

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.030

# 生物炭和肥料配施对土壤理化特性和作物生长影响的研究综述

庄 晔, 王 娟

(扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225000)

**摘 要:** 生物炭能够改善土壤的理化性质和作物的生长发育,被广泛应用于农业、生态保护等领域。肥料是作物生长所需,但肥料的不合理施用也会造成一系列的环境问题。生物炭和肥料配施能够更好的达到改善土壤理化特性、作物增产提质以及保护环境的目的。根据已有的对于生物炭和肥料配施方面的研究进行总结归纳,综述了生物炭和肥料配施对于土壤理化性质、作物生长和产量以及作物品质的影响,发现土壤的类型、生物炭的添加量、肥料的添加量、生物炭和肥料的配施比例等因素都关系着生物炭和肥料配施对土壤理化特性和作物生长的影响,也对今后的研究进行了展望。

**关键词:** 生物炭;肥料;土壤理化性质;作物生长;作物产量;作物品质

中图分类号: S156

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)04—0186—08

## A Review of the Effects of Biochar and Fertilizer on Soil Physical and Chemical Properties and Crop Growth

ZHUANG Ye, WANG Juan

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

**Abstract:** Biochar can improve the physical and chemical properties of soil and the growth and development of crops, and has been widely used in agriculture, ecological protection and other fields. Fertilizer is necessary for the growth of crops, but the unreasonable application of fertilizer will also cause a series of environmental problems. Combined application of biochar and fertilizer can better achieve the purpose of improving soil physical and chemical properties, increasing crop yield and quality and protecting the environment. This paper summarizes the existing research papers on biochar and fertilizer application, reviews the effects of biochar and fertilizer on soil physical and chemical properties, crop growth and yield and crop quality, found that soil type, the amount of added biochar, the amount of added fertilizer, proportion of biochar and fertilizer were all related to the effects of biochar and fertilizer combined application on soil physical and chemical properties and crop growth, this paper also prospected the future research on the application of biochar and fertilizer.

**Keywords:** fertilizer; soil physical and chemical properties; crop growth; crop yield; crop quality

生物炭是由生物质在无氧或低氧环境中高温裂解后产生的固体颗粒物<sup>[1]</sup>。生物炭的含碳量丰富,重度较小,比表面积较大,吸附能力强,稳定性强,一般呈碱性<sup>[2-3]</sup>。大部分研究表明,在土壤中施加生物炭能够较好地改善土壤理化特性,从而促进

作物生长并获得较高产量<sup>[4-6]</sup>。

肥料作为植物生长发育的粮食,在农业生产中至关重要,它起到调节土壤理化生物特性,提高土壤肥力,最终提高农作物产量以及改善农产品品质等重要作用<sup>[7]</sup>。目前常用的肥料有化学肥料、有机肥

收稿日期:2021-03-15

修稿日期:2021-04-12

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:庄 晔(1997—),女,硕士研究生,研究方向为节水灌溉技术与农业水土环境。E-mail: 845106268@qq.com

通讯作者:王 娟(1988—),女,副教授,硕士生导师,主要从事农业水土资源高效利用方面的工作。E-mail: blesswangj@163.com

料和生物肥料等。

然而,目前在肥料利用方面仍存在着较多问题,主要表现为肥料利用率较低。肥料利用率的低下不仅会增加农业投资成本,还会引发土壤板结、土壤肥力降低、污染物增多等一系列问题<sup>[8-10]</sup>。此外,肥料利用率的低下还会导致养分流入水体,污染水体,导致水体富营养化等问题,造成农业面源污染<sup>[11]</sup>。有研究表明,在农业生产过程中施加生物炭不仅能够达到增产提质的效果,还对养分具有一定的持留作用,能够延缓肥料的养分释放,有效提高肥料利用率<sup>[12-14]</sup>。所以,探究生物炭和肥料配施对土壤理化特性和作物生长的影响具有重要意义,对于提高肥料利用率,减少施肥造成的环境问题极为重要。

本文总结了生物炭和不同种类肥料配施对土壤理化特性和作物生长及产量的影响方面的研究成果和进展,并对生物炭配施肥料在农业生产过程中所面临的问题和需要解决的科学问题进行了展望,旨在为生物炭和肥料合理施用、作物增产提质提供理论依据。

## 1 生物炭和肥料配施对土壤理化性质的影响

### 1.1 生物炭和肥料配施对土壤物理性质的影响

土壤的物理性质包括了土壤的地温、重度、持水性能等。在土壤中添加生物炭后会对土壤的内部结构产生一定的影响,从而改善土壤的物理特性。

地温是土壤物理性质的重要指标之一,适宜的地温能够有效促进作物的生长发育。尚杰等<sup>[15]</sup>研究发现,施加 40 t/hm<sup>2</sup> ~ 60 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭增加了土壤的温度。李昌见等<sup>[16]</sup>研究表明,施加生物炭(10 t/hm<sup>2</sup>、20 t/hm<sup>2</sup>、40 t/hm<sup>2</sup>、60 t/hm<sup>2</sup>)显著提高了土壤温度,各生育期施加 60 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭土壤温度增幅最大,增幅为 58.1%、31.3%、55.8%。王鹏<sup>[17]</sup>研究指出,与空白对照相比,生物炭(10 t/hm<sup>2</sup>、15 t/hm<sup>2</sup>)和羊粪有机肥配施(4.5 t/hm<sup>2</sup>、9 t/hm<sup>2</sup>)增加了土壤平均温度。这主要可能是因为生物炭添加后土壤表层颜色变深,土壤吸热能力增强,从而促使了土壤温度的提升<sup>[18]</sup>。

生物炭与肥料配施可以降低土壤重度(见表1)。梁利宝等<sup>[22]</sup>研究发现,随着复垦时间的延长,土壤重度逐渐降低,第3年施加 3 t/hm<sup>2</sup> 生物炭和 9 677 kg/hm<sup>2</sup> 鸡粪有机肥处理明显降低了土壤的重度,与不施生物炭和肥料处理相比降幅达到 10%,而无机肥(N120 kg/hm<sup>2</sup>、P92 kg/hm<sup>2</sup>、K98 kg/hm<sup>2</sup>)

配施生物炭(3 t/hm<sup>2</sup>)处理对土壤重度的降低效果不明显。由此可见,生物炭配施肥料能够改善土壤重度,且以生物炭配施有机肥效果较优。

土壤质地和结构的改变会影响土壤水分的入渗、流动和滞留时间,从而影响土壤持水性能<sup>[24]</sup>。勾芒芒等<sup>[25]</sup>研究生物炭与化肥配施对土壤含水率的影响发现,生物炭(10 t/hm<sup>2</sup>、20 t/hm<sup>2</sup>、40 t/hm<sup>2</sup>、60 t/hm<sup>2</sup>)和化肥(N306 kg/hm<sup>2</sup>、408 kg/hm<sup>2</sup>、P122.25 kg/hm<sup>2</sup>、163 kg/hm<sup>2</sup>、K225 kg/hm<sup>2</sup>、300 kg/hm<sup>2</sup>)配施能有效改善土壤持水性能,显著增加了 0~20 cm 土层土壤的含水率。王湛等<sup>[26]</sup>通过在宁夏吴忠地区的定位试验发现,生物炭配施牛粪有机肥处理有效增加了 0~10 cm 土层土壤的体积含水率,在全生育期中生物炭(17 t/hm<sup>2</sup>)配施有机肥(110 t/hm<sup>2</sup>)处理 0~10 cm 土层土壤平均含水率分别比单施有机肥(110 t/hm<sup>2</sup>)处理、单施生物炭(17 t/hm<sup>2</sup>)处理、以及不施有机肥和生物炭处理分别提高了 12.4%、20.4% 和 29.2%,试验结果还表明生物炭和有机肥配施使得水分集中在 0~30 cm 土层,增加了作物可利用的有效水含量。生物炭和肥料配施能够改善土壤的持水性能,但其对土壤持水性能的改善效果受土壤质地、生物炭添加量等多种因素的影响。孟繁昊等<sup>[20]</sup>通过研究发现,生物炭(8 t/hm<sup>2</sup>、16 t/hm<sup>2</sup>、24 t/hm<sup>2</sup>)和氮肥(150 kg/hm<sup>2</sup>、300 kg/hm<sup>2</sup>)配施可显著提高 0~40 cm 土层土壤的含水率和蓄水量,并且发现土壤持水性随生物炭施加量的增加呈先增后减的趋势。高海英等<sup>[27]</sup>研究指出,对质地较黏土壤施加生物炭或生物炭基氮肥可增大土壤通透性,促进土壤水分入渗,而对于质地较轻土壤则会降低土壤通透性,抑制水分入渗。此外,试验结果表明适量的生物炭及生物炭基氮肥可提高土壤持水性能,但当超过一定用量时(此研究中用量为 80 t/hm<sup>2</sup>)反而会降低土壤持水性能。由此可见,生物炭配施肥料可有效改善土壤持水性能,增加土壤中有效水含量,且生物炭配施肥料对土壤持水性能的改善效果优于单施生物炭或肥料。对于不同质地的土壤,生物炭添加量存在阈值,过量添加生物炭反而会降低土壤持水性能,影响作物水分利用。

总体而言,生物炭与肥料配施能显著增加土壤温度,降低土壤重度,并显著提高作物根系层水分有效性。在一定添加范围内,土壤持水特性与生物炭添加量正相关,但过量添加反而会降低土壤持水性,这主要与土壤质地相关。

表 1 生物炭和肥料配施对土壤重度的影响

生物炭 /(t·hm <sup>-2</sup> )	肥料 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	土壤 类型	土壤重度/% (与空白对照相比)	参考 文献
0.0、1.5	N(0、12、21、30)	褐土	11.74 ~ 15.73 ↓	[19]
0.0、8.0	N(0、150、300)	沙壤土	3.92 ~ 8.35 ↓ (0 ~ 20 cm 土层)	[20]
0.0、 20.0	N(0、180)、P(0、90) K(0、120)	灰潮土	0.68 ~ 2.70 ↓	[21]
0.0、 3.0	N(0、120)、P(0、92)、 K(0、98)、 鸡粪有机肥(0、9677)	褐土	10.00 ↓ (有机肥 + 生物炭处理)	[22]
0.0、5.0、 10.0	牛粪有机肥 (0、20000)	风沙 土	0.63 ~ 4.40 ↓ (第一年) 0.71 ~ 5.71 ↓ (第二年)[23] 0.00 ~ 9.70 ↓ (第三年)	[23]

## 1.2 生物炭和肥料配施对土壤化学性质的影响

土壤的化学性质包括了土壤 pH、土壤氮素、有机质等养分含量。钱嘉文等<sup>[28]</sup>研究发现,与空白对照相比,单施生物炭(17.6 t/hm<sup>2</sup>)处理土壤 pH 值提高了 16.49%,而单施化肥(2 000 kg/hm<sup>2</sup>)处理土壤 pH 值降低了 11%,生物炭(8.8 t/hm<sup>2</sup>)和化肥(2 000 kg/hm<sup>2</sup>)配施与单施化肥(2 000 kg/hm<sup>2</sup>)相比,明显减缓了土壤 pH 值下降。侯晓娜<sup>[29]</sup>通过室内培养试验发现,单施生物炭(50 g/kg)、单施有机肥(50 g/kg)、生物炭(50 g/kg)与有机肥(50 g/kg)配施处理土壤 pH 值较空白对照分别提高了 26.1%、24.3%、32.7%。杨劲峰等<sup>[30]</sup>研究表明,随着种植年限的增加 pH 值有所下降,在连续三年施肥后,与猪粪配施化肥、玉米秸秆配施化肥、炭基颗粒配施化肥相比,炭基缓释花生专用肥处理土壤 pH 值下降的最多,较第二年降低了 7.0%。郭茹等<sup>[31]</sup>通过生菜盆栽试验发现,生物炭(24 g/kg、48 g/kg、72 g/kg)和蚯蚓粪有机肥(400 g/kg、800 g/kg、1 200 g/kg)配施能够提高土壤有机质和全氮含量,并且土壤中有机质和全氮含量随着生物炭和有机肥添加量的增加而增加。胡茜等<sup>[32]</sup>通过盆栽试验发现,在水稻分蘖期前,添加 3% 的三种不同生物炭(水稻秸秆炭、玉米秸秆炭、小麦秸秆炭)和化肥配施处理的土壤碱解氮含量远高于单施化肥处理,并且增幅普遍在 31.32% 以上。樊晓东等<sup>[33]</sup>研究发现,生物炭(6 t/hm<sup>2</sup>)和鸡粪有机肥(12 000 kg/hm<sup>2</sup>)配施处理土壤全氮、碱解氮、硝态氮含量比单施有机肥(12 000 kg/hm<sup>2</sup>)处理分别增加了 1.5%、11.1%、20.3%。徐绮雯等<sup>[34]</sup>在试验中采用不同梯度的生物炭(0 t/hm<sup>2</sup>、35 t/hm<sup>2</sup>、50 t/hm<sup>2</sup>)与常规施肥(N180 kg/hm<sup>2</sup>、P90 kg/hm<sup>2</sup>、K120 kg/hm<sup>2</sup>)、减量施肥(N90

kg/hm<sup>2</sup>、P45 kg/hm<sup>2</sup>、K60 kg/hm<sup>2</sup>)相配合处理,通过研究发现,与不施生物炭处理相比,生物炭和常规肥、生物炭和减量肥配施处理土壤的全碳、全氮含量平均上升了 6.11 与 1.42 倍。王智慧等<sup>[35]</sup>研究指出,生物炭和化肥配施能够提高土壤有效磷含量和速效钾的含量,与空白对照相比,80% 常规肥和 20% 生物炭配施处理以及 70% 常规肥和 30% 生物炭配施处理有效磷和速效钾含量分别提高了 52.16% ~ 81.00%、40.49% ~ 72.24% 以及 11.79% ~ 19.15%、7.54% ~ 20.36%。

总体来讲,生物炭配施肥料能显著提高土壤有机质、氮、碳、钾和磷等养分的含量及有效性,但对于土壤 pH 的影响尚不统一,这可能与土壤 pH 的本底值有关。此外,部分研究表明,肥料减量与生物炭配施仍可以提高土壤养分含量,但对于肥料和生物炭的比例关系还需要进一步研究。

## 1.3 生物炭和肥料配施对氮肥利用的影响

生物炭和肥料配施能够显著提高土壤的养分含量及其有效性,从而提高肥料利用率,众多研究表明,生物炭与肥料配施会显著影响土壤中氮素形态,并有效提高氮素利用率。张爱平等<sup>[36]</sup>研究发现,生物炭和氮肥配施能够提高氮肥农学效率和氮肥利用率,且两者均随生物炭用量的增加而增加。乔志刚等<sup>[37]</sup>通过田间试验发现,施用生物炭基肥处理氮素吸收利用率均有增加,低氮量炭基肥处理(炭基肥 375 kg/hm<sup>2</sup> 和 N150 kg/hm<sup>2</sup>)氮素吸收利用率增加的最为显著,较施常规肥(45% 养分复合肥 375 kg/hm<sup>2</sup> 和 N300 kg/hm<sup>2</sup>)处理增加了 10.2%。生物炭和肥料配施之所以能够提高氮素的利用率主要是因为生物炭是多孔结构,比表面积大,施入土壤后能够改善土壤通气状况,能够增强对于氮素的吸附,减少氮素的淋溶<sup>[38-39]</sup>。

尹秀玲等<sup>[40]</sup>研究表明,玉米秸秆生物炭能够提高对氮素的吸附,且随生物炭添加量(添加量为 0%、0.5%、1%、2%)的增加暗棕壤土对氮的饱和吸附量增加。索桂芳等<sup>[41]</sup>通过选用稻壳炭、山核桃壳炭和竹炭三种不同类型的生物炭进行吸附试验发现,三种生物炭在生物炭添加量为 0.05 g, pH 为 9, 吸附时间为 3 h, 初始浓度为 100 mg/L 的条件下,稻壳炭对氮的吸附效果最佳,最大吸附量为 23.79 mg/g。王思源等<sup>[42]</sup>研究发现,铁氧化改性生物炭和铁改性生物炭对铵态氮的吸附作用较好,两者对铵态氮的饱和和吸附量分别较未改性生物炭增加了 23.3% ~ 24.1% 和 14.1% ~ 14.3%。Sika 等<sup>[43]</sup>研

究发现,添加生物炭处理显著降低了硝态氮的淋溶。李卓瑞等<sup>[44]</sup>研究发现,土壤中添加生物炭能够有效减少总氮的淋失,各生物炭添加处理(添加量为2%、4%、6%、8%)与不添加生物炭对照相比,总氮淋失量分别减少了17.6%、24.7%、30.6%、37.7%。杨放等<sup>[45]</sup>研究指出,1%的生物炭添加量增加了铵态氮的淋失,5%和10%的生物炭添加量减少了土壤铵态氮的淋失量,与不添加生物炭对照相比,分别减少了31.1%和52.4%。

总体来看,由于生物炭的多孔结构和较大的比表面积,肥料配施不同种类生物炭均可提高对无机氮的吸附,减小氮素淋溶损失,从而提高氮肥利用率,且随生物炭用量的增加,氮肥利用率提高更显著。

## 2 生物炭和肥料配施对作物生长发育的影响

### 2.1 生物炭和肥料配施对作物生长的影响

土壤环境对于作物的生长发育来说非常重要,生物炭和肥料配施有效地改善了土壤的理化性质,为作物根系生长提供了良好的土壤环境,从而促进作物的生长发育。部分研究表明,生物炭的添加能够促进小麦、水稻、大豆等作物的生长<sup>[46-49]</sup>。张伟明等<sup>[50]</sup>研究表明,生物炭(0、1.5 t/hm<sup>2</sup>)与化肥(60 kg/hm<sup>2</sup>、82.5 kg/hm<sup>2</sup>、105 kg/hm<sup>2</sup>、127.5 kg/hm<sup>2</sup>)配施能够提高大豆生长前期的株高,在大豆的苗期、开花期显著提高净光合速率和蒸腾速率,在结荚期降低蒸腾速率提高光合速率,从而增加大豆光合产物的积累,减少光合产物消耗,促进大豆叶、茎干物重的提高。李司童等<sup>[51]</sup>研究指出,生物炭(0 t/hm<sup>2</sup>、0.75 t/hm<sup>2</sup>、1.5 t/hm<sup>2</sup>)和菜籽饼(0 kg/hm<sup>2</sup>、750 kg/hm<sup>2</sup>、1 500 kg/hm<sup>2</sup>)配施能够提高烤烟的株高,并且发现施加菜籽饼能显著提高上、中部烟叶面积,在同一生物炭水平下,烤烟叶面积随菜籽饼用量的增加而增加。吕贝贝等<sup>[52]</sup>通过玉米盆栽试验发现,与不施生物炭和化肥以及单施生物炭(1.25 g/kg、5 g/kg、20 g/kg)、单施化肥(0.27 g/kg)处理相比,生物炭(1.25 g/kg、5 g/kg、20 g/kg)与化肥(0.27 g/kg)配施处理有效提高了玉米的总根长和根表面积,促进了玉米根系的生长发育。陈婧婷等<sup>[53]</sup>在对生物炭与氮肥配施对盐碱胁迫下甜菜生长的研究中发现,盐碱胁迫严重影响了甜菜种子的出苗率,但在添加了生物炭(30 g/kg)之后,甜菜种子出苗率却有所提高,同时发现添加生物炭条件下,减少氮肥用量

(减少氮肥用量的梯度为10%、20%、30%、40%)对甜菜种子的出苗率无显著影响。刘领等<sup>[54]</sup>通过盆栽试验研究发现,与常规施氮量(0.2 g/kg)相比,在常规施氮量条件下施用生物炭(7.2 g/kg)可显著提高叶片中叶绿素的总量和类胡萝卜素的含量,增强烟株的根系活力,并且在添加生物炭的情况之下,减少10%~20%氮肥施用量并没有显著影响烤烟叶片的叶绿素总量、类胡萝卜素含量、净光合速率等,反而更有利于提高烟株根系活力和根冠比。

由此可见,生物炭和肥料配施能够很好的促进作物的生长发育,提高作物的出苗率、光合速率、叶绿素含量等,且生物炭配施肥料对作物的生长发育的影响优于单施生物炭或单施肥料。同时,在生物炭配施肥料时,适当的减少肥料的施用量对作物的生长发育并无显著的影响,有时反而会促进作物的生长发育。

### 2.2 生物炭和肥料配施对作物产量的影响

生物炭和肥料配施能够改善土壤的内部结构,提高土壤养分含量,促进微生物的繁殖,为作物生长提供良好的土壤环境,从而达到提高作物产量的效果<sup>[55-57]</sup>。从表2可以看出,生物炭和肥料配施能够促进小麦、玉米、红枣、苹果等作物的增产。但生物炭对作物的增产效果也受到土壤类型的影响。代快等<sup>[64]</sup>研究发现,在紫色土上施加生物炭烤烟产量增加了24.4%~55.6%,而在黄红壤土上施加生物炭烤烟产量降低了18.9%~37.9%。也有研究表明生物炭对作物产量的增产效果具有累积性。Major等<sup>[63]</sup>在土壤中施加0 t/hm<sup>2</sup>、8 t/hm<sup>2</sup>、20 t/hm<sup>2</sup>的生物炭后发现,第一年玉米产量无显著提高,但施加20 t/hm<sup>2</sup>生物炭处理第二至四年玉米产量较未施加生物炭处理分别增加了28%、30%、140%。

生物炭配施肥料对作物产量的影响与生物炭添加量之间也有着密切联系。张爱平等<sup>[36]</sup>通过大田试验发现,在施氮量为300 kg/hm<sup>2</sup>情况下,水稻籽粒产量随生物炭添加量(4.5 t/hm<sup>2</sup>、6.75 t/hm<sup>2</sup>、9 t/hm<sup>2</sup>)的增加而增加,在不施氮情况下,生物炭的添加对水稻籽粒产量没有显著影响。也有研究指出并不是生物炭添加量越高对作物的增产效果就越好。张娜等<sup>[65]</sup>研究表明,不同量生物炭(0 t/hm<sup>2</sup>、1 t/hm<sup>2</sup>、5 t/hm<sup>2</sup>、10 t/hm<sup>2</sup>)配施化肥均增加了玉米产量,其中1 t/hm<sup>2</sup>生物炭配施化肥玉米产量增幅最大,较未添加生物炭处理产量提高了8.8%。宋大利等<sup>[66]</sup>研究指出,氮肥和生物炭对小麦和玉米产量都有着显著影响。在同一生物炭用量下,小麦和玉

米产量随着施氮量的增加而先增后降,在同一施氮水平下,小麦和玉米产量随着生物炭用量的增加同

样先增后降。

表 2 生物炭和肥料配施对作物产量的影响

生物炭/(t·hm <sup>-2</sup> )	肥料/(kg·hm <sup>-2</sup> )	作物+土壤类型	产量/%	参考文献
0.000,10.000,20.000,30.000	N(0,300,400)	红枣+砂壤性潮土	0.3~28.5 ↑(与空白对照相比)	[58]
0.000,20.000,40.000	N(0,300)	玉米+冲积土	8.1~10.2 ↑(与空白对照相比)	[59]
2.625,7.875,15.750	N(102),P(169),K(66)	大豆+黑土	4.8~12.1 ↑(与单施化肥相比)	[60]
0.000,2.700,5.400	生物有机肥(0,1200,2250)	藜蒿+黏壤土	7.9~16.6 ↑(与空白对照相比)	[61]
0.000,20.000	甘蔗渣有机肥(0,25000)	苹果+垆土	20.4~43.3 ↑(与空白对照相比)	[62]
0.000,8.000,20.000		玉米+氧化土	第一年无显著提高 第二年、第三年、第四年逐年递增	[63]
0.000,0.825,3.300, 5.775,9.075		烤烟+紫色土、 黄红壤土	24.4~55.6 ↑(紫色土,与空白对照相比) 18.9~37.9 ↓(黄红壤土,与空白对照相比)	[64]
0.000,4.500, 6.750,9.000	N(0,300)	水稻+灌淤土	15.3~44.9 ↑(施氮量 300 kg/hm <sup>2</sup> ,与 N300C0 相比) 没有显著影响(施氮量 0 kg/hm <sup>2</sup> ,与 N0C0 相比)	[36]
0.000,1.000,5.000,10.000	N(300),P(375)	玉米+壤土	7.1~8.8 ↑(与单施化肥相比)	[65]
0.000,7.500,22.500	N(0,150,225,300)	小麦、玉米+石灰性潮土	41.4~173.8 ↑(小麦,与空白对照相比) 38.2~97.7 ↑(玉米,与空白对照相比)	[66]

总体来看,生物炭与肥料配施能够促进作物的增产,生物炭与肥料配施对作物的增产效果与土壤类型、生物炭添加量等因素有关,生物炭与肥料配施对作物产量的促进作用与生物炭施用量并不一定呈正相关关系。目前的研究结果对于适宜的生物炭添加量并无定论,还需进一步明确作物产量对生物炭添加以及其与肥料配施的响应机理,才能够在农业生产的过程实现肥料高效利用,从而在更为经济有效的前提下促进作物的生长发育和产量的提升。

### 2.3 生物炭和肥料配施对作物品质的影响

随着社会的进步和生活水平的不断提高,在农业生产过程当中不仅仅要追求作物产量的提高,对作物品质的要求也越来越高。了解生物炭配施肥料对农产品品质的影响,有助于实现农业过程中的增产提质的目标。

部分研究发现,生物炭和化肥、菜籽饼、有机菌肥配施均能提高烤烟叶总糖和还原糖的含量<sup>[67-69]</sup>。袁晶晶等<sup>[70]</sup>在对生物炭与氮肥配施对华北平原枣区作物品质的影响研究中指出,生物炭(0 t/hm<sup>2</sup>、2.5 t/hm<sup>2</sup>、5 t/hm<sup>2</sup>、10 t/hm<sup>2</sup>)和氮肥(300 mg/kg、450 mg/kg、600 mg/kg)配施总体上提高了红枣中维生素 C、可溶性固形物的含量,降低了有机酸的含量。姜天华等<sup>[71]</sup>利用田间小区试验发现,单施氮肥(400 kg/hm<sup>2</sup>、600 kg/hm<sup>2</sup>)或生物炭(10 t/hm<sup>2</sup>、20 t/hm<sup>2</sup>)均能提高牡丹籽粒中蛋白氮、总氨基酸和脂肪酸的含量,且生物炭(10 t/hm<sup>2</sup>、20 t/hm<sup>2</sup>)与氮肥(400 kg/hm<sup>2</sup>、600 kg/hm<sup>2</sup>)配施对于牡丹籽粒中蛋

白氮、总氨基酸和脂肪酸的含量提升效果更为显著。

易洪海等<sup>[61]</sup>研究指出,生物炭(2.7 t/hm<sup>2</sup>、5.4 t/hm<sup>2</sup>)配施生物有机肥(1.2 t/hm<sup>2</sup>、2.25 t/hm<sup>2</sup>)提高了藜蒿可溶性糖含量,与不施炭不施肥处理相比,可溶性糖含量增加了 1.86%~3.65%。郑孟菲等<sup>[72]</sup>研究发现,与常规施氮处理(0.25 g/kg)相比,生物炭(4%)与 60% 氮肥(0.15 g/kg)配施处理小白菜可溶性蛋白含量增加了 54.58%。赵长江等<sup>[73]</sup>研究发现,化肥中添加少量至中量生物炭(67 g/kg~167 g/kg)的处理生菜维生素 C 含量均明显高于单施化肥(13 g/kg)和不施肥的对照,其中 8 g/kg 化肥配施 133 g/kg 生物炭处理的生菜维生素 C 含量最高,分别是不施炭不施肥、单施化肥(13 g/kg)、单施生物炭(333 g/kg)处理的 3.42、2.88、2.91 倍。

可溶性蛋白、可溶性糖、维生素 C 等都是衡量作物品质的重要指标,除此之外,硝酸盐含量也是衡量农产品品质的一个重要指标,硝酸盐对人体的健康存在一定的危害,所以农产品中硝酸盐含量不宜过高,尤其是部分蔬菜作物。

廖上强等<sup>[74]</sup>以田间小区试验研究了用熔融高压、水溶浸泡、直接混合三种不同方法制备的生物炭基尿素对芹菜品质的影响,试验中发现三种生物炭基尿素中,尿素与生物炭直接混合(含氮量为 24.67%)处理芹菜硝酸盐含量最高,熔融高压制备的生物炭基尿素(含氮量为 22.17%)和水溶浸泡制备的生物炭基尿素(含氮量为 24.49%)处理芹菜硝酸盐含量较低。王浩等<sup>[75]</sup>通过盆栽种植高粱发现,

生物炭和氮肥对于叶片硝酸盐含量均有影响,叶片硝酸盐含量随氮肥用量的增加而增加,随生物炭用量增加而降低。

总体来讲,生物炭与肥料配施能够提高作物中可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 等物质的含量,并在一定程度上减少有机酸、硝酸盐的含量,提高农产品品质。但目前的研究多集中于少数的经济作物,对于粮食作物品质的影响却不多见,例如小麦作为我国的主要粮食作物,其品质除受到品种和遗传的影响外,也会受到根区水土环境和施肥等的影响,而生物炭施加对其品质的影响并未见报道。因此,在今后的研究中,应深入开展生物炭对粮食作物增产提质的研究,并深入揭示作物品质对生物炭与肥料配施的响应机制。

### 3 总结与展望

生物炭对土壤理化性质、作物生长、产量以及品质都有着一定的影响,因其较大的比表面积和吸附性,被广泛用于农业生产。综述已有的研究成果发现,生物炭与肥料配施能够改善土壤质地和孔隙结构,适量的生物炭与肥料配施可提高根系层土壤持水特性,并促进作物对水分和肥料的吸收利用,从而促进作物生长发育,获得较高的产量和品质。生物炭和肥料配施对土壤理化性质和作物生长发育的影响与土壤类型、作物种类、生物炭和肥料添加量等因素密切相关,在不同类型的土壤上针对作物种类添加适量的生物炭和肥料能够有效改善土壤理化性质,促进作物的生长发育。生物炭和肥料配施对土壤理化性质的改善及作物生长的促进效果往往优于单施生物炭或肥料,且肥料适当减量所产生的影响并不大。基于已有的研究成果,今后应在以下几个方面加强研究:

(1) 由于生物炭性质、土壤类型、作物种类等因素的不同,生物炭和肥料配施对土壤理化性质的改善及作物生长的促进效果也不同。因此,今后应积极开展根据不同土壤类型和不同作物种类选择适宜生物炭的研究,从而使生物炭充分发挥其功效。

(2) 由于生物炭和肥料的施用量及其配施比例的不同,导致生物炭和肥料配施对作物生长发育、产量品质以及肥料利用率的影响存在一定的差异。因此,应进一步研究生物炭配施肥料对作物生长发育、产量品质的影响机制和生物炭添加对土壤养分释放及转化的影响机制,探索生物炭和肥料适宜的施用量及配施比例,以实现增产、节肥且环保的目的。

(3) 目前关于生物炭与肥料配施对作物品质影响的研究大多集中在蔬菜等经济作物,鲜有关于粮食作物的研究。因此,在今后的研究中应扩大对于农产品品质研究的范围,深入展开对粮食作物品质的研究。

#### 参考文献:

- [1] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. *Org Geo Chem*, 1998, 29(4): 811-819.
- [2] Gerard C, Zofia K, Stavros K, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(13): 3632-3640.
- [3] Karaosmanoglu, Isigigur-Ergundenler, Sever A. Biochar from the Straw - Stalk of Rapeseed Plant[J]. *Energy & Fuels*, 2000, 14(2): 336-339.
- [4] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal, and mineral fertilizer on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil[J]. *Plant Soil*, 2007, 291: 275-290.
- [5] 杨小彤,冉志芳,李 瑞,等. 生物炭在农业及中药材栽培中的应用研究进展[J/OL]. *中国中药杂志*: 1-7 [2021-03-25]. <https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20210123.107>.
- [6] 邵礼阳,林威鹏,张凤姬,等. 生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(1): 35-44.
- [7] 王 鑫. 土壤肥料在农业生产中的问题与对策研究[J]. *种子科技*, 2019, 37(7): 2.
- [8] 徐晓侠. 我国农作物施肥存在的问题及对策[J]. *农业开发与装备*, 2020(7): 72-74.
- [9] 张 越. 土壤肥料使用中存在的问题及其解决对策[J]. *农村实用技术*, 2020(3): 64-65.
- [10] 张 悦. 肥料应用中存在的问题及建议[J]. *肥料与健康*, 2020, 47(6): 4-9.
- [11] 韩 芳. 从农业可持续发展看土壤肥料存在的问题及对策[J]. *北京农业*, 2014(3): 230.
- [12] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 436-442.
- [13] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *The ecological Society of America*, 2007, 5(7): 381-387.
- [14] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate - nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 255-257.
- [15] 尚 杰,耿增超,赵 军,等. 生物炭对壤土水热特性

- 及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [16] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1141-1147.
- [17] 王 鹏. 生物炭与有机肥不同配比对设施黄瓜生长及根际环境影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [18] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar[J]. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, 2009, 3(5): 547-562.
- [19] 吴嘉楠. 氮肥与生物炭配施对烤烟氮素利用和植烟土壤特性的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [20] 孟繁昊, 于晓芳, 王志刚, 等. 生物炭配施氮肥对土壤物理性质及春玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 142-150.
- [21] 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.
- [22] 梁利宝, 冯鹏艳. 生物炭与有机肥、无机肥配施对采煤塌陷区复垦土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 305-308.
- [23] 燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(9): 303-307.
- [24] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35: 219-230.
- [25] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 283-288.
- [26] 王 湛, 李银坤, 王利春, 等. 生物炭配施有机肥对菜田土壤水分及水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(12): 771-779.
- [27] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
- [28] 钱嘉文, 宿贤超, 徐 丹, 等. 生物炭对土壤理化性质及作物生长的影响[J]. 现代农业, 2014(1): 15-16.
- [29] 侯晓娜. 生物炭与有机物料配施对砂姜黑土团聚体理化特征的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [30] 杨劲峰, 江 彤, 韩晓日, 等. 连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 68-73.
- [31] 郭 茹, 洪坚平, 沈江龙. 蚯蚓粪生物炭配施对铅污染土壤养分和生菜生长的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(8): 23-28.
- [32] 胡 茜, 赵 远, 张玉虎, 等. 生物炭配施化肥对稻田土壤有效氮素以及水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 108-112.
- [33] 樊晓东, 孟会生. 有机肥和化肥配施生物炭对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(11): 1960-1964.
- [34] 徐绮雯, 马淑敏, 朱 波, 等. 生物炭与化肥配施对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(5): 121-131.
- [35] 王智慧, 唐春双, 赵长江, 等. 生物炭与肥料配施对土壤养分及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 146-151, 159.
- [36] 张爱平, 刘汝亮, 高 霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1352-1360.
- [37] 乔志刚, 陈 琳, 李恋卿, 等. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5): 175-180.
- [38] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [39] Zwieten V L, Kimber S, Morris S, et al. Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [40] 尹秀玲, 张 璐, 贾 丽, 等. 玉米秸秆生物炭对暗棕壤性质和氮磷吸附特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(4): 439-445.
- [41] 索桂芳, 吕豪豪, 汪玉瑛, 等. 不同生物炭对氮的吸附性能[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1193-1202.
- [42] 王思源, 申 健, 李盟军, 等. 不同改性生物炭功能结构特征及其对铵氮吸附的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 1037-1045.
- [43] Sika M P, Hardie A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 113-119.
- [44] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 333-338.
- [45] 杨 放, 李心清, 刑 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.
- [46] 郑云珠, 田晓飞, 翟 胜, 等. 小麦秸秆生物炭对冬小麦生长及土壤水分的影响[J]. 江苏农业科学, 2020,

- 48(23):84-88.
- [47] Zhang K, Wang Y F, Mao J F, et al. Effects of biochar nanoparticles on seed germination and seedling growth [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256:113409.
- [48] Akhtar S S, Li G T, Andersen M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138: 37.
- [49] 胡 剑,孟维忠. 调亏灌溉和施用生物炭对大豆根系生长及耗水的影响[J]. *农业科技与装备*, 2020(5): 3-6.
- [50] 张伟明,管学超,黄玉威,等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. *作物学报*, 2015, 41(1): 109-122.
- [51] 李司童,毛凯伦,郑璞帆,等. 生物炭与菜籽饼配施对土壤养分及烟叶产质量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(4): 37-43.
- [52] 吕贝贝,张丽萍,张贵云,等. 生物炭配施化肥对土壤肥力及玉米生长的影响[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(1): 81-86.
- [53] 陈婧婷,武沛然,刘新宇,等. 减氮条件下生物炭对甜菜盐碱胁迫的缓解效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1492-1500.
- [54] 刘 领,王艳芳,宋久洋,等. 生物炭与氮肥减量配施对烤烟生长及土壤酶活性的影响[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(2): 62-66.
- [55] 芦海灵,郭中义,卫双玲. 有机无机肥配施对芝麻产量及土壤性质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2021, 58(3): 467-473.
- [56] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E, et al. Effect of charcoal quantity on microbial and activity in temperate soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1173-1181.
- [57] 许跃奇,阎海涛,王晓强,等. 生物炭与有机肥配施对褐土烟田微生物功能多样性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2020, 41(5): 55-59, 67.
- [58] 江 立. 生物炭与氮肥配比对土壤微生物特性和红枣产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 81-86.
- [59] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. *Plant and Soil*, 2012, 351: 469-475.
- [60] 金 梁,魏 丹,郭文义,等. 化肥单施及生物炭与化肥配施对土壤物理性质、大豆形态学指标及产量影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(2): 29-32.
- [61] 易洪海,杨 利,张 成,等. 生物炭与有机肥配合对藜蒿产量及品质的影响[J]. *北方园艺*, 2019(8): 1-6.
- [62] 李喜凤,杨小妮,罗艳君,等. 生物炭及有机肥对苹果园土壤有机碳组分及果树生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(4): 617-624.
- [63] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during four years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 117-128.
- [64] 代 快,计思贵,张立猛,等. 生物炭对云南典型植烟土壤持水性及烤烟产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(4): 44-51.
- [65] 张 娜,李 佳,刘学欢,等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1569-1574.
- [66] 宋大利,刁向银,黄绍敏,等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 369-379.
- [67] 余其昌,扈 强,金保锋,等. 生物炭与菜籽饼不同对比对土壤养分及烤烟产质量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33(3): 513-519.
- [68] 凌天孝,于晓娜,李志鹏,等. 生物炭与化肥配施对土壤特性及烤烟品质和经济性状的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1425-1432.
- [69] 李 影,李 斌,柳东阳,等. 生物炭配施菌肥对植烟土壤养分和可溶性有机碳氮光谱特征的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(6): 227-234.
- [70] 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.
- [71] 姜天华,温立柱,郭芸琿,等. 生物炭与氮肥配施对牡丹叶片氮素营养和籽粒品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2939-2946.
- [72] 郑孟菲,程利峰,胡新喜,等. 生物炭与不同用量氮肥配施对小白菜生长和品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2019, 32(4): 30-34.
- [73] 赵长江,鞠世杰,贝丽霞,等. 生物炭与化肥不同比例配施对生菜产量和品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2020(2): 33-37.
- [74] 廖上强,陈延华,李艳梅,等. 生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(5): 443-448.
- [75] 王 浩,焦晓燕,王劲松,等. 不同氮肥水平下生物炭对高粱苗期生长及有关生理特性的影响[J]. *华北农学报*, 2014, 29(6): 195-201.