

旱砂地两种籽瓜光合日变化及光响应研究

杨育苗¹,蒋志荣¹,安力²,罗建²,张永文²

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃兰州730070;2.甘肃农业大学园艺学院,甘肃兰州730070)

摘要:以靖远压砂地籽瓜试栽品种“黑丰1号”和主栽品种“靖远大板”为试材,测定籽瓜的光合参数,比较两个品种籽瓜的光合特性差异。结果表明,黑丰1号光饱和点($3\,818.18\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、光补偿点($67.47\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)均高于靖远大板,说明其对光照强度的要求较高;黑丰1号在较高光照条件下光合能力大于靖远大板,且在强光条件下黑丰1号的水分利用率更高(12:00为203%),抗旱保水性更强;两种籽瓜蒸腾速率(Tr)与其净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)及胞间 CO_2 浓度(Ci)相关性显著,且 Ci 与其它三个光合指标的相关系数均为负,变化趋势相反;同一类型籽瓜个体间的各光合指标也存在着显著差异,个体间 Gs 差异较小, Ci 差异较大;灰色关联度分析发现净光合速率(关联序1)及光合有效辐射(关联序2)是影响当地籽瓜光合能力最主要的两个参数,试验当地条件更适于黑丰1号的生长。

关键词:旱砂地;籽瓜;光合日变化;光响应;灰色关联度

中图分类号:S651 **文献标志码:**A

Diurnal variation of photosynthesis and light intensity response of two seed watermelons in dry sandy land

YANG Yu-miao¹, JIANG Zhi-rong¹, AN Li², LUO Jian², ZHANG Yong-wen²

(1. Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Horticulture College of Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Photosynthetic indexes of ‘Heifeng 1’ and ‘Jingyuan daban’ at Jingyuan county’s dry sandy land were analyzed to detect photosynthetic differences between the two varieties. The results showed that both light saturation point ($3\,818.18\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and light compensation point ($67.47\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) of Heifeng 1 were higher than which of ‘Jingyuan daban’ for its higher demand light intensity. Photosynthetic capacity, water use efficiency (203% at 12:00) and drought resistance of Heifeng 1 were higher than which of Jingyuan daban under strong light condition. Tr of two seed watermelons correlated significantly to the Pn , Gs and Ci while Ci corelated negatively to other indexes with adverse tren. There were significant differences in the photosynthetic indexes of the same varitiety of seed watermelon, the difference of Gs among individuals was not significant, and the difference of Ci was relatively significant. Grey correlation analysis showed that Pn (correlated order 1) and PAR (correlated order 2) were key indexes to affect photosynthetic capacity of watermelons. The finds suggest Heifeng 1 prefer to local conditions.

Keywords: the dry sandy land; seed watermelon; diurnal variations of photosynthesis; light response; grey correlation analysis

籽瓜(Seed Watermelon),又名“打瓜”,是葫芦科(*Cucurbitaceae*)西瓜属(*Citrullus*)普通西瓜种(*lanatus*)栽培西瓜亚种(*ssp. vulgaris*)的一个变种

(*var. megalasperms* Lin et Chao)^[1]。籽瓜为一年生蔓性植物,喜温喜光,最适温度 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$,要求积温 $2\,400^{\circ}\text{C}$ 以上,在高温、强光照、昼夜温差大的条件下

生长健壮,发育快,病害少,产量高^[1]。籽瓜瓜瓢是低糖类高级绿色保健食品,含有丰富的蛋白质、脂肪、维生素 B、D 等营养物质^[2];瓜籽也是我国名特优产品,具有很高的营养价值。

甘肃省白银市靖远县高湾乡属温带干旱半干旱气候,年均气温 8.9℃左右,最高气温 35.1℃,年均降水量 240 mm,年均蒸发量 1 634 mm,是我省旱砂瓜的主要产区。当地无灌条件,为适应干旱少雨的气候条件,籽瓜种植在旱砂地,且完全靠降雨维持生长。旱砂地是该地区保护性耕作的主导模式^[3-4]。该地主栽籽瓜品种为“靖远大板”,在种植品种上较为单一。为更好地利用当地生产条件,提高籽瓜产量,需引进更适合当地条件的新品种。“黑丰 1 号”是目前选育的籽瓜新品种。植株生长势旺盛,抗逆性较强,适应性广,种子每 667 m² 产量达到 130~150 kg,经济效益较好。本试验以试栽品种“黑丰 1 号”和主栽品种“靖远大板”为材料,测定籽瓜自然条件下光合作用日变化和光响应等光合参数,运用方差分析、相关性分析、隶属函数值及灰色关联度分析等方法,比较两个品种籽瓜的光合特性差异,为旱砂地引种及丰产栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为民勤县瓜类作物研究所提供的试栽品种“黑丰 1 号”和甘肃省白银市靖远县高湾乡贾崖村旱砂地主栽品种“靖远大板”。

1.2 试验方法

1.2.1 光合日变化的测定 利用 Li-6400 便携式光合作用测定仪 (LI-COR, Inc, Lincoln, NE, USA) 于 2016 年 7 月 21~26 日 (晴天) 进行光合作用日变化测定。采用自然光源,各时刻自然光照强度见图 6。从 8:00 到 18:00 每隔 2 h 测定 1 次,测定指标包括净光合速率 [$P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、胞间 CO_2 浓度 ($C_i, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、蒸腾速率 [$Tr, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、气孔导度 [$G_s, \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、空气相对湿度 (RH, %)、光合有效辐射 [$PAR, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] 等参数,并计算出水分利用率 (WUE)。选择长势一致的植株,取叶龄一致、叶位相同的 5 片叶进行标记测定,每片叶 3 次重复,每次读取 10 组数据,根据各个指标实测数据的值求其平均值。

1.2.2 光合光响应曲线的测定 利用 Li-6400 便携式光合作用测定仪,光合有效辐射 (LED 红蓝光源) 设定梯度为 0、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500、5 000、5 500、6 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,对每个类型籽瓜光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度及蒸腾速率进行测定,测试时选取叶龄一致、叶位相同的叶片,以叶片的中部为测试部位,3 次重复,结果取平均值。

1.3 数据处理

数据的统计与分析采用 Excel 2007、SPSS 17.0、DPS 9.5 和 Origin 8.5 软件进行。

2 结果与分析

2.1 籽瓜光合特性的日变化

2.1.1 2 种籽瓜的光合速率日变化 从图 1 可以看出,黑丰 1 号和靖远大板的净光合速率日变化曲线均呈双峰型,有“光合午休”现象,且靖远大板的“光合午休”现象更为明显;从上午 8:00 到 12:00 两种籽瓜的净光合速率均呈上升趋势,12:00 达到各自的第一个峰值 14.12 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑丰 1 号)、9.86 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (靖远大板),16:00 达到各自第二个峰值 13.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑丰 1 号)、9.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (靖远大板)。12:00 到 14:00 两种籽瓜的净光合速率明显下降,14:00 到 16:00 净光合速率又缓慢上升,18:00 两种籽瓜的净光合速率均到达最小值,此时黑丰 1 号的净光合速率远大于靖远大板,是其 2.7 倍。

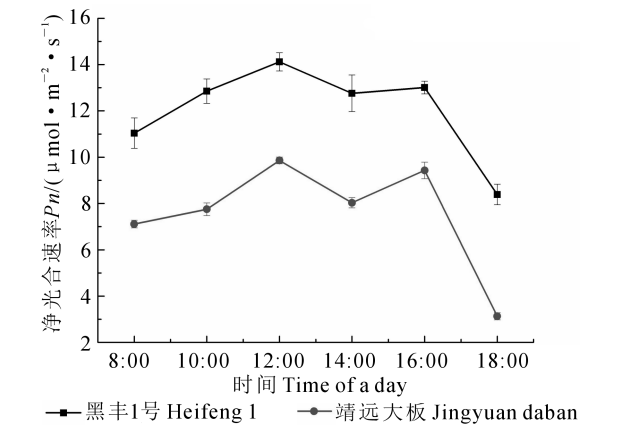


图 1 两种籽瓜光合速率日变化

Fig.1 The net photosynthetic rate diurnal change of 2 types of seed watermelons

2.1.2 2 种籽瓜胞间 CO_2 浓度日变化 由图 2 可以看出,黑丰 1 号与靖远大板的胞间 CO_2 浓度变化趋势基本一致,在 8:00、14:00、18:00 黑丰 1 号的胞间 CO_2 浓度大于靖远大板。黑丰 1 号于 8:00 到 12:00 胞间 CO_2 浓度缓慢下降,12:00 到 14:00 有所上升,14:00 到 16:00 继续回落,到 16:00 后则剧烈上升,达到最大值 358.35 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。靖远大板籽瓜的胞间 CO_2 浓度变化较为平稳,8:00 到 12:00 呈下降趋势,于 12:00 达到最小值 290

$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。12 : 00 到 18 : 00 则一直呈上升趋势。

2.1.3 2 种籽瓜蒸腾速率日变化 由图 3 可以发现,两种籽瓜的日蒸腾速率变化大致相同,呈不明显的双峰型。12 : 00 到达第一个峰值 $3.12 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑丰 1 号)、 $1.52 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (靖远大板);16 : 00 到达第二个峰值 $3.36 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑丰 1 号)、 $1.63 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (靖远大板)。

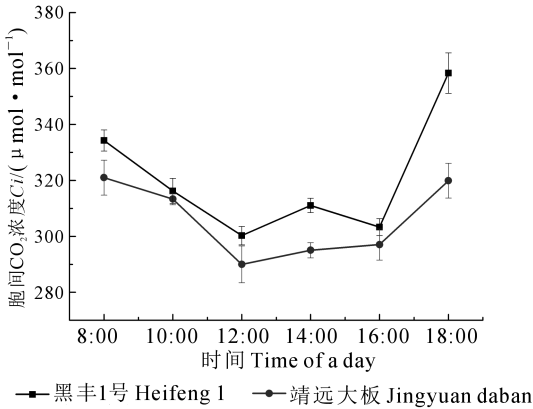


图 2 两种籽瓜胞间 CO_2 浓度日变化

Fig. 2 Intercellular CO_2 concentration diurnal change of 2 types of seed watermelons

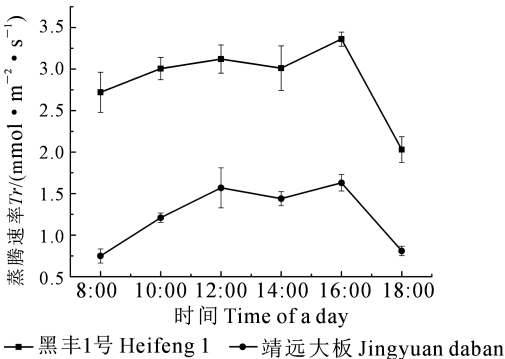


图 3 两种籽瓜蒸腾速率日变化

Fig. 3 Transpiration rate diurnal change of 2 types of seed watermelons

2.1.4 2 种籽瓜气孔导度日变化 黑丰 1 号和靖远大板的气孔导度日变化呈明显的双峰型(图 4)。两种籽瓜的峰值均出现在 10 : 00, $0.34 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑丰 1 号)、 $0.13 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (靖远大板) 和 16 : 00, $0.22 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑丰 1 号)、 $0.092 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (靖远大板)。12 : 00 到 14 : 00 气孔导度相对较低。

2.1.5 2 种籽瓜水分利用率日变化 水分利用率 (WUE) 是指植物光合作用同化二氧化碳与蒸腾消耗的水分之比,通常用光合速率与蒸腾速率之比或光合速率与气孔导度来表示,是反映农业生产中作

物能量转化效率的一个生理生态指标^[5]。本文用光合速率与蒸腾速率之比计算 WUE。

由图 5 可以发现,两种籽瓜水分利用率日变化曲线均呈不断下降的趋势。10 : 00 前籽瓜的水分利用率靖远大板大于黑丰 1 号,12 : 00 后则是黑丰 1 号的水分利用率大于靖远大板。

2.1.6 籽瓜光合有效辐射日变化 光合有效辐射 (PAR) 日变化曲线呈单峰曲线,8 : 00 到 14 : 00 呈上升趋势,峰值出现在 14 : 00,为 $1946 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,随后不断下降,18 : 00 达最小值 $796 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

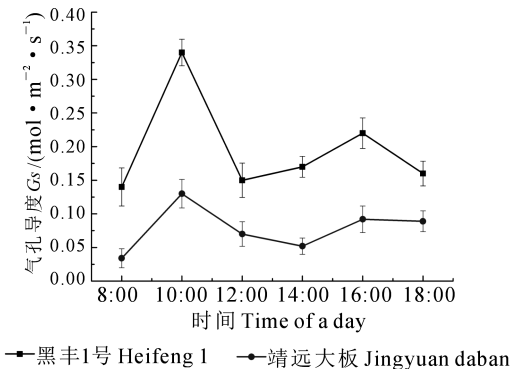


图 4 两种籽瓜气孔导度日变化

Fig.4 Stomatal conductance diurnal change of 2 types of seed watermelons

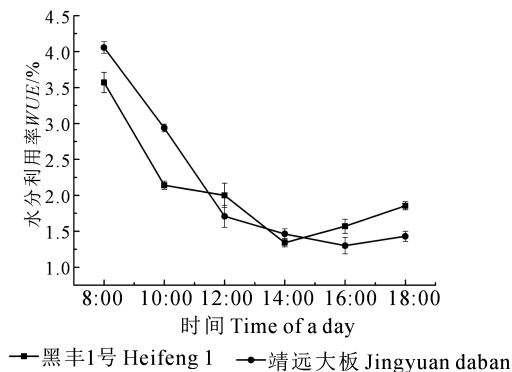


图 5 两种籽瓜水分利用率日变化

Fig.5 The water use efficiency diurnal change of 2 types of seed watermelons

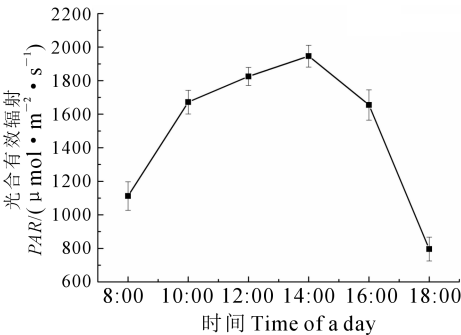


图 6 光合有效辐射日变化

Fig.6 Photosynthetic active radiation diurnal change

2.2 两种籽瓜光合—光响应曲线以及光饱和点、光补偿点的获得

光响应曲线反映了光照强度与净光合速率之间的变化规律^[6-7]。光饱和点是指在一定的光强范围内,植物的光合速率随光照度的上升而增大,当光照度上升到某一数值之后,光合速率不再继续提高时的光照强度值^[8-9]。达到光饱和点后,净光合速率变化较小,并且维持在较高的水平^[10]。

本研究采用非直角双曲线模型求取两种籽瓜的 LSP:

$$P_n = \frac{PAR \cdot Q + P_{nmax} - \sqrt{(PAR \cdot Q + P_{nmax})^2 - 4k \cdot PAR \cdot Q \cdot P_{nmax}}}{2k} - R_{day}$$

(1)

式中, P_n 为净光合速率, P_{nmax} 为最大净光合速率, PAR 为光合有效辐射, Q 为表观光量子效率, R_{day} 为暗呼吸速率, k 为光响应曲线曲角。根据该模型利用 SPSS 非线性回归,得到预测值 P_n ,同时可以计算出 Q 、 k 、 P_{nmax} 以及 R_{day} 的值^[11]。

利用实测数据对 $PAR-P_n$ 进行线性回归,可以得到拟合直线方程 $y=ax+b$,其中 y 为净光合速率实测值, x 为光合有效辐射,光补偿点即为与 x 轴的交点值,表观光量子效率为 a ,将 P_{nmax} 预测值带入方程可以得出光饱和点^[11]。

图 7a 及 7b 是两种籽瓜的光合—光响应曲线。由图 7a 可以看出,当光合有效辐射为零时,黑丰 1 号的净光合速率为 $1.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光补偿点经过计算为 $67.47 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,随着光合有效辐射的增强,净光合速率迅速上升,当其达到最大净光合速率 $17.04 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的光强值便是光饱和点,为 $3\,818.18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当光照强度达到饱和点后,净光合速率增长曲线变化平缓,增幅较小。图 7b 光合—光响应曲线表明,光合有效辐射为零时靖远大板 ($-0.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的净光合速率均为负值,光补偿点为 $52.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

s^{-1} 。随着光强的增大,净光合速率逐渐上升,达到最大净光合速率后便不再上升,其光饱和点为 $3\,697.96 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 两种籽瓜光合指标方差分析

对两种籽瓜的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 进行方差分析,结果见表 2。由平均值可知,黑丰 1 号的四种光合指标均大于靖远大板品种,二者间 C_i 差距相对最小, P_n 和 Tr 次之, G_s 差距相对最大;从标准差可以看出, G_s 的波动范围最小,为 $0.0105 \sim 0.0129 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, C_i 的波动范围最大,为 $16.8176 \sim 20.4694 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,表明同一类型籽瓜个体间的各光合生理指标也存在着显著差异,个体间 G_s 的差异较小, C_i 的差异较大。

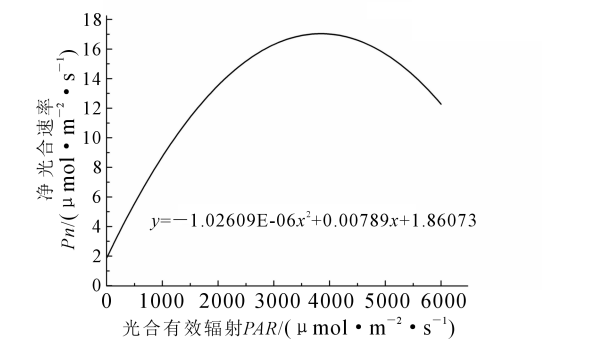


图 7a 黑丰 1 号光合—光响应曲线
Fig.7a Light response curve of Heifeng 1

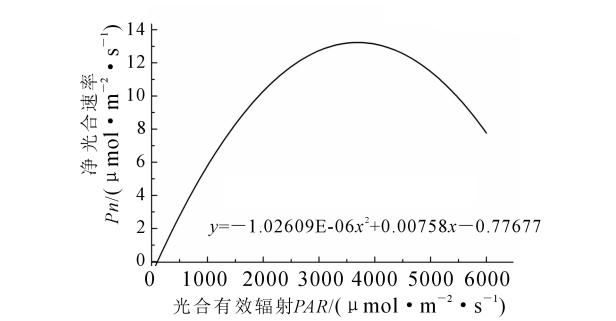


图 7b 靖远大板光合—光响应曲线
Fig.7b Light response curve of Jingyuan daban

表 1 拟合直线方程及相关指标				
Table 1 Fitting equation of the straight line and relevant indicators				
材料 Material	拟合直线方程 Imitative straight line equation	最大净光合速率 $P_{nmax}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光饱和点 $LSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光补偿点 $LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
黑丰 1 号 Heifeng 1	$y=0.0174x-1.1740$	17.0383	3818.18	67.47
靖远大板 Jingyuan Daban	$y=0.0142x-0.7414$	13.2278	3697.96	52.21

表 2 两个类型籽瓜的主要光合指标比较

Table 2 Comparing of main photosynthetic indexes of 2 types of seed watermelons

材料 material	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s /($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr /($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
黑丰 1 号 Heifeng 1	12.0283±0.3201B	0.1967±0.0129B	320.5816±16.8176A	2.886±0.3995CD
靖远大板 Jingyuan daban	7.5516±0.6389B	0.0778±0.0105A	306.0583±20.4694AB	1.2267±0.3716AB

注:表中数值为平均值±标准差,大写字母表示不同类型籽瓜在 0.01 水平下差异显著。
Note: The values in the table are averages ± standard deviation, capitalized letters indicate that different types of seed melon are significantly different at 0.01 levels.

2.4 两种籽瓜光合指标相关性分析

由表 3 及表 4 可以看出:黑丰 1 号的 P_n 与 C_i 呈显著负相关($r=-0.758$), P_n 与 Tr 呈极显著正相关($r=0.766$), G_s 与 C_i 、 Tr 均呈负相关,相关系数分别为-0.860 和-0.495 (显著), C_i 与 Tr 呈显著负相关($r=-0.728$)。靖远大板的 P_n 与 G_s 呈显著正相关($r=0.973$), P_n 与 Tr 呈极显著正相关($r=0.749$), G_s 与 Tr 呈显著负相关($r=-0.259$), C_i 与 Tr 呈显著负相关($r=-0.886$)。

表 3 黑丰 1 号光合参数的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between photosynthetic parameters of Heifeng 1

光合参数 Photosynthetic parameters	净光合 速率 P_n	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	蒸腾速率 Tr
P_n	1	0.863	-0.758 *	0.766 **
G_s	0.863	1	-0.860	-0.495 *
C_i	-0.758 *	-0.860	1	-0.728 *
Tr	0.766 **	-0.495 *	-0.728 *	1

注: ** 表示 0.01 水平上的相关性显著, * 表示 0.05 水平上的相关性显著。
Note: ** indicates that the correlation on the 0.01 level is significant, * indicates that the correlation on the 0.05 level is significant.

表 4 靖远大板光合参数的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between photosynthetic parameters of Jingyuan daban

光合参数 Photosynthetic parameters	净光合 速率 P_n	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	蒸腾速率 Tr
P_n	1	0.973 *	-0.480	0.749 **
G_s	0.973 *	1	-0.636	-0.259 *
C_i	-0.480	-0.636	1	-0.886 *
Tr	0.749 **	-0.259 *	-0.886 *	1

注: ** 表示 0.01 水平上的相关性显著, * 表示 0.05 水平上的相关性显著。
Note: ** indicates that the correlation on the 0.01 level is significant, * indicates that the correlation on the 0.05 level is significant.

2.5 两种籽瓜光合指标隶属函数值法分析

对所测籽瓜光合生理指标用下式求每个品种各指标的具体隶属值:

$$X(\mu) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(2)

或

$$X(-\mu) = 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(3)

式中, X 为各品种某一光合生理指标测定值, $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为所用品种中该指标测定值内的最大值和最小值。若所用指标与光合作用呈正相关, 用 $X(\mu)$ 式; 若所用指标与光合作用呈负相关, 用 (3) 式。把每一品种各光合生理指标的隶属值进行累加, 并求其平均数, 根据各品种平均值大小确定光和能力的强弱。

表 5 两种籽瓜光合参数的隶属函数值

Table 5 Photosynthetic parameters of membership function value 2 seed watermelons

隶属函数值 Membership function	黑丰 1 号 Heifeng 1	靖远大板 Jingyuan daban
Z(1)	0.61	0.58
Z(2)	0.86	0.50
Z(3)	0.68	0.46
Z(4)	0.73	0.58
Z(5)	0.54	0.51
Z(6)	0.62	0.62

注:表中 Z(1), Z(2), ..., Z(6) 分别代表各籽瓜 P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 、 WUE 、 PAR 的隶属函数值。
Note: Z(1), Z(2), ..., Z(6) in the table represent the membership functions of seed melon's P_n , G_s , C_i , Tr , WUE and PAR respectively.

根据两种籽瓜的隶属函数值对各光合生理指标权重处理可得隶属函数平均值。从表 6 可以发现, 黑丰 1 号的隶属函数累加平均值较大, 为 0.67; 靖远大板较小, 为 0.54。由此可以得出两种籽瓜的光合作用的大小为: 黑丰 1 号>靖远大板。

2.6 两种籽瓜光合生理指标灰色关联度分析

灰色关联分析是一种多因素统计分析方法, 可以用来描述各因素之间关系的强弱、大小和次序。如果两因素的变化趋势具有一致性, 则它们之间的关联度较高; 反之, 则较低^[12]。

设参考数列为 X_0 , 比较数列为 $X_i(i=1, 2, \dots, n)$, 则参考数列 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$, 比较数列 $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$ 。利用下列公式对各指标进行处理:

用 $X'_i(k) = \frac{x_i(k) - x_i}{S_i}$ 对原始数据进行无量纲化处理,其中 $X_i(k)$ 是原始数据, X 和 S_i 是同一指标的平均值和标准差。

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min\min\Delta i(k) + \rho\max\max\Delta i(k)}{\Delta i(k) + \rho\max\max} \tag{4}$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (i, k = 1, 2, \cdots, n) \tag{5}$$

式中, $\varepsilon_i(k)$ 为关联系数; r_i 为灰色关联度; $\Delta i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$ 表示 X_0 数列与 X_i 数列在第 k 点的绝对值; $\min\min\Delta i(k)$ 为二级最小差, $\max\max\Delta i(k)$ 为二级最大差, ρ 为分辨系数,取值范围为 0 到 1,文中试验取值 0.5^[13]。

将两种籽瓜各光合指标的平均隶属函数值与 6 个光合指标看作一个灰色系统,前者作为参考数列 $X_0, X_0 = (0.67, 0.54), Pn, Gs, Ci, Tr, WUE, PAR$ 等 6 个光合指标作为比较数列 X_i , 即 $X_i(Pn) = (12.03,$

$7.55); X_i(Gs) = (0.192, 0.079); X_i(Ci) = (320.58, 306.06); X_i(Tr) = (2.89, 1.23); X_i(WUE) = (2.08, 2.17); X_i(PAR) = (1501, 1501)$ 。对数据分别进行标准化无量纲处理后,在 DPS 软件中,用公式(4)和(5)计算出各光合指标与平均隶属函数值的关联度,并按关联度大小进行排序。关联度大小可表明某一项光合指标对光合作用的敏感程度,关联度越大则相似程度越高,反之则越低。计算出关联度和关联序。

由表 6 可看出,6 个光合指标与光合作用的密切程度(关联序)从大到小依次是:净光合速率(Pn)、光合有效辐射(PAR)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、气孔导度(Gs)、水分利用率(WUE)、蒸腾速率(Tr)。可见,6 种光合生理指标中净光合速率和光合有效辐射对总光合作用影响最大,所以为增强植物的光合作用应首先满足其光照条件,其次再考虑水分及 CO_2 浓度。

表 6 籽瓜各光合指标与光合作用的关联度及关联序

Table 6 Correlation degrees and association order of photosynthetic indexes of 2 seed watermelons						
项目 Project	净光合速率 Pn	气孔导度 Gs	胞间 CO_2 浓度 Ci	蒸腾速率 Tr	水分利用率 WUE	光合辐射 PAR
黑丰 1 号 Heifeng 1	0.825	0.722	0.56	0.618	0.476	0.811
靖远大板 Jingyuan daban	0.598	0.488	0.698	0.404	0.602	0.581
关联度 Correlated grade	0.712	0.605	0.629	0.511	0.539	0.696
关联序 Correlated order	1	4	3	6	5	2

3 讨 论

3.1 旱砂地籽瓜光合特性

在光合日变化的测定中,发现 14 : 00 两种籽瓜的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)回落至最小值,胞间 CO_2 浓度(Ci)、空气温度(T_{air})、叶温(T_{leaf})、光合有效辐射(PAR)到达最大值,两个品种籽瓜均出现了“光合午休”现象。许大全等提出,造成植物叶片净光合速率午间降低的植物自身因素不外乎气孔的部分关闭引起的气孔限制和叶肉细胞自身活性下降引起的非气孔限制两类^[14-15],本研究中两种类型籽瓜的光饱和点远大于 14 : 00 的光合有效辐射,可以肯定两种籽瓜 Pn 在 14 : 00 的下降不是因为光照强度高于光饱和点而造成光抑制引起的,而是因为叶片部分气孔关闭导致的。该时段由于强烈的太阳辐射和高温导致植株出现了“光合午休”现象,致使叶片部分气孔关闭,气孔导度下降,光合、蒸腾作用受抑制,造成以上参数达最小值。

光饱和点和光补偿点是反映植物对光照条件要求的重要指标,通过它们可以判断植物是否具有

耐阴性^[16-17]。一般认为光饱和点和光补偿点都比较低的植物属于耐阴植物,它们可以充分利用弱光进行光合作用^[18]。反之,光饱和点和光补偿点均较高的属于阳性植物,能够很好地在强光下进行光合作用^[19]。孟繁静^[20]认为依照植物对光照强度的需要,植物分为阳性(喜光)植物和阴性(耐阴)植物。阳性植物 LSP 一般在 $540 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以上, LCP 在 $13 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以上;而阴性植物 LSP 一般在 $90 \sim 180 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, LCP 在 $10 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以下。由此发现本研究中两种类型的籽瓜均为阳性植物,适合生长在日照强烈的区域。其中黑丰 1 号的光饱和点及光补偿点均较高,说明其对光照强度的要求较高,靖远大板则对光强要求相对较低。利用非直角双曲线模型模拟两种籽瓜净光合速率与光合有效辐射的关系可以发现(图 8),两种籽瓜在不同光强下的最大净光合速率对光强的响应呈现米氏响应规律,与张向前^[21]的结果一致。

3.2 “黑丰 1 号”与“靖远大板”光合特性的差异

黑丰 1 号在较弱、较强光照条件下均能达到远高于靖远大板的净光合速率(图 1)、气孔导度(图 4)和与靖远大板接近的胞间 CO_2 浓度(图 2),说明

黑丰 1 号能够利用较少的 CO₂ 达到较高的光合速率^[22]。在水分利用率(WUE)方面,强光下则黑丰 1 号更强,说明在强光环境中黑丰 1 号的水分利用率高、抗旱保水性强。

从相关性分析看出, P_n 与 T_r 有着极显著($P<0.01$)的相关关系, G_s 与 T_r 有着显著($P<0.05$)的相关关系, C_i 与 T_r 也有着显著($P<0.05$)的相关关系。说明籽瓜的蒸腾速率与其净光合速率、气孔导度及胞间 CO₂ 浓度有着密切的关系,蒸腾速率可能是影响不同类型籽瓜净光合速率、气孔导度及胞间 CO₂ 浓度的内部因子^[22]。 C_i 与其它三个光合生理指标的相关系数均为负,表明籽瓜胞间 CO₂ 浓度与其净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均为负相关,变化趋势相反。从方差分析可以看出, G_s 的波动范围最小, C_i 的波动范围最大,说明同一类型籽瓜个体间的各光合生理指标也存在着显著差异,个体间 G_s 的差异较小, C_i 的差异较大。从灰色关联度分析发现 6 种光合生理指标中净光合速率和光合有效辐射对总光合作用影响最大,为增强植物的光合作用应首先满足其光照条件,其次考虑 CO₂ 浓度及水分,因此黑丰 1 号更符合当地强光照干旱的气候条件。

参 考 文 献:

[1] 林明,李春燕,白晓山,等.籽瓜花粉活力测定最适培养条件研究[J].新疆农业科学. 2017,54(3):429-433.

[2] 湛园园,田丽萍,刘宏亮,等.籽瓜皮总皂苷提取物胶囊的制备工艺研究[J].食品研究与开发, 2017,38(04):48-53.

[3] 李双,肖洪浪,张慧文,等.景泰县旱地、旱砂地养分特征比较研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(04):157-162.

[4] 逢蕾,肖洪浪,路建龙,等.干旱半干旱地区旱砂地结构及水分特征[J].中国沙漠,2012,32(3):698-706.

[5] 胡绵好,袁菊红,奥岩松.西瓜皮水浸提物对西瓜种子萌发的影响[J].华北农学报,2008,23(增刊):40-42.

[6] 韩瑞宏,田华,张亚光,等.北京地区公农 1 号紫花苜蓿叶片光合作用日变化特征[J].草业科学,2008,25(6):34-37.

[7] 张治安,杨福,陈展宇,等.菰叶片净光合速率日变化及其与环境因子的相互关系[J].中国农业科学,2006,39(3):502-509.

[8] 郭春燕,李晋川,岳建英,等.两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征[J].生态学报, 2013. 33(6): 1751-1761.

[9] 郭运雪,蒋文伟,戴锋,等.3 种金鸡菊的光合特性比较[J].浙江农林大学学报, 2012,29(5):755-761.

[10] 柯世省,金则新,李钧敏.浙江天台山茶树光合日变化及光响应[J].应用与环境生物学报,2002,8(2):159-164.

[11] 林保花,刘金祥,肖生鸿,等.粤西乡土香根草光合生理生态特征日动态分析[J].应用生态学报, 2006, 17(11): 2041-2045.

[12] 田民,刘思峰,卜志坤.灰色关联度算法模型的研究综述[J].统计与决策,2008,(1):24-27.

[13] Wang R Z, Gao Q. Photosynthesis, transpiration, and water use efficiency in two divergent *Leymus chinensis* populations from Northeast China[J].Photosynthetic, 2001, 39(1): 123-126.

[14] Xu D Q. Some problems in stomatal limitation analysisof photosynthesis[J]. Plant Physiol Commun ,1997, 33(4):241-244.

[15] Xu D Q , Shen Y G. Diurnal variations in the photosynthetic efficiency in plants. Acta Phytophysiol Sin [J]. Plant Physiology Journal, 1997, 23(4): 410-416.

[16] 陶磊,严俊霞,陈良富,等.太原盆地玉米和大豆光合作用日变化和光合光响应[J].安徽农业科学, 2011, 39(5): 2521-2523.

[17] 林茂兹,曹智,王阮萍,等.太子参光合速率变化特征初探[J].草业科学,2009,26(7):36-39.

[18] 蒋高明.植物生理生态学[M].北京:高等教育出版社,2004: 65-66.

[19] 左应梅,陈惠娟,杨重法,等.华南 8 号木薯光响应参数日变化及其主要影响因子[J].中国农学通报, 2010, 26(13): 371-375.

[20] 孟繁静.植物生理学[M].武汉:华中科技大学出版社,2000: 206-213.

[21] 张向前,赵秀玲,王钰乔,等.耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化和籽粒产量的影响[J].应用生态学报,2017,28(3):885-893.

[22] 党远,樊丽莉,樊巍,等.流苏光合生理日变化及光响应的特征[J].西部林业科学,2016,45(02):117-123.