

# 渭北旱塬玉米田保护性轮耕土壤固碳效果与增产增收效应

李娟<sup>1,2</sup>, 李军<sup>3\*</sup>, 程科<sup>2</sup>, 韩霁昌<sup>2</sup>, 王丽<sup>1,4</sup>, 尚金霞<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075;  
3.西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; 4.甘肃武威市凉州区林业技术推广中心, 武威 733000)

**摘要:** 针对渭北旱塬降水少、季节性差异大及长期采用单一土壤耕作制度等制约作物增产增收的因素, 该研究探索有利于提高旱作农田土壤质量及作物生产能力的轮耕模式。2007—2012年在陕西合阳实施了渭北旱塬春玉米连作田6种不同轮耕模式的长期定位试验, 设置以免耕(NT, no-tillage)、深松(ST, sub-soiling)和翻耕(CT, continuous tillage)3种耕作处理组合集成的6种轮耕模式(NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT、ST↔ST和CT↔CT), 测定各轮耕模式下春玉米田土壤容重和有机碳储量, 分析各轮耕模式下春玉米籽粒产量、水分利用效率和经济效益的变化规律。结果表明: 1)在疏松土壤、减少耕作机械碾压次数, 改善土壤结构和降低容重等方面, 6种轮耕模式以NT↔ST表现最佳, ST↔ST次之, 差异显著( $P<0.05$ )。2)6种轮耕模式在0~60 cm土层土壤有机碳平均储量较试验前均增加幅度6.6%~17.4%。NT↔NT轮耕模式对增加表层土壤有机碳储量具有优势, 且与各处理间差异显著( $P<0.05$ )。NT↔ST轮耕模式可改变耕层土壤有机碳储量分布特征, 进而使土壤营养均匀分布。3)6种轮耕模式5年春玉米籽粒产量、水分利用效率和经济效益综合评价分析, NT↔ST轮耕模式最高, 分别为9 338.8 kg/hm<sup>2</sup>、22.6 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)和7 600.5元/hm<sup>2</sup>; 其次是ST↔CT, 其中NT↔ST轮耕模式下春玉米籽粒产量、水分利用效率和经济效益较其他处理增加幅度分别为3.7%~15.7%、17.6%~45.8%和10.1%~40.4%, 差异显著( $P<0.05$ ); 且5种轮耕模式下作物籽粒产量、水分利用效率和经济效益均高于传统CT↔CT模式。综上所述, 在6种轮耕模式下, 以NT↔ST(免耕与深松逐年轮换)轮耕模式下土壤容重和有机碳储量最佳, 生产能力最强, 水分利用率最高, 是渭北旱塬地区春玉米连作田最佳适宜轮耕模式, 其次是ST↔CT(深松与翻耕逐年轮换)轮耕模式。

**关键词:** 土壤; 有机碳; 作物; 轮耕模式; 春玉米; 产量; 水分利用效率; 渭北旱塬

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.015

中图分类号: S157.4; S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0104-08

李娟, 李军, 程科, 韩霁昌, 王丽, 尚金霞. 渭北旱塬玉米田保护性轮耕土壤固碳效果与增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 104—111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.015 <http://www.tcsae.org>  
Li Juan, Li Jun, Cheng Ke, Han Jichang, Wang Li, Shang Jinxia. Soil organic carbon sequestration, yield and income increment of rotational tillage measures on Weibei highland maize field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 104—111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.015 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

渭北旱塬区位于黄土高原中南部暖温带半湿润易旱区, 是黄土沟壑区和河谷平原之间的过渡区, 降雨量少, 季节变异性大及长期传统耕作模式是制约该区粮食增产增收的主要因素<sup>[1-3]</sup>。长期传统耕作模式不利于改善土壤结构, 以致于降低土壤生产性能。保护性耕作通过运用机械力、生物力、风力和土壤自身重力等综合作用来改善农田土壤结构和质量, 从而达到水、肥、气和热的交换与平衡, 现阶段主要是通过通过对土壤实行深松、免耕及

作物秸秆还田等措施, 达到减少风蚀和水蚀, 增加土壤有机碳含量, 提高土壤蓄水保墒能力及水分利用效率的目的, 为作物增产增收奠定基础, 对保护生态环境和实现农业可持续发展具有重要意义<sup>[4-7]</sup>。近年来, 国内外学者认为, 适时实行深松、免耕、翻耕等土壤耕作措施轮换, 构建土壤轮耕技术模式, 是提高土壤质量和生产性能的有效措施, 可有效减轻长期传统耕作模式的弊端<sup>[8-12]</sup>。一些学者通过长期定位试验, 分析得出免耕与深松、免耕与翻耕组成的轮耕模式可有利改善土壤的物理性状, 使耕层土壤容重维持在较低水平, 增加土壤孔隙度, 为作物种子萌发和生长发育提供好的环境<sup>[13-15]</sup>。王丽等研究通过长期定位试验研究发现, 轮耕模式下的土壤团聚体稳定性和各粒级下有机碳含量显著高于传统耕作<sup>[16-17]</sup>。张海林和王育红等研究表明, 合理的轮耕模式可有效提高土壤蓄水量约10.0%, 水分利用效率平均提高幅度16.8%, 作物籽粒产量较传统耕作平均增产幅度约18.8%<sup>[17-18]</sup>。目前, 对于轮耕技术效应研究主要集中在南方双季水稻区和华北麦玉两熟区, 在渭北旱塬地区实行土壤耕作措施

收稿日期: 2015-09-21 修订日期: 2015-12-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02); 国家自然科学基金项目(31571620); 公益性行业(农业)科研专项(201303104); 公益性行业(农业)科研专项(201503116); 国家科技支撑计划(2014BAL01B01)

作者简介: 李娟, 女, 陕西宝鸡人, 博士生, 主要从事旱区农业生态研究。杨凌 西北农林科技大学林学院, 712100。Email: lijuan8136@163.com

\*通信作者: 李军, 男, 甘肃泾川人, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农业生态、高效农作制度和数字农作技术等研究。杨凌 西北农林科技大学农学院, 712100。Email: junli@nwsuaf.edu.cn

的合理组合和轮换,形成与该区种植制度相匹配的土壤轮耕模式,是提高土壤质量和解决当地作物低产的有效途径,但轮耕技术的研究周期较长,定位试验难度较大,现阶段对于此方面的研究较少<sup>[19-20]</sup>。本研究于2007年秋季开始,在渭北旱塬地区玉米连作田进行5a土壤轮耕试验,探索在春玉米收获后将玉米秸秆进行全量还田覆盖,6种轮耕模式对春玉米田土壤容重、有机碳储量、籽粒产量、水分利用效率和经济效益的影响,评价和筛选结构好、肥力足、产量高和收益好的最优保护性轮耕模式,以之作为该区建立与当地作物种植制度相匹配的轮耕模式提供科学支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

于陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大学旱作农业试验站(35°19'N, 110°05'E, 海拔900 m)进行试验,该区属于渭北旱塬东部半湿润易旱区,年平均气温11.5℃,平均降水量537.8 mm,年蒸发量1832.8 mm。降雨年际和季节变异性较大,试验地地势平坦,土壤为黑垆土,属于中壤土,母质疏松。土层厚,蓄水保肥能力强,田间持水率为22.1%。2007年开始试验前,在0~60 cm土层,土壤有机质平均质量分数为8.6 g/kg,全氮和全钾质量分数分别为0.7和5.7 g/kg,速效磷和速效钾质量分数分别为2.4和142.5 mg/kg。

### 1.2 试验设计

于2007年秋季开始进行春玉米连作制下定位试验,设置免耕(no-tillage, NT)即在玉米收获后全部秸秆粉碎覆盖地表,无其他措施,保持秸秆覆盖地表越冬闲期;深松(sub-soiling, ST)即在玉米收获后全部秸秆粉碎覆盖地表,单深松铲耕作深度为30~35 cm,宽度为40~60 cm,保持秸秆覆盖地表越冬闲期;翻耕(continuous tillage, CT),即在玉米收获后将全部秸秆粉碎覆盖地表,用单犁铧全面深翻20~25 cm且秸秆全部翻埋,地表裸露越冬闲期。3种耕作法集成6种轮耕模式在2007—2012年试验年度的轮耕次序如表1所示。

表1 2007—2012年土壤轮耕次序

Table 1 Sequence of soil rotational tillage systems from 2007 to 2012

轮作模式 Rotational system	试验前 Before treatment (2007年)	试验年度 Year				
		2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
NT↔ST	CT	NT	ST	NT	ST	NT
ST↔CT	CT	ST	CT	ST	CT	ST
CT↔NT	CT	CT	NT	CT	NT	CT
NT↔NT	CT	NT	NT	NT	NT	NT
ST↔ST	CT	ST	ST	ST	ST	ST
CT↔CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT

注: NT代表免耕处理; ST代表深松处理; CT代表翻耕处理; 下同。

Note: NT stand for no-tillage; ST stand for sub-soiling tillage; CT stand for continuous tillage; the same as below.

试验采用随机区组设计,每种耕作处理设3个重复,小区面积为110 m<sup>2</sup> (22 m×5 m),共18个小区。试验供

试玉米品种为豫玉22,5a春玉米播种时间分别于2008年4月17日、2009年4月15日、2010年4月19日、2011年4月22日和2012年4月20日;播种采用点播机,播种量为75 kg/hm<sup>2</sup>;收获时间分别为2008年9月15日、2009年9月22日、2010年9月26日、2011年9月24日和2012年9月18日;采用联合收割机收获。播种时尿素、磷酸二铵和氯化钾等作为基肥施用,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>用量为120 kg/hm<sup>2</sup>,N用量为75 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O用量为90 kg/hm<sup>2</sup>;大喇叭口期只追施尿素,用量与基肥一致,试验期间田间管理与当地大田管理一致。

### 1.3 样品采集和测定

1) 土壤容重<sup>[21]</sup>:采用环刀法,春玉米收获后用体积为100 cm<sup>3</sup>的标准环刀(高5 cm,直径5.04 cm),每个小区采集土壤深度为0~60 cm,该深度是土壤耕作和施肥处理影响的主要深度,取样区间为0~20、>20~40和>40~60 cm,以期揭示耕作和作物根系生长对不同土层土壤容重的影响差异。依据试验小区形状,采用对角线法,设置5个取样点,采集3个层次土壤原状土样,密封带回实验室,烘干称质量(105℃,24 h),测定土壤容重。

2) 土壤有机碳:土壤样品于每年春玉米收获后立即采集,各小区采集土壤深度为0~60 cm,取样间隔为20 cm,采用对角线法,设置5个取样点,同一深度的每5个重复样品组成1个混合样品,带回实验室自然风干,剔除石砾及植物根系、残茬等杂物,过0.25 mm筛子,采用重铬酸钾(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)氧化外源加热法(GB7857—1997)测定土壤有机碳,用于有机碳储量计算。

3) 产量:春玉米产量于各小区选取3个取样点,每点取样20个,共计取样60株,人工脱粒,晒干后称取风干质量,并测定其含水率,计算作物产量。

### 1.4 指标计算

1) 有机碳储量计算:采用等深度方法,等深度土壤碳储量为各处理20 cm结果,参考梁爱珍等方法<sup>[22]</sup>,按下式计算

$$SOC_{\text{storage in depth}} = 2 \times BD \cdot C$$

式中SOC<sub>storage in depth</sub>为等深度(20 cm)单位面积土壤碳储量,t/hm<sup>2</sup>;BD为土壤容重,g/cm<sup>3</sup>;C为各处理下0~20、>20~40和>40~60 cm土层土壤有机碳含量,g/kg。

2) 经济收益计算:经济效益以单位土地面积纯收益表示,按下式计算

$$RE = YET - TC$$

$$YET = Y \cdot M$$

式中RE为单位土地面积玉米籽粒纯收益,元/hm<sup>2</sup>;YET为单位土地面积玉米籽粒的总产值,元/hm<sup>2</sup>;TC为单位土地面积玉米种植及收获的总成本,元/hm<sup>2</sup>;总成本包括机械费(耕作处理、播种和收获)、化肥费、种子费、农药费等物资费用和除草、收获及测产等劳动报酬)。Y为单位土地面积玉米的总产量,kg/hm<sup>2</sup>;M为各年份玉米籽粒的单价,元/kg。2008和2009玉米单价为1.6元/kg、2009年、2010年、2011年和2012年市场价格为1.7元/kg;在计算各年份总成本时,均采用该年度下各种费用的年市场价格。

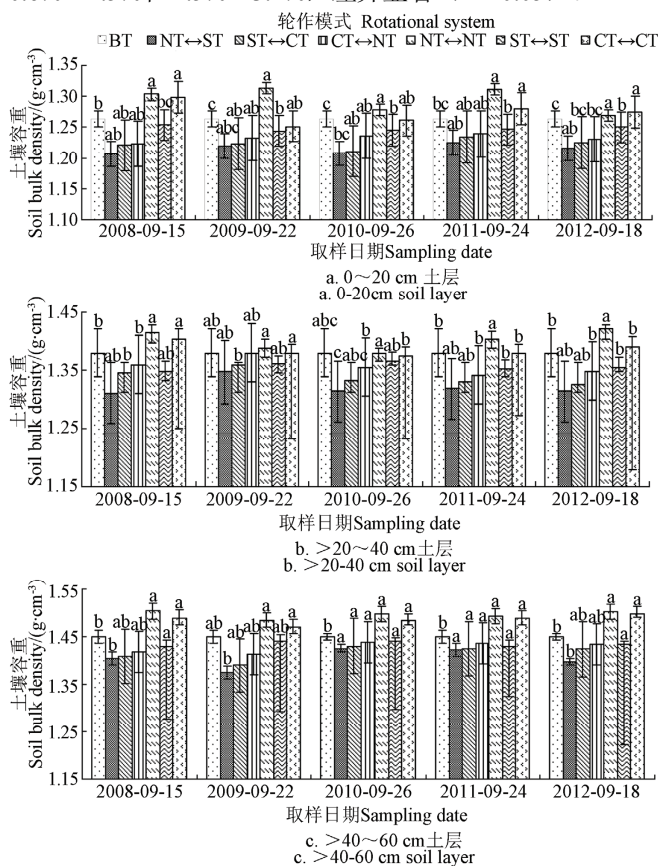
## 1.5 数据分析

试验数据采用 SPSS (PASW Statistics 16.0) 进行单因素方差分析, 利用 EXCEL 2007 和 Sigmaplo12.5 进行数据整理并制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 轮耕对土壤容重的影响

土壤容重是反映土壤紧实度、水、肥和土壤结构的重要物理指标之一。随着土层深度的增加, 各轮耕模式作用下土壤容重均呈现增大趋势, 即 6 种耕作模式分别在 0~20、>20~40 和 >40~60 cm 土层土壤容重 5 a 平均值分别为 1.25、1.36 和 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 且不同轮耕模式间土壤容重有显著差异 ( $P<0.05$ ), 如图 1 所示。由于轮耕模式下春玉米种植年所采用的土壤耕作方式的不同, 即 0~20、>20~40 和 >40~60 cm 土层土壤容重呈现年际变化趋势, NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT 和 ST↔ST 轮作模式各土层的土壤容重较试验前均有不同程度的下降, 且 4 种耕作模式在 0~20、>20~40 和 >40~60 cm 土层土壤容重 5 a 平均值较试验前降低幅度分别为 1.3%~3.9%、1.4%~4.3%和 1.0%~3.1%, 差异显著 ( $P<0.05$ ), 而 NT↔NT 和 CT↔CT 耕作模式下土壤容重呈现增加趋势, 增加幅度分别为 1.1%~2.4%、0.6%~1.5%和 2.5%~3.2%, 差异显著 ( $P<0.05$ )。



注: BT 为 2007 年试验开始前; 小写字母不同表示不同日期比较结果差异达到 5% 的显著水平 ( $P<0.05$ ), 下同。

Note: BT is before experiment start in 2007; Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level, indicating the comparative results in the same date, the same below.

图 1 不同轮耕处理对春玉米田 0~60 cm 土壤容重的影响

Fig.1 Effect of different rotational tillage treatments on soil bulk density at 0-60 cm soil layer of spring corn field

在 0~20 cm 土层土壤容重大小次序为 NT↔ST、ST↔CT>CT↔NT>ST↔ST>CT↔CT>NT↔NT; 在 >40~60 cm 土层土壤容重大小次序为 NT↔ST>ST↔CT>CT↔NT>ST↔ST>CT↔CT>NT↔NT; 即土层土壤容重变化趋势相似。在 0~60 cm 土层, NT↔ST 轮耕模式下土壤容重 5 a 平均值为 1.36 g/cm<sup>3</sup>, 较试验前土壤容重平均值降低 3.4%; 而 CT↔CT 和 NT↔NT 轮耕模式下土壤容重 5 a 平均值分别为 1.38 和 1.40 g/cm<sup>3</sup>, 较试验前土壤容重平均值增加 1.8%和 2.9%, 差异显著 ( $P<0.05$ )。结果表明, 合理的耕作组合能有效的降低土壤容重, 改善土壤结构, 使土壤疏松从而利于水、肥等物质的交换。其中, 以 NT↔ST 模式改善效果最佳, 其次为 ST↔CT, 再次为 CT↔NT, 可为作物生长发育和根系伸长创造良好的耕作结构。

### 2.2 轮耕对有机碳储量的影响

不同轮耕处理对玉米田 0~60 cm 土层土壤有机碳储量具有明显的影响。5 a 试验期土壤有机碳储量变化趋势相似, 以 2007 年 (试验前)、2008 年 (首次) 和 2012 年 (末次) 春玉米收获后土壤有机碳储量为代表, 分析各轮耕模式下 0~60 cm 土层土壤有机碳储量变化特征 (表 2), 以期揭示较试验前期, 不同的轮耕模式对土壤有机碳储量的改善作用。

表 2 2007 (试验前)、2008 年 (首次) 和 2012 年 (末次) 轮耕模式对等深度土壤有机碳储量的影响

Table 2 Effects of different rotational tillage treatments on soil organic carbon storage of equivalent depth before maize sowing in 2007 and after spring maize harvesting in 2008 and 2012

年份 Year	轮作模式 Rotational system	不同土层有机碳储量 Soil organic carbon storage of different soil layer/(t·hm <sup>-2</sup> )		
		0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm
2007 年	BT	(14.5±0.26)c	(13.8±0.13)d	(10.9±0.20)d
	NT↔ST	(18.2±0.15)b	(17.0±0.66)a	(14.1±0.80)a
	ST↔CT	(17.6±0.30)b	(14.7±0.20)cd	(13.4±0.47)b
	CT↔NT	(17.2±0.72)b	(14.2±0.56)d	(13.2±0.35)bc
2008 年	NT↔NT	(20.7±0.35)a	(14.9±0.64)cd	(12.8±0.47)ab
	ST↔ST	(17.1±0.56)b	(16.3±0.42)ab	(13.5±0.71)b
	CT↔CT	(17.5±0.36)bc	(14.6±0.80)cd	(12.3±0.70)ab
	NT↔ST	(20.0±0.42)ab	(15.1±0.65)bc	(13.0±1.01)bc
2012 年	ST↔CT	(19.8±0.36)ab	(14.3±0.70)d	(12.0±0.48)ab
	CT↔NT	(19.4±0.76)ab	(13.4±0.96)d	(11.3±1.08)d
	NT↔NT	(22.2±0.55)a	(13.9±0.91)d	(11.4±1.10)d
	ST↔ST	(19.1±0.32)ab	(14.5±0.65)cd	(12.2±0.46)ab
	CT↔CT	(19.4±0.71)ab	(13.6±0.72)d	(11.1±0.85)d

注: 相同土层, 同一列内数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著; 数据为平均值±标准差; 下同。

Note: Different small letters in same column meant significant difference at 0.05 level at same soil layer; The data: mean± standard deviation; the same as below.

2007 年、2008 年和 2012 年, 0~60 cm 土层土壤有机碳储量均呈现随着土层深度的增加而减小, 各处理间

有机碳平均储量差异显著 ( $P<0.05$ )。2 a 试验数据表明, NT↔NT 轮耕模式下, 0~20 cm 土层土壤有机碳储量与其他处理间差异显著 ( $P<0.05$ ), 较 NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT 和 CT↔CT 分别增加 12.6%、14.9%、17.5%、18.6%和 16.5%。这主要是由于 NT↔NT 轮耕模式减少了对土壤的扰动, 加上地表残茬的作用, 减少了表土有机碳的流失和矿化作用, 从而增加了土壤表层有机碳储量。在 >20~60 cm 土层, NT↔ST 轮耕模式与其他处理间差异显著 ( $P<0.05$ ), 且有机碳平均储量最高, 为 14.8 t/hm<sup>2</sup>, ST-ST 次之, ST↔CT 为第 3 位, NT↔NT 为第 4 位, CT↔NT 为第 5 位, CT↔CT 最低。在 0~60 cm 土层, 各轮耕模式较试验前等深度土壤有机碳平均储量均增加 6.6%~17.4%, NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT 和 ST↔ST 轮耕模式较传统 CT↔CT 耕作有机碳平均储量增加幅度为 4.0%~10.2%, 差异显著 ( $P<0.05$ )。NT↔ST 轮耕模式在 0~60 cm 土层土壤总有机碳平均储量最高, 为 48.7 t/hm<sup>2</sup>, 即该轮耕模式对于增加渭北旱塬土壤有机碳积累具有一定程度的优势。

### 2.3 轮耕对春玉米产量、WUE 及经济效益的影响

轮耕模式对土壤理化性状的影响, 其最终的作用结果将会作用于作物增产和增收效应, 主要表现为对作物籽粒产量、水分利用效率和经济收益方面产生差异。在 5 a 试验期, 不同轮耕模式作物籽粒产量和 WUE 差异显著, 如图 2a 和图 2b 所示。5 a 试验期间, 3 种单一耕作方式即 ST↔ST、NT↔NT 和 CT↔CT 处理下作物平均籽粒产量分别为 9 082.6、8 795.4 和 8 266.2 kg/hm<sup>2</sup>, ST↔ST、NT↔NT 和 CT↔CT 处理 WUE 分别为 20.1、18.9 和 17.5 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。ST↔ST 处理下作物平均籽粒产量较 NT↔NT 和 CT↔CT 处理分别增加 3.3%和 10.4% ( $P<0.05$ ), WUE 分别增加 5.1%和 14.1% ( $P<0.05$ )。

从 6 种不同轮耕模式的总体效应分析, 各轮耕模式下作物籽粒平均产量和 WUE 表现趋势一致 (表 3), 即以 NT↔ST 轮耕模式下作物籽粒产量和 WUE 最高, 分别为 9 338.8 kg/hm<sup>2</sup> 和 22.6 kg/(hm<sup>2</sup>·mm); 其次为 ST↔CT, ST↔ST 为第 3 位, NT↔NT 为第 4 位, CT↔NT 为第 5 位, CT↔CT 为最差, 其中, NT↔ST 轮耕模式下作物籽粒产量和 WUE 较其他处理增加幅度分别为: 3.7%~15.7%和 17.6%~45.8%, 且差异均达到显著 ( $P<0.05$ )。CT↔CT 轮耕模式为传统的农作种植模式, ST↔CT,

ST↔ST、NT↔NT、CT↔NT 轮耕模式下作物籽粒产量和 WUE 较传统 CT↔CT 耕作模式分别提高 11.5%和 24.0%、2.6%和 6.8%、7.3%和 18.5%、9.7%和 23.9%。由此可见, 在渭北旱塬春玉米连作田, NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT 和 ST↔ST 轮耕模式优于传统 CT↔CT 耕作, 其中以 NT↔ST 模式最佳, ST↔ST 模式次之, 再次为 ST↔CT。

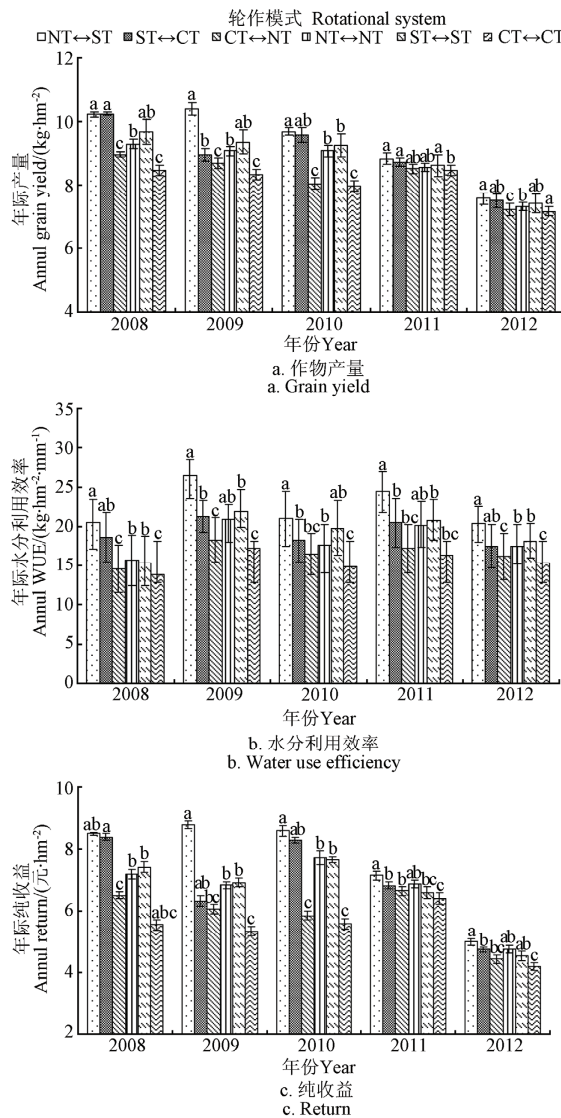


图 2 不同轮耕模式对 2008–2012 年玉米产量、水分利用效率和经济收益的影响

Fig.2 Effects of different rotational tillage systems on grain yield, WUE and economic benefit in 2008–2012

表 3 不同轮耕模式对 2008–2012 年春玉米平均成本、产量、WUE、产量收入及纯收益的影响

Table 3 Effects of different rotational tillage treatments on total cost, grain yield, WUE, yield income and return of spring corn in 2008–2012

耕作模式 Tillage system	平均产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	平均水分利用效率 WUE/(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	平均产量收入 Yield income/(元·hm <sup>-2</sup> )	平均总成本 Total cost/(元·hm <sup>-2</sup> )	平均纯收益 Return/(元·hm <sup>-2</sup> )
NT↔ST	(9338.8±177.8)a	(22.6±0.3)a	(15463.5±561.9)a	(7863.0±141.5)b	(7600.5±69.6)a
ST↔CT	(9002.1±74.5)b	(19.2±0.9)ab	(14919.4±526.5)a	(8010.5±181.2)a	(6908.9±84.3)b
CT↔NT	(8281.5±84.1)d	(16.6±1.4)c	(13725.7±380.9)b	(7828±172.1)ab	(5897.7±117.8)bc
NT↔NT	(8659.5±171.5)c	(18.4±0.9)bc	(14353.9±520.9)ab	(7680.5±147.9)b	(6673.4±58.7)bc
ST↔ST	(8853.8±114.2)bc	(19.2±1.4)a	(14671.0±621.7)a	(8045.5±69.3)a	(6625.5±122.1)c
CT↔CT	(8072.7±155.3)d	(15.5±0.7)bc	(13388.1±565.3)b	(7975.5±100.1)ab	(5412.6±128.7)d



不同轮耕模式的经济效益在不同年份, 由于作物产量和各种投入的不同, 而存在显著差异, 如图 2c 和表 3 所示。在 6 种轮耕处理下, NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT、ST↔ST 和 CT↔CT 处理 5a 总成本平均值分别为 7 863.1、8 010.5、7 828.0、7 680.5、8 045.5 和 7 975.5 元/hm<sup>2</sup>。同一年同一作物不同轮耕模式间经济效益的差异主要是由该模式当年所采用的耕作处理有关, 以 ST 最高, NT 次之, 而 CT 最低。从不同轮耕模式 5 年的总体效应看, 以 NT↔ST 增收效应最佳, 为 7 600.5 元/hm<sup>2</sup>, 较其他处理增加幅度为 10.1~40.4%, 且差异显著 ( $P<0.05$ )。ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT 和 ST↔ST 轮耕模式下纯收益较传统 CT↔CT 模式分别提高 27.6%、9.0%、23.3%和 22.4%, 处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。可见, NT↔ST、ST↔CT、CT↔NT、NT↔NT 和 ST↔ST 轮耕模式增收效应均优于传统耕作模式, 其中以 NT↔ST 模式最佳, 其次为 ST↔CT, 再次为 ST↔ST。

### 3 讨 论

#### 3.1 轮耕模式对土壤容重的影响

不同轮耕模式下 0~60 cm 土层土壤容重变化趋势一致, 均随着土层的增加而呈现不断增加, 这与王玉玲等的研究结果一致<sup>[23]</sup>。翻耕、深松和旋耕等土壤基本耕作措施对改善土壤耕层结构有显著作用。翻耕可对上下层土壤进行全面翻转, 对表层秸秆和残茬进行翻埋, 增加土壤通透性, 但机械碾压次数多、强度大; 深松可有效打破土壤犁底层, 有利于提高土壤入渗率, 加强土壤蓄水保墒能力<sup>[24-25]</sup>。本试验研究结果表明: 由免耕和深松集成的轮耕模式较其它处理对 0~60 cm 土层土壤容重改善效果好, 这主要是由于间隔深松能够打破犁底层, 免耕能够避免机械碾压土壤, 两者间隔进行, 既达到疏松土壤, 又减少土壤受碾压次数, 因此, 免耕与深松隔年轮耕措施对降低耕层土壤容重, 改善土壤结构最有效, 这与秦红灵等研究结果一致<sup>[26]</sup>, 而连年免耕处理虽对土壤无扰动, 但是在作物播种及收获均会对土壤进行碾压, 从而使土壤容重增大; 连续翻耕对土壤碾压次数最多, 碾压强度最大, 且翻耕深度不及深松, 土壤容重改善效果不佳。

#### 3.2 轮耕模式对土壤有机碳储量的影响

不同轮耕模式下 0~60 cm 土层土壤有机碳储量变化趋势一致, 均随着土层的增加而呈现不断下降, 这与 Blanco-Canqui H 等研究结果相似<sup>[27-29]</sup>。土壤固碳主要是通过减少土壤碳库分解和增加土壤碳库输入来实现的。长期免耕可减少对土壤的扰动, 使土壤有机碳矿化率降低, 从而保持土壤有机碳储量, 且秸秆仅覆盖于地表, 这与 R LaI 等 11 a 的定位试验研究结果一致<sup>[30-32]</sup>, 即在 0~20 cm 土层, 长期免耕模式下土壤有机碳储量较高于其它轮耕模式, 呈现富集现象; 此外, 长期免耕模式可增加春玉米上层根系的数量, 从而增加了土壤碳库的输入, 这与 Qin 等研究指出免耕较传统翻耕增加了 0~5 cm 夏玉米的根长密度, 从而增加碳库输入结果相似<sup>[33-34]</sup>。深松处理对土壤进行了机械耕作, 使耕作层土壤混合均

匀, 改变了残茬等物质的分布特征, 从而提高下层土壤有机碳储量, 这与庄恒扬等的研究结果一致<sup>[35]</sup>。长期单一的耕作模式对土壤机械扰动频繁, 破坏土层团聚体结构, 导致土壤活性增加, 增加土壤碳的矿化速率, 如传统单一翻耕<sup>[36]</sup>。本文采用等深度法计算土壤有机碳储量, 与多数研究结果一致, 免耕可显著提高表层土壤有机碳储量, 而梁爱珍研究发现, 长期免耕没有使耕层黑土土壤发生显著变化, 这可能与当地试验土壤质地有关<sup>[22]</sup>。本试验研究表明: 6 种轮耕模式下, 各土层土壤有机碳储量均较试验前显著增加, 差异显著 ( $P<0.05$ )。翻耕和深松, 深松和深松等集成的耕作模式主要是由于耕作措施扰动了耕层土壤, 增加了土壤通气性及土壤与残茬的接触, 进而加速了有机碳的转化, 但优于传统耕作固碳能力, 这与孙国峰研究结果一致<sup>[37]</sup>; 免耕和深松集成的轮耕模式固碳优势最明显, 主要是由于免耕可增加表层土壤的有机碳储量, 深松则改变了耕层土壤有机碳的分布特征, 增加了相应耕作深度的有机碳储量, 使有机碳均匀分布, 将有利于耕层结构的形成和作物生长。

#### 3.3 轮耕模式对作物产量、WUE 和经济效益的影响

水、肥、气、热等因素交换流通直接影响土壤生产性能, 长期采用单一耕作措施不利于提高土壤质量, 对土壤及作物生长发育并不十分有利, 易造成土壤侵蚀, 影响土壤蓄水能力和作物根系生长发育, 这一结论与武际等研究结论一致<sup>[38]</sup>。若采用合理的轮耕模式, 可改善土壤质量, 增加土壤孔隙当量, 降低了土壤容重和紧实度, 为玉米生长发育提供适宜的种床, 有利于玉米籽粒的萌发和生长发育, 从而达到增产效果<sup>[39]</sup>。轮耕模式在不同年份所采用的耕作方式不同, 其单年作物产量、WUE 和经济效益不同, 既评价轮耕模式的优劣, 要对该模式周期进行综合比较。王玉玲等研究结果表明深松-翻耕轮耕模式对黄土台塬区冬小麦-春玉米轮作系统增产增收最优, 而免耕-深松次之, 这可能主要与作物种植制度有关。本研究通过 5 a 定位试验, 不同轮耕模式以深松-免耕组合下的春玉米籽粒产量、WUE 和经济效益最高, 这主要由于免耕与深松隔年轮耕有效打破了土壤犁底层, 有效降低土壤容重, 改善了土壤结构, 增加土壤入渗率, 促进了土壤养分释放, 增加土壤有机碳含量, 使土壤耕作层养分分布均匀, 提高蓄水保墒增肥能力, 这与 Joseph 等<sup>[40]</sup>研究结果一致。

### 4 结 论

1) 免耕-深松轮耕模式在 0~60 cm 土层土壤容重 5 年平均值最低, 在改善土壤结构, 疏松土壤且避免过多机械碾压等方面较其他 5 种轮耕模式表现最优, 其次为深松-翻耕轮耕模式。

2) 6 种轮耕模式在 0~60 cm 土层土壤有机碳平均储量较试验前均增加 6.6%~17.4%。免耕-免耕轮耕模式对增加表层土壤有机碳储量具有优势。免耕-深松轮耕模式可改变耕层土壤有机碳储量分布特征, 进而使土壤营养均匀分布, 且在 0~60 cm 土层土壤总有机碳平均储量最高, 为 48.7 t/hm<sup>2</sup>, 其次为深松-深松轮耕模式。

3) 6种轮耕模式5年春玉米籽粒产量、水分利用效率和经济效益总体效应以轮耕-深松轮耕模式最高,分别为 $9\,338.8\text{ kg/hm}^2$ 、 $22.6\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$ 和 $7\,600.5\text{ 元/hm}^2$ ;其次是深松-翻耕,其中轮耕-深松轮耕模式下作物籽粒产量、水分利用效率和经济效益较其他处理增加幅度分别为 $3.7\%\sim 15.7\%$ 、 $17.6\%\sim 45.8\%$ 和 $10.1\%\sim 40.4\%$ ,差异显著( $P<0.05$ );且5种轮耕模式下作物籽粒产量、水分利用效率和经济效益均高于传统翻耕-翻耕模式。

综上所述,6种轮耕模式中轮耕-深松轮耕模式的土壤理化性状最佳、水分利用效率最高,增产增收效果最优,是渭北旱塬地区春玉米连作田最适宜的轮耕模式,其次是深松-翻耕和深松-深松轮耕模式。有效的轮耕模式有利于土壤质量和生产性能的提高,主要是减少了对土壤的扰动,增加土壤的通透性、养分储存和水分利用,在后期试验中将拓展研究内容,增加2a轮耕-1a深松、3a轮耕-1a深松等轮耕模式,分析减少土壤扰动后,土壤质量效应的差异性。

#### [参 考 文 献]

- [1] 毛红玲,李军,贾志宽,等.旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J].农业工程学报,2010,26(8):44-51. Mao Hongling, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 44-51. (in Chinese with English abstract)
- [2] 尚金霞,李军,贾志宽.渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应[J].中国农业科学,2010,43(13):2668-2678. Shang Jinxia, Li Jun, Jia Zhikuan. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2668-2678. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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[J].中国农业科学,2014,47(5):880-894. Bai Weixia, Li Jun, Wang Yuling, et al. Effects of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in weibei highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5): 880-894. (in Chinese with English abstract)
- [4] 雷金银,吴发启,王健,等.保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):40-45. Lei Jinyin, Wu Faqi, Wang Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 40-45. (in Chinese with English abstract)
- [5] 钮溥,包忠谟,王谦,等.渭北旱原农业开发[M].杨陵:西北农林科技大学,2000.
- [6] Vita D P, Paolo E D, Fecondo G, et al. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 69-78.
- [7] Martinez E, Fuentes J P, Silva P, et al. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(2): 232-244.
- [8] 侯贤清,李荣,韩清芳,等.夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):94-100. Hou Xianqing, Li Rong, Han Qingfang, et al. Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 94-100. (in Chinese with English abstract)
- [9] Chen Haiqing, Billen Norbert, Stahr Karl, et al. Effects of nitrogen and intensive mixing on decomposition of  $^{14}\text{C}$ -labelled maize (*Zea mays* L.) residue in soils of different land use types[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1): 114-123.
- [10] 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[J].农业工程学报,2007,23(12):109-113. Sun Guofeng, Chen Fu, Xiao Xiaoping, et al. Preliminary study on effects of rotational tillage on soil physical properties and rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(12): 109-113. (in Chinese with English abstract)
- [11] 侯贤清,李荣,韩清芳,等.轮耕对宁夏旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响[J].土壤学报,2012,49(3):592-600. Hou Xianqing, Li Rong, Han Qingfang, et al. Effects of alternate tillage on soil physicochemical properties and yield of dryland wheat in arid areas of South Ningxia[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 592-600. (in Chinese with English abstract)
- [12] Hatfield J L, Sauer T J, Prueger J H. Managing soils to achieve greater water use efficiency[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(3): 271-280.
- [13] 李娟,李军,尚金霞,等.轮耕对渭北旱源春玉米田土壤理化性状和产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(7):867-873. Li Juan, Li Jun, Shang Jinxia, et al. Effects of rotational tillage on soil physiochemical properties and spring maize yield in Weibei Highlands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 867-873. (in Chinese with English abstract)
- [14] Pierce F J, Fortin M C, Staton M J. Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(6): 1782-1787.
- [15] Carter M R, Sanderson J B, Ivany J A, et al. Influence of rotation and tillage on forage maize productivity, weed species, and soil quality of a fine sandy loam in the cool-humid climate of Atlantic Canada[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 67(2): 85-98.
- [16] 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[J].中国农业科学,2013,46(18):3800-3808. Cheng Ke, Li Jun, Mao Hongling. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties in rainfed wheat fields of the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(18): 3800-3808. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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[J].应用生态学报,2014,25(3):759-768. Wang Li, Li Jun, Li Juan, et al. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland[J]. Chinese Journal of Applied

- Ecology, 2014, 25(3): 759—768. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张海林, 陈阜, 秦耀东, 等. 覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 36—40.  
Zhang Hailing, Chen Fu, Qin Yaodong, et al. Water consumption characteristics for summer corn under no-tillage with mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(2): 36—40. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王育红, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 豫西旱坡地高留茬深松对冬小麦生态效应的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 146—148.  
Wang Yuhong, Yao Yuqing, Lü Junjie, et al. Ecological effect of subsoiling high stubble on the winter wheat in sloping land of western Henan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(2): 146—148. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙国峰, 陈阜, 李琳, 等. 耕作措施对长期免耕双季稻田土壤碳库的影响[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(6): 45—49.  
Sun Guofeng, Chen Fu, Li Lin, et al. Effects of tillage on the carbon pool of paddy soil with long-term no-tillage[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(6): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [21] 中国科学院南京土壤研究所土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学出版社, 1983: 62—126.
- [22] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006, 3(6): 1287—1293.  
Liang Aizhen, Zhang Xiaoping, Yang Xueming, et al. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in northeast china[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 3(6): 1287—1293. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王玉玲, 李军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台源麦玉轮作田土壤生产性能的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 107—116.  
Wang Yuling, Li Jun, Bai Weixia. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 107—116. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李华, 逢焕成, 任天志, 等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 647—656.  
Li Hua, Pang Huancheng, Ren Tianzhi, et al. Effects of deep rotary-subsoiling tillage method on brown physical properties and maize growth in Northeast of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 647—656. (in Chinese with English abstract)
- [25] 贾树龙, 孟春香, 任图生, 等. 耕作及残茬管理对作物产量及土壤性状的影响[J]. 河北农业科学, 2004, 12(4): 37—42.  
Jia Shulong, Meng Chunxiang, Ren Tusheng, et al. Effect of tillage and residue management on crop yield and soil properties[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2004, 12(4): 37—42. (in Chinese with English abstract)
- [26] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 免耕条件下农田休闲期直立作物残茬对土壤风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 66—71.  
Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effect of standing crop stubble on soil erosion by wind under no-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 66—71. (in Chinese with English abstract)
- [27] Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(3): 693—701.
- [28] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2464—2475.  
Wang Chengji, Pan Gengxin, Tian Youguo. Characteristics of cropland topsoil organic carbon experiments across mainland China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2464—2475. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1387—1393.  
Yang Minfang, Zhu Liqun, Han Xinzhong, et al. Short-term effects of different tillage modes combined with straw-returning on the soil labile organic carbon components in a farmland with rice-wheat double cropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1387—1393. (in Chinese with English abstract)
- [30] R Lal. Carbon sequestration[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2008, 363(1492): 815—830.
- [31] Naudin K, Goz E, Balarabe O, et al. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 108(1/2): 68—76.
- [32] He J, Li H, Rasaily R G, et al. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113(1): 48—54.
- [33] Qin R J, Stamp P, Richner W. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1): 50—61.
- [34] 冯福学, 黄高宝, 柴强, 等. 不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2499—2506.  
Feng Fuxue, Huang Gaobao, Chai Qiang, et al. Effects of tillage on spatiotemporal distribution of winter wheat root and yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2499—2506. (in Chinese with English abstract)
- [35] 庄恒扬, 曹卫星, 沈新平, 等. 麦稻两熟集约生产土壤养分平衡与调控研究[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 776—770.  
Zhuang Hengyang, Cao Weixing, Shen Xinping, et al. Soil nutrient balance and adjustment under intensive wheat-rice double cropping[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 776—770. (in Chinese with English abstract)
- [36] 吕贻忠, 廉晓娟, 赵红, 等. 保护性耕作模式对黑土有机碳含量及密度的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 163—169.  
Lü Yizhong, Lian Xiaojuan, Zhao Hong, et al. Effects of conservation tillage patterns on content and density of organic carbon of black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 163—169. (in Chinese with English abstract)
- [37] 孙国峰, 徐尚起, 张海林, 等. 轮耕对双季稻田耕层土壤有机碳储量影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3776—3783.  
Sun Guofeng, Xu Shangqi, Zhang Hailin, et al. Effects of rotational tillage in double rice cropping region on organic carbon storage of the arable paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3776—3783. (in Chinese with English abstract)
- [38] 武际, 郭熙盛, 张祥明, 等. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012,

28(3): 87—93.

Wu Ji, Guo Xisheng, Zhang Xiangming, et al. Effects of tillage patterns on crop yields and soil physicochemical properties in wheat-rice rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 87—93. (in Chinese with English abstract)

- [39] 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报,

2006, 26(4): 1176—1185.

Huang Gaobao, Guo Qingyi, Zhang Renzhi, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1176—1185. (in Chinese with English abstract)

- [40] Joseph J L, Kristian J S. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 859—866.

## Soil organic carbon sequestration, yield and income increment of rotational tillage measures on Weibei highland maize field

Li Juan<sup>1,2</sup>, Li Jun<sup>3\*</sup>, Cheng Ke<sup>2</sup>, Han Jichang<sup>2</sup>, Wang Li<sup>1,4</sup>, Shang Jinxia<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

4. Forest Technology Extend Center of Wuwei City of Gansu Province, Wuwei 733000, China)

**Abstract:** Weibei highland of Shaanxi province belongs to warm temperate and semi-humid drought climate zone, so drought is the biggest limiting factor for crop production on dryland. Shortage of precipitation and uneven distribution in seasons are the main factors to cause the low and unstable yields of spring maize (*Zea mays* L.) grown on dryland. A long-term practice of applying single soil tillage measures in this area causes soil compaction, poor ability of retaining rainwater and a low crop water use efficiency. In order to investigate the effects of different rotational tillage systems on soil production for spring corn fields, soil organic carbon sequestration, crop yields and water use efficiency (WUE) as well as economic benefits for different tillage system were determined on the Loess Platform of China. The research results could provide basis to establish a reasonable soil tillage system for a crop rotation system under a certain fertilizing method in the semi-humid and prone-to-drought Loess Platform. The objectives of this research were to study the effects of different rotational tillage patterns on soil bulk density, soil organic carbon sequestration, yield and economic benefit increase in spring maize rotation region in Weibei highland. A five-year field experiment was carried out from 2008 to 2012 in Dryland Agricultural Research Station, Ganjing Town (latitude 35°33'N; longitude 110°08'E; 900 m above sea level), Shaanxi province. There were six different rotational tillage systems in the study including no-tillage/sub-soiling rotation (NT↔ST), sub-soiling/ continuous- tillage rotation (ST↔CT), continuous tillage /no-tillage rotation (CT↔NT), no-tillage/ no-tillage rotation (NT↔NT), sub-soiling /sub-soiling rotation (ST↔ST) and continuous tillage / continuous rotation (CT↔CT). The data for spring corn grain yield, water use efficiency and economic benefits under different rotational tillage treatments were analyzed. Results showed that in the aspects of loosening soil, decrease of the frequency of tillage machine rolling and improving soil structure and lower bulk density, NT ↔ ST was the best among the six different rotational tillage systems, followed by ST ↔ ST ( $P > 0.05$ ). In addition, soil organic carbon reserves increased by 6.6%-17.4% in average of 0-60 cm soil layer with the applying of six rotational tillage systems. NT ↔ NT tillage showed advantages in increasing the soil organic carbon sequestration. NT↔ST rotation system changed the distribution of soil organic carbon characteristics in the top soil layer, and then made the soil nutrients distribute evenly. Through comprehensive evaluation and analysis of the grain yield, water use efficiency and economic benefit for spring corn of six rotational tillage systems in five years, NT↔ST rotation tillage was the best with a yield of 9 338.8 kg/hm<sup>2</sup>, WUE of 22.6 kg/(hm<sup>2</sup>·mm) and economic benefit of 7 600.5 Yuan/hm<sup>2</sup>. The second was ST↔CT. Increase of crop grain yield, water use efficiency and economic benefits of the NT↔ST rotation tillage was respectively 3.7%-15.7%, 17.6%-45.8% and 10.1%-40.4% higher than other treatments ( $P > 0.05$ ). The grain yield, water use efficiency and economic benefits of all five rotational tillage systems were higher than conventional tillage. The soil bulk density and soil organic carbon sequestration of NT↔ST treatment were the best among six tillage treatments, as well as the crop yield, water use efficiency and crop yield increment. Therefore NT↔ST was the most suitable conservation tillage practice for spring maize field on Weibei dryland, followed by ST↔CT rotation tillage.

**Keywords:** soils; organic carbon; crops; rotational tillage mode; spring maize; yield; water use efficiency; Weibei highland