

文冬妮,杨程,杨霖,等.岩溶区农业种植对土壤有机氮矿化的影响[J].中国岩溶,2020,39(2):189-195.
DOI:10.11932/karst20200207

岩溶区农业种植对土壤有机氮矿化的影响

文冬妮¹,杨程²,杨霖¹,秦兴华¹,孟磊¹,何秋香¹,朱同彬³,

Christoph Müller⁴

(1.海南大学热带作物学院,海口 570228; 2.江苏省地质调查研究院,南京 210018; 3.中国地质科学院岩溶地质所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004;
4. Department of Plant Ecology, Justus-Liebig University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany)

摘要:土壤有机氮矿化是供应无机氮的主导过程,研究其变化对于认识土壤氮素有效性和指导氮肥施用具有重要意义。本研究分别在云南建水、蒙自和勐腊岩溶区选取脐橙地、玉米地和橡胶地作为研究对象,并以临近未受人为扰动的草地或原始林地作为对照,采用¹⁵N同位素标记方法,研究了岩溶区草地或原始林地开垦种植农作物后石灰土有机氮矿化(M_{Norg})速率变化,并区分了易分解有机氮矿化(M_{Nlab})和难分解有机氮矿化(M_{Nrec})对 M_{Norg} 的贡献。结果表明,原始林地土壤 M_{Norg} (8.94 mg N·kg⁻¹ d⁻¹)显著高于草地(1.41~2.46 mg N·kg⁻¹ d⁻¹),且均以 M_{Nlab} 为主。其中,草地 M_{Nlab} 对 M_{Norg} 贡献率可达80.6%~93.1%,而在原始林地中该贡献率达到62.2%。岩溶区草地或林地开垦种植经济作物显著降低 M_{Norg} 速率,其 M_{Norg} 速率为0.53~0.89 mg N·kg⁻¹ d⁻¹,下降比例达62.5%~90.1%。这种差异主要受 M_{Nlab} 和 M_{Nrec} 影响,由草地开垦种植脐橙和玉米后土壤 M_{Norg} 下降主要归于 M_{Nlab} 速率下降,而 M_{Nrec} 并未发生显著变化;原始林地开垦种植橡胶后土壤 M_{Norg} 下降主要归于 M_{Nlab} 和 M_{Nrec} 速率的共同下降。岩溶区草地或原始林地开垦种植农作物后土壤有机碳、全氮、全磷、全钙和全镁含量及土壤田间持水量、pH、阳离子交换量均显著降低,且与土壤 M_{Norg} 和 M_{Nlab} 呈显著正相关,表明农业种植对土壤理化性质的改变是影响矿化速率的重要因素。

关键词:岩溶区;农业种植;¹⁵N标记;矿化速率;易分解有机氮

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)02-0189-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

氮素是植物生长发育所必须营养元素之一^[1],也是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素^[2]。土壤中氮素主要以有机氮形态存在,大部分有机氮在微生物的作用下转化成铵态氮(NH₄⁺)或硝态氮(NO₃⁻),以无机氮形态才能被植物吸收利用^[3]。土壤无机氮持续供给是维持植物生长的重要因子,但是土壤若累

积过多的无机氮,也会因氮素损失而引起负面环境效应,如温室效应^[4]和水体富营养化^[5]等。因此,调查土壤无机氮的供应过程,对于认识土壤氮的有效性和由此产生的环境效应具有重要意义。

土壤有机氮矿化是产生无机氮的重要途径,矿化速率决定了土壤中供给植物生长的氮素可利用性^[6-7]。土壤有机氮矿化过程作为土壤氮循环的重要过程之一,受到越来越多的关注和研究。近年来,

基金项目:国家自然科学基金(41771340, 41877348);中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2020003)

作者简介:文冬妮(1994-),女,硕士研究生,主要从事土壤氮循环研究。E-mail:494897684@qq.com。

通信作者:何秋香(1972-),女,助理研究员,主要从事土壤C、N循环及其环境效应研究。E-mail:43060398@qq.com。

收稿日期:2020-02-18

中国科研工作者已开展大量关于土壤氮矿化的研究工作,主要集中在热带及亚热带森林^[8-10]、温带草原^[11-13]和农田土壤等方面^[14-16],且多针对于单一的生态系统,而对于岩溶区自然生态系统转变为农业生态系统后土壤有机氮矿化的变化研究还比较薄弱。

受地质环境条件制约岩溶生态系统分布广泛^[17],按碳酸盐岩出露面积计算,我国岩溶生态系统面积可达 90.7 万 km²^[18],约占我国国土面积的 1/10。由于该地区地少人多,耕地资源匮乏,大面积林地或草地等自然生态系统遭到破坏、被开垦而种植农作物。人为干扰条件下,自然生态系统转变为自然-人工复合生态系统^[19],施肥和耕作等管理措施可能导致土壤氮矿化过程发生显著变化。先前研究发现,土壤有机氮矿化速率与有机碳或全氮含量呈显著正相关关系^[20]。与林地或草地相比,农田土壤有机物含量显著下降,导致土壤有机氮矿化速率下降,这些研究多开展于黑土、红壤等,而对于由碳酸盐岩发育而来的石灰土研究较少。岩溶区自然生态系统下的石灰土含有较高的钙^[21],能够与有机物络合而产生稳定的胡敏酸钙^[21-22],虽然能够提高土壤有机碳氮含量,但可能导致其有效性较低,易分解有机氮含量下降,反而不利于有机氮矿化速率提高。当林地或草地开垦种植农作物,虽然有机碳氮含量降低,但钙固持的胡敏酸可能被释放出,加之有机肥施用,可能促进易分解有机氮含量提高,一定程度上增加土壤有机氮矿化速率。由此可见,岩溶区自然生态系统条件下的林地或草地开垦种植农作物后土壤有机氮矿化变化特点可能与其他地带性土壤有较大差别^[23-24]。

本研究分别在云南省建水县、蒙自市和西双版纳勐腊县勐远国家自然保护区典型岩溶区选择脐橙地、玉米地和橡胶地等农田土壤,并以临近自然生态系统下的草地或原始林地土壤作为对照组,采用¹⁵N 同位素标记方法,研究了岩溶区草地或原始林地开垦种植农作物后石灰土有机氮矿化速率变化,并区分易分解有机氮矿化和难分解有机氮矿化对总矿化过程的贡献率。研究结果可加深对岩溶区农业种植后土壤有机氮矿化过程的了解,对于评估岩溶农田土壤氮素有效性及土地合理利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点分别位于云南省建水县、蒙自市和西双版纳勐腊县分布的岩溶区,土壤类型均为石灰土。

建水县采样区(23°37'13"N, 102°54'12"E)位于建水县面甸镇阎把寺村,属亚热带季风气候,海拔高度 260~610 m,年平均气温为 19.8℃,全年降水量 805 mm,集中分布在 5~10 月。由于人类扰动较大,该地区产生严重的植被和土壤退化,石漠化问题严重。所选草地为石漠化区封育自然演替至草丛阶段的样地。选择的脐橙地已连续种植脐橙 5 年,种植前 3 年施肥量约为 160 kg N·hm⁻² a⁻¹、70 kg P₂O₅·hm⁻² a⁻¹和 60 kg K₂O·hm⁻² a⁻¹,3 年之后年施肥量提高至 280 kg N·hm⁻² a⁻¹、200 kg P₂O₅·hm⁻² a⁻¹和 160 kg K₂O·hm⁻² a⁻¹,同时每年基施 18 000 kg·hm⁻² a⁻¹腐熟牛粪,其中含全氮 2.8 g·kg⁻¹,全磷 2.1 g·kg⁻¹,全钾 1.7 g·kg⁻¹。

蒙自市采样区(23°27'58"N, 103°24'35"E)位于云南省蒙自市西北勒乡碧色寨村,海拔为 1 800~2 400 m,属典型亚热带季风气候,年平均气温 19~21.5℃,年均降水量 1 572 mm。上世纪 50 年代,该区域经历了大规模的砍伐开垦,石漠化问题较为严重,属重度石漠化地区。研究区草地为石漠化区封育自然演替至草丛阶段的样地。选择的玉米地已连续种植玉米 2 年,N、P₂O₅和 K₂O 的施肥量均为 90 kg·hm⁻² a⁻¹。

勐腊县采样区(21°43'54"N, 101°23'14"E)位于西双版纳勐腊国家级自然保护区内勐远国家自然保护区,海拔 710~815 m,属热带季风性半湿润气候,年平均气温约为 21.5℃,年降水量约为 1 557 mm,分布着石灰岩山热带季节性雨林、半常绿或落叶季节林、竹林等,森林覆盖率达 95% 以上。该区域由原始林地转变而来的橡胶林面积较大。采样的橡胶林种植年限为 8 年,种植前 2 年年施肥量约为 12 kg N·hm⁻² a⁻¹、6 kg P₂O₅·hm⁻² a⁻¹和 3.6 kg K₂O·hm⁻² a⁻¹,2 年之后施肥量提高至约 30 kg N·hm⁻² a⁻¹、15 kg P₂O₅·hm⁻² a⁻¹和 9.0 kg K₂O·hm⁻² a⁻¹。

1.2 土壤样品采集

2016 年 9 月在云南省建水县面甸镇阎把寺村、蒙自市西北勒乡碧色寨村和西双版纳勐腊县勐远国家自然保护区典型岩溶区采集脐橙地、玉米地和橡胶地等农田土壤,并分别采集临近的草地、草地和原始林地作为对照,每个区域采样点坡度等条件相对一致。每个区域的草地或林地及农田各选取 3 个代表性样地作为空间重复,共采集得到 18 个土壤样品。在每个样地中间隔 20 m 随机选取 5 个 1 m×1 m 样方,采用直径 5 cm 的土钻采集 0~15 cm 的表层土壤,剔除

石块和植物根系,将新鲜土壤混合均匀组成一个样品,过 2 mm 筛,保存于 4 ℃ 冰箱。同时取出部分土样在室温下风干,过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定土壤理化性质。

1.3 ^{15}N 标记试验

称取相当于 30 g 干土重的新鲜土样于 250 mL 三角瓶中,在 25 ℃ 恒温培养箱中预培养 1 d。预培养结束后,每个土壤分为两组,每组各 12 瓶,分别均匀加入 1 mL $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 或 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ (^{15}N 丰度均为 5%) 溶液,加入的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量分别达到 $50 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随后添加蒸馏水调节土壤含水量至 60% WHC (田间持水量),用封口膜封住瓶口,并用注射器针头扎 3 个小孔,便于瓶内外气体交换,置于恒温 25 ℃ 条件下培养。分别在添加标记液后 0.5 h、24 h、48 h 和 96 h 各取 3 瓶加入 150 mL $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液, 25 ℃、250 rpm 下振荡 1 h,过滤,测定提取液中 NH_4^+ 、 NO_3^- 浓度和 ^{15}N 丰度。

1.4 分析方法

提取液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量用 Skalar^{plus} San 流动分析仪测定;浸提液中的 $\text{NH}_4^+^{15}\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^-^{15}\text{N}$ 用 MgO -定氮合金蒸馏法,即先在浸提液中加入 MgO 蒸出 NH_4^+ ,之后加入定氮合金再次进行蒸馏,将 NO_3^- 转化为 NH_4^+ 蒸出,馏出液均用硼酸+混合指示剂(甲基红+溴甲酚绿)吸收液吸收,用 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸溶液滴定。将含有 NH_4^+ 的溶液放置于 80 ℃ 烘箱烘干,用 Sercon Integra 2 同位素比质谱仪测定 ^{15}N 丰度。

土壤样品理化指标采用常规分析方法分析^[25-26],其中:pH 值(水土比为 2.5 : 1)采用电位法测定;有机碳和全氮用 Sercon Integra 2 元素分析仪测定;土壤田间持水量(WHC)采用室内环刀法进行测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定;土壤中全磷、全钙、全镁、全钾含量采用 XRD 法测定。

1.5 土壤矿化速率的计算

将测定得到的土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量和 ^{15}N 丰度输入到 MCMC 氮素转化模型(图 1)^[27]中,计算得到土壤易分解有机氮矿化速率(M_{Nlab} , mineralization of labile organic N to NH_4^+)和难分解有机氮矿化速率(M_{Nrec} , mineralization of recalcitrant organic N to NH_4^+),总矿化速率(M_{Norg} , mineralization of organic N to NH_4^+)为易分解有机氮和难分解有机氮的矿化速率之和,即 $M_{\text{Norg}} = M_{\text{Nlab}} + M_{\text{Nrec}}$ 。

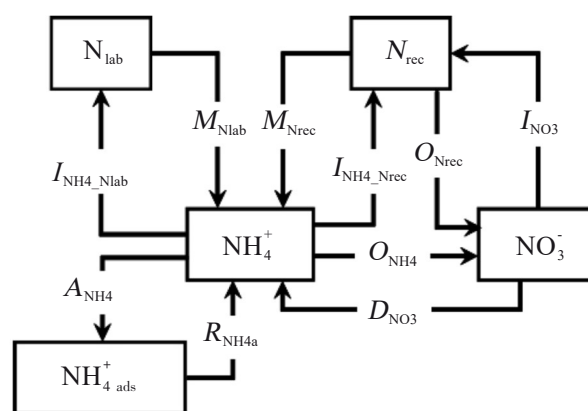


图 1 氮素转化模型

Fig. 1 ^{15}N tracing model used for data analysis

1.6 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2010 程序进行数据整理,SPSS 13.0 统计分析软件比较岩溶区不同土地利用方式下,土壤基本理化性质和有机氮矿化速率差异,以及有机氮矿化速率和土壤基本理化性质之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

岩溶区受人类扰动较小的自然生态系统开垦种植农作物后土壤理化性质发生显著改变(表 1)。草地开垦种植脐橙、草地开垦种植玉米和原始林地开垦种植橡胶均显著降低土壤有机碳、全氮、全磷、全钙和全镁含量以及 WHC、CEC 和 pH,而无机氮和全钾含量因研究区不同而呈现出不同的变化趋势。建水地区草地开垦种植脐橙后土壤全钾含量显著提高,蒙自地区草地开垦种植玉米后全钾含量无显著性变化,而勐腊地区原始林地开垦种植橡胶后土壤全钾含量显著性降低。三个岩溶区自然生态系统下的土壤无机氮均以硝态氮为主,由于施肥措施不同,导致三个区域农田土壤无机氮含量差异较大。建水地区脐橙地土壤铵态氮和硝态氮含量分别达到 $170 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $144 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于蒙自地区和勐腊地区。

2.2 土壤有机氮矿化速率

三个研究区以勐腊地区原始林地土壤总矿化(M_{Norg})速率最大,达到 $8.94 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$,显著高于建水($2.46 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)和蒙自($1.41 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)地区的草地,且三个研究区 M_{Norg} 均以易利用有机氮矿化

表 1 三个岩溶区自然生态系统和农田生态系统土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils of natural and agricultural ecosystems in three karst regions

成分及性质	建水		蒙自		勐腊	
	草地	脐橙地	草地	玉米地	原始林地	橡胶地
有机碳/g C·kg ⁻¹	56.8±5.12A	8.75±1.34B	51.0±6.95A	10.5±3.92B	74.9±9.81A	12.6±0.98B
全氮/g N·kg ⁻¹	4.76±0.63A	1.08±0.08B	4.34±0.71A	1.17±0.20B	7.67±1.46A	1.43±0.08B
铵态氮/mg N·kg ⁻¹	10.2±1.11B	170±11.4A	11.4±1.23A	9.55±0.31B	8.32±1.07A	9.14±0.64A
硝态氮/mg N·kg ⁻¹	13.1±3.15B	144±10.2A	19.5±4.18A	18.6±4.16A	28.3±9.20A	8.52±1.58B
pH	7.17±0.43A	4.50±0.05B	7.22±0.23A	5.49±0.45B	7.38±0.15A	5.61±0.05B
WHC/ %	1.11±0.06A	0.75±0.03B	0.96±0.03A	0.80±0.03B	1.28±0.13A	0.70±0.04B
CEC/cmole·kg ⁻¹	35.9±3.12A	15.0±0.11B	33.7±3.01A	15.5±0.73B	41.9±12.0A	14.2±1.49B
全磷/g P ₂ O ₅ ·kg ⁻¹	1.71±0.10A	1.36±0.14B	0.90±0.11A	0.62±0.01B	7.90±0.03A	1.02±0.27B
全钾/g K ₂ O·kg ⁻¹	3.83±0.69B	5.70±0.00A	9.31±2.26A	7.49±0.21A	14.8±1.59A	9.74±1.30B
全钙/g CaO·kg ⁻¹	14.5±3.90A	1.90±0.34B	10.6±2.89A	2.80±0.28B	23.5±8.42A	3.80±0.47B
全镁/g MgO·kg ⁻¹	3.57±0.26A	2.28±0.18B	7.62±0.48A	4.53±0.15B	8.56±1.40A	6.41±1.11B

注:表中同行中不同字母表示同一地区自然生态系统和农田生态系统各指标差异达显著水平($P<0.05$)。

(M_{Nlab})为主,其贡献率达到62.2%~80.6%。岩溶区草地或林地开垦种植经济作物显著降低土壤 M_{Norg} 和 M_{Nlab} 。建水地区草地开垦种植脐橙、蒙自地区草地开垦种植玉米和勐腊地区原始林地开垦种植橡胶 M_{Norg} 分别下降了62.5%、68.6%和90.1%,而 M_{Nlab} 分别下降

了75.1%、80.5%和91.1%。建水地区草地开垦种植脐橙和蒙自地区草地开垦种植玉米后土壤 M_{Nrec} 无显著性变化,处于较低水平,介于0.20~0.39 mg N·kg⁻¹·d⁻¹。勐腊地区原始林地开垦种植橡胶后土壤 M_{Nrec} 由3.38 mg N·kg⁻¹·d⁻¹显著下降至0.39 mg N·kg⁻¹·d⁻¹。

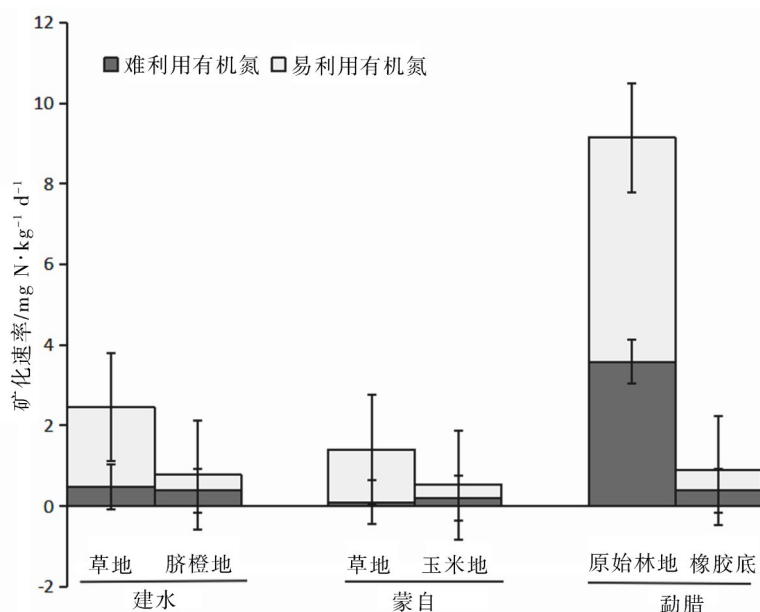


图 2 三个岩溶区自然生态系统和农田生态系统土壤氮矿化速率

Fig. 2 Soil N mineralization rates of natural and agricultural ecosystems in three karst regions

相关性分析表明,土壤 M_{Norg} 、 M_{Nlab} 和 M_{Nrec} 均与有机碳、全氮、全磷、全钾、全钙和全镁含量以及WHC和

CEC呈显著正相关。此外,土壤 M_{Norg} 和 M_{Nlab} 与pH呈显著正相关(表2)。

表 2 土壤理化性质与总矿化 (M_{Norg})、易利用有机氮矿化 (M_{Nlab})和难利用有机氮矿化 (M_{Nrec})速率的相关性

Table 2 Correlations between soil physical and chemical properties and the rates of soil M_{Norg} , M_{Nlab} and M_{Nrec}

成分及性质	M_{Norg}	M_{Nlab}	M_{Nrec}
有机碳	0.78**	0.81**	0.65**
全氮	0.87**	0.87**	0.76**
铵态氮	-0.24	-0.26	-0.17
硝态氮	-0.18	-0.22	-0.08
pH	0.60**	0.64**	0.42
WHC	0.86**	0.87**	0.72**
CEC	0.74**	0.78**	0.58*
全磷	0.95**	0.98**	0.86**
全钾	0.69**	0.60**	0.74**
全钙	0.90**	0.93**	0.73**
全镁	0.55*	0.51*	0.55*

注:*表示在 0.05 水平上相关性显著; **表示在 0.01 水平上相关性显著

3 讨 论

本研究结果表明,岩溶区受人类扰动较小的自然生态系统(如草地和原始林地)开垦种植农作物后土壤 M_{Norg} 显著下降,表明农业种植显著降低了土壤内在的无机氮供应能力。先前研究发现自然生态系统下植被种类的差异以及不同植被下凋落物质量的差异会对氮素矿化过程产生影响^[28]。不同植被类型会对植物根系分泌物及其残体产生的土壤有机质造成直接影响,从而使得土壤微生物群落发生改变,进一步影响土壤氮素矿化过程^[29]。由草地或林地开垦种植农作物后,土壤 M_{Norg} 差异主要归于土壤理化性质的改变。先前研究发现土壤有机碳和全氮是控制土壤有机氮矿化的关键因素^[20],有机碳氮含量增加能够提高矿化速率^[30-31]。本研究中,土壤 M_{Norg} 与有机碳和全氮含量呈显著正相关,进一步证实了土壤有机物在氮素矿化过程中的重要作用。岩溶区草地和原始林地开垦为农田后,土壤有机碳和全氮含量显著下降,较低的碳氮含量可能无法为微生物生长提供充足的营养物质,降低了微生物对有机物的有效分解,从而使得土壤 M_{Norg} 降低。除碳氮含量外,pH 也是影响矿化过程的一个重要因素。先前研究发现随着土

壤 pH 下降,有机氮矿化呈下降趋势^[32-33]。本研究土壤 M_{Norg} 与 pH 呈显著正相关(表 2),证实了先前研究结果。草地和原始林地开垦为农田后,由于化肥施用导致 pH 显著下降,进而可能会抑制微生物数量和活性^[34-35],从而抑制矿化速率。土壤水分也是影响土壤矿化过程的一个重要环境因子^[33],水分含量会影响有机氮矿化速率^[36-38]。Stanford 等^[39]研究发现,有机氮矿化在一定范围内与水分条件呈显著正相关关系。同时有研究表明,土壤水分含量较低时将抑制微生物的繁殖和活动^[40]。研究区土壤 M_{Norg} 与 WHC 呈显著正相关支持了这一观点。与受人类扰动较小的草地和原始林地等相比,农业生产破坏了土壤环境(如保水性和 pH 等下降),同时也降低矿化过程的底物浓度,从而抑制有机氮矿化速率。

总体来看,岩溶区草地或原始林地土壤有机氮矿化主要由易利用的有机氮矿化主导,其比例高达 62.2%~80.6%,这主要是因为微生物衍化过程中更愿意利用土壤中易利用的有机氮而非难利用的有机氮。当草地或林地种植农作物后,活性的、易利用的有机氮首先被消耗掉,进而导致有机氮总矿化速率显著下降。建水和蒙自地区草地转为农田地后,土壤 M_{Norg} 降低主要归于易利用的有机氮矿化速率下降,难利用的有机氮矿化速率并没有发生显著变化。值得注意的是,勐腊县自然保护区原始林地转为农田后,土壤 M_{Norg} 降低主要归于易利用的有机氮和难利用的有机氮矿化速率的共同下降,与建水和蒙自两个采样区表现出的有机氮矿化特点并不一致,这种差异可能是受土壤钙含量影响。先前研究发现除有机物的数量外,有机物的质量也会对土壤氮矿化过程产生影响^[41]。勐腊县自然保护区原始林地石灰土钙含量显著高于蒙自和建水草地(表 1),含量较高的钙能够与有机物形成稳定的腐殖酸钙^[21-22],导致活性组分含量及有效性降低而难利用有机物含量增加^[42]。因此,勐腊县自然保护区难利用的有机氮的比例高于其他两个地区土壤,从而导致勐腊县自然保护区原始林地石灰土有机氮矿化受易利用的有机氮和难利用的有机氮矿化共同控制。原始林地种植橡胶后,施肥和耕作等管理措施加快钙元素对有机物的保护作用,降低了土壤中难利用的有机氮含量,从而导致难利用的有机氮矿化速率下降。相反,建水和蒙自草地土壤钙含量相对较低,导致土壤中难利用的有机氮在矿化过程中的贡献较小。

4 结 论

岩溶区土地利用方式改变显著影响土壤有机氮矿化过程速率。与受人类扰动较小的草地和原始林地相比,农业利用降低了土壤有机氮矿化速率,尤其是易利用的有机氮的矿化速率,这主要归于土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、全钙和全镁含量以及 WHC、pH 和 CEC 下降。总体来看,岩溶区草地或原始林地开垦种植农作物后土壤质量下降,进而降低有机氮矿化过程速率,表明土壤内在的无机氮供应能力下降。

参考文献

- [1] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils[M]. Advances in soil science. New York: Springer, 1989: 57-112.
- [2] Mackie—Dawson L A, Pratt S M, Millard P. Root growth and nitrogen uptake in sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) seedlings in relation to nitrogen supply [J]. Plant and Soil, 1994, 158(2): 233-238.
- [3] Booth M S, Stark J M, Rastetter E B. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data[J]. Ecological Monographs, 2005(75): 139-157.
- [4] 李德军. 珠江三角洲森林和蔬菜地土壤一氧化氮排放[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2007.
- [5] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur?[J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.
- [6] Kolberg R, Roupert B, Westfall D G, et al. Evaluation of an in situ net soil nitrogen mineralization method in dryland agroecosystem[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 504-508.
- [7] Joanne B, Chen C R, Xu Z H, et al. Gross nitrogen transformations in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007(39): 426-433.
- [8] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带不同林分土壤矿质氮库及氮矿化速率的季节动态[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 730-738.
- [9] 沙丽清, 孟盈, 冯志立, 等. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 152-156.
- [10] 王光军, 田大伦, 朱凡, 等. 湖南省 4 种森林群落土壤氮的矿化作用[J]. 生态学报, 2009(3): 1607-1609.
- [11] 单玉梅, 温超, 常虹, 等. 不同放牧强度下荒漠草原土壤氮矿化季节性动态研究[J]. 生态环境学报, 2019(4): 723-731.
- [12] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2016(5): 480-492.
- [13] 刘颖慧, 李悦, 牛磊, 等. 温度和湿度对内蒙古草原土壤氮矿化的影响[J]. 草业科学, 2014(3): 349-354.
- [14] Zhang J B, Zhu T B, Meng T Z, et al. Agricultural land use affects nitrate production and conservation in humid subtropical soils in China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 62(5): 107-114.
- [15] 王乐云, 田飞飞, 能惠, 等. 不同施肥处理对农田土壤有机氮组分及其矿化的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版) 2019(4): 117-127.
- [16] 郑洁, 张继宗, 翟丽梅, 等. 洱海流域农田土壤氮素的矿化及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2010(S1): 35-40.
- [17] 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.
- [18] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. Earth—Science Reviews, 2014, 132(3): 1-12.
- [19] 陈同庆, 魏兴琥, 关共凑, 等. 粤北岩溶区不同土地利用方式对土壤钙离子的影响[J]. 热带地理, 2014, 34(3): 337-343.
- [20] Wang W, Smith C J, Chalk, P M, et al. Evaluating chemical and physical indices of nitrogen mineralization capacity with an unequivocal reference [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001(65): 368-376.
- [21] 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, 18(1): 37-44.
- [22] 曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.
- [23] Bengtsson G, Bengtson P, Månsson K F. Gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003(35): 143-154.
- [24] Zhu T B, Zhang J B, Meng T Z, et al. Tea plantation destroys soil retention of NO_3^- , and increases N_2O emissions in subtropical China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73(6): 106-114.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [27] Müller C, Rütting T, Kattge J, et al. Estimation of parameters in complex ^{15}N tracing models by Monte Carlo sampling. Soil Biology and Biochemistry, 2007(39): 715-726.
- [28] Lovett G M, Rueth H. Potential nitrogen mineralization and nitrification in American beech and sugar maple stands along a nitrogen deposition gradient in the northeastern US[J]. Ecological Applications, 1999, 9(1330): 44.
- [29] Patra A K, Abbadie L, Clays-Josserand A, et al. Effects of management regime and plant species on the enzyme activity and genetic structure of N-fixing, denitrifying and nitrifying bacterial communities in grassland soils[J]. Environmental Microbiology, 2006, 8(6): 1005-1016.
- [30] Barrett J E, Burke I C. Potential nitrogen immobilization in grassland soils across a soil organic matter gradient[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000(32): 1707-1716.
- [31] Mack M C, D'Antonio C M. Exotic grasses alter controls over soil nitrogen dynamics in a Hawaiian woodland[J]. Ecological Applications, 2003(13): 154-166.
- [32] Wang J, Zhang J B, Müller C, et al. Temperature sensitivity

- of gross N transformation rates in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(2):423-431.
- [33] Fu M H, Xu X C, Tabatabai M A. Effect of pH on nitrogen mineralization in crop-residue-treated soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1987(5):115-119.
- [34] Xiao K C, Xu J M, Tang C X, et al. Differences in carbon and nitrogen mineralization in soils of differing initial pH induced by electrokinesis and receiving crop residue amendments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013(67):70-84.
- [35] 张凯乐. 探究酸性土壤 pH 与碳氮矿化之间的相互关系[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- [36] 王其兵, 李凌浩, 白永飞, 等. 气候变化对草甸草原土壤氮素矿化作用影响的实验研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 687-692.
- [37] Schuur E A, Matson P A. Net primary productivity and nutrient cycling across a mesic to wet precipitation gradient in Hawaiian montane forest[J]. *Oecologia*, 2001, 128(3):431-442.
- [38] Pandey C B, Rai R B, Singh L. Seasonal dynamics of mineral N pools and N-mineralization in soils under homegarden trees in South Andaman, India[J]. *Agroforestry Systems*, 2007, 71(1):57-66.
- [39] Standford G, Smith S. Nitrogen mineralization potentials of soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(3):465-472.
- [40] 唐树梅, 漆智平. 土壤水含量与氮矿化的关系[J]. *热带作物研究*, 1997(4):54-60.
- [41] 于一. 分解底物质量对森林土壤氮矿化动态的调控作用[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [42] Yannikos N, Leinweber P, Helgason B L, et al. Impact of populus trees on the composition of organic matter and the soil microbial community in Orthic Gray Luvisols in Saskatchewan (Canada)[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 70(2):5-11.

Effects of agricultural cultivation on soil organic nitrogen mineralization in karst regions

WEN Dongni¹, YANG Cheng², YANG Lin¹, QIN Xinghua¹, MENG Lei¹, HE Qiuxiang¹, ZHU

Tongbin³, Christoph Müller⁴

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. Department of Plant Ecology, Justus-Liebig University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany)

Abstract The mineralization of organic N dominates the production of inorganic N, therefore, it is of great significance to study the change of soil N availability and to guide N fertilization. Soil samples under navel orange, corn and rubber plantations were collected in karst regions of Jianshui, Mengzi and Mengla, Yunnan Province, respectively, and the adjacent undisturbed grassland and natural forest were sampled as control. The ¹⁵N tracing technique was used to investigate the changes in the mineralization rate of organic N to NH₄⁺ (M_{Norg}) in calcareous soil when grassland or natural forest was converted to croplands in karst regions, and the contributions of the mineralization of labile organic N (M_{Nlab}) and recalcitrant organic N (M_{Nrec}) to M_{Norg} were quantified. The results showed that M_{Norg} rate in forest soils (8.94 mg N·kg⁻¹ d⁻¹) was significantly higher than that in grassland soils (1.41–2.46 mg N·kg⁻¹ d⁻¹). Soil M_{Nlab} dominated M_{Norg} , accounting for 80.6%–93.1% of M_{Norg} in grassland soils and 62.2% in forest soils, respectively. Soil M_{Norg} was significantly reduced to 0.53–0.89 mg N·kg⁻¹ d⁻¹ during the conversion of grassland or forest to cropland, with a decreased ratio of 62.5%–90.1%. When grassland was converted to navel orange or corn plantations, M_{Nlab} rather than M_{Nrec} was responsible for the decreased M_{Norg} . However, the decreased M_{Norg} was mainly attributed to the simultaneous decline in M_{Nlab} and M_{Nrec} when natural forest was converted to rubber plantation. The contents of soil organic carbon, total N, total phosphorus, total calcium and total magnesium, as well as pH, CEC and WHC were significantly reduced during the conversion of grassland or natural forest to cropland in karst regions, all of which were positively correlated with soil M_{Norg} and M_{Nlab} , indicating that the changes in soil physical and chemical properties during agricultural cultivation was an important factor affecting M_{Norg} .

Key words karst regions, agricultural cultivation, ¹⁵N tracing, mineralization rate, labile organic N

(编辑 庄艳)