

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017100704

黄华斌, 林承奇, 于瑞莲, 等. 安溪铁观音茶园土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境化学, 2018, 37(5): 994-1001.

HUANG Huabin, LIN Chengqi, YU Ruilian, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soils from Tieguanyin tea garden of Anxi County[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(5): 994-1001.

## 安溪铁观音茶园土壤重金属分布及污染评价\*

黄华斌<sup>1,2</sup> 林承奇<sup>1</sup> 于瑞莲<sup>2</sup> 胡恭任<sup>2\*\*</sup> 江嵩鹤<sup>2</sup> 邱其俊<sup>2</sup>

(1. 厦门华夏学院检验科学与技术系, 厦门, 361024; 2. 华侨大学环境科学与技术系, 厦门, 361021)

**摘 要** 为研究安溪铁观音茶园土壤中重金属分布特征及污染程度, 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析测定了安溪 8 个乡镇的铁观音茶园土壤中 9 种重金属的含量, 运用地质累积指数法、富集系数法和潜在生态风险指数法评价重金属污染特征及潜在生态风险. 结果表明, 不同乡镇茶园土壤中重金属含量差异较大, 重金属总平均含量顺序为 Mn > Zn > V > Pb > Cr > Cu > Ni > Co > Cd, Mn、Zn、Co、Pb 和 Cd 的总平均含量超过福建省土壤环境背景值. 地质累积指数法和富集系数法评价结果均表明, 各元素污染程度顺序为 Cd > Pb > Zn > Mn > Co > V > Cu > Ni > Cr, 其中, Cd 为中度富集和偏中度污染, Pb、Zn、Mn 为轻度富集和无污染, 其他元素为无富集无污染. 潜在生态风险指数法评价结果表明, Cd 表现为较高潜在生态风险, 其他元素表现为轻度潜在生态风险, 各元素综合潜在生态风险为较高, Cd 应成为安溪铁观音茶园土壤质量评价中重点关注的重金属.

**关键词** 茶园土壤, 重金属, 分布特征, 污染评价, 安溪铁观音.

## Distribution and pollution assessment of heavy metals in soils from Tieguanyin tea garden of Anxi County

HUANG Huabin<sup>1,2</sup> LIN Chengqi<sup>1</sup> YU Ruilian<sup>2</sup> HU Gongren<sup>2\*\*</sup>  
JIANG Songhe<sup>2</sup> QIU Qijun<sup>2</sup>

(1. Department of Science and Technology for Inspection, Xiamen Huaxia University, Xiamen, 361024, China;

2. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China)

**Abstract:** To investigate the distribution characteristics and pollution degree of heavy metals in soils from Tieguanyin tea garden of Anxi county, contents of 9 heavy metals in the soils from Tieguanyin tea garden of 8 towns were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Geo-accumulation index, enrichment factor and potential ecological risk index were applied to evaluate the pollution degree and potential ecological risk of heavy metals. The results showed that the contents of the heavy metals in tea garden soils showed variation and the average contents of the heavy metals showed the order of Mn > Zn > V > Pb > Cr > Cu > Ni > Co > Cd. Mn, Zn, Co, Pb and Cd were enriched in the soils comparing to the background values in soils of Fujian Province. The results of pollution assessment by geo-accumulation index and enrichment factor revealed that the pollution degree of heavy metals showed the order of Cd > Pb > Zn > Mn > Co > V > Cu > Ni > Cr. Cd showed mild to moderate pollution and moderate enrichment. Pb, Zn and Mn showed non-pollution and mild enrichment. The assessment results of potential ecological risk index indicated that

2017 年 10 月 7 日收稿 (Received: October 7, 2017).

\* 福建省中青年骨干教师教育科研项目 (JAT170817), 国家自然科学基金 (21177043, 21377042) 和黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG1607) 资助.

**Supported by** Education and Scientific Research Project of Middle and Young Teachers in Fujian Province (JAT170817), the National Natural Science Fund (21177043, 21377042) and the Opening Foundation of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG1607).

\*\* 通讯联系人, Tel: 13808544503, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

**Corresponding author**, Tel: 13808544503, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

Cd showed considerable potential ecological risk and the comprehensive ecological risk of 9 elements was considerable. In summary, Cd should be the focus of heavy metals in the evaluation of soil quality of Anxi Tieguanyin tea garden.

**Keywords:** tea garden soil, heavy metals, distribution characteristics, pollution assessment, Tieguanyin.

重金属是与人体健康密切相关的持久性有毒污染物,其对人体健康或生态系统稳定具有直接或间接的危害或风险<sup>[1]</sup>.近年来,随着工农业生产的发展和城市化进程的加快,土壤已受到不同程度的重金属污染<sup>[2-3]</sup>.茶叶中含有对人体健康有益的多酚类和必须矿物元素等,因其独特风味和营养价值而备受青睐<sup>[4-5]</sup>.因此,茶叶安全质量问题受到越来越多人的关注,而重金属可在土壤中积累并危害土壤-植物系统,最终通过食物链等途径危害人类健康,已成为我国茶叶安全质量问题之一<sup>[6-7]</sup>.张清海等<sup>[8]</sup>与周国华等<sup>[9]</sup>的研究均表明,茶园土壤重金属含量与茶叶中重金属含量具有明显相关性,说明开展茶园土壤重金属评价具有重要意义.国内外对茶园土壤的研究由来已久,但是,以往针对茶园土壤的研究主要集中在土壤肥力、理化性质等方面<sup>[10-11]</sup>,近年来,土壤中重金属污染评价越来越受关注,特别是农产品产地土壤重金属含量及其质量评价<sup>[12]</sup>.如叶宏萌等<sup>[13]</sup>研究了武夷山茶园土壤中 5 种重金属的化学形态和生物有效性;Rashid 等<sup>[14]</sup>研究了孟加拉国 Moulvibazar 和 Sylhet 两个地区茶园土壤中重金属含量分布.

福建省位于中国东南部,是中国茶叶生产大省和出口大省,茶叶种类多,产量大,在国内外茶叶市场占有重要地位<sup>[15]</sup>.铁观音茶叶是乌龙茶中的极品,其品质优良,享誉国内外,而安溪县是全国铁观音茶叶的主产区,有着“中国茶都”之美称.安溪县位于福建省东南部,闽南金三角(厦门、漳州、泉州)西北部,隶属泉州市,县域范围东经 117°36′—118°17′,北纬 24°50′—25°26′.安溪县以丘陵山地为主,地势自西北向东南倾斜.属南、中亚热带海洋性季风气候,昼夜温差大,具有相对低温、高湿、多雾的气候特征,为铁观音的生长和优异品质的形成提供了优越的条件<sup>[16]</sup>.

本研究通过测定安溪铁观音主要产区茶园土壤中重金属元素(Mn、Zn、Cr、V、Co、Cu、Ni、Pb、Cd 和 Sc)含量,分析不同产区茶园土壤中重金属分布特征,运用富集系数法、地质累积指数法和潜在生态风险指数法对重金属污染情况进行评价,以期福建省茶园土壤质量评价提供一定科学依据.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 样品采集及预处理

2014 年 10 月,采集了福建省安溪县 8 个乡镇(感德镇、长坑乡、湖头镇、尚卿乡、西坪镇、虎邱镇、官桥镇和县城)铁观音茶园耕层(0—20 cm)土壤样品.具体采样点分布见图 1,为确保茶园土壤的代表性,每个乡镇选取 3 个茶园采样点,根据茶园产地特征(茶园面积、土壤类型等),每个采样点 10 m × 10 m 范围内以梅花形布点采集 5 个土壤样品混合为 1 个采样点样品.

将采集的土壤样品装入干净的可密封塑料袋中运回实验室,置于干净通风的试验台上自然风干.用干净木棒将土壤样品碾碎,剔除杂物,以四分法选取土壤样品于玛瑙研钵中轻轻研磨并过 200 目尼龙筛,筛下样保存备用.

### 1.2 样品中重金属含量测定

准确称取 0.1000 g 土壤样品于聚四氟乙烯溶样杯中,加入 2 mL HF(GR)、1 mL HCl(GR)和 1 mL HNO<sub>3</sub>(GR),置于电热板上密封消解.待消解完全至溶液澄清,加热赶酸至近干,用 5% HNO<sub>3</sub>(GR)复溶并转移定容.用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ELEMENT XR 型,德国 Finnigan-MAT 公司)测定消解液中 Mn、Zn、Cr、V、Co、Cu、Ni、Pb、Cd 和 Sc 元素.

实验过程中采用如下方式进行质量控制:(1)试剂空白,每批样品处理时均同步进行全程试剂空白,以减少误差干扰;(2)平行试验,每批样品处理时选取 10%样品进行 6 次平行试验,相对标准偏差均在 5%以下;(3)添加国家标准物质进行质量控制,选取土壤成分分析标准物质-黄红壤(GSS-5)和砖红壤(GSS-7),标准物质实验过程与样品分析一致且同步进行,各元素相对误差均在 10%以下.

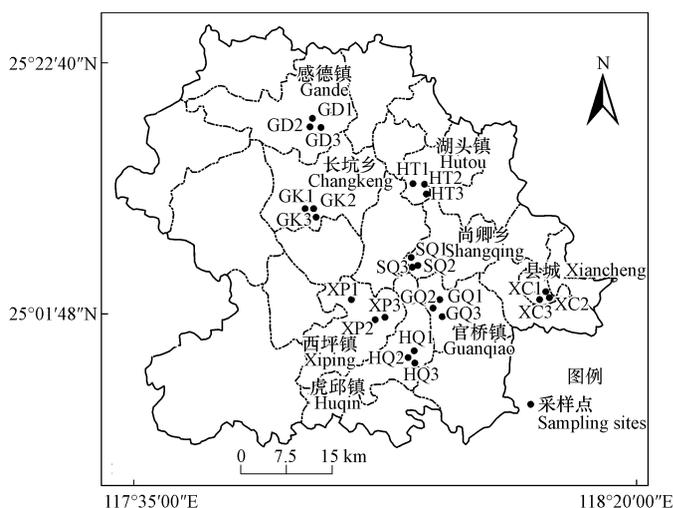


图 1 安溪铁观音茶园土壤采样点分布

Fig.1 Sampling sites of soils from Tieguanyin tea garden of Anxi County

### 1.3 数据分析方法

本研究用 ArcGIS 绘制采样分布图,用 Origin 8.5、Excel 2016 和 Photoshop CS6 进行数据分析及绘图。

目前,已有较多用于评价土壤重金属污染的方法,王斐等<sup>[17]</sup>对不同评价方法进行了比较,结果表明,评价结果存在差异,应根据具体评价目的选择合适的评价方法。本研究分别从土壤中重金属含量相对地质背景的污染程度、人为因素影响的富集程度以及重金属的环境生态效应与毒理方面出发,运用地质累积指数法、富集系数法和潜在生态风险指数法对重金属污染进行综合评价。

地质累积指数法最早由德国学者 Müller<sup>[18]</sup>提出,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_s / (k \times C_b)] \quad (1)$$

式中, $I_{geo}$ 为地质累积指数; $C_s$ 为茶园土壤中重金属的实测含量; $C_b$ 为重金属的土壤元素背景值,本文采用福建省土壤元素背景值<sup>[19]</sup>;  $k$ 为考虑到沉积作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数,一般取  $k=1.5$ 。地质累积指数分级标准见表 1。

表 1 地质累积指数( $I_{geo}$ )与污染程度

Table 1 Index of geoaccumulation ( $I_{geo}$ ) and pollution degree

$I_{geo}$	<0	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	>5
污染程度 Pollution degree	无 None	轻度 Mild	偏中度 Mild to moderate	中度 Moderate	偏重度 Moderate to severe	重度 Severe	严重 Serious

富集系数(Enrichment Factor)是评价人类活动对土壤中重金属富集程度影响的重要参数,其可区分人类活动和自然因素对土壤中重金属富集的影响,其计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_s}{(C_i/C_n)_b} \quad (2)$$

式中, $(C_i/C_n)_s$ 为茶园土壤中元素  $i$  的实测含量与参比元素  $n$  的实测含量之比值; $(C_i/C_n)_b$ 为自然背景中元素  $i$  的含量与参比元素  $n$  的含量之比值。富集系数法分级标准<sup>[21]</sup>见表 2。

表 2 富集系数与富集程度

Table 2 Enrichment Factor (EF) and degree of enrichment

EF	<1	1—2	2—5	5—20	20—40	>40
富集程度 Enrichment degree	无 None	轻度 Mild	中度 Moderate	显著 Significantly	强烈 Strong	极强 Very strong

潜在生态风险指数法由 Hakanson<sup>[22]</sup>于 1980 年提出,其可反映土壤中重金属对环境的潜在生态风险程度,其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_b^i} \quad (3)$$

$$RI = \sum E_r^i \quad (4)$$

式中,  $E_r^i$  为土壤中重金属  $i$  的潜在生态风险系数;  $C_i$  为土壤中重金属  $i$  的实测含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_b^i$  为土壤中重金属  $i$  的背景值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 本文采用福建省土壤元素背景值<sup>[19]</sup>;  $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度, 本文采用徐争启等<sup>[23]</sup>的推荐值 ( $\text{Mn} = \text{Zn} = 1$ 、 $\text{Cr} = \text{V} = 2$ 、 $\text{Co} = \text{Cu} = \text{Ni} = \text{Pb} = 5$ 、 $\text{Cd} = 30$ );  $RI$  为土壤中多种重金属元素的综合生态风险指数. 根据所研究的元素种类调整后的潜在生态风险分级标准见表 3<sup>[24]</sup>.

表 3 潜在生态风险程度分级  
Table 3 Degree of potential ecological risk

$E_r^i$	潜在生态风险程度 Level of potential ecological risk	RI	潜在生态风险程度 Level of potential ecological risk
<40	轻度 Mild	<63	轻度 Mild
40—80	中等 Moderate	63—126	中等 Moderate
80—160	较高 Considerate	126—252	较高 Considerate
160—320	高 High	$\geq 252$	很高 Very high
$\geq 320$	很高 Very high		

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 茶园土壤中重金属含量特征

安溪铁观音茶园土壤中 9 种重金属含量统计见表 4. 各元素总平均含量顺序为  $\text{Mn} (336.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Zn} (103.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{V} (68.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Pb} (49.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Cr} (22.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Cu} (15.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Ni} (8.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Co} (7.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Cd} (0.280 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ . 与福建省土壤元素背景值<sup>[19]</sup>进行对比,  $\text{Mn}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Pb}$  和  $\text{Cd}$  的总平均含量超过福建省土壤环境背景值, 其中  $\text{Cd}$  元素含量最高达到土壤元素背景值的 5.2 倍. 考虑不同乡镇的差异, 除了  $\text{Cd}$  在 8 个乡镇所有采样点均超过土壤环境背景值, 其余元素均是在部分乡镇含量超过土壤元素背景值. 如:  $\text{Zn}$ 、 $\text{V}$  和  $\text{Co}$  均在尚卿乡、西坪镇和虎邱镇含量超过土壤元素背景值;  $\text{Cr}$  和  $\text{Ni}$  均在湖头镇含量超过土壤元素背景值. 土壤中重金属含量的变异系数可表征重金属元素在各采样点含量的差异, 对比不同乡镇茶园土壤中重金属含量, 除  $\text{Pb}$  之外, 各元素的变异系数均较大 ( $\geq 0.4$ ), 说明不同产地茶园土壤中重金属含量差异较大, 重金属来源较分散<sup>[25]</sup>.  $\text{Mn}$ 、 $\text{V}$  和  $\text{Co}$  元素在西坪镇茶园土壤中含量最高,  $\text{Zn}$  元素在尚卿乡茶园土壤中含量最高,  $\text{Cr}$  和  $\text{Ni}$  元素在湖头镇茶园土壤中含量最高,  $\text{Cu}$  元素在县城茶园土壤中含量最高,  $\text{Pb}$  元素在官桥镇茶园土壤中含量最高, 而  $\text{Cd}$  元素在虎邱镇茶园土壤中含量最高.  $\text{Mn}$ 、 $\text{Cu}$  和  $\text{Pb}$  元素在感德镇茶园土壤中含量最低,  $\text{Zn}$  和  $\text{Co}$  元素在长坑乡茶园土壤中含量最低,  $\text{Cr}$  元素在虎邱镇茶园土壤中含量最低,  $\text{V}$  元素在县城茶园土壤中含量最低,  $\text{Ni}$  元素在尚卿乡茶园土壤中含量最低, 而  $\text{Cd}$  元素在湖头镇茶园土壤中含量最低.

将安溪茶园土壤中重金属平均含量与其他省市进行对比, 结果见表 5. 安溪茶园土壤中  $\text{Cd}$  含量比其他 5 个区域都高而  $\text{Cr}$  含量比其他 5 个区域都低;  $\text{Zn}$  含量高于杭州和广东而低于贵州;  $\text{Co}$  含量低于杭州;  $\text{Cu}$  含量高于贵州而低于杭州和广东;  $\text{Ni}$  含量低于长沙和广东;  $\text{Pb}$  含量高于长沙、杭州和广东而低于武夷山. 可见, 不同省市茶园土壤中各重金属含量均存在较大的差异, 说明其可能受地理位置、气候、土壤类型、茶叶品种、耕作方式以及周边环境等多方面的影响, 对茶园土壤及茶叶产品进行质量安全评价时, 应具体结合产地环境情况, 得到更准确的结果.

表 4 安溪茶园土壤重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Contents of heavy metals in soils from Tieguanyin tea garden of Anxi County (mg·kg<sup>-1</sup>)

元素 Element	感德镇 (n=3)	长坑乡 (n=3)	湖头镇 (n=3)	尚卿乡 (n=3)	西坪镇 (n=3)	虎邱镇 (n=3)	官桥镇 (n=3)	县城 (n=3)	平均 Ave	背景 <sup>[19]</sup> Background	CV
Mn	171±31.65	174.1±9.14	230.8±32.62	546.9±92.04	609.6±23.90	268.6±45.24	210.3±31.94	476.2±24.07	336.0	280	0.52
Zn	76.4±3.61	61.5±7.25	67.4±1.90	177.6±10.62	81.6±6.89	174.4±8.56	77.7±3.80	109.1±17.01	103.2	82.7	0.44
Cr	18.8±2.09	23.4±3.38	48.9±6.01	15.1±2.39	23.1±1.18	13.1±3.22	20.1±3.05	13.3±2.12	22.0	41.3	0.52
V	78.7±3.20	44.9±4.14	62.0±3.81	84.2±4.44	113.6±12.16	87.6±2.86	43.5±3.63	33.5±1.49	68.5	78.3	0.40
Co	4.06±0.22	3.63±0.19	4.27±0.66	9.11±2.09	16.37±1.63	14.53±0.51	4.46±0.37	5.95±0.68	7.80	7.41	0.63
Cu	10.45±0.70	10.63±1.73	19.03±0.49	10.8±0.89	17.2±2.59	13.7±1.87	11.16±1.79	27.87±1.79	15.1	21.6	0.40
Ni	6.75±0.89	8.63±0.57	14.17±0.55	4.77±0.35	10.61±1.04	7.86±1.13	7.26±0.83	4.78±0.56	8.10	13.5	0.40
Pb	35.6±0.70	51.1±2.24	41.3±1.56	46.7±0.57	41.7±5.05	55.2±4.36	70.1±6.65	57.4±1.31	49.9	34.9	0.22
Cd	0.241±0.067	0.151±0.027	0.126±0.012	0.272±0.037	0.145±0.034	0.667±0.019	0.419±0.017	0.218±0.047	0.280	0.054	0.63

表 5 不同研究区域茶园土壤中重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 5 Contents of heavy metals in soils of tea garden from different studied area (mg·kg<sup>-1</sup>)

区域	Zn	Cr	Co	Cu	Ni	Pb	Cd	参考文献 Reference
安溪	103.2	22	7.8	15.1	8.1	49.9	0.28	本研究
武夷山		67.46				76.54	0.193	[13]
长沙		92.2			19.5	42.7	0.074	[12]
杭州	80.71	61.11	19.47	21.79		26.87	0.14	[26]
贵州	160.9	91.35		13.78			0.043	[27]
广东	93.96	29.29		15.43	20.02	14.35	0.063	[28]

2.2 茶园土壤中重金属污染评价

2.2.1 地质累积指数法评价

安溪铁观音茶园土壤中重金属地质累积指数法评价结果见图 2.各重金属元素的平均地质累积指数顺序为 Cd(1.6) > Pb(-0.1) > Zn(-0.4) > Mn(-0.5) > Co(-0.8) > V(-0.9) > Cu(-1.2) > Ni(-1.4) > Cr(-1.6),整体上,Cd 表现为偏中度污染,其他元素表现为无污染.考虑不同区域差异性,Cr、V、Cu 和 Ni 元素在所有采样点处均表现为无污染 ( $I_{geo} < 0$ ); Mn 在尚卿乡 ( $I_{geo} = 0.37$ )、西坪镇 ( $I_{geo} = 0.54$ ) 和县城 ( $I_{geo} = 0.18$ ) 表现为轻度污染,在其他区域表现为无污染; Zn 在尚卿乡 ( $I_{geo} = 0.52$ ) 和虎邱镇 ( $I_{geo} = 0.49$ ) 表现为轻度污染,其他区域表现为无污染; Co 在西坪镇 ( $I_{geo} = 0.55$ ) 和虎邱镇 ( $I_{geo} = 0.39$ ) 表现为轻度污染,在其他区域表现为无污染; Cd 在长坑乡 ( $I_{geo} = 0.88$ )、湖头镇 ( $I_{geo} = 0.63$ ) 和西坪镇 ( $I_{geo} = 0.81$ ) 表现为轻度污染,在感德镇 ( $I_{geo} = 1.54$ )、尚卿乡 ( $I_{geo} = 1.74$ ) 和县城 ( $I_{geo} = 1.40$ ) 表现为偏中度污染,在官桥镇 ( $I_{geo} = 2.37$ ) 和虎邱镇 ( $I_{geo} = 3.00$ ) 表现为中度污染.

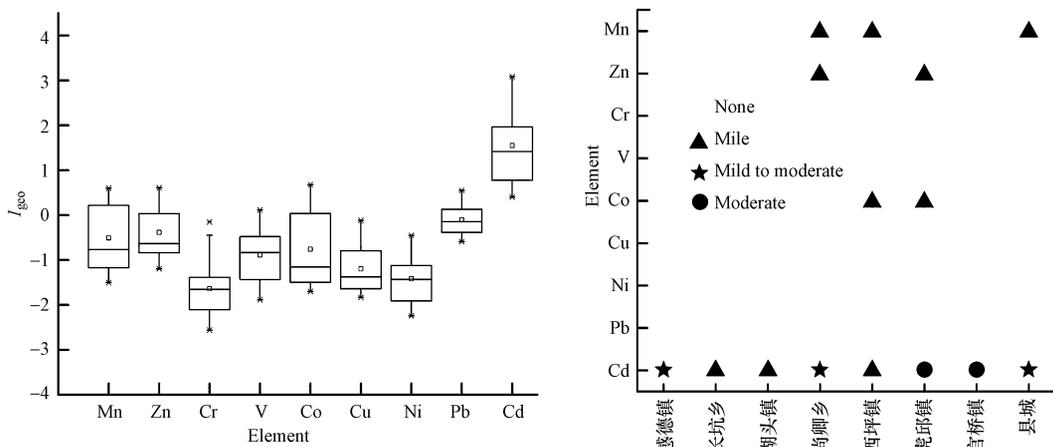


图 2 茶园土壤重金属的地质累积指数( $I_{geo}$ )评价结果

Fig.2 Evaluation results of geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ) of heavy metals in soils of tea garden

### 2.2.2 富集系数法评价

参比元素的选取应满足在风化、沉积等表生过程中化学性质稳定等条件<sup>[29]</sup>.实际应用中常作为参比元素的有:Al、Cs、Zr、Nb、Y、Li、Fe、Sc 和 Co 等<sup>[20,30]</sup>.本研究中同时测定了元素 Sc 在茶园土壤中的含量,结果发现 Sc 元素在茶园土壤中的含量为  $14.0 \pm 1.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与福建省土壤元素背景值中 Sc 元素含量( $13.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较接近,且 Sc 元素在各采样点之间的变异系数较小( $CV=0.13$ ),故本研究将 Sc 作为参比元素,用于评估各重金属元素的富集系数.

安溪铁观音茶园土壤中重金属富集系数法评价结果见图 3.各重金属元素的平均富集系数顺序为  $\text{Cd}(4.9) > \text{Pb}(1.4) > \text{Zn}(1.2) > \text{Mn}(1.1) > \text{Co}(1.0) > \text{V}(0.8) > \text{Cu}(0.7) > \text{Ni}(0.6) > \text{Cr}(0.5)$ ,整体上,Cd 表现为中度富集,Pb、Zn、Mn 表现为轻度富集,其他元素表现为无富集.考虑不同区域差异性,Cr 和 Ni 元素在湖头镇表现为轻度富集(EF 均为 1.1),在其他区域表现为无富集;V 元素在西坪镇表现为轻度富集(EF=1.4),在其他区域表现为无富集;Cu 元素在县城(EF=1.3)表现为轻度富集,在其他区域表现为无富集;Mn 元素在尚卿乡(EF=1.7)、西坪镇(EF=1.9)和县城(EF=1.8)表现为轻度富集,在其他区域表现为无富集;Zn 元素在尚卿乡(EF=1.9)、虎邱镇(EF=1.7)、官桥镇(EF=1.1)和县城(EF=1.4)表现为轻度富集,在其他区域表现为无富集;Co 元素在西坪镇(EF=2.1)表现为中度富集,在虎邱镇(EF=1.6)表现为轻度富集,在其他区域表现为无富集;Pb 在官桥镇(EF=2.4)表现为中度富集,在感德镇(EF<1)表现为无富集,在其他区域表现为轻度富集;Cd 元素在虎邱镇(EF=10.2)和官桥镇(EF=9.1)表现为显著富集,在其他区域表现为中度富集.对比地质累积指数法和富集系数法评价结果,两者具有较高一致性.

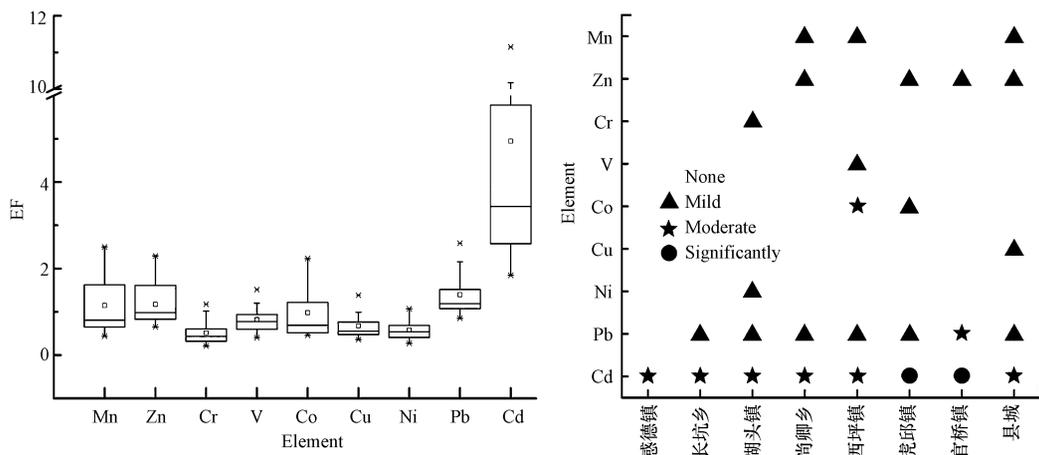


图3 茶园土壤重金属的富集系数(EF)评价结果

Fig.3 Evaluation results of enrichment factor (EF) of heavy metals in soils of tea garden

### 2.2.3 潜在生态风险指数法评价

安溪铁观音茶园土壤中重金属潜在生态风险指数法评价结果见图 4.各重金属元素的平均潜在生态风险系数顺序为  $\text{Cd}(155.6) > \text{Pb}(7.1) > \text{Co}(5.3) > \text{Cu}(3.5) > \text{Ni}(3.0) > \text{V}(2.6) > \text{Zn}(2.1) > \text{Cr}(1.6) > \text{Mn}(1.2)$ ,整体上,Cd 表现为较高潜在生态风险,其他元素表现为轻度潜在生态风险.考虑不同区域差异性,Cd 元素在虎邱镇表现为很高生态风险( $E_r=370.7$ ),在官桥镇( $E_r=232.8$ )表现为高潜在生态风险,在感德镇( $E_r=134.1$ )、尚卿乡( $E_r=151.3$ )、西坪镇( $E_r=80.7$ )和县城( $E_r=121.1$ )表现为较高潜在生态风险,在长坑乡( $E_r=79.9$ )和湖头镇( $E_r=69.8$ )表现为中等潜在生态风险;其余元素在所有采样点均表现为轻度潜在生态风险( $E_r<40$ ).综合潜在生态风险指数平均值为 182.4,表现为较高潜在生态风险且主要由 Cd 贡献.

综合对比 3 种污染评价方法的结果,地质累积指数法和富集系数法评价结果均表明,各元素污染程度顺序为  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Co} > \text{V} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr}$ ,其中,地质累积指数法可以直观反映重金属污染的污染程度,富集系数法可区分人类活动和自然因素对土壤中重金属富集的影响,但这两种评价方法均仅侧重单一金属,未能全面反应重金属复合污染.潜在生态风险指数法结合重金属丰度与毒性,联系起

重金属的环境生态效应及毒理效应,评价结果对改善生态环境及人类健康生活均有科学参考意义.综合这3种方法进行评价能更全面评估安溪铁观音茶园土壤中重金属污染情况.

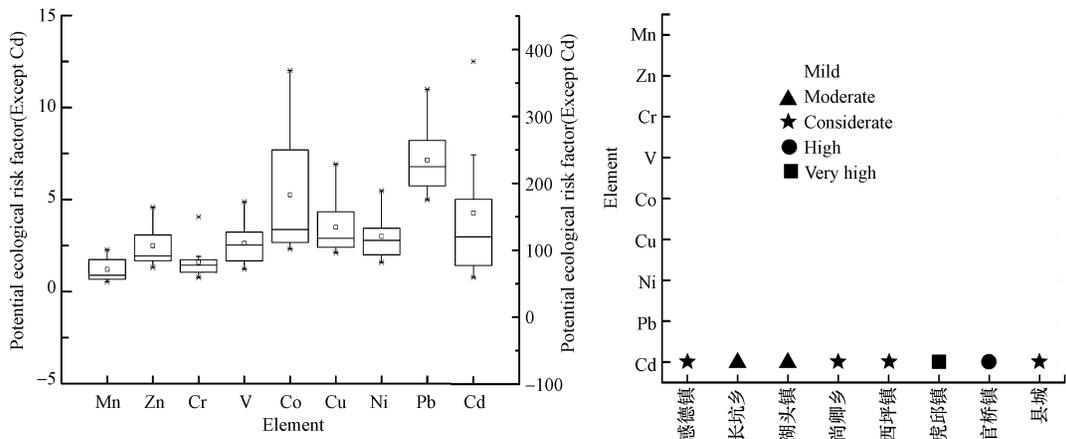


图4 茶园土壤重金属的潜在生态风险指数法评价结果

Fig.4 Evaluation results of potential ecological risk index of heavy metals in soils of tea garden

### 3 结论 (Conclusion)

(1)安溪铁观音茶园土壤中9种重金属总平均含量顺序为  $Mn(336.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Zn(103.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > V(68.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Pb(49.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Cr(22.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Cu(15.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Ni(8.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Co(7.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Cd(0.280 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ .  $Mn$ 、 $Zn$ 、 $Co$ 、 $Pb$  和  $Cd$  的总平均含量超过福建省土壤元素背景值,其中  $Cd$  元素含量最高达到土壤元素背景值的5.2倍.除  $Pb$  之外,各元素含量的变异系数均较大 ( $\geq 0.4$ ),不同产地茶园土壤中重金属含量差异较大,重金属来源较分散.

(2)地质累积指数法和富集系数法结果均表明,各元素污染程度顺序为  $Cd > Pb > Zn > Mn > Co > V > Cu > Ni > Cr$ ,其中, $Cd$  为中度富集和偏中度污染, $Pb$ 、 $Zn$ 、 $Mn$  为轻度富集和无污染,其他元素为无富集无污染.潜在生态风险指数法结果表明, $Cd$  表现为较高潜在生态风险,其他元素表现为轻度潜在生态风险,各元素综合潜在生态风险为较高.可见, $Cd$  应成为安溪铁观音茶园土壤质量评价中重点关注的重金属,特别是虎邱镇和官桥镇.

#### 参考文献 (Reference)

- [1] GHREFAT H, YUSUF N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan [J]. Chemosphere, 2006, 65(11): 2114-2121.
- [2] CHEN H, TENG Y, LU S, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 512: 143-153.
- [3] KRISHNA A K, MOHAN K R. Distribution, correlation, ecological and health risk assessment of heavy metal contamination in surface soils around an industrial area, Hyderabad, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5): 1-17.
- [4] CABRERA C, GIMÉNEZ R, LÓPEZ M C. Determination of tea components with antioxidant activity [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(15): 4427-4435.
- [5] 汪庆华, 刘新. 浅谈我国茶叶质量安全现状及应对措施 [J]. 茶叶, 2006, 32(2): 66-69.  
WANG Q H, LIU X. Discussion on the present status and corresponding measurement of china tea safe and quality [J]. Journal of Tea, 2006, 32(2): 66-69 (in Chinese).
- [6] 周玉婵, 李明顺. 广西两茶园土壤-茶叶-茶汤系统重金属污染及其转移特征 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2151-2157.  
ZHOU Y C, LI M S. Heavy metal contamination and transportation in soil-tea leaf-tea liquor system in two tea gardens of Guangxi [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2151-2157 (in Chinese).
- [7] 李云, 张进忠, 童华荣. 茶园土壤和茶叶中重金属的监测与污染评价 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(5): 77-81.  
LI Y, ZHANG J Z, TONG H R. Monitoring and evaluation of heavy metals in soil of tea gardens and teas [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 31(5): 77-81 (in Chinese).
- [8] 张清海, 林绍霞, 谭红, 等. 黔南州不同茶区土壤和茶叶重金属污染区域的差异性 [J]. 贵州农业科学, 2012, 40(9): 124-128.  
ZHANG Q H, LIN S X, TAN H, et al. Regional differences of heavy metals in soil and tea in tea areas of South Guizhou [J]. Guizhou

- Agricultural Sciences, 2012, 40(9): 124-128 (in Chinese).
- [ 9 ] 周国华, 孙彬彬, 贺灵, 等. 安溪土壤—茶叶铅含量关系与土壤铅临界值研究[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 148-153.  
ZHOU G H, SUN B B, HE L, et al. The relationship of lead concentration between soils and tea leaves and the critical value of lead for soil in Anxi, Fujian Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 148-153 (in Chinese).
- [10] 宗良纲, 周俊, 罗敏, 等. 江苏茶园土壤环境质量现状分析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 61-64.  
ZONG L G, ZHOU J, LUO M, et al. Analysis on current status of soil environmental quality of tea gardens in Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 61-64 (in Chinese).
- [11] 杨如兴, 张磊, 王文建, 等. 安溪铁观音茶园土壤肥力分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 160-166.  
YANG R X, ZHANG L, WANG W J, et al. Soil fertility analysis of Tieguanyin tea garden at Anxi County[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(21): 160-166 (in Chinese).
- [12] 郭海彦, 周卫军, 张杨珠, 等. 长沙“百里茶廊”茶园土壤重金属含量及环境质量特征[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2320-2326.  
GUO H Y, ZHOU W J, ZHANG Y Z, et al. Content of soil heavy metals and characteristics of environmental quality in tea plantations of Changsha Baili tea zone[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2008, 29(8): 2320-2326 (in Chinese).
- [13] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷山茶园土壤中五种重金属的化学形态和生物有效性[J]. 环境化学, 2016, 35(10): 2071-2078.  
YE H M, LI G P, ZHENG M Z, et al. Speciation and bioavailability of five toxic heavy metals in the tea garden soils of Wuyishan[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(10): 2071-2078 (in Chinese).
- [14] RASHID M H, FARDOUS Z, CHOWDHURY M A, et al. Determination of heavy metals in the soils of tea plantations and in fresh and processed tea leaves: an evaluation of six digestion methods[J]. Chemistry Central Journal, 2016, 10(1): 1-13.
- [15] 杨江帆, 徐清, 谢向英, 等. 福建茶叶企业差异化与融资风险透视[J]. 茶叶科学, 2012, 32(1): 66-72.  
YANG J F, XU Q, XIE X Y, et al. Perspective of financing risk from the differentiation in Fujian tea enterprises[J]. Journal of Tea Science, 2012, 32(1): 66-72 (in Chinese).
- [16] 许璐璐. 福建铁观音茶园铜锌营养状况研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 1-14.  
XU L L. Study on the nutritional situation of copper and zinc in Tieguanyin tea[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011: 1-14 (in Chinese).
- [17] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 225-233.  
WANG F, HUANG Y Z, WANG X L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: Comparison of different evaluation methods[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(2): 225-233 (in Chinese).
- [18] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(108): 108-118.
- [19] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1992, 13(4): 70-75.  
CHEN Z J, CHEN C X, LIU Y Q, et al. Study of soil environmental background values in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1992, 13(4): 70-75 (in Chinese).
- [20] N'GUESSAN Y M, Probst J L, Bur T, et al. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): where do they come from? [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(8): 2939-2952.
- [21] SUTHERLAND R A. Bed sediment-associated trace elements in an urban stream, Oahu, Hawaii[J]. Environmental Geology, 2000, 39: 330-341.
- [22] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-986.
- [23] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.  
XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 31(2): 112-115 (in Chinese).
- [24] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江近岸表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1218-1225.  
LIN C Q, HU G R, YU R L, et al. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in offshore surface sediments from Jiulong River[J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1218-1225 (in Chinese).
- [25] NEZHAD M T K, TABATABAII S M, GHOLAMI A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 152: 91-109.
- [26] 孔樟良, 谢国雄. 杭州市典型茶园土壤与茶叶中重金属的积累与来源分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(10): 226-231.  
KONG Z L, XIE G X. Accumulation and sources of heavy metals in soil and tea-leaf in typical tea gardens in Hangzhou[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(10): 226-231 (in Chinese).
- [27] 李卿, 何璐君, 谯莉萍, 等. 贵州茶园土壤中重金属元素含量的检测与分析[J]. 贵州农业科学, 2008, 36(3): 164-166.  
LI Q, HE L J, QIAO L P, et al. Determination and analysis of heavy metal elements in tea plantation soil of 33 villages and towns in Guizhou[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2008, 36(3): 164-166 (in Chinese).
- [28] 李张伟. 粤东风凰茶主产区土壤重金属元素背景值及其评价[J]. 江苏农业科学, 2009, 37(5): 276-278.  
LI Z W. Background value and evaluation of heavy metal elements in the tea garden soil in the east of Guangdong Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009, 37(5): 276-278 (in Chinese).
- [29] PENG B, TANG X Y, YU C X, et al. Geochemistry of trace metals and Pb isotopes of sediments from the lowermost Xiangjiang River, Hunan Province (P.R.China): Implications on sources of trace metals[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(5): 1455-1473.
- [30] ROUSSEZ V, LUDWING W, PROBST J L, et al. Background levels of heavy metals in surficial sediments of the Gulf of Lions (NW Mediterranean): An approach based on 133Cs normalized and lead isotope measurements[J]. Environmental Pollution, 2005, 138: 167-177.