

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.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.002

## 改性生物炭特征及其对盐碱化土壤改良的研究进展

夏晓阳<sup>1</sup>, 王响玲<sup>1,2</sup>, 夏浩<sup>1</sup>, 李宇轩<sup>1</sup>, 王吉元<sup>1</sup>, 姜存仓<sup>1,2</sup>

1. 华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070;

2. 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003

**摘要** 土壤盐碱化严重制约农业的可持续发展,但施用改性生物炭对盐碱地改良效果显著。为探究改性生物炭改良盐碱土壤的作用机制,本文归纳总结了不同改性方式对原生物炭理化性质的影响,以及改性生物炭对盐碱地的改良效果和影响因素。结果表明,改性生物炭具有比表面积大、含氧官能团类型和数量多、碱性物质比例下降等特点;可以促进盐碱化土壤团粒结构的形成,增加对盐分离子的吸附和养分保持,改变土壤微生物的功能结构,增强作物应对外界胁迫的能力。然而改性生物炭长期效应及在不同类型盐碱地上应用差异的研究较少。未来应进行不同类型盐碱地应用的大田试验,深入研究改性生物炭对不同盐分离子的吸附能力及长效作用,优化在不同盐碱类型下的改良途径。

**关键词** 改性生物炭; 改性方法; 盐碱地; 土壤改良

**中图分类号** TQ424; S156.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0012-08

由于气候干旱、成土母质富含盐基离子以及灌溉不合理、开发过度等多重因素导致了盐碱地的形成与发展<sup>[1]</sup>。据统计,目前全世界盐碱化土壤面积共有11亿hm<sup>2</sup>,而我国盐碱土总面积为3690万hm<sup>2</sup>,主要分布在西北、华北、东北以及沿海地区,其中,西部地区的盐碱土面积占全国的69.03%,且呈逐年递增趋势<sup>[2]</sup>。盐碱化土壤可溶性盐离子含量高,导致团聚体稳定性差,具体表现为土壤板结、持水率差且盐碱环境常常伴随着土壤养分有效性的降低<sup>[3]</sup>。盐胁迫引起的土壤溶液渗透势升高对植物形成生理干旱,抑制植物对养分元素的吸收<sup>[4]</sup>,植物体内钠离子含量升高能够抑制酶活性,破坏细胞内离子稳态<sup>[5]</sup>,且较高的pH环境会产生碱胁迫,影响植物细胞稳定,导致植物生理代谢紊乱<sup>[6]</sup>。因此,盐碱胁迫已成为限制农业生产的关键影响因素。

生物炭是生物质在限氧条件煅烧而成的富碳材料,作为一种温和的土壤改良剂,在改善酸性土壤pH、提高营养元素有效性以及缓解铝毒等方面已经取得显著成效<sup>[7]</sup>。研究表明在盐碱地区施用生物炭也有较好的效果<sup>[8]</sup>。但由于生物炭本身呈碱性且携

带较多的盐基离子,会出现施用效果不明显甚至土壤盐碱度升高的现象<sup>[9]</sup>。大量研究表明,改性生物炭在改良盐碱土壤方面具有明显作用<sup>[10-11]</sup>,这与改性后生物炭表面含氧官能团、酸性基团的种类和数量增加<sup>[12]</sup>,比表面积、总孔隙度进一步扩大,阳离子交换能力增强密切相关<sup>[13]</sup>。此外,改性生物炭上负载的外源添加物质的特性也有影响<sup>[14-16]</sup>。因此,越来越多的研究关注改性生物炭在盐碱土壤中的应用。

改性生物炭虽然在盐碱化土壤的改良中表现出突出潜力,但目前盐碱地上应用的改性生物炭类型有限,且不同改性方式会对生物炭理化性质的改变有显著差异,在盐碱地上施用效果也会有不同的侧重。

因此,本文综述了生物炭的改性方法和改性特征,改性生物炭在盐碱地上的应用情况及不同类型改性生物炭对于盐碱地改良产生显著影响的可能机制,并提出未来研究重点和发展方向,以期改性生物炭在盐碱地上的合理应用和生产实践提供理论依据。

收稿日期: 2023-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(42167042);绿洲生态农业兵团重点实验室开放课题(202103);国家重点研发计划项目(2022YFD1701004-1)

夏晓阳, E-mail: Xia-xiaoyang@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 姜存仓, E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

## 1 生物炭的改性方式及其理化性质

生物炭在土壤改良中应用广泛,但在复杂的土壤环境中,其比表面积、孔隙度和官能团具有局限性,无法满足理想的改良效果要求。为优化生物炭

的表面结构和理化性质、提高其应用性能,越来越多的学者集中于生物炭的改性研究,其制备流程通常分为前处理和后处理2种类型(图1)。目前生物炭常用的改性方法大致分为4类:物理改性、化学改性、负载改性和有机改性。

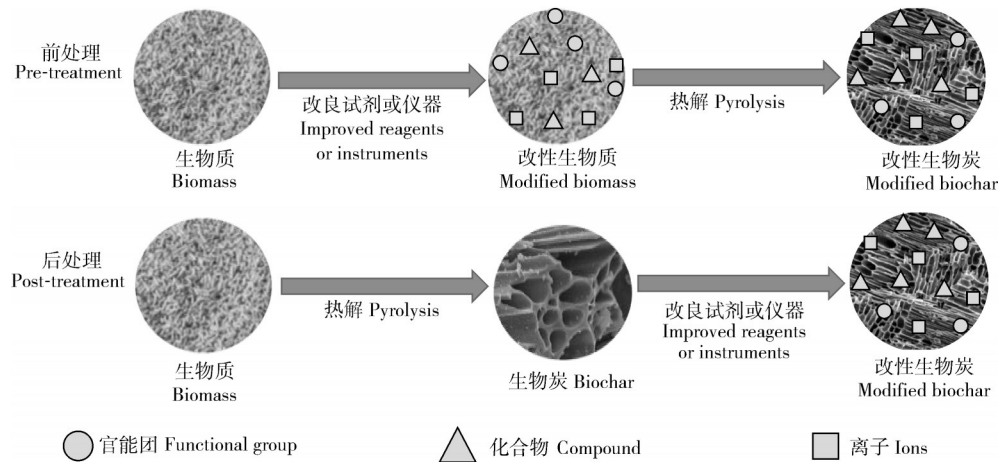


图1 改性生物炭的制备流程

Fig.1 Preparation process of modified biochar

### 1.1 物理改性

物理改性包括球磨、气体活化、紫外线照射等,是一种在改性过程中不需要使用化学试剂的绿色、环境友好型改性方式。球磨研磨将生物炭内部孔隙网络暴露、含氧官能团引入生物炭表面,比表面积扩大<sup>[17]</sup>。气体活化过程中因挥发性化合物被清除增加孔隙度,水蒸气中氧与生物炭表面碳交换,形成表面氧化物<sup>[18]</sup>。紫外光照射可以氧化生物炭原有的官能团,在照射距离40 mm下照射32 h后生物炭O/C从0.22上升至0.45,说明改性生物炭的含氧官能团相对含量增加<sup>[19]</sup>。因此,物理改性的主要作用是扩大生物炭比表面积、孔隙结构,增加表面官能团种类和数量。

### 1.2 化学改性

化学改性是提升生物炭表面性能最常用的方式,通过加入酸( $H_3PO_4$ 、 $HNO_3$ 、 $HCl$ 、 $H_2SO_4$ )、碱( $NaOH$ 、 $KOH$ )或氧化剂( $H_2O_2$ 、 $KMnO_4$ )来实现对生物炭理化性质的改善。酸碱改性对于生物炭表面酸碱基团的影响十分显著, $KOH$ 改性后碱性基团的比例进一步增加,而 $H_3PO_4$ 改性后酸性基团显著升高,约是碱性基团的3.3倍<sup>[12]</sup>。 $HCl$ 改性后油茶籽壳生物炭表面羧基和酚羟基均有所增加<sup>[20]</sup>。 $H_3PO_4$ 改性也得到了相似的结果,即化学改性生物炭的比表面积和孔隙度增加,含氧官能团( $-COOH$ 、 $-OH$ 、 $P=O$ 、 $P=OOH$ )含量显著升高,通过与金属离子形成表

面络合物,提高对金属离子的吸附能力<sup>[13]</sup>。总体而言,化学改性增加生物炭表面的含氧官能团种类和数量,提高生物炭比表面积和孔隙度,其中酸碱改性能够对生物炭的pH产生显著影响。

### 1.3 金属负载改性

金属改性可使生物炭获得更大的比表面积和更多的吸附位点,改变生物炭金属元素含量和表面电荷,具有良好的静电吸引和沉淀能力。外源金属氧化物的负载能够显著提升生物炭对阴离子的吸附能力<sup>[15]</sup>。例如, $MgCl_2$ 改性后的生物炭表面引入带正电的 $MgO$ 片层和羟基官能团有利于对硝态氮的吸附<sup>[21]</sup>。 $FeCl_3$ 和 $FeCl_2$ 改性的水稻秸秆生物炭具有较高的零电荷点(pHzpc),增强了与磷养分之间的静电吸附和配体交换反应,提高对磷酸盐的吸附率,磷素养分淋失率分别降低86.4%和69.3%<sup>[16]</sup>。也有研究发现, $MgO$ 堵塞生物炭孔隙从而降低比表面积,但对 $K^+$ 和 $PO_4^{3-}$ 的吸附能力增强,说明金属负载改性生物炭的吸附能力主要受化学过程影响<sup>[22]</sup>。

### 1.4 有机改性

有机化合物官能团含量丰富,被广泛用于生物炭的官能团富集。施用富含羧基、羟基、酚基和醇基等含氧官能团的改性生物炭能够显著增强对目标污染物的吸附。 $Li$ 等<sup>[23]</sup>用L-半胱氨酸对柚皮生物炭改性,将巯基、氨基、羧基官能团在生物炭富集,增加生物炭的吸附位点和亲水性。以聚乙烯亚胺作为改

性剂制备的生物炭富含氨基,能够增强生物炭对Cr(VI)的吸附能力<sup>[24]</sup>。类似地,有机物壳聚糖和丙烯酸改性生物炭引入大量羧基、羟基或氨基,这些官能团与水体中重金属离子形成内层络合物,通过吸附减少水体重金属污染<sup>[25]</sup>。

## 2 改性生物炭在盐碱地上的应用

### 2.1 施用改性生物炭对盐碱土壤物理性质的影响

研究发现,生物炭通过 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 置换土壤胶体表面高含量的 $\text{Na}^+$ ,促进盐碱地中 $\text{Na}^+$ 的浸出,形成生物炭-有机物-矿物复合体,从而促进盐碱土壤团聚体的形成<sup>[8]</sup>。 $\text{FeCl}_3$ 改性生物炭与对照相比增加了土壤有机碳含量,促进土壤团聚体的形成,大团聚体比例占比显著增加24.67%<sup>[26]</sup>。带正电荷的铁氧化物和带负电荷的黏土矿物之间的静电结合是促进土壤微团聚体形成的主要原因<sup>[27]</sup>。由于酸化改性生物炭具有大量 $\text{H}^+$ 和含氧官能团( $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ ),提高了对土壤胶体上交换性 $\text{Na}^+$ 的置换能力和吸附能力<sup>[11,28]</sup>,含氧官能团的增加促进生物炭-有机-矿物复合体的形成,提高土壤团聚体的稳定性<sup>[29]</sup>。经 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 酸化改性生物炭导致不同土层 $>0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体占比提高21%~897%<sup>[11]</sup>。因此,改性生物炭促进土壤团聚体形成的直接机制是增加胶结物质(土壤有机碳,外源负载物质等)或本身作为胶结物质促进颗粒聚集。此外,生物炭可通过调控影响植物、微生物的生长代谢间接对土壤颗粒产生物理团聚作用<sup>[8]</sup>。改性生物炭增强植物菌根定殖<sup>[30]</sup>、促进植物根系生长<sup>[14]</sup>、提高土壤细菌中具有增加分泌黏液和多糖功能的变形菌门相对丰度<sup>[31]</sup>,进而起到稳定土壤团聚体的作用。

改性生物炭能够通过增加土壤中胶结物质含量,增强对植物、微生物的间接调控以及对水分的有效固持起到改善盐碱土壤物理性质的作用。降低盐碱土壤容重和增加孔隙度的直接机制是生物炭的高孔隙度、低容重和盐碱土的低孔隙度、高容重进行“中和作用”,土壤团聚结构的改善也有利于形成土壤多级孔隙,降低土壤容重<sup>[8]</sup>。通过多种改性方式获得的生物炭均具有比表面积和孔隙度增加等特性<sup>[14,18]</sup>,研究表明生物炭的孔隙结构能够有效固持水分<sup>[32]</sup>。且改性生物炭表面的亲水性提高、极性含氧官能团数量和种类增多,能够与水分子形成氢键,增强生物炭的水分固持能力<sup>[33]</sup>。

### 2.2 施用改性生物炭对盐碱土壤化学性质的影响

生物炭灰分中的碱金属、碱土金属化合物含量高,碱性官能团比例显著高于酸性官能团的特性使其pH值呈碱性<sup>[34]</sup>,富有碱性特征的生物炭在盐碱地上施用会进一步提高土壤盐渍化的风险,因而在盐碱土的应用仍受到一定限制<sup>[9]</sup>。而生物炭酸化或水洗改性后碱性元素总量分别比原生物炭下降了88.78%和26.53%<sup>[35]</sup>。研究表明, $\text{FeO}$ 和 $\text{ZnO}$ 负载改性的生物炭可以有效降低土壤交换性钠饱和度(ESP)和钠吸收比(SAR)<sup>[36]</sup>, $\text{HNO}_3$ 酸化和纳米改性的生物炭也起到减少土壤盐分含量的效果<sup>[37]</sup>。Farhangi-abriz等<sup>[38]</sup>通过吸附试验发现负载 $\text{MgO}$ 和 $\text{MnO}$ 的生物炭对 $\text{Na}^+$ 的吸附量由46.7 mg/kg分别提升至91.4和73.6 mg/kg,进一步证实改性生物炭确实能够提升对盐分离子的吸附能力。目前研究普遍认为土壤盐分的减少主要是由于改性生物炭吸附、结合作用的增强。可能的机制为:(1)由于生物炭改性后比表面积和孔隙度增加,与土壤盐分的接触面积扩大,吸附能力增强<sup>[33]</sup>;(2)生物炭含氧官能团( $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 等)的数量和种类增加,与 $\text{Na}^+$ 的表面络合能力增强<sup>[12]</sup>;(3)负载于生物炭的金属氧化物带有正电荷,对阴离子的吸附能力增强<sup>[16,21]</sup>。盐碱地中的主要盐分阳离子为 $\text{Na}^+$ ,而不同典型盐碱类型的盐分阴离子有所差异。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 是硫酸盐型、氯化物型、氯化物-硫酸盐混合型盐碱地主要盐分阴离子,因此可施用具有高pH<sub>zpc</sub>且对阴离子吸附能力增强的金属负载改性生物炭<sup>[15-16]</sup>;而苏打型盐碱地以 $\text{HCO}_3^-$ 为主,施用酸性基团较多的酸化生物炭效果会更好<sup>[12]</sup>。

有研究显示,生物炭改性后对降低盐碱土壤pH值无显著效果,甚至略有升高,这与改性后暴露出更多的碱性官能团和矿物质有关<sup>[39]</sup>。目前降低盐碱土pH值效果最显著的改性方式为酸化改性,酸化改性生物炭表面碱性基团大幅度下降,而酸性基团则由0.321 nmol/g上升至0.785 nmol/g<sup>[12]</sup>;Zhang等<sup>[39]</sup>研究发现球磨红磷改性能在生物炭表面负载磷酸和磷酸氢根离子,显著降低盐碱地pH。但也有研究显示,生物炭经 $\text{HCl}$ 改性后pH值由10.21降低至7.26,当酸化生物炭添加量为1%时施入pH 7.73的土壤中,碱性土壤pH值有增加趋势<sup>[40]</sup>。改性生物炭降低盐碱地pH值的可能机制是:(1)改性所用试剂与生物炭碱性无机化合物( $\text{NaOH}$ 、 $\text{CaCO}_3$ 等)反应,溶解、冲刷灰分,引入 $\text{H}^+$ 替换原有的盐基离子<sup>[41]</sup>;(2)改性后

生物炭酸碱基团的变化,酸性基团占据主导地位<sup>[12]</sup>;  
(3)改性生物炭pH值显著低于盐碱地pH值。

改性生物炭具有优良的吸附性能,可以减少养分流失。FeCl<sub>3</sub>改性生物炭通过静电吸引和配位体交换作用促进磷酸盐的吸附,减少了养分的浸出<sup>[16]</sup>。MgCl<sub>2</sub>改性生物炭不仅在生物炭表面形成纳米MgO片层,增加比表面积,而且引入羟基官能团促进对铵态氮的吸附<sup>[21]</sup>;其次对磷的吸附机制由单层吸附转为多层扩散,对磷酸盐的吸附容量增加为原生物炭的1.46倍<sup>[42]</sup>。H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>改性生物炭在施用3 a中均能减少反应性气态氮损失并提高水稻产量<sup>[43]</sup>。木醋液改性生物炭则通过增强对铵态氮的吸附和降低pH值来减少氮的损失<sup>[10]</sup>。改性生物炭还可以通过调节与养分循环有关的微生物和相关酶的数量与活性来调控土壤养分的生物地球化学循环过程。施用FeO改性的生物炭5 a后增加携带*phoD*基因的细菌丰度,增加碱性磷酸酶数量与活性,促进有机磷向无机磷转化<sup>[27]</sup>。目前研究表明,改性生物炭对增加土壤有效性氮、磷养分具有较好的长期效应,而对于钾素等养分状况的研究还十分缺乏。有研究发现在4 a的盆栽试验中,原始生物炭对酸性土壤微环境和柑橘生长有积极的影响,具有良好的钾效应<sup>[44]</sup>。但改性生物炭在酸性土壤上施用对于钾素营养的提升效应显著弱于原生物炭,这或许与改性过程中K<sup>+</sup>损失有关<sup>[45]</sup>。

### 2.3 施用改性生物炭对盐碱土壤微生物的影响

土壤微生物对土壤理化性质和作物生长具有重要作用,可以通过改变根际环境影响植物获取养分的能力。生物炭通过为微生物提供碳(C)、氮(N)、磷(P)等营养底物和定殖空间,调节土壤微域环境,影响微生物群落的结构和功能<sup>[46]</sup>。Wang等<sup>[31]</sup>研究发现土壤C、N、P等养分和pH、电导率(EC)的变化是驱动土壤微生物群落结构变化的主要因子,生物炭处理增加了变形菌门的相对丰度,有利于土壤团聚体稳定和土壤碳的储存。Zhang等<sup>[39]</sup>研究发现球磨生物炭可以显著提高变形菌门的假单胞菌科、海洋杆菌科和鞘氨醇单胞菌科的相对丰度。酸化改性生物炭增加了芽孢杆菌属和参与土壤硝化作用的亚硝化毛杆菌属及亚硝化螺菌属的相对丰度,可促进土壤养分循环<sup>[11]</sup>。Liu等<sup>[26]</sup>研究发现,FeO改性生物炭通过增加土壤有机碳含量促进了盐碱地上携带*pho-D*(碱性磷酸酶)基因的微生物相对丰度的提升,促进了有机磷的矿化。酸化生物炭施用后还增加了

有益耐盐菌黄杆菌属、芽孢杆菌属和节细菌属的相对丰度<sup>[37]</sup>。说明应用改性生物炭后能够驱动微生物群落结构向固氮、有机磷矿化、促进土壤C循环、缓解盐碱胁迫的结构转变,但相关功能基因的鉴定及微生物对改性生物炭修复盐碱地的响应机制有待进一步研究。

目前改性生物炭对于盐碱土壤真菌的研究较少,已有研究发现相较其他处理,酸化改性生物炭分别导致布氏白粉菌属和镰刀菌属相对丰度降低31.34%~73.92%、37.89%~67.48%,通过功能基因预测也发现酸化改性生物炭处理下病原真菌的功能预测值比其他处理低48.37%~58.13%,进一步验证了施用酸化改性生物炭可以降低致病真菌的相对丰度<sup>[37]</sup>。富含磁性铁纳米粒子的生物炭通过促进菌根定殖,增加了植物对氮、磷营养的吸收<sup>[30]</sup>。微生物在酸性土壤中施用生物炭的定殖已有一定研究,并且证实生物炭表面可以定殖大量有益微生物<sup>[47]</sup>。改性生物炭孔隙度和比表面积增大,可能为微生物提供更多的栖息地和免受天敌捕食的保护场所<sup>[39]</sup>,但关于改性生物炭上表面定殖微生物的研究还很缺乏。

### 2.4 施用改性生物炭对缓解植物盐碱胁迫的影响

改性生物炭通过改善盐碱土壤理化性质可以缓解植物盐碱胁迫,促进植物生长。主要机制有两方面:(1)降低土壤盐离子浓度。改性生物炭含氧官能团数量增加,比表面积增大,对Na<sup>+</sup>的吸附能力增强,可有效减少Na<sup>+</sup>在植物体内的积累<sup>[14]</sup>,增加土壤有机碳促进土壤团聚体的形成<sup>[26]</sup>,水分固持能力增强,对降低土壤盐离子也有一定作用<sup>[33]</sup>;(2)养分有效性的提高。改性生物炭通过特定养分富集增加对土壤中养分的供应<sup>[39]</sup>,增强对土壤养分的固持能力、减少养分流失<sup>[10,16]</sup>,以及调节与C、N、P等生物地球化学循环过程循环有关的微生物、酶活性<sup>[26,31]</sup>三方面来增加土壤养分的有效性。

植物耐盐性的增强也是改性生物炭缓解植物盐碱胁迫的重要途径。通过对植物叶片代谢组学研究发现改性生物炭处理可以调控多种代谢产物(*L*-瓜氨酸、3-甲基-1-戊醇、异烟酸等)和代谢途径,植物抗氧化水平和抗盐碱胁迫能力增强<sup>[37]</sup>。改性生物炭还可以通过负载相关的营养元素来调节植物生理反应,增强植物抗盐碱能力。负载纳米金属氧化物的生物炭通过促进植物对纳米养分的吸收来调节植物体所受的胁迫作用,添加外源锰可以提高植物体超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、酚类化合

物、抗坏血酸等抗氧化剂含量,增强植物的抗氧化功能<sup>[48]</sup>。 $Mg^{2+}$ 是叶绿素结构中的中心离子,镁离子的富集有利于增加叶绿素含量和稳定性<sup>[49]</sup>。负载镁和锰金属氧化物的生物炭基纳米复合材料可以增强光系统II的量子产率、光合电子传输速率、光合色素的生物合成和植物的抗氧化系统,从而减少了红花植物在盐胁迫下的活性氧(ROS)生成和氧化胁迫<sup>[50]</sup>。同时植物根系的发达程度与改性生物炭中镁、锰含量增加具有很强的相关性<sup>[19]</sup>。负载铁、锌纳米材料的生物炭在提高植物的抗逆性和养分利用率方面具有巨大潜力,因为铁是许多重要酶的组成部分,而锌作为色氨酸合成活化剂可以促进植物生长<sup>[36]</sup>。目前,负载金属氧化物的生物炭具有缓解植物胁迫和增强植物抗盐碱的性能已经得到初步验证,下一步可以探究生物炭负载更多功能性营养元素对于缓解植物盐碱胁迫的作用。

### 3 存在问题与展望

近年来,随着改性生物炭改良盐碱土所受关注度的增加,改性生物炭在盐碱土改良上取得了一定的进展。本文重点阐述了不同改性生物炭特征及其对盐碱地的改良效果。生物炭适当改性进一步优化了原生物炭比表面积大、孔隙丰富的特性,增加了生物炭表面含氧官能团类型和数量,降低了生物炭碱性特征,解决了原生物炭对阴离子吸附能力弱以及在盐碱地中应用效果差等问题。改性生物炭在盐碱地改良中可以实现降低土壤盐碱度、提高土壤养分有效性和调节植物根际微域环境、缓解植物盐碱胁迫的目标,因此改性生物炭具有广阔的应用前景。但关于改性生物炭在盐碱地改良中仍有以下问题亟待解决:

1) 优化改性生物炭在不同盐碱地类型下的改良途径。不同盐碱地类型土壤理化性质和主要盐分阴离子有较大差异,需结合X射线衍射、傅立叶红外光谱及X射线光电子能谱等技术手段,探究施入土壤前后的改性生物炭理化性质、结构形貌等变化,进一步检验在改良不同类型盐碱地中的主导吸附机制,如物理吸附、官能团吸附、离子交换机制,探究不同盐分离子对改性生物炭的响应,以此来优化改性生物炭在不同盐碱类型下的改良途径。

2) 验证改性生物炭的长期效应。目前盐碱土壤上改性生物炭的施用研究以盆栽或小规模试验为主,所获得的结果缺乏长期定位大田试验的验证。

已有研究初步证明改性生物炭对促进土壤氮磷养分有效性具有长期效应,但对于生物炭吸附的盐离子是否会出现大量解吸造成土壤盐分含量再次增加,对植物根际微域环境的影响及对土壤养分供给的长效能力仍需进行研究验证。

3) 明晰改性生物炭添加下微生物的响应机制,建立生物学修复技术。土壤盐分改变如何影响土壤微生物演替过程,微生物功能基因表达与环境改变的内在机制,以及定殖于生物炭表面的微生物群落组成、结构和功能仍需深入探究。应利用高通量测序、非靶向代谢组学、宏基因组学等技术深入揭示改性生物炭施加下盐碱化土壤微生物群落生态学机制,为盐碱化土壤生物修复技术的建立提供理论依据。

4) 优化改性炭的性能并控制成本。原料类型、热解温度以及改性条件能够显著影响生物炭与改性生物炭的性质,因此,未来研究应更加具体地对生物炭制备和改性方式进行分类和整合,建立不同原料生物炭改性的系统化构架,在盐碱地改良的研究中选取更加高效的改性方式,但目前改性生物炭的研究大多处于试验阶段,因效能或成本问题未能广泛应用于实际,未来的研究应集中于选取低成本、操作简单、实用性强的生物炭改性方式。

### 参考文献 References

- [1] 路晓筠,项卫东,郑光耀,等.盐碱地改良措施研究进展[J].江苏农业科学,2015,43(12):5-8.LU XY, XIANG W D, ZHENG G Y, et al. Research progress on improvement measures of saline - alkaline land[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2015, 43(12): 5-8(in Chinese with English abstract).
- [2] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta pedologica sinica, 2008, 45(5): 837-845(in Chinese with English abstract).
- [3] 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.YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect [J]. Acta pedologica sinica, 2022, 59(1): 10-27(in Chinese with English abstract).
- [4] 郭家鑫,鲁晓宇,陶一凡,等.盐碱胁迫对棉花生长和养分吸收的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(4):23-32,59.GUO J X, LU X Y, TAO Y F, et al. Effects of saline and alkaline stresses on growth and nutrient uptake of cotton[J]. Agricultural research in the arid areas, 2022, 40(4): 23-32, 59(in Chinese with English abstract).
- [5] ABDUL W. Potassium-sodium interactions in soil and plant

- under saline-sodic conditions[J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2013, 176(3): 344-354.
- [6] HU L X, ZHANG P P, JIANG Y, et al. Metabolomic analysis revealed differential adaptation to salinity and alkalinity stress in Kentucky bluegrass (*Poa pratensis*) [J]. Plant molecular biology reporter, 2015, 33(1): 56-68.
- [7] 丛铭, 张梦阳, 夏浩, 等. 施用生物炭对红壤中不同形态钾含量及小白菜生长的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 22-28. CONG M, ZHANG M Y, XIA H, et al. Effect of biochar application on potassium content of different forms in red soil and the growth of pakchoi [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 22-28 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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. LIU Q, YUAN Y F, LIU Y F, et al. Research progress: the application of biochar in the remediation of salt-affected soils [J]. Advances in earth science, 2022, 37(10): 1005-1024 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张进红, 吴波, 王国良, 等. 生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 285-294. ZHANG J H, WU B, WANG G L, et al. Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(8): 285-294 (in Chinese with English abstract).
- [10] 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 等. 木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2779-2787. SHEN S W, WANG D D, WANG M G, et al. Effects of combined application of wood vinegar-acidified biochar and nitrogen on active nitrogen and ammonia volatilization in saline soil [J]. Environmental science, 2022, 43(5): 2779-2787 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘国欢. 改性生物炭对盐碱地改良及冬小麦生长特征影响的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021. LIU G H. Effects of modified biochar on saline alkali soil improvement and growth characteristics of winter wheat [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [12] WANG W, MA X L, SUN J, et al. Adsorption of enrofloxacin on acid/alkali-modified corn stalk biochar [J]. Spectroscopy letters, 2019, 52(7): 367-375.
- [13] PENG H B, GAO P, CHU G, et al. Enhanced adsorption of Cu (II) and Cd (II) by phosphoric acid-modified biochars [J]. Environmental pollution, 2017, 229: 846-853.
- [14] GHASSEMI-GOLEZANI K, FARHANGI-ABRIZ S. Biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese improved root development and productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under salt stress [J/OL]. Rhizosphere, 2021, 19: 100416 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100416>.
- [15] REN J, LI N, LI L, et al. Granulation and ferric oxides loading enable biochar derived from cotton stalk to remove phosphate from water [J]. Bioresource technology, 2015, 178: 119-125.
- [16] WU L P, ZHANG S R, WANG J, et al. Phosphorus retention using iron (II/III) modified biochar in saline-alkaline soils: adsorption, column and field tests [J/OL]. Environmental pollution, 2020, 261: 114223 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114223>.
- [17] ZHANG P, XUE B, JIAO L, et al. Preparation of ball-milled red phosphorus-loaded biochar and its highly effective remediation for Cd- and Pb-contaminated alkaline soil [J/OL]. The science of the total environment, 2022, 13: 152648 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152648>.
- [18] WANG R Z, HUANG D L, LIU Y G, et al. Synergistic removal of copper and tetracycline from aqueous solution by steam-activated bamboo-derived biochar [J/OL]. Journal of hazardous materials, 2020, 384: 121470 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121470>.
- [19] PENG Z Y, ZHAO H, LÜ H H, et al. UV modification of biochar for enhanced hexavalent chromium removal from aqueous solution. [J]. Environmental science and pollution research international, 2018, 25(11): 10808-10819.
- [20] WU J W, WANG T, ZHANG Y S, et al. The distribution of Pb(II)/Cd(II) adsorption mechanisms on biochars from aqueous solution: considering the increased oxygen functional groups by HCl treatment [J/OL]. Bioresource technology, 2019, 291: 121859 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121859>.
- [21] 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 等. 水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4980-4986. LIU S L, PENG H J, YANG J Y, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from water by biomass carbon of aquatic plants [J]. Environmental science, 2019, 40(11): 4980-4986 (in Chinese with English abstract).
- [22] SHEN Y F, YUAN R. Pyrolysis of agroforestry bio-wastes with calcium/magnesium oxides or carbonates-focusing on biochar as soil conditioner [J/OL]. Biomass and bioenergy, 2021, 155: 106277 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106277>.
- [23] LI B Q, GONG J X, FANG J Z, et al. Cysteine chemical modification for surface regulation of biochar and its application for polymeric adsorption from aqueous solutions. [J]. Environmental science and pollution research, 2020, 28(1): 1061-1071.
- [24] MA Y, LIU W J, ZHANG N, et al. Polyethylenimine modified biochar adsorbent for hexavalent chromium removal from the aqueous solution [J]. Bioresource technology, 2014, 169: 403-408.
- [25] ZHANG L X, TANG S Y, HE F X, et al. Highly efficient and selective capture of heavy metals by poly(acrylic acid) grafted chitosan and biochar composite for wastewater treatment [J/OL]. Chemical engineering journal, 2019, 378: 122215 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122215>.

- [26] LIU L, ZHANG S, CHEN M, et al. Fe-modified biochar combined with mineral fertilization promotes soil organic phosphorus mineralization by shifting the diversity of *phoD*-harboring bacteria within soil aggregates in saline-alkaline paddy soil [J]. *Journal of soils and sediments*, 2022, 23: 619-633.
- [27] XUE B, HUANG L, HUANG Y N, et al. Roles of soil organic carbon and iron oxides on aggregate formation and stability in two paddy soils [J]. *Soil & tillage research*, 2019, 187: 161-171.
- [28] 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. LU X R, CHEN G S, LI X J. Experimental effects of acidified biochar on saline-sodic [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(4): 462-466 (in Chinese with English abstract).
- [29] HAN L F, SUN K, YANG Y, et al. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon [J/OL]. *Geoderma*, 2020, 364: 114184 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114184>.
- [30] JOSEPH S, ANAWAR H M, STORER P, et al. Effects of enriched biochars containing magnetic iron nanoparticles on mycorrhizal colonisation, plant growth, nutrient uptake and soil quality improvement [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5): 749-760.
- [31] WANG Z J, PAN X, KUANG S P, et al. Amelioration of coastal salt-affected soils with biochar, acid modified biochar and wood vinegar: enhanced nutrient availability and bacterial community modulation [J/OL]. *International journal of environmental research and public health*, 2022, 19(12): 7282 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.3390/ijerph19127282>.
- [32] EDEH I G, MASEK O, BUSS W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties - new insights and future research challenges [J/OL]. *Science of the total environment*, 2020, 714: 136857 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>.
- [33] DUAN M L, LIU G H, ZHOU B B, et al. Effects of modified biochar on water and salt distribution and water-stable macroaggregates in saline-alkaline soil [J]. *Journal of soils and sediments*, 2021, 21(6): 2192-2202.
- [34] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望 [J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 1-18. ZHANG M W, XIU L Q, WU D, et al. Review of biochar structure and physicochemical properties [J]. *Acta agronomica sinica*, 2021, 47(1): 1-18 (in Chinese with English abstract).
- [35] 林庆毅, 姜存仓, 张梦阳. 生物炭老化后理化性质及微观结构的表征 [J]. *环境化学*, 2017, 36(10): 2107-2114. LIN Q Y, JIANG C C, ZHANG M Y. Characterization of the physical and chemical structures of biochar under simulated aging condition [J]. *Environmental chemistry*, 2017, 36(10): 2107-2114 (in Chinese with English abstract).
- [36] RAHIMZADEH S, GHASSEMI-GOLEZANI K. Biochar-based nutritional nanocomposites altered nutrient uptake and vacuolar H<sup>+</sup>-pump activities of dill under salinity [J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2022, 22(3): 3568-3581.
- [37] DUAN M L, YAN R P, WANG Q J, et al. Integrated microbiological and metabolomics analyses to understand the mechanism that allows modified biochar to affect the alkalinity of saline soil and winter wheat growth [J/OL]. *The science of the total environment*, 2023, 866: 161330 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161330>.
- [38] FARHANGI-ABRIZ S, GHASSEMI-GOLEZANI K. Changes in soil properties and salt tolerance of safflower in response to biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese [J/OL]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2021, 211: 111904 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111904>.
- [39] ZHANG P, BING X, JIAO L, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar [J/OL]. *Chemical engineering journal*, 2022, 431: 133904 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133904>.
- [40] 郭大勇, 商东耀, 王旭刚, 等. 改性生物炭对玉米生长发育、养分吸收和土壤理化性状的影响 [J]. *河南农业科学*, 2017, 46(2): 22-27. GUO D Y, SHANG D Y, WANG X G, et al. Effects of modified biochar on growth, nutrients uptake of maize and soil physicochemical properties [J]. *Journal of Henan agricultural sciences*, 2017, 46(2): 22-27 (in Chinese with English abstract).
- [41] CHANG R H, SOHI S P, JING F Q, et al. A comparative study on biochar properties and Cd adsorption behavior under effects of ageing processes of leaching, acidification and oxidation [J/OL]. *Environmental pollution*, 2019, 254(2): 113123 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113123>.
- [42] WU L P, WEI C B, ZHANG S R, et al. MgO-modified biochar increases phosphate retention and rice yields in saline-alkaline soil [J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 235: 901-909.
- [43] CHEN T T, LIU C, ZHANG F, et al. Acid-modified biochar increases grain yield and reduces reactive gaseous N losses and N-related global warming potential in alternate wetting and drying paddy production system [J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2022, 377: 134451 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134451>.
- [44] ZHANG M Y, RIAZ M, XIA H, et al. Four-year biochar study: Positive response of acidic soil microenvironment and citrus growth to biochar under potassium deficiency conditions [J/OL]. *The science of the total environment*, 2022, 813: 152515 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152515>.
- [45] XIA H, RIAZ M, MING C, et al. Assessing the difference of biochar and aged biochar to improve soil fertility and cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) productivity [J]. *Journal of soils and sediments*, 2022, 23: 606-618.
- [46] MAO X X, YANG Y, GUAN P B, et al. Remediation of organic amendments on soil salinization: focusing on the relation-

- ship between soil salts and microbial communities[J/OL]. *Eco-toxicology and environmental safety*, 2022, 239: 113616 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113616>.
- [47] ZHANG M Y, XIA H, RIAZ M, et al. Various beneficial microorganisms colonizing on the surface of biochar primarily originated from the storage environment rather than soil environment [J/OL]. *Applied soil ecology*, 2023, 182: 104700 [2023-02-06]. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104700>.
- [48] RAHMAN A, HOSSAIN M S, MAHMUD J A. Manganese-induced salt stress tolerance in rice seedlings: regulation of ion homeostasis, antioxidant defense and glyoxalase systems [J]. *Physiology and molecular biology of plants*, 2016, 22 (3): 291-306.
- [49] 李佳, 曹先梅, 刘立云, 等. 镁对槟榔幼苗光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 1949-1956. LI J, CAO X M, LI L Y, et al. Effects of different magnesium nutrition levels on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of areca palm seedlings [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2019, 25(11): 1949-1956 (in Chinese with English abstract).
- [50] GHASSEMI-GOLEZANI K, FARHANGI-ABRIZ S, ABDOLI S. How can biochar-based metal oxide nanocomposites counter salt toxicity in plants? [J] *Environmental geochemistry and health*, 2021, 43(5): 2007-2023.

## Characteristics of modified biochar and its application in improving saline-alkali soil

XIA Xiaoyang<sup>1</sup>, WANG Xiangling<sup>1,2</sup>, XIA Hao<sup>1</sup>, LI Yuxuan<sup>1</sup>, WANG Jiyuan<sup>1</sup>, JIANG Cuncang<sup>1,2</sup>

1. *College of Resources and Environment/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *College of Agronomy, Shihezi University/ Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture, Shihezi 832003, China*

**Abstract** Soil salinization seriously restricts the sustainable development of agriculture, but the application of modified biochar has a significant effect on the improvement of saline-alkali soil. In order to explore the mechanism of modified biochar improving saline-alkali soil. This article summarizes the effects of different modification methods on the physical and chemical properties of pristine biochar, as well as the improvement effect and influencing factors of modified biochar on saline-alkali soil. The results showed that the modified biochar had the characteristics of large specific surface area, many types and quantities of oxygen-containing functional groups, and a decrease in the proportion of alkaline substances. It can promote the formation of aggregate structure in saline-alkali soil, increase the adsorption of salt ions and nutrient retention, change the functional structure of soil microorganisms, and strengthen the ability of crops to cope with external stress. However, there were few studies on the long-term effects of modified biochar and the differences of its application in different types of saline-alkali soil. In the future, field verification tests of different types of saline-alkali soil should be carried out to explore the adsorption capacity and long-term effect of modified biochar on different salt ions, in order to optimize its improvement methods under different saline-alkali types.

**Keywords** biochar; modifying methods; saline-alkali soil; soil improvement

(责任编辑: 赵琳琳)