

多金属阳离子球磨改性生物质炭对苏打盐碱土控盐改良效果与机制研究^①

孙 凯^{1,2}, 方国东^{2,3*}, 樊广萍^{4*}, 陈 宁², 张新逸^{1,2}

(1 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001; 2 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 3 中国科学院大学南京学院, 南京 211135; 4 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部盐碱土改良与利用(滨海盐碱地)重点实验室, 南京 210014)

摘 要: 基于改性生物质炭中负载阳离子可通过交换作用置换盐碱土中 Na^+ 的机理, 本研究以玉米秸秆生物质炭为载体, 通过球磨技术复合脱硫石膏(DG)、过磷酸钙(SSP)和聚合硫酸铝铁(PAFC), 制备 3 种改性生物质炭(BCDG、BCSSP、BCPAFC), 系统评价其对苏打盐碱土的改良效应与作用机制。结果表明, 球磨改性显著改变了生物质炭的理化性质, 其中 BCPAFC 具有高度多孔结构、丰富的无定形金属羟基复合物及更高的极性和亲水性。培养试验显示, BCPAFC 能有效调节盐碱土酸碱性, 将土壤 pH(初始 8.25)稳定在中性范围(6.49–6.88), 并维持较高电导率(0.50–0.55 mS/cm), 同时提升溶液中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度, 促进 Na^+ 的持续释放与淋洗, 使钠吸附比(SAR)降至 2.73–4.24。另外, 培养 12 d 后, BCPAFC 可使土壤可交换性钠(ENa^+)降低 31.7%, 阳离子交换量(CEC)提升 86.4%, 交换性钠饱和度(ESP)降低 63.4%, 表明其在重塑土壤可交换离子平衡方面具有显著优势。微生物群落分析进一步显示, BCPAFC 能提升细菌 α 多样性, 富集放线菌门和假单胞菌门等耐盐类群, 并增强碱性磷酸酶与脲酶活性。相关性分析表明, 土壤 pH、盐基离子及碳、氮养分是驱动微生物群落结构演变的主要环境因子。综上, BCPAFC 通过离子交换、专性吸附、结构调控及微生物激活等多重机制协同作用, 可实现苏打盐碱土的快速改良与生态功能恢复, 为生物质炭基土壤修复材料的研发提供重要理论依据与技术支持。

关键词: 盐碱地改良; 改性生物质炭; 阳离子交换; 机械球磨

中图分类号: S156.4; S154.3 文献标志码: A

Ameliorative Effects and Mechanisms of Multi-Metal Cation Ball-Milled Biochar on Soda Saline-Alkali Soils

SUN Kai^{1,2}, FANG Guodong^{2,3*}, FAN Guangping^{4*}, CHEN Ning², ZHANG Xinyi^{1,2}

(1 School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China; 4 Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Coastal Saline-Alkali Lands), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the mechanism whereby cations loaded onto modified biochar can displace Na^+ in saline-alkali soils via ion exchange, this study used corn-stover biochar as the carrier and employed ball-milling to composite it with flue-gas desulfurization gypsum (DG), single superphosphate (SSP), and poly-aluminum ferric sulfate (PAFC), thereby preparing three modified biochars (BCDG, BCSSP, and BCPAFC) and systematically evaluating their amelioration effects and underlying mechanisms in soda saline-alkali soil. The results showed that ball-milling modification markedly altered the physicochemical properties of biochar; among the three, BCPAFC exhibited a highly porous structure, abundant amorphous metal hydroxyl complexes, and higher polarity and hydrophilicity. Incubation experiments indicated that BCPAFC effectively regulated soil alkalinity, stabilizing soil pH (initially 8.25) within a near-neutral range (6.49–6.88), while maintaining a relatively high electrical

①基金项目: 中国科学院科研项目资助。

* 通信作者(gdfang@issas.ac.cn; fanguangping@jaas.ac.cn)

作者简介: 孙凯(2000—), 男, 安徽无为, 硕士研究生, 主要从事生物质炭基材料的定向修饰与高效阻控盐碱技术研究。E-mail: sk18855354959@163.com

conductivity (0.50–0.55 mS/cm). Meanwhile, it increased Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations in soil solution, promoted sustained Na^+ release and leaching, and reduced sodium adsorption ratio (SAR) to 2.73–4.24. In addition, after 12 days of incubation, BCPAFC decreased exchangeable sodium (ENa^+) by 31.7%, increased cation exchange capacity (CEC) by 86.4%, and reduced exchangeable sodium percentage (ESP) by 63.4%, demonstrating a pronounced advantage in reshaping soil exchangeable-ion equilibrium. Microbial community analysis further revealed that BCPAFC enhanced bacterial α -diversity, enriched salt-tolerant taxa such as Actinobacteriota and Pseudomonadota (Proteobacteria), and increased alkaline phosphatase and urease activities. Correlation analysis suggested that soil pH, base cations, and carbon–nitrogen nutrients were the primary environmental drivers governing microbial community succession. Overall, BCPAFC enables rapid amelioration and ecological function recovery of soda saline–alkali soil through the synergistic action of multiple mechanisms, including ion exchange, specific adsorption, structural regulation, and microbial activation, providing important theoretical and technical support for the development of biochar-based soil remediation materials.

Key words: Saline–alkali soil amelioration; Modified biochar; Cation exchange; Mechanical ball milling

土壤盐碱化是制约全球农业可持续发展和生态安全的主要障碍之一^[1]。在各类盐碱土中,苏打盐碱土因其独特的盐碱复合障碍,被公认为治理难度最大的类型。其特殊性主要体现在:以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主的盐分组成,导致土壤具有高 pH、高钠吸附比 (SAR) 的特征;高浓度的交换性钠离子引起土壤胶体分散,造成土壤结构板结、通透性差,严重抑制水分入渗、作物根系生长及微生物活动^[2]。与以中性盐(如 NaCl 、 Na_2SO_4) 为主的氯化型或硫酸盐型盐碱土相比,苏打盐碱土的强碱性与物理结构的同步恶化,使其改良过程更为复杂,易在改良后发生返盐返碱^[3]。我国东北松嫩平原作为全球三大苏打盐碱土集中分布区之一,其盐碱地面积达 233.3 万 hm^2 ,治理需求尤为迫切^[4]。因此,研发能够同步调控土壤化学性质与物理结构的改良材料,对于提升苏打盐碱土治理效果具有重要的理论与实践意义。

为应对上述挑战,近年来研究者已开发多种改良策略。物理方法(如灌排、客土)虽可在短期内改善土壤环境,但存在成本高和易返盐等问题^[5];化学改良中,石膏及脱硫石膏(DG)通过提供 Ca^{2+} 置换 Na^+ 来降低交换性钠百分比(ESP),是应用最广泛的盐碱土改良材料之一。然而,在渗透性差的苏打盐碱土中,其 Ca^{2+} 迁移受限,且对高 pH 的调节作用较弱^[6]。过磷酸钙(SSP)除作为钙源外,还能提供磷酸根,具有一定的酸化作用,有助于降低土壤 pH 并补充磷素养分^[7]。聚合硫酸铝铁(PAFC)作为无机高分子絮凝剂,其水解产生的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 及 H^+ 可促进土壤胶体絮凝、改善团聚结构,并协同降低土壤碱性,在改善土壤物理通透性方面表现出独特潜力^[5, 8]。生物方法如种植耐盐植物及利用微生物修复方式,虽环境友好,但改良周期较长^[3]。

生物质炭,因其多孔结构、丰富的表面官能团及环境稳定性,被视为具有潜力的土壤改良载体^[9]。研究表明,生物质炭可改善土壤团聚结构、调节酸碱性质并提升养分有效性^[10],同时通过吸附和交换作用降低 Na^+ 的有效性,并为土壤微生物提供良好生境^[11]。然而,原始生物质炭存在阳离子交换容量(CEC)有限、对 Na^+ 的吸附能力不强,以及因其自身碱性可能短期内加剧苏打盐碱土的高 pH 等问题。因此,对生物质炭进行金属负载改性成为提升其盐碱土改良效能的重要途径。传统金属负载方法主要依赖化学浸渍结合热解,但常存在负载不均、金属结合力弱、易淋失及潜在二次污染等问题^[12–13]。相比之下,球磨技术作为一种高效机械化学改性方法,可在破碎生物质炭的同时实现金属离子的嵌入。该技术不仅显著提升生物质炭的比表面积和活性位点数量,还能通过表面络合作用增强金属在碳骨架上的稳定固定,降低淋失风险^[14]。

尽管上述 3 种改良材料(DG、SSP、PAFC)在盐碱土改良中均已得到一定研究,但现有工作多集中于单一材料或传统施用方式,缺乏将其与生物质炭通过球磨技术进行结合,并系统比较其对苏打盐碱土改良效果与机制差异的研究。特别是,球磨改性如何影响不同金属阳离子(Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 PO_4^{3-} 等)在生物质炭上的赋存形态与释放行为,进而如何差异性地调控苏打盐碱土的化学性质、物理结构及微生物环境,至今尚不明确。

基于此,本研究分别采用脱硫石膏(DG)、过磷酸钙(SSP)和聚合硫酸铝铁(PAFC)作为改性剂,利用球磨技术制备 3 种相应的金属阳离子改性生物质炭,系统评估并从机制层面解释生物质炭改性对苏打盐碱土的综合改良效应,为盐碱地治理提供理论依据和

新型材料支撑。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤为采自吉林省大安市红岗子乡(123° 85'E, 45°60'N)休耕地 0~20 cm 表层的苏打盐碱土。采样区域地处松嫩平原腹地,是该类土壤典型集中分

布区之一,区域内气候属温带半干旱季风气候,年均气温约 4.5 °C,年降水量约 380 mm,蒸发量显著高于降水量,导致土壤盐分易在表层富集。采用系统布点法采样,在样地内均匀布设取样点,使用不锈钢土铲采集 0~20 cm 土层样品,将采集的样品充分混合后带回实验室,经自然风干,过 2 mm 筛,用于后续理化性质分析。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of tested soil

| pH | EC (mS/cm) | K ⁺ (mg/kg) | Na ⁺ (mg/kg) | Ca ²⁺ (mg/kg) | Mg ²⁺ (mg/kg) | Cl ⁻ (mg/kg) | SO ₄ ²⁻ (mg/kg) | CO ₃ ²⁻ (mg/kg) | HCO ₃ ⁻ (mg/kg) | CEC (cmol/kg) | ENa ⁺ (cmol/kg) | ESP (%) | SAR |
|------|---------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|--|--|------------------|-------------------------------|------------|------|
| 8.25 | 0.090 7 | 14.5 | 865 | 68.5 | 77.0 | 168 | 396 | 192 | 2 220.4 | 11.8 | 2.39 | 20.4 | 12.0 |

供试化学试剂及材料:三氯化六氨合钴([Co(NH₃)₆]Cl₃,纯度 99%)与乙酸铵(CH₃COONH₄,纯度 98%)均购自上海阿拉丁生物科技股份有限公司;脱硫石膏(DG)由河北敬业钢铁有限公司提供,呈灰白色粉末,粒径 30~60 μm,主要成分为二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O),pH 为 5.33;过磷酸钙(SSP,纯度 85%)购自天津市众联化学试剂有限公司,主要化学组分为磷酸二氢钙(Ca(H₂PO₄)₂)与硫酸钙(CaSO₄),全磷含量为 16%,pH 为 5.83;聚合硫酸铝铁(PAFC)由义乌市鑫邦环保有限公司提供,Al₂O₃ 含量为 16.5%,Fe 含量为 0.57%,pH 为 2.82。

1.2 改性生物质炭的制备与表征

原始生物质炭为玉米秸秆生物质炭(南京智融联科技有限公司)。其制备过程如下:将玉米秸秆机械破碎后置于炭化炉中,于 300 °C 条件下炭化 4 h,待自然冷却至室温后收集作为原料生物质炭。

改性生物质炭的制备采用干法球磨工艺。原始生物质炭分别与脱硫石膏(DG)、过磷酸钙(SSP)和聚合硫酸铝铁(PAFC)按质量比 1:1 混合均匀,在室温下以 300 r/min 的转速球磨 4 h,球料比设置为 3:1。球磨结束后,将所得样品密封于聚乙烯袋中保存,并分别命名为脱硫石膏改性生物质炭(BCDG)、过磷酸钙改性生物质炭(BCSSP)和聚合硫酸铝铁改性生物质炭(BCPAFC),用于后续试验。

改性生物质炭的 pH 和 EC 按液固比 20:1 采用 pH 计(FE28, Mettler Toledo, 瑞士)和电导率仪(FE38, Mettler Toledo, 瑞士)进行测定^[15]。采用场发射扫描电子显微镜(ZEISS Sigma360, 德国)表征生物质炭及改性材料的表面形貌和微观结构,所有样品在测试前均经溅射镀金处理,图像在高真空模式下采集。采用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D2 Phaser, 德国)分析生

物质炭改性前后的晶体结构及物相组成。测试使用 Cu Kα 辐射源(λ=1.5406Å),电压与电流分别设为 30 kV 和 10 mA;扫描范围为 10°~80°(2θ),步长为 0.02°。生物质炭中的 O、N、H 含量采用氧氮氢分析仪(EMGA-830, 日本)测定,C 含量采用碳硫分析仪(HIR-944, 中国)测定。

1.3 培养试验

通过摇瓶培养试验系统评价负载多金属阳离子的改性生物质炭对苏打盐碱土的改良效果。试验共设置 8 个处理组,分别为:空白对照(CK,不添加改良剂)、2.5% 原始生物质炭(BC)、3 种单一改良剂(DG、SSP、PAFC,均为 2.5% 添加量),以及 3 种复合改性生物质炭处理(BCDG、BCSSP、BCPAFC,均为 5% 添加量)。每个处理设置 3 个重复。

取 10 g 供试土壤,与过 1 mm 筛的改良材料按上述比例充分混合后装入 50 mL 离心管中。按照水土质量比 2.5:1 加入去离子水,随后将样品置于恒温振荡培养箱中,在 25 °C、150 r/min 条件下连续培养 12 d。该水土比用于构建土浆培养体系,以增强固液接触与传质过程,便于比较不同处理对溶液 pH、电导率(EC)、离子组成(Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺)和钠吸附比(SAR)等指标的短期调控效应。该体系主要用于机理阐释与材料初筛。分别在培养开始后 4、12 h 以及 1、3、5、7 和 12 d 进行破坏性取样,测定土壤溶液的 pH、EC、离子(Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺)浓度和 SAR。同时,在培养 4 h 和 12 d 测定土壤溶液中的总碳(TC)和可溶性有机氮(DON)。培养结束(12 d)后采集土壤样品,一部分新鲜土样保存于 4 °C 和 -80 °C 冰箱,分别用于土壤酶活性测定以及土壤微生物群落多样性分析;另取一部分土样风干后用于测定土壤交换性钠含量(ENa⁺)、阳离子交换量(CEC)和交换性钠百分比(ESP)。

1.4 土壤理化指标分析

供试土壤 pH 按水土质量比 2.5 : 1 配制悬浊液, 使用 pH 计(FE28, Mettler Toledo, 瑞士)测定; 土壤 EC 使用电导率仪(FE38, Mettler Toledo, 瑞士)测定(水土质量比 5 : 1)。培养试验土壤溶液 pH 与 EC 同样使用对应仪器测定。土壤溶液 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 浓度采用原子吸收火焰分光光度法测定; Cl^- 和 SO_4^{2-} 采用离子色谱法测定; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用酚酞-溴酚蓝双指示剂酸碱滴定法测定^[16]。 ENa^+ 采用 $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{NH}_4\text{OH}$ 火焰光度法测定; 土壤溶液 TC 与 DON 使用 TOC 分析仪(Elementar vario TOC select, 德国)测定; 土壤 CEC 采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定^[17]。土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶与脲酶活性均使用试剂盒(南京科默森生物科技有限公司)进行测定。

1.5 土壤微生物群落多样性分析

选取 CK、BC、PAFC 及 BCPAFC 共 4 组处理土壤进行微生物群落多样性分析。土壤总 DNA 提取后, 委托上海美吉生物医药科技有限公司基于 Illumina Novaseq6000 测序平台, 对细菌 16S rDNA 的 V3~V4 高变区进行扩增与双末端测序。所用引物为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACNVGGGTWCTAAT-3')。后续微生物群落多样性分析基于美吉云平台完成(<https://v.majorbio.com/project-center/data/origin>)。

1.6 数据统计与分析

钠吸附比(SAR)和交换性钠百分比(ESP)根据 Rietz 和 Hayne^[18]计算:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}} \quad (1)$$

式中: Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为土壤中水溶性形态浓度 (mmol/L)。

$$\text{ESP} (\%) = \frac{\text{ENa}^+}{\text{CEC}} \times 100 \quad (2)$$

式中: ENa^+ 为土壤中交换性 Na^+ 含量 (cmol/kg), CEC 为土壤阳离子交换量 (cmol/kg)。

试验数据以 3 次重复的平均值表示。采用 Excel 2019 整理数据, 使用 OriginPro 2024 绘图, 并利用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 通过邓肯法进行多重比较, 显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 改性生物质炭特性表征

不同生物质炭的理化性质见表 2。与原始生物质炭(BC)相比, 经不同改良剂球磨处理后的生物质炭在 pH、EC 和元素组成方面均发生明显变化。改性后生物质炭的 pH 普遍降低, 其中 BCPAFC 的酸性最强 (pH=3.82), 较 BC 下降 4.18 个单位; BCDG 和 BCSSP 的 pH 分别降至 6.93 和 6.32。同时, 所有改性生物质炭的 EC 显著升高, BCDG、BCSSP 和 BCPAFC 的 EC 分别为 BC 的 12.89 倍、8.34 倍和 19.93 倍, 表明改性显著提高了生物质炭的可溶性盐含量。

在元素组成方面, 改性生物质炭的 C 含量明显下降, BCDG、BCSSP 和 BCPAFC 分别降低 33.87%、33.64% 和 41.71%; O 含量则显著升高, 其中 BCPAFC 的 O 含量为 BC 的 4.9 倍; H 与 N 含量变化不显著。原子比分析显示, 各改性生物质炭的 H/C、O/C 及 (O+N)/C 比值均高于 BC, 其中 BCPAFC 的原子比最高, 分别为 BC 的 6.35 倍、8.23 倍和 8.04 倍。原子比的提高表明改性后生物质炭极性和亲水性增强, 且较高的 H/C 值反映其芳香性程度更高。

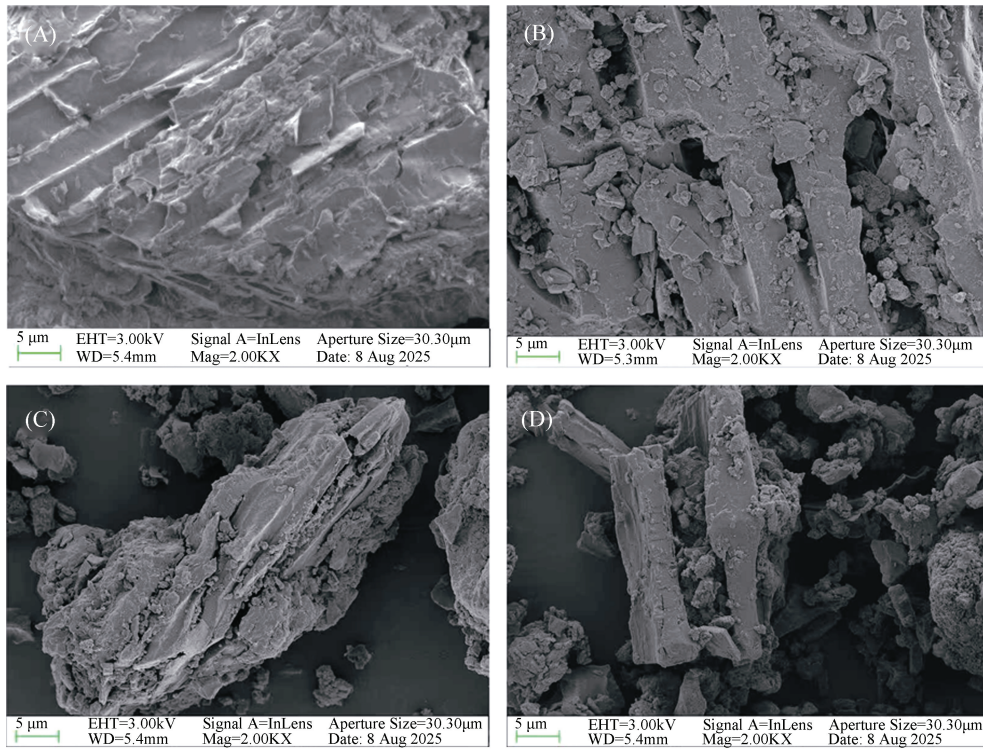
表 2 不同生物质炭的理化性质
Table 2 Physicochemical properties of different biochars

| 生物质炭 | pH | EC(mS/cm) | C(%) | H(%) | O(%) | N(%) | H/C | O/C | (O+N)/C |
|--------|------|-----------|------|------|------|-------|-------|------|---------|
| BC | 8.00 | 0.44 | 43.4 | 1.33 | 9.35 | 0.760 | 0.031 | 0.22 | 0.23 |
| BCDG | 6.93 | 5.67 | 28.7 | 1.50 | 18.4 | 0.398 | 0.052 | 0.64 | 0.66 |
| BCSSP | 6.32 | 3.67 | 28.8 | 2.57 | 25.7 | 0.629 | 0.089 | 0.89 | 0.91 |
| BCPAFC | 3.82 | 8.77 | 25.3 | 4.98 | 45.8 | 0.971 | 0.197 | 1.81 | 1.85 |

注: BC、BCDG、BCSSP、BCPAFC 分别表示 300 °C 制备玉米秸秆生物质炭及添加脱硫石膏、过磷酸钙、聚合硫酸铝铁的球磨改性生物质炭, 下同。

扫描电子显微镜(SEM)结果如图 1 所示。BC 表面相对平整, 孔隙结构发育不足, 呈不规则块状聚集, 表明其比表面积低、活性位点有限。BCDG 表面呈块状与片状复合结构, 整体致密平整, 伴随少量裂纹和

破碎颗粒。BCSSP 表面出现片层状和条带状结构, 局部破碎剥落, 孔隙数量增加, 表面粗糙度提升。BCPAFC 的结构变化最为显著, 表面高度多孔, 骨架破碎, 并附着大量絮状团聚体与裂隙, 整体结构疏松。



(A. 原始生物质炭; B. 脱硫酸石膏改性生物质炭; C. 过磷酸钙改性生物质炭; D. 聚合硫酸铝铁改性生物质炭)

图 1 不同生物质炭的扫描电子显微镜图谱(2 000×)

Fig. 1 Scanning electron micrographs of different biochar samples (2 000×)

球磨作用使其形成丰富的微孔与介孔,显著提高比表面积及活性位点数量。

综上所述, BC 的孔隙结构较弱、比表面积低、反应活性有限; BCDG 结构相对致密, 活性提升幅度较小; BCSSP 具有较为发育的孔隙结构, 具备一定的养分释放能力; BCPAFC 兼具高度多孔结构、高比表面积及金属改性优势, 是应用潜力较高的改性生物质炭材料。

X 射线衍射(XRD)结果如图 2 所示。BC 在 $2\theta=20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内呈宽化弥散峰, 显示其主要为无定形碳, 结晶度和石墨化程度较低。BCDG 在 $2\theta\approx 14.7^{\circ}$ 、 20.7° 、 23.4° 、 25.5° 、 29.1° 及 31.1° 处出现尖锐衍射峰, 与 $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 标准谱一致, 表明结晶良好。BCSSP 的衍射峰强度较弱, 在 $2\theta\approx 26^{\circ}$ 、 $29^{\circ}\sim 31^{\circ}$ 及 $34^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 处可识别出 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ 及少量残留石膏峰。峰形宽化说明其晶格发生畸变, 结晶度降低。BCPAFC 在 $2\theta=20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内仅呈宽缓弥散特征, 未见明显晶体峰, 其主要由无定形碳及低结晶度的金属(氧)氢氧化物组成。综上所述, BC 结晶性低、活性位点少; BCDG 结晶度高, 可稳定释放 Ca^{2+} ; BCSSP 结晶度适中, 兼具 Ca^{2+} 释放与磷释放能力; BCPAFC 为高度非晶态结构, 活性位点丰富, 在 Na^+ 置换与

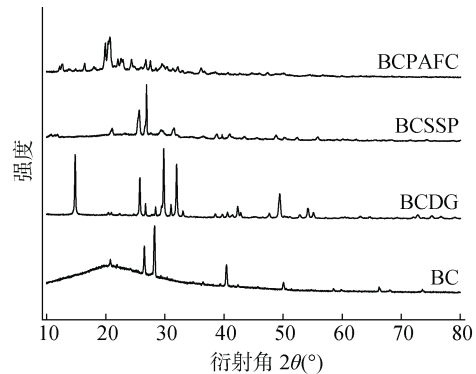


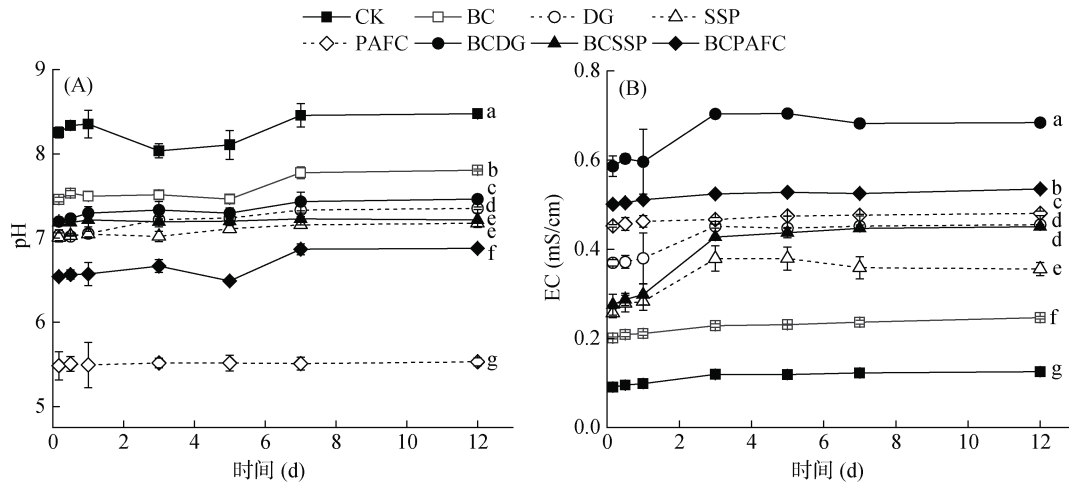
图 2 不同生物质炭 X 射线衍射谱图

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of different biochars

结构调控方面表现突出, 适用于盐碱土改良。

2.2 改性生物质炭对盐碱土平衡溶液化学特性的影响

在 12 d 的培养过程中, 不同改良剂处理对土壤 pH 与 EC 的影响如图 3 所示。各处理间土壤 pH 存在显著差异。对照(CK)在整个培养期保持最高的 pH 水平(8.04~8.48), 而单一 PAFC 处理则始终维持较低的 pH 水平(5.48~5.53)。与单一改良剂(DG、SSP、PAFC)相比, 添加生物质炭的处理(BCDG、BCSSP、BCPAFC)均使土壤 pH 稳定于接近中性范围内, 且均略高于相



(CK 表示对照; BC 表示添加原始生物质炭; DG、SSP、PAFC 分别表示添加脱硫石膏、过磷酸钙、聚合硫酸铝铁; BCDG、BCSSP、BCPAFC 分别表示添加脱硫石膏、过磷酸钙、聚合硫酸铝铁的球磨改性生物质炭。图中误差线为标准差(SD, $n=3$), 小写字母不同表示差异达 $P<0.05$ 显著水平。下同)

图 3 不同改良剂对溶液 pH 和 EC 的影响

Fig. 3 Effects of different amendments on solution pH and electrical conductivity (EC)

应单一改良剂处理。其中, BCPAFC 处理的 pH 介于 6.49~6.88, 在各类改性生物质炭处理中处于相对较低的水平, 较单一 PAFC 处理高 0.97~1.36 个单位, 表明该处理在加入酸性改良剂的同时仍具有较好的酸碱缓冲能力。

EC 对处理差异的反应更为敏感。CK 与 BC 处理的 EC 值最低, 始终保持在 0.10~0.25 mS/cm 范围内; BCDG 处理在第 3 天 EC 从 0.60 mS/cm 上升至 0.70 mS/cm, 并在后续阶段保持稳定。与单一改良剂或生物质炭处理相比, 复合改性生物质炭处理进一步提高了 EC 值: BCSSP 处理使 EC 从 0.27 mS/cm 增至 0.45 mS/cm; 而 BCPAFC 在整个培养期内均维持较高的 EC 水平 (0.50~0.55 mS/cm), 约为 BC 单独处理的 2.5 倍。

上述结果表明, 改性生物质炭可在降低土壤 pH 的同时促进可溶性离子的释放, 从而提升土壤溶液 EC 值。其中, BCPAFC 在调节土壤酸碱性与维持较高 EC 方面具有较为综合的调控效应, 显示出其在盐碱土改良中的潜在应用价值。

土壤上清液中 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度变化是评价盐碱土改良效果的关键指标, 图 4 展示了不同处理对这些离子浓度及钠吸附比(SAR)的影响。 Na^+ 浓度在培养初期(1~3 d)迅速升高, 随后逐渐下降(图 4A)。CK 处理的 Na^+ 浓度在整个培养期内均为最低 (156~296 mg/L)。BC 处理显著提高了 Na^+ 释放量。各单一改良剂处理(DG、SSP、PAFC)与相应改性生物质炭处理(BCDG、BCSSP、BCPAFC)的 Na^+ 浓度均高于 BC 处理, 且改性生物质炭处理的 Na^+ 浓度普遍高于其对应的单一改良剂处理, 说明改性生物质

炭具有更强的 Na^+ 释放能力。其中, BCPAFC 处理在整个培养期内均维持较高的 Na^+ 浓度, 表现出持续的 Na^+ 释出特征。

Ca^{2+} 浓度变化呈现明显的处理差异(图 4B)。CK 的 Ca^{2+} 浓度保持在较低水平(1.21~6.16 mg/L), BC 处理使其略有增加。BCDG 与 DG 处理的 Ca^{2+} 释放量最高, 显著高于其他处理; 其后依次为 BCPAFC 与 PAFC 处理, 而 BCSSP 与 SSP 处理的 Ca^{2+} 浓度最低。所有改性生物质炭处理的 Ca^{2+} 浓度均高于其对应的单一改良剂处理。BCPAFC 处理的 Ca^{2+} 浓度在整个培养期保持相对稳定的中高水平(352~442 mg/L), 约为 BC 处理的 8 倍, 表明其 Ca^{2+} 释放过程更为稳定且可控。 Mg^{2+} 浓度变化趋势与 Na^+ 类似, 在第 3~5 天达到峰值后逐渐下降(图 4C)。CK 与 BC 处理的 Mg^{2+} 浓度最低(2.1~18.6 mg/L); 各改性生物质炭处理的 Mg^{2+} 浓度均高于相应单一改良剂处理。其中, BCPAFC 处理的 Mg^{2+} 浓度最高, 在第 5 天达到 132 mg/L, 至培养结束时降至 32.54 mg/L。

不同处理对土壤钠吸附比(SAR)的影响如图 4D 所示。CK 处理的 SAR 在第 3 天达到最高值(18.06), 之后虽略有下降, 但仍维持在较高水平, 表明其钠盐累积程度较高。BC 处理显著降低了 SAR, 但仍高于其他改良剂处理。单一改良剂与改性生物质炭处理进一步降低了 SAR, 其值介于 1.91~5.23。其中, BCDG 处理的 SAR 最低, BCPAFC 与 BCSSP 处理的 SAR 在整个培养期内保持平稳且处于较低水平, 显示出较强的 Na^+ 调控能力。

综合来看, 改性生物质炭在促进 Na^+ 释放、提

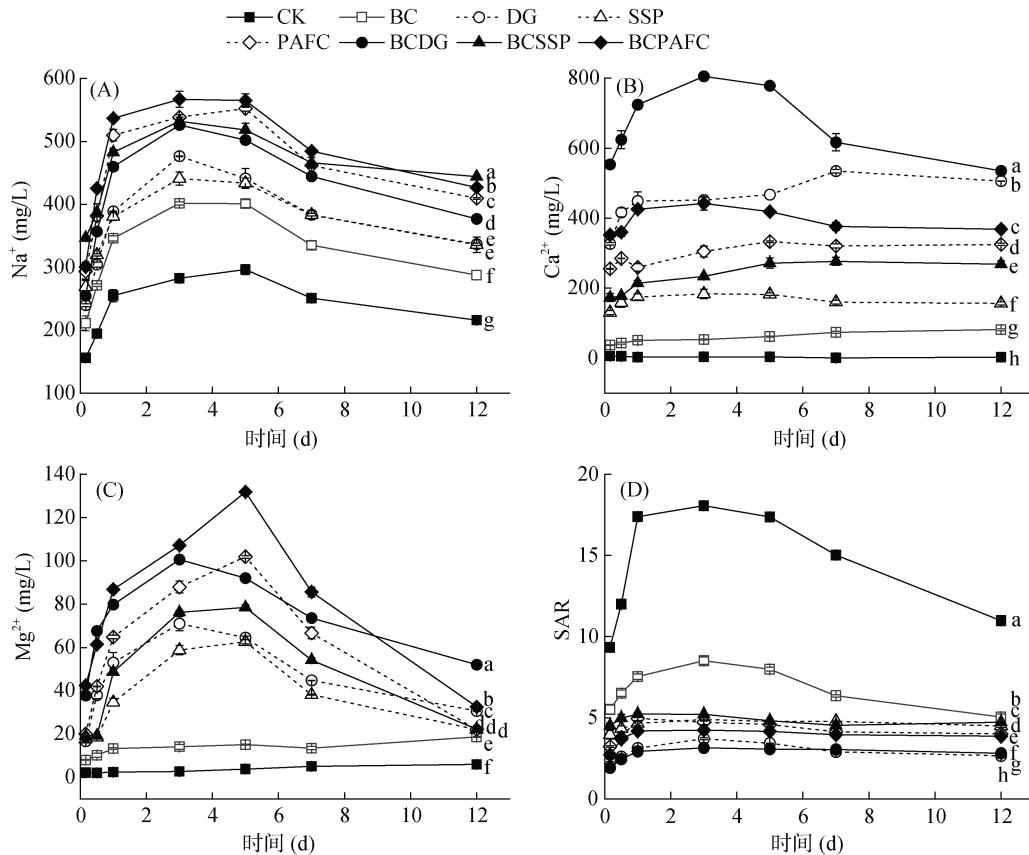


图 4 不同改良剂对溶液中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SAR 的影响
 Fig. 4 Effects of different amendments on Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and SAR in solution

高 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度以及降低 SAR 方面均优于单一改良剂与未改性生物质炭。其中, BCPAFC 处理表现出较为综合的改良效应: 其将土壤 pH 稳定在接近中性范围(6.49~6.88), 维持较高的电导率(0.50~0.55 mS/cm), 在培养过程中保持较高的 Na^+ 释放能力和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度, 同时将 SAR 控制在较低水平(2.73~4.24)。这些结果表明, BCPAFC 能够协同改善土壤酸碱环境、促进盐分离子迁移并增强离子平衡稳定性, 在盐碱土修复中展现出较高的应用潜力。

2.3 改性生物质炭对盐碱土 ENa^+ 、CEC 与 ESP 的影响

图 5 为培养试验结束时(12 d)不同处理对土壤 ENa^+ 、CEC 与 ESP 的影响。各处理均显著降低了土壤 ENa^+ 与 ESP, 同时显著提高了土壤 CEC($P < 0.05$)。在 ENa^+ 方面(图 5A), 与 CK(2.40 cmol/kg)相比, 所有改良处理均显著降低了 ENa^+ 含量。其中, BCPAFC 处理的 ENa^+ 含量最低(1.64 cmol/kg), 较 CK 降低了 31.7%, 且显著低于 BC、单一 PAFC 及另外两种改性生物质炭(BCDG、BCSSP)处理。这表明 BCPAFC 在降低土壤交换性 Na^+ 积累方面效果最为显著。CEC 的结果如图 5B 所示。CK 处理的 CEC 最低,

为 11.88 cmol/kg, BC 处理显著提升至 13.88 cmol/kg; 单一改良剂处理与 BC 处理间差异不显著; 而改性生物质炭处理较原始生物质炭及单一改良剂处理均显著提高, 其中, BCPAFC 处理的 CEC 最高, 为 22.15 cmol/kg, 较 CK 提高了 86.4%, 同时也显著高于 BCDG (17.57 cmol/kg) 和 BCSSP(16.59 cmol/kg) 处理。这一结果表明, BCPAFC 处理对提升土壤阳离子交换容量的作用最为突出。ESP 的变化趋势与 ENa^+ 一致(图 5C)。CK 的 ESP 最高, 为 20.24%; BC 处理显著降至 14.55%; 而 BCPAFC 处理进一步降至 7.41%, 较 CK 降低 63.4%, 且显著低于其他处理。

综上所述, 在培养结束时, BCPAFC 处理同步实现了最低的 ENa^+ 与 ESP 以及最高的 CEC, 表明其在促进 Na^+ 置换、降低交换性钠比例以及增强土壤阳离子交换能力方面具有更显著的改良效果。

2.4 改性生物质炭对盐碱土总碳与可溶性有机氮的影响

不同处理对土壤总碳(TC)与可溶性有机氮(DON)含量的影响如图 6 所示。在培养初期(4 h), BCPAFC 处理的 TC 含量最高, 为 269 mg/L, 较 CK(218.45 mg/L) 提高 23.3%($P < 0.05$); 单一改良剂处理(DG、SSP 和

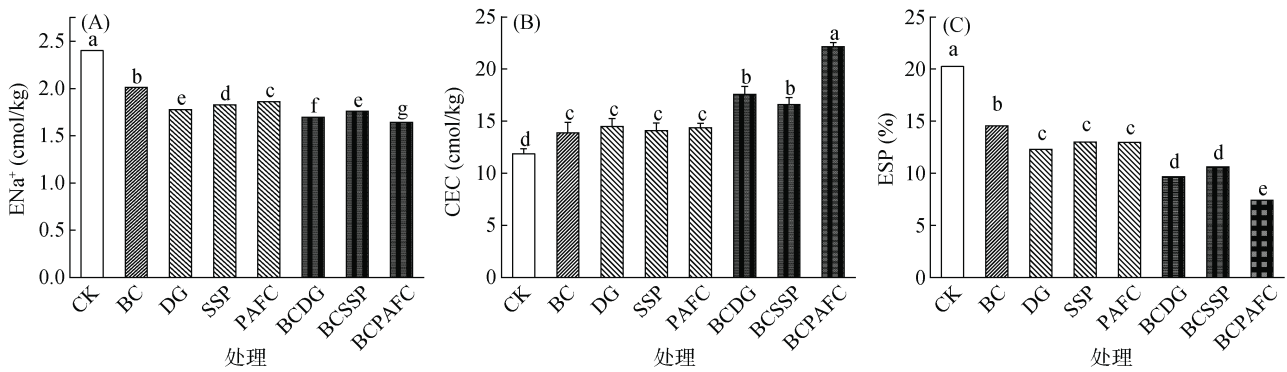
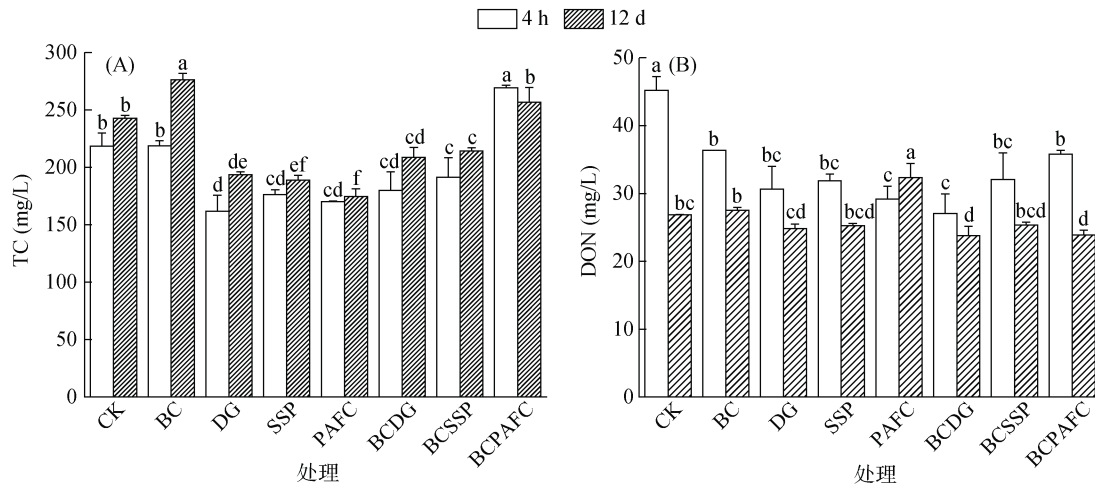


图 5 不同改良剂对土壤 ENa⁺、CEC 和 ESP 的影响
Fig. 5 Effects of different amendments on soil ENa⁺, CEC and ESP



(图中小写字母不同表示同一培养时间不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 6 不同处理反应前后土壤总碳和可溶性有机氮含量

Fig. 6 Total carbon and dissolved organic nitrogen contents before and after reactions of different treatments

PAFC)的 TC 含量较低(161.73~176.08 mg/L),仅为 CK 的 74%~81%; BCDG 与 BCSSP 处理的 TC 含量介于单一改良剂处理与 BCPAFC 处理之间。培养至第 12 天,多数处理的 TC 含量进一步提升。BC 处理提高至 276 mg/L,较 4 h 时增加 26.4%,表现为持续的碳释放特征;BCPAFC 处理虽略有下降(256.57 mg/L),但仍高于同期 CK 处理(242.78 mg/L);相比之下,CK 与 PAFC 处理的 TC 增幅有限,说明其可溶性碳释放能力有限。

DON 的变化趋势与 TC 相反(图 6B)。培养 4 h 时,CK 的 DON 含量最高(45.19 mg/L),显著高于其他处理($P < 0.05$);BC、PAFC 和 BCPAFC 处理的 DON 含量为 29.15~36.35 mg/L,相当于 CK 的 64.5%~80.4%;DG、SSP、BCDG 和 BCSSP 处理的 DON 含量进一步降低至 27~32 mg/L。培养至第 12 天,除 PAFC 处理外,其他处理的 DON 均显著下降,其中 CK 的降幅达 40.6%,BCPAFC 降幅为 33.26%。此时,BCDG 与 BCPAFC 的 DON 含量最低(约 24 mg/L),

较同期 CK 低 11.36%。

综合来看,BC 与 BCPAFC 处理在培养初期即显著提高土壤 TC 含量,并在后期维持较高的可溶性碳水平,同时有效降低 DON 含量。这表明两者在促进土壤碳积累与调控氮素转化方面具有协同作用潜力。

2.5 改性生物质炭对土壤酶活性的影响

不同处理对土壤酶活性的影响如图 7 所示。各处理过氧化氢酶(CAT)活性介于 44.2~49.6 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$ (图 7A)。其中,SSP 处理的 CAT 活性最高(49.6 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$),显著高于 CK(45.52 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$),其余处理与 CK 无显著差异。

碱性磷酸酶(ALP)和脲酶(URE)活性在不同处理间表现出明显差异(图 7B、7C)。与 CK 相比,所有改良剂及生物质炭处理均提高了 ALP 活性。其中,SSP 与 PAFC 处理的 ALP 活性最高,分别为 18.48 和 19.47 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$,较 CK(11.35 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$)显著提高 62.8%~71.5%($P < 0.05$);BC、BCSSP 与 BCPAFC 处

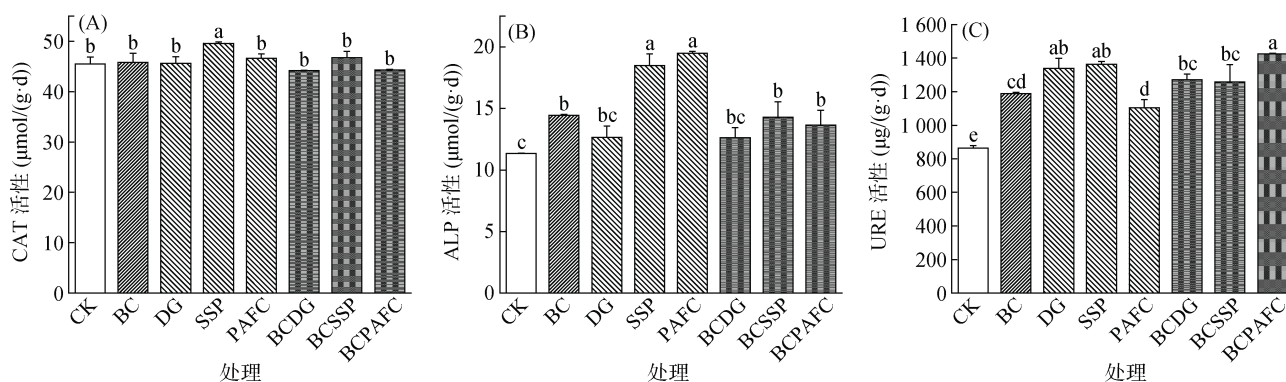


图 7 不同改良剂对土壤过氧化氢酶(A)、碱性磷酸酶(B)、脲酶(C)活性的影响

Fig. 7 Effects of different amendments on the activities of soil catalase (A), alkaline phosphatase (B), and urease (C)

理的提升效果次之($P < 0.05$); 而 DG 与 BCDG 的提升幅度较小, 与 CK 差异不显著。

各改良剂及生物质炭处理的 URE 活性均显著高于 CK($P < 0.05$), 增幅为 27.78%~64.90%。其中, BCPAFC 的 URE 活性最高, 达到 1 425 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$, 较 CK(864.2 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$)提高约 64.90%。

综上所述,不同改良剂均能不同程度地提升土壤 ALP 与 URE 活性, SSP 与 PAFC 对 ALP 活性的提升幅度较大, 而 BCPAFC 对 URE 的促进作用更为显著。

2.6 改性生物质炭对土壤微生物群落结构及多样性的影响

基于前期土壤理化性质与酶活性结果,本研究选取 CK、BC、PAFC 与 BCPAFC 4 个代表性处理, 对

其土壤细菌群落 α 多样性进行了统计分析。表 3 显示, 不同处理对细菌群落的丰富度与多样性均产生显著影响。与 CK 相比, BC 和 BCPAFC 处理在观测物种数(Sobs)、Chao1 丰富度指数、Shannon 多样性指数及 Simpson 优势度指数方面均呈现显著提升($P < 0.05$)。其中, BCPAFC 处理在 4 项指标上均显著高于其他处理($P < 0.05$), 表明其对土壤细菌 α 多样性的促进作用最为显著。

BC 处理在丰富度与多样性方面也表现出明显的提升作用, 各指数均显著高于 CK 与 PAFC 处理。相较之下, PAFC 处理仅在 Simpson 指数上较 CK 有一定改善, 而其 Sobs 与 Shannon 指数与 CK 无显著差异, 说明其对细菌群落结构多样性的提升作用相对有限。

表 3 土壤细菌丰富度和多样性指数

Table 3 Soil bacterial richness and diversity indices

| 处理 | Sobs | Chao1 指数 | Shannon 指数 | Simpson 指数 |
|--------|---------------|---------------|------------|----------------|
| CK | 2 143±142.37c | 2 539±147.63c | 5.02±0.13c | 0.009 5±0.005b |
| BC | 2 759±50.52b | 3 117±65.05b | 5.75±0.33b | 0.029 7±0.003a |
| PAFC | 2 300±121.56c | 2 713±126.24c | 5.10±0.27c | 0.026 2±0.010a |
| BCPAFC | 3 070±198.71a | 3 399±208.99a | 6.40±0.30a | 0.036 8±0.011a |

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

综上, BCPAFC 处理在提升土壤细菌群落的物种丰富度、结构多样性及群落稳定性方面均表现出更为全面的调控能力, 显示出其在改善盐碱土微生态环境方面的良好潜力。

图 8A 显示了培养 12 d 后各处理的细菌操作分类单元(OTUs)分布情况。共鉴定到 4 130 个 OTUs, 其中 1 213 个为各处理共有(占 29.37%)。CK 的 OTUs 数量最少, 而 BCPAFC、PAFC 与 BC 处理的 OTUs 数量分别较 CK 提高了 30.05%、32.04% 和 6.76%, 其中 BC 处理的增幅最小。

在门水平上, 细菌群落主要由假单胞菌门

(Pseudomonadota, 45.76%)、放线菌门(Actinobacteriota, 9.98%)、酸杆菌门(Acidobacteriota, 19.57%)和拟杆菌门(Bacteroidota, 10.04%)组成(图 8B)。各改良处理均显著提高了放线菌门的相对丰度, 其中 BCPAFC 处理的相对丰度最高(23.65%), 显著高于 PAFC(15.13%)和 BC(11.47%)处理。此外, PAFC 和 BCPAFC 处理均显著提升了绿弯菌门(Chloroflexi)的相对丰度, 均高于 CK 和 BC 处理。

Circos 分析进一步揭示了不同处理与主要菌门之间的对应关系(图 8C)。BCPAFC 处理显著提升了多个菌门的相对丰度, 尤其在假单胞菌门与放线菌门等

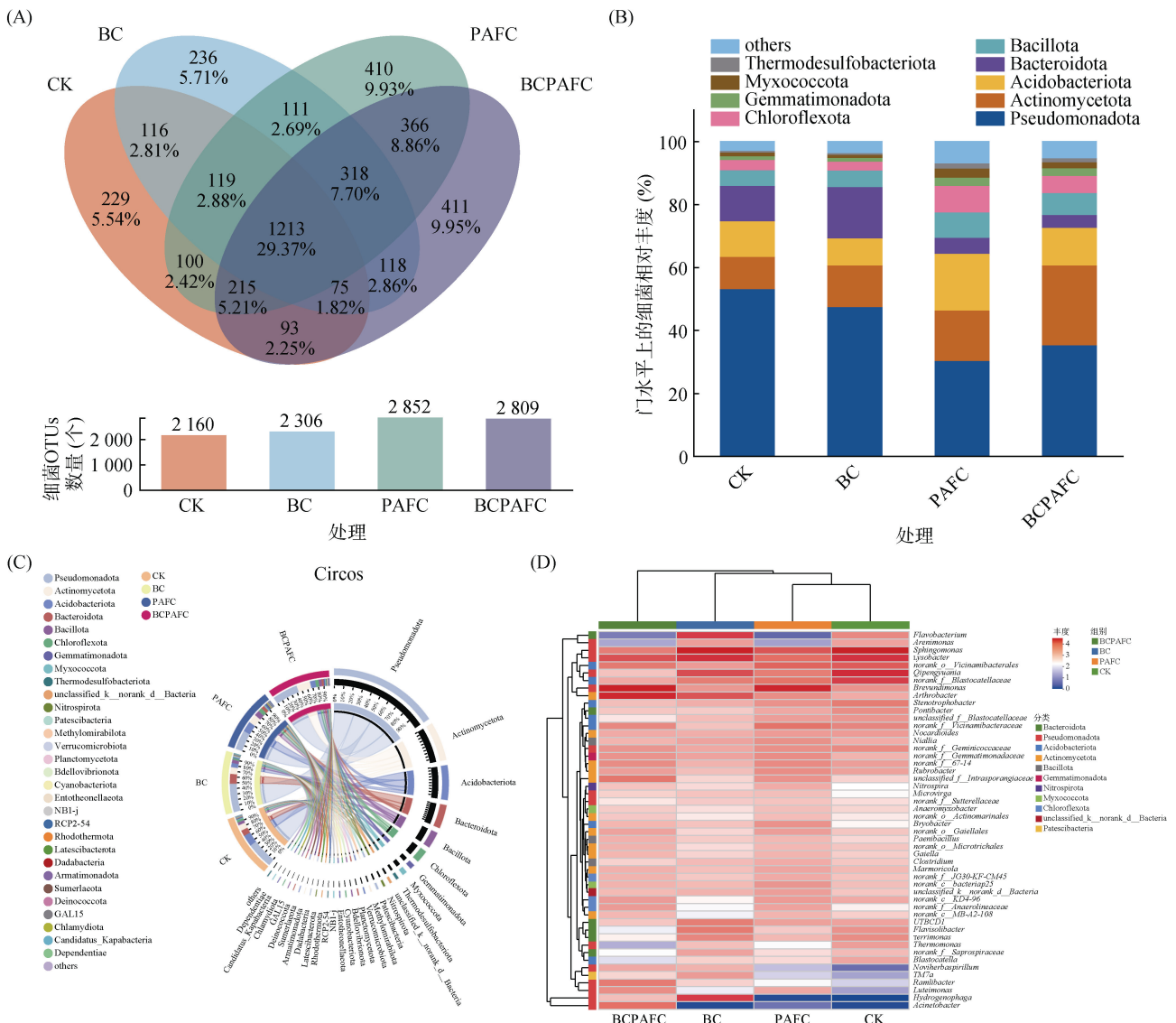


图 8 不同改良剂处理下的土壤细菌 OTUs 序列 Venn 图(A), 门水平上的群落柱形图(B)和 Circos 图(C), 以及属水平上的热图(D)

Fig. 8 Venn diagram of soil bacterial OTUs sequences (A), community bar chart (B), and Circos diagram (C) at phylum level, and heatmap at genus level (D) under different amendments treatments

类群中表现出更高的结构复杂度；而 CK 处理的群落组成相对简单且均匀。BC 与 PAFC 处理虽能改善部分菌门的丰度，但其整体调控作用弱于 BCPAFC 处理。

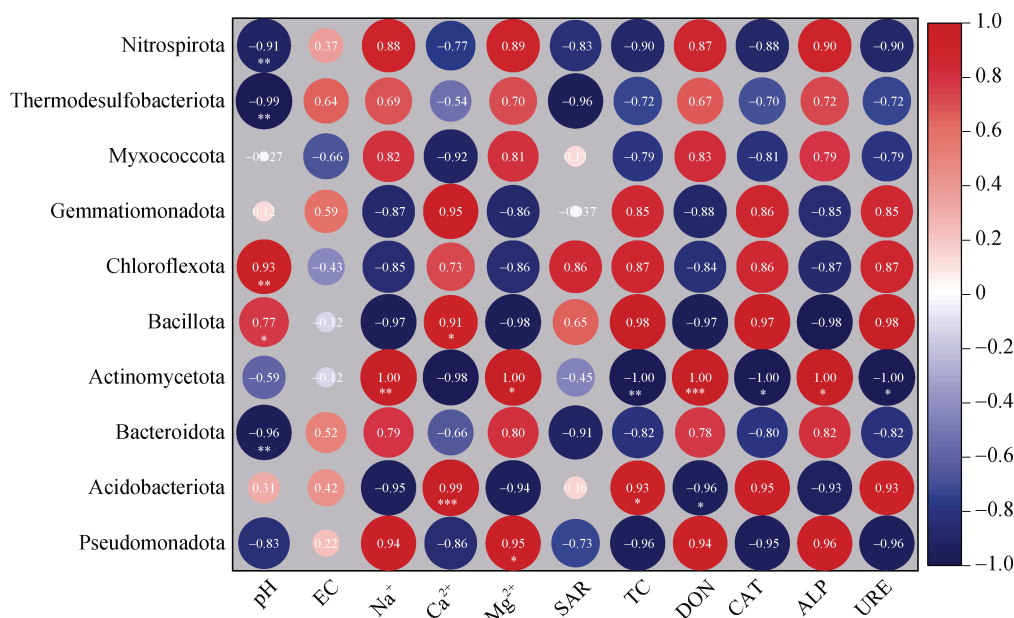
基于属水平相对丰度的热图分析(图 8D)显示，样本可分为两个主要聚类：BCPAFC 处理单独聚为一类，而 BC、PAFC 与 CK 处理聚为另一类，表明 BCPAFC 处理显著改变了土壤细菌群落结构。在 CK 处理中，优势属包括鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、溶细菌属(*Lysobacter*)和奇朋元菌属(*Qipengyuania*)；而在 BCPAFC 处理中，这些属的丰度降低，黄杆菌属(*Arthrobacter*)与短小单胞菌属(*Brevundimonas*)成为主要优势类群。同时，假单胞菌属(*Pseudomonas*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、氢代单胞菌属(*Hydrogenophaga*)

以及根瘤菌属(*Rhizobium*)等在 BCPAFC 处理中均表现出较高的相对丰度。

总体来看，改性生物质炭处理，尤其是 BCPAFC，不仅显著改变了关键菌门与菌属的组成，而且提高了土壤细菌群落的整体丰度、多样性及结构复杂性，表明其在调控盐碱土微生态方面具有较为综合的改善作用。

2.7 土壤微生物优势菌群与理化因子的关联分析

土壤理化性质与主要细菌类群之间的相关性分析结果如图 9 所示。土壤 pH 与多个细菌门类的相对丰度存在显著相关性。其中，pH 与硝化螺旋菌门(*Nitrospirota*, $r = -0.91$, $P < 0.01$)、产硫杆菌门(*Thermodesulfobacteriota*, $r = -0.99$, $P < 0.01$)和拟杆



(*、**、*** 分别表示相关性达 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 显著水平)

图 9 土壤微生物优势菌群与理化因子之间的相关性

Fig. 9 Correlation heatmap between dominant soil microbial taxa and physicochemical properties

菌门(Bacteroidota, $r = -0.96$, $P < 0.01$)呈显著负相关,而与绿弯菌门(Chloroflexota, $r = 0.93$, $P < 0.01$)和厚壁菌门(Bacillota, $r = 0.77$, $P < 0.05$)呈显著正相关。

在盐基离子方面, Ca^{2+} 浓度与酸杆菌门(Acidobacteriota, $r = 0.99$, $P < 0.001$)及厚壁菌门呈显著正相关。 Mg^{2+} 浓度则与放线菌门(Actinomycetota)及假单胞菌门(Pseudomonadota)呈显著正相关。

碳氮组分(TC、DON)及土壤酶活性指标(CAT、ALP、URE)与多数细菌类群也呈现高度相关,其中与放线菌门和酸杆菌门的相关性最强,表明这些细菌类群对土壤养分循环、酶促代谢过程及微生态调控具有重要的响应作用。

3 讨论

3.1 改性生物质炭结构与表面化学性质对离子调控的作用机理

球磨复合改性显著改变了生物质炭的物理结构和表面化学性质,这是其提升盐碱土离子调控能力的基础。本研究的表征结果表明,改性后生物质炭表面粗糙度增加,孔隙结构更为发达,含氧官能团增加,材料极性增强。该变化与 Gao 等^[19]的研究一致,其指出球磨改性研究中的机械力活化能诱导生物质炭表面产生更多缺陷位点,从而显著提高表面反应活性。更重要的是,无机改性剂(DG、SSP、PAFC)的负载与复合,通过化学键合或表面络合,进一步提高了生物质炭的亲水性及表面有效电荷密度。这直接强

化了其与土壤溶液离子的相互作用,特别是通过增强阳离子交换和特异性吸附来调控盐基离子组成。这一机制与 Tomczyk 等^[20]关于生物质炭表面性质决定其环境行为与功能的综述观点一致。

现有盐碱土改良理论普遍认为,有效改良材料需同时具备结构稳定性与化学活性。改性生物质炭以碳基骨架为稳定载体,提供丰富的交换与吸附位点,而其负载的无机组分则主要承担中和土壤碱度与补给二价金属阳离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的双重功能,从而实现 pH、ESP 和 SAR 等关键指标的综合调控^[21]。Mao 等^[22]基于多地区田间试验的荟萃分析进一步证实,生物质炭施用能普遍提高土壤 CEC 并降低钠毒害相关指标,但其效果受材料自身性质和土壤初始盐碱化程度的共同影响。本研究中,BCPAFC 处理在降低 ENa^+ 、ESP, 以及提升 CEC 方面均表现出最优的综合效果,这超越了单一改性剂(PAFC)或未改性生物质炭(BC)的作用,体现了铝铁水解产酸、钙离子置换与生物质炭多孔载体稳定缓释三者通过球磨改性实现的协同增效^[23]。

3.2 溶液化学与土壤交换性钠转化平衡的机制及差异分析

苏打盐碱土的高 pH 主要由碳酸钠和碳酸氢钠体系维持。因此,改良的核心路径是降低碱度与增加土壤溶液中有竞争力的二价阳离子浓度,以驱动固相交换性 Na^+ 向液相的转化与迁移。需要强调的是,本研究采用水土质量比 2.5 : 1 的土浆摇瓶培养,重点

揭示溶液化学与离子交换过程的响应特征,用于材料机理阐释与处理间对比,并不直接评价团聚体与孔隙等结构性指标。本研究中,BCPAFC 处理能显著且持续地降低并稳定土壤溶液 pH,这主要归因于 PAFC 组分水解产生的 H^+ 及多价金属(Al^{3+} 、 Fe^{3+})羟基络合物对土壤碳酸盐碱度的中和作用,与 Guan 等^[24]关于酸改性生物质炭降低盐渍土 pH 的研究机制一致。Elmeknassi 等^[15]在综述中也明确指出,酸化中和与钙镁离子补给是降低土壤碱化度(ESP)并改善其结构稳定性的关键化学路径。

交换性钠的减少是改良效果的最终体现。本研究观察到,土壤溶液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度显著升高,同时,固相 ENa^+ 和 ESP 同步下降,清晰表明了离子交换平衡向 Na^+ 解吸方向移动的过程。溶液中竞争性阳离子浓度的增加,驱动 Na^+ 从土壤胶体交换位点上被置换下来,进入溶液。这一机制在大量田间研究中得到验证。Mao 等^[25]在沿海滩涂苏打盐碱土上的试验表明,脱硫石膏(DG)的施用能将 ESP 降至 6% 以下,pH 降至 7.0 左右,并使土壤溶液的主导离子由 Na^+ 、 HCO_3^-/CO_3^{2-} 体系转变为 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 体系。黄广志等^[26]的荟萃分析也指出,生物质炭可通过提高 CEC 和优化交换性阳离子组成来降低土壤盐碱化风险。本研究中 BCPAFC 处理同时实现 CEC 大幅提升和 ESP 显著下降,与上述田间规律在机理上高度吻合。

然而,必须指出,本研究(摇瓶培养)与田间实际过程在盐分归宿上存在根本差异。在本封闭培养体系中,从固相置换出的 Na^+ 在有限的溶液中累积,导致 EC 值伴随 Na^+ 浓度同步升高,这直接反映了材料促进 Na^+ 活化与解吸的能力。而在田间条件下,成功的改良必须结合排水淋洗措施,将解吸出的 Na^+ 排出根层,从而在降低 ESP 的同时,也降低土壤溶液 EC 和总盐分。周利颖等^[27]的暗管排水试验与 Gharaibeh 等^[28]的长期田间观测均证明,水分运移驱动盐分淋失是田间盐分风险降低的关键。因此,本研究的价值在于揭示并量化了材料驱动离子交换与钠活化的内在潜力,而其在田间的长期控盐效果,需在具备淋洗条件的土柱或田间试验中进一步验证。

3.3 碳氮循环与微生物群落响应的驱动机制

改性生物质炭的添加改变了土壤碳氮转化过程。本研究中 BCPAFC 等处理提高了土壤总碳(TC),同时降低了可溶性有机氮(DON)。这揭示了一个耦合的微生物过程:生物质炭及其负载的有机、无机组分输入,增加了易利用碳源,刺激了微生物活性;微生物

为满足生长需求,加速同化吸收溶液中的有效氮(如 DON),导致其浓度下降。这一“碳激发氮固持”效应,有助于将氮素暂时固定在微生物量中,减少淋失风险,提升土壤养分保持能力^[29]。Zhang 等^[30]在盐碱地改良研究中也指出,当盐碱胁迫缓解且外源碳输入增加时,微生物介导的碳氮周转强度会增强,并趋于形成更稳定的养分库。

土壤酶活性是微生物代谢活性的直接反映,也是养分循环强度的指标。BCPAFC 处理显著提高了碱性磷酸酶(ALP)和脲酶(URE)活性,表明土壤中有机磷矿化尿素水解的速率加快。这通常与土壤环境胁迫(盐碱)减轻和底物有效性提高有关。Jin 等^[31]的研究证实,生物质炭改良可通过改善盐碱土微环境来显著提升关键酶活性;反之,高盐胁迫会强烈抑制酶活性,如颜路明和郭祥泉^[32]所报道。本研究中,酶活性的提升与 pH 降低、ESP 下降等化学改良效果同步出现,形成了“化学环境改善→微生物抑制解除→酶活性增强→养分循环加速”的良性连锁反应。

BCPAFC 处理对微生物 α 多样性和群落结构的显著提升与重塑,是物理、化学和营养因子共同作用的综合结果。首先,改性生物质炭发达的多级孔隙结构,为微生物提供了大量免受竞争的微生境,增加了空间生态位异质性,从而支持更高的物种共存^[33]。其次,BCPAFC 有效降低并缓冲了土壤 pH,直接减轻了强碱胁迫对微生物的筛选压力。同时, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 对 Na^+ 的置换可降低交换性 Na^+ 占比及分散风险,改善土壤胶体体系的离子环境,从而为团聚体形成与孔隙功能恢复提供必要的化学条件,有利于氧气与底物扩散并创造更适宜的生存环境^[34]。进一步地,TC 的增加意味着有效碳源供给增强,与改善后的离子环境共同作用,激发了微生物的整体代谢活性,促进了那些参与碳氮循环、耐盐或具益生功能的类群(如放线菌门、假单胞菌属)的富集^[35]。Gu 等^[36]的研究也表明,生物质炭能快速改变盐碱条件下微生物群落,其核心机制在于改善微生境和资源供给。此外,富集的某些微生物(如放线菌、节杆菌)可能通过分泌胞外聚合物等途径,进一步促进土壤团聚体的形成,增强结构的稳定性,这一过程在耐盐微生物研究中被广泛证实^[37]。

3.4 研究局限性与田间适用性分析

本研究采用摇瓶培养试验,其核心优势在于能精确控制条件,揭示材料本身驱动土壤离子交换平衡、酸碱缓冲及激发微生物响应的内在机制与短期潜能。但由于土浆培养条件下原状团聚体与孔隙结构难以

保持,因此,本研究不对结构性指标(如团聚体稳定性、入渗率等)作直接评价,结构改善需在专门结构表征及柱渗/田间条件下进一步验证。另外,该体系缺乏田间关键的水盐运移过程,无法评估盐分在土体剖面中的淋洗、再分布及长期累积风险。正如 Gharaibeh 等^[28]的研究所强调,田间盐碱土改良的最终效果(尤其是 EC 和总盐的降低)高度依赖于灌溉、排水等水分管理措施与改良材料的协同作用。因此,本研究的结论主要适用于机理阐释和材料初筛。

基于本研究取得的积极结果,BCPAFC 展现出作为苏打盐碱土复合改良材料的良好潜力。它整合了降碱、改构(生物质炭与多价离子)和促生(碳源与微生境)等多种功能,符合杨劲松等^[38]所倡导的“综合治理”理念。未来研究应递进至土柱淋洗试验和田间小区试验,重点验证:①在干湿循环条件下,BCPAFC 对抑制盐分表聚的长期效果;②其与不同灌溉/排水模式协同应用的优化方案;③对主要作物生长、产量及土壤健康指标的长期影响。通过将材料改性机制与田间水盐管理实践深度结合,才能推动该材料走向实际应用,为苏打盐碱土的高效治理提供可靠的技术选项。

4 结论

1) 球磨改性成功将脱石膏、过磷酸钙和聚合硫酸铝铁负载于生物质炭表面,显著改变其结构与表面化学特性。尤其是聚合硫酸铝铁改性生物质炭(BCPAFC),形成了发达的多孔结构和丰富的金属-羟基复合物,表现出更高的极性与亲水性,为改善盐碱土的理化性质提供了优势。

2) 在土壤化学性质调控方面,BCPAFC 能显著降低土壤 pH 并维持于近中性范围(6.49~6.88),同时提高土壤溶液 EC。该处理有效促进了 Na^+ 从固相解吸,并持续释放 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} ,使钠吸附比(SAR)与交换性钠百分比(ESP)稳定处于最低水平,展现出通过水解酸化、多价阳离子絮凝及钙钠置换等多路径协同改良的能力。

3) BCPAFC 处理显著提高了土壤细菌 α 多样性,富集了放线菌门等功能类群,并增强了碱性磷酸酶与脲酶活性。伴随总碳(TC)增加与可溶性有机氮(DON)降低,表明其通过缓解胁迫、提供碳源与微生境,激活了微生物驱动的碳氮转化过程。

综上,球磨改性生物质炭(尤以 BCPAFC 为代表)可多维度协同改良苏打盐碱土,后续需结合土柱与田间试验,验证其在水盐运移条件下的长期效果。

参考文献:

- [1] Daliakopoulos I N, Tsanis I K, Koutroulis A, et al. The threat of soil salinity: A European scale review[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 727-739.
- [2] Zhao Y G, Zhang W C, Wang S J, et al. Effects of soil moisture on the reclamation of sodic soil by flue gas desulfurization gypsum[J]. *Geoderma*, 2020, 375: 114485.
- [3] Tóth T. Review of sodic soil reclamation with a snapshot of current research activity[J]. *Chinese Geographical Science*, 2022, 32(6): 1099-1109.
- [4] 姚东恒, 廖宇波, 孔祥斌, 等. 基于“三层”融合的松嫩平原盐碱地资源特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 247-257.
- [5] Elmeknassi M, Elghali A, de Carvalho H W P, et al. A review of organic and inorganic amendments to treat saline-sodic soils: Emphasis on waste valorization for a circular economy approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171087.
- [6] Guo J Z, Liu B Y, Zhang K P, et al. Long-term effects of a one-time application of flue gas desulfurization gypsum on the soil pore structure in sodic paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 309: 109346.
- [7] Dowling P M, Vimpany I A, Conyers M K, et al. Changes in pasture and soil properties with liming and superphosphate application on five soils in the Central Tablelands of New South Wales over 12 years[J]. *Crop & Pasture Science*, 2025, 76(5): CP24336.
- [8] Luo J Q, Wang L L, Li Q S, et al. Improvement of hard saline-sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 149: 12-20.
- [9] Lin Y C, Yu C L, Zhang Y B, et al. Biochar modification methods and mechanisms for salt-affected soil and saline-alkali soil improvement: A review[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40: e12992.
- [10] Wang X, Ding J L, Han L J, et al. Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2024, 443: 116845.
- [11] Li T, Jiao Y, Liu T T, et al. Effects of biochar addition on soil fauna communities—a meta-analysis[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(3): e13096.
- [12] Lan W J, Zhao X X, Wang Y X, et al. Research progress of biochar modification technology and its application in environmental remediation[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 184: 107178.
- [13] Fakhra A, Canatoy R C, Galgo S J C, et al. Advancements in modified biochar production techniques and soil application: A critical review[J]. *Fuel*, 2025, 400: 135745.
- [14] Nan H Y, Huang R, Zhang X X, et al. How does ball-milling elevate biochar as a value-added peroxydisulfate activator for antibiotics removal [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 214: 118569.
- [15] Singh B, Camps-Arbestain M, Lehmann J, eds. *Biochar: A guide to analytical methods*[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.

- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [17] 岳中慧, 岳启建, 龙寿坤, 等. 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定土壤中阳离子交换量[J]. 化学分析计量, 2022, 31(4): 55-59.
- [18] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 845-854.
- [19] Gao M, Wang Z Y, Yuan Y R, et al. Ball-milled biochar for efficient neutral electrosynthesis of hydrogen peroxide[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 434: 134788.
- [20] Tomczyk A, Kondracki B, Szewczuk-Karpisz K. Chemical modification of biochars as a method to improve its surface properties and efficiency in removing xenobiotics from aqueous media[J]. Chemosphere, 2023, 312: 137238.
- [21] Su Z J, Liu X Z, Wang Z J, et al. Biochar effects on salt-affected soil properties and plant productivity: A global meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 366: 121653.
- [22] Mao T T, Wang Y F, Ning S R, et al. Assessment of the effects of biochar on the physicochemical properties of saline-alkali soil based on meta-analysis[J]. Agronomy, 2024, 14(10): 2431.
- [23] 唐雪, 尚辉, 刘广明, 等. 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1033-1039.
- [24] Guan R H, Li Y, Jia Y L, et al. Acidified biochar one-off application for saline-alkali soil improvement: A three-year field trial evaluating the persistence of effects[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119972.
- [25] Mao Y M, Li X P, Dick W A, et al. Remediation of saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 45: 224-232.
- [26] 黄广志, 黄立华, 刘伯顺, 等. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 388-399.
- [27] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 排盐暗管间距对河套灌区重度盐碱土盐碱特征与肥力的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 602-609.
- [28] Gharaibeh M A, Eltaif N I, Shunnar O F. Leaching and reclamation of calcareous saline-sodic soil by moderately saline and moderate-SAR water using gypsum and calcium chloride[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(5): 713-719.
- [29] Wu L P, Zheng H N, Wang X J. Effects of soil amendments on fractions and stability of soil organic matter in saline-alkaline paddy[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294: 112993.
- [30] Zhang G R, Zhang L, Shi Z Y, et al. Microbial nutrient limitation and carbon use efficiency in saline-alkali soil amended with biochar: Insights from ecoenzymatic C: N: P stoichiometry[J]. Biochar, 2025, 7: 68.
- [31] Jin F, Piao J L, Miao S H, et al. Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: Based on a 6-year field experiment[J]. Biochar, 2024, 6: 40.
- [32] 颜路明, 郭祥泉. 盐碱胁迫对香樟幼苗根际土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(4): 733-737.
- [33] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota-A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [34] Zhang M Y, Riaz M, Liu B, et al. Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply *via* alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 137286.
- [35] Li M, Chen C J, Zhang H Y, et al. Effects of biochar amendment and organic fertilizer on microbial communities in the rhizosphere soil of wheat in Yellow River Delta saline-alkaline soil[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1250453.
- [36] Gu Y Y, Zhang H Y, Liang X Y, et al. Impact of biochar and bioorganic fertilizer on rhizosphere bacteria in saline-alkali soil[J]. Microorganisms, 2022, 10(12): 2310.
- [37] Bhagat N, Raghav M, Dubey S, et al. Bacterial exopolysaccharides: Insight into their role in plant abiotic stress tolerance[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2021, 31(8): 1045-1059.
- [38] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.

(责任编辑: 毛小芳)