

耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响*

谢军红^{1,2} 张仁陟^{1,3} 李玲玲^{1,2} 罗珠珠^{1,3} 蔡立群^{1,3} 柴强^{1,2**}

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070;
3. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070)

摘要 全膜双垄沟播是黄土高原旱作玉米主要生产技术,但此技术的土壤耕作主要依赖传统耕作和旋耕,在形成犁底层的同时造成耕层变浅,影响玉米生长、产量形成以及土壤健康。本文以打破犁底层、改善土壤结构、提高黄土高原旱地玉米(*Zea mays* L.)产量和有限降水资源利用效率为目标,布设大田定位试验,比较研究了深松耕、免耕、旋耕和传统耕作对旱地全膜双垄沟播玉米土壤水分、温度、土壤容重、产量以及水分利用效率的影响。结果表明:全膜双垄覆盖条件下,深松耕和免耕较旋耕和传统翻耕能有效增加0~30 cm土壤贮水量,其0~30 cm土层土壤含水量较翻耕、旋耕分别增加50.0%、43.7%和14.8%、10.3%;深松耕能有效降低5~30 cm土层土壤容重,其5~10 cm和10~30 cm土层土壤容重,深松耕较传统耕作分别降低10.9%和12.9%,随着土层的加深,深松耕、免耕的土壤容重呈降低趋势,旋耕和传统翻耕呈增大趋势;深松耕在苗期、拔节—抽雄期较传统翻耕分别具有明显的增温和降温作用,有利于玉米生长和产量提高;2个平水年,深松耕处理的玉米生物产量、籽粒产量和水分利用效率分别较传统翻耕增加6.1%~5.6%、18.6%~28.8%和28.1%~32.9%,具有明显的增产和提高水分利用效率的作用。因此,在黄土高原半干旱区同等降雨条件下,深松耕能有效增加全膜双垄沟播玉米的土壤贮水量,改善土壤结构,协调水温关系,有利于增产和提高水分利用效率,是全膜双垄沟播玉米一项理想的土壤耕作方法。

关键词 全膜双垄沟播 耕作方法 旱作玉米 产量 土壤水分 土壤温度 水分利用效率 黄土高原
中图分类号: S341.1; S152.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2015)11-1384-10

Effect of different tillage practice on rain-fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau*

XIE Junhong^{1,2}, ZHANG Renzhi^{1,3}, LI Lingling^{1,2}, LUO Zhuzhu^{1,3}, CAI Liqun^{1,3}, CHAI Qiang^{1,2**}

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China; 2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Complete film mulch of alternating narrow and wide ridges with furrow planting (CMRF) significantly increases maize yield and water use efficiency (WUE). It has been the dominant mode of maize production in the semiarid Loess Plateau

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB722902)、“循环农业科技工程”项目(2012BAD14B03)、国家科技支撑计划项目(2015BAD22B04)、农业部公益性行业计划项目(201103001)、国家自然科学基金项目(31171513)和甘肃农业大学盛彤笙创新基金项目(GSAU-STS-1226)资助

** 通讯作者: 柴强, 主要从事多熟种植、节水农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

谢军红, 主要从事保护性农业、旱作农业的研究。E-mail: xiejh@gsau.edu.cn

收稿日期: 2015-01-06 接受日期: 2015-06-01

* This study was financially supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program)(No. 2012CB722902), the Project of Science and Technology for Circulation Agricultural (No. 2012BAD14B03), the National Key Technology Support Program (No. 2015BAD22B04), Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201103001), the National Natural Science Foundation of China (No. 31171513), and the Innovation Foundation of Gansu Agriculture University (No. GSAU-STS-1226).

** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

Received Jan. 6, 2015; accepted Jun. 1, 2015

region. However, due to single tillage methods (e.g., conventional tillage and rotary tillage) continuous applied in the CMRF system, it was apparent that soil water infiltration was affected by the soil plow pan. This has caused the top soil layer shallow, which adversely impacted maize growth, grain yield and soil health. In order to eliminate the plow pan, improve soil structure, increase utilization of the limited rainfall, and enhance crop productivity, a field experiment was conducted at Dingxi in the semiarid Loess Plateau region of northwest China in 2012 and 2013. The study determined the effects of different tillage methods on soil water content, soil water storage, soil bulk density, soil temperature, and water use efficiency (WUE) and grain yield of CMRF system in the rain-fed semiarid environment of the Loess Plateau. Maize was grown under four tillage modes — conventional tillage (T1), no-tillage (T2), rotary tillage (T3) and sub-soiling (T4). The results showed that soil water storage in the 0–30 cm soil depth increased significantly under sub-soiling and no-tillage. Compared with conventional tillage, and rotary tillage, sub-soiling and not-tillage increased 0–30 cm depth soil water content by 50.0% and 43.7%, and 14.8% and 10.3%, respectively. Soil bulk density in the 5–10 cm and 10–30 cm soil depths were 10.9% and 12.9% lower under sub-soiling than conventional tillage, respectively. Under sub-soiling and no-tillage conditions, soil bulk density increased with increasing soil depth. On the contrary, soil bulk density decreased with increasing soil depth under rotary tillage and conventional tillage. Soil temperature was higher at seedling stage and lower at jointing-to-tasselling stage under sub-soiling than under conventional tillage. This was critical for improving grain yield, biomass and water use efficiency of maize. In 2012 and 2013, two normal-precipitation years, sub-soiling increased by 5.6%–6.1% in maize biomass, by 18.6%–28.8% in grain yield and by 28.1%–32.9% in water use efficiency, compared with conventional tillage. The study showed that under the same rainfall conditions, sub-soiling in combination with CMRF was the most promising agronomic practice in terms of improving soil water storage and structure. It also coordinated relationship between soil water and temperature, and increased maize yield and water use efficiency in the Loess Plateau of China.

Keywords Complete film mulch of alternating narrow and wide ridges with furrow planting; Tillage practice; Rain-fed maize; Maize yield; Soil moisture; Soil temperature; Water use efficiency; The Loess Plateau

水资源不足、旱灾频繁、严重的水土流失、落后的农业生产方式是黄土高原半干旱区农业生产面临的主要问题^[1–2]。如何解决传统翻耕法(三耕两耩)造成的地表疏松裸露、易蚀、蓄水保墒效果差、影响春播作物出苗、以及由此造成产量低而不稳^[3]等问题对促进半干旱区农业的可持续发展具有现实意义。近年来,受高产利益驱动,全膜双垄沟播玉米(*Zea mays* L.)目前已成为黄土高原半干旱区最大规模的种植制度,大面积替代了以小麦(*Triticum aestivum* L.)、豌豆(*Pisum sativum* L.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)为主的轮作制度。全膜双垄沟播生产技术将 C₄ 作物高效用水,沟垄微集水、蓄水以及地膜覆盖抑蒸、增温、保墒等多项技术的优势集成于同一模式,显著提高了耕地生产力和水分利用效率^[4–6]。但全膜双垄沟播土壤耕作技术主要以铧式犁传统翻耕和旋耕为主,频繁的铧式犁翻耕、旋耕造成冬闲期地表裸露,容易发生土壤侵蚀,破坏生态环境,同时也易造成耕层变浅,形成犁底层,破坏土壤结构,阻止水分入渗,降低肥料的利用率,影响作物生长、产量和水分利用效率的提高^[1,7]。研究发现,以少(深松)、免耕为代表的各种保护性耕作措施通过增加地表秸秆和残茬覆盖,有效地提高夏秋降水就地入渗、冬闲期土壤水分贮藏,实现有限降水资源的跨季、跨年利用,从而增加作物的产量,提高水分利用效率。同时在改良土壤结构,

增加土壤水稳性团聚体含量,改善土壤孔隙状况,增加土壤的保水保肥能力,防止土壤侵蚀等方面具有明显优势^[8–9]。黄土高原半干旱区频繁的冬春旱,较低的土壤水分影响春播作物出苗,通过冬闲期地膜覆盖,能有效降低土壤水分的无效蒸发,增加播前贮水,翌年适时进行深松、免耕处理等,形成与该区种植制度相适应的旱作土壤耕作技术体系,是解决长期连续翻耕、旋耕弊病的有效措施^[10–12]。目前,黄土高原半干旱区全膜双垄沟播玉米面积日益扩大,但土壤耕作以旋耕和传统翻耕为主,缺少少免耕、深松等配套耕作技术的应用研究。本试验以增加降雨入渗,提高作物水分利用效率和保持土壤健康为出发点,重点研究了全膜双垄沟播玉米冬闲期免耕,翌年进行深松耕、旋耕、免耕和传统耕作 4 种耕作处理,探讨不同耕作方法对旱作全膜双垄沟播玉米农田土壤水分、土壤容重、玉米产量、水分利用效率的影响,探索将深松耕和少免耕技术应用于全膜双垄沟播体系的可行性,找出一条既能提高玉米产量又能保障土壤健康的可持续利用途径,进而为丰富半干旱区全膜双垄沟播玉米生产技术体系提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2012 年 11 月—2013 年 10 月在甘肃省

定西市李家堡乡麻子川村进行。该地位于甘肃省中部偏南,属中温带半干旱区。平均海拔 2 000 m,年均太阳辐射 592.85 kJ·cm⁻²,日照时数 2 476.6 h,年均气温 6.4 °C,≥0 °C 积温 2 933.5 °C,≥10 °C 积温 2 239.1 °C,无霜期 140 d。多年平均降雨量 399.3 mm,2012—2013 年降雨量分别为 487.2 mm 和 471.3 mm,均为平水年(图 1);年蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53,为典型的半干旱雨养农业区。试验地土壤为黄绵土,0~200 cm 土壤容重见表 1;凋萎含水率 7.3%,饱和含水率 28.6%,pH 8.36,土壤有机质 12.01 g·kg⁻¹,全氮 0.76 g·kg⁻¹,全磷 1.77 g·kg⁻¹。

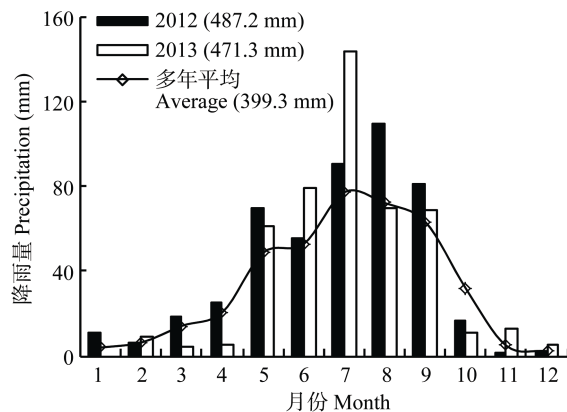


图 1 2012—2013 年研究区降雨分布
Fig. 1 Monthly rainfall of the experimental area in Dingxi of Gansu Province in 2012—2013

表 1 试验田不同土层的土壤容重

Table 1 Soil bulk density of the experimental field at different soil depths

土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)	土层 Soil depth (cm)								
	0~5	5~10	10~30	30~50	50~80	80~110	110~140	140~170	170~200
	1.29	1.29	1.32	1.20	1.14	1.14	1.13	1.12	1.11

1.2 试验设计

试验设传统翻耕(T1)、免耕(T2)、旋耕(T3)和深松耕(T4)4 个处理,3 次重复,小区随机区组排列,小区面积 88 m²(4.4 m×20 m)。试验前茬为全膜双垄沟播玉米,各处理具体操作为:传统翻耕(T1),前茬收获后,土壤免耕至翌年 3 月中旬,待土壤解冻后,揭去残膜,用铧式犁进行 20 cm 翻耕处理后及时耙耢,人工用全膜双垄沟播起垄机起垄,用 0.008 mm 的白色地膜全地表覆盖,于沟内间隔 50 cm 留渗水孔;免耕(T2),前茬收获后,土壤免耕至翌年 3 月中旬,待土壤解冻后,揭去残膜,直接在前茬地表覆膜,在沟内间隔 50 cm 留渗水孔;旋耕(T3),前茬收获后,土壤免耕至翌年 3 月中旬,待土壤解冻后,揭去残膜,用旋耕机进行 15 cm 旋耕处理后,人工用全膜双垄沟播起垄机起垄,用 0.008 mm 的白色地膜全地表覆盖,于沟内间隔 50 cm 留渗水孔;深松耕(T4),前茬收获后,土壤免耕至翌年 3 月中旬,待土壤解冻后,揭去残膜,及时用深松机进行 35 cm 深松处理后,人工用全膜双垄沟播起垄机起垄,用 0.008 mm 的白色地膜全地表覆盖,于沟内间隔 50 cm 留渗水孔。供试玉米品种为‘富农 821’,播种期为 5 月上旬,播种方式为穴播(沟内),密度 5.25 万株·hm⁻²。生育期施纯氮 200 kg·hm⁻²、纯磷(P₂O₅)150 kg·hm⁻²。试验期内,及时防治病虫害危害,10 月上旬收获,其他田间管理同大田。

1.3 测定指标与方法

土壤含水量采用烘干称重法和中子仪法测定。测定深度为 200 cm,其中,0~10 cm 土层用烘干法测定,10~200 cm 土层用美国生产的 CPN503DR 型中子仪测定,测定层次为 0~5 cm、5~10 cm、10~30 cm、30~50 cm、50~80 cm、80~110 cm、110~140 cm、140~170 cm 和 170~200 cm 共 9 个层次,播种前、收获后和生育期间间隔 15 d 测定一次,每处理设大垄、垄沟、小垄 3 个测定点。

0~10 cm 土层土壤水分计算公式为:

$$W(\%) = [(W1 - W) / W] \times 100\% \quad (1)$$

式中:W1 为土壤鲜样重,W 为土壤干样重。计算土壤贮水量时需将土壤质量含水量换算为体积含水量,换算公式为:

$$V(\%) = W(\%) \times D \quad (2)$$

式中:V 为土壤体积含水量,W 为土壤重量含水量,D 为每层土壤容重(g·cm⁻³)。

10~200 cm 土层土壤水分计算公式为:

$$Y(\%) = 58.923x / 23\ 789.67 + 0.448\ 3 \quad (R^2 = 0.766\ 6) \quad (3)$$

式中:Y 为土壤体积含水量,x 为中子仪读数^[1]。

土壤容重及孔隙度于 2013 年玉米收获后,在每处理小区均按 0~5 cm、5~10 cm 和 10~30 cm 用环刀取样,测定各土层土壤容重并计算孔隙度^[13]。

作物耗水量用农田水分平衡法计算,由于试验小区平整、地下水位深、土层深厚及土壤质地均一,因此在试验区未产生深层渗漏和地下水补给。因此,

适用于计算本试验的作物耗水量的方程为(mm):

$$ET=P-\Delta W \quad (4)$$

式中: ET为作物耗水量; P为生育期降水量; ΔW 为玉米收获后与播种期土壤贮水量之差, 单位为mm。

土壤贮水量的计算公式为:

$$W=(\sum Vi \times Hi \times 10)/100 \quad (5)$$

式中: W 为土壤贮水量, V_i 为土壤某一层体积含水量, H_i 为土壤层次厚度(mm), i 为土壤层次。

水分利用效率是作物消耗单位水量生产出的产量。其中, 籽粒产量水分利用效率计算公式为:

$$WUE=Y/ET \quad (6)$$

式中: Y 为籽粒产量(kg·hm⁻²), ET 为作物一生的耗水量(mm)。

收获指数计算公式为:

$$HI=Y/DM \quad (7)$$

式中: Y为籽粒产量, DM为生物产量(kg·hm⁻²)。

自苗期开始, 于每天14:00分别用曲管土壤温度计测定一次土壤温度, 测深为0 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm和25 cm。

1.4 数据分析

应用 SPSS 16.0 软件, 采用 One-way Anova 进行方差分析, 并用LSD法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作处理对土壤贮水量的影响

由图 2 可知, 2012 年与 2013 年 0~30 cm 土壤贮水量相差不大, 基本在 36~73 mm 波动, 随生育期的推进, 除 2013 年 5 月 31 日各处理明显降低外, 全生

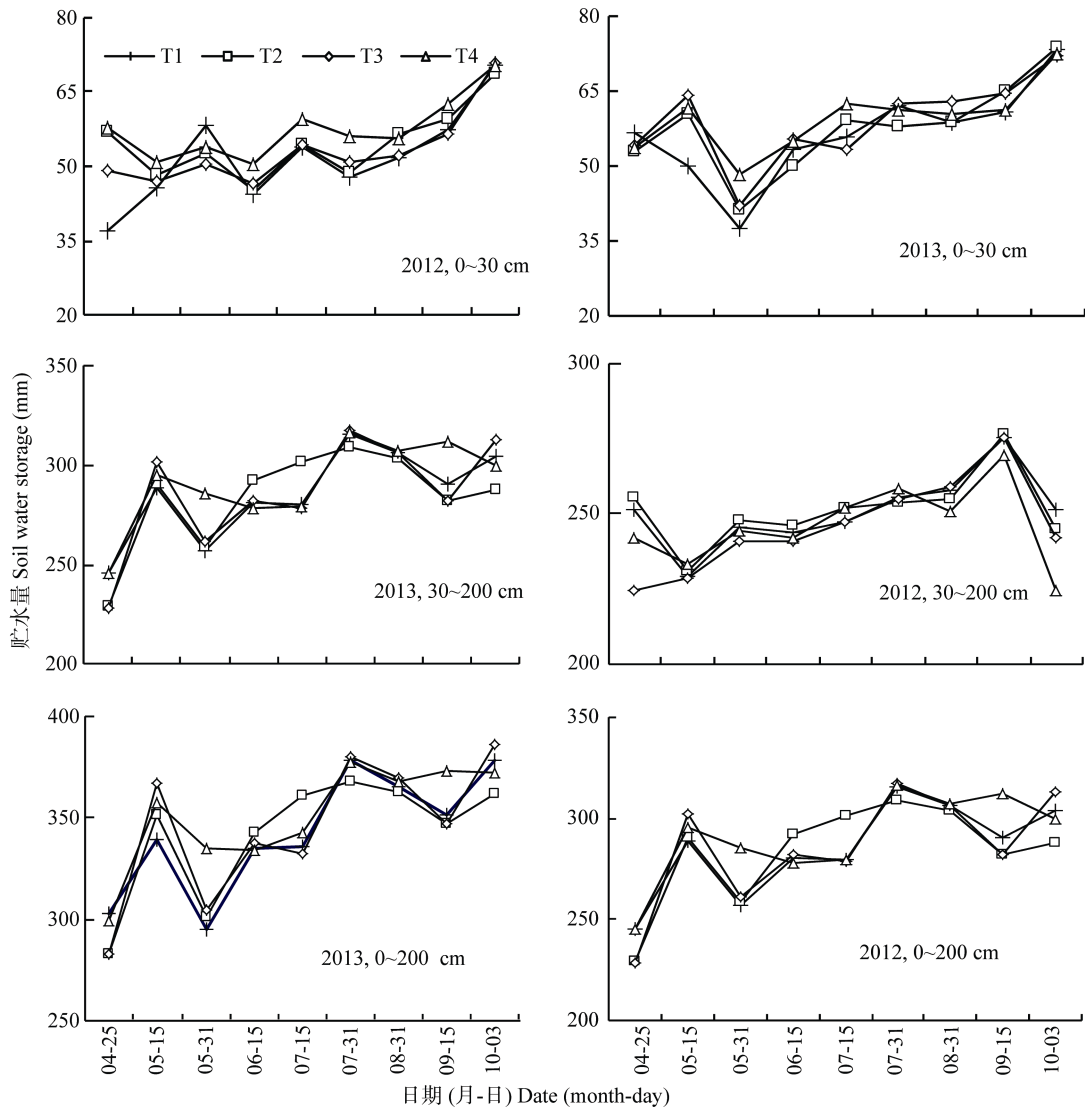


图 2 2012—2013 年不同耕作处理对玉米全生育期 0~30 cm、30~200 cm 及 0~200 cm 土层土壤贮水量的影响

Fig. 2 Effects of different tillage treatments on soil water storage at 0~30 cm, 30~200 cm, 0~200 cm soil depths at maize growing stages in 2012-2013

T1: 传统翻耕; T2: 免耕; T3: 旋耕; T4: 深松耕。下同。T1: conventional tillage; T2: no-till; T3: rotary tillage; T4: sub-soiling. The same below.

育期 0~30 cm 土壤贮水量总体呈增加态势, 深松耕和免耕处理 0~30 cm 土壤贮水量相对高于传统耕作和旋耕处理, 且播种前增加优势更加明显, 收获期 0~30 cm 处理间土壤贮水量差异小于播种前。全生育期内各处理土壤贮水量差异明显, 其中 2012 年 4 月 25 日至 6 月 15 日, 免耕、传统耕作和深松耕的土壤贮水量均高于旋耕处理, 7 月 15 日至 30 日, 深松耕处理最高, 7 月 31 日至 10 月 3 日传统耕作、免耕和旋耕土壤贮水量明显高于深松耕处理。2013 年 30~200 cm 土层土壤贮水量的变化与 2012 年不同, 播种期翻耕和深松耕土壤贮水量高于旋耕和免耕, 5 月 15 日, 免耕、旋耕和深松耕高于翻耕处理, 5 月 31 日深松耕最高, 其他处理差异较小, 6 月 15 日至 7 月 15 日, 免耕明显高于传统翻耕、旋耕和深松耕处理, 7 月 31 日至 8 月 31 日处理间的差异较小, 9 月 15 日深松耕、翻耕具有较高的土壤贮水量, 传统翻耕和免耕处理差异较小, 收获期 30~200 cm 土壤贮水量旋耕>翻耕>深松耕>免耕。2013 年 0~200 cm 土壤贮水量明显高于 2012 年, 试验期内深松耕和免耕土壤贮水量相对高于翻耕和旋耕且 0~200 cm 土壤贮水量的变化趋势与 30~200 cm 土层土壤贮水量的变化趋势相似, 随生育期的推进, 0~200 cm 土壤贮水量

2012 年、2013 年分别呈降-升-降和升-降-升-降的变化趋势。

2.2 不同耕作处理对土壤含水量空间分布的影响

2.2.1 对玉米播种期土壤含水量的影响

由表 2 知, 耕作方法对玉米播种期土壤含水量有明显影响, 随着土层的加深, 土壤含水量基本呈先增加后降低的趋势。耕作方法对 0~30 cm 土层土壤含水量影响较大, 深松耕、免耕有利于保水, 增加土壤含水量, 其中 2012 年土壤含水量的差异主要表现在 0~30 cm 和 110~200 cm 土层, 0~30 cm 土层深松耕、免耕的土壤含水量较翻耕、旋耕分别增加 50.0%、43.7%和 14.8%、10.3%, 110~140 cm 土层免耕较翻耕增加 10.9%, 旋耕和深松耕与翻耕无显著差异, 140~200 cm 土层免耕、旋耕和深松耕处理土壤含水量平均较翻耕降低 14.0%、20.7%和 19.4%, 差异显著; 2013 年不同耕作方法对 0~10 cm 和 50~80 cm 土层土壤含水量影响较大, 其中 0~5 cm 免耕处理含水量较翻耕增加 25.8%($P<0.05$), 5~10 cm 免耕、旋耕和深松耕分别较翻耕增加 23.4%、24.0%和 20.1%, 50~80 cm 免耕较翻耕土壤含水量提高 27.5%, 旋耕和深松耕与翻耕无差异。以上结果说明, 全覆盖双垄沟播条件下, 深松耕能有效地提高土壤贮水量。

表 2 2012—2013 年玉米播种期和收获期不同耕作处理土壤剖面的水分含量

Table 2 Soil moisture contents under different tillage treatments at sowing and harvesting stages of maize in 2012–2013 %

生育时期 Growth stage	土层深度 Soil depth (cm)	2012				2013			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
播种期 Sowing	0~5	11.4b	10.6b	12.9b	16.1a	15.1b	19.0a	14.9b	14.7b
	5~10	11.5c	19.8a	16.4b	16.4b	15.4b	19.0a	19.1a	18.5a
	10~30	12.7c	20.9a	17.3b	20.8a	18.1a	19.9a	18.0a	18.7a
	30~50	15.9a	16.7a	15.3a	17.9a	17.5a	18.3a	18.6a	18.5a
	50~80	15.2a	15.7a	13.4a	16.5a	13.8b	17.6a	16.7ab	16.4ab
	80~110	13.6a	15.5a	15.6a	15.1a	13.0a	13.1a	15.0a	12.9a
	110~140	14.6b	16.2a	12.1b	11.6b	12.9a	12.7a	13.0a	12.1a
	140~170	15.0a	12.8b	11.6b	11.4b	13.5a	10.4a	11.5a	12.5a
收获期 Harvesting	0~5	25.1a	23.4a	24.9a	23.4a	27.1a	25.5a	27.4a	25.4a
	5~10	25.1a	23.6a	24.1a	24.3a	26.5a	27.3a	25.1a	27.9a
	10~30	23.3a	21.9a	23.1a	23.5a	22.0b	24.6a	22.5ab	23.7ab
	30~50	21.5a	18.5b	19.3ab	17.8b	21.4a	21.0a	20.5a	20.5a
	50~80	14.1a	13.1a	13.4a	14.1a	20.8a	20.9a	21.1a	20.8a
	80~110	12.7ab	11.9b	12.7ab	14.3a	18.9ab	19.4ab	20.8a	15.6b
	110~140	14.2a	12.7a	13.3a	14.3a	16.7a	16.9a	16.4a	15.3a
	140~170	14.6a	12.8a	13.1a	13.7a	15.9a	15.4a	16.0a	14.9a
170~200	14.7a	12.9a	13.8a	13.3a	15.6a	15.1a	14.5a	15.4a	

同一年份同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同。Different small letters in the same row in the same year indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.2.2 对玉米收获期土壤含水量的影响

玉米收获期的土壤含水量随着土层的加深呈递减趋势(表2), 同一处理各层次 2013 年土壤含水量高于 2012 年, 土壤含水量具有明显差异的层次出现在 2012 年的 30~50 cm 和 80~110 cm 土层, 2013 年的 10~30 cm 和 80~110 cm 土层, 其中 2012 年, 30~50 cm 土层免耕和深松耕较翻耕土壤含水量降低 14.0%和 17.2%, 差异显著, 旋耕和翻耕无差异, 80~110 cm 土层, 深松耕较免耕增加 20.1%, 差异显著, 但免耕、旋耕、深松耕和翻耕无显著差异; 2013 年, 10~30 cm 土层免耕较翻耕土壤含水量增加 11.8%, 80~110 cm 土层旋耕较深松耕增加 33.3%, 免耕、旋耕、深松耕与翻耕无显著差异, 且其余层次处理间无显著差异。

2.3 不同耕作处理对玉米产量和水分利用效率的影响

由表 3 可知, 耕作方法显著影响玉米的生物产量、籽粒产量、播前土壤贮水量、耗水量、水分利

用效率(WUE)和收获指数, 差异表现在处理间与年际间。2012 年、2013 年均均为平水年, 深松耕、旋耕、免耕较传统耕作增产明显, 其中深松耕、旋耕和免耕的生物产量分别较传统耕作增幅达 6.1%~5.6%、5.6%~12.0%和 1.9%~2.8%, 差异显著; 3 种处理的籽粒产量分别较传统耕作显著增产 18.6%~28.8%、17.6%~25.2%和 14.9%~15.7%。深松耕较传统耕作能有效提高玉米 WUE, 两年分别较传统耕作显著提高 32.9%和 28.1%, 2013 年旋耕较传统耕作的 WUE 提高 29.5%, 免耕对玉米 WUE 无显著影响。耕作方法对年际间玉米收获指数有明显影响, 其中 2012 年免耕、深松耕和旋耕玉米收获指数分别较传统耕作显著提高 13.6%、11.4%和 11.4%, 2013 年玉米收获指数处理间无差异。深松耕、旋耕对玉米播前、收获后的土壤贮水量、耗水量无显著影响。综上所述, 深松耕、旋耕、免耕较传统耕作具有明显的增产优势, 能提高玉米水分利用效率, 但对玉米耗水量影响较小。

表 3 2012—2013 年不同耕作处理的玉米产量和水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency of maize under different tillage treatments in 2012–2013

年份 Year	处理 Treatment	生物产量 Biomass (kg·hm ⁻²)	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	降雨量 Rainfall (mm)	播前土壤贮水量 Soil water storage before sowing (mm)	收后土壤贮水量 Soil water storage after harvesting (mm)	耗水量 Water consumption (mm)	WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	收获指数 Harvest index
2012	T1	17 681c	7 778b	410.0	291.3a	321.8a	379.4a	20.7b	0.44b
	T2	18 024b	9 003a	410.0	284.0a	313.8a	380.3a	23.8ab	0.50a
	T3	18 721a	9 738a	410.0	259.8ab	313.3a	356.4a	25.2ab	0.49a
	T4	18 832a	9 228a	410.0	251.7b	295.0a	366.7a	27.5a	0.49a
2013	T1	16 686c	7 545c	423.5	302.1a	377.7a	347.9a	21.7b	0.45a
	T2	17 173b	8 672b	423.5	282.8b	361.7a	344.0a	25.4ab	0.48a
	T3	18 970a	8 876b	423.5	282.4b	388.7a	317.2a	28.1a	0.47a
	T4	17 680b	9 719a	423.5	299.1ab	372.3a	350.3a	27.8a	0.49a

2.4 不同耕作处理对 0~30 cm 土层土壤容重的影响

表 4 表明, 耕作方法对 0~30 cm 土层土壤容重有显著影响, 表现在耕作方法与土层之间。其中, 深松耕较传统耕作和旋耕显著降低了 5~30 cm 土壤容重, 5~10 cm 土壤容重, 深松耕较传统耕作和旋耕显著降低 12.4%和 8.1%, 免耕较传统耕作显著降低 10.9%, 旋耕和传统耕作之间无显著差异; 10~30 cm 土层, 深松耕较传统耕作和旋耕分别降低 12.9%和 15.6%, 差异显著, 免耕与传统耕作、旋耕处理间无差异; 4 种耕作方法对 0~5 cm 土层土壤容重无影响。另外, 随着土层加深, 免耕、深松耕土壤容重呈降低趋势, 深松耕、免耕处理 5~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤容重较 0~5 cm 分别降低 12.4%、16.3%和 7.3%、6.5%, 传统耕作和旋耕土层间土壤

表 4 不同耕作处理 0~30 cm 土层的土壤容重

Table 4 Bulk density of 0–30 cm soil depth under different tillage treatments

土层 Soil layer (cm)	T1	T2	T3	T4
0~5	1.18a	1.24a	1.21a	1.29a
5~10	1.29a	1.15bc	1.23ab	1.13c
10~30	1.24a	1.16ab	1.28a	1.08b

容重的变化与免耕、深松耕相反, 呈增大趋势, 其 5~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤容重较 0~5 cm 分别增加 9.3%、5.1%和 1.7%、5.8%。

2.5 不同耕作处理对 0~25 cm 土层土壤温度的影响

图 3 分别为玉米五叶期、拔节期、大喇叭口期和抽雄期 0~25 cm 土层土壤温度的垂直变化, 4 个生

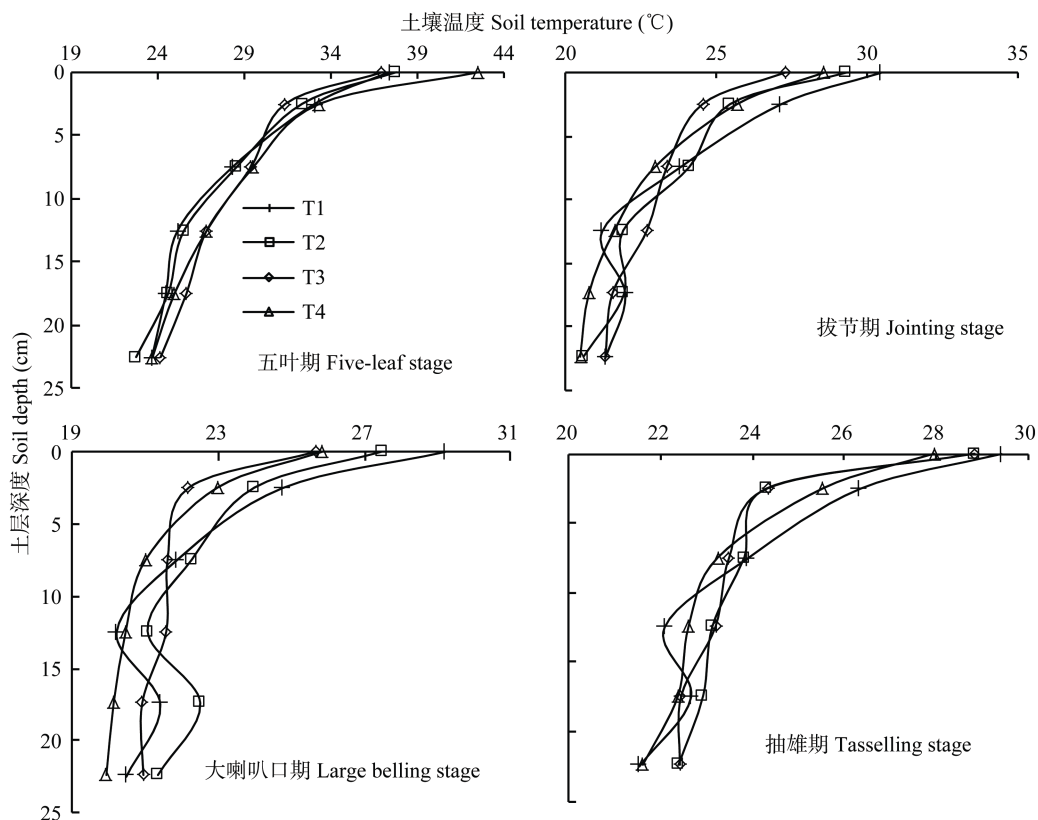


图 3 不同玉米生育期不同耕作处理土壤温度的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of soil temperature under different tillage treatments at different growth stages of maize

育时期的土壤温度随土层的加深呈递减趋势, 深松耕、免耕能提高 0~5 cm 土壤温度, 但不同生育时期同一土层各处理的温度差异明显。五叶期, 0~5 cm 土层土壤温度最高, 均在 30 °C 以上, 处理间深松耕温度最高, 免耕、旋耕和翻耕的处理土壤温度差异不大; 10~20 cm 土层, 深松耕和旋耕处理的土壤温度高于免耕和翻耕处理; 20~25 cm 免耕处理的土壤温度最低, 翻耕、旋耕和深松耕温度差异不大。拔节期, 各测定层次处理间土壤温度差异明显, 0~5 cm 土层, 翻耕处理土壤温度最高, 免耕、深松耕次之, 旋耕最低; 5~25 cm 土层, 翻耕和深松耕处理土壤温度降低幅度高于旋耕和免耕; 20~25 cm 旋耕和免耕处理的土壤温度高于深松和翻耕。大喇叭口期, 0~5 cm 土层, 处理间土壤温度的高低排序为翻耕>免耕>深松耕>旋耕; 深松耕处理 5~20 cm 土壤温度降低程度最大, 明显低于同层次其他处理; 20~25 cm 土层, 土壤温度免耕最高, 翻耕、旋耕次之, 深松最低。抽雄期, 土壤表层温度翻耕最高, 旋耕、免耕次之, 深松耕最低; 0~5 cm 土层, 土壤温度降幅剧烈, 处理间翻耕>深松耕>旋耕(免耕); 10~25 cm 土层土壤温度的降幅小于 0~5 cm 降幅, 且深松、翻耕和免耕处理土壤温度持续降低; 旋耕在 15~20 cm 较 10~15 cm 和

20~25 cm 稍有增加。以上结果说明, 深松耕处理玉米五叶期较翻耕具有明显的增温效应, 拔节—抽雄期具有降温效应, 旋耕处理较翻耕表现出持续的降温效应, 免耕维持土壤温度稳定的能力介于同时期深松与旋耕处理之间。

3 讨论

充分利用有限降水, 挖掘降水生产潜力, 提高土壤雨水蓄积保墒能力对雨养农业粮食增产具有十分重要的现实意义。深松耕、免耕通过降低土壤容重, 增大土壤孔隙度, 增加土壤入渗量, 提高土壤贮水量, 改善耕层生态环境, 促进作物生长和产量、水分利用效率的提高^[14-15]。长期翻耕和旋耕往往造成耕层变浅, 形成坚硬的犁底层, 影响土壤水分的入渗及作物根系的下扎, 影响玉米生产以及土壤健康^[7]。本研究中, 全膜双垄沟播玉米深松耕比传统翻耕增产 18.6%~28.8%, 原因主要是深松耕技术利用专用深松铲将土层耕松而不翻转表土层, 创造了疏松深厚的耕作层, 降低土壤容重, 提高蓄水能力, 在实现全膜双垄沟播玉米提高农田降水的资源化程度^[16-18]的同时, 改善了根际土壤物理状况, 促进作物生长发育, 有利于干物质的转化与分配, 保证了

较高的玉米产量和水分利用效率^[19-22]。即使在同等覆膜种植条件下,不同耕作方式因对土壤扰动程度和深度不同,导致土壤含水量出现一定差异,深松耕打破了犁底层,有效降低土壤容重^[9],有利于增加水分入渗深度和土壤含水量^[14,23];深松、免耕结合地膜覆盖拟蒸保墒能有效提高土壤的保水能力。余海英等^[24-25]认为深松、免耕通过降低土壤容重来提高土壤的保水能力和水分利用效率。但也有研究认为连续多年实施少免耕,土壤压实程度严重,容重增大,影响作物根系生长发育制约产量提高^[26]。本研究中发现耕作措施对土壤含水量、土壤贮水量的影响主要在播种期,播种期土壤具有较高的土壤含水量,有利于降低因冬春旱造成作物播种出苗难题,保证了玉米稳产高产。耕作措施对收获期土壤水分状况影响较小,其主要原因是前期深松耕、免耕储存的土壤水分一定程度上被作物消耗,本研究中玉米的耗水量差异不大,但水分利用效率差异明显,其主要原因是深松耕处理在同等耗水条件下有效增加了玉米籽粒产量,促进了水分利用效率的提高。

地膜覆盖具有显著的增温作用,原因是地膜覆盖能够透过日光中的短波辐射,阻止地表长波辐射,又能避免地表乱流热交换以及减少因水分蒸发而损失汽化热,地膜与土面之间形成小温室效应,表现出明显的增温作用^[27]。一般土壤含水量和土壤温度呈极显著负相关关系^[28],本试验在同等覆盖条件下,不同耕作处理下土壤水分状况、土壤容重结构差异以及不同生育时期作物冠层结构都可能是影响土壤温度变化的主要原因^[29],玉米地膜覆盖生育前期较高的地温对玉米生长有促进作用,但后期过高的地温不利于增产。本研究中,深松耕前期具有明显的增温效应,后期表现出一定的降温效应,翻耕、旋耕的土壤温度前期较低后期较高,免耕处理介于深松和翻耕、旋耕之间,随着生育期的推进,处理间温度变幅减小。研究表明播前到拔节期间较高的地温有利于玉米根系生长,提高根冠比,形成壮苗,玉米生育中后期适宜的地温对于延缓根系衰老,实现玉米植株地上地下生长平衡,增强对外界环境的抗逆能力十分有利^[30],这也可能是深松耕增产的原因。

4 结论

全膜双垄覆盖条件下,深松耕和免耕较旋耕和传统翻耕能有效增加 0~30 cm 土壤贮水量,其土壤含水量较翻耕、旋耕分别增加 50.0%、43.7%和

14.8%、10.3%,全覆膜条件下深松耕增加土壤贮水的作用大于旋耕和翻耕,全膜双垄条件下耕作方式对玉米耗水量影响不大。

两个试验年度均为平水年,深松耕、旋耕和免耕的玉米生物产量分别较传统耕作增幅 6.1%~5.6%、5.6%~12.0%和 1.9%~2.8%,籽粒产量分别较传统耕作显著增加 18.6%~28.8%、17.6%~25.2%和 14.9%~15.7%,差异显著,免耕、深松耕、旋耕玉米收获指数分别较传统耕作显著提高 13.6%、11.4%、11.4%,深松耕处理的水分利用效率较传统翻耕提高 32.9%和 28.1%,旋耕在 2013 年的水分利用效率较传统耕作增加 29.5%,差异显著,免耕对玉米的水分利用效率无影响。

深松耕较传统耕作和旋耕显著降低了 5~30 cm 土壤容重,其中 5~10 cm 土层深松和免耕较传统耕作显著降低 10.9%和 12.4%,深松耕较旋耕显著降低 8.1%,10~30 cm 土层,深松耕较传统耕作和旋耕分别降低 12.9%和 15.6%,差异显著;随着土层加深,免耕、深松耕土壤容重呈降低趋势,其 5~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤容重较 0~5 cm 分别降低 12.4%、16.3%和 7.3%、6.5%,传统耕作和旋耕土壤容重的变化与免耕、深松耕相反,其 5~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤容重较 0~5 cm 分别增加 9.3%、5.1%和 1.7%、5.8%。

深松耕处理苗期较翻耕具有明显的增温效应,拔节—抽雄期具有降温效应,旋耕处理较翻耕表现出持续的降温效应,免耕维持土壤温度稳定的能力介于同时期深松与旋耕处理之间。

由此可知,深松耕能有效增加旱作全膜双垄沟播玉米土壤水分含量,降低土壤容重,调控土壤温度,协调水热关系,有利于增产和提高水分利用效率,深松耕是全膜双垄沟播玉米适宜的一种耕作方法。

参考文献

- [1] Huang G B, Zhang R Z, Li G D, et al. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems[J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 43-55
- [2] 李凤民,徐进章.黄土高原半干旱地区集雨型生态农业分析[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1): 101-103
- [3] Li F M, Xu J Z. Rainwater-collecting eco-agriculture in semi-arid region of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1): 101-103
- [4] 尚金鑫,李军,贾志宽,等.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
- [5] Shang J X, Li J, Jia Z K, et al. 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
- [4] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41–47
- [5] 张雷, 牛芬菊, 李小燕, 等. 旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(22): 142–145
Zhang L, Niu F J, Li X Y, et al. Effects of planting in furrow and whole plastic-film mulching on double ridges in autumn on yield index of corn production and water use efficiency in dry lands[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(22): 142–145
- [6] Zhang Z C, Zhang S F, Yang J C. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 71–81
- [7] 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 G B, Guo Q Y, Zhang R Z, 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
- [8] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 61–69
Zhang R Z, Huang G B, Cai L Q, et al. Dry farmland practice involving multi-conservation tillage measures in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 61–69
- [9] Pikul J L, Aase J K. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 859–866
- [10] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 78–85
Qin H L, Gao W S, Ma Y C, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 78–85
- [11] Hill P R. Use of continuous no-till and rotational tillage systems in the central and northern corn belt[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(4): 286–290
- [12] 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
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62–126
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physics and Chemistry Analysis*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983: 62–126
- [14] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 709–714
Xiao J B, Sun Z X, Yang J T, et al. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 709–714
- [15] 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 J, Li H W, Gao H W. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 62–67
- [16] 廖允成, 温晓霞, 韩思明, 等. 黄土高原旱地小麦覆盖保水技术效果研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(5): 548–552
Liao Y C, Wen X X, Han S M, et al. Effect of mulching of water conservation for dry land winter wheat in the loess tableland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5): 548–552
- [17] Richards R A, Rebetzke G J, Condon A G, et al. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals[J]. *Crop Science*, 2002, 42(1): 111–121
- [18] 李尚中, 王勇, 樊廷录, 等. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(5): 922–931
Li S Z, Wang Y, Fan T L, et al. Effects of different plastic film mulching modes on soil moisture, temperature and yield of dryland maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5): 922–931
- [19] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2/3): 115–125
- [20] Zhang S L, Li P R, Yang X Y, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(1): 92–97
- [21] 李来祥, 刘广才, 杨祁峰, 等. 甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 114–118
Li L X, Liu G C, Yang Q F, et al. Research and application development for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 114–118
- [22] 刘广才, 杨祁峰, 李来祥, 等. 旱地玉米全膜双垄沟播技术土壤水分效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 18–28
Liu G C, Yang Q F, Li L X, et al. Study on soil water effects of the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of dryland corn[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 18–28
- [23] 侯贤清, 王维, 韩清芳, 等. 夏闲期轮耕对小麦田土壤水分及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2524–2532
Hou X Q, Wang W, Han Q F, et al. Effects of rotational tillage during summer fallow on wheat field soil water regime and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2524–2532
- [24] 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 H Y, Peng W Y, Ma X, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99–104
- [25] 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 W Y. Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 379–383
- [26] 杜兵, 李问盈, 邓健, 等. 保护性耕作表土作业的田间试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(4): 65–67
- Du B, Li W Y, Deng J, et al. Research on surface tillage in conservation tillage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(4): 65–67
- [27] 潘渝, 郭谨, 李毅, 等. 地膜覆盖条件下的土壤增温特性[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(2): 130–134
- Pan Y, Guo J, Li Y, et al. Characteristics of increasing temperature in soils with plastic mulching[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(2): 130–134
- [28] 李全起, 陈雨海, 于舜章, 等. 灌溉与秸秆覆盖条件下冬小麦农田小气候特征[J]. *作物学报*, 2006, 32(2): 306–309
- Li Q Q, Chen Y H, Yu S Z, et al. Micro-climate of winter wheat field under the conditions of irrigation and straw mulching[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 306–309
- [29] 朱琳, 刘毅, 徐洪敏, 等. 黄土旱塬不同水分管理模式对旱作春玉米土壤温度的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(12): 4396–4402
- Zhu L, Liu Y, Xu H M, et al. Effects of water management patterns in spring maize cultivation on the dryland soil temperature dynamics in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(12): 4396–4402
- [30] 党建友, 张定一, 裴雪霞, 等. 黄土高原沟谷地春玉米不同耕作覆膜方式水温效应的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 75–77
- Dang J Y, Zhang D Y, Pei X X, et al. Moisture and temperature effects of different tillage and film mulching techniques for spring maize in the gully region of the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 75–77