

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201804041

二倍体马铃薯与其染色体加倍个体间的光合特性比较*

王婷婷[#], 张光海[#], 蔡汶玻, 郭华春^{**}

(云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】植物的光合能力在很大程度上反映了其干物质累积能力,而多倍体植株的光合能力一般强于二倍体或单倍体。本研究旨在分析二倍体马铃薯与人工诱导染色体加倍个体的光合生理特性差异。【方法】以二倍体马铃薯品系及其经秋水仙素加倍得到的加倍个体为试验材料,采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪对移栽后不同时期的光合参数进行测定,并在盛花期测定光响应曲线与 CO₂ 响应曲线。【结果】加倍个体和二倍体的净光合速率 (P_n) 均呈现先上升后下降的趋势,并在移栽后 60 d 达到峰值,在同一时期,加倍个体的 P_n 均高于二倍体,并在移栽后 60 d 和 75 d 呈现显著差异 ($P<0.05$); 加倍个体的最大净光合速率 (P_{nmax}) 和光饱和点 (LSP) 分别比二倍体高 16.12% 和 13.00%; 加倍个体的光补偿点 (LCP) 和 CO₂ 补偿点 (CCP) 均低于二倍体,但两者的表观量子效率和羧化效率没有差异。【结论】加倍个体利用弱光的能力比二倍体强,在高光和低光条件下均具有较强的光合能力,加倍个体能够利用低浓度的 CO₂, 固定和转化 CO₂ 的能力较二倍体强。综上所述,加倍个体的光合能力高于二倍体。

关键词: 马铃薯; 二倍体; 四倍体; 光合特性

中图分类号: S 532.035.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 03-0371-06

Comparison of Photosynthetic Characteristics between Diploid Potato and Its Chromosomedoubled Individuals

WANG Tingting, ZHANG Guanghai, CAI Wenbo, GUO Huachun

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] The photosynthetic capacity of plants largely reflects its ability to accumulate dry matter, while the photosynthetic capacity of polyploid plants is generally stronger than that of diploids or haplotypes. This study aimed to analyze the photosynthetic physiological characteristics of diploid potato and artificially induced chromosome doubling individuals. [Methods] Diploid potato line and doubled individuals obtained by colchicine were used as experimental materials. Using a Li-6400 portable photosynthesis system, we measured the photosynthetic parameters at different stages after transplanting, and the light response curves and CO₂ response curves at flowering stage. [Results] The net photosynthetic rate (P_n) of the doubled individuals and the diploid showed a trend of increase first and then decrease, and reached a peak at 60 days after transplanting. During the same peri-

收稿日期: 2018-04-20

修回日期: 2019-01-09

网络出版时间: 2019-03-18

*基金项目: 国家马铃薯产业技术体系 (CARS-09-P15); 云岭学者人才培养项目 (A30086652)。

作者简介: [#]对本文文献等同, 为并列第一作者。王婷婷 (1992—), 女, 山东济宁人, 在读硕士研究生, 主要从事马铃薯分子遗传育种研究。E-mail: jnwt@sina.com; ; 张光海 (1991—),

男, 云南保山人, 在读博士研究生, 主要从事马铃薯遗传育种研究。E-mail: zghzxf@126.com

^{**}通信作者 Corresponding author: 郭华春 (1963—), 男, 云南丽江人, 博士, 教授, 主要从事马铃薯遗传育种研究。E-mail: ynghc@126.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201804041](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201804041)



od, the P_n of the doubled individuals was higher than that of the diploid, and showed a significant difference at 60 days and 75 days after transplanting; the maximum net photosynthetic rate (P_{nmax}) and light saturation point (LSP) of doubled individuals were higher than those of diploid, which increased by 16.12% and 13.00%, respectively; the light compensation point (LCP) and CO_2 compensation point (CCP) were lower than diploid, but diploid and its doubled individuals had no difference in apparent quantum efficiency and carboxylation efficiency. [Conclusion] The ability of doubled individuals to use weak light is stronger than that of diploid. Doubled individuals have higher photosynthetic capacities than diploid individuals under both high and low light conditions. They also can use low concentrations of CO_2 , and have the ability to fix and convert CO_2 . In sum, the photosynthetic capacity of the doubled individuals is higher than that of the diploid.

Keywords: potato; diploid; tetraploid; photosynthetic characteristics

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是茄科 (*Solanaceae*) 茄属 (*Solanum*) 一年生草本植物, 起源于南美洲的秘鲁和智利地区^[1]。马铃薯引入中国已有 400 多年, 目前中国已成为世界上马铃薯种植面积最大、总产量最高的国家^[2-3]。马铃薯是中国继水稻、小麦和玉米之后的第四大主粮作物, 对缓解中国食物安全压力有重要作用^[3]。

马铃薯块茎中 95% 以上的干物质含量来自光合作用的积累^[4], 光合作用对马铃薯的代谢过程十分重要。光合速率在很大程度上反映了马铃薯干物质的积累能力^[5]。已有研究多聚焦马铃薯的光合日变化和光合速率等光合参数^[6-9], 关于染色体倍性和光合作用的关系研究较少, 但在其他作物上的研究却并不罕见。研究发现: 三倍体西瓜的光合速率比二倍体高^[10], 但三倍体无籽西瓜的光合速率与二倍体普通西瓜无显著差异^[11]; 四倍体萝卜与二倍体萝卜的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率的动态变化趋势大体一致, 但总体来说, 四倍体萝卜的光合参数值高于二倍体^[12]; 四倍体白桦的全天最大净光合速率比二倍体高 24.81%, 光饱和点、光补偿点和羧化效率等光合指标差异极显著^[13]; 二倍体大青杨与三倍体、四倍体大青杨的净光合速率 (P_n)、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP) 等光合参数差异显著, 且三倍体大青杨的 P_n 比二倍体高 21%^[14]; 四倍体杜仲的光合能力比二倍体高^[15]; 四倍体与二倍体短白梗白菜的 P_n 日变化均呈单峰曲线^[16]。前人对不同植物的二倍体及其多倍体植株的光合特性分析表明二倍体植株的光合能力与四倍体存在差异。

与二倍体植株相比, 多倍体植株通常表现为植株高大, 茎秆粗壮, 叶面积增大, 光合能力较强, 这些性状都是植物高产的基础。多倍体植物对外界环境的适应性较强, 表现出较强的抗寒、抗旱、抗病等抗逆性。就马铃薯而言, 目前应用于生产栽培的均是四倍体 ($2n=4x=48$), 但四倍体马铃薯遗传背景较为狭窄, 基因库相对贫乏; 二倍体马铃薯 ($2n=2x=24$) 遗传资源丰富, 具有很多抗逆性基因, 但是二倍体与四倍体存在杂交障碍, 故二倍体马铃薯优异的抗逆性基因很难被利用。前期工作中, 作者通过秋水仙素处理二倍体马铃薯的单节茎段获得马铃薯同源四倍体, 这对于筛选马铃薯优良育种材料具有重要意义, 但是获得的新种质的光合特性并不明确, 因此本研究对二倍体马铃薯品系与加倍形成的四倍体新个体的光合特性进行了比较, 初步明确加倍个体的光合生理规律, 为马铃薯二倍体利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试马铃薯品系为二倍体 ($2n=2x=24$) 和染色体加倍个体 ($2n=4x=48$)。二倍体马铃薯由云南农业大学薯类作物研究所保存, 加倍个体则通过秋水仙素溶液浸泡处理二倍体马铃薯的单节茎段, 经流式细胞仪检测确认^[17-20]而获得。

1.2 试验方法

首先进行马铃薯二倍体与加倍个体的组织培养扩繁, 20 d 后将组培苗移到炼苗室炼苗, 1 周后移栽至云南农业大学薯类作物研究所温室中盆栽种植。选择两个马铃薯品系的倒 4 叶顶小叶, 采

用 Li-6400 便携式光合作用测定仪 (Li-Cor, USA) 分别在移栽 45、60、75、90、105 d 后测定二倍体和加倍个体的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r); 于盛花期测定二倍体和加倍个体的光响应曲线和 CO_2 响应曲线。

1.2.1 移栽后不同时期光合指标的测定

移栽后不同时期的光合指标为控制条件下的测定值, 于上午 11:00—13:00 进行。选择长势一致的二倍体和加倍个体各 6 株进行光合参数的测定, 为了避免因测定时间造成的影响, 分不同时间段 3 次交替测定, 共测定 18 个重复值。测定时设置光强为 $1\,200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 温度 $25\ ^\circ\text{C}$, 相对湿度 60%, CO_2 摩尔分数为 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ ^[21], 空气流速为 $300\ \text{mol}/\text{s}$, 每个点稳定 2 min 后进行仪器自动匹配并记录数值, 记录参数包括叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)。

1.2.2 光响应曲线测定

于盛花期测定二倍体和加倍个体植株的光响应曲线, 每个材料测 3 次重复。使用 CO_2 注入系统, 将参比室 CO_2 含量控制为 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, 叶室温度控制为 $(25\pm 5)\ ^\circ\text{C}$, 夹上叶片后于 $1\,200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光强下诱导 10~15 min, 数据稳定后启动自动测量程序, 光照强度从大到小依次设为: $1\,200$ 、 $1\,000$ 、 800 、 600 、 400 、 300 、 200 、 150 、 100 、 80 、 60 、 40 、 20 、 10 和 $0\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。每个光强下稳定 180 s 后记录净光合速率 (P_n)。根据 WEBB 等^[22]提供的方法拟合 P_n -PFD 光响应曲线, 拟合模型表达式为:

$$P_n = a - c \cdot e^{-b \cdot \text{PFD}} \quad (1)$$

式中, a 、 b 和 c 是与光合有效辐射 (PFD) 相关的系数。根据式 (1) 中系数计算相应的最大净光合速率 ($P_{n\text{max}}=a$), 暗呼吸速率 ($R_d=a-c$), 光补偿点 ($\text{LCP}=\ln(a/c)\times(-1/b)$), 光饱和点 ($\text{LSP}=\ln(0.1\times a/c)\times(-1/b)$), 表观量子产额 ($\text{AQY}=b\cdot c\cdot e^{[b\cdot(-\text{LCP})]}$)。

1.2.3 CO_2 响应曲线测定

于盛花期测定二倍体和加倍个体植株的 CO_2 响应曲线测定, 每个材料测 3 次重复; 测定 CO_2 响应曲线时, 参比室 CO_2 摩尔分数梯度依次设置为 400 、 300 、 200 、 100 、 80 、 50 、 400 、 400 、 600 、 800 、 $1\,000$ 、 $1\,200\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ (用 Li-6400 自带的 CO_2 注入系统控制), 光和有效辐射设置为 $1\,200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 其他设置条件与光响应曲线测

定设置的条件相同, 仪器在稳定 180 s 后自动记录该摩尔分数梯度下的 P_n 和胞间 CO_2 浓度 (C_i), 将 P_n - C_i 响应曲线的直线部分按非直角双曲线模型^[23]进行拟合:

$$y = kx + b \quad (2)$$

根据式 (2) 中各参数, 计算所对应的羧化效率 ($\text{CE}=k$)、 CO_2 补偿点 ($\text{CCP}=-b/k$), 并计算光呼吸速率 ($\text{RL}=\text{CE}\cdot\text{CCP}$), 参照 BERNACCHI 等^[24]的方法计算最大羧化速率 (V_{cmax}) 和最大电子传递速率 (J_{max})。

1.3 数据处理

数据采用 SPSS 21.0 统计分析软件进行单因素方差分析 (ANOVA), 采用 Student's t -test ($P<0.05$) 来检验二倍体和加倍个体间的显著差异。采用 Excel 2010 进行图形绘制, 采用 SigmaPlot 10.0 进行光响应曲线和 CO_2 响应曲线拟合。

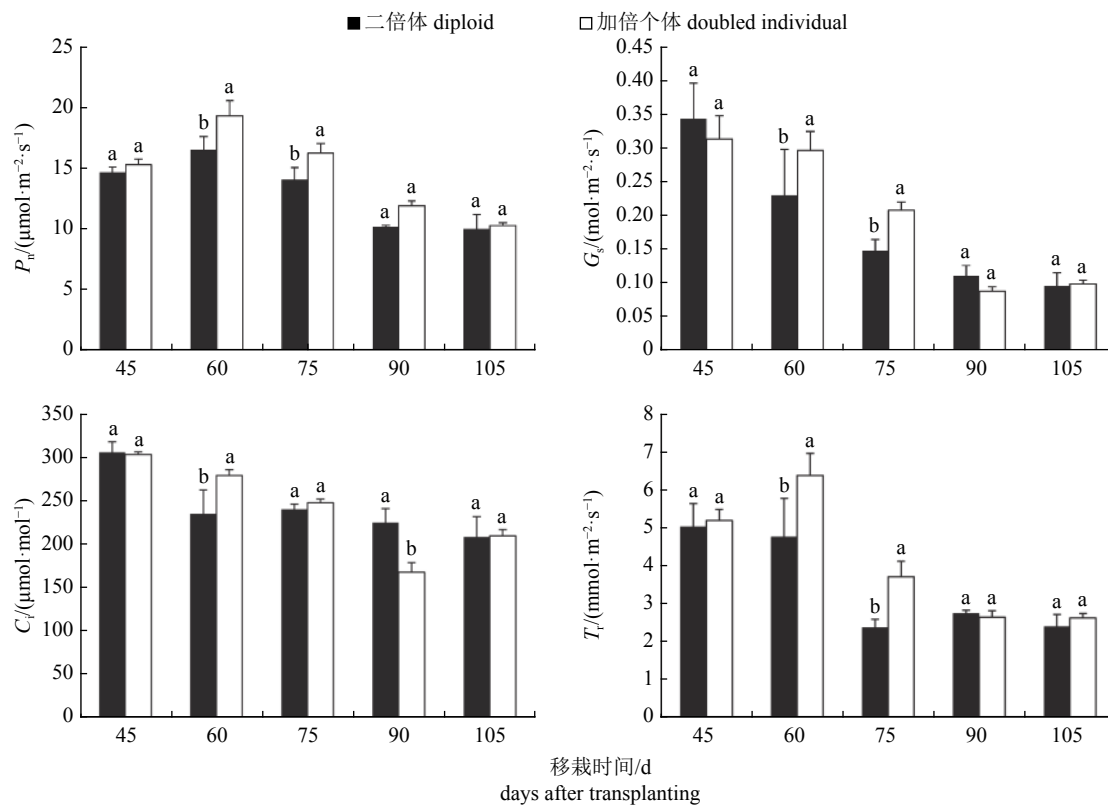
2 结果与分析

2.1 不同时期二倍体与加倍个体马铃薯光合作用的比较

由图 1 可知: 加倍个体和二倍体的净光合速率 (P_n) 均呈现先上升后下降的趋势, 并在移栽后 60 d 达到峰值, 分别为 16.56 、 $19.35\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 在同一时期, 加倍个体的 P_n 明显高于二倍体, 并在移栽后 60、75 d 呈现显著差异 ($P<0.05$)。移栽后 45 d, 二倍体和加倍个体的气孔导度 (G_s) 均最大, 且二倍体高于加倍个体, 但未呈现显著差异; 移栽后 60、75 d, 加倍个体的 G_s 显著高于二倍体 ($P<0.05$)。移栽后 45~90 d, 加倍个体和二倍体的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 呈下降趋势, 说明在这段时间加倍个体和二倍体所利用的 CO_2 越来越多; 在 90 d 时, 二倍体马铃薯的 C_i 显著高于加倍个体。在移栽后 60、75 d, 两个种质的蒸腾速率 (T_r) 差异显著 ($P<0.05$), 且表现为加倍个体高于二倍体马铃薯, 这与两个种质 P_n 的变化相一致。

2.2 不同倍性马铃薯光响应曲线的比较

由图 2 可知: 二倍体马铃薯与加倍个体的光响应曲线变化趋势相似, 均随光照强度的增加 P_n 增加; 当达到一定光照强度后, P_n 趋于稳定。当光照强度在 $0\sim 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 两个种质的 P_n 随光照强度的增加上升较快, 但差异不大, 之后继续上升, 最后趋于稳定, 在整个变化



注: 不同小写字母表示采用 Student's *t*-test 分析二倍体与加倍个体在 0.05 水平下的显著差异, 值表示为均值 $\pm$ 标准误 ($n=18$)。

Note: A significant difference between diploid and doubled individual is indicated by lowercase letters ($P<0.05$) using the Student's *t*-test. Values are means $\pm$ S.E. ($n=18$).

图 1 不同倍性马铃薯在不同时期的光合参数比较

Fig. 1 Comparison of photosynthetic parameters of different ploidy potatoes in different periods

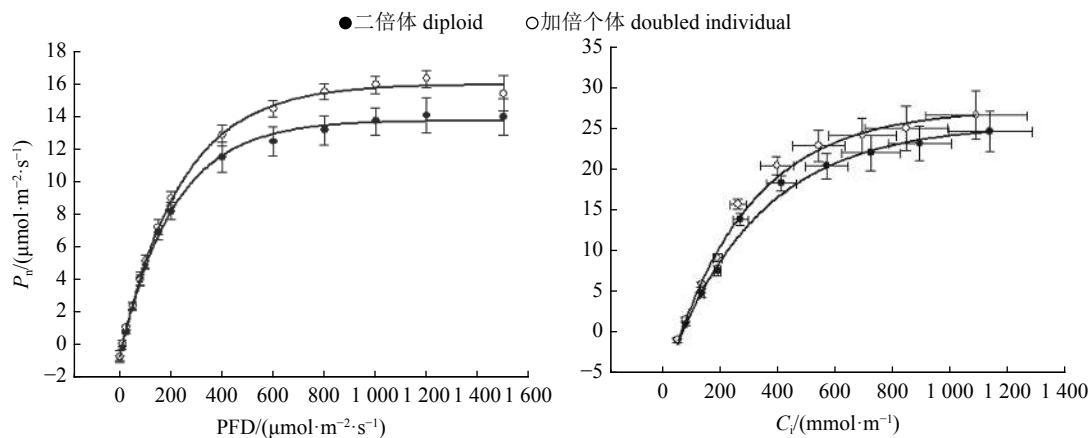


图 2 光响应曲线和二氧化碳响应曲线

Fig. 2 Curves of diploid and doubled individuals

过程中, 加倍个体的 P_n 高于二倍体, 但不存在显著差异。由表 1 可知: 加倍个体的最大净光合速率 ($P_{n\max}$)、光饱和点 (LSP) 均显著高于二倍体, 分别升高 16.12%、13.00%。加倍个体的光补偿点 (LCP) 低于二倍体, 但没有达到显著水平, 说明加倍个体利用弱光的能力比二倍体强,

在高光照和低光照条件下均可以进行光合作用。

2.3 不同倍性马铃薯 CO_2 响应曲线的比较

由图 2 可知: 二倍体马铃薯与加倍个体的 CO_2 响应曲线变化趋势相似, 都是随着 C_i 的增加 P_n 也增加; 当 C_i 达到一定值后, P_n 趋于稳定不再增加。 C_i 为 0~200 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时, 二倍体和加

倍个体的 P_n 随 C_i 的增加上升较快, 但差异不大, 之后继续上升, 最后趋于稳定, 在整个变化过程中, 加倍个体的 P_n 均高于二倍体。

2.4 不同倍性马铃薯光响应和 CO_2 响应参数差异

由表 1 可知: 两个种质的羧化效率 (CE) 相同, 加倍个体的暗呼吸速率 (R_d) 高于二倍体, 但没有达到显著水平, 说明在相同条件下, 加倍个体自

身消耗的有机物少; 加倍个体与二倍体的最大羧化速率 (V_{cmax}) 与最大电子传递速率 (J_{max}) 没有显著差异; 加倍个体的 CO_2 补偿点 (CCP) 显著低于二倍体, 说明加倍个体能够在低光强下利用低浓度的 CO_2 , 固定和转化 CO_2 的能力较二倍体强, 从而光合能力强于二倍体。

表 1 不同倍性马铃薯光合特征参数 (mean±SE, n=3)
Tab. 1 Photosynthetic characteristics of potato genotypes

光合参数 photosynthetic parameters	二倍体 diploid	加倍个体 doubled individual
最大净光合速率 (P_{nmax})/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) maximum net photosynthetic rate	13.77±0.98 b	15.99±0.62 a
光饱和点 (LSP)/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) light saturation point	968.83±26.69 b	1 094.82±65.18 a
光补偿点 (LCP)/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) light compensation point	8.78±3.25 a	8.69±6.60 a
暗呼吸速率 (R_d)/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) dark respiration rate	-0.62±0.3 a	-0.58±0.38 a
表观量子产额 (AQY)/($\mu mol \cdot mol^{-1}$) apparent quantum yield	0.07±0.01 a	0.07±0.01 a
羧化效率 (CE)/($mol \cdot mol^{-1}$) carboxylation efficiency	0.09±0.01 a	0.09±0.01 a
光呼吸 (RL)/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) photorespiration	-4.93±0.4 a	-4.79±0.68 a
CO_2 补偿点 (CCP)/($\mu mol \cdot mol^{-1}$) carbon dioxide compensation point	51.67±12.29 a	47.93±10.17 b
最大羧化速率 (V_{cmax})/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) maximum carboxylation rate	106.17±14.72 a	111.2±16.19 a
最大电子传递速率 (J_{max})/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) maximum electrontransportation rate	244.78±33.45 a	258.5±32.38 a

注: 同行不同小写字母表示采用 Student's *t*-test 分析二倍体和加倍个体在 0.05 水平下的差异显著。
Note: Small letters in each rows indicate a significance between diploid and doubled individual at 0.05 level using the Student's *t*-test.

3 讨论

光合作用是植物重要的生理过程之一, 光合能力的高低对植物的生长发育具有很大影响。在移栽后 60、75 d, 加倍个体的净光合速率和气孔导度显著高于二倍体, 说明在这两个时期, 气孔是影响光合作用的限制因子。本研究中, 染色体加倍马铃薯个体和二倍体个体的净光合速率与气孔导度变化趋势一致, 气孔导度大, 净光合速率高。植物进行光合作用所需的 CO_2 会受到气孔阻力的影响。加倍后的植株气孔变大, 气孔导度升高, 相应的气孔阻力减小, 进入到细胞中参与光合作用的 CO_2 增多, 导致染色体加倍马铃薯个体的净光合速率高于二倍体个体。胞间 CO_2 浓度与净光合速率呈现相反的变化趋势, 这是因为气孔变大, 气孔导度升高, 净光合速率随之升高, 参与光合反应的 CO_2 越多, 故胞间 CO_2 减小; 但在移栽后 60 d 时, 加倍个体的净光合速率高于二倍体, 而胞间 CO_2 浓度也高于二倍体, 分析可能除了气孔导度外还有其他因素影响净光合速率。

比较加倍个体与二倍体马铃薯发现, 随着染

色体倍性升高净光合速率增大, 与傅亚萍等^[25]对不同倍性水稻光合作用的研究结果相一致, 这可能是由于 DNA 发生甲基化或者核仁显性等^[26], 也可能是因为加倍之后植株基因数量增加^[27], 从而引起植株外部形态变化。加倍后的植株通常表现为植株高大, 茎秆粗壮, 气孔变大, 这些特征都有助于光合作用升高。

在光响应曲线中, 光饱和点的高低反映了马铃薯叶片利用强光能力的大小。光饱和点越高, 说明马铃薯叶片利用强光的能力越强, 在强光条件下越不容易产生光抑制现象。而光补偿点和表观量子效率是衡量植物利用弱光能力的重要指标^[13, 15]。光补偿点越小、表观量子效率越大表明植物利用弱光的能力越强。本研究表明: 加倍个体的最大净光合速率 (P_{nmax})、光饱和点 (LSP) 均显著高于二倍体, 光补偿点 (LCP) 低于二倍体, 说明加倍个体无论是利用强光的能力还是利用弱光的能力均比二倍体强, 加倍个体可利用光的范围比二倍体广。加倍个体的 CO_2 补偿点 (CCP) 显著低于二倍体, 加倍个体能够利用较低浓度的 CO_2 , 说明加倍个体积累同化物的能力比二倍体强。

4 结论

染色体加倍马铃薯个体的最大净光合速率、光饱和点均显著高于二倍体, 光补偿点低于二倍体, 加倍个体的 CO_2 补偿点显著低于二倍体, 表明加倍个体利用弱光的能力比二倍体强, 在高光 and 低光条件下均有较强的光合能力, 加倍个体能够利用低浓度的 CO_2 , 固定和转化 CO_2 的能力强于二倍体。综上所述, 加倍个体的光合能力高于二倍体。

[参考文献]

- [1] LEVIN D A. Polyploidy and novelty in flowering plants[J]. American Naturalist, 1983, 122(1): 1. DOI: [10.1086/284115](#).
- [2] 屈冬玉, 谢开云. 中国马铃薯产业的可持续发展[J]. 农产品市场周刊, 2015(29): 26.
- [3] 蔡兴奎, 谢从华. 中国马铃薯发展历史、育种现状及发展建议[J]. 长江蔬菜, 2016(12): 30. DOI: [10.3865/j.issn.1001-3547.2016.12.013](#).
- [4] 张宝林, 高聚林, 刘克礼. 马铃薯群体光合系统参数的研究[J]. 中国马铃薯, 2003, 17(3): 146. DOI: [10.3969/j.issn.1672-3635.2003.03.004](#).
- [5] 黄彩霞, 施垌林. 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. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2008.05.028](#).
- [6] 陈光荣, 高世铭, 张晓艳. 施钾和补水对旱作马铃薯光合特性及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(1): 74. DOI: [10.13432/j.cnki.jgsau.2009.01.012](#).
- [7] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 宁南半干旱区不同施肥量下马铃薯光合特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 68. DOI: [10.3321/j.issn:1000-7601.2005.05.013](#).
- [8] 李彩斌, 郭华春. 耐弱光基因型马铃薯在遮阴条件下的光合和荧光特性分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1181. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.170177](#).
- [9] 孙国琴, 门福义, 刘梦芸, 等. 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(3): 129.
- [10] 刘文革, 阎志红, 王鸣. 不同染色体倍性西瓜光合速率日变化的研究[J]. 中国西瓜甜瓜, 2003(2): 4. DOI: [10.16861/j.cnki.zggc.2003.02.002](#).
- [11] 徐坤, 康立美, 邢海荣. 嫁接无籽西瓜光合特性研究[J]. 西北农业学报, 1999, 8(2): 73.
- [12] 张红亮, 韩业飞, 柳李旺, 等. 二倍体和同源四倍体萝卜光合特性研究[J]. 天津农业科学, 2012, 18(3): 1. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6500.2012.03.001](#).
- [13] 杜琳, 李永存, 穆怀志, 等. 四倍体与二倍体白桦的光合特性比较[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 1. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2011.02.017](#).
- [14] 祁传磊, 靳春莲, 李开隆, 等. 不同倍性大青杨的光合特性及叶片解剖结构比较[J]. 植物生理学报, 2010, 46(9): 917. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2010.09.022](#).
- [15] 李蕾, 张伟超, 郭婧, 等. 杜仲四倍体与二倍体光合特性比较[J]. 北方园艺, 2012(6): 35.
- [16] 侯喜林, 徐明宇, 张蜀宁. 白菜不同倍性材料间光合特性差异研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(6): 1338. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2006.06.039](#).
- [17] BAIRD W V, ESTAGER A S, WELLS J K. Estimating nuclear DNA content in peach and related diploid species using laser flow cytometry and DNA hybridization[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1994, 119(6): 1312. DOI: [10.21273/JASHS.119.6.1312](#).
- [18] 周香艳, 张宁, 王旺田, 等. 流式细胞术检测 4 种提取沙棘核 DNA 方法的比较[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(4): 155. DOI: [10.13432/j.cnki.jgsau.2012.04.025](#).
- [19] 覃永华, 徐鑫, 王春台. 水稻细胞核 DNA 含量和倍性的流式细胞术测定[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2014(1): 28.
- [20] 杨静, 宋勤霞, 宁军权, 等. 利用流式细胞术鉴定桑树染色体倍性的方法[J]. 蚕业科学, 2017(1): 8. DOI: [10.13441/j.cnki.cykx.2017.01.002](#).
- [21] 何长征, 刘明月, 宋勇, 等. 马铃薯叶片光合特性研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(5): 518. DOI: [10.13331/j.cnki.jhau.2005.05.015](#).
- [22] WEBB W L, NEWTON M, STARR D. Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*[J]. Oecologia, 1974, 17(4): 281. DOI: [10.1007/BF00345747](#).
- [23] ETHIER G J, LIVINGSTON N J. On the need to incorporate sensitivity to CO_2 transfer conductance into the Farquhar-von Caemmerer-Berry leaf photosynthesis model[J]. Plant, Cell and Environment, 2010, 27(2): 137. DOI: [10.1111/j.1365-3040.2004.01140.x](#).
- [24] BERNACCHI C J, SINGSAAS E L, PIMENTEL C, et al. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis[J]. Plant, Cell and Environment, 2001, 24(2): 253. DOI: [10.1111/j.1365-3040.2001.00668.x](#).
- [25] 傅亚萍, 颜红岚, 李玲方, 等. 不同染色体倍性水稻植株光合特性的研究[J]. 中国水稻科学, 1999, 13(3): 157. DOI: [10.16819/j.1001-7216.1999.03.007](#).
- [26] PROIETTI P, FAMIANI F. Diurnal and seasonal changes in photosynthetic characteristics in different olive (*Olea europaea* L.) cultivars[J]. Photosynthetica, 2002, 40(2): 171. DOI: [10.1023/A:1021329220613](#).
- [27] 田永生, 赵晓明. 蒲公英二倍体与四倍体的几个生理指标比较[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 345. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6850.2007.06.076](#).

责任编辑: 何馨成