

柴达木盆地白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片 和土壤养分指标的关系

邱 权¹, 李吉跃^{1*}, 王军辉², 王 宁³, 孙 奎³, 贾子瑞², 董 蕾¹, 潘 昕¹

(1 华南农业大学 林学院, 广州 510642; 2 中国林业科学研究院 林业研究所国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3 青海省农林科学院 野生植物资源研究所, 西宁 810016)

摘 要:在青海省柴达木盆地选择 6 个重要的唐古特白刺分布区域, 通过测定不同白刺居群的叶片营养元素、土壤养分含量和叶片碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$, 对比不同白刺居群间的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征差异, 并分析白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与地理位置信息及叶片营养和土壤养分含量指标的关系。结果显示: (1) 白刺居群间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著空间变异性, 其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围在 -25.47‰ ~ -27.66‰ 之间, 平均为 -26.66‰ 。(2) 纬度、经度和海拔是白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 重要影响因素, 白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与纬度、经度和海拔分别呈极显著负相关, 正相关和正相关关系 ($n=10$)。(3) 白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片有机 C 含量、N、P、K 含量总体均呈负相关关系, 但仅叶片有机 C 含量达到极显著水平 ($n=30$), 其余均未达到显著性水平 ($n=30$)。(4) 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与表层土壤 (0~15 cm) 有机质、全 N、速效 K 含量呈极显著负相关关系 ($n=30$), 与全 P、碱解 N 和有效 P 含量呈显著负相关关系 ($n=30$), 并与 15~30 cm 土壤有机质和全 N 含量显著负相关 ($n=30$), 但叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 30~45 cm 土壤各化学指标相关性均不显著 ($n=30$)。研究表明, 环境因子纬度、经度、海拔, 叶片有机 C 含量, 以及立地土壤全 N、全 P、碱解 N、有效 P、速效 K 含量的变化均显著影响柴达木盆地唐古特白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

关键词: $\delta^{13}\text{C}$; 叶片营养; 土壤养分; 白刺; 柴达木盆地

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Relationship on Leaf $\delta^{13}\text{C}$ and Nutrients in Leaf and Soil of Different *Nitraria tangutorum* Populations in Tsaidam Basin

QIU Quan¹, LI Jiyue^{1*}, WANG Junhui², WANG Ning³,
SUN Kui³, JIA Zirui², DONG Lei¹, PAN Xin¹

(1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3 Institute of Wild Plant Resources, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry, Xining 810016, China)

Abstract: In this study, 10 *Nitraria tangutorum* populations in six important *N. tangutorum* distribution areas in Tsaidam Basin were selected as research objects, to make a comparison on the differences in leaf $\delta^{13}\text{C}$ characteristics of different *N. tangutorum* populations and analysis the correlations between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and nutrients contents in leaf and soil, by measuring their leaf $\delta^{13}\text{C}$, leaf nutrients, organic carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) contents and soil nutrients: pH, organic matter (OM), total nitrogen (N), total phosphorus (P), total potassium (K), hydrolysis N, available P and available K contents. The results showed that: (1) there was a significant difference in leaf $\delta^{13}\text{C}$ between different *N. tangutorum* populations, leaf $\delta^{13}\text{C}$ varied from -27.66‰ to -25.47‰ , and their leaf average $\delta^{13}\text{C}$ was

收稿日期: 2013-07-04; 修改稿收到日期: 2013-09-18

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (200904033); 农业科技成果转化资金项目 (2011GB24320010)

作者简介: 邱 权 (1989—), 男, 在读博士研究生, 主要从事栽培生理生态方面的研究。E-mail: qiuquan89@163.com

* 通信作者: 李吉跃, 博士, 教授, 主要从事森林培育、栽培生理生态方面的研究。E-mail: ljyymy@vip.sina.com

—26.66‰. (2) Leaf $\delta^{13}\text{C}$ showed a extremely significant negative correlation with latitude, positive correlation with longitude and positive correlation with altitude respectively ($n=10$), thus latitude, longitude and altitude were important factors for leaf $\delta^{13}\text{C}$. (3) Leaf $\delta^{13}\text{C}$ showed a negative correlation with leaf N, P and K contents, but this correlation was not significant ($n=30$), whereas leaf $\delta^{13}\text{C}$ had a extremely significant correlation with leaf organic C content ($n=30$). (4) Leaf $\delta^{13}\text{C}$ showed a extremely significant negative correlation between OM, total N and available K contents in surface soil (0~15 cm) ($n=30$) and a significant negative correlation between total P, hydrolysis N and available P in surface soil (0~15 cm) ($n=30$) respectively. In addition, leaf $\delta^{13}\text{C}$ was extremely significantly correlated with OM and total N content in soil (15~30 cm), but it had no significant correlation with nutrients content in soil (30~45 cm). In general, latitude, longitude, altitude, leaf organic C content, soil total N, total P, hydrolysis N, available P and available K contents all had significant influence on $\delta^{13}\text{C}$ in leaf of *N. tangutorum*.

Key words: leaf $\delta^{13}\text{C}$; leaf nutrients; soil nutrients; *Nitraria tangutorum*; Tsaidam Basin

植物叶片碳同位素组成(以 $\delta^{13}\text{C}$ 值表示)能反映植物生长期内的生理生态适应特性,并且已经被公认为是一种估测植物长期水分利用效率的可靠途径^[1-2],已有大量研究证实叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可以表征叶片光合能力和长期水分利用效率^[3-6]。一般认为植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受植物本身遗传因素、温度、降水、相对湿度、光照与海拔等因素影响^[7-12],存在明显的时空变异特征^[13-14],因此植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可以一定程度反映其小生境的环境因子和指示其生态适应策略。唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)为蒺藜科(Zygophyllaceae)白刺属(*Nitraria*)灌木,是中国特有种,主要分布于青藏高原地区,具有强抗逆性和生态适应特性,在稳定沙漠、保护绿洲中起着重要作用^[15-16]。青海柴达木盆地是白刺的自然分布区域,由于自然退化现象严重,加上修建公路等因素人为破坏,其分布区域日益减少,即时开展叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征研究对于认识其野外生存环境以及生态保护有重要意义。目前的报道中,已有许多针对热带亚热带植物^[17-18]、东北草原区植物^[19]、黄土高原植物^[20]、荒漠植物^[21-22]、青藏高原草本植物^[23-24]叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 及水分利用效率相关研究,但对于柴达木盆地白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征相关研究鲜见报道。此外,关于植物体叶片生理指标和土壤理化性质对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响相关研究逐渐受到关注,其中土壤和叶片养分

指标对于植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响即是研究的热点^[23-25],但其具体影响机制尚不清楚,并且目前未见不同白刺居群土壤和叶片养分对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响机制的相关研究报道。

本研究在青海柴达木盆地选择 6 个白刺分布区域,测定不同白刺居群的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 及营养元素和土壤养分含量,对比不同白刺居群间的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 差异,并研究叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与纬度、经度、海拔、叶片营养元素含量和土壤养分含量的相关关系,分析柴达木盆地荒漠化地区特殊生境下白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和长期水分利用效率特征,从而为白刺退化居群保护提供基础数据和理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

柴达木盆地位于 $90^{\circ}16' \sim 99^{\circ}16' \text{E}$, $35^{\circ}00' \sim 39^{\circ}20' \text{N}$ 之间,地处青海省西北部,阿尔金山、祁连山和昆仑山之间,东西长约 800 km,南北最宽处约 350 km,面积约 20 万 km^2 ,地势自西北向东南缓倾,海拔在 2 600~3 000 m 之间,是中国地势最高的内陆盆地。盆地属高原大陆性气候,以干旱为主要特点。年降水量区域性差异较大,自东南部的 200 mm 递减到西北部的 15 mm,年均相对湿度为 30%~40%,最小可低于 5%。盆地年均温在 5°C 以下,

表 1 柴达木盆地 6 个白刺居群分布区域地理信息

Table 1 Situation and altitude of 6 distribution areas of *N. tangutorum* in Tsaidam Basin

代码 Code	样点 Sample plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m
WL	乌兰柯柯镇 Wulan keke town	$\text{N}36^{\circ}59'56''$	$\text{E}98^{\circ}10'19''$	2 966
KL	可鲁克湖 Keluke lake	$\text{N}37^{\circ}19'1''$	$\text{E}96^{\circ}54'6''$	2 819
CK	茶卡镇 Chaka town	$\text{N}36^{\circ}47'5''$	$\text{E}98^{\circ}58'39''$	3 074
GH	尕斯库勒 Gahai	$\text{N}37^{\circ}8'8''$	$\text{E}97^{\circ}34'50''$	2 865
GB	戈壁车站 Gebi station	$\text{N}37^{\circ}14'44''$	$\text{E}97^{\circ}1'59''$	2 824
HT	怀头他拉镇 Huaitou tala town	$\text{N}37^{\circ}19'24''$	$\text{E}96^{\circ}51'1''$	2 817

气温变化剧烈,绝对年温差可达 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,日温差也常在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,夏季夜间可降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。风力强盛,年 8 级以上大风日数可达 $25\sim 75\text{ d}$,西部甚至可出现 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强风,风力蚀积强烈。盆地海拔高,云量少,日照时间长,常年干旱少雨,区内时常刮大风,其中茶卡镇地区风能十分丰富。

1.2 白刺叶片和土壤取样

于 2012 年 8 月在青海柴达木盆地唐古特白刺原生地采集叶样,选取 6 个白刺重要分布区域,记录纬度、经度和海拔高度等相关信息(表 1),每个地区选 2 个居群,其中茶卡镇由于白刺分布范围较小、可鲁克湖部分区域被水淹,均选 1 个居群。在每一个居群中分单株随机在开阔环境中选 15 个基本同龄的植物各采集 10 枚叶片,多点混合后分装 3 个封口袋中,迅速带回实验室进行处理,每一居群取叶片样品 3 袋。同时进行土壤取样,在每个居群里按“S”型选择 6 个取样点,分别采集深度为 $0\sim 15$ 、 $15\sim 30$ 、 $30\sim 45\text{ cm}$ 的土壤样品,然后按土层深度分别采用四分法取土样,3 次重复。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶片养分含量 叶片在实验室洗净后,用烘箱于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 1 h, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,粉碎过筛,混匀后密闭于样品袋中待测。叶片有机碳(SOC)含量采用高温外热重铬酸钾容量法测定,样品经硫酸-双氧水消煮后做全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)含量测定,其中 TN 含量用蒸馏滴定法,TP 含量用钒钼黄比色法,TK 含量用火焰原子吸收分光光度法^[26],每个居群叶片样品均做 3 次重复。

1.3.2 土壤化学性质 土壤化学分析采用土壤标

准分析方法^[26]测定,其中 pH 采用水:土为 $2.5:1$ 玻璃电极法;有机质(OM)含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,全氮(TN)含量采用开氏-蒸馏滴定法;全磷(TP)含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;全钾(TK)含量采用氢氧化钠熔融-火焰原子吸收分光光度法;碱解氮(AN)含量采用碱解扩散法;有效磷(AP)含量采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法;速效钾(AK)含量采用乙酸铵提取-火焰原子吸收分光光度法。

1.3.3 叶片碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$) 与叶片养分含量测定同步,样品过 100 目筛,进行叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 测定(中国林科院稳定同位素实验室)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 作图,SPSS 19.0 对数据进行方差分析和多重比较(Duncan’s 法)、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 各白刺居群叶片碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 、养分含量及其立地土壤化学性质

2.1.1 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 柴达木盆地不同白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著性差异(表 2)。其中,柴达木盆地白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 范围介于 $-25.47\text{‰}\sim -27.66\text{‰}$ 之间,平均值为 -26.66‰ ;即使相同地区之间两个白刺种群也存在显著性差异($P<0.05$),如尕海的 2 个白刺居群和戈壁车站的 2 个白刺居群即表现出了显著性差异;茶卡镇和乌兰县柯柯镇白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 较高($-25.47\text{‰}\sim -25.97\text{‰}$),而怀头他拉镇和可鲁克湖白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 较低($-27.18\text{‰}\sim -27.66\text{‰}$),且显著低于其他地区白刺居群,其中的

表 2 不同白刺居群叶片碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 和养分含量

Table 2 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ and nutrient content in different *N. tangutorum* populations

样点 Sample plot	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	有机碳 SOC/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	全钾 TK/(g/kg)
WL1	$-25.92\pm 0.06\text{b}$	$357.43\pm 7.98\text{d}$	$42.37\pm 2.95\text{cd}$	$2.37\pm 0.06\text{cde}$	$17.32\pm 1.41\text{a}$
WL2	$-25.97\pm 0.11\text{b}$	$384.23\pm 7.70\text{c}$	$48.16\pm 3.03\text{ab}$	$3.32\pm 0.07\text{abc}$	$17.10\pm 1.34\text{ab}$
KL	$-27.18\pm 0.07\text{g}$	$358.36\pm 9.84\text{d}$	$26.12\pm 2.44\text{f}$	$1.60\pm 0.02\text{e}$	$8.03\pm 0.80\text{e}$
CK	$-25.47\pm 0.07\text{a}$	$387.69\pm 9.11\text{bc}$	$37.61\pm 2.37\text{de}$	$2.11\pm 0.08\text{de}$	$17.19\pm 1.62\text{ab}$
GH1	$-26.67\pm 0.05\text{d}$	$407.65\pm 11.07\text{a}$	$45.96\pm 2.98\text{cd}$	$3.12\pm 0.07\text{bcd}$	$15.13\pm 1.32\text{bc}$
GH2	$-26.27\pm 0.11\text{c}$	$365.87\pm 7.60\text{d}$	$38.95\pm 1.27\text{de}$	$2.92\pm 0.11\text{bcd}$	$14.76\pm 0.75\text{c}$
GB1	$-27.01\pm 0.06\text{f}$	$415.63\pm 10.29\text{a}$	$33.92\pm 2.67\text{e}$	$2.19\pm 0.10\text{de}$	$12.25\pm 0.60\text{d}$
GB2	$-26.87\pm 0.06\text{e}$	$382.15\pm 7.89\text{c}$	$41.81\pm 2.83\text{cd}$	$2.43\pm 0.03\text{cde}$	$13.08\pm 0.76\text{d}$
HT1	$-27.66\pm 0.08\text{h}$	$401.34\pm 7.36\text{ab}$	$51.19\pm 4.66\text{a}$	$3.77\pm 0.09\text{ab}$	$16.72\pm 0.13\text{abc}$
HT2	$-27.56\pm 0.07\text{h}$	$403.18\pm 9.53\text{ab}$	$52.65\pm 2.67\text{a}$	$4.23\pm 0.05\text{a}$	$16.84\pm 1.36\text{ab}$
平均值 Average	-26.66 ± 0.71	385.62 ± 22.61	41.89 ± 8.24	2.81 ± 0.79	14.72 ± 3.20

注:样点代码同表 1;SOC. 有机碳;TN. 全氮;TP. 全磷;TK. 全钾;同列不同字母表示居群间数值在 0.05 水平上存在显著性差异(Duncan’s 法);下同。

Note: Codes of sample plot same as Table 1; SOC. Organic carbon; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; TK. Total potassium; Different letters within same column indicate significantly different among populations at the 0.05 level (Duncan multiple range test); The same as below.

尕海和戈壁车站白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 处于中等水平。

2.1.2 叶片养分含量 柴达木盆地不同白刺居群间的叶片 SOC、TN、TP 和 TK 含量均存在显著性差异(表 2), 它们的含量范围分别介于 357.43~415.63、26.12~52.65、1.60~4.23 和 8.03~17.32 g/kg 之间, 其平均值分别为 (385.62 ± 22.61) g/kg、 (41.89 ± 8.24) g/kg、 (2.81 ± 0.79) g/kg 和 (14.72 ± 3.20) g/kg。叶片 SOC 含量方面, 怀头他拉镇、戈壁车站和尕海白刺居群叶片有机碳含量相对较高, 而乌兰柯柯镇、可鲁克湖和茶卡镇白刺居群普遍较低, 叶片 SOC 含量仅介于 357.43~387.69

g/kg 之间。TN 含量方面, 而怀头他拉镇 2 个白刺居群 N 含量分别达到了 (51.19 ± 4.66) g/kg 和 (52.65 ± 2.67) g/kg, 显著高于其他地区白刺居群, 而可鲁克湖白刺居群叶片 TN 含量最低, 仅为 (26.12 ± 2.44) g/kg。比较各白刺居群叶片 TP 含量发现, 怀头他拉镇 2 个白刺居群叶片 TP 含量分别为 (3.77 ± 0.09) g/kg 和 (4.23 ± 0.05) g/kg, 高于其他地区白刺居群, 而可鲁克湖和茶卡镇白刺居群叶片 TP 含量显著低于其他白刺居群, 叶片 P 元素相对比较缺乏。此外, 乌兰柯柯镇、茶卡镇和怀头他拉镇白刺居群叶片 K 含量相对较高, 而可鲁克湖

表 3 不同白刺种群土壤 pH 值和养分元素含量

Table 3 pH and nutrient contents in soils in different *N. tangutorum* populations

样点 Sample plot	深度 Depth /cm	pH	有机质 OM /(g/kg)	全氮 TN /(g/kg)	全磷 TP /(g/kg)	全钾 TK /(g/kg)	碱解氮 AN /(mg/kg)	速效磷 AP /(mg/kg)	速效钾 AK /(mg/kg)
WL1	0~15	8.71±0.13	3.80±0.03	0.28±0.02	0.51±0.02	17.76±1.01	13.11±0.96	9.92±1.03	132.28±4.04
	15~30	9.24±0.13	5.86±0.07	0.37±0.02	0.60±0.05	17.33±0.91	11.97±0.07	8.77±0.06	199.92±8.86
	30~45	8.60±0.10	2.97±0.07	0.17±0.02	0.48±0.03	17.09±0.97	4.56±0.06	2.69±0.04	90.70±4.42
WL2	0~15	9.20±0.15	4.67±0.04	0.21±0.04	0.40±0.02	18.02±0.13	11.4±1.14	11.63±0.92	115.64±10.31
	15~30	9.38±0.08	4.16±0.08	0.22±0.02	0.37±0.02	18.95±1.43	11.4±0.93	5.16±0.12	130.23±10.45
	30~45	9.05±0.16	1.96±0.04	0.10±0.02	0.28±0.04	19.31±0.74	5.13±0.10	3.45±0.10	65.61±1.63
KL	0~15	8.60±0.18	18.36±0.98	0.86±0.06	0.73±0.04	20.50±1.46	34.19±1.61	9.92±0.98	226.08±11.07
	15~30	8.60±0.12	15.58±0.86	0.80±0.04	0.76±0.03	20.40±1.55	35.33±1.38	8.97±0.11	168.07±7.10
	30~45	8.38±0.14	23.12±1.10	1.27±0.04	0.75±0.04	22.17±1.77	40.46±3.22	10.11±0.97	243.04±10.96
CK	0~15	8.63±0.14	3.74±0.04	0.21±0.02	0.55±0.03	19.50±0.71	6.27±0.05	1.35±0.03	156.16±3.63
	15~30	8.58±0.10	3.02±0.04	0.17±0.02	0.55±0.04	18.47±1.17	5.70±0.17	0.78±0.07	135.30±3.06
	30~45	8.48±0.04	3.26±0.14	0.17±0.02	0.55±0.04	22.04±1.89	3.42±0.03	1.16±0.06	128.39±2.96
GH1	0~15	8.47±0.12	8.30±0.05	0.36±0.03	0.40±0.02	20.24±1.56	83.76±2.39	6.68±0.20	387.12±16.65
	15~30	8.27±0.15	16.22±1.27	0.84±0.05	0.45±0.05	20.50±1.54	184.62±4.30	10.68±0.89	635.71±30.07
	30~45	8.37±0.12	12.27±1.11	0.48±0.03	0.4±0.02	19.06±1.09	190.88±3.90	19.05±1.08	466.33±27.94
GH2	0~15	8.43±0.04	15.20±0.27	0.75±0.03	0.53±0.03	19.66±1.07	235.90±5.16	21.33±1.74	453.31±27.89
	15~30	8.61±0.05	17.59±1.95	0.98±0.07	0.59±0.06	21.34±0.95	354.99±11.51	8.97±0.08	725.41±26.58
	30~45	8.46±0.08	8.87±0.08	0.57±0.03	0.44±0.04	20.22±1.82	165.24±4.50	3.83±0.04	493.49±4.53
GB1	0~15	8.48±0.08	28.76±1.98	1.10±0.02	0.64±0.01	16.38±1.86	51.85±3.93	31.23±3.21	482.22±4.32
	15~30	8.58±0.08	11.80±0.92	0.48±0.05	0.58±0.03	16.30±0.90	34.76±2.24	20.57±2.14	380.00±3.41
	30~45	8.76±0.08	10.21±1.67	0.47±0.05	0.61±0.02	17.14±1.69	30.77±3.21	16.58±1.11	367.26±23.16
GB2	0~15	8.66±0.08	17.88±1.12	0.78±0.01	0.60±0.05	15.96±0.14	40.46±4.27	27.99±1.20	541.46±48.42
	15~30	8.64±0.08	22.4±1.86	1.27±0.11	0.76±0.05	16.55±0.90	62.11±3.43	65.09±3.45	469.7±24.05
	30~45	8.60±0.14	21.76±2.19	1.38±0.04	0.76±0.04	15.86±0.14	67.81±3.47	64.52±4.44	489.06±24.22
HT1	0~15	8.59±0.08	19.78±1.87	1.31±0.06	0.60±0.04	21.84±0.20	651.85±24.62	30.85±3.26	602.86±35.19
	15~30	8.55±0.08	12.15±0.92	0.77±0.04	0.58±0.03	23.21±1.35	620.51±22.78	12.39±1.08	685.16±24.98
	30~45	8.51±0.08	8.41±0.08	0.57±0.03	0.60±0.03	21.07±0.55	387.46±3.47	6.68±0.06	398.82±33.43
HT2	0~15	8.47±0.10	23.61±1.85	1.66±0.11	0.64±0.04	20.18±1.35	469.52±24.05	27.99±2.24	734.91±35.13
	15~30	8.53±0.08	19.60±1.87	1.34±0.10	0.67±0.04	22.38±1.81	418.8±21.00	31.99±3.22	577.16±24.98
	30~45	8.48±0.09	9.08±1.02	0.63±0.03	0.63±0.04	23.04±2.20	162.96±11.40	11.06±0.10	364.22±28.13

注: OM. 有机质; AN. 碱解氮; AP. 速效磷; AK. 速效钾。
Note: OM. Organic matter; AN. Available nitrogen; AP. Available phosphorus; AK. Available potassium.

白刺居群叶片 K 含量仅为 8.03 g/kg,显著低于其他地区白刺居群。

2.1.3 土壤化学性质 从表 3 可以看出,随着土层深度加深,土壤 pH 值和各项养分指标含量大部分呈下降趋势,但变化趋势无明显规律,部分地区白刺居群养分指标甚至出现了上升的现象。总体上来讲,30~45 cm 深的土壤养分含量普遍低于 0~30 cm 土层深度的土壤。此外,不同白刺居群之间相同土层深度处土壤 pH 值和养分含量之间也有所差异。综合 3 个土层深度土壤 pH 值和养分含量来看,乌兰柯柯镇白刺居群土壤 pH 值介于 8.60~9.38,相对高于其他地区。土壤 OM 含量方面,可鲁克湖和戈壁车站白刺居群土壤 OM 含量相对较高,而乌兰柯柯镇和茶卡镇相对低于其他地区。土

壤 TN、TP 和 TK 含量方面,乌兰柯柯镇、茶卡镇和尕海白刺居群土壤 TN 和 TP 含量相对较低,存在 N、P 元素相对缺乏情况,就土壤 TK 含量而言,怀头它拉镇白刺居群土壤 TK 含量相对较高,而戈壁车站存在土壤相对缺 K 现象。土壤有效养分含量方面,乌兰柯柯镇和茶卡镇白刺居群 AN、AP 和 AK 含量均相对低于其他地区,而怀头它拉镇和戈壁车站白刺居群土壤有效养分含量高于其他地区。

2.2 白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与其地理位置的关系

相关分析结果表明,白刺居群叶片碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 与其立地纬度、经度和海拔均存在极显著性相关关系($P<0.01$; $n=10$),即叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与纬度呈极显著负相关,而与经度和海拔高度均呈极显著正相关,其拟合程度见图1。由此可见,柴达木盆地白

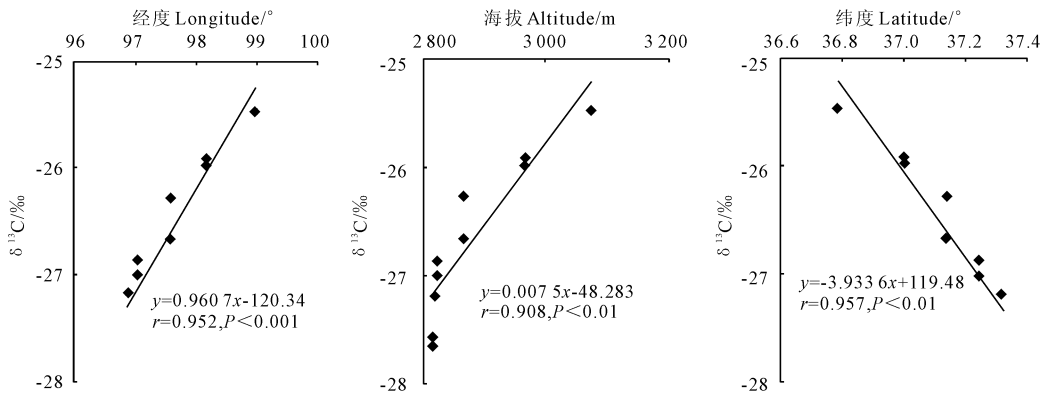


图 1 白刺叶片碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 与纬度、经度和海拔高度的关系

Fig. 1 Relationship between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and latitude, longitude and altitude of sample sites

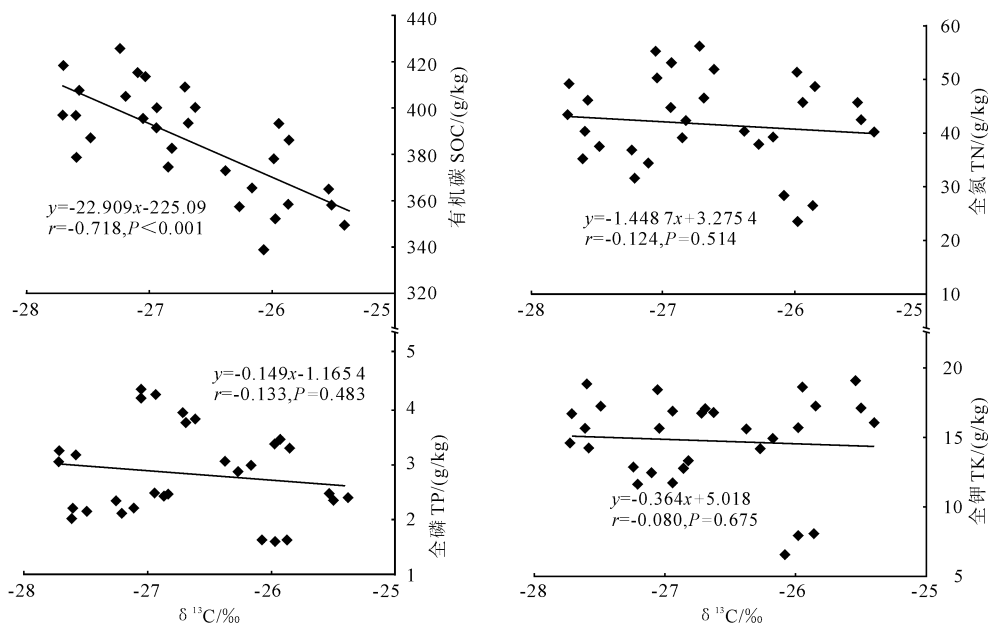


图 2 白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与其有机 C、全 N、全 P 和全 K 含量的相关性

Fig. 2 Correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and SOC, TN, TP and TK contents in leaf

表 4 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与不同土层深度土壤化学性质相关系数Table 4 Correlation coefficients between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and chemical indices of soil in different depths

土层深度 Soil depth /cm	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK
0~15	0.422	-0.827 **	-0.889 **	-0.585 *	-0.309	-0.675 *	-0.720 *	-0.794 **
15~30	0.492	-0.670 *	-0.680 *	-0.463	-0.474	-0.617	-0.423	-0.543
30~45	0.276	-0.544	-0.574	-0.567	-0.197	-0.628	-0.278	-0.58

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关, $n=30$ 。

Note: * and ** stand for significant correlation at the 0.05 and 0.01 level, respectively, $n=30$.

刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出了与地理位置信息的密切联系,其数值随着纬度的减少、经度的增加和海拔高度的增加而呈增加的趋势。

2.3 白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片养分元素含量的关系

白刺叶片碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片 SOC、TN、TP 和 TK 含量的相关性分析表明(图 2),叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片 TN、TP 和 TK 含量总体呈负相关关系,但其相关性均未达到显著性水平($P>0.05$; $n=30$),仅叶片有机 C 含量与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出了极显著的负相关关系($P<0.01$; $n=30$)。说明白刺居群叶片养分指标中的有机 C 含量与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 有密切的联系,其高低会显著影响其 $\delta^{13}\text{C}$ 。

2.4 白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与其土壤化学性质的关系

白刺居群叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与其立地 3 个土层深度(0~15、15~30、30~45 cm)土壤 pH、有机质(OM)、全 N(TN)、全 P(TP)、全 K(TK)、碱解 N(AN)、有效 P(AP)、速效 K(AK)的相关性分析表明(表 4),叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与表层土壤(0~15 cm)OM、TN、AK 含量呈极显著负相关关系($P<0.01$; $n=30$),与 TP、AN 和 AP 含量呈显著负相关($P<0.05$; $n=30$),并且与 15~30 cm 深土壤 OM 和 TN 含量显著负相关($P<0.05$; $n=30$),但叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 30~45 cm 深土壤各化学指标相关性均不显著($P>0.05$; $n=30$)。此外,3 个土层深度 pH 与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 总体呈正相关,但其相关性均未达到显著性水平($P>0.05$; $n=30$),即土壤 pH 并不是白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的显著影响因素。以上结果说明,除立地土壤 pH 外,3 个土层深度的土壤化学指标含量均与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 呈负相关关系,但相关性程度有所不同,总体上呈现出随着土层深度的加深叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤化学指标含量相关系数随之降低的规律。因此,表层土壤(0~15 cm)化学指标含量高低对白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响最显著。

3 结论与讨论

3.1 柴达木盆地白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 特征及空间变异性

一般认为 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-23\text{‰} \sim -32\text{‰}$, C_4 植物为 $-6\text{‰} \sim -19\text{‰}$ ^[27],本研究中柴达木盆地白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 范围介于 $-25.47\text{‰} \sim -27.66\text{‰}$ 之间,其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值落在 C_3 植物区。另据任书杰等^[28]研究表明中国区域 478 种 C_3 物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 $-22.00\text{‰} \sim -33.50\text{‰}$,本研究中白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围也在此范围内。此外,白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -26.66‰ ,接近于已经报道的青藏高原北部 C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值($-23.8\text{‰} \sim -29.5\text{‰}$)^[7]和青藏高原草地群落植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[10]($-25.88\text{‰} \sim -26.55\text{‰}$),但高于中国区域灌木植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值(-27.50‰)。可见,青藏高原地区植物之间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在一定的相似性,并且其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 普遍高于中国区域植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值(灌木为 -27.50‰ ,草本为 -26.81‰),可能与植物对青藏高原地区特殊生境产生的相似生态适应性有关。因为青藏高原属于高原气候,海拔较高,降水相对不足,植物在面对长期的干旱逆境过程中,产生了提高水分利用效率的生态适应策略,即表现出了更高的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而这一适应策略广泛见于其他荒漠植物中^[20-21,23]。

本研究中柴达木盆地不同地区白刺居群之间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著性差异($P<0.05$),表现出了明显的空间变异性,与前人对其他植物的研究结论一致^[8,10,14]。大量研究认为,海拔显著影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ ^[8-10],本研究中白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔呈显著正相关,进一步证实了这一研究结论。此外,纬度和经度与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别呈显著负相关和正相关,由此说明纬度、经度和海拔高度均是植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的重要影响因子。

3.2 柴达木盆地白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片和土壤养分指标的联系

$\delta^{13}\text{C}$ 值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,因此它同时受土壤和叶片营养元素的影响^[23-25]。在叶片营养元素方面,一般认为在

C_3 植物中,大部分叶氮组成直接影响碳同化过程相关联 RuBisco、叶绿素及其他生物化学结构,其浓度与光合作用中碳的固定密切相关,进而与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值有关^[29-30],磷和钾是植物正常生长发育所不可或缺的元素。马剑英等^[23]研究表明,荒漠植物红砂(*Reaumuria soongoric*)叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片全氮、全磷和全钾含量均呈显著正相关,而本研究中白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片全氮、全磷和全钾含量相关性均未达到显著水平,与上述结论有所不同,这可能与不同植物叶片养分指标对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响机制不同有关。因为大量关于叶片营养元素含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系研究认为影响叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的生理机制主要有两种:光合效率^[23]和气孔限制^[31-32]。而据 Ares 等^[31-32]研究发现,柳叶桉(*Eucalyptus saligna*)和金合欢(*Acacia koa*)在野外和温室环境下,其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片营养物质含量均没有显著相关性,说明此两种树种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化主要受气孔限制的影响,而不是由于光合效率的改变引起的。从这个角度来讲,本研究中白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片 N、P 和 K 含量的相关性不显著,可以推断白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要影响因素是气孔限制,并不是光合效率,从而叶片营养元素含量变化并不直接对叶片

$\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响,但其具体原因和影响机制有待进一步研究。值得注意的是,仅叶片有机碳与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈极显著负相关,说明叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以指示植物体叶片有机物含量的高低。

另一方面,不同土层深度的不同土壤养分指标与白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值相关性程度有所不同。3 个土层深度的土壤化学指标含量均与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 呈负相关关系,总体上呈现出了随着土层深度的加深叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤化学指标含量相关系数随之降低的规律,其中表层土壤(0~15 cm)化学指标含量高低对白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响最显著,可能与白刺的浅根系分布有关,因为 0~40 cm 土层是白刺吸收和利用水分和养分的重要区域^[33]。就表层土壤而言,土壤 pH 和全 K 含量对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响不显著,而有机质、全 N、全 P、碱解 N、有效 P 和速效 K 含量均与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 呈显著负相关。由此说明,土壤有机质、全 N、全 P、碱解 N、有效 P 和速效 K 均是白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的重要影响因子,白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可以负向指示土壤的大部分养分元素含量。此外,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明显的季节变化差异^[34-35],在今后的研究中需重点关注此项内容。

参考文献:

- [1] FARQUHAR G D, EHIERINGER J R, HUBICK K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1989, **40**(1): 503—537.
- [2] CAO SH K(曹生奎), FENG Q(冯 起), SI J H(司建华), *et al.* Summary on the plant water use efficiency at leaf level[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, **29**(7): 3 883—3 892(in Chinese).
- [3] TANAKA-ODA A, KENZO T, KORETSUNE S, *et al.* Ontogenetic changes in water use efficiency ($\delta^{13}\text{C}$) and leaf traits differ among tree species growing in a semiarid region of the Loess Plateau, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, **259**(5): 953—957.
- [4] CUI N B, DU T S, KANG S Z, *et al.* Relationship between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency under regulated deficit irrigation of pear-jujube tree[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, **96**(11): 1 615—1 622.
- [5] WILLIAMS D G, EHRLINGER J R. Carbon isotope discrimination and water relations of oak hybrid populations in Southwest Utah[J]. *Western North American Naturalist*, 2000, **60**: 121—129.
- [6] ZHAO F J(赵凤君), GAO R F(高荣孚), SHEN Y B(沈应柏), *et al.* A study on foliar carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and water use efficiency of different *Populus deltoides* clones under water stress[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2005, **41**(1): 36—41(in Chinese).
- [7] LIU G X(刘光琇), CHEN T(陈 拓), AN L ZH(安黎哲), *et al.* The environmental significance of stable carbon isotope composition of modern plant leaves in the northern part of the Tibetan Plateau[J]. *Advance in Earth Science*(地球科学进展), 2004, **19**(5): 749—753(in Chinese).
- [8] WANG L(旺 罗), LÜ H Y(吕厚远), WU N Q(吴乃琴), *et al.* Altitudinal trends of stable carbon isotope composition for poaceae in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Quaternary Sciences*(第四纪研究), 2003, **23**(5): 574—580(in Chinese).
- [9] FENG H Y(冯虎元), AN L ZH(安黎哲), CHEN T(陈 拓), *et al.* The relationship between foliar stable carbon isotope composition in *Pedicularis* L. and environmental factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(冰川冻土), 2003, **25**(1): 88—93(in Chinese).
- [10] ZHOU Y CH(周咏春), FAN J W(樊江文), ZHONG H P(钟华平), *et al.* Relationships between altitudinal gradient and plant carbon isotope composition of grassland communities on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Science China: Earth Sciences*(中国科学:地球科学), 2013, **43**(1): 120—130(in Chinese).
- [11] SU B(苏 波), HAN X G(韩兴国), LI L H(李凌浩), *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*(植物生态学报), 2000, **24**(6): 648—655(in Chinese).
- [12] CHEN SH P(陈世苹), BAI Y F(白永飞), HAN X G(韩兴国), *et al.* Variations in foliar carbon isotope composition and adaptive strategies of *Carex korshinskyi* along a soil moisture gradient[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2004, **28**(4): 515—522(in Chinese).

- [13] YAN CH R(严昌荣), HAN X G(韩兴国), CHEN L ZH(陈灵芝), *et al.* Water use efficiency of six woody species in relation to micro-environmental factors of different habitats[J]. *Acta Ecology Sinica* (生态学报), 2001, **21**(11): 1 952—1 956(in Chinese).
- [14] YAN CH R(严昌荣), HAN X G(韩兴国), CHEN L ZH(陈灵芝), *et al.* Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within temperate deliduous forest: its spatial change and interspecies variation[J]. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1998, **40**(9): 853—859(in Chinese).
- [15] WANG Y G(王彦阁), YANG X H(杨晓晖), YU CH T(于春堂), *et al.* The actuality, ecological function and protective measures of genus *Nitraria*[J]. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2007, **14**(3): 74—79(in Chinese).
- [16] WANG SH D(王尚德), KANG X Y(康向阳). Current research situation and suggestion on *Nitraria tangutorum* Bobr. [J]. *Journal of Plant Genetic Resources* (植物遗传资源学报), 2005, **6**(2): 231—235(in Chinese).
- [17] QU CH M(渠春梅), HAN X G(韩兴国), SU B(苏波), *et al.* The characteristics of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants and plant water use efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ values in two fragmented rainforests in Xishuangbanna, Yunnan[J]. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2001, **43**(2): 186—192(in Chinese).
- [18] LIN ZH F(林植芳), LIN G ZH(林桂珠), KONG G H(孔国辉), *et al.* Effect of growth irradiance on stable carbon isotope ratio, intercellular CO_2 concentration and water-use efficiency of two woody plant in subtropical natural forest[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 1995, **3**(2): 77—82(in Chinese).
- [20] ZHENG SH X(郑淑霞), SHANGGUAN ZH P(上官周平). Variation in the $\delta^{13}\text{C}$ value of typical plants of Loess Plateau over the last 70 years[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(2): 289—295(in Chinese).
- [21] CHEN T(陈拓), FENG H Y(冯虎元), XU SH J(徐世建), *et al.* Stable carbon isotope composition of desert plant leaves and water-use efficiency[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2002, **22**: 288—291(in Chinese).
- [22] SU P X(苏培玺), CHEN H SH(陈怀顺), LI Q S(李启森). Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ values of desert plants and their water utilization efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ values in the desert of central Hexi corridor region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2003, **25**(5): 597—602.
- [23] MA J Y(马剑英), CHEN F H(陈发虎), XIA D SH(夏敦胜), *et al.* Correlations between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and physiological parameters of desert plant *Reaumuria soongorica* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(5): 1 166—1 171(in Chinese).
- [24] EHRLINGER J R, PHILLIPS S L, SCHUSTER W S F, *et al.* Differential utilization of summer rains by desert plants[J]. *Svalbard. Oecologia*, 1991, **88**(3): 430—434.
- [25] WELKER J M, WOOKEY P A, PARSON A N, *et al.* Leaf carbon isotope discrimination and vegetative responses of *Dryas octopetala* to temperature and water manipulations in a high arctic polar semi-desert[J]. *Oecologia*, 1993, **95**(4): 463—469.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106—195.
- [27] HAN J M(韩家懋), WANG G A(王国安), LIU D SH(刘东生). Appearance of C_4 plants and global changes[J]. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2002, **9**(1): 233—243(in Chinese).
- [28] REN SH J(任书杰), YU G R(于贵瑞). Carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of C_3 plants and water use efficiency in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(2): 119—124(in Chinese).
- [29] PRASOLAVA N V, XU Z H, LUNDKVIST K, *et al.* Genetic variation in foliar carbon isotope composition in relation to tree growth and foliar nitrogen concentration in clones of the F_1 hybrid between slash pine and Caribbean pine[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **172**: 145—160.
- [30] WELKER J M, JÓNSDÓTTIR I S, FAHNESTOCK J T. Leaf isotopic ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) and nitrogen contents of *Carex* plants along the Eurasian Coastal Arctic: results from the Northeast Passage expedition[J]. *Polar Biology*, 2003, **27**(1): 29—37.
- [31] ARES A, FOWNES J H. Water supply regulates structure, productivity, and water use efficiency of *Acacia koa* in Hawaii[J]. *Oecologia*, 1999, **121**(4): 458—466.
- [32] ARES A, FOWNES J H. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, **139**: 227—236.
- [33] WANG W(王文), JIANG W L(蒋文兰), XIE ZH K(谢忠奎), *et al.* Study on soil water in rhizosphere and root system distribution of *Nitraria tangutorum* on Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2013, **22**(1): 20—28(in Chinese).
- [34] LI M C(李明财), YI X F(易现峰), LI L X(李来兴), *et al.* Seasonal variations of $\delta^{13}\text{C}$ values in leaves of typical alpine plants grown in the East of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2005, **25**(1): 77—81(in Chinese).
- [35] CHEN T(陈拓), QIN D H(秦大河), REN J W(任贾雯), *et al.* The altitudinal and temporal variation of $\delta^{13}\text{C}$ values in leaves of *Plantago media* L. [J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2000, **20**(4): 672—675(in Chinese).