

青藏高原东部高寒草甸植物 ^{13}C 年间变化及其环境分析

李明财^{1,2}, 黎贞发¹, 易现峰³, 李来兴³

1. 天津市气候中心, 天津 300074; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001

摘要: 植物有机体稳定碳同位素组成受植物生长期气候环境因子的影响, 包含了大量的环境信息。要真正理解植物体同位素组成所包含的环境信息首先要研究植物体同位素组成与环境之间的关系。文章通过分析 2002 年和 2003 年青藏高原东部青海省门源县境内隶属于 19 科 41 属 51 种植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 研究高寒草甸植物稳定碳同位素组成的年间变化及其与环境因子的关系, 分析影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的关键因子。结果表明, 所测植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在一个很小的范围 -29.2‰ ~ -24.9‰ 之间, 平均值为 -26.9‰, 说明所测植物的光合作用均通过 C_3 途径实现, 这可能与该研究区较低温度有关。研究发现一年生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于多年生植物, 而且一年生和多年生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的差异在 2002 年 ($t = -3.031, P < 0.01$) 和 2003 年 ($t = -3.567, P < 0.001$) 均能达到显著性水平, 表明多年生植物水分利用效率显著高于一年生植物, 能更好的适应该地区寒冷干燥的低温环境。两年间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显不同, 2003 年显著低于 2002 年 ($t = 6.786, P < 0.001$)。通过分析两年间环境因子的变化认为植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年间变化主要是由于降水的变化引起的, 随降雨量的增加而降低。不同植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值年间变化差别很大, 反应了植物对环境变化的不同响应。在植被恢复中应选用植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值随环境变化存在较大差异的物种, 因为此类物种能够采取不同的对策适应该地区环境的变化。

关键词: 高寒草甸; $\delta^{13}\text{C}$ 值; 年间变化; 一年生植物; 多年生植物

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2007) 04-1205-06

植物光合作用过程中普遍发生了稳定碳同位素分馏, 使光合作用产物明显富集碳的轻同位素 (^{12}C)^[1-2], 利用这种分馏效应可以指示植物长期的水分利用效率, 揭示植物重要的生理生态学过程。它在生态学及全球变化研究中得到了广泛的关注和应用^[3-5]。植物稳定碳同位素组成受其光合作用类型控制, 同时又受气候环境因子的影响^[2], 从而越来越广泛的应用于气候环境变化的研究中^[6-7]。全球变化研究的一种重要方法就是从古植被及古土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化中提取当时的环境信息, 但是古环境信息的获得必需依赖于现代植被同位素组成与环境之间的相关关系。研究现代植物叶片稳定碳同位素组成的时空分异以及与环境因子的关系可以更好的为利用植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究气候环境的变化提供依据。前人研究表明植物稳定碳同位素组成受众多环境因素的影响, 温度、降水、光照以及大气 CO_2 状况是主要影响因子^[8-10]。在中国, 最近几年也展开了植物稳定碳同位素与环境之间关系的研究, 但多局限于木本及干旱草原植物。比如, 严昌荣等^[11]研究了温带阔叶林叶片的稳定碳同位素组成特征及其空间变化和种间变化的影响因素。陈拓等^[12]研究了甘肃马街山平车前叶片稳定碳同位素比值的海拔及时间变化。苏波等报道了中国东北样带草原区植物稳定碳同位素比值及水分利用

效率对环境梯度的响应^[10]。Chen 等^[13]研究了不同土壤湿度下内蒙古草原植物稳定碳同位素组成的分异。

被称为世界第三极的青藏高原, 地处低纬, 平均海拔超过 4000 m, 高寒草甸生态系统成为其主要部分, 是研究高寒草甸生态系统结构和功能以及对全球变化响应的理想场所。青藏高原独特的环境条件及其动态过程, 在生物的发生发展及其适应特性方面形成了特有的规律, 而且由于山地的阻隔, 高山物种很少受到人为的干扰, 成为研究植物 - 环境关系的理想区域。对青藏高原高山植物忍受极端环境 (如强烈的太阳辐射、寒冷的气候条件、缺少降水、低气压和频繁的疾风与冰雹等) 的生理生态特性的研究, 具有重要的意义, 引起了科学家的极大兴趣和关注^[14-15]。但目前对于青藏高原高寒草甸植物稳定碳同位素组成与环境之间关系的研究还鲜有报道^[16-17], 而且多局限于群落水平上的研究, 未对同物种进行对照, 从而混淆了种间差异以及不同物种对相同环境变化的不同响应程度。展开青藏高原典型高山植物稳定碳同位素组成及其与环境因子关系的研究为推测青藏高原古环境及探讨青藏高原植物的高山适应特性具有重要生态学意义。为此本研究以青藏高原东部门源县境内的高寒草甸为研究对象, 通过测定不同年份植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270217)

作者简介: 李明财 (1976 -), 男, 博士, 主要从事生态学及气候变化研究。E-mail: Mingcaili3394@163.com

收稿日期: 2007-03-29

值:1)研究典型高山植物的光合型;2)分析不同寿命植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异,研究相同环境条件下不同寿命植物的水分利用策略;3)分析植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年间变化及其与环境的关系。这些研究一方面为研究青藏高原高山植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值时空分异及环境的关系提供基础数据,另一方面,为高寒草甸区物种恢复和维护物种多样性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究在青藏高原东部青海省门源县境内进行(北纬 $37^{\circ}26'$,东经 $101^{\circ}29'$)。研究区平均海拔3200 m,年平均气温约为 -1.0°C ,极端最高和最低气温分别为 26.6°C 和 -35.1°C 。该研究区没有明显的四季之分,只有冷暖两季,5—10月为暖季,11—4月为冷季。年平均降雨量为512 mm,而年蒸发量为1106.6 mm。植被主要为高寒草甸所占据。2002年与2003年夏季主要气象资料见表1。

表1 研究区2002与2003年的主要气象资料

Table 1 Dominant climatic data in 2002 and 2003 in the study site

年份	2002年					2003年				
	5	6	7	8	平均或累积	5	6	7	8	平均或累积
气压/hPa	692.6	695.4	693.1	694.8	694.0	693.8	695.3	694.3	692.0	693.9
温度/ $^{\circ}\text{C}$	6.6	11.5	13.3	12.0	10.9	7.1	10.5	11.7	13.1	10.6
日照/h	233.3	217.6	257.9	236.5	945.3	222.1	233.7	192.6	191.0	839.4
降水/mm	104.8	76.2	46.3	70.1	297.4	98.3	91.9	106.8	151.1	448.1

一年生叶和多年生植物之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著性以独立样本T检验进行分析, $P < 0.05$ 为显著水平,所有统计分析结果均是双尾的。

2 结果与讨论

2.1 植物的稳定碳同位素组成特征

我们分析了属于19科41属的51种植物2002和2003年的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,结果表明所测植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在一个很小的范围 $-29.2\text{‰} \sim -24.9\text{‰}$ 之间,平均值为 -26.9‰ (表1)。根据 C_3 ($-22\text{‰} \sim -34\text{‰}$)和 C_4 ($-6\text{‰} \sim -19\text{‰}$)植物各自不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,表明本研究所测的植物中没有 C_4 植物,均为 C_3 植物。研究区内缺乏 C_4 植物可能与青藏高原特殊的生长环境有关^[18]。植物光合型的分布与其特定生境有直接的关系,早期的研究把 C_4 植物归纳为炎热环境条件下的产物,干旱和高温有利于 C_4 植物的进化和生存^[19]。已有的大量研究表明温度是决定 C_4 植物分布的关键因子^[20-21]。该研究区位于青藏高原东部门源县境内,平均海拔3200 m。该地气候主要受东南季风和西伯利亚高压影响,是典型的大陆性季风气候,冬季漫长而寒冷,夏季短暂,年平均气温为 -1.0°C ,极端最低气温达到 -35.1°C 。本研究区内没有 C_4 植物分布与本地的气候有关,是对青藏高原高寒地区长期低温的一种适

1.2 样品的采集与分析

于2002年与2003年8月中旬分别采集来自19科、41属的51种植物。所有样品均采自开阔平坦的环境下,避免了局部地貌与微环境的影响。每一实验种的材料至少由3个独立生长的植物个体混合而成。将采集的植物样品用清水洗净、晾干,置于烘箱中在 70°C 下烘烤48 h至恒质量,粉碎,过200目筛。用燃烧法收集植物完全燃烧后产生的 CO_2 ,收集的 CO_2 用MAT-252质谱仪分析碳同位素组成。以PDB(Pee Dee Belemnite)为标准,根据下面公式进行计算:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_s}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sta}}} - 1 \right] \times 1000$$

式中, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_s$ 和 $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sta}}$ 分别是测试植物样品和PDB标样的稳定碳同位素比值。系统误差不超过 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 数据分析

数据以SPSS 10.0进行统计分析。不同年份以及

应,极端环境低温是该地区没有 C_4 植物分布的主要限制因子^[18]。

2.2 一年生植物和多年生植物 ^{13}C 值的差异

本研究分析了不同年龄植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,发现一年生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于多年生植物(下图1),而且一年生和多年生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的差异在2002年($t = -3.031, P < 0.01$)和2003年($t = -3.567, P < 0.001$)均能达到显著性水平。本研究的结果支持了Ehleringer and Cooper的结论^[22],即在相同的生境条件下,短寿命植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常要低于长寿植物。因为植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值包含了碳同化过程中叶片内部 CO_2 与大气 CO_2 浓度比率(Ci/Ca)的综合情况,反映了同化速率与气孔导度的平衡(即植物内在水分利用效率),能够很好的指示植物长期的水分利用策略^[8,23]。所以本研究的结果表明多年生植物水分利用效率显著高于一年生植物。Farquhar and Richards^[24]也证实长寿的植物有更高的水分利用效率。William et al^[25]分析了相同生境下植物叶片的稳定碳同位素组成,发现植物年龄与 $\delta^{13}\text{C}$ 值有很好的正相关关系。但是他们的研究只包含了四种植物。本研究收集了研究区内的大部分植物,包含了该地区主要植物种,认为有很好的代

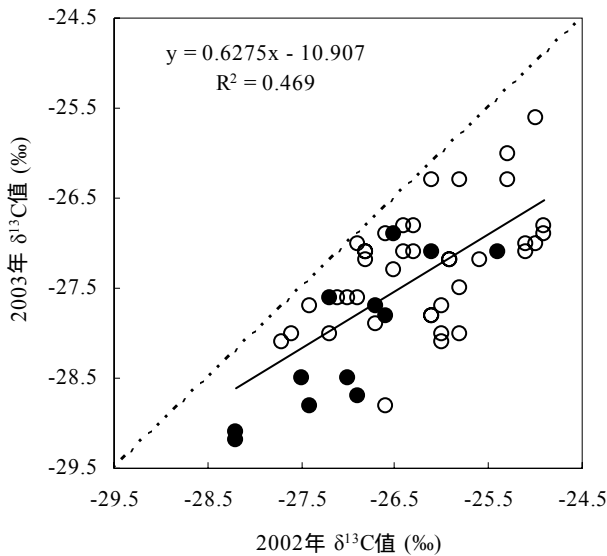


图1 2002年与2003年所采集植物样品 ^{13}C 值的相关分析
Fig. 1 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ values collected in 2002 and 2003
(● 一年生植物; ○ 多年生植物)

表性，而且一年生和多年生之间的差异在不同年份间是非常稳定的。我们认为在青藏高原水分胁迫的环境条件下，多年生植物是更有利的，可以通过提高本身的水分利用效率来适应这里的低降水高蒸发量环境。但是本文仅对植物划分为一年生和多年生，没有对多年生植物进行更细的区分，还有待于进一步研究。

2.3 植物稳定碳同位组成的年间变化及其环境分析

2003年采集的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于2002年(图1)($t = 6.786, P < 0.001$)，所有植物叶片平均值低1.1‰，而且两年间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值很好的相关性(图1)。尽管所有物种的稳定碳同位素比值在两年内均存在差异，但变化幅度在不同种间有所不同(下页表2)，薄荷和山生柳的差异最大，2003年比2002年低2.2‰，而麻花苻差异最小，仅为0.1‰。植物在进行光合作用过程中，从吸收大气 CO_2 到最终植物有机质的形成都伴随着稳定碳同位素分馏。Farquhar等^[8]研究了植物的碳同位素分馏，认为植物碳同位素的分馏主要受温度、水分、光照、大气 CO_2 状况等环境气候因素的影响。下面就这些环境因子加以讨论。

2.3.1 温度

温度是影响植物碳同位素分馏的重要因素。到目前为止人们已经发现了温度与植物稳定碳同位素之间的关系，但是并没有取得一致的意见。Körner^[9]发现植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度升高而降低，而Stuiver和Braziunas^[2]的结果显示温度与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关。而依据Schleser等^[26]的研究，不论是正相

关还是负相关，每升高或降低1℃，植物的稳定碳同位素平均变化值小于0.3‰。本研究区内2年间植物生长期平均温度相差只有0.3℃(见图1)，所以温度对 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化贡献是很小的。

2.3.2 大气压力及大气中 CO_2 的稳定碳同位素比值

虽然大气压力对植物的稳定碳同位素比值有重要影响，但本研究所测样品均来自同一个地区，大气压力虽然有年间变化，但变化不大，不会对植物稳定碳同位素比值的影响。2年间大气中 CO_2 稳定碳同位素比值分别为10.1‰和10.2‰，没有明显变化，不影响植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

光照：光照强弱也会对植物的碳同位素组成产生影响^[8]。随着光照增强，叶片细胞内部 CO_2 浓度会逐渐降低，从而导致光合产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大^[26]。光照条件的变化可以影响植物叶片的气孔导通系数(g)、 CO_2 的吸收率(A)及叶片内 CO_2 的分压 P_i ，从而对植物的碳同位素比值产生影响。植物的稳定碳同位素比值随光照的变化趋势是，弱光条件下，随光照的增强而 $\delta^{13}\text{C}$ 增大。当达到光饱和点时g、A、及 P_i 不再发生变化。本研究区地处高海拔地区，光照充足，同时本地区的降水多以暴雨的形式出现，所以光照足以满足光合作用要求，而且两年间植物生长期间的光照时间差异不大，对碳同位素比值变化的贡献很小。

2.3.3 降水

降水是植物生长的重要环境限制因子，也是影响植物碳同位素组成的一个重要因素。研究表明，水分供应不足时，植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值会增大^[8,10,27]。因为水胁迫可诱导叶子气孔关闭，从而引植物叶片内 CO_2 浓度下降，使光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大，因此降水量增加植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值有降低的趋势。我们实验中来自19科41属的51种植物都是随机选取的，而且是高寒草甸的代表种，所测的结果有很强的代表性。研究区两年间生长季降水显著不同，根据当地的气象资料，2003年降水量比2002年高得多，2003生长季(5—8月)降雨量累计达到448.1mm，而2002只有297.4mm。本研究认为植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化主要是由降水造成的。Winter等^[27]报道小麦和草地早熟禾的 ^{13}C 在高湿度条件下较低湿度明显偏负¹。他们的结论是在人工胁迫的条件下获得的，实验中排除了其它气候环境因子的影响。与我们的结果一致，表明无论是在人工控制还是在自然条件下 C_3 植物的稳定碳同位素组成都将随着水分的增加而降低。

为什么不同的植物种对相同的环境变化会有不同的反应？不同植物种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值年间变化随降

表2 研究区2002年及2003年植物稳定碳同位素比值¹⁾
Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ values of plant species grown in the study area collected in 2002 and 2003.

科名	种名	基本特征	2002年 $\delta^{13}\text{C}$ 值/‰	2003年 $\delta^{13}\text{C}$ 值/‰	差值/‰
紫草科 Boraginaceae	微孔草 <i>Microula sikkimensis</i>	D,F,A	-27.4	-28.8	1.4
紫草科 Boraginaceae	附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>	D,F,P	-26.3	-26.8	0.5
藜科 Chenopodiaceae	野滨藜 <i>Atriplex fera</i>	D,F,A	-26.1	-27.1	1.0
菊科 Compositae	细叶亚菊 <i>Ajania tenuifolia</i>	D,F,P	-26.7	-27.9	1.2
菊科 Compositae	大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	D,F,A	-26.5	-26.9	0.4
菊科 Compositae	矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	D,F,P	-25.1	-27.0	1.9
菊科 Compositae	沙生风毛菊 <i>Saussurea arenaria</i>	F,D,P	-25.9	-27.2	1.3
菊科 Compositae	大通风毛菊 <i>Saussurea katochaete</i>	D,F,P	-25.8	-26.3	0.5
菊科 Compositae	美丽风毛菊 <i>Saussurea superba</i>	D,F,P	-25.1	-27.1	2.0
菊科 Compositae	蒙古蒲公英 <i>Taraxacum monogolicum</i>	D,F,P	-25.3	-26.0	0.7
十字花科 Cruciferae	芥菜 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	D,F,A	-27.5	-28.5	1.0
莎草科 Cyperaceae	矮嵩草 <i>Kobresia humulis</i>	M,S,P	-26.8	-27.2	0.4
莎草科 Cyperaceae	二柱头蘆草 <i>Scirpus distigmaticus</i>	M,S,P	-26.5	-27.3	0.8
龙胆科 Gentianaceae	刺芒龙胆 <i>Gentiana aristata</i>	D,F,P	-26.0	-27.7	1.7
龙胆科 Gentianaceae	蓝白龙胆 <i>Gentiana leucomelaena</i>	D,F,P	-26.9	-27.6	0.7
龙胆科 Gentianaceae	麻花苳 <i>Gentiana straminea</i>	D,F,P	-26.9	-27.0	0.1
龙胆科 Gentianaceae	湿生扁蕾 <i>Gentianopsis paludosa</i>	D,F,A	-27.2	-27.6	0.4
龙胆科 Gentianaceae	肋柱花 <i>Lomatogonium rotatum</i>	D,F,A	-27.0	-28.5	1.5
禾本科 Gramineae	赖草 <i>Aneurolepidium dasystachys</i>	M,G,P	-27.4	-27.7	0.3
禾本科 Gramineae	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	M,G,P	-26.3	-27.1	0.8
禾本科 Gramineae	羊茅 <i>Festuca ovina</i>	M,G,P	-26.8	-27.1	0.3
禾本科 Gramineae	藏异燕麦 <i>Helictotrichon tibeticum</i>	M,G,P	-25.0	-27.0	2.0
禾本科 Gramineae	胎生草熟禾 <i>Poa sinattenuata</i>	M,G,A	-25.4	-27.1	1.7
禾本科 Gramineae	太白细柄茅 <i>Ptilagrostis concinna</i>	M,G,P	-25.0	-25.6	0.6
禾本科 Gramineae	双叉线柄茅 <i>Ptilagrostis dichotoma</i>	M,G,P	-25.6	-27.2	1.6
唇形科 Labiatae	薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	D,F,P	-26.6	-28.8	2.2
豆科 Leguminosae	天蓝苜蓿 <i>Medicago lupulina</i>	D,F,A	-26.9	-28.7	1.8
豆科 Leguminosae	蓝花棘豆 <i>Oxytropis caerulea</i>	D,F,P	-26.8	-27.1	0.3
车前科 Plantaginaceae	平车前 <i>Plantago depressa</i>	D,F,P	-26.1	-27.8	1.7
蓼科 Polygonaceae	园穗蓼 <i>Polygonum macrophyllum</i>	D,F,P	-27.6	-28.0	0.4
蓼科 Polygonaceae	西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	D,F,P	-27.7	-28.1	0.4
报春花科 Primulaceae	雪山点地梅 <i>Androsace septentrionalis</i>	D,F,P	-26.4	-27.1	0.7
报春花科 Primulaceae	海乳草 <i>Glaux maritime</i>	D,F,P	-27.1	-27.6	0.5
毛茛科 Ranunculaceae	露蕊乌头 <i>Aconitum gymanandrum</i>	D,F,A	-26.7	-27.7	1.0
毛茛科 Ranunculaceae	大通翠雀花 <i>Delphinium pylzowii</i>	D,F,P	-26.6	-26.9	0.3
毛茛科 Ranunculaceae	三裂叶碱毛茛 <i>Halerpestes tricuspis</i>	D,F,P	-27.0	-27.6	0.6
毛茛科 Ranunculaceae	高原毛茛 <i>Ranunculus brotherusii</i>	D,F,P	-26.1	-27.8	1.7
毛茛科 Ranunculaceae	高山唐松草 <i>Thalictrum alpinum</i>	D,F,P	-26.4	-26.8	0.4
毛茛科 Ranunculaceae	矮金莲花 <i>Trollius pumilus</i>	D,F,P	-26.0	-28.0	2.0
蔷薇科 Rosaceae	蓬子菜 <i>Galium verum</i>	D,F,P	-25.9	-27.2	1.3
蔷薇科 Rosaceae	金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>	D,Sh,P	-26.1	-26.3	0.2
蔷薇科 Rosaceae	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	D,F,P	-26.0	-28.1	2.1
蔷薇科 Rosaceae	雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>	D,F,P	-25.8	-27.5	1.7
杨柳科 Salicaceae	山生柳 <i>Salix oritrepha</i>	D,P	-25.8	-28	2.2
玄参科 Scrophulariaceae	小米草 <i>Euphrasia tatarica</i>	D,F,A	-28.2	-29.2	1.0
玄参科 Scrophulariaceae	兰石草 <i>Lancea tibetica</i>	D,F,P	-24.9	-26.8	1.9
玄参科 Scrophulariaceae	阿拉善马先蒿 <i>Pedicularis alaschanica</i>	D,F,P	-27.2	-28.0	0.8
玄参科 Scrophulariaceae	甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i>	D,F,A	-26.6	-27.8	1.2
玄参科 Scrophulariaceae	斑唇马先蒿 <i>Pedicularis longiflora</i>	D,F,A	-28.2	-29.1	0.9
瑞香科 Thymelaeaceae	狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>	D,F,P	-24.9	-26.9	2.0
伞形科 Umbelliferae	宽叶羌活 <i>Notopterygium frobesii</i>	D,F,P	-25.3	-26.3	1.0

1) A, P, D, M, F, G, Sh 分别表示一年生, 多年生, 双子叶植物, 单子叶植物, 杂草, 莎草, 禾本科类, 灌丛

Notes: A, P, D, M, F, S, G, Sh in Table 1 stand for annual, perennial, dicotyledonous, monocotyledonous, forb, sedge, grass, and shrub, respectively

水变化的响应不同, 随着降水量减少有的物种如山生柳和薄荷通过降低叶片的气孔导度等途径来提高水分利用效率以适应环境的变化, 而有的物种如麻花苳对这种环境变化不敏感, 降水对它们的影响

不大, 说明不同物种对环境变化具有不同的响应。产生这种结果的原因可能与物种的生活型, 根部特征, 以及生理生化机制等不同有关。这有待于进一步研究。

3 结论

所测高寒草甸典型高山植物稳定碳同位组成有明显的年间变化，生长季的降水量是造成这种变化的主要因子，随着降水的增加 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低。尽管2003所有植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均低于2002年，表明不同植物对相同的年间环境变化有相同的响应模式，但是响应程度却存在明显不同，年间变化差值介于0.1‰~2.2‰之间。在物种恢复中应选择植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值对环境变化出现较大差异的物种，因为此类物种更有利于适应该地区的环境变化。本研究发一年生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于多年生植物，反应了该地区不同寿命植物的明显不同的生存策略，多年生植物相对于一年生植物能够通过提高本身的水分利用效率来适应青藏高原极端的低温干燥环境。

参考文献：

- [1] O'LEAR M H. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. *Bioscience*, 1988, 38(5): 328-336.
- [2] STUIVER M, BRAZIUNAS T F. Tree cellulose $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios and climate change[J]. *Nature*, 1987, 328(6125): 58-60.
- [3] 林植芳. 稳定碳同位素在植物生理生态研究中的应用[J]. *植物生理学报*, 1990, 26(3): 1-6.
LIN Zhifang. Application of stable carbon isotope in plant physiology and Ecology[J]. *Plant Physiology Communications*, 1990, 26(3): 1-6.
- [4] DAWSON T E, MAMBELL S, PLAMBOECK A H, *et al.* Stable isotopes in plant ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 507-559.
- [5] 郑淑霞, 上官周平. 陆生植物稳定碳同位素组成与全球变化[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 733-739.
ZHENG Shuxia, SHANGGUAN Zhouping. Terrestrial plant stable carbon isotope composition and global change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 733-739.
- [6] GESSLER A, RENNENBERG H, KEITEL C. Stable isotope composition of organic compounds transported in the phloem of European Beech-evaluation of different methods of phloem sap collection and assessment of gradients in carbon isotope composition during leaf-to-stem transport[J]. *Plant Biology*, 2004, 6(6): 721-729.
- [7] SCARTAZZA A, MATA C, MATTEUCCI G, *et al.* Comparisons of $\delta^{13}\text{C}$ of photosynthetic products and ecosystem respiratory CO_2 and their responses to seasonal climate variability[J]. *Oecologia*, 2004, 140(22): 340-351.
- [8] 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]. *Austrian Journal Plant Physiology*, 1982, 9(2): 121-137.
- [9] KÖRNER C H, FARQUHAR G D, ROKSAPDIE Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude[J]. *Oecologia*, 1988, 74(4): 623-632.
- [10] 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.
SU Bo, HAN Xingguo, LI Linghao, *et al.* Responses of $\delta^{13}\text{C}$ value and water use efficiency of plant species to environmental gradients along the grassland zone of Northeast China transect [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6): 648-655.
- [11] 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.
YAN Changrong, HAN Xingguo, CHEN Lingzhi, *et al.* Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within temperate deciduous forest: Its spatial change and interspecies variation[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(9): 853-859.
- [12] 陈拓, 秦大河, 任贾文, 等. 平车前 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔及时间差异[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(4): 672-675.
CHEN Tuo, QIN Dahe, REN Jawen, *et al.* The altitudinal and temporal variation of $\delta^{13}\text{C}$ values in leaves of *Plantago media* L.[J] *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(4): 672-675.
- [13] CHEN S P, BAI Y F, LIN G H, *et al.* Variations in life form composition and foliar carbon isotope discrimination among the eight plant communities under different soil moisture conditions in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Ecological Research*, 2005, 20(2): 167-176.
- [14] 韩发, 贲桂英, 师生波. 青藏高原不同海拔矮蒿草抗逆性的比较研究[J]. *生态学报*, 1998, 18(6): 654-659.
HAN Fa, BEN Guiying, SHI Shengbao. Comparative study on the resistance of *Kobresia humilis* grown at different altitudes in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acat Ecologica sinica*, 1998, 18(6): 654-659.
- [15] SHI S B, ZHU W Y, LI H M, *et al.* Photosynthesis of *Saussurea superba* and *Gentiana straminea* is not reduced after long-term enhancement of UV-B radiation[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 51(1): 75-83.
- [16] 陈拓, 杨梅雪, 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.
CHEN Tuo, YANG Meixue, FENG Huyuan, *et al.* Spatial distribution of stable carbon isotope compositions of plant leaves in the north of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of glaciology and geocryology*, 2003, 25(1): 83-87.
- [17] LI M C, LIU H Y, LI L X, *et al.* Carbon isotope composition of plants along altitudinal gradient and its relationship to environmental factors on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2007, 55(1): 67-78.
- [18] 李明财, 易现峰, 李来兴, 等. 基于稳定碳同位素技术研究青藏高原东部高寒区植被的光合型[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(6): 1052-1056.
LI Mingcai, YI Xianfeng, LI Laixing, *et al.* Photosynthetic pathways of plants grown in alpine and cold region in the East Qinghai-Tibet Plateau based on stable carbon isotope values[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(6): 1052-1056.
- [19] BLACK C C. Ecological implications of dividing plants into groups with distinct photosynthetic production capacities[J]. *Advances in Ecological Research*, 1971, 7: 87-114.
- [20] CAVAGNARO J B. Distribution of C_3 and C_4 grasses at different altitudes in a temperate arid region of Argentina[J]. *Oecologia*, 1988, 76(2): 273-277.
- [21] 唐海萍. 中国东北样带(NECT)的 C_4 植物分布及其与环境因子的相关性[J]. *科学通报*, 1999, 44(4): 416-420.
TANG Haiping. Distribution of C_4 plants along the Northeast China transect and its correlation to the environmental factors[J]. *Chinese*

- Science Bulletin, 1999, 44(14): 1316-1320.
- [22] EHLERINGER J R, COPPER, T A. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants[J]. *Oecologia*, 1988, 76(4): 562-566.
- [23] HULTINE K R, MARSHALL J D. Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition[J]. *Oecologia*, 2000, 123(1): 32-40.
- [24] FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotope composition of plant carbon correlated with water-use efficiency of wheat genotypes[J]. *Austrian Journal Plant Physiology*, 1984, 11(6): 539-552.
- [25] WILLIAMS S F, DARREN R S, SUSAN L P, *et al.* Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid-land plant species in lifespan[J]. *Oecologia*, 1992, 91(3): 332-337.
- [26] SCHLESER G H, HELLE G, LUCKE A, *et al.* Isotope signals as climate proxies: the role of transfer functions in the study of terrestrial archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(7): 927-943.
- [27] 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 C_3 - C_4 intermediates species[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1982, 33(1): 88-91.

Annual variation of plant $\delta^{13}\text{C}$ and its environmental analysis in alpine meadow in the east of Tibetan Plateau

LI Mingcai^{1,2}, LI Zhenfa¹, YI XianFeng³, LI LaiXing³

1. Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China ;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

Abstract: The stable isotope compositions of plant organic matters contain an integrated record of environmental conditions during growing season. Interpreting that record requires a full understanding of how the isotope ratios of plant organic matters respond to changes in climate. In this study, by measuring stable carbon isotopes in leaves of 51 alpine plant species belonged to 19 families and 41 genera growing in the east of Tibetan Plateau in 2002 and 2003, we studied the variations of $\delta^{13}\text{C}$ values between two years and its relationship to environmental factors in order to determine the dominant factors affecting annual changes. The measured $\delta^{13}\text{C}$ values (ranged from -29.2‰ to -24.9‰ with an average of -26.9‰) indicated that all the considered species perform photosynthesis through the C_3 pathway, which reflected the adaptation of alpine plants to extremely low air temperature charactering on the Tibetan Plateau. Leaf $\delta^{13}\text{C}$ values of annual plants were significantly negative compared with perennial plants both in 2002 ($t = -3.031$, $P < 0.01$) and 2003 ($t = -3.567$, $P < 0.001$), suggesting that perennials have greater water use efficiency than annuals, i.e. perennials may be more advantageous than annuals in water-limited and low temperature environment on the Qinghai-Tibet Plateau. There was significant difference of $\delta^{13}\text{C}$ values occurred between two years, with a substantially more positive $\delta^{13}\text{C}$ values in 2002 than in 2003. By analyzing the variations of climatic factors between two years, the changes of $\delta^{13}\text{C}$ values could be mainly contributed to the difference of precipitation. However, the variations of $\delta^{13}\text{C}$ values between two years were species-dependent, although the consistency of the decreasing trend of $\delta^{13}\text{C}$ values from 2002 to 2003, suggesting distinct responses of different species to environmental changes. It is suggested that plant species showing significant positive $\delta^{13}\text{C}$ values with same environmental changes should be the optimum choice in vegetation recovery on the Tibetan Plateau because these plants would take different strategies to adapt to variability of environment.

Key words: alpine meadow; $\delta^{13}\text{C}$ value; annual variation; annuals; perennials