

生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响

潘全良, 陈坤, 宋涛, 徐晓楠, 战秀梅, 彭靖, 苏慧清, 王月, 韩晓日

(沈阳农业大学 土地与环境学院 土肥资源高效利用国家工程实验室/辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要:通过连续 6 年微区定位试验,以传统的土壤培肥方式作为对照,探究较长时间施用生物炭和炭基肥对土壤保水作用的影响,为生物炭农用提供理论参考。定位试验于 2009 年开始,连续 6 年进行了花生微区田间试验(2 m²)。试验设 4 个处理,分别为秸秆还田+NPK(CS)、施用猪厩肥+NPK(PMC)、生物炭+NPK(BIO)和炭基肥(BF)处理,在 2014 年花生的生育期间测定了表层土壤含水量、水分累积蒸发量和土壤理化性质。研究表明:土壤水分含量充足时,BIO 和 BF 处理含水量与 PMC 处理接近,都高于 CS 处理;土壤含水量较低时,BIO 和 BF 处理含水量低于 CS 和 PMC 处理。与秸秆还田和施用猪厩肥相比,生物炭处理可提高土壤供水数量但降低土壤保水能力。炭基肥处理降低了土壤供水数量和保水能力。

关键词:生物炭;炭基肥;保水能力;土壤结构

中图分类号:S157.3;S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0115-07

Influences of Biochar and Biochar-Based Compound Fertilizer on Soil Water Retention in Brown Soil

PAN Quanliang, CHEN Kun, SONG Tao, XU Xiaonan, ZHAN Xiumei,
PENG Jing, SU Huiqing, WANG Yue, HAN Xiaori

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Land and Environment/
Biochar Engineering Technology Research Center of Liaoning Province, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the influence of application of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention under test of improving brown soil for the sixth year in a row, so as to provide a theoretical reference for the use of biochar-based fertilizers in agriculture. A micro-plot (2 m²) field experiment was conducted from 2009 to 2014 with peanut as tested crop. Four treatments were designed: corn straw returning in combination with NPK (CS), pig manure in combination with NPK (PMC), biochar from corncob in combination with NPK (BIO), and biochar-based compound fertilizer (BF). Surface soil moisture content, cumulative evaporation of water, soil physical and chemical properties of peanut field were determined using their relevant methods before sowing and at different developmental stages of peanut in 2014. The results show that when the water is adequate for the treatments of soil, soil moisture content of BIO and BF were close to PMC and higher than CS; when the water moisture is low, BIO and BF were lower than PMC and CS. Compared with CS and PMC, BIO can improve the soil water quantity but lower soil water retention capacity, BF decreases the soil water quantity and water retention capacity.

Keywords: biochar; biochar-based compound fertilizer; water retention capacity; soil structure

影响土壤肥力主要因素有水、肥、气、热这几个因子,水分不仅是土壤的重要组成部分,它的数量和运动变化影响着土壤气、热状况,同时作为养分循环和流动载体对养分的有效性也起着关键的作用,还深刻影响着土壤物理、化学和生物学性质^[1],对植物的生

长有不可替代的作用。土壤持水能力的高低主要取决于土壤结构和有机质含量,土壤结构中的机械组成、密度、团聚体、孔隙度、大孔隙半径及密度等不仅影响土壤表层固、液、气三相的分配比例,而且对土壤水分运移、物质运输以及能量交换等产生重要作

收稿日期:2016-03-09

修回日期:2016-03-21

资助项目:国家自然科学基金(41201283);国家公益性行业(农业)科研专项(201303095-15)资助;国家科技支撑计划项目(2015BAD23B05)

第一作者:潘全良(1991—),男,山东汶上人,在读硕士,研究方向为植物营养与土壤肥力。E-mail:qlpan0228@sina.com

通信作者:战秀梅(1974—),女,辽宁朝阳人,副教授,博士,主要从事植物营养与土壤肥力研究。E-mail:xiumeizhan@163.com

用^[2]。土壤有机质含量可以直接影响土壤吸水能力,也可以通过改善土壤结构间接地提高土壤持水性能。向土壤中添加不同的有机物料,对土壤养分循环以及生物代谢影响是不同的^[3-4],秸秆还田和施用有机肥可以改良土壤结构,提高土壤持水性能,早已有大量研究报道^[5-9],并对其改良作用给予充分肯定。生物炭具有疏松多孔、比表面积大的特征^[10],施入土壤后可以改善土壤结构、通气性以及保水能力^[11]。炭基肥是生物炭农用的另一种方式,有研究报道炭基肥可以提高水稻经济产量,增加籽粒氮素累积效率^[12]。如果将生物炭作为一种改良土壤的材料,还应该明确其与传统的土壤培肥方式之间改良效果的差异及优劣,但目前这方面的研究鲜有报道。沈阳农业大学植物营养研究团队自2009年开始进行生物炭及炭基肥(专利产品,基于生物炭的复合肥)改土微区定位试验,同时以玉米秸秆还田、猪厩肥作为对照试验,本文在此定位试验基础上,探究在相对较长的时间定位施用生物炭和炭基肥对土壤持水能力的影响,为生物炭农用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间微区试验位于国家花生产业技术体系土壤肥料长期定位试验基地—沈阳农业大学花生基地(40°48'N,123°33'E),属于温带湿润—半湿润季风气候(春季干旱,6—8月湿润),年平均气温7.0~8.1℃,年平均降雨量574~684 mm。试验于2008年整地2009年春季开始,小区面积2 m²。试验前0—20 cm土层土壤有机碳含量7.75 g/kg,土壤全氮含量0.86 g/kg,土壤全磷含量0.51 g/kg,碱解氮含量51.3 mg/kg,速效磷含量4.60 mg/kg,速效钾含量114.51 mg/kg,pH值6.10(水土比2.5:1),CEC值为8.32 cmol/kg。试验前原始土壤砂粒含量67.7%,粉粒含量6.3%,黏粒含量19.0%,根据国际制土壤质地分类标准确定为砂质黏壤土。

1.2 试验设计

试验设4个处理,分别为生物炭(BIO)、玉米秸秆(CS)、猪厩肥(PMC)3种物料与氮磷钾化肥配施以及单施炭基肥(BF)。处理1:秸秆(CS)4 500 kg/hm²+NPK(N:55.5 kg/hm²;P₂O₅:72.0 kg/hm²;K₂O:69.0 kg/hm²);处理2:猪厩肥(PMC)13 500 kg/hm²+NPK(N:45.0 kg/hm²;P₂O₅:52.5 kg/hm²;K₂O:46.5 kg/hm²);处理3:生物炭(BIO)1 500 kg/hm²+NPK(N:55.5 kg/hm²;P₂O₅:72.0 kg/hm²;K₂O:69.0 kg/hm²);处理4:炭基肥(BF)(11—11—13)

750 kg/hm²。化肥种类为尿素(46%N),过磷酸钙(12%P₂O₅)和硫酸钾(50%K₂O)。生物炭(辽宁生物炭工程技术研究中心提供)为玉米芯450℃裂解并过0.149~0.167 mm筛后造粒;秸秆粉碎至2~3 cm长,秸秆和猪厩肥为干基重量,炭基肥为玉米秸秆450~550℃裂解制备的生物炭与无机肥料复合而成,C含量20%、N含量11%、P₂O₅含量11%、K₂O含量13%。每年于播前将各有机物料、肥料与土壤耕层混合,人工除去杂草,收获后将地上植株残体移除,本试验设计3个重复,完全随机排列。

1.3 土壤样本采集与测试方法

1.3.1 样本的采集 在花生成熟期(2014年9月)采集0—20 cm原状土样,用塑料盒带回实验室,避免受到机械压力而破碎,稍阴干时即将土壤沿自然结构面轻轻地掰成直径约为1 cm左右的小土块,除去粗根和小石块,风干,用于团聚体的测定。另在微区中采集0—20 cm土样,放置室内通风处阴干,粉碎并过0.149 mm筛,用于测定土壤有机质含量。

1.3.2 土壤基本理化性质测定方法 土壤容重、田间持水量和土壤孔隙度的测定:使用100 cm³环刀(直径50.46 mm×高50 mm)采集表层下7—12 cm原位土壤,并使用铝盒法测定环刀周围土壤含水量,计算土壤容重、田间持水量和土壤孔隙度^[13]。

团聚体的测定:采用沙维诺夫和约得法^[14-15]分别分离出>0.25 mm和<0.25 mm粒级的干稳性和水稳性团聚体。

土壤比重采用比重瓶法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用NH₄OAc浸提,火焰光度计测定;pH值采用pH值计按水土比1:2.5测定;土壤全氮和有机碳采用元素分析仪(Vavio EL德国)测定。

土壤水分蒸发累积量的测定:使用100 cm³环刀(直径50.46 mm×高50 mm)原位采集表层土壤100 g,放置于实验室通风处,每隔2 d称量环刀内水分蒸发的重量,持续30 d,将水分蒸发累积量绘制曲线,即为水分蒸发累积曲线。

1.4 数据分析

采用Excel 2013与SPSS 19.0软件对试验数据进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤水分蒸发累积量和土壤含水量的影响

2.1.1 生物炭对土壤水分蒸发速率的影响 表层土

壤变干的过程一般经过 3 个阶段:一是初期固定蒸发速率阶段,土壤水分接近饱和,影响水分蒸发速率的因素只有气象条件;二是蒸发速率递减阶段,此阶段对土壤水分蒸发速率最大的因素变为土壤条件;三是蒸发消滞阶段,此阶段土壤表层接近干燥,土壤蒸发主要通过水分汽化的方式扩散到大气中,其速率主要取决于下层土壤的含水量及土壤中水汽压梯度^[16]。

由图 1 可以看出,在模拟试验前期(前 9 天内),土壤内水分含量较为充足,生物炭和炭基肥处理水分累积蒸发量都高于秸秆还田和猪厩肥处理,这段时间内生物炭和炭基肥处理土壤水分蒸发速率高于秸秆还田和猪厩肥处理,说明生物炭和炭基肥处理土壤保水能力低于秸秆还田和猪厩肥处理;在模拟试验的中后期(第 12~30 天),生物炭处理的土壤水分蒸发速率与猪厩肥处理持平,都高于秸秆和炭基肥处理。在模拟试验结束后,土壤已处于风干状态,水分主要以吸湿水形态存在,水分蒸发累积量越高即为环刀内 100 g 原状土中含水量越高,生物炭处理水分累积蒸发量最高,炭基肥处理累积蒸发量最低,说明生物炭处理土壤含水量最高,为 17.7%;炭基肥处理土壤含水量是最低的,为 15.9%。由于本试验土壤质地为砂质黏壤土,凋萎系数在 3%~5%,在凋萎系数之前

表 1 各处理间水分蒸发累积曲线与蒸发时间的回归方程

| 水分蒸发累积量(y)与蒸发时间(t)方程 | | | 水分蒸发累积百分比(Y)与蒸发时间(T)方程 | |
|------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| CS | $y_{cs} = 3.46 + 7.56 \lg t$ | $R^2 = 0.992$ | $Y_{CS} = 0.248 + 0.540 \lg T$ | $R^2 = 0.991$ |
| PMC | $y_{pmc} = 3.54 + 8.13 \lg t$ | $R^2 = 0.993$ | $Y_{PMC} = 0.238 + 0.545 \lg T$ | $R^2 = 0.992$ |
| BIO | $y_{bio} = 3.65 + 8.15 \lg t$ | $R^2 = 0.993$ | $Y_{BIO} = 0.241 + 0.538 \lg T$ | $R^2 = 0.993$ |
| BF | $y_{bf} = 4.41 + 6.85 \lg t$ | $R^2 = 0.973$ | $Y_{BF} = 0.321 + 0.498 \lg T$ | $R^2 = 0.973$ |

注: y 为水分蒸发累积量, t 为蒸发时间(d), a, b 为待定参数; Y 为水分蒸发累积比, T 为蒸发时间(d), A, B 为待定参数, 这些参数通过 SPSS 统计软件可以确定。

各处理中水分蒸发累积并非保持着同一个速率,而是有的快,有的慢。这种快慢的差别就体现了添加的各种有机物料对土壤保水能力以及供水数量的影响。对表 1 中的对数方程 $y = a + b \lg t$ 求时间的一阶导数,即能得到各处理水分蒸发速率随时间变化的方程。

$$d(t) = \frac{b}{\ln 10} \cdot \frac{1}{t} \quad (1 \leq t \leq 30)$$

各处理中时间(t)取同一数值时,蒸发累积量的变化速率与常数 b 呈正相关关系,即 b 值越大,在时间 t 天时土壤水分累积量增加越多。在本试验中生物炭处理的 b 值与猪厩肥处理持平,都高于秸秆和炭基肥处理,炭基肥处理回归方程中 b 值最小。当 t 值等于 1 时,水分蒸发累积量(y)等于常数 a , a 值与各处理初始蒸发速率呈正相关关系,即 a 值越大土壤水分蒸发速率越快。

的土壤水分对作物来说均为有效水,有效水含量由高到低排序为 $BIO > PMC > CS > BF$,所以与秸秆还田和施用猪厩肥相比,生物炭处理为作物生长提供的有效水含量增加,而炭基肥处理则降低了土壤有效水的供给。

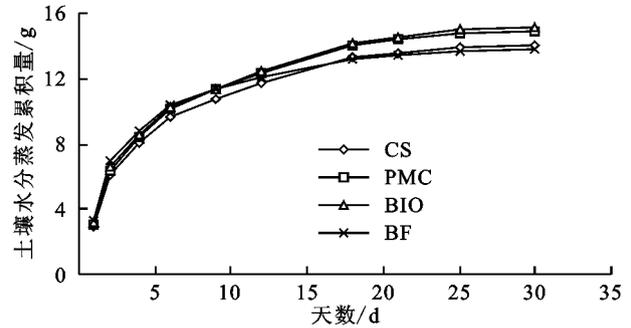


图 1 土壤水分蒸发累积量曲线

通过对不同处理下水分蒸发累积量以及水分蒸发量占总蒸发量百分比随蒸发时间延长的变化动态,也就是对各处理中水分蒸发累积量以及水分蒸发量占总蒸发量百分比随蒸发时间进行回归分析,结果发现:施用生物炭及附属产物和传统培肥方式水分蒸发累积动态变化规律非常相似。通过选用不同曲线模型对其动态变化进行拟合,结果发现用对数方程 $y = a + b \lg t$ 来拟合,效果最好(表 1)。

水分蒸发累积百分比是土壤水分蒸发量与水分总蒸发量的百分比,是土壤水分的相对蒸发速率,与土壤含水量没有关系,其变化速率可以解释试验土壤在含水量不一致的前提下土壤水分蒸发的快慢。对表 1 中的对数方程 $Y = A + B \lg T$ 求时间的一阶导数,导函数与上文一致,但是各处理中 B 值的大小排序发生了变化,生物炭和炭基肥处理中 B 值均小于秸秆还田和施用猪厩肥处理,这说明生物炭和炭基肥处理在时间 T 天时土壤水分累积蒸发量的百分比低。

2.1.2 生物炭对土壤含水量的影响 土壤相对含水量是土壤含水量与田间持水量的比值,这个指标能更好地反映各种土壤持水性能和土壤水分的有效性,及土壤水气状况,是评估不同土壤供给作物水分的统一尺度^[17]。由图 2 可知,生物炭和炭基肥对土壤

持水性能的影响与土壤含水量有密切关系。当土壤含水量较为充足,即相对含水量高于40%时,生物炭和炭基肥处理土壤保水性能较好,与猪厩肥持水性能接近,都优于秸秆还田处理;当土壤较为干旱,即相对含水量低于30%时,各处理含水量都持续下降,其中炭基肥处理含水量最低,猪厩肥和秸秆还田处理含水量分别比它高24%和20%;生物炭处理与秸秆还田处理土壤含水量相近,但与猪厩肥处理相比低了6%。

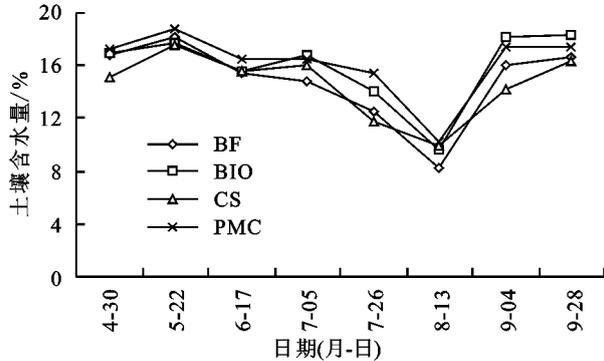


图2 2014年不同处理对土壤含水量的影响

表2 不同处理对土壤物理性质的影响

| 处理 | 比重/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 容重/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 总孔隙度/ % | 毛管孔隙度/ % | 田间持水量/ % | 土壤有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$) |
|-----|------------------------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| CS | 2.63±0.01a | 1.21±0.06a | 52.55±2.39a | 37.67b | 28.95±0.06b | 17.39±0.10ab |
| PMC | 2.63±0.01a | 1.28±0.09a | 50.00±3.42a | 38.89b | 29.18±0.03b | 18.08±0.14a |
| BIO | 2.65±0.01a | 1.25±0.11a | 51.37±4.34a | 39.70a | 30.41±0.03a | 16.48±0.40b |
| BF | 2.65±0.01a | 1.24±0.05a | 51.68±1.94a | 38.76b | 29.10±0.04b | 15.02±0.40c |

注:不同小写字母表示在0.05水平上差异显著, $n=3$,下表同。

2.2.2 生物炭对团聚体稳定性的影响 一般把 >0.25 mm的团聚体称为土壤团粒结构体,团粒结构是土壤中最好的结构体,其数量与土壤的肥力状况呈正相关^[18]。湿筛法获得的团聚体是土壤中的水稳性团聚体,水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要的贡献^[19]。

通过干筛法可以获得原状土壤中团聚体的总体数量,这些团聚体包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体。通过图3可以看出在干稳性团聚体中,PMC处理中 >0.25 mm粒级团聚体含量最高,BIO处理次之,CS处理中含量最低;在水稳性团聚体中,同样以PMC处理中 >0.25 mm粒级团聚体含量最高,各处理中大团聚体含量从高到低排序为PMC $>$ CS $>$ BIO $>$ BF,且各处理间差异达到显著水平。但是 >0.25 mm粒级水稳性团聚体含量最高为24.6%,远远小于 >0.25 mm粒级干稳性团聚体的最低含量(77.8%),说明该土壤中团聚体主要以非水稳性团聚体形式存在,土壤结构稳定性主要取决于非水稳性团聚体含量。

2.2 生物炭对土壤结构的影响

2.2.1 生物炭对各处理间孔隙状况的影响 土壤容重是土壤最基本的物理性状之一,可反映土壤的孔隙状况和松紧程度,能够影响植物赖以生存的土壤环境中水、肥、气、热的状况,进而影响植物的生长^[7]。土壤毛管孔隙可以持水,因此毛管孔隙度可以与田间持水量一起用来评价土壤持水能力。

由表2可见,BIO和BF处理中土壤比重高于CS和PMC处理;CS处理的土壤容重最低,为 $1.21 g/cm^3$,其次为BF和BIO处理,PMC处理容重最大;总孔隙度以CS处理最高,其次为BF和BIO处理,PMC处理容重最小,虽然比重、容重和总孔隙度大小有一定差异,但差异未达到显著水平;BIO处理的毛管孔隙度和田间持水量显著高于其他处理,BF处理与PMC和CS处理无显著性差异。由此可见,生物炭在改善土壤通气和持水潜力方面的效果优于秸秆还田、猪厩肥,施用炭基肥对在改良土壤结构方面的功效与秸秆还田和施猪厩肥没有显著性差异。

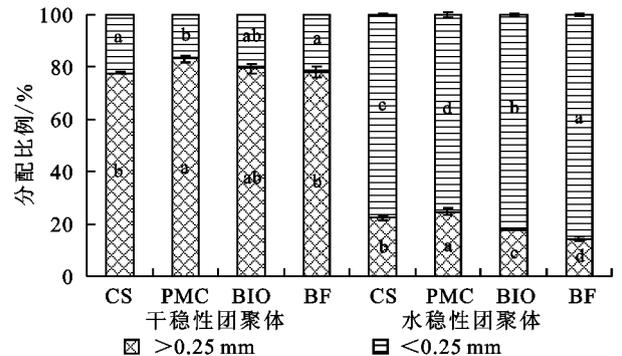


图3 不同耕作处理干湿筛下的 >0.25 mm团聚体含量

3 讨论

3.1 生物炭和炭基肥对土壤含水量的影响

(1) 生物炭和炭基肥通过改变土壤结构影响土壤含水量。由于生物炭多微孔,使得生物炭密度远远小于土壤的密度^[20]。因此生物炭施入后可使土壤容重降低^[21],具有更大的孔隙度,保持更多的水分、空气和养分^[22],进而改善土壤的持水保肥能力。秸秆还田和施用有机肥都可以降低土壤容重,提高田间持

水量。大量研究^[8-9,23-26]表明,秸秆还田可以降低土壤容重。秸秆还田后分解形成大量稳定腐殖质,提高土壤有机质,进而促进团粒结构的发育^[27-28],使土壤的孔隙增加,土质变松,保水保肥的能力增强^[9]。中国农科院在山东连续 9 a 进行的有机肥与化肥配施的试验表明,容重降低 0.03~0.1 g/cm³,总孔隙度提高 1.1%~3.8%,毛管孔隙度提高 3.45%~5.0%,田间持水量提高 2.49%~4.24%^[29]。

本研究结果表明,生物炭具有降低容重、改善土壤持水性能的作用,这与相关研究^[30]结果一致,并且效果优于施用猪厩肥的处理。生物炭处理容重高于秸秆还田处理,与葛顺峰等^[31]研究结果不一致,原因可能在于秸秆还田后,土壤难以压实,大大增加了土壤大孔隙数量。我国东北地区年积温较少,秸秆进入土壤后当年可能不能完全腐解,残余的秸秆会大大降低土壤容重。

与秸秆还田处理相比,生物炭和炭基肥处理总孔隙度少,但其毛管孔隙度显著高于秸秆还田处理。原因在于秸秆还田后降低了土壤容重、增加了土壤孔隙度,但主要是增加了非毛管孔隙的数量,非毛管孔隙不能提高土壤持水性能,甚至还会降低土壤持水性能。

Eynard 等^[32]研究结果表明,团聚体结构稳定性和土壤持水能力受到土壤有机碳含量和团聚体的粒径分布的影响,在低吸力段内,土壤团聚体的稳定性越好土壤持水能力越高。土壤团聚体越稳定是与土壤有机碳含量和大团聚(>0.25 mm 粒径)含量呈正相关^[33]。大团聚体含量越高,土壤越稳定。本试验土壤中水稳性大团聚体含量占总团聚体中的比例太少,团聚体总量对于土壤结构的稳定性起着主导作用,土壤含水量与干稳性大团聚体含量呈极显著正相关关系,相关系数可达 0.83。本试验中施用猪厩肥处理中干稳性和水稳性团聚体含量均为显著性最高($p < 0.05$),施用炭基肥处理稳定性最差,与猪厩肥相比,炭基肥处理土壤含水量在花生生长期间一直处于较低水平。

(2) 生物炭和炭基肥自身对土壤含水量的影响。在降水量较为充足的条件下,生物炭和炭基肥处理土壤含水量都高于秸秆还田处理。一方面,生物炭具有复杂的孔隙结构和极强的吸附性能^[10],据报道^[34],将生物炭作为土壤改良剂施入土壤,可吸附更多的水分和养分离离子^[35],提高土壤养分吸持量和持水容量^[36],尤其是氧化后的生物炭可提高砂质土壤的持水量^[37],改善土壤持水能力。生物炭可以增加土壤水

分滞留减少淋溶作用,这可能与它自身性质有关,生物炭含有羧基和羟基等亲水基团,随着生物炭在土壤中的氧化,羧基基团会越多,生物炭的亲水性增强^[38]。另一方面,秸秆翻压还田后,会出现土壤变得过松,孔隙大小比例不均、大孔隙过多,导致跑墒跑风,土壤水分蒸发量大^[39]。生物炭和炭基肥处理中毛管孔隙度都高于秸秆还田处理,说明这两个处理的保水能力优于秸秆还田处理。

2014 年辽宁省遭受 60 年一遇的干旱灾害,据统计,7 月至 8 月 31 日全省平均降水量为 144.8 mm,较常年同期(316.6 mm)偏少 5 成,为 1951 年以来同期最少值,土壤含水量持续降低,各处理含水量均下降至田间持水量的 30% 以下。生物炭和炭基肥对土壤的持水性能弱于秸秆还田和猪厩肥处理,这可能与生物炭性质有关。生物炭大多含有疏水基团^[40],其自身吸水量为 100%~200%,所以其持水能力是有限的^[41]。周桂玉等^[42]通过差热和红外法研究表明,生物炭不仅由芳香化结构组成,而且还含有许多脂肪族和氧化态碳结构物质。生物炭的基团会受材料来源、制作工艺的影响,且各种基团比例与温度有很大关系^[43]。生物炭中的脂肪族以及烷烃等疏水基团会影响生物炭与水亲和的能力,且疏水基团愈多,生物炭的保水性也就越差。Dugan 等^[39]在加纳土壤试验中得出,在一定含量内生物炭可以提高土壤保水性能,添加量持续增加反而会产生疏水作用,使土壤持水能力降低。腐殖质的吸水量为 400%~600%^[44],是黏土矿物吸水性的 10 倍,可以起到很好的保水作用。秸秆还田和施用猪厩肥后,土壤中腐殖质等有机胶体含量高于生物炭和炭基肥处理,所以在干旱时其保水性能高于生物炭和炭基肥处理。

3.2 生物炭和炭基肥对土壤保水能力的影响

(1) 生物炭通过改变土壤结构影响土壤持水能力。土壤水分蒸发是土壤水分整个运动过程中的一种特殊形式的阶段。土壤蒸发受土壤含水量、土壤质地和结构、土壤色泽和地表特征、土壤中毛管的输送能力等土壤内在因素的影响^[16]。生物炭和炭基肥处理在模拟干旱试验的前期(前 9 d)土壤水分蒸发累积量高于秸秆和猪厩肥处理。这说明生物炭和炭基肥处理土壤水分蒸发速率快,与秸秆还田和施用猪厩肥相比,对土壤水分吸附能力较弱。出现这一现象的原因可能是生物炭和腐殖质吸水性能差异较大,生物炭吸水量为自身的 100%~200%,而腐殖质吸水量为自身的 400%~600%。另外,生物炭和炭基肥施入

土壤后会加深土壤颜色,使土壤吸热能力变强,水分蒸发速度加快。与秸秆还田和施用猪厩肥相比,生物炭和炭基肥处理中毛管孔隙度显著较高,土壤输送水分的能力较强,秸秆改变了土壤的部分物理结构,土壤毛细管部分发生断裂,抑制土壤下层水分上升,达到减缓水分蒸发的效果^[1],这也是试验前期生物炭和炭基肥水分蒸发速率快的一个因素。

在模拟试验的中后期(第12天之后),生物炭和猪厩肥处理土壤水分蒸发速率高于秸秆和炭基肥处理。这是因为当土壤水分蒸发到一定程度,土壤表面相当干燥,土壤中液态水很难到达表面,土壤水分蒸发主要是通过水分汽化,由分子作用扩散到大气中。这时土壤水分蒸发速率主要是受土壤含水量的影响,含水量越高土壤水分蒸发速率越快。

在模拟试验结束时,各处理土壤水分累积蒸发量排序为 BIO>PMC>CS>BF。生物炭处理土壤水分累积蒸发量最高,且前期蒸发速率高于秸秆还田和猪厩肥处理,说明施用生物炭与秸秆还田和施用猪厩肥相比可提高土壤供水数量但降低了土壤保水能力。炭基肥处理与秸秆还田和猪厩肥处理相比降低了土壤供水数量和保水能力。

由本试验通过水分蒸发累积量以及水分蒸发量占总蒸发量百分比随蒸发时间拟合的回归方程 $y = a + blgt(1 \leq t \leq 30)$ 可知,在一段时间内,随着干旱天数的增加,PMC 和 BIO 处理中能够为作物提供的水分高于 CS 和 BF 处理。

(2) 生物炭通过改变土壤有机质含量影响土壤持水能力。土壤持水性能的强弱与土壤有机质含量密不可分,有机质不仅可以增加土壤孔隙度,还可以提高土壤胶体的数量,增加土壤的吸附能力^[45]。在发育良好的土壤中,其孔隙度和饱和含水量显著受控于土壤有机质含量^[46],原因在于土壤有机质可以促进土壤团粒结构的发育,提高毛管孔隙度,改善土壤通气和持水性能^[33]。由表2可知,本试验中生物炭和炭基肥处理中有机质含量显著低于秸秆还田和施用猪厩肥处理,这可能是影响生物炭和炭基肥保水性能的主要因素之一。

4 结论

与秸秆还田和施猪厩肥相比,生物炭和炭基肥处理能够更加有效地降低土壤容重、提高田间持水量、增大毛管孔隙度;与秸秆还田处理相比,在水分比较充足的情况下,施用生物炭和炭基肥可以提高土壤含

水量;在土壤水分贫瘠时,它们对土壤水分吸附能力弱于秸秆还田和施用猪厩肥处理;施用生物炭与秸秆还田和施用猪厩肥相比,可提高土壤供水数量但降低土壤保水能力。炭基肥处理降低了土壤供水数量和保水能力。

参考文献:

- [1] 钱成,蔡晓布. 秸秆还田对西藏中部退化农田土壤水分的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 586-588.
- [2] 赵勇钢,赵世伟,华娟,等. 半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究[J]. 草地学报, 2009, 17(1): 106-112.
- [3] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3594-3603.
- [4] 李紫燕,倪绸娟,李世清,等. 土壤类型和添加有机物料对铵态氮回收的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(6): 141-147.
- [5] 王静,黄毅. 辽西旱农区秸秆还田保水效果及对玉米生长的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(2): 113-116.
- [6] 武志杰,张海军,许广山,等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 539-542.
- [7] 张宝峰,曾路生,李俊良,等. 优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 309-314.
- [8] 乌学敏. 玉米秸秆还田对土壤理化性状的影响[J]. 现代农业, 2013(12): 22-26.
- [9] 刘娣,范丙全,龚明波. 秸秆还田技术在中国生态农业发展中的作用[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6): 404-407.
- [10] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [11] 张文玲,李桂花,高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153-157.
- [12] 陈琳,乔志刚,李恋卿,等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 671-675.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [14] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 681-689.
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [16] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003(2): 26-27.
- [17] 徐建明,黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil

- organic matter; II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3):1042-1049.
- [19] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [20] Bird M I, Ascough P L, Young I M, et al. X-Ray microtomographic imaging of charcoal[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(10):2698-2706.
- [21] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2008, 171(4): 591-596.
- [22] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2):1-7.
- [23] 王增丽. 秸秆不同处理还田方式对土壤理化特性和作物生长效应的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [24] 王珍. 秸秆不同还田方式对土壤水分特性及土壤结构的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- [25] 韦武思. 秸秆改良材料对沙质土壤结构和水分特征的影响[D]. 重庆:西南大学, 2010.
- [26] 张大伟. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对土壤理化性状及水稻养分吸收和产量影响[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
- [27] 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.
- [28] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(35):219-230.
- [29] 姚源喜, 杨延蕃. 施肥对土壤肥力的调控作用: III. 有机肥与无机肥配合施用对调节土壤中钾素平衡的影响[J]. *莱阳农学院学报*, 1988, 5(3):19-24.
- [30] 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(10):1948-1955.
- [31] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2):366-373.
- [32] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of aggregate structure and organic C on wettability of Ustolls[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 88(1/2):205-216.
- [33] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(10):2176-2183.
- [34] Kimetu J M, Lehmann J, Krull E, et al. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7):577-585.
- [35] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1):68-79.
- [36] 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.
- [37] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2013(8):1348-1352.
- [38] 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.
- [39] Dugan E, Verhoef A, Robinson S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities(WHC) of three soils from Ghana[C]//19th World Congress of Soil Science. Brisbane, Australia, 2010.
- [40] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2):159-166.
- [41] 陈静, 李恋卿, 郑金伟, 等. 生物质炭保水剂的吸水保水性能研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6):232-237.
- [42] 周桂玉. 生物质炭的结构特征及其对土壤腐殖质和植物生长的影响[D]. 长春:吉林农业大学, 2011.
- [43] 陆海楠, 胡学玉, 刘红伟. 不同裂解条件对生物炭稳定性的影响[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(8):11-14.
- [44] 赵兰坡. 土壤学[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1993.
- [45] 单秀枝, 魏由庆. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1):1-9.
- [46] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. *植物生态学报*, 2011(12): 1209-1218.