

中国暖温带落叶阔叶林中某些树种的¹³C 自然丰度:δ¹³C 值及其生态学意义

严昌荣^{1,2}, 韩兴国¹, 陈灵芝¹, 沈做奎³

(1. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 2. 中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081; 3. 湖北民族学院, 湖北恩施 445000)

摘要:利用质谱分析仪对暖温带地区落叶阔叶林优势种稳定碳同位素的分析发现不同树种叶片的稳定碳同位素比率差别较大, 大多数优势种叶片 δ¹³C 值在 -24.751‰ ± 0.854‰ ~ -28.113‰ ± 1.519‰ 之间。叶片的 δ¹³C 值可以分为 3 个等级, I 级, 叶片的 δ¹³C ≥ -25.5‰, II 级, 叶片的 δ¹³C 值在 -25.5‰ ~ -27.5‰ 之间, III 级, 叶片的 δ¹³C ≤ -27.5‰, 由于 δ¹³C 值在一定程度上能够反映植物的生理生态特性, 这表明所研究的植物在生理生态特性方面也可以分为 3 个类型。同时, 由于植物的不同器官具有不同的生理生态特性, 导致器官对 ¹³C 具有不同的分馏特性, 也导致器官之间的 δ¹³C 值产生差异, 分析结果显示树干、根和小枝的 δ¹³C 值一般要较叶片的 δ¹³C 值高, 但不同树种又各具特点。生境的差异是影响稳定碳同位素比率的另一个重要原因, 良好生境条件下生长的植物的 δ¹³C 值一般较生长在干旱瘠薄生境下的低。

关键词:落叶阔叶林; 优势种; 稳定碳同位素比率; 生态学意义

¹³C at Natural Abundance Levels in the Broad-leaved Deciduous Forest in the Warm-temperate Region of China: Their δ¹³C Values and Ecological Significance

YAN Chang-Rong^{1,2}, HAN Xing-Guo¹, CHEN Ling-Zhi¹, SHEN Zuo-Kui³ (1. *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093*; 2. *Agro-Meteorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081*; 3. *Hubei Institute for Nationalities, Hubei, Enshi 445000*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (12): 2163 ~ 2166.

Abstract: We analyzed the stable carbon ratio of some tree species of a broad-leaved deciduous forest in the warm-temperate region of China. The results showed that there were significant differences in the foliar δ¹³C values among tree species. The δ¹³C values of most species ranged from -24.751‰ ± 0.854‰ to -28.113‰ ± 1.519‰. We categorized these tree species into three groups based on their foliage δ¹³C values. The foliage δ¹³C values of the Group I plants were greater than -25.5‰, while those of Group III plants were below -27.5‰. The foliage δ¹³C values of Group II plants fell in between, ranging from -25.5‰ to -27.5‰. Because the δ¹³C values can reflect the ecophysiological features of plants to a certain extent, therefore, the plant species that we studied could also be divided into three groups. At the same time, our results indicated that stems, roots and twigs had higher δ¹³C values than leaves, though they differed among species. We also found that trees growing in good habitats had lower δ¹³C values than those growing in dry and infertile habitats, suggesting that the habitats can have great influence on the δ¹³C values of plants.

Key words: broad-leaved deciduous forest; dominant species; stable carbon isotopes ratio; warm-temperate

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(39899370); 国家自然科学基金资助项目(39570126); 十五国家科技攻关资助项目(2001BA508B09); 国家高新技术研究发展计划资助项目(2002AA623311)

收稿日期:2000-04-10 **万方数据** **日期:**2002-04-10

作者简介:严昌荣(1961~), 男, 湖北省荆门市人, 博士, 副研究员。从事生态学研究。E-mail: yancr@ns.ami.ac.cn

zone

文章编号:1000-0933(2002)12-2163-04 中图分类号:S718 文献标识码:A

碳是最重要的生命元素之一,在植物体中,由于其生理生态特性的差异, $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同物种和同一物种的不同器官都不一样,由于植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异,稳定碳同位素技术正广泛应用于植物生态学研究的许多方面^[1~3],如植物光和途径的鉴别、生态系统土壤中碳素的来源、植物的水分利用效率等,本研究对暖温带地区落叶阔叶林优势种的稳定碳同位素比率进行研究,其目的是要了解这些关键种间稳定碳同位素的差异,器官对稳定碳同位素比率的影响,植物生境和其稳定碳同位素的关系,以便从另一个方面对暖温带落叶阔叶林几种优势种生理生态特性和其影响因子进行探讨。

1 研究地基本情况

落叶阔叶林是我国暖温带地区的地带性植被,落叶阔叶灌丛是暖温带落叶阔叶林被破坏后形成的次生植被。试验材料采自北京西部东灵山的落叶阔叶林和杂灌丛,该地年平均气温 2~8℃,年平均降水量在 600mm 左右。落叶阔叶林主要由辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、椴树(*Tilia mandshurica*)、五角枫(*Acer mono*)、棘皮桦(*Betula dahurica*)、核桃楸(*Juglans mandshurica*)、大叶白蜡(*Fraxinus rhychophylla*)等树种组成;杂灌丛则以山杏(*Prunus var. ansu*)、山桃(*Prunu sdavidiana*)、大叶白蜡、荆条(*Vitex negdo var. heterophylla*)、北京丁香(*Syringa peginensis*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)为主。根据树干解析资料,该落叶阔叶林主要树种的树龄在 30~50a,杂灌丛地上部分植株的年龄大多在 5~10a,有部分植株的年龄在 20a 以上。

2 样品采集、处理和分析方法

采样的对象为辽东栎、山杏、大叶白蜡、五角枫、核桃楸、北京丁香、荆条等树种。在生长季的不同时期,分 4 次采集这些植物叶片,在 $70\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干,然后用粉碎机磨碎、过 80 目的筛后制成供试样品。在秋季采集这些植物的茎干和根,分别对茎皮、茎干、根皮和根干按前述方法制成供试样品。将样品经过气、纯化、结晶后用 MAT-251 型质谱仪进行 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值的测定,分析精度高于 0.02‰,相对误差小于 0.1‰,具体的计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C} = [^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{(\text{sample})}/^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{(\text{PDB})} - 1] \times 1000$$

其中, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{(\text{sample})}$ 为样品中碳元素重轻同位素丰度之比; $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{(\text{PDB})}$ 为标准物中碳元素重轻同位素丰度之比;PDB 为 Pee deebelemnite 碳同位素的标准物(一种碳酸盐陨石)

3 结果与讨论

3.1 植物体稳定碳同位素自然丰度的特征

如图 1 所示,不同树种叶片的稳定碳同位素自然丰度差别较大,暖温带落叶阔叶林主要树种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-24.751\text{‰}\pm 0.854\text{‰}\sim -28.113\text{‰}\pm 1.519\text{‰}$ 之间,根据多重比较的 F 检验可知,所研究树种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可分为 3 个等级:Ⅰ级($\delta^{13}\text{C}\geq -25.5\text{‰}$),Ⅱ级($-25.5\text{‰}\geq \delta^{13}\text{C}\geq -27.5\text{‰}$)和Ⅲ级($\delta^{13}\text{C}\leq -27.5\text{‰}$)。可见,树种的特性对其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响是确定的。主要是由于树种不同,其生理生化特性不同,由此带来对 $^{13}\text{CO}_2$ 分馏的差异。

生境对植物分布、生长、发育具有很大的影响,同样也影响到植物稳定碳同位素的比率,不少科学家^[3~6]等对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值和其生境的关系进行了研究,结果都显示二者有很好的相关性。孙谷畴^[1]和林植芳^[2]对南亚热带几种植物研究后也发现光照强度对叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响很大。如图 2 所示,同种植物生长在土层较深厚(大于 80cm)、土壤湿度大(生长季土壤平均湿度为 15%左右)的样地 1 上,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,而在土层薄(20~30cm)、土壤湿度低(生长季土壤平均湿度约 10%)的样地 2 和样地 3 上,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高。根据方差分析,二色胡枝子和大叶白蜡在 3 个采样点叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异($F_{\text{二色胡枝子}(2,12)}=19.86>F_{0.01}(2,12)=6.93$; $F_{\text{大叶白蜡}(2,14)}=7.72>F_{0.01}(2,14)=6.51$)。样地 1 和样地 2 二色胡枝子叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著性差异($DS=1.30<DS_{0.1}=1.34$),而样地 1 和样地 3,样地 2 与样地 3 的二色胡枝子 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著性差异(DS 分别为 3.51 和 2.22,大于 $DS_{0.01}=2.10$)。同样,样地 1 与样地 2 和样地 1 与样地 3 的大叶白蜡 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著性差异(DS 分别为 3.51 和 2.22,大于 $DS_{0.01}=2.10$)。同样,样地 1 与样地 2 和样地 1 与样地 3 的核桃楸 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著性差异(DS 分别为 3.51 和 2.22,大于 $DS_{0.01}=2.10$)。同样,样地 1 与样地 2 和样地 1 与样地 3 的山杏 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著性差异(DS 分别为 3.51 和 2.22,大于 $DS_{0.01}=2.10$)。同样,样地 1 与样地 2 和样地 1 与样地 3 的辽东栎 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著性差异(DS 分别为 3.51 和 2.22,大于 $DS_{0.01}=2.10$)。

地3上生长的大叶白蜡叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间存在差异(DS 分别为1.80和2.69大于 $DS_{0.1}=1.57$ 和 $DS_{0.01}=2.55$),而大叶白蜡在样地2和样地3上叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在差异($DS=0.89<DS_{0.1}=1.64$)。这说明生境对植物体 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有影响,其原因可能是在土层薄、土壤湿度低的生境下,植物多数时间处于水分亏缺状态,导致叶片的气孔趋于关闭,气孔传导率低(本文的野外测定结果已证实这一点)、细胞间隙 CO_2 浓度下降,同时也带来叶片稳定碳同位素比率的增高。

植物器官的生理生态特性差距较大,叶片和小枝是植物生理活性最旺盛的器官,同时这些器官在化学成分组成上也存在差异,如树干、根中木质素、粗纤维素占的比重大,叶片中蛋白质含量高。因此各个类型的器官对 ^{13}C 值具有不同的分馏特性,不同器官的 ^{13}C 值也不同。表1数据显示树干、根和小枝的稳定碳同位素比率一般要较叶片的高,但不同树种又各具特色。

表1 杂灌丛样地上几种植物不同器官的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)

植物名称 Species	叶片 Leaf	小枝 Twig	干 Stem	根 Root
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	-25.755±0.578	-29.214±0.267	-28.097±0.514	-26.443±0.033
山杏 <i>Prunus</i> var. <i>ansu</i>	-24.925±0.171		-26.825±0.122	-25.751±0.116
大叶白蜡 <i>Fraxinus rhynchophylla</i>	-25.540±0.710	-27.560±0.134	-25.772±0.278	-26.544±0.214
核桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	-27.182±0.787	-28.636±0.245	-28.034±0.781	-27.203±0.782

3.2 植物体稳定碳同位素比率的生态学意义

植物体稳定碳同位素比率受控于植物种的特点、生境两个方面,植物光合作用是自然界产生碳同位素分差的最重要过程。 CO_2 通过气孔进入植物叶片,在叶片中进行一系列的反应合成有机物,这一系列反应中都存在显著的碳同位素效应^[7],现在的研究结果显示不同光合途径的植物对 $^{13}\text{CO}_2$ 在时空上有不同的识别和排斥特点,如在陆生植物中, C_3 植物体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在-22‰~-35‰; C_4 植物体 $\delta^{13}\text{C}$ 值在-8‰~-16‰。利用植物体 $\delta^{13}\text{C}$ 值这一特点可以有效地鉴别植物的光合途径。通过对北京山区暖温带落叶阔叶林优势种 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-24.751‰±0.854‰~-28.113‰±1.519‰)分析,可知这些乔灌木植物都属于 C_3 植物。植物水分利用特点是植物生态学所关注的一个重要方面,现今的研究结果表明植物体,特别是植物叶片稳定碳同位素比率能够很好地反映植物的长期水分利用效率^(1,3,8)。根据植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值计算的北京山区暖温带落叶阔叶林优势种的长期水分利用效率结果说明这些乔灌木种的长期水分利用效率存在差异,在所研究植物中,山杏的水分利用效率最高,荆条虽然能在十分干旱、瘠薄土壤上生存,但它的长期水分利用效率并不高,原因是它具有十分庞大的地下根系,即使在水分匮乏的地方它仍能获取其需要的水分。

全球变化生态系统的影响已引起广泛的关注。工业革命以来,大气中 CO_2 浓度一直在稳定上升,目前已有许多利用植物体稳定碳同位素比率重建全球或某一地区 CO_2 的变化过程,如有科学家利用 C_4 植物

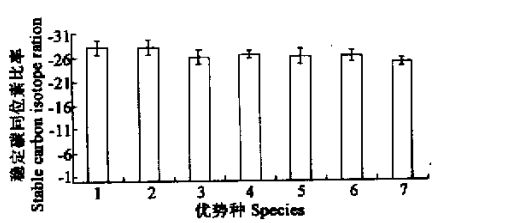


图1 暖温带落叶阔叶林优势种叶片稳定碳同位素比率
Fig. 1 The mean $\delta^{13}\text{C}$ values in leaves of some plants in the warm temperate zone of China during the growing season

1 桃楸 *Juglans mandshurica* $n=17$; 2 二色胡枝子 *Lespedeza bicolor* $n=16$; 3 大叶白蜡 *Fraxinus rhynchophylla* $n=20$; 4 北京丁香 *Syring peginensis* $n=13$; 5 荆条 *Vitex neguno* var. *heterophylla* $n=12$; 6 辽东栎 *Quercus liaotungensis*; $n=18$; 7 山杏 *Prunus armeniaca* var. *ansu* $n=14$

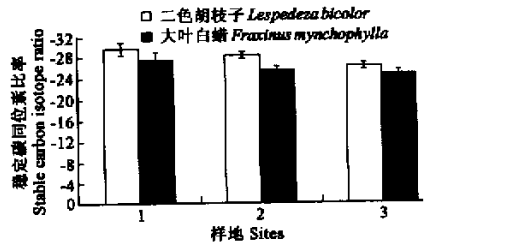


图2 不同生境下两种植物叶片稳定碳同位素比率
Fig. 2 The stable carbon isotope ratio of 2 species's leaf of in different habitats

光合作用碳同位素分差原理用玉米纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化成功地重建了 1948 至 1987 年期间大气 CO_2 变化,蒋高明等^[9]利用油松年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化揭示从 1840 至 1990 年我国北方地区大气 CO_2 浓度的变化。根据对山杏从 1992 年至 1996 年年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和温度、降水量相互关系的研究,发现山杏年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和植物生长季的温度和降水量有关,通过灰色系统关联度理论也证实它们之间确实存在密切关系,山杏木质部 $\delta^{13}\text{C}$ 值和温度、降水量的关联度分别为 0.845 和 0.617^[10]。

总而言之,植物体稳定碳同位素比率对于揭示植物种之间生理生态特性的差异,反映植物在生理生态特性的细微差别方面具有很好的指示作用,环境对植物生理生态特性的影响有十分重要的意义,气候变迁和环境污染也能被植物体稳定碳同位素比率反映出来。

参考文献

[1] Sun G C(孙谷畴), Lin Z F(林植芳), Lin Gui-zhu(林桂珠), *et al.* The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio and water use efficiency of *Pinus massaniana* plantation in subtropical region, *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese)(应用生态学报), 1993, **4**(3): 325~327.

[2] Lin Z F(林植芳), Lin G Z(林桂珠), Kong G H(孔国辉), *et al.* The effect of light density on the stable carbon isotope ratio, CO_2 concentration in cellular and water use efficiency of two wood species in natural forest of subtropical region, *The Botanical Journal of Tropical and Subtropical Region*(in Chinese)(热带亚热带植物研究), 1995, **3**(2): 77~82.

[3] Beerling D J, Woodward F I. Leaf stable carbon isotope composition records increased water-use efficiency of C_3 plants in response to atmospheric CO_2 enrichment. *Functional Ecology*, 1995, **9**: 394~401.

[4] Zhang J W, Marshall J D. Variation in carbon isotope discrimination and photosynthetic gas exchange among populations of *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus ponderosa* in different environments. *Functional Ecology*, 1995, **9**: 402~412.

[5] Smith B N Oliver J and McMillan L. Influence of carbon source oxygen concentration, light intensity and temperature on $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Bot. Gaz.*, 1976, **137**:99~104.

[6] Yan C R(严昌荣), Han X G(韩兴国), Chen L Z(陈灵芝). Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within temperate deciduous forest: spatial, temporal, and species sources of variation. *Acta Botanica Sinica*(in Chinese)(植物学报). 1998, **40**(9):835~839.

[7] Farquhar G D, Ehleringer JR, and KT Hubick. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review in Plant Physiology & Molecular Biology*, 1989, **40**: 503~537.

[8] William SF, Sandquist DR, Phillips SL, *et al.* Compositions of carbon isotope discrimination in populations of aridland plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, **91**:332~337.

[9] Jiang G M(蒋高明), Huang Y X(黄银晓), Wang G J(万国江). The study on the $\delta^{13}\text{C}$ values tree ring on the indicative function in reveal atmosphere CO_2 changes in north China, *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese) (植物生态学报), 1997, **21**(2): 155~160.

[10] Han X G, Yan C R, Chen L Z. Study on the stable carbon isotope characteristics of some woody plants in temperate zone, *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese) (应用生态学报), 2000, **11**(4):491~500.