

生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析

勾芒芒¹ 屈忠义^{2,3} 王 凡^{2,3} 高晓瑜^{2,3} 胡 敏^{2,3}

(1. 内蒙古机电职业技术学院水利与土木建筑工程系, 呼和浩特 010070;
2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;
3. 内蒙古农业大学寒旱区灌溉排水研究所, 呼和浩特 010018)

摘要: 生物炭(Biochar)因其特殊性质而被广泛应用在土壤改良和固碳减排等方面,因潜力很大,备受国内外学者的关注。然而,生物炭性质不仅因生物质制备材料来源不同而有所差异,还受到热解温度和工艺的影响。同时,生物炭性质和土壤条件差异也在较大程度上影响其改良土壤效果和固碳减排成效。综述近年来国内外有关生物炭在农田水土环境及固碳减排影响的研究进展,总结了生物炭在农业领域、固碳减排及盐碱地改良等方面的研究成果,分析了现存问题,并对生物炭在农业相关领域的研究应用进行了探讨,旨在为广泛应用生物炭技术提供借鉴和参考。

关键词: 生物炭; 水土环境; 固碳减排; 盐碱土改良

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0001-12

Progress in Research on Biochar Affecting Soil-water Environment and Carbon Sequestration-mitigating Emissions in Agricultural Fields

GOU Mangmang¹ QU Zhongyi^{2,3} WANG Fan^{2,3} GAO Xiaoyu^{2,3} HU Min^{2,3}
(1. Water Conservancy and Civil Engineering Department, Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Huhhot 010070, China
2. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
3. Institute of Irrigation and Drainage in Cold and Arid Regions, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Biochar has been widely used in soil improvement and carbon sequestration. It has great potential and has attracted much attention in the scientific field at home and abroad. However, the properties of biochar are not only affected by the sources of biomass materials, but also related to pyrolysis temperature and technology. At the same time, different biochar properties and soil conditions also greatly affect the effect of soil improvement and carbon sequestration. In this paper, progress in research on the biochar affecting soil and water environment and carbon sequestration in farmland is reviewed. The study summarize the research achievements of biochar in agriculture, carbon sequestration and reduction, and improvement of saline and alkaline land, analyze the existing problems and discuss the application of biochar in these fields in the future. The purpose of this study is to provide references for the wide application of biochar.

Key words: biochar; soil-water environment; carbon sequestration-mitigating emissions; saline soil improvement

0 引言

生物炭广义上是黑炭的一种,是指生物有机材料(如木材、有机肥或者农林废弃物)在缺氧或低氧

条件下热裂解(小于700℃)的固体产物。常见生物炭有竹炭、木炭、稻壳炭、秸秆炭等。这些生物炭含大量有机碳,大多由芳香烃和单质碳或具有石墨结构的碳组成,含羟基、烯烃。生物炭可溶性极低,具

收稿日期: 2018-06-01 修回日期: 2018-06-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51779117,41161038)
作者简介: 勾芒芒(1980—),女,讲师,博士,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: goumangmang@163.com
通信作者: 屈忠义(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事节水理论与农田水土环境效应研究,E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

有较大比表面积、孔隙度及离子吸附交换能力,这些基本性质使其具备了较强吸附性、抗氧化性和抗生物分解能力,可广泛应用于农业、工业、能源、环境等领域。生物炭生产原料大多是废弃生物质资源,如农作物秸秆、家禽粪便、发酵渣、酒糟、果核等,这些废弃生物质资源量大、易收集,能为生物炭生产提供大量原材料。炭的制备技术从人类长期生产实践中摸索出来,随着科学技术发展,炭生产由原始土窑、砖窑,发展为现代工业热裂解、生物质热裂解、快速热裂解及微波热裂解等技术,使得生物炭生产效率及炭品质均有所提高。

然而,不同生产工艺及工艺参数对生物炭性质、品质及特征有着较大影响,也直接导致生物炭在土壤改良、农业环境改善及固碳减排应用等方面研究结果的不一致,给生物炭技术大规模应用带来了阻碍。本文结合国内外最新研究进展,总结生物炭在农业领域、固碳减排及盐碱地改良等方面的研究成果,分析现存问题,并对未来生物炭在农业领域的研究应用进行探讨,为生物炭广泛应用提供借鉴和参考。

1 生物炭性质与制备工艺

生物炭中主要组成成分是碳、氢、氧等元素,其中碳元素质量分数在 70% 左右。由于生物炭是由许多紧密堆积且高度扭曲的芳香环片层组成,所以具有多孔性、比表面积大等特点。同时,生物炭含有的羟基、羧基、苯环等主要官能团赋予了其特有的强大吸附能力和较大离子交换量^[1-2]。复杂的芳香环结构、疏水性脂肪族和氧化态碳等特点使得生物炭在施入土壤后可以长时间保持稳定而不易被分解和矿化。由于生物质资源高温裂解后形成的生物炭基本上都是纯碳,它们埋藏在地下几百年甚至上千年都不会分解消失,相当于把碳封存到了土壤中,施于土壤可以有效降低温室气体排放,起到固碳作用。

生物炭不仅解决了农林废弃物带来的环境问题,还能改良土壤、提高水肥利用效率。生物炭中有许多微孔,具有良好的吸附和通气性,为聚集营养物质和微生物生长创造了条件,能够有效储存大量土壤水分及养分,提高土壤持水性,减少化肥淋失^[3]。生物炭中含有大量碳、氮、磷、钾等有利于作物生长的元素,能够增加土壤中有机物含量^[4]。生物炭能够有效吸附农药、除草剂及重金属等污染物。然而,由于制备生物炭的原材料、制备工艺不同,使得生物炭的结构、孔容、灰分含量、pH 值、持水性能、比表面积等特性不尽相同^[5]。目前,国际上常见生物炭包括秸秆炭、木炭、竹炭、稻壳炭等,不同种类制备的生

物炭,其理化性质差异较大。例如,500℃ 下制备木炭和竹炭,其灰分比秸秆炭低,燃烧后秸秆炭灰分较多,但前两者固定碳比例和热值均高于秸秆炭^[6]。同时,原材料来自畜禽粪便的生物炭较以上几种生物炭具有较高矿质养分^[7]。热解温度和速度不同也直接影响生物炭性质。生物炭在低温下(300 ~ 400℃)制备,其 pH 值小于 7;较高温度下(700℃) pH 值大于 7。一般认为,在中间温度下(500℃)进行慢速热裂解,生物炭产量将占到原材料 50%,具有较高 pH 值,持水性强,比表面积大,具有较高阳离子交换量^[8]。

2 生物炭在农业领域的应用

生物炭可用来改良农林业土壤,科研工作者在生物炭改善土壤理化性质方面进行了大量研究。生物炭从物理、化学、生物等方面来改善土壤结构,增加土壤碳库储量,改善土壤微生物生长生态环境,提高作物产量及土壤生产能力。近些年,国内外有关生物炭改良土壤的研究备受关注,同时也有大量报道证明生物炭在改良土壤方面具有积极作用。

2.1 生物炭对土壤理化性质的影响

由于生物炭本身特殊性质使得其施入土壤后改变了土壤理化特征,主要表现在对土壤结构、土壤持水性、土壤 pH 值及阳离子交换量等方面的改变,进而直接参与土壤形成、变化及作物吸水吸肥过程,影响土壤有机质运移、微生物活动及土壤呼吸。生物炭可有效降低砂质土壤容重,改变土壤孔隙度,并随着施炭量的不同而有所差异。

韩晓日等^[9]研究发现,与对照土壤(1.25 g/cm³)相比,施炭量 3.0 t/hm² 和 6.0 t/hm² 处理后土壤容重分别降低 5.6% 和 9.87%,总孔隙度增加 10.7%,土壤 pH 值增加 0.32。田丹等^[10]、勾芒芒等^[11]研究发现添加生物炭能促使砂土、粉砂壤土容重减小。按照土炭比(0.05、0.1、0.15 g/g)添加玉米秸秆炭后,砂土容重(1.54 g/cm³)降低幅度为 6.73% ~ 11.27%;添加花生壳炭后,砂土容重降低幅度为 9.28% ~ 18.63%。对于粉砂壤土(1.39 g/cm³),添加玉米秸秆炭后,土壤容重降低幅度为 1.26% ~ 7.66%;添加花生壳炭后,土壤容重降低幅度为 6.42% ~ 19.06%。从生物炭对土壤总孔隙度影响来看,生物炭可增大砂土孔隙度,且随着施入量增加呈现增长趋势。而对于粉砂壤土而言,只有高炭处理的土壤孔隙度出现增加趋势,低炭处理总孔隙度低于对照。高炭量处理可有效增加土壤 pH 值。较高炭处理可使砂土阳离子交换量(CEC)提高 12.22%。郑瑞伦等^[12]应用生物炭对沙化地进行改

良发现,施用生物炭 (14 t/hm^2) 后土壤容重降低 11.5%,总孔隙度增加 11.3%,土壤 pH 值增加 0.2,然而土壤 CEC 没有显著变化,原因是观测期可能不够长,不足以使土壤表面氧化生成羧基,或者分析过程可能不够精确,无法检测出 CEC 的微小变化。阎海涛等^[13]研究表明,褐土 (1.34 g/cm^3) 中施入小麦秸秆生物炭 (10 、 20 、 40 t/hm^2) 容重降低 4% ~ 12.7%。王睿垠等^[14]按照玉米秸秆炭占黑土 (1.139 g/cm^3) 土壤体积分数 (2%、4%、6%、8%) 试验后发现,土壤容重降低 2.5% ~ 7%,土壤 pH 值增加 0.30。吴崇书等^[15]室内模拟试验研究表明,炭土 1%、2% 处理后的粘土 (1.35 g/cm^3)、粘壤土 (1.36 g/cm^3)、壤土 (1.31 g/cm^3)、壤质砂土 (1.38 g/cm^3) 容重分别降低 3% ~ 5%、3.6% ~ 5.8%、3.1% ~ 4.6% 和 2.2% ~ 4.3%。李昌见等^[16]野外大田试验研究表明,施用生物炭能明显减小土壤容重,增大土壤孔隙度,增加土壤含水率。与不施炭相比,处理组水分和肥料利用效率分别最少提高 27.7% 和 87.4%。

可见,添加生物炭改良材料,可以改善土壤结构,能促使土壤容重减小,改变土壤孔隙度。然而受限于生物炭种类和配比不同,观测时间不同等因素改良效果影响不同。砂土孔隙度增大可能因为生物炭在结构上呈多孔性,微孔形状各异,数量较多,添加到土壤中可以填充土壤大孔隙,使之分割成许多小孔隙,同时生物炭本身多孔结构也是砂土孔隙度增加原因之一,随着添加量增大,砂土孔隙率愈加接近壤土孔隙率,这对砂土结构改良意义重大。粉砂壤土中添加较多生物炭才能增大土壤孔隙度,且增幅空间不大,这在实际应用中并不经济。

生物炭对土壤水分特征影响主要体现在对土壤含水量、土壤入渗和扩散能力、土壤导水性能等方面。王丹丹等^[17]应用锯末和槐树皮制成生物炭改善黄土高原地区黑垆土和湘黄土,结果表明,土壤田间持水量随着生物炭添加量增加而增大,锯末生物炭添加处理较对照分别增加 2.7% ~ 8.1%,槐树皮生物炭增加 5.41% ~ 16.22%。施炭后土壤饱和导水率降低,土壤入渗性能下降,且随着施入量增加降低趋势显著,这是因为原有土壤质地粗,大孔隙较多,生物炭颗粒充实到大孔隙中,土壤大孔隙渗漏性降低。吴昱等^[18]研究发现生物炭可有效改善黑土区坡地水土流失状况,土壤饱和含水率、田间持水量和土壤储水能力均随生物炭施用量的增加而增加。岑睿等^[19]采用玉米秸秆生物炭改良黏壤土,通过入渗模型模拟土壤入渗规律,结果表明:施用量为 30 t/hm^2 较不施炭相比,施用层 (0 ~ 40 cm) 入渗速

率增加 44.6%,耕作层土壤含水率增加 8.9%,累积入渗量增加 45.45%。比较 3 种模型的入渗过程拟合结果,认为 Kostiakov 经验公式拟合效果符合实测规律,为研究区改良土壤水分入渗过程提供了理论依据。

研究结果表明生物炭可改变砂土土壤结构,使其大、中孔隙度较对照减小,小孔隙度较对照增大,导致持留在土壤小孔隙中水分增多,土壤有效含水量增加,供作物可吸收利用水分增加。较砂土相比,生物炭对粉砂壤土和黏土的持水性改良效果不显著。

2.2 生物炭对土壤微生物的影响

生物炭作为改良剂可改善土壤结构,生物炭的较大比表面积和多孔性为土壤微生物提供了良好栖息之所。研究表明,添加生物炭可提高微生物生物量、改善土壤微生物群落,提高土壤酶活性,但影响效果与生物炭类型、施用比例以及土壤性质密切相关。生物炭本身有机碳含量较高且易分解,其表面氧化后为微生物提供有效碳源。匡崇婷等^[20]研究发现,与对照相比,添加生物炭有效提高微生物生物量,且随着施入量增加而增大。添加 0.5% 生物质炭处理土壤,微生物生物量碳、氮含量分别比对照高 111.5% ~ 250.6% 和 11.6% ~ 97.6%,添加 1.0% 后生物量碳、氮含量分别比对照高 58.9% ~ 243.6% 和 55.9% ~ 110.4%。BARGMANN 等^[21]室内研究发现,应用甜菜根和啤酒糟制备生物炭施入土壤 56 d 后土壤微生物生物量碳显著高于对照,增加 30%。研究也证明土壤中施入生物炭可显著提高微生物丰度^[22]。然而,也有研究认为生物炭施入土壤中对微生物生物量影响效果不显著。这与生物炭的材料类型、热解时间和温度、土壤类型及试验观测时间长短都有联系。ZAVALLONI 等^[23]发现短期内生物炭按照 5% 比例施入土壤中不能改变微生物丰度。DEMPSTER 等^[24]应用桉树生物炭改善粗质砂土,发现生物炭的施入显著降低了土壤微生物生物量。

生物炭对土壤微生物群落影响主要体现在改变细菌群落和真菌群落方面。研究表明土壤中施入生物炭可以增加土壤中总细菌丰度。NIELSEN 等^[25]研究发现农田土壤中生物炭雨酸杆菌门的响应性较强,可以增加其丰度值。ANDERSON 等^[26]在室内盆栽试验和田间小区试验结果均显示生物炭可以提高土壤中某些功能细菌丰度。同时,土壤中细菌也可以有效降解生物炭复杂芳香类化合物。真菌相比于细菌更容易降解生物炭中顽固性碳,且能够更好地生长,故在施入含较难降解碳的生物炭时更有利

于真菌生长。BAMMINGER 等^[27]添加 2% 生物炭于农田土壤中,37 d 后发现土壤中真菌和细菌丰度均呈现增加趋势,真菌丰度增长更快,主要是因为生物炭具有较高碳氮比,且真菌对碳利用率更高。然而,也有研究认为生物炭对土壤真菌群落结构没有长期影响。ROUSK 等^[28]通过 3 年长期监测发现生物炭并不能影响土壤中微生物群落变化,可能因为生物炭长期施用后表面盐基离子被淋溶损失,生物炭 pH 值趋于中性,失去了影响效应。土壤酶活性也是土壤微生物活动过程的重要指示,酶活性越高说明微生物过程越活跃。研究表明,生物炭施入土壤中对碳、氮、pH 值、阳离子交换量等土壤理化性质产生影响,而这种影响也间接对土壤酶活性产生作用。同时,生物炭中含有营养物质,例如 P、K、Mg 等元素促进了土壤微生物活性,也相应提高了土壤酶活性。但这种影响也与生物炭类型及性质、土壤结构和质地等密切相关,并体现出不同影响效果。AWAD 等^[29]研究发现同一种生物炭施入砂壤土中酶活性较施入砂土中酶活性高。周震峰等^[30]应用花生壳生物炭后土壤中尿酶和蔗糖酶活性显著升高,且随着施炭量增多而增大。然而,也有研究表明生物炭中重金属和多环芳烃等毒性物质会抑制土壤酶活性。顾美英等^[31]研究发现,施入小麦秸秆生物炭于灰漠土中,结果显示生物炭对脲酶有显著抑制作用。

通过研究可知,添加生物炭使土壤微生物群落、丰度、土壤酶活性等产生变化,影响了土壤微生物特性,但其间相互作用机理还需要进一步研究,尤其是不同生物炭对不同土壤微生物影响机理还需进行长期观测和探索。

2.3 生物炭对作物生长性状的影响

生物炭对作物产量影响的报道最早可追溯到 1879 年,探险家赫伯特·史密斯在《Nature》杂志发表文章中阐述了亚马逊河流域的黑土可使当地种植的甘蔗和烟草产量大幅度提高,因为这种黑土中含有丰富生物炭。UZOMA 等^[32]将牛粪生产制备生物炭应用在砂质土壤玉米种植中,结果显示,随着生物炭施用量增加玉米产量显著提高,但处理中施加 15 t/hm² 的玉米产量比 20 t/hm² 高。MAJOR 等^[33]通过 4 年研究表明,在 Colombian Savanna 土壤中施加生物炭(0、8、20 t/hm²)后,第 1 年玉米产量无显著影响,随后影响效益显著,施入 20 t/hm² 生物炭后玉米产量可提高 140%。据 KIMETU 等^[34]报道,在肯尼亚贫瘠土壤中添加生物炭(7 t/hm²),2 年内连续施用 3 次后玉米产量翻倍增长。VAN ZWIETEN 等^[35]通过试验发现,施加生物炭(10 t/hm²)后小麦、萝卜和番茄的产量增幅均已超过 50%。无土栽

培条件下,生物炭和灰岩混合(按其体积的 1% ~ 5%),辣椒和番茄生物量可提高 28.4% ~ 228.9%,果实产量提高 16.1% ~ 25.8%。近年来,国内有关施加生物炭增加作物产量报道逐渐增多。张伟明等^[36]研究表明,以不同标准在砂壤土中施入生物炭,水稻产量均比对照平均提高 21.98%,其中每 1 kg 土加 10 g 生物炭处理水稻增幅最大。同时,在研究对大豆生长影响中,3 t/hm² 和 6 t/hm² 生物炭施用量均比对照产量提高近 11%。黄超等^[37]在每 1 kg 红壤土中施用 10、50、200 g 生物炭种植黑麦草,产量分别增加 7%、27% 和 53%。唐光木等^[38]在新疆灰漠土中添加生物炭种植玉米,表明施入 40 t/hm² 生物炭的玉米产量提高近 50%,增产效果显著。

然而,在生物炭对作物生长作用方面还存在一些不同观点。KISHIMOTO 等^[39]认为,在壤土中施加生物炭(0.5 t/hm²)使大豆产量增加 50%;然而,随着施用量的增加产量出现减少趋势且 15 t/hm² 时减产近 70%。邓万刚等^[40]在海南花岗岩砖红壤土上添加不同比例生物炭(炭土比分别为 0.1%、0.5% 和 1.0%),通过试验反而得出不同处理与对照相比,在一定程度上均降低了王草第 2 次刈割产草量和桂花草第 1 次刈割产草量。张晗芝等^[41]研究在中层砂浆水稻土中施加生物炭对玉米影响,发现在玉米苗期生物炭抑制了植株生长发育,表现为添加量越大抑制效果越明显,随着玉米生长抑制效应逐渐消失。

通过研究可知,生物炭对作物生长及产量提高具有促进作用。生物炭对作物生长特征产生的影响与土壤类型、观测时间等密切相关,适宜生物炭用量与土壤结构是影响作物生长的主要因素。

2.4 生物炭与化肥耦合作用影响

氮肥利用率低一直是农业生产中面临的难题,而我国主要粮食作物氮肥利用率不足 1/3。如何提高氮素利用率,减少消耗和面源污染,一直是农业生产中亟待解决的关键问题。大量研究表明,添加生物炭可减轻土壤氮素淋洗,提高土壤水分和养分利用率。同时,学者发现单纯以生物炭代替化肥还存在一定难度,为了既发挥其自身优势又能减少肥料投入带来的负面影响以达到作物增产增收目的,沈阳农业大学生物炭研究中心以生物炭为基质制造炭基缓释肥料施入土壤中,作物增产效果明显。

葛少华等^[42]研究表明,连续两年进行生物炭(2.4 t/hm²)和化肥配施,有效提高烤烟土壤中硝态氮含量,施氮量减少 15% 用量后仍可提高烤烟氮素利用效率。据统计,生态炭本身含有丰富有机碳,施用后可以增加土壤有机质及腐殖质含量,大大改

善土壤微结构,从而提高土壤肥力。随着土壤中有有机碳含量增加,土壤中碳氮比相应提高,进而提高了土壤对氮素和其他养分吸持能力。有机质和腐殖质含量是土壤肥力重要指标,生物炭吸附土壤中有有机分子,通过表面催化活性促进小分子聚合从而形成土壤有机质,生物炭可以延长有机质分解时间从而有助于腐殖质形成,改善土壤肥力。吕一甲等^[43]研究发现,施用生物炭肥料可有效提高耕层土壤有机质、速效磷及速效钾含量。

其实,生物炭本身也含有一定矿物养分,例如氮、磷、钾、镁等,但由于生物炭制备原料和控制条件不同,其所含有养分含量不尽相同。如果生物炭与其他肥料同时施用,可以提高土壤养分含量,因为生物炭可以延缓肥料养分在土壤中释放过程,降低肥料养分淋失,有效提高肥料利用效率。STEINER 等^[44]研究表明,使用生物炭结合化学改良法(氮磷钾肥料和石灰)与单用肥料相比,平均粮食产量连续四季翻一番。生物炭与化肥配施 3a 后土壤团聚结构和数量显著增加,与单施化肥相比,团聚体数量增加 16.7%,平均质量直径增加 62.4%。聂新星等^[45]研究表明,生物炭与化肥配施显著提高土壤 pH 值和速效磷含量,分别提高 0.03% 和 12.6%,土壤容重降低 2.0%。炭肥配施提高了土壤中细菌含量,对真菌有一定抑制作用。炭肥配施后有效增加小麦籽粒干质量,提高率达到 16.5%。勾芒芒^[46]研究表明,生物炭与化肥耦合施用可以提高土壤含水率,同一施肥水平下土壤中施加较高生物炭量可以有效提高土壤的持水、保水能力;同一施炭水平下,低肥处理的土壤含水量对番茄生长具有积极的促进作用。

炭肥耦合施用可增加土壤有机质含量,提高氮素利用率。在同一施炭水平下,减少化肥施用量可显著提高作物植株生长能力,增加干物质积累,提高作物产量和品质。

2.5 生物炭对土壤重金属的影响

生物炭具有比表面积大、孔隙度大、呈碱性、吸附溶解性有机质等特点,修复重金属污染土壤的研究较多,作为环境修复和固定土壤材料受到研究者广泛关注,但因为生物炭原材料、技术工艺、热解条件等不同使得其对土壤重金属吸附效应差异较大。UCHIMIYA 等^[47]研究发现山核桃生物炭呈酸性,生活垃圾制备的生物炭呈碱性,它们施入酸性土壤中对 Cu 的吸附要比在碱性土壤中吸附效果好。佟雪娇等^[48]发现不同秸秆炭对 Cu(Ⅱ)的吸附效果不同。玉米秸秆生物炭对 Pb、Cd 吸附量显著高于小麦秸秆。CHEN 等^[49]研究表明生物炭特性使得其

对土壤重金属具有静电吸附量,表面丰度的含氧官能团(如羧基、羟基、酚基等)可以增加土壤对重金属吸附量,降低重金属迁移率,从而减少对土壤环境污染及作物毒害。

生物炭通过提高土壤 pH 值和有机质含量改变土壤氧化还原电位,从而降低重金属生物有效性。BEESLEY 等^[50]通过土柱淋洗试验发现,土壤中加入生物炭后 Cd 含量降低为原来的 1/300。袁金华等^[51]通过室内试验发现,稻壳炭降低酸性红壤中有毒形态铝含量。生物炭可以固定可溶性重金属(Pb、Cu、Cd、Ni)并限制其生物有效性。相比于其他重金属,As 是比较稳定的元素,但施加生物炭后仍可被固定。LUKE 等^[52]通过对番茄根茎及果实检测可知,与对照相比施炭处理根系中 As 浓度显著降低,果实中浓度也很低,有效改善作物对重金属吸收,进而降低重金属生物毒性。高德才等^[53]研究发现土壤 pH 值增加后,Al、Cu、Fe 的金属可交换态含量显著降低。

通常情况下,重金属污染的土壤肥力较低,要考虑生物炭用量及长期监测效果才能体现出生物炭修复污染土壤的效果。

3 生物炭在固碳减排方面的应用

3.1 固碳减排潜力

农田生态系统是重要温室气体排放源之一,占全球总排放量 10%~20%,且呈现增长趋势。CO₂、CH₄和 N₂O 是温室气体的研究对象。气候变暖及土壤盐渍化问题对土壤固碳减排要求日趋增加。作为农业大国,我国超过 50% 秸秆随意丢弃或焚烧^[54]。粗放农业管理方式直接增加农业生产温室气体排放量。我国土壤生态系统具有巨大固碳减排潜力,《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中指出应大力发展低碳农业,坚持减缓与适应协同,抑制和降低农业领域温室气体排放,减少农田氧化亚氮和甲烷排放,推进农林废弃物综合利用。这些秸秆废弃物在缺氧或无氧环境下裂解得到生物炭重新回归到土壤中的生态循环模式,能将碳有效存于土壤较长时间,减轻气候变暖,修复区域环境。同时,增加土壤碳汇,减少温室气体排放,抑制其释放能力。

3.2 固碳减排效果

大量研究发现施用生物炭不仅增加碳汇,调节碳循环,而且对土壤温室气体排放起到抑制作用。研究表明,不同生物炭施用量对温室气体排放效果存在差异。高德才等^[53]通过土柱试验表明,2% 以上生物炭添加量会抑制 CH₄排放,同时会降低 N₂O 排放;4% 以上生物炭添加量,能大幅降低 CH₄和

N_2O 排放,从而缓解温室效应;而低于 0.5% 生物炭添加量对温室气体排放的削弱作用不显著。屈忠义等^[55]采用静态暗箱-气象色谱法研究玉米农田施加生物炭后对温室气体排放特征影响,结果表明:添加生物炭(15、30、45 t/hm^2)后显著降低 CO_2 和 N_2O 季节累积排放总量,与对照相比最大降幅分别为 24.6% 和 110.35%。添加生物炭降低 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势(GWP)及排放强度(GHGI),且随着生物炭施用量增加而降低,最大降幅 GWP 为 109.9%, GHGI 为 100.03%。SHENBAGAVALLI 等^[56]研究认为一定量生物炭会抑制温室气体排放,对 CO_2 及 N_2O 效果明显。生物炭降低土壤容重、改善土壤通气性、封存土壤中碳含量,从而减少 CH_4 、 N_2O 排放量。生物炭添加后,冻融期间可促进土壤吸收 CH_4 。添加 30 t/hm^2 生物炭有效降低玉米农田土壤季节累计排放总量,降低玉米农田土壤 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势(GWP)和排放强度(GHGI)。常规施肥基础上添加生物炭是提高作物产量、降低增温潜势的有效农业措施。施加生物炭对抑制农田 N_2O 排放具有巨大潜力,排放高峰均出现在施肥(基肥和追肥)后,累积排放量占整个生育期排放量的一半。

也有少量研究表明生物炭的施用会促进温室气体的排放,王月玲等^[57]研究表明生物炭施用量与 CO_2 排放呈正比,一方面生物炭为微生物活动提供大量碳源和能源,增加其对土壤有机质的分解作用,另一方面生物炭的特殊结构对土壤理化性质具有改善效果,增强了微生物活性。SINGLA 等^[58]发现生物炭增加使土壤中的有机质可利用率提高,促进 CH_4 的排放。总之,导致结果存在差异的原因是否与生物炭性质、土壤类型、施肥方法、作物种类等有关,还需进一步深入研究。

3.3 固碳减排影响机制

王妙莹等^[59]研究发现,影响温室气体排放因素较多,主要与外源物、土壤性质、微生物等相关,有研究表明施用生物炭显著抑制 CO_2 和 CH_4 排放,细菌数量与 CO_2 和 CH_4 通量显著正相关。真菌/细菌与 CO_2 和 CH_4 通量显著负相关,硝化细菌种群与 N_2O 通量显著正相关。生物炭通过改善土壤通气性、生物多样性及甲烷营养微生物丰度,缓解温室气体排放。何飞飞等^[60]研究结果表明不同施炭量对 N_2O 、 CO_2 影响不同,而铵态氮主要影响 N_2O 排放, pH 值是 CO_2 排放的主要影响因素。张阿凤等^[61]试验表明,作物秸秆制备生物炭具有稳定芳香化结构性和抗分解生物化学性;大幅提高土壤碳库,利于固定和保持养分,提高其有效利用率,从而达到增产增收目

的。宋敏等^[62]的研究显示施加 30 t/hm^2 的生物炭对 N_2O 气体释放抑制效果较好,在相对稳定的环境条件下,温度是影响 N_2O 排放主要因素。吴震等^[63]研究发现,施入新生物炭和多年陈化生物炭均能降低综合温室效应和温室气体强度,且陈化生物炭能更有效地减少温室气体排放并提高作物产量。因此,生物炭对固碳减排和改善作物生产具有长期效应。

冯政君^[64]研究发现,与适当比例氮肥配施,高碳氮比(大于 30)生物炭对土壤 N_2O 排放具有抑制作用。土壤 CO_2 通量对生物炭响应随着热解温度或生物炭碳氮比增加而降低,随着生物炭 pH 值降低而下降。因此,应考虑土壤属性、土地利用类型、农业实践和生物炭特性,以评估生物炭缓解气候变化实际潜力。

4 生物炭在盐碱地治理方面的应用

我国降水时空分布不均匀,水资源匹配极不合理,特别是作为我国用水大户的农业领域用水非常紧缺。同时,针对我国盐渍化土地资源总量多且分布广泛等特点,合理利用大面积盐渍化农田,将对我国粮食安全保障和提高我国农业生产能力具有重要意义。由于盐渍化土壤结构性差、肥力低、对作物生长有毒害作用,严重限制农业可持续发展,且盐碱地治理符合国家生态安全战略方针,是生态与农业可持续发展绿色发展的必要举措。目前,针对盐渍化土壤改良措施较多,包括工程措施、化学措施、生物措施等,随着人类对资源高效利用和保护生态环境意识的提高,更多绿色可持续材料进入研究领域。由于盐碱地有机质含量低,养分贫瘠,具有高生物物质含量、保水保肥特性的改良材料备受关注。生物炭作为农林生物物质材料的再生产品,在酸性土壤改良方面已经取得较好成果,碱化度较高的土壤研究较少,但生物炭对盐碱土壤理化性质和作物生长特性改良也取得了研究进展。

4.1 生物炭对盐碱土改良效果

生物炭具有改善土壤结构、保水保肥、强吸附性等特性,可以对盐碱土理化性质和作物生长特性产生影响(表 1)。王荣梅等^[65]研究发现,炭土比 10% 的生物炭用量可以提高盐碱土田间持水量,显著提高棉花产量,但 5% 施用量提高幅度高于 10%。许健^[66]研究显示,当生物炭添加量较低(小于 5%)时,能抑制土壤蒸发和降低土壤表层返盐量,当生物炭含量较高时(大于 10%),增强土壤蒸发能力,加剧表层土壤盐碱化程度。夏阳^[67]研究认为,较低生物炭施用量(如 1.5%)能够降低盐碱土 pH 值和盐

度,提高土壤有机质含量、碳氮比和 CEC,提高植物根际土壤养分。然而也有研究成果与以上观点不同。代红翠等^[68]在碱性土壤中施用生物炭后提高了土壤 pH 值和 CEC,从而抑制了小麦出苗和幼苗生长。李阳等^[69]研究表明,生物炭能将酸性黄壤土改变为中性或弱碱性土壤,而且能够有效改善黄壤氮磷钾养分含量。ALI 等^[70]研究发现,在干旱或盐

分胁迫下,生物炭可以增加植物的光合作用,改善养分吸收和改良气体交换特性。在盐胁迫下,生物碳减少 Na⁺ 吸收,增加植物对 K⁺ 的吸收,调节气孔导度和植物激素。对比其他改良剂,生物炭具有自身优势,施用生物黑炭比施用石灰更能增强土壤对酸的缓冲性能,提高土壤阳离子交换量、盐基饱和度、交换性钙、镁、钾和钠含量。

表 1 生物炭对盐碱土理化性质和作物生长特性的影响

Tab.1 Effects of biochar on physicochemical properties of saline-alkali soil and crop growth

指标	效果
土壤水力特性	施用生物炭量可以提高土壤田间持水量和土壤饱和导水率 ^[65,71] ;降低黑土区土壤残余含水率;明显降低土壤水分扩散率 ^[72] ;提高土壤水分利用效率和保水能力 ^[73]
土壤 pH 值	能显著提高酸性土壤 pH 值 ^[72] ,且随着用量增加呈上升趋势,而加入到碱性土壤中并没有产生多大影响 ^[74] ;但也有研究表明碱性土壤中施用后会提高土壤 pH 值 ^[68] ;酸化处理生物炭可以有效降低苏打碱化土壤 pH 值 ^[75]
电导率	在碱性土壤中施用生物炭提高土壤电导率 ^[68] ;玉米秸秆和污泥基生物炭能改善盐渍土壤养分含量和肥力指数,并能降低土壤盐分 ^[73]
离子变化	在盐胁迫下,生物碳减少 Na ⁺ 吸收,同时增加植物对 K ⁺ 的吸收 ^[70] ;提高土壤阳离子交换量、盐基饱和度、交换性钙、镁、钾和钠含量 ^[76]
养分指标	土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量增加 ^[77-79] ,通过较低养分淋失率而提高作物吸收利用率,提高植物根际土壤养分有效性 ^[80] 和土壤中有效磷含量 ^[81]
土壤结构	土壤总有效孔隙度和半径大于 100 μm,有效孔隙度分别增加 8.3% 和 10.2% ^[71]
土壤微生物	生物炭显著提高盐碱土中微生物量和微生物活性,但土壤微生物量随着生物炭添加量增加而减少;土壤中施加生物炭后,土壤微生物量碳和脱氢酶活性显著提高,有效减缓了盐碱土土壤有机碳损失 ^[82] ;提高细菌和放线菌数量 ^[45]
作物生长特性	促进植物生长 ^[79] ,生物量和产量均显著提高,同时提高干旱和盐胁迫条件下植物光合作用 ^[70]

4.2 生物炭与其他物质复配对盐碱土改良效果

由于生物炭呈碱性,对碱性较强的盐碱土不利,但考虑与一定量的酸性物质复配施用,可以弥补生物炭副作用或改良效果。适宜生物炭与木醋液施用量可以满足降盐抑盐效果,有效抑制表层土壤盐分积聚;施用木醋液可以降低土壤 pH 值。非生育期春汇洗盐结合改良剂改良,可以提高脱盐率,满足生育期内作物对盐分阈值要求。

刘玉明等^[83]应用生物炭和木醋液改良盐碱土效果显著,在其含盐量 0.5% ~ 1.35%,pH 值大于 10 的盐碱地中,可大幅提高土壤质量和作物生长特性。韩建刚等^[84]研究发现,生物炭垫层应用于沿海滩涂盐碱地土壤改良,有效控制农业面源污染,促进盐碱地土壤改良及农业生态良性发展,改良后土壤可用于种植水稻、小麦或盐碱资源植物等。韩剑宏等^[73]使用玉米秸秆和污泥基生物炭能改善盐渍土壤养分含量和肥力指数,显著提高有机碳含量;可溶性盐含量显著下降,并能降低土壤盐分。袁晶晶等^[85]将生物炭(10 t/hm²)施入土壤后发现,氮肥 300 kg/hm²为适宜施肥量,提高土壤肥力同时也可以减少化肥投入。但 XU 等^[86]研究认为,当生物炭与磷肥一起施用时,盐碱土壤中发生磷酸盐沉淀/吸附反应,导致盐碱土壤中植物磷有

效性和植物产量下降。生物炭与磷施肥之间的负相互作用效应表明生物炭在盐碱土壤中应用价值有限。

4.3 生物炭对不同类型土壤改良效果

由于不同类型土壤理化性质存在差异,生物炭改良效果也不尽相同。曹雨桐等^[71]研究发现,在海涂围垦区盐碱土中添加 2% 生物炭能使土壤饱和导水率提高 46.4%;土壤总有效孔隙度和半径大于 100 μm 有效孔隙度分别增加 8.3% 和 10.2%。魏永霞等^[72]认为施用生物炭能降低黑土区土壤残余含水率,增加土壤饱和含水率和田间持水量,其中对残余含水率影响最显著;施用生物炭能明显降低土壤水分扩散率,施用生物炭可以提高大豆产量。聂新星等^[45]研究认为,生物炭能有效改善灰潮土土壤理化性质,提高细菌和放线菌数量,且在一定程度上提高冬小麦产量。生物炭与 N、P、K 配施改善风沙土理化性质,促进玉米生长及产量增加,且生物炭施用量越高,其效果越明显。孙嘉曼等^[78]发现,生物炭处理有利于改善石灰土水分与养分供应状况,且随着施用量增加,改良效果不断加强。施用生物炭可改善喀斯特山地石灰土土壤质量,促进刺槐苗期根系发育和生长,对改良喀斯特石灰土和恢复植被具有重要意义。

5 问题与展望

大量研究成果表明,生物炭在农业土壤改良、固碳减排及改良盐碱土方面均有巨大潜力。在改善农业水土环境、抑制温室效应、助力发展绿色可持续农业等方面可发挥积极促进作用。然而,在大面积实施和应用生物炭方面还存在许多不足,需进行深入研究,主要体现在:

(1)由于制备生物炭的原材料、制备方法以及研究方式大不相同,有关生物炭物理和化学性质各有差异。在实际应用过程中应积极开展生物炭标准化、系统化研究。此外,应开展根据不同土壤类型制备和筛选适宜生物炭的研究。

(2)虽然应用生物炭提高作物产量方面研究成果较多,但大多数研究还停留在室内盆栽和小区试验阶段,如何应用适宜生物炭类型及其用量开展长期和大规模示范区建设还需投入大量工作。同时,

大规模应用生物炭改善作物土壤、提高作物产量之前还必须考虑如何使生物炭成本更廉价、更实效,改变施用方式,采用穴施、沟施等专用设备,以便充分发挥生物炭节水增收优势。

(3)生物炭对微生物和酶活性作用机理还不清楚,需要进行深入研究。

(4)生物炭对土壤改良是一个长期过程,对土壤改良及固碳是否具有持续效果,还需要长期定点观测;生物炭与其他物质复配施用对气体排放影响机理还不明确。

(5)虽然有关生物炭改良盐碱土成果与日俱增,但针对盐渍化土壤开展生物炭及其复配材料(如其他土壤调理剂)的应用成果并不多见,应加大力度开展这方面研究。

(6)研究开发各种专用生物炭基肥,实现生物炭高效利用,为绿色农业发展提供有力支持。

参 考 文 献

- LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1719 - 1730.
- CHENG C H, LEHMANN J, ENGELHARD M H. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72: 1598 - 1610.
- 李明, 胡云, 黄修梅, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤养分和菌群的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 172 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161123&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.023.
- LI Ming, HU Yun, HUANG Xiumei, et al. Effect of biological carbon on nutrient and bacterial communities of rhizosphere soil of facility cucumber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 172 - 178. (in Chinese)
- 马莉, 吕宁. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 976 - 981.
- MA Li, LÜ Ning. Effect of biochar on organic carbon and its components in grey desert soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 976 - 981. (in Chinese)
- 王汉卫, 王玉军, 陈杰华, 等. 改性纳米碳黑用于重金属污染土壤改良的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(4): 431 - 436.
- WANG Hanwei, WANG Yujun, CHEN Jiehua, et al. Application of modified nano-particle black carbon for the remediation of soil heavy metal pollution [J]. China Environmental Science, 2009, 29(4): 431 - 436. (in Chinese)
- 袁艳文, 田宜水, 赵立欣, 等. 生物炭应用研究进展[J]. 可再生资源, 2012, 30(9): 45 - 49.
- YUAN Yanwen, TIAN Yishui, ZHAO Lixin, et al. Research progress of biochar application[J]. Renewable Resources, 2012, 30(9): 45 - 49. (in Chinese)
- GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effects of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 2061 - 2069.
- LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendment on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158: 443 - 449.
- 韩晓日, 葛银凤, 李娜, 等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 392 - 398.
- HAN Xiaori, GE Yinfeng, LI Na, et al. Effects of continuous application of biochar on soil physico-chemical properties and nitrogen use efficiency [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(4): 392 - 398. (in Chinese)
- 田丹, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1374 - 1378.
- TIAN Dan, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Influence and mechanism analysis of biochar on water diffusivity of different soil textures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1374 - 1378. (in Chinese)
- 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137 - 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137 - 142. (in Chinese)

- 12 郑瑞伦,王宁宁,孙国新,等. 生物炭对京郊沙化地土壤性质和苜蓿生长、养分吸收的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(5):904-912.
ZHENG Ruilun, WANG Ningning, SUN Guoxin, et al. Effects of biochar on soil properties and alfalfa growth and nutrient uptake in desertified land in Beijing suburb [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5): 904-912. (in Chinese)
- 13 阎海涛,殷金玉,丁松爽,等. 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响[J]. 环境科学,2018,39(5):2412-2419.
YAN Haitao, YIN Quanyu, DING Songshuang, et al. Effect of biochar amendment on physicochemical properties and fungal community structures of cinnamon soil [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2018, 39(5): 2412-2419. (in Chinese)
- 14 王睿垠,魏永霞,张翼鹏,等. 生物炭对东北草甸黑土水力特性影响的数值化研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):277-286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180533&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.033.
WANG Ruiyin, WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, et al. Numerical investigation on effects of biochar on hydraulic characteristics of northeast meadow black soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 277-286. (in Chinese)
- 15 吴崇书,邱志腾,章明奎. 施用生物质炭对不同类型土壤物理性状的影响[J]. 浙江农业科学,2014(10):1617-1619,1623.
WU Chongshu, QIU Zhiteng, ZHANG Mingkui. Effect of biochar on physical properties of different types of soil [J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2014(10): 1617-1619, 1623. (in Chinese)
- 16 李昌见,屈忠义,勾芒芒,等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(11):2187-2193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effect of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2187-2193. (in Chinese)
- 17 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等. 生物炭对宁南山区土壤持水性影响的定位研究[J]. 水土保持学报,2013,27(2):101-104,109.
WANG Dandan, ZHENG Jiyong, YAN Yonghao, et al. Study on the effect of biochar on the water holding capacity of mountainous soil in the south of Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 101-104, 109. (in Chinese)
- 18 吴昱,刘慧,杨爱峥,等. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):287-294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034.
WU Yu, LIU Hui, YANG Aizheng, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 287-294. (in Chinese)
- 19 岑睿,屈忠义,孙贵芳,等. 秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(6):284-289.
CEN Rui, QU Zhongyi, SUN Guanfang, et al. Effects of biochar on the physical properties and infiltration of clay loam [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 284-289. (in Chinese)
- 20 匡崇婷,江春玉,李忠佩,等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤,2012,44(4):570-575.
KUANG Chongting, JIANG Chunyu, LI Zhongpei, et al. Effects of biochar amendments on soil organic carbon mineralization and microbial biomass in red paddysoils [J]. Soils, 2012, 44(4): 570-575. (in Chinese)
- 21 BARGMANN I, MARTENS R, RILLIG M C, et al. Hydrochar amendment promotes microbial immobilization of mineral nitrogen [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 177(1): 59-67.
- 22 李瑞霞,李洪杰,霍艳丽,等. 生物炭对华北冬小麦根系形态和内生真菌多样性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):235-242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180328&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.028.
LI Ruixia, LI Hongjie, HUO Yanli, et al. Effect of biochar on root morphology and endophytic fungal diversity of winter wheat in North China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 235-242. (in Chinese)
- 23 ZAVALLONI C, ALBERTI G, BIASIOL S, et al. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: a short-term study [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 50: 45-51.
- 24 DEMPSTER D N, GLEESON D B, SOLAIMAN Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil [J]. Plant and Soil, 2011, 354(1): 311-324.
- 25 NIELSEN S, MINCHIN T, KIMBER S, et al. Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilisers [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 191: 73-82.
- 26 ANDERSON C R, HAMONTS K, CLOUGH T J, et al. Biochar does not affect soil N-transformations or microbial community structure under ruminant urine patches but does alter relative proportions of nitro-gen cycling bacteria [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 191: 63-72.
- 27 BAMMINGER C, ZAISER N, ZINSSER P, et al. Effects of biochar, earthworms, and litter addition on soil microbial activity and abundance in a temperate agricultural soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(8): 1189-1200.
- 28 ROUSK J, DEMPSTER D N, JONES D L. Transient biochar effects on decomposer microbial growth rates: evidence from two agricultural case-studies [J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(6): 770-776.
- 29 AWAD Y M, BLAGODATSKAYA E, OK Y S, et al. Effects of polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by ^{14}C and enzyme activities [J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 48:

- 1-10.
- 30 周震峰,王建超,饶潇潇.添加生物炭对土壤酶活性的影响[J].江西农业学报,2015,27(6):110-112.
ZHOU Zhenfeng, WANG Jianchao, RAO Xiaoxiao. Impact of adding biochar on enzyme activity in soil [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(6):110-112. (in Chinese)
- 31 顾美英,刘洪亮,李志强,等.新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J].中国农业科学,2014,47(20):4128-4138.
GU Meiyang, LIU Hongliang, LI Zhiqiang, et al. Effects of biochar application on soil nutrients and microbial community diversity in continuous cropping cotton fields in Xinjiang [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(20):4128-4138. (in Chinese)
- 32 UZOMA K C, INOUE M, ANDRY H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2):205-212.
- 33 MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a colombian savanna oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2):117-128.
- 34 KIMETU J M, LEHMANN J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. Aust J. Soil Res., 2010, 48(7):577-585.
- 35 VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2):235-246.
- 36 张伟明,孟军,王嘉宇,等.生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J].作物学报,2013,39(8):1445-1451.
ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8):1445-1451. (in Chinese)
- 37 黄超,刘丽君,章明奎.生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2011,37(4):439-445.
HUANG Chao, LIU Lijun, ZHANG Mingkui. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2011, 37(4):439-445. (in Chinese)
- 38 唐光木,葛春辉,徐万里,等.施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1797-1802.
TANG Guangmu, GE Chunhui, XU Wanli, et al. Effect of applying biochar on the quality of grey desert soil and maize cropping in Xinjiang, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9):1797-1802. (in Chinese)
- 39 KISHIMOTO S, SUGIURA G. Charcoal as a soil conditioner [J]. Int Achieve Future, 1985, 5:12-23.
- 40 邓万刚,吴鹏豹,赵庆辉,等.低量生物质炭对2种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J].草地学报,2010,18(6):844-847,853.
DENG Wan'gang, WU Pengbao, ZHAO Qinghui, et al. The effect of biochar on grass yield and quality [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(6):844-847,853. (in Chinese)
- 41 张晗芝,黄云,刘钢,等.生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J].生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage [J]. Ecology and Environment Science, 2010, 19(11):2713-2717. (in Chinese)
- 42 葛少华,丁松爽,杨永锋,等.生物炭与化肥氮配施对土壤氮素及烤烟利用的影响[J].中国烟草学报,2018,24(2):84-92.
GE Shaohua, DING Songshuang, YANG Yongfeng, et al. Effects of mined application of biochar and nitrogen fertilizer on effective nitrogen in soil and nitrogen accumulation in flue-cured tobacco [J]. Chinese Journal of Tobacco, 2018, 24(2):84-92. (in Chinese)
- 43 吕一甲,屈忠义.生物炭肥料对河套灌区耕层土壤肥力及含水率影响的研究[J].节水灌溉,2015(3):18-21.
LÜ Yijia, QU Zhongyi. Effect of biochar fertilizer on topsoil of soil fertility and moisture content in Hetao Irrigation Area [J]. Water Saving Irrigation, 2015(3):18-21. (in Chinese)
- 44 STEINER C, GLASER B, TEIXEIRA W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian ferralsol amended with compost and charcoal [J]. Plant and Soil, 2008, 171(6):893-899.
- 45 聂新星,李志国,张润花,等.生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J].中国农学通报,2016,32(9):27-32.
NIE Xinxing, LI Zhiguo, ZHANG Runhua, et al. Effects of biochar and its combined application with chemical fertilizers on physical and chemical properties and microbial quantity of fluvo-aquic soil and winter wheat yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9):27-32. (in Chinese)
- 46 勾芒芒.生物炭节水保肥机理与作物水炭肥耦合效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
GOU Mangmang. Research on mechanism of saving water and preserving fertility using biochar and couple effect of crop-water-biochar-fertilizer [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 47 UCHIMIYA M, WARTELLE L H, KLASSON K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6):2501-2510.
- 48 佟雪娇,李九玉,姜军,等.添加农作物秸秆炭对红壤吸附 Cu(II)的影响[J].生态与农村环境学报,2011,27(5):37-41.
TONG Xuejiao, LI Jiuyu, JIANG Jun, et al. Effect of adding crop straw carbon on red soil sorption of Cu(II) [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(5):37-41. (in Chinese)
- 49 CHEN B, ZHOU D, ZHU L. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine

- needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environment Science and Technology, 2008, 42(14): 5137–5143.
- 50 BEESLEY L, MARMIROLI M. The immobilization and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar [J]. Environment Pollution, 2011, 159(2): 474–480.
- 51 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472–476. YUAN Jinhua, XU Renkou. Effects of biochar prepared from rice husk on acidity of red soil and yellow brown soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 472–476. (in Chinese)
- 52 LUKE B, MARTA M, LUCA P, et al. Biochar addition to an arsenic contaminated soil increases arsenic concentrations in the pore water but reduces uptake to tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2013(454–455): 598–603.
- 53 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放及其环境效益的影响[J]. 生态学报, 2014, 35(11): 3618–3622. GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Effects of biochar on CO_2 , CH_4 , N_2O emission and its environmental benefits in dryland soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 35(11): 3618–3622. (in Chinese)
- 54 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16–23. SHI Yuanchun. Biomass feedstock resources in China [J]. China Engineering Science, 2011, 13(2): 16–23. (in Chinese)
- 55 屈忠义, 高利华, 李昌见, 等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 111–118. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161215&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.015. QU Zhongyi, GAO Lihua, LI Changjian, et al. Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 111–118. (in Chinese)
- 56 SHENBAGAVALLI S, MAHIMAIRAJA S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil [J]. International Journal of Advanced Biological Research, 2012, 2(2): 249–255.
- 57 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3634–3641. WANG Yueling, GENG Zengchao, WANG Qiang, et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2016, 37(9): 3634–3641. (in Chinese)
- 58 SINGLA A, INUBUSHI K. Effect of biochar on CH_4 and N_2O emission from soils vegetated with paddy [J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(1): 239–243.
- 59 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田温室气体排放及其相关微生物影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(3): 1046–1056. WANG Miaoying, XU Xuping, WANG Weiqi, et al. Effect of slag and biochar amendment on greenhouse gases emissions and related microorganisms in paddy fields [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(3): 1046–1056. (in Chinese)
- 60 何飞飞, 荣湘民, 梁运珊, 等. 生物炭对红壤菜田土壤理化性质和 N_2O 、 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1893–1900. HE Feifei, RONG Xiangmin, LIANG Yunshan, et al. Effects of biochar on soil physicochemical properties and N_2O , CO_2 emissions from vegetable-planting red soil [J]. Journal of Agro-environment Science, 2013, 32(9): 1893–1900. (in Chinese)
- 61 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459–2463. ZHANG Afeng, PAN Genxing, LI Lianqing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2459–2463. (in Chinese)
- 62 宋敏, 齐鹏, 蔡立群, 等. 不同生物质炭输入水平下黄绵土 N_2O 日排放特性[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 137–144. SONG Min, QI Peng, CAI Liqun, et al. Diurnal variations of N_2O gases emission in loessial soil under biochar application [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 137–144. (in Chinese)
- 63 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用3年后对稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 141–148. WU Zhen, DONG Yubing, XIONG Zhengqin. Effects of biochar application three-years ago on global warming potentials of CH_4 and N_2O in a rice-wheat rotation system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 141–148. (in Chinese)
- 64 冯政君. 不同环境条件下生物炭对土壤 N_2O 排放的影响及机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. FENG Zhengjun. Mechanisms for biochar-induced soil N_2O emission under different environmental conditions [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- 65 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. WANG Rongmei, YANG Fang, XU Liang, et al. The effects of biochar application in the cotton fields of kashgar oasis, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. Earth and Environment, 2014, 42(6): 757–763. (in Chinese)
- 66 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. XU Jian. Effect of biochar on soil water and salt transport [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 67 夏阳. 生物炭对滨海盐碱植物生长及根际土壤环境的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. XIA Yang. Effects of biochar on growth of saline-alkali plants in the coastal area and rhizosphere soil environment [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)
- 68 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. DAI Hongcui, CHEN Yuanquan, WANG Dong, et al. Effect of biochar amendment on wheat emergence and seedling growth in

- alkaline soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 1–7. (in Chinese)
- 69 李阳, 李心清, 王兵, 等. 四种改良剂对酸性黄壤土壤酸度和肥力的影响[J]. 地球与环境, 2016, 44(6): 683–690.
LI Yang, LI Xinqing, WANG Bing, et al. Effects of four soil amendments on improving soil quality and acidity of yellow soils [J]. Earth and Environment, 2016, 44(6): 683–690. (in Chinese)
- 70 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(14): 1–13.
- 71 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.
CAO Yutong, SHE Dongli. Effects of biochar and PAM application on saline soil hydraulic properties of coastal reclamation region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3684–3690. (in Chinese)
- 72 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎锐, 等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 201–207. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025.
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 201–207. (in Chinese)
- 73 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.
HAN Jianhong, LI Yanwei, ZHANG Lianke, et al. Effect of biochar and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2017, 11(9): 5291–5297. (in Chinese)
- 74 CHINTALA R, SCHUMACHER T E, MCDONALD L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/bio-char mixtures[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, 42(5): 626–634.
- 75 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 Xinrui, CHEN Guoshuang, LI Xiujun. Experimental effects of acidified biochar on saline-sodic [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(4): 462–466. (in Chinese)
- 76 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.
WANG Yixiang, XIN Sijie, YE Jing, et al. Improvement effect of biochar on soil acidity in strong acidity tea garden [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(12): 108–111. (in Chinese)
- 77 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.
HUANG Zhe, QU Shihua, BAI Lan, et al. Effects of different straw mixing biochar on nutrient and enzyme activity of saline soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 290–295. (in Chinese)
- 78 孙嘉曼, 卜晓莉, 吴永波, 等. 喀斯特山地石灰土施用生物炭对刺槐幼苗生长和土壤特性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3250–3257.
SUN Jiaman, BU Xiaoli, WU Yongbo, et al. Effects of biochar application on the growth of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings and soil properties in limestone soil in a karst mountain site [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3250–3257. (in Chinese)
- 79 武梦娟, 王桂君, 许振文, 等. 生物炭对沙化土壤理化性质及绿豆幼苗生长的影响[J]. 生物学杂志, 2017, 34(2): 63–67.
WU Mengjuan, WANG Guijun, XU Zhenwen, et al. The impact of biochar on mung bean growth and soil physicochemical properties of sandy soil [J]. Journal of Biology, 2017, 34(2): 63–67. (in Chinese)
- 80 WANG G J, XU Z W. The effects of biochar on germination and growth of wheat in different saline-alkali soil [J]. Asian Agricultural Research, 2013, 5(11): 116–119.
- 81 杨放, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972–977.
YANG Fang, LI Xinqing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5): 972–977. (in Chinese)
- 82 梁皓. 不同培养方式下生物炭对土壤微生物的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LIANG Hao. Influence of biochar on soil microbes under different culture methods [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 83 刘玉明, 潘根兴, 康全德, 等. 一种利用农业废弃物生物质炭化产物改良熟化盐碱土的方法: 201110230887. X[P]. 2012–04–11.
- 84 韩建刚, 范弟武, 朱咏莉. 一种利用生物炭垫层改良沿海滩涂盐碱地土壤的方法: 201610298724. 8[P]. 2016–05–06.
- 85 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 468–475.
YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(2): 468–475. (in Chinese)
- 86 XU G, ZHANG Y, SUN J, 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.