南京农业大学学报 2026,49(4):801-811
Journal of Nanjing Agricultural University
http://nauxb.njau.edu.cn
DOI:10.7685/jnau.202502037

马林熠,王静,孙豪杰,等.覆膜滴灌对宁夏干旱与半干旱区盐碱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 南京农业大学学报,2026,49(4):801-811.
Ma L Y,Wang J,Sun H J,et al. Effects of film mulching and drip irrigation on photosynthetic characteristics and grain yield of maize in saline-alkali soils of arid and semi-arid regions in Ningxia[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(4):801-811.

覆膜滴灌对宁夏干旱与半干旱区盐碱地玉米光合特性和产量的影响

马林熠[1],王静[2*],孙豪杰[1],刘吉利[2]

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021;2.宁夏大学生态环境学院/西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,宁夏 银川 750021)

摘要:[**目的**]本研究旨在探究宁夏干旱与半干旱地区盐碱地玉米在不同覆膜方式与滴灌量条件下的光合生理响应特征,从光合生理机制角度揭示覆膜滴灌提高作物产量及水分利用效率的内在原因。[**方法**]本研究采用裂区试验设计,以滴灌量和覆膜方式为试验因素。主区滴灌量设置5个水平,分别为4 200(W1)、3 750(W2)、3 300(W3)、2 850(W4)、2 400(W5) $m^3 \cdot hm^{-2}$;副区为覆膜方式,包括覆膜与无膜2种处理。试验共形成10个处理组合,每个处理重复3次。[**结果**]在相同覆膜条件下,玉米叶绿素含量(SPAD)、叶面积及光合参数(包括净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度)在整个生育期内均呈"先升后降"的单峰变化趋势,各指标从高到低依次对应W3、W2、W1、W5、W4处理。同一滴灌量下,覆膜处理的上述指标均显著高于无膜处理。其中,在W3滴灌量(3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$)下,覆膜使叶面积、SPAD值、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度分别显著提高3.13%~40.10%、1.55%~13.80%、4.96%~58.06%、23.76%~106.00%、0.85%~14.58%和54.67%~82.58%。滴灌量与覆膜方式的互作对产量构成因素均具有显著影响($P< 0.05$)。与覆膜处理相比,不覆膜条件下W1—W5滴灌处理的产量分别降低了4.89%、3.58%、7.14%、1.50%和3.36%。[**结论**]将3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$滴灌量与覆膜措施相结合,可显著提高盐碱地玉米的叶绿素含量(SPAD)、叶面积以及光合参数,并显著增加产量,表明该处理组合是一种适用于盐碱地玉米栽培的优化模式。

关键词:光合生理;滴灌;覆盖地膜;盐碱地;玉米
中图分类号:S287;S156 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2030(2026)04-0801-11

Effects of film mulching and drip irrigation on photosynthetic characteristics and grain yield of maize in saline-alkali soils of arid and semi-arid regions in Ningxia

MA Linyi[1],WANG Jing[2*],SUN Haojie[1],LIU Jili[2]

(1.School of Agriculture,Ningxia University,Yinchuan 750021,China;2.College of Ecology and Environment/National Key Laboratory for the Cultivation Base of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China/Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China,Ningxia University,Yinchuan 750021,China)

Abstract:[**Objectives**]This study was conducted to investigate the photosynthetic physiological response characteristics of maize planted in saline-alkali soils of arid and semi-arid areas in Ningxia under different film mulching patterns and drip irrigation quotas, and to reveal the intrinsic mechanisms by which film mulching coupled with drip irrigation improved crop yield and water use efficiency from the perspective of photosynthetic physiology.[**Methods**]A split-plot experimental design was adopted in this study, with drip irrigation quota and film mulching pattern as experimental factors. The main plots consisted of five drip irrigation quota levels:4 200 (W1),3 750 (W2),3 300 (W3),2 850 (W4) and 2 400 (W5) $m^3 \cdot hm^{-2}$;the subplots were assigned to two mulching treatments, i.e., film mulching and no mulching. A total of 10 treatments combinations were generated, with three replications for each treatment.[**Results**]Under identical film mulching conditions, maize chlorophyll content (SPAD value), leaf area and photosynthetic parameters (net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration) exhibited a unimodal trend of increasing first and then decreasing across the whole growth period. All measured indicators reached the highest values under treatment W3,followed sequentially by W2,W1,W5 and W4. For a given drip irrigation

收稿日期:2025-02-28
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900603);宁夏回族自治区自然科学基金项目(2025AAC030180)
作者简介:马林熠,硕士研究生。*通信作者:王静,副研究员,主要从事农业资源与环境研究,E-mail:wangjing@nxu.edu.cn。

quota, all above-mentioned indicators under film mulching were significantly higher than those under no mulching. Specifically, at the drip irrigation level of W3 (3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$), film mulching significantly increased leaf area, SPAD value, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration by 3.13%-40.10%, 1.55%-13.80%, 4.96%-58.06%, 23.76%-106.00%, 0.85%-14.58% and 54.67%-82.58%, respectively. The interaction between drip irrigation quota and mulching pattern exerted significant effects on yield components ($P<0.05$). Relative to film mulching, grain yields under no mulching decreased by 4.89%, 3.58%, 7.14%, 1.50% and 3.36% for treatments W1 to W5, respectively. [**Conclusions**] The dripirrigation quota level of 3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ combined with mulching film could significantly promote the improvement of chlorophyll content (SPAD), leaf area, and photosynthetic indexes of maize in saline soil and increase the yield, and better cultivation effect could be realized.

Keywords: photosynthetic physiology; drip irrigation; cover with mulch; saline-alkali soil; maize

作物的生长发育和产量形成主要依靠光合作用,其中95%以上的干物质合成都是由光合作用提供的。改善作物叶面积指数和光能利用率有助于延缓叶片衰老,增加玉米和大豆的干物质积累,促进干物质向籽粒转移,利于养分吸收,促进养分积累,提高土地当量比,提高群体产量和经济效益[1-2]。因此,改善光合性能是增加作物产量的重要途径。光合性能主要通过净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度衡量[2]。而土壤水分是影响作物生长和产量形成的主要限制因子,如何有效利用水资源是旱区农业节水、增产的关键问题[3-4]。膜下滴灌,即在植物根系范围内埋设滴灌管,直接将水分和养分送达根系区域,以提供适量的水分和养分[5],这种灌溉方式不仅为土壤提供较好的保墒能力,而且还有效地改善作物品质,提高产量。覆盖地膜同样具有保温性强,减少土壤水分蒸发的优点,并能有效缓解作物与土壤之间的水分平衡[6]。二者相结合可以有效改善土壤环境,为作物提供良好的生长条件。

目前,国内有关覆膜的研究多侧重于节水灌溉。如:张建喜等[7]研究表明,在当地传统施肥条件下,合理的灌溉量有助于增强青贮玉米生育期叶片的光合特性,提高产量及其构成要素;张彦群等[8]研究表明,覆膜能有效减少玉米等作物上冠层和下冠层的净辐射量,通过增加作物蒸腾与土壤水分蒸发,促进农田耗水量向作物产量的分配;Zhou 等[9]在田间试验中发现,在春玉米不同生育期内,与不覆盖地膜处理相比,覆膜可显著提高土壤温度、水资源利用率及作物产量。地膜覆盖可有效减少太阳辐射通过反射或散射等方式的损失,使作物能够充分利用光照辐射资源,同时还可以减少土壤水分蒸发及热量损失,进而增加光合产能[10]。葛均筑等[11]与候海鹏等[12]的试验结果表明,覆膜能够提高春玉米的光合性能参数及产量指标,对其进行补偿,可达到增产的目的。Zhang 等[13]研究结果表明,与不覆膜玉米相比,覆膜降低了土壤蒸散量,提高了作物蒸腾量和水分利用效率,增产5.9%~8.8%。但也有研究表明,覆膜会改变作物叶片的温度环境,造成热应激,对光合酶活性和光合产物的合成产生影响,进而抑制作物的光合作用[14]。尽管有关覆膜滴灌对作物光合生理生态方面已开展了大量研究,如王传娟等[15]基于东北地区田间定位试验观测,定量分析了覆膜滴灌(MD)、不覆膜滴灌(ND)和对照组(CK)之间的作物光合参数及生物学指标的变化差异及其内在原因,但关于覆膜与滴灌互作是否能增强作物光合特性、提高产量的相关研究还较少。

宁夏大部分地区属于干旱与半干旱区,水资源是该区农作物生长发育的主要限制性因子[16]。如何提高水分利用效率,建立科学的节水滴灌模式,已成为宁夏地区农业发展的焦点问题。玉米作为西北地区的主要农作物和饲料原料,也是一种高耗水作物,如何在青贮玉米生长过程中,采取有效栽培技术及合理灌溉模式,对提高作物水分利用效率,实现节水增产的目的具有重要意义[17-18]。近年来,膜下滴灌技术因其节水效果显著、能维持土壤水分均衡并可减少土壤侵蚀和盐渍化等优势,被广泛应用于作物栽培[19-20]。本研究基于该技术,通过设置不同滴灌量与地膜覆盖的交互处理,探讨其对玉米各生育期叶片光合特性和产量的影响,为玉米种植过程中节水、增产以及高效种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验研究区位于我国宁夏北部惠农区(106.80°E—106.82°E, 39.08°N—39.10°N),地处贺兰山东麓冲洪积扇平原,属暖温带季风气候,表土平均含盐量2.16 $g \cdot kg^{-1}$,平均pH值为8.7,年平均气温9 ℃,平均日照时数约3 008.6 h。测定试验田3—9月月均气温、降水量见表1,光照与总辐射量见图1。由于该区域降水少(平均约173.2 mm)、蒸发强烈(平均约1 755 mm)、日照及总辐射量高等自然因素复杂和不合理的农业灌溉,使土壤盐分在地表聚集,是典型的土壤盐碱化地区[14]。

表 1　2023 年 1—9 月宁夏北部石嘴山市惠农区的降水量及月均气温

Table 1　Precipitation and average monthly temperature in Huinong district, Shizuishan city, northern Ningxia from January to September in 2023

指标 Index	2023-01	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07	2023-08	2023-09
气温/℃ Air temperature	-6.5	-0.2	7.1	11.4	19.0	24.3	26.1	25.0	19.8
降水量/mm Precipitation	0.0	0.8	0.0	13.9	15.7	6.1	18.4	29.0	13.0

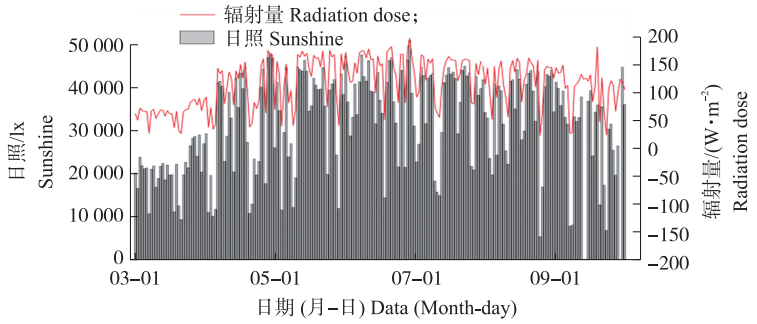

图 1　2023 年 3—9 月试验研究区日均日照及辐射量

Fig. 1　The average daily sunshine and radiation in the experimental study area from March to September in 2023

1.2　试验设计

于 2023 年 4 月 5 日—10 月 1 日在宁夏石嘴山惠农区星火村进行裂区试验设计,设置覆膜方式和灌水量 2 个因素,主区为灌水量,设置 5 个灌水水平,分别为 4 200(W1)、3 750(W2)、3 300(W3)、2 850(W4)、2 400(W5) $m^3 \cdot hm^{-2}$。副区为覆膜方式,设覆膜(C)和不覆膜(B)2 种处理,试验覆膜材料选用厚度为 0.008~0.012 mm 聚乙烯薄膜。试验共 10 个处理,5 个灌水梯度处理均分别在 6 月 5 日、6 月 25 日、7 月 10 日、7 月 22 日进行 4 次灌水,每处理重复 3 次,共计 30 个试验小区,小区面积为 60 m^2(10 m×6 m)。具体试验处理方案如表 2 所示。试验采用“干播湿出”的播种方式,玉米品种为‘先玉 1225’。播种时间为 2023 年 4 月 30 日,收获时间为 9 月 22 日,单种宽窄行,一带 2 行种植模式,窄行 40 cm、宽行 70 cm。采用滴灌方式灌溉,滴灌带铺设于窄行正中,种植密度 5 500 株·hm^{-2}。播种前随旋耕施入基肥(尿素 200 kg·hm^{-2}、磷酸二铵 400 kg·hm^{-2}、氯化钾 125 kg·hm^{-2})。在拔节期、大喇叭口期、开花期和灌浆期随灌水追肥 1 次,追施尿素 40 kg·hm^{-2},合计 N、P_2O_5 和 K_2O 用量分别为 238、184 和 75 kg·hm^{-2}。分别于玉米的苗期(5 月 13 日)、拔节期(6 月 9 日)、大喇叭口期(6 月 21 日)、吐丝期(7 月 2 日)、乳熟期(7 月 31 日)、蜡熟期(8 月 14 日)、完熟期(8 月 31 日)和收获期(9 月 22 日)进行采样。

表 2　不同生育时期覆膜及灌水处理方案

Table 2　Mulching and irrigation treatment schemes at different growth stages　　$m^3 \cdot hm^{-2}$

处理 Treatment	不同生育时期灌水定额 Irrigation quota in different growth stages						灌水总量 Total amount of irrigation
	冬灌 Winter irrigation	苗期 Seedling stage	拔节抽雄期 Jointing and tasseling period	抽雄吐丝期 Male spawning period	吐丝灌浆期 Silk grouting period	灌浆成熟期 Filling maturity period	
W1	1 050	0	900	900	900	450	4 200
W2	1 050	0	900	900	450	450	3 750
W3	1 050	0	900	600	450	300	3 300
W4	1 050	0	450	450	450	450	2 850
W5	1 050	0	450	450	300	150	2 400

1.3　测定指标及方法

1.3.1　气象指标　使用气象墒情一号(星火村,编号:861714055711992)定期进行校准。对温度、降水、光照、辐射量进行测定,剔除传感器故障或环境干扰(如鸟粪遮挡)导致的突变数据。以 1 d 内多个小时为单位进行测定,最终对数据进行平均值处理得到相对应的气候数据。

1.3.2　叶绿素含量　利用便携式叶绿素仪(IN-YL01)在拔节期、大喇叭口期、花粒期、乳熟期、蜡熟期、完熟期进行随机取样,在不同处理下各抽取 3 个以上的完整植株,选取从上至下第 6 片叶子,选位原则是选择

完全展开叶,避免新叶与已经衰老的叶片。用便携式叶绿素仪测定叶片的相对叶绿素含量(SPAD 值),得到数据后进行方差分析。

1.3.3 叶面积 用长宽法测定,在玉米拔节期、大喇叭口期、花粒期、乳熟期和完熟期各测定 1 次,每个处理选取穗位叶,用卷尺测量玉米所有叶片的长度和最大宽度,随机在各处理中抽取 3 个以上完整植株,叶面积(LAI)计算公式[21]:$LAI=0.75\times P\times\sum_{i=1}^{n}(a_i\times b_i)$。式中:0.75 为校正系数;$P$ 为玉米种植密度;a 和 b 分别为叶片的长和宽;i 为叶片数量。测出叶面积指标后进行方差分析。

1.3.4 光合指标 利用光合仪(GFS-3000)从玉米拔节期至完熟期,于天气晴朗的上午 09:30—11:30,各小区随机选取长势均匀、具有代表性的玉米植株 3 株,测定光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度等指标。于拔节期选取植株从上到下第 2 展开叶,于花粒期、乳熟期、蜡熟期和完熟期均选取玉米穗位叶,测定位置为叶片中部,且避开叶脉及叶缘,测定相应的光合指标后进行方差分析。

1.3.5 产量及其组成因素测定 在玉米收获时选取每个处理 3 个重复小区,每个小区随机选取 $S=1$ m×5 m 区域对玉米进行采摘,测定穗重、穗长、穗粗、穗行粒数、百粒重、鲜果穗重、果穗出籽率、籽粒含水率等,计算实际产量(kg·hm^{-2})。产量计算公式:产量=$W_{总重}$×果穗出籽率×(1−籽粒含水率)÷0.86÷S×666.7。式中:$W_{总重}$为小区 S 收获的玉米鲜果穗重(kg·m^{-2});籽粒含水率由水分速测仪测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 和 Origin 2021 软件统计数据并绘图,用 SPSS 21.0 软件进行 Duncan's 检验,设 $P<0.05$ 为显著水平,$P<0.01$ 为极显著水平。

2 结果与分析

2.1 覆膜与不同灌溉量对玉米全生育期叶绿素和叶面积指数的影响

从图 2 可知,玉米整个生育期内叶绿素含量(SPAD 值)呈先升高后降低的趋势,并在乳熟期达到峰值。在所有处理中,W3B 和 W3C 处理的表现最为显著。覆膜(C)处理相比不覆膜(B)处理在多个生育时期的叶绿素含量均显著提高,分别于拔节期、大喇叭口期、花粒期、乳熟期和完熟期提高 12.5%、13.8%、3.15%、1.55%和 6.63%。此外,在同一覆膜条件下各处理的叶绿素含量从大到小依次为 W3、W2、W1、W5、W4。在各生育时期,相同灌水量下,覆膜处理的叶绿素含量均高于不覆膜处理。因此,在同一灌水量下,

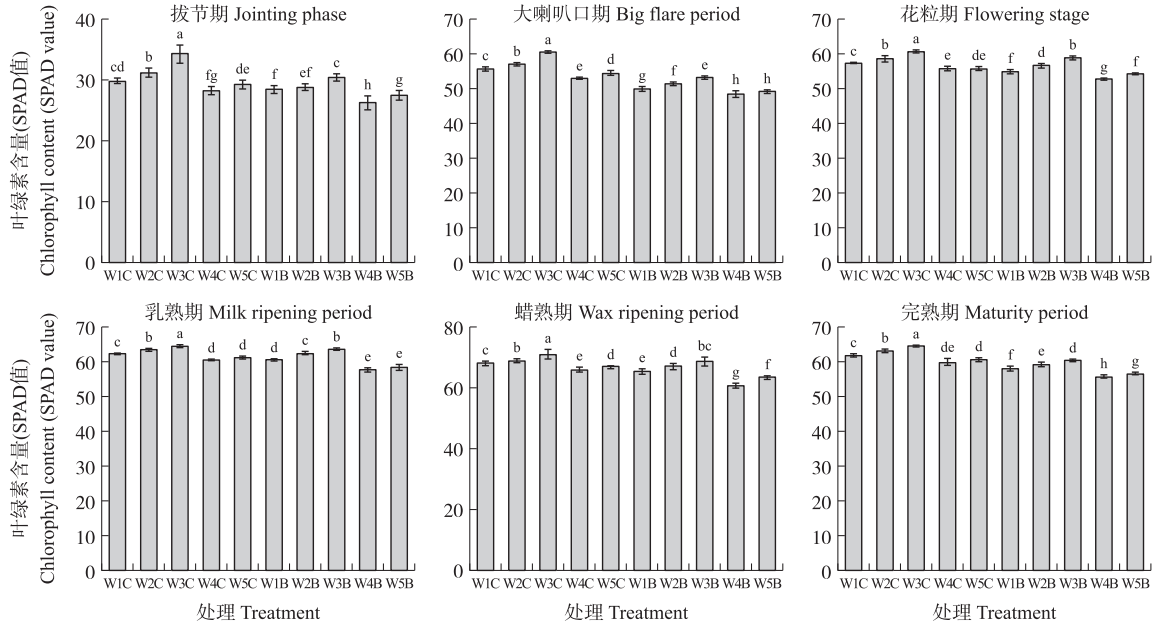

图 2 覆膜与不同灌溉量对各时期叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of film mulching and different irrigation amount on chlorophyll content at different stages

C. 覆膜 Mulching;B. 不覆膜 No mulching;W1—W5 分别表示灌水量为 4 200、3 750、3 300、2 850 和 2 400 m^3·hm^{-2}的处理。W1−W5 indicate the treatment with the drip irrigation quota of 4 200, 3 750, 3 300, 2 850 and 2 400 m^3·hm^{-2}. 不同小写字母代表在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level. 下同 The same as follows.

覆膜处理显著促进玉米叶绿素含量的增加。

从图 3 可知,在玉米全生育周期中,叶面积的变化规律为从拔节期至乳熟期呈整体上升的趋势。不覆膜处理的叶面积均低于覆膜处理。从乳熟期至完熟期,叶面积呈下降趋势。滴灌量与覆盖地膜对玉米叶面积的影响显著,且二者的交互作用对叶面积也有显著影响。同一滴灌量下(W3,3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$),覆膜处理(W3C)与不覆膜处理(W3B)在各生育时期的叶面积差异显著。覆膜处理的叶面积在拔节期、大喇叭口期、花粒期、乳熟期和完熟期分别比不覆膜处理提高 40.10%、3.13%、4.47%、9.11%和 7.52%。因此,覆膜处理叶面积相比不覆膜处理表现更优,且 W3C 处理表现最佳。

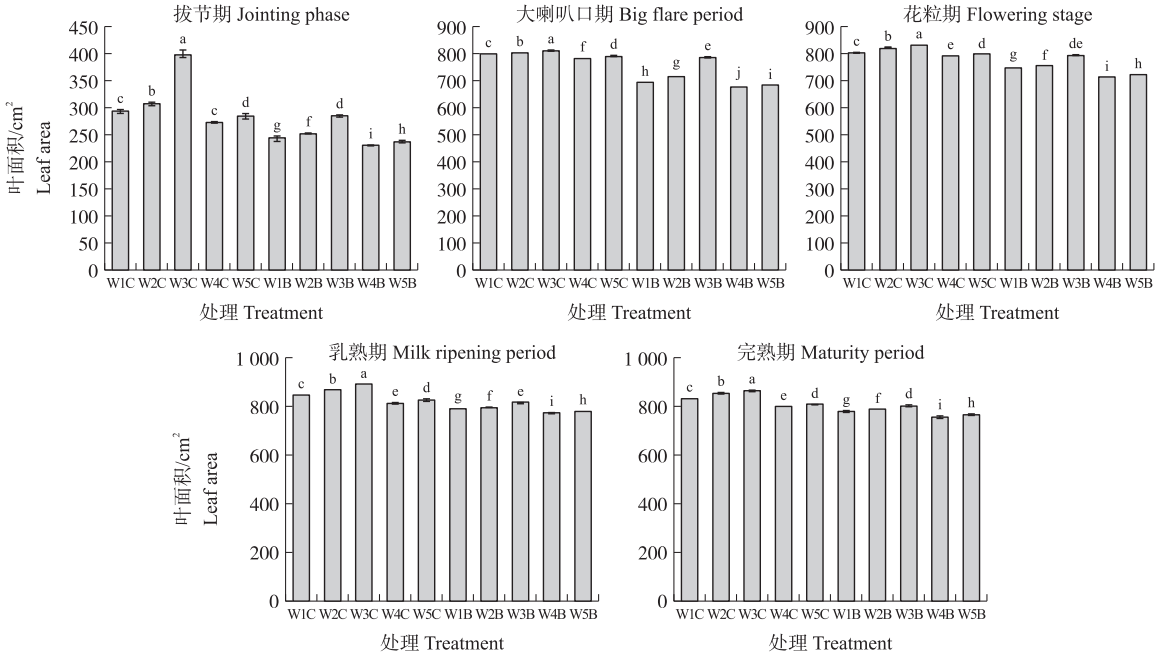

图 3　覆膜与不同灌溉量对各时期叶面积的影响

Fig. 3　Effects of mulching and different irrigation amount on leaf area at different stages

2.2　覆膜与不同灌溉量对玉米全生育期光合生理指标的影响

2.2.1　蒸腾速率　如图 4 所示,在玉米整个生育周期中,覆盖地膜与不覆盖地膜处理蒸腾速率的趋势:先升高,在蜡熟期达到最高值,随后在完熟期下降。在所有处理中,W3 处理滴灌量是覆膜与不覆膜处理中

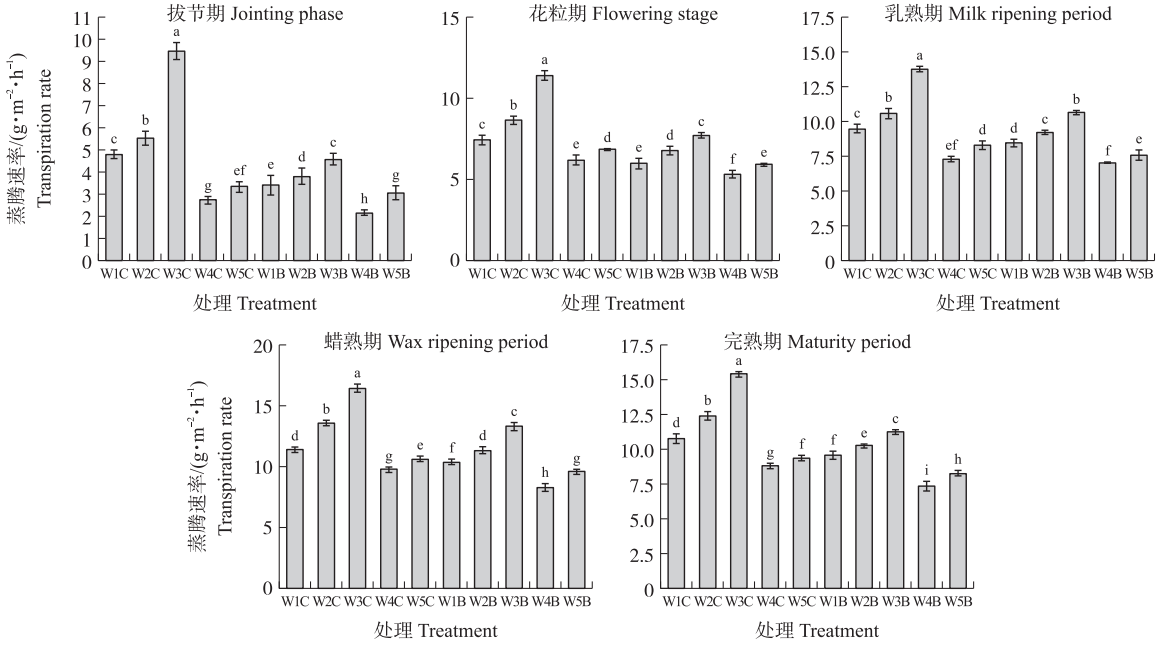

图 4　覆膜与不同灌溉量对蒸腾速率的影响

Fig. 4　Effect of mulching and different irrigation amount on transpiration rate

影响最显著的滴灌处理。在同一滴灌量下,覆膜的 W3C 处理在拔节期、花粒期、乳熟期、蜡熟期和完熟期的蒸腾速率均显著高于不覆膜 W3B 处理,分别高出 106.00%、47.90%、29.32%、23.76%和 36.54%。这表明覆膜处理促进作物的蒸腾作用,也更有利于干物质的累积。在所有滴灌处理中,W3 处理对作物生长的促进作用最显著。

2.2.2 净光合速率 如图 5 所示,在玉米整个生育周期中,净光合速率随着玉米的生长发育呈现先上升、在蜡熟期达到峰值后开始下降的趋势。覆膜和滴灌量对玉米的净光合速率在整个生育时期均具有显著影响,但二者的交互作用对净光合速率的影响在不同生育时期表现不同。交互作用在拔节期和蜡熟期的显著性较明显,而在花粒期与乳熟期的显著性较低,完熟期则不显著。当滴灌量为 3 750 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W3)时,覆膜处理(W3C)相比不覆膜处理(W3B)在玉米整个生育周期中的净光合速率显著提高。覆膜处理在拔节期、花粒期、乳熟期、蜡熟期和完熟期的净光合速率分别比不覆膜处理提高 58.06%、8.68%、5.87%、5.19%和 4.96%。因此,W3 处理滴灌量在覆盖地膜的情况下是所有处理中最有利于提高玉米净光合速率的滴灌模式。

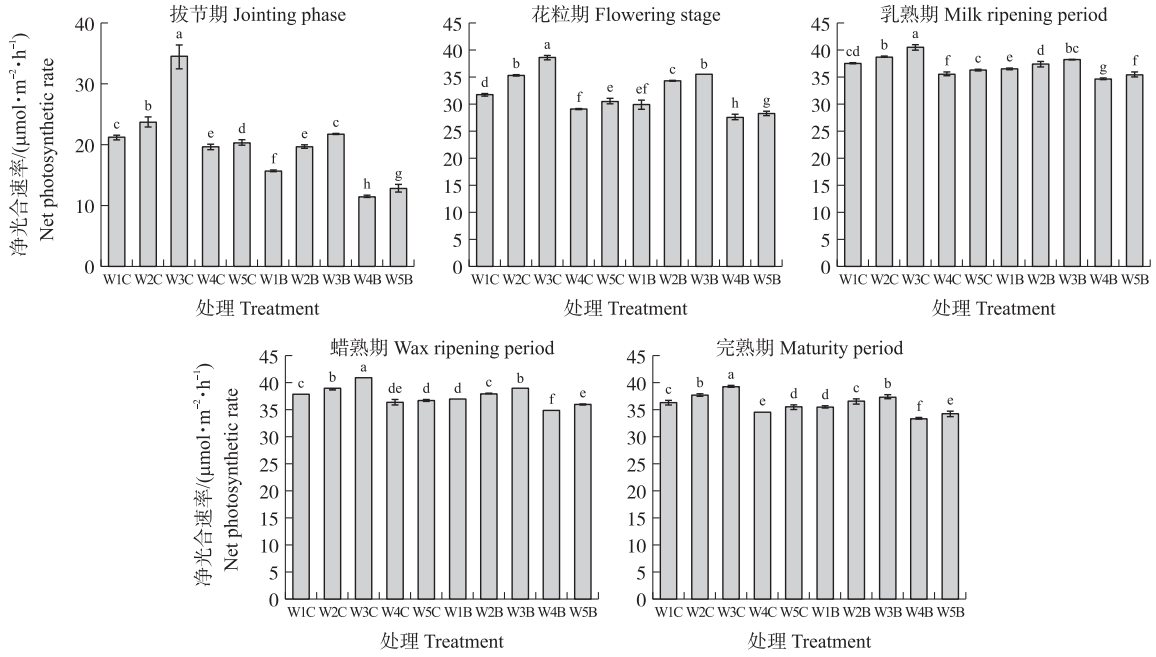

图 5 覆膜与不同灌溉量对净光合速率的影响

Fig. 5 Effect of film mulching and different irrigation amount on net photosynthetic rate

2.2.3 气孔导度 如图 6 所示,在整个生育周期中,玉米的气孔导度随着玉米的生长发育呈现先升高、中后期出现略微下降的趋势。对所有处理进行方差分析,在覆膜与不覆膜的处理中,W3C(覆膜)和 W3B(不覆膜)处理表现相对较好。覆膜处理的气孔导度普遍高于不覆膜处理,并且覆膜与滴灌量的交互作用对玉米的气孔导度具有显著影响。当滴灌量为 3 750 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W3)时,覆膜处理(W3C)相比不覆膜处理(W3B)在玉米整个生育周期中的气孔导度显著提高。覆膜处理在拔节期、花粒期、乳熟期、蜡熟期和完熟期的气孔导度分别比不覆膜处理提高 8.59%、10.54%、14.74%、14.71%和 14.58%。因此,W3C 处理是最有利于提升玉米气孔导度的处理。

2.2.4 胞间 CO_2 浓度 从图 7 可知,根据数据分析,在玉米整个生育周期中,同一生育周期中 5 个处理所测胞间 CO_2 浓度呈现从拔节期至蜡熟期升高之后在完熟期下降的趋势。在覆膜条件下,随着灌水量的减小,胞间 CO_2 浓度的变化趋势:在拔节期,W3 处理的胞间 CO_2 浓度最高,W4 处理最低;在大喇叭口期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在灌浆期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在蜡熟期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在完熟期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低。在不覆膜条件下,随着灌水量的减小,胞间 CO_2 浓度的变化趋势:在拔节期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在大喇叭口期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在灌浆期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在蜡熟期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低;在完熟期,W2 处理的浓度最高,W3 处理最低。通过对比可以发现覆膜处理普遍高于不覆膜处理。W3C 处理相比 W3B 处理于拔节期、大喇叭口期、灌浆期、蜡熟期和完熟期分别提高 82.58%、73.36%、

56.74%、54.80%和 54.67%。这表明滴灌量与覆膜对胞间 CO_2 浓度均具有显著影响,二者交互对玉米整个生育周期中的胞间 CO_2 浓度具有显著影响。

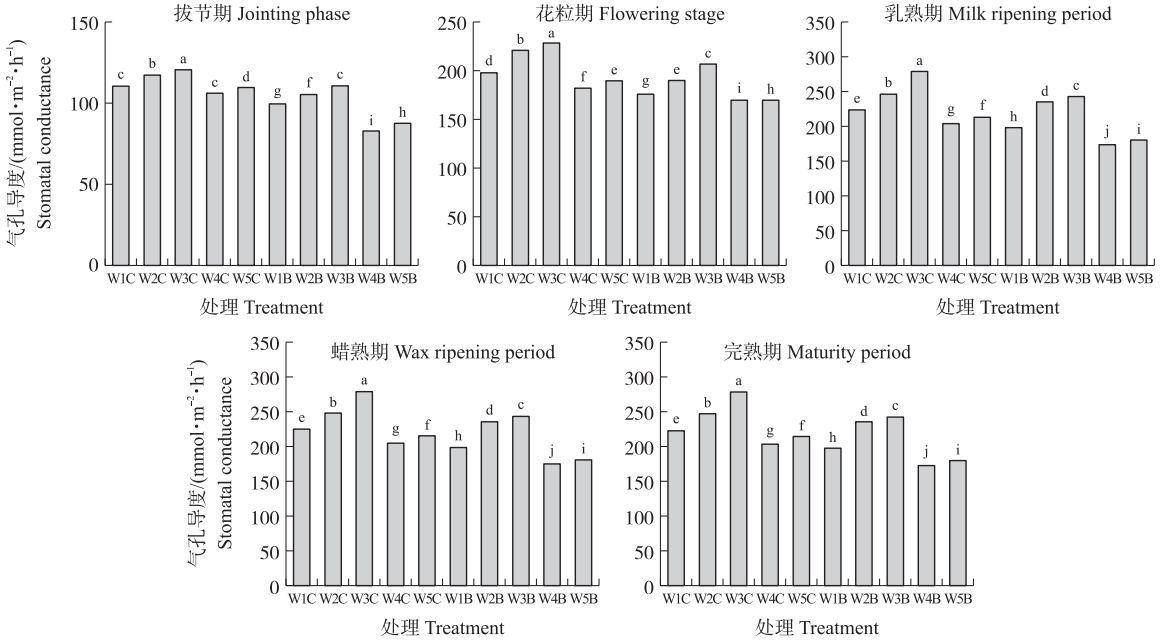

图 6　覆膜与不同灌溉量对气孔导度的影响

Fig. 6　Effect of film mulching and different irrigation amount on stomatal conductance

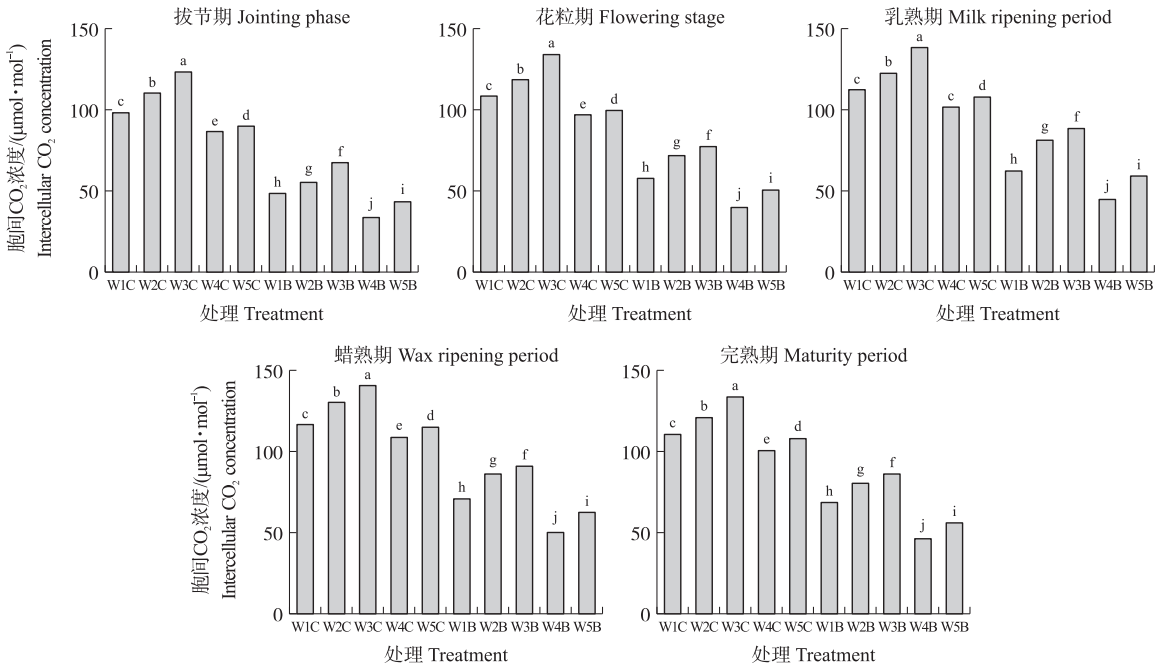

图 7　不同时期各灌水模式与覆膜处理对胞间 CO_2 浓度的影响

Fig. 7　Effects of irrigation patterns and mulching treatments on intercellular CO_2 concentrations at different stages

2.3　覆膜与不同灌溉量对玉米全生育期产量及其构成因素的影响

如表 3 所示,滴灌量与覆膜以及二者交互对产量及其构成的相关因素均有显著影响。当不同滴灌量在同一覆膜情况下,所有指标从大到小的处理依次均为 W3、W2、W1、W5、W4,其中 W3 处理的各项数值(尤其是产量)均最高。不同覆膜情况下,各滴灌量不覆膜处理的产量均相比覆膜处理低,分别为 4.89%、3.58%、7.14%、1.50%、3.36%。因此,覆膜处理的产量均高于不覆膜处理,在覆膜处理中 W3 处理产量最高。

在覆膜条件下,随着灌水量的减小,产量及其构成因素的变化趋势如下:在穗重方面,W3 处理的穗重最高,W4 处理最低;在穗长方面,W3 处理的穗长最长,W4 处理最短;在穗粗方面,W3 处理的穗粗最粗,

W4 处理最细;在穗行数方面,W3 处理的穗行数最多,W4 处理最少;在穗行粒数方面,W3 处理的穗行粒数最多,W4 处理最少;在百粒重方面,W3 处理的百粒重最重,W4 处理最轻;在产量方面,W3 处理的产量最高,W4 处理最低。

在不覆膜条件下,随着灌水量的减小,产量及其构成因素的变化趋势如下:在穗重方面,W3 处理的穗重最高,W4 处理最低;在穗长方面,W3 处理的穗长最长,W4 处理最短;在穗粗方面,W3 处理的穗粗最粗,W4 处理最细;在穗行数方面,W3 处理的穗行数最多,W4 处理最少;在穗行粒数方面,W3 处理的穗行粒数最多,W4 处理最少;在百粒重方面,W3 处理的百粒重最重,W4 处理最轻;在产量方面,W3 处理的产量最高,W4 处理最低。通过对比可以发现,覆膜处理普遍高于不覆膜处理。以 W3 滴灌量为例,覆膜相比不覆膜,在穗重、穗长、穗粗、穗行数、穗行粒数、百粒重和产量方面分别提高 14.08%、14.21%、7.61%、6.25%、13.33%、10.52%和 7.14%。这表明滴灌量与覆膜对产量及其构成因素具有显著影响,二者交互同样对产量及其构成因素具有显著影响。

表 3 不同灌溉覆膜处理下玉米的产量及产量构成性状

Table 3 Yield and yield traits of maize under different irrigation and mulching treatments

处理 Treatment	穗重/g Spike weight	穗长/cm Spike length	穗粗/mm Spike diameter	穗行数 Number of spike rows	穗行粒数 Number of grains per row	百粒重/g 100-grain weight	产量/(kg·hm^{-2}) Yield
W1C	279.44^{c}	22.59^{c}	51.76^{c}	37.33^{bc}	18.67^{c}	38.02^{c}	13 899.66^{c}
W2C	285.92^{b}	23.53^{b}	52.66^{b}	38.33^{b}	20.67^{b}	40.61^{b}	14 072.67^{b}
W3C	296.15^{a}	24.48^{a}	55.54^{a}	39.67^{a}	22.67^{a}	41.86^{a}	14 962.17^{a}
W4C	260.49^{e}	20.59^{e}	49.23^{e}	35.67^{d}	16.00^{d}	36.09^{d}	13 092.16^{e}
W5C	264.02^{d}	21.25^{d}	49.95^{d}	37.00^{c}	18.00^{c}	36.38^{d}	13 517.43^{d}
W1B	247.87^{bc}	20.16^{bc}	49.81^{c}	35.00^{bc}	16.00^{c}	35.73^{c}	13 250.65^{c}
W2B	250.78^{b}	20.62^{b}	50.59^{b}	36.00^{ab}	18.00^{b}	36.73^{b}	13 585.93^{b}
W3B	259.59^{a}	21.44^{a}	51.61^{a}	37.33^{a}	20.00^{a}	37.88^{a}	13 964.55^{a}
W4B	235.53^{d}	18.63^{d}	47.70^{e}	33.67^{c}	16.00^{c}	33.20^{e}	12 898.18^{e}
W5B	245.90^{c}	19.48^{c}	48.57^{d}	34.33^{d}	16.00^{c}	33.93^{d}	13 077.48^{d}
W	174.19***	93.86***	424.60***	24.16***	68.00***	392.97***	466.82***
F	1 385.69***	388.44***	593.53***	76.56***	75.00***	943.17***	571.62***
W×F	19.06***	4.20**	24.25***	0.16	5.00***	12.30***	32.93***

注:W.灌水量处理 The irrigation amount treatment;F.覆膜处理 The mulching treatment. $^{*}P<0.05$, $^{**}P<0.01$, $^{***}P<0.001$.

3 讨论

3.1 覆膜与不同灌溉量对玉米叶绿素含量与叶面积的影响

玉米作为典型的喜温作物,其正常生长发育依赖于适宜的土壤温度环境,过高或过低的土壤温度均会显著抑制其生理代谢过程[22]。宁夏地区受低温与干旱复合胁迫影响,玉米营养生长期冠层扩展速率普遍偏低,而地膜覆盖技术可通过改善土壤热力学条件与水分保持能力有效缓解这一限制[23]。同时,灌溉量的精准调控能够削弱干旱对玉米叶片的生理胁迫效应,不同滴灌梯度对植株叶面积指数与叶绿素相对含量具有显著差异化影响[24]。本研究结果表明,滴灌量、覆膜措施及其交互作用对玉米叶绿素含量与叶面积指数均具有极显著影响($P<0.01$)。在相同滴灌量条件下,覆膜处理的叶绿素含量与叶面积指数均显著高于未覆膜处理($P<0.05$),且覆膜处理组内各滴灌梯度指标从大到小的处理依次为 W3、W2、W1、W5、W4。玉米全生育期内叶绿素含量与叶面积呈显著正相关($r=0.87$, $P<0.01$),二者动态变化均呈现“单峰曲线”特征,即拔节期至蜡熟期逐渐升高,完熟期显著下降。覆膜处理对叶面积与叶绿素含量的提升效应与张丽华等[25]的研究结论一致。其机制可能是地膜覆盖通过抑制土壤水分蒸发显著提高耕层贮水量,进而增强根系活力与叶片 RuBisco 酶活性,再通过改善光合性能促进植株生长。本研究中,W3 处理(3 300 m^{3}·hm^{-2})覆膜条件下,拔节期、大喇叭口期、花粒期、乳熟期和完熟期的叶面积指数较未覆膜处理分别提高 40.1%、3.13%、4.47%、9.11%和 7.52%。这一结果证实覆膜措施可通过改善植株光合器官功能显著提高玉米生产力。滴灌量的调控效应与杨恒山等[26]的研究结果一致,不同滴灌梯度通过改变土壤水分时空分布特征,显著影响玉米冠层光合参数。与传统畦灌相比,滴灌技术通过高频低量的精准灌溉模式,使土壤体积含水量稳定维持在田间持水量的 75%~85%(变异系数降低 42.3%),显著提高水分利用效率。这种持续优化的土壤水分环境为玉米光合碳同化提供了稳定的物质基础,最终导致叶面积指数与叶绿素含

量发生显著表型响应[26]。5 个滴灌量中 W3(3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$)处理最有利于叶面积与叶绿素含量的提高。

3.2　覆膜与不同灌溉量对光合生理指标的影响

光合作用作为植物物质与能量代谢的核心生理过程,其强度直接表征植株生长势与抗逆能力。在干旱半干旱生态区,土壤水分有效性是制约作物光合碳同化的关键环境因子[27]。本试验结果表明,玉米全生育期光合参数在拔节至蜡熟期呈显著上升趋势,而在蜡熟至完熟期出现生理性衰退,该动态特征与同化物转运规律具有显著相关性。地膜覆盖通过构建“保墒—增温—抑蒸”的微域环境,显著提高土壤含水量,进而促进气孔开度,最终实现光合性能提升。试验数据显示,同等滴灌量条件下覆膜处理的净光合速率较裸地栽培提高 18.7%~34.2%,这与李友军等[28]在北方旱区的研究结论相一致。Ren 等[29]的模拟降雨试验证明了膜下滴灌系统可以对水分精准调控,可有效维持 0~40 cm 土层含水量为 65%~80%。在此水分阈值内,作物气孔因素主导的光合限制占比达 72%~85%,而当土壤体积含水量降至 12%以下时,非气孔限制贡献率显著增加至 53%~67%,膜下滴灌系统通过水分精准调控,可有效维持 0~40 cm 土层含水量为 65%~80%。在此水分阈值内,作物气孔因素主导的光合限制占比达 72%~85%,而当土壤体积含水量降至 12%以下时,非气孔限制贡献率显著增加至 53%~67%,这与水分胁迫引发的 PSⅡ光化学效率下降及叶绿体超微结构损伤密切相关[30]。张勤杰[31]研究证实,在光合有效辐射为 500~2 100 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 强光条件下,滴灌加强膜处理的 P_n 较普通膜提高 14.2%~18.7%($P<0.05$),且低水处理表现出更优的水分利用效率,本试验研究结果与之一致。上述研究结果从生理生态角度阐明了土壤水分-光合响应机制,为旱作农业水肥协同调控提供了理论依据。结合光合数据进行分析,在 5 个滴灌量中 W3(3 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$)处理最有利于植物光合作用。

3.3　覆膜与不同灌溉量对产量及其构成要素的影响

本研究从产量形成角度系统解析了盐碱地改良的农艺调控效应。玉米籽粒产量作为盐碱障碍消减效应的综合表征指标,其构成要素受滴灌量与覆膜措施互作关系的显著调控。方差分析显示,在覆膜条件下各处理产量从大到小依次为 W3、W2、W1、W5、W4,其中 W3 处理通过覆膜与灌溉协同调控使产量达到 12.87 $t \cdot hm^{-2}$,较 W4 处理增产 38.6%($P<0.01$)。试验数据与周辉洪[32]的研究结果一致,全膜覆盖处理较对照增产 52.04%,证明了微域环境改良对产量形成的正向调控机制。本试验构建的膜下滴灌可以通过调节土壤水分进而改善产量。这与赵灿明[33]提出的“精准灌溉-根系构型-产量响应”理论模型高度契合。魏子涵等[34]的对比试验进一步证实,膜下滴灌较低压管灌使光合产物向籽粒的分配比例提高 12.3%,最终实现 7.83%的产量增益。本试验通过结合产量及构成要素分析发现滴灌与覆膜互作可以有效提高玉米的产量。

参考文献 References:

[1] 钟宇晖,汤松,蒋靖怡,等. 大豆玉米带状复合种植产量、效益及关键因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文),2026,34(3):485-499.
Zhong Y H,Tang S,Jiang J Y,et al. Study on yield,economic benefit,and key impact factors under the strip intercropping system of soybean and maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2026,34(3):485-499.

[2] 张书静,魏娇娇,徐得甲,等. 不同施氮量对滴灌水肥一体化模式下玉米生长发育和土壤生物学特性的影响[J]. 江苏农业学报,2025,41(11):2157-2166.
Zhang S J,Wei J J,Xu D J,et al. Effects of different nitrogen application rates on maize growth and development and soil biological properties under drip irrigation with fertigation integration mode[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2025,41(11):2157-2166(in Chinese with English abstract).

[3] 殷文,郭瑶,范虹,等. 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[J]. 中国农业科学,2021,54(22):4750-4760.
Yin W,Guo Y,Fan H,et al. Effects of different plastic film mulching and using patterns on soil water use of maize in arid irrigated area of northwestern China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(22):4750-4760 (in Chinese with English abstract).

[4] 陈涛涛,刘晓晗,孟凡超,等. 减氮施炭对温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸和氮素气态损失的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2024,55(1):9-20.
Chen T T,Liu X H,Meng F C,et al. Soil respiration and N losses from greenhouse cucumber under mulched drip irrigation as affected by reduced N fertilizer coupled with biochar incorporation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2024,55(1):9-20 (in Chinese with English abstract).

[5] 张恒嘉,李晶. 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J]. 农业机械学报,2013,44(10):143-151.
Zhang H J,Li J. Photosynthetic physiological characteristics and water use of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):143-151 (in Chinese with English abstract).

[6] 柴守玺,杨长刚,张淑芳,等. 不同覆膜方式对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J]. 作物学报,2015,41(5):787-796.
Chai S X,Yang C G,Zhang S F,et al. Effects of plastic mulching modes on soil moisture and grain yield in dryland winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica,2015,41(5):787-796 (in Chinese with English abstract).

[7] 张建喜,李广,张武清,等. 施氮对河西灌区青贮玉米土壤-植株化学计量特征及稳态性的影响[J]. 南京农业大学学报,2025,48(1):152-160.
Zhang J X,Li G,Zhang W Q,et al. Effects of nitrogen application on soil-plant stoichiometry and stability of silage maize in Hexi irrigation area [J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2025,48(1):152-160 (in Chinese with English abstract).

[8] 张彦群,王建东,龚时宏,等. 基于液流计估测蒸腾分析覆膜滴灌玉米节水增产机理[J]. 农业工程学报,2018,34(21):89-97.
Zhang Y Q,Wang J D,Gong S H,et al. Analysis of water saving and yield increasing mechanism in maize field with drip irrigation under film mulching based on transpiration estimated by sap flow meter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34 (21):89-97 (in Chinese with English abstract).

[9] 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.

[10] 包开花,蒙美莲,陈有君,等. 覆膜方式和保水剂对旱作马铃薯光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(3):139-143,159.
Bao K H,Meng M L,Chen Y J,et al. Effects of plastic film mulching patterns and water retaining agent on photosynthetic characteristics and yield of rainfed potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2016,34(3):139-143,159 (in Chinese with English abstract).

[11] 葛均筑,李淑娅,钟新月,等. 施氮量与地膜覆盖对长江中游春玉米产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. 作物学报,2014,40(6):1081-1092.
Ge J Z,Li S Y,Zhong X Y,et al. Effects of nitrogen application and film mulching on yield performance parameters and nitrogen use efficiency of spring maize in the middle reaches of Yangtze River[J]. Acta Agronomica Sinica,2014,40(6):1081-1092 (in Chinese with English abstract).

[12] 侯海鹏,丁在松,马玮,等. 高产夏玉米产量性能特征及密度深松调控效应[J]. 作物学报,2013,39(6):1069-1077.
Hou H P,Ding Z S,Ma W,et al. Yield performance characteristics and regulation effects of plant density and sub-soiling tillage system for high yield population of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2013,39(6):1069-1077 (in Chinese with English abstract).

[13] Zhang Y Q,Wang J D,Gong S H,et al. Effects of film mulching on evapotranspiration,yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in Northeastern China[J]. Agricultural Water Management,2018,205:90-99.

[14] 孙仕军,姜浩,陈志君,等. 不同颜色地膜覆盖下春玉米主要生长性状对耕层积温的响应[J]. 草业学报,2019,28(2):61-72.
Sun S J,Jiang H,Chen Z J,et al. Effects of surface-layer accumulated temperature on major growth traits of spring maize when un-mulched or under clear or black plastic film mulches[J]. Acta Prataculturae Sinica,2019,28(2):61-72 (in Chinese with English abstract).

[15] 王传娟,张彦群,王建东,等. 东北典型区覆膜滴灌春玉米节水增产的光合生理响应[J]. 农业工程学报,2019,35(24):90-97.
Wang C J,Zhang Y Q,Wang J D,et al. Photosynthetic response of water-saving and yield-increasing of mulched drip irrigation for spring maize (*Zea mays* L.) in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(24):90-97 (in Chinese with English abstract).

[16] 周斌,李凤霞.宁夏中部干旱带玉米需水规律与节水补灌技术指标研究[J]. 宁夏农林科技,2013,54(9):1-4,8.
Zhou B,Li F X. Study on water requirement law and water-saving supplementary irrigation technology index of maize in the arid zone of central Ningxia[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology,2013,54(9):1-4,8(in Chinese with English abstract).

[17] 董姗,王皓,贾倩民,等. 灌溉模式与种植方式对河西地区青贮玉米生长、产量和经济效益的影响[J]. 草地学报,2020,28(4):1111-1120.
Dong S,Wang H,Jia Q M,et al. Effects of irrigation modes and planting patterns on the growth,yield and economic benefits of silage maize in Hexi Region[J]. Acta Agrestia Sinica,2020,28(4):1111-1120 (in Chinese with English abstract).

[18] 肖让,康永德,张永玲,等. 河西走廊制种玉米不同施肥与灌溉定额优化研究[J]. 节水灌溉,2021(12):30-37.
Xiao R,Kang Y D,Zhang Y L,et al. Optimization of different fertilization and irrigation quota for seed maize production in Hexi Corridor[J]. Water Saving Irrigation,2021(12):30-37 (in Chinese with English abstract).

[19] 惠施佳,张金霞. 不同覆盖方式和灌水定额对河西绿洲食葵农田土壤水热、养分和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(6):212-223.
Hui S J,Zhang J X. Effects of different mulching patterns and irrigation quotas on soil hydrothermal,nutrients and yield of sunflower farmland in Hexi Oasis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2022,40(6):212-223 (in Chinese with English abstract).

[20] 赵记军,于显枫,张绪成. 地膜源头减量化技术可行路径探讨[J]. 中国农学通报,2021,37(9):57-63.
Zhao J J,Yu X F,Zhang X C. The plastic film source reduction technology:feasible path discussion[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2021,37(9):57-63 (in Chinese with English abstract).

[21] 王利琴,杨建春. 水肥耦合调控对胡麻苗期光合特性的影响[J]. 农学学报,2020,10(8):19-22.
Wang L Q,Yang J C. Effect of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics of flax at seedling stage[J]. Journal of Agriculture,2020,10(8):19-22 (in Chinese with English abstract).

[22] 霍轶珍,郭彦芬,韩翠莲,等. 不同覆膜处理对土壤水热效应及春玉米产量的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(5):124-128.
Huo Y Z,Guo Y F,Han C L,et al. Effects of different film mulching treatments on soil moisture,heat and spring maize yield[J]. Research of

Soil and Water Conservation,2016,23(5):124-128 (in Chinese with English abstract).

[23] 受娜,高玮,沈禹颖,等. 不同施氮量对青贮玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 草业科学,2021,38(7):1351-1361.
Shou N,Gao W,Shen Y Y,et al. Effects of different nitrogen application rates on yield and water use efficiency of silage maize[J]. Pratacultural Science,2021,38(7):1351-1361 (in Chinese with English abstract).

[24] 王科捷. 滴灌量对玉米生长、生理特性和产量的影响[D]. 银川:宁夏大学,2023.
Wang K J. The amount of drip irrigation on maize growth,physiological characteristics and yield of influence[D]. Yinchuan:Ningxia University,2023(in Chinese with English abstract).

[25] 张丽华,徐晨,闫伟平,等. 地表覆盖对土壤水分、玉米生理特性及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报,2025,47(1):15-24.
Zhang L H,Xu C,Yan W P,et al. Effects of surface mulching on soil moisture,physiological characteristics and yield of maize[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2025,47(1):15-24 (in Chinese with English abstract).

[26] 杨恒山,张雨珊,葛选良,等. 浅埋滴灌下不同滴灌量对玉米花后碳代谢和光合氮素利用效率的影响[J]. 作物学报,2022,48(10):2614-2624.
Yang H S,Zhang Y S,Ge X L,et al. Effects of different amount of drip irrigation on carbon metabolism and photosynthetic nitrogen utilization efficiency of maize after anthesis under shallow buried drip irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica,2022,48(10):2614-2624 (in Chinese with English abstract).

[27] Ngo P T,Rumpel C,Ngo Q A,et al. Biological and chemical reactivity and phosphorus forms of buffalo manure compost,vermicompost and their mixture with biochar[J]. Bioresource Technology,2013,148:401-407.

[28] 李友军,吴金芝,黄明,等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(12):44-48.
Li Y J,Wu J Z,Huang M,et al. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2006,22(12):44-48 (in Chinese with English abstract).

[29] Ren X,Chen X,Jia Z. Effect of rainfall collecting with ridge and furrow on soil moisture and root growth of corn in semiarid northwest China[J]. Journal of Agronomy and Crop Science,2010,196(2):109-122.

[30] 杨佳鹤,何进宇,刘飞杨,等. 不同土壤水分对植物光合作用的影响研究进展[J]. 节水灌溉,2023(11):39-46.
Yang J H,He J Y,Liu F Y,et al. Research progress on effects of different soil moisture on plant photosynthesis[J]. Water Saving Irrigation,2023(11):39-46 (in Chinese with English abstract).

[31] 张勤杰. 灌溉方式及覆膜类型对玉米生长的研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
Zhang Q J. Effects of irrigation methods and film mulching types on maize growth[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2022(in Chinese with English abstract).

[32] 周辉洪. 不同覆膜方式对玉米产量的影响[J]. 特种经济动植物,2023,26(5):46-47,66.
Zhou H H. Effects of different film mulching methods on maize yield[J]. Special Economic Animals and Plants,2023,26(5):46-47,66 (in Chinese).

[33] 赵灿明. 浅埋滴灌对玉米产量及经济效益的影响[J]. 农业工程技术,2024,44(8):62-63.
Zhao C M. Effect of shallow buried drip irrigation on maize yield and economic benefit[J]. Agricultural Engineering Technology,2024,44(8):62-63 (in Chinese).

[34] 魏子涵,魏占民,李春强,等. 不同灌溉方式对玉米植株生长参数及产量的影响[J]. 水土保持研究,2017,24(3):183-187.
Wei Z H,Wei Z M,Li C Q,et al. Effects of different irrigation methods on maize plant growth parameters and yield[J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(3):183-187 (in Chinese with English abstract).

责任编辑:刘怡辰