

# 黔中喀斯特石漠化区不同小生境 常见木本植物水分来源特征

杜雪莲<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>2,3</sup>, 罗绪强<sup>2,4</sup>

(1. 贵州财经大学资源与环境管理学院, 贵州 贵阳 550025; 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, 贵州 贵阳 55002; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州师范学院地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018)

**摘要:** 选择黔中清镇市王家寨小流域内不同石漠化植物群落, 通过分析测定喀斯特小生境内 5 种常见木本植物, 鼠李、火棘、烟管荚蒾、圆果化香和云贵鹅耳枥与其潜在水源稳定性氢氧同位素组成, 研究植物水分来源特征, 并通过线性混合模型确定水源贡献比, 探讨喀斯特小生境植物水分利用对石漠化过程的适应与响应。结果表明: 多数情况下, 研究区不同小生境内各植物种在雨季同时利用土壤水和表层岩溶带水, 对土壤水的利用比例大于表层岩溶带水。各植物种对表层岩溶带水的利用比例随着石漠化的进行而减小。常绿灌木火棘、鼠李和烟管荚蒾在轻度、无石漠化样地同时利用土壤水和表层岩溶带水, 但在中、强度石漠化则多利用土壤水, 落叶小乔木圆果化香和云贵鹅耳枥在无石漠化同时利用土壤水和表层岩溶带水, 而在轻度石漠化样地仅利用土壤水, 这跟不同样地植被类型、干扰方式、土壤情况及裂隙发育等不同有关。

**关键词:** 喀斯特石漠化; 小生境; 水分来源; 稳定氢氧同位素

中图分类号: X142; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2015)07-1168-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201507013

近 30 a 来, 随着质谱测定技术的发展与完善, 稳定性氢氧同位素技术在植物水分生态研究中得以不断应用和发展<sup>[1]</sup>, 其原理在于植物根系吸收水分时不发生同位素分馏<sup>[2,3]</sup>。对木质部水分氢氧同位素的分析测定避免了对植物地下根系的破坏, 该技术已被广泛应用于不同生态系统植物水分利用策略<sup>[4~7]</sup>、不同功能群植物水分来源<sup>[6,7]</sup>及植物水分再分配<sup>[8,9]</sup>等相关研究中。与常态地貌不同, 喀斯特地区特殊的二元结构水文系统导致降雨渗漏严重, 小生境类型多样, 土层浅薄且不连续, 多分布于石沟、石缝等负地形中, 植物根系多穿梭于岩层裂隙而较少集中分布于土面, 显示喀斯特植物可能具有特殊的用水策略<sup>[10,11]</sup>。稳定性氢氧同位素技术的应用为喀斯特地区植物水分来源和水分利用策略研究提供了科学的方法和手段。Querejeta 等<sup>[12,13]</sup>最早利用稳定性氢氧同位素技术研究了尤卡坦半岛旱季时该区常见植物种的水分利用策略。在临时性干旱频繁的中国西南喀斯特地区, 容丽等<sup>[14]</sup>对荔波喀斯

特森林 4 种木本植物水分来源的研究证实表层、深层土壤水或具地下水性质的表层岩溶带水都为植物生长做出了贡献, 聂云鹏等<sup>[15]</sup>对桂西北石灰岩地区植物水分来源的研究表明, 岩层裂隙中的雨水是该区次生林的水分来源。陈喜等<sup>[16]</sup>对喀斯特高原和喀斯特峡谷的植物水分来源的相关研究表明高原区和峡谷区植物在水分来源上不存在本质差异。喀斯特地区脆弱地质背景加上不合理的人为干扰, 极易发生石漠化。石漠化导致植物土壤、水环境要素缺损, 植物遭受严重水分胁迫<sup>[17]</sup>。喀斯特不同生境内如温湿度、光照度、土壤基质和水分、土层厚度等生态因子的变化导致不同生境水分条件不同, 从而影响植物的水分利用状况。已有的研究多集中于样地尺度的喀斯特林地和灌木林, 对石漠区和小生境尺度的研究关注不够。研究喀斯特石漠化区植物的水分利用状况对生境异质性的响应和适应机制对于该区的生态治理和植被恢复有重要意义。鉴于此, 本研究通过对黔中喀斯特石漠化小流域内不同小生境

收稿日期: 2014-06-09; 修回日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203063, 31100187); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB956700)

作者简介: 杜雪莲(1981~), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为喀斯特生态学和地球化学。E-mail: duxuelian520@163.com

中常见植物种木质部水分与不同水源稳定氢氧同位素的对比分析,探讨石漠化过程对喀斯特特有小生境中常见植物种水分来源的影响,以加深对该区植物水分利用内在机理的认识和理解,为该区生态治理和植被恢复提供基础理论依据。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地设在贵州省清镇市王家寨小流域(106°20'5"~106°21'8"E, 26°31'45"~26°30'27"N),面积约 2.4 km<sup>2</sup>,该区岩性较均一,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,属亚热带季风湿润气候,年均温

14℃,极端最低温 -5℃,极端最高温 35℃,年总积温 4700℃,年辐射量 361.2 kJ/cm<sup>2</sup>,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。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、藤刺灌丛和稀疏灌草丛为主,乔木主要为村寨风水林,土壤类型有黑色石灰土及黄壤。流域内石漠化等级序列完整,小生境类型复杂,具有较大的代表性。

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。样地具体情况见表 1。样地分布位置、植被类型等详细情况见文献[18]。研究区各样地小生境类型多样,主要有土面、石缝、石沟、石面,小生境基本概况参见文献[11]。

表 1 研究样地概况

Tab. 1 Basic Features of Sample Plots

| 石漠化等级 | 样地 | 植被类型  | 干扰类型  | 土壤类型  | 群落盖度 (%) | 群落高度 (m) | 枯落物厚度 (cm) | 坡位 | 坡度 (°) |
|-------|----|-------|-------|-------|----------|----------|------------|----|--------|
| 强度    | 02 | 稀疏灌草丛 | 耕作、放牧 | 黄壤    | <30      | <1       | <1         | 中  | 15     |
| 中度    | 05 | 藤刺灌丛  | 耕作、放牧 | 黄壤    | 30~50    | 1.0      | 1.0        | 中  | 30     |
| 轻度    | 20 | 灌丛    | 樵采、放牧 | 黑色石灰土 | 50~70    | 3.0      | 2.5        | 中  | 20     |
| 对照    | 26 | 次生林   | 樵采    | 黑色石灰土 | >70      | 16       | 18         | 中  | 40     |

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样品采集

根据样地调查和小生境调查结果,选择研究区广泛存在的常绿灌木火棘(*Pyracantha fortuneana*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)、烟管荚蒾(*Viburnum utile*)以及落叶小乔木圆果化香(*Platycarya longipes*)和云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*),其中,火棘(*Pyracantha fortuneana*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)、烟管荚蒾(*Viburnum utile*)在各样地均有分布,圆果化香和云贵鹅耳枥仅在轻度石漠化和对照样地分布。根据研究区的情况,样地范围内尤其是中强度石漠化样地相同类别的小生境内生长的植株不完全相同,有些生境植株太小不满足采样所需,有些生境甚至没有植物生长。为了便于比较,于每个样地选择一个尽可能长有越多所选植物种的小生境进行采样研究。采集的植株详细信息见表 2。样品采自植物生长季的 8 月 5 日~7 日,于植物开始蒸腾作用的上午中间时段,在各样地不同小生境取完全栓化没有叶片小枝,直径在 0.5~1.0 cm,长 8~15 cm,距离枝端几厘米的茎,用于植物水分的提取以及  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的测定。研究

区各小生境土壤厚度差异较大,石面土层极薄,一般小于 10 cm,石缝生境土层厚薄差异较大。土面和石沟土层稍厚,一般能达到 30 cm。在各小生境所采集的植物样附近,从地表 0~10 cm,10~30 cm,分别取土样(约 30 g)混合完全后用于土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值及土壤含水量的测定。用于测定  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值的小枝和土壤在采集后立即放入定制玻璃管中,用带有 O 型密封圈的螺纹盖盖紧,并用 parafilm 封口带回实验室冷冻贮藏<sup>[19]</sup>。在小流域采集 5 个喀斯特表层泉以代表上层滞水带及该区浅层地下水的稳定同位素组成,用雨量筒收集了 7、8 和 9 月份的大气降水,雨水样及泉水样取样后立即封装于 10 mL 左右的干净聚乙烯瓶中,并用 parafilm 密封瓶口,冷藏(4℃)备用<sup>[5]</sup>。

#### 1.2.2 样品水分的提取及氢氧同位素的测定

植物木质部及土壤水的提取采用较常见的低温真空蒸馏法<sup>[4,20]</sup>,氧稳定同位素分析采用 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 平衡法;氢同位素分析采用 H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 平衡法,萃取的植物木质部水、土壤水以及表层岩溶带水、雨水水样采用环境地球化学国家重点实验室连续流质谱(Continuous Flow MS)Isoprime-GC 进行测定,实验

表 2 小生境植物采样信息  
Tab. 2 Basic Features of Sample Plants

| 石漠化等级 | 样地 | 小生境 | 高度(cm)/基径或胸径(cm)/冠幅(cm*cm) |                  |                  |                  |                  |
|-------|----|-----|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|       |    |     | 鼠李                         | 火棘               | 烟管荚蒾             | 圆果化香             | 云贵鹅耳枥            |
| 对照    | 26 | 土面  | 66/0.86/67*73              | —                | —                | —                | —                |
|       |    | 石沟  | 73/0.79/44*58              | 63/0.70/84*83    | 72/0.78/64*68    | —                | —                |
|       |    | 石缝  | 64/0.46/54*53              | 71/0.68/49*68    | 83/0.71/44*73    | 416/5.24/412*331 | 388/4.86/354*373 |
|       |    | 石面  | 63/0.52/74*48              | 63/0.77/37*74    | 78/0.82/56*80    | 343/4.28/324*220 | 330/5.19/454*246 |
| 轻度    | 20 | 土面  | 86/1.22/77*93              | —                | 123/1.58/64*87   | 154/2.41/150*86  | —                |
|       |    | 石沟  | 105/0.99/99*68             | —                | —                | 167/3.35/140*93  | —                |
|       |    | 石缝  | 120/1.57/120*72            | —                | —                | —                | —                |
|       |    | 石面  | 113/1.52/124*73            | 141/1.99/74*63   | 153/1.37/144*110 | 214/3.01/120*92  | 280/3.27/167*83  |
| 中度    | 05 | 土面  | —                          | 78/0.79/144*73   | —                | —                | —                |
|       |    | 石沟  | 40/0.79/81*80              | 67/0.72/48*75    | —                | —                | —                |
|       |    | 石缝  | 123/1.45/131*121           | 100/1.71/102*120 | 113/1.38/89*60   | —                | —                |
|       |    | 石面  | 74/0.66/43*44              | 73/0.69/64*59    | 85/1.12/54*53    | —                | —                |
| 强度    | 02 | 土面  | 73/0.91/97*56              | 70/1.32/83*73    | —                | —                | —                |
|       |    | 石沟  | 60/0.62/66*34              | 63/0.72/65*32    | —                | —                | —                |
|       |    | 石缝  | 80/0.64/46*36              | —                | 75/0.63/34*23    | —                | —                |
|       |    | 石面  | —                          | —                | —                | —                | —                |

注：“—”表示未采集到样品。

标准采用 SMOW(标准平均海洋水)。测量误差,  $\delta D$  值小于 4‰,  $\delta^{18}O$  值小于 0.15‰。  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值由国际通用标准形式给出。

$$\delta D\text{‰} = \left[ \left( \frac{D}{H} \right)_{\text{sample}} - \left( \frac{D}{H} \right)_{\text{standard}} \right] / \left( \frac{D}{H} \right)_{\text{standard}} \times 1000$$

$$\delta^{18}O\text{‰} = \left[ \left( \frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{sample}} - \left( \frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{standard}} \right] / \left( \frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{standard}} \times 1000$$

### 1.2.3 水分来源比例的测算

通过线性混合模型确定水源贡献比<sup>[21~23]</sup>。根据不同生境潜在水源不同,采用二元模型或三元模型确定植物水源贡献比。

### 1.3 数据处理

所有数据均采用 SPSS 软件进行分析。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  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同小生境土壤水分含量及其 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值特征

研究区各小生境土壤水分含量及其  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值见图 1,由图 1 可知,不同小生境土壤水分含量随石漠化进行逐渐减少,其  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值随石漠化进行趋正,显示随着石漠化进行,土壤蒸发越强烈。不同等级石漠化样地土壤剖面水分存在差异,强度、中度

石漠化各小生境土壤剖面含水量从表层(0~10 cm)到深层(10~30 cm)表现为增加型,轻度石漠化和对照样地则为减少型。这跟不同样地的植被类型和土壤情况有关<sup>[24]</sup>。各小生境土壤水氢氧同位素均为表层较正,下层较负,显示表层土壤蒸发强烈。方差分析结果显示土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值在剖面不同层次间呈显著性差异( $P<0.05$ )。各样地石缝小生境土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值最负,是由于其负地形覆盖着较多的枯枝落叶水分蒸发少导致<sup>[11]</sup>。方差分析结果表明各小生境土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值存在显著差异( $P<0.05$ ),其中,石缝与石沟、石面差异显著( $P<0.05$ ),与土面差异不显著( $P>0.05$ )。石面与土面、石缝差异显著( $P<0.05$ ),与石沟差异不显著( $P>0.05$ )。

不同小生境土壤水分  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值随石漠化的进行变化不同,石面生境土壤水分随石漠化进行趋正,中、强度石漠化石面土壤水分  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值显著偏正于轻度和对照样地( $P<0.05$ )。如表 2 所示,中、强度石漠化样地石面生境植株稀疏,浅薄土层由于缺乏植株遮盖蒸发强烈<sup>[11]</sup>。其余小生境随石漠化进行规律不明显。不同样地内各小生境土壤水分  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值呈现不同格局(图 1)。这同样跟小生境上覆植株情况有关<sup>[11]</sup>。中、强度石漠化石面、石沟生境植株较少且植株较小,土壤水分蒸发强烈导致其  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值偏正,而轻度石漠化、对照样地石沟和

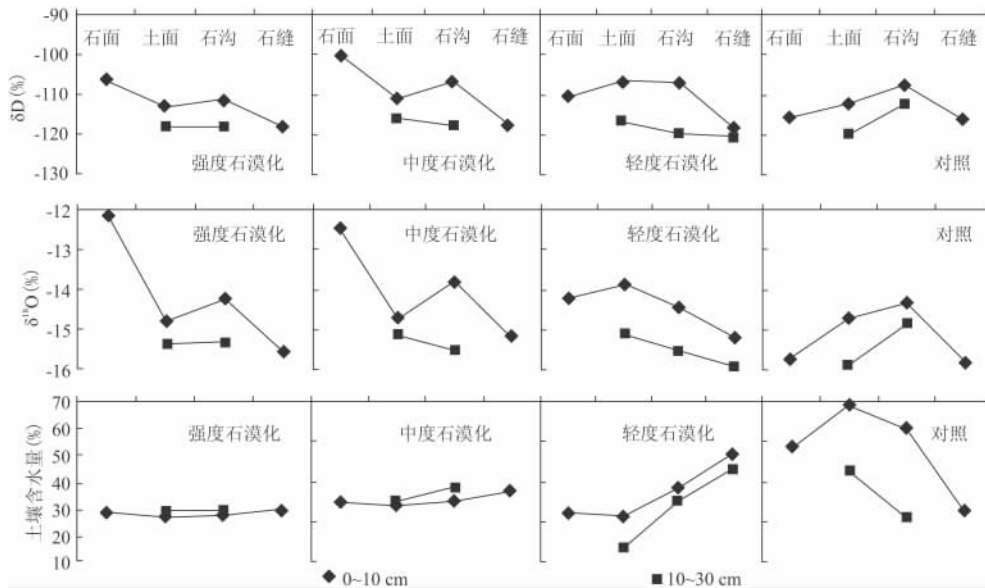


图 1 研究区各样地不同小生境土壤水分含量及其  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值特征

Fig. 1 Soil Water  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  Values at Different Soil Layers in Different Microhabitat in Representative Sample Plots with Different Karst Rocky Desertification Degrees

土面植株较少,其土壤水分  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值较石面生境稍偏正。

### 2.2 植物木质部水分和潜在水源的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值特征

研究区植物小枝木质部水分和各潜在水源的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值分布见图 2(A),小枝木质部水分  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值、各潜在水源  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值分布与当地降雨线一致,表明所有水源都是雨水来源。土壤水和小枝木质部水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值集中分布在左下角,这是因为夏季降雨受季风影响其  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值贫化,导致各小生境土壤水及小枝木质部水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值贫化,表层岩溶带水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值集中分布于右上方。表层岩溶带是土壤、岩石界面之间的岩溶形态<sup>[25]</sup>,表层岩溶带含水层即表层岩溶带裂隙、孔隙和溶沟等含水空隙构成的含水层<sup>[16]</sup>。它位于渗流带上部,是土层以下 30 m 左右深度内基岩风化裂隙中作侧向缓慢运动的水流,是一个上层悬挂的饱和带构成的稳定含水层<sup>[25,26]</sup>。表层岩溶带水位于渗流带上部,继承了一般地下水的性质<sup>[25]</sup>,由于降水对表层岩溶带水迅速的补给作用,渗流带上部的水源继承了雨水的同位素特性。植物小枝的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值介于土壤水分和表层岩溶带水之间,显示土壤水和表层岩溶带水均是植物可靠水源。这与容丽<sup>[14]</sup>、陈喜<sup>[16]</sup>等在喀斯特高原以及喀斯特峡谷进行的植物水分来源的研究结果一致。

图 2(B)为不同小生境土壤水和植物小枝木质

部水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值在当地降雨线上的分布情况,由表 3 可知,石缝生境各水样  $\delta D$  值(-120.55 ~ -74.35)、 $\delta^{18}O$  值(-15.91 ~ -8.70)分布范围最大, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变异系数最大,分别为 0.109 和 0.132,石面生境各水样  $\delta D$ (-115.68 ~ -93.08)和  $\delta^{18}O$  值(-15.78 ~ -11.74)分布范围最小,变异系数最小,分别为 0.058 和 0.086,土面和石沟生境各水样  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值范围和变异系数居中。方差分析结果显示,土壤、小枝木质部水样  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值在各小生境间差异显著( $P < 0.05$ ),多重比较表明,石面生境水样  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值与土面、石沟生境间存在显著差异( $P < 0.05$ )。

图 2(C)为不同石漠化植物群落土壤水和小枝木质部水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值在当地降雨线上的分布情况,由表 4 可知,对照样地各水样  $\delta D$  值(-120.22 ~ -74.35)、 $\delta^{18}O$  值(-15.87 ~ -8.70)分布范围较大, $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值变异系数最大,分别为 0.132 和 0.092,强度石漠化植物群落各水样  $\delta D$ (-118.67 ~ -106.14)和  $\delta^{18}O$  值(-15.55 ~ -12.12)分布范围较小,变异系数最小,分别为 0.058 和 0.086,中度、轻度石漠化植物群落各水样  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值范围和变异系数居中。方差分析结果显示,土壤水、小枝木质部水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值在各样地间差异显著( $P < 0.05$ ),多重比较表明, $\delta D$  值在对照样地和强度、中度、轻度石漠化样地间差异显著( $P < 0.05$ ), $\delta^{18}O$  值在强度和中度、轻度、对照样地间差异显著( $P < 0.05$ )。

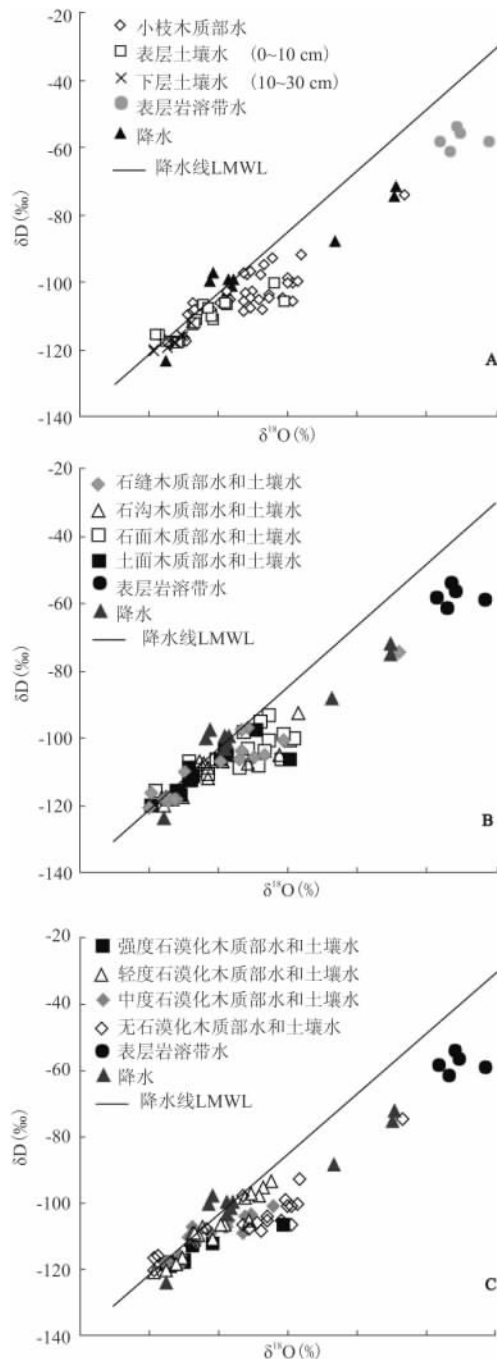


图 2 各水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值与当地大气降水线 LMWL 的关系(A)以及各水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值在各小生境(B)及不同石漠化等级(C)的分布

Fig. 2 Relationships Between  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  Values of Different Water and LMWL(A), the Distribution of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  Values of Different Water in Various Microhabitat(B) and in Different Karst Rocy Desertification Plots(C)

### 2.3 不同水源对植物水分来源的贡献比

经二元或者三元混合模型<sup>[21~23]</sup>计算,不同水源对植物的水分贡献比例如图 3 所示,多数情况下,研究区各植物种在各小生境同时利用土壤水和表层岩

溶带水,对土壤水的利用比例大于表层岩溶带水。这与容丽等<sup>[14]</sup>和陈喜等<sup>[16]</sup>在荔波、花江等地区的相关研究结果类似,表明雨季土壤水是植物最主要的水源。Querejeta 等<sup>[12,13]</sup>对尤卡坦半岛喀斯特地区的相关研究显示植物在旱季利用了风化岩层内贮存的水分。这是由于该区碳酸盐岩孔隙度高,风化的岩层疏松具有较好的持水性并贮存了水分。本研究所处的西南喀斯特地区碳酸盐岩结构致密,空隙度低,酸不溶物含量低<sup>[27]</sup>,当浅薄且不连续的土层储存的水分不足以支撑植物生长时,植物转而利用表层岩溶带水。显示出该区植物对水源的充分利用和对生境的适应。

研究区不同等级石漠化样地植物水分来源存在差异。总体上,各植物种对表层岩溶带水的利用比例随着石漠化的进行而减小。无石漠化样地为次生林,各小生境内植物均利用了表层岩溶带水和土壤水(图 3),其表层岩溶带水的利用比例均值超过 30%,这与之前的研究结果类似,容丽等<sup>[14]</sup>在荔波的研究结果显示次生林对表层岩溶带水的利用比例为 33.65%。说明植被良好的喀斯特生境中,表层岩溶带水是植物稳定的水分来源。轻度石漠化样地为灌木丛,各小生境中鼠李、火棘和烟管荚蒾利用了较大比例的土壤水和较小比例的表层岩溶带水,除石缝生境鼠李对表层岩溶带水的利用比例超过 30%外,其余生境各种对表层岩溶带水的利用比例为 20%左右。容丽等<sup>[14]</sup>对荔波灌木林的研究结果显示灌木林对表层岩溶带水的利用较次生林少,比例为 12.39%,稍小于本研究中灌木林植物种对表层岩溶带水的利用比例,这可能跟研究区的土层厚度有关。本研究区灰质白云岩发育的土层浅薄,土厚一般达到 30 cm,而荔波研究区土层较厚,能达到 50 cm<sup>[14]</sup>。较为深厚的土层必然能提供植物更多的水分。中度石漠化样地植物利用喀斯特地下水比例进一步减小,强度石漠化样地植物仅利用土壤水。这跟不同样地植被类型、干扰方式、土壤状况及裂隙发育程度不同有关。野外踏勘发现对照样地坡度最陡峭,岩石裂隙发育最强烈,植被以乔木和小乔木为主,植物根系多穿梭于岩石裂隙间。强度石漠化坡度比较平缓,岩石裂隙发育较弱,植株较小且较多分布于土面、石沟等土层较厚的小生境<sup>[11]</sup>。另一方面,可能跟不同样地表层岩溶带水位高低有关。White 等<sup>[28]</sup>在纽约州的相关研究显示在地下水位较深地区,*Pinus strobus* 在雨后主要利用雨水,而在地下水位相对较浅地区同时利用雨水和地下水。本研

表 3 不同小生境土壤水及小枝木质部水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值特征Tab. 3 Characters of  $\delta D, \delta^{18}O$  Values of Plant Xylem Water and Soil Water in Various Microhabitat

| 小生境 | 样本数 | $\delta D$ 值变化范围(‰)     | $\delta D$ 值平均±标准差(‰)     | $\delta D$ 值变异系数(CV)     |
|-----|-----|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
|     |     | $\delta^{18}O$ 值变化范围(‰) | $\delta^{18}O$ 值平均±标准差(‰) | $\delta^{18}O$ 值变异系数(CV) |
| 石面  | 17  | -115.68~-93.08          | -103.80±5.97              | 0.058                    |
|     |     | -15.78~-11.74           | -13.18±1.14               | 0.086                    |
| 土面  | 15  | -120.22~-97.81          | -111.29±6.54              | 0.059                    |
|     |     | -15.90~-11.90           | -14.46±1.06               | 0.073                    |
| 石沟  | 17  | -119.85~-92.27          | -110.64±7.07              | 0.064                    |
|     |     | -15.59~-11.65           | -14.29±1.17               | 0.082                    |
| 石缝  | 17  | -120.55~-74.35          | -107.86±11.71             | 0.109                    |
|     |     | -15.91~-8.70            | -13.91±1.84               | 0.132                    |

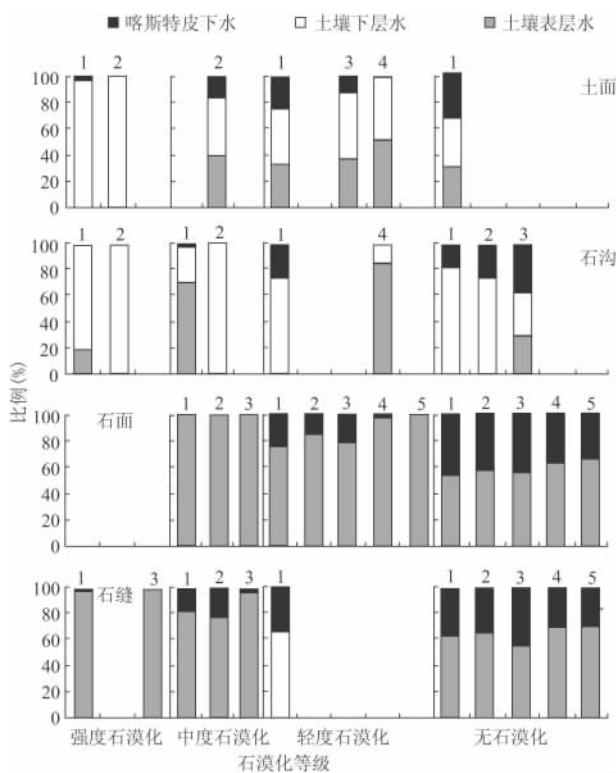
表 4 不同石漠化植物群落土壤水及小枝木质部水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值特征Tab. 4 Characters of  $\delta D, \delta^{18}O$  Values of Plant Xylem Water and Soil Water in Different Karst Rocy Desertification Plots

| 石漠化 | 样本数 | $\delta^{18}O$ 值(‰)变化范围 | $\delta^{18}O$ 值(‰)平均±标准差 | $\delta^{18}O$ 值变异系数(CV) |
|-----|-----|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
|     |     | $\delta D$ 值(‰)变化范围     | $\delta D$ 值(‰)平均±标准差     | $\delta D$ 值变异系数(CV)     |
| 强度  | 12  | -118.67~-106.14         | -116.01±3.85              | 0.033                    |
|     |     | -15.55~-12.12           | -14.89±0.94               | 0.063                    |
| 中度  | 15  | -117.89~-100.42         | -109.33±5.57              | 0.051                    |
|     |     | -15.59~-12.46           | -14.23±0.96               | 0.067                    |
| 轻度  | 18  | -120.55~-93.08          | -106.70±8.45              | 0.079                    |
|     |     | -15.91~-12.50           | -14.10±1.02               | 0.072                    |
| 对照  | 21  | -120.22~-74.35          | -104.56±9.64              | 0.092                    |
|     |     | -15.87~-8.70            | -13.06±1.73               | 0.132                    |

究中,随着石漠化的进行,群落的结构和功能逐渐退化,喀斯特水赋存的二元结构被破坏,表层岩溶带水渗漏<sup>[29]</sup>,植物只能吸收土壤水。由于植物对有限的资源可能发生竞争,植物水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)依赖于水分可利用性和植物对水分的潜在竞争,WUE 与水源可利用性呈负相关<sup>[30]</sup>。杜雪莲等<sup>[18]</sup>对该区常见种植物叶片  $\delta^{13}C$  值的研究结果显示无石漠化样地植物叶片  $\delta^{13}C$  值显著偏负于其他石漠化样地,显示无石漠化样地植物水分条件最好。

Jackson 等<sup>[6]</sup>在 BCI 热带低地森林的研究表明,常绿树种比落叶种利用更多深层土壤水以减轻在旱季生长的水分胁迫。Valentini 等<sup>[7]</sup>在地中海植物群落的研究发现该区落叶种比常绿种更多地利用深层土壤水,特殊的气候导致落叶种在全年最早的时候进行短时间的生长需要更稳定的深层土壤水,而常绿物种能随着土壤含水量的变化调整其生长格局。本研究中,常绿灌木火棘、鼠李和烟管荚蒾在轻度石漠化和对照样地同时利用土壤水和表层岩溶带水。由于喀斯特区特殊的地表地下双层结构导

致浅薄土层持水性差,土壤水分变化剧烈,极不稳定,即使在雨季临时性干旱也时有发生,常绿种为了保持全年的生长,需要更稳定的水源即表层岩溶带水。Caldwell 等<sup>[8]</sup>在美国大盆地首次用添加氘水( $D_2O$ )的实验验证了植物种的水分提升作用。Dawson<sup>[9]</sup>通过测定植物木质部水分、土壤水及地下水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$ ,运用混合模型首次确定了相邻植物对提升水分的利用比例,该研究还发现提水作用不仅在干旱半干旱存在水文周年性亏缺的地区存在,在相对湿润地区具有水分间歇式亏缺的地区也同样存在。本研究中对照样地为以云贵鹅耳枥和圆果化香这两种乔木为主的次生林,高大乔木根系较为发达,可能将其根系吸收的表层岩溶带水释放在表层供小乔木和常绿灌木生长。但这些种在中强度石漠化则大多利用土壤水,这跟强烈的人为干扰以及土壤情况有关。中强度石漠化主要由耕作、放牧导致,植物根系受损严重,植被已退化为稀疏草坡和稀疏灌草丛,表层岩溶带水渗漏严重。另外,中强度石漠化土层较轻度石漠化和对照样地稍厚,可以供给植物更多的水分。落叶小乔木圆果化香和云贵鹅



注:1. 鼠李 (*Rhamnus davurica*); 2. 火棘 (*Pyracantha fortuneana*); 3. 烟管荚蒾 (*Viburnum utile*); 4. 圆果化香 (*Platycarya longipes*); 5. 云贵鹅耳枥 (*Carpinus pubescens*).

图 3 各样地不同小生境常见种对水分利用的比例图  
Fig. 3 Proportion Chart of Plant Water Use in Various Micro-habitat with Different Karst Rocky Desertification Degrees

耳枥在轻度石漠化样地大多利用土壤水,而在对照样地它们则同时利用土壤水和表层岩溶带水。这可能跟样地的植被类型有关。对照样地是当地的风水林,植被保持良好,群落层次复杂,喀斯特水赋存的二元结构良好。轻度石漠化样地已退化成灌木丛,加上长期人为干扰,表层岩溶带水容易因渗漏下降较快,在有限的水资源条件下,小乔木圆果化香和云贵鹅耳枥选择仅利用土壤水。另外,对照样地圆果化香和云贵鹅耳枥主要生长于石面裂隙及石缝中,而在轻度石漠化样地多生长于土层较厚的石沟和土面中。

### 3 结论

(1)研究区各常见种小枝木质部水与各潜在水源  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值分布与当地降雨线一致,表明所有水源都是雨水来源。植物小枝木质部水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值介于土壤水和表层岩溶带水之间,显示土壤水和

表层岩溶带水均是该区植物的潜在水源。多数情况下,研究区各小生境植物种同时利用土壤水和表层岩溶带水,对土壤水的利用比例大于表层岩溶带水。说明雨季土壤水是该区各常见种的最主要的水源。

(2)研究区各植物种对表层岩溶带水的利用比例随着石漠化的进行而减小。常绿灌木火棘、鼠李和烟管荚蒾在轻度石漠化和对照样地同时利用土壤水和表层岩溶带水,但这些种在中强度石漠化样地则利用土壤水。落叶小乔木圆果化香和云贵鹅耳枥在对照样地同时利用土壤水和表层岩溶带水,而在轻度石漠化样地大多利用土壤水。这跟不同样地的植被类型、干扰方式、土壤状况及裂隙发育程度等有关。

### 参考文献:

[ 1 ] DAWSON T E, MAMBELLI S, PLAMBOECK A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 507.

[ 2 ] GONFIANTINI R, GRATZIU S, TONGIORGI E. Oxygen isotopic composition of water in leaves[M]//Isotopes and Radiation in Soil-Plant Nutrition Studies. Vienna: Intern. At. Energy Agency, 1965: 405-410.

[ 3 ] WERSHAW R L, FRIEDMAN I, HELLER S J. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees [A]//Hobson FAND SPEERS M. eds. Advances in Organic Geochemistry. New York: Pergamon, 1966: 55-67.

[ 4 ] DAWSON T E, EHLERINGER J R. Streamside trees that do not use stream water[J]. Nature, 1991, 350(3): 335-337.

[ 5 ] PEUELAS J, FILELLA I. Deuterium labelling of roots provides evidence of deep water access and hydraulic lift by *Pinus nigra* in a Mediterranean forest of NE Spain[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(2): 201-208.

[ 6 ] JACKSON R C, CAVELIER J, GOLDSTEIN G, et al. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest[J]. Oecologia, 1995, 101: 197-203.

[ 7 ] VALENTINI R S, MUGNOZZA G E, EHLERINGER J R. Hydrogen and carbon isotope ratios of selected species of a Mediterranean macchia ecosystem [J]. Functional Ecology, 1992, 6: 627-631.

[ 8 ] CALDWELL M M, RIEHARDS J H. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by roots[J]. Oecologia, 1989, 79: 1-5.

[ 9 ] DAWSON T E. Hydraulic lift and water use by plants: Implications for water balance, performance and plant-plant interactions[J]. Oecologia, 1993, 95: 565-574.

[10] 朱守谦, 何纪星, 祝小科, 等. 喀斯特森林小生境特征初步研究 [M]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究 ( I ). 贵阳: 贵州科技出版社, 1993: 52-62.

- [11] 杜雪莲,王世杰. 喀斯特石漠化区小生境特征研究——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 255-261.
- [12] QUEREJETA J I, ESTRADA-MEDINA H, ALLEN M F, et al. Utilization of bedrock water by *Brosimum alicastrum* trees growing on shallow soil atop limestone in a dry tropical climate[J]. *Plant and Soil*, 2006, 287: 187-197.
- [13] QUEREJETA J I, ESTRADA-MEDINA H, ALLEN M F, et al. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate[J]. *Oecologia*, 2007, 152: 26-36.
- [14] 容 丽,王世杰,俞国松,等. 荔波喀斯特森林4种木本植物水分来源的稳定同位素分析[J]. 林业科学, 2012, 48(7): 14-22
- [15] 聂云鹏,陈洪松,王克林. 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1029-1037.
- [16] 陈 喜,张志才,容 丽,等. 西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [17] 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.
- [18] 杜雪莲,王世杰,容 丽. 喀斯特石漠化区小生境常见灌木种叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3094-3100.
- [19] BOLLARD E G. Transport in the xylem[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1960, 11(7): 141-166.
- [20] ADAM G. WEST, SHELA J. PATRICKSON and JAMES R. Ehleringer. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2006, 20: 1317-1321.
- [21] ZIMMERMANN V, EHHALT D, MUNNICH K O. Soil-water movement and evapotranspiration; Changes in the isotopic composition of water[M]//Proceedings of the Symposium of Isotopes in Hydrology. Intern At Energy As-soc Pub, 1966: 567-585.
- [22] 巩国丽,陈 辉,段德玉. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较[J]. 生态学报, 2011, 3(24): 7533-7541.
- [23] BRUNEL J P, WALKER G R, KENNETT-SMITH A K. Field validation of isotopic procedures for determining source water used by plants in a semi-arid environment[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 167(3): 351-368.
- [24] 杜雪莲,王世杰. 喀斯特高原区土壤水分时空变异分析[J]. 地球与环境, 2008, 36(3): 193-201.
- [25] WILLIAMS P W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Z Geomorph N F*, 1985, 29(4): 463-482.
- [26] WILLIAMS P W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 61(1/3): 45-67.
- [27] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 461-466.
- [28] WHITE J W C. Stable hydrogen isotope ratios in plants: A review of current theory and some potential applications[A]//RUNDEL P W, EHLERINGER J R, NAGY KA. eds. *Ecological Studies*. Vol. 68. Stable Isotopes in Ecological Research. Heidelberg: Springer-Verlag, 1988, 142-162.
- [29] 周政贤. 茂兰喀斯特森林考察综合报告[M]//周正贤主编. 茂兰喀斯特森林考察集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 1-23.
- [30] FLANAGAN L B, EHLERINGER J R, MARSHALL J D. Differential uptake of summer precipitation among cooccurring trees and shrubs in a pinyonjuniper woodland. *Plant Cell and Environment*, 1992, 15: 831-836.



## CHARACTERISTICS OF WATER SOURCES OF COMMON PLANT SPECIES IN VARIOUS MICROHABITATS IN KARST ROCKY DESERTIFICATION AREA IN CENTRAL GUIZHOU PROVINCE

DU Xue-lian<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jie<sup>2,3</sup>, LUO Xu-qiang<sup>2,4</sup>

(1. Department of Resources and Environment Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang 550002, China; 3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100;

4. School of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China)

**Abstract:** Stable isotope analysis can be used to investigate water sources of plants because of no isotopic fractionation during water uptake by terrestrial plants. Ecosystems in the karst region of southwest China are very fragile due to the thin soil layer and intensive infiltration capacity of rock fracture, which result in a very limited amount of water storage for plant uptake. Water retention in the soil zone and shallow fractured rock zone (subcutaneous) is a key factor for plant growth. However, the source of water for plant growth in karst region remains unclear. Distinction of water sources taken by karst plants is a challenging task for botanists and hydrologists, and has important implications for ecosystem management. In this study, we selected 5 dominant plant species grown in various micro-habitats in the Wangjiashai catchment, a typical karst desertification area in Guizhou Province. The spatial heterogeneity of plant water sources at niche scale and the response of the heterogeneity to different karst rocky desertification degree were studied. Proportions of water sources for plant uptake were determined by the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of plant stem water, and the water taken from different soil layers and the subcutaneous zone. The following conclusions were drawn from the analysis: (1) The  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of soil water were significantly different among various micro-habitats, stony surface had the most positive  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values, stony crevice had the most negative  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values, the others had the medium  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values. The  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of soil water were significantly different in soil profile and the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of soil water in the 0–10 cm layer were more positive than those in the 10–30 cm layer. (2) The plant species absorbed water from both soil layers and subcutaneous zone and these plant species extracted more water from soil layers than subcutaneous zone in rainy seasons in general. The proportion of plants water use from the subcutaneous zone decreased with increasing degree of karst rocky desertification. *Pyracantha fortuneana*, *Rhamnus davurica* and *Viburnum utile* in slight and non karst desertification grade extracted water from both soil layers and subcutaneous zone, while these plants only used water form soil layers in medium and severe grade, and *Platycarya longipes* and *Carpinus pubescens* in non karst desertification grade extracted water from both soil layers and subcutaneous zone, while these plants only used water form soil layers in slight grade, which is mainly due to various vegetation types, disturbance regimes, soil conditions and crack growth degree of rocks in different grades plots.

**Key words:** karst rocky desertification; micro-habitats; water sources; stable hydrogen and oxygen isotopes