

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.027

覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响

任新茂^{1,2} 孙东宝^{1,2} 王庆锁^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 为探究黄土高原旱作玉米的适宜种植密度,开展了玉米露地与覆膜6个种植密度的大田试验。结果表明:覆膜加速了玉米的生长和发育,表现在株高和叶面积指数的增加,生育期的提前,如抽穗期(即最大高度出现时)比露地种植提前了11 d。在玉米生长的中后期,露地玉米株高具有随密度增加而降低的趋势,而覆膜玉米则无显著差异。无论是覆膜还是露地种植,玉米叶面积指数都是随种植密度的增加而提高。玉米的蒸散量随种植密度的增加而增加,但覆膜种植降低了玉米对水分的消耗,在不同程度上缓解了因种植密度增加而导致的蒸散量增加与降水不足之间的矛盾。覆膜显著提高了玉米产量和水分利用效率,平均产量和水分利用效率较露地种植分别提高52.79%和60.55%。露地与覆膜种植产量和水分利用效率随种植密度的增加都呈现先增加后减小的趋势,但获得最高产量与水分利用效率对应的种植密度不同:露地种植在密度为52 500株/hm²(D2)时获得最高产量和水分利用效率,而覆膜种植增大了单位面积土地可支撑的群体,最高产量和水分利用效率分别在密度为82 500株/hm²(D4)和67 500株/hm²(D3)时获得,但D3与D4下水分利用效率无显著差异,所以在试验气候年型下,黄土高原东部露地和覆膜种植的春玉米适宜密度分别为52 500株/hm²和82 500株/hm²。

关键词: 旱作春玉米; 种植密度; 覆膜; 产量; 农田蒸散

中图分类号: S157.4; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0206-06

Effects of Plastic Film Mulching and Plant Density on Yield and Evapotranspiration of Rainfed Spring Maize

REN Xinmao^{1,2} SUN Dongbao^{1,2} WANG Qingsuo^{1,2}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Concerning the increasing of plant density is one of important ways to achieve high yield, field experiments were conducted to investigate the effects of increasing plant density and plastic film mulching on the growth and yield of spring maize, and crop evapotranspiration. The results showed that film mulching accelerated growth and development of maize. It also increased height and leaf area index of the plant at early growth stage of maize. At the late growth stage of maize, plant height of maize without film mulching was decreased with the increase of density, but no significant difference was found for plastic film mulching. Whether mulching or un-mulching, leaf area index of maize was increased with the increase of the density. Evapotranspiration increased with the increase of the density, however, film mulching reduced consumption of water and alleviated the contradiction between increase of water consumption because of the increased plant density and plant height and insufficient precipitation. Film mulching significantly increased maize yield and water use efficiency by 52.79% and 60.55% compared with un-mulching. The grain yield and the water use efficiency of un-mulching and film mulching treatments were all increased with the increase of the plant density until a plateau and then declined. The difference was that the maximum yield of un-mulching was 8 466.02 kg/hm² and it was achieved at 52 500 plants/hm², however, the maximum yield of film mulching was 12 778.47 kg/hm² and it was achieved at 82 500 plants/hm². As a result, the optimum planting densities on eastern Loess Plateau for film mulching and un-mulching of spring maize were 52 500 plants/hm² and 82 500 plants/hm².

Key words: rainfed spring maize; plant density; plastic film mulching; yield; evapotranspiration

收稿日期: 2016-05-21 修回日期: 2016-06-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD09B01)和国家自然科学基金项目(31401344)

作者简介: 任新茂(1981—),男,博士生,主要从事旱作节水农业与模型研究, E-mail: renxinmao@163.com

通信作者: 王庆锁(1964—),男,研究员,博士,主要从事旱地农业和水环境研究, E-mail: wangqingsuo@caas.cn

引言

玉米是我国主要粮食作物之一,是当前种植面积最大、总产量最高的作物,在我国农业生产中占有重要地位,但随着人口增长,作为粮食和工业原料的玉米供应日益紧张。因此大力发展玉米生产对保障国家粮食安全具有重要意义^[1],其中,增加种植密度是提升玉米单产的措施之一^[2]。在美国平均种植密度已经由 20 世纪 30 年代的 30 000 株/hm² 提高到现在的 80 000 株/hm²^[3]。目前我国玉米平均种植密度为 52 500 ~ 60 000 株/hm²,远低于美国的种植密度。黄土高原是我国旱作农业重点区域,玉米种植面积大,但降水时空分布不均且年际间变化较大,蒸发剧烈^[4],限制了当地玉米产量的提高。如何可持续地提高土地生产力和水分利用效率,是该地区玉米生产面临的重大挑战。在旱作区提高玉米种植密度是增加玉米产量的有效途径,但密度过高反而会因为水分限制导致产量降低^[5-6]。地膜覆盖自 20 世纪 70 年代在我国春玉米生产中推广应用以来,对粮食的高产稳产起到了巨大的推动作用^[7]。地膜覆盖种植能提高土壤温度,减少地表无效蒸发,增加土壤蓄水,进而增加产量,提高水分利用效率^[8-13]。因此,能否利用地膜覆盖的保水效应来弥补增加种植密度时因降水不足而导致的产量风险,同时明确覆膜种植的适宜密度,是旱作春玉米生产中亟需解决的问题。本文在黄土高原东部半湿润偏旱区将种植密度与地膜覆盖相结合,旨在为明确当地露地和覆膜种植下的适宜密度、提高旱地春玉米产量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2015 年在农业部寿阳旱地农业实验站进行。该站位于黄土高原东部典型旱作农业区,地理位置 113°05'E、37°51'N,海拔高度 1 135 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,干旱寒冷,四季分明。1981—2010 年平均气温 7.6℃,年平均降水量 489.5 mm,无霜期 140 d 左右。2015 年春玉米生育期内(5—9 月份)降水量 414.8 mm,月平均最低和最高气温分别为 11.9℃ 和 25.2℃(图 1)。土壤为褐土、轻壤,耕作层有机质质量比为 22.99 g/kg,全氮质量比为 1.15 g/kg,硝态氮质量比为 16.02 mg/kg,有效磷质量比为 7.7 mg/kg,有效钾质量比为 99.2 mg/kg,pH 值为 8.4。

1.2 田间试验设计

玉米种植品种为“大丰 30”。设计露地和覆膜

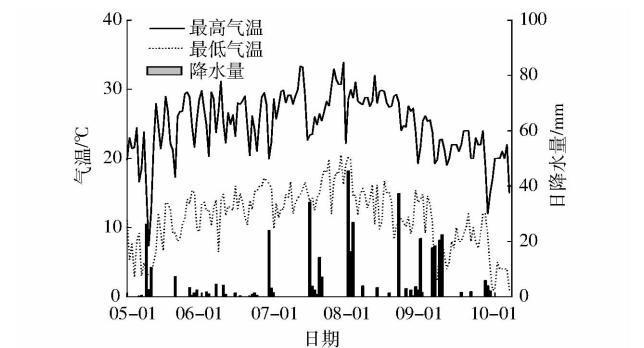


图 1 2015 年春玉米生育期内逐日气温与降水量
Fig.1 Distribution of air temperature and precipitation during growth period of spring maize in 2015

2 种植方式,每种种植方式分别设计 6 个密度,即 37 500、52 500、67 500、82 500、97 500、112 500 株/hm²,分别标记为 D1、D2、D3、D4、D5 和 D6,共 12 个处理,重复 3 次,小区面积为 100 m²。种植方式为主区,密度为副区。播种时施入纯氮 150 kg/hm²,P₂O₅ 84 kg/hm²。2015 年 4 月 27 日播种,播种当天人工覆盖普通聚乙烯塑料薄膜,10 月 4 日收获。

1.3 测定项目

1.3.1 株高与叶面积

每个小区选取生长一致的玉米 5 株,挂牌标记。六叶期开始每 8 ~ 10 d 用直尺测定株高和叶片长、宽,按照长、宽折算系数(展开叶为 0.75,未展叶为 0.5)的乘积计算单株叶面积。叶面积指数计算公式为

$$V_{LAI} = SN/A \tag{1}$$

式中 V_{LAI} ——叶面积指数

S ——单株叶面积

N ——单位面积株数

A ——单位土地面积

1.3.2 土壤水分

土壤水分采用德国 TRIME-T3 型管式土壤时域反射仪(TDR)测定。每个小区中部安装一根测管,测管深度 260 cm。土壤水分每 10 d 测定 1 次,每 20 cm 为 1 层,每层按 2 个方位重复测定,取平均值,人工记录数据。降水后加测 1 次。

1.3.3 产量

成熟时每个小区全部测产,手工脱粒,称质量,随机取 300 g 籽粒在 105℃ 条件下干燥至质量恒定,按质量含水率为 14% 计算籽粒产量。

1.4 蒸散量与水分利用效率

土壤贮水量 W (mm) 计算式为

$$W = \sum_{i=1}^n \theta_i h_i \tag{2}$$

式中 θ_i ——第 i 层土壤体积含水率, %

h_i ——第*i*层土壤厚度,mm
 n ——土壤层序

玉米生育期内的蒸散量 ET (mm) 计算式为

$$ET = P + \Delta W \tag{3}$$

式中 P ——玉米生育期内的降水量,mm
 ΔW ——播种期与收获期土壤贮水量之差,mm

玉米水分利用效率 WUE ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$) 计算式为

$$WUE = Y/ET \tag{4}$$

式中 Y ——籽粒产量, kg/hm^2

1.5 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 16.0 进行数据整理与统计分析,利用 SigmaPlot 10.0 制图,以最小显著差数法(LSD)完成显著性检验,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 覆膜和种植密度对玉米株高的影响

覆膜种植显著提高了玉米的株高(图2)。7个测定时期覆膜种植(6个密度)平均株高分别比露地种植增加39.17%、30.41%、43.62%、55.35%、66.17%、45.89%和7.75%。覆膜种植的另一个特

征是玉米最大高度出现时间的提前。覆膜玉米的最大高度出现在第89天,比露地种植提前了11d,说明覆膜使玉米生长发育进程明显加快,这主要取决于覆膜的“增温效应”^[14]。露地种植的玉米株高在中后期具有随着种植密度增加而降低的趋势,这可能与水分胁迫有关,而覆膜种植的玉米株高在后期无显著差异,这说明不存在水分限制,其原因可能与保墒作用有关。在生育前期,露地种植玉米的株高具有随种植密度增加而增高的趋势,有的研究也得到同样的结论^[14-16],覆膜玉米的株高随种植密度的增加无明显变化规律,原因有待进一步研究。

2.2 覆膜和种植密度对玉米叶面积指数的影响

覆膜种植增加了玉米群体叶面积指数(图3)。例如第89天覆膜较露地种植平均叶面积指数增加45%,且差异达到显著水平。覆膜种植在播种后第89天叶面积指数达到最大值,较露地种植的最大叶面积指数出现时间(播种后第100天)提前了10d左右,这与 XIE 等^[9]在春小麦上的研究结果一致。无论是覆膜种植还是露地种植,玉米的叶面积指数都是随着种植密度的增加而提高。

2.3 覆膜和种植密度对玉米蒸散量的影响

覆膜种植减小了玉米全生育期蒸散量(图4)。与露地种植相比,覆膜种植平均蒸散量减少了

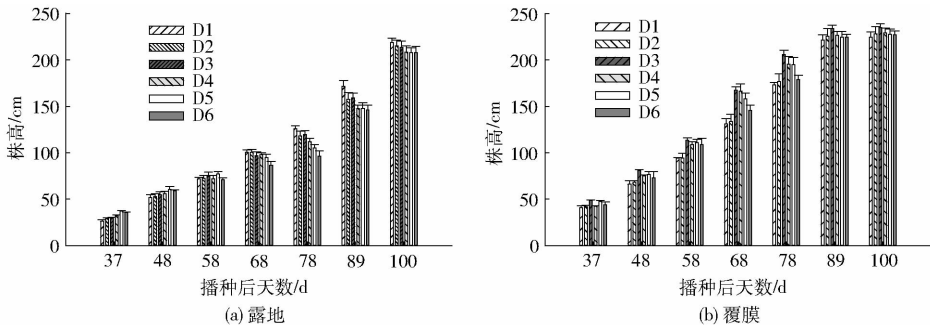


图2 不同种植密度春玉米株高的变化
Fig.2 Plant height of spring maize for different plant densities

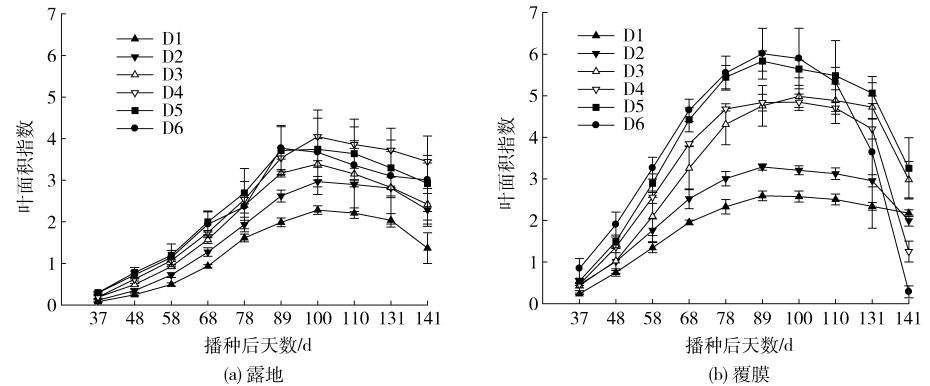


图3 不同种植密度下的春玉米叶面积指数
Fig.3 LAI of spring maize for different plant densities

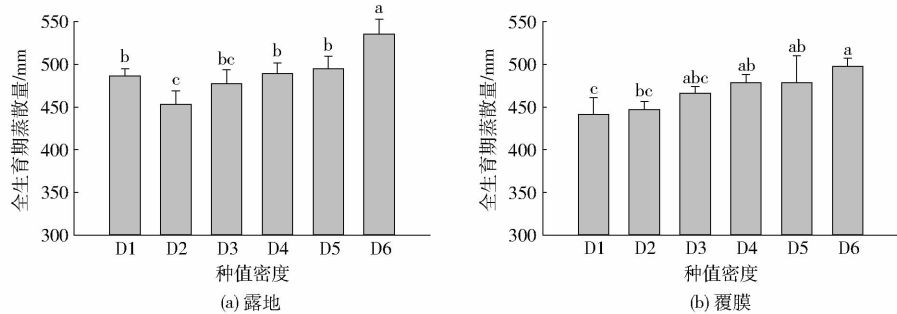


图 4 不同种植密度下的全生育期春玉米蒸散量
Fig. 4 Evapotranspiration of spring maize for different plant densities

21.4 mm。覆膜较露地种植不同密度间的蒸散量极差减小 31.92%，说明覆膜种植减少了玉米对土壤水分的消耗，缓和了增加种植密度对土壤水分消耗量的增加，这与多数研究一致^[17-19]，但也与个别结论相反^[20-22]，这可能与播种时土壤墒情及降水年型有关。露地与覆膜种植全生育期蒸散量随种植密度增加都呈增加趋势。

覆膜对春玉米蒸散量的减少主要表现在拔节期之前(图 5)。露地种植播种-拔节期、拔节-抽雄期、抽雄-成熟期的平均蒸散量为 135.99、178.00、175.44 mm，而覆膜种植的平均蒸散量依次为

127.69、181.81、158.54 mm，且生育期前期差异达到显著水平。在播种-拔节期覆膜种植不同密度间蒸散量的极差为 15.73 mm，较露地种植减小 45.70%，这是因为封垄前春玉米蒸散以地表蒸发为主，而覆膜有效抑制了地表蒸发；生育期中期，春玉米蒸散以作物蒸腾为主，地膜覆盖改善了土壤水温条件，同时，降水主要集中在在这个阶段，植株生长旺盛，叶面积扩展迅速，作物蒸腾剧烈，从而导致蒸散量增加^[21]。刘战东等^[19]发现增加种植密度后蒸散量的增加主要是由出苗-拔节期蒸散量的增加所致，这与本研究结果一致。

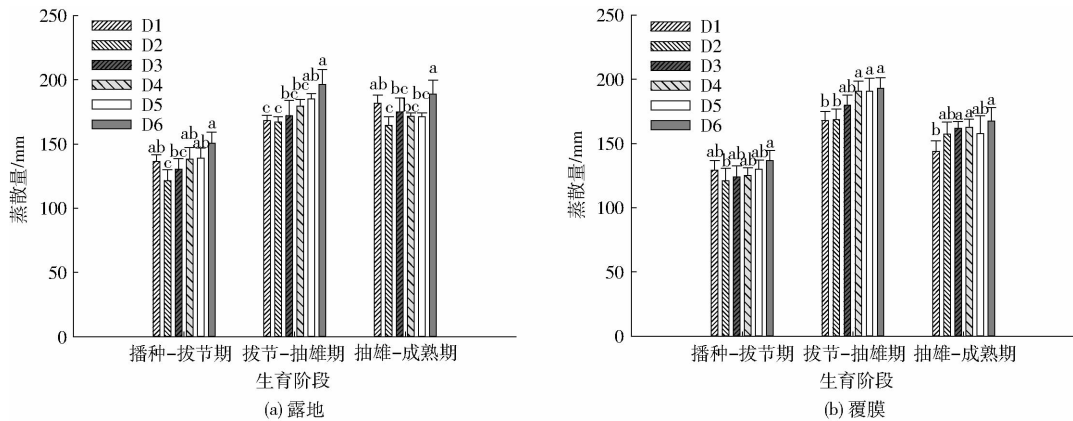


图 5 不同种植密度下的生育阶段春玉米蒸散量
Fig. 5 Evapotranspiration of spring maize for different plant densities at each growth stage

2.4 覆膜和种植密度对玉米产量及其构成的影响

覆膜大大提高了玉米产量，种植密度从 D1 增至 D6，覆膜较相同密度露地种植产量分别增加 40.62%、39.07%、47.27%、67.29%、58.95% 和 63.53%，且差异均达到显著水平(表 1)。这主要归因于穗粒数和百粒质量的增加。无论是露地还是覆膜种植，玉米产量随种植密度增加都呈现出先增加后减小的趋势，但 2 种植方式获得最高产量的种植密度不同：露地种植在 D2(52 500 株/hm²)时获得最高产量，为 8 466.02 kg/hm²；而覆膜种植在 D4(82 500 株/hm²)获得最高产量，为 12 778.47 kg/hm²，即覆膜种植的玉米最高产量对应的密度较露地种

植高。

2.5 覆膜和种植密度对玉米水分利用效率的影响

在覆膜种植中，由于玉米产量的提高和蒸散量的降低，水分利用效率得以提高(图 6)。种植密度从 D1 增至 D6，覆膜种植水分利用效率较相同种植密度露地种植分别提高 55.05%、45.79%、50.85%、71.05%、64.43% 和 76.13%，且差异均达到显著水平。在种植密度处理间，露地与覆膜种植水分利用效率随种植密度变化与产量一致，都是先增加后降低，露地种植在 D2 时获得最高水分利用效率，为 18.08 kg/(hm²·mm)，覆膜种植在 D3 时获得最高水分利用效率，为 26.75 kg/(hm²·mm)。

表 1 露地和覆膜不同密度下春玉米产量及其构成因素

Tab.1 Yield characters in un-mulching and plastic mulching fields for different plant densities

种植方式	种植密度	每公顷穗数	穗粒数	百粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
露地	D1	43 381.35 ± 2 853.15 ^f	630.13 ± 32.80 ^a	34.66 ± 3.73 ^a	7 836.55 ± 127.38 ^{ab}
	D2	56 252.85 ± 2 500.05 ^e	550.67 ± 15.11 ^a	27.33 ± 1.13 ^b	8 466.02 ± 198.65 ^a
	D3	69 795.15 ± 1 962.00 ^d	430.11 ± 17.58 ^b	28.20 ± 2.13 ^{bc}	8 465.48 ± 164.35 ^a
	D4	82 357.05 ± 3 026.10 ^c	386.46 ± 8.70 ^c	24.00 ± 1.55 ^{bc}	7 638.59 ± 187.56 ^b
	D5	94 766.70 ± 2 363.70 ^b	346.78 ± 16.54 ^d	23.43 ± 1.30 ^{bc}	7 699.75 ± 245.24 ^b
	D6	112 505.70 ± 3 656.85 ^a	251.65 ± 8.99 ^e	21.58 ± 1.98 ^c	6 109.70 ± 256.10 ^c
覆膜	D1	42 101.07 ± 1 941.00 ^e	648.69 ± 10.36 ^a	40.35 ± 1.74 ^a	11 020.02 ± 352.44 ^c
	D2	55 558.35 ± 2 194.05 ^d	677.49 ± 12.34 ^a	31.28 ± 2.33 ^{ab}	11 773.94 ± 147.03 ^{bc}
	D3	67 162.50 ± 3 563.70 ^c	658.25 ± 9.56 ^{ab}	28.20 ± 0.95 ^{bc}	12 467.09 ± 275.30 ^{ab}
	D4	78 958.95 ± 2 632.95 ^b	473.46 ± 9.09 ^{bc}	30.17 ± 1.76 ^{bc}	12 778.47 ± 178.74 ^a
	D5	83 319.60 ± 4 684.35 ^b	599.80 ± 28.76 ^c	24.49 ± 2.62 ^{bc}	12 238.95 ± 279.02 ^{ab}
	D6	103 196.10 ± 4 500.60 ^a	361.53 ± 8.98 ^d	26.78 ± 1.00 ^c	9 991.25 ± 296.18 ^d

注:同列数值后不同字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

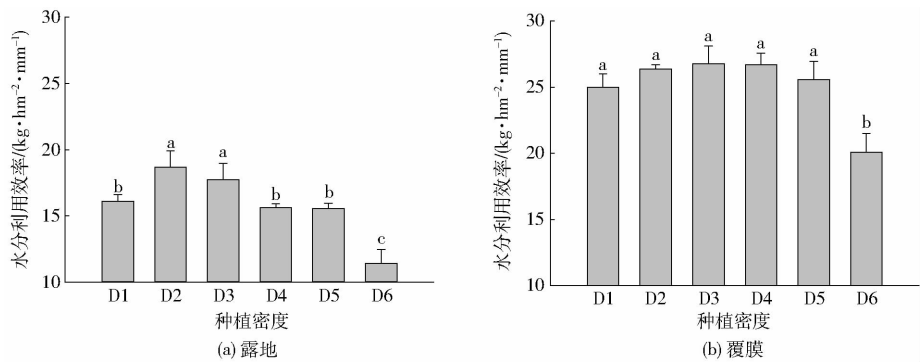


图 6 不同密度下的春玉米水分利用效率
Fig.6 Water use efficiency of spring maize for different plant densities

3 结论

(1)覆膜加速了玉米的生长和发育,表现在株高和叶面积指数的增加,生育期的提前,如抽穗期(即最大高度出现时)比露地种植提前了 11 d。在玉米生长的中后期,露地种植玉米株高具有随着种植密度增加而降低的趋势,而覆膜种植玉米则无显著差异。无论是覆膜还是露地种植,玉米叶面积指数都是随着种植密度的增加而提高。

(2)玉米的蒸散量随着种植密度的增加而增

加,但覆膜种植降低了玉米对水分的消耗,在不同程度上缓解了因种植密度增加而导致蒸散量增加与降水不足之间的矛盾。

(3)覆膜显著提高了玉米产量和水分利用效率,较露地种植分别提高 52.79% 和 60.55%。露地与覆膜种植玉米产量和水分利用效率随种植密度的增加都呈现先增加后减小的趋势,因此,在试验降雨年型下(年降水量 458 mm),黄土高原东部露地和覆膜种植玉米的适宜密度分别为 52 500 株/hm² 和 82 500 株/hm²。

参 考 文 献

1 赵久然,王荣焕. 中国玉米生产发展历程、存在问题及对策[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(3):1-6.
ZHAO Jiuran, WANG Ronghuan. Development process, problem and countermeasure of maize production in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(3): 1-6. (in Chinese)

2 TOKATLIDIS I S, KOUTROUBAS S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability [J]. Field Crops Research, 2004, 88(2):103-114.

3 LI J, XIE R Z, WANG K R, et al. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(3):829.

4 肖国举,王静. 黄土高原集水农业研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(5):1003-1011.
XIAO Guoju, WANG Jing. Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the loess plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5):1003-1011. (in Chinese)

5 ANTONIETTA M, FANELLO D D, ACCIARESI H A, et al. Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina [J]. Field Crops Research, 2014, 155:111-119.

6 陈传永,侯玉虹,孙锐,等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. 作物学报, 2010, 36(7):1153-1160.

- CHEN Chuanyong, HOU Yuhong, SUN Rui, et al. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1153–1160. (in Chinese)
- 7 乌瑞翔, 刘荣权, 卢翠玲, 等. 地膜玉米的最佳播期及其“两个学说”的应用[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 433–438. WU Ruixiang, LIU Rongquan, LU Cuiling, et al. The optimum sowing time for plastic-film corn and the use of the two theories [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(4): 433–438. (in Chinese)
- 8 张德奇, 廖允成, 贾志宽, 等. 宁南旱区谷子地膜覆盖的土壤水温效应[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2069–2075. ZHANG Deqi, LIAO Yuncheng, JIA Zhikuan, et al. Effects of plastic film mulching of millet on soil moisture and temperature in semi-arid areas in South Ningxia [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2069–2075. (in Chinese)
- 9 XIE Z, WANG Y, LI F. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 71–83.
- 10 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/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 97–103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150215&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.015. LI Xianyue, PENG Zunyuan, SHI Haibin, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 97–103. (in Chinese)
- 11 LIU Q, CHEN Y, LIU Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157: 1–10.
- 12 谷晓博, 李援农, 银敏华, 等. 降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 184–193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151225&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.025. GU Xiaobo, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of biodegradable film mulching on root distribution, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 184–193. (in Chinese)
- 13 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 93–104, 135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151014&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.014. LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 93–104, 135. (in Chinese)
- 14 刘战东, 肖俊夫, 于景春, 等. 春玉米品种和种植密度对植株性状和耗水特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 125–131. LIU Zhandong, XIAO Junfu, YU Jingchun, et al. Effects of varieties and planting density on plant traits and water consumption characteristics of spring maize [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(11): 125–131. (in Chinese)
- 15 窦超银, 于秀琴, 于景春. 控制灌溉条件下种植密度对玉米中地 77 生长和耗水的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 141–145. DOU Chaoyin, YU Xiuqin, YU Jingchun. Effects of planting density on plant growth and water consumption of Zhongdi77 maize under controlled irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 141–145. (in Chinese)
- 16 张冬梅, 张伟, 陈琼, 等. 种植密度对旱地玉米植株性状及耗水特性的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(4): 102–108. ZHANG Dongmei, ZHANG Wei, CHEN Qiong, et al. Effects of planting density on plant traits and water consumption characteristics of dryland maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(4): 102–108. (in Chinese)
- 17 ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. 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 [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41–47.
- 18 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 88–94. WANG Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 88–94. (in Chinese)
- 19 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 不同覆盖方式对旱地春玉米土壤水分及作物生产力的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 128–133. XIE Wenyan, ZHOU Huaiping, YANG Zhenxing, et al. Effect of different mulching patterns on soil moisture and crop productivity of spring maize [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 128–133. (in Chinese)
- 20 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1558–1568. XIE Junhong, CHAI Qiang, LI Lingling, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of loess plateau of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1558–1568. (in Chinese)
- 21 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 Shangzhong, WANG Yong, FAN Tinglu, 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. (in Chinese)
- 22 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)