

喀斯特高原石灰土区退化植物群落常见  
灌木叶片的氮同位素组成研究罗绪强<sup>1,2</sup>, 张桂玲<sup>2,3</sup>, 王世杰<sup>2</sup>, 阮英慧<sup>1</sup>, 刘兴<sup>1,2</sup>, 杨成<sup>4</sup>

1. 贵州师范学院 地理与资源学院, 贵阳 550018; 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 550081; 3. 贵阳学院 化学与材料工程学院, 贵阳 550005; 4. 贵州民族大学 生态环境工程学院, 贵阳 550025

**摘要:**为探讨喀斯特高原石灰土区植物稳定氮同位素组成的变异特征及其影响因素,以贵州省清镇市王家寨小流域为例,选取流域内石灰土区退化植物群落3种植被类型中的4种灌木植物,分别对其叶片的氮同位素和C、N、P、K、Ca、Mg元素含量进行了测定。结果表明,研究区常见灌木叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $-5.86\text{‰}$ ~ $-0.54\text{‰}$ ,均值为 $-2.31\text{‰}$ ;植物叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同群落间的差异显著( $P<0.05$ ),但种间差异仅在灌丛群落中显著( $P<0.05$ );物种因素和群落类型的交互作用对研究区灌木叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值有显著影响( $P=0.021$ ,  $R^2=0.860$ );植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值与叶片K含量之间具有显著负相关( $P<0.05$ ),而与叶片N含量之间并非正相关,这可能与喀斯特地区严酷的生境条件有关。

**关键词:**稳定性氮同位素比率; 退化植物群落; 灌木; 喀斯特高原; 石灰土; 元素化学计量比

中图分类号: Q948; X142 文章编号: 1007-2802(2019)05-0931-07 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.069

Nitrogen Isotope Compositions of Shrub Leaves from Degraded Floras in a Typical Calcareous  
Soil Region of the Karst PlateauLUO Xu-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Gui-ling<sup>2,3</sup>, WANG Shi-ji<sup>2</sup>, RUAN Ying-hui<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1,2</sup>, YANG Cheng<sup>4</sup>

1. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;  
3. College of Chemistry and Materials Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China;  
4. College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** In order to investigate the variation of nitrogen isotope compositions of plants in calcareous soil regions of the karst plateau, southwest China, and its affecting factors, a small watershed in the karst plateau, Wangjiashai, was selected as the study area, leaves of four common shrub species from degraded floras with only three different types of vegetation in the study area were collected, and nitrogen stable isotope compositions and contents of C, N, P, K, Ca and Mg in the leaves were analyzed. The results showed that: (1) The  $\delta^{15}\text{N}$  values of leaves ranged from  $-5.86\text{‰}$  to  $-0.54\text{‰}$ , with an average of  $-2.31\text{‰}$ . (2) Statistically, the  $\delta^{15}\text{N}$  values of leaves from different plant communities were significantly different ( $P<0.05$ ), but the difference of  $\delta^{15}\text{N}$  in leaves of different plant species presented significantly ( $P<0.05$ ) only in shrub communities. (3) The  $\delta^{15}\text{N}$  values of shrub leaves in the study area were significantly affected by the interaction of species factor and community type ( $P=0.021$ ,  $R^2=0.860$ ). (4) The  $\delta^{15}\text{N}$  values and the contents of K in leaves showed a significant negative correlation ( $P<0.05$ ) while the  $\delta^{15}\text{N}$  values and the contents of N in leaves didn't show a positive correlation, implying the effect of harsh habitat conditions in the karst area.

**Key words:** stable nitrogen isotope ratio; degraded plant community; shrub; karst plateau; calcareous soil; element stoichiometry

收稿编号: 2019-015 2019-01-22 收到 2019-01-29 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41563007, 41563013); 贵州省优秀青年科技人才培养对象专项资金项目(黔科合人字[2015]21号); 贵州省优秀科技教育人才省长专项资金项目(黔省专合字[2012]80号); 贵州省高层次创新型人才资金项目(黔人领发[2015]3号)

第一作者简介: 罗绪强(1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生态环境地球化学. E-mail: xuqiangluo@163.com.

氮(N)是影响陆地生态系统初级生产力和物种组成的关键元素之一(Clark and Tilman, 2008; Rennenberg *et al.*, 2009)。氮在生态系统中的循环大致可分为氮的输入(主要是生物固氮和氮沉降)、氮在生态系统中的转化(主要包括分解作用、矿化和硝化作用以及在食物网中的转化)和氮的输出(主要是反硝化和气体挥发)3个过程(林光辉, 2013)。由于 $^{14}\text{N}$ 和 $^{15}\text{N}$ 反应所需能量不同,其反应速率也会不同,从而导致氮循环过程中的化学转化、物理运输等环节都可能使氮发生同位素分馏(Templer *et al.*, 2007; 罗绪强等, 2007a, 2011, 2014; 姚凡云等, 2012; 刘贤赵等, 2014)。

植物的氮同位素组成是陆地生态系统氮循环的综合结果,能较好的反映流域内的物源信息和生物地球化学特征(Evans, 2001; Robinson, 2001; Schimann *et al.*, 2008; 郜士垒等, 2015; 段中华等, 2015)。目前,国内外学者对影响植物稳定氮同位素组成的生物和非生物因素,以及利用植物稳定氮同位素组成对区域内的氮素生物地球化学循环、植物生理生态、气候环境变化等方面的研究成果已有大量报道(Templer *et al.*, 2007; 周咏春等, 2012; Werth *et al.*, 2015; 刘艳杰等, 2016; 张金美等, 2016; van der Sleen *et al.*, 2017; Voronin *et al.*, 2017; 孙建飞等, 2017; 陈伟霖等, 2018),但针对喀斯特退化生态系统植物稳定氮同位素组成方面的研究还较少。

石灰土作为喀斯特生态系统的重要组成部分,对喀斯特生态系统的元素生物地球化学循环起着至关重要的作用(刘文景等, 2010; 陈家瑞等, 2012)。本研究以喀斯特高原贵州省清镇市王家寨峰丛洼地小流域为例,选取流域内石灰土区退化植物群落3种植被类型中的4种灌木植物为研究对象,分别对其叶片稳定氮同位素和C、N、P、K、Ca、Mg元素含量进行了分析测定,探讨了植物稳定氮同位素组成变异的影响因素及其相关关系,以期为深入理解喀斯特地区氮素的生物地球化学循环过程提供基础数据和理论支持。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域概况

研究区位于喀斯特高原贵州省清镇市的王家寨小流域(东经 $106^{\circ}20'5''\sim 106^{\circ}21'8''$ ,北纬 $26^{\circ}31'45''\sim 26^{\circ}30'27''$ )。流域面积约 $2.4\text{ km}^2$ ,喀斯特分布面积达95%。该区岩性较均一,为中三叠统关岭组的灰质白云岩。地貌为典型喀斯特浅碟状峰丛

洼地,地表渗漏强烈,峰丛与洼地面积比为1.65:1。海拔最高点1451.1 m,最低点1275.0 m。属亚热带季风湿润气候,年均温 $14^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温 $35^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温 $-5^{\circ}\text{C}$ ,年总积温 $4700^{\circ}\text{C}$ ,年辐射量 $361.2\text{ kJ/cm}^2$ ,年降雨量1200 mm,雨热同季,降雨集中在5~9月份。

### 1.2 土壤概况

研究区土壤类型主要为黑色石灰土和黄壤。洼地以北的峰丛坡面以黑色石灰土为主,土层浅薄,土壤pH值大于7.5,为碱性土壤,土壤比重小于 $2.5\text{ g/cm}^3$ ,有机质含量均大于20%(罗绪强等, 2011; 杜雪莲等, 2014);洼地以南的峰丛坡面由于地势相对平缓,坡度较小,该区土壤主要以湖泊沉积物堆积风化而成的黄壤为主,土层较厚,土壤pH值小于7,为中性偏弱酸性土壤,土壤比重大于 $2.5\text{ g/cm}^3$ ,有机质含量小于10%(罗绪强等, 2011; 杜雪莲等, 2014)。

### 1.3 植被概况

研究区植被类型丰富。稀疏灌草丛、草灌丛、灌丛、灌木林、次生乔灌林等不同演替阶段的植物群落均有分布。常见植物种有火棘(*Pyracantha fortuneana*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)、烟管荚蒾(*Viburnum utile*)、过路黄(*Lysimachia christinae*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、粉枝莓(*Rubus biflorus*)、毛轴蕨(*Pteridium revolutum*)、竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*)、月月青(*Itea ilicifolia*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*)等。其中,烟管荚蒾、火棘、竹叶椒和鼠李在不同演替阶段植物群落中均有分布,是该流域内的常见灌木植物。

## 2 研究方法

### 2.1 样地的设置

在流域内石灰土区分别选取草灌丛、灌丛、次生乔灌林3种植被类型的退化植物群落为研究样地。在草灌丛和灌丛群落坡面典型地段随机拉一条从坡顶至坡底的样线,按上坡、中坡和下坡分别设置1个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的样方,不同坡位样方间隔距离约10 m。由于次生乔灌林坡面高差较小,样方面积需求较大,无法按坡位变化设置样方,仅在坡面中部典型位置设置1个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的样方。样地基本情况见表1。

### 2.2 样品的采集

样品采集于植物生长较旺的7月中旬。选取在草灌丛、灌丛、次生乔灌林样方中均有分布的常见灌木植物烟管荚蒾、火棘、竹叶椒和鼠李为研究对

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic features of the sample plots

植被类型	坡位	坡型	坡度/°	群落高度/m	群落盖度/%	枯落物厚度/cm	凋落物 δ <sup>15</sup> N* /‰	表土 δ <sup>15</sup> N**/‰
草灌丛	上坡	直坡	30	1.0	40	1.0	-3.20	3.96
草灌丛	中坡	直坡	35	1.5	50	3.0	-3.07	6.50
草灌丛	下坡	直坡	25	1.4	45	1.0	-3.48	4.83
灌丛	上坡	凸坡	12	2.4	90	5.0	-3.23	2.70
灌丛	中坡	直坡	40	4.2	70	1.0	-2.44	3.97
灌丛	下坡	直坡	37	1.9	90	2.0	-3.46	4.81
次生乔灌林	中坡	凸坡	33	16.0	98	8.0	-3.76	3.19

注: \* 据罗绪强等(2014); \*\*据罗绪强等(2011)。

象。于树冠中上层东、南、西、北 4 个方位选择充分伸展的新鲜、成熟、健康叶片,每个植株每个方位采集 3~5 片叶片,同一样方同种植物不同方位采集的叶片混合成一个样装入干净透气信封。草灌丛、灌丛各样方各植物种所采集的植株数量不低于 3 株,次生乔灌林样方各植物种所采集的植株数量不低于 10 株,各样方各植株状况(株高、茎粗等)基本一致。共采集到样品 28 个。

### 2.3 样品的处理

样品用自来水充分冲洗以去除粘附的泥土和污物,然后用去离子水冲洗干净,放入烘箱中 105 °C 杀青,再于 70 °C 左右烘干至恒重,烘干后的样品用不锈钢植物粉碎机粉碎,过筛(筛孔直径 0.149 mm) 样品封存于密封袋内干燥保存,备用。

### 2.4 分析测试

样品在环境地球化学国家重点实验室测定。C、N 含量用元素分析仪(PE2400-II)测定,P 含量用钼锑抗分光光度法测定,Ca、Mg 含量用电感耦合等离子体发射光谱仪(Vista MPX 2000)测定,K 含量用原子吸收光谱仪(PE-5100-PC AAS)测定。C、N、P、K、Ca、Mg 含量的测定均以植物成分分析标准物质 GBW07604(GSV-3) 杨树叶作质量控制,标样元素含量测定结果均在标准值范围内,误差为 ±0.1%。

氮同位素比率采用 MAT-252 质谱仪(Finnigan MAT, USA)测定,用硝酸钾标准物质 ST-N1(δ<sup>15</sup>N = -1.89‰)、ST-N2(δ<sup>15</sup>N = 21.38‰)进行校正,分析测试的标准偏差为 ±0.2‰(n=5)。在测试过程中,每测 5 个样品插 1 个平行样和 1 个标样以进行校对。对照标准为大气氮,样品重复测定误差小于 0.05‰,氮同位素值(δ<sup>15</sup>N)由国际通用标准形式给出:

$$\delta^{15}\text{N} = \left[ \left( \frac{{}^{15}\text{N}}{{}^{14}\text{N}} \right)_{\text{样品}} - \left( \frac{{}^{15}\text{N}}{{}^{14}\text{N}} \right)_{\text{标样}} \right] / \left( \frac{{}^{15}\text{N}}{{}^{14}\text{N}} \right)_{\text{标样}} \times 1000\text{‰}$$

### 2.5 数据处理与统计

用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理,用 IBM

SPSS Statistics 19 进行数据统计分析,包括描述性统计分析(Descriptive Statistics)、比较均值分析(Compare Means)及相关分析(Correlate)等。植物叶片元素含量采用质量含量,元素比值均采用质量比。

## 3 结果与讨论

### 3.1 灌木叶片氮同位素组成的总体特征

从分析结果(表 1、表 2)可以看出,研究区王家寨小流域石灰土区常见灌木叶片 δ<sup>15</sup>N 值的变化范围为 -5.86‰ ~ -0.54‰,均值为 -2.31‰,总体上较地表凋落物的 δ<sup>15</sup>N 值(-3.76‰ ~ -2.44‰,均值为 -3.23‰)偏正,较表土全氮 δ<sup>15</sup>N 值(2.70‰ ~ 6.50‰,均值为 4.28‰)偏负。灌木叶片 δ<sup>15</sup>N 值有 25.0% 的数据落在地表凋落物的范围,有 64.3% 的数据在地表凋落物和表土全氮 δ<sup>15</sup>N 值之间,没有数据落在表土全氮 δ<sup>15</sup>N 值范围内。研究区灌木叶片 δ<sup>15</sup>N 值的标准差为 1.29‰,方差为 1.67‰,变异系数(CV)为 -55.84%,频数分布曲线的偏度和峰度值分别为 -1.36 和 2.01,表明研究区常见灌木叶片的 δ<sup>15</sup>N 值分布较集中,呈负偏态分布。

### 3.2 灌木叶片氮同位素组成的空间分异特征

3.2.1 群落 从表 3 可知,流域内石灰土区草灌丛、灌丛、次生乔灌林各群落内的植物叶片 δ<sup>15</sup>N 值变异系数均较小,分布均较集中,群落间的变化趋势为次生乔灌林 < 灌丛 < 草灌丛,差异显著(P < 0.05) 按同类子集可将其分为次生乔灌林、灌丛-草灌丛 2 类。分别与地表凋落物 δ<sup>15</sup>N 值和表土全氮 δ<sup>15</sup>N 值相比较(表 1),得知灌丛中的常见灌木叶片 δ<sup>15</sup>N 值有 25.0% 的数据落在其地表凋落物 δ<sup>15</sup>N 值分布范围(-3.46‰ ~ -2.44‰)内,草灌丛、灌丛、次生乔灌林中的常见灌木叶片 δ<sup>15</sup>N 值分别有 100.0%、66.7% 和 50.0% 的数据落在其地表凋落物 δ<sup>15</sup>N 值分布范围和表土全氮 δ<sup>15</sup>N 值分布范围之间(草灌丛、灌丛、次生乔灌林的该区间值分别为:

表2 常见灌木叶片元素含量及  $\delta^{15}\text{N}$  值Table 2 The macronutrient contents and  $\delta^{15}\text{N}$  values in leaves of common shrubs in the sample plots

物种	植被类型	坡位	元素含量/(mg/g)					$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	
			C	N	P	K	Ca		Mg
烟管荚蒾	草灌丛	上坡	488.98	11.77	0.58	4.33	19.84	4.50	-2.63
烟管荚蒾	草灌丛	中坡	488.65	11.32	0.61	5.74	21.08	4.43	-2.57
烟管荚蒾	草灌丛	下坡	489.79	12.72	0.70	3.15	20.71	5.36	-1.76
烟管荚蒾	灌丛	上坡	494.89	11.49	0.62	3.11	20.86	4.56	-1.32
烟管荚蒾	灌丛	中坡	481.02	12.15	0.51	3.28	20.70	4.90	-2.38
烟管荚蒾	灌丛	下坡	495.69	12.35	0.46	6.74	20.06	3.74	-2.95
烟管荚蒾	次生乔灌林	中坡	452.90	12.76	0.67	4.81	22.88	5.11	-3.30
火棘	草灌丛	上坡	477.26	16.23	0.63	5.35	21.23	3.80	-1.36
火棘	草灌丛	中坡	482.20	14.73	0.57	4.90	20.98	4.08	-1.92
火棘	草灌丛	下坡	476.11	15.68	0.58	5.01	21.08	4.27	-0.93
火棘	灌丛	上坡	472.38	16.23	0.65	6.16	22.84	4.13	-1.80
火棘	灌丛	中坡	483.85	17.45	0.67	4.39	22.24	4.53	-0.54
火棘	灌丛	下坡	483.51	19.63	0.67	6.49	21.00	4.35	-1.81
火棘	次生乔灌林	中坡	468.98	17.24	0.87	7.28	20.96	3.82	-5.86
竹叶椒	草灌丛	上坡	423.01	20.18	0.91	4.88	11.11	2.68	-2.32
竹叶椒	草灌丛	中坡	423.82	19.71	0.95	7.42	10.62	2.87	-0.97
竹叶椒	草灌丛	下坡	422.96	22.98	0.94	4.94	10.89	2.89	-0.99
竹叶椒	灌丛	上坡	424.99	23.46	0.75	4.48	10.78	2.84	-1.35
竹叶椒	灌丛	中坡	436.50	27.42	1.05	9.44	10.22	2.70	-1.52
竹叶椒	灌丛	下坡	431.26	25.67	0.76	9.82	10.48	2.71	-1.88
竹叶椒	次生乔灌林	中坡	426.72	28.35	1.38	10.64	10.43	2.73	-3.35
鼠李	草灌丛	上坡	457.29	21.47	0.75	7.34	22.59	3.85	-2.02
鼠李	草灌丛	中坡	456.02	25.11	0.87	11.57	22.68	3.97	-2.28
鼠李	草灌丛	下坡	460.29	26.63	0.93	7.12	22.89	3.80	-1.26
鼠李	灌丛	上坡	455.91	25.19	0.65	6.12	23.86	4.05	-3.04
鼠李	灌丛	中坡	468.83	28.10	0.70	10.03	21.90	3.61	-4.16
鼠李	灌丛	下坡	456.61	26.23	0.85	7.85	23.56	4.04	-2.84
鼠李	次生乔灌林	中坡	456.39	30.20	0.93	9.39	23.23	4.07	-5.67

表3 不同群落中灌木叶片的氮同位素组成

Table 3  $\delta^{15}\text{N}$  values of shrub leaves in different floras

群落类型	样本数	平均值/‰	标准偏差/‰	变化范围/‰	方差/‰	变异系数/‰
草灌丛	12	-1.75 <sup>a</sup>	0.63	-2.63~-0.93	0.40	-36.00
灌丛	12	-2.13 <sup>a</sup>	0.98	-4.16~-0.54	0.96	-46.01
次生乔灌林	4	-4.55 <sup>b</sup>	1.41	-5.86~-3.30	1.99	-30.99

注:表中同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

-3.07‰~3.96‰, -2.44‰~2.70‰, -3.76‰~3.19‰)。

3.2.2 坡位 在流域内石灰土区,比较灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值在相同群落中不同坡位上的变化,发现在草灌丛群落中的变化趋势和在灌丛群落中的变化趋势正好相反,且在草灌丛群落中的变异程度相对较低(图1)。灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值在草灌丛群落中表现为上坡(-2.08‰) < 中坡(-1.93‰) < 下坡(-1.24‰),而在灌丛群落中则表现为下坡(-2.37‰) < 中坡(-2.15‰) < 上坡(-1.88‰)。单因素方差和多重比较分析结果表明,无论是在草灌丛群落中还是在灌丛群落中,灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值在不同坡位间的差异均不显著( $P>0.05$ )。

### 3.3 灌木叶片氮同位素组成的种间分异特征

从表4可以看出,流域内石灰土区不同种灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的平均值表现为鼠李(-3.04‰) < 烟管荚蒾(-2.42‰) < 火棘(-2.03‰) < 竹叶椒(-1.77‰)。竹叶椒、火棘、鼠李叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值均呈负偏态分布,烟管荚蒾呈正偏态分布,火棘离散程度最大,烟管荚蒾离散程度最小。从变异系数来看,火棘叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的变异程度最高,烟管荚蒾最低。烟管荚蒾叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的离散程度和变异程度均较小,说明其对环境变化的响应不敏感;火棘叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的离散程度和变异程度均较大,说明火棘的生理生态受环境变化的影响较大。

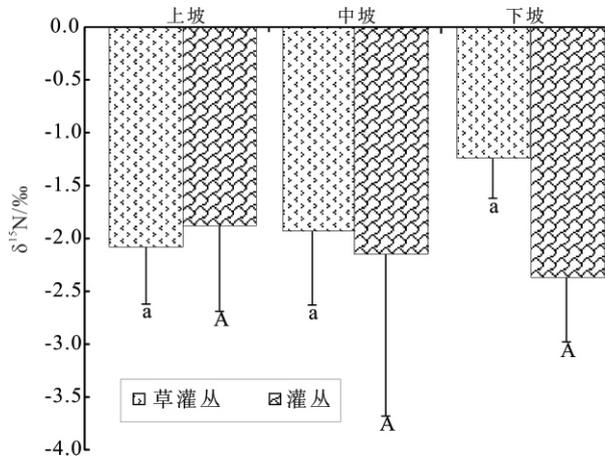
表 4 不同种灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值特征 ( $n=7$ )

Table 4 Characteristics of  $\delta^{15}\text{N}$  values in leaves of different shrub species ( $n=7$ )

(‰)

灌木种	平均值	标准偏差	中值	最小值	最大值	偏度	峰度	极差	方差	变异系数/%
烟管荚蒾	-2.42 <sup>a</sup>	0.68	-2.57	-3.30	-1.32	0.55	-0.31	1.99	0.46	-28.10
火棘	-2.03 <sup>a</sup>	1.76	-1.80	-5.86	-0.54	-2.18	5.29	5.32	3.11	-86.70
竹叶椒	-1.77 <sup>a</sup>	0.85	-1.52	-3.35	-0.97	-1.17	1.12	2.38	0.72	-48.02
鼠李	-3.04 <sup>a</sup>	1.47	-2.84	-5.67	-1.26	-0.92	0.66	4.41	2.17	-48.36

注: 表中同列相同小写字母表示在 0.05 水平上差异不显著。



相同群落不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 1 草灌丛群落和灌丛群落不同坡位上的灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值(平均值±标准偏差)

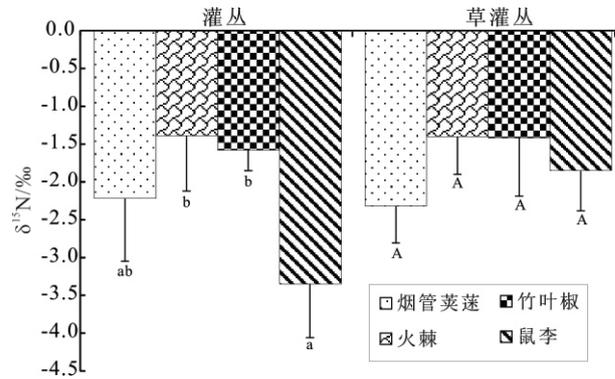
Fig.1  $\delta^{15}\text{N}$  of shrub leaves from grass-shrub and shrub communities at different sites of a slope (mean±SD)

从图 2 可知,灌丛群落中各种灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的平均值表现为鼠李 ( $-3.35\text{‰}$ ) < 烟管荚蒾 ( $-2.22\text{‰}$ ) < 竹叶椒 ( $-1.58\text{‰}$ ) < 火棘 ( $-1.39\text{‰}$ ), 种间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 按同类子集可分为鼠李-烟管荚蒾、烟管荚蒾-竹叶椒-火棘 2 类。草灌丛群落中各种灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的平均值表现为烟管荚蒾 ( $-2.32\text{‰}$ ) < 鼠李 ( $-1.85\text{‰}$ ) < 竹叶椒 ( $-1.42\text{‰}$ ) < 火棘 ( $-1.40\text{‰}$ ), 种间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。不同演替阶段植物群落中各灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化趋势不一致,进一步说明了不同种植物在生理生态上对环境变化的响应程度不同。

## 4 讨论

### 4.1 物种、群落和坡位对植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值的交互影响

植物稳定氮同位素组成是其生长环境多因素综合作用的整体响应 (Högberg, 1997; Evans, 2001; Dijkstra et al., 2015; Ismaili et al., 2015)。为了解研究区物种、群落、坡位对植物叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的交互影响情况,分别以物种和群落、物种和坡位、群落和坡位为控制变量,植物叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值为观测变量建



相同群落不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 2 草灌丛群落和灌丛群落中不同灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值(平均值±标准偏差)

Fig.2  $\delta^{15}\text{N}$  of shrub leaves from different plant species in grass-shrub and shrub communities (mean±SD)

立固定效应的饱和模型进行植物叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的双因素方差分析。结果表明,研究区物种和群落类型对灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值产生了显著的交互作用 ( $P = 0.021$ ,  $R^2 = 0.860$ , 调整的  $R^2 = 0.764$ ), 但群落类型和坡位产生的交互作用不显著 ( $P = 0.370$ ,  $R^2 = 0.582$ , 调整的  $R^2 = 0.462$ ), 而物种和坡位在对植物叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的影响上几乎没有产生交互作用 ( $P = 0.955$ ,  $R^2 = 0.351$ , 调整的  $R^2 = -0.096$ )。物种和群落类型对灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值产生的交互作用较显著, 主要原因可能是群落演替后环境物理特征及辐射状况的改变幅度较大, 诱导着群落内各种生态因子发生较大变化, 导致植物的氮源、氮素吸收利用及其生理生态过程发生变化 (容丽等, 2006; 罗绪强等, 2007b; 杜雪莲等, 2014, 2015)。

### 4.2 植物叶片氮同位素组成与元素含量及化学计量比之间的关系

C、N、P、K、Ca、Mg 在植物体中的含量、分布和化学计量特征是植物响应及适应环境条件变化的反映 (孙力等, 2017; 于海玲等, 2017)。目前, 尽管植物叶片营养对叶片  $\delta^{15}\text{N}$  的影响机理还不是很清楚 (周咏春等, 2012; 闵孝君等, 2017), 但已有许多研究在不同空间尺度上证明了叶片  $\delta^{15}\text{N}$  与其 N 含量呈正相关 (Hobbie et al., 2000; 郜士垒等, 2015;

表 5 植物叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值与元素含量及元素化学计量比之间的皮尔逊相关系数Table 5 Pearson correlation coefficients between  $\delta^{15}\text{N}$ , macronutrient contents, and selected stoichiometric ratios in leaves

指标	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	元素含量/(mg/g)						C/N	N/P	P/K	K/Ca
		C	N	P	K	Ca	Mg				
C	-0.041										
N	-0.213	-0.661**									
P	-0.156	-0.736**	0.705**								
K	-0.390*	-0.410*	0.761**	0.593**							
Ca	-0.268	0.742**	-0.273	-0.543**	-0.148						
Mg	-0.079	0.803**	-0.616**	-0.626**	-0.500**	0.806**					
C/N	0.106	0.761**	-0.960**	-0.707**	-0.691**	0.350	0.687**				
N/P	-0.137	-0.169	0.659**	-0.056	0.451*	0.156	-0.247	-0.616**			
P/K	0.349	-0.068	-0.334	0.069	-0.706**	-0.257	0.157	0.278	-0.560**		
K/Ca	-0.045	-0.717**	0.639**	0.749**	0.732**	-0.746**	-0.803**	-0.633**	0.140	-0.282	
Ca/Mg	-0.366	0.401*	0.175	-0.252	0.263	0.800**	0.293	-0.119	0.500**	-0.562**	-0.401*

注: \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

熊鑫等,2016)。本研究区的植物叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值与叶片 N 含量之间并不呈正相关(表 5),可能与喀斯特的生存环境有关。因为现有关于植物叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值与其 N 浓度正相关的解释基本都是基于植物叶片 N 浓度可以反映其生境土壤 N 的有效性来进行的(周咏春等,2012)。然而,并非所有地区的植物叶片 N 浓度都能准确反映其生境土壤 N 的有效性(Alvarez-Clare and Mack,2011)。喀斯特地区的植物为了适应生境而使更多的 N 分配到叶片的光合器官内,以及该地区植物生长速率缓慢使植物叶片 N 浓度的稀释作用降低,均可导致随着土壤 N 有效性降低植物叶片 N 含量反而增加的情况(Körner,1989;胡启武等,2007;陈超等,2013;郭屹立等,2017;吴邦利等,2018)。因此,在此生态系统中,植物叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值与叶片 N 浓度之间不一定呈正相关。研究区植物叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值与叶片 K 含量之间显著负相关( $P<0.05$ ),说明叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值受 K 含量的影响较大。

## 5 结论

研究区常见灌木叶片  $\delta^{15}\text{N}$  值的为  $-5.86\text{‰} \sim -0.54\text{‰}$ ,均值为  $-2.31\text{‰}$  较地表凋落物的  $\delta^{15}\text{N}$  值偏正,较表土全氮的  $\delta^{15}\text{N}$  值偏负。流域内石灰土区不同灌木受环境变化影响的适应性不同,物种因素和群落类型对灌木叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值产生了显著的交互作用( $P=0.021$ )。研究区常见灌木叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值主要受其生境条件的控制,且在不同群落间差异显著( $P<0.05$ ),而种间差异仅在灌丛群落中显著( $P<0.05$ )。研究区灌木叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值受叶片 K 含量的影响较大,植物叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值与其 N 浓度并非正相关关系,可能与喀斯特严酷的生存环境有关。

## 参考文献(References):

- Alvarez-Clare S, Mack M C. 2011. Influence of precipitation on soil and foliar nutrients across nine Costa Rican forests. *Biotropica*, 43(4): 433-441
- Clark C M, Tilman D. 2008. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 451(7179): 712-715
- Dijkstra F A, He M Z, Johansen M P, Harrison J J, Keitel C. 2015. Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using  $^{15}\text{N}$  and  $^{32}\text{P}$  tracers. *Soil Biology and Biochemistry*, 82: 135-142
- Evans R D. 2001. Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends in Plant Science*, 6(3): 121-126
- Hobbie E A, Macko S A, Williams M. 2000. Correlations between foliar  $\delta^{15}\text{N}$  and nitrogen concentrations may indicate plant-mycorrhizal interactions. *Oecologia*, 122(2): 273-283
- Högberg P. 1997. Tansley Review No. 95  $^{15}\text{N}$  natural abundance in soil-plant systems. *New Phytologist*, 137(2): 179-203
- Ismaili K, Ismaili M, Ibijbijen J. 2015. The use of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  based isotopic techniques for assessing soil C and N changes under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*, 64: 1-7
- Körner C. 1989. The nutritional status of plants from high altitudes: A worldwide comparison. *Oecologia*, 81(3): 379-391
- Rennenberg H, Dannenmann M, Gessler A, Kreuzwieser J, Simon J, Papen H. 2009. Nitrogen balance in forest soils: Nutritional limitation of plants under climate change stresses. *Plant Biology*, 11(S1): 4-23
- Robinson D. 2001.  $\delta^{15}\text{N}$  as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(3): 153-162
- Schimann H, Ponton S, Hättenschwiler S, Ferry B, Lensi R, Domenach A M, Roggy J C. 2008. Differing nitrogen use strategies of two tropical rainforest late successional tree species in French Guiana: Evidence from  $^{15}\text{N}$  natural abundance and microbial activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(2): 487-494
- Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, Weathers K C. 2007. Plant and soil natural abundance  $\delta^{15}\text{N}$ : Indicators of relative rates of nitrogen

- cycling in temperate forest ecosystems. *Oecologia*, 153(2): 399-406
- van der Sleen P, Zuidema P A, Pons T L. 2017. Stable isotopes in tropical tree rings: Theory, methods and applications. *Functional Ecology*, 31(9): 1674-1689
- Voronin P Y, Mukhin V A, Velivetskaya T A, Ignat'ev A V, Kuznetsov V V. 2017. Isotope composition of carbon and nitrogen in tissues and organs of *Betula pendula*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 64(2): 184-189
- Werth M, Mehlreter K, Briones O, Kazda M. 2015. Stable carbon and nitrogen isotope compositions change with leaf age in two mangrove ferns. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 210: 80-86
- 陈超, 杨丰, 刘洪来, 姚红艳, 宋高翔. 2013. 贵州喀斯特地区草地开垦对土壤微量元素的影响与评价. *农业工程学报*, 29(7): 230-237
- 陈家瑞, 曹建华, 梁毅, 杨慧. 2012. 石灰土发育过程中土壤腐殖质组成及其与土壤钙赋存形态关系. *中国岩溶*, 31(1): 7-11
- 陈伟霖, 缪绅裕, 陶文琴, 龙连娣, 戴文坛, 刘志群, 陈学梅, 易祖盛. 2018. 珠海淇澳与广州南沙湿地3种植物稳定碳氮同位素组成比较. *海洋环境科学*, 37(1): 38-42
- 杜雪莲, 王世杰, 罗绪强. 2014. 黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响. *环境科学*, 35(9): 3587-3594
- 杜雪莲, 王世杰, 罗绪强. 2015. 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. *长江流域资源与环境*, 24(7): 1168-1176
- 段中华, 乔有明, 全小龙, 梁海东, 何桂芳. 2015. 黄河源区湿地、草地土壤理化性质和碳氮组成及其稳定同位素特征分析. *水土保持学报*, 29(4): 247-252, 315
- 鄯士垒, 何宗明, 黄志群, 林思祖, 刘桌明. 2015. 杉木宿存叶片的分解及稳定性碳氮同位素和化学组成. *生态学杂志*, 34(9): 2457-2463
- 郭屹立, 李冬兴, 王斌, 白坤栋, 向悟生, 李先琨. 2017. 北热带喀斯特季节性雨林土壤和6个常见树种凋落物的C、N、P化学计量学特征. *生物多样性*, 25(10): 1085-1094
- 胡启武, 宋明华, 欧阳华, 刘贤德. 2007. 祁连山青海云杉叶片氮、磷含量随海拔变化特征. *西北植物学报*, 27(10): 2072-2079
- 林光辉. 2013. 稳定同位素生态学. 北京: 高等教育出版社, 243-270
- 刘文景, 涂成龙, 郎赞超, 冯家毅, 李龙波, 汪齐连, 刘丛强. 2010. 喀斯特地区黄壤和石灰土剖面化学组成变化与风化成土过程. *地球与环境*, 38(3): 271-279
- 刘贤赵, 张勇, 宿庆, 田艳林, 王庆, 全斌. 2014. 陆生植物氮同位素组成与气候环境变化研究进展. *地球科学进展*, 29(2): 216-226
- 刘艳杰, 许宁, 牛海山. 2016. 内蒙古草原常见植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  对环境因子的响应. *生态学报*, 36(1): 235-243
- 罗绪强, 王世杰, 刘秀明. 2007a. 稳定氮同位素在环境污染示踪中的应用进展. *矿物岩石地球化学通报*, 26(3): 295-299
- 罗绪强, 王世杰, 刘秀明. 2007b. 陆地生态系统植物的氮源及氮素吸收. *生态学杂志*, 26(7): 1094-1100
- 罗绪强, 王世杰, 王程媛, 梁玉华, 廖昕荣, 杨鸿雁. 2011. 喀斯特石漠化过程中土壤氮同位素组成及其空间分异特征. *核农学报*, 25(6): 1235-1243
- 罗绪强, 王世杰, 张桂玲, 刘秀明, 杨鸿雁, 勾昕. 2014. 喀斯特石漠化过程中地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  特征. *矿物岩石地球化学通报*, 33(2): 214-220
- 闵孝君, 马剑英, 巴贺贾依娜尔·铁木尔别克, 臧永新. 2017. 水、盐胁迫下长穗柽柳和梭梭碳氮同位素组成的变化特征. *干旱区研究*, 34(5): 1109-1116
- 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 2006. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应——以贵州花江峡谷区小流域为例. *生态学杂志*, 25(9): 1038-1043
- 孙建飞, 戴巍巍, 贺同鑫, 彭勃, 姜萍, 韩士杰, 白娥. 2017. 蒙古栎叶片及其土壤碳、氮同位素自然丰度对大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应. *应用生态学报*, 28(7): 2179-2185
- 孙力, 贡璐, 朱美玲, 解丽娜, 李红林, 罗艳. 2017. 塔里木盆地北缘荒漠典型植物叶片化学计量特征及其与土壤环境因子的关系. *生态学杂志*, 36(5): 1208-1214
- 吴邦利, 龙翠玲, 秦随涛. 2018. 茂兰喀斯特森林碎叶凋落物种群结构与数量动态. *西北植物学报*, 38(10): 1918-1926
- 熊鑫, 张慧玲, 吴建平, 褚国伟, 周国逸, 张德强. 2016. 鼎湖山森林演替序列植物-土壤碳氮同位素特征. *植物生态学报*, 40(6): 533-542
- 姚凡云, 朱彪, 杜恩在. 2012.  $^{15}\text{N}$  自然丰度法在陆地生态系统氮循环研究中的应用. *植物生态学报*, 36(4): 346-352
- 于海玲, 樊江文, 钟华平, 李愈哲. 2017. 青藏高原区域不同功能群植物氮磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 37(11): 3755-3764
- 张金美, 张萌, 匡武名, 祝国荣, 王玉玉, 卢龙, 徐军. 2016. 水华条件下鄱阳湖区植物叶片碳氮同位素特性. *环境科学研究*, 29(5): 708-715
- 周咏春, 程希雷, 樊江文. 2012. 植物氮同位素组成与其影响因子的关系研究进展. *草地学报*, 20(6): 981-989

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)