

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*

杜雪莲^{1,2} 王世杰^{1**} 葛永罡^{1,2} 容丽¹ 罗绪强^{1,2}

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. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 测定了贵州高原喀斯特小流域内不同等级石漠化样地几种乡土种叶片稳定碳同位素组成的变化及主要环境因子的变化, 旨在从小流域尺度上探讨喀斯特石漠化过程中植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化及影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要环境因子。结果表明: 石漠化过程中, 生境逐渐由低光、高水分环境向高光、低水分环境转变; 植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化的发展显著增加, 即群落的水分利用效率随着石漠化发展显著提高; 植物种也基本呈现出随着石漠化进行其 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋正的趋势, 说明随着水分可利用性的降低, 植物的水分利用效率提高; 所研究的植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种内差异不同, 反应了喀斯特石漠化区不同植物的水分利用对环境变化的不同响应; 轻度石漠化坡面上坡和中坡植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异, 而上坡和下坡、中坡和下坡间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在显著差异, 中度石漠化坡面不同坡位间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值均不存在显著差异, 这正是喀斯特地区特殊的二元结构水文系统以及其复杂多变的地形地貌的体现; 通过对各种石漠化样地植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与环境因子的相关分析得出, 水分和光照是影响该区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主控因子。

关键词 喀斯特石漠化 $\delta^{13}\text{C}$ 值 水分利用效率 小流域 环境因子

对中国南方喀斯特石漠化区退化生态系统进行恢复与重建时, 在该地带的综合生态因子中, 虽然有光照、温度、降水充裕的有利条件, 但基岩裸露率高, 渗透性强, 土体零星, 土层浅薄, 以致土壤储水能力差, 临时性干旱时有发生, 且干旱程度不亚于有些长期干旱的地区^[1,2]。水分成为植被恢复最重要的限制因子。有关喀斯特地区树种的水分生态研究工作相当零散, 主要集中在树种水势、蒸腾强度、PV曲线及利用植物光合、蒸腾速率表征水分利用效率(WUE)等方面^[3-12]。植物碳同位素组成, 作为指示WUE的可靠指标, 于20世纪80年代在生态学领域的应用取得突破性进展^[13-15], 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^[15], 而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^[16,17]。该技术目前已广泛应用于叶片^[18,19]、植物种^[20-24]、群落^[25-28]、生态系统^[29-32]乃至全球^[33,34]各个尺度上的水分利用研究。已有的研究表明植物稳定碳同位素组成往往受降雨量、土壤含水量、湿度、温度、光照、氮素有效性及大气 CO_2 浓度等多种气候及环境因子的影响^[25-33,35-40],

2007-08-15 收稿, 2007-11-29 收修改稿

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB403200)、中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号: kzcx2-yw-306)、创新团队国际合作伙伴计划、中国科学院知识创新前沿领域项目和国家自然科学基金(批准号: 40672112)资助

** 通信作者, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

并且各环境因子之间还会互相影响,甚至对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生完全相反的作用^[41].而小尺度范围特别是小流域尺度上的研究则消除了大尺度上的环境因素如降雨量、海拔、大气 CO_2 浓度等的影响,因此更有利于弄清植物稳定碳同位素组成与环境因子间的关系.目前,国内关于群落和植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究集中在西北干旱半干旱荒漠区,而在临时性干旱频繁的喀斯特石漠化区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关研究在国内外尚为少见.为此,本文选择了贵州高原一个典型喀斯特小流域,通过对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叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究,探讨:(i)植物的水分利用状况在群落和种群水平上对石漠化梯度的响应;(ii)不同坡位植物的水分利用状况;(iii)影响该区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要环境因子;以期对喀斯特石漠化区的生态治理与植被恢复提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区及样地环境概况

实验地设在喀斯特高原区清镇市簸箩村王家寨小流域,东经 $106^{\circ}20'5''-106^{\circ}21'8''$,北纬 $26^{\circ}31'45''-26^{\circ}30'27''$,面积约 2.4 km^2 ,该区岩性较均一,为 T_2g 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 $361.2\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,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,次生林主要为村寨风水林,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^[42].

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^[43].样地设于小流域内不同峰丛坡面上,选择不同退化程度的无石漠化、轻度石漠化和中度石漠化为研究样地(图1).各石漠化样地所在的峰丛坡面坡度差别不大,均在 30° 左右,坡面也较为均一,土壤类型均为黑色石灰土.表2可知各样地土壤基本理化性质差异不大.各等级石漠化样地具体情况详见表1.

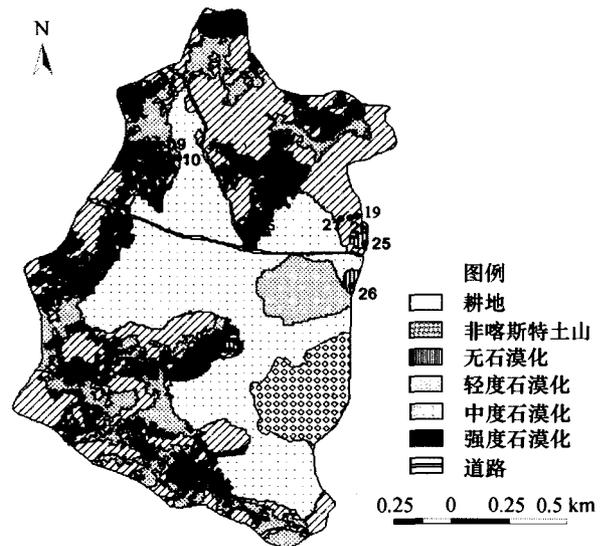


图1 石漠化等级及样地分布图

1.2 研究方法

1.2.1 各石漠化样地主要环境因子的监测 于2005年9月13日到9月18日进行了典型天气(无云晴朗日)监测.测定样地内离地面 1.5 m 高处的光照强度和空气温湿度、气压等大气气候指标;用ZDS-10照度计测定光照强度,阿斯曼通风干湿温度计测定气温和相对湿度.每个指标分别选择3个典型点,取平均值.每日从 $8:00-18:00$ 间隔 2 h 观测1次,中午 $13:00$ 和 $15:00$ 各加密监测1次.

1.2.2 样品的采集 供试材料于2005年9月13日—9月18日采取实验区不同石漠化等级的峰丛坡面上.在轻度、中度石漠化坡面典型地段随机拉一条从坡顶至坡底的样线,在每条样线上每隔约 10 m 设置一个约 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 样方,由于无石漠化坡面高差较小,样地面积需求较大($20\text{ m}\times 20\text{ m}$),无法按坡位变化设置样地,只有在坡面典型位置设置两个样

表1 王家寨小流域研究样地概况

样地号	植被类型	常见种 ^{a)}	群落盖度/%	群落高度/m	枯落物厚度/cm	最高土厚/cm	石漠化等级	坡位
07	以 k, m, l, d 为主的草灌丛	a, b, d, f g, l, n	40	0.8	1.0	40	中	上
08	以 m, k, p, d 为主的草灌丛	a, d, e, l g, n	50	0.8	1.0	35	中	中上
09	以 k, l, p, g 为主的草灌丛	a, b, c, d g, l, n	50	0.9	1.0	45	中	中下
10	以 b, m, n, p 为主的草灌丛	a, b, d, e f, g, l, n	45	1.0	1.0	50	中	下
19	以 e, b, c, f, g 为主的灌丛	a, b, c, d, e f, g, l, n	65	3.0	2.3	50	轻	上
20	以 i, a, b, j, g 为主的灌丛	a, b, c, f g, h, i, l, n	70	2.8	2.5	50	轻	中
21	以 a, b, c, i, k 为主的灌丛	a, b, c, g h, i, l, n	65	2.8	2.5	60	轻	下
25	以 h, i, a, b 为主的次生林	a, b, c, h i, n	90	16	18	50	无	中
26	以 h, i, a, b 为主的次生林	a, b, c, h i, n	90	16	18	50	无	中

a) a 鼠李(*Rhamnus davurica*); b 竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*); c 烟管荚蒾(*Viburnum utile*); d 过路黄(*Lysimachia christinae*); e 小果蔷薇(*Pyracantha fortuneana*); f 火棘(*Pyracantha fortuneana*); g 粉枝莓(*Rubus biflorus*); h 云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*); i 圆果化香(*Platycarya longipes*); j 月月青(*Itea iliciifolia*); k 毛轴蕨(*Pteridium revolutum*); l 青蒿(*Artemisia carviifolia*); m 地瓜藤(*Ficus tikoua*); n 莎草(*Cyperus rotundus*); o 荻草(*Arthraxon hispidus*); p 黄茅(*Heteropogon contortus*)

地进行采样。所取植物主要为本区分布广泛，且在各地频繁出现的灌草植物。由于无法在每个样点上采集到所有的植物，因此在无石漠化样地采集莎草、鼠李、竹叶椒、烟管荚蒾、圆果化香和云贵鹅耳枥，在轻度石漠化样地采集青蒿、莎草、鼠李、粉枝莓、火棘、竹叶椒、烟管荚蒾、圆果化香和云贵鹅耳枥，在中度石漠化样地采集青蒿、莎草、鼠李、粉枝莓、火棘、竹叶椒和烟管荚蒾。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。

1.2.3 样品的处理及指标的测定 将样品用蒸馏水洗净，放置于70℃烘箱中恒温烘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以上即可)，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^[44]。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。

在每个样方内选取5—8个样点，分别采集9块样地坡面表层土壤(0—20cm)混合样品。新鲜土样自然风干后，用四分法取一定量样品，挑出石砾及可见凋落物及根系，植物碎片太小时用塑料棒的摩擦静电法去除。然后过2mm筛的土壤用于土壤有效态养分含量的测定；过1mm筛的土壤用于pH值的测定；再取少量土样研磨过0.25mm筛用于土壤化学性质的测定。土壤pH值采用酸度计法、有机质采用重铬酸钾外加热法、碱解氮采用碱扩散法、有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法、速

效钾采用醋酸铵提取-AAS 测定的方法、有效铁、锰、铜、锌采用 DTPA 提取后原子吸收测定的方法、其余元素含量采用 ICP-OES 测定。测定结果见表 2。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。

表 2 王家寨小流域研究样地土壤基本养分含量

样地	pH	有机质 /%	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	速效 K /(mg·kg ⁻¹)	有效 Fe /(mg·kg ⁻¹)	有效 Mn /(mg·kg ⁻¹)	有效 Cu /(mg·kg ⁻¹)	有效 Zn /(mg·kg ⁻¹)
07	7.8	28.1	648.46	9.1	55.5	27.3	43.7	1.01	7.59
08	7.8	18.2	454.03	5.4	74.5	44.6	102.1	0.80	6.92
09	7.8	19.6	523.10	6.6	61.6	23.5	51.6	1.15	3.14
10	7.9	26.2	537.84	9.1	26.1	24.9	79.9	1.57	5.54
19	7.9	24.9	510.27	11.3	67.6	26.7	86.6	0.89	8.62
20	7.8	27.4	643.38	9.4	68.7	34.9	45.2	0.98	8.74
21	7.6	24.1	454.10	4.9	54.8	41.3	70.6	0.96	9.32
25	7.6	33.1	657.04	10.6	63.5	62.6	43.6	0.58	8.10
26	7.5	22.1	590.40	5.2	39.6	32.7	47.1	0.91	3.68

1.3 数据分析

使用 SPSS11.5 数据分析系统的单因子方差分析(One-Way ANOVA)和相关分析(Bivariate)进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同石漠化梯度植物群落的主要环境因子特征

对各石漠化等级样地光照强度和大气相对湿度的监测结果见图 2, 虽然所有石漠化等级的光照强度日变化呈中午高、早晚低的单峰曲线; 但同一时间样地的光照强度随石漠化等级的增高呈现不断增强的特征, 中度石漠化光照强度可达到潜在石漠化的 4 倍以上, 尤其在中午表现得最为明显。不同石漠化样地大气相对湿度的日动态均呈与光照强度相反的变化, 早晨相对湿度常出现较高值, 日出后温度的上升导致湿度迅速下降, 在气温最高、太阳辐射最强时, 相对湿度最低, 日落时湿度又迅速上升。随着石漠化等级的提高, 样地光照强度及大气相对湿度的日变幅逐渐增大。中度石漠化样地光照强度和大气相对湿度的日变幅最大, 轻度石漠化地区次之, 无石漠化样地光照强度和大气相对湿度的日变幅最小。

不同石漠化等级植物群落日均光照强度、日均大气相对湿度及土壤含水量见表 3, 可见随着石漠化程度的增加, 日均光照强度逐渐升高, 日均大气相对湿度逐渐降低, 土壤水分含量逐渐减少, 形成了一个水分可利用性逐渐降低的生境梯度。

方差分析表明不同等级石漠化样地间 0—30 cm 土壤平均含水量、日均光照强度及日均大气相对湿度均呈显著性差异($p < 0.05$)。结合表 1, 3 和图 2 分析可知, 在本研究区, 从无石漠化-轻度石漠化-中度石漠化, 植物群落类型从次生林—灌木灌丛—稀灌草坡, 其结构和功能逐渐退化, 群落高度盖度降低, 光照强度增强, 大气相对湿度降低, 岩石裸露率增加, 蓄水保土功能退化, 地表枯落物层逐渐减少直至消失, 喀斯特水赋存的二元结构被破坏^[45], 碳酸岩强烈的渗漏性使地表水迅速转入地下水, 地表水与地下水之间的良性循环向着恶性循环转变, 水分贮量大大减少, 散失速度加快, 浅薄的土壤物质被冲刷殆尽, 环境向着干旱化快速发展。

由于同一等级石漠化坡面较为均一, 群落盖度和高度相差无几, 接受的太阳辐射差不多, 导致中度石漠化和轻度石漠化不同坡位间样地的光照强度、大气相对湿度均无显著性差异($p > 0.05$)。

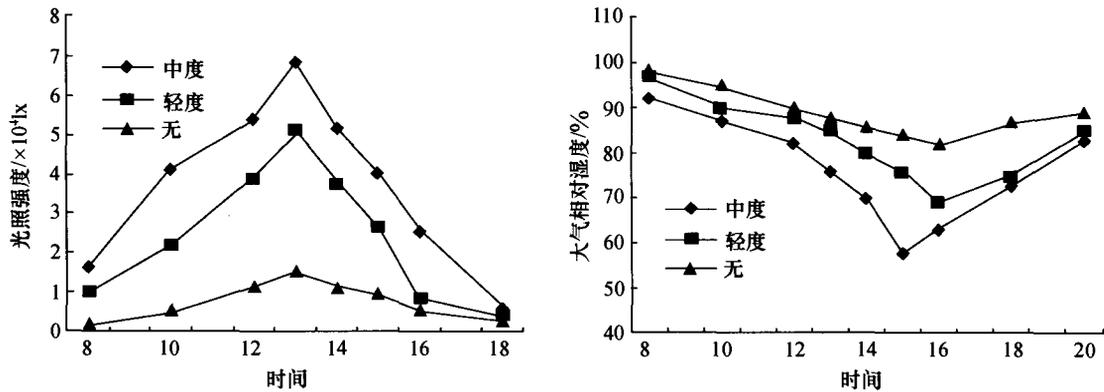


图 2 不同石漠化等级样地光照强度和大气相对湿度日变化

表 3 不同石漠化等级样地日均光照强度、大气相对湿度及土壤含水量

样地	日均光照强度 /×10 ³ lx	日均大气相 对湿度/%	土壤含水量/%			平均值
			0—10	10—20	20—30	
07	38.75	75.8	40.09±1.10	38.82±1.09	30.85±1.97	36.58±1.27
08	37.86	76.2	35.63±1.25	31.55±1.57	29.76±1.18	32.32±0.93
09	37.82	76.5	38.06±1.84	33.50±1.99	30.93±1.36	34.16±1.70
10	36.96	75.5	39.94±1.50	34.49±2.38	23.13±2.79	32.52±2.22
19	25.56	82.69	52.02±1.98	40.97±1.09	34.67±1.92	42.55±1.64
20	25.83	83.98	63.05±0.95	61.88±1.09	50.32±1.90	58.42±1.31
21	23.16	81.66	51.02±1.59	41.97±1.24	37.93±1.80	43.64±1.45
25	8.765	86.39	56.69±2.66	43.09±1.09	33.96±2.06	44.65±1.65
26	7.888	88.78	58.57±1.68	44.09±2.22	32.82±1.66	45.16±1.84

2.2 植物样品 δ¹³C 值的特征

研究区常见植物叶片 δ¹³C 值测定结果见表 4。结果显示本研究区植物 δ¹³C 值的范围为 -30.74‰—-25.96‰，与先前报道的喀斯特峡谷石漠化区植物 δ¹³C 值的范围 (-30.280‰—-25.546‰) 相近^[46]。流域内不同等级石漠化样地植物叶片的 δ¹³C 值各不相同(图 3)，无石漠化样地植物叶片 δ¹³C 值变化范围为 -30.74‰—-27.64‰，轻度石漠化样地植物叶片 δ¹³C 值变化范围为 -29.77‰—-25.96‰，中度石漠化样地植物叶片 δ¹³C 值变化范围为 -29.11‰—-26.46‰。而在亚热带常态地貌、亚热带荒漠、暖温带荒漠、热带荒漠和温带大陆性荒漠的植物叶片 δ¹³C 值分别在 -31.10‰—-30.50‰^[27]，-29‰—-21‰^[47,48]，-29‰—-22‰^[32]，-29‰—-18‰^[49]和 -28.05‰—-23‰^[50-52]之间。本研究所属流域属于亚热带地区，虽然该区未被破坏的无石漠化地区 δ¹³C 值仍保

留有部分亚热带植物叶片的特征，但发生了石漠化的轻度以上等级石漠化 δ¹³C 值主要集中在荒漠植物 δ¹³C 值范围内，为喀斯特石漠化这一生态类型的定义提供了科学依据。

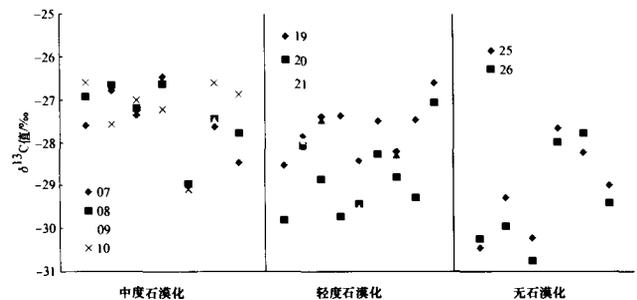


图 3 不同等级各石漠化样地植物叶片 δ¹³C 值

2.3 不同石漠化梯度植物群落 δ¹³C 值特征

流域内不同等级各石漠化样地所有植物叶片 δ¹³C 值见图 3。虽然各石漠化等级植物群落物种组成并不完全一致，但是群落 δ¹³C 均值仍能很好地指

示群落水平的水分可利用性^[24]。流域内不同石漠化梯度植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值各不相同。无石漠化样地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值最小, 为 $(-29.24 \pm 1.11)\%$, 其次是轻度石漠化, 为 $(-28.09 \pm 0.94)\%$, 中度石漠化最大, 为 $(-27.54 \pm 0.83)\%$ 。显示无石漠化区环境条件最优越, 中度石漠化区环境条件最恶劣。这一结果与我们在喀斯特峡谷石漠化区的研究结果一致^[46], 进一步证实了南方喀斯特石漠化区植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值随着石漠化的进行逐渐趋正即植物群落水分利用效率随石漠化进行逐渐提高这一规律, 这为石漠化的进一步治理提供了一定的理论依据, 充分认识这一点有助于更加深刻地理解和认识石漠化过程。方差分析结果表明不同等级石漠化群落的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈极显著差异 ($F_{(2,64)0.01} = 4.95 < F = 13.927, P < 0.001$), 其中中度石漠化群落与无石漠化群落的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在极显著差异 ($F_{(1,38)0.01} = 7.35 < F = 28.373, P < 0.001$), 轻度石漠化群落与无石漠化群落的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异 ($F_{(1,37)0.05} = 7.37 < F = 10.879, P < 0.01$), 轻度石漠化群落与中

度石漠化群落的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间也存在显著差异 ($F_{(1,53)0.05} = 4.02 < F = 4.209, P < 0.05$)。

同样, 该研究区各植物种也基本呈现出随着石漠化的进行即生境的逐渐恶劣其 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋正的趋势 (图 4)。其中竹叶椒、莎草、云贵鹅耳枥、粉枝莓、鼠李和青蒿在不同石漠化等级差异达显著水平 ($p < 0.05$)。另外, 所研究的灌草植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种内差别各异, 竹叶椒的最大, 为 4.15% , 火棘的差异最小, 为 1.13% , 其他 7 种植物的差异在 1.31% — 3.63% 之间。这些都说明了该区不同植物种的水分利用状况对石漠化过程的响应方式不同。不同植物种具有不同的适应环境变化的策略。这可能与物种自身遗传特性、植物的生活型、根系分布特征、叶片解剖结构以及物候等特性有关。值得注意的是, 火棘 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 即其 WUE 是在所有植物种中最低的, 并且其中度石漠化和轻度石漠化坡面的 $\delta^{13}\text{C}$ 值几乎没有差别, 也就是说火棘不论处于何种环境, 都具有相对稳定的低的 WUE。这可能提示它具有某种特殊的吸水机制和水分利用策略。

表 4 常见灌草物种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征

植物种 (Species)	样本数	$\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围/ $\%$	$\delta^{13}\text{C}$ 值平均土标准差/ $\%$	变异系数 (CV)
粉枝莓 (<i>Rubus biflorus</i>)	7	-26.46—-29.68	-27.50 ± 1.08	0.039
青蒿 (<i>Artemisia carvifolia</i>)	7	-26.65—-27.97	-27.37 ± 0.55	0.020
火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)	7	-28.34—-29.47	-29.06 ± 0.36	0.012
莎草 (<i>Cyperus rotundus</i> L.)	9	-26.61—-30.46	-28.49 ± 1.41	0.049
鼠李 (<i>Rhamnus davurica</i> Pall.)	9	-26.88—-29.93	-28.46 ± 0.88	0.031
竹叶椒 (<i>Zanthoxylum planispinum</i> Sieb. et Zucc.)	9	-26.59—-30.74	-28.11 ± 1.38	0.049
烟管荚蒾 (<i>Viburnum utile</i>)	9	-26.28—-28.78	-27.60 ± 0.54	0.020
圆果化香 (<i>Platycarya longipes</i>)	5	-27.35—-29.22	-28.14 ± 0.70	0.025
云贵鹅耳枥 (<i>Carpinus pubescens</i>)	5	-25.96—-29.38	-27.54 ± 1.54	0.056

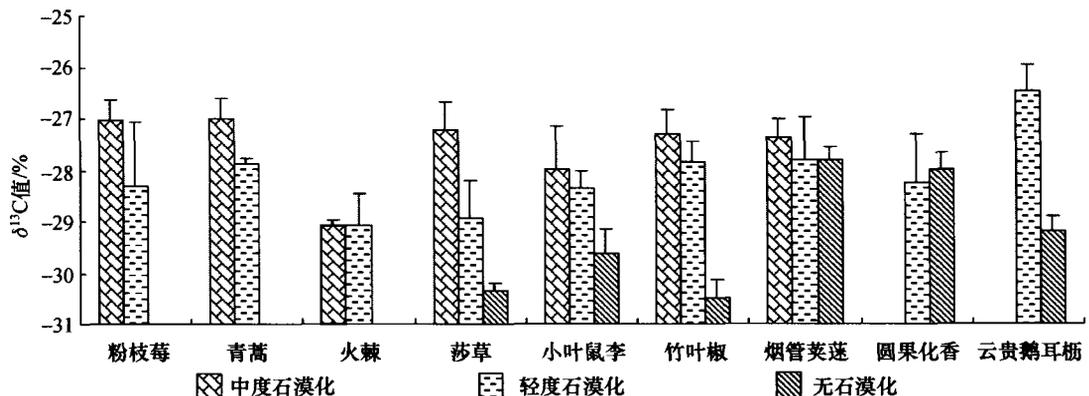


图 4 不同等级石漠化样地各植物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

2.4 同一坡面不同坡位植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

同一坡面不同坡位植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布见图5, 轻度石漠化坡面从上到下植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -26.45‰ — -28.44‰ , -26.94‰ — -29.77‰ , -25.96‰ — -29.47‰ ; 中度石漠化坡面从上到下植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -26.46‰ — -29.02‰ , -26.64‰ — -29.07‰ , -27‰ — -28.77‰ , -26.59‰ — -29.11‰ . 方差分析得出轻度石漠化不同坡位间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异 ($F_{(2,24)0.05} = 3.4 < F = 4.309, P < 0.05$), 轻度石漠化上坡和中坡植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异 ($F_{(1,16)0.05} = 8.53 < F = 9.456, P < 0.05$), 而上坡和下坡植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值则不存在显著差异 ($F_{(1,16)0.05} = 8.53 > F = 0.883, P > 0.05$). 中度石漠化不同坡位间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值均不存在显著差异 ($F_{(3,18)0.05} = 3.16 > F = 1.098, P > 0.05$). 说明轻度石漠化上坡和中坡植物水分利用效率存在显著差异, 而上坡和下坡植物水分利用效率差异不显著; 中度石漠化不同坡位间植物的水分利用效率也不存在显著差异.

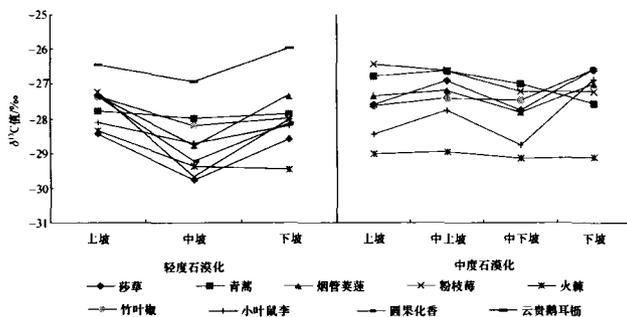


图5 不同坡位间植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Peiiuelas 等^[53]在西班牙中东北部的一个荒漠流域的研究结果表明位于坡脚处植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 位于坡顶处植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 这是由于该区坡脚土层较厚土壤水分含量高, 而坡顶土层较薄土壤水分含量低, 植物在高水分可利用性条件下具有较低的水分利用效率. 由于喀斯特地区地表破碎, 小生境异质性高, 土壤厚度并不像常态地貌那样自坡顶到坡脚依次规律性增加, 而表现出较大的随机性^[54,55], 由表1可知研究区不同坡位土壤厚度相差不大. 一般认为, 当土地利用方式相对一致时, 由于大气蒸发力沿坡向下递减、坡面径流的沿程入渗

以及侧向水流(饱和、非饱和和土壤水分)等的综合作用, 土壤水分沿坡面向下逐渐增加^[56-60]. 由表3可知研究区坡面不同坡位间土壤水分并不呈现此规律, 这是由于喀斯特山区存在地表地下双层空间结构, 加上地形地貌复杂多变、小生境类型多样, 其坡面土壤水分运移较其他地区复杂, 在植被类型相对一致、坡面较为均一的条件下, 坡位对土壤水分沿坡面的分布影响较小^[54,55]. 由于土壤水分是影响该区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的最重要因素之一, 也就不难理解植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值并不随着坡位呈现出规律性变化. 轻度石漠化坡面上坡和中坡植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异可能是由于微地形的差异引起, 野外调查证实中坡为凹坡有利于保持水分导致中坡土壤水分含量高, 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著降低.

3 讨论

实验结果表明植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值和各植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随着石漠化的进行逐渐趋正, 也就是说植物群落和各植物种的水分利用效率均随着石漠化的进行逐渐提高. 结合图2及表3分析, 由于研究区中无石漠化样地是村寨风水林, 其群落林分郁闭, 基本无岩石裸露, 群落平均高度16m, 垂直结构复杂, 包括乔木层、灌木层和草本层, 这种和谐组配的群落垂直结构有效地截留和反射了太阳光能, 日均光照强度低, 大大减缓了林内热量和水分的散失, 大气相对湿度高. 厚达18cm的枯落物覆盖于地表和填充于裂隙中, 由于其具有很强的持水性吸收了大量水分, 极大地阻止了地表水的迅速下漏和地表径流的形成, 形成水分赋存的二元结构^[45], 同时减小了土壤的蒸发强度, 土壤含水量高. 轻度石漠化坡面植物群落退化为灌木灌丛, 林分平均高度3m, 0—30cm土壤平均含水量稍低于无石漠化区, 但20—30cm土壤平均含水量稍高于无石漠化区, 这是因为轻度石漠化区生长的植物多为灌木, 其蒸腾作用耗水小于无石漠化区大量生长的乔木的蒸腾耗水. 由于只存在灌木层和草本层两个层次结构, 轻度石漠化区对太阳辐射的阻挡作用降低, 其日均光照强度明显大于无石漠化样地, 大气相对湿度降低, 由于群落高度、盖度减小, 生物量下降, 枯落物随之减少, 水赋存的二元结构被破坏, 环境逐渐向着干旱化发展. 研究区中度石漠化样地已退化为

稀灌草坡, 群落盖度不大, 高度一般在 1 m 以下, 分为草本层和灌木层, 草本层占绝对优势, 由于缺乏上层植被的缓冲, 空气相对湿度低. 枯落物的急剧减少使水赋存的二元结构不复存在, 灌草植物只能吸收浅薄土层的水分, 由于垂直结构比较简单, 对太阳辐射几乎没有阻挡作用, 光照强度大, 土面的强烈蒸发使土壤含水量较低, 植物水分胁迫最为严重.

由表 2 可知所选各等级石漠化样地土壤养分差别不大, 方差分析显示各等级石漠化样地各养分含量均不存在显著差异 ($p > 0.05$), 说明土壤养分不是影响该区植物碳同位素组成的主控因子. 由于本研究所选样地在 2.4 km² 小流域内, 纬度、海拔等大环境背景较一致, 因此影响各样地中植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的环境因子主要表现为各石漠化等级植物群落的小气候因子. Farquhar 等^[18]认为, 光照和水分的可利用性是控制植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要环境因子. 影响上述两个因子的其他环境因素则会对植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生间接影响. 因此, 各样地的自然条件如地形、方位、植被盖度等会通过影响光照和水分条件来影响植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值.

对各等级石漠化样地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各样地 0—30 cm 土壤平均含水量、日均大气相对湿度以及日均光照强度进行相关分析, 结果表明植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与样地 0—30 cm 土壤含水量以及日均大气相对湿度呈显著负相关, 而与日均光照强度呈显著正相关(图 6、图 7). 这是因为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^[13,18], 由表 4 和图 2 以及上面的分析可知, 研究区中度石漠化样地的土壤含水量及空气湿度最低, 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 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高^[13], 故中度石漠化区植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值和各植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值均最大. 反之, 生长于水分条件最好的无石漠化样地植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值和各植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值均最小. 这与国内外一系列关于群落和种群植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究结果一致. Stewart 等^[25]在对昆士兰南部一条 900 km 长的降雨梯度上的 12 个植物群落的 348 种植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定, 发现植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值与年降雨量呈显著负相关. 同样, Schulze 等^[24]在对澳大利亚一条降雨梯度上的 29 个样地内的桉树叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究表明桉树叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随降雨量的增加而降低. 渠春梅等^[27]在西双版纳热带雨林的研究发现水分条件稍好的补蚌样地所有植物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值低于水分条件稍差的城子样地. Ehleringer 等^[32]对荒漠植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究表明, 随着小生境土壤含水量的降低, 所有植物种均表现出更正的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值. 而王国安等^[28]对中国西北干旱地区不同小生境植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 均值表现出更正的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值. 陈世莘等^[22,26]在内蒙古锡林河流域一个水分梯度上的研究表明不同群落 C3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值和各植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值均与土壤含水量表现出显著的负相关关系,

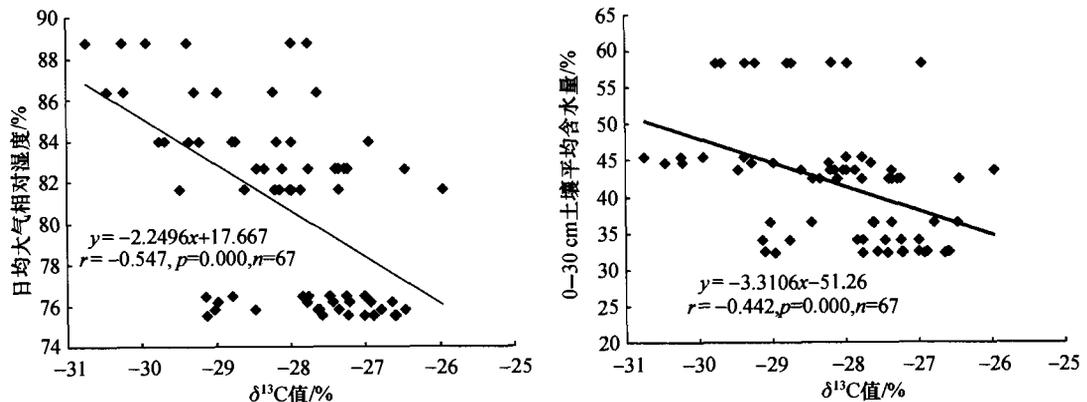


图 6 不同石漠化等级植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与日均大气相对湿度及土壤含水量之间的关系

生长在干旱生境中的植物具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。郑淑霞等^[23]对黄土高原9种优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究发现植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年均降雨量呈显著负相关。相关研究结果还表明：植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化不仅包含了水分的影响，而且包含了其他影响水分条件的环境因子的影响，它们的影响可能会叠加在直接的水分影响之上^[27]。本研究区样地的光照强度就间接对植物水分利用产生影响，强光照对应低的土壤水分和大气相对湿度。在研究区，高水分、低光、高资源环境的无石漠化样地的植物均具有较低的 WUE 。

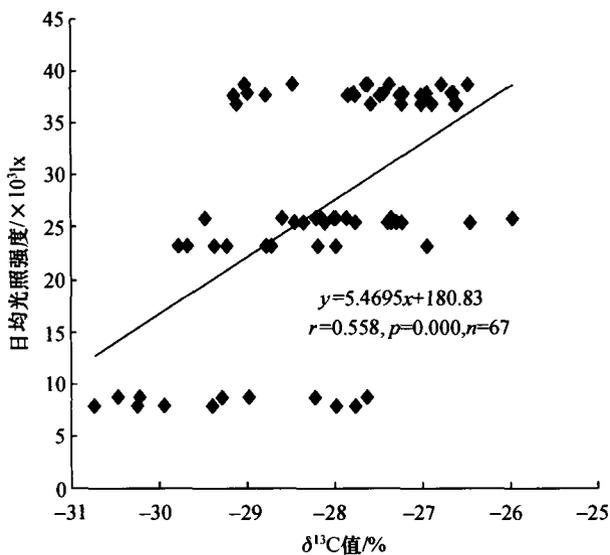


图7 不同石漠化等级植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与日均光照强度间的关系

在小流域的东南面，存在非喀斯特土山（见图1），土层相对较厚，土壤类型为第四纪粘土风化形成的黄壤，植被覆盖率虽相对较高，但因人为干扰处于退化状态，植被以灌木灌丛为主。葛永罡等（未发表数据）对该非喀斯特土山植物群落与喀斯特石漠化植物群落的对比研究表明该土山植物群落叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于该小流域已发生石漠化的植物群落的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，显示土山植物的 WUE 低于石漠化样地植物的 WUE 。可见虽然两种植物群落同位于一小流域内，都受到人为干扰，两种植物群落间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值却存在如此大的差异，这是因为石漠化样地土层浅薄且持水性低植物受到严重水分胁迫导致其 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于非喀斯特土山植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。研究结果显示了喀斯特石漠化区生境的严酷性，并且为

喀斯特石漠化这一生态类型的定义提供了科学依据。

4 结论

随着石漠化的进行，植物群落逐渐由高水分环境向低水分环境转变。不同石漠化等级植物群落叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值存在以下顺序：中度石漠化 > 轻度石漠化 > 无石漠化，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： $WUE_{\text{中度}} > WUE_{\text{轻度}} > WUE_{\text{无}}$ 。不同石漠化等级各植物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值也基本表现出相同的趋势。进一步证实了在喀斯特石漠化区，随着石漠化进行即随着水分可利用性的降低，植物表现出更正的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，即更高的水分利用效率。通过对各石漠化样地植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与环境因子间的相关分析得出，水分和光照是影响该区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主控因子。

对同一坡面不同坡位植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分析结果表明：轻度石漠化坡面上坡和中坡植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异，轻度石漠化上坡和下坡植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在显著差异。而中度石漠化不同坡位间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值均不存在显著差异，说明该研究区不同坡位间植物群落的 WUE 并不随着坡位呈现一定规律的变化，这是由于喀斯特地区特殊的二元结构水文系统以及其复杂多变的地形地貌导致土壤水分沿坡面的差异不大。

参 考 文 献

- 1 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101—108
- 2 容 丽, 王世杰, 杜雪莲. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1038—1043
- 3 何纪星, 朱守谦, 韦小丽. 喀斯特森林树种水势特征初步研究. 见: 朱守谦. 主编. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳: 贵州科技出版社, 1997, 9—15
- 4 何纪星, 朱守谦, 韦小丽. 喀斯特森林树种蒸腾特性初步研究. 见: 朱守谦. 主编. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳: 贵州科技出版社, 1997, 16—24
- 5 何纪星, 朱守谦, 韦小丽. 喀斯特森林树种的PV曲线研究. 见: 朱守谦. 主编. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳: 贵州科技出版社, 1997, 25—32
- 6 何纪星, 朱守谦, 韦小丽. 喀斯特森林树种对水分亏缺的适应类型. 见: 朱守谦. 主编. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳: 贵州

- 科技出版社, 1997, 42—46
- 7 韦小丽, 何纪星, 朱守谦. 女贞滇柏耐水分胁迫的实验研究. 见: 朱守谦. 主编. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳: 贵州科技出版社, 1997, 47—54
 - 8 何梅. 27种乔灌木水分生态生理及耐临时性干旱的多种途径探讨. 贵州林业科技, 1998, 26(1): 17—24
 - 9 傅松玲, 刘胜清. 石灰岩地区集中树种抗旱特性的研究. 水土保持学报, 2001, 15(5): 89—94
 - 10 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中. 喀斯特森林不同种组的耐旱适应性. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(1): 19—22
 - 11 张小珊, 刘延惠. 贵州喀斯特山地主要造林树种耗水量研究. 贵州林业科技, 2005, 33(4): 25—27
 - 12 黄玉清, 王晓英, 陆树华, 等. 岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究. 广西植物, 2006, 26(2): 171—177
 - 13 Francey RJ, Farquhar GD. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 1982, 295: 28—31
 - 14 Farquhar GD, Richards RA. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aus J Plant physiol*, 1984, 11: 539—552
 - 15 O'Leary MH. Carbon isotope in photosynthesis. *Bioscience*, 1988, 38(5): 497—502
 - 16 Schuster WSF, Sandquist DR, Philips SL, et al. Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, 91: 332—337
 - 17 Ehleringer JR. Gas-exchange implications of isotopic variation in arid-land plants. In: Smith J A C, Griffiths H. eds. *Water Deficits-Plant Responses From Cell to Community*. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1993, 265—284
 - 18 Farquhar GD, O'Leary MH, Berry JA. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aus J Plant physiol*, 1982, 9: 121—137
 - 19 Schleser GH. Investigations of the $\delta^{13}\text{C}$ pattern in leaves of *Fagus sylvatica* L. *J Exp Bot*, 1990, 41: 565—572
 - 20 Donovan LA, Ehleringer JR. Carbon isotope discrimination, water use efficiency, growth, and mortality in a natural shrub population. *Oecologia*, 1994, 100: 347—354
 - 21 Schulze ED, Williams RJ, Farquhar GD, et al. Carbon and nitrogen isotope discrimination and nitrogen nutrition of trees along a rainfall gradient in northern Australia. *Aus J Plant physiol*, 1998, 25: 413—425
 - 22 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. *J Arid Environ*, 2007, 71: 12—28
 - 23 Zheng SX, Shangguan ZP. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of nine dominant species in the Loess Plateau of China. *Photosynthetica*, 2007, 45(1): 110—119
 - 24 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 Physiol*, 2006, 26(4): 479—492
 - 25 Stewart GR, Turnbull MH, Schmidt S, et al. ^{13}C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: A biological integrator of water availability. *Aus J Plant physiol*, 1995, 22: 51—55
 - 26 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. *Aust J Bot*, 2007b, 55: 48—54
 - 27 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. *植物学报*, 2001, 43(2): 186—192
 - 28 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. *Physiol Plantarum*, 2005, 125(1): 74—81
 - 29 Garten CT, Taylor GE. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ within a temperate deciduous forest: Spatial, temporal, and species sources of variation. *Oecologia*, 1992, 90: 1—7
 - 30 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. *中国地质*, 2002, 29(1): 55—57
 - 31 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. *自然科学进展*, 2002, 12(6): 617—620
 - 32 Ehleringer JR, Cooper TA. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. *Oecologia*, 1988, 76: 562—566
 - 33 Bowling DR, McDowell NG, Bond BJ, et al. ^{13}C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit. *Oecologia*, 2002, 13: 113—124
 - 34 Kloeppe BD, Gower ST, Treichel IW, et al. Foliar carbon isotope discrimination in *Larix* species and sympatric evergreen conifers: A global comparison. *Oecologia*, 1998, 114: 153—159
 - 35 Panek JA, Waring RH. Stable carbon isotopes as indicators of limitations to forest growth imposed by climate stress. *Ecol Appl*, 1997, 7: 854—863
 - 36 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. *中国科学, D辑*, 2003, 33(6): 550—556
 - 37 Ehleringer JR, Field CB, Lin ZF, et al. Leaf carbon isotope and mineral composition in subtropical plants along an irradiance cline. *Oecologia*, 1986, 70: 520—526
 - 38 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. *植物学报*, 1998, 40(9): 853—859
 - 39 Guehl JM, Fort C, Ferhi A. Differential response of leaf conductance, carbon isotope discrimination and water-use efficiency

- to nitrogen deficiency in maritime pine and pedunculate oak plants. *New Phytologist*, 1995, 131: 149—157
- 40 Williams DG, Gempko V, Fravolini A, et al. Carbon isotope discrimination by *Sorghum bicolor* under CO₂ enrichment and drought. *New Phytologist*, 2001, 150: 285—293
- 41 李相博, 陈践发. 植物碳同位素分馏作用与环境变化研究进展. *地球科学进展*, 1998, 13(3): 285—290
- 42 周梦维, 王世杰, 李阳兵. 典型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. *地理研究*, 2007, 26(5): 897—905
- 43 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 192—195
- 44 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 CO₂ 来源的对比研究. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(9): 777—782
- 45 周政贤. 茂兰喀斯特森林考察综合报告. 见: 周政贤. 主编. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987, 1—23
- 46 容 丽, 王世杰, 杜雪莲. 花江峡谷区常见乔灌植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化梯度的响应及水分利用效率的指示. *林业科学*, 2007, 43(6): 38—44
- 47 Rundel PW, Esler KJ, Cowling RM. Ecological and phylogenetic patterns of carbon isotope discrimination in the winter rainfall flora of the Richterveld, South Africa. *Plant Ecol*, 1999, 142: 133—148.
- 48 Ziegler H, Batanouny KH, Sankhla N, et al. The photosynthetic pathway types of some desert plants from India, Saudi Arabia, Egypt and Iraq. *Oecologia*, 1981, 48: 93—99
- 49 Ehleringer JR, Cook CS. Carbon and oxygen isotope ratios of ecosystem respiration along an *Oregon conifer* transect: Preliminary observations based on small-flask sampling. *Tree Physiol*, 1998, 18: 513—519
- 50 陈 拓, 马 健, 冯虎元, 等. 阜康典型荒漠 C₃ 植物稳定碳同位素值的环境分析. *干旱区地理*, 2002, 25(4): 342—345
- 51 陈 拓, 冯虎元, 徐世建, 等. 荒漠植物叶片碳同位素组成及其水分利用效率. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 288—291
- 52 苏培玺, 陈怀顺, 李启森. 河西走廊中部沙漠植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 597—602
- 53 Peiiuelas 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 Oecol*, 1999, 20(2): 119—123
- 54 高化瑞, 朱守谦. 乌江流域岩溶山地立地因子分析. 见: 朱守谦. 主编. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳: 贵州科技出版社, 2002, 49—59
- 55 陈洪松, 傅 伟, 王克林, 等. 桂西北岩溶山区峰丛洼地土壤水分动态变化初探. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 136—139
- 56 Qiu Y, Fu BJ, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a serof-arid-gully catchment of the Loess Plateau, China. *J Arid Environ*, 2001, 49: 723—750
- 57 Qiu Y, Fu BJ, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *J Hydrol*, 2001, 240: 243—263
- 58 Western AW, Grayson RB, Bloschl G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resour Res*, 1999, 35: 797—810
- 59 马祥华, 白文娟, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究. *水土保持通报*, 2004, 24(5): 19—23
- 60 李军健, 吕 刚, 黄建国. 紫色土旱坡地土壤水分时空分布特征. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(1): 161—164