

干旱区不同谷子品种叶片光合特性对光强的响应

王乐,相宗杰,孙倩,康建宏,吴宏亮,梁熠,吴娜

(宁夏大学农学院,宁夏银川750021)

摘要:以本地品种小红毛、常规品种陇谷11号、晋谷29号和杂交品种张杂谷5号、华大3号为供试材料,在宁夏同心县旱作田比较孕穗期和灌浆中期不同谷子品种叶片光强-光合响应曲线及光合参数的变化特点。结果表明:在孕穗期,不同谷子品种的表观量子效率在 $0.044\sim0.079\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,光补偿点的变化范围在 $14.11\sim50.59\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间;最大光合速率的变化范围为 $38.53\sim50.01\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,暗呼吸速率变化范围为 $2.16\sim5.28\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本地品种小红毛在孕穗期的表观量子效率高($0.079\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),利用低光强的能力较强,而常规品种和杂交品种的最大光合速率较高(陇谷11号和晋谷29号分别为 $38.53,47.53\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、张杂谷5号和华大3号分别为 $44.06,50.01\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),利用强光的能力强,且杂交品种大于常规品种。常规品种和杂交品种的光合能力强,可为谷子获得高产奠定基础。

关键词:谷子;干旱区;光强;光合响应曲线;产量

中图分类号:S515 **文献标志码:**A

Response of photosynthetic characteristic of various millet variety leaves to light intensity in arid region

WANG Le, XIANG Zong-jie, SUN Qian, KANG Jian-hong, WU Hong-liang, LIANG Yi, WU Na

(College of Agricultural, Ningxia University, Ningxia, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to better understand the response of leaf photosynthesis of various millet varieties to light intensity, we used local millet varieties (Xiaohongmao), conventional variety (Longgu 11, Jingu 29), and hybrid varieties (Zhangza 5, Huada 3) as experimental crops. The photosynthetic response curves and photosynthetic parameters were studied in booting and filling stages. It is found that the maximum photosynthetic rate, apparent quantum efficiency, dark respiration rate, and light compensation point in booting stage were higher than that in filling stage. At the booting stage, the apparent quantum efficiency of different millet varieties is between 0.044 and $0.079\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and the light compensation point varies from 14.11 to $50.59\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. The maximum photosynthetic rate ranged from 38.53 to $50.01\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and the dark respiration rate ranged from 2.16 to $5.28\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. Compared with other varieties the apparent quantum yield of Xiaohongmao (local variety) was higher ($0.079\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), and it had a great ability to use low light intensity. Nevertheless, The maximum photosynthesis of conventional varieties and hybrid varieties was higher than local variety (Longgu 11, and Jingu 29 were 38.53 and $47.53\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Zhangza 5 and Huada 3 were 44.06 and $50.01\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively). Conventional varieties and hybrid varieties had a great ability to use high-light intensity, and hybrid variety had a stronger ability to use highlight intensity than conventional variety. Conventional varieties and hybrid varieties had a higher photosynthetic capacity, which established the foundation of high yield.

收稿日期:2017-10-12 修回日期:2017-12-10

基金项目:宁夏大学研究生创新项目(GIP2017035);国家科技支撑项目“黄土高原旱区增粮增效潜力与提升技术研究”(2015BAD22B01);宁夏重点研发计划项目(科技园区专项)

作者简介:王乐(1993-),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,研究方向为作物高产生理。E-mail:1182719919@qq.com

通信作者:康建宏(1968-),男,宁夏青铜峡人,教授,主要从事作物高产生理研究工作。E-mail:kangjianhong@163.com

Keywords: millet; varieties; photosynthetic response curve; yield

谷子又称粟,是世界上栽培历史最悠久的作物之一,也是我国北方地区主要杂粮作物^[1-3]。谷子具有抗旱耐瘠、水分利用效率高、适应性广、营养丰富、各种成分平衡、饲草蛋白含量高等突出特点,被认为是应对未来水资源短缺的战略贮备作物,是发展可持续农业的生态作物以及人们膳食结构调整、平衡营养的特色作物,也是近年来兴起的世界性杂粮的主要作物^[4-5]。宁夏谷子主要分布在宁夏南部山区和中部干旱带,作为典型的旱作农业区,谷子在该地区占有重要地位,是当地重要的“救灾”作物。近年来,宁夏回族自治区将“小杂粮”产业作为宁南山区的特色产业之一,发展谷子生产对当地的经济发展和农民增收具有积极意义。

光合作用是作物干物质积累和产量形成的基础,较高的光合碳同化能力是作物获得高产的前提,前人围绕小麦、水稻、玉米等作物的光合特性做了大量研究^[6-11],刘建栋^[12]等对不同历史年代的冬小麦叶片光合作用进行了大量测定,拟合了不同年代12个典型品种的叶片光合作用光响应曲线,揭示了黄淮海地区冬小麦叶片光合特征参数随时间演变规律,并利用数值模式分析了特征参数对光合日总量的影响。王尚明等^[13]以5种早稻和5种晚稻品种为试验材料,观测水稻生长各生育期叶片光合,结果表明,同期栽培的不同试验水稻品种,叶片的暗呼吸速率、光补偿点、表观量子效率、CO₂补偿点等光合参数值均无显著差异。梁熠等^[14]采用双株紧靠、大垄双行和等行距型3种行距配置模式,比较研究玉米光合特性和产量的变化特征,结果表明,合理行距配置(即大垄双行)的植株最大光合速率和表观量子效率较高,光能利用率和水分利用率优于其他2个处理。前人对谷子的光合性能也进行了一定的研究^[3,15],刘子会等^[16]通过试验研究杂交谷子和常规谷子的光合生理差异,强光下杂交谷子光合速率、光饱和点、潜在最大光合速率高于常规谷子,表观量子效率低于常规谷子,且差异显著。卢成达等^[17]通过在相同栽培条件下对14个常规谷子栽培品种主要形态特征指标、光合生理特性指标和产量的变化进行研究发现,品种间净光合速率存在极显著差异,且抽穗期和灌浆期间净光合速率差异大于品种间的净光合速率。虽然前人对谷子的光合生理进行了一定的研究,但针对宁夏中部干旱带谷子生理缺乏深入研究。本文收集了全国主要生产区的4个谷子品种,以当地主栽品种为对照,研

究了孕穗期及灌浆中期不同谷子品种叶片光-光合响应曲线的变化规律,以期为宁夏中部干旱带谷子高产稳产优质栽培提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏自治区同心县王团镇旱作节水科技园区。同心县属中温带干旱、半干旱大陆性气候,海拔1 240~2 625 m,太阳辐射强,昼夜温差大,日照时间长,年均降水量273 mm左右,而蒸发量却高达2 325 mm以上,年均温度8.6℃,年最高气温36.7℃,最低气温-25.4℃,无霜期140~170 d,≥10℃的积温为3 056.8℃,可以满足作物需求。土壤类型为沙壤土,肥力中等。

1.2 试验材料与试验设计

供试谷子品种5个(品种及来源见表1)。其中本地品种有小红毛,常规品种有陇谷11号、晋谷29号,杂交品种有张杂谷5号、华大3号。以当地农家品种小红毛为对照(CK),测定光-光合响应曲线。

试验采取随机区组设计,3次重复,于5月8日播种,小区宽3.6 m,长9 m,设定行距40 cm、株距10 cm、每hm²留苗45万株。种植前对试验地进行旋耕、耙耱镇压、播种前喷水1次(75 m³·hm⁻²),每hm²施有机肥(羊粪)30 m³、复合肥(氮磷钾15%,总养分≥45%)750 kg,尿素(氮含量46.4%)195 kg。在拔节期中耕一次并且每hm²追肥(尿素)150 kg。拔节期-灌浆初期共喷水1 200 m³·hm⁻²,分两次进

表1 供试品种及编号

Table 1 Experimental millet varieties and number

品种 Varieties	编号 Number	来源 Source	生育期/d Growth period
小红毛 Xiaohongmao	1	当地农家品种 Local conventional variety	90~100
陇谷11号 Longgu 11	2	甘肃省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of Gansu Academy of Agricultural Sciences	102~108
晋谷29号 Jinggu 29	3	山西省农业科学院经济作物研究所 Institute of Economic Crops, Shanxi Academy of Agricultural Sciences	120
张杂谷5号 Zhangzagu 5	4	河北省张家口市农业科学院 Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences in Hebei Province	115
华大3号 Huada 3	5	华大基因 Huada gene	130

行。其他田间管理与大田管理一致。谷子成熟后,无损收获,风干后测产。随机选1.2 m²取样,每小区取有代表性植株30株考种,考种项目包括穗长、每穗粒数、谷码数、每穗粒重、千粒重等指标。

1.3 测定方法

在孕穗期和灌浆中期,晴天9:00~11:00在每个小区随机选取生长一致的3个点,每点选取3片最顶端长势一致的无损伤成熟叶片,利用便携式光合系统分析仪(TPS-2,英国汉莎公司),在流速300 μmol·s⁻¹、CO₂摩尔分数400 μmol条件下,测定不同光强下的净光合速率。测定时,用不同光强的LED光源逐渐降低光合有效辐射,光合有效辐射为2126、1569、740、491、301、279、176、117、59、0 μmol·m⁻²·s⁻¹。以净光合速率和光合有效辐射(PAR)拟合光响应曲线,得出表观量子效率(α,以每秒每平方米同化的CO₂量(μmol·m⁻²·s⁻¹)表示)、最大净光合速率(P_{\max} , μmol·m⁻²·s⁻¹)、暗呼吸速率(R_d , μmol·m⁻²·s⁻¹)、光补偿点(LCP, μmol·m⁻²·s⁻¹)。

谷子叶片净光合速率(P_n)与光合辐射(PAR)间的关系(净光合速率的光强响应)用Michaelis-Menten模型拟合。

$$P_n = \frac{\alpha I P_{\max}}{\alpha I + P_{\max}} - R_d \quad (I = PAR)$$

式中, I 为照射到叶面的光量子通量密度, α 是弱光下光量子利用效率(即表观量子效率), P_{\max} 为最大光合速率, R_d 为暗呼吸速率。光补偿点(LCP)计算公式为:

$$LCP = \frac{P_{\max} R_d}{\alpha (P_{\max} - R_d)}$$

运用DPS7.05进行直角双曲线拟合。

表观量子效率(α)用弱光(光量子通量密度300 μmol photons·m⁻²·s⁻¹以下)条件下光合速率与光强拟合的直线方程的斜率进行模拟所得。

1.4 数据统计分析:

数据采用Excel进行处理,利用SAS 8.1软件、DPS 7.05软件进行分析,并用Excel进行作图。

2 结果与分析

2.1 孕穗期不同品种谷子叶片对光强的响应

本研究中,表观量子效率(α)用弱光(光量子通量密度300 μmol photons·m⁻²·s⁻¹以下)条件下光合速率与光强拟合的直线方程的斜率进行模拟所得。5个谷子品种孕穗期叶片净光合速率(P_n)与光合辐射(PPFD)间的关系(净光合速率的光强响应)

呈现直角双曲线关系(图1),各供试品种在光合有效辐射0~400 μmol·m⁻²·s⁻¹时,光合速率迅速增加,除小红毛外,其他品种间无显著差异,地方品种小红毛的光合速率显著高于其他品种;在光强超过500 μmol·m⁻²·s⁻¹后,各品种间光合速率差异显著。

用Michaelis-Menten模型拟合(图1),决定系数R²≥0.99。将谷子孕穗期光-光响应曲线各参数列表2。从表2可知,谷子孕穗期表观量子效率(α)以地方品种小红毛最大(0.079 μmol·m⁻²·s⁻¹),张杂谷5号次之(0.061 μmol·m⁻²·s⁻¹),晋谷29号最小(0.044 μmol·m⁻²·s⁻¹),晋谷29号比本地品种小红毛的表观量子效率低44.3%。各品种间表观量子效率大小为小红毛>张杂谷5号>华大3号>陇谷11号>晋谷29号,小红毛的表观量子效率显著高于其他供试品种。因此本地品种利用低光强的能力较强,而常规品种利用低光强的能力较弱。

各品种间光补偿点(LCP)以晋谷29号最大(50.59 μmol·m⁻²·s⁻¹),小红毛最小(14.11 μmol·m⁻²·s⁻¹),小红毛与晋谷29号相比光补偿点低72.21%。孕穗期谷子光补偿点大小为晋谷29号>张杂谷5号>陇谷11号>华大3号>小红毛,陇谷11号与小红毛、华大3号之间,晋谷29号与小红毛、华大3号之间,张杂谷5号与小红毛、华大3号之间存在极显著性差异,也进一步说明本地品种小红毛利用弱光的能力强。

品种间最大光合速率(P_{\max})以华大3号最大(50.01 μmol·m⁻²·s⁻¹),陇谷11号最小(38.53 μmol·m⁻²·s⁻¹),华大3号比陇谷11号最大光合速率高22.95%。最大光合速率大小关系表现为华大3号>晋谷29号>张杂谷5号>小红毛>陇谷11号,相关分析表明华大3号与小红毛、陇谷11号之间存在显著性差异,说明杂交品种利用强光的能力高于本地品种和常规品种。

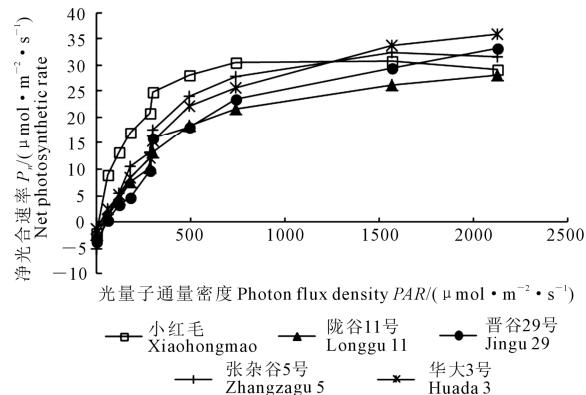


图1 孕穗期不同谷子品种光合速率对光强的响应

Fig.1 Response of photosynthesis of different millet variety to light intensity at booting stage

表2 孕穗期不同品种谷子净光合速率光响应曲线模拟参数

Table 2 Parameters of net photosynthetic rate and light response curve of different varieties of millet at booting stage

品种 Variety	$\alpha/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	$P_{\text{max}}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
小红毛 Xiaohongmao	0.079aA	14.11bB	38.83bA	2.81bcBC
陇谷 11 号 Longgu 11	0.046cC	39.04aA	38.53bA	3.16bcBC
晋谷 29 号 Jinggu 29	0.044cC	50.59aA	47.53abA	3.71bB
张杂谷 5 号 Zhangzagu 5	0.061bB	40.17aA	44.06abA	5.28aA
华大 3 号 Huada 3	0.052bcBC	22.07bB	50.01aA	2.16cC

注:不同大小写字母表示不同处理在 1% 和 5% 水平上差异显著,下同。

Note: values followed by different letters are significantly different at the 1% and 5% probability levels. The same as following.

孕穗期谷子暗呼吸速率表现为张杂谷 5 号最大 ($5.28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 华大 3 号最小 ($2.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 华大 3 号比张杂谷 5 号低 59.09%。暗呼吸速率大小为张杂谷 5 号>晋谷 29 号>陇谷 11 号>小红毛>华大 3 号。方差分析表明,张杂谷 5 号与其他 4 个品种之间、晋谷 29 号与华大 3 号之间差异极显著。

由于孕穗期华大 3 号最大光合速率最高,表观量子效率较高,光补偿点比较低,呼吸消耗最小,理论上华大 3 号产量应最高,然而田间试验测产发现华大 3 号产量低于张杂谷 5 号,高于其他 3 个品种,这主要是因为华大 3 号生育期较长,在早霜到来前没有完全成熟,造成产量的降低。同时分析发现本地品种小红毛表观量子效率最高,光补偿点最低,说明其利用低光强的能力最强,生产上可以通过加大密度提高产量。

2.2 灌浆中期不同谷子品种叶片对光强的响应

灌浆期谷子各品种对光强的响应曲线与孕穗期类似,但品种间有明显差别(图 2),将谷子灌浆期光合参数列于表 3,从表 3 中可以看出,灌浆期所有光合参数值与孕穗期相比都有所降低。

表观量子效率(α)以张杂谷 5 号最高 ($0.053 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 小红毛最低 ($0.023 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 张杂谷 5 号是小红毛的 2.3 倍。大小为张杂谷 5 号>陇谷 11 号>晋谷 29 号>华大 3 号>小红毛,其中张杂谷 5 号灌浆期的表观量子效率极显著高于其他 4 个品种,陇谷 11 号与小红毛、华大 3 号之间的表观量子效率存在显著性差异。各品种间光补偿点(LCP)以陇谷 11 号最高 ($49.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 华大 3 号最低 ($8.84 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 陇谷 11 号是华大 3 号的 5.5 倍。大小关系为陇谷 11 号>晋谷 29 号>张杂谷 5 号>小红毛>华大 3 号,品种之间差异表现为陇谷 11 号与小红毛、张杂谷 5 号、华大 3 号之间差异显著。品种间最大光合速率(P_{max})小红毛最高,与华大 3 号之间存在显著性差异。暗呼

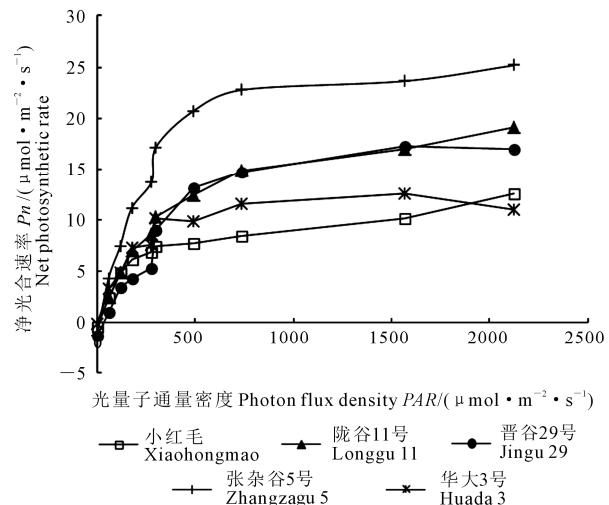


图2 灌浆中期不同谷子品种光合速率对光强的响应

Fig.2 Response of photosynthesis to light intensity of different millet varieties at middle of filling stage

吸速率表现为晋谷 29 号最高 ($1.85 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 小红毛最低 ($0.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 晋谷 29 号是小红毛的 6.37 倍。晋谷 29 号与小红毛、华大 3 号之间,张杂谷 5 号与小红毛、华大 3 号之间,陇谷 11 号与小红毛之间存在极显著性差异,陇谷 11 号与华大 3 号之间存在显著性差异。

分析表明,谷子到了灌浆期各个品种光补偿点较孕穗期有所下降,说明谷子灌浆期利用低光强的能力增强,而最大光合速率和呼吸消耗有所降低,这可能与植株逐渐衰老有关。不同品种的谷子在不同生育期对光强反应有所差别,最大光合速率、表观量子效率、光饱和点、呼吸速率都表现为孕穗期>灌浆期。张杂谷 5 号表观量子效率、最大净光合速率高,光补偿点比较低,这可能是张杂谷 5 号高产的主要原因。而小红毛的表观量子效率高、光补偿点低,利用低光强的能力强,但其生育期较短,产量不高。

2.3 不同品种谷子产量及产量构成因素

由表 4 可以看出,华大 3 号收获穗数最多,每 hm^2 达到 55.03 万穗,而陇谷 11 号收获穗数最少,每

表3 灌浆中期不同品种谷子净光合速率光响应曲线模拟参数

Table 3 Parameters of net photosynthetic rate and light response curve of different varieties of millet at grain filling stage

品种 Variety	$\alpha / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	LCP / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$P_{n\max} / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$R_d / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
小红毛 Xiaohongmao	0.023cB	10.84bA	30.79aA	0.29bC
陇谷 11 号 Longgu 11	0.038bB	49.12aA	24.35aA	1.27aAB
晋谷 29 号 Jinggu 29	0.031bcB	39.72abA	24.45aA	1.85aA
张杂谷 5 号 Zhangzagu 5	0.053aA	13.25bA	30.46aA	1.81aA
华大 3 号 Huada 3	0.024cB	8.84bA	11.17bB	0.63bBC

表4 不同品种谷子产量及其构成因素

Table 4 Grain yield and its yield components of different varieties

品种 Variety	穗长/cm Ear length	谷码数 Millet yards	每穗实粒数 Number of grain per ear	千粒重/g Thousand-grain weight	穗数/(万穗·hm ⁻²) Spike numbers /(10^4 spike · hm ⁻²)	生物产量/(kg·hm ⁻²) Biological yield	籽粒产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield
小红毛 Xiao Hongmao	22.23±4.37	96±18	4789±72	3.05±0.12	53.36±0.44	10293±178	5145±337
陇谷 11 号 Longgu 11	24.02±4.07	103±12	4342±138	4.27±0.05	28.35±0.24	10499±618	5247±287
晋谷 29 号 Jinggu 29	21.21±2.23	109±12	6909±88	3.13±0.09	34.60±0.42	10911±472	5453±442
张杂谷 5 号 Zhangzagu 5	22.2±3.24	111±17	6608±77	3.07±0.03	48.77±0.44	13587±622	6791±358
华大 3 号 Huada 3	25.15±4.51	142±19	5864±47	3.52±0.02	55.03±0.42	12455±472	6225±415

hm²仅为 28.35 万穗, 华大 3 号比陇谷 11 号的收获穗数多 94.12%。不同供试品种间谷码数华大 3 号最高, 为 142 个, 小红毛最少, 为 96 个, 小红毛比华大 3 号低 47.91%。每穗实粒数以晋谷 29 号最多, 达 6 909 粒, 陇谷 11 号的每穗粒数最少, 每穗只有 4 342 粒, 陇谷 11 号比晋谷 29 号低 59.12%。千粒重以陇谷 11 号最高, 为 4.27 g, 小红毛最小, 为 3.05 g, 陇谷 11 号比小红毛高 39.67%。不同供试品种间籽粒产量以张杂谷 5 号最大, 每 hm² 为 6 790.5 kg, 小红毛最小, 每 hm² 为 5 145 kg, 张杂谷 5 号比小红毛的籽粒产量高 31.98%。5 个不同供试品种间, 张杂谷 5 号的生物产量最高, 小红毛的最低。综上所述, 产量较高的谷子品种, 每穗实粒重、千粒重、穗数都在较高水平, 而造成小红毛产量低的原因主要是千粒重低, 谷码数少。华大 3 号产量低于张杂谷 5 号的主要原因是其生育期长, 早霜来临前未完全成熟。

3 讨 论

植物 90%~95% 的干物质来自光合产物^[18]。人们对玉米、小麦、水稻等作物的光-光合响应做了大量研究^[19~21], 刘子会等^[16]研究认为, 强光下杂交谷子的光合速率高于常规谷子, 最大光合速率高于常规谷子, 而表观量子效率低于常规谷子。樊修武等^[22]研究认为, 杂交谷与常规谷相比, 光合速率高

而光补偿点低。

本研究表明, 谷子叶片净光合速率(P_n)与光合辐射(PAR)间的关系(净光合速率的光强响应)符合 Michaelis-Menten 模型。宁夏中部干旱带谷子在孕穗期表观量子效率(α)以地方品种小红毛最大, 华大 3 号最小, 变化范围在 0.052~0.079 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间; 各品种间光补偿点(LCP)晋谷 29 号最大, 小红毛最小, 变化范围在 14.11~50.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间; 品种间最大光合速率($P_{n\max}$)为华大 3 号最大, 陇谷 11 号最小, 变化范围在 38.53~50.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间; 暗呼吸速率表现为张杂谷 5 号最大, 华大 3 号最小, 变化范围在 2.16~5.28 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。不同品种谷子对光强的利用能力不同, 本地品种的表观量子效率较高, 利用低光强的能力较强, 而常规品种和杂交品种的最大光合速率较大, 利用强光的能力较强。谷子杂交品种和常规品种相比, 杂交谷的最大光合速率、暗呼吸速率高于常规谷子, 光补偿点杂交品种低于常规品种, 这与刘子会等^[16]以及樊修武等^[22]研究结论一致。张杂谷 5 号和华大 3 号相比, 张杂谷 5 号的籽粒产量较高, 原因可能是张杂谷 5 号和华大 3 号的最大光合效率都较大, 而张杂谷 5 号的暗呼吸速率较低, 净光合生产力较高, 从而籽粒产量较高, 为谷子高产奠定基础。

谷子杂交品种和常规品种相比,高光强下杂交谷的最大光合速率高,本地品种小红毛的表观量子效率高,利用低光强的能力较强,而其他品种利用低光强的能力较低。现代杂交品种利用强光的能力高于本地品种小红毛及周边省区的品种陇谷11号。小红毛利用低光强的能力最强,生产上可以进一步加大密度。不同品种在不同生育期对光强的响应有所差别,表观量子效率、光补偿点、呼吸速率都表现为孕穗期>灌浆期,在灌浆期,谷子弱光下光量子利用效率提高。本地品种小红毛的表观量子效率高、光补偿点低,利用低光强的能力强,但其生育期较短,产量不高;引进的常规品种和杂交品种的最大光合速率较高,利用强光的能力强,其中杂交种的光合能力又高于常规种。因此,若以抗灾补收为主,则可种植生育期较短的当地品种小红毛及周边地区的品种;如果气候条件适宜,降雨条件满足,则可种植产量较高的杂交谷和近年育成的常规品种。

参考文献:

- [1] Brutnell T P, Wang L. A model for C4 photosynthesis [J]. Plant Cell, 2010, 22(1): 2537-2544.
- [2] Doust A N, Kellogg E Z, Devos K M. A sequence-driven grass model system[J]. Plant Physiology, 2009, 149(1): 137-141.
- [3] 张亚琦,李淑文,付巍,等.施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5): 1119-1126.
- [4] 邵丽华,王莉,白雯雯,等.山西谷子资源叶酸含量分析及评价[J].中国农业科学,2014,47(70): 1265-1272.
- [5] 李顺国,刘斐,刘猛,等.我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J].农业现代化研究,2014,35(5): 531-535.
- [6] 关雅楠,黄正来,张文静,等.低温胁迫对不同基因型小麦品种光合性能的影响[J].应用生态学报,2013,24(7): 1895-1899.
- [7] 同丽霞,石玉,于振文.测墒补灌对不同小麦品种光合特性及产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(3): 372-378.
- [8] Acreche M M, Briceño-Felix G, Martin Sanchez J A, et al. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat [J]. Field Crops Research, 2009, 110: 91-97.
- [9] 王卫,谢小立,谢永宏.不同水分管理模式对水稻生长及光合特性的影响[J].长江流域资源与环境,2010,19(7): 746-751.
- [10] 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.
- [11] 张兴华,高杰,杜伟莉.干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(1): 154-159.
- [12] 刘建栋,周秀骥,于强.中国黄淮海地区冬小麦光合作用特征参数[J].应用气象学报,2003,14(3): 257-265.
- [13] 王尚明,张崇华,曾凯,等.不同品种水稻单叶的光合特性比较[J].中国农学通报,2015,31(12): 77-83.
- [14] 梁熠,齐华,王敬亚.行距配置对春玉米群体冠层环境与光合特性的影响[J].西北农业学报,2014,23(8): 66-72.
- [15] 郭志利,卢成达,李阳,等.谷子不同品种、生育时期、叶位光合特性研究[J].农学学报,2014,4(6): 5-9.
- [16] 刘子会,张红梅,张艳敏,等.灌浆期杂交谷子旗叶的光合特性[J].西北农业学报,2012,21(11): 60-64.
- [17] 卢成达,吕建珍,马建萍.不同谷子品种形态特征和光合生理特性分析[J].河北农业科学,2015,(01): 1-5.
- [18] 王忠.植物生理学[M].北京:中国农业出版社,2000; 179-182.
- [19] 李力,张祥星,郑睿.夏玉米光合特性及光响应曲线拟合[J].植物生态学报,2016,40(12): 1310-1318.
- [20] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等.阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响[J].生态学杂志,2012,31(11): 2797-2803.
- [21] 徐俊增,彭世彰,魏征,等.不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J].农业工程学报,2012,28(2): 72-76.
- [22] 樊修武,池宝亮,张冬梅.谷子杂交种灌浆期光合性能研究[J].山西农业科学,2011,39(3): 227-229.

(上接第193页)

- [23] 郑炳松.现代植物生理生化研究技术[M].北京:气象出版社,2006: 91-92.
- [24] 孙群,胡景江.植物生理学研究技术[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2006: 167-170.
- [25] 张岁岐,山仑.土壤干旱条件下氮素营养对玉米内源激素含量影响[J].应用生态学报,2003, 14(9): 1503-1506.
- [26] 罗宏海,韩焕勇,张亚黎,等.干旱及复水对膜下滴灌棉花根系及叶片内源激素含量的影响[J].应用生态学报,2013, 24(4): 1009-1016.
- [27] 杜伟莉,高杰,胡富亮,等.玉米叶片光合作用和渗透调节对干旱胁迫的响应[J].作物学报,2013, 39(3): 530-536.
- [28] Mishra KB, Iannaccone R, Petrozza A, et al. Engineered drought tolerance in tomato plants is reflected in chlorophyll fluorescence emission[J]. Plant Science, 2012, 182: 79-86.
- [29] 林叶春,曾昭海,任长忠,等.局部根区灌溉对裸燕麦光合特征曲线及叶绿素荧光特性的影响[J].作物学报,2012, 38(6): 1062-1072.
- [30] 王强,金则新,郭水良,等.濒危植物长叶榧的光合生理生态特性[J].生态学报,2014, 34(22): 6460-6470.
- [31] 李长宁,Manoj K S,农倩,等.水分胁迫下外源ABA提高甘蔗抗旱性的作用机理.作物学报[J], 2010, 36(5): 863-870.