

## 基于主成分聚类分析研究茶树富集氟的特性

赵强<sup>1</sup>, 郜红建<sup>2\*</sup>, 张家侠<sup>1</sup>

(1. 安徽省农业科学院茶叶研究所, 黄山 245000; 2. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 利用主成分与聚类分析方法研究了不同无性系茶树品种体内氟的富集转运特性及其归类划分。结果表明, 茶树不同器官氟含量表现为老叶 ( $243.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 嫩叶 ( $101.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 根 ( $7.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、茎 ( $7.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的规律, 老叶和嫩叶氟含量分别在  $124.10\sim 464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $39.77\sim 256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 品种间氟含量差异显著 ( $P<0.05$ )。茶树老叶和嫩叶氟含量、氟的富集系数及转移系数在第 1 主成分 (方差贡献率为 73.89%) 中的载荷系数大于 0.9, 可据此将不同茶树品种聚氟特征分为 4 类: 乌牛早具有较高的富集系数 (106.1) 和转移系数 (39.4), 老叶 ( $464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和嫩叶 ( $256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 氟含量较高, 为高富集高转移型; 鳧早 2 号具有较低的富集系数 (34.2) 和转移系数 (6.7), 老叶 ( $124.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和嫩叶 ( $39.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 氟含量较低, 为低富集低转移型; 龙井 43 和平阳早的富集系数 ( $55.8\sim 71.7$ ) 中等, 转移系数 ( $4.9\sim 5.8$ ) 较低, 老叶 ( $264.10\sim 274.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和嫩叶 ( $83.04\sim 117.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 氟含量中等, 为中等富集低转移型; 浙农 113 等茶树品种具有中等富集系数 ( $48.9\sim 65.4$ ) 和转移系数 ( $7.9\sim 12.7$ ), 老叶 ( $203.69\sim 238.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和嫩叶 ( $75.72\sim 100.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 氟含量也中等, 为中等富集中等转移型。

**关键词:** 茶树品种; 氟含量; 富集; 转移; 主成分聚类分析

中图分类号: S571.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0768-07

### Fluoride accumulation characteristics of different tea varieties based on principal component and cluster analysis

ZHAO Qiang<sup>1</sup>, GAO Hongjian<sup>2</sup>, ZHANG Ji Xia<sup>1</sup>

(1. Tea Research Institution, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Huangshan 245000 ;

2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** Characteristics of accumulation and translocation of fluoride in different tea (*C. sinensis* L.) varieties were investigated by the principal component analysis and cluster analysis methods. Results revealed that the fluoride contents in different parts of tea plants were in the order of old leaf ( $243.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > young leaf ( $101.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > root ( $7.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and stem ( $7.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). The fluoride contents in old leaves and young leaves were  $124.10\sim 464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $39.77\sim 256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectively. Fluoride contents in leaves varied significantly with the different cultivars ( $P<0.05$ ). Principal component analysis results showed that: the contents of fluoride in young leaves and old leaves, BF (bioaccumulation factors) and TF (translocation factors) were significantly correlated (correlation coefficient > 0.9) to the first principal component whose variance contribution rate is 73.89%. The cluster analysis showed that different tea varieties could be clustered into 4 groups: Wuniuzao cultivar was characterized by high BF (106.1), high TF (39.4) and high fluoride contents in old ( $464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and young leaves ( $256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), so was grouped into high accumulation and high translocation type; Fuzao-2-hao cultivar had low BF (34.2), low TF (6.7) and low fluoride contents in old ( $124.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and young leaves ( $39.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), so was grouped into low accumulation and low translocation type; Longjing 43 and Pingyangzao cultivars were characterized by medium BF ( $55.8\sim 71.7$ ), low TF ( $4.9\sim 5.8$ ) and medium fluoride contents in old ( $264.10\sim 274.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and young leaves ( $83.04\sim 117.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), so were grouped into medium accumulation and low translocation type; Zhenong 113 and other tea varieties had medium BF ( $48.9\sim 65.4$ ), medium TF ( $7.9\sim 12.7$ ) and medium fluoride

收稿日期: 2016-08-08

基金项目: 安徽省农业科学院院长基金项目 (16B0815) 资助。

作者简介: 赵强, 研究实习员。E-mail: zhaoandqiang@163.com

\* 通信作者: 郜红建, 教授。E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

contents in old leaves (203.69~238.98 mg·kg<sup>-1</sup>) and young (75.72~100.17 mg·kg<sup>-1</sup>), so were grouped into medium accumulation and medium translocation type. Results from this study provide critical data for selecting low fluoride accumulation tea plant varieties.

**Key words:** tea cultivars; fluoride contents; accumulation; translocation; cluster analysis

氟广泛存在于自然界中, 作为人体必需营养元素之一, 对人体的作用非常微妙, 适量的氟摄入有利于防止龋齿和骨质疏松, 但摄入过量容易导致氟斑牙和氟骨症等<sup>[1]</sup>。WHO 规定, 成人日安全摄氟量应不大于 4 mg<sup>[2]</sup>。茶树 (*Camellia sinensis* L.) 中氟含量远远超出其他植物, 因此被认为是一种聚氟植物<sup>[3]</sup>。茶树体内的氟主要集中于叶片, 累积量占全株的 98.1%<sup>[4]</sup>。干茶中的氟含量最高可达几千 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中 80% 以上可溶解于茶汤中, 饮茶成为氟的重要摄入途径<sup>[5]</sup>。我国西藏、新疆和内蒙古等地居民习惯饮用的砖茶是粗老叶片和茶梗加工制造而成, 氟含量较高, 长期饮用易导致“饮茶型氟中毒”<sup>[6]</sup>。因此研究茶树中氟的富集规律, 进而降低茶叶中氟的含量具有重要意义。

在没有大气污染的情况下, 茶树体内的氟主要来源于土壤。土壤水溶态氟是茶树可直接吸收利用的形态<sup>[7]</sup>, 氟被根系吸收进而向茶树叶片迁移并富集<sup>[8]</sup>, 是茶树累积氟的主要途径。沙济琴和郑达贤的研究表明: 闽南主要茶树鲜叶氟含量范围在 33.2~117.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 不同种茶树叶片氟含量的顺序为: 毛蟹>铁观音>肉桂>本山>乌龙>佛手>水仙>黄檀, 多数品种鲜叶间的氟含量差异显著<sup>[4]</sup>。陈瑞鸿等分析了 31 个茶树品种后发现氟含量最高的乌牛早 (2 163.2 mg·kg<sup>-1</sup>) 比最低的浙农 113 (805.7 mg·kg<sup>-1</sup>) 高出 1.7 倍<sup>[9]</sup>。Ruan 等比较了不同品种茶树在浙江和江苏两地的氟含量后发现: 浙农 113>紫笋=浙农 121>碧峰<sup>[10]</sup>。不同茶树品种间氟含量存在显著差异, 品种是决定茶树氟含量主要因素之一<sup>[4,9-12]</sup>。但是, 有关对不同品种茶树吸收富集氟的差异性归类的研究还鲜有报道。

本研究对不同一年生无性系茶树品种吸收富集氟的特征进行分析, 在对老叶、嫩叶、根和茎氟含量以及富集系数、转移系数主成分分析的基础上进行聚类分析, 根据不同品种茶树聚氟的主要特性进行归类, 为茶树低氟品种的筛选提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验仪器与药品

奥立龙台式氟离子测定仪 (9609BNWP 氟离子选择电极), 万分之一天平, 酸度计, 电热干燥箱,

恒温水浴锅, 马弗炉等; 主要试剂为 NaF、柠檬酸三钠、冰醋酸、NaCl 和 NaOH 等均为国产分析纯。

### 1.2 供试材料

一年生无性系茶树: 多抗香、鳧早 2 号、红旗一号、龙井 43、平阳早、舒茶早、乌牛早、仙寓早、迎霜和浙农 113 采自安徽省安庆市东至茶树良种繁育基地 (30°10'N, 117°02'E)。茶树取回后 (2010 年 10 月), 取部分茶树用自来水洗净表面灰尘和杂质, 再用蒸馏水漂洗 3 次。把茶树分成根、茎、嫩叶 (一芽二叶) 和老叶 4 个部分, 105℃ 杀青 30 min, 60℃ 烘干后粉碎并过 40 目筛, 密封保存, 置于干燥器中备用。另一部分茶树留作室内培养用。

本实验所采集的茶园土壤为发育于花岗岩的红壤。茶树土壤采用对角线法取样<sup>[13-14]</sup>: 土样采集后剔除石砾、杂草和根系, 自然风干, 磨碎过 1 mm 孔径网筛, 低温 (4℃) 保存, 备用。

### 1.3 方法

**1.3.1 茶树培养方法** 茶树根据文献<sup>[15]</sup>用小西茂毅培养液培养。待茶树长出吸收根后, 挑选长势较一致茶树用蒸馏水冲洗根部 3 次, 除去表面营养液, 滤纸吸干表面水分后, 在 5 mg·L 的 NaF 水溶液中培养 72 h。参照 1.2 的试验方法烘干、粉碎成茶树样品, 备用。

**1.3.2 茶树样品中氟的提取方法** 茶样中的氟参照张显晨等<sup>[16]</sup>的方法提取, 分别称取 0.5000 g 茶树样品于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 超纯水, 沸水浴浸提 30 min, 冷却至室温, 120 r·min<sup>-1</sup> 震荡 30 min, 定性滤纸过滤后待测。

**1.3.3 土壤水溶性氟和全氟的提取方法** 土壤水溶性氟采用 70℃ 亚沸水震荡提取法<sup>[17]</sup>。土壤总氟参照吴卫红等<sup>[18]</sup>的方法提取: 准确称取 0.2500 g 的土样, 置于 50 mL 镍坩锅中, 用少量蒸馏水润湿后, 加入 16.75 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液, 轻敲坩锅以使样品分散均匀, 然后放入 150℃ 烘箱中保持 1 h 后取出, 将坩锅放入 300℃ 的马弗炉中, 再将温度调到 600℃, 在此温度下使样品熔融 30 min 后取出, 冷却, 加 5 mL 蒸馏水, 微热以使氢氧化钠熔块溶解。然后缓缓加入浓盐酸约 4 mL, 边加边搅拌, 使 pH 调整到 8~9 之间 (用 pH 试纸检查), 待冷却后, 转入 50 mL 容量瓶中, 定容至刻度线, 摇匀后过滤备测。

**1.3.4 测定方法** 茶样和土壤提取液中氟含量参照郜红建等<sup>[19]</sup>的方法测定:准确量取 15 mL 提取液于 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中,加入 15 mL 的 TISAB,充分搅拌均匀后,在氟离子测定仪上测量氟离子含量。

土壤有机质采用外加热法测定<sup>[20]</sup>,土壤 pH 用电极法测定(土水比为 1:2.5)<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 数据处理方法

茶树和土壤中的氟含量用每 kg 样品中所含氟的 mg 数表示( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),为 3 次重复测量的算术平均值±标准差。采用 Microsoft Excel 2003 进行数据整理和制图,用 DPS 7.55 进行方差分析(单因素试验统计分析多重比较中的 Duncan 新复极差法)。用 SPSS 16.0 进行主成分分析和聚类分析:先对不同品种茶树老叶、嫩叶、根和茎的氟含量以及富集系数、

转移系数进行主成分分析,据此进行聚类分析,聚类采用系统聚类(Hierarchical cluster analysis)中的组间联接法(Between-groups linkage),测度选用欧式距离(Euclidean distance)。

## 2 结果与分析

### 2.1 茶园土壤氟含量

本次调查的茶园土壤全氟含量在 300.11~374.07  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 342.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,标准差为 29.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这一含量在我国土壤的背景含量变化范围 191~1 012  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之内,与郜红建等<sup>[22]</sup>对安徽茶园土壤氟含量研究结果(312.5~359.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )相当。小于全国土壤氟含量的平均值 453  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,却高于世界土壤的全氟含量(200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[23]</sup>。

表 1 茶园土壤氟含量及理化性质

Table 1 Total soluble fluoride contents and basic properties in different tea-planting soils

茶树品种 Tea cultivars	全 F / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Total fluoride	水溶性 F / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Soluble fluoride	水溶性氟占全氟的百分比/% Percentage of soluble fluoride in total fluoride	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Organic matter	pH
多抗香 Duokangxiang	357.62±5.31 <sup>b</sup>	1.53±0.05 <sup>d</sup>	0.43	9.47±0.19 <sup>d</sup>	4.66±0.02 <sup>g</sup>
皂早 2 号 Fuzao No.2	374.07±6.05 <sup>a</sup>	1.55±0.04 <sup>d</sup>	0.41	10.19±0.95 <sup>d</sup>	4.85±0.04 <sup>e</sup>
红旗一号 Hongqi No.1	336.97±3.03 <sup>c</sup>	1.56±0.03 <sup>d</sup>	0.46	11.71±0.12 <sup>c</sup>	4.87±0.04 <sup>de</sup>
龙井 43 Longjing No.43	300.11±7.14 <sup>f</sup>	1.54±0.04 <sup>d</sup>	0.51	11.13±0.80 <sup>c</sup>	4.82±0.01 <sup>e</sup>
平阳早 Pingyangzao	372.40±18.72 <sup>a</sup>	1.82±0.26 <sup>c</sup>	0.49	11.32±0.50 <sup>c</sup>	4.91±0.03 <sup>d</sup>
舒茶早 Shuchazao	315.20±3.81 <sup>d</sup>	1.70±0.10 <sup>c</sup>	0.54	11.43±0.21 <sup>c</sup>	4.76±0.04 <sup>f</sup>
乌牛早 Wuniuzao	321.98±8.43 <sup>d</sup>	2.29±0.09 <sup>a</sup>	0.71	16.83±0.41 <sup>a</sup>	5.55±0.03 <sup>a</sup>
仙寓早 Xianyuzao	306.39±7.94 <sup>e</sup>	2.05±0.03 <sup>b</sup>	0.67	13.53±0.055 <sup>b</sup>	5.14±0.04 <sup>b</sup>
迎霜 Yingshuang	367.66±3.93 <sup>a</sup>	1.83±0.09 <sup>c</sup>	0.50	10.17±0.16 <sup>d</sup>	5.05±0.05 <sup>c</sup>
浙农 113 Zhenong No.113	372.24±6.41 <sup>a</sup>	1.70±0.02 <sup>c</sup>	0.46	7.10±0.09 <sup>e</sup>	4.46±0.03 <sup>h</sup>

注:表中的数据为平均值±标准差。邓肯氏显著性检验,不同小写字母表示差异显著( $\alpha=0.05$ )。下同。

Note: The data in the table are mean ± SD. Duncan's multiple test, different letters indicate significant difference at 5% level. The same below.

水溶性氟的含量在 1.53~2.29  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 1.76  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占全氟含量的 0.41%~0.71%。含量在全国土壤水溶性氟含量变化范围 0.1~10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之内,但高于世界土壤平均值(0.3~0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[23]</sup>。土壤水溶性氟含量与土壤 pH 呈极显著正相关( $r=0.77^{**}$ ,  $P<0.01$ ) (图 1),这可能是因

为随着土壤 pH 升高,  $\text{H}^+$  释放量减少,吸附氟的能力增强,使得土壤水溶性氟含量增高。水溶性氟与有机质也呈极显著性正相关( $r=0.70^{**}$ ,  $P<0.01$ ) (图 2),这可能由于土壤腐殖质通常带有的负电荷基团与土壤表面吸附的氟竞争结合位点,从而降低了土壤对氟的吸附有关<sup>[24]</sup>。

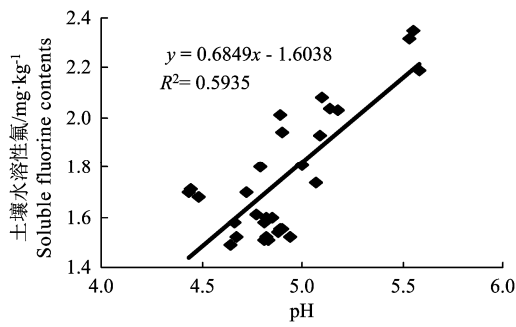


图 1 水溶性氟与 pH 的关系

Figure 1 The relationship between soluble fluorine contents and pH

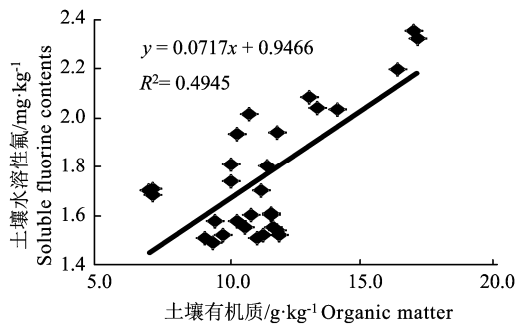


图 2 水溶性氟与有机质的关系

Figure 2 The relationship between soluble fluorine contents and organic matter

## 2.2 不同茶树体内氟的富集特征

不同茶树品种体内氟的平均含量表现为老叶 ( $243.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 嫩叶 ( $101.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 根 ( $7.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、茎 ( $7.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的规律, 老叶氟含量在  $124.10\sim 464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 均值为  $243.59 \pm 84.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其中乌牛早老叶氟含量 ( $464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 明显高于其他品种, 是皂早 2 号氟含量 ( $124.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的 3.7 倍。嫩叶氟含量在  $39.77\sim 256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为 ( $101.60 \pm 55.79$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其中乌牛早嫩叶氟含量 ( $256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 最高, 比皂早 2 号嫩叶氟含量 ( $39.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高出 5.4 倍。

根据我国农业部 2003 年颁布的关于茶叶中氟化物限量的行业标准 (NY 659-2003), 茶叶中氟化物 (以 F 计) 含量不高于  $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  [25]。本研究分析的茶树老叶氟含量除皂早 2 号外, 其余茶树品种老叶氟含量均高于国家限量标准值, 其中乌牛早 ( $464.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 老叶氟含量高出国限量标准值一倍以上, 其对茶叶质量安全的影响值得关注。而茶树嫩叶中, 除乌牛早嫩叶氟含量 ( $256.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高于国家标准值外, 其余茶树嫩叶氟含量均低于国家限量标准值。

表 2 不同茶树各器官氟含量

Table 2 The contents of fluoride in various organs of different tea plants

茶树品种 Tea cultivars	根/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Roots	茎/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Stems	嫩叶/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Young leaves	老叶/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Old leaves	富集系数 BF	转移系数 TF
多抗香 Duokangxiang	$6.96 \pm 0.41$ <sup>cd</sup>	$7.35 \pm 0.46$ <sup>d</sup>	$84.28 \pm 0.29$ <sup>e</sup>	$225.88 \pm 5.99$ <sup>e</sup>	65.4	9.3
皂早 2 号 Fuzao No.2	$8.03 \pm 0.26$ <sup>ab</sup>	$5.50 \pm 0.16$ <sup>e</sup>	$39.77 \pm 0.43$ <sup>g</sup>	$124.10 \pm 1.35$ <sup>g</sup>	34.2	6.7
红旗一号 Hongqi No.1	$7.88 \pm 0.69$ <sup>ab</sup>	$7.15 \pm 0.37$ <sup>d</sup>	$81.01 \pm 0.22$ <sup>e</sup>	$216.61 \pm 2.47$ <sup>e</sup>	63.5	12.7
龙井 43 Longjing No.43	$7.95 \pm 0.44$ <sup>ab</sup>	$7.21 \pm 0.03$ <sup>d</sup>	$117.05 \pm 0.50$ <sup>b</sup>	$264.10 \pm 3.78$ <sup>c</sup>	71.7	4.9
平阳早 Pingyangzao	$8.51 \pm 0.11$ <sup>a</sup>	$8.67 \pm 0.36$ <sup>c</sup>	$83.04 \pm 0.21$ <sup>e</sup>	$274.21 \pm 6.48$ <sup>b</sup>	55.8	5.8
舒茶早 Shuchazao	$7.89 \pm 0.25$ <sup>ab</sup>	$10.45 \pm 0.23$ <sup>b</sup>	$100.17 \pm 0.07$ <sup>c</sup>	$204.87 \pm 7.25$ <sup>f</sup>	68.7	16.7
乌牛早 Wuniuzao	$8.11 \pm 0.20$ <sup>ab</sup>	$12.02 \pm 0.70$ <sup>a</sup>	$256.21 \pm 3.11$ <sup>a</sup>	$464.69 \pm 5.10$ <sup>a</sup>	106.1	39.4
仙寓早 Xianyuzao	$6.34 \pm 0.54$ <sup>dc</sup>	$7.31 \pm 0.49$ <sup>d</sup>	$84.99 \pm 0.72$ <sup>e</sup>	$218.78 \pm 6.70$ <sup>e</sup>	48.9	7.9
迎霜 Yingshuang	$7.64 \pm 0.03$ <sup>bc</sup>	$6.95 \pm 0.12$ <sup>d</sup>	$75.72 \pm 0.71$ <sup>f</sup>	$203.69 \pm 2.76$ <sup>f</sup>	51.0	8.8
浙农 113 Zhenong No.113	$5.94 \pm 0.66$ <sup>e</sup>	$6.09 \pm 0.26$ <sup>e</sup>	$93.76 \pm 7.28$ <sup>d</sup>	$238.98 \pm 7.44$ <sup>d</sup>	64.2	16.0

富集系数 (bioaccumulation factor, BF) 是指植物中某元素含量与土壤中元素含量之比, 其表征土壤-植物体系中元素迁移的难易程度, 是反映植物将

土壤中某元素吸收转移到体内能力大小的评价指标, 富集系数越高, 表明植物吸收能力越强 [26]。本研究以茶树体内氟的平均含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 与土壤水

溶性氟的平均含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的比值表示富集系数。不同茶树品种的富集系数在 34.2~106.1 之间,平均值为 62.9,其中乌牛早的富集系数最高,达 106.1,是鳧早 2 号富集系数的 3.1 倍。这与沙济琴和郑达贤<sup>[4]</sup>对黄椴茶树品种生物积累系数(31.8)的描述一致。

转移系数(translocation factor, TF)是指地上部分元素的含量与地下部分同种元素含量的比值,用来评价植物将某元素从地下向地上的运输能力,转移系数越大,元素从根系向地上部器官转移能力

越强<sup>[26]</sup>。本研究以茶树地上部分氟的平均含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )与茶树地下部分氟的平均含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的比值表示转移系数。不同茶树品种氟的转移系数在 4.9~39.4 之间,平均值为 12.8,远大于 1,这说明氟在茶树体内有较强的转移能力。茶树可以把根系从土壤中吸收的氟运输至叶片并积累起来。乌牛早的转移系数(39.4)远高于其他茶树品种,高出鳧早 2 号 4.9 倍。这与郜红建等<sup>[22]</sup>分析安徽省不同茶园氟在茶树体内转移系数(9.7~25.5)的结果一致。

表 3 主成分因子分析

Table 3 Principal composition factor analysis

主成分 Principal component	特征值 Accumulative value	方差贡献率/% Variance contribution	累计贡献率/% Accumulative contribution rate
1	4.433	73.886	73.886
2	1.030	17.166	91.052
3	0.245	4.075	95.127
4	0.178	2.974	98.101
5	0.093	1.543	99.644
6	0.021	0.356	100.000

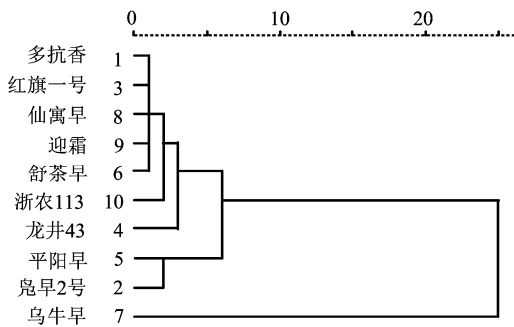


图 3 不同茶树聚类结果树形图

Figure 3 Cluster analysis of various tea-plants

### 2.3 不同茶树品种聚氟特征的聚类分析

主成分的特征值和贡献率是选择主成分的依据<sup>[27]</sup>。对茶树老叶、嫩叶、根、茎氟含量以及氟的富集系数和转移系数进行主成分分析,得到主成分对原有变量总体描述情况(表 3)。第 1 主成分的方差贡献率为 73.89%,可以代表该组数据中的大部分信息。而老叶、嫩叶氟含量以及富集系数和转移系数在第 1 主成分中的载荷系数(载荷系数的大小说明了对应指标在对应主成分中所占信息量的大小)大于 0.9,说明这些指标是影响氟在茶树体内富集的主要因素。故选取老叶、嫩叶氟含量以及富集系数和转移系数作为聚类参数对不同茶树品种进行聚类,不同茶树品种可分为 4 个聚氟类型。

第 1 类为中等富集中等转移型:如多抗香、红旗一号、舒茶早、仙寓早、迎霜和浙农 113 等 6 个

茶树品种。该类型茶树氟的富集系数和转移系数分别在 48.9~65.4 和 7.9~12.7 之间,老叶和嫩叶氟含量分别在 203.69~238.98  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 75.72~100.17  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间。叶部氟平均含量在 197.33~218.63  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,与国家限量标准值(200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )相当。

第 2 类为低富集低转移型:如鳧早 2 号。该类茶树富集系数和转移系数分别为 34.2 和 6.7,均较小。老叶和嫩叶氟含量分别为 124.10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 39.77  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,叶部氟平均含量为 118.49  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著低于国家限量标准值。该类型茶树品种有望成为培育低富集氟茶树品种的种质资源。

第 3 类为中等富集低转移型:包括龙井 43 和平阳早 2 个茶树品种。该类茶树富集系数中等(55.8~71.7),转移系数较小(4.9~5.8),老叶和嫩叶氟含量分别在 264.10~274.21  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 83.04~117.05  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间。叶部氟平均含量分别为 256.39  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 257.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高出国家限量标准值 20%以上。

第 4 类为高富集高转移型:如乌牛早。该类茶树富集系数和转移系数分别为 106.1 和 39.4,均明显高于其他富集类型。老叶和嫩叶氟含量分别为 464.69  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 256.21  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,叶部氟平均含量为 442.79  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高出国家限量标准值一倍以上,以此类品种茶树叶片为原料的茶叶对茶叶质量安全的不良影响值得关注。

表 4 氟溶液培养条件下不同茶树各器官氟含量

Table 4 The contents of fluoride in various organs of different tea plants at solution culture (5.0 mg·L<sup>-1</sup>)

茶树品种 Tea cultivars	根/mg·kg <sup>-1</sup> Roots	茎/mg·kg <sup>-1</sup> Stems	嫩叶/mg·kg <sup>-1</sup> Young leaves	老叶/mg·kg <sup>-1</sup> Old leaves	富集系数 BF	转移系数 TF
多抗香	50.73±3.60 <sup>c</sup>	25.23±2.31 <sup>bc</sup>	170.55±5.25 <sup>d</sup>	308.42±11.10 <sup>c</sup>	17.4	0.9
鳧早 2 号	77.06±5.11 <sup>a</sup>	27.88±0.32 <sup>a</sup>	117.88±0.85 <sup>g</sup>	189.41±1.57 <sup>h</sup>	12.7	0.7
红旗一号	63.54±2.99 <sup>b</sup>	25.86±0.64 <sup>b</sup>	174.48±4.83 <sup>d</sup>	278.29±16.64 <sup>de</sup>	19.4	1.4
龙井 43	45.93±0.92 <sup>cd</sup>	17.35±0.20 <sup>f</sup>	284.77±0.90 <sup>b</sup>	369.10±34.86 <sup>b</sup>	15.2	0.7
平阳早	59.20±2.50 <sup>b</sup>	23.17±0.64 <sup>de</sup>	196.90±0.16 <sup>c</sup>	352.89±1.29 <sup>b</sup>	19.4	1.0
舒茶早	61.46±0.86 <sup>b</sup>	21.55±0.29 <sup>e</sup>	190.03±6.85 <sup>c</sup>	223.52±5.16 <sup>g</sup>	17.1	1.0
乌牛早	47.51±1.77 <sup>cd</sup>	24.32±1.16 <sup>bcd</sup>	374.85±7.34 <sup>a</sup>	514.15±5.44 <sup>a</sup>	32.3	4.6
仙寓早	60.21±6.19 <sup>b</sup>	28.01±0.99 <sup>a</sup>	166.91±9.28 <sup>de</sup>	261.22±5.88 <sup>ef</sup>	21.5	1.6
迎霜	44.29±0.57 <sup>d</sup>	23.65±0.97 <sup>cd</sup>	127.65±1.08 <sup>f</sup>	251.06±14.86 <sup>f</sup>	15.2	1.4
浙农 113	45.50±1.71 <sup>cd</sup>	23.75±0.91 <sup>cd</sup>	158.99±2.99 <sup>e</sup>	288.32±8.56 <sup>cd</sup>	18.3	2.6

## 2.4 聚类分析结果验证

为验证聚类分析结果, 将茶树放入 5 mg·L<sup>-1</sup> 的氟溶液中培养 72 h。测定茶树老叶、嫩叶、根和茎氟含量以及氟的富集系数和转移系数, 用同样的主成分聚类分析方法仍可得到与田间调查完全吻合的结果: 把多抗香、红旗一号、舒茶早、仙寓早、迎霜和浙农 113 归为第 1 类; 鳧早 2 号归为第 2 类; 龙井 43、平阳早归为第 3 类; 乌牛早归为第 4 类(图 3), 说明上述聚类分析结果可行。

## 3 讨论

不同茶树品种对氟的富集规律不同<sup>[4,9-12,28-29]</sup>。陈瑞鸿等的研究表明: 不同茶树品种成熟叶片氟的平均含量差异大, 以乌牛早叶片氟含量最高(2 163.2 mg·kg<sup>-1</sup>), 浙农 138 叶片氟的含量最低(805.7 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[9]</sup>。罗学平等的研究显示, 蒙山 23 茶树品种叶片氟含量为 3 625.11 mg·kg<sup>-1</sup>, 而连南大叶品种叶片氟含量为 1 150.79 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[28]</sup>。曾建明等对国家种质茶树苗圃保存的 4 个砖茶生产区的 93 份种质的氟含量的测定结果表明, 老叶平均氟含量为 546 mg·kg<sup>-1</sup>, 品种间变幅较大(248~866 mg·kg<sup>-1</sup>), 其中 400~650 mg·kg<sup>-1</sup> 间的资源占 69%; 含量低于 400 mg·kg<sup>-1</sup> 的资源占 11%, 高于 650 mg·kg<sup>-1</sup> 的资源占 20%。新梢的平均氟含量为 119 mg·kg<sup>-1</sup>, 变幅为 45~222 mg·kg<sup>-1</sup>, 主要集中于 60~160 mg·kg<sup>-1</sup>, 占试验材料的 91%; 高于 180 mg·kg<sup>-1</sup> 的资源占 8%<sup>[30]</sup>。这些结果均高于本试验的调查结果, 这可能是由于茶树叶片氟的积累与叶片生长期长短有密切关系<sup>[4]</sup>, 前人的调查均为多年生茶树, 而本次试验选用的是年生茶树所致。

关于不同茶树品种之间富集氟的差异的原因,

一些学者做出了初步探索。沙济琴和郑达贤的研究发现, 闽南主要茶树鲜叶间的氟含量差异显著, 认为品种是茶树氟含量的决定因素之一<sup>[4]</sup>。Ruan 等比较了江苏和浙江不同品种茶树氟含量, 推测不同品种茶树氟含量显著性差异可能受基因控制<sup>[10]</sup>。由于遗传基因不同, 不同茶树从土壤中吸收氟的能力以及茶树自身转移氟的能力不同, 最终导致不同茶树体内氟含量表现出较大差异。梁远发等认为, 不同品种茶树在氟的长期胁迫下, 可能发生一定程度的遗传分化, 这种遗传分化还可能与茶树富集氟的特性有一定的关联度<sup>[29]</sup>。也有学者认为与茶树品种间对氟富集能力相关的功能基因的差异可能不仅存在于个体间, 还可能在不同组织器官间存在差异<sup>[11]</sup>。不同茶树体内氟富集量与富集系数和转移系数关系密切。本试验的研究结果表明, 鳧早 2 号具有较低的富集系数(34.2)和转移系数(6.7), 茶树老叶(124.10 mg·kg<sup>-1</sup>)和嫩叶(39.77 mg·kg<sup>-1</sup>)氟的含量均较低, 而乌牛早具有较高的富集系数(106.1)和转移系数(39.4), 叶部氟的累积量高达 442.79 mg·kg<sup>-1</sup>, 远高于国家限量标准值(200 mg·kg<sup>-1</sup>), 对茶叶质量安全造成潜在威胁。但是, 有关不同茶树品种富集氟能力差异的生理机制与遗传基础还有待于进一步研究。

## 4 结论

茶树体内氟主要集中在叶片中, 占到全株氟含量的 93% 以上。以乌牛早叶片平均氟含量最高(442.79 mg·kg<sup>-1</sup>), 鳧早 2 号最低(118.49 mg·kg<sup>-1</sup>)。氟在不同茶树体内的富集系数和转移系数变幅分别在 34.2~106.1 和 4.9~43.4 之间, 均值分别为 62.9

和 12.8。

主成分分析结果显示,老叶、嫩叶氟含量以及氟的富集系数和转移系数在第 1 主成分中的载荷系数大于 0.9,是影响氟在茶树体内富集的主要因素。

根据茶树老叶、嫩叶氟含量以及氟的富集系数和转移系数,可将茶树分为高富集高转移型(如乌牛早);中等富集低转移型(如龙井 43 和平阳早);中等富集中等转移型(如多抗香、红旗一号、舒茶早、仙寓早、迎霜和浙农 113)和低富集低转移型(如鳧早 2 号) 4 种类型。

### 参考文献:

- [1] CAO J, BAI X X, ZHAO Y, et al. The relationship of fluorosis and brick tea drinking in Chinese Tibetans[J]. *Environ Health Persp*, 1996, 104(12): 1340-1343.
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Fluorides and human health[M]. Geneva:World Health Organization, 1970:364.
- [3] XIE Z M, YE Z H, WONG M H. Distribution characteristics of fluoride and aluminum in soil profiles of an abandoned tea plantation and their uptake by six woody species[J]. *Environ Int*, 2001, 26(5): 341-346.
- [4] 沙济琴, 郑达贤. 福建茶树鲜叶含量氟的研究[J]. *茶叶科学*, 1994, 14(1): 37-42.
- [5] SOFUOGLU S C, KAVCAR P. An exposure and risk assessment for fluoride and trace metals in black tea[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 158(2): 392-400.
- [6] 孙殿军, 刘立志. 我国饮茶型氟中毒研究的回顾及展望[J]. *中国地方病学杂志*, 2005, 24(1): 1-2.
- [7] 董青华, 孙威江, 杨贤强. 茶树吸收氟的根际效应及富集机理研究[J]. *亚热带农业研究*, 2009, 5(3): 162-166.
- [8] 高绪评, 王萍, 王之让, 等. 环境氟迁移与茶叶氟富集的关系[J]. *植物资源与环境*, 1997, 6(2): 43-47.
- [9] 陈瑞鸿, 梁月荣, 陆建良, 等. 茶树对氟富集作用的研究[J]. *茶叶*, 2002, 28(4): 187-190.
- [10] RUAN J Y, WONG M H. Accumulation of fluoride and aluminium related to different varieties of tea plant[J]. *Environ Geochem Hlth*, 2001, 23(1): 53-63.
- [11] FUNG K F, ZHANG Z Q, WONG J W C, et al. Aluminium and fluoride concentrations of three tea varieties growing at Lantau Island, Hong Kong[J]. *Environ Geochem Hlth*, 2003, 25(2): 219-232.
- [12] SHU W S, ZHANG Z Q, LAN C Y, et al. Fluoride and aluminium concentrations of tea plants and tea products from Sichuan Province, PR China[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1475-1482.
- [13] 姜城, 杨俐苹, 金继运, 等. 土壤养分变异与合理取样数量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(3): 262-270.
- [14] 杨俐苹. 评价区域性土壤肥力的取样技术的回顾与展望[J]. *土壤肥料*, 2000 (1): 3-8.
- [15] 童启庆. 茶树栽培学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 342-345.
- [16] 张显晨, 郇红建, 张正竹, 等. 茶叶氟化物提取方法对比与电位法测定条件优化[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(1): 1-4.
- [17] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 不同土壤中氟赋存在形态特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2002, 23(2): 104-108.
- [18] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 土壤全氟含量测定方法的比较[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 29 (1): 103-107.
- [19] GAO H, ZHANG Z, WAN X. Influences of charcoal and bamboo charcoal amendment on soil-fluoride fractions and bioaccumulation of fluoride in tea plants[J]. *Environ Geochem Hlth*, 2012, 34(5): 551-562.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 中国林业科学研究院. 森林土壤 pH 值的测定: GBLY/T 1239-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [22] 郇红建, 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, 30(8): 1462-1467.
- [23] 王云, 魏复盛, 杨国治. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [24] 黎成厚, 万红友, 师会勤, 等. 土壤水溶性氟含量及其影响因素[J]. *山地农业生物学报*, 2003, 22(2): 99-104.
- [25] 中华人民共和国农业部. 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量标准: NY 659-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [26] BU-OLAYAN A H, THOMAS B V. Translocation and bioaccumulation of trace metals in desert plants of Kuwait Governorates[J]. *Res J Environ Sci*, 2009, 3(5): 581-587.
- [27] 刘明芝, 周仁郁. 中医药统计学与软件应用[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2006: 280-284.
- [28] 罗学平, 何春雷, 李丽霞, 等. 不同茶树品种含氟量的研究[J]. *福建茶叶*, 2006(4): 10-13.
- [29] 梁远发, 刘声传, 王家伦, 等. 不同茶树品种对氟的富集特征[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(4): 24-26.
- [30] 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.