

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.006

李京京, 刘文, 任天宝, 等. 不同土壤质地和含水率对炭基肥料氮素矿化的影响. 土壤, 2020, 52(1): 40–46

不同土壤质地和含水率对炭基肥料氮素矿化的影响^①

李京京^{1,3}, 刘文², 任天宝¹, 阎海涛¹, 杜飞乐¹, 张璐¹, 李朋彦¹, 刘英杰², 刘国顺^{1*}

(1 河南农业大学烟草学院/河南省生物炭研究工程技术中心, 郑州 450002; 2 河南省烟草公司郑州市公司, 郑州 450001; 3 黄鹤楼科技园(集团)有限公司, 武汉 430040)

摘要: 为了探究土壤特性对炭基肥料氮素矿化的影响, 采用室内培养和大田小区试验, 分析了炭基肥在不同土壤质地(砂质壤土、粉砂质壤土、黏土)及含水率(80%、60%、40% 田间最大持水量)条件下, 氮素矿化动态变化特征。结果表明: 在室内培养条件下, 对于不同土壤质地, 炭基肥在砂质壤土条件下矿化势最高, 其次为黏土, 最低的为粉砂质壤土; 对于不同田间持水量, 在粉砂质壤土条件下, 炭基肥矿化势最高的为 80% 田间最大持水量(80%SMC), 其次为 60%SMC, 最低的是 40%SMC; 在砂质壤土和黏土条件下, 炭基肥的矿化势均表现为 60%SMC > 80%SMC > 40%SMC。培养状态下粉砂质壤土、砂质壤土、黏土条件下最大氮素有效性分别是 34.12%、56.31%、41.14%, 而在大田条件下, 炭基肥单季氮素最大矿化率在粉砂质壤土、砂质壤土、黏土 3 种土壤质地下分别是 50.61%、32.27%、34.29%。

关键词: 炭基肥; 氮素矿化; 土壤质地; 土壤含水率

中图分类号: S572 **文献标志码:** A

Effects of Soil Texture and Moisture on Nitrogen Mineralization Rate of Biochar-based Fertilizer

LI Jingjing^{1,3}, LIU Wen², REN Tianbao¹, YAN Haitao¹, DU Feile¹, ZHNAG Lu¹, LI Pengyan¹, LIU Yingjie², LIU Guoshun^{1*}

(1 Tobacco College, Henan Agricultural University / Henan Biochar Engineering Research Center, Zhengzhou 450002, China; 2 Zhengzhou Tobacco Company of Henan Province, Zhengzhou 450001, China; 3 Huanghelou Science Park (Group) Co., Ltd, Wuhan 430040, China)

Abstract: In order to study the effect of soil texture and water content on nitrogen mineralization of biochar-based fertilizer, an indoor incubation and field experiment were conducted to study the characteristics of nitrogen mineralization under different soil textures (sandy loam, silty loam, clay) and soil moistures (80%, 60%, 40% of SMC). The results showed that the mineralization potential of the sandy loam was the highest, followed by clay, and silty loam was the lowest; The mineralization potential was in an order of 80%SMC>60%SMC>40%SMC for silty loam, 60%SMC>80%SMC>40%SMC for sandy loam and clay, the maximum nitrogen availability were 34.12% for silty loam, 56.31% for sandy loam, 41.14% for clay, respectively. The nitrogen availability of biochar-based fertilizer in single season under field conditions under three soil types the sand loam clay were 50.61% for silty loam, 32.27% for sandy loam and 34.29% for clay.

Key words: Biochar-based fertilizer; Nitrogen mineralization; Soil texture; Soil moisture

氮素是满足作物生长、提高作物产量的重要营养元素, 化学氮肥为全球的粮食生产做出了重要贡献^[1]。改革开放以来, 由于作物增产的需要, 造成我国大量的化肥施入, 从而导致了土壤环境恶化, 生产力下降, 并已影响到我国粮食食品安全^[2]。生物质炭施入土壤后能改善土壤环境, 增加作物产质量^[3-4], 然而因为自身养分含量较低且碳氮比较高, 施入土壤后可能出

现与作物争夺养分, 从而造成作物减产的现象。因此 Spokas 等^[5]指出, 仅有 50% 的研究证明生物质炭对于作物有增产效应。于是, 将生物质炭与有机无机肥料结合, 制成炭基肥已成为生物质炭发展的新方向^[6]。目前已有大量研究证明炭基肥在改良土壤、提高肥料利用率、提高作物产质量等方面发挥作用^[7-11]。有机肥中氮素主要以有机态形式存在, 施入土壤后在微

①基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2017YFD0200808)和河南省烟草公司项目(ZYKJ201416、ZYKJ201501)资助。

* 通讯作者(liugsh1851@163.com)

作者简介: 李京京(1990—), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 研究方向为烟草栽培生理生化。E-mail: 18638598063@163.com

生物的作用下变成能被作物吸收的无机态氮,在土壤体系中由于含水率和土壤质地等一系列条件的影响,会导致肥料的氮素矿化特征发生变化,从而影响肥料氮素有效性和矿化规律。

土壤含水率通过影响土壤的通气状况,使得有机肥矿化反应底物向微生物的移动,硝化、反硝化、氨化等作用发生变化,进而影响有机氮矿化反应强度^[12]。研究表明^[13],当田间最大持水量在 18%~45% 时,有机氮的矿化随着土壤含水率的增加而增加;而当田间最大持水量大于 60% 时,由于厌氧微生物的活性会增加,其反硝化作用大于硝化作用,导致有机氮的矿化会随着土壤含水率的增加而减少^[14-15],当土壤含水率过低时,反应底物和微生物的接触频率过低,同样会造成有机氮矿化的降低^[16]。

土壤质地是土壤重要的物理指标之一,土壤质地的改变往往会造成土壤系统通气状况的改变,从而影响微生物对有机氮底物的活性作用。关于土壤质地与有机肥氮素矿化的研究多集中在土壤黏粒含量方面,Sørensen 等^[17]通过 ¹⁵N 标记的羊粪试验说明了黏粒含量越高,被微生物固定的氨态氮含量越高,从而造成了无机氮净矿化量的降低。Hubbard 等^[18]的研究提出了土壤中黏粒对微生物矿化作用底物的保护是造成黏粒含量越高有机氮净矿化量越低的原因,Thomsen 和 Olesen^[19]以及 Chae 和 Tabatabai^[20]的研究也得出了类似的结论。

目前关于不同含水率处理和土壤质地条件下炭基肥的氮素矿化的研究较少,因此本试验以不同含水量的砂土、壤土、黏土为处理进行室内培养试验,并增设大田小区矿化试验,利用曲线拟合与函数求导研究含水率和土壤质地对炭基肥氮素矿化势、矿化速率和氮素有效性的影响,为炭基肥的推广利用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验设计

选取登封当地未施肥的 3 种质地土壤(粉砂质壤土、砂质壤土、黏土),供试炭基肥为生物质炭与有机肥复混后所得,干燥过筛后称取 300 g 土壤与 3 g 粉碎过筛后的炭基肥充分混匀后按田间最大持水量(SMC)的 80%、60%、40% 加入蒸馏水,并设对照(不加炭基肥)共 18 个处理 3 次重复。用黑色塑料膜封闭后放入培养箱内 35 ℃ 条件下培养^[21],并用恒重法保持含水率不变。各处理情况如表 1,供试土壤和肥料基本理化性质见表 2。

采用埋设玻璃纤维滤纸包法进行大田条件下氮素矿化试验,具体操作为:取表 2 中 3 种土壤质地样品各 15 g(烘干后过 60 目筛)与 1 g 炭基肥(干样,过 60 目筛)充分混合后用玻璃纤维滤纸包好装入尼龙网袋,于移栽时埋入两棵烟中间(埋入相对应土壤质地的土壤中),埋设深度为 20 cm^[22],每块试验地埋设 30 个肥料袋。

表 1 培养试验各处理情况
Table 1 Condition of each treatment of indoor incubation

处理	土壤质地	大田持水量(%)	土壤质量(干重, g)	肥料质量(干重, g)
CKS-40%SMC	粉砂质壤土	40	300	0
CKS-60%SMC	粉砂质壤土	60	300	0
CKS-80%SMC	粉砂质壤土	80	300	0
CKR-40%SMC	砂质壤土	40	300	0
CKR-60%SMC	砂质壤土	60	300	0
CKR-80%SMC	砂质壤土	80	300	0
CKN-40%SMC	黏土	40	300	0
CKN-60%SMC	黏土	60	300	0
CKN-80%SMC	黏土	80	300	0
S-40%SMC	粉砂质壤土	40	300	3
S-60%SMC	粉砂质壤土	60	300	3
S-80%SMC	粉砂质壤土	80	300	3
R-40%SMC	砂质壤土	40	300	3
R-60%SMC	砂质壤土	60	300	3
R-80%SMC	砂质壤土	80	300	3
N-40%SMC	黏土	40	300	3
N-60%SMC	黏土	60	300	3
N-80%SMC	黏土	80	300	3

表 2 土壤和炭基肥料基本理化性质
Table 2 Physiochemical properties of soil and biochar-based fertilizer

材料	SMC (%)	土壤质地	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	总氮 (g/kg)	总碳 (g/kg)	pH	土壤机械组成(g/kg)		
									黏粒	粉粒	砂粒
土壤	19.15	砂质壤土	67.13	15.14	109.61	1.2	10.0	6.65	100	220	680
土壤	17.98	粉砂质壤土	55.93	17.86	117.78	0.9	10.9	7.05	140	550	310
土壤	22.39	黏土	73.95	6.53	215.11	1.2	10.8	6.33	460	440	100
肥料	-	-	-	-	-	22.6	398.0	7.13	-	-	-

1.2 氮素矿化规律的测定

室内培养试验, 从培养开始第 0、5、11、14、25、43、73、103、130 天取土 10 g, 5 g 用于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 测定, 5 g 测含水率以补水保持含水率恒定。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别以双波长比色法和靛酚蓝比色法进行测定^[23-24]。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 之和即为矿质氮。炭基肥的氮素净矿化量等于加炭基肥的矿质氮含量与不加炭基肥的矿质氮含量之差。

大田小区试验, 从肥料袋埋入后的第 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90 天, 每块试验地取 3 个肥料袋, 风干过 60 目筛后用德国 Element 元素分析仪进行总氮的测定。

1.3 炭基肥料氮净矿化量和净矿化率的计算

$$N_a = (N_i)_t - (N_i)_0$$

式中: N_a 是矿质氮; 对于培养试验, $(N_i)_t$ 和 $(N_i)_0$ 是第 t 天和第 0 天矿质氮含量; 对于田间矿化试验, 是第 t 天和第 0 天总氮含量^[25]。

炭基肥氮净矿化率(%)= 炭基肥氮净矿化量/每公斤土中炭基肥的全氮含量。根据对炭基肥氮素累计矿化量随时间变化曲线进行观察和分析, 对其采用最小二乘残差法进行拟合, 拟合方程为: $f(x) = N_0 / [1 + b \times \exp^{-cx}]$, 其中 N_0 为矿化势, 表示炭基肥能矿化出的最大量的矿

质氮。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 和 Matlab 2012a 对数据进行统计与分析。

2 结果与分析

2.1 培养试验炭基肥料氮素矿化特征

各个土壤质地下炭基肥的氮素矿化特征如图 1 所示, 炭基肥施入土壤后在粉砂质壤土和黏土条件下前 3 d 即出现了净矿化的状况, 而砂质壤土条件下在前 5 d 出现了矿质氮下降的情况, 即负矿化, 说明炭基肥在施入砂质壤土时会出现氮素固定的状况。在粉砂质壤土条件下, 80%SMC 下能矿化出更多的矿质氮, 其含量达到了 107 mg/kg; 而 60%SMC 下仅比 40%SMC 高 5 mg/kg。砂质壤土条件下, 60%SMC 在培养结束后矿质氮含量最高, 为 172 mg/kg; 其次为 80%SMC, 最少为 40%SMC, 能矿化出 10 mg/kg 的矿质氮; 且 80%SMC 与 60%SMC 间差异不大。黏土条件下和砂质壤土类似。

对炭基肥氮素累计矿化量选用 matlab 中 cftool 工具箱进行拟合, 为了确保拟合的稳定与准确, 运用最小二乘残差法(LAR)进行鲁棒性检测, 并统一选择

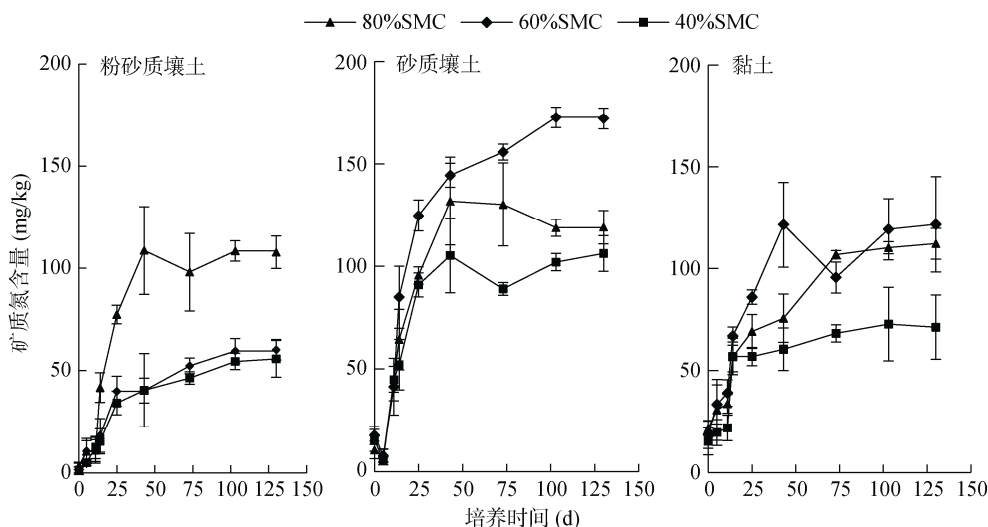


图 1 炭基肥氮素矿化特征

Fig. 1 Nitrogen mineralization of biochar-based fertilizer

表 3 炭基肥氮素矿化特征曲线拟合情况
Table 3 The fitting condition of the carbon based mineral nitrogen mineralization

处理	N_0	b	c	R^2	标准差	最大矿化率(%)
S-80%SMC	98.94	19.99	0.17	0.96	10.33	34.12
S-60%SMC	60.36	6.26	0.06	0.93	6.99	20.81
S-40%SMC	52.69	16.20	0.14	0.96	5.09	18.17
R-80%SMC	119.10	10.42	0.16	0.97	9.98	41.07
R-60%SMC	163.30	15.76	0.16	0.93	12.01	56.31
R-40%SMC	103.00	12.33	0.18	0.96	8.58	35.52
N-80%SMC	110.90	3.57	0.07	0.93	8.25	38.24
N-60%SMC	119.30	5.42	0.11	0.93	12.01	41.14
N-40%SMC	69.40	4.33	0.11	0.90	8.56	23.93

信赖域算法(Trust-Region)。拟合情况见表 3, 可以看出各拟合方程的 R^2 均在 0.90 以上, 且标准差在 15.00 以下, 说明拟合情况较好, 拟合后方程能代表原曲线的大部分信息。

最大矿化率是指各曲线经拟合后所得的矿化势除以土壤中炭基肥氮素的含量, 从表 3 可以看到炭基肥的最大矿化率在 18.17%~56.31% 之间。其中粉砂质壤土处理矿化氮素的能力最弱, 平均值仅为 24.37%, 最高能矿化 34.12% 的氮素, 最低在 40% 大田最大持水量情况下只能矿化 18.17% 的氮素。而矿化能力最强的是砂质壤土, 平均值为

44.3%, 最高能矿化炭基肥 56.31% 的氮素, 最低能矿化 35.52% 的氮素。而黏土矿化氮素的能力在这 3 种土壤质地的土壤中处于中间水平, 平均值为 34.42%, 最高能矿化 41.14% 的氮素, 最低仅能矿化 23.93% 的氮素。

为了确定炭基肥在不同土壤质地及含水率条件下的氮素矿化速率, 选用 matlab 中的 diff 函数对所拟合的方程求一阶导数得到矿化速率。如图 2 所示为各个土壤质地下炭基肥的氮素矿化速率。炭基肥料的氮素矿化速率从零上升到最大之后又降低到零的趋势发展, 其曲线近似于高斯函数。

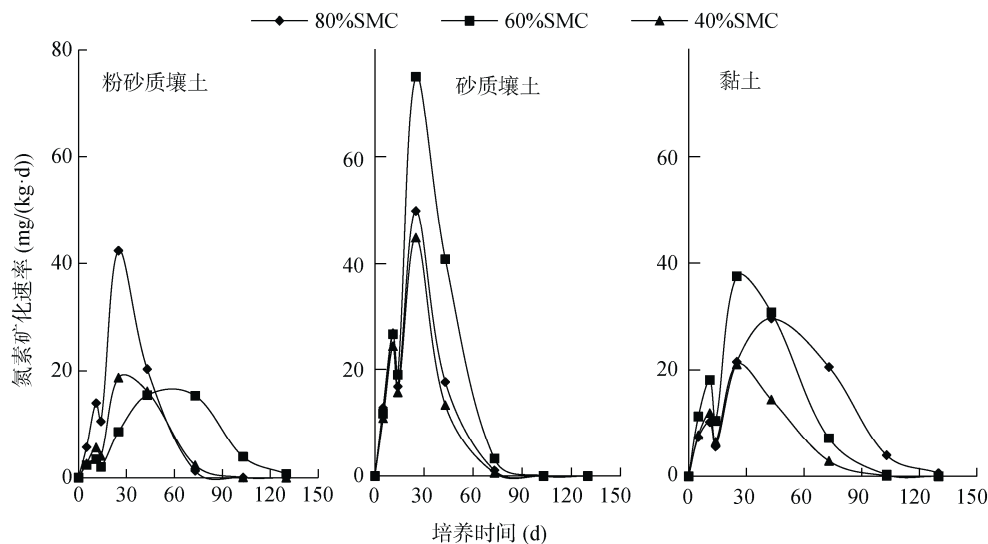


图 2 炭基肥氮素矿化速率

Fig. 2 Nitrogen mineralization rates of biochar-based fertilizer

对于粉砂质壤土处理, 其矿化速率最大值为 80%SMC 处理, 在 25 d 左右达到最大值, 约为 42 mg/(kg·d), 其矿化速率在 75 d 左右降到 1 以下; 对于 60%SMC 处理, 其矿化速率达到最大值的时间明显滞后, 约在 60 d 达到最大矿化率, 而其速率小于 1 时其培养时间需要到 120 d 左右; 对于矿化量最少的 40%SMC 其速率达到最大值时约为 25 d, 在其培养

时间为 80 d 时速率就降至 1 以下。

对于砂质壤土处理, 氮素矿化速率最大值约为 66 mg/(kg·d), 60%SMC 处理, 达到最大矿化速率的时间约为 25 d, 其速率降到 1 以下时培养时间为 70 d。而在 80%SMC 和 40%SMC 下其最大矿化速率分别为 43 mg/(kg·d) 和 38 mg/(kg·d), 达到最大值的时间也约为 25 d; 80%SMC 条件下大约在 80 d 矿化速率才

会小于 1, 而 40%SMC 下滞后情况稍轻, 大约在培养后 65 d 后矿化速率小于 1。

对于黏土处理, 其氮素矿化速率普遍偏低, 速率最高的为 60%SMC, 最高速度仅为 33 mg/(kg·d) 左右, 在培养后 30 d 出现峰值, 约在 95 d 时速率才会降至 1 以下; 而在 80%SMC 时, 其滞后情况更为严重, 培养 45 d 后才会达到最高值, 为 25 mg/(kg·d), 而培养后 120 d 左右矿化速率才会降至 1 左右; 在 40%SMC 下最高速率约为 12 mg/(kg·d), 由于其速率一直较慢, 导致其达到最高速率的时间和速率降至 1 以下的时间相对比较提前, 约为 25 d 和 70 d。

2.2 大田条件下氮素矿化特征

大田条件下氮素矿化规律由埋设肥料袋的方法所得(图 3)。在炭基肥料埋设进土壤后, 除了在通气性很强的粉砂质壤土上马上出现了氮素的损失外, 在砂质壤土和黏土这两种土壤质地上出现了氮素矿化的延后, 在埋入土壤后 10 d 后才出现氮素的净矿化。从总矿化量上来看, 粉砂质壤土处理能矿化出更多的氮素, 在移栽后 90 d 矿化出了 0.87 mg/kg 的氮素; 而砂质壤土处理氮素累计矿化量为 0.56 mg/kg, 为 3 个土壤质地最小量; 黏土处理经 90 d 后矿化出的氮素为 0.63 mg/kg。对于移栽后 0~60 d 和移栽后 60~90 d 矿化的氮素量, 粉砂质壤土处理分别是 0.63 mg/kg 和 0.25 mg/kg, 这两者的比值为 2.52; 砂质壤土处理分别是 0.47 和 0.09, 比值为 5.2; 黏土处

理分别是 0.50 和 0.13, 比值为 3.8。

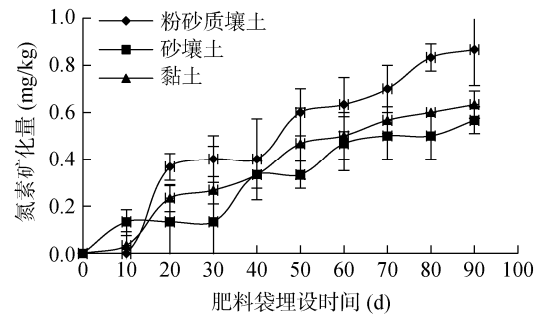


图 3 大田条件下炭基肥氮素矿化特征

Fig. 3 Nitrogen mineralization of biochar-based fertilizer under field condition

对图 3 中曲线进行拟合, 选用 Levenberg-Marquardt 算法, 其余与培养试验拟合方法选择一致。拟合结果如表 4。可以看出拟合后曲线 R^2 均在 0.9 以上, 且标准差均在 0.1 以下, 说明其能够代表原曲线的大部分信息。粉砂质壤土、砂质壤土、黏土最大矿化率分别为 50.61%、32.27%、34.29%。在粉砂质土壤条件下存在田间条件最大矿化率大于培养试验最大矿化率的情况, 原因可能是粉砂质壤土在大田条件下出现了较强烈的淋洗作用造成了一部分的氮素损失, 并且大田条件下, 土壤湿度不是处于恒定的状态, 特别是对于保水性不强的粉砂质壤土, 其干湿交替频率更高从而加强了氮素的矿化^[26]。

表 4 大田试验炭基肥氮素矿化特征曲线拟合情况表

Table 4 The fitting condition of the carbon based mineral nitrogen mineralization in field condition

土壤质地	N_0	b	c	R^2	标准差	最大矿化率(%)
粉砂质壤土	0.95	9.70	0.05	0.92	0.07	50.61
砂质壤土	0.61	10.95	0.06	0.96	0.02	32.27
黏土	0.64	9.61	0.06	0.97	0.01	34.29

对拟合后的曲线用 diff 函数求一阶导数, 得到图 4 所示的氮素矿化速率。可以看出炭基肥在大田条件下的矿化速率先增长到最高速度后逐渐降低。但从图 4 可以看出到埋入 90 d 后各土壤质地处理矿化速率均没有达到 0, 在烟株进入成熟期后炭基肥仍会矿化出氮素。对于粉砂质壤土处理其矿化速率最大值为 0.117 9 mg/(kg·d)。约在 50 d 时达到最大值。对于砂质壤土处理氮素矿化速率达到最大值时约为移栽后 50 d, 最大速率约为 0.088 7 mg/(kg·d), 而在移栽后 90 d 其氮素矿化速率为 0.021 8 mg/(kg·d)。对于黏土处理在移栽后 40 d 左右, 其氮素矿化速率达到最大值为 0.094 5 mg/(kg·d), 移栽后 90 d 时其氮素矿化速率为 0.020 4 mg/(kg·d)。

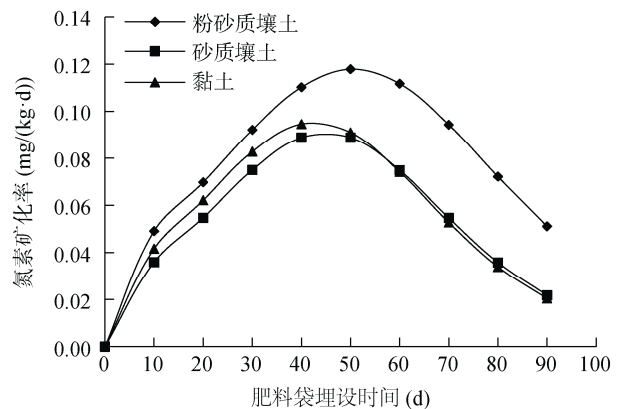


图 4 大田条件下炭基肥氮素矿化速率

Fig. 4 Nitrogen mineralization rates of biochar-based fertilizer under field condition

3 讨论

不同的田间持水量影响微生物的活性和丰度从而影响微生物的氨化、硝化等作用,影响有机肥的氮矿化^[12]。本研究中,室内培养条件下,砂质壤土和黏土在 60%SMC 状态下炭基肥能矿化出最多的氮素,而当达 80%SMC 时炭基肥的氮素矿化出现了一定程度的抑制现象。这与 Linn 和 Doran 等人^[14]的研究结果一致,可能是当 60%SMC 时,参与矿化的微生物活度最强从而导致炭基肥中氮素通过硝化作用矿化出来的最多;高于 60% 时,可能会导致反硝化的微生物活性增强,硝化量降低从而降低矿化量^[15]。而在砂质土壤条件下,出现了含水率越高,矿质氮含量越高的情况,分析原因,可能是对于通气性较好的砂质土壤,其参与矿化的微生物活性,在 80%SMC 及以上情况时出现阈值。对于 40%SMC 无论在何种土壤质地其氮素矿化量均是最低的,这与 De Neve 等人^[27]的研究结果一致,说明在相对干旱的条件下,土壤与肥料底物的可溶性组分移动性减弱,降低了对微生物的供给,造成微生物活性下降从而使硝化作用减弱^[16]。

室内培养条件下,对于 3 种土壤质地炭基肥的矿化特征,经曲线拟合后的结果显示,氮素矿化势最高的为砂质壤土处理,其次为黏土处理,最低为粉砂质壤土处理。这与 Hubbard 等^[18]、Chae 和 Tabatabai^[20]的观点不尽相同,他们认为有机肥施入土壤后其净矿化量随着土壤中黏粒含量的升高而降低,而本研究中黏粒含量最低的粉砂质壤土矿化量却是最低的,可能是由于炭基肥中含有一定量的生物质炭能促进土壤本身的矿化,而粉砂质壤土作为土壤易矿化态氮含量较低的土壤,其被生物质炭激发而矿化出的氮含量极低;而在砂质壤土净矿化量高于黏土则是因为黏土颗粒较碎,对易矿化形式的氮有较强的保护作用从而抑制了硝化作用,且黏土通透性较差从而降低了微生物的活性也会导致硝化作用的降低^[18, 20]。同时有研究表明,氮素矿化会随 pH 的升高而增加^[28-29],本试验中砂质壤土、粉砂质壤土、黏土的 pH 分别为 6.65、7.05、6.33,因此不同土壤质地氮素矿化量的不同,是否仅为黏粒含量所造成的,需进一步试验证明。

本研究中大田试验炭基肥氮素矿化状况与培养试验有所不同,如 3 种土壤质地粉砂质壤土的矿化势最大,黏土最小,原因可能是,在大田条件下土壤处于不断的干湿交替而不是湿度恒定的状态,不断地干湿交替可能导致某些团聚体的裂解,导致微生物

与矿化底物的接触变得更加频繁,从而加强了矿化,同时干湿交替过程中由于微生物活性下降,可能会导致被微生物固定部分的氮素得到释放^[16];加上降雨等作用导致一部分氮素出现淋洗等状态,造成了氮素的损失。

4 结论

1)室内培养试验中,炭基肥在砂质壤土条件下矿化势最高,其次为黏土条件,最低为粉砂质壤土条件,不同含水率条件下砂质壤土与黏土中炭基肥氮素有效性情况类似,即 60%SMC > 80%SMC > 40%SMC,而粉砂质壤土条件下炭基肥氮素有效性则是 80%SMC > 60%SMC > 40%SMC,炭基肥在 3 种土壤质地下的最大有效性分别为 34.12%、56.31%、41.14%。

2)大田试验中,炭基肥氮素矿化势表现为,粉砂质壤土 > 黏土 > 砂质壤土,当季氮素有效性在 3 种土壤质地下分别是 50.61%、32.27%、34.29%,且均存在烟叶成熟期后仍有氮素释放的情况。

参考文献:

- [1] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636-639.
- [2] 张亦涛,刘宏斌,王洪媛,等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6664-6676.
- [3] 俞映惊,薛利红,杨林章,等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. *土壤学报*, 2015(4): 759-767.
- [4] 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 857-861.
- [5] Spokas K A, Cantrell K B, Novak J M, et al. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 973-989.
- [6] 原鲁明,赵立欣,沈玉君,等. 我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(4): 107-113.
- [7] 高海英,陈心想,张雯,等. 生物质炭及炭基硝酸铵肥料理化性质研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 14-20.
- [8] 周旻旻. 水稻秸秆生物质炭基缓释肥的制备与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] 任少勇. 炭基肥对马铃薯生育及土壤特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [10] 张雯. 新型生物炭基氮肥的研制及田间应用研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

- [11] 钟雪梅, 朱义年, 刘杰, 等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(s1): 154-157.
- [12] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(6): 1844-1855.
- [13] Sde N, Hofman G. Quantifying soil water effects on nitrogen mineralization from soil organic matter and from fresh crop residues[J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, 35(5): 379-386.
- [14] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. Journal - Soil Science Society of America (USA), 1984, 89(3): 647-653.
- [15] Flowers T H, O'Callaghan J R. Nitrification in soils incubated with pig slurry or ammonium sulphate[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1983, 15(3): 337-342.
- [16] Stevenson F J, Cole M A. Cycles of soils: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients[M]. 2nd ed. New York, USA: John Willey & Lotd, 1999: 155-231.
- [17] Sørensen P, Jensen E S, Nielsen N E. The fate of ¹⁵N-labelled organic nitrogen in sheep manure applied to soils of different texture under field conditions[J]. Plant and Soil, 1994, 162(1): 39-47.
- [18] Hubbard R K, Bosch D D, Marshall L K, et al. Nitrogen mineralization from broiler litter applied to southeastern Coastal Plain soils[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2008, 63(4): 182-192.
- [19] Thomsen I K, Olesen J E. C and N mineralization of composted and anaerobically stored ruminant manure in differently textured soils[J]. Journal of Agricultural Science, 2000, 135(135): 151-159.
- [20] Chae Y M, Tabatabai M A. Mineralization of nitrogen in soils amended with organic wastes1[J]. Journal of Environmental Quality, 1986, 15(2): 193-198.
- [21] 周才平, 欧阳华, 刘金福. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 204-209.
- [22] 王岩, 刘国顺. 绿肥中养分释放规律及对烟叶品质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 273-279.
- [23] 蒋岳文. 靛酚蓝分光光度法测定海水中的氨—氮[J]. 海洋环境科学, 1990(1): 75-80.
- [24] 陈明昌, 张强, 杨晋玲. 土壤硝态氮含量测定方法的选择和验证[J]. 山西农业科学, 1995(1): 31-36.
- [25] Griffin T S, He Z, Honeycutt C W. Manure composition affects net transformation of nitrogen from dairy manures[J]. Plant & Soil, 2005, 273(1/2): 29-38.
- [26] Cortez J. Effect of drying and rewetting on mineralization and distribution of bacterial constituents in soil fractions[J]. Biology & Fertility of Soils, 1989, 7(2): 142-151.
- [27] De N S, Csitári G, Salomez J, et al. Quantification of the effect of fumigation on short- and long-term nitrogen mineralization and nitrification in different soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(5): 1647.
- [28] Curin D, Campbell C A, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(1): 57-64.
- [29] Sahrawat K L. Mineralization of soil organic nitrogen under waterlogged conditions in relation to other properties of tropical rice soils[J]. Soil Research, 1983, 21(2): 133-138.