

种植模式对旱地玉米光合特性和产量的影响

任金虎, 谢军红, 李玲玲, Lamptey Shirley, Stephen Yeboah, 张明君, 高海强
(甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为进一步优化陇中半干旱区玉米高产栽培技术, 提高有限水土资源利用效率, 2014—2015 年采用田间试验, 研究了玉米马铃薯间作和单作下全膜沟垄作、全膜平作和露地平作对玉米抽雄期光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 及子粒产量的影响。结果表明: (1) 不同种植模式下玉米抽雄期叶片 P_n 和 Tr 的日变化均呈先升后降的单峰曲线, 峰值出现在中午 12:00 左右, 全膜沟垄作高于平作和露地, 间作高于单作; 全膜沟垄作玉米间作马铃薯下的玉米 P_n 、 Tr 和 G_s 均最高。(2) 全膜沟垄作、全膜平作和露地平作的玉米间作马铃薯, 土地当量比 (LER) 均大于 1, 以全膜沟垄作玉米间作马铃薯优势最为突出, 其间作下玉米子粒产量为 $5\,451.35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较露地间作提高了 66.00%, 特别是在降水量偏少的年份, 增产效果更明显。因此, 在陇中雨养农业区进一步提高玉米产量和水土资源利用效率, 引入间作是可行的, 全膜沟垄作玉米间作马铃薯是较佳的种植模式。

关键词: 玉米 || 马铃薯; 光合特性; 作物产量; 土地当量比 (LER)
中图分类号: S344.2; S513 **文献标志码:** A

Effects of planting patterns on photosynthetic pharacteristics
and grain yield of maize in dryland

REN Jin-hu, XIE Jun-hong, LI Ling-ling, Lamptey Shirley, Stephen Yeboah, ZHANG Ming-jun, GAO Hai-qiang
(Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Agronomy College of Gansu Agriculture University,
Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to further optimize the high-yielding cultivation techniques of maize in semi-arid region of Central Gansu Province and improve the efficiency of limited water and soil resources, the field experiment was conducted for studying the effects of photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and grain yield of maize in maize-potato intercropping and monoculture under double ridges and furrow with plastic-film mulching, flat planting with plastic-film mulching and flat planting without mulching from 2014 to 2015. The results showed that: (1) The diurnal variation of P_n and Tr in the maize tasseling stage under different planting patterns showed a single peak and then descended, and the peak appeared at about 12:00 pm. The P_n and Tr of double ridges and furrow with plastic-film mulching was higher than that of the flat planting with plastic-film mulching and flat planting without mulching, also the P_n and Tr of intercropping was higher than that of monoculture. And P_n , Tr and G_s of maize were the highest under double ridges and furrow with plastic-film mulching in the maize-potato intercropped. (2) The LER of maize-potato intercropped was more than 1, and the grain yield of maize was $5\,451.35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ under double ridges and furrow with plastic-film mulching in the maize-potato intercropped, compared with intercropping under flat planting without mulching increased by 66.00%, especially in the years of low rainfall, the yield effect is more obvious. Therefore, the maize-potato intercropped planting patterns are feasible to further improve the yield of maize and the efficiency of water and soil in the rain-fed agricultural region of Central Gansu Province, and the maize-potato intercropped under double ridges and furrow with plastic-film mulching is a better planting pattern.

Keywords: maize-potato intercropped; photosynthetic characteristics; crop yield; LER

收稿日期:2016-06-17 修回日期:2016-10-24
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB722902);国家科技支撑计划项目(2015BAD22B04-03)
作者简介:任金虎(1991—),男,甘肃灵台人,硕士研究生,研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: renjinhu0310@qq.com。
通信作者:李玲玲(1977—),女,博士,教授,主要从事旱地与绿洲农作制。E-mail: lill@gsau.edu.cn。

甘肃省地处黄土高原中部,是典型的旱作农业区,全省现有旱地面积 239.06 万 hm^2 , 占耕地面积的 70%, 旱作农业对全省农业经济发展具有重要贡献。但长期以来,水资源短缺、耕地面积有限、水资源利用率低下是制约该区农业发展的主要因素^[1-5]。全膜沟垄作栽培技术是一项有效的旱作农业技术,能有效地提高降水利用率和利用效率^[6-8], 解决玉米等作物因春旱无法播种和出苗的问题,最终达到增产目的^[9-10],已成为旱地农作物高产栽培的突破性技术。但是在甘肃中部地区,一直以来以单作一熟制为主,对土地和水热等自然资源利用率低,不能使经济效益最大化,造成资源浪费。

间套作在农业生产中历史久远,为解决世界人口的温饱问题做出了重要贡献。合理的间套作不仅能高效地利用水、热等自然资源^[11], 而且还能提高单位耕地面积的产量、土壤肥力,减弱水土流失,增强农业系统的抗风险能力,是一种增强农田生态系统多样性的重要措施^[12-15]。在间套作种植体系中,玉米处于非常重要的地位。在玉米与低矮作物间套作体系中,全田群体结构高矮相错,形成的伞状群体结构使玉米受光条件得到改善,会对功能叶片的叶绿素含量、蒸腾速率、气孔导度和光合速率等光合特性产生影响^[16-18]。Simmons 等^[19]研究表明,玉米关键生育期的光合作用对产量形成有决定作用。然而,在陇中半干旱雨养农业区,对间作体系却鲜有探索和报道,为此,本研究选择目前在该区域大面积应用的玉米全膜沟垄作技术,组配主导作物马铃薯进行间作,研究间作和不同覆膜方式对玉米关键生育期光合特性和产量的影响,探讨在陇中雨养农业区应用间作模式提高玉米产量和土地资源利用效率的可行性,旨在为该区玉米高产栽培技术提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

2014—2015 年在陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西市李家堡镇设置试验。试区属中温带偏旱区,日照时数 2 476.6 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温可达 2 239.1 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期 140 d。多年平均降水 390.9 mm, 年蒸发量 1 531 mm, 干燥度 2.53, 为典型的一年一熟雨养农业区,农田土壤为黄绵土,土层深厚,质地较均匀,贮水性能良好; $0\sim 200\text{ cm}$ 土壤容重平均为 $1.17\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 凋萎含水率 7.3%, 饱和含水率 21.9%, pH 8.36, 土壤有机质 $12.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷 $1.77\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

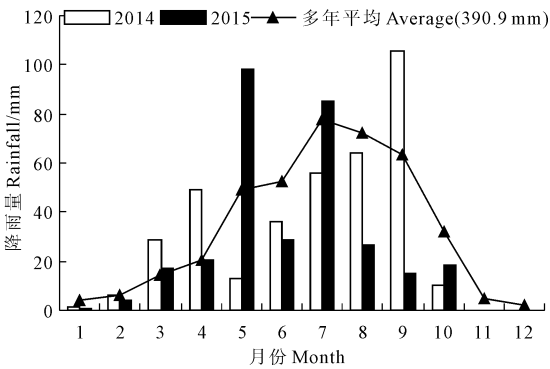


图 1 2014 年和 2015 年试区月降水分布
Fig.1 Monthly precipitation distribution of 2014 and 2015 in the test area

1.2 试验设计

试验设玉米间作马铃薯、玉米单作、马铃薯单作三种植模式,间作和单作玉米均有全膜沟垄作、全膜平作、露地平作三种覆膜方式,所有马铃薯均采用露地平作,共 7 个处理:全膜沟垄作玉米间作马铃薯(M1P)、全膜平作玉米间作马铃薯(M2P)、露地平作玉米间作马铃薯(M3P)、全膜沟垄作玉米单作(M1)、全膜平作玉米单作(M2)、露地平作玉米单作(M3)、露地平作马铃薯单作(P),3 次重复,共 21 个小区,随机区组排列。马铃薯密度为 $52\,500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 行距为 40 cm, 带宽为 1.1 m, 每带种 3 行;单作玉米密度为 $52\,500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 采用宽(70 cm)窄(40 cm)行种植,行宽为 40:70,间作玉米密度为 $26\,250\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 带宽为 1.1 m, 每带种 2 行,行距为 40 cm, 株距 24 cm, 小区面积 $44\text{ m}^2(4.4\text{ m}\times 10\text{ m})$ 。玉米基施 N $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{ }150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 马铃薯基施 N $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{ }150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。供试马铃薯品种“费乌瑞”,2014 年于 4 月 10 日播种,10 月 1 日收获;2015 年于 4 月 16 日播种,10 月 7 日收获;玉米为“富农 821”,2014 年于 4 月 20 日播种,10 月 13 日收获,2015 年于 4 月 23 日播种,10 月 7 日收获,同种作物在单作和间作模式中的播种、收获时间相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片光合参数 在玉米抽雄期,选择晴朗天气,用 GFS-3000 便携式光合作用-荧光测量系统测定玉米单叶叶片光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s),测定部位为穗位叶。各测定项目重复 3 次,从早晨 9:00 开始每隔 2 h 测定 1 次,共测定 5 次。

1.3.2 间套作优势确定 土地当量比(land equivalent ratio, LER)参照 Al-Dalain 的方法^[14],计算公式为:

$$LER = LERs(\text{potato}) + LERs(\text{maize})$$
$$LERs = YP/YM$$

式中, $LERs(\text{potato})$ 、 $LERs(\text{maize})$ 分别为马铃薯和玉米的相对土地当量比, YP 为套作作物产量, YM 为单作作物产量。 $LER > 1$, 表明套作具有优势, $LER < 1$, 表明套作具有劣势^[14,20]。

1.3.3 产量构成因素测定 在玉米成熟后, 每小区随机取 10 株植株, 考种记录果穗数、穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重、单株粒重, 产量按小区剔除边行后单收计产。

1.4 试验数据处理

数据采用 Excel 2003 处理, 运用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和显著性检验。其中, 显著性检验方法为 Duncan 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对玉米间作马铃薯体系玉米光合特性的影响

2.1.1 光合速率 (P_n) 不同处理下玉米抽雄期光合速率的日变化呈先升后降的趋势(图 2)。从上午 9:00 开始升高, 在 12:00 左右达到峰值。此时, 间作较单作分别提高了 9.51%、8.08% 和 2.61%, 全膜沟垄作较全膜平作、露地平作分别提高了 9.51% 和 4.18%。随后温度升高, 光合有效辐射增大, 玉米叶片失水速度加快, 为了防止水分亏缺, 植株内部进行自我调节, 出现了光合午休现象。在 16:00 左右光合午休现象结束, 光合速率有所回升, 18:00 左右由于温度、胞间 CO_2 浓度、气孔导度降低, 光合速率下降。不同处理光合速率的日表现为: $\text{M1P} > \text{M1} > \text{M2P} > \text{M2} > \text{M3P} > \text{M3}$, M1P 较其它处理, 分别提高了 14.48%、17.89%、19.48%、49.12%、67.36%。主要原因是露地栽培下的土壤水分亏缺严重, 玉米植株长势弱, 气孔开度减小, 从而影响了光合作用, 使得光合速率较低。方差分析显示, M1P 与 M3 和 M3P 处理差异达到了显著水平 ($P < 0.05$), 与其它处理差异不明显。

2.1.2 蒸腾速率 (Tr) 不同处理下玉米抽雄期蒸腾速率的日变化呈双峰曲线(图 3)。在 12:00 和 16:00 左右形成峰值, 14:00 左右形成低谷。12:00 左右叶片蒸腾速率达到了一天的最大值。此时, 间作较单作分别提高了 7.00%、2.30% 和 13.91%, 全膜沟垄作较全膜平作、露地平作分别提高了 9.92% 和 76.1%。不同处理蒸腾速率的日表现为: $\text{M1P} > \text{M1} > \text{M2P} > \text{M2} > \text{M3P} > \text{M3}$, M1P 较其它处理, 分别提高了 10.45%、14.93%、16.61%、50.22%、

52.47%。经方差分析, 处理间日蒸腾速率 M1P 与 M3 和 M3P 差异达到了显著水平 ($P < 0.05$), 与其它处理差异不明显。

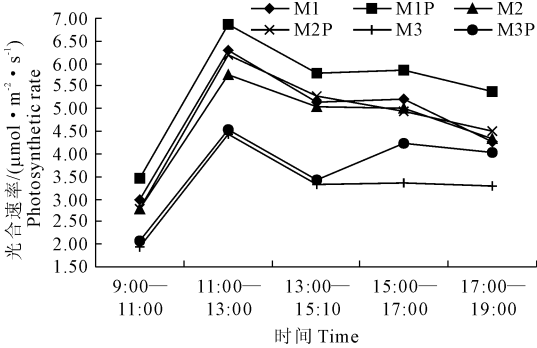


图 2 不同处理下玉米叶片光合速率的日变化

Fig.2 Diurnal changes of photosynthetic rate of maize under different treatments

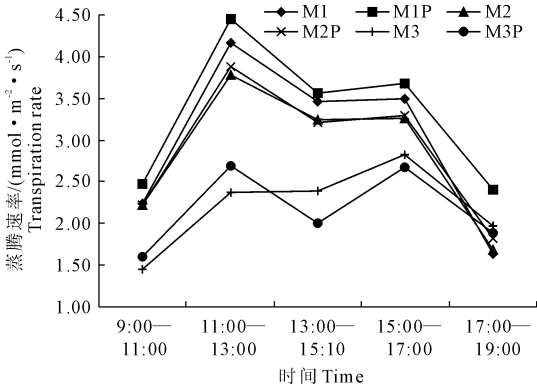


图 3 不同处理下玉米叶片蒸腾速率的日变化

Fig.3 Diurnal changes of transpiration rate of maize under different treatments

2.1.3 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 可以作为光合速率变化的主要判断依据。一般认为气孔关闭, 光合原料 CO_2 供应不畅, 胞间 CO_2 浓度降低, 光合速率下降; 而胞间 CO_2 浓度升高, 光合速率反而降低, 主要原因是光抑制使叶绿体光合效率下降。当光合速率减弱时, 对 CO_2 的利用能力也会降低, 从而导致细胞间隙 CO_2 浓度的提高。图 4 表示不同处理下细胞间 CO_2 浓度的日变化趋势, 可以看出各处理下细胞间 CO_2 浓度从上午 9:00 左右开始迅速下降, 12:00 至 19:00 之间处于较低水平, 且有下降趋势, 主要原因是叶片的光合速率(图 2)从 9:00 开始一直升高, 并且长时间处于高光合状态, 叶片光合速率高, 同化 CO_2 能力强, 加之气孔导度变化, CO_2 补充不及时而明显降低。不同处理胞间 CO_2 浓度的日变化表现为: $\text{M2} > \text{M1P} > \text{M2P} > \text{M1} > \text{M3P} > \text{M3}$, M2 较其它处理, 分别提高了 1.98%、

5.07%、9.83%、13.08%、13.30%。经方差分析,M2 与 M3 和 M3P 处理差异达到了显著水平 ($P < 0.05$),与其它处理差异不明显。

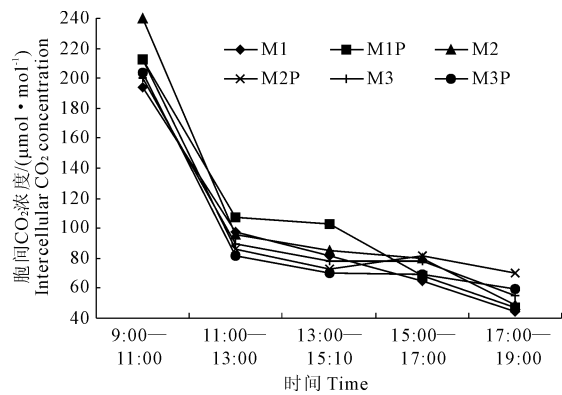


图 4 不同处理下玉米叶片胞间 CO₂ 浓度的日变化

Fig.4 Diurnal changes of intercellular CO₂ concentration of maize under different treatments

2.1.4 气孔导度(G_s) 气孔导度反映了叶片蒸腾失水的情况和气孔对干旱的敏感性,在自然条件下,气孔导度直接影响蒸腾速率。不同种植模式下玉米叶片气孔导度的日变化呈先升后降的趋势(图 5),这与光合速率、蒸腾速率的日变化相一致。不同处理的气孔导度日变化表现为 $M1P > M2P > M1 > M2 > M3P > M3$ 。M1P 较其它处理,分别提高了 5.65%、6.14%、10.16%、20.28%、28.74%。露地玉米单作处理下叶片气孔导度最低,对于旱变得最为敏感,并且在各时刻低于其它处理,可能是由于水分亏缺的影响。经方差分析,各处理间差异不显著($P > 0.05$)。

2.1.5 玉米功能叶片光合特性的相关性分析 由表 1 可知,光合速率与蒸腾速率($r = 0.788^*$)、胞间 CO₂ 浓度($r = 0.821^*$)达到显著水平,与气孔导度达

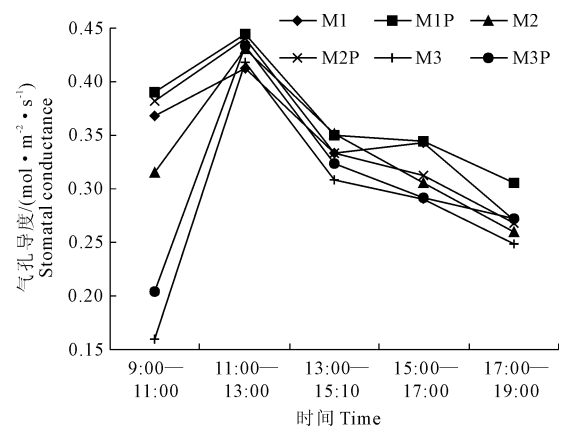


图 5 不同处理下玉米叶片气孔导度的日变化

Fig.5 Diurnal changes of stomatal conductance of maize under different treatments

到极显著水平($r = 0.931^{**}$);蒸腾速率与气孔导度达到极显著水平($r = 0.964^{**}$),与胞间 CO₂ 浓度未达到显著水平;胞间 CO₂ 浓度与气孔导度达到显著水平($r = 0.782^*$)。由此可见,光合速率受到蒸腾速率和胞间 CO₂ 的影响,叶片气孔导度对蒸腾速率和光合速率的影响明显,对胞间 CO₂ 浓度也有一定影响。

表 1 玉米光合特性的相关分析				
Table 1 Correlation analysis among photosynthetic characteristics of maize				
项目 Item	光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	胞间二氧化碳 碳浓度 C_i	气孔导度 G_s
光合速率 P_n	1.000	0.788 [*]	0.821 [*]	0.931 ^{**}
蒸腾速率 T_r	—	1.000	0.549	0.964 ^{**}
胞间二氧化碳浓度 C_i	—	—	1.000	0.782 [*]
气孔导度 G_s	—	—	—	1.000

注: * 表示 $P < 0.05$ 水平上显著相关; * * 表示 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

Note: * significant at $P < 0.05$; * * significant at $P < 0.01$.

2.2 不同种植模式对玉米产量的影响

2.2.1 不同种植模式对玉米产量构成的影响 从表 2 可以看出,间作可以提高玉米单株子粒产量,较单作分别提高了 6.34%、5.82% 和 2.96%;全膜沟垄作较全膜平作、露地平作分别提高了 12.92% 和 63.42%。M1P 处理下玉米的双穗率最高,达到了 70.10%,单株子粒产量也最高,且与露地平作达到了显著水平($P < 0.05$),表现为: $M1P > M1 > M2P > M2 > M3P > M3$,较其它处理分别提高了 6.34%、12.92%、19.78%、66.03%、63.42%。但由于品种自身因素和生长环境等的影响,穗长、穗粗、行粒数、穗行数、百粒重与产量表现略不一致。

2.2.2 间作对玉米产量及土地当量比的影响 由表 3 可以看出,2014 和 2015 年玉米间作马铃薯种植,土地当量比均大于 1,说明在陇中半干旱区玉米间作马铃薯相对于玉米单作有间作优势。在本试验中,玉米、马铃薯各占间作土地的比例为 50%,因此当间作作物产量超过单作一半时,说明间作具有增产效益^[21]。三种间作模式下玉米产量均超过单作的一半,都具有增产效益。在三种间作模式中,相对于 M3P,2014 年 M1P 模式下玉米增产 67.78%, M2P 模式下增产 38.57%;2015 年 M1P 模式下玉米增产 64.22%, M2P 模式下增产 54.59%。两年的产量数据表明, MIP 增产效果最好。显著性比较发现,无论是间作或单作,全膜沟垄作与露地平作均达到了显著水平($P < 0.05$)。

表 2 不同种植模式对玉米产量构成因素的影响

Table 2 Effects of different cropping patterns on the yield components of maize

处理 Treatment	双穗率 Double ear rate /%	穗长 Ear length /cm	穗粗 Ear diameter /cm	穗行数 Number of lines per ear	行粒数 Number of kernels per line	百粒重 Weight of 100-kernel /g	单株子粒产量 Kernel yield per plant /(g·plant ⁻¹)
M1	46.7	21.6a	5.2a	14.3a	35.4a	51.2a	195.3a
M1P	70.1	20.3a	5.2a	13.8a	34.6ab	55.2a	207.7a
M2	46.7	20.9a	5.2a	14.6a	34.3ab	53.9a	173.4ab
M2P	56.7	21.0a	5.3a	14.5a	33.7ab	50.2a	183.5ab
M3	33.3	21.4a	5.2a	14.3a	32.2b	49.8a	121.5b
M3P	40.0	21.0a	5.2a	14.5a	34.6ab	52.6a	125.1b

注:同列数据中不同小写字母表示 P<5% 水平上差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same as below.

表 3 不同种植模式对玉米间作马铃薯体系作物产量及土地当量比的影响

Table 3 Effects of different cropping patterns on yield of maize-potato intercropping system and LER

年份 Year	种植模式 Planting pattern	处理 Treatment	作物产量/(kg·hm ⁻²) Crop yield		总产量 Total crop yield /(kg·hm ⁻²)	土地当量比 LER
			玉米 Maize	马铃薯 Potato		
2014	间作 Intercropping	M1P	5450.7b	7920.9b	13371.6	1.11
		M2P	4501.9bc	6773.1b	11275.0	1.06
		M3P	3248.9c	7216.3b	10465.2	1.03
	单作 Monocropping	M1	10431.0a	—		
		M2	8653.9a	—		
		M3	6349.5b	—		
		P	—	13800.0a		
2015	间作 Intercropping	M1P	5452.0cd	4901.5b	10323.5	1.12
		M2P	5132.3cd	4662.9b	9795.2	1.09
		M3P	3319.9d	4237.9b	7357.8	1.02
	单作 Monocropping	M1	10070.7a	—		
		M2	9558.3ab	—		
		M3	6405.4bc	—		
		P	—	8458.3a		

3 讨 论

在我国西北部的黄土高原地区,干旱缺水一直是制约农业发展的主要因子,土壤水分不足引起作物气孔导度降低,CO₂ 吸收受阻,降低了叶片光合速率,减弱了蒸腾作用,使叶片水分损失减少,从而影响叶片水平水分利用效率^[16,18]。本研究探讨了不同种植模式下玉米叶片光合特性及产量的变化。全膜沟垄作玉米马铃薯间作与其它模式相比,明显改善了旱地玉米的光合特性,可能是由于覆膜为旱地玉米提供适宜的生长小环境^[9,15,22-23],沟垄作改善了土壤的供水和玉米植株的吸水,叶片气孔导度增大,有利于气体的交换^[7,24]。同时,间作改变了群体通风和透光率,形成的伞状群体结构使玉米受光条

件得到改善,因而影响了旱地玉米光合速率、蒸腾速率和气孔导度。

本研究中三种间作模式下 LER 均大于 1,其中全膜沟垄作玉米间作马铃薯模式下玉米子粒产量最高,较露地平作玉米间作马铃薯平均高出 66.00%,增产效果最好,这与他人的研究结果基本一致^[8-9]。这可能主要是由于 M1P 模式提高了冠层透光率和通风状况,降低了叶温,提高光合速率,最终更加有效地利用了农田的光和水资源,达到高产高效的目的。相关分析表明,光合速率与蒸腾速率、胞间 CO₂ 显著相关,与气孔导度极显著相关;蒸腾速率与气孔导度极显著相关,与胞间 CO₂ 浓度不相关;胞间 CO₂ 浓度与气孔导度显著相关,这一结果与方彦杰^[9]关于旱地全膜沟垄作播玉米光合生理的研究结果略有

不一。对于旱地玉米抽雄期光合特性的研究发现,M1P 种植模式提高了玉米叶片的光合速率、蒸腾速率和气孔导度,这与高玉红等^[16]关于旱地玉米的研究结果一致。

4 结 论

不同种植模式下玉米关键生育期叶片合速率和蒸腾速率的日变化均呈先升后降的单峰曲线,峰值出现在中午 12:00 左右,全膜沟垄作高于平作和露地,间作高于单作,其中,全膜沟垄作玉米间作马铃薯模式下玉米叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度均最高。与露地平作玉米间作马铃薯相比,全膜沟垄作玉米间作马铃薯模式下玉米子粒产量平均提高了 66.00%,在三种间作模式中,增产效果最好,特别是在降水量偏少的年份,覆膜减少了土壤水分蒸散,沟垄作改善了土壤供水能力,而间作增加了作物的水分利用效率,增产效果更明显。但是,不同覆膜方式下玉米间作马铃薯势必会引起水分差异,而这种差异对玉米和马铃薯产量的形成将会产生多大影响,本研究并未涉及,尤其是水分特征,这是旱作农业生产实践中的关键,在后续研究中,还应从水分运移、耗水特征等方面开展研究。

因此,在该区采用全膜沟垄作玉米间作马铃薯更有利于提高光能利用率,实现土地资源的高效利用,是我国陇中地区提高玉米产量较佳的种植模式。

参 考 文 献:

[1] 陈少勇,郭玉珍,郑延祥,等.甘肃旱作农业区降水对土壤水分的影响[J].中国沙漠,2012,32(1):155-162.

[2] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等.保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J].生态学报,2006,26(4):1176-1185.

[3] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等.不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J].生态学报,2005,25(9):2326-2332.

[4] Fu B J. Soil erosion and its control on the loess plateau of China[J]. Soil Use and Management, 1989,5(2):76-82.

[5] Li L L, Huang G B. Benefits of conservation agriculture on soil and water conservation and its progress in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011,10(6):850-859.

[6] 刘广才,杨祁峰,李来祥,等.旱地玉米全膜双垄沟播技术土壤

水分效应研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):19-28.

[7] 黄高宝,方彦杰,李玲玲,等.旱地全膜双垄沟播玉米高效用水机制研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):116-121.

[8] 李来祥,刘广才,杨祁峰,等.甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应用进展[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):114-118.

[9] 方彦杰.旱地全膜双垄沟播玉米土壤水温光合生理及产量表现研究[D].兰州:甘肃农业大学,2010.

[10] 张雷,牛芬菊,李小燕.旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响[J].中国农学通报,2010,26(22):142-145.

[11] 刘英超,汤丽,郑毅.玉米马铃薯间作作物的土壤水分利用效率的研究[J].云南农业大学学报,2013,28(6):841-877.

[12] 胡应锋,王余明,王西瑶.马铃薯大豆间作模式效益分析[J].中国农学通报,2009,25(4):111-114.

[13] 董宛麟,张立祯,于洋,等.向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J].农业工程学报,2012,28(18):127-133.

[14] Al - Dalain S A. Effect of intercropping of zea maize with potato *Solanum tuberosum* L. on potato growth and on the productivity and land equivalent ratio of potato and zea maize[J]. Agricultural Journal, 2009,4(3):164-170.

[15] Zhang L Z, Vander Werf W, Zhang S P, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2007,103(3):178-188.

[16] 高玉红,牛俊义,徐锐,等.不同覆膜方式对玉米叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响[J].草业学报,2012,21(5):178-184.

[17] 焦念元,付国占,宁堂原,等.玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J].生态学报,2013,33(14):4325-4330.

[18] 张文丽,张彤,吴冬秀,等.土壤逐渐干旱下玉米幼苗光合速率与蒸腾速率变化的研究[J].中国生态农业学报,2006,14(2):72-75.

[19] Simmons S R, Jones R J. Contributions of pre-silking assimilate to grain yield on maize[J]. Crop Science, 1985,25(6):1004-1006.

[20] Connolly J, Goma H C, Rahim K. The information content of indicators in intercropping research[J]. Agriculture ecosystems and environment, 2001,87(2):191-207.

[21] 殷文,柴强,胡发龙.少耕轮作小麦间作玉米的产量表现和水分利用效率[J].西北农业学报,2013,22(6):47-52.

[22] Ndubuisi M C. Physical properties of an ultisol under plastic film and no-mulches and their effect on the yield of maize[J]. Journal of American Science, 2009,5(5):25-30.

[23] 王红丽,张绪成,宋尚有,等.西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J].中国农业科学,2013,46(5):917-926.

[24] 孙玉莲,边学军,黄成秀,等.全膜双垄沟播对旱区玉米田土壤水分和温度的影响[J].中国农业气象,2014,35(5):511-515.