1 研究区概况

灵石山国家森林公园位于闽中福清市西部, 北纬 $25^{\circ}40'$, 东经 $119^{\circ}13'$, 总面积 2275.0 hm^2 , 其中有林地面积 2040.5 hm^2 , 森林覆被率 93.5% 。属亚热带气候带闽东南沿海海洋性季风气候区域。全年平均气温为 19.7°C , 7 月平均气温 29°C , 1 月平均气温 7°C , 极端最高气温 34°C , 极端最低气温 0°C 。年均日照时数 2000 h , 无霜降期 $340-360\text{ d}$, 有雾日 $20-30\text{ d}$ 。年均降水量 1780 mm , 雨季多在 3—6 月, 相对湿度 86% 。森林植被保持良好, 公园内水质甚佳, 清澈透明, 各山涧小溪水源常年不断。土壤大多为花岗岩发育的酸性土壤, 地带性土壤为红壤, 其中海拔 600 m 以上为黄红壤。公园内土壤表层物理性能良好, 土层深厚, 腐殖质层较厚。在《福建植被区划》上, 灵石山森林公园属于闽粤沿海丘陵平原亚热带雨林区闽江口、鹫峰山南温暖亚热带雨林小区。海拔 250 m 以下为地带性植被, 随着海拔的增高, 森林植被依次为亚热带常绿阔叶林、山地矮林, 间有马尾松林和竹林。

2 研究方法

2.1 调查与实验方法

根据灵石山国家森林公园米槠林的主要分布范围, 结合 GPS 定位技术, 采用样线和样地相结合的方法, 于 2008 年 3 月在灵石山设 9 个不同海拔梯度, 根据米槠林生长状况及地形等环境因子, 按海拔从低到高分别记为 A1 (157 m)、A2 (200 m)、A3 (242 m)、A4 (332 m)、A5 (442 m)、A6 (531 m)、A7 ($632-662\text{ m}$)、A8 (762 m)、A9 (842 m)。每一海拔高度视野外情况而定, 选取 1—2 个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的典型样地, 将各样地分成 16 个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$

的小样方,对各小样方内胸径 $\geq 2.5\text{ cm}$ 的树种进行每木调查,实测胸径、树高、冠幅等指标;通过计算重要值确定优势种,A1—A9的所有优势种有米楮(*C. carlessii*)、闽桂润楠(*Machilus minkweiensis*)、鹅掌柴(*Schefflera heptaphylla*)、木荷(*Schima superba*)、微毛柃(*Euryahebeclados*)、细齿柃(*Enitida acuminatissima*)、罗浮栲(*Castanopsis fabri*)、山杜鹃(*Rhododendron simisii*)、九节木(*Psychotria rubra*)、罗伞树(*Ardisia quinqueгона*)、围涎树(*Pithecellobium. clypearia*)、赤楠(*Syzygium buxifolium*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、密花树(*Rapanea neriifolia*)、乌药(*Lindera aggregata*)、油茶(*Camellia oleifera*)、石栎(*Lithocarpus glabra*)、柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、肉实树(*Sarcosperma laurinum*)、黑壳楠(*Lindera megaphylla*)、厚叶冬青(*Ilex pachyphylla*)、狗骨柴(*Diplospora dubia*)、八瓣糙果茶(*Camellia octopetala*) (表1)。然后每样地中选择各优势树种接近平均胸径的标准木3株,在树冠的中上层分东西南北四个方向采集树枝^[12],按叶鳞痕等生长状况将叶片分为1年生和2年生叶片^[20-21],封装后立刻带回实验室处理,SLA为叶片干重与面积的比值^[22-23];Chl含量测定采用丙酮乙醇混合液法测定^[24];叶片N含量采用靛酚蓝比色法测定,P含量用钼锑抗比色法测定,K含量用火焰光度计法测定,Ca、Mg、Fe、Mn、Zn含量用原子吸收分光光度计测定^[25-26]。并进行SLA、Chl含量以及养分含量等叶属性的测定^[22-26]。用MAT-251DELTA plus Advantage型稳定同位素质谱仪(mass spectrometer)分析样品的碳同位素组成 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。采用PDB(Pee Dee Belemnite)标准,测量误差小于0.05‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值按国际通用标准测定形式^[27]:

$$\delta^{13}\text{C} = [(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}] / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}} \times 1000。$$

2.2 数据分析

实验所得数据采用SPSS13.0软件进行相关性及回归统计分析($P < 0.05$)。

表1 灵石山米楮林不同海拔优势种列表

Table 1 The list of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests at different altitude gradients

海拔 Altitude/m	优势种
157(A ₁)	米楮、鹅掌柴、木荷、微毛柃、罗伞树、围涎树、柏拉木、细齿柃、青冈栎、罗浮栲
200(A ₂)	闽润桂楠、鹅掌柴、九节木、罗伞树、围涎树
242(A ₃)	米楮、闽润桂楠、鹅掌柴、木荷、微毛柃、山杜鹃、九节木、罗伞树、围涎树
332(A ₄)	米楮、鹅掌柴、围涎树、肉实树
442(A ₅)	米楮、鹅掌柴、微毛柃、山杜鹃、九节木、罗伞树
531(A ₆)	米楮、闽润桂楠、鹅掌柴、木荷、微毛柃、山杜鹃、九节木、密花树、八瓣糙果茶
632—332(A ₇)	米楮、鹅掌柴、山杜鹃、闽润桂楠、木荷、微毛柃、赤楠、罗浮栲、乌药
762(A ₈)	闽润桂楠、木荷、赤楠、油茶
842(A ₉)	米楮、闽润桂楠、赤楠、油茶、石栎

3 结果与分析

3.1 灵石山米楮林不同海拔 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征

表2总结了灵石山米楮林不同海拔优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-30.885 \pm 1.205)\text{‰}$,最高值为A1的细齿柃,为 -28.806‰ ;最低值来自A1的围涎树,为 -34.399‰ 。C3植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围在 -35‰ — -20‰ 之间,说明灵石山米楮林优势种采用C3植物光合代谢途径,属于C3植物。

3.2 各海拔梯度米楮林优势种不同叶龄 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各叶属性因子的相关系数

分别对灵石山不同海拔米楮林不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各属性因子的相关性进行分析(表1,表2),结果表明,不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各属性因子的关系表现不尽相同,1年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与SLA在A1、A5和A8、2年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与SLA除在A4和A6外,在其它海拔梯度均呈现显著负相关。1年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与Chl在A1、A2、A6和A9、2年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与Chl在A1、A5、A6、A7和A9呈现正相关。1年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与N含量在A1和A6呈显著负相关,2年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与N在A1、A2、A6、A7、A8呈显著负相关。1年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与P含量在A1、A2、A3、A5和A7呈显著正相关,在A6呈显著负相关;2年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与P在A1、A2、

A3 和 A5 呈显著正相关。1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 K 含量在 A7 呈显著正相关,2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 K 含量在 A6 呈显著负相关。1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Na 含量在 A2、A3、A4 和 A6 呈显著负相关,2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Na 含量在 A1、A2、A3、A4、A8 呈显著负相关,在 A7 和 A9 呈显著正相关。1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Ca 含量在 A1、A2、A3 和 A6 呈显著正相关,在 A4 和 A5 呈显著负相关,2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Ca 含量除在 A8 相关性不显著、在 A4 呈负相关外,在其它海拔梯度上均呈显著正相关。不同年龄叶片在各海拔梯度上 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Mg 含量的相关性均未达到显著性水平。不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Fe、Mn、Zn 含量的相关性在不同的海拔梯度上表现形式比较复杂。1 年生和 2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 LDMC 分别在 A1、A4、A6、A9 和 A1、A3、A6、A7、A9 呈显著正相关。1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Ash(灰分)含量在 A5、A6、A7 呈显著负相关,2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Ash 含量在 A2、A5、A7 二者呈显著负相关。

表 2 灵石山米槠林各海拔优势种 $\delta^{13}\text{C}$ 值Table 2 Foliar $\delta^{13}\text{C}$ value of dominant species in *Castanopsis carlessii* forest at different elevation gradients (mean $\pm$ SD)

海拔	优势种数	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ values		变异系数 CV/%
		范围 Range /‰	平均值 $\pm$ 标准差 mean $\pm$ SD/‰	
A1	10	-28.806—-34.339	-31.509 $\pm$ 1.589	5.08
A2	5	-29.772—-31.452	-30.928 $\pm$ 0.587	1.90
A3	9	-30.027—-33.319	-31.363 $\pm$ 1.056	3.37
A4	4	-30.402—-33.398	-32.03 $\pm$ 1.021	3.19
A5	6	-29.292—-31.791	-30.855 $\pm$ 0.133	0.43
A6	9	-29.638—-34.022	-31.105 $\pm$ 1.275	4.10
A7	9	-29.385—-30.337	-29.919 $\pm$ 0.500	1.67
A8	4	-29.065—-29.760	-29.340 $\pm$ 0.401	1.37
A9	5	-29.124—-30.353	-29.748 $\pm$ 0.487	0.49
At	22	-28.806—-34.022	-30.885 $\pm$ 1.205	3.90

A1—A9 代表不同的海拔梯度,At 代表所有海拔

表 2 各海拔梯度米槠林优势种 1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各属性因子的相关系数Table 2 Related coefficients between foliar $\delta^{13}\text{C}$ value and leaf trait factors of one-year-old leaves of dominant species at each altitude gradient in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park

海拔	SLA	Chl	N	P	K	Na	Ca
A1	-0.665 *	0.684 *	-0.630 *	0.732 **	-0.623	-0.68	0.821 **
A2	-0.045	0.68 *	-0.612	0.804 *	-0.551	-0.733 *	0.709 *
A3	-0.371	-0.24	-0.432	0.754 *	-0.21	-0.706 *	0.758 *
A4	-0.896	-0.708	-0.746	0.871	-0.15	-0.936 *	-0.925 *
A5	-0.647 *	0.23	0.312	0.519	0.412	-0.200	-0.803 *
A6	-0.175	0.858 *	-0.865 *	-0.881 **	-0.13	-0.811 *	0.810 **
A7	0.914 *	-0.644	-0.332	0.986 **	0.990 **	0.375	0.620
A8	-0.957	-0.7011	-0.218	0.944	-0.911	-0.254	0.586
A9	-0.943 *	0.891	-0.378	-0.811	0.860	-0.231	0.723
海拔	Mg	Fe	Mn	Zn	LDMC	Ash	
A1	-0.09	0.526	0.884 **	-0.745 *	0.713 *	-0.078	
A2	-0.39	0.957 *	0.01	0.842 *	0.054	-0.785	
A3	0.40	-0.687 *	0.525	0.639	0.193	0.864 *	
A4	-0.41	-0.914 *	0.960 *	0.72	0.994 *	-0.763	
A5	-0.31	-0.787 *	-0.698 *	-0.766 **	-0.526	-0.710 *	
A6	-0.04	0.900 **	0.904 **	-0.786 *	0.781 *	-0.861 *	
A7	NS	-0.848 *	-0.327	0.963 **	0.655	-0.889 *	
A8	NS	-0.500	0.867	-0.971 *	0.952	-0.575	
A9	NS	-0.262	-0.349	-0.931 *	0.953 *	-0.471	

表 3 各海拔梯度米槠林优势种 2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各属性因子的相关系数

Table 3 Related coefficient between foliar $\delta^{13}\text{C}$ value and leaf trait factors of two-year-old leaves of dominant species at each altitude gradient in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park

海拔	SLA	Chl	N	P	K	Na	Ca
A1	-0.792 *	0.740 *	-0.751 **	0.781 **	-0.01	-0.710 *	0.670 *
A2	-0.878 *	0.29	-0.731 *	0.830 *	-0.05	-0.822 *	0.856 **
A3	-0.690 *	0.02	-0.392	0.865 *	0.01	-0.903 **	0.748 *
A4	-0.710	-0.685	-0.839	0.470	-0.309	-0.886 *	-0.891 *
A5	-0.725 *	0.657 *	0.359	0.766 **	0.139	-0.248	0.663 *
A6	0.498	0.874 *	-0.758 *	-0.903 *	-0.844 *	-0.720	0.837 **
A7	-0.753 *	0.862	-0.997 **	-0.893 *	-0.194	0.955 *	0.885 **
A8	-0.974 *	-0.988	-0.980 **	0.643	-0.995	-0.98 *	0.810
A9	-0.969 *	0.925 *	0.475	0.452	0.826	-0.896 *	0.889 *

海拔	Mg	Fe	Mn	Zn	LDMC	Ash
A1	-0.655	0.140	0.802 *	-0.728 *	0.838 *	0.022
A2	0.17	-0.272	0.848 *	0.832 *	0.391	0.876 *
A3	0.460	-0.875 *	0.745 *	0.582	0.844 *	0.437
A4	0.298	-0.912 *	0.894 *	-0.247	0.552	0.819
A5	-0.301	-0.641 *	0.34	-0.380	-0.265	0.676 *
A6	0.277	0.121	0.887 **	-0.808 *	0.939 *	0.627
A7	0.001	-0.854 *	-0.075	-0.896 **	0.850 *	0.989 *
A8	0.805	0.193	-0.706	-0.986 *	0.947	0.675
A9	-0.140	0.696	-0.01	-0.881 *	0.984 *	0.567

3.3 灵石山米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各属性因子的回归分析

对灵石山米槠林所有海拔梯度上优势种不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各属性因子的相关性进行回归分析(图 1),结果表明不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 SLA 呈线性负相关;2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Chl 呈现正相关,1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Chl 相关性不显著;不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 N 含量呈线性负相关;不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 P 呈线性正相关;1 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 K 含量相关性不显著,2 年生叶片呈显著负相关;不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Na 含量均呈显著线形负相关;不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Ca 含量均呈线性正相关;不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Mg 含量均呈线性负相关;不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Fe 含量没有呈现显著的相关关系;不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Zn 含量没有呈现显著的相关关系;不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 LDMC 呈线性正相关;不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Ash 含量呈负线性相关。

4 讨论

4.1 灵石山米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 SLA 的关系

SLA 是植物叶片长期对生长环境的一种适应,是一个衡量植物种相对生长速率的重要参数,是叶片厚度和组织组成的综合反映^[28],植物的很多特征都直接或间接与 SLA 有关^[29]。本研究,灵石山米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 SLA 呈负相关。Luo 对中国东南部不同海拔云杉种群的研究及 Ares 等对美国夏威夷柳叶桉和红椿中也得出了一致的结果^[3,30];王玉涛和薛慧勤等的研究得出了一致的结论,并指出在实际应用中可以使用 SLA 代替碳同位素比率来估测水分利用效率^[31-32]。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 SLA 呈负相关说明植物通过降低叶片面积来提高水分利用效率。

4.2 灵石山米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 Chl 以及养分含量的关系

Chl 是植物吸收太阳能进行光合作用的重要物质,起到接受和转换能量的作用。目前,有关叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Chl 关系的研究报道不多。本研究中,2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 Chl 含量显著负相关。与本研究结果不同,马剑英等对红砂叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Chl 含量的分析表明二者没有显著相关性^[33]。Bort 等对大麦的研究表明叶片

$\delta^{13}\text{C}$ 和基于面积的 SPAD 值没有相关性^[34]。

表 4 灵石山米槭林优势种不同年龄叶片稳定性碳同位素和叶片属性的回归关系

Table 4 Linear regression between foliar $\delta^{13}\text{C}$ value and leaf trait factors of different age leaves of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park

1 年生 One year		2 年生 Two year	
回归关系式	R^2	回归关系式	R^2
SLA = -22.702X - 540.85	0.617 **	SLA = -22.863X - 559.36	0.651 **
Chl = 0.0202X + 2.0746	0.063	Chl = 0.1126X + 5.02	0.388 **
N = -2.4724X - 61.509	0.447 **	N = -2.7855X - 71.832	0.487 **
P = 0.0998X + 3.9404	0.520 **	P = 0.0666X + 2.8116	0.395 **
K = -0.5463X - 9.0376	0.162	K = -2.8641X - 78.908	0.525 **
Na = -0.1401X - 3.8246	0.553 **	Na = -0.1332X - 3.6654	0.564 **
Ca = 4.3692X + 166.4	0.435 **	Ca = 4.4364X + 168.85	0.448 **
Mg = -0.1511X - 1.5132	0.322 *	Mg = -0.1506X - 1.5919	0.325 *
Fe = -0.7257X + 72.036	0.035	Fe = -1.3462X + 59.322	0.056
Mn = -0.1596X - 2.5737	0.305 *	Mn = 0.1878X + 8.1366	0.364 **
Zn = -4.3471X - 80.794	0.232	Zn = -3.5105X - 50.779	0.138
LDMC = 0.0352X + 1.3471	0.692 **	LDMC = 0.0383X + 1.4758	0.603 **
Ash = -8.7623X - 216.64	0.435 **	Ash = -7.725X - 184.07	0.409 **

X 代表叶片 $\delta^{13}\text{C}$, 回归分析的样本数 $n = 66$

叶片 N 含量在一定程度上反映了叶片吸收和固定大气 CO_2 的能力,进而影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[35],本研究中叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 N 含量呈显著负相关,与李善家、Vitousek 和 Hultine 等研究结果一致^[15,36-37],也有研究表明植物叶片中的 N 含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关关系^[33,38],但是较多的研究发现植物叶片中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片 N 含量之间没有相关性^[30,39-42]。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 N 含量的相关性,除了与叶片的生理结构有关,还与叶 N 在光合器官和非光合器官的分配、以及 N 在光合器官内部各组分之间的分配比例以及 N 素光合利用效率等因素有关^[43-46]。

P 在植物新陈代谢过程中起重要作用,不但通过影响植物的渗透调节能力和保水力来增强植物组织的抗旱能力,而且能够通过提高植物体内可溶性糖和磷脂的含量增强植物的抗寒性。本研究中,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 P 含量呈正相关,这与前人的研究结果一致^[33,42]。中国植物普遍缺 P,特别在南方热带亚热带地区表现更为明显^[47],因此 P 作为生理元素,对植物的光合作用以及同位素判别变得更加重要。

K 在调节气孔功能和提高植物水分利用效率方面有着重要的作用,同时能够促进植物光合作用和光合产物的运输、提高 CO_2 的同化率^[48];Na 属于“功能性营养元素”^[49],Na 离子可以替代 K 离子进行细胞渗透调节的生理功能^[50-51]。本研究中,2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 K 含量显著负相关,不同叶龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 Na 含量负相关,说明 K、Na 可以通过调节叶片胞间 CO_2 浓度,使植物达到合适的水分利用效率。

Ca 作为结构性元素与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 呈显著正相关,说明 Ca 对细胞的渗透调节十分重要。Mg 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著负相关。微量元素 Fe、Mn、Zn 对于植物的光合作用起着重要作用,但是各海拔梯度上叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Fe、Mn 和 Zn 含量的相关性表现形式比较复杂,这可能与环境因素以及各叶属性因子对 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响机理有关,还有待于进一步研究。

由于 LDMC 在重复测定中较为稳定,很少受叶片厚度的影响,这使它成为一些学者预测植物资源利用策略的一个重要指标。本研究中,不同年龄叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 LDMC 显著正相关,这与前人的研究结果基本一致^[34,52]。本研究中叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 Ash 的负相关性与前人的研究结果一致^[53-54]。

本研究选择不同海拔梯度米槭林优势种不同叶龄叶片,因此叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶属性的关系更能突出了植物叶片生理关系的内在属性。总体来看,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值及分馏结果受环境因子以及养分元素等叶片属性的影响。不同年龄叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶属性的关系表现形式也不同,说明植物生长过程中资源利用策略的变化。

References:

- [1] Li C, Berninger F, Koskela J, Sonninen E. Drought responses of *Eucalyptus microtheca* provenances depend on seasonality of rainfall in their place of origin. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2000, 27(3): 231-238.
- [2] Ponton S, Dupouey J L, Breda N, Dreyer E. Comparison of water-use efficiency of seedlings from two sympatric oak species: genotype $\times$ environment interactions. *Tree Physiology*, 2002, 22(6): 413-422.
- [3] Luo J X, Zang R G, Li C Y. Physiological and morphological variations of *Picea asperata* populations originating from different altitudes in the mountains of southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221(1/3): 85-290.
- [4] He C X, Li J Y, Meng P, Zhang Y X. Changes in leaf stable carbon isotope fractionation of trees across climatic Gradients. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3828-3838.
- [5] Lin G H. Stable isotope ecology: a new branch of ecology resulted from technology advances. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 119-122.
- [6] Feng Q H, Cheng R M, Shi Z M, Liu S R, Liu X L, He F, Cao H M. Response of foliar $\delta^{13}\text{C}$ of *Quercus spinosa* to altitudinal gradients. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3629-3637.
- [7] Cordell S, Goldstein G, Meinzer F C, Vitousek P M. Regulation of leaf life-span and nutrient-use efficiency of *Metrosidero polymorpha* trees at two extremes of a long chronosequence in Hawaii. *Oecologia*, 2001, 127: 198-206.
- [8] Wright I J, Reich P B, Westoby M. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428: 821-827.
- [9] Liu F D, Wang Z S, Zhang M, Wang W J, An S Q, Zheng J W, Yang W J, Zhang S T. Photosynthesis in relation to leaf nitrogen, phosphorus and specific leaf area of seedlings and saplings in tropical montane rain forest of Hainan Island, South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4651-4661.
- [10] Shipley B, Lechowicz M J. The functional co-ordination of leaf morphology, nitrogen concentration, and gas exchange in 40 wetland species. *Ecoscience*, 2000, 7(2): 183-194.
- [11] Westoby M, Wright I J. Land-plant ecology on the basis of functional traits. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21(5): 261-268.
- [12] Qi J, Ma K M, Zhang Y X. The altitudinal variation of leaf traits of *Quercus liaotungensis* and associated environmental explanations. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 930-937.
- [13] Lin L, Chen L T, Zheng W L. Altitudinal Variation of the Foliar $\delta^{13}\text{C}$ in *Abies georgei* var. *smithii* and *Quercus aquifolioides* in Tibet. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 1048-1054.
- [14] Zhang P, Wang G, Zhang T, Chen N L. Responses of foliar $\delta^{13}\text{C}$ in *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to altitude and its mechanism in the Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 125-133.
- [15] Li S J, Zhang Y F, Chen T. Relationships between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors and leaf element contents of *Pinus tabulaeformis* in northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(6): 596-604.
- [16] Yan S J, Hong W, Wu C Z, Bi X L, Lan B. The structure and distribution pattern of dominant populations in *Castanopsis carlessii* Community. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10(1): 15-21.
- [17] Wang Y Z, Hong W, Wu C Z, Zheng G G, Fan H L, Chen C, Li J. Research on leaf traits for different age leaves of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2009, 29(3): 203-209.
- [18] Wang Y Z, Hong W, Wu C Z, Lin H, Fan H L, Chen C, Li J. Research on the variation of uneven-aged leaf SPAD values and the correlation between SPAD and chlorophyll, nitrogen concentration of Dominant Species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshihan National Forest Park. *Journal of Forestry Research*, 2009, 20(4): 362-366.
- [19] Wang Y Z, Hong W, Wu C Z, Zheng G G, Fan H L, Chen C, Li J. Variation of chloroplast pigments of various age leaves along elevation gradients of dominant species in *Castanopsis carlessii* Forests in Lingshishan National Forest Park. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(11): 43-51.
- [20] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.
- [21] Reich P B, Uhl C, Walters M B, Prugh L, S. Ellsworth A D. Leaf demography and phenology in Amazonian rain forest: a census of 40,000 leaves of 23 tree species. *Ecological Monographs*, 2004, 74(1): 3-23.
- [22] Yu S L, Ma K P, Chen L Z. Analysis on leaf forms in *Quercus mongolica* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 151-153.
- [23] Garnier E, Shipley B, Roumet C, Laurent G. A Standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Functional Ecology*, 2001, 15(5): 688-695.
- [24] Zhang X Z. Determination of plant chlorophyll content by a mixture with Acetone and Ethanol. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1986, (3): 26-28.

- [25] Li Y H, Luo T X, Lu Q, Tian X Y, Wu B, Yang H H. Comparisons of leaf traits among 17 major plant species in shazhuyu Sand Control Experimental Station of Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 994-999.
- [26] LY/T 1210-1275—1999. Republic of China Forestry Industry Standard. Beijing: State Forestry Administration, P. R. China, 1999: 274-298.
- [27] 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: 530-536.
- [28] Garnier E, Cordonnier P, Guillerm J L, Sonié L. Specific leaf area and leaf nitrogen concentration in annual and perennial grass species growing in Mediterranean old-fields. *Oecologia*, 1997, 111(4): 490-498.
- [29] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low- rainfall and high- and low- nutrient habitats. *Functional Ecology*, 2001, 15: 423-434.
- [30] Ares A, Fownes J H. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 2000, 139(1/3): 227-236.
- [31] Wang Y T, Li J Y, Cheng W, Cheng W, Geng X. Study on seasonal variation in carbon isotope composition correspond with soil temperature and humidity and weather factors for main greening tree species in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3143-3151.
- [32] Xue H Q, Gan X M, Sun M H, Sun L Z. Study on the relationship between water use efficiency and carbon isotope discrimination in drought condition. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 1999, 21(1): 27-34.
- [33] Ma J Y, Chen F H, Xia D S, Sun H L, Duan Z H, Wang G. Correlations between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and physiological parameters of desert plant *Reaumuria soongorica*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1166-1171.
- [34] Bort J, Arous J L, Hazzam H, Grando S, Ceccarelli S. Relationships between early vigour, grain yield, leaf structure and stable isotope composition in field grown barley. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1998, 36(12): 889-897.
- [35] Zhao C M, Chen L T, Ma F, Yao B Q, Liu J Q. Altitudinal differences in the leaf fitness of juvenile and mature alpine spruce trees (*Picea crassifolia*). *Tree Physiology*, 2008, 28(1): 133-141.
- [36] Hultine K R, Marshall J D. Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition. *Oecologia*, 2000, 123(1): 32-40.
- [37] Vitousek P M, Field C B, Matson P A. Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ in Hawaiian *Metrosideros polymorpha*: a case of internal resistance. *Oecologia*, 1990, 84(3): 362-370.
- [38] Hamerlynck E P, Huxman T E, McAuliffe J R, Smith S D. Carbon isotope discrimination and foliar nutrient status of *Larrea tridentata* (creosote bush) in contrasting Mojave Desert soils. *Oecologia*, 2004, 138(2): 210-215.
- [39] Ares A, Fownes J H. Water supply regulates structure, productivity, and water use efficiency of *Acacia koa* in Hawaii. *Oecologia*, 1999, 121(4): 458-466.
- [40] Kao W Y, Chang K W. Altitudinal trends in photosynthetic rate and leaf characteristics of *Miscanthus* populations from central Taiwan. *Australian Journal of Botany*, 2001, 49(4): 509-514.
- [41] Kao W Y, Tsai H C, Tsai T T. Effect of NaCl and nitrogen availability on growth and photosynthesis of seedlings of a mangrove species, *Kandelia candel* (L.) Druce. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158(7): 841-846.
- [42] DesRochers A, VandenDriessche R, Thomas B R. NPK fertilization at planting of three hybrid poplar clones in the Boreal region of Alberta. *Forest Ecology and Management*, 2006, 232(1/3): 216-225.
- [43] Takashima T, Hikosake K, Hirose T. Photosynthesis or persistence; nitrogen all location in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species. *Plant Cell and Environment*, 2004, 27(8): 1047-1054.
- [44] Warren C R, Adams M A. Evergreen trees do not maximize instantaneous photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(6): 270-274.
- [45] Welker J M, Jónsdóttir I S, Fahnestock J T. Leaf isotopic ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) and nitrogen contents of *Carex* plants along the Eurasian Coastal Arctic; Results from the Northeast Passage expedition. *Polar Biology*, 2003, 27(1): 29-37.
- [46] Ripley B S, Muller E, Behenna M, Whittington-Jones G M, Hill M P. Biomass and photosynthetic productivity of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as affected by nutrient supply and mirid (*Eccritotarus catarinensis*) biocontrol. *Biological control*, 2006, 39(3): 392-400.
- [47] Ren S J, Yu G R, Tao B, Wang S Q. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [48] Liu X N, Ma J Y, Sun W, Cui Y Q, Duan Z H. Advances in mechanisms underlying the responses of $\delta^{13}\text{C}$ in alpine plants to the altitudinal gradients. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(1): 37-46.
- [49] Li S X, Zhou X R, Wang S M. Positive Functions of Sodium in Plants. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(3): 485-490.
- [50] Very A A, Robinson M F, Mansfield T A, Sanders D. Guard cell cation channels are involved in Na^+ induced stomatal closure in a halophyte. *The Plant Journal*, 1998, 14(5): 509-521.
- [51] Raghavendra A M, Rao J M, Das V S R. Replaceability of potassium by sodium for stomatal opening in epidermal strips of stomatal opening in

epidermal strips of *Commelina benghalensis*. *Z. Pflanzenphysiol*, 1976, 80: 36-42.

- [52] Araus J L, Amaro T, Zuhair Y, Nachit M M. Effect of leaf structure and water status on carbon isotope discrimination in field grown durum wheat. *Plant Cell and Environment*, 1997, 20(12): 1484-1494.
- [53] Tsialtas J T, Tokatlidis I S, Tsikrikoni C, Lithourgidis A S. Leaf carbon isotope discrimination, ash content and K relationships with seed cotton yield and lint quality in lines of *Gossypium hirsutum* L. *Field Crops Research*, 2007, 107(1): 70-77.
- [54] Araus J L, Casadesus J, Asbatia, Nachit M M. Basis of the relationship between ash content in the flag leaf and carbon isotope discrimination in kernels of durum wheat. *Photosynthetica*, 2001, 39(4): 591-596.

参考文献:

- [4] 何春霞,李吉跃,孟平,张燕香. 树木叶片稳定碳同位素分馏对环境梯度的响应. *生态学报*,2010,30(14):3828-3838.
- [5] 林光辉. 稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支. *植物生态学报*, 2010,34(2):119-122.
- [6] 冯秋红,程瑞梅,史作民,刘世荣,刘兴良,何飞,曹慧明. 巴郎山刺叶高山栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 对海拔高度的响应. *生态学报*,2011,31(13):3629-3637.
- [12] 祁建,马克明,张育新. 辽东栎(*Quercus liaotungensis*)叶特征沿海拔梯度的变化及其环境解释. *生态学报*,2007,27(3):930-937.
- [13] 林玲,陈立同,郑伟列. 西藏急尖长苞冷杉与川滇高山栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 沿海拔梯度的变化. *冰川冻土*,2008,30(6):1048-1054.
- [14] 张鹏,王刚,张涛,陈年来. 祁连山两种优势乔木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔响应及其机理. *植物生态学报*,2010,34(2):125-133.
- [15] 李善家,张有福,陈拓. 西北油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征与环境因子和叶片矿质元素的关系. *植物生态学报*, 2011,35(6):596-604.
- [17] 王英姿,洪伟,吴承祯,郑关关,范海兰,陈灿,李键. 灵石山米楮林优势种群不同叶龄叶属性的研究. *福建林学院学报*,2009,29(3):203-209.
- [19] 王英姿,洪伟,吴承祯,郑关关,范海兰,陈灿,李键. 灵石山米楮林优势种不同叶龄叶绿体色素沿海拔梯度的变化. *林业科学*,2010,46(11):43-51.
- [22] 于顺利,马克平,陈灵芝. 蒙古栎群落叶型的分析. *应用生态学报*,2003,14(1):151-153.
- [24] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法. *辽宁农业科学*,1986,(3):26-28.
- [25] 李永华,罗天祥,卢琦,田晓娅,吴波,杨恒华. 青海省沙珠玉治沙站 17 种主要植物叶性因子的比较. *生态学报*,2005,25(5):994-999.
- [26] LY/T 1210-1275—1999. 中华人民共和国林业行业标准. 北京:国家林业局,1999:274-298.
- [31] 王玉涛,李吉跃,程炜,陈崇,耿欣. 北京城市绿化树种叶片碳同位素组成的季节变化及与土壤温湿度和气象因子的关系. *生态学报*,2008,28(7):3143-3151.
- [32] 薛慧勤,甘信民,孙明辉,孙兰珍. 干旱条件下花生水分利用效率与叶片碳同位素辨别力的相关性研究. *中国油料作物学报*,1999,21(1):27-34.
- [33] 马剑英,陈发虎,夏敦胜,孙惠玲,段争虎,王刚. 荒漠植物红砂叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与生理指标的关系. *应用生态学报*, 2008,19(5):1166-1171.
- [47] 任书杰,于贵瑞,陶波,王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*,2007,28(12):2665-2673.
- [48] 刘小宁,马剑英,孙伟,崔永琴,段争虎. 高山植物稳定碳同位素沿海拔梯度响应机制的研究进展. *山地学报*,2010,28(1):37-46.
- [49] 李三相,周向睿,王锁民. Na^+ 在植物中的有益作用. *中国沙漠*,2008,28(3):485-490.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 10 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Soil and Water Conservation of County Changting, Fujian Province

- Spatiotemporal dynamics of the bare soil cover in the Hetian basinal area of County Changting, China, during the past 35 years XU Hanqiu (2946)
- Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian basinal area of County Changting, Fujian Province, China XU Hanqiu, HE Hui, HUANG Shaolin (2954)
- Dynamic of soil organic carbon pool after restoration of *Pinus massoniana* in eroded red soil area HE Shengjia, XIE Jinsheng, ZENG Hongda, et al (2964)
- RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in County Changting, Fujian Province, China YANG Ranran, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2974)
- Land use changes in a reddish soil erosion region of Southern China: Hetian Basin, County Changting LIN Na, XU Hanqiu, HE Hui (2983)
- Remote-sensing estimate of the carbon storage of subtropical *Pinus massoniana* forest in the Hetian Basin of County Changting, China HUANG Shaolin, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2992)
- Mutation of soil fertility quality in the red eroded area of southern China: A case study in Changting County, Fujian Province CHEN Zhiqiang, CHEN Zhibiao (3002)

Frontiers and Comprehensive Review

- The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO₂ efflux: a review SHEN Zhengtao, SHI Bin, WANG Baojun, et al (3011)
- Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes MA Jianrong, DENG Jianming, QIN Boqiang, et al (3020)

Autecology & Fundamentals

- Characteristics of concentrations and carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon in soil water under varying vegetations in karst watershed LIANG Xuan, WANG Zhijun, YUAN Daoxian, et al (3031)
- The traits of diapause development of overwinter eggs in *Rammeacris kiangsu* Tsai (Orthoptera: Arcypteridae) ZHU Daohong, CHEN Yanyan, ZHAO Qin (3039)
- Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (3047)

Population, Community and Ecosystem

- Avifaunal community structure and species diversity in the Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China WANG Bin, PENG Boyong, LI Jingjing, et al (3056)
- Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains QI Lin, YU Dapao, ZHOU Wangming, et al (3065)
- Community structure and species diversity of fish assemblage in the coastal waters of Jiaozhou Bay XU Binduo, ZENG Huihui, XUE Ying, et al (3074)
- Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary WANG Yaoping, BAI Junhong, XIAO Rong, et al (3083)
- The effects of different original state on grassland community restoration succession YANG Chen, WANG Wei, WANG Shiping, et al (3092)
- Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow WANG Changting, WANG Genxu, LIU Wei, et al (3103)
- Pattern-controlling mechanics of different age classes of *Stellera chamaejasme* population in degraded alpine grassland GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (3114)

- Soil organic carbon pool at the western side of the sygera mountains, southeast Tibet, China MA Heping, GUO Qiqiang, LIU Heman, et al (3122)
- Correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park WANG Yingzi (3129)
- Influences of artificial *Kandelia obovata* mangrove forest rehabilitation on the macrobenthos in Ximen Island HUANG Li, CHEN Shaobo, CHOU Jianbiao, et al (3138)
- Responses of soil microbial properties in soil profile to typical vegetation pattern and slope in karst-cluster depression area FENG Shuzhen, SU Yirong, QIN Xinmin, et al (3148)
- Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (3158)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years ZHAO Liang, LIU Jiping, TIAN Xuezhi (3169)
- Sensitivity analysis of climate control in the Daisyworld model based on system dynamics CHEN Haibin, TANG Haiping (3177)
- Resource and Industrial Ecology**
- Analysis of key climatic factors influencing on seed cotton yield in cotton-wheat double cropping HAN Yingchun, WAN Guoping, FAN Zhengyi, et al (3185)
- The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation JIANG Lina, YANG Wenbin, LU Qi, et al (3192)
- Dissolution rate under soil in karst areas and the influencing factors of different land use patterns LAN Jiacheng, FU Wali, PENG Jingtao, et al (3205)
- Measuring external benefits of agricultural land preservation: an application of choice experiment in Wuhan, China CHEN Zhu, JU Dengping, ZHANG Anlu (3213)
- Research Notes**
- Effect of temperature and feeding frequency on asexual reproduction and polyp growth of the scyphozoan *Cyanea nozakii* Kishinouye SUN Ming, DONG Jing, CHAI Yu, LI Yulong (3222)
- The research on *Buteo hemilasius* nest-site selection on the west bank of Dalai Lake in Dalai Lake Natural Reserve ZHANG Honghai, WANG Ming, CHEN Lei, et al (3233)
- Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology ZHANG Shusheng, BAO Yixin, WANG Yanni, et al (3241)

《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,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科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 高玉葆

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 10 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 10 (May, 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	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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元