

# 不同制备方式杨树枝条炭对滨海盐碱土壤理化性质和海滨锦葵生长的影响

贾明云<sup>1</sup>, 陈欣雨<sup>1</sup>, 刘壮壮<sup>1</sup>, 侯焯琪<sup>1</sup>, 刘艳双<sup>2</sup>, 刘磊<sup>2</sup>, 于金平<sup>1,①</sup>

[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:** 通过盆栽实验探讨了不同热解温度和升温速率制备的杨树(*Populus* spp.) 枝条炭对滨海盐碱土壤理化性质和海滨锦葵(*Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray) 生长的影响。结果显示: 与对照相比, 400~700 °C 制备的杨树枝条炭提高了滨海盐碱土壤有机质、铵态氮、有效磷和速效钾含量, 降低了土壤电导率和硝态氮含量。同一升温速率(10 °C · min<sup>-1</sup>)下, 与对照相比, 500 °C 制备的杨树枝条炭显著( $P < 0.05$ )促进了海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量、总干质量、叶绿素相对含量、叶绿素 *a* 含量、叶绿素 *b* 含量, 增幅分别为 53.8%、102.8%、88.9%、98.1%、8.7%、27.4%、59.5%, 对海滨锦葵生长的促进效果最佳; 其次是 600 和 700 °C 制备的杨树枝条炭, 其中, 700 °C 制备的杨树枝条炭更有利于根系生长; 300 °C 制备的杨树枝条炭抑制了海滨锦葵的生长。慢速升温(10 °C · min<sup>-1</sup>)比快速升温(30~50 °C · min<sup>-1</sup>)制备的杨树枝条炭更有利于海滨锦葵干质量的积累。海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量、总干质量与土壤的 pH 值、有机质含量、有效磷含量、速效钾含量总体呈显著或极显著( $P < 0.01$ )正相关, 而与土壤电导率呈极显著负相关。杨树枝条炭的热解温度和升温速率均能影响滨海盐碱土壤的理化性质及海滨锦葵的生长, 其中热解温度是主要影响因子。综合研究结果表明: 杨树枝条炭主要通过改善根际生长环境、提高植物养分供应及对盐胁迫的耐受能力, 促进海滨锦葵生长, 其中, 500 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭对海滨锦葵生长的促进效果最好。

**关键词:** 杨树枝条炭; 盐碱土壤; 海滨锦葵; 制备方式; 土壤理化性质

中图分类号: Q945.1; S888.5; S792.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)05-0023-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.05.03

**Effects of poplar (*Populus* spp.) branch biochar prepared with different methods on physical and chemical properties of coastal saline-alkali soil and growth of *Kosteletzkya virginica*** JIA Mingyun<sup>1</sup>,

CHEN Xinyu<sup>1</sup>, LIU Zhuangzhuang<sup>1</sup>, HOU Zhaoqi<sup>1</sup>, LIU Yanshuang<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>2</sup>, YU Jinping<sup>1,①</sup>

[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): 23-32

**Abstract:** The effects of poplar (*Populus* spp.) branch biochar prepared at different pyrolysis temperatures and heating rates on physical and chemical properties of coastal saline-alkali soil and growth of *Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray were investigated by using pot experiments. The results show that compared with the control, poplar branch biochar prepared at 400-700 °C increase the contents of organic matter, ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium in coastal

收稿日期: 2025-04-30

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022306)

作者简介: 贾明云(1985—), 女, 河南南阳人, 博士, 副研究员, 主要从事植物生态修复方面的研究。

①通信作者 E-mail: yujinping@cnbg.net

引用格式: 贾明云, 陈欣雨, 刘壮壮, 等. 不同制备方式杨树枝条炭对滨海盐碱土壤理化性质和海滨锦葵生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 23-32.

saline-alkali soil, while reducing soil electric conductivity and nitrate nitrogen content. Under the same heating rate ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ), compared with the control, poplar branch biochar prepared at  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  significantly ( $P<0.05$ ) promotes height, above-ground part dry mass, root dry mass, total dry mass, chlorophyll relative content, chlorophyll *a* content, and chlorophyll *b* content of *K. virginica*, and the increase amplitudes are 53.8%, 102.8%, 88.9%, 98.1%, 8.7%, 27.4%, and 59.5%, respectively, demonstrating the best growth-promoting effect on *K. virginica*; followed by poplar branch biochar prepared at 600 and  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , among which, poplar branch biochar prepared at  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  is more beneficial for root growth; poplar branch biochar prepared at  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  inhibits the growth of *K. virginica*. Poplar branch biochar prepared at slow heating rate ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) is more beneficial for dry mass accumulation of *K. virginica* than those prepared at fast heating rate ( $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Height, above-ground part dry mass, root dry mass, and total dry mass of *K. virginica* show significant or extremely significant ( $P<0.01$ ) positive correlations with soil pH value, organic matter content, available phosphorus content, and available potassium content, but show extremely significant negative correlations with soil electric conductivity. Both pyrolysis temperature and heating rate of poplar branch biochar can influence the physical and chemical properties of coastal saline-alkali soil and growth of *K. virginica*, among which pyrolysis temperature is the dominant effect factor. The comprehensive research results suggest that the poplar branch biochar primarily promotes *K. virginica* growth by improving the rhizosphere environment, enhancing plant nutrient supply, and increasing salt stress tolerance, among which, poplar branch biochar prepared at  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  exhibits the best growth-promoting effects on *K. virginica*.

**Key words:** poplar (*Populus* spp.) branch biochar; saline-alkali soil; *Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray; preparation method; soil physical and chemical property

盐碱地是全球范围内限制农业生产和威胁生态环境安全的重要土地退化类型。据统计,全球盐碱地总面积约  $11\times 10^8\text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>,占陆地总面积的 8.7%。中国盐碱地面积达  $9.913\times 10^7\text{ hm}^2$ ,居全球第 3 位<sup>[2]</sup>。盐碱地难以被利用的关键问题在于土壤中钠盐积累、酸碱度 (pH) 升高、有机质匮乏及养分失衡,导致土壤结构板结、渗透性下降、肥力不足<sup>[2-3]</sup>。此外,盐碱土壤的水溶盐含量过高直接影响植物对养分的获取和运输,导致养分失衡,抑制植物生长,造成植物生产力下降和环境生态功能退化<sup>[2,4]</sup>。因此,探索盐碱土壤改良措施、提高土地生产力,对保障耕地资源稳定和生态环境安全等具有重要意义。传统的盐碱土壤改良措施主要有物理工程措施(客土回填、水利工程、暗管排盐等)和化学改良(脱硫石膏、磷矿粉、腐殖酸等改良剂),耗费较大,且可能产生二次污染<sup>[2,5]</sup>。近年来兴起的生物改良措施(耐盐植物和微生物修复),虽成本较低,但见效慢<sup>[2-3,5]</sup>。亟需开发与传统改良技术兼容且效果显著的新型盐碱土壤改良剂,以实现盐碱地的绿色、精准改良与可持续利用。

生物炭(biochar)是一种由生物质原料在限氧条件下通过热裂解产生的多孔富碳材料<sup>[6]</sup>。因其具有较高的比表面积、化学稳定性和吸附能力,已成为一种环境友好的新型修复材料。大量研究表明:生物炭

可提高土壤质量,为植物生长创造更有利的生存环境<sup>[7]</sup>。近年来关于生物炭在盐碱土壤改良中的应用受到越来越多的关注<sup>[8]</sup>。目前的研究表明:生物炭可通过提高土壤持水能力和增加土壤有效含水量改善土壤水文特性,从而缓解植物盐胁迫<sup>[9]</sup>。施用生物炭可促进土壤小颗粒结合形成中等团聚体,并构建孔隙通道以改善土壤渗透性、加速盐分淋洗,从而降低土壤盐分<sup>[10-11]</sup>。施用生物炭可减少养分淋失(如  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ),释放自身养分,提高土壤养分库容量及养分有效性<sup>[12]</sup>。土壤环境的这些改变可促进植物根系生长,改善微生物群落结构,调节植物激素谱和抗氧化系统,进而促进植物生长<sup>[12-15]</sup>。然而,由于土壤类型以及生物炭的物料来源、热解条件和施用方式等方面的差异,出现了一些矛盾的结果<sup>[11,16-20]</sup>。如 Maucieri 等<sup>[19]</sup>发现施用生物炭可降低黏壤土的电导率(EC),加速盐分淋溶,进而缓解盐分胁迫;而 Li 等<sup>[20]</sup>发现施用玉米(*Zea mays* Linn.)秸秆炭提高了砂壤土的 EC 值。Su 等<sup>[8]</sup>利用全球 987 组数据进行 Meta 分析,发现木本植物废弃物制备的生物炭对盐碱土中植物生产力的促进作用更为显著。这可能与木本植物的木质素含量高,制备的生物炭碳含量高、比表面积大、含盐量低有关<sup>[21-22]</sup>。生物炭的热解温度和升温速率是影响土壤容重、pH 值和有机碳含量

的主要因子。通常来说,低温热解制备的生物炭的pH和EC值较低,有利于其在盐碱土壤改良中的应用;高温热解制备的生物炭虽然具有较高的pH和EC值,但是其碳含量高、比表面积大,有利于改善土壤物理结构<sup>[8,21-22]</sup>。因此,探索不同热解条件下制备的生物炭对盐碱土壤理化性质和植物生长的影响,对于推动生物炭技术在盐碱土壤改良中的高效应用具有重要意义。

根据《中国林业和草原统计年鉴2023》(<https://www.forestry.gov.cn/u/cms/www/202507/080923501n0e.pdf>)数据测算,中国林业废弃物资源量约 $3.81 \times 10^8$  t。杨树(*Populus* spp.)作为中国北方主要的造林树种,其种植面积超过 $7.57 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,木材产量占全国木材产量的30%左右,采伐和加工剩余物产量巨大<sup>[23]</sup>。然而,目前关于杨树剩余物制备的生物炭用于滨海盐碱土改良的研究尚未见报道。

海滨锦葵 [*Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray] 是原产北美盐沼的多年生耐盐先锋植物,1992年引种至中国。海滨锦葵种子含油率高,富含蛋白质、脂质和矿质元素等营养;块根含多糖、黄酮等抗炎成分;花大而艳,花期长达2~3个月,是海滨景观大道优选绿化植物<sup>[24-25]</sup>。海滨锦葵的核心优势为极端耐盐,在含盐量高达2.5%的基质中可生长,兼具耐旱、耐涝等环境胁迫抗性<sup>[25]</sup>。由于其生态与经济价值,海滨锦葵成为当前沿海滩涂盐碱地修复与综合利用的优选物种。为明确园林废弃物生物炭在中国盐碱土壤改良中的应用效果,本研究以前期实验室在不同热解温度和升温速率下制备的杨树枝条炭<sup>[22]</sup>为原料,通过探索其对滨海盐碱土壤理化性质及海滨锦葵生长的影响,明确适宜盐碱土壤改良的生物炭制备条件,为推动盐碱地生物炭改良技术的快速、健康发展提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验用土壤取自江苏省连云港市连云区滨海(北纬 $34^{\circ}46'45''$ 、东经 $119^{\circ}17'10''$ )盐碱土。采集0~20 cm表层土壤,自然风干后过孔径2 mm筛。供试土壤的电导率为 $2.25 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,可溶盐含量为1.74%,酸碱度为pH 9.17。土壤中有有机质、碱解氮、有效磷、速效钾的含量分别为 $2.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $6.88$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $25.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $61.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

实验用生物炭原材料为杨树枝条,采自江苏省句容市下蜀林场(北纬 $32^{\circ}07'12''$ 、东经 $119^{\circ}13'04''$ )。生物炭的制备方法和基本理化性质详见文献<sup>[22]</sup>。供试海滨锦葵种子由连云港金海岸开发建设有限公司提供。实验用有机肥购自南京宁粮生物工程有限公司,主要原料为鸡粪和食用菌,其中,N含量大于或等于1.5%, $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量大于或等于1.1%, $\text{K}_2\text{O}$ 含量大于或等于1.4%,有机质含量大于或等于30%。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计 盆栽实验于2022年4—6月在江苏省中国科学院植物研究所进行,采用完全随机实验,共设置8个处理组。对照(CK)组为不添加生物炭处理;A组为 $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭;B1组为 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭;B2组为 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭;B3组为 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭;C组为 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭;D组为 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭;E组为 $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的杨树枝条炭,添加量均为盆栽基质总质量的5%。每个处理设置4个重复。将土壤与生物炭按照上述处理中的比例混合,再加入盆栽基质总质量3%的有机肥作为底肥,混合均匀后装入塑料盆(上口口径15.5 cm、下口径12.0 cm、高14.0 cm),每盆装基质1.5 kg。每盆播入5粒海滨锦葵种子,待种子萌发并长出2枚真叶后,每盆保留1株幼苗。盆栽置于塑料温室大棚中,实验期间保持土壤水分含量为田间最大持水量的40%~60%,并做好病虫害防治等管理措施。

1.2.2 土壤理化性质测定 植物收获(幼苗定植后第60天)后,采集0~20 cm表层土壤样品,部分鲜样置于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱,用于测定铵态氮和硝态氮含量,其余样品风干后过孔径2 mm筛。风干土和去离子水以1:5( $m:V$ )比例混匀,使用雷磁PHS-3E pH计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定pH值<sup>[26]12-13</sup>,使用雷磁DDS-307电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定电导率<sup>[26]87-88</sup>。采用重铬酸钾外加热法<sup>[26]107-108</sup>测定有机质含量,采用紫外分光光度法<sup>[27]</sup>测定硝态氮含量,采用靛酚蓝比色法<sup>[26]159-160</sup>测定铵态氮含量,采用Olsen法<sup>[26]180-181</sup>测定有效磷含量,采用乙酸铵提取-火焰光度法<sup>[26]193-195</sup>测定速效钾含量。

1.2.3 植物生长指标测定 使用 SPAD-502 Plus 便携式叶绿素仪(美国 Spectrum 公司)于收获当天 9:00 测定海滨锦葵叶片叶绿素相对含量,并参照刘树文<sup>[28]</sup>的方法测定叶片叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 含量,每株随机选取 3 枚叶片,每枚叶片重复测定 3 次。使用卷尺(精度 0.1 cm)测量株高。将植株的地上部与根分离,分别装入信封,置于 105 °C 烘箱杀青 30 min,随后在 65 °C 下烘干至恒质量,使用千分之一电子天平称量地上部干质量( $m_a$ )和根干质量( $m_r$ )。根冠比为  $m_r$  与  $m_a$  的比值<sup>[29]</sup>。

### 1.3 数据处理和分析

使用 EXCEL 2019 软件处理数据。使用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用 Duncan's 新复极差检验分析不同处理间的差异显著性,并对海滨锦葵生长指标与土壤理化性质指标进行 Pearson 相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同制备方式杨树枝条炭对盐碱土壤理化性质的影响

2.1.1 对土壤 pH 值和电导率的影响 结果(表 1)显示:与对照相比,仅 700 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理的土壤 pH 值显著升高( $P < 0.05$ ),而 400 °C、30 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理的土壤 pH 值降幅最大。不同制备方式杨树枝条炭处理降低了土壤电导率,降幅为 12.3% ~ 57.6%,其中,400 ~

700 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 以及 400 °C、50 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理显著降低了土壤电导率。

2.1.2 对土壤养分含量的影响 结果(表 1)显示:与对照相比,不同制备方式杨树枝条炭处理显著提高了土壤有机质含量,提高了 1.7~12.8 倍;500~700 °C 制备的杨树枝条炭处理的土壤有机质含量较高,其中,600 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理的土壤有机质含量最高(40.69 g · kg<sup>-1</sup>),表明施用高温热解的生物炭更有利于有机质的积累。

结果(表 1)还显示:与对照相比,不同制备方式杨树枝条炭处理降低了土壤硝态氮含量,降幅为 10.8%~46.9%,其中,300 °C、10 °C · min<sup>-1</sup>,400 °C、10 °C · min<sup>-1</sup>,400 °C、30 °C · min<sup>-1</sup> 以及 500 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理与对照差异显著。不同制备方式杨树枝条炭处理提高了土壤铵态氮含量,增幅为 9.5%~52.0%,其中,仅 500 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理与对照差异显著。不同制备方式杨树枝条炭处理提高了土壤有效磷含量,增幅为 5.2%~32.1%,其中,仅 500 °C、10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理与对照差异显著。不同制备方式杨树枝条炭处理总体显著提高了土壤速效钾含量,增幅为 10.1%~101.5%。

### 2.2 不同制备方式杨树枝条炭对海滨锦葵生长的影响

结果(表 2)显示:同一升温速率(10 °C · min<sup>-1</sup>)下,与对照相比,300 °C 制备的杨树枝条炭明显抑制了海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量、总干质

表 1 不同制备方式杨树枝条炭对盐碱土壤理化性质的影响( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Effects of poplar (*Populus* spp.) branch biochar prepared with different methods on saline-alkali soil physical and chemical properties ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

热解温度/°C Pyrolysis temperature	升温速率/(°C · min <sup>-1</sup> ) Heating rate	pH 值 pH value	电导率/(mS · cm <sup>-1</sup> ) Electric conductivity	含量 Content				
				有机质/(g · kg <sup>-1</sup> ) Organic matter	硝态氮/(mg · kg <sup>-1</sup> ) Nitrate nitrogen	铵态氮/(mg · kg <sup>-1</sup> ) Ammonium nitrogen	有效磷/(mg · kg <sup>-1</sup> ) Available phosphorus	速效钾/(mg · kg <sup>-1</sup> ) Available potassium
CK	CK	8.68±0.03bc	2.69±0.36a	2.94±0.31e	1.30±0.08a	2.96±0.12b	27.49±2.86b	273.00±11.13b
300	10	8.65±0.08c	2.34±0.42ab	7.99±1.39d	0.69±0.06d	3.59±0.17b	33.05±5.32ab	300.70±80.65b
400	10	8.63±0.09c	1.80±0.16cd	24.53±2.88c	0.69±0.26d	3.64±0.27b	31.01±1.81ab	528.00±66.30a
400	30	8.61±0.09c	2.36±0.18a	25.36±3.94c	0.77±0.12cd	3.74±0.57ab	35.78±2.33ab	518.00±11.53a
400	50	8.71±0.06bc	1.90±0.08bc	25.11±4.54c	1.07±0.04abc	3.73±0.45ab	28.92±2.33ab	497.00±70.15a
500	10	8.84±0.03ab	1.21±0.25e	37.28±1.75ab	0.92±0.22bcd	4.50±0.18a	36.31±8.01a	527.67±59.05a
600	10	8.83±0.14ab	1.44±0.25de	40.69±3.80a	0.98±0.34abcd	3.36±0.80b	35.00±4.63ab	536.67±35.23a
700	10	8.93±0.13a	1.14±0.08e	34.15±1.30b	1.16±0.08ab	3.26±0.58b	35.96±3.95ab	550.00±97.04a

<sup>1)</sup> CK; 对照 The control. 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ).

量、根冠比、叶绿素相对含量、叶绿素 *a* 含量、叶绿素 *b* 含量, 降幅分别为 11.2%、30.3%、49.4%、36.4%、28.3%、7.3%、22.6%、51.4%; 500~700 °C 制备的杨树枝条炭显著 ( $P<0.05$ ) 促进了海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量、总干质量, 其中, 施用 500 °C 制备的杨树枝条炭的促进效果最好, 增幅分别为 53.8%、102.8%、88.9%、98.1%; 500 °C 制备的杨树枝条炭显著促进了海滨锦葵的叶绿素相对含量、叶绿素 *a* 含量、叶绿素 *b* 含量, 增幅分别为 8.7%、27.4%、59.5%; 除了 700 °C 制备的杨树枝条炭外, 其他热解温度制备的杨树枝条炭均降低了海滨锦葵的根冠比。

结果(表 2)还显示: 同一热解温度(400 °C)下, 杨树枝条炭处理的海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量、总干质量、根冠比、叶绿素相对含量、叶绿

素 *a* 含量、叶绿素 *b* 含量总体随升温速率的增加而降低, 但与对照差异不显著; 50 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理的海滨锦葵株高、地上部干质量、根干质量和总干质量较 10 °C · min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理显著降低。

### 2.3 海滨锦葵生长与土壤理化性质的关系

海滨锦葵生长指标与土壤理化指标间的相关性分析见表 3。结果显示: 海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量、总干质量和根冠比与土壤 pH 值呈显著 ( $P<0.05$ ) 或极显著 ( $P<0.01$ ) 正相关, 而与土壤电导率呈显著或极显著负相关; 海滨锦葵的株高、地上部干质量、根干质量和总干质量与土壤有机质和速效钾含量呈显著或极显著正相关; 海滨锦葵的地上部干质量、根干质量和总干质量还与土壤有效磷含量呈

表 2 不同制备方式杨树枝条炭对海滨锦葵生长的影响 ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of poplar (*Populus* spp.) branch biochar prepared with different methods on the growth of *Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

<i>t</i> /°C	<i>v</i> / (°C · min <sup>-1</sup> )	株高/cm Height	干质量/g Dry mass			根冠比 Root-shoot ratio	SPAD	含量/(mg · g <sup>-1</sup> ) Content	
			地上部 Above-ground part	根 Root	总计 Total			叶绿素 <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	叶绿素 <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>
CK	CK	15.23±0.15d	3.90±0.20cd	1.80±0.20c	5.71±0.39cd	0.46±0.03ab	31.99±1.09bc	1.06±0.11bc	0.37±0.09bc
300	10	13.53±0.78e	2.72±0.38d	0.91±0.08e	3.63±0.46e	0.33±0.02c	29.64±0.69d	0.82±0.07d	0.18±0.06d
400	10	16.73±0.42c	4.71±0.79c	2.01±0.20c	6.71±0.99c	0.43±0.03b	32.05±1.19bc	1.07±0.12bc	0.38±0.09bc
400	30	14.80±0.75de	3.83±0.75cd	1.57±0.23cd	5.40±0.98cde	0.41±0.03b	31.37±0.86bcd	1.00±0.09bcd	0.32±0.07bcd
400	50	14.03±0.31de	3.27±0.60d	1.34±0.30de	4.61±0.90de	0.41±0.02b	30.23±0.55cd	0.88±0.06cd	0.23±0.04cd
500	10	23.43±0.15a	7.91±1.19a	3.40±0.34a	11.31±1.53a	0.43±0.02b	34.77±1.39a	1.35±0.14a	0.59±0.11a
600	10	19.57±0.87b	6.23±1.05b	2.81±0.28b	9.04±1.33b	0.45±0.03ab	32.61±1.45b	1.13±0.15b	0.42±0.12b
700	10	20.20±1.87b	6.13±0.68b	3.00±0.31ab	9.14±0.93b	0.49±0.04a	31.90±1.07bc	1.05±0.11bc	0.36±0.09bc

<sup>1)</sup> *t*: 热解温度 Pyrolysis temperature; *v*: 升温速率 Heating rate; SPAD: 叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content; CK: 对照 The control. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P<0.05$ ).

表 3 海滨锦葵生长指标与土壤理化指标间的相关性<sup>1)</sup>

Table 3 Correlations between growth indexes of *Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray and soil physical and chemical indexes

生长指标 Growth index	相关系数 Correlation coefficient						
	pH 值 pH value	电导率 Electric conductivity	有机质含量 Organic matter content	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	有效磷含量 Available phosphorus content	速效钾含量 Available potassium content
株高 Height	0.650 **	-0.780 **	0.716 **	0.121	0.296	0.395	0.505 *
地上部干质量 Dry mass of above-ground part	0.661 **	-0.679 **	0.732 **	0.239	0.353	0.510 *	0.555 **
根干质量 Root dry mass	0.718 **	-0.721 **	0.734 **	0.300	0.245	0.454 *	0.567 **
总干质量 Total dry mass	0.684 **	-0.697 **	0.738 **	0.260	0.320	0.495 *	0.563 **
根冠比 Root-shoot ratio	0.429 *	-0.420 *	0.349	0.376	-0.258	-0.025	0.332
叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content	0.250	-0.495 *	0.451 *	-0.025	0.127	0.130	0.310
叶绿素 <i>a</i> 含量 Chlorophyll <i>a</i> content	0.239	-0.495 *	0.453 *	-0.370	0.130	0.124	0.312
叶绿素 <i>b</i> 含量 Chlorophyll <i>b</i> content	0.255	-0.494 *	0.452 *	-0.200	0.135	0.129	0.313

<sup>1)</sup> \* :  $P<0.05$ ; \*\* :  $P<0.01$ .

显著正相关。海滨锦葵的叶绿素相对含量、叶绿素 *a* 含量和叶绿素 *b* 含量与土壤电导率呈显著负相关,而与土壤有机质含量呈显著正相关。海滨锦葵的生长指标与土壤硝态氮和铵态氮含量均无显著相关性。

#### 2.4 生物炭制备方式对土壤理化性质和海滨锦葵生长的影响

热解温度和升温速率对土壤理化性质和海滨锦葵生长影响的单因素方差分析结果见表4。结果显示:热解温度显著( $P < 0.05$ )影响土壤 pH 值、电导率、有机质含量和速效钾含量;升温速率仅显著影响土壤电导率和有效磷含量。热解温度对海滨锦葵的所有生长指标均有显著影响;升温速率仅显著影响株高和根干质量。

综上,杨树枝条炭的热解温度和升温速率对土壤理化性质和海滨锦葵生长均有一定的影响,其中,热解温度是改良盐碱土壤理化性质与促进海滨锦葵生长的主要影响因素,升温速率主要影响土壤电导率、有效磷含量以及海滨锦葵的株高和根干质量。

表4 热解温度和升温速率对土壤理化性质和海滨锦葵生长影响的单因素方差分析结果<sup>1)</sup>

Table 4 Results of one-way ANOVA for effects of pyrolysis temperature and heating rate on soil physical and chemical properties and growth of *Kosteletzkya virginica* (Linn.) C. Presl ex A. Gray<sup>1)</sup>

指标 Index	热解温度 Pyrolysis temperature		升温速率 Heating rate	
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
	pH	5.048	0.017	1.414
EC	10.837	0.001	12.038	0.008
$w_1$	88.360	0.000	0.037	0.964
$w_2$	2.533	0.106	4.330	0.069
$w_3$	3.237	0.060	0.049	0.952
$w_4$	0.555	0.700	7.873	0.021
$w_5$	6.658	0.007	0.238	0.795
<i>h</i>	41.369	0.000	20.825	0.002
$m_1$	15.027	0.000	3.041	0.122
$m_2$	44.822	0.000	5.617	0.042
$m_3$	20.798	0.000	3.695	0.090
R	10.667	0.001	0.541	0.608
SPAD	7.128	0.006	3.063	0.121
$w_{Chla}$	7.912	0.004	3.054	0.120
$w_{Chlb}$	6.843	0.012	3.062	0.121

<sup>1)</sup> pH: pH 值 pH value; EC: 电导率 Electric conductivity;  $w_1$ : 有机质含量 Organic matter content;  $w_2$ : 硝态氮含量 Nitrate nitrogen content;  $w_3$ : 铵态氮含量 Ammonium nitrogen content;  $w_4$ : 有效磷含量 Available phosphorus content;  $w_5$ : 速效钾含量 Available potassium content; *h*: 株高 Height;  $m_1$ : 地上部干质量 Dry mass of above-ground part;  $m_2$ : 根干质量 Root dry mass;  $m_3$ : 总干质量 Total dry mass; R: 根冠比 Root-shoot ratio; SPAD: 叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content;  $w_{Chla}$ : 叶绿素 *a* 含量 Chlorophyll *a* content;  $w_{Chlb}$ : 叶绿素 *b* 含量 Chlorophyll *b* content.

### 3 讨论和结论

#### 3.1 杨树枝条炭对盐碱土壤理化性质的影响

土壤 pH 值是影响土壤性质和过程的主控变量,是决定盐碱生境植物生长和产量的关键因子,也是评价农业改良措施影响土壤健康状况的重要指标<sup>[30]</sup>。Su 等<sup>[8]</sup>研究发现,生物炭的原料来源、热解温度及 pH 值是引起盐碱土壤 pH 值变化的重要因子,整体而言,施用木质原料生物炭会引起土壤 pH 值升高;施用热解温度低于 400 °C 或高于 600 °C 制备的生物炭能降低土壤 pH 值,而施用热解温度 400~600 °C 制备的生物炭导致土壤 pH 值升高;施用酸碱度小于 pH 7.6 的生物炭可降低土壤 pH 值,而施用酸碱度大于 pH 9.0 的生物炭则导致土壤 pH 值升高。本研究发现,同一升温速率(10 °C · min<sup>-1</sup>)下,300 和 400 °C 制备的杨树枝条炭使土壤 pH 值略有降低(降幅分别为 0.3% 和 0.6%),而 500~700 °C 制备的杨树枝条炭提高了土壤 pH 值(增幅为 1.7%~2.9%)。300 和 400 °C 制备的杨树枝条炭降低了土壤 pH 值,这可能是由于此热解条件下,杨树枝条炭表面含有酸性有机含氧官能团(如-COOH、-OH)<sup>[22]</sup>,这些基团可直接释放 H<sup>+</sup>,或者 H<sup>+</sup>与土壤中的 Na<sup>+</sup>发生交换反应<sup>[4]</sup>,引起土壤 pH 值下降。此外,Saifullah 等<sup>[31]</sup>认为,土壤 pH 值的变化,主要由盐碱土壤和生物炭 pH 值的差异决定。300 和 400 °C 制备的杨树枝条炭的 pH 值分别为 pH 5.65 和 pH 7.13<sup>[22]</sup>,远低于供试土壤的初始 pH 值(pH 9.17),这可能是这 2 种生物炭能够降低土壤 pH 值的又一原因。热解温度升高至 500~700 °C,杨树枝条炭的灰分含量增加,pH 值升高(pH 8.83 至 pH 9.72)<sup>[22]</sup>,接近甚至高于土壤初始 pH 值。此外,随热解温度升高至 500~700 °C,杨树枝条炭在 1 622 cm<sup>-1</sup>(C=O)附近的红外光谱吸收峰强度降低<sup>[22]</sup>,酸性含氧官能团(羧基、羰基等)含量降低,对土壤 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等碱性阳离子的吸附能力降低,可能引起土壤碱性增加<sup>[30]</sup>。

降低土壤可溶盐含量、减轻植物盐胁迫是盐碱地改良的最终目标。电导率是反映盐碱土结构和生物质量对作物管理措施响应的一个重要化学指标<sup>[31]</sup>。Su 等<sup>[8]</sup>的研究结果显示:施用作物剩余物、木料以及粪便热解制备的生物炭能够使盐碱土的电导率降低 7.4%(均值);Chaganti 等<sup>[32]</sup>的研究结果表明:与未改

良的土壤相比,木屑生物炭处理使盐碱土壤饱和浸提液的电导率降低 84%;Mao 等<sup>[33]</sup>通过盆栽实验发现施用杏(*Prunus armeniaca* Linn.)壳生物炭使盐碱土壤电导率显著降低了 19.23%;Zhou 等<sup>[34]</sup>通过田间实验发现施用玉米秸秆生物炭显著降低盐碱土壤电导率。不同制备方式杨树枝条炭使滨海盐碱土壤电导率降低了 12.3%~57.6%。这可能与生物炭具有较高的比表面积和孔隙有关。生物炭的高比表面积和孔隙可改善土壤孔隙度和导水性,从而加速盐分的淋溶<sup>[9-11]</sup>;其次,盐碱土壤中  $\text{Na}^+$  等盐离子可通过静电作用或孔隙填充吸附于生物炭中,从而降低土壤溶液中的盐浓度<sup>[31]</sup>。

土壤有机质含量低是制约盐碱地土壤资源化高效利用的重要因子之一。生物炭含碳量高,且稳定性强,可通过生物炭中难熔碳的直接输入、对土壤原生有机碳的负激发效应、促进土壤中无机碳和微生物碳的形成等方式有效提高盐碱土壤有机碳含量<sup>[35-38]</sup>。Al-Wabel 等<sup>[10]</sup>发现,600 °C 制备的木材炭比秸秆炭的稳定性高,能有效提高土壤碳封存。而 Yuan 等<sup>[3]</sup>发现,炭化温度和原料来源对生物炭提升盐碱土壤有机质的效果无显著差异。不同制备方式杨树枝条炭使土壤有机质含量提高了 1.7~12.8 倍,且在同一升温速率(10 °C·min<sup>-1</sup>)下,土壤有机质含量随着热解温度升高总体呈上升趋势,其中 600 °C 制备的杨树枝条炭处理的土壤有机质含量最高。这可能与不同热解温度制备的杨树枝条炭中碳的组成和存在形态有关,热解温度升高,杨树枝条炭的芳香化程度增强、稳定性提高<sup>[22,39]</sup>。盐碱土壤由于环境恶劣,植物难以立地生存,导致有机质积累少、土壤养分匮乏。此外,盐碱土壤结构性差,土壤中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等可与 N、P 竞争土壤颗粒表面的吸附位点,导致土壤养分淋失<sup>[40]</sup>。已有研究结果<sup>[41]</sup>表明:施用生物炭可提高松嫩平原盐碱土壤有效磷、速效钾、全氮等养分含量和有效性。原因主要是:1)生物炭中含 N、P 和 K 等营养元素,施入土壤中可提高土壤养分含量,供给植物生长所需养分;2)生物炭能够提高土壤对养分的固持能力,减少养分的淋溶;3)生物炭能够改善微生物群落结构,促进营养物质转化,从而提高养分有效性<sup>[42]</sup>。与对照相比,施用杨树枝条炭提高了土壤铵态氮、有效磷和速效钾含量,表明生物炭中养分的释放可直接提高盐碱土壤养分库<sup>[42]</sup>。此外,施用杨树枝条炭降低了土壤硝态氮含量,提高了铵态氮含量。该现象可能与生

物炭抑制土壤氮素硝化和矿化作用,固持铵态氮有关<sup>[43]</sup>。同一升温速率(10 °C·min<sup>-1</sup>)下,随热解温度的升高,杨树枝条炭处理盐碱土壤的硝态氮和速效钾含量总体呈上升趋势,这一变化与生物炭自身全氮和全钾含量的变化规律一致<sup>[22]</sup>。然而,土壤铵态氮和有效磷含量则呈先上升(300~500 °C)后下降(600~700 °C)的波动变化。这些结果表明:杨树枝条炭不仅影响盐碱土壤养分含量,而且能调控养分的有效性。其中,500 °C 制备的杨树枝条炭对土壤铵态氮和有效磷含量的提升效果最佳。然而,当热解温度大于 500 °C 时,生物炭表面官能团随温度升高而减少,甚至丧失,导致其对铵态氮的吸附和持留能力下降;同时,生物炭的灰分含量和 pH 值升高,灰分中的碱土金属(如 Ca、Mg)含量增加且活性增强,易与可溶性磷酸盐结合形成难溶性的磷酸钙、磷酸镁等矿物沉淀<sup>[22,42-44]</sup>。这共同导致了 600~700 °C 制备的杨树枝条炭处理土壤中铵态氮和有效磷含量的下降。

### 3.2 杨树枝条炭对海滨锦葵生长的影响

海滨锦葵是锦葵科(Malvaceae)多年生耐盐经济植物,主要通过肉质块根蓄水、离子区隔化及抗氧化机制适应盐碱环境<sup>[45-46]</sup>。Zheng 等<sup>[47]</sup>研究结果显示:施用花生(*Arachis hypogaea* Linn.)壳生物炭能够促进海滨锦葵在滨海盐碱土壤中生长。本研究中,海滨锦葵能够在可溶盐含量为 1.74% 的盐碱土中生长,且添加不同制备方式的杨树枝条炭对海滨锦葵生长的影响不同。其中,300 °C、10 °C·min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭处理明显降低了海滨锦葵的株高、干质量(地上部干质量、根干质量、总干质量)、根冠比、叶绿素相对含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量,抑制了海滨锦葵的生长。这可能是由于低温制备的生物炭未完全炭化,残留的挥发性有机物(如酚类、醛类)对海滨锦葵的生长产生毒性效应<sup>[48]</sup>。500 °C、10 °C·min<sup>-1</sup> 制备的杨树枝条炭对海滨锦葵生长的促进效果最好,其株高、干质量、叶绿素相对含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量高于对照和其他处理组。孙玲等<sup>[22]</sup>的研究结果表明:500 °C 制备的杨树枝条炭兼具高孔隙度和适宜的 pH 值等理化性质,能够有效促进养分的缓释,进而促进植物生长。

除热解温度外,升温速率也影响杨树枝条炭的理化性质,进而对海滨锦葵生长产生不同的影响。同一热解温度(400 °C)下,慢速升温(10 °C·min<sup>-1</sup>)制备的杨树枝条炭处理的海滨锦葵的干质量明显高于快

速升温 ( $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 制备的杨树枝条炭处理。这可能是由于慢速升温有利于纤维素的有序分解,形成多级孔隙结构,而快速升温可能导致微孔塌陷,从而影响养分的有效性<sup>[22]</sup>。

Liang 等<sup>[49]</sup>发现,添加芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.] 炭可降低植物对  $\text{Na}^+$  的吸收,并通过降低土壤电导率促进植物根系生长。Buss 等<sup>[50]</sup>认为,生物炭通过提高植物对土壤中养分 (P、K) 的利用效率增强了其对盐胁迫的耐受性。Ali 等<sup>[51]</sup>认为,生物炭通过调控植物对  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  的吸收,增强植物光合作用,提高植物耐盐能力,促进植物生长。本研究结果与已有报道类似。Pearson 相关性分析结果显示:海滨锦葵的株高、干质量、根冠比、叶绿素 *a* 含量和叶绿素 *b* 含量等与土壤电导率呈极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 负相关,表明高盐环境导致渗透胁迫与离子毒害,是限制海滨锦葵生长的核心逆境因子。海滨锦葵的干质量、叶绿素 *a* 含量和叶绿素 *b* 含量与土壤有机质含量呈极显著或显著正相关,表明土壤有机质含量对干物质积累的促进作用较为显著。海滨锦葵的株高、干质量与土壤速效钾含量呈极显著或显著正相关,可能与土壤速效钾参与渗透调节酶激活,抵消  $\text{Na}^+$  损害有关<sup>[52]</sup>。海滨锦葵干质量与土壤有效磷含量呈显著正相关,而海滨锦葵的生长指标与土壤的硝态氮和铵态氮含量均无显著相关性,表明 N、P 养分在缓解盐胁迫以及植株促生方面的贡献较小。李亭亭<sup>[53]</sup>发现,在盐胁迫条件下 ( $150$  和  $300\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ ), 海滨锦葵对氮素的需要量降低。土壤硝态氮含量和铵态氮含量与海滨锦葵生长无显著相关性,可能是因为实验基质中氮素供应已满足海滨锦葵生长所需。施用杨树枝条炭引起土壤 pH 值小幅度升高,但并未对海滨锦葵生长产生负面影响,这可能与海滨锦葵的高 pH 值耐受极限 (pH 8.0 至 pH 9.0 下可正常生长<sup>[43]</sup>) 有关。综上,推测杨树枝条炭促进海滨锦葵生长机制主要为:1) 增加了滨海盐碱土壤的有机质含量,提高了土壤通气和持水性能;2) 加速盐分淋溶,降低土壤电导率,缓解根际土壤盐分胁迫;3) 吸附固持土壤养分含量,提高有效磷、速效钾等养分的供给能力;4) 调节海滨锦葵生理过程,增加叶绿素含量,提高光合性能。

### 3.3 结论

综上所述,不同热解温度和升温速率制备的杨树枝条炭均能影响滨海盐碱土壤的理化性质及海滨锦

葵生长,其中,热解温度是主要影响因子。 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  制备的杨树枝条炭在土壤理化性质改良和植物促生方面表现最佳,其次是  $600$  和  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  制备的杨树枝条炭,而  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  制备的杨树枝条炭抑制了海滨锦葵的生长;慢速升温 ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 比快速升温 ( $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 制备的杨树枝条炭更有利于海滨锦葵干质量的积累。杨树枝条炭通过降低土壤电导率,提高土壤有机质和有效养分含量,改善根际生长环境,提高了植物养分供应和对盐胁迫的耐受能力,进而促进海滨锦葵的生长。此外,本研究仅为单一条件的短期盆栽实验,与自然田间差异大,缺乏长期效应评估及规模化应用等问题,限制了成果的适用性与转化。

### 参考文献:

- [1] ZHANG P, BING X, JIAO L, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133904.
- [2] 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.
- [3] YUAN Y, LIU Q, ZHENG H, et al. Biochar as a sustainable tool for improving the health of salt-affected soils [J]. *Soil and Environmental Health*, 2023, 1: 100033.
- [4] MUKHOPADHYAY R, SARKAR B, JAT H S, et al. Soil salinity under climate change: challenges for sustainable agriculture and food security [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111736.
- [5] 于功霞, 李迎, 刘宏元, 等. 我国盐碱地改良与利用技术研究进展 [J]. *黑龙江农业科学*, 2025(7): 96-103.
- [6] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447: 143-144.
- [7] FALOYE O T, ALATISE M O, AJAYI A E, et al. Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 165-178.
- [8] 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.
- [9] SUN J, YANG R, ZHU 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 Sediments*, 2019, 19: 4021-4030.
- [10] AL-WABEL M I, HUSSAIN Q, USMAN A R A, et al. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: a review [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29: 2124-2161.
- [11] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain [J]. *Science of the Total*

- Environment, 2020, 722: 137428.
- [12] HOU J, WAN H, LIANG K, et al. Biochar amendment combined with partial root-zone drying irrigation alleviates salinity stress and improves root morphology and water use efficiency in cotton plant [J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166978.
- [13] GUO X X, LIU H T, ZHANG J. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: a review [J]. Waste Manage, 2020, 102: 884-899.
- [14] PALANSOORIYA K N, WONG J T F, HASHIMOTO Y, et al. Response of microbial communities to biochar amended soils: a critical review[J]. Biochar, 2019, 1: 3-22.
- [15] HOU J, ZHANG J, LIU X, et al. Effect of biochar addition and reduced irrigation regimes on growth, physiology and water use efficiency of cotton plants under salt stress[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 198: 116702.
- [16] LUO X, LIU G, XIA Y, et al. Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17: 780-789.
- [17] EL-MAGEED T A A, RADY M M, TAHA R S, et al. Effects of integrated use of residual sulfur-enhanced biochar with effective microorganisms on soil properties, plant growth and short-term productivity of *Capsicum annuum* under salt stress [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261: 108930.
- [18] HE M, XIONG X, 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.
- [19] MAUCIERI C, ZHANG Y, MCDANIEL M D, et al. Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting [J]. Geoderma, 2017, 307: 267-276.
- [20] LI C, XIONG Y, QU Z, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China [J]. Geoderma, 2018, 331: 100-108.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 王亚飞, 贺曰林, 杨红青, 等. 灌溉施肥对杨树人工林林木及地力效应研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(5): 63-69.
- [24] 尹增芳, 何祯祥, 王丽霞, 等. NaCl胁迫下海滨锦葵种子萌发和幼苗生长过程的生理特性变化[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(1): 14-17.
- [25] 孙建国, 张焕仕, 宰学明, 等. 耐盐经济植物海滨锦葵综合利用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 440-442.
- [26] 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.
- [27] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 288-293.
- [28] 刘树文. 贵阳红枫湖不同形态微囊藻毒素的时空分布特征及其与铁、叶绿素 *a* 相关性研究 [J]. 生态毒理学报, 2025, 20(2): 270-280.
- [29] 韦继光, 贾明云, 蒋佳峰, 等. 不同生物质炭对蓝莓幼苗叶片光合性能和生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(1): 69-76.
- [30] NEINA D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2019, 2019: 5794869.
- [31] SAIFULLAH, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities [J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320-335.
- [32] CHAGANTI V N, CROHN D M, ŠIMŮNEK J. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water [J]. Agricultural Water Management, 2015, 158: 255-265.
- [33] MAO X, YANG Y, GUAN P, et al. Remediation of organic amendments on soil salinization: focusing on the relationship between soil salts and microbial communities [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 239: 113616.
- [34] ZHOU Z, LI Z, ZHANG Z, et al. Treatment of the saline-alkali soil with acidic corn stalk biochar and its effect on the sorghum yield in western Songnen Plain [J]. Science of the Total Environment, 2021, 797: 149190.
- [35] SAKHIYA A K, ANAND A, KAUSHAL P. Production, activation, and applications of biochar in recent times [J]. Biochar, 2020, 2: 253-285.
- [36] HAN L, SUN K, YANG Y, et al. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon [J]. Geoderma, 2020, 364: 114184.
- [37] LUO X, WANG L, LIU G, et al. Effects of biochar on carbon mineralization of coastal wetland soils in the Yellow River Delta, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 329-336.
- [38] LIANG C, AMELUNG W, LEHMANN J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter [J]. Global Change Biology, 2019, 25: 3578-3590.
- [39] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 3488-3497.
- [40] ZHANG J, ZHOU S, SUN H, et al. Three-year rice grain yield responses to coastal mudflat soil properties amended with straw biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 23-29.
- [41] 孔祥清, 韦建明, 尝国伟, 等. 生物炭对盐碱土壤理化性质及大豆产量的影响 [J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 647-651.

- [42] 刘 森, 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.
- [43] 胡立煌, 史文竹, 项 剑, 等. 生物炭、秸秆、粪肥对滨海盐碱土壤氮矿化和硝化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1089-1096.
- [44] ZHENG H, WANG Z, DENG X, et al. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2013, 130: 463-471.
- [45] 党瑞红, 周俊山, 范 海. 海滨锦葵的抗盐特性[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(4): 635-638.
- [46] 闫道良, 余 婷, 徐菊芳, 等. 盐胁迫对海滨锦葵生长及 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>离子积累的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 105-109.
- [47] ZHENG H, WANG X, CHEN L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation[J]. Plant, Cell and Environment, 2018, 41: 517-532.
- [48] HAN H, BUSS W, ZHENG Y, et al. Contaminants in biochar and suggested mitigation measures: a review[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132287.
- [49] LIANG J F, LI Q W, GAO J Q, et al. Biochar rhizosphere addition promoted *Phragmites australis* growth and changed soil properties in the Yellow River Delta[J]. Science of the Total Environment, 2021, 761: 143291.
- [50] BUSS W, JANSSON S, MAŠEK O. Unexplored potential of novel biochar ash composites for use as organo-mineral fertilizers[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 208: 960-967.
- [51] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review[J]. Environmental Science Pollution Research, 2017, 24: 12700-12712.
- [52] 董 轲, 许亚萍, 崔 冰, 等. 盐胁迫下不同钾素水平对海滨锦葵生长和光合作用的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(10): 1649-1657.
- [53] 李亭亭. 不同氮素水平对盐胁迫下海滨锦葵的生理效应[D]. 济南: 山东师范大学, 2010: 1-3.

(责任编辑: 郭严冬)

## 欢迎订阅 2026 年《植物资源与环境学报》

《植物资源与环境学报》为江苏省中国科学院植物研究所和江苏省植物学会联合主办的学术刊物, 国内外公开发行。本刊为全国中文核心期刊(北大核心)、中国科技核心期刊和中国科学引文数据库核心期刊(CSCD 核心), 并为 BA(预评)、CAB、BCI、JST、EBSCO、中国生物学文摘、中国环境科学文摘、中国科学引文数据库、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)、超星期刊出版平台和中文科技期刊数据库等国内外著名刊库收录。2013 年荣获“首届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖”及江苏省精品科技期刊项目; 2015 年荣获“第六届江苏省科技期刊金马奖·精品期刊奖”; 2015 年至 2023 年均荣获江苏省精品科技期刊项目; 2021 年荣获第三届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖提名奖。

本刊围绕植物资源与环境两个中心命题, 报道我国植物资源的考察、开发利用和植物物种多样性保护, 自然保护区与植物园的建设和管理, 植物在保护和美化环境中的作用, 环境对植物的影响以及与植物资源和植物环境有关学科领域的原始研究论文、研究简报和综述等。凡从事植物学、生态学、自然地理学以及农、林、园艺、医药、食品、轻化工和环境保护等领域的科研、教学、技术人员及决策者均可以从本刊获得相关

学科领域的研究进展和信息。

本刊为双月刊, 大 16 开本, 每期 120 页。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号 28-213, 每期定价 30 元, 全年定价 180 元。国内统一连续出版物号 CN 32-1339/S, 国际标准连续出版物号 ISSN 1674-7895。若错过征订时间或需补齐 1992 年至 2026 年各期, 请直接与编辑部联系邮购。1992 年至 1993 年每年 8 元; 1994 年至 2000 年每年 16 元; 2001 年至 2005 年每年 24 元; 2006 年至 2008 年每年 40 元; 2009 年至 2011 年每年 60 元; 2012 年至 2019 年每年 80 元; 2020 年至 2021 年每年 120 元; 2022 年至 2023 年每年 156 元; 2024 年至 2026 年每年 180 元(快递到付)。

编辑部地址: 江苏省南京市中山门外 江苏省中国科学院植物研究所内(邮编 210014); 电话: 025-84347014; QQ: 2219161478; E-mail: zwzybjb@163.com。本刊目前只接收在线投稿, 投稿网址: <http://zwzy.cnbg.net>。

本刊已开通微信公众号, 欢迎您扫码关注。

