

添加生物质炭对喀斯特地区黄壤饱和导水率的影响

屠 丹, 毛天旭

(贵州大学 林学院, 贵阳 550025)

摘 要:为探究添加生物质炭对喀斯特坡耕地黄壤饱和导水率的影响,在室内条件下测定了不同添加量(质量分数为 0,1%,2%,3%)、不同粒径(粒径大小为 $<0.25\text{ mm}$, $0.25\sim 1\text{ mm}$ 和 $>1\text{ mm}$)的玉米秸秆生物质炭(CSB)和稻壳生物质炭(RHB)添加后的土壤容重、孔隙度、持水量和饱和导水率。结果显示:添加生物质炭显著降低了土壤容重,与对照(CK)相比,添加相同含量的 CSB 和 RHB 后土壤容重分别降低了 5.13%和 4.85%,随着添加量增加,土壤容重呈减小趋势,而土壤总孔隙度和毛细孔隙度呈增大趋势。添加 CSB 和 RHB 后土壤的田间持水量(FMC)提高了 5.30%和 4.72%,毛细持水量(CWC)提高了 4.75%和 6.60%,随着添加量增加、粒径增大,土壤的 FMC 和 CWC 呈增大趋势。土壤饱和导水率的变化与生物质炭的粒径有关,添加 $<0.25\text{ mm}$ 粒径 CSB 和 RHB,土壤饱和导水率减小了 11.74%和 21.74%,添加 $>1\text{ mm}$ 粒径 CSB 和 RHB,土壤饱和导水率增加了 66.67%和 33.33%,添加 $0.25\sim 1\text{ mm}$ 粒径的生物质炭,土壤饱和导水率无明显的变化规律。本研究得出,添加生物质炭可以显著降低土壤容重,提高土壤田间持水量和毛细持水量,改善土壤的导水性能,研究结果可为生物质炭在喀斯特地区坡耕地黄壤结构改良的应用中提供理论依据。

关键词:生物质炭;黄壤;田间持水量;毛细持水量;饱和导水率

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0108-06

Effect of Biochar Addition on Saturated Hydraulic Conductivity of Yellow Soil in Karst Area

TU Dan, MAO Tianxu

(College of Forestry, Guizhou University, Guizhou 550025, China)

Abstract:In order to explore the effect of biochar addition on the saturated hydraulic conductivity of yellow soil in Karst sloping farmland, soil bulk density, porosity, water holding capacity and saturated hydraulic conductivity were determined under the treatments of the corn straw biochar (CSB) and rice husk biochar (RHB) addition with different amounts (0, 1%, 2%, 3%) and different particle sizes (0.25 mm, 0.25~1 mm, and $>1\text{ mm}$). The results showed that the addition of biochar significantly reduces the soil bulk density. Compared with the control (CK), the additions of CSB and RHB reduce the soil bulk density by 5.13% and 4.85%, respectively, the soil bulk density shows the decreasing trend with the increase of the addition, the corresponding total soil porosity and capillary porosity show the increasing trend. The field water holding capacities (FMC) of the soils with CSB and RHB addition increase by 5.30% and 4.72%, and the capillary water holding capacities (CWC) increase by 4.75% and 6.60%, respectively. With the increase of the amount of biochar and the increase in particle size, the FMC and CWC increase. The change of saturated hydraulic conductivity is related to the particle size of biochar. Compared with CK, the saturated hydraulic conductivities reduces by 11.74% and 21.74% at the CSB and RHB addition with particle size $<0.25\text{ mm}$, increase by 66.67% and 33.33% with particle size of $>1\text{ mm}$ respectively. With the addition of biochar with particle size of $0.25\sim 1\text{ mm}$, there is no obvious change in the saturated hydraulic conductivity. This study indicates that the biochar addition can significantly reduce soil bulk density, increase soil field water holding capacity and capillary water holding capacity, and improve soil water conductivity. The research results can

收稿日期:2020-09-16

修回日期:2020-10-13

资助项目:国家自然科学基金(42067006);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y177);贵州省生态学国内一流学科建设项目(GNYL[2017]007)

第一作者:屠丹(1996—),女,贵州六盘水人,硕士在读,主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail:2469606387@qq.com

通信作者:毛天旭(1984—),男,甘肃武威人,副教授,主要从事生态水文学等方面的研究。E-mail:txmao@gzu.edu.cn

provide a theoretical basis for the application of biochar.

Keywords: biochar; yellow soil; field water holding capacity; capillary water holding capacity; saturated hydraulic conductivity

土壤水分是“土壤—植物—大气”连续体的一个关键因子,是土壤系统养分循环和流动的载体^[1-2],其含量变化常常会对土壤的通气状况、蓄水抗旱、热状况、保肥性能和养分转化及有害物质的产生等方面有着重要的影响^[3]。土壤持水特性是对土壤水分有效性的一种反映,能够表征土壤涵养水源和保持水分的能力^[4],土壤的持水性能主要受土壤物理性质的影响,而具有良好孔隙度的土壤可以较好地协调土壤的水分运移、物质运输和能量交换,进而为作物生长提供良好的环境条件^[5]。土壤饱和和导水率是土壤重要的物理性质之一,是表征土壤透水性能的一个综合指标,饱和和导水率越高,土壤透水性越好,可延缓降水形成的地表径流^[6]。土壤饱和和导水率的大小是决定土壤水分入渗和再分布的主要因素^[7],对降水的有效储存与转换利用至关重要。贵州省是典型的喀斯特地貌分布区,其农业生产一直受到土壤保水性能差、易产生水土流失等因素制约,因此,如何改良土壤结构来提高土壤水分利用效率已成为科学研究和农业生产重点关注问题。

生物质炭是生物质原料(稻壳、玉米秆、蔗渣等)在高温低氧条件下热解得到的固体产物^[8-9],其比表面积大,孔隙结构发达,密度低,在改良土壤结构、提高保水保肥性能方面具有广阔的应用前景^[10-11]。近年来,国内外很多学者就生物质炭改良土壤结构和改善土壤持水能力、导水性能展开了大量的研究。高海英等^[12]采用一维垂直土柱研究了生物质炭对土壤持水特性的影响,该研究表明,在一定范围内,随着生物质炭添加量的增加,土壤的持水性能提高,但当添加量达到 80 t/hm² 时,反而会降低其对土壤的持水能力。刘小宁等^[13]的研究同样表明,添加生物质炭能够提高黄土高原典型旱作农田土壤饱和含水量、土壤田间持水量、土壤有效水分含量,但输入水平达到 40 t/hm² 后,土壤持水性能趋于稳定。Wang 等^[14]研究表明,添加 1~2 mm 粒径的生物质炭对砂土田间持水量的增幅大于添加 <1 mm 粒径的生物质炭。解倩等^[15]发现,添加小于 0.25 mm 粒径大添加量的杂木炭,显著提高了黄绵土的持水能力。Asai 等^[16]研究添加生物质炭对山地水稻产量的影响时,发现添加生物质炭后,土壤表层的饱和和导水率有所增加。上述研究表明,不同添加量、不同粒径的生物质炭可以在一定程度上改善土壤的持水性和提高土壤的饱和和导水率。

目前关于添加生物质炭对土壤持水性能的影响研究大多以黄土高原和东北黑土区为研究对象^[5,17],喀斯特坡耕地黄壤发育于碳酸盐岩,质地黏重、结构性差,添加生物质炭对黄壤结构改良的研究较少,对添加不同粒径生物质炭和添加量对黄壤持水性和饱和和导水率的影响研究也较为缺乏。基于此,本研究选取了贵州坡耕地黄壤,通过设置不同添加量不同粒径的两种类型生物质炭,比较了土壤添加生物质炭后土壤持水特性和饱和和导水率的变化,以期进一步丰富生物质炭对黄壤影响研究的成果,同时为喀斯特地区生物质炭改良土壤的性能提供一定的理论依据和应用参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自贵州省贵阳市花溪水库周边玉米坡耕地,采样时取表层 0—20 cm 的土壤带回实验室,自然风干后,剔除较大的石块和植物根系,通过 2 mm 筛孔备用。利用 MS-2000 激光粒度仪测定土壤机械组成,其中砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 22.03%,61.25%和 16.72%,根据美国农业部制土壤质地分类系统,供试土壤质地为壤土,供试土壤的初始含水量为 5%。供试生物质炭购于沈阳农业大学辽宁省生物质炭工程技术研究中心,采用玉米、水稻秸秆在 500℃ 无氧条件下烧制而成,生物质炭研磨后,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛孔,分为 <0.25 mm, 0.25~1 mm 和 >1 mm 3 个粒径等级备用。

1.2 研究方法

根据已有关于生物质炭合理施用量的研究^[18],本研究生物质炭含量梯度按照质量百分比设置为 0, 1%,2%和 3%,其中 0 为对照(CK),每种含量的生物质炭设置 <0.25 mm,0.25~1 mm 和 >1 mm 3 种粒径,2 种生物质炭类型:稻壳生物质炭(RHB)和玉米秸秆生物质炭(CSB),每个处理 3 次重复。

为尽量贴近田间实际情况,添加生物质炭后的土壤容重是在 100 cm³ 环刀中不施加外力时测出,试验中测定添加生物质炭土壤的持水性指标与饱和和导水率也按此方法进行。在本研究中,选取了田间持水量(FMC)、毛管持水量(CWC)、土壤孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)几个指标表征添加生物质炭后土壤的持水特性,并依照《土壤分析技术规范》

测定^[19],土壤饱和和导水率采用定水头法测定。

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计及对试验数据进行单因素(One-way ANOVA)和相关性分析(Pearson)。

2 结果与分析

2.1 添加生物质炭对土壤容重和孔隙度的影响

由表 1 可知,两种生物质炭添加到土壤后,容重都有不同程度的减小,同一类型生物质炭不同处理之间基本都存在显著差异。两种类型生物质炭,随着炭粒径的增大,土壤容重呈现降低的趋势,与对照(CK)相比,添加>1 mm 粒径生物质炭的土壤容重降幅最大,添加>1 mm 粒径的 CSB,RHB 土壤容重分别降

低了 11.88%,8.91%;随着炭含量的增加,土壤容重减小的幅度也在提高。两种类型生物质炭对土壤总孔隙度和毛管孔隙度的影响趋于一致,在相同的粒径下,随着炭含量的增加,总孔隙度和毛管孔隙度有缓慢增大的趋势。与 CK 相比,添加<0.25 mm、0.25~1 mm、>1 mm 粒径的 CSB,土壤总孔隙度增加了 2.05%,1.32%,0.16%,毛管孔隙度增加了 3.07%,0.53%,0.71%,添加<0.25 mm、0.25~1 mm 粒径的 RHB,土壤总孔隙度增加了 2.68%,1.74%,添加 0.25~1 mm、>1 mm 粒径的 RHB,土壤毛管孔隙度增加了 4.33%,2.45%。土壤添加 CSB 和 RHB。可见,生物质炭疏松多孔、质轻的特点充分降低了土壤容重并相应提高了土壤孔隙度,且两种类型的生物质炭对土壤容重和孔隙度的影响差异不大。

表 1 生物质炭对容重、孔隙度的影响

炭粒径/mm	炭含量/%	CSB			RHB		
		容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度	毛管 孔隙度	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度	毛管 孔隙度
<0.25	0	1.01±0.004a	48.64±0.24b	44.59±0.55a	1.01±0.004a	48.64±0.24a	44.59±0.55a
	1	1.00±0.003a	49.04±0.12b	44.82±1.75a	1.00±0.016a	50.43±0.83a	44.44±1.01a
	2	1.00±.001a	49.55±0.42ab	45.63±0.24a	0.98±0.003b	49.69±1.67a	43.95±1.31a
	3	0.97±0.004b	50.40±0.47a	47.56±0.56a	0.98±0.003b	49.83±0.21a	44.94±0.10a
0.25~1	0	1.01±0.004a	48.64±0.24a	44.59±0.55a	1.01±0.004a	48.64±0.24a	44.59±0.55b
	1	0.98±0.008b	48.36±0.63a	43.13±1.41a	0.98±0.003b	49.02±0.18a	44.13±1.51b
	2	0.96±0.001c	49.86±0.46a	44.59±2.10a	0.95±0.004c	49.74±0.29a	47.62±0.30a
	3	0.94±0.007d	49.62±0.68a	46.77±0.41a	0.93±0.011d	49.74±0.67a	48.07±1.08a
>1	0	1.01±0.004a	48.64±0.24a	44.59±0.55a	1.01±0.004a	48.64±0.24b	44.59±0.55b
	1	0.96±0.009b	48.25±0.39a	44.97±0.94a	0.96±0.005b	48.49±0.43b	44.53±1.20b
	2	0.93±0.010c	48.30±0.32a	42.98±0.87a	0.92±0.008c	47.57±0.18b	44.54±0.59b
	3	0.89±0.006d	47.33±0.73a	40.27±0.39b	0.93±0.009c	49.78±0.46a	47.09±0.38a

注:表中所列数值均为平均值±标准偏差(SD),不同小写字母表示同一粒径不同含量间差异显著($p<0.05$),下同。

2.2 添加生物质炭对土壤持水特性的影响

由图 1 可见,添加玉米秸秆生物质炭(CSB)和稻壳生物质炭(RHB)对土壤田间持水量(FMC)分别为 60.91%,60.54%,与 CK 相比,分别提高了 5.30%,4.72%,添加 CSB 土壤的 FMC 略高于添加 RHB 土壤的,且差异不显著。

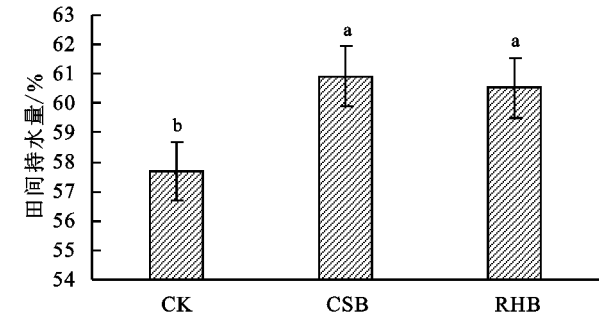
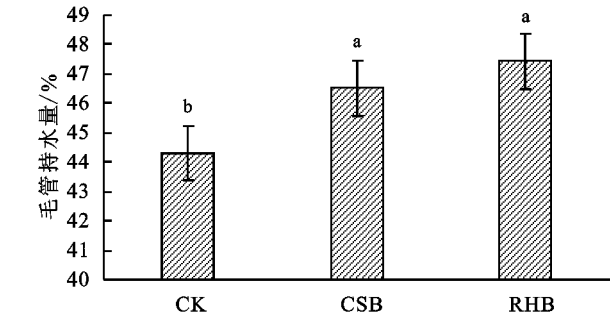


图 1 生物质炭类型对土壤持水特性的影响

在添加 CSB 和 RHB 后土壤的毛管持水量(CWC)为 46.51%,47.43%,与 CK 相比,分别提高了 4.75%,6.60%,添加 CSB 土壤的 CWC 较添加 RHB 土壤的降低了 1.94%,但两种类型生物质炭的土壤 CWC 差异不显著。由此可见,添加生物质炭后显著提高了土壤的 FMC 和 CWC。



由图 2 可见,当两种类型生物质炭的添加量为 1%,2%,3%时,对土壤的 FMC 均显著提高,添加

1%,2%,3%的CSB后,与CK相比,土壤FMC分别提高了2.53%,4.71%,8.50%;添加1%,2%,3%的RHB后,与CK相比,分别提高了3.16%,4.33%,6.64%,增加幅度与生物质炭添加量成正比,且RHB的增幅略小于CSB。

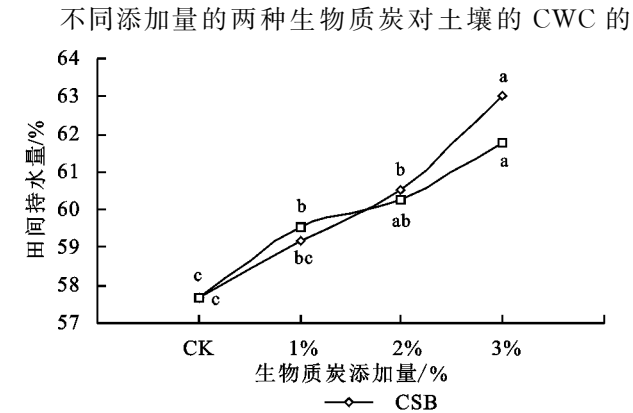


图2 生物质炭添加量对土壤持水特性的影响

由图3可见,添加不同粒径的CSB对土壤FMC和CWC的影响趋势一致,与CK相比,添加<0.25 mm,0.25~1 mm和>1 mm 粒径生物质炭的FMC为4.53%,4.69%和6.64%,CWC提高了5.02%,5.44%,3.76%,添加不同粒径生物质炭的FMC和CWC之间差异不显著。与CK相比,添加3种粒径

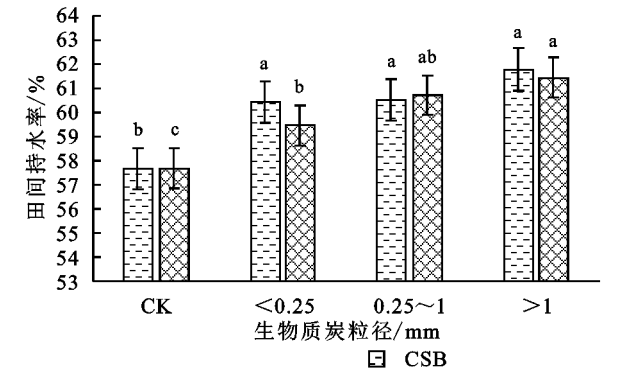
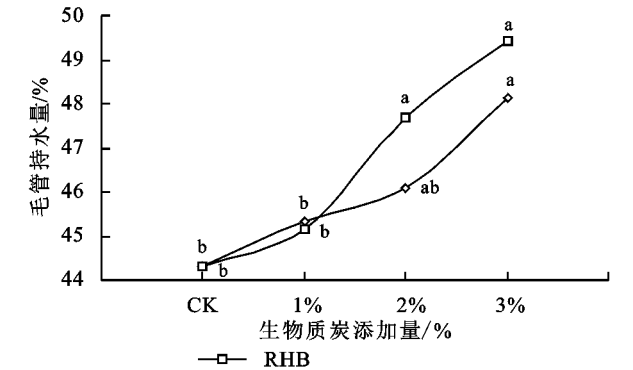


图3 生物质炭粒径对土壤持水特性的影响

2.3 添加生物质炭对土壤饱和和导水率的影响

表2是添加不同粒径不同含量生物质炭的土壤饱和和导水率,与CK相比,添加<0.25 mm,0.25~1 mm粒径CSB的土壤饱和和导水率显著减小了11.74%,18.18%,但添加>1 mm 粒径CSB的土壤饱和和导水率显著增加了66.67%,由此可见,添加小粒径CSB减小了土壤饱和和导水率。添加不同粒径不同含量RHB的土壤饱和和导水率差异不显著,与CK相比,添加<0.25 mm 粒径生物质炭的土壤饱和和导水率有所减小,添加0.25~1 mm,>1 mm 粒径生物质炭的饱和和导水率均大于CK,分别增加了38.46%,33.33%。随着炭含量的增加,土壤的饱和和导水率呈现降低的趋势。

影响趋于一致,与CK相比,当两种生物质炭的添加量为1%时,土壤间的CWC差异不显著;当添加量为2%,3%时,添加CSB后的土壤CWC显著提高了3.86%,7.94%,添加RHB后土壤的CWC显著提高了7.13%,10.36%,添加RHB对土壤CWC的增幅高于CSB。



RHB后土壤的FMC提高了2.99%,5.01%和6.12%,差异显著,其中添加>1 mm 粒径生物质炭的FMC最大;当添加<0.25 mm 粒径的RHB时,土壤的CSB比CK高1.64%,但差异不显著,当添加粒径为0.25~1 mm、>1 mm 时,土壤CWC显著高于CK,比CK显著增加了8.47%,9.31%。

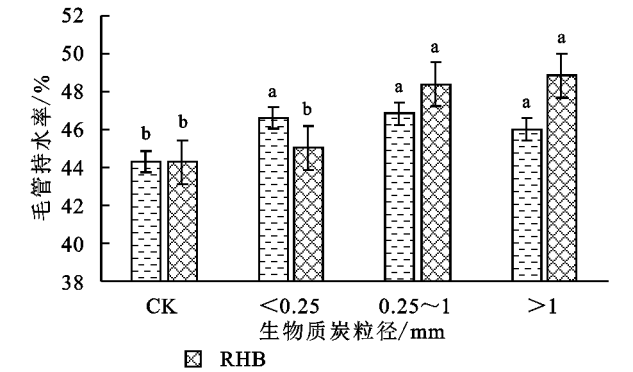


表2 添加生物质炭对饱和和导水率的影响

炭粒径/mm	炭含量/%	饱和导水率/(cm·min ⁻¹)	
		CSB	RHB
<0.25	0	0.13±0.02ab	0.13±0.02a
	1	0.16±0.03a	0.09±0.04ab
	2	0.06±0.04c	0.08±0.02b
	3	0.09±0.02bc	0.06±0.02b
0.25~1	0	0.13±0.02a	0.13±0.02a
	1	0.08±0.03bc	0.19±0.10a
	2	0.12±0.03ab	0.22±0.20a
	3	0.06±0.02c	0.13±0.07a
>1	0	0.13±0.02b	0.13±0.02a
	1	0.32±0.07a	0.21±0.09a
	2	0.11±0.08b	0.18±0.08a
	3	0.22±0.16ab	0.13±0.04a

2.4 土壤孔隙度、持水性能对土壤饱和导水率的影响

为进一步明晰土壤孔隙度、持水性能对土壤饱和导水率的影响,本文选取毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度和容重 6 个指标与饱和导水率作相关分析,结果见表 3,可知毛管持水量、非毛

管孔隙度与饱和导水率相关性不显著($p>0.05$),容重与饱和导水率呈极显著负相关($p<0.01$),FMC、毛管孔隙度和总孔隙度与饱和导水率均呈现显著正相关($p<0.05$),其相关性绝对值排序为容重 $>$ 毛管孔隙度 $>$ 总孔隙度 $>$ FMC $>$ CWC $>$ 非毛管孔隙度。

表 3 饱和导水率与孔隙度、持水性能的相关性分析

参数	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	毛管 持水量/%	田间 持水量/%	非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	总孔隙度/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
饱和导水率/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	1						
毛管持水量/%	0.319	1					
田间持水量/%	0.359 *	0.389 *	1				
非毛管孔隙度/%	-0.256	-0.814 **	0.059	1			
毛管孔隙度/%	0.589 *	0.827 **	-0.068	-0.909 **	1		
总孔隙度/%	0.411 *	0.479 *	-0.054	-0.348	0.707 **	1	
容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	-0.649 **	-0.171	-0.757 **	-0.274	0.411 *	0.460 *	1

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

生物质炭的容重较小,一般在 $0.08\sim 0.5\text{ g/cm}^3$,明显低于土壤容重,且其比表面积大,因此常被用于改良土壤,可显著降低土壤容重,增加土壤的孔隙度^[5,20]。本研究表明,土壤添加这两种类型生物质炭,容重都有一定程度的减小,其中添加 $>1\text{ mm}$ 粒径的 CSB 土壤容重降低了 11.88%,添加 $>1\text{ mm}$ 粒径的 RHB 土壤容重降低了 8.91%,并且土壤的总孔隙度和毛管孔隙度都有所提高。Githinji 等^[21]的研究表明,土壤中添加 25% 体积比的生物质炭,与 CK 相比,土壤容重降低了 18.05%,总孔隙度增加了 10%。Oguntunde 等^[22]的研究结果表明,生物质炭施入土壤后,可使土壤容重降低 9%,总孔隙率由 45.7% 提高到 50.6%。颜永毫^[23]在对添加生物质炭对黄土高原典型土壤田间持水量的影响研究中表明,不同土壤添加生物质炭后,容重都有不同程度减小,其中风沙土的下降幅度最大,最大达 29.49%,并且土壤容重的降幅随着生物质炭添加量的增加也不断在增大。在本试验中,添加 CSB 和 RHB 后土壤的 FMC 和 CWC,相比 CK,分别显著提高了 5.30%,4.72%,4.75%,6.60%,且随着生物质炭含量增加、粒径增大,土壤 FMC 和 CWC 均呈现逐渐增大的趋势。Glaser 等^[24]研究发现,在巴西亚马逊地区,富含生物质炭的土壤与其相邻无炭土壤相比,持水能力要高 18% 左右。且施加的生物质炭含量在一定范围内增加,土壤的 FMC 也随之增加。岑睿等^[25]的研究发现,土壤中添加 50 t/hm^2 生物质炭,土壤的总孔隙度增加了 13.40%,FMC 增加了 11.52%。王艳阳^[26]在对黑土区添加生物质炭的研究表明,在不同处理下,土壤的 FMC 提高范围为 0.32%~10.36%。虽研究的土壤类型土壤质地不一

致,但本试验的研究结果与前人的研究结果一致,添加生物质炭能够使土壤容重明显降低,总孔隙度增加,田间持水量和毛管持水量增大,究其原因,生物质炭作为一种多孔介质,具有比表面积大、孔隙结构丰富、密度小、强大的吸附性能的特点,且具有丰富的有机大分子,所以土壤添加生物质炭后,可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度,增强土壤的持水能力。

土壤饱和导水率反映了土壤的入渗和渗漏特性,是研究水分在土壤中运动规律的重要水力参数,其与土壤容重和孔隙分布等物理性质存在密切关系^[27]。在本研究中,土壤添加小粒径生物质炭,土壤饱和导水率显著减小,添加大粒径的生物质炭,饱和导水率显著增大,增加幅度高达 66.67%,且添加高含量的饱和导水率小于低含量,试验土壤的质地较为黏重,土壤中添加小粒径生物质炭后,反而阻塞毛孔通道,致使饱和导水率减小,而添加大粒径生物质炭,使土壤细小的毛管通道打开,饱和导水率就有所增大。土壤添加生物质炭对饱和导水率的影响因土壤质地不同而有所差异,王丹丹等^[28]的研究表明,土壤饱和导水率随着生物质炭添加量的增加而逐渐降低,土壤的饱和导水率与生物质炭添加量呈负相关关系。文曼^[29]在添加生物质炭对黄土高原地区的土壤水动力学的研究中表明,添加生物质炭提高了壤土和风沙土的饱和导水率,但黑垆土、黄绵土和沙黄土的饱和导水率却呈下降趋势。因此,在不同质地土壤中添加生物质炭对于土壤的饱和导水率具有不同的影响,总体来说,添加小粒径生物质炭,土壤的饱和导水率有所减小。

本研究表明,土壤容重与饱和导水率呈极显著负相关,与田间持水量、毛管孔隙度和总孔隙度呈显著正相关。这与张一璇等^[30]和蔡路路等^[6]土壤容重与

饱和导水率呈极显著负相关、总孔隙度呈显著正相关的研究结果一致,但其他指标的相关性各不一致,因研究的土壤不同所致。土壤添加生物质炭,容重降低,孔隙度增大,故土壤饱和导水率增大,于贵州喀斯特地区来说,土壤的饱和导水率增大,可以加快入渗的速率,减少地表径流。

4 结论

土壤添加生物质炭可以有效地改良土壤结构,(1)两种生物质炭添加到土壤后,容重都有不同程度的减小,与对照(CK)相比,添加粒径 $>1\text{ mm}$ 粒径的CSB和RHB土壤容重降幅最大,分别显著降低了11.88%,8.91%。(2)两种类型生物质炭对土壤总孔隙度和毛管孔隙度的影响趋势趋于一致,随着炭含量的增加,总孔隙度和毛管孔隙度有缓慢增大的趋势,而土壤非毛管孔隙度呈现波动减小的趋势。(3)与CK相比,土壤添加两种生物质炭后,FMC分别显著提高了5.30%,4.72%,CWC显著提高了4.75%,6.60%。(4)添加小粒径生物质炭,土壤的饱和导水率减小,添加大粒径生物质炭,饱和导水率增大,且随着炭含量的增加,土壤的饱和导水率呈现逐渐降低的趋势。(5)做相关性分析得出,土壤容重与饱和导水率呈极显著负相关,与田间持水量、毛管孔隙度和总孔隙度呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 刘元生,陈祖拥,刘方,等.牧草品种与生物质炭对植草土壤水分的调控效应[J].水土保持通报,2019,39(3):175-179.
- [2] 安明态.喀斯特森林土壤水分和养分格局及其植物物种多样性维持机制研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [3] 张鹏,胡心雨,陈官运,等.泰安棕壤土不同土地利用类型饱和导水率比较[J].排灌机械工程学报,2020,38(4):403-408.
- [4] 王秋菊,焦峰,刘峰,等.东北主要类型旱田土壤持水特性研究[J].中国土壤与肥料,2018,66(6):23-29.
- [5] 代镇,李伟,韩娟,等.生物炭对壤土持水能力的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):265-273.
- [6] 蔡路路,刘子琦,李渊,等.喀斯特地区不同土地利用方式对土壤饱和导水率的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):119-125.
- [7] 赵春雷,邵明安,贾小旭.冻融循环对黄土区土壤饱和导水率影响的试验研究[J].土壤通报,2015,46(1):68-73.
- [8] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agro-economic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010,327:235-246.
- [9] 何绪生,张树清,余雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J].中国农学通报,2011,27(15):16-25.
- [10] Cohen-Ofri I, Weiner L, Boaretto E, et al. Modern and fossil charcoal:aspects of structure and diagenesis [J]. Journal of Archaeological Science, 2006,33(3):428-439.
- [11] Ayodele, Ajayi, Philip. Numerical analysis of the impact of charcoal production on soil hydrological behavior, runoff response and erosion susceptibility [J]. Rev Bras Cienc Solo, 2009,1(33):137-145.
- [12] 高海英,何绪生,陈心想,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1948-1955.
- [13] 刘小宁,蔡立群,黄益宗,等.生物炭对旱作农田土壤持水特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):112-117.
- [14] Wang T, Stewart C E, Sun C, et al. Effects of bio-char addition on evaporation in the five typical Loess Plateau[J]. Catena, 2018,162:29-39.
- [15] 解倩,王丽梅,齐瑞鹏,等.生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响[J].地球环境学报,2016,7(1):65-76,86.
- [16] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. Field Crops Research, 2009,111(1):81-84.
- [17] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):290-299.
- [18] Jeffery S, Marcel B J, Stoof C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil[J]. Geoderma, 2015,251:47-54.
- [19] 全国农业技术推广服务中心.土壤分析技术规范[M].北京:中国农业出版社,2006:1-30.
- [20] Sue Anne Sheya. Development of thermal desorption gas chromatography mass spectrometry as a rapid method for ambient particulate characterization [D]. Salt Lake City,US: the University of Utah, 2002.
- [21] Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014,60(4):457-470.
- [22] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effect of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008,171(4):591-596.
- [23] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等.生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):120-124,190.