

安徽茶园土壤氟在茶树体内的富集与转运特征*

郜红军 刘腾腾 张显晨 张正竹 宛晓春**

(安徽农业大学茶叶生物化学与生物技术教育部重点实验室, 合肥, 230036)

摘要 研究了安徽宣城、六安和合肥茶区不同茶园土壤氟含量及在茶树体内的富集与转运特征,探讨了茶树根际和非根际土壤氟的有效性特征及其在茶树体内的累积规律. 结果表明,安徽省典型茶园表层土壤全氟含量为:六安黄棕壤($319.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 宣城黄红壤($316.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 合肥黄褐土($311.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),均低于我国土壤总氟背景值($478 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并呈现一定的表层富集现象. 表层土壤的水溶性氟含量则为:合肥黄褐土($5.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 宣城黄红壤($3.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 六安黄棕壤($2.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),根际土壤中水溶性氟含量也高于非根际土壤. 不同茶园茶树体内氟含量有较大差异,但均呈现成叶 > 落叶 > 嫩叶 > 根、茎的规律. 茶树嫩叶氟含量在 $108.2\text{—}184.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,低于农业部茶叶氟含量安全限量标准($\leq 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);而成叶中氟含量较高($531.0\text{—}1155.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 茶树对土壤氟具有较强的富集和运输能力,茶园表层土壤全氟和水溶性氟在茶树成熟叶片的富集系数分别在 $1.71\text{—}3.65$ 和 $99.8\text{—}348$ 之间,氟由根部向叶片的转移系数在 $9.7\text{—}25.5$ 之间. 研究结果可为土壤氟在茶树体内的富集及其对茶叶质量安全的影响评价提供依据.

关键词 茶园土壤, 茶树, 氟含量, 富集, 转运.

茶树是氟高富集植物,富集能力是其它植物的几十甚至百倍,每千克干茶中氟含量最高可达几千毫克,而其中的80%以上可溶解在茶汤中,饮茶成为人体摄氟的重要途径^[1-2]. 茶叶氟含量及其对人体健康的影响已引起了广泛的关注. 在没有大气污染的情况下,茶树体内氟主要来源于土壤,而吸收的多寡则与土壤氟形态密切相关^[3]. 土壤中氟的形态包括水溶态、交换态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残留态,其中水溶态氟是植物吸收的主要形态,其含量受土壤有机质、pH、黏土矿物组成的影响^[4]. 根系是茶树吸收土壤氟的主要器官,其生理活动及与根际微生物的共同作用改变着茶树的根际环境;同时,根际环境中的氟含量、pH、有机质等也影响着茶树根际中氟的生物有效性和根系对氟的吸收能力^[3],使根际土壤物理、化学和生物学性质与非根际存在着极大差异.

国内外学者对土壤中氟的形态及其影响因素^[5]、茶叶中氟的含量、累积和溶出特性及其安全性评价^[6-7]等方面进行了一些报道. 但有关茶园土壤-茶树系统中氟的吸收、富集与转运规律及其影响因素还缺少深入研究.

本文研究了安徽省江南丘陵(宣城)、皖西大别山(六安)和江淮(合肥)茶区不同茶园土壤氟的含量、茶树根际与非根际土壤中氟的形态及有效性、氟在茶树体内的富集与转移特征,为不同茶园茶叶质量安全评价提供依据.

1 实验方法

1.1 样品的采集与制备

选择安徽省大别山六安茶区9个茶园($N31^{\circ}51'8''\text{—}N31^{\circ}52'23''$; $E117^{\circ}14'87''\text{—}E117^{\circ}13'68''$)、江南丘陵宣城茶区的13个茶园($N31^{\circ}01'05''\text{—}N31^{\circ}01'88''$; $E119^{\circ}03'25''\text{—}E119^{\circ}04'02''$)和江淮合肥茶区的15个茶园($N31^{\circ}30'27''\text{—}N31^{\circ}30'65''$; $E116^{\circ}41'28''\text{—}E116^{\circ}41'73''$)分别采集土壤和茶树样品. 根据茶树根系在土壤中的分布特征,土壤剖面样品采集0—20 cm, 20—40 cm 和 40—60 cm 3个层次. 根际土壤参

2010年9月27日收稿.

* 教育部科学技术研究重点项目(210097); 安徽省自然科学基金(090411009); 中国博士后基金(20090450800)和安徽省博士后基金(090411009)资助.

** * 通讯联系人.

照 Chen 等^[8]的方法采集. 土壤样品剔除石砾、杂草和根系后, 风干过 2 mm 网筛. 土壤有机质含量用外加加热法测定, 土壤 pH 用电极法测定(土水比为 1:2.5). 土壤基本理化性质见表 1.

表 1 安徽省不同茶园土壤基本性质(均值)

Table 1 Basic properties of several tea plantation soils in different regions of Anhui Province (mean)

土壤样品	宣城茶园			六安茶园			合肥茶园		
	数量	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)	数量	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)	数量	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)
0—20 cm	13	4.54	24.9	9	4.25	24.6	15	6.53	12.98
20—40 cm	7	4.75	14.8	5	4.79	15.6	7	6.63	8.57
40—60 cm	7	4.76	13.8	5	5.0	11.6	7	6.24	7.07
根际土壤	5	4.57	35.3	5	4.62	19.2	5	5.58	14.4
非根际土壤	5	4.64	26.8	5	4.57	15.6	5	5.68	12.2

茶树分别采集嫩叶(一芽二叶)、成熟叶片、落叶、茎和根系作为茶树不同部位样品. 茶样在 105 °C 杀青 30 min, 60 °C 烘干后, 过 0.25 mm 网筛.

1.2 土壤总氟、水溶性氟和茶树样品中氟的提取方法

土壤总氟参照吴卫红等^[9]的方法提取: 准确称取 0.2500 g 过 100 目网筛的土样, 置于 50 mL 镍坩锅中, 用少量蒸馏水润湿后, 加入 3 mL 浓度为 16.75 mg·L⁻¹ 的 NaOH 溶液, 轻敲坩锅使样品分散均匀, 然后放入 150 °C 烘箱中保持 1 h 后取出, 将坩锅放入 300 °C 的马弗炉中, 再将温度升到 600 °C, 样品熔融 30 min 后, 取出坩锅冷却, 加 5 mL 蒸馏水溶解, 缓缓加入浓盐酸 4 mL, 边加边搅拌, 溶液 pH 调至 8—9 之间, 冷却后转入 50 mL 容量瓶中定容备测. 土壤水溶性氟采用 70 °C 亚沸水振荡提取^[10].

茶样中氟的提取参照张显晨等^[11]的方法: 分别称取 0.5000 g 茶树不同部位样品置于 50 mL 离心管中, 加 30 mL 超纯水, 在 100 °C 沸水浴中静置浸提 30 min; 冷却至室温, 在 4000 r·min⁻¹ 下离心 15 min, 取上清液测定氟含量.

1.3 氟的测定方法

氟标准液储备液(1000 mg·L⁻¹)配制方法: 准确称取 2.2100 g 氟化钠(NaF), 溶解后定容至 1 L, 贮于聚乙烯瓶中备用. 总离子强度缓冲液(TISAB)配制方法为: 准确称取 68 g 柠檬酸三钠(Na₃C₆H₅O₇·2 H₂O), 58 g NaCl, 溶解后, 加入 57 mL 冰醋酸, 溶于 700 mL 纯水中, 用 5 mg·L⁻¹ 氢氧化钠调节 pH 值至 5.0, 定容至 1000 mL. 土壤和茶样提取液中氟的含量参照郜红建等^[12]的方法测定: 准确取 15 mL 氟提取液置于 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中, 加入 15 mL 的 TISAB, 充分搅拌均匀后, 在氟离子电位测量仪上测定氟离子浓度. 以浓度 0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mg·L⁻¹ 的氟标准溶液做标准曲线.

所有土壤和茶树样品中氟的含量为 3 次重复分析的算术平均值 ± 标准差, 用 Excel 2003 进行统计分析. 不同茶园茶树体内氟含量差异的显著性检验(ANOVA)采用 SPSS16.0 软件分析.

2 结果与讨论

2.1 不同茶园土壤剖面氟含量

安徽省不同茶区茶园表层(0—20 cm)土壤中全氟含量见表 2. 由表 2 可见, 全氟含量六安黄棕壤(319.7 mg·kg⁻¹) > 宣城黄红壤(316.6 mg·kg⁻¹) > 合肥黄褐土(311.3 mg·kg⁻¹), 但差异不显著($p > 0.05$). 所研究的茶园土壤全氟含量均低于我国土壤全氟环境背景值(478 mg·kg⁻¹)^[13], 也低于安徽省土壤环境质量调查的黄棕壤(628 mg·kg⁻¹)、黄红壤(628 mg·kg⁻¹) 和黄褐土(419 mg·kg⁻¹) 表层土壤全氟含量^[14]. Shu 等^[15]研究表明, 在宜茶土壤中, 黄壤和黄棕壤全氟含量分别为 485 mg·kg⁻¹ 和 515 mg·kg⁻¹, 红壤和紫色土分别为 480 mg·kg⁻¹ 和 485 mg·kg⁻¹ 左右, 均高于本研究所调查茶园土壤表层全氟含量. 阮建云等^[16]对湖南、湖北砖茶主产区 55 个茶园土样分析结果证实, 表层土壤全氟含量在 205—935 mg·kg⁻¹ 之间, 均值为 383 mg·kg⁻¹, 也略高于本次所调查茶园土壤表层全氟含量. 而郑达贤和沙济琴^[17]等分析了福建闽东、闽南和闽北 3 个茶场 22 个剖面土壤全氟含量为 126—388 mg·kg⁻¹ 之间,

均值为 $237 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于本研究所调查茶园土壤表层全氟含量。

从全氟含量在土壤剖面的分布情况看, 安徽省茶园黄红壤、黄棕壤和黄褐土表层土壤(0—20 cm)全氟含量大于下层土壤(20—40 cm 和 40—60 cm)。按照谭长银等^[18]的计算方法, 氟在宣城黄红壤、六安黄棕壤和合肥黄褐土中的富集系数(0—20 cm 表层氟含量与 20—40 cm 下层氟含量的比值)分别为 1.02、1.04 和 1.09(均大于 1), 表明这些茶园土壤中的氟存在表层富集现象。阮建云^[16]等分析湖南、湖北砖茶主产区茶园土样氟含量也表现出表层富集规律, 表层土壤(0—20 cm)全氟平均含量为 $383 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 下层土壤(20—40 cm)全氟平均含量 $338 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 富集系数为 1.13。这可能与茶树落叶中氟含量较高, 氟随落叶转移到表层土壤, 增加了表层土壤含氟量有关。本研究中, 茶园表层土壤水溶性氟含量为合肥黄褐土($5.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 宣城黄红壤($3.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 六安黄棕壤($2.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这可能与黄褐土 pH(6.53) 大于黄红壤(4.54) 和黄棕壤(4.25) 有关。

表 2 安徽省不同茶园土壤中氟含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 The total and soluble fluoride contents in soils from several tea plantations in Anhui Province ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土壤样品	宣城茶园		六安茶园		合肥茶园	
	全氟	水溶性氟	全氟	水溶性氟	全氟	水溶性氟
0—20 cm	316.6 ± 22.9	3.32 ± 0.90	319.7 ± 37.6	2.65 ± 0.45	311.3 ± 31.0	5.32 ± 2.40
20—40 cm	309.9 ± 17.3	2.70 ± 1.36	306.3 ± 58.4	2.42 ± 0.05	307.4 ± 3.7	6.81 ± 1.57
40—60 cm	309.6 ± 27.9	2.12 ± 0.65	297.5 ± 62.9	2.26 ± 0.05	286.8 ± 13.8	5.94 ± 1.10
根际土壤	298.8 ± 6.1	3.98 ± 1.10	398.0 ± 9.1	2.90 ± 0.57	329.2 ± 9.5	5.48 ± 0.47
非根际土壤	316.2 ± 11.5	3.34 ± 1.08	359.2 ± 22.6	2.48 ± 0.06	312.5 ± 28.2	4.03 ± 1.31

2.2 茶树根际和非根际土壤中氟含量

茶树根际是指离根轴表面数毫米之内的狭小范围, 但其 pH、Eh 和微生物活性与原土体有明显差异^[19]。茶树生长过程中根系分泌物的有机酸、氨基酸等组分对根际养分离子和污染物形态起到重要调节作用, 从而影响其有效性^[20]。茶园根际土壤水溶性氟含量在宣城黄红壤、六安黄棕壤和合肥黄褐土中分别为 3.98 、 2.90 和 $5.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别高于其非根际土壤中 3.34 、 2.48 和 $4.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水溶性氟含量。这是因为根际土壤水溶性氟含量受根系生长和代谢活动影响, 茶树向根际环境中分泌有机酸类物质, 增加了根际土壤中有机阴离子基团数量, 与氟阴离子竞争土壤表面的吸附位点, 减少了氟在土壤表面的吸附量, 使根际土壤水溶性氟含量增加^[21]。低分子量有机酸可以通过与铝离子的配合作用及与氟的竞争作用, 改变氟的形态, 增加水溶性氟含量^[22]。茶树向根际分泌的氨基酸、果胶质等有机物质, 增加了根际土壤有机质含量, 含有的负电荷功能团(如羧基、羟基等)降低了对氟的吸附, 提高了根际土壤水溶性氟含量^[23]。土壤水溶性氟是植物根系吸收氟的主要形态, 根际土壤水溶性氟含量高于非根际土壤, 从而有利于茶树的吸收与富集。

2.3 茶树不同器官氟含量

安徽省不同茶区茶树不同器官氟含量见表 3。茶树不同器官氟含量大小顺序为: 成叶 > 落叶 > 嫩叶 > 根、茎, 表明氟主要在茶树叶片积累, 尤以成熟叶片和落叶最高, 而在根和茎中富集较少。马立峰^[24]等的研究表明, 茶树从土壤中吸收的氟, 主要向叶片运输, 根与茎积累较少, 随着生长期增加, 茶树叶片氟含量增加。此外, 氟是植物体内易移动元素, 茶树老叶脱落前, 部分氟可转移到茶树的其它部位再次利用, 从而降低了脱落叶片中氟的含量。

表 3 安徽省不同茶园茶树体内氟含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 The contents of fluoride in different parts of tea plants from Anhui Province ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

采样点	嫩叶	成叶	落叶	茎	根
宣城茶园	$184.3 \pm 29.3\text{aC}$	$1155.2 \pm 8.1\text{aA}$	$818.6 \pm 14.6\text{aB}$	$54.04 \pm 11.7\text{aD}$	$45.25 \pm 12.8\text{aD}$
六安茶园	$108.2 \pm 10.0\text{bC}$	$859.5 \pm 8.8\text{bA}$	$707.0 \pm 10.9\text{bB}$	$47.62 \pm 0.72\text{aD}$	$51.05 \pm 15.9\text{aD}$
合肥茶园	$119.9 \pm 17.3\text{bC}$	$531.0 \pm 17.4\text{cA}$	$485.3 \pm 12.6\text{cB}$	$46.83 \pm 4.61\text{aD}$	$54.67 \pm 11.95\text{aD}$

注: 同列内的 a—c 表示不同茶园茶树体内氟含量的差异显著($p=0.05$), 同行内的 A—D 表示同一茶园茶树不同器官氟含量的差异显著($p=0.05$)。

安徽省不同茶区茶树嫩叶和成熟叶片中氟含量在 $108.2\text{—}184.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $531.0\text{—}1155.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,前者低于农业部茶叶氟含量安全限量标准 ($\leq 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25],而后者高于这一限量标准. 侯少范等^[26]的研究表明,茶叶中氟含量主要取决于茶叶原料,茶叶叶龄越长,氟含量越高. 嫩叶加工而成的茶叶(绿茶等)氟含量较低,茶叶品质较高;而砖茶原料来自茶树的老叶和茶梗,氟含量较高. 如罗淑华等^[27]测定了 14 种砖茶中氟含量在 $252.5\text{—}829.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值 $567.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均高于农业部茶叶氟含量安全限量标准. 陈瑞鸿等^[28]分析了浙江大学茶树种质资源圃 31 个茶树栽培品种成熟叶片平均氟含量为 $1499\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中乌牛早氟含量最高,为 $2163\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,浙农 138 氟含量最低,为 $806\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其它 29 个品种氟含量都在 $1000\text{—}2000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 李丽霞等^[29]分析了四川雅安及周边茶区茶叶氟含量的结果表明,茶树老叶氟含量均高于 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,20 个茶园的老叶氟含量在 $500\text{—}1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,约占茶叶样品总数的 38.46%,老叶氟含量 $> 1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的茶叶样品数占 59.6% 以上,其中约 5.8% 的茶树老叶氟含量超过了 $4000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于本次调查茶树成熟叶片中的氟含量.

2.4 氟在茶树体内的富集与转移特征

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种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^[30]. 不同茶园表层土壤中全氟和水溶性氟在茶树成熟叶片的富集系数分别在 1.71—3.65 和 99.8—348 之间,其中茶树对宣城黄红壤中的全氟和水溶性氟的吸收能力最强,BF 分别为 3.65 和 348,六安黄棕壤次之,BF 分别为 2.69 和 324,合肥黄褐土最弱,BF 分别为 1.71 和 99.8. 马立峰^[24]用采自浙江杭州的土壤栽培茶树发现,茶树叶片氟的吸收系数在 24.0—34.1 之间,平均是根部吸收系数的 30 倍,表明茶树叶片对氟的吸收程度比根茎大.

转移系数(translocation factor, TF)是指地上部元素的含量与地下部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运能力越强^[30]. 以茶树成熟叶片中氟含量与根系氟含量的比值计算氟在茶树体内的转移系数可知,不同地区茶园茶树体内氟的 TF 在 9.7—25.5 之间,均大于 1,这表明氟在茶树体内有较强的转移能力,可把根系从土壤中吸收的氟运输到茶树叶片累积.

茶树体内的氟主要是以游离态或氟铝络合物的形式存在,具有向生长部位转移的特性,并随叶片生长而累积^[3]. Liang 等^[31]认为氟铝络合物 (AlF_2^+ 、 AlF_2^+ 、 AlF_4^-) 是茶树体内氟的主要存在和运输形态,且茶树叶片中氟、铝浓度呈显著正相关. Nagata 等^[32]利用²⁷Al-NMR 和¹⁹F-NMR 研究显示,茶树从土壤中吸收的氟在木质部以氟铝络合物形态向地上部分运输,并以 AlF_n^{3-n} 的形式存在于叶片中. 氟铝按一定比例络合并富集于叶片等器官中,消除了氟离子和铝离子本身的毒性,这可能是茶树高富集氟的重要生理机制. 此外,茶树品种也是影响茶叶氟含量的主要因素之一,在土壤氟含量相同的条件下,不同茶树品种之间氟含量有显著差异. 在相同的土壤环境中,龙井 43 嫩叶和老叶中氟的浓度分别为 $140.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3152.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于福鼎大白茶嫩叶和老叶中 $84.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2015.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的氟含量^[33]. Ruan 等^[34]认为不同茶树品种氟含量的差异可能受遗传差异性所决定,不同品种茶树吸收富集氟的生理特性不同,导致茶树品种间富集氟的能力有所差异. 有关茶树超量吸收富集氟的生理机制还有待于进一步研究.

3 结论

安徽省典型茶园表层土壤全氟含量表现为:六安黄棕壤 $>$ 宣城黄红壤 $>$ 合肥黄褐土,且表现为表层富集,但差异不显著($p > 0.05$). 茶树根际土壤中水溶性氟含量高于非根际土壤. 茶树不同部位氟含量顺序为:成叶 $>$ 落叶 $>$ 嫩叶 $>$ 根、茎,氟主要在茶树叶片积累,尤以成熟叶片和落叶最高. 茶树嫩叶氟含量低于农业部茶叶氟含量安全限量标准,而成熟叶片中氟含量高于农业部茶叶氟含量安全限量标准. 茶园表层土壤全氟和水溶性氟在茶树叶片的富集系数分别在 1.71—3.65 和 99.8—348 之间,茶树体内氟的转移系数在 9.7—25.5 之间,表明茶树对土壤中氟有较强的富集和运输能力.

参 考 文 献

- [1] Sofuoglu S C, Kavcar P. An exposure and risk assessment for fluoride and trace metals in black tea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158 (2/3): 392-400
- [2] 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
- [3] 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进展[J]. *亚热带农业研究*, 2009, 5(3): 162-166
- [4] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] 于群英, 慈恩, 杨林章. 皖北地区土壤中不同形态氟含量及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2001, 18(6): 1333-1340
- [6] Cao J, Zhao Y, Li Y, et al. Fluoride levels in various black tea commodities: Measurement and safety evaluation [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2006, 44(7): 1131-1137
- [7] Malinowska E, Inkielewicz I, Czarnowski W, et al. Assessment of fluoride concentration and daily intake by human from tea and herbal infusions[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, 46(3): 1055-1061
- [8] Chen Y M, Wang M K, Zhuang S Y, et al. Chemical and physical properties of rhizosphere and bulk soils of three tea plants cultivated in Ultisols[J]. *Geoderma*, 2006, 136: 378-387
- [9] 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
- [10] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 不同土壤中氟赋存形态特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2002, 23(2): 104-108
- [11] 张显晨, 郜红建, 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
- [12] 郜红建, 张显晨, 张正竹, 等. 水中氟化物测定过程中 TISAB 的对比分析与优化[J]. *环境化学*, 2010, 29(4): 759-763
- [13] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- [14] 安徽省环境监测中心站. 安徽省土壤污染状况调查研究报告[R]. 2010.
- [15] Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y, et al. Fluoride and aluminium concentrations of tea plants and tea products from Sichuan Province, P. R. China [J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1475-1482
- [16] 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
- [17] 郑达贤, 沙济琴. 福建茶区土壤中的氟[J]. *土壤通报*, 1994, 25(5): 230-233
- [18] 谭长银, 吴龙华. 典型潮土剖面主要性质和微量金属垂直分布特征[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 817-824
- [19] Walker T S, Bais H P, Grotewold E, et al. Root Exudation and Rhizosphere Biology[J]. *Plant Physiology*, 2003, 132: 44-51
- [20] Bais H P, Weir T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57: 233-266
- [21] 徐仁扣, 王亚云, 赵安珍. 低分子量有机酸对可变电荷土壤吸附性氟解吸的影响[J]. *土壤*, 2003, 35(5): 392-396
- [22] 谢忠雷, 房春生, 孙文田, 等. 柠檬酸-铝-氟交互作用对茶园土壤氟吸附特征及形态分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(6): 2271-2286
- [23] Bertin C, Yang X H, Weston L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256: 67-83
- [24] 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
- [25] 中华人民共和国农业部. 茶叶氟含量标准[S]. NY659—2003
- [26] 侯少范, 李海蓉, 王五一. 茶树富集铝氟的生物学特性与茶叶铝氟含量的关系[J]. *地方病防治杂志*, 2008, 23(3): 186-189
- [27] 罗淑华, 贾海云, 章雄才, 等. 砖茶中氟的浸出规律研究[J]. *茶叶科学*, 2002, 22(1): 38-42
- [28] 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): 287-290
- [29] 李丽霞. 茶树吸收富集氟的特性及初步调控研究[D]. 四川农业大学硕士学位论文, 2008, 17-18
- [30] Bu-Olayan A H, Thomas B V. Translocation and bioaccumulation of trace metals in desert plants of Kuwait governorates[J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2009, 3: 581-587
- [31] Liang J, Shyu T, Lin H. The aluminium complexes in the xylem sap of tea plant[J]. *Journal of the Chinese Agricultural Society*, 1996, 34: 695-702
- [32] Nagata L, Hayatsu M, Kosuge N. Aluminium kinetics in the tea plant using ^{27}Al and ^{19}F NMR[J]. *Phytochemistry*, 1993, 32: 771-775
- [33] 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
- [34] Ruan J Y, Wong M H. Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant[J]. *Environmental and Health*, 2001, 23: 56-63

BIOACCUMULATION AND TRANSLOCATION OF FLUORIDE FROM SOILS TO DIFFERENT PARTS OF TEA PLANTS IN ANHUI PROVINCE

GAO Hongjian LIU Tengting ZHANG Xianchen ZHANG Zhengzhu WAN Xiaochun

(Key Laboratory of Tea Biochemistry & Biotechnology, Ministry of Education, Anhui Agricultural University, Hefei, 230036, China)

ABSTRACT

Bioaccumulation and translocation of fluoride from soils to different parts of tea plants from several tea plantations of Xuancheng, Liu'an and Hefei in Anhui Province were investigated by sampling tea garden soils and tea plants. Results revealed that the total fluoride concentrations in surface soil (0—20 cm) in tea plantations from Liu'an ($319.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were higher than those in Xuancheng ($316.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and Hefei ($311.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), respectively. these fluoride contents were lower than the national fluoride background level ($478 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The fluoride concentrations in surface soil were higher than those in the subsoil profile (20—40 cm and 40—60 cm), indicating that a large amount of fluorides were enriched in the surface soil. The soluble fluoride in rhizosphere soil was higher than that in the non-rhizosphere soil from different tea planting areas. The fluoride contents in the different parts of tea plants were in the order of: mature leaf > fallen leaf > young leaf > root, stem. In young leaves, the fluoride contents ($108.2\text{—}184.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were below the national fluoride limit in tea ($\leq 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), while in mature leaves, the fluoride contents ($531.0\text{—}1155.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were above the limit, which pose potential risks to tea quality. The bioaccumulation factors (BF) of total and soluble fluorides from surface soil to tea plant ranged from 1.71 to 3.65, and from 99.8 to 348, respectively. The translocation factors (TF) of fluorides from roots to mature leaves ranged from 9.7 to 25.5, indicating that the ability of fluoride translocation from roots to leaves were higher in tea plants.

Keywords: tea plantation soils, tea plants, fluoride contents, accumulation, translocation.