

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.022

免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响

王宪良 王庆杰 李洪文 李问盈 牛琪 陈婉芝

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为研究免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性及作物根系的影响,于2013—2016年在河北涿州免耕试验田设置免耕(NT)、免耕深松(STNT)、免耕压实(CNT)和免耕压实深松(CSNT)4种处理,分析4种处理对土壤水稳团聚体、土壤容重、土壤紧实度、作物根系生长的影响。试验结果表明,在3年的试验周期内,CNT处理对大团聚体含量的影响具有累积效应,随着耕作时间的增加,CNT处理各土层土壤大团聚体含量逐渐减小,在深度上CNT处理对大团聚体含量的影响深度逐渐增加,且CNT处理能够显著减小土壤团聚体平均质量直径(MWD);10~40 cm土层,CNT处理土壤容重明显高于NT、STNT、CSNT处理;0~30 cm土壤紧实度由大到小表现为:CNT、NT、CSNT、STNT,CNT处理平均土壤紧实度分别比NT、CSNT、STNT处理大38.2%、58.9%、59.4%;0~20 cm土层CNT处理玉米平均根系质量百分比分别比NT、STNT、CSNT处理大24.0%、24.9%、19.3% ($P < 0.05$),CNT处理20~40 cm土层平均根系质量百分比仅有11.6%;CNT、NT、STNT、CSNT处理小麦平均最大根长密度分别为0.63、0.83、0.84、0.83 cm/cm³。免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性及作物根系生长影响显著,深松技术能够显著缓解压实,未受轮胎压实的免耕区域虽然能够增加土壤容重、紧实度,但影响不显著,短期内不需采取疏松措施。

关键词: 免耕; 土壤压实; 土壤特性; 作物根系生长; 深松

中图分类号: S152.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)06-0168-08

Effect of Tyre Induced Soil Compaction on Soil Properties and Crop Root Growth under No-tillage System

WANG Xianliang WANG Qingjie LI Hongwen LI Wenying NIU Qi CHEN Wanzhi

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate the effects of tyre-induced soil compaction on soil properties and crop root system under no-tillage condition in North China, a three-year (2013—2016) field experiment was carried out in Hebei Province. Four treatments, including no-tillage (NT), compaction lane under no-tillage (CNT), subsoiling tillage under no-tillage (STNT) and subsoiling tillage in compaction lane under no tillage (CSNT), were performed with randomized complete block design, with three replications for each treatment. The effects of different treatment on soil aggregation, soil bulk density, soil penetration resistance, maize root dry weight and roots distribution were evaluated. According to the result, there was a cumulative effect on macroaggregates content over time in CNT treatment, the value of this indicator was gradually decreased from 2014 to 2016; in the meantime, it was increased with the increase of soil depth. It was also indicated that soil mean weight diameter (MWD) was significantly reduced under CNT treatment. The soil bulk density for all the four treatments was increased with soil depth from 2014 to 2016, and the soil bulk density throughout the 0~40 cm soil profile presented a descending order of CNT, NT, CSNT and STNT. The soil bulk density under CNT treatment at 10~40 cm depth was significantly increased by 14.2% ($P < 0.05$), 15.7% ($P < 0.05$) and 17.1% ($P < 0.05$), respectively, compared with those for NT, CSNT and STNT treatments. The soil penetration resistance was one of the key soil properties, the values for this parameter presented a descending order of CNT, NT, CSNT and STNT, with the increase of soil depth. The average soil penetration resistance under CNT treatment was increased by 38.2% ($P < 0.05$), 58.9% ($P < 0.05$) and 59.4% ($P < 0.05$),

收稿日期: 2016-10-13 修回日期: 2016-11-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700301)和江苏省现代农业装备与技术协同创新中心项目(NZXT02201601)

作者简介: 王宪良(1990—),男,博士生,主要从事土壤压实研究,E-mail: 13126728942@126.com

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

respectively, when compared with NT, CSNT and STNT treatments. The wheat root length density and maize root space distribution in 0 ~ 20 cm soil layer in CNT treatment were better than those for NT, STNT and CSNT treatments, in cropping seasons from 2013 to 2016. The mean root content of summer maize under CNT treatment was increased by 24.0%, 24.9% and 19.3% ($P < 0.05$), respectively, compared with NT, STNT and CSNT treatments during a period from 2014 to 2016. There was only 11.6% of the average root content at 20 ~ 40 cm soil depth. The maximum mean wheat root density of wheat under CNT, NT, STNT and CSNT treatments was 0.63 cm/cm^3 , 0.83 cm/cm^3 , 0.84 cm/cm^3 and 0.83 cm/cm^3 , respectively. Finally, it was concluded that the soil under no-tillage was less compacted in spite of the compaction from nature sedimentation and seeding, but the tire-induced compaction had a significant effect on soil properties and crop root growth under no-tillage, the subsoiling tillage could significantly decrease soil compaction. Although the no-tillage area can increase the soil bulk density and soil penetration resistance, the effect was negligible, and there was no need for loosening measures.

Key words: no-tillage; soil compaction; soil properties; crop root growth; subsoiling tillage

引言

少耕免耕技术在我国主要包括秸秆覆盖和少耕免耕播种,可有效减少土壤扰动破坏和土壤风蚀水蚀,有利于农业可持续发展^[1-2]。由于我国干旱、半干旱地区农业发展面临干旱及土壤退化严重等问题,近年来免耕技术在我国发展迅速,免耕类机具不断发展,提高了农业生产效率,减少了农业生产成本^[3]。但大量研究表明^[4-6],农机具行走状态下轮胎碾压土壤造成土壤压实现象,且土壤压实一旦形成会造成持久伤害。免耕虽然可以减少轮胎进地次数,但如果长期不进行必要耕作,会产生轮胎积累压实效应。部分国外学者指出^[7-8],免耕技术引起的土壤压实现象会对土壤水氮运移、作物根系生长产生影响,最终导致作物减产。因此研究免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性及作物生长的影响具有重要意义。

目前,国内外科研工作者对免耕技术的研究主要集中在免耕技术对土壤理化性状的影响方面,如HUANG等^[9]通过设置免耕秸秆覆盖、免耕无覆盖、传统耕作3种处理,研究免耕对土壤特性的影响,结果表明,相比于传统耕作免耕覆盖能明显降低土壤容重,增加土壤入渗率,且能够明显增加土壤有机质含量。也有部分学者对传统耕作及田间机具对土壤硬度的影响进行了研究。焦彩强等^[10]通过旋耕和深翻对比试验,表明旋耕处理显著增加土壤紧实度,影响作物根系生长,深翻在整个作物生长期都能体现松土效果。郑红兵等^[11]研究了不同耕作方式对土壤硬度的影响,结果表明免耕能够增加耕层0~25 cm土壤硬度,而25~45 cm土层硬度显著降低。目前,缺乏固定免耕模式条件下,土壤压实及缓解措施方面的研究。

本文在免耕试验田基础上设置免耕(NT)、免耕深松(STNT)、免耕压实(CNT)和免耕压实深松

(CSNT)处理,通过田间定位试验测量土壤水稳性团聚体、土壤容重、土壤紧实度及作物生长指标,研究免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性及作物根系生长的影响,以期为华北一年两熟区农业生产系统选择合理的耕作措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2013—2016年在河北省涿州市东城坊镇中国农业大学河北北部耕地保育科学观测实验站(东经 $115^{\circ}44'$ 、北纬 $39^{\circ}21'$ 、海拔高度20~70 m)进行,试验区属于典型暖温带半湿润大陆性季风气候,2013—2016年年平均温度分别为11.6、12.3、13.6、11.2 $^{\circ}\text{C}$,年降水量分别约为450、460、490、480 mm。试验地地势平坦,土壤质地为砂壤土,pH值7.8,种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟,免耕试验地耕作工序为玉米联合收获—秸秆粉碎—小麦免耕施肥播种—小麦田间除草—小麦联合收获—玉米免耕施肥播种—喷药除草—玉米联合收获。

1.2 试验设计

试验于2013年10月—2016年6月,采用田间定位的方法进行,在免耕工艺的基础上,设置免耕(NT)、免耕深松(STNT)、免耕压实(CNT)和免耕压实深松(CSNT)4种处理,田间试验处理见图1a,其中深松时间为每年10月玉米收获之后小麦播种之前及6月小麦收获之后玉米播种之前。试验点免耕模式涉及的农机具为小麦/玉米免耕播种机、喷药机、秸秆粉碎机、雷沃欧豹904型拖拉机、雷沃GE60(4LZ-6E3)型小麦联合收获机及雷沃CB03(4YZ-3H)型玉米联合收获机,其中喷药机及秸秆粉碎机为悬挂式,播种机为牵引式,免耕模式压实带轮胎压实区域分布见图1b。

从2013年10月开始按照试验设计要求对各试

验小区进行相应处理,各试验小区面积为 $20\text{ m} \times 8\text{ m}$ (160 m^2),每个小区深松与不深松区域之间设置 2 m 隔离带,每种处理3次重复,试验采用完全随机设计,试验地在开始试验之前进行全面深松处理,深松深度为 35 cm ,试验区深松后土壤基本性质见表1。试验地小麦品种为豫麦70,播种量为 $150\text{ kg}/\text{hm}^2$,行距为 20 cm ,玉米品种为郑单958,行距为 60 cm ,

株距为 20 cm ,各处理施肥量均为 $\text{N } 284\text{ kg}/\text{hm}^2$, P_2O_5 $102\text{ kg}/\text{hm}^2$, $\text{K}_2\text{O } 95\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。测试土壤物理特性的土壤取样时间分别为2014年6月、2015年6月、2016年6月小麦收获后玉米播种前,测试作物根系发育时间分别为2014—2015年、2015—2016年冬小麦-夏玉米生长季,分别在冬小麦及夏玉米成熟期取根样测量。

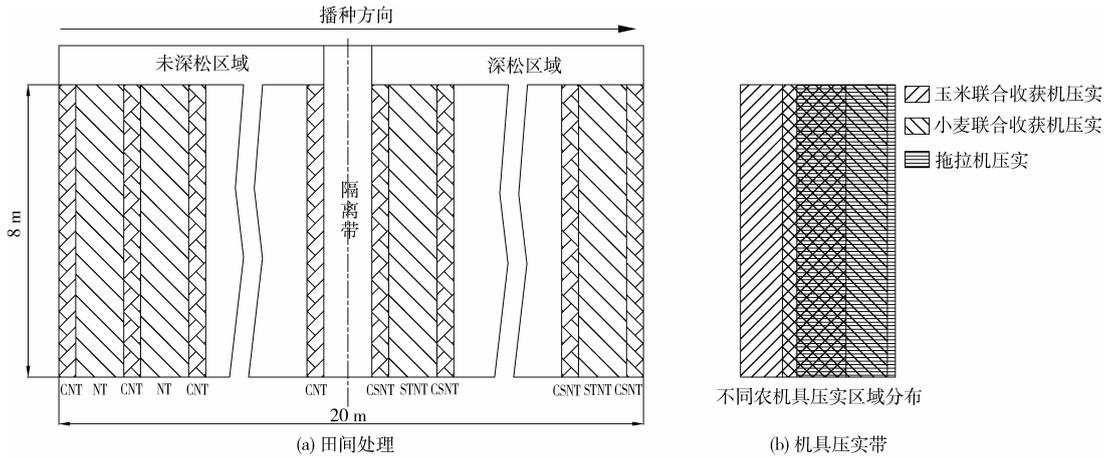


图1 不同处理具体操作方式

Fig.1 Specific operations under different treatments

表1 试验区土壤基本性质

Tab.1 Basic soil properties in experiment field

土壤深度/ cm	土壤机械组成(质量分数)/%				土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤孔隙 度/%	土壤有机质含 量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤含水 率/%
	>2 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	0~0.25 mm				
0~20	4.20	7.81	44.30	43.69	1.19	54.2	13.5	15.82
20~40	1.34	4.87	47.75	46.04	1.36	47.7	7.6	14.46

1.3 测试方法

1.3.1 水稳团聚体

土壤团粒结构采用水稳性团粒结构测试仪测量,将取得的散土试样带回室内风干后,利用湿筛法原理分别测量 2 、 1 、 0.5 、 0.25 、 0.106 mm 粒级团聚体含量。各级土壤水稳团聚体含量及团聚体平均质量直径计算方法^[12]为

$$A_{GRi} = \frac{M_{AGRi} - m_i}{\sum_{i=1}^n (M_{AGRi} - m_i)} \times 100\% \quad (1)$$

$$M_{WD} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{Mi} (M_{AGRi} - m_i)}{\sum_{i=1}^n (M_{AGRi} - m_i)} \quad (2)$$

式中 A_{GRi} ——第 i 粒径团聚体含量, %

M_{AGRi} ——第 i 粒径团聚体总质量, g

m_i ——团聚体中根茬、秸秆等杂质质量, g

D_{Mi} ——第 i 粒径团聚体平均直径, mm

M_{WD} ——团聚体平均质量直径, mm

n ——土壤团聚体粒径级数

1.3.2 土壤容重和紧实度

用环刀法测量土壤容重,取土深度为 $0 \sim 10\text{ cm}$ 、 $10 \sim 20\text{ cm}$ 、 $20 \sim 30\text{ cm}$ 和 $30 \sim 40\text{ cm}$,环刀规格: $\Phi 50.46\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。将土样放入铝制称量盒内,放在电子天平上称其质量,然后将铝盒放入干燥箱, 108°C 恒温下干燥至质量恒定。

选取 SC900 型 Cone index 土壤紧实度仪(美国 SPECTRUM 公司)测量试验区土壤紧实度,在试验区作物生长带随机选取 5 个点进行测量,测量深度 45 cm ,测量结果取算数平均值,仪器每隔 2.5 cm 自动记录数据一次,紧实度仪测试杆在垂直入土速度为 $0.05 \sim 0.08\text{ m/s}$ 的范围内缓慢匀速插入。

1.3.3 作物根系生长

在成熟期小麦种植行利用根钻系统测量小麦根长密度,利用 Bi-partite 根钻系统取整株冬小麦根系,根钻取根时按 10 cm 的间距分层向下钻取,测至 100 cm ,将取得的根系用蒸馏水洗净,利用 AZR-100 型根系生态监测系统扫描、分析计算根长密度。

土壤剖面法分析玉米根系分布情况。选择玉米

成熟期,在玉米生长带挖置土壤剖面(宽 1.5 m、深 1 m),将玉米根系部分稍作清洗,将带有方格刻度(5 cm×5 cm)的透明塑料板(长 1 m、宽 1 m)放在土壤剖面上,玉米根系印在透明塑料板上。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 处理数据,SPSS 统计软件进行方差分析,利用 Origin 9.1 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 压实对土壤水稳团聚体的影响

外力作用在土壤表面上会导致土壤结构的破坏,从微观上表现为,力在传递过程中破坏了土壤原本稳定的团聚体,将土壤颗粒重新排列。土壤水稳性大团聚体的数量和分布特征反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力^[13]。图 2 为不同处理条件下土

壤大团聚体的变化情况。由图 2 可以看出,2014 年 0~20 cm CNT 处理大团聚体含量明显低于 CSNT、NT、STNT 处理,分别低 22.85%、25.99%、24.18%;20~40 cm 深度 4 种处理大团聚体含量无显著差异;2015 年 0~30 cm 土层 CNT 和 CSNT 处理大团聚体含量显著低于 NT 及 STNT 处理,CNT 分别低 60.78%、59.53%,CSNT 分别低 21.29%、20.35%,30~40 cm 无明显差异;2016 年 0~40 cm 土层 CNT 处理大团聚体含量均显著低于 CSNT、NT、STNT 处理,分别低 35.67%、65.95%、65.20%,0~30 cm 土层 CSNT 处理低于 NT、STNT 处理,且 CNT 处理大团聚体含量明显低于 CSNT 处理。2014—2016 年 CNT 处理大团聚体含量逐渐减小,且影响深度不断增加,表明 CNT 处理对大团聚体含量影响具有累积效应。

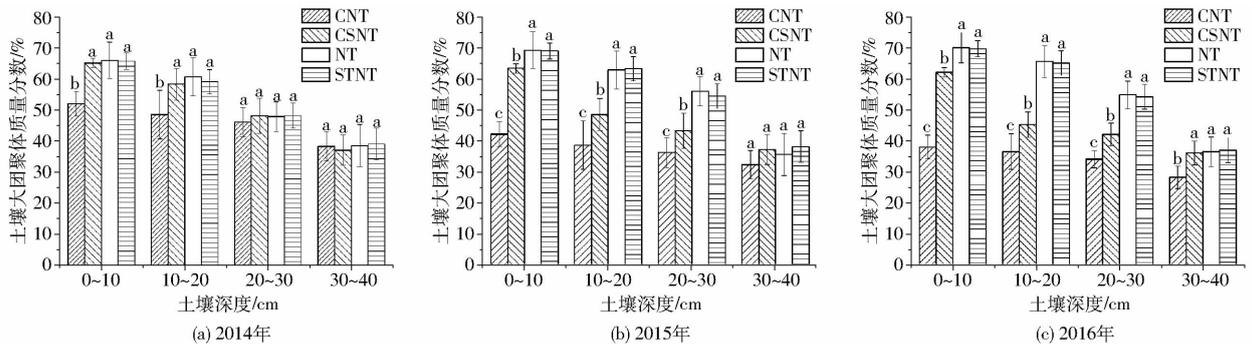


图 2 4 种处理土壤大团聚体(粒径大于 0.25 mm)变化

Fig. 2 Changes of water stable macroaggregates (greater than 0.25 mm) under NT, CNT, STNT and CSNT treatments

表 2 为不同处理条件下土壤平均质量直径(MWD)的变化趋势,随着土壤深度增加 MWD 显著下降,2014—2016 年 CNT 处理能显著减小 0~20 cm

土层的 MWD,CNT 处理 3 年平均 MWD 分别比 NT、STNT、CSNT 处理减小 5.4%、8.5%、5.7%。

表 2 不同处理条件下土壤平均质量直径

Tab. 2 Mean weight diameter under different treatments

mm

土壤深度/ cm	2014 年				2015 年				2016 年			
	NT	CNT	STNT	CSNT	NT	CNT	STNT	CSNT	NT	CNT	STNT	CSNT
0~10	3.20 ^a	2.86 ^b	3.18 ^a	3.12 ^a	3.24 ^a	2.59 ^b	3.10 ^a	2.96 ^b	3.25 ^a	2.79 ^b	3.22 ^a	3.08 ^a
10~20	3.08 ^a	2.78 ^b	3.12 ^a	3.05 ^a	3.08 ^a	2.51 ^b	3.09 ^a	2.88 ^a	3.16 ^a	2.64 ^b	3.14 ^a	2.98 ^a
20~30	2.60 ^a	2.58 ^a	2.61 ^a	2.44 ^a	2.65 ^a	2.48 ^a	2.75 ^a	2.57 ^a	2.59 ^a	2.45 ^a	2.63 ^a	2.51 ^a
30~40	2.55 ^a	2.15 ^a	2.47 ^a	2.39 ^a	2.22 ^a	2.12 ^a	2.41 ^a	2.33 ^a	2.28 ^a	2.14 ^a	2.25 ^a	2.38 ^a

注:数据为 3 次重复试验的平均值,同年份同行数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 压实对土壤容重的影响

土壤容重影响土壤通透性和土壤养分的转化与利用,是衡量土壤紧实程度的重要指标^[14],外力对土壤容重的影响较大^[15]。由表 3 可知,2014—2016 年 4 种处理的土壤容重均随着土层加深呈逐渐增大的趋势,0~40 cm 土层的土壤容重由大到小表现为: CNT、NT、CSNT、STNT,且 0~10 cm 各处理之间土壤容重差异不显著,10~40 cm 深度土层 CNT 处理土壤容重显著大于 NT、CSNT、STNT 处理,且平均

容重较各处理分别提高 14.2% ($P < 0.05$)、15.7% ($P < 0.05$)、17.1% ($P < 0.05$),NT、CSNT、STNT 处理之间土壤容重变化无明显差异。2014—2016 年,随着耕作时间增加各处理 0~40 cm 土层的平均土壤容重呈增加趋势,CNT 处理增加幅度最大,2016 年比 2015、2014 年分别增大 3.40%、3.27%。

2.3 压实对土壤紧实度空间分布的影响

土壤紧实度是表征土壤质量的指标之一,对作物生长具有重要影响,受外力对土壤压实作用的影响

表3 不同处理下土壤容重变化情况

Tab.3 Soil bulk density of four treatments

		in different years				g/cm ³
年份	处理	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	
2014年	CNT	1.24 ^b	1.50 ^a	1.57 ^a	1.61 ^a	
	NT	1.20 ^b	1.28 ^b	1.39 ^b	1.45 ^b	
	STNT	1.18 ^b	1.27 ^b	1.34 ^b	1.41 ^b	
	CSNT	1.20 ^b	1.28 ^b	1.36 ^b	1.42 ^b	
2015年	CNT	1.26 ^b	1.51 ^a	1.54 ^a	1.60 ^a	
	NT	1.26 ^b	1.31 ^b	1.36 ^b	1.43 ^b	
	STNT	1.21 ^b	1.28 ^b	1.33 ^b	1.40 ^b	
	CSNT	1.23 ^b	1.29 ^b	1.35 ^b	1.41 ^b	
2016年	CNT	1.23 ^b	1.59 ^a	1.60 ^a	1.60 ^a	
	NT	1.32 ^b	1.39 ^b	1.41 ^b	1.44 ^b	
	STNT	1.29 ^b	1.35 ^b	1.38 ^b	1.41 ^b	
	CSNT	1.30 ^b	1.37 ^b	1.39 ^b	1.43 ^b	

较大^[16-17]。图3为2014—2016年各处理土壤紧实度的平均值。由图3可知,随着土壤深度不断增加,土壤紧实度由大到小基本表现为:CNT、NT、CSNT、STNT,且CNT处理平均土壤紧实度分别比NT、CSNT、STNT处理大38.2% ($P < 0.05$)、58.9% ($P < 0.05$)、59.4% ($P < 0.05$)。NT处理由于受降水、自身重力等影响,且未进行任何机械疏松措施,导致其土壤紧实度较CSNT和STNT处理大,0~30 cm土层由大到小表现为:CNT、NT、CSNT、STNT,大于30 cm土层土壤受外界环境影响较小,CNT处理土壤紧实度明显大于其余处理,但NT、CSNT、STNT处理之间变化不显著。由此说明免耕条件下轮胎压实是土壤紧实度增大的主要影响因素,免耕引起的土层变硬现象主要集中于0~30 cm土壤,且短时间内未形成显著差异。

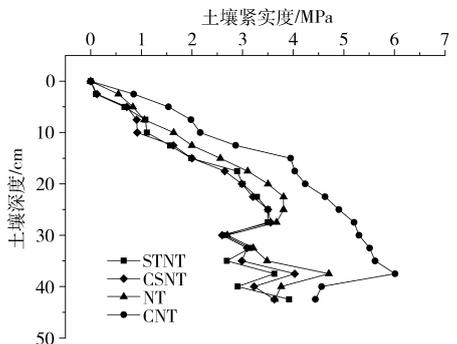


图3 土壤紧实度变化

Fig.3 Changes of soil penetration resistance under different treatments

2.4 土壤压实对小麦-玉米根系生长的影响

图4分别为小麦根长密度与玉米根系空间分布。由图4a、4b可知2014—2016年CNT处理小麦根长密度明显小于NT、STNT、CSNT处理,且均在10 cm左右达到最大根长密度,CNT、NT、STNT、

CSNT处理在2014—2015年和2015—2016年平均最大根长密度分别为0.65、0.94、0.95、0.93 cm/cm³和0.42、0.57、0.62、0.60 cm/cm³。

由图4c、4d可知,2014、2015年CNT处理0~10 cm土层玉米根系质量百分比明显($P < 0.05$)高于NT、STNT、CSNT处理,10~20 cm土层各处理根系质量百分比无明显差异,20~40 cm CNT处理根系质量百分比显著低于NT、STNT、CSNT处理。2014年0~20 cm土层CNT处理根系质量百分比分别比NT、STNT、CSNT处理大13.5%、21.8%、12.6% ($P < 0.05$),CNT处理20~40 cm土层根系质量百分比仅有16.7%。2015年0~20 cm土层CNT处理根系质量百分比分别比NT、STNT、CSNT处理大30.4%、24.3%、16.2% ($P < 0.05$),CNT处理20~40 cm土层根系质量百分比仅有9.3%。2016年0~20 cm土层CNT处理根系质量百分比分别比NT、STNT、CSNT处理大28.1%、28.6%、29.1% ($P < 0.05$),CNT处理20~40 cm土层根系质量百分比仅有8.9%。

3 讨论

3.1 压实对土壤团聚体的影响

CNT处理对土壤大团聚体含量的影响趋势为:2014年显著降低0~20 cm大团聚体含量,2016年显著降低0~40 cm大团聚体含量,主要是由于轮胎对土壤压实作用呈线性累积关系,CNT处理长期受拖拉机及收割机等机具多次压实,导致轮胎在行走过程中与土壤表面相互作用产生的应力向更深层土壤传递,破坏了深层土壤结构^[18-19]。NT及STNT处理2014—2016年大团聚体含量一直保持较高水平,其主要原因可能由两方面:一方面可能是由于NT及STNT处理极少扰动土壤,土壤结构未遭到破坏;另一方面可能由于秸秆还田能够增加土壤有机质含量,有助于团粒结构的形成,尤其是土壤大团粒结构形成,增强土壤结构稳定性^[20-22]。2015、2016年CSNT处理0~30 cm土层大团聚体含量显著低于NT、STNT处理,主要原因可能是经过多次不同机具轮胎碾压之后土壤结构遭到破坏,大团聚体含量降低,尽管进行了秸秆还田及深松处理,但破坏后的土壤结构修复是一个漫长的过程^[23]。

3.2 压实对土壤容重、紧实度的影响

2014—2016年,0~40 cm土壤容重由大到小表现为:CNT、NT、CSNT、STNT,10~40 cm土层土壤容重呈现CNT处理显著大于NT、CSNT、STNT处理的变化趋势,主要由农机具田间作业(尤其在湿度较

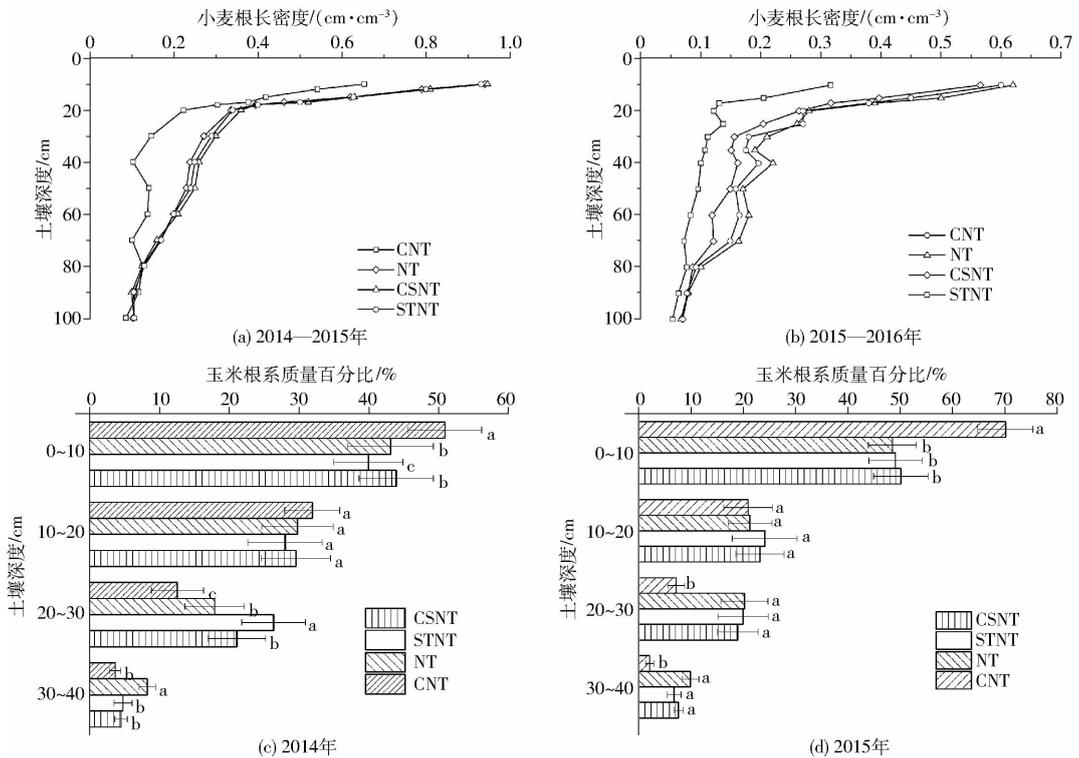


图4 2013—2016年冬小麦、夏玉米根系空间分布

Fig. 4 Root distribution within root zone profile for winter wheat and summer maize in 2013—2016 seasons

大土壤)过程中外力压实土壤^[24],土壤结构破坏后土壤颗粒重新排列所致^[25]。NT、CSNT、STNT处理间无显著差异,主要原因是未受轮胎压实的免耕区域,会因为降水、自然沉降等因素增加土壤容重,NT处理对土壤扰动较小,受干湿交替、冻融作用及作物根系等因素的调节能够缓解这种紧实作用^[26]。0~10 cm各处理之间土壤容重变化不显著,WAGNER等^[26]研究指出NT处理免耕播种机开沟器能够显著影响0~10 cm土层土壤物理特性。试验过程中免耕播种机种肥开沟器能够疏松0~10 cm土壤,故各处理间容重变化不显著。研究表明免耕技术条件下,土壤受自然沉降和农机具压实双重作用会导致土壤变硬,紧实度增大等不同程度的土壤压实现象^[27]。试验周期内,0~45 cm土层CNT处理土壤紧实度显著大于NT、STNT、CSNT处理,BOTTA等^[28]研究表明,拖拉机及小麦、玉米联合收获机等农机具能够增加深层土壤(0~60 cm)紧实度,与本文研究结果一致。0~30 cm土层平均土壤紧实度由大到小表现为: CNT、NT、CSNT、STNT,NT处理较CSNT、STNT处理紧实度大的主要原因是,NT处理没有进行机械疏松,常年受降水、自身重力等影响导致土壤紧实度逐渐增大,深松等耕作能够疏松耕层土壤,降低土壤紧实度;大于30 cm土层土壤受外界环境影响较小,NT、CSNT、STNT处理变化不显著,苏丽丽等^[29]研究表明,耕层以下土壤受外界环境影响

小,不同耕作处理间差异较小,与本文研究结果一致。

3.3 土壤压实对冬小麦-夏玉米根系生长的影响

耕作措施能够为作物根系提供良好的生长空间,根系是小麦、玉米的主要营养器官,是作物生长发育的基础,根系的发育情况直接影响作物产量,不同耕作措施对土壤物理特性产生不同影响,从而影响作物生长^[30-31]。小麦根系属于须根系,小麦根系生长主要受不同深度土层之间水热交换的影响,土壤紧实度对小麦根系的影响较玉米小^[32],2013—2016年,CNT、NT、STNT、CSNT处理平均小麦最大根长密度分别为0.63、0.83、0.84、0.83 cm/cm³,主要原因可能是土壤压实增加了土壤容重,减小了土壤孔隙度,影响了表层土壤与底层土壤之间的气体及热量循环,且土壤大孔隙量的减少,降低了土壤参与持水能力,减少了土壤水分运移,从而影响小麦根系生长^[33]。2014—2016年0~20 cm土层CNT处理玉米平均根系质量百分比分别比NT、STNT、CSNT处理大24.0%、24.9%、19.3% ($P < 0.05$),CNT处理20~40 cm土层平均根系质量百分比仅有11.6%,玉米根系较容易受到土壤压实的影响,土壤压实增加了土壤容重及土壤紧实度,从而增大土壤机械阻力,限制根系生长,降低根系活力^[34],CNT处理造成的土壤压实,致使玉米根系无法正常向下生长,故而横向生长较多。NT处理能够减少土壤扰动,增加土

壤有机质含量,提高土壤结构稳定性,而深松能够打破土壤硬层,降低耕层土壤容重,增加土壤持水能力,为作物生长提供有利条件^[30],所以在试验周期内 NT、STNT、CSNT 处理之间玉米根系生长无显著差异。

4 结论

(1)免耕技术引起的土壤紧实度上升,除自然沉降导致土壤物理特性变化外,农机具行走装置是

造成土壤压实的主要原因。

(2)免耕处理虽然出现土壤紧实现象,但3年内未达到影响作物生长的程度,不需要深松处理。轮胎压实区域在第2个作物生长季开始已经显著影响作物根系生长,需要及时进行机械化消减措施。

(3)深松技术能够有效缓解土壤压实问题,减小容重和紧实度,但对轮胎压实后的土壤进行深松,受轮胎碾压的土壤团聚体在短时间内难以恢复,导致深松后的土壤结构仍然不稳定。

参 考 文 献

- 高焕文,李问盈,李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报,2003,19(3):1-4.
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen. Conservation tillage technology with Chinese characteristics [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3):1-4. (in Chinese)
- 高焕文,李洪文,李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报,2008,39(9):43-48.
GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying. Development of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(9):43-48. (in Chinese)
- 雷金银,吴发启,王健,等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(10):40-45.
LEI Jinyin, WU Faqi, WANG Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(10):40-45. (in Chinese)
- 李汝莘,林成厚,高焕文,等. 小四轮拖拉机土壤压实的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):126-129.
LI Ruxin, LIN Chenghou, GAO Huanwen, et al. The research of soil compaction caused by tractor [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1):126-129. (in Chinese)
- KELLER T, DEFOSSEZ P, WEISSKOPF P. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches [J]. Soil and Tillage Research,2007,93(2):391-411.
- 李汝莘,史岩,迟淑筠,等. 机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗[J]. 农业机械学报,1999,30(2):13-17.
LI Ruxin, SHI Yan, CHI Shuyun, et al. Soil compaction and tillage energy consumption caused by tires of agricultural machines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2):13-17. (in Chinese)
- BATEY T, MCKENZIE D C. Soil compaction: identification directly in the field [J]. Soil Use Management, 2006, 22(2):123-131.
- CHEN G, WEIL R R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops [J]. Soil & Tillage Research, 2011, 117:17-27.
- HUANG Manxiang, LIANG Tao, WANG Lingqing, et al. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat-maize double cropping system [J]. CATENA, 2015,128(5):195-202.
- 焦彩强,王益权,刘军,等. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):7-12.
JIAO Caiqiang, WANG Yiquan, LIU Jun, et al. Spatial-temporal variability of soil hardness and effect of soil hardness on other soil properties in rotary tillage in Guanzhong farmland [J]. Agricultural Research in the Aird Area,2009,27(3):7-12. (in Chinese)
- 郑红兵,郑金玉,罗洋,等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报,2015,31(9):63-70.
ZHENG Hongbing, ZHENG Jinyu, LUO Yang, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9):63-70. (in Chinese)
- MÁRCIO R N, JOSÉ E D, ELOY A P, et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage [J]. Geoderma, 2015,259-260:149-155.
- BOTTA G F, JORAJURIA D, BALBUENA R, et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields [J]. Soil and Tillage Research, 2006,91(1-2):164-172.
- 朱凤武,佟金. 土壤深松技术及高效节能仿生研究的发展[J]. 吉林大学学报,2003,33(2):95-99.
ZHU Fengwu, TONG Jin. Development of high-efficient and energy-saving bionic subsoiling techniques [J]. Journal of Jilin University,2003,33(2):95-99. (in Chinese)
- WANG Q J, LU C Y, LI H W, et al. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-year experiment on alkaline soils of Northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2014,137:43-49.
- KASPER M, BUCHAN G D, MENTLER A, et al. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions [J]. Soil & Tillage Research, 2009,105(2):192-199.
- 赵红,袁培民,吕贻忠,等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤,2011,43(2):306-311.

- ZHAO Hong, YUAN Peimin, LÜ Yizhong, et al. Effects of organic manure application on stability of soil aggregates[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 306–311. (in Chinese)
- 18 迟仁立, 左淑珍, 夏平, 等. 不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 39–43.
CHI Renli, ZUO Shuzhen, XIA Ping, et al. Effects of different level compaction on the physicochemical characteristics of soil and crop growth[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(6): 39–43. (in Chinese)
- 19 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 基于 FRIDA 模型的轮胎-土壤接触特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 121–127.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160918&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.018.
WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Research on contact properties of soil-tyre based on FRIDA model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 121–127. (in Chinese)
- 20 李洪文, 高焕文, 陈君达, 等. 固定道保护性耕作的研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(4): 73–77.
LI Hongwen, GAO Huanwen, CHEN Junda, et al. Study on controlled traffic with conservation tillage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(4): 73–77. (in Chinese)
- 21 罗红旗, 高焕文, 姚宗路, 等. 固定道垄作小麦玉米两用免耕播种机的研制[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(3): 83–87.
LUO Hongqi, GAO Huanwen, YAO Zonglu, et al. Study on permanent raised bed planter[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(3): 83–87. (in Chinese)
- 22 CHENU C, LE B Y, ARROUAYS D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1479–1486.
- 23 LLEWELLYN R S, DEMDEN F H, KUEHNE G. Extensive use of no-tillage in grain growing regions of Australia[J]. *Field Crops Research*, 2012, 132: 204–212.
- 24 BOTTA G F, TOLON B A, TOUR C, et al. Agricultural traffic: motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 120: 92–98.
- 25 JOSÉ M R, VANDERLEIA T R, EDUARDO S V, et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 123–136.
- 26 WAGNER H M, CÁSSIO A T, DOUGLAS L K, et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 53–64.
- 27 BATEY T. Soil compaction and soil management: a review[J]. *Soil Use Management*, 2009, 25(4): 335–345.
- 28 BOTTA G F, TOLON B A, RIVERO D, et al. Compaction produced by combine harvest traffic: effect on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 74: 155–163.
- 29 苏丽丽, 徐文修, 李亚杰, 等. 耕作方式对干旱绿洲滴灌复播大豆农田土壤有机碳的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 150–156.
SU Lili, XU Wenxiu, LI Yajie, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon in soybean soil of drip irrigation in arid oasis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(4): 150–156. (in Chinese)
- 30 MU Xinyuan, ZHAO Yali, LIU Kui, 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[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 32–43.
- 31 BARBER A S. *Soil nutrient bioavailability*[M]. New York: Macmillan, 1984.
- 32 张素瑜, 王和洲, 杨明达, 等. 水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(13): 2484–2496.
ZHANG Suyu, WANG Hezhou, YANG Mingda, et al. Influence of returning corn stalks to field under different soil moisture contents on root growth and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(13): 2484–2496. (in Chinese)
- 33 KUNCORO P H, KOGA K, SATTAN, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: soil pore structure indices[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 143: 180–187.
- 34 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1706–1711.
LI Chaohai, LI Shengli, WANG Qun, et al. A study on corn root growth and activities at different soil layers with special bulk density[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1706–1711. (in Chinese)