

中国区域478种C₃植物叶片碳稳定性同位素组成与水分利用效率

任书杰* 于贵瑞**

中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN综合研究中心, 北京 100101

摘要 目前, 在中国区域关于植物碳稳定性同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)已经有了很多的研究, 同时, $\delta^{13}\text{C}$ 作为植物水分利用效率(WUE)的替代指标, 得到了越来越广泛的应用。而这些研究多集中在站点或小的区域尺度, 那么在整个中国区域尺度上, $\delta^{13}\text{C}$ 能否作为植物 WUE 的替代指标值得探讨。该文通过对文献资料的收集整理, 研究了中国区域187个采样点478种C₃植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$, 统计分析结果表明 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 -33.50‰ – -22.00‰ , 均值为 $-(27.10 \pm 1.70)\text{‰}$ 。在乔木、灌木和草本3种不同的生活型间, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的差异达到极显著水平, 其中以草本的 $\delta^{13}\text{C}$ 最高, 乔木最低, 这与在站点或小的区域尺度上的研究结果不同。对不同系统发育类型的植物而言, 种子植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 极显著地大于蕨类植物; 裸子植物与被子植物间的差异未达到显著水平; 单子叶植物极显著地大于双子叶植物。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随经度的变化没有明显的规律, 但是随纬度的增加, $\delta^{13}\text{C}$ 极显著地升高。随年均温度和年均降雨量的降低, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值极显著升高。年均降雨量与 $\delta^{13}\text{C}$ 间的这种极显著的负相关关系, 与 WUE 和降水量间的关系一致, 这表明在大的区域尺度上, $\delta^{13}\text{C}$ 可以作为植物 WUE 的指示指标。

关键词 C₃植物, 生活型, 降雨量, 稳定性同位素, 水分利用效率

Carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of C₃ plants and water use efficiency in China

REN Shu-Jie* and YU Gui-Rui**

Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract

Aims There have been many studies of carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of C₃ plants in China, and $\delta^{13}\text{C}$ has been widely used as an index of water use efficiency (WUE); however, most studies focused on single sites or small regions. Therefore, our objective was to study the spatial pattern of $\delta^{13}\text{C}$, the relationships between $\delta^{13}\text{C}$ and climate factors and whether $\delta^{13}\text{C}$ can represent WUE in large regions.

Methods We obtained leaf $\delta^{13}\text{C}$ for 478 C₃ species from 187 sites in China based on the literature.

Important findings The range of $\delta^{13}\text{C}$ was from -33.50‰ to -22.00‰ , and the mean was $-(27.10\text{‰} \pm 1.70)\text{‰}$. There were significant differences among $\delta^{13}\text{C}$ of grasses, shrubs and trees, with grasses having the highest value and trees the lowest. The result was different from studies in single sites and small regions. For different phylogenetic plants, $\delta^{13}\text{C}$ of seed plants was significantly higher than ferns, the difference between gymnosperms and angiosperms was not statistically significant and monocotyledons had significantly higher values than dicotyledons. Leaf $\delta^{13}\text{C}$ had irregular variation with increasing longitude, but significantly increased with increasing latitude. Leaf $\delta^{13}\text{C}$ significantly increased with mean annual temperature and decreasing mean annual precipitation. The relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and precipitation was similar to that of WUE and precipitation, so we conclude that $\delta^{13}\text{C}$ of C₃ plants can be used as an index of WUE in large regions as well as in single sites or small regions.

Key words C₃ plant, life-form, precipitation, stable isotope, water use efficiency

碳稳定性同位素技术具有简捷、快速、准确、高效等特点被广泛应用于植物光合型的鉴定 (Ehleringer *et al.*, 1987; 殷立娟和祝玲, 1990; 殷立

娟和王萍, 1997)、古气候重建(Raffalli-Delerce *et al.*, 2004)以及植物水分利用效率(WUE) (Knight *et al.*, 1994)等多个研究领域。目前, 植物叶片碳稳定性同

收稿日期Received: 2010-03-03 接受日期Accepted: 2010-05-17

* E-mail: renshujie1656@163.com

** 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: yugr@igsnr.ac.cn)

位素组成($\delta^{13}\text{C}$)被认为是估算植物长期WUE的有效途径(Farquhar *et al.*, 1982; Knight *et al.*, 1994; 刘海燕和李吉跃, 2008; 孙双峰等, 2005)。

目前, 在利用 $\delta^{13}\text{C}$ 来估算植物长期WUE方面中国已经有了许多研究(苏波等, 2000; 王国安和韩家懋, 2002; 陈拓等, 2003; 王国安等, 2003; 刘光琇等, 2004; 郑淑霞和上官周平, 2005)。但是这些研究多集中在站点或小的区域尺度上, 在整个中国区域尺度上, 降雨量存在较大的空间变异, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 能否作为WUE的指示指标值得进一步探讨。

本文通过对中国目前已公开发表的 C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的文献资料的收集整理, 研究在中国区域尺度上, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间分布格局, 以及与气候因子尤其是降雨量的关系, 探讨在大的区域尺度上, 叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 能否作为植物WUE的替代指标。

1 材料和方法

1.1 数据库的建立

中国区域植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值数据库的数据主要来自2个方面: (1)已公开发表的学术论文, (2)中国期刊网博硕士学位论文数据库。本数据库包括了187个采样点(对于原出处没有经纬度信息的采样点只要在同一县境内的统一用该县县城所在点的经纬度代替) 63科249属478种植物。采样点分布如图1所示。



审图号: GS(2010)1351号

图1 中国区域187个采样点分布图。

Fig. 1 Distribution of 187 sample sites in China.

1.2 采样点环境要素的收集

本文所需要的气象数据(年平均温度和年均降雨量), 如果文献中已有记载则直接获取, 否则通过1954–2002年全国730个站点进行 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 样条函数插值的气象数据库(陶波等, 2006)获得。

1.3 数据分析

采用SPSS统计分析软件包(SPSS 14.0 for windows, Chicago, USA)进行数据统计分析。在进行多重比较时, 若方差为齐性, 则采用LSD法进行多重比较, 若方差为非齐性, 则采用法Tamhane's T2法进行多重比较。正态分性检验采用One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test, 简称K-S检验。

2 结果和分析

2.1 中国区域植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 统计学特征

从图2可以看出, 中国区域478种 C_3 物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 -33.50‰ – -22.00‰ , 分布较为集中, 超过80%植物的叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量分布在 -24.50‰ – -28.00‰ , 平均值为 $-(27.10 \pm 1.70)\text{‰}$ 。

2.2 不同生活型和系统发育型植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的差异

乔木、灌木和草本3种不同生活型的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 分别为 $-(28.30 \pm 1.75)\text{‰}$ 、 $-(27.50 \pm 1.91)\text{‰}$ 和 $-(26.81 \pm 1.53)\text{‰}$, 并且3种不同生活型间的差异均达到极显著水平(表1)。

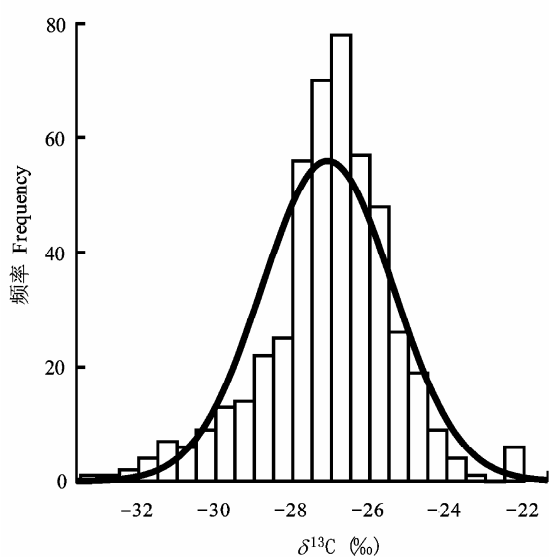


图2 中国区域478种C₃植物叶片碳稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的频率分布图。

Fig. 2 Histogram of leaf carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of 478 C₃ species in China.

表1 不同生活型植物叶片碳稳定性同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的比较
Table 1 Comparison of leaf carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) between different life-form plants

生活型 Life form	均值 Mean (‰)	差异 Difference	物种数 No. of species
草本 Grass	-26.81 ± 1.53	A	341
灌木 Shrub	-27.50 ± 1.91	B	86
乔木 Tree	-28.30 ± 1.75	C	51

大写字母表示不同生活型间差异达到极显著水平($p < 0.01$)。Capital letters indicate significant differences at the confidence level of $p < 0.01$ between different life-form plants.

表2 不同系统发育植物叶片碳稳定性同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的比较

Table 2 Comparison of leaf carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) between different phylogenetic plants

系统发育类型 Phylogenetic type	均值 Mean (‰)	差异 Difference	物种数 No. of species
种子植物 Seed plant	-27.07 ± 1.68	A	473
蕨类植物 Fern	-29.99 ± 1.41	B	5
裸子植物 Gymnosperm	-26.39 ± 2.41	a	10
被子植物 Angiosperm	-27.08 ± 1.66	a	463
单子叶植物 Monocotyledon	-26.37 ± 1.70	A	86
双子叶植物 Dicotyledon	-27.24 ± 1.61	B	377

不同大写字母表示差异达到极显著水平($p < 0.01$)，不同小写字母表示差异达到显著水平($p < 0.05$)。

Capital and small letters indicate significant differences at the confidence level of $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

表3 不同生活型植物样点分布情况比较

Table 3 Comparison of sample sites distribution about different life-form plants

生活型 Life form	纬度 Latitude	年均温 MAT	年均降雨量 MAP	物种数 No. of species
乔木 Tree	32.62 ^C	9.89 ^A	780.15 ^A	117
灌木 Shrub	35.42 ^B	8.93 ^A	549.88 ^B	228
草本 Grass	38.92 ^A	2.06 ^B	389.99 ^C	603

表中的纬度、年均温度和年均降雨量是按采样点物种数的加权平均，物种数为按采样点计算的物种数总和。上角大写字母表示不同生活型在0.01水平上的差异，相同字母表示差异不显著，不同字母表示差异显著。Latitude, MAT and MAP are the weighted means based on species numbers of sample sites, number of species is based on sample sites. Capital letters indicate significant differences at the confidence level of 0.01, the same letters indicate the differences aren't significant, and the different letters indicate the differences are significant. MAT, mean annual temperature; MAP, mean annual precipitation.

对于不同系统发育的植物而言，蕨类植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 极显著低于种子植物；种子植物中的裸子植物低于被子植物，但两者间的差异未达到显著水平($p = 0.162$)；被子植物中的单子叶植物极显著高于双子叶植物(表2)。

2.3 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间分布格局及与气候因子的关系

植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随经度和纬度的空间分布格局如图3A和图3B所示。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值从西到东随经度的增加并没有显著的变化规律，但是从南到北随纬度的增加，叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值极显著增加($R^2 = 0.1235$, $n = 791$)。

植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随气候因子年均温度和年均降雨量的分布如图3C和图3D所示。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随年均温度和年均降雨量的增加而极显著地降低($p < 0.0001$, $n = 791$)。

3 讨论

对中国区域不同生活型的植物，叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的高低顺序为：草本(-26.81‰) > 灌木(-27.50‰) > 乔木(-28.30‰)。由于植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值是植物长期生理生态过程的综合指标，可以用来指示植物长期的WUE (Farquhar *et al.*, 1982; Knight *et al.*, 1994)。我们初步认为，3种生活型的植物中草本具有最高的WUE，乔木WUE最低，灌木居中。这与目前在中国区域尺度的研究结果不同(李明财等, 2008; 陈拓等, 2002)。在中国西部荒漠生态系统的C₃植物研究结果(陈拓等, 2002)表明，以乔木叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高(-26.83‰)，灌木次之(-27.01‰)，草本最低(-28.04‰)，但是杂草类的较高，为 -26.96‰ 。在对

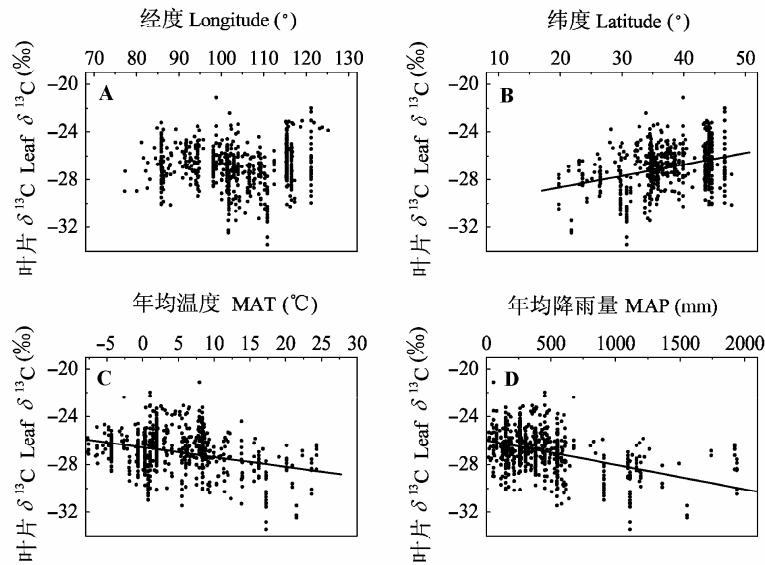


图3 中国区域 C_3 植物叶片碳稳定性同位素组成($\delta^{13}C$)的空间分布格局。经度, $y = 0.0036x - 27.273$ ($R^2 = 0.0005$, $n = 791$); 纬度, $y = 0.0965x - 30.562$ ($R^2 = 0.1235$, $n = 791$); 年平均温度, $y = -0.0812x - 26.561$ ($R^2 = 0.1045$, $n = 791$); 年平均降雨量, $y = -0.002x - 25.977$ ($R^2 = 0.173$, $n = 791$)。

Fig. 3 Spatial pattern of leaf carbon isotope composition ($\delta^{13}C$) of C_3 species in China. MAT, mean annual air temperature; MAP, mean annual precipitation. Longitude, $y = 0.0036x - 27.273$ ($R^2 = 0.0005$, $n = 791$); latitude, $y = 0.0965x - 30.562$ ($R^2 = 0.1235$, $n = 791$); MAT, $y = -0.0812x - 26.561$ ($R^2 = 0.1045$, $n = 791$); MAP, $y = -0.002x - 25.977$ ($R^2 = 0.173$, $n = 791$).

青藏高原色季拉山林线处的研究(李明财等, 2008)表明, 常绿乔木(冷杉(*Abies georgei*)) (-27.27‰) > 常绿灌木(-27.56‰) > 落叶灌木(-27.93‰) = 草本(-27.91‰)。在西双版纳热带雨林生态系统的研究(渠春梅等, 2001)同样表明, 乔木(-33.01‰)略大于灌木(-32.98‰), 高于草本(-33.93‰)。因此我们进一步分析了样点的分布情况, 如表3所示, 从表中采样点分布以及气候因子的大小我们可以得出, 草本植物相对于灌木和乔木多分布在年均温度和年均降雨量较低的高纬度地区, 其次为灌木, 而乔木的纬度较低, 年均温度和年均降雨量较高。因此我们认为造成本研究中叶片 $\delta^{13}C$ 值草本>灌木>乔木的原因之一可能是由于采样点的分布不均。但是在中国区域上三者 $\delta^{13}C$ 值的顺序也说明了相对于乔木, 草本和灌木更适合在干旱的区域生存, 具有较高的抗旱性。

在中国区域, 叶片 $\delta^{13}C$ 值随年均降雨量的升高而显著降低($y = -0.002x - 25.977$, $R^2 = 0.173$, $p < 0.0001$, $n = 791$), 这说明降水量越高 $\delta^{13}C$ 越低, WUE 越低, 这与目前的绝大部分研究结果一致(Stewart *et al.*, 1995; 王国安和韩家懋, 2002; Keitel *et al.*, 2006; Peuke *et al.*, 2006)。在澳大利亚昆士兰南部相

距900 km的12个植物群落348个植物种的研究结果(Stewart *et al.*, 1995)表明, 虽然在不同的植物群落和不同物种间存在较大的变异, 但是叶片 $\delta^{13}C$ 与5年的平均降雨量存在极显著的负相关关系($R^2 = 0.70$, $n = 12$), 说明 $\delta^{13}C$ 可以表征水分的可利用性。对来源于德国的11个不同气候条件下的山毛榉(*Fagus sylvatica*)幼苗的温室培养实验(Peuke *et al.*, 2006)表明, 干旱显著增加了叶片、茎秆和根系的 $\delta^{13}C$ 。在德国东部到法国南部具有较大的环境变异的样带上的研究(Keitel *et al.*, 2006)表明, 叶片 $\delta^{13}C$ 与空气的相对湿度存在显著的负相关关系($R = -0.64$, $p < 0.05$)。王国安和韩家懋(2001)对中国西北分布较广的4种植物——独行菜(*Lepidium apetalum*)、藜(*Chenopodium album*)、平车前(*Plantago depressa*)和魁薊(*Cirsium leo*)的叶片 $\delta^{13}C$ 值均随着年降雨量降低而逐渐升高的趋势, 且独行菜、藜和魁薊的变化达到了显著水平。陈世萍等(2004)等测定了中国内蒙古锡林河流域6个水分条件不同的典型植物群落, 黄囊薹草(*Carex korshinskyi*)的结果表明, 土壤水分降低, 叶片 $\delta^{13}C$ 值显著增大。苏波等(2000)对中国东北样带草原区15个常见植物种叶片的 $\delta^{13}C$ 值的研究表明, 有相当一部分植物种的 $\delta^{13}C$

值随年均降雨量和年均温度的增加呈不同程度的降低趋势, 但是也有少数物种的变化截然相反或变化不大。在中国北方黄土区对 C₃ 草本植物的研究(王国安和韩家懋, 2002)表明, 在黄土高原中部的半湿润气候区比黄土高原西部边缘半干旱—干旱气候区显著降低, 年降雨量是造成这种显著降低的主要原因。本研究的结果与上述试验条件和区域尺度的研究结果一致, 水分条件越好, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值越低, 即叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 WUE 间存在正相关关系。因此, 在中国区域范围内, C₃ 植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以表征植物的 WUE。

致谢 国家自然科学基金重大项目(30590381)、中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-432)和国家重点基础研究发展计划(2010CB833504)资助。

参考文献

- Chen SP (陈世莘), Bai YF (白永飞), Han XG (韩兴国), An JL (安吉林), Guo FC (郭富存) (2004). Variations in foliar carbon isotope composition and adaptive strategies of *Carex korshinskyi* along a soil moisture gradient. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 28, 515–522. (in Chinese with English abstract)
- Chen T (陈拓), Feng HY (冯虎元), Xu SJ (徐世建), Qiang WY (强维亚), An LZ (安黎哲) (2002). Stable carbon isotope composition of desert plant leaves and water-use efficiency. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 22, 288–291. (in Chinese with English abstract)
- Chen T (陈拓), Yang MX (杨梅学), Feng HY (冯虎元), Xu SJ (徐世健), Qiang WY (强维亚), He YQ (何元庆), An LZ (安黎哲) (2003). Spatial distribution of stable carbon isotope compositions of plant leaves in the north of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 25, 83–87. (in Chinese with English abstract)
- Ehleringer JR, Lin ZF, Field CB, Sun GC, Kuo CY (1987). Leaf carbon isotope ratios of plants from a subtropical monsoon forest. *Oecologia*, 72, 109–114.
- Farquhar GD, O'Leary MH, Berry JA (1982). On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 121–137.
- Keitel C, Matzarakis A, Rennenberg H, Gessler A (2006). Carbon isotopic composition and oxygen isotopic enrichment in phloem and total leaf organic matter of European beech (*Fagus sylvatica* L.) along a climate gradient. *Plant, Cell & Environment*, 29, 1492–1507.
- Knight JD, Livingston NJ, Kessel C (1994). Carbon isotope discrimination and water-use efficiency of six crops grown under wet and dryland conditions. *Plant, Cell & Environment*, 17, 173–179.
- Li MC (李明财), Luo TX (罗天祥), Kong GQ (孔高强), Guo J (郭军) (2008). Characteristics of stable carbon isotope compositions of different life form species growing at the timberline in Sergyemla Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 3160–3167. (in Chinese with English abstract)
- Liu GX (刘光琇), Chen T (陈拓), An LZ (安黎哲), Wang XL (王勋陵), Feng HY (冯虎元) (2004). The environmental significance of stable carbon isotope composition of modern plant leaves in the northern part of the Tibetan Plateau. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 19, 749–753. (in Chinese with English abstract)
- Liu HY (刘海燕), Li JY (李吉跃) (2008). Application of stable isotopic carbon in studies of plant water use efficiency. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 23, 54–58. (in Chinese with English abstract)
- Peuke AD, Gessler A, Rennenberg H (2006). The effect of drought on C and N stable isotopes in different fractions of leaves, stems and roots of sensitive and tolerant beech ecotypes. *Plant, Cell & Environment*, 29, 823–835.
- Qu CM (渠春梅), Han XG (韩兴国), Su B (苏波), Huang JH (黄建辉), Jiang GM (蒋高明) (2001). 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. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 43, 186–192. (in Chinese with English abstract)
- Raffalli-Delercé G, Masson-Delmotte V, Dupouey JL, Stievenard M, Breda N, Moisselin JM (2004). Reconstruction of summer droughts using tree-ring cellulose isotopes: a calibration study with living oaks from Brittany (western France). *Tellus B*, 56, 160–174.
- Stewart GR, Turnbull MH, Schmidt S, Erskine PD (1995). ^{13}C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22, 51–56.
- 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 Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 648–655. (in Chinese with English abstract)

English abstract

- Sun SF (孙双峰), Huang JH (黄建辉), Lin GH (林光辉), Zhao W (赵威), Han XG (韩兴国) (2005). Application of stable isotope technique in the study of plant water use. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 2362–2371. (in Chinese with English abstract)
- Tao B (陶波), Cao MK (曹明奎), Li KR (李克让) (2006). Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981–2000. *Science in Chinese (Series D)* (中国科学D辑), 36, 1–9. (in Chinese)
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋) (2001). 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), Liu DS (刘东生) (2003). The carbon isotope composition of C_3 herbaceous plants in loess area of northern China. *Science in Chinese (Series D)* (中国科学D辑), 33, 550–556. (in Chinese)
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋), Zhou LP (周力平) (2002). Relationships between $\delta^{13}\text{C}$ values of C_3 plants and the annual average temperature in northern China. *Geology in China* (中国地质), 29, 55–57. (in Chinese with English abstract)
- Yin LJ (殷立娟), Wang P (王萍) (1997). Distribution of C_3 and C_4 photosynthetic pathways of plants on the steppe of northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 17, 113–123. (in Chinese with English abstract)
- Yin LJ (殷立娟), Zhu L (祝玲) (1990). C_3 and C_4 plant in forage resource of grasslands in northeastern China. *Inner Mongolia Prataculture* (内蒙古草业), (3), 32–40. (in Chinese)
- Zheng SX (郑淑霞), Shangguan ZP (上官周平) (2005). Tempo-spatial variations in the stomatal density and $\delta^{13}\text{C}$ value of *Quercus liaotungensis* leaves. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 41, 30–36. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 杨 劫 责任编辑: 李 敏