

ALA 对红掌叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响

康博文, 李文华, 刘建军, 撒文清

(西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】探讨叶面喷施 5-氨基乙酰丙酸(ALA)对红掌光合作用及叶绿素荧光参数的影响,为花卉植物上合理施用 ALA 奠定基础。【方法】选择 3 组红掌,每组 60 株,自 2007-07-15~10-30,每 15 d 每组叶面分别喷施 1 次 0(清水),200 和 400 mg/L 的 ALA,利用 Li-6400 光合测定系统和 Li-6400-40 荧光叶室分别测定不同质量浓度 ALA 处理对红掌叶片光合作用及叶绿素荧光参数指标的影响。【结果】与对照相比,200 和 400 mg/L ALA 处理的红掌叶片叶绿素总量均极显著($P<0.01$)提高,提高幅度分别为 6.7%和 8.5%;1 d 中(8:00~18:00)的光合速率显著提升,在较高光辐射强度下,光合速率的提高更为明显;初始荧光(F_o)极显著($P<0.01$)地降低,降低幅度分别为 7.5%和 10.4%;最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、最大光化学效率(F_v/F_m)、潜在光化学效率(F_v/F_o)、光能获取能力($1/F_o-1/F_m$)依次提高 0.3%和 0.7%,2.5%和 3.8%,2.2%和 3.1%,10.7%和 15.8%,10.4%和 15.0%,差异达极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)水平;200 和 400 mg/L ALA 处理对有效光化学速率(F_v'/F_m')的影响不显著($P>0.05$),但可使 $\Phi PS II$ 分别提高 42.4%和 66.7%,NPQ 分别提高 2.1%和 3.3%, qP 分别提高 43.0%和 67.7%,差异均达显著水平($P<0.05$);可使 PCR 分别降低 13.9%和 40.0%,ETR 分别提高 37.1%和 61.9%,差异均达极显著水平($P<0.01$)。【结论】喷施 ALA 可以提高红掌叶片的光化学效率,对降低不良环境的胁迫有积极作用,因而其可以在红掌上施用。

【关键词】 红掌;5-氨基乙酰丙酸(ALA);光合速率;叶绿素荧光

【中图分类号】 S682.301

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)04-0097-06

Effects of ALA treatment on photosynthetic and chlorophyll fluorescence dynamics of *Anthurium andraeanum*

KANG Bo-wen, LI Wen-hua, LIU Jian-jun, SA Wen-qing

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The paper studied the effect of 5-aminolevulinic acid (ALA) on chlorophyll a, photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence dynamics of *Anthurium andraeanum*. 【Method】3 *Anthurium andraeanum* groups including 180 plants were treated every 15 days with different content of ALA, 0, 200 and 400 mg/L, during 15, July to 30, October 2007. Photochemistry rate and chlorophyll fluorescence of its leaves were measured with Li-6400 photosynthetic measure system and Li-6400-40 chlorophyll fluorometer respectively. 【Result】ALA application with 200 and 400 mg/L ALA, compared with the control (0 mg/L ALA), decreased the minimal fluorescence (F_o) by 7.5% and 10.4%, the photochemistry rate (PCR) 13.9% and 40.0%, increased the content of chlorophyll a by 6.7% and 8.5%, photosynthetic rate by 11.8% and 18.4%, the maximal fluorescence (F_m) 0.3% and 0.7%, the variable fluorescence (F_v) 2.5% and 3.8%, the PS II maximal photochemical efficiency (F_v/F_m) 2.2% and 3.1%, the potential photochemical efficiency (F_v/F_o) 10.7% and 15.8%, the ability of PS II reaction center to trap energy

* 【收稿日期】 2008-06-18

【基金项目】 日本 COSMO 公司资助项目(X14210335)

【作者简介】 康博文(1963—),男,陕西周至人,高级工程师,主要从事森林植被恢复研究。

【通信作者】 刘建军(1962—),男,山西夏县人,教授,博士生导师,主要从事森林生态及植被恢复研究。

from antenna pigment ($1/F_0 - 1/F_m$) 10.4% and 15.0%, PS II actual photochemical efficiency (Φ_{PS2}) 42.4% and 66.7%, the electron transfer rate (ETR) 37.1% and 61.9%, the non-photochemical quench (NPQ) 2.1% and 3.1%, photochemical quench (qP) 43.0% and 67.7% respectively. 【Conclusion】 The data presented in the paper suggested that ALA treatment might increase photosynthetic rate and enhance the ability to adapt to adverse environment for *Anthurium andraeanum*.

Key words: *Anthurium andraeanum*; 5-aminolevulinic acid (ALA); photosynthetic rate; chlorophyll fluorescence

5-氨基乙酰丙酸(ALA)是一种含氧、氮的碳氢化合物和生物代谢中间产物,广泛存在于细菌、真菌、动物及植物的活细胞中^[1],近年来已被大量人工合成^[1-4]。绿色植物中,ALA于质体中合成并转化为叶绿素和亚铁血红素,与植物的光合作用与呼吸作用密切相关。外源供给试验表明,无论是用ALA浸泡根系还是叶面喷施,其对植株整体都会产生生理效应^[5]。在农林业生产中,高浓度ALA是无污染的天然除草剂^[6-8],而低浓度的ALA作为植物生长调节剂,可大幅提高多种作物的产量并改善果品品质^[5,9-14],明显增强植物的抗寒性、耐盐性和耐弱光性^[12,15-19]。作为一种具有植物生理调节功能的物质,ALA具有广阔的应用前景。

红掌(*Anthurium andraeanum*)为多年生常绿草本植物,是世界名贵花卉,色泽鲜艳,造形奇特,经济价值高,是目前全球发展较快、需求量较大的高档热带切花和盆栽花卉。目前,已有关于ALA应用于棉花、西瓜、甜瓜、苹果、草莓、小白菜、萝卜等农作物或果品的研究^[5-21],但尚未见其在花卉等园林植物上应用的报道。

为此,本试验对红掌叶片喷施不同质量浓度的ALA,研究其对红掌光合作用及叶绿素荧光参数的影响,以期探索ALA在促进花卉生长及其在高档花卉上的应用价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试ALA由日本COSMO公司提供。供试植物材料为红掌,生育期为盛花期。

1.2 试验设计

试验在陕西省眉县陕西省苗木繁育中心进行。ALA处理的质量浓度分别设为0, 200, 400 mg/L,其中以0 mg/L ALA处理即清水处理为对照。每处理60株,不同处理分开培育。采用叶面喷施,喷施量以药液开始下滴为度。从2007-07-15~10-30(生长季结束),每15 d喷1次。

1.3 测试项目及方法

1.3.1 测试项目及仪器 叶片叶绿素含量采用SPAD-502手持叶绿素仪(美国Spectrum公司)测定;光合作用相关指标及叶绿素荧光动力参数分别采用Li-6400光合测定系统和Li-6400-40荧光叶室(美国LI-COR公司)测定。

1.3.2 测试时间 光合速率(P_n)的日变化和光合速率光辐射响应分别于2007-10-06~07测定,叶绿素荧光动力参数于2007-10-08~10测定。

1.3.3 测定方法 选择红掌心叶向下第3片叶为测定叶。测定所有供试植株的叶片叶绿素含量,每处理选择长势中等、具代表性的植株3个,测定其光合速率及叶绿素荧光动力参数。

光合速率日变化的测定自8:00~18:00,每2 h测定1次。在叶绿素荧光动力参数测定前,首先对供试3个红掌植株进行30 min的暗适应,然后用Li-6400便携式光合系统分析仪配备的6400-40叶绿素荧光叶室,按照仪器使用说明,对样叶暗适应初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、恒态荧光(F_s)值及动力学曲线、淬灭分析、荧光光曲线、光适应叶片最大荧光(F_m')、最小荧光(F_0')、PS II实际光化学效率($\Phi_{PS II}$)、光化学速率(PCR)、电子传递速率(ETR)、光化学荧光猝灭(qP)、非光化学荧光猝灭(NPQ)、反应中心非光化学能量耗散比例(E)、天线热耗散(D)等主要生理指标进行测定。

1.3.4 参数计算及数据整理和分析 其他部分荧光参数计算公式如下:叶片可变荧光 $F_v = F_m - F_0$;潜在光化学效率 $F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$;最大光化学效率 $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$;PS II反应中心有效光化学速率 $F_v'/F_m' = (F_m' - F_0')/F_m'$;光化学反应百分率 $P = 1 - (D + E)$ 。

所有指标的测定数据均用3次重复的算术平均数表示,并采用统计分析软件DPSv3.11专业版进行处理,用LSD(新复极差法,即Duncan法)法对测定结果进行多重比较和方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度 ALA 对红掌叶片叶绿素含量的影响

从表 1 可以看出,与对照(喷清水)相比,喷施 200 和 400 mg/L 的 ALA 可极显著($P<0.01$)地提高红掌叶片的叶绿素含量,提高幅度分别为 6.7% 和 8.5%;喷施 400 mg/L ALA 与喷施 200 mg/L ALA 处理间差异不显著($P>0.05$)。表明 ALA 质量浓度超过一定范围,对叶片叶绿素含量的促进作用就会逐渐趋于稳定。

表 1 不同质量浓度 ALA 对红掌叶片叶绿素含量的影响
Table 1 Effect of ALA treatments on chlorophyll of *Anthurium andraeanum* leaves

ALA 质量浓度/ (mg · L ⁻¹) Concentration of ALA	样本数 Sample	叶绿素含量/(mg · g ⁻¹) Chlorophyll
0(CK)	60	74.476 7±10.678 4 a A
200	60	79.436 7±6.823 1 b B
400	60	80.798 3±4.840 9 b B

注:同列数据后标相同字母者表示差异不显著,标不同大写字母者表示在 1% 水平上差异极显著,标不同小写字母者表示在 5% 水平上差异显著。下同。

Note: The same lowercase letters and capital letters in the table represent no difference at $P=5\%$ and 1% respectively, the same below.

2.2 不同质量浓度 ALA 对红掌叶片净光合速率(P_n)的影响

由图 1 可见,用不同质量浓度 ALA 处理时,红

掌叶片 P_n 的日变化曲线均呈单峰曲线,均于 12:00 达到峰值,且任何时刻 400 和 200 mg/L ALA 处理叶片的 P_n 均高于对照,但以 400 mg/L ALA 处理的 P_n 最高。同时,在光辐射强度较低的早晨和傍晚,400 和 200 mg/L ALA 处理的 P_n 与对照接近,而中午时分相差较大。说明在一定光辐射范围内,ALA 可以提高植物的 P_n 。同时,较强的光辐射对 ALA 提高植物 P_n 的效率具有放大作用。

2.3 不同质量浓度 ALA 对红掌叶片光合速率光辐射响应的影响

由图 2 可见,当光辐射强度(PAR)低于 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, P_n 上升较快;之后随 PAR 的增强, P_n 上升趋于缓慢甚至保持稳定,而且在不同的 PAR 下,喷施 ALA 处理的 P_n 一直高于对照。不同 ALA 处理之间,当 PAR 低于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,200 mg/L ALA 处理的 P_n 与对照较为接近,其 P_n 明显低于 400 mg/L ALA 处理;当 PAR 高于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,400 和 200 mg/L ALA 处理的 P_n 较为接近,二者均显著高于对照。表明喷施 ALA 对红掌 P_n 有提升作用,在较低的 PAR 下,较高质量浓度的 ALA 处理(400 mg/L)对红掌 P_n 的提高效果明显优于较低质量浓度的 ALA 处理(200 mg/L);而在较高 PAR 下,较高质量浓度(400 mg/L)与较低质量浓度 ALA 处理(200 mg/L)相比,二者对红掌叶 P_n 的提升效果差异不大。

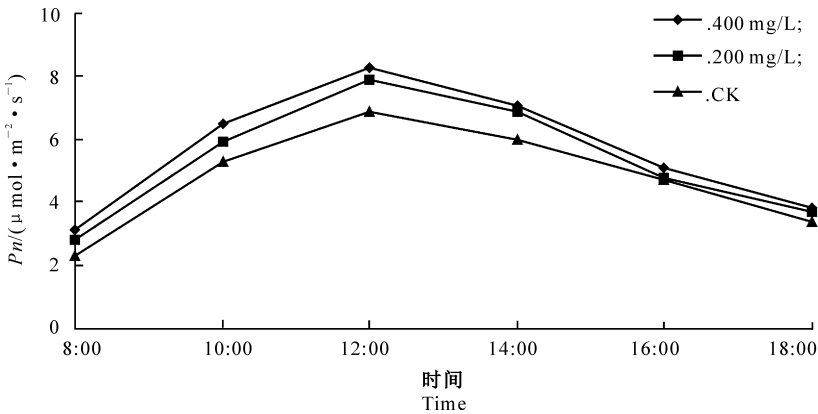


图 1 不同质量浓度 ALA 处理对红掌叶片 P_n 影响的日变化曲线
Fig. 1 Effect of ALA on net photosynthetic rate of *Anthurium andraeanum* leaves

2.4 不同质量浓度 ALA 对红掌叶片叶绿素荧光特性的影响

2.4.1 叶绿素荧光参数 由表 2 可以看出,ALA 处理对红掌叶片暗适应初始荧光(F_o)具有极显著($P<0.01$)的抑制作用。与对照相比,在 200 和 400

mg/L ALA 处理下, F_o 分别降低了 7.5% 和 10.4%,表明喷施 ALA 降低了叶片叶绿素荧光产量,使叶片非光化学能量耗散增多。 F_m 、 F_v 、暗适应叶片最大光化学效率(F_v/F_m)、暗适应叶片潜在光化学效率(F_v/F_o)以及叶片获取光能的能力

($1/F_o-1/F_m$)均随 ALA 质量浓度的提高而上升,除($1/F_o-1/F_m$)在对照与 400 mg/L 处理、200 与 400 mg/L 处理之间差异不显著外,各处理之间其他指标的差异均达极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)水平。与对照相比,200 和 400 mg/L ALA 处理对 F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、($1/F_o-1/F_m$)的提

高幅度依次为 0.3% 和 0.7%,2.5% 和 3.8%,2.2% 和 3.1%,10.7% 和 15.8%,10.4% 和 15.0%,表明 ALA 处理对暗适应红掌叶片 PSⅡ潜在光化学效率和叶片获取光能的能力有促进作用,有利于红掌叶片光合作用的进行。

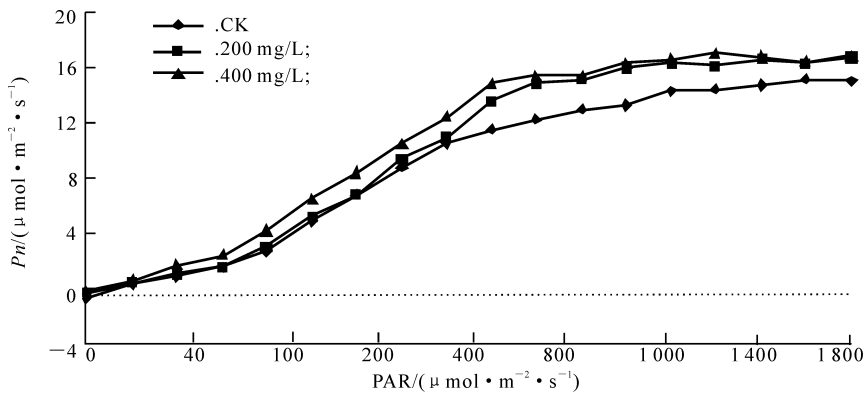


图 2 不同质量浓度 ALA 处理对红掌光合速率光辐射响应的影响
Fig. 2 Effect of ALA on net photosynthetic rate of *Anthurium andraeanum* leaves

表 2 不同质量浓度 ALA 处理对红掌叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effect of ALA treatment on chlorophyll fluorescence characteristics of the dark-adapted leaves of <i>Anthurium andraeanum</i>							
ALA 质量浓度/(mg·L ⁻¹) Concentration of ALA	F_o	F_m	F_v	F_s	F_v/F_m	F_v/F_o	$1/F_o-1/F_m$
0(CK)	301.0 A	1 381.9 A	1 080.9 A	343.3 A	0.782 A	3.590 A	0.002 60 a
200	278.5 B	1 385.9 B	1 107.4 B	352.9 B	0.799 B	3.975 B	0.002 87 ab
400	269.8 C	1 391.5 C	1 121.7 C	361.0 C	0.806 C	4.157 C	0.002 99 b

2.4.2 叶片 PSⅡ有效光化学效率(F_v'/F_m')和实际光化学效率(Φ PSⅡ) 由表 3 可以看出,与对照相比,ALA 处理对红掌叶片 PSⅡ有效光化学效率(F_v'/F_m')虽然有提升作用,但差异并不显著($P>0.05$);ALA 处理对实际光化学效率(Φ PSⅡ)均有

促进作用,200 和 400 mg/L ALA 处理的 Φ PSⅡ分别较对照提高 42.4%和 66.7%,且差异均达极显著水平($P<0.01$),并且 400 mg/L ALA 处理对 Φ PSⅡ的促进效果极显著($P<0.01$)优于 200 mg/L 处理。

表 3 不同质量浓度 ALA 处理对红掌叶片光化学参数的影响

Table 3 Effect of ALA treatments on the photochemical characteristics of <i>Anthurium andraeanum</i> leaves								
ALA 质量浓度/(mg·L ⁻¹) Concentration of ALA	F_o'	F_m'	F_v'	F_v'/F_m'	Φ PSⅡ	qP	qN	P
0(CK)	234.2 A	362.2 Aa	128.0 a	0.353 a	0.033 A	0.093 A	0.886 a	0.055 Aa
200	236.1 A	366.6 Ab	130.5 b	0.356 a	0.047 B	0.133 B	0.889 a	0.047 Bb
400	241.5 B	373.4 Bc	131.9 c	0.356 a	0.055 C	0.156 C	0.895 a	0.033 Bc

2.4.3 光化学速率(PCR)和电子传递速率(ETR)

由表 4 可知,ALA 处理降低了红掌叶片的 PCR,与对照相比,200 和 400 mg/L ALA 处理的 PCR 分别降低 13.9%和 40.0%,差异达极显著水平($P<0.01$)。ALA 处理提高了红掌叶片的 ETR,200 和 400 mg/L 处理的 ETR 分别较对照提高 37.1%和 61.9%,差异均达到极显著水平($P<0.01$),其中 400 mg/L ALA 处理对 ETR 的提升效果优于 200 mg/L 处理,且二者间的差异也达极显著水平($P<$

0.01)。

2.4.4 光化学荧光猝灭系数(qP)和非光化学荧光猝灭系数(NPQ) 由表 3 和表 4 可以看出,与对照相比,ALA 处理对红掌叶片的 qP 和 NPQ 均有提升效应,其中对 qP 的提升幅度大于 NPQ。与对照相比,200 和 400 mg/L ALA 处理分别使 qP 提高 43.0%和 67.7%,差异均达极显著水平($P<0.01$);使 NPQ 提高 2.1%和 3.3%,差异也达到显著水平($P<0.05$)。2 个 ALA 处理之间,400 mg/L 处理对 qP 和 NPQ 的

提升效应优于 200 mg/L 处理,且二者间差异亦达极显著($P<0.01$)或显著水平($P<0.05$)。

表 4 不同质量浓度 ALA 处理对红掌叶片非光化学参数的影响

ALA 质量浓度/(mg · L ⁻¹) Concentration of ALA	PCR	ETR	D	E	NPQ
0(CK)	164.860 A	25.762 A	0.645 a	0.300 Aa	2.729 Aa
200	141.975 B	35.324 B	0.643 a	0.310 ABb	2.785 Bb
400	98.993 C	41.714 C	0.646 a	0.321 Bc	2.820 Bc

2.4.5 叶绿素荧光能量分配 从表 4 可以看出,不同 ALA 处理之间红掌叶片天线热耗散(D)的差异不明显($P>0.05$),说明 ALA 处理对红掌叶片天线热耗散的影响不显著。与对照相比,200 和 400 mg/L ALA 处理使 PSⅡ反应中心非光化学反应能量耗散比例(E)分别提高 3.4%和 6.5%,光化学耗散比例(P)提升 42.4%和 66.7%,均达到显著差异水平($P<0.05$);另外,400 mg/L ALA 处理对 E 和 P 的提高效应均优于 200 mg/L 处理,这表明 ALA 处理提高了红掌叶片 PSⅡ反应中心光化学能量耗散比例,相对使非光化学能量耗散的比例有所降低。

3 结论与讨论

本研究表明,ALA 处理可以提高红掌叶片叶绿素含量,200 和 400 mg/L 处理分别较对照提高 6.7%和 8.5%,进一步印证了 ALA 可在绿色植物质体中合成并转化为叶绿素;1 d 之中,400 和 200 mg/L ALA 处理的光合速率均高于对照,并在较高强度的光辐射条件下,ALA 对提高红掌光合速率具有放大作用,说明 ALA 在红掌上具有一定的应用潜力,不过对不同植物物种来说,ALA 提高植株不同部位即不同叶龄叶片净光合速率的效应并不相同,有的在中下部老龄叶上的效果优于顶叶,有的却相反^[11-12,20-21]。本研究未涉及红掌不同位置叶片之间 ALA 促进叶片光合速率的差异,因此,出于成本考虑,实际施用时应加以注意。

F_o 、 F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 $(1/F_o - 1/F_m)$ 是反映植物叶片光化学特性的常用指标,不良的环境条件会影响植物叶片的光合结构及其对光能的利用能力。本研究结果表明,喷施 ALA 降低了 F_o ,提高了 F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 $(1/F_o - 1/F_m)$,说明喷施 ALA 可以减少天线色素的热耗散,对叶片光合结构起保护作用,同时可以提高红掌叶片的光化学效率,对降低不良环境对植物的胁迫有积极作用,与刘卫琴等^[13]在草莓和康琅等^[19]在大棚西瓜上的研究结果一致。但也有研究表明,ALA 对遮荫条件下西瓜幼苗的叶绿素荧光产量和 PSⅡ原初光化

学效率没有影响^[20],甚至会降低萝卜的叶绿素荧光产量^[21]。这表明 ALA 对植物叶片荧光产量和光化学过程的效应十分复杂,既与物种有关,也可能与试验条件、ALA 质量浓度等因素有关。因此,研究对不同植物及其不同环境条件下 ALA 的作用效果和 ALA 施用的合理质量浓度,对 ALA 在农业生产中的推广应用十分必要。

用 ALA 处理后,红掌叶片的 PSⅡ有效光化学效率(F_v'/F_m')虽有提升,但变化不显著,这可能与光照强度有关,当光照强度达到光抑制程度(如本试验的 3 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)时, F_v'/F_m' 的变化幅度开始降低。与对照相比,200 和 400 mg/L ALA 处理可使红掌叶片的实际光化学效率($\Phi\text{PSⅡ}$)分别提高 42.4%和 66.7%,电子传递速率(ETR)分别提高 37.1%和 61.9%,光化学荧光猝灭系数(qP)分别提高 43.0%和 67.7%,这些连续荧光动力学参数的升高,是 ALA 促进红掌叶片实际光合效率提高的基础,与 ALA 引起叶片荧光产量升高或下降无关。刘卫琴等^[13]研究认为,ALA 可以提高草莓叶片叶绿素荧光产量和实际光合效率,其与 ALA 促进 SOD 等抗氧化酶活性上升和消除超氧阴离子、防止 PSⅠ光抑制有关。汪良驹等^[21]研究认为,ALA 在未提高萝卜叶片叶绿素荧光产量的情况下,提高了叶片实际光合效率,其主要原因可能是通过 Cytb559 对 PSⅡ光的保护,促进了非辐射能量耗散,提高了光合电子传递速率所致。那么,ALA 提高植物叶片实际光合效率是发生在 PSⅠ,还是在 PSⅡ,抑或同时发生在 PSⅠ和 PSⅡ,以及发生效应产生的光系统位置差异是否与光照等条件有关,均需在进一步的研究中受到重视。

[参考文献]

[1] 汪良驹,姜卫兵,章 镇,等. 5-氨基乙酰丙酸生物合成生理活性及其在农业上的潜在应用 [J]. 植物生理学通讯,2003,39 (3):185-192.
Wang L J, Jiang W B, Zhang Z, et al. Biosynthesis and physiological activities of 5-aminolevulinic acid (ALA) and its potential application in agriculture [J]. Plant Physiology Communi-

- cations, 2003, 39(3): 185-192. (in Chinese)
- [2] 刘秀艳,徐向阳,陈蔚青. 光合细菌产生 5-氨基乙酰丙酸(ALA)的研究[J]. 浙江大学学报:理学版, 2002, 29(3): 336-338.
Liu X Y, Xu X Y, Chen W Q. Research on photosynthetic bacteria strain to biological formation of 5-aminolevulinic acid [J]. Journal of Zhejiang University: Sciences Edition, 2002, 29(3): 336-338. (in Chinese)
 - [3] 赵春晖,穆江华,岑沛霖. 化学法与生物转化合成 5-氨基乙酰丙酸的研究进展[J]. 农药, 2003, 42(11): 11-15.
Zhao C H, Mu J H, Cen P L. Advancement of research on biological and chemical synthesis of 5-aminolevulinic acid [J]. Pesticides, 2003, 42(11): 11-15. (in Chinese)
 - [4] 张淑婷,周 强. 植物生长调节剂 D-ALA 的全化学合成[J]. 农药, 2002, 41(7): 43-47.
Zhang S T, Zhou Q. Synthesis of growth regulators δ -aminolevulinic acid [J]. Pesticides, 2002, 41(7): 43-47. (in Chinese)
 - [5] Hotta Y, Tanaka T, Takaoka H, et al. New physiological effects of 5-aminolevulinic acid in plants: the increase of photosynthesis, chlorophyll content, and plant growth [J]. Biosci Biotech Biochem, 1997, 61: 2025-2028.
 - [6] Kumar A M, Chaturvedi S, Söll D. Selective inhibition of HE-MA gene expression by photooxidation in *Arabidopsis thaliana* [J]. Phytochem, 1999, 51: 847-851.
 - [7] 阎宏涛,王邦法,李汉杰. 光活化农药 5-ALA 除草增效剂的研究[J]. 科技通报, 1995, 11(4): 228-231.
Yan H T, Wang B F, Li H J. Studies on the synergist of photo-activation pesticide δ -aminolevulinic acid [J]. Bulletin of Science and Technology, 1995, 11(4): 228-231. (in Chinese)
 - [8] Wang L J, Jiang W B, Liu H, et al. Promotion of 5-aminolevulinic acid (ALA) on germination of pakchoi *Brassica chinensis* seeds under salt stress [J]. Integrative Plant Biol, 2005, 47(9): 1084-1091.
 - [9] 汪良驹,王中华,李志强,等. 5-氨基乙酰丙酸促进苹果果实着色的效应[J]. 果树学报, 2004, 21(6): 512-515.
Wang L J, Wang Z H, Li Z Q, et al. Effect of 5-aminolevulinic acid on enhancing apple fruit coloration [J]. Journal of Fruit Science, 2004, 21(6): 512-515. (in Chinese)
 - [10] 王中华,汤国辉,李志强,等. 5-氨基乙酰丙酸和金雀异黄素促进苹果果皮花青素形成的效应[J]. 园艺学报, 2006, 33(5): 1055-1058.
Wang Z H, Tang G H, Li Z Q, et al. Promotion of 5-aminolevulinic acid and genistein on anthocyanin accumulation in apples [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(5): 1055-1058. (in Chinese)
 - [11] 汪良驹,姜卫兵,黄保健. 5-氨基乙酰丙酸对弱光下甜瓜幼苗光合作用和抗冷性的促进效应[J]. 园艺学报, 2004, 31(3): 321-325.
Wang L J, Jiang W B, Huang B J. Promotion of photosynthesis by 5-aminolevulinic acid(ALA) during and after chilling stress in melon seedlings grown under low light condition [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004, 31(3): 321-325. (in Chinese)
 - [12] 汪良驹,石 伟,刘 晖,等. 外源 5-氨基乙酰丙酸处理对小白菜叶片光合作用的效应 [J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(2): 34-38.
Wang L J, Shi W, Liu H, et al. Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid treatment on leaf photosynthesis of pak-choi [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2004, 27(2): 34-38. (in Chinese)
 - [13] 刘卫琴,康 琅,汪良驹. ALA 对草莓光合作用的影响及其与抗氧化酶的关系 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(1): 57-62.
Liu W Q, Kang L, Wang L J. Effects on strawberry photosynthesis and relations to anti-oxidant enzymes of ALA [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(1): 57-62. (in Chinese)
 - [14] 汪良驹,王中华,李志强,等. L-谷氨酸促进富士苹果花青素积累的效应 [J]. 果树学报, 2006, 23(2): 157-160.
Wang L J, Wang Z H, Li Z Q, et al. Promotion of L-glutamic acid on anthocyanin accumulation of Fuji apples [J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(2): 157-160. (in Chinese)
 - [15] Hotta Y, Tanaka T, Bingshan L, et al. Improvement of cold resistance in rice seedlings by 5-aminolevulinic acid [J]. J Pest Sci, 1998, 23(1): 29-33.
 - [16] Watanabe K, Tanaka T, Hotta Y, et al. Improving salt tolerance of cotton seedlings with 5-aminolevulinic acid [J]. Plant Growth Regul, 2000, 32: 99-103
 - [17] 刘 晖,康 琅,汪良驹. ALA 对盐胁迫下西瓜种子萌发的促进效应 [J]. 果树学报, 2006, 23(6): 854-859.
Liu H, Kang L, Wang L J. Promotion of 5-aminolevulinic acid on seed germination of watermelon (*Citrullus lanatus*) under salt stress [J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(6): 854-859. (in Chinese)
 - [18] Wang L J, Jiang W B, Huang B J. Promotion of 5-aminolevulinic acid on photosynthesis of melon (*Cucumis melo*) seedlings under low light and chilling stress conditions [J]. Physiology Plant, 2004, 121(2): 258-264. (in Chinese)
 - [19] 康 琅,汪良驹. ALA 对西瓜叶绿素荧光光响应曲线的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(1): 31-36.
Kang L, Wang L J. Effects of ALA treatments on light response curves of chlorophyll fluorescence of watermelon leaves [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2008, 31(1): 31-36. (in Chinese)
 - [20] 孙永平,汪良驹. ALA 处理对遮荫下西瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响 [J]. 园艺学报, 2007, 34(4): 901-908.
Sun Y P, Wang L J. Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA) on chlorophyll fluorescence dynamics of watermelon seedlings under shade condition [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(4): 901-908. (in Chinese)
 - [21] 汪良驹,刘卫琴,孙国荣,等. ALA 对萝卜不同部位叶片光合作用与叶绿素荧光特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 488-496.
Wang L J, Liu W Q, Sun G R, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of Radish seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(3): 488-496. (in Chinese)