

生物炭在盐碱地改良中的应用进展

刘 淼, 王志春, 杨 福, 李景鹏, 梁正伟

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 盐碱地是我国重要的后备耕地资源, 盐碱地治理与农业利用在保障口粮绝对安全、保持现有耕地稳定、坚守粮食基本自给的安全底线等方面具有重要作用。环境友好型土壤改良剂—生物炭在促进农业可持续发展方面前景巨大。然而, 现有研究多关注于生物炭在中性和酸性土壤中的改良作用, 缺乏其对盐碱地改良的深入研究和系统总结。通过综合分析国内外生物炭在盐碱土壤物理性质、化学性质、养分利用和微生物方面的研究进展, 总结了生物炭在盐碱地改良中的可能机制, 并对生物炭在盐碱地的应用前景进行了展望, 以期对盐碱地生态治理提供参考。

关键词: 生物炭; 盐碱土壤; 理化性质; 养分; 微生物

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0001-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.001

Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkaline Soil

LIU Miao, WANG Zhichun, YANG Fu, LI Jingpeng, LIANG Zhengwei

(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102)

Abstract: Saline-alkaline soil is an important reserve resource of arable land in our country. Saline-alkaline soil management and agricultural utilization play an important role in ensuring the absolute safety of rations, maintaining the stability of existing arable land, and adhering to the safety bottom line of basic food self-sufficiency. Biochar, which is an environmentally friendly soil amendment, has a great prospect in promoting the sustainable development of agriculture. However, most of the existing researches focused on the improvement effect of biochar in neutral and acidic soil, and lacked of in-depth research and systematic summary on the improvement effect of biochar in saline-alkaline soil. This article comprehensively analyzed the research progress of biochar in physical properties, chemical properties, nutrient utilization and microorganisms in saline-alkaline soil, summarized the possible mechanism of biochar in saline-alkaline soil amelioration. The application prospect of biochar was prospected in order to provide reference for ecological management of saline-alkaline soil.

Keywords: biochar; saline-alkaline soil; physical and chemical properties; nutrient; microorganism

目前,在全球范围内有 75 个国家受到土壤盐分的影响。盐碱化土地面积约为 $9.5 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 此外有 $7.7 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 土壤处于次生盐碱化状态^[1], 限制了世界各地的作物产量^[2]。预计到 2050 年, 约 50% 以上的耕地将受到盐碱化的影响^[3-4]。我国可利用盐碱地面积约为 $3.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中, 约 $0.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 盐碱地具备农业改良利用潜力^[5]。随着我国城市化和工业化进程的推进, 全国每年平均减少耕地 $0.04 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 耕地总量下降严重^[6]。我国盐碱地集中分布于东北、中北、西北、华北和滨海五大区^[5]。东北地区为内陆苏打盐

碱地, 土壤以碳酸盐和碳酸氢盐为主, $\text{pH} > 8.5$, 呈碱性。中北地区为河套灌区次生盐碱地, 盐分以氯化物和硫酸盐为主, 并有部分龟裂碱土。西北地区为内陆盐碱地, 盐分以氯化物和硫酸盐为主。华北地区盐碱地以氯化物和硫酸盐为主, 不同盐分类型盐碱地交错分布。滨海地区为滨海滩涂盐碱地, 盐分以氯化钠为主。不同区域的盐碱类型和盐碱程度随成土母质、气候水文和地形条件等各有差异^[7-8]。盐碱地作为我国重要的后备耕地资源, 开发利用盐碱地在保障口粮绝对安全、保持现有耕地稳定、坚守粮食基本自给的安

收稿日期: 2021-01-06

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501208, 2018YFD0200200); 吉林省科技发展规划项目(20200201018JC); 国家自然科学基金项目(31301266)

第一作者: 刘淼(1976—), 女, 高级工程师, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: liumiao@iga.ac.cn

通信作者: 梁正伟(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐碱地生态治理研究。E-mail: liangzw@iga.ac.cn

全底线等方面具有重要作用。

生物炭(biochar)是生物质在缺氧或限氧条件下热裂解得到的富碳产物^[9]。2013年,国际生物炭协会(International Biochar Initiative, IBI)再次完善了生物炭的概念和内涵。指出生物炭的施用可以改良土壤,改善环境污染,降低温室气体排放,进一步突出其在农业和环境领域中的作用。生物炭主要由碳和灰分2部分组成,碳占比最高约70%~80%,碳分为结构相对稳定的芳族碳和结构不稳定的脂族碳;灰分是指生物炭含有的矿物成分,如K、Ca、Na和Mg等。生物炭的元素组成、理化性状与生物炭原材料和制备过程炭化温度密切相关。原材料类型决定了生物炭的转化效率,生物炭的稳定性取决于制备温度,在一定范围内,生物炭的元素组成随炭化温度的升高,碳和灰分含量增加,氢和氧含量降低^[10-11]。生物炭丰富的孔隙结构、巨大的比表面积和较强吸附能力,可明显改善土壤的容重和孔隙结构,促进团聚体形成,有效提高土壤含水量和土壤通透性,保持根际土壤含水量^[10]。同时,生物炭吸附并固定土壤中矿质养分,有效调控土壤养分循环,固持土壤肥力^[11-12],提高农作物产量和品质^[13]。生物炭可为土壤微生物生存提供适宜环境,调控土壤微生物生长和代谢^[14-16],提高土壤阳离子交换量,有效改良土壤性状^[13,17]。生物炭被誉为“黑色黄金”^[18-19],在土壤改良和农作物增产等方面具有良好的应用^[20]。生物炭利用不仅解决了农林废弃物直接焚烧造成的环境破坏和资源浪费问题,同时为障碍性土壤改良、固碳减排及可持续利用提供了新型技术方案,是环境友好型多赢策略。

生物炭是近年土壤学和环境科学领域的研究热点,在酸性或中性土壤中的应用引起了科学界广泛关注^[21-24]。近年研究^[25-28]发现,生物炭可作为盐碱地改良物质,改善土壤理化性质,提高土壤养分含量和有效性,增强土壤肥力,调节微生物群落结构和活性,促进植物生长。因此,本文分析归纳了近年生物炭对盐碱土壤理化性质、养分利用及微生物调控的影响效应,以期深入探索盐碱地生态治理和生物炭农业可持续发展提供理论基础。

1 生物炭—盐碱土壤相关论文统计

本文基于Web of Science数据库对生物炭—盐碱土壤相关论文进行统计,通过主题词“biochar soil”“biochar and saline soil”“biochar and sodic (alkaline) soil”检索式进行检索,统计了至2020年9月20日所有期刊文献。由图1可知,自2007年以来,生物炭—土壤为主题的相关论文开始出现。由拟合趋势

线发现,文献数量年度变化趋势呈指数增长, R^2 为0.886 3,说明国际对生物炭的研究越来越重视,其关注度迅猛增加。其中,“biochar and saline soil”“biochar and alkaline soil”的文献分别占比为2.0%和5.6%。由此表明,生物炭在盐碱障碍中低产田的应用已成为契合现代农业绿色发展理念、改善生态环境的引领性研究。

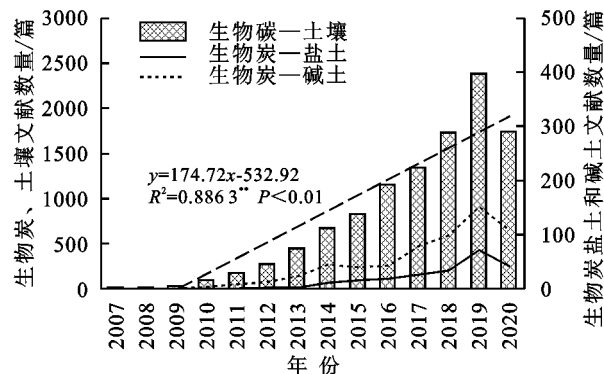


图1 生物炭—土壤、生物炭—盐土和生物炭—碱土文献数量

2 生物炭对盐碱土壤物理性质的影响

盐碱土壤物理性质受土壤盐度和钠质化程度共同影响。土壤中过量 Na^+ 使黏粒发生分散作用^[29],破坏土壤结构,导致土壤紧实膨胀,通气透水性差,表层土壤易形成封闭与结皮,孔隙度低,可耕性差^[30-32]。

已有研究^[33-36]表明,由于生物炭具有比表面积大、质量轻、密度小、多孔隙结构及较好通气性,可有效降低河套灌区、滨海滩涂或滨海重度盐碱土壤容重,增加土壤孔隙度,提高土壤通透性,改善土壤结构,促进盐分淋洗,提高土壤水稳性团聚体百分比和饱和导水率^[1],增加滨海盐土田间持水量^[37]。曹雨桐等^[38]研究发现,施用2%生物炭可促进海涂围垦区盐碱土壤孔隙结构发育和稳定团聚体形成,有效提高盐碱土饱和含水量和田间持水量,增强导水能力。施用4%生物炭或5%生物炭可显著降低滨海盐碱土壤^[39]和江苏省沿海围垦区盐碱土容重^[40]。3%生物炭复配絮凝黄河泥沙^[41]或5%生物炭复配1%聚丙烯酰胺^[42]可有效提高盐碱土壤孔隙度、饱和导水率及水分含量,降低土壤表层盐分。同时,室内淋洗试验^[43]发现,生物炭可作为盐碱土壤的隔盐层,在淋洗过程吸附土体盐分,加快土壤脱盐速率,为阻碍盐碱滩涂围垦农田盐分在耕作层积聚起到一定缓冲作用^[44]。尽管多数研究报道了生物炭对盐碱土壤物理性质的正向效应,但由于生物炭具有较强的疏水性,随着施用量的增加,虽然降低了盐碱土壤容重,反而不利于滨海滩涂盐碱地土壤性质的改善^[36]。已有研究^[1,45]表明,并非所有类型生物炭都能有效改善盐碱

土物理性质,其影响因土壤盐碱特征、生物炭原材料、热解温度和工艺、生物炭施用量和施用时间而异。

生物炭改良盐碱土壤物理性质的可能机制为:(1)生物炭对盐碱土壤物理性质的直接影响。由于生物炭容重低,孔隙度高,具有较强的持水力,物理性稀释效应可降低土壤容重,改善土壤孔隙状况,从而提高土壤透水性,加快盐分淋洗降低土壤含盐量;(2)生物炭含有的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子可交换盐碱土壤胶体吸附的 Na^+ ,从而阻止胶体分散,促进土壤颗粒胶结与絮凝作用^[46],并通过多价阳离子静电黏结,促进土壤团粒结构形成,改善土壤结构^[47]。

3 生物炭对盐碱土壤化学性质的影响

盐碱土壤 pH、电导率(EC)、土壤碱化度(ESP)等是衡量盐碱程度的重要指标。土壤高 pH 与 NaHCO_3 或 Na_2CO_3 水解及 ESP 直接相关,盐碱土改良除了通过淋洗降低土壤盐分外,还应降低土壤胶体的代换性 Na^+ 含量,降低 ESP^[48];生物炭的碱性特征是制约其在盐碱土壤应用的主要障碍^[49]。因此,生物炭在盐碱地改良方面一直富有争议^[11,50-51]。

已有研究^[27,33,46-47,52-59]表明,施入生物炭和酸化生物炭后均可显著降低盐碱土壤 pH,但随着生物炭添加量逐渐增加,内蒙古盐碱土壤 pH 降低幅度呈减小趋势^[60]。也有研究^[14,61-63]表明,在滨海盐碱土壤中施入生物炭后对土壤 pH 没有显著影响,或由于生物炭的碱性特征提高盐碱土壤 pH^[64-66]。目前,导致盐碱土壤 pH 降低的作用机制尚不明确,可能主要包括的机制有:(1)生物炭通过减小土壤容重,增加孔隙度,增强盐分淋洗效果,进而降低盐碱土壤 pH;(2)盐碱土壤的高 pH 主要与高 ESP(交换性 Na^+)有关^[48],生物炭带入的 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,间接降低了 Na^+ 比例,进而降低土壤 ESP,可能是导致盐碱土壤 pH 降低的机制之一^[45,67];(3)生物炭与盐碱土壤的 pH 差值将影响其降低幅度^[68];(4)生物炭在氧化过程中释放酸性官能团^[52,69],酸性基团与土壤阳离子之间存在静电吸引^[50,70],减少土壤中碱性基团,降低土壤 pH,一定程度上缓解土壤盐碱化过程^[71]。

虽然生物炭对盐碱土 pH 具有不同的正负效应,但可通过代换作用降低土壤盐碱度^[46,64,72]。已有研究^[73-74]表明,由于生物炭较强的吸附作用,可将盐碱土壤中 Na^+ 吸附并固定于固态聚合物中,减小 Na^+ 对土壤结构的破坏,有效调控土壤盐分。由于生物炭中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子与盐碱土壤的 Na^+ 置换,增加交换性盐基数量和盐基饱和度,降低盐碱土碱化度和含盐量^[72,74-80],同时促进土壤淋洗排盐过程,缩短

盐分洗脱时间,提高洗盐效率^[49],尤其是有利于 NO_3^- 和 CO_3^{2-} 的溶出^[81-82]。

生物炭降低盐碱土壤盐碱度主要原因有:(1)由于生物炭的多孔结构,盐离子吸附于生物炭表面或物理截留余孔隙中,进而降低土壤盐分^[67,83];(2)生物炭可以增加土壤孔隙度,促进土壤剖面 Na^+ 浸出,降低 EC 和 ESP^[45,56,67];(3)生物炭可降低土壤水分蒸发,减少土壤表层盐分积累^[50-51];(4)生物炭增加了盐碱土壤 K^+ 和 Ca^{2+} 含量,取代土壤胶体中 Na^+ ,致使土壤胶体的 Ca^{2+} 吸附量 $>$ Na^+ 吸附量,进而降低土壤 ESP^[26,53,67,73,83-85]。

4 生物炭对盐碱土壤养分的影响

盐碱土壤由于恶劣的理化性质,引发离子拮抗和渗透胁迫。养分移动性差,有效氮、磷、钾含量低,有机质溶解度增加,矿化养分淋失加快。植物根系活性下降,影响养分转化及其有效性,抑制植物对矿质营养和水分吸收和利用^[86]。

已有研究^[87]表明,生物炭可以增加松嫩平原盐碱土壤速效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾与有机质含量,提高盐碱土壤总有机碳含量,增加养分含量和有效性^[55,88],提高滨海盐碱土壤生产力和碳固存^[62],有效减少黄河三角洲地区盐碱土壤氮含量并提高氮肥利用率^[89],提高滨海盐碱土壤氨氧化产物丰度,改变氨氧化产物组成^[90],明显减少硝态氮和总氮淋失,延长其在盐碱土壤中的停留时间,增强土壤持续供氮能力^[55,88],并降低盐碱土壤的氨挥发^[91];同时,改善滨海草甸盐化水稻土壤磷素状况,提高土壤固磷能力^[92],促进苏北盐渍土磷素吸收利用^[93],有效增加辽宁碱性土壤磷素从无效态向有效态转化^[94];促进植物对养分的吸收、利用和转化,提高植物水肥利用率,改善盐碱土壤的养分微环境^[39,60,83,95-96]。但也研究^[97-98]得出相反结论,认为生物炭施用后显著降低苏打盐碱稻田土壤碱解氮和铵态氮含量和土壤磷有效性,可能是施用生物炭增加了土壤 pH,导致土壤磷被固定,使其无法被植物吸收和利用^[98]。

综合分析,生物炭增强盐碱土壤养分的原因主要有:(1)生物炭本身含有大量营养元素,可显著增加盐碱土壤养分含量,尤其是大幅度提高土壤中有机碳含量,改善土壤养分环境^[60];(2)生物炭中碳含量高且不易降解,是盐碱土壤有机质含量增加的主要原因^[99];(3)生物炭加入土壤后,能够产生正负电荷,从而有效吸附盐碱土壤养分,降低养分的淋溶损失^[100];(4)生物炭可促进营养物质转化,提高养分有效性^[101-102]。

5 生物炭对盐碱土壤微生物的影响

土壤微生物对土壤营养循环和植物生长起着至关重要的作用。盐碱土壤对土壤微生物的生长、微生物量、多样性和相关酶活性均有负向效应^[103-106]。随着土壤盐碱程度增加,土壤微生物量和活性降低,群落结构从真菌转为以细菌为主,竞争性减弱^[107-108]。

已有研究^[14]表明,施加生物炭可以促进华北平原滨海盐碱土壤微生物量碳氮含量,改变滨海盐碱土壤固氮菌群落结构,刺激土壤固氮菌生长^[101],显著影响河套灌区盐碱土玉米生长旺盛期反硝化细菌的基因丰度和群落结构^[109],提高固氮细菌丰度和活性^[102],增加土壤氮素输入,加速土壤氮循环。同时,添加生物炭可提高盐碱土壤中溶磷菌如硫杆菌、假单胞菌和黄杆菌的相对丰度,促进土壤有效磷含量增加^[54]。通过土壤泥浆厌氧培养法^[82]研究表明,生物

炭可以增强微生物还原 Fe(III) 的能力,并与 CO_3^{2-} 结合形成沉淀态铁化合物。促进微生物厌氧培养体系的产氢产酸过程,促进 CO_3^{2-} 向 HCO_3^- 及 CO_2 转化,从而有效降低土壤中 CO_3^{2-} 摩尔浓度及 pH,提高养分有效性,有利于改善盐碱土壤环境。

生物炭对盐碱土壤微生物的主要作用机制包括:(1)生物炭改变盐碱土壤微生物生存环境,直接或间接影响微生物代谢活动;(2)土壤 pH 是微生物群落组成的主要决定因素,生物炭通过调控土壤 pH,改变土壤微生物群落的多样性和丰富度^[110];(3)生物炭通过促进土壤的脱氢—产氢过程,进而增加 CO_3^{2-} 向 HCO_3^- 的转化,强化微生物铁还原过程,增加对 CO_3^{2-} 的固定,减弱土壤盐碱化^[80]。本文基于生物炭对盐碱土壤物理、化学、养分和微生物的改良机理,绘制了相关机制示意(图 2)。

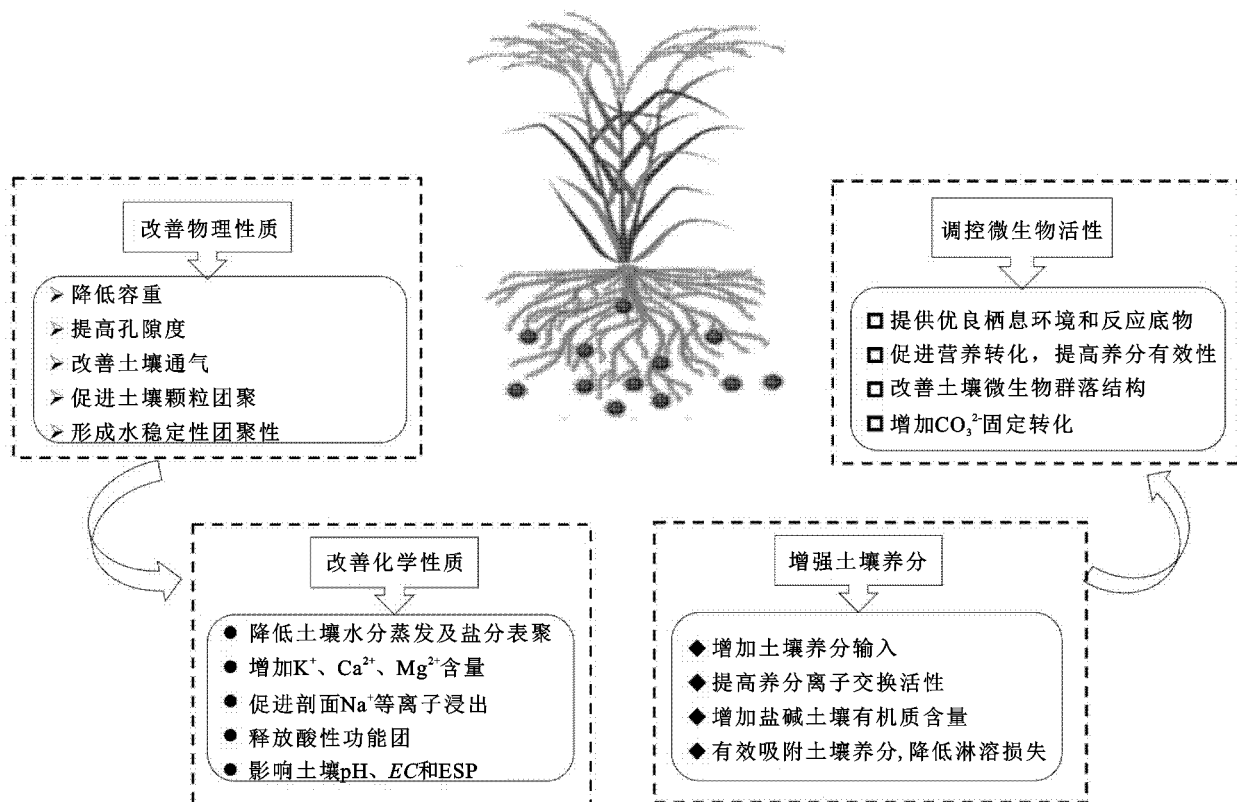


图 2 生物炭改良盐碱土的可能机制示意

6 展望

综上,生物炭以其良好的理化性质、资源丰富、材料来源广泛、可再生和环境友好等优点成为当今农业、能源与环境等领域的研究热点。国内外学者在生物炭改良盐碱土壤方面做了很多有益探索,但与生物炭在中性和酸性土壤中的应用相比,其在盐碱地中的应用研究尚处于起步阶段。生物炭本身具有的独特别理化特性及原材料多样、环境友好等特点使其在盐碱地生态治理中具有广阔应用前景。目前,生物炭在盐

碱地的改良应用中仍有一些问题需重点关注。

(1)需要继续深化基础理论研究,生物炭在盐碱地改良中的争议性和不确定性,生物炭—盐碱土壤—作物的互作机制等问题仍有待进一步系统研究和验证。

(2)生物炭对盐碱地的改良作用研究多基于模拟试验,而不同类型盐碱地理化性质非常复杂。因此,需扩大已有研究尺度,长期定点监测,分析大田实际应用的适用性和作用机理,并评估其持续效果。

(3)由于生物炭制备选材和制备工艺等区别导致

生物炭价格不同。随着施炭量的增加,盐碱地改良的前期投入也随之加大。是否可以兼顾盐碱地改良的生态、经济和社会效益,需构建一套统一评价指标体系进行综合权衡。

参考文献:

- [1] Amini S, Ghadiri H, Chen C R, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: A review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16: 939-953.
- [2] Nan J K, Chen X M, Chen C, et al. Impact of flue gas desulfurization gypsum and lignite humic acid application on soil organic matter and physical properties of a saline-sodic farmland soil in Eastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16: 2175-2185.
- [3] Shrivastava P, Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2015, 22: 123-131.
- [4] Yue J M, Fu Z Y, Zhang L, et al. The positive effect of different 24-epiBL pretreatments on salinity tolerance in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings [J]. *Forests*, 2019, 10 (4): 1-7.
- [5] 杨劲松,姚荣江.我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(增刊1): 162-170.
- [6] 郎文聚.我国耕地资源开发利用的问题与整治对策[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(4): 484-491.
- [7] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993: 250-305.
- [8] 梁正伟,王志春,马红媛,等.利用耐逆植物改良松嫩平原高 pH 盐碱土研究进展 [J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(4): 517-528.
- [9] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44: 1295-1301.
- [10] Tripathi M, Sahu J N, Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 467-481.
- [11] 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.
- [12] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1812-1836.
- [13] Kamau S, Karanja N K, Ayuke F O, et al. Short-term influence of biochar and fertilizer-biochar blends on soil nutrients, fauna and maize growth [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55: 661-673.
- [14] 石玉龙,高佩玲,刘杏认,等.生物炭和有机肥施用提高了华北平原滨海盐土微生物量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 555-567.
- [15] Fang Y, Singh B P, Luo Y, et al. Biochar carbon dynamics in physically separated fractions and microbial use efficiency in contrasting soils under temperate pastures [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 399-409.
- [16] Gomez J D, Denef K, Stewart C E, et al. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65: 28-39.
- [17] Lian F, Liu X W, Gao M L, et al. Effects of Fe-Mn-Ce oxide-modified biochar on As accumulation, morphology, and quality of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 18196-18207.
- [18] Woods W I, Falcao N P S, Teixeira W G. Biochar trials aim to enrich soil for smallholders [J]. *Nature*, 2006, 443: 144.
- [19] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [20] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol [J]. *Geoderma*, 2013, 209: 188-197.
- [21] 王义祥,辛思洁,叶菁,等.生物炭对强酸性茶园土壤酸度的改良效果研究[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(12): 108-111.
- [22] 赵牧秋,金凡莉,孙照炜,等.制炭条件对生物炭碱性基团含量及酸性土壤改良效果的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 299-303.
- [23] Qayyum M F, Ashraf I, Abid M, et al. Effect of biochar, lime, and compost application on phosphorus adsorption in a Ferralsol [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178: 576-581.
- [24] Wang Z Y, Zong H Y, Zheng H, et al. Reduced nitrification and abundance of ammonia-oxidizing bacteria in acidic soil amended with biochar [J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 576-583.
- [25] 李思平,曾路生,李旭霖,等.不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 363-368.
- [26] Drake J A, Cavagnaro T R, Cunningham S C, et al. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? [J]. *Land Degradation and Development*, 2016, 27: 52-59.
- [27] Luo X C, Liu G C, Xia Y C, 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.
- [28] 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(3): 517-532.
- [29] Bauder J W, Brock T A. Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching [J]. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15: 101-113.
- [30] Levy G J, Goldstein D, Mamedov A I. Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: Combined effects of salinity, sodicity, and rate of wetting [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 653-662.
- [31] Mamedov A I, Levy G J, Shainberg I, et al. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39: 1293-1305.
- [32] Shainberg I, Levy G J, Goldstein D, et al. Prewetting rate and sodicity effects on the hydraulic conductivity of soils [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39: 1279-1291.
- [33] 胡敏, 屈忠义, 王丽萍, 等. 不同改良剂对河套灌区盐渍化土壤性状和葵花生长特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 316-322.
- [34] 高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(3): 524-529.
- [35] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 酸性和碱性土壤中芒草生物质炭激发效应的特征和差异[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 90-95.
- [36] 孙运朋, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物炭和黄腐酸对滨海滩涂盐碱地土壤性质的提升[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(8): 115-121.
- [37] 侯新村, 胡艳霞, 孙宇, 等. 生物炭添加对滨海盐土柳枝稷生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 31-37.
- [38] 曹雨桐, 余冬立. 施用生物炭和聚丙烯酰胺对海涂围垦区盐碱土水力性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3684-3690.
- [39] 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]. 山东烟台: 鲁东大学, 2019.
- [40] 孙泉沁, 房凯, 费远航, 等. 施加生物质炭对盐渍土土壤结构和水力特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 242-249.
- [41] 李争争, 屈忠义, 王丽萍, 等. 絮凝黄河泥沙复配生物炭对盐碱土水盐运移及水力特征参数影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 328-331.
- [42] Fei Y H, She D L, Gao L, et al. Micro-CT assessment on the soil structure and hydraulic characteristics of saline/sodic soils subjected to short-term amendment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 193: 59-70.
- [43] 田飞, 张楚涵, 王国强, 等. 生物炭隔盐层在盐碱土淋洗改良中的应用效果[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 302-308.
- [44] 孙运朋, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物炭和无机肥对盐碱滩涂围垦农田土壤性状的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2): 454-459.
- [45] Chaganti V N, Crohn D M, Simunek 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.
- [46] 张雯, 耿增超, 陈心想, 等. 生物质炭对盐土改良效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 73-77.
- [47] Chaganti V N, Crohn D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water [J]. *Geoderma*, 2015, 259: 45-55.
- [48] Shaygan M, Reading L P, Baumgartl T. Effect of physical amendments on salt leaching characteristics for reclamation [J]. *Geoderma*, 2017, 292: 96-110.
- [49] 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.
- [50] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 61-68.
- [51] Thomas S C, Frye S, Gale N, et al. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 62-68.
- [52] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 1836-1844.
- [53] Kim H S, Kim K R, Yang J E, et al. Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response [J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 153-159.
- [54] Liu S N, Meng J, Jiang L L, et al. Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 116: 12-22.
- [55] Sun J N, Dong L K, Xu G, et al. Effects of furfural and its biochar additions on physical-chemical characteristics of a saline soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33: 532-538.
- [56] Wu Y, Xu G, Shao H B. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil [J]. *Solid*

- Earth, 2014, 5: 665-671.
- [57] 陈友媛, 王翔宇, 吴海霞, 等. 浒苔生物炭对滨海盐碱土 Na^+ 的吸附迁移机制研究[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(增刊1): 85-92.
- [58] 鲁新蕊, 陈国双, 李秀军. 酸化生物炭改良苏打盐碱土的效应[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 462-466.
- [59] 王凡. 生物炭与木醋液复配对盐渍化农田作物生长及水土环境影响试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [60] 黄哲, 曲世华, 白岚, 等. 不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 290-295.
- [61] 武沛然. 生物炭与氮肥配施对盐碱胁迫下甜菜生长及土壤特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [62] 赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 196-200.
- [63] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil [J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66: 329-338.
- [64] 代红翠, 陈源泉, 王东, 等. 生物炭对碱性砂质土壤小麦出苗及幼苗生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 1-7.
- [65] 韩剑宏, 李艳伟, 张连科, 等. 生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5291-5297.
- [66] 王荣梅, 杨放, 许亮, 等. 生物炭在新疆棉田的应用效果研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(6): 757-763.
- [67] Lashari M S, Ye Y, Ji H, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: A 2-year field experiment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95: 1321-1327.
- [68] Abrishamkesh S, Gorji M, Asadi H, et al. Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth [J]. Plant Soil and Environment, 2015, 61: 475-482.
- [69] Liu X H, Zhang X C. Effect of biochar on pH of alkaline soils in the loess plateau: Results from incubation experiments [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2012, 14: 745-750.
- [70] 岳小红. 外源有机碳对盐渍化土壤性质及小麦生长的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [71] Tang J W, Zhang S D, Zhang X T, et al. Effects of pyrolysis temperature on soil-plant-microbe responses to *Solidago canadensis* L. derived biochar in coastal saline-alkali soil [J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: e138938.
- [72] 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.
- [73] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 226-234.
- [74] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Biochar mitigates salinity stress in potato [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201: 368-378.
- [75] 郜少敏. 生物炭和聚合硫酸铝铁对苏打盐碱土理化性质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [76] 姜井军, 郭瑞, 陈伶俐. 生物炭对酸性土和盐碱土改良效果的研究进展[J]. 农业开发与装备, 2014(11): 30-32.
- [77] 项子宸, 修海峰, 马琨, 等. 淋洗条件下不同改良剂对浙江东部滨海盐碱土的改良效果[J]. 浙江大学学报, 2020, 46(3): 344-359.
- [78] 校康, 孙亚乔, 马卫国. 添加生物炭对降低冬小麦幼苗盐害并促进其生长的效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 22-27.
- [79] 王潇, 胡海波, 施海新. 稻壳炭改良盐渍土性状研究[J]. 南京林业大学学报, 2019, 43(1): 193-197.
- [80] 周文志, 孙向阳, 李素艳, 等. 生物炭和园林废弃物堆肥对滨海盐碱土淋溶的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 23-30.
- [81] 盛海君, 杜岩, 施那峰, 等. 碳调节剂降低次生盐渍化土壤中可溶性盐含量的可行性[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 192-200.
- [82] 唐珺瑶, 赵永杰, 曲东, 等. 生物炭对减弱土壤盐渍化的贡献及其机理探讨[J]. 西北农业学报, 2017, 26(2): 294-303.
- [83] Lashari M S, Liu Y, Li L, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain [J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113-118.
- [84] 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [85] Zheng H, Wang X, Luo X X, et al. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: Roles of soil aggregation and microbial modulation [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610: 951-960.
- [86] Rengasamy P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils [J]. Functional Plant Biology, 2010, 37: 613-620.
- [87] 孔祥清, 韦建明, 常国伟, 等. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 647-651.
- [88] Hammer E C, Forstreuter M, Rillig M C, et al. Bio-

- char increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 114-121.
- [89] 王一字. 盐碱农田的氨挥发规律及添加生物炭对氨挥发的影响[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [90] Song Y J, Zhang X L, Ma B, et al. Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 321-332.
- [91] Esfandbod M, Phillips I R, Miller B, et al. Aged acidic biochar increases nitrogen retention and decreases ammonia volatilization in alkaline bauxite residue sand [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 157-165.
- [92] 曹殿云, 兰宇, 杨旭, 等. 生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(11): 2536-2543.
- [93] 高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1219-1229.
- [94] 杨洋, 张阳, 郝宇, 等. 生物炭与螯合剂配施条件下土壤无机磷的动态变化[J]. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(3): 415-420.
- [95] Huang M Y, Zhang Z Y, Zhu C L, et al. Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 250: 405-413.
- [96] Arif M, Ilyas M, Riaz M, et al. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 25-37.
- [97] 冉成, 邵玺文, 朱晶, 等. 生物炭对苏打盐碱稻田土壤养分及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(5): 46-51.
- [98] Xu G, Zhang Y, Sun J N, et al. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 910-915.
- [99] 张瑞, 杨昊, 张芙蓉, 等. 生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2404-2411.
- [100] 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.
- [101] 宋延静, 张晓黎, 龚骏. 添加生物质炭对滨海盐碱土固氮菌丰度及群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(8): 2168-2175.
- [102] Bhaduri D, Saha A, Desai D, et al. Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study [J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 86-98.
- [103] Morrissey E M, Gillespie J L, Morina J C, et al. Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1351-1362.
- [104] Huo L, Pang H C, Zhao Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 286-293.
- [105] Wichern J, Wichern F, Joergensen R G. Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils [J]. *Geoderma*, 2006, 137(1/2): 100-108.
- [106] Wong V, Dalal R C, Greene R. Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(7): 943-953.
- [107] Pankhurst C E, Yu S, Hawke B G, et al. Capacity of fatty acid profiles and substrate utilization patterns to describe differences in soil microbial communities associated with increased salinity or alkalinity at three locations in South Australia [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(3): 204-217.
- [108] Shi S H, Tian L, Nasir F, et al. Response of microbial communities and enzyme activities to amendments in saline-alkaline soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 135: 16-24.
- [109] 岳燕. 耐盐植物生物质炭特性及对盐渍化土壤改良施肥的作用与机理[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [110] Lauber C L, Hamady M, Knight R, et al. Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75: 5111-5120.