

氟对茶树生理的影响及茶树耐氟机制研究进展

杨晓^{1,2} 张月华¹ 余志¹ 陈玉琼¹ 倪德江¹

1. 华中农业大学园艺林学学院/园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070;
2. 上海交通大学农业与生物学院/农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240

摘要 茶树具有聚氟特性,是植物界氟含量最高的几种植物之一。本文主要从茶树富氟特点和分布规律、茶树氟生理等方面进行综述,并提出了茶树耐氟的5种可能机制,即茶树对氟的吸收模式与有效转移、茶树次生代谢对降低氟毒害的作用、茶树保护性酶和非酶抗氧化剂对氟毒害的防御、茶树体内氟化物的存在形式对氟毒害的缓解、茶树细胞壁对氟的固定与解毒作用。

关键词 茶树; 氟; 生理; 耐氟机制

中图分类号 TS 272 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)03-0142-05

近年来,关于“饮茶性氟中毒”如氟骨症及氟斑牙等临床症状的报道日益增多^[1],人们对茶叶的氟安全性愈加重视。茶树(*Camellia sinensis* L. O. Kuntze)是植物界氟含量最高的植物之一,能通过土壤、水及空气吸收并积累氟化物^[2],但氟并非茶树必需元素,高浓度的氟对茶树生长^[3]与茶叶品质^[4-5]都会造成危害。本文就氟对茶树的生理影响、茶树对氟的吸收累积特性、氟在茶树体内运输机制、茶树叶片亚细胞结构的氟分布及茶树可能存在的耐氟机制进行综述。

1 茶树富氟特点、含量及分布规律

在相同的土壤和生长环境下,茶树氟含量比其他植物高出10~100倍。一般的植物中,氟含量约为0.4~264.0 mg/kg^[6-9],而茶树中氟含量达到10.88~3 625 mg/kg时,仍能正常生长,并未表现出受害症状^[9-16]。因此,茶树被认为是一种氟聚集植物,具有从周围环境中超累积氟的能力^[2]。茶树生育期不同,其体内氟含量存在巨大差异。在不同季节的茶鲜叶中,一般认为春茶中氟含量最高,夏秋茶氟含量相对较低^[17];成熟叶的氟含量比嫩叶的高,且随叶片成熟度的增加而逐渐增大^[17]。茶树器官中的氟含量分布规律为:老叶>落叶>嫩叶>茶果>细茎>侧根>粗茎>主根,其中约90%的氟都

聚集在叶片中,茶树品种间的氟含量也存在差异,遗传因素被认为是最主要的因素^[18]。Ruan等^[19]比较了不同茶树品种在浙江和江苏两地的氟含量,发现不同茶树品种氟含量有显著差异。Shu等^[2]也发现四川省不同茶树品种氟含量差异很大,其中黔湄303氟浓度是其他品种的2~3倍。吴命燕^[11]对不同茶树品种相同叶位之间的氟含量进行比较后发现,不同品种同叶位之间氟含量存在差异,且与老叶中氟含量变化趋势基本一致,说明无论是老叶还是新梢的氟含量差异均体现了遗传因素的影响作用。

2 氟对茶树的生理影响

氟对植物而言,并非是一种必需元素^[1]。植物可以从土壤和大气中吸收累积氟,环境中一定量的氟常会对植物造成伤害^[7,20]。同样,氟也不是茶树的必需元素^[21],没有氟的存在,茶树仍可以正常生长,并无缺素症状出现。自然生长状态下的茶树可以随环境条件累积相当量的氟而无中毒现象,但外源施用高浓度的氟仍会对茶树造成危害^[3-4,9,22-30]。氟对茶树的毒害作用一般表现为以下几方面。

2.1 氟对茶树生长的影响

低剂量的氟对茶树生长影响不明显,但高剂量的氟会抑制茶树生长,并对茶树产生毒害作用。氟对植物的毒性作用主要表现在对新陈代谢的抑制和

收稿日期: 2014-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170646/C161104); 中央高校基金项目(52902-0900202126)

杨晓, 博士研究生, 研究方向: 园艺植物栽培生理。E-mail: yalxd1988@163.com

通信作者: 倪德江, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶安全。E-mail: nidj@mail.hzau.edu.cn

对细胞结构的破坏,过量摄入氟使植物叶绿体和细胞膜系统受损;光合作用、呼吸作用及其他新陈代谢关键酶活性受抑制;导致植株矮小、生长量减少;叶片褪绿、坏死、脱落,最终导致植株死亡^[28,31-34]。在茶树的水培试验中也发现了类似的现象,外源高浓度氟处理下,水培茶苗会出现氟过量症,出现叶色发黄、顶芽停止生长、根系生长不良、叶片脱落、顶芽枯死、根系发黑、断裂直至植株死亡等现象。李丽霞^[9]用水培法研究了不同浓度氟对茶苗的影响,发现质量浓度为200 mg/L 氟处理14 d的茶苗叶片有少量脱落,叶色暗淡,根系呈深黄色;随着氟的质量浓度继续增加,茶苗受氟胁迫症状越明显,当培养液氟质量浓度达到250 mg/L时,茶苗叶片大量脱落,根系转黑。

2.2 氟对光合作用的影响

氟对植物光合作用有较大影响。用低浓度氟化物处理茶树时,其叶绿素含量和光合速率略微升高^[28];高浓度的氟处理茶树时,其叶片光合速率、叶绿素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)均显著降低^[3,23-24]。氟的摄入会抑制植物光合作用,研究表明,植物受氟污染后,叶片表皮细胞关闭、气孔变形、细胞明显皱缩、表皮产生腐蚀孔和腐蚀斑,甚至还有裂缝的出现,这也会造成植物光合效率降低^[23,35-37]。氟能与叶绿素中的镁离子结合,引起类囊体扭曲,从而抑制光合原初反应^[23,38]。氟化物还可以通过抑制核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(rubisco)的活性从而阻碍碳同化过程^[39-40],抑制叶绿体类囊体膜上的ATP合酶活性从而阻碍光合磷酸化^[41];推测茶树与其他植物光合作用氟抑制机制相似,相关研究还有待深入。

2.3 氟对呼吸作用的影响

较低浓度氟化物处理植物,其初期呼吸方式由糖酵解途径转向磷酸戊糖途径,呼吸作用增强,随着氟浓度的增大和作用时间的延长,氟抑制了呼吸作用相关酶的活性,对线粒体造成不可逆的损害并使其生理功能全部丧失^[23,42]。目前,有关氟对茶树呼吸作用的影响的研究较少。Wang等^[24]发现在氟胁迫下,茶树蒸腾速率、ATPase活性均显著降低。Li等^[23]研究表明,高浓度氟处理使茶树叶片线粒体空泡化,甚至降解,这使酶分子附着的表面减少,使细胞呼吸减弱,茶树有氧糖代谢受阻,从而降低呼吸作用。

3 茶树吸氟及耐氟机制

茶树主要从土壤中吸收氟。土壤中存在难溶态、交换态和水溶态3种形态的氟,水溶性氟是茶树吸收的主要形态,难溶态氟和交换态氟不能被吸收^[43-47]。茶园土壤中富含有机质和交换性阳离子,这些都影响着茶园土壤氟的形态分布^[22,48]。茶树可以从酸性土壤中和大气氟含量高的地区积累丰富的氟,但在生产茶园中,很少出现氟毒害现象^[8,49]。在水培试验中,高浓度氟处理水培茶苗,茶苗并不是立即表现出受害症状,往往会经历一段时间^[11,50]。茶树耐氟的这种特征已引起学者广泛兴趣,并从多种角度开展了研究。

3.1 茶树对氟的吸收模式与有效转移

非积累型植物一般通过根被动吸收氟,氟在内皮层的渗透性较差,造成根中的氟浓度明显大于叶片^[47]。在较低浓度的氟溶液中,茶树根系通过主动吸收并积累氟,吸收动力学曲线符合Michalis-Menten动力学模型;在高浓度氟溶液中,茶树对氟的吸收随外界氟浓度提高呈线性增长,表现为被动吸收^[48]。在含氟的介质中,茶树对氟的转运系数为1.32~3.00,吸收的氟56%以上被贮藏于地上部分^[30]。在不含氟的水培条件下,老叶中的氟可以向根系和新梢转移,但老叶中的氟含量仍高于其他部位^[9]。茶树这种具有较强的运输和有效转运氟的能力,说明其体内尤其是叶片存在着某种不同于其他植物的氟存贮机制。当氟积累较少时,茶树根系源源不断的将氟运输至体内,随着氟积累的增多,叶片中的氟开始向其他器官迁移,但并不会抑制茶树对氟的吸收,这种独特的吸收模式,在使茶树叶片积累大量氟的同时又可以 let 茶树保持正常的生理状况而不受氟的毒害。

3.2 茶树次生代谢对降低氟毒害的作用

木质素和茶多酚都是茶树苯丙烷代谢的中间产物,属于合成的两个重要分支。木质素是植物细胞壁的主要成分之一,与植物的抗病、抗涝、抗寒和抗旱等抗逆性密切相关,其合成与植物其他苯丙烷物质如酚类物质、类黄酮等物质合成具有相关性^[49-50]。茶多酚不仅是茶叶中重要的品质成分,而且担当呼吸作用的中间递氢体,是一种特殊贮能方式,具有很强的清除自由基的能力,与茶树抗逆性相关;也可作为碳骨架参与木质素合成,从而参与茶树形态建成^[50]。研究表明,高浓度的氟会抑制茶树叶片茶多

酚及儿茶素的合成^[3-4,26],且具有计量依赖关系^[51],也会抑制茶树苯丙烷类代谢关键酶 PAL 的活性^[27]。研究发现,随氟浓度的升高,茶树叶片多酚类物质含量减少,木质素含量增加^[29],推测在较高浓度氟胁迫下,茶树体内酚类物质作为碳骨架参与合成木质素或氟作为调控物质使木质素合成途径成为苯丙烷代谢的主要代谢途径,茶树叶片木质化促进了茶树的抗逆性。因此,氟胁迫下次生代谢物质的转化可能也是茶树耐氟的机制之一。

3.3 茶树保护性酶和非酶抗氧化剂对氟毒害的防御

茶树在逆境胁迫下,活性氧平衡被破坏,产生大量有害的活性氧,它们会对茶树体内的 DNA、蛋白质、糖类和脂类等物质造成不可逆的损害^[28,52-53],体内细胞膜脂过氧化加剧,细胞膜受损,最终导致植物死亡。在氟胁迫下,茶树可以通过调控自身代谢在一定浓度氟阈值内清除过多的活性氧,使自身免受伤害。茶树可以上调体内过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶的表达量和提高它们的活性,抑制过氧化氢(H₂O₂)和丙二醛(MDA)等的产生,减少其对机体的伤害;同时,茶树体内抗坏血酸-谷胱甘肽循环系统也对氟胁迫做出积极的响应,抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)活性、体内还原型抗坏血酸(ASA)/氧化型抗坏血酸(DHA)及还原型谷胱甘肽(GSH)/氧化型谷胱甘肽(GSSG)升高;正是这些保护性酶和非酶抗氧化剂的调节,在一定程度上清除了过多的活性氧,减轻了氟对茶树的毒害^[28]。随着氟浓度的增大,超过了茶树防御反应的阈值,膜脂过氧化加剧,丙二醛含量显著增加,细胞膜损坏,表现出中毒现象^[3,23,25]。

3.4 茶树体内氟化物的存在形式对氟毒害的缓解

茶树嗜氟喜铝,茶树吸收 F 和 Al 后,F 和 Al 按一定比例络合并富集于叶片等器官中。有学者推测氟铝共存的形式可以降低单独的氟与铝对茶树的毒害作用^[2]。有关茶树体内氟铝化合物的形式及运输方式还存在争论。Nagata 等^[54]发现茶树的成熟叶片中有铝氟复合物的存在,并推测铝氟络合物是氟在木质部运输的形态。Morita 等^[55-56]认为 Al 与 F 含量的浓度比值为 2 : 1,F 与 Al 主要以 F⁻、Al-柠檬酸盐和 Al-草酸盐分别运输,而 F/Al 化合物并非运输的主要形式。刘晓静^[34]认为 Al/F 比值为 2.6~2.7,同时以络合物和单体 2 种形式迁移,以单

体形式迁移时,叶片中氟和铝优先结合。张显晨^[57]发现当 $c(\text{Al}^{3+}) : c(\text{F}^{-}) = 1 : 3$ 时,有 52.1% 的氟以 Al/F 络合物形式被茶树吸收。也有研究表明,使用一定比例的氟铝混合物处理茶苗比氟单独处理对茶苗细胞结构破坏更严重,并推测茶树耐氟并不是简单形成了氟铝络合物^[28]。一些研究结果显示,氟可能有其他存在形态并发挥解毒作用。春晓娅^[58]研究表明,茶叶多糖富集了大量的氟,其氟含量占总氟含量的 80% 左右,氟能与多糖结合并主要以极性较小的状态存在,同时,与其他植物多糖相比,茶多糖中氟含量最高、络合氟能力最强。氟与茶多糖的这种特殊络合形式是否对缓解氟的毒害作用起到较好的屏蔽作用值得深入探讨。

3.5 茶树细胞壁对氟的固定与解毒作用

有学者通过差速离心法和 TEM-DEX 等方法研究氟在茶树叶片和根亚细胞中的分布规律,发现细胞壁组分是茶树氟主要的存储部位^[28,30,59]。在大田和水培的茶苗中,氟在茶树叶片亚细胞中含量的分布规律是细胞壁 > 细胞核和叶绿体 > 含核糖体的可溶性组分 > 线粒体^[28],氟主要积累在叶片和根系的细胞壁(76.84%~91.58%)和可溶性组分(53.24%~80.35%)中^[30]。细胞壁中蛋白质和淀粉酶等生物大分子含有可以和大量金属离子结合的基团结构,如醛基、羧基、氨基和磷酸盐等^[60],这些化学基团结构可以使氟与细胞壁结合,防止进入原生质体。可溶性部分的液泡可以囤积大量代谢废物,将富集的离子与原生质体隔离,减少对酶的损害和对细胞器的伤害^[30,61]。随着叶片的生长发育,根部的氟逐渐向叶片细胞壁累积,也存在原生质体结构中氟向细胞壁迁移的可能,细胞壁沉淀和细胞内的区隔化作用可以使得氟远离原生质这一生理代谢活动中心而不干扰茶树细胞正常生理活动^[30],这可能也是茶树耐氟机制之一。

4 展 望

近年来,有关茶树吸氟耐氟机制的研究已取得一定进展,但是仍存在一些问题,如氟在茶树体内的运输形式与运输机制;氟对茶树呼吸作用及茶树重要次级代谢的影响机制如苯丙烷代谢、咖啡碱代谢、茶氨酸等氨基酸的合成代谢等;细胞、分子水平上的耐氟机制研究,包括亚细胞存在形式与结合位点,氟的基因调控及耐氟基因的筛选与克隆。通过对这些问题的研究,将有利于我们进一步认识茶树富氟机

制,对指导低氟茶树品种的选育具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] CHAN L, MEHRA A, SOHEL S. Human exposure assessment of fluoride from tea (*Camellia sinensis* L.): a UK based issue[J]. Food Research International, 2013, 51: 564-570.
- [2] SHU W, ZHANG Z, LAN C, et al. Fluoride and aluminium concentrations of tea plants and tea products from Sichuan Province, PR China[J]. Chemosphere, 2003, 52(9): 1475-1482.
- [3] 唐茜, 赵先明, 杜晓, 等. 氟对茶树生长、叶片生理生化指标与茶叶品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 186-194.
- [4] LI C, NI D. Effect of fluoride on chemical constituents of tea leaves[J]. Fluoride, 2009, 42(3): 237-243.
- [5] LI C, YANG X, HU J, et al. Effect of fluoride on aroma of tea leaves[J]. Fluoride, 2013, 46(1): 25-28.
- [6] XIE Z, YE Z, WONG M. Distribution characteristics of fluoride and aluminium in soil profiles of an abandoned tea plantation and their uptake by six woody species[J]. Environment International, 2001, 26(5): 341-346.
- [7] FORNASIERO R B. Phytotoxic effects of fluorides[J]. Plant Science, 2001, 161(5): 979-985.
- [8] 缪崑, 王雁, 彭镇华. 植物对氟化物的吸收积累及抗性作用[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(3): 100-106.
- [9] 李丽霞. 茶树吸收富集氟的特性及初步调控研究[D]. 雅安: 四川农业大学图书馆, 2008.
- [10] 冯雪, 肖斌. 陕西茶园茶叶氟含量及影响因素[J]. 西北农业学报, 2011(1): 109-113.
- [11] 吴命燕. 茶叶氟积累特性及降氟措施研究[D]. 杭州: 浙江大学图书馆, 2011.
- [12] 谢忠雷, 陈卓, 孙文田, 等. 不同茶园茶叶氟含量及土壤氟的形态分布[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008(2): 293-298.
- [13] 乔沙, 伊晓云, 阮建云. 茶园土壤氟的生物有效性研究[J]. 安徽农业科学, 2011(19): 11534-11538.
- [14] 郗红建, 刘腾腾, 张显晨, 等. 安徽茶园土壤氟在茶树体内的富集与转运特征[J]. 环境化学, 2011(8): 1462-1467.
- [15] 苏祝成, 陆德彪, 朱有为, 等. 浙江山区茶园茶叶氟含量及影响因素[J]. 林业科学, 2009(12): 135-138.
- [16] FRATZL P, SCHREIBER S, ROSCHGER P, et al. Effects on sodium fluoride and alendronate on the bone mineral in mini pigs: a small-angle X-ray scattering and backscattered electron imaging study[J]. Journal of Bone and Mineral Research, 1996, 11: 248-253.
- [17] 刘超, 吴方正, 傅柳松, 等. 茶叶中的氟含量及测定方法研究[J]. 农业环境保护, 1998, 17(3): 37-40.
- [18] RUAN J, WONG M H. Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2001, 23(1): 53-63.
- [19] RUAN J, MA L, SHI Y, et al. Uptake of fluoride by tea plant (*Camellia sinensis* L.) and the impact of aluminum[J]. Journal of The Science of Food and Agriculture, 2003, 83: 1342-1348.
- [20] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [21] 向勤程, 刘德华. 氟对人体的作用及茶树富氟的研究进展与展望[J]. 茶叶通讯, 2002(2): 34-37.
- [22] 方兴汉, 吴采. 茶树某些矿质元素缺乏症和过量症的研究[J]. 中国茶叶, 1984(2): 19-21.
- [23] LI C, ZHENG Y, ZHOU J, et al. Changes of leaf antioxidant system, photosynthesis and ultrastructure in tea plant under the stress of fluorine[J]. Biologia Plantarum, 2011, 55(3): 563-566.
- [24] WANG L, TANG J, XIAO B, et al. Variation of photosynthesis, fatty acid composition, ATPase and acid phosphatase activities, and anatomical structure of two tea (*Camellia sinensis* L. O. Kuntze) cultivars in response to fluoride[J]. The Scientific World Journal, 2013(8): 1-9.
- [25] 王小平, 刘鹏, 罗虹, 等. 铝氟交互处理对茶树生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(9): 1359-1364.
- [26] 王小平, 刘鹏, 罗虹, 等. 铝氟交互处理对茶叶品质的影响[J]. 茶叶科学, 2009, 29(1): 9-14.
- [27] 李琼, 阮建云. 氟对茶叶品质成分代谢的影响[J]. 茶叶科学, 2009, 29(3): 207-211.
- [28] 李春雷. 氟对茶树幼苗生理生化的影响及机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2011.
- [29] 杨晓. 氟对茶树幼苗多酚合成代谢相关酶的影响[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2013.
- [30] 蔡荟梅, 彭传斌, 李成林. 三个品种茶树氟富集特性及其在亚细胞中的分布[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1668-1675.
- [31] MILLER G. The effect of fluoride on higher plants: with special emphasis on early physiological and biochemical disorders[J]. Fluoride, 1992, 26: 3-22.
- [32] 曾清如, 吴方正, 周细红, 等. 氟化物对植物的衰老效应及其机理探讨[J]. 农业环境保护, 1996, 15(5): 231-233.
- [33] FORNASIERO R. Fluorides effects on hypericum perforatum plants: first field observations[J]. Plant Science, 2003, 165: 507-513.
- [34] 刘晓静. 茶园土壤-茶树-茶汤系统中氟和铝的迁移、转化特征及饮茶型氟中毒的防治探索[D]. 北京: 中国科学院研究生院图书馆, 2006.
- [35] 陈宜宜, 何增耀, 叶兆杰. 植物叶吸收气态氟化物的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 1988, 7(2): 19-22.
- [36] 缪崑, 王雁. 植物对氟化物的吸收积累及抗性作用[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30: 100-106.
- [37] ELEFThERIOU E, TSEKOS I. Fluoride effects on leaf cell ultrastructure of olive trees growing in the vicinity of the Aluminium Factory of Greece [J]. Trees-Structure and Funct, 1991, 5(2): 83-89.
- [38] WEINSTEIN L, DAVISON A. Fluorides in the environment: effects on plants and animals[M]. United Kingdom: CABI,

- 2004.
- [39] 徐丽珊. 大气氟化物对植物影响的研究进展[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版, 2004, 27(1): 66-71.
- [40] 徐丽珊, 申秀英, 许晓路, 等. 氟化物对金华佛手碳代谢及花粉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 474-476.
- [41] 孟范平. HF 对梅树超氧化物歧化酶和纤维素酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 1997(16): 28-31.
- [42] YU M, MILLER G. Effect of fluoride on the respiration of leaves from higher plants[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1967, 8(3): 483-493.
- [43] 陆景冈, 赵小敏. 茶园土壤发育度与土壤及茶叶含氟量的关系[J]. 茶叶科学, 1992, 12(1): 33-38.
- [44] 吴卫红. 土-水-气界面间氟的迁移机理及其生态效应[D]. 杭州: 浙江大学图书馆, 2002.
- [45] RUAN J, MA L, SHI Y, et al. The impact of pH and calcium on the uptake of fluoride by tea plants (*Camellia sinensis* L.)[J]. *Annals of Botany*, 2003, 93(1): 97-105.
- [46] 石元值, 王新超, 方丽, 等. 四个茶树品种的氟吸收累积特性比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 396-403.
- [47] ARNESEN A. Availability of fluoride to plants grown in contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 13-25.
- [48] ZHANG L, LI Q, MA L, et al. Characterization of fluoride uptake by roots of tea plants (*Camellia sinensis* L. O. Kuntze)[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1): 659-669.
- [49] WANG Y, GAO L, SHAN Y, et al. Influence of shade on flavonoid biosynthesis in tea (*Camellia sinensis* L. O. Kuntze)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 141: 7-16.
- [50] 杨贤强, 王岳飞, 陈留记. 茶多酚化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [51] LU Y, GUO W, YANG X. Fluoride content in tea and its relationship with tea quality[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(14): 4472-4476.
- [52] STADTMAN E. Protein oxidation and aging[J]. *Science*, 1992, 257: 1220-1224.
- [53] ASADA K. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1999, 50(1): 601-639.
- [54] NAGATA T, HAYATSU M, KOSUGE N. Aluminium kinetics in the tea plant using ^{27}Al and ^{19}F NMR[J]. *Phytochemistry*, 1993, 32: 771-775.
- [55] MORITA A, HORIE H, FUJII Y, et al. Chemical forms of aluminum in xylem sap of tea plants (*Camellia sinensis* L.)[J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(20): 2775-2780.
- [56] MORITA A, YANAGISAWA O, TAKATSU S, et al. Mechanism for the detoxification of aluminum in roots of tea plant (*Camellia sinensis* L. Kuntze)[J]. *Phytochemistry*, 2007, 69(1): 147-153.
- [57] 张显晨. 氟在茶树体内的富集规律研究与测定方法优化[D]. 合肥: 安徽农业大学图书馆, 2011.
- [58] 春晓娅. 茶树新梢氟的分布特性及与多糖的结合方式初探[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2011.
- [59] 马士成. 铝对茶树氟吸收、累积、分布特性的影响及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学图书馆, 2012.
- [60] ALLAN D, JARRELL W. Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls[J]. *Plant Physiology*, 1989, 89(3): 823-832.
- [61] 汪良驹, 刘友良. 植物细胞中的液泡及其生理功能[J]. *植物生理学通讯*, 1998, 34(5): 394-400.

Physiological effects of fluoride on tea plant and fluoride-resistant mechanism of tea

YANG Xiao^{1,2} ZHANG Yue-hua¹ YU Zhi¹ CHEN Yu-qiong¹ NI De-jiang¹

1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University/
Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, Wuhan 430070, China;

2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University/
Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China

Abstract Tea plant which has strong ability to accumulate fluoride is one of the several plants containing richest fluoride. In this paper, the absorption and distribution of fluoride in tea tree and the influences of fluoride on physiology of tea plant was reviewed. The possible mechanisms including the uptake and transfer way of fluoride for fluoride-resistant, the role of secondary metabolites in reducing poison of fluoride, the defense system against the free radical injury under fluoride stress, the toxic effect of the combined forms on fluoride and the detoxification of cell walls in fixation of fluorine were discussed.

Key words tea plant; fluoride; physiology; fluoride-resistant mechanism