

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240904011

# 陕西省市售茶叶的铅污染状况及健康风险评估

牟 霄<sup>1</sup>, 魏宇琛<sup>2</sup>, 张崇森<sup>2\*</sup>, 张晓林<sup>3</sup>

(1. 陕西省食品药品检验研究院食品药品技术研究中心, 西安 710065;

2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055;

3. 大连海关技术中心, 大连 116620)

**摘 要: 目的** 探究陕西省市售茶叶中铅污染情况并评估饮茶的健康风险。**方法** 在陕西省 9 个市的茶叶经营单位随机抽样采集了 305 份样品。使用电感耦合等离子体质谱法测定茶叶中的铅含量, 并用单项污染指数法评价茶叶铅污染情况。计算经饮茶途径的铅的每日摄入量, 并用蒙特卡洛模拟全面展现饮茶途径的铅暴露状况。利用靶标危害商评估饮茶途径铅暴露的健康风险。**结果** 陕西省市售茶叶铅检出率为 99.02%, 铅含量范围为 0.02~3.05 mg/kg, 所有样品的铅含量均符合 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》。不同种类、不同茶区的茶叶铅含量存在显著性差异( $P<0.05$ )。黑茶铅含量最高, 其次是青茶、绿茶, 红茶的铅含量最低。西南茶区的茶叶中铅含量处于较高水平。饮茶途径铅暴露的最大靶标危害商为  $4.25\times 10^{-2}$ , 远小于 1。**结论** 陕西省市售茶叶铅检出率高, 但铅含量均符合 GB 2762—2017。饮茶途径的铅暴露不会造成明显的健康风险, 应重点关注黑茶与青茶的铅含量。本研究结果可为市售茶叶监管和健康风险控制提供科学依据。

**关键词:** 茶叶; 铅; 蒙特卡洛模拟; 靶标危害商; 健康风险评估

## Lead contamination and health risk assessment of commercial tea in Shaanxi Province

MOU Xiao<sup>1</sup>, WEI Yu-Chen<sup>2</sup>, ZHANG Chong-Miao<sup>2\*</sup>, ZHANG Xiao-Lin<sup>3</sup>

(1. Food and Drug Technology Research Center, Shaanxi Institute for Food and Drug Control, Xi'an 710065, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Technology Center of Dalian Customs District, Dalian 116620, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the lead contamination in commercial tea in Shaanxi Province and assess the health risk associated with tea consumption. **Methods** The 305 samples were randomly collected from tea business units in 9 cities of Shaanxi Province. The lead content in tea was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, and the lead contamination was assessed by single pollution index method. The daily intake of lead through tea consumption was calculated, and Monte Carlo simulation was used to comprehensively demonstrate the lead exposure status via tea consumption. The health risk associated with lead intake through tea consumption was assessed using target hazard quotient. **Results** The detection rate of lead in commercial tea in Shaanxi Province was 99.02%, with a lead content ranging from 0.02 to 3.05 mg/kg. The lead content in all samples complied with GB 2762—2017

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY06-07、2022SF-244)

**Fund:** Supported by the Key Research and Development Project of Shaanxi Province (2020ZDLNY06-07, 2022SF-244)

\*通信作者: 张崇森, 博士, 教授, 主要研究方向为新污染物风险评估与控制。E-mail: cmzhang@xauat.edu.cn

\*Corresponding author: ZHANG Chong-Miao, Ph.D, Professor, Xi'an University of Architecture and Technology, No.13, Middle Yanta Road, Beilin District, Xi'an 710055, China. E-mail: cmzhang@xauat.edu.cn

*National Food Safety Standard Food Contaminant Limit*. There were significant differences in the lead content in tea from different varieties and different tea regions ( $P < 0.05$ ). The lead content was highest in dark tea, followed by oolong tea, then green tea, and black tea had the lowest lead content. The lead content of tea from southwest tea region was at a high level. The highest target hazard quotient of lead intake through tea consumption was  $4.25 \times 10^{-2}$ , far less than 1.

**Conclusions** The detection rate of lead in commercial tea in Shaanxi Province is high, but the lead concentration met GB 2762—2017. Lead exposure through the tea consumption does not pose a significant health risk, and the focus on lead concentration in dark tea and oolong tea should be emphasized further. The results of this study can provide a scientific basis for the regulation and health risk control of commercial tea.

**KEY WORDS:** tea; lead; Monte Carlo simulation; target hazard quotient; health risk assessment

## 0 引 言

中国茶文化历史悠久、底蕴丰厚,在国际上享有极高声誉。茶叶中富含茶多酚、儿茶素、咖啡碱等多种功能成分,有预防心脑血管疾病、降血脂及保健功效<sup>[1]</sup>。近年来,我国茶叶产业快速发展。2022 年我国茶园面积 5089.5 万亩,茶叶产量 334.2 万 t<sup>[2]</sup>,均居世界首位。

茶叶消费量的持续增加使得茶叶重金属污染和健康风险备受关注。在冲泡过程中,茶叶里的重金属会转移至茶汤而被人体摄入。据报道,血液中的重金属浓度与茶叶消费之间存在剂量反应关系<sup>[3]</sup>,长期慢性接触重金属可能导致严重且不可逆的损伤<sup>[4]</sup>。铅是典型的重金属毒物,会损伤神经系统、心血管系统、肾脏、大脑等<sup>[5]</sup>。铅比其他元素更容易被茶树富集<sup>[6]</sup>。茶产品的铅污染现象普遍,例如重庆市 11 类 2347 份食品样品调查中,茶是铅含量平均值最高的食品<sup>[7]</sup>;在贵阳市 2016—2021 年间市售食品铅污染状况调查中,茶产品铅超标率最高<sup>[8]</sup>;在福建省铁观音茶叶重金属调查中,91 个样品中均有铅检出<sup>[9]</sup>。

目前有关茶叶铅污染的研究,大多是以某地茶园土壤与茶叶中铅含量调查为基础<sup>[10-12]</sup>,这些研究能揭示铅在土壤和茶叶中的迁移规律,但存在明显的地域和种类局限性,并不能准确反映茶叶市场的真实情况。市售茶叶种类多样,消费者覆盖面广,对市售茶叶的调查更能全面反映茶叶铅污染的状况和健康风险。然而,这方面目前研究报道较少,不同种类、不同产地茶叶铅污染特征尚不明确。因此本研究针对陕西省市售茶叶开展采样调查,定量检测茶叶铅含量,对茶叶中铅摄入造成的健康风险进行评估,以期对市售茶叶监管和健康风险控制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 茶叶样品采集与种类划分

2022 年 3 月—2024 年 9 月,采用随机抽样的方法在陕西省西安市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、延安市、榆林

市、汉中市、安康市、商洛市等 9 个城市的茶叶经营单位(包括超市、商场、批发市场等)采集在售饮用茶叶共 305 份。根据茶叶的加工工艺和发酵程度将采集的样品划分为绿茶、青茶、黑茶、红茶 4 类<sup>[13]</sup>。

根据自然、经济和社会条件,我国一级茶区可划分为江北、江南、西南及华南 4 大茶区<sup>[14]</sup>。本研究通过查询商品信息确认茶叶产地,将 305 份茶叶样品归属于:江北茶区(南起长江,北至秦岭、淮河,西起大巴山,东至山东半岛,包括甘南、陕南、鄂北、豫南、皖北、苏北、鲁东南等地);江南茶区(长江以南,大樟溪、雁石溪、梅江、连江以北,包括粤北、桂北、闽中北、湘、浙、赣、鄂南、皖南和苏南等地);西南茶区(米仓山、大巴山以南,红水河、南盘江、盈江以北,神农架、巫山、方斗山、武陵山以西,大渡河以东的地区,包括黔、川、滇中北和藏东南);华南茶区(大樟溪、雁石溪、梅江、连江、浔江、红水河、南盘江、无量山、保山、盈江以南,包括闽中南、台、粤中南、海南、桂南、滇南)以及归属于 4 大茶区外的其他茶区。

### 1.2 仪器与设备

HM100 刀式研磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司);DHG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);ME204 电子天平(精度 0.1 mg, 上海梅特勒—托利多仪器有限公司);TOPEX+微波消解仪、G-400 智能控温电加热器(上海屹尧仪器科技发展有限公司);ICAP-PQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 铅的检测方法与铅污染指数评价法

采用 GB 5009.12—2017《食品安全国家标准 食品中铅的测定》规定的电感耦合等离子体质谱法对茶叶样品中的铅含量进行定量检测,检出限为 0.05 mg/kg。

将茶叶样品中铅含量测定值与 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的茶叶中铅含量限值进行比较。依据 NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》中规定的产品单项污染指数法<sup>[15]</sup>评价茶叶质量,按照式(1)计算茶叶中铅污染指数:

$$P_{\text{铅}} = \frac{C_{\text{铅}}}{S_{\text{铅}}} \tag{1}$$

式中： $P_{\text{铅}}$ 为茶叶铅污染指数； $C_{\text{铅}}$ 为茶叶铅含量测定值，mg/kg； $S_{\text{铅}}$ 为茶叶铅含量限值，为 5.0 mg/kg。使用茶叶铅污染指数，对照 NY/T 398—2000 中给出的农、畜、水产品质量分级标准(表 1)评定茶叶质量级别。

| 表 1 农、畜、水产品质量分级标准                                                               |         |                            |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------|
| Table 1 Quality grading standards for agriculture, animal husbandry and fishery |         |                            |
| 等级划分                                                                            | 单因子污染指数 | 污染水平                       |
| 一级产品                                                                            | ≤0.6    | 有污染物残留产品，污染物含量接近背景值或略高于背景值 |
| 二级产品                                                                            | 0.6~1.0 | 污染物残留较多的产品                 |
| 三级产品                                                                            | ≥1.0    | 污染产品，不符食品卫生标准，品质下降，影响食用    |

1.3.2 暴露评估方法

采用估计每日摄入量(estimated daily intake, EDI)作为健康风险评估的基本参数<sup>[16]</sup>，通过估算每天经口摄入的铅含量来评估潜在的健康风险水平，具体如下式(2)：

$$EDI = \frac{C_i \times IR \times TR_i \times EF \times ED}{AT \times BW \times 1000} \tag{2}$$

式中：EDI 为饮茶途径的铅估计每日摄入量，mg/(kg·d)； $C_i$ 为茶叶中铅的浓度，mg/kg；IR 为每人每日茶叶消耗量，一般取值为 5~15 g/d<sup>[17-18]</sup>，本研究取最大值 15 g/d； $TR_i$ 是重金属从干茶叶到茶汤的浸出率，铅的浸出率一般取值为 10%~20%<sup>[19-20]</sup>，本研究取最大值 20%；EF 为暴露频率，取值为 365 d/a<sup>[21]</sup>；ED 为成年人口平均暴露持续时间，男性为 57 a，女性为 62 a<sup>[22]</sup>；BW 为平均体重，成年男性平均体重 69.6 kg、成年女性平均体重 59 kg<sup>[23]</sup>；AT 为非致癌性暴露平均时间，取值为 ED×365 d<sup>[24-25]</sup>。

1.3.3 风险表征方法

靶标危害商(target hazard quotient, THQ)是由美国环境保护署提出的，用于评估人类暴露于包括重金属在内的污染物的非致癌风险。当 THQ<1 时，健康风险不明显；当 1<THQ<10 时，存在健康风险，当 THQ>10 时，对人体健康造成威胁，存在慢性毒性<sup>[26]</sup>。THQ 越大健康风险越高<sup>[27-28]</sup>。具体计算如式(3)所示：

$$THQ = \frac{EDI}{RfD} \tag{3}$$

式中：EDI 为饮茶途径的铅每日摄入量，mg/(kg·d)；RfD 为铅的口服摄入量参考值，为 0.0036 mg/(kg·d)<sup>[29-31]</sup>。

1.4 数据处理

采用 Origin 2021 进行数据处理和绘图。当检测数值低于方法检出限(limit of detection, LOD)时，描述为“未检

出”。根据国家卫生健康委员会发布的技术指南<sup>[32]</sup>以及污染物研究报道<sup>[33]</sup>，未检出数据可用 1/2 LOD 替代。总体样本中个别数据铅含量超过箱线图内限时，认定其为异常值，不纳入茶叶中铅含量分布与平均值统计。采用 SPSS 27 软件进行数据统计分析。基于茶叶铅含量分布规律，使用 Oracle Crystal Ball 软件通过蒙特卡洛方法产生大量随机数模拟茶叶的铅含量，模拟次数设定为 10000，进而计算 EDI 和 THQ。

2 结果与分析

2.1 茶叶中铅的检出情况和整体评价

本研究共采集茶叶样品 305 份，其中绿茶、黑茶、青茶和红茶样品量分别为 170、62、30、43 份；来自江北茶区、江南茶区、西南茶区、华南茶区和其他茶区样品量分别为 81、58、40、55、71 份。有 302 份样品有铅检出，铅检出率为 99.02%。绿茶、黑茶、青茶、红茶样品的铅检出率分别为 98.82%、98.39%、100.00%、100.00%。茶叶样品的铅含量范围为 0.02~3.05 mg/kg，平均值为 0.41 mg/kg。所有样品的铅含量均低于 GB 5009.12—2017 中规定的限量值 5 mg/kg，合格率为 100.00%。从铅污染指数质量分级上看，304 份茶叶样品都属于一级产品，但有 1 份绿茶铅污染指数为 0.61，属二级产品。由此可见，陕西省市售茶叶中普遍含铅，但污染程度轻微，均符合国家标准。

2.2 不同品种茶叶的铅含量

剔除了 11 个极端异常值，用 294 个数据分析本次调查的茶叶铅含量分布特征。由图 1 可见，绿茶铅含量范围为 0.20~0.82 mg/kg，平均值为 0.33 mg/kg；黑茶 0.02~1.30 mg/kg，平均值 0.52 mg/kg；青茶 0.02~0.85 mg/kg，平均值 0.44 mg/kg；红茶 0.06~0.46 mg/kg，平均值 0.22 mg/kg。分别经 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Shapiro-Wilk 检验，绿茶与青茶的铅含量符

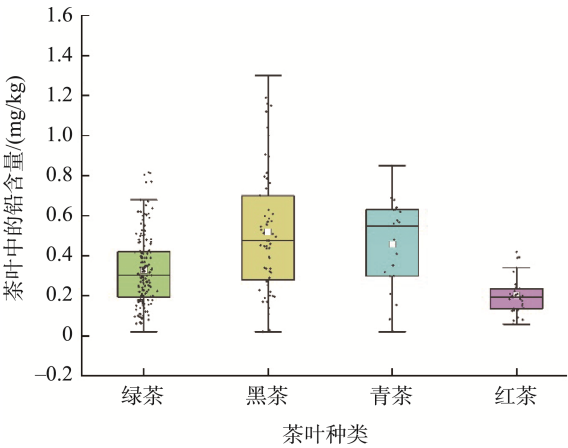


图1 不同品种茶叶的铅含量  
Fig.1 Lead content in different varieties of tea

合正态分布( $P>0.05$ ), Anderson-Darling 检验表明黑茶和红茶的铅含量符合对数正态分布( $P>0.05$ )。通过 Kruskai-Wallis 检验发现不同品种的茶叶中铅含量存在显著性差异( $P<0.05$ ), 黑茶的铅含量最高, 其次是青茶、绿茶, 红茶的铅含量最低(表 2)。

| 表 2 不同种类茶叶铅含量分布与特征参数                                                                          |         |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|
| Table 2 Lead content distribution and characteristic parameters in different varieties of tea |         |               |
| 茶叶种类                                                                                          | 铅含量分布类型 | 特征参数          |
| 绿茶                                                                                            | 正态      | $0.33\pm0.10$ |
| 黑茶                                                                                            | 对数正态    | $0.52\pm0.25$ |
| 青茶                                                                                            | 正态      | $0.44\pm0.14$ |
| 红茶                                                                                            | 对数正态    | $0.22\pm0.12$ |

2.3 不同茶区茶叶的铅含量

如图 2 所示, 江北茶区铅含量范围为 0.02~1.01 mg/kg, 平均值为 0.36 mg/kg; 江南茶区 0.09~0.83 mg/kg, 平均值 0.35 mg/kg; 西南茶区 0.10~0.82 mg/kg, 平均值 0.40 mg/kg; 华南茶区 0.02~0.81 mg/kg, 平均值 0.26 mg/kg; 其他茶区 0.02~1.30 mg/kg, 平均值 0.43 mg/kg。经 Kruskai-Wallis 检验表明各茶区的茶叶铅含量存在显著性差异( $P<0.05$ )。来自其他茶区的茶叶铅含量平均值最高, 这与铅含量较高的茯茶在其中的高占比(59.2%)有关。西南茶区茶叶样品铅含量数值分布集中, 极差最小, 整体铅含量处于较高水平(表 3)。

2.4 饮茶途径铅暴露的健康风险评估

以本次调查的茶叶样品的铅含量分布特征进行暴露量模拟, 可以得出饮茶途径铅的 EDI。如图 3 所示, 考虑所有种类茶叶铅含量分布特征, 计算得到的成年男性和女性经饮茶途径的铅 EDI 范围分别为  $6.40\times10^{-7}\sim8.73\times10^{-5}$  mg/(kg·d)、 $7.5\times10^{-7}\sim9.40\times10^{-5}$  mg/(kg·d), 平均值分别为  $1.64\times10^{-5}$  mg/(kg·d)

和  $1.92\times10^{-5}$  mg/(kg·d)。如果仅对某一种茶叶而言, 成年男性饮黑茶、青茶、绿茶和红茶的铅 EDI 最大值分别为  $1.24\times10^{-4}$ 、 $4.14\times10^{-5}$ 、 $3.36\times10^{-5}$ 、 $6.39\times10^{-5}$  mg/(kg·d), 平均值分别为  $2.24\times10^{-5}$ 、 $1.90\times10^{-5}$ 、 $1.41\times10^{-5}$ 、 $0.94\times10^{-5}$  mg/(kg·d); 成年女性饮上述 4 种茶的铅 EDI 最大值分别为  $1.58\times10^{-4}$ 、 $5.19\times10^{-5}$ 、 $3.59\times10^{-5}$ 、 $6.98\times10^{-5}$  mg/(kg·d), 平均值分别为  $2.67\times10^{-5}$ 、 $2.24\times10^{-5}$ 、 $1.68\times10^{-5}$ 、 $1.14\times10^{-5}$  mg/(kg·d)。根

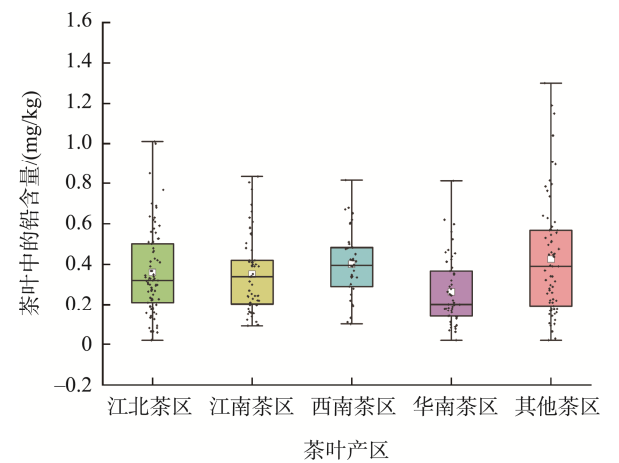


图2 不同地区茶叶中铅含量  
Fig.2 Lead content in different tea regions

| 表 3 不同茶区的茶叶铅含量分布与特征参数                                                                           |         |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|
| Table 3 Lead content distribution and characteristic parameters in different tea regions of tea |         |                      |
| 茶区                                                                                              | 铅含量分布   | 特征参数                 |
| 江北茶区                                                                                            | 对数正态    | $0.36\pm0.18$        |
| 江南茶区                                                                                            | Gamma分布 | 形状参数=1.85, 尺度参数=0.15 |
| 西南茶区                                                                                            | 正态      | $0.40\pm0.13$        |
| 华南茶区                                                                                            | Gamma分布 | 形状参数=2.44, 尺度参数=0.11 |
| 其他茶区                                                                                            | Gamma分布 | 形状参数=2.17, 尺度参数=0.20 |

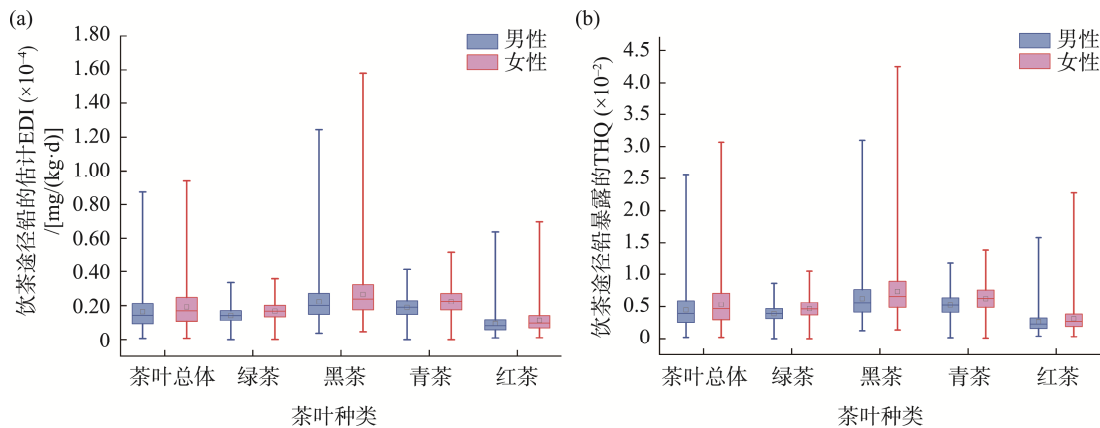


图 3 饮茶途径铅的估计 EDI 和 THQ  
Fig.3 EDI and THQ of lead through tea consumption

据 EDI 进一步计算出饮茶途径铅暴露的 THQ。考虑所有种类茶叶的铅含量分布,成年男性饮茶铅暴露的 THQ 最大值为  $2.56 \times 10^{-2}$ , 平均值为  $4.51 \times 10^{-3}$ ; 成年女性饮茶铅暴露的 THQ 最大值为  $3.07 \times 10^{-2}$ , 平均值  $5.34 \times 10^{-3}$ 。针对单一种类茶叶,最大风险情景是成年女性饮用黑茶,铅暴露的 THQ 为  $4.25 \times 10^{-2}$ 。为了充分考虑最不利因素,本研究的人均每日茶叶消耗量、铅浸出率等参数都取了其在合理范围内的最大值,即使如此,所得出的 THQ 值仍然都远小于 1。由此可见,饮茶途径铅暴露不会对人体健康构成明显风险。

### 3 讨论与结论

陕西省市售茶叶铅检出率为 99.02%, 铅含量范围 0.02~3.05 mg/kg, 平均值为 0.41 mg/kg。所有样品的铅含量均符合国家标准,且绝大部分属于一级产品。黑茶铅含量明显高于其他茶种,铅平均含量为 0.52 mg/kg, 红茶铅平均含量最低,仅为 0.22 mg/kg。在我国的四大茶区中,西南茶区的茶叶中铅含量高于其他茶区。不同种类和产地的茶叶铅含量有显著差异,可能与茶园土壤铅背景值、土壤 pH 和茶叶种类有关。

茶叶中的铅污染有两大来源,一是茶树生长过程中的铅污染,包括土壤和灌溉水中的铅<sup>[34]</sup>、大气中铅的沉降<sup>[35]</sup>、茶园施肥<sup>[36]</sup>和喷洒农药引入的铅<sup>[37]</sup>;二是茶叶加工和运输中的铅污染,例如加工器械、包装材料引入的铅<sup>[38]</sup>。

茶叶中重金属的转移和积累取决于土壤理化性质,茶园土壤中的铅是影响茶叶铅含量的重要因素<sup>[39]</sup>。云南省和四川省的土壤铅背景值都比较高,分别达 40.60 mg/kg 和 30.90 mg/kg<sup>[40]</sup>。这可能是导致西南茶区茶叶铅含量偏高的主要原因。但本研究中发现具有相同土壤铅背景值的地区,茶叶铅含量也有一定差异。例如,陕西汉中市汉台区和商洛市镇安县都属于陕南的著名绿茶产地,气候类型、土壤铅背景值相似<sup>[41]</sup>,此次调查两地的绿茶样品铅含量平均值分别为 0.42 mg/kg、0.17 mg/kg,经 Mann-Whitney 检验,统计结果显示镇安县的绿茶铅含量显著低于汉台区 ( $P < 0.05$ )。汉中的茶园主要位于秦岭南侧低山丘陵地区,土壤多为黄褐土, pH 范围在 4.2~5.6 之间<sup>[42]</sup>;而商洛土壤 pH 则可达 7.51<sup>[43]</sup>。茶园土壤中铅的赋存状态受 pH 影响,在酸性条件下碳酸盐结合态铅容易转变为可交换态铅<sup>[44]</sup>,使铅生物利用系数增加<sup>[45]</sup>。有研究表明,土壤 pH 与茶叶中铅含量呈负相关<sup>[46]</sup>,土壤 pH 时茶树对铅的吸收和积累都有所增加<sup>[47]</sup>。

影响不同茶叶品种中铅含量的因素除生产工艺之外,主要由茶的生长阶段和采摘部位决定。例如,绿茶多采摘的是茶树新梢的一芽一叶、一芽两叶,而黑茶则要求原料粗老,常带较多的枝梗,而茶树枝条的铅含量明显高于叶片<sup>[48]</sup>。黑茶的铅含量通常比其他种类茶叶高。例如,湖南省各种类茶叶铅平均含量为 0.62 mg/kg,而其中黑茶铅含

量达 1.97 mg/kg<sup>[49]</sup>,远高于其他种类茶叶;福建省市售茶叶中黑茶的铅平均含量 0.614 mg/kg,为各种茶叶之首<sup>[50]</sup>;江西省市售 370 份茶叶中黑茶铅平均含量最高,达到 1.06 mg/kg<sup>[51]</sup>。本研究对陕西省市售茶叶抽检,在各种茶叶中黑茶铅含量最高,铅含量均值比绿茶高 29.03%,为这一观点提供了新证据。

成年男性和成年女性饮茶途径铅暴露的最大 THQ 分别为  $2.56 \times 10^{-2}$  和  $3.07 \times 10^{-2}$ ,都远小于 1,表明饮用市售茶叶造成的铅暴露不会产生明显的健康风险,这与之前有关贵州红茶<sup>[52]</sup>、袋装茶<sup>[53]</sup>的研究结果相近。饮茶途径铅暴露造成的健康风险,其不确定性主要与每日茶叶消耗量、茶叶铅的浸出率以及人体基本参数有关。茶叶的浸泡方式影响茶叶中铅的浸出率<sup>[54]</sup>,SUN 等<sup>[55]</sup>研究表明泡茶水质、浸泡次数对茶叶中重金属含量有直接影响。在本研究中对茶叶每日消费量和茶叶铅的浸出率都取了高值,以显示最大化风险。建议今后对这些暴露参数进行细致研究,并分析在长期低浓度铅暴露对机体的影响,将有助于建立更准确的健康风险评估模型,为市售茶叶监管和健康风险控制提供科学依据。

### 参考文献

- [1] 刘春林, 张建, 彭益书, 等. 贵州雷山茶区土壤-茶叶重金属含量特征及饮茶风险评价[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 1049–1059.
- [2] LIU CL, ZHANG J, PENG YS, *et al.* Heavy metal content characteristics of soil-tea and risk assessment of tea drinking in Leishan tea area of Guizhou [J]. Zhejiang Agric J, 2020, 32(6): 1049–1059.
- [3] 国家统计局. 统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [4] National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press House, 2023.
- [5] COLAPINTO CK, ARBUCKLE TE, DUBOIS L, *et al.* Is there a relationship between tea intake and maternal whole blood heavy metal concentrations? [J]. J Exp Sci Environ Epidemiol, 2016, 26(5): 503–509.
- [6] MA X, ZUO H, TIAN M, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques [J]. Chemosphere, 2016, 144: 264–272.
- [7] NAG R, CUMMINS E. Human health risk assessment of lead (Pb) through the environmental-food pathway [J]. Sci Total Environ, 2022(810): 151168.
- [8] ZHANG J, YANG R, CHEN R, *et al.* Accumulation of heavy metals in tea leaves and potential health risk assessment: A case study from Puan County, Guizhou Province, China [J]. Int J Environ Res Pub Health, 2018, 15: 133.
- [9] 陈佳辉, 陈京蓉, 冯萍, 等. 重庆市居民膳食铅暴露概率风险评估[J]. 卫生研究, 2023, 52(4): 611–617.
- [10] CHEN JH, CHEN JR, FENG P, *et al.* Risk assessment of dietary lead exposure probability in Chongqing residents [J]. Health Res, 2023, 52(4): 611–617.
- [11] 何进, 刘琳, 张黎黎, 等. 2016—2021 年贵州省市售食品中铅污染状况及主要膳食中铅暴露的健康风险评价[J]. 现代预防医学, 2023(12):

- 2153–2157.
- HE J, LIU L, ZHANG LL, *et al.* Health risk assessment of lead pollution in commercially available food and lead exposure in main diets in Guizhou Province from 2016 to 2021 [J]. *Mod Prev Med*, 2023(12): 2153–2157.
- [9] YAO Q, HUANG M, ZHENG Y, *et al.* Prediction and health risk assessment of copper, lead, cadmium, chromium, and nickel in Tieguanyin tea: A case study from Fujian, China [J]. *Foods*, 2022, 11(11): 1593.
- [10] 林承奇, 王凤婷, 胡恭任, 等. 安溪铁观音茶园土壤-茶叶重金属健康风险评估[J]. *食品工业*, 2021, 42(5): 492–496.
- LIN CQ, WANG FT, HU GR, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soil-tea of Tieguanyin tea garden in Anxi [J]. *Food Ind*, 2021, 42(5): 492–496.
- [11] 弓秋丽, 杨剑洲, 王振亮, 等. 海南省琼中县土壤—茶树中重金属的迁移特征及饮茶健康风险[J]. *物探与化探*, 2023, 47(3): 826–834.
- GONG QL, YANG JZ, WANG ZL, *et al.* The migration characteristics of heavy metals in soil-tea trees and the health risks of tea drinking in Qiongzong County, Hainan Province [J]. *Geophys Geochem Explor*, 2023, 47(3): 826–834.
- [12] 高日红, 高云霄, 董峰光, 等. 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[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(8): 1174–1182.
- GAO RH, GAO YX, DONG FG, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of soil-tea in the main tea producing areas of Jiaodong in China [J]. *Chin J Food Hyg*, 2023, 35(8): 1174–1182.
- [13] 陈椽. 茶叶分类的理论与实际[J]. *茶业通报*, 1979(Z1): 48–56, 94.
- CHEN C. Theory and practice of tea classification [J]. *Tea Ind Bull*, 1979(Z1): 48–56, 94.
- [14] 陈宗懋. 中国茶经[M]. 上海: 上海文化出版社出版社, 1992.
- CHEN ZM. Chinese Tea Classics [M]. Shanghai: Shanghai Culture Publishing House, 1992.
- [15] 刘萍, 任梁, 周伟杰, 等. 无锡市谷物重金属污染状况及健康风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2024, 36(4): 420–425.
- LIU P, REN L, ZHOU WJ, *et al.* Pollution status and health risk assessment of heavy metals in grains in Wuxi city [J]. *Chin J Food Hyg*, 2024, 36(4): 420–425.
- [16] HU C, ZHANG X, ZHAN N, *et al.* Current status and health risk assessment of heavy metals contamination in tea across China [J]. *Toxics*, 2023, 11(8): 662.
- [17] 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 YX, LI HF, ZHAO L, *et al.* Effects of consumers' daily tea drinking habits on health [J]. *J Agron*, 2017, 7(2): 91–95.
- [18] 王燕云, 林承奇, 黄华斌, 等. 厦门市售蔬菜、茶叶重金属含量及健康风险评估[J]. *食品工业*, 2018, 39(12): 190–195.
- WANG YY, LIN CQ, HUANG HB, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of vegetables and tea sold in Xiamen [J]. *Food Ind*, 2018, 39(12): 190–195.
- [19] 赵馨, 吕冰, 尚晓虹, 等. 不同浸泡条件对绿茶中铅浸出率的影响[J]. *中国食品卫生杂志*, 2014, 26(3): 270–274.
- ZHAO X, LV B, SHANG XH, *et al.* Effects of different soaking conditions on the leaching rate of lead in green tea [J]. *Chin J Food Hyg*, 2014, 26(3): 270–274.
- [20] 杨钦沾, 陈孟君, 温恒, 等. 茶叶中 10 种重金属浸出率[J]. *福建农业学报*, 2015, 30(4): 406–410.
- YANG QZ, CHEN MJ, WEN H, *et al.* Leaching rates of 10 heavy metals in tea [J]. *Fujian J Agric*, 2015, 30(4): 406–410.
- [21] 国家统计局. 国家统计年鉴 2022[R]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- National Bureau of Statistics. National Statistical Yearbook 2022 [R]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2022.
- [22] 中国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection of China. Handbook of population exposure parameters in China (adult volume) [M]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2013.
- [23] 国务院新闻办公室. 中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年)[J]. *营养学报*, 2020, 42(6): 521.
- The State Council Information Office. Report on Nutrition and Chronic Disease Status of Chinese Residents 2020 [J]. *J Nutr*, 2020, 42(6): 521.
- [24] USEPA. Exposure factors handbook (final report) [R]. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 2011.
- [25] 王菲, 费敏, 韩冬锐, 等. 山东省典型污灌区土壤-小麦重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3609–3618.
- WANG F, FEI M, HAN DR, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soil-wheat of typical sewage irrigation areas in Shandong Province [J]. *Environ Sci*, 2023, 44(6): 3609–3618.
- [26] 张志强, 韦亮, 耿丽平, 等. 农田土壤和辣椒/甘薯可食部位镉铅污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 21(8). DOI: 10.13227/j.hjxx.202312242
- ZHANG ZQ, WEI L, GENG LP, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of cadmium, arsenic and lead in farmland soil and edible parts of pepper/sweet potato [J]. *Environ Sci*, 2024, 21(8). DOI: 10.13227/j.hjxx.202312242
- [27] SUN QB, YIN CQ, DENG JF, *et al.* Characteristics of soil-vegetable pollution of heavy metals and health risk assessment in Daye mining area [J]. *Environ Chem*, 2013, 32: 671–677.
- [28] LIU J, LU W, ZHANG N, *et al.* Collaborative assessment and health risk of heavy metals in soils and tea leaves in the southwest region of China [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(19): 10151.
- [29] FAO/WHO. Report of the Fifty-third Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. TRS 896, JECFA 53/81, 1999.
- [30] LI J, HUANG Z, HU Y, *et al.* Potential risk assessment of heavy metals by consuming shellfish collected from Xiamen, China [J]. *Environ Sci Pollut R*, 2013, 20(5): 2937–2947.
- [31] YANG CM, CHEN MY, CHAO PC, *et al.* Investigation of toxic heavy metals content and estimation of potential health risks in Chinese herbal medicine [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 412: 125142.
- [32] 国家卫生健康委员会. 环境与健康横断面调查数据统计分析技术指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
- National Health Commission. Technical guidelines for statistical analysis of environmental and health cross-sectional survey data [M]. Beijing: People's Health Publishing House, 2020.
- [33] CAO H, QIAO L, ZHANG H, *et al.* Exposure and risk assessment for aluminium and heavy metals in Puerh tea [J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408(14): 2777–2784.

- [34] LIU ZY, FEI Y, SHI HD, *et al.* Prediction of high-risk areas of soil heavy metal pollution with multiple factors on a large scale in industrial agglomeration areas [J]. *Sci Total Environ*, 2022, 808. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151874
- [35] JIN CW, ZHENG SJ, HE YF, *et al.* Lead contamination in tea garden soils and factors affecting its bioavailability [J]. *Chemosphere*, 2005, 59(8): 1151–1159.
- [36] 伊晓云, 方丽, 杨向德, 等. 我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4613–4621.  
YI XY, FANG L, YANG XD, *et al.* Status of heavy metal content in organic fertilizer in main tea producing areas of China [J]. *Environ Sci*, 2022, 43(10): 4613–4621.
- [37] 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 CL, ZENG XD, LIU HF, *et al.* Status of soil environmental quality and distribution and migration of heavy metal elements in Yantai [J]. *Geol China*, 2015, 42(1): 317–330.
- [38] ABD AA, CHOI JH, RAHMAN MM, *et al.* Residues and contaminants in tea and tea infusions: A review [J]. *Food Addit Contam A*, 2014, 31(11): 1794–1804.
- [39] QU SY, WU WH, WERNER N, *et al.* The behavior of metals/metalloids during natural weathering: A systematic study of the mono-lithological watersheds in the upper Pearl River Basin, China [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 708: 134572.
- [40] 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.  
China Environmental Monitoring Station. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [41] XU RK, COVENTRY DR. Soil acidification as influenced by some agricultural practices [J]. *Agro-Environ Prot*, 2002, 21(5): 385–388.
- [42] 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 ZP, FU J, YUE SY, *et al.* Analysis of tea quality and evaluation of heavy metal content in tea gardens in southern Shaanxi [J]. *J Agric Eng*, 2020, 36(16): 201–211.
- [43] 王洪, 曹婧, 毋俊华, 等. 近 40 年来陕西省耕层土壤 pH 的时空变化特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(6): 1117–1126.  
WANG H, CAO J, WU JH, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of topsoil pH in Shaanxi Province in recent 40 years [J]. *J Ecol Agric*, 2021, 29(6): 1117–1126.
- [44] ZHANG J, YANG R, LI YC, *et al.* Distribution accumulation, and potential risks of heavy metals in soil and tea leaves from geologically different plantations [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 195: 110475.
- [45] GOOD SR, HARRIS AR, CROUCH P, *et al.* Lead bioaccessibility and commonly measured soil characteristics in Detroit, Michigan [J]. *Appl Geochem*, 2024, 166: 105978.
- [46] 黄莹, 景金泉, 肖旭, 等. 南京市茶园土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *广东农业科学*, 2017, 44(10): 46–51.  
HUANG Y, JING JQ, XIAO X, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in tea garden soil in Nanjing [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2017, 44(10): 46–51.
- [47] YE J, ZHANG Q, LIU G, *et al.* Relationship of soil pH value and soil Pb bio-availability and Pb enrichment in tea leaves [J]. *J Sci Food Agric*, 2022, 102(3): 1137–1145.
- [48] 韩文炎, 杨亚军, 梁月荣, 等. 茶树体内铅的吸收累积特性研究[J]. *茶叶科学*, 2009, 29(3): 200–206.  
HAN WY, YANG YJ, LIANG YR, *et al.* Absorption and accumulation characteristics of lead in tea plant [J]. *Tea Sci*, 2009, 29(3): 200–206.
- [49] 张楠, 杨兆光, 李海普, 等. 湖南省不同种类茶叶重金属含量调查及其污染评价[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(7): 1436–1439.  
ZHANG N, YANG ZG, LI HP, *et al.* Investigation and pollution evaluation of heavy metal content in different types of tea in Hunan Province [J]. *Zhejiang Agric Sci*, 2020, 61(7): 1436–1439.
- [50] 姚奋增, 高海荣, 刘晨, 等. 茶叶中铝、铅、砷、汞、铬、镉含量的分析及危害评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(1): 291–297.  
YAO FZ, GAO HR, LIU C, *et al.* Analysis and hazard assessment of aluminum, lead, arsenic, mercury, chromium and cadmium in tea [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(1): 291–297.
- [51] 王艳敏, 周鸿, 熊丽, 等. 2014—2016 年江西省茶叶中重金属污染状况调查分析[J]. *实验与检验医学*, 2020, 38(5): 1004–1007.  
WANG MY, ZHOU H, XIONG L, *et al.* Investigation and analysis of heavy metal pollution in tea in Jiangxi Province from 2014 to 2016 [J]. *Exp Lab Med*, 2020, 38(5): 1004–1007.
- [52] 张明露, 黄聪薇, 赖飞. 贵州红茶中 14 种微量元素含量分析及健康风险评估[J]. *贵州农业科学*, 2023, 51(5): 117–124.  
ZANG ML, HUANG CW, LAI F. Content analysis and health risk assessment of 14 trace elements in Guizhou black tea [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2023, 51(5): 117–124.
- [53] 吴梅, 陈祝军, 陈蓉, 等. 茶叶、袋装茶以及茶粉中 15 种金属及类金属含量及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(16): 98–106.  
WU M, CHEN ZJ, CHEN R, *et al.* Contents and health risk assessment of 15 metals and metalloids in tea, bagged tea and tea powder [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(16): 98–106.
- [54] 李杨, 卢钰荣, 何希梅, 等. 浸泡方式对茶叶中铜、铅、镉浸出率的影响[J]. *饮料工业*, 2018, 21(3): 2–6.  
LI Y, LU YR, HE XM, *et al.* Effects of soaking methods on leaching rates of copper, lead and cadmium in tea [J]. *Beverage Ind*, 2018, 21(3): 2–6.
- [55] SUN JW, HU G, LIU KK, *et al.* Potential exposure to metals and health risks of metal intake from Tieguanyin tea production in Anxi, China [J]. *Environ Geochem Health*, 2019, 41: 1291–1302.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

## 作者简介



牟 霄, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全风险监测。

E-mail: mouxiao0819@163.com



张崇森, 博士, 教授, 主要研究方向为新污染物风险评估与控制。

E-mail: cmzhang@xauat.edu.cn