

# 中国北方黄土区C<sub>4</sub>植物稳定碳同位素组成的研究\*

王国安<sup>①②③\*\*</sup> 韩家懋<sup>②</sup> 周力平<sup>③</sup> 熊小刚<sup>④</sup> 谭明<sup>②</sup> 吴振海<sup>⑤</sup> 彭隽<sup>⑥</sup>

(① 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; ② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ③ 北京大学环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; ④ 中国科学院植物研究所, 北京 100093; ⑤ 西北农林科技大学生命科学院, 杨凌 712100; ⑥ 中国农业大学网络中心, 北京 100029)

**摘要** 通过对中国北方黄土区 C<sub>4</sub> 植物稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )的系统分析, 发现 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布区间为  $-10.5\text{‰} \sim -14.6\text{‰}$ , 其平均值为  $-12.6\text{‰} \pm 0.82\text{‰}$ ; C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成有随年降雨量减少, 即从半湿润区到半干旱区, 再到干旱区微微变轻的趋势; C<sub>4</sub> 植物的稳定碳同位素组成雨季比旱季偏重. 以上变化趋势都与 C<sub>3</sub> 植物稳定碳同位素变化趋势相反.

**关键词** C<sub>4</sub> 植物 稳定碳同位素 中国北方黄土区

C<sub>4</sub> 植物在地球上的出现较 C<sub>3</sub> 要晚得多, 但 C<sub>4</sub> 植物相对 C<sub>3</sub> 植物具有更高的水分利用效率和氮素利用效率, 在较恶劣的环境中仍具有较高的竞争力<sup>[1,2]</sup>. 近年来有关 C<sub>4</sub> 植物的研究成为学术界研究的热点, 这当中包括 C<sub>4</sub> 植物出现和扩张的时间, C<sub>4</sub> 植物的分布等问题<sup>[3-5]</sup>, C<sub>4</sub> 植物同位素组成特征及其与环境的关系也是其中的重要内容.

中国北方黄土区的现代 C<sub>3</sub> 植物(主要是草本植物)的稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )组成研究表明: 中国北方黄土区现代 C<sub>3</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值分布在  $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$  之间, 平均值为  $-26.7\text{‰}$ , 其中在黄土高原中部半湿润气候区生长的 C<sub>3</sub> 植物其  $\delta^{13}\text{C}$  值比黄土高原西部半干旱-干旱气候区明显偏轻, 平均值分别是  $-27.5\text{‰}$  和  $-26.2\text{‰}$ , 相差达  $1.3\text{‰}$ <sup>[6]</sup>. 这一结果提醒我们在借助

于沉积物的  $\delta^{13}\text{C}$  值对过去植被中 C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> 植物生物量估算的过程中, 选择 C<sub>3</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  的端元值时, 要考虑冷暖和干湿环境变化的影响. 中国北方黄土区现代 C<sub>4</sub> 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值虽有报道<sup>[7]</sup>, 但系统的研究较少, 全球 C<sub>4</sub> 植物同位素的研究<sup>[8-10]</sup> 也没有 C<sub>3</sub> 植物那么系统, 因此对 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成以及与气候环境关系的认识尚不十分清楚. 本文的目的就是希望通过对生长在中国北方黄土区的现代 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成较系统的工作, 来初步探讨它们与气候环境的关系.

## 1 植物样品的采集和分析方法

### 1.1 植物样品的采集

绝大多数植物样品采自中国北方黄土区, 也有少量的样品采自黄土区的外围, 但均生长在黄土状

2004-07-01 收稿, 2005-02-28 收修改稿

\* 国家自然科学基金项目(批准号: 40273006, 40072059, 49925307)和国家自然科学基金西部项目(批准号: 90102001)资助

\*\* E-mail: [gawang@cau.edu.cn](mailto:gawang@cau.edu.cn)

物质为母质发育的土壤之上。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), 南北跨越 300 km 左右。样品采集点的分布及部分样品点附近的气象资料见图 1 和表 1。除甘肃白银地区有 5 个植物样品采于 1999 年的旱季(6 月下旬)<sup>[4]</sup>外, 其他所有植物样品均采于当年的雨季时(7 月下旬至 8 月中旬)(见附录, 白银地区 1999 年夏季的部分气象资料可参见文献<sup>[11]</sup>中的表 1)。

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。来自河边或沟渠边的样品, 在本次研究中均没有采用, 因此避免了局部水分环境差异的影响。样品均为正在生长的植物, 每一样品由 3~6 个不同的植株混合而成。

### 1.2 样品的碳同位素分析

将采集的样品在清水中超声洗净后凉干, 置于烘箱中, 在 85°C 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, 仔细磨碎, 每株植物所取的叶片量大体相等。研磨后的样品于真空状态下在密封安瓶中燃烧, 以 CuO 作为氧化剂法, 燃烧

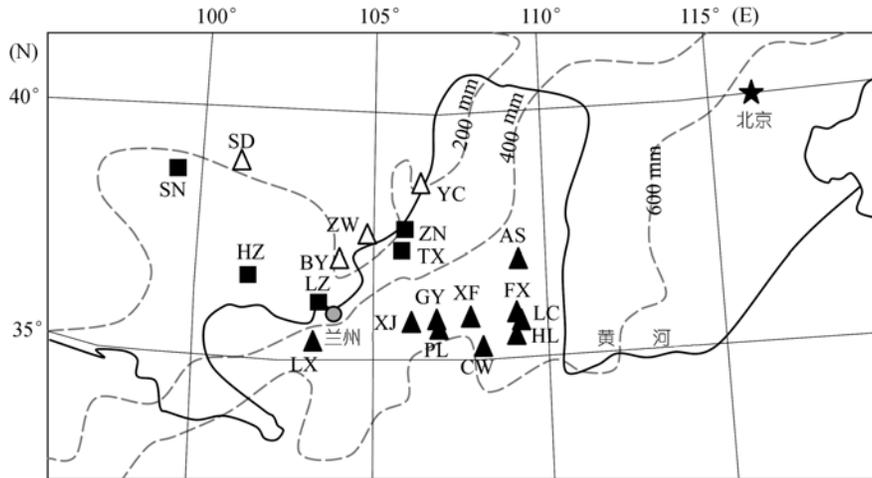


图 1 植物样品采集分布图

图中黑色三角形、黑色正方形和白色三角形分别代表在半湿润区、半干旱区和干旱区的植物采集点; 虚线是多年平均降水量的等值线。AS 安塞, LC 洛川, CW 长武, XF 西峰, HL 黄陵, FX 富县, GY 固原, XJ 西吉, LX 临夏, PL 平凉, LZ 兰州, HZ 湟中, SN 肃南, BY 白银, ZN 中宁, TX 同心, YC 银川, ZW 中卫, SD 山丹

表 1 各采样点位置及年均降雨量(mm)和年均气温(°C)

采样点	经度/E°	纬度/N°	年降雨量 <sup>a)</sup>	年温度	采样点	经度/E°	纬度/N°	年降雨量	年温度
半湿润区					半干旱区				
陕西长武	107.73	35.20	584	9.1	甘肃兰州	103.83	36.0	327	6.6
陕西洛川	109.40	35.70	621	9.2	甘肃肃南	99.63	38.81	234	3.6
陕西安塞	109.33	36.75	531	8.8	青海湟中	101.52	36.55	280	3.0
陕西富县	109.45	36.00	600	8.9	宁夏同心	105.80	37.00	277	8.4
陕西黄陵	109.25	35.60	631	9.4	宁夏中宁	105.70	37.50	223	9.2
甘肃西峰	107.67	35.70	594	8.9	干旱区				
甘肃平凉	106.67	35.55	511	8.6	宁夏银川	106.50	38.55	203	8.5
甘肃临夏	103.20	35.60	501	6.3	宁夏中卫	104.63	37.45	186	8.5
宁夏西吉	105.65	36.00	435	5.3	甘肃白银	104.10	36.35	194	8.0
宁夏固原	106.27	36.00	478	6.2	甘肃山丹	101.00	38.16	180	5.7

a) 所列的年降雨量系 30 年(1961~1990 年)降雨量的平均值; 所有气象数据均来自国家气候中心

的温度为 500°C, 时间 24 h, 收集完全燃烧后产生的 CO<sub>2</sub>, 用 MAT-252 质谱计测量 δ<sup>13</sup>C 值. 样品的前处理和质谱测量均在中国科学院地质地球物理研究所同位素实验室完成.

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‰.

### 1.3 数据分析方法

本文中不同气候区 C<sub>4</sub> 植物碳同位素组成差异显著性分析, 以及 C<sub>4</sub> 植物同位素组成在旱季和雨季变化的显著性分析所采用的方法均为方差分析, 使用的统计分析软件是 SPSS for Windows 11.5.

## 2 结果

### 2.1 中国北方黄土区 C<sub>4</sub> 植物碳同位素组成

在本次研究中我们共采集了 89 个 C<sub>4</sub> 植物样品, 它们的 δ<sup>13</sup>C 值分布如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 中国北方黄土区 C<sub>4</sub> 植物 δ<sup>13</sup>C 分布范围为 -10.5‰ ~ -14.6‰. C<sub>4</sub> 植物 δ<sup>13</sup>C 平均值为 -12.6‰ ± 0.82‰ (n = 89).

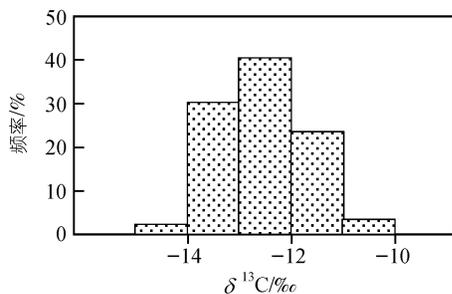


图 2 中国北方黄土区 C<sub>4</sub> 植物碳同位素组成分布直方图

### 2.2 C<sub>4</sub> 植物在不同气候区的碳同位素组成

图 3 给出了不同气候区 C<sub>4</sub> 植物碳同位素的分布范围和平均值. 在黄土高原中部陕西的洛川、长武、富县、黄陵和安塞, 宁夏东南部的西吉和固原和甘肃东部的西峰、平凉和临夏等地共采集了 45 个样品(图 1). 该区域各采样点的年均降雨量均 > 400 mm, 大多在 480 ~ 600 mm, 属于半湿润气候区(表 1). 这一地

区 C<sub>4</sub> 植物的 δ<sup>13</sup>C 值变化范围窄, 在 -10.8 ‰ ~ -14.1‰ 之间, 平均值为 -12.4‰ ± 0.80‰ (n = 45)(图 3).

在黄土高原西部边缘以及相邻的河西走廊地区, 共采集了 34 个样品, 具体的样品点分别是甘肃的山丹和白银, 宁夏的中卫、银川(古窑子)(图 1). 这些地区的年均降雨量都 ≤ 200 mm, 属于干旱气候区. C<sub>4</sub> 植物 δ<sup>13</sup>C 值变化范围在 -10.5‰ ~ -14.6‰, 平均值为 -12.9‰ ± 0.78‰ (n = 34)(图 3).

半干旱气候区(年平均降雨量在 200 ~ 400 mm 之间的) C<sub>4</sub> 样品植物采自甘肃的兰州和肃南, 宁夏的中宁和同心以及青海湟中等地(图 1), 总共只有 10 个样品, 原因是肃南和湟中两地海拔较高, 气候寒冷, C<sub>4</sub> 植物极少. 该气候区 C<sub>4</sub> 植物 δ<sup>13</sup>C 平均值为 -12.6‰ ± 0.69‰ (n = 10)(图 3). 方差分析结果显示, 不同气候区的 C<sub>4</sub> 植物碳同位素组成存在显著差别 (p < 0.05).

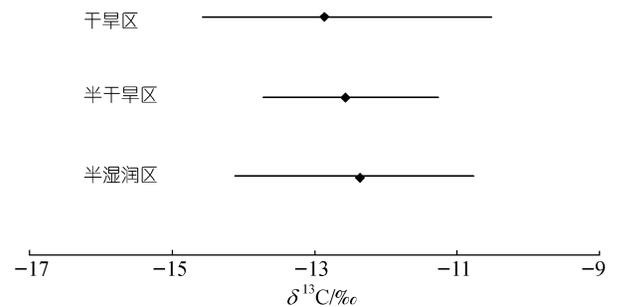
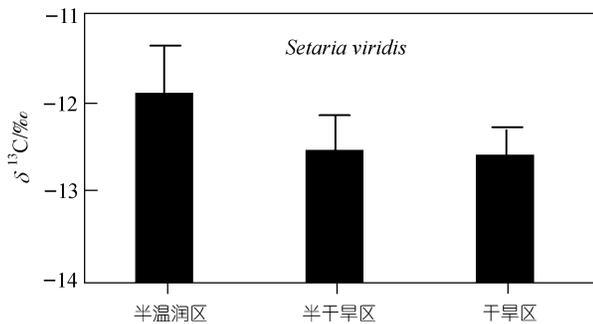
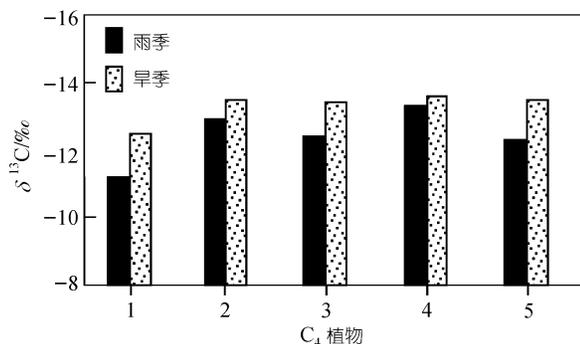


图 3 C<sub>4</sub> 植物在不同气候区的碳同位素分布范围和平均值

在本次研究的所有 C<sub>4</sub> 植物中, 狗尾草 (*Setaria viridis*) 是一种分布很广泛的植物见附录. 通过对 *Setaria viridis* 的碳同位素研究, 发现它在半湿润区、半干旱区和干旱区的碳同位素平均值分别为 -11.9‰ (n = 11, ± 0.51‰), -12.5‰ (n = 4, ± 0.40‰) 和 -12.6‰ (n = 6, ± 0.27‰)(图 4), 表明在半湿润与更干旱的气候区之间, 它的碳同位素组成存在显著性差异 (p < 0.05). *Setaria viridis* 在不同气候区所表现出的 δ<sup>13</sup>C 变化规律与前面 C<sub>4</sub> 植物 δ<sup>13</sup>C 值总体的变化规律是一致的.

### 2.3 C<sub>4</sub> 植物在旱季和雨季的碳同位素组成变化

我们对甘肃白银地区的 5 种 C<sub>4</sub> 植物和 7 种 C<sub>3</sub> 植物进行了旱季和雨季的碳同位素组成比较<sup>[11]</sup>, 结果

图 4 *Setaria viridis* 在不同气候区的  $\delta^{13}\text{C}$  平均值( $\pm\sigma$ )图 5 甘肃白银地区 5 种 C<sub>4</sub> 植物在旱季与雨季的碳同位素组成

1~5 分别代表 *Salsola collina*, *Cleistogenes songorica*, *Eleusine indica*, *Chenopodium glaucum* 和 *Setaria viridis* 等 5 种植物

显示这 5 种 C<sub>4</sub> 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  组成均是雨季重于旱季(图 5 和附录), 旱季和雨季的同位素组成存在显著性差异( $p < 0.05$ ). 与 7 种 C<sub>3</sub> 植物的同位素变化趋势正好相反<sup>[11]</sup>.

### 3 讨论

Deines<sup>[12]</sup>曾对当时全球 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值进行过统计, 结果表明全球 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  的分布范围在  $-9.0\text{‰}$  ~  $-16.0\text{‰}$  之间, 其中 90% 左右的  $\delta^{13}\text{C}$  值分布在  $-11.0\text{‰}$  ~  $-15.0\text{‰}$  之间, 与之相比, 中国北方黄土区 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围以及主要的分布区间均更加集中(图 2).

尽管 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成在各气候区之间的差异, 在统计上存在显著性( $p < 0.05$ ), 但从图 2 和 3 看出, 我们测得的 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围并不大, 各气候区的平均值差别很小. 对特定的种, 如 *Setaria viridis* 来说, 不同气候区的平均  $\delta^{13}\text{C}$  值相差也较小(图 4),

这意味着 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成对环境的变化不敏感. 这点是与 C<sub>3</sub> 植物截然不同, C<sub>3</sub> 植物碳同位素组成在不同气候区存在较大的差别<sup>[6]</sup>. 基于以上认识, 当人们利用土壤有机质和土壤碳酸盐的  $\delta^{13}\text{C}$  值来估算过去植被中 C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> 植物生物量贡献的过程中, 选择 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  端元值就相对要简单得多, 尤其是在黄土区估算冰期与间冰期 C<sub>3</sub> 与 C<sub>4</sub> 植物相对生物量时, 可以考虑忽略 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  端元值的差异.

目前全球对 C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成与环境因子之间关系的研究还不充分, 但已有的结果基本上与我们的结果一致, 如 Tieszen 和 Boutton<sup>[8]</sup> 对 6 种 C<sub>4</sub> 植物进行碳同位素分析, 其中有 5 种植物的同位素组成在 6 月份最高, 12 月 ~ 1 月份最低, 分别与一年中的雨季与旱季相对应. Schulze 等<sup>[10]</sup> 也观察到 C<sub>4</sub> 植物的平均  $\delta^{13}\text{C}$  值有随年降雨量增多而轻微变重的趋势. 水分对 C<sub>4</sub> 植物的影响可以归纳为: 随着可利用的水分增加, C<sub>4</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值会变重. 而这恰好与水分对 C<sub>3</sub> 植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响相反<sup>[6,7,13,14]</sup>.

在不同气候区, C<sub>4</sub> 植物的碳同位素呈现与 C<sub>3</sub> 植物不同的变化, 其原因可能就在于 C<sub>4</sub> 植物光合作用机理与 C<sub>3</sub> 植物存在的差别, 使得 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物具有不同的碳同位素分馏模式. 对 C<sub>3</sub> 植物而言, 碳同位素组成与叶片细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和大气 CO<sub>2</sub> 的浓度的比率 ( $c_i/c_a$ ) 成负相关<sup>[15,16]</sup>, Farquhar 等<sup>[15]</sup> 最先提出了 C<sub>3</sub> 植物碳同位素分馏模式:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}} = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b-a)c_i/c_a, \quad (1)$$

其中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$  和  $\delta^{13}\text{C}_a$  分别是植物叶片和大气 CO<sub>2</sub> 的同位素值;  $a$  是大气 CO<sub>2</sub> 扩散到叶内细胞间时所发生的碳同位素分馏 ( $a = 4.4\text{‰}$ );  $b$  是在 C<sub>3</sub> 植物内 CO<sub>2</sub> 被核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubsico)羧化所发生的碳同位素分馏 ( $b = 29\text{‰}$ );  $c_a$ ,  $c_i$  分别是大气 CO<sub>2</sub> 浓度和叶片细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度.

而对 C<sub>4</sub> 植物而言, 它的碳同位素组成不仅取决于叶片细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和大气 CO<sub>2</sub> 的浓度的比率 ( $c_i/c_a$ ), 而且还决定于 C<sub>4</sub> 光合过程中, 在鞘细胞内 C<sub>4</sub> 二羧酸释放的部分 CO<sub>2</sub> 因未被 Rubsico 羧化而又泄漏返回至叶肉细胞中, 这部分 CO<sub>2</sub> 所占整个 C<sub>4</sub> 二羧酸释放的 CO<sub>2</sub> 的比例 ( $\phi$ ). Henderson 等<sup>[17]</sup> 对 Farquhar<sup>[18]</sup> 1983 年提出了 C<sub>4</sub> 植物碳同位素分馏模式

进行一定的修改后认为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}} = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b_4 + \phi(b-s) - a) c_i/c_a, \quad (2)$$

其中  $b_4$  为由磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEP)羧化过程中总的同位素分馏, 应包括:  $\text{CO}_2$  水合和溶解以及羧化过程中的碳同位素分馏( $30^\circ\text{C}$ 时,  $b_4$ 为 $-5.2\%$ );  $s$  为泄漏过程中所发生的碳同位素分馏 ( $1.8\%$ );  $a$  和  $b$  代表的意义与模式 (1) 相同. 从模式(2)看出, 在  $30^\circ\text{C}$  时, 当  $\phi$  大于  $0.34$  时,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$  与  $c_i/c_a$  呈负相关, 反之,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$  与  $c_i/c_a$  呈正相关关系.

不论是  $\text{C}_3$  植物还是  $\text{C}_4$  植物, 随着土壤水分降低, 为了减少蒸腾, 植物都会关闭叶面气孔, 从而导致进入叶内细胞间的  $\text{CO}_2$  减少, 即  $c_i$  浓度降低. 对  $\text{C}_3$  植物而言, 根据模式(1),  $c_i$  降低的结果使得植物同位素变重. 而对  $\text{C}_4$  植物而言,  $c_i$  降低有可能使得植物同位素变重, 与  $\text{C}_3$  植物一致, 也有可能使得植物同位素变轻, 与  $\text{C}_3$  植物相反. 到底变重还是变轻, 取决于  $\phi$  值的大小.

从模式(1)和(2)中我们还可看出, 当  $c_i/c_a$  变化一个单位时,  $\text{C}_3$  植物同位素要变化  $22.6\%$ , 而  $\text{C}_4$  植物仅发生  $3.7\%$  的变化( $\phi = 0.21$  时). 因此, 同样条件下,  $\text{C}_4$  植物的碳同位素变化就要比  $\text{C}_3$  植物小得多. 这就是为什么  $\text{C}_4$  植物在不同气候区的碳同位素变化要比  $\text{C}_3$  植物小得多的原因.

## 4 结论

通过对中国北方黄土区  $\text{C}_4$  植物的碳同位素研究可以得出以下的初步认识:

(1) 中国北方黄土区  $\text{C}_4$  植物  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为  $-10.5\% \sim -14.6\%$ , 平均值为  $-12.6\%$ .

(2) 从半湿润区, 半干旱区, 到干旱区,  $\text{C}_4$  植物  $\delta^{13}\text{C}$  组成有随降雨量减少而轻微变轻的趋势, 这种变化与  $\text{C}_3$  植物  $\delta^{13}\text{C}$  变化正好相反.  $\text{C}_4$  植物的  $\delta^{13}\text{C}$  平均组成在半湿润区、半干旱区和干旱区分别为  $-12.4\%$ ,  $-12.6\%$  和  $-12.9\%$ .

(3)  $\text{C}_4$  植物的碳同位素组成是雨季比旱季偏重, 也与  $\text{C}_3$  植物同位素变化正好相反.

**致谢** 碳同位素分析由中国科学院地质地球物理研究所同位素室的张福松和霍卫国高级工程师、陈建和曹洁工程师等完成; 植物样品的鉴定由中国科学院植物研究所曹子余和程树志完成, 文中所引气象数

据来自国家气候资料中心, 谨致谢意.

## 参 考 文 献

- 1 Sage R F. Why  $\text{C}_4$  photosynthesis? In: Sage R F, Monson R K, eds. *C<sub>4</sub> Plant Biology*. San Diego: Academic Press, 1999. 3~16
- 2 Knapp A K, Medina E. Success of  $\text{C}_4$  photosynthesis in the field: Lessons from communities dominated by  $\text{C}_4$  plants. In: Sage R F, Monson R K, eds. *C<sub>4</sub> Plant Biology*. San Diego: Academic Press, 1999. 251~283
- 3 Sage R F, Wedin D A, Li M R. The biogeography of  $\text{C}_4$  photosynthesis: Patterns and controlling factors. In: Sage R F, Monson R K, eds. *C<sub>4</sub> Plant Biology*. San Diego: Academic Press, 1999. 313~373
- 4 Cerling T E, Wang Y, Quade J. Expansion of  $\text{C}_4$  ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene. *Nature*, 1993, 361: 344~345[DOI]
- 5 Cerling T E, Harris J M, MacFadden B J. Carbon isotopes, diet of North American equids, and the evolution of North American  $\text{C}_4$  grasslands. In: Griffiths H, ed. *Stable Isotopes Integration of Biological, Ecological and Geochemical Processes*. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd, 1998. 363~379
- 6 王国安, 韩家懋, 刘东生. 中国北方黄土区  $\text{C}_3$  植物碳同位素组成研究. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(6): 550~556
- 7 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[摘要]
- 8 Tieszen L L, Boutton T W. Stable carbon isotope in terrestrial ecological research. In: Rundel P W, Ehleringer J R, Nagy K A, eds. *Stable isotope in ecological research*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 167~195
- 9 Tiessen L L, Senyimba M M, Impamba S K, et al. The distribution of  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  grasses and carbon isotope distribution along an altitudinal and moisture gradient in Kenya. *Oecologia*, 1979. 37: 337~350
- 10 Schulze E-D, Schulze R E W, Trimborn P, et al. Diversity, metabolic types and  $\delta^{13}\text{C}$  carbon isotope ratios in the grass flora of Namibia in relation to growth form, precipitation and habitat conditions. *Oecologia*, 1996, 106: 352~369[DOI]
- 11 王国安, 韩家懋.  $\text{C}_3$  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
- 12 Deines P. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz P, Fontes J C, eds. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry I, The Terrestrial Environment*. Amsterdam: Elsevier, 1980. 329~406
- 13 Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotope ratios and climatic change. *Nature*, 1987, 328: 58~60[DOI]
- 14 Winter K, Holtum J A M, Edwards G E, et al. Effect of low relative humidity on  $\delta^{13}\text{C}$  value in two  $\text{C}_3$  grasses and in *Panicum milioides*, a  $\text{C}_3$ - $\text{C}_4$  intermediates species. *Journal of Experimental Botany*, 1982, 32: 88~91
- 15 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
- 16 Farquhar G D, Richards R A. Isotope composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust J Plant Physiol*, 1984, 11: 539~552
- 17 Henderson S A, von Caemmerer S, Farquhar G D. Short-term measurements of carbon isotope discrimination in several  $\text{C}_4$  species. *Aust J Plant Physiol*, 1992, 19: 263~285
- 18 Farquhar G D. On the nature of carbon isotope discrimination in  $\text{C}_4$  species. *Aust J Plant Physiol*, 1983, 10: 205~226

附录 中国北方黄土区 C<sub>4</sub> 植物碳同位素组成

植物种类及采集地区	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	采集时间	植物种类及采集地区	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	采集时间
半湿润区			半干旱区		
陕西长武县			甘肃兰州		
<i>Setaria viridis</i>	-10.8	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.4	2000
<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	-11.5	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.3	2000
<i>Stipa</i> sp.	-13.5	1999	<i>Setaria lutescens</i>	-13.4	2002
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-11.9	1999	甘肃肃南		
<i>Kochia scoparia</i>	-12.1	1999	<i>Setaria viridis</i>	-13.2	1999
陕西洛川		1999	<i>Salsola beticolor</i>	-12.7	1999
<i>Bothriochloa ischaemum</i>	-11.8	1999	青海湟中		
<i>Festuca extremiorientalis</i>	-11.4	1999	<i>Pennisetum flaccidum</i>	-11.3	1999
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-11.6	1999	宁夏同心		
<i>Setaria viridis</i>	-12.3	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.2	2000
<i>Setaria viridis</i>	-12.4	1998	<i>Chloris virgata</i>	-13.7	2002
<i>Themeda triandra</i>	-12.1	1998	宁夏中宁		
<i>Themeda triandra</i>	-12.0	1998	<i>Amaranthus retroflexus</i>	-11.9	2000
<i>Bothriochloa ischaemum</i>	-12.1	1998	<i>Artemisia ordosica</i>	-12.4	2000
<i>Bothriochloa ischaemum</i>	-12.2	1998			
<i>Kochia scoparia</i>	-12.5	1998	干旱区		
<i>Setaria viridis</i>	-11.9	2002	宁夏银川		
<i>Miscanthus sinensis</i>	-13.1	2002	<i>Setaria viridis</i>	-12.9	2000
<i>Miscanthus sinensis</i>	-13.3	2002	宁夏中卫		
<i>Setaria viridis</i>	-12.3	2002	<i>Setaria</i> sp.	-10.5	1999
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	-11.9	2002	<i>Cleistogenes caespitosa</i>	-13.2	1999
陕西富县			<i>Trilulus terrestris</i>	-13.4	1999
<i>Chloris virgata</i>	-12.7	1998	<i>Salsola ikonnikovii</i>	-13.1	1999
<i>Chloris virgata</i>	-12.9	1998	<i>Salsola</i> sp.	-13.6	1999
<i>Eragrostis pilosa</i>	-13.5	1998	<i>Salsola ruthenica</i>	-12.8	1999
<i>Eragrostis pilosa</i>	-14.1	1998	<i>Chenopodium glaucum</i>	-12.4	1999
陕西安塞			<i>Kochia scoparia</i>	-13.9	1999
<i>Setaria viridis</i>	-12.0	1999	<i>Blysmus sinocompressus</i>	-12.1	1999
<i>Cleistogenes songorica</i>	-14.0	1999	<i>Salsola ruthenica</i>	-12.6	1999
<i>Salsola collina</i>	-12.0	1999	<i>Salsola collina</i>	-11.5	2001
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-11.4	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.3	2001
陕西黄陵			<i>Chloris virgata</i>	-13.5	2001
<i>Setaria viridis</i>	-11.7	2000	<i>Aristida adsgenensis</i>	-13.3	2001
甘肃西峰县			<i>Eragrostis pilosa</i>	-13.3	2001
<i>Cleistogenes squarrosa</i>	-10.8	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.7	2001
<i>Setaria viridis</i>	-12.5	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.7	2001
<i>Echinochloa crusgalli</i> var. <i>hispidala</i>	-12.2	1999	甘肃白银		
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-12.2	1999	<i>Setaria viridis</i>	-12.3	1999
<i>Kochia scoparia</i>	-13.5	1999	<i>Setaria viridis</i>	-13.5*	1999
<i>Kochia prostrata</i>	-13.9	1998	<i>Cleistogenes songorica</i>	-12.9	1999
<i>Setaria lutescens</i>	-13.3	2002	<i>Cleistogenes songorica</i>	-13.5*	1999
甘肃临夏			<i>Eleusine indica</i>	-12.4	1999
<i>Setaria lutescens</i>	-12.9	1998	<i>Eleusine indica</i>	-13.4*	1999
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	-12.7	1998	<i>Enneapogon borealis</i>	-12.9	1999
<i>Digitaria sanguinalis</i>	-12.2	1998	<i>Artemisia</i> sp.	-12.6	1999
<i>Salsola ruthenica</i>	-13.4	1998	<i>Salsola collina</i>	-11.6	1999
<i>Setaria viridis</i>	-11.1	1999	<i>Salsola collina</i>	-12.5*	1999
甘肃平凉			<i>Chenopodium glaucum</i>	-13.3	1999
<i>Setaria viridis</i>	-12.0	2000	<i>Chenopodium glaucum</i>	-13.6*	1999
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-12.1	2000	<i>Cleistogenes songorica</i>	-13.5	2001
宁夏固原			<i>Enneapogon borealis</i>	-13.3	2001
<i>Amaranthus retroflexus</i>	-11.8	2000	甘肃山丹		
宁夏西吉			<i>Achnatherum splendens</i>	-11.8	1999
<i>Setaria viridis</i>	-11.8	2000	<i>Halogeton glomeratus</i>	-14.6	1999

\* 代表该植物样品采集于 1999 年的旱季中