

铝胁迫对西瓜幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响

郑阳霞,贾松涛,赵英鹏,张伟伟,孙远秀,邱 爽

(四川农业大学 园艺学院,四川 雅安 625014)

摘要:为了探明铝胁迫对西瓜光合特性的影响。以西瓜品种早蜜王(ZM)、早春红玉(HY)为材料,研究不同浓度铝(0,250,500,1 000,1 500 $\mu\text{mol/L}$)处理下西瓜幼苗生长指标、叶绿素含量、光合特性及叶绿素荧光参数的变化。随铝浓度升高,铝处理对两西瓜品种幼苗根长及生物量的影响基本都表现为“先促后抑”,且对 ZM 的抑制作用较 HY 更明显。对光合作用的影响主要有以下 3 个方面:铝处理下 HY 叶绿素含量均高于对照,ZM 叶绿素含量仅在低浓度(250 $\mu\text{mol/L}$)铝处理下高于对照;HY 叶绿素 a/b 随铝浓度升高呈下降趋势; $\text{Al}^{3+} \leq 500 \mu\text{mol/L}$ 的铝处理下,ZM 气孔导度、胞间 CO_2 浓度、净光合速率、蒸腾速率受影响程度较 HY 明显,在 $\text{Al}^{3+} \geq 1\,000 \mu\text{mol/L}$ 处理下,HY、ZM 的 4 个参数均呈降低趋势。在大于 250 $\mu\text{mol/L}$ 的铝处理下,两西瓜品种在铝胁迫下荧光参数变化表现为:初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、潜在光化学活性(F_v/F_0)、最大光化学效率(F_v/F_m)和实际量子产量 $Y(\text{II})$ 下降,非光化学猝灭(NPQ)上升,光化学猝灭(qP)与 PS II 电子传递速率(ETR)降低。HY 较 ZM 耐铝在荧光参数变化上表现为:低浓度胁迫(250 $\mu\text{mol/L}$)下, F_0 、 F_m 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 更加稳定;电子传递速率受铝处理影响较小,非光化学猝灭(NPQ)在不同浓度铝处理下较为恒定,即能够维持恒定的光保护能力。

关键词:西瓜;铝胁迫;光合特性;叶绿素荧光参数

中图分类号:S651.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2015)04-0150-07

doi:10.7668/hbxb.2015.04.026

Effect of Aluminum Stress on Photosynthetic Characteristics and Chlorophyll Fluorescence Parameters of Watermelon Seedlings

ZHENG Yang-xia, JIA Song-tao, ZHAO Ying-peng, ZHANG Wei-wei, SUN Yuan-xiu, QIU Shuang

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: In the study, two watermelon varieties Zaomiwang (ZM) and Zaochunhongyu (HY) seedlings were used as materials to investigate the effect of aluminum (Al) on growth and physiological characteristics under different Al concentrations (0, 250, 500, 1 000, 1 500 $\mu\text{mol/L}$) treatment in order to find out the impact of aluminum stress on photosynthetic characteristics of watermelon. Changes in root length and biomass results showed that ZM was more sensitive to Al than HY. Effects on photosynthesis for the followed three aspects: Chlorophyll content of HY increased in the Al treatment. Chlorophyll content of ZM was higher than contrast only when Al concentration was 250 $\mu\text{mol/L}$. Chlorophyll a/b content of HY intended to decrease as long as the Al concentration increased; In the Al treatment, when concentration lower than 500 $\mu\text{mol/L}$ the stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r) of ZM was effected more obviously than those of HY. When Al concentration was above 1 000 $\mu\text{mol/L}$, the value of these four items all intended to fall down; Changes of Chlorophyll fluorescence in these two watermelon variety in the Al treatment (without $\text{Al}^{3+} = 250 \mu\text{mol/L}$ concentration) were as follow: original fluorescence (F_0), maximum fluorescence (F_m), potential photochemical efficiency (F_v/F_0), photochemical maximum efficiency of PS II (F_v/F_m) and the ability of leaves to transform energy $Y(\text{II})$ decreased, while non-photochemical quenching (NPQ) increased, and leaves maintained a high actinic light energy distribution by adjusting the heat dissipation; In addition, photochemical quenching coefficient (qP) and electron transport rate (ETR) decreased. At $\text{Al}^{3+} \leq 250 \mu\text{mol/L}$ concentration, the four parameters

收稿日期:2015-04-20

基金项目:四川省教育厅重点项目(11ZA075)

作者简介:郑阳霞(1977-),女,山西晋城人,副教授,博士,主要从事蔬菜作物的逆境生理生态研究。

of HY; Fo, Fm, Fv/Fo, Fv/Fm was more stable; with aluminum concentration increases, the electron transfer rate was less affected, NPQ relatively constant, that is able to maintain a constant light protection.

Key words: *Citrullus lanatus*; Aluminum stress; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence parameters

我国南方 15 个省区拥有大面积的酸性土壤,铝毒害被认为是酸性土壤中制约作物生产的重要障碍因子,影响作物生长,造成作物减产^[1]。土壤酸性,加之南方多雨水淋溶,导致大量土壤结合态铝被活化成为活性铝($\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$),其中 $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ (又称 Al^{3+})是现今大多数学者认为造成酸性土壤中植物毒害的主要铝形态。西瓜(*Citrullus lanatus*)是葫芦科植物,是我国南北方重要的蔬菜作物之一,全国各地栽培广泛。随着设施园艺的发展,西瓜设施栽培面积增长迅速。而土壤酸化又是设施土壤退化的主要特征之一,西瓜的连作障碍问题也被证明和土壤酸化有着密切的关系^[2-3]。而土壤酸化后引起的活性铝增加与影响西瓜产量、品质的一系列问题存在的关系还未有深入的研究,因此,进行西瓜铝毒害的研究具有重要的理论及生产意义。

本研究分析了铝胁迫对西瓜叶绿素含量、净光合速率、叶片的气孔导度、胞间 CO_2 浓度及蒸腾速率等的影响,旨在探明铝胁迫对西瓜光合特性的影响。叶绿素荧光技术可以快速、无损伤地测定光合作用过程中光能的吸收、传递、耗能和分配等情况,在植物光合机构的功能和环境胁迫的效应评估中已有广泛应用^[4-6]。叶绿素荧光作为光合作用的探针,可以从微观角度解释光合作用的变化机制。鉴于此,本研究以西瓜品种早蜜王(ZM)、早春红玉(HY)为研究材料,研究不同浓度铝胁迫对两西瓜品种叶绿素含量、光合特性、叶绿素荧光参数和电子传递的影响,以期从不同层次综合探讨并比较铝胁迫对耐铝性不同的 2 个西瓜品种光合作用的影响机制,为选择耐铝西瓜品种,提高西瓜产量奠定相关理论基础。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试西瓜品种从市场上购买,为蔬菜栽培生理课题组通过前期试验初步筛选出的铝敏感品种早蜜王和耐铝品种早春红玉^[7]。

供试试剂:十八水合硫酸铝(分子式 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)、分析纯。

1.2 试验设计

挑选大小均匀、健康饱满的西瓜种子浸种、催

芽、育苗,幼苗第 1 片真叶完全展开后将长势一致的幼苗移栽到装有珍珠岩的塑料盆里,每盆 3 株,用 1/3 Hoagland 营养液浇灌培养至五叶期。以 1/3 Hoagland 营养液为母液配制铝浓度为 0, 250, 500, 1 000, 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 的处理液,用 H_2SO_4 和 NaOH 调节溶液 $\text{pH} = 4.5 \pm 0.3$ (模拟酸性土壤 pH 值条件,使添加铝主要以 Al^{3+} 形态存在),每个浓度设 6 次重复,每重复 8 盆。用各浓度的处理液分别浇灌各组西瓜幼苗,每天 1 次,每次每盆浇灌 150 mL。铝处理后的第 5 天选取从上到下的第 2~3 片完全展开的叶子进行指标测定。

1.3 测定项目及方法

根长用直尺测量;将地下部与地上部分开后在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青 30 min 后转入 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,分别称地上部和地下部干质量^[8];叶绿素含量测定采用分光光度法,以 95% 乙醇为提取液^[8];使用美国 LI-6400 便携式光合测定系统测定西瓜叶片净光合速率($\text{Pn}, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)及影响因子,包括气孔导度($\text{Gs}, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、胞间 CO_2 浓度($\text{Ci}, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率($\text{Tr}, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)等;采用 PAM-2500 便携式调制荧光仪(Walz, Effeltrich, Germany),利用 2030-B 叶夹测定叶绿素荧光参数。首先将叶片暗适应 30 min,参照 Cuddy 等^[9]的方法测定慢速荧光诱导曲线,仪器自动记录 Fo、Fm、Fm'、Fo'、ETR、Fv/Fo、Fv/Fm、Y(II)、NPQ、qP。数据间计算公式如下:

$$\text{Fv/Fo} = (\text{Fm} - \text{Fo})/\text{Fo}; \text{Fv/Fm} = (\text{Fm} - \text{Fo})/\text{Fm}; \text{Y(II)} = \Delta\text{F}/\text{Fm}' = (\text{Fm}' - \text{F})/\text{Fm}'; \text{PQ} = (\text{Fm} - \text{Fm}')/\text{Fm}'; \text{qP} = (\text{Fm}' - \text{F})/(\text{Fm}' - \text{Fo}')$$

1.4 数据统计

采用 SPSS 进行单因素方差分析,选择最小显著性差异法(LSD 法)进行均值多重比较,用 Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 铝胁迫对西瓜根长、生物量的影响

表 1 为 HY、ZM 西瓜五叶期幼苗在铝处理 5 d 后的生长情况。HY、ZM 根长随铝浓度升高均呈先增后减的趋势,分别在 500, 250 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下达最大值,随后随浓度的升高根长量减小。HY 各处理组根长量与对照差异不显著,ZM 仅在 Al^{3+} 为 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 浓度处理下低于对照达显著水平。HY、ZM 地下部干质量、地上部干质量随铝浓度升高也均呈

先增后减的趋势,均在 250 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下达最大峰值且与对照差异均不显著。HY 地下部干质量各铝处理组与对照差异都不显著,地上部干质量在浓度升高至 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时低于对照达显著水平。ZM 地下部干质量、地上部干质量在 500 ~ 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 铝处理下均较 250 $\mu\text{mol/L}$ 铝处理下显著降低。

表 1 不同浓度铝处理对西瓜根长、生物量的影响

Tab.1 Effects of root length,dry weight of watermelon under different Al^{3+} concentration treatments

品种 Varieties	铝浓度/($\mu\text{mol/L}$) Concentration of aluminum	根长/cm Root length	地下部干质量/g Root dry wright	地上部干质量/g Aerial part dry wright
早春红玉 HY	CK	6.1 \pm 0.51ab	0.035 \pm 0.002 8ab	0.33 \pm 0.017a
	250	6.3 \pm 0.90ab	0.040 \pm 0.007 5a	0.35 \pm 0.042a
	500	7.4 \pm 0.70a	0.037 \pm 0.003 7ab	0.32 \pm 0.033a
	1 000	6.2 \pm 0.24ab	0.030 \pm 0.004 2ab	0.24 \pm 0.025b
	1 500	6.0 \pm 0.46b	0.028 \pm 0.003 3b	0.22 \pm 0.032b
早蜜王 ZM	CK	8.8 \pm 0.57ab	0.060 \pm 0.002 0a	0.44 \pm 0.012ab
	250	9.5 \pm 0.41a	0.061 \pm 0.001 7a	0.47 \pm 0.036a
	500	8.1 \pm 0.37ab	0.047 \pm 0.004 6b	0.40 \pm 0.046bc
	1 000	7.5 \pm 1.15bc	0.042 \pm 0.001 7bc	0.35 \pm 0.019cd
	1 500	6.1 \pm 0.84c	0.038 \pm 0.002 1c	0.33 \pm 0.020d

注:同列数值不同字母表示差异达 5% 显著水平。表 2 ~ 4、图 1 ~ 4 同。
Note: Different letters within the same column indicate significant difference at 5% level. The same as Tab. 2 ~ 4, Fig. 1 ~ 4.

2.2 铝胁迫对西瓜叶片叶绿素的影响

梯度浓度铝处理下,HY、ZM 叶片叶绿素 a 含量均呈先增后减的趋势,均在 250 $\mu\text{mol/L}$ 铝处理下达最大值。其中 HY 在 250 ~ 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 铝处理下叶片叶绿素 a 含量均显著高于对照;ZM 仅 250 $\mu\text{mol/L}$ 铝处理下叶绿素 a 含量高于对照达显著水平。两西瓜品种叶绿素 b 含量的变化趋势不同。HY 各铝处理组叶绿素 b 含量均显著高于对照且组

间差异不显著;而 ZM 在 Al^{3+} 为 250 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下叶绿素 b 略高于对照但差异不显著,随浓度升高, Al^{3+} 在 500,1 000,1 500 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下叶绿素 b 含量均显著低于对照且组间差异不显著。HY 叶绿素 a/b 在铝处理下各组均显著低于对照,而组间差异不显著;ZM 叶绿素 a/b 随铝浓度升高呈先增后减的趋势, Al^{3+} 在 250,500,1 000 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下均显著高于对照(表 2)。

表 2 不同浓度铝处理对西瓜叶绿素的影响

Tab.2 Effects of chlorophyll of watermelon under different Al^{3+} concentration treatments

品种 Varieties	铝浓度/($\mu\text{mol/L}$) Concentration of aluminum	叶绿素 a/(mg/g) Chlorophyll a contents	叶绿素 b/(mg/g) Chlorophyll b contents	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
早春红玉 HY	CK	8.04 \pm 0.026c	2.24 \pm 0.163b	3.60 \pm 0.180a
	250	8.48 \pm 0.068a	2.99 \pm 0.276a	2.84 \pm 0.108b
	500	8.39 \pm 0.176a	3.27 \pm 0.207a	2.57 \pm 0.137b
	1 000	8.27 \pm 0.044b	3.10 \pm 0.057a	2.68 \pm 0.146b
	1 500	8.14 \pm 0.046c	3.09 \pm 0.132a	2.64 \pm 0.152b
早蜜王 ZM	CK	7.84 \pm 0.212b	2.97 \pm 0.107a	2.64 \pm 0.072b
	250	10.00 \pm 0.181a	3.28 \pm 0.089a	3.07 \pm 0.196a
	500	6.82 \pm 0.301c	2.29 \pm 0.152b	3.00 \pm 0.134a
	1 000	6.03 \pm 0.270d	2.05 \pm 0.156b	2.94 \pm 0.055a
	1 500	4.95 \pm 0.240e	1.96 \pm 0.148b	2.52 \pm 0.049b

2.3 铝胁迫对西瓜品种 ZM、HY 光合特性的影响

Al^{3+} 浓度为 250,500 $\mu\text{mol/L}$ 的胁迫下 HY 叶片气孔导度与对照差异不显著,随铝浓度升高,HY 叶片气孔导度呈下降趋势, Al^{3+} 浓度为 1 000,1 500 $\mu\text{mol/L}$ 处理下均显著低于对照;ZM 随铝浓度升高叶片气孔导度呈降低趋势,铝处理各组气孔导度均

显著低于对照。胞间 CO_2 浓度与气孔导度变化趋势基本相同,HY 胞间 CO_2 浓度随铝浓度升高呈先增后减的趋势,在 500 $\mu\text{mol/L}$ 铝胁迫下达最大值,但与对照差异不显著;ZM 胞间 CO_2 浓度随铝浓度升高呈下降趋势, Al^{3+} 浓度为 1 000,1 500 $\mu\text{mol/L}$ 处理下低于对照达显著水平。HY 光合速率与蒸腾

速率变化趋势相似,Al³⁺浓度为 250,500 μmol/L 铝胁迫下 HY 叶片光合速率、蒸腾速率与对照差异不显著,随铝浓度升高呈下降趋势,Al³⁺浓度为 1 000,1 500 μmol/L 处理下两指标均显著低于对照。ZM 光合速率随铝浓度升高呈先增后减的趋势,250

μmol/L 铝处理下达最大峰值且高于对照达显著水平,而后随铝浓度升高光合速率降低,Al³⁺浓度为 1 000,1 500 μmol/L 处理下均显著低于对照;ZM 在 250 μmol/L 铝处理下蒸腾速率与对照差异不显著,随铝浓度升高各处理组蒸腾速率均显著低于对照(表 3)。

表 3 不同浓度铝处理对西瓜光合特性的影响

Tab.3 Effects of characteristics of photosynthesis of watermelon under different Al ³⁺ concentration treatments					
品种 Varieties	铝浓度/(μmol/L) Concentration of aluminum	净光合速率 (μmol/(m ² ·s)) Pn	气孔导度/ (mol/(m ² ·s)) Gs	胞间 CO ₂ 浓度 /(μL/L) Ci	蒸腾速率/ (mmol/(m ² ·s)) Tr
早春红玉 HY	CK	7.3 ±0.18a	0.52 ±0.052a	352.0 ±16.51ab	5.50 ±0.171a
	250	7.6 ±0.28a	0.54 ±0.042a	362.3 ±13.91ab	5.84 ±0.465a
	500	7.2 ±0.21a	0.61 ±0.062a	376.0 ±11.05a	5.49 ±0.286a
	1 000	5.8 ±0.26b	0.32 ±0.012b	341.3 ±8.18ab	3.63 ±0.147b
	1 500	4.6 ±0.16c	0.22 ±0.029c	331.3 ±25.22b	2.71 ±0.065c
早蜜王 ZM	CK	5.4 ±0.43b	0.33 ±0.005a	361.7 ±16.11a	4.96 ±0.376a
	250	6.4 ±0.12a	0.22 ±0.013b	350.3 ±17.63ab	4.73 ±0.065a
	500	5.2 ±0.43b	0.21 ±0.010b	344.7 ±15.69ab	3.27 ±0.302b
	1 000	4.2 ±0.65c	0.18 ±0.020c	319.7 ±7.32bc	2.49 ±0.171c
	1 500	3.3 ±0.07d	0.16 ±0.017d	313.3 ±9.46c	1.81 ±0.090d

2.4 铝胁迫对西瓜叶绿素荧光参数的影响

HY 荧光参数随铝胁迫浓度升高,Fo 呈先增后减的趋势,Fm、Fv/Fo 和 Fv/Fm 均呈下降趋势,250 μmol/L 浓度处理下 4 个参数均与对照差异不显著,随处理浓度升高,Al³⁺浓度为 500,1 000,1 500 μmol/L 处理下均低于对照,Fm、Fv/Fo、Fv/Fm 达显著水平,Al³⁺浓度为 1 000,1 500 μmol/L 处理下 Fo 低于对照达显著水平。ZM 荧光参数 Fo、Fm 随铝胁迫

浓度升高均呈先增后减的趋势,250 μmol/L 的 Al³⁺浓度下达最大峰值,Al³⁺浓度为 1 000,1 500 μmol/L 处理下低于对照达显著水平;随铝胁迫浓度升高,Fv/Fo 呈下降趋势,Al³⁺处理各组均显著低于对照;Fv/Fm 在 Al³⁺浓度为 250,500 μmol/L 胁迫下与对照差异不显著,Al³⁺浓度为 1 000,1 500 μmol/L 处理下低于对照达显著水平(表 4)。

表 4 不同浓度铝处理对西瓜 Fo、Fm、Fv/Fo、Fv/Fm 的影响

Tab.4 Effect of Fo,Fm,Fv/Fo and Fv/Fm in leaves of watermelon under different Al ³⁺ concentration treatments					
品种 Varieties	铝浓度/(μmol/L) Concentration of aluminum	初始荧光 Fo	最大荧光 Fm	潜在光化学活性 Fv/Fo	最大光化学效率 Fv/Fm
早春红玉 HY	CK	0.846 ±0.008 2ab	2.50 ±0.071a	1.96 ±0.057a	0.662 ±0.006 6a
	250	0.865 ±0.026 2a	2.49 ±0.137a	1.88 ±0.126a	0.652 ±0.015 5a
	500	0.822 ±0.016 3bc	2.18 ±0.099b	1.66 ±0.075b	0.623 ±0.010 5b
	1 000	0.789 ±0.012 5cd	2.01 ±0.034bc	1.55 ±0.016bc	0.607 ±0.002 4b
	1 500	0.754 ±0.003 1d	1.83 ±0.008b	1.42 ±0.007c	0.587 ±0.001 1c
早蜜王 ZM	CK	0.676 ±0.015 2b	2.17 ±0.078ab	2.21 ±0.057a	0.689 ±0.005 6a
	250	0.771 ±0.008 2a	2.25 ±0.082a	1.92 ±0.094b	0.657 ±0.011 3a
	500	0.677 ±0.017 0b	1.99 ±0.056b	1.93 ±0.009b	0.659 ±0.001 0a
	1 000	0.603 ±0.002 9c	1.41 ±0.125c	1.34 ±0.195c	0.570 ±0.034 9b
	1 500	0.564 ±0.005 6d	1.25 ±0.068c	1.21 ±0.100c	0.547 ±0.020 6b

Y(Ⅱ)、Y(NPQ)和 Y(NO)存在 Y(Ⅱ)+Y(NPQ)+Y(NO)=1 的关系。由图 1 可知,随铝胁迫浓度升高,HY 各处理组光量子产量 Y(Ⅱ)呈下降趋势,较对照分别下降 6.2%,14.1%,18.4%,50.7%,仅 Al³⁺浓度为 250 μmol/L 下与对照差异未达显著水平;Y(NPQ)和 Y(NO)随铝浓度升高均呈

升高的趋势,Y(NPQ)在 Al³⁺浓度为 250,500,1 000 μmol/L 下与对照差异都不显著,仅 Al³⁺浓度为 1 500 μmol/L 下显著高于对照;Y(NO)在 Al³⁺浓度为 500,1 000,1 500 μmol/L 均显著高于对照。ZM 在 Al³⁺浓度为 250,500 μmol/L 胁迫下 Y(Ⅱ)、Y(NPQ)和 Y(NO)与对照差异都不显著;随铝浓度升

高, Al^{3+} 浓度为 1 000, 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 下, $Y(\text{NPQ})$ 和 $Y(\text{NO})$ 均显著高于对照, $Y(\text{II})$ 显著低于对照。

由图 2 可知, 铝胁迫下, HY 叶片非光化学猝灭系数 (NPQ) 与对照差异均不显著, ZM 叶片 NPQ 在 Al^{3+} 浓度为 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 下显著高于对照, 是对照的 110.5%。

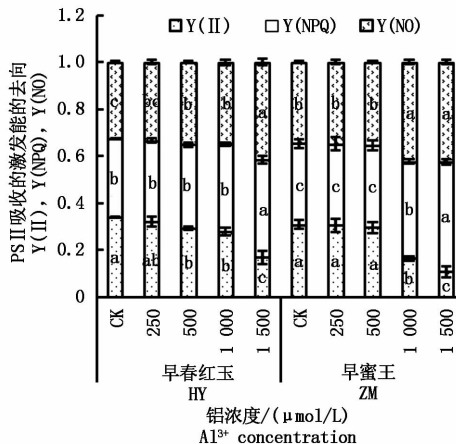


图 1 不同浓度铝处理对西瓜 $Y(\text{II})$ 的影响

Fig.1 Effects of $Y(\text{II})$ of watermelon under different Al^{3+} concentration treatments

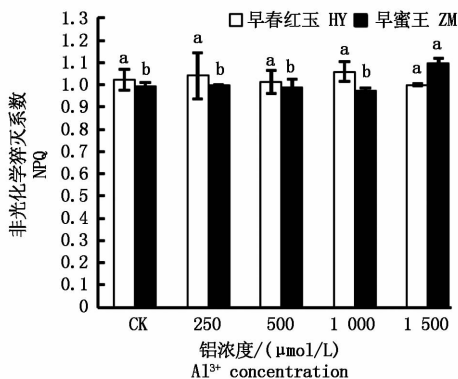


图 2 不同浓度铝处理对西瓜 NPQ 的影响

Fig.2 Effects of NPQ of watermelon under different Al^{3+} concentration treatments

由图 3 可知, 随着铝浓度的升高, HY 光化学猝灭系数呈先升后降的趋势, Al^{3+} 浓度为 250, 500 $\mu\text{mol/L}$ 下均显著高于对照, 分别为对照的 123.3%, 123.6%, 随着浓度升高 qP 下降, Al^{3+} 浓度为 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 下低于对照达显著水平, 为对照的 89.8%。ZM 荧光参数 qP 随铝浓度升高呈下降趋势, 分别为对照的 93.8%, 92.6%, 78.5%, 77.4%, Al^{3+} 浓度为 1 000, 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 下各处理组 qP 均显著低于对照。

由图 4 可知, 随铝浓度升高, HY 荧光参数 ETR 在 Al^{3+} 浓度为 250, 500 $\mu\text{mol/L}$ 胁迫下与对照差异不显著, 随铝胁迫浓度升高呈下降趋势, 1 000, 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 分别较对照降低 33.3%, 45.8%; ZM 荧光参数 ETR 随铝胁迫浓度的升高呈下降趋势, 各铝处

理组均显著低于对照, 分别是对照的 48.7%, 51.3%, 45.2%, 41.7%。

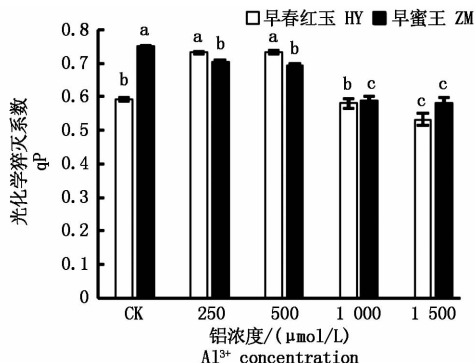


图 3 不同浓度铝处理对西瓜 qP 的影响

Fig.3 Effects of qP of watermelon under different Al^{3+} concentration treatments

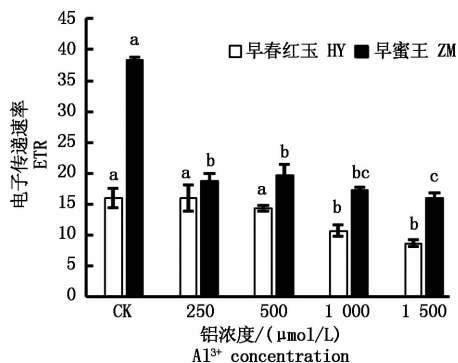


图 4 不同浓度铝处理对西瓜 ETR 的影响

Fig.4 Effects of ETR of watermelon under different Al^{3+}

3 讨论

根长和生物量是鉴定植物耐铝性的重要指标^[10-11]。本试验中 HY 和 ZM 幼苗随铝处理浓度的升高根长、地下部干质量、地上部干质量均呈先增后减的趋势; HY 根长、地下部干质量在铝处理下与对照差异均不显著, 仅地上部干质量在 Al^{3+} 浓度为 1 000, 1 500 $\mu\text{mol/L}$ 胁迫下显著低于对照; ZM 根长、地下部干质量、地上部干质量依次在 Al^{3+} 浓度为 1 500, 500, 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 胁迫下低于对照达显著水平。可见, ZM 对铝处理的敏感性要大于 HY, 这和四川农业大学园艺学院蔬菜栽培生理课题组的研究结果也相一致^[7]。

叶绿素含量可以反映植物的同化能力, 植物受到逆境胁迫时, 植物叶片中的叶绿素含量以及叶绿素 a/b 均会发生变化^[12]。本试验中在 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 铝处理范围内 HY 叶绿素含量 a, b 均显著高于对照; 而 ZM 在铝处理浓度为 250 $\mu\text{mol/L}$ 时叶绿素含量 a, b 均达最大峰值, 随铝处理浓度的升高叶绿素含量 a, b 均呈下降趋势且低于对照达显著水平。说明一定范围内的铝胁迫下两西瓜品种都可能刺激叶

绿素的合成来缓解铝胁迫带来的生理紊乱^[13-14], ZM 在 $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol/L}$ 的处理下会导致叶绿素含量降低,可能是较高浓度的铝胁迫导致叶绿素结构的破坏^[15]。此外,铝处理下 HY 叶绿素 a/b 均显著低于对照,诸多研究表明,铝胁迫会导致植物叶绿素含量明显下降,叶绿素 a/b 的比值减少^[16],叶绿素 a/b 降低对于吸收短波光较有利,这可能也是 HY 对铝胁迫适应性优于 ZM 的一种表现。

气孔直接控制着 CO_2 从叶片的进入和叶片的蒸腾作用, CO_2 的浓度也会影响叶片光合作用的进行,因此本试验光合特性 4 个参数之间存在密切的相互关系。在 $\text{Al}^{3+} \geq 500 \mu\text{mol/L}$ 的 3 个处理组, HY、ZM 的 4 个参数均随铝浓度升高呈降低趋势,与孙广玉等^[17]研究水分胁迫下大豆光合速率和气孔导度提出的它们在一定范围内呈直线关系的观点一致。

叶绿素荧光动力学用于研究和探测完整植株在胁迫下光合作用的真实行为,具有快速、灵敏和无损伤的特点,经常被用于评价环境胁迫对植物光合结构的影响^[18]。原初反应作为光合作用的起点,包括光能的吸收、传递和转换,是由叶绿体内片层膜上的蛋白质复合体(包括 PS II)和与它们相结合的色素分子共同来完成的一系列过程^[18]。ZM 初始荧光参数 F_0 与叶绿素含量,叶绿素 a/b 变化趋势均一致,Camejo^[19]认为, F_0 与叶绿素 a/b 的值有关,本试验不能完全佐证这一观点,本试验结果中 F_0 与叶绿素含量的变化趋势相近,已有研究表明,初始荧光 F_0 主要与叶绿素浓度有关^[20],本试验结果与此传统观点相一致。铝胁迫会导致两西瓜品种 F_m 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 不同程度下降,表明铝胁迫下叶片活力指数降低而使 PS II 受抑制,原初光能转化效率降低^[21]。本研究中 $250 \mu\text{mol/L}$ 铝处理下, HY 叶片荧光参数 F_m 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 与对照差异不显著; ZM 参数 F_m 较对照略有升高但未达显著水平, F_v/F_0 低于对照达显著水平, F_v/F_m 与对照差异不显著。推测 $250 \mu\text{mol/L}$ 铝处理对 HY 叶片 PS II 结构整体影响较小,而对 ZM 叶绿体 PS II 已经产生影响,使得 F_m 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 发生不同改变。综合来看,较低浓度的铝胁迫依然会对两西瓜品种产生不同程度的微观影响,而后随胁迫浓度的升高,两西瓜品种叶片 PS II 潜在活性中心都会受损,热耗散提高,光合机构受到损害,光能转化为化学能的转换效率降低,从而导致光合速率的降低。

$Y(II)$ 、 $Y(NPQ)$ 和 $Y(NO)$ 表征着 PS II 吸收的激发能的去向,其中 $Y(II)$ 代表用于光化学反应的

能量, $Y(NO)$ 代表被耗散为热量和发出荧光的能量, $Y(NPQ)$ 代表通过调节性光保护机制耗散为热的能量^[22]。本试验中,铝处理下两西瓜品种 $Y(II)$ 均随浓度升高呈降低趋势, HY、ZM 分别自 $500, 1\ 000 \mu\text{mol/L}$ 低于对照达显著水平,说明较高浓度铝胁迫导致参与光反应的能量显著降低。 $NPQ = Y(NPQ)/Y(NO)$, 结合 $Y(NPQ)$ 和 $Y(NO)$ 来看, HY 随铝处理浓度升高 NPQ 无显著变化,说明 HY 维持较为恒定的光保护能力; ZM 在 $1\ 000 \mu\text{mol/L}$ 内的铝处理下 NPQ 与对照差异不显著, $1\ 500 \mu\text{mol/L}$ 浓度铝处理下 NPQ 显著高于对照,说明用于热耗散的能量比重增大,光能转化效率下降。光化学猝灭系数代表 PS II 原初电子受体 Q_A 的氧化还原状态和 PS II 开放中心的数目,其值越大, PS II 电子传递活性越高^[23]。本试验中 $500 \mu\text{mol/L}$ 铝浓度内, HY 参数 qP 显著高于对照,电子传递速率(ETR)与对照差异不大,随浓度升高 qP 逐渐减小并于 $1\ 500 \mu\text{mol/L}$ 铝处理下显著低于对照, ETR 显著低于对照,可能 $1\ 500 \mu\text{mol/L}$ 浓度铝处理 Q_A 被过分还原导致光化学反应效率明显降低; ZM 参数 qP、ETR 随铝浓度升高均呈降低趋势,且各处理组均显著低于对照。说明铝处理下 ZM 参数 qP 值逐渐减小, PS II 反应中心过剩的激发能使 Q_A 被还原程度逐渐增加,电子传递速率(ETR)降低,电子传递活性下降,这也从叶绿素荧光的角度解释了光合速率下降的原因。

参考文献:

- [1] 翁建华, 黄连芬, 刘晓茹, 等. 土壤酸化及天然土壤溶液中铝的形态[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 501 - 505.
- [2] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 171 - 173.
- [3] 赵萌, 李敏, 王森焱, 等. 西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报, 2008, 35(8): 1251 - 1254.
- [4] Faraloni C, Cutino I, Petrucci R, et al. Chlorophyll fluorescence technique as a rapid tool for *in vitro* screening of olive cultivars (*Olea europaea* L.) tolerant to drought stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 73: 49 - 56.
- [5] Zribi L, Fatma G, Fatma R, et al. Application of chlorophyll fluorescence for the diagnosis of salt stress in tomato "*Solanum lycopersicum* (variety Rio Grande)" [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 120(3): 367 - 372.
- [6] Petkova V, Denev I D, Cholakov D, et al. Field screening for heat tolerant common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) by measuring of chlorophyll fluorescence induc-

- tion parameters [J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 111 (2): 101 – 106.
- [7] 贾松涛, 郑阳霞, 邱 爽, 等. 铝胁迫对西瓜幼苗生长及生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (8): 1485 – 1492.
- [8] 刘家尧, 刘 新. *植物生理学实验教程* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [9] Cuddy W S, Summerell B A, Gehringer M M, *et al.* *Nostoc*, *microcoleus* and *Leptolyngbya inoculums* are detrimental to the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress [J]. *Plant and Soil*, 2013, 370 (1 – 2): 317 – 332.
- [10] Foy C D, Carter T E J R, Duke J A, *et al.* Correlation of shoot and root growth and its role in selecting for Al tolerance in soybean [J]. *Plant Nutr*, 1993, 16: 305 – 325.
- [11] 林咸永, 章永松, 罗安程. 不同小麦基因型耐铝性的差异及筛选方法的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7 (1): 64 – 70.
- [12] 肖祥希, 刘星辉, 杨宗武, 等. 铝胁迫对龙眼幼苗光合作用的影响 [J]. *热带作物学报*, 2005, 26 (1): 63 – 69.
- [13] 于翠平, 潘志强, 陈 杰, 等. 铝对茶树生长与生理特性影响的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (1): 182 – 187.
- [14] Chenery E M. A preliminary study of Aluminum and the tea bush [J]. *Plant and Soil*, 1955, 6 (2): 174 – 200.
- [15] 陈 香, 胡雪华, 肖宜安, 等. 铝胁迫下北美车前和车前生长及叶绿素荧光特性的比较研究 [J]. *植物研究*, 2011, 31 (6): 680 – 685.
- [16] 应小芳, 刘 鹏. 铝胁迫对大豆叶片光合特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (1): 166 – 170.
- [17] 孙广玉, 邹 琦, 程炳嵩, 等. 大豆光合速率和气孔导度对水分胁迫的响应 [J]. *植物学报: 英文版*, 1991, 33 (1): 43 – 49.
- [18] 郭礼和. 美国《Science》杂志评出 2011 年十大科学突破-介绍光合系统 II 的结构研究成果 [J]. *中国细胞生物学学报*, 2012, 34 (3): 295 – 297.
- [19] Camejo D. Changes in the chlorophyll fluorescence parameters and superoxide dismutase activity during heat shock treatment and the recovery period in tomato plants [J]. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, 2013, 26 (4): 53 – 59.
- [20] 张阿宏, 齐孟文, 张晔晖. 调制叶绿素荧光动力学参数及其计量关系的意义和公理化讨论 [J]. *核农学报*, 2008, 22 (6): 909 – 912.
- [21] 肖 璐, 魏亦农. 不同陆地棉品种 (系) 盛花期叶片光抑制光保护机制 [J]. *新疆农业科学*, 2013, 50 (7): 1177 – 1184.
- [22] Klughammer C, Schreiber U. Complementary PS II quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the Saturation Pulse method [J]. *PAM Application Notes*, 2008, 1: 27 – 35.
- [23] 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, 16 (4): 444 – 448.