

生物黑炭对黑土根际土壤氮素转化强度及无机氮的影响

王大庆¹, 孟颖², 孙泰朋², 赵伟², 王宏燕²

(1. 黑龙江省农垦经济研究所, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:采用盆栽试验,研究了生物黑炭对大豆根际土壤氮素转化强度及无机氮的影响。结果表明:固氮作用强度在结荚期达到最大值,此后逐渐呈现出降低的趋势。氨化作用强度在开花期、结荚期和鼓粒期有显著差异,5%生物黑炭处理的氨化作用强度均显著高于CK处理。硝化作用强度在苗期、开花期和结荚期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤硝化作用强度与CK处理均存在显著性差异;在鼓粒期和成熟期,只有 N_2Y_5 处理与CK处理存在显著性差异,分别比CK处理提高了58.87%,84.49%。生物黑炭的适量施用提高了根际土壤铵态氮的含量。苗期、花期、结荚期和鼓粒期不同处理之间铵态氮含量存在显著差异,成熟期差异不显著。合理的生物黑炭施用量对硝态氮利用起着关键性的作用,在苗期、花期、结荚期、鼓粒期,5%生物黑炭的处理均显著高于CK处理,在成熟期, N_1Y_5 、 N_1Y_{10} 和 N_2Y_{10} 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著降低了20.73%,21.04%,22.85%。

关键词:生物黑炭;黑土;氮素转化;无机氮

中图分类号:S153.6;S156.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0085-05

Effects of Biochar on Nitrogen Transformation and Mineral Nitrogen of Rhizosphere in Black Soil

WANG Daqing¹, MENG Ying², SUN Taipeng², ZHAO Wei², WANG Hongyan²

(1. Heilongjiang Economic Research Institute of State Farms, Harbin 150030, China;

2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of biochar on mineral nitrogen transformations and nitrogen of rhizosphere of soybean. The results showed that nitrogen-fixing capacities were the highest at the podding stage, and then fell gradually. Ammonifying capacities were significantly different in flowering, bearing and podding periods and ammonifying capacities of 5% biochar treatment were much higher than those of CK. Nitrifying capacities of N_2Y_5 and N_1Y_5 treatments were significantly different from CK at seedling, flowering and podding stages and nitrifying capacities of N_2Y_5 were 58.87%, 84.49% higher than those of CK at bearing and maturing period, respectively. NH_4^+ -N contents of soybean rhizosphere were improved by use of biochar, and NH_4^+ -N contents of different treatments were significantly different at seedling stage, flowering and podding and bearing stages, but not remarkably different at maturing stage. Reasonable applications of biochar might play a key role in NO_3^- -N utilization, and NO_3^- -N contents of 5% biochar treatment were much higher than those of CK at seedling, flowering, podding and bearing stage. NO_3^- -N contents of N_1Y_5 , N_1Y_{10} and N_2Y_{10} treatments were 20.73%, 21.04% and 22.85% lower than those of CK at maturing stage.

Keywords: biochar; black soil; nitrogen transformation; mineral nitrogen

近年来,随着秸秆产量增加,大量秸秆资源未被合理利用,经常发生就地焚烧秸秆的现象,由此造成的环境污染、土壤退化等问题引起广泛关注^[1]。如何减少土地利用中温室气体排放、增加陆地生态系统碳汇是当前减缓气候变化研究的热点之一。而利用农

作物秸秆制备生物黑炭技术因其绿色环保日益受到重视,成为秸秆资源化利用新途径。而生物黑炭是有机质高温裂解的产物,具有相对稳定的结构,能够影响土壤肥力进而对作物生长产生影响^[2-4],减少 CH_4 和 N_2O 等温室气体的排放,更能增加土壤碳库、改善

收稿日期:2016-03-08

修回日期:2016-03-17

资助项目:黑龙江省博士后科研启动金“高效复合菌剂降解秸秆还田对土壤碳库影响机制的研究”(LBH-Q13020)

第一作者:王大庆(1969—),男,黑龙江绥化人,博士,副研究员,主要从事农业生态学和农垦生态经济研究。E-mail: wangdaqing511@163.com

通信作者:赵伟(1971—),女,河北乐亭人,教授,博士,主要从事农业生态学和土壤生态学研究。E-mail: niersi7105@sina.com

土壤持水性、改变土壤容积、增加酸性土壤 pH、阳离子交换量,进而通过影响营养物质转化(如氮的有效性)提升土壤肥力,改善土壤物理条件^[5-6]。生物炭也能促进茶树和紫荆树等生长,提高菜豆、高羊茅草、玉米、水稻、萝卜等作物生物量,并使菜豆、玉米、水稻等作物增产^[7]。

氮是植物生长的必需元素,土壤氮素可利用性与土壤氮素转化过程密切相关^[8],而生物黑炭对氮素转化及利用具有一定影响。Zhao 等^[9]通过室内土柱模拟试验研究表明生物黑炭对铵态氮有较强吸附能力,促进酸性土壤硝化过程并减少氮的淋失。王峰等^[10]研究表明生物黑炭施用能明显增加土壤 pH,减少 NO_3^- -N 的淋失,增强土壤的持续供氮能力。刘志华等^[11]研究表明生物黑炭与化肥配施对根际固氮菌数量、氨化细菌数量和硝化细菌数量的影响具有一定剂量效应,中等生物黑炭与化肥配施处理对大豆根际氮素转化相关细菌数量、速效氮含量的提升最为有利。刘娇等^[12]研究表明不同碳源(玉米秸秆和黑炭)的施加对氮素净矿化量的影响差异极显著($p < 0.01$)。与直接施加玉米秸秆相比,施加黑炭增加了土壤硝态氮和铵态氮的含量,显著降低了土壤 N_2O 排放量,目前关于生物黑炭的研究多是对土壤氮素含量、淋溶以及土壤 N_2O 排放量等,关于生物黑炭对黑土土壤氮素转化研究还较少。因此,本研究利用玉米秸秆制成生物黑炭,采用不同的施用数量,探究生物黑炭对黑土根际土壤氮素转化强度及无机氮的影响,旨在为秸秆生物黑炭的合理利用提供理论基础和实践依据,同时对于实现秸秆高效还田,提高作物产量和质量以及促进农业生态环境的可持续发展具有重要的意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本试验采用的黑土是东北农业大学试验田 0—20 cm 耕层土,生物黑炭是由辽宁省生物炭工程技术研究中心提供,基质为玉米秸秆,供试作物为大豆(东农-47),供试土壤类型为黑土壤土,有机质含量 48.36 g/kg,全氮 1.7 g/kg,全磷 0.21 g/kg,碱解氮 173 mg/kg,速效磷 18 mg/kg,速效钾 209 mg/kg,pH 为 6.91。生物黑炭为实验室在 500℃ 条件下热裂解玉米秸秆制得。把粉碎后玉米秸秆放入瓷坩埚内,经加盖密封后置于马弗炉内高温灼烧,马弗炉升至 500℃ 后,保持该温度 2 h,待马弗炉温度自然降至室温后,取出烧好的生物质炭,经 300 目研钵粉碎后装袋备用。生物黑炭有机质含量 716 g/kg,全氮 6.878 g/kg,全磷 10.259 g/kg,速效钾 25.986 mg/kg,pH 为 9.89。

1.2 试验设计

试验为盆栽试验,选用上口径为 28 cm、下口径 16 cm、高 18 cm 的聚乙烯塑料盆,将所取的土样平铺在塑料薄膜上风干、压碎,剔除根系和石块,过粗筛(3 mm×3 mm)备用,每盆装土 10 kg。供试作物为大豆,试验在东北农业大学试验站进行。黑炭的梯度按土壤质量比设置,分别添加生物黑炭 0,1%,5%,10%(分别用 Y_1, Y_5, Y_{10} 表示),氮素 2 个梯度,分别为 50 mg/kg 和 100 mg/kg(分别用 N_1 和 N_2 表示),P、K 按大豆生长需要肥施用量分别为 100 mg/kg,150 mg/kg,肥源为商品尿素($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、 KH_2PO_4 和 K_2SO_4 ,共设置 9 个处理。分别为:不施肥(CK)、 N_1 、 N_2 、 $N_1 + 1\%$ 玉米黑炭($N_1 Y_1$)、 $N_1 + 5\%$ 玉米黑炭($N_1 Y_5$)、 $N_1 + 10\%$ 玉米黑炭($N_1 Y_{10}$)、 $N_2 + 1\%$ 玉米黑炭($N_2 Y_1$)、 $N_2 + 5\%$ 玉米黑炭($N_2 Y_5$)、 $N_2 + 10\%$ 玉米黑炭($N_2 Y_{10}$)。

每个处理 3 次重复。2012 年 5 月 18 日播种,供试大豆品种为东农-47。出苗后,每盆保留 4 株长势一致的幼苗,每两天浇 1 次水,使土壤中含水量为田间持水量的 60%,土壤容重控制在 1 g/cm³,不同处理的管理措施一致。在 5 个时期(苗期、花期、荚期、鼓粒期、成熟期)进行取样测定,每次取 3 盆即 3 个重复。

1.3 样品的采集及测定

1.3.1 样品的采集 分别于苗期、花期、结荚期、鼓粒期和成熟期 5 个时期取样,每个处理植株取 3 盆,全部取回,采用抖落法收集根际土壤。将根际土壤用无菌塑封袋封好放入冰盒内迅速带回实验室,将采回的新鲜土样置于无特殊气体、无灰尘污染的室内自然风干,研磨并过 10 目、20 目和 100 目筛,供土壤理化性质的测定。

1.3.2 测定方法

(1) 土壤氮素转化细菌强度的测定。固氮作用强度:采用土壤培养法^[13]。固氮菌采用改良的阿须贝无氮培养基,28~30℃ 下避光培养 7 d。氨化作用强度:取新鲜土壤 10 g 于 150 ml 灭菌三角瓶中,加入灭菌的 0.2% 蛋白胨 5 ml,并用灭菌蒸馏水调节土壤水分达最大持水量的 50%~60%,塞上棉塞,28℃ 下培养 7 d,采用比色法测定。硝化作用强度:采用培养基接种土壤悬液法,吸取稀释度为 1/10 土壤悬浮液 1 ml,加入灭菌后的 30 ml 亚硝酸盐培养基中,置于 28℃ 恒温箱中,培养 15 d,加入对氨基苯磺酸溶液、 α -萘胺溶液和 20% 醋酸钠溶液,于波长 520 nm 处比色,根据培养后剩下的亚硝酸根含量表示硝化作用强度。

(2) 无机氮的测定。铵态氮:土壤浸提液—流动分析仪测定;硝态氮:土壤浸提液—流动分析仪测定^[14]。

1.4 数据分析

利用 SPSS 15.0 进行数据的处理和统计分析,采用 Duncan 多重比较法判断各处理间的差异显著性 ($p<0.05$),并使用 Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 生物黑炭对根际土壤固氮作用强度的影响

不同处理对根际土壤固氮作用强度的影响见图 1。不同处理在整个生育期固氮作用强度的变化趋势基本一致,均在结荚期达到最大值,此后逐渐呈现出降低的趋势。从整个生育期的平均水平来看,根际土壤固氮作用强度由大到小的顺序依次为 N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_2Y_1 , N_1Y_1 , N_1 , CK, N_2 , N_1Y_{10} , N_2Y_{10} 。鼓粒期和成熟期不同处理根际土壤固氮作用强度无显著差异 ($p<0.05$)。在苗期, N_1Y_5 , N_2Y_1 和 N_2Y_5 处理下根际土壤固氮作用强度比 CK 处理显著提高了 39.5%, 30.33%, 69.5%。在开花期, N_1Y_5 和 N_2Y_5 处理下根际土壤固氮作用比 CK 处理显著提高了 95.12%, 1.46 倍。在结荚期, N_1Y_5 和 N_2Y_5 处理下根际土壤固氮作用比 CK 处理显著提高了 45.71%, 54.43%。鼓粒期和成熟期不同处理根际土壤固氮作用强度无显著差异 ($p<0.05$)。从整个生育期看,生物黑炭的适量施入对根际土壤固氮作用强度有促进作用。

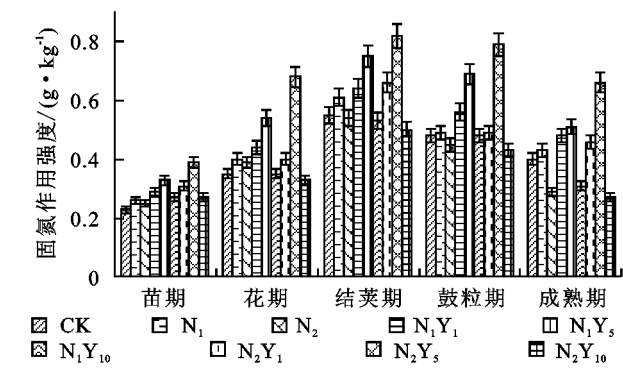


图 1 生物黑炭在大豆不同生育期对根际土壤固氮作用强度的影响

2.2 生物黑炭对根际土壤氨化作用强度的影响

由图 2 可知,不同处理在整个生育期氨化作用强度的变化趋势基本一致,即先上升后下降。不同处理根际土壤氨化作用强度均在结荚期达到最大值,从整个生育期平均水平来看,根际土壤氨化作用强度由大到小的顺序依次为 N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_2Y_1 , N_1Y_1 , N_1Y_{10} , N_1 , N_2Y_{10} , CK, N_2 。方差分析结果表明,在苗期和成熟期,各处理对氨化作用强度均没有显著的影响 ($p>0.05$)。在开花期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下根际土壤氨化作用强度比 CK 处理显著提高了 80%, 70%。在结荚期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下根际土壤氨化作用强

度比 CK 处理显著提高了 91.67%, 66.67%。在鼓粒期, N_2Y_1 和 N_2Y_5 处理下根际土壤氨化作用强度比 CK 处理显著提高了 63.64%, 72.73%。综上所述,说明生物黑炭在一定程度上能提高根际土壤氨化作用强度。

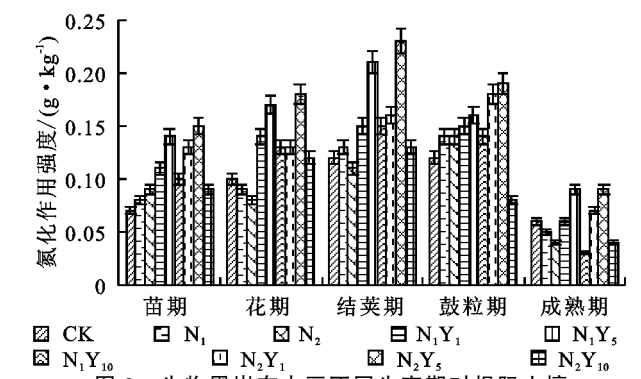


图 2 生物黑炭在大豆不同生育期对根际土壤氨化作用强度的影响

2.3 生物黑炭对根际土壤硝化作用强度的影响

不同处理对根际土壤硝化作用强度的影响见图 3,从整个生育期来看,变化趋势基本一致,即先上升后下降,均在结荚期达到最大值,硝化作用强度最大的是 N_2Y_5 。从图 3 中可以直观看出在整个生育期 N_2Y_5 处理下的根际土壤硝化作用强度均高于其他处理。从总体平均水平来看,硝化作用强度由高到低的顺序依次 N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_2Y_1 , CK, N_1 , N_1Y_1 , N_2 , N_2Y_{10} , N_1Y_{10} , 这说明施入生物黑炭会提高根际土壤的硝化作用强度。经方差分析结果表明,在苗期、开花期和结荚期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤硝化作用强度与 CK 处理均存在显著性差异。在鼓粒期和成熟期,只有 N_2Y_5 处理与 CK 处理存在显著性差异,分别比 CK 处理提高了 58.87%, 84.49%。各时期各处理间几乎都存在显著差异 ($p<0.05$),表明生物黑炭在一定程度上能提高根际土壤硝化作用强度。

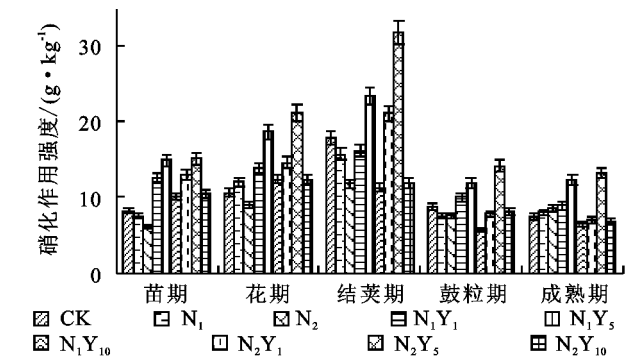


图 3 生物黑炭在大豆不同生育期对根际土壤硝化作用强度的影响

2.4 生物黑炭对根际土壤无机氮的影响

2.4.1 生物黑炭对铵态氮的影响 由图 4 可看出,整个生育期土壤铵态氮含量的变化趋势基本一致,都

是先升高再降低,花荚期达到最大,各时期间差异不显著。经方差分析结果表明,同一时期不同处理之间的差异也不一样,苗期、花期、结荚期和鼓粒期不同处理之间铵态氮含量存在显著差异($p < 0.05$),成熟期差异不显著。在苗期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤铵态氮含量比CK处理提高了16.90%,16.76%。在开花期, N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_2Y_{10} 和 N_1Y_{10} 处理下的根际土壤铵态氮含量比CK处理分别提高了17.25%,16.24%,12.89%,10.48%。在鼓粒期,只有 N_2Y_5 处理与CK处理存在显著性差异, N_2Y_5 处理下的根际土壤铵态氮含量比CK处理提高了9.14%。从整个生育期平均水平来看,铵态氮利用情况由高到低的顺序依次是 N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_1Y_1 , N_1 , N_2 , N_1Y_{10} ,CK, N_2Y_1 , N_2Y_{10} 。总体来看生物黑炭对铵态氮含量起到了促进作用。

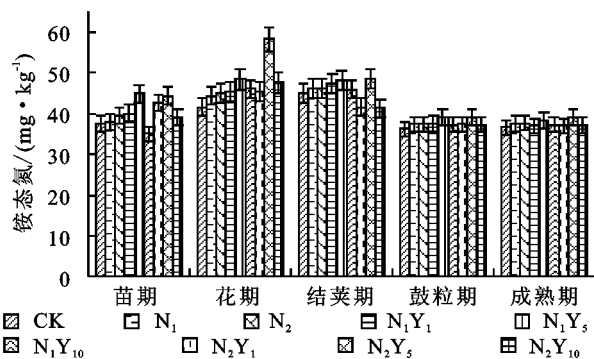


图4 生物黑炭在大豆不同生育期对根际土壤铵态氮的影响

2.4.2 生物黑炭对根际土壤硝态氮的影响 如图5所示,不同处理下硝态氮含量在整个生育期变化一致,总体来看硝态氮含量都是先升高后下降,不同处理下的硝态氮含量均在结荚期达到最大。从整个生育期平均水平来看,硝态氮利用程度由大到小顺序为 N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_2Y_1 , N_1 ,CK, N_1Y_1 , N_2Y_{10} , N_2 , N_1Y_{10} 。方差分析结果表明,在苗期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著提高了14.12%,10.71%。在开花期和结荚期, N_2Y_5 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著提高了46.61%,38.60%。在鼓粒期, N_1Y_5 , N_2Y_1 和 N_2Y_5 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著提高了31.71%,26.95%,46.61%。在成熟期, N_1Y_5 , N_1Y_{10} 和 N_2Y_{10} 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著降低了20.73%,21.04%,22.85%。从总体来看,在各个时期中适量的施入生物黑炭对硝态氮的利用都起到了促进作用;从成熟期来看,过量施入生物黑炭则会抑制硝态氮的利用。综上,合理的生物黑炭施用量对硝态氮利用率起着关键性的作用。

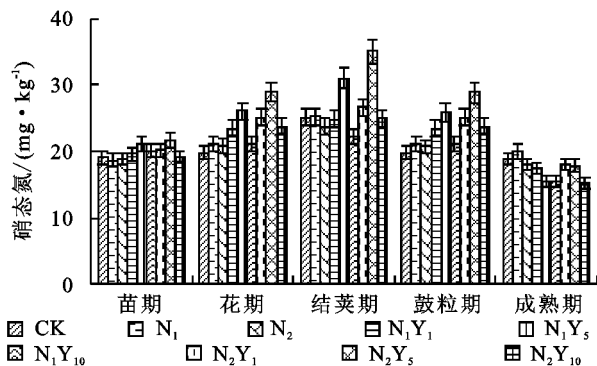


图5 生物黑炭在大豆不同生育期对根际土壤硝态氮的影响

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 生物黑炭对根际土壤氮素转化强度的影响 生物黑炭对土壤氮素转化及无机氮影响结论并不一致^[15-17]。顾美英等^[18]研究表明施用生物炭对新疆连作棉田根际和非根际土壤养分有一定的影响。灰漠土根际土壤有机质含量分别增加36.1%和7.9%,非根际土壤分别增加32.8%和15.4%,施用生物炭能提高新疆灰漠土连作棉田根际土壤养分。同时,Lehmann等^[19]的研究也发现生物炭具有固碳、贮存养分和提高土壤肥力的能力。Dempster等^[20]研究认为,施用生物黑炭可促进土壤有机氮的矿化。孙永明等^[21]认为施用生物黑炭增加了土壤CEC,增加幅度随生物黑炭施用量的增加而增加。同时刘志华等^[22]研究也表明中量生物黑炭与化肥配施(5%BF处理)显著促进大豆根际固氮菌数量、氨化细菌数量和硝化细菌数量,从而提高土壤氮素转化强度。本试验表明,生物黑炭对根际土壤生物固氮作用强度具有促进作用,苗期、花期和结荚期均存在显著性差异。氨化作用强度从总体看,在苗期和成熟期,各处理对氨化作用强度均没有显著的影响($p > 0.05$)。在开花期、结荚期和鼓粒期,5%生物黑炭的处理的氨化作用强度均显著高于CK处理。硝化作用强度从总体看,在苗期、开花期和结荚期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤硝化作用强度与CK处理均存在显著性差异。在鼓粒期和成熟期,只有 N_2Y_5 处理与CK处理存在显著性差异,分别比CK处理提高了58.87%,84.49%。本试验从转化强度来看,生物黑炭对土壤生化强度的影响具有阶段性。

3.1.2 生物黑炭对根际土壤无机氮的影响 孟颖等^[15]研究结果表明,短期生物黑炭的施入对铵态氮含量无显著性影响,但显著增加土壤全氮和硝态氮含量,且增加程度随生物黑炭施入量的增加而增加。同时刘娇等^[12]研究表明不同碳源(玉米秸秆和黑炭)的

施加对氮素净矿化量的影响差异极显著($p < 0.01$)。与直接施加玉米秸秆相比,施加黑炭增加了土壤硝态氮和铵态氮的含量。然而肖辉等^[23]研究表明,生物黑炭能显著降低设施土壤表层及剖面硝态氮含量,且使用量越大,效果越明显。而刘志华等^[24]研究表明生物黑炭影响大豆苗期、花期和结荚期根际铵态氮含量,对鼓粒期和成熟期根际铵态氮含量无显著影响,这可能与施入生物黑炭的量有关。本试验研究:苗期、花期、结荚期和鼓粒期不同处理之间铵态氮含量存在显著差异($p < 0.05$),成熟期差异不显著。在苗期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤铵态氮含量比CK处理提高了16.90%,16.76%。在开花期, N_2Y_5 , N_1Y_5 , N_2Y_{10} 和 N_1Y_{10} 处理下的根际土壤铵态氮含量比CK处理分别提高了17.25%,16.24%,12.89%,10.48%。在鼓粒期,只有 N_2Y_5 处理与CK处理存在显著性差异, N_2Y_5 处理下的根际土壤铵态氮含量比CK处理提高了9.14%。说明合理生物黑炭量对土壤铵态氮含量有重要作用。在苗期、花期、结荚期、鼓粒期,5%生物黑炭的处理均显著高于CK处理,说明合理的生物黑炭施用量对硝态氮利用率起着关键性的作用。在成熟期, N_1Y_5 , N_1Y_{10} 和 N_2Y_{10} 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著降低了20.73%,21.04%,22.85%,说明过量施入生物黑炭则会抑制硝态氮的利用。所以合理的生物黑炭施用量对硝态氮利用率起着关键性的作用。

3.2 结论

生物黑炭对根际土壤生物固氮作用强度具有促进作用,苗期、花期和结荚期均存在显著性差异。氨化作用强度在苗期和成熟期,各处理对氨化作用强度均没有显著的影响;在开花期、结荚期和鼓粒期,5%生物黑炭的处理的氨化作用强度均显著高于CK处理。硝化作用强度在苗期、开花期和结荚期, N_2Y_5 和 N_1Y_5 处理下的根际土壤硝化作用强度与CK处理均存在显著性差异;在鼓粒期和成熟期,只有 N_2Y_5 处理与CK处理存在显著性差异,分别比CK处理提高了58.87%,84.49%。

生物黑炭的适量施用提高了根际土壤铵态氮的含量,苗期、花期、结荚期和鼓粒期不同处理之间铵态氮含量存在显著差异($p < 0.05$),成熟期差异不显著。合理的生物黑炭施用量对硝态氮利用率起着关键性的作用,在苗期、花期、结荚期、鼓粒期,5%生物黑炭的处理均显著高于CK处理,在成熟期, N_1Y_5 , N_1Y_{10} 和 N_2Y_{10} 处理下的根际土壤硝态氮含量比CK处理显著降低了20.73%,21.04%,22.85%。

参考文献:

- [1] 钟诵权. 农村秸秆焚烧对环境的影响及对策[J]. 现代农业科技, 2014(5):260-263.
- [2] 陈温福,张伟明,孟军,等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011,13(2):83-89.
- [3] Luo Y, Durenkamp M, Nobili M D, et al. Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013,57:513-523.
- [4] 蔺海红,付琳琳,李恋卿,等. 生物质炭对土壤特性及葡萄幼苗植株生长的影响[J]. 中国农学通报, 2013,29(28):195-200.
- [5] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol[J]. Geoderma, 2013,209/210(11):188-197.
- [6] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013,5(2):202-214.
- [7] 任少勇,王姣,黄美华,等. 炭基肥对马铃薯品质和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014,30(6):233-237.
- [8] Li H, Han X, Wang F, et al. Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007,38(13/14):1673-1690.
- [9] Zhao X, Wang S, Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014,14(3):471-482.
- [10] 王峰,陈玉真,尤志明,等. 生物黑炭对强酸性茶园土壤氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015,29(1):111-115.
- [11] 刘志华,李晓梅,姜振峰,等. 生物黑炭与化肥配施对大豆根际氮素转化相关功能菌的影响[J]. 东北农业大学学报, 2014,45(8):11-19.
- [12] 刘娇,高健,赵英. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土氮素转化的影响[J]. 土壤学报, 2014,51(6):1361-1368.
- [13] 李振高,骆永明,腾应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 孟颖,王宏燕,于崧,等. 生物黑炭对玉米苗期根际土壤氮素形态及相关微生物的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014,22(3):270-276.
- [16] 郭伟,陈红霞,张庆忠,等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011,20(3):425-428.
- [17] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. Water Air & Soil Pollution, 2010,213(1):47-55.

4 结论

淮南煤矿塌陷区在由非稳沉区转变为稳沉区的过程中,土壤质量呈现下降的趋势;对塌陷区进行复垦与植物修复对土壤质量改善有一定作用;通过对不同塌陷类型土壤的理化性质指标与酶活性综合比较,非稳沉区相关指标要优于修复区,修复区要优于稳沉区;从土壤综合肥力指标值(IFI)评价得分值来看,非稳沉区的土壤综合肥力最好,全氮、全钾、碱解性氮、速效磷、有机质、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶等可以作为塌陷区土壤生态肥力评价的科学指标,由于土壤脲酶和蔗糖酶与土壤理化性质及其他酶活性指标具有较好的相关性,土壤脲酶和蔗糖酶可以作为评估煤矿塌陷区土壤肥力变化的有效性指标。

参考文献:

- [1] 栗丽,王曰鑫,王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报,2010(5):1237-1240.
- [2] 张建锋,张旭东,周金星,等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究,2006,12(6):28-30.
- [3] 张振石. 哲里木盟盐渍土类型、利用现状及改良利用对策[J]. 土壤通报,2000,31(5):203-204.
- [4] Song Y, Song C, Yang G, et al. Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in Northeast China[J]. Environmental Management,2012,50(3):418-426.
- [5] Liu C, Xu J M, Ding N F, et al. The effect of long-term reclamation on enzyme activities and microbial community structure of saline soil at Shangyu, China[J]. Environmental Earth Sciences,2013,69(1):151-159.
- [6] 张宏刚. 对淮南采煤沉陷区治理若干问题的探讨[C]//重庆市科学技术协会. 中国南方十六省(市、区)水产学

会渔业学术论坛第二十六次学术交流大会论文集(上册). 重庆,2010.

- [7] 李晋川,王翔,岳建英,等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究,2015,22(1):66-71.
- [8] Miller B A, Schaetzl R J. Precision of soil particle size analysis using laser diffractometry[J]. Soil Science Society of America Journal,2012,76(5):1719-1727.
- [9] 于兆水,胡外英,张勤. 多目标地球化学调查土壤样品中氮和碳的快速测定[J]. 岩矿测试,2007,26(3):235-237.
- [10] 钱宝,刘凌,肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(1):34-38.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [12] 魏振荣,刘国彬,薛莲,等. 黄土丘陵区人工灌木林土壤酶特征[J]. 中国水土保持科学,2010,8(6):86-92.
- [13] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志,2010(1):173-180.
- [14] 魏媛,喻理飞,张金池,等. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生态肥力质量评价:以贵州花江喀斯特峡谷地区为例[J]. 中国岩溶,2009,28(1):61-67.
- [15] 李晋川,王翔,岳建英,等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究,2015,22(1):66-71.
- [16] 栗丽,王曰鑫,王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报,2010(5):1237-1240.
- [17] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(12):3227-3235.
- [18] 孙庆业,任冠举,杨林章,等. 自然植物群落对铜尾矿废弃地土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报,2005,42(1):37-43.
- [19] Aon M A, Colaneri A C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil[J]. Applied Soil Ecology,2001,18(3):255-270.

(上接第89页)

- [18] 顾美英,刘洪亮,李志强,等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(20):4128-4138.
- [19] 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.
- [20] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil

[J]. Plant and Soil, 2012,354(1/2):311-324.

- [21] 孙永明,李钟平,黄齐,等. 施用生物黑炭对红壤旱地理化性状及玉米生长的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(27):127-131.
- [22] 刘志华,李晓梅,姜振峰,等. 生物黑炭与化肥配施对大豆根际氮素转化相关功能菌的影响[J]. 东北农业大学学报,2014,45(8):11-19.
- [23] 肖辉,潘洁,程文娟,等. 生物黑炭对日光温室土壤硝态氮动态变化的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(2):12-16.
- [24] 刘志华,孟颖,姜振峰,等. 生物黑炭对黑土根际氮素转化相关功能菌的影响[J]. 大豆科学,2014,33(4):528-533.