

外源钙对镉胁迫下茶苗的缓解作用及茶叶品质的影响

杨 训¹, 耿 耿¹, 马儒泉¹, 张 千¹, 刘小红¹, 曹德菊^{1*}, 宛晓春^{2*}

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 茶树生物学与资源利用国家重点实验室, 合肥 230036)

摘 要: 通过土培实验, 研究茶苗镉胁迫下施加不同浓度外源钙, 对茶叶的过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和丙二醛 (MDA) 等生理指标及茶多酚、氨基酸和可溶性糖等茶叶品质指标的影响。结果表明, 5.0 mg·kg⁻¹ 的镉胁迫下, 茶叶的 CAT、POD 等防御酶指标均显著提高, MDA 含量上升, 茶多酚、氨基酸、可溶性糖等茶叶品质指标下降。当施加外源钙时, 镉胁迫下的茶苗 CAT、POD 和 MDA 出现了一定程度下降趋势, 茶叶的茶多酚、氨基酸和可溶性糖各项品质指标均得到提高, 表明了外源钙可以缓解镉胁迫对茶苗产生的毒害作用, 并改善茶叶品质。特别是施加 50.0 mg·kg⁻¹ 的外源钙对防御酶系统的调节效果最好, 其 CAT、POD 较无外源钙添加的 5.0 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下的茶苗下降了 58.25% 和 80.76%, MDA 下降 15.25%。另外, 外源钙添加, 使 5.0 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下茶叶品质得以改善, 当添加 50.0 mg·kg⁻¹ 的外源钙时, 茶多酚含量上升 97.44%、氨基酸提高 32.69%, 但对可溶性糖含量没有显著影响。100.0 mg·kg⁻¹ 的外源钙对镉毒害也有较好的缓解作用并能提高茶叶品质, 其 CAT、POD 和 MDA 相比较无外源钙添加的 5.0 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下的茶苗分别下降了 58.83%、61.54% 和 32.82%; 茶多酚含量上升 97.43%, 氨基酸含量上升 7.69%, 可溶性糖含量上升 22.35%。随着外源钙浓度升高, 其缓解镉胁迫的能力下降, 当外源钙施加量超过 150.0 mg·kg⁻¹, 不能缓解镉胁迫茶苗的毒性。

关键词: Cd 胁迫; 外源 Ca; CAT; POD; MDA; 茶叶品质

中图分类号: S571.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)06-0953-06

Effects of exogenous calcium on the growth of tea seedling and the quality of tea under cadmium stress

YANG Xun¹, GENG Geng¹, MA Ruxiao¹, ZHANG Qian¹, LIU Xiaohong¹, CAO Deju¹, WAN Xiaochun²

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Hefei 230036)

Abstract: We investigated the effects of different concentrations of exogenous calcium on the physical signs of tea plants, including peroxidase(POD), catalase(CAT), malondialdehyde(MDA), as well as the quality of tea such as tea polyphenols, amino acids, soluble sugar in tea with pot experiment under cadmium stress. The results showed that under cadmium stress of 5.0 mg·kg⁻¹, the antioxidative defense system of tea including CAT and POD were significantly improved, MDA content increased, while tea polyphenols, amino acids and soluble sugar were declined. When we applied exogenous calcium, CAT, POD and MDA under cadmium stress of tea seedling appeared a certain degree of decline; tea polyphenols, amino acids and soluble sugar in tea were improved, which indicated that exogenous calcium could alleviate the toxicity of cadmium stress on tea seedlings and improve the quality of tea. Especially, when exogenous calcium concentration reached to 50.0 mg·kg⁻¹, the effect of the regulation of the defense enzyme system got best. CAT and POD decreased 58.25% and 80.76%, respectively, and MDA also decreased by 15.25% when 50.0 mg·kg⁻¹ exogenous calcium was added under 5.0 mg·kg⁻¹ Cd stress. In addition, the quality of tea was improved under 5.0 mg·kg⁻¹ Cd stress with adding exogenous calcium. With 50.0 mg·kg⁻¹ exogenous calcium, tea polyphenols and amino contents increased by 97.44% and 32.69%, respectively, but which had no significant influence on the soluble sugar content. 100.0 mg·kg⁻¹ exogenous calcium could also give a relief to cadmium poisoning better and improve the quality tea. The CAT, POD and MDA fell by 58.83%,

收稿日期: 2017-06-23

基金项目: 茶树生物学与资源利用国家重点实验室开放基金项目 (SKLTOF20150104) 资助。

作者简介: 杨 训, 硕士研究生。E-mail: yangxun0206@163.com

* 通信作者: 曹德菊, 教授。E-mail: cdj@ahau.edu.cn; 宛晓春, 教授, 博士生导师。E-mail: xcwan@ahau.edu.cn

61.54% and 32.82%, respectively. The contents of tea polyphenols, amino acids and soluble sugar increased by 97.43%, 7.69% and 22.35%, correspondingly. As the exogenous calcium concentration increased, its ability to alleviate cadmium dropped. If the concentration of exogenous calcium exceeded $150.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the exogenous calcium could not alleviate the toxicity of tea seedling caused by cadmium stresses.

Key words: Cd stress; exogenous calcium; CAT; POD; MDA; tea quality

镉 (Cd) 是毒害最高的重金属污染物之一, 有着极强且不可逆转的积累趋势^[1]。镉污染是造成环境问题和限制农作物增长和产量增加的最严重的非生物胁迫因素之一^[2]。目前, Cd 污染土壤在世界范围内广泛存在并日趋严重。Cd 被植物根系吸收, 通过食物链放大, 对人类健康造成威胁^[3]。植物镉中毒一般会诱发生活性氧 (ROS), 可能会导致细胞膜的裂解或者破坏细胞器官和生物分子^[4-5]。同时 Cd 还会与 Fe、Mn、Zn 和 Ca 等的运输相竞争, 减少植物对这些微量元素的吸收^[6]。钙 (Ca) 是植物必需的营养元素, 对于植物细胞壁和细胞膜的稳定、体内酶的调控和阴阳离子的平衡等具有十分重要的作用^[7]。2005 年 Hepler 发现了钙是植物新陈代谢和生长发育的主要调控者^[8], 钙离子能通过镶嵌在细胞壁双脂质层的闸门, 调节细胞内外的钙离子浓度, 完成生理功能。它可与镉竞争植物根系上的吸收位点, 增施钙可减弱植物受镉胁迫的程度^[9-10]。20 世纪 80 年代, Mukherjee 和 Choudhuri^[11]最先研究发现, 钙能增强植物的抗旱及其他抗逆性, 该研究对于外源钙缓解镉毒害有着基础性指导价值。2016 年, 龚晓敏等^[12]首次提出了外源钙对镉胁迫下苎麻生长及生理代谢的影响, 细致地阐述了不同钙浓度对镉毒害的缓解效果, 为植物在重金属胁迫下外源钙对植物的解毒机理提供依据。Taspinar 等^[13]首次从基因多态性和基因模版稳定性角度探究施钙对镉胁迫下蚕豆幼苗的影响, 并表明添加钙离子后能缓解蚕豆幼苗镉胁迫, 基因多态性值下降, 基因模版稳定性、总蛋白量和总叶绿素含量上升, 是对于增施钙可减弱植物受镉胁迫的程度的有力证明。

茶叶是国内外极受欢迎的饮品之一, 茶园土壤镉污染问题也日益引起人们的关注。我国农业标准 NY 659-2003 规定^[14]茶叶中铬 $\leq 5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 镉 ≤ 1

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 砷 $\leq 2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 汞 $\leq 0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤中积累的镉及施肥的影响是重要因素, 我国磷肥中重金属镉元素含量为 0.98%, 相对还比较低^[15]。镉含量过高, 在一定程度上增加了土壤环境中重金属镉的含量^[16]。已有研究表明, 外源钙可有效缓解镉对多种作物的毒害作用^[12-13], 然而外源钙的施入对茶树生长及品质的研究国内外尚未见报道。本研究采用盆栽实验, 研究外源钙施入对茶叶的过氧化氢酶、过氧化物酶及二醛等的影响。另外, 研究其对茶叶茶多酚、氨基酸及可溶性糖含量产生的影响, 探讨钙在缓解茶树幼苗镉毒中的作用, 为进一步探明外源钙对茶树吸收镉的阻控及其解毒机理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试茶苗种子: 舒茶早 (*Camellia. sinensis* cv. "Shuchazao") 种子由安徽农业大学大杨店茶叶实训基地提供。

供试土壤源于安徽农业大学农萃园 (0~15 cm) ($31^{\circ}50'N$, $117^{\circ}15'E$)。其理化指标^[17]有机质、全氮、有效磷、交换性钾和全镉含量分别为 $31.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $2.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $24.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.610 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.204 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 为 7.41。土样经过自然风干、磨碎、过 100 目筛和混匀后待盆栽实验使用。

1.2 试验方法

茶苗培养: 舒茶早种子用 NaClO 进行表面消毒 10 min, 用蒸馏水浸泡种子直至坚硬的外壳裂开并发芽, 将发芽的种子栽培到 $30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的塑料盆中, 浇灌小西茂毅茶树培养液^[18]于恒温人工气候箱中培养数月至长成幼苗, 选择高度 15 cm 左右, 且生长状况良好的茶苗进行实验。

表 1 试验设计

Table 1 The design of experiment

组别 Group	CK	Cd	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Cd ²⁺ 浓度 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0	5	5	5	5	5	5	5	5
Ca ²⁺ 浓度 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0	0	5	10	50	100	150	250	500

试验设计: 试验设计见表 1, 采用 3 L 塑料桶, 每只桶装风干土样 2.0 kg, 分别以硝酸镉和氯化钙

为镉源和钙源, 加入含镉 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的小西茂毅溶液, 添加不同外源钙 2 L 溶液, 搅匀后在室温下平

衡 1 d。之后均匀栽种 10 株茶苗。每个处理设 3 个重复。于光照培养箱(型号 RGL-P1000A)中培养, 培养条件: 白日温度 25℃, 黑夜温度 20℃, 相对湿度为 65%, 光照强度 12 000 lx, 光暗比为 12 h:12 h。期间用去离子水进行浇灌, 培养 30 d。

1.3 茶叶生理指标的测定

过氧化物酶(POD)与过氧化氢酶(CTA)活性测定分别采用愈创木酚法和紫外分光光度法^[19], 取 1 g 叶尖新鲜叶片, 用去离子水洗净后置于预冷的石英研钵中, 加入 1.5 mL 预冷的 0.05 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲液(pH 7.8)研磨成匀浆, 移入离心管在 4℃, 12 000 g 条件下离心 20 min, 上清液即为酶提取液, 用于后续测定。

丙二醛的测定采用硫代巴比妥酸法^[20], 取 1 g 第二或三叶新鲜叶片, 用去离子水洗净后置于石英研钵中, 加入 5 mL 0.05 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲液(pH 7.8)研磨成匀浆, 离心(4 500 r·min⁻¹, 10 min)后提取上清液; 将 3 mL 0.5% 的硫代巴比妥酸加入到 2 mL 上清液中混匀, 15 min 的沸水浴加热后冷却再离心(4 500 r·min⁻¹, 10 min), 取上清液测定。

1.4 茶叶品质指标的测定

茶多酚的测定—GB/T8313-2008 酒石酸铁比色法^[21], 氨基酸总量的测定—GB/T8314-2013 茚三酮比色法^[22], 可溶性糖的测定—GB/T8312-2013 蒽酮比色法^[23]。

1.5 统计分析

采用 SPSS18.0 和 OriginPro8.5.0 软件来进行数据分析, 用单因子方差分析(ANOVA)及 Duncan 检验法($P < 0.05$)来研究指标间的差异。

2 结果与分析

2.1 镉对茶树幼苗保护酶系统和 MDA 的影响及外源钙的缓解作用

2.1.1 对过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性的影响 如图 1 与图 2 所示, 茶苗在 5.0 mg·kg⁻¹ 的镉处理条件下, 茶苗 CAT 和 POD 均显著增加。说明镉胁迫会对茶苗产生毒害作用, 刺激茶苗体内的防御酶系统使得 CAT、POD 活性酶指标上升, 这与汪洪等^[24]的研究结果一致。当加入外源钙时镉胁迫下的茶苗 CAT、POD 可显著下降到空白对照水平, 其中 5、10、50 和 100 mg·kg⁻¹ 的施钙处理处理分别使 CAT 较 Cd 处理下降了 48.47%、53.58%、58.25% 和 58.83%, 使 POD 较 Cd 处理下降了 57.69%、50.00%、80.76% 和 61.54%。这说明添加外源钙浓度在 100.0 mg·kg⁻¹ 以下明显改善镉对茶苗

的毒害。EL-Beltagi 和 Mohamed^[25]以及 Suzuki^[9]的研究表明, Ca²⁺和 Cd²⁺具有相似的离子半径及化学性质, 能够同时被植物根系吸收, 在进入根表皮细胞时存在竞争关系, 故钙能减弱镉对植物的毒害程度。但当外源钙浓度达到 150.0 mg·kg⁻¹ 时, CAT 和 POD 均有上升趋势, 表明随着钙浓度的继续提升已经对茶苗产生了一定的抑制作用。而 CAT 和 POD 在 250 和 500 mg·kg⁻¹ 施钙处理下又有很大的降低, 这有可能是过高浓度的钙对茶苗产生毒害作用破坏了植物体内抗氧化系统。李贺^[26]在研究钙对大蒜的生理影响中表明高浓度的钙对大蒜有不利的影响, 使得 CAT 和 POD 等防御酶活性降低。

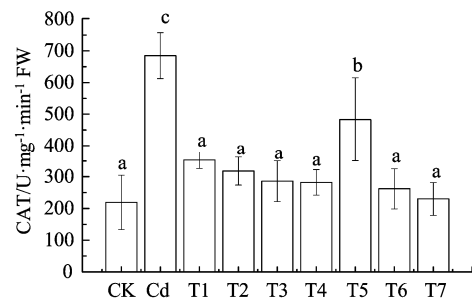


图 1 镉胁迫及外源钙对茶树幼苗叶片 CAT 活性的影响

Figure 1 Activities of CAT in fresh tea leaves as affected by cadmium stress and Ca²⁺ treatment in tea seedlings

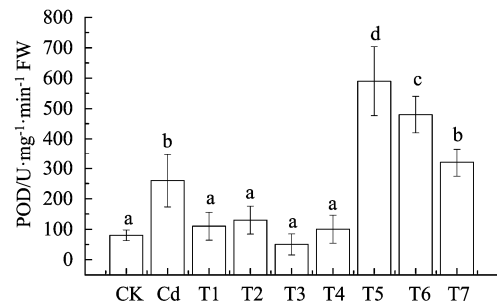


图 2 镉胁迫及外源钙对茶树幼苗鲜叶 POD 活性的影响

Figure 2 Activities of POD in fresh tea leaves as affected by cadmium stress and Ca²⁺ treatment in tea seedlings

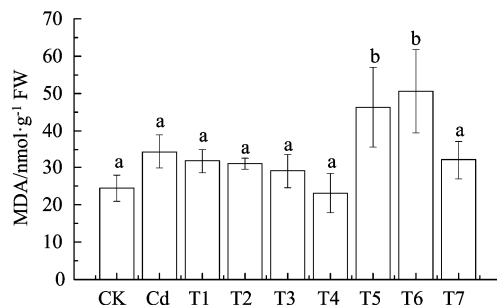


图 3 镉胁迫及外源钙对茶树幼苗 MDA 含量

Figure 3 Contents of MDA in fresh tea leaves as affected by cadmium stress and Ca²⁺ treatment in tea seedlings

2.1.2 丙二醛(MDA)含量的影响 MDA 是膜脂过氧化最重要的产物之一, 它的产生还能加剧膜的损

伤，一般可通过 MDA 了解膜脂氧化的程度，以间接测定膜系统受损程度以及植物的抗逆性。从图 3 中可以看出 Cd 处理提高了茶苗的 MDA 含量，外源钙的加入使得镉胁迫下茶苗中的 MDA 含量呈下降趋势，并在 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施钙处理下 MDA 含量最为接近正常生长下的茶苗状态，表明 $100.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度的外源钙最有利于茶树缓解由镉毒害造成的膜脂过氧化损伤。而钙浓度在 $150.0\sim 500.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，MDA 有显著上升，植物膜脂化程度较高，这与 Tian 等^[27]的研究结果相类似。说明了低浓度的外源钙对重金属胁迫有缓解作用，茶苗受到的镉毒害较少，膜脂过氧化程度降低，而高浓度的外源钙仍表现出毒害效果增加植物的膜脂过氧化程度。龚小敏等^[12]探究外源钙对镉胁迫下对作物的影响中也发现了相似的规律。

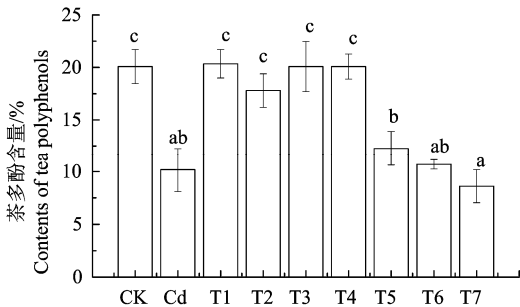


图 4 镉胁迫及外源钙对茶树幼苗茶多酚含量

Figure 4 Contents of tea polyphenols as affected by cadmium stress and Ca^{2+} treatment in tea seedlings

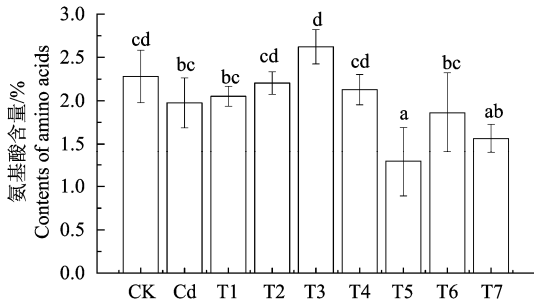


图 5 镉胁迫及外源钙对茶树幼苗氨基酸含量

Figure 5 Contents of amino acids as affected by cadmium stress and Ca^{2+} treatment in tea seedlings

2.2 镉对茶鲜叶品质的影响及外源钙的改善作用

2.2.1 对茶鲜叶茶多酚含量的影响 由图 4 可知，在 $5.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下茶叶中茶多酚含量较正常生长的茶苗有显著下降，减少至空白对照水平的 50.65%。而施加外源钙后，茶多酚含量有较为明显的改善，其中 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施钙处理使得茶多酚较 Cd 处理提高了 74.87%，施钙浓度在 5、50 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 均使茶多酚含量较 Cd 处理有显著的提升并且已

经增加到空白对照水平。茶多酚具有抗氧化、抗衰老、防辐射和助消化等多种保健功能而被认作为茶叶的一项重要品质指标，它具有较强的抗氧化活性并能降低机体脂质过氧化程度^[28]，而镉毒害会诱导植物产生活性氧，所以在镉胁迫下茶多酚可能会因为在发挥抗氧化活性的作用时而分解，导致茶叶的茶多酚含量的减少而破坏了茶叶的品质。茶树鲜叶中茶多酚的主要由儿茶素类、黄酮类化合物、花青素和酚酸组成，冯德建^[29]在研究铅镉及其复合污染对茶树影响中指出镉污染会减少茶叶中儿茶素含量，即会降低茶叶的品质。加入 $5\sim 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度的外源钙使得茶多酚含量上升，表明适量的钙对镉胁迫下茶叶的品质有改良作用。这可能是因为该浓度范围的钙处理下缓解了镉胁迫诱发的活性氧对植物造成的损害，从而使得茶多酚含量得以积累。而在钙浓度为 $150\sim 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，茶多酚含量随着钙浓度的增加而减少，因此过高浓度的钙仍表现为降低茶叶的品质。

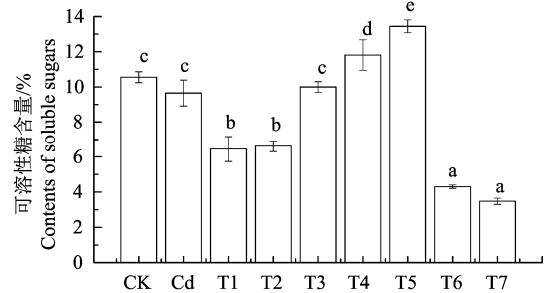


图 6 镉胁迫及外源钙下茶树幼苗可溶性糖含量

Figure 6 Contents of soluble sugar as affected by cadmium stress and Ca^{2+} treatment in tea seedlings

2.2.2 对茶鲜叶氨基酸含量的影响 氨基酸不仅是茶叶中主要的呈鲜和呈香的物质，也是一个重要的营养指标，其在茶叶的品质中也有着颇为重要的地位。从图 5 中可看出，镉毒害会使茶叶中氨基酸含量降低，相较正常生长下的茶苗减少了 13.33%，这在很大程度影响了茶叶营养价值，表明镉处理对茶树的毒害降低了茶叶的品质。石值元等^[30]的研究中也发现一定镉胁迫会使茶叶中氨基酸含量降低，从而使茶叶品质下降。而施钙处理使镉胁迫的茶叶氨基酸含量呈上升趋势，5、10、50 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的施钙处理分别使氨基酸含量提升 3.85%、11.54%、32.69% 和 7.69%，表明钙处理能减轻镉毒害对茶树的影响，增加茶叶中氨基酸的含量。其中在 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施钙处理时达到峰值，其含量高出 CK 水平的 14.91%，对茶叶品质有显著改善，这可能是因为钙作为植物新陈代谢和生长发育的主要调控者^[8]，

它在处于逆境的植物中发挥了重要的调节改善作用。随着钙浓度的继续增加, 氨基酸含量开始下降, 在钙浓度超过 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后其氨基酸含量均低于 CK 水平。这与李贺^[26]的研究结果一致, 过高浓度的外源钙会使得植物中的氨基酸下降。

2.2.3 对茶鲜叶可溶性糖含量的影响 可溶性糖除了在茶叶品质中发挥甜味削弱茶汤的苦味与涩味, 掩盖杂味, 使汤味甘醇、汤体黏稠外, 同时它也是参与细胞渗透调节的主要物质之一, 糖的积累能提高细胞渗透浓度, 在植物抗性的维持中具有重要作用。如图 6 所示, Cd 处理使得可溶性糖的含量降低 8.51%, 李荣春^[31]在烟叶上的实验也有相似的结果, 他认为烟叶可溶性糖含量对 Cd 污染非常敏感, 在较低污染浓度下其含量就有明显的下降。本实验

中施钙处理对可溶性糖含量有显著的提升作用。在 100 和 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施钙处理下分别使可溶性糖含量相较 Cd 处理提升 22.35% 和 39.28%。表明镉胁迫下施钙处理可以提高可溶性糖的含量从而提高植物抗性, 这与石贵玉等^[32]研究结果较为相似。不过本实验中可溶性糖含量随镉、钙的加入变化更为复杂, 镉胁迫下的茶苗加入低浓度的钙离子 ($5\sim 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 时其可溶性糖较含量 Cd 处理显著减少, 当施钙处理浓度达到 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量与 Cd 处理较为接近。当钙离子浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量有很大的上升趋势; 但当钙离子浓度超过 $250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量又急剧显著减少。其中机理有待进一步研究。

表 2 生理指标及品质影响的相关性

Table 2 Relationship between physical signs and the quality of tea

项目 Item	处理浓度 Treatment concentration	POD	CAT	MDA	茶多酚 Tea polyphenols	氨基酸 Amino acids	可溶性糖 Soluble sugar
处理浓度 Treatment concentration	1	0.45372*	-0.43734*	0.21696	-0.48592*	-0.61521**	-0.49673*
POD		1	0.26438	0.66210**	-0.77463**	-0.67058**	0.00849
CAT			1	0.04537	-0.23207	-0.23879	0.41814*
MDA				1	-0.38813	-0.54993**	-0.11506
茶多酚 Tea polyphenols					1	0.56487**	-0.00313
氨基酸 Amino acids						1	0.29408
可溶性糖 Soluble sugar							1

注: *、**分别为 0.05 及 0.01 水平上的显著性差异。

Note: “*” and “**” refer to the different significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.3 外源钙对镉胁迫下茶苗生理指标与品质指标的关联分析

不同外源钙添加对茶苗镉胁迫下防御酶系统、MDA 及品质相关指标的关联分析结果(表 2)显示: 施钙浓度与茶叶 POD 成显著正相关 ($P<0.05$); 与 CAT、茶多酚、可溶性糖含量成显著负相关 ($P<0.05$); 与氨基酸含量成极显著负相关 ($P<0.01$)。这表明高浓度的施钙处理对茶苗的毒害影响较低浓度施钙处理对茶苗的改善效果更为显著, 因此施钙浓度要严格控制在 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理水平以下才能起到缓解茶苗在镉胁迫下的毒害作用。茶叶 POD 含量与 MDA 成极显著正相关 ($P<0.01$), 与茶多酚、氨基酸成极显著负相关 ($P<0.01$)。MDA 与氨基酸成极显著负相关 ($P<0.01$), 茶多酚与氨基酸成极显著正相关 ($P<0.01$)。说明茶叶的茶多酚和氨基酸与茶树生理指标有负相关关系, 施钙处理对镉胁迫下茶苗生理指标的改善有助于茶叶品质的提升。而可溶性糖含量与 CAT 成显著正相关 ($P<$

0.05), 说明在逆境中可溶性糖由于参与渗透压的调节, 其含量一定程度反映茶树抗逆程度, 但由于本实验中镉、钙对可溶性糖影响的复杂性, 其具体机理有待进一步探究。

3 结论

$5.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的镉处理对茶苗有明显的毒害作用, 显著提高了茶苗的 CAT、POD 活性和 MDA 含量, 同时茶叶品质也会受到影响, 其茶多酚下降 49.35%, 氨基酸含量下降 13.33%, 可溶性糖含量下降 8.51%。

添加外源钙时, 可以有效缓解镉对茶苗的毒害。5、10、50 和 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源钙浓度均可发挥缓解镉毒害的作用, 其中 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源钙处理对茶苗 CAT 和 POD 活性的降低最为显著。100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源钙处理对茶苗 MDA 含量的减少效果最好。

添加外源钙对镉胁迫下茶苗的茶叶品质有明显的提升作用。施钙浓度在 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可使茶叶的

茶多酚和氨基酸含量相较 Cd 处理分别提高 97.44% 和 32.69%，但对可溶性糖的提升效果不明显。而 100 mg·kg⁻¹ 的施钙浓度对茶叶品质均有显著提升作用，分别使茶多酚、氨基酸和可溶性糖含量相较 Cd 处理提高了 97.43%、7.69% 和 22.35%。而 150 mg·kg⁻¹ 外源钙处理可使氨基酸和可溶性糖含量达到 CK 水平以上，但对其他指标有不利影响，仍主要表现为毒害作用。当外源浓度超过 150 mg·kg⁻¹，茶多酚、氨基酸和可溶性糖含量均显著减少，这可能是过量的钙并不能起到抑制镉毒害的作用或者钙浓度过高本身就会对植物造成细胞膜结构损伤和植株生长阻滞等损害。因此在一定的镉环境中，适量施钙能明显缓解茶树受镉胁迫的毒害，增强植株活性氧的清除能力和生物膜结构的稳定性以及提高茶叶的品质。

参考文献:

- [1] XIE C J, HU L J, YANG Y Z, et al. Accumulation and tolerance to cadmium heavy metal ions and induction of 14-3-3 gene expression in response to cadmium exposure in *Coprinus atramentarius* [J]. Microbiol Res, 2017, 196: 1-6.
- [2] HOWLADAR S M. A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants [J]. Ecotox Environ Safe, 2014, 100: 69-75.
- [3] 曹德菊, 杨训, 张千, 等. 重金属污染环境的微生物修复原理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 315-321.
- [4] ANJUM S A, TANVEER M, HUSSAIN S, et al. Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation[J]. Environ Sci Pollut R, 2015, 22(21): 17022-17030.
- [5] EKMEKCI Y, TANYOLAC D, AYHAN, B. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars [J]. Plant Physiol, 2008, 165: 600-611.
- [6] SARWAR N, ISHAQ W, FARID G, et al. Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition[J]. Ecotox Environ Safe, 2015, 122: 528-536.
- [7] CHOI Y E, HARADA E, WADA M, et al. Detoxification of cadmium in tobacco plants: formation and active excretion of crystals containing cadmium and calcium through trichomes[J]. Planta, 2001, 213(1): 45-50.
- [8] HEPLER P K. Calcium: a central regulator of plant growth and development[J]. Plant Cell, 2005, 17(8): 2142-2155.
- [9] SUZUKI N. Alleviation by calcium of cadmium-induced root growth inhibition in Arabidopsis seedlings[J]. Plant Biotechnol, 2005, 22(1): 19-25.
- [10] FARZADFAR S, ZARINKAMAR F, MODARRES-SANAVY S A M, et al. Exogenously applied calcium alleviates cadmium toxicity in *Matricaria chamomilla* L. plants[J]. Environ Sci Pollut, 2013, 20(3): 1413-1422.
- [11] MUKHERJEE S P, CHOUDHURI M A. Effect of water stress on some oxidative enzymes and senescence in *Vigna* seedlings[J]. Physiol Plantarum, 1981, 52(1): 37-42.
- [12] 龚小敏, 刘云国, 黄丹莲, 等. 外源钙对镉胁迫下苜蓿生长及生理代谢的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3866-3870.
- [13] TASPINAR M S, AGAR G, ALPSOY L, et al. The protective role of zinc and calcium in *Vicia faba* seedlings subjected to cadmium stress[J]. Toxicol Ind Health, 2011, 27(1): 73-80.
- [14] 中华人民共和国农业部. 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量: NY 659-2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [15] 胡留杰, 周正科. 茶叶中重金属的含量状况及其控制对策[J]. 南方农业, 2010(7): 89-92.
- [16] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.
- [17] XIE P P, DENG J W, ZHANG H M, et al. Effects of cadmium on bioaccumulation and biochemical stress response in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecotox Environ Safe, 2015, 122: 392-398.
- [18] 童启庆. 茶树栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006, 93-344.
- [19] 张雯. 硫硒交互对水稻幼苗镉累积和毒害的影响机制研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [20] 谢盼盼. 锌对镉胁迫下水稻生长及镉的迁移积累研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
- [21] 中华全国供销合作总社. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法: GB/T 8313-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [22] 中华全国供销合作总社. 茶游离氨基酸总量的测定: GB/T 8314-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [23] 中华全国供销合作总社. 茶 咖啡碱测定: GB/T 8312-2013. [S]. 北京: 中国标准出版社, 213.
- [24] 汪洪, 赵士诚, 夏文建, 等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用, 脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 36-42.
- [25] EL-BELTAGI H S, MOHAMED H I. Alleviation of cadmium toxicity in *Pisum sativum* L. seedlings by calcium chloride[J]. Not Bot Horti Agrobo, 2013, 41(1): 157-168.
- [26] 李贺. 钙对大蒜生理特性、产量与品质及缓解镉胁迫的影响效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [27] TIAN B, QIAO Z, ZHANG L, et al. Hydrogen sulfide and proline cooperate to alleviate cadmium stress in foxtail millet seedlings[J]. Plant Physiol Bioch, 2016, 109: 293-299.
- [28] 张晓梦, 倪艳, 李先荣. 茶多酚的药理作用研究进展 [J]. 药物评价研究, 2013(2): 157-160
- [29] 冯德建. 铅、镉及其复合污染对茶树生理生化及吸收积累特性的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [30] 石元值, 阮建云, 马立峰, 等. 茶树中镉, 砷元素的吸收累积特性[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 70-75.
- [31] 李荣春. Cd, Pb 及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 238-242.
- [32] 石贵玉, 李佳枚, 韦颖, 等. 钙对镉胁迫下生菜幼苗生长和生理的影响[J]. 浙江农业科学, 2010(4): 717-720.