

不同遮光处理对马铃薯光合作用和产量的影响

唐鑫华¹ 王堡槐¹ 马佳¹ 李威² 张丽莉¹ 石瑛^{1*}

(1. 东北农业大学 农学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要 为探究遮光处理对马铃薯植株光合作用和产量的影响,以12个马铃薯品种原种为试验材料,苗齐后设置正常光照(CK)、单层遮光网遮盖处理(Z_1)、双层遮光网遮盖处理(Z_2),间隔取样测量期为14 d,分别测定叶绿素相对含量(SPAD)、荧光参数(F_v/F_m)、光合生理指标(蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 、净光合速率 P_n 和胞间 CO_2 浓度 C_i)、单株产量、干物质含量和单株块茎干物质质量。结果表明,遮光处理导致叶片的 SPAD 下降,部分品种在遮光处理下叶片提早枯萎;遮光处理初期 Z_1 和 Z_2 叶片的 F_v/F_m 高于 CK,而随着处理时间的延长 Z_1 和 Z_2 叶片的 F_v/F_m 显著低于 CK;除“大西洋”外,其余品种的 T_r 、 G_s 和 P_n 随遮光程度加重而下降但 C_i 相反, Z_2 的 P_n 比 CK 低 12.20%~82.69%、 C_i 比 CK 高 11.52%~76.55%;且 Z_1 和 Z_2 的单株产量比 CK 低 38.44%~100.00%, Z_2 的块茎干物质含量比 CK 低 66.88%~100.00%, Z_1 和 Z_2 的单株块茎干物质质量比 CK 低 42.06%~100.00%。

关键词 马铃薯;光照强度;光合作用;荧光参数;产量

中图分类号 S532

文章编号 1007-4333(2022)02-0046-11

文献标志码 A

Effects of different shading treatments on photosynthesis and yield of potato

TANG Xinhua¹, WANG Baohuai¹, MA Jia¹, LI Wei², ZHANG Lili¹, SHI Ying^{1*}

(1. Agricultural College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract To study the effects of shading treatments on the photosynthesis and yield of potato, 12 potato virus-free varieties were taken as experimental materials. After the seedling emergence, the control group (CK) was planted under normal light, treatment Z_1 was covered by a single-layer shading net, and treatment Z_2 was covered by a double-layer shading net. The sampling interval for was 14 days, and the relative content of chlorophyll (SPAD), fluorescence parameters (F_v/F_m), photosynthetic physiological indexes (transpiration rate T_r , stomatal conductance G_s , net photosynthetic rate P_n and intercellular CO_2 concentration C_i), yield per plant, dry matter content and weight of dry matter per plant tuber were measured, respectively. The results showed that: The SPAD of leaves was decreased in treatments Z_1 and Z_2 , and the leaves of some varieties withered earlier. F_v/F_m of the leaves of plants in treatments Z_1 and Z_2 in the early stage was higher than that of CK, while with the extension of treatment time, the F_v/F_m of leaves of plants in Z_1 and Z_2 was significantly lower than that of the control. T_r , G_s and P_n of other varieties except “Atlantic” decreased in Z_1 and Z_2 , while C_i was the opposite. P_n of Z_2 was significantly lower than that of CK 12.20%-82.69%, and C_i was significantly higher than that of CK 11.52% - 76.55%. Moreover, the yield per plant of Z_1 and Z_2 was 38.44% - 100.00% lower than that of CK, the tuber dry matter content of Z_2 was 66.88% - 100.00% lower than that of CK, and the weight of dry matter per tuber of Z_1 and Z_2 was 42.06% - 100.00% lower than that of CK.

Keywords potato; light intensity; photosynthesis; fluorescence parameters; yield

收稿日期: 2021-02-09

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-09);东北农业大学大学生 SIPT 项目

第一作者: 唐鑫华,高级实验师,主要从事马铃薯分子育种和生理研究,E-mail:tangxinhua821@sina.com

通讯作者: 石瑛,副研究员,主要从事马铃薯育种及栽培研究,E-mail:shiyingneau@sina.com

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是世界第三、中国第四大粮食作物,其块茎营养丰富、含有人体必需的全部七大类营养物质。马铃薯品质的提升和产量的提高及产业的可持续发展对保障世界的粮食安全具有重要意义^[1-2]。光合作用对马铃薯的代谢过程十分重要,马铃薯块茎中 95% 以上的干物质含量来自光合作用的积累,光合速率在很大程度上反映了马铃薯干物质的积累能力^[3-4]。光照作为光合作用的能量来源是影响植物生长的重要因素之一,光照强度、光质和光周期等都会对植物生长发育和形态建成产生较大影响,光照强度是影响植物光合作用重要的因子^[5-6]。有研究表明光照强度高于植物光合作用的光饱和点可能引起植物光合色素降解、光抑制、光合速率降低,造成膜质过氧化和活性氧代谢紊乱等^[7-10];光照强度低于植物光合作用的光补偿点,植物净光合速率下降、碳水化合物合成减少,破坏碳平衡,造成植物碳饥饿^[11-12]。植物生长的最适光照强度并不固定,不同的植物种类、品种和生长环境存在显著差异^[5]。随着气候和环境的变化,连续的雾霾天气降低光照强度,会造成农作物的产量和品质下降^[13]。

在中国西南地区马铃薯与玉米等高位作物间套种植是一种重要模式,而马铃薯作为低矮作物,在不同生育时期均会受到高位作物的遮荫影响,造成品质和产量下降,影响马铃薯种植的经济效益。弱光胁迫逐渐成为限制马铃薯产业发展的重要因素^[14-16]。而马铃薯脱毒种苗繁育过程需光照,这需要消耗大量的能源转化为光能,这种能源消耗将限制产业的可持续发展。因此研究持续遮光条件对马铃薯光合作用和产量的影响,对于提高马铃薯常规种植光能利用率、降低马铃薯种苗生产中的能源消耗具有重要意义,对于挖掘和培育耐弱光马铃薯种质资源、进一步丰富马铃薯的种植方式(间套种、林下种植等)和扩展种植区域具有重要意义。目前,遮荫对马铃薯光合作用和产量影响方面的研究鲜见报道。本研究通过对 12 个马铃薯主要栽培品种在特定生育时期进行遮光处理,比较其荧光参数、光合生理指标和产量的差异,旨在揭示不同遮光处理对马铃薯生长和产量的影响,以期为选育耐遮荫马铃薯品种提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

以 12 个马铃薯品种(‘尤金’、‘荷兰 7 号’、‘东

农 310’、‘兴佳 2 号’、‘延薯 4 号’、‘龙薯 4 号’、‘延薯 9 号’、‘延薯 10 号’、‘克新 13 号’、‘克新 19 号’、‘克新 23 号’和‘大西洋’)原原种为试验材料(脱毒组培苗种植在土壤基质),种薯由东北农业大学马铃薯研究所提供,试验地点为东北农业大学校内马铃薯盆栽场。

1.2 试验设计

选取质量均一种薯,20 °C、散色光催芽 15 d,盆栽种植,2019 年 5 月 11 日整薯播种。盆栽所用土盆规格为高 26 cm、上部内径 33 cm,土壤至盆上沿 3 cm。基质为草炭土和黑钙土按质量比 3 : 1 均匀混合, pH 6.51,碱裂解氮(N)205.5 mg/kg,有效磷(P)44.1 mg/kg,速效钾(K₂O)262.0 mg/kg,有机质 75.8 g/kg。播种前均匀施入基肥尿素、硫酸钾和磷酸二铵,用量分别为 1.50、3.00 和 2.25 g/盆^[18]。苗齐后,6 月 10 日搭建遮光网开始进行遮光处理,设置 3 个处理:对照 CK(正常光照)、Z₁(单层遮光网)、Z₂(双层遮光网),见表 1。遮光网距地面高 2.0 m、四周较盆栽种植区域外延 2.0 m,每个品种每个处理 6 盆,各处理间距 2.5 m,人工浇灌保持各处理基质含水率一致,用浙江托普云农科技股份有限公司的快速测定仪 TZS-1K-G 测定土壤基质水分;设置 5 个测定期:6 月 24 日(第 1 次)、7 月 8 日(第 2 次)、7 月 22 日(第 3 次)、8 月 5 日(第 4 次)和 8 月 19 日(第 5 次);第 5 次测定后移除遮光网,9 月 4 日收获。

表 1 不同处理光照强度

Table 1 Light intensity of different treatments

处理 Treatment	处理方式 Method of treatment	12:00 晴天 光照强度/1x Light intensity at 12:00 on sunny days
CK	正常光照 Normal light	78 000±11 000
Z ₁	单层遮光网 Single-layer shading net	16 000±4 000
Z ₂	双层遮光网 Double-layer shading net	3 800±1 400

注:应用照度计 TES-1332A 距地面 1.2 m 处且水平放置测定光照强度。

Note: Use the illuminance meter TES-1332A to measure the light intensity at 1.2 m from the ground and place it horizontally.

1.3 测定指标及方法

于测定日期 7:00—11:00 分别取样测定叶绿素相对含量和荧光参数,共计 5 次;于 7 月 8 日测定光合作用参数;9 月 4 日收获单株,测定单株产量、块茎干物质含量和单株块茎干物质质量。

1.3.1 叶绿素相对含量、叶绿素荧光动力学参数和光合作用参数测定

选取长势均一植株,每个品种每种处理 3 株,测定部位均为上部第 3 和第 4 片叶。应用日本柯尼卡美能达公司的叶绿素仪 SPAD-502 测定叶绿素相对含量;应用叶绿素荧光仪 PAM-2500 测定叶绿素荧光参数 F_v/F_m ;应用德国 WALZ 公司的植物光合作用仪 GFS-3000 测定光合作用参数 T_r 、 G_s 、 P_n 和 C_i ,参数设置如下:光量子通量为 $1\ 400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 $25\ ^\circ\text{C}$ 、 CO_2 浓度 $380\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 、叶室面积 $4.00\ \text{cm}^2$ ^[17]。

1.3.2 干物质含量的测定

将样品切成 $1.5\ \text{cm} \times 1.5\ \text{cm} \times 1.5\ \text{cm}$ 的小块,置于烘箱 $105\ ^\circ\text{C}$ 杀青,而后 $80\ ^\circ\text{C}$ 下加热干燥,至恒

重为止。

1.3.3 数据分析

应用 Excel 2012 记录数据,应用 SPSS 23 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同遮光处理对 SPAD 的影响

由表 2 可知,在第 4 次(08-05)和第 5 次(08-19)测定期的同一品种不同处理间 SPAD 差异显著,同一测定期 SPAD 由高到低均表现为 $\text{CK} > Z_1 > Z_2$;在第 5 次测定期各品种 Z_1 的 SPAD 比 CK 低 $7.80\% \sim 66.64\%$, Z_2 的 SPAD 比 CK 低 $30.20\% \sim 65.37\%$,‘大西洋’和‘兴佳 2 号’的 Z_1 和 Z_2 的 SPAD 显著高于其他品种的同种处理;随着遮光处理时间的持续部分品种植株叶片较 CK 出现提早枯萎的现象,如‘尤金’、‘龙薯 4 号’、‘延薯 4 号’、‘延薯 9 号’、‘延薯 10 号’和‘克新 23 号’。结果表明,遮光处理导致叶片的 SPAD 下降,部分品种在遮光处理下叶片提早枯萎。

表 2 不同处理下马铃薯叶片的 SPAD

Table 2 SPAD of potato leaves under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	测定日期 Date of measurement				
		06-24 (第 1 次)	07-08 (第 2 次)	07-22 (第 3 次)	08-05 (第 4 次)	08-19 (第 5 次)
尤金 Youjin	CK	43.433 a	39.067 a	42.900 a	40.967 a	37.633
	Z_1	41.233 ab	37.067 a	37.800 a	20.356 b	—
	Z_2	37.200 b	33.967 b	38.167 a	—	—
大西洋 Atlantic	CK	39.867 b	36.867 a	41.933 a	40.200 a	37.633 a
	Z_1	46.233 a	38.700 a	40.300 a	33.867 b	34.733 ab
	Z_2	39.000 b	34.833 b	38.233 a	35.033 b	30.033 b
荷兰 7 号 Netherlands 7	CK	46.400 a	40.367 a	39.500 a	40.700 a	23.133 a
	Z_1	43.433 ab	38.700 a	40.233 a	37.467 a	13.267 b
	Z_2	40.733 b	40.933 a	39.200 a	22.333 b	9.467 c
东农 310 Dongnong 310	CK	41.767 a	39.867 a	42.667 a	37.067 ab	30.967 a
	Z_1	37.967 a	37.800 a	40.333 a	41.700 a	23.167 b
	Z_2	42.833 a	41.867 a	39.400 a	35.700 b	11.167 c
兴佳 2 号 Xingjia 2	CK	49.200 a	45.433 a	47.433 a	47.200 a	42.800 a
	Z_1	44.167 b	39.200 a	39.767 b	42.600 a	34.333 ab
	Z_2	44.433 b	41.100 a	42.567 a	27.133 b	29.150 b

表 2(续)

品种 Variety	处理 Treatment	测定日期 Date of measurement				
		06-24 (第 1 次)	07-08 (第 2 次)	07-22 (第 3 次)	08-05 (第 4 次)	08-19 (第 5 次)
龙薯 4 号 Longshu 4	CK	40.500 b	43.533 a	43.900 a	42.367 a	40.467 a
	Z ₁	44.700 a	37.533 b	38.133 b	43.000 a	13.500 b
	Z ₂	44.300 a	42.567 a	41.767 a	26.200 b	—
延薯 4 号 Yanshu 4	CK	37.300 a	34.067 a	31.800 a	35.367 a	5.733 a
	Z ₁	31.233 b	32.633 a	35.567 a	33.933 a	3.221 b
	Z ₂	38.767 a	30.267 a	33.467 a	23.566 b	—
延薯 9 号 Yanshu 9	CK	42.667 a	40.667 a	42.967 a	39.833 a	29.467
	Z ₁	37.767 a	33.000 b	37.567 ab	30.167 b	—
	Z ₂	38.733 a	34.867 ab	27.033 b	29.600 b	—
延薯 10 号 Yanshu 10	CK	38.767 a	32.433 a	34.667 a	35.467 a	27.267 a
	Z ₁	39.800 a	31.533 a	35.933 a	35.767 a	15.467 b
	Z ₂	32.500 b	30.033 b	34.000 a	31.533 b	—
克新 13 号 Kexin 13	CK	41.533 a	41.633 a	41.333 a	37.800 a	34.267 a
	Z ₁	42.600 a	39.167 a	36.867 b	36.767 a	16.533 b
	Z ₂	45.867 a	39.267 a	41.167 a	31.567 b	11.867 c
克新 19 号 Kexin 19	CK	42.600 a	39.433 a	41.067 a	40.667 a	36.733 a
	Z ₁	40.767 a	38.633 a	37.900 a	38.300 ab	13.500 ab
	Z ₂	41.000 a	39.767 a	39.400 a	35.533 b	12.867 b
克新 23 号 Kexin 23	CK	47.233 a	41.267 a	42.800 a	38.467 a	35.800
	Z ₁	42.933 b	35.200 b	36.000 b	36.233 a	—
	Z ₂	43.233 b	34.167 b	35.200 b	31.000 b	—
方差分析 Analysis of variance	品种 Variety	*	*	*	*	**
	处理 Treatment	NS	NS	*	*	**
	品种×处理 Variety×Treatment	*	*	*	**	**

注:CK,正常光照;Z₁,单层遮光网遮盖处理;Z₂,双层遮光网遮盖处理。小写字母表示在 0.05 水平差异显著; * 和 ** 表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著;NS 表示差异不显著;—代表植株叶片枯萎。下同。

Note: CK, under normal light, Z₁, covered by a single-layer shading net; Z₂, covered by a double-layer shading net. Lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels; * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels; NS indicate no significant differences; — represent leaf blight. The same below.

2.2 不同遮光处理对荧光动力学参数的影响

由表 3 可知,在前 4 次(06-24、07-08、07-22 和 08-05)时,马铃薯品种间的 F_v/F_m 差异不显著、在第 5 次(08-19)测定时差异显著;处理间在第 1、4 和

5 次测定时差异显著;品种×处理在测定时差异均显著。

同一品种的不同处理在第 1 次测定期叶片的 F_v/F_m 由高到低表现为 $Z_2 > Z_1 > CK$,除‘克新 19 号’

表3 不同处理下马铃薯叶片的 F_v/F_m Table 3 F_v/F_m of potato leaves under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	测定日期 Date of measurement				
		06-24 (第1次)	07-08 (第2次)	07-22 (第3次)	08-05 (第4次)	08-19 (第5次)
尤金 Youjin	CK	0.747 b	0.800 a	0.802 a	0.774 a	0.750 a
	Z ₁	0.782 a	0.808 a	0.770 a	0.749 b	—
	Z ₂	0.807 a	0.798 a	0.786 a	—	—
大西洋 Atlantic	CK	0.758 b	0.786 b	0.783 a	0.779 a	0.770 a
	Z ₁	0.751 b	0.804 a	0.758 a	0.787 a	0.501 b
	Z ₂	0.808 a	0.804 a	0.779 a	0.765 a	0.750 a
荷兰7号 Netherlands 7	CK	0.749 b	0.733 b	0.764 a	0.773 a	0.772 a
	Z ₁	0.757 b	0.781 a	0.790 a	0.789 a	0.563 ab
	Z ₂	0.804 a	0.776 a	0.625 a	0.485 b	0.401 b
东农310 Dongnong 310	CK	0.741 b	0.772 a	0.765 b	0.751 ab	0.788 a
	Z ₁	0.738 b	0.802 a	0.766 b	0.783 a	0.653 ab
	Z ₂	0.815 a	0.772 a	0.794 a	0.741 b	0.477 b
兴佳2号 Xingjia 2	CK	0.753 b	0.806 a	0.751 a	0.719 a	0.788 a
	Z ₁	0.744 b	0.792 a	0.780 a	0.510 b	0.563 ab
	Z ₂	0.802 a	0.789 a	0.775 a	0.703 a	0.477 b
龙薯4号 Longshu 4	CK	0.753 a	0.749 a	0.799 a	0.792 a	0.765 a
	Z ₁	0.799 a	0.753 a	0.791 ab	0.781 a	0.568 b
	Z ₂	0.801 a	0.748 a	0.769 b	0.253 b	—
延薯4号 Yanshu 4	CK	0.722 c	0.726 a	0.755 a	0.772 a	0.483 a
	Z ₁	0.793 b	0.714 a	0.786 a	0.757 a	0.267 b
	Z ₂	0.810 a	0.762 a	0.783 a	0.520 b	—
延薯9号 Yanshu 9	CK	0.738 b	0.792 a	0.796 a	0.779 ab	0.757
	Z ₁	0.811 a	0.791 a	0.793 a	0.801 a	—
	Z ₂	0.796 a	0.776 a	0.773 b	0.760 b	—
延薯10号 Yanshu 10	CK	0.726 b	0.795 a	0.792 a	0.790 a	0.489 a
	Z ₁	0.818 a	0.787 a	0.801 a	0.780 a	0.333 b
	Z ₂	0.793 a	0.753 b	0.791 a	0.757 a	—
克新13号 Kexin 13	CK	0.682 c	0.771 ab	0.779 a	0.758 a	0.762 a
	Z ₁	0.818 a	0.781 a	0.793 a	0.792 a	0.567 b
	Z ₂	0.797 b	0.754 b	0.785 a	0.753 a	0.447 c
克新19号 Kexin 19	CK	0.787 b	0.719 b	0.801 a	0.808 a	0.754 a
	Z ₁	0.815 a	0.725 b	0.790 a	0.785 a	0.640 b
	Z ₂	0.796 ab	0.755 a	0.792 a	0.786 a	0.485 c
克新23号 Kexin 23	CK	0.751 b	0.689 b	0.789 a	0.778 a	0.768 a
	Z ₁	0.815 a	0.747 a	0.784 a	0.757 a	—
	Z ₂	0.794 a	0.729 a	0.763 a	0.753 a	—
方差分析 Analysis of variance	品种 Variety	NS	NS	NS	NS	*
	处理 Treatment	*	NS	NS	*	**
	品种×处理 Variety×Treatment	*	*	*	**	**

外,其他品种的 Z_2 比 CK 高 5.72%~16.86%, F_v/F_m 呈现随遮光程度的加重而增加的趋势;而在第4和第5次测定时变化趋势与第1次相反,叶片的 F_v/F_m 由高到低均表现为 $CK > Z_1 > Z_2$, F_v/F_m 随遮光程度的加重而降低;其中第4次测定时 Z_2 的 F_v/F_m 比 CK 低 1.33%~68.05%;第5次测定时 Z_1 的 F_v/F_m 比 CK 低 15.12%~44.72%,‘荷兰7号’、‘东农310’、‘兴佳2号’、‘克新13号’和‘克新19号’ Z_2 的 F_v/F_m 分别比 CK 低 48.06%、39.47%、39.47%、41.34%和 35.68%。结果表明,在处理前期遮光处理较 CK 提升叶片 PSII 的 F_v/F_m ,随着遮光程度的加重和处理时间的延长,遮光处理植株叶片的 F_v/F_m 显著低于 CK,在马铃薯生育后期遮光处理对马铃薯植株生长造成较为严重的胁迫。

2.3 不同遮光处理对光合作用参数的影响

由表4可知, T_r 、 G_s 、 P_n 和 C_i 在品种、处理间和处理×品种间差异均显著。除‘尤金’和‘大西洋’外,同一品种不同处理间 T_r 和 G_s 随遮光程度的加重总体呈现下降趋势;除‘大西洋’外, P_n 随遮光程度的提高总体亦呈现下降趋势, C_i 随遮光程度的加重总体呈现上升趋势。处理间的 T_r 、 G_s 和 P_n 由高到低均表现为 $CK > Z_1 > Z_2$, 而 C_i 由高到低表现为 $Z_2 > Z_1 > CK$ 。

在 CK 条件下,‘龙薯4号’的 P_n 最高,‘兴佳2号’的 P_n 最低;‘大西洋’ Z_1 的 P_n 比 CK 高 89.36%,其余11个品种 Z_1 比 CK 低 12.20%~82.69%,其中‘东农310’降幅最小,‘延薯9号’降幅最大; Z_2 的 P_n 比 CK 低 15.85%~88.81%,其中‘大西洋’降幅最小,‘克新23号’降幅最大。在 C_i 方面,‘大西洋’的 Z_1 比 CK 低 11.81%,其余11个品种均高于 CK; Z_2 比 CK 高 11.52%~76.55%。结果表明: P_n 随遮光程度的提高而显著下降, T_r 和 G_s 随遮光程度的加重而呈下降趋势,而 C_i 则相反(除‘大西洋’);‘大西洋’在遮光条件(Z_1) P_n 显著高于 CK, C_i 显著低于 CK。

2.4 不同遮光处理对单株产量和块茎干物质的影响

由表5可知,马铃薯单株产量、块茎干物质含量和单株块茎干物质质量在品种、处理和品种×处理间差异均显著。同一品种随遮光程度的提高其单株产量、块茎干物质含量和单株块茎干物质质量从高到低均表现为 $CK > Z_1 > Z_2$ 。

在单株产量方面,CK 条件下,‘兴佳2号’最高,‘延薯4号’最低; Z_1 条件下,‘延薯4号’最高、

‘克新19号’最低; Z_2 条件下‘克新19号’产量最高,‘东农310’产量为0;同一品种不同处理的单株产量差异显著, Z_1 比 CK 低 38.44%~97.71%, Z_2 比 CK 低 91.65%~100.00%。在干物质含量方面,‘大西洋’在 CK、 Z_1 和 Z_2 条件下均最高,同一品种 CK 和 Z_2 的差异显著, Z_2 比 CK 低 66.88%~100.00%。在单株块茎干物质质量方面,CK 条件下‘兴佳2号’最高,‘延薯4号’最低; Z_1 条件下‘大西洋’最高,‘东农310’最低; Z_2 条件下‘克新19号’最高;同一品种不同处理的单株块茎干物质质量差异显著, Z_1 比 CK 低 42.06%~98.23%, Z_2 比 CK 低 95.92%~100.00%。结果表明:在一定范围内遮光处理会导致马铃薯单株产量、块茎干物质含量和单株块茎干物质质量显著降低。

2.5 单株产量、干物质含量和光合参数相关性分析

由表6可知,单株产量和干物质含量与所测光合参数具有一定相关性。单株产量与 T_r 呈显著正相关,相关系数为 0.229;与 G_s 和 P_n 均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.255 和 0.510;而与 C_i 呈极显著负相关,相关系数为 -0.410。干物质含量与 T_r 和 P_n 均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.273 和 0.452;与 G_s 呈显著正相关,相关系数为 0.213;而与 C_i 呈极显著负相关,相关系数为 -0.468。 T_r 、 G_s 和 P_n 彼此均呈极显著正相关;而 C_i 与 T_r 、 G_s 均呈负相关但不显著,与 P_n 呈极显著负相关,相关系数为 -0.577。

3 讨论

3.1 F_v/F_m 在测定期中的变化

在遮光处理初期(第1次测定期)12个马铃薯品种 Z_1 和 Z_2 的叶片的 F_v/F_m 均高于 CK,而随着遮光处理时间的延长在第4次测定时 Z_1 和 Z_2 的 F_v/F_m 均低于对照但不显著,在第5次测定时12个品种 Z_1 和 Z_2 的 F_v/F_m 均显著低于对照。 F_v/F_m 反映 PSII 内光能转换效率且非胁迫条件下该参数的变化极小,不受物种和生长条件的影响,而在胁迫条件下该参数显著下降^[18]。在第1次测定期叶片较为幼嫩,光照强度过高对马铃薯叶片造成了非生物逆境胁迫,并可能产生光抑制,过剩光能以非光化学淬灭耗散,有研究表明叶绿体通过 PSII 上捕光色素蛋白复合体 LHCII 的可逆磷酸化调控这一过程^[19-20],而遮光处理下叶片通过提高光化学效率而利用更多光能,因此遮光处理的叶片的 F_v/F_m 高于

表4 不同处理下马铃薯叶片的光合作用参数

Table 4 Photosynthesis parameters of potato leaves under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	T_r / (mmol/(m ² ·s))	G_s / (mmol/(m ² ·s))	P_n / (μ mol/(m ² ·s))	C_i / (μ mol/mol)
尤金 Youjin	CK	1.656 a	48.763 a	4.545 a	221.207 b
	Z ₁	1.930 a	59.563 a	3.182 b	271.652 a
	Z ₂	1.756 a	53.564 a	3.113 b	282.649 a
大西洋 Atlantic	CK	1.526 b	44.207 b	3.322 b	254.199 b
	Z ₁	2.189 a	65.277 ab	4.290 a	224.177 c
	Z ₂	2.462 a	63.079 a	2.795 b	301.578 a
荷兰7号 Netherlands 7	CK	2.529 a	87.600 a	6.902 a	249.491 b
	Z ₁	1.621 ab	51.165 a	3.914 ab	263.830 b
	Z ₂	1.234 b	37.892 b	1.603 b	313.174 a
东农310 Dongnong 310	CK	1.500 a	45.559 a	3.882 a	241.108 b
	Z ₁	1.318 a	40.922 a	3.408 a	249.067 b
	Z ₂	0.920 b	27.444 b	0.804 b	338.408 a
兴佳2号 Xingjia 2	CK	1.177 a	39.377 a	3.167 a	266.333 b
	Z ₁	0.870 a	26.991 b	1.570 b	296.029 a
	Z ₂	0.959 a	30.417 ab	1.766 b	297.037 a
龙薯4号 Longshu 4	CK	1.725 a	70.133 a	7.102 a	199.483 b
	Z ₁	0.997 ab	38.573 b	2.597 b	255.268 a
	Z ₂	0.545 b	21.981 c	2.104 b	266.123 a
延薯4号 Yanshu 4	CK	1.287 a	54.161 a	3.901a	248.896 b
	Z ₁	0.779 b	32.904 b	2.136 ab	272.750 ab
	Z ₂	0.466 b	19.120 c	0.959 b	321.114 a
延薯9号 Yanshu 9	CK	1.253 a	50.921 a	5.147 a	205.916 b
	Z ₁	1.082 a	47.969 a	0.891 b	222.085 b
	Z ₂	0.207 b	8.260 b	0.767 b	351.108 a
延薯10号 Yanshu 10	CK	1.377 a	63.806 a	5.391 a	241.963 c
	Z ₁	0.342 b	15.399 b	1.008 b	288.347 b
	Z ₂	0.576 b	26.088 b	1.445 b	339.036 a
克新13号 Kexin 13	CK	0.659 a	30.255 a	3.810 a	188.756 c
	Z ₁	0.575 a	27.378 a	1.529 b	276.356 b
	Z ₂	0.140 b	6.519 b	0.936 b	333.254 a
克新19号 Kexin 19	CK	1.184 a	55.098 a	3.843 a	240.730 b
	Z ₁	0.751 b	34.264 b	2.849 ab	274.237 ab
	Z ₂	0.683 b	31.520 b	1.857 b	295.372 a
克新23号 Kexin 23	CK	1.077 a	48.372 a	3.838 a	257.478 b
	Z ₁	1.000 a	39.500 ab	1.850 b	292.254 ab
	Z ₂	0.743 b	34.034 b	0.430 c	363.779 a
方差分析 Analysis of variance	品种 Variety	*	**	*	*
	处理 Treatment	**	**	**	**
	品种×处理 Variety×Treatment	**	**	**	**

表 5 不同遮光处理下马铃薯的单株产量和干物质

Table 5 Yield per plant and tuber dry matter of potato under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	单株产量/g Yield per plant	干物质含量/% Dry matter content	单株块茎干物质质量/g Weight of dry matter per tuber
尤金 Youjin	CK	479.967 a	18.70 a	89.754 a
	Z ₁	82.733 b	16.30 a	13.485 b
	Z ₂	22.233 c	5.30 b	1.178 c
大西洋 Atlantic	CK	401.900 a	24.00 a	96.456 a
	Z ₁	133.700 b	22.00 ab	29.414 b
	Z ₂	32.067 b	7.30 b	2.341 c
荷兰 7 号 Netherlands 7	CK	302.867 a	16.00 a	48.459 a
	Z ₁	63.667 b	14.30 a	9.104 b
	Z ₂	19.760 c	5.70 b	1.126 c
东农 310 Dongnong 310	CK	508.167 a	21.70 a	110.272 a
	Z ₁	11.667 b	16.70 b	1.948 b
	Z ₂	0.000 c	0.00 c	0.000 c
兴佳 2 号 Xingjia 2	CK	1 085.033 a	18.00 a	195.306 a
	Z ₁	124.667 b	16.70 a	20.819 b
	Z ₂	8.533 c	4.30 b	0.367 c
龙薯 4 号 Longshu 4	CK	703.200 a	12.30 a	86.494 a
	Z ₁	107.767 b	9.30 a	10.022 b
	Z ₂	0.867 c	1.00 b	0.009 c
延薯 4 号 Yanshu 4	CK	243.133 a	17.00 a	41.333 a
	Z ₁	149.667 a	16.00 a	23.947 b
	Z ₂	7.533 b	5.30 b	0.399 c
延薯 9 号 Yanshu 9	CK	852.667 a	16.00 a	136.427 a
	Z ₁	61.600 b	14.00 a	8.624 b
	Z ₂	4.067 c	5.30 b	0.216 c
延薯 10 号 Yanshu10	CK	365.133 a	15.70 a	57.326 a
	Z ₁	90.067 b	13.70 ab	12.339 b
	Z ₂	8.100 c	4.30 b	0.348 c
克新 13 号 Kexin 13	CK	455.000 a	16.00 a	72.800 a
	Z ₁	98.100 b	15.70 a	15.402 b
	Z ₂	15.900 c	6.30 b	1.002
克新 19 号 Kexin19	CK	416.467 a	15.70 a	65.385 a
	Z ₁	61.325 b	5.10 b	3.128 b
	Z ₂	53.367 b	5.00 b	2.668 c
克新 23 号 Kexin 23	CK	559.867 a	18.30 a	102.456 a
	Z ₁	129.500 b	17.70 a	22.922 b
	Z ₂	46.767 c	5.30 a	2.479 c
方差分析 Analysis of variance	品种 Variety	*	*	**
	处理 Treatment	**	**	**
	品种×处理 Variety×Treatment	**	**	**

表6 光合参数、单株产量和干物质含量相关性

Table 6 Correlation of photosynthetic parameters, yield per plant and dry matter content

参数 Item	T_r	G_s	P_n	C_i	单株产量 Yield per plant	干物质含量 Dry matter content
T_r	1.000					
G_s	0.950**	1.000				
P_n	0.703**	0.733**	1.000			
C_i	-0.070	-0.051	-0.557**	1.000		
单株产量	0.229*	0.255**	0.510**	-0.410**	1.000	
干物质含量	0.273**	0.213*	0.452**	-0.468**	0.580**	1.000

注: * 和 ** 表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

Note: * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels.

自然光照条件生长的叶片,这与前人的研究结果相似^[18,21-23],但随着遮光处理的持续和植株生育进程的推进,遮光处理导致植株无法合成足够的有机物,对马铃薯生长造成了严重的胁迫,遮光处理的植株叶片 F_v/F_m 较自然光照条件的低。这可能是由于叶绿体超微结构受到破坏^[24],在第5次测定时遮光处理的植株叶片 SPAD 均比自然光照条件下植株叶片的低,也恰能支持这一推测。而在遮光处理中非生物因素变化幅度最大的参数是光照强度,因此推测在马铃薯生育期内最适的光照强度是随生育进程而变化。

3.2 光合生理指标的差异

在第2次测定时,12个品种 Z_1 和 Z_2 叶片的 F_v/F_m 和 SPAD 较 CK 呈下降趋势,同时 T_r 、 G_s (除‘尤金’和‘大西洋’)和 P_n (除‘大西洋’)随着遮光程度的加重而显著下降,但 C_i (除‘大西洋’)呈显著上升。持续的遮光处理造成 F_v/F_m 下降,没有充足的光能转化为 ATP,在暗反应阶段的卡尔文循环不能充分将 CO_2 固定,有机物合成效率降低。相关性分析结果表明 C_i 和 P_n 呈极显著负相关,推测由于 P_n 下降导致 CO_2 消耗减少,因此 Z_1 和 Z_2 的 C_i 较高。这可能是光照强度降低造成 PSII 的光能转化效率下降,从而导致卡尔文循环中碳固定所需的化学能不足,叶绿体基质无法合成充足有机物、 P_n 下降。自然光照条件下(CK)叶片接受光照强度高、叶片温度较高,为调节叶片内外气压差和降低扩散阻力, G_s 增加使扩散阻力降低、 T_r 提升,从而降低叶片温度;遮光处理条件(光照强度低、叶片温度较低)则相反,因此 T_r 和 G_s 呈极显著正相关。从各品种处理间光

合作用参数的差异情况分析,在 Z_1 条件下马铃薯‘大西洋’品种较其他品种更耐遮光处理。

3.3 遮光处理对不同品种产量等指标的影响

随着遮光程度的提高12个马铃薯品种单株产量、干物质含量和单株块茎干物质质量均显著下降,但品种间比较发现在 Z_1 条件下‘大西洋’的干物质含量和单株块茎干物质质量最高,这与 P_n 的变化相对应,仅‘大西洋’ Z_1 的 P_n 未较 CK 下降,说明在遮光处理前期叶片较高的 P_n 为后期块茎的干物质积累奠定了基础,推测‘大西洋’对遮光处理反应不敏感且较耐弱光,因此在 Z_1 条件下其成熟期的单株块茎干物质质量高于其他品种。生育期部分时段遮光处理对于早熟品种的影响相对较大,如试验中‘尤金’在第4次测定期 Z_2 叶片均枯萎、第5次测定期 Z_1 叶片也均枯萎;而‘大西洋’和‘东农310’同属中晚熟品种,但遮光处理后在产量方面差异显著,这可能与其植株形态和光能利用率有关。

4 结论

本研究通过对12个马铃薯品种出苗后进行不同遮光处理,测定分析叶绿素荧光参数、光合作用参数和单株产量等。研究表明遮光处理导致叶片的 SPAD 下降,‘尤金’、‘龙薯4号’、‘延薯4号’、‘延薯9号’、‘延薯10号’和‘克新23号’在遮光处理下叶片提早枯萎;遮光处理初期 Z_1 和 Z_2 叶片的 F_v/F_m 均高于 CK,而随遮光处理时间的持续 Z_1 和 Z_2 叶片的 F_v/F_m 显著低于 CK;除‘大西洋’外其余品种的 T_r 、 G_s 和 P_n 随遮光程度的加重而显著下降,但 C_i 显著上升, Z_2 的 P_n 比 CK 低 12.20%~

82.69%、 C_i 比 CK 高 11.52%~76.55%;单株产量和块茎干物质含量与 T_r 、 G_s 和 P_n 均呈显著或极显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关。遮光处理导致马铃薯单株产量、块茎干物质含量和单株块茎干物质质量显著降低。

参考文献 References

- [1] Mullins E, Milbourne D, Petti C, Doyle-Prestwich B M, Meade C. Potato in the age of biotechnology[J]. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(5): 254-260
- [2] 徐建飞, 金黎平. 马铃薯遗传育种研究:现状与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6): 990-1015
- Xu J F, Jin L P. Advances and perspectives in research of potato genetics and breeding[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 990-1015 (in Chinese)
- [3] 黄彩霞, 施炯林. 不同灌水量对加工型马铃薯产量及生态生理指标的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 97-99
- Huang C X, Shi J L. Effects of different irrigation on yield and eco-physiological indices of potato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(5): 97-99 (in Chinese)
- [4] 王婷婷, 张光海, 蔡汶玻, 郭华春. 二倍体马铃薯与其染色体加倍个体间的光合特性比较[J]. 云南农业大学学报:自然科学版, 2019, 34(3): 371-376
- Wang T T, Zhang G H, Cai W B, Guo H C. Comparison of photosynthetic characteristics between diploid potato and its chromosome doubled individuals [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2019, 34(3): 371-376 (in Chinese)
- [5] Shafiq I, Hussain S, Raza M A, Iqbal N, Asghar M A, Raza A, Fan Y F, Mumtaz M, Shoaib M, Ansar M, Manaf A, Yang W Y, Yang F. Crop photosynthetic response to light quality and light intensity [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(1): 4-23
- [6] 孙国琴, 门福义, 刘梦芸, 徐建勋. 马铃薯丰产植株光合产物日变规律的研究(一):干物率及其日变化[J]. 中国马铃薯, 1991, 5(3): 129-133
- Sun G Q, Men F Y, Liu M Y, Xu J F. Studies on the laws of dry matter rate and its diurnal variation in potato high-yield population plants[J]. *Chinese Potato Journal*, 1991(3): 129-133 (in Chinese)
- [7] da C A Alves P A, Magalhaes A C N, Barja P R. The phenomenon of photoinhibition of photosynthesis and its importance in reforestation[J]. *The Botanical Review*, 2002, 68(2): 193-208
- [8] Egerton J J G, Banks J C G, Gibson A, Cunningham R B, Ball M C. Facilitation of seedling establishment: Reduction in irradiance enhances winter growth of *Eucalyptus pauciflora* [J]. *Ecology*, 2000, 81(5): 1437-1449
- [9] 寿森炎, 杨信廷, 朱祝军, 吴韩英. 氮素形态和光照强度对番茄生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2000, 26(5): 500-504
- Shou S Y, Yang X T, Zhu Z J, Wu H Y. Effect of nitrogen form and light intensity on the growth and activities of antioxidative enzymes in tomato (*Lycopersicon esculentum* L)[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2000, 26(5): 500-504 (in Chinese)
- [10] Long S P, Humphries S, Falkowski P G. Photoinhibition of photosynthesis in nature [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1994, 45(1): 633-662
- [11] Cleland R E, Melis A, Neale P J. Mechanism of photoinhibition: Photochemical reaction center inactivation in system II of chloroplasts[J]. *Photosynthesis Research*, 1986, 9(1-2): 79-88
- [12] 何欣, 张攀伟, 丁传雨, 张玉萍, 沈其荣, 陈巍. 弱光下硝铵比对小白菜氮吸收和碳氮分配的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 452-458
- He X, Zhang P W, Ding C Y, Zhang Y P, Shen Q R, Chen W. Effects of nitrate/ammonium ratio on nitrate absorption and distribution of carbon and nitrogen in *Pakchoi* growing under low light intensity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 452-458 (in Chinese)
- [13] 毛艺林. 雾霾环境对设施农业的影响及应对策略[J]. 河南农业科学, 2014, 43(7): 76-79
- Mao Y L. Influence of haze on facility agriculture and coping strategy[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(7): 76-79 (in Chinese)
- [14] 黄承建, 赵思毅, 王季春, 王龙昌, 赵勇, 蔡叶茂, 滕艳, 杨国才. 马铃薯/玉米不同行比套作对马铃薯生理特性和群体产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 117-128
- Huang C J, Zhao S Y, Wang J C, Wang L C, Zhao Y, Cai Y M, Teng Y, Yang G C. Effects of a potato/maize intercropping system on physiological characteristics and total yield with two potato varieties at different row ratios[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(6): 117-128 (in Chinese)
- [15] 桂富荣, 普雁翔, 王平华. 马铃薯与玉米不同套种模式的经济效益评价[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(6): 792-794, 803
- Gui F R, Pu Y X, Wang P H. Economic evaluation of different intercrop pattern of corn and potato[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(6): 792-794, 803 (in Chinese)
- [16] 秦玉芝, 邢铮, 邹剑锋, 何长征, 李炎林, 熊兴耀. 持续弱光胁迫对马铃薯苗期生长和光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(3): 537-545
- Qin Y Z, Xing Z, Zou J F, He C Z, Li Y L, Xiong X Y. Effects of sustained weak light on seedling growth and photosynthetic characteristics of potato seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(3): 537-545 (in Chinese)
- [17] 唐鑫华, 曲自成, 张浩, 魏峭嵘, 张丽莉, 石瑛. 块茎形成期外施表油菜素内酯对马铃薯生理和产量的影响[J]. 核农学报,

- 2018, 32(9): 1855-1863
- Tang X H, Qu Z C, Zhang H, Wei Q R, Zhang L L, Shi Y. Effect of physiology and yield by spraying EBR during potato tuber formation stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(9): 1855-1863 (in Chinese)
- [18] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999, 34(4): 444-448
- Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 34(4): 444-448 (in Chinese)
- [19] Pascal A A, Liu Z F, Broess K, van Oort B, van Amerongen H, Wang C, Horton P, Robert B, Chang W R, Ruban A. Molecular basis of photoprotection and control of photosynthetic light-harvesting[J]. *Nature*, 2005, 436(7047): 134-137
- [20] Pan X W, Ma J, Su X D, Cao P, Chang W R, Liu Z F, Zhang X Z, Li M. Structure of the maize photosystem I supercomplex with light-harvesting complexes I and II[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1109-1113
- [21] 崔波, 周一冉, 王喜蒙, 袁秀云, 蒋素华, 许申平. 不同光照强度下白及光合生理特性的研究[J]. *河南农业大学学报*[J]. 2020, 54(2): 276-284
- Cui B, Zhou Y R, Wang X M, Yuan X Y, Jiang S H, Xu S P. Study on the photosynthetic and physiological characteristics of *Bletilla striata* under different light intensities[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(2): 276-284 (in Chinese)
- [22] 种培芳, 陈年. 光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展[J]. *甘肃农业大学学报*, 2008, 43(5): 104-109
- Zhong P F, Chen N. Research progress of the influence of light intensity on photosynthesis of horticultural plants[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2008, 43(5): 104-109 (in Chinese)
- [23] Xu M Y, Wu K X, Liu Y, Liu J, Tang Z H. Effects of light intensity on the growth, photosynthetic characteristics, and secondary metabolites of *Eleutherococcus senticosus* Harms[J]. *Photosynthetica*, 2020, 58(3): 881-889
- [24] 王玉珺, 付秋实, 郑禾, 温常龙, 程琳, 赵冰, 郭仰东. 干旱胁迫对黄瓜幼苗生长、光合生理及气孔特征的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2010, 5(5): 12-18
- Wang Y J, Fu Q S, Zheng H, Wen C L, Cheng L, Zhao B, Guo Y D. Effects of drought stress on growth, photosynthetic physiological features and stomata characters of cucumber seedlings [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(5): 12-18 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅