中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

绿洲灌区玉米产量形成及水分利用特征对地膜覆盖方式及行距的响应

于爱忠，柴强，殷文，赵财，胡发龙，樊志龙

引用本文:
于爱忠, 柴强, 殷文, 等. 绿洲灌区玉米产量形成及水分利用特征对地膜覆盖方式及行距的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 662–670.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190828

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绿洲灌区玉米产量及水分利用对绿肥还田方式的响应

Response of maize yield and water use to different green manure utilization patterns in arid oasis irrigation area

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 671–679 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190813

行距及密度影响玉米密植潜力的干物质累积和产量构成机制

Characteristics of dry matter accumulation and yield formation of dense planting maize in different row spacings

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 652–661 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190852

半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响

Effect of straw strip covering on ridges on soil water content and potato yield under rain–fed semiarid conditions

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 874–882 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151371

不同灌水水平下一膜两年覆盖间作农田耗水特征及经济效益研究

Characteristics and economic benefits of water consumption in intercropping fields with one plastic film mulching for 2 years and different irrigation levels

中国生态农业学报. 2016, 24(6): 744–752 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151041

沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响

Effects of furrow–mulching materials on soil temperature, crop yield and water use efficiency in ridge–furrow rainwater harvesting systems

中国生态农业学报. 2016, 24(5): 590–599 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151064

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 5 月 第 28 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2020, 28(5): 662−670

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190828

于爱忠, 柴强, 殷文, 赵财, 胡发龙, 樊志龙. 绿洲灌区玉米产量形成及水分利用特征对地膜覆盖方式及行距的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 662−670

YU A Z, CHAI Q, YIN W, ZHAO C, HU F L, FAN Z L. Responses of grain yield formation and water use characteristic of maize to plastic film mulching pattern and row spacing in oasis irrigation area in Northwest China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 662−670

绿洲灌区玉米产量形成及水分利用特征对地膜覆盖方式及行距的响应*

于爱忠, 柴 强**, 殷 文, 赵 财, 胡发龙, 樊志龙

(甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070)

摘 要: 干旱绿洲灌区玉米生产普遍采用全膜覆盖方式, 残膜污染问题严重。因此, 研究地膜减投增效生产技术对缓解残膜污染有重要意义。在甘肃河西石羊河流域通过田间试验研究了不同覆膜方式(全膜覆盖、半膜覆盖)和不同种植行距(50 cm 等行距、40 cm+80 cm 宽窄行)对玉米产量、耗水量、耗水结构及水分利用效率的影响。结果表明, 全膜宽窄行和半膜宽窄行种植条件下均可获得较高的玉米籽粒产量, 分别达 14 712.7 kg·hm^{-2} 和 14 155.2 kg·hm^{-2}, 较半膜覆盖等行距处理高 13.2%和 8.9%(P<0.05), 与全膜覆盖等行距处理差异不显著。全膜宽窄行和半膜宽窄行获得较高籽粒产量的原因是提高了穗数和双穗率。全膜覆盖条件下宽窄行种植获得较高 LAI 峰值的同时, 玉米全生育期平均 LAI 显著高于半膜覆盖处理。全膜覆盖显著降低了玉米生长前期(播种至大喇叭口期)的棵间蒸发量。半膜覆盖等行距和宽窄行种植玉米全生育期棵间蒸发量分别较全膜等行距种植高 14.3%和 21.9%, 差异显著。半膜覆盖宽窄行种植条件下玉米水分利用效率达 19.3 kg·mm^{-1}·hm^{-2}, 与全膜覆盖等行距和宽窄行处理均无显著差异。干旱绿洲灌区半膜覆盖宽窄行种植替代全膜等行距种植或宽窄行不会导致玉米产量和水分利用效率降低。

关键词: 绿洲灌区; 玉米产量; 水分利用; 地膜覆盖方式; 行距

中图分类号: S513 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Responses of grain yield formation and water use characteristic of maize to plastic film mulching pattern and row spacing in oasis irrigation area in Northwest China*

YU Aizhong, CHAI Qiang**, YIN Wen, ZHAO Cai, HU Falong, FAN Zhilong

(College of Agronomy, Gansu Agricultural University / Key Laboratory of Arid Land Crop Science in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Full plastic film mulching is widely used in maize production in the Arid Oasis Irrigation area of Northwest China. The problem of residual plastic film pollution is of great concern, therefore it is important to study the cultivation techniques of the area in

* 国家自然科学基金项目(31401350)、现代农业产业技术体系项目(CARS-22-G-12)和国家公益性行业(农业)科研专项(201503125-3)资助

** 通信作者: 柴强, 主要研究方向为多熟种植、节水农业等。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
于爱忠, 主要研究方向为节水农业、保护性农业等。E-mail: yuaizh@gsau.edu.cn

收稿日期: 2019-11-24 接受日期: 2020-01-03

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31401350), the Special Fund for the Industrial Technology System Construction of Modern Agriculture of China (CARS-22-G-12), and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503125-3).

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

Received Nov. 24, 2019; accepted Jan. 3, 2020

order to reduce pollution by plastic film. The effects of different film mulching patterns (full-film, half-film mulching) coupled with different row spacing (50 cm uniform row spacing and 40 cm + 80 cm paired row spacing) were used to test the yield, water consumption, water consumption structure, and water use efficiency of maize at the Shiyang River Basin in Hexi, Gansu. The results showed that high grain yield was obtained from the paired row spacing of full-film or half-film mulching conditions, which reached 14 712.7 and 14 155.2 kg·hm^{-2}, and they were 13.2% and 8.9% higher than that of the half-film mulching, respectively ($P < 0.05$). However, these were not significantly different from the uniform row spacing of full-film. This was due to the significant increase in spike number and the double-ear rate by planting in paired row spacing. Under the condition of full film mulching, the peak value of the leaf area index (LAI) was obtained by paired row space planting, with the average LAI of the maize during the whole growth period being significantly higher than that of half-film mulched treatment. The amount of evaporation at the early growth stage of maize decreased significantly under full-film mulching than under half-film mulching. The total amount of evaporation under half-film mulching with uniform and paired row spacing were 177.2 and 189.0 mm, respectively. And these were 14.3% and 21.9% respectively, significantly higher than that of full-film mulching with uniform row spacing. The water use efficiency of maize was 19.3 kg·mm^{-1}·hm^{-2} under the conditions of half-film with paired row spacing, which was not significantly different from that of the full-film mulching. These results indicate that half-film mulching with paired row spacing instead of full-film mulching with uniform or paired row spacing will not lead to a decrease in the grain yield and water use efficiency of maize in the Arid Oasis Irrigation area of Northwest China.

Keywords: Oasis irrigation area; Maize yield; Water use; Plastic film mulching pattern; Row spacing

地膜覆盖作为一项轻简易化的农业节水生产技术，被认为是在干旱和半干旱地区不可或缺的作物生产技术。近年来，聚乙烯塑料薄膜大面积使用，造成了“白色污染”问题[1-2]。生物可降解地膜应用、一膜两(多)用、塑料薄膜机械回收等技术，因存在成本高、适应性低、缺乏配套机械等问题未能很好地解决残膜污染的问题[3]。玉米(*Zea mays* L.)是干旱、半干旱地区的主要作物，目前普遍采用地膜覆盖栽培措施[4-6]。研究[7-9]表明，半干旱雨养农业区地膜覆盖提高玉米籽粒产量 15%～26%，增加 0～30 cm 土壤含水量 30%以上，提高水分利用效率(WUE)21.1%以上。干旱绿洲灌区全膜覆盖较不覆膜处理玉米产量提高 28.9%, WUE 提高 6.3%[10]。地膜覆盖条件下玉米产量的提升归因于改善了玉米生长的土壤水热条件，提高了光合产物的积累等[11-12]。关于地膜覆盖提高 WUE 的机制，雨养农业区的研究[13-14]认为，地膜覆盖改善了土壤水分条件，促进了玉米对土壤水分的吸收利用；地膜覆盖通过改善土壤水热状况，进而提高了 WUE[11]。另外，覆盖方式发生变化后，引起作物空间布局发生变化。一些围绕不同种植行距的研究[15-16]表明，种植行距能显著影响玉米叶片的光合速率及产量形成。然而，针对地膜覆盖方式和种植行距两个关键农艺技术的交互作用对作物产量形成及水分利用特征方面的研究鲜见报道，进而未能很好揭示产量形成和耗水过程对覆盖方式及种植行距的响应及其关键机制。干旱绿洲灌区资源性缺水问题突出，主栽作物玉米普遍采用全膜覆盖种植模式，地膜大量使用造成残膜污染问题严重。能否采用半膜覆盖替代全膜覆盖是研究者和生产者关心的重要问题。本研究通过连续 3 年定位试验，分析了全膜覆盖和半膜覆盖条件下，种植行距对玉米产量形成及水分利用特征的影响，以期为区域内地膜减投增效技术的适应性评价提供重要参考依据。

1　材料与方法

1.1　试区概况

试验于 2013—2015 年在位于甘肃省武威市凉州区的甘肃农业大学绿洲农业综合试验站(37°30′N, 103°5′E)进行。该试验站平均海拔 1 776 m，年平均气温 7.2 ℃，全年无霜期 156 d，近 30 年平均降水量 156 mm，年蒸发量超过 2 400 mm，年日照时数 2 945 h，年太阳辐射总量 504~630 kJ·cm^{-2}。主要种植作物有小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)等，属于典型的两熟不足、一熟有余的干旱内陆河灌区。区域内土壤为典型的石灰性灌漠土，0~110 cm 土壤容重 1.44 g·cm^{-3}，0~30 cm 有机碳含量 11.3 g·kg^{-1}，全氮、速效磷、速效钾含量分别为 0.94 g·kg^{-1}、29.2 mg·kg^{-1} 和 152.6 mg·kg^{-1}。

1.2　试验设计

田间试验设地膜覆盖方式和种植行距2个因素。采用2因素完全随机区组设计。其中，地膜覆盖方式包括全膜覆盖(膜宽140 cm)、半膜覆盖(膜宽80 cm)，种植行距包括等行距(50 cm)、宽窄行(40 cm+80 cm)，共4个处理，重复3次。小区面积12 m×8 m，全膜覆盖种5带，半膜覆盖种10带(图1)。玉米品种为‘先玉335’。2013年4月20日播种，9月25日收获；2014年4月22日播种，9月27日收获；2015年4月24日播种，9月26

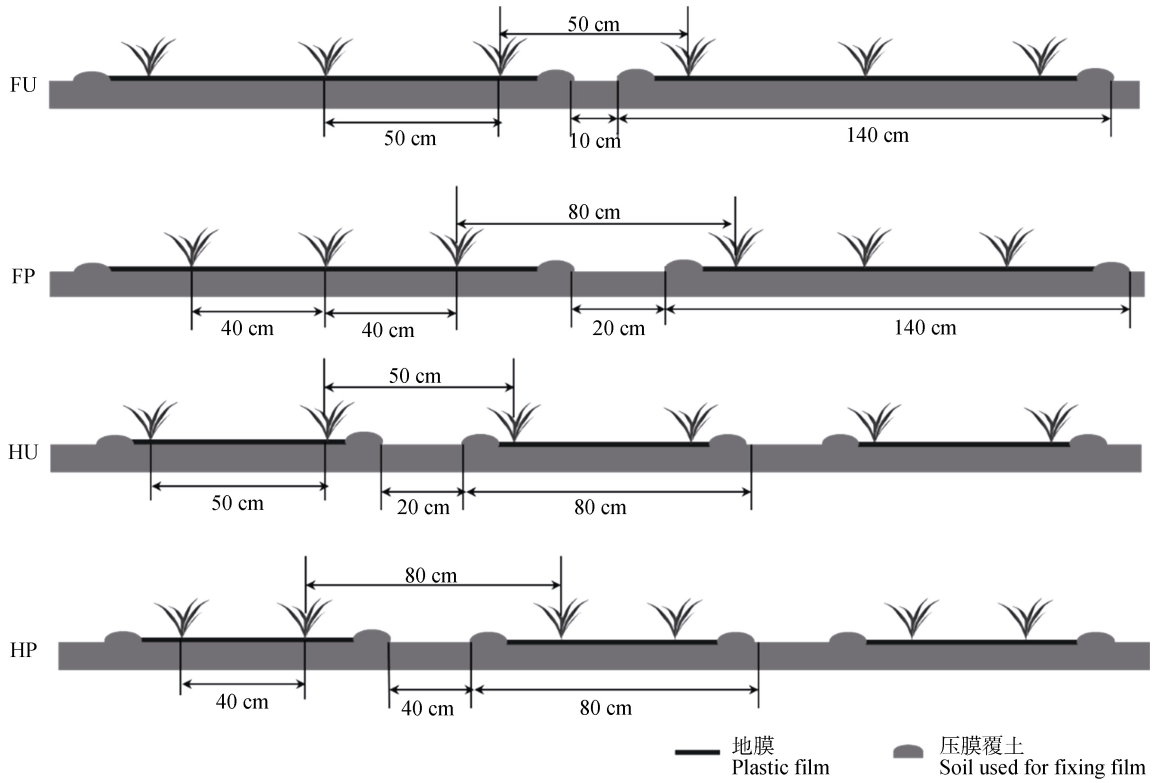

图 1 玉米不同地膜覆盖方式及行距田间试验处理示意图

Fig. 1 Schematic diagrams for the field experiment treatments of plastic film mulching pattern and row spacing

FU: 全膜等行距; FP: 全膜宽窄行; HU: 半膜等行距; HP: 半膜宽窄行。FU: full-film mulching + uniform row; FP: full-film mulching + paired row; HU: half-film mulching + uniform row; HP: half-film mulching + paired row.

日收获。密度82 500株·hm^{-2}, 玉米全生育期施用纯氮450 kg·hm^{-2}, 按基肥：大喇叭口期追肥：灌浆期追肥3：6：1施入; 磷肥施用P_2O_5 225 kg·hm^{-2}, 全部用作基肥。采用输水管道分小区、水表计量灌溉, 灌溉定额525 mm, 其中冬储灌120 mm; 拔节期、大喇叭口、抽雄吐丝期、灌浆初期、灌浆中期灌水定额分别为90 mm、75 mm、90 mm、75 mm和75 mm。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤含水量

0~30 cm 土层每 10 cm 为一层用烘干法测定土壤含水量, 每小区随机选择 3 个点重复; 30~110 cm 用水分中子仪(美国 CPN 公司 503 DR)测定。全膜覆盖和半膜覆盖处理, 分别在小区中央的覆膜带和不覆膜带安装 1 根中子管, 每 20 cm 为一层。玉米播种前和收获后各测定 1 次, 生育期内每 15 d 测定 1 次, 灌水前后分别加测 1 次。

1.3.2 棵间蒸发量

采用微型蒸渗仪(Micro-lysimeter)进行测定。全膜覆盖和半膜覆盖处理, 分别在小区中央的覆膜带和不覆膜带安装 1 套。微型蒸渗仪用 PVC 管做成。根据孙宏勇等[17]研究结果, 内径 10 cm、壁厚 5 mm、高 15 cm 时, 观察的土壤蒸发量最接近于实际值。测定前将其垂直压入作物行间土壤内, 使其顶面与地面齐平, 取原状土, 然后用塑料膜封住底部, 其目的是避免与周围土壤发生水分交换; 另用内径为 12 cm PVC 管做成外套, 固定于行间, 使其表面与附近土壤持平, 以保证操作时不破坏周围土体结构。

土壤蒸发测定采用称重法, 即 2 次称量之间的重量差值。

作物生长前期, 由于作物对地表的郁蔽程度低, 棵间蒸发量相对较高, 需要每天更换微型蒸渗仪内的原状土, 作物生长中后期, 每 3 d 更换 1 次, 降雨和灌溉后立即更换土体, 其目的是保证微型蒸渗仪内部的土壤水分剖面与周围土壤一致。

1.3.3 叶面积和籽粒产量

每小区选择长势一致的植株 10 株标记, 采用长宽系数法, 每隔 20 d 测定 1 次叶面积。叶面积指数(LAI)为单位面积上所有叶片表面积总和与相应土地面积之比。每小区单独全部收获计产。

1.3.4 水分利用效率

玉米某一阶段的水分利用效率和全生育期水分利用效率分别用基于干物质量水分利用效率($WUE_{ET.B}$)和基于籽粒产量水分利用效率($WUE_{ET.Y}$)表示, 用式(1)和式(2)计算:

$$WUE_{ET.B}=Biomass/ET \quad (1)$$

$$WUE_{ET.Y}=Y/ET \quad (2)$$

式中: Biomass 为玉米某一生育阶段积累的干物质量; Y 为玉米籽粒产量; ET 为玉米某一生育阶段(式 1)或全生育期(式 2)的耗水量, ET 用式(3)计算:

$$ET = P + I + U - R - D - \Delta S \quad (3)$$

式中: P 表示玉米某一生育阶段或全生育期有效降雨量, I 为某一生育阶段或全生育期内灌水量, U 为补给到作物根区地下水量, R 为地表径流量, D 为渗漏量, ΔS 为 0~110 cm 土层土壤含水量的变化[18]。

本研究区地下水埋深超过 15 m, 试验条件控制, 无径流产生; 经测定无渗漏。因此, U、R、D 均取值 0。

1.4 数据处理

采用SPSS 20.0进行二因素方差分析, 多重比较选择Duncan法。

2 结果与分析

2.1 籽粒产量及其构成因素对地膜覆盖方式及行距的响应

本研究在保证各处理基本苗一致的情况下, 分析了不同处理对玉米穗数、双穗率、穗粒数、粒重和籽粒产量的影响。如表 1 所示, 不同年度间穗粒数、籽粒产量差异显著; 地膜覆盖方式及行距对穗数、双穗率及籽粒产量影响显著, 且二者互作效应显著。从不同地膜覆盖方式来看, 全膜覆盖条件下玉米籽粒产量达 14 267.1 kg·hm^{-2}, 较半膜覆盖提高 5.1%(P<0.05); 对应穗数和双穗率分别高 3.8%和 7.3%(P<0.05)。从不同行距来看, 宽窄行种植条件下玉米籽粒产量达 14 036.7 kg·hm^{-2}, 较等行距高 4.7% (P<0.05)。对应穗数和双穗率分别高 6.6%和 18.2% (P<0.05)。从地膜覆盖方式和行距组合来看, 全膜宽窄行和半膜宽窄行种植条件下可获得较高的籽粒产量, 分别达 14 712.7 kg·hm^{-2} 和 14 155.2 kg·hm^{-2}, 较半膜覆盖等行距处理高 13.2%和 8.9%(P<0.05), 与全膜覆盖等行距处理差异不显著。全膜宽窄行和半膜宽窄行种植条件下穗数和双穗率也较高, 并且显著高于等行距处理。全膜等行距处理与半膜宽窄行处理籽粒产量无显著差异。地膜覆盖方式及行距互作对玉米穗粒数和粒重影响不显著。从不同年度来看, 2015 年、2014 年籽粒产量分别达 13 984.2 和 13 710.1kg·hm^{-2}, 分别较 2013 年提高 5.0%和 3.0% (P<0.05)。2015 年穗粒数达 610.5 粒·穗$^{-1}$, 显著高于

表 1　不同覆膜方式及种植行距条件下玉米产量及产量构成因素

Table 1　Grain yield and yield components of maize under different treatments of plastic film mulching patter and rows spacing

因素及互作 Main factors and interaction		穗数 Ear number (ears·hm^{-2})	双穗率 Double ear rate (%)	穗粒数 Seeds number per ear	百粒重 100-seed weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg·hm^{-2})
年份 Year (Y)	2013	6 235.2±83.9a	18.9±0.8a	583.8±8.9b	35.3±1.2a	13 314.5±232.5b
	2014	6 318.2±73.5a	19.9±0.8a	590.2±10.0b	36.1±1.6a	13 710.1±158.3a
	2015	6 156.3± 92.3a	18.2±1.1a	610.5±10.0a	36.8±1.1a	13 984.2±220.1a
覆膜方式 Plastic film mulching pattern (P)	全膜 Full-film mulching (F)	6 529.2±63.7a	20.7±0.6a	594.7±13.2a	36.1±0.9a	14 267.1±256.7a
	半膜 Half-film mulching (H)	6 289.1±80.8b	19.3±0.7b	589.4±9.2a	35.6±1.5a	13 578.4±214.7b
行距 Rows spacing (R)	等行距 Uniform row (U)	6 143.1±110.4b	18.1±1.1b	596.0±11.8a	35.7±0.9a	13 411.6±286.5b
	宽窄行 Paired row (P)	6 550.2±92.2a	21.4±1.4a	588.1±9.7a	36.0±0.9a	14 036.7±189.5a
覆膜方式×行距 P × R	全膜等行距 Full-film mulching + uniform row	6 410.3±52.3b	18.5±0.4b	598.8±12.6a	36.0±1.1a	13 821.5±178.4b
	全膜宽窄行 Full-film mulching + paired row	6 648.1±91.7a	22.8±0.9a	590.5±15.2a	36.2±0.8a	14 712.7±389.8a
	半膜等行距 Half-film mulching + uniform row	6 075.9±100.2c	17.7±0.3c	593.2±11.8a	35.3±0.8a	13 001.6±416.2c
	半膜宽窄行 Half-film mulching + paired row	6 502.3±50.6a	20.9±1.1a	585.6±9.9a	35.8±0.9a	14 155.2±335.2ab
年份 Year (Y)		NS	NS	*	NS	*
地膜覆盖方式 Plastic film mulching pattern (P)		*	*	NS	NS	*
行距 Rows spacing (R)		*	**	NS	NS	*
Y × P		*	NS	*	NS	*
Y × R		*	*	NS	NS	NS
P × R		*	*	NS	NS	*
Y × P × R		*	NS	NS	NS	NS

NS 表示无显著差异; *和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平差异显著。同一因素同列数字后不同小写字母表示在 P<0.05 水平差异显著。NS indicates non-significance; * and ** indicate significance at P < 0.05 and P < 0.01, respectively. Means followed by different letters within a column under a factor are significantly different at P < 0.05.

2013 年和 2014 年。综合上述结果，试区无论在全膜覆盖还是半膜覆盖条件下，宽窄行种植均能获得较高籽粒产量，其主要原因是提高了穗数和双穗率。

2.2 地膜覆盖方式及行距对玉米叶面积指数的影响

不同地膜覆盖方式及种植行距条件下玉米全生育期叶面积指数(LAI)动态变化及平均叶面积指数如图 2 所示。地膜覆盖方式对 LAI 影响显著，而种植行距对其无显著影响，二者互作效应不显著。从 3 年平均结果来看，玉米生长前期(苗期至拔节期)各处理 LAI 无显著差异；拔节期至抽雄吐丝期，全膜覆盖处理条件下 LAI 显著高于半膜覆盖处理。但相同覆膜方式下，不同行距处理间无显著差异。全膜覆盖宽窄行处理 LAI 峰值大于 6.0，显著高于同期半膜覆盖处理；此外，后者玉米 LAI 峰值出现晚于全膜覆盖处理。从全生育期 LAI 来看，全膜覆盖等行距处理平均 LAI 达 3.4，分别比半膜覆盖等行距处理和半膜覆盖宽窄行处理提高 17.6%和 11.3%(P<0.05)；相同覆膜方式下，等行距种植和宽窄行种植玉米平均 LAI 无显著差异。说明全膜覆盖条件下宽窄行种植可以获得较高 LAI 峰值的同时，玉米全生育期平均 LAI 显著高于半膜覆盖处理，为其获得较高的籽粒产量创造了较大的光合源。

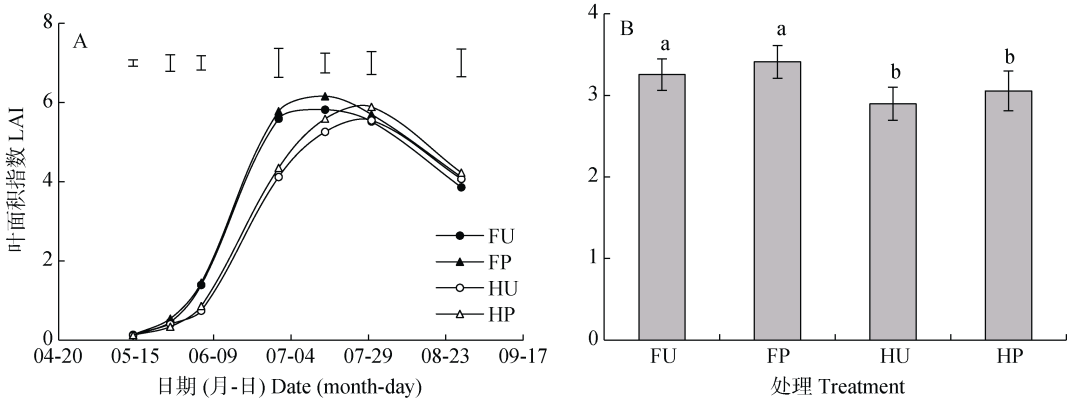

图 2 不同地膜覆盖及种植行距条件下玉米叶面积指数动态变化和平均叶面积指数

Fig. 2 Dynamics of leaf area index (LAI) and average LAI across growing season of maize under different treatments of film mulching pattern and rows spacing

FU: 全膜等行距; FP: 全膜宽窄行; HU: 半膜等行距; HP: 半膜宽窄行。A 图中误差线表示 LSD 值。B 图中误差线表示标准误，不同小写字母表示不同处理在 P<0.05 水平差异显著。FU: full-film mulching + uniform row; FP: full-film mulching + paired row; HU: half-film mulching + uniform row; HP: half-film mulching + paired row. Error bars indicate LSD value in the figure A. Error bars indicate standard error, and different lowercase letters above the error bars mean significant difference at P < 0.05 among different treatments in the figure B.

2.3 不同地膜覆盖方式及种植行距下玉米耗水结构

2.3.1 不同生育阶段玉米耗水结构

3年平均试验结果表明，地膜覆盖方式及种植行距对玉米不同生育阶段棵间蒸发量(E)及蒸发量占蒸散量的比例(E/ET)存在显著影响，且对玉米大喇叭口期至开花期E和E/ET的影响存在显著互作效应(图3)。从不同生育阶段来看，播种期至拔节期，半膜覆盖条件下的E平均为28.1 mm，比全膜覆盖提高36.5%(P<0.05)，且E/ET比全膜覆盖下高6.2个百分点，差异显著。拔节期至大喇叭口期，半膜覆盖下的E平均为144.5 mm，较全膜覆盖下高9.6%(P<0.05)，且E/ET较全膜覆盖下高3.8个百分点(P<0.05)。同时，播种至大喇叭口期，相同地膜覆盖方式下，种植行距对E和E/ET无显著影响。大喇叭口期至开花期，相同覆膜方式下，宽窄行处理下的E和E/ET均显著高于等行距处理，其中全膜覆盖宽窄行和半膜覆盖宽窄行处理E分别达45.2 mm和48.7 mm，分别较对应等行距处理高24.5%和16.2%；全膜覆盖宽窄行和半膜覆盖宽窄行处理E/ET分别比对应等行距处理低4.0个和3.8个百分点。开花期至成熟期，各处理E和E/ET均无显著差异。上述结果说明，全膜覆盖显著降低了玉米生长前期(播种至大喇叭口期)的E，且种植行距对这一生长阶段的E没有显著影响，但种植行距影响玉米生长中期(大喇叭口期至吐丝期)E及E/ET；地膜覆盖方式和种植行距对玉米生长后期E无显著影响。

2.3.2 全生育期玉米耗水结构

地膜覆盖方式及种植行距对玉米全生育期总棵间蒸发量(E)影响显著，且互作效应显著，但对全生育期总蒸散量(ET)和蒸发量占蒸散量的比例(E/ET)影响不显著(图4)。半膜覆盖和全膜覆盖下玉米全生育期E分别平均为179.9 mm和163.0 mm，前者较后者提高12.4%(P<0.05)；E/ET无显著差异。宽窄行种植和等行距种植下玉米全生育期E平均分别为179.9 mm和166.1 mm，前者较后者高11.6%(P<0.05)；E/ET无显著差异。从地膜覆盖方式和种植行距组合

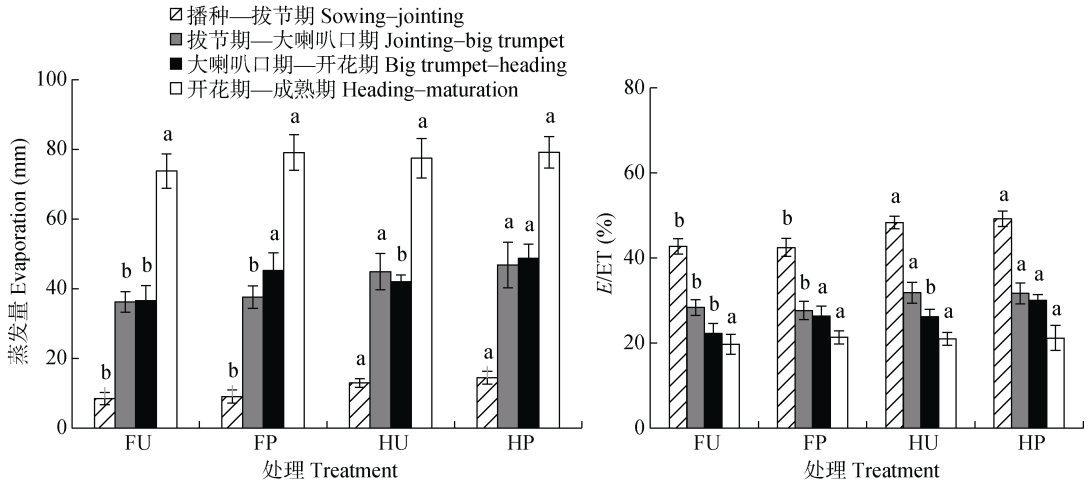

图 3　不同覆膜方式及种植行距下玉米不同生育阶段棵间蒸发量(*E*)及蒸发量与蒸散量之比(*E*/ET)

Fig. 3　Evaporation (*E*) and rate of *E* to evapotranspiration (*E*/ET) of maize at different growth stages under different treatments of film mulching pattern and rows spacing

FU: 全膜等行距; FP: 全膜宽窄行; HU: 半膜等行距; HP: 半膜宽窄行。不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。FU: full-film mulching + uniform row; FP: full-film mulching + paired row; HU: half-film mulching + uniform row; HP: half-film mulching + paired row. Different lowercase letters above the error bars mean significant differences at $P < 0.05$ among different treatments.

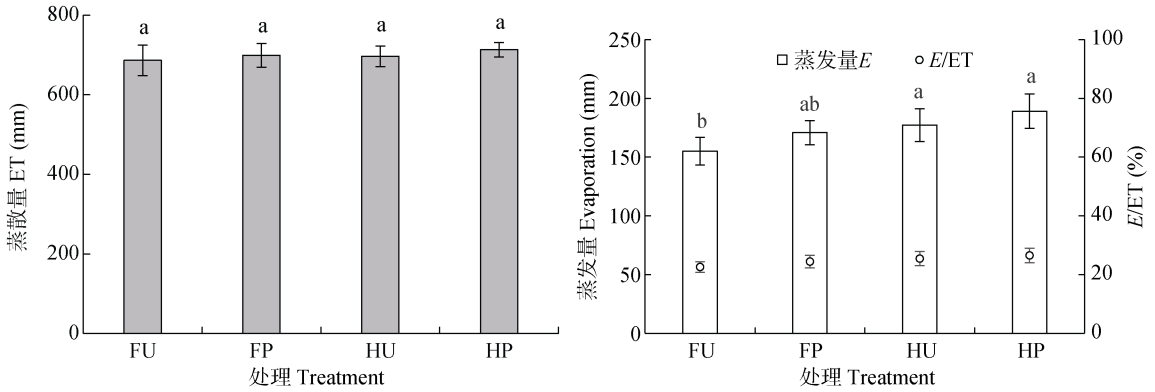

图 4　不同覆膜方式及种植行距下玉米全生育期总蒸散量(ET)、棵间蒸发量(*E*)及 *E*/ET

Fig. 4　Total evapotranspiration (ET), evaporation (*E*) and *E*/ET of maize during whole growth stage under different treatments of film mulching pattern and rows spacing

FU: 全膜等行距; FP: 全膜宽窄行; HU: 半膜等行距; HP: 半膜宽窄行。不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。FU: full-film mulching + uniform row; FP: full-film mulching + paired row; HU: half-film mulching + uniform row; HP: half-film mulching + paired row. Different lowercase letters above the error bars mean significant difference at $P < 0.05$ among different treatments.

来看，半膜覆盖等行距和宽窄行种植处理玉米全生育期*E*分别为177.2 mm和189.0 mm，分别较全膜等行距高14.3%和21.9%($P<0.05$)；相同覆膜方式下，不同种植行距处理玉米全生育期*E*无显著差异；各处理间*E*/ET无显著差异。说明相对于传统的全膜等行距种植方式，半膜覆膜覆盖宽窄行和等行距种植均增加了玉米全生育期*E*。从玉米全生育期来看，地膜覆盖方式及种植行距对*E*/ET影响不显著。

2.4　不同地膜覆盖方式及种植行距对玉米水分利用效率的影响

不同年度对玉米生长前期水分利用效率($WUE_{ET.B}$)影响显著；覆膜方式对玉米不同生育阶段$WUE_{ET.B}$及基于经济产量水分利用效率($WUE_{ET.Y}$)影响显著；种植行距对玉米生长前期$WUE_{ET.B}$影响显著，对生长中后期$WUE_{ET.B}$和$WUE_{ET.Y}$无显著影响，但二者对$WUE_{ET.B}$和$WUE_{ET.Y}$互作效应显著(表2)。全膜覆盖处理下，玉米不同生育阶段$WUE_{ET.B}$比半膜覆盖高8.9%~46.3%($P<0.05$)；玉米$WUE_{ET.Y}$比半膜覆盖处理提高6.8% ($P<0.05$)。等行距种植处理玉米生长前期(播种到大喇叭口期)$WUE_{ET.B}$较宽窄行处理高10.7%~11.5%($P<0.05$)，种植行距对玉米生长中后期(大喇叭口期至成熟期)$WUE_{ET.B}$和$WUE_{ET.Y}$无显著影响。这说明，地膜覆盖方式和种植行距对玉米不同生育阶段的水分利用效率影响显著，但不同生育阶段表现并不一致。半膜覆盖宽窄行种植下玉米水分利用效率达19.3 $kg\cdot mm^{-1}\cdot hm^{-2}$，与全膜覆盖处理差异不显著。采用半膜覆盖宽窄行种植并没有显著降低玉米基于经济产量水分利用效率。

表 2 不同覆膜方式及种植行距条件下玉米水分利用效率

Table 2 Water use efficiency of maize under different treatments of film mulching pattern and rows spacing

因素及互作 Factors and interaction		$WUE_{ET.B}$ ($kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$) 播种—拔节期 Sowing–jointing	拔节期—大喇叭口期 Jointing–big trumpet	大喇叭口期—开花期 Big trumpet–heading	开花期—成熟期 Heading–maturation	$WUE_{ET.Y}$ ($kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$)
年 Year (Y)	2013	15.1±0.8b	13.4±0.6a	18.9±1.3a	55.9±2.8a	20.9±1.0a
	2014	17.3±0.8a	12.9±0.8ab	21.2±1.2a	54.8±3.2a	19.8±0.9a
	2015	16.3±0.5ab	11.1±1.1b	20.3±0.9a	56.2±1.9a	18.9±1.3a
覆膜方式 Plastic film mulching (P)	全膜 Full-film mulching (F)	19.6±1.1a	14.8±0.9a	20.8±0.8a	57.7±2.8a	20.3±0.6a
	半膜 Half-film mulching (H)	13.4±1.3b	11.9±1.2b	19.0±0.6b	53.0±2.1b	19.0±0.5b
行距 Rows spacing (R)	等行距 Uniform row(U)	17.4±0.9a	14.0±0.6a	19.6±0.8a	55.3±2.3a	19.6±0.8a
	宽窄行 Paired row(P)	15.6±0.8b	12.7±0.6b	20.2±0.7a	55.3±2.4a	19.7±0.9a
覆膜方式×行距 P × R	全膜等行距 Full-film mulching + uniform row	20.3±0.5a	15.4±0.5a	20.1±0.8ab	58.4±1.8a	20.4±0.6a
	全膜宽窄行 Full-film mulching + paired row	18.9±0.8b	14.2±1.2ab	21.5±0.7a	56.9±2.4ab	20.2±0.5a
	半膜等行距 Half-film mulching + uniform row	14.5±1.2c	12.6±0.8b	19.1±0.5b	52.2±2.5b	18.7±0.8b
	半膜宽窄行 Half-film mulching + paired row	12.3±1.1c	11.1±1.9b	18.8±0.5b	53.7±1.9b	19.3±0.5ab
年份 Year (Y)		*	*	NS	NS	NS
地膜覆盖方式 Plastic film mulching pattern (P)		**	*	*	*	*
行距 Rows spacing (R)		*	*	NS	NS	NS
Y × P		*	*	NS	NS	NS
Y × R		NS	NS	NS	NS	NS
P × R		**	*	*	*	*
Y × P × R		NS	NS	NS	NS	NS

$WUE_{ET.B}$: 某一生育阶段水分利用效率; $WUE_{ET.Y}$: 生育期水分利用效率。NS 表示无显著差异; *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。同一因素同列数字后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。$WUE_{ET.B}$: water use efficiency based on biomass of a growth period; $WUE_{ET.Y}$: water use efficiency based on yield. NS indicates non-significance; * and ** indicate significance at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. Means followed by different letters within a column under a factor are significantly different at $P < 0.05$.

3 讨论

3.1 产量形成对地膜覆盖方式及种植行距的响应

西北干旱绿洲灌区连续 3 年研究结果表明，地膜覆盖方式和种植行距对玉米籽粒产量影响显著，全膜覆盖处理下玉米籽粒产量显著高于半膜覆盖处理；相对于等行距种植，宽窄行能获得较高籽粒产量。从增产机制上来看，本研究认为全膜覆盖较半膜覆盖提高玉米产量、宽窄行种植较等行种植增产的主要原因是提高了穗数和双穗率。有研究表明全膜覆盖较半膜覆盖增产的主要原因是提高了双穗率、粒重和穗粒数，增加了叶面积指数[10]，这与本研究结果一致。全膜覆盖较半膜覆盖促进了玉米根系生长，改善土壤水分状况，进而提高了玉米产量[19]。另外，相对于半膜覆盖，全膜覆盖通过提高土壤温度，提高了玉米籽粒产量[5]。地膜覆盖显著提高玉米籽粒产量归因于穗部干物质积累及表层土壤水热状况的改善[7]。从种植行距的产量效应来看，本究结果与一些研究者在川中丘陵区、黄淮海地区得出的研究结果一致[20-21]。另外，选用与本研究相同的玉米品种的研究认为，宽窄行种植的下部叶片的净光合速率(P_n)高于等行距种植[22]。有研究发现，宽窄行种植改善了群体冠层结构，使吐丝期的中下层叶片获得更多光合有效辐射，增强了其光合作用[15]。宽窄行(160 cm +40 cm)较等行距(60 cm)提高了上部叶片光合速率，同时也提高了叶片中 POD 活性，推迟了叶片衰老，从而提高了产量[16]。本研究发现全膜覆盖处理下玉米叶面积指数峰值与全生育期平均叶面积指数均高于半膜覆盖，这从光合源的角度进一步解释了全膜覆盖较半膜覆盖增产的原因。本研究发现，半膜覆盖下，宽窄行种植玉米籽粒产量较全膜覆盖并没有显著降低。因此，半膜覆盖宽窄行种植替代全膜等行距或宽窄行种植能够实现玉米产量不

降低，但有效降低地膜的投入量，这对于干旱绿洲灌区有重要的生态和经济效益。

3.2 地膜覆盖方式及种植行距对玉米水分利用特征的影响

连续 3 年研究结果表明，相对于半膜覆盖，全膜覆盖显著减低了玉米生长前期(播种至大喇叭口期)的棵间蒸发量，但全膜覆盖和半膜覆盖对玉米全生育期总蒸散量影响不显著。这一结果与李小刚等[23]在黄土高原半干旱区的研究结果一致，其认为地膜覆盖下作物生长发育加快，冠层覆盖和叶面积显著增加，从而显著增加了蒸腾消耗，苗期因减少土面蒸发而保蓄的水分在生长盛期被作物吸收利用。另外，黄土高原半干旱区的研究结果也证明地膜覆盖与不覆盖处理玉米耗水量无显著差异[24]。本研究发现，与等行距种植相比，宽窄行种植提高了玉米生长中期(大喇叭口期至吐丝期)棵间蒸发量及蒸发量占蒸散量的比例。黄淮海平原研究结果表明，40 cm 行距较 50 cm 行距增加了玉米耗水量[25]。在黄土旱塬区的研究发现，不同行距相同密度下玉米产量和水分利用效率没有显著差异[26]。因此，行距对玉米耗水量影响的阶段性及其机制有待进一步深入探讨。

各种节水技术、节水措施的应用，归根结底是为了提高水分利用效率[27]。本研究发现，采用半膜覆盖宽窄行种植并没有显著降低玉米基于经济产量水分利用效率。这是因为半膜覆盖种植下玉米产量和耗水量与传统全膜覆盖等行距并没有显著差异。也有研究发现。在黄土旱塬区，相同密度下不同行距产量和水分利用效率没有显著差异[26]。许多研究认为覆盖之所以能够提高作物的水分利用效率是地膜或秸秆等覆盖方式有利于改善土壤水分状况[28-29]，即减少了作物耗水中的棵间蒸发，从而降低作物的耗水量，提高了作物水分利用效率[11,30]。本研究进一步分析发现，不同地膜覆盖方式和种植行距对玉米不用生育阶段的水分利用效率影响并不一致，这可能是因为覆盖和种植行距这两个因子共同影响了耗水过程和干物质积累过程。

4 结论

干旱绿洲灌区，地膜覆盖方式和种植行距对玉米籽粒产量影响显著，全膜覆盖下玉米籽粒产量显著高于半膜覆盖；宽窄行种植较等行距种植能获得较高籽粒产量。增产的主要原因是提高了穗数和双穗率。相对于半膜覆盖，全膜覆盖显著降低了玉米生长前期(播种至大喇叭口期)的棵间蒸发量，但全膜覆盖和半膜覆盖对玉米全生育期总蒸散量(ET)影响不显著。半膜覆盖宽窄行种植替代全膜等行距或宽窄行种植能够实现玉米产量和水分利用效率不降低，这为水资源短缺、地膜投入量较高的干旱内陆灌区玉米生产过程中实现地膜减投增效提供了一种重要途径。

参考文献 References

[1] LIU E K, HE W Q, YAN C R. ‘White revolution’ to ‘white pollution’ — agricultural plastic film mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 091001

[2] CHEN Y S, WU C F, ZHANG H B, et al. Empirical estimation of pollution load and contamination levels of phthalate esters in agricultural soils from plastic film mulching in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(1): 239–247

[3] 薛颖昊, 曹肆林, 徐志宇, 等. 地膜残留污染防控技术现状及发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1595–1600
XUE Y H, CAO S L, XU Z Y, et al. Status and trends in application of technology to prevent plastic film residual pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1595–1600

[4] LI C J, WANG C J, WEN X X, et al. Ridge-furrow with plastic film mulching practice improves maize productivity and resource use efficiency under the wheat-maize double-cropping system in dry semi-humid areas[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 201–211

[5] WU Y, HUANG F Y, JIA Z K, et al. Response of soil water, temperature, and maize (*Zea may* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of Northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 113–121

[6] YU Y Y, TURNER N C, GONG Y H, et al. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 99: 138–147

[7] XU J, LI C F, LIU H T, et al. The effects of plastic film mulching on maize growth and water use in dry and rainy years in northeast China[J]. PLoS One, 2015, 10(5): e0125781

[8] BI Y L, QIU L, ZHAKYPBEK Y, et al. Combination of plastic film mulching and AMF inoculation promotes maize growth, yield and water use efficiency in the semiarid region of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 278–286

[9] ZHANG P, WEI T, CAI T, et al. Plastic-film mulching for enhanced water-use efficiency and economic returns from maize fields in semiarid China[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 512

[10] 于爱忠, 柴强. 供水与地膜覆盖对干旱灌区玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 778–786
YU A Z, CHAI Q. Effects of plastic film mulching and irrigation quota on yield of corn in arid oasis irrigation area[J].

Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(5): 778–786

[11] LIU J L, BU L D, ZHU L, et al. Optimizing plant density and plastic film mulch to increase maize productivity and water-use efficiency in semiarid areas[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(4): 1138–1146

[12] 孙扬, 郭占全, 吴春胜. 地膜覆盖对玉米产量及干物质特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(6): 72–75
SUN Y, GUO Z Q, WU C S. Effect of plastic film mulching on yield and dry matter characteristics in semi-arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(6): 72–75

[13] ZHANG Z, ZHANG Y Q, SUN Z X, et al. Plastic film cover during the fallow season preceding sowing increases yield and water use efficiency of rain-fed spring maize in a semi-arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 203–210

[14] 胡亚瑾, 吴淑芳, 冯浩, 等. 宽垄窄行覆膜种植对夏玉米土壤水热及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 8–12
HU Y J, WU S F, FENG H, et al. Effects of wide ridge and narrow row with ridge mulching mode on soil water content and temperature and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 8–12

[15] LIU T, SONG F, LIU S, et al. Canopy structure, light interception, and photosynthetic characteristics under different narrow-wide planting patterns in maize at silking stage[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2011, 9(4): 1249–1261

[16] TIAN C, HAN J C, LI J, et al. Effects of row direction and row spacing on maize leaf senescence[J]. PLoS One, 2019, 14(4): e0215330

[17] 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (8): 114–118
SUN H Y, LIU C M, ZHANG Y Q, et al. Study on soil evaporation by using micro-lysimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (8): 114–118

[18] FAN Z L, CHAI Q, HUANG G B, et al. Yield and water consumption characteristics of wheat/maize intercropping with reduced tillage in an Oasis region[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 45: 52–58

[19] GAO Y H, XIE Y P, JIANG H Y, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 40–47

[20] 陈伟, 李强, 刘晓林, 等. 密度与行距配置对川中丘区玉米物质积累及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(3): 301–307
CHEN W, LI Q, LIU X L, et al. Effects of density and row spacing on maize accumulation and yield in hilly area of Sichuan[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(3): 301–307

[21] 魏珊珊, 王祥宇, 董树亭. 株行距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 441–450
WEI S S, WANG X Y, DONG S T. Effects of row spacing on canopy structure and grain-filling characteristics of high-yield summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 441–450

[22] 冯瑞云, 王慧杰, 闫贵云, 等. 旱地宽窄行种植对春玉米冠层结构、光合特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2015, (5): 80–84
FENG R Y, WANG H J, YAN G Y, et al. Effects of wide and narrow row cultivation on canopy structure, photosynthetic characteristics and yield in spring maize of dryland[J]. Crops, 2015, (5): 80–84

[23] 李小刚, 李凤民. 旱作地膜覆盖农田土壤有机碳平衡及氮循环特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4630–4638
LI X G, LI F M. Soil organic carbon balance and nitrogen cycling in plastic film mulched croplands in rainfed farming systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4630–4638

[24] 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[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 42455

[25] LIU J Q, LI M D, ZHOU X B. Row spacing effects on radiation distribution, leaf water status and yield of summer maize[J]. The Journal of Animal & Plant Sciences, 2016, 26(3): 697–705

[26] 王磊, 樊廷录, 李尚中, 等. 株行距配置连作对黄土旱塬覆膜春玉米土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 79–86
WANG L, FAN T L, LI S Z, et al. Effects of row spacing and continuous cropping on soil moisture and yield of spring maize covered with film in Loess Plateau dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 79–86

[27] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99–104
WANG H X, LIU C M. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99–104

[28] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, et al. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management[J]. Field Crops Research, 2014, 163: 55–63

[29] LI S X, WANG Z H, LI S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 39–49

[30] 党建友, 裴雪霞, 张晶, 等. 秸秆还田条件下灌水模式对冬小麦产量和水肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2511–2516
DANG J Y, PEI X X, ZHANG J, et al. Effects of irrigation mode on winter wheat yield and water-and nutrient use efficiencies under maize straw returning to field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2511–2516