

秸秆全量深翻还田和施加生物炭对 不同土壤持水性的影响

于博,于晓芳,高聚林*,胡树平,孙继颖,王志刚,谢岷,朱文新
(内蒙古农业大学,呼和浩特 010019)

摘要:【目的】研究秸秆深翻还田对土壤持水性的影响机理。【方法】采用连续4 a玉米秸秆全量深翻还田定位试验和土壤有机碳梯度入渗淋溶模拟试验,秸秆全量深翻还田1~4 a处理(SF1、SF2、SF3和SF4),以不深翻秸秆全量还田处理作为对照(CK);土壤有机碳入渗淋溶模拟试验研究了2种质地土壤(砂土、壤土)的不同质量比生物炭处理条件下的土壤水力传导性,砂土中添加质量比为0、1%、3%、5%、8%、10%生物炭处理分别记作CKS、BS、CS、DS、ES、FS,壤土中添加质量比为0、1%、3%、5%、8%、10%生物炭处理分别记作CKR、BR、CR、DR、ER、FR,应用单环入渗法测定了土壤平均入渗速率和累积入渗量,应用压力膜法测定了土壤水分特征曲线。【结果】秸秆全量深翻还田后,相同的静水压力下,SF4处理持水性比CK降低21.05%,土壤平均入渗速率比CK增加82.07%,累积入渗量比CK增加225.09 cm;随深翻秸秆还田年限(随年份和深翻措施的累积增加)的增加,土壤持水性逐渐降低,土壤平均入渗速率逐渐加快,土壤的累积入渗量逐渐增多;在土壤体积质量保持不变的情况下,随生物炭量的增加,砂土的入渗速率、累积入渗量减小,持水能力升高;当生物炭添加比例从1%到8%时,壤土累积入渗量、入渗速率递增,持水能力降低,当添加生物炭量为10%时,较添加8%生物炭处理时土壤持水性略有升高,土壤持水性变化规律出现波动。秸秆全量深翻还田增加了土壤有机质量,土壤有机质的腐解增加了土壤生物炭量,同时结合室内模拟试验的结果,生物炭量的增加改善了土壤(0~40 cm)持水性和通透性。【结论】应适度采取秸秆深翻还田来改善土壤的持水性,可为春玉米的连续高产稳产提供良好的土壤水分环境。

关键词:春玉米;深翻;秸秆还田;土壤持水性;累积入渗量;土壤水分特征曲线

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0014

于博,于晓芳,高聚林,等. 秸秆全量深翻还田和施加生物炭对不同土壤持水性的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(5):25-32.

0 引言

秸秆覆盖还田可降低土壤水分蒸发速度,减少土壤蒸发量,增强土壤蓄水保墒能力,为下茬作物生长创造适宜的土壤水分条件^[1-3]。研究表明,生物炭是以木本植物为基质,在无氧条件下经高温缓慢热解产生含碳量较高、矿物质较少的固体物质^[4],其表面含有丰富的-COOH、-COH和-OH等含氧官能团^[5],施入土壤后,表面官能团被氧化使得该物质具有较高的阳离子交换量而显现出强大的吸附能力^[6]。生物炭本身具有孔隙结构、比表面积大等特点,添加到土壤后能增大土壤的孔隙度,有利于保持水分、空气和养分^[7],降低土壤密度^[8],促进土壤中水、肥、气、热的交换,促进植物根系生长,提高作物水肥利用效率^[9-11]。土壤饱和导水率、土壤水分特征曲线是土壤水动力学的主要参数,与土壤的结构和质地等因素密切相关,反映土壤的孔隙度、孔隙大小分布、导水性能及土壤水的入渗性能等^[12-15]。前人研究表明,随着土壤体积质量的增大土壤饱和导水率减小^[16-19]。田丹等^[20]研究发现,砂粒(粒径1~0.05 mm)量大于50%的砂土随着生物炭施入量的增加,孔隙

收稿日期:2017-12-04

基金项目:国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-63);国家科技支撑计划项目(2013BAD07B04);华北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站项目(25204120);国家重点研发计划项目(2017YFD0300804)

作者简介:于博(1986-),男,博士,主要从事作物生理生态研究。E-mail: yubotougao@163.com

通信作者:高聚林(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事玉米生理生态研究。E-mail: nmgaojulin@163.com

率增大,土壤入渗率、饱和导水率减小,饱和含水率增大,添加生物炭比例5%、10%与15%处理时饱和导水率与未添加生物炭处理相比分别减小37.9%、77.5%、92.2%,饱和含水率分别增大17.3%、24.0%、33.2%。目前,生物炭对改良土壤及作物效应的研究报道较多^[21-23],而对于不同配比生物炭对砂土、壤土入渗速率、累积入渗量及土壤水分特征曲线的影响机理研究较少。为此,对内蒙古河套灌区常见的砂土及壤土进行了不同配比生物炭对土壤导水性能和持水能力影响的研究,本研究中秸秆还田定位试验田的土壤类型为沙壤土。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

秸秆深翻还田定位试验于2010年10月—2014年10月在内蒙古农业大学科技示范园区(内蒙古包头市土默特右旗沟门镇)试验基地(属土默川平原灌区典型地块)进行。采集试验田0~40 cm(土壤深翻扰动土层深度为40 cm)土层土壤。地势平坦,定点试验田的耕层15~17 cm,犁底层为17~40 cm,土壤类型为沙壤土,年平均气温5.8℃,年平均降水392.8 mm,年平均积温2 767℃,年平均日照时间2 953.8 h,春玉米生育期降水量为314 mm,生育期积温2 580℃。每年秸秆全量深翻还田后取土,室内模拟采自内蒙古包头市土默特右旗春玉米高产地块的砂土和壤土(按卡庆斯基制土粒分级标准进行划分)。该地区气候干燥,降雨稀少,蒸发强烈,冬季漫长寒冷,夏季短促温热,属于典型高原干旱半干旱季风气候。室内模拟试验所用生物炭来源于辽宁金和福农业开发有限公司,试验取砂土和壤土(取土深度0~40 cm),土样运回实验室后风干、筛分并均匀混合备用,0~40 cm土层土壤物理参数见表1。

表1 不同质地土壤的基本物理参数

土壤	原状土体积质量/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤颗粒级配/%		
						0.05~1 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm
砂土	1.54	28.6	87.78	11.16	1.06	19.8	69.1	11.1
壤土	1.42	36.7	24.31	62.09	13.6	59.1	37.6	3.3

注 表中饱和含水率为质量含水率。

1.2 试验设计

1.2.1 深翻秸秆还田定位试验设计

秸秆全量深翻还田定位试验于2010年秋季,在联合收割机收获玉米籽粒后秸秆全量粉碎(粉屑状)还田,之后用翻转犁将地表秸秆深翻至土壤中,深度40 cm,相邻地块翌年同一时间深翻秸秆还田,至2013年秋季逐渐形成深翻秸秆还田1~4 a四条试验田,秸秆全量深翻还田1 a处理记作SF1、秸秆全量深翻还田2 a处理记作SF2、秸秆全量深翻还田3 a处理记作SF3、秸秆全量深翻还田4 a处理记作SF4,以不深翻秸秆全量还田处理作为对照(CK),共5条试验田平行排列,每条试验田长115 m,宽4.5 m,每条试验田年均秸秆还田量为20 034.79 kg/hm²,详见表2。

表2 深翻秸秆还田定位试验设计方案

自2010年,每条试验田于5月1日播种,品种为郑单958,密度82 500株/hm²。施肥量为纯N 465 kg/hm²、P₂O₅ 210 kg/hm²、K₂O 202.5 kg/hm²。其中磷钾肥全部作基肥,氮肥以3:6:1分别用作基肥和追肥,追肥于拔节期与灌浆前施用。春玉米生育期灌水4次,

处理	秋深翻处理年		秸秆还田方式
	2010	2011、2012、2013	
CK	0		2010—2013年籽粒收获后秸秆全量不深翻还田
SF1	2013		
SF2	2012、2013		2010—2013年籽粒收获后
SF3	2011、2012、2013		秸秆全量粉碎深翻还田
SF4	2010、2011、2012、2013		

拔节期1次、大喇叭口期1次和灌浆期2次,SF1、SF2、SF3和SF4处理的灌溉制度相同。

1.2.2 室内模拟试验设计

室内模拟试验选用砂土与壤土,以不添加生物炭作为对照组,以添加生物炭质量比为1%、3%、5%、8%、10%作为5个试验组,砂土记作CKS、BS、CS、DS、ES、FS处理,壤土分别记作CKR、BR、CR、DR、ER、FR处理,每个处理3次重复,共计36个土样。

1.3 测定内容

秸秆全量深翻还田定位试验,每年玉米籽粒收获后和春播前取原状土样,采用压力膜法测定土壤水分特征曲线;采用单环入渗法测定土壤渗析速率曲线、土壤累积入量、土壤平均入渗速率;采用碱解扩散法测定土壤速效氮;采用碳酸氢钠浸提分光光度计比色法测定土壤速效磷;采用火焰光度计法测定土壤速效钾;采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质;采用pH电位计法测定土壤pH值。

室内模拟入渗试验于内蒙古农业大学岩土物理实验室进行。采用环刀(100 cm³)装土,为消除环刀内壁面优势流的影响,在环刀内壁均匀涂抹凡士林。环刀外部采用1 cm的石英砂作为反滤层,为防止土壤进入反滤层引起堵塞,在反滤层上平铺2层纱布。由于生物炭体积质量很小(介于0.3~0.8 g/cm³),将生物炭与土壤均匀混合,以确保试验材料的一致性,用塑料袋将调好的土样包裹严实静放24 h(避免蒸发),分割6份;然后将土壤与生物炭均匀混合样按照初始体积质量(砂土为1.54 g/cm³,壤土为1.42 g/cm³)和初始质量含水率(砂土为7.12%,壤土为15.03%)均匀回填至环刀中。装填后用塑料袋将调好的土样包裹严实静放24 h,避免产生水动力学特征突变。

采用单环入渗仪,由环刀、水位控制杯和马利奥特(Mariotte)瓶组成。取土环刀内径5 cm,高为5.05 cm;水位控制杯由有机玻璃管制成,高13 cm,内径5 cm。试验装置成功安装后,调整马氏瓶发泡点与水位控制杯高度,使其处于同一水平面并自动供水,马氏瓶提供恒定水头10 cm,环刀下面用外径5.2 cm的多孔(孔径20目)底座固定,防止试验过程中土壤脱离环刀,底座下方放置漏斗和量筒,收集渗出水。开始入渗试验时,用秒表迅速记录下不同时刻马氏瓶刻度上的读数。测定包括每一时间段和不同时间段的入渗水量,根据土壤入渗的一般过程,入渗开始后的0~2 min,每1 min观测1次;2~30 min内,每2 min观测1次;30~90 min内,每5 min观测1次;90 min以后,每10 min观测1次。室内模拟入渗试验观测时间持续120 min。

1)土壤水入渗速率测定:采用单环入渗法进行入渗速率及累积入渗量测定。试验结果运用Kostiakov模型对土壤入渗速率进行相关分析。计算公式为: $K=\alpha \cdot t^n$ 。式中: α 为入渗参数,反映土壤前期入渗能力的重要指标; n 为入渗指数,反映土壤入渗能力的衰减速度, n 值越大则入渗速率随时间减小的程度越快; t 为渗透时间(min)。

2)土壤水分特征曲线:采用压力膜法测定,压力范围:0~15 mbar。借助 van Genuchten 模型 $\theta=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)/[1+(\alpha H_p)^m]^m$ 拟合不同配比生物炭处理的土壤水分特征曲线。其中 θ_r 为残留含水率(cm^3/cm^3), θ_s 为饱和含水率(cm^3/cm^3), α 、 u 、 m 为曲线形状参数($m=1-1/u, u>1$), H_p 为土壤基质势(cm)。

1.4 数据统计分析

采用Excel 2007软件进行回归拟合,SPSS 17.0软件对数据进行单因素方差分析、LSD多重比较和相关分析,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 深翻秸秆还田对土壤导水性的影响

2.1.1 深翻秸秆还田对土壤水分特征曲线的影响

由图1、图2可知,连年深翻秸秆还田处理后,0~20 cm土层,在相同压力下的含水率变化规律为CK<SF1处理<SF2处理<SF3处理<SF4处理;20~40 cm土层,在相同压力下的含水率变化规律为SF4处理<SF3处理<SF2处理<SF1处理<CK。各土层变化规律趋于一致,当压力为1 mbar时含水率趋于稳定。

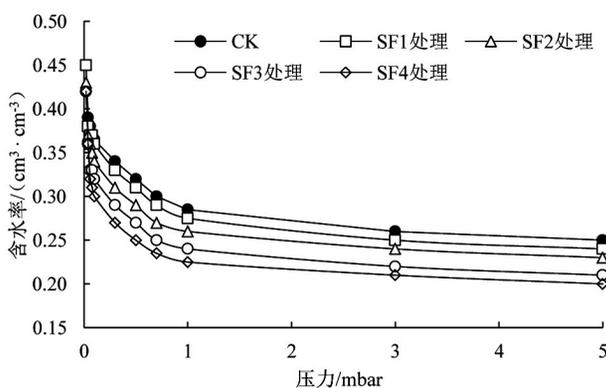


图1 不同处理0~20 cm土壤水分特征曲线

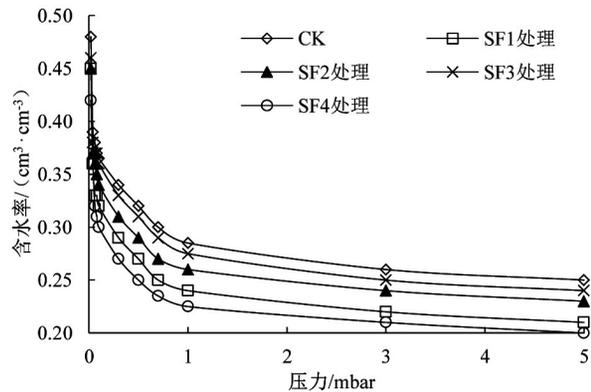


图2 不同处理20~40 cm土壤水分特征曲线

2.1.2 深翻秸秆还田对土壤渗析速率曲线的影响

由图3可知,连年深翻秸秆还田处理后,对土壤渗析速率曲线进行分析,在0~6 min时,SF1、SF2、SF3、SF4处理渗析速率与CK相比差异不明显;在6~14 min时,CK<SF1处理<SF2处理<SF3处理<SF4处理。CK在14 min时达到稳定入渗,渗析速率为0.055 cm/min;SF1处理在16 min时达到稳定入渗状态,渗析速率为

0.057 cm/min; SF2 处理在 18 min 时达到稳定入渗, 渗析速率为 0.089 cm/min; SF3 处理在 16 min 时达到稳定入渗, 渗析速率为 0.125 cm/min; SF4 处理在 14 min 时达到稳定入渗, 渗析速率为 0.15 cm/min。说明土壤渗析速率随深翻秸秆还田年限的增加而增大。

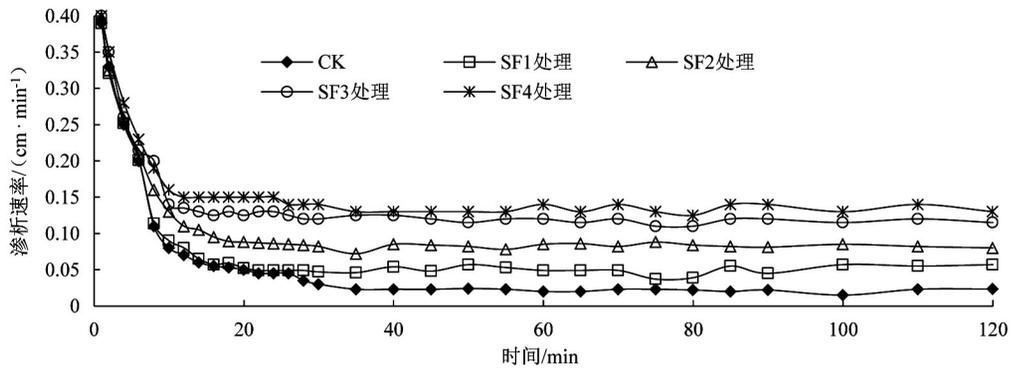


图3 不同处理0~20 cm 土壤渗吸速率曲线

2.1.3 深翻秸秆还田对土壤保水蓄水能力的影响

表3为连年深翻秸秆还田后, 0~40 cm 土层土壤累积入渗量。土壤累积入渗量越大表示蓄水保水能力越弱。由表3可知, SF1、SF2、SF3、SF4 处理的土壤累积入渗量显著大于 CK ($p < 0.05$); 各处理大小规律为: SF1 处理 < SF2 处理 < SF3 处理 = SF4 处理。SF1、SF2、SF3、SF4 处理土壤平均入渗速率显著大于 CK ($p < 0.05$); 各处理大小规律为: SF1 处理 < SF2 处理 < SF3 处理 = SF4 处理。

表3 深翻秸秆还田下土壤累积入渗量和平均入渗速率

处理	累积入渗量/cm	平均入渗速率/(cm·min ⁻¹)
CK	94.79±3.55c	0.79±0.04c
SF1	217.52±11.28b	1.813±0.09b
SF2	297.85±15.99b	2.482±0.12b
SF3	319.88±36.82a	2.666±0.16a
SF4	319.88±41.64a	2.666±0.09a

2.1.4 深翻秸秆还田对土壤基础肥力和 pH 值的影响

由表4可知, 连年深翻秸秆还田后, SF1、SF2、SF3、SF4 处理的土壤有机质量比 CK 显著增加了 15.35%、24.78%、25.07% 和 25.56% ($p < 0.05$), 且 SF4 处理 > SF3 处理 > SF2 处理 > SF1 处理。SF1、SF2、SF3、SF4 处理的速效氮量比 CK 显著增加了 20.28%、14.46%、17.20% 和 21.95% ($p < 0.05$), 各处理间大小顺序为 SF4 处理 > SF3 处理 > SF2 处理 > SF1 处理; SF1、SF2、SF3、SF4 处理的速效磷量比 CK 显著增加了 6.8%、12.07%、17.85% 和 23.30% ($p < 0.05$), 各处理间大小顺序为 SF4 处理 > SF3 处理 > SF2 处理 > SF1 处理; SF1、SF2、SF3、SF4 处理的速效钾量比 CK 显著增加了 17.59%、16.34%、20.49% 和 29.85% ($p < 0.05$), 各处理间大小顺序为 SF4 处理 > SF3 处理 > SF1 处理 > SF2 处理; SF3、SF4 处理的土壤 pH 值比 CK 显著降低了 1.95% 和 1.73%, 各处理间大小顺序为 SF1 处理 > SF2 处理 > SF4 处理 > SF3 处理。

表4 深翻秸秆还田下土壤有机质、速效养分和 pH 值

处理	有机质量/(g·kg ⁻¹)	速效养分质量分数/(mg·kg ⁻¹)			pH 值
		速效氮	速效磷	速效钾	
CK	10.29±0.41a	48.61±1.06a	5.88±0.11a	50.81±0.91a	8.22±0.01a
SF1	11.87±0.34b	58.47±0.60b	6.28±0.08ab	59.75±0.05b	8.23±0.02a
SF2	12.84±0.17c	55.64±2.16b	6.59±0.23b	59.11±1.26b	8.13±0.02a
SF3	12.87±0.08c	56.97±4.51b	6.93±0.03c	61.22±1.40b	8.06±0.04b
SF4	12.92±0.06c	59.28±0.84b	7.25±0.26c	65.98±2.46c	8.08±0.06b

2.2 添加不同生物炭量对土壤导水性的影响

2.2.1 添加不同生物炭量对累积入渗量的影响

图4为添加不同生物炭量处理土壤累积入渗量。由图4(a)可知, 生物炭的添加量对砂土累积入渗量影响较大, 其中 BS 处理比 CKS 明显降低, DS 处理比 CS 处理明显降低。试验选取 10、50、120 min 作为累积入渗量变化的观测时间点。10 min 时, CKS、BS、CS、DS、ES、FS 处理的土壤累积入渗量分别为 12.36、8.53、8.48、5.47、5.30、4.71 mL; 50 min 时, CKS、BS、CS、DS、ES、FS 处理的土壤累积入渗量分别为 45.31、30.31、25.55、11.65、9.71、7.651 mL; 120 min 时, CKS、BS、CS、DS、ES、FS 处理的土壤累积入渗量分别为 100.63、

65.32、53.21、20.63、16.18、11.77 mL。10 min时,BS、CS、DS、ES和FS处理变化不明显,说明入渗初期添加生物炭对累积入渗量影响不明显。50 min时,BS、CS、DS、ES和FS处理的土壤累积入渗量比10 min时明显增大,说明随入渗时间增加土壤表层含水率增大,土壤累积入渗量随生物炭量的增加而增大。120 min时,BS、CS、DS、ES和FS处理的土壤累积入渗量比50 min时明显增大,说明不同生物炭添加量对土壤入渗后期影响明显。到入渗后期砂土逐渐达到稳定入渗状态,DS、ES、FS处理累积入渗量增加的速度减小。

由图4(b)可知,生物炭对壤土累积入渗量的影响结果与砂土不同。生物炭添加比例从1%增加到8%时,壤土累积入渗量呈增大的趋势,说明壤土生物炭量在1%~8%时,累积入渗量随生物炭量的增加而增大。10 min时,CKR、BR、CR、DR、ER和FR处理的土壤累积入渗量分别为3.53、3.75、3.82、3.98、5.89、3.77 mL。50 min时,CKR、BR、CR、DR、ER和FR处理的土壤累积入渗量分别为7.65、7.39、7.60、8.10、10.04、7.72 mL。120 min时,CKR、BR、CR、DR、ER和FR处理的土壤累积入渗量分别为10.44、10.04、9.96、10.23、12.18、9.05 mL。10 min时,ER处理的累积入渗量最大,BR、CR、DR、ER和FR处理间变化不明显;50 min时,BR、CR、DR、ER和FR处理的土壤累积入渗量比10 min时明显增大;120 min时,BR、CR、DR、ER和FR处理的土壤累积入渗量与50 min时相比变化不明显。

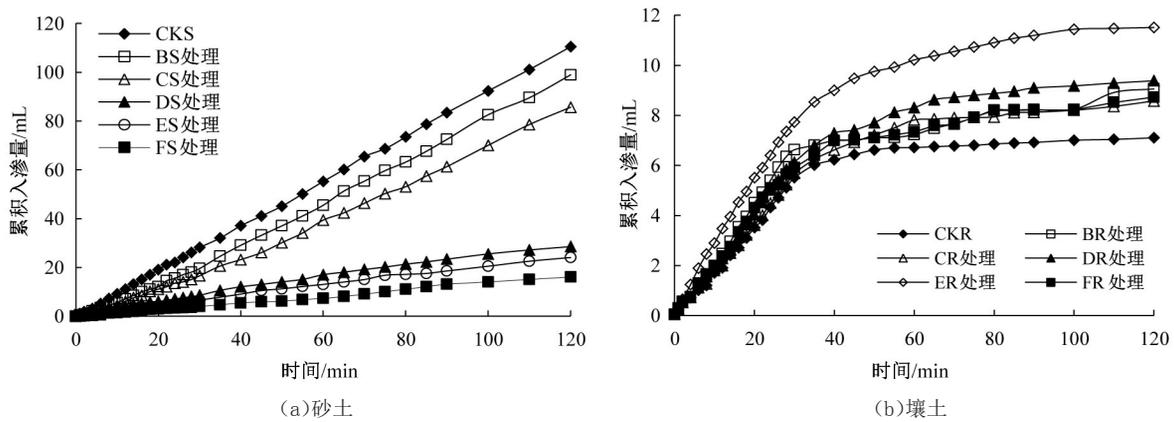


图4 不同生物炭配比条件下土壤累积入渗量

2.2.2 添加不同生物炭量对土壤入渗速率的影响

从表5可以看出,砂土 α 值随添加生物炭量增多逐渐减小,释水能力减小,CKS的 α 值最大,FS处理的 α 值最小,说明生物炭量不同对 α 值的影响不同。壤土 α 值是随着生物炭量的增多而增大,释水能力有所提高,FR处理较CKR显著减小了63.6%。 n 值变化范围在0.256 4~0.981 6之间,砂土的 n 值随生物炭量增加而增大;壤土的 n 值变化先升高后降低的趋势。Kostiakov模型中的 α 表征土壤前期入渗能力, n 表征土壤入渗能力的衰减速度, n 值越大则入渗速率随时间减小的程度越快。因此,砂土随生物炭量的增加 α 随之减小, n 值随之增大,累积入渗量逐渐降低,土壤入渗速率降低。壤土随生物炭量的增加 α 值和 n 值先增大后减小,累积入渗量先增加后减小,土壤入渗速率先增大后减小。

表5 不同生物炭处理土壤的Kostiakov模型参数

处 理	模型参数			
	α	n	R^2	
砂土	CKS	0.142 5	0.256 4	0.906 2
	BS	0.099 6	0.281 7	0.813 7
	CS	0.074 5	0.412 5	0.895 1
	DS	0.069 9	0.493 1	0.776 3
	ES	0.060 4	0.600 5	0.815 4
	FS	0.051 8	0.714 3	0.755 7
壤土	CKR	0.062 7	0.706 1	0.900 7
	BR	0.091 7	0.838 0	0.854 4
	CR	0.096 6	0.894 2	0.918 5
	DR	0.098 8	0.957 4	0.802 2
	ER	0.143 4	0.981 6	0.805 5
	FR	0.075 1	0.808 0	0.912 2

2.2.3 添加不同生物炭量对土壤持水能力的影响

RETIC 软件中 van Genuchten 模型中, θ_s 饱和含水率与 θ_r 残留含水率均表征土壤持水能力的重要指标。由表 6 可知, 对试验结果进行曲线拟合, 决定系数(R^2)均大于 0.755 7, 相关系数均达到显著水平。 θ_s 随生物炭量增加而增大, 壤土比砂土显著增大 9.7%, θ_r 与添加生物炭量呈正相关关系。 θ_r 随生物炭量增加而增大, 壤土比砂土显著增大 66.1%。说明生物炭量增加对 2 种质地土壤孔隙状况影响显著, 同时也说明壤土的持水性能比砂土强。

表 6 不同生物炭处理土壤水分特征曲线模型参数

处理	θ_s	θ_r	α_v	u	R^2	
砂土	CKS	0.398 1	0.057 6	0.015 1	1.387 5	0.973 7
	BS	0.407 8	0.021 1	0.016 9	1.410 9	0.968 7
	CS	0.430 4	0.046 6	0.016 3	1.390 6	0.971 0
	DS	0.444 6	0.080 4	0.012 2	1.334 4	0.964 6
	ES	0.417 3	0.087 1	0.015 0	1.363 7	0.975 5
	FS	0.496 0	0.088 5	0.037 3	1.185 6	0.975 0
壤土	CKR	0.454 0	0.049 9	0.009 6	1.058 8	0.864 4
	BR	0.478 9	0.065 9	0.012 8	1.054 4	0.879 6
	CR	0.483 4	0.115 8	0.022 6	1.055 8	0.902 6
	DR	0.492 3	0.251 1	0.026 7	1.237 8	0.828 0
	ER	0.490 7	0.275 0	0.028 6	1.215 2	0.928 2
	FR	0.474 1	0.379 2	0.006 4	1.150 2	0.891 8

α_v 为进气值的倒数, 即水分特征曲线接近饱和时拐点的吸气值。进气值越小, α_v 值越大, 排水越容易。砂土中添加生物炭 α_v 值逐渐减小, CKS 比 DS 处理减小 19.2%, CKS 比 ES 处理减小了 0.7%, 土壤毛管孔隙增多, 含水率增大。壤土则随生物炭量增加 α_v 值逐渐增大, ER 处理较 CKR 显著增大 66%, 含水率降低。

u 为土壤水分特征曲线的斜率, 表征土壤的释水能力。砂土的 u 值随生物炭量增加而减小, CKS 比 DS 处理减小 3.8%, CKS 比 ES 处理减小 1.7%, 随生物炭量增加, 曲线的斜率由缓变陡, 释水能力逐渐减小。壤土的 u 值是随着生物炭量增加而增大, 释水能力得到改善, CKR 比 DR 处理显著增加 14.46%, CKR 比 ER 处理增加 12.87%, CKR 比 FR 处理增加 7.9%。

3 讨论

试验结果表明, 连年深翻秸秆还田处理后, SF1、SF2、SF3 和 SF4 处理的渗析速率比 CK 明显增大, 原因是玉米秸秆的腐解增加了土壤有机质量, 从而增加了土壤生物炭量, 土壤固相颗粒的排列方式发生变化, 造成土壤的毛管孔隙减少, 重力孔隙增多, 同时结合室内模拟试验的结果, 生物炭增加后壤土持水性明显降低, 通透性明显增大, 这与前人^[1-3]的研究结果一致; 砂土持水性明显增大, 通透性降低。秸秆全量深翻还田后土壤平均入渗速率比 CK 显著增大, 相同时间内的累积入渗量明显增大, 这与曲学勇等^[24]研究结果一致。

土壤累积入渗模拟试验结果表明, 砂土累积入渗量随生物炭增加而降低, 这与 Doerr 等^[25]研究结果一致, 由于砂土孔隙较大, 对运动流体的阻力小, 单位势梯度下, 土壤水流通量大, 土壤水力传导度较大。随添加生物炭量增加, 砂土中大孔隙被生物炭填充而变小, 非毛管孔隙增多, 生物炭材料的比表面较大, 通透性较好, 累积入渗量随之减小。但砂土累积入渗量的减小并不是等梯度的, BS 处理与 CKS 差异明显, DS 处理与 CS 处理差异明显, DS、ES、FS 处理变化差异不明显。壤土质地密实, 孔隙度小, 累积入渗量较小; 生物炭体积质量小, 比表面积巨大, 比表面能高、吸附能力强, 添加生物炭量小于 8% 时, 随生物炭量增加土壤累积入渗量增加。当生物炭添加量超过 8% 时, 其累积入渗量减小了 18.23%。

通过 Kostikov 模型分析了土壤入渗速率的变化规律。 α 值在 0.051 8~0.143 4 之间变化。壤土入渗速率的衰减得到有效抑制, 入渗量增加, 生物炭量增加对土壤渗吸速度和入渗能力衰减起到一定抑制作用, 在入渗后期入渗速率减小, 这与许健^[26]研究结果一致。添加生物炭量, 壤土的入渗速率减小, 这可能是因为壤土内中小孔隙比例大, 土壤水以薄膜水形式吸附于土壤表面; 生物炭具有强吸附性使壤土的持水能力增加, 减小相同吸力下孔隙水的析出。

通过 van Genuchten 模型分析了土壤持水能力。砂土和壤土生物炭增加对土壤持水能力影响明显, 在不

同质地的土壤中影响机制不同。砂土添加生物炭后,通气孔隙减小、毛管孔隙数量增加, θ_s 增大;壤土添加生物炭后,非活性孔隙减少、毛管孔隙数量增加。砂土随生物炭量增加, α_s 值降低,渗出水量减少,砂土的持水能力增大;壤土随生物炭量增加, α_s 值增大,持水能力减小,通透性增大。这与文曼等^[27]研究结果不一致,认为土壤中添加生物炭能有效降低土壤干燥过程中的收缩程度,改善土壤结构,提高土壤持水性能;而本研究认为砂土添加生物炭后通气孔隙减小、毛管孔隙数量增加是导致土壤持水性降低的主要原因。砂土的水分特征曲线斜率 u 值为先缓后陡,因为孔隙较多,毛管力弱,较小吸力可以促使重力孔隙中的水导出,添加生物炭能保存毛管孔隙中的水分,只有较大吸力下才能缓慢释出;壤土中添加生物炭后,累积入渗量先增大后减小,释水能力先减小后增大,原因是生物炭是多孔碳材料,比表面积大和体积质量小,有一定的持水能力,这与文曼等^[27]和郑荣伟等^[28]研究结果一致。

4 结论

1) 秸秆全量深翻还田后,SF1、SF2、SF3和SF4处理土壤累积入渗量和平均入渗速率比CK增大,且各处理呈逐年递增的趋势,表明秸秆全量深翻还田4 a后,0~40 cm土层排水能力和释水能力增强、土壤持水性降低。

2) 随添加生物炭量增加,砂土的累积入渗量和吸渗速率逐渐减小,表明砂土的排水能力和释水能力减小,持水能力增大。当添加生物炭量为1%~8%时,壤土的累积入渗量和吸渗速率逐渐增大,当添加生物炭量超过8%时,累积入渗量和吸渗速率减小,排水能力和释水能力减小,持水能力增大,对于壤土而言,体积质量不变,添加生物炭量8%时为壤土持水性变化的拐点。

综合可知,秸秆全量深翻还田耕作措施增加了春玉米高产土壤有机碳,该措施是既能达到耕作土壤的目的,又改善土壤(0~40 cm)持水性和通透性,是一项可持续的耕作措施。

参考文献:

- [1] 李全起,陈雨海.覆盖与灌溉条件下农田耕层土壤养分含量的动态变化[J].水土保持学报,2006,20(1):37-40.
- [2] 蒋向,任洪志,贺德先.玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J].麦类作物学报,2011(3):569-574.
- [3] 徐泰平,朱波,汪涛,等.秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J].水土保持学报,2006,20(1):30-32.
- [4] GLASER B,HAUMAIER L,GUGGENBERGER G, et al. Black carbon in soils: the use of benzene carboxylic acids as specific markers[J].Organic Geochemistry, 1998, 29(4):811-819.
- [5] MORENOCASTILLA C, ÁLVAREZMERINO M A, LOPEZRAMON M V C, et al. Cadmium ion adsorption on different carbon adsorbents from aqueous solutions. Effect of surface chemistry, pore texture, ionic strength, and dissolved natural organic matter[J]. Langmuir, 2004, 20(19):8 142-8 148.
- [6] LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5):1 719-1 730.
- [7] DOWNIE A, CROSKY A, MUNROE P. Physical properties of biochar[M]. London: Earthscan, 2009.
- [8] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J].Plant and Soil, 2010, 333(1/2):117-128.
- [9] BOND T C, SUN H. Can reducing black carbon emissions counteract global warming[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(16):5 921-5 927.
- [10] BORNEMANN L C, KOOKANA R S, WELP G. Differential sorption behaviour of aromatic hydrocarbons on charcoals prepared at different temperatures from grass and wood [J]. Chemosphere, 2007, 67(5):1 033-1 042.
- [11] CHENG C H, LEHMANN J, THIES J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11):1 477-1 488.
- [12] 郭素珍.土壤物理学[M].呼和浩特:内蒙古文化出版社,1986.
- [13] 郭华,樊贵盛.冻融土壤Kostiakov入渗模型参数的非线性预报模型[J].节水灌溉,2015(11):1-3.
- [14] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:220-261.
- [15] 华孟,王坚等.土壤物理学附实验指导[M].北京:北京农业大学出版社,1993:44-102.
- [16] KAMMAR R S, RIZVI H A, AHMED M, et al. Measurement of field saturated hydraulic conductivity by using Guelph and Velocity permeameters[J]. Transactions of the Asae, 1989, 32(6):1 885-1 890.
- [17] HELALIA A M. The Relation Between Soil infiltration and Effective Porosity in Different Soils[J]. Agricultural Water Management,1993, 24(1):39-47.
- [18] 王小彬,蔡典雄,高绪科,等.不同农业措施对土壤持水特征的影响及其保水作用[J].植物营养与肥料学报,1996(4):297-304.
- [19] 刘洪禄,吕露,杨培岭,等.波涌灌溉供水表面密实层特性的实验研究[J].灌溉排水,1997(4):6-11.
- [20] 田丹,屈忠义,李波,等.生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J].灌溉排水学报,2013, 32(3): 135-137.
- [21] 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等.生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J].农业机械学报,2014, 45(1):137-142.
- [22] 葛春辉,唐光木,徐万里.生物质炭对沙质土壤理化性质及作物产量的影响[J].新疆农业科学,2013, 50(6):1 108-1 114.
- [23] 王典,张祥,姜存仓,等.生物质炭改良土壤及对作物效应的影响研究进展[J].中国生态农业学报,2012, 20(8):963-967.
- [24] 曲学勇,宁堂原.秸秆还田和品种对土壤水盐运移及小麦产量的影响[J].中国农学通报,2009, 25(11):65-69.

- [25] DOERR S H, SHAKESBY R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, Characteristics and hydrogeomorphological significance[J]. Earth Science Reviews, 2000, 51(1/4): 33-65.
- [26] 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [27] 文曼, 郑继勇. 生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 46-50, 55.
- [28] 郑荣伟, 冯绍元, 郑艳侠. 北京通州区典型农田土壤水分特征曲线测定及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 77-80.

Change in Hydraulic Properties of Soils Amended with Biochar Following Plough of Straw Stalk into Deep Soil Horizon

YU Bo, YU Xiaofang, GAO Julin*, HU Shuping, SUN Jiying, WANG Zhigang, XIE Min, ZHU Wenxin
(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: **【Objective】** Soil hydraulic properties are affected by many biotic and abiotic processes and this paper is to investigate experimentally the changes in infiltration rate and water-holding capacity of soils amended with biochar after ploughing maize stalk into deep soil horizons. **【Method】** We measured water infiltration in the soils in a corn field for four years after stalk of the maize was ploughed into subsoil via a deep tillage after the harvest; the control was no straw. We also examined the impact of biochar amendment on a loam soil and a sandy soil with biochar-soil ratio at 0, 1%, 3%, 5%, 8%, 10%. The average water infiltration rate and accumulated infiltration in the soils were measured using single-ring infiltration method, and water retention curves of the soils were measured using pressure-membrane method. **【Result】** ① Compared with the CK, at the same matric potential, four years after the tillage increased the water-retention capacity by 21.05%, average infiltration rate by 82.07% and cumulative infiltration by 225.09 cm. ② As time elapsed after the tillage, the water-holding capacity of the soils started to decline while the average infiltration rate increased. 3) Water-holding capacity and the infiltration rate of the sandy soil decreased with increasing biochar application, while in the loam soil applying biochar at ratio of 1% to 8% increased the infiltration rate but reduced water-holding capacity; increasing the biochar application further to 10% only slightly improved the water-holding capacity. **【Conclusion】** Ploughing the maize stalks into subsoil horizon by deep tillage increased soil organic matters and microbial decomposition, thereby improving the ability of the 0~40 cm soil to hold and conduct water. The four-year experiment revealed that such treatments increase yield of the spring maize due to the improved soil quality.

Key words: spring maize; deep tillage; straw returning; soil water retention property; cumulative infiltration; water characteristic curve

责任编辑:白芳芳