

# 喀斯特石漠化过程中地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 特征\*

罗绪强<sup>1,2</sup>，王世杰<sup>2</sup>，张桂玲<sup>3</sup>，刘秀明<sup>2</sup>，杨鸿雁<sup>1</sup>，勾昕<sup>1</sup>

1. 贵州师范学院 地理与旅游学院，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 550002；3. 贵阳学院 化学与材料工程学院，贵阳 550005

**摘要：**为了解喀斯特石漠化过程中地表凋落物稳定氮同位素的变异特征及其影响因素，对喀斯特高原区贵州省清镇市王家寨峰丛洼地同一流域内不同类型石漠化、不同等级石漠化以及不同干扰方式石漠化地表凋落物的氮同位素组成及其空间分异特征进行了研究。结果表明：流域内黄壤区样地的地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要为 $-4.00\text{‰} \sim -1.83\text{‰}$ ，平均值 $-3.13\text{‰}$ ；黑色石灰土区样地的地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要为 $-4.49\text{‰} \sim -2.44\text{‰}$ ，平均值 $-3.39\text{‰}$ ；环境水热条件是影响地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的主要因素；除了在黑色石灰土区的轻度石漠化与无石漠化间差异显著外，无论是黄壤区样地还是黑色石灰土区样地，其地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值在各等级石漠化样地间、不同干扰方式环境下、甚至在不同坡位上都无显著性差异体现，两土壤类型间的总体差异也不显著（ $P \leq 0.05$ ），这主要与喀斯特区高度的生境异质性有关。

**关键词：**喀斯特石漠化；地表凋落物；氮同位素组成；空间分异特征

中图分类号：X142；Q948 文献标识码：A Doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2014.02.009

## Characteristics of Nitrogen Isotope in Litters Under Karst Rocky Desertification

LUO Xu-qiang<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jie<sup>2</sup>, ZHANG Gui-ling<sup>3</sup>, LIU Xiu-ming<sup>2</sup>, YANG Hong-yan<sup>1</sup>, GOU Xin<sup>1</sup>

1. School of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. College of Chemistry and Materials Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China

**Abstract:** This study investigated isotopic composition and spatial distribution of nitrogen of surficial litters in karst rocky desertification areas with different type, grade and disturbed model within a small catchment of the Wangjiazhai peak-cluster depression basin, Qingzhen, Guizhou. Results showed that the most  $\delta^{15}\text{N}$  values of surficial litters in yellow soil areas are between  $-4.00\text{‰}$  to  $-1.83\text{‰}$  with an average of  $-3.13\text{‰}$ , and that between  $-4.49\text{‰} \sim -2.44\text{‰}$  with an average of  $-3.39\text{‰}$  in black calcareous areas. The hydrothermal condition of the environment is the key factor controls litters'  $\delta^{15}\text{N}$  values. The  $\delta^{15}\text{N}$  values of surficial litters show no significant difference for all sampling sites except those from slight or no rocky desertification sites in black calcareous areas. We suggest not significant ( $P \leq 0.05$ ) overall difference of surficial litters'  $\delta^{15}\text{N}$  values in yellow soil and black calcareous areas as a result of the high habitat heterogeneity of the karst area.

**Key words:** karst rocky desertification; surficial litter; composition of Nitrogen isotope; spatial distribution characteristics

地表凋落物是指森林生态系统内由生物组分产生并归还到林地表面的有机物质的总称<sup>[1]</sup>。地表凋落物层作为植被系统与土壤系统的接触界面，是地上生物库与地下土壤库的联系纽带<sup>[2-4]</sup>。它不仅结构疏松、具有良好的透水性和持水能力，在降水过程中起着缓冲器的作用，具有保持水土和涵养水源等重要的水文生态功能，而且参与森林生态系统养分循环，对土壤发育和改良、增加土壤肥力，促进植物群落的正常演替有着重要的意义<sup>[5-8]</sup>。研究表明，多数生态系统中植物所吸收的养分，90%以上的氮和磷及60%以上的矿质

收稿日期：2013-03-13 收到，04-16 改回

基金项目：国家自然科学基金资助项目（31100187）；贵州省科学基金项目（[2010]2027）；贵州省教育厅自然科学基金重点项目（黔教科 20090128）

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

元素都来自于凋落物分解归还给土壤的养分再循环<sup>[9]</sup>。凋落物分解是森林生态系统的重要过程，它包括水溶性化合物的淋溶、土壤动物对凋落物的破碎、由微生物进行的物质转换以及有机物和矿质化合物向土壤的转化等过程<sup>[10]</sup>，这些过程的综合决定了凋落物分解的快慢及其化学过程，并直接影响到地表凋落物积累，也制约着 N、P 等营养元素及其他物质向土壤的归还和土壤养分有效性<sup>[4,7,8,11~16]</sup>。因此，地表凋落物的产生和分解是森林生态系统氮素生物地球化学循环输入、转化和输出 3 个过程的中心环节，是后 2 个过程的关键所在。

喀斯特石漠化包括植被系统、土壤系统和环境系统 3 个子系统的退化<sup>[17]</sup>。植被系统退化是喀斯特环境系统退化的根源，环境系统的退化是植被系统和土壤系统退化的结果，土壤系统的退化是由植被系统退化所致<sup>[18]</sup>。近年来，国内外在凋落物方面的研究已做了许多工作并取得了相当大的进展，主要集中于凋落物的形成、现存量 and 组分、凋落动态变化、持水特性、分解速率变化、分解过程及其与生态系统养分循环之间关系、环境因素对分解过程的影响等方面<sup>[7,16,19~21]</sup>，但在土层浅薄且土被很不连续的喀斯特区域进行凋落物氮同位素组成研究的报导尚不多见。由于凋落物的产生和分解与森林生态系统氮素的生物地球化学循环过程密切相关，而氮素循环诸过程中的化学转化、物理运输等都有可能使其发生同位素分馏<sup>[22~28]</sup>，因此，从系统论的观点出发，深入研究喀斯特石漠化过程中地表凋落物稳定氮同位素的变异特征及其影响因素，对于了解喀斯特地区氮的生物地球化学循环和不同石漠化程度下土壤-植物系统中氮素的行为过程具有重要意义。本文以喀斯特高原区贵州省清镇市王家寨峰丛洼地小流域为例，对同流域内不同类型土壤石漠化、不同等级石漠化、不同干扰方式石漠化间地表凋落物稳定氮同位素组成及其空间分异特征进行对比研究，以期阐明喀斯特地区的氮素循环，特别是不同演替阶段植被-土壤氮素循环的生物地球化学过程提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于贵州省清镇市红枫湖镇簸箕村王家寨小流域，东经 106°20'5"~106°21'8"，北纬 26°31'45"~26°30'27"，流域面积约 2.4 km<sup>2</sup>。该区岩性较为均一，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，峰丛与洼地面积比为 1.65 : 1。海拔最高点 1451.1m，最低点 1275.0m。属亚热带季风湿润气候，年均温 14℃，极端最高温 35℃，极端最低温 -5℃，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。研究区主要土壤类型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，洼地以南的峰丛坡面以黄壤为主。

流域内喀斯特地表渗漏强烈，加上人类活动的长期干扰影响，造成该地区的森林植被受到不同程度的破坏。近年来，当地政府采取退耕还林还草、封山育林等措施对植被进行恢复和保护，使该地区存在着不同恢复阶段的植物群落类型。区内草、灌、乔不同演替阶段植被群落均有分布，分别是强度石漠化下的经过放牧干扰后的稀疏灌草丛、强度石漠化下的经过开垦干扰后的稀疏灌草丛、中度石漠化下的经过火烧干扰后的火烧迹地草灌丛、中度石漠化下的经过放牧干扰后的藤刺灌丛、中度石漠化下的经过开垦干扰后的藤刺灌丛、轻度石漠化下的经过放牧干扰后的灌丛和现存最好的没有发生石漠化的次生乔灌林，构成了比较完整且具有代表性的演替系列。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

样地设于小流域内不同峰丛坡面上<sup>[29]</sup>，在不同类型土壤、不同干扰方式背景区分别选择无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化等不同退化程度的研究样地，同时考虑坡位等影响因素。在强度、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 10m 设置一个约 5m×5m 的样方。由于无石漠化山坡高差较小，样地面积需求较大（20m×20m），仅在坡面的典型位置设一个样地，不考虑坡位变化因素。

## 2.2 样品采集

在每个样方内按“梅花形”五点法分别在 4 个角及中心位置布设 5 个 50cm×50cm 的小区，收集小区内的全部凋落物，混和后代表该样方凋落物样品。用四分法取原样并在 70℃ 下烘干至恒重。取烘干样粉碎过 0.073mm 筛，包装于密封袋内置于保干器中，待用。

## 2.3 样品分析

凋落物全 C 含量采用  $KCr_2O_7-H_2SO_4$  氧化法测定；N 含量采用元素分析仪（PE2400-II）测定，采用标准物质脍氨酸（N%=11.7%）进行校对，测量误差为 ±0.1%。

氮同位素比率采用 MAT-252 质谱仪进行测试。用四分法将粉碎过 0.073 mm 筛的凋落物样品 15~20 mg 置于经过高温处理过的石英管底部，依次加入过量的 CuO（2~3g）和 Cu 丝（0.5~1g），在自制气体纯化系统上抽高真空后焊封，置于马弗炉中 850℃ 灼烧 5 h，使凋落物中的氮全部转化为  $N_2$ ，缓慢冷却后取出，在自制外接液氮冷阱配合下将  $N_2$  纯化后，尽快上气体同位素质谱仪（MAT-252）进行凋落物氮同位素的测定。 $\delta^{15}N$  测定数据采用硝酸钾标准物质 ST-N1（ $\delta^{15}N = -1.89\%$ ）、ST-N2（ $\delta^{15}N = 21.38\%$ ）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（ $\delta^{15}N$ ）由国际通用标准形式给出：

$$\delta^{15}N = [ ( ^{15}N/^{14}N )_{\text{sample}} - ( ^{15}N/^{14}N )_{\text{standard}} ] / ( ^{15}N/^{14}N )_{\text{standard}} \times 1000\text{‰}$$

## 2.4 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。统计分析方法包括描述性统计分析（Descriptive Statistics）、单因素方差分析（One-way ANOVA）、比较均值分析（Compare Means）及相关分析（Correlate）等。

# 3 结果与分析

## 3.1 不同类型土壤地表凋落物氮同位素组成及其频数分布

3.1.1 黄壤 流域内黄壤区地表凋落物的  $\delta^{15}N$  值主要为 -4.00‰~-1.83‰（表1），平均值 -3.13‰，平均标准误差 0.15‰，标准偏差 0.53‰，全距为 2.17‰，方差 0.29‰，变异系数（CV）-17.05%。其中，83.3% 的数据分布在 -3.80‰~-2.80‰ 之间，分布在 -4.00‰~-3.80‰ 之间和 -2.80‰~-1.80‰ 之间的数据各占 8.3%， $\delta^{15}N$  值频数分布曲线的偏度和峰度分别为 0.95 和 2.98（图1）。表明黄壤区不同环境条件下地表凋落物的  $\delta^{15}N$  存在较大变率。

3.1.2 黑色石灰土 黑色石灰土区地表凋落物的  $\delta^{15}N$  值主要为 -4.49‰~-2.44‰（表1），平均值 -3.39‰，平均标准误差 0.21‰，标准偏差 0.59‰，全距 2.04‰，方差 0.34‰，变异系数（CV）-17.31%。其中，75.0% 的数据分布在 -3.80‰~-2.80‰ 之间，分布在 -4.50‰~-3.80‰ 之间和 -2.80‰~-2.40‰ 之间的数据各占 12.5%， $\delta^{15}N$  值频数分布曲线的偏度和峰度分别为 -0.45 和 1.69（图2）。表明黑色石灰土区不同环境条件下地表凋落物的  $\delta^{15}N$  值同样存在较大变率。

表 1 样地基本特征参数（地表凋落物 C、N 含量及  $\delta^{15}N$  值）  
Table 1 Basic features of sample sites (C, N contents and  $\delta^{15}N$  values of litters)

样地	土壤 类型	石漠化 等级	坡位	干扰 方式	植被 类型	土壤含水量 (%)	土壤 pH	凋落物 C 含量/mg.g <sup>-1</sup>	凋落物 N 含量/mg.g <sup>-1</sup>	$\delta^{15}N$ (‰)
----	----------	-----------	----	----------	----------	--------------	----------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------

1	YS	SRD	US	RC	TSG	30.2	6.60	453.59	15.32	-1.83
2	YS	SRD	MS	RC	TSG	27.3	6.81	431.54	15.19	-3.77
3	YS	SRD	DS	RC	TSG	28.3	6.75	464.24	15.44	-3.10
16	YS	SRD	US	GR	TSG	34.7	6.79	460.05	14.90	-2.94
17	YS	SRD	MS	GR	TSG	29.7	6.75	447.04	18.66	-3.07
18	YS	SRD	DS	GR	TSG	27.0	5.86	457.00	17.03	-2.92
4	YS	MRD	US	GR	VS	28.4	6.49	464.04	16.68	-3.26
5	YS	MRD	MS	GR	VS	29.2	7.07	437.87	19.25	-3.13
6	YS	MRD	DS	GR	VS	30.3	6.31	446.71	18.65	-3.38
11	YS	MRD	US	RC	VS	28.6	6.95	448.95	19.33	-2.85
12	YS	MRD	MS	RC	VS	30.3	7.34	468.81	17.01	-3.34
13	YS	MRD	DS	RC	VS	31.6	6.74	459.00	13.70	-4.00
7	BCS	MRD	US	BU	GS	31.8	7.80	448.29	13.69	-3.20
9	BCS	MRD	MS	BU	GS	33.2	7.78	441.05	13.23	-3.07
10	BCS	MRD	DS	BU	GS	30.1	7.89	450.11	14.80	-3.48
22	BCS	LRD	US	GR	S	32.5	7.53	471.20	20.07	-3.23
23	BCS	LRD	MS	GR	S	16.9	7.86	448.54	23.20	-2.44
24	BCS	LRD	DS	GR	S	30.5	7.81	467.45	18.90	-3.46
25	BCS	NRD	US	WC	STS	21.7	7.58	466.69	17.23	-4.49
26	BCS	NRD	MS	GR	STS	25.8	7.55	428.23	18.86	-3.76

注：①等级：SRD-强度石漠化；MRD-中度石漠化；LRD-轻度石漠化；NRD-无石漠化。②坡位：US-上坡；MS-中坡；DS-下坡。③干扰方式：RC-开垦；GR-放牧；WC-樵采；BU-火烧。④土壤类型：YS-黄壤；BCS-黑色石灰土。⑤植被类型：TSG-稀疏灌草丛；VS-藤刺灌丛；GS-草灌丛；S-灌丛；STS-次生乔灌林。下同

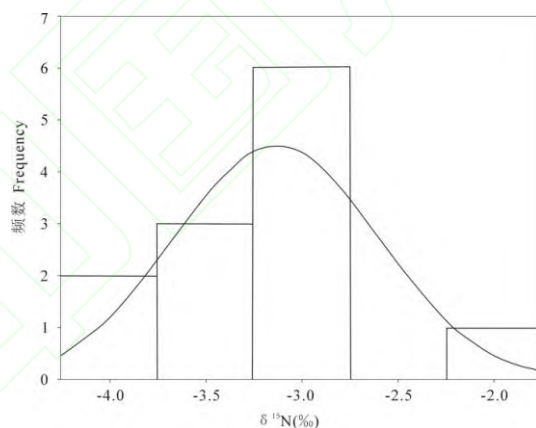


图1 黄壤区地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值的频数分布直方图

Fig.1 Frequency histogram for  $\delta^{15}\text{N}$  values of litters in yellow soil areas

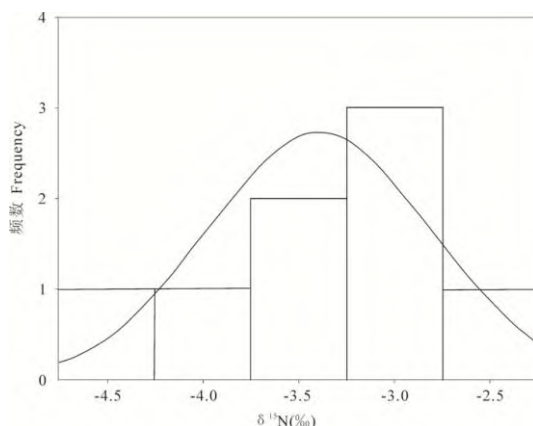


图2 黑色石灰土区地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值的频数分布直方图  
Fig.2 Frequency histogram for  $\delta^{15}\text{N}$  values of litters in black calcareous soil areas

### 3.2 不同类型土壤地表凋落物氮同位素组成的空间分异特征

3.2.1 黄壤 从表 1 和图 3 可以看出,流域内黄壤区强度石漠化(稀疏灌草丛)样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.77‰~-1.83‰,均值-2.94‰,变异系数-21.32%;中度石漠化(藤刺灌丛)样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-4.00‰~-2.85‰,均值-3.33‰,变异系数-11.45%。强度石漠化样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值总体上较中度石漠化样地偏正,中度石漠化样地的数据相对较为集中,离散小,分布区间较强度石漠化样地窄。受开垦干扰样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-4.00‰~-1.83‰,均值-3.15‰,变异系数-24.51%;受放牧干扰样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.38‰~-2.92‰,均值-3.12‰,变异系数-5.76%。其中,受开垦干扰的强度石漠化样地和中度石漠化样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  均值分别为-2.90‰和-3.40‰,变异系数分别为-33.98%和-16.99%;受放牧干扰的强度石漠化样地和中度石漠化样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  均值分别为-2.98‰和-3.26‰,变异系数分别为-2.74%和-3.84%。不同坡位样地间地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化趋势为下坡 $\approx$ 中坡<上坡。其中,上坡位样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.26‰~-1.83‰,均值-2.72‰,变异系数-22.80%;中坡位样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.77‰~-3.07‰,均值-3.33‰,变异系数-9.48%;下坡位样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-4.00‰~-2.92‰,均值-3.35‰,变异系数-14.09%。不同坡位间样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值数据在中坡位分布最为集中,下坡位次之,上坡位最分散。

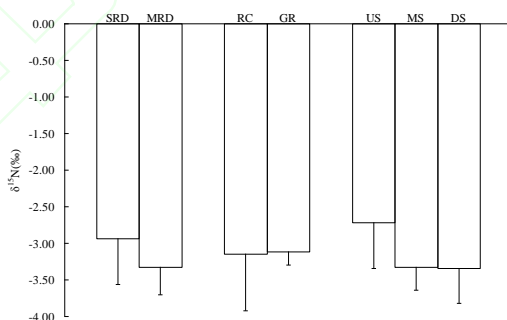


图3 不同环境条件下黄壤区地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  均值  
Fig.3 The mean  $\delta^{15}\text{N}$  value of litters in different environmental conditions in yellow soil areas

3.2.2 黑色石灰土 从表 1 和图 4 可以看出,流域内黑色石灰土区不同等级石漠化样地间地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化趋势由小到大为无石漠化(次生乔灌林)→中度石漠化(草灌丛)→轻度石漠化(灌丛)。其中,无石漠化样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-4.49‰~-3.76‰,均值-4.12‰,变异系数-12.54%;轻度石漠化样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.46‰~-2.44‰,均值-3.04‰,变异系数-17.51%;中度石漠化样地的地

表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.48‰~-3.07‰，均值-3.25‰，变异系数-6.44%。受不同干扰方式影响的样地其地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化趋势由小到大为樵采→火烧→放牧。其中，受放牧干扰样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.76‰~-2.44‰，均值-3.22‰，变异系数-17.45%；受火烧干扰样地即为同流域黑色石灰土区中度石漠化样地；受樵采干扰样地仅一个， $\delta^{15}\text{N}$  值为-4.49‰。不同坡位样地间地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化趋势由小到大为上坡→下坡→中坡。其中，上坡位样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-4.49‰~-3.20‰，均值-3.64‰，变异系数-20.19%；中坡位样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.76‰~-2.44‰，均值-3.09‰，变异系数-21.25%；下坡位样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要为-3.48‰~-3.46‰，均值-3.47‰，变异系数-0.35%。不同坡位间样地的地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值数据在下坡位分布最为集中，上坡位次之，中坡位最分散。

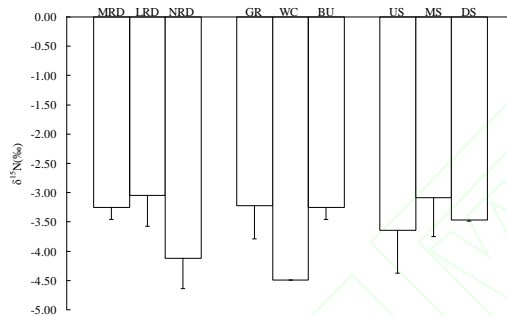


图 4 不同环境条件下黑色石灰土区地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  均值

Fig.4 The mean  $\delta^{15}\text{N}$  values of litters in different environmental conditions in black calcareous soil areas

单因素方差和多重比较分析结果表明，流域内地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值仅在黑色石灰土区的轻度石漠化（灌丛）与无石漠化（次生乔灌林）样地间差异显著，除此之外，无论是黄壤区样地还是黑色石灰土区样地，其地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值在各等级石漠化样地间、不同干扰方式环境下、甚至在不同坡位上都无显著性差异体现，两土壤类型间的总体差异也不显著 ( $P \leq 0.05$ )，这可能与喀斯特区高度的生境异质性有关<sup>[30]</sup>。

### 3.3 地表凋落物氮同位素组成与凋落物C、N含量及土壤含水量、土壤pH值之间的关系

从表 2、表 3 可以看出，流域内无论是黄壤区样地还是黑色石灰土区样地，地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值与凋落物 C、N 含量及土壤含水量、土壤 pH 值间均无显著相关关系 ( $P \leq 0.05$ )。

表 2 黄壤区地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值与凋落物 C、N 含量及土壤含水量、土壤 pH 值间的相关性

Table 2 Correlations between litter  $\delta^{15}\text{N}$  values, C、N contents, soil water contents and soil pH values in yellow soil areas

因子	$\delta^{15}\text{N}$	凋落物 C 含量	凋落物 N 含量	土壤含水量
凋落物 C 含量	0.11			
凋落物 N 含量	0.16	-0.35		
土壤含水量	0.04	0.29	-0.32	
土壤 pH 值	-0.15	-0.02	0.06	0.27

注：\*  $P \leq 0.05$ ，\*\*  $P \leq 0.01$ ，下表同

表 3 黑色石灰土区地表凋落物  $\delta^{15}\text{N}$  值与凋落物 C、N 含量及土壤含水量、土壤 pH 值间的相关性

Table 3 Correlations between litter  $\delta^{15}\text{N}$  values, C、N contents, soil water contents and soil pH values in black calcareous soil areas

因子	$\delta^{15}\text{N}$	凋落物 C 含量	凋落物 N 含量	土壤含水量
凋落物 C 含量	-0.21			
凋落物 N 含量	0.26	0.23		
土壤含水量	0.00	0.08	-0.65	
土壤 pH 值	0.55	-0.14	-0.22	0.01

## 4 讨论

地表凋落物包括地上乔木和灌木的枯叶、枯枝、落皮和繁殖器官，野生动物的残骸及代谢产物，枯死

的草本植物和枯死的树根等<sup>[1,31]</sup>,其 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要与凋落物的来源和组成有关,同时受凋落物分解程度和过程的影响<sup>[16,32-34]</sup>。喀斯特石漠化过程中,随石漠化程度的加深,植被群落类型发生了从次生林到灌木灌丛到草灌再到稀疏灌草的逆向演替,结构和功能逐渐退化,群落高度、盖度降低,使地表凋落物的组成成分向单一化发展,来自贫 $^{15}\text{N}$ 的生物固氮和降水中的氮减少,加之岩石裸露率逐渐增加,光照强度增强,温度升高,使凋落物层及其下伏土壤动物、微生物和与分解有关的酶活性相应升高,从而加速了凋落物的分解,有利于 $^{15}\text{N}$ 富集的氮挥发增加,导致地表凋落物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值趋正<sup>[3,14,16,32-38]</sup>。

受动物粪便污染的土壤和受氮肥污染的土壤其 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异<sup>[37]</sup>。刘贤赵等<sup>[26]</sup>研究发现不同功能型植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值表现为乔木( $7.69\% \pm 1.28\%$ )大于灌木( $3.46\% \pm 0.51\%$ )大于草本( $-1.51\% \pm 2.02\%$ ),并把结果归结为不同功能型植物具有不同的氮代谢过程和不同的氮循环,认为草本植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值之所以显著低于乔木和灌木,是因为草本植物从土壤中吸收的氮源( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比乔木和灌木从土壤中吸收的氮源( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )的 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显要低。而本研究结果表明,研究区内无论是黄壤还是黑色石灰土,地表凋落物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都有随石漠化程度加深而升高的趋势,且放牧、开垦、樵采和火烧等干扰方式对凋落物的氮同位素组成均无显著影响。说明地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值尽管与凋落物的来源和组成有关,但对凋落物分解程度和过程影响较大的环境水热条件可能才是其主要控制因素。

流域内黄壤区多为坡缓,不同坡位上的植被情况差异不大,但由于地表径流沿坡面自上而下的运动,造成凋落物和土壤物质的同向迁移及再分配,使环境水热条件发生了至上而下光照强度依次减弱,温度降低,而水分含量依次升高的变化趋势<sup>[30]</sup>,导致地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值随坡位升高有升高的趋势。黑色石灰土区由于坡度较大、地势陡峭、地形崎岖,上坡位植被情况相对保存较好,导致中坡位相对于上坡位和下坡位来说,光照最强,温度最高,而水分含量最低,因此,其地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值以中坡位最高。研究区地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同坡位上的变化情况,进一步说明了环境水热条件是影响地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的主要因素。各环境条件下地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的差异均不显著,这可能主要与喀斯特区高度的生境异质性有关。

## 5 结论

流域内黄壤区地表凋落物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要为 $-4.00\% \sim -1.83\%$ ,平均值 $-3.13\%$ ;随石漠化程度的加深和坡位的升高,地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值有升高的趋势,且放牧和开垦两种干扰方式对凋落物氮同位素组成的影响不显著。反映环境水热条件可能是影响凋落物氮同位素组成的主要因素。

黑色石灰土区地表凋落物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要为 $-4.49\% \sim -2.44\%$ ,平均值 $-3.39\%$ ;凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值同样有随石漠化程度加深而升高的趋势,火烧、放牧和樵采干扰对地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值无明显影响,不同坡位上以中坡位最高。表明影响黑色石灰土区地表凋落物氮同位素组成的主要因素同样是环境水热条件。

地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值与凋落物的来源、组成以及凋落物所处地形、土地利用与管理方式、水热条件等因素密切相关,对凋落物分解程度和过程影响较大的环境水热条件是其影响的主要因素。研究区同流域内各环境条件下,两类土壤的地表凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 值除了在黑色石灰土区的轻度石漠化与无石漠化样地间差异显著外,均无显著性差异,两土壤类型间的总体差异也不显著( $P \leq 0.05$ ),这主要与喀斯特区高度的生境异质性有关。

## 参考文献 (References):

- [1] 韩士杰,董云社,蔡祖聪,宋长春. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 47—77.
- [2] Ostertag R, Marin-Spiotta E, Silver W L, Schulten J. Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico[J]. *Ecosystems*, 2008, 11: 701—714.
- [3] 彭少麟,刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534—1544.
- [4] 林波,刘庆,吴彦,何海. 森林凋落物研究进展[J]. *生态学杂志*, 2004, 23 (1): 60 — 64.

- [5] 郭汉清, 韩有志, 白秀梅. 不同林分枯落物水文效应和地表粗率系数研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 179—183.
- [6] 张显松, 姚健, 薛建辉, 吴永波, 刘成刚. 喀斯特地区人工林凋落物及表层土壤水源涵养功能[J]. 林业科技开发, 2010, 24(4):32—35.
- [7] 曾昭霞, 刘孝利, 王克林, 曾馥平, 宋同清, 宋希娟. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物及养分归还特征比较[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 146—151.
- [8] 常雅军, 陈琦, 曹靖, 鲁海燕, 王威. 甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2392—2400.
- [9] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 2002, 6—137.
- [10] Wang L X, Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* litter decomposition in different climate zones[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45 (4) : 399—407.
- [11] Vitousek P M. Litterfall nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests[J]. Ecology, 1984, 65: 285—298.
- [12] Wang Q K, Wang S L, Huang Y. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255:1210—1218.
- [13] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19( 2): 245— 251.
- [14] 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物分解研究综述[J]. 土壤通报, 2009, 40(6):1473—1478.
- [15] 刘明国, 苏芳莉, 谭学仁, 孔祥文, 杨爱风, 迟德霞. 不同间伐强度下天然次生林凋落物分解进程研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(4):877—881.
- [16] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(2):0335—0343.
- [17] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6) : 657— 666.
- [18] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 关于喀斯特石漠和石漠化概念的讨论[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 689—695.
- [19] 代静玉, 秦淑平, 周江敏. 水杉凋落物分解过程中溶解性有机质的分组组成变化[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 207—210.
- [20] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展[J]. 林业科学, 2006, 42(4):93—100.
- [21] 魏鲁明, 余登利, 陈正仁. 茂兰喀斯特森林凋落物量的动态研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(3):31—34.
- [22] 苏波, 韩兴国, 黄建辉.  $^{15}\text{N}$  自然丰度法在生态系统氮素循环研究中的应用[J]. 生态学报, 1999, 19(3):408—416.
- [23] Robinson D.  $\delta^{15}\text{N}$  as an integrator of the nitrogen cycle[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2001, 16(3): 153—162.
- [24] Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, Weathers K C. Plant and soil natural abundance  $^{15}\text{N}$ : Indicators of relative rates of nitrogen cycling in temperate forest ecosystems[J]. Oecologia, 2007, 153: 399—406.
- [25] Schimann H, Ponton S, H ätenschwiler S, Ferry B, Domenach A M, Roggy J C. 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[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40:487—494.
- [26] 刘贤赵, 王国安, 李嘉竹, 王庆. 北京东灵山地区现代植物氮同位素组成及其对海拔梯度的响应[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(10): 1347—1359.
- [27] 禹朴家, 徐海量, 王炜, 张鹏, 赵新风, 傅蓁仪. 荒漠草地土壤  $^{15}\text{N}$  同位素对水分变化的响应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):241—244.
- [28] 张东, 杨伟, 赵建立. 氮同位素控制下黄河及其主要支流硝酸盐来源分析[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 622—627.
- [29] 罗绪强, 王世杰, 刘秀明, 王程媛, 余海. 喀斯特石漠化过程中土壤重金属镉的地球化学特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1):160—166.
- [30] 罗绪强, 王世杰, 王程媛, 梁玉华, 廖听荣, 杨鸿雁. 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[J]. 核农学报, 2011, 25 (6): 1235—1243.
- [31] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3127—3136.
- [32] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 27—34.
- [33] 刘晓宏, 赵良菊, Menassie Gasaw, 高登义, 秦大河, 任贾文. 东非大裂谷埃塞俄比亚段内  $\text{C}_3$  植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  及其环境指示意义[J]. 科学通报, 2007, 52(2):199—206.
- [34] 刘卫国, 王政. 黄土高原现代植物-土壤氮同位素组成及对环境变化的响应[J]. 科学通报, 2008, 53(23): 2917— 2924.
- [35] 孙志高, 刘景双. 湿地凋落物分解及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2007, 27 (4):1606—1618.
- [36] 罗绪强, 王世杰, 刘秀明. 陆地生态系统植物的氮源及氮素吸收[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7):1094—1100.
- [37] 罗绪强, 王世杰, 刘秀明. 稳定氮同位素在环境污染示踪中的应用进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3):295—299.
- [38] Sardans J, Peuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a mediterranean shrub land[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 39: 223—235.