

不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对旱作农田土壤酸解有机氮组分的影响

张世汉¹, 武 均^{1,2}, 张仁陟^{1,2,3}, 齐 鹏^{1,2,3}, 贺永岩¹, 郭万里¹

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学甘肃省干旱旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探明不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对陇中黄土高原旱作农田土壤酸解有机氮组分的影响,2014 年在定西市安定区李家堡镇布设的不同氮水平下秸秆、生物质炭添加定位试验(共 9 个处理),利用 Bremner 分级法,对该试验 2018 年收获后的土壤有机氮组分进行测定与分析。结果表明:在 0~30 cm 土层(0~5、5~10、10~30 cm 土层),各处理酸解总有机氮、酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮、酸解未知态氮含量均随土层的加深而降低,酸解氨基糖态氮含量随土层的加深而增加;较之无炭处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值),生物质炭添加(BN0、BN50、BN100 处理的均值)处理可提升酸解总有机氮含量 10.12%、9.14%、7.61%(土层由上至下),提升酸解氨态氮含量 15.02%、16.25%、17.19%(土层由上至下),提升酸解氨基酸态氮含量 13.31%、11.84%、8.74%(土层由上至下),其中 BN100 处理下对其提升效应最显著;较之无炭处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值),秸秆添加处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)可提升酸解氨基糖态氮含量 26.46%、26.51%、25.78%(土层由上至下),其中 SN100 处理下对其提升效应最显著;不同处理下,有机氮各形态的分布趋势为酸解氨基酸态氮>酸解氨态氮>酸解未知态氮>酸解氨基糖态氮。总之,BN100 处理对酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮提升效应最显著,进而增加土壤供氮潜力,可筛选为该区春小麦栽培的合理施肥方式。

关键词: 秸秆; 生物质炭; 氮水平; 旱作农田; 土壤酸解有机氮; 陇中黄土高原

中图分类号: S158.5 **文献标志码:** A

Effects of nitrogen fertilizer combined with straw and bio-char on soil organic nitrogen components in dryland farmland

ZHANG Shihan¹, WU Jun^{1,2}, ZHANG Renzhi^{1,2,3}, QI Peng^{1,2,3}, HE Yongyan¹, GUO Wanli¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-saving, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to explore the effect of straw and biochar addition on the acidolysis organic nitrogen (N) components of dry farmland soil on Longzhong Loess Plateau under different N levels, an experiment of straw and biochar addition under different N levels (9 treatments in total) was conducted in Lijiabao, Anding District, Dingxi City in 2014. Bremner classification method was used to determine the soil organic N components after harvest in 2018. The results showed that in 0~30 cm soil layer (0~5, 5~10, and 10~30 cm), the contents of total organic N, ammoniac N, amino acid N and unknown N decreased with increase in soil depth, and the contents of amino sugar N increased with the soil depth; compared with the carbon free treatment (CN0, CN 50, and CN100), bio-char was added (BN0, BN50, and BN100) treatments significantly increased the content of total organic N by 10.12%, 9.14% and 7.61% (from top to bottom), 15.02%, 16.25% and 17.19% (from top to bottom) and

收稿日期:2019-01-24 修回日期:2019-04-02
基金项目:甘肃农业大学青年导师扶持基金(GAU-QNDS-2017-04);国家自然科学基金项目(31571594, 41661049);甘肃省自然科学基金项目(1606RJZA076)
作者简介:张世汉(1992-),男,甘肃金塔人,硕士研究生,研究方向为恢复生态学。E-mail:1016625243@qq.com
共同第一作者:武均(1989-),男,甘肃敦煌人,博士,研究方向为保护性耕作、土壤生态学。E-mail:wujun210@126.com
通信作者:齐鹏(1979-),男,甘肃武威人,副教授,硕士生导师,主要从事土壤生态学研究。E-mail:gsaup@gsau.edu.cn

13.31%, 11.84% and 8.74% (from top to bottom), respectively. Compared with the carbon free treatment (CN0, CN50, and CN100), straw addition treatment (SN0, SN50, and SN100) significantly increased the content of acid hydrolyzed amino sugar N by 26.46%, 26.51%, 25.78% (from the top to the bottom of the soil layer), respectively, of which SN100 treatment had the most significant effect; under different treatments, the distribution trend of various forms of organic N was acid hydrolyzed amino acid N > acid hydrolyzed ammonia N > acidolysis unknown N > acidolysis amino sugar N. In a word, BN100 treatment had the most significant effect on the increase of acid hydrolyzed amino acid N and acid hydrolyzed ammonia N, and then increased the potential of soil N supply. It can be selected as a reasonable fertilization method for spring wheat cultivation in this area.

Keywords: straw; biochar; nitrogen; dryland farmland; soil acidolysis organic nitrogen; Longzhong Loess Plateau

有机态氮是土壤氮素的主要成分^[1], 90%以上的氮以有机态化合物的形式存在^[2], 有机态氮只有转化为无机态氮才能被作物吸收利用^[3]。因此, 研究有机氮组分的含量与组分间的关系对土壤的供氮能力及优化农业生产氮肥投入具有重要意义。众多研究表明^[4-8], 土壤有机氮组分的含量与分布受土壤类型、耕作措施、施肥种类和方式等多方面因素的影响, 而合理的施肥方式可维持土壤肥力与生产力、改善土壤生态环境、节约农业投入。

自 Bremner^[9]提出将有机氮分为酸解有机氮和非酸解氮后, 有机氮组分备受学者们关注。研究者们^[10-15]对有机氮组分的分布特征及其矿化特性进行大量研究, 但由于受土壤类型、气候环境等因素影响, 各有机氮组分对土壤供氮潜力尚存争议。张电学等^[6]研究不同施肥制度对褐土有机氮组分的影响, 结果表明, 有机氮积累过程中, 化肥氮主要进入土壤氨态氮和氨基酸态氮库, 而有机肥料氮则主要进入土壤氨基酸态氮库; 韦至激等^[16]研究稻田土壤有机氮组分发现, 干湿交替灌溉和增施氮肥可提高稻田土壤酸解氨态氮和氨基糖态氮含量; 贾倩等^[17]对比研究了水旱轮作下氮肥用量对土壤有机氮含量及其组分的影响, 发现周年氮肥合理施用能明显提高土壤有机氮含量, 水旱轮作下土壤酸解态氮库各组分变化差异明显; 任金凤等^[18]通过研究长期施肥对潮棕壤有机氮组分的影响, 发现无论单施化肥还是有机肥或二者配施均会显著影响土壤有机氮各组分的含量, 单施化肥显著提高了酸解氨态氮含量, 而氨基酸态氮降低, 单施有机肥主要提高氨基酸态氮和氨基糖态氮含量, 二者配施有机氮各组分含量均有所增加, 其中酸解未知氮增加较多。尽管国内外学者关于有机无机肥对有机氮组分相关关系及其矿化特性的影响做了大量研究, 但大多集中于草地、稻田、森林和湿地等, 对旱地有机氮组分相关研究较少, 尤其是土壤贫瘠、生产力低下的黄土高原陇中地区^[19]鲜见报道。此外, 结合特定生

态环境和农作措施研究土壤有机氮组分的变化规律, 对提升土壤供氮潜力具有重要意义。因此, 本研究依托甘肃农业大学于 2014 年布设在定西市安定区李家堡镇的不同氮水平下秸秆、生物质炭添加定位试验, 利用 Bremner 分级法, 通过对该试区 2018 年土壤酸解有机氮组分含量的测定分析, 以探明不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对酸解有机氮组分含量的影响, 并为该区春小麦栽培寻求有利于提高土壤供氮能力的合理施肥方式。

1 试验设计与方法

1.1 试验区概况

试验区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市李家堡镇。该区海拔 2 000 m 左右, 年均太阳辐射 594.7 kJ · cm⁻², 日照时数 2 476.6 h, 年均气温 6.4℃, ≥0℃ 积温 2 933.5℃, ≥10℃ 积温 2 239.1℃, 无霜期 140 d, 多年平均降水 390.9 mm, 年蒸发量 1 531 mm, 干燥度 2.53, 80% 保证率的降水量为 365 mm, 变异系数为 24.3%, 土壤为典型的黄绵土, 土质绵软, 土层深厚, 质地均匀, 储水性能良好。0~200 cm 土层土壤容重平均为 1.17 g · cm⁻³, 凋萎含水率 7.3%, 饱和含水率 21.9%, 是典型的雨养农业区。试验布设前, 土壤全氮含量为 0.88 g · kg⁻¹、土壤全磷含量为 0.83 g · kg⁻¹、土壤有机质含量为 15.91 g · kg⁻¹、土壤硝态氮 9.27 mg · kg⁻¹、铵态氮含量为 4.23 mg · kg⁻¹、速效磷含量为 12.34 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验涉及秸秆、生物质炭、氮素 3 个因素, 秸秆设置为不施、施用秸秆 2 个水平; 生物质炭为不施和施用生物质炭 2 个水平; 氮素设置为不施氮、施纯氮 50 kg · hm⁻²、施纯氮 100 kg · hm⁻² 3 个水平。试验共设 9 个处理(表 1)。采用随机区组排列, 各处理 3 个重复, 共计 27 个小区, 小区面积 3×6=18 m²。其中, 生物质炭于 2014 年 3 月上旬一次性均匀施入

15 t · hm⁻², 利用旋耕机将其翻埋入土壤(耕深 18±2 cm)。秸秆于每年收获后利用铡草机切割为 3~5 cm 长小段均匀散布于还田小区内, 并利用旋耕机将其翻埋入土壤(三耕两耨, 耕深 18±2 cm)。各处理于每年播种前均施入 P₂O₅ 105 kg · hm⁻²(过磷酸钙, P₂O₅ 含量为 14%); 试验中所添加氮素为尿素(纯氮含量为 46%), 于每年播种前根据各处理所需用量同磷肥一并均匀撒施于各小区后, 迅速利用播种机播种(播深 7±2 cm), 待肥料与土壤混合, 利用耙耨将地耨平。

供试作物为定西 40 号春小麦 (*Triticum turgidum* L.), 自 2014 年开始, 采用春小麦连作并遵循定西当地传统耕作生产方式, 于每年 3 月下旬播种, 播量为 187.5 kg · hm⁻², 行距 20 cm, 7 月下旬收获, 收获后三耕两耨。供试生物质炭来源于金和福农业科技股份有限公司生产的生物质炭(过 200 目筛), 碳含量 53.28%, 氮素含量 1.04%; 小麦秸秆含碳量 38.49%, 氮素含量为 0.55%。

1.3 样品采集与处理

于 2018 年 7 月作物收获后采集不同氮水平下秸秆、生物质炭添加试验的供试土样。利用 5 点采样法用土钻分别采集各小区 0~5、5~10、10~30 cm 3 个土层土样各 1 000 g 左右, 混合均匀后装自封袋, 带回室内风干后过 2 mm 筛待测。土壤有机氮分级采用 Bremner 方法^[9], 土壤酸解总有机氮采用

6 mol · L⁻¹ HCL 酸解—凯氏半微量定氮法测定; 酸解氨态氮采用 MgO 蒸馏法测定; 酸解氨态氮+氨基糖态氮采用磷酸盐—硼酸盐缓冲液蒸馏法测定; 酸解氨基酸态氮采用茚三酮氧化、磷酸盐—硼酸盐缓冲液蒸馏法测定; 酸解未知态氮和酸解氨基糖态氮则采用差减法求得。有机质采用重铬酸钾外加热法测定, 全氮采用凯氏法测定。

1.4 数据处理与统计方法

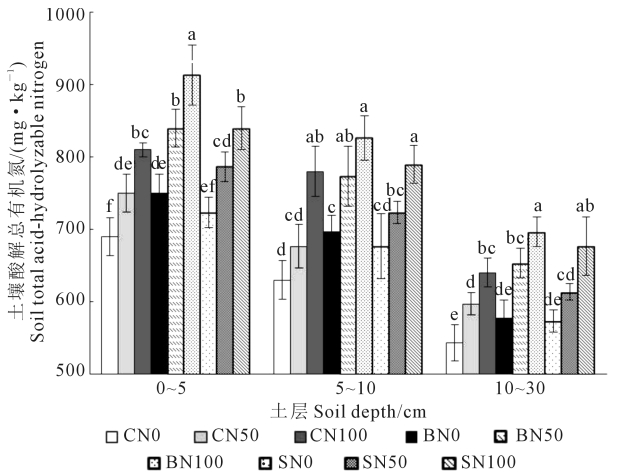
利用 Microsoft Excel 2010 软件作图与制表, 采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析, 其中多重比较采用新复极差法。

2 结果与分析

2.1 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤酸解总有机氮的影响

由图 1 可知, 各处理下土壤酸解总有机氮含量均随土层加深呈降低趋势。各土层土壤酸解总有机氮含量均以 BN100 处理最高, CN0 处理最低。在 0~5 cm 土层, CN50、CN100、BN50、BN100、SN50、SN100 处理土壤酸解总有机氮含量高于 CN0 处理 8.00%、14.81%、17.86%、24.45%、12.29%、17.86%; 在 5~10 cm 土层, CN100、BN0、BN50、BN100、SN50、SN100 处理土壤酸解总有机氮含量高于 CN0 处理 19.23%、9.57%、18.53%、23.79%、12.90%、20.25%; 在 10~30 cm 土层, CN50、CN100、BN50、BN100、SN50、SN100 处理土壤酸解总有机氮含量高于 CN0 处理 8.94%、15.10%、16.84%、22.01%、11.41%、19.70%。

表 1 试验处理	
Treatment code	Experimental design
CN0	无碳+施纯氮 0 kg · hm ⁻² No carbon+pure nitrogen 0 kg · hm ⁻²
CN50	无碳+施纯氮 50 kg · hm ⁻² No carbon +pure nitrogen 50 kg · hm ⁻²
CN100	无碳+施纯氮 100 kg · hm ⁻² No carbon +pure nitrogen 100 kg · hm ⁻²
BN0	生物质炭 15 t · hm ⁻² +施纯氮 0 kg · hm ⁻² Biochar 15 t · hm ⁻² + pure nitrogen 0 kg · hm ⁻²
BN50	生物质炭 15 t · hm ⁻² +施纯氮 50 kg · hm ⁻² Biochar 15 t · hm ⁻² + pure nitrogen 50 kg · hm ⁻²
BN100	生物质炭 15 t · hm ⁻² +施纯氮 100 kg · hm ⁻² Biochar 15 t · hm ⁻² + pure nitrogen 100 kg · hm ⁻²
SN0	秸秆 4.5 t · hm ⁻² +施纯氮 0 kg · hm ⁻² Straw 4.5 t · hm ⁻² + pure nitrogen 0 kg · hm ⁻²
SN50	秸秆 4.5 t · hm ⁻² +施纯氮 50 kg · hm ⁻² Straw 4.5 t · hm ⁻² + pure nitrogen 50 kg · hm ⁻²
SN100	秸秆 4.5 t · hm ⁻² +施纯氮 100 kg · hm ⁻² Straw 4.5 t · hm ⁻² + pure nitrogen 100 kg · hm ⁻²



注: 不同字母表示在 $P<0.05$ 水平下各土层不同处理差异显著, 下同。
Note: Different letters indicate the significant difference under the level of $P<0.05$, the same below.
图 1 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加处理土壤酸解总有机氮含量
Fig.1 Soil total acid-hydrolyzable nitrogen content under different nitrogen, straw and biochar treatment

由表 2 可知,氮素、秸秆和生物质炭对 0~30 cm 各土层的酸解总有机氮含量均有显著效应。N100 处理(CN100、BN100、SN100 处理的均值)的土壤酸解总有机氮含量高于 N0(CN0、BN0、SN0 处理的均值)(土层由上至下)15.60%、16.41%、15.89%。添加秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤酸解总有机氮含量分别高于无碳素添加处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值)(土层由上至下)4.26%、4.72%、4.47%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的酸解总有机氮含量显著高于无碳素添加处理(土层由上至下)10.12%、9.14%、7.61%。

2.2 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤酸解氨态氮的影响

由图 2 可知,各处理下土壤酸解氨态氮含量均随土层加深呈降低趋势。各土层土壤酸解氨态氮含量均以 BN100 处理最高,CN0 处理最低。在 0~5 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理均高于 CN0 处理土壤酸解氨态氮含量 12.71%、25.28%、11.47%、27.50%、37.16%、9.09%、23.72%、32.41%;在 5~10 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理均高于 CN0 处理土壤酸解氨态氮含量 12.98%、31.99%、19.31%、31.84%、38.09%、13.33%、25.02%、36.72%;在 10~30 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理均高于 CN0 处理土壤酸解氨态氮含量 15.52%、26.59%、17.09%、32.16%、37.58%、13.64%、23.14%、35.18%。

由表 3 可知,氮素、秸秆、生物质炭对 0~30 cm 各土层的土壤酸解氨态氮含量均有显著效应,而氮

素和生物质炭的交互效应仅对 5~10 cm 土层的土壤酸解氨态氮含量效应达到显著水平。N50 处理(CN50、BN50、SN50 处理的均值)、N100 处理(CN100、BN100、SN100 处理的均值)的土壤酸解氨态氮含量分别高于 N0(CN0、BN0、SN0 处理的均值)(土层由上至下)15.81%、14.10%、15.03%、26.76%、27.28%、25.36%。添加秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤酸解氨态氮含量分别高于无碳素添加处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值)(土层由上至下)10.45%、11.03%、11.39%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的土壤酸解氨态氮含量高于无碳素添加处理(土层由上至下)15.02%、16.25%、17.19%。

2.3 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤酸解氨基糖态氮的影响

由图 3 可知,各处理下土壤氨基糖态氮含量均随土层加深呈增加趋势。各土层土壤氨基糖态氮含量均以 SN100 处理最高,CN0 处理最低。在 0~5 cm 土层,B0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤氨基糖态氮含量高于 CN0 处理21.26%、24.76%、

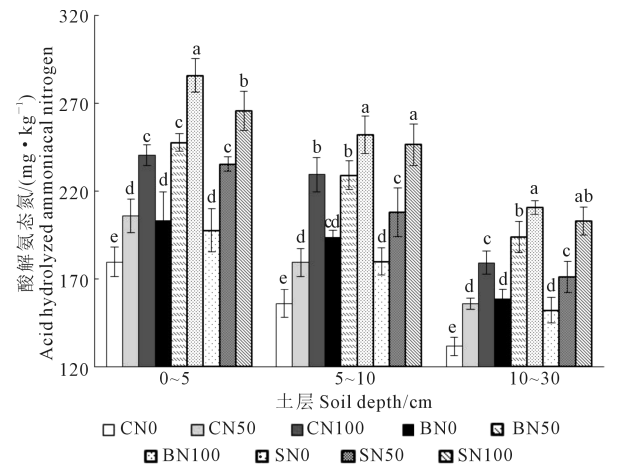


图 2 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加处理土壤酸解氨态氮含量

Fig.2 Soil acid-hydrolyzable ammoniac nitrogen content under different nitrogen, straw and biochar treatment

表 3 氮素、秸秆、生物质炭对土壤酸解氨态氮含量的效应

Table 3 Effects of nitrogen, straw and biochar on soil acid-hydrolyzable ammoniac nitrogen content

因子 Factor	土层 Soil depth/cm		
	0~5	5~10	10~30
施氮 Nitrogen	102.93 ***	78.90 ***	88.42 ***
秸秆 Straw	31.94 ***	32.87 ***	40.14 ***
生物质炭 Biochar	73.33 ***	80.55 ***	104.71 ***
施氮×秸秆 Nitrogen×straw	0.63n.s.	0.67n.s.	0.60n.s.
施氮×生物质炭 Nitrogen×biochar	2.55n.s.	3.68 *	1.04n.s.

注: *, **, *** 分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平下有显著效应, n.s. 表示在 $P<0.05$ 水平下无显著效应; *, **, *** 和 n.s. 前的数值为 F 检验值, 下同。

Note: *, **, and *** indicate significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively; n.s. indicates no significant difference at $P<0.05$. The values represent F -statistic in front of n.s. *, **, and ***. The same below.

29.25%、26.40%、34.04%、35.60%；在 5~10 cm 土层,CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤氨基糖态氮含量高于 CN0 处理 13.89%、17.96%、19.73%、26.25%、29.41%、32.03%、32.98%；在 10~30 cm 土层,CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤氨基糖态氮含量高于 CN0 处理 11.70%、14.26%、17.58%、27.89%、26.35%、31.01%、33.17%。

由表 4 可知,氮素、秸秆和生物质炭对 0~30 cm 各土层的土壤氨基糖态氮含量均有显著效应。N100 处理(CN100、BN100、SN100 处理的均值)的土壤氨基糖态氮含量分别高于 N0(CN0、BN0、SN0 处理的均值)(土层由上至下)12.30%、9.83%、12.24%。添加秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤氨基糖态氮含量分别高于无碳素添加处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值)(土层由上至下)26.46%、26.51%、25.78%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的土壤氨基糖态氮含量高于无碳素添加处理(土层由上至下)18.86%、15.32%、15.20%。

2.4 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤酸解氨基酸态氮的影响

由图 4 可知,各处理下土壤酸解氨基酸态氮含量均随土层加深呈降低趋势。各土层土壤酸解氨基酸态氮含量均以 BN100 处理最高,CN0 处理最低。在 0~5 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤酸解氨基酸态氮含量高于 CN0 处理 9.77%、16.50%、9.04%、22.32%、29.91%、11.12%、18.82%、26.47%；在 5~10 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、

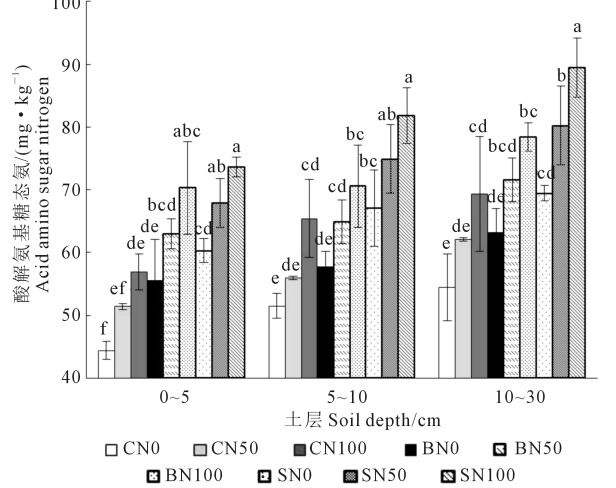


图 3 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加处理土壤酸解氨基糖态氮含量

Fig.3 Soil acid-hydrolyzable amino sugar nitrogen content under different nitrogen, straw and biochar treatment

SN100 处理土壤酸解氨基酸态氮含量高于 CN0 处理 8.96%、21.52%、10.68%、22.38%、29.46%、14.23%、21.72%、29.93%；在 10~30 cm 土层,CN50、CN100、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤酸解氨基酸态氮含量高于 CN0 处理 10.54%、19.22%、19.97%、26.28%、10.13%、18.56%、26.46%。

由表 5 可知,氮素、秸秆和生物质炭对 0~30 cm 各土层的土壤酸解氨基酸态氮含量均有显著效应。N50 处理(CN50、BN50、SN50 处理的均值)、N100 处理(CN100、BN100、SN100 处理的均值)的土壤酸解氨基酸态氮含量分别高于 N0(CN0、BN0、SN0 处理的均值)(土层由上至下)11.11%、10.34%、11.44%、19.07%、20.24%、19.48%。秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤酸解氨基酸态氮含量高于无碳素添加处理(土层由上至下)11.06%、12.86%、9.32%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的土壤酸解氨基酸态氮含量高于无碳素添加处理(土层由上至下)13.31%、11.84%、8.74%。

表 4 氮素、秸秆、生物质炭对土壤酸解氨基糖态氮含量的效应

因子 Factor	土层 Soil depth/cm		
	0~5	5~10	10~30
施氮 Nitrogen	17.47 ***	11.43 **	16.52 ***
秸秆 Straw	70.80 ***	51.73 ***	50.37 ***
生物质炭 Biochar	38.45 ***	8.19 *	13.28 **
施氮×秸秆 Nitrogen×straw	0.01n.s.	0.19n.s.	0.35n.s.
施氮×生物质炭 Nitrogen×biochar	0.13n.s.	0.23n.s.	0.01n.s.

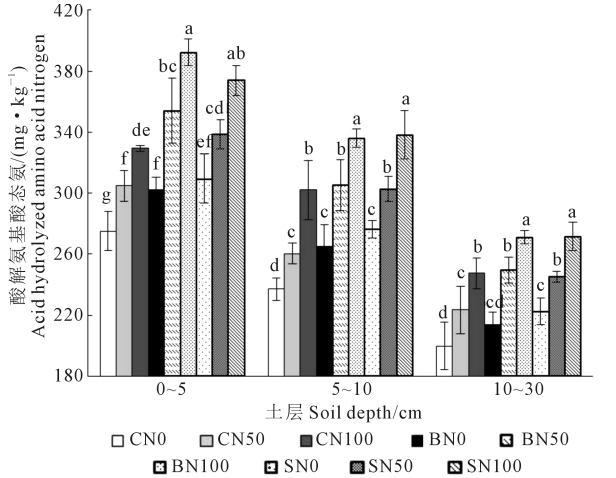


图 4 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加处理土壤酸解氨基酸态氮含量

Fig.4 Soil acid-hydrolyzable amino acid nitrogen content under different nitrogen, straw and biochar treatment

2.5 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤酸解未知态氮的影响

由图 5 可知,各处理下土壤酸解未知态氮含量均随土层加深呈降低趋势。各处理下各土层土壤酸解未知态氮含量无明显规律。在 0~5 cm 土层,SN100 处理显著低于 CN0 处理土壤酸解未知态氮含量 33.71%;在 5~10 cm 土层,SN50、SN100 处理土壤酸解未知态氮含量低于 CN0 处理 25.84%、33.50%;在 10~30 cm 土层,SN0、SN50、SN100 处理土壤酸解未知态氮含量低于 CN0 处理 17.98%、25.95%、28.53%。

由表 6 可知,秸秆对 0~30 cm 各土层的土壤酸解未知态氮含量有显著效应,生物质炭仅对 10~30 cm 土层的土壤酸解未知态氮含量效应达到显著水平。秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤酸解未知态氮含量低于无碳素添加处理(土层由上至下)31.64%、32.75%、27.55%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的土壤酸解未知态氮含量低于无碳素添加处理 10.04%。

表 5 氮素、秸秆、生物质炭对土壤酸解氨基酸态氮含量的效应

因子 Factor	土层 Soil depth/cm		
	0~5	5~10	10~30
施氮 Nitrogen	61.60***	43.12***	42.44***
秸秆 Straw	43.90***	45.55***	23.65***
生物质炭 Biochar	66.89***	37.69***	20.55***
施氮×秸秆 Nitrogen×straw	0.38n.s.	0.09n.s.	0.02n.s.
施氮×生物质炭 Nitrogen×biochar	3.33n.s.	0.71n.s.	0.61n.s.

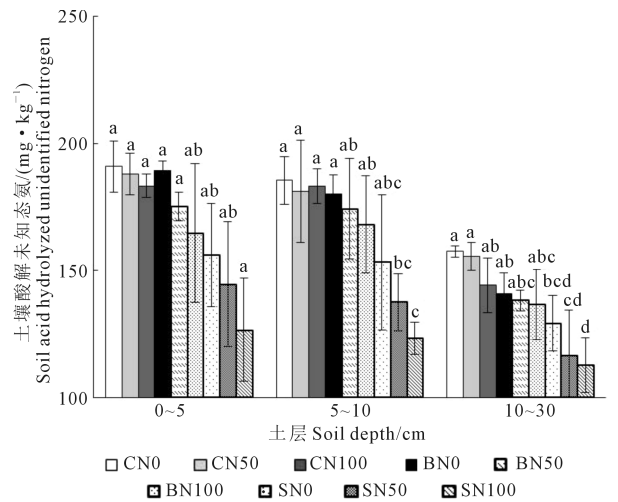


图 5 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加处理土壤酸解未知态氮含量

Fig.5 Soil acid-hydrolyzable unidentified nitrogen content under different nitrogen, straw and biochar treatment

2.6 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤有机氮组分的影响

由图 6 可知,不同处理下各土层均以酸解氨基酸态氮含量最高,酸解氨基糖态氮含量最低,排序均为:酸解氨基酸态氮>酸解氨态氮>酸解未知态氮>酸解氨基糖态氮。酸解氨态氮/酸解总有机氮范围为 24.20%~31.65%;酸解氨基酸态氮/酸解总有机氮范围为 36.77%~44.52%;酸解氨基糖态氮/酸解总有机氮范围为 6.43%~13.22%;酸解未知态氮/酸解总有机氮范围为 15.07%~29.44%。各处理下酸解氨态氮/酸解总有机氮、酸解氨基酸态氮/酸解总有机氮均随土层的加深而减小;氨基糖态氮/酸解总有机氮随土层的加深而增大,酸解未知态氮/酸解总有机氮随土层的加深呈先增大而后减小的趋势。

2.7 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤全氮含量的影响

由图 7 可知,各处理下土壤全氮(STN)含量均随土层加深呈降低趋势。各土层土壤全氮含量均以 BN100 处理最高,CN0 处理最低;在 0~5 cm 土层,CN100、BN0、BN50、BN100、SN50、SN100 处理土壤全氮含量高于 CN0 处理 12.21%、8.48%、16.11%、21.35%、11.18%、15.64%;在 5~10 cm 土层,CN100、BN0、BN50、BN100、SN50、SN100 处理土壤全氮含量高于 CN0 处理 16.07%、8.44%、16.07%、20.79%、10.76%、17.06%;在 10~30 cm 土层,CN50、CN100、BN50、BN100、SN50、SN100 处理土壤全氮含量高于 CN0 处理 7.58%、12.54%、14.69%、18.94%、10.95%、16.44%。

由表 7 可知,氮素、秸秆和生物质炭均对 0~30 cm 各土层的全氮含量有显著效应。N100 处理(CN100、BN100、SN100 处理的均值)的土壤全氮含量高于 N0(CN0、BN0、SN0 处理的均值)(土层由上至下)12.43%、13.86%、13.37%。添加秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤全氮含量高于无碳素添加处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值)

表 6 氮素、秸秆、生物质炭对土壤酸解未知态氮含量的效应

Table 6 Effects of nitrogen, straw, and biochar on soil acid hydrolyzable unidentified nitrogen content

因子 Factor	土层 Soil depth/cm		
	0~5	5~10	10~30
施氮 Nitrogen	1.82n.s.	1.39n.s.	1.13n.s.
秸秆 Straw	15.23**	19.24***	31.33***
生物质炭 Biochar	0.91n.s.	0.77n.s.	5.59*
施氮×秸秆 Nitrogen×straw	0.30n.s.	0.60n.s.	0.28n.s.
施氮×生物质炭 Nitrogen×biochar	0.18n.s.	0.09n.s.	0.29n.s.

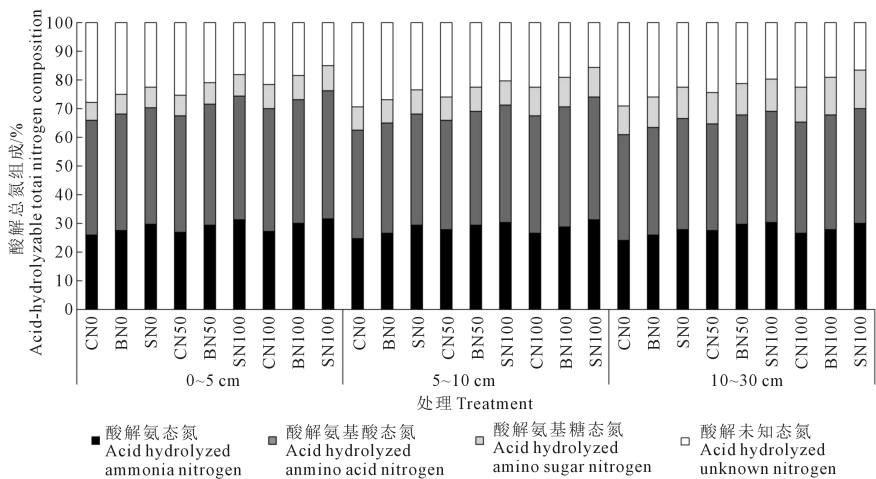


图 6 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加处理土壤有机氮组分分布/%

Fig.6 Distribution of soil organic nitrogen components under different nitrogen, straw and biochar treatments

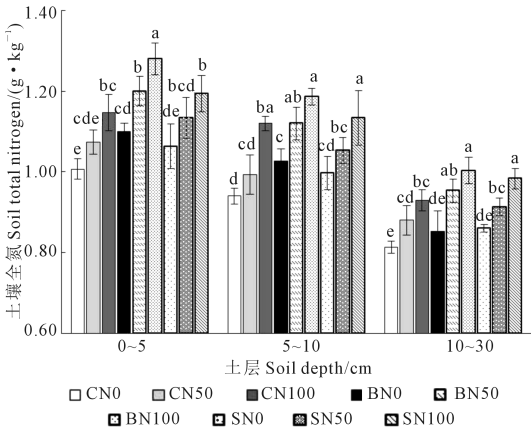


图 7 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤全氮含量的影响

Fig.7 Effect of different straw and biochar on soil total nitrogen content under different nitrogen levels

4.82%、4.08%、4.84%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的全氮含量高于无碳素添加处理(土层由上至下)9.87%、8.40%、6.64%。

2.8 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤有机质含量的影响

由图 8 可知,各处理下土壤有机质含量均随土层加深呈降低趋势。各土层土壤有机质含量均以 BN100 处理最高,CN0 处理最低;在 0~5 cm 土层, BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤有机质含量高于 CN0 处理 23.26%、24.89%、26.20%、13.40%、16.46%、16.58%;在 5~10 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤有机质含量高于 CN0 处理 5.22%、6.05%、21.87%、24.24%、25.31%、8.27%、12.46%、12.80%;在 10~30 cm 土层,CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100 处理土壤有机质含量高于 CN0 处理 6.07%、6.20%、14.18%、15.60%、16.59%、5.27%、5.27%、5.60%。

表 7 氮素、秸秆、生物质炭对土壤全氮含量的效应

Table 7 Effects of nitrogen, straw and biochar on soil total nitrogen content

因子 Factor	土层 Soil depth/mm		
	0~5	5~10	10~30
施氮 Nitrogen	19.98 **	20.17 **	30.21 **
秸秆 Straw	7.37 *	5.17 *	9.54 **
生物质炭 Biochar	34.50 ***	23.96 ***	18.70 **
施氮×秸秆 Nitrogen×straw	0.04n.s.	0.62n.s.	0.17n.s.
施氮×生物质炭 Nitrogen×biochar	0.38n.s.	0.86n.s.	0.60n.s.

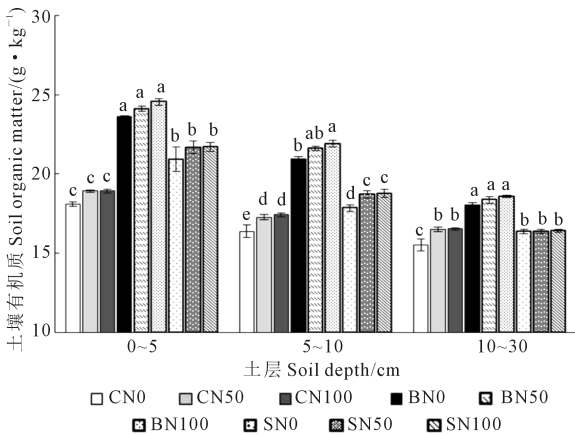


图 8 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对土壤有机质含量的影响

Fig.8 Effect of different straw and biochar on soil organic matter content under different nitrogen levels

由表 8 可知,生物质炭对 0~30 cm 各土层的土壤有机质含量有显著效应;秸秆仅对 0~10 cm 各土层土壤有机质含量有显著效应;而氮素仅对 5~10 cm 土层土壤有机质含量有显著效应;施氮与秸秆的交互效应仅对 10~30 cm 土层土壤有机质含量有显著效应。在 5~10 cm 土层,N100 处理(CN100、BN100、SN100 处理的均值)的土壤有机质含量高于 N0

(CN0、BN0、SN0 处理的均值) 5.07%。添加秸秆处理(SN0、SN50、SN100 处理的均值)的土壤有机质含量分别高于无碳素添加处理(CN0、CN50、CN100 处理的均值)(土层由上至下) 13.01%、7.69%。生物质炭处理(BN0、BN50、BN100 处理的均值)的有机质含量高于无碳素添加处理(土层由上至下) 22.58%、20.81%、11.78%。

表 8 氮素、秸秆、生物质炭对土壤有机质含量的效应

Table 8 Effects of nitrogen, straw and biochar on soil organic matter content			
因子 Factor	土层 Soil depth/cm		
	0~5	5~10	10~30
施氮 Nitrogen	3.60n.s.	6.88 *	1.23n.s.
秸秆 Straw	102.70 ***	41.86 ***	1.87n.s.
生物质炭 Biochar	391.03 ***	416.05 ***	207.24 ***
施氮×秸秆 Nitrogen×straw	0.01n.s.	0.03n.s.	4.80 *
施氮×生物质炭 Nitrogen×biochar	0.22n.s.	0.10n.s.	1.91n.s.

3 讨 论

本研究表明,与仅施氮肥相比,不同氮水平下秸秆、生物质炭添加可不同程度提升土壤全氮含量,这与张水清等^[20]研究结果一致,其中 BN100 处理对 0~30 cm 土层的土壤全氮提升效果最优。这主要是由于生物质炭、秸秆作为外源有机物料,含有一定的氮素,添加秸秆、生物质炭可以增加土壤中氮素含量;有机肥作为土壤团聚体形成的粘合剂,在增加土壤有机质含量的同时,可改善土壤团聚体,使更多氮素可以受到土壤团聚体的保护,降低其与微生物的接触,减缓了土壤全氮因微生物分解而引起的损失^[21-23],进而减少了土壤全氮的损失;氮素在土壤中淋溶能力较强,而生物质炭添加可有效降低土壤氮素淋溶,提升土壤固氮能力^[24];生物质炭添加可有效降低 N₂O 排放量,降低了土壤氮素因 N₂O 排放而引起的无效损失^[25];此外,由于生物质炭具有较强的吸附性,与氮肥配施后,赋予了化学肥料缓释性,从而形成了协同互补效应,减少了氮素的损失^[26]。

土壤酸解性氮库处于动态平衡之中,它的含量高低取决于不同农作措施下土壤微生物矿化-同化过程对各组分的直接或间接影响。本研究表明,在 0~30 cm 土层,各处理下酸解总有机氮、酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮、酸解未知态氮均随土层的加深而减小,这与王克鹏等^[7]研究结果一致,而土壤酸解氨基糖态氮随土层的加深而增加,这与申晓辉^[27]研究结果相似。这可能是土壤类型、土壤肥

力、气候条件不同所致^[27]。大量研究表明^[5-7,12-16],不同施肥处理可普遍提升土壤酸解有机氮组分含量,尤其对酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮含量提升最显著,这与本研究结果相似。较之 CN0,生物质炭配施氮素可显著提升 0~30 cm 土层土壤酸解总有机氮、酸解氨态氮及酸解氨基酸态氮含量,且 BN100 处理提升效应最优,这与黄东迈等^[28]、于洪飞等^[29]研究结果吻合;而秸秆配施氮素可显著提升酸解氨基糖态氮含量,且 SN100 提升效应最优。这是由于生物质炭、秸秆添加配施氮素后,尽管大部分氮素会被作物吸收利用以及通过淋溶、反硝化作用等方式流失^[29],但土壤酸解有机氮组分仍可通过生物质炭、秸秆添加得到有效补充;另一方面,生物质炭、秸秆添加有益于固氮微生物的大量繁殖,且极大地丰富了土壤微生物群落结构^[30],有利于土壤酸解有机氮组分的积累;此外,生物质炭、秸秆添加可显著改善土壤团聚体结构,增加了土壤各酸解有机氮组分的物理保护^[31],有益于土壤酸解有机氮组分的固持。

Kwon 等^[10]研究发现,施用有机肥能显著提升土壤有机氮含量;李世清等^[5]研究结果表明,有机肥配施化肥可显著提升酸解氮的含量和比例,这与本研究结果一致。Smith 等^[14]认为不论施化肥还是有机肥,对土壤有机氮组分含量的影响如何,均不会改变各组分的相对含量,李树山等^[15]也得出相似结果。本研究结果表明,不同处理下,酸解有机氮组分形态分布趋势为酸解氨基酸态氮>酸解氨态氮>酸解未知态氮>酸解氨基糖态氮,这与郝小雨等^[32]研究结果相吻合。较之 CN0,生物质炭、秸秆配施氮素可显著提升 0~30 cm 各土层酸解氨态氮、酸解氨基糖态氮、酸解氨基酸态氮占酸解总有机氮的比例,且 BN100 处理对酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮占酸解总有机氮比例提升效应最优,而 SN100 处理对酸解氨基糖态氮占酸解总有机氮比例提升效应最优。这是由于有机物料进入土壤后会较多地转向酸解氨基酸态氮和酸解氨基糖态氮^[6,33];酸解氨基酸态氮和酸解氨基糖态氮与土壤微生物细胞壁及结构蛋白所含成分相似^[28],有机物料进入土壤通过改善微生物群落结构、提升微生物活性,进而提升土壤酸解有机氮组分含量及其占酸解总有机氮的比例;此外,富东英等^[33]研究发现,长期施入土壤中的化肥氮主要向酰胺态氮转化,秸秆氮向氨基糖态氮转化最多,有机肥氮则向氨基酸态氮转化率最大。众多研究表明^[32-35],土壤酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮是土壤矿化氮的主要来源,对土壤

氮素的保持和有效性起到了重要作用。总之, SN100 处理对酸解氨基糖态氮及其占酸解总有机氮比例提升效应最优,但其含量及其占酸解总结总有机氮比例较低,而 BN100 处理对土壤酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮含量及其占酸解总有机氮比例提升效应最优。

4 小 结

在 0~30 cm 各土层,有机氮各形态的分布趋势为酸解氨基酸态氮>酸解氨态氮>酸解未知态氮>酸解氨基糖态氮;不同氮水平下秸秆、生物质炭添加能显著改变土壤酸解有机氮组分含量及其占酸解总有机氮比例,其中 BN100 处理对土壤酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮含量及其占酸解总有机氮提升效应最优,可有效提升土壤供氮能力,可筛选为该区最佳施肥方式。但酸解氨基糖态氮含量随土层加深的变化趋势与其他酸解有机氮组分相反,其原因尚不明确;生物质炭、秸秆配施氮肥对酸解未知态氮含量的影响及其供氮能力还需进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 王颖颖,李文全,周华坤,等.高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化[J].生态环境学报,2016,25(1):30-35.

[2] 王茂成.木质素降解真菌的筛选鉴定及相关酶活性研究[D].重庆:西南大学,2013.

[3] 马芳霞,王忆芸,燕鹏,等.秸秆还田对长期连作棉田土壤有机氮组分的影响[J].生态环境学报,2018,27(8):1459-1465.

[4] 党亚爱,王国栋,李世清.黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征[J].中国农业科学,2011,44(24):5021-5030.

[5] 李世清,李生秀,邵明安,等.半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响[J].中国农业科学,2004,37(6):859-864.

[6] 张电学,韩志卿,吴素霞,等.不同施肥制度对褐土有机氮及其组分的影响[J].华北农学报,2017,32(3):201-206.

[7] 王克鹏,张仁陟,索东让.长期施肥对河西灌漠土有机氮组分及剖面分布的影响[J].土壤通报,2009,40(5):1092-1097.

[8] 李彤,王梓廷,刘露,等.保护性耕作对西北旱区土壤微生物空间分布及土壤理化性质的影响[J].中国农业科学,2017,50(5):859-870.

[9] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[C]//Black C A. Methods of Soil Analysis. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1965: 1238-1255.

[10] Kwon H Y, Hudson R J M, Mulvaney R L. Characterization of the organic nitrogen fraction determined by the Illinois soil nitrogen test [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73 (3): 1033-1043.

[11] Khan S U. Nitrogen fractions in a Gray wooded soil as influenced by long-term cropping systems and fertilizers [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1971, 51(3):431-437.

[12] 徐阳春,沈其荣,菲泽圣.长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响[J].中国农业科学,2002,35(4):403-409.

[13] 张玉树,丁洪,王飞,等.长期施用不同肥料的土壤有机氮组分变化特征[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1981-1986.

[14] Smith S J, Young L B. Distribution of nitrogen forms in virgin and cultivated soils [J]. Soil Science, 1975, 120(5):354-360.

[15] 李树山,杨俊诚,姜慧敏,等.有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布[J].农业环境科学学报,2013,(6):1185-1193.

[16] 韦至激,方泽涛,李伏生,等.不同灌溉模式和施氮量下稻田 N₂O 排放与有机氮组分的关系[J].江苏农业科学,2018,46(9):246-251.

[17] 贾倩,廖世鹏,卜容燕,等.不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1547-1558.

[18] 任金凤,周桦,马强,等.长期施肥对潮棕壤有机氮组分的影响[J].应用生态学报,2017,28(5):1661-1667.

[19] Huang G B, Zhang R Z, Li G D, et al. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems [J]. Field Crops Research, 2008, 107(1):43-55.

[20] 张水清,林杉,郭斗斗,等.长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系[J].中国土壤与肥料,2017,(6):23-29.

[21] Blanco-Canqui H, Lal R. Crop Residue removal impacts on soil productivity and environmental quality[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2009, 28(3):139-163.

[22] Peng Z, Wei T, Li Y, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C:N ratio in a semiarid region of China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 153:28-35.

[23] Guo J H, Chen X Y, Liu M Q, et al. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil [J]. Soils, 2007,39(5):787-793.

[24] Marcoa R, Johannes L, Juan R, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions [J]. Biology & Fertility of Soils, 2007, 43(6):699-708.

[25] 宋敏,齐鹏,蔡立群,等.不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究[J].中国生态农业学报,2016,24(10):1185-1195.

[26] 何绪生,张树清,余雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J].中国农学通报,2011,27(15):16-25.

[27] 申晓晖.吉林省主要旱田土壤有机氮组份的研究[J].吉林农业大学学报,1990,12(3):43-50,120.

[28] 黄东迈.有机肥无机肥对提高土壤氮素肥力的作用及其配合施用[J].土壤通报,1985,(5):197-201.

[29] 于洪飞,张恩平.长期施肥对菜田土壤有机氮组分的影响[J].辽宁农业科学,2014,(1):13-16.

[30] 党亚爱,王立青,张敏.黄土高原南北主要类型土壤氮组分相关关系研究[J].土壤,2015,47(3):490-495.

[31] 李娇,信秀丽,朱安宁,等.长期施用化肥和有机肥下潮土干团聚体有机氮组分特征[J].土壤学报,2018(6):1-10.

[32] 郝小雨,马星竹,高中超,等.长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征[J].中国农业科学,2015,48(23):4707-4716.

[33] 富东英,田秀平,薛菁芳,等.长期施肥与耕作对白浆土有机态氮组分的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(6):1127-1131.

[34] 丛耀辉,张玉玲,张玉龙,等.黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献[J].土壤学报,2016,53(2):457-467.

[35] 沈其荣,史瑞和.不同土壤有机氮的化学组分及其有效性的研究[J].土壤通报,1990,(2):54-57.