

磷对铝氟交互处理下茶树主要生理生化特性的影响

王小平¹, 罗 虹¹, 刘 鹏^{1,*}, 谢忠雷², 徐根娣¹, 姚建东¹, 陈可宝¹

(1. 浙江师范大学生态研究所, 浙江金华 321004; 2. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

摘要:通过白茶和智仁早茶在铝氟交互处理下添加外源磷的水培试验,研究了不同浓度磷(0, 0.2, 1.0 mmol/L)对茶树主要化学成分及抗氧化酶的影响。结果表明:(1)当施入 0.2 mmol/L 磷时,茶叶中的蛋白质、叶绿素和茶多酚含量及 SOD、POD 和 CAT 活性均比无磷组高,且在 5.0 mmol/L 铝和 1.0 mmol/L 氟处理下,均达到最高值(叶绿素除外),表明适量外源磷的施加对茶树的生理生化特性起促进作用,并能有效缓解铝和氟毒所致的氧化损伤,从而抑制了脂质过氧化作用;(2)随着磷浓度(1.0 mmol/L)增加,茶叶中的各指标值均比无磷组和对照低,出现最低值,表明磷对铝氟胁迫下茶树的缓解效应有限,超过一定的浓度,则表现出明显的抑制作用;(3)在外源磷的施加下,白茶的可溶性蛋白、茶多酚和叶绿素含量及 SOD、POD 和 CAT 活性均比智仁早茶的变化幅度大。因此,外源磷对茶树幼苗生理生化作用具有一定的调控效应。

关键词:磷;铝-氟交互;茶;生理生化特性

文章编号:1000-0933(2009)10-5434-08 中图分类号:Q142, Q948, X171 文献标识码:A

Effects of phosphate on physiological and biochemical characteristics of tea plants leaves under Al and F interactions

WANG Xiao-Ping¹, LUO Hong¹, LIU Peng^{1,*}, XIE Zhong-Lei², XU Gen-Di¹, YAO Jian-Dong¹, CHEN Ke-Bao¹

¹ Institute of Ecology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

² College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5434 ~ 5441.

Abstract: we studied the physiological and biochemical characteristics of tea plants leaves were affected by different concentrations of phosphate (P) (consisting of 0, 0.2 and 1.0 mmol/L) through hydroponic cultivation experiments of *Camellia sinensis* L (baicha and zhirenzaocha) under aluminum (Al) and fluorine (F) interactions. The results followed showed: (1) Compared with the four non-P treatments, an obvious upward tendency of soluble protein, chlorophyll and polyphenols contents and superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activity was observed in the treatment of 0.2 mmol/L P under single Al or F. Meanwhile these indexes reached maximum values except the content of chlorophyll under 5.0 mmol/L Al and 1.0 mmol/L F interactions in zhirenzaocha. This suggests proper concentration of P can weaken oxidative injury-caused by Al and/or F and inhibit lipid peroxides by increasing antioxidative enzyme activities. (2) With the increasing concentrations of P, the soluble protein, chlorophyll content, polyphenols contents and superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) activities were all fell to the minimum level, which were all below non-P and the control. The fact that the treatment of 1.0 mmol/L P can not alleviate the toxonosis-caused by Al and F interactions implies detoxication depends on concentration of P and beyond the concentration range, it restrains detoxication. (3) The sensibilities between baicha and zhirenzaocha according to the P stress were differed and order was sorted as follows: zhirenzaocha > baicha. Therefore, the concentration of P plays a high impact on physiological and biochemical characteristics of young tea plants and detoxication of P is associated with variety under Al and F interactions.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40573052); 浙江省自然科学基金资助项目(305151, 304135)

收稿日期:2008-07-07; 修订日期:2008-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sky79@zjnu.cn

Key Words: phosphate; physiological and biochemical characteristic; tea plants; Al and F interactions

全球范围内酸性物质沉降的日益严重以及不合理的施用化肥引起土壤酸化,使得土壤中可溶性铝的数量增加,移动性增强,铝的毒害问题已成为限制酸性土壤地区作物生长的主要因素之一^[1~5]。氟具有高度的生物活性,与铝形成较稳定 Al-F 络合物,有效降低氟的生物毒性^[6]。酸性条件下氟与土壤间相互作用较明显,影响土壤中铝的活化和磷的吸附与迁移行为,导致土壤中难溶性磷和可溶性磷发生迁移和转化^[7,8]。磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一,不仅是植物体内许多重要化合物的组分,而且还以多种途径参与植物代谢^[9]。我国南方大面积的酸性土壤由于风化程度高,磷肥施入土壤后很快转化成 Fe-P 和 Al-P,造成磷肥利用率较低,限制植物的生长发育^[10,11]。

茶树 (*Camellia sinensis* L.) 是一种既超积累铝,又富集大量氟的重要经济作物。酸性、强酸性土壤条件下,植茶及施肥虽使土壤 pH 值降低,但却增加土壤有机质和氮素,增加了土壤对养分的保蓄和供应能力^[12~14]。近 20a 来,因茶树的强聚氟特性,导致茶叶特别是砖茶中氟含量极高,引起很多西部边疆居民因饮茶导致“氟斑牙”、“氟骨症”等氟中毒^[15]。众多研究表明,在茶园的酸性土壤中,铝与氟络合构成一个平衡系统,其中 Al^{3+} 、 AlF^{2+} 、 AlF_2^+ 、 AlF_3 、 AlF_4^- 等可以共同存在,并以铝氟络合离子形态向叶部转移,从而消除铝、氟离子本身的毒性,并且不同部位的 Al/F 比值基本保持恒定^[16,17]。铝能调节对磷的吸收,一定浓度的铝能促进茶树对磷的吸收,一定比例的 Al/P 促进茶树的生长发育^[18,19]。也有研究表明,土壤中磷的迁移和转化与氟污染状况有关^[11,20]。但是,关于磷、铝和氟 3 种元素的复合作用报道较少^[21],及对茶树生理生化特性的作用尚未见报道。据此,本实验以茶树为材料,通过不同浓度磷、铝和氟处理,测定茶叶的主要生理生化特性,探讨如何减轻元素对作物毒害,提高经济作物产量,对揭示酸性氟污染土壤中铝和磷的地球化学及环境化学行为具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试茶苗为 3 年生的白茶和智仁早茶,2007 年 2 月购自温州乐清茶场,试验时幼苗株高 28 ~ 30cm,主干胸径 0.6 ~ 0.8cm。

1.2 试验设计

选择长势一致的茶苗,洗净原先根部的土壤,然后移植到外壁涂有黑漆的 3 L 塑料桶中进行水培,每桶 4 株,采用 Hoagland 培养液培养。预培养两个星期后,添加不同浓度的磷、铝和氟(表 1),每个处理 5 次重复,磷源为 KH_2PO_4 ,铝源为 $AlCl_3 \cdot 6H_2O$,氟源为 NH_4F 。温室培养,每天通气一次,每次 2 h,每周更换营养液。培养 30 d 后,每株摘取 1 芽 2 叶测定各相关品质指标,采集相同部位的成熟叶测定主要生理指标,保证每个指标测定 3 次重复。

1.3 分析方法

可溶性蛋白质测定采用考马斯亮蓝法^[22],用 $\mu g/g \cdot FW$ 表示;叶绿素含量测定参照 Arnon^[23]的方法;茶多酚含量用酒石酸铁比色法测定,以 %FW 表示^[24];超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定按陈贻竹等^[25]的方法,以 $U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ 表示;过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法^[26],以 $U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ 表示;过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用 Cakmak 等^[27]的方法,以 $U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ 表示。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 进行数据统计和 SAS 分析软件进行 LSD 显著性检验。

表 1 磷、铝、氟处理浓度
Table 1 P, Al and F concentrations

P (mmol/L)	0				0.2				1.0			
Al (mmol/L)	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5
F (mmol/L)	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

2 结果与分析

2.1 磷对铝氟交互处理下茶树叶片可溶性蛋白质含量的影响

图 1 显示,在同一 P 浓度处理下,两个茶树品种的蛋白质含量变化趋势均为:对照 > Al-F 交互 > 单 Al > 单 F,各处理之间差异显著($p < 0.05$),说明 Al 与 F 处理导致茶树可溶性蛋白含量降低。3 个 P 浓度处理下,4 组 Al-F 交互处理的蛋白质含量变化趋势均为:P (0.2 mmol/L) > P (0 mmol/L) > P (1.0 mmol/L),在 A10F0P0.2 处理下,白茶和智仁早茶的可溶性蛋白质含量显著增加($p < 0.05$),分别出现最高值,较对照 (A10F0P0,下同)上升 16.7% 和 22.4%,而茶树在 1.0 mmol/L P 浓度下可溶性蛋白质含量均比对照低,在 A15F1 处理时,分别较对照下降 36.7% 和 32.1%,说明 P 与 Al、F 的相互作用促使茶叶中蛋白质含量降低。

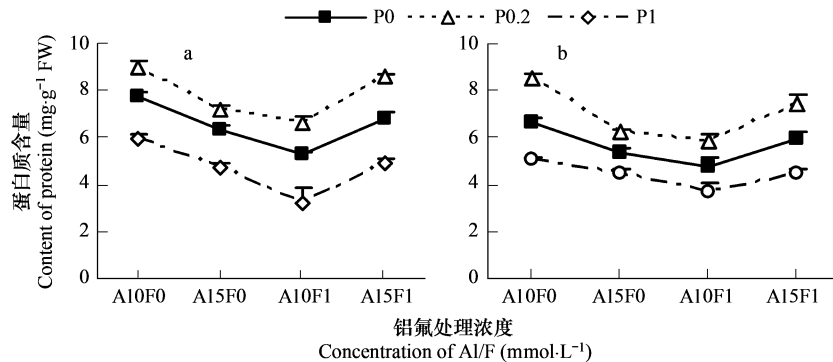


图 1 磷对铝氟交互处理下白茶(a)和智仁早茶(b)蛋白质含量的影响

Fig. 1 Effects of phosphate on the content of protein of baicha (a) and zhirenzaocha (b) under Al and F interactions

2.2 磷对铝氟交互处理下茶树叶片叶绿素含量的影响

叶绿体是光合作用的主要场所,叶绿素含量的多少直接影响光合作用的强弱。图 2 所示,在 5.0 mmol/L 单 Al 处理下,白茶和智仁早茶的叶绿素含量分别较对照减少 9.7% 和 13.5%,同样地,在 1.0 mmol/L 单 F 胁迫下,白茶和智仁早茶的叶绿素含量也出现不同程度下降,分别较对照减少 4.1% 和 6.2%,而在 Al-F 交互处理时,两者的叶绿素含量均上升。Al-F 交互处理时同时外施 P 可有效影响茶树的叶绿素含量,当施入 0.2 mmol/L P 时,茶树的叶绿素含量均比无 P 组高,在 A10F0P0.2 达到最大,值得注意的是 0.2 mmol/L P 对白茶叶绿素含量的影响较智仁早茶明显;当施入 1.0 mmol/L P 时,叶绿素含量均比无 P 组低,A10F1P1 处理下白茶和智仁早茶分别较对照下降 19.2% 和 16.8%,这说明外施适量的 P 能提高叶绿素含量,有利于物质生产和积累,过量则对茶树生长不利。

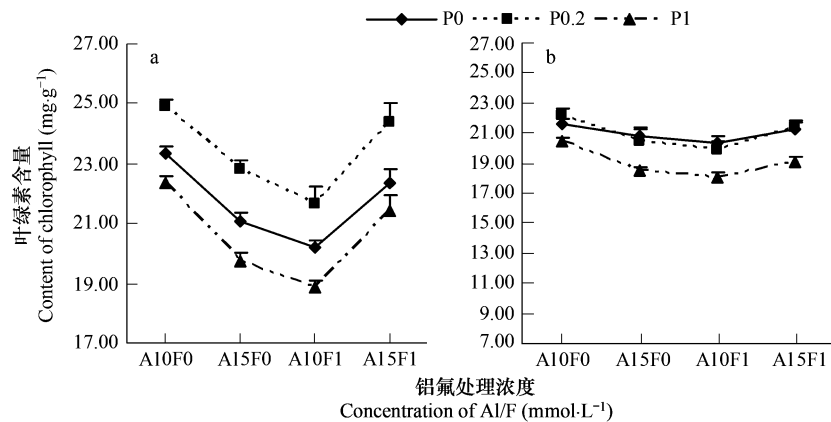


图 2 磷对铝氟交互处理下白茶(a)和智仁早茶(b)叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of phosphate on the content of chlorophyll of baicha (a) and zhirenzaocha (b) under Al and F interactions

2.3 磷对铝氟交互处理下茶树叶片茶多酚含量的影响

茶多酚类是茶叶的主体化学成分,能有清除自由基作用,具有较强的抗氧化活性^[28]。图3可见,白茶和智仁早茶在0.2 mmol/L P处理下茶多酚含量均显著增加($p < 0.05$),4组处理均高于对照,且在Al5F1P0.2处理下为最高值,说明外施一定量的P与Al、F发生某种反应,对茶多酚含量的增加有刺激作用,其中白茶受到刺激作用大于智仁早茶。白茶在Al0F0P0、Al0F0P0.2和Al0F0P1处理下,茶多酚含量呈先升后降趋势,而智仁早茶在Al0F0P0和Al0F0P0.2处理下,含量相近。分别外施P浓度分别为0.2 mmol/L和1.0 mmol/L时,Al-P对茶树的毒害作用均比F-P弱,以P浓度为1.0 mmol/L为例,Al0F1处理下,白茶和智仁早茶的茶多酚含量分别较对照下降16.7%、19.1%,而Al5F0处理下,只有0.3%、6.2%降幅。

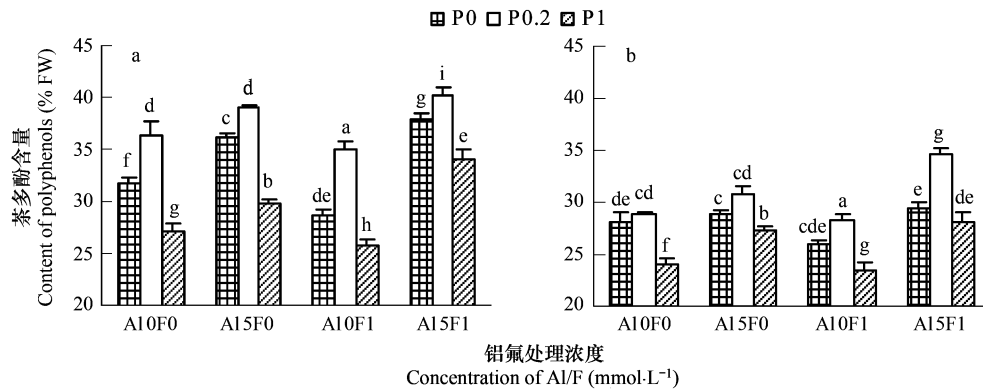


图3 磷对铝氟交互处理下白茶(a)和智仁早茶(b)茶多酚含量的影响

Fig.3 Effects of phosphate on the content of polyphenols of baicha (a) and zhirenzaocha(b) under Al and F interactions

2.4 磷对铝氟交互处理下茶树叶片保护酶的影响

SOD是植物体内清除氧自由基的一种重要保护酶。图4可看出,在同一P浓度的4个处理组中,白茶和智仁早茶的SOD活性均在单F处理最高,对照其次,单Al处理稍小,Al-F交互处理最低。从外施不同浓度的P来看,茶树的SOD活性大小依次是:P(0.2 mmol/L) > P(0 mmol/L) > P(1.0 mmol/L),在Al0F1P0.2处理下,白茶和智仁早茶的SOD活性均升至最高点,分别较对照高42.8%和11.3%,说明低浓度的P诱导SOD活性增加,超过一定值后,SOD活性受到抑制。在单Al处理中添加0.2 mmol/L P,白茶和智仁早茶的SOD活性比不添加P处理分别高53.2%和8.2%,从另一侧面反映适当的外源P对Al胁迫下茶树SOD活性的促进作用。就两个茶树品种而言,智仁早茶的SOD活性比白茶高61.3%~381.1%。

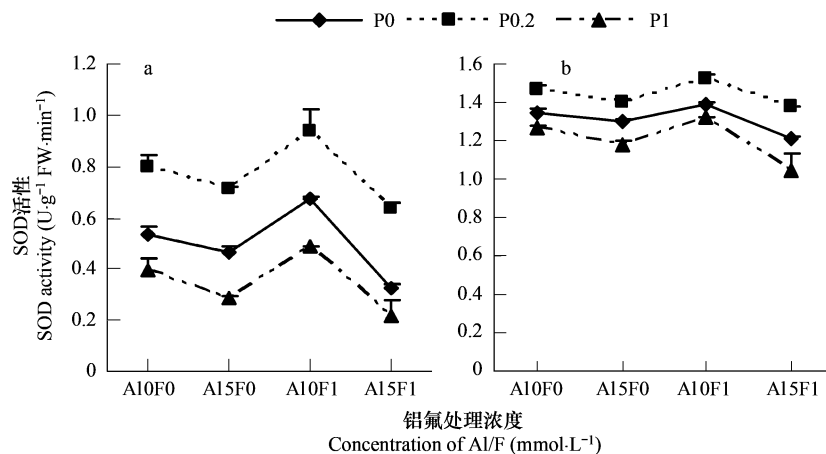


图4 磷对铝氟交互处理下白茶(a)和智仁早茶(b)SOD活性的影响

Fig.4 Effects of phosphate on SOD of baicha (a) and zhirenzaocha(b) under Al and F interactions

POD 是防止膜脂过氧化的主要酶,在逆境下能保持膜系统的完整性。图 5 可见,外施不同浓度的 P 所引起 POD 活性变化趋势与 SOD 活性相似: $P(0.2 \text{ mmol/L}) > P(0 \text{ mmol/L}) > P(1.0 \text{ mmol/L})$,表明并非 P 浓度越高越好,适量的 P 能最大限度地提高抗氧化酶系统活性。添加 0.2 mmol/L 浓度的 P 时,在 A15F1P0.2 处理下,白茶和智仁早茶的 POD 活性达到最高值,分别比对照高 52.7% 和 26.5%,其次为单 Al 处理,单 F 处理活性最小。单 F 处理下, P 浓度为 0.2 mmol/L 处理中的 POD 活性比不添加 P 处理分别高 25.1% 和 71.6% (白茶和智仁早茶),说明外源 P 对茶树 F 胁迫具有缓解作用,促进茶树体内 POD 的活性。各个处理下,智仁早茶叶片的 POD 活性均比白茶高,和 SOD 活性表现一致。

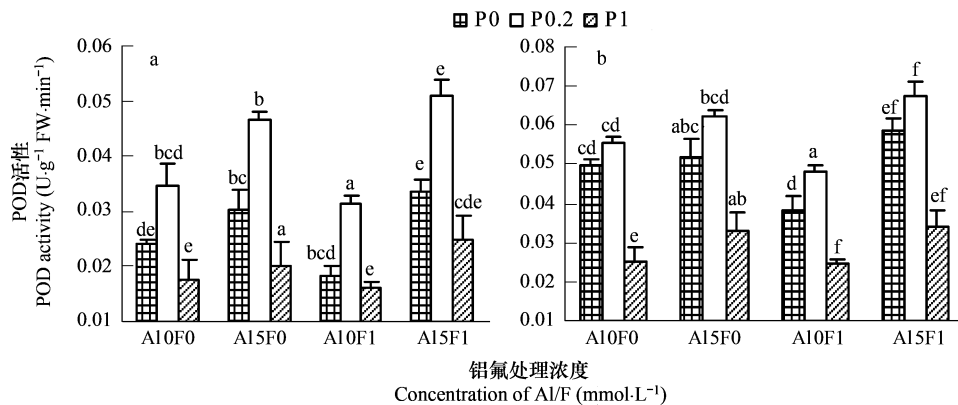


图 5 磷对铝氟交互处理下白茶(a)和智仁早茶(b)POD 活性的影响

Fig. 5 Effects of phosphate on POD of baicha (a) and zhirenzaocha(b) under Al and F interactions

CAT 是清除过氧化氢的重要酶类,它与 SOD、POD 等协同作用,有效的清除体内的活性氧^[29]。图 7 表明, CAT 和 SOD、POD 的变化趋势基本一致,外施不同浓度的 P 下,茶树的 CAT 活性大小依次是: $P(0.2 \text{ mmol/L}) > P(0 \text{ mmol/L}) > P(1.0 \text{ mmol/L})$,说明 0.2 mmol/L P 浓度对茶叶的 SOD、POD 和 CAT 活性具有促进作用,因而减轻膜脂过氧化和质膜损伤程度,缓解了活性氧自由基积累和膜脂过氧化。但 CAT 活力变化小于 POD 活力变化,在 A15F1P0.2 处理下,白茶和智仁早茶的 CAT 活性分别上升为对照的 41.3% 和 24.9%,其次为单 Al 处理,单 F 处理活性最小。P 浓度为 1.0 mmol/L 时,白茶和智仁早茶茶叶的 CAT 活性在 A10F1 处理下降到最低,分别降为对照的 32.2% 和 27.6%;同时明显看出, 0.2 mmol/L P 对白茶 CAT 活性的影响比较显著

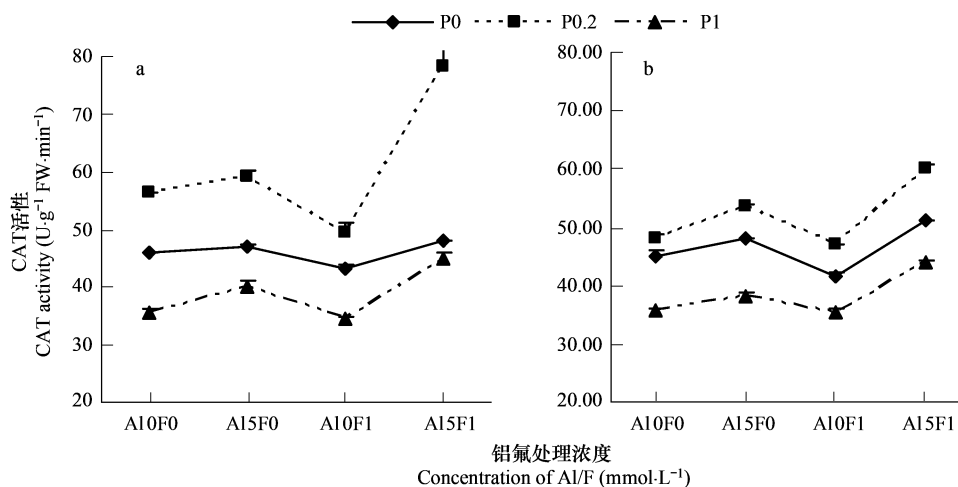


图 6 磷对铝氟交互处理下白茶(a)和智仁早茶(b)CAT 活性的影响

Fig. 6 Effects of phosphate on CAT of baicha (a) and zhirenzaocha(b) under Al and F interactions

($p < 0.05$)。

3 讨论

前人认为^[30],在多种逆境(干旱、盐分、污染物等)胁迫下,植物体内正常的蛋白质合成常会受到抑制,但是往往会有一些被诱导出的新蛋白出现或原有蛋白质含量的明显增加。本研究表明,施入 0.2 mmol/L P,茶树中的蛋白质均比无 P 组高,在 Al0F0 处最大,该磷浓度可能促进可溶性蛋白质增加,为茶树生长发育提供物质和能量,茶多酚呈现相似的趋势,在 Al5F1 为最大值;叶绿素能够在一定的程度上保护了叶绿体和细胞膜结构的完整,同时为茶叶增添色泽,实验结果中智仁早茶的叶绿素含量与无 P 组相近,而白茶的叶绿素含量却有所提高,体现了品种间的差异。无 P 添加的情况下,茶树在 Al-F 交互处理组中的蛋白质、叶绿素和茶多酚含量均比单 Al 和单 F 处理高,从侧面反映 Al 进入液泡后与 F 形成稳定的 Al-F 络合物,从而减轻 Al 的毒害作用^[31];随着 P 浓度增加(1.0 mmol/L),各个处理中蛋白质、叶绿素和茶多酚含量绝大部分低于对照,除了茶多酚含量在 Al5F1 处理下比对照高,茶多酚是茶叶中的重要活性物质,是茶汤滋味浓度和汤色的决定因素,从而进一步证实 Al 可以改善红茶汤色和滋味^[32]。

磷效率植物感受到环境磷胁迫信号,会诱导体内产生一系列抗氧化酶反应。SOD 在活性氧的酶促清除系统中处于核心地位,它首先催化超氧阴离子歧化成 H_2O_2 和 O_2 , H_2O_2 在 CAT 酶的催化下进一步分解成 H_2O 和 O_2 , POD 酶不但可以清除 H_2O_2 , 而且使脂质的过氧化物转变成正常的脂肪酸^[33]。本试验结果表明:茶树的 SOD、POD 和 CAT 活性顺序均表现为以下规律: P (0.2 mmol/L) > P (0 mmol/L) > P (1 mmol/L), 外施加 0.2 mmol/L 磷处理,各个处理下茶叶 SOD、POD 和 CAT 活性呈现上升趋势,这与对水稻和小麦研究结果一致^[33];而浓度超过一定阈值则对茶叶生长不利,表明适量的 P 浓度使茶树保持着较高的 CAT 和 POD 活性,增强活性氧清除系统的活性,从而减少剧毒性和高活性的 $\cdot OH$ 的形成,有效阻止 $O_2^{\cdot -}$ 和 H_2O_2 的积累。此外,比较 3 种保护酶在同等的逆境胁迫下,敏感度为 POD > SOD > CAT。值得注意,茶树的 POD 和 CAT 活性在 Al-F 交互处理下达到最高值,而 SOD 活性在单 F 处理时升到最大值,说明 Al-F 交互作用缓解其本身毒性,茶树可以依靠 CAT 和 POD 清除 H_2O_2 , 限制自由基对膜脂过氧化的启动。

近年来,从植物营养性状的遗传改良入手,通过挖掘磷素高效利用植物,筛选能活化吸收土壤固定态磷的高效利用植物基因,对于充分挖掘我国南方地区土壤的储备态磷和缓解土壤磷素不足的矛盾具有重要现实意义。根据 Gshoonia 和 Nieslen^[34]的观点,如果一个基因型能从土壤中活化吸收更多的磷以及能更充分利用所吸收的磷而产出高于标准基因型的生物量,就说明该基因型比其他基因型对磷更有效。本试验中,磷对两个品种茶树的影响通过其生理生化特征呈现出来,在外源 P 的施加下,智仁早茶的可溶性蛋白、茶多酚和叶绿素含量及 SOD、POD 和 CAT 活性均比白茶的变化幅度大,因此,可以推断,这两品种间存在基因差异。

Reference:

- [1] Chen W R, Liu P, Huang C B, *et al.* Effects of aluminum on influx and translocation of aluminum and other essential elements in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (3): 174 – 176.
- [2] Karina B, Balestrasse, Susana M. Aluminium stress affects nitrogen fixation and assimilation in soybean (*Glycine max* L.). *Plant Growth Regulation*, 2006, 48: 271 – 281.
- [3] Larsen P B, Stenzler L M, Tai C Y, *et al.* Molecular and physiological analysis of Arabidopsis mutant exhibiting altered sensitivities to aluminum. *Plant and soil*, 1997, 192: 3 – 7.
- [4] Ma J F, Furukawa J. Recent progress in the research of external Al detoxification in high plants aminireview. *Journal Inorg Biochem*, 2003, 97: 46 – 51.
- [5] Yang Y J, Guo L Q, Yang C W, *et al.* Physiologic mechanism of aluminum tolerance in plants. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(2): 319 – 325.
- [6] Jian Y R, Ming H W. Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant. *Environmental Geochemistry and Health*, 2001, 23: 53 – 63.
- [7] Zhu M X, Xie M, Jiang X. Interaction of fluoride with hydroxyaluminum-montmorillonite complexes and implications for fluoride-contaminated

- acidic soils. *Applied Geochemistry*, 2006, 21: 675—683
- [8] Shen H, Yan X L. Exudation and accumulation of organic acids in the roots of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in response to low phosphorus and aluminum toxicity stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 388—394.
- [9] Mugwira L M, Haque I. Screening forage and browse legumes germplasm to nutrient stresses III: tolerance of sesbania to aluminum and low phosphorus in soil and nutrient solution. *Journal Plant Nutrient*, 1993, 16(1): 51—66.
- [10] Guo C J, Li B X, Wang B, *et al.* Physiological mechanisms of absorption and use of phosphorus with high efficiency in wheat cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(6): 827—832.
- [11] Shin E W, Han J S, Jang M, *et al.* Phosphate adsorption on aluminum-impregnated mesoporous silicates: Surface structure and behavior of adsorbents. *Environment Science Technology*, 2004, 38: 912—917.
- [12] Wong M H, Fung K F. Effects of soil pH on the uptake of Al, F and other elements by tea plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2001, 82: 146—152.
- [13] Harrington L F, Cooper E M, Vasudevan D. Fluoride sorption and associated aluminum release in variable charge soils. *Journal Colloid Interface Sci*, 2003, 267(2): 302—313.
- [14] Moonre C S, Ritchie G S P. Aluminum speciation and pH of an acid soil in the presence of fluoride. *Journal Soil Sci*, 1988, 39(1): 1—8.
- [15] Michael P W, Kevan E, Francis H G, *et al.* Skeletal fluorosis and instant tea. *The American Journal of Medicine*, 2005, 118: 78—82.
- [16] Ding R X, Huang X. Biogeochemical cycle aluminum and fluoride in tea garden soil system and its relationship to soil acidification. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(3): 229—236.
- [17] Akio M, Hideki H, Yousuke F, *et al.* Chemical forms of aluminum in xylem sap of tea plants (*Camellia sinensis* L.). *Phytochemistry*, 2004, 65: 2775—2780.
- [18] Li H S, Zhang Z Q. The absorption and accumulation of aluminum and mineral nutrient in tea (*Camellia sinensis* L.) under different Al levels. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 186—190.
- [19] Talahashi T, Ikeda Y, Fujita K, *et al.* Effect of liming on organically complexed aluminum of monallopahic Andosols from northeastern Japan. *Geoderma*, 2005: 1—9.
- [20] Yang L Y, Xia J G, Wu D Y *et al.* Effect of aluminum application on mengshan tea quality in Western Sichuan. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(20): 6154—6156.
- [21] Zhu M X, Jiang X, He W X, *et al.* Study on characteristics and mechanisms of interaction between selected soils and fluoride-bearing acidic solutions. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4): 466—469.
- [22] Li H S. In principle and technique for plant physiology biochemistry. Beijing: Higher Education Press, 2000. 182—184.
- [23] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts; polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 1949, 24: 1—15.
- [24] Zhong L. Analysis of tea quality. Shanghai: Science and Technology Press, 1989. 87—88.
- [25] Li C S, Liu P, Xu G D. Effect of seed soaking with aluminum on seed germination and seedling physiology of buckwheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 2042—2047.
- [26] Zhang Z X. Measure of crop's physiological research. Beijing: Agricultural Press, 1992.
- [27] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiology*, 1992, 98: 1222—1227.
- [28] Zhang X F, Gong J S, Zhou H J, *et al.* Study on relationship between polyphenols and quality of Yunnan Pu-erh Tea. *Food Science*, 2008, 29(4): 230—233.
- [29] Long X H, Liu Z P, Xu W J. Effects of seawater treatments on the physiological and biochemical characteristics of *Helianthus tuberosus* seedlings and response to phosphorus supply. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 307—313.
- [30] Li N Y, Gao J F, Wang P H. The characteristics of induced protein in shoots of wheat seedlings under water stress. *Acta Photophysiological Sinica*, 1998, 1: 66—71.
- [31] Huang J, Kong G H, Xia H P. Aluminum toxicity and its relationship with organic acids and phosphorus. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, 11(4): 498—503.
- [32] Zheng W W, Liu P, Xu G D, *et al.* Effect of aluminum on quality of tea plant. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 822—826.
- [33] Wang H Z, Ma J, Li X Y, *et al.* Relationship between some physiological and biochemical characteristics and drought tolerance at rice flowering stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(2): 399—404.
- [34] Gahoonia T S, Nielsen N E. Variation in acquisition of soil among wheat and barley genotypes. *Plant and Soil*, 1996, 178: 223—230.

参考文献:

- [1] 陈文荣, 刘鹏, 黄朝表, 等. Al 对荞麦 Al 和其它营养元素运输的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 174—176.

- [5] 杨亚军, 郭立泉, 杨春武, 等. 植物耐 Al 的生理机制. 植物生理学通讯, 2006, 42(2): 319 ~ 325.
- [8] 沈宏, 严小龙. 低磷和 Al 毒胁迫条件下菜豆有机酸的分泌与累积. 生态学报, 2002, 22(3): 388 ~ 394.
- [10] 郭程瑾, 李宾兴, 王斌, 等. 小麦高效吸收和利用磷素的生理机制. 作物学报, 2006, 32(6): 827 ~ 832.
- [18] 李海生, 张志权. 不同 Al 水平下茶对 Al 及矿质养分的吸收与累积. 生态环境, 2007, 16(1): 186 ~ 190.
- [20] 杨凌云, 夏建国, 吴德勇. 施 Al 对川西蒙山茶叶品质的影响. 安徽农业科学, 2007, 35(20): 6154 ~ 6156.
- [21] 朱茂旭, 蒋新, 和文祥, 等. 土壤与酸性含氟溶液相互作用特征及机理研究. 环境科学学报, 2001, 21(4): 466 ~ 469.
- [22] 李合生, 主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000. 182 ~ 184.
- [24] 钟萝. 茶叶品质理化分析. 上海: 科技出版社, 1989. 87 ~ 88.
- [25] 李朝苏, 刘鹏, 徐根娣. Al 浸种对芥麦种子萌发和幼苗生理的影响. 生态学报, 2006, 26(6): 2042 ~ 2047.
- [26] 张宪政. 作物生理研究法. 北京: 农业出版社, 1992.
- [28] 张新富, 龚加顺, 周红杰, 等. 云南普洱茶中多酚类物质与品质的关系研究. 食品科学, 2008, 29(4): 230 ~ 233.
- [29] 隆小华, 刘兆普, 徐文君. 海水处理下菊芋幼苗生理生化特性及磷效应的研究. 植物生态学报, 2006, 30(2): 307 ~ 313.
- [30] 李妮亚, 高俊凤, 汪沛洪. 小麦幼芽水分胁迫诱导蛋白的特征. 植物生理学报, 1998, 1: 66 ~ 71.
- [31] 黄娟, 孔国辉, 夏汉平. Al 毒与有机酸和磷的关系. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 498 ~ 503.
- [32] 郑伟伟, 刘鹏, 徐根娣, 等. Al 对茶叶叶片主要化学成分的影响. 生态环境, 2006, 15(4): 822 ~ 826.
- [33] 王贺正, 马 均, 李旭毅, 等. 水稻开花期一些生理生化特性与品种抗旱性的关系. 中国农业科学, 2007, 40(2): 399 ~ 404.