



活化铁尾砂与镁改性生物炭配施对水稻幼苗生长及盐碱土性质的影响

罗春峰, 张晓蓉, 巩宗强, 贾艳杰, 赵祥, 刘凤飞, 郭伟

引用本文:

罗春峰, 张晓蓉, 巩宗强, 贾艳杰, 赵祥, 刘凤飞, 郭伟. 活化铁尾砂与镁改性生物炭配施对水稻幼苗生长及盐碱土性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(1): 68–78.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0675>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究](#)

金梦野, 黄娟, 侯嫔, 黄占斌

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 118–124 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0880>

[钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土](#)

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

[蛭石改性水稻秸秆生物炭在土壤中的短期降解](#)

王瑞, 刘玉学, 高诚祥, 何莉莉, 汪玉瑛, 吕豪豪, 杨生茂, 梁宗锁

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1954–1962 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0477>

[生物质炭对湘南矿区轻度Pb污染土壤性质及Pb的累积转运影响](#)

徐继敏, 张平, 廖柏寒, 耿勤, 李倩, 彭佩钦

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 259–267 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1089>

[土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响](#)

杨华, 陈莎莎, 冯哲叶, 邓照亮, 李真, 王世梅

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2080–2085 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0379>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

罗春峰, 张晓蓉, 巩宗强, 等. 活化铁尾砂与镁改性生物炭配施对水稻幼苗生长及盐碱土性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 68–78.

LUO C F, ZHANG X R, GONG Z Q, et al. Effects of a combination of activated iron tailings and magnesium-modified biochar on rice seedling growth and properties of saline-alkali soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 68–78.



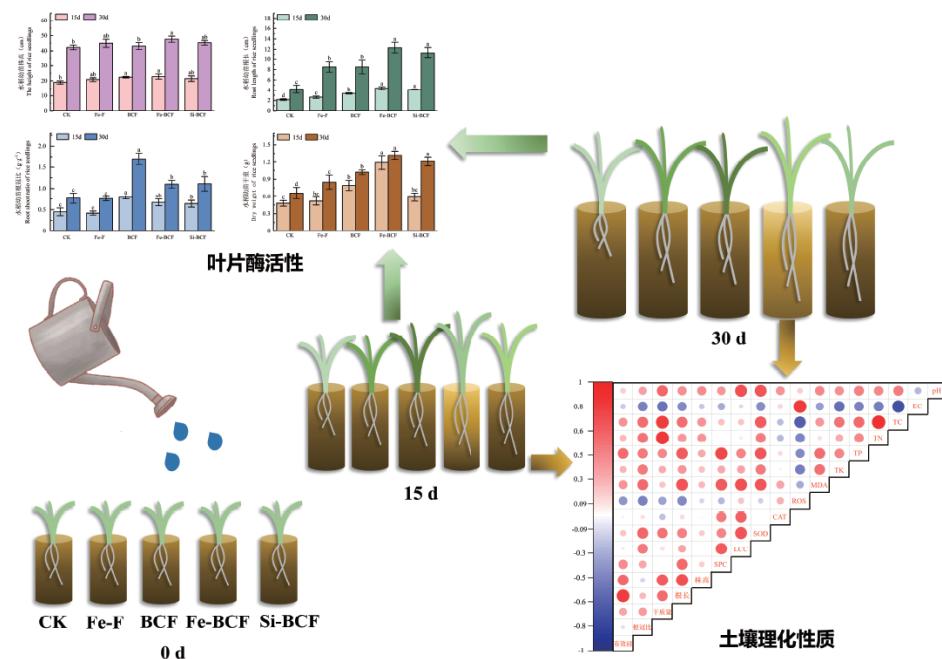
开放科学 OSID

活化铁尾砂与镁改性生物炭配施对水稻幼苗生长及盐碱土性质的影响

罗春峰^{1,2}, 张晓蓉², 巩宗强², 贾艳杰^{2,3}, 赵祥^{2,4}, 刘凤飞^{2,4}, 郭伟^{1*}

(1. 沈阳农业大学, 沈阳 110000; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态和环境工程重点实验室, 沈阳 110000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 辽宁大学, 沈阳 110000)

摘要:为探究活化的高硅型铁尾砂与镁改性生物炭配施材料对水稻幼苗生长及盐碱土壤理化性质的影响以及改善盐碱地水稻生产力的可行性,本研究应用电子扫描显微镜对生物炭材料进行形貌结构观察,应用傅里叶变换红外光谱仪对生物炭材料进行官能团表征;开展盆栽实验,探究活化铁尾砂与生物炭材料配施对水稻幼苗的形态学和生理学的影响及对盐碱土的改善效果。结果表明,相比于其他生物炭材料,活化铁尾砂-镁改性生物炭材料孔隙较大,表面更加粗糙,对于养分的吸附能力强,表面的官能团丰富。盆栽实验中活化铁尾砂-镁改性生物炭配施组中水稻幼苗株高、根长、根冠比和干质量分别较对照组提高



12.61%、191.49%、42.93% 和 100.00%;叶片的丙二醛和活性氧含量分别降低 65.76% 和 46.46%;过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、叶绿素和可溶性蛋白值分别升高 117.35%、44.75%、55.00% 和 19.31%。施用活化铁尾砂-镁改性生物炭材料后,盐碱土的电导率降低,pH、总碳、总氮、土壤有效硅、总磷和总钾含量升高。研究证明活化铁尾砂-镁改性生物炭材料性能优越,并且活化铁尾砂与镁改性生物炭配施改善了盐碱土壤理化性质和养分含量,使水稻幼苗活性氧含量降低及抗氧化酶活性提升,减缓盐碱土对水稻幼苗生长的胁迫,促进盐碱土壤中水稻幼苗生理过程,增加干物质积累,可以促进盐碱地水稻幼苗生长。

关键词:活化铁尾砂-镁改性生物炭材料;水稻;酶活性;苏打盐碱土

中图分类号:S511;S156.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2024)01-0068-11 **doi:**10.11654/jaes.2023-0675

收稿日期:2023-08-21 录用日期:2023-10-30

作者简介:罗春峰(1997—),男,甘肃庆城人,硕士研究生,研究方向为植物生态学。E-mail:lchunfeng1235@163.com

*通信作者:郭伟 E-mail:guowei233@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1100504);辽宁省博士科研启动基金计划项目(2023-BS-024)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2019YFD1100504); Liaoning Province Doctoral Research Initiation Fund Program Project (2023-BS-024)

Effects of a combination of activated iron tailings and magnesium-modified biochar on rice seedling growth and properties of saline-alkali soil

LUO Chunfeng^{1,2}, ZHANG Xiaorong², GONG Zongqiang², JIA Yanjie^{2,3}, ZHAO Xiang^{2,4}, LIU Fengfei^{2,4}, GUO Wei^{1*}

(1. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000, China; 2. Key Laboratory of Pollution and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Liaoning University, Shenyang 110000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of activated iron tailings and magnesium-modified biochar materials on rice seedling growth and soil properties, as well as to assess the viability of improving rice production in saline-alkaline soil. A scanning electron microscope was used to characterize the morphology and structure of the biochar materials, and Fourier transform infrared spectrometry was applied to determine the functional group composition of the magnesium-modified biochar materials. Pot tests were undertaken to investigate the morphological impacts of activated iron tailings and biochar materials, the physiological traits of rice seedlings, and the effects on saline-alkali soil. Compared with other biochar materials, our results suggested that activated iron tailings and biochar treated with magnesium had more surface functional groups, larger pores, and a rougher surface. Pot experiments demonstrated that plant height, root length, root-shoot ratio, and dry weight of rice seedlings after applying the activated iron tailing-magnesium-modified biochar increased by 12.61%, 191.49%, 42.93%, and 100.00% respectively, in comparison to the control group. Malondialdehyde and active oxygen concentrations in leaves decreased by 65.76% and 46.46%, respectively. Catalase and superoxide dismutase activities, and chlorophyll and soluble protein levels, increased by 117.35%, 44.75%, 55.00%, and 19.31%, respectively. After applying iron tailings-magnesium-modified biochar, the electric conductivity of saline-alkali soil was reduced, while pH, total carbon, total nitrogen, total phosphorus, soil available silicon, and total potassium contents increased. These results indicate that activated iron tailings and magnesium modified biochar have great potential, and their application can enhance the physical and chemical properties and nutritional content of saline-alkaline soil, reduce the active oxygen content of rice seedlings, increase the activity of antioxidant enzymes, and mitigate the stress of saline soils on the growth of rice seedlings. Moreover, rice seedling growth in saline-alkaline soil can be promoted by increasing the accumulation of dry matter.

Keywords: activated iron tailing-magnesium-modified biochar; rice; enzyme activity; soda-salt-alkali soil

土壤盐碱化是我国面临的重要生态环境问题之一。据统计,我国盐碱土壤面积不断扩大,已占全国可利用土地总面积的4.88%^[1]。盐碱土高盐基离子含量及pH压力会造成土壤肥力下降,抑制作物组织和器官的生长与分化,造成作物生长发育迟缓^[2],致使单株平均根数减少、幼苗主根变短以及根总面积减小,影响幼苗株高以及干物质积累^[3]。水稻是世界三大粮食作物之一,而盐碱地水稻生产受限。改善盐碱地水稻生产环境,研发适用于盐碱地水稻生长的肥料有助于解决盐碱地水稻低产问题。

水稻是典型的需硅作物,硅元素对水稻的光合作用、抗倒伏能力、体内矿物质含量以及抗病能力等都有很好的促进作用^[4]。袁源远等^[5]研究发现硅元素能够使水稻幼苗的茎秆变粗,叶宽增加,有利于水稻幼苗壮苗。尾砂是钢铁企业产生的固体废弃物,大量铁尾砂的堆放导致了严重的生态环境问题,它的资源化利用也一直是一个难点问题。铁尾砂中含有大量硅,富含硅酸盐和铁盐等化合物,将其改性并活化其中的硅元素,然后应用于农田生态系统中有望促进水稻生产,对降低矿业铁尾砂堆放占地面积,实现其资源化

应用具有重要意义。另一方面,生物炭特性优良,具有丰富的孔隙结构,可以改善盐碱土壤结构,提升土壤通透性,是一种高效的土壤改良剂^[6-7]。黄晶等^[8]研究发现添加生物炭能有效抑制水稻幼苗膜脂过氧化作用,提高抗氧化能力,减轻盐胁迫对水稻幼苗的伤害,在生理层面提高水稻幼苗的耐盐性。相较于传统生物炭材料,改性生物炭的微孔隙结构进一步提升,具有更大的比表面积和更强的阳离子交换能力,吸附能力显著提高,其中通过碱金属镁改性后的生物炭对氮磷具有突出的吸附能力而备受青睐^[9]。吴行等^[10]研究证实将镁改性生物炭施入土壤后可以改善土壤理化性质和土壤养分含量,使土壤有效磷含量显著增加。总体上,铁尾砂和生物炭可以从不同方面促进水稻生长,将二者改性、配施有望改善盐碱土中水稻的生长状况,但是二者的配施效果及配施材料对水稻生长及土壤性质的影响目前尚不清楚。

本研究以水稻幼苗为研究对象,将活化铁尾砂与改性生物炭材料配施于盐碱土壤中,分析不同材料对水稻幼苗形态学、生理学以及盐碱土壤性质的影响,以期阐明活化铁尾砂-改性生物炭配施对水稻酶活

及土壤性质的影响,实现铁尾砂的资源化利用,为促进盐碱土壤中水稻生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验基本材料

实验所需的氮、磷、钾肥分别来自于尿素、磷酸二铵及硫酸钾;铁尾砂取自辽宁省某钢厂;硅肥由湖北美力农业科技有限公司生产;供试水稻品种为“稻花香2号”;盆栽土壤取自吉林省白城市镇赉县($45^{\circ}37' 46.05''N, 122^{\circ}50' 43.09''E$),土壤类型为苏打盐碱土,质地为砂壤土,其土壤理化性质为:pH 8.74、电导率 $1.68 S \cdot m^{-1}$ 、总碳 1.23%、全氮 0.10%、全磷 $153.50 mg \cdot kg^{-1}$ 、全钾 $174.46 mg \cdot kg^{-1}$ 、有效硅 $87.88 mg \cdot kg^{-1}$ 。

1.1.2 实验材料制备

氮磷钾肥施用量参考市面售卖复合肥(辽宁宇恒肥业科技有限公司):所用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、磷酸二氢钾、碳酸钾,肥料总施用量为 $220 kg \cdot hm^{-2}$ (以 N 计), $48 kg \cdot hm^{-2}$ (以 P 计), $91 kg \cdot hm^{-2}$ (以 K 计)。为对比不同处理组对水稻幼苗生长影响,保证最终不同处理组施用的氮磷钾元素含量一致。

(1)活化铁尾砂材料:将铁尾砂与氢氧化钠按 $10:3(m:m)$ 混合,于 $800^{\circ}C$ 煅烧炉(上海昕仪 SX-12-12A)中煅烧 30 min 后过 100 目筛,得到活化铁尾砂,其性质为:钙含量 2.60%,铁含量 6.13%,有效硅含量 29.01%,锰含量 1.70%,锌含量 $70.22 mg \cdot kg^{-1}$,参考市面上硅肥(湖北美力农业科技有限公司)施用量,结合复合肥用量,按份取 1.90 g 活化铁尾砂、1.40 g 尿素、0.77 g 磷酸二铵,0.77 g 硫酸钾混合得活化铁尾砂材料(Fe-F)。

(2)镁改性生物炭材料:以废弃菌棒为原料于 $550^{\circ}C$ 厌氧条件下烧制 4 h 制得生物炭(BC),取 100 g 生物炭浸渍于 2 500 mL 氯化镁溶液($1 mol \cdot L^{-1}$)24 h 获得镁改性生物炭(MBC),然后将 100 g 镁改性生物

炭与 2.0 g 尿素、1.1 g 磷酸二铵和 1.10 g 硫酸钾溶液混合,用 $0.05 mol \cdot L^{-1}$ 硫酸溶液调节 pH 到 8.0 ± 0.5 ,浸渍 24 h,在摇床上以 $200 r \cdot min^{-1}$ 的转速振荡 24 h 后,于 $105^{\circ}C$ 烘箱中烘干 6~8 h 制成镁改性生物炭材料(BCF)。

(3)活化铁尾砂-镁改性生物炭材料:将活化铁尾砂与镁改性生物炭材料按质量比 19:700 混合制得铁尾砂基镁改性生物炭材料(Fe-BCF)。

(4)硅-镁改性生物炭材料:称取硅肥 0.1 g 与 7.0 g 镁改性生物炭材料混合获得硅-镁改性生物炭材料(Si-BCF)。

1.2 实验育苗

首先将水稻种子用 10% H_2O_2 溶液浸种消毒 3 h 后,用去离子水冲洗 3 次,黑暗处用水浸泡 3 d 催芽,然后置于 $26^{\circ}C$ 培养箱内发芽,保持 $28^{\circ}C$ 光照 14 h, $25^{\circ}C$ 黑暗 10 h,光子通量密度 $150 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,待秧苗至三叶一心移栽,移栽时保持盆栽中 2 cm 的水层。

1.3 实验设计

设置盆栽实验(直径 10 cm,深 15 cm),盐碱土壤自然风干破碎后过 2 mm 筛,每盆装土 700 g。共设置 5 个处理组,对照组(CK)、Fe-F 组、BCF 组、Fe-BCF 组以及 Si-BCF 组,将各处理组施用材料与土壤混匀后装盆,稳定一周后移栽水稻苗,在整个实验期间始终保持盆栽水层 2~3 cm,每个处理设置 5 个重复,分别于水稻移栽 15 d 和 30 d 后取样,处理组材料施用量依据同实验材料制备,具体各处理组施用材料方案见表 1。

1.4 测定方法

1.4.1 生物炭材料的表征

利用扫描电镜对生物炭材料进行表面形貌特征分析。用镊子将少量的干燥后的生物炭材料置于双面胶上,使样品观察面朝上,均匀粘贴在扫描电镜铜板上,将其放入扫描电镜中,在 10 000 倍下观察各生物炭材料的表面微观结构。

表 1 处理组施用材料($g \cdot pot^{-1}$)

Table 1 Applied materials of each treatment($g \cdot pot^{-1}$)

处理 Treatment	尿素 CH_4N_2O	磷酸二铵 $(NH_4)_2HPO_4$	硫酸钾 K_2SO_4	活化铁尾砂 Activated iron tailing	硅肥 Silicon fertilizer	镁改性生物炭 Magnesium modified biochar
CK	0.14	0.077	0.077	0	0	0
Fe-F	0.14	0.077	0.077	0.19	0	0
BCF	0.14	0.077	0.077	0	0	7
Fe-BCF	0.14	0.077	0.077	0.19	0	7
Si-BCF	0.14	0.077	0.077	0	0.10	7

采用傅里叶变换红外光谱仪测定生物炭材料红外光谱特征。将实验各生物炭材料研磨成粉末状,采用压片法制备成样品,扫描范围为500~4 000 cm⁻¹,扫描次数为32,分辨率为4 cm⁻¹。

1.4.2 水稻幼苗形态学指标测定

用直尺直接测量水稻幼苗株高和根长并记录数据,随后将水稻幼苗的地上部分和地下部分做好标记,在烘箱中105℃杀青30 min,75℃烘干6~8 h至质量恒定,用电子天平测定地上部分和地下部分的干质量,计算根冠比和水稻幼苗干质量。

1.4.3 水稻幼苗生理学指标测定

采集新鲜水稻叶片,清水清洗后使用滤纸擦干表面水分,进行研磨,制备水稻叶片组织匀浆。分别用分光光度法测定叶片叶绿素含量(leaf chlorophyll content,LCC)^[11];用考马斯亮蓝G-250法测可溶性蛋白含量(soluble protein content,SPC)^[12];用羟胺法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)^[13];用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(malondialdehyde,MDA)^[14];用钼酸铵法测定过氧化氢酶(catalase,CAT)^[15];参照试剂盒(宝如亿生物技术有限公司, www.brybio.com),采用双抗体夹心法测定活性氧(reactive oxygen species,ROS)^[16];SPC单位用每克鲜质量中含有的可溶性蛋白表示,SOD活性的单位用每克组织湿质量在1 mL反应液中SOD抑制率达50%时所对应的SOD量为一个SOD活力单位,MDA的单位用每克组织蛋白中含有的MDA表示,CAT活性的单位用每毫克组织蛋白每秒钟分解1 μmol的H₂O₂为一个活力单位表示。

1.4.4 水稻土壤指标测定

取0~10 cm层土壤风干、粉碎、研磨,过2 mm筛

备用。用酸度计(上海雷磁PHS-3C)和电导率仪(上海雷磁DDS-307A)测定土壤的pH值和电导率值(electrical conductivity,EC)^[17],用土壤元素分析仪测定土壤的总碳(TC)和总氮(TN)含量,用电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤的总磷(TP)和总钾(TK)含量^[18],采用硅钼蓝比色法测定土壤有效硅含量^[19]。

1.5 数据分析

用Excel、Origin 2021和GraphPad Prism 9.0进行数据整理、计算和作图。利用SPSS 25.0软件,运用Pearson法进行相关性分析,采用单因素方差分析和最小显著差异法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 形貌表征

2.1.1 扫描电镜特征

如图1所示,BC、MBC和Fe-BCF的电镜图显示三种材料都有明显的疏松多孔隙结构,BC的孔隙较小,表面较为光滑;MBC的孔隙较大,表面粗糙、破碎且有卷曲状的结构,孔隙内部能够观察到白色颗粒状的镁离子吸附物;Fe-BCF的孔隙大且多,呈现粗糙的层级状结构,内有密集的吸附物质。

2.1.2 红外光谱表征

如图2所示,实验材料均在1 390 cm⁻¹附近出现峰值,此峰属于C=C的伸缩振动,证明样品中存在芳香骨架,在3 420 cm⁻¹和876 cm⁻¹附近时,存在较强的特征峰,其中3 420 cm⁻¹处所对应的峰为O—H键的伸缩振动,在876 cm⁻¹处所对应的C—H键的伸缩振动。MBC、BCF和Fe-BCF在594 cm⁻¹处出现的峰归属于Mg—O键和O—Mg—O键的伸缩振动,在1 610 cm⁻¹出现的峰归属于C=O的伸缩振动;BC、BCF和

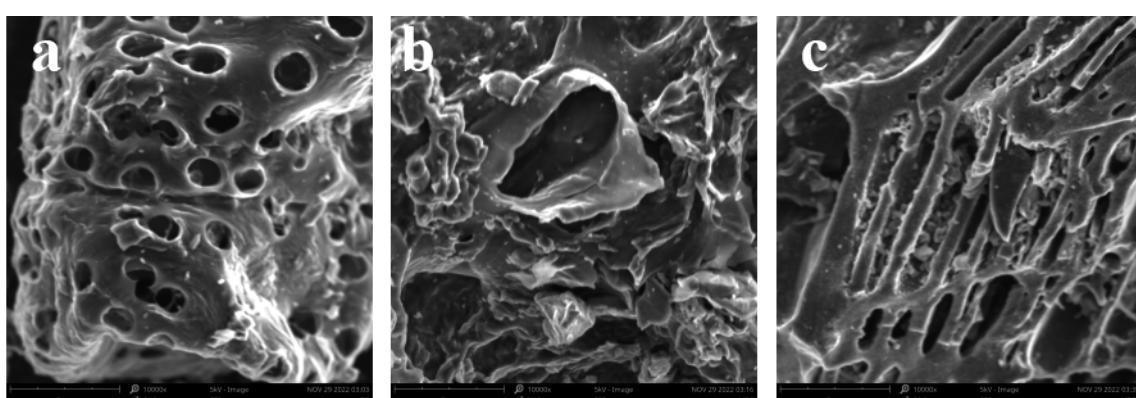


图1 BC(a)、MBC(b)和Fe-BCF(c)扫描电镜图

Figure 1 Scanning electron microscopic of BC(a), MBC(b) and Fe-BCF(c)

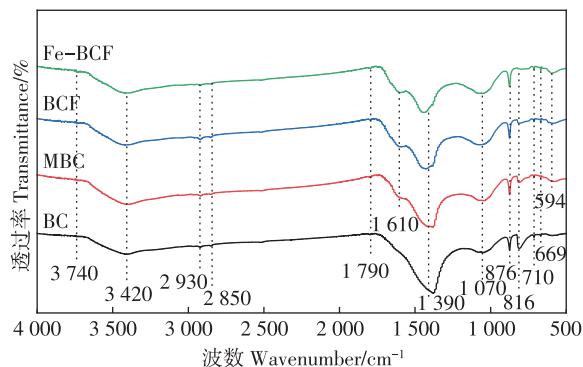


图2 不同材料红外图谱

Figure 2 Infrared spectrum of different materials

Fe-BCF在 1070 cm^{-1} 附近出现的峰归属于C—N键和 NH_4^+ 的伸缩振动，在 1610 cm^{-1} 附近出现的峰归属于C—O键的伸缩振动；BC、MBC、BCF和Fe-BCF在 2930 cm^{-1} 附近出现的峰归属于C—H键的伸缩振动，在 669 cm^{-1} 和 710 cm^{-1} 附近出现的峰归属于C—C键的伸缩振动。

2.2 水稻幼苗期形态学特性

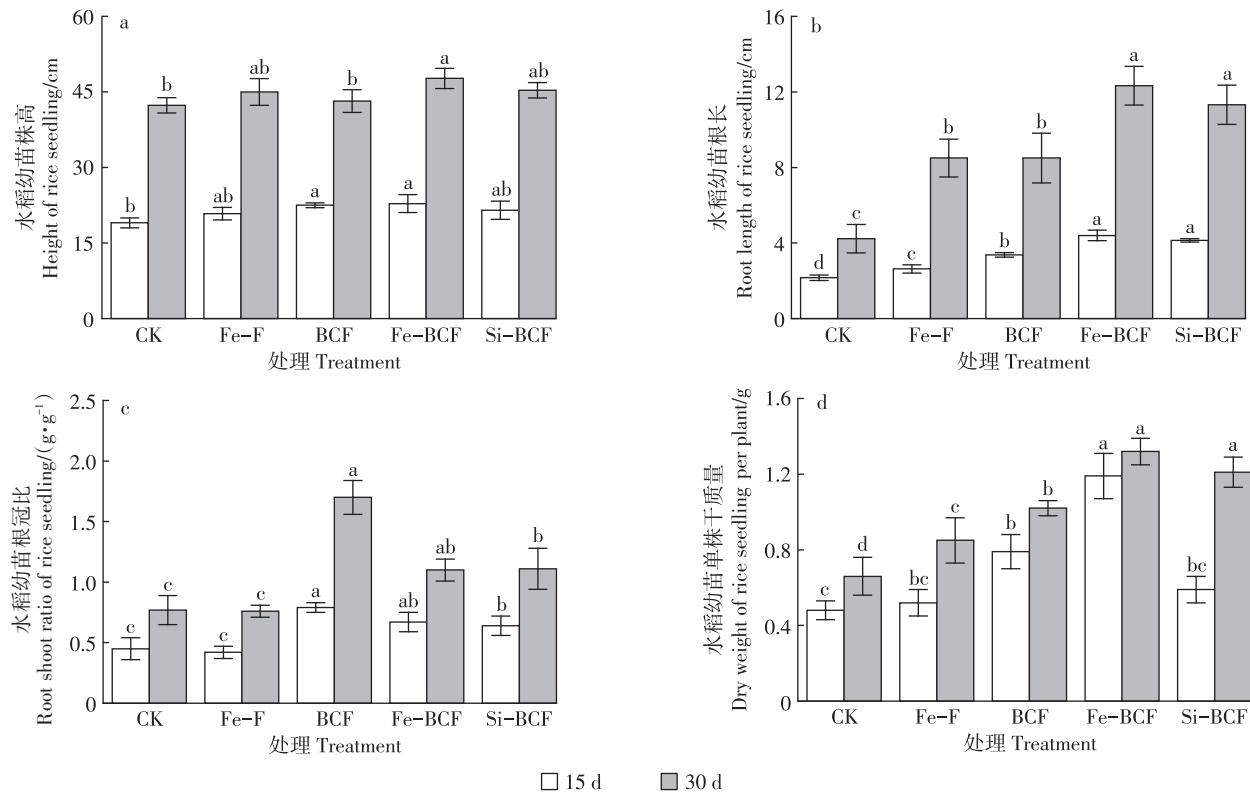
如图3所示，15 d时Fe-BCF处理组单株幼苗株

高、根长、根冠比和干质量分别为 22.83 cm 、 4.40 cm 、 $0.67\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 1.19 g ，相较于CK提高了 20.16% 、 103.70% 、 48.81% 和 147.92% ($P<0.05$)；30 d时Fe-BCF处理组单株幼苗株高、根长、根冠比和每株干质量分别为 47.67 cm 、 12.33 cm 、 $1.10\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 1.32 g ，相较于CK分别提高了 12.61% 、 191.49% 、 42.93% 和 100.00% ($P<0.05$)。Si-BCF处理组根冠比比CK提高了 42.93% ($P<0.05$)，比BCF处理组降低了 35.26% ($P<0.05$)（图3c）。

2.3 水稻幼苗期生理学特性

2.3.1 叶片酶活性

如图4所示，15 d时Fe-BCF处理组水稻叶片中MDA和ROS含量相较于CK分别降低 65.76% 和 46.46% ($P<0.05$)（图4a、图4b）；CAT和SOD活性比CK分别提高 117.35% 和 44.75% ($P<0.05$)（图4c、图4d）；Si-BCF处理组的CAT活性比Fe-BCF处理组高 26.68% ($P<0.05$)。30 d时Fe-BCF处理组水稻幼苗叶片MDA和ROS含量分别为 $1.47\text{ nmol}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和 $297.56\text{ pg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，较CK分别显著降低 21.39% 和 16.39% ($P<0.05$)（图4a、图4b），CAT和SOD活性则高



不同小写字母表示同一时间不同处理组之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level among different treatment groups at the same time. The same below.

图3 单株水稻幼苗株高(a)、根长(b)、根冠比(c)和干质量(d)

Figure 3 Plant height(a), root length(b), root shoot ratio(c), and dry weight of rice seedlings per plant(d)

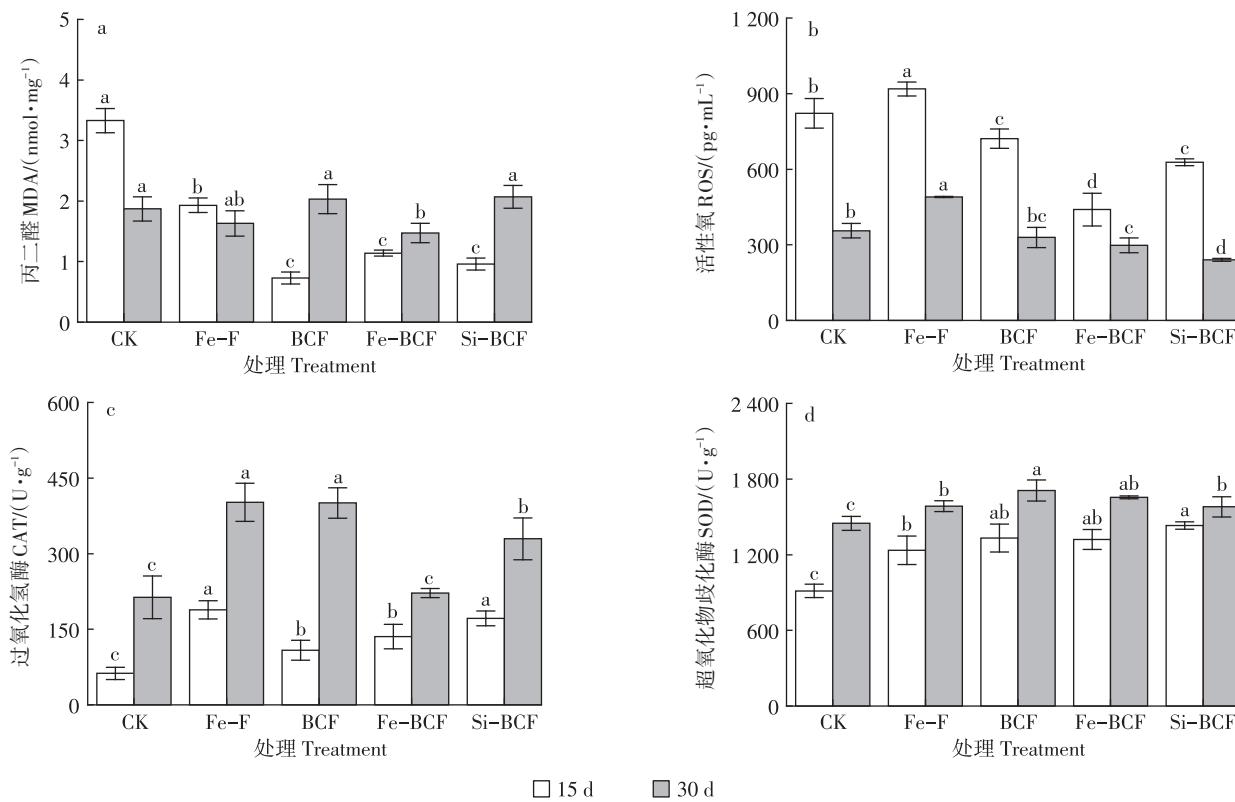


图4 水稻幼苗叶片丙二醛(a)、活性氧(b)、过氧化氢酶(c)和超氧化物歧化酶(d)

Figure 4 Contents of MDA(a),ROS(b),CAT(c),and SOD(d) in rice seedling leaves

于CK,分别为 $221.92\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1\,655.13\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。各处理的水稻叶片ROS值随着时间推移而降低(图4b),而CAT和SOD活性值均随时间推移而升高(图4c,图4d)。CK和Fe-F处理组MDA含量随时间推移而降低,Si-BCF、BCF和Fe-BCF处理组水稻叶片MDA含量呈现相反趋势(图4a)。

2.3.2 叶片叶绿素和可溶性蛋白含量

如图5所示,15 d时Fe-BCF处理组LCC和SPC分别为 $2.48\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $245.33\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,较CK分别提高

了55.00%和19.26%($P<0.05$);BCF和Si-BCF处理组LCC比Fe-BCF处理组分别提高了36.74%和24.58%($P<0.05$)(图5a)。30 d时Fe-BCF处理组LCC和SPC分别为 $2.24\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $173.09\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,较CK分别显著提高了45.45%和9.06%($P<0.05$),而BCF处理组LCC显著高于Fe-BCF处理组($P<0.05$)(图5a)。对15 d和30 d的LCC和SPC进行比较发现,Fe-F和BCF处理组LCC随时间推移逐渐升高,而CK、Fe-BCF和Si-BCF处理组的LCC呈下降趋势。此外,各处理中30 d

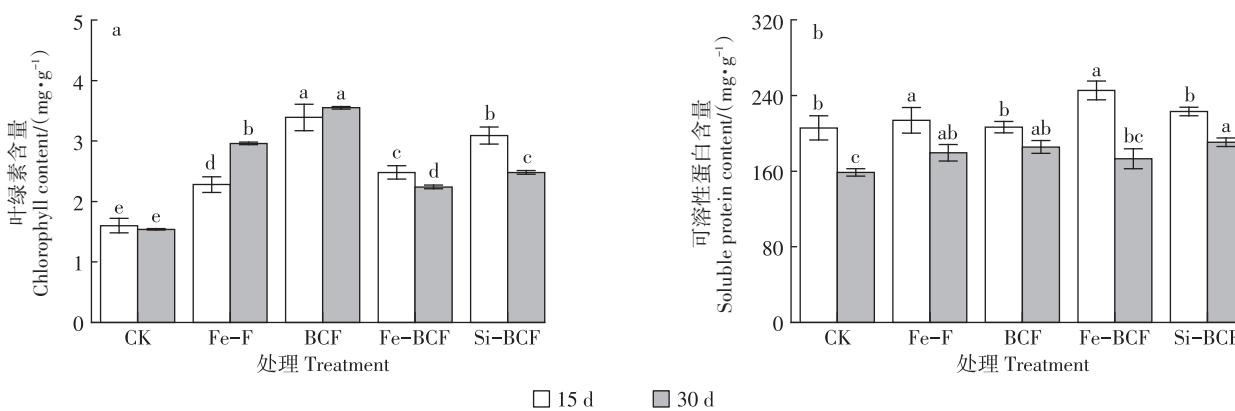


图5 水稻幼苗叶片叶绿素(a)和可溶性蛋白(b)含量

Figure 5 Contents of chlorophyll(a) and soluble protein(b) in rice seedling leaves

的SPC含量均低于15 d时的结果。

2.4 对盐碱土壤的影响

从表2可以看出,15 d时,Fe-BCF处理组pH为7.35,显著高于CK($P<0.05$);Fe-BCF处理组EC为 $0.74\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$,较CK降低了58.43%;Fe-BCF处理组TC和TN较CK分别高出了1.06个和0.02个百分点;Fe-BCF和Si-BCF处理组土壤有效硅较CK显著高出了69.63%和62.63%($P<0.05$);Fe-BCF处理组TP和TK含量较CK显著提高194.07%和98.54%($P<0.05$)。30 d时,Fe-BCF处理组pH为7.55,显著高于CK($P<0.05$);Fe-BCF处理组EC较CK显著降低($P<0.05$);Fe-BCF处理组TC和TN含量较CK显著高出了1.14个和0.03个百分点($P<0.05$);Fe-BCF和Si-BCF处理组土壤有效硅较CK分别显著提高82.53%和69.28%($P<0.05$);Fe-BCF处理组TP和TK含量较CK分别显著提高163.12%和95.23%($P<0.05$)。相同处理条件下,Fe-BCF处理组pH和EC随时间推移无明显变化($P>0.05$),TC和TN分别高出了0.15个和0.02个百分点;Fe-BCF和Si-BCF处理组土壤有效硅分别降低了4.18%和7.32%。

2.5 相关性分析

图6为土壤理化性质与水稻幼苗形态、生理指标的相关性分析的结果,可以看出EC与ROS呈极显著正相关($P<0.01$),而与TC呈极显著负相关($P<0.01$),与TK和干质量呈显著负相关($P<0.05$);水稻幼苗单

株干质量与株高、TN和TC呈极显著正相关($P<0.01$),与根长、SOD和pH呈显著正相关($P<0.05$)而与EC呈显著负相关($P<0.05$);ROS与EC呈显著正相关($P<0.05$),而与TC、TN、TP、TK、土壤有效硅呈负相关;SOD与MDA、TC、TP、LCC和pH呈极显著正相关($P<0.01$),与单株干质量和根冠比呈显著正相关($P<0.05$);水稻幼苗叶片LCC与SOD、MDA、pH和SPC呈极显著正相关($P<0.01$),与CAT和根冠比显著正相关($P<0.05$),有效硅与EC和ROS呈负相关,与根长呈极显著正相关($P<0.01$),与株高和TP呈显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 活化铁尾砂和镁改性生物炭配施对水稻幼苗期形态学的影响

水稻耐盐性指标一般包括地上部分和地下部分的干鲜质量和叶片的叶绿素含量等与生长相关以及与生理代谢相关指标^[7]。本研究结果表明活化铁尾砂和镁改性生物炭配施提高了水稻幼苗干物质的合成和积累,使水稻幼苗的株高、根长、根冠比和单株干质量相比对照增加。尤其Fe-BCF处理组对水稻促生效果优于其他处理组,使水稻幼苗生长茁壮。其原因为生物炭经过改性后孔隙增大,结构粗糙,表面官能团发生变化,尤其含氧官能团降低,生物炭的吸附能力和离子交换能力增强,使活化铁尾砂-镁改性生

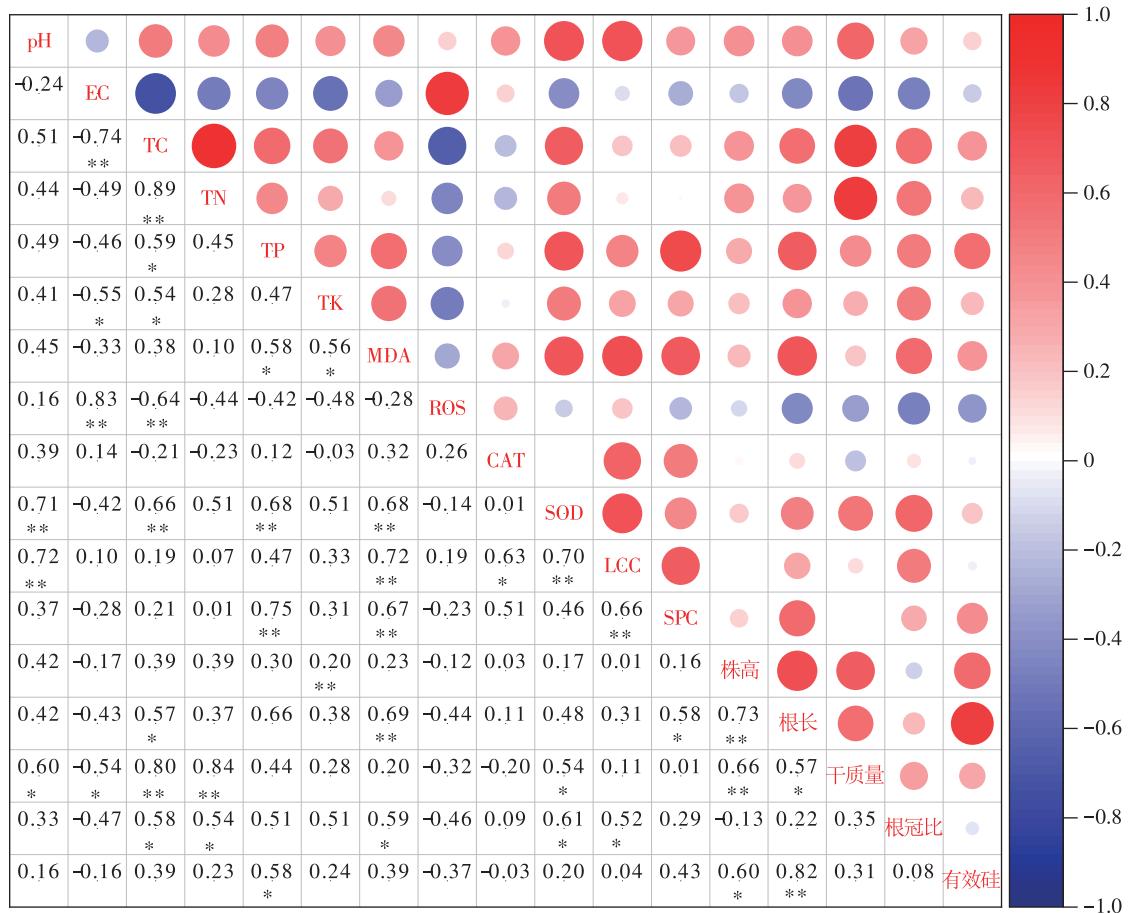
表2 不同处理组盐碱土壤pH、EC和元素含量

Table 2 Saline soil pH, EC, and element contents in different treatments

采样时间 Sampling time	指标 Index	CK	Fe-F	BCF	Fe-BCF	Si-BCF
15 d	pH	6.82±0.02c	7.26±0.05b	7.29±0.10b	7.35±0.06ab	7.41±0.03a
	EC/(S·m ⁻¹)	1.78±0.13a	1.64±0.02b	0.63±0.04d	0.74±0.04cd	0.82±0.01c
	TC/%	1.12±0.04d	1.48±0.01d	2.05±0.08b	2.18±0.04a	1.49±0.13c
	TN/%	0.10±0.00c	0.10±0.00c	0.11±0.00b	0.12±0.00a	0.12±0.01ab
	TP/(mg·kg ⁻¹)	126.67±13.77c	290.00±37.83b	320.00±34.14ab	372.50±37.75a	387.50±35.27a
	TK/(mg·kg ⁻¹)	137.00±6.42b	165.08±61.31ab	274.75±80.40a	272.00±42.72a	235.33±84.80ab
	有效硅/(mg·kg ⁻¹)	98.67±3.23d	131.64±1.79c	100.67±3.50d	167.37±1.56a	160.47±2.82b
30 d	pH	7.26±0.02c	7.26±0.05b	7.29±0.10b	7.55±0.06a	7.37±0.02b
	EC/(S·m ⁻¹)	1.78±0.13a	1.88±0.04a	0.63±0.17c	0.74±0.04cd	0.73±0.04c
	TC/%	1.19±0.01c	1.14±0.01c	1.90±0.30b	2.33±0.10a	1.68±0.07b
	TN/%	0.11±0.01c	0.11±0.00c	0.12±0.01b	0.14±0.01a	0.12±0.00b
	TP/(mg·kg ⁻¹)	106.67±61.05b	204.17±73.24ab	259.17±17.56a	281.67±43.04a	274.17±59.39a
	TK/(mg·kg ⁻¹)	120.50±16.05a	129.08±78.02a	247.42±88.90a	235.25±88.14a	215.42±88.33
	有效硅/(mg·kg ⁻¹)	87.86±4.10d	126.88±2.62c	92.93±3.82d	160.37±2.16a	148.73±1.15b

注:不同小写字母表示同一时间不同处理组之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level among different treatment groups at the same time.



*, P<0.05; **, P<0.01。

图6 水稻幼苗各指标相关性分析

Figure 6 Correlation analysis of rice seedling indices

物炭复合材料含有更加丰富的碳、氮和硅等植物所需的营养元素,提高了土壤TC、土壤有效硅和TN含量,而TC、TN和有效硅是提升水稻幼苗干物质积累及根长的关键因素,所以使水稻幼苗的根长优势突出,碳氮代谢旺盛,有利于水稻幼苗生长^[20]。硅是水稻必需元素,对于水稻的生长发育极其重要,能增加水稻植株的机械强度和韧性^[21],从而提高水稻的抗逆性。本研究中活化后的铁尾砂中硅元素进入土壤,增加了土壤的有效硅含量。活化铁尾砂与镁改性生物炭材料配施条件下,硅炭复合增加了土壤中有效硅含量和水稻植株对硅的吸收和利用^[22-23],使水稻幼苗保持良好的根系生长环境^[19],提高了水稻根系活力,增加了水稻幼苗对盐碱土壤中养分的吸收利用,进一步促进了水稻幼苗干质量积累,从而使水稻幼苗的植株更加茁壮,有利于水稻在盐碱地的生长发育。综上,活化铁尾砂-镁改性生物炭配施对于盐碱土壤水稻幼苗的形态学构建有较好的促进作用。

3.2 活化铁尾砂和镁改性生物炭配施对水稻幼苗期生理学的影响

植物内部的代谢物质对于胁迫条件下植物的生长有重要指示作用,其中ROS、MDA、CAT和SOD含量的变化可以直接反映植物的抗性生理指标^[24]。ROS的不断积累,会损伤细胞结构与功能,诱发膜脂过氧化^[25]。MDA是膜脂过氧化重要的产物之一,其MDA含量的变化表明了膜脂过氧化程度,间接反映作物膜系统受损程度。盐碱土可使作物的叶片面积、叶绿素含量和气孔导度的数量减小,扰乱作物中的电势平衡和营养平衡^[4],导致作物的光合作用受阻,渗透缺水,细胞离子失衡,产生大量活性氧(ROS),加剧了膜脂过氧化,造成作物代谢紊乱^[25]。本研究中Fe-BCF组提高了水稻幼苗对盐胁迫的抵抗力,与CK相比,水稻幼苗叶片的MDA和ROS的含量显著降低,减缓了ROS对水稻幼苗细胞结构与功能的损伤,降低了膜脂过氧化。CAT与SOD是植物抗氧化酶系统中

的关键酶,可以通过催化植物体组织与器官内超氧阳离子所含自由基发生相应的歧化反应,消除自由基对植物细胞的氧化伤害^[24]。施加 Fe-BCF 后,水稻叶片中 CAT 和 SOD 酶活性显著增加,水稻幼苗的生理代谢加强,使水稻幼苗的抗氧化能力增强,减缓了盐碱土壤对水稻幼苗的生长胁迫。水稻施硅也可以促进脂膜脱氧化作用,延缓功能叶片衰老^[5]。本实验 Fe-BCF 处理组中叶绿素和可溶性蛋白的含量与 CK 相比显著提高,其原因是 Fe-BCF 活化后的铁尾砂中硅元素和镁改性生物炭表面有机小分子参与了酶代谢和蛋白合成,影响了水稻幼苗的生理过程,促进了水稻幼苗的生长发育^[26]。另外,镁改性生物炭孔隙粗大,官能团丰富,可以吸附盐离子,直接减缓盐碱胁迫,而其富含的营养元素可以被水稻幼苗利用,调节水稻幼苗的生理代谢活动,使水稻幼苗抗氧化能力增加,抵抗盐碱土壤中高盐碱的生理危害,提高水稻幼苗的叶绿素和蛋白的合成等生理过程,有利于水稻幼苗生长。

3.3 活化铁尾砂和镁改性生物炭配施对盐碱土的影响

盐碱土受盐分的影响通常缺乏氮、磷和钾,高的盐分也会对微量元素的可用性产生不利影响。生物炭作为农业实践中很有前途的土壤改良剂,能够减少土壤养分的损失,同时含有大量营养元素,改善土壤环境^[26]。本研究表明,施入活化铁尾砂和镁改性生物炭配施材料导致盐碱土壤的 TC、TN、TP、TK 和有效硅含量显著提高。其主要原因因为配施材料中含有丰富的营养元素和矿质成分,施入后使盐碱土壤养分含量增加,同时改性后生物炭的孔隙结构和表面官能团更丰富,吸附能力增强,盐碱土壤中的营养元素被吸附缓慢释放,有效降低土壤中养分元素的淋溶损失^[27]。王宁等^[28]研究表明生物炭能够改变微生物生存环境、土壤磷酸酶活性等来影响土壤磷钾转化。配施材料改善了盐碱土壤中养分环境,使参与总磷和总钾反应的酶活性发生变化,改变了土壤总磷和总钾的转化,从而影响土壤总磷和总钾的含量^[29-30]。与 CK 相比,Fe-BCF 处理组盐碱土壤 pH 提高,EC 降低,TC 与 pH 显著正相关,与 EC 显著负相关,说明配施材料本身的碱性属性提高了盐碱土壤 pH,而其吸附性可以吸附盐碱土壤中的 Na⁺,降低了土壤电导率^[31]。综上,盐碱土壤中添加活化铁尾砂和镁改性生物炭配施材料使盐碱土壤的性质和养分含量发生变化,能改善土壤环境。

3.4 土壤理化性质与形态生理指标相关性

活化铁尾砂和镁改性生物炭配施材料可以直接

提供营养物质,同时自身独特的性质能够诱导土壤性质的改善^[25],硅炭复合有利于水稻前期营养元素的吸收利用和生理代谢^[32]。通过相关性分析发现,EC 与 ROS 和 CAT 呈正相关,与其他的形态指标、生理指标和土壤指标呈负相关。SOD 与水稻幼苗叶绿素含量、干质量和根冠比显著正相关,ROS 与水稻幼苗叶绿素含量、可溶性蛋白含量、株高、根长、干质量和根冠比呈负相关。TC 和 TN 与水稻幼苗生物量呈显著正相关,与水稻叶片的 MDA 和 ROS 呈显著负相关,与 SOD 呈显著正相关,表明配施材料施入盐碱土壤后吸附盐碱土壤中的 Na⁺等阳离子和释放了碳氮等营养元素,改善了土壤环境,对水稻幼苗胁迫减弱,同时水稻幼苗吸收土壤中营养元素和矿质成分,自身的抗氧化酶活性增强,提高水稻幼苗抗氧化能力,进一步促进水稻幼苗抵抗盐碱土壤生理危害,使水稻幼苗抗逆性增加,促进叶绿素和蛋白质等合成,增强水稻幼苗光合作用等生理过程,使水稻幼苗干物质积累,形成良好的正向作用,有利于水稻幼苗生长。

3.5 展望

尽管本研究探究了活化铁尾砂和镁改性生物炭配施对水稻幼苗酶活及土壤理化性质的影响,初步证明了活化铁尾砂与镁改性生物炭配施可以促进盐碱地水稻生产,但其对水稻分蘖期、抽穗期和成熟期的水稻生理生化指标及土壤的影响还需要通过长期、系统的实验验证;由于年际间效应和环境变化等综合因素影响,活化铁尾砂和镁改性生物炭配施对水稻品质及土壤根际生态的作用机制还应通过田间试验进行系统的研究和分析。

4 结论

(1)活化铁尾砂-镁改性生物炭材料性能优越,相较于其他生物炭材料孔隙大,表面更加粗糙,对于养分的吸附能力强,表面的官能团丰富。

(2)水稻盆栽中添加 1% 的活化铁尾砂-镁改性生物炭材料后改变了盐碱土壤性质和养分含量,影响水稻幼苗养分吸收利用,进而调节水稻幼苗的酶活性,增加了水稻自身的抗逆性和耐盐性,促进水稻幼苗株高和根长生长及干物质积累,使盐碱土中水稻幼苗生长更加茁壮。

(3)水稻盆栽中添加 1% 活化铁尾砂-镁改性生物炭材料到盐碱土中改善了盐碱土壤环境,使盐碱土对水稻幼苗的生长胁迫减弱,有利于盐碱土中水稻幼苗生长。

参考文献:

- [1] 杜学军,胡树文. 基于文献计量分析的近30年国内外盐碱地研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(18):236–239, 242. DU X J, HU S W. Research progress of saline-alkali land at home and abroad over the past 30 years based on bibliometric analysis[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(18):236–239, 242.
- [2] 王康君,樊继伟,陈凤,等. 植物对盐胁迫的响应及耐盐调控的研究进展[J]. 江西农业学报, 2018, 30(12):31–40. WANG K J, FAN J W, CHEN F, et al. Research advances in response of plants to salt stress and regulation of salinity tolerance[J]. *Journal of Jiangxi Agriculture*, 2018, 30(12):31–40.
- [3] ZHANG N, ZHAO B, ZHANG H J, et al. Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus L.*) [J]. *Journal of Pineal Research*, 2013, 54(1): 15–23.
- [4] ZHANG H, LI D, ZHOU Z, et al. Soil water and salt affect cotton (*Gossypium hirsutum*, L.) photosynthesis, yield and fiber quality in coastal saline soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187:112–121.
- [5] 袁源远,颜晓,陈晨,等. 硫、硅肥配施对铜污染下水稻幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(6):1220–1231. YUAN Y Y, YAN X, CHEN C, et al. Effects of sulfur and silicon fertilizers on growth and physiological characteristics of rice seedlings under copper pollution[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(6):1220–1231.
- [6] 刘莹. 生物炭对土壤保水性的影响研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2020: 16–44. LIU Y. Study on the effect of biochar on soil water retention[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020:16–44.
- [7] ZHANG P, BING X, JIAO L. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431P1:133904.
- [8] 黄晶,孔亚丽,吴龙龙,等. 生物炭调控盐胁迫下水稻幼苗耐盐性能[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3):627–634. HUANG J, KONG Y L, WU L L, et al. Biochar regulates the salt tolerance of rice seedlings under salt stress[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 40(3):627–634.
- [9] LUO W C, QIAN L, LIU W W, et al. A potential Mg-enriched biochar fertilizer: excellent slow-release performance and release mechanism of nutrients[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768:144454.
- [10] 吴行,郑琴,张帅,等. 镁改性生物炭配施磷肥对红壤磷有效性及小麦产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022 (3):84–90. WU H, ZHENG Q, ZHANG S, et al. Effect of combined application of magnesium modified biochar and phosphorus fertilizer on phosphorus availability and wheat yield in red soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022 (3):84–90.
- [11] 徐伟,季索菲. 提取方法对叶绿素含量的影响[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2022, 22(4):56–59. XU W, JI S F. Effect of different extraction methods on chlorophyll content[J]. *Journal of Langfang Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 22(4):56–59.
- [12] 曲春香,沈颂东,王雪峰,等. 用考马斯亮蓝测定植物粗提液中可溶性蛋白质含量方法的研究[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2006, 22(2):82–85. QU C X, SHEN S D, WANG X F, et al. Method research of measuring soluble protein contents of plant rough extraction using coomassie brilliant blue[J]. *Journal of Suzhou University (Natural Science Edition)*, 2006, 22(2):82–85.
- [13] 丛军,徐杰,任飞,等. 小麦苗中超氧化物歧化酶(SOD)提取条件的优化研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(4):213–218. CONG J, XU J, REN F, et al. Study on optimization of SOD extraction conditions from wheat seedlings[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(4):213–218.
- [14] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994(3):207–210. ZHAO S J, XU C C, ZOU Q, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. *Plant Physiology Communications*, 1994 (3):207–210.
- [15] 彭建,王丹英,徐春梅,等. 钼酸铵法测定水稻过氧化氢酶活性[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16):61–64. PENG J, WANG D Y, XU C M, et al. Ammonium molybdate method for detecting the activities of rice catalase[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 (16): 61–64.
- [16] 林金明,屈锋,单孝全. 活性氧测定的基本原理与方法[J]. 分析化学, 2002, 30(12):1507–1514. LIN J M, QU F, SHAN X Q. Determinations of active oxygen species and their basic principles[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2002, 30(12):1507–1514.
- [17] 陈玉. 电位法测定土壤中pH值[J]. 农村实用技术, 2019(10):104. CHEN Y. Determination of soil pH by potentiometry[J]. *Rural Practical Technology*, 2019 (10):104.
- [18] 吕康,李优琴,倪晓璐,等. 超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法测定土壤中18种元素[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(2):123–128. LÜ K, LI Y Q, NI X L, et al. Determination of eighteen elements in soil by inductively coupled plasma optical emission spectrometry with super microwave digestion[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(2):123–128.
- [19] 占国艳,卢信,潘晓威,等. 不同因素对柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法测试土壤有效硅的影响及优化措施[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13 (6):609–615. ZHANG Y, LU X, PAN X W, et al. Influence of different factors on the detection of available silicon in soil by citric acid leaching-silica molybdenum blue colorimetric method and its optimization measures[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(6):609–615.
- [20] 刘伟. 生物炭肥对水稻苗期生长发育的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020(11):31–34. LIU W. Effect of biochar on rice seedlings growth [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2020 (11):31–34.
- [21] 吴倩. 不同阶段水稻施用硅肥对其生理特性及经济效益的影响[J]. 基层农技推广, 2022, 10(2):65–67. WU Q. Effects of silicon fertilizer application on physiological characteristics and economic benefits of rice at different stages[J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2022, 10(2):65–67.
- [22] 宁川川,陈悦桂,柳瑞,等. 减氮配施秸秆生物炭对双季稻产量和硅、氮营养的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4):993–1001. NING C C, CHEN Y G, LIU R, et al. Effects of N fertilizer reduction combined with straw biochar application on the yield, Si, and N nutri-

- tion of double-cropping rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4):993–1001.
- [23] WANG Y F, XIAO X, ZHANG K, et al. Effects of biochar amendment on the soil silicon cycle in a soil–rice ecosystem[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 248:823–833.
- [24] 高继平, 隋阳辉, 张文忠, 等. 生物炭对水稻秧苗生长及内源激素的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2):145–151. GAO J P, SUI Y H, ZHANG W Z, et al. Effects of biochar on seedling growth and endogenous hormone of rice[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(2):145–151.
- [25] KORAI P K, XIA X, LIU X, et al. Extractable pool of biochar controls on crop productivity rather than greenhouse gas emission from a rice paddy under rice–wheat rotation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:802.
- [26] 王丽娜, 杨瑛, 杜苏. 生物炭施入对盐碱土壤影响的研究现状[J]. 中国农学通报, 2022, 38(8):81–87. WANG L N, YANG Y, DU S. Effects of biochar application on saline–alkali soil: research status[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(8):81–87.
- [27] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):333–338. LI Z R, WEI G L. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):333–338.
- [28] 王宁, 焦晓燕, 武爱莲, 等. 生物炭对土壤磷、钾养分影响研究进展[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9):1402–1405, 1420. WANG N, JIAO X Y, WU A L, et al. Research advances on effects of biochar application on soil phosphorus and potassium[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(9):1402–1405, 1420.
- [29] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同秸秆生物炭对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(9):2113–2119. HUANG Y F, CHEN G F, XIONG L M, et al. Effects of different straw biochars on rice growth and soil nutrients[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(9):2113–2119.
- [30] 田阿林, 雷涛, 邹应斌, 等. 施用生物炭对水稻生长生理特性及产量的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(3):25–29. TIAN A L, LEI T, ZOU Y B, et al. Effects of biochar addition on growth and physiological characteristics and yield of rice[J]. *China Rice*, 2018, 24(3):25–29.
- [31] FIELD J L, KESKE C M H, BIRCH G L, et al. Distributed biochar and bioenergy coproduction: a regionally specific case study of environmental benefits and economic impacts[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2):177–191.
- [32] 吴云艳. 不同炭硅处理对水稻抗倒伏特性和产量的影响[J]. 中国稻米, 2022, 28(6):49–53, 58. WU Y Y. Effects of different biochar and silicon treatments on lodging resistance properties and yield of rice[J]. *China Rice*, 2022, 28(6):49–53, 58.
- [33] 严青青, 张巨松, 徐海江, 等. 盐碱胁迫对海岛棉幼苗生物量分配和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7632–7640. YAN Q Q, ZHANG J S, XU H J, et al. Effects of saline–alkali stress on biomass allocation and root morphology of sea Island cotton seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7632–7640.
- [34] 韩东洺, 张喜洋, 庞秋颖, 等. 萌芽菊芋块茎对盐碱土壤胁迫的生理响应[J]. 生态学报, 2017, 37(4):1244–1251. HAN D M, ZHANG X Y, PANG Q Y, et al. Physiological response of sprouting *Jerusalem artichoke* tubers to saline–alkali stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4):1244–1251.
- [35] 段文静, 孟妍君, 江丹, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花幼苗形态及抗氧化系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(1):92–104. DUAN W J, MENG Y J, JIANG D, et al. Effects of exogenous melatonin on the morphology and antioxidant enzyme activities of cotton seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 2022, 30(1):92–104.

(责任编辑:叶飞)