

不同培肥措施下复垦土壤氮素转化特征

焦欢¹, 李廷亮^{1,2}, 高继伟¹, 李彦¹, 何冰¹, 李顺¹

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;

2.山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心,山西 太谷 030801)

摘要:为揭示不同复垦年限和培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素转化特征影响,分别采用间歇淋洗好气培养法、室内恒温控湿好气培养法和硝酸盐消失法研究了5种培肥措施下复垦4,8年土壤矿化、硝化、反硝化作用规律。结果表明:随复垦年限增加,土壤的矿化量(N_t)和矿化势(N_0)均有增加,但土壤矿化率(N_t/N)及矿化势占全氮的比例(N_0/N)无明显变化;不同培肥措施下,复垦8年土壤生物有机肥配施化肥处理(MCFB) N_t 、 N_0 、 N_t/N 和 N_0/N 分别较单施化肥处理(CF)提高65.22%,65.21%,60.42%和60.76%。土壤硝化率和达到最大硝化速率需要的时间(T_{max})受复垦年限影响较小,不同施肥措施均可提高土壤硝化率,但处理间差异不显著;最大硝化速率(V_{max})随复垦年限增加而增大,复垦4,8年土壤 V_{max} 和 T_{max} 总体以MCFB效果优于其他培肥处理。土壤硝态氮损失率和硝酸盐消失速率随复垦年限的增加而增加,经过7天培养,不同培肥措施下复垦4年土壤硝态氮损失率以单施有机肥处理(M)最高,达78.72%,硝酸盐消失速率以MCFB处理最低,与不施肥对照(CK)一致;复垦8年土壤反硝化作用在不同处理下无显著差异。通过短期氮素转化作用强度比较,复垦土壤硝化作用>反硝化作用>矿化作用。综合来看,培肥对复垦土壤氮素转化作用提升效果明显,生物有机肥配施化肥更有利于土壤有效氮的保持和提高,减少氮素损失。

关键词:复垦土壤;矿化作用;硝化作用;反硝化作用

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0147-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.021

Nitrogen Transformation Characteristics of Reclaimed Soil Under Different Fertilizer Application Measures

JIAO Huan¹, LI Tingliang^{1,2}, GAO Jiwei¹, LI Yan¹, HE Bing¹, LI Shun¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.National Environment Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to reveal the effects of different reclamation years and fertilization measures on nitrogen transformation characteristics of reclaimed soils in coal mining subsidence areas, intermittent leaching and aerobic culture method, laboratory aerobic incubation method with constant temperature and controlled humidity, and nitrate loss method were used to study the regularities of soil mineralization, nitrification and denitrification in reclaimed soil for four years and eight years, respectively, under five fertilization measures. The results showed that as the increasing of reclamation years, both cumulative mineralized nitrogen (N_t) and potentially mineralizable nitrogen (N_0) increased, while mineralization rate (N_t/N) and the proportion of N_0 to total N (N_0/N) did not change significantly. Under different fertilization measures, the N_t , N_0 , N_t/N and N_0/N of eight years reclaimed soil in MCFB treatment (application chemical fertilizer combined with biological organic fertilizer) increased by 65.22%, 65.21%, 60.42% and 60.76%, respectively, compared with chemical fertilizer treatment (CF). The soil nitrification rate and the time needed to reach the maximum nitrification rate (T_{max}) were less affected by reclamation years, and nitrification rates of different fertilization treatments were all higher than that of CK treatment, but there was no significant difference between treatments. The maximum nitrification rate (V_{max}) increased with the increasing of reclamation

收稿日期:2019-01-09

资助项目:国家自然科学基金项目(41401342)

第一作者:焦欢(1994—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail:m18235477152@163.com

通信作者:李廷亮(1982—),男,山西大同人,博士,教授,主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail:litingliang021@126.com

years. Treatments of MCFB could improve V_{\max} and T_{\max} more effectively than other treatments in soils reclaimed for four and eight years. Nitrate loss and nitrate disappearance rate increased with the increasing of reclamation years. After seven days of cultivation, in the reclaimed soil for four years, the nitrate loss was the highest in organic manure treatment(M), reaching 78.72%, and the nitrate disappearance rate was the lowest in MCFB treatment, which was consistent with CK. There was no significant difference in soil nitrogen denitrification among different treatments for soil reclaimed for eight years. The sequence of short-term nitrogen transformation intensity was nitrification>denitrification>mineralization. On the whole, fertilization had obvious improvement effect on nitrogen transformation characteristics in reclaimed soil, and chemical fertilizer combined with biological organic fertilizer was more conducive to the maintenance and improvement of soil available nitrogen and reduce nitrogen loss.

Keywords: reclaimed soil; mineralization; nitrification; denitrification

土壤和肥料是植物吸收氮素的主要途径^[1],氮素在土壤中的转化影响土壤有效氮含量和肥料的利用效率,探究土壤氮矿化、硝化、反硝化作用特征对合理施肥具有指导作用。山西是我国重要的煤炭开采区,在带动经济发展的同时造成的采空区面积达 5 000 km²,导致土壤肥力降低,耕地面积锐减^[2]。对矿区土壤进行复垦是实现耕地总量动态平衡的重要举措,但复垦过程中存在机械碾压、扰动等问题,造成土壤结构不良,生物多样性减少,且土壤养分贫瘠不利于耕种,使得对矿区土壤采取培肥尤为必要。氮素作为植物生长不可或缺的营养元素之一,探究培肥措施对复垦土壤氮素转化特征的影响,有利于重建采煤塌陷地土壤氮库,改良土壤性质和提高耕地质量水平^[3]。目前,国内外关于施肥对土壤氮素的影响及其时空变化多集中于一般农田土壤^[4-10]。大多研究^[7-8,11-13]认为,施肥可增强土壤氮的矿化、硝化和反硝化作用,其中有机无机肥配施能有效提高土壤供氮能力、氨氧化潜势和硝化强度^[4,7,11];单施有机肥能增加土壤 N₂O 的排放和反硝化损失量^[13-14];施氮肥虽能促进硝化作用,却抑制了培养初期的氮素矿化,在氮肥中添加秸秆会促进土壤无机氮的同化,从而抑制硝化作用的进行^[1],同时氮肥的施用量水平与土壤的反硝化作用和 N₂O 排放通量呈正相关关系^[15-16];含氯化肥和生物炭的施用对土壤硝化具有抑制作用^[7],且施加生物炭还可降低土壤 N₂O 的排放^[14]。可见,不同施肥种类和施用量对土壤氮素转化的影响不尽相同,关于不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮矿化作用、硝化作用和反硝化作用的影响规律和机制还有待进一步研究。

为此,本文以山西省潞安洛江沟采煤塌陷区复垦 4,8 年土壤为研究对象,分别采用间歇淋洗好气培养、室内恒温控湿好气培养和硝酸盐消失法研究不同培肥措施下复垦土壤氮素矿化、硝化、反硝化作用特征,以期为提高复垦土壤肥力、重建矿区土壤氮库找到合理的培肥措施并提供有力的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

长期定位试验基地位于山西省襄垣县洛江沟村(36°28′11.95″N,113°00′52.57″E,海拔 980 m),属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 9℃,年降水量 500~600 mm,无霜期为 160 d,土壤类型为石灰性褐土。该基地于 2008 年开始采用剥离复垦方式平整恢复耕地,2009 年起开始通过不同培肥措施和种植玉米来培肥土壤,播种密度为 60 000 株/hm²。目前,有连续复垦 4 年和 8 年土壤,复垦 4 年土壤于 2013 年起在同一基地开始复垦。土壤样品于玉米播种前(2017 年 3 月 31 日)采集。多点混合采样法采集 0—20 cm 表层土壤,装入无菌袋中带回实验室,剔除动、植物残体和石块,风干后过 2 mm 筛待测。复垦土壤基本理化性状见该试验区前期研究^[17]。

1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理:(1)不施肥对照(CK);(2)单施化肥(CF);(3)单施有机肥(M);(4)有机肥+化肥(MCF);(5)生物有机肥+化肥(MCFB)。同时采集周边未破坏农田熟土(undisturbed soil,US)作为复垦土壤肥力提升程度的对比标准。其中供试有机肥为完全腐熟的鸡粪,含有机质 25.8%,N 1.68%,P₂O₅ 1.54%,K₂O 0.82%。供试菌肥是将拉恩式菌、假单胞菌 1、假单胞菌 2 制成混合磷细菌菌液后,与鸡粪按照 1:9 的比例混匀,其活菌数≥0.5×10⁸ CFU/g。每个处理重复 3 次,采用随机区组设计。试验小区面积为 100 m²。除对照外,各培肥处理总养分投入量一致,分别为 N 201.5 kg/hm²,P₂O₅ 184.8 kg/hm²,K₂O 98.4 kg/hm²。试验期间一年一作种植春玉米,每年 5 月左右播种,10 月左右收获,玉米秸秆全部粉碎翻压还田,每年为农田带入 C 2 580 kg/hm²,N 45 kg/hm²,P₂O₅ 7.2 kg/hm²,K₂O 81.6 kg/hm²。

1.3 测定项目与方法

土壤矿化作用测定采用好气培养间歇淋溶方

法^[17]:称取过 2 mm 筛的风干土 25 g 与等量石英砂混匀后铺于 100 mL 注射器中(注射器的顶部和底部铺好玻璃丝和石英砂,起到缓冲作用)。然后用 100 mL 0.01 mol/L CaCl₂溶液少量多次淋洗土壤起始可溶性总氮,收集淋洗液用于测定土壤起始所含矿质氮含量。淋洗完毕后加入 40 mL 无氮营养液(0.5 mmol/L CaHPO₄ · 2 H₂O, 2 mmol/L MgSO₄ · 7 H₂O, 2 mmol/L CaSO₄ 和 2.5 mmol/L K₂SO₄ 混合液),之后抽除多余水分,注射器宽口密封后再扎 1 个小孔,保持管内通气良好,然后放入(35±1)℃的恒温箱下培养,在培养 1, 2, 3, 5 周后,分别再用 100 mL 0.01 mol/L CaCl₂溶液淋洗培养期间所产生矿质氮。矿质氮采用连续流动分析仪(Skalar San, Netherlands)测定。

土壤硝化作用测定采用室内恒温控湿好气培养方法^[18]:称取过 2 mm 筛风干土样 10 g 于 100 mL 塑料瓶中,分别加入 2.5 mg N 的硫酸铵溶液,置于 28 ℃ 恒温箱中培养,分别于 0, 5, 7, 14, 21, 28 天取出。相应时间取出后,加入 50 mL 2 mol/L KCl 浸提 1 h(190 r/min, 25 ℃)。用定量滤纸过滤后采用流动分析仪测定其中铵态氮和硝态氮含量。

土壤反硝化作用测定采用硝酸盐消失方法^[19]:取过 2 mm 筛的土壤 20 g,置于 100 mL 三角瓶中,加入一定量 KNO₃溶液,使土表有薄的淹水层。将三角瓶置于真空干燥器中,抽真空后灌入氩气,如此反复 3~4 次,使干燥器内无氧。干燥器底部可放若干毫升碱性焦性没食子酸以吸收残余氧气,并用美蓝作氧化还原指示剂。将干燥器置恒温室培养(25 ℃),分别于 0, 1, 3, 5, 7 天取出土样,采用流动分析仪测样品中剩余硝态氮含量。

1.4 数据处理与统计分析

土壤矿化参数计算公式为:

根据 Stanford^[20]求解公式

$$N_0 = N_t / (1 - 10^{-kt/2.303}) \quad (1)$$

式中: N_0 为氮矿化势(mg/kg); t 为培养时间(周),本试验 t 值为 1, 2, 3, 5 周; N_t 为 t 时间(周)内累积的矿质氮量(mg/kg); k 为矿化速率常数。

根据修正的埃伦纽斯方程式

$$\lg k = 7.71 - 2758/T \quad (2)$$

求得 35 ℃ 的矿化速率常数 k 值为 0.057 5。

矿化作用强度(mg/(kg · d)) = $(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})_t / t$ (3)

式中: t 为培养天数(d); $(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})_t$ 为培养 t 天时矿质态氮含量(mg/kg)。

土壤硝化参数计算公式为:

氮素硝化率(%) = $\text{NO}_3^- - \text{N} / (\text{NH}_4^+ - \text{N} +$

$$\text{NO}_3^- - \text{N}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{硝化作用强度(mg/(kg · d))} = [(\text{NO}_3^- - \text{N})_t - (\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0}] / t \quad (5)$$

式中: t 为培养天数(d); $(\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0}$ 和 $(\text{NO}_3^- - \text{N})_t$ 分别为培养 0 天和 t 天时硝态氮含量(mg/kg)。

为定量描述土壤硝态氮浓度随培养时间的变化趋势,引用方程^[21-22]:

$$N_{t\text{NO}_3} = N_{t_0} / (1 + e^{a-bt}) \quad (6)$$

式中: $N_{t\text{NO}_3}$ 为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 瞬时增加浓度(mg/kg); N_{t_0} 为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的增加量的渐进值; a 、 b 为积分常数; t 为取样时间(d)。

土壤反硝化参数计算公式为:

$$\text{硝态氮消失率(}\%) = (\text{加入的硝态氮量} - \text{培育后剩余硝态氮量}) / \text{加入的硝态氮量} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{硝酸盐消失速率(mg/(kg · d))} = [(\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0} - (\text{NO}_3^- - \text{N})_t] / t \quad (8)$$

式中: t 为培养天数(d); $(\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0}$ 和 $(\text{NO}_3^- - \text{N})_t$ 分别为培养 0 天和 t 天时硝酸盐含量(mg/kg)。

本试验中反硝化作用强度以培养 7 天的硝酸盐消失速率来计算。

所有数据采用 Excel 2003 软件进行统计运算和整理,不同处理之间的差异显著性采用 SPSS 19.0 软件进行分析($P < 0.05$)。硝化动力学方程的非线性回归统计应用 DPS 软件,回归方程的微分应用 Matlab 软件^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同培肥措施对土壤氮素矿化作用的影响

表 1 为培养 5 周后不同培肥措施复垦土壤氮素矿化参数的变化。由表 1 可知,不同培肥措施下,复垦土壤氮素矿化量(N_t)和矿化势(N_0)均随复垦年限的增加而增加。复垦 4, 8 年土壤,各处理 N_t 的变化趋势均表现为 MCFB > MCF > M > CF > CK, 其中 MCFB 处理分别较周边农田熟土提高 28.29% 和 62.86%; 不同培肥措施下复垦 4, 8 年土壤的 N_0 同样以 MCFB 处理最高, 分别较对应 CF 处理提高 49.68% 和 65.21%, 表明 MCFB 处理是提高复垦土壤供氮潜力的有效手段。复垦土壤矿化率(N_t/N)和 N_0 占土壤全氮含量的比例(N_0/N)随年限变化无明显差异, 不同培肥处理 N_t/N 和 N_0/N 仍以 MCFB 处理最高, 且复垦 8 年土壤 MCFB 处理 N_t/N 和 N_0/N 较周边农田熟土分别高 146.48% 和 146.44%, 可见 MCFB 处理提高了矿区土壤易矿化有机氮的比例。

2.2 不同培肥措施对土壤氮素硝化作用的影响

2.2.1 不同培肥措施对土壤氮素硝化率的影响 复垦 4, 8 年土壤, 各处理的土壤硝化率变化与周边农田熟土基本一致: 随培养时间增长迅速上升, 在第 14 天

达培养时期峰值后开始趋于平稳,整体变化范围分别为 3.65%~95.65%和 9.45%~95.72%(图 1)。复垦 4 年土壤培养前 14 天,不同施肥处理硝化率较 CK 处理均显著提高,其中以 MCFB 处理提升幅度最大,可达 441.64%($P<0.05$)(图 1a)。复垦 8 年土壤硝

化率与复垦 4 年土壤整体无明显差异,培养前 14 天,各施肥处理间土壤硝化率差异不显著,但仍高于 CK 处理(图 1b)。总体来看,矿区复垦土壤均在培养 14 天时基本完成硝化作用,且不同施肥措施均可一定程度提高土壤硝化率。

表 1 不同培肥措施下复垦土壤有机氮矿化参数

处理	4 年复垦土壤				8 年复垦土壤			
	$N_t/$	$N_0/$	$N_t/N_0/$	$N_0/N_0/$	$N_t/$	$N_0/$	$N_t/N_0/$	$N_0/N_0/$
	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	%	%	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	%	%
CK	10.64	42.59	2.36	9.46	12.32	49.31	2.16	8.65
CF	12.00	48.03	2.18	8.73	13.80	55.24	1.92	7.67
M	14.12	56.52	1.96	7.85	15.92	63.72	2.02	8.07
MCF	16.32	65.32	2.51	10.05	17.08	68.37	2.22	8.88
MCFB	17.96	71.89	2.85	11.41	22.80	91.26	3.08	12.33
US	14.00	56.04	1.25	5.00	14.00	56.04	1.25	5.00

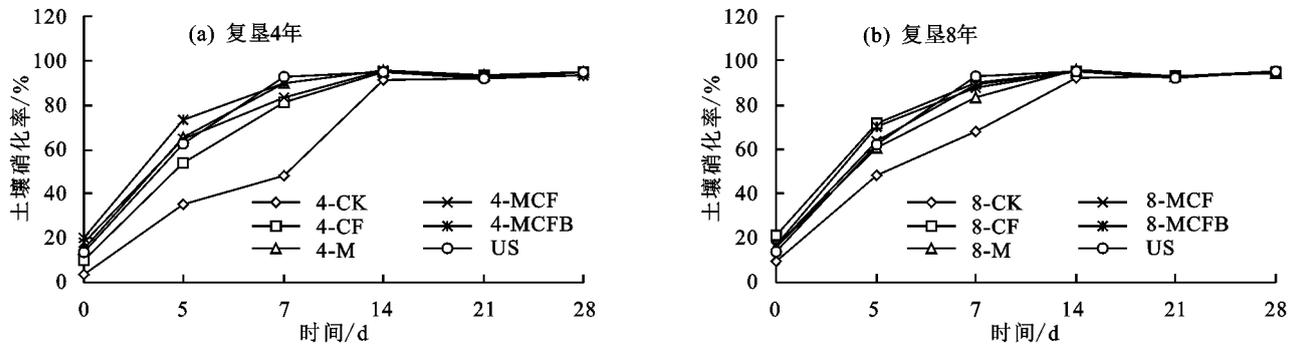


图 1 复垦土壤硝化率变化

2.2.2 不同培肥措施对土壤氮素硝化速率的影响
已有研究^[21-22]通过分析土壤剖面不同层次和不同类型土壤硝化过程,对土壤硝化率随时间的变化规律用 Logistic 的“S”形曲线进行拟合。本试验拟合不同处理复垦土壤硝态氮含量变化,得出决定系数为 0.993 6~0.999 9,表明 Logistic 方程适用于本试验数据。根据方程求出复垦土壤最大硝化速率 V_{\max} ($V_{\max} = dN_t \text{NO}_3 / dt$) 和最大硝化速率对应时间 T_{\max} ($T_{\max} = a/b$)。

不同培肥措施显著影响土壤最大硝化速率及其所需要的时间(表 2)。复垦 4,8 年土壤,各施肥处理最大硝化速率出现时间较 CK 分别提前 2.49~4.61

天和 1.64~2.57 天,说明施肥可有效缩短硝化高峰出现的时间;随复垦年限的增加,在同一培肥处理下,复垦 8 年土壤 CK 处理 T_{\max} 较复垦 4 年减少 37.54%,但 M、MCF 和 MCFB 处理 T_{\max} 较复垦 4 年分别提高 21.76%,3.45%和 15.04%,表明复垦年限对 T_{\max} 影响并不显著。复垦 8 年土壤最大硝化速率与复垦 4 年相比提高 1.64%~47.13%,但其平均值(32.14 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$)仍较周边农田熟土低 15.62%,复垦 4 年土壤 V_{\max} 以 M 处理最高,较 CK 处理高 110.49%;复垦 8 年土壤以 MCFB 处理最高,但与 CF 处理无明显差异。

表 2 不同培肥措施下复垦土壤硝态氮拟合方程及特征值

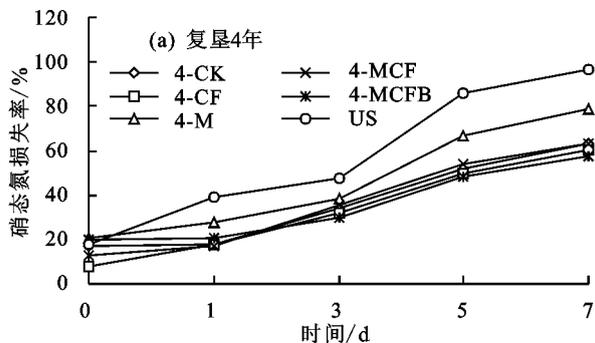
复垦年限/a	处理	拟合方程	决定系数 R^2	最大硝化速率需要的时间 T_{\max}/d	最大硝化速率 $V_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
4	CK	$159.9729/(1+\text{EXP}(2.6640-0.4482t))$	0.9974	5.94	17.93
	CF	$165.0394/(1+\text{EXP}(2.2916-0.6650t))$	0.9936	3.45	27.44
	M	$163.5946/(1+\text{EXP}(1.5713-0.9227t))$	0.9992	1.70	37.74
	MCF	$165.8771/(1+\text{EXP}(1.3811-0.7938t))$	0.9978	1.74	32.92
	MCFB	$164.0151/(1+\text{EXP}(1.1702-0.8807t))$	0.9980	1.33	36.11
	US	$163.1140/(1+\text{EXP}(2.3994-0.6470t))$	0.9952	3.71	26.38
8	CK	$163.9403/(1+\text{EXP}(0.9979-0.8763t))$	0.9983	1.14	35.92
	M	$164.3684/(1+\text{EXP}(1.3833-0.6694t))$	0.9975	2.07	27.51
	MCF	$165.4803/(1+\text{EXP}(1.4578-0.8087t))$	0.9972	1.80	33.46
	MCFB	$165.2243/(1+\text{EXP}(1.3880-0.9061t))$	0.9952	1.53	37.43
	US	$168.0206/(1+\text{EXP}(1.6639-0.9069t))$	0.9999	1.83	38.09

注: $n=6$; $P_{0.05}=0.811$; $P_{0.01}=0.917$ 。

2.3 不同培肥措施对土壤氮素反硝化作用的影响

2.3.1 不同培肥措施对土壤硝态氮损失率的影响

复垦 4 年土壤硝态氮损失率随培养时间增长呈上升趋势,各处理硝态氮损失率较周边农田熟土均有降低,培养过程中不同处理间始终以 M 处理最高,可达 78.72%,而其他处理间无显著差异(图 2a)。复垦 8 年土壤硝态



氮损失率较复垦 4 年高 0.48%~191.06%,但仍低于周边农田熟土。8 年土壤硝态氮损失率变化趋势与复垦 4 年土壤基本一致,但各施肥处理与 CK 无显著差异(图 2b)。表明采煤塌陷区土壤氮素反硝化作用随复垦年限和培养时间的增加而增加,且单施有机肥在一定程度上增强短期复垦土壤的反硝化作用。

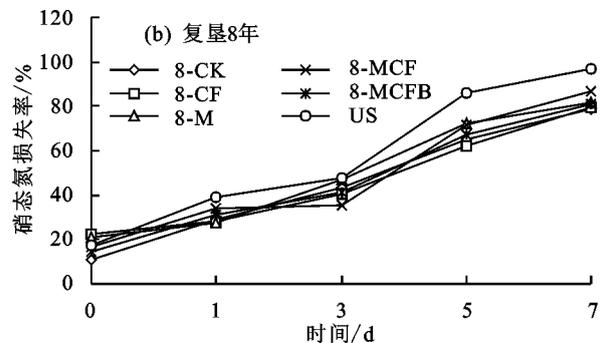
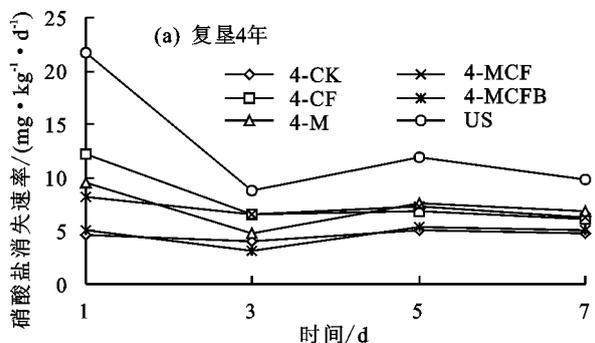


图 2 复垦土壤硝态氮损失率变化

2.3.2 不同培肥措施对土壤硝酸盐消失速率的影响

由图 3 可知,复垦 4,8 年土壤各处理反硝化速率随时间变化趋势基本一致,表现为 1~3 天下降较快,在第 3 天时达到最低值,然后趋于平稳。复垦 8 年土壤硝酸盐消失速率较复垦 4 年土壤高 11.62%~278.12%,可能是由于复垦 8 年土壤有机质含量高,为异养型反硝化



微生物提供了更多的电子供体和能源。复垦 4 年土壤反硝化速率明显以 CK 和 MCFB 处理较低,各处理均显著低于周边农田熟土(图 3a)。复垦 8 年土壤,CK、MCF 和 MCFB 处理培养 1 天时硝化速率高于 M 和 CF 处理,但随后各处理间无明显差异,且整体仍低于周边农田熟土(图 3b)。

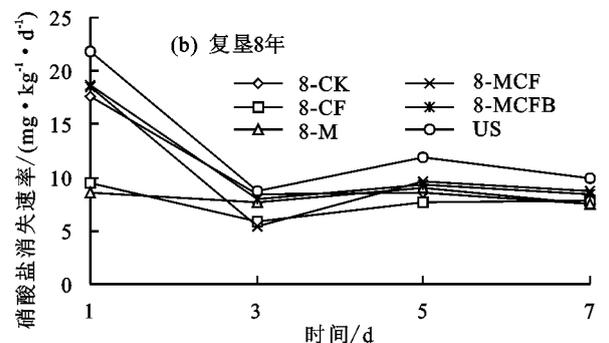


图 3 复垦土壤硝酸盐消失速率变化

2.4 不同培肥措施下土壤氮矿化、硝化和反硝化作用强度比较

由表 3 可知,经过 7 天培养,同一复垦年限下不同培肥处理间土壤氮素矿化作用强度以 MCFB 处理显著高于 CK 和 CF 处理,硝化、反硝化强度整体无显著性差异。随复垦年限增长,复垦 8 年土壤各处理矿化和硝化作用强度的平均值与复垦 4 年相比均未有明显提高,但反硝化作用强度平均值较复垦 4 年土壤提高 38.93% ($P < 0.05$);与周边农田土壤相比,复垦 8 年土壤矿化、硝化、反硝化作用强度平均值并无显著降低。不同复垦年限各培肥处理的氮素转化过程均以硝化作用强度最大,分别是反硝化作用和矿化作用的 2.61,12.10 倍。总体来说,经过 7 天的培养,不同培肥处理对矿区土壤氮素转化强度影响较小,复垦年限仅在一定程度上影响到土壤反硝化作用,矿区复垦土壤氮素转化以硝化作用最为强烈,其次是反硝

化作用,最后是矿化作用。

3 讨论

本研究表明,施肥可有效促进复垦土壤的氮素矿化,增加土壤矿化量和提高土壤供氮潜力,以有机无机配施或生物有机肥配施化肥效果较为显著,这与大多数入研究^[9-10,23-25]相一致。原因可能是有机无机肥配施可协调微生物活动所需的碳氮比,提高微生物的生物量和活性,从而加快微生物对有机质的分解,促进土壤氮素矿化;生物菌剂的添加可以增加土壤微生物代谢,进而促进土壤有机物质的转化。另外,本研究在等养分投入下,单施有机肥、有机无机肥配施和生物有机肥配施化肥的 N_e 较单施化肥提高 15.35%~65.21%,可能是因为有机肥的投入增加了氮素矿化的潜能,提高土壤供氮能力。赵伟等^[23]的研究中也有相同观点。王帘里等^[26]研究表明,氮矿化在短期培养试验中主

要来自于受土壤结构保护作用弱的易分解氮库,难分解氮库在较长的氮素矿化过程中才会参与分解,且在有机质含量较低的土壤中,土壤累积净矿化氮量在 25 ℃ 以上表现出持平和下降趋势。本研究中,尽管施肥对土壤矿化作用具有明显的积极意义,但与一般农田土壤相比^[7,9,23,25],矿区复垦土壤的矿化量、矿化势仍明显偏低,一方面是因为受培养时间和温度的影响,另一方面是受采煤塌陷地土壤自身肥力的限制。本研究中单施化肥和单施有机肥处理的 N_0/N 低于不施肥对照,表明单施化肥或单施有机肥更大程度提高了土壤中稳定性氮库。

表 3 不同培肥措施下复垦土壤氮素矿化、硝化和反硝化作用强度比较 单位:mg/(kg·d)

复垦年限/a	处理	矿化作用强度	硝化作用强度	反硝化作用强度
4	CK	1.02b	12.70b	4.77a
	CF	1.16b	20.12a	6.04a
	M	1.52a	19.38a	6.80a
	MCF	1.60a	18.09ab	6.28a
	MCFB	1.69a	17.36ab	5.01a
	CK	1.11c	19.36a	7.58a
8	CF	1.24c	17.20a	7.88a
	M	1.43b	18.39a	7.59a
	MCF	1.58b	19.03a	8.68a
	MCFB	2.53a	18.60a	8.41a
	Mean(4 a)	1.40a	17.53a	5.78b
	Mean(8 a)	1.58a	18.52a	8.03a
	US	1.46a	19.82a	9.89a

注:同列同一年份数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), Mean(4 a)、Mean(8 a)、US 对应数据后不同小写字母亦表示 $P = 0.05$ 水平上的差异性, Mean(4 a)、Mean(8 a) 分别表示 4、8 a 复垦土壤各培肥处理的平均值。

土壤硝化作用是铵态氮通过生物氧化过程转化为硝态氮和亚硝态氮的过程,是氮素循环的重要环节,也是生态系统中氮素损失的潜在途径之一^[27]。范晓晖等^[8]表明,耕作多年的农田土壤培养至 2~4 周后,硝化率可以达到 77%~95%,在本研究中,经过 14 天培养,矿区复垦土壤各处理土壤硝化率可达 90% 以上。表明土壤自身肥力并不是影响土壤硝化作用的决定性因素。有研究^[12]表明,施肥能够促进土壤氮素硝化作用,其中有机肥效果优于单施化肥,原因在于有机肥所含的大量有效碳和其他养分有益于改善土壤的物理化学和生物学性质。在本研究中,不同施肥措施较 CK 处理显著提高了矿区复垦土壤的硝化作用,整体以 MCFB 处理提升幅度较大,但与其他施肥处理并无明显差异,表明不同施肥方式对硝化作用影响不大。这与张云舒等^[28]对灰漠土的研究相同,具体原因有待于进一步研究。

反硝化作用是氮素转化过程中必不可少的步骤

之一。大量长期定位施肥试验^[12-13,29-30]结果表明,施用氮肥和有机肥均会提高土壤反硝化速率,且有机肥的刺激作用高于氮肥。一方面是因为有机肥作为碳源,可直接为反硝化细菌提供能量和电子而促进反硝化,增加 N_2O 的产生量,且有机肥的施用可以激发自养硝化和异养硝化,为反硝化提供底物;另一方面,有机肥还可通过提高微生物活性加剧对土壤孔隙中 O_2 的消耗,为反硝化提供厌氧环境^[12]。但在本研究中,复垦 4、8 年土壤各施肥处理反硝化作用整体较 CK 无明显变化,可能是因为在矿区复垦土壤条件下,反硝化细菌生物量和活性较低,使得不同处理经短期培养后无较大差异。且本试验土壤在反硝化培养前经历过长期秸秆还田,有研究^[31]表明,作物秸秆被微生物分解后产生的苯甲酸等化感物质对土壤硝化、反硝化细菌等微生物活动产生一定的抑制作用。

土壤的矿化、硝化和反硝化是土壤氮素转化过程中的 3 个重要组成部分,三者紧密联系,实质上都是土壤微生物的新陈代谢活动。本研究中,矿区土壤氮素转化过程以硝化作用为主,反硝化作用次之,最后是矿化作用。有研究^[32]表明,在通气较好的中性或碱性土壤中,硝化作用强烈,原因可能是硝化细菌在该环境中存在生物量较多且具有较高活性。当土壤处于嫌气状态, pH 为 7.0~8.2 的微碱性环境中,反硝化条件最适,作用较为旺盛。无论是好气或嫌气条件下,微生物均可以有有机质中的碳素为能源完成矿化作用,但在通气良好,温度、湿度和酸碱度适中的砂质土壤中,氮矿化作用最大,且积累的中间产物有机酸较少^[33]。探究不同土壤条件下的氮素转化过程,对更好的调节矿区土壤氮素转化具有指导意义。

4 结论

不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素转化的影响各异。随复垦年限的增加,土壤的矿化量和矿化势增加,但土壤矿化率及矿化势占全氮的比例无明显变化;各培肥处理以生物有机肥配施化肥对矿化参数的提高程度最大,有效提高了土壤的供氮潜力和易矿化氮比例。土壤硝化率和达到最大硝化速率需要的时间受复垦年限影响较小,最大硝化速率随复垦年限增加而增大;施肥可提高土壤硝化率,但不同处理间提升效果差异不显著,复垦土壤的最大硝化速率及其需要时间整体以生物有机肥配施化肥优于其他处理。土壤硝态氮损失率和硝酸盐消失速率随复垦年限的增加而增加,复垦 4 年土壤以单施有机肥对反硝化影响最明显,复垦 8 年土壤不同处理反硝化作用差异不大。通过短期氮素转化作用强度比较,复垦土壤以硝化作用最强,矿化作用最弱。整体来看,培肥对

矿区土壤氮素转化作用有明显的提升效果,施用生物有机肥配施化肥是保持和提高土壤有效氮,减少氮素在反硝化过程中损失的最佳方式。

参考文献:

- [1] 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[J].农业环境科学学报,2015,34(7):1326-1332.
- [2] 高雅,陆兆华,魏振宽,等.露天煤矿区生态风险受体分析:以内蒙古平庄西露天煤矿为例[J].生态学报,2014,34(11):2844-2854.
- [3] 鲁叶江,李树志,张春娜.东部平原矿区不同培肥处理对复垦土壤特性的影响[J].中国农学通报,2012,28(5):221-225.
- [4] Chen Y, Sun T T, Qian H Y, et al. Nitrogen mineralization as a result of phosphorus supplementation in long-term phosphate deficient soil[J].Applied Soil Ecology,2016,106:24-32.
- [5] Moreno-Cornejo J, Zornoza R, Faz A. Carbon and nitrogen mineralization during decomposition of crop residues in a calcareous soil[J].Geoderma,2014,230/231(7):58-63.
- [6] 孟繁华.长期有机无机配施黑土氮素转化特征[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [7] 秦子娴,张宇亭,周志峰,等.长期施肥对中性紫色水稻土氮素矿化和硝化作用的影响[J].中国农业科学,2013,46(16):3392-3400.
- [8] 范晓晖,林德喜,沈敏,等.长期试验地潮土的矿化与硝化作用特征[J].土壤学报,2005,42(2):340-343.
- [9] 伍玉鹏,邓婵娟,姜炎彬,等.长期施肥对水稻土有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(10):1958-1964.
- [10] Kader M A, Yeasmin S, Solaiman Z, et al. Response of hydrolytic enzyme activities and nitrogen mineralization to fertilizer and organic matter application in subtropical paddy soils[J]. European Journal of Soil Biology,2017,80:27-34.
- [11] 王斯佳,韩晓增,侯雪莹.长期施肥对黑土氮素矿化与硝化作用特征的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):170-173.
- [12] 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[J].土壤学报,2016,53(2):292-304.
- [13] 曾泽彬,朱波,朱雪梅,等.施肥对夏玉米季紫色土 N_2O 排放及反硝化作用的影响[J].土壤学报,2013,50(1):130-137.
- [14] 石玉龙,刘杏认,高佩玲,等.生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N_2O 排放的影响[J].环境科学,2017,38(12):5333-5343.
- [15] 张中杰,朱波,项红艳.氮肥施用对西南地区紫色土冬小麦 N_2O 释放和反硝化作用的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(10):2033-2040.
- [16] 王书伟,颜晓元,单军,等.利用膜进样质谱法测定不同氮肥用量下反硝化氮素损失[J].土壤,2018,50(4):664-673.
- [17] 李彦,李廷亮,焦欢,等.不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素矿化的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):227-232.
- [18] 余冻,高明,慈恩,等.不同耕作方式下土壤氮素矿化和硝化特征研究[J].生态环境学报,2010,19(3):733-738.
- [19] 李振高.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008.
- [20] Standford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J].Soil Science Society of America Journal,1972,36(3):465-472.
- [21] 张国桢,李世清.三种氨态氮肥在石灰性土壤中硝化作用的模拟研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):177-182.
- [22] 朱继荣,韦绪好,祝鹏飞,等.施用生物炭抑制塌陷区复垦土壤硝化作用[J].农业工程学报,2015,31(7):264-271.
- [23] 赵伟,梁斌,周建斌.长期不同施肥处理对土壤氮素矿化特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):177-181.
- [24] 南镇武,梁斌,陈延玲,等.长期定位施肥对土壤氮素矿化与作物产量的影响[J].华北农学报,2016,31(5):146-151.
- [25] 鲁彩艳,牛明芬,陈欣,等.不同施肥制度培育土壤氮矿化势与供氮潜力[J].辽宁工程技术大学学报,2007,26(5):773-775.
- [26] 王帘里,孙波.温度和土壤类型对氮素矿化的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):583-591.
- [27] 鲍俊丹,石美,张妹婷,等.中国典型土壤硝化作用与土壤性质的关系[J].中国农业科学,2011,44(7):1390-1398.
- [28] 张云舒,刘骅,王西和,等.灰漠土长期试验地氮素矿化和硝化作用的特征[J].新疆农业科学,2008,45(4):700-703.
- [29] 林伟,丁军军,李玉中,等.有机肥和无机肥对菜地土壤 N_2O 排放及其来源的影响[J].应用生态学报,2018,29(5):1470-1478.
- [30] 王大鹏,郑亮,罗雪华,等.砖红壤不同温度、水分及碳氮源条件下硝化和反硝化特征[J].土壤通报,2018,49(3):616-622.
- [31] 黄益宗,张福珠,刘淑琴,等.化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究[J].环境科学学报,1999(5):478-482.
- [32] 曹彦强,闫小娟,罗红燕,等.不同酸碱性紫色土的硝化活性及微生物群落组成[J].土壤学报,2018,55(1):194-202.
- [33] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,2012:198-199.