

# 土壤剖面养分特征与小麦产量对生物质炭施用的响应<sup>①</sup>

刘佳乐, 陈梓蕊, 吴 思, 孙海军\*

(南京林业大学林草学院/南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

**摘 要:**本研究通过盆栽试验考察 200 kg/hm<sup>2</sup> 施氮时以 0.5% 和 1.5%(0~20 cm 耕层干土重百分比)用量施用生物质炭对土壤剖面肥力指标、小麦产量和氮素利用率的影响。结果表明: 生物质炭施用可提高 0~40 cm 土壤有机碳含量(其中 0~10、20~30 cm 剖面增幅达 21.1%~44.2%、12.6%~18.4%), 且该效应与生物质炭用量呈正相关。相较于施氮处理, 添加生物质炭处理的 0~10 cm 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、全氮和速效钾含量提高了 3.7%~49.0%、20.1%~23.7%、3.4%~16.7% 和 3.6%~14.8%, 且 30~40 cm 剖面速效钾含量也显著提高 10.2%~19.7%。除 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 外, 各养分含量的增幅在高用量(1.5%)添加生物质炭处理中更大。但 30~40 cm 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 20~30 cm 土壤速效钾含量均因生物质炭添加而降低, 降幅分别为 27.4%~32.8% 和 10.8%~12.6%, 且在生物质炭低用量(0.5%)时降幅更显著。生物质炭对小麦氮素利用率和产量无显著影响, 但存在降低小麦产量的趋势(风险)。综上, 土壤剖面养分特征对生物质炭添加的响应因其用量和土层深度不同而具有显著差异。

**关键词:** 生物质炭; 氮素利用率; 有机碳; 土壤肥力; 作物产量

**中图分类号:** S606 **文献标志码:** A

## Responses of Soil Profile Nutrient Characteristics and Wheat Yield to Biochar Application

LIU Jiale, CHEN Zirui, WU Si, SUN Haijun\*

(College of Forestry and Grassland/Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** In this study, a pot experiment was conducted to investigate the effects of biochar (BC) added at 0.5% and 1.5% on soil profile nutrient characteristics, wheat yield and nitrogen use efficiency (NUE) under conventional N input rate (200 kg/hm<sup>2</sup>). The results showed that 0–40 cm soil organic carbon (SOC) content increased after BC application and was positively correlated with BC application rate, of which, 0–10 cm and 20–30 cm SOC contents under BC-amended treatment significantly increased by 21.1%–44.2% and 12.6%–18.4%, respectively. Compared with N fertilizer alone treatment, BC-amended treatments increased the contents of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (3.7%–49.0%), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N (20.1%–23.7%), total N (3.4%–16.7%), and available K (3.6%–14.8%) in 0–10 cm soil. In addition, 30–40 cm soil available K contents were significantly increased with BC application by 10.2%–19.7%. Generally, nutrient content increases were higher under 1.5% BC amending treatment, except for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. However, BC addition reduced the NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in 30–40 cm soil by 27.4%–32.8% and available K in 20–30 cm soil by 10.8%–12.6%, and the effects were more significant at lower BC added (0.5%) treatment. BC had no significant effect on either wheat NUE or yield, but performed a reducing potential (risk) on wheat yield. In conclusion, the responses of soil nutrients to BC addition significantly varied with BC application rate and soil profile depth.

**Key words:** Biochar; Nitrogen use efficiency (NUE); Soil organic carbon; Soil fertility; Crop yield

氮素是作物生长的主要限制养分,对作物产量形成和品质提高至关重要<sup>[1]</sup>。然而,为追求作物高产和经济效益,农业生产过程中存在过量施用化学氮肥的现象,不仅导致作物产量与氮素利用率不再持续提

升,同时也加剧了氮损失,如 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失、NH<sub>3</sub> 挥发与 N<sub>2</sub>O 排放等,威胁水体与大气环境<sup>[2-5]</sup>。因此,优化适用于不同作物种植体系的高效氮肥施用技术至关重要。近年来,生物质炭(Biochar, BC)施用成

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972518)和江苏省现代农业-碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022305)资助。

\* 通信作者(hjsun@njfu.edu.cn)

作者简介: 刘佳乐(2000—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事农林土壤养分管理方面研究。E-mail: liujiale@njfu.edu.cn

为提高土壤氮素利用效率,减少氮素损失,并确保粮食安全的关键措施之一<sup>[6-7]</sup>。生物质炭是由农林剩余物等有机物料在限氧、高温条件下热解制备的多孔性碳物质,具有碳稳定性高、比表面积大和吸附能力强等特点<sup>[8]</sup>。由于在改善土壤物理、化学和生物学特性以及维持作物生产力方面的积极作用<sup>[9-11]</sup>,生物质炭已被认为是十分有益的土壤改良剂,应用前景广阔。

前人研究表明,土壤改良剂添加会显著改变耕作层土壤养分状况。Marmo<sup>[12]</sup>研究表明有机肥能增强土壤有机氮富集,提高养分贮量及其供应能力。根据方圆等<sup>[13]</sup>报道,土壤淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 和可溶性有机碳浓度均随活性炭用量增大而减小。陈义群和董元华<sup>[14]</sup>研究发现,作物秸秆、豆科绿肥和畜禽粪便等有机固体废物输入可增强土壤持水作用,增加土壤有机质和有效氮磷含量。另据报道,麦秸生物质炭在土壤环境中会进一步分解成微纳米颗粒,并垂直迁移至底土层<sup>[15]</sup>,而且在土壤剖面尺度发生迁移的颗粒态生物质炭性质发生显著改变<sup>[16]</sup>。但是,沿土壤剖面上发生迁移的生物质炭是否会影响对应土壤剖面的养分特征,目前尚不清楚。此外,充分了解养分特征在土壤垂直剖面上的变化是合理施肥的基础<sup>[17]</sup>,这直接决定土壤养分的可持续供应能力<sup>[18]</sup>。因此,明确土壤剖面不同肥力指标对生物质炭添加的响应至关重要。

根据已有报道,土壤养分及作物产量等对生物质炭施用的响应与其施用量显著相关。尚杰等<sup>[19]</sup>研究表明 0~10 cm 土壤的颗粒态、易氧化态和总有机碳含量随生物质炭施用量的增加而增加。陈芳等<sup>[20]</sup>发现施用 20 t/hm<sup>2</sup> 木炭有提高作物产量和土壤总养分含量的作用,但用量增至 40 t/hm<sup>2</sup> 则明显降低。陈心想等<sup>[21]</sup>研究表明土壤速效氮磷钾含量均随生物质炭用量增加而提高,但超过 20 t/hm<sup>2</sup> 的生物质炭施用对小麦产量呈现出抑制作用。可见,生物质炭与土壤养分含量和作物产量之间的关系并非总是正相关<sup>[22]</sup>。

综上,本研究以阐明不同添加量的生物质炭对土壤剖面养分变化特征的影响为切入点,通过室内盆栽(土柱)试验,考察常规施氮量(200 kg/hm<sup>2</sup>)条件下,不同用量生物质炭施用对土壤剖面肥力特征、小麦产量和氮素利用率等的综合影响,以期为生物质炭科学应用于土壤养分管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤与生物质炭

盆栽(土柱)试验于南京林业大学科研温室内开展,该温室配备由玻璃纤维增强聚酯材料制作的遮雨

棚,可保证采光、通风等与自然条件相近。供试土壤取自江苏省宜兴市周铁镇稻田(31°07' N, 119°31' E),所在区域为典型亚热带季风气候,年平均气温和降水量分别为 15.7 °C 和 1 108 mm。2022 年 5 月按照 0~20 和 20~40 cm 的剖面顺序于一块平整的常年为稻-麦轮作模式的稻田采集土壤样品,同一层次剖面土壤样品混匀后风干,粉碎至过 2 mm 筛后以与田间相近容重分层装填土柱<sup>[23]</sup>。土柱由高度为 45 cm、直径为 30 cm 的不透明 PVC 材料制成,底部封闭。

供试土壤类型为典型潴育型水稻土,0~20 cm 表层土壤性质为: pH 6.03,容重 1.23 g/cm<sup>3</sup>,速效氮 0.38 g/kg,全氮 1.56 g/kg,全磷 0.96 g/kg,全钾 4.12 g/kg,阳离子交换量(CEC)19.6 cmol/kg,有机碳(SOC)1.32 g/kg。试验所用生物质炭是以小麦秸秆为原料在 500 °C 的裂解温度下制备而成<sup>[24]</sup>,其全氮含量为 8.1 g/kg,碳含量为 375 g/kg,比表面积为 32 m<sup>2</sup>/g。

### 1.2 试验设计

试验设置氮肥用量为 200 kg/hm<sup>2</sup>(参照农户施肥水平),生物质炭用量为 0.5% 和 1.5%(0~20 cm 耕作层干土重百分比)2 个水平,同时设置不施氮和生物质炭的对照处理,即为 CK、N200、N200+BC0.5% 和 N200+BC1.5% 4 个处理,每个处理重复 3 次。于试验开始前,将称好的生物质炭施用于对应试验处理的 0~20 cm 土壤层次,并做混匀处理。于 2022 年 11 月 10 日播种小麦(宁麦 13),每盆播种 50 粒(出苗一个月后统一间苗至 30 株/盆),播种同时施用基肥(30% 的氮肥和全部磷钾肥),并于 2023 年 1 月 21 日和 3 月 18 日追施两次氮肥作为蘖肥(30%)和穗肥(40%)。本试验所施氮肥为尿素(46% N),磷、钾肥为过磷酸钙(12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(60% K<sub>2</sub>O),设置施用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>。小麦生长季,按需浇水、除虫,在小麦自然成熟后于 2023 年 5 月 24 日收获。

### 1.3 土样采集与指标测定

在小麦收获后,每个土柱选取 3 个采样点,使用内径为 5 cm 的土钻采集 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 层次土壤剖面样品,去除植物根系等之后混合。取部分新鲜土样过 2 mm 筛,用于测定土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。剩余土壤样品自然风干,粉碎过 60 目筛后,用于测定土壤全氮、有效磷、速效钾和 SOC 含量等。相关指标测定参照《土壤农化分析》<sup>[25]</sup>, $\text{NH}_4^+$ -N 采用靛酚蓝比色法, $\text{NO}_3^-$ -N 采用酚二磺酸比色法,全氮采用凯氏定氮法,SOC 采用重

铬酸钾氧化-外加加热法,有效磷采用钼锑抗比色法,速效钾采用火焰光度计法。

#### 1.4 小麦产量测算和氮素利用率计算

小麦收获后,将其分为秸秆、籽粒两部分,分别记录秸秆生物量和籽粒产量,并统计产量构成因子(穗数、穗粒数和千粒重)。取适量秸秆、籽粒样品称重后于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒重。使用高速粉碎机(DS-YM-001)将干燥的植物样品研磨成粉末并过 2 mm 尼龙筛,经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后采用凯氏定氮法测定其全氮含量<sup>[26]</sup>,并按下式计算小麦氮素利用率(%)。

$$\text{小麦氮素利用率(\%)} = \frac{\text{施氮处理小麦吸氮量} - \text{对照小麦吸氮量}}{\text{施氮量}} \times 100$$

#### 1.5 数据分析

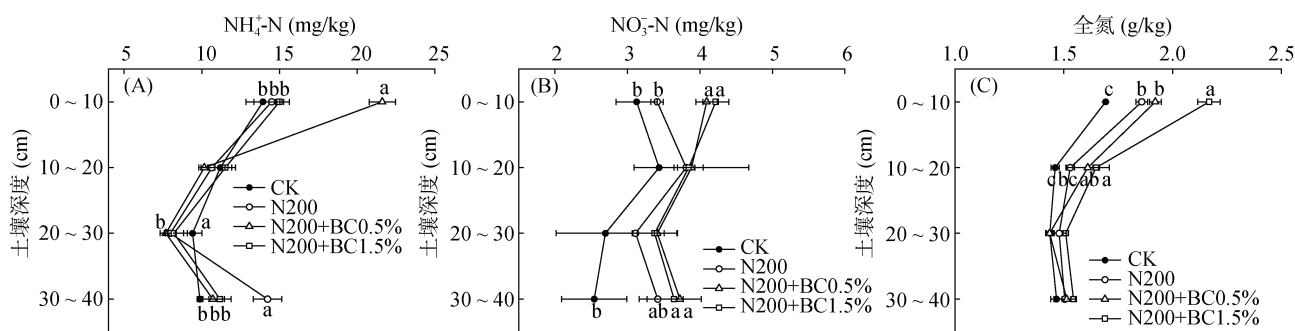
采用 Excel 2010 进行数据整理,运用 SPSS 26.0

软件进行数据统计分析和显著性检验( $P < 0.05$ ),使用 Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和全氮

如图 1A 所示,土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量随剖面深度增加呈先减后增的规律:0~30 cm 剖面逐渐下降,而在 30~40 cm 剖面上升。同土层不同处理间比较发现:在 0~10 cm 剖面中,N200+BC0.5% 处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量达到最大值 21.6 mg/kg,比 N200 和 N200+BC1.5% 处理显著提高 49.1% 和 44.1%;各处理 10~20 cm 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量无显著差异;与 CK 处理相比,N200 处理 20~30 cm 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 显著降低 15.2%,但与生物质炭处理间没有显著差异;在 30~40 cm 剖面中,N200 处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量达到 14.2 mg/kg,比其他处理显著提高 27.4%~32.8%。



(图中小写字母不同表示同一土层不同处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平,下同)

图1 不同处理 0~40 cm 土壤剖面 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和全氮含量

Fig. 1 Contents of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and total N of 0~40 cm depth under different treatments

由图 1B 可知,添加生物质炭处理 0~30 cm 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量由 4.1~4.2 mg/kg 降至 3.3~3.4 mg/kg,而在 30~40 cm 土壤增至 3.6~3.7 mg/kg。N200 处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的剖面分布规律则表现为先升后降再升,在 10~20 cm 土壤深度含量升高至与生物质炭处理相近。添加生物质炭处理在 0~40 cm 土壤深度均提高了土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,特别是在 0~10 cm 深度,较 N200 处理显著提高 20.0%~23.7% (图 1B)。

施氮肥处理各土层全氮含量均高于 CK (图 1C)。各处理土壤全氮含量随土壤深度增加而降低 (由 1.7~2.2 g/kg 降至 1.4~1.5 g/kg)。添加生物质炭可提高耕作层 (0~20 cm) 土壤全氮含量,特别是高用量生物质炭处理 (N200+BC1.5%) 0~10 和 10~20 cm 土壤全氮含量比 N200 处理分别显著提高 16.7% 和 7.8%。

### 2.2 土壤有效磷与速效钾

由图 2A 可知,土壤有效磷含量由 10~20 cm 的

35.1~40.8 mg/kg 大幅提高至 20~30 cm 的 54.1~57.3 mg/kg。在 0~20 cm 剖面,施氮处理的土壤有效磷含量较 CK 处理明显降低,0~10 cm 和 10~20 cm 降幅分别为 10.3%~17.3% 和 8.5%~13.8%。同时结果表明,与 N200 处理相比,N200+BC0.5% 与 N200+BC1.5% 的 0~40 cm 土壤有效磷含量均无显著差异;但是,10~40 cm 土壤的有效磷含量在添加生物质炭处理中有上升趋势,且该趋势在 N200+BC1.5% 处理下更明显。

土壤速效钾含量在 0~40 cm 剖面上变化较大:由 0~10 cm 的 214.0~245.7 mg/kg 急剧下降至 10~20 cm 的 93.3~111.7 mg/kg (下降幅度 > 50%),然后在 20~30 和 30~40 cm 逐渐上升至 106.0~121.3 和 147.0~176.0 mg/kg (图 2B)。不同深度土壤速效钾含量对生物质炭添加的响应无一致规律:在 0~10 cm 土层,N200 和 N200+BC0.5% 处理的土壤速效钾含

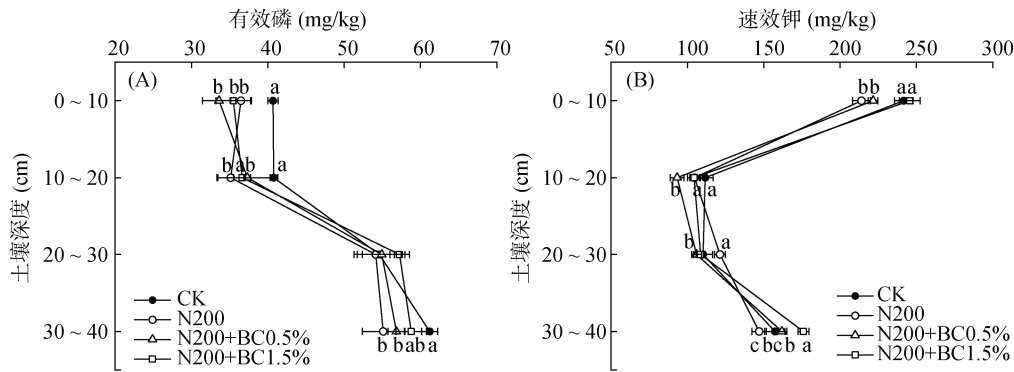


图 2 不同处理 0~40 cm 土壤剖面有效磷和速效钾含量

Fig. 2 Contents of available phosphorus and potassium of 0–40 cm depth under different treatments

量分别比 N200+BC1.5% 处理显著降低 12.9% 和 9.8%；在 10~20 与 20~30 cm 剖面中，添加生物质炭处理的土壤速效钾含量均低于 N200 处理，特别是低用量处理(N200+BC0.5%)比 N200 处理分别显著降低 10.8% 和 12.6%；而 30~40 cm 土壤剖面的速效钾含量因生物质炭添加而提高，较 N200 处理显著提高 10.2%~19.7%(图 2B)。

### 2.3 土壤有机碳

纵观 0~40 cm 剖面，SOC 含量在 0~10 cm 最高，为 14.6~22.4 g/kg，然后逐渐降低至 30~40 cm 的 10.7~14.0 g/kg(图 3)。同土层不同处理间比较发现：与 N200 处理相比，添加生物质炭处理可提高 SOC 含量，特别是高用量处理(N200+BC1.5%)。其中，添加生物质炭处理 0~10 与 20~30 cm 的 SOC 含量较 N200 处理分别显著提高 21.1%~44.2% 和 12.6%~18.4%。图 3 结果同时表明，30~40 cm 深度土壤 SOC 含量仅在高用量施用生物质炭(1.5%)时显著提高 19.3%，低用量(0.5%)时无显著影响。

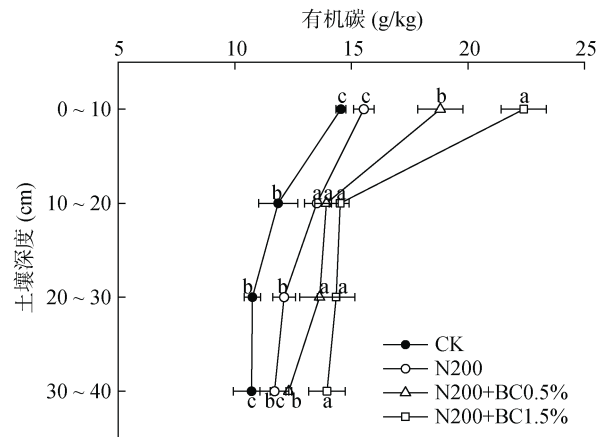


图 3 不同处理 0~40 cm 土壤剖面有机碳含量

Fig. 3 Soil organic carbon contents of 0–40 cm depth under different treatments

### 2.4 小麦氮素利用率和产量

图 4 结果表明，施氮处理的小麦吸氮量较 CK 处理显著提高 4.6 倍~5.4 倍(图 4A)。但与单施氮肥处理相比，生物质炭添加对小麦吸氮量与氮素利用率均无显著影响(图 4B)。

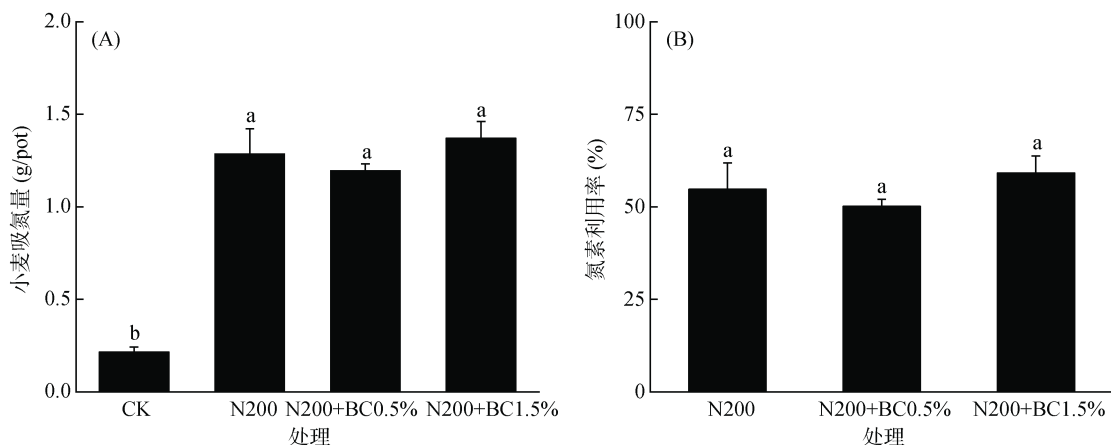


图 4 不同处理对小麦吸氮量与氮素利用率的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on responses of wheat N uptake and use efficiency

由表 1 可知,施氮处理的小麦产量较 CK 处理显著提高 4.6 倍 ~ 4.7 倍,同时施氮处理产量构成因子(穗数、穗粒数、千粒重)也均显著高于 CK 处理。不同用

量生物质炭添加对小麦籽粒产量及其构成因子的影响均不显著,但表现出微弱的减产趋势,特别是在高用量施用下。可见单肥施用是影响小麦产量的主导因素。

表 1 不同处理对小麦产量及其构成因子的影响  
Table 1 Effects of different treatments on wheat yields and its components

处理	总穗数	穗粒数	千粒重(g)	籽粒产量(g/盆)
CK	29 ± 0.8 b	142.3 ± 25.1 b	67.6 ± 7.7 b	9.8 ± 2.6 b
N200	42 ± 3.1 a	353.0 ± 63.1 a	143.5 ± 5.4 a	55.9 ± 2.3 a
N200+BC0.5%	44 ± 0.5 a	408.6 ± 32.1 a	137.2 ± 14.9 a	55.7 ± 2.2 a
N200+BC1.5%	48 ± 5.5 a	363.0 ± 9.1 a	150.5 ± 3.3 a	54.6 ± 0.8 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达  $P<0.05$  显著水平。

3 讨论

3.1 土壤养分对生物质炭添加的响应

农业生产中氮素损失的问题较为严重,特别是大量氮淋失会威胁地下水质量和生物多样性<sup>[27-28]</sup>。本研究结果表明,0 ~ 10 cm 剖面  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在低用量(0.5%)生物质炭添加处理最高,且两个用量生物质炭添加处理的土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  均显著高于仅施氮肥处理。Ahmad 等<sup>[29]</sup>研究表明生物质炭可增强土壤氮矿化,提高土壤无机氮含量,本研究结果与此相似。但是,生物质炭添加显著降低了 30 ~ 40 cm 深度的土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量(图 1A)。同时,添加生物质炭处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量在 0 ~ 20 cm 随土层深度增加逐渐降低,而未施生物质炭处理的变化规律则与之相反(图 1B)。上述结果表明 0 ~ 20 cm 耕作层土壤无机氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )可能会被生物质炭固持,这与其比表面积大、孔隙结构发达等特征有关<sup>[30]</sup>。与宋大利等<sup>[31]</sup>研究一致,添加生物质炭处理的 0 ~ 20 cm 耕作层土壤全氮含量均高于仅施氮处理。另据报道,竹渣制成的生物质炭增加了微生物对氮的需求,刺激了包括硝化、反硝化过程的土壤氮循环过程,提高了土壤中微生物对氮的固定量<sup>[32]</sup>,这是生物质炭提高土壤氮含量的原因之一。此外,Zhang 等<sup>[33]</sup>研究指出更高用量(4.0%)生物质炭施用也可捕获更多氮,本研究中耕层土壤全氮含量的增幅随生物质炭用量增加而显著提高,与之一致。因此,在麦季适量施用生物质炭有助于耕层土壤氮养分提高。

与王昆艳等<sup>[34]</sup>研究结果相反,生物质炭添加降低了 0 ~ 10 cm 表层土壤有效磷含量。但 10 ~ 40 cm 土壤有效磷含量在生物质炭添加处理中有上升趋势,且该趋势在生物质炭高用量(1.5%)添加时更明显(图 2A)。这意味着生物质炭添加会降低土壤对有效磷的

吸附,其原因可能是由于生物质炭表面官能团与土壤矿物质的磷素吸附位点之间的竞争作用<sup>[35]</sup>,也可能是生物质炭携带的有机物质通过螯合土壤中活性铝和铁来降低土壤中磷的吸附<sup>[36]</sup>。同时研究发现,0 ~ 10 与 10 ~ 20 cm 剖面的土壤速效钾含量在高用量(1.5%)生物质炭添加处理最大,与之相似的是张珂珂等<sup>[37]</sup>研究表明 1.0% 和 2.0% 用量的生物质炭处理均能显著提高土壤速效钾含量,生物质炭本身含有相当量的可溶性钾可能是主要原因。此外,30 ~ 40 cm 剖面的土壤速效钾含量随生物质炭用量增加而显著提高(图 2B),这可能是由于施用于耕作层 0 ~ 20 cm 土壤的生物质炭在本试验中小麦收获后向下迁移明显<sup>[15]</sup>,从而提高底层(30 ~ 40 cm)土壤的速效钾含量。可见,较高用量生物质炭添加有助于提高土壤剖面的速效钾含量,但存在增加表层土壤磷流失的风险。

3.2 生物质炭施用与剖面有机碳含量的关系

SOC 含量是考察土壤质量的主要指标,与许多重要的土壤肥力性状相关,适宜的 SOC 能增加土壤养分的可持续供应<sup>[38]</sup>。本研究结果表明,生物质炭施用对 SOC 的提升效应明显,且提升幅度随生物质炭用量而增强,这与罗梅等<sup>[39]</sup>所报道的研究结果相一致。原因之一是生物质炭施入土壤中促进了腐殖质形成,有助于碳水化合物、芳香烃等有机大分子的形成,进而提高 SOC 的含量<sup>[40]</sup>。其次,土壤中的生物质炭表面钝化后,会与土壤相互作用形成一种保护基质,提高 SOC 的氧化稳定性,有助于 SOC 的积累<sup>[10]</sup>。另一方面,比表面积巨大的生物质炭能够吸附土壤中有有机小分子,并将其催化形成新的有机物质,进而转化为 SOC<sup>[41]</sup>。由此可见,添加生物质炭对增加 SOC 含量,提高土壤生产力的可持续性具有重要意义。进一步分析本研究结果发现,0 ~ 10 cm 土层的 SOC 含量对生物质炭的响应更为明显(图 3),这与前述分析

的生物质炭对 SOC 的固持、截留和转化等作用有关。不仅如此,生物质炭添加后 10 ~ 40 cm 土层的 SOC 含量也显著提高,根系生长、淋滤作用等导致生物质炭颗粒随土壤剖面垂直迁移可能是这一结果的原因<sup>[42]</sup>。然而生物质炭加对深层 SOC 含量的提升效果不及表层。He 等<sup>[43]</sup>发现施入田间土壤 2 年后的洋麻芯生物质炭颗粒较新制备生物质炭明显粗糙,老化生物质炭表面吸附了更多的土壤矿物,且含氧官能团增加,释放有机质减少。由此可见,沿土壤剖面不同老化环境下的生物质炭性质存在差异性,导致其对 SOC 含量的影响具有显著剖面差异。

### 3.3 小麦产量和氮素利用率对生物质炭施用的响应

本研究结果表明,生物质炭虽然对耕作层土壤速效氮与 SOC 含量具有提高效果,但对小麦增产与氮素利用率的提高却无积极作用。宋大利等<sup>[31]</sup>研究表明常规氮肥施用量(225 kg/hm<sup>2</sup>)下生物质炭添加与否处理的小麦产量相近,这表明氮肥供应充足的前提下生物质炭虽然能提高土壤养分含量,但并未实现当季作物产量的提升。因此,生物质炭的后期增产效果是否显著仍需进一步验证。此外,孙海军等<sup>[44]</sup>研究表明硝化抑制剂对水稻的增产效果主要在减氮条件下表现;柳瑞等<sup>[45]</sup>认为适度减氮配施生物质炭能够促进水稻对氮素的吸收,提高氮素利用率。因此,结合本文研究结果,有待于开展长期试验进一步探索减化肥氮的条件下生物质炭是否对小麦产量与氮素利用率产生积极影响。

## 4 结论

1) 添加生物质炭可提高 0 ~ 10 cm 表层土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、全氮和速效钾以及 30 ~ 40 cm 土壤速效钾等养分含量。

2) 0 ~ 40 cm 土壤剖面 SOC 含量因生物质炭施用而提高,特别是 0 ~ 10 cm 表层土壤 SOC 增幅更显著,且提升幅度在高用量生物质炭施用处理下更大。

3) 200 kg/hm<sup>2</sup> 施氮条件下,生物质炭施用对小麦氮素利用率、产量及其构成因子均无显著影响。

4) 综合来看,生物质炭施用对土壤肥力特征的影响存在剖面差异,且与其用量相关。

### 参考文献:

[1] 李婷玉,姚澜,钟于秀,等. 绿色发展背景下的中国氮肥需求[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 308–321.  
[2] 陆启帆,林上平,刘胜辉,等. 施肥对毛竹林产量影响的 Meta 分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 88–96.

[3] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(6): 410–416.  
[4] 朱文彬,曾科,田玉华,等. 不同深施方式对太湖地区稻田氨挥发和氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 729–738.  
[5] Yang Y Y, Liu L, Zhang F, et al. Enhanced nitrous oxide emissions caused by atmospheric nitrogen deposition in agroecosystems over China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(12): 15350–15360.  
[6] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1–7.  
[7] 李力,刘娅,陆宇超,等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411–1421.  
[8] 孙美佳,周志勇,王勇强,等. 有机物料添加对山西太岳山油松林土壤呼吸及碳组分的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 67–75.  
[9] Ali M A, Kim P J, Inubushi K. Mitigating yield-scaled greenhouse gas emissions through combined application of soil amendments: A comparative study between temperate and subtropical rice paddy soils[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 529: 140–148.  
[10] 袁帅,赵立欣,孟海波,等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402–1417.  
[11] 杨放,李心清,王兵,等. 生物炭在农业增产和污染治理中的应用[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 100–107.  
[12] Marmo L. EU strategies and policies on soil and waste management to offset greenhouse gas emissions[J]. *Waste Management*, 2008, 28(4): 685–689.  
[13] 方圆,冯浩,操信春,等. 活性炭对土壤入渗、蒸发特性及养分淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 23–26.  
[14] 陈义群,董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1282–1289.  
[15] Chen M, Chen X, Xu X Y, et al. Biochar colloids facilitate transport and transformation of Cr(VI) in soil: Active site competition coupling with reduction reaction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129691.  
[16] Xue P, Hou R J, Fu Q, et al. Potentially migrating and residual components of biochar: Effects on phosphorus adsorption performance and storage capacity of black soil[J]. *Chemosphere*, 2023, 336: 139250.  
[17] 刘飞,张民,诸葛玉平,等. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1351–1358.  
[18] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S, et al. Site - specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 544–553.  
[19] 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.  
[20] 陈芳,张康康,谷思诚,等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报,

- 2019, 38(5): 57–63.
- [21] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6534–6542.
- [22] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324–3333.
- [23] Sun H J, Zhang H L, Wu J S, et al. Laboratory lysimeter analysis of  $\text{NH}_3$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and leaching losses of nitrogen in a rice-wheat rotation system irrigated with nitrogen-rich wastewater[J]. *Soil Science*, 2013, 178(6): 316–323.
- [24] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378(1): 279–294.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] Fan Y C, Shi Y, Yu Z W, et al. Difference of nitrogen accumulation and translocation of wheat varieties with different yield potential[J]. *J. Triticeae Crops*, 2021, 41: 1496–1502.
- [27] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(4): 783–795.
- [28] 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 等. 基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1770–1778.
- [29] Ahmed R, Li Y Z, Mao L L, et al. Biochar effects on mineral nitrogen leaching, moisture content, and evapotranspiration after 15N urea fertilization for vegetable crop[J]. *Agronomy*, 2019, 9(6): 331.
- [30] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977–982.
- [31] 宋大利, 习向银, 黄绍敏, 等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 369–379.
- [32] Chen P F, Liu Y Z, Mo C Y, et al. Microbial mechanism of biochar addition on nitrogen leaching and retention in tea soils from different plantation ages[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 757: 143817.
- [33] Zhang M, Liu Y L, Wei Q Q, et al. Biochar enhances the retention capacity of nitrogen fertilizer and affects the diversity of nitrifying functional microbial communities in Karst soil of southwest China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 226: 112819.
- [34] 王昆艳, 官会林, 卢俊, 等. 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 503–509.
- [35] Morales M M, Comerford N, Guerrini I A, et al. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar–soil mixtures[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(3): 306–314.
- [36] Schneider F, Haderlein S B. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus—mechanistic insights[J]. *Geoderma*, 2016, 277: 83–90.
- [37] 张珂珂, 宋晓, 郭斗斗, 等. 生物炭对潮土土壤肥力特征和氮肥利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(12): 73–80.
- [38] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317–331.
- [39] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4327–4337.
- [40] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1795–1799.
- [41] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206–213.
- [42] Tammeorg P, Simojoki A, Mäkelä P, et al. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 108–116.
- [43] He E K, Yang Y X, Xu Z B, et al. Two years of aging influences the distribution and lability of metal(loid)s in a contaminated soil amended with different biochars[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 673: 245–253.
- [44] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027–1033.
- [45] 柳瑞, 高阳, 李恩琳, 等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 926–932.