

深松轮耕模式对黄土旱塬春玉米土壤理化性质和作物产量的影响

张琦 王浩 王淑兰 张元红 王瑞 王小利 李军*

(西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 秸秆覆盖深松耕能保护土壤并调节土壤结构,但长期连续深松并不能获得持续增产与培肥土壤效果。为实现持续培肥增产的目的,于2007—2016年在黄土旱塬区连作春玉米田进行了深松轮耕长期定位试验,设置免耕/翻耕/深松(NT/CT/ST)与深松/翻耕(ST/CT)轮耕处理,并以连续深松(ST)为对照,对比分析不同耕作模式对土壤理化性质和玉米产量的影响。结果表明:与ST相比,NT/CT/ST处理机械稳定性团聚体($DR_{0.25}$)和水稳定性团聚体($WR_{0.25}$)较ST分别显著增加9.2%和21.9%,团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)显著增加;ST/CT处理 $WR_{0.25}$ 显著增加了11.9%。在0~20 cm土层,NT/CT/ST和ST/CT处理土壤容重较ST分别显著降低7.0%和11.5%,土壤孔隙度分别增加8.4%和13.9%;在20~40 cm土层,ST/CT处理土壤容重增加了6.9%,土壤孔隙度降低了5.7%。NT/CT/ST比ST显著增加了土壤全氮和有机质含量,但降低了土壤全磷和全钾含量。NT/CT/ST处理玉米籽粒产量多年平均值较ST/CT和ST分别提高4.8%和10.2%。 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、土壤全氮、有机碳含量均与产量呈显著正相关,说明深松轮耕模式提高了 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、土壤全氮、有机碳含量,有利于玉米籽粒产量提高。综合考虑土壤肥力和玉米产量,NT/CT/ST处理有利于培肥土壤,提高土壤结构稳定性,并且可获得较高的玉米产量,为推荐轮耕模式。

关键词 春玉米;黄土旱塬;深松;轮耕;土壤理化性质;产量

Effects of tillage alternation pattern with subsoiling on soil physical and chemical properties and spring maize yield in the Loess Plateau, China. ZHANG Qi, WANG Hao, WANG Shu-lan, ZHANG Yuan-hong, WANG Rui, WANG Xiao-li, LI Jun* (College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shannxi, China).

Abstract: Straw mulching and subsoiling can protect soil and improve soil structure. However, long-term continuous subsoiling cannot continuously gain yield increasing and soil improvement. To realize continuous soil improvement and yield enhancement, a long-term experiment on subsoiling alternation patterns was carried out with spring maize continuous cropping in the Loess Plateau in 2007–2016. The subsoiling alternation patterns were no-tillage/conventional tillage/subsoiling (NT/CT/ST) and subsoiling/conventional tillage (ST/CT), with continuous subsoiling (ST) as control. We analyzed the effects of the different patterns on soil physical and chemical properties and maize yield. The results showed that, compared with the ST, the mechanical-stable aggregates ($DR_{0.25}$) and water-stable aggregates ($WR_{0.25}$) in NT/CT/ST were significantly increased by 9.2% and 21.9%, with the mean weight diameter (MWD) and geometrical mean diameter (GMD) being significantly increased. The $WR_{0.25}$ in ST/CT was significantly increased by 11.9%. In 0–20 cm soil layer, soil bulk density in NT/CT/ST and ST/CT decreased by 7.0% and 11.5%, and soil porosity increased by 8.4% and 13.9%, respectively. In 20–40 cm soil layer, soil bulk density in ST/CT increased by 6.9%, and soil porosity decreased by 5.7%. In the NT/CT/ST, soil total nitrogen and organic matter contents significantly increased, but soil total phosphorus and total potassium con-

本文由国家自然科学基金项目(31571620,31671641)、国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02)和公益性行业(农业)科研专项(201503116)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31571620, 31671641), the National Science and Technology Support Program (2015BAD22B02), and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503116).

2019-05-08 Received, 2019-12-13 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

tents reduced. The multi-year average grain yield of spring maize in NT/CT/ST was 10.2% higher than ST and 4.8% higher than ST/CT. The $DR_{0.25}$, $WR_{0.25}$, soil total nitrogen content and soil organic carbon content were all positively correlated with maize yield, indicating such changes facilitated corn grain yield. Considering the effects on soil fertility and corn yield, the NT/CT/ST model was conducive to soil fertility, soil structural stability and higher maize yield.

Key words: spring maize; Loess Plateau; subsoiling; tillage alternation; soil physical and chemical property; yield.

黄土旱塬地处半湿润易旱气候区,是我国重要的粮食生产基地,素有“旱塬粮仓”之称。但由于气候干旱少雨,农田土壤长期采取翻耕方式,土壤结构被破坏,土壤退化明显,导致旱地玉米产量低而不稳^[1]。保护性耕作能调节土壤结构,有利于蓄水保墒和土壤培肥,可促进耕地质量提升,实现培肥增产的目的^[2-4]。近年来,深松耕被认为是较翻耕更为合理的土壤耕作方式,其在土壤不被翻转条件下疏松土壤、打破坚硬犁底层、加深耕作层,提高土壤蓄水保墒能力,减少多年翻耕形成的犁底层的影响,减轻土壤风蚀与水蚀^[5-7]。但这种效应多为短期试验结果^[8-9],长期连续深松仍然弊端明显,多年连续深松并没有持续的增产效果,如何明等^[10]研究表明,深松对产量的影响具有两面性,既有疏松土壤、增加田间持水量的正面影响,也有降低播种质量、迟缓土壤有机质积累、减少土壤细菌数量等负面影响,并且这种负面影响会随着深松年限的增加而逐年增大,深松增产效应也会逐步下降。郑侃等^[11]对中国北方深松试验进行 meta 分析,结果表明,隔年或 2 年深松 1 次可获得较高的产量;在黄土旱塬的试验结果也表明长期深松并不具有产量优势^[12-13]。

土壤轮耕体系被认为是克服单一耕作弊端的有效方式^[14],轮耕可充分利用多样化的耕作方式,发挥各种耕作措施优势,克服其他耕作措施的弊端。如传统翻耕尽管对表土破坏较大,不利于土壤水分保蓄,但可以利用翻耕翻埋秸秆,加速秸秆腐解,提高土壤肥力,降低表层土壤容重,有利于作物苗期生长,减少病虫害和杂草等^[15]。国际上广泛使用的免耕技术能有效提高表层土壤肥力水平,充分保蓄土壤水分,并且有利于提高土壤结构稳定性,降低土壤风蚀和水蚀,但长期免耕往往使土壤容重增加,不利于作物苗期生长,并且会引起土壤杂草与病害频发^[16-17]。在中国东北、华北和西北旱区的土壤轮耕试验表明,轮耕较单一土壤耕作提高了作物产量并克服了单一耕作的弊端^[18]。目前,对轮耕技术的研究往往在传统翻耕基础上结合免耕或深松进行^[19-20],而以深松为基础的土壤轮耕模式研究仍少

见报道。因此,本研究基于旱地春玉米长期定位试验,以连续深松耕为对照,比较免耕/翻耕/深松、深松/翻耕两种轮耕模式下的土壤改良和玉米增产效应,以期为黄土旱塬玉米田适宜的深松轮耕模式选择提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于渭北旱塬东部的陕西省渭南市合阳县甘井镇(35°19' N, 110°05' E),地处典型的黄土旱塬粮食主产区,属于暖温带半湿润偏旱气候,海拔 877 m,多年平均降雨量 536.6 mm,且主要集中在 7—9 月,2008—2016 年月平均降雨量分布见图 1。年平均气温 11.5 ℃,最高气温在 7 月,平均气温为 25 ℃,最低气温在 1 月,平均气温为 -2.9 ℃,年平均日照时间约为 2528 h。试验地土壤类型为中壤土,土层较厚易耕作,土壤蓄水保肥能力强,种植方式为春玉米一年一熟制,试验地初始养分含量见表 1。

1.2 试验设计

本试验于 2007 年 9 月—2016 年 9 月进行,试验期间无灌溉措施。试验开始前土壤耕作方式均为传统的翻耕措施。试验采用单因素随机区组设计,小区面积 5 m×22.5 m = 112.5 m²,重复 3 次。试验设置两种深松轮耕模式:免耕/翻耕/深松 (NT/CT/ST) 和深松/翻耕 (ST/CT),并以连续深松 (ST) 为对

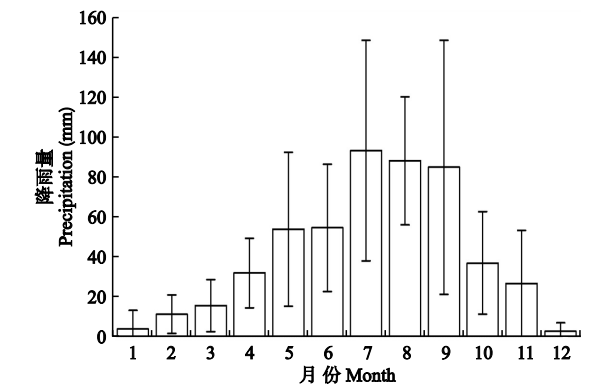


图 1 2008—2016 年多年平均月降雨量
Fig.1 Average monthly rainfall in 2008–2016.

表 1 试验前土壤理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties before experiment

土层 Soil layer (cm)	pH	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g · kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g · cm ⁻³)	孔隙度 Porosity (%)
0~20	7.86	9.95	0.74	0.59	5.92	1.36	48.7
20~40	7.96	8.41	0.65	0.69	5.53	1.45	44.7

照,每年 9 月下旬春玉米收获后休闲初期实施各耕作处理,翌年 4 月中下旬播种春玉米。免耕(NT)处理是不采取任何土壤耕作方式,仅在秸秆全量粉碎覆盖下度过休闲期;深松(ST)处理是在秸秆全量粉碎覆盖下采用深松机进行间隔 60 cm、耕深 30~35 cm 的深松作业;翻耕(CT)处理是采用铧式犁对土壤全面翻耕 20~25 cm,将全量粉碎后的秸秆翻埋入土壤,地表裸露度过休闲期。在休闲期结束后,3 种耕作方式均按照相同的施肥量(N:150 kg · hm⁻², P₂O₅:120 kg · hm⁻², K₂O:90 kg · hm⁻²)撒施肥料,并浅旋 0~5 cm 将肥料搅拌均匀。采用玉米单粒点播机进行一次性播种,行距 60 cm,株距 30 cm。供试品种:2008—2013 年为‘豫玉 22’,2014—2016 年为‘郑单 958’。其余田间管理方式与当地大田管理措施一致。

1.3 测定项目与研究方法

1.3.1 土壤团聚体数量和大小 于 2016 年 9 月玉米收获后使用铁锹采集 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 4 个土层土样,每小区取 3 次重复。自然风干后除去粗根和小石块,并将大土块按自然裂痕剥离为 1 cm 左右,小心运到试验室。

土样预处理:将风干土样过孔径为 5、2 mm 的筛子,分为>5、5~2、<2 mm 的 3 个级别,然后用对角线分割法按 3 个级别土样在原状土中所占比例取混合土样 200 g(2 份),用于机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的测定^[21~22]。机械稳定性团聚体采用干筛法测定:将 200 g 土样放入孔径为 5、2、1、0.5、0.25 mm 套筛的最上层,用底盒和筛盖密封,用震荡式机械筛分仪进行 200 次 · min⁻¹为时 2 min 的震荡,得到>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、<0.25 mm 的机械稳定性团聚体,分别测量 6 个粒径的团聚体质量^[21~22]。水稳性团聚体采用湿筛法测定:将 200 g 土样放入孔径为 5、2、1、0.5、0.25 mm 套筛的最上层,调整筛桶内水面高度使其没过套筛土壤上表面,待土壤浸泡完全后,用团粒分析仪以 30 次 · min⁻¹振荡 30 min。分别将 6 个粒径大小的团聚体洗入铝盒中,烘干称重^[21~22]。

利用各粒级团聚体数据,计算>0.25 mm 团聚体含量(R_{0.25})、团粒平均重量直径(MWD)、团粒几何平均直径(GMD)。干筛法和湿筛法测定的 R_{0.25} 含量分别用 DR_{0.25}和 WR_{0.25}表示^[22]。

$$R_{0.25} = (M_r > 0.25) / M_t$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$GMD = \sum xp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \overline{X_i}}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)$$

式中:R_{0.25}为直径>0.25 mm 的团聚体含量;M_t为团聚体的总重量;M_r>0.25 为粒径>0.25 mm 团聚体的重量;MWD 为团粒平均重量直径(mm);GMD 为团粒几何平均直径(mm);X_i为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm);W_i为对应等级的团聚体百分含量。

1.3.2 土壤容重和孔隙度 土壤容重采用环刀法测定。土壤孔隙度(P_t)根据土壤容重实测值计算:P_t(%)= 93.947 - 32.995D,其中:D 是土壤实测容重(g · cm⁻³)。

1.3.3 土壤养分 于 2016 年春玉米收获后,采用 5 点取样法分别取 0~20、20~40 cm 土层土样,自然风干后将土样分别过 40 目和 100 目筛子,用于土壤养分的测定。土壤养分含量测定参照鲍士旦^[23]的方法,其中,全氮采用半微量凯氏定氮法;全磷采用浓硫酸-高氯酸消解-钼锑抗比色法,全钾采用浓硫酸-高氯酸(HClO₄-H₂SO₄)消煮-原子吸收火焰光度法;有机质(SOM)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法。

1.3.4 产量 在每年春玉米收获时,各处理分别选择测产样方 9 m²,重复 3 次,实收玉米籽粒测定产量。产量变化量为免耕/翻耕/深松、深松/翻耕处理下玉米籽粒产量减去对照下玉米籽粒产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行整理、Origin-

Pro 2015 软件作图,采用 SPSS 软件对数据进行方差分析和相关性分析, LSD 法进行多重比较 ($\alpha = 0.05$)。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同深松轮耕模式对土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤团聚体含量 经过 9 年定位耕作处理后,不同耕作模式土壤团聚体含量差异显著(图 2)。干筛法测定结果表明,与 ST 相比,NT/CT/ST 显著提升 0~10、10~20 cm 土层 DR_{0.25} 含量,20~30 cm 土层各处理差异不显著,30~40 cm 土层 NT/CT/ST、ST/CT 的 DR_{0.25} 含量分别显著提高 12.0%和 10.5%。湿筛法测定结果表明,与 ST 相比,NT/CT/ST 和 ST/CT处理 0~40 cm 土层平均 WR_{0.25} 含量分别显著提高了 21.9%和 11.9%,耕作模式显著影响了 0~30 cm 土层 WR_{0.25} 含量,并且 0~10 和 20~30 cm 土层 WR_{0.25} 含量均表现为 NT/CT/ST>ST/CT>ST,但 10~20 cm 土层 WR_{0.25} 含量表现为 ST/CT>NT/CT/ST>ST。

2.1.2 土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 干筛法测定结果表明,NT/CT/ST 处理 0~40 cm 土层平均 MWD、GMD 值较 ST 分别显著提高 8.3%、3.0%,ST/CT 处理较 ST 分别提高 7.5%、3.7%(表 2)。0~10 cm 土层,NT/CT/ST、ST/CT 显著提升了 MWD、GMD 值;10~20 cm 土层,NT/CT/ST 的 MWD 和 GMD 值显著提升 10.3%和 11.5%;20~30 cm 土层,各处理无差异;30~40 cm 土层,MWD、GMD 值大小为 NT/CT/ST>ST/CT>ST。

表 2 不同耕作模式下土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)

Table 2 Mean weight diameter (MWD) and geometrical mean diameter (GMD) of soil aggregates in different tillage patterns

方法 Method	指标 Index	处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)				
			0~10	10~20	20~30	30~40	0~40
干筛法 Dry sieve method	MWD	NT/CT/ST	2.59±0.21a	3.49±0.28a	3.12±0.12a	2.32±0.01a	2.88±0.52a
		ST/CT	2.51±0.02a	3.16±0.31b	3.02±0.31a	2.25±0.03a	2.74±0.43b
		ST	2.26±0.26b	3.14±0.05b	3.07±0.18a	2.15±0.07b	2.66±0.52c
	GMD	NT/CT/ST	1.73±0.07a	2.79±0.15a	2.36±0.13a	2.31±0.28a	2.30±0.44a
		ST/CT	1.73±0.02a	2.61±0.05ab	2.36±0.04a	2.16±0.33b	2.22±0.37a
		ST	1.58±0.06b	2.47±0.18b	2.32±0.11a	2.18±0.06b	2.14±0.39b
湿筛法 Wet sieve method	MWD	NT/CT/ST	1.21±0.41a	1.06±0.14b	1.48±0.17a	0.76±0.03a	1.13±0.30a
		ST/CT	0.99±0.06b	1.49±0.16a	1.10±0.21b	0.80±0.05a	1.10±0.29a
		ST	1.08±0.33b	1.00±0.09b	1.07±0.21b	0.72±0.11a	0.97±0.17b
	GMD	NT/CT/ST	0.89±0.06a	0.63±0.15b	1.01±0.15a	0.53±0.17a	0.77±0.22a
		ST/CT	0.75±0.03b	0.70±0.05a	0.76±0.04b	0.50±0.13a	0.68±0.12b
		ST	0.75±0.09b	0.58±0.17b	0.73±0.01b	0.49±0.09a	0.64±0.10b

NT: 免耕 No tillage; CT: 翻耕 Conventional tillage; ST: 深松 Subsoiling. 同列不同字母表示同一指标不同处理间差异显著 ($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference among treatments in the same index at 0.05 level. 下同 The same below.

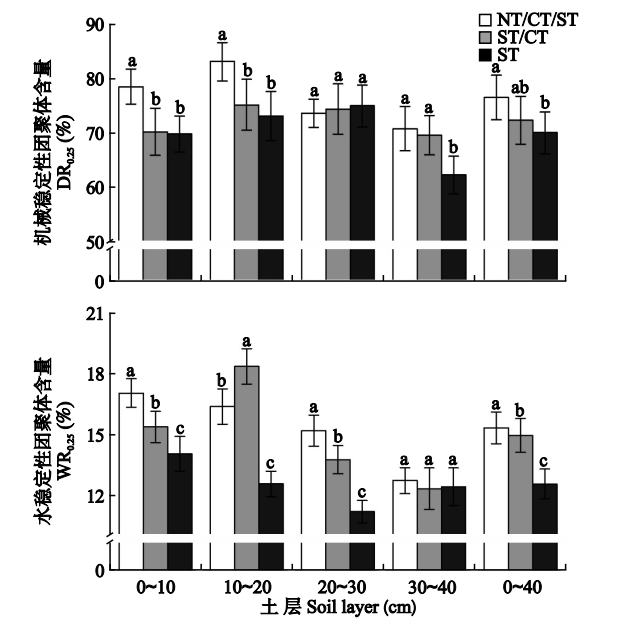


图 2 不同耕作模式下土壤 DR_{0.25} 和 WR_{0.25} 含量
Fig.2 Soil DR_{0.25} and WR_{0.25} contents under different tillage patterns.
NT: 免耕 No tillage; CT: 翻耕 Conventional tillage; ST: 深松 Subsoiling. 不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

湿筛法测定结果表明,NT/CT/ST 处理 0~40 cm 土层平均 MWD 和 GMD 值较 ST 分别显著提高 16.5%和 20.3%,但 ST/CT 处理仅显著提高了 MWD 值。0~10 cm 土层,NT/CT/ST 显著提升了 MWD 和 GMD 值;10~20 cm 土层,MWD 和 GMD 值在 ST/CT 处理下得到显著提升;20~30 cm 土层,NT/CT/ST 显著提升了 MWD 和 GMD 值,增幅均为 27.7%;30~40 cm

表 3 2016 年不同耕作模式下土壤养分含量
Table 3 Soil nutrient contents under different tillage patterns in 2016 (g · kg⁻¹)

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	全氮 Total nitrogen	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	有机质 Organic matter
0~20	NT/CT/ST	1.02±0.01a	11.08±1.41b	0.60±0.01b	14.07±1.31a
	ST/CT	0.95±0.02b	11.10±0.71b	0.62±0.04b	13.40±0.98b
	ST	0.91±0.00b	11.50±1.53a	0.69±0.02a	13.00±0.37c
20~40	NT/CT/ST	0.72±0.01a	12.66±0.98a	0.47±0.00a	11.88±0.31a
	ST/CT	0.75±0.01a	12.62±2.12a	0.47±0.00a	10.43±0.17b
	ST	0.64±0.02b	12.57±1.41a	0.45±0.01a	8.27±0.67c
0~40	NT/CT/ST	0.85±0.21a	11.67±1.12b	0.53±0.01b	12.75±1.54a
	ST/CT	0.79±0.14b	11.14±1.07b	0.51±0.11b	11.19±2.10b
	ST	0.79±0.19b	12.39±0.76a	0.58±0.17a	10.95±3.01c

土层,各处理无差异。

2.1.3 土壤容重和孔隙度 耕作模式对 0~40 cm 土层土壤容重和孔隙度均产生了显著影响(图 3)。在 0~20 cm 土层,与 ST 相比,NT/CT/ST 和 ST/CT 处理土壤容重分别显著降低 7.0%和 11.5%,孔隙度分别增加 8.4%和 13.9%。在 20~40 cm 土层,NT/CT/ST 与 ST 处理土壤容重和孔隙度并无显著差异,但 ST/CT 处理土壤容重比 ST 处理增加了 5.7%,土壤孔隙度降低了 6.9%。

2.2 不同深松轮耕模式对土壤化学性质的影响

不同耕作模式显著影响土壤养分含量(表 3),与 ST 相比,NT/CT/ST 和 ST/CT 处理 0~40 cm 土层平均土壤有机质含量均显著增加,并且以 NT/CT/ST 处理增幅最大,为 16.4%。在 0~20 cm 土层

中,与 ST 相比,NT/CT/ST 处理显著增加了土壤全氮和有机质含量,但降低了全磷和全钾含量;ST/CT 处理显著增加了土壤有机碳含量,降低了全磷和全钾含量,但全氮含量并无显著差异。在 20~40 cm 土层,不同耕作模式显著提高了土壤有机质和全氮含量,但对全磷和全钾含量并无显著影响。

2.3 不同深松轮耕模式对玉米产量的影响

2008—2016 年 NT/CT/ST 处理春玉米籽粒产量较 ST 优势明显,在各年份均观测到了较高的籽粒产量(图 4),多年玉米籽粒产量平均提高 10.2%(图 5)。ST/CT 处理在 2008、2009、2010 年并未表现出产量优势,但在 2011 年后产量优势明显,并且 9 年平均较 ST 提高 4.8%。

2.4 土壤理化性质与玉米产量的相关性

0~40 cm 土层 DR_{0.25} (r = 0.577)、WR_{0.25} (r = 0.621)、土壤全氮 (r = 0.617)、有机质含量 (r = 0.643)均与产量呈显著正相关,其中土壤有机质含量与产量的关系最密切,其次为 WR_{0.25}和全氮含量。

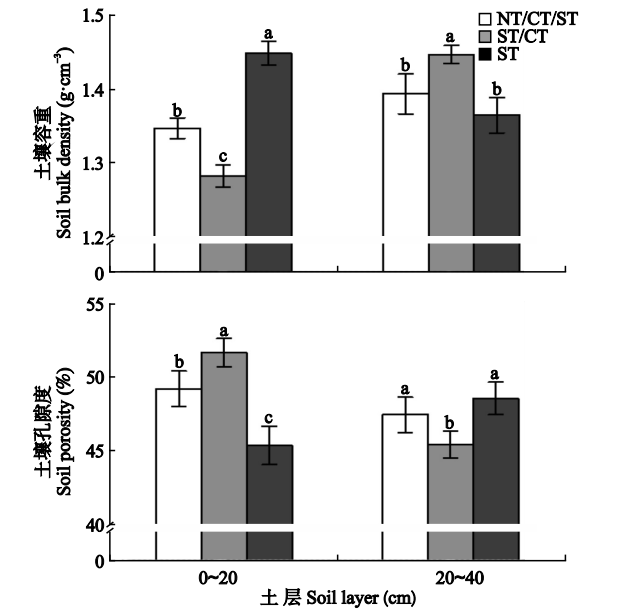


图 3 2016 年不同耕作模式下土壤容重和孔隙度
Fig.3 Soil bulk density and porosity under different tillage patterns in 2016.

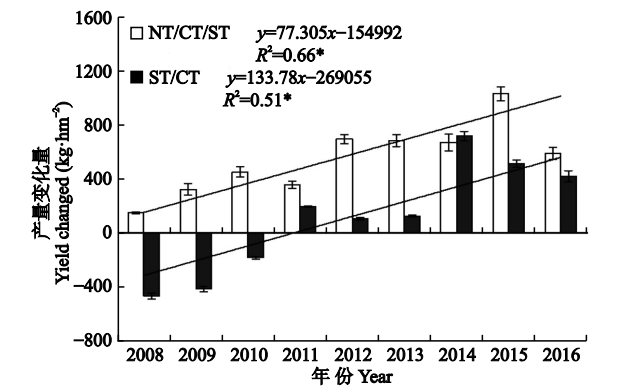


图 4 2008—2016 年不同耕作模式下春玉米产量变化
Fig.4 Yield change of spring maize under different tillage patterns in 2008–2016.
* P<0.05. 产量变化量为耕作处理与对照的差值 Yield change was the difference between tillage treatment and control.

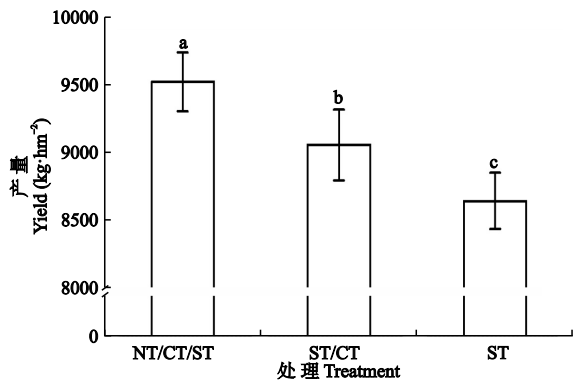


图 5 2008—2016 年不同耕作模式下多年平均玉米产量
Fig.5 Average annual maize yield under different tillage patterns in 2008–2016.

土壤全磷 ($r = 0.218$)、全钾含量 ($r = 0.174$)、容重 ($r = -0.349$) 和孔隙度 ($r = 0.386$) 与产量相关性不显著。

3 讨 论

土壤耕作通过调节土壤结构,影响土壤水肥气热状况和养分积累与转化,最终影响作物生长和产量形成,因此合理的耕作措施是农田高效生产的基础,也是改良土壤的重要方式。本研究以长期单一连续深松方式为对照,对比分析了深松与免耕和翻耕组成的轮耕方式对土壤理化性质和作物产量的影响。由于土壤物理性质受当季耕作措施的显著影响^[24],本研究选择在当季耕作方式(2015 年 9 月耕作)均为深松处理下玉米收获后(2016 年 9 月)的土壤样品,分析多年不同耕作模式对土壤理化性质的长期综合影响。结果显示,深松轮耕方式较连续深松具有较好的土壤改良效应与增产优势,说明深松轮耕方式实现了耕作措施间的优势互补。

3.1 不同耕作模式对土壤团聚体的影响

不同耕作模式对土壤扰动强度不同,导致土壤团聚体含量产生显著差异^[25]。本研究中,NT/CT/ST 较 ST 显著提高了 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 含量,这可能与免耕措施有关,免耕避免了土壤扰动,减少了耕作对土壤的破坏,有利于土壤团聚体聚合^[26–27]。但 NT/CT/ST 模式在免耕后进行了翻耕,尽管翻耕会破坏表层土壤结构,但仍显著提高了 0~10 和 10~20 cm 土层 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 含量,这可能与翻耕翻埋秸秆,有利于秸秆腐解,增加了土壤有机质含量有关,而相关研究也证实了有机质是团聚体的胶结剂^[28]。ST/CT 处理较 ST 提高了 30~40 cm 土层 $DR_{0.25}$ 含量和 0~30 cm 土层 $WR_{0.25}$ 含量,但增幅小于 NT/CT/ST 处

理,这可能是因为 ST/CT 处理对土壤的扰动,不利于有机质形成,降低了团聚体含量^[29]。 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 提升意味着较高的土壤结构稳定性,对减少土壤侵蚀具有重要意义。NT/CT/ST 处理显著提高 MWD 和 GMD 值,ST/CT 处理显著提高 MWD 值,表明深松轮耕方式更有利于提高土壤结构稳定性。

3.2 不同耕作模式对土壤容重和孔隙度的影响

深松耕能够利用深松铲疏松土壤,显著降低耕作底层土壤容重,但对表层土壤容重和孔隙度的影响并不明显^[30],而合理的土壤容重和孔隙度有利于作物根系生长。本研究中,ST 处理 0~20 cm 土层土壤容重较高,20~40 cm 土层土壤容重较低,与前人研究结果^[31]一致。NT/CT/ST 和 ST/CT 处理均显著降低了 0~20 cm 土层土壤容重,增加了土壤孔隙度,这可能与翻耕有关,翻耕极大地疏松了表层土壤^[32]。而 ST/CT 处理较 ST 增加了 20~40 cm 土层土壤容重,这可能是由于 ST 模式下深松铲降低了 20~40 cm 土层土壤容重,而 ST/CT 处理下深松频次相对减少,增加了翻耕次数,在降低 20~40 cm 土层土壤扰动的同时增加了犁底层形成的可能性。NT/CT/ST 与 ST 处理 20~40 cm 土层土壤容重无显著差异,这是因为 3 年轮耕中翻耕出现的频次较少,说明降低翻耕频次(相对于 ST/CT)而采用免耕措施能有效改善深层土壤紧实状况。

3.3 不同耕作模式对土壤养分的影响

合理的耕作模式能有效提高土壤肥力水平,达到培肥地力的目的,深松轮耕模式显著提升了 0~40 cm 土层土壤全氮和有机质含量,这与前人研究结果^[33]一致,即耕作处理主要影响了土壤全氮和有机质含量,一方面,土壤有机质和全氮受土壤结构的影响较大,如耕作处理改变土壤容重和孔隙度,这势必影响土壤碳排放与积累,进而影响土壤氮积累与转化。本研究发现,轮耕模式土壤全氮和有机质含量较连续深松模式显著提升,这说明深松轮耕模式更有利于土壤碳氮积累,有助于提升土壤肥力水平,而两种轮耕模式中,NT/CT/ST 能更显著地增加土壤全氮和有机质含量,说明 3 种耕作措施的轮换能更好地提升土壤碳氮含量,这主要是由于翻耕翻埋秸秆后免耕与深松降低对表层土壤的扰动,有利于土壤养分的保蓄^[34]。NT/CT/ST 和 ST/CT 处理降低了土壤全磷和全钾含量,主要与土壤养分的移出增加有关,两者均增加了玉米籽粒产量,因此随籽粒收获会增加全磷和全钾养分的移出量,而这种影响仅体现在 0~20 cm 土层,20~40 cm 土层各处理间并

无明显差异,说明玉米根系对表层土壤磷、钾的吸收更多。

3.4 不同耕作模式对玉米产量的影响

一般情况下玉米籽粒产量的提升意味着土壤肥力水平的提升,土壤肥力水平的提升也会正向促进玉米籽粒产量的增加^[35]。本研究中,NT/CT/ST 和 ST/CT 轮耕模式均显著提高了玉米籽粒产量,并且以 NT/CT/ST 增产幅度更大,说明长期采取 NT/CT/ST 轮耕模式有利于土壤肥力水平和产量的提升。这种提升作用主要与免耕、深松、翻耕 3 种耕作措施的优势互补有关,如免耕引起的表层容重增加的问题,翻耕可以有效解决,翻耕造成的养分易流失的问题,免耕和深松均可有效解决,而翻耕和免耕导致的底层土壤容重增大的问题可以由深松来解决^[36]。DR_{0.25}、WR_{0.25}、土壤全氮和有机碳含量均与产量呈显著正相关,表明轮耕模式下 DR_{0.25}、WR_{0.25}、土壤全氮和有机碳提升可能是轮耕模式较连续深松模式下产量提升的关键因素。

参考文献

- [1] Wang H, Wang SL, Zhang YJ, *et al.* Tillage system change affects soil organic carbon storage and benefits land restoration on loess soil in North China. *Land Degradation and Development*, 2018, **29**: 2880-2887
- [2] 胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势. 农业资源与环境学报, 2018, **35** (2): 95-103 [Hu J-M, Chen S-N, Wei X-H, *et al.* The influence and development trend of tillage on healthy surface structure. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(2): 95-103]
- [3] 孔维萍, 成自勇, 张芮, 等. 保护性耕作在黄土高原的应用和发展. 干旱区研究, 2015, **32**(2): 240-250 [Kong W-P, Cheng Z-Y, Zhang R, *et al.* Application and development of conservation tillage in loess plateau. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(2): 240-250]
- [4] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践. 中国生态农业学报, 2013, **21**(1): 61-69 [Zhang R-S, Huang G-B, Cai L-Q, *et al.* Practice of several conservation tillage measures in dry farming on Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(1): 61-69]
- [5] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 等. 条带深松对不同密度玉米根系空间分布的调节效应. 作物学报, 2014, **40** (12): 2136-2148 [Wang X-B, Hou H-P, Zhou B-Y, *et al.* Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, **40**(12): 2136-2148]
- [6] 柏炜霞, 李军, 王玉玲, 等. 渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响. 中国农业科学, 2014, **47**(5): 880-894 [Bai W-X, Li J, Wang Y-L, *et al.* Effect of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in Weiwei Highlands. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(5): 880-894]
- [7] 郭志军, 佟金, 周志立, 等. 深松技术研究现状与展望. 农业工程学报, 2001, **17**(6): 169-174 [Guo Z-J, Tong J, Zhou Z-L, *et al.* Subsoiling technology and outlook. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, **17**(6): 169-174]
- [8] 温美娟, 王成宝, 霍琳, 等. 深松和秸秆还田对甘肃引黄灌区土壤物理性状和玉米生产的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 224-232 [Wen M-J, Wang C-B, Huo L, *et al.* Effects of sub soiling and straw returning on physical properties and maize production in Yellow River irrigation area of Gansu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 224-232]
- [9] 杨雪, 逢焕成, 李轶冰, 等. 深旋松耕作法对华北缺水区域壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响. 中国农业科学, 2013, **46**(16): 3401-3412 [Yang X, Pang H-C, Li Y-B, *et al.* Effects of deep rotary sub-soiling tillage on the physical properties and crop growth of the stick loamy soil in North China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(16): 3401-3412]
- [10] 何明, 高焕文, 董培岩, 等. 一年两熟地区保护性耕作深松试验. 农业机械学报, 2018, **49**(7): 58-63 [He M, Gao H-W, Dong P-Y, *et al.* Sub-soiling experiment on double cropping and conservation tillage adopted area. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(7): 58-63]
- [11] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析. 农业工程学报, 2015, **31** (22): 7-15 [Zheng K, He J, Li H-W, *et al.* Meta-analysis on maize and yield under subsoiling in Northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(22): 7-15]
- [12] 张玉娇, 李军, 郭正, 等. 渭北旱塬小麦产量和土壤水分对保护性耕作的响应模拟. 应用生态学报, 2015, **26**(3): 800-808 [Zhang Y-J, Li J, Guo Z, *et al.* Simulated responses of winter wheat yield and soil moisture to different conservation tillage practices in Weiwei Highlands, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(3): 800-808]
- [13] Wang SL, Wang H, Zhang YJ, *et al.* The influence of rotational tillage on soil water storage, water use efficiency and maize yield in semi-arid areas under varied rainfall conditions. *Agricultural Water Management*, 2018, **203**: 376-384
- [14] 王玉玲, 李军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响. 农业工程学报, 2015, **31** (1): 107-116 [Wang Y-L, Li J, Bai W-X. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in loess platform region of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(1): 107-116]
- [15] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 等. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响. 农业机械学报, 2017, **48**(11): 229-237 [Wang X-D, Zhang X, Wang Y-L, *et al.* Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial soil on Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(11): 229-237]
- [16] Hamza MA, Anderson WK. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 2005, **82**: 121-145
- [17] 薛建福, 赵鑫, Shadrack BD, 等. 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展. 生态学报, 2013, **33** (19): 6006-6013 [Xue J-F, Zhao X, Shadrack BD, *et al.* Advances in effects of conservation tillage on organic carbon and nitrogen. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19): 6006-6013]
- [18] 李荣, 侯贤清, 贾志宽, 等. 北方旱作区土壤轮耕技术研究进展. 西北农业学报, 2015, **24**(3): 1-7 [Li R, Hou X-Q, Jia Z-K, *et al.* Research advance in soil rotational tillage on dry farming areas in Northern China.

- Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, **24** (3): 1-7]
- [19] 吕薇, 李军, 岳志芳, 等. 轮耕对渭北旱塬麦田土壤有机质和全氮含量的影响. 中国农业科学, 2015, **48** (16): 3186-3200 [Lyu W, Li J, Yue Z-F, *et al.* Effects of rotational tillage on soil organic matter and soil total nitrogen contents of continuous cropping wheat field in Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48** (16): 3186-3200]
- [20] 张玉娇, 李军, 郭正, 等. 渭北旱塬麦田保护性轮耕方式的产量和土壤水分效应长周期模拟研究. 中国农业科学, 2015, **48** (14): 2730-2746 [Zhang Y-J, Li J, Guo Z, *et al.* Long-term simulation of winter wheat yield and soil water response to conservation tillage rotation in Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48** (14): 2730-2746]
- [21] 程科, 李军, 毛红玲. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响. 中国农业科学, 2013, **46** (18): 3800-3808 [Cheng K, Li J, Mao H-L. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties in rainfed wheat fields of the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46** (18): 3800-3808]
- [22] 张鹏, 贾志宽, 王维. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响. 中国农业科学, 2012, **45** (8): 1513-1520 [Zhang P, Jia Z-K, Wang W. Effect of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in Southern Ningxia of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45** (8): 1513-1520]
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000 [Bao S-D. Soil and Agrochemistry Analysis. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000]
- [24] 贺建华, 王平, 陈娟, 等. 不同轮耕方式对旱作区土壤容重、水分及春玉米产量的影响. 土壤通报, 2018, **49** (2): 415-422 [He J-H, Wang P, Chen J, *et al.* Effect of different rotational tillage patterns on bulk density and moisture of soil and yield of spring maize (*Zea mays* L.). *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49** (2): 415-422]
- [25] Alvero FJ, Arrue JL, Cantero MC. Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil. *Soil and Tillage Research*, 2008, **101**: 62-68
- [26] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响. 应用生态学报, 2014, **25** (3): 759-768 [Wang L, Li J, Li J, *et al.* Effect of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and carbon content in corn field in Weibei Highland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25** (3): 759-768]
- [27] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响. 水土保持学报, 2018, **32** (5): 121-127 [Wang J, Xue Y, Pan J-J, *et al.* Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32** (5): 121-127]
- [28] Six J, Bossuyt H, Degryze S. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**: 7-31
- [29] 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. 生态学报, 2013, **33** (22): 7116-7124 [Tian S-Z, Wang Y, Li N, *et al.* Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (22): 7116-7124]
- [30] 张丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响. 水土保持通报, 2015, **35** (1): 102-106 [Zhang L, Zhang Z-D, Guo Z-Y, *et al.* Effect of subsoiling tillage and straw returning to field on soil physical properties. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35** (1): 102-106]
- [31] 李娟, 李军, 尚金霞, 等. 轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响. 中国生态农业学报, 2012, **20** (7): 867-873 [Li J, Li J, Shang J-X, *et al.* Effect of rotational tillage on soil physiochemical properties and spring maize yield in Weibei Highlands. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20** (7): 867-873]
- [32] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 等. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 2010, **26** (8): 150-155 [Kong F-L, Chen F, Zhang H-L, *et al.* Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26** (8): 150-155]
- [33] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 保护性耕作对农田碳效应影响研究进展. 中国农业科学, 2009, **42** (12): 4275-4281 [Zhang H-L, Sun G-F, Chen J-K, *et al.* Advances in research on effects of conservation tillage on soil carbon. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42** (12): 4275-4281]
- [34] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理. 农业工程学报, 2014, **30** (19): 155-165 [Zhao Y-L, Xue Z-W, Guo H-B, *et al.* Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30** (19): 155-165]
- [35] 张爱君, 张明普, 张洪源. 土壤基础肥力对夏玉米养分吸收和产量的影响. 玉米科学, 1999, **7** (2): 71-74 [Zhang A-J, Zhang M-P, Zhang H-Y. Effects of soil basic fertility on nutrient uptake and yield of summer maize. *Journal of Maize Sciences*, 1999, **7** (2): 71-74]
- [36] 王平, 陈娟, 谢成俊, 等. 轮耕条件下土壤改良及春玉米增产增收效果研究. 干旱地区农业研究, 2018, **36** (5): 59-67 [Wang P, Chen J, Xie C-J, *et al.* Effects of rotation tillage on soil improvement and increasing yield and benefit of spring maize. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, **36** (5): 59-67]

作者简介 张琦, 男, 1995年生, 硕士研究生。主要从事高效农作制度研究。E-mail: 17835424993@163.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



张琦, 王浩, 王淑兰, 等. 深松轮耕模式对黄土旱塬春玉米土壤理化性质和作物产量的影响. 应用生态学报, 2020, **31** (2): 459-466

Zhang Q, Wang H, Wang S-L, *et al.* Effects of tillage alternation pattern with subsoiling on soil physical and chemical properties and spring maize yield in the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31** (2): 459-466