



# 西北干旱灌区不同地膜覆盖利用方式对玉米水分利用的影响

殷文, 郭瑶, 范虹, 樊志龙, 胡发龙, 于爱忠, 赵财, 柴强

甘肃农业大学农学院/省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 兰州 730070

**摘要:** 【目的】资源型缺水严重制约干旱灌区的农业生产, 传统玉米生产模式地膜投入量大。在极端高温和生态环境污染的挑战日益加剧的情境下, 探讨通过免耕地膜重复利用维持较高水分利用的可行性, 以期构建试区地膜减量玉米高效生产技术提供理论支撑。【方法】2017—2018年, 在甘肃河西绿洲灌区, 设置免耕地膜重复利用(免耕覆膜, NM)、秋免耕春覆膜(少耕覆膜, RM)与传统耕作每年覆盖新膜(传统覆膜, 对照, CM)3种地膜覆盖利用方式, 研究其对玉米田土壤水分利用的影响, 以期优化试区玉米高产高效栽培管理技术提供理论依据。【结果】NM与RM处理较CM处理提高玉米播种时0—120 cm土层平均土壤重量含水量, 分别为7.8%与5.1%, 这为玉米播种创造良好的土壤水分环境。玉米播种—拔节期及吐丝—灌浆初期, NM处理较CM处理提高0—120 cm土层平均土壤重量含水量, 分别为5.0%与4.7%, 弥补了灌浆期玉米植株旺盛生长对土壤水分的大量需求。与CM处理相比, NM处理增加了玉米播种—大喇叭口期的耗水量, 降低了玉米吐丝—灌浆初期的耗水量, 增大了玉米灌浆初期—收获期的耗水量, 有效协调玉米各生育阶段的水分需求关系。虽然NM处理较RM与CM处理提高了玉米吐丝期之前的棵间蒸发量, 分别为11.7%与26.0%, 提高棵间蒸发量占耗水量的比例(E/ET), 分别为13.4%与19.9%, 但是NM处理较RM与CM处理降低了玉米吐丝期之后的棵间蒸发量, 分别为9.2%与19.4%, 降低E/ET, 分别为9.7%与20.7%, 说明NM处理有利于增强玉米吐丝期之后土壤水分的有效利用。因而, 在地膜减投与免耕措施下, NM处理获得与RM及CM处理相当的籽粒产量与水分利用效率。【结论】在西北干旱灌区, 应用免耕地膜重复利用并没有导致玉米产量和水分利用效率的降低, 具有稳定产量及水分利用效率的作用, 是玉米生产中地膜减投的可行措施。

**关键词:** 玉米; 免耕; 地膜覆盖; 耗水特性; 产量

## Effects of Different Plastic Film Mulching and Using Patterns on Soil Water Use of Maize in Arid Irrigated Area of Northwestern China

YIN Wen, GUO Yao, FAN Hong, FAN ZhiLong, HU FaLong, YU AiZhong, ZHAO Cai, CHAI Qiang

College of Agronomy, Gansu Agricultural University/State Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070

**Abstract:** 【Objective】Water resource scarcity is one of the most prominent constraints for agricultural production in arid irrigation areas, so maize production are mainly mulched with traditional plastic film. However, this process is increasingly challenged by extreme high-temperature and ecological environment pollution. This study investigated the feasibility of maintaining high water use via no tillage with plastic film reusing pattern, and the aim was to prove the theoretical support for the construction of efficient maize

收稿日期: 2021-01-18; 接受日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(32101857)、甘肃省科技计划项目(20JR5RA025, 20JR5RA037)、甘肃省高等学校科研项目(2021B-134, 2019B-083)、中央引导地方科技发展专项(ZCYD-2020-1-4)、甘肃农业大学伏羲青年人才项目(Gaufx-03Y10)

联系方式: 殷文, E-mail: yinwen@gsau.edu.cn。通信作者柴强, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

production technology with plastic film reduction. 【Method】 In 2017 and 2018, a field experiment was carried out in Hexi oasis irrigation region from Gansu province to determine the effects of different plastic film mulching and using patterns on soil water utilization of maize field. The treatments included no tillage with plastic film reusing pattern (no tillage with plastic film mulching, NM), no tillage in fall and new plastic film mulching in spring (reduced tillage with plastic film mulching, RM), and conventional tillage with annual new plastic film mulching (conventional tillage with plastic film mulching, the control, CM). 【Result】 Compared with CM, the mean soil weight moisture content across the 0-120 cm soil depth was increased by 7.5% and 5.1% with NM and RM before the maize sowing, respectively, which created a good soil moisture environment for sowing of maize. NM had greater mean soil weight moisture content across the 0-120 cm soil depth by 5.0% and 4.7% than that under CM from sowing to jointing and silking to early-filling stages, respectively, which made up for the abundant demand of soil moisture for the vigorous growth of maize filling stage. Evapotranspiration under NM was increased until maize big-flare stage, decreased from maize silking to early-filling stage, and increased after maize early-filling stage, which was effectively coordinated with water demand contradiction of maize at each growth stages. Compared with RM and CM, NM increased soil evaporation before silking stage by 11.7% and 26.0%, and increased the ratio of soil evaporation to evapotranspiration (E/ET) by 13.4% and 19.9%, respectively. However, NM reduced soil evaporation after silking stage by 9.2% and 19.4%, and reduced E/ET by 9.7% and 20.7%, respectively. The results indicated that NM was beneficial to enhance the effective utilization of soil water after maize silking stage. Therefore, NM with no tillage and plastic film reduction obtained the same grain yield and water use efficiency for RM and CM. 【Conclusion】 The results showed that no tillage with plastic film reusing pattern did not lead to a decrease in the grain yield and water use efficiency of maize, compared with conventional tillage with annual new plastic film mulching, but it stabilized grain yield and water use efficiency, thus, this practice was a feasible measure to reduce plastic film input and stabilize productivity of maize production in the arid irrigated area of northwestern China.

**Key words:** maize; no tillage; plastic film mulching; evapotranspiration characteristics; yield

## 0 引言

【研究意义】资源型缺水作为世界重大生态问题,是制约农业生产的主要因素,如何在现有的水分供给条件下发展以水资源高效利用为前提的节水型农业尤为重要<sup>[1-2]</sup>。农业生产维持作物持续高产稳产需要消耗大量水资源,对土壤水分安全带来严重威胁,造成土壤水分承载潜力严重降低<sup>[3]</sup>,因而,研发高效水资源管理农艺措施显得格外重要。【前人研究进展】覆盖作为降低水分无效蒸发,优化农田土壤水分环境而增强作物水分利用的有效措施<sup>[4-5]</sup>,在干旱半干旱区域广泛应用。秸秆与地膜覆盖作为轻简化的农业节水及水分高效利用生产技术,广泛应用于农业生产<sup>[2-3]</sup>。秸秆覆盖具有抑制土壤蒸发、保墒蓄水、调节地温、提高肥力等优势被广泛应用于喜凉作物生产<sup>[6-7]</sup>,而对于喜温作物,因较低的土壤温度,延缓出苗及生长发育的缺点,甚至呈现减产及降低水分利用的效应<sup>[8]</sup>。无色普通地膜因蓄水保墒、增温及高产、水分高效利用而被大量应用于干旱与半干旱区域喜温作物生产<sup>[9-10]</sup>。然而,地膜覆盖栽培措施弊端屡屡出现,诸如在高温季节,容易造成作物根区土壤的极端高温,导致作物根系及叶片发生早衰,从而影响产量及水分利用<sup>[11]</sup>,同时造成“白色污染”,农田生态环境恶化<sup>[12]</sup>。西北

干旱内陆灌区资源性缺水严重,春、秋热量不足但夏季炎热,喜温玉米作为主栽作物,其高产及水分高效利用主要归因于地膜覆盖措施的增温保水效应<sup>[13]</sup>。在区域全面推行非膜不植的生产背景下,寻求弱化地膜覆盖高温弊端而提高水分利用的技术亟待进行,因而,地膜减量化生产技术备受关注。【本研究切入点】纵观西北干旱内陆灌区气候特征和地膜覆盖优缺点,将地膜覆盖及免耕技术集成在同一玉米栽培模式中,有望通过实现周年覆盖,蓄纳休闲期降水,优化农田土壤水分环境,增强作物需水与土壤供水的吻合度,研发适宜于西北干旱灌区玉米水分高效生产的农艺管理技术。

【拟解决的关键问题】本研究在典型西北干旱内陆灌区,系统分析不同地膜覆盖利用方式下玉米农田耗水特性、产量表现及水分利用效率,以期为区域内地膜减投玉米高产高效技术的适应性评价提供理论参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试区概况

本试验于 2017—2018 年在甘肃农业大学武威黄羊镇绿洲农业科研教学基地进行。该区属寒温带干旱气候区,年平均气温 7.3℃,≥10℃积温约 3 000℃;年日照时数近 3 000 h,光热资源丰富,是我国典型的玉米主产区。试验地土壤为砂壤土,0—60 cm 土层土

壤理化性质如表 1。试区多年平均降水量 156 mm、土壤水分潜在蒸发量高于 2 000 mm，2017 与 2018 年，全年降水量分别 218.1 和 251.6 mm，玉米生育期内降水量分别为 142.8 与 213.8 mm。作物生产依赖于补充灌溉，玉米以覆膜种植为主，地膜投入大、成本高，且潜在污染日益严重。

表 1 研究区域 0—60 cm 土层土壤理化特性

Table 1 Soil physical and chemical properties across 0-60 cm soil depth at arid irrigated of northwestern China

土层深度 Soil depth (cm)	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	萎蔫点 Wilting point (%)	田间持水量 Field capacity (%)	土壤养分含量 Soil nutrition content (g·kg <sup>-1</sup> )		
				土壤有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorous
0-20	1.46	6.7	20.2	14.8	0.78	1.17
20-40	1.53	9.6	23.4	14.4	0.76	1.14
40-60	1.54	10.2	26.2	13.5	0.70	1.10

1.2 试验设计

本研究以 2013 年布设的长期定位试验为基础，涉及 2017 与 2018 年玉米农田耗水相关数据。本试验设 3 种地膜覆盖利用方式：免耕覆膜（NM），即免耕地膜重复利用，地膜覆盖 1 次使用 2 年，当季玉米收获后免耕，地膜完整度在 70%以上，翌年春季玉米播种季节采用简易滚轮穴播器硬茬播种玉米；少耕覆膜（RM），即秋免耕春覆膜，当季玉米成熟收获后不翻

耕，翌年春季回收残膜后，旋耕、镇压、覆盖新地膜，并采用简易滚轮穴播器播种玉米；传统覆膜（CM），即传统耕作每年覆盖新地膜，当季玉米收获后立即回收旧膜，再利用铧式犁深翻耕，翌年春季旋耕、镇压、覆盖新地膜后，采用简易滚轮穴播器播种玉米。其中，免耕与少耕覆膜处理年际间交替轮换，具体安排顺序如表 2。试验共 3 个处理，每个处理 3 次重复，共 9 个小区，小区面积 48 m<sup>2</sup>，田间采用随机区组排列。

表 2 不同地膜覆盖利用方式的具体安排顺序

Table 2 The specific arrangement sequence under different plastic film mulching and using patterns

试验类别 Experimental category	年份 Year	处理设计 Treatment design		
预备试验 Preliminary experiment	2013	传统覆膜 CM	传统覆膜 CM	传统覆膜 CM
	2014	免耕覆膜 NM	少耕覆膜 RM	传统覆膜 CM
	2015	少耕覆膜 RM	免耕覆膜 NM	传统覆膜 CM
	2016	免耕覆膜 NM	少耕覆膜 RM	传统覆膜 CM
	2017	少耕覆膜 RM	免耕覆膜 NM	传统覆膜 CM
	2018	免耕覆膜 NM	少耕覆膜 RM	传统覆膜 CM

供试玉米（*Zea mays* L.）品种“先玉 335”，种植密度为 82 500 株/hm<sup>2</sup>，覆膜栽培，膜宽 140 cm，膜厚 0.01 mm。因试区农田土壤钾处于富集状态，因而本试验只施用氮肥与磷肥，施纯氮 360 kg·hm<sup>2</sup>（按基肥：大喇叭口期：开花后 15 d=3：5：2 分施），施纯磷（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）180 kg·hm<sup>2</sup>，均为基肥，传统与少耕覆膜基肥在播种前均匀施于地面，用旋耕机旋入 15 cm 耕作层，而免耕覆膜玉米基肥用直插式施肥器施入。追肥时，在对应生育时期灌水前用直插式施肥器在距离玉米茎秆 10 cm 处打孔，将肥料施入 10 cm 孔中，然后埋土，利于提高氮肥利用。全生育期灌水 5 次，于

拔节期、抽雄期各灌 900 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>，大喇叭口期、吐丝开花期和灌浆期各灌水 750 m<sup>3</sup>·hm<sup>2</sup>。其他管理措施同当地玉米高产田一致。播种日期分别为 2017 年 4 月 25 日和 2018 年 4 月 20 日，收获日期分别为 2017 年 9 月 22 日和 2018 年 9 月 23 日。

1.3 测定与计算指标及方法

1.3.1 土壤重量含水量与贮水量

（1）土壤重量含水量。用烘干法测 0—30 cm 土层土壤重量含水量，30—60、60—90、90—120 cm 土层采用水分中子仪（NMM503DR，CA，USA）测定。在玉米播种前、收获后各测定一次，生育期内每隔约

15 d 测定一次。中子水分仪测定值与土壤重量含水量的拟合曲线如下:

$$\theta = \left( 0.4023 \times \frac{R}{R_0} + 0.0031 \right) \times 100\%, R^2 = 0.9828;$$

式中,  $\theta$  为土壤重量含水量(%),  $R$  为中子水分仪的实际测定值,  $R_0$  为中子水分仪基础数值。

(2) 土壤贮水量。运用土壤重量含水量计算土壤贮水量(SWS), 计算公式如下:

$$SWS = \theta \times h \times r \times 10$$

式中,  $\theta$  为土壤重量含水量(%),  $h$  为土层深度(cm),  $r$  为土壤容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 10 为单位换算系数。

### 1.3.2 耗水特性

(1) 棵间蒸发量。采用 PVC 管自制微型蒸渗仪(高 15 cm, 直径 11 cm) 测定<sup>[2]</sup>, 每次取土时将其垂直放入作物行间, 使其顶面与地面齐平, 取原状土, 然后用尼龙网布封底, 另用 PVC 管做成外套, 固定行间, 使其表面与附近土壤持平。自玉米播种后每 5—6 d 测定 1 次, 微型蒸发器中土样每减少 1 g 相当于蒸发水分 0.1051 mm, 降雨、灌水后立即换土。

(2) 耗水量(ET)。采用水分平衡公式计算<sup>[1]</sup>:  $ET_i = P_i + I_i - \Delta S_i$ 。式中,  $ET_i$  为  $i$  时段作物耗水量(mm);  $P_i$  为  $i$  时段的降水量(mm);  $I_i$  为  $i$  时段灌水量(mm);  $\Delta S_i$  为  $i$  时段末与时段初的土壤贮水量之差(mm)。由于本试验区水资源匮乏, 土层深度 1.2 m, 试验区地下水在 30 m 以下, 节水灌溉量较少, 因而忽略了渗漏量和地下上升水的影响。

(3) 耗水结构( $E/ET$ )。耗水结构为棵间蒸发量( $E$ )与耗水量( $ET$ )之比。

1.3.3 籽粒产量(GY)与水分利用效率(WUE) 玉米成熟后, 以小区为单元收获, 用种子水分仪(PM-8188)测定籽粒含水量, 计算产量时保留籽粒含水量为 14%。水分利用效率  $WUE = GY/ET$ 。

### 1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 2016 整理、分析数据并绘制图表, 利用 SPSS 19.0 软件在 0.05 水平下进行显著性检验(Duncan's)。

## 2 结果

### 2.1 不同地膜覆盖利用方式下玉米农田土壤重量含水量差异

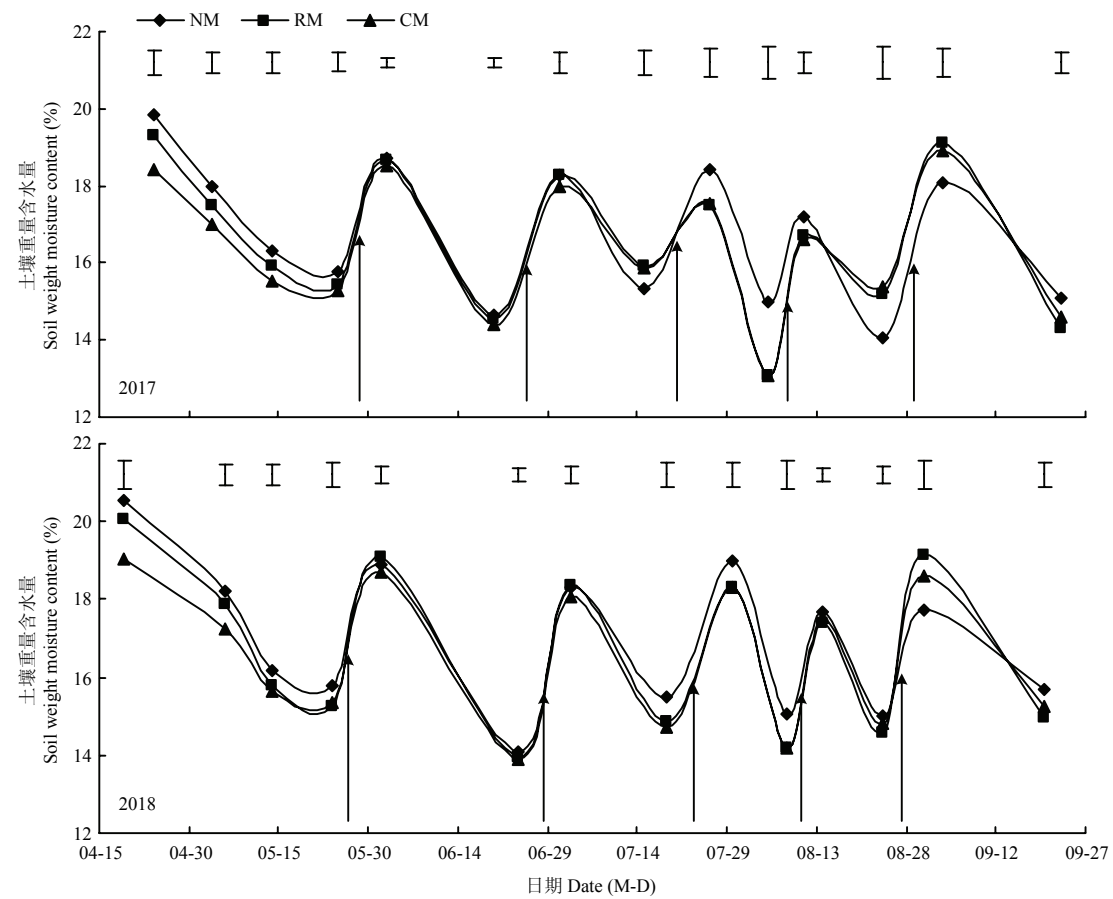
#### 2.1.1 全生育期土壤重量含水量动态 不同地膜覆盖利用方式下玉米农田 0—120 cm 土层土壤重量含

水量在 2 个试验年度处理间差异均显著, 且土壤重量含水量随灌溉及作物生育进程而有差异(图 1)。免耕覆膜(NM)与少耕覆膜(RM)具有提高玉米播种时 0—120 cm 土层平均土壤重量含水量的作用, 较传统覆膜(CM)分别提高 7.8%与 5.1%, 相对应的土壤贮水量分别提高 7.4%与 4.5%, 提高数量分别为 26.2 与 16.1 mm。玉米播种—拔节期及吐丝—灌浆初期, 仍有 NM 处理较 CM 处理提高 0—120 cm 土层平均土壤重量含水量, 分别为 5.0%与 4.7%, 相对应的土壤贮水量分别提高 4.8%与 4.2%, 提高数量分别为 16.8 与 14.7 mm。然而, 地膜覆盖利用方式对玉米拔节—吐丝期及灌浆初期之后土壤含水量无显著影响。以上结果表明, 免耕覆膜措施保持玉米播种及吐丝—灌浆初期较高土壤重量含水量, 为玉米播种创造良好的土壤水分环境, 且弥补了灌浆期玉米植株旺盛生长对土壤水分的大量需求。

2.1.2 玉米播种前、收获后及生育期内土壤含水量垂直变化 不同地膜覆盖利用方式对玉米播种前 0—120 cm 各土层土壤重量含水量影响显著(图 2), 耕层 0—30 cm 土层, NM 与 RM 处理较 CM 处理提高土壤重量含水量, 分别为 8.5%与 6.3%; 30—60 cm 土层, NM 处理较 CM 处理提高 8.9%; 60—90 cm 土层, NM 与 RM 处理较 CM 处理分别提高 7.8%与 4.9%; 90—120 cm 土层土壤重量含水量年际间有差异, 2018 年玉米播种前土壤重量含水量明显高于 2017 年, 使得地膜覆盖利用方式对 2017 年深层土壤重量含水量造成显著影响, NM 处理较 CM 处理提高 5.4%。免耕地膜重复利用保持玉米播种时各土层较高的土壤重量含水量, 为玉米播种及出苗创造良好的土壤水分环境。玉米生育期内, 地膜覆盖利用方式对各土层土壤重量含水量的影响不显著, 且补充灌溉与降雨弱化了相同地膜覆盖利用方式下不同土层间土壤重量含水量差异, 与播种前相比, 各土层土壤重量含水量明显降低。玉米收获后, NM 处理较 RM 与 CM 处理提高耕层 0—30 cm 土层土壤重量含水量, 分别为 6.6%与 6.4%, NM 处理较 RM 处理提高 30—60 cm 土层土壤重量含水量 5.5%; 地膜覆盖利用方式对玉米农田 60—120 cm 土层土壤重量含水量无显著影响。

### 2.2 不同地膜覆盖利用方式下玉米农田的耗水特性

2.2.1 全生育期棵间蒸发量动态 地膜覆盖利用方式对玉米全生育期总棵间蒸发量的影响不显著, 但对其各生育阶段棵间蒸发量的影响显著(图 3)。玉米播种—大喇叭口期, 因 NM 处理具有较高的土壤水分



图上方的误差线表示 LSD 值，箭头表示不同的灌溉时间。下同  
Error bars above the curves indicate the value of LSD and arrows show different irrigation dates in the figure. The same as below

图 1 不同地膜覆盖利用方式下玉米农田 0—120 cm 土层平均土壤重量含水量动态

Fig. 1 Dynamics of soil weight moisture content at 0-120 cm soil depth of maize field under different plastic film mulching and using patterns

含量，其地膜的完整度低于 RM 与 CM 处理，因而 NM 处理较 RM 与 CM 处理增加了棵间蒸发量，增加比例分别为 12.2%与 28.4%。玉米大喇叭口期—吐丝期，仅有 2017 年，NM 与 RM 处理较 CM 处理增加棵间蒸发量，分别达到 12.3%与 7.7%。相反，随着生育期的推进，当玉米进入生殖生长期（吐丝—收获期），NM 处理因前期生长慢而后期的快速恢复生长，增大了地表覆盖度及有效耗水，明显抑制了土壤蒸发，使得 NM 处理较 RM 与 CM 处理棵间蒸发量分别降低 7.6%与 18.4%。纵观玉米全生育期棵间蒸发量动态发现，虽然玉米吐丝期之前，NM 处理较 RM 与 CM 处理农田棵间蒸发量较大，但吐丝期之后，NM 处理较 RM 与 CM 处理均降低了棵间蒸发量，说明 NM 处理增强了玉米生殖生长期土壤水分的有效利用，利于籽

粒灌浆，为玉米高产稳产奠定基础。

2.2.2 玉米各生育阶段耗水量 虽然地膜覆盖利用方式对玉米全生育期总耗水量无显著影响，但对玉米各生育阶段的耗水量影响显著（表 3）。就不同生育阶段而言，玉米播种—拔节期，NM 与 RM 处理较 CM 处理增加耗水量，分别达到 14.4%与 9.9%，但 NM 与 RM 处理间差异不显著。玉米拔节—大喇叭口期，NM 与 RM 处理较 CM 处理增加耗水量，分别为 7.0%与 9.4%。玉米大喇叭口期—吐丝期，2018 年度，NM 处理较 RM 与 CM 处理降低耗水量 7.7%与 6.8%。随着生育期的推进，玉米吐丝—灌浆初期，NM 处理耗水量逐渐变小，NM 较 CM 处理降低耗水量为 7.8%。相反，当玉米进入灌浆期之后，NM 处理因前期生长慢而后期的快速恢复生长，导致玉米灌浆初期—收获期

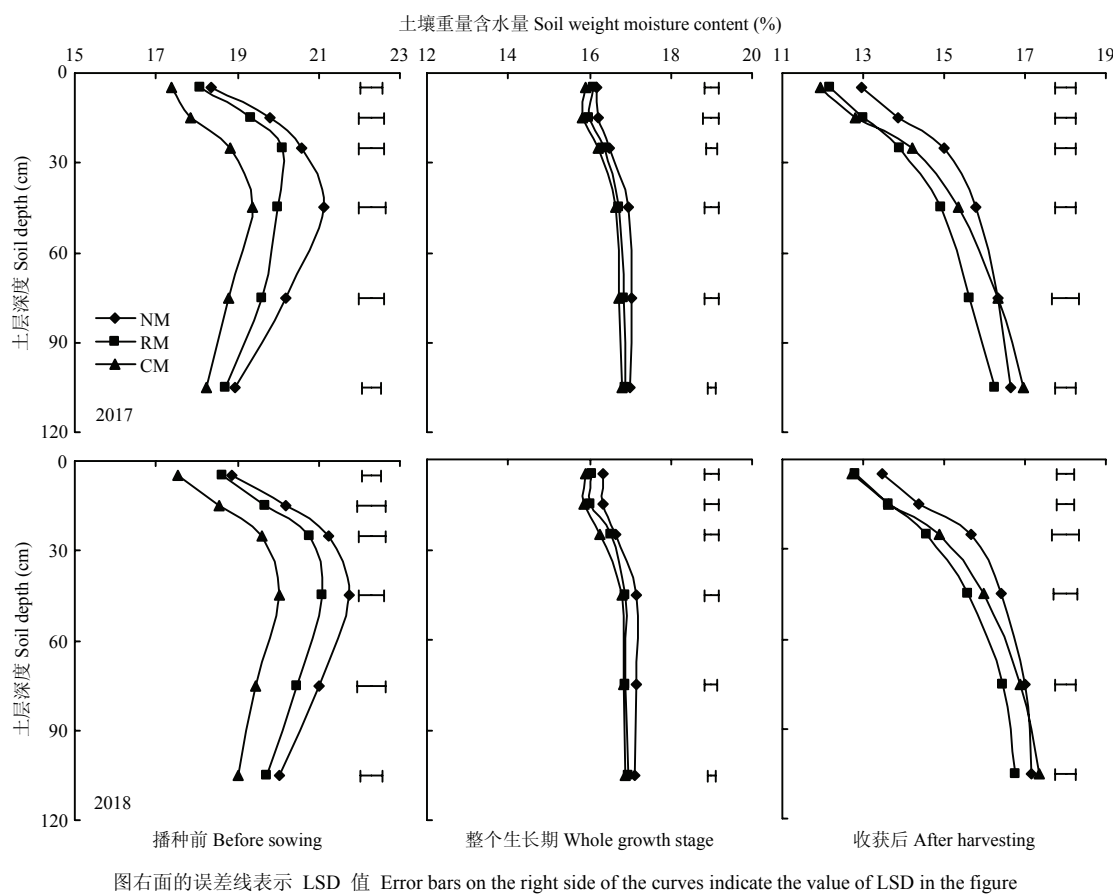


图 2 不同地膜覆盖利用方式下玉米播种前、收获后及全生育期内 0—120 cm 土层平均土壤重量含水量的垂直变化

Fig. 2 Vertical changes of mean soil weight moisture content at 0-120 cm soil depth of before sowing, after harvesting, and whole growth stage for maize field under different plastic film mulching and using patterns

表 3 不同地膜覆盖利用方式下玉米各生育阶段的耗水量及耗水结构													
Table 3 Evapotranspiration ( <i>ET</i> ) and the ratio of soil evaporation to evapotranspiration ( <i>E/ET</i> ) for maize at each of growth stage under different plastic film mulching and using patterns													
年份	处理	玉米生育阶段 Maize growth stage										全生育期	
Year	Treatment	播种—拔节		拔节—大喇叭口期		大喇叭口期—吐丝期		吐丝期—灌浆初期		灌浆初期—收获期		Whole growth period	
		Sowing-jointing		Jointing-big flare		Big flare-silking		Silking-early filling		Early filling-harvesting			
		<i>ET</i>	<i>E/ET</i>	<i>ET</i>	<i>E/ET</i>	<i>ET</i>	<i>E/ET</i>	<i>ET</i>	<i>E/ET</i>	<i>ET</i>	<i>E/ET</i>	<i>ET</i>	<i>E/ET</i>
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
2017	NM	108a	50.5a	128a	27.3a	88a	41.1a	89b	33.8b	219a	16.1c	633a	30.2a
	RM	105a	45.8b	132a	22.9b	92a	37.7b	94ab	35.4b	212ab	19.0b	635a	29.4a
	CM	98b	41.1c	120b	22.3b	91a	35.1c	99a	38.3a	203b	22.7a	612a	30.0a
2018	NM	97a	56.4a	118a	32.9a	93b	29.7a	134b	22.9a	277a	17.8c	720a	28.0a
	RM	92b	51.6b	120a	27.6b	101a	27.1b	138ab	21.2b	272ab	21.0b	723a	26.9a
	CM	82c	50.1b	110b	26.1c	100a	26.9b	142a	23.7a	264b	23.5a	698a	27.6a

数据后不同字母表示同一年度中所有处理在 0.05 水平下差异显著。2017 年，玉米播种期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆初期、收获期对应土壤水分测定日期为 4 月 24 日、5 月 29 日、6 月 20 日、7 月 26 日、8 月 10 日、9 月 23 日；2018 年各测定时期对应日期为 4 月 19 日、5 月 28 日、6 月 26 日、7 月 19 日、8 月 8 日、9 月 20 日

Different letters afterwards indicate significant difference within the same year among the treatments at 0.05 probability level. The determining dates on soil water content were 24 April, 29 May, 20 June, 26 July, 10 August, and 23 September in 2017, and 19 April, 28 May, 26 June, 19 July, 8 August, and 20 September in 2018. The corresponding growing stages of maize were sowing, jointing, big flare, silking, early-filling, harvesting, respectively



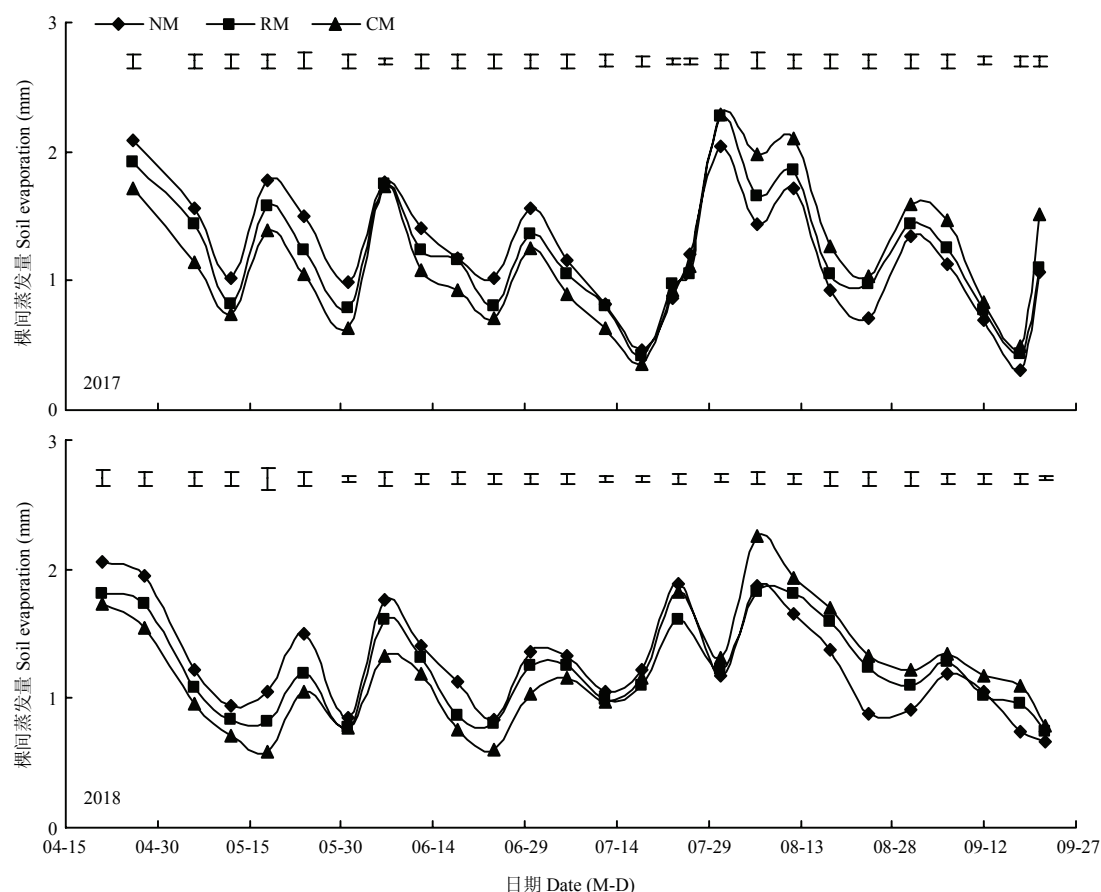


图3 不同地膜覆盖利用方式下玉米农田土壤蒸发量动态

Fig. 3 Dynamics of soil evaporation of maize field under different plastic film mulching and using patterns

耗水量较 CM 处理增加 6.5%。纵观玉米各生育阶段耗水量差异发现,与 CM 处理相比,NM 处理增加了玉米播种—大喇叭口期的耗水量,降低了玉米吐丝—灌浆初期的耗水量,增大了玉米灌浆初期—收获期的耗水量,有效协调玉米各生育阶段的水分需求关系,增强其水分高效利用的潜势。

**2.2.3 玉米各生育阶段裸间蒸发量占耗水量的比例**虽然地膜覆盖利用方式对玉米全生育期裸间蒸发量占总耗水量比值 ( $E/ET$ ) 无显著影响,但对玉米各生育阶段  $E/ET$  影响显著(表 3)。玉米播种—大喇叭口期,因 NM 处理地膜的完整度低于 RM 与 CM 处理而产生较大的裸间蒸发量,因而 NM 处理较 RM 与 CM 处理提高了  $E/ET$ ,提高比例分别为 14.5%与 21.0%。玉米大喇叭口期—吐丝期,NM 处理较 RM 与 CM 处理提高  $E/ET$ ,分别为 9.2%与 13.6%。相反,玉米吐丝之后,NM 处理因旺盛的生殖生长,增大有效蒸腾耗水而降低  $E/ET$ ,且灌浆盛期降低幅度更大。玉米吐丝—灌浆

初期,仅有 2017 年,NM 处理较 CM 处理降低  $E/ET$  (11.8%)。玉米灌浆初期—收获期,2 个试验年份,均有 NM 处理较 RM 与 CM 处理降低  $E/ET$ ,分别为 15.2%与 26.8%。以上结果表明免耕地膜重复利用主要是减少了玉米吐丝—收获期土壤的无效耗水,提高了土壤水分利用的有效性。

### 2.3 玉米籽粒产量与水分利用效率对地膜覆盖利用方式的响应

地膜覆盖利用方式对玉米籽粒产量的影响年际间有差异(图 4)。2017 年,免耕覆膜(NM)较少耕覆膜(RM)玉米籽粒产量降低 4.1%,但 NM 处理与对照传统覆膜(CM)差异不显著。2018 年,地膜覆盖利用方式对玉米籽粒产量没有造成显著影响。两个年度,地膜覆盖利用方式对玉米水分利用效率没有造成显著影响。说明免耕地膜重复利用在实现地膜减投的基础上仍可获得较高产量及水分利用效率,进一步证实该措施应用于西北干旱灌区玉米生产的可行性。

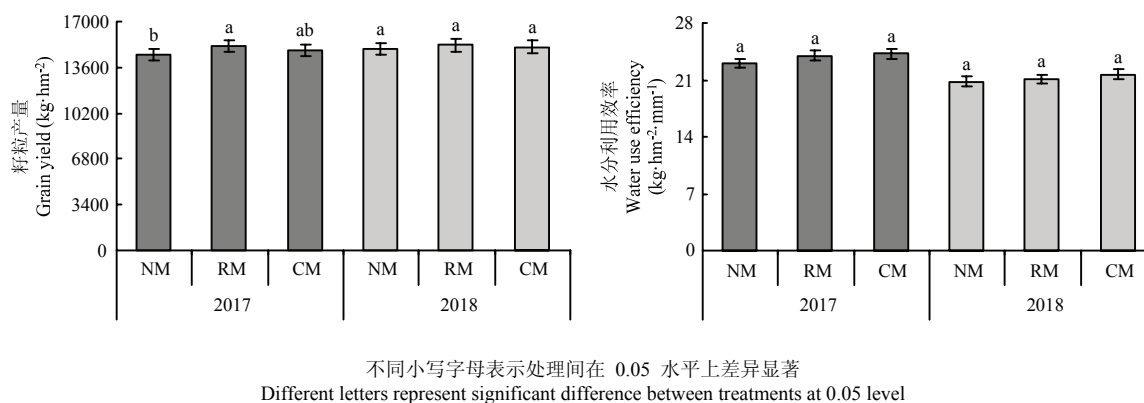


图4 不同地膜覆盖利用方式下玉米籽粒产量与水分利用效率

Fig. 4 Grain yield and water use efficiency of maize under different plastic film mulching and using patterns

### 3 讨论

#### 3.1 地膜覆盖利用方式对农田耗水特性的调控效应

近年来,随着资源型缺水日趋紧迫,干旱气候条件下,农业生产必须以水分高效利用为重心,而优化农艺措施,改善农田土壤水分环境,增强作物需水与农艺调控措施间的吻合度,研发适宜于特定区域的水分高效生产农艺管理技术是提高作物水分利用效率的重要途径之一<sup>[2, 14]</sup>。地膜覆盖作为简易节水措施广泛地应用于农业生产<sup>[3, 9]</sup>,可有效地抑制土壤蒸发、降低无效耗水、提高水分收获而增强水分利用的有效性<sup>[1, 7]</sup>。特别是年均降水不足 200 mm 且潜在蒸发高于 2 000 mm 的西北干旱内陆灌区,玉米栽培存在非膜不植的生产现状。该区玉米生产通常采用传统耕作每年覆盖新地膜,其弊端日趋明显,例如在高温季节,容易造成作物根区土壤的极端高温,导致作物根系及叶片发生早衰,从而影响产量及水分利用<sup>[11]</sup>。也有学者尝试玉米栽培采用黑色地膜覆盖,但很难满足其生长发育的热量需求<sup>[15]</sup>;若提早播种玉米,土壤温度达不到种子发芽的基本要求,延缓出苗或者种子发生冷害而降低出苗率<sup>[16]</sup>。因而,地膜覆盖循环利用模式作为一种减量化途径在西北干旱内陆灌区受到研究者及广大种植户关注。本研究表明,免耕地膜重复利用(NM)较传统每年覆盖新地膜(CM)显著提高了玉米播种前一拔节期的土壤重量含水量,这是因为前茬玉米收获后土地休闲期免耕地膜重复利用实现了周年覆盖,降低土壤水分无效蒸发,保墒蓄水,提高土壤水分含量<sup>[17]</sup>。NM 处理提高了玉米吐丝—灌浆初期的土壤重量含水量,因为该生长阶段 NM 较 CM 处理降低了土

壤温度,延缓了玉米生长发育而对土壤水分的利用较少<sup>[18]</sup>。说明该措施通过保持玉米灌浆初期较高的水分含量,弥补了玉米灌浆盛期对土壤水分的大量需求。地膜覆盖利用方式对玉米灌浆初期之后土壤重量含水量无显著影响,主要因为随着气温的回升,NM 处理土壤温度达到玉米正常生长发育的热量需求,其地上群体大小及光合速率与 CM 处理相似<sup>[19]</sup>,因而二者土壤重量含水量差异不显著。

本研究表明,地膜覆盖利用方式对玉米全生育期内总棵间蒸发量的影响不显著,但对各生育阶段棵间蒸发量的影响显著。玉米吐丝期之前,NM 处理较秋免耕春覆膜(RM)与 CM 处理农田棵间蒸发量较大,这是因为 NM 处理播种—拔节期的土壤水分含量高于 RM 与 CM 处理,但地膜完整度低于 RM 与 CM 处理,导致 NM 处理棵间蒸发量较大;相反,玉米吐丝期之后,NM 处理较 RM 与 CM 处理均降低了棵间蒸发量,源于 NM 处理较 RM 与 CM 处理降低了土壤温度<sup>[4, 18]</sup>,玉米生育前期生长缓慢,消耗水分与养分较少,随着气温回升,生育前期剩余的土壤水分与养分促使玉米生长发育旺盛,使得玉米灌浆后期甚至蜡熟期仍保持较高的光合性能而延缓衰老,因而保持较大的冠层与遮阴面积而增强抑制土壤蒸发的效应<sup>[19]</sup>。说明 NM 处理可均衡玉米生育前后期棵间蒸发量,进而产生与 RM 及 CM 处理相似的抑蒸效应。耕作与覆盖方式对协调作物生产水分利用动态具有显著效应<sup>[2, 7]</sup>,有研究指出免耕地膜覆盖可通过优化土壤水热特性<sup>[17-18]</sup>,调控作物生长发育动态而实现对水资源的错峰利用,增强作物需水与土壤供水的吻合度<sup>[17]</sup>,即有效降低作物生育前期无效蒸发,增加作物生育后期的有



效蒸腾,使无效耗水转化为有效耗水而增强水分有效利用,进一步证实本研究得出的基本观点,与CM处理相比,NM处理增加了玉米播种—大喇叭口期耗水量,降低了玉米吐丝期—灌浆初期耗水量,增大了玉米灌浆初期—收获期耗水量,有效协调玉米各生育阶段的水分需求关系,为玉米水分高效利用奠定基础。因此,在水资源严重短缺的西北干旱内陆灌区,应用免耕地膜重复利用技术可缓解玉米需水与土壤供水矛盾,为试区玉米高效生产提供理论与实践依据。

### 3.2 作物产量表现对地膜覆盖利用方式的响应

大量研究表明,作物生产中,覆盖具有不同程度的增产效应,而在干旱与半干旱地区,对于喜温作物玉米而言,地膜覆盖增产效应大于秸秆覆盖,源于地膜覆盖的增温、保水、促进生长发育<sup>[5,7]</sup>。但是,近10年来,干旱内陆灌区玉米成熟期从10月中旬提前至9月上旬甚至8月下旬,呈现减产趋势,其实这属于早衰并不是早熟,其主要原因:一是高温与低温的极端变化;二是农户传统生产模式每年覆盖新地膜,在玉米旺盛生长期(开花灌浆期)的0—15 cm土壤温度达到40℃以上<sup>[7]</sup>,明显高于玉米根系正常生长发育土壤温度35℃的适温阈值<sup>[20]</sup>,导致其生长发育受损;三是大量投入地膜对农田土壤水分与养分的过度消耗而造成土壤微环境恶化<sup>[21-22]</sup>;四是农户传统生产模式每年覆盖地膜,提高土壤温度,加快玉米生育前期生长,对资源的消耗多,造成玉米生育后期出现可利用资源不足等现象<sup>[22]</sup>。因此,亟待研发减缓以上传统农户生产模式诸多弊端的农艺管理措施。本研究将免耕、地膜覆盖同步集成于玉米生产模式,NM处理获得与RM及CM处理相当的籽粒产量。NM处理维持较高籽粒产量的原因是该措施显著降低了玉米全生育期0—15 cm土层土壤温度<sup>[4,18]</sup>,延缓了玉米生育前期生长,消耗水分与养分较少,随着气温回升,生育前期剩余的土壤水分与养分促使玉米生育后期生长发育旺盛,使得灌浆后期甚至蜡熟期仍保持较高的光合性能而延缓衰老,利于玉米籽粒灌浆而促进增产<sup>[19]</sup>,说明免耕地膜重复利用方式下玉米增产主要发生在生育后期。相反,传统耕作每年覆盖新地膜在玉米开花灌浆期造成玉米根区极端高的土壤温度<sup>[7,11]</sup>,以及生育前期较高的土壤温度加快玉米生长,造成资源过度消耗而后期不足,导致玉米根系及叶片发生早衰,降低光合作用而减少地上部光合同化物的累积与分配<sup>[17,23-24]</sup>。因此,在玉米生产田间管理中,可通过优化栽培措施,调控玉米生长发育动态,从而实现资源需求与供给的

同步性而维持并增强玉米生育后期的旺盛生长,延缓衰老而实现高产稳产效应。

### 3.3 地膜覆盖利用方式对作物水分利用效率的影响

根据作物水分利用效率(WUE)的量算公式可知,提高作物产量与降低耗水量是提高WUE的两个主要途径<sup>[15]</sup>。从农田耗水的组成可知,降低土壤水分蒸发、提高作物有效蒸腾耗水可提高WUE<sup>[14]</sup>。地膜覆盖可通过抑制土壤蒸发、提高作物有效蒸腾、提高土壤温度而促进增产和提高WUE<sup>[5,14]</sup>。本研究中,NM处理与RM及CM处理具有相当的WUE,主要原因一是NM处理提高了玉米播种—拔节期及吐丝—灌浆初期0—120 cm土层平均土壤重量水分含量,为玉米播种及灌浆期的旺盛生长创造良好的土壤水分环境;二是NM处理增加了玉米播种—大喇叭口期耗水量,降低了玉米吐丝期—灌浆初期耗水量,增大了玉米灌浆初期—收获期耗水量,有效协调玉米各生育阶段的水分需求关系,为玉米籽粒灌浆奠定基础;NM较CM处理提高了玉米吐丝期之前的棵间蒸发量与其占耗水量的比例( $E/ET$ ),但降低了玉米吐丝期之后的棵间蒸发量与 $E/ET$ ,有利于增强玉米吐丝期之后土壤水分的有效利用,为其籽粒灌浆提供充足的土壤水分,保证产量而维持较高WUE。因而,在资源型缺水严重的干旱内陆灌区,玉米生产中应用免耕地膜重复利用技术可缓解作物需水与供水矛盾而实现较高的WUE,可作为维持西北干旱灌区玉米生产中地膜减投的可行措施。

## 4 结论

免耕地膜重复利用(NM)可提高玉米播种—拔节期及吐丝—灌浆初期0—120 cm土层平均土壤重量水分含量,为玉米播种及灌浆期的旺盛生长创造良好的土壤水分环境。与传统耕作每年覆盖新膜(CM)相比,NM处理增加了玉米播种—大喇叭口期的耗水量,降低了玉米吐丝期—灌浆初期的耗水量,增大了玉米灌浆初期—收获期的耗水量,有效协调了玉米各生育阶段的水分需求关系。NM较CM处理提高了玉米吐丝期之前的棵间蒸发量与其占耗水量的比例( $E/ET$ ),但降低了玉米吐丝期之后的棵间蒸发量与 $E/ET$ ,NM处理有利于增强玉米吐丝期之后土壤水分的有效利用。在地膜减投与免耕措施下,NM处理获得与RM及CM处理相当的籽粒产量与水分利用效率。因此,免耕地膜重复利用可作为维持干旱绿洲灌区玉米较高产量及水分利用效率的地膜减投可行措施。

## 参考文献 References

- [1] CHAI Q, GAN Y T, TURNER N C, ZHANG R Z, LIANG C, SIDDIQUE K.H.M. Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Advances in Agronomy*, 2014, 126: 149-202.
- [2] 殷文, 柴强, 胡发龙, 樊志龙, 范虹, 于爱忠, 赵财. 干旱内陆灌区不同秸秆还田方式下春小麦田土壤水分利用特征. *中国农业科学*, 2019, 52(7): 1247-1259.  
YIN W, CHAI Q, HU F L, FAN Z L, FAN H, YU A Z, ZHAO C. Characteristics of soil water utilization in spring wheat field with different straw retention approaches in dry inland irrigation areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(7): 1247-1259. (in Chinese)
- [3] 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 Z, 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)
- [4] YIN W, CHAI Q, GUO Y, FAN Z L, HU F L, FAN H, ZHAO C, YU A Z, COULTER J A. Straw and plastic management regulate air-soil temperature amplitude and wetting-drying alternation in soil to promote intercrop productivity in arid regions. *Field Crops Research*, 2020, 249: 107758.
- [5] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 李荣, 张睿, 贾志宽, 杨宝平. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响. *作物学报*, 2011, 37(7): 1249-1258.  
WANG M, WANG H X, HAN Q F, LI R, ZHANG R, JIA Z K, YANG B P. Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1249-1258. (in Chinese)
- [6] 员学锋, 吴普特, 汪有科, 徐福利. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 22-26.  
YUAN X F, WU P T, WANG Y K, XU F L. Soil moisture conserving irrigation under straw mulch with no-tillage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 22-26. (in Chinese)
- [7] 殷文, 陈桂平, 柴强, 赵财, 冯福学, 于爱忠, 胡发龙, 郭瑶. 前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(15): 2898-2908.  
YIN W, CHEN G P, CHAI Q, ZHAO C, FENG F X, YU A Z, HU F L, GUO Y. Responses of soil water and temperature to previous wheat straw treatments in plastic film mulching maize field at Hexi corridor. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(15): 2898-2908. (in Chinese)
- [8] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 15-19.  
GAO Y J, LI S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dry land. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 15-19. (in Chinese)
- [9] BI Y L, QIU L, ZHAKYPBEK Y, JIANG B, CAI Y, SUN H. Combination of plastic film mulching and AMF inoculation promotes maize growth, yield and water use efficiency in the semiarid region of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 278-286.
- [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. *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. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(5): 778-786. (in Chinese)
- [11] BU L D, ZHU L, LIU J L, LUO S S, CHEN X P, LI S Q. Source-sink capacity responsible for higher maize yield with removal of plastic film. *Agronomy Journal*, 2013, 105(3): 591-598.
- [12] LIU E K, HE W Q, YAN C R. 'White revolution' to 'white pollution' -agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 91001.
- [13] YU Y Y, TURNER N C, GONG Y H, LI F M, FANG C, GE L J, YE J S. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients. *European Journal of Agronomy*, 2018, 99: 138-147.
- [14] YIN W, CHAI Q, ZHAO C, YU A Z, FAN Z L, HU F L, FAN H, GUO Y, COULTER J A. Water utilization in intercropping: A review. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: 106335.
- [15] 闫静琦, 武佳颖, 蒋傲男, 赵海超, 卢海博, 黄智鸿. 不同颜色地膜覆盖对寒旱区春玉米土壤水温状况及产量的影响. *河北北方学院学报*, 2020, 36(11): 34-39.  
YAN J Q, WU J Y, JIANG A N, ZHAO H C, LU H B, HUANG Z H. Effects of mulching with different color plastic films on soil water temperature and yield of spring maize in cold and arid areas. *Journal of Hebei North University*, 2020, 36(11): 34-39. (in Chinese)
- [16] 牛冬, 唐红艳. 基于土壤温度的春玉米适宜播种指标及播种期分析. *中国农学通报* 2019, 35(2): 79-85.  
NIU D, TANG H Y. Suitable sowing date and sowing indexes of spring maize based on soil temperature. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(2): 79-85. (in Chinese)
- [17] 张乃旭, 赵财, 赵良霞, 蔡莉娟, 王一帆, 柴强. 绿洲灌区一膜覆两年玉米的节水潜力. *作物学报*, 2018, 44(6): 876-885.

- ZHANG N X, ZHAO C, ZHAO L X, CAI L J, WANG Y F, CHAI Q. Water-saving potential for biennial mulched corn with same plastic film in oasis irrigation area. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(6): 876-885. (in Chinese)
- [18] YIN W, CHAI Q, GUO Y, FAN H, FAN Z L, HU F L, ZHAO C, YU A Z, COULTER J A. No tillage with plastic re-mulching maintains high maize productivity via regulating hydrothermal effects in an arid region. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 649684.
- [19] 殷文, 柴强, 于爱忠, 赵财, 樊志龙, 胡发龙, 范虹, 郭瑶. 间作小麦秸秆还田对地膜覆盖玉米灌浆期冠层温度及光合生理特性的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(23): 4764-4776.
- YIN W, CHAI Q, YU A Z, ZHAO C, FAN Z L, HU F L, FAN H, GUO Y. Effects of intercropped wheat straw retention on canopy temperature and photosynthetic physiological characteristics of intercropped maize mulched with plastic during grain filling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4764-4776. (in Chinese)
- [20] 张吉旺. 光温胁迫对玉米产量和品质及其生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- ZHANG J W. Effects of light and temperature stress on physiological characteristics of yield and quality in maize (*Zea mays* L.)[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [21] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 郑盛华. 农用地膜残留污染的现状与防治. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 269-272.
- YAN C R, MEI X R, HE W Q, ZHENG S H. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese)
- [22] LEE J G, HWANF H Y, PARK M H, LEE C H, KIM P J. Depletion of soil organic carbon stocks are larger under plastic film mulching for maize. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(4): 807-818.
- [23] 赵财, 蔡莉娟, 柴强, 赵良霞, 范虹, 殷文, 胡发龙, 于爱忠, 樊志龙. 绿洲灌区地膜利用方式与灌水量对玉米产量形成的协同效应. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 152-158.
- ZHAO C, CAI L J, CHAI Q, ZHAO L X, FAN H, YIN W, HU F L, YU A Z, FAN Z L. Synergetic effect of plastic film mulching and irrigation quota on yield and yield components of maize. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(6): 152-158. (in Chinese)
- [24] 殷文, 陈桂平, 郭瑶, 樊志龙, 胡发龙, 范虹, 于爱忠, 赵财, 柴强. 春小麦秸秆还田对后茬玉米干物质积累及产量形成的调控效应. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(8): 1210-1218.
- YIN W, CHEN G P, GUO Y, FAN Z L, HU F L, FAN H, YU A Z, ZHAO C, CHAI Q. Responses of dry matter accumulation and yield in a following maize crop to spring wheat straw returning. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1210-1218. (in Chinese)
- (责任编辑 杨鑫浩)