

田间老化生物质炭对黄土高原旱作农田土壤有机氮组分的影响

潘占东^{1,2}, 蔡雪梅², 蔡立群^{1,2,3}, 董博⁴, 武均^{2,3}, 张仁陟^{2,3}

(1 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070; 2 甘肃农业大学干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃兰州 730070; 3 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070; 4 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃兰州 730070)

摘要:【目的】研究田间老化生物质炭对土壤有机氮组分及微生物生物量碳氮的影响, 为生物质炭在陇中黄土高原地区培肥改良土壤、提高氮肥利用效率方面的应用提供科学依据。【方法】2015 年在甘肃农业大学旱作农业综合试验站开展定位试验, 试验包含 6 个玉米秸秆生物质炭添加量: 0、10、20、30、40、50 t/hm², 依次记为 CK、BC1、BC2、BC3、BC4、BC5 处理。2020 年小麦收获后 (第 5 茬), 调查了春小麦产量, 采集 0—5、5—10 和 10—30 cm 土层土壤, 用 Bremner 法测定有机氮组分及微生物生物量碳、氮含量。【结果】施用生物质炭 5 年后依然能显著提高春小麦产量, 以 BC3 处理春小麦产量最高, 较 CK 显著提高了 24.76%。与 CK 相比, 生物质炭处理土壤全氮 (TN) 和微生物生物量碳 (MBC) 分别显著增加 6.55%~10.94%、68.63%~139.74%, 微生物生物量碳氮比 (B_c/B_n) 增加 10.60%~202.44%。有机氮各组分占比表现为: 氨基酸态氮 (AAN)>非酸解氮 (AIN)>酸解铵态氮 (AMN)>酸解未知态氮 (UAN)>氨基糖态氮 (ASN), 分别占土壤全氮的 27.46%~45.13%、15.47%~31.14%、19.00%~28.66%、1.59%~18.54% 和 2.76%~8.86%。其中三个酸解氮含量在 5 个生物质炭处理土壤中均表现为: AAN>AMN>ASN, BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理土壤 AAN 和 ASN 含量分别较 CK 显著提高 17.58%~81.51% 和 43.60%~107.55%, BC2 和 BC3 处理土壤 AMN 含量显著提高 15.46%~28.95%。BC3 处理土壤的酸解总氮 (TAN)、AMN 和 ASN 含量最高, AIN 含量最低。【结论】土壤全氮及微生物生物量碳是影响有机氮组分差异的主要因素。10~50 t/hm² 施用量下, 生物质炭均显著提高了土壤全氮及微生物生物量碳, 施用生物质炭 30 t/hm² 提高土壤酸解总氮、酸解铵态氮和氨基糖态氮含量的效果最显著, 土壤供氮能力最强, 春小麦产量最高。因此, 在黄土高原旱作农业区, 合理的生物质炭用量可长期提高土壤供氮能力。

关键词: 老化生物质炭; 黄土高原; 旱作农田; 有机氮组分; 微生物生物量碳氮

Effects of field-aged biochar on soil organic nitrogen fractions in dry farmland of Loess Plateau

PAN Zhan-dong^{1,2}, CAI Xue-mei², CAI Li-qun^{1,2,3}, DONG Bo⁴, WU Jun^{2,3}, ZHANG Ren-zhi^{2,3}

(1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2 State Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3 College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4 Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: 【Objectives】The effects of field-aged biochar on soil organic nitrogen components and microbial biomass carbon and nitrogen were studied to provide scientific basis for improving soil fertility and nitrogen use efficiency in the Loess Plateau of central Gansu. 【Methods】The biochar experiment was carried out in Dry Farming Comprehensive Experimental Station of Gansu Agricultural University in 2015, six levels of corn straw biochar addition treatments were setup, as: 0 t/hm², 10 t/hm², 20 t/hm², 30 t/hm², 40 t/hm², 50 t/hm², and denoted as

收稿日期: 2023-05-08 接受日期: 2023-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD190070403-04); 定西市科技计划项目 (DX2023BR22); 甘肃农业大学青年导师基金项目 (201703-DAN-QNDS)。

联系方式: 潘占东 E-mail: panzdgs@163.com

CK, BC1, BC2, BC3, BC4, and BC5, respectively. After 5 years of continuous planting of wheat harvest in 2020, soil samples were collected in 0–5 cm, 5–10 cm and 10–30 cm soil layers for the determination of the contents of organic nitrogen components, microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) by Bremner method. The variation in soil organic nitrogen components, and MBC and MBN contents caused by biochar treatment were discussed. **【 Results 】** All the biochar treatments significantly increased the yields of spring wheat, BC3 was recorded the highest yield which was 24.76% higher than that of CK. Compared with CK, biochar treatments significantly increased soil total N and MBC by 6.55%–10.94% and 68.63%–139.7%, enhanced the MBC to MBN ratio by 10.60%–202.44% consequently. The organic nitrogen was divided into five components: ammonia acid nitrogen (AAN), non-acidolysable nitrogen (AIN), acidolysable ammonia nitrogen (AMN), unknown-acidolysable nitrogen (UAN), and amino sugar nitrogen (ASN), accounting for 27.46%–45.13%, 15.47%–31.14%, 19.00%–28.66%, 1.59%–18.54%, and 2.76%–8.86% of soil total nitrogen, respectively. The contents of the three acid hydrolysis nitrogen components in all the biochar treatments were in order of AAN>AMN>ASN. Compared with CK, the AAN and ASN contents in BC2, BC3, BC4 and BC5 treatments were significantly increased by 17.58%–81.51% and 43.60%–107.55%, AMN content in BC2 and BC3 treatments was significantly increased by 15.46%–28.95%. Among the treatments, The highest total acid-hydrolyzed N, AMN and ASN, and the least AIN was obtained in BC3 treatment. **【 Conclusions 】** Soil total nitrogen and microbial biomass carbon are the main factors affecting organic nitrogen components. Application of 10–50 t/hm² of biochar could significantly increase soil total N and microbiomass carbon. Application of biochar 30 t/hm² is the most effective in increasing soil total acidolysable nitrogen, amino sugar nitrogen, and ammonium nitrogen, thus the spring yield is the highest as result of the highest soil nitrogen supply capacity. Therefore, suitable biochar application rate could increase the soil nitrogen supply capacity in the long-run in Loess Plateau.

Key words: aged biochar; Loess Plateau; dry farmland; organic nitrogen fractions; microbial biomass carbon and nitrogen

土壤是植物生长的重要载体^[1], 土壤氮素也是限制作物生长的主要因素之一^[2–4]。土壤有机态氮是土壤中氮素的主要存在形式^[5–6], 土壤有机态氮的化学形态和存在特征, 以及微生物生物量是影响土壤氮素有效性的重要因子, 也是植物生长所需养分的重要来源^[6–7]。生物质炭是在无氧或低氧条件下, 经热解后产生的高度芳香化的含碳固体物质, 具有比表面积大、孔隙度丰富、稳定性和吸附性较高的物理性质^[8], 因此, 生物质炭作为一种新型土壤培肥改良材料, 成为研究的热点^[9]。研究发现, 土壤中添加生物质炭后会增强养分的持久性供应能力^[10]。因此, 施用生物质炭是提高黄土高原旱作农业区土壤肥力和养分供应能力的有效措施。

目前, 土壤有机氮组分研究主要是采用 Bremner^[11]提出的酸解方法, 分为酸解性和非酸解性氮两组, 酸解氮占比高于非酸解氮。施肥措施或土壤类型影响着有机氮含量、组分及比例, 巨晓棠等^[12]研究表明, 长期施肥显著提高了土壤全氮、酸解性氮、非酸解性氮含量。郝小雨等^[3]研究认为, 长期单施有机肥和有机无机肥配施显著增加了酸解性氮含量, 对非

酸解性氮无显著影响。对土壤酸解有机氮组分的研究一般认为其分配比例为: 氨基酸态氮>酸解铵态氮>酸解未知态氮>氨基糖态氮^[13–15]。沈其荣等^[16]研究发现, 氨基酸态氮对矿化氮的贡献最大, 其次是酸解未知态氮; 也有研究认为, 土壤活性氮的主要贡献因子是氨基酸态氮、酸解未知态氮和酸解铵态氮^[6, 17–18]。由于生物质炭材料和土壤类型的差异, 添加生物质炭对土壤有机氮组分和微生物生物量碳氮含量的影响结果存在较大差异。李玥等^[19]研究表明, 添加生物质炭能够提高土壤酸解铵态氮、酸解未知态氮和非酸解氮的总量; 龙泽华等^[20]研究发现, 秸秆炭化还田后能够显著增加土壤酸解铵态氮、氨基糖态氮和非酸解氮含量。有研究表明, 添加 4.5 t/hm² 的小麦秸秆生物质炭显著提升了土壤微生物生物量碳含量^[21]。添加果树主干或枝条生物质炭 2 年后, 土壤微生物生物量碳氮含量均随着生物质炭添加量的增加呈先增加后降低趋势, 添加量超过 40 或 60 t/hm² 时, 其含量开始下降^[9]。也有研究^[22–23]发现, 在红壤油菜、红薯轮作土壤中添加 2.5~40.0 t/hm² 小麦秸秆生物质炭, 第 3 年和第 4 年土壤微生物生物量碳氮

含量随着生物质炭添加量的增加而增加, 且高添加量能够显著增加二者含量。也有研究^[24]表明, 施用 30 t/hm² 的生物质炭能够提高土壤中有机碳和全氮的封存量。因此, 我们进行定位试验, 研究单施生物质炭经田间自然老化后, 对陇中黄土高原旱作农业区土壤有机氮组分及微生物生物量碳氮含量的影响, 明确不同用量生物质炭处理下土壤氮素的转化特征和供肥潜力, 为陇中黄土高原地区制定科学的土壤培肥改良措施、提高氮肥利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期定位试验位于甘肃农业大学旱农综合试验站(甘肃省定西市安定区李家堡镇)。该地区属于黄土高原丘陵沟壑区, 也是典型的雨养旱作农业区, 平均海拔为 2000 m。近年来年均降水量为 390.9 mm, 主要集中在 7—9 月份, 冬季和春季较为干旱, 年均蒸发量 1531 mm; 年均气温约 6.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温约 2239.1℃, 每年平均日照时间约为 2476.6 h, 太阳辐射约 592.9 kJ/cm²; 无霜期约为 140 天。试验地土壤为黄绵土, 土壤质地均匀, 储水性能良好。该地区土壤主要理化指标为: pH 为 8.36, 土壤平均容重为 1.17 g/cm³, 凋萎含水率 73.00 g/kg, 饱和含水率 219.00 g/kg, 有机质含量 12.01 g/kg, 全氮 0.76 g/kg, 全磷 (P₂O₅) 1.77 g/kg。

1.2 试验设计

试验布设于 2015 年, 为单因素随机区组设计, 共设 6 个生物质炭添加水平: CK (0 t/hm²)、BC1 (10 t/hm²)、BC2 (20 t/hm²)、BC3 (30 t/hm²)、BC4 (40 t/hm²)、BC5 (50 t/hm²), 每个处理 3 次重复, 共 18 个小区, 小区面积 16.8 m² (2.8 m×6 m); 生物质炭添加量均以玉米秸秆经炭化后自然风干的重量计算。2015 年 3 月将生物质炭按照试验设计量一次性均匀撒入各小区后, 用旋耕机将其旋入耕层土壤中 (20 cm 左右)。供试小麦品种为“定西 40 号”, 每年 3 月播种, 7 月份收获, 播种量为 187.5 kg/hm², 行距为 20 cm, 播种深度 7 cm。各处理每年播种前施尿素 (N 46%) 228 kg/hm², 过磷酸钙 (P₂O₅ 14%) 750 kg/hm², 每年小麦播种前和收获后按照当地常规耕作方式翻耕 (深约 20 cm)。

供试生物质炭来自辽宁金和福农业科技股份有限公司, 为玉米秸秆在 500℃ 缺氧条件下干馏制

得, 可将 35% 的生物质转化为生物质炭。生物质炭基本性质: pH 为 9.21, 阳离子交换量 (CEC) 为 25.21 cmol/kg, 比表面积为 11.3 m²/g, 可溶性有机碳含量为 432.37 mg/kg, 自然风干含水率 50.70 g/kg, C 含量 53.28%, N 含量 1.04%, P 含量 0.26%, K 含量 0.51%, Ca 含量 0.8%、Mg 含量 0.47%, 灰分含量 35.64%。

1.3 土壤样品采集与分析

土壤样品采集于 2020 年 8 月小麦收获后, 采用 5 点法分别采集 0—5、5—10 和 10—30 cm 土壤样品, 将每层所采集的样品混匀后采用四分法将其分为两份, 一份自然风干过 0.25 和 0.15 mm 筛后保存于密封袋中; 另一份鲜样过 2 mm 筛后装入无菌袋保存于 4℃ 冰箱中。

全氮 (total nitrogen, TN) 采用 H₂SO₄ 消煮, 全自动凯氏定氮仪 (SKD-3000, PEIOU) 测定^[25]; 土壤微生物生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 和微生物生物量氮 (microbial biomass nitrogen, MBN) 采用氯仿熏蒸, 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提 (土水比 1:4), 碳氮联合分析仪 (Jena multi N/C 2100s, Germany) 测定^[26]。土壤有机氮组分采用 Bremner 法测定^[11], 其中土壤酸解总氮 (total acidolysable nitrogen, TAN) 采用 6 mol/L HCl 酸解-凯氏定氮法测定; 酸解铵态氮 (acidolysable ammonia nitrogen, AMN) 采用 3.5% MgO 蒸馏法测定; 酸解铵态氮+氨基糖态氮 (amino sugar nitrogen, ASN) 采用磷酸-硼砂 (pH=11.2) 缓冲液蒸馏法测定; 氨基酸态氮 (amino acid nitrogen, AAN) 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 (unknown-acidolysable nitrogen, UAN)、非酸解氮 (non-acidolysable nitrogen, AIN) 和氨基糖态氮采用差减法求得, $\text{UAN}=\text{TAN}-\text{AMN}-\text{AAN}-\text{ASN}$; $\text{AIN}=\text{TN}-\text{TAN}$; $\text{ASN}=(\text{AMN}+\text{ASN})-\text{AMN}$

1.4 数据处理

数据整理采用 Excel 2016, 采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 图表绘制采用 SigmaPlot 12.5。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对土壤全氮及小麦产量的影响

如图 1 所示, 0—30 cm 土层全氮含量的变化范围为 0.83~1.07 g/kg, 随着生物质炭添加量的增加, 不同土层全氮含量均增加, 但随着土层的加深, 土

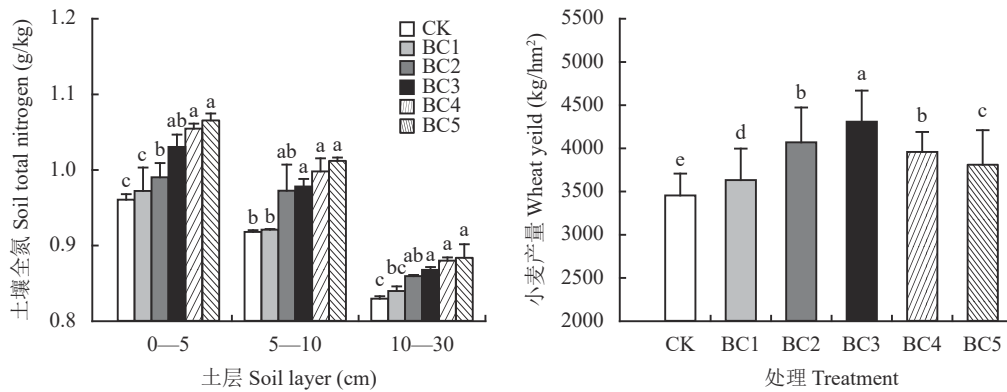


图 1 施用不同量生物质炭土壤全氮含量及春小麦产量

Fig. 1 Soil total nitrogen content and spring wheat yield as affected by biochar application rate

注: CK、BC1、BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理生物质炭施用量分别为 0、10、20、30、40、50 t/hm²。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The biochar application amount in CK, BC1, BC2, BC3, BC4, and BC5 treatment is 0, 10, 20, 30, 40, and 50 t/hm², respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

壤全氮含量均下降。在 0—5 cm 土层中, BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理土壤全氮含量比 CK 分别增加 3.11%、7.28%、9.81% 和 10.94%, 在这 4 个处理间, BC2 与 BC4、BC5 差异显著, 其他处理间均无显著差异; 在 5—10 cm 土层中, BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理土壤全氮含量较 CK 分别增加 5.94%、6.55%、8.75% 和 10.25%, 4 个处理间均无显著差异, BC3、BC4、BC5 处理与 BC1、CK 差异显著; 在 10—30 cm 土层中, BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理土壤全氮含量较 CK 分别增加 3.60%、4.60%、6.06% 和 6.52%, 4 个处理间均无显著差异, BC1 与 BC3、BC4、BC5 处理间差异显著。在 BC1 处理时, 3 个土层土壤全氮含量与 CK 均无显著差异。

添加生物质炭显著提高小麦产量, 随着生物质炭添加量的增加, 小麦产量呈先增加后下降的趋势。BC1、BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理较 CK 小麦产量分别增加了 5.17%、17.86%、24.76%、14.59% 和 10.28%, 其中 BC3 处理时, 小麦产量最高。

2.2 生物质炭对土壤有机氮组分的影响

如图 2 所示, 添加生物质炭对土壤酸解总氮和非酸解氮有一定影响, 0—30 cm 土壤酸解总氮、非酸解氮含量的变化范围分别为 0.62~0.78、0.13~0.33 g/kg, 分别占土壤全氮含量的 66.07%~86.87%、13.13%~33.93%。随着生物质炭添加量的增加, 各土层土壤酸解总氮含量先增加后下降, 土壤非酸解氮含量先下降后增加, 二者的含量均随着土层深度的增加而下降。土壤酸解总氮含量在 0—5 cm 土层中除 BC1 处理与较 CK 差异不显著外, 其他处理与

CK 均差异显著, BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理较 CK 分别增加 12.06%、15.42%、9.56% 和 8.57%, 在这 4 个处理中, BC3 处理与 BC4、BC5 处理间差异显著; 在 5—10 cm 土层中, BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理较 CK 分别增加 13.85%、14.69%、10.99% 和 7.50%, 4 个处理间 BC2、BC3 与 BC5 差异显著, 其中 BC2、BC3 和 BC4 处理较 BC1 处理分别增加 9.31%、10.11% 和 6.55%, 其他处理间均无显著差异; 在 10—30 cm 土层中, BC1、BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理较 CK 分别增加 5.66%、14.98%、17.98%、12.66% 和 5.79%, 其中 BC2、BC3、BC4 处理较 BC1 和 BC5 处理分别增加 8.81%、11.66%、6.62% 和 8.68%、11.53%、6.49%, BC3 较 BC4 增加 4.73%, 其他处理间差异不显著。土壤非酸解氮含量在 0—5 和 5—10 cm 土层中生物质炭处理与 CK 均无显著差异, 其中在 0—5 cm 土层中 BC5 处理较 BC2 处理增加 42.34%, 在 5—10 cm 土层中 BC5 处理较 BC2、BC3 处理均增加 36.07%, 其他处理间均无显著差异; 在 10—30 cm 土层中, BC2、BC3 处理较 CK 分别下降 30.43%、35.38%, BC2、BC3 较 BC1 和 BC5 处理分别下降 20.93%、26.56% 和 36.00%、40.56%, BC3 较 BC4 处理下降 25.21%, BC1 较 BC5 处理下降 19.06%, 其他处理间差异不显著。

土壤酸解氮组分随着生物质炭添加量和土层深度的增加变化明显。0—30 cm 土壤氨基酸态氮、酸解未知态氮、氨基糖态氮和酸解铵态氮含量的变化范围分别为 0.24~0.48、0.05~0.21、0.05~0.09 和 0.18~0.27 g/kg, 分别占酸解总氮的 34.48%~67.58%、

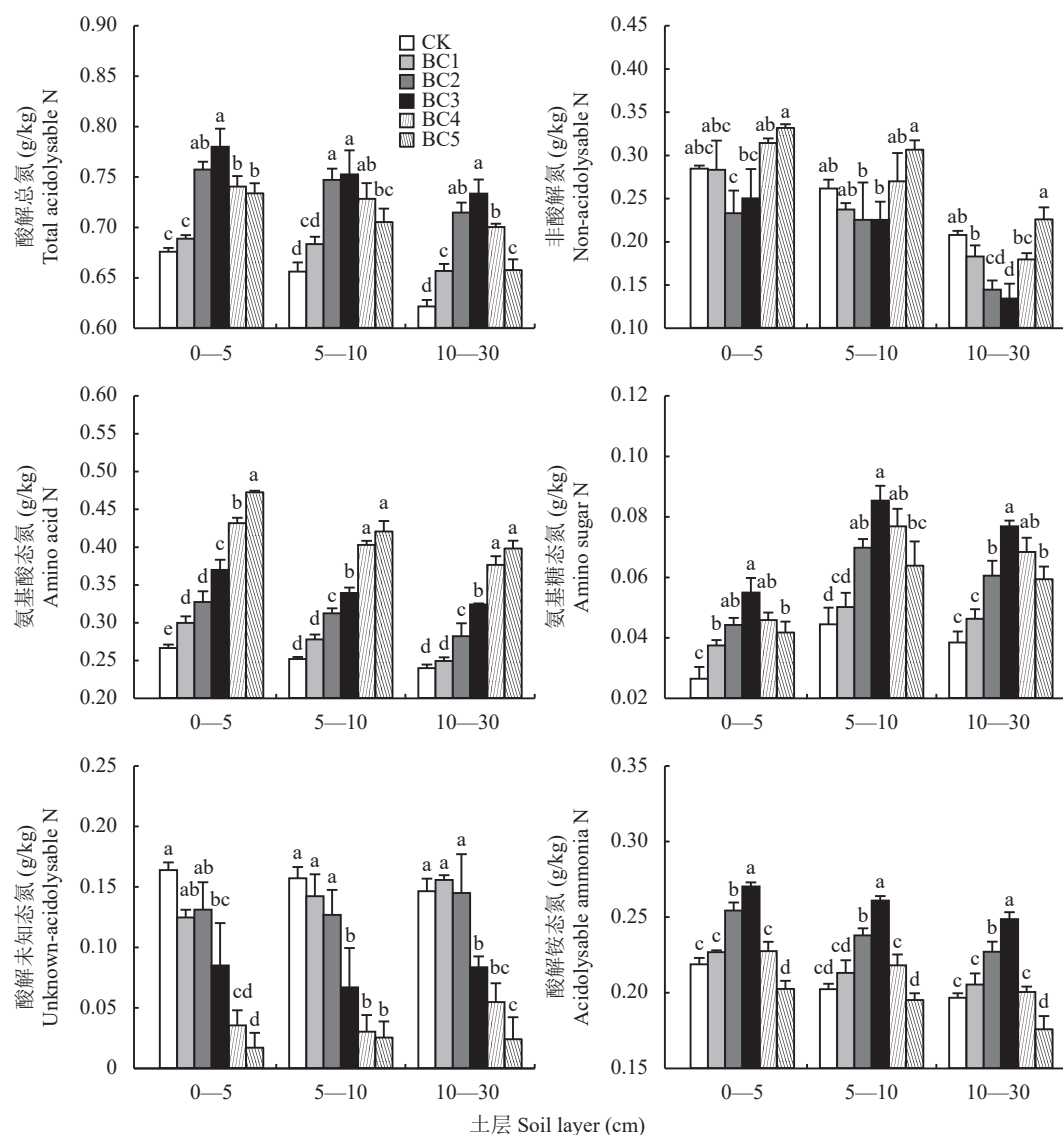


图 2 施用不同量生物质炭土壤有机氮各组分含量

Fig. 2 Contents of organic nitrogen components in soils applied with different amounts of biochar

注: CK、BC1、BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理生物质炭施用量分别为 0、10、20、30、40、50 t/hm²。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: The biochar application amount in CK, BC1, BC2, BC3, BC4, and BC5 treatment is 0, 10, 20, 30, 40, and 50 t/hm², respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

4.18%~33.78%、3.19%~12.37% 和 24.09%~36.90%。各土层土壤氨基酸态氮含量均随着生物质炭添加量的增加而增加, 且随着土层深度的增加均下降; 在 0—5 和 5—10 cm 土层中, BC1、BC2、BC3、BC4、BC5 处理较 CK 分别增加 12.41%、22.80%、38.70%、61.87%、81.51% 和 10.27%、24.00%、34.67%、59.86%、77.27%, 除 0—5 cm 土层中 BC1 与 BC2 间差异不显著外, 其他处理间均差异显著 ($P < 0.05$); 在 10—30 cm 土层中, BC1 处理较 CK 差异不显著, BC2、BC3、BC4、BC5 处理较 CK 分别增加 17.58%、35.08%、56.92%、71.04%,

4 个处理间均差异显著 ($P < 0.05$)。土壤酸解未知态氮含量在 0—5 cm 土层中, BC3 处理较 CK 下降 48.14%, BC4 处理较 CK、BC1、BC2 分别下降 78.34%、71.53%、72.94%, BC5 处理较 CK、BC1、BC2、BC3 分别下降 89.57%、86.29%、86.97%、79.88%, 其他处理间均无显著差异; 在 5—10 cm 土层中, BC3 处理较 CK、BC1、BC2 分别下降 57.42%、52.99%、47.42%, BC4 处理较 CK、BC1、BC2 分别下降 62.57%、64.80%、62.21%, BC5 处理较 CK、BC1、BC2 分别下降 83.77%、82.08%、79.89%, 其他处理间均无显著差异; 在 10—30 cm 土层中, BC3

处理较 CK、BC1、BC2 分别下降 42.90%、46.31%、42.34%，BC4 处理较 CK、BC1、BC2 分别下降 62.57%、64.80%、62.21%，BC5 处理较 CK、BC1、BC2、BC3、BC4 分别下降 83.54%、84.52%、83.38%、71.17%、56.02%，其他处理间均无显著差异。土壤氨基糖态氮含量随着生物质炭添加量和土层深度的增加均呈先增加后下降趋势，各土层在 BC3 处理时其含量均为最高；在 0—5 cm 土层中，BC1、BC2、BC3、BC4、BC5 处理较 CK 分别增加 41.51%、67.17%、107.55%、73.21%、57.74%，处理间，BC3 较 BC1、BC5 分别增加 46.67%、31.58%，其他处理间均无显著差异；在 5—10 cm 土层中，BC2、BC3、BC4、BC5 处理较 CK 分别增加 56.85%、91.91%、72.81%、43.60%，BC2、BC3、BC4 处理较 BC1 处理分别增加 39.04%、70.12%、53.19%，BC3 处理较 BC5 处理增加 33.65%，其他处理间均无显著差异；在 10—30 cm 土层中，BC2、BC3、BC4、BC5 处理较 CK 和 BC1 分别增加 57.40%、99.74%、77.66%、54.29% 和 30.89%、66.09%、47.73%、28.29%，BC3 处理较 BC2 和 BC5 处理分别增加 26.90%、29.46%，其他处理间差异不显著。土壤酸解铵态氮含量随着生物质炭添加量的增加先增加后下降，随着土层深度的增加，各处理其含量均减小；在 0—5 cm 土层中，BC2 和 BC3 处理较 CK、BC1、BC4、BC5 分别增加 16.27%、12.17%、11.82%、25.63% 和 23.54%、19.18%、18.81%、33.48%，BC3 较 BC2 处理增加 6.25%，BC5 处理较 CK、BC1、BC4 分别下降 8.05%、12.00%、12.35%，其他处理间差异不显著；在 5—10 cm 土层中，BC2 和 BC3 处理较 CK、BC1、BC4、BC5 分别增加 17.54%、11.64%、9.08%、21.88% 和 28.95%、22.48%、19.67%、33.71%，BC3 较 BC2 处理增加 9.71%，BC5 较 BC4 处理下降 10.50%，其他处理间差异不显著；在 10—30 cm 土层中，BC2 和 BC3 处理较 CK、BC1、BC4、BC5 分别增加 15.46%、10.56%、13.27%、29.11% 和 26.44%、21.08%、24.04%、41.39%，BC3 较 BC2 处理增加 9.51%，BC5 处理较 CK、BC1、BC4 分别下降 11.82%、16.77%、13.99%，其他处理间差异不显著 ($P<0.05$)。

如表 1 所示，在各土层中，随着生物质炭添加量的增加，氨基酸态氮占全氮的比例 (27.46%~45.13%) 增加，BC5 处理较 CK 增加约 14.09%~16.58%；酸解未知态氮占全氮的比例 (1.59%~18.54%) 总体呈下降趋势，BC5 处理较 CK 下降约

14.61%~15.47%；酸解铵态氮 (19.00%~28.66%) 和氨基糖态氮 (2.76%~8.86%) 占全氮的比例均呈先增加后下降趋势，BC3 处理时二者占比均为最高，较 CK 分别增加约 3.45%~4.95%、2.57%~4.22%；非酸解氮在全氮中的比例 (15.47%~31.14%) 则呈先下降后增加趋势。各有机氮组分占全氮的比例在不同土层之间的差异不明显，整体表现为氨基酸态氮>非酸解氮>酸解铵态氮>酸解未知态氮>氨基糖态氮。

2.3 生物质炭对土壤微生物生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 的影响

如图 3 所示，添加不同量生物质炭处理下 0—5、5—10、10—30 cm 土层 MBC 和 MBN 含量的变化范围分别为 92.71~176.05、100.95~170.24、64.66~155.02 和 19.98~29.94、22.50~30.99、16.30~25.57 mg/kg，总体表现为：5—10 cm>0—5 cm>10—30 cm，但在 BC4 处理时，MBC 含量表现为 0—5 cm>5—10 cm>10—30 cm，BC5 处理时，MBC、MBN 含量均表现为 0—5 cm>5—10 cm>10—30 cm。MBC 随着生物质炭添加量的增加，0—5 cm 土层含量均呈增加趋势，BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理较 CK 分别增加 28.51%、33.56%、44.59% 和 89.89%，BC3、BC4 和 BC5 处理较 BC1 处理分别增加 28.71%、39.35% 和 83.00%，BC5 处理较 BC2 增加 47.76%，其他处理间差异均不显著；在 5—10 cm 土层，随着生物质炭添加量的增加，MBC 含量呈先增加后降低再增加趋势，BC1、BC2、BC3、BC5 处理较 CK 和 BC4 分别增加 29.13%、27.56%、55.52%、68.63% 和 20.21%、18.75%、44.78%、56.98%，BC3 和 BC5 处理较 BC1、BC2 分别增加 20.43%、21.92% 和 30.59%、32.19%，其他处理间差异不显著；在 10—30 cm 土层，BC1、BC2、BC3 和 BC5 处理较 CK 分别增加 41.27%、47.05%、58.65% 和 139.74%，BC5 处理较 BC1、BC2、BC3 和 BC4 分别增加 69.71%、63.03%、51.11% 和 82.90%，其他处理间差异不显著。MBN 含量随着生物质炭添加量的增加，0—5 cm 土层呈先降低后升高趋势，BC4、BC5 处理较 BC2 分别增加 44.56%、49.87%，BC5 较 BC3 增加 32.18%，其他处理间差异不显著；在 5—10 和 10—30 cm 土层中，随着生物质炭添加量的增加，MBN 含量均呈先下降后上升再下降的趋势，在 5—10 cm 土层中，BC4 较 BC2 增加 37.72%，其他处理间均无显著差异；在 10—30 cm 土层中，

表 1 土壤有机氮各组分占土壤全氮的比例 (%)

Table 1 Proportion of soil organic nitrogen components in soil total nitrogen

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	氨基酸态氮 Amino acid nitrogen	酸解铵态氮 Acidolysable ammonia nitrogen	酸解未知态氮 Unknown-acidolysable nitrogen	氨基糖态氮 Amino sugar nitrogen	非酸解氮 Non-acidolysable nitrogen
0—5	CK	27.77±1.09 d	22.79±0.95 bc	17.06±0.97 a	2.76±0.67 c	29.63±0.26 ab
	BC1	30.95±3.13 cd	23.37±1.11 b	12.81±0.52 ab	3.88±0.48 b	28.99±4.27 abc
	BC2	33.03±1.35 bc	25.71±1.41 a	13.33±4.29 ab	4.47±0.39 ab	23.45±3.76 c
	BC3	35.89±1.95 b	26.23±0.37 a	8.35±6.08 bc	5.32±0.65 a	24.20±4.98 bc
	BC4	40.93±1.32 a	21.57±1.01 c	3.36±2.00 cd	4.35±0.43 ab	29.80±1.09 ab
	BC5	44.34±0.71 a	19.00±0.76 d	1.59±1.98 d	3.92±0.59 b	31.14±0.84 a
5—10	CK	27.46±0.62 d	22.05±0.57 bc	17.12±1.83 a	4.85±1.03 d	28.51±1.85 ab
	BC1	30.18±1.26 cd	23.13±1.59 b	15.44±3.40 a	5.45±0.89 cd	25.79±1.38 ab
	BC2	32.20±1.92 bc	24.55±2.17 ab	13.16±4.10 a	7.18±0.08 abc	22.91±6.49 b
	BC3	34.72±1.55 b	26.68±0.11 a	6.82±5.77 b	8.72±0.80 a	23.06±3.81 b
	BC4	40.38±1.43 a	21.88±1.85 bc	3.05±2.46 b	7.73±1.2 ab	26.95±4.87 ab
	BC5	41.56±2.09 a	19.29±0.88 c	2.51±2.25 b	6.32±1.42 bcd	30.31±1.94 a
10—30	CK	28.92±0.81 d	23.71±0.68 c	17.64±2.14 a	4.64±0.79 d	25.08±1.05 ab
	BC1	29.70±1.08 cd	24.47±1.80 bc	18.54±0.69 a	5.52±0.71 cd	21.77±2.41 bc
	BC2	32.82±3.42 c	26.41±1.28 ab	16.87±6.45 a	7.06±0.99 b	16.83±2.13 de
	BC3	37.36±0.46 b	28.66±1.08 a	9.65±1.85 b	8.86±0.42 a	15.47±3.35 e
	BC4	42.78±1.93 a	22.78±0.55 c	6.24±3.12 bc	7.78±0.96 ab	20.41±1.25 cd
	BC5	45.13±3.06 a	19.92±1.92 d	2.66±3.42 c	6.74±0.93b c	25.55±2.09 a

注: CK、BC1、BC2、BC3、BC4和BC5处理生物质炭施用量分别为0、10、20、30、40、50 t/hm²。同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The biochar application amount in CK, BC1, BC2, BC3, BC4, and BC5 treatment is 0, 10, 20, 30, 40, and 50 t/hm², respectively. Different lowercase letters after data in a column represent significant difference among treatments ($P<0.05$).

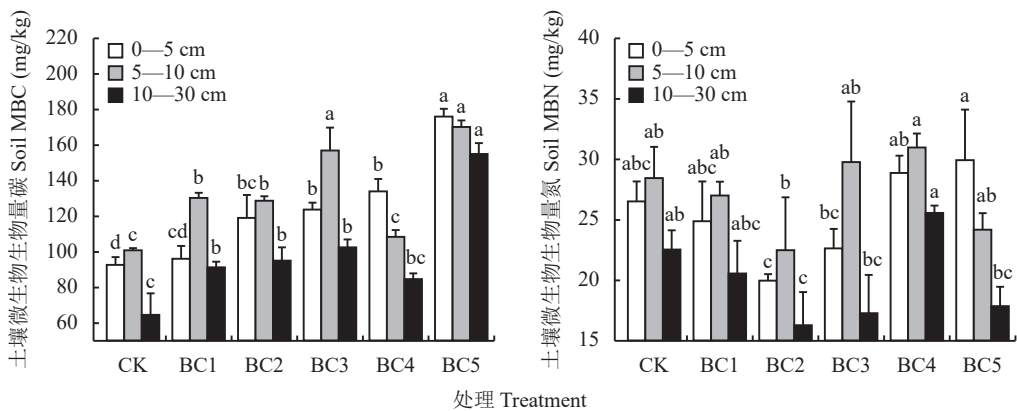


图 3 施用不同量生物质炭土壤微生物生物量碳、氮含量

Fig. 3 Soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) content as affected by biochar application rate

注: CK、BC1、BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理生物质炭施用量分别为 0、10、20、30、40、50 t/hm²。柱上不同小写字母代表同一土层处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The biochar application amount in CK, BC1, BC2, BC3, BC4, and BC5 treatment is 0, 10, 20, 30, 40, and 50 t/hm², respectively. Different lowercase letters above the bars represent significant difference among treatments in the same soil layer ($P<0.05$).

BC2 较 CK、BC4 分别降低 27.72%、36.28%，BC4 较 BC3、BC5 分别增加 47.93%、43.12%，其他处理间差异不显著 ($P<0.05$)。

如表 2 所示，添加生物质炭总体可提高 0—30 cm 土层 B_c/B_N 的比值，其变化范围为 2.87~8.68。随着生物质炭添加量的增加， B_c/B_N 的比值均表现为先增加后下降再增加趋势，0—5 cm 土层中，BC2 处理时其比值最高，为 5.96，而 5—10 和 10—30 cm 土层中，BC5 处理时其比值均为最高，分别为 7.04 和 8.68；生物质炭处理较 CK 处理 B_c/B_N 增 10.60%~202.44%。

2.4 小麦产量与土壤有机氮组分及微生物生物量碳氮之间的关系

通过通径分析 (表 3)，将因变量和因子之间的相关系数分解为间接通径系数和直接通径系数，因子的直接通径系数从大到小排序为： x_5 (0.7760) $> x_6$

表 2 施用不同量生物质炭土壤微生物量生物碳、氮比
Table 2 Soil microbial biomass carbon to nitrogen ratio as affected by biochar application rate

土层 (cm) Soil layer	CK	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5
0—5	3.49	3.86	5.96	5.47	4.64	5.88
5—10	3.55	4.82	5.72	5.27	3.50	7.04
10—30	2.87	4.44	5.83	5.93	3.31	8.68

注：CK、BC1、BC2、BC3、BC4和BC5处理生物质炭施用量分别为0、10、20、30、40、50 t/hm²。
Note: The biochar application amount in CK, BC1, BC2, BC3, BC4, and BC5 treatment was 0, 10, 20, 30, 40, and 50 t/hm², respectively.

表 3 小麦产量与土壤有机氮组分及微生物生物量碳氮之间的通径分析

Table 3 Path analysis between wheat yield and soil organic nitrogen components and microbial biomass carbon and nitrogen

因子 Factor	r_{yi}	P_{yi}	间接通径系数 Indirect impact path coefficient							合计 Total
			$\rightarrow x_1$	$\rightarrow x_2$	$\rightarrow x_3$	$\rightarrow x_4$	$\rightarrow x_5$	$\rightarrow x_6$	$\rightarrow x_7$	
x_1	-0.6030**	-1.0610		0.2864	0.1580	0.1397	0.0481	-0.0157	-0.1587	0.4578
x_2	0.4240	-0.3860	0.7873		-0.0699	-0.2161	0.2111	0.0324	0.0649	0.8096
x_3	-0.1410	-0.4020	0.4170	-0.0672		0.1741	-0.4485	0.0909	0.0957	0.2619
x_4	0.6160**	-0.3310	0.4477	-0.2521	0.2115		0.5867	-0.0521	0.0050	0.9467
x_5	0.4930*	0.7760	-0.0658	-0.1050	0.2324	-0.2502		-0.0414	-0.0527	-0.2828
x_6	0.2120	-0.1480	-0.1125	0.0845	0.2468	-0.1165	0.2173		0.0395	0.3591
x_7	-0.4780*	-0.2650	-0.6355	0.0946	0.1451	0.0063	0.1544	0.0221		-0.2131

注： x_1 —酸解未知态氮； x_2 —酸解铵态氮； x_3 —非酸解氮； x_4 —氨基糖态氮； x_5 —全氮； x_6 —微生物生物量碳； x_7 —微生物生物量氮； r_{yi} —相关系数； P_{yi} —直接通径系数； y —小麦产量。**— $P<0.01$ ；*— $P<0.05$ 。
Note: x_1 —Unknown-acidolizable nitrogen; x_2 — Acidolizable ammonia nitrogen; x_3 —Non-acidolysable nitrogen; x_4 —Amino sugar nitrogen; x_5 —Total N; x_6 —Microbial biomass carbon; x_7 —Microbial biomass nitrogen; r_{yi} —Correlation coefficient; P_{yi} —Direct impact path coefficient; y —Wheat yield. **— $P<0.01$; *— $P<0.05$.

(-0.1480) $> x_7$ (-0.2650) $> x_4$ (-0.3310) $> x_2$ (-0.3860) $> x_3$ (-0.4020) $> x_1$ (-1.0610)。小麦产量 (y) 与酸解铵态氮 (x_2)、非酸解氮 (x_3) 和微生物生物量碳 (x_6) 之间无显著相关关系，因此不能作为影响小麦产量的主要因子；酸解未知态氮 (x_1) 和微生物生物量氮 (x_7) 与小麦产量 (y) 之间呈显著负相关关系，其中酸解未知态氮与小麦产量 (y) 之间呈极显著负相关关系；氨基糖态氮 (x_4) 和全氮 (x_5) 与小麦产量 (y) 之间呈显著正相关关系，其中氨基糖态氮 (x_4) 与小麦产量 (y) 之间呈极显著正相关关系，说明土壤全氮 (x_5) 和氨基糖态氮 (x_4) 含量的增加能够增加小麦产量；但氨基糖态氮 (x_4) 对小麦产量 (y) 的直接通径系数较小，间接通径系数较大，其主要通过影响全氮含量间接影响小麦产量。进一步进行逐步回归分析，土壤有机氮组分及微生物生物量碳氮与小麦产量的逐步回归分析方程为： $y=4042.106+17948.902 x_4-52.316 x_7$ ($R^2=0.597$, $F=8.112$, $P<0.05$)，由此可知，氨基糖态氮和微生物生物量氮的变化是影响小麦产量的主要因素。

3 讨论

本试验结果表明，玉米秸秆生物质炭田间老化后能够显著影响土壤全氮、微生物生物量碳氮含量及有机氮组分。土壤全氮含量随着生物质炭添加量的增加而增加，且随着土层的加深，土壤全氮含量逐渐降低，BC5 (生物质炭添加量 50 t/hm²) 处理下，土壤全氮含量在各土层中均为最高，这可能由于生物质炭本身含有一定的氮素，并且生物质炭具有疏

松多孔和强吸附性^[27],对每年施入土壤的氮素具有吸附作用。在0—5、5—10和10—30 cm土层中BC5处理土壤全氮含量分别较CK提高10.94%、10.25%和6.52%。生物质炭具有较大的比表面积(11.3 m²/g),能够增强土壤对肥料中氮素的吸持^[19],降低氮素淋溶造成的损失,同时也能降低氨挥发造成的氮素损失^[18],从而显著提高了全氮含量。

已有研究结果^[10, 21–22]表明,生物质炭对微生物生物量碳、氮的影响因土壤和生物质炭类型的差异而存在较大差异^[28]。本研究结果表明,土壤微生物生物量碳含量随着生物质炭添加量的增加而增加。一方面,生物质炭具有pH高、比表面积大、疏松多孔的特性^[27],施入土壤后提高土壤pH,增加土壤持水性^[21, 29]、孔隙度^[22],降低土壤容重^[29–30],为微生物的生长繁殖提供舒适、良好的生活条件^[31],从而使得土壤微生物生物量增加;另一方面,生物质炭吸附性强、碳含量高、养分元素丰富,施入土壤后部分组分可直接作为微生物生长的能源物质^[32],并且对氮、磷等养分的吸附性增强了土壤养分供应的能力^[33]。土壤微生物生物量氮含量随生物质炭添加量的增加总体呈先下降后升高再下降趋势,但处理间差异多不明显。这与Pokharel等^[28]的研究结果相似,这是由于本试验选用的生物质炭pH(9.21)大于土壤pH(8.36),随着生物质炭添加量的增加,土壤pH增大,导致土壤中真菌类生物量下降。在0—30 cm土层中,BC2(生物质炭添加量20 t/hm²)处理下微生物生物量氮含量均为最低。这与张志龙等^[34]研究结果相反,其研究发现添加20 t/hm²小麦秸秆生物质炭1年后,土壤微生物生物量氮含量最高,生物质炭添加量大于20 t/hm²后随着生物质炭添加量的继续增加微生物生物量氮含量逐渐降低;这可能与种植作物种类、土壤酸度、生物炭性质、生物炭加工热解温度、生物炭原料、气候条件的变化有关^[35],也可能与添加生物炭后采样年份不同有关。微生物生物量碳与微生物生物量氮的比值(B_c/B_N)是衡量土壤微生物碳、氮有效性和微生物组成变化的重要指标。本研究中B_c/B_N总体随着生物质炭添加量的增加呈“先增加后减小再增加”的变化趋势;在相同的常规施肥条件下,生物炭和氮肥的共同作用会影响土壤中氮的有效性,施用过量的生物质炭导致土壤中能被微生物直接利用的活性氮比值减小^[34],即高的C/N值使土壤中氮素发生了固存作用^[21],对土壤微生物来说更像是一个碳库而非氮源^[36]。

土壤酸解态有机氮是土壤氮库中较为活跃的部分,

其容易受到人为活动的影响^[17],而非酸解氮在土壤中的转化速度较为缓慢,是土壤氮库中较为稳定、难矿化的组分。在本研究中,老化生物质炭显著增加了土壤酸解总氮的含量,对非酸解氮含量的影响多不显著。土壤有机氮组分整体表现为:氨基酸态氮>非酸解氮>酸解铵态氮>酸解未知态氮>氨基糖态氮,这与很多研究者^[15, 37–39]的研究结果类似;土壤可矿化和植物吸收的氮素主要来自氨基酸态氮,其次为酸解铵态氮,再次为酸解未知态氮和非酸解氮,氨基糖态氮的贡献最低^[40],因此,施用生物质炭对提高土壤氮素供应能力具有重要作用,生物质炭本身含有一定的氮素,施入生物质炭后土壤增加的部分有机氮素可能来自生物质炭,而此部分有机氮素又很难区分和溯源,因此,希望广大研究者能够在未来的研究中通过新的技术手段,对此有更深入探讨。本研究结果表明,酸解总氮和非酸解氮的变化趋势相反,非酸解氮含量随着生物质炭添加量的增加呈先下降后增加趋势,其与土壤全氮、微生物生物量碳氮之间呈显著正相关关系(图4),这与郝小雨等^[3]的研究结果相似。也有研究^[15, 41]表明,土壤中施入氮肥时,大部分会优先转化为氨基酸态氮和酸解未知态氮,当土壤中全氮含量高于3.30 g/kg时,酸解有机氮会转化为非酸解态氮。而本研究中,土壤全氮含量随着生物质炭添加量的增加不断增加,添加生物质炭超过30 t/hm²时,酸解有机氮含量减小,非酸解氮含量增加,这进一步表明,当土壤中全氮含量超过一定阈值后,部分酸解有机氮会直接转化为非酸解态氮,这与姬景红等^[15]的研究结果相似,其研究认为,减少的土壤有机氮主要转化为难以矿化的稳定态有机氮被保存于土壤中。这也说明添加适量的生物质炭对提高土壤氮肥利用率具有积极作用。

酸解铵态氮和氨基酸态氮是土壤易矿化有机氮的源和库,也是植物吸收利用矿化氮主要来源^[37],与土壤供氮能力密切相关^[42–43]。氨基酸态氮可能来自酰胺、氨基糖、嘌呤和嘧啶的脱氨、羟基和其他氨基酸的分解^[18, 44–45],酸解铵态氮主要来自土壤中固定铵和吸附性铵^[46]。本研究中,0—30 cm土层土壤酸解铵态氮和氨基酸态氮含量占土壤全氮含量的比例均比较高,这与党亚爱等^[14]在黄土高原典型土壤有机氮组分研究所得的结果相同。当生物质炭添加量超过30 t/hm²时,酸解铵态氮含量呈逐渐下降趋势,其作为土壤有机氮组分中易于移动的组分,大量的生物质炭施入导致土壤孔隙度和含水量增加,从而增

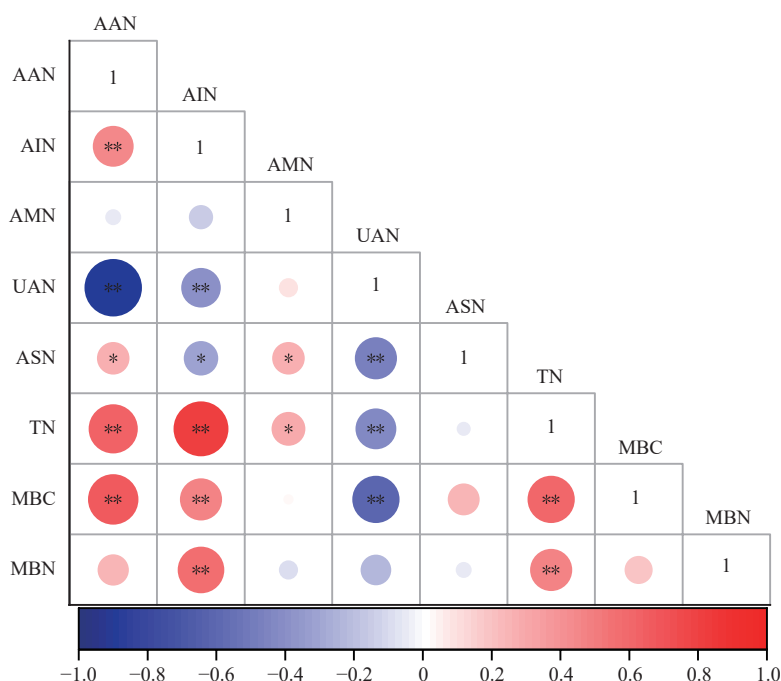


图4 土壤有机氮组分、全氮及微生物生物量碳氮的皮尔逊相关性分析
Fig. 4 Pearson correlation analysis of soil organic nitrogen components, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen

注: AAN—氨基酸态氮; AIN—非酸解氮; AMN—酸解铵态氮; UAN—酸解未知态氮; ASN—氨基糖态氮; TN—全氮; MBC—微生物生物量碳; MBN—微生物生物量氮。*— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$ 。

Note: AAN—Amino acid nitrogen; AIN—Non-acidolysable nitrogen; AMN—Acidolysable ammonia nitrogen; UAN—Unknown-acidolysable nitrogen; ASN—Amino sugar nitrogen; TN—Total nitrogen; MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

加了土壤溶液中酸解铵态氮的径流流失和淋溶^[47]。通过分析发现, 酸解铵态氮与土壤全氮之间呈极显著正相关, 氨基酸态氮与土壤全氮和微生物生物量碳之间呈极显著正相关(图4); 这说明老化生物质炭在提高土壤全氮、微生物生物量碳含量的基础上促进了土壤微生物对土壤中大分子复杂有机物的降解, 增加土壤中的无机氮源和低分子有机氮^[19], 以提升土壤的供氮潜力; 同时, 二者含量均随着土层的加深而降低, 主要是由于每年均按照常规施肥量施入化肥, 导致表层土壤中全氮含量高于下层。

酸解未知态氮由非 α -氨基酸氮、嘌呤和嘧啶、酸解未释放的固定态铵和芳胺^[48-49]等组成, 在土壤中的矿化速率较慢, 容易在土壤中积累^[17]。本研究中, 随着生物质炭添加量的增加, 不同土层中酸解未知态氮含量总体呈下降趋势。通过分析发现, 其含量与土壤全氮、微生物量碳、氨基酸态氮、非酸解氮和氨基糖态氮含量之间呈极显著负相关关系(图4), 这表明老化生物质炭提高了土壤中微生物对酸解未知态氮的分解能力, 促使其转化为其他酸解有机氮组分, 进一步增加土壤的供养能力。此结果与大多

数研究者在施肥处理下的研究结果不同, 这可能是由于土壤类型、试验材料、气候条件及采样年份的差异所致。

氨基糖态氮在土壤全氮和酸解有机氮组分中的占比较低^[17, 37, 50], 其主要源于微生物生物合成的微生物细胞壁^[51], 其含量的高低主要反映土壤中已经死亡微生物的积累程度^[52], 也可以反映土壤微生物的氮素同化吸收利用过程。本研究结果表明, 氨基糖态氮含量随着生物质炭添加量的增加和土层的加深呈先增加后降低趋势, BC3 (生物质碳添加量 30 t/hm²) 处理时其含量最高, 这与已有研究结果^[53]相似; 一方面可能是由于生物质炭具有丰富的孔隙, 添加适量生物质炭能够改善土壤环境, 为微生物提供良好的生存环境^[20, 54], 增加了微生物活性和数量, 进而增加土壤氨基糖态氮含量; 另一方面随着生物质炭用量的不断增加, 导致土壤持水能力和透气性增加, 破坏了土壤微生物生长的最佳环境和群落结构, 从而减小部分微生物的生长繁殖速度。但氨基糖态氮含量与土壤微生物生物量碳、氮之间无显著相关, 这说明氨基糖态氮的积累与全部的微生物量相关性不

强,只与部分微生物有关;氨基糖态氮与小麦产量呈极显著正相关关系,通过通径分析发现,氨基糖态氮对小麦产量的影响主要通过影响土壤全氮含量间接影响小麦产量。综上所述,本研究中,BC3 处理下,土壤酸解总氮、酸解铵态氮、氨基糖态氮含量最高,非酸解氮含量最低;在 BC5 处理下,氨基糖态氮和酸解未知态氮含量分别最高和最低;这说明在 BC3 和 BC5 处理下,土壤有机氮组分中活性部分含量较高。但在 BC3 处理下,小麦产量最高。因此,在黄土高原旱作农区,科学合理的生物质炭用量对提高土壤供氮能力和作物产量具有重要意义。

4 结论

土壤全氮及微生物生物量碳是影响有机氮组分差异的主要因素。在供试施用量下,生物质炭均显著提高了土壤全氮及微生物生物量碳含量,其中以施用生物质炭 30 t/hm² 提高土壤酸解总氮、酸解铵态氮和氨基糖态氮含量的效果最显著,土壤供氮能力最强,春小麦产量最高。因此,在黄土高原旱作农业区,合理的生物质炭用量可长期提高土壤的供氮能力。

参 考 文 献:

- [1] 王瑞,武威,刘涛,孙成明.耕地土壤容重作用及其调控途径研究进展[J].北方园艺,2020,(4):135-141.
Wang R, Wu W, Liu T, Sun C M. Research progress on soil bulk density function and its regulation methods in cultivated land[J]. Northern Horticulture, 2020, (4): 135-141.
- [2] 王媛,周建斌,杨学云.长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J].中国农业科学,2010,43(6):1173-1180.
Wang Y, Zhou J B, Yang X Y. Effects of different long-term fertilization on the fractions of organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(6): 1173-1180.
- [3] 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.
Hao X Y, Ma X Z, Gao Z C, et al. Variation characteristics of fractions of active nitrogen and organic nitrogen under different long-term fertilization practices in black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4707-4716.
- [4] 何红波,张旭东.同位素稀释分析在土壤氮素循环利用研究中的应用[J].土壤通报,2006,37(3):576-581.
He H B, Zhang X D. Application of isotope dilution analysis in N internal cycle and N utilization in soil-plant systems[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(3): 576-581.
- [5] Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Content and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization [J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 739-745.
- [6] 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.
Li S Q, Li S X, Shao M A, et al. Effects of long-term application of fertilizers on soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen in semiarid farmland ecological system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(6): 859-864.
- [7] 薛菁芳,高艳梅,汪景宽,等.土壤微生物生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J].土壤通报,2007,38(2):247-250.
Xue J F, Gao Y M, Wang J K, et al. Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 247-250.
- [8] Rebecca R. Rethinking biochar[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [9] 孙玲,贾明云,刘壮壮,等.不同热解温度和升温速率下杨树枝条生物质炭产率和理化性质分析[J].植物资源与环境学报,2023,32(3):71-82,91.
Sun L, Jia M Y, Liu Z Z, et al. Analyses on yield and physicochemical properties of poplar branch biochars at different pyrolysis temperatures and heating rates[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023, 32(3): 71-82,91.
- [10] 尚杰,耿增超,王月玲,等.施用生物炭对壤土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].中国农业科学,2016,49(6):1142-1151.
Shang J, Geng Z C, Wang Y L, et al. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in tier soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6): 1142-1151.
- [11] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[A]. Black C A. Methods of soil analysis[M]. Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Incorporation, 1965: 1148-1178.
- [12] 巨晓棠,刘学军,张福锁.长期施肥对土壤有机氮组成的影响[J].中国农业科学,2004,37(1):87-91.
Ju X T, Li X J, Zhang F S. Effects of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(1): 87-91.
- [13] 吴汉卿,杜世宇,高娜,等.水氮调控对设施土壤有机氮组分、全氮和矿质氮的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):212-219.
Wu H Q, Du S Y, Gao N, et al. Effects of water and nitrogen regulation on soil organic nitrogen fractions, total nitrogen and mineral nitrogen in greenhouse soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 212-219.
- [14] 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.
Dang Y A, Wang G D, Li S Q. The changing characteristics of profile distribution of soil organic nitrogen component of the typical soil types on the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(24): 5021-5030.
- [15] 姬景红,刘双全,李玉影,等.黑龙江省不同类型旱田土壤有机氮组分含量及分布[J].黑龙江农业科学,2020,(9):38-41.
Ji J H, Liu S Q, Li Y Y, et al. Content and distribution of soil organic nitrogen in different types of farmland in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020, (9): 38-41.
- [16] 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.

- Shen Q R, Shi R H. Study on chemical components and availability of organic nitrogen in different soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, (2): 54–57.
- [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.
- Jia Q, Liao S P, Bu R Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on fractionation of soil organic nitrogen relative to crop rotation mode [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1547–1558.
- [18] 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.
- Xu Y C, Shen Q R, Mao Z S. Contents and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(4): 403–409.
- [19] 李玥, 余亚琳, 张欣, 等. 连续施用炭基肥及生物炭对棕壤有机氮组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(10): 2903–2909.
- Li Y, Yu Y L, Zhang X, *et al.* Effects of continuous application of biochar-based fertilizer and biochar on organic nitrogen fractions in brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(10): 2903–2909.
- [20] 龙泽华, 王晶, 侯振安. 秸秆炭化还田和施氮量对棉田土壤有机氮组分的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(2): 154–161.
- Long Z H, Wang J, Hou Z A. Effects of cotton straw biochar returning and N application rate on soil organic nitrogen fractions in cotton field[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2019, 37(2): 154–161.
- [21] Oladele S, Adeyemo A, Adegaiye A, *et al.* Effects of biochar amendment and nitrogen fertilization on soil microbial biomass pools in an Alfisol under rain-fed rice cultivation[J]. *Biochar*, 2019, 1(2): 163–176.
- [22] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 231–235.
- Tao P C, Chen X M, Jin Z W, *et al.* Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 231–235.
- [23] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭长期施用对旱地红壤微生物特性及理化性质的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1423–1428.
- Tao P C, Chen X M, Jin Z W, *et al.* Long-term effects of biochar application on microbial properties and physicochemical properties in upland red soil, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1423–1428.
- [24] Joseph U E, Toluwase A O, Kehinde E O, *et al.* Effect of biochar on soil structure and storage of soil organic carbon and nitrogen in the aggregate fractions of an Albic soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(1): 1–12.
- [25] 鲍士旦. 土壤农业化学分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Soil and agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [27] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 509–517.
- Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 509–517.
- [28] Pokharel P, Ma Z L, Chang S X. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra-and intracellular enzyme activities: A global meta-analysis[J]. *Biochar*, 2020, (2): 65–79.
- [29] Amonette J E, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London, UK: Earthscan, 2009.
- [30] 李秋霞, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 208–213, 261.
- Li Q X, Chen X M, Jin Z W, *et al.* Persistent effects of biochar on soil physicochemical properties and crop yields in upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 208–213, 261.
- [31] Gul S M, Whalen J K, Thomas B W, *et al.* Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 206: 46–59.
- [32] Chan K Y, Xu Z. Biochar: Nutrient properties and their enhancement [A]. Amonette J E, Joseph S. Biochar for environmental management science and technology[M]. London, UK: Earthscan, 2009: 67–84.
- [33] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812–1836.
- [34] 张志龙, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤中微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1384–1391.
- Zhang Z L, Chen X M, Qu C C, *et al.* Effects of biochar addition on soil microbial biomass C, N and enzyme activities in cucumber continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1384–1391.
- [35] Xu N, Tan G C, Wang H Y, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 74: 1–8.
- [36] Zhang Y J, Lin F, Wang X F, *et al.* Annual accounting of net greenhouse gas balance response to biochar addition in a coastal saline bioenergy cropping system in China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 36–48.
- [37] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(12): 2423–2434.
- Jiao Y P, Qi P, Wang X J, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on soil organic nitrogen components and enzyme activities in farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(12): 2423–2434.
- [38] 张名豪, 卢吉文, 赵秀兰. 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2291–2297.
- Zhang M H, Lu J W, Zhao X L. Effect of different organic materials on nitrogen mineralization in two purple soils[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2291–2297.
- [39] 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, 32(6): 1185–

- 1193.
- Li S S, Yang J C, Jiang H M, *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizer on nitrogen pool and distribution of residual N fractions in fluvo-aquic soil under the winter wheat system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1185–1193.
- [40] 李菊梅, 李生秀. 可矿化氮与各有机氮组分的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 158–164.
- Li J M, Li S X. Relation of mineralizable N to organic N components [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9(2): 158–164.
- [41] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 荣向农. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 3–10.
- Liang G Q, Lin B, Lin J X, Rong X N. Effect of long-term fertilization on the forms of nitrogen in calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2000, 6(1): 3–10.
- [42] 吴汉卿, 杜世宇, 王丹阳, 等. 设施土壤有机氮组分及番茄产量对水氮调控的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 805–813.
- Wu H Q, Du S Y, Wang D Y, *et al.* Response of soil organic nitrogen fractions and tomato yield to irrigation and nitrogen fertilization in greenhouse[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 805–813.
- [43] Lu H L, Li S Q, Jin F H, *et al.* Contributions of organic nitrogen forms to mineralized nitrogen during incubation experiments of the soils on the Loess Plateau[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2009 40 (21–22): 3399–3419.
- [44] 李强, 王晋, 庄舜尧. 我国南方不同地带性水稻土有机氮组分变化[J]. *土壤*, 2015, 47(5): 940–946.
- Li Q, Wang J, Zhuang S Y. Soil organic nitrogen composition in paddy fields varied with latitude in southern China[J]. *Soils*, 2015, 47(5): 940–946.
- [45] Schulten H R, Schnitzer M. The chemistry of soil organic nitrogen: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26(1): 1–15.
- [46] Lü H J, He H B, Zhao J S, *et al.* Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season[J]. *Plant & Soil*, 2013, 373(1–2): 595–607.
- [47] 杜晓玉, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 华北地区施用有机肥对土壤氮组分及农田氮流失的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011, (6): 13–19.
- Du X Y, Xu A G, Ji H J, *et al.* Effects of manure on soil nitrogen components and nitrogen loss from farmland in North China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (6): 13–19.
- [48] 卓苏能, 文启孝. 土壤未知态氮[J]. *土壤学进展*, 1992, (2): 11–19.
- Zhuo S N, Wen Q X. Unknown nitrogen in soil[J]. *Progress in Soil Science*, 1992, (2): 11–19.
- [49] Nieder R, Scherer B H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, (1): 1–14.
- [50] 王瑞军, 李世清, 张兴昌, 等. 西北地区不同生态系统几种土壤有机氮组分和微生物体氮的差异[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 21–27.
- Wang R J, Li S Q, Zhang X C, *et al.* Difference of soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen under different eco-system in northwestern China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 21–27.
- [51] Zhang X D, Amelung W. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine, and galactosamine in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1201–1206.
- [52] 马欣, 谢泽宇, 罗珠珠, 等. 陇中地区多年种植苜蓿后不同后茬作物的土壤有机氮特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (2): 17–23.
- Ma X, Xie Z Y, Luo Z Z, *et al.* Characterization of soil organic nitrogen component in different succeeding crops of Lucerne on the Loess Plateau of central Gansu[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, (2): 17–23.
- [53] 张世汉, 武均, 张仁陟, 等. 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[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 92–100.
- Zhang S H, Wu J, Zhang R Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer combined with straw and biochar on soil organic nitrogen components in dryland farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 92–100.
- [54] 陈坤. 生物炭等有机物料定位施用对土壤微生物群落和有机氮的影响[D]. 辽宁沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2017.
- Chen K. Influences of soil microbial community and organic nitrogen under the long-term application of biochar and three organic resources [D]. Shenyang, Liaoning: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2017.