

模拟酸雨和铝调控对茶叶主要化学品质与铝积累的影响

黄媛^{1a,1b}, 段小华^{1a,2}, 胡小飞^{1a}, 邓泽元^{1a,1b}, 陈伏生^{1b*}

(1. 南昌大学, a. 食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047; b. 生命科学与食品工程学院, 南昌 330031;

2. 江西师范大学生命科学院, 江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 为研究模拟酸雨和铝(Al)对茶叶主要化学品质与 Al 积累的影响及其交互作用, 采用 3 个酸度水平(pH 3.0、4.0、5.0)和 4 种 Al 浓度水平(0、10、20、30 mg L⁻¹), 用溶液培养法研究茶叶的主要化学指标和 Al 含量的异同。结果表明, 在模拟酸雨下, 茶叶的茶多酚和咖啡碱含量随酸度增加先增加后下降, 氨基酸、儿茶素和可溶性糖含量则下降, 黄酮含量无显著差异。随 Al 浓度的增加, 茶叶茶多酚、咖啡碱、氨基酸、儿茶素、黄酮和可溶性糖含量均先增加后下降。模拟酸雨和 Al 浓度对茶叶茶多酚、儿茶素和黄酮含量具有显著交互作用, 对咖啡碱、氨基酸和可溶性糖含量没有明显交互作用, 高酸高 Al 显著降低儿茶素含量($P < 0.05$)。适中 Al 浓度(10 ~ 20 mg L⁻¹)促进茶叶的 Al 积累, 而对根、茎和老叶 Al 积累无明显影响。低浓度 Al 条件下, 酸雨促进茶叶 Al 的积累, 而高酸高 Al 抑制茶叶 Al 的积累。综合来看, 适中的酸度(pH 4.0 左右)和适量的 Al 浓度有利于提高和稳定茶叶的化学品质。

关键词: 模拟酸雨; 铝; 茶叶; 化学品质

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2011)03-0254-06

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.03.010

Effects of Simulated Acid Rain and Al Regulation on Tea Quality and Its Al Accumulation

HUANG Yuan^{1a,1b}, DUAN Xiao-hua^{1a,2}, HU Xiao-fei^{1a}, DENG Ze-yuan^{1a,1b}, CHEN Fu-sheng^{1b*}

(1a. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 1b. College of Life Sciences and Food Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Subtropical Plant Resource Protection and Utilization

Key Laboratory, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: The influences of simulated acid rain and aluminum (Al) addition on main chemical quality and aluminum accumulation in tea leaves were investigated, which grown in acid deposition regions of red soil in southern China. The tea plants were treated with three pH levels (3.0, 4.0, 5.0) of acid rain and four levels of Al addition (0, 10, 20, 30 mg L⁻¹), respectively. The results showed that the contents of tea polyphenols and caffeine was the highest in tea leaves treated with pH 4.0 acid rain, and the contents of amino acid, catechin and soluble sugar decreased with increasing acidity, while the flavonoid content showed no significant difference among three levels of pH solutions ($P < 0.05$). With the increasing Al concentrations in solution, the contents of tea polyphenols, caffeine, amino acid, catechin, flavonoid and soluble sugar in tea leaves increased first and decreased later. Simulated acid rain and Al addition had significant interactive effects on polyphenols, catechin and flavones, while no interactions on caffeine, soluble sugar and amino acid were found. The catechin content in tea leaves was

收稿日期: 2010-09-30

接受日期: 2010-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31060081); 中国博士后基金项目(20070421040); 江西省教育科技项目(GJJ08055)资助

作者简介: 黄媛(1985 ~), 女, 硕士研究生, 研究方向为茶树铝循环与茶叶铝安全, email: emily502214@126.com。

* 通讯作者 Corresponding author, email: chenfush@hotmail.com

inhibited by the highest pH (5.0) and Al concentration (30 mg L^{-1}) in solution. The Al accumulation in tea leaves was the highest in the treatment of middle Al concentration in solution (20 mg L^{-1}), while the Al accumulation in roots, shoots and old leaves were not significantly different among three treatments of Al concentration. The Al accumulation in tea leaves increased with decreasing pH solution under lower Al concentration (10 mg L^{-1}), while the Al content in tea leaves was the lowest under the lowest pH (3.0) and the highest Al concentration (30 mg L^{-1}) in solution among the twelve treatments. Therefore, it was recommend that the moderate acidity (pH close to 4.0) and Al content ($10\text{--}20 \text{ mg L}^{-1}$) in solution was advantaged to improve tea quality.

Key words: Simulated acid rain; Aluminum; Tea leaves; Chemical quality

茶是一种在中国具有悠久历史的饮料,且已成为风靡世界的三大无酒精饮料(茶、咖啡和可可)之一,被认为是一种健康饮料^[1]。茶树(*Camellia sinensis*)喜生于酸性富铝(Al)化的土壤中,是一种富Al植物,广泛种植于中国南方的丘陵红壤区。近几十年来,由于人类活动的加剧,酸沉降已成为全球重要的生态环境问题,导致土壤酸化加剧^[2],固定于晶格中的Al逐渐解离成以可溶性Al释放到土壤溶液中,被植物吸收^[3]。目前我国南方大部分茶园的土壤呈酸化趋势,土壤中可溶性Al含量增加,对茶树生长、茶叶Al安全及其品质的影响受到关注^[4]。通常茶叶中的Al含量很高,达 $5\sim 16 \text{ g kg}^{-1}$,远远高于一般的粮食和饲料作物中Al的平均含量(0.2 g kg^{-1})^[5]。在大多数国家,一般每人每日摄入的Al含量为几毫克左右,而茶水中的Al含量约为 $1\sim 6 \text{ mg L}^{-1}$,所以认为茶叶是Al摄入的主要饮食来源^[6],茶叶中的Al对人类健康的负面影响越来越受到重视。茶叶品质是茶叶生产者和消费者共同关注的问题,茶叶质量是茶产业快速健康发展的瓶颈^[7]。茶叶的化学成分是茶叶品质的物质基础和质量鉴定的主要内容之一^[8],尤其是茶叶中茶多酚、儿茶素、氨基酸、咖啡碱和可溶性糖,为国际上公认的茶叶品质成份。而酸沉降和可溶性Al增加对茶叶化学成分的影响及其它它们之间的耦合关系并不清楚。已有研究表明,适量的Al可以提高茶叶中的氨基酸、茶多酚、咖啡碱、维生素和可溶性糖含量,提高茶叶品质,过高的Al则降低茶叶的品质^[9-10]。与此同时,酸雨对农作物生长、生理过程、产量和品质的影响已成为陆地生态系统全球变化研究的热点问题。宋建国等^[11]发现酸雨可降低番茄(*Lycopersicon esculentum*)的维生素C和可溶性糖含量,使果实的风味和口感变差。梁俊等^[12]的研究表明,酸雨胁迫会导致油菜(*Brassica campestris*)的粗脂肪含量降低,可溶性糖含量减少,

而且随着酸度增强,粗脂肪与可溶性糖降低幅度越大。徐晓燕等^[13]用水培实验的方法,认为营养液pH为7.5~4.5时,烟草(*Nicotiana tabacum*)叶中的烟碱随着pH下降而减少;蛋白质和总糖含量则呈上升的趋势,当pH下降至4.5时,不利于烟叶品质的形成。在自然条件下,酸度增加往往伴随着土壤可溶性Al含量的增加,而有关酸雨和Al的双重作用对茶叶品质影响的研究报道较少,有关茶树的Al含量与茶叶化学成分等品质的耦合关系研究仍有待深入。本文通过模拟酸雨和Al添加双重作用,研究其对茶叶Al吸收及茶叶品质的影响,重点检验适度的酸度和适量的Al浓度有利提高和稳定茶叶品质的科学假设,从而为丘陵红壤酸沉降区构建优质安全茶园提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 材料

2009年5月在江西省茶树良种繁育场购买1年生茶树(*Camellia sinensis*)扦插苗(品种为福鼎大白),平均地径为 0.24 cm ,平均苗高为 26 cm 。

选取生长一致的一年生茶苗,用蒸馏水洗净附着于根部的泥土后,将其插入装有 1.5 L 营养液(改良Hoagland大量元素和Arnon微量元素)的黑色有盖塑料桶内,每桶3~4株。置于温度 25°C ,光照强度 $23.5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,光照时间为 16 h d^{-1} ,湿度80%的人工气候箱中培养,连续充气,隔天补充失去的水分,每周定期更换一次营养液。

1.2 方法

预培养一周后开展Al添加梯度和酸雨强度双因素多水平随机化试验。其中Al的添加梯度为 0 、 10 、 20 、 30 mg L^{-1} 等4个水平,用 2 g L^{-1} 的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 溶液(以纯Al计)配制;酸雨强度设置为 3.0 、 4.0 、 5.0 等3个酸度水平,每天用 $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{NO}_3^-]=$

5:1 的 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 和 1 mol/L 的 HNO_3 混合酸液或 1 mol/L 的 NaOH 溶液调控。试验共设 3 次重复,共计 36 桶。

各处理培养 45 d 后,分别收集根、茎、老叶(处理前已存在的茶叶)和茶叶(一芽两叶),用蒸馏水洗净,置于烘箱中 200℃ 杀青 2 ~ 3 min, 80℃ 烘干 1.5 h,用研钵磨碎,过 1 mm 筛,装袋备用,其中根、茎、老叶仅分析 Al 含量,茶叶用于分析化学成分和 Al 含量。

1.3 测定项目

茶多酚的测定采用酒石酸铁比色法(紫外可见分光光度计 UV-2100,尤尼柯上海仪器有限公司),参照 GB/T 8313-2002 中的方法^[14];咖啡碱的测定采用醋酸铅沉淀比色法,参照 GB/T 8312-2002 中的方法^[15];游离氨基酸总量的测定采用茚三酮比色法,参照 GB/T 8314-2002 中的方法^[16];儿茶素的测定采用香荚兰素比色法^[17];可溶性糖的测定采用蒽酮比色法,参照张志良等编著的植物生理学试验指导中的方法^[18];黄酮类化合物含量测定参照王廷峰中的方法^[19]。茶叶中的 Al 含量测定参照肖乐勤改良后的石墨炉原子吸收光谱法(原子吸收光谱仪 A700,美国 PE(PerkinElmer)公司)^[20]。

1.4 数据处理

采用 SPSS(13.0)软件进行双因素方差分析,并用 Duncan 检验进行多重比较。差异显著取 $P < 0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 茶叶的茶多酚含量

茶多酚是鲜叶水溶部分质量分数最多的物质^[21],具有多种生物学功效,如抗氧化、抗肿瘤、抗辐射等,对人体具有独特的医疗保健作用^[22],可以作为评价茶叶品质的重要指标。在相同 Al 溶液处理下,随着模拟酸雨酸度的增加,茶叶茶多酚含量先增加后下降,且 pH 为 3.0 时的茶叶茶多酚含量高于 pH 5.0 时的含量;在同一模拟酸度下,随着 Al 浓度的升高,茶多酚的含量先增加后下降。在 pH 4.0 及 10 mg L⁻¹ 的 Al 处理浓度时茶多酚的含量达到最大值(360 mg g⁻¹)(图 1A)。双因素方差分析表明,模拟酸雨和 Al 对茶叶茶多酚含量具有显著的交互作用($F_{6,12} = 34.76$, $P < 0.001$)。可见,适中的酸度(pH 4.0)和适量的 Al 浓度(10 mg L⁻¹)能提高茶叶

茶多酚的含量。

2.2 茶叶的咖啡碱含量

茶叶中含有咖啡碱、茶碱、可可碱等生物碱类化合物,其中咖啡碱含量最高,对茶汤滋味有影响^[23],具有兴奋、利尿、强心、解毒、减肥等多种生理效应。在相同 Al 处理浓度下,随着模拟酸度的增加,咖啡碱的含量先增加后稍有下降;在同一模拟酸度下,随着 Al 浓度的增加,咖啡碱的含量先增加后下降;在不同模拟酸度下,10 mg L⁻¹ 的 Al 处理下的咖啡碱含量均最高,比无 Al 处理分别增加了 63% (pH 3.0)、43.9% (pH 4.0)和 58.2% (pH 5.0)(图 1B)。双因素方差分析表明,模拟酸雨与 Al 处理对茶叶咖啡碱含量没有显著交互作用。

2.3 茶叶的氨基酸含量

茶叶中的氨基酸有茶氨酸、谷氨酸、丝氨酸、苏氨酸等 20 多种,可以增进茶汤滋味,提高茶叶香气,改进干茶色泽和汤色。在无 Al 或相同 Al 处理下,随模拟酸度的增加,茶叶氨基酸含量逐渐降低,表明酸雨降低茶叶氨基酸含量。在同一模拟酸度下,与无 Al 处理相比,10 mg L⁻¹ 的 Al 处理的茶叶中氨基酸含量明显增加,且随着 Al 处理浓度的增加,稍有下降,但下降幅度不明显,表明适量 Al 处理可增加茶叶氨基酸含量(图 1C)。双因素方差分析表明,模拟酸雨与 Al 处理对茶叶氨基酸含量没有显著交互作用。

2.4 茶叶中的儿茶素含量

儿茶素是构成绿茶品质和功效最重要的化学成分。茶叶的品质与儿茶素的含量和存在形式有很大关系,一般来说,含儿茶素较多的茶汤滋味较浓,含儿茶素较少的茶汤,则滋味平淡。在无 Al 处理时,茶叶的儿茶素含量随模拟酸度的增加而下降,表明酸雨降低茶叶儿茶素含量。在各模拟酸度下,随 Al 处理浓度的增加,茶叶的儿茶素含量先增加后减少,在 10 mg L⁻¹ Al 浓度下儿茶素的含量最高,分别比无 Al 处理时增加了 24.9% (pH 3.0)、39.5% (pH 4.0)和 22.1% (pH 5.0)。Al 浓度为 30 mg L⁻¹ 时,各模拟酸度下茶叶儿茶素含量均最低且有显著性差异,表明超过一定浓度的 Al 将抑制儿茶素的合成(图 1D)。双因素方差分析表明模拟酸雨和 Al 对茶叶儿茶素含量具有显著的交互作用($F_{6,12} = 34.76$, $P < 0.001$)。

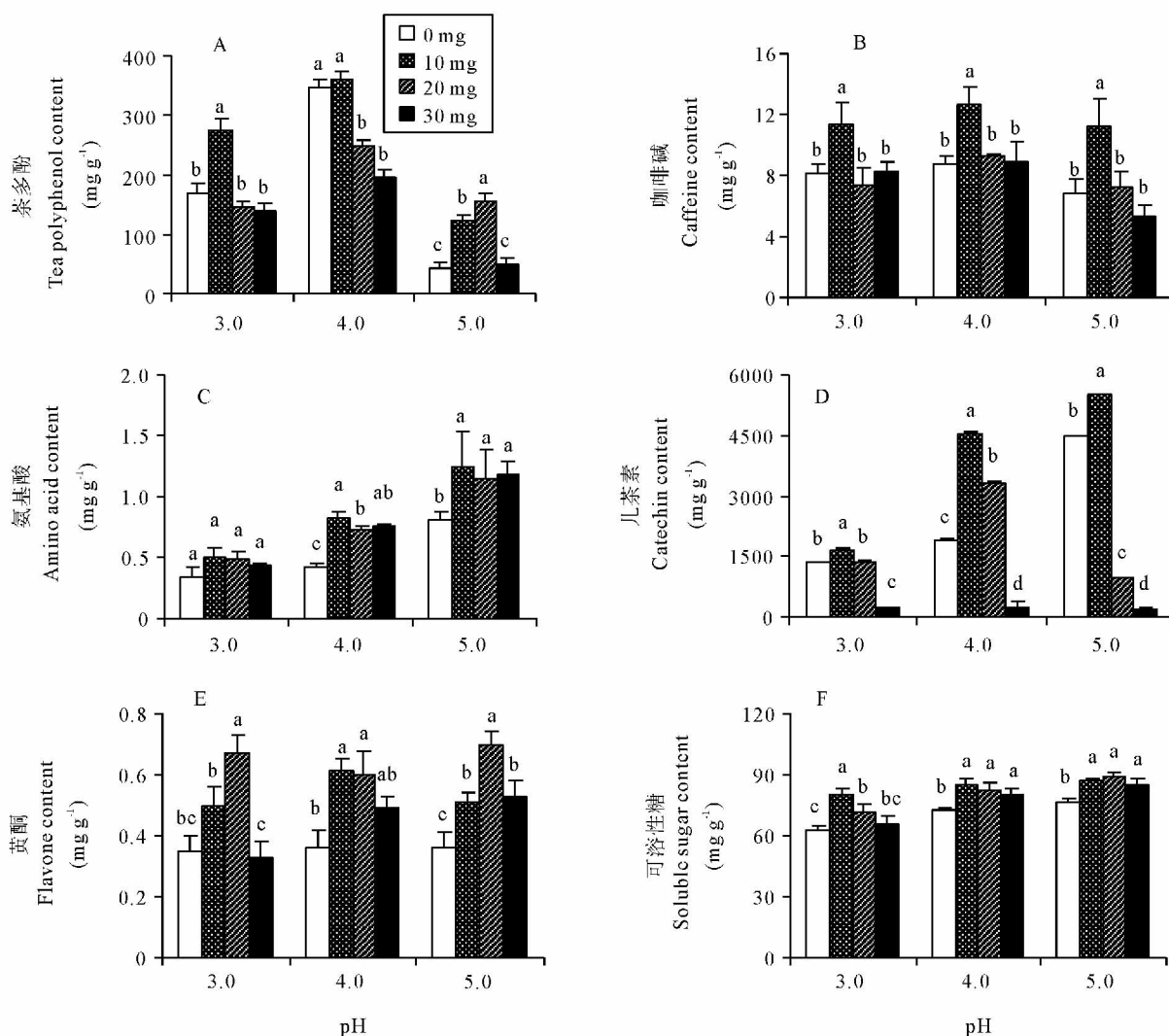


图1 模拟酸雨和铝调控对茶叶化学品质的影响

Fig. 1 Effects of simulated acid rain and Al addition on chemical quality in tea leaves

柱上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。Different letters on the bars indicate significant difference at 0.05 level.

2.5 对黄酮类化合物含量的影响

黄酮类化合物具有多种生理功能。茶叶中的黄酮甙具有抗氧化、抑制脂质过氧化反应、预防心血管疾病、防癌等作用。在无 Al 处理时,不同模拟酸度对茶叶中黄酮的含量影响不明显。随着 Al 处理浓度的增加,各模拟酸度下茶叶黄酮的含量先增加后下降,且 Al 浓度为 20 mg L^{-1} 时达到最大,表明适量的 Al 可以促进茶叶黄酮的合成(图 1E)。双因素方差分析表明模拟酸雨和 Al 对茶叶黄酮含量具有显著的交互作用($F_{6,12} = 3.35$, $P < 0.05$)。

2.6 对可溶性总糖含量的影响

可溶性总糖含量主要影响茶汤的口感。一般来说,含可溶性总糖较多的茶汤滋味较甘甜。在无 Al 处理时,随着模拟酸度的增加茶叶中可溶性总糖

的含量稍有降低,但差异不显著,表明酸雨对茶叶可溶性总糖含量没有明显影响。在同一模拟酸度下,随着 Al 浓度的增加,茶叶可溶性总糖含量先增加后下降,以 pH 为 3.0 时的下降幅度最大,表明适量的 Al ($10 \sim 20 \text{ mg L}^{-1}$)可促进茶叶可溶性总糖的合成,且酸雨降低了 Al 对茶叶可溶性总糖合成的促进作用(图 1F),但双因素方差分析表明模拟酸雨和 Al 对茶叶可溶性总糖含量没有显著交互作用。

2.7 对茶树 Al 积累的影响

从表 1 可见模拟酸雨和 Al 添加对茶树 Al 积累的影响。无 Al 处理时,酸雨对各器官中 Al 含量没有明显的影响。而有 Al 存在时,酸雨对根和老叶中的 Al 含量也没有明显影响,Al 浓度为 10 mg L^{-1} 和 20 mg L^{-1} 时,酸雨对茎中 Al 含量也没有明显影

表 1 模拟酸雨和 Al 浓度对茶树不同部位 Al 含量的影响
Table 1 Effects of stimulated acid rain and Al addition on Al accumulation in tea plant

Al (mg L ⁻¹)	pH	Al (mg g ⁻¹)			
		根 Root	茎 Stem	老叶 Old leaf	茶叶 Tea leaf
0	3.0	6.44 ± 0.34a	1.27 ± 0.06a	7.29 ± 0.36a	3.36 ± 0.23b
	4.0	6.29 ± 0.33a	1.22 ± 0.16a	7.05 ± 0.36a	3.23 ± 0.29b
	5.0	6.64 ± 0.31a	1.23 ± 0.15a	7.67 ± 0.53a	2.76 ± 0.26a
	平均 Mean	6.46 ± 0.33	1.24 ± 0.11	7.14 ± 0.42	3.12 ± 0.26
10	3.0	7.58 ± 0.44a	2.07 ± 0.25b	7.68 ± 0.35a	5.94 ± 0.35c
	4.0	7.85 ± 0.45a	1.85 ± 0.22a	7.75 ± 0.36a	5.21 ± 0.26b
	5.0	8.25 ± 0.67a	1.80 ± 0.15a	7.23 ± 0.39a	4.41 ± 0.31a
	平均 Mean	7.89 ± 0.52	1.91 ± 0.21	7.55 ± 0.37	5.19 ± 0.31
20	3.0	7.01 ± 0.45a	1.88 ± 0.18a	7.18 ± 0.22a	5.52 ± 0.32a
	4.0	8.03 ± 0.61b	1.86 ± 0.18a	7.01 ± 0.45a	5.50 ± 0.46a
	5.0	7.53 ± 0.39ab	1.85 ± 0.15a	7.16 ± 0.41a	5.18 ± 0.22a
	平均 Mean	7.86 ± 0.49	1.86 ± 0.17	7.12 ± 0.36	5.40 ± 0.34
30	3.0	7.19 ± 0.23a	1.56 ± 0.09a	7.83 ± 0.35a	2.61 ± 0.18a
	4.0	7.85 ± 0.43a	1.68 ± 0.12b	7.17 ± 0.34a	2.78 ± 0.20ab
	5.0	7.37 ± 0.26a	1.73 ± 0.19b	7.41 ± 0.36a	3.08 ± 0.12b
	平均 Mean	7.47 ± 0.31	1.66 ± 0.14	7.47 ± 0.35	2.82 ± 0.17

数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。Data followed different letters indicated significant difference at 0.05 level.

响,而幼叶中 Al 含量则随酸度的增加而略有增加,表明在适度 Al 的作用下,酸雨促进幼叶 Al 的积累。Al 浓度为 30 mg L⁻¹时,茎和幼叶中 Al 的含量随着酸度的增加而降低。Al 处理组根和老叶中的 Al 含量明显高于无 Al 处理组,但各个 Al 处理组间没有差异。茎和幼叶中的 Al 含量随着 Al 处理浓度的增加先增加后下降,但 Al 处理浓度为 30 mg L⁻¹时,茶叶中的 Al 含量有较大幅度的下降,表明适量的 Al 可以促进茶叶对 Al 的积累,高浓度的 Al 则抑制了茶叶对 Al 的积累。

3 讨论

3.1 适当的酸度有利于提高茶叶品质,但各品质成分合成的最适酸度各有差别

已有研究表明,酸雨降低作物品质^[11-13]。本研究以茶多酚、咖啡碱、氨基酸、儿茶素、黄酮类化合物、可溶性总糖作为成叶茶的品质指标^[24],研究表明,适度的酸度(pH 4.0 左右)可以提高茶叶品质,且不同的品质指标其最适酸度有一定差异。茶树是喜酸植物,一定的酸度有利于茶树的生长和发育,从而有利于茶叶各品质指标的生物合成。在本试验模拟酸度下,茶多酚和咖啡碱的含量在 pH 4.0 时达到最高,氨基酸、儿茶素和可溶性糖的含量在 pH 5.0 时最高,黄酮含量在不同酸雨酸度下没有明

显差异;但酸度过高均不利于茶叶这些品质指标的合成,原因可能是酸度过高影响茶树根系对各种营养的吸收,从而也影响茶叶品质指标的生物合成。儿茶素是茶多酚的主要组成成分,本研究结果表明,儿茶素和茶多酚对酸度的响应并不一致,当无 Al 或浓度为 10 mg L⁻¹时,儿茶素含量在 pH 5.0 时达到最大,而茶多酚含量却最少,推测 pH 5.0 时,茶叶以儿茶素合成为主而抑制了茶多酚中其他组分的合成,这还需要进一步深入研究。

3.2 适量的 Al 有利于提高茶叶品质

本研究表明,在 10~20 mg L⁻¹的 Al 浓度处理下,酸雨可促进茶叶对 Al 的积累,这与李海生^[25]的研究结果相一致。虽然 Al 对植物是非必需元素,但 Al 对植物的生长发育和生理生化特性都有较大的影响^[26]。茶树作为耐 Al 植物,Al 可以促进茶树根系的生长,增加叶绿素含量,增强净光合作用和二氧化碳同化能力,提高同化物的积累^[27]。有研究表明 Al 能促进茶树的光合作用,为茶树体内茶氨酸、可溶性糖等有机物的合成提供充足的能源^[28],因而 Al 可以提高茶叶的品质。本研究表明,适量的 Al 促进了茶叶茶多酚、咖啡碱、氨基酸、儿茶素、黄酮和可溶性糖的合成,从而提高茶叶的品质,但过量的 Al 则降低茶叶的品质;这与郑伟伟

等^[9]、杨凌云等^[10]的研究结果相一致。

3.3 酸度和 Al 对某些茶叶品质成分的合成可能有交互作用

本研究结果表明,模拟酸雨和 Al 的共同作用对茶叶品质的影响较为复杂。模拟酸雨和 Al 对茶叶茶多酚、儿茶素、黄酮和可溶性糖含量具有显著的交互作用,而对咖啡碱和氨基酸含量则没有明显的交互作用,总体上看适量的酸雨和 Al 有利于茶叶品质的提高,高酸高 Al 或低酸无 Al 都不利于茶叶品质的提高。这可能是高浓度的 Al 对茶树的根及生长发育有毒害作用,同时培养液酸度过高,一方面对茶树根系吸收营养成分造成较大影响^[4,25],另一方面,较高的酸度增加了溶液中 Al^{3+} 的量,增加了 Al 对茶树的毒害;而低浓度的 Al 虽对茶树没有毒害,但会使茶树缺少 Al 元素而使其生长发育不良^[27]。总之,适量的 Al 和适度的酸度有利于茶叶品质的提高。

参考文献

- [1] Trevisanato S I, Kim Y I. Tea and health [J]. *Nutr Rev*, 2000, 58(1): 1-10.
- [2] Liu J X(刘菊秀). Effect of aluminum toxicity on forests under acid deposition [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2000, 8(3): 269-274.(in Chinese)
- [3] Rengel Z. Aluminium cycling in the soil-plant-animal-human continuum [J]. *BioMetals*, 2004, 17: 669-689.
- [4] Duan X H(段小华), Deng Z Y(邓泽元), Hu X F(胡小飞), et al. Effects of simulated acid rain and exogenous Al additions on assimilation and accumulation of Al and some nutrition elements of tea plant [J]. *J Agro-Environ Sci(农业环境科学学报)*, 2010, 29(10): 1936-1942.(in Chinese)
- [5] Chenery E M. A preliminary study of aluminium and the tea bush [J]. *Plant Soil*, 1955, 6: 174-200.
- [6] Flaten T P. Aluminium in tea concentrations, speciation and bioavailability [J]. *Coord Chem Rev*, 2002, 228: 385-395.
- [7] Chen Z M(陈宗懋), Ruan J Y(阮建云), Cai D X(蔡典雄), et al. Tri-dimension pollution chain in tea ecosystem and its control [J]. *Sci Agri Sin(中国农业科学)*, 2007, 40(5): 948-958.(in Chinese)
- [8] Venkatesan S, Ganapathy M N K. Impact of nitrogen and potassium fertiliser application on quality of CTC tea [J]. *Food Chem*, 2004, 84(3): 325-328.
- [9] Zheng W W(郑伟伟), Liu P(刘鹏), Xu G D(徐根娣), et al. Effect of aluminum on quality of tea plant [J]. *Ecol Environ(生态环境)*, 2006, 15(4): 822-826.(in Chinese)
- [10] Yang L Y(杨凌云), Xia J G(夏建国), Wu D Y(吴德勇). Effect of aluminum application on Mengshan tea quality in western Sichuan [J]. *J Anhui Agri Sci(安徽农业科学)*, 2007, 35(20): 6154-6146.(in Chinese)
- [11] Song J G(宋建国), Liu W(刘伟), Shang Q C(尚庆昌). Effect of acid stress on the growth, yield and quality of tomato [J]. *Environ Chem(环境化学)*, 2005, 24 (4): 423-425.(in Chinese)
- [12] Liang J(梁骏), Mai B R(麦博儒), Zheng Y F(郑有飞), et al. Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2008, 28(1): 274-283.(in Chinese)
- [13] Xu X Y(徐晓燕), Sun W S(孙五三), Li Z H(李章海), et al. Synthesis of nicotine of tobacco roots and effects of pH values on the roots growth and quality of tobacco [J]. *J Anhui Agri Univ(安徽农业大学学报)*, 2004, 31(3): 315-319.(in Chinese)
- [14] GB/T 8313-2002. 茶多酚的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 150-151.
- [15] GB/T8312-2002. 咖啡碱测定 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 147-148.
- [16] GB/T 8314-2002. 游离氨基酸测定 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 153-154.
- [17] 钟梦. 茶叶品质理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 476-477.
- [18] 张志良. 植物生理学实验指导 [M]. 第3版, 北京: 高等教育出版社, 2003: 127-128.
- [19] 王延峰, 李延清, 郝永红, 等. 超声法提取银杏叶黄酮的研究 [J]. *食品科学*, 2002, 23(8): 166-167.
- [20] Xiao L Q(肖乐勤). Determination of aluminum in water by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. *Chin J Spectro Lab(光谱实验室)*, 2006, 23(1): 66-68. (in Chinese)
- [21] Li P, Wang Y H, Ma R, et al. Separation of tea polyphenol from green tea leaves by a combined CATUFM-adsorption resin process [J]. *J Food Eng*, 2005, 67: 253-260.
- [22] Huang L F(黄丽凤), Liu Y P(刘友平), Li D Y(黎代余). Advances on research of purification of tea polyphenols from green tea leaves [J]. *Chin Food Add(中国食品添加剂)*, 2010(1): 69-72. (in Chinese)
- [23] Zhao H(赵卉), Du X(杜晓). The research progress of the decaffeinated tea [J]. *J Huazhong Agri Univ (Nat Sci)(华中农业大学学报: 自然科学版)*, 2008, 27(4): 564-568.(in Chinese)
- [24] 陆松候, 施兆鹏. 茶叶评价与检验 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 55-70.
- [25] Li H S(李海生). A Study on the absorption and accumulation of aluminium, copper and mineral nutrients in tea seedlings under different pH levels [J]. *J Guangdong Edu Inst(广东教育学院学报)*, 2005, 25(5): 78-81.(in Chinese)
- [26] Deborah A, Tesfaye M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils: A review [J]. *Plant Cell Tis Org Cult*, 2003, 75(3): 189-207.
- [27] 廖万有. 茶生物圈中铝的生物学效应及其研究展望 [J]. *福建茶叶*, 1995(4): 13-17.
- [28] Wang X P(王小平), Liu P(刘鹏), Luo H(罗虹), et al. Effect of Al and F interaction on the tea quality [J]. *J Tea Sci(茶叶科学)*, 2009, 29(1): 9-14.(in Chinese)