

不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化动态特征研究

张若扬^{1,2}, 郝鲜俊^{1,2}, 韩阳^{1,2,3}, 吕鉴于^{1,2}, 高文俊⁴, 薛玉晨^{1,2}, 张博凯^{1,2}

(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;3.中国农业大学资源与环境学院,北京 100093;4.山西农业大学动物科技学院,山西 太谷 030801)

摘要:为揭示不同有机肥对煤矿复垦土壤氮素矿化特性的影响,以山西省孝义市水峪煤矿采煤塌陷复垦土壤为研究对象,采用室内好气培养法,研究在40%含水量和30℃培养条件下,施用3种有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)后在0~161天的氮素矿化动态特征,以明确不同有机肥对该矿区复垦土壤氮素矿化特征,从而预估不同有机肥的供氮特性,为合理施用有机肥进行低产农田的培肥改造提供科学依据。结果表明:(1)各处理0~14天铵态氮含量均随培养时间的延长迅速下降,与培养时间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),14~161天土壤铵态氮含量维持在较低水平,培养结束时,各处理铵态氮含量均低于1.31 mg/kg。(2)各处理土壤硝态氮含量、累积量及矿质氮累积量变化均呈近似的“S”形曲线递增,表现为0~56天缓慢增加,56~84天迅速增加,84天至培养结束(161天)其含量基本不变。培养结束时不同处理间硝态氮含量、累积量及矿质氮累积量整体上均表现为鸡粪>猪粪>牛粪>空白,且鸡粪较猪粪和牛粪处理间存在显著差异,猪粪和牛粪较空白处理间存在显著差异($P < 0.05$)。(3)不同施肥处理出现氮素净矿化的时间点不同,其中鸡粪处理在第14天时最早出现净矿化现象,而猪粪和牛粪在培养28天后才出现明显的氮素净矿化。(4)不同施肥处理在培养的不同阶段硝态氮和矿质氮累积速率不同,但整体趋势一致,表现为培养0~84天各处理土壤累积矿化波动较大,56~84天达到峰值,培养84~161天各处理矿化速率平稳下降。总体来看,有机肥的施入能有效促进煤矿复垦土壤氮素矿化,从而提高土壤氮素有效性。其中,施鸡粪较猪粪和牛粪对提高矿区复垦土壤有效氮效果更好。4种处理的氮素矿化效果总体表现为鸡粪>猪粪>牛粪>空白。

关键词:有机肥;土壤氮素矿化;采煤塌陷区

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)02-0188-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.027

Dynamic Characteristics of Soil Nitrogen Mineralization in Mining Subsidence Area with Different Organic Fertilizers

ZHANG Ruoyang^{1,2}, HAO Xianjun^{1,2}, HAN Yang^{1,2,3},

LÜ Jianyu^{1,2}, GAO Wenjun⁴, XUE Yuchen^{1,2}, ZHANG Bokai^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University,

Taigu, Shanxi 030801; 2.National Experimental Teaching Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 3.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100093;

4.College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to reveal the effects of different organic fertilizers on nitrogen mineralization characteristics in a coal mining reclamation soil, a pot experiment was conducted by using a subsidence reclamation soil, which collected from Shuiyu Coal Mining in Xiaoyi City, Shanxi Province. The nitrogen mineralization dynamic characteristics of 0~161 days after application of three organic fertilizers (chicken manure, pig manure, cattle manure) were studied by indoor aerobic incubation method under 40% water content and 30℃ incubation conditions. The nitrogen supply characteristics of different organic fertilizers in the reclaimed soil of the mining area could be predicted, which could provide a scientific basis for the rational application of organic fertilizers for the fertility improvement of low-yield farmland. The results showed:

收稿日期:2019-08-05

资助项目:国家自然科学基金项目(41601327);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目;山西农业大学科技创新基金项目(2016ZZ14)

第一作者:张若扬(1993—),女,山西运城人,在读硕士研究生,主要从事土壤学与矿区土壤复垦研究。E-mail:492977204@qq.com

通信作者:郝鲜俊(1976—),女,山西汾阳人,博导,教授,主要从事土壤学与矿区土壤复垦研究。E-mail:haoxianjun660@126.com

(1) The dynamic trend of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content in each treatment was basically same. The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ contents decreased rapidly with incubation time at 0~14 days, which were significantly negative correlation with the incubation time ($P < 0.01$). The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ contents remained at the low level at 14~161 days. At the end of incubation, the content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in each treatment was lower than 1.31 mg/kg. (2) The dynamic trend of soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation amount and mineral nitrogen accumulation showed an increased S-shaped curve in the whole incubation period, which slowly increased at 0~56 days, quickly increased at 56~84 days, and basically unchanged at 84~161 days. At the end of incubation (161 days), the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation amount and mineral nitrogen accumulation varied among different treatments, with a sequence of chicken manure > pig manure > cattle manure > CK, and chicken manure treatment was significantly higher than pig manure treatment and cattle manure treatment, meanwhile pig manure treatment and cattle manure treatment were significantly higher than CK ($P < 0.05$). (3) The time of nitrogen net mineralization in different fertilization treatments was different. The net mineralization of chicken manure occurred at 14 days, while the net mineralization of pig manure and cattle manure occurred after 28 days. (4) Although the accumulation rates of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and mineral nitrogen of different fertilization treatments at different periods of incubation were different, their trends were totally consistent, which showed that the soil mineralization rate fluctuated greatly at 0~84 days, peaked at 56~84 days, decreased steadily at 84~161 days. In a word, the application of organic fertilizer could effectively promote the nitrogen mineralization of reclaimed soil in coal mines, thereby improved soil nitrogen availability. Among three organic fertilizers, the application of chicken manure was better than pig manure and cattle manure in improving the available nitrogen in the reclaimed soil in the mining area. The effects of nitrogen mineralization varied with four treatments, with a sequence of chicken manure > pig manure > cattle manure > CK.

Keywords: organic fertilizer; soil nitrogen mineralization; coal mining subsidence area

山西省是我国煤炭资源大省,煤炭资源在推动我省经济社会发展的同时,不可避免地造成了一系列问题,如损毁或占用耕地、造成地表裂缝或裂隙及土地塌陷,仅因采煤而塌陷的土地面积就占全国塌陷地的 27.27%^[1],其中农耕地占 40%,达 200 km²^[2]。《全国土地利用总体规划》(2006—2020)^[3]明确提出:“守住 18 亿亩耕地红线,土地整理复垦开发全面推进”。为此,对采煤塌陷的土地进行科学复垦,是补充耕地的有效途径。现阶段,采煤塌陷的土地一般先进行工程复垦,然而,工程复垦后土壤结构扰乱,心土层覆于表土层之上,导致耕层土壤养分匮乏,特别是氮素有效性极低^[4],如何快速培肥复垦土壤是矿区亟待解决的课题之一。

为了短期迅速提高土壤氮含量,当地农民在生产中通常是施用化学氮肥,然而长期大量施用化学氮肥会带来一系列负面效应,包括土壤肥力下降^[5]、结构破坏^[6]等。2017 年农业部印发《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》^[7]提出:“全国畜禽粪污综合利用率达到 75% 以上,华北平原区域遵循粪污全量收集还田利用”。与此同时,随着我国畜牧业集约化和规模化发展,产生了大量含有氮素营养的有机肥。2011 年我国主要畜禽粪便的产量达 20.04 亿 t,以氮养分总量计达 1 419.76 万 t,其中以牛粪(48.75%)、猪粪

(28.15%)和家禽粪便(20.69%)为主^[8]。将畜禽粪便归还农田,尤其是矿区新复垦土壤,不仅能提高作物产量,而且能改善复垦土壤理化性状,增加土壤有效养分含量,加快低产田的培肥熟化。

有机态氮是有机肥中氮素存在的主要形式,需经过矿化后才能被作物吸收利用。Wichern 等^[9]研究发现,畜禽粪便中氮素的矿化主要发生在培养试验的 0~9 天;Abbasi 等^[10]则表明,在培养的 10~20 天矿化过程最为明显;Azeez 等^[11]认为,有机肥矿化过程主要集中在培养的 0~30 天。可见,有机肥主要矿化过程的时间差异和阶段差异较大。不同有机肥的矿质氮含量和矿化速率不同,赵明等^[12]针对棕壤(pH 7.05)在 70%含水量和 25℃培养条件下,以 15 t/hm²肥料用量加入有机肥,进行室内培养试验,结果表明,培养 120 天后,各有机肥矿质氮含量规律表现为鸡粪(39.9%)>猪粪(35.3%)>牛粪(20.6%),而矿化速率则表现为鸡粪(87.5%)>牛粪(71.9%)>猪粪(55.4%)。李玲玲^[13]在 50%含水量和 25℃培养条件下,按 200 mg/kg 施氮量,研究不同有机肥在黑土上的氮素有效性,发现不同有机肥处理均在室内培养 28 天后出现净矿化,鸡粪、猪粪和牛粪间的氮素净矿化量均存在显著差异($P < 0.05$),分别占施入有机氮总

量的 21.0%,19.1%和 13.1%。由于土壤类型、有机肥的理化性质、培养温度 and 水分等的差异,不同有机肥施入土壤后其氮素矿化不尽相同。目前,有关氮素矿化的研究多集中在我国东北、西北及水稻种植区的普通农田,而关于黄土丘陵煤矿复垦区域黄棕壤氮素矿化的研究较少,仅有的研究多以等质量(有机肥)、等比例(有机肥所占土壤的质量比)的粗放式施肥方式来进行分析,而忽略有机肥中全氮的含量,并没有在统一的施氮水平下进行研究^[12,14];并且发达国家在对氮含量较低的土壤进行施肥时是依据作物氮肥需求进行施用,那么在统一施氮水平下不同有机肥的氮素矿化过程及矿质氮累积量是否一致还有待研究。为此,本试验基于作物需氮量在统一氮素水平下,以采煤塌陷区复垦土壤为研究对象,采用室内培养法,研究 3 种有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)氮素矿化特征,为预估有机肥供氮特性、合理使用有机肥进行低产农田的培肥改造提供科学依据。

表 1 供试有机肥基本理化性状

有机肥	pH	含水量/%	全氮/%	全磷/%	全钾/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	C/N	NH ₄ ⁺ —N/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ —N/ (g·kg ⁻¹)
鸡粪	8.19	54.25	2.83	2.15	2.24	532.20	10.91	0.61	0
猪粪	8.15	56.35	2.75	3.67	0.99	584.47	12.33	0.52	0
牛粪	8.07	62.60	2.48	4.89	1.22	610.50	14.79	0.51	0

1.2 试验设计

试验始于 2016 年 9 月 3 日,至翌年 2 月 18 日结束。采用好气培养法,以不施肥处理为空白对照,设施用鸡粪、猪粪、牛粪,共 4 个处理,3 次重复。称取供试土壤 500 g,装入 1 L 棕色玻璃瓶中,加蒸馏水,使土壤水分含量达到田间最大持水量的 50%,盖上盖子,放入 25℃恒温培养箱中预培养 1 周,以消除土壤机械搅动的干扰,并使土壤中微生物恢复活性,期间每天开盖通气 1 h,每隔 3 天利用称重法补水以保持其含水量不变。预培养结束后,除空白对照处理外,其他处理按照 200 mg/kg 氮(以全 N 计)施入有机肥,并与土壤充分混匀。由于本试验研究区为干旱半干旱气候,黄土丘陵矿区土壤含水量较低,为模拟田间自然条件,故按田间最大持水量的 40%加入蒸馏水,放置于(30±2)℃恒温培养箱中进行培养。期间每 3 天通气 1 h,并利用称重补水法保持土壤含水量不变。于培养后第 0,3,7,14,28,42,56,84,112,161 天进行采样,样品一部分用于测定土壤含水量,一部分用来测定土壤硝态氮和铵态氮含量。

1.3 测定项目与方法

土壤基本理化性质参照《土壤农化分析》^[15]中的方法测定。有机肥养分状况根据 NY 525—2012《有机肥料》^[16]标准方法测定。土壤硝态氮、铵态氮采用

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验供试土壤采自山西省孝义市偏城村水峪煤矿采煤塌陷区(37°06′39.57″—37°06′41.4″N,111°37′31.7″—111°37′36.2″E),该采煤塌陷区的地貌为黄土丘陵,于 2015 年塌陷稳定,塌陷深度为 6.5~7.7 m,2016 年秋经煤矸石、煤渣填充,生土覆盖、混推复垦后,平整土地,复垦土壤厚度约 1 m。工程复垦后采集尚未种植作物的表层土壤(0—20 cm),风干、磨碎后过 2 mm 筛备用。供试土壤类型为黄棕壤,质地为粉砂质黏壤土,其基本理化性质为:pH 8.43,有机质含量 5.45 g/kg,全氮含量 0.15 g/kg,硝态氮含量 7.86 mg/kg,铵态氮含量 6.94 mg/kg,有效磷含量 4.34 mg/kg,有效钾含量 85.88 mg/kg,田间最大持水量 25%。

供试有机肥为新鲜腐熟的鸡粪、猪粪和牛粪,均采自偏城村附近养殖场,基本理化性状见表 1。

AA3(Auto Analyzer 3)型流动分析仪测定。

1.4 数据处理与氮素矿化指标计算

试验数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较,用 Excle 2010 软件进行整理及作图。

矿质氮含量(mg/kg)=硝态氮含量(mg/kg)+铵态氮含量(mg/kg)

第 *n* 天硝态氮累积量(mg/kg)=培养第 *n* 天硝态氮含量—培养 0 天硝态氮含量

第 *n* 天硝态氮累积速率(mg/(kg·d))=(培养第 *n* 天硝态氮累积量—(*n*—*d*)天硝态氮累积量)/间隔天数 *d*

第 *n* 天矿质氮累积量(mg/kg)=培养第 *n* 天矿质氮含量—培养 0 天矿质氮含量

第 *n* 天矿质氮矿化速率(mg/(kg·d))=(培养第 *n* 天矿质氮累积量—(*n*—*d*)天矿质氮累积量)/间隔天数 *d*

式中:*d* 为与上一阶段培养间隔的天数(*d*)。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥对采煤塌陷区土壤铵态氮的影响

2.1.1 不同有机肥对采煤塌陷区土壤铵态氮含量动态变化的影响 由图 1 可知,培养初始,各处理铵态氮含量均出现峰值,猪粪、鸡粪、牛粪和空白处理的土

壤铵态氮含量分别为 17.06, 14.80, 9.94, 7.20 mg/kg, 四者间均存在显著差异($P<0.05$)。0~14 天, 各处理土壤铵态氮含量迅速降低, 第 14 天时以鸡粪处理的铵态氮含量最大, 为 2.84 mg/kg, 显著高于猪粪和牛粪处理($P<0.05$); 猪粪和牛粪处理间差异不显著, 但铵态氮含量均显著高于空白处理($P<0.05$)。14~161 天土壤铵态氮含量维持在较低水平, 波动中趋于平稳, 到培养结束时(161 天), 不同施肥处理间铵态氮含量无显著差异, 均低于 1.31 mg/kg, 但显著高于空白处理($P<0.05$)。

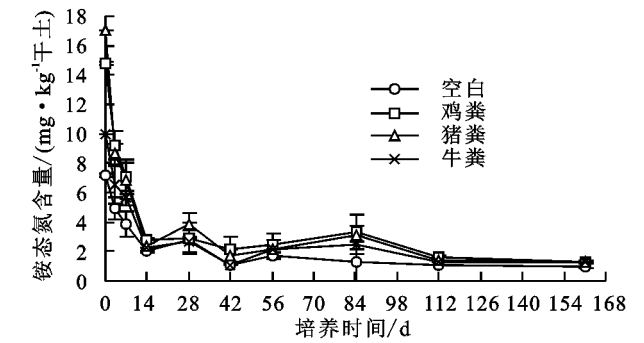


图 1 不同处理土壤铵态氮含量的动态变化

2.1.2 培养前 14 天土壤铵态氮含量与培养天数的关系 由培养前 14 天土壤铵态氮含量与培养时间的拟合关系(图 2)可知, 各处理土壤铵态氮含量与培养时间均呈现极显著负相关关系($P<0.01$), 说明培养初期以氨化作用为主, 各处理随培养时间的延长, 土壤铵态氮含量的下降速率表现为猪粪>鸡粪>牛粪>空白, 空白处理铵态氮含量的减少量最少, 为 5.21 mg/kg, 鸡粪、猪粪和牛粪的减少量分别为空白处理的 2.30, 2.82, 1.48 倍。说明不同施肥处理对铵态氮在土壤转化速率影响不同。

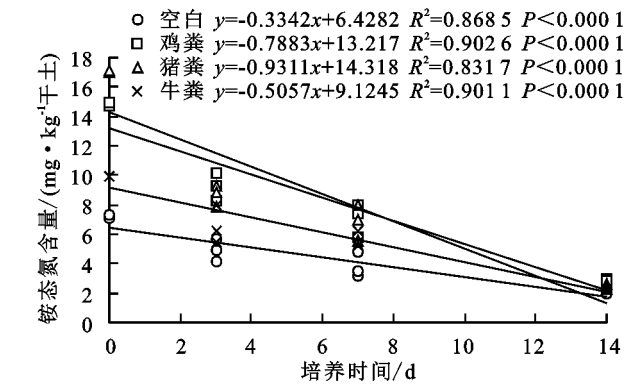


图 2 培养前 14 天土壤铵态氮含量与培养天数的关系

2.2 不同有机肥对采煤塌陷区土壤硝态氮的影响

2.2.1 不同有机肥对采煤塌陷区土壤硝态氮含量动态变化的影响 由图 3 可知, 各施肥处理土壤硝态氮含量变化趋势一致, 均表现为 0~56 天硝态氮含量波动中平缓增长, 培养 56~84 天时硝态氮含量剧烈增加, 培养 84 天后, 硝态氮含量增加速度放缓, 培养 112~161 天时, 各处理土壤硝态氮含量趋于稳定, 到第 161 天培养结

束时, 各处理土壤硝态氮含量达到最大。各培养阶段不同处理间土壤硝态氮含量有所差异。培养 0~7 天, 不同有机肥处理之间的土壤硝态氮含量无显著差异($P>0.05$), 但均显著高于空白处理($P<0.05$)。从培养第 14 天开始, 土壤硝态氮含量在不同施肥处理间表现为鸡粪>猪粪>牛粪>空白, 且四者间均存在显著差异($P<0.05$)。培养结束时(161 天), 鸡粪处理的土壤硝态氮含量较猪粪和牛粪分别提高 14.66% 和 28.89%, 猪粪和牛粪处理较空白处理分别提高 92.31% 和 71.08%。

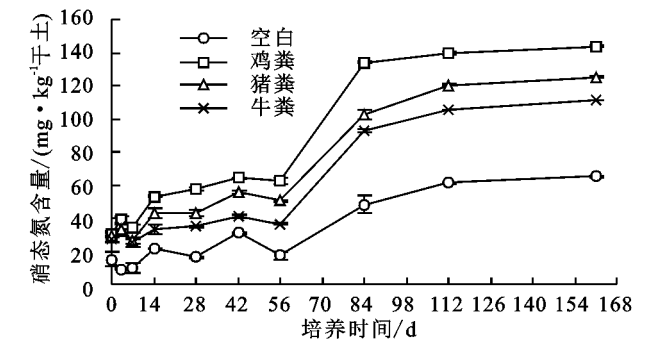


图 3 不同处理土壤硝态氮含量的动态变化

2.2.2 不同有机肥对采煤塌陷区土壤硝态氮累积量和累积速率的影响 由表 2 可知, 不同施肥处理硝态氮累积量变化趋势与硝态氮含量变化趋势基本一致, 表现为培养 0~56 天缓慢增加, 56~84 天时其含量迅速增加, 此阶段施鸡粪、猪粪、牛粪处理的硝态氮累积量分别占各自总累积量的 63.48%, 54.19%, 67.46%, 此后硝态氮累积量趋于平稳, 到培养结束时(161 天), 鸡粪处理的土壤硝态氮累积量为 112.84 mg/kg, 较猪粪(95.69 mg/kg)和牛粪(83.68 mg/kg)处理分别提高 17.92% 和 34.85%, 猪粪和牛粪处理较空白(50.20 mg/kg)分别提高 90.62% 和 66.69%。

各施肥处理土壤硝态氮累积量大于 0 mg/kg 出现的时间不同, 其中施鸡粪处理在培养 0~3 天最早出现。整个培养过程均以鸡粪处理硝态氮累积量最高, 显著高于施猪粪和牛粪处理($P<0.05$)。培养 0~7 天, 猪粪、牛粪与空白处理间均不存在显著差异, 培养 7 天后, 猪粪处理土壤硝态氮累积量显著高于牛粪和空白处理。而施牛粪处理在培养 42 天后才表现出与空白处理的显著差异($P<0.05$)。

培养 0~84 天各处理土壤硝态氮累积速率波动较大, 培养 84~161 天硝态氮累积速率平稳下降。由表 3 可知, 各处理土壤硝态氮累积速率均在培养 56~84 天出现峰值, 此阶段不同处理硝态氮累积速率表现为鸡粪>猪粪>牛粪>空白, 且各处理间均存在显著差异($P<0.05$)。同时鸡粪处理还存在 2 个硝态氮累积速率峰值, 分别为培养 0~3, 7~14 天, 牛粪处理的硝态氮累积速率峰值还出现在培养 0~3 天。

2.3 不同有机肥对采煤塌陷区土壤矿质氮累积量和矿化速率的影响

由表 4 可知,不同施肥处理出现氮素净矿化(矿质氮累积量 >0 mg/kg)的时间点存在差异,其中鸡粪处理最早出现(第 14 天),猪粪和牛粪次之(第 28 天)。由于 0~14 天铵态氮含量下降较快,与硝态氮累积量大于 0 mg/kg 出现的时间相比,各处理出现净矿化的时间略晚。不同处理在 56~84 天矿质氮累积量迅速增加,此阶段各有机肥处理矿质氮累积增量

占总累积量的 66.21%~75.36%。在培养的整个过程中,总体上以施鸡粪处理的矿质氮累积量最高,显著高于施猪粪、牛粪处理($P<0.05$)。就猪粪和牛粪处理而言,培养前 84 天,整体上施牛粪、猪粪处理的矿质氮累积量与空白处理间无显著差异($P>0.05$),培养 84 天后,施猪粪和牛粪处理才显著高于不施肥处理($P<0.05$)。培养结束时(161 天),鸡粪处理的土壤矿质氮累积量较猪粪和牛粪处理分别提升 24.17%和 32.35%,猪粪和牛粪处理较空白处理分别提高 83.52%和 72.18%。

表 2 不同处理土壤硝态氮累积量随培养时间的变化 单位:mg/kg 干土

有机肥	3 d	7 d	14 d	28 d	42 d	56 d	84 d	112 d	161 d
空白	-1.01±0.87b	-5.11±2.50b	2.94±1.57c	1.65±0.54c	10.70±5.87c	0.12±0.09d	33.12±6.25c	46.33±4.50d	50.20±3.92d
鸡粪	8.95±0.41a	3.06±1.12a	22.48±1.20a	27.02±2.41a	33.54±2.06a	31.88±1.53a	103.51±2.68a	108.04±1.84a	112.84±2.13a
猪粪	3.53±1.96ab	-3.56±1.59b	13.57±1.99b	13.47±1.80b	25.78±2.28b	21.20±1.70b	73.05±3.88b	91.51±1.12b	95.69±1.53b
牛粪	7.61±3.46ab	-2.38±1.09b	5.58±2.57c	7.18±2.55c	13.29±2.19c	8.84±1.99c	65.29±2.75b	77.53±1.65c	83.68±2.02c

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3 不同处理土壤硝态氮累积速率随培养时间的变化 单位:mg/(kg·d)

有机肥	0~3 d	3~7 d	7~14 d	14~28 d	28~42 d	42~56 d	56~84 d	84~112 d	112~161 d
空白	-0.34±0.22d	-1.03±0.62a	1.15±0.65c	-0.09±0.02d	0.65±0.42b	-0.76±0.28c	1.18±0.22d	0.47±0.16b	0.08±0.03c
鸡粪	2.98±0.13a	-1.47±0.28b	2.77±0.17a	0.32±0.17a	0.47±0.15c	-0.12±0.11a	2.56±0.10a	0.16±0.07d	0.10±0.04b
猪粪	1.18±0.65c	-1.77±0.40c	2.45±0.28b	-0.01±0.01c	0.88±0.16a	-0.33±0.12b	1.85±0.14c	0.66±0.04a	0.09±0.03bc
牛粪	2.54±1.15b	-2.50±0.27d	1.14±0.37c	0.11±0.08b	0.44±0.16d	-0.32±0.14b	2.02±0.10b	0.44±0.06c	0.13±0.04a

表 4 施用 3 种有机肥后土壤矿质氮累积量的变化 单位:mg/kg 干土

有机肥	3 d	7 d	14 d	28 d	42 d	56 d	84 d	112 d	161 d
空白	-3.72±1.87b	-8.95±2.50b	-2.23±0.44b	-1.67±0.54b	4.11±2.87b	-3.51±0.19c	26.77±6.25c	41.89±4.50d	43.56±3.92d
鸡粪	3.87±0.02ab	-4.50±1.12a	10.52±1.20a	15.15±2.41a	22.34±2.06a	19.51±1.53a	92.06±2.67a	94.91±0.09a	99.26±2.13a
猪粪	-2.13±1.96ab	-13.81±1.59c	-1.10±0.99b	0.21±0.10b	10.38±2.28b	6.17±1.70b	59.10±3.88b	75.82±0.06b	79.94±1.53b
牛粪	4.20±2.46a	-6.67±1.09ab	-2.12±1.57b	-0.08±0.05b	4.96±2.19b	-0.19±0.08c	56.33±2.75b	68.91±1.65c	75.00±2.02c

由表 5 可知,培养 0~28 天土壤矿质氮缓慢释放,各有机肥处理的平均矿化速率为-0.43~0.42 N mg/(kg·d);28~84 天矿质氮迅速释放,平均矿化

速率为0.67~0.97 N mg/(kg·d),其中 56~84 天速率最快;培养 84~161 天各处理矿化速率平稳下降,平均矿化速率为 0.09~0.34 N mg/(kg·d)。

表 5 施用 3 种有机肥后土壤氮素矿化速率的变化 单位:mg/(kg·d)

有机肥	0~3 d	3~7 d	7~14 d	14~28 d	28~42 d	42~56 d	56~84 d	84~112 d	112~161 d
空白	-1.24±0.62d	-1.31±0.34a	0.96±0.14c	0.04±0.01d	0.41±0.13c	-0.54±0.22c	1.08±0.36d	0.54±0.27b	0.03±0.01c
鸡粪	1.29±0.43b	-2.09±0.82b	2.15±0.28a	0.33±0.16a	0.51±0.20b	-0.20±0.09a	2.59±0.73a	0.10±0.03d	0.09±0.03b
猪粪	-0.71±0.19c	-2.92±0.76d	1.82±0.09b	0.09±0.02c	0.73±0.29a	-0.30±0.14ab	1.89±0.47c	0.60±0.12a	0.08±0.02b
牛粪	1.40±0.32a	-2.72±0.35c	0.65±0.11d	0.15±0.02b	0.36±0.07d	-0.37±0.15b	2.02±0.58b	0.45±0.06c	0.12±0.07a

3 讨论

3.1 不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化趋势的影响

对有机肥氮素矿化动态特征的研究是获知不同有机肥氮素有效性、预估不同有机肥的供氮特性、进行低产农田培肥改造的前提。本研究中随培养时间的延长,铵态氮含量下降,硝态氮含量上升的变化趋势与部分学者^[13,17-21]的研究结果一致,他们认为这是由于在预培养阶段,适宜的温度和水分条件激活了土壤和有机肥中各种微生物和酶活性,培养初期以氨化

作用为主,土壤中的氨化微生物在分解有机氮的同时产生了大量的铵态氮^[17],但当铵态氮含量较高时则会抑制氨化微生物的酶促反应,同时土壤中的其他微生物以释放出的矿质氮(主要为铵态氮)为氮源,以有机肥中的有机质为碳源来合成细胞体并大量繁殖,导致铵态氮被微生物固定^[18-19],且好氧环境下,硝化细菌在碳源、氮源都充足的情况下快速繁殖,并将氨化作用释放出来的氨氧化为硝酸盐,使硝态氮含量增加^[13,20],到培养后期,由于有机肥可矿化量有限,矿化难度加大,矿质氮释放量减少,同时土壤中数量庞大的微生物不断消耗矿化出的氮,故硝态氮含量趋于稳定^[21]。

3.2 不同有机肥对采煤塌陷区土壤培养结束时铵态氮和硝态氮含量的影响

本试验培养结束时(161天),各有机肥处理土壤铵态氮含量为鸡粪 1.25 mg/kg,猪粪 1.31 mg/kg,牛粪 1.26 mg/kg,远低于赵明等^[12]对菜地土(壤质潮棕壤)室内培养 120 天的研究结果(鸡粪堆肥 9.0 mg/kg,猪粪堆肥 7.7 mg/kg,牛粪堆肥 7.7 mg/kg)。一方面是由于赵明等^[12]所研究的菜地土壤铵态氮含量(8.7 mg/kg)高于本试验中经煤矸石、煤渣填充复垦后生土裸露的矿区土壤(6.94 mg/kg),且与本试验新鲜腐熟的有机肥相比,该试验所用有机肥经过堆肥处理,更易使有机肥中易分解的氮素转化为稳定性氮素,加强了铵态氮的固定;另一方面也与赵明等^[12]施肥方式(有机肥:土为 2%)、培养温度(25℃)和水分(70%)等培养条件的设置与本研究不同有关。

同时,本试验培养结束时(161天),各有机肥处理土壤硝态氮累积量为鸡粪 112.84 mg/kg,猪粪 95.69 mg/kg,牛粪 83.68 mg/kg,均低于李玲玲^[13]在黑土上的研究结果(鸡粪 141.7~206.4 mg/kg,猪粪 132.4~196.0 mg/kg,牛粪 130.6~176.0 mg/kg),这可能是由于本试验研究区为干旱半干旱气候,黄土丘陵矿区土壤含水量较低,故本试验培养过程中水分含量设定为 40%低于李玲玲^[13]50%的水分含量,从而影响了有机肥氮素释放,同时供试土壤为黄棕壤,与黑土相比,土壤有机质含量低,微生物和土壤酶活性差,从而抑制了有机肥氮素的矿化。

3.3 不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化速率和矿质氮含量的影响

本研究发现,有机肥氮素矿化速率表现为培养 0~28 天土壤矿质氮缓慢释放,28~84 天释放速率骤增,84~161 天各处理矿化速率平稳下降 3 个阶段,这与杨蕊^[20]在红壤上的研究结果相似,但其研究结果 3 个阶段中鸡粪、猪粪平均矿化速率分别为 0.29~0.46(前 4 周),0.6~0.71(4—10 周),-0.20~-0.09(10 周后)N mg/(kg·d),低于本文中对对应阶段鸡粪、猪粪平均矿化速率-0.43~0.42,0.77~0.97,0.09~0.34 N mg/(kg·d),这主要是由于杨蕊等^[20]的研究中以等磷量方式施入有机肥,所施入鸡粪、猪粪中的氮含量(59.6,34.6 mg/kg)远低于本研究的氮含量(200 mg/kg)。杨蕊^[20]通过研究不同施氮量下(59.6,99.3,139.0 N mg/kg)鸡粪的矿化特征发现土壤中矿质氮的含量随着施氮量的增加而增加。

本研究得出,在培养结束(161天)时,与牛粪处理相比,鸡粪处理的矿质氮含量提高 28.52%,张帆等^[21]对不同有机肥矿化培养 180 天后发现,鸡粪处理的矿质氮含量比牛粪提高 157.11%,远高于本研究

结果,这是由于张帆等^[21]是研究纯有机肥的氮素矿化,并未添加土壤与有机肥混合,纯有机肥中氮素含量浓度高,微生物组织、数量和活性远高于一般施肥处理,故不同处理间矿化差异更为明显。周博等^[22]在壤土上对不同种类有机肥氮矿化特征的研究发现,培养结束时(23周),猪粪和牛粪处理的矿质氮含量与空白对照间无显著差异,与本文研究结果不一致,这是由于周博等^[22]的研究中对照土壤为人工培肥的温室耕层土,其有机质(30.0 g/kg)和土壤全氮(1.28 g/kg)远高于本试验采煤塌陷新复垦的土壤(有机质 5.45 g/kg,土壤全氮 0.15 g/kg),故猪粪、牛粪的施入对本试验结果有显著影响。可见,供试土壤基础理化性质的不同会导致不同有机肥氮素矿化量存在差异。

3.4 C/N 对不同有机肥氮素矿化的影响

本试验得出不同有机肥的硝态氮含量、硝态氮累积量、铵态氮含量、矿质氮累积量差异明显,均表现为鸡粪>猪粪>牛粪,这与郑福丽等^[23]、韩阳^[24]、赵明等^[25]、张帆等^[26]的研究结果相似,这是由于培养前期 3 种供试有机肥以鸡粪的氮含量最大,C/N(10.91)低于猪粪(12.33)和牛粪(14.79)。韩晓日等^[27]和周博等^[22]认为鸡粪 C/N 小,易激发土壤微生物活性,容易发生矿化作用;Calderón 等^[28]发现,有机肥氮素累积量和矿化速率与有机肥碳氮比呈负相关关系;李俊良等^[29]通过 3 种不同的培养法研究有机肥碳氮比与矿化率的关系,结果发现均呈负线性相关关系,与本试验研究结果一致。同时有研究^[30]表明,由于矿化过程中碳的损失量远大于氮的损失,不同有机肥处理的 C/N 比会随培养时间的推进呈下降趋势^[31],故鸡粪的矿化效果优于猪粪和牛粪。此外,张鸣等^[32]认为,出现此现象的原因还可能是由于与猪和牛相比,鸡的肠道短、排泄快,对饲料的消化吸收不完全,导致鸡粪中残留的微量元素及营养物质与猪粪和牛粪相比较多。

本试验中,不同有机肥处理硝态氮和矿质氮累积速率峰值及累积量大于 0 出现的时间不同,沈其荣等^[33]和黄向东等^[34]认为这与有机肥的来源(畜禽种类、养殖方式、饲料成分等)、堆积方式、腐熟程度、理化性质(尤其是 C/N)有关。

4 结论

本试验中,鸡粪、猪粪、牛粪在采煤塌陷复垦土壤中的矿化特征总体一致,为培养 0~56 天土壤矿质氮累积量缓慢增加,培养 56~84 天时其含量迅速增加,84 天至培养结束矿质氮累积量基本不变。

培养最初 14 天土壤铵态氮含量迅速减少,与培养时间呈极显著负相关关系。各处理土壤硝态氮含量、累

积量及矿质氮的累积量随培养时间的延长呈近似的“S”形曲线递增,其中,施用鸡粪能显著提高土壤硝态氮含量、硝态氮累积量及矿质氮累积量,猪粪和牛粪效果次之,但均显著高于空白处理($P<0.05$)。

总体来看,有机肥的施入能有效促进煤矿复垦土壤氮素矿化,从而提高土壤氮素有效性。4 种处理的氮素矿化效果总体表现为鸡粪>猪粪>牛粪>空白。

参考文献:

[1] 焦欢,李廷亮,高继伟,等.培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):208-213.

[2] 黄岑丽.潞安矿区煤炭开采对地质环境影响的研究[D].北京:中国矿业大学,2013.

[3] 《全国土地利用总体规划纲要(2006 利用总体规年)调整方案》印发实施[J].城市规划通讯,2016(13):7.

[4] 叶凌枫.不同修复措施对矿区土壤肥力质量的影响及评价[D].西安:长安大学,2016.

[5] 杨林生,张宇亭,黄兴成,等.长期施用含氯化肥对稻—麦轮作体系土壤生物肥力的影响[J].中国农业科学,2016,49(4):686-694.

[6] 聂军,郑圣先,杨曾平,等.长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J].中国农业科学,2010,43(7):1404-1413.

[7] 附录:畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)[J].中国畜牧业,2017(16):36-39.

[8] 朱建春,张增强,樊志民,等.中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J].农业环境科学学报,2014,33(3):435-445.

[9] Wichern F, Muller T, Joergensen R G, et al. Effects of manure quality and application forms on soil C and N turnover of a subtropical oasis soil under laboratory conditions[J].Biology and Fertility of Soils,2004,39:165-171.

[10] Abbasi M K, Hina M, Khalique A, et al. Mineralization of three organic manures used as nitrogen source in a soil incubated under laboratory conditions[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,2007,38:1691-1711.

[11] Azeez J O, Van Averbeke W. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil[J].Bioresource Technology,2010,101(14):5645-5651.

[12] 赵明,陈雪汇,赵征宇,等.鸡粪等有机肥料的养分释放对土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(2):47-50.

[13] 李玲玲.有机肥氮素有效性和替代化肥氮比例研究[D].北京:中国农业科学院,2011.

[14] 赵晶晶,郭颖,陈欣,等.有机物料对土壤有机磷组分及其矿化进程的影响[J].土壤,2006,38(6):740-744.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[16] 《中华人民共和国农业行业标准有机肥料(NY525—2012)》[S].北京:中国农业出版社,2012.

[17] 刘清.采煤塌陷地土壤氮素矿化过程研究[D].北京:中国矿业大学,2015.

[18] 金相灿,崔哲,王圣瑞.连续淹水培养条件下沉积物和土壤的氮素矿化过程[J].土壤通报,2006,37(5):909-915.

[19] 刘春艳.室内培养条件下南北方稻田土壤氮素矿化特征的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.

[20] 杨蕊.畜禽有机肥氮磷在红壤中的矿化、利用和环境风险研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.

[21] 张帆,王晨冰,王鸿,等.基质矿化特性与生化性状协同效应的研究[J].干旱区地理,2017,40(1):114-121.

[22] 周博,高佳佳,周建斌,等.不同种类有机肥碳、氮矿化特性研究[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):366-373.

[23] 郑福丽,姚海军,张柏松,等.不同有机肥料在生姜种植中氮素的矿化特征研究[J].中国农学通报,2018,34(2):60-64.

[24] 韩阳.有机肥氮素矿化特征及其与化肥配施对矿区土壤氮有效性研究[D].山西 太谷:山西农业大学,2018.

[25] 赵明,蔡葵,赵征宇,等.不同有机肥料中氮素的矿化特性研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):146-149.

[26] 张帆,王晨冰,牛茹萱,等.6 种类型有机肥的矿化特性研究[J].甘肃农业科技,2017(8):29-33.

[27] 韩晓日,郑国砥,刘晓燕,等.有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J].中国农业科学,2007,40(4):765-772.

[28] Calderón F J, Mccarty G W, Reeves III J B. Analysis of manure and soil nitrogen mineralization during incubation[J].Biology and Fertility of Soils,2005,41:328-336.

[29] 李俊良,韩琅丰,江荣风,等.碳、氮比对有机肥料氮素释放和植物吸氮的影响[J].中国农业大学学报,1996,5(1):57-61.

[30] 巨晓棠,边秀举,刘学军,等.旱地土壤氮素矿化参数与氮素形态的关系[J].植物营养与肥料学报,2000,6(3):251-259.

[31] 柳敏,张璐,宇万太,等.有机物料中有机碳和有机氮的分解进程及分解残留率[J].应用生态学报,2007,18(11):2503-2506.

[32] 张鸣,高天鹏,李昂,等.畜禽粪肥与化肥配施对春小麦产量和养分吸收利用的影响[J].麦类作物学报,2014,34(2):216-221.

[33] 沈其荣,沈振国,史瑞和.有机肥氮素的矿化特征及其与化学组成的关系[J].南京农业大学学报,1992,15(1):59-64.

[34] 黄向东,韩志英,石德智,等.畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J].应用生态学报,2010,21(1):247-254.