

氟对茶树生长、叶片生理生化指标与茶叶品质的影响

唐茜¹, 赵先明², 杜晓¹, 吴永胜¹, 梁琪惠¹, 王春梅¹

(1 四川农业大学园艺学院, 四川雅安 625014; 2 宜宾职业技术学院, 四川宜宾 644003)

摘要: 以2个茶树品种为试验材料, 通过土壤盆栽试验, 研究了土壤添加氟浓度为0~200 mg/kg对茶树生长、叶片生理生化指标与茶叶品质的影响以及茶树的氟累积特性。结果表明, 随氟处理浓度增加, 茶树的生长、叶绿素合成和光合作用均受到明显抑制; 福鼎大白茶的SOD、CAT和POD活性均随氟处理浓度的增加呈先升高后降低趋势, 名山白毫的3种酶活性则受到明显抑制。2个品种的新梢中游离氨基酸、儿茶素组分和咖啡碱含量也随施氟浓度的增加总体呈下降趋势, 茶叶品质降低, 表明氟可能抑制茶树儿茶素的合成代谢和氮素代谢。茶树的氟累积量也随着土壤氟水平的增加而增加, 且各器官的氟含量(y)与土壤中添加的氟(x)呈显著或极显著线性正相关; 茶树的聚氟能力依次为叶片>新梢>枝条>茎>根, 叶片是氟累积的主要器官。福鼎大白茶耐氟、抗氟的能力明显强于名山白毫, 但氟积累能力则低于名山白毫。

关键词: 茶树; 氟; 生理生化指标; 生长; 品质

中图分类号: S571.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)01-0186-09

Effects of fluorine stress on growth, physiological-biochemical characteristics and quality of tea leaves

TANG Qian¹, ZHAO Xian-ming², DU Xiao¹, WU Yong-sheng¹, LIANG Qi-hui¹, WANG Chun-mei¹

(1 College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China;

2 Yibin Vocational and Technical College, Yibin, Sichuan 644003, China)

Abstract: With a pot experiment, effects of fluorine stress with different concentrations (0—200 mg/kg) on growth, physiological-biochemical indexes of leaves, abilities of accumulating fluorine and quality characteristics in two tea cultivars (Mingshanbaihao and Fudingdabaicha) were studied. The results show that chlorophyll synthesis, tea plant growth and photosynthesis are significantly inhibited with the increase of fluorine stress. Meanwhile, the activities of SOD, CAT and POD in Fudingdabaicha are tended to increase at first and then decrease with the increase of fluorine stress. However, the activities of SOD, CAT and POD in Mingshanbaihao are significantly inhibited. The components of catechin and contents of free amino acids and caffeine, which are the indexes of the quality of tea, are decreased. These results indicate that the fluorine stress might restrain catechin synthesis and nitrogen metabolism. The accumulation of fluorine in tea plant is increased with the increase of fluorine concentration in soil. The total content of fluorine (y) in all organs of tea plant is significantly positively correlated with the fluorine concentrations (x), and the distribution order of fluorine in tea plants was: leaves > new shoots > branches > stems > roots. It's highlighted that Fudingdabaicha has a much better ability of tolerance and resistance to fluorine than that of Mingshanbaihao, while Mingshanbaihao accumulates more fluorine.

Key words: tea plant; fluorine; physiological and biochemical indexes; growth; quality

收稿日期: 2009-12-16

接受日期: 2010-09-06

基金项目: 国家现代茶叶产业技术体系项目资助。

作者简介: 唐茜(1963—), 女, 四川彭州市人, 教授, 主要从事茶树栽培生理方面的研究。E-mail: tangqi2008@126.com

茶叶是一种富氟饮品。一般绿茶、红茶和乌龙茶等成茶氟的含量在 300 mg/kg 以下,而用成熟叶和老叶制成的砖茶类产品中的氟含量较高,通常在 300 mg/kg 以上,最高的超过 1000 mg/kg^[1]。氟是人体必需的元素,通过饮茶可以补充一定的氟,有利于人体健康。但饮用含氟量极高的砖茶可导致“饮茶型”氟中毒,如氟斑牙、氟骨症^[1-3]。近年来,国内外对茶园土壤氟、茶树氟吸收累积特性及茶叶氟安全评价等方面进行了较多的研究^[4],取得了一定的进展,但系统研究氟对茶树生长、叶片生理生化指标与茶叶品质的影响的报道较少。本研究以 2 个茶树品种为材料,通过土壤盆栽试验,研究了不同浓度氟处理对茶树叶片的叶绿素含量、净光合速率等光合生理指标, SOD、POD、CAT 酶活性和丙二醛含量等抗性生理指标,茶叶中的儿茶素和氨基酸组分等生化成分指标的影响以及茶树对氟的累积特性,以期深入研究氟对茶树的毒害机理,茶树对氟的耐性机制和累积特性提供参考,并为调控茶叶氟含量,生产低氟茶提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2007 年 4 月进行。供试土壤取自位于雅安四川农业大学教学实习茶园(102°59'E, 29°58'N),砂质黄壤,有机质 10.38 g/kg, pH 4.78, 碱解氮 54.36 mg/kg, 速效磷 6.73 mg/kg, 速效钾 41.37 mg/kg, 水溶性氟 1.89 mg/kg。采用 1 年生的茶树(*Camellia sinensis* L.)扦插苗为试材,品种为名山白毫和福鼎大白茶(以下简称福鼎)。

试验设添加氟(F)为 0、20、50、100、150 和 200 mg/kg,共 6 个处理,用 F₀、F₁、F₂、F₃、F₄ 和 F₅ 表示,以 NH₄F 作为氟的来源。土壤经自然风干、去杂质、压碎后过 2 mm 孔径筛,混匀后按设计要求与氟充分混匀后,每盆装土 8 kg(以干土计,盆钵直径为 30 cm,高 25 cm,盆底部有盆垫,以便渗出水返回盆中),并补充尿素平衡氮元素含量,使各氟处理施入相同用量的氮元素。每盆栽种 4 株茶苗,每处理栽种 2 盆,重复 3 次。采用常规管理技术管理,如连续 7 天左右不下雨,对茶苗浇自来水,浇水以不从盆底渗出为度,自来水的氟含量为 0.52 mg/kg。在降雨强度较大时,用塑料布遮盖,阳光太强时用黑色遮阳网遮荫。

1.2 采样与测试项目及方法

2008 年 11 月(处理 19 个月)取茶树秋梢顶芽

下第 3、4 片成熟叶片测定各抗性生理指标。2009 年 4 月(处理 24 个月)取茶树越冬芽萌发的一芽二叶春梢制作生化分析样,测定主要生化成份;同时测定茶树生长量、光合生理指标和不同器官的氟含量。光合生理指标的测试部位为春梢芽下第四、五片成熟叶片。

茶树生长量:测量茶苗树高、树幅、主干直径及根重、地上部重量(干重)等生长势和生长量指标。

光合生理指标:采用分光光度法^[5]测定叶片的叶绿素含量;用 Li-6400 光合测定仪(USA)进行净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、细胞间隙 CO₂ 浓度(Ci)和气孔导度(Gs)的测定。

抗性生理指标: SOD 活性采用氮蓝四唑比色法^[6]测定,以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活性单位。POD 活性采用愈创木酚氧化法^[6]测定,以 1 min OD₄₇₀ 值增加 0.01 为一个酶活性单位。CAT 活性用分光光度法^[7]测定,以 1 min OD₂₄₀ 值减少 0.1 为一个酶活力单位。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[8]测定。蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定^[7]。

主要生化成份:采用 HPLC 法测定春梢的游离氨基酸^[9]、儿茶素组分和咖啡碱含量。

氟含量:在处理 24 个月,取出植株清洗后,按根、茎、枝条、成熟叶片和新梢(1 芽 5 叶)分别取样。样品经蒸汽杀青固定后,60℃烘箱中干燥备测。氟含量采用氟离子选择电极法^[10]测定。

数据利用 DPS3.01 数据处理软件进行统计分析, Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果分析

2.1 施氟对茶树生长的影响

福鼎和名山白毫茶树的树高、树幅、主干直径、根系和地上部重量都随施氟浓度的增加持续下降,说明氟处理抑制了茶树生长;且随施氟浓度的上升,抑制作用增强(表 1)。方差分析表明,除根重外,名山白毫的其它生长量指标均极显著或显著低于福鼎($F_{\text{根重}} = 0.96$, $F_{\text{树高}} = 46.36^{**}$, $F_{\text{树幅}} = 37.91^{**}$, $F_{\text{主干直径}} = 29.09^{**}$, $F_{\text{地上部重量}} = 8.51^{**}$),表明氟处理对名山白毫的抑制作用显著强于福鼎。

2.2 不同氟水平对茶树光合生理指标的影响

2.2.1 对叶绿素含量和组成的影响 从表 2 看出,随着氟浓度的升高,叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素(a+b)的含量呈明显下降趋势,且呈极显著负相关。福鼎的相关系数分别为: $r_{\text{chl. a}} = -0.972^{**}$ 、

表 1 不同氟水平对茶树生长的影响
Table 1 Effects of different concentrations of fluorine on tea plant growth

品种 Cultivar	处理 Treatment	树高 (cm) Height	树幅 (cm) Canopy width	主干直径 (cm) Diameter at stem base	根重 (g) Root biomass	地上部重量 (g) Above-ground biomass
福鼎 Fuding- dabaicha	F ₀	57.91 ± 9.03 a	54.83 ± 7.03 a	0.87 ± 0.07 a	26.75 ± 2.29 a	76.11 ± 13.40 a
	F ₁	56.14 ± 8.91 a	50.31 ± 8.91 ab	0.82 ± 0.10 ab	19.95 ± 2.75 b	38.16 ± 10.23 b
	F ₂	54.94 ± 5.79 a	44.06 ± 6.42 bc	0.80 ± 0.14 ab	12.26 ± 1.59 c	30.63 ± 9.19 bc
	F ₃	53.56 ± 7.98 a	39.50 ± 5.67 cd	0.76 ± 0.11 abc	9.63 ± 1.78 d	27.78 ± 7.87 bc
	F ₄	51.93 ± 8.67 a	35.21 ± 5.08 de	0.70 ± 0.09 bc	6.92 ± 1.00 e	22.21 ± 6.94 c
	F ₅	49.45 ± 6.93 ab	32.25 ± 1.76 e	0.65 ± 0.10 c	4.28 ± 1.21 f	18.86 ± 3.53 c
名山白毫 Mingshan- baihao	F ₀	68.19 ± 8.33 a	63.42 ± 6.45 a	0.87 ± 0.07 a	37.23 ± 3.70 a	87.29 ± 15.41 a
	F ₁	56.35 ± 6.36 b	35.67 ± 5.26 b	0.74 ± 0.21 ab	16.02 ± 3.73 b	36.93 ± 12.98 b
	F ₂	40.58 ± 7.65 c	28.35 ± 4.13 c	0.63 ± 0.05 bc	9.63 ± 1.86 c	18.80 ± 7.09 c
	F ₃	33.69 ± 7.87 cd	21.50 ± 5.39 cd	0.59 ± 0.08 c	6.73 ± 1.38 d	11.65 ± 5.19 cd
	F ₄	29.91 ± 4.27 de	18.67 ± 2.98 de	0.51 ± 0.11 cd	3.78 ± 0.95 e	8.43 ± 1.26 d
	F ₅	21.81 ± 2.85 e	13.03 ± 3.08 e	0.41 ± 0.10 d	3.23 ± 0.84 e	6.03 ± 2.74 d

注(Notes): 同列数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at 5% level.

$r_{\text{chl. b}} = -0.917^{**}$ 、 $r_{\text{chl. (a+b)}} = -0.965^{**}$; 名山白毫的相关系数分别为: $r_{\text{chl. a}} = -0.910^{**}$ 、 $r_{\text{chl. b}} = -0.972^{**}$ 、 $r_{\text{chl. (a+b)}} = -0.928^{**}$ 。其中, F₅ 处理 (F 200 mg/kg) 福鼎的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 (a + b) 的含量分别为 F₀ 的 64.42%、67.90% 和 65.40%; 名山白毫分别为 F₀ 的 56.68%、72.41%

和 61.18%。方差分析表明, 2 个品种的叶绿素 a、叶绿素 b 含量差异显著 (叶绿素 a, $F = 24.97^{**}$; 叶绿素 b, $F = 37.78^{**}$), 但叶绿素 (a + b) 的含量差异不显著 ($F = 2.18$), 且名山白毫的叶绿素 a 和叶绿素 (a + b) 含量的降幅均明显大于福鼎。表明氟处理对名山白毫叶绿素合成的抑制效应也强于福鼎。

表 2 不同氟水平对叶绿素含量和组成的影响
Table 2 Effects of different concentrations of fluorine on chlorophyll content and component

品种 Cultivar	浓度 (mg/L) Concentration	叶绿素 a Chl. a		叶绿素 b Chl. b		叶绿素 (a + b) Chl. (a + b)	
		(mg/g)	(%)	(mg/g)	(%)	(mg/g)	(%)
福鼎大白茶 Fuding- dabaicha	F ₀	2.08 ± 0.18 a	100	0.81 ± 0.06 a	100	2.89 ± 0.23 a	100
	F ₁	2.05 ± 0.23 a	98.56	0.80 ± 0.04 a	98.77	2.85 ± 0.21 a	98.62
	F ₂	1.79 ± 0.23 b	86.06	0.64 ± 0.06 b	79.01	2.43 ± 0.34 b	84.08
	F ₃	1.56 ± 0.30 c	75.0	0.62 ± 0.07 b	76.54	2.20 ± 0.12 c	76.12
	F ₄	1.43 ± 0.24 c	68.75	0.58 ± 0.07 bc	71.60	2.01 ± 0.32 c	69.55
	F ₅	1.34 ± 0.06 d	64.42	0.55 ± 0.03 c	67.90	1.89 ± 0.05 c	65.40
名山白毫 Mingshan- baihao	F ₀	2.17 ± 0.20 a	100	0.87 ± 0.04 a	100	3.04 ± 0.02 a	100
	F ₁	1.71 ± 0.09 b	78.80	0.82 ± 0.09 ab	94.25	2.52 ± 0.20 b	82.89
	F ₂	1.63 ± 0.18 bc	75.12	0.76 ± 0.07 bc	87.36	2.39 ± 0.06 bc	78.62
	F ₃	1.51 ± 0.11 c	69.59	0.73 ± 0.02 c	83.91	2.24 ± 0.07 c	73.68
	F ₄	1.27 ± 0.15 d	58.53	0.64 ± 0.06 d	73.56	1.90 ± 0.25 d	62.50
	F ₅	1.23 ± 0.08 d	56.68	0.63 ± 0.05 d	72.41	1.86 ± 0.18 d	61.18

注(Notes): 同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level.

2.2.2 对光合作用的影响 从表3可看出,茶树的净光合速率(Pn)随施氟浓度的增加呈下降趋势(福鼎 $r = -0.933^*$,名山白毫 $r = -0.990^{**}$),且名山白毫的Pn下降幅度大于福鼎。在 F_5 (200 mg/kg)时,福鼎和名山白毫的Pn分别为对照 F_0 的75.6%和56.1%。茶树的气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)也随施F浓度的增加趋于下降(福鼎: $r_{Gs} = -0.947^{**}$, $r_{Tr} = -0.919^*$, $r_{Ci} = -0.940^*$; 名

山白毫: $r_{Gs} = -0.958^{**}$, $r_{Tr} = -0.887^*$, $r_{Ci} = -0.990^{**}$),施氟浓度越高受到的抑制作用越强。比较2个品种的光合生理指标,除Gs无显著差异外($F = 0.44$),Pn、Tr和Ci均有明显差异($F_{Pn} = 60.43^{**}$ 、 $F_{Tr} = 31.74^{**}$, $F_{Ci} = 10.03^{**}$),名山白毫的Pn、Tr明显低于福鼎,表明其受抑制程度也强于福鼎。这与不同氟水平对叶绿素含量的影响趋势相一致。

表3 不同氟水平对茶树光合作用的影响
Table 3 Effects of different concentrations of fluorine on photosynthesis of tea plant

品种 Cultivar	浓度(mg/L) Concentration	净光合速率 Pn		气孔导度 Gs		蒸腾速率 Tr		胞间 CO ₂ 浓度 Ci	
		[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	(%)	[$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	(%)	[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	(%)	($\mu\text{L}/\text{L}$)	(%)
福鼎大白茶 Fuding- dabaicha	F_0	11.82 ± 0.90 a	100	0.16 ± 0.02 a	100	2.94 ± 0.14 a	100	211.62 ± 19.09 a	100
	F_1	11.40 ± 0.84 ab	96.4	0.14 ± 0.02 b	85.5	2.82 ± 0.35 a	95.9	209.47 ± 14.68 ab	99.0
	F_2	10.86 ± 0.69 b	91.9	0.13 ± 0.02 b	82.4	2.27 ± 0.33 b	77.4	206.57 ± 22.77 ab	97.6
	F_3	10.41 ± 1.03 b	88.1	0.13 ± 0.02 b	81.1	2.18 ± 0.32 b	74.1	205.83 ± 27.54 ab	97.3
	F_4	9.84 ± 0.89 c	83.3	0.11 ± 0.02 c	71.7	2.13 ± 0.54 b	72.5	205.58 ± 14.49 ab	97.1
	F_5	8.93 ± 0.95 d	75.6	0.10 ± 0.03 d	59.7	1.87 ± 0.17 c	63.6	200.49 ± 20.40 b	94.7
名山白毫 Mingshan- baihao	F_0	12.30 ± 0.89 a	100	0.17 ± 0.02 a	100	2.62 ± 0.29 a	100	246.78 ± 12.45 a	100
	F_1	11.08 ± 0.80 b	90.0	0.15 ± 0.02 b	89.9	2.35 ± 0.29 b	89.7	235.78 ± 12.33 b	95.5
	F_2	10.42 ± 0.93 c	84.7	0.14 ± 0.03 c	79.9	2.30 ± 0.44 bc	87.5	224.28 ± 16.53 c	90.9
	F_3	9.08 ± 0.42 d	73.8	0.12 ± 0.04 d	69.2	2.32 ± 0.22 bc	88.5	206.89 ± 16.47 d	83.8
	F_4	8.12 ± 0.67 e	66.0	0.11 ± 0.02 de	65.7	2.21 ± 0.17 c	84.3	193.11 ± 41.13 e	78.3
	F_5	6.90 ± 0.16 f	56.1	0.10 ± 0.02 e	59.2	1.72 ± 0.41 d	65.4	183.60 ± 8.10 e	74.4

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level.

2.3 不同氟水平对茶树抗性生理指标的影响

2.3.1 对 POD、SOD、CAT 活性的影响 POD、SOD、CAT 共同组成植物体内一个有效的活性氧清除系统,能有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[11]。由图1可知,随施F浓度的升高,福鼎的POD、SOD、CAT活性都呈现出先扬后抑的趋势;但无显著相关性($r = -0.6279$ 、 -0.6832 、 -0.7315)。 F_1 和 F_2 处理的SOD活性分别比 F_0 处理高4.77%、13.33%,CAT活性分别比 F_0 处理升高7.97%、13.35%;POD活性分别比 F_0 处理高56.86%、57.08%,表现出明显的激活效应;而 F_3 、 F_4 和 F_5 处理的SOD活性分别比 F_0 处理下降1.26%、2.79%、5.93%,CAT活性分别比 F_0 处理下降3.73%、6.50%、11.98%,POD活性分别比 F_0 处理下降0.60%、27.83%、31.56%。名山白毫的POD活性也是先升高后降低,且与施氟浓度呈极显著负相关($r =$

-0.9550^{**}), F_1 处理的POD活性比 F_0 处理高12.25%,但 F_2 、 F_3 、 F_4 和 F_5 处理的POD活性分别比 F_0 处理下降2.84%、24.62%、35.75%、43.09%。SOD、CAT活性则呈逐渐下降的趋势,也与施氟浓度呈极显著负相关($r = -0.9971^{**}$ 、 -0.9679^{**});从 F_1 到 F_5 ,SOD活性分别比 F_0 处理下降4.40%、6.48%、8.28%、11.07%、16.72%;CAT活性分别比 F_0 处理下降2.69%、11.74%、18.96%、27.15%、44.06%。图1还看出,在 F_0 水平,名山白毫的SOD和CAT活性均高于福鼎,POD活性则显著低于福鼎;而施氟量从 F_1 到 F_5 水平,名山白毫的3种抗氧化酶的活性均低于福鼎,表明福鼎清除自由基的能力强于名山白毫。

2.3.2 对 MDA 含量的影响 植物在逆境中,细胞原生质膜中的不饱和脂肪酸会发生过氧化作用产生MDA,使质膜系统受到伤害,因而MDA含量可反映

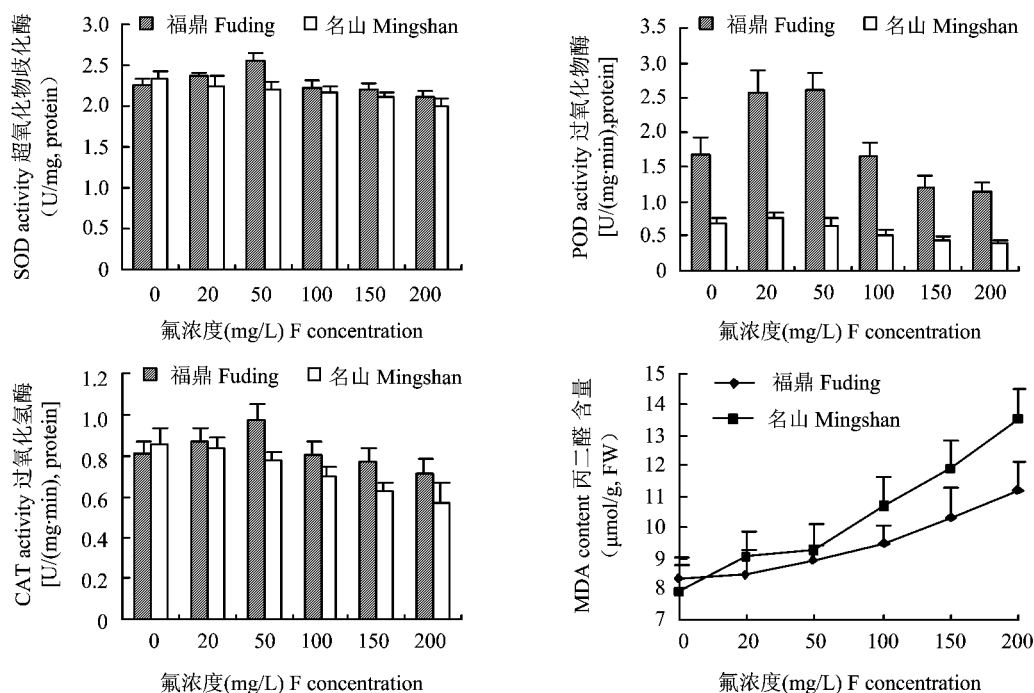


图1 不同氟水平对茶树叶片 SOD、POD、CAT 酶活性和 MDA 含量的影响

Fig.1 Effects of fluorine stress on leaf SOD、POD、CAT activities and MDA content of tea plant

膜脂过氧化作用的强弱^[12]。由图 1 可知, 名山白毫和福鼎的 MDA 含量都随加氟浓度的增加呈逐渐升高趋势, 呈极显著正相关 ($r = 0.991^{**}$ 、 0.993^{**})。从 F_1 到 F_5 , 名山白毫的 MDA 含量分别比 F_0 处理高 14.65%、16.99%、35.32%、50.64%、70.81%; 福鼎则分别比 F_0 处理高 1.72%、7.07%、13.44%、21.69%、34.15%。显示膜脂过氧化水平升高, 造成膜透性增大, 膜结构受到一定程度的损伤。此外, 名山白毫各处理的 MDA 含量均高于福鼎, 表明其细胞膜脂质氧化程度高于福鼎, 细胞膜损伤程度更为严重。

2.4 氟对茶叶主要生化成分的影响

茶叶中的氨基酸、儿茶素和咖啡碱是茶叶主要品质成分, 影响茶汤滋味等感官品质。表 4 看出, 当土壤施入外源氟 20~100 mg/kg 时, 2 个品种新梢的 17 种游离氨基酸总量均低于对照, 且随施氟浓度升高而降低。对新梢氨基酸组分进行分析发现, 各处理间谷氨酸、天冬氨酸、茶氨酸和精氨酸等与茶叶香气、滋味等密切相关的氨基酸含量总体也呈下降趋势。从 F_0 到 F_3 , 名山白毫的氨基酸的含量均低于福鼎, 且降幅大于福鼎, 尤其是茶氨酸含量比 F_0 降低了 31.09%~37.05%。

不同氟水平对新梢中儿茶素的组成和含量也有一定影响(表 5)。福鼎 3 个处理的儿茶素总量、

2 种酯型儿茶素 (EGCG、ECG) 和咖啡碱的含量均低于 F_0 ; 但非酯型儿茶素 EGC、EC 的含量均高于 F_0 。除 GCG 外, 名山白毫 F_1 处理的各儿茶素组分的含量和咖啡碱含量均高于 F_0 和 F_2 、 F_3 处理; 而 F_2 和 F_3 处理的儿茶素总量、2 种酯型儿茶素 (EGCG、ECG) 和咖啡碱的含量均低于 F_0 。

2.5 茶树对氟的吸收积累

2.5.1 对氟的吸收 根据 Sabine^[13] 提出吸收系数 AC ($AC = C_0/C_x$, C_0 表示某一器官中 x 元素的浓度, C_x 表示同一植物参比器官中同一元素的浓度), 可比较茶树各器官对氟的相对吸收程度^[14]。表 6 是以根为参比器官的茶树各部位的氟吸收系数, 显示出叶片和新梢的吸收系数约为根的 11~25 倍和 3~10 倍, 约为茎的 16~35 倍和 6~14 倍, 明显高于根、茎部。而且随氟处理浓度的增加, 各部位的氟吸收系数总体呈下降趋势, 尤其是 F_5 处理时, 吸收系数大幅下降。

2.5.2 对氟的积累 从表 7 可看出, 除新梢的 F_5 处理外, 茶树各器官的氟积累量随着施氟浓度的升高而增加, 叶片和新梢 (1 芽 5 叶) 中的氟含量明显高于茎、枝条和根。茶树的聚氟能力依次为叶片 > 新梢 (1 芽 5 叶) > 枝条 > 茎 > 根。统计分析表明, 茶树各器官的氟含量 (y) 与土壤中添加的氟 (x) 呈显著或极显著线性正相关(表 8)。从表 7 还可看出, 名

表 4 不同氟水平对新梢氨基酸组分的影响 (mg/kg)
Table 4 Effects of different concentrations of fluorine on component of free amino acids in new shoots

氨基酸 Amino acid	福鼎大白茶 Fudingdabaicha				名山白毫 Mingshanbaihao			
	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃
天冬氨酸 Asp	1.46	1.44	1.32	1.39	1.51	1.46	1.48	1.29
丝氨酸 Ser	0.72	0.72	0.84	0.54	0.63	0.76	0.57	0.43
谷氨酸 Glu	2.64	2.72	2.14	1.98	2.79	2.47	2.00	1.70
甘氨酸 Gly	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
组氨酸 His	3.31	2.56	1.48	1.09	3.37	2.02	1.28	1.23
精氨酸 Arg	8.29	7.76	3.83	2.39	5.98	6.24	3.35	2.23
苏氨酸 Thr	0.31	0.29	0.28	0.22	0.31	0.29	0.25	0.21
丙氨酸 Ala	0.17	0.15	0.14	0.1	0.17	0.15	0.13	0.09
脯氨酸 Pro	0.56	0.52	0.63	0.55	0.62	0.59	0.58	0.61
茶氨酸 The	15.09	14.08	14.29	12.89	15.92	10.97	10.20	9.77
酪氨酸 Tyr	0.03	0.1	0.12	0.15	0.02	0.09	0.08	0.03
缬氨酸 Val	0.06	0.04	0.07	0.05	0.01	0.07	0.05	0.05
甲硫氨酸 Met	0.97	1.42	1.45	1.66	1.5	0.61	0.81	1.22
赖氨酸 Lys	0.16	0.14	0.11	0.08	0.1	0.15	0.09	0.06
异亮氨酸 Ile	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
亮氨酸 Leu	0.23	0.16	0.24	0.23	0.21	0.22	0.19	0.21
苯丙氨酸 Phe	0.05	0.03	0.06	0.07	0.04	0.03	0.02	0.04
总量 Total	34.1	32.17	27.05	23.44	33.23	26.16	21.11	19.21

注 (Note): 氟浓度 ≥ 150 mg/kg 的处理,因发芽少,未能采到 1 芽 2 叶新梢样 The shoot of 1-bud and 2-leaf was not gotten, for sprout limited heavily under the higher F stresses (≥ 150 mg/kg).

表 5 不同氟水平对新梢儿茶素各组分及咖啡碱含量的影响
Table 5 Effects of different concentrations of fluorine on component of catechin and content of caffeine in new shoots

品种 Variety	处理 Treatment	儿茶素各组分 Catechin components (mg/g)						儿茶素总量 (mg/g) Catechin	咖啡碱 (%) Coffeine
		EGC	+ C	EC	EGCG	GCG	ECG		
福鼎大白茶 Fuding- dabaicha	F ₀	11.98	0.77	7.29	71.59	10.10	15.79	117.53	40.20
	F ₁	17.08	0.33	8.15	58.39	9.03	14.55	107.54	38.07
	F ₂	15.11	0.51	9.12	64.61	9.36	15.08	113.79	38.90
	F ₃	20.89	1.74	8.15	62.48	8.77	14.58	116.60	38.34
名山白毫 Mingshan- baihao	F ₀	14.11	0.27	7.52	67.00	7.46	16.43	112.80	37.49
	F ₁	18.79	0.69	8.77	75.46	8.46	18.22	130.39	38.38
	F ₂	10.07	0.30	4.95	62.27	8.88	14.98	101.45	36.31
	F ₃	14.25	0.22	6.68	65.57	8.42	15.70	110.84	35.40

山白毫各器官的氟含量均显著或极显著高于福鼎 ($F_{\text{根}} = 8.13^*$, $F_{\text{茎}} = 5.81^*$, $F_{\text{枝条}} = 1.6^*$, $F_{\text{叶}} = 8.10^*$, $F_{\text{新梢}} = 60.98^{**}$)。

3 讨论

据方兴汉^[15]报道,在完全培养液中加入 0.5 ~ 1.0 mg/L 的氟,3 个月后茶树出现叶色变黄,根系、顶芽生长受阻的症状;当浓度为 4 ~ 8 mg/L 时,症

状加重,约 2 个月后,茶树嫩叶焦枯,老叶全部脱落,根系发黑而死。但这种氟过量症却很少在生产茶园中出现,其原因在于茶园的酸性土壤中,大量的氟离子与铝离子结合形成 AlF^+ 、 AlF^{2+} 等络合形式,消除了氟离子本身的毒性^[16]。氟处理使茶树叶绿素含量降低的原因可能是氟化物与叶绿素的镁离子结合,使色素合成受到抑制^[17],或者氟进入叶片组织后,与叶片内的可溶性硅酸结合,形成硅氟酸,而硅

表 6 茶树器官的氟吸收系数
Table 6 Coefficient of F absorption in organs of tea plant

品种 Variety	器官 Organ	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
福鼎大白茶	根 Root	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fuding-	茎 Stem	1.15	1.13	0.96	0.89	0.84	0.31
dabaicha	枝条 Branches	2.73	2.63	2.10	1.89	1.57	0.81
	叶片 Leaf	15.12	18.51	18.90	16.27	18.54	10.90
	新梢 Shoot	5.04	6.53	6.51	7.39	6.30	2.52
名山白毫	根 Root	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Mingshan-	茎 Stem	1.13	1.09	0.76	0.67	0.62	0.36
baihao	枝条 Branches	2.71	2.42	1.65	1.38	1.25	0.60
	叶片 Leaf	19.34	24.69	16.19	14.96	14.09	10.83
	新梢 Shoot	6.36	9.49	9.78	8.08	8.76	3.58

表 7 不同氟水平对茶树不同器官的氟积累量的影响 (mg/kg)
Table 7 Effects of different concentrations of F on accumulation of F in different organs of tea plant

品种 Variety	器官 Organ	处理 Treatment					
		F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
福鼎	根 Root	34.74 ± 3.54 d	38.57 ± 0.79 d	47.98 ± 2.15 c	54.47 ± 1.30 c	71.81 ± 11.37 b	170.7 ± 2.23 a
大白茶	茎 Stem	39.91 ± 4.03 d	43.67 ± 1.89 cd	45.23 ± 2.56 cd	48.65 ± 2.46 bc	60.89 ± 5.97 a	52.59 ± 2.63 b
Fuding-	枝条 Branches	94.96 ± 2.30 c	101.4 ± 3.68 c	101.0 ± 1.42 c	102.4 ± 3.95 c	112.9 ± 12.10 b	138.7 ± 4.85 a
dabaicha	叶片 Leaf	525.1 ± 33.59 e	714.6 ± 126.14 d	945.1 ± 13.25 c	886.3 ± 31.92 c	1331.5 ± 132.8 b	1860.1 ± 98.44 a
	新梢 Shoot	175.1 ± 3.04 e	251.8 ± 20.85 d	313.1 ± 9.37 c	402.5 ± 11.90 b	452.71 ± 11.90 a	429.4 ± 18.06 a
名山白毫	根 Root	34.13 ± 1.44 e	40.13 ± 2.62 e	62.34 ± 2.04 d	79.53 ± 3.66 c	89.79 ± 9.47 b	189.7 ± 8.01 a
Mingshan-	茎 Stem	38.36 ± 1.34 e	43.42 ± 2.04 de	47.78 ± 1.08 cd	53.09 ± 1.18 bc	55.89 ± 2.98 b	67.41 ± 7.38 a
baihao	枝条 Branches	92.54 ± 3.42 d	96.94 ± 2.23 cd	103.1 ± 4.94 bc	110.0 ± 3.50 ab	111.4 ± 3.66 a	111.6 ± 4.94 a
	叶片 Leaf	660.4 ± 17.64 d	990.82 ± 9.70 c	1008.9 ± 29.86 c	1178.4 ± 18.29 b	1274.2 ± 39.32 b	2053.9 ± 81.64 a
	新梢 Shoot	217.2 ± 4.32 f	380.8 ± 14.22 e	609.0 ± 3.26 d	644.1 ± 7.41 e	782.2 ± 20.77 b	678.4 ± 22.68 a

注 (Note): 新梢为 1 芽 5 叶新梢 Shoot are the tender with 1-bud and 5-leaf. 同列中不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in same column mean significant at 5% level.

表 8 各器官氟含量 (y) 与氟处理浓度 (x) 的相关分析
Table 8 Correlation analysis of F content (y) and F concentration (x) in different organs

器官 Organs	福鼎大白茶 Fudingdabaicha		名山白毫 Mingshanbaihao	
	回归方程 Regression equation	相关系数 r	回归方程 Regression equation	相关系数 r
根 Root	$y = 0.5696x + 20.347$	0.8668 *	$y = 0.6697x + 24.535$	0.9196 **
茎 Stem	$y = 0.0785x + 41.675$	0.8445 **	$y = 0.1286x + 39.885$	0.9798 **
枝条 branch	$y = 0.1828x + 92.777$	0.8987 *	$y = 0.1052x + 95.588$	0.9485 **
叶片 Leaf	$y = 5.9534x + 521.376$	0.9586 **	$y = 5.5493x + 713.500$	0.9197 **
新梢 Shoot	$y = 1.2955x + 225.046$	0.9187 **	$y = 2.2625x + 356.244$	0.8337 *

注 (Note): * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$

氟酸和氟化物可使叶绿素结构降解^[18]。本试验供试茶树光合速率降低的原因除叶绿素的合成受阻外,还可能是积累在叶绿体内的氟化物抑制了核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)羧化酶的活性,同时位于叶绿体类囊体的ATP酶以及参与光合作用的其它酶也受到氟化物的抑制^[19],从而阻碍代谢机能,抑制植物生长。此外,在酸性条件下,氟化物能以HF的形式与蛋白质结合形成氢键,并对希尔反应产生破坏作用^[20],也使光合作用受到明显抑制。而氟化物对酶的活性抑制主要是通过取代酶蛋白中的金属元素成络合物或与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子结合形成F-Mg或F-Ca复合物并阻碍底物与酶的连接而完成的^[19]。

在施氟浓度为20、50 mg/kg时,SOD、CAT和POD酶活性都有逐渐被激活的趋势,这也是一种应急解毒措施,使细胞免受氟毒害的调节反应,在一定程度上可减轻自由基对膜的伤害^[21]。而在施氟浓度 ≥ 100 mg/L时,超过了防御反应的阈值,酶的结构或合成受到影响,酶活性反而受到抑制,使植物体内活性氧的产生和清除系统失衡,导致植物的生理代谢紊乱,从而使叶片的MDA含量增加,细胞膜发生脂质氧化并受到一定程度的损伤,显示高浓度氟对茶树有一定的毒害作用。这与孟范平等^[22]对大豆和菜豆的研究结果相似。从2个供试品种酶活性的变化规律还可看出,名山白毫清除 H_2O_2 的能力和耐氟能力均明显弱于福鼎。

茶叶作为保健饮料,其生化内含物组成及含量决定茶叶品质的高低。本试验条件下,当土壤加氟处理24个月,除名山白毫浓度为F 20 mg/kg的处理外,2个品种的其它处理的游离氨基酸、儿茶素组分以及咖啡碱的质量分数总体呈下降趋势。而李琼等^[23]的土壤加氟试验(处理176 d)则显示,一定的施氟量(50~250 mg/kg)增加新梢游离氨基酸含量,再增加施氟量则含量降低;而新梢咖啡碱、茶多酚总量及主要儿茶素组分(EGCG等)的含量则随氟施入量增加持续降低。其游离氨基酸含量变化趋势与本试验结果的差异可能与品种和处理时间不同有关。不同氟水平下,茶叶氨基酸含量下降的原因可能与氟化物抑制植物体内谷氨酸合成酶、谷酰胺合成酶、谷氨酸脱氢酶和丙氨酸转氨酶的活性有关。这样使得植物固氮能力下降,并减少了氨基酸的合成^[23-24]。而氟处理减少儿茶素合成的原因,可能与氟抑制苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性^[23]有关。

本研究中茶树氟积累量的变化规律与马立锋^[14]、沙济琴^[25]等的研究结果基本一致。进一步证实茶树对氟具有特别的累积特性,茶树从土壤中吸收的氟,主要向叶片运输,叶片和新梢是氟累积的主要器官,根、茎部基本不积累氟。

本试验结果显示,福鼎对氟的吸收和积累能力较名山白毫弱,但福鼎清除 H_2O_2 的能力则显著强于名山白毫,这是福鼎耐氟的生理机制。2个供试品种耐氟能力和氟积累能力的差异,可能与相关基因表达调控有关,有待进一步研究。因此,培育耐氟且含氟量低的茶树品种对降低茶叶中的氟含量有积极意义。

参考文献:

- [1] 周敬思. 中国茶叶的氟含量及饮茶型氟中毒预防措施的探讨[J]. 中国地方病学杂志, 1988, (7): 365-367.
Zhou J S. Discussion into the fluorine content in tea and preventive measure for tea drinking fluorosis in China[J]. Chin. J. Endem., 1988, (7): 365-367.
- [2] 自学信, 方进良, 吴金生, 等. 饮茶型氟中毒的氟骨症调查[J]. 地方病通报, 1994, (9): 65-66.
Zi X X, Fang J L, Wu J S et al. Survey of tea drinking fluorosis of bone[J]. Endem. Dis. Bull., 1994 (9): 65-66.
- [3] 曹进. 哈萨克人群砖茶型氟中毒调查报告[J]. 中国地方病学杂志, 1996, 15(5): 267-270.
Cao J. Report on a survey of tea drinking fluorosis in Kazakhs[J]. Chin. J. Endem., 1996, 15(5): 267-270.
- [4] 阮建云, 杨亚军, 马立锋. 茶叶氟研究进展: 累积特性、含量及安全性评价[J]. 茶叶科学, 2007, 27(1): 1-7.
Ruan J Y, Yang Y J, Ma L F. Recent progress in the research on fluoride in tea: accumulation characteristics by plants and concentrations in products with regarding to the impact on human health[J]. Tea Sci., 2007, 27(1): 1-7.
- [5] 徐华. 混合液法测定茶树叶片叶绿素含量[J]. 龙岩师专学报(自然科学版), 1995, 13(3): 94-95.
Xu H. Measuring the chlorophyll content in tea plant with a method of mixture liquid[J]. Longyan Normal Training Coll. (Nat. Sci.), 1995, 13(3): 94-95.
- [6] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
Xiong Q E. Experimentation of plant physiology[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2003.
- [7] 王晶英. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003. 82-83.
Wang J Y. Principle and experimental technology of plant biochemistry[M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2003. 82-83.
- [8] 赵世杰, 许长成. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 26(4): 62-65.
Zhao S J, Xu C C. Improvement of measuring MDA in plant tissue

- [J]. *Plant Physiol. Comm.*, 1994, 26(4): 62–65.
- [9] 朱旗, 施兆鹏, 童京汉, 等. HPLC 检测分析速溶绿茶游离氨基酸[J]. *茶叶科学*, 2001, 21(2): 134–136.
- Zhu Q, Shi Z P, Tong J H *et al.* HPLC determination of free amino acids in instant green tea[J]. *Tea Sci.*, 2001, 21(2): 134–136.
- [10] GB19965—2005, 砖茶氟含量[S].
- GB19965—2005, Fluoride content of brick tea[S].
- [11] Panla K P, Thompson J E. Evidence or the accumulation of peroxidized lipids in membranes of senescing cotyledons[J]. *Plant Physiol.*, 1984, 75: 1152–1157.
- [12] 郑爱珍. 重金属 Cr^{6+} 污染对辣椒幼苗生理生化特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1343–1346.
- Zheng A Z. Effects of heavy metal Cr^{6+} pollution on physiological and biochemical characteristics of pepper (*Capsicum Annuum* L.) seedlings[J]. *Agro-Environ. Sci.*, 2007, 26(4): 1343–1346.
- [13] 龚子同. 土壤地球化学的进展和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Gong Z T. Advances and applications in geochemistry of soil [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [14] 马立锋, 阮建云, 石元值, 等. 茶树氟累积特性研究[J]. *浙江农业学报*, 2004, 16(2): 96–98.
- Ma L F, Ruan J Y, Shi Y Z *et al.* Study on accumulation characteristics of fluorine in tea plants[J]. *Acta Agric. Zhejiangensis*, 2004, 16(2): 96–98.
- [15] 方兴汉. 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.
- Fang X H. Research into mineral element deficiency and adequacy of tea plant[J]. *China Tea*, 1984, (2): 19–21.
- [16] 陆英, 刘仲华. 茶叶中氟的研究进展[J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2004, 25(4): 84–88.
- Lu Y, Liu Z H. Recent advances in F of tea plant[J]. *Jishou Univ. (Nat. Sci.)*, 2004, 25(4): 84–88.
- [17] 张其德. 大气污染对植物光合作用的危害[J]. *植物杂志*, 1989, (2): 37–39.
- Zhang Q D. Damage of air pollution to photosynthesis of plants [J]. *J. Bot.*, 1989, (2): 37–39.
- [18] 周青, 黄晓华. 大气氟污染对农作物的危害[J]. *农业环境保护*, 1992, 11(5): 228–232.
- Zhou Q, Huang X H. Damage of crops from Fluorine pollution in air[J]. *Agro-Environ. Protec.*, 1992, 11(5): 228–232.
- [19] 孟范平, 吴方正. 氟化物对植物生理生化的影响[J]. *农村生态环境*, 1996, 12(1): 42–46.
- Meng F P, Wu F Z. Effects of fluoride on physiological and biochemical processes of plant[J]. *Rural Eco-Environ.*, 1996, 12(1): 42–46.
- [20] 高吉喜, 柳若安, 舒俭民, 等. 氟化物对植物新陈代谢影响研究进展[J]. *环境科学进展*, 1998, 6(3): 25–29.
- Gao J X, Liu R A, Shu J M *et al.* Recent advances in effects of fluoride on metabolism of plants [J]. *Adv. Environ. Sci.*, 1998, 6(3): 25–29.
- [21] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(1): 5–8.
- Xu Q S, Shi G X, Zhou H W *et al.* Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activated oxygen in leaves of *Ottelia alismoides* (L.) Pers [J]. *Chin. J. Ecol.*, 2003, 22(1): 5–8.
- [22] 孟范平, 李桂芳. 氟化氢对植物抗氧化酶活性的影响[J]. *环境导报*, 1997, (6): 18–22.
- Meng F P, Li G F. Effect of HF on the activities of antioxidative enzymes in plants[J]. *Environ. Herald*, 1997, (6): 18–22.
- [23] 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.
- Li Q, Ruan J Y. Effects of fluoride on the metabolism of tea quality components[J]. *Tea Sci.*, 2009, 29(3): 207–211.
- [24] 申秀英, 吴方正. 氟化物对桑叶氮代谢某些影响的研究[J]. *农业环境保护*, 1991, 10(5): 194–197.
- Shen X Y, Wu F Z. Research in effects of fluoride on nitrogen metabolism of *folium mori* [J]. *Agro-Environ. Protec.*, 1991, 10(5): 194–197.
- [25] 沙济琴, 郑达贤. 福建茶树鲜叶含氟量的研究[J]. *茶叶科学*, 1994, 14(1): 37–42.
- Sha J Q, Zheng D X. Research in the fluorine content of fresh tea leaves in Fujian[J]. *Tea Sci.*, 1994, 14(1): 37–42.