

# 生物炭对土壤改良效果的研究进展

王娟, 黄成真

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

**摘要:** 生物炭是原材料在缺氧或无氧条件下经过高温裂解得到的一种物质,具有良好的性质,被广泛应用于土壤改良。本文介绍了生物炭的改性和制备方法,综述了添加生物炭对土壤入渗能力、蒸发能力、土壤养分、土壤微生物与酶活性的影响以及对土壤修复功能的促进,发现生物炭对土壤改良效果主要与生物炭原材料、制备条件、添加量以及添加方式有关。并对未来研究方向进行了展望,提出应对各类生物炭进行合理分类,进而对各类生物炭的最佳利用方式进行探讨,为生物炭的进一步推广利用提供了理论基础和依据。

**关键词:** 生物炭; 土壤改良; 入渗; 土壤养分; 土壤微生物; 土壤修复

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0246-08

## Research process of soil amelioration with the application of biochars

WANG Juan, HUANG Chengzhen

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Biochar is obtained from the pyrolysis of raw materials under anoxic or anaerobic conditions, which is widely used in soil amelioration for its soil improving properties. This paper introduces the modification and preparation of different biochars, summarizes the effect of biochar addition on soil infiltration capacity, evaporation capacity, soil nutrients, soil microorganism, enzyme activity, and soil remediation. It is found that the effect of biochar on soil amelioration is mainly related to the original raw materials, preparation conditions, amount of biochar addition and the method of biochar addition. It is suggested that the future research should focus on the appropriate classification of all kinds of biochars and find out the optimum utilization method for each of them, so as to provide theoretical basis for the further promotion and utilization of biochars.

**Key words:** biochar; soil amelioration; infiltration; soil nutrients; soil microorganism; soil remediation

## 1 研究背景

生物炭被认为是一种良好的土壤改良剂。通常制备生物炭的温度为 300 ~ 500℃,制备条件和制备原料是影响生物炭性质的主要因素<sup>[1-2]</sup>。制备生物炭的原材料来源广泛,农业生产中常使用秸秆、花生壳等为原料生产生物炭,试验中还会经常用到以淤泥或家禽粪便为原料生产的生物炭。生物炭多为碱性,因此应用于酸性土壤的改良效果较好,但对碱性土壤的改良效果并不明显,且存在不少争议<sup>[3-4]</sup>。部分研究表明,对生物炭进行改性能够影响生物炭的比表面积、吸附能力等性质<sup>[5]</sup>。生物炭在提高土壤肥力以及改良土壤理化性质方面应用前景十分广

阔<sup>[6-7]</sup>。本文介绍了生物炭及改性生物炭的制备方法,对二者在土壤改良及农业环境方面影响的研究现象进行了总结分析,并对未来生物炭及改性生物炭的研究及应用进行了展望。

## 2 生物炭的制备

根据不同的制备原料分类,生物炭可分为木炭、竹炭、秸秆类生物炭等。生物炭常见制备方法有慢速热解、快速热解和高温限氧气化法。制备生物炭的材料源不同、制备时温度的差异都会对生物炭性质产生影响,整体来看,后者更为显著。Wei 等<sup>[8]</sup>设计了从 300℃到 700℃的 5 个温度梯度试验,发现高温条件下制备的生物炭具有更高的碳含量。Tang

收稿日期:2019-10-11; 修回日期:2019-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51609209);江苏省自然科学基金项目(BK20160471)

作者简介:王娟(1988-),女,甘肃张掖人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事农业水土资源高效利用。

等<sup>[9]</sup>以50℃为间隔,设计了从350℃到550℃5个热解温度的试验,研究了制备温度对污泥生物炭的产率、比表面积、官能团密度以及生物炭对污水中氨氮去除能力的影响,发现制备温度越高,生物炭的产率越低,制备温度450℃下得到的生物炭具有较大的比表面积和官能团密度,对水体中氮的去除能力最强。有研究认为制备时温度越高,生物炭pH值就越高,比表面积也越大,但生物炭的制备应选择一定的适宜温度,过高或过低都会降低生物炭的阳离子交换量<sup>[10]</sup>。

制备原料决定着生物炭的性质。简敏菲等<sup>[10]</sup>以水稻秸秆为原料,在不同温度下制备生物炭,结果发现生物炭的产率随着温度的提高而提高,并且温度越高,所制得的生物炭pH值和碳含量均越高。颜钰等<sup>[11]</sup>对3种原材料在2种温度下制备得到的生物炭进行了理化性质的对比研究,发现制备温度和其他条件相同的情况下,以植物为原料比以动物为原料制备的生物炭比表面积更大,而同原料不同温度条件时,较高温度比较低温度下制备的生物炭具有更强的疏水性、更大的比表面积。制备方法不同也会影响生物炭性质,Liu等<sup>[12]</sup>发现,在快速热解条件下得到的生物炭通常具有比慢速热解得到的生物炭更高的溶解有机质含量(DOC),当热解温度在300~600℃时,慢速热解生物炭中的DOC浓度随温度的升高而降低,这对于生物炭运用于土壤培肥具有重要意义。

生物炭的改性方面,目前常用方法主要有酸、碱预处理法等。酸改性生物炭即用酸进行预处理的生物炭,如硝酸、硫酸、盐酸、磷酸、氢氟酸等,酸洗能有效地去除生物炭中的灰分和矿物质、改变比表面积,但不同的酸对生物炭的结构改良可能有不同的效果<sup>[13-14]</sup>。Wibowo等<sup>[15]</sup>使用硝酸处理生物炭后发现生物炭含氧酸性表面基团增加,比表面积增大;李蕊宁等<sup>[16]</sup>使用硫酸对生物炭进行预处理,结果发现改性生物炭的比表面积、平均孔径均有所减小;赵力等<sup>[17]</sup>研究了盐酸和氢氟酸处理对生物炭自由基的影响,发现除了200℃下得到的结果外,其他情况下生物炭的自由基信号与酸洗程度呈正相关。磷酸无毒无腐蚀性,可以提高生物炭比表面积、增强吸附能力、改善生物炭的理化性质<sup>[18-20]</sup>,被认为是较理想的酸化试剂,因而实验室中常采用磷酸作为酸化试剂制备酸改性生物炭。用碱性溶液对生物炭进行预处理可以得到碱改性生物炭,目前常用的碱性溶液有氢氧化钾、氢氧化钠等。研究发现,利用氢氧化钾

溶液对马铃薯根生物炭进行碱化预处理后,生物炭的比表面积、空隙体积均减小,这是因为蚀刻作用使得孔隙结构中的阻碍物被清除,致使小孔连成大孔<sup>[16]</sup>。除此之外,还有一些其他预处理方法,如氧化法,即使用金属盐溶液对生物炭进行氧化还原处理。常用铁盐、钙盐作为金属盐溶液氧化生物炭,也有人用阴离子表面活性剂来处理生物炭。从改善生物炭的性质方面来看,目前酸改性生物炭较多,且主要以磷酸作为酸化试剂。

### 3 生物炭对土壤入渗、蒸发的影响

土壤的入渗能力与土壤结构息息相关,反映了土壤的基本物理性质。不同的生物炭添加量和添加方式都会对土壤的入渗、蒸发特性产生影响。李兴等<sup>[21]</sup>研究了生物炭对沙壤土水分特征的影响,发现随着生物炭添加量的加大,土壤容重变小、孔隙度变大,对于增强沙壤土的保水性能具有积极作用。王幼奇等<sup>[22]</sup>针对宁夏淡灰钙土进行的试验结果表明生物炭显著提高了淡灰钙土的持水能力。王艳阳等<sup>[23]</sup>针对黑土施加生物炭,发现生物炭对改善黑土的持水能力也有一定的积极效应。田丹等<sup>[24]</sup>通过土柱试验研究发现随着生物炭添加量的增加,土壤密度减小、土壤总孔隙度增大,并且生物炭添加量越大,土壤的饱和导水率越小,饱和含水量越大,这也说明生物炭的添加增强了土壤的持水性能。李帅霖等<sup>[25]</sup>对比了不同施加方式以及添加量对土壤入渗的影响,发现生物炭的施加方式和施加量均会对土壤入渗造成影响,且生物炭添加量为4%、添加土层深度为10cm时能显著增加土壤入渗能力,试验结果表明生物炭用量越多,改良后土壤入渗能力越强。然而,刘易等<sup>[26]</sup>的研究认为生物炭吸附土壤细小颗粒形成的团粒结构能够提高土壤的黏粒含量,提高土壤微小孔隙的比例,从而降低水分入渗能力,增强砂壤土的持水能力。齐瑞鹏等<sup>[27]</sup>向壤土和沙土中分别添加生物炭进行入渗试验,发现壤土的入渗能力增强,但沙土的入渗能力受到抑制。总体来讲,添加生物炭能够降低土壤容重,改善土壤物理结构,但对于土壤入渗和持水性能的改善效果还与土壤质地有很大关系。

一般认为添加生物炭会抑制土壤的蒸发。许健等<sup>[28]</sup>在土柱试验中以5%、10%、15%为梯度添加生物炭,发现以5%添加梯度添加生物炭对土壤水分蒸发起到了抑制作用。文曼<sup>[29]</sup>认为生物炭用量越大,所用生物炭颗粒越小,对土壤蒸发的抑制效果也

越好。然而,李文雪<sup>[30]</sup>研究了生物炭不同添加量与潜水蒸发的关系,结果发现在添加量为1%时,生物炭对土壤蒸发有一定抑制效果,但当添加量达到5%时,对土壤水分蒸发并没有显著影响。张妙等<sup>[31]</sup>以不添加生物炭为对照,研究了添加梯度为2%、4%时对土壤蒸发能力的影响,结果发现添加生物炭对土壤蒸发能力的影响不显著。李帅霖等<sup>[25]</sup>在不同土壤深度处添加不同量的生物炭发现,虽然整个蒸发阶段,各处理与对照间累积蒸发量没有显著差异,但蒸发中后期不同处理间累计蒸发量差异显著,说明生物炭对土壤蒸发能力的影响不仅与添加量有关,还可能受添加方式的影响。

#### 4 生物炭与改性生物炭对土壤养分的影响

生物炭的添加不仅能够对土壤的养分产生影响,还能将碳素稳定封存于土壤碳库,从而起到固碳减排的作用<sup>[32]</sup>。Xiu等<sup>[33]</sup>在大豆田中添加生物炭,发现土壤有机质含量明显提高。Oladele等<sup>[34]</sup>研究了稻壳生物炭对土壤肥力的影响效应,结果表明添加生物炭可显著提高表层土壤的有机碳含量。Gao等<sup>[35]</sup>为了探究生物炭对农业系统的影响,将木材废料生物炭施用于有机农场,结果表明,生物炭施用于农田除了改善土壤碳储存外,还可以增加磷溶解细菌丰度,影响磷酸酶的产生,从而增加可利用磷的含量,并最终使土壤肥力和作物生产力得到显著提升,且土壤总碳含量、微生物量碳及生物可利用磷受生物炭施入的影响最大。Yin等<sup>[36]</sup>发现添加生物炭对土壤溶解性有机碳、微生物量碳的含量影响不大,但能显著提高土壤有机碳含量,这也证实了生物炭在土壤碳储存中具有良性作用。

余炜敏等<sup>[37]</sup>在土壤中添加铁改性生物炭,结果发现当改性生物炭的施加量达到了11 250 kg/hm<sup>2</sup>时,土壤中的有机质含量明显增加。生物炭对土壤有机质含量的影响可能与生物炭本身的新鲜度也有关系,Jiang等<sup>[38]</sup>对生物炭、土壤有机碳、新鲜低分子量碳化合物之间的相互作用进行了试验研究。结果表明,老化的生物炭对土壤有机碳的保护作用不如新添加时有效,甚至对二氧化碳的排放有增强的趋势,并且溶解有机碳也比对照组更多。新鲜低分子量碳的添加可使老化的土壤有机碳衍生的二氧化碳翻倍。添加老化生物炭的土壤中,有机碳稳定性的下降可能与老化生物炭吸附能力的减弱、生物炭添加密度大以及微生物群落有关。Liu等<sup>[39]</sup>

发现在土壤中添加新鲜生物炭后,土壤中的溶解有机质含量明显增加,但当生物炭老化后,这种影响便大大减弱。

添加生物炭后不但原料中的大部分养分返还土壤,且土壤中C/N的提高可增强土壤对氮素和其他养分的吸持能力,从而减少养分流失,提高土壤肥力<sup>[40]</sup>。一般认为添加生物炭对增加土壤中氮、磷、钾的含量起到积极作用,但具体影响效果未有明确结论。郭雄飞<sup>[41]</sup>通过盆栽试验研究了添加生物炭对土壤养分的影响,结果表明虽然土壤碱解氮、全钾的含量基本不变,但全氮、全磷含量却有明显增加。曾爱等<sup>[42]</sup>在小麦田中添加生物炭发现,较高的生物炭用量对于提高土壤的有机碳和速效钾含量有利,较低的生物炭用量则能有效提高土壤碱解氮和有效磷含量。王桂君等<sup>[43]</sup>向不同程度的盐碱土中添加生物炭,发现土壤中的速效氮含量降低,速效磷、有效钾含量增加。张祥等<sup>[44]</sup>研究了生物炭对红壤和黄棕壤理化性质的影响,试验发现添加生物炭能够增加土壤有机质、氮、磷、钾的含量,且增加效果与生物炭施加量成正比。肖茜等<sup>[45]</sup>向不同质地土壤中(风沙土、黑垆土、黄绵土)添加生物炭,发现添加了生物炭的处理土壤中硝态氮淋溶量减少了,但硝态氮淋溶量与生物炭添加量并不成正比,不同土壤均在添加5%的生物炭时硝态氮淋溶减少最显著,这说明适量添加生物炭有利于固持土壤中的氮素。王凡等<sup>[46]</sup>针对土壤氮素淋失进行了试验,发现生物炭的添加在一定程度上降低了氮素的淋失量,说明添加生物炭有利于土壤固氮,减少氮素流入地下水系,降低污染风险。王静等<sup>[47]</sup>研究了玉米生物炭以及改性生物炭对氮磷淋失的影响,发现改性生物炭能够有效减少氮磷向深处土层的流失量,改性生物炭比未改性生物炭对氮磷的吸附能力也更强。郭大勇等<sup>[48]</sup>发现使用酸改性生物炭后,植株地上部分氮、磷、钾含量均有所下降,但使用普通生物炭却使氮、钾含量升高,认为改性生物炭与普通生物炭均可能抑制植株对磷的吸收。Zhu等<sup>[49]</sup>以中国南方的红壤为研究对象,发现添加生物炭后土壤有效磷含量有明显提高。

然而,也有研究发现添加生物炭后土壤氮素水平并未发现显著变化,Liang等<sup>[50]</sup>研究了生物炭添加对石灰性土壤的改良以及对作物产量的影响,结果发现相比对照组,土壤中碱解氮的含量减少了,钾的含量增加了,土壤速效磷含量则基本不变,这可能与土壤质地有关。生物炭对土壤养分影响方面的研

究结论并不统一,主要与土壤质地、生物炭种类有关,后期还需要进一步研究明确。总体来讲,对于大多数种类的土壤,添加了生物炭可减少硝态氮的淋溶,提高土壤氮素固持能力,但硝态氮淋溶量的减少与生物炭添加并不成正比,对于不同的土壤需要进一步确定研究最适宜的生物炭添加量。

## 5 生物炭施加对土壤微生物以及酶活性的影响

部分研究认为生物炭本身的多孔性有利于微生物的生长,因此在土壤中添加一定量的生物炭能够为微生物提供一个良好的繁殖环境,从而促进微生物群落的代谢活动,以提高土壤微生物的生物量<sup>[51-52]</sup>。杨美玉等<sup>[53]</sup>以1%、2%、5% 3个梯度添加生物炭,发现添加生物炭能够对土壤微生物结构产生明显的影响,土壤微生物总量也有不同程度的提高。陈坤等<sup>[54]</sup>则发现长期施用生物炭对细菌的繁殖有利,却不利于真菌和革兰氏细菌的积累。

土壤微生物的多样性和规模会影响土壤的养分循环,部分研究认为不同的土壤类型、含水量、土壤通透性及土壤温度等性质会直接或间接造成土壤微生物结构的改变,而生物炭的施用能影响土壤中微生物群落的组成,对微生物群落多样性的增加有利<sup>[55-58]</sup>。不同生物炭添加量可能会对微生物群落造成不同的影响。邓建强等<sup>[59]</sup>将生物炭以4个梯度(7.5、15、30、45 t/hm<sup>2</sup>)向土壤中添加,发现细菌和真菌多样性随生物炭添加量的增大呈现先增大后减小的趋势,用量在30 t/hm<sup>2</sup>时微生物多样性达到峰值,认为适量添加生物炭对土壤微生物多样性的提高有利。程扬等<sup>[60]</sup>在玉米地中按照5、10 t/hm<sup>2</sup>两个梯度添加生物炭,发现生物炭的添加能提高微生物群落多样性,且添加量为5 t/hm<sup>2</sup>时提高效果更为显著。除生物炭添加量之外,不同原料来源的生物炭可能因其性质的不同而对土壤微生物结构产生不同的影响。邵慧芸等<sup>[61]</sup>通过多样性分析,对比了添加烟秆生物炭和小麦秸秆生物炭对土壤微生物的效应,发现前者对微生物结构的影响更为显著。不同条件的土壤也可能导致不同的改良效果。王雪玉等<sup>[62]</sup>向连续种植了1 a、10 a、20 a蔬菜的土壤中添加生物炭,发现施加生物炭在连续种植10 a蔬菜的土壤中对微生物繁殖最有利。

目前关于添加生物炭对土壤酶活性影响的报道无统一结论,有研究认为生物炭能提高土壤中与N、P相关酶的活性<sup>[63-64]</sup>,部分研究发现添加生物炭提

高了土壤中的脲酶和蔗糖酶的活性<sup>[65-66]</sup>。袁晶晶等<sup>[67]</sup>的试验结果表明土壤脲酶活性随生物炭添加量的增加而增加。然而,夏丽丹<sup>[68]</sup>在酸性土壤中添加生物炭后发现,土壤中的酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性反而降低了。在土壤中添加生物炭后,具有多孔结构和较大比表面积的生物炭能够为土壤中的微生物提供良好的生长环境,而微生物作为有机质形成和养分转化的重要动力,能够对土壤酶的活性产生影响<sup>[66]</sup>,生物炭对土壤酶活性的影响与土壤环境、生物炭原材料和制备条件以及土壤中酶的种类息息相关。

## 6 生物炭对土壤的修复作用

由于常用的生物炭多为碱性,且含有较多盐离子,能够降低土壤中氢离子及交换性铝离子水平,故添加生物炭对改良酸性土壤的pH具有一定的效果<sup>[69]</sup>,且在一定范围内,生物炭对酸性土壤的改良效果与添加量呈正相关<sup>[70]</sup>。赵牧秋等<sup>[71]</sup>针对生物炭原材料粒径、热解温度、碳化时间设立了不同的对照组来研究生物炭对酸性土壤的改良效果,结果发现制备的生物炭均为碱性,并且对强酸性土壤的改良效果与生物炭碱性基团数量成正比,制备生物炭的原材料粒径越小、制备温度越高、时间越长、生物炭添加量越大则改良的效果越好。王义祥等<sup>[72]</sup>通过盆栽试验探讨了施加生物炭对强酸性土壤的改良效果,发现生物炭添加量越大,对强酸性土壤的改良效果越好。McDonald等<sup>[73]</sup>研究了不同原料生物炭对土壤pH的改良效果,结果发现酸性土壤施加任何一种生物炭后土壤的pH值都会不同程度地提高,且提高程度与生物炭添加量呈正相关。总体看来,生物炭对酸性土壤具有一定的改良效应,且目前的试验结果表明改良效果与生物炭添加量呈正比。然而,对于碱性土壤的改良效果则存在争议,大部分研究集中于改性生物炭对盐碱土的改良效果。鲁新蕊等<sup>[74]</sup>使用盐酸对生物炭进行了预处理,研究了盐酸酸化生物炭对盐碱土的改良效果,发现酸化生物炭能够降低碱性土壤的pH值。周志云等<sup>[75]</sup>在碱性土壤中添加量磷酸改性生物炭,也得到了类似的结论。

由于工业和农业对土壤的污染,许多地区土壤受到重金属或有机污染物的污染。生物炭在改良污染土壤方面具有一定的功效。Frédéric等<sup>[76]</sup>对蚕豆的根部和受污染的土壤进行研究,使用了不同酸碱性的土壤营造不同的化学环境,发现生物炭的吸附

性能够降低土壤重金属污染对作物生长的危害,且在酸性土壤中生物炭对重金属污染的修复效果最好。周楫等<sup>[77]</sup>利用生物炭对城市污泥进行处理,发现添加生物炭能有效降低污泥中的重金属含量。Xing等<sup>[78]</sup>研究了两种生物炭对水稻田土壤汞迁移率的影响,结果发现添加生物炭能够有效降低土壤中的汞含量。也有研究发现,生物炭对酸性土壤pH的提升能够降低土壤中可溶性铅、锌的浓度<sup>[79]</sup>。王晓琦等<sup>[80]</sup>开展了商陆炭和玉米炭的试验,发现两种生物炭均能增加土壤pH值,降低土壤有效态铜含量,但商陆炭效果优于玉米炭,并指出这可能是因为商陆炭富含锰元素。此外,生物炭对于土壤中的激素也具有吸附效果,Alizadeh等<sup>[81]</sup>在表层土壤中添加不同生物炭研究土壤渗滤液中激素17 $\beta$ -雌二醇及其初级代谢产物雌酮的去向和运输情况,结果发现表层添加生物炭后,更多的激素滞留在表层,土壤深层的渗滤液中两种激素的浓度则明显降低,试验结果证明了生物炭减缓地下水激素污染的有效性。总体来讲,生物炭对土壤重金属污染的修复作用也与生物炭原材料及其制备条件有极大关系,此外,生物炭对污染土壤的修复机理比较复杂,既有直接吸附作用,又有间接改良过程。

## 7 结论与展望

目前,生物炭的制备与应用越来越受到关注,大量的研究表明,适量施用生物炭对于土壤理化性质改良、保水培肥及土壤修复都有一定的效应。添加生物炭能显著降低土壤容重,改善土壤物理结构,增强入渗并抑制土壤蒸发。然而,目前关于生物炭的研究和技术推广还存一些不足,需要做进一步的探讨:

(1)生物炭的原料种类繁多,且在不同制备条件下得到的生物炭产物性质也截然不同,对土壤的改良效应又因生物炭添加量以及添加方式而异,尤其是土壤入渗能力和持水性能还与土壤质地有很大关系。目前研究结论多集中于表观效应的研究,对于内部机制等方面的成果还很少见,在未来的研究中应将种类繁多的生物炭按一定的条件进行合理分类,重点研究不同类型生物炭对土壤的改良效应及机理,进一步探讨不同类型生物炭的施用量阈值及最适宜的施用方式,为促进生物炭的推广应用提供指导。

(2)关于生物炭的研究多集中于室内模拟试验,田间试验较少,研究结论也主要集中于土壤物理

特性、土壤养分、土壤微生物环境等单一方面的影响,对于几方面的综合效应研究并不多见,有关生物炭对土壤改良效应的综合评价还未见报道。未来应考虑多学科交叉,综合多方面构建生物炭改良评价体系。

(3)现有研究周期相对较短,缺乏长效性研究。未来应关注不同时间和空间尺度上,基于试验和模型模拟,探讨施加生物炭对土壤的长期效应,为生物炭的进一步广泛利用提供理论基础。

(4)生物炭作为一种新兴的土壤改良剂,农户对其在农田中施用的意愿是一个值得考虑的问题,因此在研究生物炭对土壤改良效应理论的同时应结合农户意愿,综合考虑基于经济投入等社会效益的生物炭利用模式,从而真正提高农田土壤生产力,缓解我国粮食需求现状。

### 参考文献:

- [1] ROBERTS K G, GLOY B A, JOSEPH S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2):827-833.
- [2] SHEN Zhengtao, HOU Deyi, JIN Fei, et al. Effect of production temperature on lead removal mechanisms by rice straw biochars [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655:751-758.
- [3] LEHMANN J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7):381-387.
- [4] 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.
- [5] 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 等. 改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 [J]. *环境科学*, 2019, 40(4):1842-1848.
- [6] DONG Xinliang, SINGH B P, LI Guitong, et al. Biochar increased field soil inorganic carbon content five years after application [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186:36-41.
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5):821-828.
- [8] WEI Siye, ZHU Mengbo, FAN Xingjun, et al. Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2019, 218:624-631.
- [9] TANG Yao, ALAM M S, KONHAUSER K O, et al. Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater [J]. *Journal of Cleaner Produc-*

- tion, 2019, 209:927 - 936.
- [10] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5):1757 - 1765.
- [11] 颜钰, 王子莹, 金洁, 等. 不同生物质来源和热解温度条件下制备的生物炭对菲的吸附行为[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1810 - 1816.
- [12] LIU Chenghua, CHU Wenying, LI Hui, et al. Quantification and characterization of dissolved organic carbon from biochars [J]. *Geoderma*, 2019, 335:161 - 169.
- [13] 王贝贝, 马艳飞, 张胜南, 等. 酸改性生物炭对柴油等温吸附的研究[J]. 石油化工, 2018, 47(10):1103 - 1109.
- [14] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 206:46 - 59.
- [15] WIBOWO N, SETYADHI L, WIBOWO D, et al. Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: Influence of surface chemistry on adsorption [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146:237 - 242.
- [16] 李蕊宁, 王兆炜, 郭家磊, 等. 酸碱改性生物炭对水中磺胺噻唑的吸附性能研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11):4119 - 4128.
- [17] 赵力, 陈建, 李浩, 等. 裂解温度和酸处理对生物炭中持久性自由基产生的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(11):2472 - 2478.
- [18] 计海洋, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 生物炭及改性生物炭的制备与应用研究进展[J]. 核农学报, 2018, 32(11):2281 - 2287.
- [19] CHU Gang, ZHAO Jing, HUANG Yu, et al. Phosphoric acid pretreatment enhances the specific surface areas of biochars by generation of micropores [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240:1 - 9.
- [20] ZHAO Ling, ZHENG Wei, MAŠEK O, et al. Roles of phosphoric acid in biochar formation: Synchronously improving carbon retention and sorption capacity[J]. *Journal of Environment Quality*, 2017, 46(2):393 - 401.
- [21] 李兴, 勾芒芒, 屈忠义, 等. 生物炭对沙壤土水分特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12):280 - 283.
- [22] 王幼奇, 包维斌, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12):60 - 65.
- [23] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):113 - 119.
- [24] 田丹, 屈忠义, 李波, 等. 生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3):135 - 137.
- [25] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):135 - 144.
- [26] 刘易, 黄建, 马彦茹, 等. 生物质炭输入对盐化灰漠土壤水分运移的影响[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(2):343 - 351.
- [27] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8):2281 - 2288.
- [28] 许健, 牛文全, 张明智, 等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11):3505 - 3513.
- [29] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [30] 李文雪. 生物炭添加对盐碱土水气传导的影响[D]. 烟台:鲁东大学, 2018.
- [31] 张妙, 李秧秧, 白岗栓. 生物炭和 PAM 共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5):124 - 130.
- [32] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. 核农学报, 2013, 27(5):681 - 686.
- [33] XIU Liqun, ZHANG Weiming, SUN Yuanyuan, et al. Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years[J]. *Catena*, 2019, 173:481 - 493.
- [34] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils [J]. *Geoderma*, 2019, 336:1 - 11.
- [35] GAO Si, HOFFMAN-KRULL K, DELUCA T H. Soil biochemical properties and crop productivity following application of locally produced biochar at organic farms on Waldron Island, WA [J]. *Biogeochemistry*, 2017, 136(1):31 - 46.
- [36] YIN Yunfeng, HE Xinhua, GAO Ren, et al. Effects of rice straw and its biochar addition on soil labile carbon and soil organic carbon[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):491 - 498.
- [37] 余炜敏, 石永锋, 王荣萍, 等. 改性生物炭对小白菜生长和磷素吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10):1878 - 1882.
- [38] JIANG Xinyu, TAN Xiangping, CHENG Jiong, et al. Interactions between aged biochar, fresh low molecular weight carbon and soil organic carbon after 3.5 years soil - biochar incubation [J]. *Geoderma*, 2019, 333:99 - 107.
- [39] LIU Chen, WANG Honglan, LI Penghui, et al. Biochar's impact on dissolved organic matter (DOM) export from a

- cropland soil during natural rainfalls [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 650:1988 - 1995.
- [40] ZWIETEN L V, 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.
- [41] 郭雄飞. 生物炭和 AM 真菌对重金属污染下土壤养分及望江南生长的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(11):150 - 161.
- [42] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5):1009 - 1015.
- [43] 王桂君, 许振文, 田晓露, 等. 生物炭对盐碱化土壤理化性质及小麦幼苗生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(12):390 - 393.
- [44] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8):979 - 984.
- [45] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16):128 - 134.
- [46] 王凡, 屈忠义, 李昌见, 等. 生物炭对砂壤土氮素淋失的影响试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(7):71 - 74.
- [47] 王静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机磷淋失影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(12):2810 - 2820.
- [48] 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.
- [49] ZHU Qiaohong, PENG Xinhua, HUANG Taiqing, et al. Effect of biochar addition on maize growth and nitrogen use efficiency in acidic red soils [J]. *Pedosphere*, 2014, 24(6):699 - 708.
- [50] LIANG Feng, LI Guitong, LIN Qimei, et al. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):525 - 532.
- [51] 王国兵, 王瑞, 徐瑾, 等. 生物炭对杨树人工林土壤微生物生物量碳、氮、磷及其化学计量特征的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2):1 - 6.
- [52] 周之栋, 卜晓莉, 吴永波, 等. 生物炭对土壤微生物特性影响的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(6):1 - 8.
- [53] 杨美玉, 罗力, 陈卫锋, 等. 生物炭对污泥施用土壤中三氯生生物有效性和微生物群落结构的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(12):4789 - 4795.
- [54] 陈坤, 徐晓楠, 彭靖, 等. 生物炭及炭基肥对土壤微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(10):1920 - 1930.
- [55] PIETIKÄINEN J, KIIKKILÄ O, FRITZE H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus [J]. *Oikos*, 2000, 89(2):231 - 242.
- [56] 侯建伟, 邢存芳, 卢志宏, 等. 不同秸秆生物炭对贵州黄壤细菌群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(23):4485 - 4495.
- [57] 胡瑞文, 刘勇军, 周清明, 等. 生物炭对烤烟根际土壤微生物群落碳代谢的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(9):49 - 56.
- [58] 赵淑文, 胡云, 李明, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤细菌群落结构及植株生长的影响[J]. *中国瓜菜*, 2018, 31(3):19 - 23.
- [59] 邓建强, 谭军, 施河丽, 等. 生物炭对土地整治区土壤微生物调控效应[J]. *中国烟草学报*, 2018, 24(3):46 - 52.
- [60] 程扬, 刘子丹, 沈启斌, 等. 秸秆生物炭施用对玉米根际和非根际土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10):1870 - 1877.
- [61] 邵慧芸, 张阿凤, 王旭东, 等. 两种生物炭对烤烟生长、根际土壤性质和微生物群落结构的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(2):537 - 544.
- [62] 王雪玉, 马建华, 李明, 等. 生物炭对不同种植年限土壤黄瓜生长及真菌丰度的影响[J]. *中国瓜菜*, 2018, 31(11):22 - 25 + 3.
- [63] 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3):535 - 540.
- [64] 文登鸿, 吴雪莲, 焦安祥, 等. 施用生物质炭对土壤氮形态含量和酶活性的影响研究[J]. *现代农村科技*, 2018(5):74 - 75.
- [65] 赵晓军, 李丽, 张璇, 等. 生物炭与微生物菌剂配施对土壤生物和化学特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(25):109 - 112.
- [66] 王雪玉, 刘金泉, 胡云, 等. 生物炭对黄瓜根际土壤细菌丰度、速效养分含量及酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(2):370 - 376.
- [67] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善枣区土壤微生物学特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4):1039 - 1046.
- [68] 夏丽丹. 添加不同水分与生物炭量对土壤磷素形态转化及土壤酶活性的影响[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会. 中国土壤学会土壤环境专业委员会第二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会摘要集. 合肥, 2018.
- [69] 刘赛男. 生物炭影响土壤磷素、钾素有效性的微生态机制[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2016.
- [70] 郭实荣, 胡昆, 邱孺, 等. 生物炭对酸性土壤改良研

- 究进展[J]. 内蒙古林业调查设计, 2017, 40(4): 92-94.
- [71] 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+309.
- [72] 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.
- [73] MCDONALD L M, SCHUMACHER T E, CHINTALA R, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. CLEAN - Soil Air Water, 2014, 42(5): 626-634.
- [74] 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.
- [75] 周志云, 马文连, 周振, 等. 磷酸改性生物炭和氯混施对土壤铅形态及小麦铅吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 899-906.
- [76] FRÉDÉRIC R, DHYÈVRE A, MOREL J L, et al. Decrease in the genotoxicity of metal-contaminated soils with biochar amendments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(36): 1-8.
- [77] 周楫, 余亚伟, 蒋越, 等. 生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 987-993.
- [78] XING Ying, WANG Jianxu, XIA Jicheng, et al. A pilot study on using biochars as sustainable amendments to inhibit rice uptake of Hg from a historically polluted soil in a Karst region of China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 170: 18-24.
- [79] NORINI M P, THOUIN H, MIARD F, et al. Mobility of Pb, Zn, Ba, As and Cd toward soil pore water and plants (willow and ryegrass) from a mine soil amended with biochar[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 117-130.
- [80] 王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 等. 两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 361-368.
- [81] ALIZADEH S, PRASHER S O, ELSAYED E, et al. Effect of biochar on fate and transport of manure-borne estrogens in sandy soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 73(11): 166-180.

(上接第245页)

- [9] 刘晓明, 赵明华, 苏永华, 等. 红层软岩崩解性的灰色关联分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(4): 16-20.
- [10] 朱训国, 杨庆. 膨胀岩的判别与分类标准[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 174-177.
- [11] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982.
- [12] 张宗堂, 高文华, 张志敏, 等. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性及分形特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 930-937.
- [13] RUIZ-CARULLA R, COROMINAS J, MAVROULI O. A fractal fragmentation model for rockfalls[J]. Landslides, 2017, 14(3): 875-889.
- [14] 韩培锋, 樊晓一, 田述军, 等. 堆石料崩解分形特征及其对堆石坝渗流影响[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(5): 102-106+122.
- [15] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987.
- [16] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362.
- [17] DENG Julong. Gray system[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1985.