

生物质炭与不同形态氮肥配施 对黄绵土氮素矿化的影响

袁瑞娜, 赵英, 张阿凤, 刘小玉, 潘小莲

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过室内培养试验将生物质炭施用于西北黄土高原旱地土壤, 旨在探讨不同形态化学氮肥施用下施用生物质炭对土壤氮素矿化速率及无机氮库的影响。结果表明: (1) 施用化学氮肥会提高土壤无机氮累积量, 但在无机氮释放高峰过后显著降低氮素矿化速率; 其中, 施用酰胺态氮肥和铵态氮肥对土壤氮素的矿化抑制作用强于施用硝态氮肥。 (2) 在无机氮释放高峰过后, 生物质炭的施用会显著降低施用酰胺态氮肥处理下的矿化速率、硝化速率及净氮矿化速率, 降低幅度分别为 64.9%、44.6% 和 47.7%, 且其降低程度在较低土壤含水量水平大于较高土壤含水量, 而对施用硝态氮肥和铵态氮肥无显著影响。 (3) 生物质炭的施用一定程度上降低了施用酰胺态氮肥和铵态氮肥处理下的无机氮累积量, 且在较低土壤含水量下无机氮累积低于较高土壤含水量处理。综合考虑, 旱地施用酰胺态氮肥或铵态氮肥配合施用生物质炭可以有效降低土壤无机氮累积量, 从而降低氮素损失的风险。

关键词: 旱地土壤; 生物质炭; 硝态氮; 铵态氮; 土壤氮素矿化

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Effects of biochar additions combined with three nitrogen fertilizer levels on soil nitrogen mineralization in loessal soil

YUAN Rui-na, ZHAO Ying, ZHANG A-feng, LIU Xiao-yu, PAN Xiao-lian

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The laboratory experiment was conducted to investigate the impacts of biochar incorporation on soil nitrogen mineralization and the accumulation of inorganic nitrogen in loessal soil. The results illustrated that application of chemical nitrogen fertilizer significantly increased the accumulation of inorganic nitrogen in the soil and reduced nitrogen mineralization rates after the peak of inorganic nitrogen release. Compared with nitrate nitrogen fertilizer, amide nitrogen fertilizer and ammonium nitrogen fertilizer obviously reduced the nitrogen mineralization rate. Biochar additions reduced the ammonification, nitrification, net nitrogen mineralization rates by 64.9%, 44.6%, and 47.7% after the peak of inorganic nitrogen release, respectively. Moreover, the inhibition effect of biochar on rates of nitrogen mineralization was high at low soil moisture content. However, there was no significant differences in nitrate fertilizer and ammonium fertilizers treatments. The biochar additions reduced cumulative inorganic nitrogen in either amide fertilizer or ammonium fertilizer treatment, especially under low soil moisture content. In summary, application of amide nitrogen fertilizer and ammonium nitrogen fertilizer combined with biochar reduced the accumulation of inorganic nitrogen efficiently, thereby reducing the risks of nitrogen losses.

Keywords: dryland soil; biochar; nitrate; ammonium; soil nitrogen mineralization

农田土壤氮素动态与土壤生产力^[1]、农田非点源污染^[2]、温室气体排放^[3]等密切相关, 因此, 农田生态系统土壤氮素转化一直是土壤学等学科关注的热点。土壤氮素的 80% 以上以有机态存在, 经过矿

化作用才能转换为植物可利用的无机氮素形态^[4]。土壤氮素矿化受水分、温度、有机质、氮肥等因素的影响。刘娇等通过二次通用旋转组合设计探讨了水、碳、氮三因素耦合对黄绵土氮素转化的影响, 得

收稿日期: 2014-09-01

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW-19-02); “863”项目(SS2013AA100904); 国家自然科学基金(41301305)

作者简介: 袁瑞娜(1988—), 女, 陕西岐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮转化。E-mail: myuanqs@gmail.com。

通信作者: 赵英(1979—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事环境土壤物理学、水文土壤学的研究。E-mail: yzhaosols@gmail.com。

出三者的交互效应在以秸秆为碳源时为水碳 > 碳氮 > 水氮,以生物质炭为碳源时为水氮 > 碳氮 > 水碳^[5]。不同氮肥形态影响土壤氮素矿化及氮素损失,熊淑萍等研究表明,酰胺态氮能够促进小麦根际土壤有机氮的分解,硝态氮肥可以促进土壤中氮的转化,以利于小麦根系的吸收与利用^[6]。当前,我国农业生产中施氮量显著高于发达国家,氮肥利用率低下,过量施肥导致资源的过度消耗与浪费,对土壤、水体、大气均造成污染并威胁人体健康^[1,7]。因此,研究土壤氮素矿化有助于了解土壤供氮能力及确定氮肥施用量,更是土壤生态系统氮素循环研究的重要组成部分。

生物质炭作为一种富碳材料,近些年来受到广泛关注。研究表明,生物质炭作用于高风化地区土壤会显著改善土壤理化性质,由于其颜色较深能提高土壤温度;呈碱性而增加土壤 pH 值;富含孔隙而提高土壤保水保肥能力;其含碳量高且不易分解可以有效固碳等^[8-9]。生物质炭对于氮素的影响因制炭原材料、制备工艺、土壤类型等不同而结果不一,生物质炭作用于酸性土壤由于增加 pH 值而增加氨挥发^[10],减少土壤氮素淋失^[11-12],减少 N₂O 等温室

气体的排放,提高肥料利用率等^[11,13-14]。李文娟等将果木生物质炭应用于黄土高原土壤,发现施用生物质炭能够降低质地较粗的黄绵土和风沙土中的硝态氮淋失,而对质地较为粘细的塬土反而会促进硝态氮淋失,且随添加量增加,其阻滞和促进作用分别增强^[15]。

本研究将果木生物质炭与不同形态化学氮肥配合施入土壤,分析不同处理对土壤氮素矿化及无机氮累积的影响,探讨生物质炭对旱地土壤外源氮素转化是否产生作用,为生物质炭在旱地农田的合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自陕西省长武县十里铺(35°14'N, 107°41'E),取农田耕层土壤(0~20 cm),风干后研磨过 2 mm 筛备用。供试生物质炭为陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司生产,500℃封闭炉内制成,主要原料为苹果木。购回的生物质炭研磨过 2 mm 筛备用。土壤和生物质炭理化性质见表 1。

表 1 土壤和生物质炭的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil and biochar

项目 Item	砂砾 Sand /%	粉粒 Silt /%	粘粒 Clay /%	pH 值 pH value	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	固定碳 Fixed carbon /%	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	C/N	挥发分 Volatile material /%	灰分 Ash content /%
土壤 Soil	14.1	67.7	18.2	7.68	6.58	—	0.73	9.01	—	—
生物质炭 Biochar	—	—	—	8.78	—	81.26	5.11	159.02	4.98	5.59

1.2 试验方案

本试验设三因子(生物质炭、氮肥形态、土壤含水量),生物质炭设不施和施加两水平;氮肥设不施、施铵态氮肥、施硝态氮肥和施酰胺态氮肥 4 个水平;土壤含水量设饱和和含水量的 40% 与饱和含量的 70% 两个水平。采用完全随机设计,共 16 个处理,每处理重复 3 次,10 个批次,共计 480 瓶样品,由于样品较多,使用大小两个培养箱同时培养,其中大培养箱中放置 2 个重复,小培养箱中放置 1 个重复。

试验开始前,将已过 2 mm 筛的风干土加蒸馏水、混匀,控制在 35% 饱和含水量水平于恒温培养箱(28℃)内平衡一周,而后将该土壤分成两组,其中一组按 7.69 g·kg⁻¹的比例(田间表层 20 cm 容重 1.3 g·cm⁻³,相当于施用 20 t·hm⁻²)施入生物质炭,混匀,另一组不施炭,再于同上条件下培养一周。预培

养结束后施入氮肥,施用方法为:将相当于干土重 60 g 预培养过的土壤装入 150 ml 塑料瓶,每瓶加入 4.2 mg(相当于施入 180 kg·hm⁻²),氮肥配成溶液喷洒于土壤表面,加水至两个不同水分条件,使用保鲜膜封闭瓶口并于瓶口上端扎上小口保持通气状态,28℃下恒温培养,试验中每隔 1 d 补充蒸馏水维持土壤含水量。所施铵态氮肥为(NH₄)₂SO₄,硝态氮肥为 KNO₃,酰胺态氮肥为 CO(NH₂)₂,试验中所用试剂均为分析纯。

1.3 测定指标及方法

培养开始后第 0、1、2、3、5、10、16、24、40 天和 60 天分别取出 48 瓶土样(取出土样不再放回培养箱),鲜土测定土壤 NH₄⁺ - N、NO₃⁻ - N,采用 1 M KCl 溶液浸提,AA3 型流动注射分析仪测定。剩余土样风干研磨过 1 mm 筛用于其他指标测定。土壤机械组

成采用吸管法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮使用 H_2SO_4 消解,生物质炭全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消解,AA3 型连续流动注射分析仪测定;pH 值采用 0.01 M CaCl_2 溶液,水土比 5:1(W/V),电极法测定。生物质炭挥发分、灰分、固定碳的测定采用中华人民共和国国家标准(GB/T212-2008)^[16]。

1.4 数据分析

土壤氮素矿化速率由培养前后铵态氮和硝态氮的变化量决定,净氮矿化速率为单位培养时间无机氮含量的变化,可通过以下公式分别计算^[17]:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i$$

$$A_a = c[\text{NH}_4^+ - \text{N}]_{i+1} - c[\text{NH}_4^+ - \text{N}]_i$$

$$A_n = c[\text{NO}_3^- - \text{N}]_{i+1} - c[\text{NO}_3^- - \text{N}]_i$$

$$A_m = A_a + A_n$$

$$R_a = A_a / \Delta t$$

$$R_n = A_n / \Delta t$$

$$R_m = A_m / \Delta t$$

式中, t_i 为培养起始时间; t_{i+1} 为培养结束时间; Δt 为培养时间; $c[\text{NH}_4^+ - \text{N}]_i$ 和 $c[\text{NH}_4^+ - \text{N}]_{i+1}$ 分别为培养前后土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $c[\text{NO}_3^- - \text{N}]_i$ 和 $c[\text{NO}_3^- - \text{N}]_{i+1}$ 分别为培养前后土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); A_a 、 A_n 、 A_m 分别为一定时间内土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和无机氮($\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$)的累积量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); R_a 、 R_n 、 R_m 分别为土壤氨化速率、硝化速率和矿化速率($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。

试验数据使用 SAS 8.1 进行方差分析, DUNCAN 法多重比较, 显著水平 0.05。使用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 生物质炭在不同形态氮肥施用下对土壤氮素矿化速率的影响

由图 2 知, 土壤无机氮在前 10 d 变化较快, 而后变化变缓, 故分 0~10 d 和 10~60 d 两个时段分别分析各因素对氮素矿化速率的影响。方差分析显示(表 2), 第 0~10 天, 各处理间土壤氨化速率无显著差异。施用化学氮肥能显著提高土壤硝化速率, 且各氮肥形态间差异显著, 表现为 $\text{KNO}_3 > (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{CO}(\text{NH}_2)_2 > \text{CK}$ 。生物质炭的输入在 70% 饱和含水量下显著降低施用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 时的硝化速率, 除此之外对于对照及其他形态氮肥的影响没有差异。由于该时期硝化作用强烈, 故土壤净氮矿化速率与硝化速率呈现相同的规律。

第 10~60 天, 土壤氨化速率、硝化速率及净氮矿化速率较前期显著降低。施用化学氮肥显著降低土壤氨化速率($P < 0.05$), 相比较而言, 对施用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 时的降低幅度最大, KNO_3 次之, 但各形态氮肥间差异不显著。生物质炭的输入显著降低了该时期的氨化速率($P < 0.05$), 其中对于施用 KNO_3 和 70% 饱和含水量下施用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 时的影响没有显著差异。施用化学氮肥能显著降低该时期土壤硝化速率, 硝化速率 $\text{CK}, \text{KNO}_3 > \text{CO}(\text{NH}_2)_2 > (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 其中 40% 饱和含水量下施用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与对照处理无显著差异。施用生物质炭使在 40% 饱和含水量下施用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理下的硝化速率略有降低但未达到显著水平。由于该时期土壤中无机氮以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主, 故土壤矿化速率呈现与硝化速率相同的规律。总之, 在无机氮释放高峰过后, 施用化学氮肥会显著降低土壤氨化速率、硝化速率及净氮矿化速率, 降低幅度平均为 43.9%, 62.2% 和 60.7%。生物质炭的施用显著降低施用酰胺态氮肥处理下的氨化速率、硝化速率及净氮矿化速率, 降低幅度分别为 64.9%, 44.6% 和 47.7%, 且其降低程度在较低土壤含水量水平大于较高土壤含水量水平。

2.2 生物质炭在不同土壤水分含量下对土壤氮素矿化速率的影响

水分显著影响土壤氮素矿化速率(表 2), 第 0~10 天, 施用生物质炭及各土壤水分含量下土壤氨化速率没有显著差异。水分含量增加提高了施用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 时的土壤硝化速率, 而在对照及其他形态氮肥处理下没有影响, 且生物质炭的输入消除了水分对施用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 时土壤硝化速率的提高效应。土壤净氮矿化速率表现出与硝化速率相同的趋势。

第 10~60 天, 土壤氨化速率在 70% 饱和含水量下显著低于 40% 饱和含水量处理, 由于生物质炭输入降低了该时期除施用硝态氮肥时的土壤氨化速率, 且在 40% 饱和含水量下的降低幅度略大于 70% 饱和含水量处理, 故生物质炭输入一定程度上减小了土壤氨化速率在两个水分梯度间的差异。较高的土壤水分含量提高了对照处理及施用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理下的土壤硝化速率及净氮矿化速率($P < 0.05$)。这说明土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 70% 饱和含水量下比 40% 饱和含水量下更容易被转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

2.3 土壤无机氮累积动态

土壤无机氮在培养前 10 天迅速累积, 随后增加速度变缓且以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积为主(图 2)。化学氮肥的施用会显著地提高土壤无机氮累积, 其中以硝态

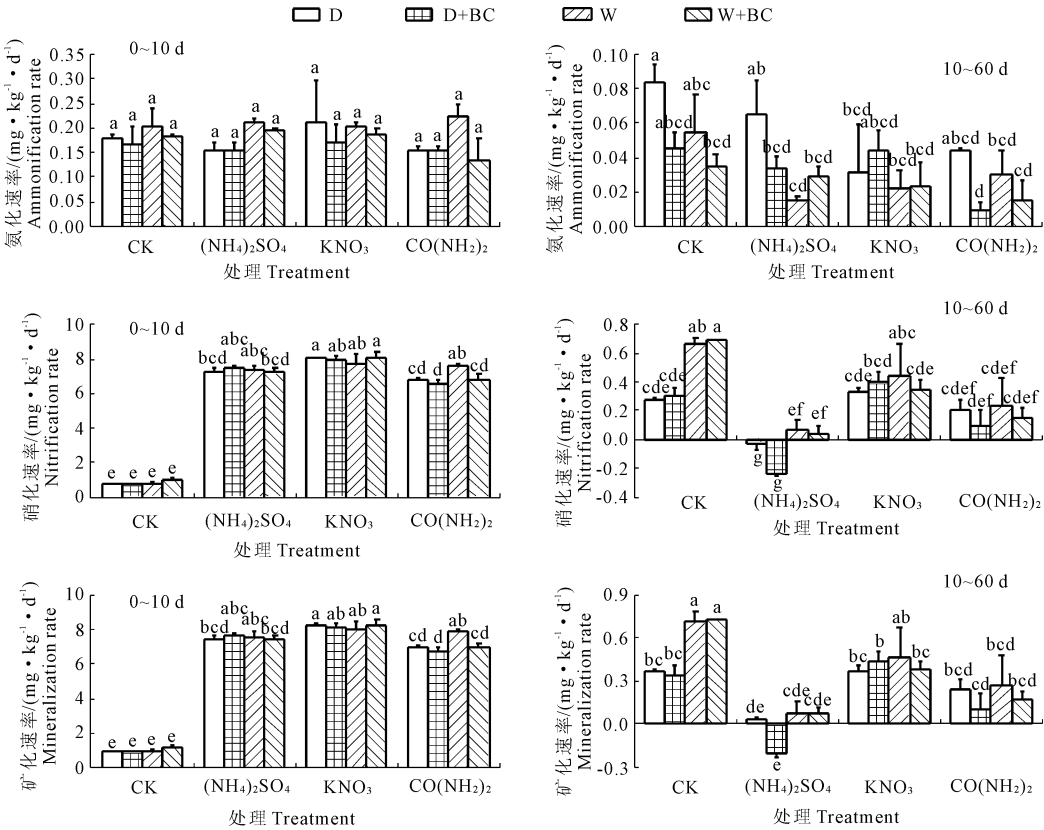
氮肥提高幅度最大,酰胺态氮肥次之,施用生物质炭和 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 时的无机氮累积量,这是由于无机氮不会改变这种趋势,但是会显著降低施用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 释放高峰过后施炭抑制了土壤氮矿化速率(图 2)。

表 2 净氮氨化速率、硝化速率、矿化速率三因素方差分析 (F 值)

Table 2 Three-way ANOVA on net N ammonification rates, nitrification rates and mineralization rates (F value)

时间/d Time	来源 Source	氨化速率 Ammonification rate	硝化速率 Nitrification rate	净氮矿化速率 Net nitrogen mineralization rate
0 ~ 10	a	2.44	0.25	0.51
	b	2.55	1.26	1.81
	a × b	0.42	0.13	0.21
	c	0.48	748.46 *	765.87 *
	a × c	0.25	1.59	1.77
	b × c	0.33	1.51	1.54
	a × b × c	0.55	1.14	1.36
10 ~ 60	a	4.76 *	1.23	1.95
	b	6.82 *	13.35 *	10.57 *
	a × b	2.04	0.04	0.16
	c	4.24 *	26.4 *	27.27 *
	a × c	1.67	0.53	0.54
	b × c	0.6	3.35 *	3.07 *
	a × b × c	0.85	0.57	0.76

注:a,生物质炭;b,水分;c,氮肥形态。* $P < 0.05$ 。
Note: a, Biocahr; b, Soil water content; c, Nitrogen fertilizer. * Significant at the 0.05 probability level.



注:D, 40% 饱和含水量; W, 70% 饱和含水量; BC, 生物质炭。下同。
Note: D, 40% saturated moisture; W, 70% saturated moisture; BC, biochar. The same below.

图 1 生物质炭与不同形态氮肥配施对土壤氨化速率、硝化速率和矿化速率的影响
Fig.1 Effect of combined application of biochar and three kinds of chemical nitrogen fertilizer on soil ammonification rates, nitrification rates and mineralization rates

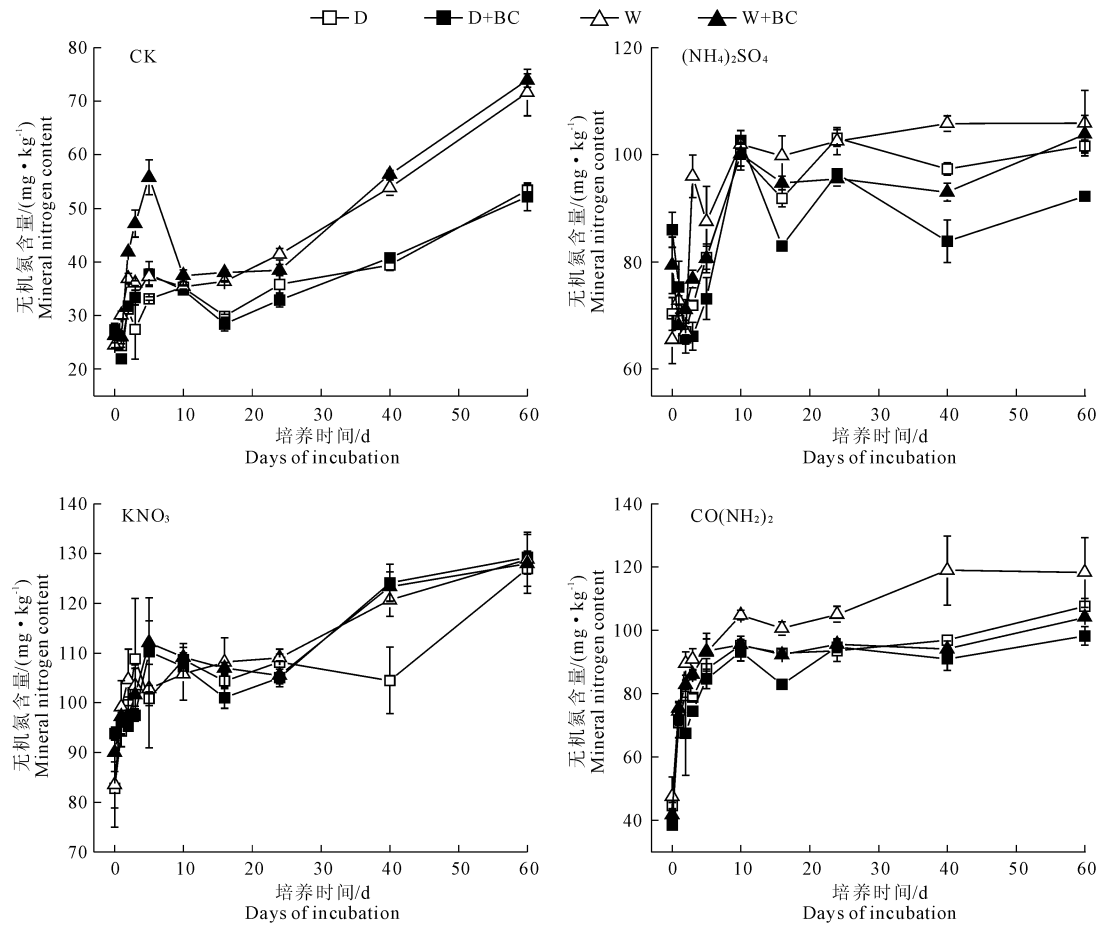


图 2 土壤无机氮累积动态
Fig.2 Dynamics of inorganic nitrogen accumulation

3 讨论

3.1 生物质炭、水分与氮肥对土壤氮素矿化的影响

土壤中加入高 C/N 的有机物料后,会显著改变土壤原有 C、N 库,促使土壤中发生复杂的生化反应,这些过程会极大地改变土壤 C、N 循环^[18]。Flavel 等研究结果显示,有机物料的添加会显著提高土壤净氮矿化速率^[19]。生物质炭是一种富碳材料,本试验中采用的生物质炭其 C/N 高达 159.02,是土壤本身 C/N 的 17.6 倍,施用生物质炭降低了无机氮释放高峰后土壤矿化速率(图 1)。Clough 等观察到施加生物质炭土壤 NH₄⁺ - N 含量升高是硝化速率降低的一种表征,并且将原因归结于生物质在炭化过程中形成了一些有毒的多环芳烃如 α -pinene 会抑制硝化作用^[20]。王晓辉等对退化设施土壤添加秸秆生物质炭和市政污泥生物质炭后发现,土壤氨氧化古菌与氨氧化细菌和 *nirK* 基因型反硝化细菌丰度显著增加,土壤硝化潜势增加^[21]。生物质炭对土壤氮素转化的影响结果不一,是受土壤类型、生物质炭原材料、制备条件等的影响^[22]。

水分对土壤氮素矿化速率的影响在培养前期不显著,而在无机氮释放高峰过后显著影响土壤氮素矿化速率,表现为较高土壤含水量下硝化作用高于较低土壤含水量处理,进而提高土壤无机氮累积。这是因为土壤水分状况影响土壤 O₂ 分压,因而影响硝化细菌的活性和数量,因此适宜的水分条件能够加速硝化反应的进行^[23]。

无机氮肥的施入常导致土壤氮素的矿化量增加,被称为“激发效应”,研究表明,当加入¹⁵N 标记的化学氮肥后,其增量与被土壤微生物固持的¹⁵N 标记化肥氮量基本相当,二者相抵后大多并无明显的净激发或者净残留,此外,培养试验中加入氮肥后并未增加土壤 CO₂ 排放,即并未促进土壤有机质分解,因此,这种激发效应被认为只是一种表观现象,是土壤氮与加入的¹⁵N 标记化肥之间的微生物置换作用的结果^[24]。本试验中,施用化学氮肥后一段时间内(0~10 d),土壤氨化速率、硝化速率及净氮矿化速率显著提高,在培养后期(第 10~60 天)氨化速率、硝化速率及净矿化速率降低,这与甘建民等的研究结果一致^[25]。施用 (NH₄)₂SO₄ 和 CO(NH₂)₂ 时,

生物质炭的输入显著降低土壤第 10 ~ 60 天氨化速率、硝化速率及净矿化速率,且在较高含水量下的降低程度高于较低含水量。Darrab 等研究认为高浓度的 SO_4^{2-} 改变渗透压,导致细胞失活,从而抑制硝化作用^[26]。这可以部分解释本试验中施用铵态氮肥 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) 时 40% 饱和含水量下土壤硝化作用为负值的现象。

3.2 生物质炭、水分与氮肥对土壤无机氮库的影响

一般情况下,随着土壤有机质增加,土壤保留可交换态与植物可利用态阳离子的能力也随之增加。研究表明,向土壤中施加生物质炭可减少养分淋失^[11-12],由于生物质炭具有巨大的比表面积,大量的表面负电荷及很高的电荷密度,其对土壤中存在可交换态的营养物质有很强的吸附能力^[27]。此外,由于其多孔隙结构且富含有机大分子,进入土壤后较易形成大团聚体,更能增加土壤养分的吸附保持,尤其是对 NH_4^+ 有很强的吸附作用^[28-29]。Mohan 等^[30] 和 Sudhakar 等^[31] 研究表明,生物质炭能吸附土壤中极性化合物,通过在微、中观土壤孔隙中滞留水分而实现养分的保留,从而使土壤氮素也得以保留。本试验中,土壤无机氮的累积随着生物质炭的施入而减少,这可能是由于生物质炭本身多孔结构吸附了部分矿质氮使浸提液无法交换下来而使检测结果偏小。除此之外,当新鲜的生物炭加到土壤当中时,可能会引起一些分解,这些分解作用会引起无机氮的固定,造成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量下降^[32]。

4 结 论

1) 化学氮肥的施用增加了土壤无机氮累积,但在无机氮释放高峰过后显著降低氮素矿化速率,其中,施用酰胺态氮肥和铵态氮肥对土壤氮素的矿化抑制作用强于施用硝态氮肥。

2) 在无机氮释放高峰过后,生物质炭的施用显著降低施用酰胺态氮肥处理下的氨化速率、硝化速率及净氮矿化速率,而对施用硝态氮肥和铵态氮肥没有显著影响。

3) 生物质炭的施用一定程度上降低了施用酰胺态氮肥和铵态氮肥处理下的无机氮累积量,且在较低土壤含水量下无机氮累积低于较高土壤含水量处理。综合考虑,旱地施用酰胺态氮肥或铵态氮肥配合施用生物质炭可以有效降低土壤无机氮累积量,从而降低氮素损失风险。

参 考 文 献:

[1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养

与肥料学报,2013,19(2):259-273.

- [2] 张维理,田哲旭,张 宁,等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报,1995,1(2):80-87.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Mitigation of climate change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007:499-500.
- [4] Mengel K, Kirkby E A, Kosegarten H, et al. Principles of plant nutrition[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001:397.
- [5] 刘 娇,袁瑞娜,赵 英,等. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(8):1659-1668.
- [6] 熊淑萍,车芳芳,马新明,等. 氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响[J]. 生态学报,2012,32(16):5138-5145.
- [7] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [8] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems — a review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006,11(2):395-419.
- [9] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. Nature, 2006,442:624-626.
- [10] 杨 帆,李飞跃,赵 玲,等. 生物炭对土壤氮氮转化的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(5):1016-1020.
- [11] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2010,39(4):1224-1235.
- [12] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3-4):436-442.
- [13] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research, 2012,127:153-160.
- [14] Zhang A, Liu Y, Pan G, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from central China plain[J]. Plant and soil, 2012,351(1-2):263-275.
- [15] 李文娟,颜永毫,郑纪勇,等. 生物炭对黄土高原不同质地土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移特征的影响[J]. 水土保持研究,2013,20(5):60-63.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T212-2008. 煤的工业分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社,2008.
- [17] Wei X, Shao M, Fu X, et al. The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2011,160(3-4):590-598.
- [18] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用[J]. 中国农业大学学报,2002,7(3):52-56.
- [19] Flavel T C, Murphy D V. Carbon and nitrogen mineralization rates after application of organic amendments to soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2006,35(1):183-193.

(下转第 93 页)

821.

[9] 曾广伟,兰进好,刘义国,等.不同土壤水分条件下施磷对小麦光合性能和产量影响比较[J].干旱地农业研究,2009,27(5):41-46.

[10] 山 仑.植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J].植物生理学通讯,1994,(1):61-63.

[11] 赵海波,林 琪,刘义国,等.氮磷肥施对超高产冬小麦灌浆期光合日变化及产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(10):2545-2550.

[12] 姜宗庆,封超年.施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):628-634.

[13] 王荣辉,王朝辉,李 生.施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):115-121.

[14] 郭文善,封超年,严六零,等.小麦开花后源库关系分析[J].作物学报,1995,21(3):334-340.

[15] 王月福,于振文,李尚霞,等.氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J].麦类作物学报,2002,22(2):55-57.

[16] 姜 东,谢祝捷,曹卫星,等.花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J].作物学报,2004,30(2):175-182.

[17] 王小燕,于振文.大穗型和中穗型小麦品种光合特性的差异及其与粒重和产量的关系[J].西北植物学报,2005,25(10):1976-1982.

[18] 马新明,张娟娟,熊淑萍,等.氮肥用量对不同品质类型小麦品种籽粒灌浆特征和产量的影响[J].麦类作物学报,2005,25(6):72-77.

[19] 李世清,邵明安,李紫燕,等.小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J].西北植物学报,2003,23(11):2031-2039.

[20] 刘兴海,王树安.冬小麦抗逆栽培技术原理的研究Ⅲ.中后期重施氮肥对小麦灌浆过程的影响[J].华北农学报,1986,1(4):8-14.

[21] 李科江,张西科,刘文菊,等.不同栽培措施下冬小麦灌浆模拟研究[J].华北农学报,2001,16(2):70-74.

[22] Jeuffroy M H. Intensity and during of nitrogen deficiency on wheat grain number[J]. Crop Science, 1999,39:1385-1393.

[23] 张国平.小麦粒重的变异与调控[J].江苏农学院学报,1996,17:98-105.

[24] 郭文善,方明奎,王蔚华,等.氮素对小麦茎鞘物质贮运和籽粒发育的调节效应[J].江苏农业研究,2001,22(4):1-4.

[25] 于振文,潘庆民,姜 东,等.9 000 kg/公顷小麦施氮量与生理特性分析[J].作物学报,2003,29(1):37-43.

[26] 马东辉,王月福,周 华,等.氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、运转及产量的影响[J].麦类作物学报,2007,27(5):847-851.

[27] 岳寿松,于振文.磷对冬小麦后期生长及产量的影响[J].山东农业科学,1994,(1):13-15.

[28] 蔡庆生,吴兆苏.小麦籽粒生长各阶段干物质积累与粒重的关系[J].南京农业大学学报,1993,16(1):27-32.

[29] 冯素伟,胡铁柱,李 淦.不同小麦品种籽粒灌浆特性分析[J].麦类作物学报,2009,29(4):643-646.

[30] 李国强,汤 亮.不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J].作物学报,2009,35(12):2258-2265.

(上接第 74 页)

[20] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine – urine – amended pasture soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3):852-860.

[21] 王晓辉,郭光霞,郑瑞伦,等.生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响[J].土壤学报,2013,50(3):624-631.

[22] Clough T J, Condon L M, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. Agronomy, 2013,3(2):275-293.

[23] Torbert H A, Mulvaney R L, Huevel R M V, et al. Soil type and moisture regime effects on fertilizer efficiency calculation methods in a nitrogen – 15 tracer study[J]. Agronomy Journal, 1992,84(1):66-70.

[24] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.

[25] 甘建民,孟 盈,郑 征,等.施肥对热带雨林下种植砂仁土壤氮矿化和硝化作用的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(2):174-177.

[26] Darrah P R, Nye P H, White R E. The effect of high solute concentrations on nitrification rates in soil[J]. Plant and Soil, 1987, 97(1):37-45.

[27] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1719-1730.

[28] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N – fertilizer: Ammonia capture[J]. Plant and soil, 2012,350(1 – 2):35-42.

[29] Taghizadeh – Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. Plant and soil, 2012,350(1-2):57-69.

[30] Mohan S V, Karthikeyan J. Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal[J]. Environmental Pollution, 1997,97(1 – 2):183-187.

[31] Sudhakar Y, Dikshit A K. Kinetics of endosulfan sorption on to wood charcoal[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 1999,34(4):587-615.

[32] Streubel J D, Collins H P, Garcia – Perez M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011,75(4):1402-1413.