近 70 年来黄土高原典型植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化研究

郑淑霞¹ 上官周平^{2*}

(1 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100)

(2 西北农林科技大学, 陕西杨陵 712100)

摘 要 对黄土高原地区 4 种典型 C_3 植物狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和酸枣(*Zizyphus jujuba* var. *spinosa*)样品稳定性碳同位素组分($\delta^{13}\text{C}$)进行分析, 研究了从 20 世纪 30 年代至今近 70 年中不同年代植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化。结果表明, 在近 70 年中, 4 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -25.05‰ ~ -29.75‰ , 平均值为 -27.04‰ 。4 种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈下降趋势, 表明随气候环境变化, 近 70 年 4 种植物的水分利用效率(*WUE*)均呈降低趋势。但不同植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降幅度不同: 狼牙刺和辽东栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降非常明显, 虎榛子叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降也较明显, 而酸枣叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降不明显。4 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降低率分别为 14.65%、14.46%、11.99% 和 2.44%, 说明不同植物对气候环境因子的敏感性不同, 具有不同的适应环境变化的策略, 酸枣是 4 种植物中耐旱能力较强, *WUE* 较高的物种。

关键词 碳同位素组分 C_3 植物 黄土高原 气候环境

VARIATION IN THE $\delta^{13}\text{C}$ VALUE OF TYPICAL PLANTS OF LOESS PLATEAU OVER THE LAST 70 YEARS

ZHENG Shu-Xia¹ and SHANGGUAN Zhou-Ping^{2*}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Increases in the world population combined with accelerated rates of industrialization has led to increases in green-house gases in the atmosphere, particularly CO_2 concentrations, resulting in an increase in global temperatures. Water use efficiency (*WUE*) is a measure of a plant's performance growing under different environmental conditions, and is an important index that reflects a plant's ability to adapt to climate change. Carbon isotopes provide a long-term, integrative measure of *WUE* with high $\delta^{13}\text{C}$ indicating high *WUE*. Stable carbon isotopes have become an important technique in ecophysiology studies in recent years for analyzing the long-term *WUE* of plants growing in different habits and to study the response of plant to different environmental variables, such as light intensity, precipitation, temperature, CO_2 , and mineral nutrient availability.

The Loess Plateau is a critical ecosystem in China but suffers from serious soil erosion problems. Water is the most important limiting environmental factor in this region and research on plant *WUE* responses to climate change is of particular relevance. However, only a few studies have examined foliar $\delta^{13}\text{C}$ value in response to climate change in this ecosystem. Four C_3 plants that are typical of the Loess Plateau were chosen as materials: *Quercus liaotungensis*, a tree, and three species of shrubs, *Ostryopsis davidiana*, *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* and *Sophora viciifolia*. Dry leaves were collected from herbarium specimens collected over a 70 year period from the 1930's to 2002. A total of 25 samples from about 160 plant specimens were analyzed that were collected from the hilly and gully region of the Plateau ranging from the northern Tongchuan to the southern Yanan.

The carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of leaves was analyzed using a MAT-251 mass-spectra photometer. The results showed that the variation in the $\delta^{13}\text{C}$ values differed among the species tested: *Ostryopsis davidiana* (-25.05‰ to -29.75‰) > *Quercus liaotungensis* (-25.51‰ to -29.20‰) > *Sophora viciifolia* (-25.12‰ to -28.80‰) > *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* (-26.69‰ to -28.69‰). The mean $\delta^{13}\text{C}$ value of four plants was -27.04‰ ranging from -25.05‰ to -29.75‰ . Comparing the mean $\delta^{13}\text{C}$ value among four species in the age of 30, 50, 70, 80 and the year 2002 indicated that the following or-

收稿日期: 2003-07-22 接受日期: 2004-01-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2002CB111502)和国家自然科学基金(30370230; 40025106)项目

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

der of *Sophora viciifolia* (−26.54‰) > *Ostryopsis davidiana* (−26.99‰) > *Quercus liaotungensis* (−27.14‰) > *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* (−27.49‰) is obtained. A decrease in the foliar $\delta^{13}\text{C}$ value with time was found in all four species, indicating that the *WUE* of the four species all declined over time. However, the decrease in foliar $\delta^{13}\text{C}$ values varied among the four species with significant decreases measured in two species, *Sophora viciifolia* and *Quercus liaotungensis*, a strong but not significant decrease in the leaves of *Ostryopsis davidiana*, and only a slight decrease in *Zizyphus jujuba* var. *spinosa*. The decrease in the $\delta^{13}\text{C}$ values in the four species were: 14.65‰, 14.46‰, 11.99‰ and 2.44‰, respectively. It was shown that different species have different sensitivities to climate change, and *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* was the most drought-tolerant of the four species with a high *WUE*.

Key words Carbon isotope composition, C_3 plant, Loess Plateau, Climate changes

在过去 100 年中,随着全球人口剧增与工业化进程的加快,大气 CO_2 浓度增加形成的温室效应和由此造成的气候环境变化是有史以来对陆地生态系统和植被分布影响最大的时期(Houghton *et al.*, 1990)。植物水分利用效率(*WUE*)是探明植物对于全球环境变化适应性以及预测全球变化的重要指标。稳定性碳同位素技术因其具有简捷、快速、准确、高效等特点而被广泛应用于植物生态学研究领域的许多领域(Farquhar *et al.*, 1989; 林植芳, 1990)。用植物体内稳定碳同位素特性来分析或指示植物种内生理生态的变异特性、植物种间生理生态特性的差异、不同生境下植物长期 *WUE* 的变化以及植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气候环境因子的响应等问题已成为目前植物生理生态研究的热点之一(Ziegler, 1995; 严昌荣等, 1998; 苏波等, 2000)。经过 20 多年的发展,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值已成为一种公认的估算植物长期 *WUE* 的技术途径(孙谷畴等, 1993; 上官周平, 2000; Warren *et al.*, 2001; Condon *et al.*, 2002)。

植物 *WUE* 是植物水分利用状况与抗旱特性的一个客观评价指标,它能为不同生境选择适宜树种提供理论依据。黄土高原是我国生态环境最为脆弱的区域之一,在这一区域水分和生态几乎是同等重要的问题(Shangguan *et al.*, 2002),因此,在黄土高原地区进行植物 *WUE* 研究就显得尤为重要。本文以黄土高原地区 4 种典型植物样品为材料,利用稳定性碳同位素测定技术,研究从上世纪 30 年代至今近 70 年这一时间尺度内不同年代植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化情况,以揭示黄土高原自然生态系统下不同植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种间差异及演变规律,探讨黄土高原地区不同植物 *WUE* 与气候环境变化的关系,为黄土高原脆弱生态环境条件下抗旱性树种的选育、森林植被的恢复重建提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区自然概况

黄土高原丘陵地区的延安以南、铜川以北范围地理位置为 $35^{\circ}12' \sim 36^{\circ}36' \text{N}$ 、 $109^{\circ}12' \sim 109^{\circ}42' \text{E}$, 是黄土高原的森林地带,属于落叶阔叶林区,海拔 1 000~1 500 m,年平均气温 $8.6 \sim 13^{\circ}\text{C}$,年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3 000~5 012 $^{\circ}\text{C}$ 。年降雨量 530~730 mm,降雨多集中在 7~8 月,干燥度 1.5,属暖温带半湿润半干旱气候。该区土壤多为灰褐土和褐土,以灰褐土为主。土壤水分分为年循环补偿或基本补偿区。植被类型主要为辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林,还有一些次生的山杨(*Populus davidiana*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林和次生的灌丛草甸。

1.2 材料的选取

根据黄土高原气候条件和植被的地带性特征,选择 4 种有代表性的植物为实验材料,这 4 种植物均为 C_3 植物,1 种乔木:辽东栎,3 种灌木:虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、酸枣(*Zizyphus jujuba* var. *spinosa*)和狼牙刺(*Sophora viciifolia*),以上 4 种植物样品均取自中国科学院西北植物研究所标本馆,取样原则为从上世纪 30 年代至今近 70 年各个年代均取样,取样年份的时间间隔和取样量视标本藏量而定,一般每一年代 1~2 份,每份样品由同一年份不同地点(4~5 个)的多份标本叶片组成,4 种植物共计 25 份样品,160 余份植物标本。为求植物生存环境上的一致和尽可能减小植物个体标本间的差异,所取植物样品均选自黄土高原丘陵地区的延安以南、铜川以北范围内,采样时间为 6~10 月。

1.3 植物叶片稳定性碳同位素组分值的测定

植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定在中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环重点实验室进行,分析仪器为 MAT-251 质谱仪(Finnigan, USA)。从每份标本上选取 1~2 片健康、成熟叶片(较大,且无虫叮咬痕迹)磨碎,过 80 目筛后各取 1 g,同一年份的样品混合后制成供试样品。取处理好的样品 3~5 mg 封入真空的燃烧管,并加入催化剂和氧化剂,在 850°C 下

气化,燃烧产生的 CO_2 经结晶纯化后,测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值,以 PDB(Pee Dee Belemnite)为标准,根据 Farquhar 等(1989)的公式进行计算:

$$\delta^{13}\text{C} = \left\{ \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}} \right\} / \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}} \times 1\,000\text{‰}$$

式中, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}$ 是植物叶片样品的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}$ 是测定过程中标准物质甘氨酸的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率。计算的最终结果都以国际标准物质 PDB 为标准,分析误差 $\leq 0.2\text{‰}$ 。

2 结果与分析

2.1 植物叶片稳定性碳同位素组分值的变化范围

从 20 世纪 30 年代至 2002 年近 70 年中,随气候环境的变化,4 种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度不同,虎榛子 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化差值最大,为 4.70‰ ($-25.05\text{‰} \sim -29.75\text{‰}$),辽东栎仅次之, 3.69‰ ($-25.51\text{‰} \sim -29.20\text{‰}$),其次分别为狼牙刺是 3.68‰ ($-25.12\text{‰} \sim -28.80\text{‰}$)、酸枣 2.00‰ ($-26.69\text{‰} \sim -28.69\text{‰}$)。结果表明在近 70 年中,4 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-25.05\text{‰} \sim -29.75\text{‰}$,平均值为 -27.04‰ 。

2.2 不同年代植物叶片稳定性碳同位素组分值的

变化

为了比较 70 年以来黄土高原 4 种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的种间差异,选取 20 世纪 30、50、70、80 年代及 2002 年中各个年代不同年份 $\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值进行比较(表 1)。结果表明,从 20 世纪 30 年代至今近 70 年中,4 种植物不同年代 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均值的大小比较:狼牙刺 (-26.54‰) > 虎榛子 (-26.99‰) > 辽东栎 (-27.14‰) > 酸枣 (-27.49‰)。狼牙刺和辽东栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值由 20 世纪 30 年代的 -25.12‰ 、 -25.51‰ 分别下降至 2002 年的 -28.80‰ 、 -29.20‰ ,降低率分别为 14.65% 、 14.46% ,下降非常明显。虎榛子的降低率为 11.99% ,下降也十分明显,而酸枣 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降低率为 2.44% ,下降不明显。这 4 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降低率比较:狼牙刺 > 辽东栎 > 虎榛子 > 酸枣。辽东栎、狼牙刺 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大值均出现在 20 世纪 30 年代,而虎榛子、酸枣 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大值均出现在 20 世纪 70 年代,除酸枣例外,其它 3 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小值均出现在 2002 年。这可能是由于物种特性的不同,导致不同植物对同一年代气候环境因子的敏感性 & 适应能力不同,因而植物 WUE 表现存在差异,有待于进一步研究。

表 1 黄土高原典型植物不同年代 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异比较*
Table 1 Comparison between the $\delta^{13}\text{C}$ values of four typical plants in Loess Plateau in different years

植物名称 Name	科 Family	叶片碳同位素组分 $\delta^{13}\text{C}$ Leaf carbon isotope composition (‰)						
		20 世纪 20th century				2002 年 Year of 2002	平均值 Average	2002 年与 30 年代 相比降低率 Dropping rate from 30's to 2002 (%)
		30 年代 30's	50 年代 50's	70 年代 70's	80 年代 80's			
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	壳斗科 Fagaceae	-25.51	-27.06	-25.92	-27.62	-29.20	-27.14	14.46
虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>	桦木科 Betulaceae	-26.57	-26.71	-26.99	-26.93	-29.75	-26.99	11.99
酸枣 <i>Zizyphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	鼠李科 Rhamnaceae	-	-27.07	-26.69	-28.18	-27.73	-27.49	2.44**
狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i>	豆科 Leguminosae	-25.12	-26.40	-26.01	-	-28.80	-26.54	14.65

* 由于受西北植物所标本藏量所限,酸枣 30 年代、狼牙刺 80 年代均无植物样品,故缺少数据 Because of a limitation to specimen in the Specimen Museum of Northwestern Institute of Botany, there no plant samples for *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* in 30's and *Sophora viciifolia* in 80's, so there were short data ** 酸枣 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降低率是 2002 年与 20 世纪 50 年代相比的结果 The dropping rate of $\delta^{13}\text{C}$ value in *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* is from 50's to 2002

2.3 不同植物叶片稳定性碳同位素组分值变化趋势

黄土高原典型植物辽东栎、虎榛子、酸枣和狼牙刺均为 C_3 植物,从 20 世纪 30 年代至 2002 年近 70 年中,随着气候环境的变化,4 种植物叶片碳同位素组分($\delta^{13}\text{C}$ 值)均呈下降趋势,但不同植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$

值下降幅度不同(图 1)。狼牙刺和辽东栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降非常明显,虎榛子叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降也较明显,而酸枣叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降不明显。4 种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降斜率绝对值比较:狼牙刺 ($K = 0.052\,6$) > 辽东栎 ($K = 0.047\,5$) > 虎榛子 ($K = 0.039\,6$) > 酸枣 ($K = 0.021\,7$)。

图1 不同年代辽东栎(A)、虎榛子(B)、酸枣(C)和狼牙刺(D)叶片碳同位素组分变化
Fig.1 The leaf carbon isotope composition of *Quercus liaotungensis* (A), *Ostryopsis davidiana* (B), *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* (C) and *Sophora viciifolia* (D) in different years

3 讨论

在古生态和古气候研究中,关于中国黄土地层稳定同位素特征与黄土高原气候环境演变的研究,多通过测定土壤有机质和土壤碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值来反映(刘启明等,2002)。近年来,有些学者也对黄土高原中部植被花粉以及现代表层黄土中植物残体的稳定同位素进行了研究,以揭示植被与气候的关系(魏明建等,1999)。王国安等(2003)对生长在我国北方黄土区的 367 个 C_3 草本植物样品进行碳同位素分析,发现我国北方黄土区 C_3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布区间为 $-21.7\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$,平均值为 -26.7‰ ;黄土高原中部半湿润区的 C_3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布集中,在 $-24.4\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$ 之间,平均值为 -27.5‰ 。本实验中,所选黄土高原丘陵区的辽东栎、虎榛子、酸枣和狼牙刺 4 种植物均为 C_3 植物,在近 70 年的时间尺度中,4 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-25.12\text{‰} \sim -29.75\text{‰}$,平均值为 -27.04‰ ,与上述研究结果基本一致。

近百年来,全球气候正经历着一次以 CO_2 浓度升高为主要特征的显著变化,大气中 CO_2 浓度已由工业革命前的 $280 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增加到 20 世纪 90 年代初期的 $350 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (Watson *et al.*, 1990),与此相对应,地球表面的年平均温度在一个多世纪以来也上升了 $0.6\text{ }^\circ\text{C}$ (Houghton *et al.*, 1990)。我国近百年来气温上升了 $0.4 \sim 0.5\text{ }^\circ\text{C}$,以西北、东北和华北地区最为明显,降水自 20 世纪 50 年代以后逐渐减少,气候呈变干趋势(秦大河,2003)。黄土高原位于我国西北东部半干旱区,光热资源优越,但降水量少、蒸散量大、土壤水分亏缺十分严重,导致气候干旱(李斌和张金屯,2003)。由于大气 CO_2 浓度的持续增高,导致全球气候变暖、气温升高,引起温度、湿度、降水和蒸发等区域性变化,进而影响植物的分布、生长及 *WUE*。

许多研究结果表明,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其 *WUE* 呈一定程度的正相关 (Farquhar *et al.*, 1989; O'leary, 1988)。由于 $\delta^{13}\text{C}$ 值是由遗传控制的,在植物体内非常稳定,因而测定植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值就可

以判定植物 WUE 高低,但同时气候环境因子(CO_2 浓度、降水量、温度、光照、海拔高度等)的变化,都会间接影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,从而进一步影响植物的长期 WUE (Ziegler, 1995)。目前,许多研究证实利用树木年轮(蒋高明等, 1997)和植物标本(Polley *et al.*, 1993)来估测过去 100 年大气 CO_2 浓度变化和植物 WUE 的变化是可行的。Duquesnay 等(1998)通过研究树木年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,推测法国西北部山毛榉(*Fagus sylvatica*)在过去 100 年里, WUE 增加 44%; 郑凤英等(2001)利用从 20 世纪 20 年代到 90 年代广东省境内的狭叶山黄麻(*Trema angustifolia*)和光叶山黄麻(*Trema cannabina*)的腊叶标本叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值推算出在近一个世纪中,两种植物潜在水分利用效率($IWUE$)分别增加 19.5% 和 40.0%。

本实验中,从 20 世纪 30 年代至 2002 年近 70 年中,4 种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈下降趋势,由植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其 WUE 呈一定程度的正相关,可推测出近 70 年中,随气候环境变化,4 种植物的 WUE 均在下降。这一结论与 Duquesnay 等(1998)、郑凤英等(2001)的研究结果并不完全一致,这可能是因为本实验研究的植物及其所处的环境——黄土高原与前两者采用的研究材料及其环境差别较大,而植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值是植物种和生境共同作用的结果,植物种本身特性以及生存环境的差异对 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响较大。郑凤英等(2001)研究的广东省境内的两种麻属植物所处生境为亚热带气候,降水量充沛,水分并不是限制因子,因而,在近百年中 CO_2 浓度的持续升高成为影响植物 WUE 的主要因素,由于高 CO_2 可以提高植物的光合能力,使蒸腾降低,从而导致植物生长加快,生物量增加,加之蒸腾作用减弱,水分损失减小,所以植物 WUE 提高。而在黄土高原这一典型的半干旱气候条件下,由于光照较强,降水量少、蒸散量大,年降水量与年最大蒸散量之间极不平衡以及土壤侵蚀严重等一系列原因,导致土壤水分亏缺十分严重,气候干旱,植被具有较强的蒸散能力。在黄土高原水分缺乏是最大的限制因子,植物从土壤中可利用的水分较少,同时由于光照较强,蒸散量大,植物为了生存,只能通过调整外部形态及内部生理上的一些功能来适应这种环境,如减小叶形,植株矮小,气孔关闭等。近年来,在黄土高原地区,植物已出现“小老树”及“小老草”现象。因此,尽管近百年来 CO_2 浓度升高明显,但由于土壤中可利用水分减少,植物叶面积减小,以及内部生理上如气孔关闭等一些可能原因,导致植物光合作用累积生物量的

速率可能远不及植物由于外界光照较强、气候干旱而引起的蒸腾失水速率高,从而长期以来恶性循环,导致黄土高原地带性植物 WUE 普遍降低,使得黄土高原植物 WUE 水平低下已成为一个亟待解决的问题。关于导致植物 WUE 降低的机制问题有待于进一步深入研究。本实验中 4 种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降幅度不同,狼牙刺和辽东栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降非常明显,虎榛子叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降也较明显,而酸枣叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降不明显。说明不同植物对气候环境因子的敏感性不同,具有不同的适应环境变化的策略。4 种植物中酸枣叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降不明显,指示了其 WUE 下降不大,说明酸枣是 4 种植物中耐旱能力较强, WUE 较高的物种。

苏波等(2000)测定了中国东北森林-草原样带草原区 15 个常见植物种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,并以此作为植物长期 WUE 的指示值,研究不同植物种的 WUE 对年均降水量、年均大气温度和海拔高度等环境梯度变化的响应。结果表明:大多数植物种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 均随年均降水量和年均温增加而呈不同程度的降低趋势,随海拔高度增高而呈不同程度的增加趋势。林植芳等(1995)测定了不同光照强度(100%、40%、16%)条件下荷木(*Schima superba*)和黧蒴(*Castanopsis fissa*)幼苗叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,结果表明,随光照强度降低, $\delta^{13}\text{C}$ 值降低, WUE 也降低,说明光强是影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的重要环境因子。Saurer 等(1995)比较了不同土壤水分状况下生长的山毛榉(*Fagus sylvatica*)、松树(*Pinus tabulaeformis*)及云杉(*Picea asperata*)树轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,发现树木生境越干旱, $\delta^{13}\text{C}$ 值越大。王国安等(2003)发现 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在黄土高原中部的半湿润区比西部边缘半干旱、干旱气候区显著低,年降雨量是造成这种现象的主要原因, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随年降雨量的减少而增大。上述研究结果同样证实:不同气候环境因子均会对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生一定的影响作用,但需考虑不同区域内起主导作用的关键因子。

本实验中,我们分别选陕北和陕南地区的辽东栎和狼牙刺测定植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,结果发现陕北和陕南地区 2 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值在近 70 年中,随气候环境变化,均呈下降趋势,且两种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现为陕北地区明显高于陕南地区(图 2)。说明在陕西这一大的气候环境背景下,在近 70 年的时间尺度上,陕北和陕南地区两种植物 WUE 均在下降;不考虑时间梯度,陕北地区两种植物的 WUE 均高于陕南地区。这与植物生存的具体气候环境因子有关,

图2 陕北和陕南地区辽东栎(a)和狼牙刺(b)叶片碳同位素组分 δ¹³C 值变化
Fig.2 The leaf carbon isotope composition of *Quercus liaotungensis* (a) and *Sophora viciifolia* (b) in the North and South in Shaanxi

陕南地区为湿润气候,年降水量、年均温度均明显高于陕北地区(表2)。降水量大,使得土壤湿度增加,能被植物利用的水分多,植物蒸腾强度增大,导致植物 *WUE* 较低,而生长在陕北干旱、瘠薄生境中的植物为了适应环境生存下去,只能通过提高 *WUE* 即具有较高的 δ¹³C 值,来适应干旱环境的胁迫。两种植物中,辽东栎在陕北和陕南 δ¹³C 值下降幅度几乎一致,而狼牙刺在陕北地区 δ¹³C 值下降趋势非常明显,而在陕南 δ¹³C 值下降不明显,这可能是因为物种不同,对气候环境因子的敏感性不同,因而作出的反应不同。

植物对气候环境变化都有一定的响应能力及适应对策,且在漫长的进化过程中已经形成了一种自我调节机制,能够通过自身的形态变化和生理、生化反应来适应不断变化的环境,但不同物种之间对气候环境变化的适应能力不同,具有差异性。水分是黄土高原生态系统结构与功能的主要限制因子之一,如何根据生境选择抗旱性强、*WUE* 高的优势种是当前植被恢复工作中一个亟待解决的问题。进一步探讨黄土高原地区不同植物 *WUE* 与气候环境变化的关系,将对黄土高原脆弱生态环境条件下森林植被的恢复重建具有重要意义。

表2 陕北和陕南地区气候地理概况比较
Table 2 Comparison between climate and geographical position of the North and South in Shaanxi

地区 Region	地形 Terrain	气候类型 Climate type	海拔 Altitude (m)	年平均气温 Annual mean tem- perature (℃)	最冷月1月 平均气温 Mean tem- perature of the coolest month in January (℃)	最热月7月 平均气温 Mean tem- perature of the hottest month in July (℃)	年降水量 Annual pre- cipitation (mm)	无霜期 Period of free frost (d)
陕北 The North in Shaanxi	黄土高原 Loess Plateau	暖温带半干旱或半湿润气候 Warm temperate semi-arid or semi-humid climate	900 ~ 1 000	7 ~ 11	- 10 ~ - 4	21 ~ 25	400 ~ 600	150 ~ 190
陕南 The South in Shaanxi	盆地 Basin	北亚热带湿润气候 North sub-tropical humid climate	1 500 ~ 3 000	14 ~ 15	0 ~ 3	24 ~ 27.5	700 ~ 900	240 ~ 269

陕北指黄土高原丘陵区的延安以南、铜川以北地区; 陕南指太白山南坡、略阳、西乡、安康一带 The North in Shaanxi include area from the range of Yanan to the south and Tongchuan to the north in the Loess Plateau Hill; The South in Shaanxi include south hillside of Taibai Mountain, Lueyang, Xixiang and Ankang

参 考 文 献

- Condon AG, Richards RA, Rebetzke GJ, Farquhar GD (2002). Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield. *Crop Science*, 42, 122–131.
- Duquesnay A, Breda N, Stievenard M, Dupouey JL (1998). Changes of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ and water use efficiency of beech in north-eastern France during the past century. *Plant, Cell and Environment*, 21, 565–572.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503–507.
- Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ (1990). *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 1–15.
- Jiang GM (蒋高明), Huang YX (黄银晓), Wan GJ (万国江), Chen YC (陈亚财), Geng LN (耿龙年), Zeng YQ (曾毅强), Wang HW (王宏卫) (1997). A study on the $\delta^{13}\text{C}$ values of tree rings and their indicative functions in revealing atmospheric CO_2 changes in North China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 21, 155–160. (in Chinese with English abstract)
- Li B (李斌), Zhang JT (张金屯) (2003). Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 82–89. (in Chinese with English abstract)
- Lin ZF (林植芳) (1990). Application of stable carbon isotope in plant physioecology. *Plant Physiology Communications* (植物生理学报), 3, 1–6. (in Chinese with English abstract)
- Lin ZF (林植芳), Lin GZ (林桂珠), Kong GH (孔国辉), Zhang HB (张鸿彬) (1995). Effect of growth irradiation on stable carbon isotope ratio, intercellular CO_2 concentration and water-use efficiency of two woody plant in subtropical natural forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 3, 77–82. (in Chinese with English abstract)
- Liu QM (刘启明), Wang SJ (王世杰), Piao HC (朴河春), Ouyang ZY (欧阳志远) (2002). Soil organic matter changes of turnover ecosystems traced by carbon isotopes. *Journal of Environmental Science* (环境科学), 23, 75–78. (in Chinese with English abstract)
- O'Leary MH (1988). Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience*, 38, 328–336.
- Polley HW, Johnson HB, Marino BD, Mayeux HS (1993). Increase in C_3 plant water-use efficiency and biomass over glacial to present CO_2 concentration. *Nature*, 361, 61–63.
- Qin DH (秦大河) (2003). The fact, effect and measurement of climate change. *Science Foundation of China* (中国科学基金), 17, 1–3. (in Chinese)
- Saurer M, Siegenthaler U, Schweingruber F (1995). The climate-carbon isotope relationship in tree rings and significance of site conditions. *Tellus*, 47B, 320–330.
- Shangguan ZP (上官周平) (2000). Carbon isotope discrimination and water use efficiency in wheat under nitrogen nutrition and water stress conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 6, 345–348. (in Chinese with English abstract)
- Shangguan ZP, Shao MA, Lei TW, Fan TL (2002). Runoff water management technologies for dryland agriculture on the Loess Plateau. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 9, 341–350.
- 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)
- Sun GC (孙谷畴), Lin ZF (林植芳), Lin GZ (林桂珠) (1993). The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and water use efficiency of *Pinus* trees in subtropical plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 4, 325–327. (in Chinese with English abstract)
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋), Liu DS (刘东生) (2003). Studies on carbon isotope composition of C_3 herbage plant in Loess Plateau of North China. *Science in Chinese* (Series D) (中国科学 D 辑), 33, 550–556. (in Chinese)
- Warren CR, McGrath JF, Adams MA (2001). Water availability and carbon isotope discrimination in conifers. *Oecologia*, 127, 476–486.
- Watson RH, Rodhe H, Oeschager H, Siegenthaler U (1990). Greenhouse gases and aerosols. In: Houghton JT, Oeschager H, Siegenthaler U eds. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, New York, 1–40.
- Wei MJ (魏明建), Zhao JB (赵景波), Zhang J (张静) (1999). The remnant stable isotope of modern plant in Loess Plateau. In: Zhang ZH (张宗祜), Shao SX (邵时雄), Chen Y (陈云), Wei MJ (魏明建), Shi DH (施德鸿), Shi JS (石建省) eds. *The Geology Environments Evolvement with Renewing Century and Trend Estimate of Existing Environment Change with Future in North China* (中国北方晚更新世以来地质环境演化及未来生存环境变化趋势预测). The Geological Publishing House, Beijing, 254–262. (in Chinese)
- Yan CR (严昌荣), Han XG (韩兴国), Chen LZ (陈灵芝), Huang JH (黄建辉), Su B (苏波) (1998). The interspecific and temporal-spatial variation of leaf $\delta^{13}\text{C}$ value of plants in warm temperate deciduous broad-leaved forests. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 40, 853–859. (in Chinese with English abstract)
- Zheng FY (郑凤英), Peng SL (彭少麟), Zhao P (赵平) (2001). Changes in stomatal density and intrinsic water use efficiency of two *Trema* species over the last century. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 25, 405–409. (in Chinese with English abstract)
- Ziegler H (1995). Stable isotopes in plant physiology and ecology. In: Behnke HD, Lüttge U, Esser K, Kadereit JW, Runge M eds. *Progress in Botany*, Vol. 56. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 1–24.