

## 耕作方式对麦–玉米轮作农田固碳、保水性能及产量的影响

冯倩倩, 韩惠芳\*, 张亚运, 许菁, 曹亚倩, 王少博, 宁堂原, 李增嘉

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室/土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018)

**摘要:** 【目的】农田固碳保水性能是影响作物产量的关键因素, 研究耕作方式对耕层 (0–20 cm) 土壤碳、水含量和产量的影响, 为选择适宜该地区的最佳耕作措施提供参考。【方法】保护性耕作长期定位试验始于 2002 年, 种植制度为冬小麦–夏玉米一年两熟, 两季秸秆全量粉碎 (3~5 cm) 还田, 试验设传统翻耕、深松、旋耕和免耕 4 种耕作方式。对 2015–2016 年作物生长各时期土壤有机碳含量、土壤含水量、碳储量、产量和等价产量等进行了测定。【结果】不同处理麦–玉米轮作农田 0–20 cm 土层有机碳含量有所不同。耕作措施对土壤有机碳含量有显著 ( $P < 0.05$ ) 影响, 表现为深松和免耕能显著增加 0–10 cm 土层有机碳含量, 且以深松效果最为显著 ( $P < 0.05$ )。与传统翻耕相比, 免耕和旋耕降低了 10–20 cm 土层土壤有机碳含量; 深松比传统翻耕显著 ( $P < 0.05$ ) 增加了小麦季土壤有机碳含量, 玉米季没有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。0–10 cm 土层, 玉米季旋耕和免耕处理的土壤含水量高于深松和传统翻耕; 在 10–20 cm 土层小麦季免耕处理土壤含水量高于其他三种耕作方式。产量结果表明, 深松能有效增加作物的有效穗数、穗粒数和千粒重, 进而增加籽粒产量和周年等价产量; 免耕显著 ( $P < 0.05$ ) 降低了亚表层 (10–20 cm) 有机碳含量, 降低穗粒数和千粒重, 不利于作物增产。两年小麦玉米单作产量和周年等价产量均表现为深松 > 传统翻耕 > 旋耕 > 免耕。【结论】深松能有效促进耕层土壤有机碳积累和保水性能提高, 增加作物的有效穗数、穗粒数和千粒重, 从而增加产量; 免耕显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了表土层 (0–10 cm) 碳储量, 有助于增强耕层土壤的保水性能。

**关键词:** 耕作措施; 麦–玉米轮作; 土壤有机碳; 土壤含水量; 产量; 等价产量

## Effects of tillage methods on soil carbon sequestration and water holding capacity and yield in wheat–maize rotation

FENG Qian-qian, HAN Hui-fang\*, ZHANG Ya-yun, XU Jing, CAO Ya-qian,

WANG Shao-bo, NING Tang-yuan, LI Zeng-jia

(Agronomy College of Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** 【Objectives】Crop grain yields are greatly affected by carbon sequestration and water holding capacity of farmland which are significantly influenced by different tillage measures. Comparison of these effects will provide a reference for selecting suitable tillage method in the area. 【Methods】A long-term experiment of conservation tillage had lasted for 12 consecutive years since 2002, the cropping system was winter wheat–summer maize rotation, and total wheat and maize straws were crushed to 3–5 cm length and returned to the soil every year. Four tillage methods were set up for the experiment, as traditional tillage, subsoiling, rotary tillage and zero tillage. Soil organic carbon content, soil water content, yield and equivalent yield at different crop growth stages were measured in 2015–2016, and soil carbon storage and water storage were analyzed at the same time. 【Results】Tillage modes had significant ( $P < 0.05$ ) effect on soil organic carbon contents, subsoiling and zero tillage could significantly increase organic carbon contents at 0–10 cm soil layer ( $P < 0.05$ ), and the subsoiling effect was the most significant. At 10–20 cm soil layer, compared with the conventional

收稿日期: 2017–11–29 接受日期: 2018–03–26

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503117); 国家自然科学基金项目 (31101127, 31471453) 资助。

联系方式: 冯倩倩 E-mail: ahfq0922@163.com; \* 通信作者 韩惠芳 E-mail: hhf@sdau.edu.cn

tillage, the zero tillage and rotary tillage reduced soil organic carbon contents. Subsoiling significantly ( $P < 0.05$ ) increased soil organic carbon content compared with the conventional tillage in wheat season, and there was no significant ( $P < 0.05$ ) difference in maize season. Soil water contents at 0–10 cm soil layer of rotary tillage and zero tillage were higher than those of the subsoiling and conventional tillage in maize season. At 10–20 cm, soil water content of the zero tillage was higher than other three tillage measures in wheat season. The results of yield indicated that the subsoiling effectively increased the effective panicle number, grain number per spike and 1000-grain weight, and then increased grain yield and annual equivalent yield. The zero tillage significantly ( $P < 0.05$ ) reduced soil organic carbon of subsoil layer (10–20 cm), and reduced grain number per spike and 1000-grain weight, which was not conducive to crop yield increase. Yield of wheat-maize and annual equivalent yield in two years were characterized by subsoiling > conventional tillage > rotary tillage > zero tillage. 【Conclusions】 Subsoiling could effectively promote soil organic carbon accumulation and improve water retention capacity of plough layer, and increase the number of effective panicles, grain number per spike and 1000-grain weight, thus increasing yield. Besides, the carbon reserves of the surface layer (0–10 cm) and soil water holding capacity of plough layer were significantly enhanced by zero tillage.

**Key words:** tillage method; wheat-maize rotation; soil organic carbon; soil water content; yield; equivalent yield

耕作是影响土壤生态环境最直接的途径,合理的耕作措施可以协调土壤中水、肥、气、热间的关系<sup>[1]</sup>。不同耕作方式所作用的土壤深度及对土壤的扰动强度不同,再加上耕作年限的差异,会造成不同土层有机碳含量不一。长期保护性耕作条件下,表土层有机碳含量整体逐渐上升,免耕覆盖和深松覆盖显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了 0—10 cm 土层的有机碳含量及碳储量<sup>[2]</sup>。较传统耕作方式能通过改变土壤水分来影响农业环境过程<sup>[3]</sup>,免耕可更有效地储存水分<sup>[4-6]</sup>。免耕和秸秆覆盖可减缓地表径流,降低土壤水分蒸发;深松能打破土壤犁底层,增加土壤水分入渗,增强根系对深层土壤的利用,从而提高作物水分利用效率和产量<sup>[7-10]</sup>。梁金凤等<sup>[11]</sup>研究表明深松耕作对表层土壤 (0—25 cm) 容重的降低作用大于深层土壤 (25—45 cm);对增加土壤含水量的作用,深层土壤大于表层土壤。多年的传统翻耕造成土壤侵蚀加重和养分损失,不利于水分保持,因而少耕、免耕加秸秆覆盖的保护性耕作措施越来越受到研究人员的关注。

黄淮海平原的麦-玉轮作体系,麦收后麦茬过高,实行免耕播种机茬茬直播夏玉米是最主要的种植方式。近年来农田耕层变浅、土壤水分入渗能力差等一系列问题开始显现<sup>[1]</sup>。本试验基于连续 12 年 (始于 2002 年) 保护性耕作长期定位试验,采用麦-玉轮作制度,在两季秸秆全量粉碎 (3~5 cm) 还田条件下,于 2014—2016 年研究了 4 种耕作方式对耕层土壤有机碳和水分含量的影响,重点研究对土壤碳水含量和作物产量的影响,以期改善农田生产力提供新的方向。同时,本研究也可为构建黄淮海平原

麦-玉轮作及其它作物高产栽培模式和通过深松优化该地区农田生态系统提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

试验基于山东省泰安市山东农业大学农学实验站保护性耕作的长期定位试验,该定位试验始于 2002 年,试验时间为 2014—2016 年。试验地点位于北纬 36°10′、东经 117°09′,地处黄淮海平原,属于典型的温带大陆型季风气候。年均日照时数 2462.3 h,年均气温 13.6℃,年均降雨量 786.3 mm。土壤类型为棕壤,耕层土壤有机碳含量为 10.9 g/kg、全氮 1.1 g/kg、有效磷 0.8 mg/kg、速效钾 41.3 mg/kg、容重 1.4 g/cm<sup>3</sup>、pH 7.1。2014—2016 年降水和气温变化如图 1 所示。

### 1.2 试验设计

试验采用冬小麦-夏玉米一年两熟周年轮耕种植模式,夏玉米品种为郑单 958,播种密度 6.67 万株/hm<sup>2</sup>,冬小麦品种为济麦 22,播量为 90.0 kg/hm<sup>2</sup>。试验采用随机区组设计,设置传统翻耕 (CK)、深松、旋耕、免耕 4 种耕作措施,小区面积 60 m<sup>2</sup> (15 m × 4 m),各处理三次重复。所有耕作处理在冬小麦播前进行,玉米采用免耕直播,收获后两季秸秆全量粉碎 (3~5 cm) 还田。各处理播前基施 N 225.0 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 180.0 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 180.0 kg/hm<sup>2</sup>,在冬小麦播种后和拔节期浇水 60 mm,配合追施 N 100 kg/hm<sup>2</sup>。其中,2016 年拔节期灌水时间为 4 月 4 日,由于降雨

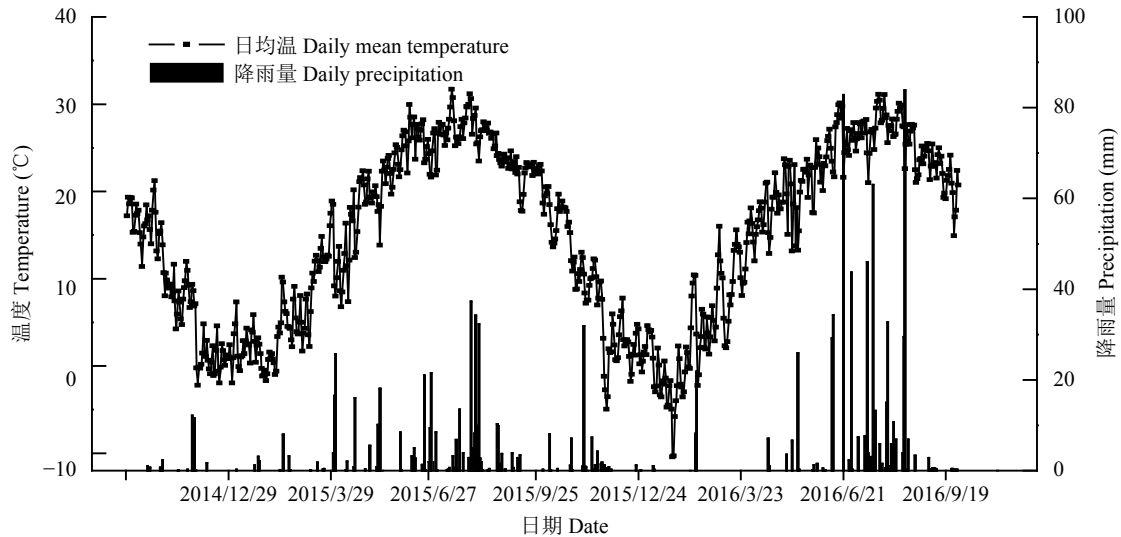


图 1 2014 年 10 月至 2016 年 9 月日平均温度和降水量

Fig. 1 Daily precipitation and average temperature from October 2014 to September 2016

较少, 灌浆期(5 月 15 日)补灌水一次。

### 1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品 分别于冬小麦返青期、拔节期、灌浆期、成熟期, 夏玉米拔节期、开花期、灌浆期、成熟期, 在 0—10 cm 和 10—20 cm 耕层, 采用蛇形取样法用土钻随机取五点土样, 混合均匀后带回实验室, 一部分鲜土采用烘干法测定土壤含水量, 其余风干后经磨土、过筛, 测定土壤有机碳<sup>[12]</sup>。

采用环刀法测定每次收获期 0—10 cm 和 10—20 cm 土层容重, 用于测定土壤碳水储量, 计算公式如下:

$$C_s = C \times \rho \times D^{[13]}$$

式中:  $C_s$  为土壤碳储量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $C$  为土壤有机碳含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ );  $\rho$  为土壤容重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $D$  为土层厚度 (m)。

$$C_w = 0.1 \times \omega \times \rho \times D^{[14]}$$

式中:  $C_w$  为土壤储水量 (mm);  $\omega$  为土壤含水量 (%);  $\rho$  为土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $D$  为土层厚度 (mm)。

1.3.2 作物产量 收获时小麦随机取  $1 \text{ m}^2$ 、玉米按 10 m 双行进行取样测产, 每个处理三次重复, 计算穗数、穗粒数和千粒重(小麦)或百粒重(玉米)。

等价产量是分析作物周年生产力的指标, 近年来多在间作、套作与轮作种植模式中得到应用<sup>[15-17]</sup>。不同作物产生不同的经济效益, 不同处理造成的产量差异使简单的产量加和无法真正反映农田的效益水平。因此, 以一种基本农作物产量为参照, 根据农产品价格关系转化能更好地分析不同处理整体的生产力水平。该指标参照 Pradhan 等<sup>[15]</sup>用玉米等价产量 (MEY) 计算, 小麦产量转化为玉米产量的公式如下所示。小麦价格为 2.4 yuan/kg, 玉米价格为 1.7 yuan/kg。

$\text{MEY} (\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{小麦产量} (\text{kg}/\text{hm}^2) \times \text{小麦价格} (\text{yuan}/\text{kg}) / \text{玉米价格} (\text{yuan}/\text{kg})$

### 1.4 数据分析

试验数据采用 Origin 8.0、SPSS 19.0 和 Microsoft Office Excel 2007 进行处理与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作方式对麦-玉米轮作农田土壤有机碳含量的影响

2.1.1 0—10 cm 土层有机碳含量 由图 2 可知, 冬小麦-夏玉米周年 0—10 cm 土层有机碳含量的变化范围在 13.3~21.4 g/kg 之间, 在冬小麦返青期和夏玉米开花期土壤有机碳含量达到最高。除小麦季灌浆期外, 深松处理土壤有机碳含量显著高于其他耕作处理 ( $P < 0.05$ ); 免耕处理土壤有机碳含量除拔节期外均高于传统翻耕, 灌浆至收获期增高趋势更明显; 旋耕在起身至灌浆期有机碳含量低于传统翻耕, 在成熟期高于传统翻耕; 传统翻耕土壤有机碳含量随生育期推进逐渐降低, 在成熟期降到最低。传统翻耕、深松、旋耕和免耕平均有机碳含量分别为 15.4、17.9、15.2 和 16.2 g/kg, 深松、旋耕、免耕分别比传统翻耕提高了 16.2%、-1.3% 和 5.2%。在玉米季, 深松、免耕土壤有机碳含量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于传统翻耕; 旋耕在拔节和开花期有机碳含量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于传统翻耕, 而在灌浆和成熟期与传统翻耕没有显著性 ( $P < 0.05$ ) 差异。传统翻耕、深松、旋耕和免耕平均有机碳含量分别为 15.0、18.4、15.4 和 16.8 g/kg, 深松、旋耕、免耕分别比传

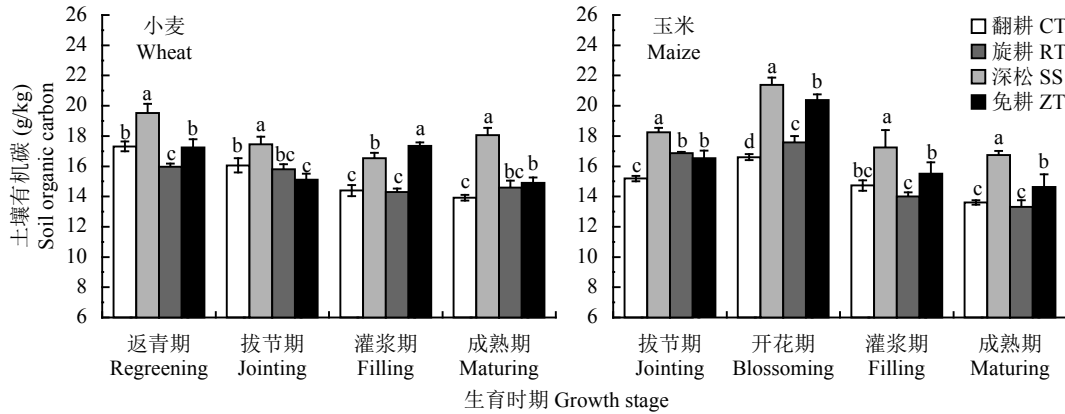


图 2 0—10 cm 土层有机碳含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of organic carbon content at 0–10 cm soil layer

[注 (Note) : CT—翻耕 Conventional tillage; SS—深松 Subsoiling; RT—旋耕 Rotary tillage; ZT—免耕 Zero tillage; 柱上不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Different small letters above the bars mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.]

统翻耕提高了 22.7%、2.7% 和 12.0%。

2.1.2 10—20 cm 土层有机碳含量 小麦-玉米轮作农田 10—20 cm 土层有机碳含量如图 3 所示, 同 0—10 cm 土层, 小麦季土壤有机碳含量在返青期最高, 灌浆期最低, 玉米季则在开花期最高, 成熟期最低。不同的是, 10—20 cm 土层有机碳含量低于 0—10 cm 土层, 与传统翻耕相比, 旋耕、免耕显著 ( $P < 0.05$ ) 降低了该层土壤有机碳含量, 不利于较深土壤有机碳积累。小麦季返青至拔节期各处理有机碳含量大小为深松 > 传统翻耕 > 旋耕 > 免耕, 灌浆以后旋耕处理的有机碳含量显著低于其他三种耕作处理, 免耕处理土壤有机碳含量略有升高。传统翻耕、深松、旋耕和免耕处理的平均有机碳含量分别为 13.8、14.6、11.3、12.3 g/kg。从夏玉米的分析结果可以看

出, 传统翻耕和深松处理 10—20 cm 土层有机碳含量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于旋耕与免耕处理, 深松与传统翻耕之间没有显著性 ( $P < 0.05$ ) 差异, 旋耕处理有机碳含量与小麦季保持一致, 即灌浆之前免耕最低, 灌浆以后旋耕低于免耕处理。传统翻耕、深松、旋耕和免耕处理的平均有机碳含量分别为 14.6、14.5、11.5、11.7 g/kg。

## 2.2 耕作方式对麦-玉轮作农田土壤含水量的影响

2.2.1 0—10 cm 土层含水量 由图 4 可知, 小麦季 4 种耕作处理 0—10 cm 土层的土壤含水量远低于玉米季, 主要是由于玉米生长季降雨增多所致。不同耕作处理, 除小麦灌浆期外, 传统翻耕条件下土壤含水量均处于最低值。免耕、深松和旋耕的平均含水量分别比传统翻耕提高了 23.1%、15.9% 和 10.4%;

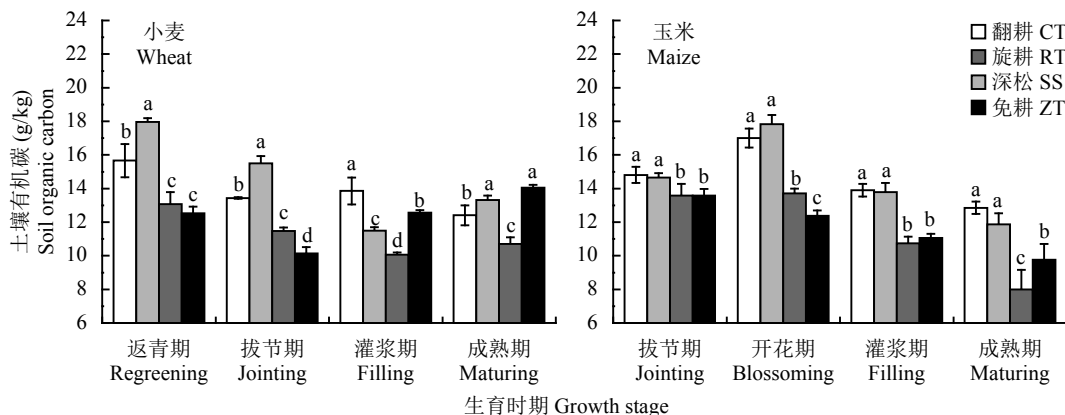


图 3 10—20 cm 土层有机碳含量的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of organic carbon content at 10–20 cm soil layer

[注 (Note) : CT—翻耕 Conventional tillage; SS—深松 Subsoiling; RT—旋耕 Rotary tillage; ZT—免耕 Zero tillage; 柱上不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Different small letters above the bars mean significant differences among the treatments at the 0.05 levels.]

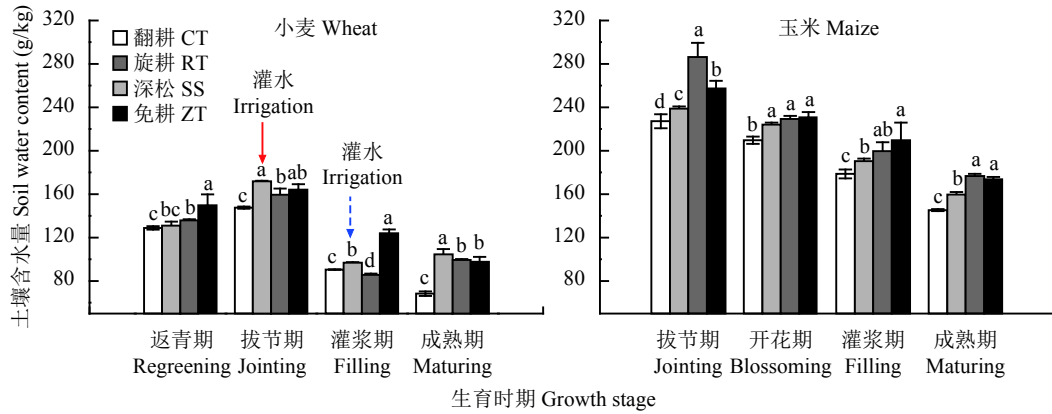


图 4 0—10 cm 土层含水量的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of water contents at 0–10 cm soil layer

[注 (Note): CT—翻耕 Conventional tillage; SS—深松 Subsoiling; RT—旋耕 Rotary tillage; ZT—免耕 Zero tillage; 小麦拔节期灌水在取样前进行, 灌浆期灌水在取样后进行 Jointing water of wheat irrigated before sampling, and filling water after sampling; 柱上不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Different small letters above the bars mean significant differences among the treatments at the 0.05 levels.]

玉米季传统翻耕处理土壤含水量最低, 其次是深松; 旋耕处理拔节期土壤含水量最高, 为 286.3 g/kg, 旋耕、免耕、深松的平均土壤含水量分别比传统翻耕提高了 17.2%、14.6%、6.8%。由此可以看出, 0—10 cm 土层传统翻耕最不利于土壤水分保持, 免耕、旋耕能显著 ( $P < 0.05$ ) 增加土壤水分含量。

2.2.2 10—20 cm 土层含水量 结合图 5 和图 4 可知, 玉米季 10—20 cm 土层含水量明显低于 0—10 cm 土层, 而小麦季两土层水分含量差异不一。小麦季除返青期外, 免耕处理的土壤含水量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他处理; 传统翻耕处理土壤含水量表现为返青期最高, 灌浆、成熟期最低, 免耕、深松、旋耕平均土壤含水量分别比传统翻耕提高了 17.7%、3.0%

和 2.7%。在夏玉米生长期间, 除灌浆期外, 深松处理的土壤含水量最低, 传统翻耕、深松、旋耕和免耕处理的平均土壤含水量分别为 175.6、171.4、186.3 和 180.5 g/kg。免耕与旋耕处理的保水性仍然高于深松与传统翻耕处理。

### 2.3 耕作方式对麦-玉轮作农田作物产量的影响

2.3.1 冬小麦-夏玉米产量及其构成要素 2015 年与 2016 年冬小麦-夏玉米的产量及构成要素如表 1 所示。由表中数据可知, 4 种耕作处理以深松产量最高, 免耕最低。对冬小麦来说, 2015 年有效穗数低于 2016 年, 穗粒数则高于 2016 年, 免耕处理的有效穗数、穗粒数均处于最低值; 深松处理小麦有效穗数、穗粒数和千粒重均处于最高值, 增产性能显

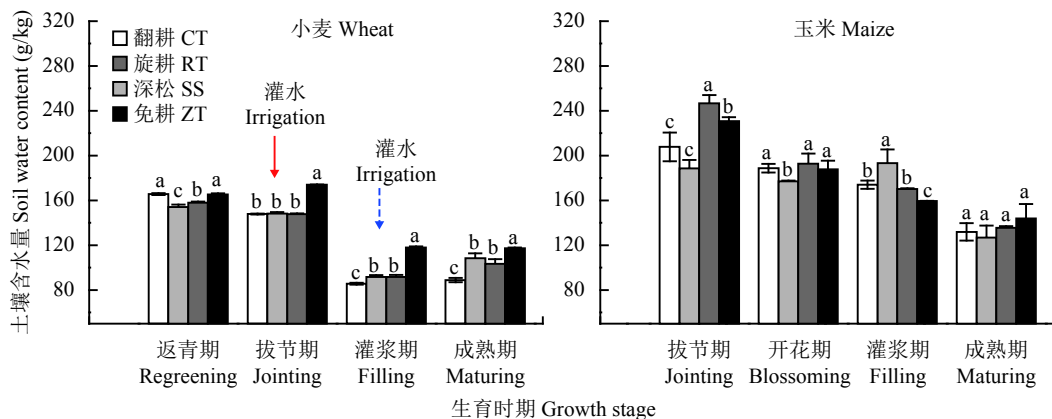


图 5 10—20 cm 土层含水量的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of water contents at 10–20 cm soil layer

[注 (Note): CT—翻耕 Conventional tillage; SS—深松 Subsoiling; RT—旋耕 Rotary tillage; ZT—免耕 Zero tillage; 小麦拔节期灌水在取样前进行, 灌浆期灌水在取样后进行 Jointing water of wheat irrigated before sampling, and filling water after sampling; 柱上不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Different small letters above the bars mean significant differences among the treatments at the 0.05 levels.]

表 1 耕作措施对冬小麦-夏玉米产量及其构成要素的影响

Table 1 Effects of tillage methods on annual yields of winter wheat-summer maize

作物 Crop	处理 Treatment	有效穗数 ( $\times 10^4$ 穗/hm <sup>2</sup> ) Productive ear No.		穗粒数 Grain number per ear		千粒重 (g) 1000-grain weight		产量 (t/hm <sup>2</sup> ) Yield	
		2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
		小麦 Wheat	翻耕 CT	625.7 ab	640.6 a	37.0 ab	36.8 ab	40.3 b	41.4 a
	深松 SS	650.7 a	652.9 a	39.3 a	38.9 a	43.7 a	43.1 a	8.2 a	8.5 a
	旋耕 RT	624.0 ab	638.8 a	37.2 ab	37.6 ab	39.9 b	42.1 a	7.7 b	7.6 b
	免耕 ZT	598.3 b	576.8 b	34.2 b	33.6 b	41.6 b	41.6 a	7.4 b	7.2 b
玉米 Maize	翻耕 CT	6.7 a	6.7 a	545.2 b	552.6 a	313.9 a	311.9 ab	10.1 b	10.2 a
	深松 SS	6.7 a	6.7 ab	565.4 a	564.7 a	325.6 a	328.3 a	11.2 a	10.8 a
	旋耕 RT	6.7 a	6.7 a	547.3 b	556.8 a	311.2 a	311.8 ab	10.1 b	10.1 a
	免耕 ZT	6.7 a	6.7 a	526.9 c	531.2 a	305.8 a	302.0 b	9.0 c	8.6 b

注 (Note): CT—翻耕 Conventional tillage; SS—深松 Subsoiling; RT—旋耕 Rotary tillage; ZT—免耕 Zero tillage; 同列数据后不同小写字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

著高于传统翻耕、旋耕和免耕处理。同样,两年玉米产量构成要素差异不大,除有效穗数外,免耕处理穗粒数和千粒重依旧最低,深松增加了玉米的穗粒数和千粒重。与传统翻耕相比,2015年和2016年小麦季深松处理的增产率分别为6.5%和10.4%;旋耕处理产量在2015年与传统翻耕相等,2016年降低了1.3%;两年小麦季免耕处理分别比传统翻耕产量降低了3.9%和6.5%。玉米季两年深松较传统翻耕的增产率分别为10.9%和5.9%;2015年免耕较翻耕减产了10.9%,2016年旋耕与免耕的减产率分别为1.0%和15.7%。

2.3.2 等价产量 麦-玉轮作体系的等价产量由玉米籽粒产量与小麦等价玉米籽粒产量之和构成。由图6可以看出,2015年和2016年两年的数据均显示深松处理的等价产量最高,均为22.6 t/hm<sup>2</sup>;免耕最低,分别为19.2 t/hm<sup>2</sup>和18.7 t/hm<sup>2</sup>;旋耕与翻耕之间等价产量没有显著性差异。2015年传统翻耕、旋耕、免耕的等价产量分别比深松耕作低了7.9%、7.9%和15.1%;2016年分别降低了7.5%、8.7%和17.6%。

## 2.4 耕作方式对麦-玉轮作农田0—20 cm土层碳、水储量的影响

小麦播前、收获后和玉米收获期0—20 cm土层的碳、水储量如表2所示。由表中数据可知,小麦和玉米收获期的土壤碳储量均高于小麦播前,且小麦收获期碳储量大于玉米收获期。0—10 cm土层的碳储量大于10—20 cm土层,深松、免耕能有效促进有机碳固存,旋耕不利于土壤碳储量的增加。对于土壤水储量,由表2可知,玉米收获期水储量大

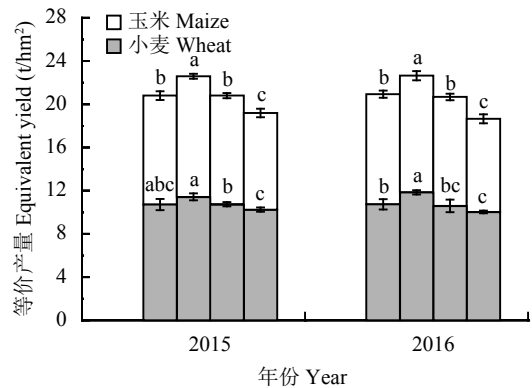


图 6 耕作方式对小麦-玉米等价产量的影响

Fig. 6 Effect of different tillage measures on equivalent yields of wheat-maize

[注 (Note): 2015 年和 2016 年两组柱形图自左向右代表相同的处理,分别是传统翻耕、深松、旋耕和免耕 In 2015 and 2016, the two groups of column graphs represent the same treatments from left to right, respectively, conventional tillage, subsoiling, rotary tillage and zero tillage.]

于小麦收获后,后者大于小麦播前。0—20 cm 土层免耕、深松较传统翻耕能有效提高耕层土壤的储水性能;旋耕处理的水储量均高于传统翻耕,除玉米季0—10 cm 土层外,二者没有显著性 ( $P < 0.05$ ) 差异。

## 2.5 麦-玉轮作农田耕层土壤有机碳、含水量和作物产量之间的相关性分析

麦-玉轮作农田耕层土壤有机碳、含水量和小麦、玉米产量之间的相关分析结果如表3所示。由表中可知,在小麦、玉米两季作物中,同一指标不同土层之间的含量均具有极显著 ( $P < 0.01$ ) 相关关

表 2 不同耕作方式下农田 0—10 cm、10—20 cm 土层碳、水储量  
Table 2 Carbon and water storage at 0—10 cm and 10—20 cm depth soil under different tillage treatments

时期 Stage	处理 Treatment	碳储量 Carbon storage (Mg/hm <sup>2</sup> )		水储量 Water storage (mm)	
		0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
小麦播前 Before wheat sowing	翻耕 CT	11.8 b	8.5 a	11.3 b	12.4 b
	深松 SS	15.4 a	7.1 b	12.3 a	14.5 a
	旋耕 RT	7.2 c	4.5 c	11.4 b	12.5 b
	免耕 ZT	16.4 a	8.7 a	13.1 a	15.4 a
小麦收获后 After wheat harvest	翻耕 CT	17.3 c	16.5 c	8.5 b	11.8 c
	深松 SS	23.8 a	18.8 b	13.8 a	15.3 ab
	旋耕 RT	18.3 c	14.0 d	12.5 a	13.5 bc
	免耕 ZT	20.2 b	20.8 a	14.6 a	17.4 a
玉米收获后 After maize harvest	翻耕 CT	16.9 c	17.0 a	18.1 d	17.5 b
	深松 SS	22.0 a	16.7 a	21.1 c	17.9 ab
	旋耕 RT	16.7 c	10.4 c	22.1 b	17.7 ab
	免耕 ZT	19.9 b	14.4 b	23.6 a	21.4 a

注 (Note): CT—翻耕 Conventional tillage; SS—深松 Subsoiling; RT—旋耕 Rotary tillage; ZT—免耕 Zero tillage; 同列数据后不同小写字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level.

表 3 土壤有机碳、含水量和麦-玉米产量之间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil organic carbon, water content and wheat-maize yield under different tillage measures

项目 Item	SOC <sub>W1</sub>	SOC <sub>W2</sub>	SOC <sub>M1</sub>	SOC <sub>M2</sub>	SWC <sub>W1</sub>	SWC <sub>W2</sub>	SWC <sub>M1</sub>	SWC <sub>M2</sub>	Y <sub>W</sub>	Y <sub>M</sub>
SOC <sub>W1</sub>	1									
SOC <sub>W2</sub>	0.654**	1								
SOC <sub>M1</sub>	0.187	-0.136	1							
SOC <sub>M2</sub>	-0.176	0.018	0.508**	1						
SWC <sub>W1</sub>	0.386*	0.297	-0.217	-0.358*	1					
SWC <sub>W2</sub>	0.430*	0.356*	-0.485**	-0.634**	0.842**	1				
SWC <sub>M1</sub>	-0.458**	-0.476**	0.513**	0.425*	-0.489	-0.684**	1			
SWC <sub>M2</sub>	-0.539**	-0.368*	0.348	0.472**	-0.352*	-0.634**	0.884**	1		
Y <sub>W</sub>	0.415*	0.053	0.319	-0.003	0.084	-0.026	0.115	-0.020	1	
Y <sub>M</sub>	0.241	0.323	-0.018	0.411*	-0.027	-0.101	-0.144	-0.087	0.550**	1

注 (Note): SOC—土壤有机碳; W1、W2、M1、M2 分别表示麦田和玉米田 0—10 cm、10—20 cm 土层; SWC—土壤含水量; Y<sub>W</sub>—冬小麦产量; Y<sub>M</sub>—夏玉米产量; \*, \*\* 分别表示在 0.05 水平 (双侧)、0.01 水平 (双侧) 上显著相关 SOC—Soil organic carbon; W1, W2, M1 and M2 — 0—10 cm, 10—20 cm soil layers in wheat field and maize field; SWC—Soil water content; Y<sub>W</sub>—Yield of winter wheat; Y<sub>M</sub>—Yield of summer maize; \*, \*\* indicate significant correlation at the 0.05 level (bilateral) and 0.01 level (bilateral).

系, 即 0—10 cm 土层有机碳与 10—20 cm 有机碳含量、0—10 cm 土层含水量与 10—20 cm 土层含水量分别呈现极显著 ( $P < 0.01$ ) 相关关系, 表明不同耕作方式对不同土层碳水含量的影响表现一致。小麦季 0—10 cm 土层有机碳与 0—10 cm、10—20 cm 土层

含水量具有显著 ( $P < 0.05$ ) 的正相关关系, 10—20 cm 土层有机碳仅与 10—20 cm 土层含水量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 在玉米季土壤有机碳和含水量的相关性也达显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 水平, 表明土壤有机碳含量增加能增强土壤保水性能。小麦

季0—10 cm 土层有机碳与小麦产量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 玉米季 10—20 cm 土层有机碳与玉米产量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 可能是玉米季降雨较多, 不同土壤水分条件下土壤有机碳对作物的调控程度不同所致。

### 3 讨论

#### 3.1 耕作方式对麦-玉周年轮作农田土壤耕层(0—20 cm) 有机碳含量的影响

不同耕作方式对麦-玉轮作农田耕层土壤有机碳含量的影响不同。本试验结果表明, 保护性耕作能促进土壤有机碳积累, 这对耕后第一季作物农田的增碳效果更明显, 也可能是玉米季高温多雨、土壤有机碳矿化率高、降低碳储量所致。深松能促进耕层土壤有机碳积累, 尤其对表层土壤有机碳含量有显著 ( $P < 0.05$ ) 的增加作用。因为深松打破了土壤犁底层, 疏水通气, 减少了土壤对根系的机械阻力, 扩大了根系生长空间, 有利于促进作物根系生长和代谢, 因而起到很好的增碳效果<sup>[7]</sup>。但耕层不同层次, 免耕和旋耕的固碳作用呈现明显的差异性。0—10 cm 土层, 免耕处理没有翻动土壤, 地表覆盖度增加, 裸露面积减少, 降低了土壤通透性和有机碳的矿化率, 土壤有机碳在表层逐渐积累<sup>[18]</sup>, 这也与 Kushwa 等<sup>[19]</sup>研究结果一致。相反, 传统翻耕破坏了土壤结构, 增大了秸秆残茬与土壤的接触面积, 增加有机碳暴露和加速分解, 造成土壤有机碳储量降低<sup>[19-21]</sup>。旋耕处理 0—10 cm 土层有机碳含量呈现多变性, 表现为小麦返青期显著 ( $P < 0.05$ ) 低于翻耕, 玉米拔节和开花期显著 ( $P < 0.05$ ) 高于翻耕。翻耕与旋耕对表层土的扰动均较大, 翻耕使秸秆翻埋, 加速有机碳转化合成, 但也增大了有机碳矿化速率, 使农田  $\text{CO}_2$  排放增加<sup>[21]</sup>, 降低了有机碳的固存。对于 10—20 cm 土层, 由于土壤紧实度增加, 秸秆和植株残体减少, 不利于有机碳合成, 有机碳含量低于 0—10 cm 土层<sup>[21]</sup>。受耕作深度限制, 旋耕、免耕作业的深层土壤没有受到扰动和植物残体输入, 因而对亚表层的增碳效果不明显<sup>[8]</sup>, 有机碳含量降幅明显低于对照。不同生育时期, 小麦季土壤有机碳含量最高值集中在返青期, 玉米季则集中在开花期, 可能是因为返青前小麦生长基本处于停滞状态, 土壤动物和微生物代谢强度较弱, 有机碳氧化分解速率低, 有机碳逐渐积累; 返青后气温升高, 小麦生长加快, 加速了有机碳的矿化损失, 表现为含量降低。夏玉米拔节期降雨偏多, 土壤含水

量过高, 抑制了根系生长和土壤动物、微生物代谢减弱, 有机碳合成速率受到一定程度抑制; 开花期土壤水分降低, 土壤生物代谢增强, 有机碳含量增加。

#### 3.2 耕作方式对麦-玉周年轮作农田(0—20 cm) 土壤含水量的影响

土壤耕作是调节土壤水分最重要的农艺措施之一, 耕层土壤水分对作物的生长发育具有重要的调节作用<sup>[22]</sup>。与传统耕作相比, 保护性耕作能降低地表径流, 减少土壤损失, 增加土壤贮水量, 并提高水分利用效率<sup>[23]</sup>。本试验结果表明, 从小麦返青期至玉米收获期, 免耕处理 0—20 cm 土层含水量整体高于传统翻耕, 这在麦田土壤表现得更为明显。多年机械耕作使农田形成了坚实的犁底层, 同时耕层土壤过于疏松, 降低了土壤墒情和水分抗蒸发能力, 从而降低了土壤蓄水能力; 相反, 免耕减少了对土壤的扰动, 免耕加秸秆覆盖抑制了土壤水分蒸发, 减轻了表土板结程度, 形成适宜的土壤三相, 因而保墒作用明显<sup>[24-25]</sup>。也有研究表明, 免耕只有在覆盖下, 才能真正起到增加土壤水分含量、提高水分利用效率的作用<sup>[26]</sup>。此外, 分析本试验点的气象数据可知, 小麦季降雨量远低于玉米季, 而麦田免耕处理的平均含水量高于其他三种处理, 这一现象比玉米季更为突出。这是因为小麦生长期降雨偏少, 当土壤干旱发生时, 免耕处理具有较高的土壤含水量, 土壤湿度较大时, 各耕作制度的土壤含水量差异不显著<sup>[27]</sup>; Verhulst 等<sup>[28]</sup>认为免耕加秸秆还田聚集了最高含量的土壤水分, 使干旱期土壤剖面蓄水在 50 mm 以上, 延长了作物生长对短期干旱缺水的缓冲期, 这可能是上述现象发生的原因所在。深松处理对麦田耕层的保水性优于旋耕和翻耕; 而在玉米季, 深松则不利于耕层水分保持, 可能是深松后土壤虚实相间、疏水保水性能提高、水分渗透较快所致。赵亚丽等<sup>[29]</sup>研究认为, 深松加秸秆还田有助于土壤水分下渗和根系下扎, 增大了作物生长期间农田耗水量, 使光合性能改善, 农作物水分吸收利用高, 深层土壤蓄水量增加, 因而耕层土壤含水量降低。玉米季旋耕处理土壤的平均含水量较高, 有利于提高土壤对玉米生育后期的供水能力。与传统翻耕相比, 少免耕特别是旋耕秸秆还田方式具有最佳的蓄水保墒作用<sup>[30]</sup>。本试验得出, 玉米各生育期 10—20 cm 土层含水量低于 0—10 cm 土层, 此与刘爽等<sup>[31]</sup>研究结果类似。各时期土壤含水量的大小易受作物生长情况、降雨、灌水和取样时间等的影响。小麦季拔节期土壤含水量最高, 原因是拔节水浇于



取样前, 而灌浆期则浇于取样之后, 至成熟期降雨增加含水量又略有升高; 玉米生长期七八月份降雨增多, 过后减少, 表现为拔节期土壤含水量最高, 而后逐渐降低。综上可知, 虽然土壤含水量受降雨、灌溉及取样时间影响严重, 但综合来看免耕、旋耕、深松的保水性能优于翻耕, 这在干旱季节表现得更为明显。

### 3.3 耕作方式对麦-玉轮作农田周年产量的影响

作物高产是农业生产最主要的目的, 实行保护性耕作必然要考虑其对产量的影响。本试验表明, 深松增加了作物有效穗数、穗粒数和千粒重, 从而增加了小麦和玉米籽粒产量。原因在于深松对土壤的松动有利于水分入渗和根系生长发育, 同时犁距间的相对紧实则降低了水分的扩散损失, 增强保水性能, 促进作物吸收深层土壤水分, 提高水分利用效率, 从而增加产量<sup>[7]</sup>。虽然免耕能降低土壤有机碳矿化速率, 培肥地力, 但仅限于土壤表层, 免耕处理田块土壤通气性往往较差, 不利于作物根系下扎与伸展, 从而导致作物减产。但在西北干旱地区, 免耕较传统翻耕增加了红小豆和糜子的产量<sup>[8]</sup>。耕作方式对黄土高原不同区域的研究同样具有不同的适应性, 表现为在中部和北部往往更有利于春玉米产量和水分利用效率的提高<sup>[32]</sup>。本文之所以与黄土高原的产量表现不同, 原因既有高原与平原土质的差异, 也表现在二者在年均气温和降雨量上的不同, 以及耕作制度的不同。旋耕处理小麦和玉米产量低于翻耕, 但二者之间没有显著性 ( $P < 0.05$ ) 差异。郑成岩等<sup>[33]</sup>研究认为, 旋耕的花后干物质积累和籽粒干物质分配比例低于传统翻耕, 最终的小麦籽粒产量也低。但成臣等<sup>[34]</sup>通过研究耕作方式对双季稻产量和土壤肥力质量的影响, 表明长期旋耕能提高土壤肥力质量和水稻产量。相同耕作方式对不同作物产量的影响也表现出差异。

前人关于等价产量的研究多集中于探究不同处理下粮食作物与豆科作物最佳的间、套、轮作搭配模式<sup>[15-16]</sup>。本试验结果表明, 与传统翻耕相比, 深松显著 ( $P < 0.05$ ) 增加了麦-玉周年等价产量, 免耕则显著 ( $P < 0.05$ ) 降低了该产量, 在保护性耕作体系中深松具有比免耕更好的增产效果。同时, 和当下大面积推广的旋耕作业相比, 深松同样具有显著 ( $P < 0.05$ ) 的增产效果, 进一步证明了深松作业的增产优势。然而鉴于深松作业的难度与高消耗特点, 建议实行年际间间隔深松来获得更高的经济效益。

## 4 结论

1) 麦-玉轮作农田耕层有机碳含量受耕作方式影响, 与传统翻耕相比, 深松、免耕能显著 ( $P < 0.05$ ) 增加表层 (0—10 cm) 土壤有机碳含量和碳储量, 免耕、旋耕降低了亚表层 (10—20 cm) 土壤有机碳含量。

2) 秸秆还田条件下, 免耕、旋耕降低了对土壤的扰动, 同时表层秸秆残茬减缓了土壤水分的蒸散, 深松打破犁底层, 疏松土层, 蓄水提墒, 三种耕作处理的保水性均高于传统翻耕。

3) 深松能增加作物的有效穗数、穗粒数和千粒重, 从而显著增加周年产量; 免耕能增加表土层碳水积累, 但不利于作物增产。

4) 深松是土壤增碳、保水和作物增产的有效耕作方式。

### 参 考 文 献:

- [1] 尹宝重, 甄文超, 马燕会. 深松一体化播种对夏玉米农田土壤水热特征及微生物动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 285-293.  
Yin B Z, Zhen W C, Ma Y H. Effects of subsoiling-seeding on soil water, temperature and microbial characteristics of summer maize field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 285-293.
- [2] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 15年保护性耕作对黄土坡耕地区土壤及团聚体固碳效应的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4690-4697.  
Li J, Wu H J, Wu X P, et al. Effects of 15-year conservation tillage on soil and aggregate organic carbon sequestration in the loess hilly region of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4690-4697.
- [3] Shao Y H, Xie Y X, Wang C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 81: 37-45.
- [4] 陈强, Kravchenko Y S, 陈渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 11-21.  
Chen Q, Kravchenko Y S, Chen Y, et al. Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 11-21.
- [5] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 不同耕作措施对土壤水分和青贮夏玉米水分生产率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 91-98.  
Li Y, Liu H J, Huang G H. Effects of different tillage methods on soil water content and water productivity of silage summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 91-98.
- [6] 赵小蓉, 赵燮京, 陈先藻. 保护性耕作对土壤水分和小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 1): 6-10.  
Zhao X R, Zhao X J, Chen X Z. Effects of conservation tillage on soil moisture and wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(Suppl. 1): 6-10.

- [7] 姬强, 孙汉印, Taraqqi A K, 等. 不同耕作措施对冬小麦-夏玉米复种连作系统土壤有机碳和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1029-1035.  
Ji Q, Sun H Y, Taraqqi A K, *et al.* Impact of different tillage practices on soil organic carbon and water use efficiency under continuous wheat-maize binary cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1029-1035.
- [8] 姚爱华, 冯佰利, 柴岩, 等. 不同耕作方式对小杂粮产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 97-101.  
Yao A H, Feng B L, Chai Y, *et al.* Effect of different tillage techniques on yield and water use efficiency in minor grain crop[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 97-101.
- [9] 张丽华, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱塬保护性耕作对冬小麦-春玉米轮作田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1750-1758.  
Zhang L H, Li J, Jia Z K, *et al.* Effects of conservation tillage on soil water conservation and crop yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei highland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1750-1758.
- [10] 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.  
Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, *et al.* Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(17): 3359-3371.
- [11] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 945-950.  
Liang J F, Qi Q Z, Jia X H, *et al.* Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 945-950.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 30-34.  
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 30-34.
- [13] Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, *et al.* Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 163: 207-213.
- [14] 高安. 沙地秸秆覆盖蓄水保墒试验研究[J]. 中国沙漠, 1995, 15(3): 261-265.  
Gao A. Experimental study on water conservation with stalk mulch on sandy land[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(3): 261-265.
- [15] Pradhan A, Chan C, Roul P K, *et al.* Potential of conservation agriculture (CA) for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach[J]. Agricultural Systems, 2018, 163: 27-35.
- [16] 胡志桥, 田霄鸿, 张久东, 等. 石羊河流域节水高产高效轮作模式研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 561-567.  
Hu Z Q, Tian X H, Zhang J D, *et al.* High efficiency production and water-saving crop rotation systems in Shi-yang River Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 561-567.
- [17] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K. Soil organic carbon pools and productivity in relation to nutrient management in a 20-year-old rice-berseem agroecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44(3): 451-461.
- [18] 陈学文, 王农, 时秀焕, 等. 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2676-2683.  
Chen X W, Wang N, Shi X H, *et al.* Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2676-2683.
- [19] Kushwa V, Hati K M, Sinha N K, *et al.* Long-term conservation tillage effect on soil organic carbon and available phosphorous content in vertisols of central India[J]. Agriculture Research, 2016, 5(4): 353-361.
- [20] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 101-106.  
Yang X M, Zhang X P, Fang H J. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1): 101-106.
- [21] 薛建福, 赵鑫, Shadrack B D, 等. 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6006-6013.  
Xue J F, Zhao X, Shadrack B D, *et al.* Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6006-6013.
- [22] 于同艳, 张兴义. 耕作措施对黑土农田耕层水分的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(3): 121-124.  
Yu T Y, Zhang X Y. Effects of different soil tillage systems on soil water in the black farmland[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2007, 29(3): 121-124.
- [23] 王长生, 王遵义, 苏成贵, 等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 167-169.  
Wang C S, Wang Z Y, Su C G, *et al.* Development and application of protective farming technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 167-169.
- [24] 吴崇友, 金诚谦, 魏佩敏, 等. 保护性耕作的本质与发展前景[J]. 中国农机化, 2003, (6): 8-11.  
Wu C Y, Jin C Q, Wei P M, *et al.* Innate characters and development foreground of conservation tillage[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2003, (6): 8-11.
- [25] 王幸, 王宗标, 齐玉军, 等. 保护性耕作研究与应用进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 3-7.  
Wang X, Wang Z B, Qi Y J, *et al.* Advances in research and application of conservation tillage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(5): 3-7.
- [26] 马月存, 秦红灵, 高旺盛, 等. 农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2523-2530.  
Ma Y C, Qin H L, Gao W S, *et al.* Dynamics of soil water content under different tillage in agriculture-pasture transition zone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2523-2530.
- [27] Singh B, Chanasyk D S, McGill W B. Soil water regime under barley with long-term tillage-residue systems[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 45(1): 59-74.
- [28] Verhulst N, Nelissen V, Jespers N, *et al.* Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid high lands[J]. Plant & Soil, 2011, 344(1-2): 73-85.
- [29] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米

- 米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1797-1807.
- Zhao Y L, Guo H B, Xue Z W, *et al.* Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1797-1807.
- [30] 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 等. 少免耕对灌溉农田冬小麦夏玉米作物水肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20-24.
- Jiang X D, Li Z J, Hou L T, *et al.* Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil  $\text{NO}_3^-$ -N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 20-24.
- [31] 刘爽, 张兴义. 不同耕作方式对黑土农田土壤水分及利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 126-131.
- Liu S, Zhang X Y. Effects of tillage management on soil water dynamics, yield and water use efficiency in arable black soil cropping system in Northeast China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 126-131.
- [32] 魏欢欢, 王仕稳, 杨文稼, 等. 免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用效率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(3): 461-473.
- Wei H H, Wang S W, Yang W J, *et al.* Meta analysis on impact of no-tillage and subsoiling tillage on spring maize and winter wheat yield and water use efficiency on the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3): 461-473.
- [33] 郑成岩, 崔世明, 王东, 等. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1432-1440.
- Zheng C Y, Cui S M, Wang D, *et al.* Effects of soil tillage practice on dry matter production and water use efficiency in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1432-1440.
- [34] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 247-257.
- Cheng C, Wang J J, Cheng H H, *et al.* Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 247-257.