

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

罗绪强^{1,2,3} 王世杰¹ 王程媛¹ 梁玉华^{2,3} 廖昕荣^{2,3} 杨鸿雁^{2,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 贵州师范学院地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018;

3. 贵州师范学院资源环境与灾害研究所, 贵州 贵阳 550018)

摘要: 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表层土壤全氮的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表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 $+0.35\text{‰} \sim +6.82\text{‰}$ 之间, 平均值为 $+4.50\text{‰}$; 黑色石灰土区样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 $+2.70\text{‰} \sim +6.50\text{‰}$ 之间, 平均值为 $+4.27\text{‰}$; 无论是黄壤区样地还是黑色石灰土区样地, 其表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 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; 表土; 氮同位素组成; 空间分异特征

NITROGEN ISOTOPE COMPOSITIONS AND SPATIAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF SOIL IN THE PROCESS OF KARST ROCKY DESERTIFICATION

LUO Xu-qiang^{1,2,3} WANG Shi-jie¹ WANG Cheng-yuan¹

LIANG Yu-hua^{2,3} LIAO Xin-rong^{2,3} YANG Hong-yan^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002;

2. School of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550018;

3. Institute of Resources Environment and Disaster, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550018)

Abstract: Isotopic composition and spatial distribution characteristic of the total nitrogen of the surficial soil in karst rocky desertification area, including different types, different grades and different disturbed modes karst rocky desertification within the same small catchment, which belong to the Wangjiazhai peak-cluster depression basin and located in Qingzhen City, Guizhou Province were discussed in this study. Results showed that $\delta^{15}\text{N}$ values of total nitrogen in top soil in yellow soil area were mainly between $+0.35\text{‰} \sim +6.82\text{‰}$ with the average of $+4.50\text{‰}$, and between $+2.70\text{‰} \sim +6.50\text{‰}$ in black calcareous with the average of $+4.27\text{‰}$. In both yellow soil area and black calcareous area, there were no significant difference in the $\delta^{15}\text{N}$ values of total nitrogen on sample lands of rocky desertification at different levels, different ways of interruption and different slope positions, and no obvious difference on the whole ($P \leq 0.05$), which is mainly due to the high habitat heterogeneity of karst area.

收稿日期: 2011-03-04 接受日期: 2011-05-24

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项重大课题(XDA05070400), 国家自然科学基金项目(31100187), 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2010]2027号), 贵州省教育厅自然科学基金重点项目(20090128), 贵州省高层次人才科研条件特助经费项目(TZJF2010065)

作者简介: 罗绪强(1976-), 男, 贵州遵义人, 博士, 副教授, 研究方向为环境地球化学。E-mail: xuqiangluo@163.com

通讯作者: 王世杰(1966-), 男, 浙江台州人, 博士, 研究员, 研究方向为岩溶环境与地球化学。E-mail: Wangshijie@vip.skleg.cn

Key words: karst rocky desertification; surface soil; composition of nitrogen isotope; spatial distribution characteristics

氮是自然和人工生态系统中最重要也是行为最为活跃的元素之一,氮素在生态系统中的循环大致可分为输入、转化和输出 3 个过程^[1-8]。由于化学转化、物理运输等原因,氮素循环诸过程都有可能使其发生同位素分馏^[9-17]。已有资料表明,各种自然因素和人为因素对土壤¹⁵N 自然丰度变异都有明显影响,土壤¹⁵N 自然丰度变异与土壤形成条件和性质、土壤类型及其利用方式、土壤 pH 值、土壤动物及微生物活性、土壤生物、气候和环境等因素密切相关,不同土壤¹⁵N 自然丰度的变异是一定环境生态条件下土壤氮素转化迁移过程的一种标记,在一定程度上反映了不同生态系统中氮素循环的特征^[13,14,18-27]。

喀斯特石漠化(Karst Rocky Desertification)是在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下,受人类不合理的社会经济活动干扰破坏,造成土壤严重侵蚀,基岩大面积出露,土地生产力严重下降,地表出现类似荒漠化景观的土地退化过程^[28,29],是土地荒漠化的主要类型之一,其实质就是土地退化^[30]。在喀斯特石漠化过程中,常伴随着强烈的水土流失,土壤有机质含量下降、质地粘重,土壤 pH 及阳离子交换量(CEC)降低,光照增强、土壤水分蒸散和植物蒸腾速率加快等一系列土壤性状与环境条件的改变,直接或间接地影响着土壤动物和微生物的种类及活性,进而影响到土壤氮素的赋存状态、迁移和转化等诸多过程^[18,31-38]。因此,从生态系统的观点出发,深入研究喀斯特石漠化过程中土壤¹⁵N 自然丰度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^[19]。

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土壤氮同位素组成及其空间分异特征进行对比研究,探讨了喀斯特石漠化过程中土壤氮同位素组成变异的影响因素及其相关关系,为进一步应用土壤-植物系统 $\delta^{15}\text{N}$ 变异,定量研究喀斯特石漠化过程中植物的氮需求和氮分配,特别是在深入理解喀斯特地区氮的生物地球化学循环过程方面提供基础数据和理论支持。

1 研究区概况

研究地位于贵州省清镇市红枫湖镇簸箩村王家寨小流域,东经 $106^{\circ}20'5''\sim 106^{\circ}21'8''$,北纬 $26^{\circ}31'45''\sim$

$26^{\circ}30'27''$,喀斯特分布面积达 95%,流域面积约 2.4 km²。该区岩性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 1451.1 m,最低点 1275.0 m;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⁻²,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以黑色石灰土和黄壤为主,洼地以北的峰丛坡面土壤以黑色石灰土为主,而洼地以南的峰丛坡面由于地势相对较为平缓,坡度较小,主要以湖泊沉积物堆积风化而成的黄壤为主。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,峰丛以灌木林和草地为主,乔木仅存于村寨附近的风水林,以“绿岛”的形式点缀在喀斯特石漠化土地上。流域内石漠化发育完全,等级明显,小生境类型复杂,人为干扰方式多样化,具有较大的代表性。

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^[39],在不同土壤类型、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 10 m 设置一个约 5 m × 5 m 的样方。由于无石漠化山坡高差较小,样地面积需求较大(20 m × 20 m),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

在不同土壤类型、不同干扰方式背景区分别按石漠化程度进行采样,共采集样品 20 份。样品采集过程中,若样地中的土壤基本连片存在,土被(regolith)连续,则按一般土壤采样规则对每个样地采集表层混合样;而对土被不连续的样地则采用权重取样法^[40],即首先对设置样地划分小生境类型^[41,42],由各类小生境面积权重确定的该类土壤样品量混合组成样地土壤代表样。由于研究区内土层均较为浅薄,考虑到样地间的可比性,所有样地采样深度均为 0~15 cm,不足 15 cm 的将土壤厚度作为采样深度。

2.3 样品分析

土壤理化性质采用常规分析方法测定分析^[43]。其中,含水量的测定采用烘干法;pH采用电位法,在水:土为2.5:1条件下用pH计测定(20℃);有机质含量采用重铬酸钾外加热法;碱解氮含量采用扩散法;N全量采用元素分析仪(PE2400-II)测定。

土壤氮同位素比率采用MAT-252质谱仪进行测试。用四分法将粉碎过0.073mm筛的土壤样品60~120mg置于经过高温处理过的石英管底部,依次加入过量的CuO(约2~4g)和Cu丝(约1~2g),在自制高真空气体纯化系统上纯化封管,置于马弗炉中850℃灼烧5~6h,使土壤中的氮全部转化为N₂,缓慢冷却取出,在自制外接液氮冷阱配合下将N₂纯化后,尽快上气体同位素质谱仪(MAT-252)进行氮同位素测定。测试过程中,每测试15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(δ¹⁵N)由国际通用标准形式给出:

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

3 结果与分析

3.1 不同类型土壤氮同位素组成及其频数分布

3.1.1 黄壤 流域内黄壤区表土全氮的δ¹⁵N值主要分布在+0.35‰~+6.82‰之间,平均值为+4.50‰,平均标准误差为0.57‰,标准偏差为1.96‰,全距为6.47‰,方差(离散)为3.83‰,变异系数(CV)为43.52%(表1)。其中83.3%的δ¹⁵N值数据分布在+0.96‰~+6.33‰之间,分布在+0.35‰~+0.96‰之间和+6.33‰~+6.82‰之间的数据各占8.3%,δ¹⁵N值频数分布曲线的偏度和峰度分别为-1.24和0.95(图1)。

3.1.2 黑色石灰土 黑色石灰土区表土全氮的δ¹⁵N值主要分布在+2.70‰~+6.50‰之间,平均值为+4.27‰,平均标准误差为0.41‰,标准偏差为1.16‰,全距为3.80‰,方差(离散)为1.34‰,变异系数(CV)为27.10%(表1)。其中87.5%的数据分布在+0.96‰~+6.33‰之间,其余12.5%的数据全部分布在+6.33‰~+6.82‰之间,δ¹⁵N值频数分布曲线的偏度和峰度分别为0.76和1.25(图2)。与同流域内黄壤区表土全氮δ¹⁵N值相比存在较大差异,黑色石灰土区表土全氮δ¹⁵N值没有数据分布在+0.35‰~+0.96‰之间,分布区间较黄壤区窄,数据相对较为集中,但整体较黄壤区偏负。

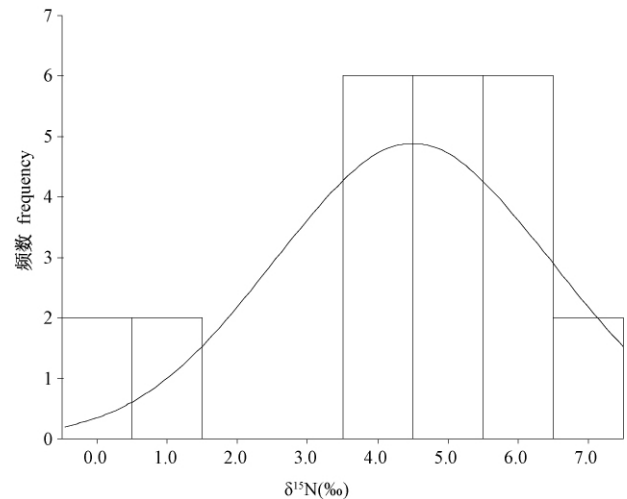


图1 黄壤区表土全氮δ¹⁵N值的频数分布直方图

Fig. 1 Frequency histogram for δ¹⁵N values of surface soil total nitrogen in yellow soil area

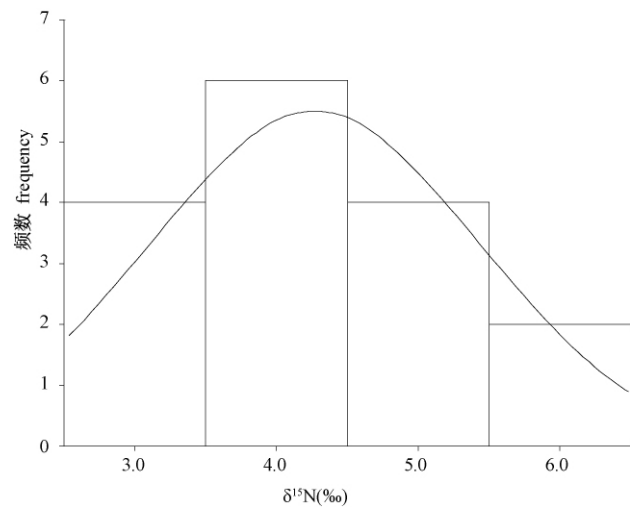


图2 黑色石灰土区表土全氮δ¹⁵N值的频数分布直方图

Fig. 2 Frequency histogram for δ¹⁵N values of surface soil total nitrogen in black calcareous soil area

3.2 不同类型土壤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样地的表土全氮δ¹⁵N值主要分布在+0.35‰~+6.82‰之间,均值为4.16‰,变异系数为66.24%;中度石漠化样地的表土全氮δ¹⁵N值主要分布在+3.77‰~+5.68‰之间,均值为4.83‰,变异系数为15.40%。强度石漠化样地的表土全氮δ¹⁵N值总体上较中度石漠化样地偏负,但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。受开垦干扰样地的表土全氮δ¹⁵N值主要分

布在 +0.35‰ ~ +5.43‰ 之间,均值为 3.48‰,变异系数为 62.43%;受放牧干扰样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +3.77‰ ~ +6.82‰ 之间,均值为 5.52‰,变异系数为 20.03%。受开垦干扰样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值总体上较受放牧干扰样地偏负,但受放牧干扰样地的数据相对较为集中,分布区间较受开垦干扰样地窄。不同坡位样地间表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化趋势为中坡 < 上坡 < 下坡。其中,上坡位样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +1.16‰ ~ +6.09‰ 之间,均值为 4.34‰,变异系数为 50.59%;中坡位样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +0.35‰ ~ +6.07‰ 之间,均值为 3.60‰,变异系数为 66.24%;下坡位样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +4.49‰ ~ +6.82‰ 之间,均值为 5.55‰,变异系数为 17.52%。不同坡位间的样地表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值数据在下坡位分布最为集中,上坡位次之,中坡位最分散。

石漠化过程中,由于土壤条件和环境因素的不同,土壤氮素的来源、含量、赋存状态及迁移转化速率等均

存在较大差异,导致表土全氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变率较大。但经单因素方差和多重比较分析结果表明,流域内黄壤区表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值无论是在各等级石漠化样地间,还是在不同干扰方式环境下,甚至是在不同坡位上都无显著性差异体现($P \leq 0.05$)。

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表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化趋势为无石漠化 < 轻度石漠化 < 中度石漠化,基本随石漠化程度的加深而趋正。其中,无石漠化样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +3.19‰ ~ +4.21‰ 之间,均值为 3.70‰,变异系数为 19.50%;轻度石漠化样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +2.70‰ ~ +4.81‰ 之间,均值为 3.83‰,变异系数为 27.73%;中度石漠化样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在 +3.96‰ ~ +6.50‰ 之间,均值为 5.09‰,变异系数为 25.36%。无石漠化样地表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值最负,数据分布也最集中,轻度石漠化样地次之,但其数据分布最为分散,说明轻度石漠化系统不稳定,受干扰

表 1 土壤基本理化特征及表土全氮同位素组成

Table 1 Soil basic characteristics and $\delta^{15}\text{N}$ values of total nitrogen of surface soil in study area

样地 plot	等级 grade	坡位 slope position	干扰方式 disturbed mode	土壤类型 soil type	含水量 water content (%)	pH	有机质 organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 total nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 available nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	C/N	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
1	SRD	US	RC	YS	30.2	6.60	44.79	2.73	0.20	9.52	1.16
2	SRD	MS	RC	YS	27.3	6.81	45.84	3.36	0.16	7.91	0.35
3	SRD	DS	RC	YS	28.3	6.75	50.48	2.32	0.20	12.62	4.49
16	SRD	US	GR	YS	34.7	6.79	90.82	4.02	0.33	13.10	6.09
17	SRD	MS	GR	YS	29.7	6.75	99.06	6.26	0.39	9.18	6.07
18	SRD	DS	GR	YS	27.0	5.86	57.36	3.34	0.26	9.96	6.82
4	MRD	US	GR	YS	28.4	6.49	112.61	5.89	0.45	11.09	4.67
5	MRD	MS	GR	YS	29.2	7.07	93.13	5.36	0.32	10.08	3.77
6	MRD	DS	GR	YS	30.3	6.31	63.70	2.84	0.29	13.01	5.68
7	MRD	US	BU	BCS	31.8	7.80	281.41	11.46	0.65	14.24	3.96
9	MRD	MS	BU	BCS	33.2	7.78	196.21	8.96	0.52	12.70	6.50
10	MRD	DS	BU	BCS	30.1	7.89	261.72	8.99	0.54	16.89	4.83
11	MRD	US	RC	YS	28.6	6.95	99.04	4.43	0.33	12.97	5.43
12	MRD	MS	RC	YS	30.3	7.34	100.27	5.58	0.31	10.42	4.20
13	MRD	DS	RC	YS	31.6	6.74	60.53	3.21	0.23	10.94	5.23
22	LRD	US	GR	BCS	32.5	7.53	150.19	8.24	0.47	10.57	2.70
23	LRD	MS	GR	BCS	16.9	7.86	284.01	9.08	0.42	18.14	3.97
24	LRD	DS	GR	BCS	30.5	7.81	260.32	8.00	0.42	18.88	4.81
25	NRD	US	WC	BCS	21.7	7.58	331.40	13.81	0.66	13.92	4.21
26	NRD	MS	GR	BCS	25.8	7.55	220.93	10.42	0.59	12.30	3.19

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。

Note: ①Grades: SRD: strong rocky desertification; MRD: medium rocky desertification; LRD: slight rocky desertification; NRD: no rocky desertification. ② slope position: US: upslope; MS: midslope; DS: downslope. ③disturbed modes: RC: reclamation; GR: grazing; WC: wood chopping; BU: burning.

④soil types: YS: yellow soil; BCS: black calcareous soil.

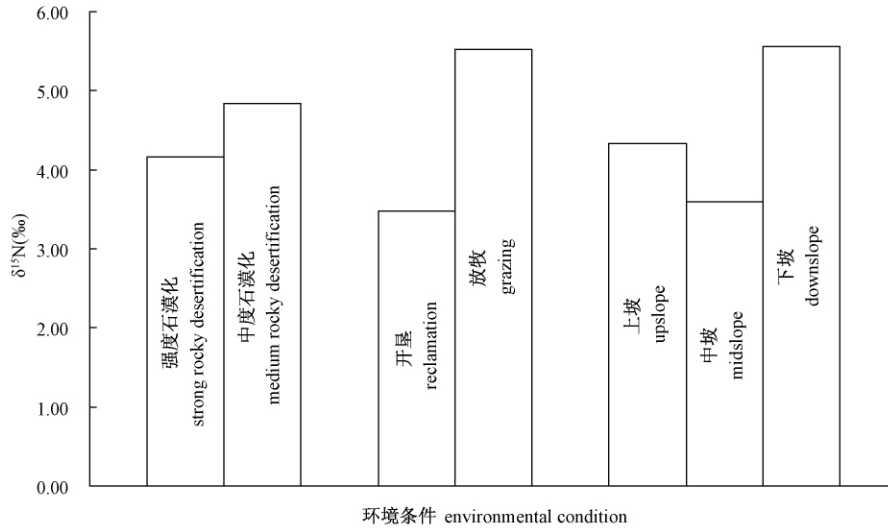


图 3 不同环境条件下黄壤区表土全氮 δ¹⁵N 均值

Fig. 3 Average values of δ¹⁵N of surface soil total nitrogen in different environmental condition in yellow soil area

破坏极易向高级石漠化发展。受不同干扰方式影响的样地其表土全氮 δ¹⁵N 值的变化趋势为放牧 < 樵采 < 火烧。其中,受放牧干扰样地的表土全氮 δ¹⁵N 值主要分布在 + 2.70‰ ~ + 4.81‰ 之间,均值为 3.67‰,变异系数为 25.15%;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,均值为 4.21‰。不同坡位样地间表土全氮 δ¹⁵N 值的变化趋势为上坡 < 中坡 < 下坡,基本沿坡面自下而上逐渐偏负。其中,上坡位样地的表土全氮 δ¹⁵N 值主要分布在 + 2.70‰ ~ + 4.21‰ 之间,均值为 3.62‰,变异系数为 22.32%;中坡位样地的表土全氮 δ¹⁵N 值主要分布在 + 3.19‰ ~ + 6.50‰ 之间,均

值为 4.55‰,变异系数为 37.94%;下坡位样地的表土全氮 δ¹⁵N 值主要分布在 + 4.81‰ ~ + 4.83‰ 之间,均值为 4.82‰,变异系数为 0.28%。与同流域内黄壤区的分布情况相似,黑色石灰土区不同坡位间样地表土全氮 δ¹⁵N 值的数据在下坡位分布最为集中,上坡位次之,中坡位最分散。单因素方差和多重比较分析结果表明,流域内黑色石灰土区样地表土全氮 δ¹⁵N 值在各等级石漠化样地间、不同干扰方式环境下和不同坡位上都无显著性差异 (P ≤ 0.05)。

3.2.3 不同类型土壤样地表土氮同位素组成的比较

同流域内黄壤区与黑色石灰土区相比,同为中度石漠化背景,黄壤样地的表土全氮 δ¹⁵N 值较黑色石灰

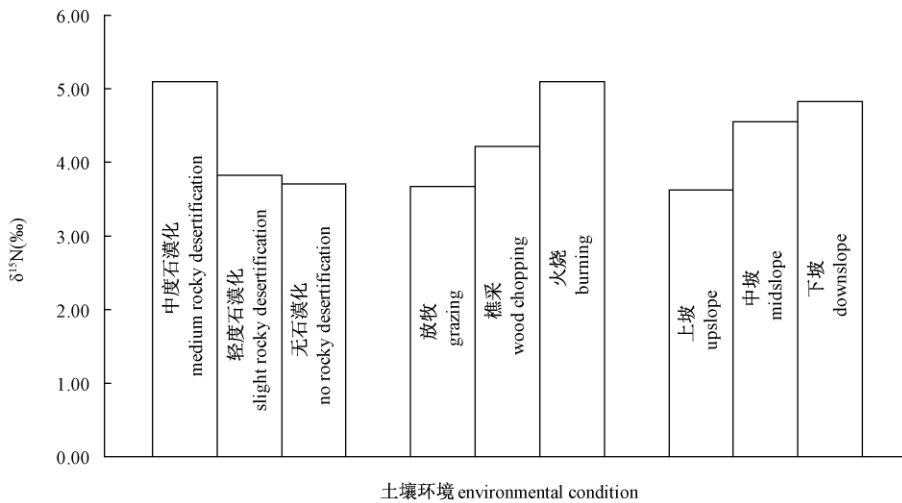


图 4 不同环境条件下黑色石灰土区表土全氮 δ¹⁵N 均值

Fig. 4 δ¹⁵N mean values of surface soil total nitrogen in different environmental condition in black calcareous soil area

土样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏负 0.26 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位;但在受放牧干扰背景下,黄壤样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值却比黑色石灰土样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏正 1.85 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位;而在不同坡位上,黄壤样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值除中坡位较黑色石灰土样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏负 0.96 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位外,上坡位和下坡位分别较黑色石灰土样地土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏正 0.71 和

0.74 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位。

3.3 土壤氮同位素组成与土壤理化性质之间的关系

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土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值与土壤 pH 值、含水量、有机质含量及全氮、碱解氮含量和 C/N 间均无显著相关关系 ($P \leq 0.05$)。

表 2 黄壤区土壤氮同位素组成与土壤基本理化特征间的相关性

Table 2 Correlations between $\delta^{15}\text{N}$ values of surface soil total nitrogen and soil basic conditions in yellow soil area

因子 factor	$\delta^{15}\text{N}$	pH	含水量 water content	有机质 organic matter	全氮 total nitrogen	碱解氮 available nitrogen
pH	-0.31					
含水量 water content	0.24	0.27				
有机质 organic matter	0.43	0.40	0.20			
全氮 total nitrogen	0.22	0.41	0.01	0.90**		
碱解氮 available nitrogen	0.53	0.08	0.16	0.93**	0.83**	
C/N	0.57	-0.02	0.42	0.22	-0.22	0.24

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

Note: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$. The same as following table.

表 3 黑色石灰土区土壤氮同位素组成与土壤基本理化特征间的相关性

Table 3 Correlations between $\delta^{15}\text{N}$ values of surface soil total nitrogen and soil basic conditions in black calcareous soil area

因子 factors	$\delta^{15}\text{N}$	pH	含水量 water content	有机质 organic matter	全氮 total nitrogen	碱解氮 available nitrogen
pH	0.59					
含水量 water content	0.25	0.01				
有机质 organic matter	0.12	0.33	-0.60			
全氮 total nitrogen	-0.13	-0.34	-0.37	0.66		
碱解氮 available nitrogen	-0.07	-0.32	0.04	0.38	0.87**	
C/N	0.30	0.78*	-0.36	0.59	-0.22	-0.44

4 讨论

森林植被下的土壤,其表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值一般较负,而荒漠土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值一般较正,草原土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值在森林土壤与荒漠土壤之间^[19, 44-48]。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,岩石裸露率增加,光照强度增强,大气相对湿度降低,蓄水保土功能下降,地表枯落物层逐渐减少直至消失^[18, 29, 31, 39, 49, 50],使每年进入土壤的来自生物固定的氮减少,加之来自贫¹⁵N 的降水氮流失加快,有利于¹⁵N 富集的氮挥发增加,导致表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值趋正^[19, 33, 34, 36, 51]。

本研究中,流域内黄壤区和黑色石灰土区表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值分别较我国森林土壤表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值(+0.96‰)偏正 3.54 和 3.31 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位,分别较荒漠土壤表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值(+10.85‰)偏负 6.35 和 6.58 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位,两类土壤表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值均与草原土壤表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值(+6.33‰)接近,分别偏负 1.83 和 2.06 个 $\delta^{15}\text{N}$ 单位^[19]。

石漠化的形成是自然因素和人为因素共同作用的结果,但究其根本,最主要的成因还是人为因素^[52]。研究区内石漠化的人为干扰类型主要有放牧、樵采、火烧、开垦等,不同人为干扰方式及干扰时间对土壤的干扰过程和干扰效应是不一样的,主要体现在对地表植被的影响上,地表植被的变异使群落归还生物量和土壤环境产生差异,导致土壤氮素的输入、输出及周转模

式发生改变^[18, 39, 53],不同的氮循环过程使土壤氮素的分馏效应不同,最终导致不同干扰方式环境下的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在较大差异。

由于地表径流沿坡面自上而下的运动造成土壤物质的同向迁移及再分配,导致包括土壤水分、有机质、全氮、碱解氮等一系列的土壤理化指标在上坡、中坡与下坡之间均有明显差异(表 1)。土壤性状和环境条件的改变,直接影响到土壤动物及微生物的种类、数量和活性,而这些因素对土壤氮素转化、迁移等生物地球化学循环起着至关重要的作用,是土壤氮素分馏的主要影响因素。

黄壤是喀斯特地区的地带性土壤,但石灰土也是该区的主要土壤类型。研究区的黄壤主要分布于坡度较小、地势较低的峰丛坡面上,土层较厚,分层明显,整个坡面受人为干扰频繁,主要以开垦和放牧为主^[18, 39]。垦殖过程中,土壤氮素循环由于受施肥、翻耕等人为因素影响较大,土壤氮源也较复杂,加之强度石漠化区的开垦程度较中度石漠化更强,使黄壤区样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同干扰方式间和不同等级石漠化间的变异趋势分别呈现出开垦 < 放牧和强度 < 中度的特征。另外,由于黄壤区坡型多为凹坡,土壤物质同向迁移及再分配的速率相对较为缓慢且容易在中坡聚集,导致黄壤区样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同坡位间呈现出中坡 < 上坡 < 下坡的变化趋势,且数据分布较分散。

黑色石灰土主要分布于地势陡峭、地形崎岖的区域,只在一些开放性不强的石沟、石缝、石坑等负地形中存在,剖面分化不明显,受人为干扰类型主要以放牧、樵采和火烧为主^[18, 39]。土壤氮源及氮素循环受人为因素的影响相对较小,使黑色石灰土区样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值更具规律性,在不同等级石漠化样地间的变化趋势为无石漠化 < 轻度石漠化 < 中度石漠化,基本随石漠化程度的加深而趋正,在受不同干扰方式影响的样地间的变化为放牧 < 樵采 < 火烧,同样也有随干扰程度的加深而趋正的趋势。除此之外,黑色石灰土区的坡型多为直坡,土壤物质同向迁移及再分配的速率相对于同流域内的黄壤区更为迅速,且由于地势陡峭,不同坡位受干扰强度有自下而上依次呈减弱的趋势,这使得黑色石灰土区样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值在不同坡位间的变化趋势为上坡 < 中坡 < 下坡,基本沿坡面自上而下逐渐偏正。

在放牧干扰背景下和除中坡位外的不同坡位上,黑色石灰土区样地的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值均较对应的黄壤区样地土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏负,整体上也是黑

色石灰土区较黄壤区偏负,这与流域内黑色石灰土区的植被覆盖度普遍高于黄壤区密切相关。黑色石灰土区样地土壤有机质含量较高和湿度较大的特征(表 1)使土壤中的氮挥发速率降低,并较好地阻截了贫¹⁵N 的降水氮的流失;同时,渍水条件下氮素的赋存状态和转化速率与旱地条件存在明显差异,在渍水条件下,硝化作用受到严重抑制,矿化作用也相对减弱,而固氮作用则较强。而同为中度石漠化背景和中坡位,黄壤样地土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值均较黑色石灰土样地土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏负,这可能主要与黄壤区土层较厚、具开垦历史及其凹坡特征有关。

5 结论

喀斯特石漠化常伴随着土壤性状与环境条件的改变,直接或间接地影响着土壤氮素的赋存状态、迁移和转化等诸多过程,由于化学转化、物理运输等原因,氮素循环诸过程都可能使氮素发生同位素分馏。土壤¹⁵N 自然丰度与土壤类型、地形、植被、土地利用与管理方式、水热条件等因素密切相关,研究区各环境条件下表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值变异的实质是土壤-植物系统氮素形态转化及其生物地球化学循环过程的综合响应和体现。同流域内两类土壤的表土全氮 $\delta^{15}\text{N}$ 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。

参考文献:

- [1] 何道文,孙辉,黄雪菊. 利用 N-15 自然丰度法研究固氮植物生物固氮量[J]. 干旱区农业研究, 2004, 22(3): 132-137
- [2] 韩兴国,李凌浩,黄建辉. 生物地球化学概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 197-231
- [3] 樊后保,苏兵强,林德喜,陈世品. 杉木人工林生态系统的生物地球化学循环 II: 氮素沉降动态[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 133-137
- [4] 沙丽清,郑征,冯志立,刘玉洪,刘文杰,孟盈,李明锐. 西双版纳热带季节雨林生态系统氮的生物地球化学循环研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 689-694
- [5] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted south American forests mainly via dissolved organic compounds[J]. Nature, 2002, 415: 416-419
- [6] 侯立军,刘敏,许世远,欧冬妮,刘巧梅,刘华林,蒋海燕. 潮滩生态系统中生源要素氮的生物地球化学过程研究综述[J]. 地球科学进展, 2004, (05): 82-89
- [7] 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

- [8] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands [J]. *Nature*, 2008, 451: 712 - 715
- [9] 苏波, 韩兴国, 黄建辉. ^{15}N 自然丰度法在生态系统氮循环研究中的应用 [J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 408 - 416
- [10] 李思亮, 刘丛强, 肖化云. 地表环境氮循环过程中微生物作用及同位素分馏研究综述 [J]. *地质地球化学*, 2002, 30(4): 40 - 45
- [11] Nadelhoffer K J, Fry B. Nitrogen isotope studies in forest ecosystems, In: Lajtha K and Michener R H, eds. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* [M]. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1994: 22 - 44
- [12] Shearer G, Kohl D H. Estimates of N_2 fixation in ecosystems: the need for and basis of the ^{15}N natural abundance method. In: Rundel P W, Ehleringer J R, Nagy K A, eds. *Stable Isotopes in Ecological Research* [M]. New York: Springer-Verlag, 1988: 342 - 374
- [13] Robinson D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2001, 16(3): 153 - 162
- [14] Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, Weathers K C. Plant and soil natural abundance ^{15}N : indicators of relative rates of nitrogen cycling in temperate forest ecosystems [J]. *Oecologia*, 2007, 153: 399 - 406
- [15] Schimann H, Ponton S, Hötterschwiler S, Ferry B, Lensi R, Domenach A M, Roggy J C. Differing nitrogen use strategies of two tropical rainforest late successional tree species in French Guiana: Evidence from ^{15}N natural abundance and microbial activities [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(2): 487 - 494
- [16] 袁玉伟, 赵明, 张志恒, 杨桂玲, 郑纪慈, 王强. 施肥对大白菜中氮同位素及硝酸盐含量的影响 [J]. *核农学报*, 2011, 25(1): 137 - 142
- [17] 孙丰梅, 于洪侠, 吴伟, 杨曙明. 稳定性同位素碳、氮在牛不同组织中的变化规律 [J]. *核农学报*, 2009, 23(3): 462 - 466
- [18] 罗绪强, 王世杰, 张桂玲, 王程媛. 喀斯特石漠化过程中土壤颗粒组成的空间分异特征 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25(12): 227 - 233
- [19] 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
- [20] Högborg P, Johannisson C. ^{15}N abundance of forests is correlated with losses of nitrogen [J]. *Plant Soil*, 1993, 157: 147 - 150
- [21] Högborg P. ^{15}N natural abundance in soil - plant systems [J]. *New Phytol*, 1997, 137: 179 - 203
- [22] Eshetu Z, Högborg P. Effects of land use on ^{15}N natural abundance of soils in Ethiopian highlands [J]. *Plant Soil*, 2000, 222: 109 - 117
- [23] Dyckmans J, Scrimgeour C M, Schmidt O. A simple and rapid method for labeling earthworms with ^{15}N and ^{13}C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 989 - 993
- [24] Dijkstra P, Ishizu A, Doucett R, Hart S C, Schwartz E, Menyailo O V, Hungate B A. ^{13}C and ^{15}N natural abundance of the soil microbial biomass [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 3257 - 3266
- [25] 宋大伟, 李明财, 李来兴, 易现峰, 张晓爱. 高寒草甸消费者种群稳定碳、氮同位素组成的海拔分异 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 40 - 45
- [26] Boeckstaens M, Andre B, Marini A M. The yeast ammonium transport protein Mep2 and its positive regulator, the Npr1 kinase, play an important role in normal and pseudohyphal growth on various nitrogen media through retrieval of excreted ammonium [J]. *Mol Microbiol*, 2007, 64: 534 - 546
- [27] Pörtl K, Zechmeister-Boltenstern S, Wanek W, Ambus P, Berger T W. Natural ^{15}N abundance of soil N pools and N_2O reflect the nitrogen dynamics of forest soils [J]. *Plant Soil*, 2007, 295: 79 - 94
- [28] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨 [J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 101 - 104
- [29] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, land use, impact and rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15: 115 - 121
- [30] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(6): 573 - 582
- [31] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价 [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 639 - 644
- [32] 罗绪强. 植物碳、氮同位素对喀斯特石漠化过程的响应特征研究——以贵州清镇王家寨小流域为例 [D]. 贵阳: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2009
- [33] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌, 卢宗凡. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 1038 - 1044
- [34] 姜桂华. 铵态氮在土壤中吸附性能探讨 [J]. *长安大学学报(建筑与环境科学版)*, 2004, 21(2): 32 - 34
- [35] 黄国弟. 植物氮磷钾营养的土壤化学原理及应用 [J]. *广西热带农业*, 2005, (4): 20 - 22
- [36] 杨小红, 董云社, 齐玉春, 耿远波, 耿会立. 草地生态系统土壤氮转化过程研究进展 [J]. *中国草地*, 2004, 26(2): 54 - 62
- [37] Cabrera-Bosquet L, Molero G, Bort J, Nogues S, Araus J L. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\Delta^{13}\text{C}$ in durum wheat potted plants [J]. *Ann Appl Biol*, 2007, 151: 277 - 289
- [38] Lambers H, Mougél C, Jaillard B, Hinsinger P. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective [J]. *Plant Soil*, 2009, 321: 83 - 115
- [39] 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
- [40] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 谢丽萍, 肖德安. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 475 - 483
- [41] 朱守谦, 何纪星, 祝小科, 魏鲁明. 喀斯特森林小生境特征初步研究 [A]. 朱守谦主编. 喀斯特森林生态研究(I) [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1993: 52 - 62
- [42] 朱守谦, 何纪星, 魏鲁明, 张丛贵, 陈正仁. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究 [A]. 朱守谦主编. 喀斯特森林生态研究(III) [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2003: 38 - 48
- [43] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25 - 200

