

文章编号: 1000-4025 (2005) 05-1046-05

青海高原高寒地区 C₄ 植物名录*

李明财^{1,2}, 易现峰¹, 张晓爱¹, 李来兴^{1*}

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要: 根据笔者实测的青海高原高寒地区 300 余种植物稳定性碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}$) 以及参阅已经发表过的国内外不同地区的 C₄ 植物名录, 整理出青海高原高寒地区 3 500 余种植物中的 C₄ 植物。得出青海高原高寒地区共有 9 科 32 属的 52 种植物属于 C₄ 植物, 禾本科 (Gramineae) 18 属 24 种, 藜科 (Chenopodiaceae) 9 属 20 种, 苋科 (Amaranthaceae) 1 属 4 种, 菊科 (Compositae) 2 属 3 种, 大戟科 (Euphorbiaceae)、蒺藜科 (Zygophyllaceae)、旋花科 (Convolvulaceae)、景天科 (Crassulaceae)、眼子菜科 (Potamogetonaceae) 各 1 属 1 种。同时归纳了 52 种 C₄ 植物的生活型以及地理分布区。

关键词: C₄ 植物; $\delta^{13}\text{C}$; 青海高原

中图分类号: Q 948.15⁺ 6 **文献标识码:** A

The List of C₄ Plants in Alpine Locality of Qinghai Plateau

LI Ming-cai^{1,2}, YI Xian-feng¹, ZHANG Xiao-ai¹, LI Lai-xing^{1*}

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, The Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2 Institute of Tibet Plateau Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: All the C₄ plants in alpine locality of Qinghai Plateau were investigated according to the stable carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of 300 plant samples and some related literatures. The results indicated there are 52 C₄ species of total 3 500 plant species in alpine locality of Qinghai Plateau. They belong to 9 families which are Gramineae, Amaranthaceae, Chenopodiaceae, Euphorbiaceae, Zygophyllaceae, Crassulaceae, Convolvulaceae, Compositae and Potamogetonaceae. The two families containing the most C₄ plants are Gramineae and Chenopodiaceae which include 76.5 percent of all plants in the study area. Other species belong to Amaranthaceae (1 genus, 4 species), Compositae (2 genera, 3 species) and Euphorbiaceae, Zygophyllaceae, Crassulaceae, Convolvulaceae, Potamogetonaceae (1 genus, 1 species, respectively). Life form, geographical distribution and altitude of 52 plants were also listed here, which could provide some important information for further studies in this area.

Key words: C₄ plants; $\delta^{13}\text{C}$ values; Qinghai Plateau

由于对 CO₂ 同化途径和最初生成产物不同, 植物被分为 C₃、C₄ 以及 CAM 3 种光合作用类型。C₄ 植物的发现以及对于 C₃ 和 C₄ 植物的研究在 20 世纪末后就引起了人们的普遍关注^[1-4]。由于 C₃ 和 C₄ 两种植物对环境变化有着不同的响应^[5-7], 明确不同植

物种的光合作用途径是植物生理生态学研究的内容之一。迄今国内外已经报道过的 C₄ 植物有 1 700 多种, 隶属于 22 科 293 属^[8,9]。国内, 林植芳等^[10] 对广东地区的 C₄ 植物进行过报道, 殷立娟等^[6,11] 分别在 1997 年先后报道了东北样区和中国范围内的 C₃

* 收稿日期: 2004-06-22; 修改稿收到日期: 2005-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270217)

作者简介: 李明财 (1976-), 男 (汉族), 博士研究生。

* 通讯联系人, Correspondence to: LILAI-XING

和 C₄ 植物, 唐海萍等^[12] 研究了内蒙古地区的 C₄ 植物。

青海高原是青藏高原的组成部分, 它的大地构造、地貌形成与演化的历史与整个青藏高原是一致的。平均海拔在 3 000 m 以上, 植物种群大多分布在荒漠草原和高寒草甸上, 对这一极端环境条件下植物种群的生理特性及生态分布的研究引起过学术界的极大兴趣^[13-15]。王启基等^[16] 曾对高寒草甸 C₃ 植物和 C₄ 植物叶片解剖学特征进行过初步研究, 但只是利用叶片横切面有无花环结构(kranz)进行判别。李明财等基于稳定同位素技术研究了青藏高原东部玛多地区植物的光合型^[17], 而对于利用稳定碳同位素技术研究青海高原高寒区 C₄ 植物到目前为止还未见报道。因此本文基于国内外已发表的不同地区的 C₄ 植物名录及实测的青海地区植物的稳定性碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}$), 整理出该区的 C₄ 植物, 并结合它们所处的生态环境, 揭示它们的分布规律, 为研究青海高原高寒地区植物光合生产率的差异和优良牧草的引种驯化, 人工栽培以及持续发展畜牧业提供理论依据。另外, 鉴定和研究该地区的 C₄ 植物及其地理分布, 有助于弥补国内在光合碳同化途径 C₄ 植物划分上在该区的不足。

1 材料与方 法

1.1 材料的收集

根据迄今已发表的世界范围 C₄ 植物名录^[8,9]、中国境内 C₄ 植物名录^[6] 并结合《青海植物志》^[18] 进行一一核对。于 2003 年植物生长旺季(7 月~8 月)在青海省范围内不同海拔地区采集植物叶片, 尽量采到已发表 C₄ 植物, 同时对一些 C₄ 植物常见种属进行大量采集。所有样品均采自开阔平坦的环境下, 以避免局部地貌与微环境对植物同位素比值的影响。每一实验种的材料至少由 10 个独立生长的植物个体混合而成。测定采集到植物叶片其稳定同位素比

值, 以此来鉴定该物种的光合型。同时根据《青海植物志》, 归纳出每种 C₄ 植物的所属科属、生活型及分布区域。

1.2 材料的预处理与测定

总共采集到植物样品 300 余种, 将采集到的 300 余种植物叶片, 用清水洗净、晾干, 置于烘箱中, 在 70℃ 下烘烤 48 h, 使叶片完全干燥, 然后从烘箱取出, 粉碎, 过 200 目筛。制成待测样品。用燃烧法收集植物样品完全燃烧后产生的 CO₂, 将收集的 CO₂ 用 MAT-252 质谱仪分析碳同位素组成。根据稳定碳同位素组成的表达式:

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

根据上式, 计算出本研究收集到的 300 余种植物样品的稳定碳同位素比值。

式中, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{样品}}$ 表示样品的碳同位素比率, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}}$ 为标准的 PDB 同位素比率。样品分析在中国科学院兰州地质研究所进行, 分析误差 $\pm 2\text{‰}$ 。

2 结果与分析

近年来, 碳同位素比值已经成为区分 C₃、C₄ 植物的特征性指标和鉴定植物对 CO₂ 同化途径的有效方法^[19,20], 大多数研究发现, C₄ 植物碳同位素比值 $\delta^{13}\text{C}$ ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) 在 $-6\text{‰} \sim -19\text{‰}$ 之间, 平均为 -12.5‰ , 而 C₃ 植物碳同位素比值在 $-22\text{‰} \sim -34\text{‰}$ 之间, 平均为 -27‰ ^[21,22]。而在笔者收集到的青海高原高寒地区的 300 多种植物中大多数植物稳定碳同位素比值在 $-24\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 之间, 只有少数植物在 $-12\text{‰} \sim -17\text{‰}$ 之间, 二者区分十分明显。根据所测植物 $\delta^{13}\text{C}$ 并结合前人研究结果及《青海植物志》, 认定 52 种植物属于 C₄ 植物, 据此整理出青海高原高寒地区的 C₄ 植物名录, 见表 1。

表 1 青海高原高寒地区 C₄ 植物名录

Table 1 Directory of C₄ plants in high and cold regions of the Qinghai Plateau

科名 Family	种名 Species	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	生活型 Life form	分布区 Distribution	海拔 Altitude above sea level(m)	参考文献 Reference
禾本科 Gramineae	三芒草 <i>Aristida adscensionis</i>	-16.3	一年生草本	循化	1 800	
禾本科 Gramineae	白羊草 <i>Bouteloua ischaemum</i>	-14.3	多年生草本	兴海、尖扎、同仁、循化	1 800~2 600	
禾本科 Gramineae	野牛草 <i>Bouteloua dactyloides</i>	-14.5	多年生草本	西宁	2 200	
禾本科 Gramineae	虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	-15.6	一年生草本	尖扎、同仁、共和、兴海、贵德、贵南、西宁、循化、乐都、民和	1 850~2 600	
禾本科 Gramineae	中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>	-14.0*	多年生草本	无记载		12
禾本科 Gramineae	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	-16.4*	多年生草本	兴海	3 300	11

续表 1 Continued Table 1

禾本科 Gramineae	无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	- 16 0	多年生草本	共和 兴海 西宁	2 400 ~ 2 800	
禾本科 Gramineae	紫马唐 <i>Digitaria violascens</i>	- 12 6	一年生草本	西宁	2 260	
禾本科 Gramineae	稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	- 11 4*	一年生草本	共和 西宁	2 200 ~ 2 520	12
禾本科 Gramineae	冠芒草 <i>Enneapogon brachystachyus</i>	- 14 3	一年生草本	兴海 共和 循化 乐都	1 890 ~ 3 200	
禾本科 Gramineae	大画眉草 <i>Eragrostis cilianensis</i>	- 13 5	一年生草本	共和 兴海 贵南 西宁 循化 乐都	1 880 ~ 2 800	
禾本科 Gramineae	小画眉草 <i>Eragrostis minor</i>	- 13 2	一年生草本	兴海 贵德 贵南 西宁	2 200 ~ 2 600	
禾本科 Gramineae	光稃香茅 <i>Hierochloa glabra</i>	- 13 5*	多年生草本	玉树 玛沁 尖扎 共和兴海 西宁	2 200 ~ 3 800	11
禾本科 Gramineae	青海固沙草 <i>Oryzopsis kokonorica</i>	- 13 9	多年生草本	囊谦 杂多 治多 贵德 贵南 同德 门源 祁连 乌兰 西宁 乐都 兴海共和 刚察 玉树 海晏	2 230 ~ 4 400	
禾本科 Gramineae	稷 <i>Panicum miliaceum</i>	- 16 9	一年生草本	兴海 共和 西宁		
禾本科 Gramineae	中亚狼尾草 <i>Pennisetum longissimum</i>	- 12 8*	多年生草本	杂多 玉树 同仁 西宁 互助	2 230 ~ 3 800	12
禾本科 Gramineae	白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	- 15 1	多年生草本	乐都 玉树 称多 尖扎 同仁 刚察 兴海 共和 贵德 贵南 西宁 化隆 循化 民和 海晏 祁连 乌兰 平安	1 850 ~ 4 000	
禾本科 Gramineae	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	- 15 7	一年生草本	玉树 称多 尖扎 同仁 兴海 共和 贵德 贵南 西宁 化隆 循化 乐都 民和	1 800 ~ 3 600	
禾本科 Gramineae	金色狗尾草 <i>Setaria glauca</i>	- 16 8	一年生草本	西宁 乐都	2 100 ~ 2 500	
禾本科 Gramineae	锋芒草 <i>Tragus racemosus</i>	- 16 3	一年生草本	兴海 共和 贵德	2 200 ~ 2 900	
禾本科 Gramineae	虱子草 <i>Tragus berteronianus</i>	- 13 6*	一年生草本	西宁 乐都	2 230 ~ 2 800	12
禾本科 Gramineae	玉米 <i>Zea mays</i>	- 14 1	一年生草本	乐都 民和	2 000	
苋科 Amaranthaceae	繁穗苋 <i>Amaranthus paniculatus</i>	- 13 6	一年生草本	平安 西宁 循化	2 100 ~ 2 800	
苋科 Amaranthaceae	干穗谷 <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	- 14 9	一年生草本	西宁	1 600 ~ 2 300	
苋科 Amaranthaceae	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	- 13 7*	一年生草本	尖扎 平安 循化 民和 西宁	2 200 ~ 2 800	12
苋科 Amaranthaceae	苋 <i>Amaranthus tricolor</i>	- 13 6	一年生草本	西宁	1 600 ~ 2 500	
藜科 Chenopodiaceae	沙蓬 <i>Atriplex squarrosus</i>	- 11 2	一年生草本	都兰 兴海 共和 贵南 同德 贵德	2 900 ~ 3 200	
藜科 Chenopodiaceae	滨藜 <i>Atriplex patens</i>	- 16 1	一年生草本	共和	2 900	
藜科 Chenopodiaceae	西伯利亚滨藜 <i>Atriplex sibirica</i>	- 15 4	一年生草本	尖扎 格尔木 德令哈 都兰 乌兰 贵南 共和 兴海 西宁 民和	1 900 ~ 3 100	
藜科 Chenopodiaceae	鞑靼滨藜 <i>Atriplex tatarica</i>		一年生草本	共和 茫崖	3 000 ~ 3 100	6, 8
藜科 Chenopodiaceae	轴藜 <i>Axyris amaranthoides</i>	- 11 4*	一年生草本	玉树 门源 互助 乐都	2 400 ~ 4 100	
藜科 Chenopodiaceae	雾滨藜 <i>Bassia dasyphylla</i>		一年生草本	格尔木 德令哈 都兰 共和 贵南 同德	2 700 ~ 3 000	12
藜科 Chenopodiaceae	尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	- 14 1	一年生草本	共和 祁连 门源	2 500 ~ 2 700	
藜科 Chenopodiaceae	盐生草 <i>Halogelion glomeratus</i>	- 13 4	一年生草本	都兰	3 000 以下	
藜科 Chenopodiaceae	西藏盐生草 <i>Halogelion tibeticus</i>	- 12 8	一年生草本	德令哈 乌兰	3 000 ~ 3 500	
藜科 Chenopodiaceae	梭梭 <i>Aloxylon ammoxylon</i>	- 12 4*	小乔木	都兰 格尔木	2 600 ~ 3 000	12
藜科 Chenopodiaceae	黑翅地肤 <i>Kochia melanoptera</i>	- 15 9	一年生草本	都兰 共和	1 900 ~ 2 600	
藜科 Chenopodiaceae	木地肤 <i>Kochia prostrata</i>	- 16 3	半灌木	兴海	2 550	
藜科 Chenopodiaceae	地肤 <i>Kochia scoparia</i>	- 14 9	一年生草本	同仁 格尔木 乌兰 兴海 共和 贵南 同德 乐都 西宁	2 300 ~ 3 300	
藜科 Chenopodiaceae	碱地肤 <i>Kochia sieberiana</i>	- 12 3*	一年生草本	共和 同仁	2 600 ~ 2 900	11
藜科 Chenopodiaceae	蒿叶猪毛菜 <i>Salsola abrotanoides</i>	- 14 6	小灌木或半灌木	德令哈 茫崖 大柴旦 都兰 乌兰 共和 兴海	2 800 ~ 3 500	
藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	- 11 5*	一年生草本	西宁 平安 门源 德令哈 茫崖 大柴旦 都兰 乌兰 共和 兴海 格尔木 循化	1 700 ~ 4 000	12
藜科 Chenopodiaceae	长刺猪毛菜 <i>Salsola paulsenii</i>	- 14 3	一年生草本	河南	3 400	
藜科 Chenopodiaceae	薄翅猪毛菜 <i>Salsola pellucida</i>	- 13 8	一年生草本	都兰 西宁	2 300 ~ 3 200	
大戟科 Euphorbiaceae	地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i>	- 13 9	一年生草本	兴海 尖扎 贵南 西宁 循化 乐都 互助	1 900 ~ 3 250	
蒺藜科 Zygophyllaceae	蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	- 14 3	一年生草本	尖扎 兴海 贵德 贵南 西宁 大通 循化 民和	1 880 ~ 3 250	
景天科 Crassulaceae	瓦松 <i>Orostachys fimbriatus</i>	- 15 6*	多年生草本	同仁 都兰 乌兰 贵南 贵德 西宁 循化 乐都 互助 门源	1 900 ~ 3 500	12
旋花科 Convolvulaceae	欧洲菟丝子 <i>Cuscuta europaea</i>	- 16 6	一年生寄生草本	玉树 囊谦 尖扎 同仁 兴海 湟中 乐都 民和 互助 门源 杂多	2 500 ~ 4 300	
菊科 Compositae	龙蒿 <i>Artemesia dracunculifolia</i>	- 14 4*	多年生草本	泽库 乌兰 德令哈 兴海 共和 刚察 门源	3 100 ~ 3 900	12
菊科 Compositae	碱蒿 <i>Artemesia anethifolia</i>	- 16 9*	二年生草本	兴海 共和 西宁 刚察	2 230 ~ 3 230	12
菊科 Compositae	狗舌草 <i>Tephrosia kirilowii</i>	- 13 9	多年生草本	尖扎 同仁 共和 门源	2 500 ~ 3 500	
眼子菜科 Potamogetonaceae	菹草 <i>Potamogeton crispus</i>		多年生沉水草本	西宁 大通 湟中	2 300	12

注: 带 * 号的植物稳定碳同位素比值来源于文献[11]或[12]。

Note: * Show that the stable carbon isotope ratios of plant is in the references [11] or [12]

从表 1 可以看出青海高原高寒地区 C₄ 植物中禾本科 15 属 21 种, 藜科 9 属 18 种, 苋科 1 属 4 种, 菊科 2 属 3 种, 大戟科、景天科、蒺藜科、眼子菜科、旋花科各 1 属 1 种, 共 9 科 32 属 52 种。从青海高原高寒地区的 C₄ 植物主要集中的科、亚科、属和种的生理生态特征来看, 单子叶植物禾本科中的 C₄ 植物主要集中在画眉草亚科 (Eragrostoidae) 和黍亚科 (Panicoideae), 其中画眉亚科中的虎尾草族 (Chlorideae)、结缕草族 (Zoysieae) 全族以及冠芒草族 (Pappophoreae) 除了小尖隐子草 (*Cleistogenes mucronata*), 三芒草族 (Aristideae) 除三刺草以外, 其余全是 C₄ 植物。黍亚科中的黍族 (Panicoideae)、蜀黍族 (Bothriochloa)、玉蜀黍族 (Maydeae) 全部为 C₄ 植物。而稻亚科 (Oryzoideae) 和早熟禾亚科 (Pooideae) 完全是 C₃ 植物而没有 C₄ 植物。另外, 青海高原高寒地区的 C₄ 植物主要还集中在禾本科锋草属 (*Tragus*)、狼尾草属 (*Pennisetum*) 以及双子叶植物苋科中的苋属 (*Amaranthus*)。所以 C₄ 植物基本上可以反映青海高原高寒地区植物亚科的特征, 同时也可以反映属与种的特征。从青海高原高寒地区的 C₄ 植物分布区域的生态环境及其海拔高度来看, C₄ 植物主要分布在低海拔地区的向阳、高温、干旱缺水或盐碱的荒漠草原和高寒草甸, 大多数 C₄ 植物分布在海拔 3 500 m 以下, 但海拔较高的低纬度地区也有 C₄ 植物的分布, 如玉树州、杂多县的海拔

超过了 4 000 m, 但却有 C₄ 植物的分布 (如欧洲菟丝子 *Cuscuta europaea*、猪毛菜 *Salsola collina*、白草 *Pennisetum centrasianicum*), 超过了认为海拔高于 3 000 m 就没有 C₄ 植物分布的界限^[23]。原因可能是该地区虽然海拔较高, 但纬度较低从而使该地区的年平均温度和生长季节平均温度达到 C₄ 植物生长要求, 温度是限制青藏高原 C₄ 植物分布的关键因子。C₄ 植物的分布情况与生长季平均温度有极显著相关性 (另文报道)。

另外, 根据对青海高原高寒地区 300 多种植物稳定同位素组成研究的结果, 认为国内曾报道的几种植物, 如菊科的大籽蒿 *Artensia sieversiana* (- 27.3‰), 藜科的灰绿藜 *Chenopodium glaucum* (- 26.8‰), 禾本科的垂穗披碱草 *Elymus nutans* (- 26.8‰)、芨芨草 *Achnatherum splendens* (- 27.8‰), 蔷薇科的鹅绒委陵菜 *Potentilla anserina* (- 26.0‰), 应属于 C₃ 植物。

同时也对唐海萍研究内蒙古地区植物对 CO₂ 同化途径时列出的存在有争议的几个植物, 如豆科线叶棘豆 *Oxytropis filiformis* (- 27.6‰), 披针叶黄华 *Themopsis lanceolata* (- 25.6‰), 海乳草 *Glaux maritima* (- 27.1‰), 菊科矮火绒草 *Leontopodium nanum* (- 26.1‰), 这 4 种植物的分布范围也超过了 4 000 m, 而且在较高纬度也有分布, 认为该 4 种植物也应属于 C₃ 植物。

致谢: 部分植物样品承蒙中国科学院西北高原生物研究所陈世龙研究员帮助鉴定, 特此致谢。

参考文献:

- [1] RAGHAVENDRA A S, DAS S R. The Occurrence of C₄ photosynthesis A supplementary list of C₄ plants reported during late 1974-Mid 1977[J]. *Photosynthetica*, 1978, 12: 200 - 208
- [2] HATTERLEY P W. The distribution of C₃ and C₄ grasses in Australia in relation to climate[J]. *Oecologia*, 1983, 57: 113 - 128
- [3] TANG H P (唐海萍), JIANG G M (蒋高明), ZHANG X SH (张新时). Application of discriminant analysis in distinguishing plant photosynthetic types - a case study in northeast China transect (NECT) area[J]. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1999a, 41: 1 132 - 1 138 (in Chinese).
- [4] TANG H P (唐海萍). C₄ plant distribution of along northeast china transect (NECT) and their relation with environmental factors[J]. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1999, 44: 416 - 421 (in Chinese).
- [5] HATTERSLEY P W. The distribution of C₃ and C₄ grasses in Australia in relation to climate[J]. *Oecologia*, 1983, 57: 113 - 128
- [6] YIN L J (殷立娟), LIM R (李美荣). A study on the geographic distribution and ecology of C₄ plants in China I. C₄ plant distribution in China and their relation with regional climatic condition[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, 17: 350 - 363 (in Chinese).
- [7] TANG H P (唐海萍), LIU SH R (刘书润), ZHANG X SH (张新时). The C₄ plants in Inner Mongolia and their eco-geographical characteristics[J]. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1999b, 41: 420 - 424 (in Chinese).
- [8] LIM R (李美荣). A list of C₄ photosynthetic plants (subit) dicotyledon[J]. *Plant Physiol. Commun.* (植物生理学通讯), 1993, 29: 148

- 159(in Chinese).
- [9] LIM R(李美荣). A list of C₄ photosynthetic plants (next) monocotyledon[J]. *Plant Physiol. Commun.* (植物生理学通讯), 1993, 29: 221 - 240(in Chinese).
- [10] LIN ZH F(林植芳), GUO J Y(郭俊彦). New C₄ and CAM photosynthetic pathway plants[J]. *Wuhan Bot Res* (武汉植物研究), 1988, 6: 371 - 374(in Chinese).
- [11] YIN L J(殷立娟), WANG P(王 萍). Distribution of C₃ and C₄ photosynthetic pathways of plants on the steppe of Northeastern China[J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1997, 17(2): 113 - 123(in Chinese).
- [12] TANG H P(唐海萍), LIU SH R(刘书润). The list of C₄ plants in Neimongol Area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium University* (内蒙古大学学报), 2001, 32(4): 431 - 438(in Chinese).
- [13] LIN Q(林 清), WANG SH L(王绍令), ZHAO L(赵 林). The records of atmospheric CO₂ derived from the stable carbon isotope composition of buried plant tissues in perennial frozen lacustrine sediments[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2001, 23(1): 22 - 27(in Chinese).
- [14] QIR H(祁如虎), LI Y ZH(李有忠), FAN J P(范建平). The idioblasts and their ecological significance in leaves of 16 alpine plants[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*. (西北植物学报), 1998, 18(2): 270 - 276(in Chinese).
- [15] ZHANG SH Y(张树源), WU H(武 海), WU SH(吴 姝), et al. Photoinhibition of photosynthesis of plants leaves in Qinghai plateau and Shanghai plain locality[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*. (西北植物学报), 1999, 19(1): 56 - 66(in Chinese).
- [16] WANG Q J(王启基), YANG F T(杨福囤). A preliminary study on the anatomical characteristics of C₃ and C₄ plants in alpine meadow[J]. *Acta Biol Plant Sin*. (高原生物学集刊), 1981, 4: 1 - 10(in Chinese).
- [17] LIM C(李明财), YIX F(易现峰), LI L X(李来兴), 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 Bot Boreal-Occident Sin*. (西北植物学报), 2004, 24(6): 1 052 - 1 056(in Chinese).
- [18] 青海植物志编辑委员会. 青海植物志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1996 - 1999
- [19] LIN ZH F(林植芳). Application of stable carbon isotope in plant physiology and ecology[J]. *Plant Physiol. Commun.* (植物生理学通讯), 1990, 3: 1 - 6(in Chinese).
- [20] STEMBERG L O, DEN ROM J, JOHNSON H B. Isotope ratios of cellulose from plants having different photosynthetic pathways[J]. *Plant Physiology*, 1984, 74: 557 - 561.
- [21] BENDER M M. Variation in the ¹³C/¹²C ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation[J]. *Phytochemistry*, 1971, 10: 1 239 - 1 244
- [22] SMITH B N, EPSTEIN S. Two categories of ¹³C/¹²C ratios for higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1971, 47: 380 - 384
- [23] TIESZEN L L, SENYEMBA M M, LMBAMBA S K, et al. The distribution of grasses and carbon isotope distribution along an altitude moisture gradient in Kenya[J]. *Oecologia*, 1979, 37: 337 - 350