

杨会, 朱同彬, 吴夏, 等. 岩溶区砂糖桔短期种植对土壤氮转化过程的影响[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 52-60.

DOI: 10.11932/karst2023y005

岩溶区砂糖桔短期种植对土壤氮转化过程的影响

杨会¹, 朱同彬¹, 吴夏¹, 吴华英¹, 唐伟¹, 蓝高勇¹, Christoph Müller²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. Department of Plant Ecology, Justus-Liebig University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany)

摘要: 利用¹⁵N同位素成对标记法并结合MCMC数值模型, 研究岩溶区乔灌地开垦种植砂糖桔4年后土壤氮转化特征。结果显示: 乔灌地开垦种植砂糖桔后, 土壤有机氮矿化速率由2.93 mg N·kg⁻¹·d⁻¹显著下降至0.60 mg N·kg⁻¹·d⁻¹, 土壤无机氮的供应能力降低, 土壤有机氮矿化速率与土壤有机碳、全氮和全钙含量呈显著正相关性, 与铁、铝、钾和黏粒比例呈显著负相关性; 土壤铵态氮微生物同化速率由1.76 mg N·kg⁻¹·d⁻¹显著降低为0.10 mg N·kg⁻¹·d⁻¹, 在砂糖桔地铵态氮微生物同化速率与有机氮矿化速率的比值仅为0.17。乔灌地土壤自养硝化速率高达11.06 mg N·kg⁻¹·d⁻¹, 而硝态氮微生物同化作用微弱, 硝态氮异化还原速率仅为0.64 mg N·kg⁻¹·d⁻¹, 导致硝态氮净产生速率达到10.42 mg N·kg⁻¹·d⁻¹。由于土壤铵态氮浓度的降低和施肥导致土壤酸化不利于硝化细菌的活动, 自养硝化速率显著降低至1.68 mg N·kg⁻¹·d⁻¹。岩溶区乔灌地开垦种植砂糖桔4年后土壤氮转化速率呈下降趋势。

关键词: 岩溶区; 土地利用方式; ¹⁵N标记技术; 氮转化过程速率

中图分类号: S153; S666 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)01-0052-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

氮是植物生长所必需的营养元素, 其供应能力是陆地生态系统初级生产力的限制性因素^[1]。土壤中95%以上的氮素以有机态存在, 不能被植物直接吸收利用^[2], 需要通过矿化过程转化为无机氮(铵态氮和硝态氮)供植物吸收和利用。此外, 无机氮可通过微生物同化作用固持在土壤中, 减少氮的损失^[3]。土壤氮转化表征的是一种形态氮素向另一种形态氮素的转变过程^[4]。目前对土壤氮转化规律的研究主要包括氮初级转化速率和氮净转化速率两个方面^[5]。氮净转化速率能够指示无机氮供应能力的大小, 但要了解无机氮含量变化的具体

过程和原因, 必须认识能反映土壤氮素各转化过程真实速率的初级转化速率^[6]。因此研究土壤氮初级转化速率, 对于评估土壤氮供应能力和保持机理至关重要。针对土壤氮初级转化速率的研究已开展大量工作, 但这些研究主要集中在亚热带的酸性土壤^[7-9], 而对于由碳酸盐岩发育的中性偏碱性土壤氮的转化速率研究相对较少。

岩溶区由碳酸盐岩发育的土壤由于特殊的地质背景和母质成土特性使得土壤富含钙、镁, pH较高, 土壤黏重^[10], 这些特点使得岩溶区石灰性土壤氮的转化过程不同于其他地带性土壤。岩溶区林地土壤有机氮的矿化速率较红壤的矿化速率低, 硝态氮产生速率大, 消耗速率低, 使得硝态氮的淋溶风险较

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702281); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA138042, 2018GXNSFAA281320)

第一作者简介: 杨会(1982—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事同位素地球化学研究。E-mail: hy5302230@163.com。

通信作者: 朱同彬(1983—), 男, 研究员, 博士, 主要从事土壤氮循环及环境效应研究。E-mail: zhutongbin@gmail.com。

收稿日期: 2021-02-26

大^[1]。广西是中国岩溶区域分布最广的省(区)之一,由于山多地少,贫困人口多,为提高当地居民的经济收入,人们常开垦山坡林地种植柑橘(如砂糖桔)。在岩溶区乔灌地开垦种植砂糖桔,农田的管理措施,如耕种、施肥、浇灌等会改变土壤的物理和化学性质,从而影响土壤的氮转化过程^[12-13]。已有研究表明施加氮肥可促进硝态氮的产生^[14],乔灌地改种砂糖桔后土壤中硝态氮的产生速率是否因为氮肥的使用而增加,硝态氮的淋溶风险是否会增强?目前关于岩溶区土地利用方式发生改变对土壤氮转化过程的影响还不甚清楚。因此,本文选择广西广泛种植的砂糖桔为研究对象,利用¹⁵N 成对标记法结合氮素转化模型,测定土壤氮素初级转化速率,研究乔灌地开垦种植砂糖桔后土壤氮的转化特征,探讨其影响因素,以期对岩溶区土壤氮的供应能力和生态环境评价提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于广西桂林市灵川县大境乡灯明村,属于亚热带季风气候,年平均气温为 19.8℃。境内四季分明,雨量充沛,年平均降水量为 1 860 mm,年平均蒸发量为 1 038~1 566 mm,雨季主要发生在 4—7 月。砂糖桔种植年限为 4 年左右,年均施氮、磷、钾和羊粪的量分别为 305、185、214 和 1 250 kg·hm⁻²。砂糖桔地由乔灌地砍伐焚荒开垦而来,相对坡度 12°~15°。乔灌植被以欆木 (*Loropetalum chinensis*) 为主,同时包括山麻杆 (*Alchornea davidii*)、葛藤 (*Puerarialobota*)、野葡萄 (*Ampelopsis sinica*) 等。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

分别在乔灌地和砂糖桔地选择 3 个具有代表性的样地作为空间重复(图 1),样地的气候环境、成土母质等均一致。每个样地间隔约 100 m,随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方,采集 0~10 cm 深度的表层土壤,混合均匀,组成一个样品。土壤样品带回实验室剔除根系、石块和植物残体,过 2 mm 筛后分两部分保存,一部分保存在 4℃ 冰箱用于培养实验,另一部分自然风干后用于土壤理化性质的分析。



图 1 采样点位置图

Fig. 1 Location map of sampling points

2.2 实验方法

2.2.1 ¹⁵N 标记实验

称取过 2 mm 筛的相当于 30 g 干土重的新鲜土样于 250 mL 三角瓶中,在 25℃ 的恒温培养箱中预培养 24 h,分别加入¹⁵NH₄NO₃ 和 NH₄¹⁵NO₃(丰度均为 5%) 溶液 1 mL,加入的 NH₄⁺和 NO₃⁻含量分别达到 50 mg N·kg⁻¹。加入去离子水调节土壤含水量至 60% 的土壤田间持水量(WHC),用保鲜膜封住瓶口,并用注射器针头扎 3 个小孔,便于瓶内外气体交换,置于 25℃ 恒温培养箱中培养。在添加标记液后的 0.5 h、24 h、48 h 和 72 h 各随机取 3 瓶重复,加入 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液 150 mL,于 25℃、250 rpm 的恒温振荡机内振荡 60 min 后过滤,测定浸提液中 NH₄⁺、NO₃⁻的含量和¹⁵N 丰度。

2.2.2 土壤理化指标分析

土壤 pH 采用电位法测定(水土比为 2.5:1)。土壤有机碳、全氮采用 0.5 mol·L⁻¹ 的稀盐酸处理,洗净烘干后过 60 目筛,经 SerCon Integra 2 元素分析仪测定。土壤中全钙、全铝、全铁、全钾、全磷含量采用 XRD 法测定。土壤田间持水量(WHC)采用室内环刀法测定。阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法(pH=7)测定。土壤粒径采用激光粒度分析仪测定(Beckman Coulter LS 230, USA)。土壤无机氮(NH₄⁺和 NO₃⁻)含量采用 Skalarplus San 流动分析仪测定。浸提液中的无机氮采用氧化镁和定氮合金蒸馏法提取:在浸提液中加入氧化镁进行蒸馏,分离出铵态氮,随后在蒸馏管中加入定氮合金,将硝态氮还原成铵态氮蒸出。馏出液用硼酸+混合指示剂(甲基红+溴甲酚绿)吸收液吸收,用 0.02 mol·L⁻¹ 的硫酸标

准液滴定。将含有 NH_4^+ 的溶液放置于烘箱中 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干, 采用 SerCon Integra 2 同位素比质谱仪测定 ^{15}N 丰度。

2.2.3 土壤氮素转化模型

土壤中的不同氮素转化过程速率可通过土壤氮素转化模型^[15] 计算(图 2), 主要包括 5 个氮库: 易分解有机氮(N_{lab})、难分解有机氮(N_{rec})、铵态氮(NH_4^+)、硝态氮(NO_3^-)和吸附的铵态氮($\text{NH}_4^+_{\text{ads}}$); 10 个氮转化速率: 易利用有机氮矿化速率(M_{Nlab})、难利用有机氮矿化速率(M_{Nrec})、铵态氮固定为难分解有机氮($I_{\text{NH}_4\text{-Nrec}}$)、铵态氮固定为易分解有机氮($I_{\text{NH}_4\text{-Nlab}}$)、铵态氮的释放(R_{NH_4})、铵态氮的吸附(A_{NH_4})、自养硝化(O_{NH_4})、异养硝化(O_{Nrec})、硝态氮固定为难分解有机氮(I_{NO_3})、硝态氮异化还原成铵(D_{NO_3}), 其中有机氮矿化速率 $M_{\text{Norg}} = M_{\text{Nlab}} + M_{\text{Nrec}}$, 铵态氮微生物同化速率 $I_{\text{NH}_4} = I_{\text{NH}_4\text{-Nlab}} + I_{\text{NH}_4\text{-Nrec}}$ 。 本研究所用的土壤氮初级转化速率符合零级或一级动力学方程, 通过连续调整模型和实测的 NH_4^+ 和 NO_3^- 的浓度和 ^{15}N 丰度, 使拟合值最小化, 确保模型运算过程中找到真正的全局最小值。

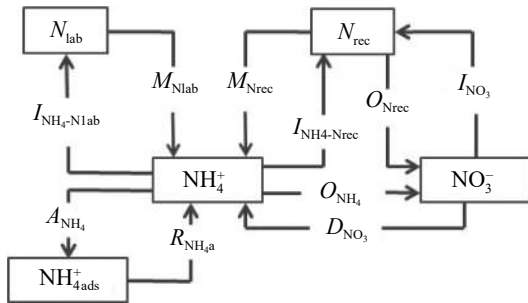


图 2 氮素转化模型^[15]

Fig. 2 ^{15}N tracing model used for data analysis

2.2.4 统计分析与数据处理

NH_4^+ 和 NO_3^- 的净产生速率均为总产生速率减去总消耗速率。

$$\text{NH}_4^+ \text{净产生速率} = (M_{\text{Norg}} + R_{\text{NH}_4} + D_{\text{NO}_3}) - (O_{\text{NH}_4} + I_{\text{NH}_4} + A_{\text{NH}_4})$$

$$\text{NO}_3^- \text{净产生速率} = (O_{\text{NH}_4} + O_{\text{Nrec}}) - (I_{\text{NO}_3} + D_{\text{NO}_3})$$

$$\text{无机氮供应能力(INS)} = (M_{\text{Norg}} + O_{\text{Nrec}}) \quad (1)$$

利用单因素方差分析检验不同土地利用方式下土壤理化性质的差异, 并采用 LSD 方法进行显著性多重比较, 差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。利用线性回归分析土壤氮转化速率与土壤理化指标之间的相关

性。以上分析在 SPSS25.0 软件中进行。

3 结果与分析

3.1 土壤理化性质

土壤基本理化性质受土地利用方式的显著影响(表 1)。乔灌地改种砂糖桔显著降低了土壤有机碳、全氮和全钙含量以及 WHC、pH 和 CEC, 其中有机碳、全氮和全钙分别降低了 65%、62%、67%, WHC 降低 30%, pH 从 7.18 降低为 5.91, CEC 降低 48%。乔灌地开垦种植砂糖桔后土壤全铁、全铝、全钾含量均显著增加, C/N、全磷含量变化不显著。乔灌地土壤主要以粉粒为主, 粉粒约占 55%, 黏粒次之, 约占 29%, 开垦种植砂糖桔后主要以黏粒为主, 约占 46%。乔灌地改种砂糖桔后, 铵态氮和硝态氮含量没有显著差异, 两种土壤的无机氮均以硝态氮为主。

表 1 乔灌地和砂糖桔地土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil in arbor-bush land and sugar orange land

指标	乔灌地	砂糖桔地
有机碳/ $\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$	89.4±10.8A	31.6±8.8B
全氮/ $\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$	7.28±0.75A	2.77±0.64B
C/N	12.26±0.57A	11.33±0.60A
铵态氮/ $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.38±0.00A	6.47±2.68A
硝态氮/ $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$	21.86±3.84A	24.76±10.70A
WHC/%	1.25±0.09A	0.88±0.04B
pH	7.18±0.25A	5.91±0.25B
CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	41.5±2.79A	21.6±2.79B
全钙/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	15.37±1.55A	5.11±1.24B
全铁/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	65.8±9.4B	83.5±2.4A
全铝/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	98.6±1.1B	151.5±0.5A
全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.93±0.09A	0.69±0.14A
全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	7.37±0.97B	10.97±1.50A
黏粒比例($<2\text{ }\mu\text{m}$)/%	29.0±5.9B	46.0±1.9A
粉粒比例($2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$)/%	54.8±6.1A	44.0±0.2B
砂粒比例($50\sim 2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$)/%	16.3±0.3A	10.0±1.7B

注: 同行中不同大写字母表示乔灌地和砂糖桔地土壤之间各指标差异达显著水平($P < 0.05$)。

3.2 土壤氮初级转化速率

根据 ^{15}N 标记试验中的铵态氮、硝态氮的浓度和

丰度变化(图3, 图4)运用氮素转化模型得到土壤氮的初级转化速率, 其中测定数据和拟合数据比较一致。乔灌地改种砂糖桔后土壤有机氮矿化速率 M_{Norg} 由 $2.93 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 显著降低为 $0.60 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (图5), 铵态氮微生物同化速率 I_{NH_4} 由 $1.76 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 显著降低为 $0.10 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。乔灌地铵态氮微生物同化速率与有机氮矿化速率的比值为 0.60, 开垦种植砂糖桔后, 微生物同化速率与有机氮矿化速率

的比值仅为 0.17。乔灌地和砂糖桔地 NH_4^+ 的消耗速率均大于生产速率, 导致 NH_4^+ 的净产生速率为负, 乔灌地改种砂糖桔后, NH_4^+ 净产生速率有所增加。乔灌地改种砂糖桔后, 土壤 O_{Nrec} 、 D_{NO_3} 和 I_{NO_3} 没有显著性差异, 土壤 O_{NH_4} 变化较明显, 由 $11.06 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 显著降低为 $1.68 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 导致硝态氮净产生速率由 $10.42 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 显著降低到 $1.79 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

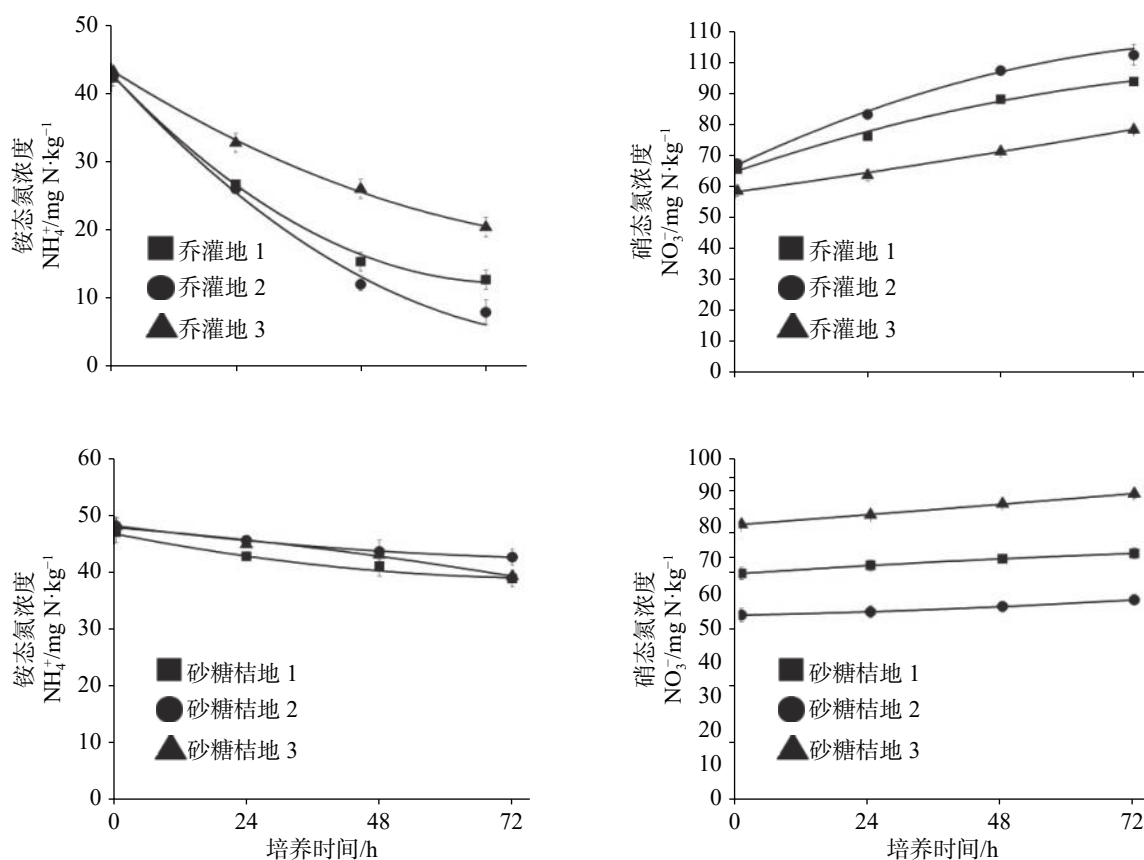


图3 ^{15}N 标记试验中铵态氮和硝态氮的浓度随时间变化

Fig. 3 Changes of the concentration of ammonium and nitrate over time in the ^{15}N labeled experiment

3.3 影响氮初级转化速率的因素

由 PCA 二维排序图(图6)和相关性分析(表2)可知, 土壤 M_{Norg} 和 O_{NH_4} 的影响因素基本一致, 均与有机碳、全氮、pH、CEC、WHC、全钙、粉粒比例和砂粒比例呈显著正相关性, 与全铝、全铁、黏粒比例呈显著负相关性, M_{Norg} 还与全钾呈显著负相关性; I_{NH_4} 与有机碳、全氮、C/N、CEC、WHC、全钙和砂粒比例呈显著正相关性, 与全钾、全铝呈显著负相关性。 R_{NH_4} 与 pH、全钙、粉粒比例呈显著正相关性, 与全铁、全铝、黏粒比例呈显著负相关性。

4 讨论

4.1 乔灌地改种砂糖桔后土壤铵态氮产生和消耗速率变化

本研究中乔灌地土壤有机氮矿化速率为 $2.93 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 这与 Zhu 等^[11]研究的岩溶区林地的矿化速率 $3.71 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 相差不大, 也有研究报道岩溶区林地的矿化速率达到 $12.12 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[17]。乔灌地开垦种植砂糖桔, 矿化速率显著降低为 $0.60 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。已有研究表明岩溶区不同农作物土

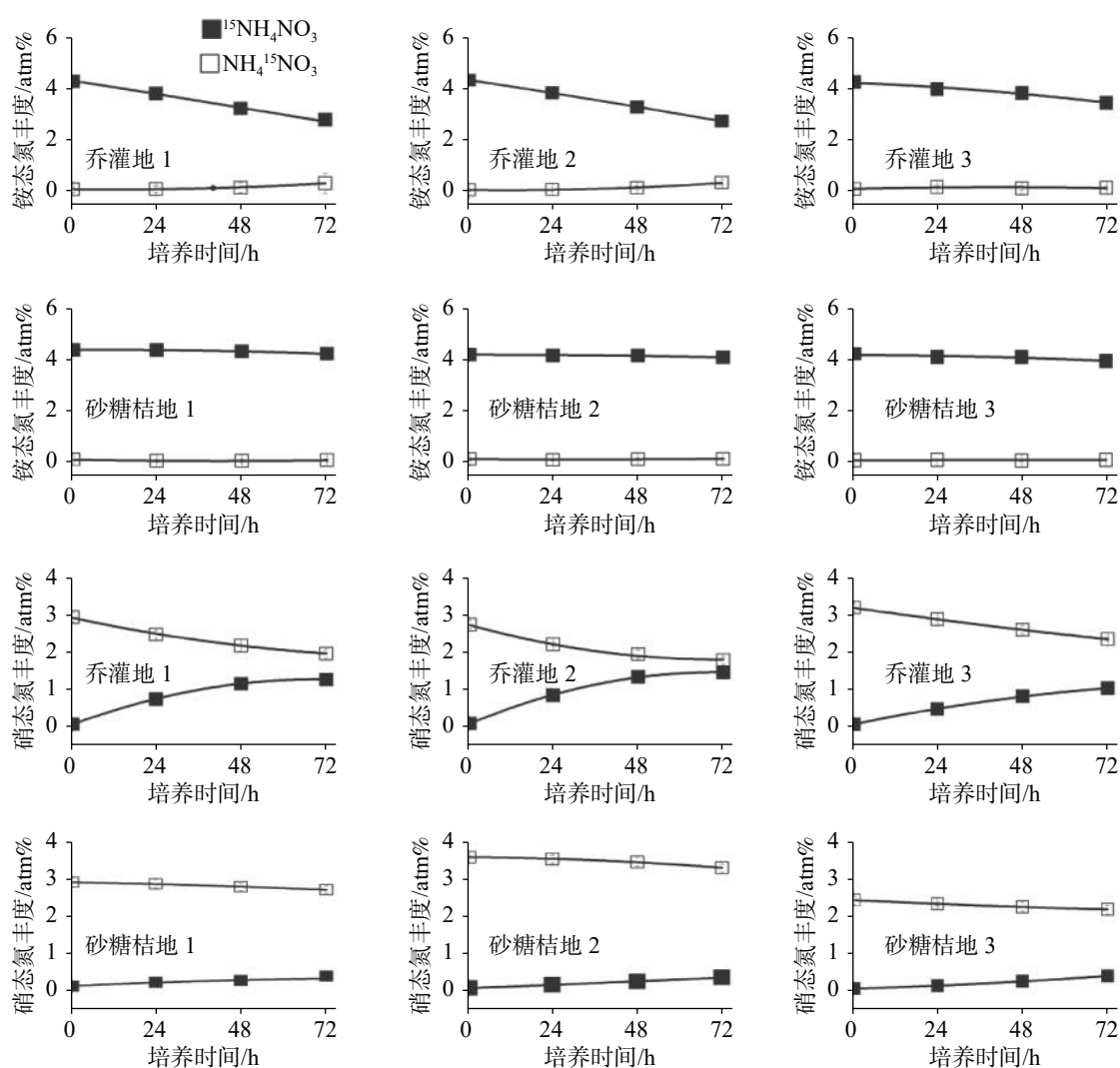


图 4 ^{15}N 标记试验中铵态氮和硝态氮的丰度随时间变化

Fig. 4 Changes in the abundance of ammonium and nitrate over time in the ^{15}N labeled experiment

壤矿化速率均低于林地土壤^[17],这与本研究结果相一致。土壤氮矿化速率主要受植物类型的影响^[18]。植物凋落物和根系分泌物通过微生物分解能够为土壤提供较多的有机质,是土壤有机氮矿化的主要底物^[19]。乔灌改种砂糖桔后凋落物和根系分泌物减少,土壤有机质含量也减少。土壤有机质还与钙含量有关,随钙含量的增加而增加^[20]。乔灌地开垦种植砂糖桔后,钙含量由 $15.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少至 $5.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤中钙含量显著降低,积累的有机质也会随之减少^[21]。本研究中砂糖桔地的有机碳和全氮仅为乔灌地的三分之一左右,有机氮和全氮的显著降低直接影响土壤有机氮的矿化速率。在本研究中 M_{Norg} 除与土壤有机碳和全氮含量有关外,还与农业的管理方式有关。为提高果树的产量,常施加大量的氮肥,氮肥的使用能够加快土壤的酸化^[22]。文冬妮等^[23]研

究发现岩溶区草地的 pH 为 7.17,种植 5 年的脐橙地土壤 pH 降为 4.5。在本研究中,乔灌地的 pH 为 7.18,开垦种植砂糖桔后 pH 为 5.91。而土壤的酸化又促进了土壤重金属的解吸和释放^[22],砂糖桔地土壤中的 Fe 和 Al 含量变高。较高的 Fe、Al 含量对微生物具有一定的胁迫作用,将影响微生物的活性和数量^[24-25]。砂糖桔地土壤有机质的减少使土壤质地变得黏重,土壤的通气透水性变差^[26],土壤微生物的活性也会随之降低。土壤有机氮矿化均是微生物参与的活动^[27],微生物的数量和活性的降低将导致土壤有机氮矿化速率的降低。

在岩溶区,异养硝化速率几乎不发生,无机氮的供应能力主要由有机氮矿化速率决定。乔灌地开垦种植砂糖桔后,有机氮矿化速率降低,土壤供氮能力也随之减弱。为提高土壤供氮能力,可适当施加有

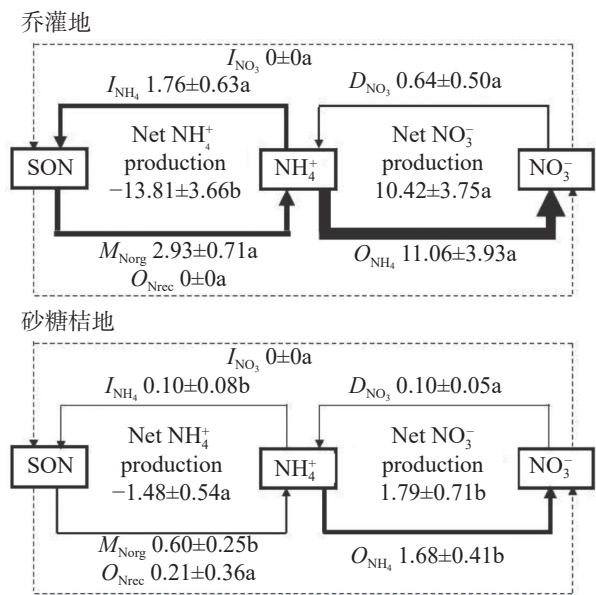


图 5 乔灌地和砂糖桔地土壤氮初级转化速率 (数据来源^[16])
注: 不同字母表示乔灌地和砂糖桔地土壤同一初级转化速率差异性显著 ($P<0.05$)。

Fig. 5 Gross N conversion rates in the soil of arbor-bush land and sugar orange land

机肥料, 提高土壤有机氮矿化的基质, 同时还要改善土壤性质, 降低土壤的黏度和 Fe、Al 含量。

在本研究中铵态氮主要通过土壤有机氮的矿化产生, D_{NO_3} 产生的铵态氮所占比例较小。乔灌地产生的铵态氮有 49% 通过微生物同化作用 I_{NH_4} 被消耗。 I_{NH_4} 能够将无机氮固持在生物体中, 有助于减少无机氮的损失, 提高土壤的保氮能力。而乔灌地改种砂

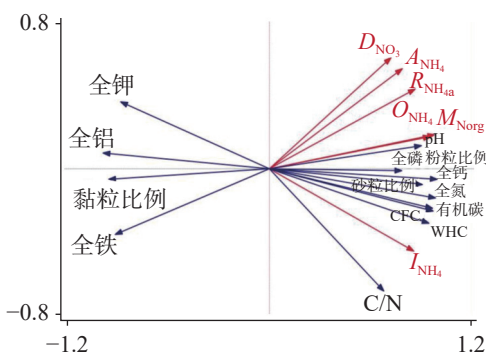


图 6 土壤的理化性质与氮初级转化速率的 PCA 二维排序图
Fig. 6 PCA map of soil physical and chemical properties and gross N conversion rates

糖桔后仅有 14% 的铵态氮通过 I_{NH_4} 固持在土壤中, 土壤的保氮能力也随之减弱。

4.2 乔灌地改种砂糖桔降低土壤硝态氮产生和消耗速率

在酸性土壤中, 无机氮主要以 NH_4^+ 的形式存在, 自养硝化速率 O_{NH_4} 仅为 $0.12\sim0.65\text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ ^[8]。岩溶区林地的 O_{NH_4} 为 $5.80\text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ ^[11]。本研究乔灌地 O_{NH_4} 为 $11.06\text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 。一般认为, 消化细菌最适生长的 pH 为 6.0~7.5, 当土壤 pH<5 时, O_{NH_4} 几乎可以忽略不计^[28]。本研究区乔灌地 pH 为 7.18, 前人研究的岩溶区林地 pH 为 6.33^[11], 较高的 pH 可显著刺激硝化细菌的数量和活性^[29-30], 从而增加 NH_4^+ 的氧化能力, 因此乔灌地较岩溶区林地的硝

表 2 土壤的理化性质与氮初级转化速率的相关性

Table 2 Correlations between soil physical and chemical properties and gross N conversion rates

成分及性质	M_{Norg}	I_{NH_4}	O_{NH_4}	A_{NH_4}	R_{NH_4a}	D_{NO_3}
有机碳	0.91*	0.92**	0.90*	0.63	0.73	0.55
全氮	0.94**	0.90*	0.93**	0.68	0.78	0.61
C/N	0.55	0.86*	0.52	0.23	0.22	0.16
pH	0.96**	0.78	0.90*	0.86*	0.94**	0.80
CEC	0.90*	0.94**	0.87*	0.64	0.76	0.56
WHC	0.86**	0.95**	0.85*	0.55	0.70	0.46
全磷	0.77	0.67	0.67	0.77	0.54	0.75
全钾	-0.81*	-0.88*	-0.78	-0.49	-0.61	-0.43
全钙	0.97**	0.87*	0.95**	0.74	0.85*	0.67
全铝	-0.94**	-0.92**	-0.90*	-0.74	-0.83*	-0.67
全铁	-0.98**	-0.58	-0.97**	-0.88*	-0.95**	-0.85*
黏粒比例(<2 μm)	-0.94**	-0.77	-0.98**	-0.72	-0.86*	-0.65
粉粒比例(2~50 μm)	0.92**	0.65	0.98**	0.68	0.85*	0.62
砂粒比例(50~2 000 μm)	0.84*	0.90*	0.83*	0.69	0.75	0.61

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。

化速率大。耕作和氮肥的使用能够增加硝化细菌的数量和活度,从而促进 O_{NH_4} 的产生^[8,12]。但乔灌地开垦种植砂糖桔后,自养硝化速率显著降低,仅为乔灌地的 15%,说明施加氮肥不是影响土壤 O_{NH_4} 的唯一因素。一方面自养硝化的底物铵态氮浓度显著降低将影响自养硝化速率,在本研究中 O_{NH_4} 与 M_{Norg} 受土壤理化性质影响的因素基本一致,说明 M_{Norg} 产生的铵态氮的多少对 O_{NH_4} 至关重要。坡耕地种植砂糖桔,一方面地表覆盖物的减少导致钙离子流失;另一方面,施用化肥提高了土壤铵态氮氧化为硝态氮过程而释放氢离子,导致土壤 pH 下降。砂糖桔地土壤的 pH 降低,成为弱酸性土壤,不利于硝化细菌的活动,从而制约 O_{NH_4} ,最终导致土壤中的 O_{NH_4} 显著降低。

在本研究区硝态氮微生物同化作用 I_{NO_3} 几乎不发生,这与前人研究的岩溶区土壤相一致^[31],而在酸性土壤中 17.2%~74.9% 的硝态氮被微生物同化^[8],是酸性土壤硝态氮保留的重要方式。在岩溶区产生的硝态氮不能通过 I_{NO_3} 保留下来。乔灌地硝态氮的产生速率非常高,消耗速率却很低,仅有 5% 的硝态氮异化还原成铵态氮。高产生速率和低消耗速率导致硝态氮的净产生速率为正。在乔灌地和砂糖桔地土壤中的无机氮均以 NO_3^- 为主,但 NO_3^- 浓度并不高,均不超过 $25 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。岩溶区属于亚热带地区,湿热多雨,断裂的土壤结构容易加剧 NO_3^- 的淋失作用^[11]。产生的 NO_3^- 可能通过氮淋溶和径流从土壤中流失。乔灌地改种砂糖桔后土壤的 O_{NH_4} 降低,净 NO_3^- 产生速率降低,将有助于降低硝态氮的淋溶风险。

5 结 论

岩溶区乔灌地开垦种植砂糖桔,土壤有机氮矿化速率显著降低,土壤无机氮的供应能力减弱。土壤矿化速率除与有机碳、全氮的含量有关,还与农业的管理措施有关。乔灌地开垦种植砂糖桔,由于氮肥的使用加快土壤的酸化,土壤中的铁、铝大量释放导致土壤的有机氮矿化速率降低。在岩溶区硝态氮微生物同化作用 I_{NO_3} 几乎不发生,乔灌地改种砂糖桔 I_{NH_4} 显著降低,土壤氮的保持能力减弱。土地利用方式发生改变后自养硝化速率 O_{NH_4} 显著降低,硝态氮的净产生速率减少。总体来看,岩溶区土壤的保氮能力均较差。农业活动导致土壤氮的供应能力减弱,由于硝化的底物减少,土壤硝态氮的淋溶风险减弱。

参考文献

- [1] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [2] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 万晓华, 桑昌鹏, 周富伟, 黄志群. 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.
XIAO Haoyan, LIU Bao, YU ZaiPeng, WAN Xiaohua, SANG ChangPeng, ZHOU Fuwei, HUANG Zhiqun. Seasonal dynamics of soil mineral nitrogen pools and nitrogen mineralization rate in different forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 730-738.
- [3] Xie Y, Yang L, Zhu T B, Yang H, Zhang J B, Yang J L, Cao J H, Bai B, Jiang Z C, Liang Y M, Lan F L, Meng L, Müller C. Rapid recovery of nitrogen retention capacity in a subtropical acidic soil following afforestation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 171-180.
- [4] 袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪. 戴云山自然保护区森林土壤氮转化特点研究[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 240-247.
YUAN Lei, LI Wenzhou, CHEN Wenwei, ZHANG Jinbo, CAI Zucong. Nitrogen transformation of different Subtropical forest soils in Daiyun Mountain National Nature Reserve[J]. *Soils*, 2017, 49(2): 240-247.
- [5] 李平, 郎漫. 开垦年限对黑土氮初级转化速率和净转化速率的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 165-173.
LI Ping, LANG Man. Effect of cultivation on gross and net N transformation rates in black soil relative to duration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 165-173.
- [6] Booth M S, Stark J M, Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data[J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(2): 139-157.
- [7] Zhang J B, Müller C, Zhu T B, Cheng Y, Cai Z C. Heterotrophic nitrification is the predominant NO_3^- production mechanism in coniferous but not broad-leaf acid forest soil in subtropical China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(5): 533-542.
- [8] Zhu T B, Meng T Z, Zhang J B, Yin Y F, Cai Z C, Yang W Y, Zhong W H. Nitrogen mineralization, immobilization turnover, heterotrophic nitrification, and microbial groups in acid forest soils of subtropical China[J]. *Biol Fertil Soils*, 2013, 49(3): 323-331.
- [9] Jiang X J, Xin X P, Li S W, Zhou J C, Zhu T B, Müller C, Cai Z C, Wright A L. Effects of Fe oxide on N transformations in subtropical acid soils[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8615.
- [10] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [11] Zhu T B, Zeng S M, Qin H L, Zhou K X, Yang H, Lan F L, Huang F, Cao J H, Müller C. Low nitrate retention capacity in calcareous soil under woodland in the karst region of Southwest-

- ern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 99-101.
- [12] Zhang J B, Zhu T B, Meng T Z, Zhang Y C, Yang J J, Yang W Y, Müller C, Cai Z C. Agricultural land use affects nitrate production and conservation in humid subtropical soils in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 107-114.
- [13] Zhu T B, Zhang J B, Meng T Z, Zhang Y C, Yang J J, Müller C, Cai Z C. Tea plantation destroys soil retention of NO_3^- and increases N_2O emissions in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 73: 106-114.
- [14] Zhang J B, Cai Z C, Yang W Y, Zhu T B, Yu Y J, Yan X Y, Jia Z J. Long-term field fertilization affects soil nitrogen transformations in a rice-wheat-rotation cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6): 939-946.
- [15] Müller C, Rütting T, Kattge J, Laughlin R J, Stevens R J. Estimation of parameters in complex ^{15}N tracing models by Monte Carlo sampling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(3): 715-726.
- [16] 杨会, 朱同彬, 吴夏, 郝玉培, 吴华英. 岩溶区种植砂糖桔对石灰土有机氮矿化过程的影响[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(11): 2665-2673.
- YANG Hui, ZHU Tongbin, WU Xia, HAO Yupei, WU Huaying. Effects of sugar orange plantation on organic nitrogen mineralization in different calcareous soils in karst region[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(11): 2665-2673.
- [17] Li D J, Liu J, Chen H, Zheng L, Wang K L. Soil gross nitrogen transformations in responses to land use conversion in a subtropical karst region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 212: 1-7.
- [18] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, Müller C. Nitrogen cycling in forest soils across climate gradients in Eastern China[J]. *Plant Soil*, 2011, 342: 419-432.
- [19] 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(11-12): 1707-1716.
- [20] Li D J, Li W, Yang L Q, Luo P, Xiao K C, Chen H, Zhang W, He X Y, Chen H S, Wang K L. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen following agricultural abandonment in a karst region[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(1): 230-242.
- [21] Ye C L, Chen D M, Hall S J, Pan S, Yan X B, Bai T S, Guo H, Zhang Y, Bai Y F, Hu S J. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: Plant, microbial and geochemical controls[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21: 1162-1173.
- [22] 赵全桂, 卢树昌, 吴德敏, 周海燕, 陈清. 施肥投入对招远农田土壤酸化及养分变化的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 301-306.
- ZHAO Quanguai, LU Shuchang, WU Demin, ZHOU Haiyan, CHEN Qing. Effect on the farmland soil acidification and nutrients change in Zhaoyuan City by fertilizer application[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 301-306.
- [23] 文冬妮, 杨程, 杨霖, 秦兴华, 孟磊, 何秋香, 朱同彬, Christoph Müller. 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.
- WEN Dongni, YANG Cheng, YANG Lin, QIN Xinghua, MENG Lei, HE Qiuxiang, ZHU Tongbin, Christoph Müller. Effects of agricultural cultivation on soil organic nitrogen mineralization in karst regions[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(2): 189-195.
- [24] 王世强, 胡长玉, 程东华, 廖万有, 赵灿, 葛慧丽, 房江育. Al^{3+} 胁迫对茶园土壤微生物区系及生理群的影响[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(6): 36-39.
- WANG Shiqiang, HU Changyu, CHENG Donghua, LIAO Wanyou, ZHAO Can, GE Huili, FAGN Jiangyu. Effect of Al^{3+} on populations and major physiological groups of microbes in tea garden soils[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(6): 36-39.
- [25] 刘亚利, 钟婷婷, 刘鹏飞, 余紫薇, 杨灿. 投加不同形态的铁对厌氧消化的影响和作用机理[J]. *应用化工*, 2018, 47(10): 2264-2267.
- LIU Yali, ZHONG Tingting, LIU Pengfei, YU Ziwei, YANG Can. Effects and mechanisms of iron in different forms on anaerobic digestion[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(10): 2264-2267.
- [26] 吕刚, 赵宾, 赵国宣, 任明强. 贵州湄潭县茶园土壤的理化性状特征[J]. *贵州农业科学*, 2016, 44(9): 84-88.
- LV Gang, ZHAO Bin, ZHAO Guoxuan, REN Mingqiang. Physical and chemical traits and characteristics of soils in tea gardens in Meitan county of Guizhou Province[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(9): 84-88.
- [27] Zhang S S, Zheng Q, Noll L S, Hu Y T, Wanek W G. Environmental effects on soil microbial nitrogen use efficiency are controlled by allocation of organic nitrogen to microbial growth and regulate gross N mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 304-315.
- [28] Weber D F, Gainey P L. Relative sensitivity of nitrifying organisms to hydrogen ions in soils and solutions[J]. *Soil Science*, 1962, 94(3): 138-145.
- [29] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, Lin X G, Yagi K, Hu J L, Zhang J B. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(2): 485-491.
- [30] Wan Y J, Ju X T, Ingwersen J, Schwarz U, Stange C F, Zhang F S, Streck T. Gross nitrogen transformations and related nitrous oxide emissions in an intensively used calcareous soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 102-112.
- [31] 赖倩倩, 杨霖, 秦兴华, 田伟, 伍延正, 汤水荣, 解钰, Christoph Müller, 孟磊. 蔗渣生物质炭对喀斯特农田石灰性土壤氮转化过程的短期影响[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(3): 450-457.
- LAI Qianqian, YANG Lin, QIN Xinghua, TIAN Wei, WU Yanzheng, TAGN Shuirong, XIE Yu, Christoph Müller, MENG Lei. Study on short-term effects of sugarcane biochar on nitrogen transformation in calcareous soils in karst farmland[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 450-457.

Effects of short-term planting of sugar orange on soil gross nitrogen conversion in karst area

YANG Hui¹, ZHU Tongbin¹, WU Xia¹, WU Huaying¹, TANG Wei¹, LAN Gaoyong¹, Christoph Müller²

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Department of Plant Ecology, Justus-Liebig University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany)

Abstract The soil developed from carbonatite is rich in calcium and magnesium, with high pH and heavy soil viscosity in karst area. Therefore, the nitrogen conversion process of calcareous soil in karst area is different from other zonal soil. The study area is a typical karst area. With a subtropical monsoon climate in this area, its annual temperature, precipitation and evaporation averages 19.8 °C, 1,860 mm, and 1,038-1,566 mm, respectively. The rainy season mainly occurs from April to July. Because the study area is mainly covered with hills, thus leading to soil shortage. In order to alleviate poverty, local people reclaim hillsides to plant sugar oranges to increase economic income, during which the change of land use will affect the process of soil nitrogen conversion.

The study of soil nitrogen conversion process under different land use modes is of great significance for understanding soil nitrogen cycle, evaluating soil nitrogen supply capacity and availability, and guiding crop planting. However, there are few studies on soil nitrogen conversion of sugar oranges in karst area. In this paper, the ¹⁵N tracing technique combined with MCMC numerical model was used to study the conversion of soil gross nitrogen and its influencing factors in the karst area where arbor-bush have been converted to sugar oranges for 4 years. This study aims to provide a scientific basis for soil nitrogen supply capacity and ecological environment evaluation in karst area.

The results showed that the mineralization rate of organic nitrogen decreased significantly from 2.93 mg N·kg⁻¹·d⁻¹ to 0.60 mg N·kg⁻¹·d⁻¹ during the conversion of arbor-bush to sugar orange. The mineralization rate of organic nitrogen showed a significant positive correlation with soil organic carbon, total nitrogen and calcium content, and a negative correlation with iron, aluminum, potassium and the proportion of clay. The ammonium nitrogen assimilation rate by microorganism significantly reduced from 1.76 mg N·kg⁻¹·d⁻¹ to 0.10 mg N·kg⁻¹·d⁻¹, and the ratio of ammonium nitrogen assimilation rate by microorganism to the mineralization rate of organic nitrogen was 0.17 in the soil of sugar orange. The autotrophic nitrification rate was as high as 11.06 mg N·kg⁻¹·d⁻¹ in the soil of arbor-bush, while the rate of nitrate dissimilation reduction was only 0.64 mg N·kg⁻¹·d⁻¹ in which the nitrate nitrogen microbial assimilation hardly occurred, resulting in the net nitrate production rate of 10.42 mg N·kg⁻¹·d⁻¹. The autotrophic nitrification rate significantly reduced to 1.68 mg N·kg⁻¹·d⁻¹ due to the decrease of soil ammonium concentration and soil acidification caused by fertilizer application. The heterotrophic nitrification rate hardly occurs, and inorganic nitrogen supply capacity is mainly determined by organic nitrogen mineralization rate in karst area. The mineralization rate of organic nitrogen decreased significantly, and the soil inorganic nitrogen supply capacity was weakened during the conversion of arbor-bush to sugar orange. The soil organic nitrogen mineralization rate was related to the content of organic carbon and total nitrogen and agricultural management measures. Since the use of nitrogen fertilizer accelerated soil acidification, the release of iron and aluminum in soil affected the activity and quantity of microorganisms, which resulted in the decrease of soil organic nitrogen mineralization rate. The assimilation rate of ammonium nitrogen significantly decreased and the retention ability of soil nitrogen was weakened in karst area. The rate of autotrophic nitrification decreased significantly, and the net rate of nitrate nitrogen production decreased after the land use change. In general, soil nitrogen retention capacity was poor in karst area. Due to the reduction of nitrification substrate in agricultural activities, the leaching risk of soil nitrate nitrogen is weakened, which led to the weakening of soil nitrogen supply capacity.

Key words karst areas, land use, ¹⁵N tracing, gross nitrogen conversion

(编辑 黄晨晖)