

喀斯特石漠化区不同小生境常见灌木种 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征*

杜雪莲^{1,2} 王世杰^{1**} 容 丽^{1,3}

(¹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; ²贵州财经学院资源与环境管理学院, 贵阳 550004; ³贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550002)

摘要 测定了喀斯特石漠化区不同小生境内 5 种常见灌木(鼠李、火棘、粉枝莓、竹叶椒和烟管荚蒾)的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 探讨喀斯特石漠化对植物水分利用空间异质性的影响. 结果表明: 不同小生境植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值大小顺序为: 石面>石沟>石缝>土面. 土面生境中多数灌木种植株叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较其他生境偏轻; 灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小顺序为: 烟管荚蒾>粉枝莓>竹叶椒>火棘>鼠李. 各小生境内灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值和主要灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随着石漠化加深而增大, 且不同小生境间差异显著. 随着石漠化的加剧, 喀斯特生境结构和功能受损, 小生境逐渐分异, 环境逐渐向着干旱化发展.

关键词 喀斯特石漠化 小生境 灌木 $\delta^{13}\text{C}$ 值

文章编号 1001-9332(2011)12-3094-07 中图分类号 X142, X17 文献标识码 A

Characteristics of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of common shrub species in various microhabitats with different karst rocky desertification degrees. DU Xue-lian^{1,2}, WANG Shi-jie¹, RONG Li^{1,3} (¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ²Department of Resources and Environment Management, Guizhou College of Finance and Economics, Guiyang 550004, China; ³School of Geography and Biology Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2011, 22(12): 3094-3100.

Abstract: By measuring the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of 5 common shrub species (*Rhamnus davurica*, *Pyracantha fortuneana*, *Rubus biflorus*, *Zanthoxylum planispinum*, and *Viburnum utile*) growing in various microhabitats in Wangjiazhai catchment, a typical karst desertification area in Guizhou Province, this paper studied the spatial heterogeneity of plant water use at niche scale and the response of the heterogeneity to different karst rocky desertification degrees. The foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of the shrub species in the microhabitats followed the order of stony surface > stony gully > stony crevice > soil surface, and those of the majority of the species were more negative in the microhabitat soil surface than in the others. The foliar $\delta^{13}\text{C}$ values decreased in the sequence of *V. utile* > *R. biflorus* > *Z. planispinum* > *P. fortuneana* > *R. davurica*, and the mean foliar $\delta^{13}\text{C}$ value of the shrubs and that of typical species in various microhabitats all increased with increasing karst rocky desertification degree, differed significantly among different microhabitats. It was suggested that with the increasing degree of karst rocky desertification, the structure and functions of karst habitats were impaired, microhabitats differentiated gradually, and drought degree increased.

Key words: karst rocky desertification; microhabitat; shrub; $\delta^{13}\text{C}$ values.

喀斯特地貌虽然地形起伏不大,但其独特的二

元结构水文系统使该区域地貌具有高度的异质性,拥有丰富多样的小生境.喀斯特生境就是由多种小生境类型镶嵌构成的复合体^[1].目前,喀斯特地区的退化生态环境逐渐成为研究热点,对喀斯特特有的小尺度生境的研究也有相关报道.例如,朱守谦

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070400)、国家自然科学基金项目(30872007, 40721002)、贵州省科技基金项目(黔科合J字[2009]2080)和贵州省教育厅自然科学基金项目(2010031)资助.

** 通讯作者. E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn
2011-05-24 收稿, 2011-09-13 接受.

等^[1-2]对喀斯特小生境的概念、小生境类型组合、空间分布、生态因子特征和植物对小生境资源的利用等进行了研究;王德炉等^[3]研究了喀斯特石漠化过程中植物对小生境资源的利用;王世杰等^[4]、刘方等^[5]和 Zhou 等^[6-7]对喀斯特小生境土壤异质性展开了相关研究. 由于喀斯特地区特殊的地质背景和水土条件,导致该区临时性干旱频繁,水分成为植被恢复的限制因子. 喀斯特不同小生境内温度、湿度、光照度、土壤基质、水分和土层厚度等生态因子的变化都会影响植物的水分利用状况. 分析微小尺度生境内植物的水分利用状况能为大尺度上植物水分利用状况研究提供基础数据,也有利于全面地理解喀斯特地区植物水分利用格局.

近 30 年来,稳定同位素技术已成为生态学研究解释植物与环境相互作用的有力工具. 植物碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)作为指示水分利用效率(WUE)的可靠指标,20世纪80年代在生态学领域的应用取得了突破性进展^[8-9],为植物水分利用评价体系提供了一种全新的分析方法. 研究表明,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^[10],而 C_i 又与植物水分利用效率显著相关. 因此,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以指示植物长期水分利用效率. 高水分、养分条件下,植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,即较低的WUE^[11-12]. 容丽等^[13-14]和杜雪莲等^[15-16]利用运用稳定同位素技术研究了贵州花江峡谷区常见乔灌植物和喀斯特高原小流域内常见种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对石漠化程度、坡位及季节的响应. 鉴于喀斯特地区小生境的多样性可能带来微小尺度上植物水分利用格局的多样性,本研究以贵州喀斯特石漠化地区典型小流域内不同小生境为对象,通过测定该区5种常见灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,研究石漠化等级及小生境对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响,以及植物水分利用对不同小生境的适应机制,旨在为喀斯特石漠化的生态治理提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地设在位于喀斯特高原区的贵州省清镇市簸箕村王家寨小流域(106°20'5"—106°21'8" E, 26°31'45"—26°30'27" N),面积约2.4 km². 该区域属亚热带季风湿润气候,年均气温14℃,极端最低气温-5℃,极端最高气温35℃,年总积温4700℃,年辐射量361.2 kJ·cm⁻²,年降雨量约1200 mm,雨热同季,降雨集中在5—9月,岩性较均一,为T2g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,小流域内喀斯特地表渗漏强烈,加上人类的长期干扰,植被覆盖率较低. 土地利用类型上,洼地以耕地为主,土壤为黄壤和水稻土;峰丛以灌木林和草地为主,乔木主要为村寨风水林,土壤为石灰土.

根据地表植被覆盖率、岩石裸露率的差异,将小流域的石漠化强度划分为强度石漠化、中度石漠化、轻度石漠化和无石漠化^[17]. 其中,强度石漠化植被类型为以鼠李(*Rhamnus davurica*)、烟管荚蒾(*Viburnum utile*)、过路黄(*Lysimachia christinae*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、粉枝莓(*Rubus biflorus*)、毛轴蕨(*Pteridium revolutum*)、莎草(*Cyperus rotundus*)为主的稀疏灌草丛;中度石漠化为以鼠李、竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*)、烟管荚蒾、小果蔷薇、粉枝莓、月月青(*Itea ilicifolia*)、毛轴蕨为主的藤刺灌丛和以毛轴蕨、地瓜藤(*Ficus tikoua*)、青蒿(*Artemisia carvifolia*)、过路黄、鼠李、莎草、竹叶椒为主的草灌丛;轻度石漠化植被类型为以鼠李、竹叶椒、烟管荚蒾、火棘、粉枝莓、圆果化香(*Platycarya longipes*)、毛轴蕨、莎草为主的灌丛;无石漠化植被类型为以云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*)、圆果化香、鼠李、竹叶椒为主的次生林.

样地设在小流域内不同峰丛坡面上,选择不同退化程度峰丛坡面的中坡样地为研究样地,以无石漠化样地为对照(图1). 样地基本概况详见表1.

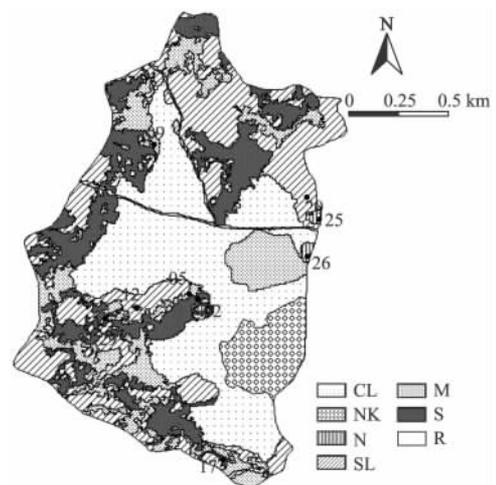


图1 石漠化等级及样地分布

Fig. 1 Distribution of the sample plots and the gradation degree of karst rocky desertified land.

CL: 耕地 Cultivated land; NK: 非喀斯特土山 Non-karst hill; N: 无石漠化 Non rocky desertification; SL: 轻度石漠化 Slight rocky desertification; M: 中度石漠化 Medium rocky desertification; S: 强度石漠化 Severe rocky desertification; R: 道路 Road. 下同 The same below.

表 1 研究样地基本概况

Table 1 Basic features of sample plots

石漠化等级 Degree of desertification	样地 Plot	植被类型 Vegetation type	盖度 Coverage (%)	群落高度 Community height (m)	枯落物厚度 Litter depth (cm)	坡位 Slope position
强度 Severe	02, 17	稀疏灌草丛 Open shrub-herbaceous land	<30	<1	<1	中 Medium
中度 Medium	05, 12	藤刺灌丛 Vine-shrub land	30~50	1.0	1.0	中 Medium
	09	草灌丛 Herbaceous-scrub land	30~50	1.0	1.0	中 Medium
轻度 Slight	20, 29	灌丛 Shrub	50~70	3.0	2.5	中 Medium
无 Non rocky (CK)	25, 26	次生林 Secondary forest	>70	16	18	中 Medium

研究区小生境类型多样,主要有土面、石缝、石沟、石面^[18]。实测了各样地内各类小生境类型的空间位置、外部形态、长、宽、深三维测度、面积比率,同时调查了研究区各小生境内常见种的数量及其树高、胸径、冠幅等,每株均测量。于典型天气测定了不同等级石漠化样地小生境小气候特征。小生境基本概况参见文献[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 供试材料于2007年8月植物生长旺季取自研究样地各小生境内广泛分布的灌木种。根据样地植被调查和小生境植株调查结果,选择在小生境和各等级石漠化样地内广泛存在的火棘、鼠李、竹叶椒、粉枝莓、烟管荚蒾,于树冠中上层东南西北4个方位分别采集成熟叶片,分别混合成一个样品后装入透气性好的样品袋中备用。

1.2.2 样品处理及测定 将样品用蒸馏水洗净,放置于70℃烘箱中恒温烘干48h,然后粉碎过100目筛,用4分法取约2mg于石英管中,用一根Pt丝作催化剂,加过量氧化铜(>1g即可),真空系统上抽真空(<3Pa)并密封,850℃烧2h左右,再上真空系统液氮冷阱纯化CO₂,将收集到的CO₂立即上MAT-252测试。所有碳同位素数据均经PDB标准化,单位为‰,累计误差小于0.05‰。所有测试均在环境地球化学国家重点实验室完成。

表 2 不同小生境植物叶片 δ¹³C 值Table 2 Foliar δ¹³C values of common species in different micro-habitats (mean±SD)

小生境 Micro-habitat	植物种 Species	样本数 Sample number	δ ¹³ C 值 δ ¹³ C values		
			范围 Range (%)	平均±标准差 mean±SD (%)	变异系数 CV (%)
SOS	Rd, Zp, Pf, Rd	22	-28.73 ~ -31.41	-29.44±0.70	2.4
STC	Rd, Zp, Pf, Rd, Vu	28	-26.89 ~ -31.50	-28.87±1.18	4.1
STG	Rd, Zp, Pf, Rd, Vu	28	-27.24 ~ -30.84	-28.71±0.96	3.3
STS	Rd, Zp, Pf, Rd, Vu	33	-26.29 ~ -31.33	-28.57±0.99	3.5

SOS: 土面 Soil surface; STC: 石缝 Stony crevice; STG: 石沟 Stony gully; STS: 石面 Stony surface. Rd: 鼠李 *Rh. davurica*; Zp: 竹叶椒 *Z. planispinum*; Vu: 烟管荚蒾 *V. utile*; Lc: 过路黄 *L. christinae*; Rc: 小果蔷薇 *R. cymosa*; Pf: 火棘 *P. fortuneana*; Rb: 粉枝莓 *R. biflorus*; Cp: 云贵鹅耳枥 *C. pubescens*; Pl: 圆果化香 *P. longipes*; Li: 月月青 *I. ilicifolia*; Pr: 毛轴蕨 *P. revolutum*; Ac: 青蒿 *A. carvifolia*; Ft: 地瓜藤 *F. tikoua*; Cr: 莎草 *C. rotundus*. 下同 The same below.

1.3 数据处理

所有数据均采用 SPSS 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,显著性水平设定为 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 不同小生境中植物叶片 δ¹³C 值特征

由表2可以看出,研究区不同小生境植物叶片平均 δ¹³C 值(-28.85±1.12)‰,最大值来自潜在石漠化土面生境的火棘,为-31.50‰,最小值来自强度石漠化石面生境的烟管荚蒾,为-26.29‰。

虽然土面生境仅采集到一个烟管荚蒾样品,不具有统计学意义,但是小生境内植物叶片 δ¹³C 均值仍能很好地指示群落水平的可利用性^[19]。由表2可以看出,不同小生境下植物叶片 δ¹³C 值大小顺序为:石面>石沟>石缝>土面,差异显著(P<0.05)。对各小生境植物叶片 δ¹³C 值进行多重比较表明,土面生境植物叶片 δ¹³C 值与石缝、石沟生境间存在显著差异(P<0.05),与石面生境间存在极显著差异(P<0.01),而石缝与石沟、石缝与石面、石沟与石面生境之间不存在显著差异(P>0.05)。

2.2 不同小生境对常见灌木种叶片 δ¹³C 值的影响

由表3可以看出,研究区5种常见灌木种叶片

表 3 不同小生境中常见灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化
Table 3 Response characteristics of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of 5 common shrubs to micro-habitat heterogeneity

小生境 Micro-habitat	植物种 Species	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ values		
		范围 Range (‰)	平均±标准差 mean±SD(‰)	变异系数 CV (%)
SOS	Pf	-28.73 ~ -30.37	-29.42±0.62	2.1
	Rd	-28.77 ~ -30.40	-29.24±0.66	2.3
	Rb	-28.74 ~ -29.68	-29.17±0.39	1.3
	Zp	-28.87 ~ -31.41	-29.72±0.88	3.0
	Vu	-	-	-
STS	Pf	-27.88 ~ -29.34	-28.70±0.62	2.2
	Rd	-27.73 ~ -29.46	-28.80±0.64	2.2
	Rb	-27.99 ~ -29.95	-28.80±0.81	2.8
	Zp	-27.68 ~ -31.33	-29.18±1.18	4.0
	Vu	-26.29 ~ -28.19	-27.54±0.61	2.4
STG	Pf	-27.82 ~ -29.38	-28.75±0.66	2.3
	Rd	-28.17 ~ -30.96	-29.47±1.23	4.2
	Rb	-27.81 ~ -28.73	-28.27±0.38	1.3
	Zp	-27.43 ~ -30.01	-28.97±0.93	3.2
	Vu	-27.24 ~ -29.60	-28.11±0.86	3.1
STC	Pf	-28.42 ~ -31.50	-30.00±1.64	5.5
	Rd	-27.37 ~ -30.71	-28.76±1.12	3.9
	Rb	-27.48 ~ -29.24	-28.57±0.95	3.3
	Zp	-27.99 ~ -31.22	-29.12±1.04	3.6
	Vu	-26.89 ~ -29.75	-28.22±0.89	3.2

$\delta^{13}\text{C}$ 均值随小生境变化顺序并不完全一致。多数灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在土面生境中偏重, 石沟、石缝居中, 石面偏轻。方差分析结果显示, 不同小生境间各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异均不显著。多重分析显示, 仅粉枝梅在土面和石沟生境间差异显著。

各生境中灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化顺序也不完全一致。多数生境中, 火棘、竹叶椒和鼠李叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏轻, 粉枝梅次之, 烟管荚蒾偏重。方差分析显示, 除石面生境中各灌木种间 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著外, 土面、石缝、石沟生境中各灌木种间 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异均不显著。经多重比较分析, 石缝生境中火棘和烟管荚蒾间差异显著, 石沟生境中鼠李与粉枝梅、鼠李与烟管荚蒾间差异显著, 而石面生境中烟管荚蒾与其他 4 种植物间均有显著性差异。

2.3 石漠化梯度对不同小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

由图 2 可以看出, 研究区各小生境群落尺度上植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随石漠化进程进行趋正。方差分析结果表明, 石缝、土面生境中各等级石漠化样地间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异极显著, 而石沟、石面生境的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值各等级石漠化样地间总体上差异显著。多重比较分析发现, 石缝、土面生境中, 无石漠化与其他等级石漠化间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在极显著

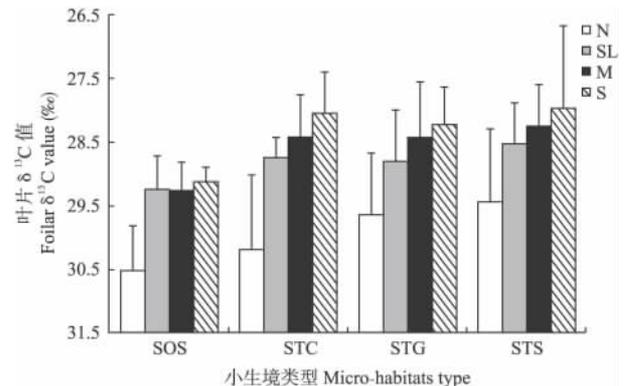


图 2 石漠化梯度对各小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

Fig. 2 Variation of $\delta^{13}\text{C}$ values of plants in various micro-habitat with different karst rocky desertification degrees.

SOS: 土面 Soil surface; STC: 石缝 Stony crevice; STG: 石沟 Stony gully; STS: 石面 Stony surface. 下同 The same below.

著差异, 石沟生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在无石漠化与强度石漠化和无石漠化与中度石漠化间存在极显著差异, 石面生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在无石漠化与强度石漠化和无石漠化与中度石漠化间存在极显著差异, 在无石漠化与轻度石漠化间存在显著差异。本研究区各小生境中常见灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化进程基本呈现出相同的变化格局(图 3)。即在小生境种群尺度上, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本上随石漠化程度进行趋正。

研究区各石漠化等级内不同小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小基本遵循以下规律: 土面 < 石缝、石沟 < 石面。方差分析结果显示, 强度石漠化样地内各小生境间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异显著, 对照、轻度和中度石漠化样地各小生境间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异均不显著。多重比较分析表明, 轻度、中度石漠化样地土面与石面生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著, 强度石漠化样地土面与石缝、石沟生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著, 与石面生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异极显著, 而其他石漠化样地不同生境间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异均不显著。

3 讨论

3.1 不同小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异

本研究从小尺度生境上探讨了喀斯特植物水分利用的空间异质性。结果表明, 不同小生境下常见灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值大小顺序为: 石面 > 石沟 > 石缝 > 土面, 这可能与不同小生境的土层厚度有关。一般来说, 土壤厚度增加, 植物可利用资源增加, 高资源可利用条件下植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小, 即 WUE 较低^[11-12]。由于碳酸盐岩特殊地质背景下的成土机

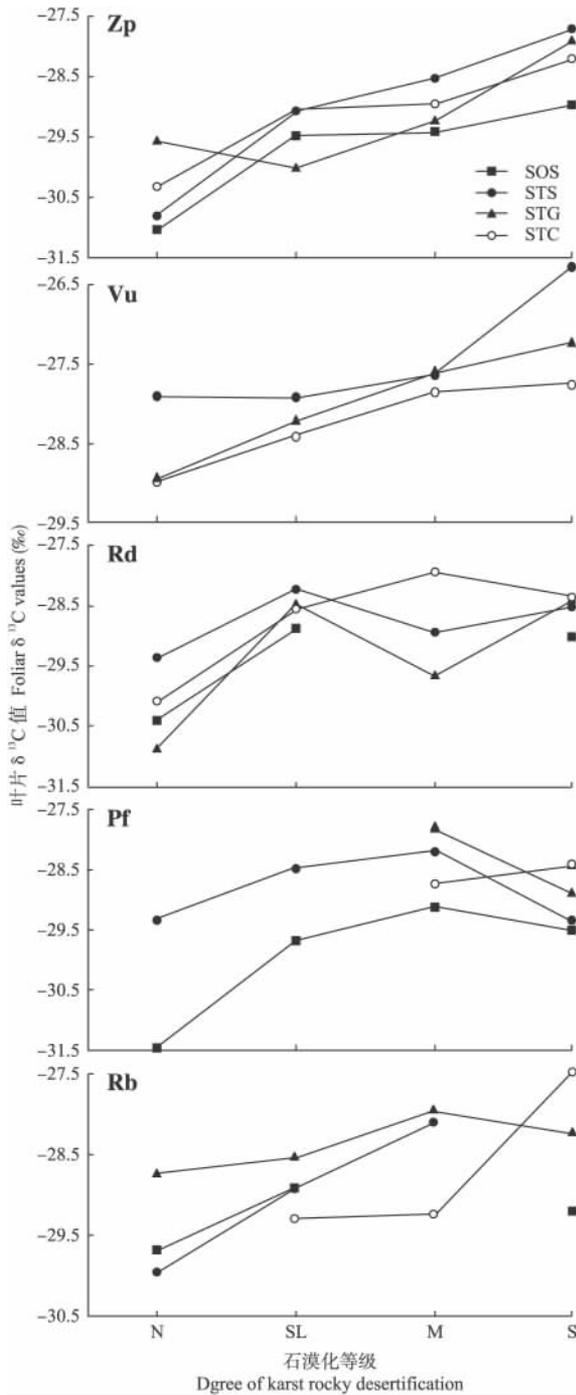


图3 石漠化过程对小生境常见灌木种叶片 δ¹³C 值的影响
Fig. 3 Foliar δ¹³C values of common plants in different microhabitats with karst rocky desertification process.

Rd: 鼠李 *Rh. daurica*; Zp: 竹叶椒 *Z. planispinum*; Vu: 烟管荚蒾 *V. utile*; Pf: 火棘 *P. fortuneana*; Rb: 粉枝莓 *R. biflorus*.

理^[20] 土壤的厚度成为喀斯特地区植物生长的限制因子,土壤厚度的增加可以提高土壤储存水分、养分能力,土壤对其他环境因子的缓冲能力加强.研究表明,在连续晴天条件下,喀斯特地区土壤含水量下降与土壤厚度关系较大^[21].由于喀斯特地区土层普遍浅薄,小生境多样,植物根系在岩石裂隙间穿梭,可

能会利用表层岩溶带的水分.本研究中,除强度石漠化各小生境中植物仅利用土壤水外,中度和轻度石漠化各小生境中的植物均不同程度利用了表层岩溶带水分(未发表数据).由于土面生境的土层较厚、土壤总量大,生长于该生境的植物水分利用状况最优;石沟、石缝生境的空间狭小,土壤总量少,能供给植物的水分较土面生境少;石面生境受外界强烈干扰,土量极少,植物水分胁迫最为严重.也就是说,在小生境群落尺度上,土面生境调节水分能力强,植物获得的水源最为充足,叶片 δ¹³C 值低;而石面生境最为严酷,导致该生境植物 δ¹³C 值最高,石沟、石缝较石面生境稍好,其植物 δ¹³C 值居中.这与国内外相关研究结果一致.葛永罡等^[22]对同一个小流域内喀斯特石漠化和土山植物叶片 δ¹³C 值研究显示,土山样地植物 δ¹³C 值显著低于喀斯特石漠化样地. Peiiuelas 等^[23]对西班牙东北部荒漠流域的研究表明,坡脚土层较厚处的植物 δ¹³C 值较坡顶土层较薄处低.严昌荣等^[24]对暖温带落叶阔叶林主要植物叶片 δ¹³C 值的研究表明,生长在土层较厚、土壤湿度较高生境下的植物 δ¹³C 值较干旱生境的低.渠春梅等^[25]对西双版纳热带雨林的研究发现,水分条件稍好的补蚌样地植物叶片 δ¹³C 均值低于水分条件稍差的城子样地.王国安等^[26]对我国西北干旱地区不同小生境植物叶片 δ¹³C 值的研究发现,随着小生境土壤含水量的降低,植物群落 δ¹³C 均值表现出更正的叶片 δ¹³C 值.陈世莘等^[27-28]研究表明,在内蒙古锡林河流域同一个水分梯度上,不同群落 C3 植物叶片 δ¹³C 均值和各植物种 δ¹³C 值均与土壤含水量呈显著负相关,生长在干旱生境中的植物 δ¹³C 值较高.本研究中,不同小生境下植物 δ¹³C 均值变异系数为:石缝>石面>石沟>土面,说明土面生境抗外界变化的缓冲能力较强,植物群落能保持相对一致的 WUE,而石缝生境随外界环境变化最为剧烈.

在小生境种群尺度上,研究区 5 种常见灌木种叶片 δ¹³C 值随小生境变化顺序并不完全一致,各小生境的总体差异均不显著,说明这些植物种对小生境资源的利用存在随机性:1) 多数灌木种在土面生境中的植株叶片 δ¹³C 值偏负,指示土面生境优越;2) 各小生境中叶片 δ¹³C 值均表现为烟管荚蒾最大,粉枝莓次之,而竹叶椒、火棘和鼠李较小,这表明烟管荚蒾对生境资源的利用效率最高.在生境资源极端匮乏的情况下,烟管荚蒾的生长和存活竞争力可能较其他种更强.野外调查证实,在生境恶劣的强度石漠化样地,烟管荚蒾数量明显增多,而且石面生境

的分布数量也明显高于其他生境^[18]. 另外, 土面生境中各灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变异系数最小, 石缝生境变异系数最大. 这与小生境群落尺度上的结果相一致.

3.2 石漠化等级对小生境植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

研究区土面、石沟、石缝、石面内植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值随石漠化程度进行趋正, 各植物种也表现出石漠化样地叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均大于无石漠化样地, 即小生境群落和种群尺度上植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随石漠化程度进行趋正. 这说明石漠化一旦发生, 植物 WUE 在小生境尺度上对环境因子变化的响应是迅速和敏感的. 随着石漠化的进程, 各小生境也变得更加恶劣. 野外调查结果也证实, 随着石漠化的进行, 各类小生境光照强度和土温逐渐增加, 大气相对湿度和土壤含水量逐渐降低, 生境逐渐向干旱化方向发展. 方差分析表明, 各小生境的地表温度、大气相对湿度、光照强度及土壤含水量均随着石漠化的进程呈极显著差异^[18]. 这是由于无石漠化样地为风水林, 群落结构复杂, 林下枯落物多. 落叶乔木的大量枯落物覆盖于地表(土面、石面)和填充于裂隙(石缝、石沟)中, 将各小生境有机地联系起来. 由于枯落物很强的持水性吸收了大量水分, 阻止了地表水迅速下渗和地表径流的形成, 形成水分赋存的二元结构^[29]. 喀斯特地貌水分的留存与良性循环对森林植被有着强烈的依附性^[3], 土壤的先天不足使喀斯特生态系统对植被的依附性强. 随着石漠化的进程, 植物群落逐渐退化为灌木灌丛、藤刺灌丛、草灌丛和稀疏灌草丛. 群落高度、盖度逐渐降低, 生物量下降, 枯落物随之减少, 水赋存的二元结构被破坏, 各小生境逐渐分离, 生境破碎度增加, 原本持水的碳酸盐岩变成了强透水层, 环境逐渐向着干旱化发展. 本研究中, 无石漠化样地各小生境植物水分来源相似, 均利用了土壤水及表层岩溶带水, 水分条件最好; 而轻度、中度石漠化样地各小生境植物的水分来源差异较大, 强度石漠化样地各小生境植物仅利用土壤水. 因此, 无石漠化样地各小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间差异均不显著, 而轻度、中度及强度石漠化样地土面生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于其他一个或几个生境. 多重比较分析显示, 轻度、中度和强度石漠化样地各小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均存在显著或极显著差异. 说明随着石漠化的进程, 喀斯特生境结构和功能受损, 小生境逐渐分异, 环境逐渐向着干旱化发展.

参考文献

[1] Zhu S-Q (朱守谦), He J-X (何纪星), Zhu X-K (祝

- 小科), *et al.* Studies on the features of micro-habitats of karst forest// Zhu S-Q (朱守谦), ed. Ecological Research on Karst Forest (I). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1993: 52-62 (in Chinese)
- [2] Zhu S-Q (朱守谦), He J-X (何纪星). A study on microhabitats to Karst forest in Maolan// Zhu S-Q (朱守谦), ed. Ecological Research on Karst Forest (III). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2003: 38-48 (in Chinese)
- [3] Wang D-L (王德炉), Zhu S-J (朱守谦), Huang B-L (黄宝龙). Changes of vegetation features of rocky desertification process in karst area of Guizhou. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science)* (南京林业大学学报·自然科学版), 2003, 27(3): 26-30 (in Chinese)
- [4] Wang S-J (王世杰), Lu H-M (卢红梅), Zhou Y-C (周运超), *et al.* Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, 44(3): 475-483 (in Chinese)
- [5] Liu F (刘方), Wang S-J (王世杰), Luo H-B (罗海波), *et al.* Micro-habitats in karst forest ecosystem and variability of soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, 45(6): 1055-1062 (in Chinese)
- [6] Zhou YC, Wang SJ, Lu HM, *et al.* Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outcrops: Example from SW China. *Acta Carsologica*, 2010, 39: 115-122
- [7] Zhou Y-C (周运超), Wang S-J (王世杰), Lu H-M (卢红梅). Spatial distribution of soils during the process of karst rocky desertification. *Earth and Environment* (地球与环境), 2010, 38(1): 1-7 (in Chinese)
- [8] Francey RJ, Farquhar GD. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 1982, 295: 28-31
- [9] Farquhar GD, Richards RA. Isotope composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1984, 11: 539-552
- [10] O'Leary MH. Carbon isotope in photosynthesis. *Bioscience*, 1988, 38: 497-502
- [11] Schuster WSF, Sandquist DR, Phillips SL, *et al.* Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, 91: 332-337
- [12] Ehleringer JR. Gas-exchange implications of isotopic variation in arid-land plants// Smith JAC, Griffiths, eds. Water Deficits: Plant Responses from Cell to Community. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1993: 265-284

- [13] Rong L (容 丽), Wang S-J (王世杰), Du X-L (杜雪莲). Responses of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of woody plants to different karst rocky desertification degrees in Huangjiang gorge, Guizhou. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2007, **43**(6): 38–44 (in Chinese)
- [14] Rong L (容 丽), Wang S-J (王世杰), Du X-L (杜雪莲). Responses of $\delta^{13}\text{C}$ values of plant leaves to environmental gradients along environmental gradient factors in rocky desertified area of a typical karst gorge. *Environmental Science* (环境科学), 2008, **29**(10): 2285–2293 (in Chinese)
- [15] Du X-L (杜雪莲), Wang S-J (王世杰), Ge Y-G (葛永罡), et al. Response of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values to environmental gradients during the process of karst rocky desertification. *Progress in Natural Science* (自然科学进展), 2008, **18**(4): 413–423 (in Chinese)
- [16] Du X-L (杜雪莲), Wang S-J (王世杰). Seasonal variations and responses to different rocky desertification degrees of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of 5 local plant species in karst area. *Earth and Environment* (地球与环境), 2010, **38**(2): 129–137 (in Chinese)
- [17] Zhou M-W (周梦维), Wang S-J (王世杰), Li Y-B (李阳兵). Spatial factor analysis of karst rocky desertification landscape patterns in Wangjiashai catchment, Guizhou. *Geographical Research* (地理研究), 2007, **26**(5): 897–905 (in Chinese)
- [18] Du X-L (杜雪莲), Wang S-J (王世杰). Micro-habitat characteristics in karst desertification area: A case study of Wangjiashai catchment in Guizhou. *Earth and Environment* (地球与环境), 2010, **38**(3): 255–261 (in Chinese)
- [19] Schulze ED, Turner NC, 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. *Tree Physiology*, 2006, **26**: 479–492
- [20] Wang SJ, Ji HB, Ouyang ZY, et al. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock. *Science in China Series D*, 1999, **42**: 572–581
- [21] Zhu S-Q (朱守谦), Wei L-L (韦小丽), Zhu X-K (祝小科), et al. A study on water characters to karst rocky hills in Wujiang river// Zhu S-Q (朱守谦), ed. *Ecological Research on Karst Forest* (III). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2003: 30–37 (in Chinese)
- [22] Ge Y-G (葛永罡), Wang S-J (王世杰). Correlations between soil moisture and $\delta^{13}\text{C}$ value of plant leave under karst and non-karst backgrounds—A case study in Wangjiashai basin, Qingzhen City, Guizhou Province. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), 2008, **27**(2): 108–114 (in Chinese)
- [23] Penuelas J, Filella I, Terradas J. Variability of plant nitrogen and water use in a 100-m transect of a subdesertic depression of the Ebro valley (Spain) characterized by leaf $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$. *Acta Oecologica*, 1999, **20**: 119–123
- [24] Yan C-R (严昌荣), Han X-G (韩兴国), Chen L-Z (陈灵芝), et al. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within temperate deciduous forest: Its spatial change and interspecies variation. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1998, **40**(9): 853–859 (in Chinese)
- [25] Qu C-M (渠春梅), Han X-G (韩兴国), Su B (苏波), et al. 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), 2001, **43**(2): 186–192 (in Chinese)
- [26] Wang GA, Han JM, Zhou LP, et al. Carbon isotope ratios of plants and occurrences of C-4 species under different soil moisture regimes in arid region of Northwest China. *Physiology Plantarum*, 2005, **125**: 74–81
- [27] Chen SP, Bai YF, Lin GH, et al. Isotopic carbon composition and related characters of dominant species along an environmental gradient in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 2007, **71**: 12–28
- [28] Chen SP, Bai YF, Lin GH, et al. Variations in $\delta^{13}\text{C}$ values among major plant community types in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Australian Journal of Botany*, 2007, **55**: 48–54
- [29] Zhou Z-X (周政贤). A comprehensive report on the survey of Maolan karst forest// Scientific Survey of the Maolan Karst Forest. Guiyang: Guizhou People's Press, 1987: 1–3 (in Chinese)

作者简介 杜雪莲,女,1981年生,博士,副教授。主要从事喀斯特生态环境和环境地球化学研究,发表论文5篇。E-mail: duxuelian520@163.com

责任编辑 李凤琴
