

生物质炭对旱作农田土壤持水特性的影响

刘小宁¹, 蔡立群¹, 黄益宗², 董博¹, 南学军¹, 高志强¹

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 为确定添加生物质炭对旱作农田土壤持水特性的影响, 在隆中黄土高原典型旱作农田区设置相关定位试验, 对不同生物质炭输入水平的土壤容重、土壤孔隙度、土壤水分常数及土壤水分特征曲线进行测定。结果表明, 生物质炭的添加能够减小土壤容重, 增加土壤孔隙度。随着生物质炭输入水平的增加, 土壤容重的减小及土壤孔隙度的增加幅度加大。生物质炭达到 50 t/hm² 时土壤结构变化最为明显, 0—5, 5—10, 10—30 cm 土层中土壤容重相比对照分别减小 7.01%, 9.91%, 16.60%, 土壤毛管孔隙度分别增加 19.47%, 21.02%, 29.94%; 并且生物质炭的施入可以增加土壤饱和含水量、土壤田间持水量、土壤有效水分含量。随着生物质炭输入水平的不断加大, 各水分常数呈现出上升趋势, 但当生物质炭输入水平达到 40 t/hm² 后涨幅空间开始减小。说明生物质炭的添加能够提高旱作农田的持水性能, 但输入水平达到 40 t/hm² 后, 土壤持水性能趋于稳定。

关键词: 生物质炭; 容重; 孔隙度; 土壤持水曲线; 土壤水分常数

中图分类号: S152.5; S152.7⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0112-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.019

Effect of Biochar on Soil Retention Ability in Dry Farmland

LIU Xiaoning¹, CAI Liqun¹, HUANG Yizong², DONG Bo¹, NAN Xuejun¹, GAO Zhiqiang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2. Agro-Environment Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191)

Abstract: In order to illustrate the effect of biochar on soil retention ability in dry farmland, this study measured the soil bulk density, soil porosity, soil moisture constants and the soil water retention curve of the soil with different biochar addition through setting located experiment in typical dry farmland of the Loess Plateau. The results showed that biochar adding reduced soil bulk density, and increased soil porosity. With the increasing of the biochar adding, the reduction range of soil bulk density and the increasing extent of soil porosity were both enhanced. The change of soil structure was the most obvious when the adding amount of biochar reached 50 t/hm². Soil bulk density of 0—5 cm, 5—10 cm and 10—30 cm soil layers decreased by 7.01%, 9.91% and 16.60% compared with control group, respectively, and soil capillary porosity increased by 19.47%, 21.02% and 29.94% compared with control group, respectively. The biochar adding increased soil saturated soil water content, soil field capacity and soil effective moisture content. With the increasing of the biochar adding, all the soil moisture constants showed rising trends, but the increasing extent decreased when the biochar amount reached 40 t/hm². This study suggests that the addition of biochar improved the water retention ability of dry farmland, but the retention ability of soil tended to be stable when the adding amount of biochar reached 40 t/hm².

Keywords: biochar; soil bulk density; soil porosity; soil water retention curve; soil moisture constants

生物质炭是由生物质废弃物(作物秸秆、城市生活垃圾和畜禽粪便等)在缺氧条件下经 300~700 °C 高温热解而成。微观上生物质炭主要是由紧密且不规则堆积的芳香环片层组成^[1], 表面多孔性特征显

著, 比表面能极高^[2]。基于生物质炭的上述特性, 将其作为土壤改良剂提高土壤保水保肥性能、改善土壤结构的应用前景广阔。陇中黄土高原是我国典型的旱作农田区, 多年平均降水量不足 400 mm, 整个冬

收稿日期: 2017-01-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(31571594, 31160269); 国家“十二五”循环农业科技工程项目(2012BAD14B03); 甘肃省自然科学基金项目(145RJZA106)

第一作者: 刘小宁(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学和恢复生态学研究。E-mail: liuxiaoning36@sina.com

通信作者: 蔡立群(1976—), 男, 教授, 主要从事土壤生态学和耕作学研究。E-mail: cailq@gsau.edu.cn

季和春、夏季干旱少雨^[3],虽秋季降雨较为集中,但此时作物生长接近成熟,能够被有效利用的水分较少。此外,该区域水分蒸发强烈,致使80%以上的耕层土壤水分无效损失,水分利用效率低下。因此,如何科学合理的减少水分流失、增加水分利用效率是旱作农田区生态系统管理及农业经济可持续发展中亟需解决的重大问题。生物质炭的添加为解决水分利用效率问题提供了新的思路和方向,凭借其自身的多孔性结构,添加到土壤中能够改善土壤质地,增加土壤含水量,为植物根系的生长创造良好的土壤环境,促进作物生长^[4]。Karhu等^[5]在芬兰南部的定位试验中发现,耕作土壤中施入9 t/hm²的生物质炭后,土壤持水能力较空白处理增加11%;文曼^[6]通过室内土柱模拟试验,分析生物质炭对土壤含水率及土壤水分蒸发的影响,发现土壤中添加生物质炭可以抑制土壤蒸发,延长土壤水分释放的时间,随着生物质炭用量增加,土壤粒径减小,抑制土壤水分蒸发作用更加显著;王丹丹等^[7]在宁夏南部山区农田的定位试验中发现生物质炭的添加量与土壤含水量呈正相关关系;康熙龙^[8]在长期种植玉米的耕地土壤中开展定位试验中所得出的结论与王丹丹等相似。纵观旱作农田区内关于土壤持水性能研究中,涉及生物质炭对土壤持水性影响的长期定位试验相对较少,且对生物质炭提高土壤持水性的最佳施用量尚不明确。为探索生物质炭添加对旱作农田土壤持水特性的影响,本研究在陇中黄土高原典型旱作农田区设置相关定位试验,将不同添加梯度的生物质炭施入土壤,18个月后将土壤容重、土壤孔隙度、土壤水分常数及土壤水分特征曲线进行测定,系统研究生物质炭的施入对旱作农田土壤持水特性的影响机理,旨在为该区制定合理的土壤水分管理及土壤改良措施提供科学依据及理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区甘肃省定西市安定区李家堡镇麻子川村。该区年平均降水390.9 mm,年蒸发量1 531 mm,干燥度2.53,80%保证率的降水量为365 mm,变异系数为24.3%,属于典型的雨养旱作农业区。土壤为黄绵土,土质绵软,土层深厚,质地均匀;0—200 cm土壤容重平均为1.17 g/cm³,凋萎含水率7.3%。

1.2 试验设计

本试验共设6个处理,于2015年3月在小区土壤表面分别一次性施入C0 0 t/hm²,C1 10 t/hm²,C2 20 t/hm²,C3 30 t/hm²,C4 40 t/hm²,C5 50 t/hm²水平的生物质炭,施入后对土壤表层进行旋耕,旋耕深度0—15 cm,后将土壤与生物质炭耙匀。各处理N、P肥料施用

水平一致,其中尿素(含N量46%)施入量为105 kg/hm²,过磷酸钙(P₂O₅)施入量为105 kg/hm²。每个处理3次重复,共18个小区,各小区随机区组排列,小区面积2.8 m×6 m=16.8 m²。试验作物为小麦(定西35号),每年3月下旬开始播种,7月底收获。播种量为187.5 kg/hm²,行距20 cm,播深10 cm。供试生物质炭为金和福农业科技有限公司生产的玉米秸秆生物质炭,生物质炭基本性质为:C含量53.28%,N含量1.04%,P含量0.26%,Ca含量0.8%,K含量0.51%,Mg含量0.47%,灰分含量35.64%。

1.3 指标测定与分析方法

1.3.1 土壤容重及孔隙度 土壤容重采用环刀法测定。在2016年9月(作物秋收后)分别对土层深度为0—5,5—10,10—30 cm的容重进行测定,各层次3次重复。

土壤总孔隙度计算公式为:

$$\text{土壤总孔隙度}(\%) = (1 - \text{土壤容重} / \text{土壤密度}) \times 100 \quad (1)$$

土壤毛管孔隙度计算公式为:

$$P_c = (W_c \times B / V) \times 100 \quad (2)$$

式中: P_c 为土壤毛管孔隙度(%); W_c 为土壤毛管含水量(%); B 为土壤容重; V 为土壤体积(100 cm³)。

1.3.2 土壤水分特征曲线 土壤水分特征曲线是土壤水分基质势与含水量之间的关系曲线,反映了土壤的持水能力和土壤水分的基本特征,是土壤水分研究中重要的工具。通常土壤水分特征曲线包括吸水曲线和脱水曲线,即分别在土壤吸水过程和失水过程中得到土壤水分特征曲线^[9]。由于脱水曲线的获取更有利于简化研究步骤,减小试验误差,故本研究采用脱水曲线来讨论土壤持水性问题。研究中土壤水分特征曲线是采用美国土壤水分公司生产的1500型15×10⁵ Pa压力膜仪分别测定0.5×10⁵,1×10⁵,3×10⁵,5×10⁵,10×10⁵,15×10⁵ Pa 6个水平下的土壤水分重量含水量后,结合国内外研究经验,利用Gardner模型拟合而成。

Gardner模型水分特征曲线的表达式为:

$$\theta = AS^{-B} \quad (3)$$

式中: θ 为重量含水量(%); S 为土壤水吸力(Pa); A 、 B 为非线性回归系数。

1.3.3 比水容量的测定 土壤水分特征曲线斜率即单位基质势的变化引起含水量变化,称为比水容量,表示单位吸力变化时单位质量土壤可释放或储存的水量,可反映土壤可释出的供给植物吸收水量的程度,是评价土壤持水性强弱的关键参数^[10],记为 C_θ 。比水容量的计算公式为:

$$C_\theta = -d_\theta / ds \quad (4)$$

式中： θ 为重量含水量(%)； S 为土壤水吸力(Pa)。

对土壤特征水分曲线的斜率求导可得：

$$C_{\theta}=A\times B\times S^{-(B+1)}$$

(5)

式中： A 、 B 为土壤持水曲线拟合参数。

1.3.4 土壤水分常数的测定 土壤饱和含水量、田间持水量、凋萎系数采用压力膜仪法分别测定 0,0.3×10⁵,15×10⁵ Pa 吸力段的土壤重量含水量后测得；土壤有效水分含量由田间持水量减去凋萎系数得出。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 软件绘制表格,Origin 8.0 软件绘制土壤水分特征曲线,运用 SPSS 软件对数据进行统计分析,Duncan 检验比较参数间差异。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对土壤容重及孔隙度的影响

从图 1 可以看出,随着生物质炭输入水平的不断增加,各土层土壤容重均呈现出下降趋势。0—5 cm 土层中 5 个生物质炭输入水平下的土壤容重相比 C0 分别降低了 2.19%,2.62%,3.88%,5.91%,9.87%;5—10 cm 土层中各处理土壤容重相比 C0 分别降低了 4.64%,5.46%,6.13%,7.46%,11.27%;10—30 cm 土层中各生物质炭输入水平下的土壤容重分别降低了 0.83%,1.50%,6.77%,12.64%,16.70%。10—30 cm 土层的土壤容重相比于其他两个土层变化幅度最大,在 0—5,10—30 cm 土层中 C5 的土壤容重相比其他水平差异显著。

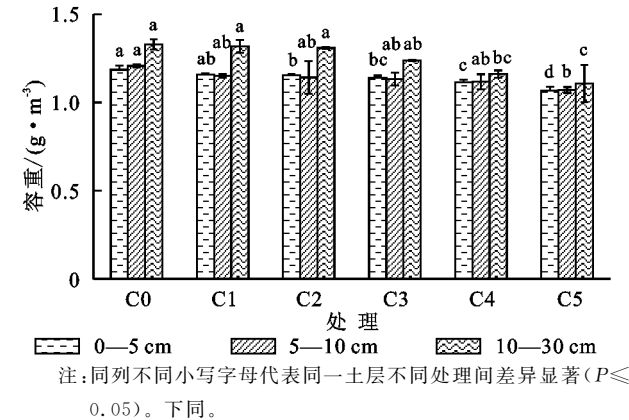


图 1 不同生物质炭输入水平下的土壤容重

从图 2 可以看出,随着生物质炭施入水平的增加,各土层土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度均呈上升趋势,土壤毛管孔隙的增加幅度更为明显,0—5 cm 土层中 5 个生物质炭输入水平下的土壤毛管孔隙度相比 C0 分别增加了 7.12%,8.63%,10.67%,12.05%,19.47%;5—10 cm 土层中各处理土壤毛管孔隙度相比 C0 分别增加了 10.00%,11.20%,12.77%,14.53%,21.02%;10—30 cm 土层中各生物质炭输入水平下的土壤毛管孔隙度分别增加了 15.72%,18.42%,18.92%,20.71%,29.94%。土壤

非毛管孔隙度并没有呈现出随生物质炭输入水平增加而增加趋势,反而在 0—5,5—10 cm 土层中出现一定程度的减小,10—30 cm 土层中土壤非毛管孔隙度无明显的递变规律。

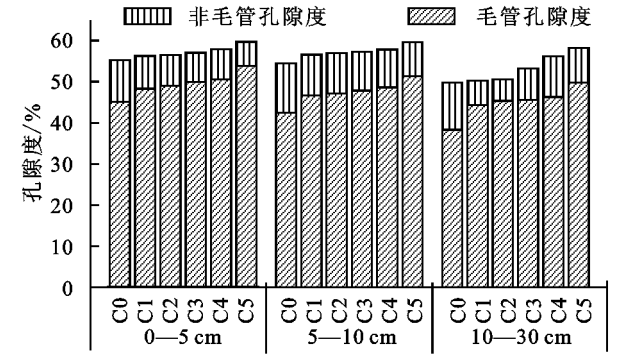


图 2 不同生物质炭输入水平下的土壤孔隙度

2.2 生物质炭对土壤持水特性的影响

2.2.1 生物质炭对土壤水分特征曲线拟合参数的影响 为定量研究生物质炭输入量对土壤持水性能的影响,本研究根据 Gardner 模型的幂函数经验公式,将试验各处理所测得的数据进行拟合,供试土壤参数拟合结果见表 1。从表 1 可以看出,实测数据所得曲线与利用 Gardner 模型拟合的土壤水分特征曲线间的相关系数 R² 均在 0.90 以上,拟合相关性较好。根据 Gardner 模型的经验方程,参数 A 表征曲线的高低,亦即持水能力的大小,A 值越大,持水能力相对越强;参数 B 表征曲线的走向,表示土壤重量含水量随吸力变化而变化的快慢程度^[11-12]。根据表 1 中各处理的土壤 A 值可以看出,C0 到 C5 土壤 A 值呈现出逐渐增加的趋势,但是在 C4 达到最大值后略有减小。C1 到 C5 各生物质炭输入水平 A 值相比于 C0 分别增长了 2.50%,5.87%,8.60%,12.97%,12.07%。由 B 为评价参数,可以发现虽然 C0 到 C5 中 B 值同样呈现出逐渐增加的趋势,但上涨趋势较小,在 C4 达到最大值后出现回落,C1 到 C5 生物质炭输入水平 B 值与 C0 相比增长 3.17%,8.73%,13.49%,18.25%,15.08%。说明土壤中施入生物质炭能够提高土壤持水性,且土壤持水性能随水吸力变化而变化的速率加大。但当生物质炭输入水平达到 C4 水平后,土壤持水性能开始趋于稳定甚至开始出现略微下降的趋势。

表 1 土壤水分特征曲线的拟合公式及拟合参数

处理	拟合方程	相关参数				
		A	B	R ²	A×B	B+1
C0	$\theta=22.120S^{-0.126}$	22.120	0.126	0.9187	2.79	1.126
C1	$\theta=22.674S^{-0.130}$	22.674	0.130	0.9301	2.95	1.130
C2	$\theta=23.418S^{-0.137}$	23.418	0.137	0.9409	3.21	1.137
C3	$\theta=24.022S^{-0.143}$	24.022	0.143	0.9733	3.44	1.143
C4	$\theta=24.988S^{-0.149}$	24.988	0.149	0.9670	3.72	1.149
C5	$\theta=24.921S^{-0.146}$	24.789	0.145	0.9641	3.61	1.146

2.2.2 生物质炭对比水容量的影响 比水容量是反映土壤可释出的供给植物吸收水量多少的指标,研究表明比水容量越大土壤供水能力及抗旱力越强^[13]。当水吸力为 1×10^5 Pa 时的土壤比水容量可表示为 A 与 B 的乘积,记作 $A \times B$ 。 $A \times B$ 值越大的土壤,供水能力相对越强。而 $B+1$ 可表示土壤比水容量随水吸力变化而变化的快慢程度, $A \times B$ 与 $B+1$ 通常被用作评价土壤供水能力的指标参数。从表 1 中参数 $A \times B$ 与 $B+1$ 的值,可以发现随着生物质炭输入量的增加, $A \times B$ 、 $B+1$ 值均呈现增加趋势。在图 3 中也可看出,在不同吸力水平下 C_0 到 C_4 的比水容量均呈现出逐渐增加的趋势,但 C_5 出现小幅回落。随着水吸力的增大各处理间比水容量的差距逐渐缩小,说明当生物质炭输入量不断增大的过程中,土壤的供水能力也随之增加;并且随着生物质炭输入水平的提高,土壤供水能力随水吸力变化的快慢程度增大,但生物质炭输入水平达到 C_4 后,土壤的供水能力趋于稳定状态。

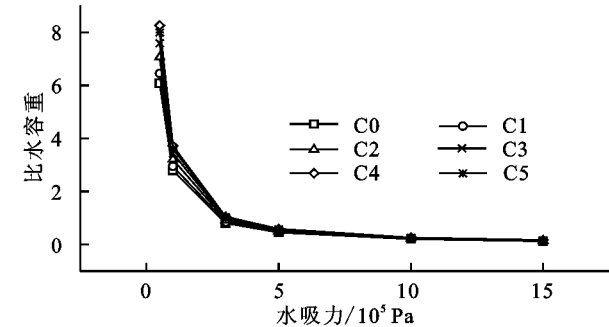


图 3 不同生物质炭输入水平下各吸力段的比水容量

2.2.3 生物质炭对土壤水分特征曲线的影响 从图 4 可以看出,各处理之间的土壤重量含水量随水吸力的变化趋势大致相同,随着水吸力的增加,土壤重量含水量均呈现出下降趋势。可以判断生物质炭的施入并没有改变土壤重量含水量随水吸力增加而降低的整体趋势,而是提高了土壤持水曲线距离水势轴的高度, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 的水分特征曲线从低到高依次排列,呈现出生物质炭输入量越大土壤持水曲线距水势轴越高的特点。 C_5 与 C_4 的土壤持水曲线距水势轴高度的差异不大,几近重叠。各处理之间的土壤持水曲线在一定水吸力范围内,下降趋势明显,斜率很大;水吸力达到一定水平后,土壤持水曲线的下降趋势开始变缓。其中,持水曲线的下降幅度在 $0 \sim 5 \times 10^5$ Pa 吸力范围内最大, 10×10^5 Pa 以后开始趋于平缓。 0.5×10^5 、 1×10^5 、 3×10^5 、 5×10^5 、 10×10^5 Pa 水平上各处理的土壤重量含水量均存在一定差异,而 15×10^5 Pa 水吸力水平下各处理的土壤重量含水量几乎重合。总体而言,土壤重量含水量呈现出随着生物质炭施加量增加而增加的趋势。随着水吸力的增

加,各吸力水平下的土壤重量含水量相比于 C_0 的变化区间呈现出缩小的趋势,说明随着水吸力的增加,生物质炭对土壤重量含水量的影响在逐渐减小。

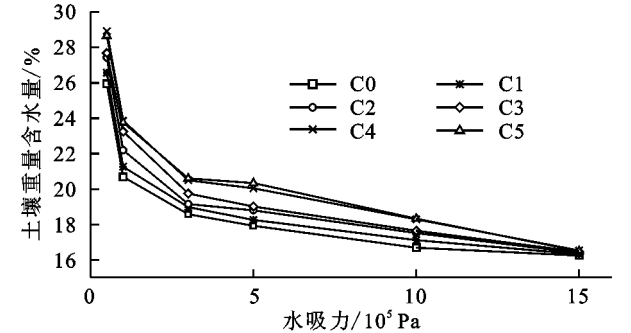


图 4 不同生物质炭输入水平下土壤水分特征曲线

2.3 生物质炭对土壤水分常数的影响

从图 5 可以看出,各生物质炭输入水平下的饱和含水量、田间持水量、有效水分含量均比空白处理 C_0 高。整体上各水分特征常数表现出随着生物质炭输入量的增加而增加的趋势。饱和含水量方面, C_5 、 C_4 、 C_3 、 C_2 、 C_1 相对空白 C_0 分别提高了 20.67%, 21.70%, 19.09%, 12.34%, 2.70%, 当生物质炭输入量达到 C_3 水平时,土壤饱和含水量的增加趋势开始放缓, C_4 时土壤饱和含水量达到最高后, C_5 开始出现略微的下降, C_3 相比 C_2 、 C_1 、 C_0 差异显著,与 C_4 、 C_5 之间没有显著差异。田间持水量方面,随着生物质炭施入水平梯度的提升,土壤田间持水量增加趋势明显。相比与 C_0 各生物质炭施入水平下的土壤田间持水量分别增加了 4.10%, 10.03%, 13.62%, 14.90%, 15.33%。虽然生物质炭输入量为 C_5 时土壤田间持水量达到最大值,但 C_3 后田间持水量增幅缩小; C_5 、 C_4 的田间持水量相比与 C_3 仅仅增加了 1.13%, 1.51%。各处理之间的凋萎系数虽然整体上呈现出随着生物质炭增加而增加的趋势,但各处理之间的差异不明显,凋萎系数在 C_4 达到最高后, C_5 的凋萎系数略有减退。各处理之间的有效水分含量依然呈现出随着生物质炭输入量增加而增加的趋势,施入水平达到 C_4 后土壤有效水含量趋于稳定。

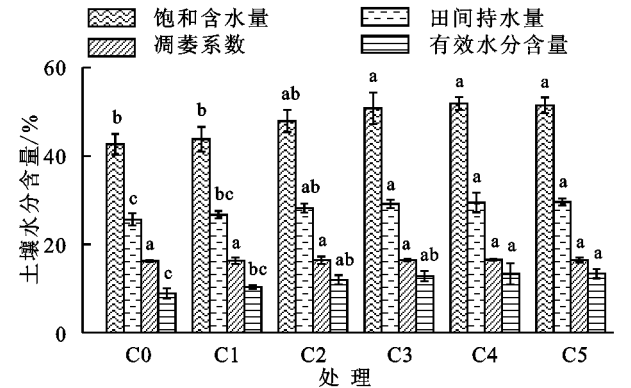


图 5 不同生物质炭输入水平下土壤水分特征常数

3 讨论

3.1 生物质炭对土壤容重及孔隙度的影响

土壤容重是反映土壤物理性质的重要参数之一,反映土壤透水性、通气性和根系延展时阻力的大小。土壤容重越小,说明土壤多孔疏松,结构较好。土壤孔隙度是土壤中养分、水分、空气和微生物等的迁移通道、贮存库和活动场所,直接影响着土壤蓄水和通气性,并间接影响着土壤肥力和植物生长状况^[14]。根据本研究的测定结果,可以发现生物质炭施入能够显著减小土壤容重,增加土壤总孔隙度,这与 Laird 等^[4]的试验结论一致。其中土壤毛管孔隙度随生物输入水平增加而增加的趋势明显,土壤非毛管孔隙度随生物质炭输入水平变化的趋势并不明显。随着生物质炭输入水平的不断增加,土壤容重的减小幅度与毛管孔隙度的增加幅度逐渐增大,10—30 cm 土层差异最为显著。说明生物质炭的输入可以改善土壤结构,显著增加土壤毛管孔隙度,提高土壤耕性。这主要是因为:(1)生物质炭多由高度扭曲、紧密堆积的芳香环片层组成,扫描电镜下显示生物质炭表面多孔性特征显著,小孔度含量高,密度极低。随着生物质炭输入水平的提高,大量的生物质炭混入土壤,从增加土壤孔隙含量和减小土壤密度两个方面改变土壤容重。且随着生物质炭输入量加大,小孔隙增加的幅度远大于大孔隙增加的幅度,故土壤中毛管孔隙度的增加趋势更为显著;(2)土壤结构的改善还可能与生物质炭输入后土壤微生物活性^[15]以及土壤团聚性^[16]的提升有关,具体原因需要进一步研究。

3.2 生物质炭对土壤持水特性的影响

土壤水分特征曲线反映了土壤水吸力与土壤含水量之间的关系,通过它可以了解土壤的持水性能和供水性能,对于研究土壤水分的贮存、保持、运动、供应及土壤—植物—大气连续体中水流等的机理和状况都有重要意义^[17]。研究表明,利用 Gardner 模型拟合土壤持水曲线有参数少,有利于实际应用的特点,并且 Gardner 模型拟合黄绵土土壤持水曲线,拟合效果良好^[18]。本研究将各处理的土壤持水曲线用该模型拟合后发现,拟合相关系数均在 0.90 以上,说明 Gardner 模型适用于隆中黄土高原旱作农田土壤。从各生物质炭施入水平的土壤持水曲线参数来看,随着生物质炭施入水平的上升,参数 A、比水容量 C_0 均呈现出增加趋势,可以判断生物质炭的添加能够提升隆中黄土高原旱作农田土壤持水和供水性能。这是因为一方面细粒径含量丰富的生物质炭提升了土壤的粘粒含量,改善土壤质地构成,使土壤中的细孔隙

数量增加,孔径分布均匀,减缓土壤含水量随水吸力增加而减小的变化速率;另一方面生物质炭表面极性官能团较多,亲水性较强,具有较大的水分截留能力,从而提高土壤持水和供水能力。

另外,各处理之间的持水特征曲线之间主要差异在于持水曲线与水势轴之间的间距,即参数 A 的差异,各持水特征曲线之间的变化趋势相似。其中,持水曲线的下降幅度在 $0 \sim 5 \times 10^5$ Pa 吸力范围内最大,可能原因是:低吸力时,土壤所能保持或释放出来的水量主要取决于大孔隙的数量及其分布状态,大孔隙中的水很容易就会排出,所以土壤持水曲线的下降趋势整体比较明显;随着吸力的增加,大孔隙中的水随之排尽,保持在中小孔隙中的水分才缓慢释出,所以此时特征曲线逐渐趋于平缓;另外,随着土壤水吸力的不断增大,土壤大孔隙中的液态水逐渐排出,土壤颗粒表面水化膜也随着逐渐变薄,在此过程中土壤水分的形态开始发生变化,故高吸力段时,即使提高土壤吸力,残余的水分由于能态的变化也很难再排出,持水曲线变化趋势不明显。总体上看,各种供试土壤持水曲线在 10×10^5 Pa 以后开始趋于平缓。

土壤水分在土壤中起着关键的作用,它不仅是作物需水的提供者,也是影响土壤有机质运移、土壤呼吸^[19]及土壤微生物活动^[20]的重要因素。尤其在陇中黄土高原旱作农田中,土壤水分是影响作物生长最为重要的因素之一。土壤饱和含水量、田间持水量、凋萎系数及土壤有效水分含量是评价土壤水分应用最为广泛的指标。根据本研究的测定结果,可以发现生物质炭的施入可以提高土壤饱和含水量、田间持水量和土壤有效水分含量。随着生物质炭施入水平的提高,各水分常数表现出上升趋势;当生物质炭输入水平达到 C3 后,土壤饱和含水量、田间持水量、土壤有效水分含量虽呈现出随生物质炭输入量增加而增加的趋势,但上升趋势减缓,土壤持水性能开始趋于稳定。土壤饱和含水量在 C4 达到最高后,C5 有略微减小的现象。这可能是因为没施入生物质炭的土壤中质地相对较粗,土壤中的大孔度含量大,此时质地较细,小孔隙含量多的生物质炭施入土壤后,大量的生物质炭进入了土壤的大孔隙中,显著增加了原土壤的小孔隙含量。大孔度和小孔度对土壤水分的协同作用能够显著提高土壤的持水性能。但是随着生物质炭输入量的不断增加,生物质炭不断进入土壤中的大孔隙中,最终土壤中大孔隙被生物质炭填满,这一定程度上堵塞了土壤大孔度的联通通道,影响了土壤较大孔隙之间的联通性,从而无法继续提升土壤持水

特性。土壤凋萎系数方面,生物质炭的添加对土壤凋萎系数影响较小。

4 结论

(1)生物质炭的添加能够改善旱作农田的土壤结构,降低土壤容重,增加土壤毛管孔隙含量,但对土壤非毛管孔隙的影响较小。随着生物质炭添加量的增加,土壤容重及孔隙度的变化幅度增大。

(2)Gardner 模型对旱作农田各生物质炭输入水平的土壤持水曲线拟合效果良好,拟合相关系数均在 0.90 以上。随着生物质炭输入水平的增加,土壤持水及供水能力增加,当生物质炭输入水平达到 40 t/hm^2 后旱作农田土壤持水及供水能力趋于稳定。随着水吸力的增加,生物质对土壤持水性能的影响逐渐减小。

(3)生物质炭的添加能够增加土壤饱和含水量、田间持水量、土壤有效水分含量。生物质炭输入水平达到 40 t/hm^2 后土壤饱和含水量、田间持水量、土壤有效水分含量达到最佳且趋于稳定,但生物质炭的添加对土壤凋萎系数的影响并不明显。

参考文献:

- [1] Van Z 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):235-246.
- [2] Lehman J, Stephen M, Joseph S, et al. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London: Earthscan Ltd, 2009:107-157.
- [3] 蔡立群,罗珠珠,张仁陟,等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5):1362-1368.
- [4] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4):443-449.
- [5] Karhu K, Mattila T, Regina K, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity: Results form a short-term poilt field study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2):309-313.
- [6] 文曼. 黄土高原地区生物质炭土壤的水动力学效应[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [7] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2):101-104.
- [8] 康熙龙. 旱地土壤施用生物质炭的后效应:水分条件对土壤有机碳矿化的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(1):152-158.
- [9] 邵明安,黄全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [10] 陈尧,袁有波,丁福章,等. 贵州植烟土壤水分特性分析[J]. *贵州农业科学*, 2010(5):42-45.
- [11] 张露,韩霁昌,罗林涛,等. 砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2):207-214.
- [12] 马昌臣,王飞,穆兴民,等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2):104-109.
- [13] 窦建德,王绪芳,熊伟,等. 宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(3):301-306.
- [14] 罗珠珠,黄高宝,蔡立群,等. 黄土高原旱地土壤质量评价指标研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(2):127-137.
- [15] Birk J, Steiner C, Teixeira W, et al. Microbial response to charcoal amendments and fertilization of a highly weathered tropical soil[C]. Woods W I, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Amazonian Dark Earths, Wim Sombroek's Vision. Netherlands: Springer, 2009.
- [16] Brodowski S, John B, Flessa H, et al. Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4):539-546.
- [17] 刘岳燕. 水分条件与水稻土壤微生物生物量、活性及多样性的关系研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [18] 刘恩斌,董水丽. 黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J]. *水土保持通报*, 1997, 17(7):20-25.
- [19] 邓东周,范志平,王红,等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(5):722-727.
- [20] 李世清,任书杰,李生秀. 土壤微生物氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(1):18-23.