

# 模拟酸雨和铝添加对茶树生长及生理生化特性的影响

段小华<sup>1,3</sup>, 胡小飞<sup>1</sup>, 邓泽元<sup>1,2\*</sup>, 陈伏生<sup>2</sup>, 鲁顺保<sup>3</sup>

(1. 南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047; 2. 南昌大学 高等研究院/生命科学与食品工程学院, 江西 南昌 330031; 3. 江西师范大学 生命科学学院/江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 江西 南昌 330022)

**摘要:** 以茶树(*Camellia sinensis*) 种子实生苗为材料, 研究了模拟酸雨和铝添加对茶树生物量、抗氧化酶及一些抗性指标的影响。结果表明, 适量的铝和适度的酸雨有利于茶树生物量的积累, 较高的铝和较高酸度酸雨不利于茶树生物量的积累。随着铝处理浓度的增加, 茶树叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)先增加后下降。随着酸雨强度的增加, SOD、POD、CAT和APX总体上增加, 在较低浓度铝处理下, 酸雨加剧SOD、POD、CAT和APX的增加, 在较高铝浓度(30 mg/L)处理下, 酸雨加剧SOD、POD、CAT和APX的下降。10 mg/L铝浓度处理茶树叶片超氧阴离子产生速率( $O_2^{\cdot-}$ )和丙二醛(MDA)含量与无铝处理的相比没有明显差异, 随着铝处理浓度的增加其 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和MDA含量增加。酸雨强度对茶树叶片 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和MDA含量没有明显影响。酸雨加剧铝引起茶树叶片 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和MDA积累的增加。随着铝处理浓度的增加, 茶树叶片脯氨酸含量增加。而酸雨单独作用对脯氨酸含量没有明显影响, 但酸雨加剧铝对茶树叶片脯氨酸积累的增加。随着铝处理浓度的增加, 茶树叶片可溶性糖含量先增加后下降。pH 3.0的酸雨明显提高茶树叶片可溶性糖含量。结果表明, 茶树可通过提高抗氧化酶活性和一些渗透调节物质(脯氨酸和可溶性糖)增强对酸雨和低浓度铝的适应性和耐受能力。高浓度的铝(30 mg/L)损伤茶树抗氧化系统, 减少一些抗性物质的合成, 影响其生长, 而酸雨加剧高铝对茶树的伤害。

**关键词:** 模拟酸雨; 铝; 生长; 生理生化; 茶树(*Camellia sinensis*)

中图分类号: Q949.758.4; X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)02-0304-07

## Effects of Simulated Acid Rain and Aluminum Addition on Growth and Physiological and Biochemical Characteristics of Tea Plants

DUAN Xiao-hua<sup>1,3</sup>, HU Xiao-fei<sup>1</sup>, DENG Ze-yuan<sup>1,2\*</sup>,  
CHEN Fu-sheng<sup>2</sup>, LU Shun-bao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 2. Institute for Advanced Study, College of Life Sciences and Food Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Jiangxi Subtropical Plant Resource Protection and Utilization Key Laboratory, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** The growth and resistant physiological characteristic effects of simulated acid rain and aluminum (Al) addition on tea plants (*Camellia sinensis*) were studied in a hydroponic experiment with three pH

收稿日期: 2011-10-12 修回日期: 2011-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(31060081)和中国博士后基金(20070421040)

作者简介: 段小华(1973—), 男, 讲师, 主要从事植物生理生态与环境污染研究, E-mail: dxh815@163.com; \* 通讯作者: 邓泽元, 教授, 博士生导师, 主要从事食品化学研究, E-mail: zeyuandeng@hotmail.com。

levels of 3.0, 4.0 and 5.0 and four aluminum degrees of 0, 10, 20 and 30 mg/L. The results showed that suitable Al and moderate acidity of acid rain were beneficial to the increase of biomass of tea plants, while higher Al and higher acidity of acid rain were harmful to the growth of tea plants. Superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) in tea leaves increased firstly and decreased later with increasing Al concentration and increased with increasing acidity of acid rain. At lower Al concentration, the increase of SOD, POD, CAT and APX caused by Al were intensified by acid rain. At higher Al concentration, the decrease of them were intensified by acid rain. The superoxide anion radical ( $O_2^{\cdot -}$ ) generation rate and malonaldehyde (MDA) content in tea leaves treated with 10 mg/L Al showed no difference compared with that without Al treatment, and then increased with increasing Al concentration.  $O_2^{\cdot -}$  generation rate and MDA content in tea leaves were not affected by acid rain and the increase of them caused by Al was intensified by acid rain at higher Al concentration. Proline content in tea leaves increased with increasing Al concentration and was not affected by acid rain. The accumulation of proline in tea leaves caused by Al was intensified by acid rain. The soluble sugar in tea leaves increased firstly and decreased later with increasing Al concentration. Acid rain at pH 3.0 significantly increased soluble sugar content in tea leaves. These results suggested that tea plant can adapt to acid rain and lower Al concentration by strengthening antioxidase activities and increasing osmoregulation substance, however, higher Al concentration is harmful to growth of tea plant for damaging antioxidation system and decreasing osmoregulation substance synthesis and the harm to tea plant caused by higher Al are aggravated by acid rain.

**Key words:** simulated acid rain; aluminum; Growth; physiology and biochemistry; *Camellia sinensis*

酸雨是目前人类面临最引人注目的环境问题之一,酸雨对植物的伤害主要表现在酸雨淋溶作用对植物地上部分的直接伤害,导致植物叶片营养物质淋失、膜系统和叶绿素破坏、光合作用被抑制,腐蚀叶肉组织和破坏花的结构等<sup>[1-2]</sup>,也可造成土壤酸化,引起土壤盐基流失及某些有毒元素(铝、锰等)的释出和活化,伤害植物根系,对植物产生间接危害。酸雨对植物产生的直接和间接危害都会导致活性氧产生及清除失去平衡,造成活性氧对细胞的毒害作用,特别引起膜脂过氧化作用<sup>[1]</sup>。

铝是地球生物活性元素之一,在丰度分布顺序中列于氧、硅之后居第3位(占地壳质量的7.1%),是土壤中最丰富的金属元素,通常以难溶性的硅酸盐或氧化铝形式存在,但在酸性条件下(pH < 5),土壤中可溶性铝含量增加,对大多数植物产生毒害<sup>[3-4]</sup>。然而大量资料表明铝对茶树的生长有益,小西茂毅<sup>[5]</sup>研究证明适量的铝可以增强茶树净光合作用,提高CO<sub>2</sub>同化能力,促进茶树生长,提高茶叶产量。当用8~32 mg/L的Al<sup>3+</sup>溶液培养茶苗时,其鲜质量是无铝的1~5倍<sup>[6]</sup>。另外,茶树还是少见的铝积累型植物<sup>[7]</sup>,平均铝含量高达1500 mg/kg以上,有些老叶中的含铝量可达20000 mg/kg,不施铝的茶树也含有很高的铝。相关研究也表明合适的铝能促进茶树根的发育<sup>[8]</sup>。目前,有关酸雨和铝对茶树影响的研究局限于单因素的研究<sup>[9-10]</sup>,酸雨和铝复合作用对茶树的影响研究较少<sup>[11]</sup>。然而酸雨和铝对植物的影响往往同时相伴存在,另外江西又是我国酸雨污染最严重的区域之一<sup>[12]</sup>。因此研究酸雨和铝复合作用对茶树生长及生理生化特性的影响显得十分必要。本文研究了不同铝浓度处理和酸雨强度对茶树生长及抗性相关生理生化的影响,为铝和酸雨对茶树生长及生理生化系统影响的机理研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

茶树种子品种为福鼎大白,采自江西省蚕桑茶叶研究所茶叶种植基地,种子采集后用湿沙贮藏,置于5~10℃冰箱中保存至实验用。

### 1.2 方法

1.2.1 种子萌发 在沙基中播种。培养沙子用1 mol/L盐酸处理3 h,然后用自来水洗去盐酸。种子先浸水1 h,随后播于沙上,再覆沙一薄层,以覆盖种子为度,沙子经常喷水保持湿润。待幼苗子叶全展开后,挑选3~4叶期生长较为一致的幼苗,用自来水洗净附着的沙子,置于盛有去离子水的烧杯中,

1 d 后去除子叶备用。

1.2.2 幼苗培养及处理 选择长势相同的茶苗培养于 3 L 黑漆过的有盖塑料桶内,每盆 3~4 株,培养液为 Hoagland 大量元素和 Aron 微量元素营养液。预培养一周后进行处理。根据预实验,Al 离子质量浓度设为 0、10、20、30 mg/L,以 2 g/L  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  的形式加入(以纯铝计),模拟酸雨 pH 值为 3.0、4.0 和 5.0 3 个水平,以  $W(SO_4^{2-}):W(NO_3^-) = 5:1$  的 0.5 mol/L  $H_2SO_4$  和 1 mol/L  $HNO_3$  混合酸液(与南昌地区近几年酸雨  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  组成相近)或 1 mol/L NaOH 溶液调配,完全随机化实验设计,共计 12 个处理,每处理设 3 个重复。置于人工气候箱中培养,培养温度 20~26 °C,光照强度 7 920 lx,光照时间 16 h/d,湿度 80%。生长 60 d 后,取第 3、4 叶(从上至下)进行生理生化指标测定,整株收获,称鲜质量。

1.2.3 测定项目与方法 超氧化物歧化酶活性(SOD)测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法<sup>[13]</sup>。过氧化氢酶活性(CAT)测定参照王以柔等<sup>[14]</sup>的方法。抗坏血酸过氧化物酶活性(APX)的测定参照 Nakano 等<sup>[15]</sup>的方法。超氧阴离子产生速率( $O_2^{\cdot-}$ )的测定采用王爱国等<sup>[16]</sup>的羟胺氧化反应法。游离脯氨酸的测定采用磺基水杨酸法<sup>[17]</sup>。过氧化物酶活性(POD)的测定采用愈创木酚法,丙二醛含量(MDA)的测定采用硫代巴比妥酸法,可溶性糖的测定采用蒽酮比色法<sup>[18]</sup>。数据统计分析使用 SPSS13.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟酸雨和铝添加对茶树生物量的影响

如图 1 所示,随着铝处理质量浓度的增加,茶树生物量先增加后减少,在 20 mg/L 时铝处理达到最大值。表明较低质量浓度的铝有利于茶树生物量的积累。未加铝处理时,pH 4.0 处理的茶树生物量高于 pH 5.0 处理的,与 pH 3.0 处理的没有明显差异。表明适量的酸度有利于茶树生物量的积累。当培养液铝质量浓度为 10 mg/L 时,随着酸度的增加,茶树生物量均增加,且增幅高于无铝处理的,而当培养液铝质量浓度为 20 mg/L 和 30 mg/L 时,随着培养液酸度的增加,茶树生物量反而减少,在铝质量浓度为 30 mg/L、pH 3.0 时,茶树生长缓慢,叶片出现黄斑。表明适度的酸雨和适量的铝有利于茶树生物量的积累,较高的铝和较高的酸雨强度不利于茶树生物量的积累。

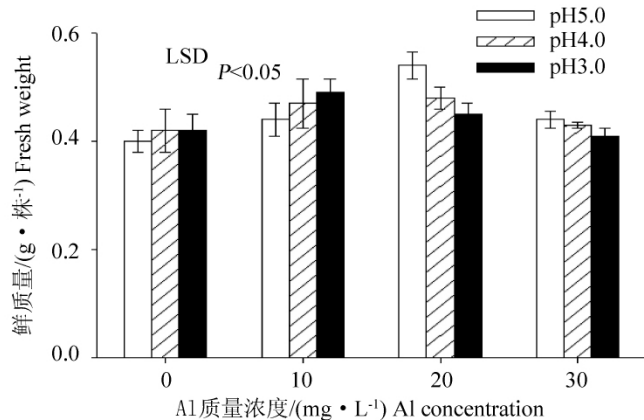


图 1 模拟酸雨和铝添加对茶树生物量的影响

### 2.2 模拟酸雨和铝添加对茶树

SOD、POD、CAT 和 APX 活性的影响 Fig. 1 Effects of stimulated acid rain and Al addition on biomass of tea plants

如图 2A 所示,未加铝处理时,茶树叶片 SOD 活性随着酸雨强度的增加而增加,说明酸雨对茶树造成了胁迫。在同一 pH 酸雨条件下,随着铝处理质量浓度的增加,茶树叶片 SOD 活性表现为先升高后下降的趋势,均在铝处理为 10 mg/L 达到最大值。说明在低质量浓度铝条件下,茶树能够通过提高 SOD 活性抵御铝的胁迫,但较高质量浓度的铝胁迫会导致 SOD 活性下降。在铝处理质量浓度为 20 和 30 mg/L 时,pH 3.0 处理的茶树叶片的 SOD 活性明显低于 pH 4.0 和 pH 5.0 处理的( $P < 0.05$ ),说明酸雨加剧茶树叶片 SOD 活性的降低。

如图 2B 所示,未加铝处理时,茶树叶片中 POD 活性随着酸雨强度的增加而增加,说明酸雨对茶树造成了胁迫。在同一 pH 酸雨条件下,随着铝处理质量浓度的增加,茶树叶片 POD 活性表现为先升高后下降的趋势,均在铝处理为 20 mg/L 时达到最大值,说明在较低质量浓度铝条件下,茶树能够通过提高 POD 活性抵御铝的胁迫,但较高浓度的铝胁迫会导致 POD 活性下降。另外,在 pH 3.0 的酸雨条件下,随着铝处理质量浓度的增加,茶树叶片 POD 上升的幅度及下降的幅度都比 pH 5.0 的要大,说明酸雨加剧了茶树叶片 POD 活性的变化。

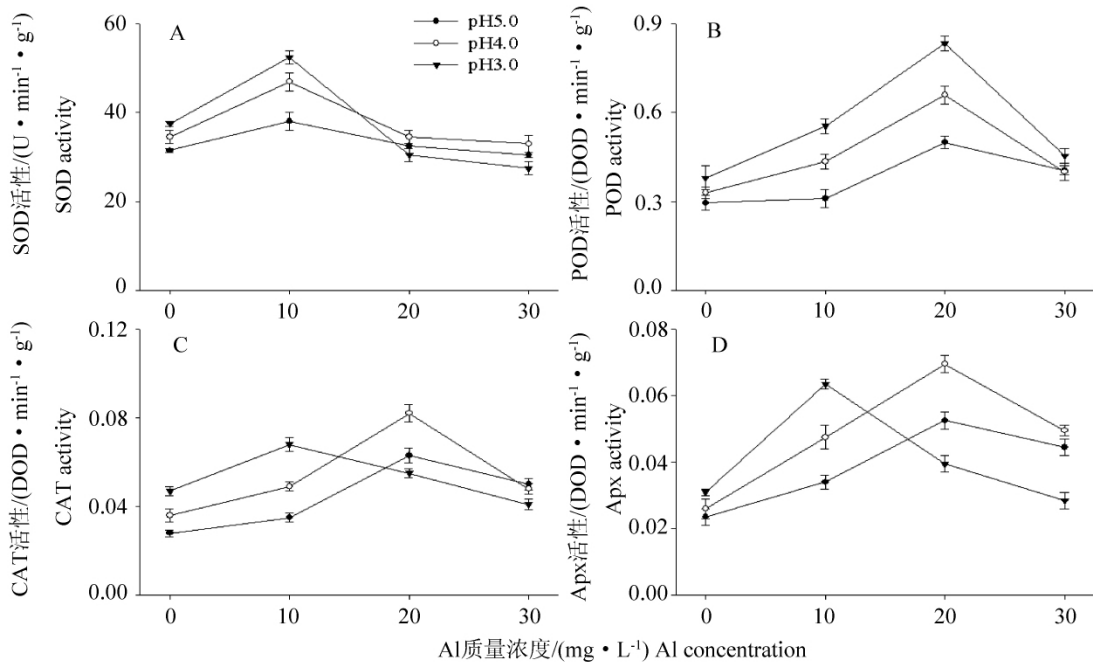


图 2 模拟酸雨和铝添加对茶树叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 2 Effects of simulated acid rain and Al addition on the antioxidant enzyme activities of tea leaves

如图 2C 所示,在未加铝处理时,茶树叶片 APX 活性随着酸雨强度的增加而增加,说明酸雨对茶树造成了胁迫。在同一 pH 酸雨条件下,随着铝处理质量浓度的增加,APX 活性先增加后下降,在 pH 5.0 和 pH 4.0 的酸雨条件下,APX 活性在 20 mg/L 时铝处理达到最大值,而在 pH 3.0 的酸雨条件下,APX 活性在铝处理为 10 mg/L 时铝处理达到最大值,且在 20 mg/L 和 30 mg/L 铝浓度质量处理下,APX 活性随着酸雨强度的增加而降低,说明在较低铝浓度条件下,茶树可以通过提高 APX 活性来增强茶树对铝的适应能力,但较高质量浓度(30 mg/L)的铝胁迫会导致 APX 活性下降。酸雨加剧 APX 活性的降低。

CAT 活性的变化趋势与 APX 的变化总体上相似(图 2D)。

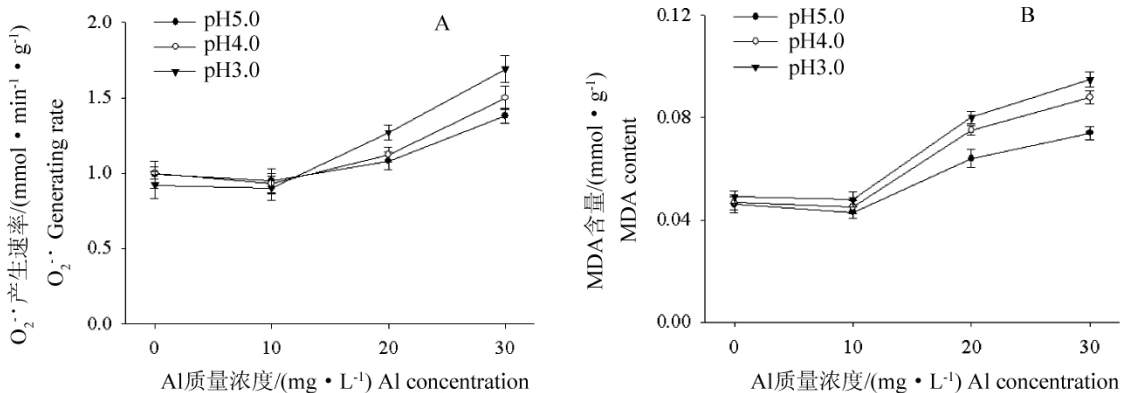


图 3 模拟酸雨和铝添加对茶树叶片 MDA 含量和超氧阴离子释放速率的影响

Fig. 3 Effects of simulated acid rain and Al addition on the MDA contents and O<sub>2</sub><sup>·-</sup> generating rate of tea leaves

### 2.3 模拟酸雨和铝添加对茶树超氧阴离子产生速率和 MDA 含量的影响

如图 3A, B 所示,未加铝处理时,酸雨强度对茶树叶片超氧阴离子产生速率和 MDA 含量影响不大。在同一 pH 酸雨条件下,10 mg/L 铝处理的茶树叶片活性氧释放速率和 MDA 含量与无铝处理的相比没有明显差异,然后随着铝处理浓度的增加,其超氧阴离子产生速率和 MDA 含量也逐渐增加,说明低浓度的铝对茶树活性氧释放和 MDA 含量没有明显影响,较高浓度的铝促进超氧阴离子的产生和 MDA 含量的积累。在 20 和 30 mg/L 铝处理时,随着酸雨强度的增加茶树叶片超氧阴离子产生速率和 MDA 含量明显增加,说明酸雨加剧铝引起的茶树叶片超氧阴离子的产生和 MDA 积累。

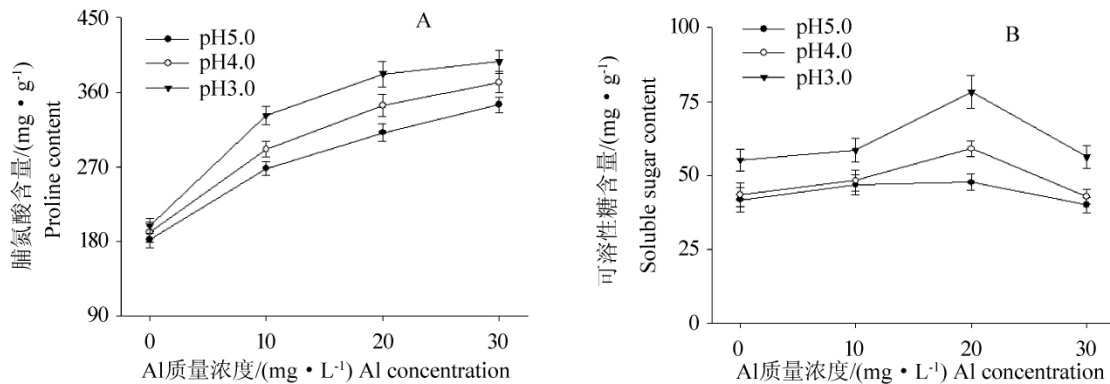


图 4 模拟酸雨和铝添加对茶树叶片脯氨酸和可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effects of simulated acid rain and Al addition on the proline and soluble sugar contents of tea leaves

### 2.4 模拟酸雨和铝添加对茶树脯氨酸和可溶性糖含量的影响

如图 4A 所示,未加铝处理时,茶树叶片脯氨酸含量在各酸度酸雨之间没有明显差异。同一 pH 酸雨下,随着铝处理质量浓度的增加,脯氨酸含量增加;在同一铝质量浓度处理下,随着酸雨酸度的增加,脯氨酸含量增加。说明铝促进茶树脯氨酸的积累,酸雨加剧铝引起的脯氨酸的积累。

未加铝处理时,pH 3.0 酸雨处理的茶树叶片可溶性糖含量明显高于 pH 4.0 和 pH 5.0 的,而 pH 4.0 与 pH 5.0 酸雨处理之间没有明显差异。说明较高酸度酸雨促进茶树可溶性糖的积累,较低酸度酸雨对可溶性糖含量没有明显影响。随着铝处理质量浓度的增加,茶树叶片可溶性糖含量先增加后降低,在 20 mg/L 铝处理时达到最大值。说明较低质量浓度的铝促进茶树叶片可溶性糖的积累,较高质量浓度的铝则降低可溶性糖的积累。在 pH 3.0 的酸雨条件下,随着铝处理质量浓度的增加,茶树叶片可溶性糖含量上升及下降的幅度均比 pH 5.0 的要大(图 4B),说明酸雨加剧茶树叶片中可溶性糖含量的变化。

## 3 讨论

### 3.1 模拟酸雨和铝添加对茶树生物量的影响

外界环境对植物的影响最终表现在对植物生长的影响上,植物生物量是植物生长的重要指标。鲁美娟等<sup>[19]</sup>的研究表明,pH 2.5 的酸雨明显抑制刨花楠幼苗的生长,而梁俊<sup>[20]</sup>研究表明模拟酸雨促进油菜的生长。本研究发现,适度酸雨(pH 4.0)提高茶树生物量的积累(图 1),这可能与茶树喜酸性的遗传本质有关。本研究发现,铝对茶树生长的影响具有双重性,即较低浓度的铝对茶树生长有刺激作用,高浓度的铝对茶树生长则有抑制作用(图 1)。虽然还没有肯定铝是茶树生长发育的必需元素,但一定质量浓度的铝能促进茶树的生长,这在李海生等<sup>[21]</sup>、小西茂毅<sup>[5]</sup>的研究结果中已证实。但对其机理不清楚,铝对茶树生长的促进作用可能与较低浓度的铝可促进磷、钾、铁等元素的吸收<sup>[11]</sup>,也可能与较低浓度的铝可提高茶树根系活力,增强它的光合能力有关(待发表)。在较低浓度铝条件下,酸雨促进茶苗生物量的积累,可能是酸雨酸度的增加提高了培养液中可利用铝形态的量,从而促进茶树的生长。但高酸高铝却抑制茶树的生长,可能是高质量浓度的铝对茶树的根及生长发育有毒害作用,同时培养液酸度过高,影响茶树根系对营养成分的吸收<sup>[21,11]</sup>,也增加溶液中 Al<sup>3+</sup> 的量,增加铝对茶树的毒害。

### 3.2 模拟酸雨和铝添加对茶树叶片抗氧化酶活性的影响

在正常情况下,植物的酶促反应、线粒体呼吸链的电子传递、叶绿体照光时的光化学反应和一些低分子有机物的自动氧化反应,都会产生 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等活性氧,但它们很快被植物体内的 SOD、CAT、POD 和 APX 等保护酶所清除,使活性氧的产生和清除处于动态平衡之中。以往对酸雨和不同重金属复合污染的研究中,不同酸雨强度下,植物 SOD、POD、CAT 和 APX 的酶活性随着重金属质量浓度增加通常呈先升后降的趋势<sup>[22-24]</sup>。本研究中,在同一 pH 酸雨条件下,茶树叶片 SOD、POD、CAT 和 APX 的酶活性随着铝质量浓度增加同样呈先升高后降低的趋势(图 2A,图 2B,图 2C,图 2D),低质量浓度铝导致茶树体内活性氧的积累,并激发了细胞自身的防御系统,表现出抗氧化酶活性的升高<sup>[25]</sup>;而高浓度铝导致活性氧自由基(O<sub>2</sub><sup>-·</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等)过量累积使植物细胞膜脂过氧化,损伤细胞的膜结构并造成细胞生理生化代谢的紊乱,导致酶活性明显下降<sup>[26]</sup>。另外,在较低 pH 酸雨条件下(pH 5.0),随着铝处理质量浓度的增加,SOD 活性在 10 mg/L 铝处理时达到最大值,而 POD、CAT 和 APX 活性在 20 mg/L 时达到最

大值(图 2A、图 2B、图 2C、图 2D),说明 SOD 对铝胁迫更敏感。在未加铝处理时,随着酸雨酸度的增加,茶树叶片各保护酶的活性增加,表明酸雨对茶树造成了胁迫,茶树对酸雨具有一定的抗性。在较低浓度铝处理下,酸雨促进铝引起的 SOD、POD、CAT 和 APX 的增加,说明茶树对适量的铝和适度的酸雨具有一定的适应性。在较高质量浓度铝处理下,酸雨则加剧各抗氧化酶活性的降低,说明酸雨加剧铝对茶树的胁迫,增加活性氧产生(图 3A),从而加剧铝对茶树的伤害。

### 3.3 模拟酸雨和铝添加对茶树叶片活性氧释放速率和 MDA 含量的影响

大量研究表明,过量的  $O_2^{\cdot-}$  毒害可以引发或加剧膜脂过氧化,造成细胞膜系统损伤,干扰植物细胞的光合、呼吸及其他代谢过程。MDA 是膜脂氧化的主要产物之一,其含量可指示膜脂氧化的程度<sup>[27]</sup>。本研究表明,与无铝处理相比,10 mg/L 铝处理的超氧阴离子产生速率和 MDA 含量稍有下降(图 3A、图 3B),这可能是由于茶树体内抗氧化酶活性在铝胁迫下提高所致(图 2A、图 2B、图 2C、图 2D)。也进一步证明茶树是一种耐铝植物。随着铝处理质量浓度进一步增加,茶树叶片超氧阴离子产生速率和 MDA 含量增加,这也与各抗氧化酶活性下降相一致(图 2A、图 2B、图 2C、图 2D)。MDA 在植物体内增加的原因可能是氧自由基参与启动膜脂过氧化或膜脂脱脂作用,在强氧化剂  $H_2O_2$  的作用下,通过 Haber-Weiss 反应产生攻击力更强的  $\cdot OH$ ,启动膜脂过氧化,造成 MDA 增加<sup>[28]</sup>;或是因为活性氧(ROS)破坏生物功能分子如氨基酸、蛋白质、糖类,最终引起膜的过氧化作用,导致 MDA 含量增加<sup>[29]</sup>。在无铝处理时,酸雨酸度对茶树叶片活性氧释放速率和 MDA 含量没有明显影响,这可能与茶树是一种喜酸性的植物有关。在较高铝质量浓度处理下,酸雨加剧茶树叶片超氧阴离子产生速率和 MDA 含量,说明酸雨加剧铝对茶树细胞的伤害,与酸雨加剧铝引起的抗氧化酶活性降低的结果相一致(图 2A、图 2B、图 2C、图 2D)。

### 3.4 模拟酸雨和铝添加对茶树叶片脯氨酸和可溶性糖含量的影响

植物体内脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理反应,可作为鉴定植物相对抗性的指标。本研究表明,随着铝处理浓度的增加,茶树叶片脯氨酸含量增加(图 4A),说明茶树叶片可通过大量合成脯氨酸来应对铝的胁迫,对铝具有较好的耐受能力。无铝处理时,酸雨对茶树叶片脯氨酸没有明显影响,说明茶树对酸雨具有很强的适应能力。在铝处理条件下,酸雨增加茶树叶片脯氨酸含量,说明酸雨加剧铝对茶树的胁迫。这些结果进一步说明茶树对酸雨和铝共同作用有较好的耐受能力,并能在酸性红壤中较好地生长。茶树叶片在 30 mg/L 铝处理时,SOD、POD、CAT 和 APX 的合成体系可能被破坏,活性降低(图 2A、图 2B、图 2C、图 2D),但脯氨酸的含量仍在增加(图 4A),说明脯氨酸可能是植物抗重金属逆境的主要物质。

可溶性糖是植物细胞重要的渗透调节物质。研究认为,重金属对植物体内糖代谢有一定影响,耐性较强的凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)和较敏感的紫背萍(*Spirodela polyrrhiza*)叶片可溶性糖含量均随水中  $Cu^{2+}$  浓度的升高而增加<sup>[30-31]</sup>。本研究表明,茶树叶片可溶性糖含量随铝处理质量浓度的增加先增加后下降(图 4B),说明低质量浓度的铝促进茶树叶片可溶性糖的合成,较高质量浓度的铝抑制可溶性糖的合成。铝处理下茶树可溶性糖含量增加的原因可能是叶片内不溶性糖降解及光合产物运输受阻的结果,或者是葡萄糖酶、蔗糖酶活性异常所致<sup>[32]</sup>,亦或是茶树对重金属胁迫环境的一种生理反应。重金属处理下植物体内含水量下降,积累的可溶性糖可作为渗透调节物质保护细胞免受伤害,维持原有的生理过程,抵御水分胁迫<sup>[33]</sup>。高质量浓度的铝抑制可溶性糖合成的原因可能是由于铝的积累干扰营养物质的吸收和分配,导致氧化过程和光合过程减弱,从而使叶内可溶性糖含量减少<sup>[34-35]</sup>。本研究还表明,pH 3.0 的酸雨增加茶树叶片可溶性糖含量,而 pH 4.0 的酸雨对可溶性糖含量没有明显影响,说明茶树对酸雨具有较强的适应能力,较高强度酸雨对茶树造成胁迫。酸雨加剧铝胁迫下可溶性糖含量增加的原因可能与酸雨改变溶液中铝形态有关。

综上所述,适量铝和适度的酸雨共同作用下,茶树可通过提高抗氧化酶活性、脯氨酸及可溶性糖含量,降低超氧阴离子产生速率和 MDA 含量来增强茶树对铝和酸雨的适应,使生物量增加,有利于茶树的生长。茶树这种耐酸铝的机制可能与提高茶树抗氧化及渗透调节系统有关。高质量浓度的铝和高强度的酸雨对茶树造成伤害,抗氧化酶活性降低、超氧阴离子释放速率和 MDA 含量增加,使膜系统造成破坏,可溶性糖含量降低,渗透调节系统失去平衡,从而抑制茶树的生长。

#### 参考文献:

- [1] 童贯和,刘天骄,黄伟. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗膜脂过氧化水平的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1509-1516.

- [2] Momen B, Helms J A, Criddle R S. Foliar metabolic heat rate of seedlings and mature trees of *Pinus ponderosa* exposed to acid rain and ozone [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1996, 19(6): 747-753.
- [3] Delhaize E, Ryan P R. Update on environmental stress: aluminum toxicity and tolerance in plant [J]. *Plant Physiology*, 1995, 107: 315-321.
- [4] Grabski S, Schindler M. Aluminum induces rigor with the action network of soybean cell [J]. *Plant Physiology*, 1995, 108: 897-901.
- [5] 小西茂毅. 铝对茶树生长的促进作用 [J]. *茶叶*, 1995, 21(3): 18-22.
- [6] 方兴汉, 吴彩. 铝对茶树营养吸收和分布的影响 [J]. *中国茶叶*, 1989, 11(4): 34-35.
- [7] 阮宇成, 方兴汉. 铝在茶树营养上的作用 [J]. *茶叶科学研究年报*, 1980—1981: 232-238.
- [8] 罗亮, 谢忠雷, 刘鹏, 等. 茶树对铝毒生理响应的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 305-309.
- [9] 李海生, 张志权. 不同铝水平下茶对铝及矿质养分的吸收与累积 [J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 186-190.
- [10] 朱韦, 魏虹, 彭月, 等. 模拟酸雨对四川大头茶幼苗的生理生态影响 [J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 31(2): 147-150.
- [11] 段小华, 邓泽元, 胡小飞, 等. 模拟酸雨和外源铝对茶树铝及一些营养元素吸收积累的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10): 1936-1942.
- [12] 蔡哲, 贺志明, 唐春燕, 等. 南昌市酸雨特征与气象条件关系分析研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21): 11292-11294.
- [13] 汤章城. *现代植物生理学实验指南* [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 314-315.
- [14] 王以柔, 刘鸿先, 李平, 等. 在光照和黑暗条件下低温水稻幼苗光合器官膜脂过氧化作用的影响 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 1986, 12(3): 244-251.
- [15] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant Cell Physiology*, 1981, 22: 867-880.
- [16] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧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] 李合生. *植物生理生化试验原理与技术* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184-185, 258-260.
- [18] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学实验指南* [M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 80-83, 123-124, 127-129, 274-277.
- [19] 鲁美娟, 江洪, 李巍, 等. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 5986-5994.
- [20] 梁骏, 麦博儒, 郑有飞, 等. 模拟酸雨对油菜 (*Brassica napus* L.) 生长、产量及品质的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 274-283.
- [21] 李海生, 张志权, 陈连周. 铝对茶树幼苗生长的影响 [J]. *广东教育学院学报*, 2000, 20(3): 107-110.
- [22] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 等. 模拟酸雨和 Pb 对羽叶鬼针草 (*Bidensmax imowicziana*) 生理特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 217-222.
- [23] 余苹中, 廖柏寒, 宋稳成. 模拟酸雨和 Zn 对四季豆 (*Phaseolus vulgaeis* L.) 根与叶酶活性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 917-920.
- [24] 徐苏凌, 方勇, 邢承华. 酸雨和 Cd 胁迫对紫花苜蓿生长和抗氧化酶系统的影响 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2008, 34(4): 467-472.
- [25] 涂俊芳, 王兴明, 刘登义, 等. 不同浓度铜对紫背萍 (*Spirodela polyrrhiza*) 和青萍 (*Lemna minor*) 色素含量及抗氧化酶系统的影响 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 502-506.
- [26] 孙守琴, 何明, 曹同, 等. Pb、Ni 胁迫对大羽蕨 (*Thuidium cym bifolium*) 抗氧化酶系统的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 937-942.
- [27] 王学, 施国新, 徐勤松, 等. 镉、钼及重金属元素铬、锌对竹叶眼子菜的毒害作用 [J]. *中国稀土学报*, 2004, 22(5): 682-686.
- [28] Liang M Y. Generation of hydroxyl radicals and its relation to cellular oxidative damage in plants subjected to water stress [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(3): 329-381.
- [29] Alaiz M, Hidalgo F J, Zamora R. Effect of pH and temperature on comparative antioxidant activity of nonenzymatically browned proteins produced by reaction with oxidized lipids and carbohydrates [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1999, 47: 748-752.
- [30] 白嵩, 李青芝, 白岩, 等. 水体镉污染对水稻种苗初期生长的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(2): 128-130.
- [31] 杨居荣, 蒋婉茹. 小麦耐受 Cd 胁迫的生理生化机制探讨 [J]. *农业环境保护*, 1996, 15(3): 97-101.
- [32] 孙赛初, 王焕校, 李启任. 镉处理对水生维管植物生理变化和伤害机制初步研究 [J]. *植物生理学报*, 1985, 11(2): 113-121.
- [33] 丁海东, 朱为民, 杨少军, 等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及脯氨酸和谷胱甘肽含量的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2005, 21(3): 191-196.
- [34] Costa G, Spitz E. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus* [J]. *Plant Science*, 1997, 128: 131-140.
- [35] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35(4): 525-545.