

轮耕对渭北旱塬玉米连作系统土壤水分和作物产量的影响

李娟^{1,2}, 王丽^{1,4}, 李军^{3*}, 尚金霞¹

(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: 陕西渭北旱塬属于暖温带半湿润易旱气候区, 干旱对旱地农作物生产威胁严重, 该地区制约春玉米生长发育和产量低而不稳的主要因素为降水少且季节性差异较大。该研究力求探索渭北旱塬春玉米连作田在不同保护性耕作措施下土壤蓄水保墒效果和作物增产增收效应。于2007—2013年在陕西合阳实施了渭北旱塬春玉米连作田保护性耕作长期定位试验, 设置了连续免耕、免耕/深松和连续翻耕等3种不同轮耕处理措施下的田间定位试验, 测定春玉米休闲期和生育期土壤水分, 分析各耕作处理下春玉米产量及水分利用效率的变化规律。结果表明: ①相对于连续翻耕处理, 冬闲期免耕/深松和连续免耕处理0~200 cm土层土壤蓄水效率6 a平均值分别提高64.6% ($P<0.05$) 和46.1% ($P<0.05$)。平水年免耕/深松较连续免耕处理土壤蓄水效率有提高的趋势, 但枯水年差异不显著。②相对于连续翻耕处理, 玉米生育期免耕/深松和连续免耕处理0~200 cm土层土壤蓄水量6 a平均分别增加了9.7和2.1 mm, 休闲期蓄水效率分别增加了0.7和0.5个百分点 ($P<0.05$)。③相对于连续翻耕处理, 免耕/深松和连续免耕处理6 a平均玉米籽粒产量分别提高7.6%、0.3%, 收获指数分别提高3.6和2.3个百分点, 水分利用效率分别提高18.6%、5.8% ($P<0.05$)。在3种耕作处理中, 冬闲期和生育期深松/翻耕和连续免耕模式下土壤蓄水量、玉米籽粒产量、收获指数和水分利用效率均优于传统连续翻耕, 且免耕/深松处理模式对于提高土壤蓄水保墒能力和作物增产效果最好, 可作为渭北旱塬区春玉米连作田较适宜的休闲保护性轮耕模式。

关键词: 土壤; 水分; 作物; 渭北旱塬; 保护性耕作; 土壤蓄水量; 产量; 水分利用效率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.016

中图分类号: S157.4; S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0110-09

李娟, 王丽, 李军, 尚金霞. 轮耕对渭北旱塬玉米连作系统土壤水分和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 110—118. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.016 <http://www.tcsae.org>

Li Juan, Wang Li, Li Jun, Shang Jinxia. Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 110—118. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

开发旱地雨热资源潜力、利用生物资源转化养分和保护生态环境是农业可持续发展研究的重点^[1]。与传统翻耕和裸露休闲不同, 保护性耕作一般通过采取少耕、免耕和地表秸秆残茬覆盖等田间耕作措施, 从而达到增加土壤水分, 阻碍土壤风蚀和水蚀, 有效抑制土地退化和沙尘暴, 实现农业可持续发展^[2-3]。国内外研究表明, 保护性耕作能较好的保持水土、提高蓄水保墒和促进增产增收效应^[4-5]。有学者多年研究结果显示^[6], 免耕较传统耕作可有效提高土壤贮水量和水分利用效率均为10%, 耗水量则显著减少15.0%, 在干旱少雨条件下, 免耕处理下土壤蓄水保墒作用愈加明显。深松可通过提高降水入

渗率, 增加土壤含水量, 从而有效满足了作物对水分的需求。刘立晶等研究指出^[7], 保护性耕作可使小麦和玉米分别增产9.7%和11.8%。但随着保护性耕作研究和应用不断深入, 发现免耕法只能适应部分土壤和自然条件, 多年免耕后土壤变硬和容重增大, 影响作物根系生长及对水分和养分吸收, 产量呈现下降趋势^[8]。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, 构建土壤轮耕技术体系, 是提高土壤质量和生产性能的有效措施^[9-11]。但保护性轮耕试验存在周期比较长和定位试验实施难度大等问题, 渭北旱塬区位于黄土高原暖温带半湿润易旱区, 干旱缺水和土壤质量低下是该区粮食生产的主要限制因素, 但人为措施不当致使天然降水利用率低, 也是导致作物产量低而不稳的重要原因^[12], 即研究旱作春玉米不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果和作物产量影响, 评价和筛选最优保护性耕作模式, 对旱地玉米生产具有重要的指导意义。但关于渭北旱塬旱作长期保护性耕作相关尚未见到报道, 本研究拟通过渭北旱塬连作春玉米田为期6 a的保护性耕作定位试验, 研究秸秆覆盖下不同保护性耕作模式对旱作玉米连作田冬闲期土壤蓄水保墒、生长期作物水分利用和玉米产量的影响, 寻找最优“蓄水保墒和增产增收”的保护性耕作模式, 力求为旱地玉米高产高效栽培提

收稿日期: 2015-06-26 修订日期: 2015-07-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02); 国家科技支撑计划(2014BAL01B01); 国家高技术研究发展计划项目(2013AA102902-5); 公益性行业(农业)科研专项(201303104)。

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

供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设置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），位于渭北旱塬东部半湿润易旱区，年平均气温、平均降水量和平均蒸发量分别为 11.5℃、537.8 和 1 832.8 mm，试验期间逐月降水量分布值显示（图 1），当地降雨季

节分配不均，主要集中在 7 月、8 月和 9 月，2008—2013 年降水量分别为 401.3、460.7、456.8、496.8、370.9 和 425.5 mm，其中 2008 和 2012 年为干旱年型，分别比多年平均降雨量低 25.4%和 31.0%，其余年份为平水年，降雨量接近多年平均值。2007—2013 年冬闲期（每年 10 月—次年 4 月）降雨量分别为 89.3、118.4、41.9、132.2、85.5 和 26.06 mm，玉米生育期（每年 5—9 月）降雨量分别为 280.6、395.3、379.8、404.1、317.5 和 361.6 mm。试验前土壤化学性质见表 1。

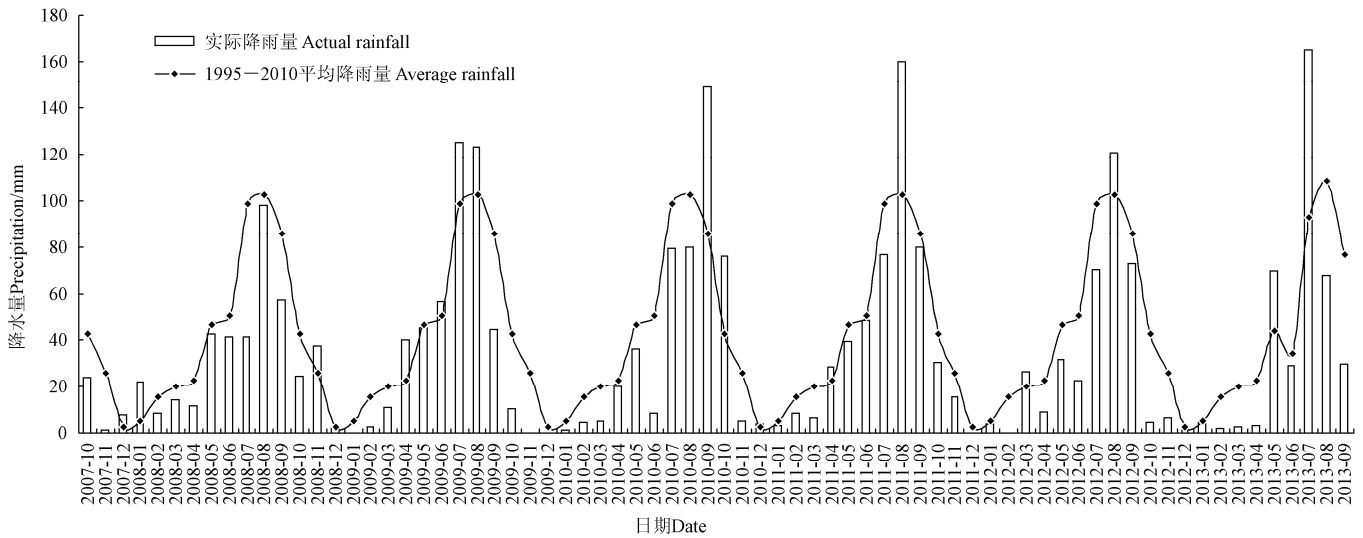


图 1 合阳试验站 2007—2013 年度逐月降水量

Fig.1 Distribution of monthly precipitation in 2007 – 2013 of Heyang experiment station

表 1 试验前土壤化学性质
Table 1 Soil basic chemical properties before experiment

土层深度 Soil layer/ cm	有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N content/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P content/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K content/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydro nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P content/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K content/ (mg·kg ⁻¹)
0~20	4.54a	1.32a	0.59a	5.92a	36.57a	3.45a	148.3a
≥20~40	1.63ab	0.89ab	0.18ab	5.53b	18.90ab	2.02b	142.2a
≥40~60	1.34b	0.89ab	0.06b	5.79a	12.14b	1.82b	137.1b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ），下同。
Note: On the same column, different lowercase letters stand for significance at 5% level, the same below.

1.2 试验设计

于 2007—2013 年实施了为期 6 a 春玉米连作田保护性耕作定位试验，试验前农田土壤耕作均采用传统翻耕法，在 2007 年秋季玉米收获后开始设置 3 种土壤轮耕或连耕处理：①免耕/深松轮耕：no-tillage(NT)-sub-soiling(ST)，即：NT₂₀₀₇→ST₂₀₀₈→NT₂₀₀₉→ST₂₀₁₀→NT₂₀₁₁→ST₂₀₁₂→NT₂₀₁₃；②连续免耕（NT-NT），③连续翻耕：(continuous ploughing; CT-CT)。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 m²（22 m×5 m）。3 种土壤耕作措施具体操作方法：①免耕处理（NT）：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过冬闲期；②深松处理（ST）：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过冬闲期；③翻耕处理（CT）：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，地表裸露越过冬闲期。

3 种耕作处理的施肥、品种和其他田间管理措施均相同，玉米品种为“豫玉 22”，分别于每年的谷雨前播种，9 月份进行秋收，收获后立即采集土样。播种时尿素、磷酸二铵和氯化钾等作为基肥施用，用量如下：P₂O₅，120 kg/hm²，N，75 kg/hm²，K₂O，90 kg/hm²；拔节期只追施尿素，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 测定指标及方法

试验期降雨量利用雨量器实行连续定位观测记录。在冬闲期和春玉米主要生育时期（播种期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、收获期）采用土钻取土，利用烘干法测定土壤含水率，每个小区设置一个样点，取样深度 0~200 cm，取样间隔为 20 cm，分别计算土壤蓄水量和水分利用效率。玉米测产利用随机取样法，各小区分别收获 30 株进行测产。

土壤含水率(B)、土壤蓄水量(W)、蓄水效率(FPSE)和水分利用效率(WUE)计算公式如下^[13-15]

$$B=(M_1-M_2)/M_2\times 100\% \quad (1)$$

$$W=H\cdot D\cdot B\times 10 \quad (2)$$

$$FPSE=S/R_1\times 100\% \quad (3)$$

$$ET=(W_1-W_2)+P \quad (4)$$

$$WUE=Y/ET \quad (5)$$

式中： B 为土壤含水率，%； M_1 和 M_2 分别为湿土质量和烘干土质量，g； W 为土壤贮水量，mm； H 为土层深度，mm； D 为土壤平均体积质量，g/cm³；FPSE 为休闲期降雨蓄水效率，%； S 为休闲前后 0~200 cm 土层增加的蓄水量，mm； R_1 为休闲期降水量，mm；ET 为耗水量，mm； P 为作物生育期有效降水量，mm； W_1 和 W_2 分别为播前和收获时的土壤贮水量，mm；WUE 为籽粒产量水分利用效率，kg/(hm²·mm)； Y 为经济产量，kg/hm²。

1.4 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 不同耕作处理休闲期土壤蓄水保墒效果

因休闲期降雨量与土壤耕作管理的不同，土壤蓄水量年际变化较大。在 2007—2008 年、2009—2010 年、2011—2012 年和 2012—2013 年冬闲期降雨量均较低，平均降雨量仅 60.7 mm (表 2)，休闲末期免耕/深松处理和连续免耕处理较连续翻耕处理 0~200 cm 土层土壤蓄水量显著增加 ($P<0.05$)，4 a 平均蓄水量分别增加了 7.9 和 9.2 mm，蓄水效率分别提高了 12.9% 和 15.7%，连续免耕处理较免耕/深松处理蓄水效率高，但差异不显著。

在 2008—2009 年和 2010—2011 年冬闲期降雨量较

高，平均达到 125.3 mm，与 6 a 冬闲期 3 种耕作处理平均蓄水量相比，免耕/深松、连续免耕和连续翻耕处理 2 a 平均蓄水量分别增加了 12.1、4.6 和 10.6 mm，免耕/深松和连续免耕处理较连续翻耕处理 2 a 平均蓄水效率分别提高了 42.4% 和 0.8%，免耕/深松处理土壤蓄水效率增加显著 ($P<0.05$)。在降雨量较低年份，免耕/深松与连续免耕蓄水效率差异不显著；在降雨量较高年份，免耕/深松模式蓄水效率相对较高。

在 6 a 试验期间，免耕/深松和连续免耕处理下春玉米田休闲期 0~200 cm 土层蓄水效率分别较连续翻耕提高 64.6% 和 46.1% ($P<0.05$)。

2.2 不同耕作处理下玉米生育期土壤水分空间变化特征

农田土壤水分空间变化随气候类型区、降水年型及不同土壤耕作措施而表现出一定的变化。在 2008、2009、2010、2011、2012 和 2013 年，玉米生育期内降雨量分别为 280.6、395.3、379.8、404.1、317.5 和 361.6 mm，玉米生育期前期降雨量相对比较少，降雨主要集中在抽雄期、灌浆期以及成熟期。6a 试验期间土壤水分状况与降雨量变化趋势基本一致，以 2012 年为代表，分析玉米在各生育期土壤含水率变化特征 (图 2)。2012 年，在玉米灌浆期，免耕/深松和连续免耕处理 20~60 cm 土层土壤含水率较连续翻耕分别平均提高 17.5% 和 2.9%。3 种耕作处理土壤含水率剖面分布曲线上均有 2 个拐点，即在 60 cm 土层有一个高峰，在 120 cm 土层有一个低谷。在 0~60 cm 土层，土壤含水率随深度增加逐渐增加，在 60~120 cm 土层，土壤含水率随深度增加逐渐降低，而在 120~200 cm 土层土壤含水率与 0~60 cm 土层表现相似，且平均含水率维持在 15.7% 左右。

可见，免耕/深松和连续免耕处理在冬闲期均不同程度提高了土壤蓄水保墒能力，但免耕/深松处理在生育期蓄水保水效果更为明显。

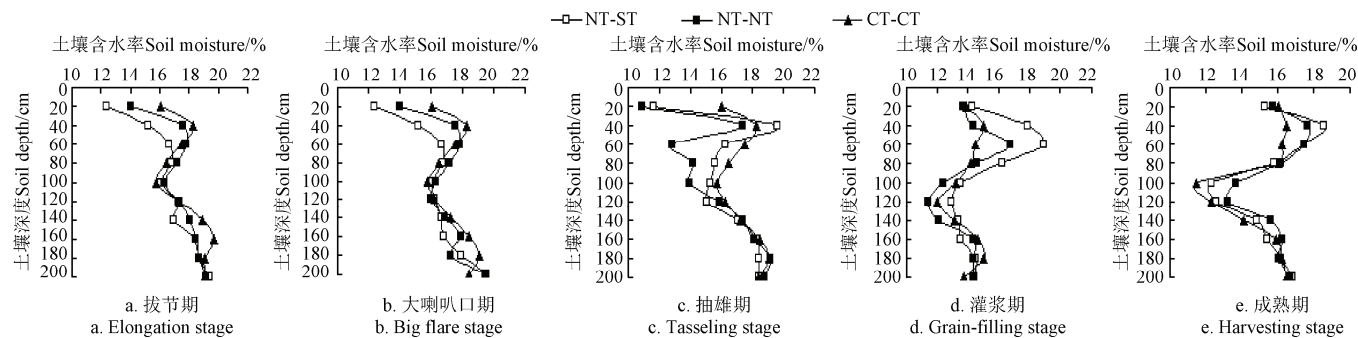
表 2 耕作对春玉米田休闲期 0~200 cm 土层蓄水效果的影响

Table 2 Effects of tillage treatments on soil water storage in 0-200 cm depth during fallow period of maize

年份 Year	耕作体系 Tillage system	休闲期降雨量 Precipitation/mm	休闲期间土壤蓄水量 Soil water storage/mm		蓄水效率 Water storage efficiency/%
			初期 Initial stage	末期 Terminal stage	
2007—2008	免耕/深松	89.3	394.5	419.6	28.20a
	连续免耕	89.3	398.8	425.1	29.51a
	连续翻耕	89.3	407.4	418.8	12.77c
2008—2009	免耕/深松	118.4	427.6	454.8	22.92b
	连续免耕	118.4	425.4	445.6	17.09bc
	连续翻耕	118.4	432.5	454.4	18.47bc
2009—2010	免耕/深松	41.9	370.6	381.6	26.40a
	连续免耕	41.9	371.7	385.2	32.15a
	连续翻耕	41.9	372.3	379.2	21.16b
2010—2011	免耕/深松	132.2	452.6	493.6	31.00a
	连续免耕	132.2	436.8	464.7	21.16b
	连续翻耕	132.2	445.4	471.3	19.64bc
2011—2012	免耕/深松	85.5	398.6	420.4	25.44ab
	连续免耕	85.5	385.3	409.3	28.15a
	连续翻耕	85.5	376.4	386.3	20.90b
2012—2013	免耕/深松	26.1	381.6	387.3	21.91b
	连续免耕	26.1	377.5	382.4	18.91bc
	连续翻耕	26.1	364.2	368.4	15.80c
平均值 Average	免耕/深松	82.2	404.3	426.2	26.71a
	连续免耕	82.2	399.2	418.7	23.72ab
	连续翻耕	82.2	399.7	413.1	16.23bc

注：相同年度，同一行内数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著，下同。

Note: Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level at the same year, the same below.

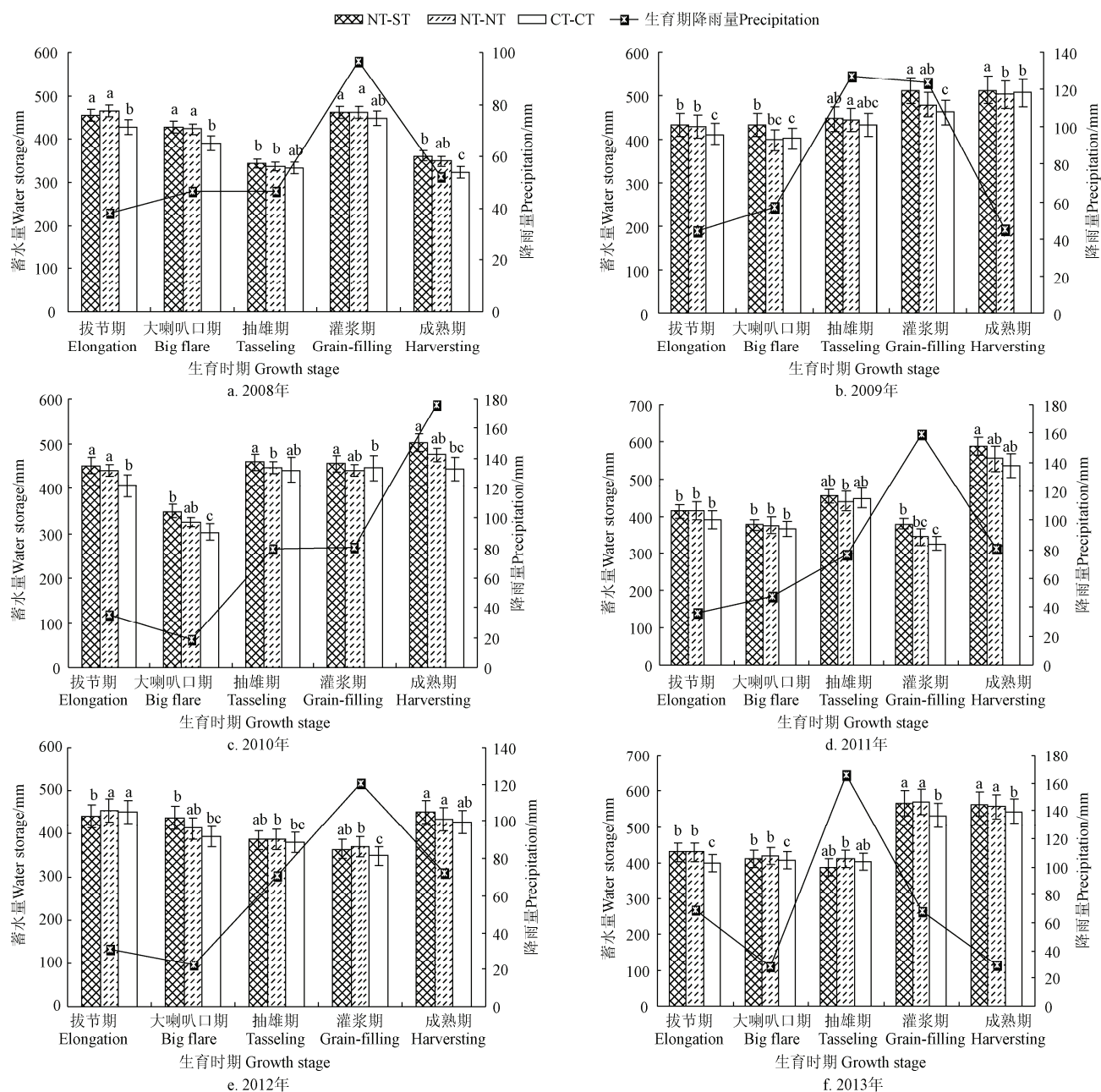


注：NT-ST 为免耕/深松处理，NT-NT 为连续免耕处理，CT-CT 为连续翻耕处理，下同。

Note: NT-ST: no-tillage/sub-soiling; NT-NT: continuous no-tillage; CT-CT: continuous ploughing, the same below.

图 2 2012 年不同轮耕处理春玉米主要生育期玉米田 0~200 cm 土层土壤含水率变化

Fig.2 Soil water moisture changes in 0-200 cm soil profile of different rotation tillage treatments during maize growth period in 2012



注：同一时期，不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: During the same stage, different lowercase letters stand for significance at 5% level.

图 3 2008-2013 年不同轮耕处理下春玉米生育期内 0~200 cm 土层土壤贮水量变化

Fig.3 Soil water storage changes in 0-200 cm soil layer of different rotation tillage treatments during growth period of maize in 2008-2013

2.3 不同耕作处理春玉米生育期土壤蓄水量变化动态

在玉米生育前期降雨量较少, 苗期-拔节期平均降雨量仅为 37.2 mm (图 3), 通过冬闲期不同耕作处理蓄水保墒作用, 玉米拔节期土壤蓄水量仍较高。2008 年播种期-苗期和苗期-拔节期降雨量分别为 12.8 和 38.2 mm, 苗期-拔节期免耕/深松和连续免耕 0~200 cm 土层土壤蓄水量分别较连续翻耕增加 6.9%和 9.1% ($P<0.05$)。2009 年播种期-苗期和苗期-拔节期降雨量分别为 40.3 和 44.3 mm, 但冬闲期降雨量高达 118.4 mm, 累积降雨量相对较高, 免耕/深松、连续免耕和连续翻耕处理拔节期土壤蓄水量呈现依次递增趋势, 前二者分别较后者增加 5.4%和 4.4% ($P<0.05$)。2010 年为干旱年型, 冬闲期降雨量仅为 41.9 mm, 较 6 a 平均水平低 51.6 mm, 玉米苗期-拔节期降雨量 35.9 mm, 免耕/深松和连续免耕处理土壤蓄水量分别较连续翻耕增高 10.9%和 8.1% ($P<0.05$)。2011 年播种-拔节期降雨量 36.3 mm, 冬闲期降雨量 132.2 mm, 免耕/深松和连续免耕土壤蓄水量分别较连续翻耕增加 5.7%和 5.9% ($P<0.05$)。2012 年苗期-拔节期降雨量 31.4 mm, 免耕/深松和连续免耕土壤蓄水量分别较连续翻耕增加 1.7%和 1.2% ($P<0.05$)。2013 年苗期-拔节期降雨量 69.6 mm, 免耕/深松和连续免耕土壤蓄水量分别较连续翻耕增加 7.3%和 7.1% ($P<0.05$)。可见, 免耕/深松和连续免耕在不同降水年型冬闲期均可有效蓄

积降水, 能改善玉米播种期和拔节期土壤水分状况, 弥补渭北旱塬春季降雨不足。

在 6 a 试验期间, 由于渭北旱塬降雨季节分布特征, 除 2008 年玉米成熟期蓄水量较低, 其他年份都达到一个峰值, 免耕/深松和连续免耕 6a 平均土壤蓄水量分别较连续翻耕增加 7.1%和 3.3% ($P<0.05$)。

2.4 不同耕作处理对玉米产量和水分利用效率的影响

免耕/深松处理玉米产量和生物量较连续翻耕差异显著 ($P<0.05$) (表 3)。在 2008 年、2010 年、2012 年和 2013 年等干旱年型, 连续免耕和免耕/深松处理 4 a 平均玉米籽粒产量比连续翻耕分别增产 1.7%和 9.4%, 而在平水年未见增产。可见, 在降雨量较低的年份, 保护性耕作更能有效蓄水保墒, 提高玉米休闲期、播前及整个生育期土壤蓄水量和降雨利用效率, 有利于作物生长及干物质积累, 进而提高作物的产量及生物量, 且在干旱年型, 免耕/深松处理增产效果更为显著。

在 6 a 试验期间, 玉米收获指数在 40.9%~43.4%之间。在 2008 年、2010 年、2012 年和 2013 年等干旱年型, 免耕/深松和连续免耕处理收获指数分别较连续翻耕提高 3.1%和 2.3%; 在 2009 年和 2012 年等平水年型, 免耕/深松和连续免耕处理收获指数分别较连续翻耕提高 4.9%和 2.2%。与连续翻耕处理相比, 免耕/深松和连续免耕处理 6 a 平均收获指数分别提高 3.7%和 2.3%。

表 3 2008—2013 年不同耕作处理春玉米籽粒产量与水分利用效率
Table 3 Yield and water use efficiency of spring maize in different tillage during 2008-2013

年份 Year	耕作体系 Tillage system	播前贮水量 Soil water in sowing/ mm	收获期贮水量 Soil water in harvesting/ mm	生育期降水量 Precipitation/ mm	生育期耗水量 Total water consumption/mm	生物产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	籽粒产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%	水分利用效率 WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2007—2008	免耕/深松	411.4	347.4	280.6	344.6	22 534.7	9 686.3a	42.9bc	26.5c
	连续免耕	415.6	360.5	280.6	335.7	21 094.1	8 778.4b	41.6ab	25.6c
	连续翻耕	414.4	361.4	280.6	333.6	21 104.0	8 701.7bc	41.2a	23.8bc
2008—2009	免耕/深松	441.6	391.0	395.3	446.9	18 659.8	8 026.4a	43.1c	20.5b
	连续免耕	435.2	387.7	395.3	443.8	17 164.5	7 169.3c	41.8ab	17.8a
	连续翻耕	430.4	393.4	395.3	433.3	18 446.7	7 568.9abc	41.0a	16.6a
2009—2010	免耕/深松	412.5	334.4	379.8	457.9	21 859.9	9 487.8a	43.4c	21.1b
	连续免耕	404.7	338.4	379.8	446.1	20 805.0	8 945.1b	42.9bc	18.6a
	连续翻耕	411.3	350.2	379.8	440.9	21 648.3	8 854.3bc	40.9a	17.4a
2010—2011	免耕/深松	509.1	459.8	404.1	453.4	20 202.3	8 709.6a	43.1c	23.7bc
	连续免耕	513.6	477.5	404.1	440.2	20 211.5	8 521.3b	42.2b	19.4a
	连续翻耕	494.7	451.0	404.1	447.8	20 723.1	8 511.6b	41.1a	19.2a
2011—2012	免耕/深松	401.2	351.8	317.5	366.9	18 502.3	7 565.3ab	40.9b	24.5c
	连续免耕	390.0	348.1	317.5	365.4	17 248.6	7 234.3ab	41.9ab	23.1bc
	连续翻耕	391.9	344.3	317.5	365.1	17 149.2	7 152.6c	41.7ab	21.7b
2012—2013	免耕/深松	430.1	393.8	361.6	397.9	21 722.9	9 271.4a	42.7b	23.3bc
	连续免耕	429.9	400.5	361.6	391.0	20 242.5	8 521.3b	42.2ab	21.8b
	连续翻耕	408.1	380.8	361.6	388.9	19 941.2	8 213.6bc	41.1a	21.1b
平均值 Average	免耕/深松	434.3	379.7	356.7	411.3	20 580.3	8 791.1ab	42.7bc	23.0bc
	连续免耕	432.5	385.5	356.7	403.7	19 461.0	8 194.9c	42.1ab	20.5b
	连续翻耕	425.1	380.2	356.7	401.6	19 835.4	8 167.1c	41.2a	19.4a

玉米生育期降雨量和不同耕作处理显著影响作物耗水量 (表 3)。在 2008 年、2010 年、2012 年、2013 年等干旱年型, 与连续翻耕处理相比, 免耕/深松和连续免

耕处理 4 a 平均耗水量分别提高 2.5%和 0.6%; 在 2009 年、2011 年等平水年型, 免耕/深松和连续免耕处理比连续翻耕处理 2 a 平均耗水量分别提高 2.2%和 0.3%; 免耕/

深松和连续免耕处理 6 a 平均耗水量分别较连续翻耕分别提高 2.4% 和 0.5%。

在 2008 年、2010 年、2012 年、2013 年等干旱年型, 除 2008 年免耕/深松与连续翻耕处理间降水利用效率差异未达到显著水平外, 其余年份均达到显著水平, 免耕/深松和连续免耕处理 4 a 平均水分利用效率分别较连续翻耕提高 13.5% 和 5.9%; 在 2009 年和 2011 年等平水年型, 免耕/深松和连续免耕处理 2a 平均水分利用效率分别较连续翻耕提高 23.5% 和 3.9%。降雨量较少年份玉米水分利用效率高于降雨量较多年份, 免耕/深松和连续免耕处理较连续翻耕处理均提高了水分利用效率。

3 讨 论

3.1 不同耕作处理休闲期土壤蓄水保墒效果

针对保护性耕作条件下土壤水分利用状况的研究, 诸多学者对此进行了大量的研究, 而且确定保护性耕作能够有利的促进土壤水分利用^[6]。不同耕作处理对休闲期土壤水分影响较大, 与当年降水量、降水季节分配密切相关, 降水越多, 相互差异越明显^[16]。秦红灵等^[17]研究表明, 在干旱年份, 采用保护性耕作技术, 有利于将降水蓄存于深层土壤, 以供作物生长。本研究 6 a 试验结果表明, 不同保护性耕作体系下, 休闲期和作物主要生育期土壤水分都有了较大的改善, 连续免耕和免耕/深松均较连续翻耕有较好的蓄水保墒保应, 在干旱年型连续免耕处理蓄水效率较高, 在平水年免耕/深松处理蓄水效率较高, 这与前人研究结果一致, 说明休闲期保护性耕作可以促进土壤对降水的保蓄, 较传统耕作具有不可比拟的蓄水保墒作用^[17]。

长期采用单一耕作措施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^[18]。刘定辉^[19]和余海英等^[20]研究认为, 免耕可以有效增加表层土壤通气空隙当量孔径, 改善土壤结构, 促进土壤保水能力和水分利用效率提高。武际等^[21]认为, 长期采用免耕技术, 会造成土壤容重增加、稳定性差、生产性能降低、表层有机碳富集和病虫草害严重等问题。本研究中免耕和深松均有较好的蓄水保墒效应, 深松可有效加深耕层而不翻转土壤, 从而改善土壤结构, 即不会造成土壤水大量损失, 又能提高其抗旱能力。在本研究中平水年型深松蓄水效率较免耕更高, 但在干旱年型免耕蓄水效率与深松差异不显著。与传统翻耕相比, 免耕有效降低土壤蒸发, 在干旱和降水较少年份有利于保蓄土壤水分, 在第二季休闲末土壤贮水量较高, 为苗期作物生长提供了良好的水分条件; 且干旱年和平水年免耕/深松轮耕处理蓄水量均高于连续翻耕和连续免耕, 蓄水保墒效果显著, 对减少长期单一耕作措施缺陷具有显著作用。

3.2 不同耕作模式对春玉米产量及收获指数的影响

保护性耕作增产的结论似乎是毋庸置疑的, 但有些学者的研究表明保护性耕作可能会造成不增产或减产^[22-24]。贾树龙等^[25]认为, 保护性耕作对影响作物产量的影响主要

取决于其实施时间的长短, 连续少耕和免耕处理实施的前 3 年对作物产量不产生影响, 而后小麦产量明显降低(最大降幅达到 31.8%), 但连续免耕对玉米产量则没有明显影响。有些学者研究表明连续进行免耕引起的土壤紧实对吉林玉米生长无不利影响^[26]。Kelly 等^[27]通过多年研究认为, 免耕对产量几乎没有不利影响, 但可以节省的机械、能源和劳力等费用, 此外对于土壤的有益性则是非常显著的。在本研究连续 6 a 定位试验中, 免耕/深松模式均体现出了增产效益, 较连续翻耕 6 a 平均增产达 7.6%, 但连续免耕并未随着耕作年限增加体现出增产效应, 与前人研究结果一致^[28-29]。

3.3 不同耕作模式对春玉米连作田耗水量及水分利用效率的影响

作物耗水量和水分利用效率是研究作物产量、蒸腾耗水和地表蒸发之间相互消长关系的具体表现。王小彬等^[30]据山西寿阳春玉米耕作试验指出, 少耕和免耕都有利于减少水土流失, 防风固沙, 且若采取保护性耕作措施, 可有效增加玉米产量和提高水分利用效率, 其中与传统耕作相比, 免耕处理下土壤水分利用效率可提高 16.0%~19.0%。彭文英等^[31]研究证明, 免耕较传统耕作相比, 可增加土壤水分 2.0%~8.0%, 但需长期实施免耕和覆盖处理, 才可达到免耕的增水效果。尚金霞等^[32]在渭北旱塬的研究认为, 2 a 冬闲期免耕和深松处理 0~200 cm 土层平均土壤贮水量和水分利用效率均有提高。本试验 6 a 结果表明, 免耕深松和连续免耕处理均能有效保蓄土壤水分, 土壤蓄水量均显著增加, 水分利用效率均高于连续翻耕; 免耕处理下玉米水分利用效率和产量受降雨量影响较大, 在干旱年型免耕与翻耕相比, 提高了土壤贮水量, 提高了产量和水分利用效率, 而在平水年型免耕春玉米水分利用效率与翻耕无显著差异, 产量甚至低于翻耕处理。免耕处理下土壤剖面水分含量提高, 从而提高土壤水分有效性、利用率, 达到增产的目的。深松处理有效打破硬底层, 促进降雨入渗和提高土壤贮蓄能力, 有利于作物生长, 提高水分利用率及达到增产效果, 这与 Joseph 等^[33]研究结果一致。

4 结 论

1) 不同的轮耕方式下土壤蓄水保墒效果和增产增收效果不同。冬闲末期春玉米连作田免耕/深松轮作、连续免耕较连续翻耕处理 0~200 cm 土层 6 a 平均土壤贮水量分别增加了 13.1 和 5.6 mm, 蓄水效率分别高 64.6% 和 46.1%。在玉米生育期内, 免耕/深松、连续免耕和连续翻耕处理 0~200 cm 土层 6 a 平均土壤贮水量为 414.7、407.1 和 405.0 mm。

2) 免耕/深松处理下春玉米产量、连作田水分利用效率和收获指数最高, 6 a 平均值分别为 8791.1 kg/hm²、23.0 kg/(hm²·mm) 和 42.7%; 连续免耕次之, 分别为 8194.9 kg/hm²、20.5 kg/(hm²·mm) 和 42.1%; 连续翻耕最低。因此, 免耕/深松有利于蓄水保墒和春玉米增产, 适合在渭北旱塬地区推广。

[参 考 文 献]

- [1] 贾延明, 尚长青, 张振国. 保护性耕作适应性试验及关键技术研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 78—81.
Jia Yanming, Shang Changqing, Zhang Zhenguo. Adaptability test and key technology research on conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(1): 78—81. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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—212.
Shi Jianglan, Liu Jianzhong, Wu Faqi. Research advances and comments on conservation tillage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1): 205—212. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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)
- [4] Hemmat A, Eskandari I. Dryland winter wheat response to conservation tillage in a continuous cropping system in northwestern Iran[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86(1): 99—109.
- [5] 谢红梅. 保护性耕作技术研究进展与展望[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(5): 1965—1967, 1969.
Xie Hongmei. Research progress on conservation tillage technique[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(5): 1965—1967, 1969. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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)
- [7] 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.
Liu Lijing, Gao Huanwen, Li Hongwen. Conservation tillage for corn-wheat two crops a year region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 70—73. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘芳, 雷海霞, 王英, 等. 我国免耕技术的发展及应用[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2557—2562.
Liu Fang, Lei Haixia, Wang Ying, et al. development and adoption status of no-tillage in china[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(10): 2557—2562. (in Chinese with English abstract)
- [9] 何进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 62—67.
He Jin, Li Hongwen, Gao Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(10): 62—67. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 等. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 66—71.
Sun Guofeng, Zhang Hailin, Xu Shangqi, et al. Effects of rotational tillage treatments on soil structure and water storage in double rice cropping region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 66—71. (in Chinese with English abstract)
- [11] López-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 278—284.
- [12] 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, RenTianzhi, 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)
- [13] He J, Kuhn N J, Zhang X M, et al. Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China[J]. Soil Use and Management, 2009, 25(2): 201—209.
- [14] Su Ziyu, Zhang Jinsong, Wu Wenliang, et al. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 307—314.
- [15] Hussain G, Al-Jaloud A A. Effect of irrigation and nitrogen on water use efficiency of wheat in Saudi Arabia[J]. Agricultural Water Management, 1995, 27(2): 143—153.
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 侯贤清, 李荣, 贾志宽, 等. 条带休闲轮作对坡地土壤水分及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17):

- 86—94.
Hou Xianqing, Li Rong, Jia Zhikuan, et al. Effects of rotation of strip planting and fallow on soil water and crop yield in sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(17): 86—94. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘定辉, 陈尚洪, 舒丽, 等. 四川盆地丘陵区秸秆还田少免耕对土壤水分特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 119—128.
Liu Dinghui, Chen Shanghong, Shu Li, et al. Impact of straw mulching and no-tillage on soil water characteristics of paddy field in hilly area of Sichuan basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 119—128. (in Chinese with English abstract)
- [20] 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 99—104.
Yu Haiying, Peng Wenying, Ma Xiu, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 99—104. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 陈宇, 温晓霞, 廖允成. 不同模拟雨量下耕作措施对夏玉米水分利用效率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2211—2221.
Chen Yu, Wen Xiaoxia, Liao Yuncheng. Effects of tillage mode on water use efficiency and yield of summer maize under different simulated rainfalls[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2211—2221. (in Chinese with English abstract)
- [24] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析-保护性耕作与作物生产[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1914—1924.
Xie Ruizhi, Li Shaokun, Li Xiaojun, et al. The analysis of conservation tillage in China-conservation tillage and crop production: reviewing the evidence[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1914—1924. (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] 何奇镜, 佟培生, 边少锋, 等. 长期少耕对玉米产量与土壤生态环境的影响(1983—2002)[J]. 玉米科学, 2004, 12(增刊 1): 99—102, 104.
He Qijing, Tong Peisheng, Bian Shaofeng, et al. The influence of long-term minimum tillage on corn yield and soil ecological surroundings (1983—2002)[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(Supp.1): 99—102, 104. (in Chinese with English abstract)
- [27] Kelly T C, Yao Chilu, Teasdale J. Economic-environment tradeoffs among alternative crops rotations[J]. Agriculture E-Cosystems and Environment, 1996, 60: 17—28.
- [28] 王玉玲, 李军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作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)
- [29] 李友军, 吴金芝, 黄明, 等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 44—48.
Li Youjun, Wu Jinzhi, Huang Ming, et al. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(12): 44—48. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王小彬, 蔡典雄. 旱作农田保护性耕作-液膜-施肥综合技术研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 22—25.
Wang Xiaobin, Cai Dianxiong. Integrated management of conservation tillage, emulsified bituminous mulch and fertilization in dryland farming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [31] 彭文英. 免耕措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 379—383.
Peng Wenying. Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 379—383. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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)

[33] 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.

Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei dryland

Li Juan^{1,2}, Wang Li^{1,4}, Li Jun^{3*}, Shang Jinxia¹

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group, 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 dryland in Shaanxi Province belongs to the semi-humid drought climate in warm temperate zone, so drought is the biggest limiting factor for crop production in dryland. Shortage of precipitation and its uneven distribution in seasons are the main factors causing the low and unstable yields of winter wheat and spring maize in dryland. The Loess Plateau that is semi-humid and prone-to-drought, is a typical rain-fed agricultural region. Winter wheat and spring maize are main grain crops cultivated in this region. A long-term practice of applying single soil tillage measure in this area causes soil compaction, poor ability of retaining rainwater and improving water use efficiency. Many studies and practices have demonstrated that reasonable soil rotational tillage systems matching different crop rotation systems have played a very important role in maintaining sustainable development of farmland ecosystem, creating suitable environment (soil, nutrients, water, air, temperature) condition for crop growth and promoting crop yields. In order to investigate the effects of different rotational tillage systems on soil production performance in maize fields, the soil water storage, crop yield and water use efficiency as well as economic benefit were determined on the Loess Plateau of China, which would provide a theoretical basis for establishing a reasonable soil tillage system for the crop rotation system with certain fertilizing method on the semi-humid and prone-to-drought Loess Plateau. The aim of this experiment was to study the effects of different rotational tillage patterns on soil water conservation, grain yield and benefit increase in spring maize rotation region in Weibei highland. A six-year field experiment was carried out from 2007 to 2013 in Dryland Agricultural Research Station, Ganjing Town (35°33' N; 110°08' E; 900 m above sea level), Shaanxi Province. Three kinds of different rotational tillage systems in this experiment included continuous no-tillage (NT), no-tillage/subsoiling rotation (NT/ST), and continuous ploughing treatments (CT). The soil moisture during leisure and growth period of spring maize was measured, and the variation regularity of spring maize yield and water use efficiency was analyzed under 3 rotational tillage systems. Results revealed that: 1) Compared to continuous ploughing treatments, average water storage efficiency in 0-200cm soil layers of no tillage with subsoiling rotation and continuous no tillage in six-year winter fallow periods increased ($P<0.05$) 64.6% and 46.1%. In normal rainfall years, water storage efficiency of no tillage with subsoiling rotation was little higher than continuous no tillage, but it was no significant difference in drought years. 2) Compared to the CT treatment, the average soil water content in 0-200 cm soil layer for the NT/ST and NT treatment in maize growth period in 6 years increased by 9.7 and 2.1 mm, respectively, and the water storage efficiency in the fallow period increased by 0.7 and 0.5 ($P<0.05$) percentage point, respectively. 3) Compared to the CT treatment, the corn grain yield for the NT/ST and NT treatment in 6 years increased by 7.6% and 0.3% ($P<0.05$), respectively, the harvest index increased by 3.6 and 2.3 percentage point, respectively, and the water use efficiency increased by 18.6% and 5.8% ($P<0.05$), respectively. Among the 3 tillage treatments, the effects of soil water storage capacity, crop yield, harvest index and water use efficiency for the NT/ST and NT treatment were better than those for the CT treatment in the fallow period of winter, and the effects of soil moisture conservation and crop yield increment for the NT/ST treatment were the best, so the NT/ST treatment was the more suitable conservation tillage pattern in spring maize field of Weibei dryland.

Key words: soils; moisture; crops; Weibei highland; conservation tillage; soil water storage; yield; water use efficiency