

文章编号: 1000-0550(2006)06-0883-06

# 滇西新近纪植物气孔、碳同位素组成与古环境分析<sup>①</sup>

解三平<sup>1</sup> 孙柏年<sup>1</sup> 阎德飞<sup>1</sup> 丛培允<sup>1,2</sup> 肖良<sup>1</sup> 韦利杰<sup>1</sup>

(1 兰州大学西部环境教育部重点实验室 兰州 730000; 2 中国科学院南京地质古生物研究所 南京 210008)

**摘要** 对滇西腾冲新近纪两种被子植物叶片及其现存对应种的气孔参数和碳同位素组成的综合分析表明: 当时的大气 CO<sub>2</sub> 浓度略高于现在水平; 化石种的碳同位素分馏值高于现存对应种, 但水分利用效率低于现存对应种; 这证明当时的气候条件比当前更为温暖湿润。受新生代全球气候变冷和喜马拉雅运动的影响, 该盆地一方面受印度洋季风的影响增强, 干湿季节交替明显; 另一方面受地形地貌影响, 沿袭了温暖湿润的气候条件。

**关键词** 上新世 气孔 碳同位素组成 古大气 CO<sub>2</sub> 古环境

**第一作者简介** 解三平 男 1977 年出生 在读博士研究生 古生物学与地层学

**通讯作者** 孙柏年 E-mail: bnsun@lzu.edu.cn

**中图分类号** Q914 **文献标识码** A

## 1 前言

陆生植物叶片角质层是植物体与外界大气圈进行气体交换的一道天然阀门, 处于其上的气孔与植物光合作用、蒸腾作用和呼吸作用等诸多生理过程密切相关。植物叶片角质层由于其很强的耐酸、耐碱性而容易被保存于植物压型化石中, 载有气孔的化石植物角质层可以提供关于古大气 CO<sub>2</sub> 浓度的数据<sup>[1]</sup>, 而碳同位素组成则提供了包括源 CO<sub>2</sub> 碳同位素组成在内的诸多古环境信息<sup>[2]</sup>。Woodward<sup>[3]</sup> 通过研究 200 年来的蜡叶标本, 发现了植物叶片气孔密度与大气 CO<sub>2</sub> 浓度的负相关关系。许多学者<sup>[4~7]</sup> 通过“温室实验”和研究化石标本发现在大部分 C<sub>3</sub> 植物中都存在这种关系, 并将它应用到古大气 CO<sub>2</sub> 重建中。McElwain 和 Chabner<sup>[8]</sup> 将这种方法推广到新近纪以前, 提出了气孔比率的方法。近年来, 植物叶片角质层的气孔参数和碳同位素组成的结合<sup>[2, 9]</sup> 有望使大量的化石植物压型标本成为古环境变化的数据库<sup>[10]</sup>。

新近纪是一个地球环境和生物界发展变化的重大变革时期, 地理地貌、环境气候、生物演化都发生了一系列的重大变化。同时新近纪也是一个从温室气候向冰室气候转变的阶段, 火山活动和新构造运动活跃, 这一时期对于理解当前由大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高引起的全球变暖, 气候变化的机制, 具有重要的作用。本文研究区——腾冲处于青藏高原东南缘, 该区新近纪

植物化石必然记录了青藏高原隆起的环境信息, 从化石植物中提取这些信息, 有助于更好的理解新生代全球构造格局的形成演化和气候系统的形成过程。陶君容和杜乃秋<sup>[11]</sup> 最早对该区的植物群特征进行了研究, 孙柏年等<sup>[12, 13]</sup> 对几种被子植物的表皮构造做了分析, 但化石植物碳同位素的古环境信息尚未做过探讨, 本文在前人研究的基础上, 结合化石叶片气孔参数, 重点剖析了化石植物碳同位素特征的古环境意义。

## 2 区域地质概况

植物化石来自云南腾冲县上新统芒棒组。芒棒组分为三段: 除中段为玄武岩外, 上、下段均为碎屑岩。中段玄武岩为腾冲地区上新世晚期火山活动的产物, 距今约 3.3~3.8 Ma<sup>[14]</sup>。本文的研究材料来自芒棒组第一段 (N<sub>2m</sub><sup>1</sup>), 地层剖面<sup>[15]</sup> 位于云南省腾冲县芒棒乡城子山, 现概述如下:

16~17 上部灰白色粘土质粉砂岩, 夹薄煤; 下部灰白色砂岩、花岗质砂砾岩。厚 9 m

14~15 上部灰色粘土岩、粘土质粉砂岩, 夹黑色炭质粘土岩; 下部灰色花岗质砂砾岩, 夹黑色粘土岩。厚 10 m

12~13 上部灰色粉砂岩; 下部灰色花岗质砂砾岩。厚 7 m

11 灰白色粘土质粉砂岩, 底部为细砂岩。夹薄层硅藻土。厚 33 m

10 深灰色熔结凝灰岩、熔结角砾凝灰岩, 夹少量薄层状

① 国家自然科学基金 (批准号: 40372012 40502005)、教育部科学技术研究重点项目 (104177) 和甘肃省自然科学基金 (ZS03FA25 002 Z) 资助。  
收稿日期: 2005-12-29 收修改稿日期: 2006-04-07

凝灰质砂岩及砂质粘土岩。厚 14.5m  
 8~9 上部灰黑色炭质砂岩、炭质粘土岩；下部浅灰色花岗质砾岩，夹少量细砂岩及粘土岩薄层。厚 34.1m  
 6~7 上部黄、浅黄色泥质细砂岩，具水平层理，夹花岗质砂砾岩及薄层状粉砂岩；下部浅灰、灰白色花岗质砂岩、砂砾岩。厚 20.1m  
 4~5 上部花岗质砂砾岩，粗细相杂或不等厚互层，其间偶夹灰、灰黑粘土岩；下部灰、灰黄色细砂岩，夹花岗质砂砾岩透镜体及粘土质粉砂岩。厚 56.6m  
 3 浅灰、灰白色粉砂质粘土岩，上部砂质增多，夹薄层铁质细砂岩；下部夹砂岩透镜体。厚 61m  
 2 浅灰、灰白色砂砾岩，夹薄层状粉砂质粘土岩及砾岩透镜体。厚 12.2m  
 1 灰白色花岗质砂砾岩。砾石成份主要为花岗岩、酸性脉岩，砾石大小不等，数厘米—数十厘米，分选差，半滚圆，棱角状。厚 28.3m

下伏地层：斑状黑云母花岗岩。

化石植物主要产于 3~5 层，与其共生的植物化石有：*Palaearya guangxiensis* Li et Chen Y. F., *Palaearya* sp., *Acer subpictum* Saporta *Acer mifanchetii* Hu et Chaney, *Acer* sp., *Alsodaphne hainanensis* Merr., *Ostyopsis cf. nobilis* I. B. Balfour & W. W. Smith *Calocarpus macrolepis* Kurz *Betula laminiifera* H. Winkl 等。据最新 2004 国际地层表，从化石组合和芒棒组中段玄武岩的年龄来看，植物化石所产层位为上新统下部。

### 3 实验方法

化石植物采用“舒氏溶液”进行浸解。先用解剖针将黑褐色的角质膜轻轻剥下，用蒸馏水洗净后浸入舒氏溶液中，待 30~40 分钟颜色变为淡黄色，接近透明，用蒸馏水清洗至中性后放入浓度为 5% 稀氨水中浸泡，再用蒸馏水清洗至中性后即得处理好的样品。现生植物先用 10% 的稀盐酸浸泡数天，再用刀片在叶片中部割开，然后用镊子直接将角质膜撕下，取叶片中部用毛刷刷净，最后将处理好的表皮封于甘油胶中并用加拿大树胶封片。在高级生物显微镜下观察，气孔参数的测量借助计算机进行，每个统计数据多于五个角质层样品。

用上述方法处理后的化石角质层、现生植物叶片和与植物化石共生的泥岩（用稀盐酸除去无机碳）在烘箱中以 50℃ 恒温烘干 12 小时，送兰州大学西部环境教育部重点实验室 MAT-252 质谱仪测定其  $\delta^{13}C$  值，测量采用 PDB 标准， $\delta^{13}C = (R_{\text{样品}} / R_{\text{标准}} - 1) \times$

1000 R 表示  $^{13}C / ^{12}C$ ，误差小于 0.1%；碳同位素分馏  $\Delta^{13}C = (\delta^{13}C_{\text{空气}} - \delta^{13}C_{\text{植物}}) / (1 - \delta^{13}C_{\text{植物}} / 1000)$ 。

## 4 分析结果

### 4.1 气孔指数

气孔密度已经被证明受大气  $CO_2$ 、湿度、温度等多种环境因子的影响，而不能精确地恢复古大气  $CO_2$  浓度；气孔指数则可以消除由于表皮细胞扩展所带来的影响，成为只受大气  $CO_2$  影响的一元函数<sup>[16]</sup>。对于在地质历史中延续时间较长的子遗物种来说，譬如银杏、水杉等活化石。首先可以利用蜡叶标本和温室实验所得到的数据，得到气孔指数与古大气  $CO_2$  浓度的回归关系；从而再将这种关系运用到同物种的化石记录中去，就可以恢复化石生活时期的古大气  $CO_2$  浓度。对于新近纪以前已经灭绝的化石植物，McElwain 和 Chaloner<sup>[8]</sup> 则将这种方法进一步推广到了中生代和古生代，提出了气孔比率的半定量化方法和“现存最近对应种”（NIEs）的概念。现存最近对应种是指与化石植物在生态环境和功能结构上相似的现生种，气孔比率指现存最近对应种与化石种的气孔指数的比值，气孔比率可以按照一定的方法转换为 Berner 碳平衡模型（GEOCARB）中的  $R_{CO_2}$ <sup>[17]</sup>， $R_{CO_2}$  是指地质历史时期大气  $CO_2$  浓度与工业革命前大气  $CO_2$  浓度（一般取 300ppmv）的比值。本文就是采用这种方法恢复云南腾冲上新世的古大气  $CO_2$  浓度。

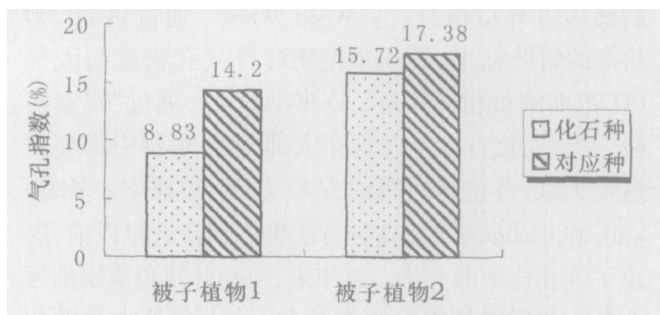


图 1 两种被子植物化石及其对应种气孔指数

被子植物 1: *Carpinus subcordata* Nathorst 其现存最近对应种为 *Carpinus cordata* 被子植物 2: *Ulmus hanutoriensis* Oishi et Huzioka 其现存最近对应种为 *Ulmus pumila* L.

Fig 1 Stomatal indices of two fossil angiosperms and their NIEs

*Carpinus subcordata* 现存最近对应种为 *Carpinus cordata* 因两者具有叶片形态和表皮构造的相似性<sup>[13]</sup>；同样，*Ulmus pumila* 和 *Ulmus hanutoriensis* 具有宏观和微观两方面的相似性<sup>[12]</sup>，所以将 *Ulmus pumila* 厘定为 *Ulmus hanutoriensis* 的现存最近对应种。从两

种化石植物的气孔指数(图 1)来看,两种现存对应种的气孔指数较为接近,而两种化石植物的气孔指数相差较大,这可能是由于化石被子植物的叶片角质层取得较为困难,获得的下表皮较小所致。同时可以看到化石种的气孔指数均小于现生种,根据大气 CO<sub>2</sub>浓度与气孔指数的负相关性,这说明云南腾冲上新世的大气 CO<sub>2</sub>高于现在水平,按照 McElwain<sup>[17]</sup>的方法( $SR = SI_{LE} / SI_{fossil}$ )计算气孔比率,并依据最新标准(1个SR相当于 1.2个单位的 R<sub>CO<sub>2</sub></sub>)换算为大气 CO<sub>2</sub>值,投到 Berner的碳平衡模型图<sup>[18]</sup>(图 2)上。

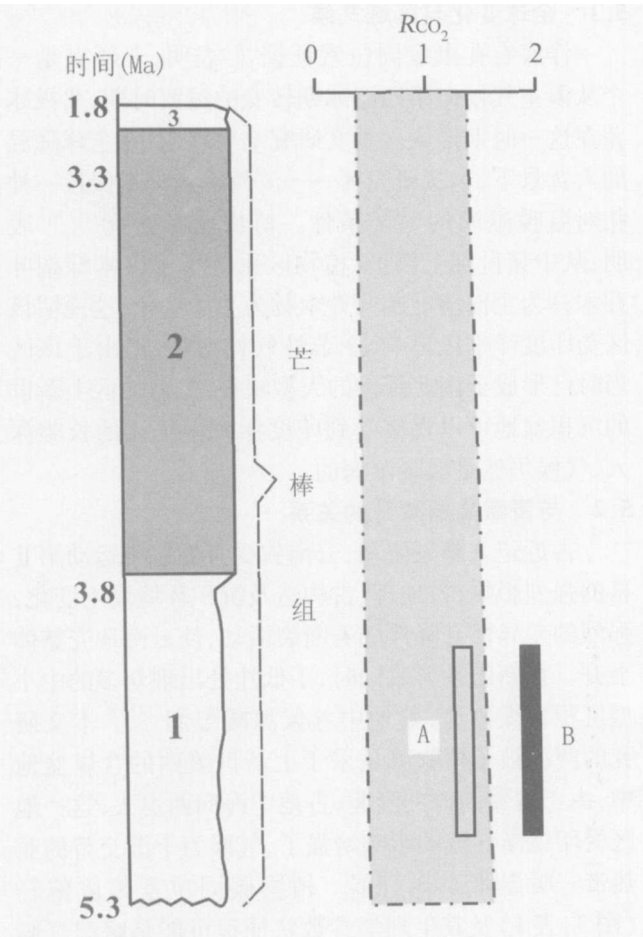


图 2 GEOCARB III<sup>[18]</sup>中古大气 CO<sub>2</sub>误差范围与本文重建的上新世大气 CO<sub>2</sub>浓度

时间标度参照最新 2004 国际地层表, R<sub>CO<sub>2</sub></sub>为碳平衡模型中古大气 CO<sub>2</sub>与工业革命前大气 CO<sub>2</sub>的浓度比值,图中浅阴影为其误差范围; 1、2、3 分别指芒棒组第 1、2、3 段, A、B 分别为两种被子植物重建的 R<sub>CO<sub>2</sub></sub>。

Fig 2 The error range of paleoatmospheric CO<sub>2</sub> in GEOCARB III and Pliocene atmospheric CO<sub>2</sub> based on two angiosperms

从图 2 可以看出,据被子植物 2(图 2 A)所得的

古大气 CO<sub>2</sub>水平与 Berner GEOCARB III 中的估计值基本一致, 大约为 400ppm v, 而据被子植物 1(图 2 B)所得的古大气 CO<sub>2</sub>浓度(580ppm v)要高出碳平衡模型的估值。这说明利用气孔比率方法重建古大气 CO<sub>2</sub>时, 应该在现代条件下利用温室实验、蜡叶标本等手段严格挑选那些对 CO<sub>2</sub>变化敏感的物种, 同时也说明这种方法迫切需要至下而上的机理模型提高其重建古大气 CO<sub>2</sub>的精度<sup>[19]</sup>。

#### 4.2 碳同位素组成

C<sub>3</sub>植物叶片碳同位素组成与其生活的自然环境密切相关<sup>[20]</sup>, 最具有代表性的是由 Farquhar 等<sup>[21]</sup>所建立的碳同位素分馏模型。其关系如下:

$$\delta^{13}C_a - \delta^{13}C_p = a + b(b - a)(P_i / P_a) \quad (1)$$

方程(1)中,  $\delta^{13}C_a$ 为大气 CO<sub>2</sub>的碳同位素组成,  $\delta^{13}C_p$ 为 C<sub>3</sub>植物叶片的碳同位素组成, a 指大气 CO<sub>2</sub>通过气孔进入植物叶片中的扩散所造成的碳同位素分馏系数(约 4.4‰), b 是指在 RuBP 酶的作用下, 固碳的羧化反应所引起的碳同位素分馏系数(27‰); P<sub>i</sub>和 P<sub>a</sub>分别代表了叶内细胞间和外界大气 CO<sub>2</sub>分压。P<sub>i</sub>/P<sub>a</sub>与外界多种环境因素密切相关, 它反映了植物气孔开张程度(导通性)、光合作用强度及其它生理过程<sup>[22]</sup>。

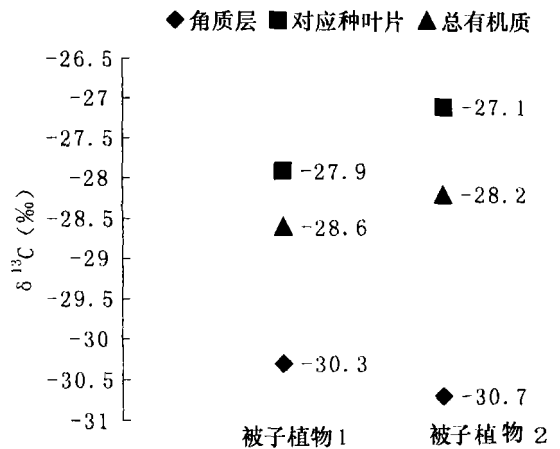


图 3 化石植物及其对应种碳同位素组成

Fig 3 Carbon isotopic composition of fossil plants and their NLEs'

现代 C<sub>3</sub>植物的  $\delta^{13}C$  分布范围为 -23‰ ~ -34‰, 平均 -27‰, 一般生存于较湿润的气候条件下, 代表了森林植被类型; C<sub>4</sub>植物的  $\delta^{13}C$  分布范围在 -6‰ ~ -23‰。从图 3 可以看出, 化石植物角质层、总有机碳、现存对应种叶片的  $\delta^{13}C$  均在这个范围之内, 而现生种的  $\delta^{13}C$  值更接近平均值。两种化石植

物的角质层和总有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值具有一致性, 总有机碳反映了当时各类型植物的总体情况, 总有机碳的  $\delta^{13}\text{C}$  值说明了该沉积盆地基本上是一种以  $\text{C}_3$  植物为主的森林植被类型; 其值的大小大概反映了当时  $\text{C}_3$  植物的平均情况, 它偏轻于现代  $\text{C}_3$  植物的平均值  $-27\text{‰}$ 。尽管植物角质层碳同位素组成与全叶之间存在一定的差异 ( $1.5\text{‰}$ )<sup>[23]</sup> 但换算出的化石植物全叶的  $\delta^{13}\text{C}$  值仍比其现存对应种的要偏轻的多。据 Sun *et al*<sup>[9]</sup>, 温暖湿润的气候会使植物叶片碳同位素成份偏轻, 这种总有机质和化石植物叶片碳同位素组成同时偏轻的现象可能反映了当时比较温暖湿润的气候条件。这与根据植物叶相和角质层构造分析的结果<sup>[12-13]</sup> 相一致。

### 4.3 水分利用效率

$\text{C}_3$  植物叶片碳同位素分馏模型<sup>[21]</sup> 的提出已使得碳同位素分析成为估算植物水分利用效率的理论基础<sup>[24]</sup>。其数学关系式为

$$WUE = \frac{A}{g_s} \times \left[ 1 - \frac{C_i}{C_a} \right] \quad (2)$$

$WUE$  为植物的水分利用效率 ( $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$ ),  $A$  为光合作用速率 ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $g_s$  为气孔导度,  $1.6$  表示水蒸气的气孔导度与  $\text{CO}_2$  的比值。利用上述关系, 结合相关数据对两种被子植物和现存对应种的碳同位素分馏和水分利用效率进行了计算 (表 1)。由于植物的不同器官之间碳同位素组成存在差异<sup>[23]</sup>, 将化石叶片角质层的碳同位素校正为全叶的碳同位素 (偏正  $1.5\text{‰}$ ),  $C_i/C_a$  由公式 (1) 求得, 再代入公式 (2) 求出其水分利用效率 ( $WUE$ )。表 1 的结果表明: 上新世化石种的碳同位素分馏要高于

表 1 化石种与其对应种的碳同位素分馏和水分利用效率对比

Table 1 Comparisons of carbon isotopic discrimination and water use efficiency between fossils and their NLEs

属种	$\delta^{13}\text{C}_p$ ‰	$C_a$ /ppmv	$\delta^{13}\text{C}_a$ ‰	$P_i$	$P_a$	$\Delta^{13}\text{C}$ ‰	$WUE$
化石种							
<i>Capinus subcordata</i>	-30.3	500	-6.0	0.81		23.5	58.1
<i>Ulmus hanbriensis</i>	-30.7	500	-6.0	0.83		23.9	52.5
现存种							
<i>Capinus cordata</i>	-27.9	370	-8.0	0.69		20.5	72.6
<i>Ulmus pumiki</i>	-27.1	370	-8.0	0.65		19.6	80.8

化石种角质层的碳同位素值据 Benner 等<sup>[23]</sup> 校正为全叶值 (偏正  $1.5\text{‰}$ ); 古大气  $\text{CO}_2$  浓度据上文气孔计算结果, 碳同位素值据 Veizer 等<sup>[25]</sup>; 现代大气碳同位素值和浓度据全球背景值 <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/>

现存种, 水分利用效率略低于其现存对应种。对现存银杏的研究<sup>[9]</sup> 表明, 生长于温暖、湿润气候下的叶片具有较高的碳同位素分馏 ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) 和较低的水分利用效率, 这说明在水分充足、气候温暖的生境中, 植物叶片具有更大的碳同位素分馏, 其水分利用比较浪费。化石叶片及其现存对应种若干生理学参数的对比说明: 化石植物可能生活在一种比现在更为温暖湿润的气候条件下。

## 5 讨论

### 5.1 全球变化与区域气候

洋底有孔虫氧同位素证据<sup>[26]</sup> 表明, 上新世是一个从温室气候向第四纪冰期转变的过渡时期, 北极冰盖在这一时期形成。本文研究结果表明: 在全球降温的大背景下, 本文研究区——滇西地区仍然保持一种相对温暖湿润的气候条件。植物区系研究<sup>[14-15]</sup> 表明: 中新世到上新世, 植物区系经历了以常绿阔叶乔木林为主向落叶阔叶乔木林为主的变化, 这说明该区受印度洋季风影响, 季节性气候增强, 但由于该区当时已形成了南北延伸的大型峡谷, 滇西地区上新世的沉积盆地可以直接受到印度洋暖湿气流的长驱深入, 气候仍然是温暖湿润的。

### 5.2 与青藏高原隆升的关系

古近纪末新近纪初, 云南省受喜马拉雅运动第 II 幕的强烈影响, 古地理、古构造及沉积环境发生变化, 强烈的差异性升降伴随着断裂活动, 使云南地壳整体上升。在新山系形成同时, 于低洼处出现众多的中小型沉积含煤盆地, 盆地中气候温暖湿润<sup>[27]</sup>。本文研究的两种被子植物就是采于上新世滇西的含煤盆地中, 由于青藏高原的隆起, 古地中海向西退去, 这一地区受印度洋气流的影响增强了, 气候为干湿交替的亚热带—暖温带季风气候。植物碳同位素组成偏轻 (图 3 表 1) 及其生理学参数特征很可能是暖湿气候条件的产物, 也可能与新生代以来强烈的新构造活动引起的排烃现象<sup>[29]</sup> 有关。但仍有待于在该地区进一步开展详细工作。

## 6 结语

滇西地处我国中低纬度, 青藏高原东南缘, 新近纪以来新构造运动和火山活动频繁。保存于小型沉积盆地中的植物化石是一定气候和环境下的产物。本文研究结果表明: 当时的大气  $\text{CO}_2$  浓度高于当前水平, 气候也比当前温暖湿润。但略高的  $\text{CO}_2$  水平可能

并非气候温暖湿润的原因, 地形地貌因素和海陆位置变化可能起了更大的作用。Pearson 和 Palmer 对古海洋的研究<sup>[28]</sup>显示, 新近纪以来, 大气 CO<sub>2</sub> 保持在一个相对稳定的水平, 驱动全球气候变化的因素并非是大气的“温室效应”, 除大气 CO<sub>2</sub> 之外的新构造运动起了主导作用<sup>[29]</sup>。所以目前许多基于大气 CO<sub>2</sub> 的气候模型有待于进一步的改进和完善, 重要的在于要更精确地恢复地质历史时期的环境记录和综合运用地球系统科学的思想和方法考虑问题。

致谢 碳同位素样品的测试, 兰州大学张成君教授给予了大力帮助, 在此表示感谢!

### 参考文献 (References)

- Chen L Q, Li C S, Chabner W G, *et al*. Assessing the potential for the stomatal characters of extant and fossil Ginkgo leaves to signal atmospheric CO<sub>2</sub> change. *American Journal of Botany* 1995 88: 1309 ~ 1315
- Beerling D J, Royer D L. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 2002 30: 527 ~ 556
- Woodward F I. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO<sub>2</sub> from pre-industrial levels. *Nature* 1987 327: 617 ~ 618
- Van der Burgh J V, Jasscher H, Dikcher D L, *et al*. Paleatmospheric signatures in Neogene fossil leaves. *Science* 1993 260: 1788 ~ 1790
- McElwain J G, Beerling D J, Woodward F I. Fossil plants and global warming at the Triassic-Jurassic boundary. *Science* 1999 285: 1386 ~ 1390
- Royer D L, Wing S G, Beerling D J, *et al*. Palaeobotanical evidence for near present day levels of atmospheric CO<sub>2</sub> during part of the Tertiary. *Science* 2001 292: 2310 ~ 2313
- Roth-Nebelsick A, Utescher T, Mosbrugger V, *et al*. Changes in atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and climate from the Late Eocene to Early Miocene: palaeobotanical reconstruction based on fossil floras from Saxony, Germany. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2004 205(1-2): 43 ~ 67
- McElwain J G, Chabner W G. Stomatal density and index of fossil plants track atmospheric carbon dioxide in the Paleozoic. *Annals of Botany* 1995 76: 389 ~ 395
- Sun B N, Dilcher D L, Beerling D J, *et al*. Variation in Ginkgo biloba L. leaf characters across a climatic gradient in China. *Proc. Natl Acad Sci USA* 2003 100(12): 7141 ~ 7146
- 孙柏年, 石亚军, 张成君, 等. 植物化石角质层分析及其应用. 北京: 科学出版社, 2005. 7 ~ 14 [Sun Bainian, Shi Yajun, Zhang Chengjun, *et al*. Cuticular Analysis of Fossil Plants and Its Application. Beijing: Science Press, 2005. 7 ~ 14]
- 陶君容, 杜乃秋. 云南腾冲新第三纪植物群及其时代. *植物学报*, 1982 24(3): 273 ~ 281 [Tao Junrong, Du Naiqiu. Neogene flora of Tengchong Basin in Western Yunnan, China. *Acta Botanica Sinica* 1982 24(3): 273 ~ 281]
- 孙柏年, 解三平, 阎德飞, 等. *Ulmus hantoniensis* Oishi et Huzioka 角质层特征及古环境意义. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2003 39(1): 80 ~ 85 [Sun Bainian, Xie Sanping, Yan Defei, *et al*. Cuticular structure of *Ulmus hantoniensis* Oishi et Huzioka and its palaeoenvironmental significance. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2003 39(1): 80 ~ 85]
- 孙柏年, 丛培允, 阎德飞, 等. 云南腾冲第三纪两种被子植物化石的角质层构造及其古环境意义. *古生物学报*, 2003 42(2): 216 ~ 222 [Sun Bainian, Cong Peiyun, Yan Defei, *et al*. Cuticular structure of two angiosperm fossils in Neogene from Tengchong Yunnan Province and its palaeoenvironmental significance. *Acta Palaeontologica Sinica* 2003 42(2): 216 ~ 222]
- 李大明, 李齐, 陈文寄. 腾冲火山区上新世以来的火山活动. *岩石学报*, 2000 016(03): 362 ~ 370 [Li Daming, Li Qi, Chen Wenji. Volcanic activities in the Tengchong volcano area since Pliocene. *Acta Petrologica Sinica* 2000 16(3): 362 ~ 370]
- 戈宏儒, 李代芸. 云南西部新生代含煤盆地及聚煤规律. 昆明: 云南科技出版社, 1999. 22 ~ 27 [Ge Hongru, Li Daiyun. Cenozoic coal bearing basins and coal forming regularity in West Yunnan. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1999. 22 ~ 27]
- Royer D L. Stomatal density and stomatal index as indicators of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Review of Palaeobotany and Palynology* 2001 114: 1 ~ 28
- McElwain J C. Do fossil plants signal palaeatmospheric CO<sub>2</sub> concentration in the geological past? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 1998 B353: 83 ~ 96
- Berner R A, Kohvala Z. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time. *American Journal of Science* 2001 301: 182 ~ 204
- Roth-Nebelsick A. Reconstructing atmospheric carbon dioxide with stomata: possibilities and limitations of a botanical P<sub>CO<sub>2</sub></sub> sensor. *Trees: Structure and Function* 2005 19(3): 251 ~ 265
- 李相博, 陈践发, 张平中, 等. 青藏高原 (东北部) 现代植物碳同位素组成特征及其气候信息. *沉积学报*, 1999 17(2): 325 ~ 329 [Li Xiangbo, Chen Jianfa, Zhang Pingzhong, *et al*. The characteristics of carbon isotope composition of modern plants over Qinghai-Tibet Plateau (NE) and its climatic information. *Acta Sedimentologica Sinica* 1999 17(2): 325 ~ 329]
- 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: 121 ~ 137
- 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
- Benner R, Fogel M L, Sprague E K, *et al*. Depletion of <sup>13</sup>C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies. *Nature* 1987 329: 708 ~ 710
- Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency in wheat genotypes. *Australian Journal of Plant Physiology* 1984 11: 539 ~ 552
- Veizer J, Ala D, Azmy K, *et al*. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>δ</sup>3C and <sup>δ</sup>18O evolution of

- Phanerozoic seawater Chemical Geology 1999, 164: 59~88
- 26 Zachos J, Pagani M, Sloan L, *et al*. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science 2001, 292: 686~693
- 27 云南省质矿产局. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1990 253~255 [Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 253~255]
- 28 Pearson P H, Palmer M R. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. Nature 2000, 406: 695~699
- 29 Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. Nature 1992, 359: 117~122

## Stomata Carbon Isotopic Composition of the Plants from the Neogene in West Yunnan and Palaeoenvironmental Analysis

XIE San ping<sup>1</sup> SUN Bai nian<sup>1</sup> YAN De fei<sup>1</sup>  
 Cong Pei yun<sup>1, 2</sup> XIAO Liang<sup>1</sup> WEI Li jie<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000  
 2 Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, the Chinese Academy of Science, Nanjing 210008)

**Abstract** The comparison of stomatal parameters in leaf cuticles between two fossil angiosperms from the Pliocene in West Yunnan and their nearest living equivalent species indicates a little higher atmospheric CO<sub>2</sub> level at that time than the present while carbon isotopic composition of fossil cuticles demonstrates much higher carbon isotopic discrimination and slight lower water use efficiency, showing a warmer and wetter climate than today. On the influence of global change of Cenozoic climate and uplift of Himalayas, the area began to present a distinct seasonal climate on the basis of previous warmth and humidity in Pliocene.

**Key words** Pliocene, stomata, carbon isotope, palaeoatmospheric CO<sub>2</sub>, palaeoenvironment