

轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响*

侯贤清^{1,2} 李荣^{1,2} 韩清芳^{1,2†} 贾志宽^{1,2} 王维^{1,2} 杨宝平^{1,2}
王俊鹏^{1,2} 聂俊峰^{1,2} 李永平³

(1 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 宁夏固原市农业科学研究所, 宁夏固原 756100)

摘要 为了探索免耕/深松隔年轮耕对土壤理化性状及冬小麦产量的影响, 2007年至2010年在宁南旱区采用免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松与连年翻耕3种耕作模式, 对土壤容重、团聚体、养分及小麦产量等进行了研究。结果表明: 与传统耕作相比, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式显著 ($p < 0.05$) 降低土壤容重, 改善了土壤的孔隙状况; 两种轮耕模式可显著 ($p < 0.05$) 增加0~40 cm各土层2~0.25 mm水稳性团聚体的含量。3种耕作方式比较, 深松/免耕/深松模式最能有效增加0~40 cm土壤有机质和0~20 cm土层全氮含量; 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理较传统耕作显著增加0~40 cm土层碱解氮和有效磷含量、20~40 cm土壤速效钾含量, 改善了土壤的养分状况。试验期间, 免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松模式3年平均小麦籽粒产量较传统耕作显著增加, 分别增产9.59%和10.69% ($p < 0.05$), 以深松/免耕/深松处理增产效果最佳。

关键词 轮耕模式; 土壤理化性状; 产量; 宁南旱区

中图分类号 S341.1; S512 **文献标识码** A

土壤的理化性状影响土壤水肥气热的协调性和土壤中养分与水分的运移, 决定土壤供给作物养分的能力和作物产量的形成。黄土高原干旱、半干旱雨养农业区常年以传统耕作方式对土壤进行频繁翻耕, 破坏土壤团聚体结构^[1-2], 使土壤有机质含量减少, 耕层养分富化, 肥料的利用率低, 氮素的损失加重, 将直接导致土壤肥力降低, 使耕地质量日趋下降^[3-5], 造成作物产量低而不稳。因此, 合理的耕作措施对维持土地质量, 促进作物生产和保护环境起着至关重要的作用^[6-8]。

许多研究以少、免耕为代表的各种保护性耕作措施在改良土壤结构, 增加土壤水稳性团聚体含量, 改善土壤孔隙状况, 提高土壤有机物质输入量, 减少土壤有机质矿化分解, 增加土壤的保水保肥能力, 防止土壤侵蚀等方面均具有明显效果, 从而增加作物的产量^[9-11]。余海英等^[12]的研究认为, 免耕可通过降低土壤容重, 促进土壤水稳性团聚体的形

成等作用来提高土壤的保水能力和水分利用效率, 进而促进作物增收; Pikul和Joseph等^[13-14]研究表明, 深松可以改善土壤结构, 减小土壤紧实度, 增加了作物产量。李友军^[15]的研究也发现, 深松覆盖和免耕覆盖耕作技术可以有效地控制土壤侵蚀, 减少土壤养分流失, 提高土壤肥力, 从而提高作物产量和养分利用效率。

近年来防治水土流失、加强生态建设任务越来越重, 另一方面引进美国的保护性耕作措施而盲目地推广休耕少耕免耕。在这一背景下, 适时的进行深松、免耕等土壤耕作措施的合理组配, 形成与种植制度相适应的旱作土壤耕作技术体系, 是解决长期连续单一耕作措施弊病的有效措施^[16-18]。在较为干旱的宁南地区, 土壤结构的稳定性通常较低, 极易产生水土流失或风蚀, 而且在作物播种前的耕作, 严重影响了耕层土壤结构的稳定性, 造成了土壤退化和农业持续性降低。为此, 本文通过免耕/

* 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAD29B03)和国家“十二五”科技支撑课题(2012BAD09B03)资助

† 通讯作者, E-mail: hanqf88@126.com

作者简介: 侯贤清(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事旱地农业研究。E-mail: houxianqing1981@126.com

收稿日期: 2011-07-29; 收到修改稿日期: 2011-10-24

深松/免耕、深松/免耕/深松和传统连年翻耕 3 种耕作方式,在黄土高原半干旱区进行 3 年定位试验,对该地区耕层土壤理化性状及作物产量进行了研究,旨在寻求能够改善土壤结构稳定性、培肥地力和提高作物产量的有效耕作模式,以减少水土流失,维持土壤的持续生产力。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2007 年至 2010 年试验在宁夏彭阳县旱作农业试验站进行。试验区位于黄土高原丘陵沟壑区,东经 $106^{\circ}45'$ 、北纬 $35^{\circ}79'$,海拔 1800 m,年蒸发量达 1050 mm,多年平均降雨量 435 mm,60% 的降雨发生在 7 月至 9 月期间。年平均气温 8.1°C ,无霜期 155 d,属典型的温带半干旱大陆性季风气候。试验田为旱平地,土壤类型为黄绵土,土壤肥力较低,耕层 0~40 cm 有机质含量为 7.2 g kg^{-1} ,碱解氮 50.3 mg kg^{-1} ,有效磷 8.6 mg kg^{-1} ,速效钾 84.8 mg kg^{-1} ,pH 为 8.5,属低等肥力水平。

1.2 试验设计

试验设置 3 种耕作模式,随机区组设计,3 次重复。每个小区宽 6 m、长 15 m。1) 免耕/深松/免耕 (NT/ST/NT):第 1 年小麦收获后进行免耕处理,第 2 年冬小麦收获后进行深松处理,第 3 年小麦收获后进行免耕处理。2) 深松/免耕/深松 (ST/NT/ST):第 1 年小麦收获后进行深松处理,第 2 年小麦收获后进行免耕处理,第 3 年,冬小麦收获后进行深松处理。3) 传统耕作 (CT):冬小麦收获后,进行传统翻耕处理。

1.3 土壤耕作与作物管理

试验地前茬作物为冬小麦,处理前一直采用传统翻耕,试验期间未进行灌溉。具体耕作处理如下:1) 免耕处理 小麦收获留茬 5~8 cm 休闲,9 月下旬直接免耕播种。2) 深松处理 采用中国农业大学生产的冀铲式深松机,进行间隔深松整地,耕作深度 30~35 cm,宽度间隔 40 cm。3) 传统耕作 采用专用铧犁拖拉机耕翻土壤,耕作深度 15~20 cm,耕后耙耢各一次。冬小麦品种为西峰 26 号,种植深度 5~8 cm,播种密度 350 万株 hm^{-2} 。采用可控制深度(压轮)和行距(20 cm)的 250 型免耕播种机分别于 2007 年 9 月 18 日、2008 年 9 月 15 日和 2009 年 9 月 20 日播种,播种时基施尿素 ($\text{N} \geq 46\%$) 675 kg hm^{-2} 、过磷酸钙 ($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 12\%$) 750 kg hm^{-2} ,冬小麦

拔节期分别追施尿素 150 kg hm^{-2} ,试验期间进行人工除草。冬小麦分别于 2008 年 6 月 27 日、2009 年 6 月 24 日和 2010 年 7 月 10 日收获。

1.4 取样和处理

1.4.1 土壤容重及孔隙度 在 2007 年 6 月 24 日试验处理前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后,每处理小区均按 0~20 cm 和 20~40 cm 用环刀取样,测定各土层土壤容重并计算孔隙度^[19];土壤孔隙度 (%) = $(1 - \text{容重}/\text{比重}) \times 100\%$,土壤比重近似值取 2.65 g cm^{-3} 。

1.4.2 土壤团聚体粒级 取样方法:在 2007 年 6 月 24 日试验处理前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后,每处理小区均在 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 4 个土层采集原状土样,自然风干后除去粗根及小石块,并将大土块按自然裂痕剥离为 1 cm^3 左右。将风干土样过孔径为 5 mm、2 mm 的筛子,分为 $>5\text{ mm}$ 、 $5\sim 2\text{ mm}$ 、 $<2\text{ mm}$ 三个级别。然后按三个级别土样在原状土中所占比例取混合土样 200 g。

测定方法:土壤团聚体粒级分布利用湿筛法^[20]测定。取土样 200 g,将其放置在孔径依次为 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm 的套筛最上层,调整桶内水面的高度,使筛子移动到最高位置时最上一层筛子中的团聚体刚好淹没在水面以下,待测土样在水面下浸泡 10 min 时开动仪器,以 30 次 min^{-1} 的速度筛分 5 min 后,将每一层筛上的团聚体分别洗入铝盒并烘干称重,计算各粒级水稳性团聚体百分含量及 $> 0.25\text{ mm}$ 团聚体含量。

1.4.3 土壤养分含量 测定试验处理前(2007 年 6 月 24 日)及小麦收获后(2010 年 7 月 10 日) 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤养分含量。土壤有机质和全氮的测定分别采用碳分析仪和半微量凯氏定氮法;土壤碱解氮、有效磷和速效钾的测定依次采用碱解扩散法、碳酸氢钠浸提法和醋酸氨浸提法^[21]。

1.4.4 土壤水分及小麦产量 小麦播种前每处理小区每 20 cm 土层分层取样测定 0~200 cm 土层的土壤含水量。土壤蓄水量: $W = h \times a \times b \times 10/100$ 式中:W 为土壤蓄水量(mm);h 为土层深度(cm);a 为土壤容重(g cm^{-3});b 为土壤含水量(%)。小麦成熟期,每处理小区均取面积为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,人工脱粒,籽粒风干,水分含量均控制在 12% 以下,测定小麦籽粒产量。

1.5 数据分析

试验数据采用 SAS 8.01 进行单因素方差

(ANOVA)分析,采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验($p < 0.05$),EXCEL 2003 作图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式对土壤物理性状的影响

2.1.1 土壤容重及孔隙度的变化 不同耕作处理对土壤容重的影响不同(图 1(a))。在试验开始前,所有耕作模式下容重均为 1.43 g cm^{-3} , 经过 3 年不同耕作处理后,2010 年两种轮耕模式比传统耕作减少了土壤容重,免耕/深松/免耕(NT/ST/NT)、深松/免耕/深松(ST/NT/ST)处理降幅达 5.57%~8.97% ($p < 0.05$),而传统耕作(CT)处理无显著变化。与 CT 处理相比,0~20 cm 土层,NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理的土壤容重分别降低 4.35% 和 7.25%;20~40 cm 土层,分别降低 2.14% 和

5.71%,显著差异($p < 0.05$),而两种轮耕处理间差异不显著。可见,3 年一个轮耕周期后,可以减少因机械频繁操作而造成的土壤压实(免耕方式),同时能有效打破犁底层(深松方式),因此,相对于传统耕作,轮耕模式能有效降低耕层土壤容重。

在作物生长条件下,不同耕作处理一定程度上影响了土壤总孔隙度(图 1(b))。处理 3 年后,免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理的 0~40 cm 土层土壤孔隙度均比处理前显著($p < 0.05$)增加,而传统耕作处理增幅不显著。NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理土壤孔隙度 0~40 cm 显著($p < 0.05$)高于 CT 处理,0~20 cm 分别高于 CT 处理 4.09% 和 6.82%,20~40 cm 分别提高 2.07% 和 4.29%。究其原因:免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式能有效打破犁底层,使土壤的通气能力加强,耕层土壤孔隙状况得到明显改善。

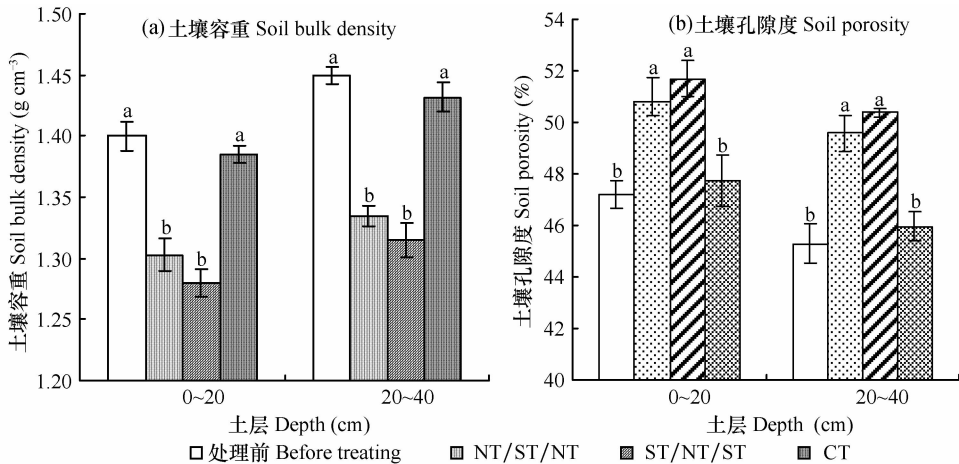


图 1 不同耕作模式下 0~40 cm 土壤容重和孔隙度的变化

Fig. 1 The change of soil bulk density and soil porosity at 0~40 cm depth under different tillage systems

2.1.2 土壤水稳性团聚体粒级分布特征 $> 0.25 \text{ mm}$ 的团聚体即土壤团粒结构体,是土壤中最好的结构体^[22],采用 $> 0.25 \text{ mm}$ 团聚体的比例能够反映不同耕作措施下土壤结构的稳定性状况。经过 3 年不同耕作处理后,与 2007 年处理前相比,3 种不同耕作处理 0~40 cm 各土层 $> 0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量均显著增加,而 $< 0.25 \text{ mm}$ 水稳性微团聚体含量显著 ($p < 0.05$) 降低,0~10 cm 和 10~20 cm 土层所有处理各组分的团聚体含量明显高于 20~30 cm 和 30~40 cm 土层(表 1)。2~0.25 mm 水稳性大团聚体对耕作处理响应最为敏感,可以作为指示耕作方式对团聚体特征短期影响的一个指标^[23]。与 CT 处理相比,NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理 0~10 cm 土层 2~0.25

mm 水稳性团聚体含量分别提高 24.70% 和 26.72%; 10~20 cm 土层分别提高 75.46% 和 74.93% ($p < 0.05$); 20~30 cm 土层分别增加 53.47% 和 62.62% ($p < 0.05$); 30~40 cm 土层分别增加 45.44% 和 35.06% ($p < 0.05$)。

与传统耕作相比,免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理对水稳性团聚体最大粒级含量(2~5 mm)无明显改善,而 2~0.25 mm 水稳性团聚体含量显著 ($p < 0.05$) 提高;相反,传统耕作处理有较高的水稳性团聚体最小粒级含量($< 0.25 \text{ mm}$),但各耕作处理之间差别不明显。可见,进行 3 年免耕/深松隔年轮耕处理的土壤团聚体数量比处理前均有明显增加,且显著 ($p < 0.05$) 高于传统耕作土壤团聚体数量。

表 1 不同耕作模式下 0~40 cm 水稳性团聚体粒级分布

Table 1 Distribution of water-stable aggregate size classes under three treatments in the 0~40 cm soil profile

土层 Depth	处理 Treatments	团聚体粒级 Aggregate size classes (%)			
		大团聚体 Macro-aggregates (>0.25 mm)			微团聚体 Micro-aggregates
		2~5 mm	2~0.25 mm	>0.25 mm	<0.25 mm
0~10 cm	处理前 Before treating	/	2.19 ± 0.08c	2.19 ± 0.07c	97.81 ± 1.13a
	NT/ST/NT	3.60 ± 0.24a	12.32 ± 0.08a	15.91 ± 0.37a	84.09 ± 1.77c
	ST/NT/ST	2.38 ± 0.20a	12.52 ± 0.07a	14.9 ± 0.12a	85.10 ± 1.80c
	CT	1.90 ± 0.14a	9.88 ± 0.14b	11.78 ± 0.32b	88.22 ± 1.78 b
10~20 cm	处理前 Before treating	/	1.19 ± 0.58d	1.19 ± 0.34c	98.81 ± 1.92a
	NT/ST/NT	3.51 ± 0.38a	13.37 ± 0.48a	16.87 ± 0.40a	83.13 ± 1.66c
	ST/NT/ST	4.15 ± 0.26a	13.33 ± 0.96b	17.48 ± 0.61a	82.52 ± 0.86c
	CT	3.05 ± 0.29a	7.62 ± 0.64c	10.67 ± 1.09b	89.33 ± 1.24b
20~30 cm	处理前 Before treating	/	1.93 ± 0.05c	1.93 ± 0.04c	98.07 ± 1.29a
	NT/ST/NT	1.10 ± 0.29a	6.20 ± 0.70a	7.30 ± 0.05a	92.7 ± 2.12c
	ST/NT/ST	0.82 ± 0.72a	6.57 ± 0.57a	7.39 ± 0.03a	92.61 ± 1.77c
	CT	0.53 ± 0.35a	4.04 ± 0.14b	4.57 ± 0.08b	95.43 ± 1.11b
30~40 cm	处理前 Before treating	/	1.58 ± 0.16c	1.58 ± 0.16c	98.42 ± 0.79a
	NT/ST/NT	0.70 ± 0.02a	7.01 ± 0.13a	7.71 ± 0.26a	92.29 ± 0.84c
	ST/NT/ST	0.66 ± 0.02a	6.51 ± 0.47a	7.17 ± 0.51a	92.83 ± 0.46c
	CT	0.47 ± 0.03a	4.82 ± 0.30b	5.29 ± 0.22b	94.71 ± 0.53b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$); NT/ST/NT——免耕-深松-免耕; ST/NT/ST——深松-免耕-深松; CT——传统耕作 Note: Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level ($p < 0.05$); NT/ST/NT——No tillage-Subsoiling tillage-No tillage; ST/NT/ST——Subsoiling tillage-No tillage-Subsoiling tillage; CT——Conventional tillage

2.2 不同耕作模式对土壤养分的影响

2.2.1 耕层土壤有机质和全氮含量的变化

免耕/深松隔年轮耕不仅影响土壤的物理性状,同时也对土壤有机质含量产生一定的影响。由表 2 可知,随耕作年限的增加,土壤有机质含量则相对较高,0~20 cm 土层高于 20~40 cm。2 个土层有机质含量平均值,轮耕处理分别显著($p < 0.05$)高于传统耕作处理 4.83% 和 10.36%,深松/免耕/深松处理的有机质含量在所有处理中最高,而两种轮耕处理间无显著差异。

耕作方式对不同土层全氮含量的影响不同。

与耕作处理前相比,2010 年小麦收获期各处理 0~40 cm 土层土壤全氮含量均明显下降,全氮大小次序为 ST/NT/ST > NT/ST/NT > CT,在 0~20 cm,ST/NT/ST 处理的全氮含量显著($p < 0.05$)较 CT 处理高 7.58%,而 NT/ST/NT 处理与 CT 处理无明显差异,20~40 cm 土层,不同耕作处理对全氮的影响不显著。所有耕作处理全氮含量 0~20 cm 土层均高于 20~40 cm 土层。可见,不同轮耕模式在一定程度上减少对耕层土壤的扰动,维持较高的土壤有机质含量,降低了土壤的氮素损失,保证冬小麦生长发育的养分供应。

表 2 不同耕作模式对 0~40 cm 土壤有机质和全氮含量的影响

Table 2 Effects of different tillage on soil organic matter, Total N contents of 0~40cm soil

年份 Year	处理 Treatments	有机质 Soil organic matter (g kg ⁻¹)		全氮 Total N (g kg ⁻¹)	
		0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
2007	处理前 Before treating	7.46 ± 0.09c	6.90 ± 0.24c	0.56 ± 0.02c	0.48 ± 0.03b
	NT/ST/NT	9.74 ± 0.10b	8.59 ± 0.07ab	0.68 ± 0.01ab	0.59 ± 0.01a
2010	ST/NT/ST	10.17 ± 0.12a	9.12 ± 0.15a	0.71 ± 0.01a	0.60 ± 0.02a
	CT	9.41 ± 0.09b	8.07 ± 0.06b	0.66 ± 0.01b	0.55 ± 0.01a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$); NT/ST/NT——免耕-深松-免耕; ST/NT/ST——深松-免耕-深松; CT——传统耕作 Note: Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level ($p < 0.05$); NT/ST/NT——No tillage-Subsoiling tillage-No tillage; ST/NT/ST——Subsoiling tillage-No tillage-Subsoiling tillage; CT——Conventional tillage

2.2.2 土壤速效养分含量的变化 速效氮含量的高低能大致反映出近期内土壤氮素的供应情况。3年不同耕作措施下0~40 cm土壤碱解氮含量的变化与全氮含量变化表现一致(表3):随年限的增加而增加,随土层的加深而降低。2010年冬小麦收获后各处理0~40 cm碱解氮含量较处理前显著($p < 0.05$)降低, NT/ST/NT和ST/NT/ST处理0~20 cm碱解氮含量分别较CT处理提高4.23%、11.13% ($p < 0.05$), 20~40 cm分别提高3.31%、6.55% ($p < 0.05$),表明土壤碱解氮含量受耕作方式影响较大,轮耕措施使耕层碱解氮含量显著增加,提高了土壤氮素的有效性。

不同耕作处理0~40 cm各土层有效磷含量比处理前显著下降,其中传统耕作处理降幅最为显

著,且随土层加深而减少(表3)。0~20 cm土层NT/ST/NT、ST/NT/ST处理显著较CT处理高3.77%、5.74% ($p < 0.05$); 20~40 cm土层分别显著较CT处理高3.59%、6.36% ($p < 0.05$),而轮耕处理间差异不显著。可见,不同耕作模式对提高土壤有效磷含量的作用主要体现在耕层,但轮耕效果明显优于传统翻耕。

耕作措施能够改变土壤速效钾的供应水平(表3)。经过3年不同耕作措施后,各处理土壤速效钾含量变化均较处理前显著($p < 0.05$)增加,且随土层的加深而降低。0~20 cm土壤速效钾含量各处理间差异不显著,但20~40 cm土层NT/ST/NT、ST/NT/ST处理分别显著($p < 0.05$)较CT处理提高10.83%和11.02%。

表 3 不同耕作模式对 0~40 cm 土壤速效养分含量的影响

Table 3 Effects of different tillage on soil available nutrient contents of 0~40 cm soil

年份 Year	处理 Treatments	碱解氮 Hydro-N (mg kg ⁻¹)		有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)		速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	
		0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
2007	处理前 Before treating	55.70 ± 2.02c	44.41 ± 0.74d	11.26 ± 0.11a	8.39 ± 0.08a	102.9 ± 4.83b	70.52 ± 3.28c
	NT/ST/NT	63.32 ± 1.05a	54.59 ± 1.34b	8.66 ± 0.4b	5.30 ± 0.15b	153.0 ± 3.54a	116.8 ± 4.61a
2010	ST/NT/ST	67.51 ± 1.72a	56.30 ± 0.93a	9.90 ± 0.03b	6.38 ± 0.02b	156.9 ± 5.77a	117.0 ± 2.63a
	CT	60.75 ± 0.84b	52.84 ± 0.44c	6.29 ± 0.05c	3.90 ± 0.15c	148.1 ± 3.90a	105.4 ± 3.10b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$); NT/ST/NT——免耕-深松-免耕; ST/NT/ST——深松-免耕-深松; CT——传统耕作。 Note: Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level ($p < 0.05$); NT/ST/NT——No tillage-Subsoiling tillage-No tillage; ST/NT/ST——Subsoiling tillage-No tillage-Subsoiling tillage; CT——Conventional tillage

2.3 不同耕作措施对小麦产量的影响

小麦播种前,免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理 0~200 cm 土层土壤蓄水量均显著高于传统耕作处理(表 4),为冬小麦出苗、生长和产量形成提供了较好的水分条件。不同耕作措施 3 年平均冬小麦有效穗数和穗粒数均表现为 ST/NT/ST > NT/ST/NT > CT,轮耕处理与传统耕作差异显著($p < 0.05$);千粒重表现为 NT/ST/NT > ST/NT/ST > CT,但各处

理间差异不显著。与 CT 处理相比,NT/ST/NT 处理平均有效穗数增加 7.39% ($p < 0.05$),平均穗粒数增加 2.88%;ST/NT/ST 处理平均有效穗数较 CT 处理增加 7.96% ($p < 0.05$),平均穗粒数增加 3.21%。3 年平均籽粒产量 NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理分别较 CT 处理增产 9.59% 和 10.69% ($p < 0.05$),以 ST/NT/ST 处理增产效果最佳(表 4)。

表 4 不同耕作处理对冬小麦产量及其构成的影响

Table 4 Effects of different tillage treatments on grain yield and its components of winter wheat

处理 Treatments	播种前蓄水量 Water storage before sowing(mm)	有效穗数 Panicle number (个 $\times 10^4$ hm^{-2})	穗粒数 Grain per spike (粒)	千粒重 1000 - kernel weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg hm^{-2})
NT/ST/NT	333.4 \pm 2.17a	358.9 \pm 6.83a	31.44 \pm 0.38a	28.85 \pm 0.75a	2561.7 \pm 81.16a
ST/NT/ST	337.4 \pm 1.09a	360.8 \pm 5.73a	31.54 \pm 0.63a	28.33 \pm 0.58a	2587.4 \pm 68.03a
CT	302.5 \pm 2.22b	334.2 \pm 7.47b	30.56 \pm 0.55b	28.76 \pm 0.88a	2337.6 \pm 77.62b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$);NT/ST/NT——免耕-深松-免耕;ST/NT/ST——深松-免耕-深松;CT——传统耕作 Note: Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level ($p < 0.05$); NT/ST/NT——No tillage-Subsoiling tillage-No tillage; ST/NT/ST——Subsoiling tillage-No tillage-Subsoiling tillage; CT——Conventional tillage

3 讨论

1) 秦红灵等^[16]研究表明,免耕 2 年后深松可以降低土壤容重,朱利群等^[24]认为连续两年深耕+秸秆还田处理和一年免耕一年深耕+秸秆还田处理对土壤容重的降低最有效。本研究结果表明,免耕/深松隔年轮耕能使土壤容重维持较低的水平,这主要由于免耕结合深松轮耕既可以疏松土壤,又减少了因机械频繁操作而造成的土壤压实,有效改善土壤结构。有关研究表明,作物生长条件下长期免耕处理一定程度上影响了土壤总孔隙度,耕作通常增加总孔隙度,改善土壤孔隙的几何空间^[25]。本研究发现,经过 3 年定位试验,轮耕处理的 0~40 cm 土层土壤孔隙度较传统耕作显著增加,使耕层土壤孔隙状况得到改善。这是由于经过免耕/深松轮耕后增强了土壤的通气能力,根系及微生物的活动能力增强,使耕层土壤孔隙度增加。

相关研究表明^[10, 26],免耕与深松均能使土壤水稳性团聚体增加。本研究也表明,轮耕模式下的 > 0.25 mm 土壤团聚体数量明显高于传统耕作。这是由于轮耕措施减少了耕作次数,从而减少对土壤结构体的机械破坏,传统耕作频繁耕翻扰动土壤,使团聚体被挤压破碎,稳定性降低^[27]。< 0.25 mm 水

稳性微团聚体在各耕作处理之间差别不明显,这是因为该粒级团聚体的形成主要受紧结合态有机质和黏粒的影响^[28],具有较高稳定性^[29],不易因外界因素的影响而发生明显变化。在两个层次,2~5 mm 土壤团聚体组分含量最低,黄土高原砂壤土性质可能阻碍大团聚体颗粒的形成,与传统耕作相比,轮耕处理增加了 2~0.25 mm 的团聚体的比例,而微团聚体(< 0.25 mm)的比例相应减少。

2) West 和 Marland^[30]对比研究了免耕和常规耕作后认为,免耕可以减缓土壤有机物质的矿化率,有利于有机碳的积累,王彩霞等^[31]对连续 6 年不同耕作措施下土壤有机碳形态及活性影响的研究结果表明,与传统耕作比较,旋耕、深松和免耕处理均能提高土壤有机碳含量。而本研究结果表明,3 年轮耕处理比传统耕作增加了有机质含量,且深松/免耕/深松处理 0~20 cm 的有机质和全氮含量显著高于传统耕作,而免耕/深松/免耕处理与传统耕作无显著差异;20~40 cm,轮耕处理的全氮含量均高于传统耕作处理,但差异不显著,这是由于免耕/深松隔年轮耕因停止翻耕扰动和减少农机具压实,减缓了微生物对有机质的分解,减少了碳、氮输出损失^[32],而传统耕作进行深翻扰动,有机碳、氮矿化迅速,加之部分秸秆残茬被翻埋到更深土层,降低了表层有机质积累^[33]。

Staley^[34]和 Balesdent^[35]的研究结果表明,免耕可显著改善土壤化学性状,土壤有机碳显著提高,同时可提高土壤表层的氮、磷、钾含量,但深层土壤变化不大。本研究发现,与传统耕作相比,免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式可以提高土壤的养分含量,并对表层土壤有机质和全氮含量与深层土壤的碱解氮、有效磷和速效钾含量影响较大。

3) 本研究发现,轮耕处理下冬小麦播种前土壤水分较高,小麦出苗情况较好,使有效穗数和穗粒数显著增加,而对千粒重无明显影响,3年小麦平均产量较传统耕作显著增加。免耕/深松隔年轮耕使土壤容重减小,总孔隙度和团聚体含量增加,提高了土壤的蓄水保墒能力^[36],同时也提高了土壤的有效养分含量,这正是轮耕处理增产的原因所在。

4 结 论

1) 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式与传统耕作相比,可有效降低耕层土壤容重,改善土壤孔隙状况,同时提高了0~40 cm各土层的2~0.25 mm水稳性团聚体的数量,对改善土壤结构具有显著作用,其中深松/免耕/深松模式效果最佳。

2) 与传统耕作相比,免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式可显著增加0~40 cm土壤碱解氮和有效磷含量、20~40 cm土层速效钾含量,其中深松/免耕/深松模式最能有效增加0~40 cm土壤有机质和0~20 cm土层全氮含量,改善了土壤的养分状况。

3) 与传统耕作相比,轮耕处理显著增加冬小麦的有效穗数和穗粒数,建立了小麦高产的群体结构和个体基础,从而提高籽粒产量。

参 考 文 献

- [1] Six J, Elliott T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1350—1358
- [2] Bayer C, Mielniczuk J, Amado T J C, et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2000, 54: 101—109
- [3] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95: 240—254
- [4] Camara K M, Payne W A, Rasmussen P E. Long-term effects of tillage, nitrogen, and rainfall on winter wheat yields in the Pacific Northwest. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 828—835
- [5] 孙国峰,陈阜,肖小平,等. 轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的初步研究. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 109—113. Sun G F, Chen F, Xiao X P, et al. Preliminary study on effects of rotational tillage on soil physical properties and rice yield (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(12): 109—113
- [6] Bauer A, Black A L. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 185—193
- [7] Huang X X, Gao M, We C F, et al. Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 16: 660—667
- [8] Robinson C A, Cruse R M, Ghaffarzadeh, M. Cropping system and nitrogen effect on Mollisol organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 264—269
- [9] Gao M, Luo Y J, Wang Z F, et al. Effect of tillage system on distribution of aggregates and organic carbon in a Hydragric Anthrosol. *Pedosphere*, 2008, 18: 574—581
- [10] Zhang X R, Li H W, He J, et al. Influence of conservation tillage practices on soil properties and crop yields for maize and wheat cultivation in Beijing, China. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47: 362—371
- [11] Huang S, Sun Y N, Rui W Y, et al. Long-term effect of no-tillage on soil organic carbon fractions in a continuous maize cropping system of northeast China. *Pedosphere*, 2010, 20: 285—292
- [12] Pikul J L, Aase J K. Wheat response and residual soil properties following subsoiling of a sandy loam in eastern Montana. *Soil and Tillage Research*, 1999, 51: 61—70
- [13] Joseph J L, Kristian J S. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 859—866
- [14] 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. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 99—104. Yu H Y, Peng W Y, Ma X, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semi-arid region of northern China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99—104
- [15] 李友军,黄明,吴金芝,等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 42—45. Li Y J, Huang M, Wu J Z, et al. Effects of different tillage on utilization and run-off of water and nutrient in sloping farmland of Yuxi dryland area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 42—45
- [16] 秦红灵,高旺盛,马月存,等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 78—85. Qin H L, Gao W S, Ma Y C, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 78—85
- [17] Hill P R. Use of continuous no-till and rotational tillage systems in the central and northern Corn Belt. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(4): 286—290
- [18] López-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment.

- Soil and Tillage Research, 2009, 104: 278—284
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62—126. Institute of soil science, Chinese Academy of Sciences. Soil physics and chemistry analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983: 62—126
- [20] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America journal, 1986, 50: 627—633
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2003. Bao S D. Soil agriculture chemical analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2003
- [22] Six J, Elliot E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1 042—1 049
- [23] 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 等. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2 801—2 808. Liang A Z, Yang X M, Zhang X P, et al. Short-term impact of no tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in Black Soil of Northeast China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2 801—2 808
- [24] 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. 土壤通报, 2011, 42(1): 81—85. Zhu L Q, Zhang D W, Bian X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 81—85
- [25] Roseberg R J, McCoy E L. Tillage and traffic-induced changes in macroporosity and macropore community: Air permeability assessment. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1 261—1 267
- [26] 严波, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同耕作方式对宁南旱地土壤团聚体的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 58—63. Yan B, Jia Z K, Han Q F, et al. Effects of different tillage on soil aggregates in the arid areas of south Ningxia (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 58—63
- [27] Chen H Q, Billen N, Stahr K, et al. Effects of nitrogen and intensive mixing on decomposition of ¹⁴C-labelled maize (*Zea mays* L.) residue in soils of different land use types. Soil and Tillage Research, 2007, 96: 114—123
- [28] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79: 7—31
- [29] Angers D A. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. Soil and Tillage Research, 1998, 47: 91—96
- [30] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses. Environmental Pollution, 2002, 116: 439—444
- [31] 王彩霞, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 不同耕作措施对壤土土壤有机碳形态及活性的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 58—63. Wang C X, Yue X J, Ge X Z, et al. Effect of different cultivation measures on activity and bound forms of organic carbon in Lou Soil (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 58—63
- [32] Larney F J, Bullock M S. Influence of soil wetness at time of tillage and tillage implement on soil properties affecting wind erosion. Soil and Tillage Research, 1994, 29: 83—95
- [33] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响. 土壤学报, 2011, 48(4): 788—796. Fan R Q, Liang A Z, Yang X M, et al. Tillage and rotation effects on soil organic carbon and total nitrogen stocks of a black soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 788—796
- [34] Staley T E. Soil microbial and organic component alteration in no-tillage chronosequence. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52: 998—1 005
- [35] Balesdent J. Effects of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ¹³C abundance in maize fields. Soil Science, 1990, 41: 587—598
- [36] 侯贤清, 王维, 韩清芳, 等. 夏闲期轮耕对小麦田土壤水分及产量的影响. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2 524—2 532. Hou X Q, Wang W, Han Q F, et al. Effects of different tillage practices in summer fallow period on soil water and crop water use efficiency in semi-arid areas (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2 524—2 532

EFFECTS OF ALTERNATE TILLAGE ON SOIL PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND YIELD OF DRYLAND WHEAT IN ARID AREAS OF SOUTH NINGXIA

Hou Xianqing^{1,2} Li Rong^{1,2} Han Qingfang^{1,2†} Jia Zhikuan^{1,2} Wang Wei^{1,2}

Yang Baoping^{1,2} Wang Junpeng^{1,2} Nie Junfeng^{1,2} Li Yongping³

(1 *The Chinese Institute of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

(2 *Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

(3 *Guyuan Institute of Agricultural Sciences, Guyuan, Ningxia 756100, China*)

Abstract To explore effects of tillage on soil physical and chemical properties and yield of winter wheat in semi-arid South Ningxia, a 3-year field experiment was carried out from 2007 to 2010. The experiment was designed to have three tillage patterns, i. e. non-tillage (NT)/subsoiling (ST)/non-tillage (NT), ST/NT/ST and conventional tillage (CT) as control and soil bulk densities, aggregates, soil nutrients and yields of winter wheat of the three treatments were determined separately. Results show that compared with CT, treatments NT/ST/NT and ST/NT/ST significantly ($p < 0.05$) decreased soil bulk density, improved soil total porosity and significantly ($p < 0.05$) increased the amount of 2 ~ 0.25 mm water-aggregates. Treatment ST/NT/ST was the most effective in increasing soil organic matter (in 0 ~ 40 cm soil layer) and total N (0 ~ 20 cm) among the three; compared with CT, treatments NT/ST/NT and ST/NT/ST significantly ($p < 0.05$) increased alkalyzable-N (0 ~ 40 cm), available P (0 ~ 40 cm) and available K (20 ~ 40 cm), and improved soil nutrient status. Treatments NT/ST/NT and ST/NT/ST also significantly increased wheat yield. Their three-year mean grain yield was ($p < 0.05$) 9.59% and 10.69% higher than that of the control. Obviously, treatment ST/NT/ST is better than treatment NT/ST/NT in yield raising.

Key words Alternate tillage practices; Soil physicochemical properties; Yield; Arid South Ningxia