文章编号:1000-7601(2020)01-0031-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.04

耕作方式对黑钙土主要肥力特征及玉米产量的影响

焦 帅[1],王玮瑜[2],赵兴敏[1],王鸿斌[1],王洪君[3],陈宝玉[3],隋 标[1]

(1.吉林农业大学资源与环境学院,吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室,吉林 长春 130118;
2.长春水务集团,吉林 长春 130041;3.吉林省农业科学院农业资源与环境研究所,吉林 长春 130033)

摘 要:为揭示不同耕作方式对黑钙土主要肥力特征及玉米产量的影响,田间试验设置了旋耕(RT)、深松(ST)、免耕(NT)、深翻(DP)和深翻秸秆还田(DPS)等 5 种耕作方式,分析了玉米不同生长时期 0~60 cm 土层土壤容重、水稳性团聚体等物理指标,氮、钾、有机质等化学指标及玉米产量。结果表明,与 RT 处理相比,NT 和 ST 处理土壤容重平均增加 4.7%和 3.8%,DP 和 DPS 处理分别降低 3.4%和 2.6%;NT 处理的田间持水量比 RT 降低 2.7%,ST 与 RT 相近,而 DP 和 DPS 处理分别比 RT 增加 8.6%和 7.0%,二者都显著高于 RT($P<0.05$);土壤大团粒结构(>0.25 mm)含量表现为苗期 DP 处理最高,抽雄期 DPS 最高、DP 次之,整体来看,平均含量以 DPS 最高;除抽雄期 NT 含量较高外,DPS 和 DP 是有机质含量整体较高的处理,说明翻耕的过程有利于土壤有机质含量的提升;从土壤全氮的比较来看,不同处理下差别不大,但碱解氮含量以 RT 最高,其他处理降低了 6.8%~12.9%;与 RT 处理相比,ST 和 DPS 处理玉米产量降低了 7.4%和 3.3%,NT、DP 分别增加 2.3%和 7.8%。综合来看,虽然 NT 处理有一定的提升土壤结构和有机质的潜力,但改变效果不大,DP 和 DPS 处理具有较好的土壤肥力特征,其中 DP 是兼具土壤肥力和增产效果的耕作方式。

关键词:耕作方式;黑钙土;肥力特征;玉米产量

中图分类号:S158.3;S513 **文献标志码**:A

Effects of tillage methods on major fertility characteristics of chernozem soil and maize yield

JIAO Shuai[1], WANG Weiyu[2], ZHAO Xingmin[1], WANG Hongbin[1], WANG Hongjun[3], CHEN Baoyu[3], SUI Biao[1]

(1. *College of Resources and Environment*, *Jilin Agricultural University*, *Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in Jilin Commodity Grain Base*, *Changchun*, *Jilin* 130118;
2. *Changchun Water Group*, *Changchun*, *Jilin* 130041;
3. *Jilin Institute of Agricultural Resources and Environment*, *Jilin Academy of Agricultural Sciences*, *Changchun*, *Jilin* 130033)

Abstract: Proper tillage mode is a necessary measure to maintain the sustainable development of agriculture. In order to reveal the effects of different tillage methods on the main fertility characteristics of Chernozem soil and maize yield, five tillage methods were set up in this study including rotary tillage (RT), subsoiling tillage (ST), no-tillage (NT), deep ploughing (DP), and deep ploughing straw returning (DPS). Physical properties such as soil bulk density, water content, water-stable aggregates, and chemical properties such as nitrogen, potassium, and organic matter in 0~60 cm soil layer at different growth stages of maize and maize yield were analyzed. The results showed that soil bulk density increased by 4.7% and 3.8% for NT and ST treatments, and decreased by 3.4% and 2.6% for DP and DPS treatments, respectively, compared with RT treatments. The field water holding capacity of NT treatment was 2.7% lower than that of RT while ST and RT were similar, while DP and DPS treatments were 8.6% and 7.0% higher than RT, respectively ($P<0.05$). The content of soil aggregate structure (>0.25 mm) was

收稿日期:2019-04-11 **修回日期**:2019-05-24
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300807)
作者简介:焦帅(1992-),男,吉林通化人,硕士研究生,主要研究方向为耕作制度与农业生态。E-mail:jiaoshuai126@163.com
通信作者:隋标(1985-),男,博士,讲师,主要研究方向为植物养分管理与土壤肥力改良。E-mail:suibiao621@126.com

the highest for the DP treatment at the seedling stage, followed by DPS and DP at the tassel stage. The content of soil aggregate for the DPS treatment was the highest. In addition to the higher NT content in the tasseling stage, DPS and DP were still the treatment with higher organic matter content as a whole, indicating that the process of ploughing was conducive to the improvement of soil organic matter content. According to the comparison of soil total nitrogen, there is little difference under different treatments, but the content of alkali-hydrolyzed nitrogen was the highest in RT, and decreased by 6.8%~12.9% for other treatments. Compared with RT treatment, ST and DPS yields decreased by 7.4% and 3.3%, NT and DP increased by 2.3% and 7.8%, respectively. In conclusion, although NT had the potential to improve soil structure and organic matter, the effect of NT was not significant. DP and DPS had good fertility characteristics under the experimental conditions, and DP is a farming method with both soil fertility and yield increasing effect.

Keyword: tillage pattern; black calcium soil; fertility characteristics; maize yield

土壤耕作作为农业生产过程中的一项重要技术环节,主要通过调节水、肥、气、热等条件[1]改善土壤环境,以实现粮食增产目的。适宜的土地耕作方式可以改善土壤结构,增强土壤对外界环境变化的抵抗能力[2]。在长期传统单一的耕作过程中,通常会出现土壤紧实度增加、耕层变浅、地表裸露、蓄水保墒能力降低[3]等问题,严重影响着土壤生产效率。因此,大面积推广合理的耕作方式对于改善土壤质量、保持地力,提升生产效率,缓解水土流失并促进水分利用[4]和减轻农业对温室效应的影响[5]等方面至关重要。目前,我国农田耕作方式主要有免耕(留茬、留茬覆盖)、少耕(浅耕、旋耕)、传统耕作(翻耕、深松耕)等[6]。以少免耕为代表的保护性耕作[7]被认为有利于改善土壤有机质、全氮等土壤理化性状[8]。然而,由于少免耕对土壤的扰动少,会引发病虫草害加重、减产[9]和土壤容重明显增大[10]等情况的发生,耕作方式效果的优劣也存在较大争议。

黑钙土是吉林省主要的三种地带性土壤类型之一[11],具有土壤质地较轻、保水保肥和抗逆性较弱、易发生干旱、潜在肥力低等特征[12]。在本研究区域内,翻耕、旋耕等多种耕作方式都有不同程度的应用,当前对耕作方式的研究大多集中在华北、西北等区域,在松嫩平原相对干旱的区域开展的研究较少,因此耕作方式对黑钙土土壤肥力及产量的影响效果尚不明确。本试验在吉林省西部旱作玉米田开展,通过设置几种比较典型的耕作方式对土壤理化性质和作物产量影响的对比,旨在寻找出适宜当地条件的耕作方式,为吉林省西部区域农田黑钙土结构改善和作物产量提高提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于吉林省西北部的白城市洮北区(45.69°N, 122.86°E),地处松嫩平原洮儿河冲击扇上,地势较为平坦,土层深厚,土壤肥力较好。气候类型属温带大陆性季风气候,四季分明。年平均气温 5.2℃,年平均降水量 400 mm 左右,年平均蒸发量超过 1 200 mm,因而相对比较干旱。年平均日照时数 2 885.8 h,0℃以上持续期 210 d;作物平均生长期 190 d,无霜期年平均 158 d,农业生产以旱作玉米为主。试验区土壤质地为砂壤土,有机质含量为 16.97 g·kg^{-1}、全氮为 1.52 g·kg^{-1}、碱解氮为 65.83 mg·kg^{-1}、速效钾为 75.99 mg·kg^{-1}、pH 值为 7.10 。

1.2 试验设计

在耕作农田中设旋耕(RT)、深松(ST)、免耕(NT)、深翻(DP)和深翻秸秆还田(DPS)5 个处理,每个处理 3 次重复,共 15 个小区,采用随机区组排列,每个小区 500 m^2。试验期为 2017 年 5 月 6 日播种至 10 月 2 日收获,供试玉米品种为翔玉 998,株距 20 cm,行距 60 cm,种植密度约为 7×10^4 株·hm^{-2},应用免耕播种机同时完成播种施肥操作,灌溉除草等管理过程按照常规高产田的方式进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品 在耕作前、玉米苗期、抽雄期和成熟期,采用蛇形布点法,分别采集 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤样品,带回实验室自然风干,用原状土测水稳性团聚体;用四分法分取样品研磨,过 20 目筛测定碱解氮、速效钾,过 60 目筛测定有机质、全氮。在同一位置取环刀测定容重、田间持水量。主要理化指标的测定采用土壤农化常规分析方法[13],具体为:土壤容重采用环刀法;田间持水量采用威尔科克斯法;水稳性团聚体采用湿筛法(约得法);有机质采用重铬酸钾容量法(外加热);活性有机质采用重铬酸钾容量法(稀释热法);全氮采用凯氏定氮法;碱解氮采用碱解扩散法;速效钾采用火焰光度法。

1.3.2　玉米产量的测定　玉米收获之前,在每个小区中间位置选择植株长势均匀的区域,在 10 m^2样方内取样并记录穗数和鲜重,分别取具有代表性的 10 穗玉米带回实验室进行考种分析,最终结果按籽粒干重计。

1.4　数据处理

用 Excel 2010 处理数据,并用 SPSS 23.0 分析处理间的差异显著性。

2　结果与分析

2.1　耕作方式对黑钙土容重、田间持水量和水稳性团聚体的影响

土壤容重是反映土壤紧实程度的重要指标,适宜的土壤容重有利于作物根系的生长和对水分养分的吸收。由表 1 可知,RT 处理 0~20 cm 土层容重明显小于 20~60 cm 容重,0~20 cm 和 40~60 cm 土层容重在玉米生长期内变化很小,20~40 cm 土层容重先升高后降低至苗期水平,比较来看,RT 处理可以使 0~20 cm 土层容重保持较低水平;ST 处理在耕作后显著减小了 20~40 cm 土层容重,到抽雄期之后增加至平均水平;NT 处理苗期土壤容重随着土层深度的增加而减小,但到成熟期时 0~40 cm 土层容重明显小于 40~60 cm 土层;DP 和 DPS 处理各土层的容重整体小于其他处理,其中 DP 处理 20~40 cm 土层容重最大,而 DPS 随深度增加逐渐增大。整体来看,RT 处理对 0~20 cm 土层土壤容重影响较大,ST 处理只在短期内对 20~40 cm 土层土壤有影响,NT 处理 0~20 cm 土层容重明显超过其他处理,DP 和 DPS 处理土壤容重较小,更适宜耕作。与 RT 处理相比,NT 和 ST 处理土壤容重平均增加 4.7%和 3.8%,DP 和 DPS 处理分别降低 3.4%和 2.6%,DP 较 NT 低 6.9%。

土壤蓄水保墒能力是影响作物生长和产量的一个关键因素,田间持水量是体现蓄水保墒能力的常用指标。由表 1 可知,RT 处理的田间持水量在苗期、抽雄期随着土层深度增加而呈递减趋势,到成熟期后不同层次之间差别不大。不同玉米生长时期,只有 0~20 cm 土层呈现先增大后减小的趋势,其他土层的田间持水量在抽雄期阶段均比苗期低,可以看出 RT 处理对 0~20 cm 土层田间持水量有较大影响;ST 处理苗期和抽雄期均呈现 20~40 cm>0~20 cm >40~60 cm 的趋势,到成熟期 0~20 cm 土层显著小于其他土层,可以看出 ST 处理可以使 20~40 cm 土层的持水量显著提升;NT 处理各时期不同深度土层的变化与 RT 一致,20~60 cm 土层的田间持水量均无显著差异,但与 0~20 cm 土层差异显著;同一土层一年的比较来看,随时间变化有逐渐增大的趋势,且各层趋势较一致。DP 处理在苗期阶段 0~60 cm 土层无显著差异,抽雄期 0~20 cm 土层持水量显著升高,而 20~60 cm 土层变化较小,到成熟期,0~20 cm 土层降低到 20~60 cm 土层的水平,各层无显著差异。DPS 处理在苗期阶段 0~20 cm 土层和 40~60 cm 土层与 DP 处理相近,但 20~40 cm 土层显著较低,因为受到新翻入土壤的秸秆影响,抽雄期后整体上比较均匀。不同耕作方式的比较来看,各处理平均水平的表现为 DP>DPS>ST>RT>NT,其中 NT 比 RT 降低 2.7%,ST 与 RT 差异不显著,而 DP 和 DPS 处理分别比 RT 增加 8.6%和 7.0%,均达到显著水平($P<0.05$)。

团聚体是土壤稳定性的一个重要指标。由表 2 可知,各处理不同层次的土壤主要为>0.25 mm 的团聚体,占比均超过 60%。除苗期 0~20 cm 土层>2 mm 团聚体占比最大外,其他土层均以 0.25~2 mm 团聚体为主,不同耕作处理下土壤各级别团聚体的质量分数发生了明显变化。抽雄期和苗期相比,RT 处理 0~20 cm 土层土壤中>2 mm 的团聚体含量减少了 30%,其它级别团聚体含量都有上升,而 20~40 cm 土壤变化较小;ST 处理 0~60 cm 各层土壤中>2 mm 团聚体含量变化不大,0.25~2 mm 的团聚体含量有一定程度的上升,其它级别有所下降。NT 处理变化趋势有所不同,0~20 cm 土层以>2 mm 团聚体为主,随时间变化呈下降趋势,其它级别呈上升趋势;20~60 cm 土层以 0.25~2 mm 团聚体为主,随着时间的变化<0.053 mm 的团聚体在 20~40 cm 土层上升显著(抽雄期比苗期高 1 倍),40~60 cm 土层明显下降,而 0.053~0.25 mm 的团聚体正好相反,呈 20~40 cm 土层下降而 40~60 cm 土层上升的趋势。DP 处理随着时间的变化>0.25 mm 的团聚体含量均有上升,微团聚体减少;DPS 处理>2 mm 团粒的含量随时间变化整体有提高,尤其是 20~60 cm 土层提高幅度较大,说明 DPS 处理有利于 20~60 cm 土层土壤团粒结构的优化。不同土壤深度相比较,随着深度的增加,>2 mm 的大团聚体含量明显降低,而 0.25~2 mm 团聚体呈上升趋势,说明土壤深度增加团聚体直径减小,土壤质量有一定的变差趋势。土壤大团粒结构(>0.25 mm)含量平均表现为苗期 RT 处理最高,抽雄期 DPS 最高、DP 次之,整体平均含量以 DPS 最高;RT 处理提升了苗期 0~40 cm 土层土壤大团粒结构的比例,ST 处理改善了抽雄期 0~20 cm 土层土壤大团粒结构,DP 和 DPS 处理对抽雄期以及 40~60 cm 土层土壤团粒结构改善效果明显,且团粒结构稳定。

表 1 不同耕作方式下土壤容重、田间持水量的变化

Table 1 Changes of soil bulk density, field water holding capacity under different tillage patterns

时期 Growth period	处理 Treatment	土壤容重/(g·cm^{-3}) Soil bulk density				田间持水量/% Field water holding capacity			
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean
苗期 Seedling stage	RT	1.56bB	1.71aA	1.67aA	1.65a	22.34aA	20.00aB	17.05bC	19.80ab
	ST	1.66aB	1.46cC	1.79aA	1.64ab	18.69cB	19.76aA	17.66bC	18.70b
	NT	1.71aA	1.73aA	1.71aA	1.72a	16.19dB	17.77bA	17.73bA	17.23c
	DP	1.54bB	1.68aA	1.62bA	1.61b	20.42bA	20.13aA	20.72aA	20.42a
	DPS	1.54bB	1.58bB	1.68aA	1.60b	20.06bA	17.00bB	20.58aA	19.21b
抽雄期 Tassel stage	RT	1.55cB	1.78aA	1.66abA	1.66a	26.33bA	16.00eB	15.09eC	19.14c
	ST	1.72bA	1.76aA	1.75aA	1.74a	20.34dB	26.50aA	16.65dC	21.16b
	NT	1.73aA	1.73aA	1.68aA	1.71a	19.79eA	17.38dB	17.99cB	18.39c
	DP	1.36dC	1.60bA	1.47cB	1.48b	27.40aA	19.23cC	21.74aB	22.79a
	DPS	1.43dB	1.48cB	1.64bA	1.52b	23.66cA	23.48bA	20.62bB	22.59a
成熟期 Maturation stage	RT	1.56bB	1.69aA	1.68aA	1.64b	19.92cA	19.02bA	19.47bA	19.47b
	ST	1.77aA	1.72aA	1.73aA	1.74a	17.45dB	19.03bA	18.97bA	18.48b
	NT	1.68aAB	1.64bB	1.74aA	1.69a	23.15aA	19.62aB	20.01aB	20.93a
	DP	1.63abA	1.68abA	1.67aA	1.66ab	19.51cA	20.25aA	19.75aA	19.84b
	DPS	1.56bB	1.74aA	1.73aA	1.68a	21.22bA	19.67aB	20.09aB	20.33ab

注:不同小写字母表示在同一土层深度不同处理间差异显著,不同大写字母表示同一处理不同土层深度差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicated that there was significant difference ($P<0.05$) between different treatments of the same soil layer depth, and different capital letters indicated that there was significant difference ($P<0.05$) between different soil layers depth of the same treatment. The following is the same.

表 2 不同耕作方式下黑钙土不同级别水稳定性团聚体的百分含量/%

Table 2 Percentage of water-stable aggregates with different grain sizes under different tillage in chernozem

深度/cm Depth	处理 Treatment	苗期 Seedling stage					抽雄期 Tassel stage				
		< 0.053 mm	0.053~0.25 mm	0.25~2 mm	>2 mm	$R_{0.25}$	< 0.053 mm	0.053~0.25 mm	0.25~2 mm	>2 mm	$R_{0.25}$
0~20	RT	2.56bD	5.46cC	25.10cB	59.06bA	84.16a	3.74aD	16.32aC	41.26bA	31.08dB	72.34d
	ST	3.02bD	14.72aC	30.68bB	46.52dA	77.20c	1.00dD	4.04dC	44.82aA	41.74cB	86.56a
	NT	2.96bD	8.20bC	19.32dB	62.46aA	81.71b	3.84aD	12.64bC	38.22cB	41.60cA	79.82c
	DP	4.14aD	14.78aC	32.08aB	42.12eA	74.20d	2.94bD	9.94cC	36.14cB	47.36bA	83.50b
	DPS	3.92aC	4.45dC	25.33cB	53.29cA	78.62c	2.12cD	9.78cC	27.80dB	55.24aA	83.04b
20~40	RT	1.26cD	14.72cC	55.82aA	22.48aB	78.30a	3.48bD	10.56bC	61.46bA	18.74cB	80.20b
	ST	5.08aD	25.26aB	44.04bA	18.04bC	62.08c	2.34cD	13.38aC	51.06cA	22.88bB	73.94c
	NT	4.14bD	21.42bB	57.74aA	10.42cC	68.16b	8.80aD	10.72bC	61.00bA	14.84dB	75.84c
	DP	5.04aD	23.66aB	56.50aA	6.38dC	62.88c	2.54cD	10.54bC	66.48aA	14.12dB	80.60b
	DPS	4.87aD	25.48aB	45.93bA	17.32bC	63.25c	0.92dD	12.62aC	50.10cA	32.18aB	82.28a
40~60	RT	1.82cD	12.72bB	70.28cA	8.84bC	79.12b	2.12bC	8.20cB	75.04aA	9.02dB	84.06a
	ST	2.68bD	15.68aC	59.68dA	17.56aB	77.24c	2.72aD	12.04bC	60.32dA	16.66cB	76.98b
	NT	6.72aD	11.48cB	70.92cA	7.48bC	78.40bc	1.92bD	14.76aB	66.52bA	11.04dC	77.56b
	DP	1.78cD	9.30dB	75.88aA	5.10cC	80.98a	2.70aD	8.56cC	58.40dA	25.42aB	83.82a
	DPS	2.47bD	12.37bB	71.86bA	8.31bC	80.17ab	1.98bD	8.16cC	62.42cA	21.22bB	83.64a

2.2 耕作方式对黑钙土有机质、氮素和速效钾的影响

有机质含量与土壤肥力水平密切相关[14]。从表 3 可以看出,同一处理同一土层深度表现为随时间升高趋势。同一时期不同层土层深度比较来看,随着土层深度的增加有机质含量均呈现显著下降的趋势,说明传统耕作处理下土壤养分有明显的表层富集现象,不利于作物生长和产量提高。由不同处理间的比较可以看出,苗期 DPS 和 DP 处理下的 0~20 cm 土层中有机质含量均较高,而在 20~60 cm 土层低于其他处理,且二者无显著差异;NT 处理各土层相差相对较小;抽雄期 NT 处理 0~20 cm 土层增加最快,同时 DPS 处理 20~40 cm 土层和 DP 处理 40~60 cm 土层也有较大增长;成熟期 RT 处理各土层趋于稳定,DP 处理的 0~20 cm 和 40~60 cm 土层最高。综合来看,除抽雄期 NT 含量较高外,DPS 和 DP 依然是有机质含量整体较高的处理,说明翻耕的过程有利于土壤有机质含量的提高。由表 3 可知,不同耕作方式间活性有机质的含量变化趋势和有机质基本一致。

表 4 列出了不同耕作方式下土壤全氮、碱解氮、速效钾的变化。由表可知,同一时期随着土层深度

的增加全氮含量整体在降低,0~20 cm 土层土壤随着生育期推进均有先升高后降低的趋势,而 40~60 cm 土层均呈现逐渐升高,应该是施用的氮肥对土壤中氮素产生的主要影响。从各处理间的比较可以看出,苗期 RT 处理对 20~40 cm 层土壤提升较大,但随着作物生长逐渐降低,DPS 和 DP 处理变化趋势与之相反,0~20 cm 层土壤中 DPS 和 DP 处理全氮含量整体较高,说明二者提升了土壤氮素水平;土壤全氮平均含量为 DPS>DP>ST>RT>NT,但是各处理的差异并不大。

土壤中碱解氮含量的变化与全氮存在差异(见表 4)。由各处理的比较看,RT 整体高于其他处理,尤其是苗期的 0~40 cm 土层中明显较高;ST 和 NT 平均含量相差不大,但 NT 不同土层碱解氮分布比 ST 均匀,说明 NT 有利于土壤氮素的均匀分布;DPS 和 DP 也能明显改善各层土壤氮素含量的均匀程度,在较短时间内使碱解氮水平提高,且 DPS 改善效果一定程度上优于 DP。从碱解氮的平均水平来看,与 RT 处理相比,ST、NT、DP、DPS 分别降低了 10.6%、8.7%、6.8%和 12.9%。

由表 4 可知,抽雄期 DPS 处理速效钾含量最高,显著高于其他处理,说明秸秆还田对土壤中速效养分的恢复有较好的效果;DP 处理虽然没有明显提升速效钾含量,但随着作物的生长使土壤各个层次中的含量分布较均匀,有利于作物对土壤养分的利用,20~60 cm 土层中含量在逐渐提升;RT 处理在苗期使 0~20 cm 土层土壤速效钾含量显著提高,说明 RT 处理在短期内对土壤耕作层养分的影响作用明显;ST 和 NT 处理速效钾含量较低。

表 3　不同耕作方式下黑钙土有机质含量的变化

Table 3　Change of soil organic matter content under different tillage patterns in chernozem

时期 Growth period	处理 Treatment	有机质/(g·kg^{-1}) Soil organic matter				活性有机质/(g·kg^{-1}) Soil active organic matter			
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean
苗期 Seedling stage	RT	23.25bA	21.94aA	12.11aB	19.10a	10.14bA	7.99abB	4.90aC	7.68a
	ST	21.19cA	17.22bB	12.98aC	17.13b	9.25bcA	8.52aB	5.37aC	7.71a
	NT	19.85dA	16.03bB	10.47bC	15.45d	8.67cA	8.35aB	5.45aC	7.49a
	DP	25.85aA	13.75cB	9.03bC	16.21c	13.70aA	6.48bB	3.02bC	7.73a
	DPS	26.33aA	13.69cB	10.21bC	16.74c	14.06aA	6.72bB	3.48bC	8.09a
抽雄期 Tassel stage	RT	25.39abA	22.59aB	13.68bC	20.55b	12.85bA	10.37aB	9.97aC	11.06a
	ST	24.94bA	23.26aB	13.76bC	20.65b	11.88cA	7.10bC	7.60bB	8.86c
	NT	26.68aA	20.51bB	14.59cC	20.60b	11.20cA	10.64aB	7.66bC	9.83b
	DP	26.41aA	18.24cB	15.26aC	19.97c	14.63aA	10.28aB	10.07aB	11.64a
	DPS	28.47aA	23.56aB	14.66aC	22.23a	15.03aA	11.20aB	9.19aC	11.81a
成熟期 Maturation stage	RT	24.34aA	21.85aB	13.66aC	19.95a	9.73abA	7.97bB	7.35abC	8.35b
	ST	22.90abA	21.33aB	13.98aC	19.40a	10.54aA	8.62aB	5.96bC	8.37b
	NT	22.39bA	18.91bB	13.06bC	18.12c	8.52bA	8.63aA	8.38aA	8.51b
	DP	24.42aA	18.00bB	14.58aC	19.00b	10.10aA	9.08aB	9.05aB	9.41a
	DPS	23.84aA	21.71aB	13.60aC	19.72a	10.57aA	7.33bB	6.69bC	8.20b

表 4　不同耕作方式下黑钙土全氮、碱解氮、速效钾含量的变化

Table 4　Change of soil total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen and available potassium content under different tillage patterns in chernozem

时期 Growth period	处理 Treatment	全氮 Total nitrogen /(g·kg)$^{-1}$				碱解氮 Hydrolyzable nitrogen/(mg·kg^{-1})				速效钾 Available potassium/(mg·kg^{-1})			
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	平均值 Mean
苗期 Seedling stage	RT	1.98cA	2.08aA	1.24aB	1.77a	111.52aA	92.32aB	36.83bC	80.22a	143.97aA	82.32aB	53.50cC	93.26a
	ST	2.04bA	1.43cB	1.05bC	1.51b	81.43dA	64.32cB	37.34bC	61.03c	79.76dA	64.81cB	65.17aB	69.91c
	NT	2.04bA	1.58bB	0.95cC	1.52b	96.47bA	65.87bB	46.16aC	69.50b	67.36eA	68.82bA	52.4dB	62.86d
	DP	2.11aA	1.11dB	0.67dC	1.30c	86.10cA	51.87dB	19.71cC	52.56d	114.79cA	55.69dC	63.35bB	77.94b
	DPS	2.13aA	1.24dB	0.72dC	1.36c	86.54cA	52.36dB	20.26cC	53.05d	125.73bA	56.03dC	62.46bB	81.41b
抽雄期 Tassel stage	RT	2.10dA	1.92aB	1.64dC	1.89bc	81.46dA	77.36aB	67.44cC	75.42b	110.52eA	63.55cB	66.33bB	80.13c
	ST	2.30cA	1.76cB	1.84cB	1.97b	93.01aA	56.42cB	51.17eC	66.87c	115.62cA	59.07eB	55.05dC	76.58e
	NT	2.43bA	1.60dB	1.56eB	1.86c	67.78eB	71.90bA	54.91dC	64.86d	113.61dA	60.77dB	62.47cB	78.95d
	DP	2.66aA	1.86bB	1.98bB	2.17a	88.34cA	78.38aB	69.44bC	78.72a	117.32bA	74.06bB	62.47cC	84.62b
	DPS	2.68aA	1.97aB	2.07aB	2.24a	89.75bA	78.64aB	70.89aC	79.76a	162.28aA	84.41aB	73.90aC	106.86a
成熟期 Maturation stage	RT	1.78dA	1.81dA	1.76cA	1.78c	60.98eB	71.74bA	51.24cC	61.32d	83.62cA	82.40cA	84.54cA	83.52c
	ST	2.16bA	1.89cB	1.87bB	1.97b	77.76aA	72.49aB	48.20eC	66.15b	78.74dA	72.94dB	61.04eC	70.91e
	NT	2.02cA	2.00bB	1.78cC	1.93b	71.50cA	63.42cB	56.17bC	63.70c	95.83bA	88.20bB	90.34aB	91.46b
	DP	2.08cA	2.15aA	2.10aA	2.11a	75.58bA	72.96aA	64.05aB	70.86a	107.73aA	97.97aB	87.90bC	97.86a
	DPS	2.24aA	2.00bB	1.48dC	1.91b	66.13dA	54.14dB	49.39dC	56.55e	96.14bA	72.03dB	70.19dB	79.45d

2.3 耕作方式对玉米产量及其构成因素的影响

如表5所示,不同耕作方式下玉米产量存在一定差异,但差异不显著,各处理的产量表现为DP>NT>RT>DPS>ST。与RT处理相比,ST和DPS处理的产量降低了7.4%和3.3%,NT、DP处理分别增加2.3%和7.8%,产量最低的ST与最高的DP相差16.5%,说明耕作方式对作物产量有一定的影响。

从产量构成因素看,产量与百粒重呈显著正相关($P<0.05$),而与穗数、穗粒数相关性不显著,与玉米轴重有一定负相关关系。

表5 不同耕作方式下作物产量及其构成因素

Table 5 Crop yields and their components under different tillage patterns

处理 Treatment	穗数 Panicle number	穗行数 Rows per panicle	行粒数 Grain number per row	穗粒数 Grain number per spike	百粒重/g 100-grain weight	轴重/g Corncob weight	籽粒干重/(kg·hm^{-2}) Dry weight of maize
RT	56.0±3.0a	16.8±0.6a	33.5±2.8b	562.8±65.4e	31.5±1.3b	33.8±5.1b	9743.7±1700.8a
ST	52.3±5.7b	17.4±0.3a	32.8±3.5b	570.7±50.5d	31.2±1.9b	36.7±2.8a	9021.2±151.2a
NT	52.3±4.5b	16.8±0.0a	36.9±2.7a	619.9±45.0b	32.1±1.9b	35.3±4.5a	9970.8±524.9a
DP	51.3±2.0b	16.8±0.1a	37.3±0.6a	626.6±15.2a	34.6±1.4a	33.3±1.3b	10507.1±915.6a
DPS	54.2±1.6ab	16.8±0.7a	36.5±1.6a	613.2±16.1c	31.7±1.8b	36.5±3.3a	9424.9±690.9a
r	−0.314	−0.710	0.709	0.628	0.881*	−0.846	1.000

注:*表示在5%水平下相关性显著,**表示在1%水平下相关性极显著;r为产量构成因素与产量的相关系数。

Note: * indicates significant correlation at 0.05 level, ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level. r is the correlation coefficient between yield components and yield.

3 讨论与结论

3.1 耕作方式对土壤理化性状的影响

RT处理,土壤容重、田间持水量、碱解氮等0~20 cm土层状况明显好于20~60 cm土层,而速效钾只在苗期0~20 cm层土壤含量较高,说明RT主要对作物生长前期的0~20 cm层土壤影响比较明显,而对20 cm以下较深层的土壤以及整个作物生长期影响较小,其原因是RT处理的作业强度和深度较小,对于打破犁底层、提升有机质含量、改善土壤结构等方面效果不明显。这一结论与吴建富等[15]的研究结果一致。

ST处理下,由土壤容重、田间持水量、团聚体等物理性状可以看出,其20~40 cm层土壤在一定时期内与0~20 cm和40~60 cm土层及其他处理之间有明显差别。具体表现为,20~40 cm土壤容重在苗期较RT、NT、DP、DPS处理分别降低14.5%、15.7%、12.9%和7.4%,但处理效果保持时间较短,逐渐接近其他处理;20~40 cm层土壤的田间持水量随着作物生长在逐渐提升,与0~20 cm和40~60 cm土层的变化不同;从团聚体的比较可以看出,20~40 cm深度土壤的大团聚体含量较其他处理少,<0.25 mm粒级的含量比0~20 cm和40~60 cm土层多。而在养分含量方面,ST与NT处理差异均不显著而且处于较低水平。说明ST处理可以改变20~40 cm层土壤结构和物理性状,在疏松土质、蓄水保墒方面有一些效果,但整体来看不利于耕作效果的发挥。本研究结果在容重、田间持水量两个指标上与何润兵等[16]、宫秀杰等[17]研究结论基本一致。因为ST耕作主要作用在15~35 cm土层且属于保护性耕作,其对不同深度土壤扰动和整体作用效果较小,在土壤自然沉降及降水等因素[18]的影响下耕作效果逐渐减小。在土壤养分变化方面,张玉玲等[19]研究得出ST可以有效提升土壤养分含量,与本研究结果不一致,可能是土壤质地、气候条件等方面状况不同导致的。但目前对ST的研究结果主要体现在改善土壤物理性质上[20-22],对养分有显著影响的研究结果很少。

NT是典型的保护性耕作,成为相关研究的热点,其结果也存在较大的争议。张婧等[23]研究表明,NT对土壤多种理化性质都有明显的促进作用;而杨艳等[24]研究显示NT对土壤理化性质的提高不明显,甚至有一定程度降低。本试验表明,表土层的含水量和>2 mm大团聚体两个方面具有较好的提升效果,其他指标并未看出显著优于其他处理。NT处理的容重、持水能力较其他处理效果差,与李凤博等[26]的研究结果相近;大团聚体和>0.053微团聚体含量较高,与李彤等[27]的研究相近;氮素和有机质的含量较低且与ST、RT差异不显著,这与冯跃华[28]关于NT处理存在表层聚集现象,含量随

着年限增加而逐渐增加的研究结果有差异,可能因为耕作时间较短,NT 处理的积累效果还没有显现,有待于更长时间的试验来验证。

从不同耕作方式的比较来看,DP 和 DPS 处理只有 0~20 cm 土层的大团聚体含量比 NT 等保护性耕作差,在测定的其他物理性质和土壤养分含量上都表现出优于其他三种处理的趋势,说明深翻耕作在提升土壤结构、蓄水保墒能力和养分含量水平等方面都有一定的改善效果。可能是因为在北方单季作物的种植过程中,休闲期长达 6 个月,加上冻融过程的促进作用,保证了土壤结构、养分的恢复。而翻耕能够充分混合不同深度的土壤,有利于均衡土壤中的各种物质,为作物生长提供较好的土壤基础,而且对于打破犁底层、疏松土壤进而增强透气保水能力效果较好。翻动的过程中还可以将表土层的作物残体带入更深层的土壤, 增加了深层土壤有机碳的固存[29],这与唐海明等[30]、战秀梅等[31]的研究结果相近。而除了田间持水量外,DPS 处理均优于 DP 处理,但二者差异不显著,说明秸秆还田对于提升土壤肥力、改善耕地质量、增加土壤有机质等方面存在潜力。但是有研究表明,进入土壤的有机物腐解过程较慢[32],因此短时期内秸秆还田对土壤质地、养分的改善效果不大。

3.2　耕作方式对作物产量及其构成因素的影响

关于耕作方式对作物产量的影响,当前已经有大量的研究,但是结果不尽相同。冯艳春等[33]对免耕、翻耕、旋耕和深松 4 种耕作方式进行比较,得出了深松比其他处理增产 8.3%~11.5%的结论,谷思玉等[34]的结论与之相似;余海英等[35]研究认为, 免耕(NT)有利于作物增产。而朱利群等[36]研究认为,翻耕有利于提高产量,与本研究的结果一致。本研究深翻秸秆还田(DPS)产量较低,可能是还田的秸秆腐解效率较低,还未有效地释放出促进作物生长的养分,而且混在土壤中对作物出苗、根系生长产生影响。对产生以上不同的结果,可能是受土壤质地、地形地貌、气候条件、作物类型等多方面因素的影响,不同区域内适宜的耕作方式不尽相同,应该因地制宜地推广相应的耕作技术。

综上所述,本试验条件下,深翻对土壤肥力和产量的改变状况具有一致性,是该区域比较适宜的耕作方式。而秸秆直接还田由于腐解周期较长,短期内不利于农业生产,应该采取相应的处理措施加快秸秆腐解,才能达到兼具提升土壤肥力和增加作物产量的效果。

参 考 文 献:

[1] 孙利军, 张仁陟, 黄高宝. 保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25 (06):207-211.

[2] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54 (03):51-56.

[3] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014,47 (17):3359-3371.

[4] 尹宝重, 甄文超, 郭丽果. 海河低平原不同耕作方式下麦田土壤生态环境特征[J]. 水土保持学报, 2015,29(01):186-194.

[5] Netz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel onClimate Change. Summary for Policymakers[J]. Computational Geometry, 2007, 18(2):95-123.

[6] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015,26(03):939-948.

[7] 濮超, 刘鹏, 阚正荣, 等. 耕作方式及秸秆还田对华北平原土壤全氮及其组分的影响[J]. 农业工程学报, 2018,34(09):160-166.

[8] 徐尚起, 张明园, 孙国峰, 等. 应用耕作指数评价耕作措施对双季稻田土壤质量的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19):3999-4006.

[9] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J]. 中国农业科学, 2007, 40 (09):1914-1924.

[10] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等.不同耕作方式对玉米叶片冠层光合特性的影响[J].玉米科学, 2012, 20(6):103-106, 111.

[11] Campbell C A, Bowren K E, Schnitzer M, et al. Effect of crop fotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick black chernozem[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1991, 71 (3) :377-387.

[12] 高雪莹,孙元宏,赵兴敏,等.添加玉米秸秆对黑钙土重组有机碳含量及有机无机复合的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(09):1829-1835.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2001:3-109.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社,2000:22-36.

[15] 吴建富, 曾研华, 赵新帆, 等. 耕作方式对双季机插水稻产量和土壤理化性质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017,43(06):581-585.

[16] 何润兵, 李传友, 王明武. 深松对土壤理化性质和冬小麦生长特性的影响[J].中国农机化学报, 2014,35(02):119-122.

[17] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 深松免耕技术对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2009,17(05):134-137.

[18] 孔晓民, 韩成卫, 曾苏明, 等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学,2014,22(01):108-113.

[19] 张玉玲, 张玉龙, 黄毅, 等. 辽西半干旱地区深松中耕对土壤养分及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009,27(04):167-170.

[20] 王春雷, 张玉霞, 包额尔敦嘎, 等. 不同时期深松对干旱灌区玉

米土壤物理性质及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2014(08):82-85.

[21] 王俊河, 宫秀杰, 于洋, 等. 春季深松对土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2011,(12):16-18.

[22] 杨净, 蔺国仓, 孙美乐, 等. 土壤深松对糯玉米生长表现及土壤理化性质的影响[J]. 西南农业学报, 2017,30(04):796-802.

[23] 张婧,张仁陟,左小安. 保护性耕作对黄土高原农田土壤理化性质的影响[J].中国沙漠, 2016,36(01):137-143.

[24] 杨艳, 刘丹, 张霞, 等. 渭北旱塬不同耕作措施对土壤养分分布及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018,36(01):171-178.

[25] 冯倩倩, 韩惠芳, 张亚运,等. 耕作方式对麦-玉轮作农田固碳、保水性能及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018,24(04):869-879.

[26] 李凤博, 牛永志, 高文玲, 等. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39 (03):549-552.

[27] 李彤, 王梓廷, 刘露, 等. 保护性耕作对西北旱区土壤微生物空间分布及土壤理化性质的影响[J]. 中国农业科学, 2017,50(05):859-870.

[28] 冯跃华. 稻田复种免耕条件下土壤特性和水稻生长生理效应研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2005.

[29] 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[J]. 水土保持学报, 2018,32(05):121-127.

[30] 唐海明,肖小平,李超,等.不同土壤耕作模式对双季稻区水稻植株养分积累与转运的影响[J].南京农业大学学报,2019,42(02):220-228.

[31] 战秀梅, 彭靖, 李秀龙,等. 耕作及秸秆还田方式对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J]. 华北农学报, 2014,29(03):204-209.

[32] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J]. 核农学报, 2018,32(11):2274-2280.

[33] 冯艳春, 罗洋, 李瑞平,等. 耕作方式对玉米出苗率、干物质积累及产量的影响[J]. 玉米科学, 2018,26(05):85-90.

[34] 谷思玉, 朱玉伟, 郭兴军,等. 不同耕作方式下黑土物理性状及其对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 2018,33(04):226-231.

[35] 余海英, 彭文英, 马秀,等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2011,22(01):99-104.

[36] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. 土壤通报, 2011,42(01):81-85.

(上接第 30 页)

[14] 王学春,李军,胡伟,等.黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下连作春玉米产量与土壤干燥化效应模拟[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):1-11.

[15] 国家气候中心,中国气象科学研究院,国家气象中心,等.GB/ T 20481-2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.

[16] 白翔斌,岳善超,李世清,等.不同栽培模式旱作春玉米农田土壤水分时空动态和产量效应[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):164-170.

[17] 孙仕军,闫瀛,张旭东,等.东北地区自然降雨条件下种植密度对玉米田间水分的影响[J].玉米科学, 2011,19(2):90-94.

[18] 王西娜,王朝辉,李生秀.种植玉米与休闲对土壤水分和矿质态氮的影响[J].中国农业科学,2006,39(06):1179-1185.

[19] 刘文兆,宋淑亚,王 俊,等.覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J].水土保持研究,2012,19(2):212-217.

[20] 张慧霞,周怀平,杨振兴,等.长期施肥对旱地土壤剖面硝态氮分布和累积的影响[J].山西农业科学, 2014,42(5):465-469.

[21] 李华,王朝辉,李生秀.旱地小麦地表覆盖对土壤水分硝态氮累积分布的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(7):1371-1377.

[22] 李树山,杨俊诚,姜慧敏,等.有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布[J].农业环境科学学报,2013,32(6):1185-1193.

[23] 王少平,俞立中,许世远,等.上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J].长江流域资源与环境,2002,11(6):554-558.

[24] 王秀康,邢英英,李占斌.覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J].中国农业科学,2016,49(20):3944-3957.

[25] 王爽,孙磊,陈雪丽,等.不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响[J].生态环境学报,2013,22(3):387-391.

[26] 聂胜委,黄绍敏,张水清,等.长期定位施肥对土壤效应的研究进展[J].土壤,2012,44(2):188-196.

[27] 杨合法,范聚芳,梁丽娜,等.长期不同施肥模式对日光温室土壤硝态氮时空分布及累积的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(2):246-252.