

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017061301

郭松, 王立发, 马海欧, 等. 滇东地区土壤剖面氮同位素垂直分异及空间分异特征[J]. 环境化学, 2018, 37(2): 279-286.  
GUO Song, WANG Lifa, MA Haiou, et al. Vertical distribution and spatial differentiation characteristics of nitrogen isotope in soil profile of Eastern Region of Yunnan Province [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(2): 279-286.

滇东地区土壤剖面氮同位素垂直分异及空间分异特征\*

郭 松<sup>1</sup> 王立发<sup>2</sup> 马海欧<sup>1</sup> 李双双<sup>1</sup> 蔡晓娟<sup>1</sup> 季宏兵<sup>1\*\*</sup>

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京, 100083; 2. 北京市地质工程设计研究院, 北京, 100120)

**摘 要** 选取云南石林县不同土壤类型、不同石漠化等级以及不同人为干扰方式影响下的 7 处典型的土壤剖面为研究对象, 研究了剖面中氮同位素垂直分异及空间分异特征. 结果表明, 土壤中 pH 值为 3.68—6.07, 全部土壤剖面呈酸性, 总有机碳 (TOC) 为 0.58—29.25 g·kg<sup>-1</sup>, 碳氮比 (C/N) 为 1.33—14.70,  $\delta^{15}\text{N}$  介于 1.44‰—14.86‰, 在随深度的垂直分异中, 受剖面中腐殖质层和硝化反硝化反应的影响, 土壤中稳定氮同位素呈现一定的规律性变化. 在各个剖面之间的空间分异中, 两种不同土壤类型下  $\delta^{15}\text{N}$  值的分散程度均存在轻度石漠化剖面>中度石漠化剖面>强度石漠化剖面的规律. 同时在受人为影响较小的红壤剖面  $\delta^{15}\text{N}$  值大致呈现强度石漠化剖面>中度石漠化剖面>轻度石漠化剖面的规律. 采样区内无论是石灰岩土壤剖面还是红壤剖面  $\delta^{15}\text{N}$  值与土壤理化性质均无显著相关关系.

**关键词** 碳酸盐岩, 喀斯特石漠化, 氮同位素.

Vertical distribution and spatial differentiation characteristics of nitrogen isotope in soil profile of Eastern Region of Yunnan Province

GUO Song<sup>1</sup> WANG Lifa<sup>2</sup> MA Haiou<sup>1</sup> LI Shuangshuang<sup>1</sup> CAI Xiaojuan<sup>1</sup> JI Hongbing<sup>1\*\*</sup>

(1. Energy & Environment Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing, 100083, China;  
2. Beijing Institute of Geological Engineering Design, Beijing, 100120, China)

**Abstract:** Seven typical soil profiles under the influence of different soil types, different rocky desertification levels and different human disturbance modes in Shilin County of Yunnan Province were selected as the object of study to investigate the vertical distribution and spatial differentiation of nitrogen isotopes. The results showed that the soil pH was 3.68 to 6.07, the total soil profile was acidic, the total organic carbon (TOC) was 0.58 g·kg<sup>-1</sup> to 29.25 g·kg<sup>-1</sup>, the C/N ratio was 1.33 to 14.70, and  $\delta^{15}\text{N}$  was 1.44‰ to 14.86‰. In the vertical differentiation with depth, the stable nitrogen isotope in the soil showed some regular changes because of the humus layers and nitrification-denitrification. In the spatial differentiation between the profiles, the degree of  $\delta^{15}\text{N}$  dispersion in the two different soil types was mild rocky desertification profile>moderate rocky desertification profile>intensity rocky desertification profile. At the same time, the  $\delta^{15}\text{N}$  values of the red soil profile, which were less affected by man-made, showed the intensity of rocky desertification profile>moderate rocky desertification profile>mild rocky desertification profile. There was no significant correlation between  $\delta^{15}\text{N}$  and soil physical and chemical properties in both the limestone soil profile and the red soil

2017 年 6 月 13 日收稿 (Received: June 13, 2017).

\* 国家自然科学基金 (41473122) 和科技部 973 项目 (2013CB956700) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41473122) and National Basic Research Program of China (2013CB956700).

\*\* 通讯联系人, E-mail: jih\_0000@126.com

Corresponding author, E-mail: jih\_0000@126.com

profile.

**Keywords:** carbonate rocks, karst rocky desertification, nitrogen isotopes.

云南省石林县地处云贵高原,是典型的岩溶地貌,具有地形条件复杂,成土速度慢,植物生长缓慢,生态环境脆弱,水土流失严重等特点<sup>[1]</sup>.国内外氮同位素示踪主要集中在非岩溶区的森林以及农田生态系统的研究,对于岩溶地区生态系统的研究较少<sup>[2-3]</sup>.氮是自然和人工生态系统中最重要元素之一,氮素在生态系统中的循环可大致分为输入、转化和输出等3个过程.这3个过程中都可能发生同位素分馏.已有资料表明,各种自然因素和人为因素对土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 都有明显影响,一般地,土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤形成条件、性质、土壤类型及利用方式、土壤pH、土壤生物、气候和环境等因素密切相关,不同土壤剖面 $^{15}\text{N}$ 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,一定程度上反映了不同生态系统中氮素循环的特征<sup>[4-6]</sup>.深入研究喀斯特岩溶地区石漠化过程中土壤氮同位素自然丰度的变异特征,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<sup>[7]</sup>.

本文选取云南省石林县受岩溶环境影响的7个典型土壤剖面为研究对象,通过对剖面的pH、TOC、C/N等基本理化性质以及稳定氮同位素垂直及空间分异特征的探究,旨在探寻石漠化地区氮的生物地球化学循环规律,为表征和认识全球范围内的喀斯特地区生物地球化学循环提供参考,为喀斯特地区生态环境保护和治理提供理论依据.

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省石林县(24°30'—25°03'N, 103°10'—104°40'E),地势东高西低,气候属亚热带高原季风气候,分干湿两季,气温年平均变化小,昼夜温差大<sup>[8]</sup>.石林县处于滇东地区岩溶分布地带,是喀斯特地貌的典型代表,属岩溶山地,石多土少,土壤极易流失,难以再生,植被生长困难,降雨调节能力差,区域内的成土母岩主要有:碳酸盐岩类、砂岩、页岩、泥岩和玄武岩等.主要土壤类型为红壤和石灰岩土壤<sup>[9-11]</sup>.

### 1.2 样品采集

通过室内调研和野外勘查,按照土壤类型、土壤受石漠化影响程度以及受人为干扰方式,分别选取大坡(DP)、偏头山(PTS)、清水塘(QST)、三家村(SJC)、石林景区1号(SL1)、石林景区2号(SL2)、西纳村(XNC)等7个采样剖面.本次采样使用间隔取样方法,自上而下依次采集,大坡采样剖面深度为110 cm,间隔10 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品12个,样品编号自上而下依次为DP-1—DP-12;偏头山采样剖面深度为280 cm,上部(0—130 cm)间隔15 cm采样,下部(130—280 cm)间隔30 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品12个,样品编号自上而下依次为PTS-1—PTS-12;清水塘采样剖面深度为120 cm,上部(0—40 cm)间隔10 cm采样,下部(40—120 cm)间隔20 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品8个,样品编号自上而下依次为QST-1—QST-8;三家村采样剖面深度为200 cm,间隔20 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品11个,样品编号自上而下依次为SJC-1—SJC-11;石林1号采样剖面深度为45 cm,间隔5 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品10个,样品编号自上而下依次为SL1-1—SL1-10;石林2号采样剖面深度为108 cm,间隔12 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品10个,样品编号自上而下依次为SL2-1—SL2-10;西纳村采样剖面深度为240 cm,上部(0—50 cm)间隔10 cm采样,下部(50—240 cm)间隔30 cm采样,采样重量1 kg,共采集样品11个,样品编号自上而下依次为XNC-1—XNC-11.其中SL1、SL2、XNC、PTS、DP等4个剖面上覆植被较为丰富,含有较厚的腐殖质层,QST、SJC两个剖面上覆植被较少,未发现腐殖质层.具体采样位置见图1.

### 1.3 测试方法

所有土壤样品经采集后放置于塑封袋内,剔除草根、碎石等杂物,将样品放于阴凉处自然风干.取一部分样品研磨至200目,并用自封袋封装,分别用于土壤TOC、TN、C/N、 $\delta^{15}\text{N}$ 的测定.其中pH值的测定

采用电位法<sup>[12]</sup>,取一定量通过 1 mm 筛孔的风干土样在液土比为 2.5 : 1 条件下用 pH 计(哈希 HQ40D)测定,TOC、TN 和 C/N 取一定量风干后的土样用德国 Elementar vario MACRO cube 有机元素分析仪测定,检测误差<0.5%.

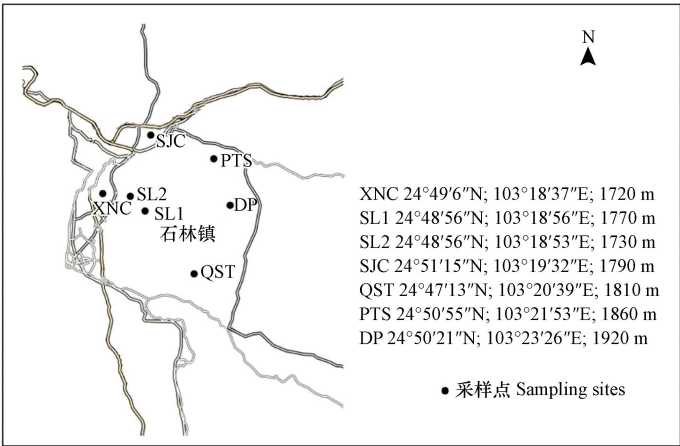


图 1 研究区域及采样点分布  
Fig.1 Study area and distribution of the sampling sites

土壤氮同位素测定采用德国 Finnigan Mat 公司生产的 MAT-252 型气体同位素质谱仪,在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完成测试.测定时将磨好的土壤样品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—4 g)和 Cu 丝(约 1—2 g),在自制真空气体纯化系统上纯化封管,置于马弗炉中 850 ℃灼烧 5—6 h,使土壤中的氮全部转化为 N<sub>2</sub>,冷却后缓慢取出,在自制外接液氮冷阱配合下将 N<sub>2</sub>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<0.05‰,稳定氮同位素(δ<sup>15</sup>N)由国际通用标准形式给出:

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

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 土壤理化性质

如图 2 所示,各个剖面 pH 值在 3.68—6.07 之间变化,均呈酸性.随着土壤深度的增加,土壤 pH 的变化均存在不同的差异性,其中 XNC、SJC 两个剖面的变化幅度较大,其原因可能是由于该两处剖面均属于强度石漠化剖面,因受石漠化影响严重,使得土壤系统被破坏,从而造成 pH 值呈现较大波动.

土壤剖面 TOC 具有高度变异性,变化范围为 0.58—29.25 g·kg<sup>-1</sup>,整体上表现为从表土层到底层逐渐减少,且在表土层中含量差别较大,而剖面下层 TOC 含量则较为稳定,并逐渐稳定在 0.60 g·kg<sup>-1</sup>左右,证明表层土中有机质含量受到外源植被的影响较大,而剖面下层因主要受内源影响,差别较小.其中 SL1 剖面因受畜牧等人为活动的影响,且 SL1 剖面采样深度较浅,未能反映整个土层形态,从而造成 SL1 剖面与其他剖面呈现较大差异.

土壤剖面 C/N 具有高度变异性,变化范围为 1.33—14.70,整体上表现为从表土层到底层逐渐减少.研究区表土层 C/N 有明显差异,这是由于输入到土壤中的植物残体的 C/N 不同.同时各个剖面的变化也存在差异性,这种差异是由不同地区的水热条件和成土作用特征以及土壤形态的差异所引起的<sup>[13-14]</sup>,各个剖面受石漠化影响的程度不一,造成氮素的迁移、转化受到影响而发生改变,从而造成 C/N 各个剖面均呈现较大差异.

综上,7 个剖面的 pH、TOC、C/N 均存在较大差异,这主要是因为 7 个剖面分属于石灰岩土壤以及红壤两种不同的土壤类型,同时各个剖面所受石漠化的影响程度不一,造成土壤被破坏而退化的程度不一,正常的碳氮等生物化学循环受此影响而发生改变所导致的,从而造成 7 个剖面基本理化性质存在较大差异.

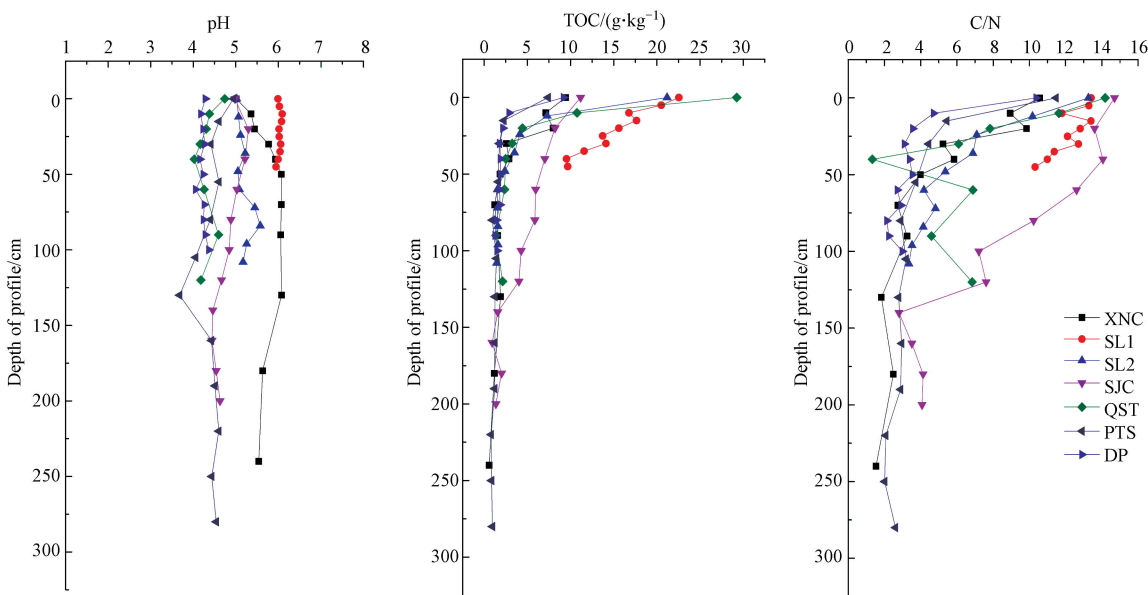


图 2 剖面中 pH、TOC 和 C/N 分布特征  
Fig.2 Profile distribution characteristics of pH, TOC and C/N

2.2 氮同位素深度变化特征

如图 3 所示,土壤  $\delta^{15}\text{N}$  在不同深度存在很大差异,变化范围为 1.44‰—14.86‰整体上,表土层变化幅度较大,且随着土壤深度的增加,大部分的  $\delta^{15}\text{N}$  变化幅度减小并趋于稳定.一般地,表土层是植被枯枝落叶的主要接受层,受腐殖质层的影响较强, $\delta^{15}\text{N}$  呈现增大的趋势;中层土壤因微生物含量减少,硝化反应和反硝化反应被抑制, $\delta^{15}\text{N}$  呈现减小的趋势;下层土壤由于矿化作用的影响, $\delta^{15}\text{N}$  又呈现增大的趋势.这种变化趋势与许多文献研究基本相符<sup>[15-16]</sup>.

除 QST、SJC 两个剖面外,其余剖面表层土壤的  $\delta^{15}\text{N}$  明显低于下层,这是由于新鲜植物体落到地面受微生物作用腐烂分解,微生物一般优先吸收富集<sup>14</sup>N 的氮化合物,使腐殖质层中<sup>15</sup>N 因<sup>14</sup>N 的富集而发生贫化现象<sup>[17-20]</sup>,受较低<sup>15</sup>N 的植物残体及腐殖质层的影响,表层土壤相较于其他土壤层对<sup>15</sup>N 表现为贫化.对于 QST、SJC 两个剖面,因表层富集植被较少,受腐殖质层的影响较弱,使表层  $\delta^{15}\text{N}$  高于下部土壤层.中下层土壤受枯枝落叶层影响减弱,但微生物活动较为强烈,因而发生富集,造成  $\delta^{15}\text{N}$  高于中上层土壤.

石林地区属于岩溶区,长期受热带和亚热带气候影响,强烈的化学淋溶作用使得土壤层中较高的黏粒发生垂直下移,形成上层质地轻,孔隙度高,水分容易下渗而下层土壤质地黏重,孔隙度低,渗透性小的形态<sup>[21]</sup>,因而,上层土壤环境相对开放,有利于表层贫化<sup>15</sup>N 的有机氮向下迁移补充有机氮,降低  $\delta^{15}\text{N}$  值,而下层土壤相对封闭,土壤有机氮矿化程度较大, $\delta^{15}\text{N}$  值较高.而 DP、SL2、XNC 未呈现此变化主要是由于这 3 个剖面下层土壤靠近基岩层,受基岩的影响,使得这 3 个剖面下层  $\delta^{15}\text{N}$  值偏低.

2.3 氮同位素空间分异特征

2.3.1 红壤

红壤发育于热带和亚热带雨林、季雨林或常绿阔叶林植被下的土壤,土层浅薄,剖面分化不明显.如表 1 所示,SJC、SL2、QST、PTS 的 4 个剖面属于红壤,但 4 个剖面所受石漠化影响程度不一,强度石漠化剖面(QST)的  $\delta^{15}\text{N}$  值主要分布在 6.69‰—10.75‰,均值为 8.03‰,变异系数为 17.58%;中度石漠化剖面(SL2)的  $\delta^{15}\text{N}$  值主要分布在 5.670‰—9.676‰,均值为 7.76‰,变异系数为 19.00%;轻度石漠化剖面(PTS)的  $\delta^{15}\text{N}$  值主要分布在 2.57‰—9.66‰,均值为 7.31‰,变异系数为 27.32%;无石漠化剖面(SJC)的  $\delta^{15}\text{N}$  值主要分布在 6.728‰—9.451‰,均值为 7.76‰,变异系数为 11.52%.SJC 剖面虽然未受到石漠化影响,但因受到放牧等人为活动的干扰,造成  $\delta^{15}\text{N}$  值略大于轻度石漠化剖面.因其他 3 个剖面位于山林深处,未受到人类活动的影响,故红壤地区  $\delta^{15}\text{N}$  值更具有规律性,大致呈现随石漠化程度的加深, $\delta^{15}\text{N}$  值逐渐增大的趋势,无石漠化剖面  $\delta^{15}\text{N}$  数据分布最为集中,说明未受石漠化影响的土壤系统最为稳定.

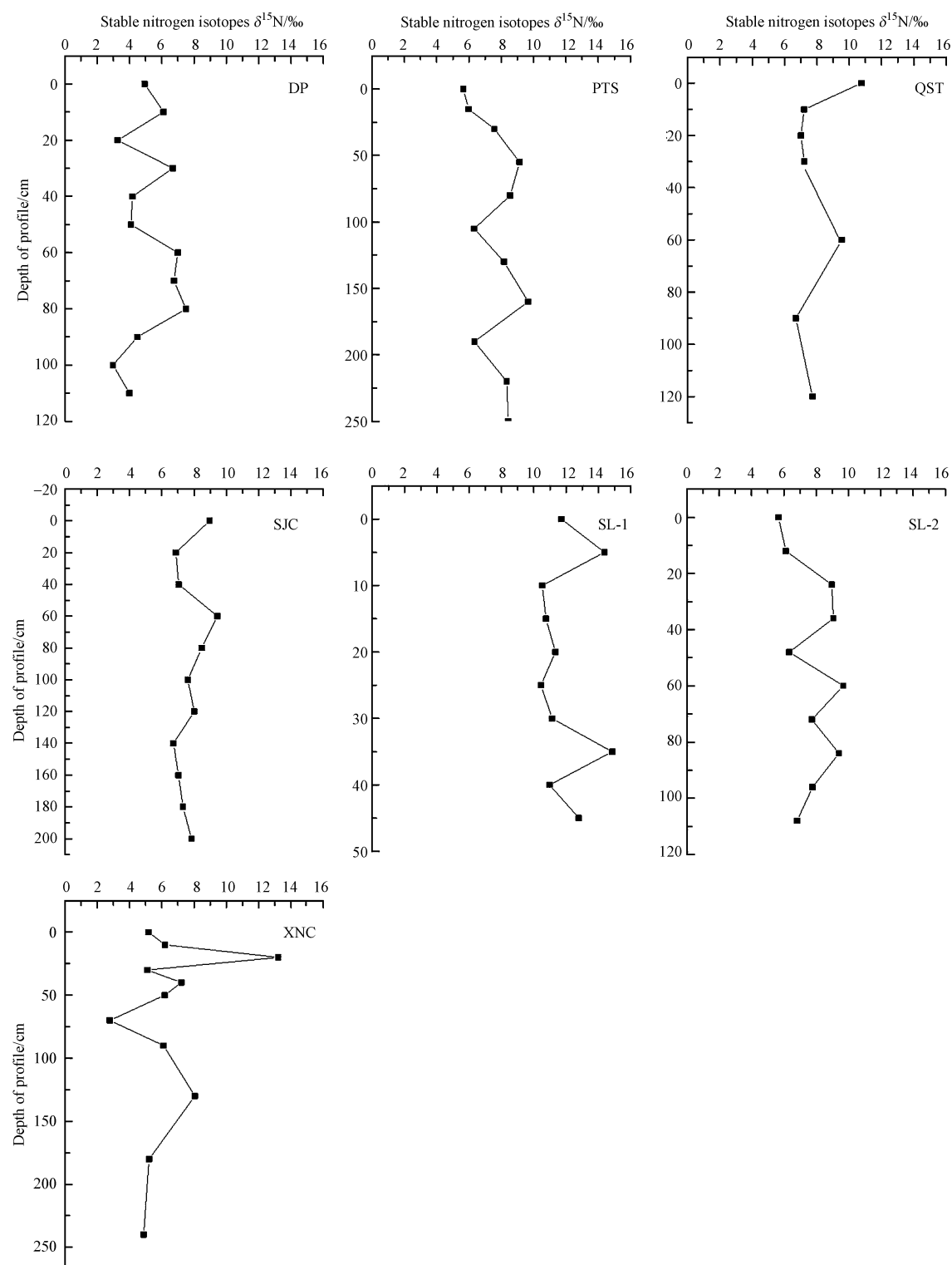


图3 剖面中稳定氮同位素分布特征

Fig.3 Profile distribution characteristics of stable nitrogen isotope

2.3.2 石灰岩土壤

石灰岩土壤是喀斯特地区的常见土壤类型,土层较厚,分层明显.如表1所示,XNC、DP、SL1等3个剖面属于石灰岩土壤,但3个剖面所受石漠化影响程度不一,轻度石漠化剖面(XNC)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在2.78‰—13.22‰,均值为6.38‰,变异系数为41.50%;中度石漠化剖面(DP)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在2.98‰—7.50‰,均值为5.17‰,变异系数为30.20%;强度石漠化剖面(SL1)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要分布在

10.52‰—14.86‰,均值为 11.89‰,变异系数为 13.37%.因 3 处剖面位于人类活动范围附近,受人类活动的影响较大,故 3 个剖面  $\delta^{15}\text{N}$  与石漠化程度未有明显的变化规律.

无论是石灰岩土壤剖面还是红壤剖面,均存在轻度石漠化剖面氮同位素分布最分散,中度石漠化剖面次之,强度石漠化剖面氮同位素分布最集中的规律,说明轻度石漠化剖面土壤系统最不稳定,土壤一旦受到人为干扰或破坏,极易向强度石漠化发展.

石漠化的形成是自然因素和人为因素相互作用导致,但其中占主要影响的还是人为因素<sup>[22]</sup>,在本次研究区内,人为干扰主要有垦耕、放牧和樵采,不同的方式对土壤的影响是不同的,但主要体现在对地表植被的影响,通过对地表植被的影响,使得土壤中氮素的转化、迁移等生物化学循环发生改变,而氮循环过程的改变,使得土壤氮素的分馏效应受到影响<sup>[23-26]</sup>,最终导致土壤的  $\delta^{15}\text{N}$  值存在较大差异,这也是造成本研究区 7 个剖面间  $\delta^{15}\text{N}$  值存在较大差异的原因之一.

表 1 采样点具体情况  
Table 1 The conditions of the sampling sites

| 编号<br>Number | 深度<br>Depth/cm | 成土母质<br>Parent material | 土壤类型<br>Soil type | 石漠化强度<br>Rocky<br>desertification<br>intensity | 干扰方式<br>Interference<br>mode | $\delta^{15}\text{N}$ 均值<br>Average value<br>of $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$ | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation/% |
|--------------|----------------|-------------------------|-------------------|------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| DP           | 110            | 碳酸盐岩                    | 石灰岩土壤             | 中度                                             | 无                            | 5.17                                                                           | 30.20                                 |
| PTS          | 280            | 碳酸盐岩                    | 红壤                | 轻度                                             | 无                            | 7.31                                                                           | 27.32                                 |
| QST          | 120            | 碳酸盐岩                    | 红壤                | 强度                                             | 无                            | 8.03                                                                           | 17.58                                 |
| SJC          | 200            | 碳酸盐岩                    | 红壤                | 无                                              | 垦耕                           | 7.76                                                                           | 11.52                                 |
| SL1          | 45             | 碳酸盐岩                    | 石灰岩土壤             | 中度                                             | 放牧                           | 11.89                                                                          | 13.37                                 |
| SL2          | 108            | 碳酸盐岩                    | 红壤                | 轻度                                             | 无                            | 7.76                                                                           | 19.00                                 |
| XNC          | 240            | 碳酸盐岩                    | 石灰岩土壤             | 轻度                                             | 樵采                           | 6.38                                                                           | 41.50                                 |

2.4 氮同位素与土壤理化性质之间的关系

从表 2 可知,采样区内无论是石灰岩土壤剖面还是红壤剖面  $\delta^{15}\text{N}$  值与土壤 pH、TOC、TN、C/N 间均无显著相关关系.这主要是因为云南石林地区属喀斯特地貌区,具有高度的生境异质性.受石漠化影响严重,土壤结构被破坏,同时受人类活动的干扰破坏,导致研究区  $\delta^{15}\text{N}$  与土壤理化性质无明显相关性.

表 2 石灰岩土壤剖面和红壤剖面土壤氮同位素与土壤基本理化性质间的相关性  
Table 2 Correlations between  $\delta^{15}\text{N}$  values of profiles soil and soil basic conditions in limestone soil and red soil profiles

|                                    |                       | $\delta^{15}\text{N}$ | pH    | TOC    | TN       | C/N      |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|--------|----------|----------|
| 石灰岩土壤剖面<br>Limestone soil profiles | $\delta^{15}\text{N}$ | 1                     | 0.152 | 0.306  | 0.416    | 0.292    |
|                                    | pH                    |                       | 1     | -0.036 | -0.155   | 0.035    |
|                                    | TOC                   |                       |       | 1      | 0.682 ** | 0.974 ** |
|                                    | TN                    |                       |       |        | 1        | 0.543 *  |
|                                    | C/N                   |                       |       |        |          | 1        |
|                                    | $\delta^{15}\text{N}$ | 1                     | 0.097 | 0.109  | 0.105    | 0.018    |
| 红壤剖面<br>Red soil profiles          | pH                    |                       | 1     | 0.208  | -0.034   | 0.391 *  |
|                                    | TOC                   |                       |       | 1      | 0.789 ** | 0.773 ** |
|                                    | TN                    |                       |       |        | 1        | 0.412 ** |
|                                    | C/N                   |                       |       |        |          | 1        |
|                                    | $\delta^{15}\text{N}$ | 1                     | 0.097 | 0.109  | 0.105    | 0.018    |

注: \*  $P\leq0.05$ ; \*\*  $P\leq0.01$ .

3 结论 ( Conclusion )

喀斯特石漠化过程中常伴随着土壤性状与环境条件的改变,直接或间接地影响土壤中碳氮元素的迁移转化,造成研究区 TOC、C/N 等理化性质存在较大差异,同时也使氮素发生同位素分馏,造成各个剖

面以及同一剖面不同深度的  $\delta^{15}\text{N}$  具有较大差异性. 土壤中氮同位素随深度具有不明显的垂直变化特征, 具体表现为, 表层土壤相对于下层土壤表现出对  $^{15}\text{N}$  的贫化, 而后  $\delta^{15}\text{N}$  呈现增大的趋势, 中层土壤因微生物含量减少, 硝化反应及反硝化反应被抑制,  $\delta^{15}\text{N}$  呈现减小的趋势, 而下层土壤由于矿化作用的影响,  $\delta^{15}\text{N}$  又呈现增大的趋势. 在空间分异上, 无论是石灰岩土壤剖面还是红壤剖面,  $\delta^{15}\text{N}$  变异系数均存在轻度石漠化剖面最分散, 中度石漠化剖面次之, 强度石漠化剖面最集中, 说明轻度石漠化剖面土壤系统最不稳定, 土壤一旦受到人为干扰或破坏, 极易向强度石漠化发展. 同时在受人为影响较小的红壤剖面  $\delta^{15}\text{N}$  值大致呈现随石漠化程度的加深而增大, 说明在一定条件下, 剖面受石漠化影响可能使得  $\delta^{15}\text{N}$  值偏正. 采样区内无论是石灰岩土壤剖面还是红壤剖面  $\delta^{15}\text{N}$  值与土壤 pH、TOC、TN、C/N 间均无显著相关关系, 这主要与喀斯特地区高度的生境异质性有关.

### 参考文献 (References)

- [1] 王家文, 周跃, 肖本秀, 等. 中国西南喀斯特土壤水分特征研究进展[J]. 中国水土保持, 2013(2): 37-41, 69.  
WANG J W, ZHOU Y, XIAO B X, et al. Advances in soil moisture characteristics of Karst in southwest China [J]. Chinese Journal of Soil and Water Conservation, 2013(2), 37-41, 69 (in Chinese).
- [2] 汪智军, 杨平恒, 旷颖仑, 等. 基于  $^{15}\text{N}$  同位素示踪技术的地下河硝态氮来源时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3548-3554.  
WANG Z J, YANG P H, KUANG Y L, et al. Temporal and spatial variations of the nitrate-nitrogen sources in an underground river using  $^{15}\text{N}$  isotope technique [J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3548-3554 (in Chinese).
- [3] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 8(1): 37-44.  
CAO J H, YUAN D X, PAN G X. Some soil features in karst ecosystem [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 8(1): 37-44 (in Chinese).
- [4] DIJKSTRA P, ISHIZU A, DOUCETT R, et al.  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  natural abundance of the soil microbial biomass [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(11): 3257-3266.
- [5] PORTL K, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, WANEK W. Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of soil N pools and  $\text{N}_2\text{O}$  reflect the nitrogen dynamics of forest soils [J]. Plant Soil, 2007, 95: 79-94.
- [6] 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, 1(2): 101-104.  
WANG S J. Discussion on Karst Rocky desertification concept and its scientific connotation [J]. Chinese Karst, 2002, 1(2): 101-104 (in Chinese).
- [7] 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.  
ZHU Z L, WEN Q X. Soil nitrogen in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 27-34 (in Chinese).
- [8] 袁道先. 中国西南部的岩溶及其与华北岩溶的对比[J]. 第四纪研究, 1992(4): 352-361.  
YUAN D X. Karst in southwestern China and its comparison with karst in North China [J]. Quaternary Research, 1992(4): 352-361 (in Chinese).
- [9] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 40-50.  
CAN J H, YUAN D X, TONG L Q. Characteristics of karst ecosystem in southwest China and comprehensive control of rocky desertification [J]. Grassland Science, 2008, 25(9): 40-50 (in Chinese).
- [10] 刘俊. 喀斯特地区森林植被气候特征研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2015.  
LIU J. Research on Karst area forest vegetation climate characteristics [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2015 (in Chinese).
- [11] 黄金. 云南石林喀斯特山地植被和土壤退化特征的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.  
HUANG J. Yunnan stone forest karst mountain vegetation and soil degradation characteristics [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009 (in Chinese).
- [12] 王敏, 南春波, 王占华, 等. NY/T 1377-2007, 土壤 pH 的测定[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.  
WANG M, NAN C B, WANG Z H, et al. NY/T 1377-2007, Determination of pH in soil [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese).
- [13] 朱书法. 贵州典型陆地生态系统土壤中有有机碳含量及碳同位素组成[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2006.  
ZHU S F. Organic carbon content and carbon isotope composition of soil from typical terrestrial ecosystem of Guizhou Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese).
- [14] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征[J]. 环境化学, 2012, 31(5): 599-603.  
WANG J F, CHEN J A, ZENG Y, et al. Spatial distribution of TP, TN and  $\text{C}_{\text{org}}$  in the sediment of Baihua Lake [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(5): 599-603 (in Chinese).
- [15] ESHETU Z, HOGBERG P. Effects of land use on  $^{15}\text{N}$  natural abundance of soils in Ethiopian highlands [J]. Plant Soil, 2000, 222: 109-117.
- [16] PORTL K, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, WANEK W, et al. Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of soil N pools and  $\text{N}_2\text{O}$  reflect the nitrogen

- dynamics of forest soils[J]. *Plant Soil*,2007,295: 79-94.
- [17] NADELHOFFER K J,FRY B. Controls on natural nitrogen<sup>-15</sup> and carbon<sup>-13</sup> abundances in forest soil organic matter [J]. *Soil Science Society of America Journal*,1988,52(6):1633-1640.
- [18] ROBINSON D.  $\delta^{15}\text{N}$  as an Integrator of the Nitrogen cycle [J]. *Trends in Ecology and Evolution*,2001,6(3): 153-162.
- [19] TEMPLER P H,ARTHUR M A,LOVETT G M, et al. Plant and soil natural abundance <sup>15</sup>N: indicators of relative rates of Nitrogen cycling in temperate forest ecosystems[J]. *Oecologia*,2007,153: 399-406.
- [20] LI C G,HAN X G,HUANG J H, et al. A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2001,21(7): 1187-1195.
- [21] LI Y B,WANG S J,LI R L. Some soil features of karst ecosystem [J].*Ecology and Environment*,2004,13(3): 434-438.
- [22] 卢红梅,王世杰. 花江小流域石漠化过程中的土壤有机碳氮的变化[J]. *地球与环境*,2006,4(4): 41-46.  
LU H M,WANG S J. Changes of soil organic carbon and nitrogen in rocky desertification process of Huajiang small watershed [J]. *Earth and Environment*,2006,4(4): 41-46(in Chinese).
- [23] 罗绪强,王世杰,张桂玲,等. 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*,2009,5(12): 227-233.  
LUO X Q,WANG S J,ZHANG G L, et al. Spatial differentiation of soil particle composition in Karst Rocky desertification process [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2009,5(12): 227-233(in Chinese).
- [24] 龙健,李娟,黄昌勇. 我国西南地区的喀斯特环境与土壤退化及其恢复[J]. *水土保持学报*,2002,6(5): 5-8.  
LONG J,LI J,HUANG C Y. Karst environment and soil degradation in southwest china and its restoration [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2002,6(5): 5-8(in Chinese).
- [25] ZHOU J P,HUANG Y,MO M H. Phylogenetic analysis on the soil bacteria distributed in karst forest [J]. *Brazilian Journal of Microbiology*,2009,40: 827-837.
- [26] 罗绪强,王世杰,王程媛等. 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.  
LUO X Q,WANG S J,WANG C Y, et al. Nitrogen isotope compositions and spatial distribution characteristics of soil in the process of Karst rocky desertification [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2011,25(6): 1235-1243(in Chinese).