

引用格式:

于丽明, 初正崑, 袁延飞, 陈姝谚, 郑浩. 生物炭–城市污水厂污泥堆肥复合改良剂对盐渍土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(2): 68–79.

YU L M, CHU Z K, YUAN Y F, CHEN S Y, ZHENG H. Improving salt-affected soil using a biochar-municipal sewage sludge compost composite amendment[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(2): 68–79.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



生物炭–城市污水厂污泥堆肥复合改良剂 对盐渍土壤的改良效果

于丽明¹, 初正崑¹, 袁延飞^{2,3}, 陈姝谚^{2,3}, 郑浩^{2,3*}

(1.青岛娄山河水务资源有限公司, 山东 青岛 266043; 2.中国海洋大学近海环境污染控制研究所, 山东 青岛 266100; 3.海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要:以常规土壤改良剂废弃木材生物炭(WBC)和城市污水厂污泥堆肥产品(SS)为基质, 添加不同量的聚丙烯酰胺(PAM)和纳米二氧化硅($\text{SiO}_2\text{-NPs}$), 分别按42.5 : 42.5 : 4 : 11(BCS1)和42.5 : 42.5 : 8 : 7(BCS2)的质量比掺混制备2种生物炭–污泥堆肥复合改良剂; 以耐盐经济作物油葵(*Helianthus annuus* L.)为供试植物, 采用盆栽试验对比研究WBC、SS、BCS1和BCS2对黄河三角洲滨海盐渍土壤的改良效果。结果表明: 通过对WBC与SS的复合改性, 成功制备出兼具碳封存、养分调控和结构优化功能的复合改良剂; $\text{SiO}_2\text{-NPs}$ 和PAM的定向负载重构了表面功能基团(如 Si-O-Si 和 C=O 键形成), 使BCS1和BCS2的理化性质区别于WBC和SS的, BCS2具有较好的保水性能, 使得土壤最大持水量(WHC)较未添加改良剂的空白处理(CK)的提升11.32%, 有效提升了土壤的保水能力; 与CK相比, 4种改良剂的添加促进了油葵的光合作用和生长发育, 使得叶片SPAD值显著增加6.83%~11.44%, 相较于WBC和SS, BCS1和BCS2对油葵光合作用的促进效果更明显, BCS2对植物生长的促进效果优于BCS1, BCS2的添加使得油葵株径显著增大19.57%, 使根尖数显著增加238.13%, 这主要是由于改良剂的添加提高了盐渍土壤团聚体的稳定性(其中BCS2的根际和非根际土壤团聚体平均质量直径分别增加了18.18%和18.98%), 提升了保水性能和养分有效性, 使得根际和非根际土壤有效磷质量分数分别显著提高25.36%~84.22%和12.45%~64.63%, 从而改善了土壤健康; 此外, 结构方程模型结果表明, 改良剂对油葵生长的直接影响不显著, 而是通过改变土壤性质间接促进油葵的生长, 其中, 改良剂诱导的土壤WHC的增加是影响油葵生长发育的最主要原因, 其次是土壤氮、碳和团聚体稳定性。可见, 以生物炭和城市污水厂污泥堆肥产品制备的复合改良剂可有效修复滨海盐渍土壤。

关键词: 油葵; 盐渍土壤; 土壤健康; 生物炭; 污泥堆肥; 纳米材料

中图分类号: S156.4+2; S565.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2025)02-0068-12

Improving salt-affected soil using a biochar-municipal sewage sludge compost composite amendment

YU Liming¹, CHU Zhengkun¹, YUAN Yanfei^{2,3}, CHEN Shuyan^{2,3}, ZHENG Hao^{2,3*}

(1.Qingdao Loushan River Water Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266043, China; 2.Institute of Coastal Environmental Pollution Control, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 3.Ministry of Education Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Two composite soil amendments were prepared by blending waste wood-derived biochar(WBC) and municipal

收稿日期: 2024-03-01

修回日期: 2025-02-15

基金项目: 青岛水务集团有限公司科技创新项目(20220293); 山东省重点研发计划项目(2022SFGC0302); 山东省杰出青年基金项目(ZR2021JQ13)

作者简介: 于丽明(1972—), 男, 山东海阳人, 学士, 高级工程师, 主要从事污水污泥处理处置及相关技术研究, ylming888@sina.com;

*通信作者, 郑浩, 博士, 教授, 主要从事滨海盐渍化土壤改良与碳固存研究, zhenghao2013@ouc.edu.cn

sewage sludge compost(SS) with polyacrylamide(PAM) and nano-silica(SiO_2 -NPs) at the mass ratios of 42.5 : 42.5 : 4 : 11 (BCS1) and 42.5 : 42.5 : 8 : 7(BCS2), respectively. The effects of WBC, SS, BCS1 and BCS2 on oil sunflower (*Helianthus annuus* L., a typical salt-tolerant commercial crop) growth and salt-affected soil(collected from the Yellow River Delta) remediation were evaluated via pot experiment. The results showed that the composite amendments prepared by combining WBC and SS effectively integrated carbon sequestration, nutrient regulation, and structural optimization. The directional loading of SiO_2 -NPs and PAM reconstructed surface functional groups(e.g., $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ and $\text{C}=\text{O}$ bonds), leading to distinct physicochemical properties of BCS1 and BCS2 compared with WBC and SS alone. BCS2 exhibited better water retention performance, increasing the soil maximum water holding capacity(WHC) by 11.32% compared with the blank treatment without amendment(CK), which effectively improved the soil water retention. Compared with CK, the addition of 4 amendments promoted the photosynthesis and growth of oil sunflower, with leaf SPAD significantly increasing by 6.83%-11.44%. Compared with WBC and SS, BCS1 and BCS2 had stronger promoting effects on photosynthesis. The effect of BCS2 on plant growth was better than that of BCS1. The addition of BCS2 significantly increased the stem diameter by 19.57% and the number of root tips by 238.13%. These effects were mainly attributed to improve soil aggregate stability(the mean weight diameter of rhizosphere and non-rhizosphere soil aggregates of BCS2 increased by 18.18% and 18.98%) and enhance water and nutrient availability, resulting in significantly increases in available phosphorus(AP) in rhizosphere and non-rhizosphere soils by 25.36%-84.22% and 12.45%-64.63%, respectively, thereby improving soil health. Furthermore, the results of structural equation model analysis revealed that amendments indirectly enhanced plant growth primarily by increasing WHC, followed by soil nitrogen, carbon, and aggregate stability. It could be seen that the composite amendments prepared from WBS and SS products demonstrated high potential for coastal salt-affected soil remediation.

Keywords: oil sunflower; salt-affected soil; soil health; biochar; sludge compost; nanomaterial

盐渍土可溶性盐含量高, 碱性强, 往往表现出较差的物理、化学和生物学性质, 导致初级生产力低下, 生态功能退化^[1-2]。盐渍土壤作为国家重要的后备土地资源, 其改良和利用对于缓解人地矛盾和保障国家粮食安全具有重要意义。立足国家战略, 开展盐渍土治理, 提高土壤初级生产力和碳固存能力, 恢复滨海湿地土壤生态功能, 是实现黄河流域生态保护和高质量发展的当务之急。

盐渍土改良措施主要包括水利工程、物理、化学和生物改良^[3]。无机改良剂(如石灰、磷石膏和氯化钙)和有机改良剂(如生物炭、污泥、粪便、堆肥、腐殖酸和木醋液)的添加是盐渍土壤常见和重要的化学改良措施^[4]。其中, 生物炭和堆肥因其环境友好性和经济可行性而被广泛建议用于盐渍土壤改良^[5-6]。近年来, 高分子聚合物(如聚丙烯酰胺(PAM)和聚乙烯醇)和纳米材料(如硅(Si)和钾(K)纳米颗粒)在盐渍土壤改良中的应用也引起了极大的关注^[7-8]。PAM因具有很强的黏聚作用, 能够促进盐渍土壤团聚体的形成, 改善土壤结构, 从而改善作物根系发育和养分吸收^[9]。此外, 纳米二氧化硅(SiO_2 -NPs)和氧化铝等纳米颗粒也已被证明可以通过增强罗勒(*Ocimum basilicum* L.)和大豆(*Glycine max* L.)等植物的离子通量、参与氧化还原反应中蛋

白质的产生、活性氧(ROS)解毒及调节激素信号通路来改善作物性能^[10]。然而, 尽管单一改良剂也表现出较好的效果, 但往往存在功能单一、效率低、效果不稳定等问题, 因此, 采用掺混、包膜、吸附和混合造粒等方法, 将一种或几种具有不同增效特性的改良剂制备成多功能复合材料, 以充分发挥各改良剂的优势并协同促进植物生长发育, 是实现盐渍土壤改良的重要途径^[11-12]。研究^[5,8,13]表明, 生物炭和其他改良剂(如堆肥、PAM、纳米材料和有机肥)联合改良盐渍土可以提升改良效果、提高养分有效性并促进植物生长。如LUO等^[5]发现, 350 °C下制备的花生壳生物炭和牡蛎壳粉、花生壳、商用腐植酸等共堆肥的改良剂, 在质量分数为1.5%的添加量下, 能够显著促进盐渍土壤田菁和滨海锦葵的生长, 使二者生物量分别增加了309.00%和70.80%。ABULAITI等^[13]发现, 将PAM与在350~550 °C下制备的小麦秸秆生物炭联合施用, 可以增加盐渍土壤团聚体的数量和稳定性, 增加含水率。MAHMOUD等^[8]也发现, 350 °C条件下制备的稻壳生物炭和纳米材料(如纳米K和纳米Si)的联合应用, 对马铃薯生长发育(包括株高、株径、生物量及光合作用)的促进效果显著强于生物炭和纳米颗粒单独施加的。这些证据充分表明生物炭与化学改良措施联合应用

具有巨大潜力。然而,用于盐渍土改良的功能性生物炭基-堆肥复合改良剂的研究较为匮乏,其对盐渍土壤理化性质和植物生长的影响仍不清楚,亟需以生物炭和堆肥为依托,复配其他功能性改良材料制备复合改良剂,从而实现高效改良盐渍土壤。

污泥中含有大量的有机质及氮(N)、磷(P)、K等养分,能够有效增加土壤肥力^[14]。城市生活污水厂产生的污泥经过好氧堆肥后能达到土壤改良的标准^[15]。然而,由于污泥堆肥施用不方便、重金属含量高,且处理不当可能会导致作物烧苗等问题,污泥堆肥技术的应用受到限制。将城市污水厂污泥堆肥按照适当的配比与生物炭联合,以制备一种高性能的复合改良剂,这可能是盐渍土壤改良和实现污泥堆肥推广应用的有效措施,可能实现环境、经济和社会效益的最大化。此外, SiO₂-NPs具有环境友好性和经济性等特点,且其施加能够为植物提供更多可利用的Si,从而提升植物抵抗生物胁迫(如真菌感染、病虫害侵害)和非生物胁迫(如盐碱、旱涝、重金属)的能力^[16], SiO₂-NPs的掺入可能在盐渍土改良方面展现出良好的效果。生物炭基肥生产工艺主要包括掺混法、吸附法、包膜法和混合造粒法等^[17]。掺混法、包膜法、吸附法生产的炭基肥料在使用过程中存在扬尘大、运输、使用不方便等问题,而混合造粒法生产出的炭基肥料为颗粒状,该方法生产效率高、操作简便^[12]。基于此,本研究中,选择生物炭、污泥堆肥协同PAM保水剂与SiO₂-NPs调节剂,通过优化配比的混合造粒工艺制备生物炭-城市污水厂污泥堆肥复合改良剂,评估其对黄河三角洲盐渍土壤的改良效果,并揭示其对土壤理化性质和植物生长的影响机制,以期为盐渍土改良技术提供新的思路和方法,进一步促进黄河三角洲地区农业的可持续发展以及城市污水厂污泥的资源化利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用生物炭和污泥堆肥产品并联合具有保水和提升抗盐能力的PAM和SiO₂-NPs为原料制备复合改良剂。供试生物炭(WBC)以废弃木材为原料,采用厌氧慢速热解法在450 °C下保持3 h制备而成^[18]。供试城市污水厂污泥堆肥产品(SS)购自青岛市娄山河污水处理厂,其工艺为好氧堆肥。SS中的

全P、全K、总镉、总砷、总铬、总铜、总汞、总镍、总铅和总锌的质量分数分别为729.00、2.30、0.14、13.15、66.00、24.50、0.03、30.50、21.50、66.00 mg/kg,均符合GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》中A级标准限值要求,能够满足园地及牧草等地的使用条件。阴离子型PAM购自南京宝热化工有限公司,其相对分子质量为 1.2×10^7 ,吸水倍率为710,盐度为0.79‰(按照1:1 000固液比测定)。SiO₂-NPs购自Sigma-Aldrich,粒径为10~20 nm。供试土壤取自山东省农业科学院现代农业综合实验示范基地(118°62'E, 37°31'N),采集土壤经自然风干后过孔径2 mm筛,备用。土壤pH为9.31,电导率(EC)为784.67 μ S/cm,盐度为0.39‰,全碳(TC)、有机碳(SOC)、全氮(TN)质量分数分别为1.85%、0.69%、0.05%,铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、有效磷(AP)质量分数分别为4.03、3.08、16.44 mg/kg。土壤可溶性盐中阴离子以硫酸根(SO₄²⁻)和氯离子(Cl⁻)为主,占48.56%和30.94%,其次是碳酸氢根(HCO₃⁻);阳离子以钠离子(Na⁺)为主,占74.64%,其次是钙离子(Ca²⁺),占13.94%。供试油菜(*Helianthus annuus* L.)种子购自山东省青岛市富鑫农种子店。

1.2 复合保水改良剂的制备

采用混合造粒法^[19]制备生物炭-污泥堆肥复合改良剂。前期研究^[5]结果表明,生物炭-堆肥改良剂在质量分数为1.5%的添加比例下呈现出最优的改良效果。通过文献调研确定PAM和SiO₂-NPs的一般施加量,并将其换算成在质量分数1.5%添加比例下复合改良剂中的含量,最终确定将WBC、SS、PAM和SiO₂-NPs按42.5:42.5:4:11(BCS1)和42.5:42.5:8:7(BCS2)的质量比掺混。使用变频调速糖衣机(BY-300,广州市大祥电子机械设备有限公司)进行制备。制备期间少量多次喷入超纯水作为黏结剂,并以35 r/min的转速持续转动圆盘30 min以上,直至形成表面光滑、内部结构紧密的颗粒。筛选粒径为2~5 mm的颗粒并在60 °C下烘干至恒质量。

1.3 材料表征

分别对WBC、SS、BCS1和BCS2的性质进行表征。采用pH计(AB150, Thermo Fisher)按固液比1:20测定上清液pH;采用便携式电导率/盐度计

(Cond 3210, WTW)测定上清液EC和盐度;采用元素分析仪(Vario macro cube, Elementar)测定TC和TN含量;采用电子扫描显微镜(SEM, Ultra 55, Carl Zeiss)在不同放大倍数下观察表面形貌;采用衰减全反射傅里叶红外光谱仪(ATR-FTIR, Spectrum Two, Perkin Elmer)在4 000~500 cm^{-1} 进行扫描测定表面官能团;利用物理化学吸附仪(Autosorb-1C-TCD Ready, Quantachrome)并采用氮气(N_2)吸附-解吸法测定其比表面积、孔体积和平均孔径,运用NLDFT模型计算孔径分布^[20];采用钼锑抗比色法测定AP含量;采用2 mol/L KCl浸提-靛酚蓝比色法测定 NH_4^+-N 含量;采用酚二磺酸比色法测定改良剂的 NO_3^--N 含量。每个样品测定分别设置3个平行。

1.4 盆栽试验

将改良剂按照质量分数为1.5%的比例分别与供试土壤混合均匀,各处理标记为WBC、SS、BCS1、BCS2。未添加改良剂的空白处理作为对照,记作CK。每盆装200 g土壤(7 cm×7 cm×8 cm),并设置3个重复。采用穴播(1~2 cm)的方式播种油葵种子,每盆播种5粒种子。油葵培养的环境温度为24~26 $^{\circ}\text{C}$,发芽后光照12 h/d。待植物生长至1周左右进行间苗,去除长势较差的植物,每盆保留4株植物。生长期间采用称重浇水方式,使土壤保持田间持水量的40%,每周随机调整盆栽的摆放位置,保证光照均匀。培养周期为36 d。

1.5 样品采集及指标分析

在植物生长过程中使用游标卡尺(CD67-SPM/PS)对油葵株高和株径进行测量并记录。使用叶绿素仪(Minolta, SPAD-502plus)测定植物叶片的SPAD值和N含量。培养结束后,采集地上部和地下部植物样品,并采用抖根法采集根际土壤样品^[21],同时采集未种植植物的土壤作为完全的非根际土壤^[22]。土壤样品风干后,进行团聚体筛分和后续土壤理化指标的测定。

采用电子天平(TP-214, Denver Instrument)称量每株植物地上部和地下部的鲜质量;采用根系扫描仪(Epson)对植物根系进行扫描,运用WinRHIZO分析软件(Prp.2005, Regent)进行根系形态的分析;植物样品经105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青、60 $^{\circ}\text{C}$ 烘至恒质量后测定每株植物干质量。

依据DE SOUZA MACHADO等^[23]的方法使土壤吸水至饱和,采用质量差值法测定土壤最大持水量(WHC)。采用与材料表征相同的方法测定土壤的pH、EC、盐度和TC、TN、AP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量。采用元素分析仪测定土壤SOC含量^[24]。对土壤过筛并进行团聚体的物理分级,获得大团聚体(>2.00 mm)、小团聚体(0.25~2.00 mm)和微团聚体(<0.25 mm),使用团聚体平均质量直径(MWD)来表征土壤团聚体的稳定性^[25]。

1.6 数据处理

运用Excel 2019和Origin 8.5进行数据处理及绘图;运用IBM SPSS 25.0进行单因素方差分析(ANOVA),并选用Duncan法进行显著性差异分析。借助Origin 8.5对土壤指标与植物指标之间的关系进行线性拟合,置信区间为95%;采用雷达图^[26]呈现复合改良剂对油葵生长的综合影响;借助IBM SPSS AMOS 25,利用最大似然评估程序构建改良剂、土壤性质与油葵生长参数的结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 生物炭-污泥堆肥复合改良剂的基本性质

由表1可知,不同改良剂的pH存在差异,WBC呈碱性,SS呈中性,BCS1和BCS2的pH较WBC均降低但高于SS的;WBC、SS、BCS1、BCS2的EC和盐度均依次增加,BCS1和BCS2的EC和盐度均随PAM添加比例的增加而升高。元素分析结果表明,WBC的含碳量最高,SS的含碳量最低,复合改良剂的含碳量处于中间,说明生物炭的掺入提升了复合改良剂的含碳量;SS含有的N、P养分高于WBC的,BCS1和BCS2的含N量高于WBC的但低于SS的,而AP含量则低于SS和WBC的。

观察改良剂表面形貌(图1)可发现,WBC含有丰富的孔隙结构,其表面附着不规则的碎片且具有完整的管束状纤维的植物组织结构,有助于PAM和 SiO_2-NPs 的负载;SS表面结构不均匀,以单个颗粒或聚集的颗粒形式存在,表面含有较多矿物质颗粒;BCS1和BCS2的SEM图像中均可清晰地观察到生物炭的纤维状多孔结构和生物炭碎片, SiO_2-NPs 和PAM均匀地附着在WBC的表面和孔隙内,表明复合改良剂制备较成功。

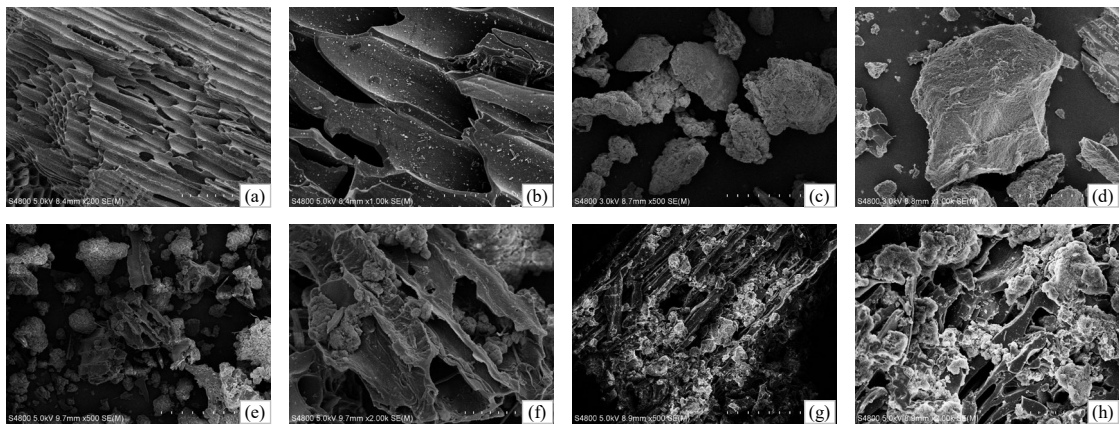
从表1还可以看出,WBC比表面积最大,BCS1

的比表面积大于SS的但小于WBC的,BCS2的最小;从图2可以看出,WBC的吸附量明显高于其他改良剂的,这也说明其具有最高的比表面积和发达的孔隙结构。BCS1和BCS2的平均孔径较大,且平均孔径和比表面积均随SiO₂-NPs的添加量的减少而减小。孔径分布图显示,WBC的孔隙主要以微孔为主,

这与其较高的比表面积相一致;相较之下,BCS1和BCS2呈现出更加明显的介孔结构,说明复合改良剂的混合造粒有效调控了孔隙结构,使得复合改良剂形成了较为发达的介孔网络,有利于水分和养分的滞留和缓释。

表1 改良剂的基本性质

Table 1 Basic properties of the amendments											
处理	pH	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	盐度/%	全碳/%	全氮/%	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
WBC	8.53	1.03	0.52	69.53	1.02	2.16	2.00	307.99	108.61	0.10	1.93
SS	6.93	4.91	2.68	18.38	1.74	1 435.96	122.77	336.26	25.26	0.07	3.62
BCS1	7.65	9.29	5.26	39.05	1.53	371.72	17.23	277.85	43.72	0.35	16.11
BCS2	8.13	16.17	9.53	40.63	1.61	426.45	26.08	223.16	24.45	0.19	15.41



(a) WBC放大200倍; (b) WBC放大1 000倍; (c) SS放大500倍; (d) SS放大1 000倍; (e) BCS1放大500倍; (f) BCS1放大2 000倍; (g) BCS2放大500倍; (h) BCS2放大1 000倍

图1 改良剂的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of the amendments

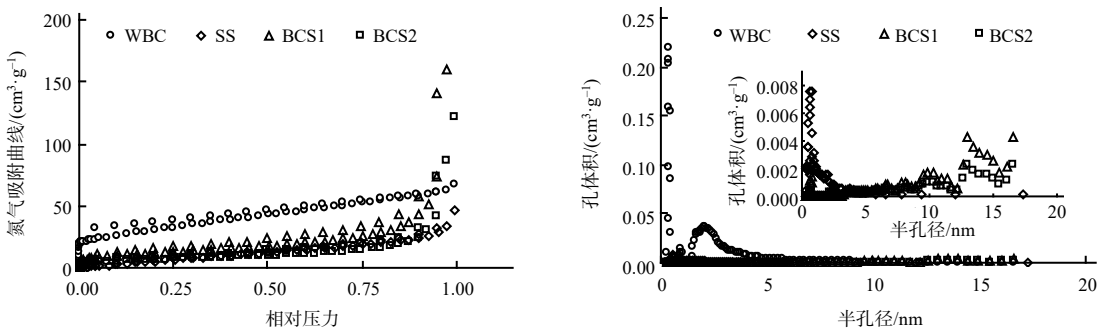


图2 改良剂的N₂吸脱附曲线和孔径分布

Fig.2 N₂ adsorption and desorption isotherms and pore distribution of the amendments

从图3可知,SS在3 528~3 400 cm⁻¹处的—OH基团有伸缩振动,在1 100 cm⁻¹和1 020 cm⁻¹处观察到C—O—C的特征峰;相比于SS,BCS1和BCS2的羟基(—OH,3 400 cm⁻¹)和脂肪族官能团(1 510~1 033 cm⁻¹)

的伸缩振动峰减弱甚至消失,芳香环C=C(1 640 cm⁻¹)、芳香性基团—CH(881~748 cm⁻¹)振动强度增强,这表明了生物炭非极性脂肪族官能团的减少和芳香结构的增加;此外,BCS1和BCS2的红外光谱中显

示出了酰胺(C=O)和Si—O—Si特征峰的伸缩振动,这是添加PAM和SiO₂-NPs所致。

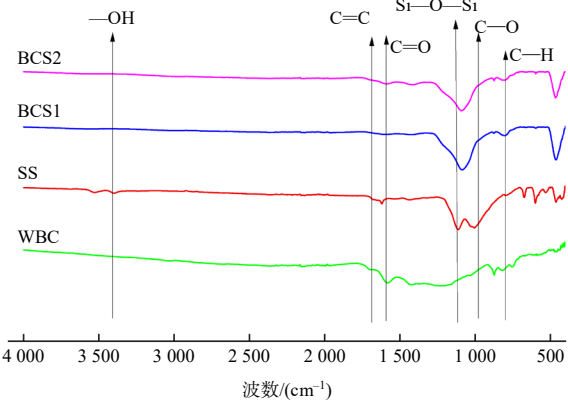
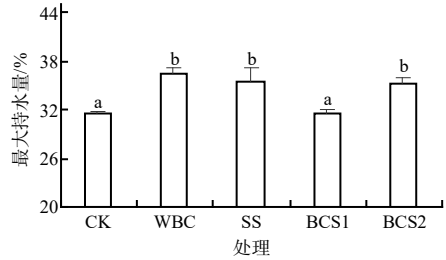


图3 改良剂的红外光谱

Fig.3 The FTIR spectra of the amendments

由图4可知,4种改良剂的添加均提高了土壤WHC,尤其是WBC、SS和BCS2,与CK相比,WHC分别提高了15.69%、12.46%、11.32%,但三者之间的差异无统计学意义,这表明改良剂具有优异的保水性能,能够增强土壤的保水能力。



图柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图4 改良剂的保水特性

Fig.4 The water retention characteristics of the amendments

2.2 生物炭-污泥堆肥复合改良剂对油葵生长的影响

由表2可知,与CK相比,4种改良剂的添加对油葵出苗率无显著影响,BCS2处理下的油葵出苗率最

低,这是由于BCS2含有较高的盐分,从而增强了对种子的盐胁迫。

由表2还可知,改良剂的添加在一定程度上促进了油葵的生长发育,不同改良剂对油葵生长的促进效果存在差异:与CK相比,4种改良剂对油葵株高、鲜质量和干质量的提升均有促进作用,但差异无统计学意义,WBC的促进效果较好,其次是BCS2的;WBC、SS和BCS1均对油葵株径的生长无显著影响,但BCS2显著促进了油葵株径的增粗,提升了19.57%;此外,4种改良剂的添加均显著提高了油葵的光合作用,其中,叶片SPAD值显著提高了6.83%~11.44%,BCS1和BCS2的添加使叶片氮质量分数分别显著提升了8.10%、10.02%。综上,4种改良剂中,BCS1和BCS2的促进效果更明显。

从表2也可知,与CK相比,4种改良剂的添加均促进了根系发育,油葵根长、根体积、根表面积和根尖数均增加,其中,WBC和BCS1的添加使油葵根长分别显著增加了106.15%和62.59%;WBC的添加使根表面积显著增加了59.22%;WBC和BCS2的添加使根尖数分别显著增加了85.68%和238.13%。

从图5可知,与CK相比,4种改良剂的添加均促进了油葵的整体生长发育,包括株高、株径、生物量、SPAD值和根系形态等多个生理指标,其中,添加改良剂在促进根系发育方面的效果更好。通过计算其综合影响的面积指数发现,WBC的面积指数(5.66)最大,说明其对油葵的综合影响最强,明显促进了植物生长;其次是BCS2的(5.26),明显大于BCS1(4.03)和SS(4.40)的,这说明不同改良剂在促进植物生长方面存在差异,适当配比的复合改良剂能够协同发挥组分优势,从而在提升作物初级生产力、推动污泥资源化利用方面具有较大潜力。

表2 添加4种改良剂下油葵的生长情况

Table 2 Growth performance of oil sunflower under the four studied amendment treatments													
处理	出苗率/%	株高/cm	株径/mm	单株地上部鲜质量/g	单株地下部鲜质量/g	单株地上部干质量/mg	单株地下部干质量/mg	SPAD值	叶片氮质量分数/(mg·g ⁻¹)	根长/cm	根体积/cm ³	根表面积/cm ²	根尖数/个
CK	93.33	3.31	1.84a	0.27	0.08	68.78	13.00	80.25a	28.15a	28.12a	0.064	5.15a	42.33a
WBC	93.33	4.20	1.91a	0.36	0.13	95.33	13.89	86.90b	30.20ab	57.97c	0.093	8.20b	78.60b
SS	100.00	3.58	1.98ab	0.30	0.10	86.67	14.44	85.73b	29.83ab	41.56ab	0.093	6.68ab	60.00ab
BCS1	93.33	3.77	1.96ab	0.30	0.08	74.56	13.22	89.40b	30.43b	45.72bc	0.076	6.57ab	58.75ab
BCS2	86.67	3.76	2.20c	0.32	0.07	93.67	13.11	89.43b	30.97b	37.03ab	0.094	6.70ab	143.13c

注: 同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

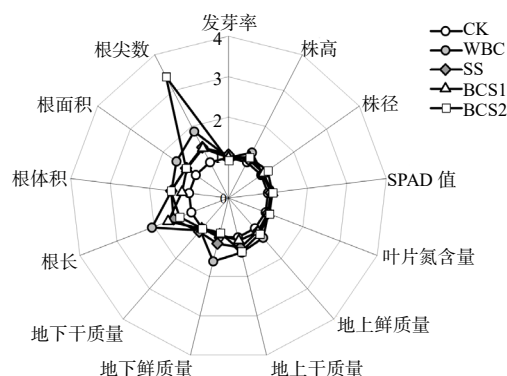


图5 改良剂对油葵生长的综合影响

Fig.5 Comprehensive effects of amendments on the growth of oil sunflower

2.3 生物炭-污泥堆肥复合改良剂对盐渍土理化性质的影响

从表3可知,与CK相比,WBC和BCS2的添加使根际和非根际土壤的MWD均显著增大,分别使根际土壤MWD增加了14.05%和18.18%,非根际土壤MWD增加了10.22%和18.98%,BCS2的提升效果强于WBC的,这表明适当配比的复合改良剂的施加可显著增强团聚体的稳定性;SS、BCS1和BCS2均使根际和非根际土壤pH显著降低,根际和非根际土壤pH分别降低了1.38%~3.30%和1.18%~2.58%,尤以SS的降低程度最为明显,这与改良剂的pH有关;SS、BCS1和BCS2的添加均使根际土壤EC和盐度显著提高,分别提高了16.67%~42.31%和18.42%~44.74%,BCS2的添加也显著提升了非根际土壤的

EC和盐度,分别提升了42.86%和45.83%,BCS2对EC和盐度的提升作用强于SS的,此外,除WBC外,根际土壤EC均低于非根际土壤的,这表明植物通过调节根际环境,在一定程度上减缓了局部盐胁迫。这一现象可能与植物根系分泌物、选择性离子吸收或根际微生物活动相关,从而在盐渍环境中维持较为适宜的生长条件。

从表3还可知,与CK相比,4种改良剂的添加均使根际土和非根际土TC和SOC质量分数增加,其中,WBC对土壤TC和SOC的促进效果最好,使根际土壤TC和SOC的质量分数分别增加了61.27%和137.75%,非根际土壤的分别增加了67.86%和91.56%,2种复合改良剂的促进效果也较好;4种改良剂的添加使得根际和非根际土TN质量分数均呈现增加的趋势,但根际土壤各处理间的差异均无统计学意义,WBC和SS的添加使得非根际土壤TN质量分数分别显著提升了22.03%和32.20%;4种改良剂的添加对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数无显著影响,但SS、BCS1和BCS2的添加均提升了根际和非根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数,改良剂对根际和非根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响表现出相似的趋势,SS的促进效果最为明显,其次是BCS2,这与改良剂中的养分含量有关;4种改良剂的添加均显著提高了土壤AP质量分数,根际和非根际土壤的分别提高了25.36%~84.22%和12.45%~64.63%,其中SS的提升效果最好,且BCS1和BCS2的提升效果优于WBC的。

表3 添加4种改良剂下的土壤理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties under the four studied amendment treatments

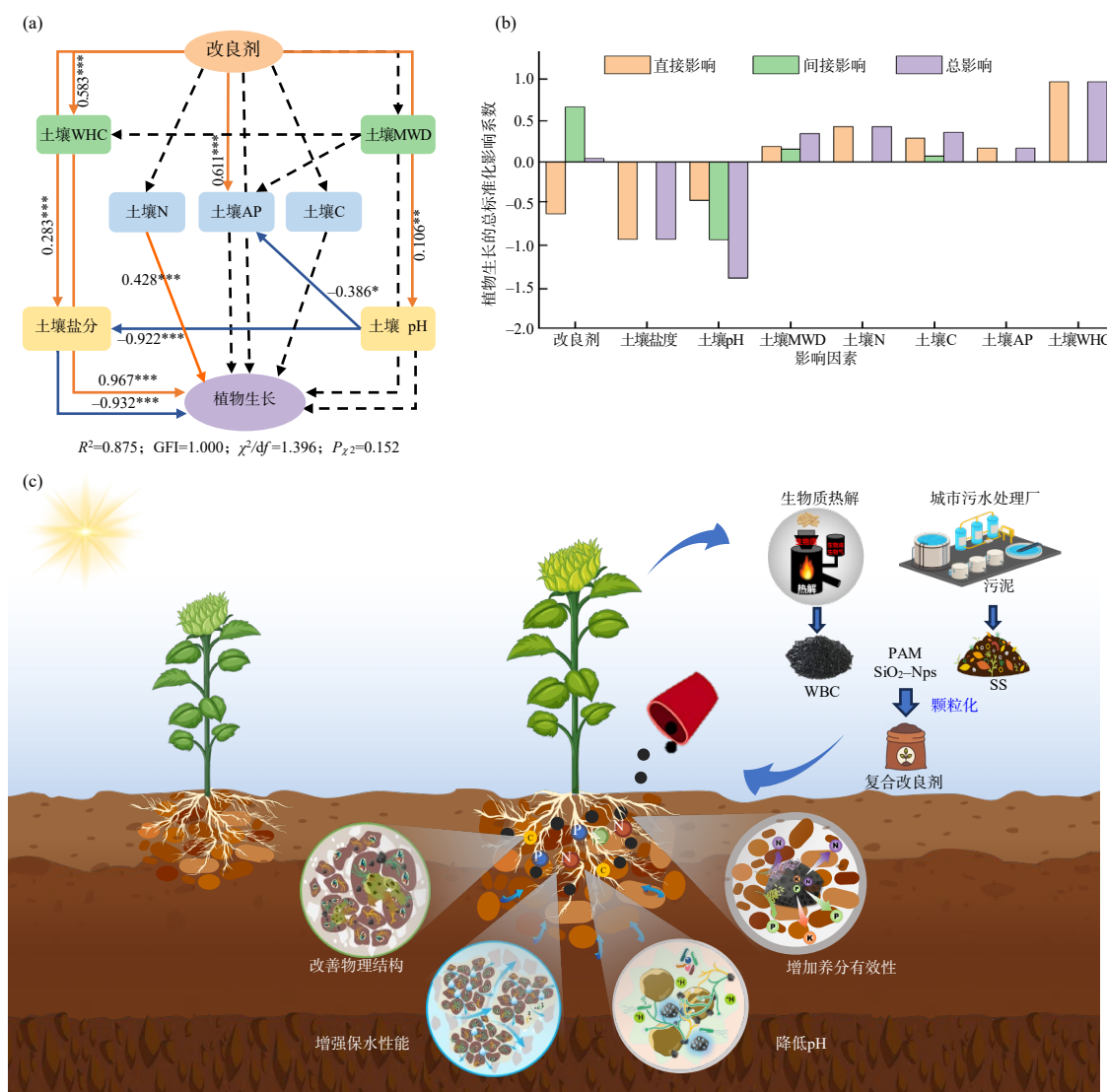
土壤	处理	平均质量 直径/mm	pH	电导率/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	盐度/ ‰	总碳质量 分数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	有机碳质 量分数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	总氮质量 分数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	铵态氮质 量分数/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮质 量分数/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷质 量分数/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
根际	CK	1.21a	9.40d	0.78a	0.38a	20.40a	7.55a	0.60	3.76	4.20ab	20.78a
	WBC	1.38bc	9.37cd	0.77a	0.38a	32.90c	17.95b	0.65	4.95	3.36a	26.05b
	SS	1.23a	9.09a	0.98b	0.49bc	21.85a	9.50a	0.76	4.33	18.01c	38.28e
	BCS1	1.27ab	9.27bc	0.91b	0.45b	22.60a	11.05a	0.63	3.92	5.01ab	33.81d
	BCS2	1.43c	9.20b	1.11c	0.55c	27.75b	11.00a	0.80	4.26	6.74b	29.38c
非根际	CK	1.37a	9.29c	0.98ab	0.48ab	19.60a	7.70a	0.59a	4.80	4.19a	23.13a
	WBC	1.51b	9.33c	0.93a	0.46a	32.90b	14.75c	0.72bc	3.75	4.25a	26.01b
	SS	1.35a	9.05a	1.13b	0.56b	22.45a	9.65b	0.78c	4.84	15.58c	38.08c
	BCS1	1.45ab	9.18b	1.15b	0.57b	22.95a	9.50b	0.63ab	4.23	6.39ab	28.24bc
	BCS2	1.63c	9.14b	1.40c	0.70c	22.65a	10.25b	0.69abc	4.09	9.09b	29.97d

注: 同列不同字母表示根际或非根际土壤处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.4 驱动4种改良剂提升土壤初级生产力的影响因素

从图6(a)可知, 决定系数(R^2)为0.875, 表明模型对因变量的解释能力强; 拟合优度指数(GFI)为1.000, 表明模型具有良好的拟合度; 卡方自由度比(χ^2/df)为1.396, 表明模型拟合良好且不过度复杂; 卡方检验的 $P(P_{\chi^2})$ 为0.152, 表明模型拟合可接受。这说明构建的改良剂、土壤理化性质与油葵生长参数的结构方程模型具有较高的可信度和预测能力, 能够有效反映改良剂通过调控土壤理化性质间接

促进植物生长的机制。土壤pH、WHC、AP均与改良剂的添加呈显著正相关, 表明改良剂的添加对这些土壤性质有显著影响; 油葵生长与土壤N和WHC均呈显著正相关; 土壤AP和pH之间存在显著负相关性, 说明土壤pH的降低可以改变P的溶解和沉淀, 从而促进了P的生物可利用性, 这种土壤性质之间的相互作用对油葵生长有重要影响。从图6(b)可知, 改良剂对油葵生长的直接影响不显著, 这意味着添加改良剂并不会直接导致油葵生长发生变化, 然而, 添加改良剂可以通过改变土壤WHC、MWD、



橙色和蓝色实心箭头分别表示显著正相关和显著负相关; 虚线箭头表示无显著相关性; 箭头旁边的数字是标准化直接影响系数, 线的粗细代表直接影响系数的大小; “*”、“**”、“***”分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 。标准化效应数据来源于结构方程模型。

(a) 改良剂对土壤理化性质和油葵生长影响的结构方程模型; (b) 潜在变量对油葵生长的总标准化效应; (c) 改良剂对油葵生长的影响机制

图6 改良剂和土壤性质对盐渍土壤中油葵生长的影响

Fig.6 Effects of amendments and soil properties on oil sunflower growth in the salt-affected soil

pH和N、C、AP质量分数,间接影响油葵生长;改良剂介导的土壤持水性能的变化是影响盐渍土壤油葵生长发育的最主要驱动因素,土壤WHC对油葵生长的总标准化影响系数最大(0.97),其次是土壤N(0.43)、土壤C(0.36)和MWD(0.34),改良剂本身(0.04)对油葵生长的影响相对较小,这进一步说明了改良剂能通过改善土壤理化性质,对油葵生长发育产生重要影响,土壤盐度的标准总效应为负值(-0.93),这说明改良剂添加导致的土壤盐度的升高对油葵生长可能存在一定的负面影响。综上,改良剂对油葵生长的影响机制(图6(c))主要为改良剂能通过改善土壤物理结构(如团聚体稳定性)、增强土壤保水性能、提高养分有效性等多重途径促进油葵的生长。

3 讨论

本研究中,相比于其他改良剂,BCS2的添加抑制了油葵的萌发,这可能是因为BCS2含有较高的盐分,其施加提高了土壤盐胁迫,从而对油葵种子萌发具有抑制作用。结构方程模型结果表明,土壤盐度是抑制油葵生长的最直接因素,说明改良剂添加存在的负面影响也不可忽视。

植物生长对改良剂添加的响应通常与改良剂和土壤性质以及改良剂与土壤之间的相互作用有关。有研究报道了生物炭促进盐渍土壤中植物的生长,包括粮食作物(如水稻、小麦)^[27]、经济作物(如大豆)和能源植物(如锦葵)^[21,28]。本研究中,WBC对油葵株高和生物量的促进效果优于其他改良剂的,这可能是由于生物炭的添加能够产生以下作用:①改善盐渍土壤理化性质,生物炭由于具有多价阳离子和发达孔隙结构,能够与土壤中的天然有机质和矿物质发生静电吸附和阳离子交换反应,促进生物炭-有机质-矿物之间的复合体形成,从而增强土壤团聚体的形成和稳定性,有效地固持水分;②提供养分,生物炭本身含有较高的养分,可以提高土壤养分含量,进而为植物提供更多可利用的营养物质;③改善微生物群落结构^[6];④调节植物的生理功能,进而提高植物的耐盐性^[29]。这与LIU等^[30]的研究结果一致,其通过荟萃分析发现生物炭可使盐渍土壤植物生产力提高29.1%,表明生物炭在减轻盐渍化土壤盐胁迫方面具有巨大潜力。添加SS也促进了油葵的生

长,这与李宇庆等^[31]的研究结果(城市污水处理厂污泥堆肥促进了木槿的生长发育)相似。

本研究中,添加改良剂并没有引起油葵总生物量的显著提升,而是通过提高特定生长指标来改善油葵的生长状况。例如,4种改良剂都降低了盐渍土壤对油葵根部的盐胁迫,促进了油葵的根系发育。油葵根系发育的提升主要归因于以下4个方面:①WBC含有丰富的孔隙结构,其添加能够有效改善土壤孔隙度,从而有利于空气和水的渗透^[21];②SS和WBC的添加能够增强土壤养分有效性,为植物根系提供更多的可利用养分^[5,32];③对于复合改良剂,PAM的添加可以使土壤颗粒黏结并形成较大的团聚体,从而提升了土壤孔隙度,增加了土壤的含水量和根系渗透力,提高了油葵根部对盐胁迫的适应性^[33];④SiO₂-NPs的添加提高了植物的光合作用和钾/钠比,且能够通过调节油葵的抗氧化酶活性、提高油葵的抗氧化能力来减轻氧化应激,从而提升油葵抵抗盐胁迫的能力^[16,34]。

光合作用是驱动植物生长的关键生理过程,叶片叶绿素含量和N含量是反映土壤中植物光合作用强度的有效指标^[35-36]。叶片N含量的增加几乎总是伴随着叶绿素含量的提高,有利于植物进行光合作用储存养分^[37]。本研究中,4种改良剂均提升了油葵的光合作用,其原因可能是生物炭提高了土壤酶活性,降低了叶片MDA,通过减少盐胁迫引起的氧化损伤进而提高油葵光合能力^[38];污泥堆肥含有丰富的有机质、N、P等营养物质,在盐渍土中添加污泥堆肥后易形成大量腐殖质,被植物吸收利用,从而增强油葵的光合作用^[39]。相比于WBC和SS,添加BCS1和BCS2对油葵光合作用的促进作用更明显,这可能是因为SiO₂-NPs的添加促进了关键光合酶活性的增加,促进气孔的打开,提高了CO₂的固定效率^[34]。通过分析改良剂对油葵生长的综合影响发现,BCS1和BCS2的促进效果不同,BCS2的促进效果较好且优于SS单独施加的,这可能是由复合改良剂中原材料的配比不同所致。综上可知,最佳配比的生物炭-城市污水厂污泥堆肥复合改良剂的施加在维持滨海湿地植物生产力方面具有重要应用前景。

MWD可以反映土壤团聚体的稳定性,MWD值越高团聚体稳定性越强^[40]。已有研究^[6]报道,生物

炭可以促进土壤团聚,降低容重,从而增加土壤持水能力、透气性和养分供应能力。本研究中,含生物炭的改良剂均提高了土壤MWD,这与SUN等^[41]的研究结果一致。这主要是由于生物炭能够通过阳离子交换和促进生物炭-有机物-矿物复合体的形成来改善盐渍土壤团聚体结构和稳定性^[6]。BCS2对土壤团聚的促进作用最强,这可能是由于BCS2中堆肥和PAM的协同作用。堆肥中的腐殖质物质能够有效改善土壤孔隙度并促进团聚体的形成^[42],PAM本身也具有很强的黏结作用,能够增加土壤大团聚体的数量并增强团聚体的稳定性,其与生物炭联用能够呈现出更好的改良效果^[13]。本研究中,生物炭施加下土壤WHC最大,这归因于生物炭具有丰富的孔隙结构,能够实现对水分的固持和吸附^[43]。

SS及复合改良剂对盐渍土壤pH具有明显的改善效果,这主要是由于SS本身pH较低。但生物炭由于其本身的碱性矿物组分,如Ca、Mg等的氧化物和氢氧化物以及碳酸盐等在盐渍土壤中的浸出,并未导致pH显著降低^[44]。此外,生物炭的施加降低了土壤EC和盐度,推测可能是因为生物炭改善了土壤的孔隙率和水力传导性,促进了盐的浸出;同时部分盐分可能被生物炭吸附或截留在生物炭微孔中,降低了土壤的盐度^[6]。SS和复合改良剂均增加了土壤盐度,尤其是BCS2。这是由于所用的阴离子型PAM的可溶性盐含量高,较高的PAM添加比例导致BCS2的EC和盐度较高,从而将更多的可溶性盐带入了土壤中。根际土壤中EC和盐度低于非根际土壤的,这表明改良剂诱导的根系生长在缓解根区周围盐胁迫方面发挥了重要作用^[21]。此外,结构方程模型结果表明,土壤盐度的标准总效应为负值。因此,为了提升对盐渍土壤的改良效果,在未来研究中需要进一步考虑改良剂与现代灌溉技术(如滴灌、喷灌)的结合应用。

SOC在保持土壤肥力和生产力以及维持全球碳的生物地球化学循环中发挥着重要的作用^[2]。由于生物炭碳含量较高(69.53%)且具有极强的稳定性,其单独施用或制备成复合改良剂均能够增加土壤碳的含量,并且团聚体稳定性的提高增强了对SOC的物理保护,从而使得SOC的矿化程度降低,这极大地增强了滨海“蓝碳”碳汇^[45]。因此,生物炭及其复合改良剂的施用不仅提高了土壤中SOC的

稳定性和蓄积能力,也表现出良好的碳封存潜力,对提升滨海盐渍土碳汇功能具有重要意义。此外,养分有效性是植物生长的必要条件。改良剂尤其是SS显著促进了养分的固存,极大地提高了土壤肥力。一方面,改良剂自身含有的养分能够提供植物生长所必需的养分。结构方程模型结果显示,改良剂与土壤养分N的含量呈正相关,从而为油葵生长提供可利用的养分。但改良剂的添加对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 无显著性影响,这与LUO等^[46]的研究结果一致,这可能是由于改良剂的添加提供了硝化作用的底物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,能够促进氨氧化细菌的丰度和活性,从而增加了土壤硝化速率,使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被快速氧化和硝化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[47]。另一方面,改良剂添加可通过调节元素生物地球化学循环来提高养分有效性。土壤中P的有效性 with pH密切相关,改良剂的添加降低了土壤pH,这对磷酸盐溶解度的增加有促进作用,从而提高了土壤AP水平,增强了P的生物可利用性^[48]。结构方程模型结果也验证了这一结论,这可能是促进油葵生长的原因之一。

4 结论

1) 与废弃木材生物炭和城市污水厂污泥堆肥产品相比,复合改良剂(BCS1和BCS2)的添加可以促进油葵的光合作用和根系发育,且BCS2对油葵生长的综合促进效果优于BCS1的。

2) 复合改良剂在提高土壤团聚体稳定性方面优于城市污水厂污泥堆肥产品单独添加的,对pH的降低以及养分有效性($\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和AP)提升方面的效果优于废弃木材生物炭单独添加的,添加复合改良剂促进了土壤健康。

3) 改良剂添加导致的土壤最大持水量的增加是影响油葵生长发育的最主要因素,其次是土壤氮、碳和平均质量直径。

参考文献:

- [1] HAJ-AMOR Z, ARAYA T, KIM D G, et al. Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: a review[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 843: 156946.
- [2] 刘强, 袁延飞, 刘一帆, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(10): 1005-1024.

- [3] 孙卿. 盐碱土壤改良措施与效益分析[J]. 农业与技术, 2022, 42(15): 78–81.
- [4] 张翼夫, 李问盈, 胡红, 等. 盐碱地改良研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 7–10.
- [5] LUO X X, LIU G C, XIA Y, et al. Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 780–789.
- [6] YUAN Y F, LIU Q, ZHENG H, et al. Biochar as a sustainable tool for improving the health of salt-affected soils[J]. Soil & Environmental Health, 2023, 1(3): 100033.
- [7] 徐鹏程, 冷翔鹏, 刘更森, 等. 盐碱土改良利用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 293–298.
- [8] MAHMOUD A W M, SAMY M M, SANY H, et al. Nanopotassium, nanosilicon, and biochar applications improve potato salt tolerance by modulating photosynthesis, water status, and biochemical constituents[J]. Sustainability, 2022, 14(2): 723.
- [9] FENG W Y, GAO J Y, CEN R, et al. Effects of polyacrylamide-based super absorbent polymer and corn straw biochar on the arid and semi-arid salinized soil[J]. Agriculture, 2020, 10(11): 519.
- [10] MUNIR N, HANIF M, DIAS D A, et al. The role of halophytic nanoparticles towards the remediation of degraded and saline agricultural lands[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(43): 60383–60405.
- [11] 车永梅, 刘广超, 郭艳苹, 等. 一种耐盐复合菌剂的制备和促生作用研究[J]. 生物技术通报, 2023, 39(11): 217–225.
- [12] 赵杭, 周旋, 王艺哲, 等. 芦荻生物质炭基肥研制及其对水稻土氮损失的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 319–326, 332.
- [13] ABULAITI A, SHE D L, LIU Z P, et al. Application of biochar and polyacrylamide to revitalize coastal saline soil quality to improve rice growth[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(7): 18731–18747.
- [14] 陆洁, 冯嘉仪, 盛晗, 等. 生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1082–1090.
- [15] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30–34, 4.
- [16] MATHUR P, ROY S. Nanosilica facilitates silica uptake, growth and stress tolerance in plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 157: 114–127.
- [17] 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.
- [18] CHOWDHURY Z Z, KARIM M Z, ASHRAF M A, et al. Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of biochar derived from slow pyrolysis of durian wood(*Durio zibethinus*) sawdust[J]. BioResources, 2016, 11(2): 3356–3372.
- [19] 索桂芳, 吕豪豪, 汪玉瑛, 等. 炭基微生物肥料制备工艺及性质分析[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(7): 1218–1228.
- [20] ZHAO M, MA X H, LIAO X R, et al. Characteristics of algae-derived biochars and their sorption and remediation performance for sulfamethoxazole in marine environment[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 133092.
- [21] SUN J N, YANG R Y, LI W X, et al. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(11): 3271–3279.
- [22] BAUMERT V L, FORSTNER S J, ZETHOF J H T, et al. Root-induced fungal growth triggers macroaggregation in forest subsoils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 157: 108244.
- [23] DE SOUZA MACHADO A A, LAU C W, TILL J, et al. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(17): 9656–9665.
- [24] LUO X X, WANG L Y, LIU G C, et al. Effects of biochar on carbon mineralization of coastal wetland soils in the Yellow River Delta, China[J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 329–336.
- [25] ZHENG H, WANG X, LUO X X, et al. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: roles of soil aggregation and microbial modulation[J]. Science of The Total Environment, 2018, 610: 951–960.
- [26] LIU G, JIANG R F, YOU J, et al. Microplastic impacts on microalgae growth: effects of size and humic acid[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(3): 1782–1789.
- [27] KAZEMI R, RONAGHI A, YASREBI J, et al. Effect of shrimp waste-derived biochar and arbuscular mycorrhizal fungus on yield, antioxidant enzymes, and chemical composition of corn under salinity stress[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 19(4): 758–770.
- [28] HE K, HE G, WANG C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.
- [29] ABBAS G, ABRAR M M, NAEEM M A, et al. Biochar increases salt tolerance and grain yield of quinoa on saline-sodic soil: multivariate comparison of physiolo-

- gical and oxidative stress attributes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(5): 1446–1459.
- [30] LIU Q, MEKI K, ZHENG H, et al. Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change[J]. *Biochar*, 2023, 5(1): 45.
- [31] 李宇庆, 陈玲, 赵建夫. 施用污泥堆肥对木槿生长的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 894–897.
- [32] 何罗驭阳, 杨佳宜, 廖桂平, 等. 3种生物炭的表征及其在烤烟生产上的效应[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(5): 15–20.
- [33] AWAD Y M, BLAGODATSKAYA E, OK Y S, et al. Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on the decomposition of ^{14}C -labelled maize residues and on their stabilization in soil aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 488–499.
- [34] HAO Y B, YU Y, SUN G Y, et al. Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize[J]. *Plants*, 2023, 12(8): 1604.
- [35] HE M J, XIONG X N, WANG L, et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125378.
- [36] 吴迪, 袁鹤翀, 顾闻琦, 等. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(1): 37–45.
- [37] 门璐, 何奕成, 李婷婷, 等. 高寒草甸植物叶绿素对氮添加梯度的非线性响应[J]. *草地学报*, 2023, 31(6): 1622–1631.
- [38] SONG X L, LI H B, SONG J X, et al. Biochar/vermicompost promotes Hybrid *Pennisetum* plant growth and soil enzyme activity in saline soils[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 183: 96–110.
- [39] SONG U, LEE E J. Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(12): 1109–1116.
- [40] 张顺涛, 任涛, 周橡棋, 等. 油/麦-稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 194–205.
- [41] SUN Q, MENG J, LAN Y, et al. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth[J]. *Catena*, 2021, 205: 105460.
- [42] XU Q, XU Q Y, ZHU H, et al. Does biochar application in heavy metal-contaminated soils affect soil micronutrient dynamics?[J]. *Chemosphere*, 2022, 290: 133349.
- [43] 杨世梅, 何腾兵, 杨丽, 等. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(1): 75–81.
- [44] SHEN X L, ZENG J F, ZHANG D L, et al. Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and environmental risk of Cr, Mn, Cu, and Zn in biochars derived from pig manure[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 704: 135283.
- [45] ZHENG H, WANG X, CHEN L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41(3): 517–532.
- [46] LUO X X, CHEN L, ZHENG H, et al. Biochar addition reduced net N mineralization of a coastal wetland soil in the Yellow River Delta, China[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 120–128.
- [47] 张倩, 刘冰洁, 余璐, 等. 生物炭对滨海湿地盐碱土壤碳氮循环的影响[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2529–2543.
- [48] WANG S B, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Application of biochar and organic fertilizer to saline-alkali soil in the Yellow River Delta: effects on soil water, salinity, nutrients, and maize yield[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(4): 1679–1692.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正