

# 中国北方黄土区 C-3 草本植物 碳同位素组成研究\*

王国安<sup>①②</sup> 韩家懋<sup>①</sup> 刘东生<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; <sup>②</sup>北京大学环境学院, 北京 100871)

**摘要** 对生长在我国北方黄土区的 367 个 C-3 草本植物样品进行了碳同位素分析, 结果表明我国北方黄土区 C-3 草本植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布区间为  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 平均值为  $-26.7\text{‰}$ ; 黄土高原中部半湿润区的 C-3 草本植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布集中, 在  $-24.4\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$  之间, 平均值为  $-27.5\text{‰}$ ; 而黄土高原西部边缘的半干旱-干旱气候区的 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围在  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 平均值为  $-26.2\text{‰}$ ; C-3 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值在黄土高原中部的半湿润气候区比黄土高原西部边缘半干旱-干旱气候区显著偏轻. 年降雨量是造成这种显著偏轻的主要原因, C-3 植物的碳同位素组成随着年降雨量的减少而变重, 在我国北方黄土区年降雨量每增加 100 mm, C-3 植被  $\delta^{13}\text{C}$  平均值将偏负约 0.49‰ 左右.

**关键词** C-3 植物 碳同位素 年降雨量

氧和碳等的稳定同位素在古环境研究中的应用日益广泛, 深海沉积物中有孔虫介壳和冰芯的  $\delta^{18}\text{O}$  曲线为了解第四纪以来的环境变化所作出的巨大贡献已是人所共知的事实. 近年来, 碳同位素, 包括土壤有机质、土壤碳酸盐、植物硅酸体和动物牙齿化石的珐琅质等的碳同位素研究结果也显示出很好的前景<sup>[1-4]</sup>. 陆相沉积物中的有机碳主要来自陆生植物, 土壤碳酸盐的碳同位素决定于地表 C-3 与 C-4 植物的相对生物量<sup>[5]</sup>, 食草动物牙齿珐琅质的碳同位素则与食物的碳同位素有关<sup>[6,7]</sup>. 在解释上述的各种结果时, 都涉及到陆生植物碳同位素组成的问题, 表明陆生植物碳同位素研究对正确解释陆相沉积物的碳同位素结果, 提取可靠的古环境和古生态信息有十分重要的意义. 从“将今论古”这一地质学的基本法则出发, 对现代植物碳同位素, 特别是现代植物碳同位素与气候参数关系的研究成为正确解释陆相沉积物的碳同位素结果, 及提取可靠的古环境与古生态信息的基础. 国外对植物  $\delta^{13}\text{C}$  的研究从 50 年代就已经开始<sup>[8,9]</sup>, 迄今有大量的数据发表<sup>[10-13]</sup>, 为解决区域的第四纪古环境问题提供了依据. 国内对沉积物中的碳同位素研究不少, 而现代植物碳同位素工作 90 年代后期才陆续开始<sup>[14-16]</sup>, 目前公开发表的数据还很少, 制约了我国古环境研究中获取的大量碳同位素数据的合理解释. 基于此, 在国家自然科学基金的资助下, 我们就北方黄土区黄土中碳同位素数据积累较多的基本事实, 系统地分析了我国北方黄土分布区的陆生植物, 主要是草本植物的碳同位素组成, 以其获得现代环境下植物碳同位素变化与各种环境, 尤其是气候参数的关系. 本文便是这项研究工作的阶段小结.

2002-10-18 收稿, 2003-02-19 收修改稿

\* 国家自然科学基金项目(批准号: 40072059, 40273006)和国家自然科学基金重大项目(批准号: 49894174)联合资助

## 1 植物样品的采集和分析方法

绝大多数植物样品, 主要是草本植物(含极少数灌木)采自我国北方黄土区, 也有少量的样品采自与黄土区相邻的地区. 本次研究的地区东起 109°24'E(陕西洛川), 西至 99°36'E(甘肃肃南县), 东西延伸 1000 km 左右, 南起 35°12'N(陕西长武), 北至 38°42'N(甘肃肃南县), 跨越 300 km 左右. 样品采集点的分布见图 1. 绝大多数地区我们都采集到了几十种植物样品, 但也有部分地区的样品数量很少. 数量少的原因是有些地区为荒漠戈壁沙漠环境, 自然环境中生长的植物种仅有 2~3 种, 如景泰、阿拉善左旗、中宁和银川古窑子等地区. 样品采集于植物的生长旺季, 绝大多数于 1999 年 6 月底~8 月初采集, 少量的样品于 1998 年 8~9 月和 2000 年 7 月采集.

采样点选择在平坦、开阔, 距离村落较远的非耕地上, 以保证生长的环境有充足的光照, 尽可能避免人类活动对其同位素组分的影响. 采集样品均为正在生长的植物, 每一样品由 2~4 株不同的植物个体混合而成.

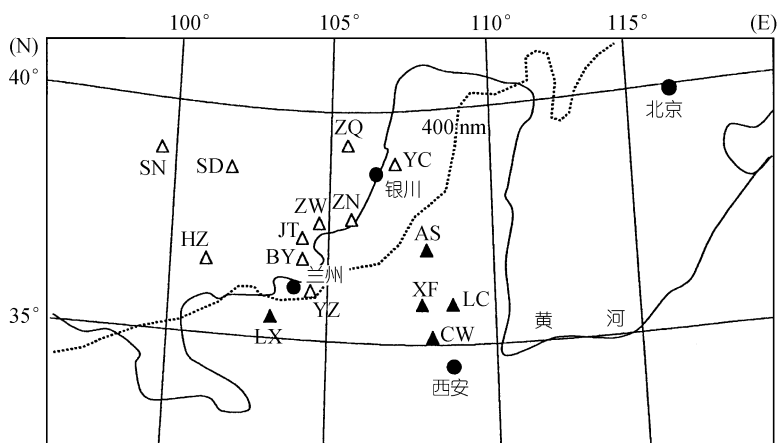


图 1 植物样品采集分布图

图中点线是 400 mm 年降雨量; ▲, △ 分别表示来自半湿润气候区和半干旱-干旱气候区的采样点. AS 示安塞; LC 示洛川; CW 示长武; XF 示西峰; LX 示临夏; YZ 示榆中; BY 示白银; HZ 示渌中; YC 示银川; ZW 示中卫; ZN 示中宁; JT 示景泰; SD 示山丹; SN 示肃南; ZQ 示阿拉善左旗

将采集的样品用清水超声洗净、凉干, 置于烘箱中, 在 85℃ 下使样品完全干燥. 每一干样根据叶片大小, 随机选取 5~20 个叶片磨碎, 每株植物所取的叶片量大体相等. 以 CuO 作为氧化剂, 采用密封安瓶燃烧法收集植物完全燃烧后产生的 CO<sub>2</sub>, 燃烧的温度为 500℃, 时间 24 h. 收集的 CO<sub>2</sub> 用 MAT-252 质谱计测量 δ<sup>13</sup>C 值.

样品的前处理和分析均在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室进行.

碳同位素组成的表达式为:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000.$$

式中  $R_{\text{样品}}$  和  $R_{\text{标准}}$  分别表示样品和标准的碳同位素比值. 碳同位素结果采用 PDB 标准表示, 重复测量的结果表明, 分析误差 ≤ 0.2‰.

## 2 结果与讨论

### 2.1 中国北方黄土区 C-3 植物碳同位素组成

在本次研究中我们共采集了 367 个 C-3 植物样品, 其中包括了 190 种不同的植物, 它们的

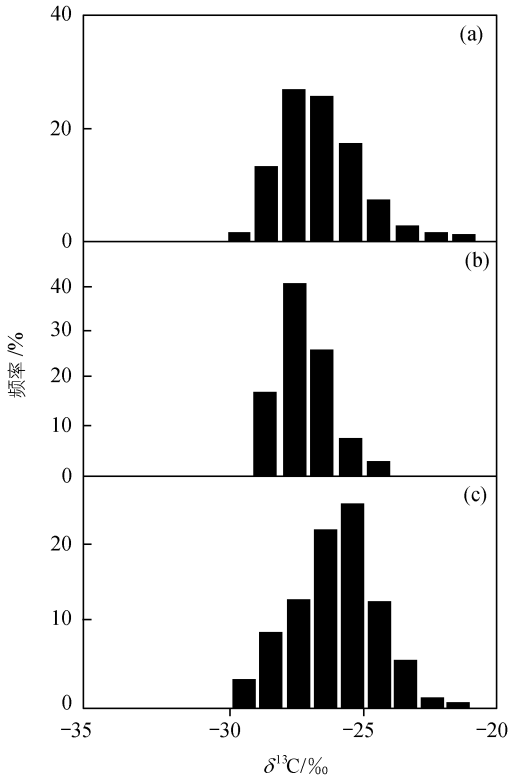


图 2 C-3 植物碳同位素组成分布直方图

(a) 来自我国北方黄土区所有 C-3 植物; (b) 来自我国北方黄土区的半湿润气候区的 C-3 植物; (c) 来自我国北方黄土区的半干旱-干旱气候区的 C-3 植物

该区域各地区的年均降雨量均 > 400 mm, 基本上都在 480 ~ 600 mm, 属于半湿润气候区. C-3 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围窄, 在  $-24.4\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$  之间, 平均值为  $-27.5\text{‰}$ . 其中 90% 的样品  $\delta^{13}\text{C}$  值分布在  $-26.0\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$  之间,  $\leq -26.0\text{‰}$  的样品仅占 10% 左右. 该区域植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布集中, 可能与各地区气候环境条件大致接近有关.

图 2(c) 中的植物样品主要采自黄土高原西部边缘区以及相邻的河西走廊等地区, 包括了采自甘肃的榆中、山丹、白银、景泰、肃南县, 青海的湟中, 宁夏的中卫、中宁、银川古窑子和内蒙阿拉善左旗等 10 个地区的 218 个样品(图 1). 该区域各地区的年均降雨量都 < 400 mm, 属半干旱-干旱气候区. C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围在  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 平均值为  $-26.2\text{‰}$ . 该区植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布范围要较上面黄土高原中部半湿润区(图 2(b)) 宽得多, 原因可能与该区域中的各采样地区气候环境条件彼此相差较大有关.

从图 2(b) 和 2(c) 可以明显看出各气候分区碳同位素组成有明显的差别, 无论是从  $\delta^{13}\text{C}$  组

$\delta^{13}\text{C}$  值分布如图 2(a) 所示. 从图 2(a) 可以看出, 我国北方黄土区 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  分布区间为  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 其中 93% 的数据分布在  $-24.0\text{‰} \sim -29.0\text{‰}$  范围内,  $< -29.0\text{‰}$  的植物不足 3%,  $> -24.0\text{‰}$  的植物也极少, 约占 5%. 又以  $-25\text{‰} \sim -29\text{‰}$  占据 85% 多, C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为  $-26.7\text{‰}$ . 该平均值较全球 C-3 植物的平均值<sup>[12]</sup> 以及我们最近对我国北方 461 个 C-3 植物样品进行同位素分析所获得的平均值 ( $-27.1\text{‰}$ ) 偏正. 主要的原因是本次研究中超过半数的样品来自干旱和半干旱地区, 而这些地区的植物同位素较湿润和半湿润地区明显偏正(图 2(b) 和 2(c)).

### 2.2 中国北方黄土区 C-3 植物碳同位素组成的空间变化

我国幅员辽阔, 气候类型复杂多样. 不同气候区中生长的植物它们的碳同位素组成变化究竟如何, 是应用植物碳同位素于环境研究的基础.

图 2(b) 中的植物样品主要采集于黄土高原中部的陕西中部和甘肃东部的黄土区, 具体的采集地区有陕西的洛川、长武和安塞等地, 甘肃的西峰和临夏等地(图 1), 共有 149 个样品.

成的平均值还是主要的分布区间而言, 黄土高原中部的半湿润气候区比黄土高原西部边缘的半干旱-干旱气候区显著偏轻。

在古生态和古气候研究中, 对过去植被中 C-3、C-4 植物生物量贡献的估算常常是借助于土壤有机质和土壤碳酸盐的  $\delta^{13}\text{C}^{17-20}$ 。不同气候区 C-3 植物碳同位素组成平均值的显著差别提醒我们在这种估算过程中, 我们应该根据沉积物所处的时代, 或者说所处的气候环境, 选择适当的值作为 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  的端元值。例如沉积物若是来自黄土高原间冰期的古土壤, 在估算时我们则可以考虑用  $-27.5\%$  (上面得到的 C-3 植物在黄土高原中部半湿润区的  $\delta^{13}\text{C}$  平均值) 作为 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  的端元值, 反之若是冰期的黄土, 可以考虑用  $-26.2\%$  作为 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  的端元值。

除了上述总体的变化特征以外, 我们将那些至少在 4 个以上地区都已经采集到的广适性的植物 (能在比较宽阔的气候环境中生长) 种属挑出, 进行了单独的分析研究, 以期获得同种植物碳同位素的区域变化。符合这特征的植物共有 9 种, 图 3 显示的是独行菜 (*Lepidium apetalum*)、藜 (*Chenopodium album*)、平车前 (*Plantago depressa*)、魁薊 (*Cirsium leo*)、阿尔泰狗哇花 (*Heteropappus altaicus*)、狗哇花 (*Heteropappus hispidus*)、车前 (*Plantago asiatica*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 这 9 种广适性 C-3 植物在各气候区  $\delta^{13}\text{C}$  平均值。从图 3 中也可以看出它们的碳同位素组成有明显的区域差异, 也表现为半湿润气候区较半干旱-干旱气候区显著偏轻。从而说明了无论是单个 C-3 植物的碳同位素组成还是 C-3 植物整体 (也即 C-3 植被) 都具有这种变化规律。

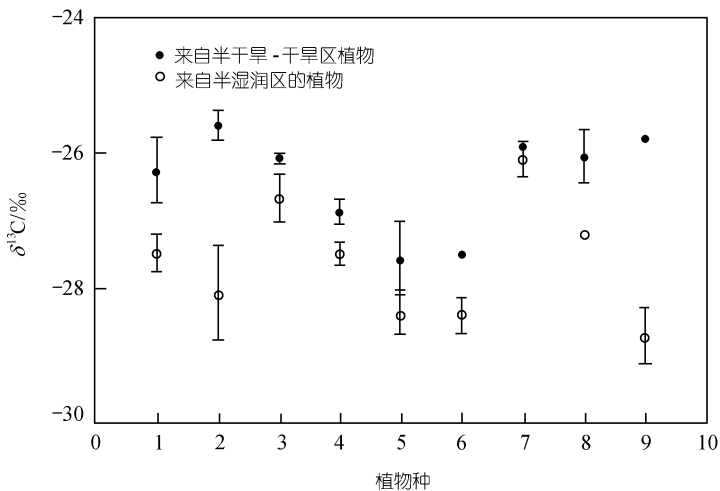


图 3 9 种广适性 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成平均值 ( $\pm 1\sigma$ )

图中横坐标的数字代表的意义如下: 1. 独行菜; 2. 藜; 3. 平车前; 4. 魁薊; 5. 阿尔泰狗哇花; 6. 狗哇花; 7. 车前; 8. 短花针茅; 9. 猪毛蒿

### 2.3 C-3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与水分状况的关系

植物碳同位素组成会受多种气候环境因子的影响<sup>[21,22]</sup>。由于我们在样品采集时尽可能地采集空旷平坦地区的植物, 避开了局部阴影的影响, 且采样地区的年光照均在 2300 小时以上, 因此本次研究中光照条件不会是植物光合作用的限制因子, 故光照对所研究的 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$

在不同气候分区的变化影响可以认为是很小的. 另外本次研究的样品均采自离城市和工业区较远的自然环境中, 我们认为这些地区大气中  $\text{CO}_2$  的浓度和它的  $\delta^{13}\text{C}$  组成彼此之间不会有太大的差异, 故它们也不可能是导致植物  $\delta^{13}\text{C}$  在不同气候分区系统变化的主要原因.

年均温度是影响植物碳同位素组成在不同气候分区系统变化的一个重要因子, 年均温度与植物碳同位素组成的关系已在另文<sup>[23]</sup>中进行了讨论, 在此不再赘述, 本文将重点讨论年降水量的影响.

图 4 是年降雨量与 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的关系图, 从图 4 中可以看出: C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  的平均值随年降雨量减少而变重的趋势十分明显, 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值与年降雨量指标之间存在非常显著的负相关, 显著水平为 99.9%. 表明降雨量的变化确实是引起我国北方黄土区 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值在不同气候分区发生规律性变化的一个重要原因. 因此, 从现代植被的变化看, 当我们用同位素组成当作替代性指标用于古环境研究时, 把  $\delta^{13}\text{C}$  值作为年降雨量的替代性指标是比较合理的. 图 4 的回归方程表明在我国北方黄土区年降雨量每增加 100 mm, C-3 植被  $\delta^{13}\text{C}$  平均值将偏负约 0.49‰ 左右. 当然这一结果(0.49‰/100 mm)还与我们分析的样品数量以及研究的地区有一定的关系, 但我们认为它至少大致可以代表我国北方植物同位素随年降雨量变化的情况, 因为我们曾经将年降雨量与来自我国北方所有 C-3 植物的碳同位素组成(样品数量为 461 个)进行过一元回归分析, 得到的结果为 0.47‰/100mm. 因此可以将这一结果(年降雨量每增加 100 mm, C-3 植被  $\delta^{13}\text{C}$  平均值将偏负约 0.49‰ 左右)初步应用于我国北方的古气候研究中.

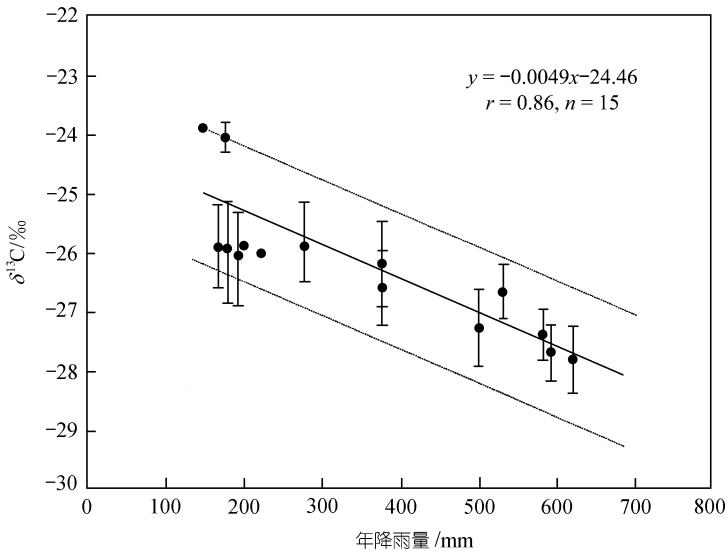


图 4 各地区 C-3 植物碳同位素组成的平均值随年降雨量的变化  
图中垂直线为各地 C-3 植物碳同位素组成的变化范围( $\pm 1 \sigma$ )

在上面的 9 种广适性 C-3 植物种中, 又以独行菜、藜、平车前和魁薊这 4 种植物我们采集到的地区最多, 我们以前<sup>[24]</sup>详细研究它们的  $\delta^{13}\text{C}$  值随年降水量的变化(见该文中图 2), 回归分析的结果表明单种植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值也有随年降雨量减少而变重的明显趋势, 但不同的植物有不同的变化率, 表明它们对降水的敏感性并不相同. 不同植物具有不同的变率提示我们在利用植物的碳同位素于古环境研究时, 选择对环境指标变化最灵敏的种属会取得更为有价值的结

果.

降水量在某种程度上反映了植物生长时的水分状况, 当降雨量不足, 使土壤含水量和/或空气湿度降低时, 植物为了减少水分的蒸发, 都会导致气孔的关闭, 气孔通导系数( $g$ )减小, 从而引起植物叶内  $\text{CO}_2$  浓度( $c_i$ )下降, 这种情况会使光合作用产物的  $\delta^{13}\text{C}$  值升高<sup>[25]</sup>. Winter 等<sup>[26]</sup>报道 C-3 植物小麦(*Triticum aestivum*)和草地早熟禾(*Poa pratense*)的  $\delta^{13}\text{C}$  值在湿度低的条件生长时明显较湿度高时偏正. Stuiver 和 Braziunas<sup>[27]</sup>曾用相对湿度作为控制因子与针叶林的  $\delta^{13}\text{C}$  作相关分析, 结果表明二者呈高度负相关. 我们在甘肃白银地区对几种 C-3 植物的同位素研究结果也表明, 它们的  $\delta^{13}\text{C}$  值在旱季要较雨季明显偏正<sup>[28]</sup>. 当然, 也有研究结果发现少量植物可能有与此相反的变化规律<sup>[29]</sup>, 这表明其他因素, 特别是温度等的影响可能会叠加在降水作用之上, 使得情况更进一步复杂化, 特别值得注意的是降水与温度的匹配关系. 对水分状况究竟如何影响植物的碳同位素的机制问题仍有待深入研究.

### 3 结语

Prentice 和 Raynaud<sup>[30]</sup>最近著文称: “据我们所知‘古生物地球化学(Paleobiogeo-chemistry), 这个名词以前并不存在, 但我们相信: 作为一个全新的研究领域, 它将在今后几十年内对我们了解地球系统以及人类活动正在怎样改变着这个系统起到核心的作用”, 他们的想法与我们十分相似. 植物的碳同位素研究确实是古生物地球化学研究中的一个重要环节. 通过对我国北方黄土区 C-3 草本植物的碳同位素研究可以得出以下的初步认识:

(1) 我国北方黄土区 C-3 草本植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布区间为  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 其中 93% 的数据分布在  $-24.0\text{‰} \sim -29.0\text{‰}$  范围内, 平均值为  $-26.7\text{‰}$ .

(2) 黄土高原中部半湿润区的 C-3 草本植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值集中, 在  $-24.4\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$  之间, 平均值为  $-27.5\text{‰}$ . 其中 90% 的样品  $\delta^{13}\text{C}$  值分布在  $-26.0\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$  之间. 而黄土高原西部的半干旱-干旱气候区的 C-3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围在  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 平均值为  $-26.2\text{‰}$ .

(3) C-3 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值在黄土高原中部的半湿润气候区比黄土高原西部边缘半干旱-干旱气候区显著偏轻. 年降雨量是造成这种现象的主要原因, C-3 植物的碳同位素组成随着年降雨量的减少而变重. 在我国北方黄土区年降雨量每增加 100 mm, C-3 植被  $\delta^{13}\text{C}$  平均值将偏负约 0.49‰ 左右.

**致谢** 样品的种属鉴定由西北植物研究所吴振海副研究员完成, 碳同位素分析由张福松和霍卫国高级工程师、陈建和曹洁工程师等完成, 文中所引气象数据来自国家气候资料中心, 特此感谢.

### 参 考 文 献

- 1 翦知潜, 成鑫荣, 赵泉鸿, 等. 南海北部近 6 Ma 以来的氧同位素地层与事件. 中国科学, D 辑, 2001, 31(10): 816 ~ 822
- 2 孟宪伟, 杜德文, 刘振夏, 等. 东海近 3.5 万年来古海洋环境变化的分子生物标志物记录. 中国科学, D 辑, 2001, 31(8): 691 ~ 696
- 3 汪永进, 吴江滢, 刘殿兵, 等. 石笋记录的东亚季风气候  $\text{H}_1$  事件突变性特征. 中国科学, D 辑, 2002, 32(3): 227 ~ 233
- 4 王永吉, 吕厚远, 王国安, 等. C-3, C-4 植物和现代土壤中硅酸体碳同位素分析. 科学通报, 45(9): 978 ~ 982
- 5 Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate. Earth Planet Sci Let,

- 1984, 71: 229~240
- 6 Cerling T E, Eleringer J R, Harris J M. Carbon diocide starvation, the development of C4 ecosystems, and mammalian evolution. *Proc R Soc London*, 1998, 353: 159~171
  - 7 Elheringer J R, Cerling T E. Photosynthetic pathways and climate. In: Schulze E-D, Heinmann M, Holland E, et al, ed. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. San Diego: Academic Press, 2001. 267~277
  - 8 Wickman F E. Variations in the relative abundance of the carbon isotopes in plants. *Geochim Cosmochim Acta*, 1952, 2: 243~254
  - 9 Craig H. Carbon-13 in plants and the relationship between carbon-13 and carbon-14 variations in nature. *J Geol*, 1954, 62: 115~149
  - 10 Stuiver M, Deevey E S. Yale natural radiocarbon measurements, VII. *Radiocarbon*, 1962, 4: 250~262
  - 11 Smith B N, Epstein S. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiol*, 1971, 47:380~384
  - 12 Deines P. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz P, Fontes J C, ed. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry I, The Terrestrial Environment*. Amsterdam: Elsevier, 1980. 329~406
  - 13 Körner C, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends. *Oecologia*, 1991, 88: 30~40
  - 14 殷立娟, 王 萍. 中国东北草原植物中的 C-3 和 C-4 光合作用途径. *生态学报*, 1997, 17(2): 113~123
  - 15 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: 325~329
  - 16 刘卫国, 宁有丰, 安芷生, 等. 黄土高原现代土壤和古土壤有机碳同位素对植被的响应. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(10): 830 ~ 836
  - 17 顾兆炎. 黄土-古土壤序列碳酸盐同位素组成与古气候变化. *科学通报*, 1991, 36(10): 767 ~ 770
  - 18 林本海, 安芷生, 刘荣谟. 最近 60 万年中国黄土高原季风变迁的稳定同位素证据. 见: 刘东生, 安芷生, 主编. *黄土·第四纪地质·全球变化(3)*. 北京: 科学出版社, 1991. 51 ~ 54
  - 19 Frakes L A, Sun J Z. A carbon isotope record of the upper Chinese loess sequence: estimates of plant types during stadials and interstadials. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1994, 108: 183 ~ 189
  - 20 Han J M, Keppens E, Liu T S, et al. Stable isotope composition of the carbonate concretion in loess and climate change. *Quaternary International*. 1996, 37: 37 ~ 43
  - 21 Smith B N, Oliver J, McMillan C. Influence of carbon source, oxygen concentration, light intensity and temperature on  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in plant tissues. *Botanical Gazette*, 1976, 137: 99~104
  - 22 Francey R J, Farquhar G D. An explanation of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  variations in tree rings. *Nature*, 1982, 297: 28~31.
  - 23 王国安, 韩家懋, 周力平. 中国北方 C-3 植物碳同位素组成与年均温度关系. *中国地质*, 2002, 29(1): 55~57.
  - 24 王国安, 韩家懋. 中国西北 C-3 植物的碳同位素组成与年降雨量关系初探. *地质科学*, 2001, 36(4): 494 ~ 499
  - 25 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 physiology*, 1982, 9: 121~137
  - 26 Winter K, Holtum J A M, Edwards G E, et al. Effect of low relative humidity on  $\delta^{13}\text{C}$  value in two C-3 grasses and in *Panicum milioides*, a C3-C4 intermediates species. *Journal of Experimental Botany*, 1982, 1982, 32: 88 ~ 91
  - 27 Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotope ratios and climatic change. *Nature*, 1987, 328: 58-60.
  - 28 王国安, 韩家懋. C-3 植物碳同位素在旱季和雨季中的变化. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 43 ~ 47
  - 29 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. *植物生态学报*, 2000, 24: 648~655
  - 30 Prentice I C, Raynaud D. Paleogeochimistry. In: Schulze E-D, Heinmann M, Holland E, et al, eds. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. San Diego: Academic Press, 2001. 87~94