

有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及作物生产力的影响

李娟^{1,2,3,4}, 葛磊^{1,2,3,4}, 曹婷婷^{1,2,3,4}, 徐艳^{1,2,3,4}

(1. 陕西省地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075; 2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 3. 国土资源部退化及未利用土地整治重点实验室, 西安 710075; 4. 陕西省土地整治工程技术研究中心, 西安 710075)

摘要: 为了探索旱地农业连作春玉米田不同保护性耕作措施下土壤蓄水保墒效果与不同施肥处理组合下春玉米的增产增收效应, 在2014—2016年通过大田试验, 研究了旱地农田冬闲期免耕、深松和翻耕3种耕作方式对玉米田冬闲期蓄水保墒效果及玉米生育期3种耕作处理与高、中、低有机肥料3种施肥处理组合对春玉米生育期土壤水分动态、产量和经济效益的影响。结果表明, 免耕和深松与翻耕相比, 蓄水效果较好; 2个试验年度冬闲期, 免耕和深松较翻耕分别高1.3、0.9个百分点。免耕、深松较翻耕处理0—200 cm土层2年土壤平均贮水量分别增加20.8、22.1 mm; 玉米生长生育期在高有机肥料条件下, 免耕、深松较翻耕处理0—200 cm土层土壤平均贮水量分别高44.2、34.6 mm; 以高有机肥料深松处理产量、WUE和纯收益最高。2年平均产量、WUE和纯收益分别为9 332.40 kg/hm², 22.01 kg/(hm²·mm)和5 104.1元/hm², 高有机肥料免耕处理次之, 较高有机肥料免耕处理增产和增收分别为7.4%和3.9%。综合考虑各处理土壤蓄水保墒效果和玉米增产增收效应, 高有机肥料深松是旱区连作玉米田最优的耕作和施肥处理组合。

关键词: 旱区农业; 耕作方式; 土壤贮水量; 春玉米; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S147.3; S344; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0121-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.020

Effects of Organic Fertilization and Tillage on Soil Water Use Efficiency and Crop Yield in Dryland

LI Juan^{1,2,3,4}, GE Lei^{1,2,3,4}, CAO Tingting^{1,2,3,4}, XU Yan^{1,2,3,4}

(1. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075; 2. Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075; 3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources, Xi'an 710075; 4. Shaanxi Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an 710075)

Abstract: In order to explore the effects of different conservation tillage measures on soil water conservation, and the effects of different fertilization treatments on yield and income of spring maize in continuous cropping spring maize field of dryland, field experiments were conducted in 2014 to 2016. We studied the water conservation effects of three types of tillage methods (no-tillage, subsoiling and plowing) during winter leisure periods, and the effects of the combination of three kinds of tillage treatments and three fertilization treatments (high organic fertilizer, medium organic fertilizer and low organic fertilizer) on the soil water dynamics, yield and economic benefits of spring maize during maize growth period. The results showed that no-tillage and subsoiling were better in water conservation. In the winter leisure periods of the two experimental years, no-tillage and subsoiling were 1.3 and 0.9 percent points higher than that of ploughing. Compared with plowing treatment, the average soil water storage in 0—200 cm soil layer in two years was increased by 20.8 mm and 22.1 mm in no-tillage and subsoiling treatments, respectively. During the growth period of maize, under the condition of high organic fertilizer, the average soil water storage in the 0—200 cm soil layer of no-tillage and subsoiling treatment was 44.2 mm and 34.6 mm higher than that of plowing treatment. The yield, WUE and net yield of the high organic fertilizer and subsoiling treatment were the highest, and the average yield, WUE and net yield of two years were 9 332.40 kg/hm², 22.01 kg/(hm²·mm) and 5 104.1 yuan/hm², respectively, followed by high organic fertilizer and no-tillage treatment, the yield and

income of the high organic fertilizer and subsoiling treatment was increased by 7.4% and 3.9%, respectively, compared with the high organic fertilizer and no-tillage treatment. Considering comprehensively the effect of soil water conservation and the effect of increasing yield and income of maize, high organic fertilizer and subsoiling treatment was the best combination for continuous cropping maize field in arid area.

Keywords: arid agriculture; tillage methods; soil water storage; spring maize; yield; water use efficiency

陕西旱地农业区地处黄土高原南部台塬和残塬沟壑区,年降水量 420~700 mm,属暖温带半湿润易旱区,降水总量有限,年变率和季节变率大,地表水资源匮乏,为典型的旱作农业区^[1]。干旱胁迫和地力瘠薄是黄土高原地区农作物生产的主要限制因子^[2]。因此,采取适宜的农业技术措施减少农田非生产性水分消耗、提高水分生产效率、改善生态环境和提高作物产量已成为旱作农业研究的焦点。有研究^[3-5]表明,保护性耕作可以增加土壤含水量,起到蓄水保墒、改善土壤质地和增加产量的效果。刘立晶等^[6]、李立群等^[7]和方日尧等^[8]研究表明,保护性耕作可提高耕层土壤水分含量,促进作物生长发育,具有秋雨春用和增产增收的作用^[9-10],但缺乏将地力培肥即有机肥使用与保护性耕作措施相结合的试验研究。本试验将施肥措施的“以肥调水”效应和保护性耕作的“蓄水保墒”效应相结合,分析 2 种措施结合下的耦合效应,进一步探究 2 种措施结合下连作玉米田土壤水分动态变化和产量效应,分析各种不同耕作处理下的蓄水保墒效果和增

产增收效应,评价和筛选适应当地降水资源状况与玉米种植制度的保护性耕作模式,为旱地农业连作玉米田水分持续高效利用和增产增收提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设于富平中试基地,位于陕西省渭南市富平县杜村镇褚塬村。该区属暖温带半湿润气候区,年均降水量 472.97 mm,7—9 月降水量占全年降水量的 49%,年蒸发量 1 000~1 300 mm,无霜期 225 d,年平均气温 13.4 °C,夏季最高气温 41.8 °C,冬季最低气温 -22~-10 °C,年光能辐射总量 123.9~127.8 kcal/cm²,气候条件能够满足作物生长需要。试验地蓄水保肥能力强,耕层土壤 pH 8.2,有机质含量 10.66 g/kg,全氮含量 0.70 g/kg,速效磷含量 12.1 mg/kg,速效钾含量 110.6 mg/kg。试验后 0—20 cm 土层免耕、深松和翻耕的土壤容重分别为 1.36,1.33,1.29 g/cm³。试验地 2014—2016 年逐月降水量见图 1。

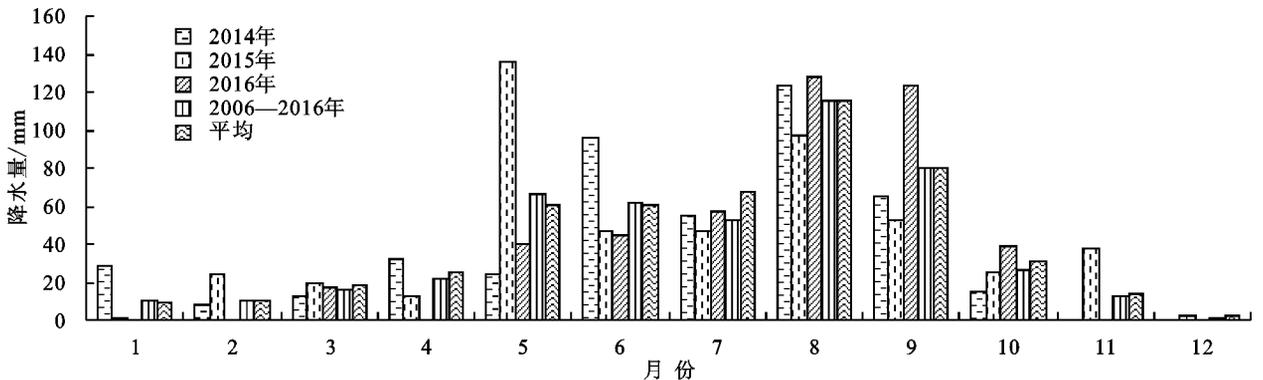


图 1 富平中试基地 2014—2016 年逐月降水量

1.2 试验设计

本试验于 2014 年 9 月至 2016 年 9 月实施,采用春玉米一年一熟制,在常规全额秸秆还田条件下实施春玉米连作冬闲期耕作试验。共设置免耕、深松和翻耕 3 种不同的耕作方式,小区面积 49 m² (7 m×7 m),耕作处理并施肥后共 9 个小区,总占地面积 450 m²。供试春玉米品种为“郑单 59”。玉米的播种期为 2015 年 4 月 23 日和 2016 年 4 月 19 日,收获期为 2015 年 9 月 22 日和 2016 年 9 月 19 日。试验期间无灌溉处理。

(1) 肥力处理:根据陕西省农业厅对旱作玉米田推荐方案,本试验基础施肥水平为 N 150 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 90 kg/hm²,其中氮肥为尿素,磷肥为磷酸二铵,钾肥为氯化钾。有机肥施用设

置 3 个水平,分别为高有机肥 22 500 kg/hm²、中有机肥 11 250 kg/hm² 和低有机肥 5 250 kg/hm²。有机肥为牛粪(含有机质 30.5 g/kg,全氮 3.45 g/kg,全磷 0.18 g/kg,全钾 1.56 g/kg)。在春玉米播种时,按施肥处理划区撒施肥料,通过旋耕切碎残茬、平整地表和混合肥料,采用人工播种。

(2) 耕作处理:在前茬玉米收获时进行秸秆粉碎全额还田后立即实施 3 种土壤耕作处理。①翻耕,前茬玉米收获后翻耕 22~25 cm,将秸秆残茬全部翻埋于耕层土壤中,地表疏松裸露度过冬闲期。②深松,前茬玉米收获时秸秆高留茬 20~30 cm 覆盖地表,每间隔 40~60 cm 宽度留茬深松 35~40 cm。③免耕,前茬玉米收获后不采取任何土壤耕作措施,使秸秆高

留茬 20~30 cm 覆盖地表。

1.3 测定项目与方法

(1) 土壤水分测定: 试验年度在春玉米冬闲期、播种期 (seeding)、拔节期 (elongation)、大喇叭口期 (mid-growth)、抽雄期 (tasseling)、灌浆期 (grain-filling) 和收获期 (harvesting) 采用土钻烘干法测定 0—200 cm 土壤湿度, 每层 20 cm 取土, 计算土壤贮水量和水分利用效率。

(2) 土壤贮水量^[11]计算: $W = W_i \times D_i \times H_i \times 10 / 100^{[12]}$
式中: W 为土壤贮水量 (mm); W_i 为第 i 层土壤质量含水率 (%); D_i 为第 i 层土壤体积质量 (g/cm^3); H_i 为第 i 层土层厚度 (cm), 其中 2 m 以上体积质量按实测值计算, 根据陕西土壤普查资料 2 m 以下均按 $1.3 g/cm^3$ 计算^[12]。

(3) 生育期耗水量 ET (mm): $ET = P + (W_e - W_b)$
式中: P 为作物生育期有效降水量 (mm); W_e 和 W_b 分别为播前和收获时的土壤贮水量 (mm)。

(4) 水分利用效率 (WUE) 的计算: 水分利用效率 (WUE) 指蒸散的每单位 (mm) 水分在单位面积上所生产的经济产量^[13]。

$$WUE = Y / ET$$

式中: Y 为经济产量 (kg/hm^2)。试验地为旱地, 无灌溉。

(5) 经济效益计算: 净收入 ($元/hm^2$) = 产量收入 - 总投入; 产量收入 ($元/hm^2$) = 籽粒产量 \times 市场价格。其中总成本投入包括播种、耕作处理的机械费用及其农药、化肥、种子费用和人工投入。

1.4 数据处理

试验采用 Excel 2003 软件对数据和图表进行处理, 采用 DPS 3.01 数据处理软件对数据进行方差分析及 Duncan 新复极差法多重比较^[14]。

2 结果与分析

2.1 冬闲期不同耕作处理玉米田 0—200 cm 土层土壤蓄墒效果

在 2014—2015 年和 2015—2016 年, 于 9 月中旬和 10 月中旬、11 月中旬、4 月中旬分 3 次测定免耕、深松和翻耕 3 个处理冬闲前和冬闲期 0—200 cm 土层土壤湿度。2014 年冬闲期降水量 137.5 mm, 较多年平均值 188.9 mm 减少 51.4 mm, 2015 年冬闲期降水量 133.8 mm, 较多年平均值减少 55.1 mm。

从图 2 可以看出, 2014 年冬闲初 (9 月 22 日) 0—200 cm 土层土壤含水率为 11.4%~16.0%, 平均值为 13.1%; 冬闲末期 (4 月 15 日) 免耕、深松和翻耕处理下 0—200 cm 土层土壤含水率的平均值分别为 14.4%, 14.3% 和 13.7%。冬闲末土壤含水率较冬闲初均有所增加, 免耕和深松较翻耕分别增加 0.7、0.6 个百分点。

0—40 cm 属于土壤耕作层, 耕作措施对土壤含水率的影响明显。免耕、深松和翻耕处理 0—40 cm 土层土壤平均含水率分别为 14.3%, 13.6% 和 12.7%, 免耕处理稍高于深松和翻耕处理; 免耕、深松和翻耕处理 40—200 cm 土壤平均含水率分别为 14.4%, 14.5% 和 13.9%, 深松和免耕处理稍高于翻耕处理。3 种耕作处理下 0—200 cm 土层的剖面分布特征相似。

2015 年冬闲初 (9 月 19 日) 0—200 cm 土层土壤含水率为 10.7%~18.9%, 平均值为 13.3%。冬闲末期 (4 月 17 日) 免耕、深松和翻耕处理下 0—200 cm 土层土壤含水率的平均值分别为 15.3%, 14.7% 和 13.5%。冬闲末土壤含水率较冬闲初均有所增加, 免耕和深松较翻耕分别增加 1.8、1.2 个百分点。0—40 cm 属于土壤耕作层, 耕作措施对土壤含水率的影响明显。免耕、深松和翻耕处理 0—40 cm 土层土壤平均含水率分别为 18.8%, 16.2% 和 15.8%, 免耕处理稍高于深松和翻耕处理; 免耕、深松和翻耕处理 40—200 cm 土壤平均含水率分别为 15.1%, 14.4% 和 13.3%, 深松和免耕处理稍高于翻耕处理。3 种耕作处理下 0—200 cm 土层剖面分布特征相似。

2 年试验结果表明, 免耕、深松和翻耕处理下的 0—200 cm 土层土壤含水率的平均值分别为 14.9%, 14.5% 和 13.6%, 免耕和深松较翻耕高 1.3、0.9 个百分点, 具有较好的蓄水效果。

在冬闲期间于 10、11 月和翌年 4 月中旬分别测定 2014—2015 年和 2015—2016 年 2 个年度冬闲期 0—200 cm 土层土壤贮水量 (图 3)。2014—2015 年冬闲期末免耕、深松和翻耕处理 0—200 cm 土层土壤贮水量分别为 399.7、406.6、382.3 mm, 免耕和深松土壤贮水量较翻耕分别增加 17.4、24.3 mm; 2015—2016 年冬闲期末免耕、深松和翻耕处理 0—200 cm 土层土壤贮水量分别为 372.1、363.9、353.1 mm, 免耕和深松土壤贮水量较翻耕分别增加 19.0、10.8 mm。从 2 年平均来看, 免耕和深松土壤贮水量较翻耕分别增加 20.8、22.1 mm。2 年试验结果表明, 冬闲期降水量越少, 土壤蓄墒率越低。

2.2 春玉米生长期不同耕作处理玉米田土壤水分变化动态

在春玉米主要生育期测定了玉米田中高有机肥处理 0—200 cm 土层土壤贮水量 (图 4)。在 2015 年春玉米生育期内降水量为 386.0 mm, 从拔节期到灌浆期各耕作处理 0—200 cm 土层贮水量呈现趋势性递减。整个生育期内免耕、深松和翻耕处理的各不同生育期平均土壤贮水量分别为 403.0、398.5、360.7 mm, 免耕和深松较翻耕处理分别增加 42.3、37.8 mm, 生育期内免耕、深松和翻耕处理的麦田耗水量分别为 416.6、437.5、

436.3 mm,耗水量大小依次为深松>翻耕>免耕。在2016年玉米生长期,大喇叭口期之前0—200 cm土层土壤贮水量呈现趋势性递减,大喇叭口期之后,由于有168.3 mm的降水量,土壤贮水量呈现增加趋势,到达收获期时有所下降。整个生育期内免

耕、深松和翻耕处理的各不同生育期平均土壤贮水量分别为398.4,383.9,352.3 mm,免耕和深松较翻耕处理0—200 cm土壤贮水量高46.1,31.6 mm。三者的玉米田耗水量分别为425.3,412.3,406.7 mm,耗水量大小依次为免耕>深松>翻耕。

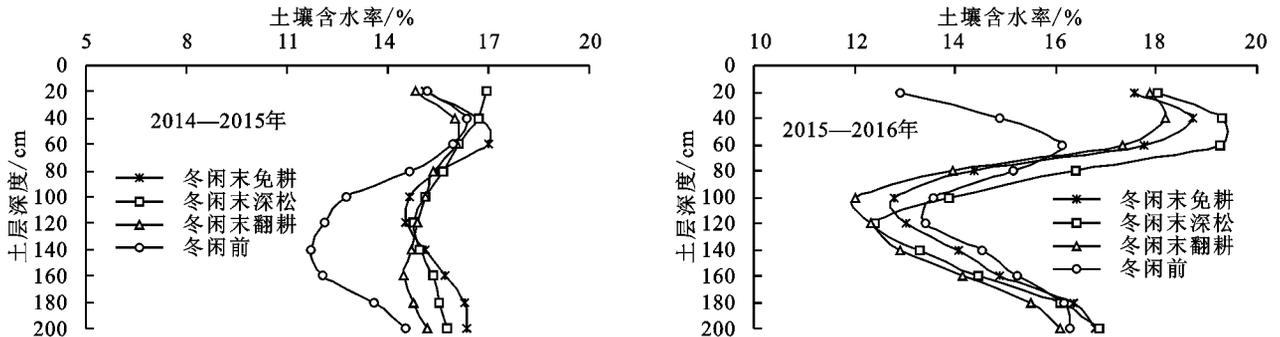
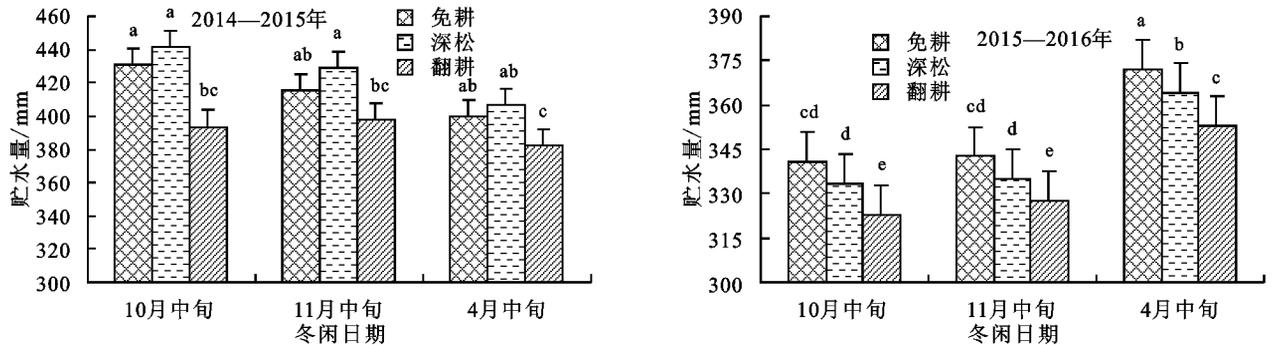


图2 2014—2016年冬闲始末0—200 cm土层不同耕作处理土壤湿度剖面分布



注:图中不同字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图3 2014—2016年冬闲期不同耕作处理玉米田0—200 cm土层土壤贮水量变化

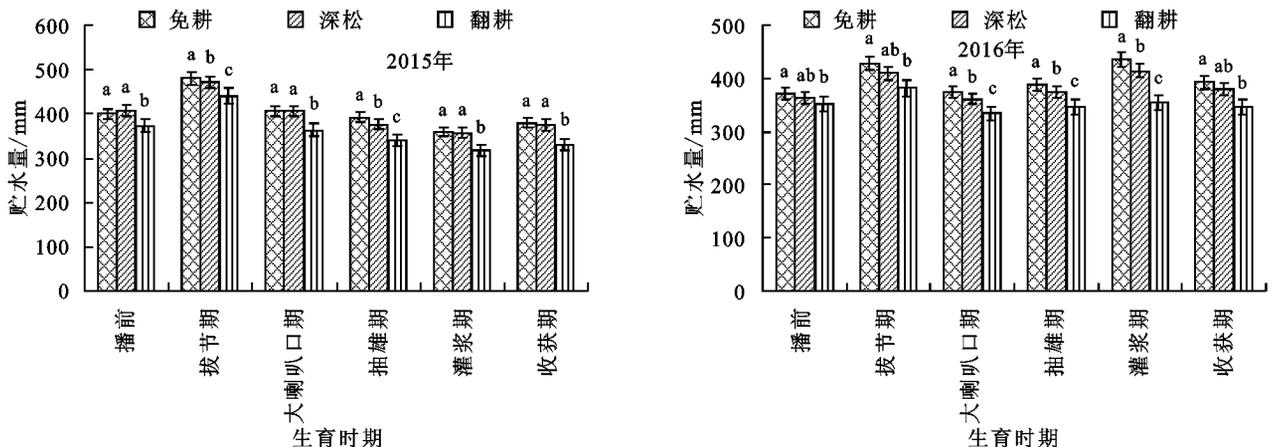


图4 高有机肥不同耕作处理春玉米生育期内0—200 cm土层土壤贮水量变化

2年试验结果表明,免耕、深松和翻耕处理下的0—200 cm的土壤平均贮水量分别为400.7,391.2,356.5 mm。免耕、深松较翻耕处理0—200 cm土壤平均贮水量高44.2,34.6 mm。由此可以得出,免耕和深松较翻耕有较好的蓄水保墒效果。

在大喇叭口期之前,由于春玉米营养生长消耗大量水分,导致土壤贮水量迅速下降,在大喇叭口期时3种不同耕作处理玉米田土壤含水率变化趋势相似。从图5可以看出,在2015年的玉米大喇叭口期,免耕、深松和翻耕处理下0—200 cm土层含水率变化范围分

别为9.3%~17.2%,10.7%~17.4%和9.5%~15.6%。3种耕作处理下0—200 cm土壤含水率的平均值分别为14.9%,15.2%和13.6%。免耕和深松较翻耕分别增加1.3,1.6个百分点。在2016年的玉米大喇叭口期,免耕、深松和翻耕处理下0—200 cm土层含水率变化范围分别为10.5%~14.7%,10.1%~15.2%和11.6%~15.8%。3种耕作处理下0—200 cm土壤含水率的平均值分别为14.5%,13.7%和12.9%,免耕和深松较翻耕分别增加1.6,0.8个百分点。2年试验结果显示,免耕和深松较翻耕的蓄水效果好。

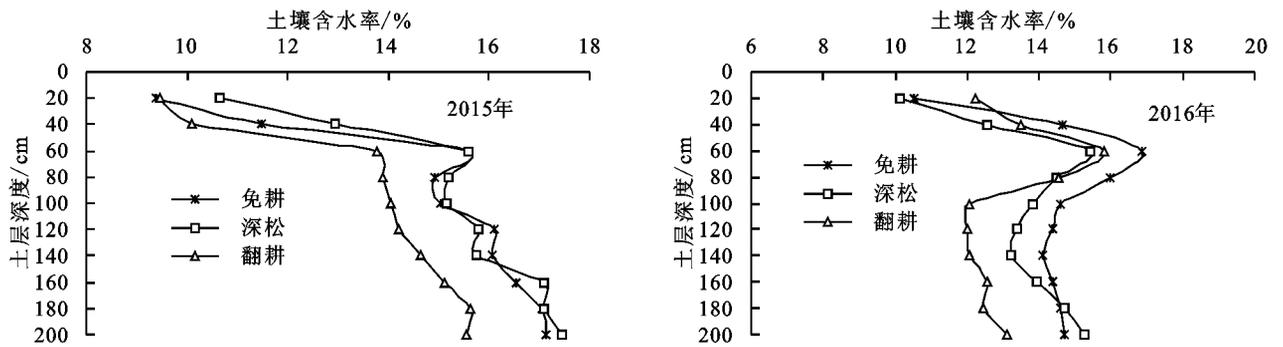


图 5 2015 年和 2016 年春玉米大喇叭口期不同耕作处理 0—200 cm 土层土壤含水率变化

2.3 不同施肥和耕作处理组合春玉米产量效应

从表 1 可以看出,在不同施肥处理下,各耕作处理春玉米产量和水分利用效率差异明显,不同年份均表现为深松产量和水分利用效率(WUE)最高,免耕次之,翻耕处理最差。2015 年免耕、深松和翻耕处理在 3 种施肥处理下玉米平均产量分别为 7 094.6, 7 855.7, 6 948.6 kg/hm²,免耕和深松较翻耕处理分别增产 2.1% 和 13.1%。免耕、深松和翻耕处理水分利用效率 WUE 平均值分别为 17.45, 18.79, 16.51 kg/(hm²·mm),免耕和深松分别较翻耕处理 WUE 提高 5.7% 和 13.8%。2016 年免耕、深松和翻耕处理在 3 种施肥处理下玉米平均产量分别为 8 094.7, 8 686.4, 7 681.7 kg/hm²,免耕和深松较翻耕处理分别增产 5.4% 和 13.1%。免耕、深松和翻耕处理水分利用效率 WUE 平均值分别为 19.96, 22.10, 19.25 kg/(hm²·mm),免耕和深松 WUE 分别较翻耕处理提高 3.7% 和 14.8%。

在各耕作处理下,不同施肥处理玉米产量和水分利用效率差异显著,均以高有机肥处理最高,中有机肥处理次之,低有机肥处理最低。2015 年高有机肥、中有机肥和低有机肥处理玉米产量平均值分别为

8 412.6, 7 388.2, 6 098.2 kg/hm²,高有机肥、中有机肥分别较低有机肥处理增产 38.0% 和 17.5%。高有机肥、中有机肥和无肥处理水分利用效率 WUE 平均值分别为 19.56, 18.27, 14.93 kg/(hm²·mm),高有机肥、中有机肥处理分别较低有机肥处理 WUE 提高 31.0% 和 22.4%。2016 年高有机肥、中有机肥和低有机肥处理玉米产量平均值分别为 9 123.1, 7 880.4, 7 459.3 kg/hm²,高有机肥、中有机肥分别较低有机肥处理增产 22.3% 和 5.6%。高有机肥、中有机肥和无肥处理水分利用效率 WUE 平均值分别为 22.00, 20.67, 18.63 kg/(hm²·mm),高有机肥、中有机肥处理分别较无肥处理 WUE 提高 18.1% 和 10.9%。

2 年试验结果显示,在 9 种施肥和耕作处理组合中,以高有机肥深松处理玉米产量和 WUE 最高,2 年平均产量和 WUE 分别为 9 332.40 kg/hm² 和 22.01 kg/(hm²·mm),其次为高有机肥免耕处理,2 年平均产量和 WUE 分别为 8 688.60 kg/hm² 和 20.63 kg/(hm²·mm),再次为高有机肥翻耕处理,2 年平均产量和 WUE 分别为 8 282.50 kg/hm² 和 19.69 kg/(hm²·mm)。因此高有机肥和深松是增产和提高水分利用效率的较佳组合。

表 1 2015 年和 2016 年不同耕作处理春玉米产量和水分利用效率

年份	处理	播前	收获期	生育期	生育期	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
		贮水量/mm	贮水量/mm	降水量/mm	耗水量/mm		
2015	高有机肥免耕	399.7	369.1	386.0	416.6	8236.7b	19.77ab
	高有机肥深松	406.6	355.2	386.0	437.5	8979.6a	20.53a
	高有机肥翻耕	373.7	323.4	386.0	436.3	8021.4b	18.38bc
	低有机肥免耕	399.7	374.3	386.0	411.4	5877.8e	14.29e
	低有机肥深松	406.6	384.7	386.0	407.9	6561.1d	16.09d
	低有机肥翻耕	373.7	353.0	386.0	406.7	5855.6e	14.40e
	中有机肥免耕	399.7	393.7	386.0	392.0	7169.3c	18.29c
	中有机肥深松	406.6	386.3	386.0	406.3	8026.4b	19.75ab
	中有机肥翻耕	373.7	343.8	386.0	415.9	6968.9cd	16.76d
2016	高有机肥免耕	436.5	401.9	390.7	425.3	9440.4ab	21.49ab
	高有机肥深松	413.3	391.7	390.7	412.3	9685.1a	23.49a
	高有机肥翻耕	377.3	361.3	390.7	406.7	7543.6d	21.01ab
	低有机肥免耕	447.9	433.2	390.7	405.5	7470.7cd	18.43bc
	低有机肥深松	412.6	411.8	390.7	391.5	7977.6e	20.38ab
	低有机肥翻耕	387.9	373.3	390.7	405.3	6929.7f	17.10d
	中有机肥免耕	434.2	440.4	390.7	384.5	7672.9de	19.96ab
	中有机肥深松	398.0	414.4	390.7	374.3	9096.5b	22.43a
	中有机肥翻耕	380.6	385.6	390.7	385.7	7571.7cd	19.63ab

注:表中同列数字后不同小写字母表示统计检验 5% 水平差异显著。播前和收获期贮水量均为 0—200 cm 土层土壤贮水量。

2.4 不同施肥和耕作处理经济效益分析

从表 2 可以看出,在 2015—2016 年各施肥处理下,免耕、深松和翻耕处理平均投入成本分别为 6 937.2,7 612.2,7 462.2 元/hm²,各耕作处理平均纯收益分别为 4 090.1,4 393.3,3 155.8 元/hm²,免耕和深松较翻耕处理分别增收 934.3,1 237.6 元/hm²,增收率分别为 29.6%和 39.2%;在各耕作处理下,高有机肥、中有机肥和低有机肥处理的平均投入成本分别为 8 163.4,6 932.1,6 916.1 元/hm²,各施

肥处理平均纯收益分别为 4 560.6,4 145.1,2 933.5 元/hm²,高有机肥和中有机肥较低有机肥处理分别增收 1 627.1,1 211.5 元/hm²,增收率分别为 55.4%和 41.3%。

2 年试验结果表明,在 9 种施肥和耕作处理组合中以高有机肥深松处理纯收益最高,平均达 5 104.1 元/hm²;其次为高有机肥免耕处理,纯收益平均达 4 914.3 元/hm²;再次为中有机肥深松处理,纯收益平均达 4 705.1 元/hm²。

表 2 2015—2016 年不同施肥和耕作处理春玉米生产成本和经济效益

单位:元/hm²

年份	处理	肥料投入	机械作业投入	其他投入	总投入	产量收入	纯收益
2015	高有机肥免耕	2494.7	1200.0	4068.8	7763.4	11696.1b	3932.7abc
	高有机肥深松	2494.7	1875.0	4068.8	8438.4	12751.1a	4312.7a
	高有机肥翻耕	2494.7	1725.0	4068.8	8288.4	11390.4b	3101.9bc
	低有机肥免耕	1247.3	1200.0	4068.8	6516.1	8346.4d	1830.4bc
	低有机肥深松	1247.3	1875.0	4068.8	7191.1	9316.8cd	2125.7abc
	低有机肥翻耕	1247.3	1725.0	4068.8	7041.1	8314.9d	1273.8c
	中有机肥免耕	1263.4	1200.0	4068.8	6532.1	10180.5bc	3648.3ab
	中有机肥深松	1263.4	1875.0	4068.8	7207.1	11397.5b	4190.4a
	中有机肥翻耕	1263.4	1725.0	4068.8	7057.1	9895.9c	2838.8bc
2016	高有机肥免耕	2494.7	1200.0	4068.8	7763.4	13527.8ab	5764.4ab
	高有机肥深松	2494.7	1875.0	4068.8	8438.4	14333.9a	5895.5a
	高有机肥翻耕	2494.7	1725.0	4068.8	8288.4	12644.5bc	4356.1abc
	低有机肥免耕	1247.3	1200.0	4068.8	6516.1	11056.6cd	4540.5bc
	低有机肥深松	1247.3	1875.0	4068.8	7191.1	11806.8c	4615.7ab
	低有机肥翻耕	1247.3	1725.0	4068.8	7041.1	10255.9d	3214.9d
	中有机肥免耕	1263.4	1200.0	4068.8	6532.1	11355.8cd	4823.8bc
	中有机肥深松	1263.4	1875.0	4068.8	7207.1	12426.8bc	5219.7abc
	中有机肥翻耕	1263.4	1725.0	4068.8	7057.1	11206.16d	4149.0cd

注:表中机械作业投入包括播种、秸秆还田和深松地或翻耕地投入,其他投入包括农药、种子和人工投入,其中,肥料二铵为 3.1 元/kg,尿素为 2 元/kg,钾肥为 5.2 元/kg,深松地 675 元/hm²,翻耕地 525 元/hm²,2015 年和 2016 年玉米价格分别为 1.42,1.48 元/kg;同列不同小写字母表示统计检验 5%水平差异显著。

3 讨论

不同耕作处理对休闲期土壤水分的时空分布性影响较大,主要由于年度和月份的降水量等因素引起的。免耕可有效提高土壤上层含水率和贮水量,深松则利于打破犁底层,全面促进降水的有效入渗和增加土壤深层含水率,优于传统的翻耕技术。针对旱作农田夏闲期采用不同保护性耕作措施,深层土壤蓄水量明显增加,且有效供给下季作物生长,蓄水效率显著增加;深松处理下土壤贮水量和含水率最高,翻耕次之;在渭北旱塬开展相关保护性耕作试验表明,免耕和深松整体较传统耕作可提高 0—300 cm 土层土壤贮水量,最大幅度为 24.5 mm,土壤空间含水率增加 38.9%。师江澜等^[15]和王顺霞等^[16]研究认为,保护性耕作技术能减少地表裸露,促进降水就地入渗,抑制土壤水分蒸发;江晓东等^[17]和籍增顺等^[18]研究表明,相对于常规耕作,保护性耕作能提高土壤上层含

水率,减少土壤水分的无效蒸发,增加土壤贮水量;郭清毅等^[11]研究发现,保护性耕作能显著改善 0—200 cm 土层土壤贮水量,随着降水量的增多土壤对降水的保蓄能力明显增强;李友军等^[3]指出,深松覆盖和免耕覆盖休闲期间土壤贮水量较传统耕作提高 8.79%~13.39%和 7.72%~8.05%,降水蓄墒率提高 13.72%和 11.28%。本试验结果表明,春玉米冬闲期内,免耕、深松较翻耕处理 0—200 cm 土层土壤 2 年平均贮水量分别增加 20.8,22.1 mm,免耕、深松较翻耕处理 0—200 cm 土层 2 年土壤平均含水率分别提高 1.3%和 0.9%。即保护性耕作技术可显著提高土壤贮水量,减少水分无效蒸发,具有蓄水保墒效果。

本试验着重探究各种不同耕作处理下的蓄水保墒效果和增产增收效应,探讨肥力与耕作处理的耦合效应,评价和筛选适应旱地农业当地降水资源状况和玉米种植制度的保护性耕作模式。2 年试验结果表

明,高有机肥和深松处理组合的玉米产量最高。这与许迪等^[19]的研究结果一致,即土壤深松能增强玉米根系活力和促进根系下扎,有利于吸收深层土壤养分和水分,有助于玉米生长和增产。此外,2年试验结果还表明,深松处理产量最高,深松平均比翻耕处理增产 13.1%,免耕平均只比翻耕增产 3.7%,这与李洪文等^[20]对玉米田保护性耕作研究结论不尽相同,即深松平均比传统耕作增产 13%,而免耕平均比传统耕作增产 23%,这可能与试验地地力水平和降水量高低不同有关。

4 结论

(1)不同的耕作方式冬闲期蓄水保墒效果不同。在 2014—2016 年 2 个试验年度冬闲期,免耕、深松较翻耕处理 0—200 cm 土层 2 年土壤平均贮水量增加 20.8,22.1 mm,在玉米生长生育期,免耕、深松较翻耕处理 0—200 cm 土层土壤平均贮水量提高 44.2,34.6 mm。2 年试验结果表明,免耕和深松耕作的蓄水保墒效果优于翻耕处理。

(2)高有机肥深松玉米产量和 WUE 最高,2 年平均产量和 WUE 分别为 9 332.4 kg/hm² 和 22.01 kg/(hm²·mm);其次为高有机肥免耕,2 年平均产量和 WUE 分别为 8 688.6 kg/hm² 和 20.63 kg/(hm²·mm);再次为高有机肥翻耕处理,2 年平均产量和 WUE 分别为 8 282.5 kg/hm² 和 19.69 kg/(hm²·mm)。在 9 种施肥和耕作处理组合中,以高有机肥深松的纯收益最高,2 年平均值为 5 104.1 元/hm²;其次为高有机肥免耕处理,2 年平均值为 4 914.3 元/hm²。因此,深松处理具有良好的蓄水保墒能力和高效水分利用效率;高有机肥与深松耕作组合有利于旱地农业增收,春玉米增产效益最佳,为旱地农业较适宜的春玉米保护性耕作种植模式。

参考文献:

[1] 宋孝玉,刘贤赵,沈冰,等. 陕西旱地农业种植业结构调整的水资源问题及对策[J]. 干旱区地理,2004,27(2): 199-201.

[2] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等. 保护性耕作条件下旱地农田麦—豆双处理轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报,2006,26(4):1176-1185.

[3] 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[J]. 水土保持学报,2006,

20(2):42-45.

- [4] 张海林,高旺盛,陈阜,等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. 中国农业大学学报,2005,10(1):16-20.
- [5] 李玲玲,黄高宝,张仁陟. 甘肃黄土高原西部保护性农业发展研究[C]//中国农学会耕作制度分会 2004 年学术年会,北京:中国农学会,2004:185-188.
- [6] 刘立晶,高焕文,李洪文. 玉米—小麦一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报,2004,20(3):70-73.
- [7] 李立群,薛少平,王虎全,等. 渭北高原旱地春玉米不同种植模式水温效应及增产效应研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(1):36-38.
- [8] 方日尧,同延安,赵二龙,等. 渭北旱原不同保护性耕作方式水肥增产效应研究[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(1):55-57.
- [9] 郑华平. 保护性耕作措施的综合效应研究及其生态与经济效益评价[D]. 兰州:甘肃农业大学,2004.
- [10] Jerry L H, Thomas J S, John H P. Managing soils to achieve greater water use efficiency: A review[J]. Agronomy Journal,2001,93(3):271-280.
- [11] 郭清毅,黄高宝. 保护性耕作对旱地麦—豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(3):165-169.
- [12] 郭兆元,黄自立,冯立孝. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992:56-57.
- [13] 晋小军,黄高宝. 陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(5):108-112.
- [14] 唐启义,冯明光. DPS 数据处理系统[M]. 北京:科学出版社,2007:115-128.
- [15] 师江澜,刘建忠,吴发启. 保护性耕作研究进展与评述[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(1):205-210.
- [16] 王顺霞,王占军,左忠,等. 不同覆盖方式对旱地玉米田土壤环境及玉米产量的影响[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(9):134-137.
- [17] 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.
- [18] 籍增顺,王盛霞,洛希图,等. 旱地玉米免耕覆盖土壤水分研究[J]. 山西农业科学,1994,22(3):7-12.
- [19] 许迪, Schmid R, Mermoud A. 耕作方式对土壤水动态变化及夏玉米产量的影响[J]. 农业工程学报,1999,15:101-106.
- [20] 李洪文,陈君达,高焕文. 旱地农业 3 种耕作措施的对比研究[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1):7-11.