

鼎湖山地区人类活动对马尾松年轮 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的影响*

林植芳 梁春 彭长连 林桂珠 孔国辉

(中国科学院华南植物研究所, 广州, 510650)

摘要 南亚热带鼎湖山自然保护区的非核心地带的旅游活动和附近工厂区污染气体的排放, 影响了马尾松年轮中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和空气 CO_2 的 δa 值。旅游点年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值自1965~1992年以年均 -0.026‰ 速率下降, 1980~1992年年均下降速率增至 -0.044‰ 。工厂点的马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 则随时间而递增, 气体污染改变了 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年际变化图式。1980~1992年, 对照点、旅游点和工厂点空气 CO_2 浓度年均增高速率分别为0.68, 0.98和2.30 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。1994年空气 CO_2 的 δa 值在旅游点和工厂点比对照点低 -0.18‰ 和 -0.44‰ 。

关键词: 人类活动, 马尾松年轮, $\delta^{13}\text{C}$, δa , CO_2 浓度。

EFFECT OF HUMAN ACTIVITY ON $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ RATIOS IN TREE RINGS OF *PINUS* *MASSONIANA* ON DINGHUSHAN

Lin Zhifang Liang Chun Peng Changlian Lin Guizhu Kong Guohui

(South China Institute of Botany, Academia Sinica, Guangzhou, 510650, China)

Abstract The carbon isotope ratios in tree rings of *Pinus massoniana* growing in Dinghushan, a Subtropical Nature Biosphere Reserve(DSNBR), and nearby factory site were studied to understand the human activity in relation to atmospheric CO_2 change. In two sampling sites of core area of DSNBR(relative clean control), the $\delta^{13}\text{C}$ value of tree ring in matured trees did not show a significant downward trend in the period from 1965~1992, but in four sites of opened tour area in non-core forests the average year decline rate of $\delta^{13}\text{C}$ tree ring was -0.026‰ in 1965~1992 and -0.044‰ in 1980~1992. By contrast, $\delta^{13}\text{C}$ value in factory area increased with time. A negative correlation was observed between $\delta^{13}\text{C}$ either with basal area or with canopy shade density. Over the long term period, the ratios of Ci/Ca were only slightly changed by different types of human activity. The calculated CO_2 increasing rates from 1980 to 1992 in control, tour and factory area were 0.68, 0.98 and 2.30 $\mu\text{L}/\text{L}$ per year, respectively. In 1994, δa of forest atmospheric CO_2 in

* 国家自然科学基金资助项目。

tour area and factory area were lower than that in core control area by -0.18% and -0.44% , respectively.

Key words: human activity, tree rings of *Pinus massoniana*, $\delta^{13}\text{C}$, δa , CO_2 concentration.

化石燃料的大量使用及森林的过度砍伐,引起大气中 CO_2 浓度及其中碳同位素比的明显变化。1981~1987年,进入大气中的由化石燃料产生的 CO_2 增加了57%^[1]。近30年来, CO_2 中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (δa)已从 -6.7% 降至 -7.9% ^[2,3]或 -8.0% ^[4]。大气中 CO_2 持续升高,预计到21世纪中期, CO_2 浓度将达工业化前(1850年)的2倍^[5,6],并使全球温度提高 $1\sim 4.5^\circ\text{C}$ 。这将对全球气候、生物圈和人类生活造成巨大的影响。关于大气 CO_2 浓度及其同位素组分变化模式的提出,主要根据对北极与南极不同地质年龄的冰核中气泡的分析,以及近30多年在少数干净地区直接测定大气 CO_2 所得的资料^[3,5]。然而,由于海洋和陆地生态系统的不确定性,使所得的模式仍令人难以完全信服,迄今对 CO_2 浓度变化及可能产生效应的程度,仍受到人们的质疑。

植物是环境信息的纪录者,在其光合作用同化 CO_2 的过程中,由于气孔扩散作用和光合羧化酶反应对 CO_2 中的 ^{13}C 和 ^{12}C 具有不同的分部效应,使其体内的有机碳化合物的稳定性碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)明显降低。植物的年轮纪录了过去和现在的环境信息,贮存于年轮中有机碳化合物(尤其是纤维素)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可反映大气 CO_2 浓度及 δa 变化或植物生理过程对环境变化的响应,或兼作两者变化的纪录^[3,7]。利用年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定,可以追踪大气的 δa 变化史,推测大气 CO_2 浓度的变化趋势。可是,许多因子皆可干扰年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录,使所得的结果往往难以解释或有争议^[8~10]。只有通过更广泛和深入的研究,才能进一步认识其规律和可行性。

过去以热带亚热带地区的树木年轮为对象进行 $\delta^{13}\text{C}$ 研究的资料不多,尤其是比较在自然林及其周围不同形式的人类活动对年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的可能影响,仍知之甚少。本文分析南亚热带地区生长在不同人为活动干扰点的马尾松年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,了解大气 CO_2 组分及浓度变化趋势,为全球变化提供新资料,并为制订森林管理和环境保护对策提供依据。

1 材料和方法

1.1 植物材料

马尾松(*Pinus massoniana*)于树干1.2 m高处用年轮钻采年轮,立即固定于特制框架中。自然干燥后磨平表面,显微镜下确定年代并测年轮宽度。年轮按每5 a分段切开,80烘干,粉碎过60目筛,粉末作 $\delta^{13}\text{C}$ 值分析。

1.2 采样地点与人类活动形式

马尾松生长于具有400多年历史的广东鼎湖山自然保护区及其附近肇庆市龟顶山,部分材料采自深圳市妈湾电厂附近。鼎湖山距广州市86 km,位于 $23^\circ 08' \text{N}$, $112^\circ 35' \text{E}$,地处南亚热带的南缘。植物终年常绿,属古热带植物区系,群落具多态性。本文各试验点围绕保护区的核心地带及外周的森林群落,除样树所处地点的阴蔽度有差异外,其他的生态、土壤条件相似,样地土壤皆为砖红壤。人类活动包括旅游与工业生产2种形式,自然保护区的核心区作为对照。

1.2.1 对照(相对干净点) 在保护区中人类干扰少的白云寺附近,海拔约290 m,马尾松生长于阔叶树为主的混交林中,冠层阴蔽度80%~90%,树高15~25m,胸径30~58 cm。年轮从1910或1930年到1992年。采样点为到白云寺的路上及白云寺护林站,各采5株树。

1.2.2 旅游点 位于鼎湖山旅游社和庆云寺附近,海拔150~190 m之间。近年来在旅游旺季日均进山2000多人,车辆往返800多次。共有4个采样点,即:A,公路边,游客进山必经之道,马尾松树龄始自1925年,高18~25 m,胸径25~52 cm,阴蔽度60%。B,火车站附近人工松林,栽于1935年,胸径38~43 cm,阴蔽度约25%。C,飞水潭,小瀑布景点和游泳胜地,混交林到阔叶林过渡型,阴蔽度80%,马尾松年轮最早自1910开始,胸径48~58 cm。D,庆云寺护林站,处于旅游车辆停车场及庆云寺附近,受汽车排放物及焚香气体等的影响。阴蔽度90%,马尾松胸径31~50 cm,年轮始于1925年。

1.2.3 工业点 包括距鼎湖山19 km外的肇庆市龟顶山1975年种的松林,位于钢铁厂和化工厂附近,及深圳市妈湾电厂附近1975年栽种的松树,树高低于10 m。

1.3 稳定性碳同位素比($\delta^{13}\text{C}$)分析及 Ci/Ca 计算。

松树样株一般为每个样点3~5株。分为5 a一段,不同样株的同一年轮段混合或单独分析。

样品制备,分析及 $\delta^{13}\text{C}$ 计算方法同前文^[11]。MAT-251同位素比质谱仪测定同位素比。

Ci/Ca 的计算方法分别以2种方法作比较,参照 Farquhar^[12]和 Meinger^[13]的方法。空气 CO_2 的 δ 值按 Francey^[7]、Broadmeadow^[14]和 Sternberg^[15]的公式计算。

2 实验结果

2.1 不同人类活动对马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

过去的研究皆取某一特定年轮作分析,所得结果波动甚大。为了获得不同年分段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均变化趋势,本文改为将每5 a的年轮作为一个样品进行分析。图1~3中每个数据点皆代表3~5株树年轮的每个5 a年轮的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值,但1990年的数据只代表1990~1992年3个年轮的平均值。

图1显示对照的2个采样点 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年轮年龄的关系。从1910~1992年,白云寺路上(BR)的马尾松 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最高与最低值相差约-1‰。生长的前30年内, $\delta^{13}\text{C}$ 的负值呈减少趋势,随后的变幅较少。白云寺护林站马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值也是幼龄期的负值较大,1965年之后也维持相对稳定状态,从1935~1992年, $\delta^{13}\text{C}$ 变幅也在-1‰左右。

与旅游活动有关的4个采样点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化见图2。4条曲线的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小有些差别,可能与生长点的微环境如冠层条件不同有关,但其年际变化的趋势相似。通常也在各自的树龄20~30 a之前, $\delta^{13}\text{C}$ 负值减少。成熟的旺盛生长期中变化在-0.16‰左右,1980年之后, $\delta^{13}\text{C}$ 值较明显下降(负值增大)。与对照相比,旅游点的马尾松在其生长期内 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变幅较大,分别达1.86‰(飞水潭),1.71‰(公路边),1.39‰(火车站附近)和0.82‰(庆云寺护林站)。1980年后开放旅游,到1992年, $\delta^{13}\text{C}$ 值比1980年下降了-0.63‰(飞水潭),-0.49‰(庆云寺护林站),-0.54‰(公路边)和-0.28‰(火车站附近)。这表明人类旅游活动带来了较多的机动车尾气,宗教焚香气体和炊烟等对环境的污染,导致了年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的较大波动,其下降趋势与旅游活动加剧有关。

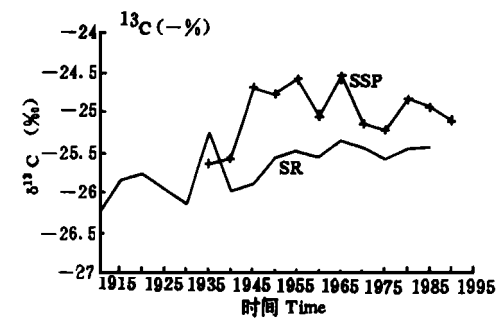


图1 对照点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化
每个点代表5 a 年轮的平均值, 图1~5皆如此.
BR, 白云寺的森林路上; BSP, 白云寺护林站
Fig 1 Changes of $\delta^{13}\text{C}$ values in tree ring of *Pinus massoniana* from Baiyun forest (Control site) BR, on the way to Baiyun temple; BSP, Baiyun forest sentry post. Each point in Fig 1~5 is the mean value of several five year-ring

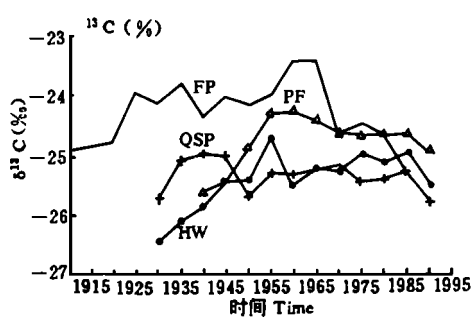


图2 旅游点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化
PF, 人工松林; QSP, 庆云寺护林站; HW, 公路边; FP, 飞水潭
Fig. 2 Changes of $\delta^{13}\text{C}$ values in tree ring of *Pinus massoniana* from tour site PF, Man-made pine forest; QSP, Qingyun forest sentry post; HW, High way side; FP, Feishui pond

肇庆市龟顶山人工栽种的马尾松直接受到附近化工厂和钢铁厂工业废气中 SO_2 、 FH 、 H_2S 、 NO_x 和 CO_2 的影响。该地2个工厂每年向大气排出 SO_2 50多吨, 氟化物120多吨, 瞬时浓度超过最高允许值0.7(SO_2) 倍和3.1倍(氟化物)。1994年在钢铁厂测定的日均 CO_2 浓度为 $377\mu\text{L/L}$ 。图3可见, 马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值从1975年到1992年呈线性增高, 负值降低了1.41‰。深圳妈湾电厂附近大气硫酸盐化速率 $0.378\text{SO}_3\text{ mg}/100\text{ cm}^2\text{ d}$, 比鼎湖山旅游点的 $0.283\text{SO}_3\text{ mg}/100\text{ cm}^2\text{ d}$ 高, 氟化物则达 $0.863\mu\text{g}/100\text{ cm}^2\text{ d}$ 。在此条件下生长的马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在1960~1980年间的波动较小, 未见如图1~2那样的幼龄期 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高现象。龟顶山松树受到2个污染源的影响, 变化的程度比深圳松树大。

在混交林中, 马尾松生长25~40 a 后达到旺盛生长期(基干面积增量高峰期), 而在阳光充足的人工纯林中, 此时间可缩短至10~15 a 左右。为了比较人类活动的影响, 图4只比较松树在成熟与旺盛生长期开始之后的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值随时间而变化的速率。线性回归分析发

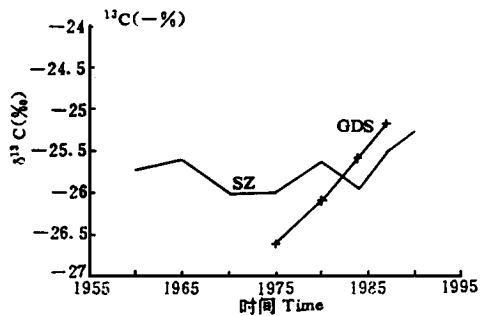


图3 工厂点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化
(SZ, 深圳妈湾电厂附近; GDS, 龟顶山)
Fig. 3 Changes of $\delta^{13}\text{C}$ values in tree ring of *Pinus massoniana* from factory site SZ, Shenzhen; GDS, Guidingshan

现从1965年到1992年, 旅游点的 $\delta^{13}\text{C}$ 值每年降低 -0.026‰ , 对照点的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变动甚少。若只统计1980年开放旅游活动之后的变化, 则对照点年下降速率为 -0.0031‰ , 旅游点达 -0.044‰ 。

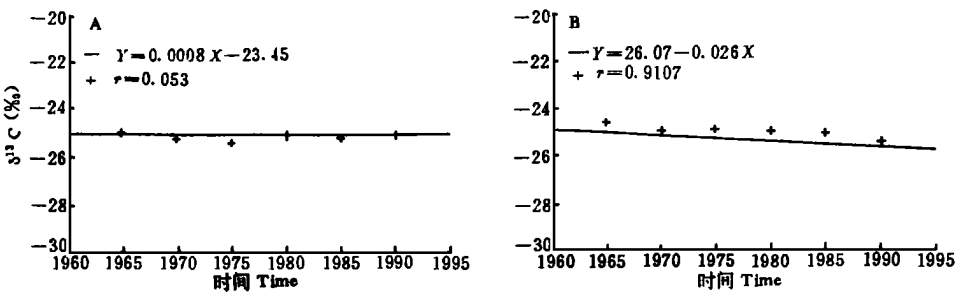


图4 马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年际变化速率

Fig. 4 The yearly variation rate of $\delta^{13}\text{C}$ value in tree ring of *Pinus massoniana*

A, 对照点 Control site; B, 旅游点 Tour site

2.2 不同人为干扰点马尾松的 C_i/C_a 及树木基干面积增量的比较

植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与细胞间隙的 CO_2 浓度/外界空气 CO_2 浓度(C_i/C_a)及叶片中长期的 C_i 浓度之间有强相关性^[12, 13, 16]。Meinzer 报告夏威夷的 *Metrosideros polymorpha* $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C_i/C_a 的相关系数 $Y^2 = 0.95^{[13]}$ 。Ehleringer 等指出桑寄生及其寄主的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和白天平均 C_i 之间呈线性关系, $\delta^{13}\text{C}$ 负值大, 则 C_i 高^[16]。图5是将马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值按 Farquhar^[12]和 Meinzer^[13]的公式分别计算 C_i/C_a 的年际变化:

$$\Delta^{13}\text{C} = \delta a - \delta p / 1 + \delta p, C_i/C_a = \Delta^{13}\text{C} - a/b - a \quad (\text{Farquhar})$$

$$\delta^{13}\text{C} = -13.7 - 21 C_i/C_a \quad (\text{Meinzer})$$

式中: δa 是不同年度空气中的碳同位素比, 数据来自 Friedli^[5], Keeling^[3], Penue-las^[17]和 Griffiths^[4]。 δp 示植物材料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, $\Delta^{13}\text{C}$ 为植物对 ^{13}C 的排斥作用(discrimination), b 是 RuBP 羧化酶羧化作用引起的分部效应(27‰), a 为空气扩散到气孔时产生的分部效应(4.4‰)。

图5A 的 C_i/C_a 平均值(0.560)比图5B(0.579)低, 但两者的变化趋势相似。工厂点的 C_i/C_a 随年际变化而有轻微下降, 速率约0.003–0.004/a, $r = 0.9940$, 对照点和旅游点的 C_i/C_a 下降速率 $< 0.001/a$, 可以认为呈相对稳定。这与桉树^[18]和荷木^[19]在短期改变 CO_2 浓度下 C_i/C_a 变化不大的结果一致。从图5各数据点计算平均值, 得到马尾松平均 C_i/C_a 为0.571, 平均 C_i 约为200 $\mu\text{L/L}$ 。

从测量年轮宽度(数据未列出)的变化计算每5 a 的基干面积增量, 将此增量最高的一些年分作为生长旺盛期。比较同期的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 基干面积增量、树冠阴蔽度等在各采样点之间的差别和相关性(表1), 发现 $\delta^{13}\text{C}$ 值与基干面积增量呈负相关, $r = -0.6265$, 线性方程式 $\delta^{13}\text{C} = 183.9 - 0.2977 x$ (基干面积增量)。Dupouey 等也曾报告山毛榉年轮与 $\delta^{13}\text{C}$ 的负相关性, $r = -0.59^{[20]}$ 。还有, $\delta^{13}\text{C}$ 值与马尾松生长地点冠层阴蔽度的关系为 $y(\delta^{13}\text{C}) = 24.67 + 0.0062 x$ (冠层阴蔽度), $r = -0.3047$ 。这意味着 $\delta^{13}\text{C}$ 值可在一定程度上反映马

尾松的生长状况和所处的光条件，较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映其所处的光强较低，生长较慢。

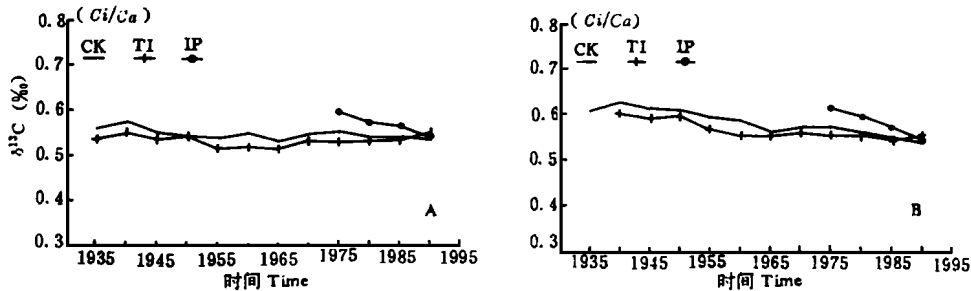


图5 人类活动对马尾松 C_i/C_a 的影响
A, 由 Meinzer 公式计算的 C_i/C_a ; B, 按 Farquhar 公式的计算值
Fig. 5 Effect of human activity on C_i/C_a of *Pinus masoniana*
CK, 对照点 Control site; TI, 旅游点 Tour site; IP, 工厂点 Factory site

旺盛生长期内，马尾松年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-24.2\text{‰} \sim -25.6\text{‰}$ 之间，平均为 $-24.96 \pm 0.52\text{‰}$ ，比一般的 C_3 木本植物高，表明马尾松为喜光性和水分利用效率较高的树种。

表1 马尾松旺盛生长期年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与基干面积增量及冠层郁蔽度的关系

Table 1 The correlation between tree ring $\delta^{13}\text{C}$, basal area increment and canopy shade density during fast growing period of *Pinus massoniana*

类型	地点	平均 $\delta^{13}\text{C}$	样品数	基干面积增量	阴蔽度
Type	Site	Average $\delta^{13}\text{C}$	N	BAI	CSD
		($-\text{‰}$)		($\text{cm}^2/5\text{a}$)	($\%$)
CK	白云路上 (BR)	25.59 ± 0.24	15	161	90
	白云寺护林站 (BSP)	24.88 ± 0.31	33	150	80
	飞水潭 (FP)	24.23 ± 0.26	26	167	80
TA	庆云寺护林站 (QSP)	25.33 ± 0.11	13	49	90
	公路边 (HW)	25.23 ± 0.26	13	179	60
	纯林 (PF)	24.52 ± 0.27	22	171	25

BAI, Basal area increment; CSD, Canopy shade density; TA, Tour activity.

2.3 不同人为干扰点大气CO₂浓度及其 δa 值的比较

1994年夏天对不同人类活动地点距地表5、10、15 m 的林间空气CO₂浓度进行日进程变化测定(另文报道)。取各点的日均CO₂浓度，分别参照3种前人获得的经验公式，计算空气的碳同素位比 δa ：(1) $\delta a = -23.4 + 5349.3/Ca$, Francey^[7]；(2) $\delta a = -22.87 + 5073/Ca$. Broadmeadow^[14]；(3) $\delta a = 6703(1/[CO_2]) - 28.3\text{‰}$, Sternberg^[15]。

从不同作者的公式得到的表2中 δa 值有较大的差别，但可见旅游点和工厂点空气CO₂ 的 δa 比对照点平均低0.18‰和0.44‰ 即人为干扰使空气CO₂中的¹³C 组分比例减少。

表2 人类活动对森林空气 CO₂浓度和 δa 值的影响

Table 2 Effect of human activity on the concentration and δa of atmospheric CO₂ of forest

类型 Type	地点 Site	CO ₂ 浓度 CO ₂ Conc. (μL/L)	δa (‰)		
			(1)	(2)	(3)
CK	白云寺护林站(BSP)	366.8	9.04	8.82	10.0
TI	庆云寺护林站(QSP)	371.3	9.21	8.99	10.25
	公路边(HW)	370.1	9.17	8.95	10.19
IP	龟顶山(GDS)	377.2	9.42	9.22	10.53

* (1), (2), (3) 代表从3种公式计算的 δa. (1), (2) and (3) were calculated form three formulas, respectively.

根据本文得到的马尾松 C_i/C_a ($0.5 > 1$) 和 C_i 值 ($200 \mu\text{L/L}$), 进而推算过去亚热带地区 CO₂ 浓度的变化速率。表3可见, 对照点在1955~1992年或1980~1992年的 CO₂ 年均增高速率相似, 约为 $0.68 \sim 0.69 \mu\text{L/L}$ 。旅游点在1955~1992年的年均 CO₂ 增高速率与对照接近, 但其中1980~1992年的年均速率增至约 $1 \mu\text{L/L}$ 。受工业废气污染地区的 CO₂ 浓度却以每年 $2.3 \mu\text{L/L}$ 的速率递增。

表3 不同人类活动对亚热带森林大气 CO₂增加速率的影响

Table 3 Effects of different types of human activity on the rate of atmospheric CO₂ increment in subtropical forest

人类活动形式 Type of human act.	1955 ~ 1992		1980 ~ 1992	
	增加值	年增加速率	增加值	年增加速率
	Increment (μL/L)	Rate (μL/L a)	Increment (μL/L)	Rate (μL/L a)
CK	23.3 ~ 27.6	0.69	7.5 ~ 8.8	0.68
TA	21 ~ 28.0	0.66	10 ~ 13.4	0.98
IP	—	—	21 ~ 34.3	2.30

3 讨论

在混交林中, 马尾松植株达到旺盛生长及其持续期长短因所处冠层阴蔽度而不同。旺盛生长期之前, 年轮的 δ¹³C 负值随年分增加而减少, 与其他树种在树龄较小时年轮的 δ¹³C 值较负的结果一致^[7, 21]。马尾松年轮样品采自树干1.2 m 高处, 幼龄树年轮的低 δ¹³C 可能由于: (1) 幼龄生理效应^[7], (2) 处于较低光下, (3) 受地表高浓度 CO₂ (由林下凋落物及土壤呼吸产生) 影响之故。Sternberg 等指出 δ¹³C 的差异值中, 34% 来自呼吸产生具较高负值 δa 的 CO₂, 66% 受光的影响^[22]。Dupouey 等分析山毛榉年轮 δ¹³C 值时只采用成熟期植株的年轮^[20]。本文的结果表明, 马尾松达旺盛生长期之后, δ¹³C 值方能较正确反映环境信息的历史纪录。

从1956年到1992年, 或1980年到1992年, 鼎湖山的旅游活动导致年轮 δ¹³C 值的年均下降速率比1950~1990年山毛榉年轮 δ¹³C 下降速率 -0.0184‰ ^[20] 高, 也比生长于威斯康星州的栎树在1890~1970年 δ¹³C 年下降 -0.016‰ (晚材) 和 -0.023‰ (早材) 高^[23]。旅游点与此相关的亚热带森林大气 CO₂ 浓度在1980年后也以每年约 $1 \mu\text{L/L}$ 的速率增高, 比相对干净的自然保护区核心区的速率高 $0.3 \mu\text{L/L}$ 。国际网络的 CO₂ 监测点几乎皆设在海洋地区, 不同作者报告的大气 CO₂ 增高速率为每年 $1 \mu\text{L/L}$ ^[24]、 $1.38 \mu\text{L/L}$ ^[1] 和 $1.5 \mu\text{L/L}$ ^[3]。前文曾从阔叶树黄果厚壳桂和荷木的年轮 δ¹³C 值推算1964~1985年空气 CO₂ 浓度平均每年

递增 $1.2\ \mu\text{L}^{[21]}$ 。本文通过对较多马尾松植株和不同人类活动形式影响的比较,表明在自然保护区中 CO_2 的浓度年均增高速率较低($0.7\ \mu\text{L}/\text{L}$ 左右),附近的旅游点旅游活动明显提高 CO_2 年递增速率,并降低了空气 CO_2 的 δa 值 -0.15‰ 到 -0.22‰ 。近年来,化石燃料燃烧释出 CO_2 的速率为每年 $5.3 \times 10^{15}\ \text{gC}$, Tans 等报告,若北大西洋的 CO_2 源每年释出 $10^{12}\ \text{gC}$,则几个地区的大气 CO_2 约增高 $0.6\ \mu\text{L}/\text{L}^{[1]}$ 。按此比例推算,鼎湖山因旅游活动等每年释出的 CO_2 比对照区高 $5.3 \times 10^{11}\ \text{gC}$ 。

工业活动产生的废气成分较复杂, SO_2 等空气污染物对植物的气孔开闭和光合作用生理生化过程的效应大小取决于植物种类、污染物成分、浓度和作用时间。Martin 等 $^{[25]}$ 及 Freyer $^{[26]}$ 皆观察到 SO_2 等污染使木材的 $\delta^{13}\text{C}$ 负值减少约 1‰ ,这意味着这些植物部分关闭了气孔,其平均 C_i 下降。本文深圳和龟顶山等工厂区的马尾松1975~1990年年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 增高(负值减少),但人工林的冠层阴蔽度低,林下植物种类和凋落物数量少,推测马尾松在生长前期不受低光和林下高 CO_2 的影响,因此其 $\delta^{13}\text{C}$ 值随时间而增高的现象显然并非由于年龄效应或生长过程中林内微环境的改变。受2个污染源影响的龟顶山松树的 $\delta^{13}\text{C}$ 从1975~1992年增高 1.4‰ ,深圳电厂附近的马尾松 $\delta^{13}\text{C}$ 值在同期增值 0.7‰ 。这说明工厂点 $\delta^{13}\text{C}$ 的年际变化图式可能主要受到 SO_2 等的影响。 SO_2 可能抑制气孔开启,限制 CO_2 进入叶片,从而减弱了光合羧化反应对 CO_2 中 ^{13}C 的排斥或歧视作用(discrimination),导致年轮中经光合产生转化形成的纤维素、木质素等含有较高的 ^{13}C 组分。至于经历更长时间的污染气体作用后,年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是否一直呈上升趋势,仍有待进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraint on the global atmospheric CO_2 budget. *Science*, 1990, **247**: 1431 ~ 1438
- 2 Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol Mol Biol*, 1989, **40**: 503 ~ 537
- 3 Keeling C D, Mook W G, Tans P P. Recent trends in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric carbon dioxide. *Nature*, 1979, **277**: 121 ~ 122
- 4 Griffiths H. Application of stable isotope technology in physiological ecology. *Func Ecol*, 1991, **5**: 254 ~ 269
- 5 Friedli H, Lotscher H, Oeschger H *et al.* Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature*, 1986, **324**: 237 ~ 238
- 6 Hunt R, Hand D W, Hannah M A, *et al.* Response to CO_2 enrichment in 27 herbaceous species. *Func Ecol*. 1991, **5**: 410 ~ 421
- 7 Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 1982, **297**: 28 ~ 31
- 8 Stuiver M, Brajnuas T F. Tree cellulose $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios and climatic change. *Nature* 1987, **328**: 58 ~ 60
- 9 Stuiver M, Brajnuas T F. Tree-ring carbon isotope ratios re-examined. *Nature*, 1988, **333**: 712
- 10 Tans P P, Mook W G. Past atmospheric CO_2 levels and the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in tree rings. *Tellus*, 1980, **32**: 268 ~ 283
- 11 林植芳, 彭长连, 林桂珠等. 菠萝叶片稳定碳同位素比和 PEP 羧化酶及 PEP 羧激酶活性. *植物学报*, 1994, **36**(7): 534 ~ 538
- 12 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. *Aust J Plant Physiol*, 1982, **9**: 121 ~ 137
- 13 Meinzer F C, Rundel P W, Goldstein G, *et al.* Carbon isotope composition in relation to leaf gas exchange and envi-

- ronmental conditions in Hawaiian *Metrosideros* polymorpha popvlations. *Oecologia*, 1992, **91**: 305 ~ 311
- 14 Broadmeadow M S J, Griffiths H, Maxwell C, *et al.* The carbon isotope ratio of plant organic material reflects temporal and spatial variation in CO₂ within tropical forest formations in Trinidad. *Oecologia*, 1992, **89**: 435 ~ 441
- 15 Sternberg L S L. A model to estimate carbon dioxide recycling in forest using ¹³C/¹²C ratios and concentration of ambient carbon dioxide. *Agri Forest Meteorol*, 1989, **48**: 163 ~ 173
- 16 Ehleringer J R, Schulze E D, Ziegler H, *et al.* Xylem-tapping mistletoes: water or nutrient parasites? *Science*, 1985, **227**: 1479 ~ 1481
- 17 Penuelas J, Azcon-Bieto J. Changes in leaf $\Delta^{13}\text{C}$ of herbarium plant species during the last 3 centuries of CO₂ increase. *Plant Cell Environ*, 1992, **15**: 485 ~ 489
- 18 Korner Ch, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends. *Oecologia*, 1991, **88**: 30 ~ 40
- 19 孙谷畴, 林植芳. 亚热带季风常绿阔叶林树木年轮的¹³C/¹²C 和空气 CO₂浓度变化. 应用生态学报, 1992, **3**(4): 63 ~ 67
- 20 Dupouey J L, Leavitt S, Choiselet E *et al.* Modelling carbon isotope fractionation in tree rings based on effective evapotranspiration and soil water status. *Plant Cell Environ*, 1993, **16**: 939 ~ 947
- 21 Freyer H D, Belacy N. ¹³C/¹²C records in northern hemispheric trees during the past 500 years-anthropogenic impact and climatic superpositions. *J. Geophys Res*, 1983, **88**: 6844 ~ 6852
- 22 Sternberg L S L, Mulkey S S, Wright S J. Ecological interpretation of leaf carbon isotope ratios: Influence of respired carbon dioxide. *Ecology*, 1989, **70**(5) : 1317 ~ 1324
- 23 Bender M M, Berge A J. Carbon isotope records in Wisconsin trees. *Tellus*, 1982, **34**: 500 ~ 504
- 24 Pearman G I. Preliminary studies with a new global carbon cycle model. In: Pearman G I (ed), *Carbon Dioxide and Climate: Australian Research. Australian Academy of Science*. Canberra, 79 ~ 89
- 25 Martin B, Bytneravicz A, Thorstenson Y R. Effects of air pollutants on the composition of stable carbon isotopes, $\delta^{13}\text{C}$, of leaves and wood, and on leaf injury. *Plant Physiol*, 1988, **88**: 218 ~ 223
- 26 Freyer H D. On the record in tree rings, Past, Registration of micro-environmental CO₂ and anomalous pollution effect, *Tellus*. 1979, **31**: 308 ~ 312