

## 风险评估

## 我国胶东茶叶主产区土壤-茶叶中重金属污染特征与健康风险评估

高日红<sup>1</sup>,高云霄<sup>2</sup>,董峰光<sup>3</sup>,隋育容<sup>4</sup>,于雪纯<sup>1</sup>,于剑峰<sup>5,6</sup>,袁文兴<sup>7</sup>,阎西革<sup>3</sup>

- (1. 海阳市疾病预防控制中心, 山东 海阳 265100; 2. 山东农业工程学院, 山东 淄博 255300;  
3. 烟台市疾病预防控制中心, 山东 烟台 264003; 4. 山东农业大学, 山东 泰安 271018;  
5. 山东省海洋地质勘查院, 山东 烟台 264004; 6. 山东省第三地质矿产勘查院,  
山东 烟台 264004; 7. 烟台市蓬莱区疾病预防控制中心, 山东 烟台 265600)

**摘要:**目的 分析胶东半岛茶叶主产区土壤与茶叶中重金属污染特征和人群健康风险。方法 2015—2021年, 在山东省海阳市采集土壤样品340份、茶叶样品173份, 测定样品中4种主要重金属铅(Pb)、镉(Cd)、总汞(Hg)、总砷(As)元素含量。通过单因子指数法、内梅罗综合污染指数法对相关重金属进行评价, 并运用皮尔逊相关分析和主成分分析对土壤与茶叶中重金属含量关系及来源进行分析。结果 研究区土壤中重金属Pb、Cd、As、Hg含量平均值分别为29.00、0.107、8.852、0.023 mg/kg, 其中Pb含量最高。所有重金属元素平均值均未超过GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中限量值, Pb、Cd的最大值均超过了限量值, 其中As、Cd、Pb元素平均值超过或接近山东省东部地区土壤背景值。茶叶中重金属元素平均值、最大值均未超过GB 2762—2017《食品安全国家标准 食物中污染物限量》和NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》中限量值。茶叶中重金属Pb、Cd、Hg、As含量平均值分别为0.286、0.041、0.001、0.037 mg/kg; 检出率分别为95.95%、96.53%、13.87%和30.64%, 含量浓度均值由大到小为Pb>Cd>As>Hg。4种元素的单项污染指数均小于0.6, 其中 $P_{Pb}(0.0572) > P_{Cd}(0.0417) > P_{As}(0.0187) > P_{Hg}(0.0053)$ , 均处于安全水平。茶叶的综合污染指数为0.0459, 污染程度为安全等级。红茶的部分污染指数高于绿茶。Pb和Cd的污染物分担率较高。结论 土壤中Cd、Pb、Hg和As可能具有相似的来源, 土壤中As和Pb属于混合来源, Cd和Hg来源于工业“三废”、农业生产; 茶叶中Pb、Cd、Hg、As来源与土壤中的重金属相关性不大。胶东半岛茶区茶叶重金属的健康风险属于安全状态。

**关键词:** 茶叶; 土壤; 重金属; 污染特征; 来源分析; 健康风险

中图分类号: R155

文献标识码: A

文章编号: 1004-8456(2023)08-1174-09

DOI: 10.13590/j.cjfh.2023.08.007

### Contamination characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil and tea in the Jiaodong main tea producing area

GAO Rihong<sup>1</sup>, GAO Yunxiao<sup>2</sup>, DONG Fengguang<sup>3</sup>, SUI Yurong<sup>4</sup>, YU Xuechun<sup>1</sup>, YU Jianfeng<sup>5,6</sup>,  
YUAN Wenxing<sup>7</sup>, YAN Xige<sup>3</sup>

- (1. Haiyang Center for Disease Control and Prevention, Shandong Haiyang 265100, China; 2. Shandong Agricultural And Engineering University, Shandong Zibo 255300, China; 3. Yantai Center for Disease Control and Prevention, Shandong Yantai 264003, China; 4. Shandong Agricultural University, Shandong Tai'an 271018, China; 5. Shandong Provincial Marine Geological Survey Institute, Shandong Yantai 264004, China; 6. Shandong Third Geological and Mineral Exploration Institute, Shandong Yantai 264004, China; 7. Yantai Penglai District Center for Disease Control and Prevention, Shandong Yantai 265600, China)

**Abstract: Objective** This study aimed to analyze the contamination characteristics of heavy metals in soil and tea leaves in the Jiaodong hilly tea-producing areas. **Methods** A total of 340 soil samples and 173 tea samples from 2015 to 2021 were collected from Haiyang, Shandong Province. The contents of Pb, Cd, total Hg, and total As were

收稿日期: 2022-09-09

基金项目: 2017年烟台市科学技术发展计划项目(2017WS118)

作者简介: 高日红 男 主任医师 研究方向为环境卫生、食品卫生、疾病控制研究 E-mail: cat343@163.com

通信作者: 阎西革 男 主任医师 研究方向为疾病控制 E-mail: yxg1966@163.com

detected. The single-factor contamination index method, the Nemerow comprehensive contamination index method, and the Target Hazard Quotient were used to evaluate the contamination level according to the grading standard of agriculture product quality. Pearson correlation analysis and principal component analysis were used to analyze the relationship between heavy metals and their sources in soil and tea. **Results** The average contents of Pb, Cd, As, and Hg were 29.00, 0.107, 8.852, and 0.023 mg/kg, respectively, and Pb content was the highest in the study area soil. The average value of all heavy metal elements did not exceed the limit value in GB 15618—2018 [the standard for the control of soil pollution risk of agricultural land (Trial)], while the maximum values of Pb and Cd exceeded the national standard. The average values of As and Pb exceeded or reached the background values for soil in the eastern Shandong Province. The average and maximum values of heavy metal elements in tea did not exceed GB 2762—2017 (National standard for food safety-limit of pollutants in food and limit of Cr, Cd, Hg, As, and fluoride in tea). The average contents of Pb, Cd, Hg, and As in tea were 0.286, 0.041, 0.001, and 0.037 mg/kg, respectively. The detection rates of Pb, Cd, Hg, and As were 95.95%, 96.53%, 13.87%, and 30.64% in tea, respectively. The mean value of heavy metals in tea decreased in the order of Pb > Cd > As > Hg. The single factor pollution index of the four elements was less than 0.6,  $P_{Pb} (0.0572) > P_{Cd} (0.0417) > P_{As} (0.0187) > P_{Hg} (0.0053)$ , and all values were at the safe level. The comprehensive pollution index of tea was 0.0459, and the pollution level was classified as safe. Black tea had higher pollution levels than green tea. Pb and Cd had higher pollutant sharing rates. **Conclusion** The sources of Cd, Pb, Hg, and As in the soil may have a common origin. As and Pb in soil exhibited mixed sources, while Cd and Hg originate from industrial “three wastes” and agricultural production. The sources of Pb, Cd, Hg, and As in tea have little correlation with heavy metals in the soil. Dietary exposure to heavy metals in tea leaves in the Jiaodong hilly tea-producing areas is at a safe level.

**Key words:** Tea; soil; heavy metals; contamination characteristics; source analysis; health risks

我国茶叶种植范围广泛,是重要的经济农作物和出口商品,是县域经济支柱和乡村振兴的重要途径<sup>[1]</sup>,2019年茶叶产量为277万吨,位居世界第一;出口量达36.6万吨,位居世界第二<sup>[2]</sup>。茶叶除含有丰富的蛋白质和氨基酸等有机化合物之外,还含有多种重金属元素,不同产地的茶叶受土壤、气候等因素的影响重金属含量存在差异<sup>[3-5]</sup>。原国家环境保护部与国土资源部于2014年联合发布的“全国土壤污染状况调查报告”<sup>[6]</sup>显示,镉(Cd)、砷(Hg)、汞(As)、铅(Pb)4种重金属污染点位超标率分别为7.05%、1.6%、2.7%、1.5%。研究表明,Pb、Cd、Hg、As含量超标时,不仅影响茶叶品质,还会影响人体的免疫、神经、内分泌、心血管等多个器官系统<sup>[7-9]</sup>。Cd、Hg是两种常见的、广泛分布的重金属,其污染具有隐蔽性、不可恢复性、滞后性等特点,一直是食品安全与环境研究关注的重点。目前胶东茶叶产地的重金属污染程度尚不清楚<sup>[10-12]</sup>,因此分析茶叶产地土壤与茶叶中的重金属含量具有重要的意义与应用价值。胶东半岛茶叶主产于海阳市,截至2022年海阳市茶园种植面积为3.5万亩,占胶东半岛各区市茶种植面积的75%<sup>[13]</sup>。本研究对胶东半岛茶叶种植区土壤和茶叶中的重金属含量进行分析、评估,以期为当地茶叶种植加工风险管控、保障茶叶食用安全等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 研究区概况

海阳市位于胶东半岛丘陵南缘,地处胶莱河与大海之间,地跨东经120°50′~121°29′,北纬36°16′~37°10′。境内丘陵起伏,地貌为低山丘陵,地质构造属断裂构造,地势北高南低。东亚季风暖温带气候,受海洋影响,气候温和,全年无霜期165~250 d,年均降水量600~800 mm。

#### 1.1.2 主要仪器与试剂

AFS-9230原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司)、pinAAcle-900Z原子吸收光谱仪(美国PerkinElmer)、MARS 6 CLASSIC微波消解仪(美国CEM)、DRA-4数显恒温电热板。盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸(优级纯),Pb、Cd、Hg及As标准溶液(1000 mg/L,均购于国家标物中心),水(一级水,纯水机自制)。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样品采集与处理

选取该区行村镇、辛安镇、龙山街道、东村街道、方圆街道、碧城工业区、留格庄镇、凤城街道的茶园土壤及茶叶为调查对象,按照网格土壤取样法规范要求,采集地表以下20 cm处的土壤样品340份<sup>[14]</sup>,样品经过室温风干、敲碎,去除杂草、植物根系、石块后,研磨过100目尼龙筛,备用;按照国家食品风险监测工作手册<sup>[15]</sup>,采集加工完未包装红茶和绿茶共

计 173 份茶叶样品。

### 1.2.2 检测与质控

土壤样品经过  $\text{HNO}_3\text{-HCL-HF-HClO}_4$  湿法消解后待检;茶叶样品经  $\text{HNO}_3$  浸泡-微波消解-赶酸后待检。采用氢化物原子荧光光谱法测定  $\text{As}^{[16]}$ , 石墨炉原子吸收光谱仪测定  $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}^{[6]}$ , 石墨炉原子荧光光谱法测定  $\text{Hg}^{[17]}$ 。为保证分析的准确度和精密度,检测过程采用标准物质加标回收进行质量控制,结果均在控制范围。

### 1.2.3 评价方法

土壤重金属质量评价以 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》为依据;茶叶重金属质量评价以 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和 NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》为依据。土壤中重金属  $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$  限量值分别为 90.0、0.3、4.0、0.3 mg/kg;茶叶中重金属  $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$  限量值分别为 5.0、1.0、2.0、0.3 mg/kg。

单因子污染指数法是通过单因子评价,以确定单一重金属对土壤的危害程度。单项污染指数按照公式(1)<sup>[18]</sup>。

$$P_i = C_i/S_i \quad \text{公式(1)}$$

式中, $P_i$ 为重金属的单因子污染指数; $C_i$ 为重金属的实测值,mg/kg; $S_i$ 为重金属的质量标准,mg/kg<sup>[19]</sup>。 $P_i \geq 1.0$ 为重度污染; $0.6 < P_i < 1.0$ 为轻度污染; $P_i \leq 0.6$ 为安全。

内梅罗综合污染指数法(Nemerow index)也称综合污染指数法,由内梅罗(N. L. Nemerow)提出。通过计算内梅罗污染指数和标准指数,与相应的等级标准指数进行对照而进行的评价方法,其计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$P_{syn} = \sqrt{(P_{max}^2 + P_{ave}^2)/2} \quad \text{公式(2)}$$

式中, $P_{syn}$ 为内梅罗综合污染指数; $P_{max}$ 为多种重金属单项指数( $P_i$ )中的最大值,mg/kg; $P_{ave}$ 为多种重金属单项指数( $P_i$ )的平均值,mg/kg。 $P_{syn} \geq 1.0$ 为重度污染; $0.6 < P_{syn} < 1.0$ 为轻度污染; $P_{syn} \leq 0.6$ 为安全。

产品污染物分担率: $K_i = (P_i/P) \times 100\%$ ,式中, $K_i$ 为重金属  $i$  元素所占的分担率,%; $P$ 为各重金属单项污染指数之和; $P_i$ 为重金属  $i$  元素的单项污染指

数<sup>[19]</sup>。 $K_i \geq 1.0$ 为重度污染; $0.6 < K_i < 1.0$ 为轻度污染; $K_i \leq 0.6$ 为安全。

### 1.2.4 茶叶重金属安全性风险评估

采用美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)建立的危害系数(Target hazard quotients, THQ)法<sup>[21]</sup>,选取合适的暴露参数进行健康风险评价,评估人体每日通过茶叶暴露重金属的健康风险<sup>[22-23]</sup>;单金属靶标危害系数  $\text{THQ} \leq 1$  表明暴露人群没有明显的健康风险<sup>[24]</sup>;  $\text{THQ} > 1$  表明可能对人体存在健康风险,且数值越大健康风险越高<sup>[24]</sup>。多金属靶标危害系数  $\text{THQ}_{\text{Total}}$  则表示多种重金属复合污染导致的潜在健康风险,  $\text{THQ}_{\text{Total}} > 1$  表明多种重金属复合污染对人体健康风险程度较高。单金属靶标风险计算公式:

$$\text{THQ} = \frac{E_f \times E_d \times F_{IR} \times c}{R_{FD} \times W_{AB} \times AT_n} \times 10^{-3} \quad \text{公式(3)}$$

式中, $c$ 为茶叶中某种元素含量,mg/kg; $E_f$ (d/a)为暴露频率,指标取值 365 d<sup>[21]</sup>; $E_d$ 为暴露时间,指标取值 70 年<sup>[25]</sup>; $F_{IR}$ 为茶叶消费量,指标取值 5 g/d<sup>[26]</sup>; $W_{AB}$ 为体质量,18 岁及以上女性平均体质量 57.3 kg,18 岁及以上男性平均体质量 66.2 kg<sup>[27]</sup>; $AT_n$ 为非致癌平均暴露时间,指标取值 25 550 d<sup>[21]</sup>; $R_{FD}$ 为健康指导值或基准剂量,详见表 1<sup>[28-29]</sup>,mg/(kg BW·d);多金属靶标复合风险计算公式: $\text{TTHQ} = \sum \text{THQ}$ 。

### 1.3 统计学分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对原始数据进行统计和分析,采用 SPSS 18.0 软件进行显著性分析,采用皮尔逊相关性分析法<sup>[30-32]</sup>对土壤和茶叶中重金属含量之间的相关性进行分析。根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)对未检出数据的处理原则<sup>[33]</sup>本研究未检出数据的比例小于等于 60% 时,所有未检出数据用 1/2 检出限(Limit of detection, LOD)替代;未检出数据的比例高于 60% 时,所有未检出数据用 LOD 替代。

## 2 结果

### 2.1 土壤与茶叶中重金属含量

#### 2.1.1 土壤中重金属含量

海阳市土壤重金属含量见表 1,  $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$

表 1 4 种重金属的健康指导值或基准剂量

Table 1 Health guide value or bench mark dose of the four heavy metals

化合物	指标	健康效应	健康指导值/基准剂量/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ )	换算后(每日)/ ( $\text{mg}/\text{kg}\text{BW}$ )
无机砷	0.5% 基准剂量的 95% 可信区间下限 (BMDL0.5)	肺癌	每日 3	$3 \times 10^{-3}$
镉	暂定每月可耐受摄入量 (PTMI)	肾毒性	每月 25	$8.33 \times 10^{-4}$
甲基汞	每周可耐受摄入 (TWI)	智商	每周 1.3	$1.86 \times 10^{-4}$
铅	1% 基准剂量的 95% 可信区间下限 (BMDL0.1)	智商, 心血管损伤	每日 1.2	$1.2 \times 10^{-3}$

平均值分别为 29.00、0.107、8.852、0.023 mg/kg; 均值由高到低依次为 Pb>As>Hg>Cd, 其中 Pb 含量最高。所有重金属元素平均值均未超过国家标准(二级)<sup>[14]</sup>, 其中 As、Cd、Pb 元素平均值超过或达到了山东省东部背景值(Pb、Cd、As、Hg 背景值分别为 25.40、0.108、6.300、0.029 mg/kg)<sup>[14]</sup>, 分别

达到背景值的 1.40 倍、0.995 倍、1.14 倍。在各金属元素中除 Hg 和 As 外其余元素的最大值均超过了国家标准(二级)<sup>[14]</sup>。土壤中重金属含量变化范围较大, As、Cd、Hg、Pb 的含量范围分别为 1.414~37.84、0.007~0.864、0.003~0.221、8.283~127.37 mg/kg。

表2 茶叶/土壤重金属含量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of heavy metal content in tea leaves/soil

样品种类	金属元素	样品份数	检出率/%	标准差	变异系数/%	峰度	偏度	检出值分布/(mg/kg)					限量值/(mg/kg)	
								含量范围	$\bar{x}$	中值	P90	P95		P97.5
茶叶	Pb	173	95.95	0.291	101.75	8.180	2.684	0.004~1.732	0.286 0	0.202 0	0.524 5	0.909 5	1.367 5	5.0
	Cd	173	96.53	0.266	637.89	4.272	1.523	ND~0.176	0.041 7	0.037 2	0.074 0	0.085 0	0.119 6	1.0
	总Hg	173	13.87	0.002	128.94	6.063	1.818	ND~0.014	0.001 6	0.001 5	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.3
	总As	173	30.64	0.076	202.74	47.729	5.822	0.005~0.757	0.037 4	0.010 0	0.109 0	0.154 3	0.237 4	2.0
红茶	Pb	85	95.29	0.343	105.02	5.069	2.327	0.004~1.732	0.326 6	0.220 0	0.743 4	1.317 7	1.464 7	5.0
	Cd	85	95.29	0.030	68.18	4.480	1.622	ND~0.176	0.044 0	0.038 0	0.078 0	0.107 9	0.132 8	1.0
	总Hg	85	15.29	0.002	138.60	8.964	2.325	ND~0.014	0.001 6	0.000 2	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.3
	总As	85	29.41	0.098	222.22	33.596	5.178	0.005~0.757	0.044 1	0.010 0	0.122 2	0.239 1	0.286 4	2.0
绿茶	Pb	88	96.59	0.227	92.19	11.565	2.973	ND~1.390	0.246 7	0.194 0	0.498 1	0.591 7	1.206 8	5.0
	Cd	88	97.73	0.023	58.37	1.831	1.091	0.003~0.127	0.039 5	0.035 4	0.071 9	0.087 2	0.096 0	1.0
	总Hg	88	12.50	0.002	119.49	-0.815	0.875	ND~0.005	0.001 6	0.000 2	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.3
	总As	88	31.82	0.045	147.79	5.387	2.380	0.010~0.220	0.030 9	0.010 0	0.093 9	0.142 8	0.177 0	2.0
土壤	Pb	340	100.00	14.212	48.99	10.942	2.603	8.283~127.370	29.006 0	25.989 0	43.578 0	54.411 0	71.221 0	90.0
	Cd	340	99.12	0.074	68.84	35.362	4.365	0.007~0.864	0.107 5	0.091 9	0.180 3	0.218 2	0.285 8	0.3
	总Hg	340	100.00	20.624	90.13	31.997	4.601	0.003~0.221	0.023 3	0.018 5	0.041 2	0.053 4	0.073 9	0.3
	总As	340	100.00	4.380	49.48	6.585	1.675	1.414~37.840	8.852 9	8.286 8	14.104 0	16.941 0	19.224 0	4.0

2.1.2 茶叶中重金属含量

海阳市茶叶中重金属含量见表 1, 茶叶中 Pb、Cd、Hg、As 检出率分别为 95.95%、96.53%、13.87%、30.64%, Pb、Cd、Hg、As 平均值分别为 0.286、0.041、0.001、0.037 mg/kg; 均值由高到低依次为 Pb>Cd>As>Hg, 其中 Pb 含量最高, 达到 0.286 mg/kg。所有重金属元素平均值、最大值均未超过国家标准。除 Hg 含量相同外, 红茶中 Pb、Cd、As 含量均高于绿茶。进行独立样本 t 检验分析, 两种茶叶中 Pb、Cd、Hg、As t 值分别为 1.800、1.124、0.287、1.132, 对应的双侧显著性水平分别为 0.074、0.263、0.781、0.260, 表明两种茶叶中重金属含量差异无统计学意义。

2.2 土壤与茶叶重金属污染指数

由表 3 可见, 茶叶单项污染指数均值评价结果表明, 4 种元素的单项污染指数均小于 0.6, 其中  $P_{Pb}(0.057 2) > P_{Cd}(0.041 7) > P_{As}(0.018 7) > P_{Hg}(0.005 3)$ , 均处于安全水平。综合污染指数为 0.045 9, 污染程度为安全。红茶的部分污染指数高

于绿茶。

土壤单项污染指数均值评价结果表明, 4 种元素的单项污染指数均小于 0.6, 其中  $P_{Cd}(0.366 7) > P_{Pb}(0.322 3) > P_{As}(0.221 3) > P_{Hg}(0.077 7)$ , 均处于安全水平。综合污染指数为 0.312 6, 污染程度为安全。

2.3 土壤与茶叶重金属相关性分析

土壤中各重金属相关性列于表 4, Pb 与 Cd、As 的相关系数分别为 0.288、0.418, 差异具有高度统计学意义; As 与 Cd、Hg 的相关系数为 0.162、0.164, 差异有统计学意义; 其他重金属相关性差异无统计学意义。

茶叶重金属的相关性分析见表 5, 茶叶中 Pb 与 Cd 及 As 与 Pb、Cd、Hg 的相关系数分别为 0.831、0.883、0.515、0.446, 差异有统计学意义, Hg 与 Pb 的相关系数为 0.154, 而 Hg 与 Cd 存在负相关, 这表明茶叶中的 Pb、Cd、As 这类重金属可能来自相同的污染源; 而 Hg 的污染源可能与 Pb、Cd 及 As 的来源都不同。

表3 土壤、茶叶中重金属污染指数

Table 3 Pollution index of heavy metals in soil and tea

种类	$P_{Pb}$	分级	$P_{Cd}$	分级	$P_{Hg}$	分级	$P_{As}$	分级	$P_{syn}$	污染等级
茶叶(总)	0.057 2	优良	0.041 7	优良	0.005 3	优良	0.018 7	优良	0.045 9	安全
红茶	0.065 3	优良	0.044 0	优良	0.005 3	优良	0.022 1	优良	0.052 1	安全
绿茶	0.049 3	优良	0.039 5	优良	0.005 3	优良	0.015 5	优良	0.039 9	安全
土壤	0.322 3	优良	0.366 7	优良	0.077 7	优良	0.221 3	优良	0.312 6	安全

表4 土壤重金属间及与茶叶重金属的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of heavy metal contents between tea leaves and topsoil

土壤	土壤				茶叶			
	Pb	Cd	Hg	As	Pb	Cd	Hg	As
Pb	1				-0.017	0.058	-0.183*	-0.045
Cd	0.288**	1			0.019	0.033	-0.046	0.012
Hg	0.076	0.057	1		0.056	0.117	-0.167*	-0.020
As	0.418**	0.162*	0.164*	1	-0.019	-0.038	-0.213**	-0.153*

注:\*\*表示相关性在0.01水平上差异有统计学意义(双侧);\*表示相关性在0.05水平上差异有统计学意义(双侧)

表5 茶叶重金属的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of heavy metals in tea

茶叶	茶叶			
	Pb	Cd	Hg	As
Pb	1			
Cd	0.831**	1		
Hg	0.154*	-0.271*	1	
As	0.883**	0.515**	0.446**	1

注:\*\*表示相关性在0.01水平上差异有统计学意义(双侧);\*表示相关性在0.05水平上差异有统计学意义(双侧)

### 2.4 茶叶重金属污染物分担率

本区茶叶重金属污染物分担率的结果显示,Pb的污染物分担率最高,接近50%;其次是Cd,污染物分担率高于30%,见表6<sup>[32]</sup>。

表6 茶叶重金属污染物分担率结果(%)

Table 6 Sharing rate of heavy metal pollutants in tea (%)

茶叶种类	$K_{Pb}$	$K_{Cd}$	$K_{Hg}$	$K_{As}$
茶叶(总)	46.53	33.92	4.34	15.21
红茶	47.78	32.19	3.90	16.13
绿茶	45.01	36.03	4.87	14.09

表7 主成分分析法得到的全部解释变量

Table 7 All explanatory variables obtained by principal component analysis

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	1.527	38.169	38.169	1.527	38.169	38.169	1.176	29.405	29.405
2	0.934	23.357	61.526	0.934	23.357	61.526	1.090	27.239	56.643
3	0.808	20.192	81.717	0.808	20.192	81.717	1.003	25.074	81.717
4	0.731	18.283	100.000						

表8 具有Kaiser标准化的正交旋转法得到的因子和全部解释变量

Table 8 Factors and all explanatory variables obtained by the Kaiser standardized orthogonal rotation method

元素	成分矩阵			成分矩阵		
	1	2	3	1	2	3
As	0.666	0.134	-0.595	0.884	-0.054	0.177
Cd	0.632	-0.357	0.588	0.062	0.926	0.106
Pb	0.673	-0.371	-0.165	0.616	0.472	-0.127
Hg	0.479	0.807	0.283	0.103	0.078	0.972

与采样相同消化检测方法(非浸出液法)省内茶叶产地临沂及国内河南、重庆、陕西商洛<sup>[11,35-37]</sup>地产茶叶结果平均值比较发现(表10),除Cd含量与陕西商洛地产茶叶略高,Hg含量与重庆地产茶叶相同,其余指标均明显低于其他产地,说明该区茶叶

### 2.5 土壤重金属主成分分析

主成分分析将具有相关性的指标重新组合形成一组新的互相无关的综合指标,对数据进一步进行解释<sup>[34]</sup>。KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验抽样适度测定值为0.620(>0.5)较适宜进行因子分析,本研究为了进一步明确海阳市土壤中重金属的污染来源,进行主成分分析发现(表7、表8),可由前3个主成分反映81.717%的信息。矩阵变换后,第1个主成分包含As和Pb,第2个主成分主要包括Cd和一部分Pb,第3个主成分主要包括Hg。

### 2.6 茶叶重金属健康风险评估

重金属在人体内代谢缓慢,若长期积累,可能会对人体造成损伤。对一般人群通过茶叶暴露重金属的风险进行评估结果显示,茶叶中重金属危害指数(THQ均值)从大到小依次均为Cd>Pb>As>Hg,THQ均值中Cd最大,为0.0047,THQ值和TTHQ值女性高于男性,茶叶中重金属的人群膳食暴露水平均处在安全状态,见表9。

质量较好。

## 3 讨论

植物能吸收土壤和环境中的重金属,土壤中的重金属可分为两类:一类是动植物生长所必需的<sup>[38]</sup>,主要是作为酶催化剂,对农业生产和人体健康有利;另一类是环境激素<sup>[38]</sup>(如Cd、Pb以及Hg),作为植物的非必须元素,当环境中重金属浓度超过一定阈值之后会对其生长造成伤害,进而通过食物链危害人类健康<sup>[39-40]</sup>。于剑峰等<sup>[14]</sup>、王存龙等<sup>[41]</sup>研究发现,胶东半岛部分地区存在土壤酸化增加,导致重金属活化、污染富集现象。本次调查发现该区土壤重金属元素平均值均低于国家标准,但部分样品中Pb、Cd最大值高于国家标准,表明存在一定重

表9 一般人群茶叶中重金属的膳食暴露及其风险指数

Table 9 Dietary exposure and risk index of heavy metals in tea of different age groups

指数	性别	均值	P25	P50	P75	P90	P95	P97.5
THQ <sub>Pb</sub>	男	0.001 6	0.000 7	0.001 1	0.001 9	0.003 0	0.005 2	0.007 7
	女	0.001 8	0.000 8	0.001 3	0.002 2	0.003 4	0.005 9	0.008 9
THQ <sub>Cd</sub>	男	0.004 1	0.002 3	0.003 6	0.005 1	0.007 3	0.008 3	0.011 7
	女	0.004 7	0.002 7	0.004 3	0.005 9	0.008 4	0.009 7	0.013 5
THQ <sub>Hg</sub>	男	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 2	0.000 3	0.000 3	0.000 3
	女	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 2	0.000 3	0.000 3	0.000 3
THQ <sub>As</sub>	男	0.000 9	0.000 2	0.000 3	0.001 1	0.002 7	0.003 9	0.006 0
	女	0.001 1	0.000 2	0.000 3	0.001 2	0.003 2	0.004 5	0.006 9
TTHQ	男	0.006 7	0.003 2	0.005 0	0.005 9	0.013 3	0.017 7	0.025 7
	女	0.007 7	0.003 7	0.007 9	0.009 5	0.015 3	0.020 4	0.029 6

表10 不同产地茶叶重金属含量比较

Table 10 Comparison of heavy metal content in tea from different producing areas

重金属含量/ (mg/kg)	产地				
	胶东	临沂	河南	重庆	商洛
Pb	0.286	0.037	0.450	0.604	0.320
Cd	0.041	0.048	0.054	0.074	0.031
Hg	0.001	0.011	0.102	0.001	0.015
As	0.037	0.059	0.095	0.183	0.179

金属污染富集。由相关系数分析可知,土壤中 Cd、Pb、Hg 和 As 可能具有相似的来源,且呈现相互伴随的复合污染现象<sup>[16,24]</sup>。土壤中 As 和 Pb 在三种主成分中都有分布,主成分 1 中因子载荷最高分别达到 0.666、0.673;旋转后更加明显,达到 0.884、0.616。As 元素平均值超出背景值 0.40 倍,最大值达到背景值的 6 倍,Pb 元素平均值超过背景值 0.14 倍,最大值是背景值的 5 倍。这 2 种元素属于混合来源,既具备主成分 1“成土母质自然来源”又具备主成分 2“工业和农业化肥环境源”;土壤 Cd 因子载荷 0.632,旋转后为 0.062,该元素平均值未超出背景值,最大含量超过背景值,自然状态下含量低,主要来源于工业生产活动,环境中的 Cd 通过雨水或降尘进入土壤;肥料和农药的使用、电镀冶金业排放也会导致土壤 Cd 污染。该区以种植小麦玉米等农作物为主,Cd 伴存在于磷肥,通过施肥进入土壤。该区以电子工业、机械加工、五金制造等产业为主,工业“三废”排放也是 Cd 元素的来源之一<sup>[32]</sup>。土壤 Hg 因子载荷 0.479,旋转后为 0.103,平均值未超出背景值,最大含量也未超过背景值,故认为 Hg 元素的来源可能是人为因素。一般 Hg 元素人为来源有 80% 是以元素汞蒸气的形式向大气排放的,主要来自于燃料燃烧、采矿、冶炼、垃圾焚烧等途径。另外有 15% 通过施肥、农药、生活废弃物等途径进入土壤。综上所述,该区土壤 As 和 Pb 属于混合来源,Cd 和 Hg 主要是人为元素,来源于工业“三废”、农业生产等。该区土壤环境质量较好,整体处于中低风险水平。

茶叶中重金属来源主要有:一是土壤母质中重金属含量较高时,茶树在多年生长的过程中慢慢从土壤中吸收累积;二是茶叶加工机械中的重金属元素(主要是 Pb),在茶叶的揉捻过程中,茶叶与机械表面接触所致;三是环境污染造成,包括飘尘和水质;四是茶园施肥、喷洒农药和在茶园使用机械所造成的污染<sup>[42]</sup>。从本次调查看,所有元素平均值未超过国家标准,表明质量合格,处在可安全接受水平,对暴露人群没有明显的健康风险。其中 Pb 含量最高,说明 Pb 是主要污染物。茶叶与土壤中各重金属相关性分析显示,茶叶中 Pb 与土壤中 Cd、Hg 存在正相关性,茶叶中 Cd 与土壤中 Pb、Cd、Hg、As 存在正相关性,茶叶中 As 与土壤中 Cd 存在正相关性,相关性差异无统计学意义;茶叶中 Pb 与土壤中 Pb、As 存在负相关;茶叶中 Cd 与土壤中 As 存在负相关;茶叶中 Hg 与土壤中 Pb、Cd、Hg、As 存在负相关,其中与 Pb、Hg、As 的差异有统计学意义;茶叶中 As 与土壤中 Pb、Hg、As 存在负相关,其中与 Pb、Hg、As 差异有统计学意义;本研究结果与赵佐平<sup>[11]</sup>报道一致,提示茶叶中 Pb、Cd、Hg、As 含量可能并不完全取决于土壤中的含量。赵佐平等<sup>[11]</sup>、胡留杰等<sup>[43]</sup>、蒋陈凯等<sup>[44]</sup>认为大部分茶叶与土壤中重金属含量并不成简单的线性关系,存在相关性不强。这种现象可能有三种原因:一是茶树对重金属富集能力有差异性,换言之,土壤中重金属含量高未必引起茶叶中相应重金属含量的超标;二是茶叶与土壤重金属含量的关系是受到茶树本身、生长环境、栽培条件等多种因素影响而在宏观上的一种体现,茶叶中重金属含量除与茶树品种、茶园管理方式有关,还与该元素本身的理化性质、在土壤中的存在形式以及茶树对该元素的吸收、转运、同化形式有关,同时海拔高度、坡度和光照等因素都会影响到土壤-茶叶系统含量;三是茶叶中重金属含量受多重因素影响,诸如大气污染沉降、有机肥料和化学肥料,茶树生理特性都可能会影响茶叶重金属含量。茶叶金属含量变化范围较大,Pb、Cd、Hg、As 的含量范围分

别为 0.004~1.732、ND~0.176、ND~0.014、0.005~0.757 mg/kg。从重金属含量变异系数可以看出,变异系数均大于 50%,属于高变异,表明在区域上差异显著,可能受人类活动影响较大。

本研究存在一定的局限性,风险评估的暴露量计算未考虑茶叶中重金属的浸出率,暴露结果存在一定偏倚。尽管胶东茶叶作为国内纬度最北的茶叶,具有独特的产品品质优势,产品质量安全,特别是近几年在市场上逐步得到认可,获得国家农产品地理标志登记保护,成为山东茶叶的一枝新秀,但仍存在管理方式粗放、品牌杂乱、标准化生产技术推广缓慢等问题,建议政府相关部门对胶东茶叶种植方式、加工生产环境进行重点关注,尤其是做好重金属控制,加大技术指导,加强品牌建设,确保胶东茶叶高质量发展,更好地保障食品安全和人体健康。

#### 参考文献

- [ 1 ] 吴芹瑶, 杨江帆, 林程, 等. 中国茶叶生产布局变迁研究[J]. 茶叶科学, 2022, 42(2): 290-300.  
WU Q Y, YANG J F, LIN C, et al. Research on the changes of China's tea production layout [J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(2): 290-300.
- [ 2 ] 夏魏, 刘志, 邵圣枝, 等. 茶叶与产地环境中稳定同位素和矿物元素特征及其相关性研究[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 573-581.  
XIA W, LIU Z, SHAO S Z, et al. Feature of stable isotope and mineral element composition from tea and its environment with correlation analysis [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3): 573-581.
- [ 3 ] 朱鹏飞, 于春娣, 唐娟, 等. 茶鲜叶中金属元素含量影响因素研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(21): 1-7.  
ZHU P F, YU C D, TANG J, et al. Factors influencing the contents of metal elements in tea leaves[J]. Food Research and Development, 2021, 42(21): 1-7.
- [ 4 ] 张洋婷, 郗艳丽, 于海涛, 等. 不同品种茶叶及茶水中的重金属含量分析[J]. 吉林医药学院学报, 2015, 36(6): 425-428.  
ZHANG Y T, XI Y L, YU H T, et al. Analysis of the heavy metal contents in different teas and tea water[J]. Journal of Jilin Medical College, 2015, 36(6): 425-428.
- [ 5 ] 徐瑞, 刘守龙, 刘志宇, 等. 不同地区茶叶中微量元素的测定[J]. 大理大学学报, 2013, 12(10): 47-49.  
XU R, LIU S L, LIU Z Y, et al. The determination of trace elements in three kinds of tea from different places[J]. Journal of Dali University, 2013, 12(10): 47-49.
- [ 6 ] 陈世金, 蔡群兴, 赵辉, 等. 常见茶叶中 14 种元素含量分析及重金属风险评价[J]. 化学通报, 2021, 84(6): 591-595.  
CHEN S J, CAI Q X, ZHAO H, et al. The content analysis of 14 elements and risk evaluation of heavy metals in common teas [J]. Chemistry, 2021, 84(6): 591-595.
- [ 7 ] 中华人民共和国环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R], 2014. [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm).  
Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land. National survey bulletin soil pollution, China[R]. 2014. [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm).
- [ 8 ] YOUNG J L, CAI L. Implications for prenatal cadmium exposure and adverse health outcomes in adulthood [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2020, 403: 115161.
- [ 9 ] SUN Y W, LONG J H, ZHAO J X, et al. Epidemiology, clinical presentation, treatment, and follow-up of chronic mercury poisoning in China: A retrospective analysis [J]. BMC Pharmacology and Toxicology, 2021, 22(1): 1-9.
- [ 10 ] KHAIRULI, WANG Q Q, JIANG Y H, et al. Metabolism, toxicity and anticancer activities of arsenic compounds [J]. Oncotarget, 2017, 8(14): 23905-23926.
- [ 11 ] 赵佐平, 付静, 岳思羽, 等. 陕南茶园茶叶品质分析及重金属含量现状评估[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 201-211.  
ZHAO Z P, FU J, YUE S Y, et al. Analysis of tea quality and assessment of heavy metal content status in tea plantations of southern Shaanxi Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 201-211.
- [ 12 ] 曹秀荣, 董照锋, 赵宇, 等. 商洛茶叶中重金属含量测定及其健康风险评估[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 50-54.  
CAO X R, DONG Z F, ZHAO Y, et al. Determination of heavy metals in Shangluo tea and its health risk assessment[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 50-54.
- [ 13 ] 肖粤新, 陈彪, 彭志刚, 等. 茶叶与土壤重金属相关性分析及评价——以汨罗市范家园茶场为例[J]. 湖南农业科学, 2021, 432(9): 49-52.  
XIAO Y X, CHEN B, PENG Z G, et al. Correlation analysis and evaluation of heavy metals in tea and in soil-A case study of Fanjiayuan tea farm in Miluo[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021, 432(9): 49-52.
- [ 14 ] 庞磊. 在北方闻秋香品绿茶[N]. 烟台日报, 2022-10-05.  
PANG L. Smell autumn fragrance and green tea in the north[N]. Daily Yantai, 2022-10-05.
- [ 15 ] 于剑峰, 汤世凯, 李金鹏, 等. 山东烟台南部海岸带地区土壤重金属来源、空间分布及潜在风险评价[J]. 山东国土资源, 2019, 35(9): 41-47.  
YU J F, TANG S K, LI J P, et al. Assessment of sources spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in the southern coastal zone of Yantai city in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(9): 41-47.
- [ 16 ] 国家食品安全风险评估中心. 2016 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册[M]. 北京: 国家食品安全风险评估中心, 2016.  
National Center for Food Safety Risk Assessment. Manual of national food contamination and harmful factors risk monitoring in 2016 [M]. Beijing: National Center for Food Safety Risk Assessment, 2016.

- [17] 范丽霞, 张丙春, 陈璐, 等. 我国金银花主产区花和土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 核农学报, 2021, 35(10): 2341-2351.  
FAN L X, ZHANG B C, CHEN L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in honeysuckle and soil from the main producing area in China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(10): 2341-2351.
- [18] 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市城郊菜地土壤和蔬菜重金属含量特征及健康风险评估[J]. 山西农业科学, 2019, 47(1): 82-87.  
HUA X Z, CHENG B, ZHAO R F, et al. Concentration characteristic and health risk assessment of heavy metal in vegetable soils and vegetables in suburbs of Taiyuan city[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 82-87.
- [19] 中华人民共和国农业部. 农、畜、水产品污染监测技术规范: NY/T 398—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Procedural regulations regarding monitoring of pollutants in the produces of agriculture, animal husbandry and fishery: NY/T 398—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [20] 董峰光, 王桂强, 宫春波, 等. 2012—2017年烟台市市售禽畜肉中重金属和 $\beta$ -受体激动剂污染状况及危险性评估[J]. 职业与健康, 2018, 34(6): 764-768.  
DONG F G, WANG G Q, GONG C B, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metals and  $\beta$ -receptor agonist in commercially available livestock and poultry meat in Yantai City from 2012-2017[J]. Occupation and Health, 2018, 34(6): 764-768.
- [21] 顾效源, 孔祥淮, 王伟, 等. 山东丁字湾表层沉积物重金属分布及污染评价[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(3): 13-21.  
GU X Y, KONG X H, WANG W, et al. Distribution and environment assessment of heavy metals in the sediments of Dingzi bay, Shandong province[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(3): 13-21.
- [22] US EPA. Risk-based concentration table[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [23] 成娟, 何智宏, 郭明玲, 等. 甘肃省核桃果仁铅、镉含量及膳食暴露评估[J]. 农产品质量与安全, 2019, 101(5): 61-65.  
CHENG J, HE Z H, GUO M L, et al. Walnut kernel content of lead, cadmium and dietary exposure assessment of Gansu province[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2019, 101(5): 61-65.
- [24] 杨莽安, 张泽东, 李朝婵, 等. 贵州无籽刺梨果实与种植基地土壤重金属污染评价[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(4): 288-298.  
YANG Q A, ZHANG Z D, LI C C, et al. Evaluation on heavy metals pollution of soil and the *Rosa sterilis* fruit in plantation bases of Guizhou province[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(4): 288-298.
- [25] 邢仕歌, 雍炜, 李永亮, 等. 2020年北京市售食用菌中重金属含量及健康风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(16): 6661-6666.  
XING S G, YONG W, LI Y L, et al. Heavy metals content and human health risks of edible mushrooms sold in Beijing[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(16): 6661-6666.
- [26] BENNETT D H, KASTENBERG W E, MCKONE T E. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: The impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 63(2): 185-198.
- [27] 李艳霞, 李含芬, 赵磊, 等. 消费者日常茶叶饮用习惯对健康的影响[J]. 农学学报, 2017, 7(2): 91-95.  
LI Y X, LI H F, ZHAO L, et al. Effects of consumers' daily tea drinking habits on health[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(2): 91-95.
- [28] 朴建华, 霍军生. 中国居民营养与健康状况监测报告-之二-2010—2013年居民体质与营养状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2019.  
PIAO J H, HUO J S. Monitoring report on nutrition and health status of Chinese residents - Part 2- Physical and nutritional status of residents from 2010 to 2013[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2019.
- [29] 王慧, 毛伟峰, 蒋定国, 等. 中国居民水产品中四种常见重金属暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(5): 470-475.  
WANG H, MAO W F, JIANG D G, et al. Risk assessment of specific heavy metals exposure to aquatic products in China[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(5): 470-475.
- [30] 马宁, 王慧, 毛伟峰, 等. 水产品重金属风险分级模型建立及应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(3): 294-300.  
MA N, WANG H, MAO W F, et al. Establishment and application of health risk ranking model for heavy metals in aquatic products[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2020, 32(3): 294-300.
- [31] 郑茂钟, 汤秀梅, 叶宏萌. 行道树对武夷山公路边茶园重金属污染的防护效果[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4): 371-379.  
ZHENG M Z, TANG X M, YE H M. Protective effects of roadside tree lines on heavy metals pollution to roadside tea gardens in Wuyishan[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(4): 371-379.
- [32] 高健翁, 龚晶晶, 杨剑洲, 等. 海南琼中黎母山一湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评估[J]. 地质通报, 2021, 40(5): 807-816.  
GAO J W, GONG J J, YANG J Z, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal pollution in the soil of Limu Mountain-Wanling Town, Qiongzong, Hainan province[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(5): 807-816.
- [33] 鲍玉花, 马秀花, 闫世芳, 等. 马铃薯及耕地土壤重金属含量的测定及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 9150-9157.  
BAO Y H, MA X H, YAN S F, et al. Detection and health risk assessment of heavy metal in potato and cultivated soil[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(23): 9150-9157.
- [34] WHO. Second workshop on reliable evaluation of low-level contamination of food[R]. Rome: WHO, 1995.
- [35] 张萌, 张银烽, 赵晓慧, 等. 云南省水生蔬菜中5种典型重金属含量特征及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3710-3718.



- ZHANG M, ZHANG Y F, ZHAO X H, et al. Content characteristics and health risk assessment of 5 kinds of typical heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan province [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(11): 3710-3718.
- [36] 于奎峰, 刘楠. 2016年-2020年临沂市茶叶中重金属含量调查分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(22): 2811-2813.
- YU K F, LIU N. Investigation and analysis of heavy metal contents in tea in Linyi city from 2016 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2021, 31(22): 2811-2813.
- [37] 付鹏钰, 李杉, 杨丽, 等. 河南省茶叶中重金属污染和农药残留状况调查分析[J]. *河南预防医学杂志*, 2018, 29(9): 651-653.
- FU P Y, LI S, YANG L, et al. Heavy metals contamination and pesticide residue in tea in Henan [J]. *Henan Journal of Preventive Medicine*, 2018, 29(9): 651-653.
- [38] 冷崇蛟, 杨针, 彭术, 等. 重庆地产茶叶中重金属含量现状分析与评价[J]. *保健医学研究与实践*, 2019, 16(4): 10-14.
- LENG C J, YANG Z, PENG S, et al. Study on heavy metal content in tea samples from Chongqing [J]. *Health Medicine Research and Practice*, 2019, 16(4): 10-14.
- [39] 何建军. 黑麦在汞镉污染土壤中的生理特性及对汞镉吸收规律研究[J]. 西安: 长安大学, 2009.
- HE J J. Study on physiological characteristics of rye in mercury and cadmium contaminated soil and its absorption law of mercury and cadmium [J]. Xi'an: Changan University, 2009.
- [40] 张双银, 吴琳娜, 张广映, 等. 都柳江上游沿岸喀斯特地区土壤重金属污染及健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(7): 421-433.
- ZHANG S Y, WU L N, ZHANG G Y, et al. Soil heavy metal pollution analysis and health risk assessment in Karst areas along the upper reaches of the Du Liujiang River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(7): 421-433.
- [41] 周蓓蓓, 郭江, 陈晓鹏, 等. 基于UNMIX模型的安徽大矾山废弃矿区土壤重金属源解析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(24): 240-248.
- ZHOU B B, GUO J, CHEN X P, et al. Source apportionment of soil heavy metals in abandoned mining areas in Dafan Mountain of Anhui Province based on the UNMIX model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(24): 240-248.
- [42] 王存龙, 曾宪东, 刘华峰, 等. 烟台市土壤环境质量现状及重金属元素分布迁移规律[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 317-330.
- WANG C L, ZENG X D, LIU H F, et al. The present situation of soil environmental quality and the distribution and migration regularity of heavy metals in soil of Yantai [J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 317-330.
- [43] 胡留杰, 周正科. 茶叶中重金属的含量现状及其控制对策[J]. *南方农业*, 2010, 5(4): 89-92.
- HU L J, ZHOU Z K. Present situation of heavy metal content in tea and its control countermeasures [J]. *South China Agriculture*, 2010, 5(4): 89-92.
- [44] 蒋陈凯, 黄亚辉, 李丹, 等. 土壤元素的测定及其对茶叶浸出液元素的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(4): 1250-1256.
- JIANG C K, HUANG Y H, LI D, et al. Determination of elements in soil and effects on elements in leaching liquid of tea leaves [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, 6(4): 1250-1256.