

中亚热带毛竹和杉木的稳定碳同位素组成及其对水分利用效率的指示

丁访军^{1,2}, 王兵^{1*}, 郭浩¹, 赵广东¹

(1. 中国林业科学研究院 森林生态与环境保护研究所, 北京 100091; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 测定和分析中亚热带毛竹和杉木植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 结果表明: 该区毛竹和杉木叶片的稳定碳同位素组成的变化范围分别为 $-29.42\text{‰} \sim -26.98\text{‰}$ 平均值为 $(-27.96 \pm 0.16)\text{‰}$ 和 $-27.88 \sim -23.78\text{‰}$ 平均值为 $(-26.41 \pm 0.18)\text{‰}$ 。与我国其它地区植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均值相比, 毛竹除了比我国热带雨林区和亚热带喀斯特地区偏高外, 比其它地区略偏低, 而杉木除了比我国暖温带落叶阔叶林植物偏低外, 比其它地区略偏高, 且两种植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围也较多数地区的小。与亚热带优势树种的 $\delta^{13}\text{C}$ 比较, 毛竹比马尾松、木荷小, 比米槠大, 而杉木与马尾松的较接近, 比木荷和米槠大, 这除了与植物本身的生物学特性有关外, 可能还与植物生长的环境有关。此外, 杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于毛竹, 且差异明显, 说明杉木的水分利用效率大于毛竹; 两种植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化规律差异显著, 均表现为生长初期大于生长末期, 说明生长初期的水分利用效率大于生长末期; 两种植物不同生长发育阶段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不明显, 说明其水分利用效率不存在差异, 但随着年龄的增加, $\delta^{13}\text{C}$ 值表现有增加的趋势。

关键词: 毛竹; 杉木; 稳定碳同位素; 水分利用效率

中图分类号: S795.702 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2011)01-0052-06

Composition of Stable Carbon Isotope of *Phyllostachys edulis* and *Cunninghamia lanceolata* and Their Indications for Water Use Efficiency in the Middle Subtropics

DING Fang-jun^{1,2}, WANG Bing^{1*}, GUO Hao¹, ZHAO Guang-dong¹

(1. Forest Ecology and Environment Protection Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China)

Abstract: Measurement and analysis of the value of $\delta^{13}\text{C}$ of the leaves of *Phyllostachys edulis* and *Cunninghamia lanceolata* in the middle subtropics indicate the composition of stable carbon isotope for *P. edulis* leaves in this region, which ranges from -29.42‰ to -26.98‰ with an average $(-27.96 \pm 0.16)\text{‰}$, and the composition of stable carbon isotope for *C. lanceolata* leaves range from -27.88‰ to -23.78‰ with an average $(-26.41 \pm 0.18)\text{‰}$. Compared with the average value of $\delta^{13}\text{C}$ of those plants in other regions of China, except being slightly higher than that of the plants in the tropical regions and sub-tropical karst regions, the average $\delta^{13}\text{C}$ value of *P. edulis* is slightly lower than that of the plants in other regions. Except being slightly lower than that of broad-leaved deciduous forest of the temperate zone, the average $\delta^{13}\text{C}$ value of

收稿日期: 2010-09-09 修回日期: 2010-12-15

基金项目: 林业公益性行业科研专项子项目(200704005/WB03)

作者简介: 丁访军(1969—), 男, 博士生, 主要从事生态系统关键过程长期观测与模拟研究, E-mail: dingfangjun1969@yahoo.com.cn; * 通讯作者: 王兵, 研究员, 博士生导师, E-mail: wangbing@caf.ac.cn。

C. lanceolata is slightly higher than that of the plants in other regions. The variation ranges of $\delta^{13}\text{C}$ of *P. edulis* and *C. lanceolata* are smaller than that of the plants in most other regions. Compared with the dominant tree species in the subtropics, the $\delta^{13}\text{C}$ value of *P. edulis* is smaller than that of *Pinus massoniana* and *Schima superba* and bigger than that of *Castanopsis carlessi*. The $\delta^{13}\text{C}$ value of *C. lanceolata* is close to that of *P. massoniana* and bigger than that of *Schima superba* and *Castanopsis carlessi*, which is not only related to the biological characteristics of the plants themselves, but also maybe related to the living environment. Besides, there is distinct difference between the two species in $\delta^{13}\text{C}$ value with *C. lanceolata* bigger than *P. edulis* and accordingly better WUE. Concerning the seasonal variations of $\delta^{13}\text{C}$ values of the two plants, the values are much bigger, with distinct difference, in the initial growth phase than in the later growth phases, which indicates better WUE in the initial growth phase. There is not so much difference between the $\delta^{13}\text{C}$ values, which indicates not so much difference in WUE, in the different development stages of the two species while the value increases with ages.

Key words: *Phyllostachys edulis*; *Cunninghamia lanceolata*; stable carbon isotope; water use efficiency

在全国重视生态环境建设的今天,特别是西部大开发战略的实施,合理地构建森林植被,降低森林植被遭受干旱胁迫的危害,是大规模开展森林植被建设必须面对和解决的难题。而解决这个问题的关键是对各种植物的水分利用特点有一个比较清楚的认识,因此,植物水分利用效率的研究已成为当前科学家们所关注的焦点之一。关于植物体 $\delta^{13}\text{C}$ 值和其水分利用效率的理论问题已进行了比较广泛和深入的研究^[1-2],植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以用来间接指示植物的长期水分利用效率,该技术已经成为一种公认的估计植物长期水分利用效率的可靠途径。毛竹(*Phyllostachys edulis*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国亚热带地区的主要优势树种之一,在该区植被恢复重建中占有十分重要的地位。到目前为止,我国其它地区植物稳定碳同位素组成的研究已有不少报道^[3-14],孙谷畴等^[15]和王英姿^[16]报道了亚热带地区部分优势树种的稳定碳同位素组成,而该区主要优势树种毛竹和杉木叶片的稳定碳同位素研究报道尚不多见。因此,本文对中亚热带地区毛竹和杉木两种优势树种不同生长发育阶段的稳定碳同位素组成特征及其季节变化进行了研究,并探讨植物的水分利用效率,以为该区森林生态系统的经营管理和植被恢复重建提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点基本情况

研究地点位于江西大岗山国家级森林生态站(114°30′~114°45′E, 27°30′~27°50′N),四季分明,气候温暖湿润,属于中亚热带季风湿润气候类型。年均气温 15.8~17.7℃,1月份平均最低温度为-5.3℃,7月份平均最高温度为28.8℃,年均降水量为1591mm,降水主要集中在4—6月,年均蒸发量为1503mm。该地区森林资源类型多样,生物多样性丰富,天然常绿阔叶林是其地带性植被。但由于长期严重的人为干扰,地带性植被已破坏殆尽,现有的各种植被类型主要有天然次生常绿阔叶林、落叶阔叶林、各类针阔混交林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)林以及大面积杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林。

1.2 样品采集和处理

2008年5月下旬和10月上旬在江西大岗山森林生态站试验区,设置毛竹林样地1块和立地条件基本相似的9年、18年和30年生杉木林样地各1块,样地面积600m²。在毛竹林样地选择I、II和III度毛竹各3个植株采集叶片,即为每度竹采集的重复数。在杉木林各样地分别选择5棵树采集叶片,即为杉木各林龄的重复数。叶片采样选择健康、正常生长的植株,在每棵树植冠层中上部4个方向共采集30~50片无破损的成熟叶片分别装袋带回实验室,并将所采集的叶片样品置于常规的干燥箱中,于70℃条件下烘48h,然后粉碎,过20目筛。

1.3 稳定碳同位素分析

碳同位素比率采用美国生产的Finnigan MAT Delta V advantage同位素比率质谱仪分析,由中国林业科学研究院稳定同位素比率质谱实验室完成。碳同位素比率采用 $\delta^{13}\text{C}$ 的表达形式,由下式计算而得:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}^{-1}) \times 1000 \quad (1)$$

(1) 式中 R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值 R_{sample} 为测定样品的 R 值 R_{standard} 为标准物质的 R 值,标准物质采用国际普遍认可的 PDB(Pee Dee Belminite)。

1.4 数据分析

数据分析采用 EXCEL 软件完成 所有的统计分析都是采用 SPSS 软件的 One Way ANOVA 分析完成。

2 实验结果

2.1 毛竹、杉木的稳定碳同位素特征分析

通过生长初期 5 月和生长末期 10 月 2 个季节叶片稳定碳同位素分析发现,中亚热带地区毛竹稳定碳同位素为 $-29.42\text{‰} \sim -26.98\text{‰}$ [平均值为 $(-27.96 \pm 0.16)\text{‰}$],杉木的稳定碳同位素为 $-27.88\text{‰} \sim -23.78\text{‰}$ [平均值为 $(-26.41 \pm 0.18\text{‰})$],毛竹的稳定碳同位素小于杉木的稳定碳同位素,平均相差 1.56‰ (图 1),且二者之间的稳定碳同位素差异显著($P < 0.001$)。这种差异主要是由于毛竹和杉木的生物学特性的差异所致。另外 2 个树种所生长的小生境的差异可能也是导致二者的稳定碳同位素差异因素之一。

2.2 毛竹、杉木的稳定碳同位素的季节变化

中亚热带地区毛竹 5 月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-28.15\text{‰} \sim -26.98\text{‰}$ [平均值为 $(-27.44 \pm 0.12)\text{‰}$],10 月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-29.42\text{‰} \sim -27.73\text{‰}$ [平均值为 $(-28.48 \pm 0.18)\text{‰}$],生长初期 5 月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值比生长末期 10 月份的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高 1.04‰ (图 2),而且 2 个季节之间的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异极显著($P < 0.001$)。而杉木 5 月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-27.67 \sim -23.78\text{‰}$ [平均值为 $(-25.93 \pm 0.29)\text{‰}$],10 月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-27.88 \sim -25.84\text{‰}$ [平均值为 $(-26.87 \pm 0.15)\text{‰}$],5 月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值比 10 月份的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高 0.94‰ (图 2),而且 2 个季节之间的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著($P < 0.01$)。

2.3 不同生长发育阶段毛竹、杉木的稳定碳同位素特征

通过分析中亚热带地区毛竹和杉木不同生长发育阶段的稳定碳同位素特征(表 1),发现毛竹生长初期 5 月的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值由小到大表现为 1 度竹(平均值为 -27.44‰)、2 度竹(平均值为 -27.29‰)、3 度竹(平均值为 -27.61‰),而生长末期 10 月的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值由小到大表现为 1 度竹(平均值为 -28.84‰)、2 度竹(平均值为 -28.08‰)、3 度竹(平均值为 -28.50‰),但 2 个季节不同生长发育阶段毛竹的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异不显著($P > 0.01$);不同生长发育阶段杉木生长初期 5 月的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值由小到大表现为幼龄林(-26.33‰)、中龄林(-25.88‰)、成熟林(-25.59‰),而生长末期 10 月的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值由小到大表现为幼龄林(-27.20‰)、中龄林(-26.94‰)、成熟

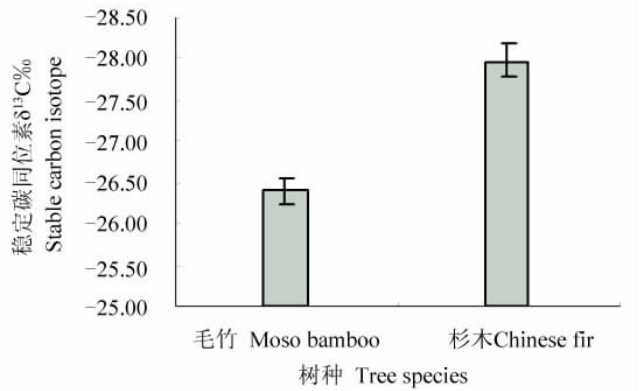


图 1 毛竹和杉木的稳定碳同位素组成比较

Fig. 1 Comparison between Moso bamboo and Chinese fir on composition of stable carbon isotope

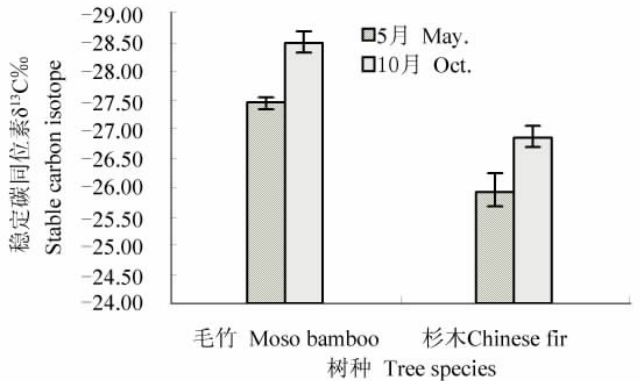


图 2 毛竹和杉木的稳定碳同位素的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of stable carbon isotope of Moso bamboo and Chinese fir

林($-26.47‰$) ,但 2 个季节不同生长发育阶段杉木的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著($P > 0.01$) 。

表 1 毛竹和杉木不同生长发育阶段的稳定碳同位素

Tab. 1 Stable carbon isotope in development stage for Moso bamboo and Chinese fir

树种 Tree species	林龄 Forest age	5 月 May		10 月 May	
		平均 $\delta^{13}\text{C} / ‰$	标准误(SE) / ‰	平均 $\delta^{13}\text{C} / ‰$	标准误(SE) / ‰
		Avg. $\delta^{13}\text{C}$	Standard error	Avg. $\delta^{13}\text{C}$	Standard error
毛竹 Moso bamboo	1 度竹 1st age class	-27.44	0.07	-28.84	0.31
	2 度竹 2nd age class	-27.29	0.27	-28.08	0.10
	3 度竹 3rd age class	-27.61	0.27	-28.5	0.39
杉木 Chinese fir	9 年生 9-year-old	-26.33	0.56	-27.2	0.22
	18 年生 18-year-old	-25.88	0.38	-26.94	0.25
	30 年生 30-year-old	-25.59	0.53	-26.47	0.25

3 讨 论

(1) 有研究结果^[17]表明 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化为 $-20‰ \sim -35‰$ (平均为 $-26‰$) , C_4 植物变化为 $-7‰ \sim -15‰$ (平均为 $-12‰$) ,而 CAM 植物则介于上述两类植物之间,一般变化为 $-10‰ \sim -22‰$ (平均为 $-16‰$) 。从本研究中所采集的毛竹和杉木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值来看,毛竹的稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要分布为 $-29.42‰ \sim -26.98‰$ (平均值为 $-27.96‰$) ,杉木稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要分布为 $-27.88‰ \sim -23.78‰$ (平均值为 $-26.41‰$) ,毛竹和杉木都属于典型的 C_3 植物。中亚热带毛竹和杉木的稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值与我国其它地区植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值相比,毛竹的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值除了比我国热带雨林区植物^[5]和亚热带喀斯特地区^[6]的偏高外,比荒漠区植物^[7]、河西走廊中部沙漠植物^[8]、黑河流域山地和绿洲植物^[9]、青藏高原北部植物^[11]、暖温带落叶阔叶林植物^[12]、青藏高原东部典型高山植物^[13],以及北京城市常绿和落叶绿化树种^[14]的略偏低,而杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比除了比我国暖温带落叶阔叶林植物^[12]和北京城市绿化树种^[14]的偏低外,比其它地区^[5-9,11,13]的略偏高。且毛竹和杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围也较多数地区的小,这可能与取样范围有一定的关系。另外,毛竹和杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值与亚热带优树种马尾松和木荷的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值^[15]以及米槠的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值^[16]相比,毛竹比马尾松、木荷小,比米槠大,而杉木与马尾松的较接近,比木荷和米槠大。这除了与植物本身的生物学特性有关外,可能还与植物生长的环境有关。

国外有研究结果表明,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在落叶树种与常绿树种之间^[18],灌木和乔木之间^[19-20]存在差异,国内有研究结果^[5-14]也表明不同种类植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异。但也有不同结论,常绿植物与落叶植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间不存在显著差异^[21-22]。而黄建辉等^[10]和苏培玺等^[8]的研究表明同一地区只有部分种之间的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异,另有一些种之间不存在差异。本研究结果得出同一地区生长的不同种类毛竹和杉木的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在着较大的差异,支持了第一种研究结论。

叶片稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 反映了环境变化对 Gi/Ca 的影响。但当水分对植物生长并不是一个主要限制因子时, $\delta^{13}\text{C}$ 值受蒸气压亏损(VPD) ,光照,叶片含 N 量等多个因子的影响^[23-24]。本研究区水分充足,水分对于植物的生长并不是限制因子,因此从研究结果看,毛竹和杉木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的差异可能是由于生物学特性或生理生态特性不同所致,但二者小生境的不同导致受蒸气压亏损(VPD) ,光照等影响不同,因此也会对二者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响。

植物叶片稳定碳同位素比值是植物长期生理生态过程的整合指标,它可以用来指示植物长期的水分利用效率^[1,4-10,21,25-26]。植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与水分利用效率呈一定程度的正相关关系^[1-2,20]。从研究结果看,毛竹和杉木两种植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在着显著的差异,且杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于毛竹,由此可以认为杉木的水分利用效率大于毛竹,这也就意味着在水分受到限制的情况下,杉木比毛竹具有更强的竞争力。

(2)毛竹和杉木生长初期5月份的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值均比生长末期10月份的高,即生长初期(5月份)的水分利用效率比生长末期(10月份)的高。本研究得出毛竹和杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化规律差异明显,与其他研究者报道的结果^[3,6,12-14,27-28]一致,也是生长初期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于生长末期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。而与另外的研究结果^[10]不一致。本研究结果可能是由于毛竹和杉木在5月份处于生长初期,而10月份则处于生长末期,两个时期植物生长快慢和叶片成熟度差异所致。植物在生长初期,细胞生长比较活跃,以便合成大量有机物来满足植物叶片发育和植物建构的需要,相对而言,细胞内部 CO_2 浓度处于“饥饿”状态,因而导致植物对 $^{13}\text{CO}_2$ 的识别和排斥降低,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高;到了生长后期,叶片外部形态和内部结构发育趋于完全,内部生理代谢功能趋于完备,植物具备了较完善的生理生化反应调控机制,能较有效地识别与排斥 $^{13}\text{CO}_2$,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低^[3,6]。季节的差异也体现在环境条件的差异上,5月份的环境条件相较于10月份来说,5月份有利于植物的生长,Smith^[29]证明,植物生长在适宜环境下,生长快,碳同位素比也较高。

(3)毛竹生长初期(5月)和生长末期(10月)的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为1度竹<2度竹<3度竹,而杉木生长初期(5月)和生长末期(10月)的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现为幼龄林<中龄林<成熟林。本研究得出毛竹和杉木不同生长发育阶段的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异均不明显,这与其他研究者的研究结果^[22]不一致。这可能是由于本研究2次采样时间前后降雨量都比较丰富,或者是由于其他何种原因导致的,这方面需要进一步的研究证实。但随着年龄的增加,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值有增加趋势,说明毛竹和杉木成年树的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于相应的幼树。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 包含了碳同化过程中胞间 CO_2 与大气 CO_2 的比值(Ci/Ca)的综合情况,反映了同化速率与气孔导度的平衡^[1]。尽管 $\delta^{13}\text{C}$ 与环境变量有着较强的关系,但有研究结果^[30]表明,水分传导性在控制树木体内水分传输及对 ^{13}C 的分馏中起着关键作用,水分传导组织的长度和传导性影响着水分传导性及 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[22]。Warren和Adams^[31]研究发现,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与传输水分的枝条的长度成正相关,枝条长度会增加降低水分传导性,因此降低了气孔导度,增强了 ^{13}C 的吸收。因此在本研究中,对于杉木来说,主要原因可能是与水分从土壤到冠层叶片的传输距离有关。由于不同发育阶段植物年龄和树木个体(高和径)的增加,水分在年龄大的树木体内传输的距离大于幼树,传输距离增加降低了水分的传导性和植物的气孔导度。而对于毛竹来说,主要原因可能是其特殊的生物学特性决定的。由于新竹长成后,新竹的组织幼嫩,含水量高,干物质少,而竹杆的高度、粗度和体积不再随年龄的增加而增大,但随着年龄的增加,毛竹消耗相同水量生成的干物质重量大于新竹,因而老竹的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于新竹。因此,同一树种不同的发育阶段对干旱环境也有不同的反应策略,成年树更接近于保守型水分利用策略,而幼树则接近于挥霍型水分利用策略。

(4)尽管 $\delta^{13}\text{C}$ 反映了植物水分利用情况,而植物各种水力特征的相互依赖性说明我们不能从一个简单的特征来预测植物利用水分变化情况,而要考虑到多种互相依赖的特征的综合性^[32]。由于本研究是在多种环境因子综合作用下进行,以及实验涉及的范围不够大,样本数不够多,研究结果只是初步的,因此用此稳定碳同位素比率比较植物的水分利用效率仍有许多不足之处。要获得毛竹和杉木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更为详细的时空变化及其影响因子,还需要进行深入的研究。

参考文献:

- [1]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 [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9(2): 121-137.
- [2]Knight J D, Livingston N J, Van KESSEL C. Carbon isotope discrimination and water use efficiency of six crops grown under wet and dryland conditions [J]. Plant, Cell & Environment, 1994, 17(2): 173-179.
- [3]陈拓, 秦大河, 任贾文, 等. 甘肃马衔山平车前叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔和时间差异 [J]. 西北植物学报, 2000, 20(4): 672-675.
- [4]苏波, 韩兴国, 李凌浩, 等. 中国东北样带草原区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率对环境梯度的响应 [J]. 植物生态学报,

- 2000, 24(6): 648 - 655.
- [5] 渠春梅, 韩兴国, 苏波, 等. 云南西双版纳片断化热带雨林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示 [J]. 植物学报, 2001, 43(2): 186 - 192.
- [6] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 喀斯特山区植物碳同位素组成特征及其对水分利用效率的指示 [J]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 105 - 110.
- [7] 陈拓, 冯虎元, 徐世建, 等. 荒漠植物叶片碳同位素组成及其水分利用效率 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 288 - 291.
- [8] 苏培玺, 陈怀顺, 李启森. 河西走廊中部沙漠植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 597 - 602.
- [9] 苏培玺, 严巧娣. 内陆黑河流域植物稳定碳同位素变化及其指示意义 [J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1616 - 1624.
- [10] 黄建辉, 林光辉, 韩兴国. 不同生境间红树科植物水分利用效率的比较研究 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 530 - 536.
- [11] 陈拓, 杨梅学, 冯虎元, 等. 青藏高原北部植物叶片碳同位素组成的空间特征 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 83 - 87.
- [12] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝, 等. 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 [J]. 植物学报, 1998, 40(9): 853 - 859.
- [13] 李明财, 易现峰, 李来兴, 等. 青藏高原东部典型高山植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(1): 77 - 81.
- [14] 王玉涛, 李吉跃, 程炜, 等. 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 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3143 - 3151.
- [15] 孙谷畴, 林植苏, 林桂珠, 等. 亚热带人工林松树 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率和水分利用效率 [J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 325 - 327.
- [16] 王英姿. 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 及养分等属性特征的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [17] O'Leary M H. Carbon isotope fractionation in plants [J]. Phytochemistry, 1981, 20(4): 553 - 567.
- [18] Kloepfel B D, Gower S T, Treichel I W, et al. Foliar carbon isotope discrimination in Larix species and sympatric evergreen conifers: a global comparison [J]. Oecologia, 1998, 114(2): 153 - 159.
- [19] Penuelas J, Filella I, Terradas J. Variability of plant nitrogen and water use in a 100m transect of a subdesertic depression of the Ebrovalley (Spain) characterized by leaf $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ [J]. Acta Oecol, 1999, 20(2): 119 - 123.
- [20] Marshall J D, Zhang J. Carbon isotope discrimination and water use efficiency in native plants of the north - central Rockies [J]. Ecology, 1994, 75(7): 1887 - 1895.
- [21] Damesin C, Rambal S, Joffre R. Between tree variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Quercus pubescens* and *Quercus ilex* among Mediterranean habitats with different water availability [J]. Oecologia, 1997, 111(1): 26 - 35.
- [22] 孙双峰, 黄建辉, 林光辉, 等. 三峡库区岸边共存松栎树种水分利用策略比较 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 57 - 63.
- [23] Waring R H, Silvester W B. Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ values with in tree crowns of *Pinus radiata* [J]. Tree Physiology, 1994, 14(11): 1203 - 1213.
- [24] Hamerlynck E P, Huxman T E, McAuliffe J R, et al. Carbon isotope discrimination and foliar nutrient status of *Larrea tridentata* (creosote bush) in contrasting Mojave Desert soils [J]. Oecologia, 2004, 138(2): 210 - 215.
- [25] Ebdon, J S, Petrovic A M, Dawson T E. Relationship between carbon isotope discrimination, water use efficiency and evapotranspiration in Kentucky bluegrass [J]. Crop Science, 1998, 38(1): 157 - 162.
- [26] Arslan A, Zapata F, Kumarasinghe K S. Carbon isotope discrimination as indicator of water - use efficiency offspring wheat as affected by salinity and gypsum addition [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1999, 30(19): 2681 - 2693.
- [27] Holtum J A M, Winter K. Carbon isotope composition of canopy leaves in a tropical forest in Panama throughout a seasonal cycle [J]. Trees, 2005, 19(5): 545 - 551.
- [28] Rice S K. Variation in carbon isotope discrimination within and among *Sphagnum* species in a temperate wetland [J]. Oecologia, 2000, 123(1): 1 - 8.
- [29] Smith B N, Oliver J, Me Millan C. Influence of carbon source oxygen concentration: light intensity and temperature on $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in plant tissues [J]. Bot Gaz, 1976, 137(2): 99 - 104.
- [30] Hubbard R M, Bond B J, Ryan M G. Evidence that hydraulic conductance limits photosynthesis in old *Pinus ponderosa* trees [J]. Tree Physiology, 1999, 19(3): 165 - 172.
- [31] Warren C R, Adams A M. Water availability and branch length determine $\delta^{13}\text{C}$ in foliage of *Pinus pinaster* [J]. Tree Physiology, 2000, 20(10): 637 - 643.
- [32] Martinez - Vilalta J, Sala A, Pinol J. The hydraulic architecture of Pinaceae - a review [J]. Plant Ecology, 2004, 171(1): 3 - 13.