

安玉艳,冯新新,丁恒毅,等. 5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)对春茶生长与品质成分的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):224-228.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.067

5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)对春茶生长与品质成分的影响

安玉艳, 冯新新, 丁恒毅, 刘龙博, 汪良驹

(南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095)

摘要:以乌牛早、迎霜 2 个品种为试验材料,通过叶面喷施法研究不同浓度 5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)对越冬茶叶芽叶率、品质成分、叶片生理特性的影响。结果发现,与对照相比,5-ALA 处理显著促进了茶树出芽,提高了茶叶游离氨基酸、咖啡碱、可溶性糖、水浸出物等品质成份的含量,降低了茶叶酚氨比,说明低浓度 5-ALA 具有提高茶叶产量与品质的潜力。此外,5-ALA 处理显著提高了越冬茶树叶片的叶绿素含量、超氧化物歧化酶和过氧化物酶的活性,降低了过氧化氢及超氧阴离子产生速率和丙二醛含量,并改善了叶片的光合电子传递,提高了 PS II 和 PS I 活性,说明 5-ALA 可能通过提高叶片的光合能力和抗氧化能力改善茶叶的产量与品质。表明喷施低浓度 5-ALA 可提高春茶产量与品质。

关键词:5-氨基乙酰丙酸(5-ALA);乌牛早;迎霜;茶叶品质;叶绿素荧光;活性氧

中图分类号:S571.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)11-0224-05

茶是遍布世界的 3 大健康饮品之一,具有诸多保健养生功能,深受人们欢迎。茶叶品质和产量是茶叶产品市场竞争力和茶叶经济效益的 2 个决定因素。然而,茶树作为一种多年生作物,一生中会受到各种不利环境因素的胁迫,如干旱、冷害、冻害、热害、涝害等^[1]。这些逆境胁迫,往往影响茶树的生长,降低茶叶的产量和品质,最终影响到茶叶的经济效益。因此,如何提高茶树的抗逆性并最终改善茶叶的产量和品质,受到研究者及消费者的广泛关注。

光合作用是植物积蓄能量和形成有机物的过程,也是植物产量和品质形成的基础,对茶叶产量和品质起着决定性作用。逆境胁迫下茶树光合作用的降低是茶叶产量和品质下降的主要起因^[2]。因此,提高茶树的光合能力对改善茶叶的产量和品质具有重大意义。5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, 5-ALA)是植物体内所有四吡咯化合物(如叶绿素、光敏素发色团等)生物合成的关键前体^[3-4],与生命活动关系密切。近 30 年来的研究表明,5-ALA 并不只是一种生物代谢中间产物,而且更是一种新的具有调节植物生长发育、提高抗逆性等多种生理活性的生长调节物质^[4]。5-ALA 最显著的生理功能是提高逆境条件下植物的光合速率^[5-9],且 5-ALA 是一种普遍存在于动植物及微生物体内的天然物质,已证实外源 5-ALA 无毒、可生物降解、对环境友好^[10],

说明了其在农林生产及食品产业上的重要应用前景。目前关于 5-ALA 提高植物生产力,改善品质方面的研究主要集中在果蔬作物上^[11-12],而关于 5-ALA 在茶叶生产上的应用未见报道。

本试验以 3 年生无性系品种乌牛早[*Camellia sinensis* (L.) cv. Wuniuzao]、迎霜[*Camellia sinensis* (L.) cv. Yingshuang]为试验材料,研究了外源喷施不同浓度 5-ALA 对春茶生长和品质的影响,并从叶绿素荧光特性及活性氧代谢等方面探讨了 5-ALA 调节茶叶生长和品质的机制,为在茶叶生产上采取安全、有效的措施以提高产量和品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及其处理

试验地位于江苏省南京市溧水区傅家边科技园内茶园。供试茶叶品种为 3 年生无性系品种乌牛早、迎霜。试验共设 4 个处理:喷施清水(对照),喷施 5 mg/L 5-ALA,喷施 10 mg/L 5-ALA,喷施 20 mg/L 5-ALA,2013 年 11 月 25 日与 2014 年 1 月 25 日各喷施 1 次。喷施时将处理液均匀喷撒于茶树叶片正反面。每个处理 3 个小区,随机排列,每个小区之间均间隔 1 行作为保护区。2014 年 3 月 10 日,统计芽叶率后,各处理随机选取茶树外围中上部相同部位成熟叶片,活体测定叶绿素荧光特性;并随机选取叶样,立即液氮固定,保存于 -80 ℃,用于测定茶树叶片生理生化指标;同时随机采集 1 芽 2 叶新梢,置于烘箱中 180 ℃杀青 2~3 min,80 ℃烘干 1.5 h,用研钵磨碎,过 1 mm 筛,用于测定茶叶品质成分。

1.2 指标测定及方法

芽叶率:每个小区随机选择 10 棵茶树,分别调查新梢数,并统计具有 1 芽 2 叶可采收的芽梢数,后者占前者的百分比记为芽叶比,10 棵树芽叶比的均值即为该小区茶树的芽

收稿日期:2015-09-26

基金项目:国家自然科学基金(编号:31401820);中央高校基本科研业务费专项资金(编号:KJQN201538);江苏省自然科学基金(编号:BK20140702)。

作者简介:安玉艳(1983—),女,湖北襄阳人,博士,讲师,主要从事植物逆境生理和植物生长调节物质在园艺作物上的应用及其机制研究。E-mail: anyuyan0447@njau.edu.cn。

通信作者:汪良驹,博士,教授,主要从事植物生长调节物质的调控机制研究。E-mail: wlj@njau.edu.cn。

叶率。

叶绿素荧光特性:叶绿素快速荧光特性测定采用美国 Hansatech 公司多功能植物效率仪(M-PEA),每个处理重复测定 15 张叶片,取平均值,并按照 Srivastava 等方法^[13]进行 JIP-test 分析,获得瞬时荧光值。

茶树叶片生理指标:叶绿素含量采用 95% 乙醇浸提法^[14]测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性按 An 等方法^[15]测定;超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)生成速率用羟胺法测定^[16];过氧化氢(H_2O_2)含量按照 Patterson 等方法^[17]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[18]测定。

茶叶品质:茶叶水浸出物含量按照 GB/T 8305—2002《茶 水浸出物测定》方法测定,茶多酚含量按照 GB/T 8313—2002《茶 茶多酚测定》方法测定,咖啡碱含量按照 GB/T 8312—2002《茶 咖啡碱测定》方法测定,游离氨基酸总量按照 GB/T 8314—2002《茶 游离氨基酸总量测定》方法测定,可溶性糖含量采用蒽酮-硫酸法^[18]测定。

1.3 数据统计分析

所有指标测定均有 3 次以上生物学重复。经方差分析和邓肯氏测验,分析数据的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 5-ALA 对春茶出芽率及茶叶内含物含量的影响

茶叶的出芽率直接关系到茶叶产量。5-ALA 处理显著提高了乌牛早、迎霜的芽叶率(图 1)。3 个处理间无显著性差异,表明喷施 5~20 mg/L 5-ALA 均能有效提高春茶的出芽率,具有提高产量的潜力。

茶叶品质是决定茶叶市场竞争力和经济效益的重要因素。5-ALA 降低了乌牛早茶叶的茶多酚含量,其中 5 mg/L

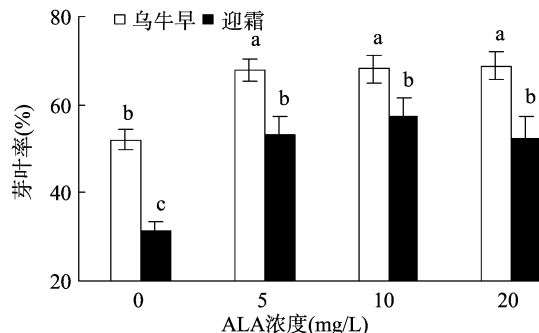


图1 不同浓度 5-ALA 提高茶叶芽叶率的效应

5-ALA 的效果达到显著性水平。3 个浓度 5-ALA 处理均使乌牛早茶叶咖啡碱含量显著升高,其中 5、10 mg/L 5-ALA 的效果更好。而对游离氨基酸来说,5 mg/L 5-ALA 的效果不显著,2 个高浓度显著提高了其含量。与对照相比,3 个浓度 5-ALA 处理均使茶叶可溶性糖和水浸出物含量显著升高,对于可溶性糖含量来说 3 个浓度间的效果基本相同,而对于水浸出物含量来说,10 mg/L 5-ALA 的效果最好。3 个浓度 5-ALA 处理均显著降低了乌牛早茶叶的酚氨比,其中 10、20 mg/L 5-ALA 处理下的降低程度高于 5 mg/L 5-ALA 处理(表 1)。

对于迎霜茶叶来说,3 个浓度 5-ALA 处理均能显著降低茶多酚含量及酚氨比,显著升高咖啡碱、可溶性糖、水浸出物含量。从这几个指标总体看来,5、10 mg/L 5-ALA 对茶叶品质的提高效应更明显。从游离氨基酸含量来看,20 mg/L 5-ALA 处理与对照相比无显著效果,而 5、10 mg/L 5-ALA 使游离氨基酸含量显著升高。

表 1 不同浓度 5-ALA 对乌牛早、迎霜茶叶内含物含量的影响

茶叶品种	5-ALA (mg/L)	茶多酚 (%)	咖啡碱 (%)	游离氨基酸 (%)	可溶性糖 (%)	水浸出物 (%)	酚氨比
乌牛早	0	21.58 ± 0.82c	2.12 ± 0.15e	3.15 ± 0.05c	3.88 ± 0.10b	36.10 ± 0.17d	6.84 ± 0.15d
	5	19.77 ± 0.92d	3.27 ± 0.19c	3.26 ± 0.16c	4.13 ± 0.10a	36.66 ± 0.25c	6.06 ± 0.20e
	10	20.80 ± 1.18cd	3.14 ± 0.21c	4.08 ± 0.07a	4.24 ± 0.10a	38.19 ± 0.23a	5.09 ± 0.23f
	20	22.10 ± 1.06c	2.54 ± 0.12d	4.02 ± 0.09a	4.21 ± 0.09a	37.36 ± 0.11b	5.49 ± 0.19f
迎霜	0	28.71 ± 0.53a	5.05 ± 0.11b	2.43 ± 0.15e	2.65 ± 0.12e	36.08 ± 0.14d	11.84 ± 0.34a
	5	25.48 ± 0.85b	5.43 ± 0.11a	2.90 ± 0.04d	2.90 ± 0.08d	38.05 ± 0.08a	8.79 ± 0.28c
	10	25.56 ± 1.12b	5.42 ± 0.09a	3.78 ± 0.14b	3.13 ± 0.13d	36.85 ± 0.18bc	6.76 ± 0.35d
	20	25.58 ± 0.58b	5.39 ± 0.18a	2.64 ± 0.15e	3.52 ± 0.09c	37.08 ± 0.21b	9.70 ± 0.33b

注:同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。

以上出芽率和茶叶品质的结果表明,3 个浓度 5-ALA 处理均具备提高茶叶产量的潜力和显著改善茶叶内含物含量的能力。从芽叶率来看,3 个处理间无显著性差异,但从茶叶内含物含量来看,低浓度处理,尤其是 10 mg/L 5-ALA 处理的总体效果更好。这说明在茶叶实际生产中使用低浓度的 5-ALA 处理即可达到较好的提高产量、改善品质的效果。

2.2 5-ALA 对茶树叶片叶绿素含量的影响

3 个浓度 5-ALA 处理均提高了乌牛早叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量,其中 10、20 mg/L 5-ALA 处理的效果较明显。由于 20 mg/L 5-ALA 对叶绿素 a 的增高幅度较大,但对叶绿素 b 的增高幅度较小,导致该处理下叶绿素 a/叶绿

素 b 与对照无显著性差异,而 5、10 mg/L 5-ALA 处理使叶绿素 a/叶绿素 b 显著升高。对于迎霜来说,3 个浓度 5-ALA 处理均显著提高茶树叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、叶绿素 a/叶绿素 b(表 2)。结果表明,5-ALA 处理能够明显提高茶树叶片叶绿素含量,这与实际观察中 5-ALA 处理过的茶树叶片颜色加深的结果相符合。

2.3 5-ALA 对茶树叶片叶绿素荧光特性的影响

与对照相比,3 个浓度 5-ALA 处理均明显提高了乌牛早叶片的 I-P 相荧光强度(图 2)。与乌牛早相比,迎霜叶片 J-P 相的增长趋势速率明显缓慢,荧光信号的缓慢增长暗示光合电子传递受到抑制。5-ALA 处理后,迎霜 O-P 之间的

表 2 不同浓度 5-ALA 对乌牛早和迎霜茶叶叶片叶绿素含量的影响

茶叶品种	5-ALA (mg/L)	叶绿素 a (mg/g)	叶绿素 b (mg/g)	叶绿素总量 (mg/g)	叶绿素 a/叶绿素 b
乌牛早	0	9.59 ± 0.16b	4.58 ± 0.63b	14.16 ± 0.87b	0.48 ± 0.04c
	5	9.90 ± 0.30ab	5.70 ± 0.36a	15.60 ± 0.74ab	0.58 ± 0.04ab
	10	10.14 ± 0.32a	6.17 ± 0.61a	16.32 ± 1.06a	0.61 ± 0.06a
	20	10.39 ± 0.08a	5.50 ± 0.30a	15.89 ± 0.49a	0.53 ± 0.03bc
迎霜	0	8.57 ± 0.25b	2.81 ± 0.45b	11.38 ± 1.02b	0.33 ± 0.02b
	5	10.23 ± 0.31a	3.97 ± 0.33a	14.20 ± 0.92a	0.39 ± 0.02a
	10	10.36 ± 0.64a	4.19 ± 0.48a	14.55 ± 1.23a	0.40 ± 0.03a
	20	10.04 ± 0.28a	3.94 ± 0.72a	13.98 ± 1.08a	0.39 ± 0.04a

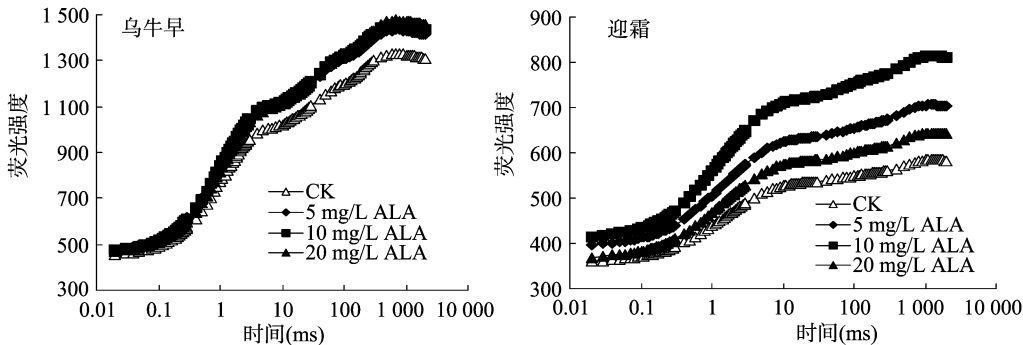


图2 不同浓度 5-ALA 对茶叶叶片叶绿素快速荧光动力学 OJIP 曲线的影响

荧光信号均明显上升,这说明 5-ALA 促进了 Q_A 的还原速率,促进了光合电子传递,导致 J 点、I 点和 P 点继续增加。

同步测定的 820 nm 光反射曲线的变化可以用来反映 PS I 的氧化还原状态。MR/MR₀ 曲线经红光照射后呈现先下

降(快相)后上升(慢相)的趋势,分别对应 P700 的氧化和 P700⁺ 的再还原过程(图 3)。5-ALA 处理提高了 2 种茶叶叶片的 MR/MR₀ 最低点,导致快相和慢相的幅度增大,暗示着 5-ALA 可以明显提高茶叶叶片 PS I 的活性。

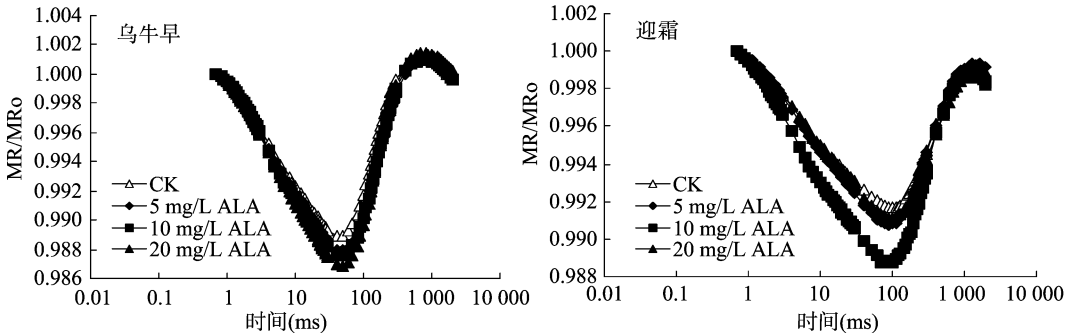


图3 不同浓度 5-ALA 对茶叶叶片 820 nm 光反射曲线的影响

2.4 5-ALA 对茶叶叶片膜脂过氧化程度的影响

H_2O_2 含量、 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、MDA 含量、相对电导率常被用来衡量不利环境因素对植物造成的伤害。5-ALA 处理显著降低了乌牛早叶片的 H_2O_2 含量、 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、相对电导率,且 3 个浓度之间无显著性差异(表 3)。乌牛早叶片 MDA 含量在 5-ALA 处理下也明显降低,其中 5、10 mg/L 5-ALA 处理达显著性水平。3 个浓度 5-ALA 处理均使迎霜茶叶叶片的 H_2O_2 含量、 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、相对电导率、MDA 含量显著降低。对于 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、相对电导率、MDA 含量来说,3 个处理间无显著性差异。对于 H_2O_2 含量来说,5、10 mg/L 5-ALA 的效果更好。

2.5 5-ALA 对茶叶叶片 SOD 与 POD 保护酶活性的影响

5-ALA 处理均提高了乌牛早、迎霜叶片 SOD 活性,其中 10 mg/L 5-ALA 提高 SOD 活性幅度最大,但 3 个处理间无

显著性差异(图 4)。与 SOD 相似,乌牛早、迎霜茶叶叶片 POD 活性在 5-ALA 处理下也显著升高。不同的是,3 个处理之间也存在显著性差异。5 mg/L 5-ALA 处理使 POD 活性的升高幅度最大,其次为 10 mg/L 5-ALA 处理,而 20 mg/L 5-ALA 处理升高幅度最小。SOD 与 POD 活性结果表明,低浓度 5-ALA 处理对保护酶活性的提升效果更好。

3 讨论与结论

茶叶的产量和品质决定了茶叶的经济效益,直接关系到以茶叶作为主要栽培经济作物的地区的社会经济发展水平和人民生活水平。因此,如何有效提高茶叶的产量与品质一直是茶叶生产中的重要研究课题。改良茶树品种,培育高产优质新品种是提高茶叶产量与品质的根本措施之一,但由于茶树是多年生木本植物,茶树育种周期长,从种质资源的选定、

表 3 不同浓度 5-ALA 降低乌牛早、迎霜茶树叶片膜脂过氧化伤害的效应

茶叶品种	5-ALA (mg/L)	H ₂ O ₂ 含量 (μmol/g)	O ₂ ⁻ ·产生速率 [nmol/(min·g)]	相对电导率	丙二醛含量 (μmol/g)
乌牛早	0	635.36 ± 14.80b	2.60 ± 0.32a	14.53 ± 1.20ab	5.49 ± 0.26a
	5	530.81 ± 30.40d	0.71 ± 0.16c	11.12 ± 0.43d	4.27 ± 0.32b
	10	540.07 ± 26.63d	1.36 ± 0.38b	11.31 ± 0.55d	4.15 ± 0.16b
	20	533.57 ± 25.12d	1.72 ± 0.40b	11.61 ± 1.29cd	5.21 ± 0.16a
迎霜	0	727.17 ± 6.68a	2.40 ± 0.49a	16.34 ± 2.26a	3.99 ± 0.22b
	5	587.32 ± 3.29cd	1.30 ± 0.32b	13.25 ± 1.41bc	2.80 ± 0.49c
	10	550.83 ± 37.87d	1.15 ± 0.42b	12.21 ± 0.91c	2.93 ± 0.34c
	20	603.63 ± 31.78bc	1.26 ± 0.31b	11.93 ± 2.04c	2.88 ± 0.28c

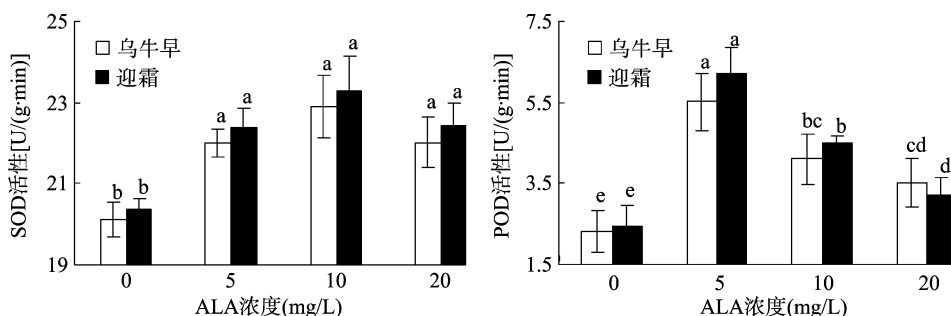


图 4 不同浓度 5-ALA 提高茶树叶片保护酶活性的效应

单株选择、无性繁殖、品比试验到区域试验,一般需 15 ~ 20 年。而且,我国茶区时常发生自然灾害,如低温、干旱等,造成茶树生长减缓,给茶树栽培育种带来了困难。寻求提高茶叶产量与品质的有效技术措施,成为了当今茶叶生产研究的另一个重要课题。

光合作用是植物产量与品质形成的基础。茶叶产量与品质低下的一个重要原因就是茶树生长周期中的各种不利环境因子常常造成光合作用的降低^[2]。因此,提高茶树的光合能力是提高茶叶产量、改善茶叶品质的根本途径。5-ALA 是一种具有多种生理活性的新型植物生长调节物质^[4],其最显著的生理功能是提高植物的光合作用^[9]。已有研究表明,5-ALA 可提高多种果蔬作物的产量与品质^[11-12]。本研究首次将 5-ALA 喷施于乌牛早、迎霜茶树叶片上,发现 3 个浓度处理均显著提高了 2 个茶树品种的芽叶率和咖啡碱、游离氨基酸、可溶性糖等品质成份的含量,降低了茶叶的酚氨比,说明向茶树叶片喷施 5-ALA 具有提高茶叶的产量、改善茶叶品质的潜能。3 个浓度处理相比,芽叶率无显著性差异,但从茶叶内含物上来看,低浓度 5-ALA,尤其是 10 mg/L 5-ALA 处理对品质成分的改善效应更显著,因此实际生产中可采用低浓度 5-ALA 处理。由于 5-ALA 是一种无毒、可生物降解且对环境友好的天然物质^[10],将 5-ALA 应用于茶叶生产不会引起食品安全问题,这在食品安全质量问题日益突出的当今社会显得尤为重要。

5-ALA 提高植物叶片叶绿素含量的报道已有很多^[4]。与这些研究相似,本试验也发现 5-ALA 处理显著提高了 2 种茶树叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量。汪良驹等认为 5-ALA 不只作为叶绿素合成的前体影响叶绿素合成,而且作为一种植物生长调节物质参与调控叶绿素合成进而调节植物生长^[19]。叶绿素是与光合作用有关的最重要的色素,因

此调控叶绿素的合成、增加叶绿素的含量、提高叶绿素 a 向叶绿素 b 的转化能力应该是 5-ALA 提高植物光合作用的重要机制之一。叶绿素荧光是光合作用研究的探针。近年来,快速叶绿素荧光诱导动力学的应用,使光合机构及其活性的研究更加深入^[20]。在多种植物抗逆性研究中,叶绿素荧光技术常用来分析不同环境因子对光合机构的影响^[21]。本研究中,5-ALA 处理显著改善光合电子传递,提高 PS II 和 PS I 活性,这可能是 5-ALA 提高植物光合性能的一个重要机制。自 Wang 等首先发现外源 5-ALA 处理可显著增大甜瓜在冷胁迫下叶片气孔导度进而提高光合速率^[19]以来,研究者相继报道 5-ALA 可降低枣椰树在盐胁迫下的气孔限制值^[6],增大胡椒^[7]、葡萄^[12]、苹果^[11]等植物的气孔导度,说明 5-ALA 增大植物气孔导度具有普遍性。陈令会等首次试验证明 5-ALA 能够促进植物叶片气孔开放,并初步揭示了 5-ALA 提高植物光合作用的气孔调节机制^[9]。因此,5-ALA 处理改善茶叶光合性能,提高产量与品质也可能与其增大茶树叶片在冬季低温下的气孔导度有关。

茶树原产湿热地区,喜热不耐严寒,容易受到低温冻害的影响。冬季低温造成的冻害是春茶品质下降、产值降低的主要原因^[22]。减轻低温造成的冻害,确保茶树安全越冬是茶叶安全生产的重要问题,这对于冬季和早春温度较低、多强寒潮活动的茶区尤其重要。已有研究表明,外源 ALA 可提高甜瓜^[19]、大豆^[23]、胡椒^[7]等多种作物的抗寒性。本研究中,5-ALA 处理显著降低了越冬茶树叶片的活性氧产生速率、相对电导率、丙二醛含量,说明 5-ALA 降低了茶树叶片膜脂过氧化程度。SOD、POD 是植物体内 2 种重要的保护酶,5-ALA 处理显著升高了 2 种茶树叶片的 SOD、POD 活性,表明 5-ALA 处理可能通过提高抗氧化酶活性加快 H₂O₂、O₂⁻·的清除,进而降低膜脂过氧化伤害程度。这与前人对 5-ALA

提高植物抗寒性的机理研究结果^[7,23]相似。这表明给越冬茶树喷施5-ALA可提高茶树的抗逆性,减缓低温等对茶树的伤害,最终提高茶树的产量与品质。事实上,5-ALA不仅可以提高植物的抗寒性,而且还可提高多种植物的抗盐性^[24]、抗旱性^[8]、耐弱光性^[19]、抗高温能力^[25]等。提高抗氧化能力,进而减轻氧化伤害、促进光合生长,是5-ALA提高植物对各种环境胁迫的适应性的共同机制。茶园是自然界中的开放体系,茶树在其生长周期中不可避免地会遭受多种不利环境因子影响^[26-27],因此,可以考虑将5-ALA应用于茶树生长的不同阶段,提高茶叶总产量及品质成分含量。

综上所述,本试验结果表明向越冬茶树叶片喷施低浓度5-ALA可有效提高春茶的芽叶率与品质成分含量,这与其提高茶树叶片叶绿素含量、光合能力及抗氧化能力密切相关。鉴于5-ALA是一种天然、无毒、可生物降解且对环境友好的具有多种生理活性的植物生长调节物质,将其应用于茶叶生产,不仅具有提高茶叶产量、改善茶叶品质的潜力,而且可满足食品质量安全的要求。

参考文献:

- [1] Upadhyaya H, Panda S K. Abiotic stress responses in tea [*Camellia sinensis* L. (O.) Kuntze]: an overview [J]. Reviews in Agricultural Science, 2013, 1: 1-10.
- [2] 韦朝领, 李叶云, 江昌俊. 茶树逆境生理及其分子生物学研究进展 [J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(3): 335-339.
- [3] 汪良驹, 姜卫兵, 章镇, 等. 5-氨基乙酰丙酸的生物合成和生理活性及其在农业中的潜在应用 [J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(3): 185-192.
- [4] Akram N A, Ashraf M. Regulation in plant stress tolerance by a potential plant growth regulator, 5-aminolevulinic acid [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2013, 32(3): 663-679.
- [5] Hotta Y, Tanaka T, Takaoka H, et al. Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on the yield of several crops [J]. Plant Growth Regulation, 1997, 22(2): 109-114.
- [6] Youssef T, Awad M A. Mechanisms of enhancing photosynthetic gas exchange in date palm seedlings (*Phoenix dactylifera* L.) under salinity stress by a 5-aminolevulinic acid-based fertilizer [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2007, 27(1): 1-9.
- [7] Korkmaz A, Korkmaz Y, Demirkiran A R. Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid [J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 67(3): 495-501.
- [8] Liu D, Pei Z F, Naem M S, et al. 5-Aminolevulinic acid activates antioxidative defence system and seedling growth in *Brassica napus* L. under water-deficit stress [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2011, 197(4): 284-295.
- [9] 陈令会, 刘龙博, 安玉艳, 等. 外源5-氨基乙酰丙酸促进苹果叶片气孔开放机理的初探 [J]. 园艺学报, 2014, 41(10): 1965-1974.
- [10] Sasikala C, Ramana C V, Rao P R. 5-aminolevulinic acid: a potential herbicide insecticide from microorganisms [J]. Biotechnology Progress, 1994, 10(5): 451-459.
- [11] 高晶晶, 冯新新, 段春慧, 等. ALA提高苹果叶片光合性能与果实品质的效应 [J]. 果树学报, 2013, 30(6): 944-951.
- [12] 谢荔, 成学慧, 冯新新, 等. 氨基酸肥料对“夏黑”葡萄叶片光合特性与果实品质的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(2): 31-37.
- [13] Srivastava A, Guisse B, Greppin H, et al. Regulation of antenna structure and electron transport in PS II of *Pisum sativum* under elevated temperature probed by the fast polyphasic chlorophyll a fluorescence transient; OKJIP [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1997, 1320(1): 95-106.
- [14] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents [J]. Biochemical Society Transactions, 1983, 603: 591-592.
- [15] An Y Y, Liang Z S. Drought tolerance of *Periploca sepium* during seed germination: antioxidant defense and compatible solutes accumulation [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(3): 959-967.
- [16] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. 植物生理学通讯, 1990, 26(6): 55-57.
- [17] Patterson B D, Macrae E A, Ferguson I B. Estimation of Hydrogen peroxide in plant extracts using titanium(IV) [J]. Analytical Biochemistry, 1984, 139(2): 487-492.
- [18] An Y Y, Liang Z S, Zhao R K, et al. Organ-dependent responses of *Periploca sepium* to repeated dehydration and rehydration [J]. South African Journal of Botany, 2011, 77(2): 446-454.
- [19] 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]. Physiologia Plantarum, 2004, 121(2): 258-264.
- [20] 李鹏民, 高辉远, Strasser R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559-566.
- [21] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659-668.
- [22] Vyas D, Kumar S. Tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) clone with lower period of winter dormancy exhibits lesser cellular damage in response to low temperature [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2005, 43(4): 383-388.
- [23] Balestrasse K B, Tomaro M L, Battie A, et al. The role of 5-aminolevulinic acid in the response to cold stress in soybean plants [J]. Phytochemistry, 2010, 71(17/18): 2038-2045.
- [24] Nishihara E, Kondo K, Parvez M M, et al. Role of 5-aminolevulinic acid (ALA) on active oxygen-scavenging system in NaCl-treated spinach (*Spinacia oleracea*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(9): 1085-1091.
- [25] Zhang J, Li D M, Gao Y, et al. Pretreatment with 5-aminolevulinic acid mitigates heat stress of cucumber leaves [J]. Biologia Plantarum, 2012, 56(4): 780-784.
- [26] 李亚春, 王友美, 巫丽君, 等. 2013年春季低温霜冻对苏南茶树影响的评估 [J]. 江苏农业科学, 2014, 42(8): 248-250.
- [27] 朱韦京, 余树全, 汪赛, 等. 不同酸雨作用方式对茶树幼苗生长与光合特征参数的影响 [J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 232-235.