

文章编号: 1000-694X(2009)05-0866-06

西部中国沙棘叶片稳定碳同位素组成的 空间特征及其气候意义

刘光琇^{1,2}, 张 威², 陈桂琛¹, 章高森², 李 田³, 安黎哲³

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 生命科学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 分析了西部中国沙棘(*Hippophae rhamnoides sinensis*)叶片稳定碳同位素组成特征及其与环境因子之间的关系。结果表明, 中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-30.40\text{‰} \sim -24.91\text{‰}$ 之间变化, 平均值约为 -27.62‰ , 属于 C_3 植物。随纬度和经度的升高, 中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显升高, 而随海拔的升高而降低, 具有明显的空间分布特征。中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度没有明显的关系, 随蒸发量和日照时间的升高而升高, 随降水量的升高有降低趋势, 具有明显的气候意义。表明中国沙棘具有较高的水分利用效率, 水分是控制中国沙棘 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化或生长的主导因子。

关键词: 中国沙棘; 稳定碳同位素; 环境因子

中图分类号: Q948.11

文献标识码: A

植物有机碳同位素值包含了各种各样的环境信息, 其差异虽然是由于遗传控制的, 但环境效应仍然存在。因此, 植物有机碳同位素值的测定技术已经广泛应用于全球变化、地球科学和植物生理生态学的研究之中^[1-4]。然而迄今为止, 大量研究集中在运用碳同位素技术探讨不同地区或同一地区不同种植物碳同位素的组成特点与环境因子(主要是气候因子)之间的关系, 对于同种植物碳同位素在大区域复杂的自然环境中空间变化的规律目前还缺乏系统的研究^[5-6]。

中国沙棘(*Hippophae rhamnoides sinensis*)是一种具有很好生态效益和社会效益的优良植物, 为解决生态环境恶化、能源危机和资源短缺等问题发挥着巨大作用。我国不仅是中国沙棘种质资源最富集的地区, 而且也是中国沙棘的类群分化中心、原始类群中心和起源中心, 而对中国沙棘的碳同化特点与环境的关系, 未见有利用稳定碳同位素技术的研究报道^[7-9]。

笔者试图用不同位点采集的野生中国沙棘叶片为材料, 研究中国沙棘叶片稳定碳同位素组成特点以及与环境因子之间的关系, 为我们更好地研究和利用沙棘属种质资源提供科学的理论依据。

1 材料与方法

野生中国沙棘叶片采集于 2000—2001 年, 采集

地见图 1, 遍及甘肃、内蒙古、宁夏、青海、四川、山西、陕西 7 个省区, 采集位点 22 个, 每个位点采集 3~10 份不等的样品。

稳定碳同位素的测定: 根据 Boutton 等^[10]的方法并稍加修改制备 CO_2 。选取 5~10 个成熟叶片, 粉碎, 过 60 目筛。用燃烧法收集完全燃烧后产生的 CO_2 , 在 MAT-252 质谱仪上进行测定样品碳同位素组成。将植物样品转化为气体及质谱分析方法^[11]。测量精度为小于 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

2 结果与分析

2.1 沙棘属叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本特征

中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-30.40\text{‰} \sim -24.91\text{‰}$ 之间变化, 平均值约为 -27.62‰ 。由于 C_3 、 C_4 和 CAM 植物因光合羧化酶(RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶)和羧化的时空差异对 ^{13}C 有不同的识别和排斥, 导致了不同光合途径的植物具有显著不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 因此, $\delta^{13}\text{C}$ 值可用来鉴别植物的光合途径^[12-13]。Francey 等^[14]的研究结果表明, 陆生 C_3 、 C_4 和 CAM 植物体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-26\text{‰} \sim -28\text{‰}$ 、 $-12\text{‰} \sim -13\text{‰}$ 和 $-10\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 。据此推断, 中国沙棘属于 C_3 植物。但是, 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值不仅受植物光合途径的影响, 而且还受一系列环境因

收稿日期: 2009-02-10; 改回日期: 2009-04-14

基金项目: 科技部公益性行为(气象)科研专项(GYHY20076008); 国家自然科学基金项目(3077342); 中国科学院方向性项目(KZCX2-YW-317)资助

作者简介: 刘光琇(1962—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 研究员, 主要从事全球变化及生物学方面的研究。

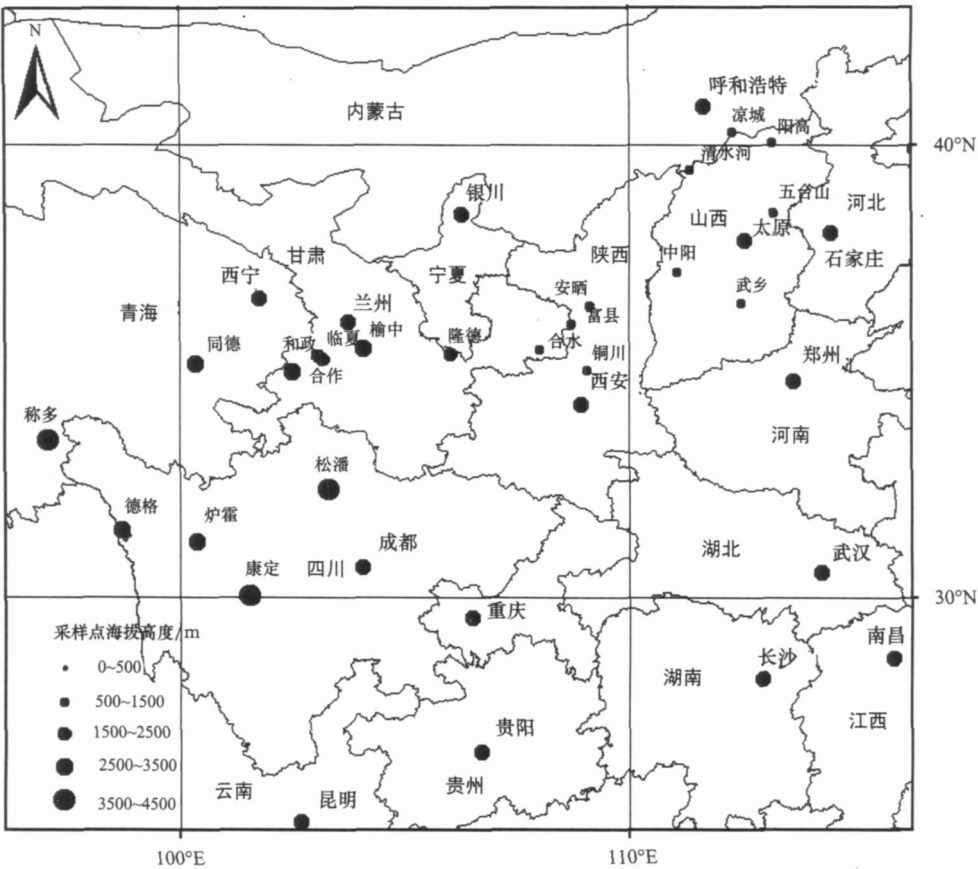


图 1 采样地点示意图

Fig. 1 Map showing sampling sites in study area

子的影响。研究表明,光照、土壤水分、盐度、空气污染都有可能引起植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著的差异^[15]。但从总体上来说,环境因子对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小的影响要小于光合途径的影响。

与热带亚热带树种桉树(−31.64‰)^[16]和红树(−29.4‰)^[17]叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比,属于温带落叶乔(灌)木的中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值(−27.62‰)明显偏高而接近于胡杨叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值(−27.93‰)^[18-19]。研究表明,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,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,是植物水分利用效率的有效指标^[20-22]。因此,中国沙棘较高的水分利用效率,可能是其成为改善西部生态环境的先锋树种之一的原因之一。

2.2 中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的空间特征

图 2 结果显示,随纬度和经度的升高,中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显升高。而随海拔的升高而降低。

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔的升高有降低的趋势(图 2),这与大多数前人的报道有差异。自从 Korner 等^[23]

率先开展植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海拔关系的研究以来,绝大多数报道显示,随海拔的增加叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为逐渐变重的趋势^[24-25]。 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔的升高而提高一方面是由于高山环境 CO_2 分压降低和叶片瞬时光合速率的升高:使植物对碳的需求常处于供不应求的状态,从而使植物光合作用器官对 ^{13}C 的分馏程度降低,植物组织中 CO_2 含量升高;另一方面是由于随海拔升高,大气压力(CO_2 分压)减少,引起植物叶片内外气体分压差降低,这样,大气 CO_2 进入叶片时的扩散阻力减小,碳同位素分馏值降低,表现为植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值加大。但 $\delta^{13}\text{C}$ 值跟海拔的相关性往往比较微弱,并且具有明显的物种依赖性^[22, 26-27],甚至对同样的物种,在不同年份表现出不同的海拔趋势^[28]。在一个模拟海拔变化的控制试验中,Morecroft 等^[29]发现在低温和喷洒水分时,*Nardus stricta* 叶片对 $^{13}\text{CO}_2$ 的识别能力降低了,而低大气压和高的土壤水分环境可导致识别能力的增强。因此,尽管从全球大尺度上看,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔高度的增加而增大,但局部地区可能遵从截然不同的格局,即小环境的变化在一定程度上可使 $\delta^{13}\text{C}$ 值跟海

拔的关系复杂化,进而使得没有一致的海拔趋势出现。本研究中样品中出现的海拔下降趋势可能是因为采样的区域较大,遍及了陕西、山西、内蒙古、宁

夏、青海、四川和甘肃 7 个省区,这样,海拔趋势可能会被植物在一个较低的海拔遇到水分胁迫的影响抵消,甚至逆转。

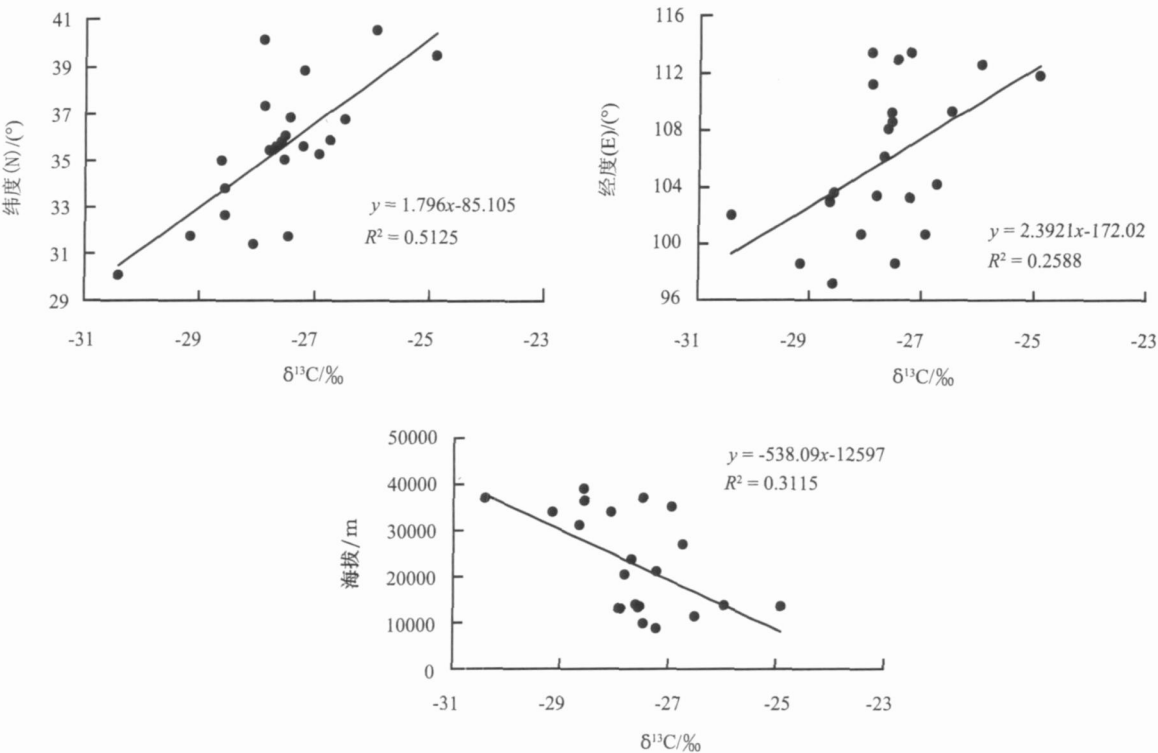


图 2 沙棘属植物叶片稳定碳同位素组成与空间特征之间的关系

Fig. 2 Relationships between the foliar stable carbon isotope composition and spatial characters

目前关于叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的纬度和经度变化的报道较少,而所得结果差异很大。Korner 等^[28]研究了多年生草本植物的纬度效应。他们发现在横跨 70° (从赤道到北极) 的纬度间,纬度每增加 1° , 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值将降低 0.036‰ ; 而冯虎元等^[31]在马先蒿(*Pedicularis*)中得出的结论刚好相反,他们发现纬度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间是一种正相关关系。Pedicino 等^[31]发现经度对 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显的负作用。韩家懋等^[32]认为在中国北方,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值从东到西有逐渐变重的趋势。本结果显示,沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明显正的纬度效应和经度效应。这可能与不同研究的采样策略不同或不同植物种对环境的适应性策略不同有关。

2.3 中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的气候意义

中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度没有明显的关系,随蒸发量和日照时间的升高,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。而随降水量的升高,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值有降低趋势(图 3)。

影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响因素很多,除了受植物本身遗传因素的影响外,还有温度、降水、相对湿度、光照等。研究表明,当降水量不足使空气湿度

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 CO_2 浓度下降,如果此时植物光合作用速率仍维持正常水平,植物对 $^{13}\text{CO}_2$ 的识别能力势必降低,从而使得叶片碳同位素值升高^[33-34]。中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与降水量的负相关和蒸发量与日照时间的正相关说明了植物可利用水分是影响中国沙棘生长的重要因子,因为植物可利用水分含量的多少普遍与降水正相关,而与蒸发量和日照时间负相关。廉永善等^[8]比较详细地研究了中国沙棘的生态学特性,认为中国沙棘集中分布于年降水量为 $400\sim 700\text{ mm}$ 的区域内,而中国沙棘生长发育最有利的降水需求在 $500\sim 600\text{ mm}$ 之间。当降水量小于 400 mm 时,沙棘的正常生长发育则会受到限制。

温度是影响植物碳同位素分馏的另一个重要因素。但相关研究表明,温度与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的关系比较复杂。这可能是因为不同植物有不同的光合最适温度的缘故^[35-37]。本研究中,温度与沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间没有明显的相关性(图 2)。根据廉永善等^[38]的结果,沙棘起源地区是中高海拔地区($2\,000\text{ m}$

~ 3 000 m), 由此向高海拔和低海拔演化, 形成了沙棘种类最富集的中心区在2 800 m~ 3 700 m。因为在本研究中, 样品的海拔范围从3 900 m~ 860 m, 因此, 温度的影响极可能被样品的广海拔分布所掩

盖。另外, 黄铨等^[39]发现沙棘对温度的要求不严格, 极端最低温度可达- 50 ℃, 极端最高温度可达50 ℃。这也许是沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度没有很好的相关性的另一个原因。

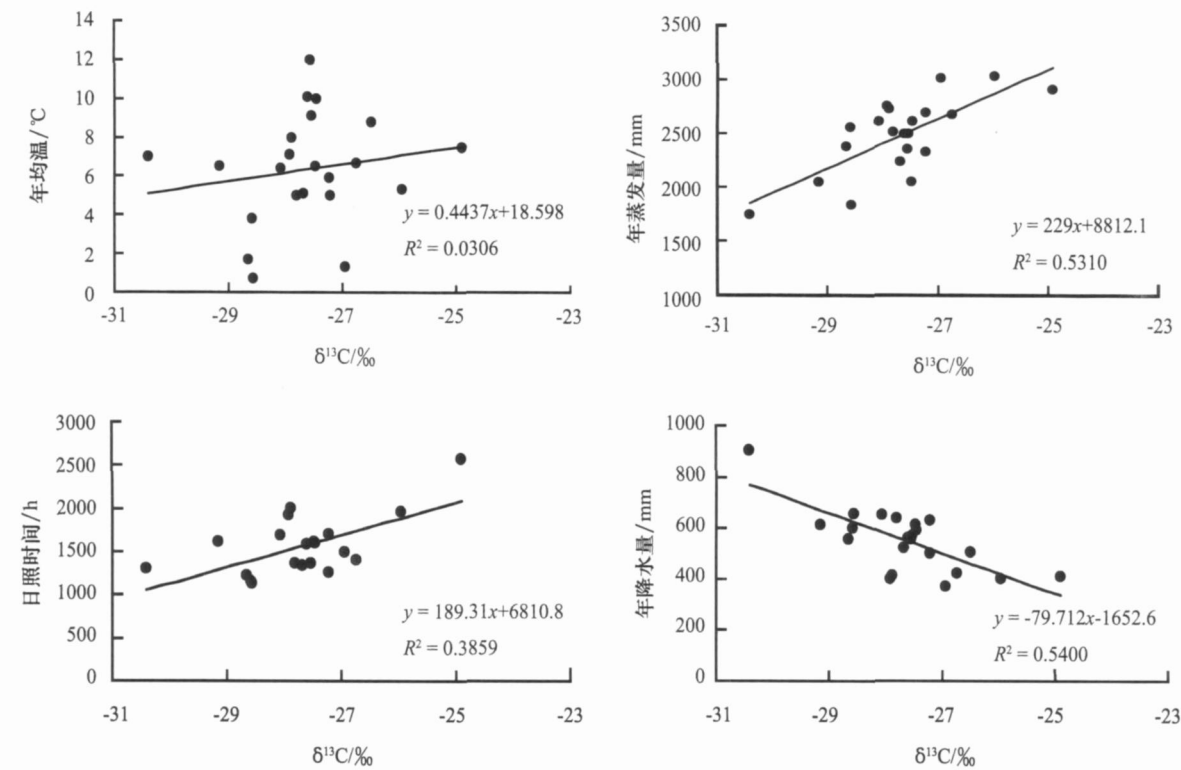


图 3 沙棘属植物叶片稳定碳同位素组成与气候特征之间的关系

Fig. 3 Relationships between the foliar stable carbon isotope composition and climate characters

3 结论

中国沙棘叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 - 30.40 ‰ ~ - 24.91 ‰之间, 平均值约为- 27.62 ‰, 属于 C_3 植物。

中国沙棘具有较高的水分利用效率, 这可能与中国沙棘对环境水分的特别敏感有关。随纬度和经度的升高, 中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显升高, 而随海拔的升高而降低, 具有明显的空间分布特征。中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度没有明显的关系, 随蒸发量和日照时间的升高而升高, 随降水量的升高有降低趋势, 具有明显的气候意义。进一步分析表明环境水分是决定中国沙棘对 ^{13}C 分馏能力差别的主要原因。

这些空间分布特征及气候意义说明中国沙棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值中含有大量的自然环境变化的信息。

参考文献 (References):

[1] O'leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. Biosci.

[2] 冯虎元, 安黎哲, 王勋陵. 环境条件对植物稳定碳同位素组成的影响[J]. 植物学通报, 2000, 17(3): 312- 318.

[3] 冯虎元, 安黎哲, 陈拓. 马先蒿属(*Pedicularis* L.) 植物稳定碳同位素组成与环境因子之间的关系[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 88- 93.

[4] 李相博, 陈践发. 植物碳同位素分馏作用与环境变化研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(3): 285- 290.

[5] 杨淑萍, 赵光平, 穆建华, 等. 宁夏极端气候事件及其影响分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1169- 1173.

[6] 马剑英, 陈发虎, 夏敦胜, 等. 荒漠植物红砂稳定碳同位素组成的空间分布特征[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 947- 954.

[7] 陈学林, 马瑞君, 孙坤. 中国沙棘属种质资源及其生境类型的研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(3): 451- 455.

[8] 廉永善, 卢顺光, 薛顺康, 等. 沙棘属植物生物学和化学[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2000: 228.

[9] 胡建忠. 沙棘的生态经济价值及综合开发利用技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000: 240.

[10] Boutton T W, Wong S C, Hachey D L, et al. Comparison of quartz and pyrex tubes for combustion of organic samples for stable carbon isotope analysis[J]. Ann Chem, 1983, 55: 1832

- 1833.
- [11] 冯虎元, 陈拓, 徐世健, 等. U V-B 辐射对大豆生长、产量和稳定碳同位素组成的影响[J]. 植物学报, 2001, 43(7): 709- 713.
- [12] O' Leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. Bio Science, 1988, 38: 328- 336.
- [13] 林植芳. 稳定碳同位素技术在植物生理生态学研究中的应用[J]. 植物生理学通讯, 1990, 3(3): 1- 6.
- [14] Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings[J]. Nature, 1977, 267: 28- 31.
- [15] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. Annual Reviews of Plant Physiology, 1989, 40: 503- 537.
- [16] 洪伟, 黄锦湖, 李健, 等. 不同桉树品种稳定碳同位素研究[J]. 福建林学院学报, 2008, 28(3): 193- 197.
- [17] 黄建辉, 林光辉, 韩兴国. 不同生境间红树科植物水分利用效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 530- 536.
- [18] 马剑英, 孙惠玲, 夏敦胜, 等. 塔里木盆地胡杨两种形态叶片碳同位素特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 51- 55.
- [19] 杨树德, 郑文菊, 陈国仓, 等. 胡杨披针形叶与宽卵形叶的超微结构与光合特性的差异[J]. 西北植物学报, 2005, 25(1): 14- 21.
- [20] Knight J D, Livingston N J, Kessel V. Carbon isotope discrimination and water use efficiency of six crops grown under wet and dry land conditions [J]. Plant, Cell And Environment, 1994, 17: 173- 179.
- [21] 渠春梅, 韩兴国, 苏波, 等. 云南西双版纳片断化热带雨林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示[J]. 植物学报, 2001, 43(2): 186- 192.
- [22] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆塔里木河下游胡杨不同叶形水势变化研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 83- 88.
- [23] Korner C, Farquhar G D, Roksandic Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude[J]. Oecologia, 1988, 74: 623- 632.
- [24] Morecroft M D, Woodward F I, Marrs R H. Altitudinal trends in leaf nutrient contents, leaf size and $\delta^{13}\text{C}$ of *Alchemilla alpine* [J]. Functional Ecology, 1992, 6: 730- 740.
- [25] Marshall J D, Zhang J. Carbon isotope discrimination and water-use efficiency in native plants of the north-central Rockies [J]. Ecology, 1994, 75(7): 1887- 1895.
- [26] Vitousek P M, Field C B, Matson P A. Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ in Hawaiian *Metrosideros polymorpha*: A case of internal resistance? [J]. Oecologia, 1990, 84: 362- 370.
- [27] 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.
- [28] Friend A D, Woodward F I, Switsur V R. Field measurements of photosynthesis, stomatal conductance, leaf nitrogen and $\delta^{13}\text{C}$ along altitudinal gradients in Scotland[J]. Functional Ecology, 1989, 3: 117- 122.
- [29] Morecroft M D, Woodward F I. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes[J]. Journal of Experimental Botany, 1990, 41: 1303- 1308.
- [30] Korner C, Farquhar G D, Wang S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends[J]. Oecologia, 1991, 88: 30- 40.
- [31] Pedicino L C, Leavitt S W, Betancourt J L, et al. Historical variations in $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ of herbarium specimens in the southwestern US [J]. Western North American Naturalist, 2002, 62(3): 348- 359.
- [32] 韩家懋, 王国安, 刘东生. C_4 植物的出现与全球环境变化[J]. 地质前缘, 2002, 9(1): 233- 243.
- [33] 阮成江, 李代琼. 黄土丘陵区沙棘气孔导度及其影响因子[J]. 西北植物学报, 2001, 21(6): 1078- 1084.
- [34] 孙惠玲, 马剑英, 王绍明, 等. 准噶尔盆地荒漠植物碳同位素组成研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 972- 976.
- [35] 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: 927- 943.
- [36] 刘彤, 赵新俊, 贾亚敏, 等. 古尔班通古特沙漠南缘心叶驼绒藜种群更新的空间格局[J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 258- 265.
- [37] 张建生, 张梅花, 李庆会, 等. 生态垫覆盖对沙漠土壤水分和温度的影响[J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 280- 283.
- [38] 廉永善, 陈学林. 沙棘的生态地理分布及其植物地理学意义[J]. 植物分类学报, 1992, 30(4): 349- 355.
- [39] 黄钰, 史玲芳, 王士坤, 等. 沙棘种植技术与开发利用[M]. 北京: 金盾出版社, 1998: 8- 9.

Spatial Characters and Climate Significances of Stable Carbon Isotope
Composition in *Hippophate rhamnoides sinensis*
Leaves in Western China

LIU Guang-xiu^{1,2}, ZHANG Wei², CHEN Gui-chen¹, ZHANG Gao-sen², LI Tian³, AN Li-ze³
(1.Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2.Key Laboratory of
Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy
of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Analysis on the relation between stable carbon isotope composition in *Hippophate rhamnoides sinensis* leaves and environmental factors was conducted in this study. Results showed that the leaf carbon isotope values ranged from - 30. 40 ‰ to - 24. 91 ‰, averaging - 27. 62 ‰, indicating the *Hippophate rhamnoides sinensis* species belongs to C₃ plant. The δ¹³C values of *Hippophate rhamnoides sinensis* has obvious spatial distribution characters, increasing with the increase of latitude and longitude, and decreasing with the increase of altitude. The δ¹³C values of *Hippophate rhamnoides sinensis* increase with the increase of evaporation and sunshine duration, and tend to decrease with the increase of precipitation, having considerable climate-indicating significance. The results also showed that the *Hippophate rhamnoides sinensis* has high water use efficiency and water is the main factor controlling its growth and the variation of foliar stable carbon isotope composition.

Keywords: *Hippophate rhamnoides sinensis*; δ¹³C; environmental factors

2007 年中国科技期刊影响因子总排序中前 50 名期刊

排名	期刊名称	影响因子	排名	期刊名称	影响因子
1	地质科学	4. 359	26	土壤学报	1. 810
2	岩石学报	3. 524	27	古地理学报	1. 794
3	地球物理学报	2. 823	28	第四纪研究	1. 780
4	中国公路学报	2. 592	29	地质论评	1. 773
5	建筑科学与工程学报	2. 394	30	电力系统自动化	1. 767
6	光学精密工程	2. 359	31	中国药理学通报	1. 708
7	地理科学	2. 344	32	气象学报	1. 678
8	大地构造与成矿学	2. 323	33	大地测量与地球动力学	1. 674
9	地学前缘	2. 306	34	地球化学	1. 662
10	石油勘探与开发	2. 226	35	地球科学	1. 657
11	矿床地质	2. 145	36	软件学报	1. 644
12	地理学报	2. 143	37	植物生态学报	1. 644
13	地质学报	2. 090	38	植物营养与肥料学报	1. 641
14	中国地质	2. 082	39	大气科学	1. 634
15	石油与天然气地质	2. 017	40	高校地质学报	1. 621
16	中国机电工程学报	2. 003	41	地理研究	1. 594
17	交通工程运输学报	1. 966	42	物理学报	1. 566
18	CHINESE PHYSICS	1. 960	43	岩石矿物学杂志	1. 548
19	电网技术	1. 941	44	中国农业科学	1. 519
20	地球物理学进展	1. 885	45	草业学报	1. 510
21	中国科学 D	1. 839	46	高原气象	1. 502
22	生态学报	1. 837	47	应用生态学报	1. 498
23	中国沙漠	1. 836	48	中华结核和呼吸杂志	1. 494
24	石油实验地质	1. 828	49	中华护理杂志	1. 473
25	自然资源学报	1. 823	50	PEDOSPHERE	1. 455

摘自中国科学技术信息研究所公布的 2008 年版《中国科技期刊引证报告》(核心版)。