

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.038

张沛祯, 罗娟, 姚宗路, 等. 改性秸秆生物炭与有机肥混施对黄土丘陵旱区土壤持水保肥的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 322-332, 342.
ZHANG Peizhen, LUO Juan, YAO Zonglu, et al. The impact of mixed application of modified straw biochar and organic fertilizer on soil water retention and fertility maintenance in the loess hilly dry area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 322-332, 342.

改性秸秆生物炭与有机肥混施对黄土丘陵 旱区土壤持水保肥的影响

张沛祯¹, 罗娟¹, 姚宗路¹, 畅芳玲^{1, 2}, 霍丽丽¹, 赵立欣¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030800)

摘要: [目的] 探究不同改性玉米秸秆生物炭混施有机肥对于干旱黄土持水保肥能力特性及其作物生长的影响。[方法] 将氮气环境下经 500 °C 热解 2 h 制得的玉米秸秆生物炭, 分别在 1 mol/L H₃PO₄、NaOH 和 NH₄Cl 试剂中浸渍改性获得不同改性玉米秸秆生物炭。系统表征生物炭的元素组成和孔隙结构等理化特性, 开展不同比例炭肥混施下的土壤盆栽试验, 分析土壤持水、保肥和植株生长状况等, 探明不同生物炭混施有机肥对于干旱黄土持水保肥性能的影响。[结果] 生物炭理化特性方面, 改性生物炭中氧含量增加 4.73%~9.18%, 灰分含量降低 12.69%~20.70%, pH 显著降低, O/C 增加, 表明生物炭亲水性增强, 比表面积增加 3.26~5.19 倍, 总孔体积增加 3~6 倍。土壤持水保肥性质方面, 炭肥混施处理下, 土壤质量密度随着炭肥比增大而减小, 土壤孔隙度增加 2.42%~4.07%, 田间持水量随炭肥比增加而增大, 其中, NaOH 改性生物炭肥比 2:1 下的土壤田间持水量最高为 37.38%。NH₄Cl 改性生物炭肥比为 2:1 时, 土壤有机质含量和全钾含量最高分别为 8.23, 5.17 g/kg。H₃PO₄ 改性生物炭肥比 1:1 和 2:1 时, 全氮和全磷含量最高分别为 0.37, 0.95 g/kg。改性生物炭混施有机肥能提高可被植物直接吸收利用的有效磷和速效钾。NH₄Cl 改性生物炭肥比 1:2 时, 玉米植株生长促进效果最明显, 且炭肥比不宜过高。[结论] 在黄土丘陵干旱区, 综合各方面考虑, 可选择 NH₄Cl 改性生物炭肥比 1:1 的改性混配方式来提升土壤的持水和保肥特性。

关键词: 改性生物炭; 有机肥; 干旱黄土; 保水; 培肥

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0332-11

The Impact of Mixed Application of Modified Straw Biochar and Organic Fertilizer on Soil Water Retention and Fertility Maintenance in the Loess Hilly Dry Area

ZHANG Peizhen¹, LUO Juan¹, YAO Zonglu¹, CHANG Fangling^{1, 2}, HUO Lili¹, ZHAO Lixin¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of

Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030800, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of different modified corn straw biochars on the water retention and fertilizer conservation capacity of arid loess soil and their effects on crop growth. [Methods] The corn straw biochar produced by pyrolysis at 500 °C for 2 h under a nitrogen atmosphere was modified by immersion in 1 mol/L H₃PO₄, NaOH, and NH₄Cl reagents, respectively, to obtain different modified corn straw biochars. The elemental composition, and physical and chemical properties such as pore structure, of the biochar were systematically characterized. Pot experiments were used to examine soil water retention, nutrient conservation, and plant growth using soil treated with different ratios of fertilizer and biochar. [Results] In terms of the physicochemical properties of biochar, the oxygen content in the modified biochar

收稿日期: 2024-10-25

修回日期: 2024-11-28

录用日期: 2024-11-30

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900704)

第一作者: 张沛祯 (1992—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事农业废弃物资源化利用。E-mail: zhangpeizhen@caas.cn

通信作者: 赵立欣 (1967—), 女, 研究员, 博士, 主要从事农业废弃物资源化利用。E-mail: zhaolixin@caas.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

increased by 4.73%~9.18%, while the ash content decreased by 12.69%~20.70%. The pH significantly decreased, and the increase in O/C ratio indicated enhanced hydrophilicity of the biochar. The specific surface area of the modified biochar increased by 3.26~5.19 times, and the total pore volume increased by 3~6 times. In terms of soil water retention and nutrient conservation properties, under the treatments of mixed application of biochar and fertilizer, soil bulk density decreased with the increase of the biochar-to-fertilizer ratio, and soil porosity increased by 2.42%~4.07%. The field water-holding capacity increased with the biochar-to-fertilizer ratio, with the highest value of 37.38% observed under the NaOH-modified biochar-to-fertilizer ratio of 2:1. When the NH_4Cl -modified biochar-to-fertilizer ratio was 2:1, soil organic matter and total potassium contents reached the highest values, being 8.23 and 15.17 g/kg, respectively. The highest total nitrogen and total phosphorus contents were 0.37 and 0.95 g/kg, respectively, when the H_3PO_4 -modified biochar-to-fertilizer ratios were 1:1 and 2:1. Mixed application of modified biochar and organic fertilizer could increase available phosphorus and rapidly available potassium that can be directly absorbed and utilized by plants. The growth promotion effect on corn plants was most significant when the NH_4Cl -modified biochar-to-fertilizer ratio was 1:2, and it was noted that an excessively high biochar-to-fertilizer ratio was not suitable. [Conclusion] In the arid regions of the loess hilly area, considering various factors, the application of NH_4Cl -modified biochar with a fertilizer ratio of 1:1 and mixed with organic fertilizer can enhance the soil's water retention and nutrient conservation properties.

Keywords: modified biochar; organic fertilizer; arid loess; water retention; fertility maintenance

Received: 2024-10-25

Revised: 2024-11-28

Accepted: 2024-11-30

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

黄土丘陵区是我国北方重要的旱作雨养农业区,呈现气候干旱、水资源短缺、水土流失严重、土壤肥力偏低等特征。加之长期不合理的农业耕作及管理模式,导致农田耕地质量降低,病虫害连年增加,土壤有机质和养分含量显著降低^[1],农作物产量和质量下降,严重制约黄土丘陵区的农业可持续发展^[2]。

生物炭是由生物质在限氧或无氧条件下经高温热解产生的一种稳定、高度芳香化、富碳的固态物质,其多孔结构、高比表面积和丰富的表面官能团,使其具有可吸附、微电荷等特性。生物炭还田可以改善土壤结构,提升土壤团聚体稳定性,增加土壤微生物活性,提高土壤有机碳和阳离子交换量^[3-4],加速土壤内部营养元素的循环利用。朱自洋等^[5]研究发现,生物炭施入土壤后吸附多种养分离子,减少氮和可溶性磷等养分的淋溶损失,固持外加肥料养分,提高土壤肥力;LI等^[6]添加生物炭来减少因 NH_3 挥发和 N_2O 排放造成的氮损失,改善氮素平衡,提高作物氮素利用率;樊洪等^[7]在砂质黏壤土中添加 5% 生物炭,显著提高土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量约 2~7 倍。通过田间试验发现,生物炭添加量为 10, 20 t/hm² 时,耕层土壤有机质含量分别提高 20.59% 和 37.05%。施用生物炭可增加黄土土壤有机碳含量 13.54%~50.00%,且随添加量增加而增大^[8]。

然而,生物炭施入土壤后可为作物提供的养分含

量较为有限,单施难以提高农田土壤肥力,维持植物生长的营养需求^[9]。通常,可将生物炭与有机肥混配制成炭基肥进行施用,生物炭承担缓释养分和改良土壤的作用,而肥料承担补充养分的作用^[10]。生物炭和有机肥配合使用具有积极的协同效应,既可以刺激微生物活性,增加土壤持水能力,增强土壤通气性,又可以减少浸出造成的养分损失。杨宇等^[11]将生物炭与有机肥混施促使土壤有机质和全氮含量分别提高 54.40% 和 19.61%。KAMMANN 等^[12]研究发现,与单独施加生物炭相比,在贫瘠的沙质土壤中将生物炭和有机肥混施能提高约 15% 的持水能力;文慧宝等^[13]将生物炭与 2.5% 有机肥混施增加了白菜的株高、地上干质量、可溶性蛋白含量等;乔月等^[14]研究发现,生物炭基肥施用下氮磷利用率分别提高 61.22% 和 72.08%,且具有较强的缓释效果。因此,生物炭与有机肥混施在土壤保水增肥方面具备一定潜力。

生物炭改性提质作为一种提高生物炭性能的技术,既可以增加比表面积和孔隙度,提升生物炭固持养分的作用,又可以增加羧基、羟基等表面官能团,与肥料发生化学反应而负载更多养分,还可以加强生物炭表面电荷分布,通过静电吸附养分离子。钱力等^[15]研究表明,随着炭基肥表面有机官能团和矿物相含量的增加,改进后的肥料具有较大的孔隙结构,施入土壤后具有更强的吸附效果和增温作用,对植物的生长起到

更积极的作用。目前,利用改性生物炭混配有机肥施用于黄土干旱丘陵区的研究较少,尤其是尚未发现有研究涉及酸、碱、盐等不同改性方法生物炭对土壤物理化学性质的影响,且它们与有机肥混施对土壤保水、养分肥力和作物生长的影响效果尚不清晰。

本研究基于温室盆栽试验,开展改性玉米秸秆生物炭混配有机肥施用对旱地土壤保水、保肥和固碳效果研究,探究不同改性方式、炭肥比对土壤含水量、养分含量及作物生长等的影响,以期对陕甘黄土丘陵区

农业生产中合理施用生物炭基有机肥,提高土壤生态环境,实现农业可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与有机肥

试验供试土壤取自陕西省榆林市米脂县(37°52′40″N, 110°19′29″E),采用“S”形取样方法采集 0—20 cm 土层土壤,经除杂后风干 3~5 天过 2 mm 筛备用,该区域土壤类型为黄绵土,发酵牛粪有机肥购于潍坊金农生物科技有限公司,耕层土壤和发酵牛粪有机肥基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和发酵牛粪有机肥基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the test soil and fermented cow dung organic fertilizer

供试样品	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
土壤	8.32	1.83	0.34	13.20	0.64	12.00	17.00	61.00	70.21	24.20	5.59
有机肥	8.52	150.90	8.87	—	3.90	—	10.60	—	—	—	—

1.2 改性玉米秸秆生物炭制备

试验所用玉米秸秆生物炭由北京艾格博联农业技术研究院有限责任公司提供,以玉米秸秆为原料,在热解温度 500 °C,升温速率 10 °C/min,停留时间 2 h 条件下制得原始生物炭,记为 BC。分别量取 300 mL 浓度为 1 mol/L H₃PO₄、NaOH 和 NH₄Cl 溶液与 20 g 生物炭分别均匀混合^[16-17],浸渍搅拌 1 h 后振荡 12 h,将过滤得到的生物炭淋洗至 pH 恒定,抽滤、烘干,获得不同改性玉米秸秆生物炭,分别记为 PBC(H₃PO₄ 改性生物炭)、HBC(NaOH 改性生物炭)及 NBC(NH₄Cl 改性生物炭)。

1.3 试验设计

盆栽试验在 2023 年 7 月 4 日至 9 月 14 日进行,选择购自潍坊金农生物科技有限公司的“郑单 958”品种玉米,使用直径 16 cm、深 16 cm 的圆口塑料盆,每盆称装土样 1.80 kg。参考 DB21/T 3314—2020《生物炭直接还田技术规程》^[18],本研究选取 10 t/hm² 的炭基肥用量,即生物炭和有机肥添加量约为每盆 20 g,二者做底肥均一次性全部施入。生物炭和有机肥混施设置 3 个水平(1:2,1:1,2:1)炭肥比,另设空白对照处理 CK(不施生物炭和有机肥),单施生物炭、改性生物炭或有机肥,共计 18 个处理,每个处理重复 3 次,共 54 个盆栽。装土后淹水平衡 1 周后播种,每盆留苗 3 株。整个生育期培养试验在 30 °C 温室中进行,期间根据陕甘黄土丘陵地区干旱气候及作物生长状况,适时适量灌水,以保证作物正常的生长发育,土壤样品与玉米植株采收同步进行。各处理生物炭和有机肥用量见表 2。

1.4 测定指标与方法

元素分析仪(Elementar Vario Micro Cube)测定生物炭中 C、H、N 和 S 的元素含量,通过差减法计算

O 元素质量分数。

表 2 各处理生物炭和有机肥的配比用量

Table 2 The ratio and dosage of biochar and organic fertilizer in each treatment

样品	炭肥比	处理	生物炭添加量/ (g·盆 ⁻¹)	有机肥添加量/ (g·盆 ⁻¹)
CK	—	CK	—	—
F	—	F	—	20.00
BC	—	BC	—	—
PBC	—	PBC	20.00	—
HBC	—	HBC	—	—
NBC	—	NBC	—	—
BC	—	F2B1	—	—
PBC	1:2	F2P1	6.67	13.33
HBC	1:2	F2H1	—	—
NBC	1:2	F2N1	—	—
BC	—	F1B1	—	—
PBC	1:1	F1P1	10.00	10.00
HBC	1:1	F1H1	—	—
NBC	1:1	F1N1	—	—
BC	—	F1B2	—	—
PBC	2:1	F1P2	13.33	6.67
HBC	2:1	F1H2	—	—
NBC	2:1	F1N2	—	—

马弗炉(SDMF300)中 550 °C 下将生物炭烧灼 2 h 测算灰分含量。采用比表面积及孔径分析测定仪(麦克 ASAP2420)测定生物炭的比表面积(SA)、孔体积(PV)和孔径(PW)。土壤 pH 通过称取过 1 mm 筛的风干土样,水土比 2.50:1,混合后搅拌均匀,静置 30 min 后用 pH 计测定悬浮液 pH。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳,采用开氏法测定土壤全氮,采用碱解扩散法测定碱解氮;采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定全磷,采用 0.50 mol/L NaHCO₃ 浸

提—钼锑抗比色法测定有效磷;采用 NaOH 熔融,火焰光度计测定全钾,采用 NH_4OAc 浸提,火焰光度计测定速效钾,具体测定方法见文献[19]。用环刀取原状土壤放入水中浸泡 24 h 至吸水饱和后取出称重,静置至平衡状态后称重,最后在 105 °C 下烘至恒重,取出称重。各指标计算公式为:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (1)$$

$$P = (1 - \frac{\rho}{d}) \times 100\% \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{m_3 - m_1}{m_1 - m_0} \quad (4)$$

式中: ρ 为土壤质量密度 (g/cm^3); m_0 为环刀质量 (g); m_1 为环刀+干土质量 (g); V 为环刀容积 (cm^3);试验所用环刀容积为 100 cm^3 ; P 为土壤孔隙度 (%); d 为土壤平均比重, 2.65 g/cm^3 ; W_1 为土壤含水量 (%); m_2 为环刀+原状土质量 (g); W_2 为田间持水量 (%); m_3 为环刀+静置平衡土样质量 (g)。

表 3 不同改性处理前后玉米秸秆生物炭的理化特性

Table 3 The physicochemical properties of corn straw biochar before and after modification treatments

处理	$\omega(\text{N})/\%$	$\omega(\text{C})/\%$	$\omega(\text{H})/\%$	$\omega(\text{S})/\%$	$\omega(\text{O})/\%$	O/C	$\omega(\text{灰分})/\%$	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均 孔径/nm	pH
BC	1.38±0.02c	61.94±1.00c	2.28±0.12b	0.20±0.05a	2.62±0.91c	0.03±0.01c	31.58±1.54a	6.34±0.72c	0.01±0.01b	6.78±0.91a	9.65±0.09a
PBC	1.82±0.04b	70.90±1.18a	2.56±0.09a	0.09±0.02b	7.35±1.26b	0.08±0.01b	17.27±0.90b	38.98±0.97a	0.04±0.01a	4.04±0.71b	5.92±0.06d
HBC	2.01±0.08a	72.70±0.84a	2.53±0.10ab	0.08±0.01b	11.80±0.68a	0.12±0.01a	10.88±1.18c	39.23±0.99a	0.07±0.01a	7.28±0.72a	8.65±0.08b
NBC	1.97±0.07a	65.89±1.07b	2.40±0.11ab	0.11±0.02b	10.74±1.05a	0.12±0.01a	18.89±1.03b	26.92±0.93b	0.05±0.01a	6.91±0.81a	7.56±0.06c

注:表中数值为平均值±标准偏差;同列不同字母表示不同生物炭间理化性质差异显著($p < 0.05$)。

2.2 改性玉米秸秆生物炭对土壤性状的影响

图 1 为不同炭肥比处理下土壤质量密度、孔隙度和 pH 的变化情况。与 CK 相比,单施生物炭(BC、PBC、HBC 和 NBC)处理下土壤质量密度显著降低 5.56%~6.03%。与 BC 相比,改性生物炭处理下土壤质量密度降低 0.10%~0.50%,其中 HBC 处理土壤质量密度最小为 1.25 g/cm^3 。混施处理下土壤质量密度随着炭肥比增大而减小。与单施 F 相比,炭肥混施处理土壤孔隙度增加 2.42%~4.07%。供试土壤孔隙度为 49.81%,单施生物炭后分别增加 5.61%,5.70%,6.08%和 5.95%。改性生物炭肥混施处理下土壤孔隙度均高于玉米秸秆生物炭,但不显著。单施 BC 和 F 后土壤 pH 分别增大 3.60%和 1.35%。与 CK 相比,HBC 处理 pH 增大 1.70%,PBC 和 NBC 处理 pH 分别减小 0.32%和 0.79%。炭肥混施后 pH 增大 0.87%~2.81%,其中 F1B2 处理 pH 最大,为 8.66。随炭肥比增大,BC 和 HBC 炭肥混施处理 pH 逐渐增大,PBC 和 NBC 炭肥混施处理 pH 逐渐减小,但都

1.5 数据处理

利用 Excel 2019 和 Origin 2021 软件处理试验数据、分析作图并进行相关性分析。使用 SPSS 19.0 软件进行差异显著性检验($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 改性玉米秸秆生物炭的理化性质

表 3 为不同改性方法处理前后玉米秸秆生物炭理化特性。改性处理后,BC 中碳含量增加 3.95%~10.76%,氧含量增加 4.73%~9.18%,灰分含量降低 12.69%~20.70%,O/C 增加,表明生物炭亲水性增强,处理后的生物炭 pH 降低 1~3.73。物理结构方面,改性生物炭比表面积增加 3.26~5.19 倍,总孔体积增加 3~6 倍, H_3PO_4 处理平均孔径稍有降低,而 NaOH 和 NH_4Cl 改性处理均呈现增加趋势,其中 PBC 平均孔径略微减小,这是由于 H_3PO_4 较强的腐蚀性导致部分中孔孔壁坍塌,生物炭孔道堵塞,但同时腐蚀造孔,孔径减少,比表面积增大,总孔体积增大^[20]。HBC 和 NBC 的总孔体积增大,这是因为低浓度 NaOH 和 NH_4Cl 溶液将生物炭孔道中灰分溶解,减小生物炭内外孔道阻塞,平均孔径略微增大^[21]。

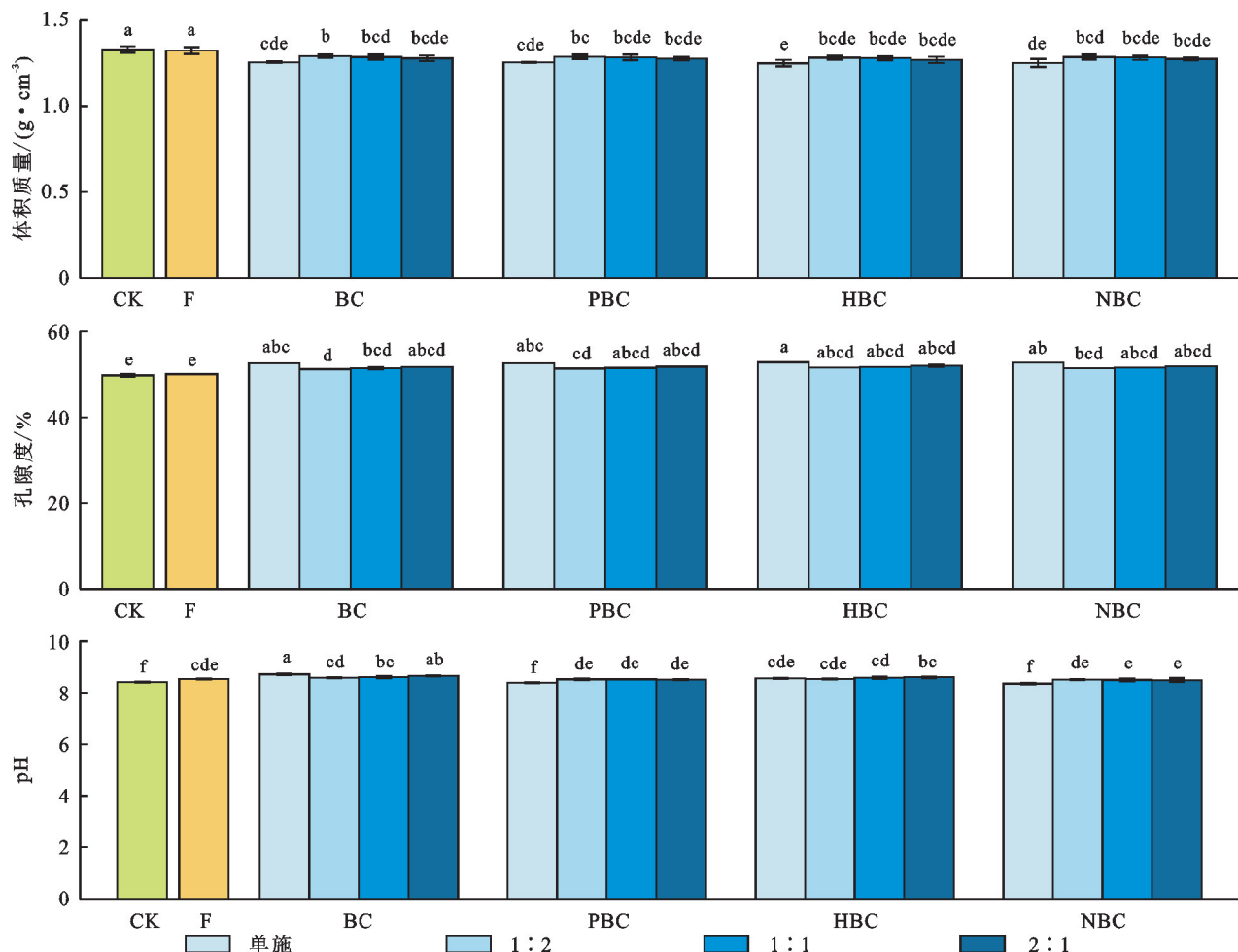
不显著。与 BC 相比,改性生物炭处理 pH 减小 1.80%~4.20%。3 种炭肥比下,与 BC 炭肥混施相比,改性生物炭肥混施 pH 减小 0.31%~1.92%。

2.3 改性玉米秸秆生物炭对土壤水分的影响

图 2 为不同炭肥比处理下的土壤饱和含水量和田间持水量。CK 和 F 处理的土壤饱和含水量分别为 38.16%和 38.78%。生物炭单施和混施有机肥均能提高土壤饱和含水量,与 CK 相比,BC 和改性生物炭(PBC、HBC、NBC)处理下饱和含水量分别增加 10.44%和 11.00%~11.43%,HBC 处理的饱和含水量最大为 42.52%。混施较单施处理有所降低,但随炭肥比增加而升高。

3 种炭肥比下,改性生物炭肥混施比 BC 炭肥混施的饱和含水量高 0.12%~2.76%。土壤田间持水量变化与土壤饱和含水量呈现相同趋势。与 CK 相比,BC 和改性生物炭处理下田间持水量分别显著增加 9.09%和 9.81%~11.24%。各炭肥混施处理的田

间持水量随炭肥比的增加而增大,炭肥比 1 : 2,1 : 1 和 2 : 1 混施处理下田间持水量较 CK 分别增加 2.88%~4.62%,4.49%~5.88%,5.70%~8.44%, F1H2 处理下田间持水量最高,为 37.38%。



注:1 : 2,1 : 1,2 : 1 分别表示炭肥配比;图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同炭肥比处理下的土壤体积质量、孔隙度和 pH

Fig. 1 Soil bulk density, porosity, and pH under different ratios of biochar and organic fertilizer

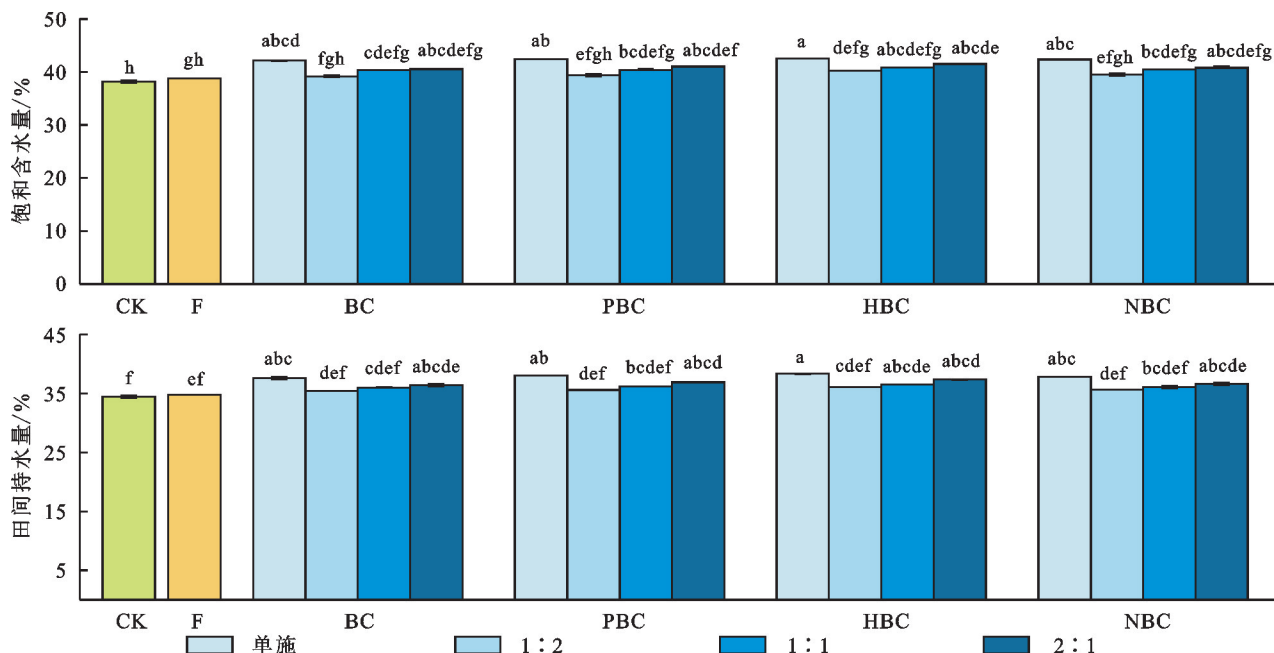


图 2 不同炭肥比处理下的土壤饱和含水量和田间持水量

Fig. 2 Soil saturated water content and field water capacity under different ratios of biochar and fertilizer

2.4 改性玉米秸秆生物炭对土壤养分的影响

2.4.1 土壤有机质含量 图 3 为不同炭肥比处理下土壤有机质含量。与 CK 相比,单施 BC、F 和改性生物炭下土壤有机质含量分别显著提高 1.44,0.38,2.78~3.45 倍。其中,NBC 处理土壤有机质含量最高,为 10.69 g/kg。改性生物炭较 BC 处理下土壤有机质含量分别增加 0.55,0.69,0.83 倍。炭肥混施处理土壤有机质含量显著提高 1.23~2.43 倍,且随着炭肥比增加,BC 炭肥混施土壤有机质含量逐渐减小,而改性生物炭肥混施土壤有机质含量逐渐增大,其中 F1N2 处理土壤有机质含量最高,为 8.23 g/kg。与单施 F 相比,BC 炭肥混施处理的土壤有机质含量增加 0.62~1.49 倍。

2.4.2 土壤全量养分 图 4 为不同炭肥比处理下的土壤全氮、全磷和全钾含量。单施 BC 处理下土壤全氮含量增加 24.36%~41.03%,与其相比,改性生物炭处理全氮含量提高 7.29%~14.58%,PBC 处理全氮含量最高,为 0.37 g/kg。炭肥混施处理下全氮含量增加 12.82%~37.18%,且随炭肥比增加先增后减。与 BC 炭肥混施相比,改性生物炭肥混施全氮含量提高 5.38%~13.79%,F1N2 除外,F1P1 处理全氮含量最高为 0.37 g/kg。与单施 F 相比,炭肥混施全氮含量增加 4.76%~27.38%。各单施

处理中,仅 PBC 处理下全磷含量增加 11.36%,其他单施处理全磷含量降低 6.82%~20.83%。所有炭肥混施处理中,F2P1 和 F1P2 全磷含量分别增加 3.41%和 7.58%,其他混施处理全磷含量均不同程度减小。3 种炭肥比下,PBC 混施较炭肥混施全磷含量增加 12.16%~52.69%,其中 F1P2 处理全磷含量最高,为 0.95 g/kg。单施生物炭(BC、PBC、HBC 和 NBC)和 F 的土壤全钾含量增加 12.94%~62.46%,各炭肥混施处理下全钾含量增加 9.17%~47.25%,各混施处理中 F1N2 处理全钾含量最高。

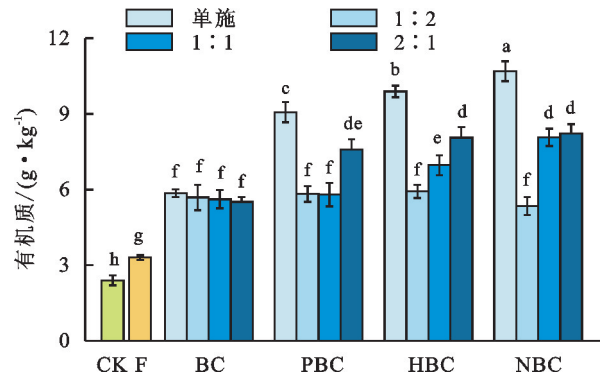


图 3 不同炭肥比处理下土壤有机质含量

Fig. 3 Soil organic matter contents under different ratios of biochar and fertilizer

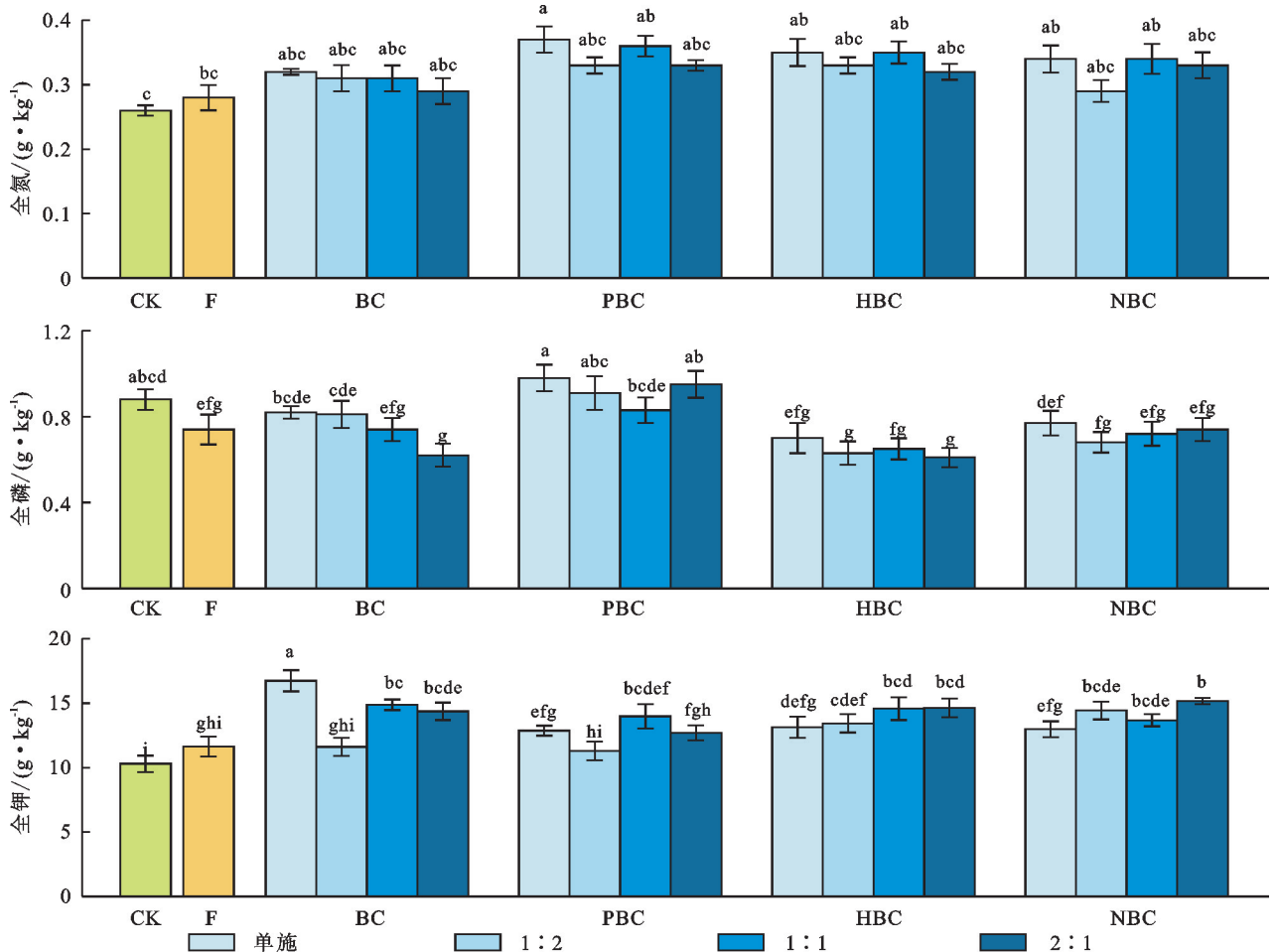


图 4 不同炭肥比处理下的土壤总氮、总磷和全钾含量

Fig. 4 Soil total nitrogen, total phosphorus and total potassium contents under different ratios of biochar and fertilizer

2.4.3 土壤速效养分 图 5 为不同炭肥比处理下的土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量。BC、F、HBC 和 NBC 处理碱解氮含量分别提高 1.66%, 59.34%, 2.14%, 5.98%, PBC 处理碱解氮含量降低 6.99%, 各混施处理碱解氮含量增加 15.12%~40.35%, 且随炭肥比增大逐渐减小。单施生物炭与炭肥混施下土壤有效磷含量分别增加 0.45~4.74, 1.10~4.36 倍。与 BC 相比, 改性生物炭处理下有效磷含量显著降低 69.82%~74.76%。随着炭肥比

增大, BC 炭肥混施有效磷含量逐渐增加, 改性生物炭肥混施有效磷含量逐渐减小。单施生物炭(BC、PBC、HBC 和 NBC)和 F 速效钾含量分别提高 0.01~6.38, 0.39 倍。与 BC 相比, 施用改性生物炭速效钾含量降低 85.02%~86.28%。各混施处理速效钾含量增加 0.11~3.76 倍, 随着炭肥比增大, 速效钾含量逐渐增加, 改性生物炭肥混施整体呈减小趋势。与 BC 炭混施处理相比, 改性生物炭肥混施速效钾含量降低 58.69%~76.67%。

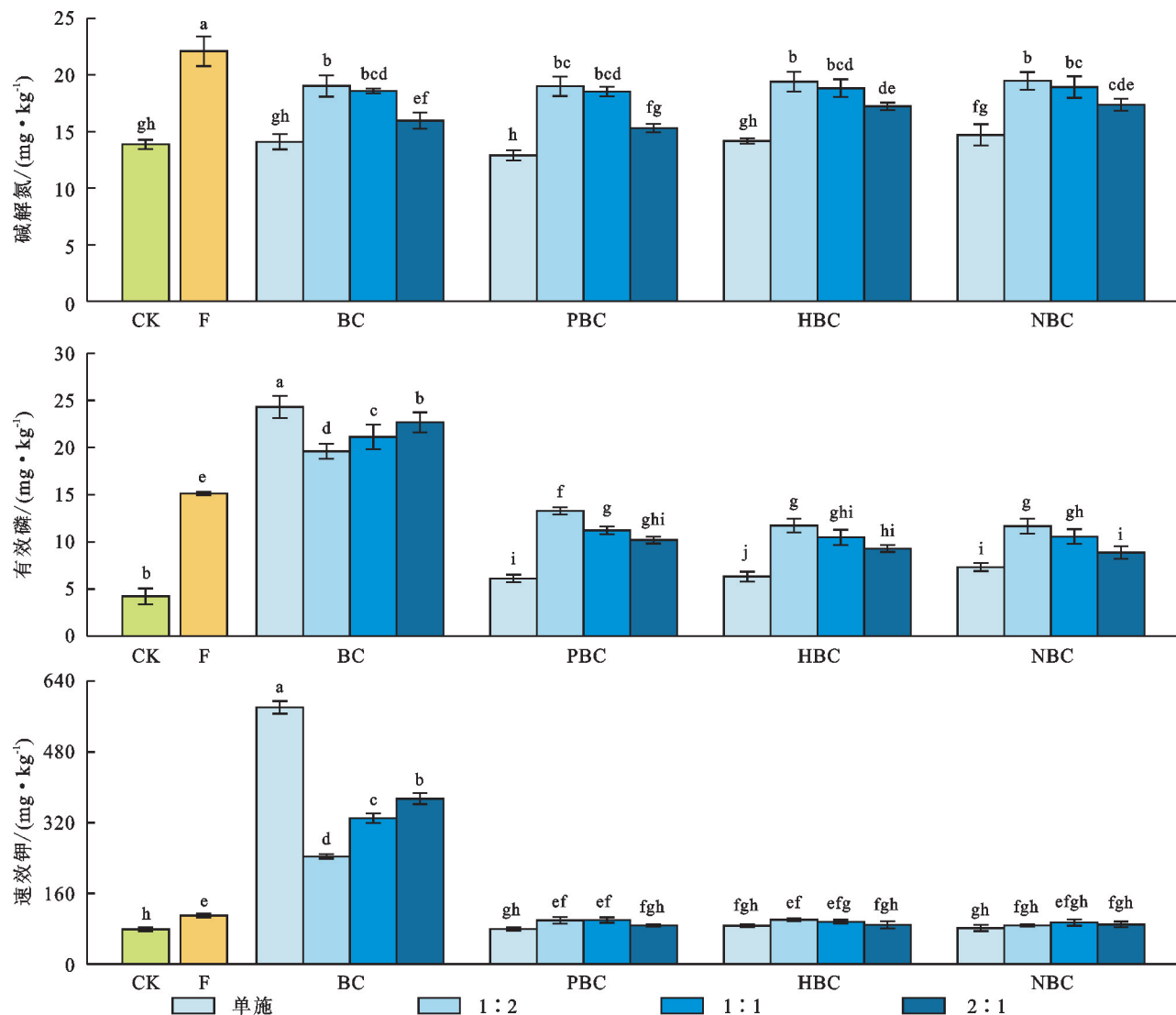


图 5 不同炭肥比处理下的土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量

Fig. 5 Soil alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and potassium contents under different ratios of biochar and fertilizer

2.5 改性玉米秸秆生物炭对玉米植株生长的影响

图 6 为不同炭肥比处理下的玉米成熟期的株高、植株鲜重和植株干重。生物炭单施和混施下玉米株高均有提高。BC、F、PBC、HBC 和 NBC 处理玉米株高分别增加 16.34%, 18.71%, 7.43%, 5.45%, 18.42%。随着炭肥比增加, 生物炭肥混施处理株高减小, 而改性生物炭肥混施先减后增, 以 F2N1 效果最优, 株高可达 46.00 cm。各处理植株鲜重、干重均呈现增加趋势, BC、F、PBC、HBC 和 NBC 处理的植株鲜重分别增加 56.78%,

58.25%, 6.54%, 7.72%, 59.57%。NBC 混施处理下植株鲜重增加最显著。各处理干重增加 14.60%~94.12%。随着炭肥比增加, 生物炭肥混施处理干物质质量整体呈现减小趋势。当炭肥比为 1:2 时, 各混施处理对植株干物质质量促进作用最明显, 其中 F2N1 处理干物质质量最大。

3 讨论

3.1 生物炭与有机肥混施对土壤性状和保水性能的影响

土壤体积质量反映土壤内部颗粒分布紧密和疏松

程度,与土壤孔隙度密切相关,对土壤的透水性、通气性及根系生长都有重要影响。施用生物炭降低土壤体积质量,主要与生物炭种类、土壤类型和生物炭施用量等多种因素相关^[22]。本研究,玉米秸秆生物炭还田土壤孔隙度增加,土壤质量密度减小,然而不同改性方式虽然增加生物炭的孔隙度和比表面积,但对土壤孔隙度和体积质量影响无显著性差异,这可能与干旱砂质粉土颗粒较细,与生物炭密度接近有关。炭肥混施较单施土壤体积质量轻微降低,这归因于混合后有机肥阻塞生物炭孔隙而导致其密度增大。适宜的土壤酸碱度是确保农作物高产的基础,玉米秸秆生物炭呈碱性,与有机肥混施可以增强土壤的缓冲性能,调节土壤

pH,但对于干旱砂质粉土影响不显著,这与战秀梅^[23]、SANDHU 等^[24]的研究结果一致,即对酸性土壤可增加 pH,调节至中性或弱碱性,而施用于碱性土壤中变化较小。改性生物炭的多孔结构和丰富的表面含氧官能团可促进土壤颗粒团聚,二者相互作用可使生物炭周边土壤颗粒微团聚体结合成稳定大团聚体,形成较大孔隙,土壤中大、中孔隙数量增加促使保水性提高^[22],与相关性分析结果一致(图 7)。与黏土和粉土相比,在砂土和砂质粉土等粗颗粒土中,生物炭提升土壤保水效果更显著^[25],与本研究结果相吻合。随着炭肥比降低,饱和含水率和田间持水量也逐渐降低,表明生物炭施用量是重要影响因素之一。

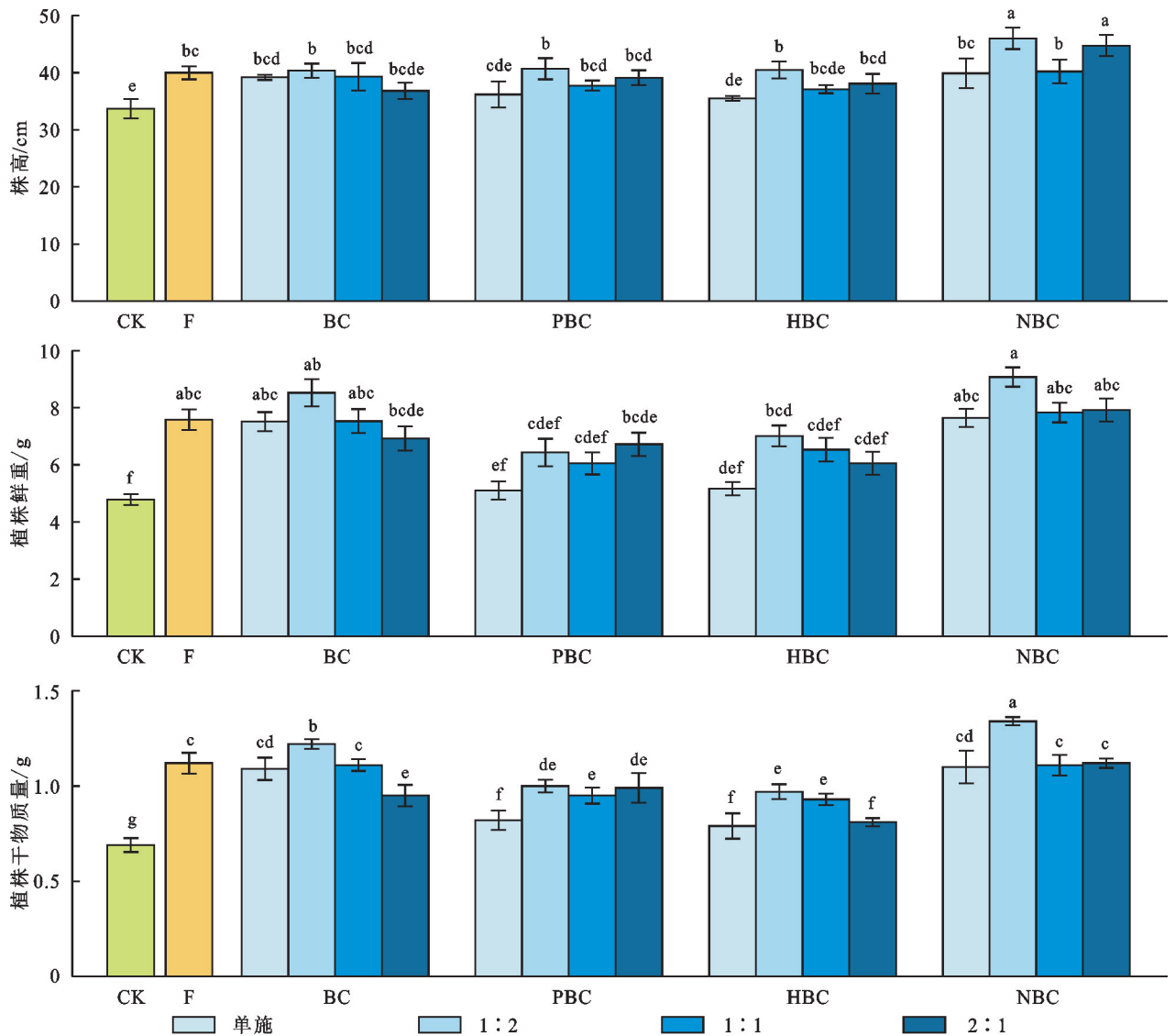


图 6 不同炭肥比处理下的玉米株高、植株鲜重和植株干重

Fig. 6 Maize plant height, fresh weight and dry weight under different ratios of biochar and fertilizer

3.2 生物炭与有机肥混施对土壤养分及作物生长的影响

炭肥混施对土壤养分、作物生物量及产量具有调

控和再分配作用。二者配施凭借高阳离子交换量和丰富孔隙结构,展现出优异的吸附能力,有效促进土壤养分固定,减缓分解和流失^[21-22]。稻壳炭基肥^[26]、玉米秸秆炭基肥^[27]等炭基产品能够明显提高土壤有机质

含量,且在黄褐土中有机肥和生物炭配施比单施对土壤有机质促进效果更显著^[28],与本研究有所不同,生物炭单施土壤有机质含量增加比混施效果更明显。 NH_4Cl 改性生物炭效果最佳,可能是额外的氮输入有助于增加微生物的数量和多样性,微生物通过分解和

转化有机物质,促进土壤有机质的形成;其次,改性后丰富的表面官能团能够通过化学键合作用吸附土壤中的有机分子,从而保护这些有机分子不被微生物快速分解。生物炭输入抑制原始土壤有机质矿化,促进土壤腐殖化过程,导致土壤有机质含量增加^[29]。

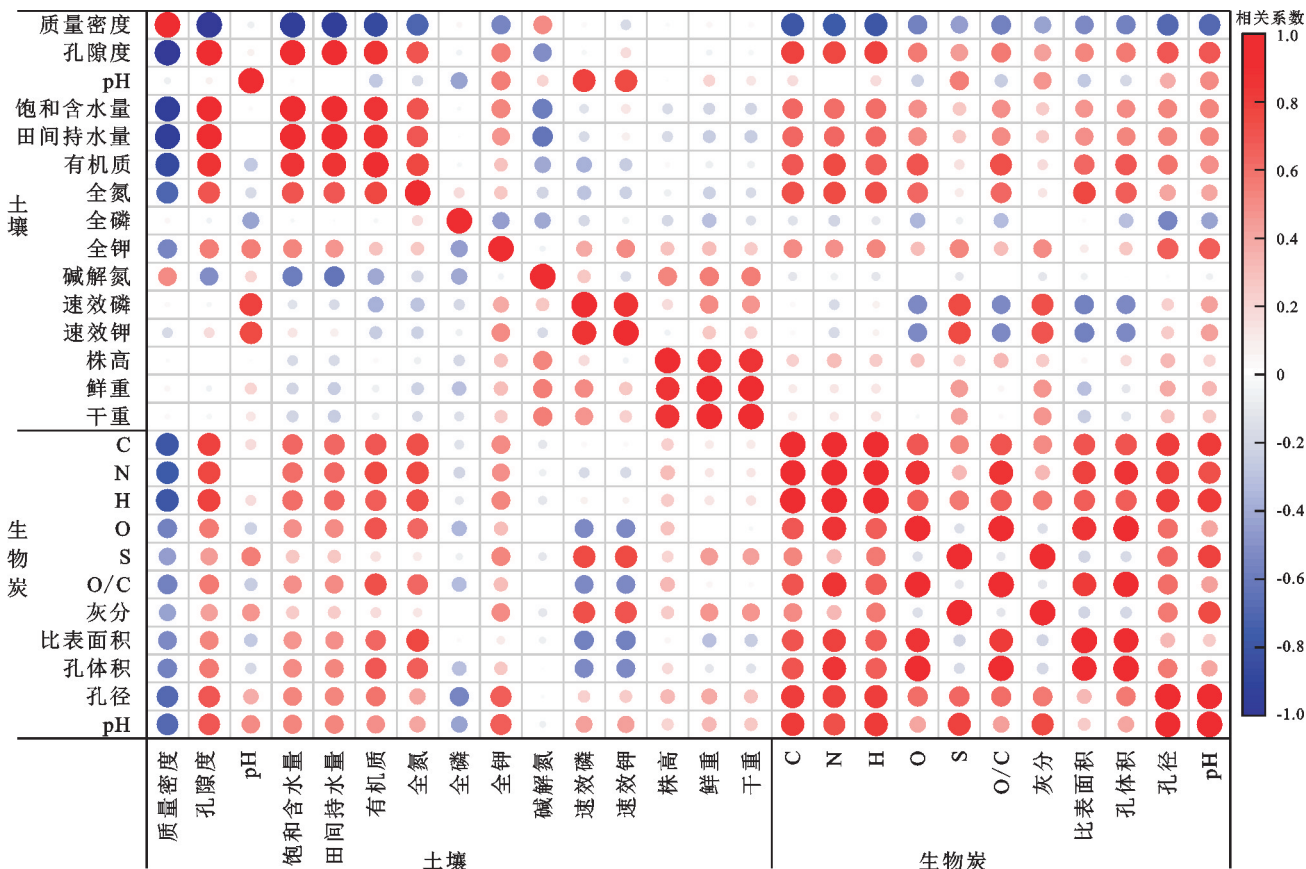


图 7 生物炭特性、土壤保水和养分特性和作物生长特性的相关性分析

Fig. 7 Correlations between biochar properties and soil water retention and nutrient properties, and crop growth characteristics

本研究发现,土壤全量养分含量大部分得到提升,主要源于炭基肥快速吸附土壤中的氮磷钾等养分元素,增加土壤养分储量,减少流失^[30]。配施炭基肥下土壤中碱解氮含量显著提高,是由于生物炭提高土壤碳氮比,降低土壤微生物矿化有机氮的速率^[31]。生物炭及其有机肥混施情况下土壤有效磷和速效钾含量显著增大,是由于炭基肥中的生物炭本身携带一定的磷元素,施入土壤后能够直接增加土壤中的有效磷含量。炭基肥还能通过改善土壤理化性质,促进土壤中磷素的转化和释放,从而提高土壤有效磷的含量。但改性后大幅降低,改性生物炭 pH 小幅升高,土壤碱性环境减弱,从而影响土壤中磷的溶解性和有效性,不利于磷的溶解和植物吸收。由于改性处理将生物炭内部矿质组分去除,降低土壤中钾离子的离子交换作用。与单施有机肥相比,炭肥混施后土壤有机质、全氮和全钾含量提高。可见,有机肥中存在的丰富的有机质、N、P 和 K 等多种营养元素,生物炭可以增加土壤养分吸附和交换,具有缓释性能,

提高养分利用率,二者混施可以起到协同作用。炭肥混施显著增加玉米植株株高、鲜重和干物质量,且添加 NH_4Cl 改性生物炭效果最明显。ZHENG 等^[32] 研究发现,在干旱或半干旱地区施用炭基肥可提高花生产量,添加大麦秸秆生物炭 ($10 \text{ t}/\text{hm}^2$) 白菜鲜重较对照提高 64.9% ^[33];刘琪琪等^[34] 探明施用炭基肥对水稻株高和茎粗具有促进作用,同时能够提高水稻的生物量;刘文秀等^[35] 施用炭基肥对菠菜根系形态生长的促进作用高于复合肥,与试验结果相吻合。但也有研究^[36] 表明,生物炭过量施用对作物生长产生负面影响,添加 $1\ 200, 1\ 800 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 生物炭使烤烟生物量和产量降低,是由于过高的生物炭添加量导致土壤碳氮比失衡,有效氮含量降低,抑制养分对植株的供应^[36]。

4 结论

(1) H_3PO_4 、 NaOH 和 NH_4Cl 3 种改性方法可以明显改善生物炭理化特性,生物炭中碳和氧含量增

加,灰分含量降低,pH显著降低,生物炭亲水性增强,比表面积和总孔体积增加。

(2)H₃PO₄改性生物炭肥比1:1和2:1时提高全氮和全磷含量效果最佳。NaOH改性生物炭肥比2:1下的改善土壤保水效果最佳。NH₄Cl改性生物炭肥比为2:1时,土壤有机质和全钾含量最佳。改性生物炭混施有机肥能够提高可被植物直接吸收利用的有效磷和速效钾。

(3)NH₄Cl改性生物炭肥比1:2时,玉米植株生长促进效果最明显,且炭肥比过高会抑制生长。

(4)在黄土丘陵干旱地区,考虑土壤持水和保肥特性,基于土壤养分含量和质地结构现状,可针对性选择以上不同改性方式和炭肥比进行施用。总体来看,建议按照NH₄Cl改性生物炭肥比1:1施用可同步提升干旱区土壤持水保肥性能。

参考文献:

- [1] 翟胜,高宝玉,王巨媛,等.农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J].生态环境,2008,17(6):2488-2493.
ZHAI S, GAO B Y, WANG J Y, et al. Mechanism and Impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J].Ecology and Environmental Sciences,2008,17(6):2488-2493.
- [2] 赵西宁,吴普特,冯浩,等.黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业研究进展[J].中国农业科学,2009,42(9):3187-3194.
ZHAO X N, WU P T, FENG H, et al. Advance in research of supplemental irrigation of collected rain water for eco-agriculture in semi-arid Loess Plateau of China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2009,42(9):3187-3194.
- [3] 朱玲,周蓉,沈玉叶,等.稻壳及稻壳生物炭对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(2):242-252.
ZHU L, ZHOU R, SHEN Y Y, et al. Effects of rice husk and its derived biochar on soil properties and stability of aggregates[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(2):242-252.
- [4] 孟维山,朱芳妮,张博文,等.玉米秸秆及其生物炭还田对黑土理化性质及玉米产量的影响[J].吉林农业大学学报,2024,46(5):721-730.
MENG W S, ZHU F N, ZHANG B W, et al. Effects of straw and biochar application on the soil physicochemical properties and corn yield in a black soil[J].Journal of Jilin Agricultural University,2024,46(5):721-730.
- [5] 朱自洋,段文焱,陈芳媛,等.干旱土壤中生物炭对黑麦草生长的促进机制[J].水土保持学报,2022,36(1):352-359.
ZHU Z Y, DUAN W Y, CHEN F Y, et al. The mechanism of biochar facilitate ryegrass growth in arid soils [J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):352-359.
- [6] LI W, YAO L R, LONG M, et al. Biochar reduced soil N losses and improved N balance in a rainfed winter-wheat cropping agroecosystem[J].Applied Soil Ecology,2022,179:e104591.
- [7] 樊洪,谢珊,龙天雨,等.刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响[J].环境科学,2024,45(6):3543-3552.
FAN H, XIE S, LONG T Y, et al. Effects of Rosa roxburghii Pomace Biochar on Yield and Quality of Chinese Cabbage and Soil Properties[J].Environmental Science,2024,45(6):3543-3552.
- [8] LUO C Y, YANG J J, CHEN W, et al. Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: Results from field experiments[J].Geoderma,2020,369:e114323.
- [9] 原鲁明,赵立欣,沈玉君,等.我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展[J].中国农业科技导报,2015,17(4):107-113.
YUAN L M, ZHAO L X, SHEN Y J, et al. Progress on biochar-based fertilizer production technology and equipment in China[J].Journal of Agricultural Science and Technology,2015,17(4):107-113.
- [10] 刘小月,高日平,韩云飞,等.生物炭配施有机肥对阴山北麓旱作燕麦生长及水分利用的影响[J].中国土壤与肥料,2023(3):46-54.
LIU X Y, GAO R P, HAN Y F, et al. Effects of biochar combined with organic manure on growth and water use of dryland oat in northern foothill of Yinshan Mountain[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2023(3):46-54.
- [11] 杨宇,李成蓉,彭银,等.生物炭与有机肥施用对红壤理化性质及氮素径流损失的影响[J].中国土壤与肥料,2023(4):16-24.
YANG Y, LI C R, PENG Y, et al. Effects of biochar and organic fertilizer application on physical and chemical properties of red soil and nitrogen losses by runoff [J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2023(4):16-24.
- [12] KAMMANN C I, SCHMIDT H P, MESSERSCHMIDT N, et al. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar [J]. Scientific Reports,2015,5:e11080.
- [13] 文慧宝,杜双江,程贵庆,等.生物炭与有机肥配施对白菜生长品质、土壤养分及酶活性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(20):224-230.
WEN H B, DU S J, CHENG G Q, et al. Effects of combined application of biochar and organic fertilizer on

- growth quality, soil nutrients and enzyme activity of Chinese cabbage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(20): 224-230.
- [14] 乔月, 胡诚, 万建华, 等. 不同施肥模式对水稻产量及养分利用效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(6): 9-15.
QIAO Y, HU C, WAN J H, et al. Effects of different fertilization patterns on rice yield and nutrient use efficiency[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(6): 9-15.
- [15] 钱力. 生物质炭基肥料的试验与改性探索[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
QIAN L. Test and modification research of biochar compound fertilizer[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [16] 孟蒙蒙, 夏文香, 许如康, 等. 盐酸改性松木屑生物炭吸附海洋溢油的模拟研究[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(3): 474-480.
MENG M M, XIA W X, XU R K, et al. Study on adsorption of marine oil spill by hydrochloric acid modified pine sawdust biochar [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(3): 474-480.
- [17] 张悍, 吴亦潇, 万亮, 等. 碱改性米糠炭对水中四环素的吸附性能研究[J]. *水处理技术*, 2020, 46(06): 20-26.
ZHANG H, WU Y X, WANG L, et al. Study on adsorption performance of alkali-modified rice bran biochar for tetracycline in water [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(6): 20-26.
- [18] 辽宁省农业农村厅. 生物炭直接还田技术规程: DB21/T 3314—2020[S]. 沈阳: 辽宁省市场监督管理局, 2020.
Department of Agriculture and Rural Affairs of Liaoning Province. DB21/T 3314—2020 Technique regulation of biochar incorporation [S]. Shenyang: Liaoning Administration for Market Regulation, 2020.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 106-107.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 106-107.
- [20] 刘爽, 汪东风, 徐莹. 磷酸活化茶渣生物炭对铅的吸附性能影响和吸附机理研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2022, 52(1): 56-64.
LIU S, WANG D F, XU Y, et al. Studies on lead adsorption performance of phosphoric acid activated tea residue biochar and associating mechanism[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2022, 52(1): 56-64.
- [21] 刘总堂, 邵江, 李艳, 等. 碱改性小麦秸秆生物炭对水中四环素的吸附性能[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3736-3743.
LIU Z T, SHAO J, LI Y, et al. Adsorption performance of tetracycline in water by alkali-modified wheat straw biochars [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3736-3743.
- [22] 李明玉, 丁梧秀, 王新武, 等. 施加生物炭对土壤理化性质的影响及其农业应用[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(1): 79-96.
LI M Y, DING W X, WANG X W, et al. Influence of applying biochar on soil physicochemical properties and its agricultural applications [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(1): 79-96.
- [23] 战秀梅, 彭靖, 王月, 等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1633-1641.
ZHAN X M, PENG J, WANG Y, et al. Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physicochemical properties and peanut yields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1633-1641.
- [24] SANDHU S S, USSIRI D A N, KUMAR S, et al. Analyzing the impacts of three types of biochar on soil carbon fractions and physicochemical properties in a corn-soybean rotation[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 473-481.
- [25] 田丹. 生物炭对不同质地土壤结构及水力特征参数影响试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
TIAN D. The experimental study of influence of biochar on different texture soils structure and hydraulic characteristic parameters [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [26] 李夏, 汪玉瑛, 吕豪豪, 等. 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(3): 568-577.
LI X, WANG Y Y, LV M M, et al. Effects of biochar-based organic fertilizer on the growth and soil properties of greenhouse tomatoes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 568-577.
- [27] 方远鹏, 谢晏芬, 赵宇婷, 等. 不同生物质炭基肥施用量对土壤养分及烤烟产质量的影响[J]. *江西农业学报*, 2023, 35(10): 14-20.
FANG Y P, XIE Y F, ZHAO Y T, et al. Effects of different biochar-based fertilizer application rates on soil nutrients and yield and quality of flue-cured tobacco [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(10): 14-20.
- [28] 燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(9): 303-307.
YAN J R, LÜ Q X, GAO Z P, et al. Effects of organic fertilizer and biochar on physical and chemical properties of desertification soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(9): 303-307.

- 特性与抗冻融性能试验研究[J].长江科学院院报,2024,41(1):128-135.
- LI Q, LUO J, PEI X J, et al. Experimental study on physical and mechanical properties and freeze-thaw resistance of straw fiber reinforced solidified soil[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2024,41(1):128-135.
- [26] LI C C, LI H J, LI J Z, et al. Using NDVI percentiles to monitor real-time crop growth[J].Computers and Electronics in Agriculture,2019,162:357-363.
- [27] 臧少龙,刘淋茹,高越之,等.基于无人机影像多时相的小麦品种氮效率分类识别[J].中国农业科学,2024,57(9):1687-1708.
- ZANG S L, LIU L R, GAO Y Z, et al. Classification and identification of nitrogen efficiency of wheat varieties based on UAV multi-temporal images[J].Scientia Agricultura Sinica,2024,57(9):1687-1708.
- [28] VANZOLINI J I, GALANTINI J A, MARTÍNEZ J M, et al. Changes in soil pH and phosphorus availability during decomposition of cover crop residues[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2017,63(13):1864-1874.
- [29] 陈梦茹,邢英英,解云霞,等.有机肥等氮替代化肥对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):369-381.
- CHEN M R, XING Y Y, XIE Y X, et al. Effects of organic manure and other nitrogen substitutes on spring maize growth, yield and water and fertilizer utilization efficiency[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):369-381.
- [30] 张乃丹,宋付朋,张喜琦,等.速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土供氮能力及小麦产量的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):337-344.
- ZHANG N D, SONG F P, ZHANG X Q, et al. Effect of available and slow-released nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on soil nitrogen supply capacity and wheat yield in coastal saline soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(6):337-344.
- (上接第 332)
- [29] YIN D W, YANG X Y, WANG H Z, et al. Effects of chemical-based fertilizer replacement with biochar-based fertilizer on albic soil nutrient content and maize yield[J].Open Life Sciences,2022,17(1):517-528.
- [30] DA SILVA CARNEIRO J S, RIBEIRO I C A, NARDIS B O, et al. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability[J].The Science of the Total Environment,2021,760:e143955.
- [31] 李玥,韩萌,杨劲峰,等.炭基肥配施有机肥对风沙土养分含量及酶活性的影响[J].花生学报,2020,49(2):1-7.
- LI Y, HAN M, YANG J F, et al. Effect of biochar-based fertilizer combined with organic fertilizer on nutrient content and enzyme activities in aeolian sandy soil[J].Journal of Peanut Science, 2020,49(2):1-7.
- [32] ZHENG J L, WANG S J, WANG R M, et al. Ameliorative roles of biochar-based fertilizer on morpho-physiological traits, nutrient uptake and yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.) under water stress[J].Agricultural Water Management,2021,257:e107129.
- [33] KANG S W, KIM S H, PARK J H, et al. Effect of biochar derived from barley straw on soil physicochemical properties, crop growth, and nitrous oxide emission in an upland field in South Korea[J].Environmental Science and Pollution Research,2018,25(26):25813-25821.
- [34] 刘琪琪.秸秆生物质炭基肥对水稻和玉米生长及产量的影响[D].南京:南京农业大学,2017.
- LIU Q Q. Effect of straw biochar based fertilizer on rice and maize growth and grain yield[D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [35] 刘文秀.生物炭基肥料对玉米和菠菜生长的影响研究[D].山东泰安:山东农业大学,2016.
- LIU W X. Effects of Biochar-based fertilizer on the growth of corn and spinach[D].Shandong Taian: Shandong Agricultural University,2016.
- [36] YANG Y F, AHMED W, YE C H, et al. Exploring the effect of different application rates of biochar on the accumulation of nutrients and growth of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*) [J].Frontiers in Plant Science, 2024,15:e1225031.