

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.43002

有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响

张贵芹¹ 王洪章¹ 郭新送² 朱福军² 高 涵² 张吉旺¹ 赵 斌¹
任佰朝¹ 刘 鹏¹ 任 昊^{1,*}

¹ 黄淮海区域玉米技术创新中心 / 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; ² 山东农大肥业科技股份有限公司, 山东肥城 271600

摘 要: 探究不同有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性质及玉米生长发育的调控作用, 为滨海盐碱地夏玉米生产提供理论依据。试验于 2021—2022 年夏玉米生长季在山东省滨州市无棣县滨海盐碱型农田进行。有机物料类型及用量分别为腐植酸(3000 kg hm⁻², HA)、生物炭(15,000 kg hm⁻², BC)、生物有机肥(15,000 kg hm⁻², BO), 以不添加有机物料为对照(CK), 探究 0~40 cm 土层土壤容重、总孔隙度、田间持水量、pH 值、电导率及总有机碳含量的变化, 分析不同有机物料投入对玉米地上部干物质积累和产量形成的影响。结果表明, 腐植酸、生物炭和生物有机肥的施用均可在一定程度上改善盐碱土壤理化性质。3 种有机物料连续处理能有效降低表层土壤容重, 增加土壤总孔隙度和田间持水量; 可显著降低 0~10 cm 土层 pH, 分别平均降低 0.17、0.08 和 0.20。连续施用 2 年后, 腐植酸显著降低 0~40 cm 土层电导率, 平均降低 32.74%; 3 种有机物料显著增加 0~20 cm 土层中总有机碳的含量, 其中生物炭处理能显著增加 57.99%。腐植酸和生物有机肥处理显著增加夏玉米地上部干物质积累量和产量; 连续使用 2 年后腐植酸处理产量显著增加了 11.01%, 表现较好。综上所述, 本试验条件下腐植酸施用后能改善土壤物理结构、降低 0~10 cm 土层 pH、提高土壤中有机碳含量、显著降低土壤电导率, 促进夏玉米地上部干物质积累、提高籽粒产量, 且连续施用 2 年后较 CK 增加纯收益。故而腐植酸可作为改良滨海盐碱地土壤理化性状、促进夏玉米生长发育的有机物料。生物有机肥的施用可改善土壤理化性状, 但仍需进行定位试验以验证其长期经济效益。

关键词: 滨海盐碱地; 有机物料; 土壤理化性状; 产量

Effects of organic material inputs on soil physicochemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land

ZHANG Gui-Qin¹, WANG Hong-Zhang¹, GUO Xin-Song², ZHU Fu-Jun², GAO Han², ZHANG Ji-Wang¹, ZHAO Bin¹, REN Bai-Zhao¹, LIU Peng¹, and REN Hao^{1,*}

¹ Huang-huai-hai Regional Maize Technology Innovation Center / College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; ² Shandong Agricultural University Fertilizer Technology Co., Ltd, Feicheng 271600, Shandong, China

Abstract: This study investigates the regulatory effects of different organic material inputs on soil physicochemical properties, as well as maize growth and development, in coastal saline-alkali land. The objective is to provide a theoretical basis for summer maize production in such environments. The experiment was conducted during the summer maize growing seasons of 2021–2022 in coastal saline-alkali farmland located in Wudi county, Binzhou city, Shandong province. The organic materials used included humic acid (3000 kg hm⁻², HA), biochar (15,000 kg hm⁻², BC), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻², BO), while the control

本研究由山东省重点研发计划项目(LJNY202103), 山东省现代农业产业技术体系建设项目(SDAIT-02-08), 山东省重大科技创新工程计划项目(2021CXGC010804-05)和山东省自然科学基金资助项目青年项目(ZR2022QC135)资助。

This study was supported by the Key Research and Development Project of Shandong Province (LJNY202103), the Shandong Province Key Agricultural Project for Application Technology Innovation (SDAIT-02-08), the Major Scientific and Technological Innovation Project in Shandong Province (2021CXGC010804-05), and the Youth Project Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2022QC135).

* 通信作者(Corresponding author): 任昊, E-mail: renhaosadu@126.com

第一作者联系方式: E-mail: zhangguiqinsy@163.com

Received (收稿日期): 2024-01-09; Accepted (接受日期): 2024-05-21; Published online (网络出版日期): 2024-06-07.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240607.0900.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

(CK) had no organic materials added. The study examined changes in soil bulk density, total porosity, field capacity, pH value, electrical conductivity, and total organic carbon content in the 0–40 cm soil layer. Additionally, the effects of different organic material inputs on aboveground dry matter accumulation and maize yield formation were assessed. The results demonstrated that the application of humic acid, biochar, and bio-organic fertilizer can improve the physicochemical properties of saline-alkali soil. All three organic material treatments significantly reduced the bulk density of the surface soil, increased total porosity and field capacity, and reduced the pH value of the 0–10 cm soil layer by 0.17, 0.08, and 0.20, respectively. After two years of continuous application, humic acid significantly decreased soil electrical conductivity in the 0–40 cm soil layer by an average of 32.74%. Furthermore, all three organic materials significantly increased the total organic carbon content in the 0–20 cm soil layer, with the biochar treatment exhibiting a significant increase of 57.99%. Both humic acid and bio-organic fertilizer treatments significantly increased aboveground biomass and yield of summer maize. After two consecutive years of application, the humic acid treatment showed a significant yield increase of 11.01%, indicating superior performance. In conclusion, comprehensive analysis showed that the application of humic acid can improve soil physical structure, reduce the pH of the 0–10 cm soil layer, increase organic carbon content, decrease soil electrical conductivity, promote aboveground biomass accumulation in summer maize, and enhance grain yield under the conditions of this study. Moreover, humic acid application demonstrated increased net yield compared to the control after two consecutive years. Therefore, humic acid can be employed as an organic material to improve soil physical and chemical properties in coastal saline-alkali land, while promoting the growth and development of summer maize. Although bio-organic fertilizer also enhances soil physical and chemical properties, further localized experiments are necessary to verify its long-term economic effects.

Keywords: coastal saline-alkali land; organic material; soil physical and chemical properties; yield

盐碱地是我国重要的后备土地资源, 具有面积大、分布广的特点, 全国盐碱地面积约 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中滨海盐碱地有 $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占总盐碱地面积的 13.55%^[1-2]。土壤盐渍化是目前全球面临的重要环境问题, 盐碱地治理与农业利用在保障口粮绝对安全、保持现有耕地稳定、坚守粮食基本自给的安全底线方面具有重要作用^[3-4]。滨海盐碱地土壤 pH 和含盐量较高、土壤孔隙度小、土壤结构差、持水性变差、影响有机质的转化, 降低土壤肥力, 限制了植物对养分的吸收, 使农业资源浪费, 并造成严重经济损失和次生危害^[5-6]。前人研究表明施加有机物料可以改善土壤理化性状, 提升土壤中有机质含量^[7]。盐碱地施用腐植酸能改善土壤结构, 增加土壤的通透性^[8], 有效改善土壤水溶性离子组成, 显著降低土壤含盐量^[9-10], 降低土壤 pH^[11]。施用生物炭可以改善土壤持水特性, 增加土壤含水量和田间储水量^[12], 显著降低土壤容重和中度盐碱地土壤电导率, 提高阳离子交换量^[13-14], 固碳减排潜力较大^[15]。生物有机肥将有益微生物与适宜基质相结合, 能改善土壤物理结构, 降低土壤电导率、全盐含量、pH, 增加土壤有机质, 提高土壤含水量^[16-18], 促进地上部干物质积累, 提高作物产量^[19-20]。前人关于有机物料改良盐碱地做了大量研究, 但多为研究单一类型有机物料在盐碱地上的改良效果, 目前尚缺乏针对滨海盐碱地施用不同类型有机物料后对土壤的调控效应的比较研究, 因此本研究于山东省滨海轻中度盐碱地设置大田试验, 选取目前应用前景较好的 3 种有机物料: 腐植酸、生物炭和生物有机肥, 比较其对滨海轻中度盐碱地土壤理化性质

和玉米生长发育的影响, 结合经济效益分析以期选择最适的滨海盐碱地改良有机物料, 为今后轻中度盐碱地改良及玉米高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于山东省滨州市无棣县小泊头镇 ($38^{\circ}03'N$, $117^{\circ}36'E$), 地处北温带东亚季风大陆性气候区, 雨热同期, 土壤类型为棕壤土, 0–20 cm 土层 pH 8.0, 土壤含盐量 1.5‰~3‰, 有机质含量 7.83 g kg^{-1} , 全氮含量 0.90 g kg^{-1} , 速效磷含量 12.40 mg kg^{-1} , 速效钾含量 $169.69 \text{ mg kg}^{-1}$ 。2021 年和 2022 年试验区降雨量与气温变化见图 1。

1.2 试验设计

本试验为随机区组设计, 在秸秆全量还田、常规施肥(复合肥 $N \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ K}_2\text{O}=25 \text{ 12 5}$)的基础上共设 3 个有机物料投入处理: 腐植酸(3000 kg hm^{-2} , HA)、生物炭($15,000 \text{ kg hm}^{-2}$, BC)和生物有机肥($15,000 \text{ kg hm}^{-2}$, BO), 同时设置不添加有机物料处理为对照(CK), 共 4 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 每个小区长 15 m, 宽 6 m, 面积为 90 m^2 , 小区间设置 1 m 宽的间隔。播种前将复合肥及有机物料均匀撒于地表, 后使用旋耕机将其旋入土层中, 旋耕深度约 15 cm。播种时采用机播方式, 播种密度为 $67,500 \text{ 株 hm}^{-2}$, 行距 60 cm, 株距 24.7 cm。2021 年 6 月 18 日播种, 10 月 9 日收获; 2022 年 6 月 17 日播种, 10 月 11 日收获。玉米种植期间采用统一的植保方案进行病虫草害防控。

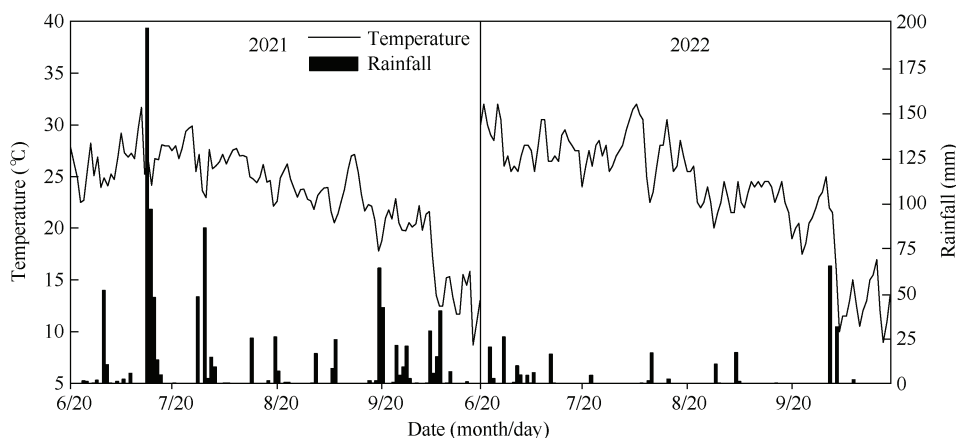


图1 试验点夏玉米季降雨量和气温变化情况

Fig. 1 Changes of rainfall and temperature during the summer maize season at the experimental site

供试玉米品种为伟科 702, 腐植酸由山东农大肥业科技股份有限公司生产, 黑色粉末状, 总有机质 74%, 总腐植酸约 44%, 价格为 500 元 t^{-1} 。生物炭由河南星诺环保材料有限公司生产, 由玉米秸秆制备, 呈黑色粉末状, 180~200 目, 价格为 4800 元 t^{-1} 。生物有机肥由山东农大肥业科技股份有限公司提供, 圆粒形, 总养分 $N-P_2O_5-K_2O \geq 5\%$, 有机质 $\geq 55\%$, 有效活菌数 $\geq 3 \times 10^8 g^{-1}$, 价格为 700 元 t^{-1} 。常规复合肥由山东农大肥业科技股份有限公司生产, 圆粒形, $N-P_2O_5-K_2O = 25-12-5$, 总养分 $\geq 42\%$, 活性腐植酸 $\geq 3\%$, 价格为 3000 元 t^{-1} 。

土壤取样方法: 在 2021 年和 2022 年玉米收获后对土壤进行取样, 每 10 cm 一层, 取至 40 cm, 每个处理重复 3 次。风干土样过 2 mm 筛, 测定其 pH、电导率、总有机碳含量; 使用环刀取原状土, 用于测定土壤容重, 并计算总孔隙度和田间持水量。取样时每个处理设置 3 个重复。

植株取样方法: 分别在玉米拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)和完熟期(R6)取 5 棵有代表性的玉米植株用于测定生物量。收获时在各小区选择具有代表性的 10 m 双行收获全部果穗, 调查产量及产量构成因素。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤容重、总孔隙度及田间持水量 采用环刀法^[21]测定土壤容重, 计算总孔隙度和田间持水量。取样前称环刀重量 W_0 , 将取样带回的环刀浸泡在 2~3 cm 水层中吸水至恒重, 即达到饱和状态, 称重记录 W_1 , 后将环刀置于筛网上 12 h 将重力水排出称重得 W_2 , 最后移至 105℃烘箱烘干至恒重称重得 W_3 。

土壤容重($g\ cm^{-3}$)= $(W_3-W_0)/V$, V 为环刀体积(cm^3)

总孔隙度($g\ cm^{-3}$)= $(W_1-W_3)/V$

田间持水量(%)= $(W_2-W_3)/(W_3-W_0)$

1.3.2 土壤 pH 和电导率 土壤 pH 和电导率分别使用 pH 计(PHSJ-4F)和电导率仪(DDS-11A 型)测定(水土比为 5:1)。

1.3.3 土壤总有机碳含量 各土层风干土壤样品采用重铬酸钾-稀释热(水合热)法进行测定^[22]。

1.3.4 地上部干物质积累量 玉米植株样品按照茎秆、叶片、雌穗、雄穗、苞叶分装, 105℃下杀青 30 min 后 80℃烘干至恒重称重。

1.3.5 玉米产量及产量构成 于完熟期的各处理小区中选择具有代表性的 10 m 双行调查单位面积穗数并收获果穗, 果穗晾干后调查穗粒数, 脱粒后烘干籽粒测定千粒重及产量, 并计算出 14%含水量的千粒重及产量, 每个处理 3 次重复。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 软件进行整理, 用 SPSS 25.0 软件进行数据统计分析, Tukey 法进行差异性比较($\alpha=0.05$), 使用 SigmaPlot 15.0 和 Microsoft Excel 2019 绘制分析图表。

2 结果与分析

2.1 有机物料投入对盐碱地土壤容重、总孔隙度和田间持水量的影响

2021 年, 与 CK 相比, 腐植酸、生物炭和生物有机肥处理显著降低 0~20 cm 土层容重, 分别平均降低 2.71%、3.23%和 4.31%; 在 20~30 cm 土层, 腐植酸和生物有机肥处理能显著降低土壤容重, 分别降低 2.02%和 5.53%。2022 年腐植酸、生物炭和生物有机肥处理显著降低 0~20 cm 土层容重, 降幅平均

为 10.32%、13.51%和 5.35%；生物炭处理还可以显著降低 20~30 cm 土层的土壤容重，降幅为 8.87%。

2021 年腐植酸、生物炭和生物有机肥处理均能增加 0~20 cm 土层的总孔隙度，分别平均提升 7.83%、10.69%和 9.24%；在 20~30 cm 土层生物有机肥的总孔隙度较 CK 显著提升了 24.49%；在 30~40 cm 土层生物炭处理的总孔隙度显著增加了 9.60%。2022 年腐植酸和生物炭处理相较于 CK 增加了 0~20 cm 土层总孔隙度，平均增幅为 4.19%和 7.95%；生物有机肥增加 10~20 cm 土层总孔隙度，增幅为 5.47%。

与 CK 相比，2021 年施用生物炭和生物有机肥显著增加 10~30 cm 土层的田间含水量，平均增幅为 22.22%和 32.09%；腐植酸处理提升 10~20 cm 土层的田间持水量(24.06%)。2022 年腐植酸、生物炭和生物有机肥处理改善了 0~20 cm 土层的田间持水性能，分别平均提高 14.20%、19.92%和 8.16%的田间持水量；生物炭处理亦能显著增加 20~30 cm 土层的田间持水量，增幅为 15.40%。

2.2 有机物料投入对盐碱地土壤 pH 及电导率的影响

由图 2 可以看出，有机物料的投入影响土壤的 pH。2021 年，随着土壤深度增加，pH 呈现上升趋势，主要原因是降雨冲刷降低了表层土壤的碱度。与 CK 相比，腐植酸、生物炭和生物有机肥均显著降低 0~20 cm 土层土壤 pH，分别平均降低了 0.12、0.15 和 0.21；生物有机肥处理亦能显著降低 30~40 cm 土层的 pH，降幅为 0.47。2022 年的土壤 pH 随土层的加深而减小，与 CK 相比，3 种有机物料均可显著降低 0~10 cm 土层 pH，分别降低了 0.17、0.08 和 0.20；腐植酸与生物有机肥处理还可以显著降低 20~30 cm 土层的 pH，分别降低 0.10 和 0.15。

与 CK 相比，2021 年施入腐植酸和生物炭后显著降低了 0~10 cm 土层的电导率值，分别降低 13.09%和 10.73%。2022 年，与 CK 相比，腐植酸处理能够显著降低 0~40 cm 土层的电导率，平均降幅为 32.74%。生物有机肥处理能显著降低 0~10 cm 土层的电导率，降幅为 4.35%。

表 1 不同有机物料投入下盐碱土壤的容重、总孔隙度和田间持水量

Table 1 Effects of different organic materials inputs on bulk density, total porosity, and field capacity in a saline-alkali soil

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	2021			2022		
		容重 Bulk density (g cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity (%)	田间持水量 Field capacity (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity (%)	田间持水量 Field capacity (%)
0~10	CK	1.43±0.01 a	40.25±1.07 b	25.78±0.54 a	1.17±0.01 a	48.75±0.01 b	36.08±0.36 b
	HA	1.41±0.01 a	42.70±0.64 a	26.78±0.57 a	1.11±0.03 bc	49.77±0.12 a	38.49±1.02 a
	BC	1.41±0.01 a	42.57±0.33 a	25.40±1.35 a	1.08±0.01 c	49.85±0.51 a	38.09±0.37 a
	BO	1.42±0.01 a	42.62±0.32 a	27.12±0.40 a	1.14±0.01 ab	49.38±0.56 ab	37.71±0.69 a
10~20	CK	1.57±0.01 a	33.84±0.78 b	20.22±0.63 b	1.56±0.01 a	39.39±0.40 c	24.49±0.49 c
	HA	1.50±0.01 b	37.19±0.26 a	25.09±0.19 a	1.33±0.02 c	42.07±0.62 b	30.69±2.80 b
	BC	1.49±0.02 b	39.44±0.06 a	25.39±0.37 a	1.28±0.01 d	45.30±0.19 a	34.55±0.02 a
	BO	1.45±0.01 c	38.32±0.31 a	24.81±0.51 a	1.44±0.02 b	41.55±0.92 b	27.81±0.80 b
20~30	CK	1.56±0.01 a	29.27±1.65 bc	16.95±0.40 c	1.48±0.03 a	40.30±0.34 a	26.02±0.06 b
	HA	1.52±0.01 b	27.77±0.64 c	17.91±0.36 bc	1.50±0.01 a	40.49±0.29 a	25.94±0.42 b
	BC	1.55±0.01 a	31.71±1.10 b	20.04±0.61 b	1.35±0.06 b	42.26±0.88 a	30.03±1.88 a
	BO	1.47±0.01 c	36.43±2.05 a	24.29±1.66 a	1.45±0.01 a	42.11±0.18 a	27.97±0.31 ab
30~40	CK	1.44±0.01 c	33.01±0.46 b	23.66±1.43 a	1.39±0.02 a	43.96±0.63 a	30.26±0.73 ab
	HA	1.56±0.01 a	26.27±0.70 c	16.51±0.45 c	1.38±0.01 a	41.89±0.24 b	29.31±0.16 b
	BC	1.47±0.01 b	36.18±1.41 a	20.93±0.79 b	1.37±0.01 a	42.76±0.25 b	31.61±0.21 a
	BO	1.47±0.01 b	34.48±0.21 ab	21.92±1.17 ab	1.32±0.05 a	42.61±0.01 b	29.00±0.74 b

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。不同小写字母表示同一年份、同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²) and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively. Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments within the same year and the same soil layer ($P < 0.05$).

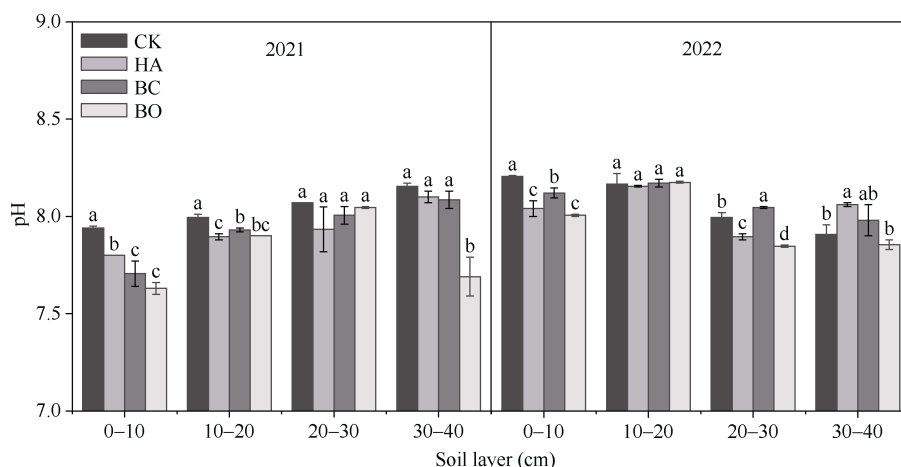


图 2 不同有机物料投入下盐碱土壤的 pH 值

Fig. 2 Effects of different organic materials inputs on pH value in a saline-alkali soil

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。误差线为标准误。图注上标以不同小写字母表示同一年份、同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively. Error bars are standard error. Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments within the same year and the same soil layer ($P < 0.05$).

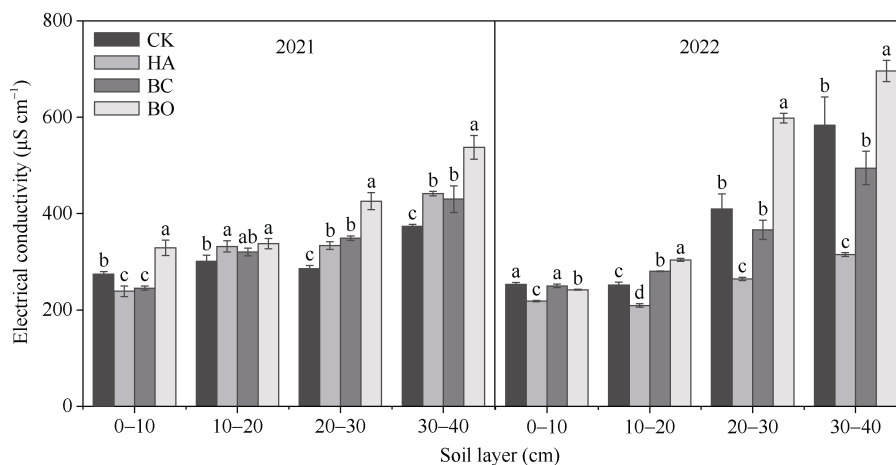


图 3 不同有机物料投入下盐碱土壤的电导率

Fig. 3 Effects of different organic materials inputs on electrical conductivity in a saline-alkali soil

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。误差线为标准误。图注上标以不同小写字母表示同一年份、同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively. Error bars are standard error. Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments within the same year and the same soil layer ($P < 0.05$).

2.3 有机物料投入对盐碱土壤总有机碳的影响

土壤中各土层在 2021 年和 2022 年总有机碳含量测定结果见图 4, 2 年有机碳含量在垂直方向上均表现为表层土大于深层土壤。2021 年, 相比于 CK, 生物有机肥处理 0~20 cm 土层的总有机碳含量, 平均增幅为 7.54%; 生物炭处理显著提升了 20~40 cm 土层的总有机碳含量, 平均增加 53.65%; 腐植酸和生物有机肥处理亦能增加 30~40 cm 土层的总有机碳含量, 分别提升了 34.61%和 20.83%。与 CK 相比, 2022 年腐植酸、生物炭和生物有机肥处理均显著增

加 0~20 cm 土层的总有机碳含量, 分别增加了 29.57%、57.99%和 14.90%; 生物炭处理显著增加 20~30 cm 土层的总有机碳含量, 增幅为 18.73%; 30~40 cm 土层生物炭处理的总有机碳含量显著增加了 16.21%。

2.4 有机物料投入对盐碱地玉米干物质积累的影响

由图 5 可以看出, 与 CK 相比, 2021 年腐植酸处理增加了拔节期的干物质积累量(4.17%), 生物有机肥处理增加大喇叭口期的干物质积累量(17.51%);

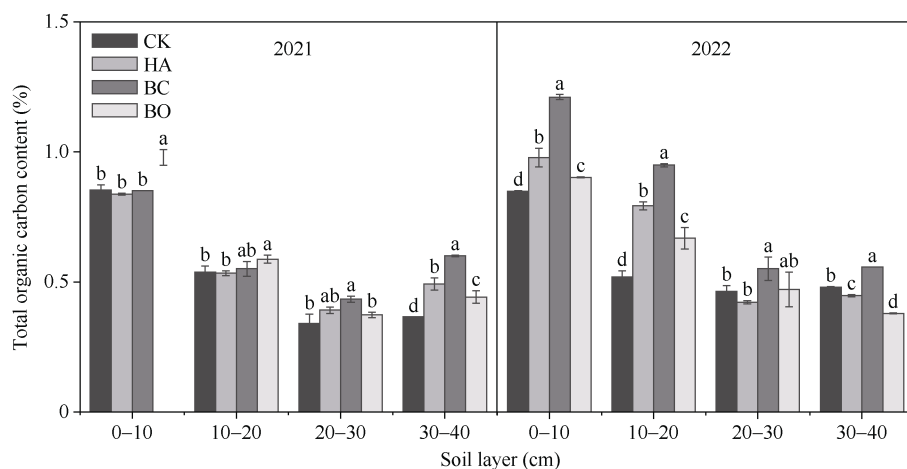


图 4 不同有机物料投入下盐碱土壤的总有机碳含量

Fig. 4 Effects of different organic materials inputs on total organic carbon content in a saline-alkali soil

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。误差线为标准误差。图注上标以不同小写字母表示同一年份、同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively. Error bars are standard error. Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments within the same year and the same soil layer ($P < 0.05$).

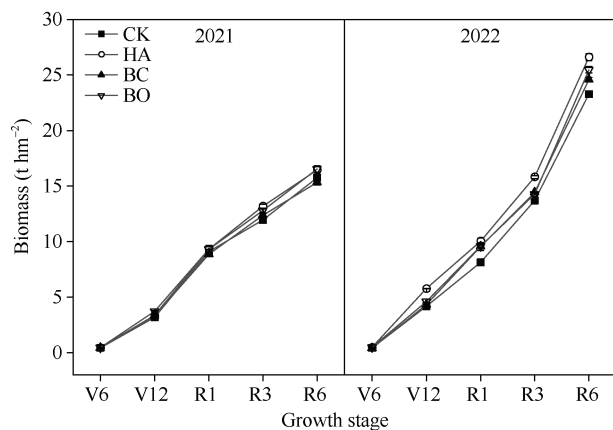


图 5 不同有机物料投入下盐碱地夏玉米的干物质积累量

Fig. 5 Effects of different organic materials inputs on biomass of summer maize in a saline-alkali soil

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。误差线为标准误差。

CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively. Error bars are standard error.

腐植酸、生物炭和生物有机肥处理在乳熟期均提高玉米地上部干物质积累量,分别提高了 10.25%、3.66%和 6.95%;腐植酸和生物有机肥处理在完熟期分别提高了 4.36%和 5.00%的干物质积累量。2022 年腐植酸和生物有机肥处理增加拔节期、大喇叭口期的干物质积累量,在拔节期分别增加 8.26%和 9.12%,在大喇叭口期增加 38.64%和 10.23%;腐植酸、生物炭和生物有机肥处理显著提高吐丝期、乳熟期和完熟期的玉米地上部干物质质量,在吐丝期分

别提高 23.52%、17.34%和 17.83%,在乳熟期分别提高 15.42%、5.36%和 4.31%,在完熟期分别提高 14.26%、5.61%和 9.36%。

2.5 有机物料投入对盐碱地玉米产量及产量构成因素的影响

有机物料还田影响夏玉米产量及产量构成因素(表 2),相对于 2021 年,2022 年玉米的穗粒数、千粒重和产量都得到提升。2021 年,生物有机肥处理较 CK 显著增加了千粒重,增幅为 12.12%。各处理产量数据表现为生物有机肥>腐植酸>CK>生物炭,腐植酸显著增加了 3.97%的籽粒产量,生物有机肥处理产量则显著增加 14.07%。

2022 年,与 CK 相比,腐植酸处理显著增加穗粒数和千粒重,分别增加了 4.67%和 3.99%,生物有机肥处理显著增加穗粒数,增幅为 4.67%,各处理产量数据表现为腐植酸>生物有机肥>生物炭>CK,其中施用腐植酸和生物有机肥相较于 CK 能显著增加夏玉米产量,分别提升了 11.01%和 9.94%。

2.6 有机物料投入对玉米经济效益的影响

由表 3 可知,不同有机物料处理在种子、农药、机械方面成本无差异,生物炭和生物有机肥处理的肥料成本明显高于 CK 和腐植酸处理。从纯收益来看,2021 年不同处理下纯收益由高到低依次为 CK、腐植酸、生物有机肥、生物炭,3 种有机物料处理较 CK 无纯收益增加;2022 年不同处理下纯收益由高到低依次为腐植酸、CK、生物有机肥、生物炭,其中腐植酸较 CK 增加了经济效益 1796.10 元 hm⁻²。

表 2 不同有机物料投入下盐碱地夏玉米的产量及其构成因素
Table 2 Effects of different organic materials inputs on yield and yield components of summer maize in a saline-alkali soil

年份 Year	处理 Treatment	公顷穗数 Actual ears (ear hm ⁻²)	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg hm ⁻²)
2021	CK	60,558.58±1170.72 a	511.18±3.43 a	255.36±0.97 b	7903.65±193.57 c
	HA	62,225.33±1644.46 a	495.91±5.71 ab	257.05±2.00 b	8217.70±96.26 b
	BC	61,114.17±1575.40 a	487.89±10.27 b	256.05±3.43 b	7732.01±215.66 c
	BO	62,780.92±962.30 a	504.83±7.37 ab	286.31±4.49 a	9015.42±73.83 a
2022	CK	56,113.92±962.30 a	556.98±2.67 b	321.67±5.84 bc	10,051.57±109.61 c
	HA	57,225.08±962.30 a	582.98±4.09 a	334.52±5.57 a	11,157.90±111.07 a
	BC	56,669.50±0.00 a	577.87±10.81 ab	315.26±4.83 c	10,324.06±251.87 bc
	BO	57,225.08±962.30 a	582.98±17.89 a	331.18±3.65 ab	11,050.37±473.17 ab

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。不同小写字母表示同一年份、同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。
CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively. Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments within the same year and the same soil layer ($P < 0.05$).

表 3 不同有机物料投入下玉米各项投入与产出情况
Table 3 Input and output of maize under different organic materials inputs

年份 Year	处理 Treatment	生产成本 Production cost (Yuan hm ⁻²)					产值 Output value (Yuan hm ⁻²)	纯收益 Net income (Yuan hm ⁻²)	较 CK 增加纯收益 Increase net income compared with CK (Yuan hm ⁻²)
		种子 Seed	农药 Pesticide	肥料 Fertilizer	机械 Machine	合计 Summation			
2021	CK	750	320	2250	1500	4820	21,735.03	16,915.03	
	HA	750	320	3750	1500	6320	22,598.67	16,278.67	-636.36
	BC	750	320	74,250	1500	76,820	21,263.03	-55,557.97	-72,472.00
	BO	750	320	12,750	1500	15,320	24,792.45	9472.41	-7442.62
2022	CK	750	400	2250	1300	4700	25,813.87	21,113.87	
	HA	750	400	3750	1300	6200	29,109.97	22,909.97	1796.10
	BC	750	400	74,250	1300	76,700	26,864.55	-49,835.45	-70,949.32
	BO	750	400	12,750	1300	15,200	27,482.41	12,282.41	-8831.46

CK、HA、BC 和 BO 分别表示不添加有机物料、添加腐植酸(3000 kg hm⁻²)、添加生物炭(15,000 kg hm⁻²)和添加生物有机肥(15,000 kg hm⁻²)。CK, HA, BC, and BO represent no organic materials, humic acid (3000 kg hm⁻²), biochar (15,000 kg hm⁻²), and bio-organic fertilizer (15,000 kg hm⁻²), respectively.

2.7 玉米生物量、产量及产量构成因素与土壤理化性状的相关性分析

由图 6 可以看出籽粒产量与穗粒数、千粒重和玉米地上部生物量呈显著正相关,与土壤电导率呈显著负相关。公顷穗数与玉米地上部生物量呈显著正相关;穗粒数与千粒重和玉米地上部生物量呈显著正相关,与土壤电导率呈显著负相关;千粒重与玉米地上部生物量呈显著正相关,与土壤电导率呈显著负相关;玉米地上部生物量与土壤总孔隙度呈显著正相关,与 pH 值呈显著负相关。

3 讨论

3.1 不同有机物料投入对盐碱土壤物理性状的影响

土壤的物理性质可以综合表征土壤中水、肥、气、热相互调节及供给状况,直接作用于作物的生长和发育,因此良好的土壤结构对土壤肥力的提升及作物增产提质至关重要^[23]。容重是土壤重要的物理性质之一,与作物根系发育密切相关;土壤孔隙度和田间持水量直接影响土壤通气状况和持水性能,

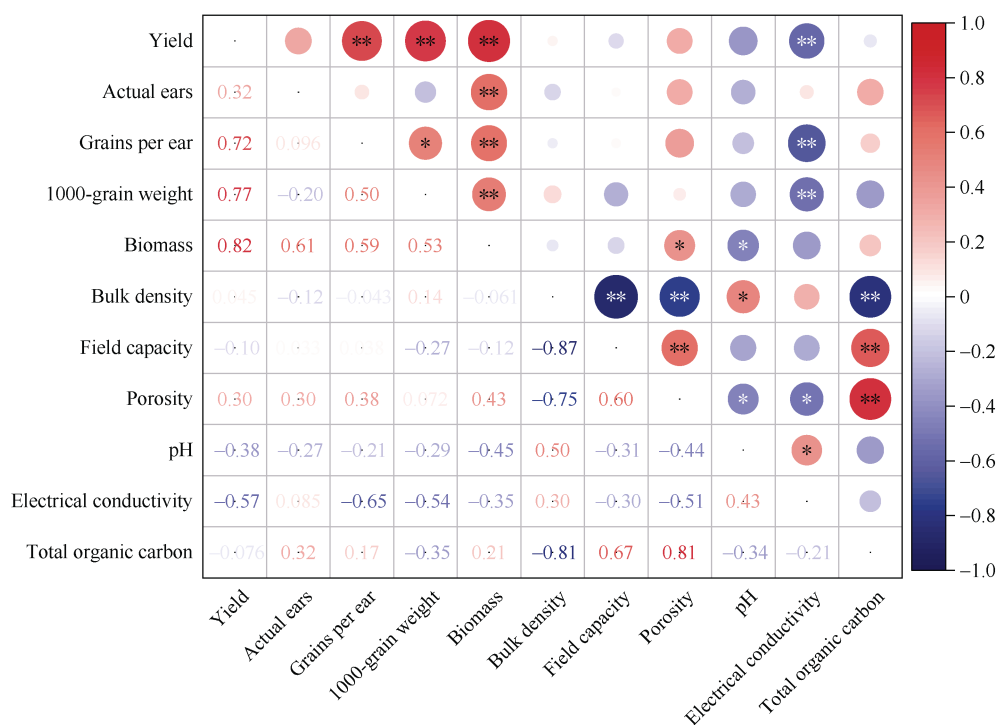


图 6 玉米地上部生物量、产量及产量构成因素与土壤理化性状的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of aboveground biomass, yield, and yield component factors with soil physicochemical properties

**表示差异极显著($P < 0.01$), *表示差异显著($P < 0.05$)。

** represents extremely significant difference at the 0.01 probability level; * represents significant difference at the 0.05 probability level.

能够反映土壤的通透性和保水性^[24]。前人研究发现, 有机物料还田能够改善土壤孔隙结构和连通性, 增加田间持水量和总孔隙度, 降低土壤容重^[25-28], 本试验中连续施用腐植酸、生物炭和生物有机肥均能降低 0~20 cm 土壤容重, 平均降低 10.32%、13.51% 和 5.35% (表 1), 相比 2021 年, 2022 年 0~10 cm 土壤容重显著降低, 原因可能为 2021 年降水量大且持续, 导致土壤沉实严重, 连续耕种措施亦可使表层土壤疏松, 因此第 2 年表层土容重显著低于第 1 年。腐植酸、生物炭和生物有机肥连续施用后亦可增加表层土壤田间持水量, 平均增幅为 14.20%、19.92% 和 8.16% (表 1); 连续施用腐植酸和生物炭均可增加 0~20 cm 土层总孔隙度, 平均增加 4.19% 和 7.95%。生物炭由于其丰富的孔隙, 施用后可以优化土壤孔隙结构^[29]。生物有机肥含有多种有益微生物菌剂, 它们在繁殖过程中可以产生大量的可黏结土壤团粒的多糖, 这些团粒结构可以使得土壤疏松^[30]。邱吟霜等^[31]探索不同种类有机肥及用量对土壤物理性状的影响, 结果表明施用生物有机肥对耕层土壤物理性质较 CK 效果最为显著, 特别是生物有机肥施用 6 t hm⁻² 处理, 对土壤孔隙度、田间持水量较 CK 分别增长 24.96%、66.01%, 土壤容重降低 10.74%。本试

验中第 1 年生物有机肥处理在各个土层的综合表现较好, 但连续施用的效果不如当季效果明显, 可能是由于生物有机肥的用量大导致的。据此本研究认为腐植酸、生物炭和生物有机肥均能在一定程度上降低土壤容重、增加土壤总孔隙度、改善土壤持水结构, 其中生物有机肥的当季效应较好, 连续处理则是生物炭及腐植酸的改良效果较好。

3.2 不同有机物料投入对盐碱土壤化学性状的影响

滨海盐碱地的化学性质差, pH 值及含盐量较高, 影响有机质的转化。投入有机物料能够修复盐碱地, 降低土壤含盐量和 pH 值^[32-34]。有机物料的施用能够降低盐碱土壤电导率^[35-36]。本试验中投入腐植酸、生物炭和生物有机肥均可显著降低 0~10 cm 土层 pH 值, 2 年平均降低 0.16、0.16 和 0.26; 腐植酸施用 2 年后能显著降低全土层电导率值, 平均降低 32.74% (图 2, 图 3), 可见腐植酸处理在降低土壤全盐含量方面表现较好。

许多研究表明施用有机物料后, 可以提高土壤碳库和有机质含量^[37-40]。在本试验中, 第 1 年生物有机肥处理显著增加了 0~20 cm 土层的总有机碳含量, 连续 2 年施入腐植酸、生物炭和生物有机肥后

分别显著增加了 29.57%、57.99% 和 14.90% 的总有机碳含量(图 4)。其中生物炭处理效果最显著, 一方面是由于生物炭自身含有较高的难降解碳, 形成固碳基础; 另一方面是由于生物炭利用自身比表面积大的特点吸附土壤中含 C、N 的有机和无机物质, 生成更稳定的有机-无机复合体等形式, 以降低碳的分解释放, 达到固碳的目的^[41-42]。生物有机肥一方面将外源有机碳带入土壤, 促进土壤中有机碳各组分的提高, 提高有机质含量^[43-44]; 另一方面可以为外源功能微生物定殖和繁衍提供能源物质的有机载体, 增加土壤微生物活性, 进而提高土壤有机质含量^[45]。腐植酸施用后当季不能增加土壤总有机碳含量, 连续施用后有显著增加效果, 出现这一现象的原因可能是腐植酸作为有机胶结物质促进土壤微团聚体和大团聚体的形成, 而团聚体对有机碳的物理保护作用能有效避免包裹在团聚体内的有机碳被微生物分解, 从而促使土壤有机碳的积累^[46-47]。

3.3 不同有机物料投入对地上部干物质积累和产量形成的影响

干物质是生物学产量形成的基础, 良好的土壤结构能促进作物对养分的吸收, 从而提高地上部生物量和产量^[48]。大量研究表明施加有机物料能够促进作物干物质积累, 提高作物产量^[49-51]。本研究腐植酸和生物有机肥处理均可促进作物后期的地上部干物质积累, 当季施用二者效果相似, 连续施用 2 年后以腐植酸处理表现较好(图 5)。结合相关性分析可知, 添加有机物料可通过增加土壤总孔隙度, 改善土壤孔隙性, 降低土壤碱度来促进玉米干物质积累(图 6)。Chen 等^[52]通过施用生物有机肥显著提高了花生地上部干重和根干重。

张帆等^[53]将有机物料与化肥配施应用于大麦-双季稻轮作体系, 发现有机肥中的氮替代 30% 化肥中的氮或替代 60% 化肥中的氮均可增加大麦产量。腐植酸配合无机复合肥能使盐碱地棉花产量增加 5.9%~18.1%^[54], 可见有机物料的施用有利于作物产量的增加。在本试验条件下, 当季施用腐植酸和生物有机肥籽粒产量分别显著提高 3.97% 和 14.07%, 而连续 2 年施用腐植酸和生物有机肥则分别提高 11.01% 和 9.94% (表 2), 整体表现与地上部干物质积累量表现一致。由相关性分析可知降低土壤的电导率, 有利于提高穗粒数、千粒重和籽粒产量(图 6), 本试验中腐植酸处理能显著降低全土层电导率, 改善土壤化学性质, 促进穗粒数、千粒重提高, 进而提

高籽粒产量。此外, 还有研究发现通过施加生物炭能够提高谷子花后同化物积累量、花后同化物积累量对籽粒产量的贡献率以及收获期穗的干物质分配比例, 增加谷子产量^[55]; 但是本试验中生物炭的施用对产量无显著增加效果, 造成这一差异的原因可能是由于本试验在秸秆还田的基础上再次投入高量的碳可能会加大土壤 C/N, 抑制土壤微生物的活动, 进而影响作物生长发育^[56]。

结合成本与效益分析(表 3), 第 1 年与 CK 相比施用有机物料收益无增加, 第 2 年腐植酸处理较 CK 增加了经济效益 1796.10 元 hm^{-2} , 说明连续施用腐植酸通过改善土壤理化性质, 在短期时间内便可实现收益的增加, 在本试验中具有最好的综合表现。施用生物有机肥后 2 年内的纯收益分别为 9472.41 元 hm^{-2} 和 12,282.41 元 hm^{-2} , 但因偏高的投入, 其相对于 CK 收益无增加。前人研究表明, 通过投入有机物料改良盐碱地时, 短期投入可使土壤达到较好改良效果, 后期便可利用其后效不再投入有机物料^[57-58], 如此其后期经济效益增加, 可实现经济效益的长效提高。本研究会继续进行定位试验, 当土壤理化性状改良至趋于平稳时停止投入, 并观测生物有机肥投入带来的后期效益。本试验中生物炭处理可显著改善土壤的物理性状, 增加土壤总有机碳, 但其对作物的生长和发育无显著促进作用, 使其产值较低; 另一方面生物炭造价高昂, 成本较高, 2 年内无纯收益, 因此生物炭不能作为改良滨海盐碱地的最适有机物料。

4 结论

综上所述, 腐植酸施用后能改善土壤物理结构、降低 0~10 cm 土层 pH 值、提高土壤中有有机碳含量、显著降低土壤电导率, 促进夏玉米地上部干物质积累、提高籽粒产量, 且连续施用 2 年后较 CK 增加纯收益。因此腐植酸可以作为改良滨海盐碱地土壤理化性状、促进夏玉米生长发育的有机物料。生物有机肥的施用也可改善土壤理化性状, 但仍需进行定位试验以验证其长期经济效益。

References

- [1] 李金彪, 陈金林, 刘广明, 杨劲松. 滨海盐碱地绿化理论技术研究进展. 土壤通报, 2014, 45: 246-251.
Li J B, Chen J L, Liu G M, Yang J S. Progress of greening theory and technology for coastal saline land. *Chin J Soil Sci*, 2014, 45: 246-251 (in Chinese with English abstract).
- [2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 谢文萍, 张新, 朱伟, 张璐, 孙瑞娟.

- 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望. 土壤学报, 2022, 59: 10–27.
- Yang J S, Yao R J, Wang X P, Xie W P, Zhang X, Zhu W, Zhang L, Sun R J. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect. *Acta Pedol Sin*, 2022, 59: 10–27 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘森, 王志春, 杨福, 李景鹏, 梁正伟. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展. 水土保持学报, 2021, 35(3): 1–8.
- Liu M, Wang Z C, Yang F, Li J P, Liang Z W. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil. *J Soil Water Conserv*, 2021, 35(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨易, 黄立华, 肖扬, 黄金鑫, 刘伯顺, 杨靖民. 苏打盐碱化稻田土壤氮素矿化和硝化特征及其影响因子. 植物营养与肥料学报, 2022, 28: 1816–1827.
- Yang Y, Huang L H, Xiao Y, Huang J X, Liu B S, Yang J M. Characteristics and influencing factors of soil nitrogen mineralization and nitrification in saline-sodic paddy fields. *J Plant Nutr Fert*, 2022, 28: 1816–1827 (in Chinese with English abstract).
- [5] He K, He G, Wang C P, Zhang H P, Xu Y, Wang S M, Kong Y Z, Zhou G K, Hu R B. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil. *Appl Soil Ecol*, 2020, 155: 103674.
- [6] Li J G, Pu L J, Han M F, Zhu M, Zhang R S, Xiang Y Z. Soil salinization research in China: advances and prospects. *J Geog Sci*, 2014, 24: 943–960.
- [7] 崔倩, 夏江宝, 刘京涛, 杨红军, 彭玲. 生物炭和 EM 菌对黄河三角洲盐碱地田菁生长和光合特性的影响. 应用生态学报, 2020, 31: 3101–3110.
- Cui Q, Xia J B, Liu J T, Yang H J, Peng L. Effects of biochar and EM application on growth and photosynthetic characteristics of *Sesbania cannabina* in saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 3101–3110 (in Chinese with English abstract).
- [8] Pamela C, Louise N, Joseph W K. Agricultural uses of plant bio-stimulants. *Plant Soil*, 2014, 383: 3–41.
- [9] Hu Y W, Li Q K, Song C J, Jin X. Effect of humic acid combined with fertilizer on the improvement of saline-alkali land and cotton growth. *Appl Ecol Environ Res*, 2021, 19: 1279–1294.
- [10] 高亮, 潘修强, 孟宪东, 赵岩, 刘丽丽. 活化腐植酸改良苏打盐碱地及对水稻生长发育的影响. 腐植酸, 2023, (2): 34–37.
- Gao L, Pan X Q, Meng X D, Zhao Y, Liu L L. Improvement of soda saline alkali land with activated humic acid and effects on the growth and development of rice. *Humic Acid*, 2023, (2): 34–37 (in Chinese with English abstract).
- [11] Motojima H, Yamada P, Irie M, Ozaki M, Shigemori H, Isoda H. Amelioration effect of humic acid extracted from solubilized excess sludge on saline-alkali soil. *J Mater Cycles Waste Manag*, 2012, 14: 169–180.
- [12] Liang J P, Li Y, Si B C, Wang Y Z, Chen X G, Wang X F, Chen H R, Wang H R, Zhang F C, Bai Y G, Biswas A. Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils. *Sci Total Environ*, 2021, 771: 144802.
- [13] 李毅, 梁嘉平, 王小芳, 杨哲, 樊向阳. 改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物炭施用量. 土壤学报, 网络首发 [2023-08-31], <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20230831.1257.002>.
- Li Y, Liang J P, Wang X F, Yang Z, Fan X Y. The most appropriate biochar application rate for improving soil physicochemical properties and crop germination rates. *Acta Pedol Sin*, Published online [2023-08-31], <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20230831.1257.002>.
- [14] Lian F, Liu X W, Gao M L, Li H Z, Qiu W W, Song Z G. Effects of Fe-Mn-Ce oxide-modified biochar on as accumulation, morphology, and quality of rice (*Oryza sativa* L.). *Environ Sci Pollut Res*, 2020, 27: 18196–18207.
- [15] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 杨刚. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应. 生态学报, 2018, 38: 393–404.
- Xu M, Wu J, Zhang X H, Yang G. Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 393–404 (in Chinese with English abstract).
- [16] 邵孝候, 张宇杰, 常婷婷, 叶欢, 张展羽. 生物有机肥对盐渍土壤水盐动态及番茄产量的影响. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46: 153–160.
- Shao X H, Zhang Y J, Chang T T, Ye H, Zhang Z Y. Effects of different fertilizer treatments on soil water, salt and crop yield formation in saline soils. *J Hohai Univ (Nat Sci Edn)*, 2018, 46: 153–160 (in Chinese with English abstract).
- [17] Lu P, Bainard L D, Ma B, Liu J G. Bio-fertilizer and rotten straw amendments alter the rhizosphere bacterial community and increase oat productivity in a saline-alkaline environment. *Sci Rep*, 2020, 10: 19896.
- [18] Peng Y Y, Zhang H, Lian J S, Zhang W, Li G H, Zhang J F. Combined application of organic fertilizer with microbial inoculum improved aggregate formation and salt leaching in a secondary salinized soil. *Plants (Basel)*, 2023, 12: 2945.
- [19] 田家明, 张冠初, 罗庄田, 袁光, 梁新波, 李泽伦, 石书兵, 姜常松, 张智猛. 生物有机肥对盐碱土花生农艺性状及荚果发育的影响. 花生学报, 2020, 49(1): 66–71.
- Tian J M, Zhang G C, Luo Z T, Yuan G, Liang X B, Li Z L, Shi S B, Jiang C S, Zhang Z M. Effect of bio-organic fertilizer on agronomic traits and pod development of peanut in saline-alkali soil. *J Peanut Sci*, 2020, 49(1): 66–71 (in Chinese with English abstract).
- [20] Naher U A, Biswas J C, Maniruzzaman M, Khan F H, Sarkar M I U, Jahan A, Hera M H R, Hossain M B, Islam A, Islam M R, Kabir M S. Bio-organic fertilizer: a green technology to reduce synthetic N and P fertilizer for rice production. *Front Plant Sci*, 2021, 12: 602052.
- [21] 简尊吉, 雷蕾, 倪妍妍, 朱建华, 曾立雄, 肖文发. 砾石对马尾松人工林土壤有机碳密度评估的影响. 应用生态学报, 2023, 34: 2073–2081.
- Jian Z J, Lei L, Ni Y Y, Zhu J H, Zeng L X, Xiao W F. Effects of gravel on the evaluation of soil organic carbon density in *Pinus massoniana* plantations. *Chin J Appl Ecol*, 2023, 34: 2073–2081 (in Chinese with English abstract).
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 25–38.
- Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis, 3rd edn. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 25–38 (in Chinese).
- [23] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biol Biochem*, 2011, 43: 1081–1088.

- [24] 史东梅, 吕刚, 蒋光毅, 卢喜平. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究. 水土保持学报, 2005, 19: 35–39.
Shi D M, Lyu G, Jiang G Y, Lu X P. Study on anti-erodibility and change of soil physical property in *Pinus massoniana* woodland. *J Soil Water Conserv*, 2005, 19: 35–39 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨建君, 盖浩, 张梦璇, 蔡育蓉, 王力艳, 王立刚. 深松结合秸秆还田对黑土孔隙结构的影响. 中国农业科学, 2023, 56: 892–906.
Yang J J, Gai H, Zhang M X, Cai Y R, Wang L Y, Wang L G. Effect of subsoiling combined with straw returning measure on pore structure of black soil. *Sci Agric Sin*, 2023, 56: 892–906 (in Chinese with English abstract).
- [26] 杨毅, 何志强, 林佳慧, 李洋, 陈飞, 吕长文, 唐道彬, 周全卢, 王季春. 椰糠施用量对土壤理化性状和甘薯产量的影响. 作物学报, 2023, 49: 2517–2527.
Yang Y, He Z Q, Lin J H, Li Y, Chen F, Lyu C W, Tang D B, Zhou Q L, Wang J C. Effects of coconut bran application rate on soil physicochemical properties and sweet-potato yield. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 2517–2527 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王璐, 朱占玲, 刘照霞, 马玉婷, 孙福, 葛顺峰, 姜远茂. 多种有机物料混施对苹果幼苗生长、氮素利用及土壤特性的影响. 水土保持学报, 2021, 35: 362–368.
Wang L, Zhu Z L, Liu Z X, Ma Y T, Sun F, Ge S F, Jiang Y M. Effects of mixtures of different organic materials on apple seedling growth, nitrogen utilization and soil properties. *J Soil Water Conserv*, 2021, 35: 362–368 (in Chinese with English abstract).
- [28] Kaje V V, Sharma D K, Shivay Y S. Long-term impact of organic and conventional farming on soil physical properties under rice (*Oryza sativa*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in north-western Indo-Gangetic plains. *Indian J Agric Sci*, 2018, 88: 107–113.
- [29] 张伟明, 管学超, 黄玉威, 孙大荃, 孟军, 陈温福. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应. 作物学报, 2015, 41: 109–122.
Zhang W M, Guan X C, Huang Y W, Sun D Q, Meng J, Chen W F. Biological effects of biochar and fertilizer interaction in soybean plant. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 109–122 (in Chinese with English abstract).
- [30] 刘东兴. 改良物质对盐碱土的改良作用及对植被生长发育的影响. 东北林业大学硕士学位论文, 黑龙江哈尔滨, 2009.
Liu D X. Effect of Soil Ameliorant on Growth Characteristics of Plants and Salinized Soil. MS Thesis of Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, China, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [31] 邱吟霜, 王西娜, 李培富, 侯贤清, 王艳丽, 吴鹏年, 霍文斌. 不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 182–189.
Qiu Y S, Wang X N, Li P F, Hou X Q, Wang Y L, Wu P N, Huo W B. Different kinds of organic fertilizers and amounts on dryland soil fertility and corn yield in the current season. *Soil Fert Sci China*, 2019, (6): 182–189 (in Chinese with English abstract).
- [32] Zhou Z X, Li Z Y, Zhang Z Q, You L R, Xu L F, Huang H Y, Wang X P, Gao Y, Cui X J. Treatment of the saline-alkali soil with acidic corn stalk biochar and its effect on the sorghum yield in western Songnen Plain. *Sci Total Environ*, 2021, 797: 149190.
- [33] 王舒华, 陈爽, 王悦, 李圆宾, 徐璐瑶, 王强, 李莹飞, 薛鹏飞, 焦加国, 李辉信, 胡锋. 不同有机物料对盐碱土的淋洗效果研究. 水土保持学报, 2021, 35: 376–383.
Wang S H, Chen S, Wang Y, Li Y B, Xu L Y, Wang Q, Li Y F, Xue P F, Jiao J G, Li H X, Hu F. Study on leaching effect of different organic materials on saline-alkali soil. *J Soil Water Conserv*, 2021, 35: 376–383 (in Chinese with English abstract).
- [34] Song J S, Zhang H Y, Chang F D, Yu R, Zhang X Q, Wang X Q, Wang W N, Liu J M, Zhou J, Li Y Y. Humic acid plus manure increases the soil carbon pool by inhibiting salinity and alleviating the microbial resource limitation in saline soils. *Catena* (Amst), 2023, 233: 107527.
- [35] 王倩姿, 王玉, 孙志梅, 刘佳, 牛劲斌, 薛澄, 马文奇. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果. 应用生态学报, 2019, 30: 1227–1234.
Wang Q Z, Wang Y, Sun Z M, Liu J, Niu S B, Xue C, Ma W Q. Amelioration effect of humic acid on saline-alkali soil. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30: 1227–1234 (in Chinese with English abstract).
- [36] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 高晓瑜, 王利明, 王丽萍. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响. 农业机械学报, 2021, 52: 311–318.
Qu Z Y, Sun H H, Yang B, Gao X Y, Wang L M, Wang L P. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil. *Trans CSAM*, 2021, 52: 311–318 (in Chinese with English abstract).
- [37] Liu M L, Wang C, Liu X L, Lu Y C, Wang Y F. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses. *Appl Soil Ecol*, 2020, 156: 103705.
- [38] Liang X Q, Ji Y J, He M M, Su M M, Liu C L, Tian G M. Simple N balance assessment for optimizing the biochar amendment level in paddy soils. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2014, 45: 1247–1258.
- [39] 张伟明, 修立群, 吴迪, 孙媛媛, 顾闻琦, 张铤贵, 孟军, 陈温福. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望. 作物学报, 2021, 47: 1–18.
Zhang W M, Xiu L Q, Wu D, Sun Y Y, Gu W Q, Zhang H G, Meng J, Chen W F. Review of biochar structure and physicochemical properties. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 1–18 (in Chinese with English abstract).
- [40] Gu Y Y, Zhang H Y, Liang X Y, Fu R, Li M, Chen C J. Effect of different biochar particle sizes together with bio-organic fertilizer on rhizosphere soil microecological environment on saline-alkali land. *Front Environ Sci*, 2022, 10: 949190.
- [41] Mukherjee A, Lal R. The biochar dilemma. *Soil Res*, 2014, 52: 217–230.
- [42] Chen M M, Zhang S R, Liu L L, Liu J G, Ding X D. Organic fertilization increased soil organic carbon stability and sequestration by improving aggregate stability and iron oxide transformation in saline-alkaline soil. *Plant Soil*, 2022, 474: 233–249.
- [43] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 闫婧妍, 嵇晨, 张俊. 生物有机肥提高设施土壤生产力减缓黄瓜连作障碍的机制. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 814–823.
Qu C C, Chen X M, Zhang Z L, Lyu J Y, Ji C, Zhang J. Mechanism of bio-organic fertilizer on improving soil productivity for continuous cucumber in greenhouse. *J Plant Nutr Fert*, 2019, 25:

- 814–823 (in Chinese with English abstract).
- [44] 孟婷婷, 杨亮彦, 孔辉, 刘金宝. 生物有机肥施用量对土壤有机碳组分及酶活性的影响. 北方园艺, 2022, (17): 86–91.
Meng T T, Yang L Y, Kong H, Liu J B. Effects of application amount of bio-organic fertilizer on soil organic carbon components and enzyme activities. *North Hortic*, 2022, (17): 86–91 (in Chinese with English abstract).
- [45] 沈其荣. 中国有机(类)肥料. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Shen Q R. Organic-based Fertilizers in China. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [46] 刘艳, 唐亚福, 杨越超, 姜茂茂, 程冬冬. 大颗粒活化腐植酸肥对苹果土壤团聚体和有机碳的影响. 应用生态学报, 2022, 33: 1021–1026.
Liu Y, Tang Y F, Yang Y C, Jiang Y M, Cheng D D. Effects of large-grained activated humic acid fertilizer on soil aggregates and organic carbon in apple orchard soil. *Chin J Appl Ecol*, 2022, 33: 1021–1026 (in Chinese with English abstract).
- [47] 李春越, 常顺, 钟凡心, 薛英龙, 苗雨, 王益, 党廷辉. 种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响. 应用生态学报, 2021, 32: 191–200.
Li C Y, Chang S, Zhong F X, Xue Y L, Miao Y, Wang Y, Dang T H. Effects of fertilization and planting patterns on soil aggregate and carbon distribution in farmland of the Loess Plateau, north-west China. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 32: 191–200 (in Chinese with English abstract).
- [48] 张斯梅, 段增强, 顾克军, 张传辉, 张恒敢. 稻秸还田下减量化施肥对小麦产量、养分吸收及土壤理化性质的影响. 土壤, 2023, 55: 537–543.
Zhang S M, Duan Z Q, Gu K J, Zhang C H, Zhang H G. Effects of reduced nitrogen fertilization on wheat yield, nutrient uptake and soil physicochemical properties under rice straw returning. *Soil*, 2023, 55: 537–543 (in Chinese with English abstract).
- [49] 赵隽, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌. 有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26: 2362–2370.
Zhao J, Dong S T, Liu P, Zhang J W, Zhao B. Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on canopy apparent photosynthesis and yield of winter wheat. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 2362–2370 (in Chinese with English abstract).
- [50] 卢合全, 唐薇, 罗振, 孔祥强, 李振怀, 徐士振, 辛承松. 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响. 作物学报, 2021, 47: 2511–2521.
Lu H Q, Tang W, Luo Z, Kong X Q, Li Z H, Xu S Z, Xin C S. Effects of commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil nutrients, plant development, and yield in cotton. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 2511–2521 (in Chinese with English abstract).
- [51] Zhang L H, Zhao H X, Xu C, Yan W P, Sun N, Tan G B, Yu J, Meng X M, Li F, Bian S F. Effects of straw returning on soil moisture and maize yield in semi-humid area. *Cereal Res Commun*, 2022, 50: 539–548.
- [52] Chen J, Wu J H, Si H P, Lin K Y, Li H X, Li Y. Application of bio-organic fertilizer inoculated with IAA-producing rhizobacterium on growth of peanut plants in red soil. *Oxid Met*, 2016, 39: 1917–1927.
- [53] 张帆, 杨茜. 大麦-双季稻轮作体系有机物料与化肥配施对大麦资源利用效率及产量的影响. 作物学报, 2021, 47: 2522–2531.
Zhang F, Yang X. Effects of combined application of organic materials and chemical fertilizers in barley-double cropping rice rotation system on barley resource utilization efficiency and yield. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 2522–2531 (in Chinese with English abstract).
- [54] Shan Y Y, Li G, Bai Y G, Liu H B, Zhang J H, Wei K, Wang Q J, Cao L. Effects of gypsum combined with different amounts of biochemical humic acid on soil improvement and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield on saline-alkali land. *Appl Ecol Environ Res*, 2022, 20: 841–854.
- [55] 李博洋, 叶茵, 楚睿雯, 井苗, 张岁岐, 严加坤. 施加生物炭对谷子干物质积累、转运、分配和土壤理化性质的影响. 作物学报, 2024, 50: 695–708.
Li B Y, Ye Y, Chu R W, Jing M, Zhang S Q, Yan J K. Effects of biochar application on dry matter accumulation, transport, and distribution of foxtail millet and soil physicochemical properties. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 695–708 (in Chinese with English abstract).
- [56] Norby R, Cotrufo M F. Global change: a question of litter quality. *Nature*, 1998, 396: 17–18.
- [57] 陈晓东, 吴景贵, 范围, 朱文悦, 李晓航. 有机物料对原生盐碱土微团聚体特征及稳定性的影响. 水土保持学报, 2020, 34: 201–207.
Chen X D, Wu J G, Fan W, Zhu W Y, Li X H. Effect of organic materials on the characteristics and stability of micro-aggregates in the native saline-alkali soil. *J Soil Water Conserv*, 2020, 34: 201–207 (in Chinese with English abstract).
- [58] 张小栋, 刘绍雄, 孙宇, 胡爱双, 李凯超, 陈亚恒. 滨海盐碱地不同改良年限土壤理化性质的变化特征. 水土保持研究, 2022, 29: 113–118.
Zhang X D, Liu S X, Sun Y, Hu A S, Li K C, Chen Y H. Variation characteristics of soil physicochemical properties of coastal saline-alkali lands with different improvement years. *Res Soil Water Conserv*, 2022, 29: 113–118 (in Chinese with English abstract).