

# 生物质炭对小麦根区土壤养分和微生物特征的影响

郑子乔<sup>1</sup>, 祝经伦<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 烟台研究院, 山东 烟台 264000; 2. 同济大学 建筑设计研究院, 上海 200000)

**摘要:** 利用控制性的大田试验栽培技术, 连续 5 年研究了不同浓度生物质炭(对照 CK, 0 t/hm<sup>2</sup>, 低生物质炭 LB, 10 t/hm<sup>2</sup>, 中生物质炭 MB, 20 t/hm<sup>2</sup>, 高生物质炭 HB, 40 t/hm<sup>2</sup>)对小麦生长过程中根区土壤特性和微生物特性的影响。结果表明: (1) 小麦根区土壤 pH 值、容重随生物质炭浓度的增加呈逐渐降低趋势, 不同浓度生物质炭处理下的小麦根区土壤 pH 值、容重均显著低于对照 ( $p < 0.05$ ); (2) 小麦根区土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量均随生物质炭浓度的增加呈先增加后降低趋势, MB 浓度处理下, 小麦根区土壤有机碳、全氮和全钾达到最大, 不同浓度生物质炭处理下土壤有机碳、全氮和全钾均显著高于对照 ( $p < 0.05$ ), 全磷差异并不显著 ( $p > 0.05$ ); (3) 小麦根区土壤微生物数量以细菌最多(占到微生物总数的 90% 以上), 其次是放线菌, 真菌最少, 小麦根区土壤细菌数量和放线菌数量, 随生物质炭浓度的增加呈先增加后降低趋势, MB 浓度处理下, 小麦根区土壤细菌数量和放线菌数量和最大, 并且显著高于对照 ( $p < 0.05$ ), 而生物质炭却显著降低了小麦根区土壤真菌数量, 总的来说, 生物质炭显著增加了土壤微生物总数; (4) 小麦根区土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物呼吸、微生物代谢熵和微生物活度均随生物质炭浓度的增加呈先增加后降低趋势, MB 浓度处理下, 小麦根区土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物呼吸、微生物代谢熵和微生物活度达到最大 ( $p < 0.05$ )。生物质炭的施用促进了小麦根区土壤养分、微生物数量和微生物特性和改良土壤肥力作用, 以中水平生物质炭(MB)处理下效果最好, 而高水平生物质炭(HB)可能会有一定的抑制作用, 这还与土壤类型、土壤肥力、植物种类和生态环境等密切相关。

**关键词:** 生物质炭; 小麦; 土壤特性; 微生物特性; 根区

中图分类号: S154; S606

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0035-07

## Effect of Biochar on Soil and Microbial Characteristics in Root Zone of Wheat

ZHENG Ziqiao<sup>1</sup>, ZHU Jinglun<sup>2</sup>

(1. Yantai Institute, China Agricultural University, Yantai, Shandong 264670, China;

2. Architectural Design and Research Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** We used the controlling fields experiment of cultivation technique to study the responses of soil and microbial characteristics of wheat in root zone to different biomass charcoal addition levels (CK 0 t/hm<sup>2</sup>, LB 10 t/hm<sup>2</sup>, MB 20 t/hm<sup>2</sup>, HB 40 t/hm<sup>2</sup>) by five years. The results showed that: (1) soil pH, bulk density in root zone gradually decreased with the increase of biochar concentration and were significantly lower than CK ( $p < 0.05$ ); (2) soil nutrients in root zone and plant nutrients first increased and then decreased with the increase of biochar concentration and were significantly higher than CK ( $p < 0.05$ ), while soil total phosphorus had no significance ( $p > 0.05$ ); (3) bacteria amounts were predominant (more than 99.3%), actinomycetes amounts were the next, and fungi amounts were the least among composition of three communities of soil microbes in root zone; soil bacteria and actinomycetes amounts first increased and then decreased with the increase of biochar concentration and were significantly higher than CK ( $p < 0.05$ ), while biochar addition decreased soil fungi amounts, in total, biochar addition significantly increased the total number of microorganisms ( $p < 0.05$ ); (4) soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, microbial respiration, microbial metabolic entropy and microbial activity first increased and then decreased with the increase of

biochar concentration and were significantly higher than CK ( $p<0.05$ ); (5) all in all, a certain range of biochar addition could improve the soil and microbial characteristics and fertility in root zone of wheat, but that was closely related to soil type, soil fertility, plant type or other ecological environment.

**Keywords:** biochar; wheat; soil characteristics; microbial characteristics; root zone

土壤是生态系统中的重要组成部分,土壤养分在有机物质分解转化过程中起主导作用,影响着土壤生态系统中能量流动和物质循环,能够反映土壤质量和健康状况<sup>[1-2]</sup>;土壤微生物量能反映参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化,被认为是土壤活性养分的储库,也是植物生长可利用养分的重要来源,在评价土壤肥力、环境监测、评价土地利用等方面有广泛的作用<sup>[3]</sup>;土壤微生物是催化土壤有机物质分解的蛋白质,主要来源于植物根系及动物的分泌释放<sup>[4-5]</sup>;它参与土壤中有有机物质转化的全过程,直接或间接影响着土壤一系列的生物化学反应,对生态系统的物质循环产生重要影响<sup>[6]</sup>。土壤呼吸作为土壤碳通量和陆地生态系统碳循环的关键成分,土壤呼吸的微小变化将对大气碳热平衡产生巨大影响<sup>[6]</sup>。

土壤养分和微生物特性是构成生态系统中农作物高产稳产的物质基础,对农作物生长、发育及其产量有着直接影响<sup>[7-8]</sup>;土壤微生物和养分在有机物质分解转化和植物生长过程中过程中起主导作用,同时也影响着植物体内的能量流动和物质循环,土壤酶活性能参与多种反应(如矿化—同化、氧化—还原等),是植物生长过程中养分吸收的主要驱动力<sup>[9]</sup>;在现代农业生产中,为了提高植物对土壤养分的可利用性,往往认为的添加特定的对于土壤生态系统具有良好作用的物质或者肥料,其中生物质炭作为一种绿色肥料,在现代农业生产中得到了广泛的应<sup>[10]</sup>。生物质炭是由植物生物质在缺氧条件下经热裂解、炭化而形成的一类高度芳香化、难溶性的固态物质<sup>[1-3]</sup>。在农业生产中,我国每年将产生 7 亿多吨生物秸秆,其中约 23%被焚烧,不仅带来了严重的环境污染,同时也造成了资源的极大浪费<sup>[7]</sup>。农业秸秆的合理利用

成为协调农业资源、环境以及可持续发展的重大问题。大量研究表明,施用生物质炭可提高土壤持水容量、养分吸持容量、阳离子交换量(CEC)和土壤微生物活性,促进土壤稳定性团聚体形成,提高土壤养分含量等<sup>[11-12]</sup>。因此,生物质炭可作为改良和培肥土壤、提高农作物的生产效率、促进农作物增产的农业可持续发展有效措施,将农业生物质废弃物低温热裂解制成生物质炭用于农业生产受到了广泛的关注<sup>[13]</sup>。目前生物质炭对土壤肥力影响的研究较多,我国学者也已着重研究生物质炭对于农业生产的作用,但多数研究都集中在生物质炭的理化特性和环境功能等方面,对于小麦土壤上施用生物质炭对植物生长过程中根区土壤养分和微生物特性的影响尚不多见。有鉴于此,本研究采用室内大田试验,对施用生物质炭后小麦植株生长状况、根区土壤性质、植株体内养分含量及根区土壤养分和微生物特性等进行研究,以期为生物质炭在农业推广上的应用,提高土壤生产力,促进我国农业的可持续发展,提供重要的科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013—2017 年在中国农业大学烟台研究院的日光温室内进行,供试土壤为北方典型土壤(主要为棕壤),供试小麦品种为印度小麦,小麦品种和生物质炭均购于中国农科院,种子安全贮存半年度过休眠期,挑选籽粒饱满、无病虫害、大小均匀、色泽一致的种子,80%乙醇消毒 20~30 min,蒸馏水反复冲洗 4℃保存以备用。供试生物质炭来源中国农业大学烟台研究院,其基本特性见表 1。

表 1 供试土壤及生物质炭的基本特性

材料	pH	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	孔隙度/ %
生物质炭	8.96	412.03	6.12	2.57	69.58	153.47	43.52

1.2 研究方法

设置 4 个处理,即生物质炭当季施用量分别为 CK(对照,0 t/hm<sup>2</sup>)、LB(低浓度生物质炭,10 t/hm<sup>2</sup>)、MB(中浓度生物质炭,20 t/hm<sup>2</sup>)、HB(高浓度生物质炭,40 t/hm<sup>2</sup>),每个处理设置 5 次重复(共 20 个小区),采用裂区试验设计,每个小区面积 2 m×3 m=6 m<sup>2</sup>,小区

与小区之间留 20 cm 缓冲带,株距为 10 cm,行距为 10 cm,播种深度 2~5 cm,播种量 20~30 kg/hm<sup>2</sup>,在小麦种子播种前施入生物质炭,翻耕使生物质炭与土壤充分混合。除生物质炭用量不同外,各处理氮、磷、钾肥作基肥,用量为 0.217 kg/m<sup>2</sup> NH<sub>3</sub> HCO<sub>3</sub>,0.108 kg/m<sup>2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,0.036 kg/m<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O,以满足小麦正常生长发育所

需。2013年4月20日种植,试验期间采取同样的管理措施(大田管理措施),分别在播种后、苗期、初花期灌水3次,自然条件生长,试验期间不追肥,定期除草,最大程度上保证其长势一致,10月20日收获,连续5a重复上述试验。

### 1.3 采样方法

为了测定土壤微生物量等相关指标,需要进行土样采集,在本试验中采取抖落法进行试验小区的土样采集。为了获取完整的根系土壤,首先在试验小区中将带有完整根系的土体挖出,然后通过抖落的方式去除大块土壤,之后取下根系周围的土壤,并去除杂质,这样就获取到了根系土。之后将根系土分为三份:第一份用来测定含水量,因此快速将鲜土装入聚乙烯封袋;第二份,风干后过1mm筛,以备酶活性测定;第三份土样用来测定微生物量及土壤容重<sup>[10]</sup>,4℃保存。

### 1.4 测定方法

土壤理化性质及养分含量的测定:pH采用电极电位法(1:2.5土水比);全盐采用电导法(%);土壤有机碳(g/kg)采用重铬酸钾氧化外加加热法;土壤全氮(g/kg)用全自动凯氏定氮法;土壤全磷(g/kg)用NaOH熔融—钼锑抗比色法;全钾(g/kg)采用火焰分光光度法<sup>[11]</sup>。土壤微生物数量测定采用平板梯度稀释法,其中细菌培养基为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌培养基为马丁氏培养基,放线菌培养基为高氏一号琼脂培养基<sup>[11]</sup>。

土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法,其中氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳、氮被浸提出来的比例分别为0.38,0.45<sup>[12]</sup>。

土壤微生物的周转按照高云超的方法进行估算<sup>[13]</sup>:

$$\beta = \Sigma A / N$$

式中: $\beta$ 为库容值; $A$ 为微生物量总和; $N$ 为采样次数。

$$r_b = \Sigma B / \beta$$

式中: $r_b$ 为周转率; $B$ 为转移量。

$$T = 1 / r_b$$

式中: $T$ 为周转周期。

$$F = \beta \times \rho \times h / T$$

式中: $F$ 为流通量; $\rho$ 为土壤密度; $h$ 为采样深度。

对微生物活度的测定采取改进的FDA法进行<sup>[13]</sup>。Excel 2013和SPSS 21.0软件包进行数据的统计和方差分析,单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用LSD法(最小显著性差异法)( $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭对小麦根区土壤理化性质的影响

由图1可知,生物质炭对小麦根区土壤理化性质

具有明显的影响,小麦根区土壤含水量变化范围为8.12%~14.14%,基本表现为HB>MB>LB>CK,生物质炭处理下土壤含水量均显著高于对照( $p < 0.05$ ),并且不同处理下土壤含水量差异均显著( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤含水量分别提高了13.92%,60.34%和74.14%;土壤pH变化范围为6.58~7.86,基本表现为HB<MB<LB<CK,其中LB与MB差异不显著( $p > 0.05$ ),MB和HB显著低于对照( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤pH分别降低了6.61%,16.53%和23.97%;土壤容重变化范围0.92~1.21 g/cm<sup>3</sup>,基本表现为HB<MB<LB<CK,其中LB与MB差异不显著( $p > 0.05$ ),MB和HB显著低于对照( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤容重分别降低了6.36%,10.81%和16.28%;土壤电导率变化范围为78.36~113.58  $\mu\text{m}/\text{cm}$ ,基本表现为HB<MB<LB<CK,并且不同处理下土壤电导率与对照差异均显著( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤电导率分别增加了4.84%,29.19%和44.95%。

### 2.2 生物质炭对小麦植物根区土壤养分的影响

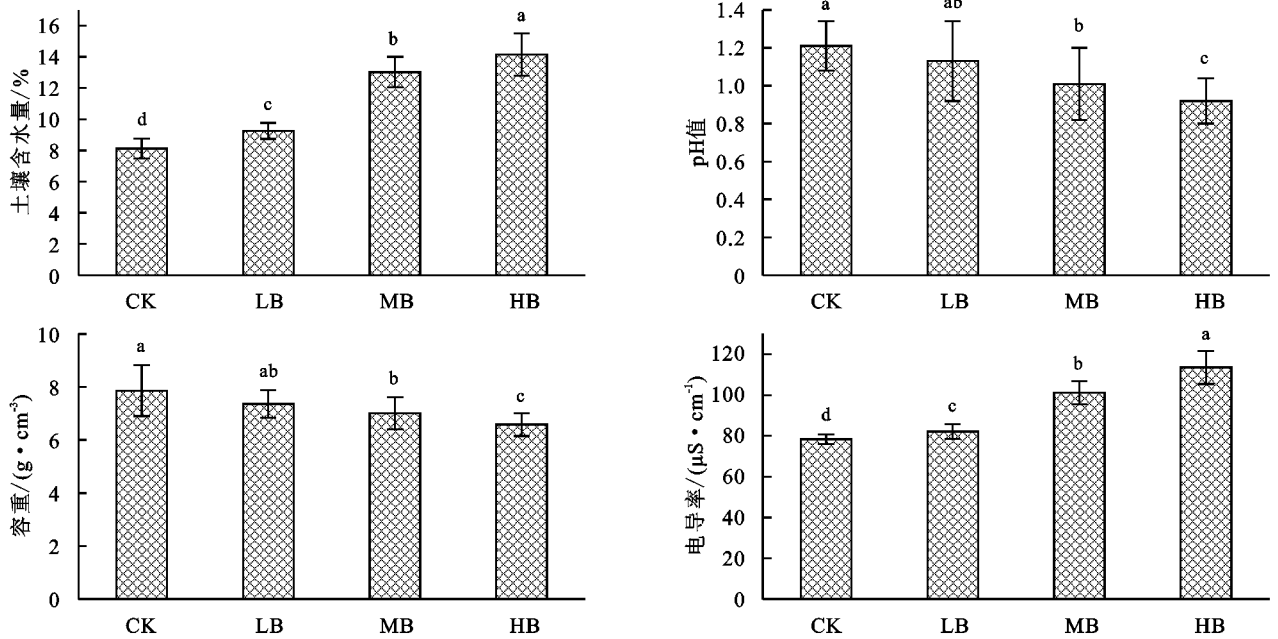
由图2可知,生物质炭对小麦根区土壤养分具有明显的影响,土壤有机碳变化范围为7.36~11.37 g/kg,基本表现为MB>HB>LB>CK,其中HB,MB与LB之间差异均显著( $p < 0.05$ ),并且不同处理下土壤有机碳与对照差异均显著( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤有机碳分别提高了25.41%,70.92%和54.48%;土壤全氮变化范围为0.98~1.98 g/kg,基本表现为MB>HB>LB>CK,其中HB,MB与LB之间差异均显著( $p < 0.05$ ),并且不同处理下土壤全氮与对照差异均显著( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤全氮分别提高了25.51%,102.04%和68.37%;土壤全磷变化范围为0.84~0.91 g/kg,基本表现为MB>HB>LB>CK,其中不同处理下土壤全磷与对照差异均不显著( $p < 0.05$ );土壤全钾变化范围为12.23~25.74 g/kg,基本表现为MB>HB>LB>CK,其中HB,MB与LB之间差异均显著( $p < 0.05$ ),并且不同处理下土壤全钾与对照差异均显著( $p < 0.05$ ),与对照相比,LB,MB和HB处理下土壤全钾分别提高了33.20%,108.26%和78.17%。

### 2.3 生物质炭对小麦根区土壤微生物数量的影响

生物质炭对小麦根区土壤微生物数量的影响如图3所示,生物质炭根区土壤微生物数量以细菌最多,其次是放线菌,真菌最少。不同生物质炭处理下小麦根区土壤细菌数量变化范围为15.3~23.6万,

基本表现为  $MB > HB > LB > CK$ , 其中 HB, MB 与 LB 之间差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 并且不同处理下土壤细菌数量与对照差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 与对照相比, LB, MB 和 HB 处理下土壤细菌分别提高了 23.53%, 54.25% 和 41.43%; 土壤真菌数量变化范围在  $8.3 \times 10^2 \sim 1.32 \times 10^3$  之间, 基本表现为  $MB < HB < LB < CK$ , 其中 HB, MB 与 LB 之间差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 并且不同处理下土壤真菌数量与对照差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 与对照相比, LB, MB 和 HB 处理下土壤真菌分别降低了 8.33%, 37.12% 和 30.30%; 土壤放线菌数量变化范围在  $6.2 \times 10^3 \sim$

$9.5 \times 10^3$  之间, 基本表现为  $MB > HB > LB > CK$ , 其中 HB, MB 与 LB 之间差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 并且不同处理下土壤真菌数量与对照差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 与对照相比, LB, MB 和 HB 处理下土壤真菌分别提高了 17.74%, 53.23% 和 30.65%; 土壤微生物总数量变化范围在  $5.2 \times 10^5 \sim 1.21 \times 10^6$  之间, 基本表现为  $MB > HB > LB > CK$ , 其中 HB, MB 与 LB 之间差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 并且不同处理下土壤微生物总数量与对照差异均显著 ( $p < 0.05$ ), 与对照相比, LB, MB 和 HB 处理下微生物总数量分别提高了 59.62%, 132.69% 和 126.92%。



注: 不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图1 生物质炭对小麦根区土壤理化性质的影响

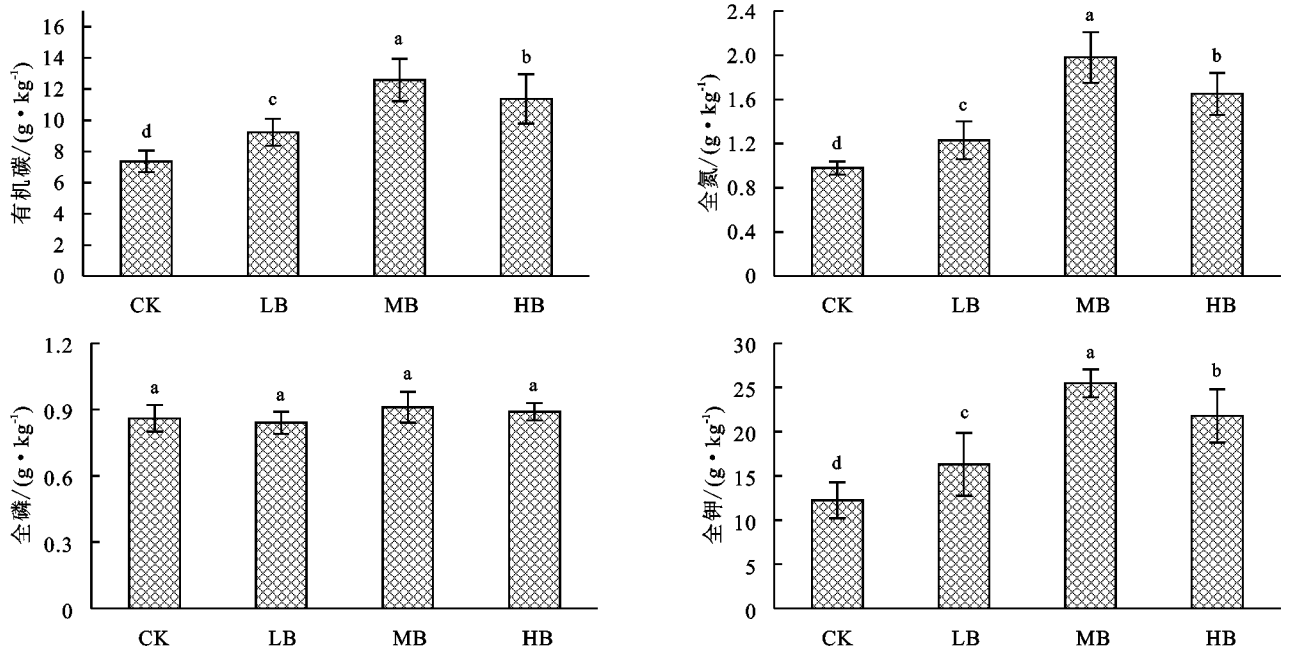


图2 生物质炭对小麦植物根区土壤养分的影响

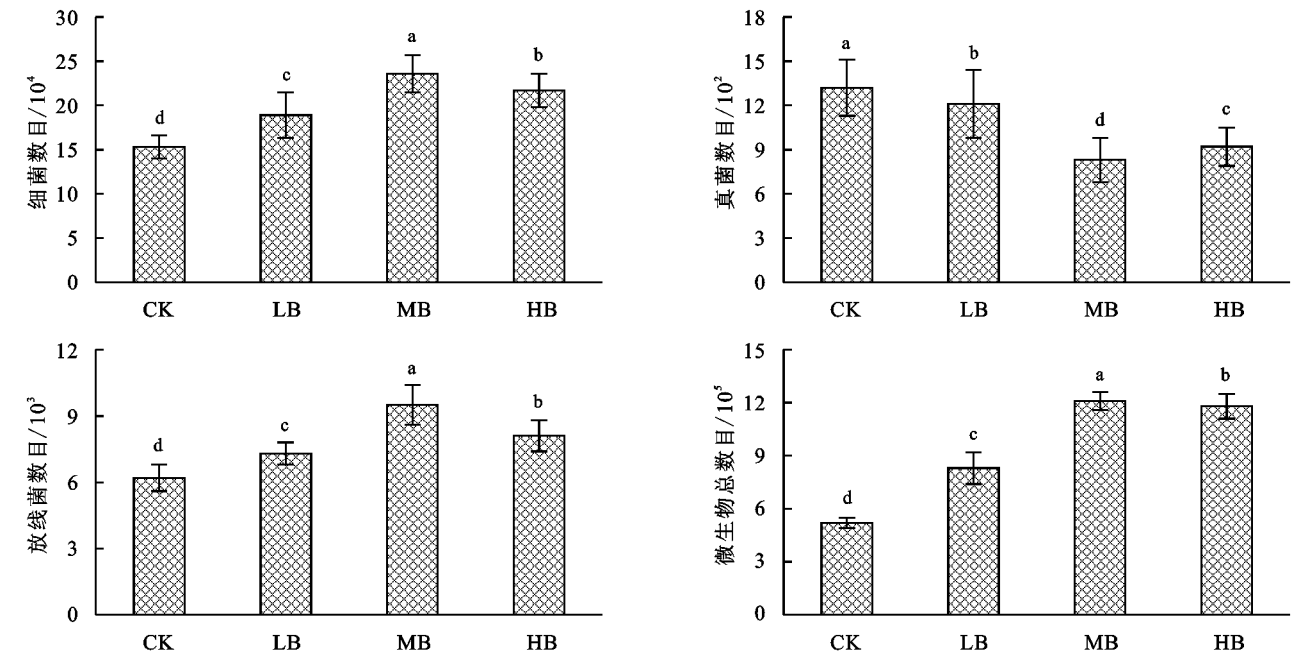


图 3 生物质炭对小麦根区土壤微生物数量的影响

2.4 生物质炭对小麦根区土壤呼吸及微生物代谢熵的影响

表 2 显示了生物质炭对小麦根区土壤呼吸及微生物代谢熵的影响,5 a 内土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物呼吸和微生物代谢熵平均值基本表现为 MB>HB>LB>CK。小麦根区土壤微生物量碳变化范围在 463.2~580.7 mg/kg 之间,基本表现为 MB>HB>LB>CK,其中 HB,MB 与 LB 之间差异均显著( $p<0.05$ ),并且不同处理下土壤微生物量碳与对照差异均显著( $p<0.05$ ),与对照相比,LB,MB 和 HB 处理下土壤微生物量碳分别提高了 8.57%,27.31%和 21.70%;土壤微生物量氮变化范围在 95.6~198.5 mg/kg 之间,基本表现为 MB>HB>LB>CK,其中 HB,MB 与 LB 之间差异均显著( $p<0.05$ ),并且不同处理下土壤微生物量氮与对照差异均显著( $p<0.05$ ),与对照相比,LB,MB 和 HB 处理下土壤微生物量氮分别提

高了 17.78%,107.64%和 91.63%;土壤微生物量磷变化范围在 16.3~20.7 mg/kg 之间,基本表现为 MB>HB>LB>CK,其中不同处理下土壤微生物量磷与对照差异均不显著( $p>0.05$ );土壤微生物呼吸变化范围在 2.01~2.68  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$  之间,基本表现为 MB>HB>LB>CK,其中 HB,MB 与 LB 之间差异均显著( $p<0.05$ ),并且不同处理下土壤微生物呼吸与对照差异均显著( $p<0.05$ ),与对照相比,LB,MB 和 HB 处理下土壤微生物呼吸分别提高了 7.46%,33.33%和 30.35%;土壤微生物代谢熵变化范围在 5.03~6.87  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$  之间,基本表现为 MB>HB>LB>CK,其中 HB,MB 与 LB 之间差异均显著( $p<0.05$ ),并且不同处理下土壤微生物代谢熵与对照差异均显著( $p<0.05$ ),与对照相比,LB,MB 和 HB 处理下土壤微生物代谢熵分别提高了 18.49%,36.58%和 29.62%。

表 2 生物质炭对小麦根区土壤呼吸及微生物代谢熵的影响

项目	土壤微生物量碳/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	土壤微生物量氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	土壤微生物量磷/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	土壤微生物呼吸/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	土壤微生物代谢熵/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )
CK	463.2±36.9d	95.6±5.6d	16.3±1.9a	2.01±0.52d	5.03±0.62d
LB	502.9±25.3c	112.6±6.9c	19.8±2.5a	2.16±0.35c	5.96±0.35c
MB	589.7±26.9a	198.5±12.0a	20.7±3.2a	2.68±0.26a	6.87±0.26a
HB	563.7±30.4b	183.2±13.7b	20.3±2.1a	2.62±0.43b	6.52±0.48b

注:同列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.5 生物质炭对小麦根区土壤微生物周转的影响

土壤微生物周转对土壤有机质和养分循环起着决定作用,对了解土壤养分供应潜力和植物养分的有效性有非常重要的意义。由表 2 可知,CK 土壤微生物周转率最低,微生物量碳周转率为 0.75  $\text{a}^{-1}$ ,周转周期为 1.26 a,说明 CK 土壤微生物量碳在 1.26 a

更新 1 次;CK 微生物量氮周转率为 0.53  $\text{a}^{-1}$ ,周转周期为 2.13 a,土壤微生物量氮在 2.13 a 更新 1 次;土壤微生物量碳周转率高于氮周转率,说明微生物量碳更新比微生物量氮快。生物质加快了土壤微生物碳和氮的周转,主要表现为增加了微生物量碳含量和周转率。

表 3 生物质炭对小麦根区土壤微生物周转的影响

项目	微生物量碳				微生物量氮			
	微生物量碳转移量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	微生物量碳 周转率/ $\text{a}^{-1}$	土壤微生物量 碳周转期/ $\text{a}$	微生物量碳流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	微生物量氮转移量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	微生物量氮 周转率/ $\text{a}^{-1}$	土壤微生物量 氮周转期/ $\text{a}$	微生物量氮流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
CK	201.3±13.6d	0.75±0.06b	1.26±0.25a	635.9±26.9d	23.6±2.4d	0.53±0.06d	2.13±0.26a	153.2±32.6d
LB	456.7±32.6c	0.81±0.08b	1.10±0.16b	985.3±21.5c	31.7±1.8c	0.61±0.05c	1.56±0.23b	169.7±43.5c
MB	623.5±19.8a	1.36±0.23a	0.81±0.11c	1325.7±56.3a	65.9±3.5a	1.21±0.13a	1.32±0.18c	203.4±23.8a
HB	601.8±25.4b	1.35±0.15a	0.68±0.08d	1103.4±42.7b	52.4±4.3b	0.97±0.14b	0.87±0.11d	189.2±29.7b

2.6 生物质炭对小麦根区土壤微生物活度的影响

由图 4 可知,土壤微生物活度的变化范围 0.46~0.79,基本表现为 MB>HB>LB>CK,其中 HB、MB 与 LB 之间差异均显著( $p<0.05$ ),并且不同处理下土壤微生物活度与对照差异均显著( $p<0.05$ ),与对照相比, LB、MB 和 HB 处理下土壤微生物活度分别提高了 26.09%,71.74%和 58.70%。主要是由于较高的生物质炭造成土壤肥力降低,导致了 LB 土壤微生物数量和酶活性的降低,从而导致土壤微生物活度显著较低。

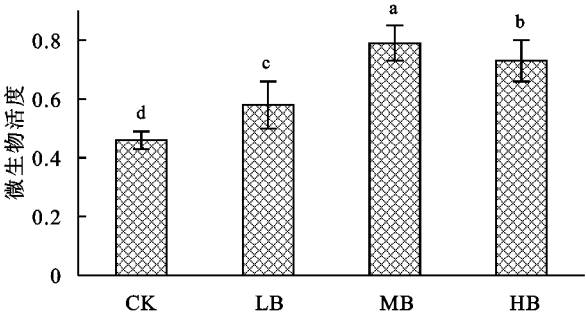


图 4 生物质炭对小麦根区土壤微生物活度的影响

3 讨论与结论

随着研究的深入,越来越多的研究发现生物质炭在增强土壤吸附能力方面作用显著,尤其是阳离子方面,其表面容易被轻度氧化,加之生物及非生物作用参与下,其能够形成酚基等,从而提升电荷量,在增强土壤电导率方面作用显著<sup>[13]</sup>。通过研究发现,生物质炭与根系土壤含水量之间存在正相关,且在 0.05 检验水平下达到显著;但是在生物质炭作用下,土壤容重及 pH 值被降低,全盐含量随之下降,土壤总孔隙度降低,因此产生了较多的可溶性离子,在这种情况下导致土壤的电导率被提升;土壤酸碱性在作物生长方面起着至关重要的作用,土壤 pH 值过高或过低都不利于微生物的新陈代谢,进而影响作物对养分的吸收利用。虽然土壤中生物质浓度不同,但是与对照组相比,根区土壤容重及水分都较低,土壤 pH 值也出现了明显下降,主要原因在于在生物质炭作用下根系具有了更强的穿插性和扩展能力,降低了土壤板结可能性,对于土壤结构起到了显著的改善作用,阴阳

离子的溶解度被提升,从而电导率及水分均得以明显上升<sup>[14-15]</sup>,这大大有利于小麦对养分的吸收。

土壤养分不仅能反映土壤“营养库”中养分的贮量水平,而且在一定程度上能影响有效养分的供应能力<sup>[16]</sup>;土壤微生物是生态系统物质循环和能量流动的主要驱动力,对土壤有机质的分解、腐殖质的形成、养分的转化及循环等过程具有重要作用<sup>[17-18]</sup>;土壤微生物通过分泌酶的方式参与土壤生态系统营养循环等,土壤酶活性动力学的变化可反映出土壤中各种生化过程的强度及其方向,土壤酶活性、微生物量和微生物数量在植物生长过程中起着重要作用<sup>[19]</sup>。本研究中生物质炭促进了小麦与土壤之间的平衡共生关系,在小麦植株生长过程中提高了土壤肥力,而土壤肥力的改变会对植物的入侵做出进一步的反馈调节。本研究在相同生境条件下,施用生物质炭后,小麦植物根区土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量均随生物质炭浓度的增加呈先增加后降低趋势,MB 处理下,小麦植物根区土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量达到最大,不同浓度生物质炭处理下的小麦植物根区土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量均显著高于对照( $p<0.05$ ),但生物质炭在高用量时可能会产生轻微抑制作用,具体表现为小麦根区土壤养分含量随生物质炭浓度的增加呈先增加后降低趋势。由此表明了生物质炭对小麦根区土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量均表现为一定程度的增加效应,并且生物质炭处理下小麦根区土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量均显著高于对照( $p<0.05$ ),与前人的研究结果相一致<sup>[20-22]</sup>。一方面,生物质炭具有较大的比表面积,通过表面催化活性促进小的有机分子聚合形成土壤有机质,同时也能够吸附多种离子,提高土壤的保肥性能,通过激发效应促进土壤有机质的分解,养分含量迅速提高<sup>[23]</sup>;另一方面,生物质炭的稳定性较高,随着生物质炭的施入,土壤中累积的生物质炭增多,一些极细小的生物质炭颗粒可能附着于土壤表面<sup>[24]</sup>;此外,生物质炭具有多芳香环和非芳香环的复杂结构,使其表现出高度的化学和微生物惰性,施入

土壤后难以被微生物利用<sup>[25-26]</sup>。由此表明生物质炭的施用有利于植被—土壤系统营养物质的循环、腐殖质的形成和土壤有效养分的提高,同时小麦根区较低的 pH 增加了根区土壤养分的有效吸收和利用,这也是多种环境因素共同引起的,但从生态系统结构稳定性而言,生物质炭对土壤养分影响的过程比较复杂,与施用量、施用时间、生境、土壤本身特性、物候等生理生态特性的差异有关。而不同浓度的生物质炭对小麦根区土壤特性的影响效果并不均匀一致,总体来看,生物质炭对小麦生长过程中根区土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量起到一定的促进作用,造成这种情况的主要原因可能是由于生物质炭的根系释放不同的化学物质,释放的物质通过化感作用影响土壤理化性质及营养循环等,对其根区土壤微生物的数量及分布造成不同的影响。由此可知,生物质炭施用技术是改善土壤肥力、提高土壤生产力的重要措施,而在小麦的高产栽培过程中需合理控制生物质炭浓度。而对于小麦栽培过程中土壤本身的肥力特性也是影响生物质炭效应的重要因素,生物质炭对小麦生长的效应需从土壤肥力、小麦类型、施炭水平以及管理措施等多方面因素加以综合考虑。

#### 参考文献:

- [1] 杨宁,杨满元,雷玉兰,等. 紫色土丘陵坡地土壤微生物群落的变化[J]. 生态环境学报,2015,24(1):34-40.
- [2] 吴林坤,林向民,林文雄. 根系分泌物介导下植物—土壤—微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报,2014,38(3):298-310.
- [3] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤微生物群落多样性的变化[J]. 林业科学,2016,52(8):146-156.
- [4] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报,2015,35(5):1445-1451.
- [5] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分演变[J]. 林业科学,2014,50(12):144-150.
- [6] 陈心想,耿增超,王森,等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报,2014,33(4):751-758.
- [7] 陈安强,付斌,鲁耀,等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报,2015,31(21):160-167.
- [8] 吴林坤,黄伟民,王娟英,等. 不同连作年限野生地黄根际土壤微生物群落多样性分析[J]. 作物学报,2015,41(2):308-317.
- [9] 韩剑,张静文,徐文修,等. 新疆连作,轮作棉田可培养的土壤微生物区系及活性分析[J]. 棉花学报,2015,23

(1):69-74.

- [10] 刘作云,杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地退化植被和恢复植被土壤微生物生物量的研究[J]. 生态环境学报,2014,23(11):1739-1743.
- [11] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报,2014,34(21):6137-6146.
- [12] 马文文,姚拓,靳鹏,等. 荒漠草原 2 种植物群落土壤微生物及土壤酶特征[J]. 中国沙漠,2014,34(1):176-183.
- [13] 高高涓,曹卫东,白金顺,等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. 土壤学报,2015,52(4):902-910.
- [14] 刘纯,刘延坤,金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. 生态学报,2014,34(2):451-459.
- [15] 王文鹏,毛如志,陈建斌,等. 种植方式对玉米不同生长期土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(10):1293-1301.
- [16] 斯贵才,袁艳丽,王建,等. 围封对当雄县高寒草原土壤微生物和酶活性的影响[J]. 草业科学,2015,32(1):1-10.
- [17] 张黎明,邓小华,周米良,等. 不同种类绿肥翻压还田对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 中国烟草科学,2016,37(4):13-18.
- [18] 杨君珑,付晓莉,马泽清,等. 中亚热带 5 种类型森林土壤微生物群落特征[J]. 环境科学研究,2015,28(5):720-727.
- [19] 谭宏伟,杨尚东,吴俊,等. 红壤区桉树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较[J]. 土壤学报,2014,51(3):575-584.
- [20] 张杰,胡维,刘以珍,等. 鄱阳湖湿地不同土地利用方式下土壤微生物群落功能多样性[J]. 生态学报,2015,35(4):965-971.
- [21] 李清华,王飞,林诚,等. 长期施肥对黄泥田土壤微生物群落结构及团聚体组分特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1599-1606.
- [22] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2663-2672.
- [23] 雷海迪,尹云锋,刘岩,等. 杉木凋落物及其生物炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报,2016,53(3):790-799.
- [24] 曹瑞,吴福忠,杨万勤,等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1257-1264.
- [25] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. 生态学报,2015,35(11):3598-3605.
- [26] 王静,王廷璞,张明莉,等. 全膜覆土穴播种植技术对旱地冬小麦土壤微生物活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(2):108-112.