

长期施用秸秆生物炭对土壤 养分及作物生长的影响

杨丽¹,王劲松²,董二伟²,刘秋霞²

(1. 山西农业大学组织人事部, 山西 太原 030031; 2. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太原 030031)

摘要:于2011—2020年在山西榆次区开展田间定位试验,设不施肥(CK)、不施肥施生物炭(CK+B)、施氮磷钾肥(NPK)和氮磷钾肥配施生物炭(NPK+B)共4个处理,种植模式为玉米-高粱轮作,研究有机碳施用5 a和10 a对0~20 cm土层土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量和土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性的影响,及各处理累积秸秆干物质质量、养分积累量和籽粒产量的变化。结果表明:(1)生物炭施用5 a和10 a后,与CK比较,CK+B处理土壤有机质含量分别提高了46.3%和61.2%;与NPK比较,NPK+B处理土壤有机质含量分别提高了67.8%和77.7%。施用10 a后CK+B处理全氮含量显著高于CK处理,但NPK+B和NPK处理土壤全氮含量间没有显著差异。生物炭对土壤速效钾含量提升效果显著,施用10 a后CK+B和NPK+B处理土壤速效钾含量较CK和NPK处理提升86.4%~46.6%。(2)生物炭施用10 a显著提升了土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性,增幅分别为11.4%~11.9%和7.9%~16.2%,但对脲酶、过氧化氢酶和有效磷没有影响。(3)生物炭施用10 a明显提高了抽穗期和成熟期作物地上部磷和钾的累积量,但对成熟期氮素累积吸收量没有影响,无论施肥与否,生物炭对累积籽粒产量没有显著影响。综上可知,长期施用秸秆生物炭可显著提升土壤有机质和速效钾含量,对土壤全氮和有效磷的影响较小,显著提高植株磷和钾吸收,因此在施用秸秆生物炭时应考虑氮的补充,降低钾投入。

关键词:秸秆生物炭;长期施用;土壤养分含量;作物养分吸收;作物产量

中图分类号:S147.5;S344.1 **文献标志码:**A

Effects of long-term application of straw biochar on soil nutrient and crop growth

YANG Li¹, WANG Jinsong², DONG Erwei², LIU Qiuxia²

(1. Organizational and Personnel Department, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

2. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: Long-term field experiments were carried out from 2011 to 2020 with four treatments of without fertilizer (CK), without fertilizer plus biochar only (CK+B), nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer (NPK), and NPK fertilizer plus biochar (NPK+B). Maize and sorghum were rotated. This experiment was conducted to study the influences of organic carbon continuous application with 5 years and 10 years on soil organic matter, total N, available P and available K content, as well as soil sucrase, urease, alkaline phosphatase, and catalase enzyme activities in 0~20 cm soil layer, along with changes in biomass, nutrient accumulation and yield. The result showed that: (1) Compared with CK, CK+B enhanced soil organic matter by 46.3% and 61.2% after biochar applying 5 and 10 years, respectively; meanwhile they were increased by 67.8% and 77.7% induced by NPK+B relative to NPK, respectively. 10-year biochar application resulted in a higher soil total N content when fertilizer was withdrawn, whereas no difference was noticed under conditions of fertilization. Soil available K con-

收稿日期:2023-06-18

修回日期:2024-01-03

基金项目:山西省博士毕业生来晋工作奖励(SXBYKY2022012);山西省基础研究计划资助项目(202103021223126);山西农业大学科研专项(2020xshf18);财政部、农业部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-06-14.5-A20)

作者简介:杨丽(1981-),女,山西太原人,助理研究员,主要从事农业资源利用研究。E-mail: yangnky@163.com

通信作者:刘秋霞(1989-),女,湖北咸宁人,讲师,硕士生导师,主要从事高粱养分管理研究。E-mail: liuqiuxia333@163.com

tents were enhanced significantly by 86.4% and 46.6% for CK+B and NPK+B, compared with CK and NPK, respectively. (2) Biochar applying continuous for 10 years significantly increased the activities of sucrase by 11.4% ~ 11.9% and alkaline phosphatase by 7.9% ~ 16.2%, but had no effect on soil urease, catalase, and available P. (3) The positive effect of biochar on accumulative P and K uptake both at heading and maturity was observed, but there was no effect on N accumulative uptake at the maturity after 10-year's application. Biochar did not enhance grain yield irrespective fertilization treatment. Obviously, long-term application of straw biochar promoted soil organic matter and soil available K significantly whereas there were relative low influences on soil total N and available P. Biochar application improved the uptake both P and K. Therefore, when biochar was applied, N should be supplied to maintain crop growth, and decrease K dose.

Keywords: straw biochar; long term application; soil nutrient content; crop nutrient absorption; crop yield

生物炭是农业废弃物在低氧条件下高温裂解形成的、具有容重小、孔隙多等特点并含多环芳香烃结构的有机物^[1-2]。生物炭在土壤中不易分解,具有较强的稳定性^[3],施入土壤有利于碳封存和应对全球气候变暖^[4],也解决了秸秆直接还田影响作物出苗的问题^[5];生物炭特有的理化特性也会影响土壤性质,提高土壤有效水含量和土壤大孔隙度比例,降低容重^[6-7]。明确生物炭施用效果对实现“双碳”目标和提升土壤生产力具有重要意义。秸秆生物炭本身含有丰富的养分,尤其是钾素营养,生物炭施用显著提高了土壤水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量;生物炭提高土壤有效钾库的同时,部分有效钾也会进入土壤非有效钾库^[8-9]。生物炭施用到土壤后不同程度提高了土壤速效磷的含量^[10],但也有报道指出生物炭施用对土壤速效磷没有影响^[11]。生物炭对土壤磷有效性的作用可能受土壤类型和磷肥水平的影响^[12],此外,解磷菌等相关微生物活动也会影响土壤磷素供应能力^[13]。生物炭具有较大的比表面积和丰富的微孔结构,可以为微生物提供良好的栖息地。研究发现生物炭能提高氨氧化古菌(AOA)、氨氧化细菌(AOB)等硝化细菌活性^[14]以及 AOA、AOB 的基因拷贝数^[15];在棕壤上能改善土壤氮的固持能力和玉米对氮素的吸收,并使土壤有机质含量增加^[16]。基于全球的 meta 分析表明,农田施用生物炭可显著提高作物产物,不施肥和施肥条件下产量分别提高 28.7%和 9.9%^[17]。

现有关于生物炭施用效果的研究大都为短期研究,长期施用生物炭对作物生长的影响尚不明确。初期施用的新鲜生物炭含有不稳定碳,易被土壤微生物利用^[13],田间老化后稳定性碳增加,生物炭结构也会发生变化,阐明大田条件下长期施用秸秆生物炭对土壤肥力和养分利用效率的影响十分

必要。本研究基于 10 a 田间定位试验,探索长期施用生物炭对土壤养分、作物产量和养分吸收的影响,以为秸秆生物炭的合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2011—2020 年在山西省晋中市山西农业大学东阳试验基地进行(37°33'21"N, 112°40'2"E),试验地海拔 802 m,多年年均气温为 9.7℃,年均降雨量为 440.7 mm,属北温带大陆性气候,种植制度多为一年一作。供试土壤为褐土,土壤机械组成为<0.002 mm,0.002~0.02 mm 和 0.002~2 mm 的土壤颗粒分别为 25.7%、26.3%和 48.0%,试验开始前 0~20 cm 土层土壤全氮为 0.71 g·kg⁻¹,有效磷 9.48 mg·kg⁻¹,速效钾 123.0 mg·kg⁻¹,有机质 9.60 g·kg⁻¹,pH 值 8.49,电导率(*Ec*)为 240 μS·cm⁻¹。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理,分别为不施肥(CK)、不施肥施生物炭(CK+B)、施用氮磷钾肥(NPK)和氮磷钾肥配施生物炭(NPK+B),NPK 处理每年 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 225、75 kg·hm⁻²和 75 kg·hm⁻²,其中 50%的氮和全部磷、钾作为基肥在作物播前施入,其余氮在拔节期追施;CK+B 处理生物炭每年用量为 4.5 t·hm⁻²,除 2011 年外均在秋季作物收获后施入,以保证其熟化,而 2011 年的生物炭在播种前施入;NPK+B 处理肥料施用方法同 NPK 和 CK+B 处理。生物炭(山西三田玉陇农业科技有限公司提供)为玉米秸秆在热解温度 400~500℃下制成,pH 值 10.06,*Ec* 值 6.47 mS·cm⁻¹,全碳 56.9%,全氮 0.66 g·kg⁻¹,有效磷 0.69 g·kg⁻¹,速效钾 29.3 g·kg⁻¹,阳离子代换量(*CEC*) 59.2 cmol·kg⁻¹。小区面积为 75 m²,各处理设 3 个重复。

作物种植模式为玉米-高粱轮作,一年一作,其中 2011、2013、2015、2017 年和 2019 年为玉米,其余年份为高粱,于每年 4 月 29 日—5 月 1 日播种,玉米和高粱播种密度分别为 6.6×10^4 株 $\cdot$ hm⁻²和 12.0×10^4 株 $\cdot$ hm⁻²,玉米于 9 月 20 日收获,高粱推迟 8~10 d 收获。生育期灌溉方式为滴灌,在播后和抽穗前各处理分别灌溉 900 m³ $\cdot$ hm⁻²;高粱用防鸟网进行保护以免鸟害影响籽粒产量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植物样品采集与测定 每年抽穗期和成熟期各处理采集具有代表性植株地上部后,将茎叶和穗部分开,105℃下杀青 30 min,65℃烘干至恒重后测干物质量;烘干后的植株样品粉碎过筛用于测定养分含量。植株全氮采用凯氏定氮法测定;磷用钒钼黄比色法测定;钾用火焰分光光度计法测定^[18]。收获测产时,每个小区去掉边行,单打单收计产。

1.3.2 土壤样品采集与测定 2015 年和 2020 年作物收获后,在远离植株根系的行间采集 0~20 cm 土层土壤样品,风干后磨细过筛用于土壤养分与土壤酶测定。有机质采用重铬酸钾容量法外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,有效磷采用 NaHCO₃浸提钼锑抗比色法测定,速效钾采用 NH₄OAc 浸提火焰光度法测定^[18]。土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性分别采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚钠-次氯酸钠比色法和磷酸苯二钠比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[19]。

1.3.3 参数计算 根据每年各处理抽穗期和成熟期地上部干物质量计算累积干物质量,依据每年作物各部位养分含量和干物质量计算 10 a 累积养分吸收量;收获指数(%)=籽粒产量/成熟期地上部干物质量 $\times$ 100,取各年度的平均值。

1.4 数据处理与分析

用 Excel 软件进行试验数据处理,使用 Excel 和 Origin 8.0 软件进行作图。采用 SPSS 26.0 进行 Two-way ANOVA 分析和相关性分析,所有数据均为 3 个重复的平均值 $\pm$ SE。

2 结果与分析

2.1 长期施用生物炭对土壤养分含量的影响

生物炭明显提高了土壤有机质含量($P<0.05$),施用 5 a(2015 年)和 10 a(2020 年)后 CK+B 处理土壤有机质含量分别提高到 10.6 g $\cdot$ kg⁻¹和 14.3 g $\cdot$ kg⁻¹,比 CK 处理分别提高 46.3%和 61.2%;同期

NPK+B 处理分别增至 16.12 g $\cdot$ kg⁻¹和 18.96 g $\cdot$ kg⁻¹,比 NPK 处理分别提高 67.8%和 77.7%(图 1A、B)。无论 CK 还是 NPK 处理,生物炭施用 5 a 对土壤全氮和有效磷没有显著影响(图 1C、E)($P>0.05$);施用 10 a 后 CK+B 全氮含量增至 0.90 g $\cdot$ kg⁻¹,显著高于 CK 处理($P<0.05$),但 NPK+B 较 NPK 处理土壤全氮含量无显著提升($P>0.05$)(图 1D),施用生物炭 10 a 仍对土壤速效磷含量没有显著影响(图 1F)。生物炭可显著提高土壤速效钾含量($P<0.05$),与 CK 比较,施用生物炭 5 a 和 10 a 后 CK+B 处理土壤速效钾含量分别显著提高 61.6%和 86.4%;与 NPK 处理比较,NPK+B 处理土壤速效钾含量则提高了 46.6%~48.0%(图 1G、H)。

2.2 长期施用生物炭对土壤酶活性的影响

由表 1 可知,无论是否施用氮磷钾肥,生物炭施用 5 a 在一定程度提高了蔗糖酶活性,但对土壤脲酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶活性没有显著影响。生物炭施用 10 a 对土壤脲酶和过氧化氢酶活性也没有显著影响,但 CK+B 处理碱性磷酸酶活性较 CK 显著提高 16.2%,NPK+B 处理蔗糖酶和碱性磷酸酶活性分别较 NPK 显著提高 11.9%和 7.9%($P<0.05$)。

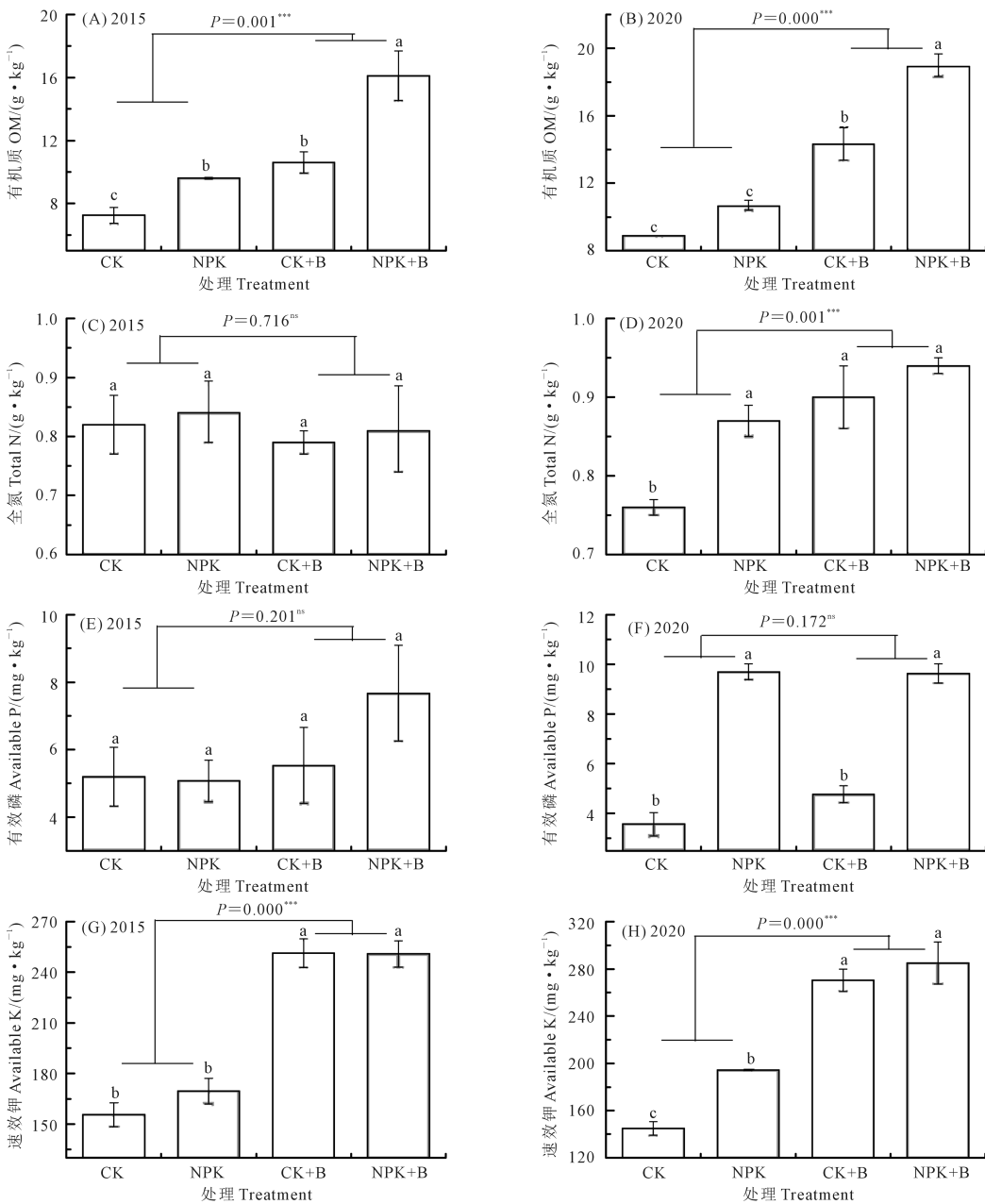
2.3 长期施用生物炭对作物累积干物质量和产量的影响

图 2A 表明,生物炭施用 10 a 后,CK 和 CK+B 处理抽穗期作物累积干物质量分别为 63.7 t $\cdot$ hm⁻²和 64.2 t $\cdot$ hm⁻²,两者无显著差异($P>0.05$);与 NPK 处理相比,NPK+B 处理抽穗期作物累积干物质量显著高于 NPK 处理($P<0.05$),增幅为 3.4%。长期施用生物炭均显著提高了作物成熟期累积干物质量($P<0.05$),与 CK 和 NPK 处理相比,CK+B 和 NPK+B 处理的成熟期累积干物质量分别增加 4.2%和 2.0%(图 2B)。

无论施氮磷钾肥与否,生物炭均提高了植株营养器官的干物质量,但对 10 a 累积籽粒产量和平均收获指数没有显著影响($P>0.05$),CK 和 CK+B 籽粒产量分别为 64.2 t $\cdot$ hm⁻²和 61.0 t $\cdot$ hm⁻²,NPK 和 NPK+B 的产量分别为 98.5 t $\cdot$ hm⁻²和 98.6 t $\cdot$ hm⁻²(图 3A、B)。

2.4 土壤养分含量和土壤酶活性与产量的关系

通过分析土壤养分和土壤酶活性与当季收获作物的籽粒产量的相关关系发现(表 2),作物产量主要受有机质和有效磷的影响,与蔗糖酶和脲酶的活性呈极显著正相关关系。



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平差异显著,ns 表示差异不显著。下同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences among treatments at $P<0.05$. *, ** and *** represent significant differences at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively, and ns indicates insignificant difference. The same as below.

图 1 生物炭对土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量的影响

Fig.1 Effects of biochar on contents of soil organic matter, total N, available P, and available K

表 1 生物炭对土壤酶活性的影响

Table 1 Effects of biochar on soil enzyme activities of sucrase, urease, alkaline phosphatase, and catalase

处理 Treatment	蔗糖酶活性 Sucrase activity		脲酶活性 Urease activity		碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity		过氧化氢酶活性 Catalase activity	
	$/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$		$/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$		$/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$		$/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	
	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020
CK	18.65±0.08b	25.05±0.16c	2.47±0.04a	2.64±0.11a	1.10±0.07a	1.17±0.02c	2.11±0.07a	1.87±0.01a
NPK	28.82±1.41ab	32.69±1.00b	2.56±0.10a	2.91±0.16a	1.18±0.01a	1.27±0.02b	1.90±0.14a	1.85±0.01ab
CK+B	27.88±0.83ab	27.91±0.46c	2.16±0.37a	2.97±0.07a	1.10±0.05a	1.36±0.02a	2.06±0.12a	1.87±0.01a
NPK+B	29.63±4.39a	36.57±1.28a	2.47±0.05a	2.82±0.11a	1.18±0.01a	1.37±0.00a	2.11±0.02a	1.82±0.00b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters behind the data at same column represent significant differences among treatments at $P<0.05$. The same as below.

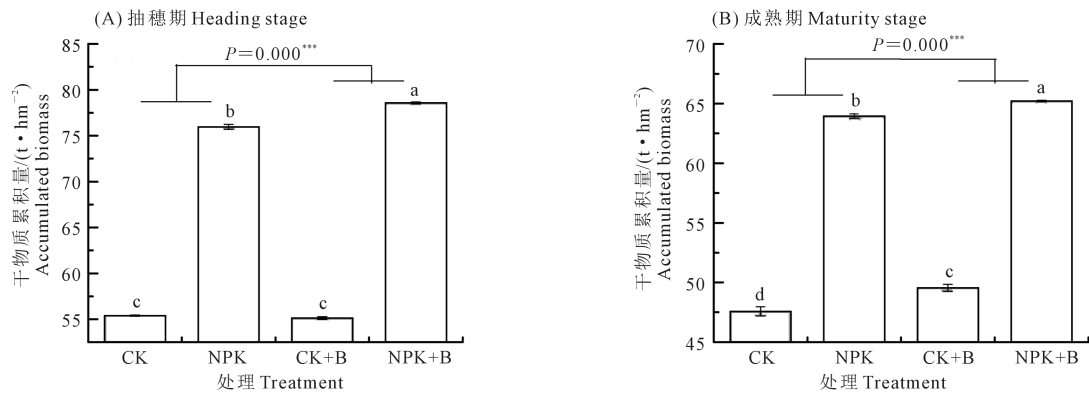


图 2 生物炭对 2011—2020 年抽穗期和成熟期作物地上部干物质累积量的影响

Fig.2 Effects of biochar on accumulative shoot biomass from 2011 to 2020 at heading and maturity stage

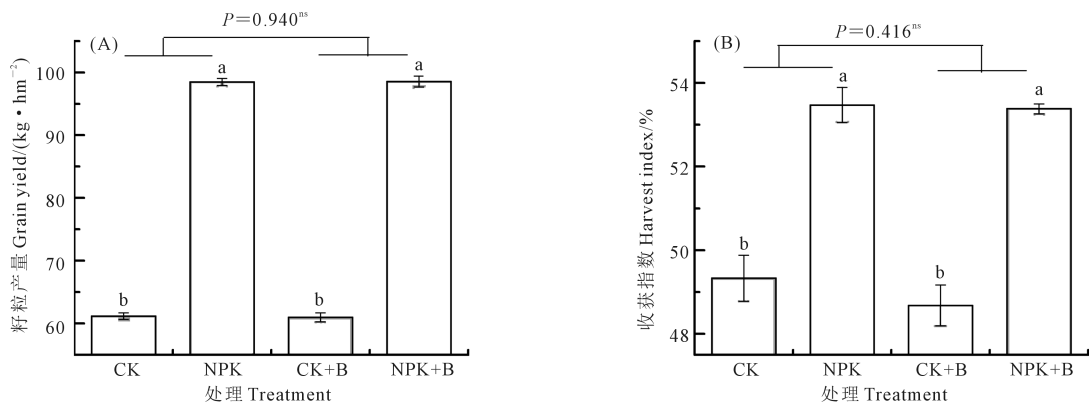


图 3 生物炭对 2011—2020 年累积籽粒产量和平均收获指数的影响

Fig.3 Effects of biochar on accumulative grain yield and average harvest index from 2011 to 2020

表 2 土壤养分含量和酶活性与作物产量的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between soil nutrient content and enzyme activities and crop yield

指标 Index	有机质 OM	全氮 Total N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	蔗糖酶 Sucrase	脲酶 Urease	碱性磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
作物产量 Crop yield	0.503 *	0.252ns	0.489 *	0.148ns	0.585 **	0.411 **	0.400ns	-0.309ns

注: * 和 * 分别表示相关关系达极显著水平 ($P<0.01$) 和显著水平 ($P<0.05$), ns 表示没有相关关系。
Note: ** and * indicate significant correlation at $P<0.01$ and $P<0.05$ respectively, ns indicates no correlation.

2.5 长期施用生物炭对作物地上部养分吸收的影响

不施肥时施用生物炭对抽穗期累积氮吸收量没有显著影响 ($P>0.05$); 但施肥条件下施用生物炭显著提高了作物抽穗期累积氮吸收量 ($P<0.05$) (表 3)。无论施肥与否, 施用生物炭显著提高了抽穗期累积磷和钾吸收量 ($P<0.05$), 与对应不施生物炭处理比较, CK+B 和 NPK+B 处理累积磷吸收量分别提高 23.9% 和 9.6%, 累积钾吸收量分别提高 19.0% 和 22.0%。收获时两种施肥条件下施用生物炭对累积氮吸收量均无显著影响 ($P>0.05$), 但显著提高了累积磷吸收量和钾吸收量 ($P>0.05$), 与 CK 比较, CK+

B 处理的累积磷和钾吸收量分别提高 13.8% 和 10.7%; 与 NPK 处理比较, NPK+B 处理的累积磷和钾吸收量分别提高 9.5% 和 5.8% (表 3)。

2.6 作物地上部养分累积吸收量与产量的关系

对抽穗期和成熟期作物地上部养分累积吸收量与籽粒产量关系进行分析 (图 4), 结果表明不同作物的养分累积吸收量与产量之间关系存在差异。总体而言, 与磷、钾吸收量相比, 各生育时期的氮素积累量与作物籽粒产量关系更密切, 其中玉米在抽穗期和成熟期氮素积累量与产量的决定系数分别为 0.84 和 0.86, 而高粱的分别为 0.70 和 0.73, 表明成熟期氮素积累量比抽穗期氮素积累量更能预测作物产量。

表 3 生物炭对抽穗期和成熟期地上部 N、P、K 吸收量的影响/(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
	N	P	K	N	P	K
CK	591.9±0.7c	115.8±1.2d	1081.4±1.1d	964.8±11.0b	197.5±0.5d	964.4±15.2d
NPK	1529.5±5.1b	202.2±2.9b	1717.8±1.3b	2014.9±17.0a	302.6±1.2b	1553.1±8.9b
CK+B	610.1±5.1c	143.4±1.2c	1287.1±2.6c	954.3±8.0b	224.7±0.5c	1067.9±2.7c
NPK+B	1598.2±11.2a	221.6±3.4a	2094.9±1.8a	2036.0±29.2a	331.3±11.0a	1642.7±11.0a

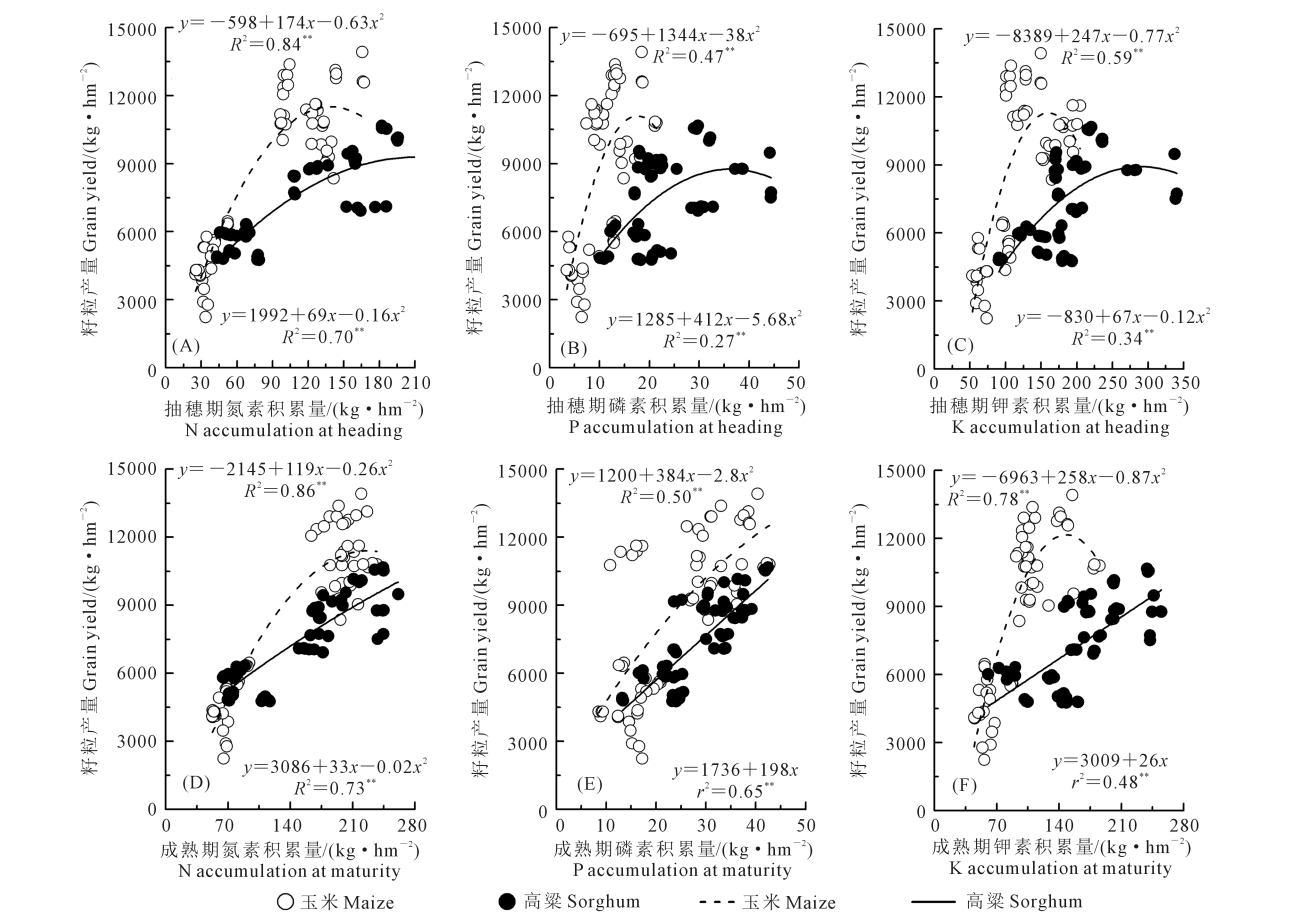


图 4 作物不同生育时期地上部养分积累量与籽粒产量的关系

Fig.4 Relationship between shoot nutrient accumulation and grain yield at different growth stages of crops

3 讨论

3.1 长期施用生物炭对土壤养分含量和酶活性的影响

生物炭降低了易分解碳/总有机碳的比值^[20], 因此施入土壤后比较稳定,能够保存较长时间^[21]。研究发现,不同用量生物炭(12~48 t·hm⁻²)对土壤中碳组分影响不同,低用量生物炭(12 t·hm⁻²)明显促进土壤中易分解碳含量的增加,此外,随生物炭用量增加土壤中总有机碳含量增加^[20]。本研究,连续施用生物炭 10 a,累积生物炭施用量达 45 t·hm⁻²,施氮磷钾肥条件下生物炭对土壤有机质含量提升的效果优于不施肥处理(图 1A、B)。由于原

料和碳化条件不同,生物炭养分含量也有所不同,导致生物炭对土壤养分的影响差异较大^[22-23]。Nguyen 等^[24]对 1 080 个田间及盆栽试验(95%的年限小于 1 a)进行 meta 分析,认为生物炭会降低土壤中无机氮含量,但由于孔隙较大及其吸附特性,老化的生物炭在土壤中能够固持硝态氮以免淋洗,并影响调控氮转化的土壤微生物活动。但本研究中无论施氮磷钾肥与否,长期施用生物炭 5 a 对土壤全氮(图 1C)没有显著影响。生物炭连续施用 10 a 提高了不施肥土壤全氮含量(图 1D),这是由于生物炭自身携带氮素。生物炭施用对施氮磷钾肥的土壤全氮含量影响较小,一方面可能是由于生物炭施用量低,其带入土壤的氮量较低;另一方面施肥

条件下生物炭促进了地上部植株对氮素的吸收利用(表 3),导致土壤氮素转移量增加,因而土壤全氮含量并未显著提高。

通常以有机肥、污泥等为原料和高碳化温度会提高生物炭中磷含量,也提高了玉米生长前期土壤有效磷含量,但对收获后土壤有效磷没有影响^[25];而作物秸秆中磷累积量仅为地上部总磷的 20%^[26-27],以其为原料的生物炭磷含量也较低^[27],加之生物炭促进了植株对磷的吸收(表 3),因此本研究中生物炭施用 5 a 对土壤有效磷含量影响不大,而其施用 10 a 具有明显的磷提升效果。玉米地上部秸秆钾累积量较高,约为磷的 10 倍,且作物 60% 的钾分布在秸秆中^[9, 26],而热解温度小于 600° C 时钾损失率低于 10%,因此玉米秸秆生物炭保留了原料中的大部分钾,加之生物炭对钾具有固持能力^[9],故本研究中施用生物炭对土壤速效钾的提升最为明显(图 1G、H)。

土壤酶活性是评价土壤健康程度的生物学指标^[28]。研究发现有机物料能提高土壤蔗糖酶活性^[29]。本研究也表明生物炭明显提高了土壤蔗糖酶活性,且与作物籽粒产量呈显著正相关关系(表 1、2),可见从有机物料利用方面,生物炭有增加作物产量的潜力。土壤尿素分解菌产生的脲酶活性参与尿素态氮向铵态氮的转化,可表征土壤氮矿化能力。室内短期培养试验发现以木头和竹子为原料的生物炭一定程度上能提高红壤的脲酶活性^[20],但本研究中无论 5 a 还是 10 a 生物炭施用处理,均对土壤脲酶活性无显著影响(表 1)。这可能是由于土壤铵化是一个短暂过程,生物炭对铵化过程的影响可能仅在施用当下有激发效应^[24],同时本研究为长期的田间研究,试验期间的作物生长对氮矿化和利用也有影响。磷酸酶是土壤磷素循环的关键作用酶,能水解有机磷为无机磷并影响土壤磷的有效性。本研究中,施用生物炭 5 a 对土壤碱性磷酸酶活性没有显著影响,但施用 10 a 后有显著影响(图 1E、F)。由于土壤酶底物浓度影响酶活性^[30],这与连续 5 a 施用生物炭对土壤有效磷含量没有影响,而施用 10 a 却明显提高了土壤有效磷含量的结果(表 1)相符。

3.2 长期施用生物炭对作物生长和养分吸收的影响

试验中观察发现,秸秆生物炭施用促进了高粱和玉米根系生长,这可能是由于生物炭长期施用降低了土壤容重,较大的根系促进了作物在灌浆前的生长,但在生育后期生物炭处理的植株氮素缺乏,

导致作物早衰,不施生物炭处理虽然前期长势较弱,但灌浆时间长,因此最终表现为与生物炭施用的籽粒产量没有差异,且后者对营养器官有一定促进效果。尽管生物炭为作物生长提供了养分,但对作物产量的影响效果不尽相同。如在 pH 值为 6 的棕壤上连续 5 a 施用 3~6 t·hm⁻²生物炭提高了玉米产量和氮吸收量^[16],在酸性淋溶土上施用生物炭也明显促进花生增产^[31],但在黄淮海平原的潮土上连续 2 a 施用 15 t·hm⁻²和 30 t·hm⁻²生物炭均对小麦产量提升效果不显著^[32]。这可能是由于施用碱性生物炭能更好地改善酸性土壤的化学特征而明显提升产量,与 Khadem 等^[23]在石灰性土壤上研究结果一致。本研究中施用生物炭提高了土壤养分含量和营养器官累积干物质量(图 2),但对籽粒产量没有显著影响(图 3A)。研究表明,生物炭施用降低土壤容重,促进植株根系生长和养分吸收^[33],因而营养器官的累积干物质量增加;但另一方面,氮是影响作物产量最重要的因素^[34],本研究中尽管生物炭提高了植株磷和钾吸收量,但对成熟期植株氮吸收量没有显著影响(表 3),导致生物炭对籽粒产量贡献不大(图 3A)。虽然不施肥土壤连续 10 a 施用生物炭的全氮含量增加,但此时生物炭提供的氮素可能无法满足作物生长所需。已有报道在施肥条件下硬木生物炭能够促进黑钙土的土壤硝化^[35],但石灰性褐土施用秸秆生物炭对土壤氮转化的调控机制及其对作物产量的影响尚不明确。由于供试秸秆生物炭本身含有较高的磷和钾含量,能明显提升磷和钾的累积吸收量,尤其是钾含量(表 3),因此施用秸秆生物炭时应注意降低钾肥的投入,加强钾素养分管理,提高钾利用效率。

4 结 论

施用年限影响秸秆生物炭对土壤养分含量和土壤养分循环酶活性的作用效果。从累积 10 a 的长期试验结果来看,生物炭提高了土壤有机质含量 61.2%~77.7%,土壤速效钾含量 48%~86%,蔗糖酶活性 11.4%~11.9%,碱性磷酸酶活性 7.9%~16.2%,促进磷、钾累积吸收量分别为 9.6%~23.9%和 19.0%~22.0%,但对氮素累积吸收量和累积籽粒产量没有显著影响。褐土施用秸秆生物炭尽管能提高土壤碳的储存,但增产效果有限,可适当增加氮肥投入,减少钾肥用量,避免钾资源的浪费。

参 考 文 献:

[1] WANG D, JIANG P K, ZHANG H B, et al. Biochar production and applications in agro and forestry systems: a review[J]. Science of the

- Total Environment, 2020, 723: 137775.
- [2] LEE Y, PARK J, RYU C, et al. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C[J]. Biore-source Technology, 2013, 148: 196-201.
- [3] SOINNE H, KESKINEN R, HEIKKINEN J, et al. Are there environmental or agricultural benefits in using forest residue biochar in boreal agricultural clay soil? [J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 138955.
- [4] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [5] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463-465, 478.
- LI S K, WANG K R, FENG J K, et al. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 463-465, 478.
- [6] HAMMES K, SCHMIDT M W I. Changes of biochar in soil [M]// LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management. London: Routledge, 2009: 169-178.
- [7] 王浩, 焦晓燕, 王劲松, 等. 生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 253-257, 287.
- WANG H, JIAO X Y, WANG J S, et al. Effects of biochar on water characteristics of soil and sorghum growth under conditions of soil water stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 253-257, 287.
- [8] 张红雪, 吴凤英, 陈宇琳, 等. 烟秆生物炭对土壤不同形态钾含量及烟草光合特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(4): 468-477.
- ZHANG H X, WU F Y, CHEN Y L, et al. Effects of tobacco stem-derived biochar on different forms of soil potassium and photosynthetic characteristics of tobacco [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2022, 51(4): 468-477.
- [9] BILIAS F, KALDERIS D, RICHARDSON C, et al. Biochar application as a soil potassium management strategy: a review[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858(Part 1): 159782.
- [10] 王宁, 焦晓燕, 武爱莲, 等. 生物炭及施肥对土壤环境和高粱产量及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(11): 1633-1637.
- WANG N, JIAO X Y, WU A L, et al. Effects of biochar and fertilization on soil environment and yield, quality of sorghum[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(11): 1633-1637.
- [11] 张晗芝. 生物炭对土壤肥力、作物生长及养分吸收的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- ZHANG H Z. Effects of biochar amendment on soil fertility, crop growth and nutrient uptake[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [12] 邝曦芝, 邓伟明, 唐乐乐, 等. 不同磷水平配施生物炭对土壤磷有效性和大豆磷吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1911-1918.
- KUANG X Z, DENG W M, TANG L L, et al. Impacts of biochar and phosphorus application on soil phosphorus availability and soybean phosphorus up-take[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1911-1918.
- [13] 刘赛男. 生物炭影响土壤磷素、钾素有效性的微生态机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- LIU S N. Effect of biochar on soil microflora associated with phosphorus and potassium[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [14] THIES J E, RILLIG M C, GRABER E R. Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota[M]//LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management. London: Routledge, 2015: 327-389.
- [15] BAI S H, REVERCHON F, XU C Y, et al. Wood biochar increases nitrogen retention in field settings mainly through abiotic processes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 90: 232-240.
- [16] PENG J, HAN X R, LI N, et al. Combined application of biochar with fertilizer promotes nitrogen uptake in maize by increasing nitrogen retention in soil[J]. Biochar, 2021, 3(3): 367-379.
- [17] YE L L, CAMPS - ARBESTAIN M, SHEN Q H, et al. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: a meta-analysis of field studies using separate controls[J]. Soil Use and Management, 2020, 36(1): 2-18.
- [18] 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: 265-271.
- LU R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 265-271.
- [19] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 234-239.
- YAN C S. Soil fertility research method[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1988: 234-239.
- [20] DEMISIE W, LIU Z Y, ZHANG M K. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil [J]. Catena, 2014, 121: 214-221.
- [21] ZHANG X, ZHANG Q Q, ZHAN L P, et al. Biochar addition stabilized soil carbon sequestration by reducing temperature sensitivity of mineralization and altering the microbial community in a greenhouse vegetable field [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 114972.
- [22] CHAN K Y, XU Z H. Biochar: nutrient properties and their enhancement [M]//LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management. London: Routledge, 2009: 67-81.
- [23] KHADEM A, RAIESI F, BESHARATI H, et al. The effects of biochar on soil nutrients status, microbial activity and carbon sequestration potential in two calcareous soils [J]. Biochar, 2021, 3(1): 105-116.
- [24] NGUYEN T T N, XU C Y, TAHMASBIAN I, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: a review and meta-analysis[J]. Geoderma, 2017, 288: 79-96.
- [25] XIE S Y, YU G W, JIANG R Q, et al. Moderate sewage sludge biochar application on alkaline soil for corn growth: a field study[J]. Biochar, 2021, 3(2): 135-147.
- [26] 王劲松, 董二伟, 焦晓燕, 等. 不同种植模式对高粱晋糯3号产量和养分吸收的影响[J]. 作物杂志, 2019, (5): 166-172.
- WANG J S, DONG E W, JIAO X Y, et al. Effects of different planting patterns on yield and nutrient absorption of sorghum jinnuo 3[J]. Crops, 2019, (5): 166-172.
- [27] 齐翔鲲, 安思危, 侯楠, 等. 耕作和秸秆还田方式对半干旱区黑土玉米养分积累分配与产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2214-2226.
- QI X K, AN S W, HOU N, et al. Effects of tillage and straw return

ning method on the nutrient accumulation, distribution and yield of maize in black soil of semi-arid region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(12): 2214-2226.

[28] ALKORTA I, AIZPURUA A, RIGA P, et al. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health[J]. Reviews on Environmental Health, 2003, 18(1): 65-73.

[29] 解雪峰, 徐梓晴, 田再洋, 等. 不同改良物质添加对滨海盐碱地土壤重金属及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5649-5656.

XIE X F, XU Z Q, TIAN Z Y, et al. Effects of supplementation of different amendments on soil heavy metals and enzyme activities in coastal saline land[J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5649-5656.

[30] 谭向平, 何金红, 郭志明, 等. 土壤酶对重金属污染的响应及指示研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 50-62.

TAN X P, HE J H, GUO Z M, et al. Research progresses on soil enzymes as indicators of soil health and their responses to heavy metal pollution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 50-62.

[31] PANDIAN K, SUBRAMANIYAN P, GNASEKARAN P, et al. Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, 62(9): 1293-1310.

[32] DONG L L, YANG X, SHI L L, et al. Biochar and nitrogen fertilizer co-application changed SOC content and fraction composition in Huang-Huai-Hai plain, China[J]. Chemosphere, 2022, 291(Part 1): 132925.

[33] 程效义, 孟军, 黄玉威, 等. 生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(2): 218-223.

CHENG X Y, MENG J, HUANG Y W, et al. Effect of biochar on root growth, absorption of nitrogen and maize yield[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(2): 218-223.

[34] 王劲松, 焦晓燕, 丁玉川, 等. 粒用高粱养分吸收、产量及品质对氮磷钾营养的响应[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1269-1278.

WANG J S, JIAO X Y, DING Y C, et al. Response of nutrient uptake, yield and quality of grain sorghum to nutrition of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(8): 1269-1278.

[35] PROMMER J, WANEK W, HOFHANSL F, et al. Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e86388.

(上接第 61 页)

[26] RINKE C, SCHWIENTEK P, SCZYRBA A, et al. Insights into the phylogeny and coding potential of microbial dark matter[J]. Nature, 2013, 499(7459): 431-437.

[27] 张春怡, 曲红云, 桑平, 等. 土壤消毒结合微生物菌剂防控茄子黄萎病及对根际真菌群落结构的影响[J]. 北方园艺, 2020, (7): 27-35.

ZHANG C Y, QU H Y, SANG P, et al. Effect of soil disinfection combined with microbial agents on control of eggplant verticillium wilt and its relationship to rhizosphere fungi community structure[J]. Northern Horticulture, 2020, (7): 27-35.

[28] 岳宏忠, 张东琴, 侯栋, 等. 微生物菌肥部分替代化肥对设施黄瓜产量和土壤细菌群落结构的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 118-126, 137.

YUE H Z, ZHANG D Q, HOU D, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by microbial fertilizer on yield of cucumber and soil bacterial community structure in greenhouse[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2022, 50(7): 118-126, 137.

[29] 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 等. 宁夏中部干旱带不同作物根际土壤真菌群落多样性及群落结构[J]. 微生物学通报, 2019, 46(11): 2963-2972.

SUN Q, WU H L, CHEN F, et al. Fungal community diversity and structure in rhizosphere soil of different crops in the arid zone of central Ningxia[J]. Microbiology China, 2019, 46(11): 2963-2972.

[30] 王根全, 郝晓芬, 郭二虎, 等. 连作与轮作谷子根际土壤真菌群落分布特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(5): 677-689.

WANG G Q, HAO X F, GUO E H, et al. Distribution characteristics of the soil fungi community in the rhizosphere of foxtail millet under different planting patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(5): 677-689.

[31] 包礼云. 小麦赤霉与黄枯枯萎菌内生细菌多样性及其代谢产物研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.

BAO L Y. Study on diversity of endophytic bacteria from fusariumgraminearum and Fusariumoxysporum f.sp.cucumerinum and it'smetabolites[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.

[32] 陈芬, 余高, 孙约兵, 等. 汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4342-4352.

CHEN F, YU G, SUN Y B, et al. Characteristics of microbial community structure in the surrounding farmlands of a mercury mining area and its environmental driving factors[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4342-4352.

[33] 赵玉卉, 郭瑞, 杨阿丽, 等. 甘肃野生羊肚菌根际土壤真菌群落与环境因子相互关系[J]. 微生物学杂志, 2022, 42(1): 96-106.

ZHAO Y H, GUO R, YANG A L, et al. Relationship between fungal community and environmental factors in rhizosphere soil around wild morels in Gansu[J]. Journal of Microbiology, 2022, 42(1): 96-106.

[34] 缪才凌, 朱书兴, 范天宇, 等. 土壤改良措施对连作生姜土壤微生物群落及枯萎病防效的影响[J]. 植物医学, 2022, 1(6): 32-41.

MIAO C L, ZHU S X, FAN T Y, et al. The effects of soil improvement treatments on the microbiota and prevention of fusarium wilt in successive cropping ginger[J]. Plant Health and Medicine, 2022, 1(6): 32-41.

[35] 张树萌, 黄懿梅, 倪银霞, 等. 宁南山区人工林草对土壤真菌群落的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1449-1458.

ZHANG S M, HUANG Y M, NI Y X, et al. Effects of artificial forest and grass on soil fungal community at southern Ningxia mountain[J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1449-1458.