

艾比湖湿地自然保护区盐生植物的水分利用效率*

杨晓东^{1,2} 吕光辉^{1,2**} 王银山^{1,2} 张雪梅^{1,2}

(¹ 新疆绿洲教育部生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; ² 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要 测定了艾比湖湿地自然保护区 3 类盐生植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 及叶片中主要生理指标, 结果表明: 所调查的 3 类盐生植物全部属于 C_3 植物; 3 类盐生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值和水分利用效率差异不显著; 在 3 类盐生植物中, 稀盐型植物的吸收水分和叶片储水能力最强, 而泌盐型植物对盐分胁迫的抗逆能力最大; 水分的亏缺导致 3 种盐生植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、叶片蛋白质、脯氨酸、可溶性糖含量、硝态氮和硝酸还原酶等下降; 盐分环境未对泌盐、拒盐类植物产生胁迫性影响, 但对于稀盐型植物产生了影响。

关键词 $\delta^{13}\text{C}$; Pearson 相关系数; 水分利用效率; 盐生植物; 艾比湖

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)12-2341-06

Water use efficiency of halophytes in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve of Xinjiang.

YANG Xiao-dong^{1,2}, LÜ Guang-hui^{1,2}, WANG Yin-shan^{1,2}, ZHANG Xue-mei^{1,2} (¹ *Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China*; ² *Institute of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12): 2341–2346.

Abstract: This paper measured the leaf $\delta^{13}\text{C}$ value and main physiological indices of three types of halophytes in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve of Xinjiang. These three types of halophytes were all C_3 plants, and had no significant differences in the $\delta^{13}\text{C}$ value and water use efficiency. Among the three types of halophytes, euhalophytes had the greatest capacity to suck and store water, while recretohalophytes had the greatest endurance against salt stress. Water shortage exerted negative effects on the leaf $\delta^{13}\text{C}$ value, contents of protein, praline, soluble sugars, and nitrate, and activity of nitrate reductase. The salt condition in the Reserve did not cause stress on the recretohalophytes and pseudohalophytes, but had negative effects on the euhalophytes in their existence.

Key words: $\delta^{13}\text{C}$; Pearson correlation coefficient; water use efficiency; halophyte; Ebinur Lake.

干旱区土壤水分强烈蒸发, 地表积盐较重, 渗透胁迫下容易土壤盐渍化。而植物由于长期生活于不同的盐渍环境进而分化形成不同类型的盐生植物。根据植物体内盐离子积累和运转的特点, 将盐生植物分为 3 种类型: 泌盐植物、拒盐植物和稀盐植物 (Breckle, 1995; 赵可夫和李法曾, 1999)。在良好且较稳定的环境中, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大小能够很好地反映与植物光合、蒸腾强度相关联的水分利用效率。因此, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以用来间接指示植物的长期水分利用效率 (Schuster *et al.*, 1992; Lajtha &

Michener, 1994), $\delta^{13}\text{C}$ 值越大, 植物水分利用效率越高 (Farquhar & Richards, 1984; Farquhar *et al.*, 1989)。

目前, 对我国青藏高原、黄土高原、沿海等地区植物稳定碳同位素及其水分利用效率的研究已有不少报道。黄建辉等 (2005) 通过测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值发现, 相对于内陆同科植物, 海水中生长的红树科植物具有较高的水分利用效率; 杨成等 (2007) 测定了贵州喀斯特山区灌丛的 12 种主要植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 表明植物生长初期的水分利用效率高于后期, 高海拔处植物水分利用效率高于低海拔处植物。在青藏高原, 李明财等 (2005, 2007) 通过对高寒草甸 28 种高山植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定, 发现叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不

* 国家自然科学基金资助项目 (31060061)。

** 通讯作者 E-mail: ler@xju.edu.cn

收稿日期: 2010-06-30 接受日期: 2010-09-05

同月份存在显著性差异;除时间外, $\delta^{13}\text{C}$ 值还与研究区域、物种数量、种类、叶片成熟度有关(孙爱芝, 2005)。同时,郑淑霞和上官周平(2005)通过测定4种黄土高原地区典型 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,证明近70年4种测定植物的水分利用效率呈降低趋势;宏观尺度上,王丽霞等(2006)测定了从秦岭到蒙古人民共和国北部接近贝加尔湖地区的161个植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,发现植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与年均降水量呈线性负相关关系。干旱区,也有一些学者对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率进行了研究,如祁连圆柏(陈拓等, 2002a, 2002b),梭梭、沙拐枣及柠条等(苏培玺等, 2003, 2005)。但是,对于干旱区荒漠盐生植物的水分利用效率的报道并不多见。本文对3种不同类型盐生植物的碳同位素及叶片的其他生理指标进行了研究,并探讨不同盐生植物的水分利用差异及叶片观测各指标之间的相互关系,以期为干旱区荒漠生态系统中盐生植物的保护和盐渍化过程中植被的恢复重建提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地自然保护区($82^{\circ}36'\text{E}$ — $83^{\circ}50'\text{E}$, $44^{\circ}30'\text{N}$ — $45^{\circ}09'\text{N}$)位于新疆维吾尔自治区境内,是准噶尔盆地西部最低洼地和水盐汇集中心(陈蜀江等, 2006)。总面积 2670.85 km^2 ,年均气温 5°C ,多年平均降水量为 105.17 mm ,潜在蒸发量为 1315 mm ,降水量年内分配不均匀,夏多冬少,气候极端干燥,降水稀少,属典型温带大陆性干旱气候。独特的湿地生态环境,是数百种动、植物生息繁衍的场所,有着其生物资源的多样性。湖区独特的地形使其发育了石漠、砾漠、沙漠、盐漠、沼泽和盐湖等多样化的地貌景观。区内典型地带性土壤为灰漠土、灰棕漠土和风沙土、隐域性土壤为盐(盐渍化)土、草甸土和沼泽土。多样化的土地类型决定了旱生、超旱生、沙生、盐生、湿生、水生等植物群落的形成。

艾比湖湿地自然保护区植物区系属古北界蒙新区北疆荒漠区准噶尔荒漠小区。共有5个植被类型,8个植被亚型,17种群系,其中有裸子植物1科,被子植物52科。主要典型的植被种群有盐穗木(*Halostachys caspica*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、胡杨(*Populus euphratica*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、西伯利亚泡泡刺(*Nitraria sibirica*)、白麻(*Poa cynosuroides*)、芦苇(*Phragmites australis*)、盐

豆木(*Halimodendron halodendron*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)、琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)、花花柴(*Karelinia caspia*)和甘草(*Glycyrrhiza glabra*)。

1.2 材料采集

于2008年6月22日和8月25日在艾比湖湿地盐生植物分布区,采集了35种植物,参考中国盐生植物和新疆盐生植物(赵可夫和李法曾, 1999; 郝金标等, 2006),从中选取了18种盐生植物作为研究对象(表1)。每种植物样品的采集,随机选取独立生长且长势较好的植物个体3~5株,在同一部位采集植物叶片后混合分成2份,一份立即称重后装到信封带回,70 $^{\circ}\text{C}$ 烘干48 h,测定叶片含水量和碳同位素。另一份采集后立即放入低温冰箱(-25°C)带回,测定叶片的若干项生理指标。

1.3 测量方法

叶片含水量(LWC)根据 $\text{LWC}(\%) = [(\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重}] \times 100\%$ 计算。而稳定碳同位素的组成则在兰州大学西部环境教育部重点实验室运用稳定气体同位素质谱仪($\text{DELTA}^{\text{plus}}$)分析,分析结果均相对于国际标准PDB)(Craig, 1957),分析误差 $\leq \pm 0.2\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值依据 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$ 进行计算。

脯氨酸测量采用茚三酮比色法,可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝G-250法,可溶性糖采用苯酚法,硝态氮采用水杨酸硝化法,硝酸还原酶活性采用离体法测定(王学奎, 2006)。具体测定数据见表1。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2003和SAS 8.1软件对数据进行单因素方差分析、相关分析和作图。

2 结果与分析

2.1 植物同位素的组成特点

表1中,18种盐生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围较小(-29.59‰ ~ -26.14‰),根据 C_3 (-22‰ ~ -34‰)和 C_4 (-6‰ ~ -19‰)植物稳定碳同位素比值的分布范围(Bender, 1968, 1971; Smith & Epstein, 1971),可以得知,艾比湖湿地自然保护区内所调查的18种盐生植物光合型均属于 C_3 型。18种盐生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -27.74‰ ,相比全球范围调查的植物稳定碳同位素平均值(-28.74‰)(Körner et al., 1988)明显偏正。可以表明:1)盐生植物是对当地

表 1 3 种盐生植物叶片的各生理指标值
Tab.1 Physiological index of leaves in different types of halophytes

类型	种名	叶片含水量 (%)	蛋白质 (mg·g ⁻¹ FW)	脯氨酸 (μg·g ⁻¹ FW)	可溶性糖 (%)	硝态氮 (mg·g ⁻¹)	硝酸还原酶 (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	δ ¹³ C (‰)
稀盐盐生植物	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>	76.0	15.81±0.23	15.64±0.58	6.33±0.21	0.120±0.002	6.30	-27.65
	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	76.5	6.85±0.29	2.36±0.40	6.77±0.62	0.277±0.018	9.73	-28.12
	盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	62.0	17.98±0.45	52.36±43.42	0.91±0.50	0.273±0.010	3.14	-26.14
	盐角草 <i>Salicornia europaea</i>	84.5	26.02±0.18	49.27±0.15	4.04±0.12	0.052±0.019	5.38	-29.52
	碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	82.5	16.64±1.23	16.83±0.81	2.24±0.05	0.149±0.028	4.12	-29.19
	猪毛菜属 <i>Salaola</i>	77.5	37.56±0.91	70.53±3.49	3.48±0.09	0.254±0.003	1.32	-26.00
	黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>	79.5	24.15±0.17	103.67±0.30	6.72±0.21	0.205±0.028	10.57	-27.91
	西伯利亚泡泡刺 <i>Nitraria sibirica</i>	76.0	7.35±1.03	302.26±0.00	6.11±0.04	0.018±0.012	4.26	-28.60
拒盐盐生植物	光果甘草 <i>Glycyrrhiza glabra</i>	52.0	12.72±0.04	46.69±0.66	21.96±1.96	0.193±0.004	19.26	-27.38
	疏叶骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	65.0	15.26±0.06	21.79±1.42	16.63±0.46	0.177±0.026	5.10	-29.59
	花花柴 <i>Karelinia caspia</i>	83.0	10.48±0.11	3.85±0.28	7.72±0.79	0.237±0.015	11.48	-29.27
	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	58.5	—	13.85±0.35	23.42±0.50	0.105±0.016	—	-25.67
	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	62.5	33.45±0.50	45.22±0.25	5.44±0.32	—	1.04	-27.28
	琵琶柴 <i>Reaumuria songarica</i>	49.0	10.48±0.17	302.26±0.00	10.82±0.35	0.234±0.010	9.73	-27.37
泌盐盐生植物	细穗怪柳 <i>Tamarix leptostachys</i>	44.0	8.65±0.18	112.48±5.57	13.32±0.90	0.229±0.019	11.97	-27.34
	多枝怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	52.0	6.47±0.12	20.43±1.57	9.10±0.58	0.311±0.016	10.43	-27.16
	大叶补血草 <i>Limonium gmelinii</i>	68.0	5.44±0.09	23.51±0.30	6.96±0.25	0.070±0.016	8.61	-27.00
	胡杨 <i>Populus euphratica</i>	64.8	6.82±0.15	8.77±0.07	15.24±0.47	0.190±0.006	4.17	-29.03

数据为平均值±标准误。

降水量少,蒸发强烈的气候背景的适应。因为当降水量不足,空气湿度和土壤含水量降低时,植物为了减少水分的蒸发,往往会关闭一部分气孔,引起植物叶片内部 CO₂ 浓度下降。如果此时植物光合速率仍维持正常水平,植物对 CO₂ 的识别能力势必降低,从而使得叶片碳同位素值升高(Ma *et al.* , 2005)。2)盐生植物是对土壤盐碱环境的适应。研究表明,艾比湖湿地自然保护区的土壤盐分含量较高(傅德平等,2008),而对于生活在其上的植物,无

论是盐生、还是非盐生,都存在植物的 δ¹³C 随着盐度的增加而减小,即植物的 δ¹³C 值随盐度的增加而增大的趋势(Farquhar *et al.* ,1989)。

2.2 稀盐、泌盐、拒盐植物水分利用效率的比较

艾比湖湿地自然保护区所调查稀盐型植物的 δ¹³C 的平均值为-27.89‰,泌盐型植物为-27.58‰,拒盐型植物为-27.84‰,相互的差异不显著(表 2),表明在艾比湖湿地自然保护区中,3 类不同类型的盐生植物对水分利用效率不存在明显的差异。

表 2 3 种类型盐生植物叶片 δ¹³C 值和生理指标比较
Tab.2 Comparison of foliar δ¹³C values and physiological indexes of different type halophytes

类型	δ ¹³ C 值 (‰)	叶片含水量 (%)	蛋白质 (mg·g ⁻¹ FW)	脯氨酸 (μg·g ⁻¹ FW)	可溶性糖 (%)	硝态氮 (mg·g ⁻¹)	硝酸还原酶 (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
稀盐型	-27.89 A	76.81 A	19.05 A	76.62 A	4.58 A	0.16 A	5.60 A
泌盐型	-27.58 A	55.56 B	7.57 A	93.49 A	11.09 B	0.20 A	8.98 A
拒盐型	-27.84 A	64.20 B	17.98 A	26.28 A	15.03 B	0.17 A	9.22 A

不同字母代表组间存在差异。

但叶片含水量和可溶性糖含量在 3 类不同的盐生植物中存在差异。叶片含水量均值排序为稀盐型>拒盐型>泌盐型。一般认为,叶片含水量的大小直接表明了植物吸收水分和叶片储水能力的大小。所以,稀盐型植物相对于泌盐、拒盐型植物具备较强的吸收水分和叶片储水能力。

可溶性糖含量在拒盐型植物中含量最高,泌盐型次之,稀盐型最低;与 3 类盐生植物对盐分胁迫的适应方式一致。拒盐型植物通过减少对盐分的吸收或减少盐分向上运输,从而将盐分控制在根中或根茎中来减轻盐害(傅德平等,2008),因此,这类植物有可能通过积累较多的糖类物质从而保持较高的细胞溶质浓度,降低细胞渗透势来吸收水分。

脯氨酸值在 3 类盐生植物中,不存在显著的差异,但泌盐型植物的含量最高,为 $93.49\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

FW。脯氨酸值常作为植物抗逆能力的指标之一,在艾比湖湿地自然保护区中,3 类盐生植物对盐渍环境不存在显著的适应性差异。

2.3 3 种盐生植物生理指标间的相关性

植物在生理干旱的情况下影响稳定碳同位素组成,水分亏缺可使植物对¹³C 的分馏能力减弱,即:叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以同时反映出环境和植物体本身水分的亏缺程度。稀盐类植物叶片含水量与叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著负相关(-0.72)(表 3),拒盐、泌盐类植物也表现出负相关性,但不显著(表 4、表 5)。同时,3 类盐生植物的叶片含水量与叶片蛋白质、脯氨酸、可溶性糖含量、硝态氮、硝酸还原酶呈负相关(表 3~表 5),说明水分亏缺同样也影响着植物的叶片生理过程。

稀盐型盐生植物可溶性糖和硝态还原酶呈显著

表 3 稀盐植物各指标间 Pearson 相关系数

Tab.3 Pearson's correlation coefficients of euhalophytes between different indexes

项目	$\delta^{13}\text{C}$ 值	叶片含水量	蛋白质	脯氨酸	可溶性糖	硝态氮	硝酸还原酶
$\delta^{13}\text{C}$ 值	1						
叶片含水量	-0.72^*	1					
蛋白质	0.38	0.20	1				
脯氨酸	-0.10	-0.05	-0.22	1			
可溶性糖	-0.29	0.36	-0.34	0.25	1		
硝态氮	0.70	-0.48	0.21	-0.54	-0.23	1	
硝酸还原酶	-0.35	0.24	-0.38	-0.16	0.73^*	0.10	1

* * $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

表 4 拒盐植物各指标间 Pearson 相关系数

Tab.4 Pearson's correlation coefficients of recretahalophytes between different indexes

项目	$\delta^{13}\text{C}$ 值	叶片含水量	蛋白质	脯氨酸	可溶性糖	硝态氮	硝酸还原酶
$\delta^{13}\text{C}$ 值	1						
叶片含水量	-0.63	1					
蛋白质	0.37	-0.25	1				
脯氨酸	0.27	-0.72	0.53	1			
可溶性糖	0.45	-0.67	-0.45	0.02	1		
硝态氮	-0.77	0.61	-0.3	-0.03	-0.61	1	
硝酸还原酶	0.09	-0.22	-0.74	0.03	0.56	0.22	1

* * $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

表 5 泌盐植物各指标间 Pearson 相关系数

Tab.5 Pearson's correlation coefficients of pseudohalophytes between different indexes

项目	$\delta^{13}\text{C}$ 值	叶片含水量	蛋白质	脯氨酸	可溶性糖	硝态氮	硝酸还原酶
$\delta^{13}\text{C}$ 值	1						
叶片含水量	-0.35	1					
蛋白质	0.04	-0.74	1				
脯氨酸	0.24	-0.58	0.93^*	1			
可溶性糖	-0.81	-0.22	0.36	0.04	1		
硝态氮	0.00	-0.73	0.42	0.22	0.28	1	
硝酸还原酶	0.85	-0.77	0.35	0.37	-0.38	0.35	1

* * $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

正相关,拒盐类植物为不显著的正相关,而泌盐类植物则呈不显著的负相关。这正好与3类盐生植物的抗盐机制相符合。稀盐型植物消耗存储的有机糖类,从外界吸收大量盐离子,并用吸收和存储的大量水分来稀释,降低了盐分浓度,从而减轻了对酶活性的抑制。而拒盐、泌盐型植物则通过积累较多的糖类降低细胞渗透势来吸收水分,保证体内的盐分含量较低,减轻了对酶活性的抑制(郗金标等,2006)。因而,拒盐型和泌盐型植物的硝酸还原酶活性较高,稀盐型最低。

蛋白质和脯氨酸在泌盐类植物中呈显著正相关,拒盐类植物也为正相关,而吸盐型植物表现出不显著的负相关。一般认为,随着盐渍化趋势的加重,会使植物蛋白质合成受到抑制而蛋白质分解受到促进,导致植物脯氨酸含量增加(赵可夫和李法曾,1999),而植物又通过增加的脯氨酸,来改变细胞的胞质渗透剂(Delauney & Verma,1993)、酶活性、细胞结构的承受性(Kishor *et al.*,1995)及对自由基的清除(van Rensburg *et al.*,1993),相对增加了植物对盐渍环境的适应。泌盐、拒盐类植物的蛋白质和脯氨酸表现为正相关,这可能是由于泌盐、拒盐类植物抗盐胁迫的能力较强,而艾比湖湿地自然保护区内的盐分含量还不足以使蛋白质合成受到抑制,使蛋白质分解以增加脯氨酸含量的程度。但这种盐分环境可能对于稀盐型植物造成了影响,致使蛋白质和脯氨酸表现为不显著的负相关。

3类盐生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片蛋白质、脯氨酸、可溶性糖含量、硝态氮、硝酸还原酶无明显的相关趋势,表现较为复杂。Pearson相关系数在吸盐类植物中,正值9对,负值12对;在拒盐类植物中,正值10对,负值11对;而在泌盐植物中,正值12对,负值8对,但3类盐生植物的相关正负值大致数目相等,这可能是由于3类盐生植物的遗传差异造成的,也可能是对干旱区水分和盐分胁迫环境下植物通过生理调节平衡的一种体现。

3 结 论

艾比湖湿地自然保护区所调查的3类盐生植物中不存在有 C_4 植物,植物光合型均属于 C_3 。盐生植物的稳定碳同位素平均值为 -27.74‰ ,相比全球范围调查的植物稳定碳同位素平均值(-28.74‰)明显偏正。且3类盐生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值相互的差异不显著,表明3类不同类型的盐生植物对水分

利用效率不存在明显的差异。

在3类盐生植物中,稀盐型植物的叶片平均含水量值最高,即相对于泌盐、拒盐型植物,它具备较强的吸收水分和叶片储水能力。脯氨酸值在3类盐生植物中,不存在显著的差异,但泌盐型植物的含量最高,表明在艾比湖湿地自然保护区中,3类盐生植物对盐渍环境不存在显著的适应性差异。

对各指标与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间、各指标之间的Pearson相关分析表明,3类盐生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片蛋白质、脯氨酸、可溶性糖含量、硝态氮、硝酸还原酶无明显的相关趋势,表现复杂,各指标间的相关正负值大致数目相等,是对干旱区水分和盐分胁迫环境下植物通过生理调节平衡的一种体现。水分的亏缺对3类盐生植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均起着负影响,同样,水分亏缺也负影响着各叶片生理指标。脯氨酸和蛋白质在泌盐、拒盐类植物表现为正相关,而稀盐型表现为不显著的负相关,说明艾比湖湿地自然保护区内的盐分环境,还不足对泌盐、拒盐类植物产生影响,但这种盐分环境可能已对稀盐型植物产生了影响,需进一步研究。

参考文献

- 陈拓,冯虎元,徐世建. 2002a. 荒漠植物叶片碳同位素组成及其水分利用效率. 中国沙漠, **22**(3): 288-291.
- 陈拓,马健,冯虎元,等. 2002b. 阜康典型荒漠 C_3 植物稳定碳同位素值的环境分析. 干旱区地理, **25**(4): 342-345.
- 陈蜀江,侯平,李文华,等. 2006. 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社.
- 傅德平,何葵,袁月,等. 2008. 艾比湖湿地植物群落特征与土壤环境关系研究. 江西农业学报, **20**(5): 10-109.
- 黄建辉,林光辉,韩兴国. 2005. 不同生境间红树科植物水分利用效率的比较研究. 植物生态学报, **29**(4): 530-536.
- 李明财,黎贞发,易现峰,等. 2007. 青藏高原东部高寒草甸植物 $\delta^{13}\text{C}$ 年间变化及其环境分析. 生态环境, **16**(4): 1205-1210.
- 李明财,易现峰,李来兴,等. 2005. 青藏高原东部典型高山植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化. 西北植物学报, **25**(1): 77-81.
- 苏培玺,陈怀顺,李启森,等. 2003. 河西走廊中部沙漠植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示. 冰川冻土, **25**(5): 597-602.
- 苏培玺,严巧嫡,陈怀顺. 2005. 荒漠植物叶片或同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率研究. 西北植物学报, **25**(4): 727-732.

- 孙爱芝, 马玉贞, 伍 婧, 等. 2005. 环境因子与植物体 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系研究. 干旱区地理, **28**(3): 538–541.
- 王丽霞, 李心清, 郭兰兰. 2006. 中东干旱半干旱区 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布及其对气候的响应. 第四纪研究, **26**(6): 955–961.
- 王学奎. 2006. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 郝金标, 张福锁, 田长彦. 2006. 新疆盐生植物. 北京: 科学出版社.
- 杨 成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 2007. 喀斯特山区植物碳同位素组成特征及其对水分利用效率的指示. 中国岩溶, **26**(2): 105–121.
- 赵可夫, 李法曾. 1999. 中国盐生植物. 北京: 科学出版社.
- 郑淑霞, 上官周平. 2005. 近 70 年来黄土高原典型植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化研究. 植物生态学报, **29**(2): 289–295.
- Bender MM. 1968. Mass spectrometric studies of carbon-13 variations in corn and other grasses. *Radiocarbon*, **10**: 468–472.
- Bender MM. 1971. Variation in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plants to the pathway of carbon dioxide fixation. *Phytochemistry*, **10**: 1239–1244.
- Breckle SW. 1995. How do halophytes overcome salinity? // Khan MA, Ungar IA, eds. *Biology of Salt Tolerant Plants*. Book Crafters, Michigan, USA: 199–213.
- Craig H. 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **12**: 133–149.
- Delauney AJ, Verma DP. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant Journal*, **4**: 215–223.
- Farquhar GD, Hubick KT, Condon AG, et al. 1989. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency // Rundel PW, Ehleringer JR, Nagy KA, eds. *Stable Isotope in Ecological Research*. New York: Springer-Verlag: 21–24.
- Farquhar GD, Richards RA. 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Australian Journal of Plant Physiology*, **11**: 539–553.
- Kishor KPB, Hong Z, Miao GH, et al. 1995. Over expression of $\Delta^1\text{-pyrroline-5-carboxylate synthetase}$ increase proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. *Plant Physiology*, **108**: 1387–1394.
- Körner CH, Farquhar GD, Roksandic Z. 1988. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude. *Oecologia*, **74**: 623–634.
- Lajtha K, Michener RH. 1994. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. London: Blackwell Scientific Publications.
- Ma JY, Chen T, Qiang WY, et al. 2005. Correlations between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors in desert plant *Reaumuria songorica* (Pall.) Maxim. *Journal of Integrative Plant Biology*, **47**: 1065–1073.
- Schuster WSF, Sandquist DR, Phillips SL, et al. 1992. Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan. *Oecologia*, **91**: 332–337.
- Smith BN, Epstein S. 1971. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, **47**: 380–384.
- van Rensburg L, Kruger CHJ, Kruger H. 1993. Proline accumulation as drought-tolerance selection criterion: Its relationship to membrane integrity and chloroplast ultrastructure in *Nicotiana tabacum* L. *Plant Physiology*, **141**: 188–194.

作者简介 杨晓东, 男, 1984 年生, 硕士研究生. E-mail: xjyangxd@sina.com
责任编辑 魏中青
