DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260205001
引用格式: 龚立科, 任韧, 严俊, 等. 2022—2025 年杭州市售咖啡中重金属污染及暴露风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 310–316.
Gong Like, Ren Ren, Yan Jun, et al. Analysis of heavy metal contamination and exposure risk in commercially available coffee from 2022 to 2025 in Hangzhou [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 310–316. (in Chinese with English abstract).

2022—2025 年杭州市售咖啡中重金属污染及暴露风险分析

龚立科, 任　韧, 严　俊, 薛　鸣, 王　娇, 樊继彩*
[杭州市疾病预防控制中心(杭州市卫生监督所), 浙江省感染与免疫多组学重点实验室, 杭州　310021]

摘　要: 目的　调查市售咖啡中总砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、总汞(Hg)及铅(Pb) 5 种重金属的污染水平, 并评估其经膳食途径的暴露风险。**方法**　采用随机抽样方法采集市售咖啡样本, 利用微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定重金属含量, 并结合平均体重数据, 估算喝咖啡人群的重金属摄入量。**结果**　87 份样品中, Cr 的检出率为 100%, 含量范围为 4.7×10^{-3}~8.0×10^{-1} mg/kg; 只有 2 份速溶咖啡中 Cd 未检出, 检出最高浓度为 0.025 mg/kg; 所有样品中 Hg 的检出率最低, 为 21.8%, 其中速溶咖啡中 Hg 的检出率只有 14.3%。所有样品均未超过国家标准限量值要求。另外, 不同类别的咖啡中, 重金属的检出情况不同。膳食暴露评估结果显示, 对于咖啡摄入量为 20 g/d 的人群, 危害指数为 0.0024, 远低于 1; 暴露边界大于 10; 致癌风险低于 10^{-6}。**结论**　市售咖啡普遍存在 5 种重金属残留, 但无论从非遗传毒性还是遗传毒性方面评估, 通过饮用咖啡摄入的重金属对人体健康的风险极低。

关键词: 咖啡; 重金属污染; 暴露评估
中图分类号: R155.5　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)17–0310–07

Analysis of heavy metal contamination and exposure risk in commercially available coffee from 2022 to 2025 in Hangzhou

GONG Li-Ke, REN Ren, YAN Jun, XUE Ming, WANG Jiao, FAN Ji-Cai*
[*Hangzhou Center for Disease Control and Prevention* (*Hangzhou Health Supervision Institution*), *Zhejiang Key Laboratory of Multi-omics in Infection and Immunity*, *Hangzhou* 310021, *China*]

ABSTRACT: Objective　To investigate the contamination levels of 5 kinds of heavy metals including arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), mercury (Hg) and lead (Pb) in commercially available coffee and assess their exposure risks through dietary intake. **Methods**　Commercially available coffee samples were collected using random sampling. Heavy metal content was determined using microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry. The heavy metal intake among coffee drinkers was estimated based on average body weight data. **Results**　Among the 87

收稿日期: 2026-02-05
基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2025C02127); 浙江省重点实验室建设项目(2024ZY01026); 杭州市医学重点学科建设项目(2025HZGF13); 杭州市科技计划引导项目(20211231Y079); 浙江省基础公益研究计划项目(LTGC24H260001)
第一作者: 龚立科(1987—), 男, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为理化分析。E-mail: lskane@163.com
***通信作者:** 樊继彩(1981—), 女, 博士, 主任技师, 主要研究方向为理化分析。E-mail: fanjc224@163.com

samples, Cr had a detection rate of 100%, with content ranging from 4.7×10^{-3} to 8.0×10^{-1} mg/kg. Cd was undetected in only 2 instant coffee powder samples, with the highest detected concentration being 0.025 mg/kg. Hg had the lowest detection rate across all samples at 21.8%, with a detection rate of only 14.3% in instant coffee powder. None of the samples exceeded the national standard limits. Additionally, significant differences in heavy metal detection were observed among different types of coffee. Dietary exposure assessment results showed that for individuals consuming 20 g/d, the hazard index was 0.0024, far below 1; the margin of exposure was greater than 10; and the cancer risk was below 10^{-6}. **Conclusion** The 5 kinds of heavy metals are commonly found in commercially available coffee. However, whether assessed from non-genotoxic or genotoxic perspectives, the health risks posed by heavy metal intake through coffee consumption are extremely low.

KEY WORDS: coffee; heavy metal contamination; exposure assessment

0　引　言

咖啡作为全球最受欢迎的饮品之一, 与茶叶、可可并称为世界三大饮料, 其产量、产值和消费量居三大饮料之首[1–3]。根据国际咖啡组织的数据, 全球咖啡年产量约在 1.6 亿至 1.7 亿袋(每袋 60 kg)之间, 同时, 咖啡也是在经济和社会层面具有重要影响力的食品之一[4–5]。全球咖啡消费格局中, 欧盟整体市场规模居首位, 美国位列单一国家消费量榜首, 而中国等新兴市场的消费需求亦保持高速增长。当前中国的咖啡消费市场正处在高速发展和深刻变革的时期, 它已从一种小众的“舶来品”转变为一个充满活力的日常消费品类。

咖啡富含钾、烟酸、镁、生育酚、多糖、单糖、脂质、甾醇以及多酚、绿原酸、羟基肉桂酸、咖啡因和咖啡酸等抗氧化物质[6–8]。近期研究指出, 适度饮用咖啡有助于预防循环系统、消化系统和神经系统疾病[9–10], 但咖啡在种植和生长过程中, 咖啡植株的根、茎或果实会富集土壤、环境中的重金属[1,11], 重金属作为污染物可通过食物链累积对人体产生危害[12]。目前, 国内外学者针对咖啡成分的组成及其作用研究较多[13–15], 对咖啡中重金属元素的含量, 国外学者的研究相对较多[16–18], 而国内的研究则较少[1,19]。为确保咖啡产品的消费安全, 开展其中重金属含量检测与健康风险评估具有重要现实意义。本研究采用微波消解法对咖啡样品进行前处理, 利用电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)技术测定咖啡中铅(Pb)、镉(Cd)、总汞(Hg)、总砷(As)、铬(Cr) 5 种重金属元素的含量, 并进一步评估其健康风险, 不仅可为阐明我国市售咖啡的重金属污染现状提供科学数据支撑, 也能为我国咖啡质量安全监管提供科学保障, 同时为相关国家标准、行业规范等的制定提供一定的数据支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

2022—2025 年随机在杭州市内各大超市(线下)以及网店(线上)抽取咖啡样品 87 份。其中咖啡豆 40 份、非速溶咖啡 19 份、速溶咖啡 28 份, 所有样品均包装完整且在保质期内。

铝(Al)、As、钡(Ba)、硼(B)、铍(Be)、铋(Bi)、Cd、钴(Co)、Cr、铜(Cu)、铁(Fe)、镓(Ga)、锂(Li)、镁(Mg)、锰(Mn)、镍(Ni)、Pb、锑(Sb)、锡(Sn)、锶(Sr)、钛(Ti)、铊(Tl)、钒(V)、锌(Zn)元素混合标准溶液(质量浓度为 100 mg/L, 标准物质证书编号: GSB04-1767-2004, 批号: 228031-4, 不确定度: 1.4%, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 汞单元素标准溶液(质量浓度为 1000 mg/L, 标准物质证书编号: GBW08617, 批号: 22033, 不确定度: 1 μg/mL, 中国计量科学研究院); 铟(In)、铑(Rh)、铼(Re)内标溶液(质量浓度为 100 mg/L, 标准物质证书编号: BWT30017-100-N-100, 批号: B21040380, 不确定度: 5%, 坛墨质检科技股份有限公司); 硝酸(HNO_3)(痕量金属级别, 美国赛默飞世尔科技有限公司); 超纯水(18.2 MΩ • cm, 德国默克集团)。

1.2　仪器与设备

iCAP-RQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技有限公司); Mars6 微波消解系统(美国 CEM 公司)。

1.3　标准溶液制备

元素混合标准溶液: 临用时均以 1% HNO_3 逐级稀释至 0.0、0.5、1.0、2.0、5.0、15.0 μg/L; Hg 单元素标准溶液: 临用时以 1% HNO_3 逐级稀释至 0.0、0.2、0.4、0.8、1.5、2.0 μg/L; In、Rh、Re 内标溶液: 临用时以 1% HNO_3 稀释至 20.0 μg/L。所用器皿均采用 20% HNO_3 溶液浸泡 24 h 后, 以超纯水洗净、备用。

1.4　实验方法

称取 0.3000 g(精确到 0.0001 g)样品于微波消解罐内, 加入 5 mL HNO_3, 放置 2.0 h 后, 置于微波消解仪中进行消解(步骤 1: 升温时间: 15 min, 保持温度 140 ℃, 保持时间 2 min; 步骤 2: 升温时间: 6 min, 保持温度 180 ℃, 保持时间 15 min)。待冷却至室温后, 以超纯水转移并定容至 25.00 mL, 摇匀待测, 每个样品设 3 个平行样, 同时做试剂空白。质谱参

数经调谐至最佳条件(表 1), Pb 和 Hg 以 Re 作为内标元素, As 以 Rh 作为内标元素, Cd、Cr、Ni 以 In 作为内标元素。

表 1 咖啡中 5 种重金属含量分析的仪器参数条件

Table 1 Instrumental parameter conditions for analysis of 5 kinds of heavy metals in coffee

参数	设定值	参数	设定值
射频功率/kW	1.55	采样深度/mm	5.00
冷却气流速/(L/min)	14.00	一级截取电压/V	0.00
辅助气流速/(L/min)	0.80	二级截取电压/V	–142.00
雾化气流速/(L/min)	1.00	氦气流速/(mL/min)	4.00
氧化物水平/(CeO^+/Ce^+, %)	1.83	双电荷水平/(Ba^{++}/Ba^+, %)	2.25
监测同位素	$^{206, 207, 208}Pb$、^{111}Cd、^{75}As、^{201}Hg、^{52}Cr、^{60}Ni、^{103}Rh、^{115}In、^{209}Bi		

1.5 低水平数据处理

参考世界卫生组织(World Health Organization, WHO)关于低浓度食品污染物可信数据评估的技术规范, 对于检测结果的处理, 采取以下方法: 若样品检测结果低于方法检出限(limit of detection, LOD), 且全部样品中未检出比例不超过 60%, 则以 1/2LOD 进行计算; 若样品未检出比例介于60%~80%之间, 并且样本总数超过25个, 在统计分析时, 对这些低于 LOD 的结果则直接以 1/2LOD 进行处理[20]。

1.6 风险评估

在化学危害领域, 风险评估是一个系统化过程, 通过该过程可在特定时期内对潜在危害及消费者健康影响进行特征描述[21–22]。本研究采用危害商(hazard quotient, HQ)进行非致癌效应评估, HQ_i 的计算公式见(1)[23], EDI 的计算公式见(2):

$$HQ_i=\sum\frac{EDI_i}{RfD} \quad (1)$$

$$EDI=\frac{C\times IR}{BW} \quad (2)$$

式中: EDI_i 为金属的估算每日摄入量(estimated daily intake), μg/(kg bw • d), 其值通过公式(2)计算得出, 其中, C 为咖啡中重金属含量, mg/kg; IR 为咖啡的人均日消费量(intake rate), g/d; BW 为平均体重(boby weight), kg; RfD 为参考剂量, 各金属的参考剂量值分别为: As: 3.0 μg/ (kg bw • d)、Cd: 1.0 μg/(kg bw • d)、Cr: 1500 μg/(kg bw • d)和 Hg: 0.1 μg/(kg bw • d)[24]。由于缺少 Pb 的 RfD 值, 本研究采用联合国粮农组织/WHO 食品添加剂联合专家委员会制定的食品中 Pb 的暂定每周耐受摄入量为 25 μg/(kg bw • d)[25], 则每日耐受摄入量为 3.57 μg/(kg bw • d)。

采用危害指数(hazard index, HI)法评估多种重金属元素混合可能导致的健康风险, 当 HI<1 时, 认为重金属的累积暴露风险可被接受; 当 HI≥1 时, 认为重金属的累积暴露可能对健康造成危害[26–27], 计算如公式(3):

$$HI=\sum HQ_i \quad (3)$$

针对基因毒性效应, 为评估 Pb 的致癌风险, 分别采用暴露边界(margin of exposure, MOE)以及致癌风险(cancer risk, CR)进行计算, MOE 数值越大, 表示当前暴露水平距观察到有害效应的剂量越远, 风险越低, 当 Pb 的 MOE≥10 时, 即可视为对公众健康关注度较低[28]。对于 CR, 数值低于 10^{-6} 被视为无显著健康风险; 数值在 10^{-6}~10^{-4} 之间被视为可接受风险; 而数值高于 10^{-4} 则意味着风险很高, 表明可能对人体造成危害[29]。具体见计算公式(4)和(5):

$$MOE=\frac{BMDL\%}{EDI} \quad (4)$$

$$CR=EDI\times SF \quad (5)$$

式中: BMDL 为基准剂量置信下限(benchmark dose limit), BMDL%表示在给定置信水平下, 能够引起特定百分比不良反应的金属剂量下限估计值, 对于Pb及其导致的心血管毒性和肾毒性效应, 采用的参考值为: $BMDL_{01}$: 1.50 μg/(kg bw • d)、$BMDL_{10}$: 0.63 μg/(kg bw • d)[30]; SF 为致癌斜率因子(slope factor), 取值为 8.5 μg/(kg bw • d)[24]。

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据统计, 采用 Origin pro 8 进行统计学数据处理分析, 实验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 咖啡样品中重金属污染状况

87 份咖啡样品中, 均检出 Cr(表 2); 只有 2 份速溶咖啡中 Cd 为 ND; 样品检出率(样本测定浓度大于检出限的样本数占样品总数的比例)最低的为 Hg, 5 种重金属的检出率分别为: As 63.2%、Cd 97.7%、Cr 100.0%、Hg 21.8%、Pb 37.9%。从检出浓度的平均值和中位值看, 所有样品中, Hg 和 Pb 的中位值均为 ND, 本研究以 1/2LOD (1.5×10^{-4} mg/kg)进行处理, 5 种重金属平均含量大小依次为 Cr>As>Cd>Pb>Hg。As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的最高检出浓度分别为 0.029、0.025、0.800、0.005、0.046 mg/kg。所有样品均未超过 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中 Pb (0.500 mg/kg)以及 NY/T 289—2025《绿色食品 咖啡》中 As 和 Cd 的限量值(0.500 mg/kg)。

关于咖啡的研究, 所检测金属元素的浓度差异明显。李秀林等[1]的研究发现, 云南产咖啡豆中主要含有 Pb、Cd、

As 3 种金属元素, 其中, As 的含量最高为 0.057 mg/kg, Pb 的含量最高为 0.077 mg/kg, 平均含量为 0.030 mg/kg; Cd 的含量最高为 0.290 mg/kg, 平均含量为 0.045 mg/kg。无论是最高浓度还是平均浓度, 均比本研究含量高。Kargarghomsheh 等[31]测定了咖啡中的 10 种微量元素, As、Cd 和 Pb 3 种重金属含量的平均值、中位值以及最大值均与本研究相近, 但 Cr 浓度的平均值、中位值和最大值均比本研究结果低。已发表的 Cr 的检出浓度普遍为 ND~0.1 mg/kg[32–33], 但 Mohammed 等[34](ND~7.5 mg/kg)和 Pigozzi 等[35](ND~3.27 mg/kg)获得的结果则显示出较大的差异性。Kowalska[29]、Massoud 等[33]和 Guadalupe 等[17]的研究未检出 Cd 或 Hg, 然而 Adler 等[36]和 Árvay 等[32]报告了数量级约 10^{-2} mg/kg 的 Cd 值, 更高的数值(约 10^{-1} mg/kg)由 Albals 等[37](0.45 mg/kg)和 Berego 等[38][(0.80±2.52) mg/kg]发布。这主要是因为咖啡中重金属含量除了受品种、产区和种植条件的影响外, 还受脱壳、烘焙等技术工艺影响[17,36]。

2.2　不同类别咖啡样品中重金属污染状况

关于不同类别咖啡中重金属含量的对比研究较少, 本研究发现: 不同类别的咖啡中, 重金属的检出情况有明显差异, 咖啡豆和非速溶咖啡中 5 种重金属的检出率接近, 而速溶咖啡的检出情况却不同。速溶咖啡中 As 的检出率大于咖啡豆和非速溶咖啡, 但 Hg 和 Pb 的检出率却低于咖啡豆和非速溶咖啡。从表 2 中检出浓度分析, 速溶咖啡中 As 含量中位值高于咖啡豆而 Cd 和 Cr 含量中位值却低于咖啡豆。

该现象的成因可从重金属赋存形态与咖啡加工工艺的耦合关系进行阐释: 速溶咖啡系咖啡提取液经喷雾干燥或冷冻干燥脱水制得的可溶性固体组分, 其中 As 主要以无机形态(砷酸盐、亚砷酸盐)存在, 水溶性较强, 在提取过程中可高效进入水相; Cd、Cr 等重金属多以阳离子形态存在, Cd 离子易与咖啡豆组织中蛋白质、多糖及有机酸的巯基、羧基等负电性官能团结合, 形成稳定难溶性络合物, Cr 离子则易与细胞壁中的纤维素、半纤维素、木质素结合或与有机配体络合, 二者水提效率显著偏低。同理, Hg 与 Pb 在水相中的迁移萃取能力较弱。

因此, 速溶咖啡中 As 的检出率与含量水平高于咖啡豆及非速溶咖啡; Cd 的检出率与含量低于咖啡豆及非速溶咖啡; Cr 含量低于咖啡豆, 与非速溶咖啡无明显差异; Hg 与 Pb 的检出率亦低于咖啡豆及非速溶咖啡。

2.3　非致癌效应评估

媒咨询发布的调查数据显示[39], 中国消费者在日常学习或工作时喝咖啡的比例已达 47.89%; 引自新潮商评论 2025 年 11 月 24 日的数据, 浙江省咖啡门店数量达到 22496 家, 位居全国第二, 其中, 杭州 6349 家, 全省第一。目前,

表 2　咖啡中 5 种重金属测定结果

Table 2　Determination results of 5 kinds of heavy metals in coffee

元素	类别	检出率/%	浓度范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)
As	咖啡豆	57.5	ND~2.3×10^{-2}	5.2×10^{-3}	3.3×10^{-3}
	非速溶咖啡	42.1	ND~1.1×10^{-2}	3.2×10^{-3}	ND
	速溶咖啡	85.7	ND~2.9×10^{-2}	9.9×10^{-3}	7.5×10^{-3}
	总计	63.2	ND~2.9×10^{-2}	6.3×10^{-3}	4.1×10^{-3}
Cd	咖啡豆	100.0	2.0×10^{-3}~2.5×10^{-2}	8.1×10^{-3}	5.0×10^{-3}
	非速溶咖啡	100.0	2.1×10^{-3}~1.7×10^{-2}	6.6×10^{-3}	5.5×10^{-3}
	速溶咖啡	92.9	ND~6.2×10^{-3}	2.6×10^{-3}	2.4×10^{-3}
	总计	97.7	ND~2.5×10^{-2}	6.0×10^{-3}	4.2×10^{-3}
Cr	咖啡豆	100.0	4.7×10^{-3}~8.0×10^{-1}	9.5×10^{-2}	5.6×10^{-2}
	非速溶咖啡	100.0	6.1×10^{-3}~7.6×10^{-2}	2.8×10^{-2}	2.2×10^{-2}
	速溶咖啡	100.0	6.6×10^{-3}~2.0×10^{-1}	5.4×10^{-2}	3.0×10^{-2}
	总计	100.0	4.7×10^{-3}~8.0×10^{-1}	6.8×10^{-2}	3.8×10^{-2}
Hg	咖啡豆	22.5	ND~1.4×10^{-3}	1.3×10^{-4}	ND
	非速溶咖啡	31.6	ND~2.7×10^{-3}	4.1×10^{-4}	ND
	速溶咖啡	14.3	ND~5.0×10^{-3}	3.3×10^{-4}	ND
	总计	21.8	ND~5.0×10^{-3}	2.6×10^{-4}	ND
Pb	咖啡豆	42.5	ND~4.6×10^{-2}	6.7×10^{-3}	ND
	非速溶咖啡	42.1	ND~3.8×10^{-2}	5.3×10^{-3}	ND
	速溶咖啡	28.6	ND~9.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}	ND
	总计	37.9	ND~4.6×10^{-2}	4.1×10^{-3}	ND

注: ND 为未检出(not detected, ND), 以 1/2LOD 代入统计。

国内尚未公开针对杭州市、浙江省乃至全国居民的咖啡摄入量官方统计数据。Derossi 等[40]指出一杯中杯咖啡约含咖啡粉 20 g, 本研究仅评估喝咖啡人群分别饮用 1~3 杯/d, 即 20~60 g/d 时的暴露情况。根据《2019 年杭州市民体质测试数据分析报告》[41], 一项针对 20~59 岁杭州市民的大规模体质调查, 共采集了 23868 人的有效数据。统计结果显示, 该人群的平均体重为 64.36 kg。当摄入量为每天 20 g/人时的数据见表 3, 从表中的数据可以得出, HI 为 0.0024, 远小于 1, 即使摄入量为每天 60 g/人时, 饮用咖啡不会给消费者带来这些金属暴露的风险。5 种元素对 HI 的贡献率为 Cd>Hg>As>Pb>Cr。

表 3 咖啡中 5 种重金属暴露风险评估

Table 3 Exposure risk assessment of 5 kinds of heavy metals in coffee

指标	As	Cd	Cr	Hg	Pb
HQ	4.3×10^{-4}	1.3×10^{-3}	7.9×10^{-6}	4.7×10^{-4}	1.6×10^{-4}
HI 贡献率/%	18.1	54.9	0.3	19.8	6.8
HI	0.0024				
MOE	2678.6 ($BMDL_{01}$); 1125.0 ($BMDL_{10}$)				
CR	4.8×10^{-9} (P_{50}); 7.0×10^{-8} (P_{95}); 1.0×10^{-7} ($P_{97.5}$)				

注: 以上数据均为咖啡摄入量为 20 g/d 时计算得到。

2.4 致癌效应评估

Pb 在非遗传毒性心血管效应和肾毒性效应方面的安全限值是 MOE 计算得出的(表 3)。针对所研究的效应, Pb 的平均 MOE 分别为 2678.6 ($BMDL_{01}$)和 1125.0 ($BMDL_{10}$), 均远大于 10, 引起的风险较低。Pb 的致癌风险结果显示, 即使浓度为第 97.5 百分位数($P_{97.5}$)时的致癌风险(1.0×10^{-7})被认为是无明显健康风险, 这个结果和 Taghizadeh 等[42]得到的数值(Pb 的 CR 为 2.71×10^{-8})基本一致; 但比 Guadalupe 等[17]的结果略低[Pb 浓度为第 50 百分位数(P_{50})和第 95 百分位数(P_{95})时得到不同产区咖啡中 Pb 的 CR 分别为 2.3×10^{-7}~2.6×10^{-7} 和 1.3×10^{-6}~1.5×10^{-6}]。

3 讨论与结论

本研究测定了市售咖啡中 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 5 种重金属的浓度, 同时对比了不同类型咖啡(咖啡豆、非速溶咖啡和速溶咖啡)中重金属浓度以及检出率的差异, 并从膳食暴露角度评估了消费者饮用咖啡的健康风险。当咖啡摄入量为 20 g/d 时, HI 为 0.0024, 远小于 1, 证明 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的非致癌健康风险处于极低水平; 针对遗传毒性与致癌效应, 即使 Pb 浓度处于 $P_{97.5}$ 水平, 其 CR 仍低于 10^{-6}, MOE 远大于 10, 整体风险可忽略。

3.1 不同类别咖啡重金属差异分析

不同类别咖啡的重金属检出率与含量存在显著差异, 其主要原因与重金属赋存形态、咖啡加工工艺及萃取效率密切相关。速溶咖啡经萃取、喷雾干燥或冷冻干燥制成, As 主要以无机砷酸盐、亚砷酸盐等水溶性形态存在, 可被高效萃取, 因此速溶咖啡中 As 的检出率与含量显著高于咖啡豆与非速溶咖啡。Cd、Cr 多以阳离子形式形成难溶性络合物, 萃取效率低, 因此速溶咖啡中 Cd、Cr 含量与检出率低于咖啡豆。Hg、Pb 在水相中的迁移能力弱, 难以被萃取, 故速溶咖啡中 Hg、Pb 检出率低于咖啡豆和非速溶咖啡。

3.2 重金属暴露风险贡献率分析

本次风险评估显示, 5 种重金属对总 HI 的贡献率依次为: Cd (54.9%)>Hg (19.8%)>As (18.1%)>Pb (6.8%)>Cr (0.3%), 其中 Cd 贡献率最高, 可能原因为: RfD 更低: Cd 的 RfD 仅为 1.0 μg/(kg bw • d), 明显低于 As、Cr 等元素, 相同暴露水平下 Cd 产生的 HQ 更高; 检出率高: Cd 总检出率达 97.7%, 仅 2 份速溶咖啡未检出, 在各类咖啡中广泛存在; 体内蓄积性强: Cd 为全身性蓄积毒物, 半衰期长, 长期低剂量摄入即可形成显著累积暴露贡献。Cr 贡献率极低, 主要因其 RfD 极高, 虽检出率 100%, 但实际含量远未达到健康影响水平; Hg、As 贡献率中等, 与检出率、含量及毒性特征一致; Pb 贡献率较低, 与其检出率及浓度偏低相关。

3.3 本研究的实践意义及局限性

结合杭州市咖啡消费特点, 本研究具有一定的实践意义: 对消费者而言, 日常饮用市售咖啡的重金属健康风险极低, 可放心饮用; 监管部门可重点关注速溶咖啡的 As 和咖啡豆的 Cd 这两个关键控制点, 实施精准抽检; 产业端则可依据结果为原料筛选和萃取工艺优化提供数据支撑。需指出的是, 本研究存在一定局限性: 样品仅来自杭州及线上渠道, 未能代表全国整体状况; 未分层分析烘焙程度与产地的影响; 也未探究冲泡过程中重金属的溶出规律, 可能导致暴露评估存在偏差。

本研究系统阐明了杭州地区市售咖啡重金属污染水平与暴露风险特征, 可为我国区域性咖啡重金属风险评估提供基础数据支撑, 为保障咖啡消费安全、完善质量安全监管措施、支撑相关国家标准与行业规范制定提供科学依据。

参考文献

[1] 李秀林, 刘汗青, 武梦琦, 等. 云南省小粒咖啡豆中重金属元素分析[J]. 食品工业, 2022, 43(10): 260–264.
Li Xiulin, Liu Hanqing, Wu Mengqi, et al. Analysis of heavy metal elements in small coffee beans from Yunnan Province [J]. The Food Industry, 2022, 43(10): 260–264.

[2] 程金焕, 何红艳, 李亚男, 等. 宾川县朱苦拉咖啡庄园发展探析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(33): 246–247, 250.
Cheng Jinhuan, He Hongyan, Li Yanan, et al. Construction of Zhu kula

coffee farm in Binchuan County [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(33): 246–247, 250.

[3] 黄家雄. 小粒咖啡标准化生产技术[M]. 北京: 金盾出版社, 2009: 11–17.
Huang Jiaxiong. Standardized production technology of small coffee [M]. Beijing: Golden Shield Press, 2009: 11–17.

[4] Al-Abdulkader A M, Al-Namazi A A, AlTurki T A, et al. Optimizing coffee cultivation and its impact on economic growth and export earnings of the producing countries: the case of *Saudi Arabia* [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(4): 776–782.

[5] Grembecka M, Malinowska E, Szefer P. Differentiation of market coffee and its infusions in view of their mineral composition [J]. Science of the Total Environment, 2007, 383(1–3): 59–69.

[6] U. S. Department of agriculture. FoodData Central [EB/OL]. (2022) [2026-02-01]. https: //fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/1104137/nutrients.

[7] Feifei W, Tanokura M. Chemical changes in the components of coffee beans during roasting[M]. Coffee in health and disease prevention. Amsterdam: Elsevier, 2015: 83–91.

[8] Yilmaz P K, Hacibekiroğlu I, Kolak U. Effect of roasting on antioxidant and anticholinesterase capacities of coffee [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2014, 53(3): 232–239.

[9] Kotyczka C, Boettler U, Lang R, et al. Dark roast coffee is more effective than light roast coffee in reducing body weight, and in restoring red blood cell vitamin E and glutathione concentrations in healthy volunteers [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, 55(10): 1582–1586.

[10] Messina G, Zannella C, Monda V. The beneficial effects of coffee in human nutrition [J]. Biology and Medicine, 2015, 7(4): 240.

[11] Singh S. Heavy metals accumulation and distribution pattern in different vegetable crops [J]. Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2012, 4(10): 170–177.

[12] da Silva Sabrina A, Fabrícia Q M, Marcelo R R, et al. Determination of heavy metals in the roasted and ground coffee beans and brew [J]. African Journal of Agricultural Research, 2017, 12(4): 221–228.

[13] Esquivel P, Jiménez V M. Functional properties of coffee and coffee by-products [J]. Food Research International, 2012, 46(2): 488–495.

[14] Sijko-Szpańska M, Mystkowska I, Dmitrowicz A. Influence of brewing methods on the bioactive and mineral composition of coffee beverages [J]. Molecules, 2025, 30(20): 4080.

[15] Karagöz M F, Koçyiğit E, Koçak T, et al. Decoding coffee cardiometabolic potential: chemical composition, nutritional, and health relationships [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(5): e13414.

[16] Kırıs E. Quantitative analysis and exposure assessment of heavy metals in roasted coffee consumed in Turkey using ICP-OES [J]. Biological Trace Element Research, 2026, 204(3): 1622–1632.

[17] Guadalupe G A, Chavez S G, Arellanos E, et al. Probabilistic risk characterization of heavy metals in Peruvian coffee: implications of variety, region and processing [J]. Foods, 2023, 12(17): 3254.

[18] Várady M, Ślusarczyk S, Boržíkova J, et al. Heavy-metal contents and the impact of roasting on polyphenols, caffeine, and acrylamide in specialty coffee beans [J]. Foods, 2021, 10(6): 1310.

[19] 刘超, 李树珍, 段丽娜, 等. 云南省居民咖啡果皮中五种重金属摄入水平及健康风险评估[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(6): 147–151.
Liu Chao, Li Shuzhen, Duan Lina, et al. Intake levels and health risk assessment of five heavy metals in coffee peel of residents in Yunnan Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(6): 147–151.

[20] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(4): 278–279.
Wang Xuqing, Wu Yongning, Chen Junshi. Low-level data processing of food pollution monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278–279.

[21] Roychowdhury T, Tokunaga H, Ando M. Survey of arsenic and other heavy metals in food composites and drinking water and estimation of dietary intake by the villagers from an arsenic-affected area of West Bengal, India [J]. Science of the Total Environment, 2003, 308(1–3): 15–35.

[22] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific opinion on arsenic in food [J]. EFSA Journal, 2009, 7(10): 1351.

[23] Doménech E, Martorell S. Assessment of safety margins of exposure to non-genotoxic chemical substances in food [J]. Food Control, 2017, 79: 1–9.

[24] EPA. Environmental Protection Agency [EB/OL]. (2022) [2026-02-01]. https://iris.epa.gov/AdvancedSearch/.

[25] FAO/WHO. Safety evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third meeting of the joint FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA) [M]. Geneva: World Health Organization/Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011: 12.

[26] Evans R M, Scholze M, Kortenkamp A. Examining the feasibility of mixture risk assessment: a case study using a tiered approach with data of 67 pesticides from the Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (JMPR) [J]. Food and Chemical Toxicology, 2015, 84: 260–269.

[27] Yu Rui, Liu Qiang, Liu Jingshuang, et al. Concentrations of organophosphorus pesticides in fresh vegetables and related human health risk assessment in Changchun, Northeast China [J]. Food Control, 2016, 60: 353–360.

[28] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific opinion on lead in food [J]. EFSA Journal, 2010, 8(1): 1570–1720.

[29] Kowalska G. The safety assessment of toxic metals in commonly used herbs, spices, tea, and coffee in Poland [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(11): 5779.

[30] Barlow S, Renwick A G, Kleiner J, et al. Risk assessment of substances that are both genotoxic and carcinogenic: report of an International Conference organized by textit EFSA and\textit WHO with support of \textit{ILSI Europe [J]. Food and Chemical Toxicology, 2006, 44(10): 1636–1650.

[31] Kargarghomsheh P, Tooryan F, Sharifiarab G, et al. Evaluation of trace elements in coffee and mixed coffee samples using ICP-OES method [J]. Biological Trace Element Research, 2024, 202(5): 2338–2346.

[32] Árvay J, Šnirc M, Hauptvogl M, et al. Concentration of micro- and macro-elements in green and roasted coffee: influence of roasting degree

and risk assessment for the consumers [J]. Biological Trace Element Research, 2019, 190(1): 226–233.

[33] Massoud R, Sadat Mirmohammadmakki F, Fathollah Mirmohammad Makki S, et al. Evaluation of heavy metals in Roasted Coffee powder in Iran and Turkey [J]. Coffee Science, 2022, 17: 1–8.

[34] Mohammed A A, Mohamed H O, Muftah E K. Heavy metals contents in some commercially available coffee, tea, and cocoa samples in misurata city–Libya [J]. Progress in Chemical and Biochemical Research, 2019, 2(3): 99–107.

[35] Pigozzi M T, Passos F R, Mendes F Q. Quality of commercial coffees: heavy metal and ash contents [J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 5908463.

[36] Adler G, Nędzarek A, Tórz A. Concentrations of selected metals (Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Al, Ni, Pb, Cd) in coffee [J]. Slovenian Journal of Public Health, 2019, 58(4): 187–193.

[37] Albals D, Al-Momani I F, Issa R, et al. Multi element determination of essential and toxic metals in green and roasted coffee beans: a comparative study among different origins using ICP-MS [J]. Science Progress, 2021, 104(2): 368504211026162.

[38] Berego Y S, Sota S S, Ulsido M, et al. The contents of essential and toxic metals in coffee beans and soil in Dale Woreda, *Sidama* Regional State, Southern Ethiopia [J]. PeerJ, 2023, 11: e14789.

[39] 艾媒咨询. 2025 年中国咖啡市场发展状况与消费行为调查数据[EB/OL]. (2025) [2026-6-9]. https: //report. iimedia. cn/repo147-0/57830. html.

[40] Derossi A, Ricci I, Caporizzi R, et al. How grinding level and brewing method (Espresso, American, Turkish) could affect the antioxidant activity and bioactive compounds in a coffee cup [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(8): 3198–3207.

[41] 杭州市体育局. 2019 年杭州市民体质测试数据分析报告[EB/OL]. (2020-8-7) [2026-6-9]. https://mp.weixin.qq. com/s/__biz= MjM5ODI2NjA0Mw==&mid=2651306277&idx= 3&sn=1273dcfb6e7f64e2b32620c0b923be83.

[42] Taghizadeh S F, Azizi M, Hassanpourfard G, et al. Assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risk of exposure to metals *via* consumption of coffee, tea, and herbal tea in iranians [J]. Biological Trace Element Research, 2023, 201(3): 1520–1537.

(责任编辑: 曹岱琳 安香玉)