

不同栽培模式下半干旱区玉米籽粒形成和叶片对光与 CO₂ 响应特性

徐晨¹, 张丽华¹, 赵洪祥¹, 闫伟平¹, 刘晓龙², 孙宁¹,
李斐¹, 谭国波¹, 李前¹, 边少锋¹, 张治安³

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林 长春 130033; 2. 宜春学院生命科学与资源环境学院, 江西 宜春 336000;
3. 吉林农业大学农学院, 吉林 长春 130118)

摘要:为探究半干旱区优化栽培模式下玉米籽粒形成及叶片对光与 CO₂ 的响应机制, 进行 2 a 的大田试验, 设置对照模式(CK)、农户习惯模式(T1)和优化栽培模式(T2)3种栽培模式, 研究不同栽培模式对玉米籽粒灌浆特性、产量形成、叶片光合响应曲线及相关参数的影响。结果表明:T2处理在吐丝后各生育阶段的百粒质量和平均灌浆速率均显著高于T1和CK处理, 与CK和T1处理相比, T2处理的2 a 平均灌浆速率分别增加了31.58%、18.00%和30.77%、9.80%, T2处理的灌浆速率在吐丝后20~30 d达到最大值, 并显著高于T1和CK处理, 与CK和T1处理相比, 2 a 分别增加33.91%、10.04%和26.28%、14.99%; T2处理的产量显著高于T1和CK处理, 与T1处理相比, 2 a 分别增加了15.67%和14.03%; 3个处理玉米叶片的净光合速率随光照强度增加而增加, 当光量子密度超过300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, T2处理的净光合速率要显著高于T1与CK处理; 随着生育时期的推进, T2处理的光补偿点量子效率(AQE)显著高于T1与CK处理, 在灌浆期(R3)降至3个生育时期(V12、R1、R3)间的最低值; T2处理的光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)均显著高于T1与CK处理, T2处理LSP与LCP的差值均为最大, 2 a 3个生育时期(V12、R1、R3)分别达到1 871.6、1 914.4、1 891.9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 和1 909.7、1 848.6、1822.4 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; CO₂补偿点(CCP)、CO₂饱和点(CSP)、CO₂饱和时最大净光合速率(GSP_m)和羧化效率(CE)均呈T2>T1>CK, T1与T2处理的CCP均显著高于CK处理, T2处理的CSP均显著高于T1与CK处理, T2处理CSP与CCP的差值更大, 2 a 3个生育时期(V12、R1、R3)分别达到540.06、558.87、561.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 和539.13、518.54、574.73 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; T2处理的CE在R1和R3期均显著高于T1和CK处理; T1与T2处理的Rubisco最大羧化效率(V_{max})、最大电子传递速率(J_{max})和磷酸丙糖利用率(TPU)均显著高于CK处理。综上所述, 优化栽培模式(T2处理)可维持叶片的光合作用能力, 促进玉米利用弱光进行光合作用, 增加玉米对光和CO₂的适应范围, 从而增加光合产物的转运能力和叶片的固碳羧化能力, 促进籽粒灌浆, 减少资源利用的同时实现玉米产量提高, 适合在吉林省西部半干旱区进行推广应用。

关键词:玉米; 栽培模式; 籽粒灌浆; 光合响应参数; 半干旱区

中图分类号:S513 文献标志码:A

Characteristics of grain formation and leaf response to light and CO₂ in semi-arid region under different cultivation patterns

XU Chen¹, ZHANG Lihua¹, ZHAO Hongxiang¹, YAN Weiping¹, LIU Xiaolong²,
SUN Ning¹, LI Fei¹, TAN Guobo¹, LI Qian¹, BIAN Shaofeng¹, ZHANG Zhian³

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;
2. College of Life Sciences, Resources and Environment Sciences, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China;
3. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: In order to explore the response mechanism of maize grain formation and leaf to light and CO₂ under optimized cultivation pattern in semi-arid area, a two-year field experiment was conducted to study the effects of dif-

收稿日期:2021-04-21

修回日期:2021-05-18

基金项目:吉林省农业科技创新工程项目博士后基金(CXGC2021RCB002);吉林省农业科技创新工程项目人才基金(CXGC2020RCG009);
国家重点研发计划项目(2018YFD0300205, 2017YFD0300605);财政部和农业农村部;国家现代农业产业技术体系(CARS-02-42)

作者简介:徐晨(1987-),男,吉林长春人,博士,助理研究员,研究方向为作物高效用水理论与技术。E-mail: 497836232@qq.com

通信作者:边少锋(1963-),男,吉林长春人,研究员,主要从事作物旱作节水栽培技术研究。E-mail: bsf8257888@sina.com

张治安(1964-),男,吉林长春人,教授,主要从事作物生理生态研究。E-mail: zhangzhian6412@163.com

ferent cultivation patterns on grain filling characteristics, yield formation, leaf photosynthetic response curve and related parameters of maize. The results showed that the 100-grain weight and average grain filling rate of T2 treatment were significantly higher than those of T1 and CK treatments at each growth stage after silking. The average filling rate of T2 treatment increased by 31.58%, 18.00% and 30.77%, 9.80% respectively compared with CK and T1 treatments. The grain filling rate of T2 treatment reached the maximum at 20~30 days after silking, which was significantly higher than that of T1 and CK treatments and increased by 33.91%, 10.04% and 26.28% and 14.99% in 2017 and 2018 compared with CK and T1 treatments. The yield of T2 treatment was significantly higher than that of T1 and CK treatments, and increased by 15.67% and 14.03% respectively compared with T1 treatment. The net photosynthetic rate of maize leaves of three treatments increased rapidly with the increase of light intensity $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The net photosynthetic rate of T2 treatment was significantly higher than that of T1 and CK. The quantum efficiency of optical compensation dots (*AQE*) of T2 treatment was significantly higher than that of T1 and CK treatment, and decreased to the lowest value among the three growth stages (V12, R1 and R3) at filling stage (R3) with the development of growth stage. The light compensation point (*LCP*) and light saturation point (*LSP*) of T2 treatment were significantly higher than those of T1 and CK treatments, and the difference between *LSP* and *LCP* of T2 treatment was the largest, reaching 1 871.6, 1 914.4, 1 891.9, 1 909.7, 1 848.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and 1 822.4 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at three growth periods (V12, R1 and R3) in 2017 and 2018. The CO_2 compensation point (*CCP*), CO_2 saturation point (*CSP*), maximum net photosynthetic rate (*CSP_n*) and carboxylation efficiency (*CE*) were T2>T1>CK. The *CCP* of T1 and T2 treatments were significantly higher than that of CK. The *CSP* of T2 treatment was significantly higher than that of T1 and CK, and the difference between *CSP* and *CCP* of T2 treatment was the largest, reaching 540.06, 558.87, 561.19, 539.13, 518.54 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ and 574.73 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ at three growth periods (V12, R1 and R3) in 2017 and 2018. The *CE* of T2 treatment was significantly higher than that of T1 and CK treatments at R1 and R3 stages. The maximum carboxylation efficiency (*V_{cmax}*), maximum electron transfer rate (*J_{max}*) and triose phosphate utilization (*TPU*) of Rubisco of T1 and T2 treatments were significantly higher than those of CK treatment. In conclusion, the optimized cultivation pattern (T2 treatment) maintained the photosynthetic capacity of leaves, promoted the use of weak light for photosynthesis, and increased the adaptability of maize to light and CO_2 . Thus, T2 treatment enhanced the transport capacity of photosynthetic products and carbon fixation and carboxylation capacity of leaves, promoted grain filling, and improved the efficiency of resource utilization and maize yield. It is suitable for popularization and application in the semi-arid area of Western Jilin Province.

Keywords: maize; cultivation pattern; grain filling; photosynthetic response parameters; semi-arid region

玉米是我国重要的粮食作物^[1],吉林省作为我国玉米的主产省之一,玉米产量的稳定提升对吉林省乃至国家的粮食安全稳定和经济快速发展具有重要意义。吉林省半干旱区多分布于吉林省西部,干旱影响着这一地区玉米的生长发育^[2]。近年来,随着许多耐旱玉米品种的推广种植,这一地区玉米的产量在逐年稳定增加,但仍具有一定的生产潜力^[3]。肥料与水是保证半干旱区玉米生长发育的重要因素,也是玉米产量形成的基础^[4]。玉米生产中,各种种植区域的玉米所处的环境各不相同,农户会根据当地气候环境形成一套固有的栽培模式,对玉米生产具有一定意义,但随着栽培技术模式的改进,某些地区利用固有栽培模式的作物产量、资源利用和经济效益之间的协同性不高,故研究适宜地

区优化栽培模式是非常重要的。

玉米籽粒质量是产量构成中的关键因素,较大程度地影响着玉米产量的稳定提升^[5],在半干旱地区,土壤水分亏缺对玉米籽粒的影响主要体现在籽粒成分、淀粉含量和籽粒质量的变化,并最终会对籽粒形成造成影响^[6]。土壤水分充足条件下适当增加肥料施用量可有效提高玉米的籽粒质量、籽粒灌浆速率和群体光合利用效率^[7],但当施肥量过大时,易遭受倒伏和病虫害,影响玉米的正常生长发育,进而导致玉米籽粒产量下降^[8]。不合理施肥同样会造成土壤水分污染,影响地下水和大气环境。因此,研究半干旱区土壤水分和肥料施用量之间的互作关系就变得尤为重要。光合作用是影响作物生长发育的重要因素,作物叶片进行光合作用能力

一方面取决于作物品种的遗传特性,另一方面则取决于作物所处的生态环境和栽培模式^[9]。在干旱条件下玉米叶片的光合作用会受到抑制,其原因主要是来源于气孔性和非气孔性因素的共同限制^[10],通过合理施肥与灌溉可以维持玉米叶片的生理代谢并改善玉米叶片叶绿素含量,并使玉米叶片维持较高的光合作用能力^[11]。通过测定植物叶片的光响应曲线,有助于探查植物叶片净光合速率与光量子密度之间的关系,并可计算获得对作物生理代谢有重要影响的响应曲线参数,该参数主要用于研究作物的生理进程和作物应对不同环境的响应机制^[12]。Yadav等^[13]研究发现,适宜的土壤水分和肥料施用量与作物的叶面积和叶片光吸收特性显著正相关,同时也会降低冠层的温度,提高核酮糖二磷酸羧化酶的活性和叶片的净光合速率。同时,还可以显著增加光系统II反应中心的电子供体和受体性质^[14],保持田间适宜作物生长的气候环境,可显著提高最大电子传输能力和Rubisco的羧化能力^[15]。CO₂响应曲线是判断植物光合能力的有效方法之一,反映了植物光合速率随CO₂浓度变化的响应特征。过高或过低的土壤水分均会对玉米的光合作用造成影响,玉米生长发育对CO₂的响应随土壤水分的变化而变化,气孔导度会随CO₂浓度的增加而降低。

吉林省西部半干旱区玉米的种植方式较为粗放,灌溉存在着单次灌溉量大、灌溉次数少和灌溉方式落后等问题,同时,农民通过增加肥料施用量来提高玉米的产量。有学者曾对吉林省玉米在不同栽培因素的协同性上进行了产量和植株养分方面的研究^[16-17],但关于半干旱区玉米不同栽培模式下籽粒形成和叶片对光与CO₂响应研究并不多见。本研究以吉林省西部半干旱区常规种植的玉米品种(华农887)为试验材料,对当地传统农户模式与优化栽培模式进行对比分析,研究不同栽培模式对玉米籽粒灌浆特性、叶片光合响应曲线及相关参数和产量形成的影响,探寻优化栽培模式与传统农户模式之间玉米籽粒形成和叶片对光合CO₂的响应机制变化,以期为提高吉林省西部半干旱区玉米生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验2017—2018年在吉林省洮南市的中国东北早熟组玉米品种区域试验站(东经122.49°,北纬45.20°)进行,该站年均日照时数为3000h,无霜期

约134d,海拔157m,属北温带大陆性季风气候,2017年和2018年≥10℃的有效积温分别为3296.8℃和3255.7℃,玉米全生育期的日均气温分别为20.52℃和20.17℃,全生育期降水量分别为197.7mm和247.1mm,试验地土壤为淡黑钙土,试验实施时0~20cm土壤体积质量为1.48g·cm⁻³,土壤有机质含量为12.57g·kg⁻¹,速效氮含量63.21mg·kg⁻¹,速效磷含量23.75mg·kg⁻¹,速效钾含量为100.24mg·kg⁻¹,pH值7.7,试验前茬作物为玉米。

1.2 试验设计

供试品种选择吉林省西部地区常规种植的玉米品种华农887,设置对照(CK)、当地农户栽培模式(T1)和优化栽培模式(T2)3种栽培模式,不同模式的灌溉方式、灌溉定额和施肥量见表1。播种日期分别为2017年5月3日和2018年5月5日,收获日期分别为2017年9月29日和2018年9月28日。试验采用常规垄作的种植方式,3个模式的种植密度均设置为65000株·hm⁻²。小区长度设置为20m,宽度3.9m,垄宽65cm,小区面积78m²,每种模式设置3次重复,采用随机区组排列,小区两侧设置保护行,共计9个小区。T1与T2处理在播种前统一灌溉50mm,T1处理于拔节期(V8)与吐丝期(R1)分别灌溉100mm,T2处理于V8期、大喇叭口期(V12)、R1期和灌浆期(R3)各灌溉30mm。试验施用的氮肥为尿素,磷肥为磷酸二铵,钾肥为氯化钾,T1与T2处理在播种前基施50%的氮肥和全部磷钾肥,剩余50%氮肥在V8期追施,其他田间管理同当地生产田。

表1 试验处理方案

Table 1 Experimental treatment scheme

处理 Treatment	灌溉模式 Irrigation mode		施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer amount		
	灌溉定额 Irrigation quota/mm	灌溉方式 Irrigation method	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	无 None	0	0	0
T1	250	沟灌 Furrow irrigation	300	120	120
T2	170	滴灌 Drip irrigation	240	90	90

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒灌浆特性 玉米吐丝前对小区内长势基本一致的50株玉米进行挂牌,于玉米开花后第5天进行第1次取样,取样间隔时间为10d,取样时间为2017年8月2日—9月21日,2018年7月30日—9月18日,均取样6次,每次取样在各小区内选取5株植株,取穗中部籽粒,在80℃条件下烘干

至恒重,使用电子天平称取 100 粒籽粒的干质量。

1.3.2 产量 收获期(R6)进行测产,使用谷物水分测定仪测定玉米籽粒的水分,按照文献[3]的方法计算产量。

1.3.3 光合响应相关参数 选择晴朗无云的天气,利用 Li-6800 光合荧光测量系统,分别于 V12、R1 和 R3 期进行测定。V12 期选择玉米顶端第三片完全展开叶,在 R1 和 R3 期选择玉米穗部叶。在每个小区内选择 3 株长势基本一致的玉米,分别于 2 600、2 400、2 200、2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、500、400、300、200、100、50 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强度条件下测定净光合速率(P_n)。利用 Photosynth-assistant 软件计算获得光补偿点量子效率(AQE)、光饱和点时最大净光合速率(A_{max})、暗呼吸速率(R_d)、光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)。采用 2 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的固定光强测定 CO_2 响应曲线,按 CO_2 浓度为 400、350、300、250、200、150、100、50、25、0、400、400、600、800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的顺序测定 P_n 。利用 Photosynth-assistant 软件分析 CO_2 补偿点(CCP)、 CO_2 饱和点(CSP)、 CO_2 饱和时最大净光合速率(CSP_n)、羧化效率(CE)、Rubisco 最大羧化效率(V_{cmax})、磷酸丙糖利用率(TPU)和最大电子传递速率(J_{max})。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2016 和 SAS 9.0 数据处理系统进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式对玉米籽粒形成的影响

表 2 是不同栽培模式下玉米籽粒百粒质量的动态变化过程,可以看出,T1 与 T2 处理的百粒质量在开花后各阶段均显著高于 CK 处理,T2 处理的百粒质量均显著高于 T1 处理。说明采用 T2 处理的栽培模式更有利于玉米籽粒质量的增加,且从籽粒形成至完全生理成熟阶段,优化栽培模式显著提高玉米籽粒的干质量。

籽粒的平均灌浆速率反映了籽粒的生长发育情况,从表 3 中可以看出,与 CK 和 T1 处理相比,T2 处理玉米籽粒的平均灌浆速率显著增加,2017 年增加了 31.58% 和 18.00%,2018 年增加了 30.77% 和 9.80%。

图 1 是不同栽培模式下玉米籽粒的灌浆速率的动态变化情况,可以看出,不同栽培模式处理玉米籽粒灌浆速率达到最大值的时间基本一致,均在吐丝后 20~30 d,与 CK 处理相比,T1 与 T2 处理在这一生育阶段的灌浆速率均显著增加,2017 年和 2018 年分别

表 2 不同栽培模式下玉米籽粒百粒质量/g

Table 2 100 kernel weight of maize under different cultivation patterns

年份 Year	处理 Treatment	开花后时间 Time after silking/d					
		5	15	25	35	45	55
2017	CK	2.60±0.14c	6.23±0.33c	12.60±0.65c	15.86±0.81c	19.90±1.19c	21.57±2.23c
	T1	2.95±0.18b	7.52±0.46b	14.53±0.81b	19.75±0.94b	25.06±1.03b	28.05±1.98b
	T2	3.70±0.24a	9.50±0.37a	18.03±1.51a	23.65±1.37a	29.44±1.45a	33.06±1.81a
2018	CK	3.08±0.35c	7.60±0.78c	13.27±1.04c	16.70±1.42c	20.57±2.29c	22.55±2.37c
	T1	4.83±0.75b	9.95±0.83b	16.47±0.95b	21.11±1.94b	26.87±2.45b	30.20±2.02b
	T2	5.93±0.69a	11.67±0.91a	18.83±0.84a	24.33±0.87a	30.43±1.83a	34.07±1.58a

注:同一年份处理间不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: The difference is significant between different treatments in the same year with different lowercase letters ($P<0.05$), the same below.

表 3 不同栽培模式下玉米籽粒平均灌浆速率

Table 3 Average grain filling rate of maize under different cultivation patterns

处理 Treatment	50 d 的平均灌浆速率/($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$) Average grain filling rate of 50 days	
	2017	2018
	CK	0.38±0.02c
T1	0.50±0.01b	0.51±0.01b
T2	0.59±0.02a	0.56±0.02a

增加了 10.04%、33.91% 和 14.99%、26.28%。

图 2 是不同栽培模式对玉米产量的影响,可以看出,栽培模式对玉米产量的影响显著,T1 与 T2 处理的玉米产量均显著高于 CK 处理,T2 处理的玉米产量均显著高于 T1 处理,其中,2017 年和 2018 年分别增加了 15.67% 和 14.03%,说明优化栽培措施可以提高玉米产量。栽培模式和年份均对玉米的产量影响显著,栽培模式和年份的互作对产量的影响不显著,这说明不同栽培模式和不同年份对玉米产量的影响趋势相同,对其的调节反应是一致的。

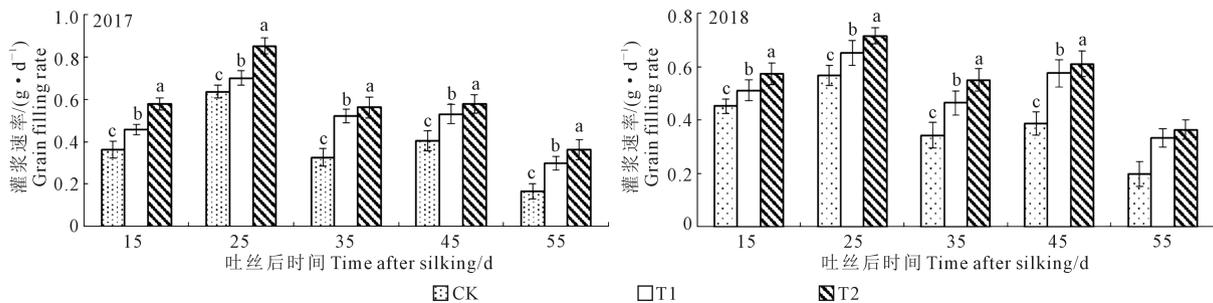


图 1 不同栽培模式下玉米籽粒灌浆速率

Fig.1 Grain filling rate of maize under different cultivation patterns

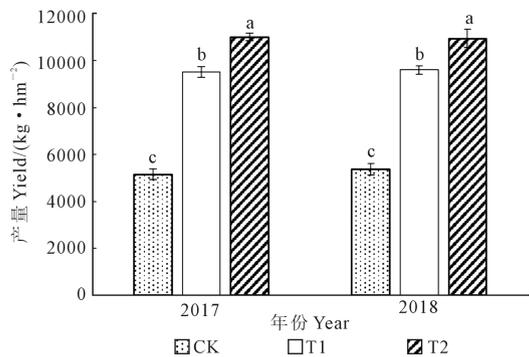


图 2 不同栽培模式下玉米的产量

Fig.2 Yield of maize under different cultivation patterns

2.2 不同栽培模式下玉米叶片光响应曲线及相关参数

随着光照强度的增加,2017 年和 2018 年玉米叶片净光合速率在 3 个栽培模式下的 3 个生育时期 (V12, R1, R3) 均快速增加(图 3)。当光子密度较低时,玉米叶片净光合速率主要受光照强度的影响,随着光量子密度的增加,T1 和 T2 处理的净光合速率迅速增加。当光量子密度超过 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在相同光照条件下,2017 年和 2018 年 T2 处理的净光合速率在 3 个生育时期均显著高于 T1 和 CK 处理。

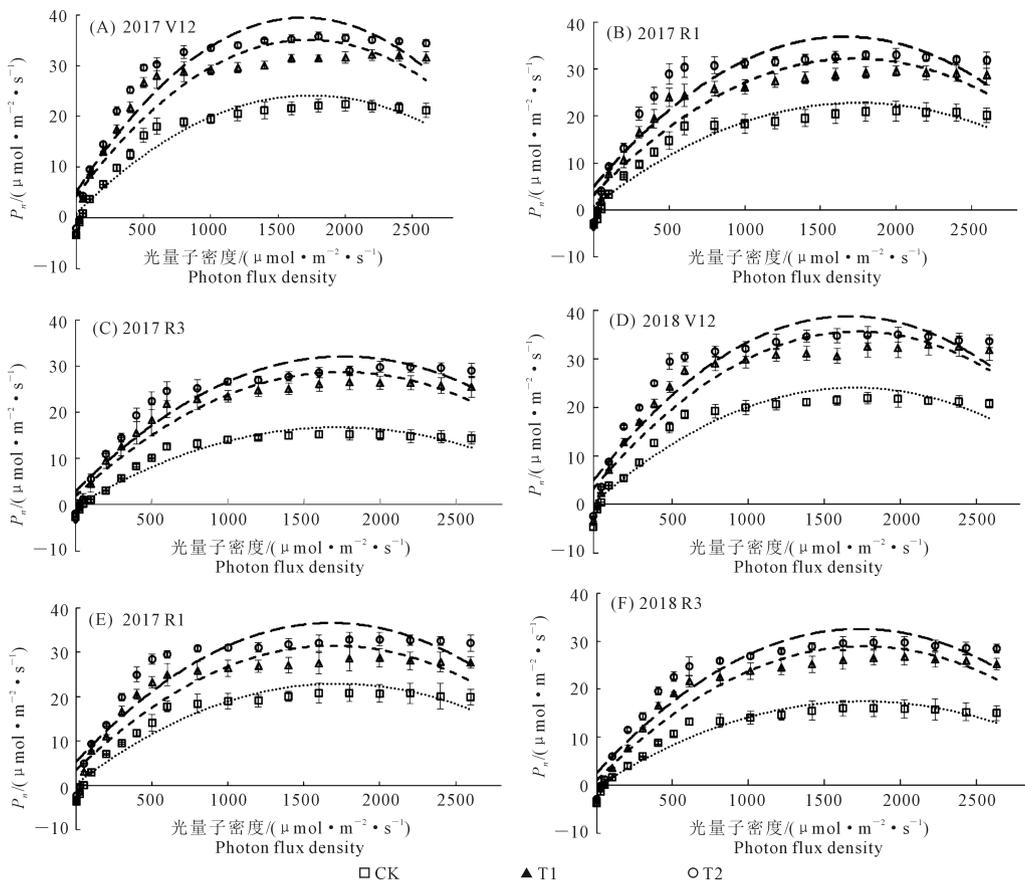


图 3 不同栽培模式下玉米不同生育期叶片光响应曲线

Fig.3 Light response curve of maize leaves at different growth stage under different cultivation patterns

表 4 是 2017 年和 2018 年 3 个生育时期玉米叶片光响应相关参数的变化情况,可以看出,T1 与 T2 处理的 AQE 在 3 个生育时期均显著高于 CK 处理,且均呈 $T2>T1>CK$ 。随着生育时期的推进,R3 期 3 个处理的 AQE 均降至最低值,CK 处理的 AQE 在 2017 年和 2018 年仅为 $0.050 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $0.053 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,同时,T1 处理的 AQE 在 R3 期均显著低于 T2 处理,2017 年和 2018 年分别下降了 17.35% 和 19.59%。当 AQE 过低时,会导致玉米很难利用弱光进行光合作用,进而导致整个植株的光合作用能力下降。

LCP 反映了植物克服其自身同化阻力的能力,其值的高低反映了植物利用低光强的能力, LSP 则反映了植物利用强光的能力,表明植物光合机构暗反应过程对同化力的需求量。从表 4 中可以看出,T2 处理的 LCP 和 LSP 在 3 个生育时期均显著高于

T1 与 CK 处理,且均呈 $T2>T1>CK$ 。用 LSP 与 LCP 的差值,可代表玉米叶片应对光响应适应范围能力,T1 和 T2 处理的玉米叶片在 3 个生育时期的 LSP 与 LCP 的差值均高于 CK 处理,且 T2 处理的差值最大,2017 年和 2018 年的 3 个生育时期分别达到 $1\ 871.6$ 、 $1\ 914.4$ 、 $1\ 891.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1\ 909.7$ 、 $1\ 848.6$ 、 $1\ 822.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

作物在无光条件下会释放能量, R_d 是反映作物在无光条件下的呼吸速率,2017 年和 2018 年,T1 和 T2 处理的 R_d 均显著高于 CK 处理(表 4),T2 处理的 R_d 在 R1 和 R3 期显著高于 CK 处理。 A_{max} 是植物达到光饱和点时的净光合速率,也可反映植物在不受光强限制条件下自身能达到的最大光合能力,T1 与 T2 处理 3 个生育时期的 A_{max} 均显著高于 CK 处理,均呈 $T2>T1>CK$,T1 与 T2 处理的 A_{max} 在 3 个生育时期均无显著性差异。

表 4 不同栽培模式下玉米叶片的光响应相关参数

Table 4 Correlation parameters of light response of maize leaves under different cultivation patterns

生育期 Growth stage	参数 Parameter	2017			2018		
		CK	T1	T2	CK	T1	T2
V12	$AQE/(\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	0.069b	0.114a	0.122a	0.066b	0.121a	0.131a
	$LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	30.8c	42.7b	56.9a	31.1c	48.4b	60.1a
	$LSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1633.8c	1818.3b	1928.5a	1564.8c	1854.6b	1974.5a
	$R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.39b	1.86a	2.02a	1.48b	1.78a	1.98a
	$A_{\text{max}}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	25.78b	34.79a	38.04a	26.09b	35.71a	39.12a
R1	$AQE/(\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	0.066b	0.115a	0.123a	0.070b	0.118a	0.124a
	$LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	41.7c	55.1b	62.4a	36.5c	47.2b	55.7a
	$LSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1586.9c	1831.5b	1954.3a	1633.2c	1817.2b	1965.4a
	$R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.58c	1.94b	2.38a	1.56c	1.88b	2.32a
	$A_{\text{max}}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	24.59b	33.49a	37.17a	25.03b	35.15a	38.66a
R3	$AQE/(\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	0.050c	0.081b	0.098a	0.053c	0.078b	0.097a
	$LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	30.2c	44.8b	50.9a	32.6c	47.3b	56.1a
	$LSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1440.2c	1717.3b	1899.5a	1482.6c	1604.8b	1878.5a
	$R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.36c	1.71b	1.87a	1.44c	1.62b	1.83a
	$A_{\text{max}}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	21.22b	29.77a	32.34a	20.18b	28.94a	31.73a

2.3 不同栽培模式下玉米叶片 CO_2 响应曲线及相关参数

图 4 是不同栽培模式下玉米 3 个生育时期(V12,R1,R3) CO_2 响应曲线的变化情况,可以看出,当 CO_2 浓度在 $0\sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,随着 CO_2 浓度的增加,各处理叶片的 P_n 会迅速增加,CK 处理增加的速率比 T1 和 T2 处理小。当 CO_2 浓度高于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,T2 处理和 T1 处理的 P_n 继续缓慢增加,至 CO_2 浓度高于环境 CO_2 浓度后仍有增加的趋势。在同一 CO_2 浓度条件下,CK 处理的 P_n 会显著低于 T1 处理和 T2 处理。

CCP 、 CSP 、 CSP_n 和 CE 是判断作物对环境 CO_2

浓度需求的重要指标,同时也可反应作物在不同 CO_2 浓度条件下叶片的光合作用能力及不同 CO_2 浓度对作物生长发育的影响。从表 5 可以看出,不同栽培模式下玉米的 CCP 、 CSP 、 CSP_n 和 CE 在 3 个生育时期均呈 $T2>T1>CK$,与 CK 处理相比,T1 与 T2 处理的 CCP 均显著增加,T1 与 T2 处理间无显著性差异。T2 处理的 CSP 在 3 个生育时期均显著高于 T1 与 CK 处理, CSP_n 可以反映植物在 CO_2 浓度饱和时的光合作用能力,T2 处理的 CSP_n 和 CE 在 R1 和 R3 期均显著高于 T1 和 CK 处理。通过 CCP 与 CSP 的差值,可发现玉米叶片应对 CO_2 的响应能力,T1 和 T2 处理的 CCP 与 CSP 的差值均高于 CK 处理,且

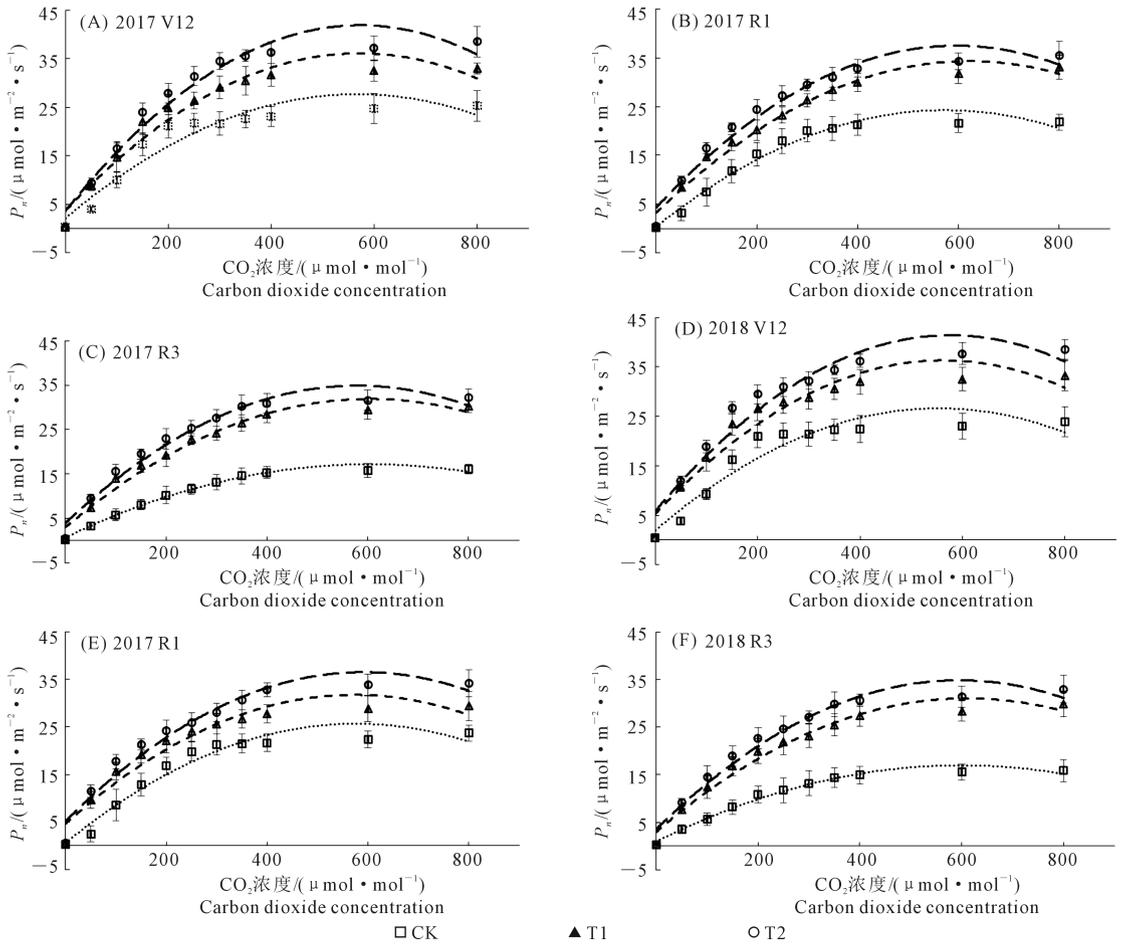


图 4 不同栽培模式下玉米 V12,R1 和 R3 期叶片 CO₂ 响应曲线

Fig.4 CO₂ response curve of maize leaves at V12, R1 and R3 stage under different cultivation patterns

表 5 不同栽培模式下玉米叶片的 CO₂ 响应相关参数

Table 5 Correlation parameters of CO₂ response of maize leaves under different cultivation patterns

生育期 Growth stage	参数 Parameter	2017			2018		
		CK	T1	T2	CK	T1	T2
V12	$CSP_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	25.31b	34.51a	37.22a	23.85b	33.33a	38.28a
	$CCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	24.04b	34.17a	35.21a	23.01b	27.35a	28.74a
	$CSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	515.25c	554.24b	575.27a	505.71c	565.58b	587.67a
	CE	0.104b	0.138a	0.146a	0.102b	0.135a	0.146a
	$V_{cmax}/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	39.52b	49.55a	57.87a	37.17b	46.96a	51.21a
	$J_{max}/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	44.39b	60.38a	67.88a	31.93b	39.49a	44.22a
	$TPU/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	5.32b	6.99a	7.58a	4.87b	7.25a	8.01a
R1	$CSP_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	24.12c	31.13b	36.08a	24.15c	30.14b	35.15a
	$CCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	23.28b	33.82a	34.04a	22.32b	31.51a	34.58a
	$CSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	506.75c	564.69b	595.21a	513.68c	550.13b	573.71a
	CE	0.075c	0.114b	0.129a	0.083c	0.109b	0.118a
	$V_{cmax}/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	39.01b	48.16a	54.68a	41.20b	49.07a	54.50a
	$J_{max}/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	42.33b	55.73a	62.33a	35.78b	50.69a	58.52a
	$TPU/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	5.09b	7.42a	8.10a	5.61b	6.63a	7.23a
R3	$CSP_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	16.04c	28.69b	32.88a	15.89c	27.26b	32.04a
	$CCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	26.17b	32.25a	33.24a	24.32b	36.31a	37.85a
	$CSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	475.25c	530.78b	551.78a	492.53c	585.12b	612.58a
	CE	0.050c	0.102b	0.117a	0.052c	0.098b	0.113a
	$V_{cmax}/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	28.03b	48.19a	56.96a	26.79b	49.37a	57.96a
	$J_{max}/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	38.83b	60.28a	69.49a	42.86b	63.36a	69.07a
	$TPU/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	3.89b	6.48a	7.19a	3.71b	7.03a	8.11a

T2 处理的差值最大,2017 年和 2018 年,3 个生育时期 *CCP* 与 *CSP* 的差值分别达到 540.06、558.87、561.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 539.13、518.54、574.73 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,这说明采用高效栽培模式可以促进玉米叶片很好地适应环境 CO_2 浓度变化所带来的影响,能够持续有效地利用光能。

V_{cmax} 、 J_{max} 和 *TPU* 是作物叶片达到光饱和和光合速率的限制因子,也反应了作物叶片的固碳能力。2017 年和 2018 年,T1 与 T2 处理的 V_{cmax} 、 J_{max} 和 *TPU* 在 3 个生育时期均显著高于 CK 处理,且均呈 $T2>T1>CK$,上述 3 个指标在 T1 与 T2 处理间无显著性差异,这说明随着 CO_2 浓度的增加,T2 处理玉米叶片获得更高净光合速率的限制因素少,且固碳能力更强。

3 讨 论

灌浆期是积累籽粒质量的关键生育阶段,而籽粒质量则是玉米产量形成的关键^[18]。本研究结果表明,与 CK 处理相比,T1 与 T2 处理的玉米产量均显著增加,T2 处理显著高于 T1 处理,T2 处理在灌溉方式、灌溉量和灌溉次数上均进行了改进。有学者认为,适当增加灌溉次数可以增加玉米的产量^[19],本研究在农户模式的基础上,在玉米的 V12 和 R3 期各增加了一次灌溉,这使得玉米的需水得以满足,缓解了由于灌溉次数偏少、间隔时间过长而引发的玉米生长发育减缓现象。农户模式采用沟灌的方式,单次的灌溉量达到 100 mm,使土壤表面水分瞬时趋于饱和,水分难以及时渗入土壤中,地表蒸发量增加,最终造成水资源浪费^[20],采用滴灌并减少每次的灌溉量可有效减少这种情况的发生^[21]。朴琳等^[22] 研究发现,优化栽培模式所施用的肥料减少,但作物的产量和籽粒的灌浆过程未受影响,反而均呈增加的变化趋势,本研究结果与其基本一致。玉米籽粒灌浆特性的变化反映了玉米籽粒的生长发育状况,良好的灌溉和肥料施用对玉米籽粒的灌浆进程有着显著的促进作用^[23-24]。本研究结果表明,T2 处理的各生育阶段的百粒质量和平均灌浆速率均显著高于 T1 和 CK 处理,这说明采用优化栽培模式能够促进玉米籽粒灌浆和干物质积累。不同栽培模式下玉米籽粒的灌浆速率达到最大值时的时间基本一致,均在吐丝后 20~30 d,T2 处理的灌浆速率在这一生育阶段要显著高于 T1 和 CK 处理,采用优化栽培模式可以延长灌浆的时间和活跃度,这与李国红等^[25] 的研究结果基本一致。合理地施用肥料和灌溉不但可以节约资源,还可使

玉米籽粒良好的生长发育,有利于玉米植株其他器官的干物质向穗部转运,从而促进玉米产量提高。

玉米光合作用的强弱与籽粒发育与产量形成密切相关,因此,研究不同栽培模式下玉米的光合作用也是挖掘玉米增产潜力的重要方面^[26],光响应曲线是判断植物叶片光合能力的重要参数,一般随光照强度的改变而发生变化^[27]。本研究发现,3 个处理玉米叶片的净光合速率随光照强度的增加均迅速增加,当光量子密度超过 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,T2 处理的净光合速率要显著高于 T1 与 CK 处理,以上变化说明优化栽培模式(T2 处理)可以维持玉米叶片的光合作用,减少气孔性限制因素,T1 与 CK 处理由于肥料施用与水分因素的限制,可能要通过关闭一些气孔来减少因栽培模式不合理而受到的胁迫影响,也加速了玉米叶片的衰老进程。同时,通过光响应曲线可以得到表征植物光合能力的指标,如 *AQE*、*LSP*、*LCP*、 A_{max} 和 R_d ,它们是反映作物生理特性的参数,常被应用于农业生产和作物生长发育的研究^[28]。本研究发现,随着生育时期的推进,T2 处理的 *AQE* 显著高于 T1 与 CK 处理,并在 R3 期降至 3 个生育时期的最低值,说明在玉米生育后期,优化栽培模式可以促进玉米利用弱光进行光合作用,从而维持玉米叶片的光合作用能力。T2 处理的 *LCP* 和 *LSP* 在 3 个生育时期均显著高于 T1 与 CK 处理,且 T2 处理 3 个生育时期 *LSP* 与 *LCP* 的差值均为最大,优化栽培模式使玉米光适应的范围增加,当作物体内养分和水分不足时(CK 处理), P_n 的下降主要是来自气孔性和非气孔性的共同限制作用,气孔关闭引起的 CO_2 供应受阻是导致净光合速率下降的原因,而非气孔性限制因素中,叶肉细胞光合活性下降是净光合速率下降的主要原因。T2 处理的玉米叶片受到胁迫的影响较小,当达到 *LSP* 时, P_n 的下降主要是来自于光的抑制作用^[29-30],玉米在生长发育过程中,叶片受不同栽培因素的影响会逐渐显现,未灌溉和施用肥料的 CK 处理与灌溉和施肥不合理的 T1 处理,叶片的光适应范围较小, P_n 下降较快,不合理的养分和水分条件不利于光合作用的正常进行。

空气中的 CO_2 是植物在进行光合作用时碳的主要来源,研究不同 CO_2 浓度条件下叶片光合特性的变化有助于判断植物适应 CO_2 的能力^[31]。本研究发现,*CCP*、*CSP*、 CSP_n 和 *CE* 在 3 个生育时期均呈 $T2>T1>CK$,T1 与 T2 处理的 *CCP* 均显著高于 CK 处理,T2 处理的 *CSP* 均显著高于 T1 与 CK 处理,T2 处理的玉米叶片拥有着更大 *CCP* 与 *CSP* 的差值,说

明优化栽培模式下的玉米叶片可在CO₂浓度范围更广的条件下充分地利用光能,并更积极地响应CO₂浓度的变化,对 P_n 的提高有着显著的效果^[32],CO₂利用率的提高对玉米增产具有重要作用。CE对外界光照和CO₂浓度的变化十分敏感,它也是光合作用碳同化的限制因子^[33]。本研究发现,T2处理的CE在R1和R3期均显著高于T1和CK处理,说明灌溉增加了玉米对CO₂的同化能力,增加了光合产物的运输能力,这与张向娟^[33]的研究结果基本一致。本研究结果表明,T1与T2处理的 V_{cmax} 、 J_{max} 和TPU均显著高于CK处理,且均呈T2>T1>CK,上述指标在T1与T2处理间无显著性差异,这说明T2处理的玉米固碳羧化能力较强,叶片对光辐射的利用能力会随着栽培模式的优化而逐渐增加^[34]。

4 结 论

与传统农户栽培模式相比,优化栽培模式(T2处理)可维持叶片的光合作用能力,促进玉米利用弱光进行光合作用,增加玉米对光、CO₂的适应范围,提高光合效率,增加光合产物的转运能力和叶片的固碳羧化能力,并通过延长灌浆时间和活跃度来促进籽粒灌浆,提高玉米籽粒质量,进而达到减少资源使用并提高产量的目的。本研究结果可为半干旱区玉米生产和优化栽培模式下玉米籽粒形成和光合响应特性研究提供理论依据。

参 考 文 献:

- [1] MENG Q F, HOU P, WU L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China [J]. *Field Crops Research*, 2013, 143: 91-97.
- [2] 徐晨,李前,赵洪祥,等.灌溉定额对半干旱区春玉米生长发育的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(10):41-51,62.
XU C, LI Q, ZHAO H X, ET al. Effects of irrigation quota on growth of spring maize with drip irrigation in semi-arid region[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(10): 41-51, 62.
- [3] 徐晨,赵洪祥,闫伟平,等.灌溉定额条件下玉米的产量形成及灌溉增产潜力研究[J].节水灌溉,2020,(5):22-26,31.
XU C, ZHAO H X, YAN W P, ET al. Study on yield formation and irrigation yield potential of maize under irrigation quota condition[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020,(5): 22-26, 31.
- [4] 王士杰,尹光华,李忠,等.浅埋滴灌水肥耦合对辽西半干旱区春玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):139-147.
WANG S J, YIN G H, LI Z, et al. Effects of water-fertilizer coupling on the yield of spring maize under shallow-buried drip irrigation in semi-arid region of western Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 139-147.
- [5] 王永平,刘杨,卢海军,等.水分胁迫对夏玉米籽粒灌浆的影响及其与内源激素的关系[J].西北农业学报,2014,23(4):28-32.
- [6] WANG Y P, LIU Y, LU H J, ET AL. Effect of water stress on grain filling and hormone changes in grains of summer corn[J]. *Acta Agricultrae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(4): 28-32.
- [7] 尹华,孙璐,李旭辉,等.干旱对不同授粉方式玉米籽粒生长和光合特性的影响[J].中国农业大学学报,2013,18(2):22-28.
YIN H, SU N L, LI X H, ET AL. Effects of drought stress on maize kernel growth and photosynthetic characteristics under different pollination types[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2): 22-28.
- [8] MO F, WANG J Y, XIONG Y C, et al. Ridge-furrow mulching system in semiarid Kenya: a promising solution to improve soil water availability and maize productivity [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 80: 124-136.
- [9] WANG X B, ZHOU B Y, SUN X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status [J]. *Plos One*, 2015, 10(6): e0129231.
- [10] THAKUR A K, MANDAL K G, MOHANTY R K, et al. Rice root growth, photosynthesis, yield and water productivity improvements through modifying cultivation practices and water management [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 206: 67-77.
- [11] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):2902-2909.
YU W Y, JI R P, FENG R, ET AL. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [12] 徐晨,闫伟平,孙宁,等.不同灌水处理对春玉米生理特性的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(1):7-14.
XU C, YAN W P, SUN N, ET al. The impacts of irrigation amount on physiological characteristics and yield of spring maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(1): 7-14.
- [13] MORENO-SOTOMAYOR A, WEISS A, PAPAROZZI E T, et al. Stability of leaf anatomy and light response curves of field grown maize as a function of age and nitrogen status [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159(8): 819-826.
- [14] YADAV S K, CHANDER K, SINGH D P. Response of late-sown mustard (*Brassica juncea*) to irrigation and nitrogen[J]. *The Journal of Agriculture Science*, 1994, 123(2): 219-224.
- [15] YANG D Q, DONG W H, LUO Y L, et al. Effects of nitrogen application and supplemental irrigation on canopy temperature and photosynthetic characteristics in winter wheat [J]. *The Journal of Agriculture Science*, 2018, 156(1): 13-23.
- [16] ZHANG D L, JIAO X C, DU Q J, ET al. Reducing the excessive evaporative demand improved photosynthesis capacity at low costs of irrigation via regulating water driving force and moderating plant water stress of two tomato cultivars [J]. *Agriculture Water Management*, 2018, 199: 22-33.
- [17] 曹玉军,姚凡云,王丹,等.不同栽培技术因子对雨养春玉米产量与氮素效率差异的影响[J].中国农业科学,2020,53(15):3036-3047.
CAO Y J, YAO F Y, WANG D, et al. Effects of different agronomy factors on yield gap and nitrogen efficiency gap of spring maize under

- rain-fed conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(15): 3036-3047.
- [17] 袁静超,刘剑钊,梁尧,等.综合农学管理模式对春玉米产量和养分累积特征的影响[J].*中国农业科学*,2019,52(20):3546-3558.
YUAN J C, LIU J Z, LIANG Y, et al. Characteristics of grain yield and nutrient accumulation for spring maize under different agronomic management practices [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20): 3546-3558.
- [18] 王晓慧,张磊,刘双利,等.不同熟期春玉米品种的籽粒灌浆特性[J].*中国农业科学*,2014,47(18):3557-3565.
WANG X H, ZHANG L, LIU S L, et al. Grain filling characteristics of maize hybrids differing in maturities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3557-3565.
- [19] 刘一龙,张忠学,郭亚芬,等.膜下滴灌条件下不同灌溉制度的玉米产量与水分利用效应[J].*东北农业大学学报*,2010,41(10):53-57.
LIU Y L, ZHANG Z X, GUO Y F, et al. Corn yield and water using efficiency of different irrigation schedule with the drip irrigation under mulch[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(10): 53-57.
- [20] YUAN Z Q, ZHANG R, WANG B X, et al. Film mulch with irrigation and rainfed cultivations improves maize production and water use efficiency in Ethiopia [J]. *Annals of Applied Biology*, 2019, 175(2): 215-227.
- [21] MARTINS J D, RODRIGUES G C, PAREDES P, Et al. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil; model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil [J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(3): 291-310.
- [22] 朴琳,李波,陈喜昌,等.优化栽培措施对春玉米密植群体冠层结构及产量形成的调控效应[J].*中国农业科学*,2020,53(15):3048-3058.
PIAO L, LI B, CHEN X C, ET al. Regulation effects of improved cultivation measures on canopy structure and yield formation of dense spring maize population [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(15): 3048-3058.
- [23] ZHANG H, CHEN T T, WANG Z Q, et al. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(13): 3719-3733.
- [24] 殷春渊,王书玉,刘贺梅,等.氮肥施用量对超级粳稻新稻 18 号强、弱势籽粒灌浆和稻米品质的影响[J].*中国水稻科学*,2013,27(5):503-510.
YIN C Y, WANG S Y, LIU H M, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on grain filling characteristics and rice quality of superior and inferior grains in super japonica rice Xindao 18 [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(5): 503-510.
- [25] 李国红,杨恒山,张玉芹,等.不同栽培模式下春玉米籽粒灌浆特性的研究[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(3):1-6,73.
LI G H, YANG H S, ZHANG Y Q, et al. Grain-filling properties of spring maize under different cultivation patterns[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(3): 1-6, 73.
- [26] 李静,王洪章,刘鹏,等.夏玉米不同栽培模式花后叶片光合性能的差异[J].*作物学报*,2021,47(7):1351-1359.
LI J, WANG H Z, LIU P, et al. Differences in photosynthetic performance of leaves at post-flowering stage in different cultivation modes of summer maize (*Zea mays* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(7): 1351-1359.
- [27] 姚斌,徐晨,王俊鹏,等.不同父本血缘玉米杂交种对光、CO₂ 响应特性[J].*分子植物育种*,2020,18(4):1297-1306.
YAO B, XU C, WANG J P, ET al. Light and CO₂ response characteristics of different parental bloodline maize hybrids [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(4): 1297-1306.
- [28] 吴玮,景元书,马玉平,等.干旱环境下夏玉米各生育时期光响应特征[J].*应用气象学报*,2013,24(6):723-730.
WU W, JING Y S, MA Y P, et al. Light response characteristics of summer maize at different growth stages under drought [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(6): 723-730.
- [29] 肖列,刘国彬,张骄阳,等.CO₂ 浓度升高、干旱胁迫和氮沉降对白羊草光响应曲线的影响[J].*草地学报*,2016,24(1):69-75.
XIAO L, LIU G B, ZHANG J Y, et al. Effects of elevated CO₂, drought stress and nitrogen deposition on photosynthesis light response curves of *Bothriochloa ischaemum* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(1): 69-75.
- [30] 李丽霞,刘济明,黄小龙,等.不同氮素条件米槁幼苗光合作用对 CO₂ 响应特征[J].*东北农业大学学报*,2017,48(2):29-36.
LI L X, LIU J M, HUANG X L, ET AL. Response characteristic of *Cinnamomum migao* seedling's photosynthesis to CO₂ in different conditions of nitrogen [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(2): 29-36.
- [31] 焦念元,宁堂原,杨萌珂,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):4324-4330.
JIAO N Y, NING T Y, YANG M K, et al. Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4324-4330.
- [32] 焦念元,李亚辉,李法鹏,等.间作玉米穗位叶的光合和荧光特性[J].*植物生理学报*,2015,51(7):1029-1037.
JIAO N Y, LI Y H, LI F P, ET AL. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in ear leaves of intercropped maize [J]. *Plant Physiology Communications*, 2015, 51(7): 1029-1037.
- [33] 张向娟.干旱胁迫下棉花叶片光合特性的适应机制研究[D].石河子:石河子大学,2014.
ZHANG X J. Photosynthetic acclimated mechanism of leaf in cotton under drought stress [D]. Shihezi: Shihezi University, 2014.
- [34] 王飞,胡莎莎,焦念元,等.玉米、花生及其间作茬口与施磷对冬小麦光合特性及产量的影响机制[J].*西北植物学报*,2019,39(4):702-711.
WANG F, Hu S S, Jiao N Y, et al. Effect of sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(4): 702-711.