

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.026

集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响^{*}

银敏华 李援农 张天乐 徐袁博 谷晓博 王星珪
(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于2 a 田间试验数据,对比研究了不覆盖(CK)、垄覆白膜沟不覆盖(M1)、垄不覆盖沟覆秸秆(M2)、垄覆白膜沟覆秸秆(M3)和垄覆黑膜沟覆秸秆(M4)5种集雨模式对农田土壤水热状况及夏玉米产量和水分利用效率的影响。结果表明,垄沟覆盖集雨措施可显著提高土壤贮水量、土壤含水率及土壤储水亏缺补偿度($P < 0.05$),其中全程覆盖处理(M3和M4)优于单一覆盖处理(M1和M2),垄覆黑膜处理(M4)优于垄覆白膜处理(M3)。黑色地膜较白色地膜可显著降低膜下(除表层)土壤温度($P < 0.05$);沟内覆秸秆较沟内无覆盖可有效改善根层土壤温度。M4处理较优的水热条件可显著提高玉米经济产量和水分利用效率($P < 0.05$),其2 a 平均籽粒产量和水分利用效率分别较处理CK提高30.90%和57.49%,是陕西关中地区合理有效的集雨模式。

关键词: 集雨模式 土壤水分 土壤温度 夏玉米 产量 水分利用效率

中图分类号: S157.2; S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0194-10

Effects of Different Rainwater Harvesting Patterns on Soil Hydrothermal Regimes and Water Use Efficiency of Summer Maize

Yin Minhua Li Yuannong Zhang Tianle Xu Yuanbo Gu Xiaobo Wang Xingyao
(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Two-year (2013 and 2014) field experiment was carried out to increase rainfall utilization efficiency and improve soil water availability for crops in arid area. A total of five treatments (CK: ridge-furrow planting without mulching over both ridge and furrow; M1: ridge-furrow planting with transparent film mulching over ridge only; M2: ridge-furrow planting with corn straw mulching over furrow only; M3: ridge-furrow planting with transparent film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow; M4: ridge-furrow planting with black film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow) were chosen to investigate the effects of different rainwater harvesting patterns on soil hydrothermal regimes, yield and water use efficiency of summer maize. The results showed that rainwater harvesting treatments could improve soil water storage, soil moisture content and compensation degree of soil water storage deficit significantly ($P < 0.05$). The treatments with mulching over both ridge and furrow (M3 and M4) were superior to the treatments with mulching either over ridge or over furrow (M1 and M2). And treatment M4 was better than treatment M3. Compared with transparent film mulching over ridge, black film mulching over ridge could reduce the temperature under film ($P < 0.05$). In contrast to no mulching over furrow, corn straw mulching over furrow could optimize the heat condition around roots. With improved soil water and temperature conditions, the treatment of ridge-furrow planting with black film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow (M4) could increase yield and water use efficiency of summer maize to a great extent. Compared with CK, the average yield and water use

收稿日期: 2015-05-02 修回日期: 2015-05-30
^{*} 农业部公益性行业科研专项资助项目(201503105)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)
作者简介: 银敏华, 博士生, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: 15109217864@163.com
通讯作者: 李援农, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术及3S技术应用研究, E-mail: liyuannong@163.com

efficiency of M4 in 2013 and 2014 were increased by 30.90% and 57.49%, respectively. In conclusion, treatment M4 was the appropriate rainwater harvesting pattern for summer maize cultivation in Guanzhong Region, Shaanxi Province. The results could provide valuable information for selecting efficient rainwater harvesting pattern in semi-arid regions of China.

Key words: Rainwater harvesting pattern Soil moisture Soil temperature Summer maize Yield
Water use efficiency

引言

干旱半干旱地区是中国乃至世界范围内农业生产的重要组成部分,也是粮油和林牧产业的主要基地。该地区气候干燥,地表水资源匮乏,降水量少且变律大,不仅不利于作物的有效吸收,而且容易引起水土流失和干旱发生^[1-3]。研究如何提高自然降水的保蓄率,改善土壤水分状况,协调作物需水与土壤供水间的矛盾,实现现代生态型旱地农业的可持续发展是旱区农业生产的核心问题^[4-5]。

农田集雨是干旱半干旱地区调控土壤水、肥、气、热状况,实现农业旱涝保收的一项重要措施^[6]。研究表明,垄沟耕作通过改变微地形将肥料与向下水流隔离,可减少氮素淋溶,促进沟内水分向垄侧运移,从而减少深层渗漏^[7-8]。垄膜沟播栽培可协调土壤水热关系,改善田间小气候,提高叶片光合性能^[9-10]。秸秆、液态膜、普通地膜和生物降解膜覆盖均可显著提高土壤含水率,实现增产、高效的有机统一^[9,11-12]。对覆膜作物在适当时期揭膜,可有效调节耕层土壤温度,增强根区土壤透气性,改善光合产物分配,延缓植株衰老^[13-15]。与均行小垄种植相比,大垄宽窄行种植可增加土壤蓄水保墒能力,改善土壤结构,促进植株生长^[16]。垄沟比 40 cm:60 cm 的垄沟集雨模式可显著提高植株叶绿素含量及水分利用效率^[17-18]。

目前,关于农田集雨措施的研究大多集中于不同种植模式、覆盖材料、覆膜时长及垄沟比例等方面,而较少涉及全程微型聚水二元覆盖,且现阶段关于系统比较不同二元覆盖模式下农田土壤水热迁移与分布以及作物产量与水分利用的研究较为缺乏,尤其是针对具备灌溉条件,但灌溉成本不断加大的地区,这一技术的应用成效至今尚未清楚。本文通过 2 a 田间试验,对比研究不同集雨模式的水热状况及产量和水分效应,以期缓解该区水资源供需矛盾、降低灌溉成本、提高农田综合效益以及完善旱区作物增产机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013、2014 年 6—10 月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室试验站进行。该区位于 108°24'E,34°20'N,海拔高度 521 m,全年无霜期 210 d,年均降水量 632 mm,主要分布在 7—9 月份,年均蒸发量 1 500 mm。土壤质地为中壤土,1 m 土层平均田间持水率 23%~25%,凋萎含水率 8.5% (均为质量含水率),平均干容重 1.44 g/cm³。耕层土壤(0~25 cm)基础肥力(质量比)为:有机质 11.18 g/kg,全氮 0.94 g/kg,全磷 0.60 g/kg,全钾 14.10 g/kg,硝态氮 76.01 mg/kg,速效磷 25.22 mg/kg,速效钾 131.97 mg/kg。气象资料由西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站提供。

1.2 试验设计

供试玉米品种为“漯单 9 号”。试验采用垄沟种植技术,垄、沟宽均为 60 cm,垄高 20 cm。试验设不覆盖(CK)、垄覆白膜沟不覆盖(M1)、垄不覆盖沟覆秸秆(M2)、垄覆白膜沟覆秸秆(M3)和垄覆黑膜沟覆秸秆(M4)5 个处理,每个处理重复 3 次,共 15 个小区。小区面积为 20 m² (4 m×5 m),随机区组排列(2 a 中同一小区处理一致)。小区边缘埋有 2 m 深塑料膜以防止小区间水分互渗,试验区四周布置 2 m 宽相同作物保护带。黑色和白色塑料膜膜宽 100 cm,膜厚 0.008 mm;秸秆(小麦秸秆,前茬收获)覆盖量为 6 000 kg/hm²。

1.3 田间管理

于播种前 10 d 深翻并平整田地,挖沟起垄,玉米植于垄两侧,株距 30 cm。氮肥(尿素,N 质量分数 46%) 120 kg/hm² (纯 N),基追比为 2:3,各处理基施氮肥、磷肥(过磷酸钙,P₂O₅ 质量分数 16%) 120 kg/hm² (纯 P₂O₅) 和钾肥(硫酸钾,K₂O 质量分数 50%) 60 kg/hm² (纯 K₂O) 作为基肥于翻地前均匀撒施,追施氮肥在大喇叭口期进行(分别为 2013 年 7 月 27 日和 2014 年 7 月 24 日)。因 2013 年出苗期和 2014 年拔节期持续高温且无降雨发生,分别补充灌溉 35 mm。其他管理措施同一般高产田。

2013 年 6 月 17 日播种,10 月 11 日收获;2014 年 6 月 15 日播种,10 月 10 日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤含水率

土壤含水率采用干燥法测定。玉米生育期内每隔 20 d(播种后 20、40、60、80、100 d)测定一次,测定深度为 1 m(每隔 10 cm 取 1 个土样)。播种前和收获后测定深度为 2 m(0~100 cm 每隔 10 cm 取 1 个土样,100~200 cm 每隔 20 cm 取 1 个土样)。取土位置为小区中央沟内玉米植株的中心区域及相邻垄上。土壤储水量计算公式为

$$W=10H\rho B \tag{1}$$

式中 W ——土壤储水量,mm
 H ——土层深度,cm
 ρ ——土壤干容重,g/cm³
 B ——土壤质量含水率,%

1.4.2 土壤水分亏缺度与土壤储水亏缺补偿度

为了评价不同集雨模式的保水效果,采用土壤水分亏缺度与土壤储水亏缺补偿度对比分析不同集雨措施下土壤储水亏缺的补偿与恢复^[19-21]。

土壤水分亏缺度计算公式为

$$D=\frac{D_a}{F}\times 100\% \tag{2}$$

其中 $D_a=F-W_c$ (3)

式中 D ——土壤水分亏缺度, %
 D_a ——植物水分亏缺量,mm
 F ——土壤田间持水量,mm
 W_c ——土壤实际储水量,mm

$D>0$ 表示土壤水分亏缺,值越大代表亏缺程度越高; $D\leq 0$ 说明土壤水分亏缺得以恢复。

土壤储水亏缺补偿度计算公式为

$$C=\frac{\Delta W}{D_{ac}}\times 100\% \tag{4}$$

其中 $\Delta W=W_{cm}-W_{cc}$ (5)

$$D_{ac}=F-W_{cc} \tag{6}$$

式中 C ——土壤储水亏缺补偿度, %
 ΔW ——时期末土壤储水量增量,mm
 W_{cc} ——时期初土壤实际储水量,mm
 W_{cm} ——时期末土壤实际储水量,mm
 D_{ac} ——时期初土壤储水亏缺量,mm

亏缺补偿度 $C\leq 0$,表示土壤水分亏缺在一段时期后并未得到补偿,甚至进一步加剧;亏缺补偿度 $C=100\%$,则表明土壤水分亏缺得以完全补偿与恢复。

1.4.3 降雨量和径流量

在试验区周围安装自记式雨量计,分别在膜垄(M1、M3 和 M4)和土垄(CK 和 M2)安装由铁皮制

作的简易径流小区,小区长、宽、高分别为 25、25、20 cm,安装时将其埋入地下 8 cm。计算径流系数时考虑垄沟角度的影响,计算垂直投影面积,每个处理重复 3 次。

临界产流降雨量即能产生径流的最小降雨量,是雨水集流系统设计的重要参数。目前主要通过线性回归法确定临界产流降雨量及产流后的集流效率,公式为

$$R_i=-a+bP_i=b(P_i-c) \tag{7}$$

式中 R_i ——第 i 次径流量,mm
 P_i ——第 i 次降雨量,mm
 a ——回归系数
 b ——产流后的集流效率
 c ——临界产流降雨量,mm

在一定时期内,雨水集流系统的平均集水效率计算式为

$$\varepsilon=\frac{R_t}{P_t}\times 100\% \tag{8}$$

式中 ε —— t 时段内的平均集水效率, %
 R_t —— t 时段内的径流总量,mm
 P_t —— t 时段内的降雨总量,mm

1.4.4 地表温度和土壤温度

分别采用直管温度计和曲管地温计(置于各处理冠层覆盖度相近的位置)测定不同处理垄上和沟内地表温度及土壤温度(5、10、15、20、25 cm)。定苗后开始观测,每 15 d 测定一次,测定时间为 08:00—20:00(每 2 h 测 1 次),取其平均值作为日平均土壤温度。

1.4.5 测产与考种

玉米成熟后采用 1 m² 的样方人工脱粒测产,换算成单位面积产量(kg/hm²),并选其中 5 穗,测定玉米穗部性状。

1.4.6 水分利用效率

根据收获时玉米籽粒产量、生物产量及生育期耗水量计算水分利用效率和经济系数,其计算式为

$$W_{UE}=\frac{G_y}{ET} \tag{9}$$

$$E_c=\frac{G_y}{B_y}\times 100\% \tag{10}$$

其中 $ET=P+E_r\frac{n_1}{n_2}P+W_1-W_2+I+K$ (11)

式中 W_{UE} ——水分利用效率,kg/mm³
 G_y ——夏玉米经济产量,kg/hm²
 ET ——作物耗水量,mm
 W_1 、 W_2 ——收获后和播种前 200 cm 土层储水量(以沟内和垄上储水量平均

值计算), mm
 E_r ——微集水种植垄面集水效率, %
 P ——作物生育期内降雨量, mm
 n_1, n_2 ——垄宽和沟宽, cm
 I ——灌溉水量, mm
 K ——时段内地下水补给量, mm
 E_c ——作物经济系数, %
 B_y ——作物生物产量, kg/hm²

由于该试验区地下水埋深在 5 m 以下, 可视地下水补给量 K 为零。

1.5 数据分析

分别采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 进行数据整理与统计分析, 方差分析使用最小显著差异法 (LSD) 进行 ($P < 0.05$), 使用 Origin 8.5 和 Sigma Plot 12.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 夏玉米生育期内降雨与气温分布

2013、2014 年夏玉米生育期间逐日降雨量及日平均气温如图 1 所示。由图 1 分析知, 2 个夏玉米生长季总降雨量分别为 269.5、355.3 mm, 大于 5 mm 有效降雨量^[22] 分别为 253.5、317.8 mm。其中, 2013 年夏玉米各生育阶段降雨量分别为苗期 (6 月 17 日—7 月 25 日) 95.5 mm、拔节期 (7 月 26 日—8 月 28 日) 70.5 mm、抽雄期 (8 月 29 日—9 月 20 日) 64.7 mm 和灌浆期 (9 月 21 日—10 月 10 日) 38.8 mm; 而 2014 年夏玉米生长期降雨分布极不均匀, 前期降雨较少, 后期尤其是抽雄期降雨加大, 4 个主要生育期的降雨量分别为 50.7、52.6、206.5、45.5 mm。

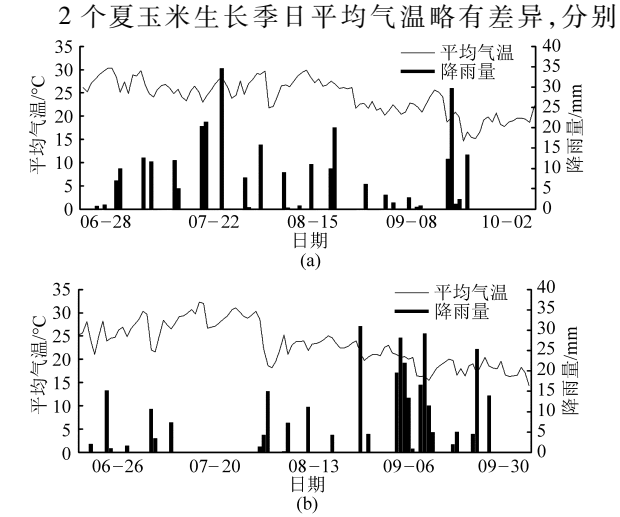


图 1 夏玉米生育期间逐日降雨量与气温分布
Fig. 1 Daily distribution of rainfall and mean temperature during summer maize growth periods
(a) 2013 年 (b) 2014 年

为 24.3、23.3℃, 变幅分别为 14.6 ~ 31.2℃ 和 14.3 ~ 32.3℃。

2.2 不同集雨模式下土壤水分的时空变化特征

2.2.1 土壤贮水量的时间变化

土壤贮水量是一定时期内土壤水分收支状况的综合反映。不同集雨模式下土壤贮水量 (0 ~ 100 cm) 随播种后天数的动态变化如图 2 所示。由图 2 分析知, 2 个夏玉米生长季, 不同集雨模式下夏玉米生育期内土壤贮水量均呈 V 字型变化, 即苗期和成熟期土壤水分较高, 而拔节期、抽雄期和灌浆期土壤水分较低, 且不同测定时期, 土壤贮水量均表现为处理 M1、M2、M3 和 M4 显著高于处理 CK ($P < 0.05$)。这与夏玉米生长规律及该区降水特征有关。

2013 年夏玉米生长季, 播种前经 7 d 左右的晒田, 播种时各处理土壤贮水量无显著差异。播种后 20 ~ 60 d 期间, 植株矮小, 地表裸露面积较大, 棵间蒸发强烈, 处理 M3 和 M4 在高效集雨的同时可大幅度降低土壤无效蒸发, 其土壤贮水量显著高于处理 M1、M2 和 CK ($P < 0.05$)。播种后 60 ~ 80 d, 正值夏玉米由营养生长向生殖生长过渡, 植株生长旺盛, 冠层覆盖度加大, 而棵间蒸发甚微, 处理 M1、M2、M3 和 M4 间土壤贮水量无显著差异, 但显著高于处理 CK ($P < 0.05$)。之后, 降雨强度逐渐减小, 处理间土壤贮水量的差异主要由植株蒸腾的强度引起。就生育期平均贮水量而言, 处理 M1、M2、M3 和 M4 分别较处理 CK 提高 7.36%、5.12%、11.60% 和 12.32% ($P < 0.05$)。可见, 全程微型聚水二元覆盖可有效提高土壤贮水量。

2014 年夏玉米生长季, 受早期降雨稀少后期降雨密集的影响, 不同处理生育期内土壤贮水量波动较大, 其贮水量极差较 2013 年增加 35.20 ~ 70.18 mm。且生育期间土壤贮水量达到最低值时, 处理间土壤贮水量差异较 2013 年偏大。可见, 降雨量小或土壤缺水时更能突显不同集雨模式的保水性能。

2.2.2 土壤含水率的空间变化

不同集雨模式下土壤水分垂直分布如图 3 所示 (为 7 次取样结果的平均值)。受不同土层中根系分布、根系吸水速率及土壤有效水含量的影响, 2 个夏玉米生长季不同集雨模式下 0 ~ 100 cm 土壤含水率均随土层深度的增加呈先降低后升高的趋势。

2013 年生长季, 0 ~ 20 cm 土层平均土壤含水率表现为处理 M1 和 M2 分别较处理 CK 提高 2.09% 和 4.53% ($P < 0.05$), 处理 M3 和 M4 分别较处理 CK 提高 6.88% 和 7.43% ($P < 0.05$)。可见, 与单一覆盖相比, 全程微型聚水二元覆盖较好的集雨保墒抑蒸调温效应可有效提高耕层土壤含水率。30 ~

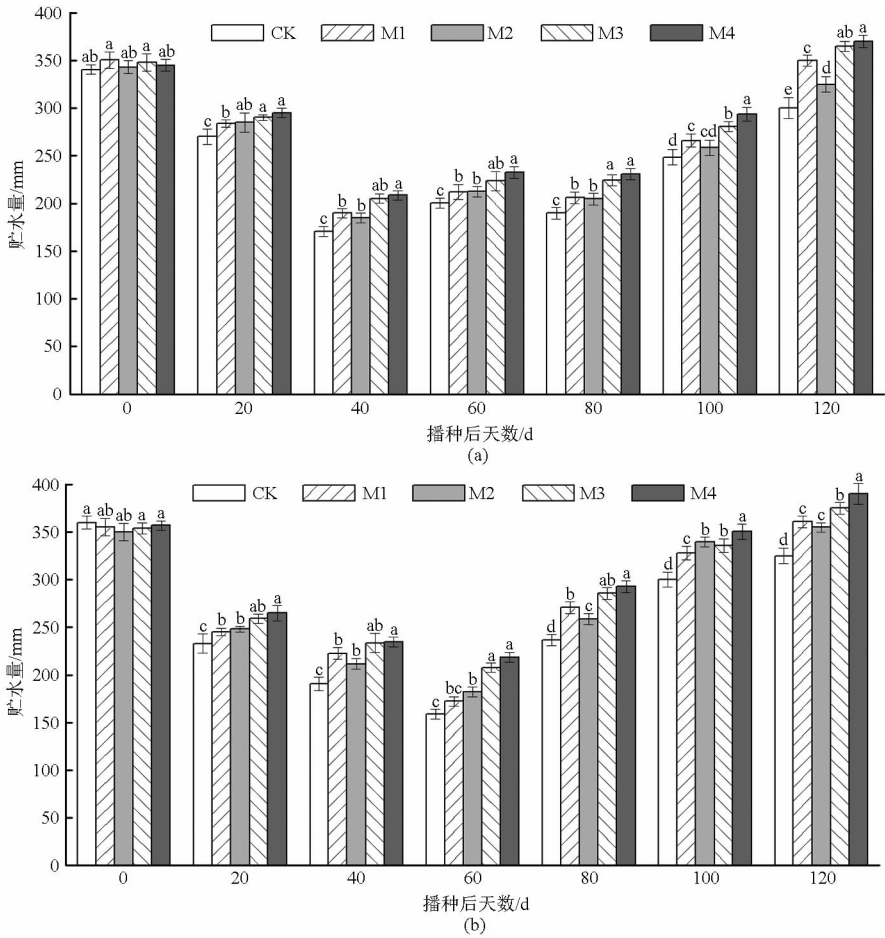


图 2 不同集雨模式下土壤贮水量变化动态

Fig. 2 Variation of soil water storage under different rainwater harvesting patterns

(a) 2013 年 (b) 2014 年

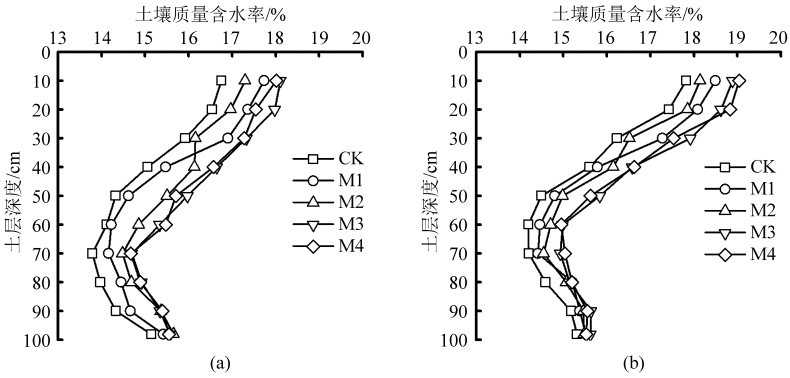


图 3 不同集雨模式下土壤水分垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of soil moisture under different rainwater harvesting patterns

(a) 2013 年 (b) 2014 年

50 cm 土层各处理土壤含水率逐渐下降,其中处理 M2、M3 和 M4 的土壤含水率分别较处理 CK 提高 6.97%、7.51% 和 7.49% ($P < 0.05$),而处理 M1 和处理 CK 间差异不显著。50 ~ 70 cm 土层各处理土壤含水率相对稳定,随后土壤含水率有所回升,且处理间差异逐渐趋同。

受生育期降雨分布的影响,2014 年生长季各处理土壤含水率变幅较 2013 年整体偏高,为 14.19% ~

19.04%。

2.3 不同集雨模式下土壤水分亏缺度与储水亏缺补偿度

2.3.1 土壤水分亏缺度

不同集雨模式下夏玉米生育期内土壤水分亏缺度如表 1 所示。由表 1 分析知,在降雨集中期,不同集雨模式下土壤水分亏缺状况均有所缓解,其余阶段各处理土壤水分处于不同程度的亏缺状态。

2013 年生长季,播种后 20 ~ 40 d 期间,地表覆盖度小,植株蒸腾强度弱,而土壤蒸发强烈。各集雨模式下土壤水分亏缺度较大,但与处理 CK 相比,其土壤水分仍有所改善。播种后 60 ~ 80 d 期间,随降雨频率的提高及降雨强度的加大,不同集雨模式下土壤水分亏缺状况得到有效缓解。各处理除 50 ~ 100 cm 土层土壤仍处于水分亏缺状态外,其余土层水分均得以完全恢复。播种后 80 d 至收获期间,降雨量减少,但太阳辐射强烈,植株蒸腾耗水旺盛,土壤水分再次进入亏缺状态。

2014 年生长季,夏玉米生长前期降雨稀少,播种后 20 ~ 60 d 期间,各集雨模式下土壤水分处于

持续亏缺状态,且 30 ~ 100 cm 土层土壤水分亏缺状态较为严重,说明在干旱时期,作物根系对深层土壤水分的吸收利用加大。播种后 80 ~ 100 d 期间,遇连雨天气,各集雨措施下土壤水分亏缺状态均得以逆转,其中 0 ~ 20 cm 土壤水分得到完全恢复。

就不同集雨模式的集雨效果而言,全程覆盖处理优于单一覆盖处理,垄覆黑膜处理优于垄覆白膜处理。这主要是由于全程微型聚水覆盖可将集雨和保墒有机统一,从而增加作物根区水分供应,提高降雨有效性;另外,黑膜特有的光学效应可有效抑制杂草生长,减少土壤水分消耗。

表 1 不同集雨模式下土壤储水量亏缺度

Tab.1 Deficit degree of soil water storage under different rainwater harvesting patterns %

处理	土层深度/ cm	播种后天数/d											
		2013 年						2014 年					
		20	40	60	80	100	收获	20	40	60	80	100	收获
CK	0 ~ 20	20.92	23.13	18.67	-5.07	6.00	19.67	18.27	24.52	29.21	-1.01	-15.01	8.17
	30 ~ 50	22.46	17.58	24.08	-0.87	10.25	15.00	21.21	29.71	35.01	10.25	5.76	10.61
	50 ~ 100	30.46	30.17	30.04	24.31	18.29	19.96	30.29	29.40	32.21	25.01	15.20	1533
M1	0 ~ 20	17.67	19.13	13.33	-10.02	0.29	14.12	17.13	21.57	24.03	-6.11	-20.11	4.28
	30 ~ 50	18.79	12.79	23.08	-1.72	11.50	13.17	16.58	26.01	34.10	11.50	5.94	10.22
	50 ~ 100	32.17	30.88	32.42	25.63	11.13	15.05	29.17	31.89	34.12	22.53	11.29	10.18
M2	0 ~ 20	19.63	19.29	14.58	-6.89	4.13	15.67	17.29	18.97	25.58	-4.78	-17.06	5.66
	30 ~ 50	15.33	11.50	21.46	-3.45	7.58	13.67	17.50	23.32	32.41	7.58	3.09	7.75
	50 ~ 100	30.92	31.13	30.04	23.85	15.17	19.42	30.13	31.42	33.05	23.22	13.11	12.89
M3	0 ~ 20	12.04	17.54	9.54	-19.59	-2.13	12.42	12.13	14.44	20.17	-10.61	-29.20	-2.65
	30 ~ 50	14.71	19.00	18.83	-2.53	5.79	15.04	12.79	17.01	29.73	5.79	2.19	8.33
	50 ~ 100	29.67	24.08	25.17	25.09	9.88	16.21	29.88	30.61	32.11	20.01	9.76	10.09
M4	0 ~ 20	10.71	15.17	7.25	-23.95	-5.54	10.29	11.54	12.75	18.03	-11.05	-30.44	-3.34
	30 ~ 50	13.01	10.25	13.13	-6.43	4.98	13.21	11.00	16.51	26.19	4.98	3.19	8.17
	50 ~ 100	30.00	28.29	27.96	21.03	10.08	15.42	29.08	30.66	32.06	20.03	10.21	10.00

2.3.2 土壤储水亏缺补偿度

与播种前相比,收获时各处理不同土层土壤储水亏缺补偿度如图 4 所示。

由图 4 分析知,收获时 5 种集雨处理土壤储水亏缺补偿度在不同土层深度存在明显差异。2013 年夏玉米生长季,0 ~ 40 cm 土层土壤储水亏缺补偿

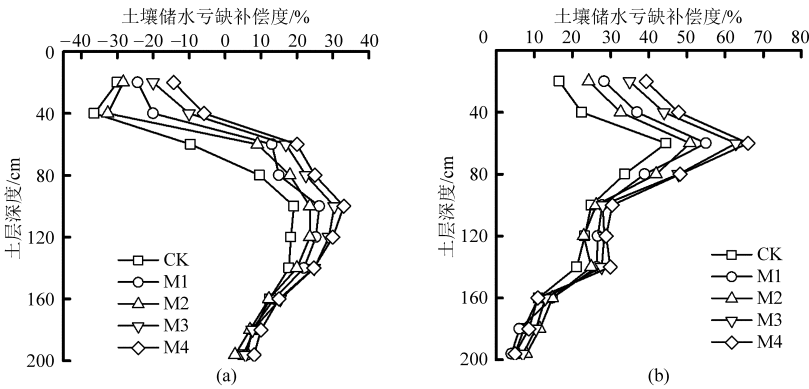


图 4 不同集雨模式下收获时土壤储水亏缺补偿度随土层深度的变化

Fig. 4 Compensation degree of soil water storage deficit in different soil depths under different rainwater harvesting patterns

(a) 2013 年 (b) 2014 年

度均为负值,说明夏玉米生育期间蒸散量大于降雨量,表现为土壤储水量的负增长。40 ~ 100 cm 土层,随土层的加深,土壤储水亏缺补偿度加大,之后逐渐减少。在 160 ~ 200 cm 深度范围时,土壤储水亏缺补偿度基本稳定。不同集雨模式的土壤储水亏缺补偿度表现为全程覆盖处理大于单一覆盖处理,垄覆黑膜处理大于垄覆白膜处理。其中处理 M1 和 M2 的土壤储水亏缺补偿度在 0 ~ 40 cm 土层范围内表现为 M1 大于 M2,之后为 M1 小于 M2。可见,覆盖地膜时土壤水分向上运移,具有提墒效应;覆盖秸秆则有利于增加降水入渗深度。

2014 年夏玉米生长季,不同集雨模式间土壤储水亏缺补偿度变化规律与 2013 年基本一致,但受降

雨分布、蒸散强度和土壤水分运移特性的影响,各集雨模式的土壤储水亏缺补偿度较 2013 年整体偏高,且各处理土壤储水亏缺补偿度峰值所对应的深度较 2013 年明显减小。

2.4 垄沟系统的集雨效率

集雨效率是评价集雨系统性能的一个重要指标。膜垄和土垄 2 种下垫面材料下垄沟集雨径流-降雨关系如表 2 所示。由表 2 分析可知,膜垄和土垄的集流效率分别为 91% 和 18%,临界产流降雨量分别为 0.39 mm 和 2.63 mm。从径流量占降雨量的总体比例来看,膜垄和土垄的平均集雨效率分别为 85.98% 和 12.64%。可见,与土垄相比,膜垄可大幅度提高集雨效率。

表 2 试验区沟垄集雨径流-降雨量关系
Tab.2 Correlations between runoff and rainfall amount at experimental site

下垫面材料	径流-降雨量关系模型	<i>r</i>	<i>P</i>	临界产流降雨量/mm	平均集雨效率/%
膜垄	$R_i = 0.91P_i - 0.35$	0.93	<0.01	0.39	85.98
土垄	$R_i = 0.18P_i - 0.47$	0.81	<0.01	2.63	12.64

注:*r* 为相关系数,*P* 为显著性水平。

2.5 不同集雨模式下土壤温度的分布特征

土壤温度是土壤热状况的综合反映。拔节期是夏玉米营养生长最旺盛的时期,此时适宜的土壤温度环境是其良好生长的必要条件。2 a 不同集雨模式下夏玉米拔节期日平均土壤温度的空间分布特征

基本一致。现以 2013 年为例进行分析(图 5),图中横轴刻度 -60、0、60 cm 分别表示沟左侧垄上土壤温度测定位置、沟中土壤温度测定位置和沟右侧垄上土壤温度测定位置。

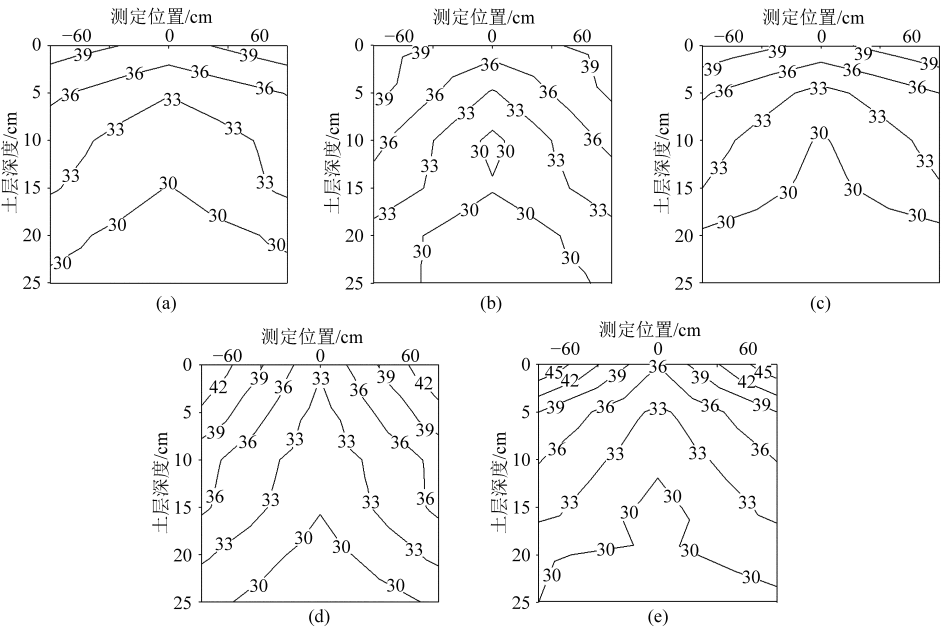


图 5 不同集雨模式下夏玉米拔节期日平均土壤温度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of average daytime temperature in 0 ~ 25 cm soil layer under different rainwater harvesting patterns
(a) CK (b) M1 (c) M2 (d) M3 (e) M4

由图 5 分析知,5 种集雨模式下夏玉米拔节期日平均土壤温度均表现为垄上高于沟内,且随土层的加深,土壤温度呈降低趋势。统计分析表明,垄上

0 cm (表层)处日平均土壤温度表现为覆黑膜分别较覆白膜和无覆盖提高 12.52% 和 17.53% ($P < 0.05$),而覆黑膜、覆白膜和无覆盖 3 种垄覆盖条件

下 5 ~ 25 cm 土层的日平均土壤温度分别为 29.4 ~ 36.6℃、31.6 ~ 41.5℃ 和 30.0 ~ 38.1℃。可见,与白色地膜相比,黑色地膜较低的热辐射和透光率可显著提高自身温度,而降低膜下(除表层)土壤温度($P < 0.05$)。沟内覆秸秆和无覆盖条件下 0 ~ 25 cm 土层的平均土壤温度分别为 29.1℃ 和 31.6℃。这主要是由于覆盖秸秆相当于在土壤表面形成一道物理隔离层,可有效拦截和吸收太阳直射及地表有效辐射,阻碍土壤与大气间的水热交换,从而降低土壤温度。由此得出,处理 M4 在最大限度蓄水保墒的同时,可显著降低植株根层土壤温度,为作物生长创造相对适宜的水热环境。

2.6 不同集雨模式的产量及水分利用效率

不同集雨模式下夏玉米产量、产量构成因素及水分利用效率如表 3 所示。由表 3 分析知,各集雨处理夏玉米穗长、穗粗、穗粒数和百粒质量等穗部性状均优于对照,其中处理 M3 和 M4 间无显著差异,但显著优于处理 M1 和 M2。籽粒产量的结果表明,

垄沟均覆盖处理较垄沟单覆盖处理以及垄覆黑膜处理较垄覆白膜处理可显著提高籽粒产量。其中处理 M1、M2、M3 和 M4 的籽粒产量在 2013 年分别较处理 CK 增加 22.81%、15.27%、28.61% 和 31.63% ($P < 0.05$),在 2014 年分别增加 19.45%、13.17%、28.63% 和 30.16% ($P < 0.05$)。收获指数表现为处理 CK、M3 和 M4 显著高于处理 M1 和 M2。可见,垄上覆膜的集雨抑蒸作用与沟内覆秸秆的保墒促渗效应相组合可协调土壤水热环境,促进经济产量的形成,且与垄覆白膜相比,垄覆黑膜的增产效应更为突出。

处理间水分利用效率由大到小为:全程微型聚水覆盖(M3 和 M4)、单一覆盖(M1 和 M2)、CK。其中,2013 年生长季,处理 M1、M2、M3 和 M4 分别较 CK 提高 41.18%、35.61%、52.57% 和 59.82% ($P < 0.05$);2014 年生长季,处理 M1、M2、M3 和 M4 分别较 CK 提高 41.94%、34.02%、50.86% 和 55.16% ($P < 0.05$)。可见,处理 M4 集蓄水与保水于一体且具有高度抑制杂草的特性,可显著提高降雨有效性。

表 3 不同集雨模式下夏玉米产量及构成因素

Tab.3 Yield and its components of summer maize under different rainwater harvesting patterns

年份	处理	穗长/ cm	穗粗/ mm	穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	百粒质量/ g	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	收获指数
2013	CK	15.5 ^c	44.01 ^c	498 ^c	28.19 ^c	8 046 ^c	2.10 ^d	0.431 ^a
	M1	16.3 ^b	45.98 ^b	551 ^b	30.03 ^b	9 881 ^c	2.96 ^c	0.408 ^c
	M2	15.7 ^c	45.12 ^b	508 ^c	28.48 ^c	9 275 ^d	2.85 ^{cd}	0.413 ^c
	M3	17.0 ^{ab}	48.08 ^a	564 ^{ab}	30.51 ^{ab}	10 348 ^b	3.20 ^b	0.428 ^b
	M4	17.5 ^a	47.48 ^{ab}	582 ^a	30.65 ^a	10 591 ^a	3.35 ^a	0.432 ^a
2014	CK	14.3 ^c	42.18 ^c	467 ^d	25.06 ^c	7 712 ^d	1.79 ^d	0.448 ^a
	M1	15.4 ^b	43.71 ^b	519 ^b	26.94 ^b	9 212 ^b	2.55 ^b	0.425 ^b
	M2	14.8 ^{bc}	43.29 ^b	490 ^c	25.56 ^c	8 728 ^c	2.40 ^c	0.419 ^b
	M3	15.9 ^{ab}	45.44 ^a	527 ^{ab}	27.32 ^{ab}	9 920 ^{ab}	2.71 ^{ab}	0.452 ^a
	M4	16.4 ^a	45.72 ^a	549 ^a	27.46 ^a	10 038 ^a	2.78 ^a	0.449 ^a

注:同列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

3 讨论

3.1 集雨模式的增温保墒效应

集雨模式对土壤温度的影响因土壤类型、气候条件和覆盖材料的不同而有所差异^[23]。本研究表明,5 种集雨模式下夏玉米拔节期日平均土壤温度表现为垄上高于沟内,且随土层加深土壤温度呈降低趋势。这与李荣等^[24]和员学峰等^[25]的研究结果一致。陈素英等^[26]研究了秸秆覆盖下麦田土壤温度的动态变化,结果表明,秸秆覆盖条件下土壤温度日变幅减小,且冬季具有增温效应,夏季则有降温效应。李荣等^[27]研究发现,垄覆地膜沟覆秸秆处理 5 ~ 25 cm 土壤温度均低于不覆盖处理。本研究也得出类似的结论,沟内覆秸秆较无覆盖可有效降低

土壤温度,其 0 ~ 25 cm 土层的平均土壤温度分别为 29.1℃ 和 31.6℃。在炎热的夏季,覆盖秸秆特有的降温效应有利于提高根系活性、延缓植株衰老,这对于夏茬作物具有重要意义。

集雨措施通过改变下垫面特性来调控土壤水分分布、抑制水分无效蒸发、提高降水利用效率^[28]。本研究表明,5 种集雨模式土壤水分垂直分布中,0 ~ 20 cm 土层土壤含水率表现为处理 M1、M2、M3 和 M4 显著高于处理 CK,而 30 ~ 50 cm 土层土壤含水率仅处理 M1 与处理 CK 间差异不显著。这与李荣等^[24]的研究结果不太一致。这可能与土壤水分测定时期及降雨年型不同有关。关于不同下垫面垄沟系统的集雨效率,本研究得出垄覆膜和不覆膜的平均集雨效率分别为 85.98% 和 12.64%。这与前

人^[29-30]的研究存在一定的差异,可能原因包括垄的尺寸、膜的厚度及完好程度有所不同,同时与试验区的降雨分布及风速等也存在一定的关系。

陕西关中地区冬小麦、夏玉米一年两作的种植制度,富集了大量的作物秸秆,通过秸秆还田和残茬覆盖可培肥地力,降低成本并调控土壤水热状况,是作物秸秆综合利用的有效途径。垄覆黑膜沟覆秸秆集雨措施集蓄水、保水与降低土壤温度于一体,同时,黑膜固有的除草性能可进一步减少土壤水分耗散。因此,该集雨模式是合理有效的,但其适用范围与生态效益还有待深入研究。

3.2 集雨模式的增产效应

在干旱半干旱地区,作物增产主要依赖于生育期间的有效降水及播前土壤蓄水,集雨种植可有效改善作物生长的水热状况,从而实现高产稳产^[4]。李小雁等^[30]研究表明,垄沟覆膜集雨种植条件下玉米生物产量和籽粒产量较对照显著增加。李荣等^[27]研究发现,垄覆地膜,沟分别覆生物降解膜、普通地膜和秸秆时,春玉米增产效果显著,4年平均产量分别较对照提高35.2%、34.7%和33.6%。本研究也表明,垄沟覆盖集雨模式可显著提高玉米籽粒产量,且垄沟均覆盖的增产效果优于垄沟单覆盖。Li等^[4]研究表明,地膜覆盖垄沟集雨系统在干旱和平均年份可提高玉米产量60%~95%,而在湿润年份仅提高20%~30%。任小龙等^[31]研究发现,随生育期降雨量的增加,垄沟集雨措施的增产效果减弱。在本研究中,2013年和2014年夏玉米生育期降雨量分别为269.5 mm和355.3 mm,而各集雨处理较对照的增产效果却表现为2013年优于2014年,与前人研究^[4,31]结果不太一致,这可能与夏玉米生育期间降雨分布有关。

3.3 集雨模式的水分有效性

集雨种植可改善作物根区土壤水热状况,提高土壤水分有效性,促进经济产量的形成,从而提高水分利用效率。覆盖材料会影响作物的水分利用效率。陈素英等^[26]研究表明,秸秆覆盖使土壤温度低

于作物生长最适温度,易导致作物减产。而本研究发现,沟覆秸秆(M2、M3和M4)处理下土壤温度较CK低,但并未影响其产量和水分利用效率的提高。这可能与作物种类及其生长时期不同有关。夏玉米生育期在6—10月份,正值炎热的夏季,降低土壤温度反而有利于其生长。降雨年型也会影响作物水分利用效率。任小龙等^[5]研究发现,夏玉米在230 mm和340 mm降雨量下,集雨处理水分利用效率分别较对照增加73.3%和40.2%,而在440 mm降雨量下,集雨处理与对照无显著差异。在本研究中,2014年夏玉米生育期降雨量较2013年偏高85.8 mm,但各集雨模式的水分利用效率却较2013年降低3.05%~5.71%。

4 结论

(1) 垄沟覆盖集雨措施可显著提高土壤贮水量、土壤含水率及土壤储水亏缺补偿度,其中全程覆盖处理(M3和M4)优于单一覆盖处理(M1和M2),垄覆黑膜处理(M4)优于垄覆白膜处理(M3)。

(2) 与垄覆白色地膜相比,垄覆黑色地膜可显著降低膜下(除表层)土壤温度($P < 0.05$);与沟内无覆盖相比,沟内覆秸秆可有效降低根层土壤温度。

(3) 不同垄沟覆盖集雨处理均可在一定程度上改善土壤水热状况,增加玉米籽粒产量并提高水分利用效率。在2个夏玉米生长季,处理M1、M2、M3和M4的平均产量分别较处理CK提高21.13%、14.22%、28.62%和30.90%;平均水分利用效率分别较处理CK提高41.56%、34.81%、51.72%和57.49%。

(4) 生育期总降雨量与降雨分布影响垄沟集雨措施的集雨效果,相对均匀的降雨分布尤其是作物关键生育期降雨可显著提高土壤水分有效性及作物经济产量。

(5) 综合考虑土壤水热条件、夏玉米产量和水分利用效率,垄覆黑膜沟覆秸秆(M4)处理可作为陕西关中地区合理有效的集雨模式。

参 考 文 献

1 姚建民,殷海善.降水资源有效化与旱地农业[J].资源科学,1999,21(4):47-50.
Yao Jianmin, Yin Haishan. Rainfall resources validation and dryland farming [J]. Resources Science, 1999, 21(4): 47-50. (in Chinese)

2 Li Xiaoyan, Gong Jiadong. Effect of different ridge;furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches [J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243-254.

3 Li Fengrui, Zhao Songling, Geballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2000, 79(2-3): 129-142.

4 Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Qian Zhaogao, et al. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid condition [J]. Agricultural Water Management, 2001,50(3):173-183.

- 5 何进,王庆杰,李洪文,等. 华北一年两熟区免耕开沟种床对农田作物生长的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 50 – 56,62.
He Jin, Wang Qingjie, Li Hongwen, et al. Effects of no-till opening seedbed on crop growth in annual double cropping areas in northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 50 – 56, 62. (in Chinese)
- 6 李仙岳,彭遵原,史海滨,等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 97 – 103.
Li Xianyue, Peng Zunyuan, Shi Haibin, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 97 – 103. (in Chinese)
- 7 Bargar B, Swan J B, Jaynes D. Soil water recharge under uncropped ridges and furrows [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1290 – 1299.
- 8 Ressler D E, Horton J, Baker J L, et al. Testing a nitrogen fertilizer applicator designed to reduce leaching losses [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1997, 13(3): 345 – 350.
- 9 莫非,周宏,王建永,等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1 – 17.
Mo Fei, Zhou Hong, Wang Jianyong, et al. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 1 – 17. (in Chinese)
- 10 王有宁,王荣堂,董秀荣. 地膜覆盖作物农田光温效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 134 – 136.
Wang Youning, Wang Rongtang, Dong Xiurong. Light temperature effect of farm land covering with film [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(3): 134 – 136. (in Chinese)
- 11 Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation [J]. Geoderma, 2007, 137(3 – 4): 360 – 369.
- 12 Sarkar S, Paramanick M, Goswami S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus* L. Var. glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1): 94 – 101.
- 13 蒋耿民,李援农,周乾. 不同揭膜时期和施氮量对陕西关中地区夏玉米生理生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1065 – 1072.
Jiang Gengmin, Li Yuannong, Zhou Qian. Effects of different uncovering plastic film periods and nitrogen rates on physiology, growth, yield and water use efficiency of summer maize in Guanzhong Region, Shaanxi Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1065 – 1072. (in Chinese)
- 14 银敏华,李援农,杨洋,等. 水分处理及覆膜历时对春玉米生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2014, 42(12): 199 – 207.
Yin Minhua, Li Yuannong, Yang Yang, et al. Effects of irrigation treatments and film mulching times on physiology of spring maize [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(12): 199 – 207. (in Chinese)
- 15 Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat [J]. Field Crops Research, 1999, 63(1): 79 – 86.
- 16 王庆杰,李洪文,何进,等. 大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 39 – 43.
Wang Qingjie, Li Hongwen, He Jin, et al. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 39 – 43. (in Chinese)
- 17 王琦,张恩和,李凤民,等. 半干旱地区沟垄微型集雨种植马铃薯最优沟垄比的确定[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 38 – 41.
Wang Qi, Zhang Enhe, Li Fengmin, et al. Optimum ratio of ridge to furrow for planting potato in micro-water harvesting system in semiarid areas [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 38 – 41. (in Chinese)
- 18 Wang X L, Li F M, Jia Y, et al. Increasing potato yields with additional water and increase soil temperature [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(3): 181 – 194.
- 19 李小英,段争虎,刘理臣,等. 黄土高原西部不同集雨保水措施下土壤水分变异特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 118 – 123.
Li Xiaoying, Duan Zhenghu, Liu Lichen, et al. Variation of soil moisture under different rainwater harvesting and conservation practices in the western part of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 118 – 123. (in Chinese)
- 20 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2395 – 2401.
Wang Jinxin, Huang Baolong, Luo Weixiang. Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of the drought-prone Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2395 – 2401. (in Chinese)
- 21 卫新东,汪星,汪有科,等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 88 – 97.
Wei Xindong, Wang Xing, Wang Youke, et al. Root distribution and soil water dynamics of jujube plantation in Loess Hilly Regions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 88 – 97. (in Chinese)
- 22 刘荣花,赵国强. 现代农业气象服务手册[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- 23 Ghosh P K, Dayal D, Bandyopadhyay K K, et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut [J]. Field Crops Research, 2006, 99(2 – 3): 76 – 86.

2009, 15(1): 48–54. (in Chinese)

22 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与 N₂O 排放量 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 557–560.
Ding Hong, Cai Guixin, Wang Yuesi, et al. Nitrification-denitrification loss and N₂O emission from maize-wheat rotation on system in north China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(5): 557–560. (in Chinese)

23 Hou A X, Tsuruta H. Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: effect of urea type, placement, and crop residues [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(2): 191–200.

24 Cao B, He F Y, Xu Q M, et al. Denitrification losses and N₂O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field [J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 390–397.

25 曾泽彬, 朱波, 朱雪梅, 等. 施肥对夏玉米季紫色土 N₂O 排放及反硝化作用的影响 [J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 130–137.
Zeng Zebin, Zhu Bo, Zhu Xuemei, et al. Effects of fertilization on N₂O emission and denitrification in purple soil during summer maize season in the Sichuan basin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 130–137. (in Chinese)

26 高大伟, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 169–174.
Gao Dawei, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 169–174. (in Chinese)

27 阎佩云, 刘建亮, 沈玉芳, 等. 黄土旱塬旱作覆膜春玉米农田 N₂O 排放通量及影响因素研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2278–2285.
Yan Peiyun, Liu Jianliang, Shen Yufang, et al. Nitrous oxide emissions and its influencing factors in spring corn fields mulched with plastic film on the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2278–2285. (in Chinese)

28 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913–918.
Dong Yuhong, Ouyang Zhu, Li Yunsheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agriculture soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(5): 913–918. (in Chinese)

(上接第 203 页)

24 李荣, 张睿, 贾志宽. 不同覆盖材料对耕层土壤温度及玉米出苗的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 13–16.
Li Rong, Zhang Rui, Jia Zhikuan. Effects of different covering materials on tilth soil temperature and maize emergence [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 13–16. (in Chinese)

25 员学锋, 汪有科. 不同保墒条件下土壤温度日变化效应研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 82–84.
Yuan Xuefeng, Wang Youke. Daily changing of soil temperature under different soil water conservation treatment [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 82–84. (in Chinese)

26 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171–173.
Chen Suying, Zhang Xiyang, Pei Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 171–173. (in Chinese)

27 李荣, 王敏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 106–113.
Li Rong, Wang Min, Jia Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 106–113. (in Chinese)

28 Liu W Z, Hu M J, Li F M, et al. Ecological characteristics of soil water and its relations to landform and vegetation in a small semiarid watershed in a loess hilly area of China [J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2005, 12(3): 326–333.

29 马育军, 李小雁, 伊万娟, 等. 沟垄集雨结合砾石覆盖对沙棘生长的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 188–194.
Ma Yujun, Li Xiaoyan, Yi Wanjuan, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system with gravel mulch on growth of sea buckthorn [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 188–194. (in Chinese)

30 李小雁, 张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 45–49.
Li Xiaoyan, Zhang Ruiling. On-field ridge and furrow rainwater harvesting and mulching combination for corn production in dry areas of Northwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 45–49. (in Chinese)

31 任小龙, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 45–50.
Ren Xiaolong, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Effect of ridge and furrow rainfall harvesting planting system on production of summer corn (*Zea mays* L.) under simulated rainfall conditions in semi-arid areas [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10): 45–50. (in Chinese)