

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 等. 秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2785–2892.

ZHU Xing-juan, LI Gui-hua, TU Shu-xin, et al. Effects of maize straw and straw biochar on soil fertility and the nitrogen mineralization process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2785–2892.

秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟¹, 李桂花², 涂书新¹, 杨俊诚², 郭康莉², 冀拯宇², 刘 晓², 张建峰^{2*}, 姜慧敏^{2*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘 要:为实现我国典型黑土区玉米秸秆有效还田与协同提高肥料氮素养分利用提供理论依据,以东北黑土区春玉米种植体系为研究对象,在4年田间连续定位试验基础上,利用¹⁵N示踪技术结合淹水培养试验,研究秸秆和秸秆炭对土壤肥力与氮素矿化的影响。试验共设5个处理:对照、单施化肥(N1)、N1+50%玉米秸秆(N2)、N1+100%玉米秸秆(N3)、N1+相当于50%玉米秸秆还田的玉米秸秆炭(N4)、N1+相当于100%玉米秸秆还田的玉米秸秆炭(N5)。结果表明:与N1处理相比较,N2、N3、N4、N5处理均增加了土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾、碱解氮含量、微生物量碳和氮含量,且等量秸秆还田处理高于相当于等量秸秆还田的秸秆炭处理,其中100%秸秆还田分别显著提高微生物量碳和氮含量15.1%和23.1%($P<0.05$);不同处理方式综合土壤肥力指数(IFI)由高到低依次为N3>N5>N4>N2>N1,秸秆、秸秆炭还田可显著提高土壤综合肥力($P<0.05$);土壤有机氮的矿化量和矿化率随着秸秆和秸秆炭还田量的增加而增加,其中N2处理分别显著提高了23.4%和22.9%,N3处理分别显著提高了53.0%和35.8%($P<0.05$);N2、N3、N4、N5处理下外源肥料¹⁵N的矿化量和矿化率分别显著提高了66.5%和50.0%、213.3%和279.0%、39.4%和36.3%、92.0%和40.0%($P<0.05$),且随着秸秆炭还田量的增加而显著增加。土壤氮素矿化指标与土壤有机质、总氮、碱解氮、微生物量碳氮含量都存在显著正相关关系。研究表明玉米秸秆、秸秆炭还田均可以显著提高土壤综合肥力;可协同提高土壤氮素矿化水平,且提高来自外源化肥氮占土壤矿化总氮的比重,其中以100%秸秆还田处理的影响更为明显。

关键词:秸秆;秸秆炭;黑土;肥力指标;氮素矿化

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)12-2785-08 doi:10.11654/jaes.2018-0165

Effects of maize straw and straw biochar on soil fertility and the nitrogen mineralization process

ZHU Xing-juan¹, LI Gui-hua², TU Shu-xin¹, YANG Jun-cheng², GUO Kang-li², JI Zheng-yu², LIU Xiao², ZHANG Jian-feng^{2*}, JIANG Hui-min^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects of maize straw and straw biochar incorporation on soil fertility and nitrogen mineralization in a typical black soil of Northeast China were studied to provide a theoretical basis for improvement of soil fertility and efficient utilization of nitrogen nutrients. A 4-year field experiment, ¹⁵N tracing experiment, and flooding incubation experiment were carried out to study nitrogen mineralization characteristics under five treatments: chemical fertilizer(N1) as control, N1+50% maize straw(N2), N1+100% maize straw(N3), N1+50% maize straw biochar(N4), and N1+100% maize straw biochar(N5). Soil samples (0~20 cm) were collected and analyzed after maize harvesting.

收稿日期:2018-01-30 录用日期:2018-04-27

作者简介:朱兴娟(1991—),女,山东临沂人,硕士研究生,从事土壤培肥与氮素转化研究。E-mail:zhuxingjuan2017@163.com

*通信作者:姜慧敏 E-mail:jianghuimin@caas.cn; 张建峰 E-mail:zhangjianfeng@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41501322, 21577172);中央级公益性科研院所专项资金(IARRP-2015-21);国家国际科技合作专项(2015DFA20790);国家重点研发计划项目(2018YFD0800402)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41501322, 21577172); The Special Funds of the Central Public Welfare Research Institutes(IARRP-2015-21); The International Science and Technology Cooperation Program of China(2015DFA20790); The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800402)

Incorporation of all the organic material combinations (straw and straw biochar) increased the soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, and alkali nitrogen contents compared to the N1 treatment. Microbial biomass C and N also were enhanced under organic material incorporation conditions, with N3 treatment significantly increasing the microbial biomass carbon and nitrogen contents by 15.1% and 23.1%, respectively ($P<0.05$). Both the net soil nitrogen mineralization amount and rate were improved with straw or straw biochar incorporation. The Integrated Fertility Index (IFI) values of the different treatment methods were ordered from high to low as $N3>N5>N4=N2>N1$, with straw and straw biochar return significantly improving the soil fertility. In addition, the N2 and N3 treatments significantly raised the mineralization amount by 23.4% and 53.0% respectively, and the mineralization rate by 22.9% and 35.8% ($P<0.05$). The nitrogen mineralization amount of exogenous ^{15}N fertilizer also increased significantly under the N2, N3, N4, and N5 treatments by 66.5%, 213.3%, 39.4%, and 92.0% respectively, and the nitrogen mineralization rate increased by 50.0%, 279.0%, 36.3%, and 40.0% ($P<0.05$). The soil nitrogen mineralization index had significant positive correlations with soil organic matter, total nitrogen, alkali nitrogen, and microbial biomass. Maize straw and straw biochar incorporation significantly improved soil nutrient conditions and the microbial biomass in the black soil. The nitrogen mineralization rate also was enhanced under the same treatments. Moreover, maize straw or straw biochar incorporation could synergistically improve the contribution of exogenous ^{15}N fertilizer to total mineralized nitrogen, especially with 100% straw return.

Keywords: straw; straw biochar; black soil; organic matter; nitrogen mineralization

氮素在土壤氮库中的转化是微生物驱动下的生物化学过程^[1],而土壤微生物的生存与繁衍主要由土壤有机碳提供碳源和能源,所以氮素养分在土壤氮库中的转化主要受土壤有机碳的调控。东北黑土区以有机碳含量高、土壤肥沃而著称,但近几十年来,随着黑土的过度垦殖与耕作,土壤有机碳储量锐减^[2],土壤质量退化严重,进而表现为土壤对氮素养分的调控能力减弱,最终导致氮素利用率下降。利用有机培肥提高土壤有机碳的输入量,通过土壤C/N调控肥料氮在土壤有机氮库中的有效转化是提高氮素利用率的新途径^[3]。许多研究已表明,玉米秸秆还田是土壤有机培肥的主要措施之一,能够增加耕层土壤有机碳含量,提高肥料氮素利用效率^[4-5]。目前,秸秆还田的方法呈现多元化的发展趋势,其中秸秆炭还田研究正受到越来越多的关注,如有许多研究表明,秸秆炭含有一定量的矿质养分,可以增加土壤中氮、磷、钾等矿质养分含量,秸秆炭用于农业可改良和培肥土壤,提高作物生产率,促进土壤可持续利用,因此,秸秆炭还田可能会成为东北大量秸秆资源有效还田的新途径。在合理的氮肥施用条件下,添加秸秆和秸秆炭对土壤肥力影响的研究较多,但多是短期模拟实验,真正在田间原位上连续开展秸秆和秸秆炭对土壤综合肥力的影响研究较少。

从“土壤学”角度看,为实现肥料氮素的高效利用,必须明确残留肥料氮在土壤有机氮库中的潜在矿化能力。Deng等^[6]研究发现,作物生长所需要的氮素主要源于施入肥料氮和土壤中有机氮的矿化,土壤氮素矿化很大程度上反映了土壤的供氮能力^[7]。马力

等^[8]对红壤水稻土长期施肥和秸秆还田的研究表明,秸秆还田能明显促进土壤氮矿化量的提高;唐淦海等^[9]研究表明,土壤氮矿化作用因土壤及秸秆类型的不同而不同。目前,关于秸秆和秸秆炭还田对残留外源化肥氮的潜在矿化研究还鲜有报道。

鉴于此,本研究以东北黑土区春玉米为对象,在田间连续定位试验条件下,系统研究秸秆和秸秆炭还田配施化肥对土壤综合肥力和残留化肥氮素矿化的影响,以期对东北黑土区秸秆有效还田和氮素养分高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本研究定位试验设在黑龙江省哈尔滨市道外区民主乡黑龙江省农业科学院现代农业科技示范园。该研究基地位于松花江南岸的冲积平原上,地理坐标为东经 $126^{\circ}48'55.64''\sim 126^{\circ}51'26.50''$,北纬 $45^{\circ}49'44.33''\sim 45^{\circ}51'01.60''$,海拔 130~150 m,属于寒温带大陆性季风气候,年平均气温 3.6°C ,年降水量 486.4~543.6 mm。试验前土壤耕层(0~20 cm)的基本理化性质见表1。

1.2 试验处理及供试材料

试验共设5个处理:对照,单施化肥(N1),N1+50%玉米秸秆(N2)、N1+100%玉米秸秆(N3)、N1+相当于50%玉米秸秆还田的玉米秸秆炭(N4)、N1+相当于100%玉米秸秆还田的玉米秸秆炭(N5)。

供试玉米秸秆炭由黑龙江省农业科学院提供,是将玉米秸秆在 500°C 厌氧条件下热解而成的高度芳

香化产物,其性质较为稳定,且含有一定的养分。供试生物炭主要性质见表2。将当地上年收获的玉米秸秆经铡草机铡碎成2 cm左右的小段作为供试秸秆。

1.3 样品采集、测定项目及方法

1.3.1 土壤样品采集

2016年10月玉米收获后,采集各微区0~20 cm表层土样。将采集的土样去除动、植物残体,混匀成两份,一份土样用于测定微生物量碳、氮,另一份风干后过2 mm筛,用于测定土壤基本理化性状和氮素矿化指标。

1.3.2 测定项目及方法

土壤基本理化性质的测定方法参照《土壤农化分析》^[10]。土壤有机质采用重铬酸钾容量法;土壤全氮采用凯氏定氮法;土壤碱解氮含量采用碱解扩散法;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠法(Olsen法);土壤速效钾采用火焰光度计法;土壤微生物量碳(SMC)、氮(SMN)采用熏蒸浸提法测定。

土壤总氮矿化量(Nt)的测定采用淹水培养法^[11]:称取20 g风干土样于100 mL离心管,加入30 mL蒸馏水,将离心管密封后放入40℃的培养箱培养7 d,然后加入50 mL 3.2 mol·L⁻¹ KCl溶液振荡30 min,过滤后的滤液用流动分析仪测定其铵态氮,将培养后土样的铵态氮含量减去培养前土样的铵态氮含量即为总氮矿化量。同时,培养前后的NH₄⁺-¹⁵N差值即为外源¹⁵N肥料的矿化量。

NH₄⁺-¹⁵N丰度的测定方法采用微扩散法^[11]:取20 mL的滤液置于250 mL肖特瓶中,加入0.6 g MgO,然后用带有10 μL 2.5 mol·L⁻¹ KHSO₄酸化滤纸片的瓶盖迅速拧紧盖好。置于摇床上,30℃、180 r·min⁻¹摇动24 h。取出滤纸片,置于含有浓硫酸的干燥器里干燥,干燥后用锡杯包好滤纸片,用同位素比例质谱仪

(ISOPRIME100/VARIO PYRO CUBE)分析¹⁵N丰度。

1.4 数据计算

1.4.1 总氮矿化率

$$Nt/TN=Nt/TN\times100/1000$$
 (1)

式中:Nt为总氮矿化量,mg·kg⁻¹;TN为土壤全氮含量,g·kg⁻¹;Nt/TN为矿化率,%;

1.4.2 外源¹⁵N肥料的矿化率

$$^{15}Nt/T^{15}N=^{15}Nt/T^{15}N\times100/1000$$
 (2)

式中:¹⁵Nt为外源¹⁵N肥料矿化量,mg·kg⁻¹;T¹⁵N为土壤¹⁵N标记氮素含量,mg·kg⁻¹;¹⁵Nt/T¹⁵N为外源¹⁵N肥料矿化率,%。

1.4.3 土壤综合肥力

土壤综合肥力利用内梅罗指数法计算^[13],计算公式如下:

$$IFI=\sqrt{\frac{IFI_{i平均}^2+IFI_{i最小}^2}{2}}\times\frac{n-1}{n}$$
 (3)

式中:IFI为土壤综合肥力;IFI_{i平均}与IFI_{i最小}分别为土壤各属性分肥力均值与最小值;n为评价指标个数。本研究选取土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、pH值等6个指标作为参评的化学指标,反映土壤肥力状况。

1.5 数据分析

用Excel进行数据的相关计算,采用SAS 9.1统计分析软件进行方差分析及相关分析,采用Origin 9.0进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 秸秆和秸秆炭还田对土壤肥力指标的影响

如表3所示,与N1处理相比,秸秆和秸秆炭还田均提高了土壤有机质、土壤全氮、土壤碱解氮、土壤速效钾、土壤速效磷含量,其中N3处理下土壤有机质、土壤全氮、土壤碱解氮、土壤速效钾含量分别显著提

表1 土壤基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of soil

项目 Items	有机质 SOM/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	全钾 Total K/ g·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	pH
黑土 Black soil	28.70	1.14	2.95	0.39	85.19	185.98	30.00	6.85

表2 供试玉米秸秆炭基本理化性质
Table 2 Basic physicochemical properties of the biochar for test

全氮 Total N/g·kg ⁻¹	全磷 Total P/g·kg ⁻¹	全钾 Total K/g·kg ⁻¹	CEC/cmol(+)·kg ⁻¹	pH	固定碳 Fixed C/%	灰分 Ash basis/%
6.10	5.17	22.8	9.98	9.07	77.1	13.3

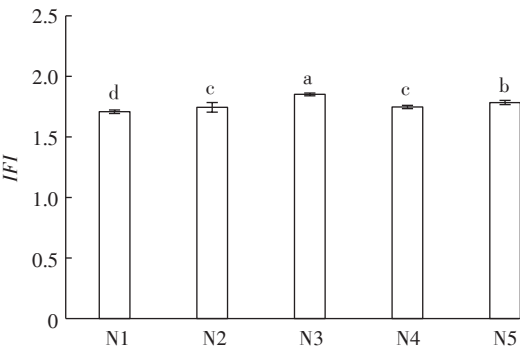
表3 秸秆、秸秆炭对土壤养分指标的影响
Table 3 Effect of straw and straw biochar on soil fertility index

处理 Treatments	有机质 SOM/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	pH
N1	28.8±0.4b	1.25±0.05b	103.8±8.3a	184.5±4.4b	107.4±1.51b	6.78±0.04c
N2	30.1±0.4b	1.31±0.06ab	108.0±5.9a	187.5±6.7b	107.4±0.7b	6.80±0.01c
N3	33.9±2.6a	1.36±0.06a	114.1±9.0a	212.9±2.18a	118.9±7.3a	6.83±0.05c
N4	28.8±0.7b	1.26±0.03b	109.5±11.6a	182.1±13.8b	108.6±2.9b	6.88±0.05b
N5	30.8±1.3ab	1.30±0.02ab	118.5±3.3a	210.8±4.4a	109.4±2.4b	6.96±0.04a

注:不同字母表示差异达 5% 显著水平。
Note: The different letters mean significant at 5% level .

高了 18.0%、11.2%、10.8% 和 15.4% ($P<0.05$), N5 处理土壤速效钾含量显著提高了 14.2% ($P<0.05$)。与 N1 相比, N2、N3 处理下 pH 值无显著差异, 而 N4、N5 处理下 pH 分别显著提高了 1.5%、2.7% ($P<0.05$)。

应用修正的内梅罗指数计算 4 年不同秸秆、秸秆炭还田处理方式下土壤综合肥力(图 1), 结果表明, 不同秸秆还田处理下 *IFI* 值由高到低依次为 N3>N5>N4=N2>N1, N1 处理分别较 N2、N3、N4 和 N5 处理显著降低了 2.1%、8.4%、2.3% 和 4.4% ($P<0.05$)。



不同字母表示差异达 5% 显著水平。下同
Different letters mean significant at 5% level. The same below

图1 秸秆、秸秆炭对土壤综合肥力指数的影响
Figure 1 Effect of straw and straw biochar on *IFI*

2.2 秸秆和秸秆炭还田对土壤微生物指标的影响

经过 4 年的秸秆和秸秆炭还田后, 土壤微生物量碳、氮含量均有不同程度的提高(图 2)。与 N1 处理相比较, N2、N3、N4 和 N5 处理下土壤微生物量碳含量分别提高了 2.2%、15.1%、0.8% 和 2.3%(图 2A), 其中 N3 处理显著提高 ($P<0.05$); N3 处理土壤微生物量碳含量显著高于 N2 处理 12.6% ($P<0.05$), 不同秸秆炭还田量之间无显著差异。土壤微生物量氮含量由高到低依次为 N3>N2>N5>N4>N1(图 2B), 且 N2、N3 和 N5 较 N1 处理显著提高了 12.9%、23.1% 和 11.8%

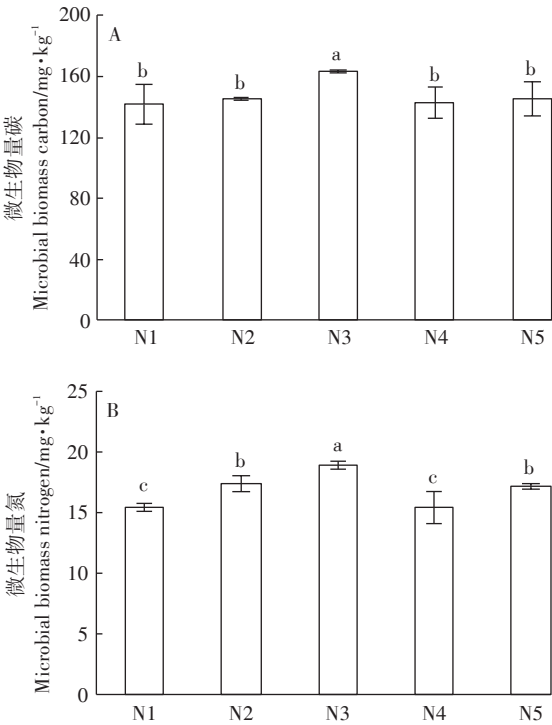


图2 秸秆、秸秆炭对微生物量碳、氮的影响
Figure 2 The effect of straw and straw biochar on microbial biomass carbon and nitrogen

($P<0.05$), N3 较 N2 处理显著提高了 9.0% ($P<0.05$), N5 较 N4 处理土壤微生物量氮显著升高 11.3% ($P<0.05$)。

2.3 秸秆和秸秆炭还田对土壤氮素矿化特征的影响

与 N1 处理相比, N2、N3 处理下土壤总氮素矿化量分别显著提高了 23.4% 和 53.0% ($P<0.05$), 且随着秸秆还田量的增加而显著增加(图 3A); N4、N5 处理下土壤总氮素矿化量分别提高了 5.3% 和 16.3%, 且随着秸秆炭还田量的增加而增加, 但均没有达到显著水平。与 N1 处理相比, N2、N3、N4、N5 处理下外源肥料 ¹⁵N 的矿化量分别显著提高了 66.5%、213.3%、

39.4%和92.0% ($P<0.05$),且随着秸秆和秸秆炭还田量的增加而显著增加(图3B)。N1、N2、N3、N4、N5处理外源肥料 ^{15}N 的矿化量分别占土壤总氮矿化量的2.2%、2.9%、4.4%、2.9%和3.6%。

与N1处理相比,N2、N3处理下土壤总氮素矿化率显著提高了22.9%和35.8% ($P<0.05$),且随着秸秆还田量的增加而显著增加(图4A);N4、N5处理下土壤总氮素矿化率分别提高了3.3%和5.3%,且随着秸秆炭还田量的增加而增加,但无显著差异。与N1处

理相比,N2、N3、N4、N5处理外源肥料 ^{15}N 的矿化率分别显著提高了50.0%、279.0%、36.3%和40.0% ($P<0.05$),且随着秸秆和秸秆炭还田量的增加而显著增加(图4B)。

相关性分析结果表明(表4),土壤总氮矿化量与土壤有机质、全氮、碱解氮、微生物量氮含量呈现极显著正相关性($P<0.01$),与微生物量碳含量呈现显著正相关性($P<0.05$),外源肥料 ^{15}N 的矿化量与碱解氮、微生物量氮含量存在极显著正相关性($P<0.01$),与有机

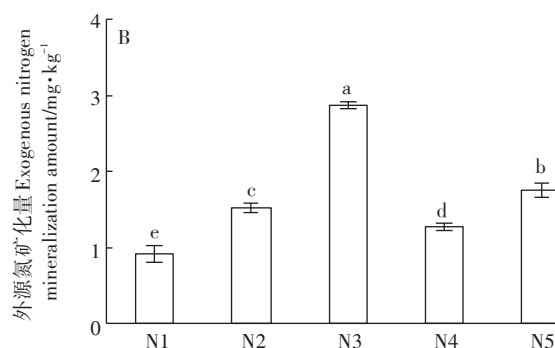
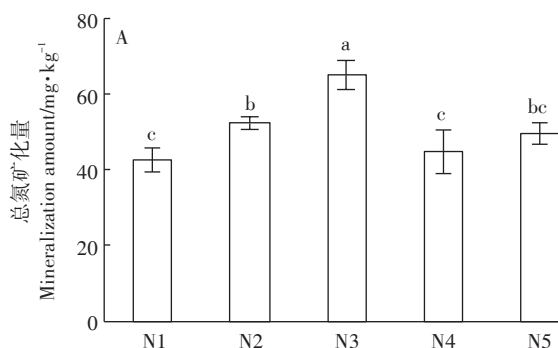


图3 秸秆、秸秆炭还田对土壤总氮和外源化肥氮矿化量的影响

Figure 3 The effect of straw and straw biochar on mineralization amount

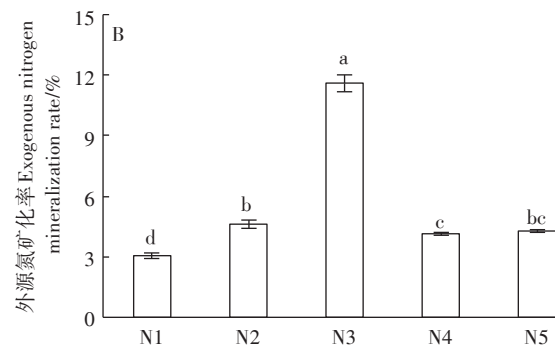
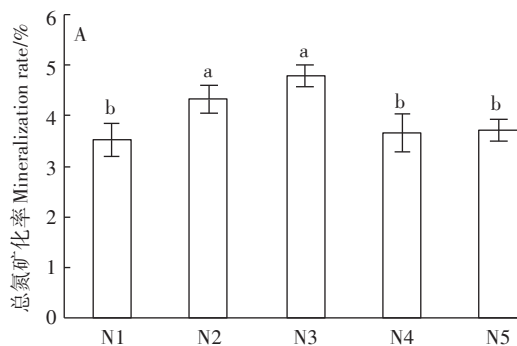


图4 秸秆、秸秆炭还田对土壤总氮和外源化肥氮矿化率的影响

Figure 4 Effect of straw and straw biochar on mineralization rate

表4 氮素矿化特征与土壤养分指标和生物指标的相关性

Table 4 Correlations between nitrogen mineralization characteristics and soil nutrient and biomass index

	有机质 SOM	全氮 TN	速效磷 AP	速效钾 AK	碱解氮 AN	微生物量碳 SMC	微生物量氮 SMN	pH
总氮矿化量 Nt	0.673**	0.661**	0.360	0.710**	0.799**	0.619*	0.802**	0.020
标记尿素矿化量 ^{15}NNt	0.585*	0.615*	0.268	0.517*	0.671**	0.525*	0.699**	0.111
总氮矿化率 Nt/TN	0.800**	0.665**	0.378	0.753**	0.748**	0.798**	0.861**	0.172
标记尿素矿化率 $^{15}\text{NNt}/^{15}\text{N}$	0.737**	0.593**	0.334	0.596**	0.802**	0.805**	0.769**	0.143

注:*,**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。

Note: Mean significant correlations at the 0.05 and the 0.01 levels, respectively. SOM—Soil organic matter; TN—Total nitrogen; AP—Available P; AK—Available K; AN—Available N; SMC—Soil microbial carbon; SMN—Soil microbial nitrogen; Nt—Amount of mineralization; Nt/TN—Mineralization rate; ^{15}NNt —Amount of labeled ^{15}N Urea mineralization; $^{15}\text{NNt}/^{15}\text{N}$: The ratio of labeled ^{15}N Urea mineralization.

质、全氮、微生物量碳呈现显著正相关性($P<0.05$)。总氮矿化率与外源肥料 ^{15}N 的矿化率与土壤有机质、全氮、微生物量碳、氮含量存在极显著正相关关系($P<0.01$)。

3 讨论

秸秆直接还田与化肥配合施用是提高土壤肥力的有效措施之一^[12]。杨敏芳等^[13]研究表明,秸秆还田下的土壤养分均高于秸秆不还田。且罗宜宾^[14]的研究表明,秸秆配施化肥较单施化肥可有效提高土壤有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量;洪春来等^[15]研究表明,秸秆全量直接还田能促进土壤有机质的积累,迅速提高土壤中速效磷、速效钾的含量,缓慢提高速效氮和全氮水平,有效提高土壤肥力;张亚丽等^[16]研究也表明,秸秆直接还田有助于提高土壤养分含量,且基本上都是随着秸秆还田量的增加而增加。本研究也得到相同的结果,即50%玉米秸秆和100%玉米秸秆直接还田与化肥配施均能提高土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量,4年土壤综合肥力指数均高于单施化肥处理,且100%秸秆直接还田对土壤肥力的提高更明显。主要原因是秸秆中富含植物生长所需要的碳、氮、磷、钾和微量元素等,秸秆还田腐解的过程中,秸秆周围会有大量微生物进行繁殖,形成土壤微生物活动层,这些营养物质被逐渐释放出来,秸秆还田量越多,养分的释放量相对增加,从而提高土壤肥力^[17]。

许多反映土壤供氮能力的指标均直接或间接地与土壤微生物的数量和活动有关。土壤微生物量与土壤有机碳含量密切相关,而土壤微生物量碳转化迅速,能在检测到土壤总碳变化之前表现出较大的差异,是更具敏感性的土壤肥力指标。张静等^[18]研究还表明,9000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 玉米秸秆还田量下土壤微生物固持碳、氮的效果最好,高于6000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 玉米秸秆还田量,能有效提高土壤肥力。

关于秸秆和秸秆炭还田对土壤肥力的研究报道较少,许毛毛^[19]利用室内培养试验得到的结果是,秸秆炭对土壤氮、磷、钾养分指标的提升效果优于秸秆。本研究对秸秆和秸秆炭连续4年还田后土壤的综合肥力指数进行了分析,IFI值由高到低依次为 $\text{N3}>\text{N5}>\text{N4}=\text{N2}>\text{N1}$,说明100%秸秆全量直接还田土壤综合肥力指数高于相当于100%玉米秸秆还田量的玉米秸秆炭还田处理,可能是由于玉米秸秆炭比玉米秸秆具有更高的养分含量且具有较大的比表面积和复杂的孔隙结构以及多种官能团,增强了对土壤中离子的

吸附能力,从而减少了土壤营养物质的流失,但同时由于秸秆炭结构特异性,具有更好的稳定性,降低了秸秆炭的分解率^[20-21],其他可能的原因还有待于进一步分析。

土壤氮素矿化水平直接影响土壤氮素供应状况,室内培养结果也可以用于评价土壤氮素矿化的矿化潜势^[22]。有研究表明,秸秆添加对不同地区、不同类型土壤均有增强土壤矿化作用的功能^[8,23],水稻秸秆生物炭与水稻秸秆相比,其土壤有机氮的矿化速率及矿化量明显降低^[24]。本研究结论与此一致,在秸秆、秸秆炭还田处理下,土壤总氮矿化量、矿化率以及外源 ^{15}N 肥料矿化量、矿化率都高于单施化肥处理,且矿化的外源肥料 ^{15}N 占总矿化氮素的比例也比单施化肥处理高,促进了化肥氮的有效转化,其中,又以秸秆的影响更为明显。矿化作用的增强主要是由于玉米秸秆中含有大量易分解物质,使得土壤微生物活性增强,提高了对有机氮的分解速率;另外由于秸秆炭具有孔隙结构和巨大的表面积可吸附氮素物质,且秸秆热解形成秸秆炭过程中,营养物质大多转化成高稳定性的芳香环状结构物质,施加到土壤中可以改变土壤理化性质,直接或间接影响土壤微生物多样性及其活性,进而影响土壤氮素循环^[25-26]。此外,Deenik等^[27]研究表明秸秆炭中也含有挥发性物质可刺激微生物活动,降低了土壤氮素的矿化过程。因此,玉米秸秆炭还田后与秸秆还田相比具有较低的氮素矿化速率^[28]。

很多研究证明土壤中氮素矿化与土壤全氮和有机质含量有较好的相关性^[29]。本研究结果表明土壤氮素矿化与土壤有机质、总氮、微生物量碳、氮呈现显著相关性,标记尿素矿化量、矿化率与有机质、全氮、微生物量碳、氮呈现显著相关性。张恒等^[30]和邵兴芳等^[31]研究发现土壤氮素矿化与土壤有机质、全氮含量呈线性相关,而矿化率与有机质、全氮含量呈指数性相关。

4 结论

(1)化肥配施秸秆、秸秆炭均可提高土壤养分含量和微生物量碳、氮含量,其中100%秸秆还田处理显著提高土壤综合肥力且对土壤微生物固持碳、氮的效果最明显。

(2)化肥配施秸秆、秸秆炭均可协同提高土壤总氮以及外源肥料氮的矿化作用,提高土壤和外源肥料氮的潜在供氮能力,其中,以100%秸秆还田处理下的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 张 乐, 何红波, 章建新, 等. 不同用量葡萄糖对土壤氮素转化的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 775-778.
ZHANG Le, HE Hong-bo, ZHANG Jian-xin, et al. Effects of different dosage of glucose on nitrogen conversion in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 775-778.
- [2] 吴彦军, 汪景宽, 李双异, 等. 黑土土壤质量演变初探 V. 东北主要黑土区表层土壤有机碳密度分布及碳库估算[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4): 535-539.
WU Yan-jun, WANG Jing-kuan, LI Shuang-yi, et al. The evolution of soil quality in black soil V. Soil organic carbon density distribution and carbon sink estimation in main black soil area in Northeast China [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(4): 535-539.
- [3] 韩晓盈. 培肥措施对黑土氮素转化的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
HAN Xiao-ying. Effect of fertilization on nitrogen conversion in black soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007.
- [4] 张金涛, 卢昌艾, 王金洲, 等. 潮土区农田土壤肥力的变化趋势[J]. 中国土壤与肥料, 2010(5): 6-10.
ZHANG Jin-tao, LU Chang-ai, WANG Jin-zhou, et al. The change trend of soil fertility of farmland in tidal soil area[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2010(5): 6-10.
- [5] 郭俊梅, 姜慧敏, 张建峰, 等. 玉米秸秆炭还田对黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 67-75.
GUO Jun-mei, JIANG Hui-min, ZHANG Jian-feng, et al. Effects of corn stalk charcoal on soil fertility and nitrogen agronomic effects in black soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(1): 67-75.
- [6] Deng S P, Moore J M, Tabatabai M A. Characterization of active nitrogen pools in soils under different cropping systems[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2000, 32(4): 302-309.
- [7] 宋庆妮, 杨清培, 王 兵, 等. 水分变化对毛竹林与常绿阔叶林土壤 N 素矿化的潜在影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3297-3304.
SONG Qing-ni, YANG Qing-pei, WANG Bing, et al. Potential effects of soil moisture variety on the soil nitrogen mineralization of phyllostachys edulis forest and evergreen broad-leaved forest in subtropical region, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(12): 3297-3304.
- [8] 马 力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 898-905.
MA Li, YANG Lin-zhang, XIAO He-ai, et al. Effects of long-term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soils in subtropical China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 898-905.
- [9] 唐淦海, 刘郡英, 谷春豪, 等. 作物秸秆与城市污泥高温好氧堆肥产物对土壤氮矿化的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 326-331.
TANG Gan-hai, LIU Jun-ying, GU Chun-hao, et al. Nitrogen mineralization in soils amended with sewage sludge composted with different crop straws as bulking agent[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 326-331.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [11] 温 腾, 曹亚澄, 张佩仪, 等. 微扩散法测定铵态氮、硝态氮的 ^{15}N 稳定同位素研究综述[J]. 土壤, 2016, 48(4): 634-640.
WEN Teng, CAO Ya-cheng, ZHANG Pei-yi, et al. A review on the determination of ^{15}N stable isotopes of ammonium nitrogen and nitrate by microdiffusion method[J]. *Soil*, 2016, 48(4): 634-640.
- [12] 孙 星, 刘 勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 782-786.
SUN Xing, LIU Qin, WANG De-jian, et al. Effects of long-term straw mulching on soil fertility quality[J]. *Soil*, 2007, 39(5): 782-786.
- [13] 杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 272-275, 281.
YANG Min-fang, ZHU Li-qun, HAN Xin-zhong, et al. Effects of tillage and crop residues incorporation on soil nutrient, microbial biomass and enzyme activity under rice-wheat rotation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 272-275, 281.
- [14] 罗宜宾. 秸秆还田对作物产量及土壤养分的影响[J]. 现代园艺, 2013(2): 9.
LUO Yi-bin. Effects of straw returning on crop yield and soil nutrient [J]. *Xiandai Horticulture*, 2013(2): 9.
- [15] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(6): 627-633.
HONG Chun-lai, WEI You-zhang, HUANG Jin-fa, et al. Study on soil fertility and ecological environment of farmland by the total amount of straw[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2003, 29(6): 627-633.
- [16] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 307-314.
ZHANG Ya-li, LÜ Jia-long, JIN Ji-yun, et al. Effects of fertilization and straw mulching on soil fertility quality and spring wheat quality[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 307-314.
- [17] 王 应, 袁建国. 秸秆还田对农田土壤有机质提升的探索研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2007, 27(增刊2): 120-121, 126.
WANG Ying, YUAN Jian-guo. Straw on the soil organic matter enhance the exploration and research soil and fertilizer[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2007, 27(Suppl 2): 120-121, 126.
- [18] 张 静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 621-619.
ZHANG Jing, WEN Xiao-xia, LIAO Yun-cheng, et al. Effects of different maize straw mulching on soil fertility and winter wheat yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 621-619.
- [19] 许毛毛. 秸秆与秸秆炭对土壤碳库及养分的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
XU Mao-mao. Effects of straw and straw carbon on soil carbon storage

- and nutrient[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [20] 周桂玉, 窦 森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075–2080.
- ZHOU Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2075–2080.
- [21] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [22] Robertson G P, Wedin D, Groffman P M, et al. Soil carbon and nitrogen availability. Nitrogen mineralization, nitrification and soil respiration potentials[M]//Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research, 1999: 258–271.
- [23] 张 鹏, 李 涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2518–2525.
- ZHANG Peng, LI Han, JIA Zhi-kuan, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2518–2525.
- [24] 李 卉, 李宝珍, 邹冬生, 等. 水稻秸秆不同处理方式对亚热带农田土壤微生物生物量碳、氮及氮素矿化的影响[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(2): 303–308.
- LI Hui, LI Bao-zhen, ZOU Dong-sheng, et al. Impacts of rice straw and its biochar product on the amounts of soil microbial biomass carbon and nitrogen and the mineralization of soil organic nitrogen in subtropical croplands[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(2): 303–308.
- [25] Zimmerman A R, Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon(biochar)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1295–1301.
- [26] 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.
- [27] Deenik J L, McClellan T, Uehara G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4): 1259–1270.
- [28] 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.
- LIU Min, ZHANG Lu, YU Wan-tai, et al. Decomposition process and residual rate of organic materials C and N in soils[J]. *China Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2503–2506.
- [29] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Chinese soil nitrogen[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [30] 张 恒, 王晶君, 石俊雄. 贵州省主要植烟黄壤氮素矿化潜力研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 324–330.
- ZHANG Heng, WANG Jing-jun, SHI Jun-xiong. Study on the potential of nitrogen mineralization in Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 324–330.
- [31] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 40(2): 326–335.
- SHAO Xing-fang, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, et al. Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 40(2): 326–335.