

# 玉米秸秆生物炭用量对砂土孔隙和持水性的影响

张慧琦<sup>1,2</sup>, 李子忠<sup>1\*</sup>, 秦艳<sup>1,3</sup>

1. 中国农业大学土地与科学技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;  
3. 吉林师范大学环境科学与工程学院, 吉林 四平 136000

**摘要:** 砂土中土壤黏粒含量少, 有机质含量低, 大孔隙度较多, 土壤水分容易渗漏, 易造成水资源浪费。中国秸秆资源丰富, 利用作物秸秆生产的生物炭作为土壤改良剂, 可以改善土壤的持水特性。为探究玉米秸秆制备的生物炭施入砂土中对土壤孔隙和持水性的影响, 将玉米秸秆生物炭和供试土壤分别按照 0、1%、2%、3%、4%、6%、8%和 10%的质量比(以干质量计)均匀混合, 设置了 8 个生物炭施用量处理, 分别记为 CK、1BC、2BC、3BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC, 每个处理 3 次重复。利用比重法测定土粒密度, 离心机法测定水分特征曲线, 并计算土壤持水性和孔隙度。结果表明, 土粒密度随着生物炭用量的增加而降低, 在 10BC 处理中土粒密度降到  $2.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 相比 CK 降低了 5.6%; 在 2BC 处理中,  $\geq 50 \mu\text{m}$  的土壤通气孔隙减少,  $< 20 \mu\text{m}$  和  $20\text{--}50 \mu\text{m}$  的孔隙显著增加; 其他处理的孔隙分布与 CK 处理之间无显著差异; 土壤田间持水量、萎蔫含水量和有效含水量随生物炭用量增加而增加, 2BC、3BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC 分别使土壤田间持水量增加了 14%、26%、39%、59%、83%和 103%; 与 CK 相比, 2BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC 使土壤有效含水量分别增加了 17%、67%、100%、133%和 150%。因此, 秸秆生物炭可以提高砂土持水能力, 提高砂土持水孔隙分布, 减少大孔隙分布, 且当生物炭施用量 $\geq 2\%$ 才有显著效果; 同时也要考虑大量施用生物炭的经济投入和回报。施用秸秆生物炭是改良砂土持水性的一种良好的措施。

**关键词:** 生物炭; 砂土; 孔隙分布; 有效水; 离心机法

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.06.024

**中图分类号:** S157.4; X712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2022) 06-1272-06

**引用格式:** 张慧琦, 李子忠, 秦艳, 2022. 玉米秸秆生物炭用量对砂土孔隙和持水性的影响[J]. 生态环境学报, 31(6): 1272-1277.  
ZHANG Huiqi, LI Zizhong, QI Yan, 2022. Effects of corn straw-based biochar amount on pores and water holding capacity of sandy soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 31(6): 1272-1277.

截至 2014 年, 中国沙化土地总面积  $1.72 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土总面积的 17.93% (国家林业和草原局等, 2015)。同时砂土在中国农业生产中也占有重要的地位。近些年全球气候变化剧烈, 极端天气状况(长期干旱、水涝等)增加 (Trenberth et al., 2015; Herawati et al., 2021), 给全球的农业生产都带来了不稳定性 (Lesk et al., 2016), 尤其是砂土区。这主要是因为砂土中有机质和黏粒含量少, 土壤大孔隙较多, 土壤中的水分容易向下渗漏 (Herawati et al., 2021), 使得农业生产在不同的年季之间有很大的变异性 (Song et al., 2022)。另外, 中国每年都有大量的秸秆资源亟待处理利用 (石祖梁, 2018)。秸秆、有机肥等传统有机物质的施用, 会因为砂质土的好氧环境导致有机物质的矿化速度加快, 不利于有机质的积累, 并且容易造成农田土壤温室气体排

放增加, 作物对水分和养分的利用率下降 (谢立勇等, 2011; 孙丽惠等, 2020)。

生物炭有着很大的比表面积, 也有着良好的孔隙分布, 这使得生物炭具有很高的保水能力 (Wang et al., 2019)。在土壤中施用生物炭可以有效地改善土壤物理性能, 显著提高土壤的水分含量 (房彬等, 2014), 增强土壤对水分的保持能力, 促进植物生长 (Jeffery et al., 2011; Blanco-Canqui, 2017; Edeh et al., 2020), 尤其在砂土中 (Zhang et al., 2021)。生物炭大量施用后, 凭借其巨大的比表面积以及丰富的有机质含量, 可以提高土壤对水分的保持能力 (Solaiman et al., 2012), 使土壤的田间持水量增加 11% (Karhu et al., 2011)。Novak et al. (2009) 的研究也表明, 与不添加生物炭的处理相比, 使用柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 制成的生物炭能够使壤

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500802); 国家自然科学基金区域 (吉林) 创新发展联合基金项目 (U19A2035); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD05B01-5)

**作者简介:** 张慧琦 (1991 生), 男, 博士, 研究方向为土地保护与可持续利用。E-mail: zhanghuiqi@caas.cn; zhq\_cau@foxmail.com

\*通信作者, 李子忠, 教授。E-mail: zizhong@cau.edu.cn

**收稿日期:** 2021-12-27

质砂土的持水量从 6.7% 增加到 15.9%。在壤质砂土上添加生物炭提高土壤持水能力，也会提高土壤中作物的水分有效性 (Basso et al., 2013)。不同孔隙结构的生物炭对土壤物理和水力特性的影响是不同的 (Bikbulatova et al., 2018; Yang et al., 2021)。

当前多数研究表明，生物炭施用能够提高土壤的持水性，但是以往关于生物炭对土壤持水性以及有效水含量的研究结果并不一致。尤其是不同的生物炭用量和不同的土壤之间表现差异很大。生物炭对不同类型的土壤中的(砂土、粉砂壤土和黏粒土)土壤有效水的影响并不一致，不同的土壤含水量的计算方式不同结果也不太相同；当以体积含水量作为衡量标准时，生物炭能够少量增加砂土中的有效水含量，对其他土壤的有效水影响并不明显 (Zhang et al., 2021)。闫辰啸等 (2021) 的研究表明，通过测定土壤水分特征曲线中的田间持水量 (FHC) 和萎蔫系数 (WP) 发现，土壤有效含水量会随着生物炭添加量的增加而增加。这与 Cornelissen et al (2013) 在 5 种土壤中添加玉米芯制成的生物炭能够显著提高作物可利用的有效水的结论一致，但与 Burrell et al. (2016) 在砂土中添加木质生物炭后没有显著改变土壤有效水含量的结论不同。总体而言，生物炭能够改善土壤的水力特性，但其改良效果很大程度上取决于生物炭的类型，以及生物炭的用量和土壤质地 (Edeh et al., 2020; Razzaghi et al., 2020)。这主要是由于制备条件和原材料的不同，所形成的生物炭的含碳量、组成成分和芳香化程度都会有所不同，从而导致生成的生物炭的理化特性也有所差异 (Mukome et al., 2013)。有研究表明在 450—550 °C 下产生的生物炭具有较高的大、中和小孔隙分析，是生物炭作为土壤改良剂增加保水能力的最佳孔隙特性 (Yang et al., 2021)。

本实验根据目前中国关于玉米秸秆还田利用的现状和发展，探究不同用量的玉米秸秆生物炭在砂土中的应用效果。利用玉米秸秆在 500 °C 下裂解产生的生物炭，通过室内比重瓶法和离心机法测定生物炭不同的添加量对土粒密度、有效水含量和孔隙大小的影响规律，分析玉米秸秆生物炭的施用对砂土持水性等的影响，为应用生物炭改良砂土提供可靠的数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料和处理

供试土壤为砂土 (土壤颗粒组成砂粒、粉粒和黏粒的质量分数分别为 96.26%、2.44% 和 1.30%)，取自吉林省四平市梨树县付家街村 (43.3°N, 124.4°E, 海拔 196 m, 深度 20—40 cm)。土壤容重

为 1.65 g·cm<sup>-3</sup>，无盐酸反应，田间持水量为 0.188 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>，萎蔫含水量为 0.087 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>。所有土壤经过风干处理过 2 mm 筛。将大约 40 kg 的风干土用去离子水调节土壤含水率到 75% 田间持水量 (FHC)，25 °C 下培养 7 d。玉米秸秆取自中国农业大学上庄实验站，秸秆风干磨碎过 2 mm 筛。将粉碎后的玉米秸秆在 500 °C 条件下制备生物炭。各试验材料的性质如表 1。

表 1 砂土、生物炭、玉米秸秆的化学性质  
Table 1 Chemical analysis of sandy soil, biochar and maize straw

材料 Materials	$w_{(OM)}/$ (g·kg <sup>-1</sup> )	$w_{(TN)}/$ (g·kg <sup>-1</sup> )	$w_{(TC)}/$ $w_{(TN)}$	$w_{(AP)}/$ (mg·kg <sup>-1</sup> )	$w_{(AK)}/$ (mg·kg <sup>-1</sup> )
砂土 S andy soil	1.8	0.2	10.09	0.82	28.80
生物炭 Biochar	660.5	27.4	24.07	6 532.82	29 543.92
玉米秸秆 Maize straw	431.5	27.8	15.51	3 531.86	12 027.53

将玉米秸秆生物炭和供试土壤 (干质量) 按 0、1%、2%、3%、4%、6%、8% 和 10% 的质量比均匀混合，分别记为 CK、1BC、2BC、3BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC，每个处理 3 个重复。

### 1.2 测定项目与方法

土壤水分特征曲线采用离心机法 (尚慢廷等, 2009) 测定，并确定试验土壤的田间持水量、萎蔫系数。根据设计压力设定离心机转速，本试验设定的转速  $n$  分别 500、1 000、1 500、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、8 000、9 000 r·min<sup>-1</sup>。离心过程完成后，将土样烘干称质量，并计算各个转速下的土壤质量含水量  $\theta_g$ 。

应用土壤水分特征曲线 van Genuchten (1980) 将各转速下  $H'$  和  $\theta_g$  进行拟合得到 pF 曲线，根据赵雅琼 (2015) 综合其他模型分析得知，van Genuchten 模型是拟合水分特征曲线最理想的模型。

van Genuchten (1980) 水分特征曲线拟合模型：

$$\tilde{\theta}(h)=[1+\alpha(-h)^n]^m \quad (1)$$

$$\tilde{\theta}=(\theta-\theta_r)/(\theta_s-\theta_r) \quad (2)$$

式中：

$\theta$ ——土壤体积含水量 (cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>)；

$\theta_r$ ——土壤残余含水量 (cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>)；

$\theta_s$ ——土壤饱和含水量 (cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>)；

$h$ ——是土壤基质势；

$\alpha$ ——土壤进气值参数；

$m$ 、 $n$ ——曲线形状参数； $m=1-1/n$ 。

再根据下式计算相应吸力下的当量孔径，从而得到土壤孔隙分布状况。土壤孔隙的分配采用的是 Taboada 的方法 (Taboada et al., 1985)，将土壤孔隙分为  $\geq 50 \mu\text{m}$ 、50—20  $\mu\text{m}$  和  $< 20 \mu\text{m}$  3 部分。

$$D = \frac{3}{S} \quad (3)$$

式中:

$D$ ——相应吸力下的当量孔径 (mm);

$S$ ——土壤吸力 (hPa)。

利用压力锅调节压力 0.3 bar 和 15 bar, 分别测定土壤样品的田间持水量和萎蔫含水量, 二者之差即为各处理土壤的有效含水量。

土粒密度采用比重瓶称质量法测定。计算公式如下:

$$d = \frac{d_w(m_s - m_a)}{(m_s - m_a) - (m_{sw} - m_w)} \quad (4)$$

其中:

$d$ ——真密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );

$d_w$ ——该温度下水的密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );

$m_s$ ——装入土壤的比重瓶的质量 (g);

$m_a$ ——比重瓶的质量 (g);

$m_{sw}$ ——装入土壤和水的比重瓶的质量 (g);

$m_w$ ——装入水的比重瓶的质量 (g)。

### 1.3 统计分析方法

所有测量指标数据应用 SAS (9.2) 软件进行数据的统计方差分析 (ANOVA), 并用最小显著法 LSD 进行各处理的多重比较 ( $P < 0.05$ )。应用 Microsoft Excel 2019 整理数据, Origin (2021) 软件绘图。

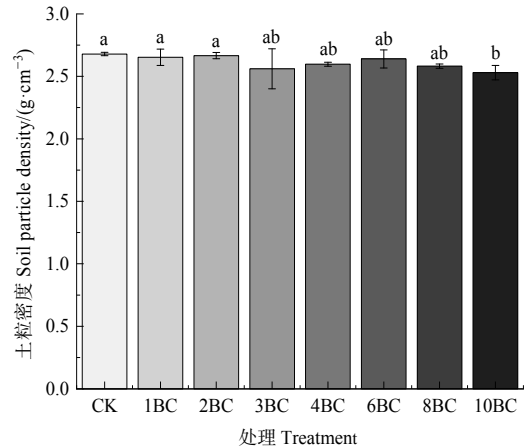
## 2 结果与分析

### 2.1 土粒密度

从图 1 可知, 随着生物炭添加量的增加, 土粒密度呈下降趋势。1BC 和 2BC 相对 CK 处理对土粒密度无显著影响, 3BC、4BC、6BC、8BC 使土粒密度有所降低但和 CK 处理相比也没有显著差异; 只有大量施用生物炭时, 10BC 处理相对于 CK、1BC、2BC 处理能使土粒密度显著降低, 在 10BC 处理中土粒密度降到  $2.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 降低了 5.6%。

### 2.2 土壤持水性

添加生物炭能够使土壤萎蔫含水量 (图 2a)、田间持水量 (图 2b) 和有效含水量 (图 2c) 都显著增加。与 CK 相比, 1BC、2BC、3BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC 分别使土壤上能够萎蔫含水量增加了 11%、17%、34%、31%、41%、56% 和 73%。2BC、3BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC 分别使土壤田间持水量增加了 14%、26%、39%、59%、83% 和 103%。2BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC 使土壤有效含水量分别增加了 17%、67%、100%、133% 和 150%。与 CK 相比, 处理 1BC 对田间持水量和有效水含量都没有显著影响。根据表 2 中的水分特征曲线参数也



CK、1BC、2BC、3BC、4BC、6BC、8BC 和 10BC 分别表示玉米秸秆生物炭和供试土壤 (干重) 按 0%、1%、2%、3%、4%、6%、8% 和 10% 的比例均匀混合, 每个处理重复 3 次。不同的小写字母表示不同处理之间有显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同

CK, 1BC, 2BC, 3BC, 4BC, 6BC, 8BC and 10BC represent the mass fraction (dry weight,  $W/W$ ) mixing of corn straw-based biochar and tested soil at the ratios of 0, 1%, 2%, 3%, 4%, 6%, 8% and 10%, respectively. The same below

图 1 生物炭用量对土粒密度的影响

Figure 1 Effect of biochar amount on soil particle density

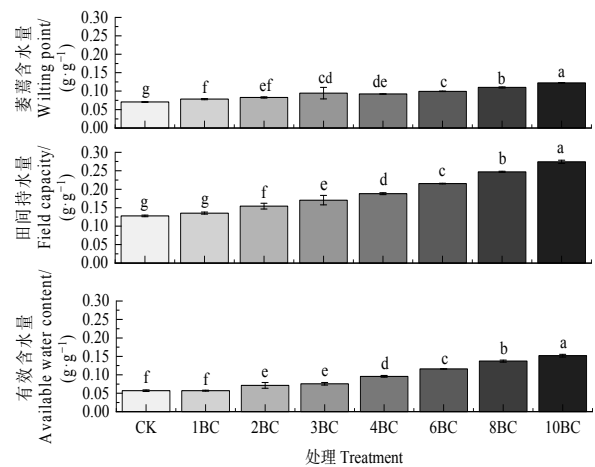


图 2 生物炭用量对土壤持水性的影响

Figure 2 Effect of biochar dosage on water-holding capacity of soil

表 2 土壤水分特征曲线参数

Table 2 Simulation parameters of pF curve

处理 Treatment	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\alpha$	$n$	$r^2$
CK	0.036	0.400c	0.112 3	1.198 4	0.983 8
2BC	0.036	0.380d	0.110 8	1.162 6	0.994 4
6BC	0.036	0.470b	0.176 1	1.181 1	0.992 5
10BC	0.036	0.500a	0.123 3	1.192 0	0.995 0

$\theta_r$ : 土壤残余含水量 ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $\theta_s$ : 土壤饱和含水量 ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$ : 土壤进气值参数;  $n$ : 曲线形状参数; 每个处理重复 3 次。

$\theta_r$ : Soil residual water content ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $\theta_s$ : Soil saturated water content ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$ : parameters of soil intake value;  $n$ : curve shape parameters; Each treatment was repeated three times

可以看出,除了 2BC 的饱和含水量(质量含水量)显著小于 CK 外,6BC 和 10BC 都可以显著提高土壤的饱和含水量。由此可见,随着生物炭用量的增加,土壤萎蔫含水量、田间持水量和饱和含水量都会显著增加,且田间持水量的增加幅度大于萎蔫含水量的增加幅度,所以土壤有效含水量能够显著增加。

### 2.3 土壤孔隙状况

根据不同处理对土壤有效水含量的影响效果,挑选处理 CK、2BC、6BC 和 10BC 经离心机测定基质势和含水量,用 van Genuchten 模型模拟得到的水分特征曲线的参数见表 2,计算的孔隙状况见表 3。 $>50\ \mu\text{m}$  的孔隙主要用于土壤通气性和快速的重力排水, $>100\ \mu\text{m}$  的孔隙是作物根系生长的主要区域。本试验是室内试验测定的土样均为扰动土,所以将土壤孔隙分为 $\geq 50\ \mu\text{m}$ 、 $50\text{—}20\ \mu\text{m}$  和 $<20\ \mu\text{m}$ 。由表 3 可知只有 2BC 处理相较于 CK 处理, $\geq 50\ \mu\text{m}$  的土壤孔隙显著减少,并能够显著提高  $50\text{—}20\ \mu\text{m}$  和 $<20\ \mu\text{m}$  的孔隙。而其他处理对土壤孔隙分布影响不显著。

表 3 土壤孔隙分布占比

Table 3 Percentage of soil pore size distribution

处理 Treatment	$\geq 50\ \mu\text{m}$	$50\text{—}20\ \mu\text{m}$	$<20\ \mu\text{m}$
CK	32% <sup>a</sup>	11% <sup>a</sup>	57% <sup>b</sup>
2BC	28% <sup>b</sup>	9% <sup>a</sup>	63% <sup>a</sup>
6BC	35% <sup>a</sup>	10% <sup>a</sup>	55% <sup>b</sup>
10BC	33% <sup>a</sup>	10% <sup>a</sup>	57% <sup>b</sup>

## 3 讨论

生物炭作为一种改良剂,其应用主要集中在土壤理化性质改良和对土壤中的重金属等污染物的去除上(Yuan et al., 2015; Burrell et al., 2016; He et al., 2019)。土壤保水能力受土壤质地结构和土壤有机质含量的影响,生物炭施入土壤后能够改变土壤孔隙度、团聚程度和较强的吸附能力,最终影响土壤的保水能力(Baiamonte et al., 2019; Li et al., 2022),影响程度取决于土壤比表面积的相对变化。本研究结果表明,2BC 处理相对于 CK 处理, $\geq 50\ \mu\text{m}$  的大孔隙显著减少,同时能够显著提高  $50\text{—}20\ \mu\text{m}$  和 $<20\ \mu\text{m}$  的孔隙。同时相对于 CK 处理,添加玉米秸秆生物炭处理对砂土的有效含水量有显著提高,仅处理 1BC 和 CK 之间没有显著差异。这和闫辰啸等(2021)的研究结果类似,生物炭是一种拥有巨大比表面积与电荷密度的多孔结构有机物,与风砂土结合后改善了土壤中的团粒结构,极大地增强了土壤颗粒对水分子的吸附能力,在颗粒间形成了较厚的水膜,使土壤孔隙中更多的重力水转变为毛管水及束缚水,从而增强了土壤整体的持水。而 Wang et al. (2019) 的研究表明,在长期的田间

试验中,粘土会受到土壤本身颗粒固持的影响而对土壤有效水含量没有显著影响,但是和试验室内的培养结果具有一定的相似性,对土壤的田间持水量和有效含水量都有一定提高作用。相反,Obour et al. (2020) 在长达 36 个月的盆栽试验中,发现不同颗粒大小( $<2\ \text{mm}$  和  $2\text{—}4\ \text{mm}$ ) 的生物炭对热带砂质粘土的植物有效水分没有产生影响。而本试验的研究结果表明,施用生物炭能够提高砂土的保水性,这和 Li et al. (2021) 的研究结果类似,施用生物炭确实可以改善土壤保水性能,虽不能完全缓解干旱胁迫对植物的影响,但可以在一定程度上减少灌溉水量。

施入生物炭能够直接影响作物吸收利用的水,土壤保水性的表现主要是集中在 $>50\ \mu\text{m}$  范围的孔隙,因为这些微米孔隙储存的水分植物更容易获得。由于生物炭具有较高的内表面积和多孔结构能够改善土壤孔隙结构和蓄水能力,从而具备更好的保水能力(Baiamonte et al., 2019; Wang et al., 2019)。这和房彬等(2014)的研究结果类似,在旱作农田中施用生物炭可以提高土壤的持水性,且随着施用量的增加土壤年平均含水量相比对照处理的增幅越高。同样地,闫辰啸等(2021)的定量研究发现,土壤水分有效性等参数随着生物炭施用量的增加而增大,且在 12% 和 16% 的生物炭施用比例下,土壤持水特性、土壤水分常数、土壤水分有效性及土壤毛管孔隙占比均未表现出明显差异,只在土壤饱和和导水率中表现出随生物炭含量增加而明显下降的现象。生物炭的应用在改良土壤、提高作物有效水含量时,会通过改善生物炭或土壤的孔隙大小来控制有效水的增加(Yang et al., 2021)。生物炭施用量的增加有利于土壤的孔隙和土壤团聚体的形成,显著增大了土壤比表面积,从而提高土壤保水能力(Tang et al., 2013; 曾爱等, 2013)。有研究表明,与对照处理(生物炭添加量为零)相比,生物炭可以使土壤田间持水量增加 23%(Basso et al., 2013)。同样地,生物炭对土壤持水能力的影响也与土壤类型有关,刘祥宏(2013)的研究结果表明,生物炭对于壤土、黑垆土、黄绵土和砂黄土的作用效果不明显,仅对风砂土的持水能力体现出明显的提高效果,尤其生物炭施用量高的情况下对风砂土保水能力改善更加明显。Burrell et al. (2016) 发现生物炭对 3 种不同的农田土壤(黑钙土、白浆土、始成土)中的植物可利用的有效含水量有不同的结果。这和 Zhang et al. (2021) 的研究结果相似,生物炭对不同类型土壤中的(砂土、粉砂壤土和黏粒土)植物有效水的影响并不一致。因此,生物炭施用后对砂土改良的长期效果还需要进一步的研究,

这对通过施用生物炭缓解田间作物干旱胁迫和指导灌溉用水都有很重要的意义。

#### 4 结论

本试验分析不同添加量生物炭对土壤的土粒密度、孔隙分布状况、田间持水量以及萎蔫系数等的影响,结果表明,玉米秸秆生物炭的施用通过降低土壤的土粒密度和 $\geq 50 \mu\text{m}$ 的孔隙,提高了田间持水量和萎蔫含水量,且对土壤田间持水量的提高更大,进而能够提高土壤的有效含水量。当施用量 $\geq 2\%$ 时土壤有效含水量有明显提高,且随着施用量的增加,土壤有效含水量提高越大,在10%时效果最好。但是以10%的生物炭施用量应用于大田时(相当于在砂土表层0—20 cm土壤中施用 $330 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭),大量的生物炭施用会增加经济投入,因此在施用生物炭提高砂土持水性时,既要考虑生物炭的施用量 $\geq 2\%$ 时才会有明显效果,又要考虑大量施用生物炭的经济投入和回报。最优生物炭施用量需结合长期大田试验进行验证。

#### 参考文献:

- BAIAMONTE G, CRESCIMANNO G, PARRINO F, et al., 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil [J]. *Catena*, 175: 294-303.
- BASSO A S, MIGUEZ F E, LAIRD D A, 2013. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 5: 132-143.
- BIKBULATOVA S, TAHMASEBIA, ZHANG Z, et al., 2018. Understanding water retention behavior and mechanism in bio-char [J]. *Fuel Processing Technology*, 169: 101-111.
- BLANCO-CANQUI H, 2017. Biochar and soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 81: 687-711.
- BROWN R A, KERCHER A K, NGUYEN T H, et al., 2006. Production and characterization of synthetic wood chairs for use as surrogates for natural sorbents [J]. *Organic Geochemistry*, 37(3): 321-333.
- BURRELL L D, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, et al., 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties [J]. *Geoderma*, 282: 96-102.
- CORNELISSEN G, MARTINSEN V, SHITUMBANUMA V, et al., 2013. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia [J]. *Agronomy*, 3(2): 256-274.
- EDEH I G, MAŠEK O, BUSS W, 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties-New insights and future research challenges [J]. *Science of the Total Environment*, 714: 136857.
- HARVEY O R, KUO L J, ZIMMERMAN A R, et al., 2012. An index-based approach to assessing recalcitrance and soil carbon sequestration potential of engineered black carbons (Biochars) [J]. *Environmental Science and Technology*, 46(3): 1415-1421.
- HE L Z, ZHONG H, LIU G X, et al., 2019. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China [J]. *Environmental Pollution*, 252(Part A): 846-855.
- HERAWATI A, MUJIYO, SYAMSIYAH J, et al., 2021. Application of soil amendments as a strategy for water holding capacity in sandy soils [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1): 012014.
- JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, VAN DER VELDE M, et al., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1): 175-187.
- KARHU K, MATTILA T, BERGSTROM I, et al., 2011. Biochar addition to agricultural soil increased  $\text{CH}_4$  uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(1-2): 309-313.
- KEILUWEIT M, NICO P S, JOHNSON M G, et al., 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 44(4): 1247-1253.
- LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N, 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production [J]. *Nature*, 529(7584): 84-87.
- LI H, AND TAN Z, 2021. Preparation of high water-retaining biochar and its mechanism of alleviating drought stress in the soil and plant system [J]. *Biochar*, 3(9): 579-590.
- LI J S, SHAO X Q, HUANG D, et al., 2022. Short-term biochar effect on soil physicochemical and microbiological properties of a degraded alpine grassland [J]. *Pedosphere*, 32(3): 426-437.
- MUKOME F N D, ZHANG X, SILVA L C R, et al., 2013. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(9): 2196-2204.
- NOVAK J M, LIMA I, XING B, 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperature and their effects on loamy sand [J]. *Annals of Environmental Science*, 3: 195-206.
- OBOUR P B, DANSO E O, POULADI N, et al., 2020. Soil structure characteristics, functional properties and consistency limits response to corn cob biochar particle size and application rates in a 36-month pot experiment [J]. *Soil Research*, 58(5): 488-497.
- QIU Y P, ZHENG Z Z, ZHOU Z L, 2009. Effectiveness and mechanisms of dye adsorption on a straw-based biochar [J]. *Bioresource Technology*, 100(21): 5348-5351.
- RAZZAGHI F, OBOUR P B, ARTHUR E, 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis [J]. *Geoderma*, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114055.
- SOLAIMAN Z M, MURPHY D V, ABBOTT L K, 2012. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings [J]. *Plant Soil*, 353(1-2): 273-287.
- SONG Z Z, PENG Y X, LI Z Z, et al., 2022. Two irrigation events can achieve relatively high, stable corn yield and water productivity in aeolian sandy soil of Northeast China [J]. *Agricultural Water Management*, 260: 107291.
- TABOADA M A, MICUCCI F G, COSENTINO D J, et al., 1985. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina [J]. *Soil and Tillage Research*, 49: 57-63.
- TANG J C, ZHU W Y, KOOKANA R, et al., 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 116(6): 653-659.
- TRENBERTH K E, FASULLO J T, SHEPHERD T G, 2015. Attribution of climate extreme events [J]. *Nature Climate Change*, 5: 725-730.
- VAN GENUCHTEN M TH, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- WANG D Y, LI C Y, PARIKH S J, et al., 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—A multi-scale analysis [J]. *Geoderma*, 340: 185-191.
- YANG C D, AND LU S G, 2021. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops [J]. *Soil and Tillage Research*, 205: 104798.
- YANG C D, LIU J J, LU S G, 2021. Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils [J]. *Geoderma*, 397(9): 115097.
- YUAN H R, LU T, HUANG H Y, et al., 2015. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112: 284-289.
- ZHANG J, AMONETTE J E, FLURY M, 2021. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil [J].

- Soil and Tillage Research, 212: 104992.
- 房彬, 李心清, 赵斌, 等, 2014. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 23(8): 1292-1297.
- FANG B, LI X Q, ZHAO B, et al., 2014. Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 23(8): 1292-1297.
- 国家林业和草原局, 国家公园管理局, 2015. 中国荒漠化和沙化状况公报 [R/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/58/content-832363.html>. [2015-12-29](2021-12-27).
- National Forestry and Grassland Administration, National Park Administration. 2015. A bulletin of status quo of desertification and sandification in China [R/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/58/content-832363.html>. [2015-12-29] (2021-12-27).
- 刘祥宏, 2013. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D]. 北京: 中国科学院.
- LIU X H, 2013. Effects of biochar application on soil improvement on the Loess Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences.
- 尚曼廷, 冯杰, 刘佩贵, 等, 2009. SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报, 37(1): 12-16.
- SHANG M T, FENG J, LIU P G, et al., 2009. On formulas for soil suction and optimum centrifugal time by use of SWCC [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 37(1): 12-16.
- 石祖梁, 2018. 中国秸秆资源化利用现状及对策建议[J]. 世界环境 (5): 16-18.
- SHI Z L, 2018. Current situation of utilization of straw resources in China and relevant countermeasures and suggestions[J]. World Environment (5): 16-18.
- 孙丽惠, 李中强, 2020. 北方旱地农田主要温室气体排放研究进展[J]. 辽宁农业科学 (2): 52-56.
- SUN L H, AND LI Z Q, 2020. Progresses in the research on major greenhouse gas emissions in the northern dry farmland [J]. Liaoning Agricultural Sciences (2): 52-56.
- 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等, 2011. 旱地土壤温室气体排放因子及减排增汇措施分析[J]. 中国农业气象, 32(4): 481-487.
- XIE L Y, YE D D, ZHANG H, et al., 2011. Review of influence factors on greenhouse gases emission from upland soils and relevant adjustment practices [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 32(4): 481-487.
- 闫辰啸, 洪明, 秦佳豪, 等, 2021. 生物炭对和田风沙土水力特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 39(4): 21-28.
- YAN X C, HONG M, QIN J H, et al., 2021. Effects of biochar on hydraulic characteristics of aeolian sandy soil in Hetian [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 39(4): 21-28.
- 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等, 2013. 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, 32(5): 1009-1015.
- ZENG A, LIAO Y C, ZHANG J L, et al., 2013. Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manurall loessial soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 32(5): 1009-1015.
- 赵雅琼, 2015. 非饱和带土壤水分特征曲线的测定与预测[D]. 西安: 长安大学.
- ZHAO Y Q, 2015. Determination and prediction of soil water characteristic curve in unsaturated zone [D]. Xi'an: Chang'an University.

## Effects of Corn Straw-based Biochar Amount on Pores and Water Holding Capacity of Sandy Soil

ZHANG Huiqi<sup>1, 2</sup>, LI Zizhong<sup>1\*</sup>, QI Yan<sup>1, 3</sup>

1. College of Land Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, P. R. China;

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agricultural, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, P. R. China

3. College of Environmental Science and Engineering, Jilin Normal University, Jilin 136000, P. R. China

**Abstract:** Sandy soils have low clay content, low organic matter content, and high macro-porosity, which can easily lead to soil water leakage and water wastage. Straw resources are abundant in China. Biochar produced by crop straw can be used as an excellent soil conditioner to improve soil water holding capacity. To investigate the effect of biochar prepared by maize straw on soil porosity and water holding capacity, 8 biochar application treatments were set up at 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 6%, 8%, and 10% based on the mass fraction (dry mass) of the biochar and tested soil. The treatments were denoted as CK, 1BC, 2BC, 3BC, 4BC, 6BC, 8BC, and 10BC, respectively. The water characteristic curve was measured by the centrifuge method, and soil water holding capacity and porosity were calculated to investigate the effects of different amounts of biochar on soil particle density and available moisture. The results showed that the soil particle density decreased with the increase of the biochar amount. In the 10BC treatment, the soil particle density decreased to 2.53 g·cm<sup>-3</sup> and was 5.6% lower than that of the CK treatment. In the 2BC treatment, the soil aeration pores ≥50 μm decreased, and the pores <20 μm and 20–50 μm increased, compared to that in the CK treatment. There were no significant differences in pore distribution between the CK and other treatments. Soil field capacity, wilting water content, and available water content increased with the increase of the biochar amount. Compared to the CK treatment, the soil field capacities increased by 14%, 26%, 39%, 59%, 83%, and 103% in the 2BC, 3BC, 4BC, 6BC, 8BC, and 10BC treatments, respectively. The effective soil water contents increased by 17%, 67%, 100%, 133%, and 150% in the 2BC, 4BC, 6BC, 8BC, and 10BC treatments, respectively, compared to the CK treatment. Therefore, biochar of maize straw can increase the water-holding capacity of sandy soil, improve the water-holding pore distribution of sandy soil, and reduce macropore distribution of sandy soil. In addition, the application amount of biochar should be more than 2% to gain significant results. The economic investment and return of the large-scale application of biochar also need to be considered. The application of biochar of maize straw can be regarded as a good measure to improve sandy soil.

**Keywords:** biochar; sandy soil; soil pores; effective water; centrifuge method