

喀斯特高原区 5 种常见灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的 季节变化及其对石漠化程度的响应

杜雪莲¹, 王世杰^{2,*}

(1. 贵州财经学院资源与环境管理学院, 贵阳 550004;

2 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要: 测定了贵州高原喀斯特石漠化小流域内 5 种灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化, 旨在探讨季节及石漠化等级对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响。结果表明: 不同季节间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著差异, 生长初期(4 月)叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于生长中后期(7 月、9 月及 12 月); 5 种灌木种间差异显著, 火棘的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最负, 荚蒾的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最正, 粉枝莓、鼠李和竹叶椒的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值居中; 7 月不同石漠化等级间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异, 而在其余月份(即 4 月、9 月及 12 月)不同石漠化等级间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在显著差异, 但基本呈现无、轻度石漠化植物叶片小于中度石漠化植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的格局; 整个生长季中, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量的相关关系研究表明大多数种在大多数时间随土壤水分的减少其 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高。

关键词: 喀斯特石漠化; 季节变化; $\delta^{13}\text{C}$ 值

中图分类号: Q94; X141 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2010)02-0129-09

目前, 喀斯特石漠化已经成为制约中国西南地区可持续发展最严重的生态地质环境问题^[1]。尽管降雨丰沛, 但由于缺乏植被系统的调节, 以及“土在上水在下”的双层结构造成土体零星、土层浅薄、土壤储水能力差, 导致临时性干旱频繁, 水分成为该区植被恢复最重要的限制因子。石漠化导致喀斯特土、水环境要素缺损, 环境与生态之间的物质能量受阻, 植物生境严酷, 普遍遭受水分胁迫^[1]。

植物碳同位素组成, 作为指示 WUE 的可靠指标, 于上世纪 80 年代在生态学领域的应用取得突破性进展^[2-4], 为解决植物水分利用评价体系提供了一个全新的方法。植物光合作用是使 CO_2 转化成有机物并产生碳同位素分馏的主要过程, 研究证实植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)的增大而降低^[4], 而水分利用效率(WUE)是指植物光合速率和蒸腾速率之比, 其也与 C_i 有很好的相关关系, 因此, 植物长期水分利用效率可以通过叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值来指示。在高资源(水分、养分)可利用性条件下的植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 即较低的 WUE^[5,6]。该技术目前已广泛应用于叶片^[2,7]、植物种^[8-12]、群

落^[13-16]、生态系统^[17-20]乃至全球^[21,22]各个尺度上的水分利用研究。由于植物在各个季节生长生理特性不同, 光合作用存在差别, 因而不同季节利用水分状况不同。国内外很多研究者利用稳定性碳同位素研究植物水分利用效率的季节变化^[23-28]。目前, 国内利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究植物水分利用效率集中在西北干旱半干旱荒漠区, 近年来在临时性干旱频繁的喀斯特石漠化区展开了初步研究, 容丽等^[29,30]研究了贵州花江峡谷区常见乔灌植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化程度的响应, 杜雪莲等^[31]利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究了贵州高原小流域内不同石漠化等级植物群落及不同坡位植物群落几种常见乡土种植物的水分利用状况。但以上研究尚未涉及石漠化区植物水分利用的季节变化。为此, 本文选择了贵州高原一个典型喀斯特小流域, 通过对不同等级石漠化植物群落内几种常见灌木种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定, 探讨 1) 喀斯特石漠化地区不同植物群落及不同种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化; 2) 不同季节植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对石漠化梯度的响应, 以期更加全面的理解和认识石漠化区植物的水分利用格局, 为喀斯特石漠化

收稿日期: 2010-01-30; 改回日期: 2010-04-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目(kzcx 2-yw-306)、国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403200)、国家自然科学基金创新群体项目(40721002)、贵州省科技基金资助项目黔科合 J 字([2009] 2080)和贵州财经学院博士科研启动资助项目

第一作者简介: 杜雪莲(1981-), 女, 博士, 研究方向为生物地球化学及岩溶生态。E-mail: duxuelian520@163.com

* 通讯作者: E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

生态系统的治理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区及样地环境概况

试验地设在喀斯特高原区清镇市簸箕村王家寨小流域,东经 $106^{\circ}20'5''\sim 106^{\circ}21'8''$,北纬 $26^{\circ}31'45''\sim 26^{\circ}30'27''$,面积约 2.4 km^2 ,该区岩性较均一,为 T_2^2 关岭组的灰质白云岩,地貌为典型喀斯特浅碟状峰丛洼地,峰丛与洼地的面积比为 $1.65:1$ 。海拔最高点 1451.1 m ,最低点 1275 m ,属亚热带季风湿润气候,年均温 14°C ,极端最低温 -5°C ,极端最高温 35°C ,年总积温 4700°C ,年辐射量 361.2 kJ/cm^2 ,年降雨量 1200 mm ,雨热同季,降雨集中在5~9月份,小流域内喀斯特地表渗漏强烈,加上人类的长期破坏造成植被覆盖率较低。土地利用类型,洼地中以耕地为主,土壤类型为黄壤和水稻土;峰丛以灌木林和草地为主,乔木主要为村寨风水林,土壤类型为石灰土。根据地表植被覆盖率、岩石裸露率的不同,把小流域按石漠化强度不同划分为强度石漠化、中度石漠化、轻度石漠化及无石漠化。详细的划分标准见文献^[32]。

本研究区的中、轻度石漠化主要由于樵采、放牧导致,而强度石漠化则主要由耕作导致。由于不同干扰方式对土壤、植被的干扰效应和干扰过程存在差异,导致喀斯特森林土壤-植被系统退化过程、退化特征存在较大差异,故本研究未考虑强度石漠化类型^[33]。样地设于小流域内不同峰丛坡面上,所选的石漠化样地的各峰丛坡面坡度差别不大,坡面也较为均一,均在 30° 左右,土壤均为浅薄的黑色石灰土。有关样地概况、植被类型及土壤基本性质见文献^[31]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集

供试材料于2006年4月底、7月底、9月底及12月初取自研究区,选择喀斯特石漠化区常见灌木火棘、鼠李、竹叶椒、粉枝莓及烟管荚蒾为研究对象,于树冠中上层4个方位选择充分伸展的新鲜叶片,中度石漠化和轻度石漠化每一个样点上每种植物种所采集的植株数量不低于3株,无石漠化样地每种植物种所采集的植株数量不低于10株,每个植株采集3~5片叶片,装入透气性良好的纸质信封带回实验室处理。采样同时在每个样地用土钻取不同土层(0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm)的土壤,放入已知重量铝盒中,用烘干称重法测定土壤质量

含水量。中度石漠化和轻度石漠化每个样地3个重复。无石漠化样地5个重复。

1.2.2 样品的处理及指标的测定

将样品用蒸馏水洗净,放置于 70°C 烘箱中恒温烘48 h,然后粉碎过100目筛,用4分法取约 2 mg 于石英管中,用一根Pt丝作催化剂,加过量氧化铜(1 g 以上即可),真空系统上抽真空($< 3\text{ Pa}$)并密封, 850°C 烧2 h左右,再上真空系统液氮冷阱纯化 CO_2 ,将收集到的 CO_2 立即上MAT-252测试^[34]。所有碳同位素数据均经PDB标准化,单位为‰,累计误差小于 0.1‰ 。所有测试均在环境地球化学国家重点实验室完成。

2 结果与分析

2.1 各样地土壤水分含量的变化

如表1和图1所示,不同月份各石漠化样地土壤含水量存在差异。这跟不同时期降雨情况及植物生长情况有关。4月份,各样地土壤含水量均较高,且各等级石漠化样地间差别不大,这是由于采样前一天刚下雨,各样地植物处于生长初期,蒸腾耗水量小,加上该阶段气温较低,土壤水分蒸发也较少。7月份,植物生长旺盛期,各等级石漠化样地基本上形成了一个水分可利用性逐渐降低的生境梯度。这是由于该阶段降雨频繁且雨量较大,无石漠化样地由于其良好的群落结构保存水分能力强^[35],其土壤含水量显著大于轻度和中度石漠化样地。9月份,采样前已持续十多天无降雨,土壤含水量较7月有所降低。12月份,由于植物生长末期蒸腾耗水降低,加上气温降低土壤水分蒸发降低,各样地土壤含水量有所回升。

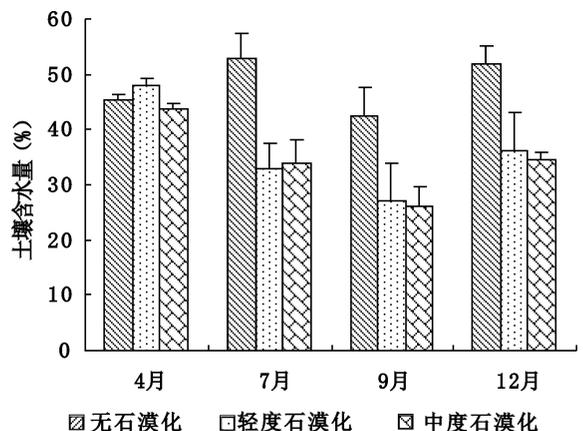


图1 各等级石漠化样地土壤含水量(0~30 cm)变化
Fig. 1 Variations in soil water content in different

karst rocky desertification plots

表 1 不同季节各样地土壤含水量(0~30 cm)的变化

Table 1 Variations in soil water content in different plots during growing seasons

样地	石漠化等级	土壤含水量(%)			
		4月	7月	9月	12月
07	中度	42.96±2.13	37.68±1.69	24.59±1.91	32.87±1.85
09	中度	44.84±3.21	34.91±1.63	30.29±1.85	35.98±1.69
10	中度	43.64±2.12	28.96±1.52	23.56±2.07	34.56±1.57
19	轻度	46.71±2.24	30.88±1.62	27.05±3.22	30.49±1.72
20	轻度	47.80±3.54	38.03±2.61	20.45±2.54	34.85±1.96
21	轻度	49.30±1.65	29.98±1.82	33.93±1.89	43.5±1.47
26	无	45.21±2.86	52.85±2.57	42.32±1.95	51.81±1.63

2.2 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化及种间差异

研究区常见灌木种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定结果见表 2。结果显示在整个生长季植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $-24.69\text{‰} \sim -31.09\text{‰}$, 平均值为 $-27.99 \pm 1.15\text{‰}$ 。最大值来自 4 月份的烟管荚蒾, 最小值来自 7 月份的火棘。这与我们先前报道的本研究区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围 ($-30.74\text{‰} \sim -25.96\text{‰}$) 以及喀斯特峡谷石漠化区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围 ($-30.280\text{‰} \sim -25.546\text{‰}$) 相近^[29,31]。处于荒漠植物和温带植物范围内。整个生长季内, 火棘叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最负, 年平均值为 $-28.55 \pm 0.75\text{‰}$, 烟管荚蒾叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最正, 年平均值为 $-27.35 \pm 1.06\text{‰}$ 。竹

叶椒、鼠李及粉枝莓居中, 分别为 $-28.42 \pm 1.24\text{‰}$ 、 $-27.92 \pm 1.14\text{‰}$ 、 $-27.57 \pm 1.04\text{‰}$ 。方差分析结果表明: 在整个生长季内, 各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异极显著 ($p < 0.001$)。其中, 火棘除与鼠李无显著性差异外 ($p > 0.05$), 与荚蒾、粉枝莓、竹叶椒均呈显著性差异 ($p < 0.05$); 鼠李与火棘、粉枝莓差异不显著 ($p > 0.05$), 与烟管荚蒾、竹叶椒差异显著 ($p < 0.05$); 烟管荚蒾除与竹叶椒差异不显著外 ($p > 0.05$), 与火棘、鼠李、粉枝莓均呈显著性差异 ($p < 0.05$); 粉枝莓与火棘、荚蒾差异不显著 ($p > 0.05$), 与鼠李、竹叶椒差异显著 ($p < 0.05$)。

表 2 常见灌木种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征Table 2 Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of common species in the study area

植物种(Species)	样本数	$\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)变化范围	$\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)平均±标准差(mean±SD)	变异系数(CV)
火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)	27	-27.47~-31.09	-28.55±0.75	0.026
鼠李(<i>Rhamnus davurica</i> Pall)	28	-25.54~-30.16	-28.42±1.24	0.044
粉枝莓(<i>Rubus biflorus</i>)	21	-26.25~-30.58	-27.92±1.14	0.041
竹叶椒(<i>Zanthoxylum planispinum</i> Sieb. et Zucc)	20	-25.79~-29.27	-27.57±1.04	0.038
烟管荚蒾(<i>Viburnum utile</i>)	26	-24.69~-28.59	-27.35±1.06	0.039

从表 3 中可知, 研究区各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值从生长初期到生长末期有逐渐降低的趋势, 这与其他研究结果一致^[23-25], 方差分析结果显示叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同生长时期存在显著差异 ($F(3, 118)0.01 = 2.69 < F = 19.857, p < 0.01$)。其中, 4 月份各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 7、9 及 12 月差异显著 ($p < 0.05$), 而 7 月、9 月及 12 月各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间无显著差异 ($p > 0.05$)。4 月份各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最正, 7 月份各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最负, 且 7 月、9 月及 12 月各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不大。另外, 除火棘外, 其余种在生长季各个时期之间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均存在显著差异 ($p < 0.05$)。这可能指示它具有某

种特殊的吸水机制和水分利用策略。

2.3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对石漠化程度的响应

不同石漠化程度植物群落叶片碳稳定同位素值存在差异。整个生长季, 不同石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年平均值从大到小依次为中度石漠化 ($-27.72 \pm 0.96\text{‰}$) > 轻度石漠化 ($-28.16 \pm 1.15\text{‰}$) > 无石漠化 ($-28.26 \pm 1.49\text{‰}$)。说明植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化进行趋正。这与之前的研究结果一致^[31]。由图 1 可知, 不同等级石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值随季节表现出相同的变化格局。4 月份, 各石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值最正, 7 月个石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值最负, 各石漠化等级植

表3 常见灌木种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化
Table 3 Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants in different months

植物种	$\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)			
	4月	7月	9月	12月
火棘	-28.47±0.55 a	-28.88±1.06 a	-28.38±0.63 a	-28.44±0.26 a
鼠李	-26.76±0.83 a	-28.89±0.86 b	-29.22±0.54 b	-28.80±0.92 b
粉枝莓	-26.97±0.79 a	-28.62±1.33 b	-28.18±0.54 b	—
竹叶椒	-26.32±0.49 a	-28.58±0.49 b	—	-27.63±0.49 c
烟管荚蒾	-25.67±0.89 a	-27.74±0.36 b	-27.46±0.77 b	-28.03±0.57 b

同一行不同字母表示 5%水平上差异显著。

物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随生长季的进行先快速降低, 后缓慢增加。

从图2中可看出, 不同季节植物群落叶片碳稳定同位素值对石漠化程度的响应存在差异, 但基本呈现出无、轻度石漠化植物群落叶片碳稳定同位素值小于中度石漠化植物群落叶片碳稳定同位素值的格局。方差分析结果表明: 7月不同石漠化等级植物群落叶片碳稳定同位素值存在显著差异 ($F(2, 32)0.01=5.34 < F=5.597, p < 0.01$), 而4月、9月及12月植物群落叶片碳稳定同位素值均不随石漠化进行表现出显著性差异 ($F(2, 30)0.05=3.32 < F=0.14, p > 0.05$; $F(2, 25)0.05=3.39 < F=0.480, p > 0.05$; $F(2, 25)0.05=3.39 < F=2.592, p > 0.05$)。

图3为7月常见灌木种 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化发展的变化图, 从图中可看出各植物种也基本呈现出随石漠化进行其 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加的趋势。这也与之前的研究结果一致^[31]。

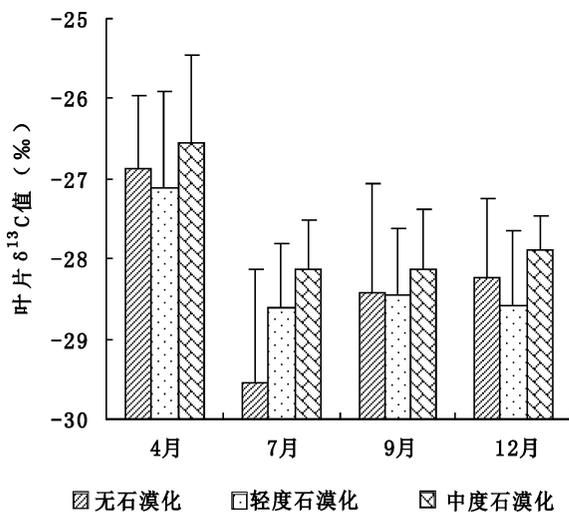


图2 不同等级石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化

Fig. 2 Variations in $\delta^{13}\text{C}$ values of plants in representative sample plots with varying degrees of karst rocky desertification

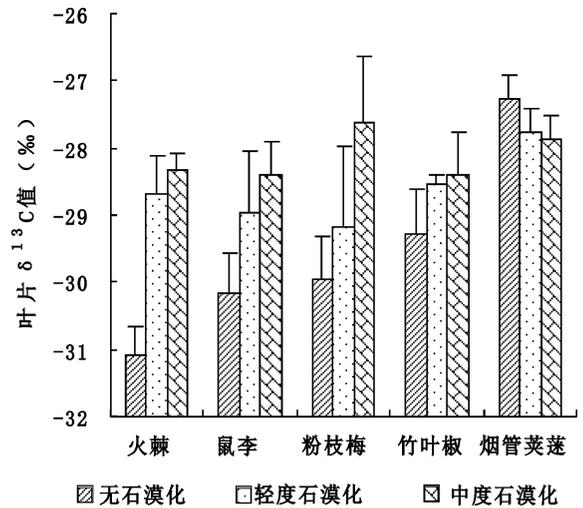


图3 7月不同等级石漠化样地常见种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Fig. 3 Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of common plants in different karst rocky desertification plots in July

3 讨论

3.1 石漠化等级及季节对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

基于石漠化梯度和季节的双因素方差分析表明(表4), 生长于不同石漠化等级及不同季节的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异显著。其中, 石漠化等级因素: $F=$ 均方因素等级/均方残差 = 5.120, $P \leq 0.01$, 认为等级差异显著。季节因素: $F=$ 均方因素等级/均方残差 = 20.841, $P \leq 0.001$, 认为季节差异显著。而石漠化等级 \times 季节的交互效应作用表明, $F=$ 均方因素等级 \times 季节/均方残差 = 0.853, $p > 0.05$, 认为石漠化等级 \times 季节的交互效应作用不显著, 即石漠化等级和季节对植物水分利用效率不存在交互作用。Eta 平方: Eta^2 季节 $>$ Eta^2 石漠化等级 $>$ Eta^2 石漠化等级与季节交互效应, 即季节影响程度最大, 其次为石漠化等级, 而石漠化等级与季节的交互作用最小。

表 4 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值双因素方差分析结果Table 4 Two-way ANOVA results for the effects of season and the gradation degree of karst rocky desertification on the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values

变异来源	三类平方差	自由度	均方	F	p	Eta ²
石漠化等级	8.586847	2	4.293423	5.120	0.007	0.085
季节	52.4305	3	17.47683	20.841	0.000	0.362
石漠化等级 * 季节	4.294051	6	0.715675	0.853	0.532	0.044
误差	92.24174	110	0.838561			
总和	95763.18	122				
校正总和	158.9282	121				

a Computed using alpha=0.05

b R Squared = 0.420 (Adjusted R Squared = 0.362)

本研究结果表明各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值及各植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值均基本随生长期的进行趋负(表 3、图 2)。4 月各等级石漠化植物群 $\delta^{13}\text{C}$ 值及各灌木种 $\delta^{13}\text{C}$ 值最正, 随生长期的进行先大幅降低然后缓慢增加。这与前人关于热带雨林地区、温带沼泽地区、荒漠地区、青藏高原地区及暖温带地区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值季节变化的研究结果一致^[23, 25, 28, 36, 37]。分析其原因是由于在生长初期由于植物细胞内部 CO_2 浓度处于“饥饿”状态, 因而导致植物对¹³ CO_2 的识别和排斥降低, 故植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高。到了生长后期, 叶片外部形态和内部结构发育趋于完全, 内部生理代谢功能趋于完备, 植物具备了较完善的生理生化反应调控机制, 能较有效地识别与排斥¹³ CO_2 , 故植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低^[29]。

由图 1 可知, 整个生长季, 不同石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年平均值从大到小依次为中度石漠化 > 轻度石漠化 > 无石漠化。说明植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化进行趋正。这与我们之前的研究结果一致^[31]。但植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同季节对石漠化等级的响应存在一定差异, 这可能跟观测年的降雨格局有关, 观测年份全年降雨量仅 721mm, 不及正常年份的 70%, 为欠水年^[38]。

4 月, 植物开始生长, 不同石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值顺序从小到大为轻度 < 无 < 中度。这是由于无石漠化植物群落为次生林, 植株多、冠层大, 树木蒸腾耗水量较轻度石漠化的灌木灌丛大, 加上该阶段降雨稀少, 所以其植物遭受的水分胁迫稍大于轻度石漠化。由于水分是喀斯特地区植物生长的限制因子。而湿度被认为是影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的最重要因素之一^[2, 39], 植物为了减少水分的蒸发, 提高 WUE, 从而关闭气孔, 气孔导通系数 (g_s) 减小, 同时由于叶面气孔是大气 CO_2 进入叶内的通

道, 气孔关闭将引起植物叶内 C_i 下降, 从而导致光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高^[4]。因此无石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值即 WUE 稍大于轻度石漠化植物群落。中度石漠化由于植株稀少、矮小, 土面直接暴露于地表, 蒸发强烈, 植物水分胁迫最为严重, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值即 WUE 最大。进入 7 月, 植物已进入生长旺盛期, 不同石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值顺序从小到大为无 < 轻度 < 中度。该阶段降雨频繁且降雨量大, 无石漠化植物群落由于其良好的群落结构及枯落物对裂隙的填充形成了喀斯特水赋存的二元结构^[35], 植物不但能利用土壤水, 还能利用裂隙中的水分, 水分状态良好, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值即 WUE 最低。而轻度石漠化植物群落由于枯落物较少, 二元结构被破坏, 环境中的水分含量降低, 植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高。中度石漠化为稀灌草坡, 降雨时易形成地表径流, 土壤侵蚀严重导致土壤浅薄、石砾含量高, 植物水分胁迫最为严重, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值即 WUE 最高。9 月, 由于采样前持续半个月无降雨使蒸腾耗水量大的无石漠化植物群落与轻度石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别不大, 均小于极度干旱的中度石漠化。12 月, 不同石漠化等级植物群落叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值顺序与 4 月类似。该阶段无石漠化植物群落由于乔木开始落叶, 群落郁闭度降低, 而轻度石漠化植物群落多为常绿灌木为主的灌木灌丛, 故无石漠化植物群落水分蒸发增多, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值稍大于轻度石漠化植物群落。该阶段中度石漠化植物群落由于其生境严酷 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍然最大。

3.2 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤水分的相关关系

对不同季节各等级石漠化样地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各石漠化样地 0~30 cm 土壤平均含水量进行相关分析(图 4), 结果表明: 从种来看: 小叶鼠李除 4 月随土壤水分变化不大外, 其余月份均随土壤水分

减少其 $\delta^{13}C$ 值增高。竹叶椒、粉枝莓同样随土壤水分减少其 $\delta^{13}C$ 值增高。火棘在 4 月、7 月随土壤水分减少其 $\delta^{13}C$ 值增高, 9、12 月相反。烟管荚蒾则相反, 其在各季节均随土壤水分减少其 $\delta^{13}C$ 值降低, 其中 4, 9, 12 月随土壤水分变化不大。说明火棘和烟管荚蒾可能存在与其他种不同的吸水机制。从不同月份来看: 在生长初期的 4 月, 除火棘、小叶鼠李随土壤水分变化不大外, 其余种均随着土壤水分的减少其 $\delta^{13}C$ 值增高。7 月, 除烟管荚蒾外, 其余种均随着土壤水分的减少其 $\delta^{13}C$ 值增高。9 月, 烟管荚蒾随土壤水分变化不大, 火棘随土壤水分减少其 $\delta^{13}C$ 值降低, 其余种均随着土壤水分的减少其 $\delta^{13}C$ 值增高。12 月, 各种 $\delta^{13}C$ 值随土壤水分的变化格局与 9 月相似。可以看出, 整体上, 本研究区所研究的常见灌木种中大多数种在大多数时间随土

壤水分的减少其 $\delta^{13}C$ 值增高。这与国内外一系列相关研究结果一致。陈世莘等^[1, 14] 在内蒙古锡林河流域的研究表明不同群落 C3 植物叶片 $\delta^{13}C$ 均值和各植物种 $\delta^{13}C$ 值均与土壤含水量表现出显著的负相关关系, 生长在干旱生境中的植物具有较高的 $\delta^{13}C$ 值。王国安等^[24] 对中国西北干旱地区不同小生境植物叶片 $\delta^{13}C$ 值的研究同样发现随着小生境土壤含水量的降低, 植物群落 $\delta^{13}C$ 均值表现出更正的叶片 $\delta^{13}C$ 值。苏波等^[40] 在对中国东北样带草原区植物 $\delta^{13}C$ 值的研究发现相当一部分种随着环境湿度的增加其 $\delta^{13}C$ 值降低即 WUE 降低, 容丽等^[30] 对喀斯特峡谷区常见种叶片 $\delta^{13}C$ 值与各环境因子的相关研究表明, 该区大多数种随着土壤贮水量降低其叶片 $\delta^{13}C$ 值增加即 WUE 增加。

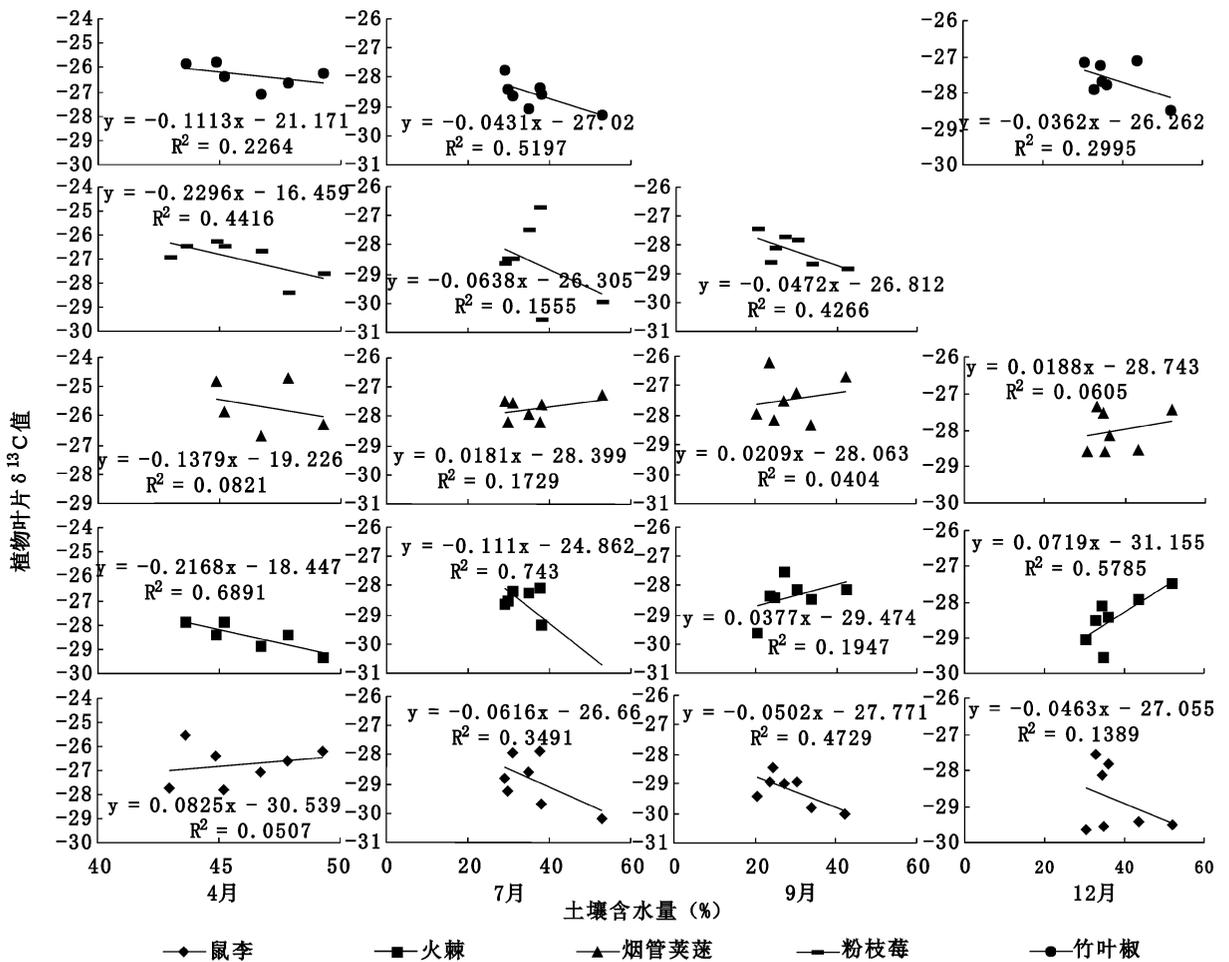


图 4 常见种叶片 $\delta^{13}C$ 值与土壤含水量的相关关系

Fig. 4 The correlation between foliar $\delta^{13}C$ values of common plants and soil moisture

4 结 论

在本研究区, 各等级石漠化植物群落及各常见灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随生长期的进行趋负, 即群落及种群水平植物 WUE 均随生长期的进行降低。常见灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值即 WUE 在不同季节呈显著差异, 4 月叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于生长中后期(7, 9, 12 月)。除火棘外, 其余植物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同季节均呈现显著性差异。5 种灌木种间差异显著, 火棘的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最负, 荚蒾的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最正。而粉枝莓, 鼠李和竹叶椒的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值居中。不同季节均呈现此规律, 这可能跟植物叶片解剖结构及其他生理因素有关。

整个生长季, 不同石漠化等级植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年平均值从大到小依次为中度石漠化 > 轻度石漠化 > 无石漠化。说明植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化

进行趋正。作为植物长期水分利用效率的表征值, 可以推测不同石漠化等级植物群落 WUE 的大小顺序为: $\text{WUE}_{\text{中度}} > \text{WUE}_{\text{轻度}} > \text{WUE}_{\text{无}}$ 。但植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值即 WUE 在不同季节对石漠化等级的响应存在一定差异, 7 月底不同石漠化等级间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异, 而在其余月份(即 4 月、9 月及 12 月)不同石漠化等级间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在显著差异, 但基本呈现无、轻度石漠化植物叶片小于中度石漠化植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的格局。这跟观测年的降雨格局、植被类型及植物生长有关。对各季节各等级石漠化样地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各石漠化样地土壤平均含水量(0~30 cm)进行相关分析, 结果表明所研究的常见灌木种中大多数种在生长季大多数时间随土壤水分的减少其 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高。

参 考 文 献

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化—中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120—126.
- [2] Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings[J]. Nature, 1982, 295: 28—31.
- [3] Farquhar G D and Richards R A. Isotope composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11: 539—552.
- [4] O'Leary M H. Carbon isotope in photosynthesis[J]. Bioscience, 1988, 38(5): 497—502.
- [5] Schuster W S F, Sandquist D R, Philips S L, *et al.* Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan[J]. Oecologia, 1992, 91: 332—337.
- [6] Ehleringer J R. Gas-exchange implications of isotopic variation in arid-land plants[A]. In: Smith J. A. C. & Griffiths H. EDS. Water deficits-plant responses From cell to community[C]. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1993, 265—284.
- [7] Schleser G H. Investigations of the $\delta^{13}\text{C}$ pattern in leaves of *Fagus sylvatica* L[J]. J Exp Bot, 1990, 41: 565—572.
- [8] Donovan LA, Ehleringer J R. Carbon isotope discrimination, water-use efficiency, growth, and mortality in a natural shrub population[J]. Oecologia, 1994, 100: 347—354.
- [9] Schulze E D, Williams R J, Farquhar G D, *et al.* Carbon and nitrogen isotope discrimination and nitrogen nutrition of trees along a rainfall gradient in northern Australia[J]. Aus J Plant physiol, 1998, 25: 413—425.
- [10] Schulze E D, Turner N C, Nicolle D, *et al.* Leaf and wood carbon isotope ratios, specific leaf areas and wood growth of Eucalyptus species across a rainfall gradient in Australia[J]. Tree Physiol, 2006, 26(4): 479—492.
- [11] Chen S P, Bai Y F, Lin G H, *et al.* Isotopic carbon composition and related characters of dominant species along an environmental gradient in Inner Mongolia, China[J]. J Arid Environ, 2007a, 71: 12—28.
- [12] Zheng S X, Shanguan Z P. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of nine dominant species in the Loess Plateau of China[J]. Photosynthetica, 2007, 45 (1): 110—119.
- [13] Stewart G R, Turnbull M H, Schmidt S, *et al.* ^{13}C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability[J]. Aus J Plant physiol, 1995, 22: 51—55.
- [14] Chen S P, Bai Y F, Lin G H, *et al.* Variations in $\delta^{13}\text{C}$ values among major plant community types in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Aust J Bot, 2007b, 55: 48—54.
- [15] Wang G A, Han J M, Zhou L P, *et al.* Carbon isotope ratios of plants and occurrences of C-4 species under different soil moisture regimes in arid region of Northwest China[J]. Physiol Plantarum, 2005, 125(1): 74—81.
- [16] 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.

- [17] Garten Jr C T, Taylor Jr G E. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within a temperate deciduous forest: spatial, temporal, and species sources of variation[J]. *Oecologia*, 1992, 90: 1—7.
- [18] Ehleringer J R, Cooper T A. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants[J]. *Oecologia*, 1988, 76: 562—566.
- [19] 王国安, 韩家懋, 周力平. 中国北方 C_3 植物碳同位素组成与年均温度关系[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 55—57.
- [20] 徐世健, 陈拓, 冯虎元, 等. 新疆乌鲁木齐河上游植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 空间分异的环境分析[J]. 自然科学进展, 2002, 12(6): 617—620.
- [21] Bowling D R, McDowell N G, Bond B J, *et al.* ^{13}C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit[J]. *Oecologia*, 2002, 131: 113—124.
- [22] Klooppel B D, Gower S T, Treiche I W, *et al.* Foliar carbon isotope discrimination in *Larix* species and sympatric evergreen conifers: a global comparison[J]. *Oecologia*, 1998, 114: 153—159.
- [23] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林主要植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 种间差异及时空变化[J]. 植物学报, 1998, 40(9): 853—859.
- [24] 王国安, 韩家懋, 刘东生. 中国北方黄土区 $\text{C}-3$ 草本植物碳同位素组成研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(6): 550—556.
- [25] 苏培玺, 严巧嫣, 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.
- [26] Garten C T, Taylor G E. Foliar delta C-13 within a temperate deciduous forest-spatial, temporal, and species sources of variation[J]. *Oecologia*, 1992, 90: 1—7.
- [27] Damesin C, Rambal S, Joffre R. Seasonal and Annual Changes in Leaf $\delta^{13}\text{C}$ in Two Occurring Mediterranean oaks: relations to leaf growth and drought progression[J]. *Oecologia*, 1998, 12: 778—785.
- [28] Holtum J A M, Winter K. Carbon isotope composition of canopy leaves in a tropical forest in Panama throughout a seasonal cycle[J]. *Tree*, 2005, 19: 545—551.
- [29] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 贵州花江峡谷区常见乔灌植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化程度的响应[J]. 林业科学, 2007, 43(6): 38—44.
- [30] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 喀斯特峡谷区常见植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与环境因子的关系研究[J]. 环境科学, 2008, (8): 2285—2293.
- [31] 杜雪莲, 王世杰, 葛永罡, 等. 喀斯特石漠化过程的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化及其环境分析[J]. 自然科学进展, 2008, 18(4): 413—423.
- [32] 周梦维, 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化小流域景观格局的空间因子分析——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地理研究, 2007, 26(5): 897—905.
- [33] 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 192—195.
- [34] 黎廷宇, 王世杰, 郑乐平. 黔中碳酸盐岩和非碳酸盐岩上覆土壤 CO_2 来源的对比研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(9): 777—782.
- [35] 周政贤. 茂兰喀斯特森林考察综合报告[A]. 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集[C]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987, 1—23.
- [36] Rice S K. Variation in carbon isotope discrimination within and among *Sphagnum* species in a temperate wetland[J]. *Oecologia*, 2000, 123: 1—8.
- [37] 李明财, 易现峰, 李来兴, 等. 青藏高原东部典型高山植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化[J]. 西北植物学报, 2005, 25(1): 77—81.
- [38] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区土壤水分的时空变异分析——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地球与环境, 2008, 36(3): 193—201.
- [39] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9: 121—137.
- [40] 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.

Seasonal Variations and Responses to Different Rocky Desertification Degrees of Foliar $\delta^{13}\text{C}$ Values of 5 Local Plant Species in Karst Areas

DU Xue-lian¹, WANG Shi-jie²

(1. Department of Resources and Environment Management, Guizhou College of Finance and Economics, Guiyang 550004, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences Guiyang 550002, China)

Abstract: By measuring the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of 5 local plant species grown in the Wangjiazhai catchment, a typical karst desertification area in Guizhou Province during growing season in 2006 we studied the impact of rocky desertification grade and season on the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values. The results showed that the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values are significantly different throughout the growing season, they are significantly higher in April than in July, September and December. The foliar $\delta^{13}\text{C}$ values differ significantly among the species tested. *Pyracantha fortuneana* is most negative, *Viburnum utile* most positive, the others moderate. The foliar $\delta^{13}\text{C}$ values increase obviously ($p < 0.01$) with increasing degree of karst rocky desertification in July, instead in April, September and December. During the growing season, the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values are more negative in non-slight rocky desertification than in medium grades basically and the correlation analysis between the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values and soil moisture indicates that the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values decrease with increasing soil moisture.

Key words: karst rocky desertification; seasonal variation; $\delta^{13}\text{C}$ value