

杨浞露,王 芳.光周期对马铃薯产量与光合作用的影响[J].江苏农业科学,2021,49(10):64-71.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.10.012

光周期对马铃薯产量与光合作用的影响

杨浞露¹,王 芳^{1,2,3}

(1. 青海大学,青海西宁 810016; 2. 青海省农林科学院,青海西宁 810016; 3. 西北马铃薯教育部工程研究中心,青海西宁 810016)

摘要:以 3 个品种马铃薯(青薯 9 号、宁波 1 号和国外 2 号)为材料,研究不同光周期处理(16 h—8 h、12 h—12 h、8 h—16 h)对马铃薯产量与光合特性的影响。结果表明,16 h—8 h 的长日照抑制马铃薯结薯,青薯 9 号和宁波 1 号在 12 h—12 h 马铃薯平均单株产量最大,国外 2 号在 8 h—16 h 平均单株产量最大,青薯 9 号平均单株产量受光周期影响程度较轻。对光合作用气体交换参数和叶绿素荧光参数分析表明,随着光周期的光照时长减少,3 个品种马铃薯叶片叶绿素含量、净光合速率(P_n)、最大光化学量子产量(F_v/F_m)均逐渐降低,非光化学猝灭(NPQ)逐渐增加。持续的短日照处理会对马铃薯叶片的光合作用系统形成抑制乃至破坏,进而导致马铃薯光合作用能力下降。

关键词:马铃薯;光周期;光合作用;叶绿素荧光

中图分类号: S532.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)10-0064-07

作物有机物质的积累有 95% 来源于光合作用,光合作用的强弱及其效率的高低决定着作物的产量,因此对作物光合作用的研究是高光效育种的关注点^[1]。李冬梅等的试验表明,长日照处理能提高桃树的光合速率,短日照处理加深、加快桃树光合机构的破坏^[2]。德国鸢尾的光合作用在长日照处理下显著提高^[3]。长日照处理能增强多穗柯的光合作用,短日照表现为抑制^[4];表明光周期的变化对作物光合作用有影响。

马铃薯属茄科茄属植物,是典型的粮菜兼用作物^[5],是世界第四大粮食作物,中国作为马铃薯第一生产国^[6],发展马铃薯产业对保障粮食安全和国民经济具有重要意义^[7]。

对于马铃薯而言,光照为其光合作用提供能量,并对其生长、发育、形态建成和物质代谢有重要作用^[8]。我国南北纬度跨度大,导致各地光周期有差异^[9]。刘梦芸等的试验表明,短日照加速马铃薯晋薯 2 号薯块生成,但结薯数减少^[10]。罗玉等的试

验证明,马铃薯大西洋诱导试管薯结薯的最佳光周期处理是全黑暗处理,长日照处理下,能结薯但块茎生成率低,多保龄球状,在短日照处理下,没有块茎生成,全部长成匍匐茎^[11]。刘艳芬等研究认为,光照 10 h/d 是马铃薯中薯 3 号试管薯诱导结薯的最佳培养条件,在光照 10 h/d 的条件下,平均结薯数最多,大薯率最高^[12]。表明光周期对马铃薯的产量形成具有显著的调控作用^[13]。

本研究通过分析不同光周期对 3 个马铃薯品种的光合作用呼吸参数、叶绿素荧光参数、叶绿素含量及结薯性能的影响,明确光周期对马铃薯产量与光合作用的影响,为指导马铃薯推广种植与高光效育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为马铃薯品种青薯 9 号(Q9)、宁波 1 号(NB1)、国外 2 号(G2),由青海省农林科学院生物技术研究所提供。

1.2 试验方法

1.2.1 种植方法 本试验于 2020 年 8—11 月在青海大学进行室内盆栽试验。将培养 30 d 的试管苗,种植于口径 12 cm、高 10 cm 的花盆中,盆栽基质为蛭石:营养土=1:1,每盆栽种 3 株,每个品种种植 27 盆。光源使用中山市领航光电科技有限公司生产的 14 W 恒流 LDE T5 工程方形支架灯和控制器,

收稿日期:2020-12-23

基金项目:青海省科技成果转化专项(编号:2020-NK-170);现代农业产业技术体系项目(编号:CARS-9)。

作者简介:杨浞露(1995—),女,广西贵港人,硕士研究生,主要从事马铃薯遗传与育种研究。E-mail:835655711@qq.com。

通信作者:王 芳,副研究员,硕士生导师,主要从事马铃薯遗传育种、种质资源创新、脱毒种薯生产等研究。E-mail:qhwf324@163.com。

LED 灯管置于植株冠层上方 15 cm,光照度为 $(44 \pm 1) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (PPFD),湿度为 60% ~ 75%,温度为 20 ~ 27 ℃。

1.2.2 处理方法 设定 3 种不同光周期处理分别为光—暗周期为 16 h—8 h (长日照)、光—暗周期为 12 h—12 h (中日照)、光—暗周期为 8 h—16 h (短日照)。

1.2.3 取样方法 分别在光周期处理 45、60、75 d,取不同品种马铃薯主茎中部位置的健康完整的叶片进行叶绿素含量、光合作用气体交换参数和叶绿素荧光参数测定,3 次重复。各项指标测定完成后,整株取出对匍匐茎和薯块进行测定。

1.3 指标测定方法

1.3.1 匍匐茎和薯块测定 使用游标卡尺度量匍匐茎长度,使用电子天平称量块茎的质量。

1.3.2 叶绿素含量测定 使用日本 Konica Minolta 公司生产的 SPAD-502 Plus 便携式叶绿素计,选取健康叶片测定叶绿素含量,3 次重复,最后测定结果取其平均值。

1.3.3 光合作用气体交换参数测定 利用 Li-6400 便携式光合作用分析仪 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) 于 09:00—11:00,设定 $1500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照度,对样品的净光合速率 (P_n)、细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r) 进行测定。

1.3.4 叶绿素荧光参数测定 采用 Li-6400 型便携式光合测定仪对叶片荧光动力学参数进行测定,测定前采用铝箔纸包裹叶片暗适应 30 min,先测定初始荧光 (F_o)、最大荧光 (F_m),计算出光系统 II (PS II) 的最大光化学量子产量 (F_v/F_m) = $(F_m - F_o)/F_m$,然后打开活化光 [$1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],测定光适应下初始荧光 (F_o')、最大荧光 (F_m')、稳态荧光 (F_s)、最大可变荧光 (F_v'),并计算光化学猝灭系数 (q_p) = $(F_m' - F_m)/(F_m' - F_o)$ 、非光化学猝灭 (NPQ) = $(F_m - F_m')/F_m$ 、表观光合电子传递速率 (ETR) = $\Phi_{\text{PSII}} \times \text{光照度} \times 0.50 \times 0.84$ 及 PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) = $(F_m' - F)/F_m'$ 等参数。测定时间为 09:00—11:00 和 16:00—18:00,每叶片重复 3 次,连续测定 3 d。

1.4 数据分析方法

采用 Excel 2007 及 SPSS 21.0 软件统计分析试验数据,利用独立样 t 检验和 Duncan's 多重比较法进行差异显著性分析,当 P 值小于 0.05 时视为差异显著。

2 结果与分析

2.1 光周期对马铃薯结薯性能的影响

通过观察,马铃薯品种 Q9 和马铃薯品种 NB1 在 12 h—12 h 和 8 h—16 h 中植株均有匍匐茎生成,在 16 h—8 h 中有部分植株有匍匐茎生成,马铃薯品种 G2 在 16 h—8 h 中无匍匐茎生成,在 12 h—12 h 中有部分植株有匍匐茎生成,在 8 h—16 h 中的植株均有匍匐茎生成,说明 G2 匍匐茎生成对短日照的依赖性相对 NB1 和 Q9 更高 (表 1)。3 个马铃薯品种在不同处理条件下,在 8 h—16 h 与 12 h—12 h 中有薯块生成,在 16 h—8 h 中均无薯块生成,表明 16 h—8 h 的长日照处理抑制马铃薯结薯。

从图 1 可以看出,马铃薯品种 Q9 在 45 d 时,12 h—12 h 中日照平均单株产量低于 8 h—16 h 短日照,在 60 d 时,12 h—12 h 中日照与 8 h—16 h 短日照平均单株产量相近,在 75 d 时,12 h—12 h 中日照平均单株产量高于 8 h—16 h 短日照,说明在 45 d 前 8 h—16 h 短日照利于马铃薯品种 Q9 薯块的形成与膨大,45 d 后 12 h—12 h 中日照利于 Q9 薯块的膨大,Q9 在 12 h—12 h 中日照处理 60 ~ 75 d 期间平均单株产量增量最高。马铃薯品种 NB1 在处理 45 d,12 h—12 h 中日照与 8 h—16 h 短日照平均单株产量相近,处理 60 d 和 75 d 的 12 h—12 h 中日照平均单株产量高于 8 h—12 h 短日照,说明 NB1 在中短日照中都能形成薯块,但是 8 h—16 h 短日照不利于 NB1 薯块膨大,12 h—12 h 中日照利于 NB1 薯块膨大,NB1 在 12 h—12 h 中日照处理 45 ~ 60 d 期间平均单株产量增量最高。马铃薯品种 G2 在 3 个处理时长中均是 8 h—16 h 短日照的平均单株产量高于 12 h—12 h 中日照,说明 8 h—16 h 短日照利于 G2 薯块形成与膨大,G2 在 8 h—16 h 短日照处理的 45 ~ 60 d 期间平均单株产量增量最高。在 75 d 时,马铃薯品种 Q9 和 NB1 在 8 h—16 h 短日照中相对 12 h—12 h 中日照平均单株产量分别减少 25% 和 71%,马铃薯品种 G2 在 12 h—12 h 中日照相对 8 h—16 h 短日照减少 70%,说明 Q9 平均单株产量受到光周期影响程度相对 NB1 和 G2 较低。

2.2 光周期对马铃薯叶绿素含量的影响

从图 2 可以看出,马铃薯品种 Q9 在 45 d 和 60 d 叶绿素含量随光周期光照时长的减少而变低,在 75 d 时叶绿素含量表现为光—暗周期 16 h—8 h >

表 1 光周期对马铃薯匍茎和结薯数的影响

品种	光—暗周期	处理时间 (d)	匍茎茎数 (个)	匍茎茎长 (mm)	单株结薯数 (个)
Q9	16 h—8 h	45	0b	0b	0c
		60	0.33 ± 0.33b	2.42 ± 2.42b	0b
		75	0.33 ± 0.33b	5.93 ± 5.93b	0b
	12 h—12 h	45	2.00 ± 0.58a	2.32 ± 0.78a	1.67 ± 0.33a
		60	1.67 ± 0.33a	11.18 ± 2.03a	1.33 ± 0.33a
		75	3.67 ± 0.67a	24.87 ± 5.731a	2.00 ± 0.58a
	8 h—16 h	45	1.00 ± 0.00ab	0.32 ± 0.02b	1.00 ± 0.00b
		60	1.33 ± 0.33ab	10.10 ± 0.91a	1.00 ± 0.00a
		75	1.67 ± 0.33b	10.37 ± 0.53ab	1.00 ± 0.00ab
NB1	16 h—8 h	45	0.33 ± 0.33a	0.50 ± 0.50b	0
		60	0b	0c	0b
		75	0c	0c	0c
	12 h—12 h	45	1.00 ± 0.00a	0.70 ± 0.06b	1.00 ± 0.00
		60	3.33 ± 1.45a	19.41 ± 0.88b	3.67 ± 0.67a
		75	3.00 ± 0.58a	42.17 ± 4.11a	2.00 ± 0.00a
	8 h—16 h	45	1.00 ± 0.00b	4.88 ± 0.49a	1.00 ± 0.00
		60	1.00 ± 0.00ab	11.80 ± 2.45a	1.00 ± 0.00b
		75	1.33 ± 0.33b	8.92 ± 0.95b	1.33 ± 0.33b
G2	16 h—8 h	45	0a	0a	0a
		60	0c	0b	0b
		75	0b	0b	0b
	12 h—12 h	45	0.33 ± 0.33a	0.57 ± 0.57a	0.33 ± 0.33a
		60	1.67 ± 0.33a	6.61 ± 1.30a	0.33 ± 0.33b
		75	0.33 ± 0.33b	3.51 ± 3.51ab	0.33 ± 0.33b
	8 h—16 h	45	1.00 ± 0.58a	6.35 ± 4.31a	1.00 ± 0.58a
		60	1.00 ± 0.00b	6.64 ± 1.00a	1.00 ± 0.00a
		75	2.67 ± 0.67a	9.70 ± 0.83a	2.33 ± 0.88a

注:同列数据后不同小写字母表示相同品种在相同处理时间不同光周期处理差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。

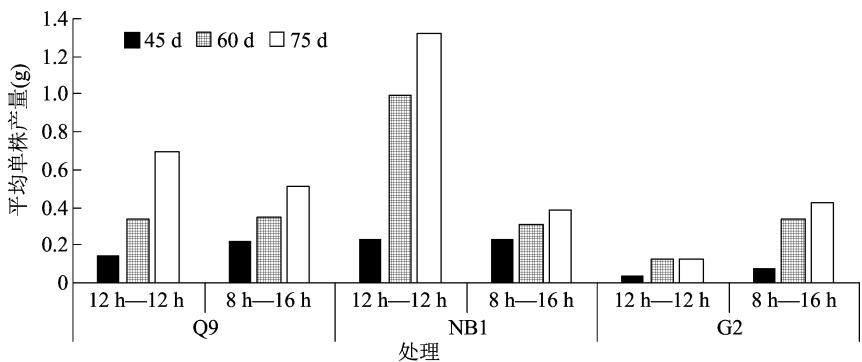
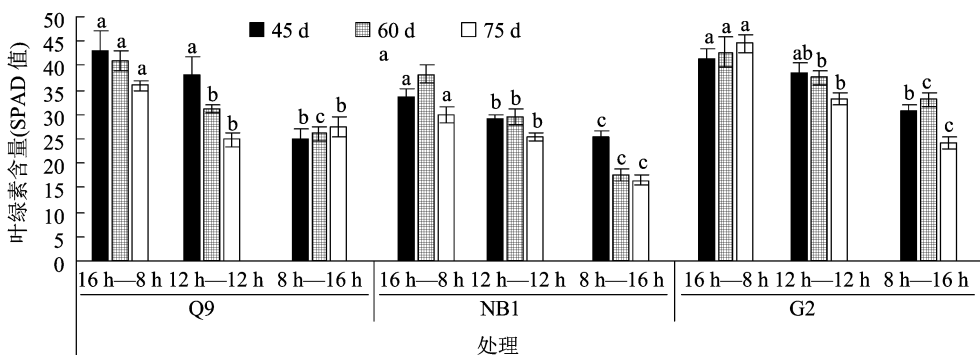


图 1 光周期对马铃薯单株薯质量的影响

8 h—16 h > 12 h—12 h,光—暗周期 12 h—12 h 与 8 h—16 h 的叶绿素含量没有显著差异。NB1 和 G2 的叶绿素含量表现出随着光照时长减少而减少的趋势,特别是这 2 个品种的叶绿素含量均在 16 h—8 h 光周期中最高,且显著高于 8 h—16 h 光周期。



柱上不同小写字母表示相同品种相同处理时间不同光周期处理差异显著($P < 0.05$)。图 3 同

图2 光周期对马铃薯叶绿素含量的影响

2.3 光周期对光合作用气体交换参数的影响

从表 2 可以看出,马铃薯品种 Q9 的净光合速率随光周期光照时长的减少而降低,表明 16 h—8 h 长日照有利于 Q9 的光合作用,净光合速率达到较高水平。马铃薯品种 NB1 在光—暗周期处理 45 d 时 P_n 表现为 16 h—8 h > 12 h—12 h > 8 h—16 h,在 60 d 和 75 d 时表现为 12 h—12 h > 16 h—8 h > 8 h—16 h,表明 45 d 前 16 h—8 h 长日照有利于 NB1 的光合作用,60 d 后 12 h—12 h 中日照有利 NB1 的光合作用。在 3 个光周期处理中,马铃薯品种 Q9 和 NB1 的 G_s 没有差异变化,说明是非气孔因素导致各光周期 P_n 的差异。马铃薯品种 G2 在 3 个处理时间中, P_n 均表现为 16 h—8 h > 12 h—12 h > 8 h—16 h,表明 16 h—8 h 长日照有利于马铃薯品种 G2 的光合作用, G_s 在 45 d 和 60 d 均表现为 16 h—8 h 显著高于另外 2 个光周期处理,在 45、60 d 的 C_i 表现为随光照时间减少而增加,在 75 d C_i 表现为 12 h—12 h、8 h—16 h > 16 h—8 h,说明在全试验期中各光周期的 P_n 差异并非受到气孔导度因素的影响, G2 的净光合速率变化与气孔导率无关。3 个品种的 C_i 大致表现为随光周期的光照时长减少而增加,综合光合指标分析可能是因为 P_n 降低,碳同化吸收减少所致。

2.4 光—暗周期对叶绿素荧光的影响

从图 3 可以看出,马铃薯品种 Q9 在光—暗周期处理 45 d 各项荧光参数差异不显著,表明在 45 d 前光—暗周期处理对马铃薯品种 Q9 光合作用的光能吸收转化影响不大,在 60 d, q_p 、ETR 和, Φ_{PSII} 在 16 h—8 h 长日照中显著低于 8 h—16 h 短日照,说明试验进行的中期 8 h—16 h 短日照利于 Q9 的光能转运与同化,在 75 d, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p 和 ETR 在呈现随光周期光照时长减少而降低的趋势, NPQ 表

现为 8 h—16 h > 16 h—8 h > 12 h—12 h, 75 d 后光周期对 Q9 的光能利用影响明显,表现为 8 h—16 h 短日照可能破坏 PS II 反应中心,持续的 16 h—8 h 长日照对 PS II 反应中心也有一定影响。

马铃薯品种 NB1 在光周期处理 45 d 时, Φ_{PSII} 和 ETR 在 8 h—16 h 短日照中显著低于另外 2 个处理, q_p 在表现为 12 h—12 h > 8 h—16 h > 16 h—8 h,且各处理间差异显著,说明光周期对 NB1 的影响较为明显,12 h—12 h 中日照对 NB1 的光化学反应最合适。在 60 d, F_v/F_m 表现为随光周期减少而减少,在 75 d, Φ_{PSII} 、 q_p 和 ETR 在 8 h—16 h 短日照中显著低于另外 2 个处理, NPQ 在短日照中显著高于另外 2 个处理,说明持续的 8 h—16 h 短日照影响了 PS II 反应中心的光能转化与电子传递,形成光抑制。表明在 45 d 前,12 h—12 h 中日照有利于马铃薯品种 NB1 光合作用,持续的 8 h—16 h 短日照处理对马铃薯品种 NB1 的 PS II 反应中心形成抑制。

马铃薯品种 G2 光周期处理 45 d 时, NPQ 在 12 h—12 h 中日照中显著低于 8 h—16 h 短日照, Φ_{PSII} 和 ETR 在 8 h—16 h 短日照显著低于长日照,说明 8 h—16 h 短日照使马铃薯品种 G2 对光能的吸收能量降低,因此在 8 h—16 h 短日照中热耗散升高。在光周期处理 60 d, F_v/F_m 在 8 h—16 h 短日照中显著低于另外 2 个处理, Φ_{PSII} 、 q_p 和 ETR 在 16 h—8 h 长日照中显著高于另外 2 个处理, NPQ 在 3 个处理中没有显著差异,说明叶片的 PS II 反应中心在 8 h—16 h 短日照中受到抑制,但未对 PS II 反应中心形成破坏。在 75 d 时, Φ_{PSII} 和 ETR 在 8 h—16 h 短日照中低于另外 2 个处理, NPQ 在 8 h—16 h 短日照中高于另外 2 个处理,说明持续的 8 h—16 h 短日照破坏了 PS II 反应中心,使其对光能的吸收、传递与转化能力降低。表明在 60 d 前光

表 2 光周期对光合作用气体参数的影响

品种	光—暗周期	处理时间 (d)	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	G_s [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
Q9	16 h—8 h	45	21.17 ± 1.25a	0.42 ± 0.20a	269.93 ± 9.21b	4.58 ± 0.35a
		60	16.55 ± 1.25a	0.07 ± 0.00a	237.96 ± 18.60b	2.69 ± 1.12a
		75	7.79 ± 1.68a	0.07 ± 0.02a	501.50 ± 46.70a	2.01 ± 0.62a
	12 h—12 h	45	16.13 ± 0.57b	0.22 ± 0.09a	323.45 ± 24.24ab	5.38 ± 1.08a
		60	6.81 ± 0.40b	0.07 ± 0.00a	374.11 ± 2.92a	1.95 ± 0.02a
		75	5.38 ± 1.55ab	0.06 ± 0.03a	522.54 ± 37.26a	1.96 ± 1.09a
	8 h—16 h	45	5.75 ± 1.09c	0.16 ± 0.04a	382.74 ± 16.14a	2.72 ± 0.69a
		60	4.01 ± 0.49c	0.03 ± 0.01a	359.58 ± 1.23a	0.77 ± 0.07a
		75	1.75 ± 0.08b	0.08 ± 0.01a	617.53 ± 8.50a	2.27 ± 0.40a
NB1	16 h—8 h	45	25.67 ± 2.18a	0.18 ± 0.00a	210.03 ± 19.66b	5.53 ± 0.69a
		60	11.72 ± 0.53a	0.06 ± 0.01a	224.65 ± 13.67c	2.22 ± 0.31b
		75	6.31 ± 1.04ab	0.03 ± 0.00a	378.32 ± 17.15b	1.04 ± 0.18a
	12 h—12 h	45	13.99 ± 1.60b	0.19 ± 0.07a	267.26 ± 18.78ab	4.17 ± 1.17ab
		60	11.90 ± 0.14a	0.09 ± 0.00a	323.68 ± 1.03b	2.89 ± 0.04a
		75	9.58 ± 1.24a	0.19 ± 0.04a	626.86 ± 10.06a	5.35 ± 1.05a
	8 h—16 h	45	7.79 ± 0.48c	0.11 ± 0.02a	327.72 ± 16.47a	2.11 ± 0.31b
		60	6.32 ± 0.31b	0.06 ± 0.03a	414.79 ± 3.95a	2.14 ± 0.06b
		75	3.28 ± 0.63b	0.29 ± 0.17a	657.99 ± 14.35a	8.08 ± 4.24a
G2	16 h—8 h	45	24.49 ± 1.63a	0.21 ± 0.03a	248.71 ± 16.48a	5.10 ± 0.78a
		60	22.91 ± 1.40a	0.16 ± 0.02a	279.88 ± 7.20c	3.86 ± 0.07a
		75	13.17 ± 1.15a	0.07 ± 0.00a	460.95 ± 12.76b	2.51 ± 0.16a
	12 h—12 h	45	12.83 ± 1.31b	0.14 ± 0.00b	292.52 ± 14.97ab	3.36 ± 0.18b
		60	9.41 ± 0.43b	0.09 ± 0.01b	371.01 ± 10.42b	2.89 ± 0.22b
		75	12.89 ± 2.98a	0.30 ± 0.12a	615.79 ± 44.58a	7.24 ± 2.37a
	8 h—16 h	45	5.49 ± 0.51c	0.11 ± 0.02b	351.28 ± 24.22b	2.40 ± 0.27b
		60	4.29 ± 0.64c	0.04 ± 0.01b	422.89 ± 7.25a	1.48 ± 0.19a
		75	4.84 ± 1.48b	0.07 ± 0.02a	593.40 ± 11.22a	2.29 ± 0.49a

周期处理中,8 h—16 h 短日照对马铃薯品种 G2 的 PSⅡ反应中心形成抑制,继续持续 8 h—16 h 短日照处理可能会对 PSⅡ反应中心造成破坏。

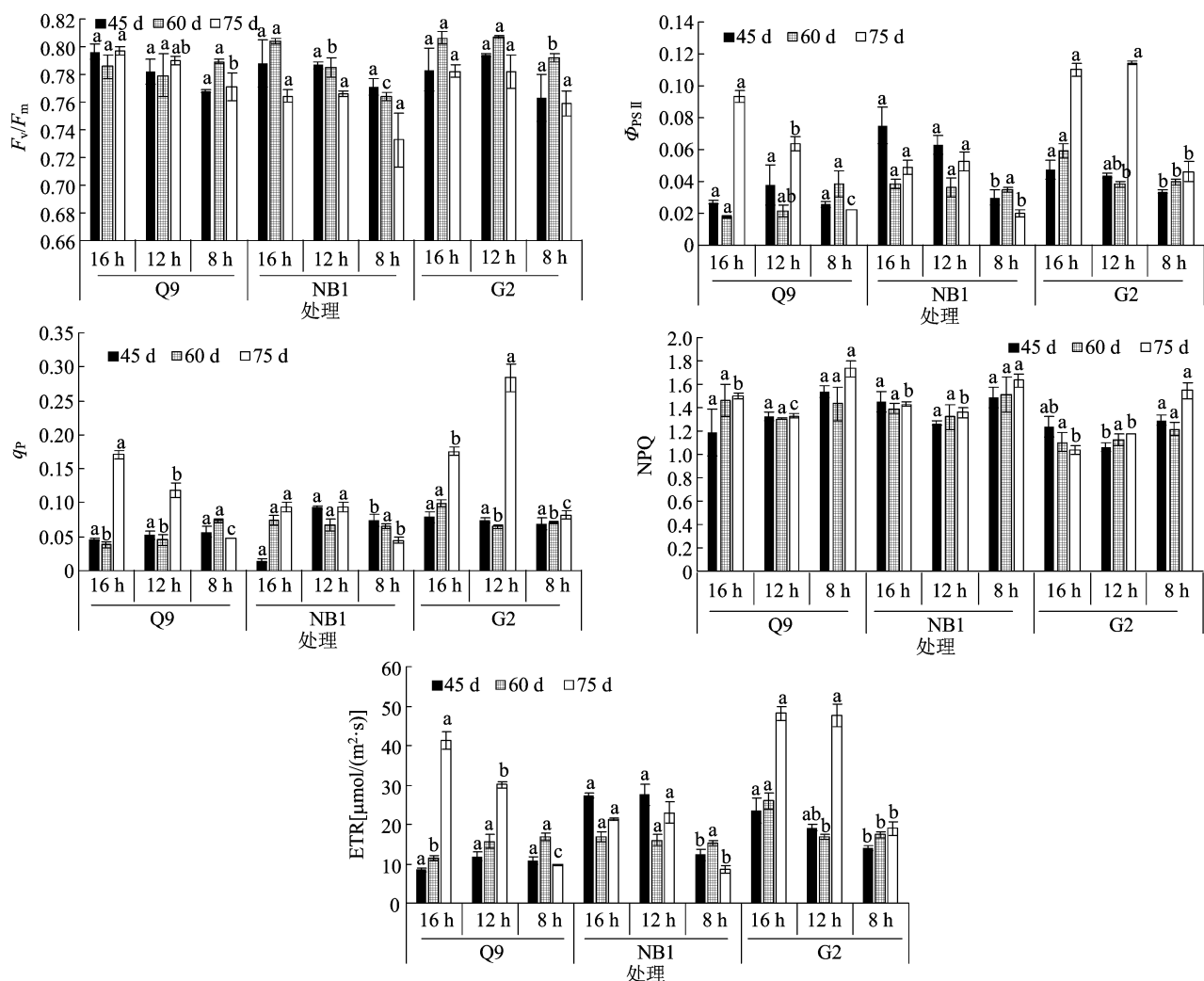
3 结论与讨论

3.1 光周期对马铃薯产量的影响

本试验观察到 16 h—8 h 的长日照处理中,3 个马铃薯品种均无薯块生成,在 12 h—12 h 与 8 h—16 h 的光周期处理中均有薯块生成。说明光周期是影响马铃薯薯块形成的因素,16 h—8 h 长日照抑制马铃薯薯块形成。12 h—12 h 中日照有利于马铃薯 Q9 和 NB1 薯块膨大,8 h—16 h 短日照有利于马铃薯品种 G2 的薯块膨大,马铃薯品种 Q9 较 NB1 和 G2 的平均单株产量受光周期影响低。由此可知,不同马铃薯品种结薯性能对光周期反应有差异。

相关研究表明,长日照中马铃薯合作 88 号无薯

块形成,米拉在不同光周期中均能结薯^[13];唐道彬等的试验证明,中日照有利于雾培马铃薯薯块膨大^[14]。柳俊等认为,短日照有利于试管薯薯块的形成与膨大^[15]。本试验结果表明,16 h—8 h 的长日照抑制马铃薯薯块的形成,不同品种的马铃薯结薯与薯块膨大对光周期的需求不同,从而决定了马铃薯不同品种对栽培区域的适应性。原因可能是马铃薯起源于南美洲安第斯山脉中部西麓、濒临太平洋的秘鲁和玻利维亚区域,该地区短日照与低温的气候条件诱导马铃薯薯块形成,以确保植株度过寒冷的冬天,导致当地大多数的野生种和部分栽培种的块茎形成受到光周期的严格调控,短日照下才能结薯,在马铃薯经驯化南迁至智利的过程中,马铃薯不同品种逐渐适应较长时间的日照条件,或者对光周期相对钝感,造成现存的栽培种马铃薯对光周期反应有差异的现象^[16-18]。目前,国际上广泛种植



16 h 表示 16 h—8 h(长日照), 12 h 表示 12 h—12 h(中日照), 8 h 表示 8 h—16 h(短日照)

图3 光周期对马铃薯叶绿素荧光的影响

的马铃薯栽培种虽然经长日照条件驯化,但仍然是短日照条件下更易形成薯块^[18]。

3.2 光周期对马铃薯光合作用的影响

本试验中马铃薯的叶绿素含量大致表现为随光周期的光照时间减少而降低。这与生菜^[19]、油菜^[20]叶绿素含量随光周期的光照时长减少而减少一致。原因可能是与叶绿素的合成相关的酶均为光响应酶,叶片接受光照时间越少,光响应酶的活性就越低,进而导致叶绿素含量越低^[21]。

植物光合作用是在光系统 I (PS I) 和光系统 II 的参与下进行的,PS II 中的叶绿素光合分子受光能激发产生电荷分离后,从水分子中抢夺电子,促使水分子裂解释放氧气和质子,PS II 夺取的电子通过叶绿素类囊体膜上的电子传递链向 PS I 传递,使 PS I 将 NADP^+ 还原为 NADPH 并利用 ATP 合酶合成 ATP,将 ATP 和 NADPH 中储存的能量进一步转

化,使二氧化碳以形成单糖与多糖的方式被固定,从而实现光能向化学能的转化,传递链上的任何一个环节受到抑制都会影响光合电子传递,对植物光合作用造成影响^[22-25]。PS II 吸收的光能以 3 种方式存在:(1)经过电子传递链传递给 PS I 的色素分子用于光化学反应,其份额可以通过叶绿素荧光参数中的 q_p 反映,这部分能量沿电子传递链传递和利用的情况由 ETR 反映;(2)以热能的方式耗散,其耗散情况由叶绿素荧光参数中的 NPQ 反映;(3)以荧光的形式进行耗散;三者之间是此消彼长相互竞争的关系^[26]。在 PS I 中固定的 CO_2 是测定光合速率的基础^[23-24],导致光合速率变化的因素可分为气孔因素和非气孔因素,由气孔导度降低引起 CO_2 供应受限导致光合速率下降为气孔因素限制,表现为光合气体交换参数中的 P_n 下降且 G_s 和 C_i 同时下降,由叶肉细胞间隙下降引起 CO_2 扩散能力减弱、羧化

能力及光合酶活性降低而导致光合速率下降为非气孔因素限制^[10,27-28]。

马铃薯品种 Q9 的光合速率表现为随光周期光照时间减少而减缓,在试验中期,8 h—16 h 短日照的 PS II 效率更高,试验后期 PS II 的效率受 8 h—16 h 短日照抑制,16 h—8 h 长日照也对 PS II 的效率有一定程度的影响。表明马铃薯品种 Q9 的光合速率随光周期光照时间减少而降低并非因为 PS II 获得的光能减少而导致,是因为叶片中光合酶活性降低,羧化能力降低所致。

马铃薯品种 NB1 在试验初期光合速率随光照时间的减少而降低,12 h—12 h 中日照对 PS II 的效率有利,在试验中后期光合速率在 12 h—12 h 中日照最高,在 8 h—16 h 短日照最低,持续的 8 h—16 h 短日照对马铃薯品种 NB1 的 PS II 形成抑制。马铃薯品种 G2 的光合速率表现为随光周期光照时长的减少而降低,试验初期马铃薯品种 G2 的气孔导度引起光合速率变化,8 h—16 h 短日照对 PS II 的活性有影响,在试验中后期,随着 8 h—16 h 短日照处理时间增加,马铃薯品种 G2 的 PS II 受 8 h—16 h 短日照的抑制程度增加最后形成破坏。表明 PS II 受到 8 h—16 h 短日照的抑制或破坏,导致 PS I 的电子受体库中 NADP⁺ 还原成 NADPH 过程受到抑制,使光合反应中固定二氧化碳的过程受限,表现为光合速率在短日照中降低^[22,29]。

光周期影响马铃薯光合作用的原因可能是:(1)在秋季的光周期中光照时间减少,这是植物减缓生长和(或)降低光合作用的信号,因此光合作用随光照时长变化而变化可能是它们的物候现象^[30];(2)光合色素含量直接影响光合作用的强弱^[31-32],光照时长减少影响了光合色素的合成,进一步影响植物的光合作用;(3)光周期影响马铃薯 PS II 的活性,短日照抑制或破坏马铃薯光合系统,使马铃薯光合速率受光周期影响。

参考文献:

[1] 张耀文,赵小光,关周博,等. 作物高光效种质筛选的研究进展[J]. 中国农学通报,2019,35(18):1-11.

[2] 李冬梅,谭秋平,高东升,等. 光周期对休眠诱导期桃树光合及 PS II 光系统性能的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1933-1939.

[3] 裴海霞,雷 石,张金政,等. 不同光周期对德国鸢尾“Royaltouch”的花芽分化和光合作用的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2006,6(14):477-481.

[4] 蓝金宣,黄晓露,李开祥,等. 光质与光周期对多穗柯幼苗生长及光合参数的影响[J]. 广西林业科学,2018,47(1):24-28.

[5] 肖 特. 温光对马铃薯植株生长及块茎形成发育影响的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[6] 郭建林. 马铃薯 StCOL 和 StTFL1 的克隆及其在块茎形成中的功能分析[D]. 南京:南京农业大学,2008.

[7] 仲乃琴,蔡冬清,赵 盼. 我国高原马铃薯种薯产业发展与精准扶贫[J]. 中国科学院院刊,2020,35(10):1308-1313.

[8] 周 俊. 马铃薯(*Solanum tuberosum* L.) 试管块茎形成的 QTL 定位及遗传分析[D]. 武汉:华中农业大学,2014.

[9] 赵书梅. 中学生物教材中植物光周期现象与引种内容分析[J]. 现代农村科技,2011(15):65.

[10] 刘梦芸,蒙美莲,门福义,等. 光周期对马铃薯块茎形成的影响及对激素的调节[J]. 马铃薯杂志,1994(4):193-197.

[11] 罗 玉,李灿辉. 不同糖处理及光周期对马铃薯块茎形成的影响[J]. 红河学院学报,2011,9(6):94-99.

[12] 刘艳芬,陈翠果,梁伟玲,等. 马铃薯脱毒试管苗保苗与试管薯诱导条件优化[J]. 浙江农业学报,2011,23(5):876-879.

[13] 肖关丽,郭华春. 马铃薯温光反应及其与内源激素关系的研究[J]. 中国农业科学,2010,43(7):1500-1507.

[14] 唐道彬,高 旭,吕长文,等. 雾培马铃薯结薯的光响应机理研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2012,34(2):23-28.

[15] 柳 俊,谢从华. 马铃薯块茎发育机理及其基因表达[J]. 植物学通报,2001,18(5):531-539.

[16] 李婉琳,宋 洁,郭华春. 引自 CIP 的马铃薯新品系的光周期敏感性评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2017,32(3):395-401.

[17] 单建伟. 光诱导的马铃薯试管薯形成相关基因的转录组分析[D]. 武汉:华中农业大学,2013.

[18] 谢婷婷,柳 俊. 光周期诱导马铃薯块茎形成的分子机理研究进展[J]. 中国农业科学,2013,22(22):4657-4664.

[19] 刘 杰,胡笑涛,王文娥,等. 光强和光周期对水培生菜光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西南农业学报,2019,32(8):1784-1790.

[20] 张 欢,章丽丽,李 薇,等. 不同光周期红光对油葵芽苗菜生长和品质的影响[J]. 园艺学报,2012,39(2):297-304.

[21] 薛 欢,朱 梅,房海灵,等. 光周期对金银花叶片光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏林业科技,2018,45(4):13-16.

[22] 陆思宇,杨再强,张源达,等. 高温条件下光周期对鲜切菊花叶片光合系统荧光特性的影响[J]. 中国农业气象,2020,41(10):632-643.

[23] 薛 娴,许会敏,吴鸿洋,等. 植物光合作用循环电子传递的研究进展[J]. 植物生理学报,2017,53(2):145-158.

[24] 肖 怡,朱新广. 叶绿素荧光及碳氧同位素信号在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理学报,2016,52(11):1663-1670.

[25] 徐建伟,张小均,李志博,等. 幼苗期大田棉花耐旱性的叶绿素荧光和光合特性辅助鉴定[J]. 江苏农业学报,2019,35(1):1-8.

[26] 徐洪岩. 七个马铃薯野生种荧光特性的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2013.

[27] 王佳佳,张明如,许 焱,等. 光强和氮素对苜蓿光响应及叶绿

王光涛,冯素伟,丁位华,等. 根际 pH 值对冬小麦叶片抗氧化酶活性和内源激素含量的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(10):71-75.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.10.013

根际 pH 值对冬小麦叶片抗氧化酶活性和内源激素含量的影响

王光涛^{1,2}, 冯素伟^{1,2}, 丁位华^{1,2}, 胡喜贵^{1,2}, 文昭普^{1,2}, 茹振钢^{1,2}

(1. 河南科技学院小麦中心,河南新乡 453003; 2. 河南省现代生物育种协同创新中心,河南新乡 453003)

摘要:以半冬性小麦品种矮抗 58(AK58)和百农 4199(BN4199)为材料进行水培试验。结果表明,酸碱胁迫会抑制小麦地上部生物量的积累,尤其是酸胁迫下抑制效果最大。测定小麦叶片抗氧化酶活性发现,与对照相比,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性在酸性条件下降低;在碱性条件下 SOD 活性升高,而 CAT 活性降低,叶片丙二醛(MDA)含量变化趋势与 CAT 活性相反。酸碱胁迫对小麦叶片激素含量有较大影响,酸胁迫会降低玉米素(ZT)、生长素(IAA)含量,提高脱落酸(ABA)含量,而碱胁迫降低了 IAA 含量,提高了 ZT 和 ABA 含量。2 个品种地上部干物质质量变化、叶片抗氧化酶活性、内源激素含量和 ZT/ABA、IAA/ABA 的比值在酸碱胁迫下的变化趋势基本一致。结果表明,酸碱胁迫下小麦地上部干物质积累量与抗氧化酶活性和内源激素水平有较大关系,小麦通过调整内源激素含量来诱导抗氧化酶基因表达以适应酸碱环境。

关键词:冬小麦;pH 值;抗氧化酶;内源激素;酸碱胁迫

中图分类号:S512.1⁺10.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)10-0071-05

小麦是我国重要的粮食作物,其生长发育和产量形成受土壤环境的影响较大^[1],特别是近几年土壤酸化加剧,严重影响了粮食生产和农业的可持续发展^[2]。小麦适宜在中性土壤中生长,土壤过酸或过碱都会引起小麦的生理变化,从而影响其生长状态及代谢途径。植物在生物及非生物胁迫下会积累活性氧(ROS)。植物具有固有的抗氧化能力,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等与其他的酶及非酶抗氧化分子对清除 ROS 具有重要的作用^[3]。ROS 产生和消除之间的不平衡会导致其在

细胞内的过度积累,对植物细胞造成损害,从而抑制植物生长^[4]。因此,研究酸碱胁迫下冬小麦叶片抗氧化酶活性变化,对生态抗逆育种具有重要作用。

植物激素帮助植物适应不利环境条件,具有重要的作用^[5],一般认为玉米素(ZT)、生长素(IAA)为生长促进剂,脱落酸(ABA)为生长抑制剂^[6]。植物体内的内源激素的变化会影响植物的生理代谢途径。研究发现,低温^[7-8]、盐碱^[9]、高温^[10]、干旱^[11]等胁迫对小麦生长及内源激素的平衡有着重要的影响,而外源喷施 ABA 可以缓解胁迫对小麦生长的抑制^[12]。刘海英等研究发现,小麦根际生长环境会影响地上部内源激素含量的变化^[13]。然而,目前对不同 pH 值条件下小麦叶片内源激素含量的变化研究鲜有报道。由于叶片是小麦吸收光能固定碳源的重要器官,因此从叶片入手研究不同 pH 值对小麦抗氧化酶活性以及内源激素水平的变化规律,对研究小麦的抗酸碱胁迫机制具有重要意义。

收稿日期:2020-09-27

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:202102110033、202102110161);2018 年度博士科研启动项目(编号:2018002)。

作者简介:王光涛(1991—),男,河南新乡人,硕士研究生,主要从事小麦抗逆生理研究。E-mail:247296709@qq.com。

通信作者:茹振钢,教授,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail:rzgh58@163.com。

素荧光参数的影响[J]. 浙江农林大学学报,2019,36(6):1199-1207.

[28] 韩吉梅,张旺锋,熊栋梁,等. 植物光合作用叶肉导度及主要限制因素研究进展[J]. 植物生态学报,2017,41(8):914-924.

[29] 张子山,张立涛,高辉远,等. 不同光强与低温交叉胁迫下黄瓜 PS I 与 PS II 的光抑制研究[J]. 中国农业科学,2009,42(12):4288-4293.

[30] Way D A, Montgomery R A. Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world[J]. Plant Cell & Environment,2015,38(9):1725-1736.

[31] 高培军. 氮素施肥对毛竹光合能力与光谱特性的影响[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[32] 熊博. 柑橘黄化苗光合特性研究、转录组分析及 CuxET 基因的挖掘[D]. 雅安:四川农业大学,2017.