

民勤 4 种主要灌木植物 $\delta^{13}\text{C}$ 季节变化及与气象因子的关系

郭树江^{1,3},王 飞^{1,2*},张卫星¹,王方琳^{1,2},韩福贵^{1,2},张裕年^{1,2}

(1. 甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070;2. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室(培育基地),甘肃 武威 733000;
3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃 民勤 733300)

摘 要:对民勤 4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 测定,研究不同荒漠灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 差异及其季节变化,并探讨植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子之间的关系。结果表明:1)4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同月份之间存在极显著差异($P<0.01$),除梭梭外,其他 3 种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值生长初期(5 月) $>$ 生长中后期(6—10 月)。4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值种间差异在 5—10 月都达到极显著水平($P<0.01$),沙拐枣 $>$ 梭梭 $>$ 柠条锦鸡儿 $>$ 白刺。2)4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值受到物种、月份、物种 \times 月份的影响,均达到极显著水平($P<0.01$),但受物种的影响最大。3)4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气象因子的关系因其物种而异;影响梭梭、沙拐枣、白刺、柠条锦鸡儿叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要气象因子分别是平均气温、相对湿度、蒸发量。

关键词:民勤;灌木;碳同位素;季节变化;气象因子

中图分类号:S793 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2020)05-0041-06

Seasonal Variations of $\delta^{13}\text{C}$ of Four Major Shrub Species and the Relationships between $\delta^{13}\text{C}$ and Meteorological Factors in Minqin

GUO Shu-jiang^{1,3}, WANG Fei^{1,2*}, ZHANG Wei-xing¹, WANG Fang-lin^{1,2}, HAN Fu-gui^{1,2}, ZHANG Yu-nian^{1,2}

(1. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei 733000, Gansu, China;
3. Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin 733300, Gansu, China)

Abstract: In order to understand the differences in $\delta^{13}\text{C}$ among the desert plants, seasonal variations of $\delta^{13}\text{C}$, and the relationships between $\delta^{13}\text{C}$ meteorological factors, values of $\delta^{13}\text{C}$ of the leaves/assimilating branches of four major shrub species s occurring in Minqin were measured. The results showed that 1) there were significant differences in $\delta^{13}\text{C}$ of four major shrub species ($P<0.01$) among different months, except for *Haloxylon ammodendron*, the values of $\delta^{13}\text{C}$ of other three plants were greater at the beginning (May) than at the middle and later growing periods (June-October). Interspecific differences of $\delta^{13}\text{C}$ of four shrub species reached extremely significant level from May to October ($P<0.01$), and the values were in the order of *Calligonum mongolicum* $>$ *H. ammodendron* $>$ *Caragana korshinskii* $>$ *Nitraria tangutorum*. 2) The influence of species, month and species \times month on $\delta^{13}\text{C}$ reached very significant level ($P<0.01$), in which the influence of species was the greatest. 3) The relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and meteorological factors changed with plants species; the main meteorological factor that affected $\delta^{13}\text{C}$ were average temperature, relative humidity, evaporation capacity, and evaporation capacity.

Key words: Minqin; shrub; $\delta^{13}\text{C}$; seasonal variation; meteorological factor

收稿日期:2019-12-12 修回日期:2020-03-03
基金项目:国家青年科学基金(31700339);国家地区基金(31760238,31960334,31860116);国家面上基金项目(41671528);中科院“西部之光”计划。
作者简介:郭树江,副研究员。研究方向:荒漠化生态。E-mail:shujguo@126.com
*通信作者:王 飞。研究方向:荒漠化防治。E-mail:zmffei@126.com

用气体交换法测定水分利用效率只代表某特定时间内植物叶片的行为,适于研究引起水分利用效率快速变化的生理生态过程,由于植物光合作用对环境条件的变化高度敏感,其瞬时性不易与植物的水分利用效率联系起来,只能用来说明植物的性能和对环境因子的反应。特定条件下的水分利用效率日变化并不能完全代表实际多变环境条件下的长期水分利用效率。因此,需使用其他方法对植物较长时间的水分利用效率进行研究。植物叶片的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值能够反映出与植物光合、蒸腾强度相关联的水分利用效率^[1],成为间接指示植物短期或长期水分利用效率的可靠途径^[2-5]。植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受光合作用的影响,同时受到气候环境因子的影响,如降水量^[6-7]、温度^[8-9]、湿度^[10]等的影响。植物对气候环境因子的响应程度因植物种类、生长阶段及其生境^[11]而异。对荒漠植物叶片碳同位素研究不仅可以揭示植物本身内在的耗水机制,同时为干旱荒漠区植被构建中树种选择提供理论依据。

巴丹吉林沙漠东南缘的民勤绿洲-荒漠过渡带属于典型的干旱荒漠气候,干旱少雨,风沙灾害严重,生态环境十分脆弱,是研究土壤荒漠化现象的热点地区之一,该地区天然植被和人工植物兼有,为维护该地区生态平衡、减少风沙风蚀都发挥了重要作用。灌木植物由于根系分布深^[12]、气孔调控能力强^[13]及叶面积小^[14]等结构和生理特性,耐旱性强且水分利用效率高^[15],在土壤性状的改善以及生态系统与功能修复中发挥着重要作用^[16-17]。目前,有关该地区主要灌木植物叶片碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 季节变化及其与气象因子之间关系的研究尚未见报道。基于此,本研究通过对民勤 4 种主要灌木植物(梭梭、沙拐枣、白刺、柠条锦鸡儿)叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定,揭示荒漠植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化规律及其与气象因子之间的关系,了解荒漠植物叶片水分利用特性,为该区植物恢复与重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在巴丹吉林沙漠东南缘的民勤治沙综合试验站周边,地处河西走廊东端石羊河流域下游民勤荒漠-绿洲过渡带,地理位置 $38^{\circ}34'\text{N}-39^{\circ}38'\text{N}$, $102^{\circ}53'\text{E}-102^{\circ}58'\text{E}$,海拔高度 $1\,376-1\,383\text{ m}$ 。该地区属于典型的干旱荒漠气候,降水稀少,年均降水量 115.56 mm ,蒸发量 $2\,643\text{ mm}$,蒸发量是降水量的 23 倍多;年均气温 7.7°C ;光照强,昼夜温差大,热量资源丰富,日照时数年均 $2\,651.9\text{ h}$;风大沙

多,年平均风速 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;土壤类型以风沙土为主;现有的植被主要包括天然和人工 2 种类型,主要灌木植物包括梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)等。

1.2 试验设置及样本采集

2018 年 5 月,试验样地设置在民勤治沙综合试验站双墩子附近,在该样地内选择 4 种灌木植物作为研究对象,有梭梭、沙拐枣、白刺、柠条锦鸡儿,每个物种选择大小、长势及冠幅基本一致的植株,每个物种 5 个重复,逐月(5—10 月)中旬收集植物叶片样品(表 1)。每月采集样品时,收集植株中上部四周的叶片,混合后作为 1 个重复样品。野外采集的植物样品用去离子纯水清洗 3 次,置于烘箱中 70°C 烘 48 h 至恒重,用玛瑙研钵研磨粉碎,过 0.125 mm (120 目)筛,装入锡箔纸袋,用于叶片碳同位素的测定。

表 1 样树基本参数

| 物种 | 高度 | 冠幅 | |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| | | 长度 | 宽度 |
| 梭梭 | 210 ± 11.29 | 118 ± 15.96 | 96 ± 9.21 |
| 沙拐枣 | 108 ± 10.54 | 167 ± 25.68 | 116 ± 16.81 |
| 白刺 | 45 ± 4.52 | 213 ± 36.45 | 189 ± 42.57 |
| 柠条锦鸡儿 | 345 ± 36.54 | 578 ± 62.59 | 550 ± 70.61 |

1.3 测定方法

植物叶片/同化枝碳同位素采用 Picarro G2131-ICO₂ 激光碳同位素分析仪(美国 Picarro 公司)测定。气象数据由甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站提供。

1.4 数据分析

用 Excel 2003 和 SPSS19.0 软件对数据进行统计分析。用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较,用 Pearson 法对植物叶片/同化枝碳同位素与气象因素之间相关性进行分析,并采用逐步回归分析法对影响植物叶片/同化枝碳同位素的主要气象因子进行分析。

2 结果与分析

2.1 叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化

由图 1、表 2 可知,在种内水平,4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 季节(5—10 月)变化差异极显著($P<0.01$),其中,梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值 5—9 月变化不显著,10 月显著($P<0.05$)升高;沙拐枣、白刺、柠条锦鸡儿叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值在生长季整体呈降低趋势,其中 5 月 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著($P<0.05$)高于 6—10 月。经方差分析,4 种灌木植物叶片/同化枝

表 2 民勤 4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化

| 物种 | 月份 | | | | | | 平均 | 变异系数 |
|-------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|-------------|-------|
| | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | | |
| 梭梭 | -15.08±0.20Bb | -15.1±0.19Bb | -15.21±0.12Bb | -15.30±0.13Bb | -14.94±0.17Bb | -13.93±0.19Aa | -14.93±0.22 | 3.37% |
| 沙拐枣 | -13.41±0.11Aa | -13.64±0.09ABab | -14.18±0.15BCc | -14.36±0.07Cc | -14.01±0.18ABCbc | -14.29±0.08Cc | -13.98±0.17 | 2.72% |
| 白刺 | -24.04±0.15Aa | -24.20±0.10ABa | -24.94±0.15BCb | -25.57±0.27Cc | -27.20±0.11Dd | -27.13±0.25Dd | -25.51±0.62 | 5.46% |
| 柠条锦鸡儿 | -23.27±0.31Aa | -23.57±0.32Aab | -24.15±0.34ABab | -24.70±0.42ABbc | -25.58±0.48Bc | -25.58±0.36Bc | -24.48±0.44 | 4.04% |

注:表中不同大写字母表示同一物种不同月份间差异极显著($P<0.01$);不同小写字母表示同一物种不同月份间差异显著($P<0.05$)。

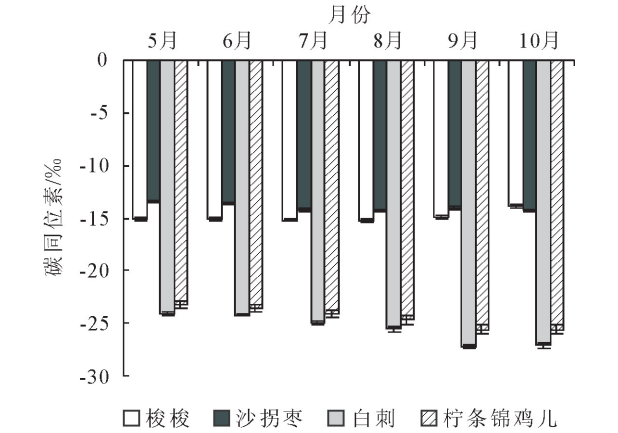


图 1 民勤 4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化
Fig. 1 Seasonal variations of $\delta^{13}\text{C}$ in the leaves /assimilative branches of four major shrub plants in Minqin

$\delta^{13}\text{C}$ 值种间差异在 5—10 月都达到极显著水平 ($P<0.01$), 其中, 沙拐枣>梭梭>柠条锦鸡儿>白刺。白刺 $\delta^{13}\text{C}$ 值变异系数最大(5.46%), 沙拐枣变异系数最小(2.72%)。

2.2 叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的整体变异来源分析

4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 受物种、月份以及两者之间的交互作用影响程度各不相同。由表 3 可知, 民勤 4 种灌木叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 受到物种、月份、物种×月份的影响, 均达到极显著水平

表 3 民勤 4 种主要灌木叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的整体变异来源分析

Table 3 Analysis on source of variation of $\delta^{13}\text{C}$ of four shrub plants in Minqin

| 参数 | 变异来源 | 自由度 | 离差平方和 | 均方 | F |
|-----------------------|-------|-----|-----------|-----------|--------------|
| $\delta^{13}\text{C}$ | 物种 | 3 | 3 211.958 | 1 070.653 | 3 024.100 ** |
| | 月份 | 5 | 34.767 | 6.953 | 19.640 ** |
| | 物种×月份 | 15 | 46.271 | 3.085 | 8.713 ** |

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关。下同。

表 4 试验样地气象因子季节变化

Table 4 Seasonal variation of meteorological factors in test sites

| 月份 | 降水量 /mm | 平均气温 /℃ | 地表温度 /℃ | 相对湿度 /% | 日照时数 /h | 平均气压 /hPa | 水汽压 /hPa | 蒸发量 /mm | 平均风速 /(m·s ⁻¹) |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|----------|---------|----------------------------|
| 5 月 | 5.8 | 17.9 | 23.9 | 38 | 248.8 | 861.6 | 7.1 | 265.0 | 2.2 |
| 6 月 | 11.5 | 22.9 | 29.6 | 44 | 222.5 | 858.4 | 15.0 | 251.5 | 0.7 |
| 7 月 | 20.2 | 24.5 | 31.0 | 61 | 229.5 | 856.3 | 16.4 | 249.9 | 1.4 |
| 8 月 | 78.4 | 22.1 | 26.0 | 66 | 143.9 | 860.9 | 18.6 | 171.3 | 1.4 |
| 9 月 | 35.3 | 14.3 | 17.3 | 67 | 185.4 | 866.8 | 15.2 | 121.9 | 1.0 |
| 10 月 | 10.0 | 6.2 | 9.2 | 62 | 223.7 | 870.2 | 5.5 | 94.3 | 0.9 |

($P<0.01$), 但受物种的影响最大, 月份次之, 物种×月份影响最小。

2.3 叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子的关系

2.3.1 气象因子的季节变化 表 4 为试验样地气象因子的季节变化。样地 5—10 月平均气温 18℃, 7 月平均气温最高, 10 月气温最低; 地表温度 7 月最大, 与平均气温变化相吻合; 生长季总降水量 161.2 mm, 其中 8 月降水量最多 78.4 mm, 占生长季降水总量的 48.64%; 蒸发量合计 1 153.9 mm, 是降水量的 7.16 倍; 平均气压变化差异小; 该地区春季多风, 5 月平均风速最高, 为 2.2 m·s⁻¹。

2.3.2 叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子的关系分析

植物叶片的碳同位素组成受到气候环境因子的影响^[18-19], 因植物种类不同所受影响程度不同。由表 5 可知, 4 种荒漠植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与各气象因子的关系不同。其中, 梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与平均气温、地表温度分别呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)负相关, 与平均气压呈显著($P<0.05$)正相关, 与其他气象因子关系不显著, 表明梭梭生长对温度、气压比较敏感; 沙拐枣同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与相对湿度呈极显著($P<0.01$)负相关; 白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与平均气压呈显著($P<0.05$)负相关, 与蒸发量呈极显著($P<0.01$)正相关; 柠条锦鸡儿叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与蒸发量

表 5 民勤 4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子的相关性
Table 5 Correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and meteorological factors

| 物种 | 气象环境因子 | | | | | | | | |
|-------|--------|----------|---------|----------|-------|---------|--------|---------|--------|
| | 降水量 | 平均气温 | 地表温度 | 相对湿度 | 日照时数 | 平均气压 | 水汽压 | 蒸发量 | 平均风速 |
| 梭梭 | -0.416 | -0.920** | -0.883* | 0.178 | 0.264 | 0.822* | -0.742 | -0.682 | -0.371 |
| 沙拐枣 | -0.584 | 0.195 | 0.286 | -0.915** | 0.608 | -0.261 | -0.315 | 0.647 | 0.379 |
| 白刺 | -0.235 | 0.734 | 0.807 | -0.801 | 0.408 | -0.822* | 0.107 | 0.968** | 0.468 |
| 柠条锦鸡儿 | -0.323 | 0.668 | 0.750 | -0.860* | 0.486 | -0.765 | 0.016 | 0.965** | 0.501 |

呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与相对湿度呈显著 ($P<0.05$) 负相关。

为进一步说明气象因子对民勤 4 种荒漠植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响,以降水量(X1)、平均气温(X2)、地表温度(X3)、相对湿度(X4)、日照时数(X5)、平均气压(X6)、水汽压(X7)、蒸发量(X8)、平均风速(X9)为自变量,与 $\delta^{13}\text{C}$ (Y)进行逐步回归分析,建立 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子的回归方程,确定影响 4 种植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因子。经检验回归方程均达到显著水平,说明此回归方程可以较好地用于民勤 4 种荒漠植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的预测。由回归方程可知(表 6),平均气温是影响梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要气象因子;影响沙拐枣主要气象因子是相对湿度;蒸发量是影响白刺和柠条锦鸡儿的主要气象因子。

表 6 民勤 4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子逐步回归分析

| Table 6 Stepwise regression analyses between $\delta^{13}\text{C}$ and meteorological factors | | | |
|---|----------------------|-------|----------|
| 物种 | 逐步回归方程 | 相关系数 | F |
| 梭梭 | $Y=-0.067X_2-13.715$ | 0.920 | 21.977** |
| 沙拐枣 | $Y=-0.028X_4-12.376$ | 0.915 | 20.592* |
| 白刺 | $Y=0.018X_8-29.034$ | 0.968 | 59.663** |
| 柠条锦鸡儿 | $Y=0.013X_8-26.967$ | 0.965 | 53.832** |

3 结论与讨论

3.1 结论

民勤 4 种主要灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 由大到小顺序为沙拐枣>梭梭>柠条锦鸡儿>白刺;沙拐枣、白刺、柠条锦鸡儿叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 在生长初期(5 月)较高,中、后期较低,梭梭叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值 5—9 月变化不显著,10 月显著 ($P<0.05$) 升高。民勤 4 种灌木叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 受到物种、月份、物种×月份的影响,均达到极显著水平 ($P<0.01$),但受物种的影响最大,月份次之,物种×月份影响最小。

植物种类不同,对环境因子的响应也有所不同。梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度如平均气温、地表温度显著 ($P<0.05$) 负相关,说明梭梭对温度的变化敏感。

沙拐枣同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与相对湿度呈极显著 ($P<0.01$) 负相关;白刺叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与平均气压呈显著 ($P<0.05$) 负相关,与蒸发量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关;柠条锦鸡儿叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与蒸发量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与相对湿度呈显著 ($P<0.05$) 负相关。逐步回归分析进一步表明,平均气温是影响梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要气象因子;影响沙拐枣主要气象因子是相对湿度;蒸发量是影响白刺和柠条锦鸡儿的主要气象因子。

3.2 讨论

在干旱半干旱地区,植物生长受到水分有效性的影响,因此较高的水分利用效率是该地区植物能持续生存与生长的重要特性^[20]。本研究表明,民勤 4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-13.41\text{‰}\sim-27.13\text{‰}$,这与全球范围调查的植物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值(-28.74‰)^[21] 相比较明显偏正,说明这 4 种灌木植物通过提高水分利用效率来适应当地的干旱环境。这是因为当降水量、空气湿度和土壤含水量降低时,植物为减少水分蒸发,往往会关闭一部分气孔,引起叶片内部 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 CO_2 的识别能力势必降低,从而使得叶片碳同位素值升高^[22-23]。民勤地区干旱少雨,水资源匮乏,空气湿度和土壤含水量低,植物只有通过提高水分利用效率来适应这种干旱环境。

4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 季节(5—10 月)变化差异极显著 ($P<0.01$),其中沙拐枣、白刺、柠条锦鸡儿叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 在生长季整体呈降低趋势,5 月 $\delta^{13}\text{C}$ 显著 ($P<0.05$) 高于其他月份,即生长初期叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 大于生长中、后期,这与褚建民^[24] 的研究结果一致,可能是该地区 5 月降水少、蒸发量大,干旱导致植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 升高。梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 5—9 月变化不显著,10 月显著 ($P<0.05$) 升高,这与苏培玺等^[25] 的研究结果不一致,但与朱雅娟等^[26] 研究结果相似,有关梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 季节变化规律有待进一步研究。本研究中,4 种灌木植物叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 种间差异在 5—10

月都达到极显著水平($P<0.01$),沙拐枣>梭梭>柠条锦鸡儿>白刺,这就说明沙拐枣同化枝具有较高水分利用效率,这可能主要是由其本身遗传性特征差异决定的。

气象因子(如日照、大气压、温度、降水量等)通过影响植物叶片气体交换活动,影响了植物碳同位素分馏^[27]。温度可直接影响参与光合作用的酶活性,从而影响植物碳同位素分馏,另外,温度通过影响叶片的气孔导通系数、 CO_2 吸收率,从而会对植物碳同位素分馏产生影响^[28]。大量研究表明,温度和植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间存在显著的负相关^[29],然而也有其他相关研究认为植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度为正相关^[30]。本研究发现梭梭同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值与平均气温、地表温度分别呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)负相关关系,其他 3 种灌木植物叶片/同化枝对温度的敏感性较低,这是由于不同物种具有不同的光合最适温度。

相关研究表明,降水量增加时,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值会降低^[31],因为当植物处于干旱环境时,可诱导叶子气孔关闭,从而导致植物叶片内 CO_2 浓度下降,使光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大。本研究中,4 种灌木植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与降水量呈负相关,但未到达显著水平。大多数报道也一致认为相对湿度在控制气孔行为方面具有重要作用^[32-33]。本研究中,沙拐枣、柠条锦鸡儿叶片/同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 与相对湿度呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)负相关。

不同植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 对相同环境变化有不同的响应,这就说明它们具有不同的适应环境变化的策略,这可能与物种、根部特征及生理生化机制等不同有关,有待于进一步研究。另外,当环境发生变化(如温度降低、降水减少)的时候, $\delta^{13}\text{C}$ 变化程度较大的物种有较高的水分利用效率^[3],更能适应低温干旱区环境的变化,在植被恢复中要多选用此类物种,因为更能适应环境的变化。

参考文献:

[1] LAJTHA K, MICHENER R H. Stable isotopes in ecology and environmental science [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1994, 1-5.

[2] FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11: 539-552.

[3] KNIGHT J D, LIVINGTON 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.

[4] 孙谷畴, 林植芳, 林桂珠, 等. 亚热带人工林松树 13C/12C 比率

和水分利用效率[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 325-327.

SUN G C, LIN Z F, LIN G Z, et al. 13C/12C Ratio and water efficiency of *Pinus massoniana* in subtropical artificial forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(3): 325-327. (in Chinese)

[5] 刘海燕, 李吉跃, 赵燕, 等. 沙柳稳定碳同位素值的特点及其水分利用效率[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 514-518.

LIU H Y, LI J Y, ZHAO Y, et al. Study on $\delta^{13}\text{C}$ values of desert plant *salix psammophila* and water use efficiency [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 514-518. (in Chinese)

[6] ANDERSON J E, KRIEDEMANN P E, AUSTIN M P, et al. Eucalypts forming a canopy functional type in dry sclerophyll forests respond differentially to environment [J]. Aust. J. Bot., 2000, 48(6): 759-775.

[7] RODEN J S, EHLENGER J R. Summer precipitation influences the stable oxygen and carbon isotopic composition of tree-ring cellulose in *Pinus ponderosa* [J]. Tree Physical, 2007, 27(4): 491-501.

[8] WELKER J M, WOOKEY P A, PARSONS A N, et al. Leaf carbon isotope discrimination and vegetative responses of *drasactopetala* to temperature and water manipulations in a High Arctic polar semi-desert, Svalbard [J]. Oecologia, 1993, 95(3): 463-469.

[9] PANEK J A, BLARING R H. Stable carbon isotopes as indicators of limitations to forest growth imposed by climate stress [J]. Ecol. Appl., 1997, 7(4): 854-863.

[10] MADHAVAN D, TREICHELL, O'LEARY M H. Effects of relative humidity on carbon isotope fractionation in plants [J]. BotActa, 1991, 104(2): 292-294.

[11] 任红剑, 丰震, 乔谦, 等. 元宝枫叶片形态特征的地理变异[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 113-119.

REN H J, FENG Z, QIAO Q, et al. Geographic variation trend of leaf morphology in *Acer truncatum* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 113-119. (in Chinese)

[12] SCHENK H J, JACKSON R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water limited ecosystems [J]. Journal of Ecology, 2002, 90(3): 480-494.

[13] NIE Y P, CHEN H S, WANG K L, et al. Seasonal variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ values: implications for different water-use strategies among species growing on continuous dolomite outcrops in subtropical China [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(10): 2571-2579.

[14] PIVOVAROFF A, SCK L, SANTIAGO L. Coordination of stem and leaf hydraulic conductance in southern California shrubs: a test of the hydraulic segmentation hypothesis [J]. New Phytologist, 2014, 203(3): 842-850.

[15] 李秧秧, 石辉, 邵明安. 黄土丘陵区乔灌木叶片水分利用效率及与水力学特性关系[J]. 林业科学, 2010, 46(2): 67-74.

LI Y Y, SHI H, SHAO M A. Leaf water use efficiency and its relationship with hydraulic characteristics in eight dominant trees and shrubs in loess hilly area during vegetation succession [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(2): 67-74. (in Chinese)

[16] 王凯博,时伟宇,上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 80-86.
WANG K B, SHI W Y, SHANGGUAN Z P. Effects of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 80-86. (in Chinese)

[17] WANG Y L, GAO Q, LIU T, *et al.* The greenness of major shrub lands in China increased from 2001 to 2013 [J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 121.

[18] EHRLINGER J R, COOPER T A. Correlations between carbon isotope ration and microhabit in desert plants [J]. Oecologica, 1988, 76: 562-566.

[19] 冯虎元, 安黎哲, 陈拓, 等. 马先蒿属 (*Pedicularis* L.) 植物稳定碳同位素组成与环境因子[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 88-93.
FENG H Y, AN L Z, CHEN T, *et al.* The relationship between foliar stable carbon isotope composition in *Pedicularis* L. and environmental factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 88-93. (in Chinese)

[20] THUMMA B R, NAIDU B P, CAMERON D F, *et al.* Transpiration efficiency and its relationship with carbon isotope discrimination under wel-watered and water-stressed conditions in *Stylosanthes scarab* [J]. Aust. J. Agric. Res., 1998, 49: 1 039-1 045.

[21] 孙惠玲, 王绍明, 马剑英, 等. 准噶尔盆地早春短命植物碳同位素组成研究[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 652-656.
SUN H L, WANG S M, MA J Y, *et al.* Study on stable carbon isotope composition in ephemeral plants in the junggar basin [J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 652-656. (in Chinese)

[22] 陈拓, 马健, 冯虎元. 阜康典型荒漠 C3 植物稳定碳同位素值的环境分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 342- 345.
CHEN T, MA J, FENG H Y. Environmental analysis of stable carbon isotope values in typical desert C3 plants of the Fukang, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2002, 25(4): 342-345. (in Chinese)

[23] 纪文文, 王立海, 张广晖, 等. 松花江干流沿岸人工防护林树种配置方案选择[J]. 森林工程, 2019, 35(1): 8-15.

[24] 褚建民. 干旱区植物的水分选择性利用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.

[25] 苏培玺, 严巧嫡, 陈怀顺. 荒漠植物叶片或同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(4): 727-732.
SU P X, YAN Q D, CHEN H S. $\delta^{13}\text{C}$ Values and water use efficiency of the leaves and assimilating shoots of desert plants [J]. Acta Bot. Boreal-Occident. Sin., 2005, 25(4): 727-732. (in Chinese)

[26] 朱雅娟, 贾志清, 卢琦, 等. 乌兰布和沙漠 5 种灌木的水分利用策略[J]. 林业科学, 2010, 46(4): 15-21.
ZHU Y J, JIA Z Q, LU Q, *et al.* Water use strategy of five shrubs in Ulanbuh Desert [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(4): 15-21. (in Chinese)

[27] SPARKS J P, EHRLINGER J R. Leaf carbon isotope discrimination and nitrogen content for riparian trees along elevational transects [J]. Oecologia, 1997, 109: 362-367.

[28] FRANCEY R J, FARQUHAR G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree ring [J]. Nature, 1982, 297: 28-31.

[29] 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.

[30] YUAN F H, ZHE A L, TUO C, *et al.* The relationship between foliar stable carbon isotope composition in *Pedicularis* L. and environmental factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 88-93.

[31] GARTEN C T J, TAYLOR G E J. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within a temperate deciduous forest: spatial temporal and species sources of variation [J]. Oecologia, 1992, 90: 1-7.

[32] APHAIO P J, JARVIS P G. An analysis of Bell's empirical model of stomatal conductance [J]. Annals of Botany, 1993, 72: 321-327.

[33] ZHANG H, NOBEL P S. Dependency of Ci/Ca and leaf transpiration efficiency on the vapour pressure deficit [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1996, 23: 561-568.