

盐生植物生物炭筛选及其对盐碱土壤性质和苜蓿生长的影响

陈欣雨¹, 李琦¹, 侯焯琪¹, 刘壮壮¹, 刘磊², 周瑞荣², 于金平¹, 贾明云^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园)江苏省植物资源保护与利用重点实验室, 江苏南京 210014;

2. 连云港金海岸开发建设有限公司, 江苏连云港 222042]

摘要:以5种典型盐生植物——假盐生植物芦苇[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]和田菁[*Sesbania cannabina* (Retz.) Pers.]、泌盐盐生植物互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)和柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)以及真盐生植物碱蓬[*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge]为原材料,在限氧条件下以升温速率10℃·min⁻¹升温至500℃后滞留2h制备生物炭。通过扫描电镜(SEM)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)等技术表征其表面形貌和理化性质,筛选具有盐碱土壤改良潜力的生物炭,并利用苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)盆栽实验验证改良效果。结果表明:碱蓬、柽柳和互花米草制备的生物炭的pH值(pH 9.40至pH 10.54)、电导率(3.51~7.59 mS·cm⁻¹)、灰分含量(19.55%~29.58%)和可溶性Na⁺含量(8.83~23.73 g·kg⁻¹)较高;表面附着大量颗粒物,比表面积较小(2.93~4.05 m²·g⁻¹),且以大孔为主(59.32%~73.45%)。芦苇和田菁制备的生物炭则表现出较低的电导率、灰分含量和可溶性Na⁺含量,以及较高的C含量和稳定性。其中,芦苇生物炭的特性尤为突出,pH值(pH 8.55)和电导率(0.78 mS·cm⁻¹)最低,比表面积最大(41.95 m²·g⁻¹),并具有多级孔隙结构(微孔、介孔和大孔共存)。盆栽实验结果表明:单一施用质量分数0.5%的芦苇生物炭可有效降低盐碱土壤容重和pH值,显著($p<0.05$)提高土壤速效钾含量和脲酶活性,并促进土壤碳封存。芦苇生物炭和复合肥联合施用对盐碱土壤中的苜蓿幼苗生长表现出显著的协同促进作用,使苜蓿幼苗的株高、根长和总干质量分别较对照增加28.82%、40.28%和86.84%。综上,芦苇生物炭具有优异的盐碱土改良潜力。

关键词: 盐生植物; 生物炭; 理化特性; 盐碱土改良; 苜蓿

中图分类号: Q948.113; S156.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)05-0011-12

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.05.02

Screening of halophyte biochars and their effects on saline-alkali soil properties and *Medicago sativa* growth CHEN Xinyu¹, LI Qi¹, HOU Zhaoqi¹, LIU Zhuangzhuang¹, LIU Lei², ZHOU Ruirong², YU Jinping¹, JIA Mingyun^{1,①} [1. Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Lianyungang Golden Coast Development and Construction Co., Ltd., Lianyungang 222042, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(5): 11-22

Abstract: Taking five typical halophytes, namely pseudohalophytes *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Sesbania cannabina* (Retz.) Pers., salt-secreting halophytes *Spartina alterniflora* Loisel. and *Tamarix chinensis* Lour., and euhalophyte *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge, as raw materials, biochars were prepared under oxygen-limited pyrolysis at a heating rate of 10℃·min⁻¹ to 500℃ and holding for

收稿日期: 2025-05-12

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022306); 江苏省植物资源保护与利用重点实验室开放基金项目(JSPKLB202407)

作者简介: 陈欣雨(2000—),女,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事盐碱土改良方面的研究。

①通信作者 E-mail: jiamingyun@jib.ac.cn

引用格式: 陈欣雨, 李琦, 侯焯琪, 等. 盐生植物生物炭筛选及其对盐碱土壤性质和苜蓿生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 11-22.

2 h. Biochars with saline-alkali soil amelioration potential were screened by characterizing the surface morphology and physical and chemical properties via scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), etc., and the ameliorative effect was verified by using a pot experiment with *Medicago sativa* Linn. The results show that pH value (pH 9.40 to pH 10.54), electric conductivity ($3.51\text{--}7.59\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), ash content (19.55%–29.58%), and soluble Na^+ content ($8.83\text{--}23.73\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) of biochars derived from *S. glauca*, *T. chinensis*, and *S. alterniflora* are relatively high; their surfaces are attached with abundant particulate matter, showing relatively small specific surface areas ($2.93\text{--}4.05\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), and are mainly macropores (59.32%–73.45%). Biochars derived from *P. australis* and *S. cannabina* exhibit relatively low electric conductivity, ash content, and soluble Na^+ content, along with relatively high C content and stability. Among which, *P. australis* biochar exhibits the most outstanding characteristics: the pH value (pH 8.55) and electric conductivity ($0.78\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) are the lowest, the specific surface area ($41.95\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) is the largest, and it has a hierarchical pore structure (coexistence of micropores, mesopores, and macropores). The pot experiment result demonstrates that single application of *P. australis* biochar at mass fraction of 0.5% effectively reduces bulk density and pH value of saline-alkali soil, significantly ($p < 0.05$) increases available potassium content and urease activity of soil, and enhances soil carbon sequestration. Combined application of *P. australis* biochar and compound fertilizer shows an evident synergistic effect on promoting the growth of *M. sativa* seedlings in saline-alkali soil, with plant height, root length, and total dry mass increasing by 28.82%, 40.28%, and 86.84% respectively compared with the control. In conclusion, *P. australis* biochar shows excellent potential for saline-alkali soil amelioration.

Key words: halophyte; biochar; physical and chemical property; saline-alkali soil amelioration; *Medicago sativa* Linn.

随着社会和经济的快速发展,中国人口增长与资源承载能力的矛盾与日俱增,尤其是耕地资源日趋减少^[1]。中国作为盐碱地大国^[2],其盐碱地总面积超过 $9.9 \times 10^7\text{ hm}^2$, 约占全球盐碱地总面积的10.37%^[3], 这些盐碱地是重要的后备耕地资源。然而,盐碱土壤普遍存在含盐量高、易板结、肥力匮乏等问题^[4], 严重制约了作物产量与品质的提升,阻碍了农林业的可持续发展^[2]。为此,研究人员正致力于探索高效、稳定且可持续的盐碱地改良技术,以期有效开发和利用盐碱土壤资源,保障国家粮食安全并推动农业的可持续发展。

生物炭 (biochar) 具有比表面积大、孔隙结构复杂、表面官能团丰富等特点^[5-7], 在酸化土壤改良^[8-9]、污染土壤治理^[10-11]等方面已有应用。在盐碱土中施用生物炭可以降低土壤的容重和碱化度,提高土壤的孔隙度和肥力^[4-5,12]。此外,施加生物炭可以提高植物耐盐性,促进植物生长,增加作物产量^[13]。生物炭的理化性质和表面特征取决于生物质原料和热解条件^[14]。目前用于盐碱土壤改良的生物炭的原材料主要是农林业废弃物^[15], 包括作物残渣(秸秆、稻草)、林木残体(枝条)^[16]及动物粪便^[17]等。本着就地取材、循环、经济、可持续的原则,利用盐碱地本土耐盐植物制备生物炭用于土壤改良不失为一种新

策略^[18], 而目前相关研究相对较少^[19-20]。

盐生植物 (halophyte) 是一类能够在盐碱环境中生长并完成生命史的特殊植物, 具有独特的生理特性和生态适应性^[21]。中国盐生植物资源丰富, 达 587 种^[22]。根据盐生植物体内离子的积累和运输特点, 将盐生植物划分为以下 3 类: 假盐生植物, 依靠根部皮质栓质化, 将盐离子积累在根部木质部薄壁组织中^[21,23]; 真盐生植物, 依靠肉质化组织区隔盐离子^[24]; 泌盐盐生植物, 通过盐腺、囊泡等泌盐结构将吸收的盐离子分泌到外部^[25-26]。不同盐生植物的耐盐机制不同, 以其为原料制备的生物炭性质也存在差异, 进而影响其应用^[27]。已有研究结果表明: 与非盐生植物生物炭相比, 盐生植物生物炭的灰分和可溶性 Na^+ 含量较高^[28-29]。Dong 等^[19]认为, 生物炭的电导率、可溶性盐基离子含量与盐生植物类型有关。目前, 关于盐生植物生物炭的应用研究主要在酸化土壤改良^[30]、重金属吸附去除^[31]、养殖废水氨氮吸附^[32]等方面。其作用机制主要为生物炭表面的碱性阳离子可以取代酸性土壤中交换性 Al^{3+} , 转化成低毒的羟基 Al 或 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 从而提高土壤 pH 值^[33]。生物炭有助于土壤中重金属的吸附和固定, 减少金属离子的积累, 并提高土壤养分含量和改善微生物环境^[34]。然而, 由于盐生植物生物炭的强碱性和高盐分特性,

制约了其在盐碱土壤改良中的应用。因此,比较不同类型盐生植物废弃物生物炭的特性,筛选出可用于盐碱土壤改良的盐生植物生物炭,对于科学利用边际土地资源,开发低成本、高效的盐碱地改良材料,实现盐生植物废弃物的资源化利用以及推动盐碱地农业的可持续发展具有重要意义。

鉴于此,以江苏省连云港市滨海盐碱地生长的5种典型盐生植物芦苇[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]、互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)、田菁[*Sesbania cannabina* (Retz.) Pers.]、碱蓬[*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge]和怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)为原材料制备生物炭,通过测定和分析不同生物炭的理化性质和表面特征,评估其盐碱地应用价值;然后进一步通过苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)盆栽实验对筛选出的生物炭在盐碱土改良中的施用效果进行评价,旨在为盐生植物废弃物就地资源化利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试5种盐生植物芦苇、互花米草、田菁、碱蓬和怪柳均于2023年10月采自江苏省连云港市滨海盐碱地,其中,芦苇和田菁为假盐生植物,互花米草和怪柳为泌盐盐生植物,碱蓬为真盐生植物。将5种盐生植物的地上部分刈割后用自来水冲洗,自然条件下风干后剪碎,用粉碎机进行二次粉碎,过孔径2 mm筛。

实验用土壤取自江苏省连云港市连云区滨海盐碱地(北纬34°46′、东经119°15′)表层土壤(0~20 cm)。将采集的土壤自然风干,去除砾石和杂质后过孔径2 mm筛,备用。供试土壤pH 7.98,电导率0.48 mS·cm⁻¹,容重1.42 g·cm⁻³,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为9.45、3.31和50.67 mg·kg⁻¹,土壤类型为砂壤土。

供试苜蓿品种‘苜丰’(‘Mufeng’)种子购自北京正道种业有限公司。复合肥购自史丹利农业集团股份有限公司,其主要养分N、P₂O₅、K₂O的质量比为14:16:15,总养分含量大于或等于45%。

1.2 方法

1.2.1 生物炭的制备与性质分析

1.2.1.1 生物炭的制备 参考Liu等^[35]的方法制备盐生植物生物炭。在限氧条件下,将盐生植物以升温

速率10℃·min⁻¹升温至500℃,滞留2h,得到的生物炭磨碎后分别过40和100目筛,装入自封袋保存。

1.2.1.2 生物炭的产率、灰分含量和元素组成测定 生物炭产率(Y)计算公式为 $Y=(m_2/m_1) \times 100\%$ 。式中, m_1 为热解前盐生植物干质量, m_2 为热解后的生物炭干质量。重复测定3次,结果取平均值。参照GB/T 17664—1999测定生物炭灰分含量。使用 Unicube 元素分析仪(德国 Elementar 公司)测定生物炭中碳(C)、氢(H)、氮(N)、硫(S)含量,氧(O)含量通过差减法^[36]计算得出。生物炭的氢碳比(H/C比)和氧碳比(O/C比)通过原子摩尔比计算得出。

1.2.1.3 生物炭的表面特征测定 使用Regulus 8100扫描电子显微镜(日本Hitachi公司)测定生物炭的表面形貌特征。使用ASAP 2460全自动比表面积及孔隙度分析仪(美国Micromeritics公司)在77 K下测定生物炭的N₂吸附-脱附曲线,采用Brunauer-Emmett-Telle(BET)法计算生物炭的比表面积和平均孔径,采用单点吸附法计算总孔容,采用t-plot法计算微孔面积和微孔体积。采用密度泛函理论(DFT)模型分析生物炭的孔径分布。使用Nicolet iS20 FTIR傅里叶变换红外光谱仪(美国Thermo Fisher Scientific公司)分析生物炭的表面官能团种类,分辨率为4 cm⁻¹,测试波数范围为400~4 000 cm⁻¹。

1.2.1.4 生物炭的化学性质测定 将盐生植物生物炭和去离子水按质量体积比1:10混合,然后以25℃、200 r·min⁻¹振荡24 h,用PHS-3E pH计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定悬液的pH值。再以25℃、200 r·min⁻¹振荡1 h,以25℃、10 000 r·min⁻¹离心20 min后,使用DDS-307电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定生物炭的电导率^[37]。使用iCAP 7400电感耦合等离子体发射光谱仪(美国Thermo Fisher Scientific公司)测定生物炭中可溶性Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量。以上指标重复测定3次,结果取平均值。

1.2.2 盆栽实验设计与指标测定 于2024年5—7月在江苏省中国科学院植物研究所进行盆栽实验。共设置4种处理,分别为不添加芦苇生物炭(对照,CK)、单一施用芦苇生物炭(BC)、单一施用复合肥(F)以及芦苇生物炭和复合肥联合施用(BC+F)。每种处理设置4次重复。其中芦苇生物炭的添加量为质量分数0.5%,复合肥的施用量为每盆5 g。按比例将土壤、芦苇生物炭和复合肥按照上述处理充分混匀

后装入塑料盆(口径 15.5 cm、底径 12.0 cm、高 14.0 cm)中,每盆装入 1.5 kg。苜蓿种子用清水催芽,露白后,每盆播 20 粒,浇透水。此后,保持土壤含水量为田间最大持水量的 40%左右。出苗 1 周后间苗,每盆保留 3 株长势基本一致的幼苗。实验期间进行常规养护管理。

于苜蓿生长至分枝末期(2024 年 7 月 29 日)破土取样。采用环刀法^{[38]269}测定土壤容重;土壤和去离子水按质量体积比 1:5 混合,然后测定土壤 pH 值和电导率^{[38]13,87};采用乙酸钠-火焰光度法^{[38]28}测定土壤阳离子交换量;使用 iCAP 7400 电感耦合等离子体发射光谱仪测定土壤可溶性 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量^{[38]95-96};采用碱解扩散法^{[38]150-151}测定土壤碱解氮含量;采用碳酸氢钠法^{[38]180}测定土壤有效磷含量;采用乙酸铵提取法^{[38]194}测定土壤速效钾含量;采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法^{[38]107}测定土壤有机质含量;采用六偏磷酸钠分散-高温外热重铬酸钾氧化-容量法^[39]测定土壤颗粒有机碳含量;土壤矿物结合态有机碳含量为土壤有机碳含量与土壤颗粒有机碳含量的差值;采用三氯甲烷熏蒸法^{[38]231}测定土壤微生物生物量碳含量。分别使用购自苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒测定土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。以上指标重复测定 4 次,结果取平均值。

于苜蓿生长至分枝末期(2024 年 7 月 29 日)收获,将其整株取出,洗净后吸干水分。用卷尺(精度 0.1 cm)测量株高(植株基部至顶端生长点的高度)和根长(植株基部至主根尖端的长度),统计每株基部发出的分枝数。将植株的地上部与根系分开,分别装入信封,置于烘箱中 105 °C 杀青 30 min 后,再于 65 °C 烘干至恒质量。使用千分之一天平称量单株的地上部干质量和根干质量,二者之和为总干质量。以

上指标重复测量 12 次,结果取平均值。

1.3 数据处理与分析

利用 EXCEL 2019 软件对实验数据进行统计和处理,利用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用 Duncan's test 进行显著性检验($p < 0.05$);利用 Origin 2022 软件绘图。利用 OMNIC 8.2 软件对傅里叶变换红外光谱(FTIR)原始数据进行分析。

2 结果和分析

2.1 盐生植物生物炭的产率、灰分含量和元素组成分析

5 种盐生植物生物炭的产率、灰分含量和元素组成见表 1。结果显示:5 种盐生植物生物炭的产率为 33.26%~41.17%,其中怪柳生物炭的产率最高,其他 4 种盐生植物生物炭的产率均在 33%左右。5 种盐生植物生物炭的灰分含量为 15.29%~29.58%,其中,芦苇生物炭和田菁生物炭的灰分含量较低,分别为 15.29%和 15.93%;互花米草生物炭和碱蓬生物炭的灰分含量较高,约为芦苇生物炭的 2 倍。5 种盐生植物生物炭的 C、H 和 N 含量差异较小。5 种盐生植物生物炭的 C 含量为 56.54%~67.35%,其中,田菁生物炭的 C 含量最高,其次为芦苇生物炭,互花米草生物炭的 C 含量最低。除芦苇生物炭的 H 含量略高外(3.07%),其他 4 种盐生植物生物炭的 H 含量在 2.18%~2.45%之间。5 种盐生植物生物炭中,田菁生物炭的 N 含量最高(3.20%),怪柳生物炭的 S 含量最高(2.63%)。芦苇生物炭和田菁生物炭的 O 含量较高,碱蓬生物炭的 O 含量最低。5 种盐生植物生物炭中,芦苇生物炭和互花米草生物炭的 H/C 比大于 0.5,其他 3 种盐生植物生物炭的 H/C 比为 0.40~

表 1 5 种盐生植物生物炭的产率、灰分含量和元素组成
Table 1 The yield, ash content, and element composition of five halophyte biochars

生物炭 Biochar	产率/% Yield	灰分含量/% Ash content	元素含量/% Element content					H/C 比 H/C ratio	O/C 比 O/C ratio
			C	H	N	S	O		
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	34.30	15.29	66.13	3.07	1.39	— ¹⁾	14.13	0.56	0.16
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	33.53	29.58	56.54	2.45	1.90	0.90	8.63	0.52	0.11
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	33.26	15.93	67.35	2.44	3.20	0.55	10.53	0.44	0.12
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	34.17	28.61	63.90	2.24	2.08	0.75	2.41	0.42	0.03
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	41.17	19.55	65.72	2.18	2.35	2.63	7.57	0.40	0.08

¹⁾ 低于检测限 Below the detection limit.

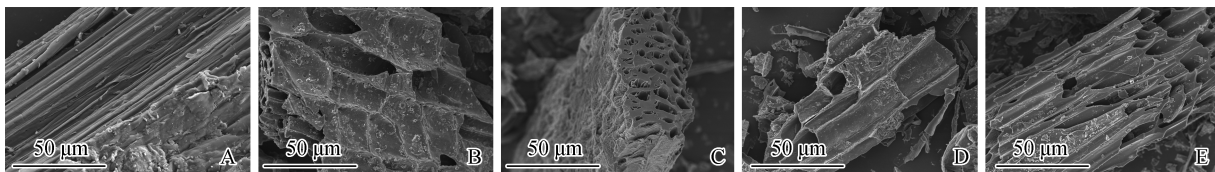
0.44。碱蓬生物炭和怪柳生物炭的 O/C 比较小, 分别为 0.03 和 0.08, 其他 3 种盐生植物生物炭的 O/C 比大于 0.1。

2.2 盐生植物生物炭表面特征分析

5 种盐生植物生物炭的扫描电镜图见图 1。结果显示: 不同盐生植物生物炭的表面形貌存在较大差异。芦苇生物炭(图 1-A)为长管状结构, 表面粗糙且不平整, 有大量的皱褶, 几乎看不到孔隙结构。互花米草生物炭(图 1-B)具有明显的维管束结构, 形状规则, 表面较光滑, 且附着许多颗粒物, 表面有大孔隙分布和少量裂隙。田菁生物炭(图 1-C)表面为平板块状, 表面粗糙且不规则, 孔隙大小不一, 呈蜂窝状。碱蓬生物炭(图 1-D)和怪柳生物炭(图 1-E)表面光滑, 表面主要由孔隙、裂隙以及一些小颗粒填充物组成, 呈现聚团状, 孔隙较大, 孔隙和裂隙表面附着许多颗粒物。

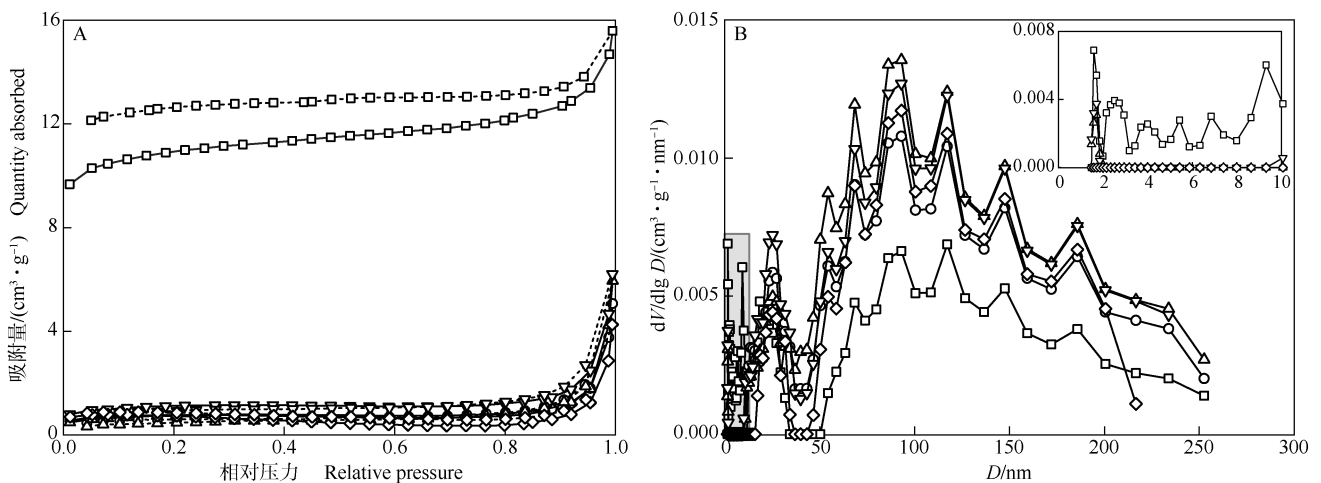
5 种盐生植物生物炭的 N₂ 吸附-脱附曲线见图 2-A。结果显示: 芦苇生物炭对 N₂ 的吸附量与其他 4 种盐生植物生物炭差异较大。芦苇生物炭的 N₂ 吸附-脱附曲线没有重合, 且在相对压力接近 0.1 时对 N₂ 的吸附量有明显增加, 表明芦苇颗粒在热解过程中形成了大量微孔; 其他 4 种盐生植物生物炭的 N₂ 吸附-脱附曲线几乎重合。根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)的分类标准, 芦苇生物炭的 N₂ 吸附-脱附曲线属于 I 型, 表明对 N₂ 的吸附具有微孔吸附或介孔吸附特征; 其他 4 种盐生植物生物炭的 N₂ 吸附-脱附曲线属于 II 型, 表明对 N₂ 的吸附具有非孔吸附或大孔吸附特征。

5 种盐生植物生物炭的孔径分布见图 2-B。结果显示: 芦苇生物炭表面的孔隙结构较复杂, 微孔 [孔径(D) < 2 nm]、介孔 (2 ≤ D ≤ 50 nm) 和大孔 (D > 50 nm) 均有分布。通过 DFT 模型计算, 芦苇生物炭



A: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; B: 互花米草 *Spartina alterniflora* Loisel.; C: 田菁 *Sesbania cannabina* (Retz.) Pers.; D: 碱蓬 *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge; E: 怪柳 *Tamarix chinensis* Lour.

图 1 5 种盐生植物生物炭的扫描电镜图
Fig. 1 Scanning electron microscope images of five halophyte biochars



—: 吸附曲线 Adsorption curve; - - -: 脱附曲线 Desorption curve. □: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; ○: 互花米草 *Spartina alterniflora* Loisel.; △: 田菁 *Sesbania cannabina* (Retz.) Pers.; ▽: 碱蓬 *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge; ◇: 怪柳 *Tamarix chinensis* Lour. V: 孔容 Pore volume; D: 孔径 Pore diameter.

图 2 5 种盐生植物生物炭的 N₂ 吸附-脱附曲线 (A) 和孔径分布 (B)
Fig. 2 N₂ adsorption-desorption curves (A) and pore diameter distribution (B) of five halophyte biochars

表面微孔、介孔和大孔对比表面积的贡献分别为33.77%、63.04%和3.19%。因此,芦苇生物炭表面孔隙以介孔为主,其次是微孔,大孔的数量极少。互花米草生物炭、田菁生物炭、碱蓬生物炭和怪柳生物炭表面大孔对比表面积的贡献分别为62.89%、66.75%、59.32%和73.45%;其次是介孔;微孔对比表面积的贡献较小,分别为8.93%、8.18%、12.47%和8.79%。因此,这4种盐生植物生物炭表面孔隙以大孔为主。

5种盐生植物生物炭的比表面积和孔隙结构指

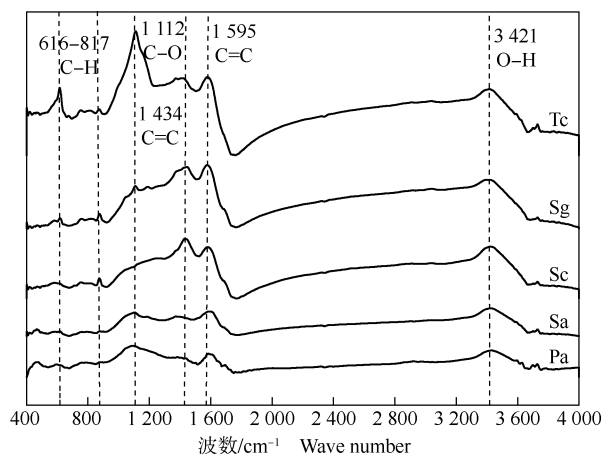
标见表2。结果显示:5种盐生植物生物炭中,芦苇生物炭的比表面积、总孔容、微孔面积和微孔体积最大,分别为 $41.95 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $24.10 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $36.61 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $14.59 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,远大于其他4种盐生植物生物炭。芦苇生物炭的平均孔径最小,为2.30 nm,远小于其他4种盐生植物生物炭。t-plot法计算结果显示:芦苇生物炭表面分布有大量的微孔,微孔面积占比表面积的87.27%。碱蓬生物炭的比表面积和总孔容次之,但也分别仅为芦苇生物炭的9.66%和37.79%。

表2 5种盐生植物生物炭的比表面积和孔隙结构指标

Table 2 The specific surface area and pore structure indexes of five halophyte biochars

生物炭 Biochar	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ Specific surface area	总孔容/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ Total pore volume	平均孔径/nm Average pore diameter	微孔面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ Micropore area	微孔体积/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ Micropore volume
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	41.95	24.10	2.30	36.61	14.59
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	2.93	7.82	10.70	1.98	0.77
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	2.70	9.20	13.64	1.85	0.81
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	4.05	9.59	9.46	2.20	0.90
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	3.17	6.58	8.30	3.01	1.15

5种盐生植物生物炭的傅里叶变换红外光谱图见图3。结果显示:在波数 3421 cm^{-1} 附近的宽峰归属于羟基的伸缩振动;在波数 1595 和 1434 cm^{-1} 附近的吸收峰为典型的芳香族化合物的红外谱,属于与C骨架相邻酮或醌中的C=C伸缩振动;在波数 1112 cm^{-1} 附近的吸收峰主要归因于C-O官能团的伸缩振



Pa: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; Sa: 互花米草 *Spartina alterniflora* Loisel.; Sc: 田菁 *Sesbania cannabina* (Retz.) Pers.; Sg: 碱蓬 *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge; Tc: 怪柳 *Tamarix chinensis* Lour.

图3 5种盐生植物生物炭的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 3 Fourier transform infrared spectrum of five halophyte biochars

动;在波数 1000 cm^{-1} 以下的吸收峰主要归因于芳香族化合物中C-H面外弯曲振动。田菁生物炭和碱蓬生物炭在波数 1434 cm^{-1} 附近的C=C吸收峰相对强度明显增加,表明田菁和碱蓬在热解过程中形成了更多的芳香C结构。怪柳生物炭在波数 1112 cm^{-1} 附近的C-O吸收峰强度最为明显,表明其炭化程度低,可能残留了有机残体。田菁生物炭在波数 1434 cm^{-1} 附近的C=C吸收峰强度最大,且在波数 1112 cm^{-1} 附近的C-O吸收峰消失,表明其炭化较为完全。

2.3 盐生植物生物炭的化学性质分析

5种盐生植物生物炭的pH值、电导率和可溶性盐基离子含量见表3。结果显示:5种盐生植物生物炭均呈碱性,其碱性由弱到强依次为芦苇生物炭(pH 8.55)、怪柳生物炭(pH 9.40)、互花米草生物炭(pH 9.75)、田菁生物炭(pH 10.05)、碱蓬生物炭(pH 10.54)。5种盐生植物生物炭的电导率存在显著差异($p < 0.05$)。怪柳生物炭的电导率最高,为 $7.59 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;其次是碱蓬生物炭($7.24 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$);芦苇生物炭和田菁生物炭的电导率较低,远低于其他3种盐生植物生物炭。5种盐生植物生物炭的可溶性盐基离子组成均以可溶性 Na^+ 和 K^+ (一价离子)为主,可溶性 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} (二价离子)含量相对较低。值得注意的是,假盐生植物芦苇和田菁制备的生物炭的可溶性盐基离子含量总体上远低于泌盐盐生植物互花

米草和怪柳以及真盐生植物碱蓬制备的生物炭。具体而言,田菁生物炭和芦苇生物炭的可溶性 Na^+ 含量较低,显著低于其他3种盐生植物生物炭;碱蓬生物炭的可溶性 Na^+ 含量最高,分别为田菁生物炭和芦苇生物炭的27.92和21.57倍。芦苇生物炭的可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均最低,与其他4种盐生植物生物

炭差异显著。互花米草生物炭和碱蓬生物炭的可溶性 K^+ 含量较高,显著高于其他3种盐生植物生物炭。怪柳生物炭的可溶性 Ca^{2+} 含量最高,显著高于其他4种盐生植物生物炭。碱蓬生物炭和怪柳生物炭的可溶性 Mg^{2+} 含量较高,显著高于其他3种盐生植物生物炭。

表3 5种盐生植物生物炭的pH值、电导率及可溶性盐基离子含量($\bar{X}\pm\text{SD}$)¹⁾

Table 3 The pH value, electric conductivity, and soluble base cation content of five halophyte biochars ($\bar{X}\pm\text{SD}$)¹⁾

生物炭 Biochar	pH 值 pH value	电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) Electric conductivity	可溶性 Na^+ 含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soluble Na^+ content	可溶性 K^+ 含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soluble K^+ content	可溶性 Ca^{2+} 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soluble Ca^{2+} content	可溶性 Mg^{2+} 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soluble Mg^{2+} content
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	8.55±0.11e	0.78±0.01e	1.10±0.01d	1.47±0.05c	29.98±3.00d	7.55±0.77e
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	9.75±0.11c	3.51±0.10c	19.19±1.95b	12.38±1.05a	122.48±8.49c	255.99±17.25c
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	10.05±0.11b	1.14±0.02d	0.85±0.02d	8.75±0.45b	128.60±8.72c	48.82±0.62d
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	10.54±0.16a	7.24±0.05b	23.73±2.47a	11.49±0.23a	176.39±3.55b	779.47±19.58a
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	9.40±0.13d	7.59±0.08a	8.83±0.53c	8.46±0.19b	744.90±29.74a	693.33±31.74b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($p<0.05$) between different treatments.

综上,相比于其他4种盐生植物生物炭,芦苇生物炭的C含量高,具有较高的稳定性;且其表面粗糙,比表面积大,表面具有微孔、介孔和大孔多级孔隙结构。此外,芦苇生物炭的pH值和电导率低,可溶性盐基离子含量低,在盐碱土改良中具有应用潜力。因此,选择芦苇生物炭进行进一步研究。

2.4 不同处理对盐碱土壤改良的影响

不同处理盐碱土壤理化指标见表4。结果显示:单一施用芦苇生物炭以及芦苇生物炭和复合肥联合施用处理盐碱土壤的容重较对照有所降低,但差异不显著。与对照相比,单一施用芦苇生物炭、单一施用复合肥以及芦苇生物炭和复合肥联合施用处理土壤pH值显著($p<0.05$)降低,分别降低了0.89%、1.91%和2.42%,但土壤电导率显著升高,分别升高了18.42%、39.47%和44.74%。就土壤阳离子交换量而言,不同处理间无显著差异,但单一施用芦苇生物炭处理的土壤阳离子交换量较对照升高,芦苇生物炭和复合肥联合施用处理较单一施用复合肥处理升高。与对照相比,3种处理均提高了土壤可溶性 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,其中单一施用复合肥处理达到显著水平;3种处理降低了土壤可溶性 K^+ 含量。与对照相比,单一施用芦苇生物炭处理显著提高土壤速效钾含量,但对土壤碱解氮和有效磷含量无显著影响;单一施用复合肥处理显著提高了土壤碱解氮含量,对土壤

有效磷和速效钾含量无显著影响;芦苇生物炭和复合肥联合施用处理使土壤碱解氮含量显著升高,土壤有效磷和速效钾含量降低。与对照相比,单一施用芦苇生物炭、单一施用复合肥以及芦苇生物炭和复合肥联合施用处理土壤有机质含量分别增加了139.22%、10.71%和111.16%,土壤颗粒有机碳含量分别增加了176.38%、7.64%和110.42%,土壤矿物结合态有机碳含量分别增加了153.30%、21.70%和133.96%。3种处理土壤微生物生物量碳含量均较对照显著增加。3种处理的土壤脲酶活性高于对照,其中单一施用芦苇生物炭以及芦苇生物炭和复合肥联合施用处理达到显著水平,分别提高了14.08和17.36倍。与对照相比,单一施用芦苇生物炭以及芦苇生物炭和复合肥联合施用处理提高了土壤碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性,降低了蔗糖酶活性,但影响均不显著。总体上看,单一施用芦苇生物炭以及芦苇生物炭和复合肥联合施用处理均降低了土壤容重和pH值,显著提高了土壤的有机质含量、颗粒有机碳含量、矿物结合态有机碳含量、微生物生物量碳含量和脲酶活性,且优于单一施用复合肥处理。

2.5 不同处理对盐碱土壤中苜蓿生长的影响

不同处理下盐碱土壤中苜蓿幼苗生长指标见表5。结果显示:单一施用芦苇生物炭处理对苜蓿幼苗的生长具有一定的促进作用,但除根长外,株高、分枝

表4 不同处理下盐碱土壤的理化指标 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 4 Physical and chemical indexes of the saline-alkali soil under different treatments ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$) Bulk density	pH 值 pH value	电导率/ ($mS \cdot cm^{-1}$) Electric conductivity	阳离子交换量/ ($cmol \cdot kg^{-1}$) Cation exchange capacity	可溶性 Na^+ 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) Soluble Na^+ content	可溶性 K^+ 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) Soluble K^+ content	可溶性 Ca^{2+} 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) Soluble Ca^{2+} content
CK	1.42±0.07a	7.84±0.04a	0.38±0.01c	28.41±1.09a	33.35±2.44b	1.57±0.31a	11.41±0.54b
BC	1.35±0.08a	7.77±0.04b	0.45±0.03b	30.22±2.35a	37.18±1.14ab	1.34±0.03ab	12.24±0.58b
F	1.41±0.06a	7.69±0.05c	0.53±0.06a	27.54±1.57a	39.38±3.60a	1.15±0.06bc	15.94±1.16a
BC+F	1.35±0.15a	7.65±0.02c	0.55±0.02a	27.97±1.97a	33.75±0.91b	0.93±0.23c	12.27±0.66b

处理 Treatment	可溶性 Mg^{2+} 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) Soluble Mg^{2+} content	碱解氮含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$) Alkali-hydrolyzable nitrogen content	有效磷含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$) Available phosphorus content	速效钾含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$) Available potassium content	有机质含量/ ($g \cdot kg^{-1}$) Organic matter content	颗粒有机碳含量/ ($g \cdot kg^{-1}$) Particulate organic carbon content
CK	2.36±0.31c	38.27±5.30b	7.80±0.41ab	94.67±1.15b	6.63±0.08c	1.44±0.18b
BC	2.83±0.11b	38.73±7.71b	7.64±0.80ab	104.00±3.46a	15.86±1.16a	3.98±0.98a
F	3.53±0.14a	42.00±3.70a	9.08±1.74a	95.33±1.15b	7.34±0.25c	1.55±0.33b
BC+F	2.72±0.06b	40.60±7.41a	6.72±0.89b	81.00±0.00c	14.00±0.60b	3.03±1.10a

处理 Treatment	矿物结合态有机碳含量/ ($g \cdot kg^{-1}$) Mineral-associated organic carbon content	微生物生物量碳含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$) Microbial biomass carbon content	脲酶活性/ ($\mu g \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$) Urease activity	碱性磷酸酶活性/ ($\mu mol \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$) Alkaline phosphatase activity	蔗糖酶活性/ ($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$) Sucrase activity	过氧化氢酶活性/ ($\mu mol \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$) Catalase activity
CK	2.12±0.25b	25.68±2.23c	7.52±1.22c	5.93±0.57a	7.69±0.31a	63.22±0.95a
BC	5.37±0.69a	51.77±1.07b	113.40±24.43b	6.30±0.37a	6.81±0.61a	63.49±1.42a
F	2.58±0.12b	69.58±4.90a	12.38±2.88c	6.20±0.58a	5.25±1.16a	61.52±4.12a
BC+F	4.96±1.13a	63.87±4.83a	138.07±6.51a	6.45±0.65a	5.98±1.93a	64.33±0.02a

¹⁾ CK: 对照 The control; BC: 单一施用芦苇生物炭 Single application of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. biochar; F: 单一施用复合肥 Single application of compound fertilizer; BC+F: 芦苇生物炭和复合肥联合施用 Combined application of *P. australis* biochar and compound fertilizer. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($p < 0.05$) between different treatments.

表5 不同处理对盐碱土壤中苜蓿幼苗生长指标的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 5 The effects of different treatments on growth indexes of *Medicago sativa* Linn. seedlings in saline-alkali soil ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	分枝数 Branching number	地上部干质量/g Dry mass of above-ground part	根干质量/g Dry mass of root	总干质量/g Total dry mass
CK	32.81±1.67b	7.92±0.74b	2.7±0.3b	1.20±0.14b	0.67±0.17b	1.87±0.37c
BC	34.38±1.79b	9.80±1.06a	2.9±0.2b	1.22±0.07b	0.86±0.19b	2.08±0.25bc
F	34.96±2.36b	9.33±0.52ab	2.6±0.2b	1.29±0.05b	0.98±0.06b	2.27±0.08b
BC+F	42.27±2.54a	11.11±1.29a	3.7±0.3a	2.21±0.22a	1.34±0.19a	3.55±0.08a

¹⁾ CK: 对照 The control; BC: 单一施用芦苇生物炭 Single application of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. biochar; F: 单一施用复合肥 Single application of compound fertilizer; BC+F: 芦苇生物炭和复合肥联合施用 Combined application of *P. australis* biochar and compound fertilizer. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($p < 0.05$) between different treatments.

数和干质量相关指标与对照无显著差异。单一施用复合肥的处理效果与单一施用芦苇生物炭处理相似。值得注意的是,芦苇生物炭和复合肥联合施用处理显著 ($p < 0.05$) 促进苜蓿幼苗生长。与对照、单一施用芦苇生物炭和单一施用复合肥处理相比,芦苇生物炭和复合肥联合施用处理苜蓿幼苗的株高分别增加了 28.82%、22.95% 和 20.89%,根长分别增加了 40.28%、13.38% 和 19.08%,分枝数分别增加了 37.04%、27.59% 和 43.30%,总干质量分别增加了 86.84%、

70.67% 和 56.39%,且差异总体达显著水平。

2.6 Pearson 相关性分析

Pearson 相关性分析结果显示:苜蓿幼苗的生长指标与土壤的容重,阳离子交换量,可溶性 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 含量,碱解氮含量,矿物结合态有机碳含量,蔗糖酶活性,过氧化氢酶活性无显著相关性。从表 6 可以看出:除分枝数外,苜蓿幼苗其他生长指标均与土壤 pH 值呈显著 ($p < 0.05$) 负相关,与土壤电导率呈显著正相关。苜蓿幼苗的株高和干质量相关指标与土壤

可溶性 Ca^{2+} 含量呈显著负相关。除根长外, 苜蓿幼苗其他生长指标与土壤速效钾含量呈显著负相关。除根干质量外, 苜蓿幼苗其他生长指标与土壤脲酶活性呈显著正相关。此外, 苜蓿幼苗的株高与土壤有效磷

含量呈显著负相关, 根长与土壤的有机质含量、颗粒有机碳含量和微生物生物量碳含量呈显著正相关, 根干质量与土壤的微生物生物量碳含量和碱性磷酸酶活性呈显著正相关。

表 6 苜蓿幼苗生长指标与部分土壤理化指标间的 Pearson 相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficient between growth indexes of *Medicago sativa* Linn. seedlings and some soil physical and chemical indexes

生长指标 Growth index	与部分土壤理化指标的 Pearson 相关系数 ¹⁾ Pearson correlation coefficient with some soil physical and chemical indexes ¹⁾									
	pH	EC	w_{Ca}	w_{AP}	w_{AK}	w_{OM}	w_{POC}	w_{MBC}	A_{URE}	A_{ALP}
株高 Plant height	-0.656 *	0.578 *	-0.721 *	-0.636 *	-0.668 *	0.437	0.322	0.460	0.624 *	0.217
根长 Root length	-0.700 *	0.717 *	-0.504	-0.254	-0.313	0.657 *	0.707 *	0.625 *	0.684 *	0.212
分枝数 Branching number	-0.463	0.393	-0.442	-0.562	-0.635 *	0.575	0.558	0.289	0.731 *	0.106
地上部干质量 Dry mass of above-ground part	-0.684 *	0.625 *	-0.586 *	-0.434	-0.810 *	0.422	0.390	0.456	0.626 *	0.215
根干质量 Dry mass of root	-0.810 *	0.775 *	-0.749 *	-0.348	-0.580 *	0.423	0.262	0.669 *	0.561	0.595 *
总干质量 Total dry mass	-0.772 *	0.717 *	-0.688 *	-0.429	-0.772 *	0.440	0.356	0.556	0.633 *	0.364

¹⁾ pH: pH 值 pH value; EC: 电导率 Electric conductivity; w_{Ca} : 可溶性 Ca^{2+} 含量 Soluble Ca^{2+} content; w_{AP} : 有效磷含量 Available phosphorus content; w_{AK} : 速效钾含量 Available potassium content; w_{OM} : 有机质含量 Organic matter content; w_{POC} : 颗粒有机碳含量 Particulate organic carbon content; w_{MBC} : 微生物生物量碳含量 Microbial biomass carbon content; A_{URE} : 脲酶活性 Urease activity; A_{ALP} : 碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity. *: $p < 0.05$.

3 讨论和结论

生物炭是一种富含碳的固体材料, 在农业生产和环境领域具有多重效益。生物炭的芳香碳具有较高的稳定性, 在固碳减排、缓解全球气候变暖等方面具有重要意义^[40]。已有研究结果表明: 生物质原料种类是影响生物炭稳定性的重要因子之一^[40]。芦苇、互花米草、田菁、碱蓬和柽柳 5 种盐生植物生物炭的 C 含量为 56.54%~67.35%, 其中芦苇生物炭和田菁生物炭的 C 含量较高, 具有较高的稳定性。生物炭的 H/C 比和 O/C 比是评价生物炭稳定性的重要指标^[40]。5 种盐生植物生物炭的 H/C 比均小于 0.6, O/C 比均小于 0.2, 均符合欧洲生物炭认证 (EBC) 的生物炭评定标准 (H/C 比小于 0.7, O/C 比小于 0.4), 且具有较高的稳定性, 拥有超过 1 000 a 的半衰期^[41]。生物炭的高比表面积和发达的多级孔隙是其吸附和固定盐分离离子、改善土壤物理结构和水力性质、在盐碱土改良中发挥核心作用的关键物理特性^[42]。生物质原料是影响生物炭的表面形貌和孔隙结构特征的重要因子。芦苇生物炭和田菁生物炭的表面粗糙且不平整, 其余盐生植物生物炭表面光滑, 且附着有大量颗粒物, 这可能与原料有关。供试 5 种盐生植物生物炭中, 芦苇生物炭的比表面积最大, 平

均孔径最小。夏晓阳等^[43]认为较大比表面积和较小孔径的生物炭与土壤盐分的接触面积扩大, 对盐分离离子和养分的吸附能力增强, 从而降低土壤盐分含量, 提高土壤肥力, 实现盐碱土的改良。此外, 芦苇生物炭具有微孔、介孔和大孔共存的多级孔隙结构特征。生物炭的微孔可通过表面吸附位点直接捕获 Na^+ 等盐分离离子, 介孔作为水分和养分的传输通道, 能够改善土壤水力特性, 大孔能够增加盐碱土壤的透气性^[44-45]。而生物炭的多级孔隙结构能够为微生物提供梯度栖息环境, 有助于提高微生物的群落多样性^[46]。芦苇生物炭的物理结构有助于其在盐碱土改良中发挥核心作用。

生物炭通常呈碱性, 其 pH 值与生物炭的灰分含量等有关^[5]。芦苇生物炭的灰分含量和 pH 值最低。相比之下, 碱蓬生物炭、互花米草生物炭和柽柳生物炭的 pH 值较高, 可能与其在高温热解时产生大量灰分有关。与非盐生植物生物炭相比, 盐生植物生物炭通常具有更高的可溶性盐基离子含量和电导率^[36]。芦苇生物炭、互花米草生物炭和田菁生物炭的可溶性 Na^+ 含量均高于非盐生植物生物炭^[36, 47], 柽柳生物炭和碱蓬生物炭的电导率高达 $7.2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以上, 与上述研究结果一致。5 种盐生植物生物炭中芦苇生物炭的电导率最低, 其值低于畜禽粪便和厨余垃圾制备的生物炭^[48-49], 但仍略高于杨树 (*Populus* spp.) 等园

林废弃物制备的生物炭^[50]。5种盐生植物生物炭的可溶性盐基离子均以一价的 Na^+ 和 K^+ 为主,但其组成存在差异。芦苇生物炭和田菁生物炭的可溶性盐基离子以 K^+ 为主,而其他3种盐生植物生物炭的可溶性盐基离子组成以 Na^+ 为主,其中碱蓬生物炭中可溶性 Na^+ 含量最高。此外,互花米草生物炭的可溶性 Na^+ 、 K^+ 含量显著($p < 0.05$)高于柽柳生物炭,而柽柳生物炭中可溶性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量显著高于互花米草生物炭。5种盐生植物生物炭在电导率和可溶性盐基离子组成上的差异可能与不同类型盐生植物的耐盐机制有关。真盐生植物通过将吸收的盐离子储存于肉质化组织来适应盐环境^[24]。因此,碱蓬生物炭经热解形成的生物炭保留了几乎所有的盐基离子,导致其电导率、灰分含量和可溶性 Na^+ 含量较高。泌盐盐生植物可通过特定结构(如盐腺、囊泡)排出盐分。柽柳的根系具有选择性,能部分排斥 Na^+ ,优先吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子^[51];互花米草则主要通过细胞内合成脯氨酸等渗透调节物质以及积累高浓度盐离子来应对土壤中的盐分^[52]。假盐生植物将吸收的盐离子积累在根部,减少向地上部运输。Dong等^[19]的研究也支持上述结果,表明盐生植物生物炭的盐含量和电导率主要受植物类型的影响。碱蓬生物炭、互花米草生物炭和柽柳生物炭的高盐、高碱特性制约了其在盐碱土改良中的应用。

在5种盐生植物生物炭中,芦苇生物炭的pH值和电导率最低,C含量较高。此外,芦苇生物炭具有发达的多级孔隙结构和比表面积大的特性,使其在盐碱土改良中具有显著的应用潜力。通过盆栽实验证实,单一施用芦苇生物炭能够有效改善盐碱土壤性质。单一施用芦苇生物炭降低了盐碱土壤容重(降幅为4.93%)和pH值(降幅为0.89%)。这一结果与Su等^[53]基于全球987组数据进行Meta分析结果一致,即施用各类生物炭(作物剩余物、木材剩余物和粪便)平均降低盐碱土壤容重4.7%和pH值1.2%。在养分与碳库提升方面,单一施用芦苇生物炭显著提高盐碱土壤速效钾、有机质、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量。这与Cai等^[12]观察到的施用海水养殖固废生物炭提升土壤有机碳和有效养分的结果相似。这些结果表明单一施用芦苇生物炭能够促进土壤有机碳周转,提升土壤碳封存,并提高土壤养分有效性。在微生物活性增强方面,单一施用芦苇生物炭提高了盐碱土壤的微生物生物量碳含量以及脲酶、碱

性磷酸酶和过氧化氢酶活性。这与碱性生物炭能显著提高酶活性、碳利用率和微生物碳利用效率的研究结果相符^[54]。然而,由于芦苇生物炭自身携带的养分较少,单一施用芦苇生物炭对盐碱土壤中苜蓿幼苗地上部生长的影响不显著,仅显著促进了根系的伸长生长。同样,单一施用复合肥因对土壤结构和性质的改善作用较弱,对苜蓿生长的影响总体不显著。但是,芦苇生物炭和复合肥联合施用对盐碱土壤中苜蓿幼苗的生长具有协同促进作用,使苜蓿的株高、根长、分枝数和干质量相关指标显著高于对照。Pearson相关性分析结果显示:总体上看,苜蓿幼苗的生长指标与土壤pH值呈显著负相关,而与土壤电导率呈显著正相关。这表明苜蓿幼苗对土壤pH值较为敏感,但对土壤盐分表现出较好的耐受性,电导率在一定范围内的升高并未对其生长产生不利影响。苜蓿幼苗的根系伸长生长和干质量与土壤的有机质含量、颗粒有机碳含量、微生物生物量碳含量、脲酶和碱性磷酸酶活性呈正相关。这表明苜蓿幼苗根系发育依赖于肥沃、健康的土壤环境,特别是土壤有机质含量和微生物驱动的养分转化^[5,55]。苜蓿幼苗的地上部生长主要与土壤速效钾含量呈显著负相关,可能与钾吸收利用效率有关。

综上所述,不同类型盐生植物热解产生的生物炭的理化性质和表面形貌特征具有差异。泌盐盐生植物互花米草和柽柳以及真盐生植物碱蓬制备的生物炭的灰分含量、pH值和电导率较高,且可溶性 Na^+ 含量较高,比表面积较小,C含量较低,表面孔隙以大孔为主。假盐生植物芦苇和田菁制备的生物炭的电导率和可溶性盐基离子含量较低,C含量较高,稳定性强。其中芦苇生物炭不仅具有最低的pH值和电导率以及较低的可溶性 Na^+ 含量,而且其比表面积大,具有多级孔隙结构。将芦苇生物炭施用于盐碱土壤可改善土壤的物理结构和生化功能,提高土壤固碳能力。芦苇生物炭和复合肥联合施用对盐碱土壤中苜蓿幼苗的生长具有协同促进作用。

参考文献:

- [1] 白洋,董雨瑞,李姿莹.耕地碳汇与粮食安全保障协同推进的制度完善[J].世界农业,2023(8):76-87.
- [2] 宋玉凤,肖辉,张慧,等.基于盐碱地研究的可视化分析及改良技术的研究进展[J].环境生态学,2025,7(1):65-75.
- [3] 赵耕毛,杨梦圆,陈硕,等.我国盐碱地治理:现状、问题与展望[J].南京农业大学学报,2025,48(1):14-26.

- [4] CUI L Q, LIU Y M, YAN J L, et al. Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth [J]. *Ecological Engineering*, 2022, 179: 106594.
- [5] 魏盈, 焦乐, 张鹏, 等. 生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J]. *环境科学*, 2024, 45(2): 940-951.
- [6] MUEMA F M, RICHARDSON Y, KEITA A, et al. An interdisciplinary overview on biochar production engineering and its agronomic applications [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 190: 107416.
- [7] 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.
- [8] ZHENG N G, YU Y X, SHI W, et al. Biochar suppresses N₂O emissions and alters microbial communities in an acidic tea soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(35): 35978-35987.
- [9] CHINTALA R, MOLLINEDO J, SCHUMACHER T E, et al. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(3): 393-404.
- [10] ZUO W G, WANG S J, ZHOU Y X, et al. Conditional remediation performance of wheat straw biochar on three typical Cd-contaminated soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160998.
- [11] 张娟香, 李慧娟, 李发永, 等. 不同来源生物炭对盐渍土吸附铜离子的影响[J]. *环境化学*, 2025, 44(2): 617-627.
- [12] CAI Y K, REN L P, WU L L, et al. Saline-alkali soil amended with biochar derived from maricultural-solid-waste: ameliorative effect and mechanism [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122134.
- [13] 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.
- [14] FAN X L, ZHANG J J, XIE Y, et al. Biochar produced from the co-pyrolysis of sewage sludge and waste tires for cadmium and tetracycline adsorption from water [J]. *Water Science and Technology*, 2021, 83(6): 1429-1445.
- [15] 王伟, 隋秀玉, 李晓晖, 等. 农林废弃物生物炭制备及其在土壤中的应用研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(1): 1-9.
- [16] DENG S J, LU X W, LEI K, et al. Effects of phosphorus and manganese modified apple pomace biochar on soil characteristics and its immobilization effect on Cd in polluted soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(7): 2751-2763.
- [17] CAO X D, HARRIS W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [18] 贾燕芳. 盐生植物修复盐碱地应用及资源化利用途径 [J]. *农业开发与装备*, 2020(1): 41-42.
- [19] DONG X L, WANG J T, LIU X J, et al. Characterization of halophyte biochar and its effects on water and salt contents in saline soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(8): 11831-11842.
- [20] WANG X Y, SUN T, MA H G, et al. Effects of acidic phosphorus-rich biochar from halophyte species on P availability and fractions in alkaline soils [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, 9(1): 101.
- [21] 薛琼琼, 赵露露, 王云霞, 等. 盐生植物耐盐性研究进展 [J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(5): 60-65.
- [22] ZHAO K F, SONG J, FENG G, et al. Species, types, distribution, and economic potential of halophytes in China [J]. *Plant and Soil*, 2011, 342(1/2): 495-509.
- [23] ZHAO S, LIU X, BANERJEE S, et al. Continuous planting of euhalophyte *Suaeda salsa* enhances microbial diversity and multifunctionality of saline soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2024, 90(4): e02355-23.
- [24] 刘佳欣, 张会龙, 邹荣松, 等. 不同类型盐生植物适应盐胁迫的生理生长机制及 Na⁺ 逆向转运研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2023, 39(1): 59-71.
- [25] 尹丹丹, 王留强, 曹媛, 等. 柽柳属植物盐腺的扫描电镜制样方法比较及观察 [J]. *电子显微学报*, 2024, 43(3): 354-361.
- [26] 马秋雨, 袁芳. 植物盐腺泌盐及发育研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2023, 39(11): 74-85.
- [27] 李俊哲, 徐泽, 刘昱彤, 等. 盐生植物生物炭改良盐碱地前景探讨 [J]. *环境与发展*, 2021, 33(1): 93-96.
- [28] 毛明月, 赵振勇, 王守乐, 等. 5种盐生植物生物炭产率及其理化性质 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1494-1501.
- [29] XIAO H Y, LIU Q M, LIU G T, et al. Comparison of biochar properties from 5 kinds of halophyte produced by slow pyrolysis at 500 °C [J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 12.
- [30] GE S Q, WANG S L, MAI W X, et al. Characteristics and acidic soil amelioration effects of biochar derived from a typical halophyte *Salicornia europaea* L. (common glasswort) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(24): 66113-66124.
- [31] WEI J, TU C, YUAN G D, et al. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 56-65.
- [32] 张程雪, 李双男, 张皓禹, 等. 盐生植物生物炭吸附海水养殖废水氨氮和 COD 的效果分析及其资源化利用研究 [J]. *山东化工*, 2023, 52(4): 219-222.
- [33] LIU S W, CEN B T, YU Z N, et al. The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity [J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 52.
- [34] GUO W P, YAO X, CHEN Z, et al. Recent advance on application of biochar in remediation of heavy metal contaminated soil: emphasis on reaction factor, immobilization mechanism and functional modification [J]. *Journal of Environmental Management*,

- 2025, 371: 123212.
- [35] LIU Z Z, JIA M Y, LI Q, et al. Comparative analysis of the properties of biochars produced from different pecan feedstocks and pyrolysis temperatures[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 197: 116638.
- [36] PARIYAR P, KUMARI K, JAIN M K, et al. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136433.
- [37] LATAF A, JOZEFCAK M, VANDECASTEELE B, et al. The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 168: 105728.
- [38] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [39] XIE J, CHEN Y X, HUANG R, et al. Long-term nitrogen application decreased mineral-associated organic carbon while increasing particulate organic carbon in purple soil in southwest China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123455.
- [40] 高诚祥, 刘玉学, 汪玉瑛, 等. 生物炭的稳定性及其对矿物改性的响应机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3245-3251.
- [41] SPOKAS K A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O : C molar ratios [J]. *Carbon Management*, 2010, 1(2): 289-303.
- [42] 吴 畏, 高佩玲, 郭祥林, 等. 微咸水与生物炭协同作用对盐碱土入渗特征及水盐运移的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 160-167.
- [43] 夏晓阳, 王响玲, 夏 浩, 等. 改性生物炭特征及其对盐碱化土壤改良的研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(5): 12-19.
- [44] SUN J N, YANG R Y, ZHU J J, et al. Can the increase of irrigation frequency improve the rate of water and salt migration in biochar-amended saline soil? [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(12): 4021-4030.
- [45] LI H, TAN Z X. Preparation of high water-retaining biochar and its mechanism of alleviating drought stress in the soil and plant system [J]. *Biochar*, 2021, 3: 579-590.
- [46] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(6): 689-701.
- [47] LONTSI G R M, DJOUSSE B M K, PERNOT C, et al. Production and characterization of eight biochars originating from agricultural waste in Cameroon [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2024, 26(5): 3280-3290.
- [48] SUN X Y, SHAN R F, LI X H, et al. Characterization of 60 types of Chinese biomass waste and resultant biochars in terms of their candidacy for soil application [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(9): 1423-1435.
- [49] RATHNAYAKE D, SCHMIDT H-P, LEIFELD J, et al. Biochar from animal manure: a critical assessment on technical feasibility, economic viability, and ecological impact [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2023, 15(9): 1078-1104.
- [50] 孙 玲, 贾明云, 刘壮壮, 等. 不同热解温度和升温速率下杨树枝条生物质炭产率和理化性质分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(3): 71-82, 91.
- [51] 丁效东, 张士荣, 宋 杰, 等. 不同抗盐机制对怪柳适应盐渍环境的贡献[J]. *干旱区研究*, 2007(2): 207-212.
- [52] 赵 阳. 互花米草(*Spartina alterniflora*)耐盐关键功能基因及其耐盐机制研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2022: 15-16.
- [53] 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.
- [54] 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(1): 68.
- [55] 刘 淼, 王志春, 杨 福, 等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 1-8.

(责任编辑: 张明霞)