

西北油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征与环境因子和叶片矿质元素的关系

李善家¹ 张有福^{2,3} 陈拓^{3*}

¹兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050; ²河南科技大学农学院, 洛阳 471003; ³中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000

摘要 选取甘肃、宁夏及内蒙古油松(*Pinus tabulaeformis*)10个天然种群, 通过测定油松叶片稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)和元素含量等特征, 分析了油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征及其与环境气候因子和叶片矿质元素含量之间的关系。研究表明, 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围在 -28.68‰ – -25.02‰ 之间, 平均值为 -26.82‰ ; 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海拔、经度之间相关性不显著, 与纬度之间呈显著正相关, 与年降水量、年平均温度之间均呈显著负相关, 说明年平均温度和年降水量是决定油松 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏能力差别及生长的主要限制因子; 叶片元素N、P、K、Si、Ca、Fe含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显的相关性, 其中叶片N、P、K含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著负相关, Si、Ca、Fe含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著正相关, 可见不同种群间 $\delta^{13}\text{C}$ 组成差异可反映植物营养元素含量的变化状况。不同生境条件下环境气候因子和矿质元素含量的这种响应模式在一定程度上反映和影响了以油松为建群种和优势种的生态系统的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特性。

关键词 相关性, 环境因子, 叶片元素含量, 油松, 稳定碳同位素组成

Relationships between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors and leaf element contents of *Pinus tabulaeformis* in northwestern China

LI Shan-Jia¹, ZHANG You-Fu^{2,3}, and CHEN Tuo^{3*}

¹College of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; ²College of Agricultural, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; and ³State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract

Aims Our objective was to analyze relationships between foliar stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and environmental factors and leaf element contents in *Pinus tabulaeformis*, which is widely distributed in northwestern China.

Methods Leaf samples were taken in ten natural populations of *P. tabulaeformis* from Gansu, Ningxia and Inner Mongolia. The $\delta^{13}\text{C}$ was determined using an isotope mass spectrometer. Environmental factors were recorded by Magellan GPS320 and from nearby weather stations. Leaf element contents were measured with low vacuum scanning electron microscope and X-ray energy dispersive spectroscopy. Carbon content was estimated with the potassium dichromate method, and nitrogen content was measured with the micro-Kjeldahl method. Data were evaluated with Excel 2003 and SPSS 13.0 analysis of correlation and regression.

Important findings Foliar $\delta^{13}\text{C}$ ranged from -28.68‰ to -25.02‰ , with an average value of -26.82‰ . Foliar $\delta^{13}\text{C}$ did not closely correlate with altitude and longitude, but was significantly positively correlated to latitude and negatively correlated with annual mean precipitation and temperature. Therefore, $\delta^{13}\text{C}$ in different natural populations of *P. tabulaeformis* is significantly influenced by environmental factors, and annual mean temperature and precipitation are essential factors in $\delta^{13}\text{C}$'s capability of fractionation and growth. Leaf N, P and K content were significantly negatively correlated with $\delta^{13}\text{C}$; however, Si, Ca and Fe content were significantly positively correlated with $\delta^{13}\text{C}$. Different $\delta^{13}\text{C}$ in different natural populations reflects changes in plant nutrient element content. Response mode of climatic factors and element content under different habitat conditions reflected and affected properties of $\delta^{13}\text{C}$ change in natural populations of *P. tabulaeformis*.

Key words correlation, environmental factors, leaf element contents, *Pinus tabulaeformis*, $\delta^{13}\text{C}$

稳定同位素技术因具有示踪、整合和指示等多项功能, 以及检测快速、结果准确等特点, 已经被广泛地应用于全球变化、环境科学和植物生理生态等诸多的研究领域(Farquhar *et al.*, 1989; 冯虎元等, 2000; 林光辉, 2010), 植物稳定碳同位素(^{13}C)的分馏研究也已成为植物生态学和全球碳循环研究的核心问题之一(史作民等, 2004; Zhao *et al.*, 2006)。植物在吸收 CO_2 进行光合作用时, 导致碳同位素的分馏, 这种分馏作用既受遗传因素控制, 也直接或间接地受到植物生长时期环境状况的影响。植物是环境变化的指示器, 叶片是植物的主要光合器官, 也是对环境变化较为敏感的营养器官, 其特征能体现环境因子变化的影响或植物对环境的适应(苏培玺和严巧娣, 2008)。通过植物 ^{13}C 的示踪作用及其变化情况, 就能了解过去环境中稳定同位素组成及与之相关联的一系列环境气候信息(郑永飞和陈江峰, 2000; 王国安和韩家懋, 2001a), 诸如海拔、温度、降水量、湿度、日照时数等。植物的营养元素特征反映了植物在一定生境下从土壤吸收或积累的矿物成分养分的能力及代谢特征(马剑英等, 2008a), 如今, 在全球范围的地球系统变化情况下, 如何很好地理解多种尺度上植物与营养元素之间的关系, 是植物生态学家和植物生理学家面临的挑战(秦海等, 2010)。

西北地区气候条件恶劣, 干旱少雨, 植物物种多样性贫乏, 生态系统脆弱。油松(*Pinus tabulaeformis*)作为我国的乡土树种, 在西北地区广泛分布, 是我国温带、暖温带半干旱、半湿润地区的基本树种, 以其根系发达、抗寒耐旱、木材坚实、树姿雄伟而成为造林、绿化的首选树种, 在林业上占有重要地位, 具有重要的生态和经济价值(陈有民, 2003)。目前, 大量的研究集中在运用 ^{13}C 技术探讨不同地区或同一地区不同种植物 ^{13}C 的组成特点与环境因子的关系(李相博和陈践发, 1998; 李相博等, 1999; 苏波等, 2000; 冯虎元等, 2001; 陈拓等, 2004), 对于同种植物 ^{13}C 在大区域复杂自然环境内的空间变化规律、气候响应还缺乏系统的研究, 并且植物叶片营养元素对 ^{13}C 分馏作用的影响尚未见报道。为此, 本文试图通过对中国西北地区10个不同自然种群油松叶片稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)特征、环境气候响应进行分析以及在大尺度上研究 $\delta^{13}\text{C}$ 值与营养元素之间的关系, 进而探究不同生境

条件对植物叶片生理生态特性的影响, 为西北地区植物生态适应策略和响应机制, 自然生态系统的保护、恢复和重建, 以及利用植物指示环境变化和生物地球化学循环模式提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区范围及样品采集

样品于2008年10月采自中国西北以油松为主要建群种和优势种的典型分布区($33^{\circ}50' - 38^{\circ}58' \text{ N}$, $103^{\circ}22' - 108^{\circ}08' \text{ E}$, 海拔1 551–2 541 m)。该区域多年平均气温 $4.9 - 12.7^{\circ}\text{C}$, 年降水量 $193.5 - 525.9 \text{ mm}$, 其环境因子数据取自采样点附近气象站及全球卫星定位导航仪(Magellan GPS320, San Dimas, CA, USA)的测定记录, 采样地点见图1和表1。选取10个不同位点, 每个位点选择2–3个自然种群, 在每一个种群中, 间隔20 m以上分单株随机采集生长在开阔、平坦、距离村落较远区域以保证生长的环境有充足的光照, 同时尽可能避免人为活动对其同位素组分的影响。考虑到植株个体间的差异, 采集样品均为15–30棵基本同龄的植株个体的当年生叶, 混匀为一个样品, 采后立即放入液氮中保鲜, 每个样品设3个重复, 带回实验室分析测定。

1.2 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 分析测定

将样品在实验室内用超纯水洗净并自然晾干, 置于 70°C 烘箱至恒量, 粉碎至均匀后过80目筛制成供试样品。植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室用Flash EA1112元素分析仪-Conflo III-Delta Plus同位素质谱联用仪(Thermo Fisher, Wacldorf, Germany)进行, 分析结果均相对于国际标准物质PDB (Pee Dee River Belemnites Standard), 分析精度 $\pm 0.2\%$, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值依据下面公式进行计算:

$$\delta^{13}\text{C}(\%) = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_L - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_S}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_S} \times 1000$$

式中, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_L$ 是植物叶片 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比率, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_S$ 是国际通用标准物质PDB的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率。

1.3 植物叶片元素含量测定

在中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室进行。按照Harvey等(1985)的方法, 将烘干的样品置于玛瑙研钵中研磨成粉末, 用双面胶粘在铝制的平板上, 置于JSM-5700LV低真空扫

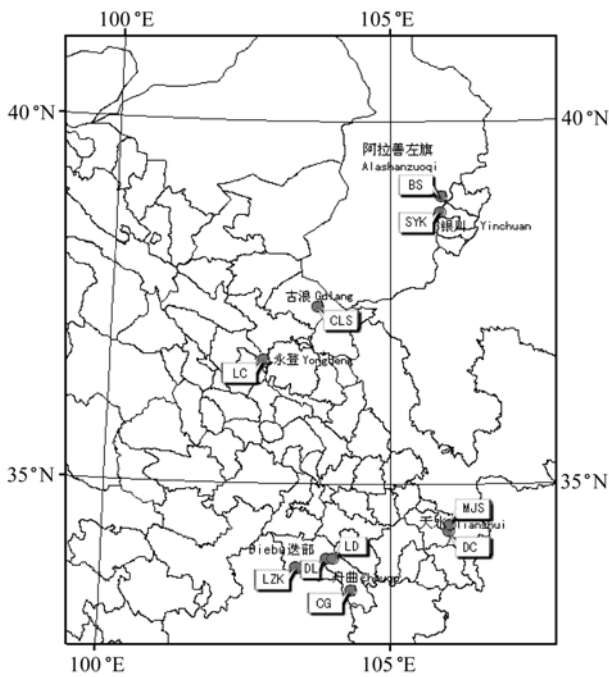


图1 采样点示意图。BS, 阿左旗北寺林场; CG, 舟曲县查岗林场; CLS, 古浪县昌岭山; DC, 天水党川林场; DL, 迭部县达拉林场; LC, 永登县连城; LD, 迭部县洛大林场; LZK, 迭部县腊子口; MJS, 天水麦积山; SYK, 银川苏峪口。
Fig. 1 Map of the study area in northwestern China, circles indicate the sample site. 度BS, Alashanzuoqi Beisi Forest; CG, Zhouqu Chagang Forest; CLS, Gulang Changling Mountains; DC, Tianshui Dangchuan Forest; DL, Diebu Dala Forest; LC, Yongdeng Liancheng; LD, Diebu Luoda Forest; LZK, Diebu Lazikou; MJS, Tianshui Maiji Mountains; SYK, Yinchuan Suoyukou.

描电子显微镜(JEOL, Tokyo, Japan), X射线能量色散谱仪(NORAN, Middleton, USA)上进行能谱扫描, 对叶片元素组成进行定性和定量分析, 测得植物叶片中钾(K)、钙(Ca)、磷(P)、硅(Si)、硫(S)、镁(Mg)、氧(O)、铁(Fe)、氯(Cl)、铝(Al)元素含量。植物叶片全碳(LTC)含量采用重铬酸钾、硫酸氧化-外加热法测定。植物全氮(LTN)含量采用微量凯氏法(李合生, 2000)测定, 仪器为DK6、UDK140分析仪(VELP, Usmate, Italy), 每个样品重复测定3次。

2 结果和分析

2.1 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的基本特征

表1总结了油松10个天然种群叶片的 $\delta^{13}\text{C}$, 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围在 -28.68‰ – -25.02‰ 之间, 变化幅度为 3.66‰ , 平均值为 -26.82‰ 。其中内蒙古阿左旗北寺林场油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大, 为 -25.02‰ ; 而甘肃省天水市石门党川林场油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小, 为 -28.68‰ 。 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围在 -35‰ – -20‰ 之间, 说明油松采用 C_3 植物光合代谢途径, 属于 C_3 植物; 同一树种不同生境 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化幅度大概在 3‰ – 5‰ 之间, 主要是环境效应导致了 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异。

2.2 环境气候因子对油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

各种环境因子与油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成之间的相关性和显著性关系见图2, 研究结果显示, 西北地区

表1 油松采样点信息和稳定碳同位素组成

Table 1 The sampling site information and their values of stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of *Pinus tabulaeformis*

种群代号 Code of population	地点 Site	海拔 Elevation (m)	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	温度 Temperature (°C)	降水量 Precipitation (mm)	稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ (‰)
CLS	古浪县昌岭山 Gulang Changling Mountains	2 310	37°26'	103°41'	4.90	306.70	-25.32
MJS	天水麦积山 Tianshui Maiji Mountains	1 551	34°20'	106°00'	11.62	433.89	-27.87
DC	天水党川林场 Tianshui Dangchuan Forest	2 029	34°26'	106°08'	11.62	433.89	-28.68
CG	舟曲县查岗林场 Zhouqu Chagang Forest	2 036	33°33'	104°20'	12.70	473.37	-28.47
LZK	迭部县腊子口 Diebu Lazikou	2 094	34°08'	103°52'	8.16	507.55	-27.60
DL	迭部县达拉林场 Diebu Dala Forest	2 541	33°50'	103°22'	10.58	525.90	-27.27
LD	迭部县洛大林场 Diebu Luoda Forest	1 985	33°58'	103°54'	6.16	433.96	-26.49
BS	阿左旗北寺林场 Alashanzuoqi Beisi Forest	2 138	38°58'	105°54'	7.60	208.50	-25.02
SYK	银川苏峪口 Yinchuan Suyukou	1 946	38°44'	105°54'	8.20	193.50	-25.10
LC	永登县连城 Yongdeng Liancheng	2 085	36°41'	102°44'	5.90	290.20	-26.35
平均值 Mean							-26.82

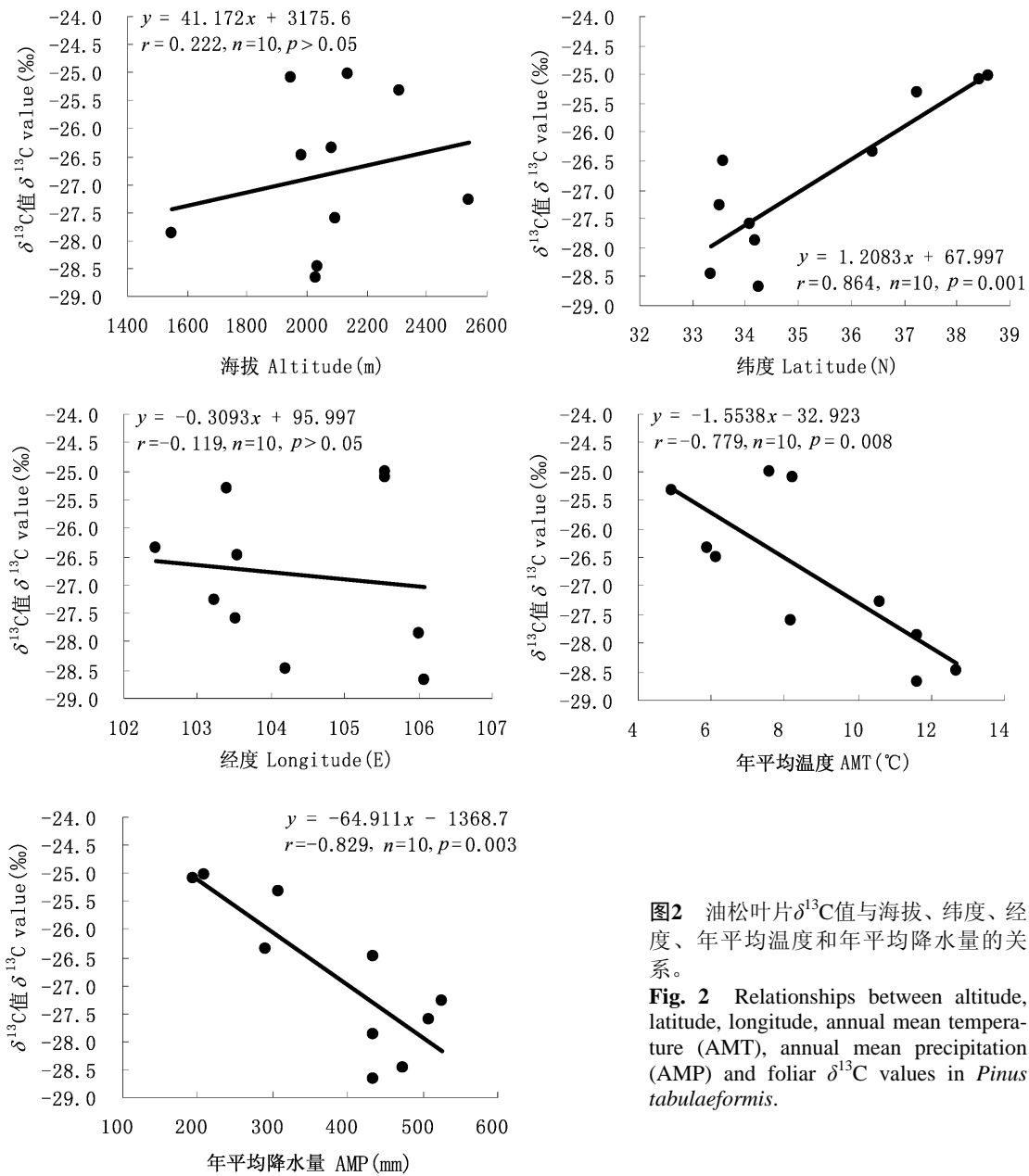


图2 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海拔、纬度、经度、年平均温度和年平均降水量的关系。
Fig. 2 Relationships between altitude, latitude, longitude, annual mean temperature (AMT), annual mean precipitation (AMP) and foliar $\delta^{13}\text{C}$ values in *Pinus tabulaeformis*.

油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海拔之间没有显著的相关关系($r_{\text{海拔}} = 0.222$, $p = 0.537$), 与纬度之间呈极显著正相关($r_{\text{纬度}} = 0.864$, $p = 0.001$), 与经度之间没有显著的相关关系($r_{\text{经度}} = -0.119$, $p = 0.744$), 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年降水量和年平均温度之间均呈极显著负相关($r_{\text{降水量}} = -0.829$, $p = 0.003$; $r_{\text{年平均温度}} = -0.779$, $p = 0.008$)。可见植物中保存了自然环境变化的大量信息, 说明纬度、年平均温度和年降水量是影响该地区油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要限制因素。

2.3 西北地区油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与元素含量的关系

表2显示了油松叶片元素含量信息, 分析结果

显示, 油松叶片中12种元素含量大小顺序为 $\text{C} > \text{K} > \text{Ca} > \text{P} > \text{Si} > \text{S} > \text{Mg} > \text{O} > \text{Fe} > \text{Cl} > \text{Al} > \text{N}$ 。油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各元素含量的相互关系见表3, 结果显示 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片元素K含量之间呈极显著负相关($r_{\text{K}} = -0.941$, $p < 0.01$), 与叶片元素N、P含量的负相关性较弱($r_{\text{N}} = -0.644$, $r_{\text{P}} = -0.635$, $p < 0.05$), 与叶片Ca含量之间呈极显著正相关($r_{\text{Ca}} = 0.790$, $p < 0.01$), 与叶片Si、Fe含量($r_{\text{Si}} = 0.697$, $r_{\text{Fe}} = 0.674$, $p < 0.05$)的正相关性较弱。而油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片C、O、Mg、S、Al、Cl含量之间没有显著的相关关系($p > 0.05$)。可以认为不同居群间油松叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异

表2 油松叶片元素含量分析结果(%)

Table 2 Results of leaf element contents in *Pinus tabulaeformis* (%)

种群代号 Code of population	N	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
CLS	0.65	50.69	0.62	3.21	2.13	7.60	5.56	3.95	0.93	33.44	39.51	3.05
MJS	0.74	48.71	—	2.35	—	1.75	6.44	3.28	0.40	46.71	38.43	0.64
DC	1.13	62.85	4.73	2.67	1.00	3.13	7.39	3.35	—	52.58	23.74	1.40
CG	0.86	47.09	0.83	2.99	0.49	1.90	10.10	2.44	2.05	50.21	28.32	0.67
LZK	0.73	48.25	1.22	2.57	0.42	1.91	6.84	2.61	0.94	43.39	39.56	0.54
DL	0.65	49.78	1.82	3.68	1.48	4.98	7.24	3.07	—	46.35	29.84	1.54
LD	0.77	52.61	2.13	2.38	0.40	1.76	7.74	2.91	—	45.97	36.16	0.54
BS	0.57	44.76	1.97	3.27	1.55	6.13	5.41	3.33	—	29.63	46.05	2.66
SYK	0.80	55.53	1.38	4.03	1.22	4.21	7.00	3.54	1.23	35.13	40.71	1.56
LC	0.70	49.10	0.87	3.86	0.87	4.08	6.88	4.24	1.77	38.19	37.93	1.31
平均值 Mean	0.76	50.94	1.73	3.10	1.06	3.75	7.06	3.27	1.22	42.16	36.02	1.39

“—”表示相应采样点没有测得元素含量。种群分布地点同表1。

The corresponding sampling points haven't measured element contents. Population site see Table 1.

表3 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片元素含量、环境气候因子之间的相关性分析Table 3 Correlations coefficient between foliar $\delta^{13}\text{C}$ values and leaf elements concentration, environmental factors in *Pinus tabulaeformis*

测试项目 Test items	$\delta^{13}\text{C}$	AMT	AMP	N	C	Mg	Si	P	S	K	Ca
AMT	-0.779**										
AMP	-0.829**	0.526									
N	-0.644*	0.523	0.282								
C	-0.234	0.147	0.023	0.815**							
Mg	0.545	-0.258	-0.560	-0.309	-0.060						
Si	0.697*	-0.501	-0.575	-0.477	-0.104	0.586					
P	-0.627	0.565	0.508	0.508	0.096	-0.128	-0.631				
S	0.547	-0.561	-0.664*	-0.193	0.174	0.527	0.623	-0.606			
K	-0.941**	0.719*	0.837**	0.699*	0.386	-0.531	-0.734*	0.703*	-0.556		
Ca	0.790**	-0.640*	-0.643*	-0.753*	-0.547	0.180	0.347	-0.676*	0.309	-0.859**	
Fe	0.674*	-0.450	-0.629	-0.381	-0.051	0.471	0.975**	-0.647*	0.592	-0.728*	0.353

*, 显著相关($p < 0.05$); **, 极显著相关($p < 0.01$)。AMP, 年降水量; AMT, 年平均气温。

*, correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). **, correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); AMP, annual mean precipitation; AMT, annual mean temperature.

可以从另一个侧面反映油松叶片N、P、K、Si、Ca、Fe等元素指标在不同生境中的变化趋势。

表3同时列出所有显著或极显著相关的元素对, 油松叶片元素含量之间的相关分析表明, 油松对N与C、N与K、N与Ca、Si与K、Si与Fe、P与K、P与Ca、P与Fe、K与Ca、K与Fe的吸收积累有很好的协同作用。如果某个器官不同元素间相关性高, 表明该器官在利用这些元素时是按照某种近似比例进行的, 也表明了油松不同自然种群的叶片特征。

3 讨论

3.1 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成特性及其与环境因子的关系

在自然条件下陆生 C_3 、 C_4 和CAM植物体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-35\text{‰} - -20\text{‰}$, $-15\text{‰} - -7\text{‰}$, $-22\text{‰} - -10\text{‰}$ (Francey *et al.*, 1985), 据此判断, 油松属于 C_3 植物类型, 10个样点 $\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值为 -26.82‰ , 均高于全球范围调查的植物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -28.74‰ 、全球 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -27.20‰ (韩家懋等, 2002)以

及我国北方 C_3 植物样品进行同位素分析所获得的平均值 -27.10% (Farquhar & Richards, 1984)。研究表明, 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, 是指示植物水分利用效率的有效指标, $\delta^{13}\text{C}$ 值越大, 水分利用效率越高 (Marshall *et al.*, 1994)。西北地区油松叶片较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映了其较高的水分利用效率, 显示了油松作为改善西部生态环境优良树种的原因之一。虽然植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是由植物自身的遗传性状控制的, 但是还直接或间接地受到植物生长环境的影响, 环境影响使得植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 3% – 5% 之间变化 (O'Leary, 1988)。本研究分析发现, 所采样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化幅度较大, 达到 3.66% , 同一树种在不同地区 $\delta^{13}\text{C}$ 值的这种明显差别说明, 采样点环境的差异并不是某一单一因素影响的结果, 是复杂环境综合作用的结果, 也反映出同一树种对于复杂环境的适应特性。这从一定程度上也验证了前人的研究结果: 植物稳定碳同位素组成是植物的遗传学因子与环境因子共同作用的结果 (Francey *et al.*, 1985)。

研究植物随环境梯度和气候因子的变异规律是评价植物对环境气候变化的响应机制的方法, 因为自然植物群落结构和野外环境条件变化很大, 而从环境气候因子变化的研究中可以明了植物群落的变化极限, 这些环境气候因子包括经度、纬度、海拔、温度、降水、光照、湿度等 (冯虎元等, 2001; 李相博和陈践发, 1998)。

温度是影响植物碳同位素分馏的一个重要原因 (刘海燕和李吉跃, 2007), 主要是温度对植物中光合羧化酶产生了直接的影响, 温度过高或过低都会妨碍酶的活性, 任何植物都有其最适的光合作用温度。王国安等 (2002) 的研究结果表明, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年平均温度呈显著负相关, 本研究得到了相同的结果, 即随着年平均温度的降低, C_3 植物油松叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈升高的趋势, 说明温度是影响油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的一个重要因素; 苏波等 (2000) 测定了中国东北草原 15 种常见植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值后发现, 不同植物种对于年平均温度的变化有不同的响应。相关研究同时表明, 温度的变化还会影响到植物叶片的气孔导度、 CO_2 的吸入率、叶子内外的 CO_2 分压比 (刘海燕和李吉跃, 2007), 温度与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系比较复杂, 可能是因为不同植物有不同的光合最适温度的缘故 (Schleser *et al.*, 1999; 张建生等, 2008), 也

可能与所采集样品的种类、数量、采样区域小气候等因素不同有关。

降水是影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的又一重要气候因子 (Francey & Farquhar, 1982)。对于中国西北地区的植物而言, 水分应该是绝大多数植物生长的主要限制因子之一。当降水量不足使土壤含水量和空气湿度降低时, 植物为了减少水分的蒸发, 都会关闭气孔, 使气孔导通系数降低, 从而引起植物叶内 CO_2 浓度下降, 光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高 (Tieszen & Boutton, 1989; 王国安和韩家懋, 2001b)。Ares 和 Fownes (1999) 对洋槐 (*Acacia koa*) 叶片的研究认为, 主要是气孔因素影响了 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化, 部分学者研究发现, 随着降水量、空气相对湿度的升高, 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低, 但变化幅度不大。前人已在 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与降水关系研究上做了许多工作 (Marshall, 1994; Anderson *et al.*, 1998; 李相博和陈践发, 1998), 多数结果认为降水量减少导致水分条件较差地区的 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成变重。因此, 我们实验的结果, 即油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成随年降水量减小而增大的趋势, 是与上述理论和结果相符合的, 油松叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成有可能作为年降水量的替代性指标。

目前对于植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与纬度关系的研究报道较少, 所得结果差异很大, 冯虎元等 (2003) 在马先蒿属 (*Pedicularis*) 植物中发现, 纬度与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间是一种正相关关系; 刘光琇等 (2009) 在中国沙棘 (*Hippophate rhamnoides* subsp. *sinensis*) 中发现 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明显正的纬度效应, 都与本研究的结果一致。本研究显示, 油松叶片和海拔、经度之间没有明显的相关关系, 而与纬度之间存在极显著的正相关关系, 我们认为主要是由于在采样点大范围内, 和纬度相联系的气候因素是控制植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的决定性因素, 最根本的原因还是温度和降水量导致了油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势。

当植物生长主要受到水分限制时, $\delta^{13}\text{C}$ 值与水分利用效率成正相关趋势, 这已被许多研究结果所证实 (冯虎元等, 2003; 陈拓等, 2004; 马剑英等, 2008b), 因此 $\delta^{13}\text{C}$ 值被广泛用作水分利用效率的指示指标。而对于较高降水条件下的植物生长, 降水已不是植物生长的主要限制因素, 温度、纬度等环境因子的影响相对较为复杂, 这可能是相关性趋势较发散的主要原因。我们的研究结果显示, 油松种群在降水 $450\text{--}550\text{ mm}$, 纬度 $33^\circ\text{--}34^\circ\text{ N}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值的相

关性趋势较为发散, 这种结果是正常的, 其他的研究中(Liu *et al.*, 2005)显示了类似的结果, 这说明在湿润地区植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值对于降水的敏感性要比在干旱地区弱, 同样在低纬度地区植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值对于纬度的敏感度随之降低。或许在高降水量地区实验数据的发散和样品采集的有限性使得 $\delta^{13}\text{C}$ 值对于降水量等环境因子响应的临界值是否存在还不确定, 需要更多深入的同位素分析和样品研究来建立可信的结果。

3.2 油松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与叶片矿质元素含量的关系

$\delta^{13}\text{C}$ 在植物体内的形成过程主要是指大气中 $^{13}\text{CO}_2$ 经过一系列物理和生物化学过程进入植物体内并合成植物组成物质的过程, 它同时受到土壤和叶片矿质营养元素的影响(Ehleringer *et al.*, 1991; Welker *et al.*, 1993)。矿质营养元素可以直接影响到植物气孔功能的变化, 后者主要控制着植物的蒸腾和碳同化过程(Ridolfi & Garrec, 2000)。

研究表明 C_3 植物的光合作用与植物组成内的相对和绝对N含量密切相关(马剑英等, 2008c)。植物叶片的N含量在一定程度上反映了叶片吸收和固定大气 CO_2 的能力, 进而影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值(Evans, 1989; Zhao *et al.*, 2008)。大量的研究表明植物叶片中的N含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关关系(Farquhar *et al.*, 1989; Hamerlynck *et al.*, 2004), 但我们的研究结果显示油松叶片N含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间呈极显著的负相关关系, Vitousek等(1990)报道了类似的结果, 也有研究发现植物叶片中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片N含量之间没有相关性, 这可能是因为有些植物用于碳同化过程的N占叶片总N的比例较小, 而大部分N存在于其他蛋白质和结构组分中, 也就是说, 这部分植物具有较小的光合氮利用效率, 从而使得这类植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片N含量之间存在负相关甚至没有相关性(史作民等, 2004)。因此, 要较准确地反映植物叶片N含量与其 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的相互关系, 应该同时考虑植物叶片N含量及其光合氮利用效率(Kouki *et al.*, 2002)。P在植物新陈代谢过程中起重要作用, 不但通过影响植物的渗透调节能力和保水力来增强植物组织的抗旱能力, 而且能够通过提高植物体内可溶性糖和磷脂的含量增强植物的抗寒性(马剑英等, 2008b)。梁银丽等(2000)的研究结果表明: P水平的差异导致植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的明显变化。K在调节气孔功能和提高植物水分利用效率方面有着重要的作用, 同时能够

促进植物光合作用和光合产物的运输、提高 CO_2 的同化率(刘小宁等, 2010)。我们测定的结果, 在西北干旱逆境条件下, 油松通过调节叶片的气孔导度达到合适的水分利用效率, 气孔导度的变化是影响其 $\delta^{13}\text{C}$ 值随环境变化的主要因素。从本研究结果来看, 油松叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片N、P、K含量之间呈现显著负相关关系, 与Si、Ca、Fe含量之间呈显著正相关关系, 说明营养元素的改变是植物对周围环境因子变化的一种响应模式, $\delta^{13}\text{C}$ 值是光合和呼吸的共同作用结果, 说明不同植物种群间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异能够从另一个侧面反映植物营养元素含量的变化状况。

植物体内的正常代谢要求各元素按一定的比例关系吸收利用, 并在体内保持相对平衡。而元素的供应过量或不足以及气候的差异会改变这种平衡(Mo *et al.*, 2000)。本研究的样点涉及西北地区油松的10个自然群落, 因此元素之间的关系就更突出了油松对元素选择吸收的内在属性。从植物体来说, 叶子的养分含量对环境的变化最为敏感, 其生理活性最强; 从元素关系方面来看, K与其他元素的相关性最多, 其次是N、P, 再次是Ca、Fe、Si。K、N、P被认为是生理元素, Ca是结构元素, 显然, 生理元素间具有更协调的关系, 更需要维持体内的平衡。总体来看, 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及分馏结果可能受到多种环境气候因子及矿质元素的控制和影响, 有可能是由于温度、降水与元素之间的相互关系共同造成的, 并且这些因素之间可能会相互影响, 甚至有的起到相互抵消的作用。

致谢 国家自然科学基金项目(30770342)和公益性行业科研专项(200806036)资助。

参考文献

- Anderson WT, Bernasconi SM, Mckenzie JA, Saurer M (1998). Oxygen and carbon isotopic record of climatic variability in tree ring cellulose (*Picea abies*): an example from central Switzerland (1913–1995). *Journal of Geophysical Research*, 103, 31625–31636.
- Ares A, Fownes JH (1999). Water supply regulates structure, productivity, and water use efficiency of *Acacia* in Hawaii. *Oecologia*, 121, 458–466.
- Chen T (陈拓), Chen FH (陈发虎), An LZ (安黎哲), Liu XH (刘晓宏) (2004). Variations of tree-ring and foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of *Sabina przewalskii* with altitude. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 26, 767–771. (in Chinese with English abstract)

- Chen YM (陈有民) (2003). *Ornamental Dendrology* (园林树木学). China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Ehleringer JR, Phillips SL, Schuster WSF, Sandquist DR (1991). Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, 88, 430–434.
- Evans JR (1989). Photosynthesis and nitrogen relationship in leaves of C_3 plants. *Oecologia*, 78, 9–19.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503–537.
- Farquhar GD, Richards RA (1984). Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Australian Journal of Plant Physiology*, 11, 539–552.
- Feng HY (冯虎元), An LZ (安黎哲), Chen T (陈拓), Xu SJ (徐世健), Qiang WY (强维亚), Liu G (刘光), Wang XL (王勋陵) (2003). The relationship between foliar stable carbon isotope composition in *Pedicularis* L. and environmental factors. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 25, 88–93. (in Chinese with English abstract)
- Feng HY (冯虎元), An LZ (安黎哲), Wang XL (王勋陵) (2000). A review on effect of environmental factors on stable carbon isotope composition in plants. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 17, 312–318. (in Chinese with English abstract)
- Feng HY (冯虎元), Chen T (陈拓), Xu SJ (徐世健), Qiang WY (强维亚), Wang XL (王勋陵), Zhang MX (张满效), An LZ (安黎哲) (2001). Effect of enhanced Uv-B radiation on growth, yield and stable carbon isotope composition in *Glycine max* cultivars. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 43, 709–713. (in Chinese with English abstract)
- Francey RJ, Gifford RM, Sharkey TD, Weir B (1985). Physiological influences on carbon isotope discrimination in huon pine. *Oecologia*, 44, 241–247.
- Francey RN, Farquhar GD (1982). An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 297, 28–31.
- Hamerlynck EP, Huxman TE, McAuliffe JR, Smith SD (2004). Carbon isotope discrimination and foliar nutrient status of *Larrea tridentata* (creosote bush) in contrasting Mojave Desert soils. *Oecologia*, 138, 210–215.
- Han JM (韩家懋), Wang GA (王国安), Liu DS (刘东生) (2002). Appearance of C_4 plants and global changes. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 9, 233–243. (in Chinese with English abstract)
- Harvey GR, Boran DA (1985). *Humic Substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation, and Characterization*. John Wiley and Sons, New York. 233–247.
- Kouki H, Dai N, Hiroshi SI, Tadaki H (2002). Photosynthesis-nitrogen relationships in species at different altitudes on Mount Kinabalu, Malaysia. *Ecological Research*, 17, 305–313.
- Li HS (李合生) (2000). *Plant Physiological Biochemical Experiment Principle and Technology* (植物生理生化实验原理和技术). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese)
- Li XB (李相博), Chen JF (陈践发) (1998). Advances in study on plant carbon isotope discrimination and environment change. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 13, 285–290. (in Chinese with English abstract)
- Li XB (李相博), Chen JF (陈践发), Zhang PZ (张平中) (1999). The characteristics of carbon isotope composition of modern plants over Qinghai-Tibet Plateau (NE) and its climatic information. *Acta Sedimentologica Sinica* (沉积学报), 17, 325–329. (in Chinese with English abstract)
- Liang YL (梁银丽), Kang SZ (康绍忠), Shan L (山仑) (2000). The effects of soil moisture and nitrogen and phosphorus addition on carbon isotope discrimination and *WUE* efficiency in wheat. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 289–292. (in Chinese with English abstract)
- Lin GH (林光辉) (2010). Stable isotope ecology: a new branch of ecology resulted from technology advances. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 119–122. (in Chinese with English abstract)
- Liu GX (刘光琇), Zhang W (张威), Chen GC (陈桂琛), Zhang GS (章高森), Li T (李田), An LZ (安黎哲) (2009). Spatial characters and climate significances of stable carbon isotope composition in *Hippophate rhamnoides sinensis* leaves in Western China. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 29, 866–871. (in Chinese with English abstract)
- Liu HY (刘海燕), Li JY (李吉跃) (2007). Application of carbon isotope in revealing environment changes. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 23, 217–221. (in Chinese with English abstract)
- Liu WG, Feng XH, Ning YF, Zhang QL, Cao YN, An ZS (2005). $\delta^{13}\text{C}$ variation of C_3 and C_4 plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid northwestern China. *Global Change Biology*, 11, 1094–1100.
- Liu XN (刘小宁), Ma JY (马剑英), Sun W (孙伟), Cui YQ (崔永琴), Duan ZH (段争虎) (2010). Advances in mechanisms underlying the responses of $\delta^{13}\text{C}$ in alpine plants to the altitudinal gradients. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 28, 37–46. (in Chinese with English abstract)
- Ma JY (马剑英), Chen FH (陈发虎), Xia DS (夏敦胜), Sun HL (孙惠玲), Wang G (王刚) (2008a). Relationships between soil factors and leaf element, water contents in desert plant *Reaumuria soongorica*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 983–992. (in Chinese with English abstract)

- Ma JY (马剑英), Chen FH (陈发虎), Xia DS (夏敦胜), Sun H L (孙惠玲), Wang G (王刚), Duan ZH (段争虎) (2008b). Correlations between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and physiological parameters of desert plant *Reaumuria soongorica*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 19, 1166–1171. (in Chinese with English abstract)
- Ma JY (马剑英), Fang XW (方向文), Xia DS (夏敦胜), Duan ZH (段争虎), Chen FH (陈发虎), Wang G (王刚) (2008c). Correlations between meteorological factors and leaf element contents in desert plant *Reaumuria soongorica*. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 32, 848–857. (in Chinese with English abstract)
- Marshall JD, Zhang JW (1994). Carbon isotope discrimination and water use efficiency in native plants of the North-Central Rockies. *Ecology*, 75, 1887–1895.
- Mo JM, Zhang DQ, Huang ZL, Yu QF, Kong GH (2000). Distribution pattern of nutrient elements in plants of Dinghushan lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 8, 198–206.
- O'Leary MH (1988). Carbon isotopes in photosynthesis (fractionation techniques may reveal new aspects of carbon dynamics in plants). *BioScience*, 38, 328–336.
- Qin H (秦海), Li JX (李俊祥), Gao SP (高三平), Li C (李铖), Li R (李蓉), Shen XH (沈兴华) (2010). Characteristics of leaf element contents for eight nutrients across 660 terrestrial plant species in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 30, 1247–1257. (in Chinese with English abstract)
- Ridolfi M, Garrec JP (2000). Consequences of an excess Al and a deficiency in Ca and Mg for stomatal functioning and net carbon assimilation of beech leaves. *Annual for Sciences*, 57, 209–218.
- Schleser GH, Helle G, Lücke A, Vos H (1999). Isotope signals as climate proxies: the role of transfer functions in the study of terrestrial archives. *Quaternary Science Reviews*, 18, 927–943.
- Shi RH (施润和), Niu Z (牛铮), Zhuang DF (庄大方) (2003). Feasibility of estimating leaf C/N ratio with hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 18, 76–80. (in Chinese with English abstract)
- Shi ZM (史作民), Cheng RH (程瑞梅), Liu SR (刘世荣) (2004). Response of leaf $\delta^{13}\text{C}$ to altitudinal gradients and its mechanism. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 2901–2906. (in Chinese with English abstract)
- Su B (苏波), Han XG (韩兴国), Li LH (李凌浩), Huang JH (黄建辉), Bai YF (白永飞), Qu CM (渠春梅) (2000). 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. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 24, 648–655. (in Chinese with English abstract)
- Su PX (苏培玺), Yan QD (严巧娣) (2008). Stable carbon isotope variation in plants and their indicating significances along the inland Heihe river basin of northwestern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 1616–1624. (in Chinese with English abstract)
- Tieszen LL, Boutton TW (1989). Stable carbon isotopes in terrestrial ecosystem research. In: Rundel PW, Ehleringer JR, Nagy KA eds. *Stable Isotopes in Ecological Research*. Springer-Verlag, New York. 167–195.
- Vitousek PM, Field CB, Matson PA (1990). Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ in Hawaiian *Metrosideros polymorpha*: a case of internal resistance. *Oecologia*, 84, 362–370.
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋) (2001a). Relations between $\delta^{13}\text{C}$ values of C_3 plants in northwestern China and annual precipitation. *Chinese Journal of Geology* (地质科学), 36, 494–499. (in Chinese with English abstract)
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋) (2001b). $\delta^{13}\text{C}$ variations of C_3 plants in dry and rainy seasons. *Marine Geology & Quaternary Geology* (海洋地质与第四纪地质), 21, 43–47. (in Chinese with English abstract)
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋), Zhou LP (周力平) (2002). The annual average temperature in Northern China. *Geology in China* (中国地质), 29, 55–57. (in Chinese with English abstract)
- Welker JM, Wookey PA, Parsons AN, Press MC, Callaghan TV, Lee JA (1993). Leaf carbon isotope discrimination and vegetative responses of *Dryas octopetala* to temperature and water manipulations in a high arctic polar semi-desert, Svalbard. *Oecologia*, 95, 463–469.
- Zhang JS (张建生), Zhang MH (张梅花), Li QH (李庆会), Wang YY (汪永洋), Wen Y (温源) (2008). Effects of eco-mat mulch on soil temperature and water content in desert. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 28, 280–283. (in Chinese with English abstract)
- Zhao CM, Chen LT, Ma F, Yao BQ, Liu JQ (2008). Altitudinal differences in the leaf fitness of juvenile and mature alpine spruce trees (*Picea crassifolia*). *Tree Physiology*, 28, 133–141.
- Zhao LJ, Xiao HL, Liu XH (2006). Variations of foliar carbon isotope discrimination and nutrient concentrations in *Artemisia ordosica* and *Caragana korshinskii* at the southeastern margin of China's Tengger Desert. *Environmental Geology*, 50, 285–294.
- Zheng YF (郑永飞), Chen JF (陈江峰) (2000). *Stable Isotope Geochemistry* (稳定同位素地球化学). Science Press, Beijing. 194. (in Chinese)

责任编辑: 张齐兵 责任编辑: 李 敏