

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.006

生态沃土机械化耕作对两熟区土壤理化特性的短期影响

张银平¹ 王振伟² 刁培松¹ 杜瑞成¹ 李洪文³ 姚文燕¹(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 以4年为一周期,设计一种生态沃土机械化耕作模式(MET),周期内将翻耕、苗带旋耕、免耕、深松4种不同的耕作措施组合,对土壤进行适度耕作,并以连续免耕(CNT)和传统翻耕(CCT)为对照,研究MET对小麦玉米两熟区不同耕层土壤理化特性的短期影响。结果表明:MET能够显著提高土壤结构质量,增加土壤肥力,避免土壤板结,生态效应和沃土效果显著。显著增加0~30 cm土层土壤大团聚体含量,提高土壤结构稳定性,平均水稳性团聚体含量分别比CNT和CCT高8.2%和30.4%;有效降低0~30 cm土层土壤容重,平均容重分别比CNT和CCT小0.089、0.125 g/cm³;增加0~30 cm土层全氮、速效磷和速效钾含量,对碱解氮含量影响不显著;增加土壤有机碳含量,平均有机碳含量分别比CNT和CCT高0.36、0.61 g/kg,并且各层之间有机碳含量分布较均衡,CNT只增加0~10 cm土层有机碳含量,CCT只增加10~20 cm土层有机碳含量。MET显著增加小麦的平均单株分蘖数、有效穗粒数和千粒质量,从而显著增加小麦产量,分别比CNT和CCT增产14%和14.9%;小麦播前进行的耕作有一定的后效,对玉米产量有影响,MET与CNT通过增加玉米的有效穗粒数和千粒质量,增加玉米产量,两者产量的差异不显著,但均显著高于CCT,分别高7.4%和3.7%。

关键词: 生态沃土; 机械化; 耕作模式; 土壤理化特性; 作物产量; 定位试验

中图分类号: S341.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0045-11

Short-term Effects of Mechanical and Ecological Tillage Pattern on Physical and Chemical Characteristics of Soil in Arid Area

ZHANG Yinping¹ WANG Zhenwei² DIAO Peisong¹ DU Ruicheng¹ LI Hongwen³ YAO Wenyan¹

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A mechanical and ecological tillage pattern (MET) which combined ploughing, rotary tillage of seeding strip, no-tillage and subsoiling in four years for a cycle was designed. To study the short-term effects of the pattern on physical and chemical characteristics of soil and groups yields in arid area, the positing experiment of four years in wheat-corn two cropping area was carried on and with continuous no-tillage (CNT) and conventional tillage (CCT) for comparison. The experiment results showed that the MET improved the quality of soil structure and soil fertility significantly, prevented soil harden, and the ecological and fertile soil effects were remarkable. It increased the aggregate content in 0 ~ 30 cm soil layer significantly and improved soil structure stability, and the average aggregate content of water stability was 8.2% and 30.4% higher than those of the CNT and CCT, respectively. It reduced the bulk density of soil in 0 ~ 30 cm soil layer effectively, its average bulk density was 0.089 g/cm³ and 0.125 g/cm³ smaller than those of the CNT and CCT. It increased the content of total nitrogen, rapid available phosphorus and rapid available potassium in 0 ~ 30 cm soil layer as well, but there were no significant impacts on the content of available nitrogen. It added the content of organic carbon, the

收稿日期: 2018-07-08 修回日期: 2018-08-07

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018LD002)、国家重点研发计划项目(2018YFD03006)和山东省现代农业产业技术体系玉米创新团队机械加工岗位专家项目

作者简介: 张银平(1989—),女,讲师,博士,主要从事旱作农业机械化体系及装备研究,E-mail: zhangyinping929@163.com

通信作者: 刁培松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化体系及装备研究,E-mail: dps2003@163.com

organic carbon content in MET was 0.36 g/kg and 0.61 g/kg higher than those in CNT and CCT, respectively, and the organic carbon concentration distribution was balanced between the layers of 0~10 cm, 10~20 cm and 20~30 cm. However, the CNT only added the organic carbon content in 0~10 cm soil layer and the CCT only increased the organic carbon content in 10~20 cm soil layer. The MET increased wheat yields significantly by increasing the average wheat tillering, effective spike and grain number per spike, the wheat yields of MET was 14% and 14.9% higher than those of CNT and CCT, respectively. The tillage methods before wheat sowing had after effects to a certain extent on corn, the MET and the CNT improved the corn yields by increasing the effective ear of corn and grain number per spike, the corn yields of the MET and CNT were 7.4% and 3.7% higher than that of CCT, respectively, but there was no significant difference between them.

Key words: ecological fertile soil; mechanization; tillage pattern; soil physical and chemical characteristics; crop yield; positioning experiment

0 引言

土壤是人类得以生存的基础,研究耕作措施对土壤理化特性的影响,有利于了解农田土壤结构衰退的机理,对提高农田土壤的质量、提高生产力及可持续发展具有重要的意义。耕作对土壤团聚体稳定性影响的研究有:杨如萍等^[1]研究黄土高原丘陵沟壑区不同耕作制度对坡耕地土壤团聚含量、分布和稳定性的影响,认为免耕及免耕覆盖能明显增加土壤团聚体含量,免耕覆盖能形成相对更高的团聚体稳定性;田慎重等^[2]研究了耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响,认为免耕、耙耕和旋耕措施更能有效地保护表层(0~10 cm)土壤水稳定团聚体的稳定性,常规耕作和深松处理则显著降低了20~30 cm土壤团聚体稳定性;ANNA等^[3]研究了传统耕作方式与少耕法对土壤团聚体稳定性的影响,认为少耕显著增加了表层土壤大团聚体含量及稳定性;MESSIGA等^[4]研究认为,与免耕相比,连续两年的翻耕和深松显著降低了土壤平均重量直径(MWD);也有研究^[5-7]认为,连续免耕会导致土壤板结,MWD降低,适时耕作有利于土壤结构的发展。耕作对土壤容重影响的研究有:周虎等^[8]基于4年的试验研究了免耕、旋耕、翻耕3种单一耕作措施对土壤容重的影响,认为免耕增加表层土壤容重,旋耕增加10~20 cm土壤容重,翻耕增加20~30 cm土壤容重;KETEMA等^[9]研究显示,土壤耕作可以在较短时期内降低土壤容重,而免耕使表层土壤容重增大;RIENZI等^[10]的研究也表明,耕作只能在初期降低土壤容重,后期会使土壤容重增加,而免耕和秸秆残茬覆盖则降低土壤容重。耕作对有机碳含量影响的研究有:TORRES等^[11]研究发现,长期耕作造成土壤有机碳的分解;MIKHAILOVA等^[12]认为,长期耕作的土壤表层有机碳比不耕作的土壤损失40%~60%,短期耕作的土壤表层有机碳含量比不耕作土壤损失60%~75%;

SIX等^[13]认为,免耕可以显著提高0~5 cm土层土壤有机碳的含量,可能会导致有机质在土壤表层积累;这与LAL^[14]认为免耕显著增加0~10 cm土层内土壤有机碳含量,而传统耕作显著增加20~40 cm土层内土壤有机碳含量,养分出现分层现象的研究结果一致。耕作对作物产量的影响研究有:高国录等^[15]研究表明,与传统耕作相比,免耕不覆盖可以增产10.21%,免耕覆盖可以增产12.88%;张萌等^[16]通过10年玉米连作研究表明,与传统耕作相比,免耕覆盖可以增产17.6%;但POWLSON^[17]的试验研究表明,秸秆还田小麦籽粒产量较秸秆不还田降低了3.9%;DOMZAL等^[18]认为,同耕翻比,免耕的冬小麦减产;KIRKEGARD等^[19]研究显示,免耕增加耕层土壤容重,导致土壤透气性差,影响作物根系下扎,限制了作物对水分和养分的吸收,导致作物苗期生长弱,最终减产。

以上研究表明,耕作对土壤理化特性以及作物产量均有影响,且影响效果不一。但以上均未研究两种以上不同耕作措施在一定的周期内进行轮耕,对土壤团聚体理化特性及作物产量的影响。目前小麦玉米两熟区存在传统精耕细作与保护性耕作两种典型的耕作模式。以连年翻耕为主要特征的传统精耕细作,耕作次数较多,土壤细碎,给种子创造良好的生长环境,但是过度的翻耕对土壤结构造成破坏;而以少免耕、秸秆覆盖、松代翻为主要特征的保护性耕作模式有一定的区域局限性,随着两熟区少免耕年限的增加,出现了土壤耕层变紧、养分和杂草种子在地表富集等问题。本研究针对传统翻耕和免耕存在的问题,设计一种生态沃土机械化耕作模式,探究该耕作模式对土壤理化特性及作物产量的短期影响。

1 生态沃土机械化耕作模式

生态沃土机械化耕作模式就是以实现机械化为前提,以生态、沃土为目标,将不同的耕作方式结合

起来,设置一定的周期,在周期内对土壤进行适度耕作,逐渐改善土壤结构,同时配合秸秆还田肥沃土壤,最终达到化肥减施、作物稳产高产的目标。本研究中生态沃土机械化耕作模式所设置的耕作周期为 4 年,周期内将翻耕、苗带旋耕、免耕、深松 4 种不同的耕作措施组合使用,进行田间试验,以连续翻耕和连续免耕为对照,通过分析不同耕作模式对土壤团聚体结构及稳定性的短期影响,探究生态沃土机械化耕作模式对改善土壤结构的作用。

2 材料与方法

2.1 试验区概况

试验地点选在山东省淄博市临淄区凤凰镇东申村富群农机专业合作社,位于山东省中部平原地区,北纬 36.88°,东经 118.23°,年降水量 650~800 mm,降水量集中在 7、8 月,年均气温 12.2℃,属典型的北温带大陆性气候。土壤为棕褐土,试验前,该地长期进行传统翻耕作业,翻耕深度 15~18 cm,犁底层较浅、较厚,秸秆不还田,0~20 cm 耕层平均容重为 1.38 g/cm³,平均有机碳质量比为 7.31 g/kg,全氮质量比为 0.65 g/kg,速效钾质量比为 84.2 mg/kg,速效磷质量比为 24.6 mg/kg。常年种植模式为小麦玉米两熟轮作。

2.2 试验方案

试验选择小麦-玉米长期进行翻耕的试验田。试验设置生态沃土机械化耕作模式(MET)、连续翻耕模式(CCT)和连续免耕模式(CNT)。每个处理试验面积 1 500 m²,3 次重复。3 个处理夏季小麦收获时秸秆均全量还田,玉米采用免耕播种。秋季进行耕作,具体耕作措施如下:

处理 MET:秋季收获玉米后,秸秆粉碎全量还田,用秸秆粉碎灭茬还田机作业两遍,保证粉碎均匀,便于小麦免耕播种。4 年周期内依次进行翻耕-免耕-深松-免耕,翻耕深度 20 cm,深松深度 30 cm。免耕年份采用免耕播种机一次完成播种、施肥、镇压作业;翻耕年份,机械翻耕一遍后旋平整地一遍,然后进行小麦播种;深松年份,深松后旋耕整地一遍,然后进行小麦播种。

处理 CCT:秋季收获玉米后,秸秆粉碎全量还田,用秸秆粉碎灭茬还田机作业两遍,保证粉碎均匀,便于小麦免耕播种。4 年周期内全部进行机械翻耕,翻耕深度 20 cm,机械翻耕一遍后旋平整地一遍,然后进行小麦播种。

处理 CNT:秋季收获玉米后,秸秆粉碎全量还田,用秸秆粉碎灭茬还田机作业两遍,保证粉碎均匀,便于小麦免耕播种。使用小麦免耕播种机一次

完成播种、施肥、镇压。

2.3 试验材料

供试小麦品种为济麦 22,播种量、播种时间及收获时间如表 1 所示。供试玉米品种为登海 605,行距 60 cm,播种密度、播种时间及收获时间如表 2 所示。

表 1 小麦播种量、播种及收获日期

Tab.1 Seeding rate, time and harvesting time of wheat

年份	播种日期	播种量/(kg·hm ⁻²)	收获日期
2012	10 月 8 日	150	6 月 10 日
2013	10 月 10 日	150	6 月 12 日
2014	10 月 8 日	150	6 月 10 日
2015	10 月 12 日	150	6 月 12 日

表 2 玉米播种密度、播种及收获日期

Tab.2 Seeding rate, time and harvesting time of corn

年份	播种日期	播种密度/(万株·hm ⁻²)	收获日期
2013	6 月 9 日	6.75	10 月 9 日
2014	6 月 12 日	6.75	10 月 8 日
2015	6 月 10 日	6.75	10 月 10 日
2016	6 月 12 日	6.75	10 月 8 日

小麦播种时深施基肥:纯 N 225 kg/hm², P₂O₅ 180 kg/hm², K₂O 180 kg/hm²;玉米播种时深施基肥:纯 N 150 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 100 kg/hm²。冬小麦生育期共灌水 3 次(越冬水 60 mm、拔节水 60 mm、灌浆水 60 mm);玉米生育期共灌溉 2 次(拔节水 80 mm、灌浆水 80 mm)。

2.4 测试项目及方法

(1) 土壤田间采样

2012—2016 年玉米收获后采样,用容积 100 cm³的环刀(避免外力挤压,以保持原来的结构状态)多点(3~5 点)采集有代表性的原状耕层土,分 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 3 层,每个处理重复 3 次。同时,用环刀采取土壤用于土壤容重和土壤含水率测定。

土壤容重测定采用干燥称量法^[20],将铝盒内的土壤在 105~110℃ 条件下干燥至恒质量,重复 3 次,计算土壤容重。

取风干土样 1 500 g,采用干筛法^[20]测定机械稳定性团聚体含量及粒径分布。

将干筛后的各级团聚体按比例配成 50 g 风干土样,采用湿筛法^[21]测定水稳性团聚体含量及粒径分布。

有机碳含量测定采用重铬酸钾容量法(外加热法)。

(2) 作物田间调查

小麦玉米两熟轮作生态沃土机械化耕作模式对

作物的影响最终表现在产量及其构成要素上,因此本研究只考虑耕作模式对作物产量及构成要素的影响,只调查与产量相关的因素,小麦调查小麦出苗情况以及收获时有效穗数、穗粒数、千粒质量,玉米调查收获时的有效穗数、穗粒数和千粒质量。小麦测产时采用取样调查法,以“之”字形随机选取5点,统计面积为1 m²方框内的小麦有效穗数及每穗的有效粒数,重复3次,求平均值,计算每公顷有效穗数及有效粒数;再随机选取20株具有代表性的小麦植株,进行室内烤种,计算千粒质量,重复3次,从而计算每公顷小麦产量。玉米测产时在每点所在的玉米行选取2行,统计长度5 m范围内玉米的有效穗数及每穗的有效粒数,重复3次,求平均值,计算每公顷有效穗数及有效粒数;再随机选取20株具有代表性的玉米植株,进行室内烤种,计算千粒质量,重复3次,从而计算玉米每公顷玉米产量。

(3) 试验数据与处理

试验所得数据采用 Excel 记录,并用 SPSS 进行数据统计和方差分析,各部分计算如下:

不同粒级土壤机械稳定性团聚体含量为

$$a_i = \frac{W_{ai}}{1500} \times 100\% \quad (1)$$

式中 a_i ——不同粒级土壤机械稳定性团聚体质量分数, %

W_{ai} ——不同粒级土壤团聚体风干质量, g

不同粒级水稳性团聚体含量为

$$w_i = \frac{W_{wi}}{50} \times 100\% \quad (2)$$

式中 w_i ——某级水稳性团聚体的质量分数, %

W_{wi} ——该级水稳性大团聚体的干燥质量, g

团聚体平均重量直径(MWD)为

$$M_{WD} = \sum_{i=1}^n x_i a_i \quad (3)$$

式中 M_{WD} ——团聚体平均重量直径, mm

x_i ——各粒级的平均直径, mm

土壤团聚体破坏率为

$$K = \frac{W_{ai > 0.25} - W_{wi > 0.25}}{W_{ai > 0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 K ——团聚体破坏率, %

$W_{ai > 0.25}$ ——大于 0.25 mm 机械稳定性团聚体质量, g

$W_{wi > 0.25}$ ——大于 0.25 mm 水稳性团聚体质量, g

土壤容重为

$$b = \frac{M_0}{V} \quad (5)$$

式中 b ——土壤容重, g/cm³

M_0 ——土壤湿质量, g

V ——环刀体积, cm³

3 结果与讨论

3.1 对土壤机械稳定性团聚体含量及粒径分布的影响

根据团聚体分级理论,一般大团聚体(直径大于 0.25 mm)是由微团聚体(直径小于 0.25 mm)聚合形成的,直径大于 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,团粒结构的多少在一定程度上体现土壤肥力高低。SIX 等^[13]认为,大于 0.25 mm 的团聚体是土壤中最好的土壤团粒结构体。本研究通过测定大于 0.25 mm 土壤团聚体的含量及水稳性来反映不同耕作模式对土壤结构稳定性的影响。

表 3 为不同耕作模式对 0~30 cm 土壤大团聚体含量、平均重量直径、团聚体破坏率(K)的影响。

表 3 不同耕作模式对 0~30 cm 土层土壤大团聚体含量、平均重量直径、团聚体破坏率的影响

Tab.3 Influence of different tillage patterns on proportion of soil macroaggregates, mean weight diameter and aggregate damage ratio of 0~30 cm soil layer

取样深度/cm	处理	团聚体质量分数/%		MWD/mm		K /%
		机械稳定性	水稳性	机械稳定性	水稳性	
0~10	MET	86.36 ^a	39.55 ^a	4.01 ^a	0.62 ^a	54.20 ^b
	CNT	83.46 ^a	38.64 ^a	3.77 ^a	0.60 ^a	53.70 ^b
	CCT	75.73 ^b	29.18 ^c	3.21 ^b	0.48 ^b	61.47 ^a
10~20	MET	81.24 ^a	38.41 ^a	3.88 ^a	0.60 ^a	52.72 ^c
	CNT	75.78 ^b	35.26 ^b	3.09 ^b	0.53 ^b	53.47 ^b
	CCT	81.12 ^a	31.28 ^c	3.67 ^a	0.52 ^b	61.44 ^a
20~30	MET	79.92 ^a	29.31 ^a	3.48 ^a	0.54 ^a	63.33 ^c
	CNT	73.86 ^b	25.23 ^b	2.57 ^b	0.47 ^b	65.84 ^b
	CCT	65.76 ^c	21.82 ^c	2.21 ^c	0.37 ^c	66.82 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著,下同。

由表 3 可看出,0~10 cm 土层,土壤机械稳定性大团聚体的含量由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT,处理 MET 和处理 CNT 显著高于处理 CCT,分别高 14.04% 和 10.21%,处理 MET 和处理 CNT 之间差异不显著;10~20 cm 土壤机械稳定性大团聚体含量由大到小的顺序为 MET、CCT、CNT,处理 MET 和处理 CCT 显著大于处理 CNT,分别高 7.21% 和 7.05%,处理 MET 和处理 CCT 之间差异不显著;20~30 cm 土壤机械稳定性大团聚体含量由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT,各处理间差异显著($P < 0.05$),处理 MET 较处理 CNT 和处理 CCT

分别高 8.20% 和 21.53%。由此可见,在秸秆还田条件下,耕作对土壤机械稳定性大团聚体含量有显著影响($P < 0.05$):连续翻耕模式明显减少 0~10 cm 和 20~30 cm 土壤机械稳定性大团聚体含量,说明过度耕作破坏了表层土壤团聚体结构,同时连续翻耕模式在 20~30 cm 土层形成了较厚的犁底层,不利于土壤机械稳定性大团聚体的形成,但 10~20 cm 土壤机械稳定性团聚体含量比连续免耕模式要高,分析可能是因为每年秸秆还田后进行翻耕,将当年秸秆翻到 10~20 cm 土层中,增加了 10~20 cm 土层的有机碳含量,促进了土壤机械稳定性大团聚体的形成;连续免耕可显著增加 0~10 cm 土壤机械稳定性大团聚体含量,但减少 10~20 cm 土壤机械稳定性大团聚体含量,对 20~30 cm 土壤机械稳定性团聚体含量的影响不显著,分析是因为虽然每年还田的秸秆覆盖在地表,使土壤有机碳在 0~10 cm 土层累积,但随着免耕年限的增加,机具对土壤压实次数的增多,导致 0~10 cm 土层土壤紧密,土壤透气

性、透水性变差,亚表层(10~20 cm)出现有机质含量降低的分层化现象,不利于土壤机械稳定性大团聚体的形成;生态沃土机械化模式在 4 年周期内进行一次翻耕,可将表层积累的有机质翻到亚表层,增加亚表层土壤有机碳含量,不翻耕的年份秸秆覆盖在地表,避免雨水对地面的直接冲刷,并在 4 年周期内进行一次深松,打破犁底层,增强土壤的透气、透水能力,促进表层土壤团聚体的形成,从而显著增加 0~30 cm 土壤机械稳定性团聚体含量。

图 1 为 0~30 cm 土层不同耕作模式下土壤机械稳定性团聚体的粒径分布,分析可知:在 0~30 cm 土层中,不同耕作模式下大于 5 mm 机械稳定性大团聚体含量的变化顺序与总的机械稳定性大团聚体的含量变化一致,且在所有团聚体粒级中含量最多,说明耕作模式对大于 5 mm 机械稳定性大团聚体含量的影响显著($P < 0.05$),不同耕作模式对机械稳定性大团聚体含量的影响主要通过影响大于 5 mm 机械稳定性团聚体的含量。

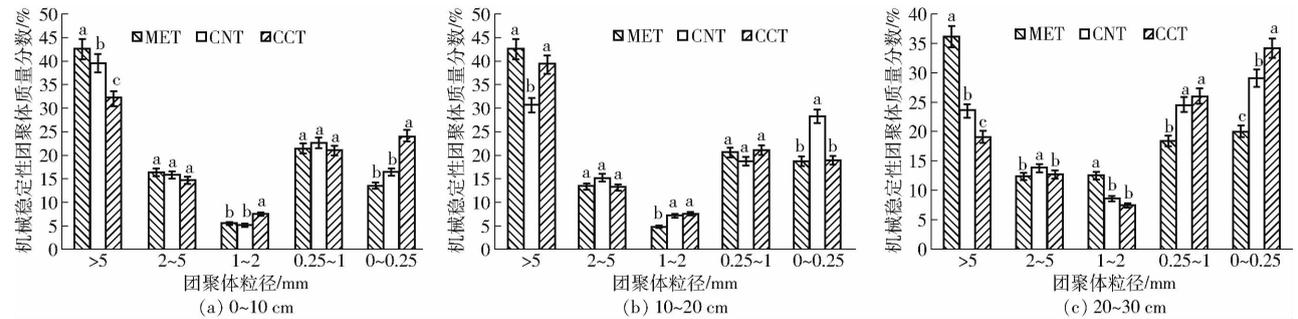


图 1 机械稳定性团聚体粒径分布

Fig. 1 Distributions of air-dried aggregate

耕作方式对 1~2 mm 团聚体含量的影响显著($P < 0.05$),0~10 cm 土层处理 MET 和处理 CNT 无显著差异,但显著小于处理 CCT;10~20 cm 土层处理 MET 显著小于处理 CNT 和处理 CCT,处理 CNT 和处理 CCT 之间差异不显著;但在 20~30 cm 土层处理 MET 显著高于处理 CNT 和处理 CCT,处理 CNT 和处理 CCT 之间差异不显著。耕作方式对 2~5 mm、0.25~1 mm 团聚体含量的影响在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层不显著,但在 20~30 cm 土层影响显著($P < 0.05$),处理 MET 小于处理 CNT 和处理 CCT。0~0.25 mm 机械稳定性团聚体的含量,在 0~10 cm 和 20~30 cm 土层处理 CCT 最高,在 10~20 cm 土层处理 CNT 最高,0~30 cm 土层中处理 MET 都是最低,与总的机械稳定性大团聚体的含量变化相反,这也说明了连续耕作对土壤机械稳定性大团聚体有破坏作用,使机械稳定性大团聚体崩解为微团聚体。

3.2 对土壤水稳性团聚体含量及粒径分布的影响

湿筛法得到的土壤水稳性团聚体反映了土壤结构的稳定性、持水性和抗侵蚀的能力,水稳性团聚体比机械稳定性团聚体对土壤结构的贡献更大。表 3 表明,0~30 cm 土层,水稳性大团聚体含量远低于机械稳定性大团聚体含量,说明机械稳定性大团聚体浸水后容易破碎,大部分是不稳定性团聚体,水稳性大团聚体含量较少。比较不同耕作模式的水稳性团聚体含量,0~30 cm 土层,土壤水稳性大团聚体含量由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT。0~10 cm 土层,处理 MET 与处理 CNT 差异不显著,两者均显著高于处理 CCT,分别高 35.54% 和 32.42%;10~20 cm 和 20~30 cm,土层各处理之间差异显著,10~20 cm 土层,处理 MET 比处理 CNT 高 8.93%,比处理 CCT 高达 22.79%,处理 CNT 比处理 CCT 高 12.72%;20~30 cm 土层,处理 MET 比处理 CNT 和 CCT 分别高 16.17% 和 34.33%。比较 0~30 cm 平均水稳性团聚体含量,处理 MET 比处理 CNT 和

CCT 分别高 8.2% 和 30.4%。说明秸秆连续还田条件下,与连续翻耕模式和连续免耕模式相比,生态沃土机械化模式显著增加 0~30 cm 土层土壤水稳定性大团聚体含量;连续免耕模式只增加 0~10 cm 土层土壤水稳性大团聚体含量;连续翻耕模式则显著降低 0~30 cm 土壤水稳性大团聚体含量,对土壤大团聚体有破坏作用。

图 2 为土壤水稳性团聚体粒径分布,从中可知,在各粒径中大于 5 mm 水稳性团聚体含量最低,但图 1 却显示大于 5 mm 机械稳定性团聚体含量最高,这说明大于 5 mm 团聚体是不稳定的,在水中极易遭到破坏。0~10 cm 和 20~30 cm 土层,耕作模式对大于 5 mm 水稳性团聚体含量影响显著 ($P < 0.05$),处理 CNT 显著高于处理 MET 和处理 CCT,处理 MET 和处理 CCT 之间差异不显著,说明生态沃土机械化和连续免耕可以增加 0~10 cm 和 20~30 cm 土层大团聚体的稳定性,但对 10~20 cm 土层大于 5 mm 水稳性团聚体含量影响不显著。0~30 cm 土层中 0~0.25 mm 水稳性团聚体的含量均为处理 CCT 最高,显著高于处理 MET 和处理 CNT,

说明连续翻耕模式下,土壤大团聚体不稳定,耕作对土壤大团聚体造成破坏,形成了大量微团聚体。0~30 cm 土层,1~2 mm 水稳性团聚体含量各处理间差异不显著,说明耕作对 1~2 mm 水稳性团聚体含量影响不显著。在 0~10 cm 土层,2~5 mm 水稳性团聚体含量各处理之间差异不显著,说明耕作对表层土壤 2~5 mm 水稳性团聚体含量影响不显著;在 10~20 cm 土层,2~5 mm 水稳性团聚体含量处理 CNT 显著高于处理 MET 和处理 CCT,处理 MET 和处理 CCT 之间差异不显著,说明生态沃土机械化耕作模式和连续翻耕都会减少 10~20 cm 土层 2~5 mm 水稳性团聚体含量;在 20~30 cm 土层,2~5 mm 水稳性团聚体含量处理 MET 和处理 CNT 之间差异不显著,但两者显著高于处理 CCT,说明连续翻耕减少 20~30 cm 土层 2~5 mm 水稳性团聚体含量。0.25~1 mm 水稳性团聚体含量在 0~30 cm 土层,处理 CCT 都显著低于处理 MET,在 10~20 cm 土层处理 CNT 也显著低于处理 MET,说明连续翻耕减少 0~30 cm 土层 0.25~1 mm 水稳性团聚体含量,而连续免耕减少 10~20 cm 土层 0.25~1 mm 水稳性团聚体含量。

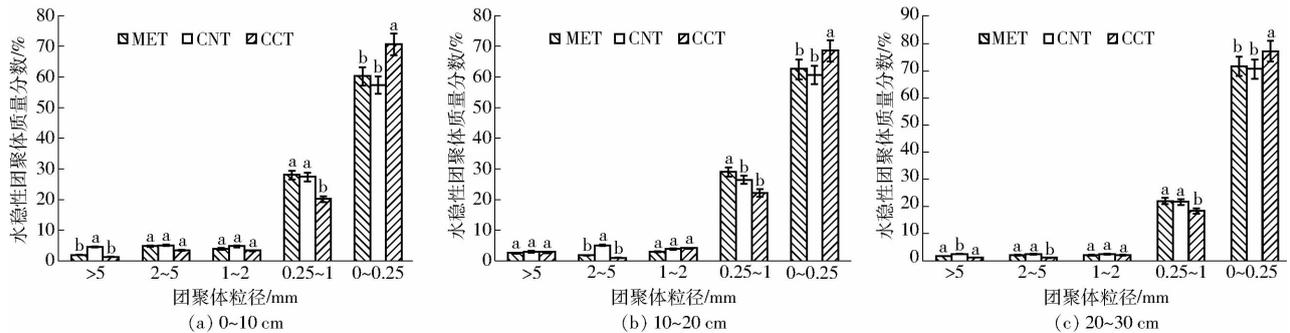


图 2 水稳性团聚体粒径分布

Fig. 2 Distributions of water-stable aggregate

土壤团聚体的粒径分布反映土壤质量,土壤团聚体平均重量直径(MWD)是表示土壤团聚体粒径分布的常用指标,水稳性团聚体 MWD 越大表示土壤团聚体的平均粒径团结度越高,稳定性越强。从表 3 中的水稳性团聚体 MWD 也可看出,0~30 cm 土层,水稳性团聚体 MWD 由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT。0~10 cm 土层,处理 MET 和处理 CNT 之间差异不显著,两者均显著高于处理 CCT;10~20 cm 和 20~30 cm 土层,各处理差异显著。说明耕作对土壤水稳性团聚体稳定的影响显著 ($P < 0.05$),连续翻耕破坏土壤团聚体稳定性,从土壤团聚体破坏率也可以看出,0~30 cm 处理 CCT 对土壤团聚体的破坏率最高。处理 CNT 耕作强度比处理 MET 小,但在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤水稳性团聚体 MWD 却不如处理 MET 大,团聚体破

坏率除 0~10 cm 土层外,均比处理 MET 要高,这可能受有机碳含量的影响。

3.3 耕作模式对土壤容重的影响

土壤容重反映土壤的松紧度,适宜的土壤容重有利于植物根系对水分养分的吸收,所以能否创造松紧适宜的耕作层是衡量土壤耕作质量的重要指标,一般适宜作物生长的土壤容重在 $1.3 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ 之间。

图 3(土壤取样是在秋季耕作之前,因此年份对应的数值表示的是上一年耕作措施对土壤容重的影响)为 2012—2016 年间 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层土壤容重的周期变化。4 年试验后的 2016 年,0~10 cm 和 20~30 cm 土层土壤容重由大到小的顺序均为 CCT、CNT、MET,各处理间差异显著 ($P < 0.05$),10~20 cm 土层土壤容重由大到小的顺序为 CNT、CCT、MET。分析原因可能是处理 CCT

连续 4 年进行翻耕,使地表裸露,经喷灌水、雨水等的冲刷,表层土壤板结严重,导致 0~10 cm 土壤容重增加;连续翻耕在 20~30 cm 形成犁底层,增加了该土层土壤容重,大于 1.5 g/cm^3 ,不利于作物的生长;连续 4 年的秸秆还田,翻耕到 10~20 cm 土层,使该土层土壤团聚体含量高于处理 CNT,与前文研究结果一致,因此该层土壤容重小于处理 CNT。而处理 CNT 由于 4 年未进行耕作,对土壤大团聚体的破坏作用小,同时又有秸秆覆盖在地表,增加表层土壤团聚体含量,0~10 cm 土层土壤容重较处理 CCT 小,但连续 4 年免耕的土壤遭到碾压后紧实度增加,4 年未翻耕,10~20 cm 土层土壤有机质较少,团聚体含量少,容重有所增加,略大于处理 CCT,显著大

于处理 MET;20~30 cm 土层处理 CNT 由于连续 4 年未进行翻耕,试验前长期传统耕作形成的犁底层变得不明显,土壤容重显著小于处理 CCT,但由于未进行深松作业,原有的犁底层并未被打破,因此土壤容重又显著大于处理 MET。处理 MET 在 4 年内进行一次翻耕,可显著减小耕层(0~20 cm)土壤容重;周期的第 3 年进行了深松,打破了原有的犁底层,有效地减小了 20~30 cm 土壤容重。比较 3 种耕作模式下的土壤容重,连续 4 年试验后,耕层平均容重比初始容重减小 0.043 g/cm^3 ,0~30 cm 土层平均容重比连续免耕和连续翻耕分别小 0.089 、 0.125 g/cm^3 ;可见生态沃土机械化模式可以有效降低 0~30 cm 土层土壤容重。

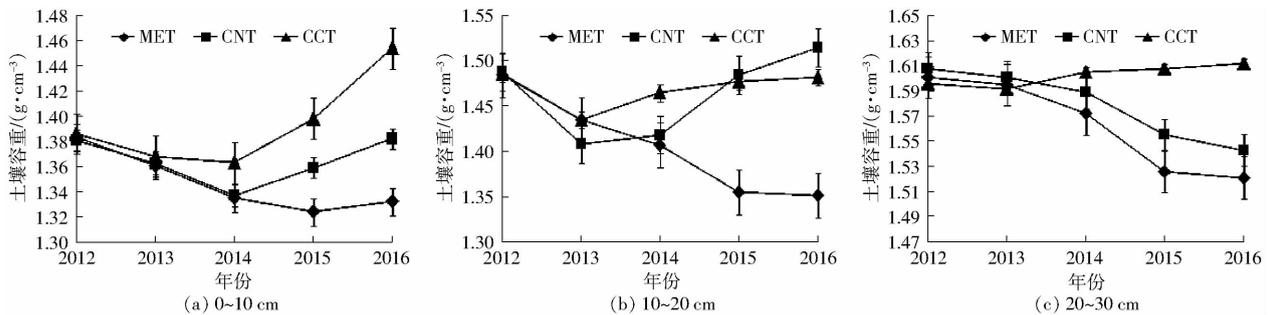


图 3 2012—2016 年间土壤容重变化

Fig. 3 Soil bulk density changes in different years from 2012 to 2016

从图 3 土壤容重周期年间变化看 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,处理 CNT 的土壤容重变化规律是先减小后增大,说明长期翻耕后进行免耕可以减小 0~20 cm 土壤容重,但经过 4 年连续免耕后土壤容重开始增大,说明连续免耕增加耕层土壤容重;20~30 cm 土层,处理 CNT 的土壤容重一直呈下降趋势,可能因为连续 4 年未进行翻耕,使 20~30 cm 土层的犁底层逐渐变得不明显。0~10 cm 和 10~20 cm 土层,处理 CCT 的土壤容重先减小后增大,可能是因为周期前两年虽然仍和试验前一样是传统翻耕,但由于秸秆还田,增加了土壤有机质,降低了土壤容重,但连续 4 年的翻耕对土壤大团聚体结构破坏严重,又使土壤容重增加;但 20~30 cm 土层处理 CCT 的土壤容重一直呈增加趋势,并且比初始容重要大,是因为处理 CCT 连续多年的翻耕在 20~30 cm 土层形成了犁底层,并且犁底层越来越紧,容重越来越大。0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层处理 MET 的土壤容重变化规律在周期的第 1 年翻耕后与处理 CCT 一致,但周期第 2 年免耕后,处理 MET 在 0~30 cm 土层的土壤容重均所降低,说明长期传统翻耕后免耕能够有效降低土壤容重;周期第 3 年深松后各土层土壤容重均显著降低,特别是 20~30 cm 土层容重降低幅度最大,说明深松可以打破犁

底层,有效降低土壤容重;周期第 4 年免耕后,第 5 年测定 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤容重略有增加,说明 4 年未进行翻耕,耕层容重有增加的趋势,在第 5 年要进行下一周期的翻耕。

图 4 为 4 年试验后不同处理的土壤剖面,可以看出,处理 MET 的犁底层被打破,如图 4a 所示,上下土层之间界限不明显;处理 CNT 秸秆在土壤表层聚集,图 4b 虽然犁底层不明显,但上下层土壤均较紧密;处理 CCT 犁底层明显,如图 4c 所示,秸秆在 10~20 cm 土层聚集,土壤分层明显。

3.4 对土壤 N、P、K 含量的影响

秸秆作为植物残体,腐解后能够提供作物生长所需的大量和微量元素,因此,秸秆还田可以减少肥料的施用量。

表 4 为不同耕作模式对土壤养分含量的影响,可以看出秸秆还田 4 年后,全氮、速效磷、速效钾含量都有显著增加,但碱解氮含量增加不显著。比较同一土层不同处理之间的各项指标可知,耕作模式对 0~30 cm 土层的全氮、速效磷、速效钾含量的影响显著($P < 0.05$),对 20~30 cm 土层土壤碱解氮的含量影响显著,但对 0~20 cm 土层土壤碱解氮影响不显著。0~10 cm 土层,处理 MET 和处理 CNT 的全氮含量、速效磷含量和速效钾含量都显著高于

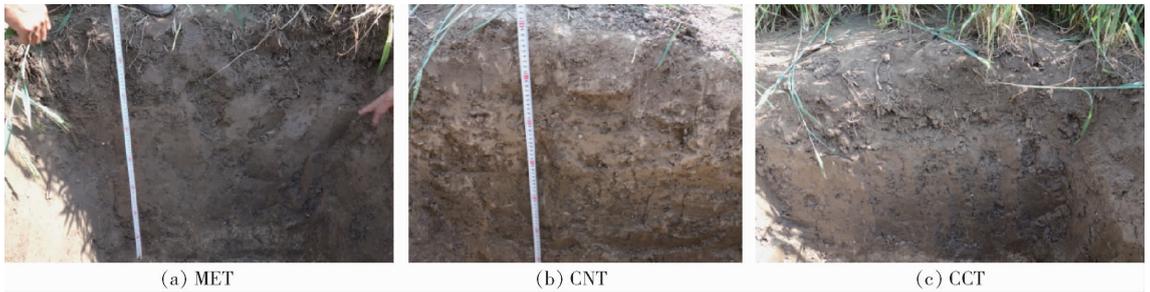


图4 不同处理的土壤剖面

Fig. 4 Soil profiles of different treatments

处理 CCT, 处理 MET 和处理 CNT 之间差异不显著; 10~20 cm 土层, 处理 MET 和处理 CCT 的全氮含量、速效磷含量和速效钾含量都显著高于处理 CNT, 处理 MET 和处理 CCT 之间差异不显著; 20~30 cm 土层, 处理 MET 的全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量都最高, 特别是速效磷含量显著高于处理 CNT 和处理 CCT。比较 0~30 cm 土层全氮、速效磷和有效钾的平均含量, 处理 MET 的平均全氮含量分别比处理 CNT 和 CCT 高 0.05、0.09 g/kg, 速效磷平均含量分别高 0.62 g/kg、1.45 mg/kg, 有效钾平均含量分别高 1.46 g/kg、3.02 mg/kg。说明生态沃土机械化模式能够显著增加 0~30 cm 土层的全氮、速效磷、速效钾的含量。

表4 不同耕作模式对土壤养分含量的影响

Tab. 4 Effects of different tillage patterns on soil nutrient

取样深度/ cm	处理	有机碳	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾
		质量比/ (g· kg ⁻¹)	质量比/ (g· kg ⁻¹)	质量比/ (mg· kg ⁻¹)	质量比/ (mg· kg ⁻¹)	质量比/ (mg· kg ⁻¹)
0~10	MET	8.82 ^a	0.88 ^a	76.27 ^a	32.84 ^a	114.94 ^a
	CNT	8.92 ^a	0.89 ^a	77.39 ^a	33.28 ^a	115.36 ^a
	CCT	8.04 ^b	0.72 ^b	76.74 ^a	30.54 ^b	111.55 ^b
10~20	MET	8.66 ^a	0.86 ^a	73.21 ^a	31.98 ^a	112.32 ^a
	CNT	8.06 ^b	0.76 ^b	72.03 ^a	30.60 ^b	110.56 ^b
	CCT	8.32 ^a	0.82 ^a	72.12 ^a	31.26 ^a	113.47 ^a
20~30	MET	8.12 ^a	0.79 ^a	68.02 ^a	31.01 ^a	108.36 ^a
	CNT	7.53 ^b	0.72 ^b	67.56 ^a	29.65 ^b	105.32 ^b
	CCT	7.40 ^b	0.70 ^c	60.12 ^b	29.24 ^b	101.53 ^c

3.5 对土壤有机碳含量的影响

表4表明, 0~10 cm 不同耕作模式的土壤有机碳含量差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 有机碳含量由大到小的顺序为 CNT、MET、CCT, 生态沃土机械化耕作模式与连续免耕模式无显著差异, 比连续翻耕模式高 9.7%, 差异显著 ($P < 0.05$); 10~20 cm 土层土壤有机碳含量变化由大到小的顺序为 MET、CCT、CNT, 生态沃土机械化耕作模式比连续翻耕模式高 4.1%, 差异不显著, 比连续免耕模式高 7.4%, 差异显著 ($P < 0.05$); 20~30 cm 土层土壤有机碳含

量变化由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT, 处理 MET 比处理 CNT 高 7.8%, 比处理 CCT 高 9.7%, 差异显著, 处理 CNT 和处理 CCT 差异不显著。说明在秸秆还田条件下, 连续免耕模式只增加 0~10 cm 土层土壤有机碳含量, 使得有机碳在表层积累, 而亚表层出现养分分化现象, 这也是处理 CNT 10~20 cm 土层土壤大团聚体含量少、土壤容重较大的原因; 连续翻耕模式增加 10~20 cm 土层土壤有机碳含量, 而 0~10 cm 土层有机碳含量显著小于生态沃土机械化模式和连续免耕模式, 20~30 cm 土层与连续免耕模式差异不显著, 显著小于生态沃土机械化耕作模式, 有机碳在各层之间的分布也不均匀, 特别是 20~30 cm 土层有机碳含量很低; 而生态沃土机械化模式可显著增加 0~30 cm 土层土壤有机碳含量, 平均有机碳含量比连续免耕和连续翻耕分别高 0.36、0.61 g/kg, 并且各层之间有机碳含量分布较均衡。

3.6 土壤大团聚体稳定性与有机碳含量的相关性

图5为 0~30 cm 土层土壤大团聚体稳定性与有机碳含量的回归曲线, 通过回归分析可知, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤大团聚体稳定性与土壤有机碳含量有极显著的相关性 (R^2 分别为 0.988 和 0.889, $P < 0.001$), 而在 20~30 cm 土层土壤大团聚体稳定性与有机碳含量没有达到显著水平。这说明在 0~20 cm 耕层, 土壤有机碳含量是影响土壤大团聚体稳定性的重要因素, 也说明了秸秆还田对改善土壤耕层结构有重要作用。

3.7 耕作模式对作物产量及构成要素的影响

图6a为 2012—2016 年间小麦产量的变化, 可以看出, 4 年试验后各处理小麦产量均较 2012 年试验前有显著增加。处理 CNT 在 2012 年免耕后 2013 年小麦产量比处理 MET 和处理 CCT 要高; 2013 年处理 MET 进行免耕后 2014 年的小麦产量比处理 CCT 要高, 处理 CNT 连续 2 年免耕后小麦产量仍高于处理 CCT。说明长期翻耕后进行免耕可以增加小麦产量, 增产幅度为 6%~12%, 处理 CNT 连续免耕 2 年仍能维持增产优势, 比处理 CCT 高 10.54%。

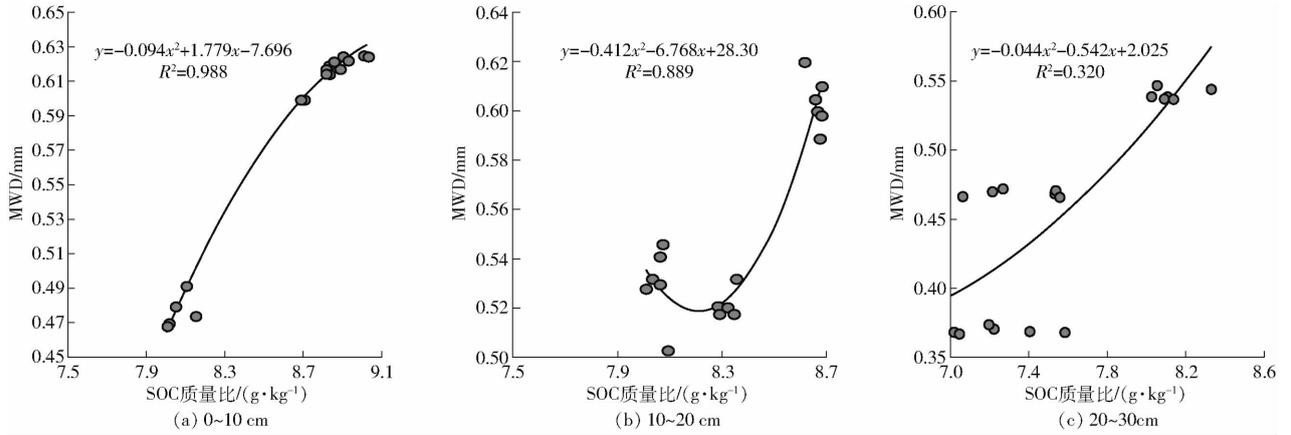


图 5 0~30 cm 各土层土壤有机碳含量与 MWD 的多元回归分析

Fig. 5 Multiple regression analysis between SOC and MWD in 0~30cm soil layer

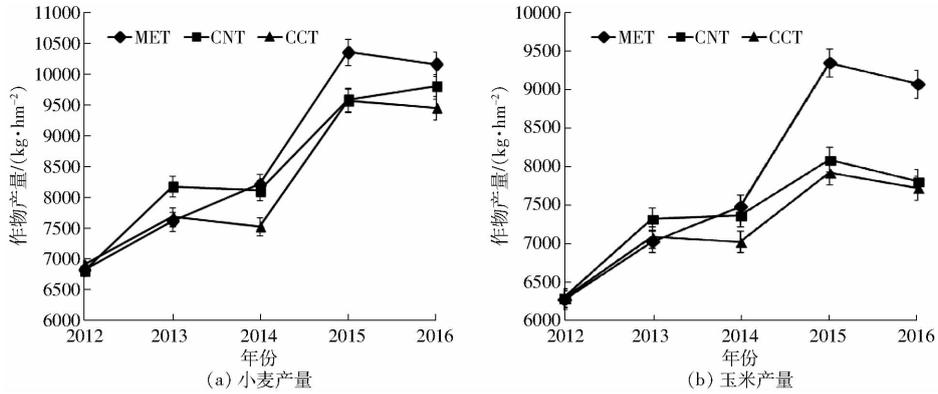


图 6 2012—2016 年间作物产量变化

Fig. 6 Variation of crops yield from 2012 to 2016

处理 MET 在 2014 年进行深松后,2015 年的小麦产量显著高于处理 CNT 和处理 CCT,分别高 15.56% 和 22.68%,说明免耕 1 年后深松能够显著增加小麦产量,2015 年处理 CNT 的小麦产量也高于处理 CCT,高 6.16%,增产优势有所减弱。处理 MET 在 2015 年免耕后,2016 年小麦产量显著高于处理 CNT 和 CCT,分别高 14% 和 14.9%,说明深松后免耕仍能保持增产优势,但增产优势较 2015 年有所减弱,处理 CNT 与处理 CCT 差异不显著,处理 CNT 连续免耕 4 年,增产效果不显著,可能是因为连续 4 年未进行翻耕,养分在表层土壤富集,亚表层养分分化,不利于根系的生长,导致增产作用减弱,要进行必要的翻耕。

表 5 为耕作模式对小麦产量构成要素的影响。在播种量相同的情况下,处理 CCT 的基本苗数显著高于处理 MET 和处理 CNT,说明连续翻耕模式能够

为种子创造良好的种床条件,保证种子与土壤紧密接触,显著增加小麦的出苗率,从而增加小麦的基本苗数,而生态沃土机械化模式和连续免耕模式,由于秸秆覆盖在地表,使得小麦的出苗率有所下降,基本苗数比连续翻耕模式分别少 16.4% 和 17.4%。分析不同耕作模式下的平均单株分蘖数可知,处理 MET 最高,其次是处理 CNT,处理 CCT 最低,三者之间差异显著 ($P < 0.05$),说明与连续翻耕模式相比,生态沃土机械化模式和连续免耕模式可以显著增加小麦的平均单株分蘖数。分析不同耕作模式下的有效穗数可知,处理 CCT 最多,其次是处理 MET,处理 CNT 最少,分析是因为处理 CCT 虽然平均单株分蘖数较少,但基本苗较多,可以保证有效穗数,而处理 MET 虽然基本苗比处理 CCT 少,但平均单株分蘖数较处理 CCT 高,也能保证有效穗数,只有处理 CNT 基本苗数不如处理 CCT 多,平均单株分蘖数不如处

表 5 不同耕作模式对小麦构成要素的影响

Tab. 5 Effects of different tillage patterns on wheat yield components

处理	基本苗数/(株·hm ⁻²)	平均单株分蘖数	有效穗数/(株·hm ⁻²)	有效穗粒数	千粒质量/g	实际产量/(kg·hm ⁻²)
MET	(2.25 × 10 ⁶) ^b	2.75 ^a	(6.19 × 10 ⁶) ^a	38.2 ^a	45.2 ^a	9 081 ^a
CNT	(2.23 × 10 ⁶) ^b	2.59 ^b	(5.78 × 10 ⁶) ^b	36.5 ^b	43.6 ^b	7 913 ^b
CCT	(2.62 × 10 ⁶) ^a	2.42 ^c	(6.34 × 10 ⁶) ^a	34.3 ^c	41.8 ^c	7 727 ^b

理 MET 多,因此其有效穗数显著小于处理 MET 和处理 CCT。有效穗粒数和千粒质量由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT,处理之间差异显著。产量构成要素的差异最终导致小麦产量的差异,生态沃土机械化模式的出苗率虽然较连续翻耕模式低,但可以通过增加小麦的平均单株分蘖数、有效穗粒数以及千粒质量来保证产量。

图 6b 为 2012—2016 年间玉米产量的变化,可以看出,4 年试验后各处理的玉米产量均较 2012 年试验前有显著增加,2012 年处理 CNT 的玉米产量显著高于处理 MET 和处理 CCT,分别高 7.4% 和 6.4%,2013 年处理 MET 的玉米产量显著高于处理 CCT,高 9.0%,处理 CNT 也显著高于处理 CCT,高 7.7%,处理 MET 和处理 CNT 无显著差异。2014 年,玉米产量由大到小顺序为 MET、CNT、CCT,差异显著,处理 MET 的增产幅度最大。2015 年处理 MET 和处理 CNT 无差异,显著高于处理 CCT,分别高 7.4% 和 3.7%。

表 6 为耕作模式对玉米产量构成要素的影响。在播种密度相同的情况下,耕作模式对玉米的出苗率没有影响,因为玉米都是免耕播种。但耕作模式对有效穗粒数和千粒质量的影响显著,有效穗粒数由大到小的顺序为 MET、CNT、CCT,处理 MET 比处理 CNT 和 CCT 分别高 3.4% 和 5.9%,处理间差异显著,说明生态沃土机械化耕作模式显著增加玉米的有效穗粒数;对于千粒质量的影响,处理 MET 和处理 CNT 显著高于处理 CCT,说明生态沃土机械化模式和连续免耕模式可以显著增加玉米的千粒质量。耕作模式对玉米产量及产量构成要素的影响说明虽然玉米播种时未进行任何土壤耕作,但在小麦播种前进行不同的土壤耕作措施对调节耕层土壤松

紧度、耕层表面状态以及土壤内部养分分布等的作用各异,因而不同耕作模式的后效各不相同。

表 6 不同耕作模式对玉米产量及产量构成要素的影响

Tab.6 Effects of different tillage patterns on corn yield and yield components

处理	有效穗数/ (株·hm ⁻²)	有效穗 粒数	千粒质量/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
MET	6.75 × 10 ⁶	538.4 ^a	329 ^a	10 163 ^a
CNT	6.75 × 10 ⁶	520.8 ^b	328 ^a	9 801 ^a
CCT	6.75 × 10 ⁶	508.6 ^c	324 ^b	9 455 ^b

4 结论

(1) MET 显著增加 0 ~ 30 cm 土层土壤大团聚体含量,提高土壤结构稳定性,平均水稳性团聚体含量分别比 CNT 和 CCT 高 8.2% 和 30.4%。

(2) MET 可以有效降低 0 ~ 30 cm 土层土壤容重,平均容重分别比 CNT 和 CCT 小 0.089、0.125 g/cm³。

(3) MET 显著增加 0 ~ 30 cm 土层全氮、速效磷、速效钾和有机碳含量,对碱解氮含量影响不显著,平均有机碳质量比分别比 CNT 和 CCT 高 0.36、0.61 g/kg,并且各层之间有机碳含量分布较均衡,CNT 只增加 0 ~ 10 cm 土层有机碳含量,CCT 只增加 10 ~ 20 cm 土层有机碳含量。

(4) MET 显著增加小麦的平均单株分蘖数、有效穗粒数和千粒质量,从而显著增加小麦产量,分别比 CNT 和 CCT 增产 14% 和 14.9%;小麦播前的耕作有一定的后效,对玉米产量有影响,MET 与 CNT 通过增加玉米的有效穗粒数和千粒质量,增加玉米产量,两者产量的差异不显著,但均显著高于 CCT,分别高 7.4% 和 3.7%。

参 考 文 献

- 1 杨如萍,郭贤仕,吕军峰,等.不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,2010,24(1):252-256.
YANG Ruping, GUO Xianshi, LÜ Junfeng, et al. Affects of distribution and stability on soil aggregate in different patterns of tillage and cropping[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(1):252-256. (in Chinese)
- 2 田慎重,王瑜,李娜,等.耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(22):7116-7124.
TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(22):7116-7124. (in Chinese)
- 3 ANNA J, MIRIAM H, SUSAN H, et al. Effect of conventional and minimum tillage on physical and biochemical stabilization of soil organic matter [J]. Biol Fertil Soils, 2010,46:671-680.
- 4 MESSIGA A J, ZIADI N, ANGERS D A, et al. Tillage practices of a clay loam soil affect soil aggregation and associated C and P concentrations[J]. Geoderma, 2011,164:225-231.
- 5 孔凡磊,陈卓,张海林,等.轮作对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):150-155.
KONG Fanlei, CHEN Fu, ZHANG Hailin, et al. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield[J]. Transaction of CASE, 2010,26(8):150-155. (in Chinese)
- 6 李传友.机械深松对土壤理化属性和夏玉米生长特性的影响[J].沈阳农业大学学报,2014,45(6):746-750.
LI Chuanyou. Effects on mechanical subsoiling on soil physical and chemical properties and growth characteristics of summer corn

- [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2014,45(6):746-750. (in Chinese)
- 7 秦红灵,高旺盛,马月,等.两年免耕后深松对土壤水分的影响[J].*中国农业科学* 2008,41(1):78-85.
QIN Hongling,GAO Wangsheng, MA Yue,et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008,41(1):78-85. (in Chinese)
- 8 周虎,吕貽忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特性的影响[J].*中国农业科学*, 2007,40(9):1973-1979.
ZHOU Hu, LÜ Yizhong, YANG Zhichen,et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007,40(9):1973-1979. (in Chinese)
- 9 KETEMA H,YIMER F. Soil property variation under agroforestry based conservation tillage and maize based conventional tillage in Southern Ethiopia[J]. *Soil and Tillage Research*,2014, 141:25-31.
- 10 RIENZI E A,MAGGI A E,SCROFFA,M,et al. Autoregressive state spatial modeling of soil bulk density and organic carbon in fields under different tillage system[J]. *Soil and Tillage Research*,2016,159:56-66.
- 11 TORRES E,MADARI B, MACHADO P L O A, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*,2005, 80:185-200.
- 12 MIKHAILOVA E A, BRYANT R B, VASSENEV I I, et al. Cultivation effects on soil carbon and nitrogen contents at depth in the Russian Chernozem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000,64:738-745.
- 13 SIX J, ELLIOT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62:1367-1377.
- 14 LAL R. Soil temperature, soil moisture and maize yield from mulched and unmulched tropical soils[J]. *Plant and Soil*, 1974,1:129-143.
- 15 高国录,张福武,蔡立群.保护性耕作措施对土壤水分含量及春小麦产量的影响[J].*甘肃农业科技*,2009(2):27-31.
- 16 张萌,李立科,郝明德.免耕覆盖对玉米产量及土壤肥力的影响[J].*西北农业学报*,2013,22(6):67-72.
ZHANG Meng, LI Like, HAO Mingde. Effect of no-tillage with straw cover on corn yield and soil fertility[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*,2013,22(6):67-72. (in Chinese)
- 17 POWLSON D S. Mineralization and assimilation in soil-plant systems[M]. San Diego: Academic Press, 1992.
- 18 DOMZAL H, SLOWINSK J A. Effects of tillage and weather conditions on structure and physical properties of soil and yield of winter wheat[J]. *Soil and Tillage Research*, 1987(10): 225-241.
- 19 KIRKEGARD J A, MUNNS R, JAMES R A, et al. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping II: soil biological factors limit growth under direct drilling[J]. *Agriculture Research*, 1995, 46: 75-88.
- 20 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社,2009.

(上接第 35 页)

- 13 ALVA A, AKASH R S, MANIKANTAN K. Optimal multilevel thresholding based on Tsallis entropy and half-life constant PSO for improved image segmentation[C]//*Electrical Computer and Electronics. IEEE*, 2016:1-6.
- 14 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1979, 9(1):62-66.
- 15 王跃勇,于海业,刘媛媛.基于形态学图像检测的机械手移栽穴苗识别技术[J].*光学精密工程*, 2016, 24(3):651-658.
WANG Yueyong,YU Haiye,LIU Yuanyuan. Recognition technology of robot hand transplanting seedling based on morphological image detection[J]. *Optics and Precision Engineering*,2016, 24(3):651-658. (in Chinese)
- 16 孙颖,张志佳.基于频域滤波的自适应条带噪声去除算法[J].*仪表技术与传感器*, 2006, 43(2):57-59.
SUN Ying,ZHANG Zhijia. Adaptive band noise removal algorithm based on frequency domain filtering[J]. *Instrument Technique and Sensor*,2006, 43(2):57-59. (in Chinese)
- 17 SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(4):379-423.
- 18 KAPUR J N, SAHOO P K, WONG A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. *Computer Vision GraphicsImage Processing*, 1985,29:273-285.
- 19 PUN T. Entropic thresholding, a new approach[J]. *Computer Graphics & Image Processing*, 1981, 16(3):210-239.
- 20 张新明,张贝,涂强.广义概率 Tsallis 熵的快速多阈值图像分割[J].*数据采集与处理*, 2016, 31(3):502-511.
ZHANG Xinming, ZHANG Bei, TU Qiang. Fast multi threshold image segmentation based on generalized probability Tsallis entropy [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2016, 31(3):502-511. (in Chinese)
- 21 YIN P Y. A fast scheme for optimal thresholding using genetic algorithms [J]. *Signal Processing*, 1999, 72(2):85-95.
- 22 包子阳,余继周.智能优化算法及其 MATLAB 实例[M].北京:电子工业出版社,2016.
- 23 BHANDARI A K, KUMAR A, SINGH G K. Tsallis entropy based multilevel thresholding for colored satellite image segmentation using evolutionary algorithms[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(22):8707-8730.
- 24 SARKAR S, DAS S, CHAUDHURI S S. A multilevel color image thresholding scheme based on minimum cross entropy and differential evolution[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2015, 54:27-35.
- 25 CAMARGO A, SMITH J S. An image-processing based algorithm to automatically identify plant disease visual symptoms[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(1):9-21.
- 26 WANG S L, ZHAO H J. Multilevel thresholding gray-scale image segmentation based on improved particle swarm optimization [J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 119:179-186.