

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19540

增施有机肥改善黑土物理特性与促进玉米根系生长的效果

槐圣昌¹, 刘玲玲², 汝甲荣², 闫志浩¹, 王瑾瑜¹, 王士超¹,
邢婷婷¹, 武红亮¹, 卢昌艾^{1*}, 孙继英^{2*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 耕地培育技术国家工程实验室 / 中国农业科学院土壤质量重点实验室, 北京 100081; 2. 黑龙江省农业科学院克山分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

摘要: 为改善东北黑土区粘重耕层的土壤物理特性, 通过玉米秸秆还田基础上增施有机肥试验, 拟明确增施有机肥对黑土物理特性和根系生长的提升效果。利用 2015 ~ 2018 年吉林省公主岭市和黑龙江省克山县黑土区的定位试验, 测定了玉米抽雄期 3 种秸秆还田处理及其增施有机肥 (旋耕秸秆还田 + 有机肥 RSM、深翻秸秆还田 + 有机肥 DSM、深松秸秆还田 + 有机肥 SSM) 处理的土壤物理指标; 并采用微根管法原位测定了根系生长指标, 计算出增施有机肥后各土壤物理特性与根系生长指标的变化量。结果表明, 相比秸秆还田处理, 增施有机肥降低了土壤容重、土壤紧实度, 提升了土壤含水量, 同时根长密度、根尖数密度和根平均直径均显著增加, 其中根长密度和根尖数密度各土层平均增加了 0.18 cm/cm² 和 34.9×10^{-3} 个/cm²。不同秸秆还田方式增施有机肥后对黑土物理特性和根系生长的改善效果不同, 其中 0 ~ 15 cm 土层 RSM 处理改善效果最明显, 15 ~ 45 cm 土层 SSM 和 DSM 处理改善效果最明显。有机肥和秸秆还田方式互作对黑土物理特性和促进根系生长指标具有显著的正向互作效应。上述结果表明, 深松秸秆还田和深翻秸秆还田基础上增施有机肥模式更有利于改善黑土物理特性和促进根系生长, 是改善东北黑土区粘重耕层的技术选择。

关键词: 增施有机肥; 秸秆还田方式; 根系生长; 玉米抽雄期; 微根管; 东北黑土区

黑土是我国宝贵的高肥力土壤资源, 但近年来由于不合理的土地管理措施和高强度的土地利用方式, 使得黑土区土壤紧实, 犁底层加厚, 阻碍玉米根系的生长。秸秆还田和施用有机肥一定程度上改善了土壤物理特性, 为根系生长创造良好的土壤环境^[1-2]。目前秸秆还田后增施有机肥对黑土物理特性和根系生长的研究相对较少。玉米抽雄期是营养生长和生殖生长旺盛的并进阶段, 是决定玉米产量最关键时期。因此, 明确不同秸秆还田方式基础上增施有机肥对黑土物理特性和玉米抽雄期根系生长的影响, 对东北黑土区深厚熟化耕层构建具有重要意义。

研究表明^[3-5], 增施有机肥减小土壤容重, 增加土壤的透气性和土壤含水量, 从而促进根系生

长, 提高作物产量。韩晓增等^[6]研究发现在东北黑土区增施有机肥较不施有机肥土壤容重降低了 6.20%, 总孔隙度增加了 6.02%, 0 ~ 100 cm 土层土壤含水量均显著增加。在黄淮海地区棕壤土上的研究表明^[7], 常规秸秆还田基础上增施有机肥能够促进秸秆腐解, 提升秸秆还田对改善土壤物理特性和促进根系生长的潜力。也有研究表明^[8-11], 相比单纯秸秆还田, 增施有机肥后不同秸秆还田方式对物理特性的改善效果存在明显差异。

上述研究进展表明, 秸秆还田基础上增施有机肥对土壤物理特性的改善效果仍有待进一步明确, 且相关研究极少涉及根系生长特征, 不同秸秆还田方式基础上增施有机肥对东北黑土物理特性和玉米根系生长的改善效果有待于进一步研究。本文通过增施有机肥试验, 测定了不同处理下黑土土壤容重、土壤含水量等物理特性的变化特征, 并采用微根管法田间原位监测玉米抽雄期玉米根系生长特征, 拟明确东北黑土区不同秸秆还田方式基础上增施有机肥对黑土物理特性和根系生长的改善效果。

收稿日期: 2019-11-19; 录用日期: 2020-02-02

基金项目: 中国农业科学院创新工程协同创新行动“东北黑土地地力提升与可持续利用技术”项目 (CAAS-XTCX2016008)。

作者简介: 槐圣昌 (1994-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为土壤培肥与改良。E-mail: huaishch@163.com。

通讯作者: 卢昌艾, E-mail: luchangai@caas.cn; 孙继英, E-mail: ksfysjy@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该定位试验开展于2015年,两试验点分别位于吉林省公主岭(43.18 ~ 44.15° N、124.03 ~ 125.30° E)、黑龙江省克山(47.85 ~ 48.56° N、125.17 ~ 126.14° E)。公主岭为温带大陆性季风气候,长期平均年降水量为572 mm,2018年降水量为683 mm,2018年生育期降水量590.3 mm;年平均气温为4 ~ 5℃,2018年玉米抽雄期日均最高气温28℃,日均最低气温18℃。克山为寒温带

大陆性季风气候,年平均降水量为499 mm,2018年降水量为639 mm,2018年生育期降水量555.7 mm;年平均气温为2.4℃,2018年抽雄期日均最高气温26℃,日均最低气温16℃。本研究进行于2018年,5月初种植春玉米,10月初收获。试验所选用的玉米品种公主岭为富民985、克山为瑞福尔1号。供试土壤为黑土,用于测定土壤基础值的土样于2015年4月获得,风干并研磨后通过2 mm的筛子,进行理化性质的测定。其0 ~ 15、15 ~ 30以及30 ~ 45 cm土壤基本理化性质见表1。

表1 试验开展前不同土层土壤理化性质

土层 (cm)	试验点	pH 值	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	质地	土壤容重 (g/cm ³)	土壤紧实度 (kPa)
0 ~ 15	公主岭	7.5	22.6	1.42	1.36	27.3	196	壤质黏土	1.35	1 590
	克山	7.1	26.7	1.49	1.09	51.3	204	中壤质	1.39	1 654
15 ~ 30	公主岭	7.6	15.4	1.28	1.33	15.2	180	壤质黏土	1.38	1 890
	克山	7.4	19.0	1.00	0.85	28.0	190	黏壤质	1.40	2 055
30 ~ 45	公主岭	7.4	7.0	0.59	1.00	7.5	186	粉质壤土	1.37	1 786
	克山	7.4	13.1	0.57	0.7	21.5	175	黏壤质	1.35	1 870

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计,以不同有机肥处理为主区,设2个水平,分别为不施有机肥、增施有机肥(M);以秸秆还田方式为副区,设旋耕秸秆还田(RS,旋耕耕深15 cm)、深翻秸秆还田(DS,深翻耕深30 cm)和深松秸秆还田(SS,深松耕深30 cm)3种方式。每个处理3次重复,小区面积为330 m²,小区之间有5 m宽的保护行;每个小区有16行玉米,均匀条播,公主岭种植密度为67 500株/hm²、克山为90 000株/hm²。有机肥为牛粪腐熟有机肥(有机质30.5 g/kg,全氮3.5 g/kg,全磷0.2 g/kg,全钾1.6 g/kg)。玉米收获后,粉碎的玉米秸秆均匀铺于小区地表,同时增施有机肥处理的小区均匀撒施有机肥(两试验点均为7.5 t/hm²),然后进行耕作整地,旋耕采用意大利MASCHIO旋耕机完成旋耕作业;深松采用ISQ-340型全方位深松机,深松后利用旋耕机将秸秆与土壤混匀;深翻采用挪威格兰KVERNELAND悬挂式翻转犁完成作业,秸秆翻埋于土中。

化肥采用缓释性包膜玉米专用肥,一次性基施,各小区施用同样的化肥用量,公主岭玉米专用肥N:P₂O₅:K₂O养分配比为26:11:13,用量为

900 kg/hm²;克山玉米专用肥N:P₂O₅:K₂O养分配比为26:12:12,用量为600 kg/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质的测定

土壤容重采用环刀法,测定时将环刀中的原状土样转移到铝盒中,在105℃下烘24 h称重,计算单位体积中烘干土的质量。土壤体积含水量采用TDR土壤水分测量仪进行测定,测定前一周内未有降雨。土壤容重和土壤含水量均于2018年8月6日测定了0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 45 cm 3个土层,每个处理均重复3次。土壤紧实度测定于2018年8月7日,所用仪器为美国spectrum公司SC-900土壤紧实度仪,测量范围为0 ~ 45 cm,测定间距为2.5 cm,每个处理均重复10次。

1.3.2 根系特征值的测定

利用CI-600植物根系检测系统监测了玉米抽雄期的根系生长特征(CID Bio-Science, Camas, WA, USA)。该系统主要包括微根管,微型摄像头和WinRHIZOTron图像分析软件3部分^[12]。微根管于2018年玉米苗期前进行安装。微根管(透明白色玻璃管)直径6.5 cm、长1 m,安装时与地面夹角为45°,地下埋深65 cm,于两个玉米植株之

间进行安装,每个处理小区随机安装3根。地上露出部分用锡纸与胶带包裹好,管口用黑色顶盖密封,防止阳光雨水进入微根管内。

玉米抽雄期利用CI-600根系扫描设备对根系进行扫描,观测时将附有滑竿的微型摄像头与计算机连接,滑竿移动间距为21 cm,每根管通过扫描获得0~15、15~30和30~45 cm 3张不同土层图片(21.59 cm×19.56 cm),然后用WinRHI-ZOTron 2015HR 软件分析获得根长、根尖数,根平均直径等根系生长指标值,并进一步计算得出根长密度、根尖数密度。

1.4 数据处理

本文利用各指标变化量(即秸秆还田+有机肥处理与单纯秸秆还田处理各指标的差值)表示增施有机肥的效果,正值表示各指标增加量,负值表示各指标降低量。运用Excel 2017 对本文数据进行整理,绘图软件为OriginPro 9.0;利用SPSS 17.0 软件,对有机肥和秸秆还田的单因素效应和交互效应进行二因素方差分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下增施有机肥对黑土物理特性的影响

由表2可知,相比不施有机肥,增施有机肥后各土层土壤物理特性均有所改善。与不施有机肥相

比,增施有机肥处理公主岭土壤容重、土壤紧实度的平均值分别降低0.041 g/cm³和111 kPa,克山分别降低0.037 g/cm³和129 kPa;公主岭和克山土壤含水量的平均值分别提高2.21%和2.04%。

不同秸秆还田方式增施有机肥后,对黑土物理特性的改善效果不同,其中0~15 cm 土层RSM处理改善效果最明显,15~45 cm 土层SSM和DSM处理改善效果最明显(表2)。从两试验点可以看出,0~15 cm 土层RSM处理土壤容重和土壤含水量变化量(两试验点平均)为-0.061 g/cm³和2.7个百分点,较SSM处理高29.7%和15.8%,较DSM处理高48.7%和18.9%;15~45 cm 土层增施有机肥后SSM和DSM处理土壤容重和土壤含水量的改善效果均优于RSM处理,其中SSM和DSM处理土壤容重的变化量(两试验点平均)分别比RSM处理高86.3%和59.0%,SSM和DSM处理土壤含水量的变化量分别比RSM处理高73.6%和66.9%;对于土壤紧实度,0~15 cm 土层RSM处理的改善效果最好,公主岭土壤紧实度降低了159 kPa,SSM和DSM处理次之,土壤紧实度分别降低了139和123 kPa;随土壤深度增加,SSM和DSM处理土壤紧实度降低迅速,15~30 cm 土层其土壤紧实度改善效果(175和170 kPa)明显优于RSM处理(134 kPa);30 cm 土层以下,对于土壤紧实度的降低幅度,SSM、DSM和RSM处理间无显著差异。

表2 不同秸秆还田下增施有机肥后土壤容重、含水量和紧实度的变化量

处理	土壤容重变化量 (g/cm ³)		土壤含水量变化量 (V/V, %)		土壤紧实度变化量 (kPa)	
	公主岭	克山	公主岭	克山	公主岭	克山
0 ~ 15 cm 土层						
RSM	-0.060 ^a	-0.062 ^a	3.05 ^a	2.40 ^a	-159 ^a	-183 ^a
DSM	-0.041 ^b	-0.042 ^b	2.52 ^b	2.02 ^b	-123 ^b	-141 ^b
SSM	-0.045 ^b	-0.049 ^b	2.44 ^b	2.23 ^{ab}	-139 ^b	-159 ^b
$\bar{X}$	-0.049A	-0.051A	2.67 A	2.22 A	-140 A	-161 A
15 ~ 30 cm 土层						
RSM	-0.040 ^b	-0.024 ^b	1.85 ^b	2.29 ^b	-134 ^b	-176 ^b
DSM	-0.058 ^{ab}	-0.048 ^a	2.83 ^a	3.60 ^a	-170 ^a	-201 ^a
SSM	-0.069 ^a	-0.055 ^a	3.07 ^a	2.76 ^{ab}	-175 ^a	-211 ^a
$\bar{X}$	-0.056 A	-0.042 A	2.58 A	2.88 A	-160 A	-196 A
30 ~ 45 cm 土层						
RSM	-0.009 b	-0.017 a	0.58 b	0.62 b	-26 a	-20 a
DSM	-0.022 ^a	-0.018 a	1.38 ^b	1.17 ^a	-36 a	-40 ^a
SSM	-0.019 a	-0.022 ^a	2.14 ^a	1.28 ^a	-40 ^a	-32 a
$\bar{X}$	-0.017B	-0.019B	1.37B	1.02 A	-34B	-31B

注:大写字母表示有机肥施用前后各土层间的差异显著性($P<0.05$);*表示同一秸秆还田方式下,有机肥施用先后差异显著性;同一土层同列不同小写字母表示旋耕秸秆还田、深翻秸秆还田和深松秸秆还田的变化量差异显著性($P<0.05$)。下表同。

除 0 ~ 15 cm 土层土壤紧实度外, 有机肥和秸秆还田方式互作对土壤容重和土壤紧实度具有显著负效应, 对土壤含水量具有显著正效应 (表 3)。

综合来看, 相比其他耕作模式, SSM 和 DSM 更有利于黑土物理特性的改变。

表 3 有机肥和秸秆还田单因素效应与互作效应的二因素方差分析 P 值

试验点	土层深度 (cm)	变异来源	土壤容重	土壤紧实度	土壤含水量	根长密度	根尖数密度	根平均直径
公主岭	0 ~ 15	有机肥 (O)	0.008	0.039	<0.001	0.010	0.002	<0.001
		秸秆还田方式 (S)	<0.001	<0.001	0.012	0.007	n.s.	n.s.
		O × S	0.022	n.s.	0.043	0.036	n.s.	<0.001
	15 ~ 30	有机肥 (O)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
		秸秆还田方式 (S)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	n.s.
		O × S	<0.001	<0.001	<0.001	0.032	<0.001	n.s.
	30 ~ 45	有机肥 (O)	<0.001	0.041	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
		秸秆还田方式 (S)	0.011	n.s.	0.021	0.002	0.014	<0.001
		O × S	0.032	n.s.	0.047	0.028	0.033	<0.001
克山	0 ~ 15	有机肥 (O)	<0.001	0.035	<0.001	<0.001	<0.001	n.s.
		秸秆还田方式 (S)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	n.s.	n.s.
		O × S	0.002	n.s.	0.002	<0.001	n.s.	n.s.
	15 ~ 30	有机肥 (O)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
		秸秆还田方式 (S)	<0.001	<0.001	0.05	0.002	<0.001	<0.001
		O × S	<0.001	<0.001	0.47	0.040	0.029	<0.001
	30 ~ 45	有机肥 (O)	0.013	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.008
		秸秆还田方式 (S)	<0.001	n.s.	<0.001	<0.001	0.003	n.s.
		O × S	0.044	n.s.	0.033	<0.001	0.046	n.s.

注: $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著, n.s. 表示差异不显著。

2.2 不同秸秆还田方式下增施有机肥对玉米根系生长的影响

2.2.1 根长密度和根尖数密度

从两试验点来看, 增施有机肥后各土层的平均根长密度和根尖数密度均高于不施有机肥处理 (表 4)。在公主岭, 增施有机肥处理根长密度和根尖数密度分别增加了 0.19 cm/cm^2 和 $33.4 \times 10^{-3} \text{ 个/cm}^2$; 在克山, 增施有机肥处理 0 ~ 45 cm 土层根长密度和根尖数密度分别增加了 0.19 cm/cm^2 和 $36.4 \times 10^{-3} \text{ 个/cm}^2$ 。

不同土层来看, 增施有机肥后, 不同秸秆还田方式的根长密度和根尖数密度在不同土层的提升效果存在显著差异。0 ~ 15 cm 土层 RSM 处理根长密度 (两试验点平均) 提高了 0.27 cm/cm^2 , 比 SSM 和 DSM 处理分别高 27.2% 和 33.3%; 15 ~ 45 cm 土层 SSM 和 DSM 处理根长密度的提升效果较 RSM 更加显著, 分别提高了 (两试验点平均) 0.21 和 0.20 cm/cm^2 , 较 RSM 处理高 66.6% 和 58.3%。与根长密度表现相似, 增施有机肥后, 不同秸秆还田方式对根尖数密度的提升效果不同, 0 ~ 15 cm 土层根尖数密度的提升效果表现为 $\text{RSM} > \text{DSM}$ 、SSM, 分别增加 (两试验点平均) $(51.9, 38.4, 35.7) \times 10^{-3} \text{ 个/cm}^2$; 15 ~ 45 cm 土层根尖数密度增加量大

小则表现 SSM 、 $\text{DSM} > \text{RSM}$, 分别增加 (两试验点平均) $(37.1, 32.4, 24.2) \times 10^{-3} \text{ 个/cm}^2$ 。

除 0 ~ 15 cm 土层根尖数密度外, 增施有机肥与秸秆还田方式互作对根长密度和根尖数密度均有显著正交互作用 (表 3)。相比其他耕作模式, SSM 和 DSM 均能显著促进根系生长。

2.2.2 根平均直径

由图 1 可知, 增施有机肥能够显著增加根平均直径, 其中公主岭根平均直径增加 0.13 mm; 克山增加 0.11 mm。与根长密度和根尖数密度有所不同, 对于根平均直径的增加幅度, 除克山 15 ~ 30 cm 土层, SSM、DSM 和 RSM 处理间无显著差异, 其中 0 ~ 15 cm 土层 SSM、DSM 和 RSM 根平均直径分别增加 (两试验点平均) 0.20、0.17 和 0.21 mm; 15 ~ 30 cm 土层分别增加 0.13、0.12 和 0.07 mm; 30 ~ 45 cm 土层分别增加 0.04、0.04 和 0.03 mm。有机肥与秸秆还田方式互作对公主岭 0 ~ 15 和 15 ~ 30 cm 土层以及克山 15 ~ 30 cm 土层根平均直径具有显著正交互作用, 而对其他土层并未产生显著影响 (表 3), 但综合几种模式来看, 仍表现为深松秸秆还田 + 有机肥和深翻秸秆还田 + 有机肥的根平均直径最高。

表 4 不同秸秆还田下增施有机肥后根长密度和根尖数密度的变化量

处理	根长密度变化量		根尖数密度变化量	
	(cm/cm ²)		(10 ⁻³ 个/cm ²)	
	公主岭	克山	公主岭	克山
0 ~ 15 cm 土层				
RSM	0.28 a	0.26 a	47.0 a	56.7 a
DSM	0.22 b	0.18 b	32.8 b	42.0 b
SSM	0.20 b	0.19 b	26.3 c	45.2 b
$\bar{X}$	0.23 A	0.21 A	35.4 A	50.0 A
15 ~ 30 cm 土层				
RSM	0.18 b	0.18 b	37.0 c	34.7 b
DSM	0.25 a	0.27 ab	48.5 b	46.1 ab
SSM	0.28 a	0.31 a	53.6 a	48.2 a
$\bar{X}$	0.24 A	0.25 A	46.4 A	43.0 A
30 ~ 45 cm 土层				
RSM	0.03 b	0.04 a	14.9 b	7.2 b
DSM	0.11 a	0.15 a	15.7 b	19.3 a
SSM	0.12 a	0.13 a	24.7 a	22.0 a
$\bar{X}$	0.09 A	0.10 A	18.4 A	16.2 A

3 讨论

3.1 不同秸秆还田方式下增施有机肥对黑土物理特性的影响

土壤容重和土壤紧实度是反映土壤松紧程度、通气状况的综合指标，直接或间接地影响土壤水分状况和作物根系的生长^[4, 13]。本研究结果表明，相比单纯秸秆还田，增施有机肥后各土层土壤容重和土壤紧实度均明显降低，这与董印丽等^[14]研究保持一致。秸秆还田基础上增施有机肥进一步降低土壤容重和土壤紧实度，可能是由于容重较低的有机肥与土壤混合后降低土壤容重，并且有机肥中含有较高的有机质，起到疏松土壤的作用^[15]；另外，有机肥能够促进秸秆的腐解^[16]，进一步改良土壤结构，从而降低土壤容重和土壤紧实度。秸秆基础上增施有机肥后各土层土壤含水量也显著增加，可能是由于增施有机肥后土壤容重和土壤紧实度降低，土壤孔隙状况改善，促进水稳性团聚体的形

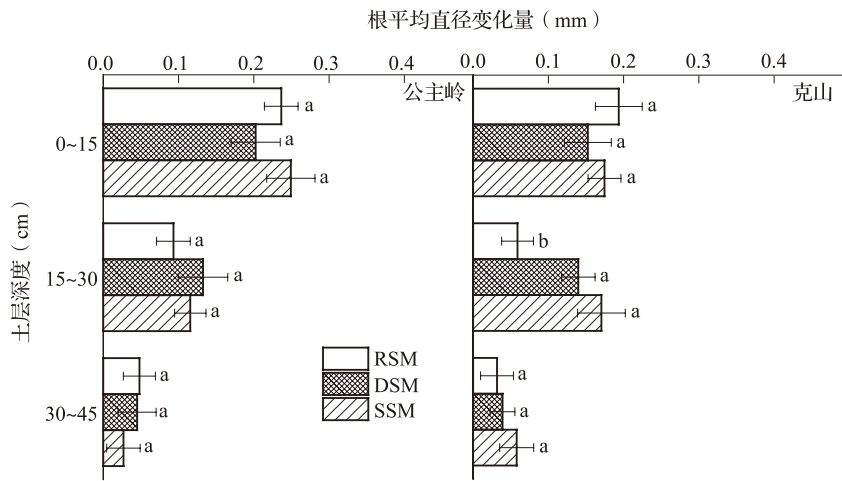


图 1 不同秸秆还田方式下增施有机肥后根平均直径的变化量

注：同一土层不同小写字母表示旋耕秸秆还田、深翻秸秆还田和深松秸秆还田的变化量差异显著 ($P<0.05$)。

成，提高土壤的蓄水性 and 持水能力^[17]。

增施有机肥后，不同秸秆还田方式对物理特性的改善效果不同。本试验结果表明增施有机肥后 0 ~ 15 cm 土层 RSM 处理土壤物理指标改善效果最好，而 15 ~ 45 cm 土层 SSM 和 DSM 处理各指标改善效果明显高于 RSM 处理。这可能是受试验地点、试验时间和耕作深度的影响，本研究选取的是长期传统旋耕的农田，试验前具有较高土壤容重和土壤紧实度（表 1），短期旋耕秸秆还田虽然在一定程度上改善了土壤犁底层厚实、水气失调的现状，但

效果有限^[18-20]，其改善程度不如 SSM 和 DSM 处理，Feng 等^[21]在中国西北地区粉壤土，以及本课题组在东北黑土区的研究均证明了这一点；在此基础上增施有机肥后，RSM 处理土壤表层物理指标有了较大程度的改善，但由于厚实犁底层的存在，仅有部分有机肥能通过稀释作用、聚集作用等途径改善下层土壤的物理特性，而 SSM 和 DSM 处理均能打破犁底层，秸秆和有机肥能够有效改善耕层及耕层以下土壤结构，使得 15 ~ 45 cm 土层 RSM 处理各物理指标改善程度明显低于 SSM 和 DSM 处理。

3.2 不同秸秆还田方式下增施有机肥对玉米根系生长的影响

有机肥能够通过改善根系环境,如土壤容重、土壤紧实度和土壤含水量等,从而刺激根系生长^[4, 22-23]。本研究表明相比单纯秸秆还田,秸秆还田基础上增施有机肥后各土层根长密度、根尖数密度和根平均直径均显著增加,这与 Zhou 等^[24]在黑钙土、张国娟等^[25]在灰漠土上的研究结果一致。这可能与增施有机肥后土壤物理特性的改善有关,增施有机肥后土壤疏松多孔,水气状况更加合理,从而促进根系生长,增加了根长密度、根尖数密度等,另一方面有机肥不仅含有作物必需的各种营养元素,而且含有大量的生物活性物质,能够促进秸秆腐解和活化土壤微生物,从而创造有利于根系生长的环境条件^[26-27]。

增施有机肥后,SSM、DSM 和 RSM 处理对各根系生长指标的改善效果存在显著差异。本研究结果表明,增施有机肥后 0 ~ 15 cm 土层 RSM 处理根长密度、根尖数密度和根平均直径的增加幅度高于 SSM 和 DSM 处理,而 15 ~ 45 cm 土层与之相反。这可能与土壤物理特性的变化特征有关^[28],从前面的讨论得知,RSM 处理土壤表层物理特性改善效果明显,从而更大程度上促进根系生长,并且由于 RSM 处理各根系指标的基础值较低,使其在增施有机肥后 0 ~ 15 cm 土层各根系指标的增加幅度显著高于 SSM 和 DSM;深松秸秆还田和深翻秸秆还田均能打破犁底层,使耕层土壤疏松多孔,在此基础上增施有机肥进一步协调土壤气、液、固三相比,加速秸秆腐解,为土壤微生物提供更为丰富的碳源,创造更为有利根系生长的土壤环境,使得 15 ~ 45 cm 土层 SSM 和 DSM 处理各根系指标改善效果较 RSM 更加显著。

4 结论

增施有机肥后均能明显降低黑土土壤容重和土壤紧实度,增加土壤含水量,提升玉米根长密度、根尖数密度和根平均直径,促进根系生长。增施有机肥基础上,不同秸秆还田方式对物理特性和根系生长的改善效果不同,其中 0 ~ 15 cm 土层旋耕秸秆还田 + 有机肥的改善效果最好,15 ~ 45 cm 土层深松秸秆还田 + 有机肥和深翻秸秆还田 + 有机肥的改善效果最好。综合来看,深松秸秆还田和深翻秸秆还田基础上增施有机肥更有利于改善黑土物理特

性和促进根系生长,是东北黑土地较为适宜的物理培肥模式。

参考文献:

- [1] 王月宁,冯朋博,侯贤清,等. 秸秆还田的土壤环境效应及研究进展 [J]. 北方园艺, 2019, (17): 140-144.
- [2] 许仁良,王建峰,张国良,等. 秸秆、有机肥及氮肥配合使用对水稻土微生物和有机质含量的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (13): 3584-3590.
- [3] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A. Safadoust, short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104 (1): 173-179.
- [4] 邱吟霜,王西娜,李培富,等. 不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 182-189.
- [5] Rasool R, Kukal S S, Hira G S. Root growth and soil water dynamics in relation to inorganic and organic fertilization in maize-wheat [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41 (20): 2478-2490.
- [6] 韩晓增,邹文秀,王凤仙,等. 黑土肥沃耕层构建效应 [J]. 应用生态学报, 2009, 20 (12): 2996-3002.
- [7] 李任. 麦玉两熟制秸秆还田促腐措施对土壤和作物的影响研究 [D]. 郑州:河南农业大学, 2015.
- [8] 杨娜. 秸秆还田和有机肥配施对土壤和作物的影响 [D]. 太谷:山西农业大学, 2018.
- [9] 史桂芳,毕军,夏光利,等. 秸秆还田与有机肥配施对冬小麦产量及性状的影响 [J]. 江西农业学报, 2011, (9): 118-120.
- [10] 王丽娜. 黄麻秸秆还田及施用有机肥对滨海盐土的改良试验 [D]. 南京:南京林业大学, 2009.
- [11] Xie J Y, Xu M G, Ciren Q J. Soil aggregation and aggregate associated organic carbon and total nitrogen under long-term contrasting soil management regimes in loess soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14 (12): 2405-2416.
- [12] Iversen C, Murphy M, Allen M, et al. Advancing the use of minirhizotrons in wetlands [J]. Plant and Soil, 2012, 352 (1/2): 23-39.
- [13] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, et al. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean [J]. Soil & Tillage Research, 2010, 110 (1): 115-125.
- [14] 董印丽,杜云良. 鸡粪有机肥改良盐化潮土的效果 [J]. 江苏农业科学, 2010, (2): 345-346.
- [15] 王西和. 长期定位施灰漠土有机质及物理性质的变化特征 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2014.
- [16] 翟修彩,刘明. 不同添加剂处理秸秆腐解物对红壤性质的影响 [J]. 土壤, 2013, 45 (5): 868-874.
- [17] 高飞,贾志宽,韩清芳,等. 有机肥对宁夏南部旱农区土壤物理性状及水分的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然

- 科学版), 2010, (7): 112-117.
- [18] 翟振, 李玉义, 张莉, 等. 短期深旋松对黄淮海沙姜黑土层结构及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1211-1218.
- [19] Ma S, Yu Z, Shi Y, et al. Soil water use, grain yield and water use efficiency of winter wheat in a long-term study of tillage practices and supplemental irrigation on the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 150 (150): 9-17.
- [20] 王淑娟, 李有兵, 吴玉红, 等. 耕作措施与秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤质量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, (4): 14-21.
- [21] Feng F X, Huang G B, Chai Q, et al. Tillage and straw management impacts on soil properties, root growth, and grain yield of winter wheat in Northwestern China [J]. *Crop Science*, 2010, 50 (4): 1465.
- [22] Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, et al. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72 (1): 9-17.
- [23] Mu X, Zhao Y, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain: the journal of the European Society for Agronomy [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 32-43.
- [24] Zhou K, Liu X, Zhang X, et al. Corn root growth and nutrient accumulation improved by five years of repeated cattle manure addition to eroded Chinese Mollisols [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92 (3): 521-527.
- [25] 张国娟, 濮晓珍, 张鹏鹏, 等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50 (13): 2624-2634.
- [26] 薛峰, 颜廷梅, 杨林章, 等. 施用有机肥对土壤生物性状影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (6): 1372-1377.
- [27] 吴晓宗, 王岩. 生物有机肥防治烟草青枯病及对土壤微生物多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (4): 193-199.
- [28] 于晓芳, 高聚林, 张峰, 等. 深翻对耕层土壤物理特性及超高产玉米根系垂直分布的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2015, 43 (2): 19-21, 23.

Effect of applying organic manure on improving soil physical properties and promoting root growth

HUAI Sheng-chang¹, LIU Ling-ling², RU Jia-rong², YAN Zhi-hao¹, WANG Jin-yu¹, WANG Shi-chao¹, XING Ting-ting¹, WU Hong-liang¹, LU Chang-ai^{1*}, SUN Ji-ying^{2*} (1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ National Engineering Laboratory for Improving Arable Land/key Laboratory of Soil Quality, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Keshan Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihaer Heilongjiang 161005)

Abstract: In order to improve the soil physical properties in the black soil area of Northeast China, the experiment of adding organic fertilizer on the basis of returning corn straw to the field was carried out to clarify the improvement effect of applying organic manure on the soil physical properties and root growth. Based on the in-situ experiments in Gongzhuling City of Jilin Province and Keshan County of Heilongjiang Province in 2015 ~ 2018, the soil physical indexes of three only straw returning treatments and their adding of organic manure treatments (rotary straw returning + manure RSM, deep straw returning + manure DSM, deep loose straw returning + manure SSM) were measured on maize's tasseling stage in 2018, and the minirhizotron method was used to measure root growth index. The change value of each index was calculated. The results showed that, compared with the only straw returning, adding of organic fertilizer reduced soil bulk density and soil compactness, significantly increased soil moisture content, and significantly increased root length density, root tip number density and root average diameter, in which root length density and root tip number density increased by 0.18 cm/cm² and 34.9 × 10⁻³/cm² respectively. The organic manure effect of different straw returning methods on the soil physical properties and root growth is different, in which RSM treatment in 0 ~ 15 cm soil layer is the most significant, and SSM and DSM treatment in 15 ~ 45 cm soil layer is the most significant. The interaction of organic fertilizer and straw returning had a significant positive interaction effect on soil physical characteristics and root growth. The results showed that adding organic manure on the basis of subsoiling straw returning and deep plowing straw returning was more conducive to improving the physical characteristics of black soil and promoting the growth of root system, which was the technical choice to improve the clay heavy ploughing layer in the black soil area of Northeast China.

Key words: application of organic manure; straw returning; root growth; maize's tasseling stage; minirhizotron; black soil region of Northeast China