

施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗生长、生理及土壤性质的影响

张巧莉^{a,b}, 吴永波^{a,b,①}, 蒲可逸^a

(南京林业大学: a. 生态与环境学院, b. 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 以株龄 1 a 的桑树 (*Morus alba* Linn.) 实生苗为材料, 采用盆栽实验, 研究不同生物炭施加量 (20~50 g · kg⁻¹) 对盐碱土 (盐度 0.4%) 中桑树幼苗生长、叶片光合特性和抗氧化特性及土壤性质的影响, 并对桑树幼苗生长、生理指标与土壤性质间的相关性进行分析。结果表明: 施加 40 g · kg⁻¹ 生物炭的盐碱土中桑树幼苗株高、单株干质量、总根长、总根面积、总根体积及根平均直径较未施加生物炭处理 (对照) 显著 ($P < 0.05$) 增加, 增幅分别为 29.82%、24.88%、78.32%、139.69%、231.07% 和 32.50%, 叶片脯氨酸含量、可溶性糖含量、丙二醛含量及过氧化物酶活性较对照显著降低, 降幅分别为 45.48%、25.04%、29.21% 和 54.87%, 表明施加适量生物炭可以缓解盐碱胁迫对桑树幼苗的氧化胁迫。施加 30 g · kg⁻¹ 生物炭的盐碱土中桑树幼苗叶片叶绿素 *a* 含量、类胡萝卜素含量、总叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、PS II 实际光合效率及相对电子传递速率较对照显著提高, 增幅分别为 38.52%、43.48%、37.21%、56.14%、100.00%、2.90% 和 33.14%, 缓解了盐碱胁迫对光合系统的损伤。施加 40 g · kg⁻¹ 生物炭的盐碱土的 pH 值较对照显著降低, 降幅为 4.04%, 阳离子交换量、有机质含量、铵态氮含量、硝态氮含量、速效磷含量、脲酶活性及碱性磷酸酶活性较对照显著升高, 增幅分别为 4.86%、84.90%、50.98%、58.04%、17.26%、46.67% 和 23.23%。相关性分析结果显示: 总体上看, 桑树幼苗生长指标与土壤有机质含量、硝态氮含量、速效磷含量、脲酶活性、蔗糖酶活性呈显著或极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 光合色素含量、净光合速率和气孔导度与土壤铵态氮含量呈显著或极显著正相关, 叶片渗透调节物质含量和丙二醛含量与土壤有机质含量呈极显著负相关, 叶片抗氧化酶活性与土壤速效磷含量呈显著或极显著负相关, 表明生物炭通过改善盐碱土肥力与微环境, 协同促进桑树幼苗根系形态结构优化、光合效率提升及抗逆响应调控。综上所述, 施加 30~40 g · kg⁻¹ 生物炭可作为滨海盐碱地区桑树种植的适宜栽培措施, 并有助于盐碱土改良。

关键词: 生物炭; 盐碱土; 桑树; 生长; 生理

中图分类号: Q945.78; S888.2; S888.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)05-0033-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.05.04

Effect of biochar application on growth and physiology of *Morus alba* seedlings and soil properties in saline-alkali soil ZHANG Qiaoli^{a,b}, WU Yongbo^{a,b,①}, PU Keyi^a (Nanjing Forestry University: a. College of Ecology and Environment, b. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(5): 33-42

Abstract: Taking one-year-old *Morus alba* Linn. seedlings as materials, the effects of different biochar application amounts (20-50 g · kg⁻¹) on seedling growth of *M. alba*, photosynthetic characteristics and antioxidant properties of leaves, and soil properties in saline-alkali soil (salinity of 0.4%) were investigated by using a pot experiment, and the correlations between growth and physiological indexes of

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金 (BE2022306); 国家“十三五”重点研发计划课题 (2016YFC0502704)

作者简介: 张巧莉 (1999—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态方面的研究。

①通信作者 E-mail: yongbowu0920@163.com

引用格式: 张巧莉, 吴永波, 蒲可逸. 施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗生长、生理及土壤性质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 33-42.

M. alba seedlings and soil properties were analyzed. The results show that the plant height, dry mass per plant, total root length, total root area, total root volume, and average root diameter of *M. alba* seedlings in the saline-alkali soil with $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biochar are significantly ($P < 0.05$) increased by 29.82%, 24.88%, 78.32%, 139.69%, 231.07%, and 32.50% respectively compared with no biochar application treatment (the control), while proline content, soluble sugar content, malondialdehyde content, and peroxidase activity of leaves are significantly decreased by 45.48%, 25.04%, 29.21%, and 54.87% respectively, indicating that applying an appropriate amount of biochar can alleviate oxidative stress in *M. alba* seedlings caused by saline-alkali stress. The chlorophyll *a* content, carotenoid content, total chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, actual photosynthetic efficiency of PS II, and relative electron transfer rate in leaves of *M. alba* seedlings in the saline-alkali soil with $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biochar are significantly increased by 38.52%, 43.48%, 37.21%, 56.14%, 100.00%, 2.90%, and 33.14% respectively compared with the control, mitigating the damage to photosynthetic systems caused by saline-alkali stress. The pH value of saline-alkali soil with $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biochar is significantly decreased by 4.04% compared with the control, while cation exchange capacity, organic matter content, ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content, available phosphorus content, urease activity, and alkaline phosphatase activity are significantly increased by 4.86%, 84.90%, 50.98%, 58.04%, 17.26%, 46.67%, and 23.23% respectively compared with the control. The correlation analysis result shows that in general, growth indexes of *M. alba* seedlings show significant or extremely significant ($P < 0.01$) positive correlations with organic matter content, nitrate nitrogen content, available phosphorus content, urease activity, and sucrose activity of soil, photosynthetic pigment content, net photosynthetic rate, and stomatal conductance show significant or extremely significant positive correlations with soil ammonium nitrogen content, leaf osmotic adjustment substance content and malondialdehyde content show extremely significant negative correlations with soil organic matter content, while leaf antioxidant enzyme activities show significant or extremely significant negative correlations with soil available phosphorus content, indicating that biochar synergistically promotes the optimization of root morphological structure, photosynthetic efficiency improvement, and stress resistance response regulation in *M. alba* seedlings by improving saline-alkali soil fertility and microenvironment. In conclusion, applying $30 - 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biochar can serve as a suitable cultivation measure for *M. alba* planting in coastal saline-alkali areas, and contribute to the improvement of saline-alkali soil.

Key words: biochar; saline-alkali soil; *Morus alba* Linn.; growth; physiology

土壤盐碱化是全球农林业可持续发展的主要威胁之一^[1]。目前,中国盐碱地面积约 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中滨海盐碱地面积为 $7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[2-3], 占中国盐碱地面积的 7.06%。受海水浸渍和高矿化度地下水共同影响,滨海盐碱土的盐分高、结构性差及养分含量低等问题日益严重,不仅对区域内植物造成氧化胁迫并抑制植物的营养吸收,还严重制约滨海地区生物多样性和可持续发展^[4-5]。桑树 (*Morus alba* Linn.) 生长速度快、营养价值高、适应性强,兼具生态价值与经济价值^[6-7], 已被广泛应用于盐碱地治理^[8], 但土壤盐碱化抑制桑树生长发育并降低其质量及产量^[9]。

生物炭是农林废弃物在热化学转化过程中产生的富碳、高度芳香化物质,具有比表面积较大、孔隙度高、吸附能力强和稳定性好等特性^[10-11], 具有较好的盐碱土改良效果^[12-13], 如提高盐碱土的保水、保肥能力,降低盐分含量^[14], 从而缓解盐碱胁迫所造成的非

生物氧化胁迫,促进植物光合作用,提高植物产量,有效提高植物生产力^[15-16]。但由于生物炭自身呈弱碱性,其对盐碱土壤 pH 值的调节能力有限,过量施加反而削弱其改良效果^[17]。因此,筛选适宜盐碱地改良的生物炭并研究其对植物生长的影响已成为当前滨海盐碱地农林业发展的重要研究方向。玉米 (*Zea mays* Linn.) 秸秆生物炭能提高土壤肥力,改善土壤结构,增强土壤持水能力,并降低土壤盐分,从而改良盐碱土^[18]。近年来,关于生物炭促进盐碱地植物生长的研究日益增多,研究对象以粮食作物、经济作物和能源植物等农作物及草本植物为主,其调控机制包括土壤性质改善、土壤养分有效性增加以及植物耐盐性增强^[19-21], 而关于木本植物的研究较少^[22-23]。

鉴于此,选择木本植物桑树进行盆栽实验,分析施加玉米秸秆生物炭对盐碱土中桑树幼苗生长、光合特性、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性以及土壤性

质的影响,阐明其缓解盐碱胁迫的机制,并筛选最佳生物炭施加量,以期为滨海盐碱地桑树栽培提供理论依据和实践参考。

1 材料和方法

1.1 材料

供试株龄 1 a 的桑树实生苗由江哥牧草农业科技示范园提供,株高(50.0±2.0) cm、地径(6.0±0.2) mm。供试土壤采自江苏省连云港市连云区,为 0~20 cm 的表层盐碱土,去除杂质后风干,过孔径 2 mm 筛,备用。土壤基本性质为 pH 8.53、盐度 0.4%、有机质含量 12.96 g·kg⁻¹、铵态氮含量 3.27 mg·kg⁻¹、硝态氮含量 6.99 mg·kg⁻¹、速效磷含量 8.48 mg·kg⁻¹,为中度盐碱土^[24]。供试玉米秸秆生物炭购自河南金邦环保科技有限公司,裂解温度 500 °C、颗粒直径 200 目、pH 8.12、碳含量 72.31%、氮含量 1.55%、灰分含量 5.38%。

1.2 方法

1.2.1 实验设计 生物炭施加量共设置 5 个水平,分别为 0、20、30、40 和 50 g·kg⁻¹^[25]。每盆(上口径 26.4 cm、下口径 21.2 cm、高 29.8 cm)装入 7 kg 土壤,生物炭按上述施加量与土壤混匀。盆栽实验于 2023 年 5—9 月在江苏省句容市下蜀林场室外的避雨、通风大棚(遮光率约 40%)内进行。于 2023 年 5 月,选择长势基本一致且发育良好的桑树幼苗,每盆栽植 1 株。每个水平 10 个重复,共计 50 盆。实验期间进行常规养护管理。为避免盐分和水分流失,盆下放置托盘,定期将渗出的盐分和基质倒回原盆中。

于 2023 年 9 月(生长期结束),在晴朗无风日的 8:30—11:30,每处理随机取 5 株桑树幼苗,收获前测定光合参数和叶绿素荧光参数并测量株高。对 10 株植株进行破坏性取样,其中 5 株冲洗干净后擦干,置于有冰袋的泡沫箱,用于桑树幼苗根系形态及单株干质量测定;另外 5 株选取植株从上至下第 3 至第 5 枚生长基本一致、向阳且健康完整的叶片,将各植株叶片冲洗干净后擦干,然后剪碎、混匀,每株作为 1 个样品,用锡箔纸包好后放入自封袋内,立即置于液氮速冻后带回实验室,于-80 °C 保存,用于桑树幼苗生理指标测定。同时采用五点法收集土壤,先去除表层落叶等覆盖物,避开可见根系,去除石块和根系碎片,混匀后作为 1 个样品放入自封袋,然后置于有冰袋的泡

沫箱运回实验室,一半于 4 °C 保存,另一半风干。

1.2.2 生长指标测量 使用钢卷尺(精度 1 mm)测量植物株高;去离子水清洗根部附着土壤,滤纸吸干表面水分,使用 MICROTEK ScanMaker i800plus 根系扫描仪(上海中晶科技有限公司)和 WinRHIZO 软件分析根系形态,包括总根长、总根面积、总根体积和根平均直径;整株置于 105 °C 烘箱杀青 15 min,然后于 75 °C 烘干至恒质量,冷却后使用天平(精度 0.1 mg)称量单株干质量。每个指标每株测量 1 次,结果取平均值。

1.2.3 光合参数测定 选择植株从上至下第 3 至第 5 枚功能叶,使用 LI-6400XT 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定叶片光合参数,包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)。测定时,CO₂ 浓度 380~420 μmol·mol⁻¹,叶室温度 25 °C,光合有效辐射 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹,叶室湿度 80%。每枚叶片测定 3 次,结果取平均值。

1.2.4 叶绿素荧光参数测定 选择上述植株从上至下第 3 至第 5 枚功能叶,使用 PAM-2500 便携式调制叶绿素荧光仪(德国 Walz 公司)暗适应 20 min 后测定叶绿素荧光参数,包括初始荧光(F₀)、PS II 最大光合效率(F_v/F_m)、PS II 实际光合效率[Y(II)]和相对电子传递速率(ETR)。每枚叶片测定 3 次,结果取平均值。

1.2.5 生理指标测定 取各处理另 5 株植株功能叶样品,采用乙醇-丙酮浸提法^[26]、^[27]131-133 测定光合色素含量,采用蒽酮比色法^[27]171-173 测定可溶性糖含量,采用考马斯亮蓝 G-250 比色法^[27]182-184 测定可溶性蛋白质含量,采用茚三酮显色法^[27]274-275 测定脯氨酸含量,采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[27]276-277 测定丙二醛含量,使用购自北京索莱宝科技有限公司的试剂盒测定超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和过氧化氢酶活性。每个指标每株测定 1 次,结果取平均值。

1.2.6 土壤指标测定 使用 ST 3100 pH 计(日本 Yokogawa 公司)测定土壤 pH 值^[28],使用 LC-CT-20 电导率仪(日本 Yokogawa 公司)测定土壤电导率^[29],采用 K₂Cr₂O₇ 容量-外加热法^[30]30-34 测定土壤有机质含量,采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法^[30]50-56 测定铵态氮含量,采用 GB/T 32737—2016 中的紫外分光光度法测定硝态氮含量,采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法^[30]81-83 测定速效磷含量,采用 Co(NH₃)₆Cl₃ 浸提-分光光度法^[31]测定阳离子交换量,使用购自北京索

莱宝科技有限公司的试剂盒测定土壤的脲酶活性、蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性。每个指标每盆土壤测定1次,结果取平均值。

1.3 数据处理和统计分析

利用 EXCEL 2016 软件整理数据;利用 SPSS 26.0 软件中的单因素方差分析和 Fisher LSD 多重检验进行差异显著性分析 ($P < 0.05$);利用 SPSS 26.0 软件进行 Pearson 相关性分析,并利用 Origin 2024 软件绘图。

2 结果和分析

2.1 施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗生长的影响

不同生物炭施加量对盐碱土中桑树幼苗生长的影响见表1。结果显示:随着生物炭施加量的增加,

盐碱土中桑树幼苗的株高、单株干质量、总根长、总根面积、总根体积、根平均直径呈先升高后降低的趋势,且均在生物炭施加量 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理达到最大值。株高、单株干质量在生物炭施加量 20、30 和 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理均较未施加生物炭处理(对照)显著 ($P < 0.05$) 增加,增幅分别为 20.31%、21.08%、29.82% 和 19.37%、24.41%、24.88%;总根长在生物炭施加量 20、30、40 和 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅分别为 40.60%、50.57%、78.32%、60.57%;总根面积、总根体积在生物炭施加量 30、40 和 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅分别为 102.11%、139.69%、137.52% 和 194.29%、231.07%、215.71%;根平均直径仅在生物炭施加量 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅为 32.50%。以上结果表明缓解桑树幼苗在盐碱土中受到伤害的生物炭最佳施加量为 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表1 不同生物炭施加量对盐碱土中桑树幼苗生长的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of different biochar application amounts on growth of *Morus alba* Linn. seedlings in saline-alkali soil ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

生物炭施加量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Biochar application amount	株高/cm Plant height	单株干质量/g Dry mass per plant	总根长/cm Total root length	总根面积/ cm^2 Total root area	总根体积/ cm^3 Total root volume	根平均直径/mm Average root diameter
0	77.80±8.26b	42.69±3.70b	586.52±170.99c	142.60±24.00b	2.80±0.19b	0.80±0.11b
20	93.60±12.70a	50.96±5.35a	824.66±129.21b	236.96±76.16ab	5.56±2.85ab	0.90±0.16ab
30	94.20±8.20a	53.11±8.39a	883.15±108.97ab	288.21±104.69a	8.24±4.31a	0.94±0.10ab
40	101.00±11.02a	53.31±3.82a	1 045.87±176.99a	341.80±92.49a	9.27±1.99a	1.06±0.21a
50	89.00±4.36ab	49.07±3.31ab	941.79±98.58ab	338.70±49.12a	8.84±2.53a	0.97±0.09ab

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.

2.2 施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗叶片光合特性的影响

不同生物炭施加量对盐碱土中桑树幼苗叶片光合特性的影响见表2。结果显示:除 PS II 最大光合效率外,盐碱土中桑树幼苗叶片光合色素含量、光合参数和叶绿素荧光参数总体随着生物炭施加量的增加呈先升高后降低的趋势。叶绿素 *a* 含量和类胡萝卜素含量在生物炭施加量 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较未施加生物炭处理(对照)显著 ($P < 0.05$) 升高,增幅分别为 38.52% 和 43.48%;叶绿素 *b* 含量在生物炭施加量 20~ $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理均与对照无显著差异;总叶绿素含量在生物炭施加量 30 和 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著升高,增幅分别为 37.21% 和 22.67%。净光合速率在生物炭施加量 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅为 56.14%;气孔导度在生物炭施加量 20、30、40

和 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅分别为 75.00%、100.00%、87.50%、87.50%;胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、初始荧光和 PS II 最大光合效率在生物炭施加量 20~ $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理均与对照无显著差异;PS II 实际光合效率在生物炭施加量 30 和 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅分别为 2.90% 和 4.35%;相对电子传递速率在生物炭施加量 20 和 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理较对照显著增加,增幅分别为 30.26% 和 33.14%。总体上看,施加 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭明显增加盐碱土中桑树幼苗叶片光合色素含量、光合参数和叶绿素荧光参数。

2.3 施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗叶片抗氧化特性的影响

不同生物炭施加量对盐碱土中桑树幼苗叶片抗氧化特性的影响见表3。结果显示:总体上看,随着生物炭施加量的增加,盐碱土中桑树幼苗叶片脯氨酸

表 2 不同生物炭施加量对盐碱土中桑树幼苗叶片光合特性的影响 ($\bar{x} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Effects of different biochar application amounts on photosynthetic characteristics of leaves of *Morus alba* Linn. seedlings in saline-alkali soil ($\bar{x} \pm SD$)¹⁾

生物炭施加量/ (g · kg ⁻¹) Biochar application amount	叶绿素 a 含量/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量/ (mg · g ⁻¹) Carotenoid content	总叶绿素含量/ (mg · g ⁻¹) Total chlorophyll content	净光合速率/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹) Net photosynthetic rate	气孔导度/ (mmol · m ⁻² · s ⁻¹) Stomatal conductance
0	1.22±0.08b	0.50±0.05a	0.23±0.02b	1.72±0.13c	3.99±1.08b	0.08±0.03b
20	1.41±0.22b	0.51±0.07a	0.29±0.04ab	1.92±0.29bc	5.00±2.23ab	0.14±0.09a
30	1.69±0.18a	0.67±0.16a	0.33±0.07a	2.36±0.32a	6.23±1.50a	0.16±0.04a
40	1.38±0.05b	0.73±0.25a	0.26±0.04b	2.11±0.24ab	5.24±0.42ab	0.15±0.05a
50	1.43±0.11b	0.60±0.06a	0.25±0.02b	2.03±0.17abc	5.78±0.67ab	0.15±0.05a

生物炭施加量/ (g · kg ⁻¹) Biochar application amount	胞间 CO ₂ 浓度/ (μmol · mol ⁻¹) Intercellular CO ₂ concentration	蒸腾速率/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹) Transpiration rate	初始荧光 Initial fluorescence	PS II 最大光合效率 Maximum photosynthetic efficiency of PS II	PS II 实际光合效率 Actual photosynthetic efficiency of PS II	相对电子传递速率 Relative electron transfer rate
0	308.61±23.43a	2.59±1.31a	0.28±0.03a	0.79±0.02a	0.69±0.02b	6.94±0.83b
20	275.82±37.62a	2.77±0.76a	0.28±0.02a	0.79±0.01a	0.68±0.01b	9.04±1.36a
30	306.63±30.23a	3.57±0.53a	0.31±0.02a	0.79±0.01a	0.71±0.02a	9.24±0.92a
40	300.30±44.35a	3.94±1.86a	0.30±0.02a	0.79±0.01a	0.72±0.01a	7.72±1.35ab
50	315.37±9.90a	3.29±0.78a	0.29±0.02a	0.80±0.01a	0.70±0.01ab	6.66±1.24b

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.

表 3 不同生物炭施加量对盐碱土中桑树幼苗叶片抗氧化特性的影响 ($\bar{x} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of different biochar application amounts on antioxidant properties of leaves of *Morus alba* Linn. seedling in saline-alkali soil ($\bar{x} \pm SD$)¹⁾

生物炭施加量/ (g · kg ⁻¹) Biochar application amount	脯氨酸含量/ (μg · g ⁻¹) Proline content	可溶性糖含量/ (mg · g ⁻¹) Soluble sugar content	可溶性蛋白质含量/ (mg · g ⁻¹) Soluble protein content	丙二醛含量/ (nmol · g ⁻¹) Malondialdehyde content	超氧化物歧化酶活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹) Superoxide dismutase activity	过氧化物酶活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹) Peroxidase activity	过氧化氢酶活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹) Catalase activity
0	49.32±6.66a	7.03±0.84a	11.59±1.63a	63.41±11.43a	762.83±17.87abc	202.09±27.93a	178.78±15.17ab
20	36.72±5.45b	6.67±0.95ab	10.60±1.43a	52.94±2.71ab	786.46±41.23ab	174.18±13.35b	181.08±27.09ab
30	28.67±8.65c	5.25±0.34bc	10.54±1.42a	46.81±4.41b	818.35±47.29a	121.11±1.94c	215.81±37.71a
40	26.89±4.02c	5.27±0.76bc	11.36±1.28a	44.89±8.23b	712.61±32.67c	91.20±17.74d	140.42±41.35bc
50	30.19±1.19bc	5.13±1.51c	8.01±0.70b	51.31±5.49b	737.23±55.72bc	111.73±10.63cd	124.00±40.12c

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.

含量、丙二醛含量和过氧化物酶活性呈先降低后升高的趋势,可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量呈降低趋势,超氧化物歧化酶活性和过氧化氢酶活性呈先升高后降低的趋势。与未施加生物炭处理(对照)相比,脯氨酸含量在生物炭施加量 20、30、40 和 50 g · kg⁻¹ 处理分别降低 25.55%、41.87%、45.48%和 38.79%,可溶性糖含量在生物炭施加量 30、40 和 50 g · kg⁻¹ 处理分别降低 25.32%、25.04%、27.03%,可溶性蛋白质含量在生物炭施加量 50 g · kg⁻¹ 处理降低 30.89%,丙二醛含量在生物炭施加量 30、40 和 50 g · kg⁻¹ 处理分别降低 26.18%、29.21%和 19.08%,过氧化物酶活性在生物炭施加量 20、30、40 和 50 g · kg⁻¹ 处理分别降低

13.81%、40.07%、54.87%和 44.71%,过氧化氢酶活性在生物炭施加量 50 g · kg⁻¹ 处理降低 30.64%,差异均达显著 ($P < 0.05$) 水平;超氧化物歧化酶活性在生物炭施加量 20~50 g · kg⁻¹ 处理均与对照无显著差异。以上结果表明施加 40 g · kg⁻¹ 生物炭总体上能有效缓解盐碱土中桑树幼苗受到的氧化胁迫。

2.4 施加生物炭对盐碱土性质的影响

不同生物炭施加量对种植桑树盐碱土性质的影响见表 4。结果显示:随着生物炭施加量的增加,盐碱土的 pH 值和电导率有一定降低,阳离子交换量、有机质含量、硝态氮含量、速效磷含量和碱性磷酸酶活性总体呈升高趋势,铵态氮含量、脲酶活性和蔗糖

酶活性呈先升高后降低的变化趋势。与未施加生物炭处理(对照)相比较,pH 值在生物炭施加量 40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的降幅为 4.04%,阳离子交换量在生物炭施加量 40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 4.86% 和 5.41%,有机质含量在生物炭施加量 20、30、40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 34.90%、55.77%、84.90% 和 116.24%,铵态氮含量在生物炭施加量 30、40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 144.61%、50.98% 和 60.29%,硝态氮含量在生物炭施加量 20、30、40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 47.47%、62.20%、58.04%

和 61.90%,速效磷含量在生物炭施加量 40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 17.26% 和 19.29%,脲酶活性在生物炭施加量 20、30、40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别 33.33%、46.67%、46.67% 和 36.67%,蔗糖酶活性在生物炭施加量 30 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 7.65% 和 4.64%,碱性磷酸酶活性在生物炭施加量 40 和 50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的增幅分别为 23.23% 和 26.13%,差异均达显著 ($P < 0.05$) 水平。以上结果表明施加 40~50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭对种植桑树的盐碱土的改良效果较佳。

表 4 不同生物炭施加量对种植桑树盐碱土性质的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Effects of different biochar application amounts on properties of the saline-alkali soil planted with *Morus alba* Linn. ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

生物炭施加量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Biochar application amount	pH 值 pH value	电导率/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) Electric conductivity	阳离子交换量/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) Cation exchange capacity	有机质含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Organic matter content	铵态氮含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Ammonium nitrogen content
0	8.66±0.18a	0.75±0.15a	9.25±0.17b	13.18±0.10e	2.04±0.31c
20	8.57±0.28ab	0.68±0.08a	9.51±0.26ab	17.78±0.10d	2.43±0.58c
30	8.54±0.24ab	0.62±0.14a	9.55±0.21ab	20.53±1.47c	4.99±0.17a
40	8.31±0.08b	0.61±0.08a	9.70±0.32a	24.37±1.37b	3.08±0.21b
50	8.47±0.16ab	0.65±0.07a	9.75±0.09a	28.50±0.64a	3.27±0.24b
生物炭施加量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Biochar application amount	硝态氮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Nitrate nitrogen content	速效磷含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Available phosphorus content	脲酶活性/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Urease activity	蔗糖酶活性/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Sucrase activity	碱性磷酸酶活性/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Alkaline phosphatase activity
0	6.72±0.72b	8.40±0.65b	0.30±0.07b	15.94±0.08c	3.10±0.30b
20	9.91±1.59a	8.74±0.86ab	0.40±0.03a	16.44±0.80bc	3.43±0.24ab
30	10.90±1.04a	9.08±0.72ab	0.44±0.03a	17.16±0.31a	3.68±0.29ab
40	10.62±3.27a	9.85±0.53a	0.44±0.05a	16.44±0.23bc	3.82±0.62a
50	10.88±1.17a	10.02±0.69a	0.41±0.03a	16.68±0.31ab	3.91±0.39a

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.

2.5 施加生物炭的盐碱土中桑树幼苗生长、生理指标与土壤性质间的相关性分析

施加生物炭的盐碱土中桑树幼苗生长、生理指标与土壤性质间的相关性见图 1。结果显示:株高与土壤的有机质含量、硝态氮含量、速效磷含量呈显著 ($P < 0.05$) 正相关;单株干质量与土壤 pH 值呈显著负相关,与土壤的阳离子交换量、铵态氮含量、硝态氮含量、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性呈显著正相关,与土壤脲酶活性呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关;总根长、总根面积、总根体积与土壤电导率呈显著负相关,与土壤有机质含量、硝态氮含量、速效磷含量、脲酶活性、蔗糖酶活性呈显著或极显著正相关,总根长还与土壤阳离子交换量呈显著正相关,总根面积还与土壤的阳离

子交换量、铵态氮含量呈显著正相关,总根体积还与土壤铵态氮含量呈显著正相关;根平均直径与土壤有机质含量呈显著正相关;叶绿素 *a* 含量、总叶绿素含量与土壤的铵态氮含量、硝态氮含量、脲酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性呈显著或极显著正相关;叶绿素 *b* 含量与土壤 pH 值呈显著负相关,与土壤铵态氮含量呈显著正相关,与土壤碱性磷酸酶活性呈极显著正相关;类胡萝卜素含量与土壤铵态氮含量呈显著正相关;净光合速率与土壤 pH 值呈极显著负相关,与土壤的阳离子交换量、铵态氮含量呈极显著正相关;气孔导度与土壤的有机质含量、铵态氮含量呈显著正相关;初始荧光与土壤铵态氮含量呈显著正相关;PS II 实际光合效率与土壤 pH 值呈显著负相关,

与土壤的有机质含量、铵态氮含量呈显著正相关;脯氨酸含量与土壤 pH 值呈显著正相关,与土壤电导率呈极显著正相关,与土壤的阳离子交换量、有机质含

量、铵态氮含量、脲酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性呈极显著负相关,与土壤硝态氮含量呈显著负相关;可溶性糖含量与土壤电导率呈极显著正相关,与土壤的有机质含量、硝态氮含量、脲酶活性呈极显著负相关,与土壤的铵态氮含量、速效磷含量呈显著负相关;可溶性蛋白质含量与土壤的阳离子交换量、速效磷含量呈显著负相关,与土壤有机质含量呈极显著负相关;丙二醛含量与土壤的有机质含量、脲酶活性呈极显著负相关,与土壤铵态氮含量呈显著负相关;超氧化物歧化酶活性与土壤铵态氮含量呈显著正相关,与土壤速效磷含量呈显著负相关;过氧化物酶活性与土壤电导率呈显著正相关,与土壤的阳离子交换量、有机质含量、铵态氮含量、硝态氮含量、速效磷含量、脲酶活性呈极显著负相关,与土壤碱性磷酸酶活性呈显著负相关;过氧化氢酶活性与土壤的有机质含量、速效磷含量呈显著负相关。

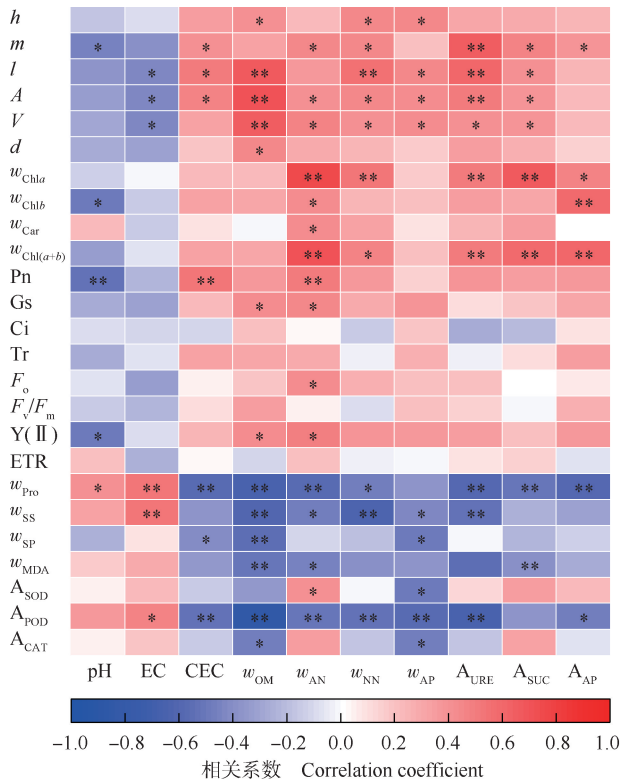
3 讨论和结论

3.1 施加生物炭促进盐碱土中桑树幼苗生长

盐碱胁迫对植物生长和形态结构有明显抑制作用^[32-33],施加生物炭可以一定程度缓解这种生长抑制^[34-35]。在生物炭施加量 20~40 g · kg⁻¹ 范围内,生物炭对盐碱土中桑树幼苗生长的促进作用随着施加量的增加持续增强,而当施加量增至 50 g · kg⁻¹ 时,促进作用有所减弱,这表明施加过多生物炭对植物有不利影响^[36]。生物炭自身呈碱性,施加过量生物炭可能加剧土壤的酸碱失衡,抑制土壤微生物的代谢活动,并加大土壤孔隙度导致土壤水分及养分的剧烈变化,从而造成植物根系养分吸收率降低^[37]。因此,改善盐碱土中桑树幼苗生长的生物炭最佳施加量为 40 g · kg⁻¹。

3.2 施加生物炭缓解盐碱土中桑树幼苗叶片光合作用受损

盐碱胁迫阻碍植物光合色素合成并导致植物缺水,植物为维持体内水分平衡而降低蒸腾、关闭气孔,光合速率下降^[38]。与未施加生物炭处理(对照)相比,盐碱土中施加 30 g · kg⁻¹ 生物炭处理总体显著 ($P < 0.05$) 增加了桑树幼苗叶片光合色素含量,缓解了盐碱土中桑树叶片光合色素合成受到的抑制作用。Yousaf 等^[39] 的研究结果显示:施加生物炭能改善植物对 Fe 等矿质元素的利用,可能对光合色素合成有



h: 株高 Plant height; *m*: 单株干质量 Dry mass per plant; *l*: 总根长 Total root length; *A*: 总根面积 Total root area; *V*: 总根体积 Total root volume; *d*: 根平均直径 Average root diameter; *w_{Chla}*: 叶绿素 *a* 含量 Chlorophyll *a* content; *w_{Chlb}*: 叶绿素 *b* 含量 Chlorophyll *b* content; *w_{Car}*: 类胡萝卜素含量 Carotenoid content; *w_{Chl(a+b)}*: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; *Pn*: 净光合速率 Net photosynthetic rate; *Gs*: 气孔导度 Stomatal conductance; *Ci*: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; *Tr*: 蒸腾速率 Transpiration rate; *F_o*: 初始荧光 Initial fluorescence; *F_o/F_m*: PS II 最大光合效率 Maximum photosynthetic efficiency of PS II; *Y(II)*: PS II 实际光合效率 Actual photosynthetic efficiency of PS II; *ETR*: 相对电子传递速率 Relative electron transfer rate; *w_{Pro}*: 脯氨酸含量 Proline content; *w_{SS}*: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; *w_{SP}*: 可溶性蛋白质含量 Soluble protein content; *w_{MDA}*: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; *A_{SOD}*: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; *A_{POD}*: 过氧化物酶活性 Peroxidase activity; *A_{CAT}*: 过氧化氢酶活性 Catalase activity; *pH*: 土壤 pH 值 Soil pH value; *EC*: 土壤电导率 Soil electric conductivity; *CEC*: 土壤阳离子交换量 Soil cation exchange capacity; *w_{OM}*: 土壤有机质含量 Soil organic matter content; *w_{AN}*: 土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content; *w_{NN}*: 土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content; *w_{AP}*: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; *A_{URE}*: 土壤脲酶活性 Soil urease activity; *A_{SUC}*: 土壤蔗糖酶活性 Soil sucrase activity; *A_{AP}*: 土壤碱性磷酸酶活性 Soil alkaline phosphatase activity. * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

图 1 施加生物炭的盐碱土中桑树幼苗生长、生理指标与土壤性质间的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between growth and physiological indexes of *Morus alba* Linn. seedlings and soil properties in the saline-alkali soil with biochar application

积极作用。施加 20~50 g·kg⁻¹生物炭的盐碱土中桑树幼苗叶片的净光合速率和气孔导度均较对照升高,表明施加适量生物炭可以缓解盐胁迫对植物光合作用的抑制^[40]。这可能是因为施加生物炭改善了土壤理化性质,促进植物根系吸收更多的有效养分,增加植物蒸腾作用,提高叶片叶绿素含量和光合速率^[41]。

叶绿素荧光参数作为研究植物光合作用的重要指标,可以反映盐碱胁迫对植物光合结构的伤害程度^[42]。施加生物炭的盐碱土中桑树幼苗叶片 PS II 实际光合效率总体升高,表明施加生物炭对提高桑树幼苗光合磷酸化过程以及缓解盐碱胁迫对 PS II 系统的损伤有间接作用。施加 20~30 g·kg⁻¹生物炭的盐碱土中桑树幼苗叶片相对电子传递速率显著升高,促进了桑树幼苗叶片光合电子传递和光能利用率,这与 Wen 等^[43]研究盐碱胁迫下施加不同生物炭对柳枝稷 (*Panicum virgatum* Linn.) 的叶绿素荧光特性的影响结果一致。盐碱土中桑树幼苗叶片的光合色素含量、光合参数和叶绿素荧光参数在施加 30 g·kg⁻¹生物炭处理总体明显升高,进一步证实施加适量生物炭有利于促进植物光合作用。

3.3 施加生物炭有效调控盐碱土中桑树幼苗叶片的抗氧化特性

植物通过合成可溶性蛋白质和可溶性糖等维持细胞渗透压平衡、保护细胞结构,脯氨酸的积累则有助于保护光合器官、消除活性氧及维持渗透与离子稳态,以此减轻盐碱胁迫伤害^[44]。与未施加生物炭处理(对照)相比,施加 40 g·kg⁻¹生物炭的盐碱土中桑树幼苗叶片脯氨酸含量和可溶性糖含量显著 ($P < 0.05$) 降低,这与 Wen 等^[43]的研究结果相似,表明施加适量生物炭可以缓解盐碱土对桑树幼苗造成的渗透胁迫伤害。

盐碱胁迫下,植物膜系统最先感应,细胞膜结构被破坏、通透性增大,导致膜脂过氧化加剧,产生丙二醛,同时植物抗氧化系统合成超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等抗氧化酶^[45]。施加生物炭的盐碱土中桑树幼苗叶片丙二醛含量总体较对照显著降低,与 Alshaal 等^[46]的研究结果一致,表明施加生物炭缓解了盐碱胁迫对植物的氧化胁迫;桑树幼苗叶片超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性随生物炭施加量增加总体呈先升高后降低的趋势,与周翠香^[25]的研究结果相似,可能因为低生物炭施加量下,酶活性升高促进桑树幼苗对盐碱胁迫的抗逆性,酶活性随着

生物炭施加量的继续增加而降低,可能由于生物炭改善土壤环境,桑树幼苗不需要维持较高的抗氧化酶活性来减轻盐碱胁迫的伤害;而过氧化物酶活性随生物炭施加量的增加呈先降低后升高的趋势,可能是因为过氧化物酶活性与超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性一定的互补作用^[47]。施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗的渗透调节物质含量、丙二醛含量和抗氧化酶活性具有较好的调控效果,且在施加 40 g·kg⁻¹生物炭处理下效果最佳。

3.4 施加生物炭改善盐碱土性质

盐碱土因高盐离子积累导致 pH 值、电导率升高^[48]。施加 20~50 g·kg⁻¹生物炭,种植桑树的盐碱土的 pH 值和电导率较未施加生物炭处理(对照)有一定降低,与岳燕等^[49]的研究结果基本一致,生物炭通过提升孔隙度和保水性促进盐分淋溶,其表面 K⁺、Ca²⁺等可置换 Na⁺而减少土壤碱性物质,导致盐碱土的 pH 值和电导率降低。施加 20~50 g·kg⁻¹生物炭,盐碱土的阳离子交换量较对照增加,且随生物炭施加量递增,与 Mahmoud 等^[50]的研究结果一致,这可能因为生物炭表面丰富的含氧官能团及土壤阳离子交换位点增加。盐碱土速效养分匮乏,且 Na⁺加剧养分流失^[51],而生物炭作为富碳材料可提升土壤有机质含量。生物炭自身带有铵态氮、硝态氮等有效态氮形态^[52],施入土壤可以提高土壤有效态氮含量,并且生物炭较大的表面积和较强的阳离子交换作用可以吸附土壤 NH₄⁺和 NO₃⁻,抑制土壤 NH₃和 NO₂的排放,增强固氮能力^[53]。施加 20~50 g·kg⁻¹生物炭处理总体较对照显著 ($P < 0.05$) 提高了盐碱土中铵态氮和硝态氮含量,但施加 50 g·kg⁻¹生物炭处理对硝态氮含量的提高效果略优于铵态氮含量,这与张金春^[54]的研究结果相似,表明较高的生物炭施加量能促进硝化作用,增加硝态氮含量。速效磷是土壤中可以直接被植物吸收利用的磷素。施加 40~50 g·kg⁻¹生物炭处理较对照显著提高了盐碱土中速效磷含量及碱性磷酸酶活性,推测碱性磷酸酶促进有机磷转化为速效磷,增加土壤磷素的可利用率^[55]。同时,施加 20~50 g·kg⁻¹生物炭处理较对照显著提高了盐碱土中的脲酶活性,这与李红宇等^[56]的研究结果一致,这可能是因为生物炭丰富的孔隙结构及养分含量,为脲酶和碱性磷酸酶提供了更多的酶促反应底物,进而提高了脲酶和碱性磷酸酶活性。施加 40~50 g·kg⁻¹生物炭处理总体提高土壤养分含量,增强土壤酶活性,

土壤酶活性的增强又促进土壤有机质的分解和养分循环,协同改善盐碱土性质与肥力^[57]。

施加生物炭的盐碱土中桑树幼苗株高和单株干质量与土壤硝态氮含量呈显著正相关,根部形态与土壤的有机质含量、硝态氮含量、速效磷含量、脲酶活性、蔗糖酶活性呈显著或极显著($P<0.01$)正相关,光合色素含量以及光合参数净光合速率和气孔导度与土壤铵态氮含量呈显著或极显著正相关,叶片渗透调节物质含量和丙二醛含量与土壤有机质含量呈极显著负相关,叶片抗氧化酶活性与土壤速效磷含量呈显著或极显著负相关,这表明施加生物炭可以通过改善盐碱土性质和肥力促进桑树幼苗生长发育、光合作用,降低叶片渗透调节物质含量、丙二醛含量和抗氧化酶活性,缓解盐碱胁迫对桑树幼苗的氧化胁迫。

3.5 结论

总体上看,施加生物炭促进盐碱土中桑树幼苗生长及根系发育,提高桑树幼苗光合作用能力,降低叶片渗透调节物质含量、丙二醛含量和抗氧化酶活性,从而提高桑树幼苗的抗逆能力,并提高土壤的养分含量及酶活性,改善盐碱土的性质,其中以施加 $30\sim 40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭对促进盐碱土中桑树幼苗生长及盐碱土改良效果较佳。

参考文献:

- [1] SHI C C, GUO F, SUN Y H, et al. Physiological and transcriptomic analysis of *Hordeum jubatum* seedlings in response to salt, alkali and drought stresses under uniform water potential [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 220: 105677.
- [2] 葛 瑶, 栾明鉴, 张雪楠, 等. 中国盐生植物分布与盐碱地类型的关系[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2021, 35(2): 14-20.
- [3] 吕 航, 赵 月, 龚绪龙, 等. 我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究[J]. *水文地质工程地质*, 2025, 52(2): 25-43.
- [4] HAJ-AMOR Z, ARAYA T, KIM D-G, et al. Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156946.
- [5] TIWARI S, SHARMA B, BISHT N, et al. Role of beneficial microbial gene pool in mitigating salt/nutrient stress of plants in saline soils through underground phytostimulating signalling molecules[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 153-171.
- [6] 郑中妮. 桑树品种选育及粗蛋白积累的机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 1-3.
- [7] 任荣荣, 王俊苏. 我国桑树蛋白质产业的实践与发展[J]. *草业科学*, 2023, 40(2): 571-581.
- [8] 曾玉理, 史建国, 常风云, 等. 桑树响应盐碱胁迫的研究进展[J]. *果树学报*, 2024, 41(9): 1862-1874.
- [9] 张会慧, 张秀丽, 胡彦波, 等. 中碱钠盐胁迫对桑树幼苗生长及光合特性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1): 55-60.
- [10] WANG D, JIANG P K, ZHANG H B, et al. Biochar production and applications in agro and forestry systems: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 137775.
- [11] 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.
- [12] AWASTHI M K. Engineered biochar: a multifunctional material for energy and environment [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 298: 118831.
- [13] 陈温福, 张伟明, 孟 军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [14] 岳 燕, 郭维娜, 林启美, 等. 加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 914-919.
- [15] 李 毅, 冯 浩, 梁嘉平, 等. 土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈研究进展[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 9-16.
- [16] ZHU Q, KONG L J, SHAN Y Z, et al. Effect of biochar on grain yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(10): 2242-2254.
- [17] 王珊珊, 兰梓瑜, 邓 锐, 等. 3种生物炭及其用量对土壤化学性质及青钱柳苗生长的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(4): 137-144.
- [18] 李 玮, 尹广生, 陈 冲, 等. 秸秆及其配施对黄灌区盐碱土壤团聚体结构、持水及收缩特性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(1): 177-186.
- [19] GILL S, RAMZAN M, NAZ G, et al. Effect of silicon nanoparticle-based biochar on wheat growth, antioxidants and nutrients concentration under salinity stress[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 6380.
- [20] 刘 强, 袁延飞, 刘一帆, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(10): 1005-1024.
- [21] MURTAZA G, RIZWAN M, USMAN M, et al. Biochar enhances the growth and physiological characteristics of *Medicago sativa*, *Amaranthus caudatus* and *Zea mays* in saline soils[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24: 304.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 陈宗源. 滨海盐渍土的性状及其改良利用[J]. *土壤肥料*, 1983(1): 24-26.

- [25] 周翠香. 黄河三角洲滨海盐碱土壤-植物系统对生物炭添加的响应机理研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2019: 6-37.
- [26] 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4): 399-402.
- [27] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [28] 生态环境部. HJ 962—2018 土壤 pH 值的测定 电位法[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018: 1-8.
- [29] 环境保护部. HJ 802—2016 土壤电导率的测定 电极法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016: 1-7.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 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.
- [32] 李悦, 蔡亚南, 任安琦, 等. 盐碱胁迫对元宝枫幼苗生长和生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(8): 5-14, 21.
- [33] 胡华冉, 刘浩, 邓纲, 等. 不同盐碱胁迫对大麻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(4): 61-68.
- [34] 梁玉, 李金凤, 崔键, 等. 炭化液对 NaCl 胁迫下高丹草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(3): 80-88, 96.
- [35] 许樊蓉, 唐盛兰, 吴文, 等. 生物炭添加对娜塔栎容器苗生长和营养状况的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(7): 76-84.
- [36] 刘宇, 高成香, 孔令荣, 等. 育苗基质施用生物炭对直干桉苗木生长的效应及其作用机制[J]. 中国土壤与肥料, 2025(1): 163-169.
- [37] 商小雨. 生物炭添加对盐胁迫下香椿幼苗生长及土壤环境的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 16-18.
- [38] 巩志勇, 辛建华, 商小雨, 等. 盐碱胁迫下香椿幼苗光合及抗逆生理特性[J]. 西北植物学报, 2021, 41(7): 1199-1209.
- [39] YOUSAF M T B, NAWAZ M F, ZIA UR REHMAN M, et al. Effect of three different types of biochars on eco-physiological response of important agroforestry tree species under salt stress[J]. International Journal of Phytoremediation, 2021, 23(13): 1412-1422.
- [40] GAO Y, SHAO G C, YANG Z, et al. Influences of soil and biochar properties and amount of biochar and fertilizer on the performance of biochar in improving plant photosynthetic rate: a meta-analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 130: 126345.
- [41] BARONTI S, VACCARI F P, MIGLIETTA F, et al. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53: 38-44.
- [42] BUSSOTTI F, GEROSA G, DIGRADO A, et al. Selection of chlorophyll fluorescence parameters as indicators of photosynthetic efficiency in large scale plant ecological studies [J]. Ecological Indicators, 2020, 108: 105686.
- [43] WEN Y Q, XU T L, QI D D, et al. *Rhizophagus irregularis* combined with biochar can improve the saline-alkali tolerance and energy quality of switchgrass through osmoregulation and gene expression[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 338: 113793.
- [44] 李子英, 丛日春, 杨庆山, 等. 盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8511-8517.
- [45] 黄荣雁, 路程伟, 许嵘, 等. 盐碱胁迫对‘冬红’花椒生长、生理及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 480-488.
- [46] ALSHAAL T, ALHARBI K, NAIF E, et al. Strengthen sunflowers resilience to cadmium in saline-alkali soil by PGPR-augmented biochar[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 280: 116555.
- [47] 李璇, 岳红, 王升, 等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(7): 973-978.
- [48] 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.
- [49] 岳燕, 林启美, 郭维娜, 等. 不同土层加入生物质炭对盐分淋洗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 62-67.
- [50] MAHMOUD E, EL-BESHBESHY T, EL-KADER N A, et al. Impacts of biochar application on soil fertility, plant nutrients uptake and maize (*Zea mays* L.) yield in saline sodic soil [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12: 719.
- [51] SINGH K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27: 706-718.
- [52] LENG L J, XU S Y, LIU R F, et al. Nitrogen containing functional groups of biochar: an overview [J]. Bioresource Technology, 2020, 298: 122286.
- [53] 项剑, 孙禧, 王成, 等. 生物炭对滨海盐碱土氮素转化和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 2969-2977.
- [54] 张金春. 稻壳炭对棕壤环境和苹果幼树生理功能及生长势的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017: 23-50.
- [55] 赵军, 耿增超, 张雯, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 123-130.
- [56] 李红宇, 林添, 王志君, 等. 生物炭连续还田后效对盐碱土稻田养分、酶活性和腐殖质组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 135-142.
- [57] 温美娟, 杨思存, 王成宝, 等. 不同耕作和秸秆还田方式对灰钙土土壤理化性状、酶活性及玉米产量的影响[J]. 生态学报, 2025, 44(3): 903-911.

(责任编辑: 张明霞)