

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241202001

引用格式: 周立强, 付贤杰, 刘贵荣, 等. 赤水虫茶中 8 种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, 2025, 16(10): 105–111.

ZHOU LQ, FU XJ, LIU GR, *et al.* Concentration characteristics and health risk assessment of 8 kinds of heavy metals in Chishui insect tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 105–111. (in Chinese with English abstract).

赤水虫茶中 8 种重金属含量特征及 健康风险评估

周立强, 付贤杰, 刘贵荣*, 刘文政*

(贵州省疾病预防控制中心, 贵阳 550004)

摘要: **目的** 探究贵州省赤水市所产虫茶中 8 种重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb)的含量水平并评估其潜在的饮用健康风险。**方法** 将采自赤水市的 88 份虫茶样品用 80 °C 的超纯水浸泡 40 min, 取上清液摇匀过滤, 采用电感耦合等离子体质谱仪进行测定。利用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对重金属的污染程度进行评价, 利用预估每日摄入量(modeling daily intake, EDI)、目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)和目标致癌风险模型(target carcinogenic risk, TCR)进行膳食健康风险评估。**结果** 虫茶样品中 8 种重金属的平均含量分别为 1.558、3.344、3.366、27.020、1.774、0.858、0.011、1.385 mg/kg。重金属的污染程度评价结果显示, 本批次虫茶的单因子污染指数值(P_i)和内梅罗综合污染指数值(P_n)均小于 1.0, 污染等级为清洁、安全。EDI 值的顺序为 $Zn > Cu > Ni > As > Cr > Pb > Cd > Hg$, 且都低于其相应的 R_{FD} 值。THQ 值排名依次为 $1 > As > Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > Hg$, 风险均较低。对 Cr、Ni、As、Cd、Hg、Pb 的 TCR 值进行评估, 其值均在可接受范围以下。**结论** 贵州省赤水市所产虫茶样本的重金属污染程度尚轻, 对消费者的膳食健康风险和致癌风险均较低。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 虫茶; 重金属; 健康风险评估

Concentration characteristics and health risk assessment of 8 kinds of heavy metals in Chishui insect tea

ZHOU Li-Qiang, FU Xian-Jie, LIU Gui-Rong*, LIU Wen-Zheng*

(Guizhou Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guiyang 550004, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the levels of 8 kinds of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb) in insect tea produced in Chishui City, Guizhou Province, and assess their potential health risks. **Methods** The 88 insect tea samples from Chishui City were soaked in ultrapure water at 80 °C for 40 min, and the supernatant was

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 贵州省卫生健康委科学技术基金资助项目(gzwbkj2022-208)

第一作者: 周立强(1996—), 男, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 1395134848@qq.com

*通信作者: 刘贵荣(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 1174651802@qq.com

刘文政(1988—), 男, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: lwzjyq1988@163.com

shaken and filtered, and then determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. The pollution degree of heavy metals was evaluated by using the single-factor pollution index and Nemero's comprehensive pollution index, and the estimated daily intake (EDI), target hazard quotient (THQ) and target carcinogenic risk (TCR) were used for dietary health risk assessment. **Results** The average content of 8 kinds of heavy metals in the insect tea samples were 1.558, 3.344, 3.366, 27.020, 1.774, 0.858, 0.011 and 1.385 mg/kg, respectively. The evaluation of the contamination degree of the heavy metals showed that the P_i and the P_n value of those samples were less than 1.0, and the contamination level was clean and safe. The EDI values were ranked in the order of $Zn > Cu = Ni > As > Cr > Pb > Cd > Hg$, and all of them were lower than their corresponding R_{FD} values. THQ values ranked in the order of $1 > As > Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > Hg$, and the risks were all low. The TCR values for Cr, Ni, As, Cd, Hg and Pb were evaluated, and their values were all below the acceptable range. **Conclusion** The samples of insect tea produced in Chishui City, Guizhou Province, shows a low level of heavy metal contamination, and the dietary health risk and carcinogenic risk to consumers are low.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; insect tea; heavy metals; health risk assessment

0 引言

虫茶又称“茶精”“虫酿茶”“虫屎茶”“虫粪茶”等,是由特种昆虫食用特定植物后经体内消化酶或消化微生物发酵后所产生的粪便加工而成的茶叶代用品^[1-3],其含有人体必需的氨基酸、脂肪酸、蛋白质、多酚等多种活性成分^[4],具有健脾胃^[5]、降血糖^[6]、降血压^[7]、降血脂^[8]、抗肿瘤^[9]等功效,是一种集保健、营养、食疗、药用于一体的保健食品资源。

近年来,虫茶因其独特的品质特征和药用保健功效而逐渐引起人们的关注,从 20 世纪 90 年代中期开始,有关虫茶的研究文献不断增多,尤其是对虫茶的生物活性、疾病预防和治疗等方面的研究^[5-9]。随着城市工业的发展,人类生活环境已经受到不同程度的污染和破坏,其中重金属污染就是严重威胁人类健康的一大因素。由于虫茶主要产自我国西南地区,而西南地区土壤重金属污染问题突出^[10-14],因此,开展虫茶中重金属的含量分析及膳食风险评估,对安全饮用虫茶具有重要的现实意义。

贵州赤水是我国虫茶的主产地之一,赤水虫茶为茶中极品,历史悠久,市场罕见,价格昂贵,仅产于赤水市四洞沟附近,省内其他地区仅零星生产。因此,本研究以赤水虫茶为研究对象,采用电感耦合等离子体质谱法同时测定虫茶样品中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 8 种重金属的含量,并对其进行污染水平和饮用健康风险评估。本研究详细呈现出所测 8 种重金属各自平均含量的具体数值,以及在不同评价方法下各项指标的排序情况、具体数值范围和对应的风险等级判定,对贵州省赤水市虫茶重金属相关风险有较为细致、全面的量化呈现与解读,为后续该地区虫茶产业发展以及消费者认知等方面提供了更具参考价值的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

iCAP-Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); Ethos A 微波消解系统(意大利 Milestone 公司); Milli-Q integral 超纯水处理系统(美国 Millipore 公司); AL204 万分之一分析天平(瑞士 METTLER TOLEDO 公司)。

Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb、Sc、In、Ge 单元素标准物质溶液(质量浓度 1000 $\mu\text{g/mL}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸、过氧化氢(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 水相针式过滤器(0.22 μm , 上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.2 样品采集

经过前期深入调研,选取赤水市 11 家在规模、生产工艺、产量和市场份额等方面均具有一定的代表性的虫茶生产商,确保能够较为全面地反映赤水市虫茶生产的整体状况。针对每家生产商随机采集 8 份虫茶样品,共采集到 88 份,每份重量严格控制在 50 g 左右。将虫茶样品装入洁净的玻璃瓶内,存放于阴凉干燥、通风良好且无异味的环境中,温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$ 以下,相对湿度保持在 40%~60% 之间,以最大程度减少环境因素对样品中重金属含量的影响,确保样品在待测期间保持原始状态,为后续实验分析的准确性提供有力保障。

1.3 样品分析

参考刘文政等^[15]对绿茶中重金属浸出规律进行样品前处理。分别称取 1.00 g 不同生产商的虫茶样品于一系列 250 mL 烧杯内,加 100 mL 80 $^{\circ}\text{C}$ 的超纯水,浸泡 40 min,取上清液摇匀、过滤,上机测定。

1.4 质量控制

在测定过程中, 为了保证质量控制, 采用试剂空白、平行双样、加标回收以及标准物质测定的方法进行控制, 具体操作及要求如下:

试剂空白: 8 种重金属的含量均须远低于混合标准系列曲线的最低浓度点。

平行双样: 每 5 个样品设置一个平行样, 要求平行双样测定结果的相对偏差不得超过 5%。

加标回收: 随机抽取一份虫茶样品, 分别向其茶汤中加入低、中、高 3 个不同浓度水平的混合标准溶液, 要求加标回收率范围为 80%~120%。

标准物质测定: 测定结果须在标准证书规定的范围内。

1.5 重金属污染评价

1.5.1 单因子污染指数法

单一重金属元素的污染程度采用单因子污染指数法^[16]进行评价, 其计算如公式(1):

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为重金属元素 i 的单项污染指数; C_i 为重金属元素 i 的实际测量值, mg/kg; S_i 为污染物 i 的评价标准值, mg/kg。当 $P_i \leq 1$ 时, 表明研究对象未受到重金属污染; 若 $P_i > 1$ 时, 表明研究对象已受到重金属污染, 且污染程度与 P_i 呈正相关。Pb 的限量标准按照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》, 为 5 mg/kg; Cr、Cd、Hg、As 的限量标准按照 NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》, 分别为 5.0、1.0、0.3、2.0 mg/kg; Cu 的限量标准按照 NYT 288—2018《绿色食品 茶叶》, 为 30 mg/kg。

1.5.2 内梅罗法综合污染指数法

利用内梅罗综合污染指数法^[16]对虫茶中重金属元素污染程度进行综合评价, 计算如公式(2):

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P_n 为内梅罗综合污染指数; P_{ave} 为重金属元素单项污染指数的平均值; P_{max} 为重金属元素单项污染指数的最大值; 评价标准分为 5 个等级(见表 1)。

表 1 金属污染物分级标准 Table 1 Grading standards for metal pollutants				
分级	单项污染		综合污染	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
1	$P_i \leq 0.7$	优良	$P_n \leq 0.7$	安全
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	清洁	$0.7 < P_n \leq 1.0$	警戒线
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	$1.0 < P_n \leq 2.0$	轻度污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	$2.0 < P_n \leq 3.0$	中度污染
5	$P_i > 3.0$	重度污染	$P > 3.0$	重度污染

1.6 膳食健康风险评价模型

1.6.1 预估每日摄入量

预估每日摄入量(modeling daily intake, EDI)是通过假定每人每天平均摄入量来计算所有的风险限值和因素。本研究中具有致癌风险的重金属元素有 Cr、As、Cd、Hg、Pb, 其每日摄入量的计算方法如公式(3):

$$EDI = \frac{C \times IR}{BW} \quad (3)$$

式中: C 为重金属元素的测量值, mg/kg; IR 为虫茶平均日摄入量, 参照茶叶的平均日摄入量, 为 8 g/(人·d)^[18-19]; BW 为平均体重, kg, 中国成人平均体重为 64.3 kg^[20]。

1.6.2 目标危害系数

使用目标危害系数(target hazard quotient, THQ)法对虫茶中的单一重金属进行健康风险评估, 其计算如公式(4):

$$THQ = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: E_F 为暴露频率, 365 day/year; E_D 为暴露时间, 70 year; F_{IR} 为虫茶的日均摄入量, 8 g/day; C 为虫茶中重金属的含量, mg/kg; R_{FD} 为每天每千克体重对应的非致癌口服参考剂量(见表 2), mg/(kg·day)^[21-22]; W_{AB} 为平均体重, 64.3 kg; T_A 为非致癌平均暴露时间($E_F \times E_D$), 25550 day。

当 $THQ < 1$ 时, 表示暴露量未超过不良反应阈值, 风险较低; 当 $THQ \geq 1$ 时, 表明暴露人群很可能面临健康风险。

表 2 各种元素经口摄入相关参数
Table 2 Parameters related to oral intake of various elements

参数	元素类别	参数取值
R_{FD} [mg/(kg·day)]	Cr	0.0030
	Ni	0.0054
	Cu	0.0050
	Zn	0.3000
	As	0.0003
	Cd	0.0005
	Hg	0.0050
	Pb	0.0014

1.6.3 目标致癌风险

目标致癌风险(target carcinogenic risk, TCR), 用于评估终身接触致癌物的潜在风险。该公式利用经口斜率因子而不是经口参考剂量来计算暴露个体的估计终生癌症风险, 其计算如公式(5):

$$TCR = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C \times OSF}{W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: E_F 为暴露频率: 365 day/year; E_D 为暴露时间: 70 year; F_{IR} 为虫茶的每日摄入量: 8 g/day; C 为虫茶中重金属元素的浓度, mg/kg; OSF 为经口斜率因子: Cr, 0.5 mg/(kg·day); Ni, 0.91 mg/(kg·day); As, 1.5 mg/(kg·day); Cd, 0.38 mg/(kg·day);

Hg, 1.0 mg/(kg · day); Pb, 0.0085 mg/(kg · day)^[23-24]; W_{AB} 为平均体重: 成人 64.3 kg; T_A 为非致癌平均暴露时间: 25550 day。风险类别: $TCR < 1 \times 10^{-6}$ 为非显著风险; $1 \times 10^{-6} < TCR < 1 \times 10^{-4}$ 为低或可接受风险, $1 \times 10^{-4} < TCR < 1 \times 10^{-1}$ 为高风险。

1.7 数据处理

用 SPSS 27.0 进行统计分析, 每份样品平行测定 3 次, Microsoft Excel 2021.3.61.40 完成表格及图片的制作。

2 结果与分析

2.1 虫茶浸出液中重金属的含量水平

将虫茶用 80 °C 的开水浸泡 40 min 后, 所得茶汤中 8 种重金属金属的含量水平如表 3 所示。由表 3 可知, 含量最高的金属是 Zn, 为 27.020 mg/kg, Hg 含量最低, 为 0.011 mg/kg, 结果由大到小分别是 Cu、Ni、As、Cr、Pb、Cd, 这与吴梅等^[25]报道的结果相似。由于虫茶不同于常规茶叶, 其颗粒较细, 与水接触更完全, 因此溶出量更高。根据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》、NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》、NYT 288—2018《绿色食品 茶叶》可知, 本批次虫茶存在一定程度的 Cr、Cu、As、Cd、Hg、Pb 污染, 究其原因可能是受产茶原料植物重金属污染的影响, 因此有必要进行重金属污染程度评价, 同时进行健康风险评估。

表 3 虫茶茶汤中 8 种重金属的含量

Table 3 Content of 8 kinds of heavy metals in tea soups of insect tea

金属	含量/(mg/kg)	金属	含量/(mg/kg)
Cr	1.558±0.306	As	1.774±0.087
Ni	3.344±0.319	Cd	0.858±0.235
Cu	3.366±0.526	Hg	0.011±0.002
Zn	27.020±4.93	Pb	1.385±0.178

2.2 质量控制结果

样品平行测定的相对偏差均小于 5%, 试剂空白中 8 种金属的含量均远低于混合标准系列曲线的最低浓度点

(1 µg/L), 符合对应的质量控制要求。随机抽取一份虫茶样品, 对其茶汤进行低浓度(Hg: 0.10 mg/kg, 其他 7 种元素: 0.80 mg/kg)、中浓度(Hg: 0.20 mg/kg, 其他 7 种元素: 1.60 mg/kg)、高浓度(Hg: 0.50 mg/kg, 其他 7 种元素: 4.00 mg/kg) 3 个浓度水平的加标回收实验, 样品加标回收率及其相对标准偏差的结果如表 4 所示。由表 4 可知, 实际样品中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 8 种金属的本底值分别为 1.159、3.477、3.598、27.097、0.142、0.448、1.060、0.010 mg/kg, 加标回收率为 85.5%~101.6%, 满足样品加标回收率应在 80.0%~120%范围的相应要求。同时对绿茶标准物质(GBW 10052a)进行 8 种金属的测定, 测定值与证书值的相对标准偏差为 3.0%~7.2%, 符合对应的质量控制要求, 结果如表 5 所示。

2.3 重金属污染程度评价结果

由于现有标准中只规定了 Cr、Cu、As、Cd、Hg、Pb 的限值, 故根据所测定的结果, 对本批次虫茶茶汤中 Cr、Cu、As、Cd、Hg、Pb 的含量进行重金属污染程度评价(见图 1)。由图 1 可知, 各金属的 P_i 均小于 1, 为清洁等级, 说明本批次虫茶样品中单一重金属的污染程度比较轻。As、Cd 的数值最高, 分别为 0.89 和 0.86, 是主要风险因素, 其次是 Cr、Pb、Cu、Hg。 P_n 为 0.69, 为安全等级, 说明虫茶的重金属综合污染程度尚不严重。

2.4 健康风险评估结果

2.4.1 预估每日摄入量评估结果

根据虫茶茶汤中 8 种重金属的估计日摄入量估算人体接触量, 如图 2 结果表明, 随着虫茶的消费量上升, 人类接触这些污染物的量也随之增大。根据美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的 R_{FD} 进行比较, 当人体平均日摄入量超出 R_{FD} 值时, 则表明该污染物可引起人体的健康风险, 而健康风险指数越大则表明该污染物对人体健康风险越大。由图 2 可知, 8 种金属元素的 EDI 顺序为 $Hg < Cd < Pb < Cr < As < Ni = Cu < Zn$, 且都明显低于其相应的 R_{FD} 值, 表明饮用健康风险并不显著。

表 4 虫茶茶汤的加标回收率

Table 4 Spike recovery of tea soups of insect tea

元素	本底 /(mg/kg)	加标 1 /(mg/kg)	结果 1 /(mg/kg)	回收率 /%	加标 2 /(mg/kg)	结果 2 /(mg/kg)	回收率 /%	加标 3 /(mg/kg)	结果 3 /(mg/kg)	回收率 /%
Cr	1.159	0.8	1.871	89.0	1.6	2.660	93.8	4	5.077	97.9
Ni	3.477		4.191	89.3		4.878	87.6		7.270	94.8
Cu	3.598		4.282	85.5		5.069	91.9		7.344	93.7
Zn	27.097		27.829	91.5		28.594	93.6		30.876	94.5
As	0.142		0.885	92.9		1.760	101.1		3.964	95.6
Cd	0.448	0.1	1.193	93.1	0.2	2.054	100.4	0.5	4.417	99.2
Pb	1.060		1.771	88.9		2.670	100.6		5.124	101.6
Hg	0.010		0.0996	89.6		0.209	99.5		0.514	100.8

表 5 绿茶标准物质(GBW 10052a)的测定结果及相对标准偏差
Table 5 Determination results and relative standard deviations of green tea standard substance (GBW 10052a)

元素	证书指示值 /(mg/kg)	测定值 /(mg/kg)	相对标准 偏差/%
As	0.1600±0.0200	0.165±0.008	5.0
Cd	0.2000±0.0200	0.196±0.007	3.7
Cr	0.6000±0.1000	0.632±0.029	4.6
Cu	13.2000±0.9000	13.270±0.490	3.7
Hg	0.0073±0.0007	0.008±0.001	7.2
Ni	4.4000±0.3000	4.470±0.130	3.0
Pb	1.6000±0.2000	1.660±0.070	4.3
Zn	26.0000±3.0000	26.500±1.400	5.2

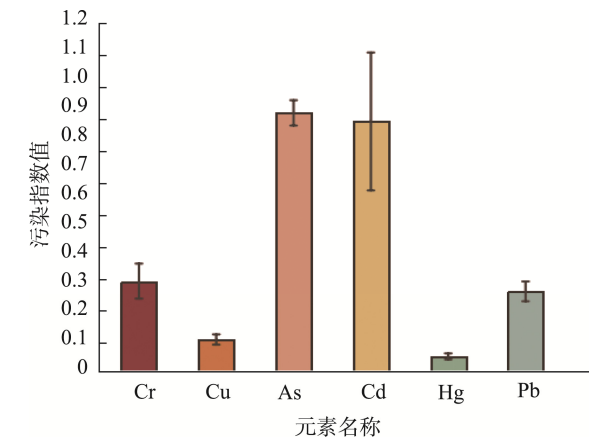


图 1 虫茶茶汤中重金属的单因子污染指数
Fig.1 single factor pollution index of metal pollutants in tea soups of insect tea

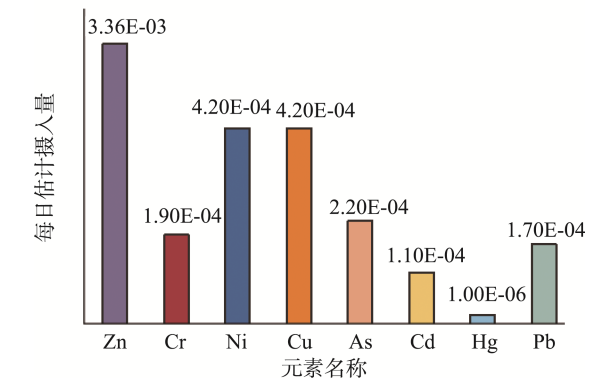


图 2 虫茶茶汤中 8 种重金属的 EDI 值
Fig.2 EDI values of 8 kinds of heavy metals in tea soups of insect tea

2.4.2 目标危害系数评估结果

对本批次虫茶茶汤中的重金属进行 THQ 评估, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 8 种重金属的单一健康风险指数的大小顺序为 $1>As>Cd>Pb>Cu=Ni>Cr>Zn>Hg$, 表明人体

摄入虫茶无明显的健康风险。对复合健康风险贡献最高的几种金属元素分别是 As、Cd、Pb, 是主要风险因素, 但风险均较低。总体而言, 虫茶的膳食健康风险较低, 处于安全水平。

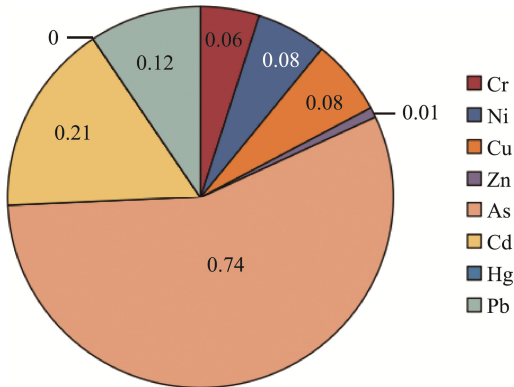


图 3 虫茶茶汤中 8 种重金属的 THQ 值
Fig.3 THQ values of 8 kinds of heavy metals in tea soups of insect tea

2.4.3 目标致癌风险评估结果

对 Cr、Ni、As、Cd、Hg、Pb 进行 TCR 评估, 结果如图 4。根据图 4 中结果可知, Ni、As 的 TCR 值较其他 4 种金属高, 分别为 3.78×10^{-4} 、 3.30×10^{-4} , Hg 的 TCR 值最低, 为 1.37×10^{-6} 。但值得注意的是, 6 种重金属的 TCR 值均在可接受范围内, 无高风险值, 因此, 本批次虫茶的 TCR 评估结果较为满意。

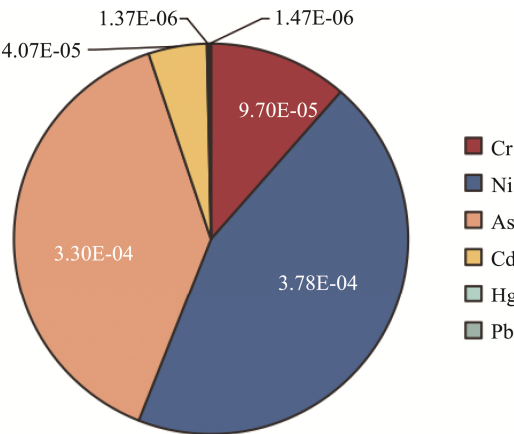


图 4 虫茶中 Cr、Ni、As、Cd、Hg、Pb 的 TCR 值
Fig.4 TCR values of Cr、Ni、As、Cd、Hg、Pb in tea soups of insect tea

3 结 论

本研究采用电感耦合等离子体质谱法分析了赤水市 88 份虫茶样品茶汤中的 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 8 种重金属元素的含量, 结果显示, 本批次虫茶存在一

定程度的重金属污染。经单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对重金属的污染程度进行评价,再利用 EDI、THQ 和 TCR 模型进行健康风险评估,结果表明其重金属污染程度尚轻,摄入后对消费者造成的健康风险并不显著。

由于虫茶是特种昆虫幼虫啃食特种植物嫩叶并经体内特殊代谢排出的粪粒而制成,属昆虫特殊排泄物,因此其重金属污染来源较普通茶叶复杂^[26]。近年来,农药化肥、工业废水及汽车尾气等的排放造成环境、肥料和土壤的污染,使茶叶受到污染的概率上升,同样茶制品受到污染的可能性也相应增加^[27]。其中重金属污染持久性强,不可生物降解,隐蔽性强^[28]。而茶树是嗜酸性植物,具有富集金属的能力,从空气、灌溉水和土壤中吸收金属元素蓄积在叶片中,昆虫啃食受污染的茶叶后,所产的虫茶中金属的含量将会大大增加^[29-32]。在后续的虫茶制作工艺中,也会引入相应的金属污染,因此虫茶重金属累积规律、污染程度、检测项目及其限量标准等问题亟待解决。

参考文献

- [1] XU LJ, PAN HM, LEI QF, *et al.* Insect tea, a wonderful work in the Chinese tea culture [J]. Food Research International, 2013, 53(2): 639-635.
- [2] 包威, 万书霞. 虫屎茶和猫屎咖啡的文化内涵与融合[J]. 农业考古, 2016(5): 216-217.
BAO W, WAN SX. Cultural connotations and fusion of insect tea and cat poop coffee [J]. Agricultural Archaeology, 2016(5): 216-217.
- [3] 尚小丽, 杨茂发, 张昌容, 等. 温度对产虫茶昆虫紫斑谷螟生长发育的影响[J]. 昆虫学报, 2013, 56(6): 671-679.
SHANG XL, YANG MF, ZHANG CR, *et al.* Effects of temperature on the growth and development of *Pyrallis farinalis* (Lepidoptera yralidae), one insect used for producing insect tea in China [J]. Acta Entomologica Sinica, 2013, 56(6): 671-679.
- [4] 胡恩明, 王道平. 紫斑谷螟豹皮樟虫茶的化学成分分析[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2022(3): 18-22.
HU ENM, WANG DP. Analysis of the chemical composition of *Pyrallis farinalis* Linnaeus insect tea [J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2022(3): 18-22.
- [5] ZHU K, ZENG XF, TAN F, *et al.* Effect of insect tea on D-galactose induced oxidation in mice and its mechanism [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(12): 4105-4115.
- [6] 文礼章. 华中昆虫研究. 第 6 卷[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
WEN LZ. Studies on insects in central China. Volume 6 [M]. Changsha: Zhongnan University Press, 2010.
- [7] 肖娟, 彭艳梅, 蔡萍, 等. 虫茶联合缬沙坦治疗原发性高血压临床观察[J]. 湖南中医药大学学报, 2017, 37(4): 413-415.
XIAO J, PENG YM, CAI P, *et al.* Clinical observation on insect tea combined with valsartan in the treatment of essential hypertension [J]. Journal of Hunan University of Chinese Medicine, 2017, 37(4): 413-415.
- [8] 袁冬寅, 陈家献, 张芬, 等. 虫茶的研究现状及发展前景[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 198-204.
- [9] YUAN DY, CHEN JX, ZHANG F, *et al.* Current research status and development prospects of insect tea [J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 198-204.
- [9] 曾昭华, 杨茂发, 杨再华. MTT 法检测灰直纹螟-青钱柳虫茶对肿瘤细胞体外增殖抑制作用[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(2): 14-19.
ZENG SH, YANG MF, YANG ZH. MTT assay for the inhibition of tumor cell proliferation in vitro by insect tea from *Orthopygia glaucinalis*-*Cyclocarya paliurus* [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2018, 37(2): 14-19.
- [10] CHEN L, ZHOU SL, SHI YX, *et al.* Heavy metals in food crops, soil, and water in the Lihe River watershed of the Taihu region and their potential health risks when ingested [J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 141-149.
- [11] DENG X, YANG Y, ZENG HY, *et al.* Variations in iron plaque, root morphology and metal bioavailability response to seedling establishment methods and their impacts on Cd and Pb accumulation and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 121343.
- [12] ZHU L, LIU JW, XU SG, *et al.* Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of Northeast China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 142: 454-463.
- [13] 李武江, 朱四喜, 王众, 等. 西南山地煤矿区耕地土壤-农作物重金属富集及健康风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(5): 22-30.
LI WJ, ZHU SX, WANG Z, *et al.* Evaluation of heavy metal enrichment and health risk of arable soils-crops in the coal mining area of southwestern mountains [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(5): 22-30.
- [14] 刘文政, 贾亚琪, 殷忠. 贵阳污灌区菜地土壤团聚体中有机碳和重金属的含量特征及相关性分析[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(5): 36-43.
LIU WZ, JIA YQ, YIN Z. Characterization and correlation analysis of organic carbon and heavy metals in soil aggregates of vegetable land in Guiyang sewage irrigation area [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(5): 36-43.
- [15] 刘文政, 贾亚琪, 李海畅, 等. 黔产市售绿茶中重金属的含量检测及浸出规律[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 365-372.
LIU WZ, JIA YQ, LI HC, *et al.* Detection and leaching rule of heavy metals in green tea sold in Guizhou Province [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 365-372.
- [16] 王浩, 叶丽丽, 陈永山, 等. 广西典型铝矿区复垦地蔬菜中重金属含量特征及健康风险评价[J]. 西南农业学报, 2020, 33(11): 2655-2661.
WANG H, YE LL, CHEN YS, *et al.* Characteristics of heavy metal content in vegetables in reclaimed land of typical aluminum mining area in Guangxi and evaluation of health risk [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(11): 2655-2661.
- [17] USEPA. Risk-based concentration table. Philadelphia PA [R]. Washington: Washington D.C. United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [18] CAO H, QIAO L, ZHANG H, *et al.* Exposure and risk assessment for aluminium and heavy metals in Puer tea [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(14): 2777-2784.

- [19] LI L, FU QL, ACHAL V, *et al.* A comparison of the potential health risk of aluminum and heavy metals in tea leaves and tea infusion of commercially available green tea in Jiangxi, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(5): 1–12.
- [20] FU QL, LIU Y, LI L, *et al.* A survey on the heavy metal contents in Chinese traditional egg products and their potential health risk assessment [J]. *Food Additives & Contaminants Part B-surveillance*, 2014, 7(2): 99–105.
- [21] 王海鹤, 孙媛媛, 张帅, 等. 贵阳市集中式饮用水源地重金属污染特征及健康风险评估[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(10): 2039–2047.
- WANG HH, SUN YY, ZHANG S, *et al.* Characterization of heavy metal pollution in centralized drinking water sources in Guiyang City and evaluation of health risk [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(10): 2039–2047.
- [22] LE TT, KIM KW, NGUYEN DQ, *et al.* Trace element contamination in rice and its potential health risks to consumers in North-Central Vietnam [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(6), 3361–3375.
- [23] 黄先亮, 赵博, 吴彦蕾, 等. 广西八角中铅、镉、铬含量分析及膳食风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(1): 128–133.
- HUANG XL, ZHAO B, WU YL, *et al.* Analysis of lead, cadmium and chromium and dietary risk assessment of *Illicium verum* in Guangxi [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(1): 128–133.
- [24] BHARDWAJ R, ORISAKWE OE, KASOZI KI, *et al.* Descriptive analysis of heavy metals content of beef from eastern Uganda and their safety for public consumption [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 592340.
- [25] 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.* Content and health risk assessment of 15 metals and metal-like substances in tea, teabags and tea powder [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(16): 98–106.
- [26] 杨琰琰, 陈潇涵, 张晓晴, 等. 基于 Meta 分析的 2000—2022 年中国茶园土壤重金属污染风险评价与来源分析[J]. *茶叶科学*, 2024, 44(1): 37–52.
- YANG YH, CHEN XH, ZHANG XQ, *et al.* Risk evaluation and source analysis of heavy metal pollution in chinese tea plantation soil based on Meta-analysis, 2000—2022 [J]. *Journal of Tea Science*, 2024, 44(1): 37–52.
- [27] 陈元生, 于海萍, 罗致迪, 等. 江西不同林分油茶林病虫害种类调查及发生差异分析[J]. *西部林业科学*, 2024, 53(5): 100–107, 115.
- CHEN YS, YU HP, LUO ZD, *et al.* Investigation and analysis of differences in the types of pests and diseases in different stands of *Camellia oleifera* forests in Jiangxi Province [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2024, 53(5): 100–107, 115.
- [28] 孙旭东, 刘俊彬. 茶叶夹杂昆虫异物 THz 光谱检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(9): 2723–2728.
- SUN XD, LIU JB. A study on THz spectroscopic detection of tea inclusions of insect foreign matter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(9): 2723–2728.
- [29] 袁冬寅, 陈家献, 张芬, 等. 虫茶的研究现状及发展前景[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(9): 198–204.
- YUAN DY, CHEN JX, ZHANG F, *et al.* Current research status and development prospects of insect tea [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(9): 198–204.
- [30] WANG KJ, WU KF, LI N, *et al.* Insect tea originated from ethnic minority regions in Southwest China: A review on the types, traditional uses, nutrients, chemistry and pharmacological activities [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 309: 116340.
- [31] XU L, PAN H, LEI Q, *et al.* Insect tea, a wonderful work in the Chinese tea culture [J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 629–635.
- [32] YANG LC, YI Y. Biological safety evaluation of white insect tea in Guizhou [J]. *Plant Diseases and Pests*, 2010, 1(2): 5755–5762.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)