

周国华, 曾道明, 贺灵, 等. 福建铁观音茶园生态地球化学特征[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 2008–2018.

Zhou Guohua, Zeng Daoming, He Ling, et al. Eco-geochemical characteristics of the Tieguanyin tea gardens in Fujian Province[J]. Geology in China, 2015, 42(6):2008–2018(in Chinese with English abstract).

福建铁观音茶园生态地球化学特征

周国华¹ 曾道明¹ 贺 灵¹ 朱晓婷² 孙彬彬¹ 白金峰¹ 周子琦²

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 东南沿海是铅等重金属的地球化学高背景区。该地区广泛分布酸性红壤, 酸雨沉降、不适当施肥导致土壤酸化以及由此引发土壤重金属生态风险令人关注。以福建省铁观音主产区为研究区, 采集了 79 个茶园的表层和亚表层土壤样、茶叶样品, 测定了重金属元素以及土壤常量元素和理化指标。研究表明, 福建铁观音茶园土壤中 Hg、Pb、Se、Zn 高含量主要由地质背景所引起, 土壤常量组分、有机质、酸碱度等理化条件对土壤元素含量有一定的影响; 铁观音茶树老叶中 As、Cd、Cr、Hg、Se、Pb、F 等非植物营养元素含量明显高于嫩叶, 显示这些元素随植物生长逐渐累积的特征, 而嫩叶中植物生长必需的营养元素 Cu、(Ni)、Zn 则高于老叶, 反映出微量营养元素在茶叶生长部位相对富集的特征; 多数情况下土壤与茶叶间元素含量相关性差, 说明茶树对土壤元素的吸收累积受到多种复杂因素的影响。研究表明茶叶与土壤 Pb、Cr 具有显著正相关性, 为建立铅污染土壤生态效应预测评价模型提供了基础依据。

关键词: 地球化学特征; 土壤; 茶叶; 重金属; 迁移系数; 铁观音; 福建

中图分类号:P593 文献标志码:A 文章编号: 1000-3657(2015)06-2008-11

Eco-geochemical characteristics of the Tieguanyin tea gardens in Fujian Province

ZHOU Guo-hua¹, ZENG Dao-ming¹, HE Ling¹,
ZHU Xiao-tin², SUN Bin-bin¹, BAI Jin-feng¹, ZHOU Zi-qi²

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, Hebei, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: It has been identified that a high geochemical background of some heavy metals including Pb exists in the southeastern part of China. There is a potential eco-geochemical hazard risk from heavy metal mobilization caused by soil acidification due to acid precipitation and improper manure. The main production area of Tieguanyin tea was selected for this study. Surface and sub-surface soils as well as tea leaves were collected from totally 79 tea gardens. Heavy metals in soils and tea leaves, major elements and physicochemical indicators of soil samples were determined. It is found that Hg, Pb, Se and Zn in tea garden soils are higher than their geochemical backgrounds of national soils, and this is attributed mainly to soil-parent rocks controlled by geological setting. However, soil properties including particle composition, organic material content and pH also play important roles in trace

收稿日期: 2014-09-09; 改回日期: 2014-11-27

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价项目“东南沿海土壤铅生物有效性评价技术研究”(12120113002400)资助。

作者简介: 周国华, 男, 1964年生, 教授级高工, 从事生态环境地球化学调查与研究; E-mail: zhouguohua@igge.cn.

element concentration. Some non-nutrition elements for vegetation including As, Cd, Cr, Hg, Se, Pb and F are accumulated in matured leaves compared with their values in sprouts. Nutritive elements such as Cu, Ni and Zn seem to accumulate in sprouts to meet the demand of tea growth. Although the relationships between soil and tea leaves are quite complicated for most elements, there exists obvious positive correlation between soils and tea leaves in Cr and Pb content. This discovery provides the mathematical basis for establishing a model for forecasting lead impact on ecosystem.

Key words: geochemical characteristics; soil; tea leaf; heavy metal; transfer factor; Tieguanyin tea; Fujian

About the first author: ZHOU Guo-hua, male, born in 1964, senior engineer, mainly engages in the study of environmental geochemistry. E-mail: zhouguohua@igge.cn.

进入21世纪以来,中国区域地球化学调查工作进入了一个新的历史时期。通过大规模的多目标区域地球化学调查,查明土壤元素组成及其分布特征,评价土壤环境质量及污染程度^[1,2],预测其有害与有益生态效应^[3,4],科学评价土地质量^[5],以服务于国土资源规划利用、环境整治、生态保护等领域,已成为我国勘查地球化学领域的研究热点。

国家尺度的区域地球化学调查表明,中国东南沿海是Ag、Al、Be、Bi、Cd、Hg、Nb、Mo、Pb、Sn、Th、U、W、Zn、Zr,以及稀土元素的地球化学高背景区^[6-8],一些专题研究也证实了福建土壤铅等元素浓度远高于全国土壤铅背景值^[9,10]。东南沿海地区主要分布地带性红壤,特别是种植茶树的山地红壤、黄红壤,土壤酸性强,十分有利于Cd、Pb、Zn等多种重金属元素活化、迁移进入茶叶,隐藏着一定的生态风险。

茶叶重金属含量特别是铅超标曾经是我国茶叶生产面临的重大问题^[11],福建安溪是我国名茶铁观音的主产区,重金属地球化学高背景对茶叶卫生质量构成了潜在威胁。虽然我国茶叶标准与国际接轨后,茶叶中铅限量由原先的 2×10^{-6} 修订为新标准的 5×10^{-6} ^[12],加上自2000年起我国停止生产和使用含铅汽油,大气铅污染有所缓解,茶叶铅超标问题不再那么严重,暂时淡出了人们关注的热点。然而,由于土壤铅等重金属具有长期累积性,随着工矿污染排放、农药化肥施用、污水灌溉和污泥利用等各种人为作用,工矿区 and 城市周边地区土壤重金属污染形势依据十分严峻,加上我国南方茶叶种植区处于酸雨沉降区,土壤有进一步酸化的趋势,有可能触发重金属生态风险。研究表明随着茶树种植时间的增加,土壤铅有效性有增加的风险^[11],因此,查明茶园土壤重金属含量水平、研究土壤-茶树系统中元素迁移累积规律对于保障茶叶安全生产仍具有重要意义。

本文以种植历史悠久、分布面积广的铁观音茶叶主产区福建安溪一同安地区为重点研究区,以福建闽侯一连江地区为对照区,调查分析茶园土壤、茶叶元素含量与组合特征,分析地质背景对土壤元素组成的影响,研究土壤-茶叶系统中元素迁移富集规律,从而为区域重金属地球化学高背景的生态风险评价提供基础依据。

1 样品采集与分析

选择茶叶种植相对集中的福建省闽侯一连江地区17处茶园、安溪一同安地区62处茶园(图1),在2013年6月15日—7月10日期间采集了茶叶和茶园土壤样品。

在选定茶园的中央部位采样。每个茶园采集表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)两件土壤样。每个土壤样采集5个以上子样组合而成,采样坑以梅花形分布在采样中心点10 m范围内。土壤样品重量大于2.5 kg,装于洁净布袋内。在野外驻地风干,风干期间用木棒轻敲以破碎土壤团块,过10目(2 mm)筛,混匀,运回实验室备用。

在采集土壤样的范围内,采样茶叶样品。在闽侯一连江的17个茶园及安溪一同安的6个茶园,采摘前一年生长的成熟老叶样,在安溪一同安的56个茶园采集了当年生长的一芽二叶样(嫩叶样,后同)。样品鲜重大于500 g。在野外驻地称取鲜重后,先以自来水快速冲洗3遍,再以去离子水快速冲洗2遍,装入洁净网袋甩去水分,摊放于洁净白布上吹干。置于瓷盆,放入微波炉加热杀青2 min,再放入小型烘箱80~90 °C烘15 min,65 °C烘2~4 h,烘干后称取干重。

取过10目筛的土壤样,按LY/T 1239-1999测定pH值,按LY/T 1243-1999测定阳离子交换量(CEC)。取80 g土壤样,研磨至200目后,采用氧化

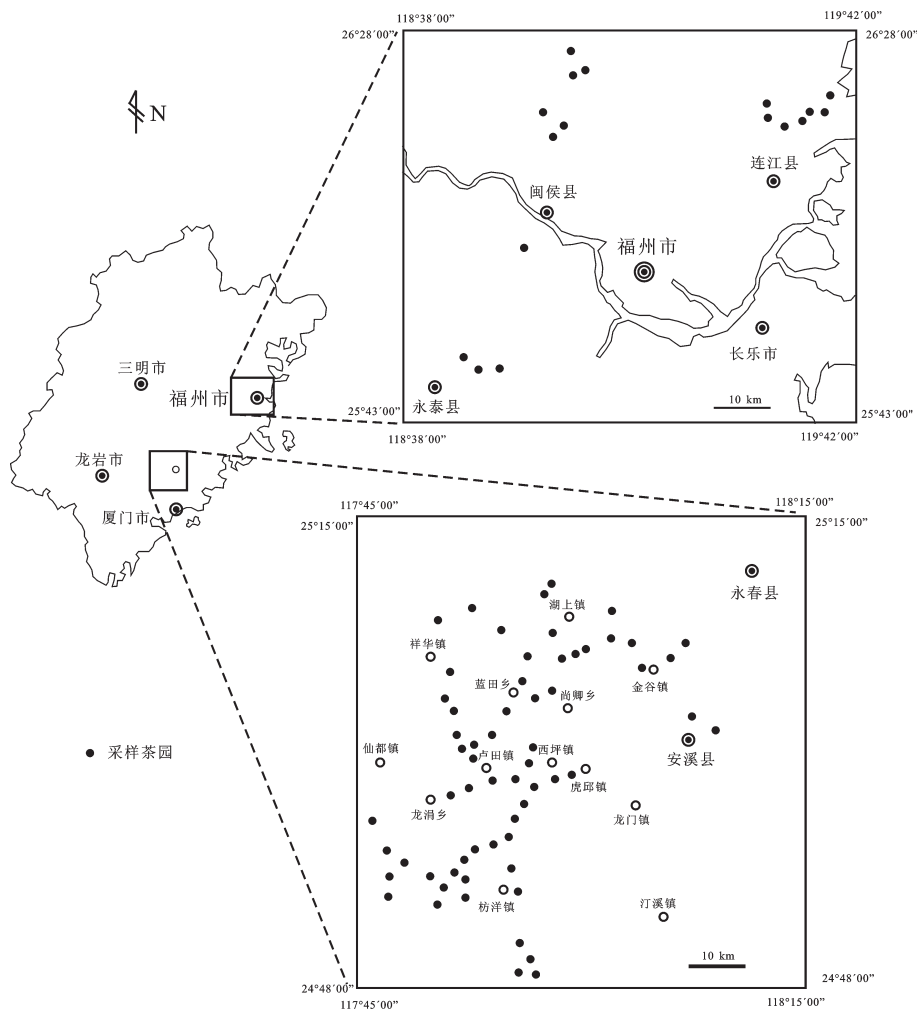


图1 研究区位置与采样茶园分布示意图

Fig.1 Location of the study area and sampled tea gardens

热解-电位法测定有机碳(Corg.)和总碳(TC), 氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定 As、Se, 冷蒸气-原子荧光光谱法(CV-AFS)测定 Hg, 离子选择性电极法(ISE)测定 F, 压片-X射线荧光光谱法(XRF)测定 SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、Cr、Mn、P、S、Zr, 等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn。样品分析采用国家一级标准物质和重复样监控分析质量, 分析结果的检出限、报出率、正确度、精密性等质量指标均达到了中国地质调查局颁布的《DD2005-01 多目标区域地球化学调查规范》的要求。

烘干后的茶叶样品, 用玛瑙钵研磨至小于 60 目, 混匀, 依据 GB/T5009-2003 方法测定茶叶元素

浓度。称取 1.0 g 样品, 经微波消解后采用等离子体质谱、等离子体光谱测定 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Se、Zn。称取 1.0 g 样品, 用(1+1)HCl 水浴提取 18 h, 采用原子荧光法测定无机 As。称取 1.0 g 样品, 扩散法提取, 采用分光光度法测定 F 浓度。采用国家一级标准物质和密码重复样监控分析质量, 插入的 3 件密码重复样除 As、Hg 相对偏差出现大于 30%外, 其他元素相对偏差均小于 15%, 分析质量符合中国地质调查局颁布的《DD2005-03 生态地球化学评价样品分析技术要求》中生物样品的分析质量要求。

土壤阳离子交换量、茶叶元素浓度测试工作由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心完成。土壤其他指标由中国地质科学院地球物理地球化学

勘查研究所中心实验室完成。

2 茶园土壤地球化学特征

2.1 茶园土壤地球化学特征

1) 土壤元素含量特征

表1和表2分别为79个茶园表层、亚表层土壤中20多种元素含量及理化指标按地质背景的统计平均值。由表可见:(1)与全国A层土壤常量元素平均值相比,研究区土壤具有富Al、贫Ca、Mg、Na、K的特点,反映了地理气候控制下地带性红壤的化学主成分特征;(2)与全国A层土壤微量元素平均值相比,研究区土壤表现为Cd、Cr、Cu、F、Mn、Ni、P、S偏低,而Hg、Pb、Se、Zn较高,与全国尺度的区域地球化学调查成果相符;(3)与亚表层土壤比较,表层土

壤中元素Cd、P、Se及Corg.呈一定程度的富集,可能与施肥带入、有机质对元素的吸附作用以及生物地球化学循环等次生富集作用有关。亚表层土壤中As、Zn含量略高于表层土壤,显示湿润气候条件下表生活动性强的元素由地表向下淋滤的趋势。其他多数微量元素在表层与亚表层土壤中含量无明显差异;(4)本次调查发现福建茶园地土壤铅平均值为 65×10^{-6} ,与Wang et al (2006)报道的福建蔬菜地铅平均浓度(71.3×10^{-6})十分接近^[9]。研究发现杭州近郊茶园表层土壤铅浓度明显高于亚表层土壤^[11],被证实主要是汽车尾气等人为污染作用的结果^[13]。福建茶园表层与亚表层土壤中铅浓度无显著差异,说明福建地区茶园土壤铅受大气沉降等人为污染影响较小,铅地球化学高背景主要与地质背景因素有关。

表1 各种地质背景区茶园表层土壤元素含量平均值

Table 1 Average concentrations of elements in surface soils of tea gardens according to geological settings

土壤元素	J _{3v}	ξ _γ J ₃	ηγK ₁	kργK ₁	γδK	γK	K ₁	K ₂	全部	全国 ^[6]	Max/Min
	54/件	14/件	2/件	2/件	1/件	1/件	1/件	4/件	79/件		
As	9.3	4.8	4.1	4.3	7.7	3.9	5.7	5.6	7.9	8.2	2.4
Cd	76	100	44	99	55	78	108	91	80.7	120	2.5
Cr	19.4	18.3	29.0	64.9	27.9	16.5	15.1	31.7	21.2	51.8	4.3
Cu	10.6	10.8	15.6	16.7	6.1	10.8	11.8	16.2	11.1	18.2	2.8
F	336	274	238	307	261	283	295	284	317	424	1.4
Hg	88.5	63.3	34.7	47.9	63.9	36.4	52.9	51.0	78.3	33	2.6
Mn	445	322	375	371	170	608	453	548	424	586	3.6
Ni	7.4	6.1	12.0	21.5	7.9	7.5	5.8	17.0	8.1	21.7	3.7
P	430	473	236	455	1072	291	315	750	454	573	4.5
Pb	74	56	29	48	15	31	47	38	65	23.3	4.8
S	211	157	188	301	192	194	177	202	202	261	1.9
Se	0.54	0.32	0.38	0.76	0.87	0.47	0.25	0.57	0.50	0.29	3.5
Zn	74	44	52	88	42	55	76	88	68	53.9	2.1
Zr	256	229	559	277	243	397	402	450	273	302.3	2.4
SiO ₂	63.9	64.9	54.9	54.1	51.2	61.4	72.0	57.4	63.2	65.3	1.4
Al ₂ O ₃	17.58	17.92	22.19	21.63	25.45	18.74	13.58	19.67	18.03	12.75	1.9
TFe ₂ O ₃	4.28	2.65	5.20	5.77	3.55	4.49	3.46	5.32	4.09	3.75	2.2
MgO	0.26	0.16	0.33	0.34	0.18	0.43	0.18	0.34	0.25	1.31	2.8
CaO	0.09	0.11	0.05	0.14	0.04	0.30	0.10	0.09	0.09	2.77	7.0
Na ₂ O	0.07	0.19	0.07	0.07	0.02	0.23	0.05	0.10	0.09	1.99	10.0
K ₂ O	1.56	2.42	1.32	1.34	0.48	2.41	1.45	1.33	1.69	2.64	5.1
Corg.	1.34	0.87	0.73	1.20	0.77	1.40	1.75	1.26	1.23	1.32	2.4
TC	1.50	1.01	0.79	1.28	1.05	1.41	1.84	1.42	1.38	1.71	2.3
pH	4.6	4.9	5.0	4.8	4.5	4.9	4.9	4.8	4.7		1.1
CEC	8.27	5.94	6.96	6.00	11.20	7.97	8.46	9.95	7.89		1.9

注: J_{3v}-晚侏罗世陆相中酸性火山岩、火山碎屑岩; ξ_γJ₃-晚侏罗世正长花岗岩; ηγK₁-早白垩世二长花岗岩; kργK₁-早白垩世碱长花岗岩; γδK-白垩纪花岗岩类; γK-白垩纪花岗岩类; K₁-早白垩世陆相中基性-中酸性火山岩、集块岩、火山角砾岩、碎屑岩夹煤、油页岩; K₂-晚白垩世细碎屑岩为主,夹火山碎屑岩、泥灰岩及石英岩。*指全国土壤平均值。含量单位: SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、Corg.、TC为10⁻²; CEC为cmol(+)/kg; pH无量纲; Cd、Hg为10⁻⁹;其他元素为10⁻⁶。

表2 各种地质背景区茶园亚表层土壤元素含量平均值

Table 2 Average concentrations of elements in sub-surface soils of tea gardens according to geological settings

土壤元素	J _{3v}	ξ _γ J ₃	η _γ K ₁	k _ρ γK ₁	γδK	γK	K ₁	K ₂	全部	全国 ^[6]	Max/Min
	54/件	14/件	2/件	2/件	1/件	1/件	1/件	4/件	79/件		
As	10.0	4.5	4.8	5.0	6.8	3.9	5.9	5.3	8.4	8.2	2.6
Cd	71	100	47	89	41	68	100	68	76	120	2.5
Cr	20.0	17.7	28.0	66.3	24.6	19.3	15.0	32.6	21.6	51.8	4.4
Cu	10.1	10.1	18.2	17.3	4.6	10.1	9.7	14.0	10.6	18.2	4.0
F	326	249	225	283	246	234	290	239	301	424	1.4
Hg	74.9	87.1	37.4	64.2	106.9	40.4	57.9	67.9	75.2	33	2.9
Mn	448	353	341	325	156	641	429	509	427	586	4.1
Ni	7.4	6.2	14.3	21.9	6.7	6.6	5.2	16.1	8.1	21.7	4.2
P	356	367	193	419	436	261	253	741	374	573	3.8
Pb	72	65	33	50	14	30	43	35	66	23.3	5.0
S	199	154	183	300	205	175	152	199	193	261	2.0
Se	0.48	0.27	0.37	0.66	0.69	0.49	0.19	0.54	0.45	0.29	3.6
Zn	74	70	57	90	39	50	71	80	73	53.9	2.3
Zr	257	227	454	259	227	386	410	444	269	302.3	2.0
SiO ₂	63.9	65.4	55.5	51.6	49.9	62.0	72.2	57.9	63.3	65.3	1.4
Al ₂ O ₃	17.74	17.90	21.81	22.32	25.95	18.29	13.91	20.42	18.19	12.75	1.9
TFe ₂ O ₃	4.27	2.79	5.20	6.07	3.41	4.43	3.70	5.37	4.12	3.75	2.2
MgO	0.28	0.15	0.32	0.33	0.19	0.45	0.18	0.35	0.26	1.31	2.9
CaO	0.09	0.11	0.05	0.13	0.04	0.30	0.07	0.09	0.09	2.77	7.0
Na ₂ O	0.07	0.18	0.06	0.07	0.02	0.23	0.05	0.10	0.09	1.99	10.0
K ₂ O	1.61	2.44	1.14	1.20	0.54	2.44	1.46	1.40	1.72	2.64	4.5
Corg.	1.10	0.82	0.52	0.96	0.82	1.13	1.18	1.17	1.03	1.32	2.2
TC	1.18	0.88	0.57	1.06	0.91	1.17	1.35	1.20	1.11	1.71	2.4
pH	4.6	4.9	4.9	4.7	4.4	4.9	4.7	4.7	4.7		1.1
CEC	8.39	5.69	6.44	7.88	8.22	7.73	5.86	11.36	7.96		2.0

注: 地层及地质体代码与时代、含量单位等同表1。

2) 土壤元素组合特征

利用79件表层茶园土壤样品的25项指标数据进行因子分析。采用具有Kaiser标准化的正交旋转法,8次迭代后收敛,7个主因子的累积方差贡献率达76.45%。

由表3可见,主成分1的元素组合以Se-Corg.-TC-CEC为主,同时As-F-S与之有较密切的关系。从表1和表2可见,研究区红壤、黄壤酸性强,pH多小于5.0,土壤无机碳含量很少,土壤有机碳是土壤总碳的主要组成(占77%),因而TC和Corg.的密切关系不难理解。S是土壤有机质的重要组成元素。大量研究表明,土壤有机质具有很强的吸附作用,这是导致As、F、Se等元素与土壤Corg.间关联密切的原因之一。另外,土壤有机质具有大量的交换性阴阳离子基团,土壤离子交换量(CEC)在一定程度上与土壤有机质有关。主成分2以Cr-Cu-Ni-(TFe₂O₃)元素组合为主,反映了基性元素组合。主成分3由土壤常量组分构成,反映了低Si、高Al-Fe-Mg红壤化粘质土壤化学组成特征。主成分4为Mn-Pb-Zn-(F),反映了土壤中锰氧化物对Pb、Zn、F

的吸附固定作用。主成分5主要为Cd-CaO-pH组合,由于土壤中碳酸钙组分是决定土壤酸碱度的主要化学成分,这一组合反映了表生环境下强活性元素Cd的富集与贫化主要受土壤酸碱性的制约。主成分6主要为Na₂O-K₂O组合,反映了土壤中粘土矿物组成特征。主成分7则为Hg-P组合,反映了土壤Hg的积聚与磷酸盐密切相关。

2.2 影响土壤元素含量的因素

1) 地质背景

本次调查茶园的成土母岩主要为上侏罗统陆相中酸性火山岩、火山碎屑岩(J_{3v},共54处茶园)及晚侏罗世正长花岗岩(ξ_γJ₃,共14处茶园),白垩纪中酸性岩、火山碎屑岩等地层及岩性类型区土壤样较少,有的仅1件样品,用以对比研究。对比表1和表2可见:(1)上侏罗统陆相中酸性火山岩、火山碎屑岩(J_{3v})形成的土壤中As、F、Hg、Mn、Pb、S、Se、Zn、Zr、MgO、Fe₂O₃、Corg.、CEC平均值明显高于晚侏罗世正长花岗岩(ξ_γJ₃)区土壤,而Cd、P、Na₂O、K₂O则相对较低;(2)无论是表层土壤还是亚表层土壤,不同地质时代和岩性区土壤元素含量差异显著,多数元

表3 表层土壤地球化学指标旋转主成分矩阵

Table 3 Principal components matrix after rotation extraction of geochemical indicators in surface soils

土壤元素	成分1	成分2	成分3	成分4	成分5	成分6	成分7
As	0.579	0.348	-0.155	-0.014	-0.224	0.002	-0.138
Cd	0.061	0.260	-0.295	0.387	0.638	0.013	0.014
Cr	0.335	0.765	0.263	-0.079	0.125	-0.068	0.086
Cu	0.031	0.785	-0.128	0.211	-0.059	-0.110	0.261
F	0.566	0.201	-0.121	0.523	-0.094	0.311	-0.026
Hg	0.026	-0.072	-0.018	-0.063	-0.082	0.018	0.839
Mn	0.035	0.040	0.205	0.819	0.137	0.078	-0.066
Ni	0.234	0.777	0.403	-0.023	0.118	-0.068	-0.011
P	0.116	0.471	-0.021	0.027	0.011	-0.080	0.739
Pb	0.027	-0.011	-0.131	0.804	0.029	-0.093	-0.028
S	0.520	0.395	0.498	0.176	0.011	-0.294	0.202
Se	0.726	0.358	0.364	-0.033	0.027	-0.002	-0.065
Zn	0.097	0.052	0.361	0.714	0.268	-0.240	0.104
Zr	-0.130	0.587	0.225	-0.010	0.151	-0.169	-0.092
SiO ₂	-0.216	-0.260	-0.894	-0.073	-0.001	-0.011	-0.007
Al ₂ O ₃	0.080	0.099	0.873	0.010	-0.029	0.026	-0.054
TFe ₂ O ₃	0.314	0.538	0.550	0.363	-0.194	-0.043	0.041
MgO	0.392	0.439	0.456	0.302	-0.095	0.295	-0.059
CaO	0.047	0.024	0.125	0.229	0.793	0.067	0.130
Na ₂ O	-0.207	-0.087	0.175	-0.175	0.217	0.748	0.098
K ₂ O	-0.170	-0.254	-0.124	0.050	0.015	0.844	-0.125
Corg.	0.854	0.009	0.130	0.024	0.228	-0.243	0.214
TC	0.857	-0.046	0.164	0.084	0.209	-0.235	0.165
pH	-0.094	0.023	-0.060	-0.085	0.828	0.100	-0.285
CEC	0.722	-0.012	0.199	0.111	-0.296	-0.095	-0.019

素最高值是最低值的2~4倍,最多相差达10倍(Na₂O)。显然,地质背景-岩石化学组成是制约土壤元素组成的重要因素。

2) 土壤理化性质

从前面的因子分析结果可以发现,土壤元素组合除了与元素地球化学性质有关外,土壤中微量元素的富集与贫化还与土壤主成分、理化条件直接有关。由表4可见,土壤微量元素与常量组分、土壤理化指标间有密切关系,具体表现为:(1)As、Cr、Cu、F、Mn、Ni、P、S、Se、Zn、Zr多与土壤SiO₂呈负相关,而与Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、Corg.、CEC多呈正相关。已有研究认为,土壤沉积物中SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO组成可以反映土壤质地和矿物组成特征^[14],低SiO₂、高Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO的土壤质地较细,富含黏土矿物、铁锰氧化物、有机质以及富集微量元素的暗色矿物,阳离子交换量(CEC)及其对阴阳离子的吸附能力较强。例如,研究认为土壤有机质的-SH、-NH₂基团能与Pb²⁺形成稳定的络合物,土壤中PO₄³⁻、CO₃²⁻、OH⁻等阴离子可与Pb²⁺形成溶解度很小

的正盐、复盐及碱式盐,粘土矿物可经离子交换作用而吸附Pb,从而使Pb固定并富集于土壤^[15]。事实上,S、P、Se、Zn等一些生命元素本身就是有机质的重要组成部分。因此,这一元素组合实质上反映了土壤质地及有机质的作用效应;(2)由于酸性条件下Cd²⁺活动性较强而易淋失,而土壤碱性越强则Cd越易保留在土壤中,因此土壤Cd浓度与土壤CaO、pH呈显著正相关性。

3 茶叶元素含量特征

表5列出了本次采集的79件茶叶样品(56件嫩叶样、23件老叶样)重金属等元素含量平均值、中位数及变化范围。对比可见,老叶样中As、Cd、Cr、Hg、Se、Pb、F含量明显高于嫩叶样,其中Cr、Pb、F平均值达嫩叶2.5倍以上,显示老叶中元素累积特征。嫩叶中Cu、Ni含量高于老叶,Zn浓度略高。虽然我国茶叶尚无Cr、F标准,但老叶茶富含F对于大量饮用砖茶的牧区人群来说,饮茶F摄入构成了潜在威胁。

表4 表层土壤微量元素与常量组分、理化指标间相关系数(N=79)

Table 4 Correlation coefficients of trace elements with major elements and physicochemical indicators in surface soils

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Corg.	pH	CEC
As	-0.115	0.040	0.280*	0.278*	-0.120	0.334**	-0.161	0.372**
Cd	0.077	-0.108	0.023	0.078	0.494**	0.122	0.501**	-0.123
Cr	-0.475**	0.288*	0.589**	0.464**	0.123	0.392**	0.011	0.193
Cu	-0.155	0.009	0.448**	0.246*	0.043	0.127	-0.131	0.057
F	-0.138	0.037	0.395**	0.533**	0.087	0.349**	-0.082	0.469**
Hg	0.039	-0.057	0.008	-0.059	-0.023	0.116	-0.196	0.012
Mn	-0.228*	0.148	0.376**	0.321**	0.221	0.079	0.091	0.097
Ni	-0.572**	0.397**	0.657**	0.542**	0.106	0.306**	0.064	0.175
P	-0.187	0.068	0.279*	0.182	0.122	0.257*	-0.167	0.152
Pb	0.011	-0.045	0.171	0.068	0.146	0.075	-0.011	-0.012
S	-0.645**	0.456**	0.722**	0.500**	0.129	0.648**	-0.215	0.366**
Se	-0.565**	0.417**	0.559**	0.538**	0.036	0.630**	0.009	0.499**
Zn	-0.346**	0.220	0.473**	0.337**	0.435**	0.292**	0.045	0.166
Zr	-0.264*	0.139	0.403	0.333**	0.158	0.057	0.135	0.022

注: *N=79, 置信度为95%时, 显著相关; ** N=79, 置信度为99%时, 显著相关。

与我国茶叶铅限量值相比, 无论是茶树嫩叶(一芽二叶)还是成熟老叶, 铅浓度均未超出新标准(5×10^{-6}), 嫩叶铅浓度均小于 1×10^{-6} , 即使是铅浓度相对较高的老叶, 也仅见1件样品铅浓度超出 2×10^{-6} , 说明铁观音茶叶自身的铅含量并不高。过去报道的铁观音茶叶存在铅超标问题($>2 \times 10^{-6}$), 除了与当时汽车尾气排放造成的大气铅污染有关外, 还可能与茶叶制作加工过程中铅二次污染有关。虽然老叶中重金属Pb浓度未超出我国茶叶铅限量新标准, 但从老叶茶与嫩叶茶中重金属元素、生命必需元素浓度来看, 由嫩叶加工制作的茶叶的内在品质要高于老叶茶。

本次调查取得的铁观音茶园表层与亚表层土壤中铅平均值分别为 65×10^{-6} 、 66×10^{-6} , 明显高于杭州近郊表层与亚表层土壤中铅 36.4×10^{-6} 、 32.2×10^{-6} 的含量水平^[11], 但茶叶铅含量却明显低于杭州近郊。汽车尾气排放曾经是环境铅的重要来源^[15], 大气铅污染被认为是杭州近郊茶叶铅超标率较高的主要原因^[11, 13, 16]。而福建安溪茶叶产区远离城市和交通干线, 加上近年来禁用含铅汽油, 大气铅污染影响减小, 这可能是本次研究中铁观音茶叶铅含量较低的原因所在。

无论是茶树老叶还是嫩叶, 茶叶中元素含量具有 $F > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr > Se > As > Cd > Hg$ 的规律, 与

黑海东部地区茶叶元素含量排序($Zn > Cu > Pb > Al > Cd > Fe$)一致^[17], 反映了地壳元素含量级次(丰度)的影响, 以及树茶具有的元素吸收聚积规律。

与台湾市场乌龙茶元素含量相比^[18], 铁观音茶叶(嫩叶)中As、Cd、Cu、Zn高于台湾市场乌龙茶, Cr、Se则偏低, Pb含量相近; 与台湾市场黑茶元素含量相比^[18], 铁观音茶叶(嫩叶)中As、Cu、Zn较高, Cd、Cr、Pb较低, Se含量相近。与产自黑海东部受块状硫化物和热液矿化作用影响的地球化学高背景区的茶叶相比^[17], 铁观音茶叶中Cd、Pb、Zn浓度明显偏低, Cu浓度两者相近; 与产于伊朗北部的黑茶相比^[19], 铁观音茶叶中Cd、Zn明显低, Cu、Pb浓度相近。

4 土壤-茶叶间元素含量关系

4.1 土壤-茶叶元素迁移系数

常常采用土壤-植物系统中元素迁移系数(Transfer Factor)来表征植物对土壤元素的吸收累积能力^[20]:

$$TF(\%) = [\text{植物元素浓度(干重计)}] / [\text{土壤元素浓度(干重计)}] \times 100$$

表6给出了土壤-茶叶系统中重金属等元素的迁移系数。由此可见: (1)无论是老茶叶还是嫩茶叶, 各种元素迁移系数变化范围很大。大量研究表

表5 茶叶元素含量(10^{-6})统计值
Table 5 Statistical parameters of trace element concentrations (10^{-6}) in tea leaves

元素	全部样品 (N=79)				老叶茶样 (N=23)				嫩叶茶叶 (N=56)				中国台湾 ^[18]			黑海东部 ^[17]		伊朗北部 ^[19]	
	最小值	最大值	平均	中位数	最小值	最大值	平均	中位数	最小值	最大值	平均	中位数	乌龙茶 (N=18)	黑茶 (N=15)	平均 (N=89)	黑茶 (N=60)			
As	0.01	0.08	0.03	0.04	0.01	0.08	0.04	0.04	0.01	0.06	0.03	0.03	0.005	0.01					
Cd	0.010	0.078	0.030	0.027	0.018	0.078	0.036	0.031	0.010	0.071	0.027	0.025	0.005	0.07	0.06	0.21			
Cr	0.17	1.61	0.38	0.24	0.33	1.61	0.74	0.65	0.17	0.47	0.23	0.22	5.2	7.92					
Cu	6.56	18.21	11.21	11.35	6.56	13.34	9.57	9.03	8.56	18.21	11.88	11.94	0.9	0.3	11.4	10.22			
F	26	700	288	233	165	700	519	500	26	700	193	138							
Hg	0.002	0.008	0.004	0.003	0.004	0.008	0.006	0.005	0.002	0.005	0.003	0.003							
Ni	1.00	6.51	2.52	2.20	1.10	4.05	2.21	2.01	1.00	6.51	2.65	2.23							
Pb	0.15	2.31	0.62	0.42	0.57	2.31	1.25	1.21	0.15	0.99	0.37	0.30	0.4	2.01	0.74	0.44			
Se	0.029	0.161	0.073	0.066	0.066	0.161	0.097	0.094	0.029	0.121	0.063	0.059	0.09	0.06					
Zn	12.68	34.34	19.04	18.13	13.54	23.15	17.48	17.34	12.68	34.34	19.67	18.65	3.4	1.2	23.93	82			

明, 植物品种、土壤理化性质以及土壤元素浓度、成因来源和有效量等因素均可影响植物对土壤元素的吸收^[21-23]; (2)相对于嫩茶叶, 老茶叶对As、Cd、Cr、F、Hg、Pb的吸收累积率较高, 而嫩茶叶对Cu、Zn、Ni、Se的吸收累积率高于老茶叶, 推断这是由于As、Cd、Cr、F、Hg、Pb不是植物生长必需的营养元素, 主要通过蒸腾作用等被动过程进入植物体内, 随着植物生长而逐步积聚^[24], 为避免游离态铅对茶树自身的伤害, 茶树体内的铅主要以草酸铅和磷酸氢铅等难溶于水的磷酸盐态存在, 不易向地上部转运而大量积聚于根部^[25]; 而Cu、Zn则为植物营养元素, 主要通过植物的主动吸收作用进入植物体。有人对水稻的研究发现, 株体内Zn分配与水稻生长期和营养状况有关, 生长期Zn主要分布于叶片而成熟期则进入籽实, 当Zn供应量过剩时优先积聚于代谢活性低的茎和叶鞘部位, 而当Zn供应量不足时则可从老叶向嫩叶转运^[26, 27]。茶树芽叶相对于老叶富集营养元素Cu、Zn可能是茶树生长对营养元素需求的反映。

根据TF平均值及中位数可见, 老茶叶对土壤元素的吸收积聚能力表现为: F>Cu>Cd>Zn>Ni>Se>Hg>Cr、Pb>As; 嫩茶叶对土壤元素的吸收积聚能力表现为: Cu>F>Ni>Cd>Zn>Se>Hg>Cr>Pb>As。总体来看, 老叶与嫩叶茶对土壤元素的吸收积聚能力排序基本一致, 仅个别元素排序不同, 反映了从茶树根系到地上叶片元素的迁移主要受茶树体内元素运移能力的控制。大量研究表明铅在植物体内的运移能力很弱^[23, 28]。与其他作物类似^[29], 茶叶中重金属元素Pb、As、Hg等由根部向地上部叶片运移能力很弱, 为茶叶饮用安全性提供了天然的生物屏障。

4.2 土壤-茶叶元素相关性

表7列出了全部茶叶样以及老叶茶、嫩叶茶与表层、亚表层土壤元素的相关系数。由此可见, 茶叶与土壤元素含量关系十分复杂, 在近些年来的生态地球化学研究中经常出现这种情况。究其原因可能有: 一是能被作物根系吸收进入植物体内的主要是土壤元素有效态组分。在各种土壤理化条件的影响下, 土壤元素有效量与全量关系极为复杂^[23], 主控因素不一, 元素全量常常难以客观反映其有效量水平。例如, 研究表明作物含铅量与土壤有效铅相关性较好而与土壤全铅关系较差^[10, 15, 30]; 二是作物对

表6 土壤-茶叶系统元素迁移系数(TF值, %)

Table 6 Transfer factors of elements in the soil-tea leaf system

		As	Cd	Cr	Cu	F	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
老叶/表土	最小值	0.15	16.0	1.25	38.6	31.8	2.91	7.3	0.57	4.8	6.9
	最大值	2.44	100.6	11.23	343.1	417.6	24.76	57.1	7.10	70.4	75.5
	平均值	0.77	47.4	3.41	113.1	179.9	11.11	23.2	3.03	19.1	31.2
	中位数	0.61	43.6	2.37	82.2	170.9	10.78	19.7	2.87	14.6	26.8
嫩叶/表土	最小值	0.07	7.9	0.24	19.7	5.7	0.25	12.0	0.14	5.9	6.9
	最大值	1.73	94.9	5.42	372.1	290.3	14.07	110.4	2.41	62.5	119.0
	平均值	0.60	41.4	2.04	156.7	70.3	5.18	49.1	0.78	19.0	37.1
	中位数	0.48	37.9	1.83	150.5	51.1	4.73	47.3	0.65	17.5	36.1
老叶/亚表土	最小值	0.14	28.6	1.25	35.5	34.8	3.66	6.5	0.54	5.6	6.3
	最大值	2.23	114.9	15.73	388.5	434.7	17.59	56.0	7.12	72.6	80.2
	平均值	0.75	56.7	3.73	120.0	202.3	9.16	23.0	2.98	21.2	30.7
	中位数	0.63	56.0	2.04	88.8	189.6	8.58	18.7	2.95	13.7	26.1
嫩叶/亚表土	最小值	0.06	6.6	0.23	25.9	5.2	1.03	12.9	0.16	5.9	7.5
	最大值	2.55	104.1	7.50	738.5	309.7	9.75	126.8	2.63	92.8	158.2
	平均值	0.64	42.1	2.09	170.3	73.6	4.43	52.0	0.76	22.1	35.4
	中位数	0.47	37.8	1.82	155.2	50.5	4.10	45.5	0.62	20.5	34.5

表7 茶叶-土壤元素含量相关系数

Table 7 Correlation coefficients of trace elements between soil and tea leaves

	N	As	Cd	Cr	Cu	F	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
茶叶与表土	79	0.207	0.267*	0.513**	0.167	-0.127	-0.097	0.145	0.099	0.317**	-0.029
茶叶与亚表土	79	0.224*	0.210	0.539**	0.222*	-0.209	-0.125	0.137	0.095	0.318**	0.004
老叶与表土	23	0.379	0.380	0.630**	0.495*	-0.438	-0.033	0.430*	0.105	-0.082	0.304
老叶与亚表土	23	0.385	0.469*	0.676**	0.522*	-0.448	-0.093	0.452*	0.083	-0.099	0.344
嫩叶与表土	56	-0.002	0.292*	0.037	0.149	-0.171	-0.047	0.241	0.580**	0.197	-0.125
嫩叶与亚表土	56	-0.009	0.253	0.019	0.231	-0.183	-0.122	0.241	0.583**	0.145	-0.099

注: *正相关, **显著正相关。

元素的吸收及其在体内转运还与作物品种及其基因型^[22,31]、土壤元素形态^[32,33]、以及元素来源^[11,21,34]有关。

本次调查发现嫩茶叶铅与土壤铅具有显著正相关性,但老茶叶与土壤铅间不存在相关性。很可能是由于嫩叶生长时间短,受大气铅沉降的干扰影响小,因而与土壤铅具有较好的相关性;而老茶叶长期暴露于大气,已受到一定程度的大气沉降铅的影响,导致茶叶与土壤铅含量没有显著相关性。本次研究发现的Pb(嫩叶)、Cr(老叶)与土壤Pb、Cr具有显著正相关性,与高海荣(2012)对福建武夷岩茶Pb和Cr^[35]、石元值等(2003)对浙江茶叶Pb^[36]的研究结果相符。茶叶与土壤间铅含量具有显著正相关性,

为建立铅污染土壤生态效应预测评价模型提供了基础依据。

5 结 论

通过对福建铁观音茶园土壤和茶叶的采样分析,取得以下主要认识:

(1)与全国土壤元素背景值相比,福建铁观音茶园土壤中Hg、Pb、Se、Zn含量较高,表层土壤中重金属污染元素累积富集不明显,且与地质背景密切相关,表明土壤Pb等重金属地球化学高背景主要由成土母岩地球化学特征所决定。土壤常量组分表现为富Al,贫Ca、Mg、Na、K的特征,反映了地理气候

控制下地带性红壤的化学主成分特征。

(2)土壤元素组合特征及地球化学指标间的相关性显示,地质背景-成土母岩类型是决定土壤重金属等微量元素含量的主要因素,同时土壤常量组分、有机质、酸碱度等理化条件也是造成土壤元素含量差异的重要原因。

(3)初步查明了铁观音茶叶元素含量及其分配特征。老茶叶中包括As、Cd、Cr、Hg、Se、Pb、F在内的非植物营养元素含量明显高于嫩叶,其中老叶Cr、Pb、F含量达嫩叶的2.5倍以上,显示这些元素随植物生长逐渐累积的特征。而嫩叶中植物生长必需的营养元素Cu、(Ni)、Zn则高于老叶,反映出茶树不同生长部位微量营养元素含量差异。

(4)由于茶树对土壤元素的吸收累积受到多种因素的影响,多数情况下土壤与茶叶间元素相关性差。本次研究发现的茶叶与土壤Pb、Cr具有显著正相关性,与前人在邻近地区的研究结论相符,为建立铅污染土壤生态效应预测评价模型提供了基础依据。

致谢: 韩志轩、柳青青、候树军同志参与了野外采样工作,审稿专家及编辑部杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室和国土资源部合肥矿产资源监督检测中心承担了样品分析测试工作,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 郭海全, 杨志宏, 李宏亮, 等. 河北平原表层土壤重金属环境质量及污染评价[J]. 中国地质, 2011, 38(1): 218-225.
Guo Haiquan, Yang Zhihong, Li Hongliang, et al. Environmental quality and anthropogenic pollution assessment of heavy metals in topsoil of Hebei plain[J]. *Geology in China*, 2011, 38(1): 218-225 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈国光, 梁晓红, 周国华, 等. 土壤元素污染等级划分方法及其应用[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1631-1639.
Chen Guoguang, Liang Xiaohong, Zhou Guohua, et al. Grade division method for soil geochemical contamination and its application[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1631-1639(in Chinese with English abstract).
- [3] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 等. 某金矿区农田土壤镉污染及其环境效应[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 636-643.
Xu Youning, Zhang Jianghua, Ke Hailing, et al. Cd contamination of farmland soil in a gold mining area and its environmental effects[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 636-643(in Chinese with English abstract).
- [4] 文帮勇, 张涛亮, 李西周, 等. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 256-263.
Wen Bangyong, Zhang Taoliang, Li Xizhou, et al. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 256-263(in Chinese with English abstract).
- [5] 王文俊. 福建省寿宁县1:25万土地质量地球化学评估[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 665-674.
Wang Wenjun. 1:250000 land quality geochemical assessment of Shouning County, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 665-674(in Chinese with English abstract).
- [6] 魏复盛. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 258.
Wei Fushen. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Publishing House, 1990: 258 (in Chinese with English abstract).
- [7] 谢学锦, 任天祥, 孙焕振. 中国地球化学图集[M]. 北京: 地质出版社, 2012. 135.
Xie Xuejing, Ren Tianxiang, Sun Huanzhen. Geochemical Atlas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. 135(in Chinese and English).
- [8] 周国华, 孙彬彬, 曾道明, 等. 中国东部主要入海河流河口区地球化学特征: 理化指标与水溶态元素浓度[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 283-294.
Zhou Guohua, Sun Binbin, Zeng Daoming, et al. Hydrogeochemical characteristics of major estuaries in eastern China: Physicochemical indicators and soluble element concentrations of river water[J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 283-294(in Chinese with English abstract).
- [9] Wang Guo, Su Miaoyu, Chen Yanhui, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144: 127-135.
- [10] Huang Zhiyong, Chen Ting, Yu Jiang, et al. Lead contamination and its potential sources in vegetables and soils of Fujian, China[J]. *Environ Geochem Health*, 2012, 34: 55-65.
- [11] Jin Chongwei, Zheng Shaojian, He Yunfeng, et al. Lead contamination in tea garden soils and factors affecting its bioavailability[J]. *Chemosphere*, 2005, 59: 1151-1159.
- [12] 张贵生. 茶叶标准研究进展[J]. 茶叶通讯, 2009, 36(4): 32-37.
Zhang Guisheng. The progress of tea standards[J]. *Tea Communication*, 2009, 36(4): 32-37(in Chinese with English abstract).
- [13] Lu Yuanfa, Yang Hongmei, Ma Liyan, et al. Application of Pb isotopic tracing technique to constraining the source of Pb in the West Lake Longjing tea[J]. *Chin. J. Geochem.*, 2011, 30: 554-562.
- [14] 孙彬彬, 周国华, 刘占元, 等. 黄河下游山东段沿岸土壤中重金属元素异常的成因[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 265-270.
Sun Binbin, Zhou Guohua, Liu Zhanyuan, et al. Origin of heavy metal anomalies in soils along the Shandong reach of the lower Yellow River, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2): 265-270(in Chinese with English abstract).
- [15] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 土壤中铅的来源及生物有效性[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 765-772.

- Yang Jinyan, Yang Xiaoe, He Zhenli. Resource and bio-availability of lead in soil[J]. Chinese Journal of Soil Sciences, 2005, 36(5): 765-772(in Chinese with English abstract).
- [16] Shi Jiachun, Wang Gang, He Yan, et al. Lead accumulation in Westlake Longjing tea: non-edaphic genesis as revealed by regional scale estimate[J]. J Soils Sediments, 2010, 10: 933-942.
- [17] Gülten Yaylalı - Abanuz, Necati Tüysüz. Heavy metal contamination of soils and tea plants in the eastern Black Sea region, NE Turkey[J]. Environ. Earth Sci., 2009, 59: 131-144.
- [18] Shen Fwuming, Chen Hongwen. Element composition of tea leaves and tea infusions and its impact on health[J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol, 2008, 80: 300-304.
- [19] Mohammad Nejatollahi, Samar Mortazavi, Alireza Ildoromi. Levels of Cu, Zn, Pb, and Cd in the leaves of the tea plant (*Camellia sinensis*) and in the soil of Gilan and Mazandaran farms of Iran[J]. Food Measure, 2014, DOI 10.1007/s11694-014-9186-3.
- [20] 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 等. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 331-340.
- Liao Qilin, Liu Cong, Cai Yuman, et al. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheat meal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 331-340(in Chinese with English abstract).
- [21] 陈怀满, 郑春荣, 王慎强, 等. 不同来源重金属污染的土壤对水稻的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 35-40.
- Chen Huaiman, Zheng Chunrong, Wang Shenqiang et al. Effect of soils polluted by different heavy metal sources on rice[J]. Rural Eco-environment, 2001, 17(2): 35-40(in Chinese with English abstract).
- [22] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003: 24(3): 112-115.
- Li Zhengwen, Zhang Yanling, Pan Genxing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. Environmental Science, 2003: 24(3): 112-115(in Chinese with English abstract).
- [23] 粟银, 袁兴中, 曾光明, 等. 土壤-植物系统中铅的迁移转化影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(16): 6953-6955.
- Su Yin, Yuan Xinzhong, Zeng Guangming, et al. Study on influence factors of transport and transformation of Pb in soil plant system[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36(16): 6953-6955(in Chinese with English abstract).
- [24] 李丽光, 何兴元, 曹志强, 等. 土壤-作物系统中铅的研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 78-82.
- Li Liguang, He Xingyuan, Cao Zhiqiang, et al. Advances in studies on lead in soil-crop system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(1): 78-82(in Chinese with English abstract).
- [25] 康孟利, 薛旭初, 骆耀平, 等. 茶树与土壤中铅的存在形态与分布[J]. 浙江农业科学, 2006(3): 280-282.
- Kang Mengli, Xue Xuchu, Luo Yaoping, et al. Species and distribution of lead in soil and tea trees[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2006(3): 280-282(in Chinese).
- [26] Impa S M, Johnson-Beebout S E. Mitigating zinc deficiency and achieving high grain Zn in rice through integration of soil chemistry and plant physiology research[J]. Plant Soil, 2012, 361: 3-41.
- [27] Khurram Bashir, Yasuhiro Ishimaru, Naoko K. Nishizawa. Molecular mechanisms of zinc uptake and translocation in rice[J]. Plant Soil, 2012, 361: 189-201.
- [28] 杨树华, 曲仲湘, 王焕校. 铅在水稻中的迁移积累及其对水稻生长发育影响[J]. 生态学报, 1986, 6(4): 312-323.
- Yang Shuhua, Qu Zhongxiang, Wang Huanxiao. The migration and accumulation of lead in rice and its influence on the growth and development of rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 1986, 6(4): 312-323(in Chinese with English abstract).
- [29] 王新, 吴燕玉. 改性措施对复合污染土壤重金属行为影响的研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 440-444.
- Wang Xin, Wu Yanyu. Effect of modification treatments on behaviour of heavy metals in combined polluted soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(4): 440-444(in Chinese with English abstract).
- [30] 夏时雨, 刘清. 土壤中不同形态铅的提取及其取样深度[J]. 环境污染与防治, 1994, 16(4): 27-29.
- Xia Shiyu, Liu Qing. Extraction different species of lead in soils and sampling depth[J]. Environmental Protection and Control, 1994, 16(4): 27-29(in Chinese).
- [31] 王凯荣, 郭炎. 重金属污染对稻米品质影响的研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(6): 254-257.
- Wang Kairong, Guo Yan. Studies on the influences of heavy metal pollution on the qualities of brown rice[J]. Agro-environmental Protection, 1993, 12(6): 254-257(in Chinese with English abstract).
- [32] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. New Phytologist, 2009, 182 (1): 49-84.
- [33] Agata Kot, Jacek Namiesik. The role of speciation in analytical chemistry[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2000, 19: 69-79.
- [34] Kabata-Pendias A. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue[J]. Geoderma, 2004, 122: 143-149.
- [35] 高海荣. 武夷岩茶与土壤中铅、铬的相关性[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3203-3206.
- Gao Hairong. Correlation between the Pb and Cr contents of Wuyi Rock Tea and soil[J]. Chinese Journal of Ecology 2012, 31 (12): 3203-3206(in Chinese with English abstract).
- [36] 石元值, 马立峰, 韩文炎, 等. 浙江省茶园中铅元素含量现状研究[J]. 茶叶科学, 2003, 23(2): 163-166.
- Shi Yuanzhi, Ma Lifeng, Han Wenyan, et al. Study on the status of lead content in tea gardens of Zhejiang Province[J]. Journal of Tea Science, 2003, 23(2): 163-166(in Chinese with English abstract).