

DOI: 10.11766/trxb201902180022

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.

开垦年限对黑土氮初级转化速率和净转化速率的影响*

李平, 郎漫[†]

(南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 以东北黑土区开垦 2 a 和开垦 30 a 的典型旱作土壤为研究对象, 采用 ¹⁵N 同位素成对标记技术开展室内培养试验, 利用数值计算模型 (FLUAZ) 计算不同开垦年限土壤的氮初级转化速率, 以比较不同开垦年限黑土氮初级转化速率和净转化速率的差异, 明确开垦年限对黑土氮转化过程的影响。结果表明, 与开垦 2 a 土壤相比, 开垦 30 a 土壤的有机碳和水溶性有机碳含量显著降低, 导致土壤氮初级矿化速率和初级固定速率也显著降低。但开垦 30 a 土壤的初级硝化速率、净硝化速率和净氮矿化速率却显著高于开垦 2 a 土壤。两个开垦年限土壤的初级硝化速率分别为净硝化速率的 1.15 倍和 1.02 倍, 说明土壤微生物对硝态氮的固定很少。开垦 30 a 土壤的 *m/i* 值 (氮初级矿化速率与初级固定速率之比) 和 *n/ia* 值 (初级硝化速率与初级铵态氮固定速率之比) 均显著大于 1, 而开垦 2 a 土壤的 *m/i* 值和 *n/ia* 值均接近 1。表明开垦 2 a 土壤的氮矿化与固定过程紧密偶联, 氮素损失的风险较小, 而开垦 30 a 土壤中氮矿化量超过了固定量, 这为硝化作用的进行提供了底物, 增加了硝酸盐反硝化和淋溶风险。

关键词: 开垦年限; 黑土; ¹⁵N 标记; 氮转化

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Effect of Cultivation on Gross and Net N Transformation Rates in Black Soil Relative to Duration

LI Ping, LANG Man[†]

(Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: 【Objective】 This paper was oriented to explore effect of cultivation, relative to duration, on gross and net N transformation rates in black soil in Northeast China. 【Method】 Two tracts of upland farmlands of typical black soils, different in cultivation history, 2 and 30 years, were selected in Northeast China for the study. Soil samples were collected for in-lab incubation using the ¹⁵N pair-labeled technique. Gross N transformation rates in the soils were calculated using the numerical algorithm model (FLUAZ), and net mineralization rates and net nitrification rates were by duration of the incubation and variation of the samples in inorganic nitrogen content or nitrate nitrogen content with the incubation. 【Result】 The soil of the farmland,

* 国家自然科学基金项目 (41301345, 41101284) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41301345 and 41101284)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mlang@nuist.edu.cn

作者简介: 李平 (1982—), 男, 江西吉水人, 博士, 副教授, 主要从事土壤氮循环及其环境效应研究。E-mail: pli@nuist.edu.cn

收稿日期: 2019-02-18; 收到修改稿日期: 2019-03-12; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-03-22

30 years in cultivation, was 20.8% and 16.0% lower, respectively, than the one 2 years in cultivation in organic C and water soluble organic C content, and only 62.6% and 42.1% of the latter, respectively, in gross mineralization and immobilization rate. However, the former was significantly higher than or 1.77, 2.00, and 7.29 times as high as the latter, respectively, in gross nitrification rate, net nitrification rate, and net mineralization rate. The gross nitrification rate was 1.15 and 1.02 times as high as the net nitrification rate, respectively, in the latter and former, and the immobilized ammonium nitrogen accounted for 60% ~ 97% of the total inorganic nitrogen during the whole incubation period, indicating that little nitrate nitrogen was immobilized by soil microorganisms in these two soils. The values of m/i (the ratio of gross N mineralization rate to immobilization rate) and n/ia (the ratio of gross nitrification rate to ammonium immobilization rate) of the former were both significantly higher than 1, while those of the latter were approximate to 1. 【Conclusion】 The processes of mineralization and immobilization of nitrogen in the soil, 2 years in cultivation, were coupled tightly, posing little risk of nitrogen loss to environment, whereas the amount of mineralized nitrogen was much higher than that of immobilized nitrogen in the soil 30 years in cultivation, thus providing substrate for nitrification and increasing denitrification and leaching risk of nitrate.

Key words: Duration of cultivation; Black soil; ^{15}N trace; Nitrogen transformation

土壤中氮素转化过程对土壤氮素有效性和氮肥利用效率有重要影响。目前,对土壤氮素转化规律的研究包括氮净转化速率和氮初级转化速率两个方面。氮净转化速率是单位时间内土壤中无机氮含量的净变化量,氮初级转化速率是土壤氮从一种形态转化为另一种形态的实际转化速率^[1-2]。自然条件下,一种形态的氮有多种输入和输出途径,因此,土壤氮净转化速率是控制其转化的多个氮初级转化速率的综合结果^[3]。比如,土壤氮净矿化速率取决于土壤氮初级矿化速率与初级固定速率差值的大小^[4],当一种土壤的氮初级矿化速率等于或者小于无机氮的固定速率时,氮净矿化速率为 0 或为负值,但这并不意味着土壤氮矿化潜势低或者无氮矿化能力。由此可见,测定土壤中的氮净转化速率对于指示土壤中无机氮供应能力的大小有一定意义,但如果要阐明土壤中无机氮含量变化的具体过程及原因,必须要认识控制其含量变化的各个过程的初级转化速率,这对于深入理解土壤氮循环具有重要意义^[5]。

土壤理化性质显著影响土壤氮初级转化速率。一些农业生产措施如耕作、施肥、灌溉等会通过影响土壤基本理化性质而对土壤氮初级转化速率产生显著影响^[6-11]。有研究^[6-9]指出,土壤有机碳含量越高,氮初级矿化速率越高,但氮初级固定速率不受有机碳含量影响,而与水溶性有机碳含量呈显著正相关。土壤 pH 对初级硝化速率影响显著, pH 越高,初级硝化速率越快^[10]。土壤砂粒含量越高、黏粒含量越少,土壤通气性就越好,初级硝化速率就越快^[11]。

总面积达 101.85 万 km^2 的东北黑土区是世界三大片黑土之一^[12]。黑土是东北地区的主要耕作土壤,因其高有机质含量、高肥力的特点而具有较高的生产力。东北黑土区是我国重要的商品粮基地,2017 年东三省粮食产量约 1.39 亿 t,占全国粮食总产量的 21%^[13]。黑土开垦后土壤性质发生了很大改变,如开垦年限越长,土壤有机碳和全氮含量越低^[14-15]。黑土开垦后长期大量氮肥的施用使得土壤 pH 随着开垦年限的增加逐渐降低^[16]。此外,黑土开垦后土壤质地也发生很大改变^[17-18]。这些土壤理化性质的改变会直接或者间接影响土壤微生物的活性,进而影响土壤氮初级转化速率。然而,有关不同开垦年限对黑土氮初级转化速率影响的研究尚未见诸报道。因此,本研究以东北黑土区开垦 2 a 和开垦 30 a 的典型旱作土壤为研究对象,利用 ^{15}N 同位素成对标记技术研究开垦年限对土壤氮初级转化速率和净转化速率的影响规律和机制,研究结果可为深入认识黑土氮循环、建立黑土区科学施肥和合理土地利用制度以促进黑土的可持续发展提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自黑龙江省哈尔滨市宾县宾西镇,该地区属于北温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,年均降水量为 550 mm,年均气温为

2.3℃, 土壤类型为中厚层黑土。于春季翻耕前选取地形和生产管理措施较为一致的开垦 2 a (Y2) 和开垦 30 a (Y30) 的田块进行采样, 采样地常年种植玉米, 年均施肥量约为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计, 下同)。采样时在大于 100 m 的空间间隔上布置 3 个采样点作为空间重复, 每个采样点按照 S 形多点采集耕作层 (0~20 cm) 土壤混匀。将采集的土样于室温下风干、磨细过 2 mm 筛后 4℃ 下保存备用。

1.2 试验设计

本研究采用室内培养试验。每个土壤样品分别称取 30 g 土壤 (干重) 于 30 个 250 mL 三角瓶中, 用移液管均匀加入去离子水使得土壤水分含量达到 40% 最大持水量 (WHC), 然后加塞密闭于 25℃ 下预培养 7 d 以便激活土壤微生物。预培养结束后, 将三角瓶分为两组, 一组加入 ^{15}N 标记丰度为 10% atom 的 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 溶液, 另一组加入相同 ^{15}N 标记丰度的 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 溶液。所有土壤添加的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 加氮的同时调节土壤水分含量至 60% WHC。然后将三角瓶置于 25℃ 下培养 7 d, 每天打开瓶塞通气 1 h, 每隔 2 d 对土壤进行补水以维持 60% WHC 的含水量。分别于添加 ^{15}N 标记溶液后的 0、1、2、4、7 d 随机选取 3 瓶土壤作为重复, 向土壤中添加 75 mL 浓度为 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液 (液土比为 2.5 : 1), 25℃ 下恒温振荡 1 h 后过滤, 收集滤液于 100 mL 塑料瓶中, 4℃ 下低温保存并于 7 d 内测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度及其 ^{15}N 丰度。过滤后的土壤用去离子水淋洗 3 次, 每次 150 mL, 淋洗后土壤于 60℃ 条件下烘干后经球磨仪磨细, 包入锡纸粒用于土壤有机氮 ^{15}N 丰度的测定。

1.3 分析方法

土壤 pH 用电位法测定 (液土比为 2.5 : 1); 土壤有机碳用重铬酸钾容量法测定; 土壤全氮采用凯氏法测定; 土壤质地采用比重计法测定; 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度采用 MgO -定氮合金蒸馏法测定^[19]; 土壤水溶性有机碳和水溶性有机氮用水浸提后利用有机碳氮分析仪 (Shimadzu Corp, Kyoto, 日本) 测定^[20]; 土壤最大持水量的测定参照 Fierer 和 Schimel^[21]的方法: 称取 20 g 风干土置于用棉球塞住的玻璃漏斗中, 加入去离子水浸泡 2 h 后加盖防止蒸发, 并去掉棉塞让水分自由下渗, 放置 12 h 后用烘干法测定土壤的重量含水量即为最大持水

量; 土壤无机氮和有机氮的 ^{15}N 丰度采用同位素质谱仪 (Europa Scientific Integra, Sercon 20-22, Crewe, 英国) 测定。

1.4 数据处理

土壤氮初级转化速率利用数值计算模型 (FLUAZ) 计算得出^[22], FLUAZ 模型结合数值方法和非线性拟合方法, 采用平均加权误差 (MWE, Mean weighed error) 作为模型运行的判断标准优化分析氮的初级转化速率, 能够准确反映数据之间的变异。土壤氮矿化速率和净硝化速率分别用培养前后无机氮和硝态氮浓度差与培养时间的比值计算得出^[23]。

文中数据均为 3 次重复的平均值, 利用 Origin 9 软件做图。利用 SPSS 22 软件的成对比较法分析开垦 2 a 和开垦 30 a 土壤的氮初级转化速率和净转化速率在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上的差异显著性。

2 结 果

2.1 不同开垦年限土壤理化性质的变化

由表 1 可知, 黑土开垦年限显著影响土壤理化性质。与开垦 2 a 土壤相比, 开垦 30 a 土壤 pH、铵态氮、有机碳、水溶性有机碳和砂粒含量显著降低, 硝态氮和水溶性有机氮含量则显著增加。两个供试土壤的最大持水量、全氮含量、碳氮比、粉粒和黏粒含量无显著差异。

2.2 不同开垦年限土壤中无机氮含量的动态变化

培养期间土壤无机氮含量的动态变化如图 1 所示。随着培养时间的延长, 开垦 2 a 和开垦 30 a 土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均呈逐渐下降趋势。其中, 开垦 30 a 土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降较快, 由 0 d 时的 $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至培养结束后的 $10.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 开垦 2 a 土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降较慢, 由 0 d 时的 $35.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至培养结束后的 $22.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化趋势相反, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在培养期间呈缓慢上升趋势。其中, 开垦 30 a 土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较高, 上升趋势较明显, 而开垦 2 a 土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量相对较低, 而且上升趋势相对较缓慢 (图 1)。无机氮含量的动态变化趋势表明, 开垦 30 a 土壤的硝化速率大于开垦 2 a 土壤。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the test soils

土壤 Soil	pH	最大持水量 Water	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ /	硝态氮	有机碳	全氮 Total N /
		holding capacity / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Organic C / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Y2	5.74 (0.12) a	594 (11.1) a	8.35 (0.28) a	4.18 (0.59) b	21.2 (0.67) a	1.88 (0.18) a
Y30	5.23 (0.15) b	602 (10.7) a	6.42 (0.33) b	15.3 (0.55) a	16.8 (0.46) b	1.64 (0.09) a

土壤 Soil	碳氮比 C/N	水溶性有机碳 Water	水溶性有机氮 Water	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
		soluble organic C / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	soluble organic N / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Y2	11.3 (0.76) a	282 (5.35) a	6.59 (0.64) b	157 (9.30) a	716 (4.60) a	127 (8.70) a
Y30	10.2 (0.89) a	237 (4.29) b	12.2 (1.04) a	119 (10.50) b	734 (9.60) a	147 (6.80) a

注: Y2: 开垦 2 年土壤; Y30: 开垦 30 年土壤。括号中数值为标准差, 同列数据后不同字母表示两个土壤间差异显著 ($P<0.05$)。下同 Note: Y2: Soil 2 years in cultivation; Y30: Soil 30 years in cultivation. The data in the brackets are standard deviations, different lowercase letters in the same column indicate significant difference between the two soils at $P<0.05$. The same below

2.3 不同开垦年限土壤中无机氮 ^{15}N 丰度的动态变化

在 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 标记的样品中, 两个供试土壤的 NH_4^+ 库的 ^{15}N 丰度均逐渐下降 (图 2a)), 表明培养期间有机氮矿化过程产生的低丰度或者自然丰度的 NH_4^+ 库稀释了标记 ^{15}N 的 NH_4^+ 库。整个培养期间, 开垦 2 a 土壤的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的 ^{15}N 丰度均低于开垦 30 a 土壤。与 NH_4^+ 库的 ^{15}N 丰度变化相反, $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 标记样品中的 NO_3^- 库 ^{15}N 丰度在培养期间逐渐上升 (图 2b)), 表明土壤发生了硝化作用使得标记的

NH_4^+ 转化为 NO_3^- , 富集了 NO_3^- 库的 ^{15}N 丰度, 开垦 30 a 土壤的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的 ^{15}N 丰度高于开垦 2 a 土壤。在 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 标记的样品中, 两个土壤的 NO_3^- 库的 ^{15}N 丰度随培养时间缓慢下降 (图 2d)), 开垦 30 a 土壤的 ^{15}N 丰度下降速率大于开垦 2 a 土壤, 这进一步证实了硝化作用的发生, 在此过程中产生的自然丰度或者低丰度的 NO_3^- 稀释了 NO_3^- 库。在 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 标记的样品中, 两个土壤中 NH_4^+ 库的 ^{15}N 丰度无明显变化 (图 2c)), 说明供试土壤中不存在标记的 NO_3^- 异化还原为 NH_4^+ 或已同化的 $^{15}\text{NO}_3^-$ 再矿化。

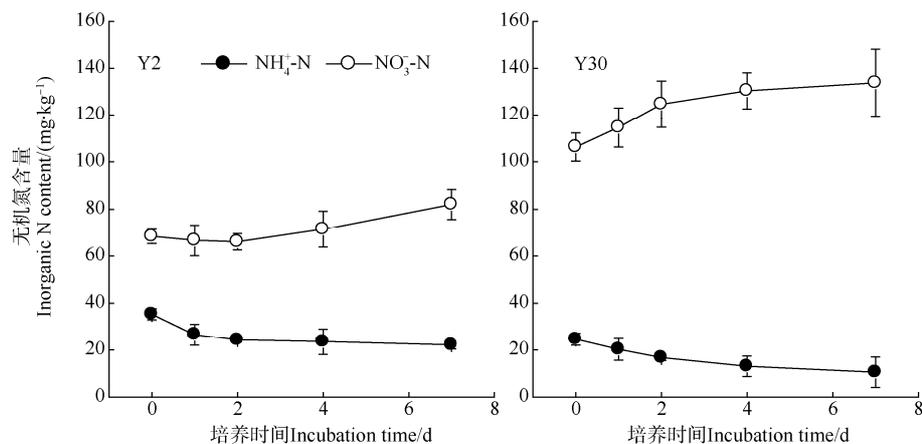


图 1 开垦 2 年 (Y2) 和开垦 30 年 (Y30) 土壤中无机氮含量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of inorganic N content in soils 2 and 30 years in cultivation

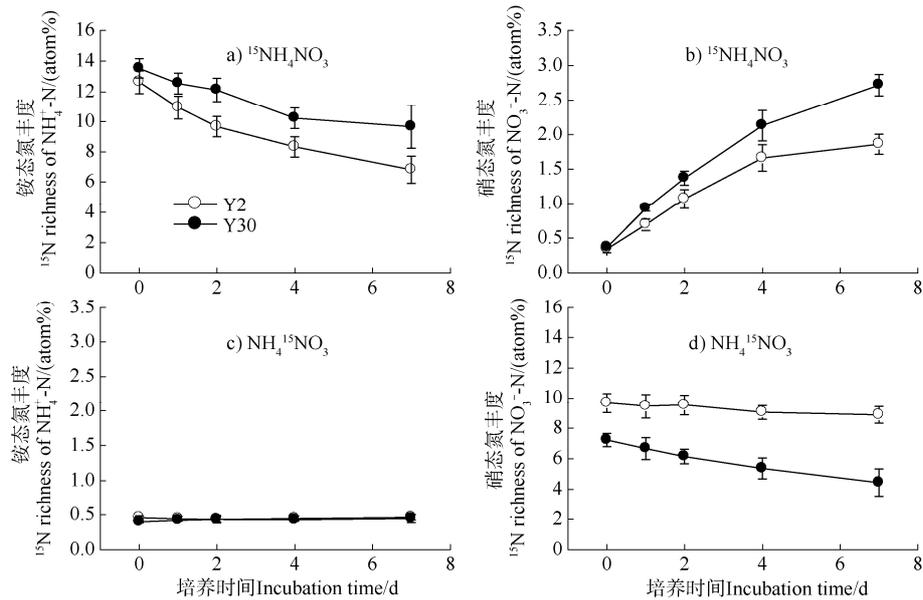


图2 开垦2年(Y2)和开垦30年(Y30)土壤中无机氮 ^{15}N 丰度的动态变化

Fig. 2 Dynamics of ^{15}N richness of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in soils 2 and 30 years in cultivation

2.4 不同开垦年限土壤氮转化速率

开垦2 a和开垦30 a土壤的氮初级矿化速率(m)和初级固定速率(i)在培养后的0~1 d内达到峰值,然后随着培养时间的延长而逐渐下降(表2)。不同时间段内,开垦2 a土壤的氮初级矿化速率均大于开垦30 a土壤(表2)。培养期间开垦2 a土壤的平均氮初级矿化速率为 $2.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (以N计,下同),显著高于开垦30 a土壤($1.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)

(图3, $P<0.05$)。开垦年限对氮净矿化速率的影响则与氮初级矿化速率相反,表现为开垦2 a土壤的氮净矿化速率($0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)显著低于开垦30 a土壤($1.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) (图3, $P<0.05$)。

不同培养时间段内,开垦2 a土壤的氮初级固定速率均大于开垦30 a土壤(表2)。开垦2 a和开垦30 a土壤的平均氮初级固定速率分别为 $2.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,差异显著(图3,

表2 不同培养时间段土壤氮初级转化速率

Table 2 Gross N transformation rates in the studied soils relative to incubation time period

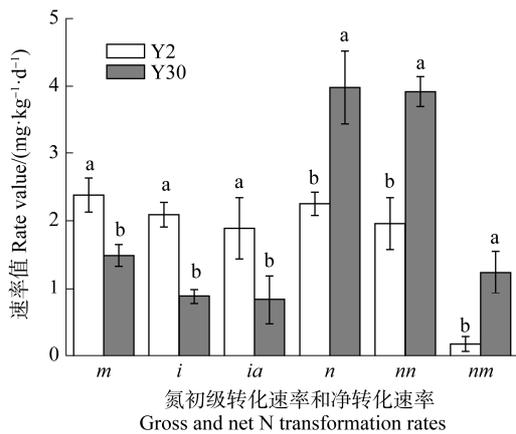
土壤 Soil	时间段 Period	氮初级转化速率 Gross N transformation rates / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)				
		m	i	ia	in	n
Y2	d0~d1	4.316 (0.53)	5.580 (0.55)	5.430 (0.64)	0.150 (0.02)	2.708 (0.28)
	d1~d2	3.769 (0.68)	3.432 (0.16)	3.121 (0.23)	0.311 (0.00)	4.782 (0.19)
	d2~d4	2.778 (0.21)	1.952 (0.08)	1.704 (0.11)	0.248 (0.01)	3.136 (0.26)
	d4~d7	1.013 (0.05)	0.565 (0.03)	0.418 (0.05)	0.147 (0.02)	0.662 (0.14)
Y30	d0~d1	3.048 (0.48)	4.701 (0.43)	3.964 (0.27)	0.737 (0.11)	7.164 (1.26)
	d1~d2	2.664 (0.24)	0.921 (0.11)	0.744 (0.13)	0.176 (0.03)	4.592 (1.17)
	d2~d4	2.189 (0.25)	0.446 (0.07)	0.374 (0.11)	0.072 (0.01)	6.730 (0.95)
	d4~d7	0.112 (0.06)	0.211 (0.05)	0.127 (0.01)	0.084 (0.04)	0.878 (0.52)

注: m , n , i , ia , in 分别是土壤氮初级矿化速率、初级硝化速率、初级固定速率、初级铵态氮固定速率和初级硝态氮固定速率。

下同 Note: m , n , i , ia and in stands for gross rates for N mineralization, nitrification, immobilization, NH_4^+ immobilization, and NO_3^- immobilization in the soils, respectively. The same below

$P < 0.05$)。表 2 结果显示, 整个培养期间铵态氮的固定量占无机氮总量的 60%~97%, 说明微生物对铵态氮的固定量显著大于硝态氮。

开垦 30 a 土壤的初级硝化速率随着培养时间的延长逐渐降低, 0~1 d 的速率最高(表 2)。开垦 2 a 土壤的初级硝化速率则随着培养的进行先增加, 于 1~2 d 达到峰值后逐渐下降。开垦年限显著影响土壤氮初级硝化速率和净硝化速率(图 3), 开垦 2 a 土壤 0~7 d 的加权平均初级硝化速率和净硝化速率分别为 $2.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 显著低于开垦 30 a 土壤 ($3.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) ($P < 0.05$)。



注: nm, nn 分别是土壤氮净矿化速率和净硝化速率。同一速率的不同字母表示两个土壤间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: nm and nn stands for net N mineralization rate and net nitrification rate in the soils, respectively. Different lowercase letters in the same rate indicate significant difference between the two soils at $P < 0.05$. The same below

图 3 开垦 2 年 (Y2) 和开垦 30 年 (Y30) 土壤的平均氮初级转化速率和净转化速率

Fig. 3 Average gross and net N transformation rates in soils 2 and 30 years in cultivation

初级硝化速率与初级铵态氮固定速率的比值 (n/ia) 可用来表征土壤硝态氮淋溶能力的大小, 氮初级矿化速率与初级固定速率的比值 (m/i) 可用来指示土壤无机氮矿化—固定耦合程度的高低。本研究结果显示(图 4), 开垦 2 a 土壤的 n/ia 值和 m/i 值分别为 1.20 和 1.14, 显著低于开垦 30 a 土壤(4.77 和 1.91), 表明开垦 2 a 土壤中氮的耦合程度高, 发生硝态氮淋溶的风险低于开垦 30 a 土壤。

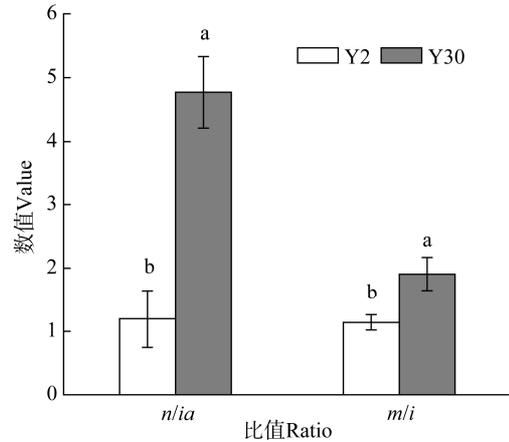


图 4 开垦 2 年 (Y2) 和开垦 30 年 (Y30) 土壤的氮初级转化速率比

Fig. 4 Ratio of gross N transformation rates in soils 2 and 30 years in cultivation

3 讨论

3.1 开垦年限对黑土氮初级矿化速率和初级固定速率的影响

本研究结果表明, 开垦 2 a 土壤的氮初级矿化速率显著高于开垦 30 a 土壤, 这可能与开垦 2 a 土壤具有较高的有机碳含量有关, 因为有机碳是影响氮素矿化潜势的主要因素^[24]。有机碳可为微生物的生存提供养分和能量, 有机碳含量越高, 微生物活性越大, 矿化潜势也越大^[25-26]。Barrett 和 Burke^[27]指出, 有机碳可以解释不同土壤间矿化潜势大小的 60% 差异。一些其他^[25-26]的研究结果也表明, 土壤有机碳含量与氮初级矿化速率具有显著正相关关系, 说明有机碳含量在影响土壤氮素矿化潜势方面具有非常重要的作用。开垦年限对土壤氮初级固定速率的影响与初级矿化速率相同, 也表现为开垦 2 a 土壤的初级固定速率显著高于开垦 30 a 土壤。Hoyle 等^[9]认为, 土壤氮初级固定速率主要受有效碳含量的影响, 与土壤有机碳含量无关。因为参与氮素矿化过程的微生物可以利用各种结构复杂的有机化合物, 而参与氮固定过程的微生物仅能利用简单的易分解有效碳化合物^[7]。黑土经过长期开垦耕作后, 不仅总有机碳含量显著下降, 水溶性有机碳含量也显著降低(表 1)。因此, 与开垦 30 a 土壤相比, 开

垦 2 a 土壤中较高的水溶性有机碳含量可能是该土壤具有较高氮初级固定速率的原因。本研究结果发现，在不同培养时间内微生物既固定了铵态氮，也固定了硝态氮，但是微生物对铵态氮固定的比率远远大于硝态氮（表 2），这与他人^[28-29]的研究结果一致。微生物固定铵态氮需要消耗的能量较固定硝态氮少^[8]，因此，当土壤中铵态氮和硝态氮同时存在时，微生物会优先利用铵态氮，只有当铵态氮数量不足时，微生物才会利用硝态氮。Rice 和 Tiedje^[30]的研究表明，土壤中铵态氮含量大于 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时就会显著抑制对硝态氮的吸收。因此，本研究中硝态氮的微量固定可能发生在铵态氮浓度极低的土粒微区内。

3.2 开垦年限对黑土氮净矿化速率的影响

氮净矿化速率是氮初级矿化速率和初级固定速率的综合结果^[1-2]。本研究中土壤氮初级矿化速率大于初级固定速率，因此土壤产生了氮净矿化。但是，开垦年限对土壤氮净矿化速率的影响规律与氮初级矿化速率正好相反，开垦 2 a 土壤的氮净矿化速率显著低于开垦 30 a 土壤，但其初级矿化速率显著高于开垦 30 a 土壤（图 3）。这说明土壤氮净矿化速率较低并不意味着该土壤的氮初级矿化速率也会低，氮净矿化速率不能真正反映土壤氮矿化过程。与开垦 30 a 土壤相比，开垦 2 a 土壤由于具有较高的有机碳含量导致具有较高的氮初级矿化速率，但高水溶性有机碳含量使得开垦 2 a 土壤的氮初级固定速率也较高，从而导致开垦 2 a 土壤的氮净矿化速率（氮初级矿化速率—氮初级固定速率）低于开垦 30 a 土壤。因此，本研究结果证实了氮净矿化速率仅能表征土壤中可利用无机氮数量的高低，并不能真实反映土壤氮素供应潜能的大小，只有研究氮初级转化速率才能客观真实地反映土壤氮素的转化能力。

3.3 开垦年限对黑土氮初级硝化速率和净硝化速率的影响

氮肥施入土壤后，铵态氮的硝化过程会释放 H^+ ，进而影响土壤 pH。研究^[31]表明，由于肥料氮的大量施用，我国农田土壤的 pH 自 1980 年以来显著降低。本研究中开垦 30 a 土壤的 pH（5.23）也显著低于开垦 2 a 土壤（5.74）。一般认为，土壤 pH 是硝化作用的重要影响因素，随着 pH 增加，净硝化速率和初级硝化速率显著升高^[11, 32]。然而本研究

中开垦 30 a 土壤的初级硝化速率和净硝化速率却显著高于开垦 2 a 土壤（图 3），这说明长期生存在低 pH 条件下的土壤硝化微生物产生了适应性^[10]。黑土经过长期开垦后，机械扰动增强了土壤的通透性，促进了土壤有机质的分解和酶活性的提高，有利于硝化微生物的生长和繁殖^[17]，从而使得开垦 30 a 土壤的初级硝化速率显著大于开垦 2 a 土壤。净硝化速率是初级硝化速率与初级硝态氮固定速率的差值。本研究中初级硝化速率数值与净硝化速率数值大小相当，开垦 2 a 和 30 a 土壤的初级硝化速率分别为净硝化速率的 1.15 倍和 1.02 倍，再次证明本研究中土壤微生物对硝态氮的固定很少，这与初级硝态氮固定速率显著低于初级铵态氮固定速率的结果相一致。

3.4 开垦年限对黑土氮损失的影响

在实验室培养条件下，由于无植物的吸收，偏酸性土壤中的铵态氮的去向主要是发生硝化作用或者被微生物固定^[9]。有研究表明^[25]，初级硝化速率与初级铵态氮固定速率之比（ n/ia ）可以用来表征硝化作用和固定作用的相对重要性，而且可有效指示土壤硝态氮淋溶能力和反硝化能力的高低。若 n/ia 值大于 1，说明土壤中的铵态氮主要发生硝化作用转化为硝态氮，被微生物固定的数量很低，这样产生的硝态氮就会在降雨时或者灌溉后直接通过淋溶损失，或是发生反硝化作用后转变为气体氮损失。相反，若 n/ia 值小于或等于 1，说明土壤微生物对铵态氮固定的数量大于或者等于发生硝化作用的数量，土壤中的铵态氮主要被固持，发生反硝化作用或者硝态氮淋溶的几率就会减小^[33]。此外，氮初级矿化速率与初级固定速率之比（ m/i ）可用来表征土壤中氮素矿化作用和固定作用偶联程度的大小^[34]。若 m/i 值等于 1，说明土壤有机氮矿化产生的无机氮可以再次被微生物固定转化为微生物氮，这样就会减少对硝化微生物的底物供应，降低反硝化和硝态氮的淋溶风险。相反，若 m/i 值大于 1，说明土壤有机氮矿化产生的铵态氮除了被微生物部分固定外，还会为硝化微生物所利用，转化为硝态氮。本研究中，开垦 30 a 土壤的 n/ia 值为 4.77， m/i 值为 1.91（图 4），均显著大于 1，说明开垦 30 a 土壤中有氮矿化产生铵态氮的数量超过了微生物对铵态氮固定的数量，由此为硝化作用的发生提供了大量的底

物, 在土壤水分含量高的条件下可能发生反硝化损失或者硝态氮的淋溶损失。而在开垦 2 a 土壤中, n/ia 值和 m/i 值分别为 1.20 和 1.14, 两者都接近 1 (图 4), 表明在开垦 2 a 土壤中氮素矿化作用和铵态氮固定作用紧密偶联, 相比开垦 30 a 土壤而言, 土壤发生硝化作用以及随后可能产生的反硝化和淋溶风险几率较低。本研究结果证明, 开垦年限的不同会显著影响黑土各个氮初级转化速率和净转化速率, 进而影响土壤氮的利用效率及氮转化过程可能带来的环境效应。

4 结 论

开垦年限对黑土氮初级转化速率和净转化速率具有显著的影响, 开垦 30 a 土壤的初级硝化速率和净硝化速率均显著高于开垦 2 a 土壤。但开垦年限对土壤氮净矿化速率、氮初级矿化速率和初级固定速率的影响有所不同, 开垦 2 a 土壤相对于开垦 30 a 土壤而言具有较低的氮净矿化速率, 而氮初级矿化速率和初级固定速率却显著高于开垦 30 a 土壤。由此可见, 土壤氮初级转化速率更能真实地反映土壤氮素转化过程。开垦 2 a 土壤的初级硝化速率与初级铵态氮固定速率比值 (n/ia) 以及初级矿化速率和初级固定速率比值 (m/i) 均接近于 1, 而开垦 30 a 土壤的 n/ia 值和 m/i 值均显著大于 1, 表明在开垦 2 a 土壤中, 氮素矿化与固定过程紧密偶联, 硝化作用发生的几率较低。而开垦年限延长至 30 a 后, 硝化作用及其可能产生的反硝化和淋溶风险增加, 随之可能带来更大的负面环境效应。

参考文献 (References)

- [1] Daebeler A, Bodelier P L E, Hefting M M, et al. Soil warming and fertilization altered rates of nitrogen transformation processes and selected for adapted ammonia-oxidizing archaea in sub-arctic grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 114—124.
- [2] Lang M, Li P, Ti C P, et al. Soil gross nitrogen transformations are related to land-uses in two agroforestry systems. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 431—439.
- [3] Wang J, Cheng Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 292—303. [王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 292—303.]
- [4] Dai S Y, Wang J, Cheng Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil gross N transformation rates and their implications. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 (12): 2863—2870.
- [5] Xie Y, Yang L, Zhu T B, et al. Rapid recovery of nitrogen retention capacity in a subtropical acidic soil following afforestation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 171—180.
- [6] Lang M, Li P, Han X Z, et al. Gross nitrogen transformations in black soil under different land uses and management systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 (2): 233—241.
- [7] Compton J E, Boone R D. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34 (7): 933—943.
- [8] Mariano E, Jones D L, Hill P W, et al. Mineral nitrogen forms alter ^{14}C -glucose mineralisation and nitrogen transformations in litter and soil from two sugarcane fields. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 154—161.
- [9] Hoyle F C, Murphy D V, Fillery I R P. Temperature and stubble management influence microbial $\text{CO}_2\text{-C}$ evolution and gross N transformation rates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (1): 71—80.
- [10] Li P, Lang M. Gross nitrogen transformations and related N_2O emissions in uncultivated and cultivated black soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50 (2): 197—206.
- [11] Lang M, Cai Z C, Mary B, et al. Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils. *Plant and Soil*, 2010, 334 (1/2): 377—389.
- [12] Liu J F, Ma S, Li S, et al. Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (21): 7647—7657. [刘家福, 马帅, 李帅, 等. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2018, 38 (21): 7647—7657.]
- [13] National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2018. Beijing: China Statistics Press, 2018. [国家统计局. 2018 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.]
- [14] Xin G, Yan L, Wang J K, et al. Changes of organic carbon in black soils with the different reclamation years. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (5): 332—335. [辛刚, 颜丽, 汪景宽, 等. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究. *土壤通报*, 2002, 33 (5): 332—335.]
- [15] Yu J B, Liu J S, Wang J D, et al. Organic carbon variation law of black soil during different tillage period. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (1): 27—30. [于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 不同开垦年限黑土有

- 机碳变化规律. 水土保持学报, 2004, 18 (1): 27—30.]
- [16] Li P, Lang M, Xu X H, et al. Study on regularity of greenhouse gas emissions from black soil with different reclamation years. *Environmental Science*, 2014, 35 (11): 4321—4328. [李平, 郎漫, 徐向华, 等. 不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究. *环境科学*, 2014, 35 (11): 4321—4328.]
- [17] Lu J, Zheng F L, An J, et al. An experimental study of Mollisol aggregate loss characteristics during rainfall erosion processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (8): 2264—2273. [卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 等. 降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征. *生态学报*, 2016, 36 (8): 2264—2273.]
- [18] Liang Y, Yuan Y R, Han X Z, et al. Distribution of organic carbon and humic acids in aggregates of Mollisol as affected by amendments with different rates of organic manure plus mineral fertilizer. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (6): 1586—1594. [梁尧, 苑亚茹, 韩晓增, 等. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (6): 1586—1594.]
- [19] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [20] Burford J R, Bremner J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total water soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7 (6): 389—394.
- [21] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34 (6): 777—787.
- [22] Mary B, Recous S, Robin D. A model for calculating nitrogen fluxes in soil using ^{15}N tracing. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30 (14): 1963—1979.
- [23] Li P, Lang M, Li Y S, et al. Effects of different fertilization on nitrification and mineralization in black soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (7): 1326—1332. [李平, 郎漫, 李煜姗, 等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (7): 1326—1332.]
- [24] Ueda M U, Kachina P, Marod D, et al. Soil properties and gross nitrogen dynamics in old growth and secondary forest in four types of tropical forest in Thailand. *Forest Ecology and Management*, 2017, 398: 130—139.
- [25] Accoe F, Boeckx P, Busschaert J, et al. Gross N transformation rates and net N mineralization rates related to the C and N contents of soil organic matter fractions in grassland soils of different age. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36 (12): 2075—2087.
- [26] Conrad K A, Dalal R C, Dalzella S A, et al. The sequestration and turnover of soil organic carbon in subtropical leucaena-grass pastures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 248: 38—47.
- [27] Barrett J E, Burke I C. Potential nitrogen immobilization in grassland soils across a soil organic matter gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (11/12): 1707—1716.
- [28] Recous S, Mary B, Faurie G. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22 (7): 913—922.
- [29] Corre M D, Schnabel R R, Stout W L. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a North-eastern US grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34 (4): 445—457.
- [30] Rice C W, Tiedje J M. Regulation of nitrate assimilation by ammonium in soils and in isolated soil microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21 (4): 597—602.
- [31] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [32] Cui J Y, Yan M J, Wu X R, et al. Effects of woodland transforming into tea garden on soil net nitrification rate and N_2O emission. *Soils*, 2017, 49 (4): 738—744. [崔静雅, 颜明娟, 吴晓荣, 等. 林地改为茶园对土壤净硝化速率及 N_2O 排放的影响. *土壤*, 2017, 49 (4): 738—744.]
- [33] Stockdale E A, Hatch D J, Murphy D V, et al. Verifying the nitrification to immobilization ratio (N/I) as a key determinant of potential nitrate loss in grassland and arable soils. *Agronomie*, 2002, 22 (7/8): 831—838.
- [34] Johnson D W. Nitrogen-retention in forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21 (1): 1—12.

(责任编辑: 陈荣府)