



地膜覆盖条件下黄土高原玉米产量及水分利用效应分析

徐佳星¹, 封涌涛², 叶玉莲¹, 张润泽¹, 胡昌录¹, 雷同¹, 张树兰¹

(¹西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²宝鸡市农业技术推广服务中心, 陕西宝鸡 721001)

摘要:【目的】综合评价地膜覆盖玉米的产量以及水分利用效应,为黄土高原地区玉米生产合理利用地膜覆盖技术提供指导。【方法】本文在中国知网(CNKI), Web of Science 与 EI Compendex 文献数据库,收集了从2000—2017年间已发表的黄土高原地膜覆盖玉米产量及水分利用文章数据,综合分析了地膜覆盖对玉米产量、水分利用及水分利用效率的影响。【结果】黄土高原半膜覆盖平均产量为9 348 kg·hm⁻²,较对照产量7 059 kg·hm⁻²增产33%,全膜覆盖平均产量为9 191 kg·hm⁻²,较对照产量5 910 kg·hm⁻²增产56%,半膜覆盖或者全膜覆盖均显著提高了玉米产量,但是全膜覆盖和半膜覆盖之间玉米产量相近,没有显著差异。另外,半膜覆盖海拔高度超过630 m 时或全膜覆盖海拔高度超过900 m 时,玉米增产率随海拔高度的增加而呈增加的趋势,可能与覆膜提高土壤温度有关。半膜覆盖平均蒸散量为385 mm,较对照蒸散量389 mm 减少1.0%,全膜覆盖平均蒸散量为366 mm,较对照蒸散量357 mm 增加2.8%,半膜覆盖玉米蒸散量较不覆膜有所减少,但是全膜覆盖显著增加了玉米蒸散量,不过2种覆膜措施的蒸散量之间差异不显著。半膜覆盖平均水分利用效率为17.3 kg·hm⁻²·mm⁻¹,较对照水分利用效率13.2 kg·hm⁻²·mm⁻¹增加31%,全膜覆盖平均水分利用效率为17.5 kg·hm⁻²·mm⁻¹,较对照水分利用效率11.7 kg·hm⁻²·mm⁻¹增加50%,半膜覆盖与全膜覆盖均显著提高了玉米水分利用效率,但是全膜覆盖和半膜覆盖之间玉米水分利用效率相似,没有显著差异。覆膜显著增加玉米产量及水分利用效率与其降低土壤无效蒸发量(57 mm),提高玉米潜在的蒸腾效率有关(11.2 kg·hm⁻²·mm⁻¹)。【结论】在区域尺度上半膜覆盖与全膜覆盖对玉米产量、蒸散量及水分利用效率具有等效性,考虑到地膜的环境污染与经济成本等因素,推荐黄土高原玉米栽培选用半膜覆盖。

关键词: 地膜覆盖; 潜在蒸腾效率; 无效蒸发; 水分利用效率; 玉米; 产量

Effects of Plastic Film Mulching on Yield and Water Use of Maize in the Loess Plateau

XU JiaXing¹, FENG YongTao², YE YuLian¹, ZHANG RunZe¹, HU ChangLu¹, LEI Tong¹, ZHANG ShuLan¹

(¹College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi; ²Baoji Agricultural Technology Extension Service Center, Baoji 721001, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】Present study comprehensively evaluated effectiveness of the yield and water use under plastic film mulching for maize production, so as to provide a theoretical basis for the rational utilization of plastic film mulching in the Loess Plateau area. 【Method】The published data about plastic film mulching of maize were collected in the Loess Plateau from 2000 to 2017, using CNKI, Web of Science and EI Compendex, to analyze the effects of plastic film mulching on maize yield, water use and water use efficiency. 【Result】The results showed that, the average yield of 50% film mulching was 9 348 kg·hm⁻², which was 33%

收稿日期: 2019-10-16; 接受日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(31672243)

联系方式: 徐佳星, E-mail: xujiaxing@nwfafu.edu.cn. 通信作者张树兰, E-mail: zhangshulan@nwfafu.edu.cn

higher than the control of $7\,059\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; The average yield of 100% film mulching was $9\,191\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which was 56% higher than the control of $5\,910\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; Compared with no film mulching, both 100% film mulching and 50% film mulching significantly increased the yield of maize. However, the yield of maize under 100% film mulching and 50% film mulching was similar. In addition, the increase of maize yield was significantly and positively related with the increase of altitude, which was higher than 900 m under 100% film mulching and 627 m under 50% film mulching, respectively. This was possibly ascribed to the increase of soil temperature under film mulch. The average evapotranspiration (ET) of 50% film mulching was 385 mm, which was 1% lower than the control of 389 mm; The average ET of 100% film mulching was 366 mm, which was 2.5% higher than the control of 357 mm, the ET under 50% film mulching and the control was similar, but 100% film mulching significantly increased evapotranspiration relative to the control, while there was no significant difference between the two mulching treatments. The average water use efficiency (WUE) of 50% film mulching was $17.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, which was 31% higher than the control of $13.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$; The average WUE of 100% film mulching was $17.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, which was 50% higher than the control of $11.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$; Compared with the control, both 100% film mulching and 50% film mulching significantly increased the WUE of maize. However, the WUE of maize under 100% film mulching and 50% film mulching was similar. The significant increase of maize yield and WUE by film mulching was related to the decrease of soil evaporation by 57 mm and the increase of potential transpiration efficiency by $11.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$. 【Conclusion】At the regional scale, 50% film mulching and 100% film mulching had equivalent effects on maize yield, evapotranspiration and water use efficiency. Considering the environmental pollution and economic cost caused by film mulching, 50% film mulching was recommended for maize cultivation in the Loess Plateau.

Key words: film mulching; potential transpiration efficiency; soil evaporation; water use efficiency; *zea mays*; grain yield

0 引言

【研究意义】黄土高原是典型的雨养农业区，玉米是该地区的主要粮食作物^[1]。随着土壤肥力提升^[2]，水分已经成为黄土高原旱作玉米生产的主要限制因素。因此如何高效利用降雨，提高作物的水分利用效率是旱作地区研究的重点。地膜覆盖技术是一项简单有效的节水增产措施^[3-5]，在黄土高原地区玉米种植中被广泛应用。【前人研究进展】大量研究指出覆膜具有提高降雨捕获量、抑制土壤水分无效蒸发、增加土壤的蓄水和水分回流的能力，从而提高作物的水分利用效率^[6-9]，同时可以使玉米生育期缩短，增加株高以及叶面积，显著增加有效穗数、千粒重等生物产量和经济产量^[10-13]。同时地膜覆盖会增加土壤温度和土壤孔隙度，有利于提高土壤微生物的活性以及积温生产效率^[14-15]。但也有研究指出覆膜会导致作物减产，地膜覆盖由于提高了土层温度，使玉米的生育期提前，尽管玉米的生育后期有大量降雨，但是“卡脖旱”仍然导致了旱地玉米减产^[16-17]。同时有人指出，覆膜增加玉米产量的同时会增加耗水量，连年进行地膜覆盖栽培，容易引起土壤水分的耗竭^[18-19]。地膜覆盖技术目前分为全膜覆盖和半膜覆盖 2 种覆盖模式，有研究指出全膜覆盖的产量要显著高于半膜覆盖^[20-21]，也有研究指出全膜和半膜覆盖产量相似^[22]。不同田间试验研究结果中的产量效应、土壤水分利用由于试验的年度变异存在差异，个别地点个别年份的研究结果难以

全面地评价不同地膜覆盖对土壤水分利用及玉米产量的影响。另外，地膜覆盖后残膜碎片等会造成环境污染^[23-25]，十分有必要在区域尺度上对不同覆膜方式进行综合评价。【本研究切入点】本文通过分析过去近 20 年黄土高原地膜覆盖玉米发表的文章，系统分析全膜和半膜覆盖对玉米产量、水分利用及水分利用效率的影响。【拟解决的关键问题】本研究综合评价地膜覆盖技术的效应，为黄土高原地区地膜覆盖的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

在中国知网 (CNKI)，Web of Science 与 EI Compendex 文献数据库，根据“玉米”、“蒸散量”、“产量”、“黄土高原”以及“地膜覆盖”关键词，收集了从 2000—2017 年发表的相关文章，进一步根据雨养条件，且水分利用效率或蒸散量基于 1.6—3 m 土层深度估算进行文献筛选。1.6—3 m 土层深度的筛选条件主要是考虑玉米根系在土壤剖面的分布，有些文献水分利用效率或蒸散量基于 1 m 土层深度计算，玉米利用土壤水分估算偏低。基于上述条件，最后筛选出 43 篇文献 (附表 1)，涉及黄土高原山西、陕西以及甘肃 3 个省 12 个不同地区。每个文献包括不覆膜 (CK) 和半膜覆盖 (RM) 或全膜覆盖 (FM) 2 个处理，或者不覆膜、半膜覆盖和全膜覆盖 3 个处理。全膜覆盖包括全膜双垄沟、全膜起垄覆盖以及全膜平铺；半膜覆盖包括半膜双垄沟、垄上覆膜沟内播种以及半

膜平铺的栽培方式。利用文章中图表的数据，构建了玉米产量、蒸散量以及水分利用效率的数据集，其中有一些文章提供蒸散量或者水分利用效率中的某一个，我们根据蒸散量（ET）= 产量（Yield）/水分利用效率（WUE）计算得出所需值。

本研究对产量、蒸散量、水分利用效率 3 个性状进行描述性统计分析。以不覆膜作为对照，计算产量、蒸散量以及水分利用效率的增加率。

$$\text{增加率 (\%)} = \frac{\text{参数}_F - \text{参数}_{CK}}{\text{参数}_{CK}} \quad (1)$$

式中，F 为覆膜类型；CK 为不覆膜。

为了了解黄土高原玉米生产的水分利用效率潜力，本文采用边界函数的方法研究产量与蒸散量之间的关系。具体步骤是将蒸散量的数据从小到大排序（作为 x 轴），产量基于蒸散量的数据排列。将蒸散量以 20 mm 间隔划分，每个区段提取产量最大数据点，直至产量达到最高产量。对产量最大的数据点进行线性回归，得到线性函数，其斜率表示玉米的潜在蒸腾效率，即黄土高原玉米的水分生产潜力，横坐标截距表示玉米当季最低的土壤水分蒸发量。边界函数的

方法最早由澳大利亚学者 FRENCH 和 SCHULTZ 提出^[26]，随后被许多学者引用^[27-29]。

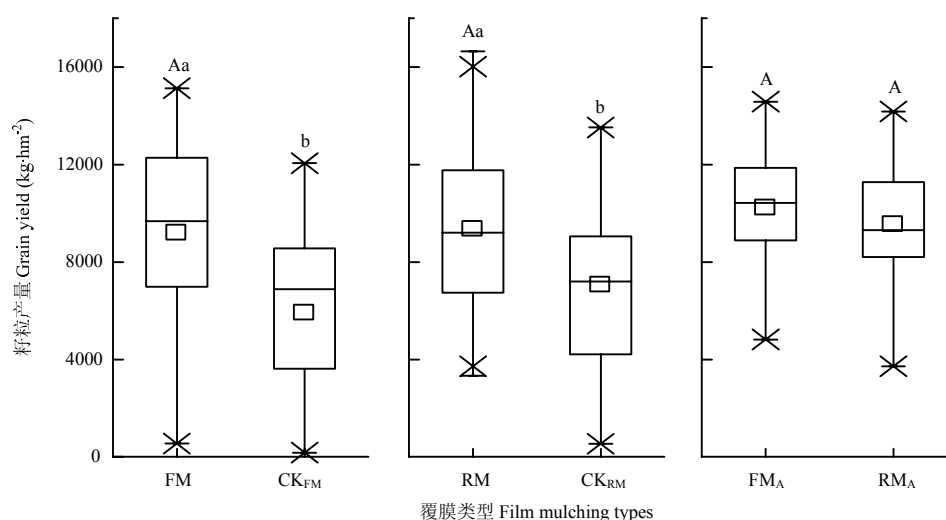
为了了解黄土高原海拔高度以及生育期降雨量对覆膜玉米增产率的影响，本研究分别将玉米增产率与海拔及生育期降雨量进行了相关分析，其中生育期降雨量以 50 mm 间隔划分，分段计算增产率的平均值，然后与降雨量进行了相关性分析。

数据采用 SPSS18.0 进行统计分析。半膜或全膜覆盖与不覆膜处理之间比较采用配对样本 T 检验进行分析，所有文献的半膜覆盖与全膜覆盖的比较采用独立样本 T 检验进行分析，同时对同一文献中既包括全膜覆盖，又包括半膜覆盖，也进行了对比分析。

2 结果

2.1 全膜及半膜覆盖对产量、耗水量及水分利用效率的影响

黄土高原地区全膜覆盖玉米产量变化范围 544—15 132 kg·hm⁻²，平均产量为 9 191 kg·hm⁻²；对照不覆膜玉米产量变化范围 170—12 059 kg·hm⁻²，平均产量为 5 910 kg·hm⁻²（图 1）。半膜覆盖玉米产量变化范



FM, 全膜覆盖; CK_{FM}, 全膜覆盖对照, 不覆膜; RM, 半膜覆盖; CK_{RM}, 半膜覆盖对照, 不覆膜; FM_A (全膜覆盖)、RM_A (半膜覆盖) 表示收集的文献中同时包含全膜覆盖和半膜覆盖。图中, 最上方和最下方的线段分别表示数据的最大值和最小值, 其中箱图的上方和下方的线段分别表示数据中 25% 和 75% 的数值, 箱图中间的粗线段表示数据的中位数, 箱图里面的方块表示数据中的平均数, 最上方和最下方的叉号分别代表所有数据中的 99% 和 1% 的值。不同的小写字母表示处理与对照差异显著 ($P < 0.05$); 相同的大写字母表示全膜覆盖与半膜覆盖差异不显著 ($P > 0.05$)。下同 FM, 100% film mulching; CK_{FM}, control without film mulching relative to FM; RM, 50% film mulching; CK_{RM}, control without film mulching relative to RM; FM_A (100% film mulching) and RM_A (50% film mulching) represent collected literature includes both FM and RM treatments. The upper and lower limits of each box represent the 25% and 75% percentiles parameters' values. The horizontal line in the center of the box indicates the median. The open circle indicates mean values, and short line indicate the max. and min. values, the cross indicate the 99% and 1% values. Different lower case letters mean significant difference between film mulching and its corresponding CK tested by t-test ($P < 0.05$); Same capital letters mean insignificant difference between FM and RM tested by t-test ($P > 0.05$). The same as below

图 1 黄土高原不同处理玉米的籽粒产量

Fig. 1 Maize grain yield under plastic film mulching in the Loess Plateau

围 3 329—16 640 kg·hm⁻², 平均产量为 9 348 kg·hm⁻²; 对照不覆膜玉米产量变化范围 536—13 520 kg·hm⁻², 平均产量为 7059 kg·hm⁻²。无论是全膜覆盖还是半膜覆盖均显著提高了玉米产量, 增产幅度大于 40%。不过无论是所有文献数据还是同一文献数据的统计分析均表明全膜覆盖和半膜覆盖的玉米产量没有显著差异。

图 2 为黄土高原地区不同覆盖条件下玉米蒸散量的差异。全膜覆盖玉米季蒸散量变化范围 221—511 mm, 均值为 366 mm; 与之对应的不覆膜玉米蒸散量变化范围 262—581 mm, 均值为 357 mm。半膜覆盖玉米季蒸散量变化范围 224—604 mm, 均值为 385 mm; 不覆膜蒸散量变化范围 225—644 mm, 均值为 389 mm。与对照相比, 全膜覆盖显著增加了玉米季蒸散量, 蒸散量的增加范围-17%—32%, 均值为 2.83%。而半膜覆盖没有显著影响玉米季蒸散量, 不过全膜与半膜覆盖之间蒸散量相似。

图 3 为黄土高原地区不同覆盖条件下玉米播种前与收获后土壤储水量的差值。全膜覆盖玉米土壤储水量差值范围-173—205 mm, 平均值为 6.85 mm, 其中有 60%的年份出现了土壤耗水; 而对照不覆膜土壤储水量差值范围-135—211 mm, 平均值为 1.90 mm, 有 56%的年份出现了土壤耗水, 全膜较对照增加土壤耗水约 5 mm。半膜覆盖玉米土壤储水量差值范围-177—253 mm, 平均值为 19.99 mm, 其中有 60%的年份

也出现了土壤耗水; 其对照不覆膜土壤储水量差值范围-146—237 mm, 平均值为 18.06 mm, 其中有 62%的年份出现了土壤耗水, 半膜较对照增加土壤耗水约 2 mm。无论是所有文献数据还是同一文献数据的统计分析均表明, 覆膜与对照或者是全膜与半膜之间玉米土壤储水量差值没有显著差异。

黄土高原地区全膜覆盖水分利用效率变化范围 0.3—39.0 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 均值是 17.5 kg·hm⁻²·mm⁻¹; 与之对应的不覆膜玉米水分利用效率变化范围 0—29.6 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 均值为 11.7 kg·hm⁻²·mm⁻¹ (图 4)。半膜覆盖水分利用效率变化范围 1.0—38.1 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 均值是 17.3 kg·hm⁻²·mm⁻¹; 不覆膜水分利用效率变化范围 0.1—38.1 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 均值为 13.2 kg·hm⁻²·mm⁻¹。全膜覆盖或半膜覆盖较对照均显著提高了玉米水分利用效率, 但全膜覆盖与半膜覆盖水分利用效率相近 (图 4)。另外, 同一文献中数据的统计分析也表明全膜和半膜覆盖之间水分利用效率没有显著差异。

2.2 玉米产量与耗水量之间的关系

图 5 显示玉米产量和蒸散量之间的关系, 当包含所有处理的数据时 (图 5-a), 土壤的无效蒸发为 69.3 mm, 玉米当季的潜在蒸腾效率为 62.9 kg·hm⁻²·mm⁻¹; 在不覆膜条件下, 土壤的无效蒸发为 126.2 mm, 玉米当季的潜在蒸腾效率为 51.7 kg·hm⁻²·mm⁻¹ (图 5-b)。地膜覆盖增加了玉米潜在蒸腾效率 11.2 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 减少了无效土壤蒸发约 57mm。

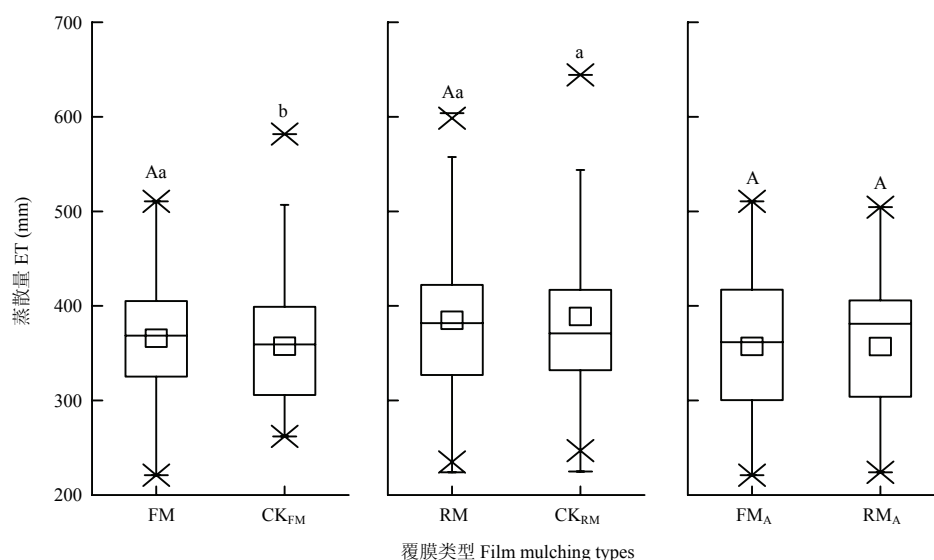
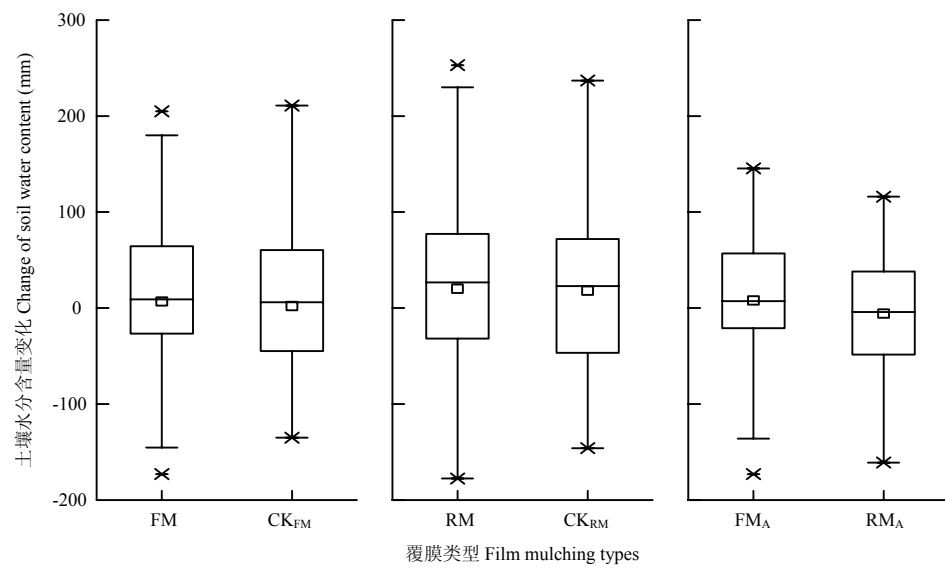


图 2 黄土高原不同处理玉米的蒸散量

Fig. 2 Evapotranspiration under plastic film mulching in the Loess Plateau



土壤含水量变化是蒸散量与生育期降雨量差值，表示玉米播前与收获土壤储水量的差值
The change of soil water was difference between evapotranspiration and growing season rainfall, it means the difference of soil water between maize sowing and harvest

图 3 黄土高原不同处理玉米播前与收获土壤储水量的增加量

Fig. 3 Difference of soil water between maize sowing and harvest under plastic mulching in the Loess Plateau

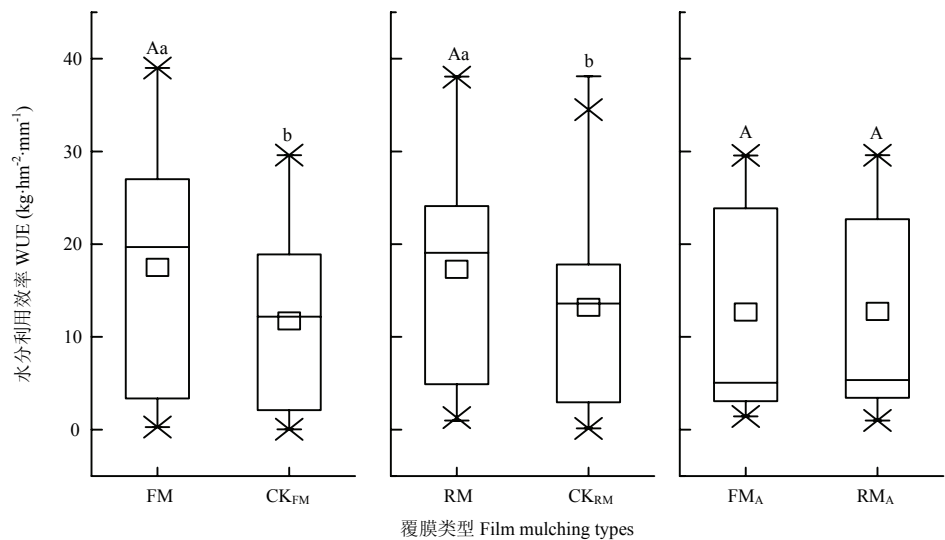


图 4 黄土高原不同处理玉米的水分利用效率

Fig. 4 Water use efficiency under plastic film mulching in the Loess Plateau

2.3 生育期降雨量和海拔高度与玉米增产率的关系

全膜覆盖条件下玉米增产率与生育期降雨量呈现显著的负相关关系 ($P<0.1$)；半膜覆盖条件下玉米增产率与生育期降雨量呈现二次曲线关系 ($P=0.1052$) (图 6-a, b)，显示当生育期降雨量超过

350 mm 时，半膜覆盖增产率将下降。全膜覆盖和半膜覆盖玉米增产率和海拔高度呈现显著二次拟合关系 (图 6-c, d)，即覆膜处理玉米增产率随着海拔高度的增加呈现出先缓慢变化，之后显著增加的趋势。

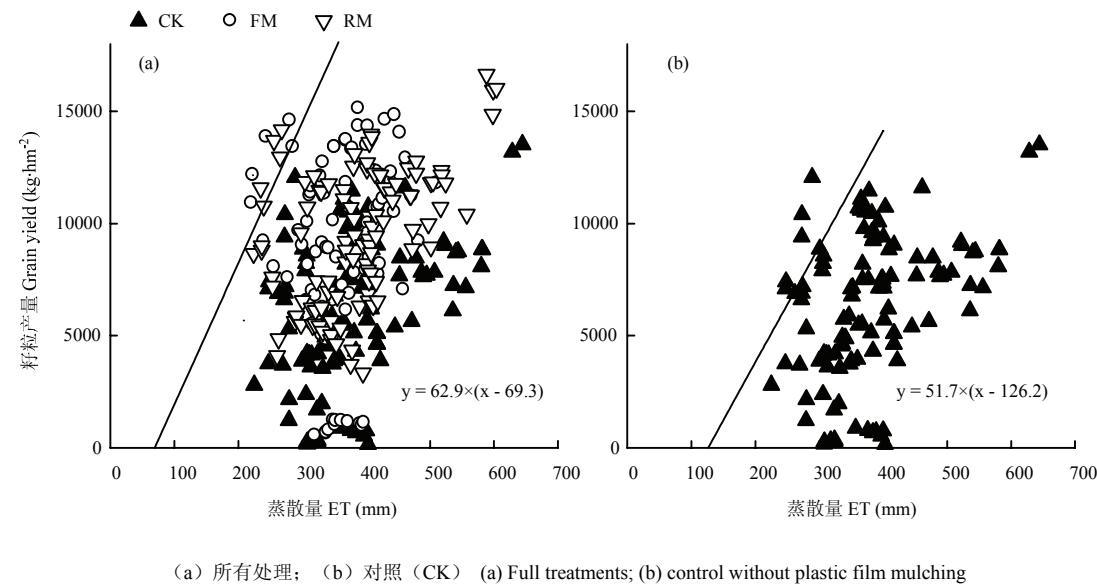


图 5 黄土高原玉米产量和耗水量之间的关系

Fig. 5 Relationship between maize yield and evapotranspiration (ET) in the Loess Plateau

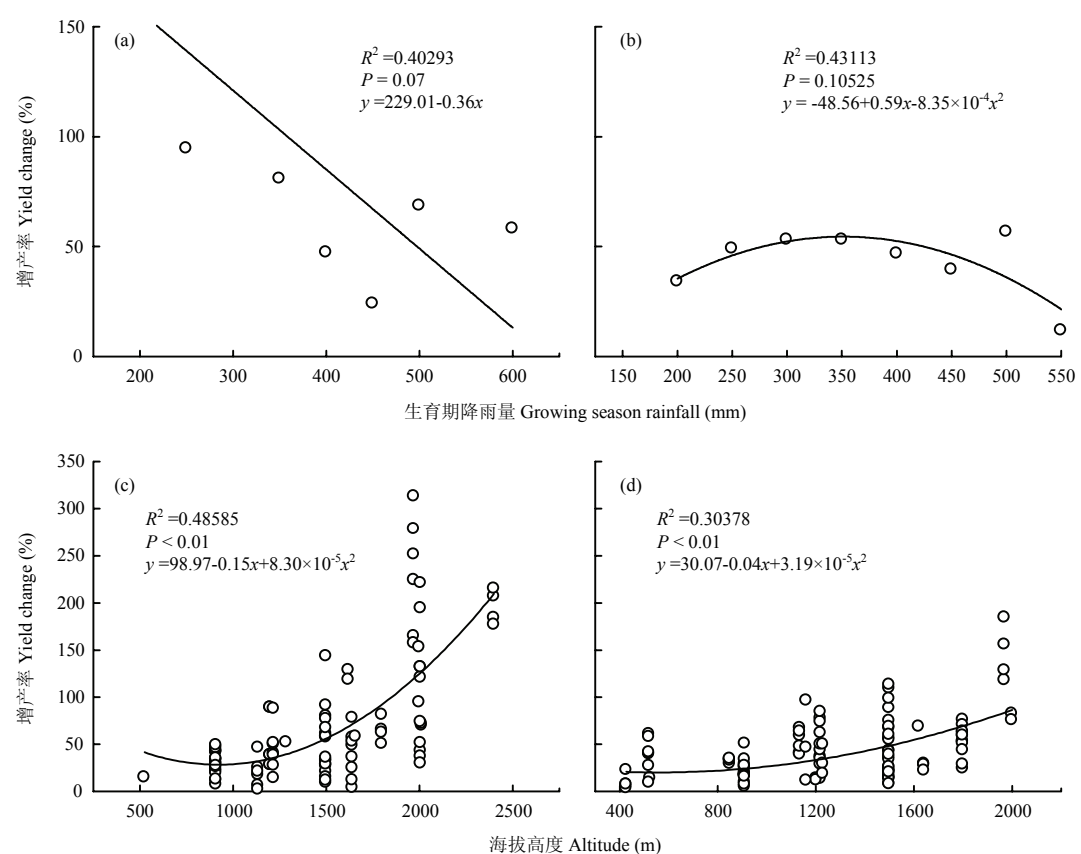


图 6 全膜覆盖和半膜覆盖玉米增产率与玉米生育期降雨量 (a, b) 和海拔高度 (c, d) 的关系

Fig. 6 Relationships between change in yield under FM and RM and growing season rainfall (a, b) and altitude (c, d) in the Loess Plateau

3 讨论

3.1 覆膜对玉米产量的影响

本研究表明, 黄土高原玉米全膜覆盖或者半膜覆盖均显著提高了玉米产量, 平均增产率超过 40%。以往研究指出, 地膜覆盖能减少土壤水分的无效蒸发, 增加作物蒸腾耗水, 显著提高玉米产量^[30-33]。LIN 等^[29]对玉米产量与蒸散量间的关系研究发现, 与不覆膜相比, 地膜覆盖使土壤无效蒸发量降低 12.3 mm。本研究发现, 地膜覆盖较不覆膜减少了约 57 mm 的土壤无效蒸发量 (图 5)。另外, 地膜覆盖能增加耕层土壤温度, 显著缩短玉米物候期, 防止玉米生育早期的冻害, 并且显著增加了叶面积指数, 增加生物量累积, 所以显著提高了产量^[33]。本研究也发现随海拔高度增加, 玉米的增产效果显著增加, 这可能主要与覆膜提高地温, 防止苗期冻害, 增强光合作用, 净光合产物相应增多有关^[34]。MBAH 等^[15]指出地膜覆盖会增加土壤孔隙度和降低土壤容重, 增加土壤的通风和微生物活动, 从而增加根系下扎深度, 扩大根系利用水分和养分空间, 加快植物生长和提高产量。郭满平等^[35]报道覆膜提高了玉米的穗数, 穗粒数以及千粒重, 显著提高产量。WANG 等^[36]研究指出覆膜可以显著增加土壤矿质态氮的含量以及作物氮、磷的吸收量, 从而促进增产。本研究发现覆膜可以显著提高玉米潜在蒸腾效率 ($11.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$), 与 LIN 等^[29]报道的结果相似 ($13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$), 这与地膜覆盖增加作物光能利用率有关^[37]。因此, 地膜覆盖增加玉米产量不仅与其改变玉米生长的土壤环境有关, 也与其改变地上部微气候条件有关。本研究也表明无论是覆膜还是不覆膜处理, 处于边界线以下的玉米产量 (图 5), 可能受其他因素 (如播期、品种、施肥、降雨分布等) 的影响^[12,38], 未能达到产量潜力。因此, 在黄土高原地区地膜覆盖下提高玉米产量要综合保水、栽培以及施肥等多种优化措施。

本文通过比较文献中同时包括全膜覆盖和半膜覆盖处理的数据发现 (图 1), 全膜较半膜覆盖处理有增加玉米产量的趋势, 但二者之间没有显著差异。以往有关半膜与全膜覆盖增产的研究报道并不一致, 一些研究显示有的年份全膜与半膜之间玉米产量相似^[22,39-40], 有些年份全膜覆盖玉米产量显著高于半膜覆盖, 特别是全膜双垄沟覆盖显著高于半膜覆盖^[5,11,21,41]。这可能是因为在干旱的年份全膜双垄沟玉米生长旺盛、前期耗水多, 生殖生长期土壤水

分严重亏缺, 授粉不良, 导致产量下降^[22], 与半膜覆盖没有差异。而全膜双垄沟覆盖较半膜覆盖显著增产的原因可能是前者可以大幅提高地温、提高光合产物累积与转运、增加籽粒灌浆速率, 进而提高收获指数^[5,21]。由于本文收集全膜双垄沟数据较少, 没有单独比较全膜双垄沟与半膜之间的差异。已有报道之间的差异可能与个别研究不同年份的气候条件, 如降雨年型 (降雨量多少以及雨量分布) 影响不同覆膜方式的玉米生长的水热环境有关。个别地点个别年份的研究结果难以全面地评价不同地膜覆盖对玉米产量的影响, 区域尺度上综合过去多点多种气候年型对比全膜与半膜效应, 结论更为可靠。另外, 长期地膜覆盖后残膜碎片对土壤性质以及作物生长有不良影响^[42], 还会造成环境污染^[23-25]。因此, 建议黄土高原地区玉米种植采用半膜覆盖。

另外, 本研究发现在区域尺度上, 全膜覆盖增产率与生育期降雨呈现显著的负相关关系, 半膜覆盖玉米产量随着降雨量的增加呈现出先增加后减少的趋势, 当降雨量为 350 mm 时, 增产率达到最大值。个别模拟研究报道玉米生育期降雨量分别为 230、340 和 440 mm 时, 半膜覆盖较传统平作分别增产 76%—83%、37%—43%和 5%—11%^[43], 表明高降雨量条件下覆膜效果降低。而大田试验发现无论全膜还是半膜覆盖在生育期降雨较少 (192 mm) 或者较高 (417 mm) 条件下玉米增产率均较低^[22]。因此, 区域尺度上综合过去多点多种气候年型, 其结果应该值得肯定。

3.2 覆膜对水分利用以及水分利用效率的影响

在黄土高原地区, 耗水量主要包括土壤蒸发以及植物蒸腾, 所耗水分的主要来源是生育期降水以及土壤播前贮水。本研究发现全膜覆盖显著提高了玉米生育期蒸散量, 而半膜覆盖与对照差异不显著 (图 2)。这可能与全膜覆盖显著提高土壤温度, 早期促进玉米生长旺盛, 蒸腾剧烈, 从而导致全膜处理蒸散量高于不覆膜处理^[22,41]。尽管全膜双垄沟具有较好的效果, 但与半膜处理间差异不显著, 这是因为不同覆膜方式都具有抑蒸、保蓄降水以及减少土壤蒸发的优点^[41], 可能在玉米生长过程中全膜与半膜相比抑蒸效果并不显著。尽管本研究发现覆膜可以减少玉米生育期土壤无效蒸发 57 mm, 但是全膜覆盖玉米蒸散量的显著增加意味着需要有可靠的水分供应。而黄土高原地区年际降雨量变幅很大, 说明覆膜作物高产的可持续性还存在不确定性。同时大多数研究基于 2 m 土层或者更浅的土层计算作物蒸散量, 这可能没有真正反映覆膜

玉米水分利用的情况, 现有发表的数据可能偏低。例如 LIN 等^[44]指出, 收获时常规以及全膜处理 2 m 以下的土壤含水量要低于播种时的土壤含水量, 因此以 2 m 作为耗水量的计算土深可能低估了植物对土壤水分的利用深度。LIN 等^[44]在 7 年的试验发现 3 年玉米生育期降雨量分别为 344、268 和 361 mm, 全膜覆盖收获期土壤水分低于播前土壤水分, 而在其他 4 年生育期降雨量均大于 350 mm, 并没有出现明显的耗水。谢红军等^[18]指出在当季生育期降雨量低于 300 mm 时, 地膜覆盖玉米对土壤水库出现明显的消耗, 吴杨等^[45]指出在当季生育期降雨量低于 350 mm 时, 地膜覆盖玉米较常规处理出现明显的耗水。而本研究区域尺度上的结果显示, 全膜和半膜覆盖均有 60% 的年份存在土壤水分消耗的状况, 全膜的相对耗水量高于半膜, 表明在黄土高原半膜覆盖可能具有可持续性。目前缺乏地膜覆盖的长期定位试验, 有关地膜覆盖的模型模块有待进一步开发, 而黄土高原降雨呈现逐年下降趋势^[46-47]。因此, 地膜覆盖是否是该区高产以及水分高效利用的可持续管理措施还有待于进一步综合评价。

覆膜显著提升玉米蒸腾效率, 提高了玉米产量, 尽管覆膜有增加玉米蒸散量的趋势, 但仍然显著提高了玉米的水分利用效率。不过全膜覆盖与半膜覆盖间水分利用效率差异不显著, 综合考虑推荐半膜覆盖。

4 结论

黄土高原地区地膜覆盖可以显著增加玉米产量和水分利用效率, 特别是高海拔区域地膜覆盖有利于玉米生长和产量提高。这与地膜覆盖显著降低土壤无效蒸发量, 显著提高玉米潜在的蒸腾效率有关。但是全膜覆盖与半膜覆盖对玉米产量和水分利用效率具有等效性, 考虑到地膜的环境污染与经济成本等因素, 推荐黄土高原地区玉米栽培选用半膜覆盖。不过地膜覆盖是否是可持续的高产、水分高效利用措施还有待于进一步评估。

References

[1] 李志军, 赵爱萍, 丁晖兵, 李科, 简毓峰. 旱地玉米垄沟周年覆膜栽培增产效应研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 12-17.
LI Z J, ZHAO A P, DING H B, LI K, JIAN Y F. Production effect of corn under whole-year furrow-film cultivation in dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 12-17. (in Chinese)

[2] 摄晓燕. 黄土区主要农业土壤肥力演变研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
SHE X Y. Study on soil fertility evolution of main agricultural soil in Loess regions[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
[3] 王勇. 旱地玉米秋覆膜春播增产机理研究. 甘肃农业科技, 2001(12): 19-21.
WANG Y. Research on yield increasing mechanism of autumn film mulching and spring sowing of maize in dryland. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2001(12): 19-21. (in Chinese)
[4] ZHOU L M, LI F M, JIN S L, SONG Y. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41-47.
[5] 王绍美, 金胜利, 王刚. 半干旱区全覆膜双垄沟播技术对玉米产量和水分利用效率的影响. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(4): 100-106.
WANG S M, JIN S L, WANG G. Effect of double ridges mulched with wide plastic film on crop yield and water use efficiency in semi-arid areas. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(4): 100-106. (in Chinese)
[6] WANG Y J, XIE Z K, MALHI S S, VERA C L, ZHANG Y B, WANG J N. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 374-382.
[7] ENRIQUE G S, BRAUD I, JEAN-LOUIS T, MICHEL V, PIERRE B, JEAN-CHRISTOPHE C. Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1999, 97(3): 151-169.
[8] WANG Q, ZHANG E Z, LI F M, LI F R. Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid areas. *Water Resources Management*, 2008, 22(10): 1431-1443.
[9] ZEGADA-LIZARAZU W, BERLINER P R. Inter-row mulch increase the water use efficiency of furrow-irrigated maize in an arid environment. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2011, 197(3): 237-248.
[10] 杨祁峰, 岳云, 熊春蓉, 孙多鑫. 不同覆膜方式对陇东旱塬玉米田土壤温度的影响. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 29-33.
YANG Q F, YUE Y, XIONG C R, SUN D X. Influence of different approaches of plastic film mulching on soil temperature of maize field in dry plateau of Longdong. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 29-33. (in Chinese)
[11] 方彦杰, 黄高宝, 李玲玲, 汪佳. 旱地全膜双垄沟播玉米生长

- 发育动态及产量形成规律研究. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 128-134.
- FANG Y J, HUANG G B, LI L L, WANG J. Yield and growth dynamics of rainfed maize in the system of completely mulched alternating narrow and wide ridges with furrow planting. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 128-134. (in Chinese)
- [12] 张雷, 牛芬菊, 李小燕, 豆国兰, 李德仁. 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. 中国农学通报, 2010, 26(22): 142-145.
- ZHANG L, NIU F J, LI X Y, DOU G L, LI D R. 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. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(22): 142-145. (in Chinese)
- [13] 任新茂, 孙东宝, 王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响. 农业机械学报, 2017, 48(1): 206-211.
- REN X M, SUN D B, WANG Q S. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 206-211. (in Chinese)
- [14] 朱琳, 李世清. 地表覆盖对玉米籽粒氮素积累和干物质转移“源-库”过程的影响. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2528-2537.
- ZHU L, LI S Q. Effect of soil surface mulching on the maize source-sink relationship of nitrogen accumulation and dry matter transfer. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2528-2537. (in Chinese)
- [15] MBAH C N, NWITE J N, NJOKU C, IBEH L M, IGWE T S. Physical properties of an ultisol under plastic film and no-mulches and their effect on the yield of maize. *World Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 6(2): 160-165.
- [16] 梁鸡保, 贺晓, 张霞, 冯佰利. 陕北旱作区不同覆盖方式对春玉米土壤水分及产量的影响. 陕西农业科学, 2014, 60(8): 1-3.
- LIANG J B, HE X, ZHANG X, FENG B L. Effects of different mulching methods on soil moisture and yield of spring maize in arid of northern Shaanxi. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 60(8): 1-3. (in Chinese)
- [17] 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 刘恩科, 张健. 地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响. 农业工程学报, 2008, 24(4): 99-102.
- ZHANG D M, CHI B L, HUANG X F, LIU E K, ZHANG J. Analysis of adverse effects on maize yield decrease resulted from plastic film mulching in dryland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 99-102. (in Chinese)
- [18] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 张仁陟, 牛伊宁, 罗珠珠, 蔡立群. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1558-1568.
- XIE J H, CHAI Q, LI L L, ZHANG R S, NIU Y N, LUO Z Z, CAI L Q. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of Loess Plateau of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1558-1568. (in Chinese)
- [19] 郭天文, 谢永春, 张平良, 刘晓伟, 姜小凤. 不同种植和施肥方式对旱地春玉米土壤水分含量及其水分利用效率的影响. 水土保持学报, 2015, 29(5): 231-238.
- GUO T W, XIE Y C, ZHANG P L, LIU X W, JIANG X F. Effects of different patterns of planting and fertilization on soil moisture and water use efficiency of spring maize on dryland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 231-238. (in Chinese)
- [20] 李荣, 王敏, 贾志宽, 侯贤清, 杨宝平, 韩清芳, 聂俊峰, 张睿. 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. 农业工程学报, 2012, 28(2): 106-113.
- LI R, WANG M, JIA Z K, HOU X Q, YANG B P, HAN Q F, NIE J F, ZHANG R. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 106-113. (in Chinese)
- [21] 金胜利, 周丽敏, 李凤民, 张光全. 黄土高原地区玉米双垄全膜覆盖沟播栽培技术土壤水温条件及其产量效应. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 28-33.
- JIN S L, ZHOU L M, LI F M, ZHANG G Q. Effect of double ridges mulched with wide plastic film on soil water, soil temperature and yield of corn in semiarid Loess Plateau of China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 28-33. (in Chinese)
- [22] 李尚中, 樊廷录, 王磊, 赵刚, 党翼, 张建军, 王勇, 唐小明, 赵晖. 不同覆膜方式对旱地玉米生长发育、产量和水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 22-27.
- LI S Z, FAN T L, WANG L, ZHAO G, DANG Y, ZHANG J J, WANG Y, TANG X M, ZHAO H. Effects of different film-mulching modes on growth, yield and water use efficiency of dryland maize. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6): 22-27. (in Chinese)
- [23] 樊小林, 廖宗文. 地膜覆盖土壤水热效应及降解特性研究初报. 华南农业大学学报, 1999, 20(1): 124-125.

- FAN X L, LIAO Z W. Effect of mulch film covering on soil water and temperature and degradability of the film (preliminary report). *Journal of South China Agricultural University*, 1999, 20(1): 124-125. (in Chinese)
- [24] 张永明. 可降解地膜覆盖玉米试验. 甘肃农业, 2006(01): 207.
- ZHANG Y M. Experiment on maize covered with biodegradable plastic film. *Gansu Agriculture*, 2006(01): 207. (in Chinese)
- [25] 张金良, 宋兆杰, 张广军. 关于玉米地膜覆盖中选膜问题的思考. 现代化农业, 1998(2): 16-17.
- ZHANG J L, SONG Z J, ZHANG G J. Considerations on selecting mulch for maize. *Modernizing Agriculture*, 1998(2): 16-17. (in Chinese)
- [26] FRENCH R J, SCHULTZ J E. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1984, 35(6): 743-746.
- [27] GRASSINI P, YANG H S, CASSMAN K G. Limits to maize productivity in western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(8): 1254-1265.
- [28] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, ZHANG F S. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management. *Field Crops Research*, 2014, 163: 55-63.
- [29] LIN W, LIU W. Establishment and application of spring maize yield to evapotranspiration boundary function in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 345-349.
- [30] 周丽娜, 雷金银. 覆膜方式对坡耕地春玉米产量、土壤水分和养分的影响. 中国农学通报, 2014, 30(33): 20-25.
- ZHOU L N, LEI J Y. Effect of plastic film mulching methods on spring maize yield, soil water and nutrients in slope farmland. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(33): 20-25. (in Chinese)
- [31] 刘建华. 旱地玉米不同覆膜方式栽培效果研究. 陕西农业科学, 2017, 63(6): 17-20.
- LIU J H. Study on cultivation effect of dryland maize with different mulching methods. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 63(6): 17-20. (in Chinese)
- [32] 智建奇, 胡奋山, 武海丽, 马淑文, 贾志森, 郑义. 旱地玉米全覆膜方式的增产效应. 山西农业科学, 2011, 39(6): 543-545.
- ZHI J Q, HU F S, WU H L, MA S W, JIA Z S, ZHENG Y. Yield increasing effect of whole film mulching mode for dry land maize. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(6): 543-545. (in Chinese)
- [33] 孙学保, 杨祁峰, 牛俊义, 张文斌, 牛芬菊. 旱地全膜双垄沟播玉米增产效应研究. 作物杂志, 2009(3): 32-36.
- SUN X B, YANG Q F, NIU J Y, ZHANG W B, NIU F J. Effect of whole covering on double ridges and planting in catchment furrows on yield increase of dry land maize. *Crops*, 2009(3): 32-36. (in Chinese)
- [34] 王辉, 覃鸿妮, 吕学高, 蔡一林. 不同海拔下玉米生物学干重的动态变化研究. 玉米科学, 2012, 20(3): 51-55.
- WANG H, QIN H N, LÜ X G, CAI Y L. Dynamic variation of biological dry-weight at different altitudes in maize. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(3): 51-55. (in Chinese)
- [35] 郭满平, 刘生瑞, 白宏鹏. 不同覆膜栽培对玉米土壤水分温度及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 50-55.
- GUO M P, LIU S R, BAI H P. Effects of different plastic mulching practices on soil moisture, soil temperature and yields of maize. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(2): 50-55. (in Chinese)
- [36] WANG Y P, LI X G, HAI L, SIDDIQUE K H M, GAN Y T, LI F M. Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(4): 486-498
- [37] LIU Y, YANG S J, LI S Q, CHEN X P, CHEN F. Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: Resource capture and use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 606-613.
- [38] SADRAS V O, ANGUS J F. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2006, 57(8): 847-856.
- [39] 李涛, 郭金锋, 赫晓岚. 玉米不同覆膜方式垄作沟灌试验. 农业科技与信息, 2018, 541(8): 21-23.
- LI T, GUO J F, HE X L. Ridge and furrow irrigation experiments of maize with different mulching methods. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2018, 541(8): 21-23. (in Chinese)
- [40] 张平良, 郭天文, 李书田, 马明生, 谢永红. 不同覆盖种植方式与平衡施肥对旱地春玉米产量及水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 169-173.
- ZHANG P L, GUO T W, LI S T, MA M S, XIE Y H. Effects of different coverage cultivation and balanced fertilization on yield and water use efficiency of spring corn in the dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 169-173. (in Chinese)
- [41] 高玉红, 牛俊义, 闫志利, 郭丽琢, 姜寒玉, 马朋丽, 马菊红. 不同

- 覆膜栽培方式对玉米干物质积累及产量的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 440-446.
- GAO Y H, NIU J Y, YAN Z L, GUO L Z, JIANG H Y, MA P L, MA J H. Effects of different plastic-film mulching techniques on maize (*Zea mays* L.) dry matter accumulation and yield. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 440-446. (in Chinese)
- [42] 邹小阳. 残膜量对土壤水分运移和温室番茄生长的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- ZOU X Y. Effects of residual plastic film amount on soil water movement and growth of tomato planted in greenhouse[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [43] REN X, CHEN X, JIA Z. Ridge and furrow method of rainfall concentration for fertilizer use efficiency in farmland under semiarid conditions. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(6): 905-913.
- [44] LIN W, LIU W Z, XUE Q W. Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38995.
- [45] 吴杨, 贾志宽, 边少锋, 王永军. 不同方式周年覆盖对黄土高原玉米农田土壤水热的调控效应. 中国农业科学, 2018, 51(15): 52-65.
- WU Y, JIA Z K, BIAN S F, WANG Y J. Regulation effects of different mulching patterns during the whole season on soil water and temperature in the maize field of Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15): 52-65. (in Chinese)
- [46] 王若安. 近 50 年平凉黄土高原沟壑区气温和降水变化趋势分析. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17564-17566.
- WANG R A. Analysis of the past 50 years' change trend of temperature and precipitation in Pingliang gully region of Loess Plateau. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(35): 17564-17566. (in Chinese)
- [47] 段建军, 王小利, 高照良, 张彩霞. 黄土高原地区 50 年降水时空动态与趋势分析. 水土保持学报, 2009, 23(5): 143-146.
- DUAN J J, WANG X L, GAO Z L, ZHANG C X. Dynamics and trends analysis of annual precipitation in the Loess Plateau region for 50 years. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 143-146. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)