

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240614003

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

吴梅, 陈祝军*, 陈蓉, 吴建兵, 秦园, 沈怡佳, 朱楠, 张珊

(张家港市疾病预防控制中心, 苏州 215600)

摘要: **目的** 研究茶叶、袋装茶以及茶粉的茶汤中 Li、Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Sb、Ba、Pb 15 种金属及类金属含量情况, 评估饮用茶汤对人群健康的风险。**方法** 随机抽取不同的茶叶、袋装茶以及茶粉共 39 份样品, 用 100 °C 水冲泡茶叶、袋装茶以及茶粉 60 min, 3 种茶汤用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)直接测定 15 种金属及类金属溶出量。运用单项污染评价、内梅罗法综合污染评价, 靶标危害系数(target hazard quotient, THQ)和危害指数(hazard index, HI), 以及美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)和国际致癌研究署(International Agency for Research on Cancer, IARC)推荐的健康风险评估模型对 3 种茶汤进行健康风险评估。**结果** 茶叶、袋装茶以及茶粉 3 种茶汤中单项污染指数和内梅罗综合污染评价指数均小于 0.7, 污染等级分别为优良、安全。THQ 值和 HI 值均小于 1。HI 排名依次是绿茶茶粉>红茶茶粉>乌龙茶粉>绿茶袋装茶>红茶茶叶>乌龙袋装茶>乌龙茶叶>绿茶茶叶>红茶袋装茶, HI 中占比较大的元素整体为上 Al、Mn、Ni、Cu。茶汤中个人健康危害年风险总和为 $9.01 \times 10^{-6} \sim 3.73 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 低于 US EPA 和国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)推荐的最大可接受风险水平。**结论** 茶叶、袋装茶以及茶粉茶汤中 15 种金属及类金属对暴露人群的健康风险较低。茶叶、袋装茶以及茶粉均处于安全饮用范围。

关键词: 茶叶; 袋装茶; 茶粉; 茶汤; 金属; 健康风险评估

Content of 15 kinds of metal and metalloid in tea, tea bag and tea powder and their health risk assessment

WU Mei, CHEN Zhu-Jun*, CHEN Rong, WU Jian-Bing, QIN Yuan,
SHEN Yi-Jia, ZHU Nan, ZHANG Shan

(Zhangjiagang Centre for Diseases Control and Prevention, Suzhou 215600, China)

ABSTRACT: Objective To study the content of 15 kinds of metal and metalloid elements including Li, Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Ba and Pb in tea, tea bag and tea powder, and assess the health risks to the population. **Methods** A total of 39 samples of different tea, tea bag and tea powder were randomly selected. Tea, tea

基金项目: 张家港市科技计划项目(ZKYL2350)、张家港市卫生青年科技项目(ZJGQNKJ202342)

Fund: Supported by the Zhangjiagang Science and Technology Plan Project (ZKYL2350), and the Zhangjiagang Health Youth Science and Technology Project (ZJGQNKJ202342)

*通信作者: 陈祝军, 主任技师, 主要研究方向为食品安全质量检测。E-mail: 13913618154@126.com

*Corresponding author: CHEN Zhu-Jun, Chief Technician, Zhangjiagang Centre for Diseases Control and Prevention, No.18, Zhizhong Road, Zhangjiagang, Suzhou 215600, China. E-mail: 13913618154@126.com

bag and tea powder were brewed in 100 °C water for 60 minutes. Then they were determined the dissolution of 15 kinds of metal and metalloid directly by inductively coupled plasma-mass spectrometry. Single pollution assessment, Nemero comprehensive pollution assessment, target hazard quotient (THQ), hazard index (HI), and the health risk assessment model recommended by U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) and International Agency for Research on Cancer (IARC) were used to evaluate the health risk of tea soup. **Results** The single pollution assessment and Nemero comprehensive pollution assessment of tea, tea bag and tea powder were all less than 0.7, and the pollution level were excellent and safe, respectively. The THQ and HI values were both less than 1. The ranking of HI in order was green tea powder>black tea powder>Oolong tea powder>green tea bag>black tea>Oolong tea bag>Oolong tea>green tea>black tea bag. The elements with a large proportion in HI were generally Al, Mn, Ni, Cu. The total annual risk of individual health hazards in tea soup was $9.01 \times 10^{-6} - 3.73 \times 10^{-5} a^{-1}$, which was lower than the maximum acceptable risk level recommended by US EPA and International Commission on Radiological Protection (ICRP). **Conclusion** The health risks of 15 metals and metalloids in tea, tea bag and tea powder to exposed populations are relatively low. Tea, tea bag, and tea powder are all within the safe drinking range.

KEY WORDS: tea; tea bag; tea powder; tea soup; metal; health risk assessment

0 引言

中国是产茶大国, 茶叶生产历史悠久, 饮茶已经成为国人的一种生活习惯^[1]。茶叶及茶制品的种类也从茶叶、袋装茶增加到茶粉, 以供人们挑选。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。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^[2], 同样茶制品受到污染的可能性也相应增加。其中重金属污染持久性长, 不可生物降解, 隐蔽性强^[3-5]。过量的重金属摄入人体后对肝脏、肾脏、骨骼、神经系统、心血管系统等造成损伤, 甚至导致全身性健康问题^[6-8]。

目前, 国内外大多研究针对的是茶叶^[9-11], 而茶制品的研究相关报道较少, 尤其对茶粉鲜有报道。本研究用 100 °C 水浸泡茶叶、袋装茶以及茶粉 60 min, 用电感耦合等离子体质谱仪对 3 种茶汤中 Li、Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Sb、Ba、Pb 15 种金属及类金属含量进行测定, 以便更精准地测定茶汤中多种金属及类金属经口途径含量, 并对其进行含量分析、健康风险评估, 定量分析其对人体健康的实际影响, 为评价其安全性提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材 料

随机选购茶叶、袋装茶、茶粉共 39 份。其中茶叶分别包括绿茶: 洞庭碧螺春、万春银叶、安吉白茶、天目湖白茶、庐山云雾; 红茶: 古树红、正山小种、花香小种、

金骏眉、茉莉红茶; 乌龙茶: 水仙、大红袍、肉桂、铁观音。共 14 份。

袋装茶分别为绿茶袋装茶: 绿茶、不同品牌茉莉绿茶; 红茶袋装茶: 红茶、温润红茶、伯爵红茶、桑葚玫瑰红茶; 乌龙茶: 韵香乌龙、不同品牌蜜桃乌龙、青提乌龙、黑枸杞葡萄乌龙等。共 13 份;

茶粉分别为绿茶茶粉: 栀香绿茶、茉莉花茶、茉莉绿茶; 红茶茶粉: 桂花红茶、滇红茶、红茶; 乌龙茶: 火花乌龙、桂花乌龙、蜜桃乌龙、兰香乌龙、荔枝味乌龙、葡萄味乌龙等。共 12 份。

1.1.2 试 剂

硝酸(优级纯, 上海晶瑞有限公司); 电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)分析用溶液标准样品-25 种金属元素混合标准溶液(10.0 μg/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 水中钪(100 mg/L)、水中钇(100 mg/L)、水中铽(1000 mg/L)、水中 25 种金属混合标准品(BYT400043)(坛墨质检科技股份有限公司)。

1.1.3 标准溶液和内标溶液配制

将 ICP-MS 调至最佳测定状态后分析, 配制质量浓度范围为 0~200 μg/L 的 25 种金属混合标准溶液。内标溶液为质量浓度为 1 mg/L 的钪、钇、铽溶液。

1.2 仪器与设备

7850 ICP-MS(美国 Agilent 公司); Simplicity UV 型超纯水系统(美国 Millipore 公司); Me204E 电子天平(精度 0.0001 g, 瑞士 Mettler Toledo 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

茶叶、袋装茶、茶粉充分混匀后采用四分法取样。称

取各种茶叶、袋装茶、茶粉茶样各 1.0 g(精确至 0.0001 g), 置于 200 mL 烧杯, 加入 100 mL 煮沸的超纯水, 泡茶 60 min 后, 取茶水溶液 50 mL, 加 0.5 mL 硝酸酸化, 用 0.22 μm 水膜过滤, 各样品放置 4 °C 保存, 待测。

1.3.2 仪器条件

ICP-MS 工作条件: 模式: He 模式, 射频功率 1550 W, 采样深度 10.0 mm, 冷却气流速 15.0 L/min, 载气流速 0.7 L/min, 雾化气流速 0.76 L/min, 雾化室温度 2 °C, 蠕动泵泵速 0.10 rps, 氦气流量 4.5 mL/min, 分析时间 25 s, 测定次数 3 次, 扫描加脉冲混合模式。将 ICP-MS 调至最佳测定状态后依次对试剂空白、混合标准系列溶液、样品空白、标准品和样品溶液进行测定。

1.3.3 质量控制

所有使用的玻璃器皿用 10% 硝酸浸泡 24 h, 用超纯水冲洗沥干, 保证数据的准确性。每进样 10 次, 进行一次重复测定, 平行样的相对偏差小于 5%。使用标准物质的测定结果在允许范围内。

1.4 健康风险评估方法

1.4.1 单项污染评价和内梅罗法综合污染评价

单项污染指数对茶汤中单个金属及类金属污染程度进行评价, 其计算见公式(1)^[12]:

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

采用内梅罗综合污染指数法对茶汤中的金属及类金属污染程度进行整体评价, 计算如公式(2)^[13]:

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

式(1)中, P_i -污染物 i 的单项污染指数; C_i -茶汤中单个重金属的实测浓度, mg/kg; S_i -污染物 i 的评价标准值, mg/kg, 见表 1。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》; Cr、Cd、As 的限量标准按照 NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》; Cu 的限量标准按照 NY 288—2018《绿色食品 茶叶》。式(2)中, $P_{\text{综}}$ -茶茶汤中金属及类金属量综合污染指数; P_{max} -茶汤中金属及类金属量污染物中单项污染指数最大值。 P_{ave} -茶汤中金属及类金属量污染物中单项污染指数平均值。评价方法参照胡承成等^[14]、牟明辉等^[15]的研究, 分级标准见表 2。

1.4.2 靶标危害系数和危害指数

茶叶、袋装茶、茶粉茶汤中金属及类金属单个元素的

表 1 茶叶金属及类金属污染物评价标准值
Table 1 Evaluation standard value of metal and metalloid pollutants in tea

| 金属 | Cr | Cu | As | Cd | Pb |
|------------|----|----|----|----|----|
| 限值/(mg/kg) | 5 | 30 | 2 | 1 | 5 |

表 2 金属及类金属污染分级标准

Table 2 Grading standard for metal and metalloid pollution

| 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 | $P_{\text{综}} \leq 0.7$ | 安全 |
| 2 | $0.7 < P_i \leq 1$ | 清洁 | $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ | 警戒线 |
| 3 | $1 < P_i \leq 2$ | 轻污染 | $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ | 轻污染 |
| 4 | $2 < P_i \leq 3$ | 中污染 | $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ | 中污染 |
| 5 | $P_i > 3$ | 重污染 | $P_{\text{综}} > 3$ | 重污染 |

风险, 通过靶标危害系数(target hazard quotient, THQ)来计算, 其计算如公式(3)、(4):

$$EDI = \frac{C \times E_f \times E_d \times IR}{T_a \times WAB} \quad (3)$$

$$THQ = \frac{EDI}{RfD_0} \quad (4)$$

式(3)中, EDI-每日摄入量, mg/(kg·d); C-茶汤中金属及类金属的浓度, mg/kg; E_f -暴露频率, 为 365 d/a; E_d -暴露期间, 为 70 a^[16-17]; IR-每日消耗茶汤, 为 8 g/(人·d)^[16-17]; WAB-平均体质量, 为 64.3 kg^[18]; T_a -平均暴露时间($E_f \times E_d$), d; RfD_0 -摄入参考剂量(见表 3)^[19], mg/(kg·d)。

多种元素对人体的健康的影响一般是共同作用的结果, 用危害指数(hazard index, HI)评估多种元素共同作用引起的健康危害, 其计算见公式(5)。

$$HI = \sum_{i=1}^n THQ \quad (5)$$

THQ<1、HI<1 表明没有明显的健康风险; THQ>1、HI>1 表明对人体存在健康风险, THQ 越大, 健康风险越大^[21]。

表 3 各种元素经口摄入相关参数

Table 3 Parameters related to oral intake of various elements

| 类别 | 参考剂量 RfD_0 /[mg/(kg·d)] | 类别 | 斜率因子 SF_0 /[mg/(kg·d)] ⁻¹ |
|----|------------------------------|--------|---|
| As | 0.0003 | As | 15.00 |
| Cd | 0.0005 | Cd | 6.10 |
| Cr | 0.0030 | Cr(六价) | 41.00 |
| Ni | 0.0054 | Ni | 0.84 ^[20] |
| Se | 0.0050 | | |
| Pb | 0.0014 | | |
| Al | 1.0000 | | |
| Mn | 0.1400 | | |
| Zn | 0.3000 | | |
| Mo | 0.0050 | | |
| Ba | 0.2000 | | |
| Sb | 0.0004 | | |
| Cu | 0.0050 | | |
| Fe | 0.3000 | | |
| Li | 0.0020 | | |

注: 斜率因子(slope factor, SF)。

1.4.3 健康风险评价模型

根据美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)、国际致癌研究署(International Agency for Research on Cancer, IARC)综合风险信息数据库和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的分类系统, 分为具有致癌风险金属及类金属元素和非致癌物风险金属及类金属元素^[22]。本研究中非致癌物风险金属及类金属元素有 Li、Al、Mn、Fe、Cu、Zn、Se、Mo、Sb、Ba、Pb, 致癌风险金属及类金属元素有 Cr、Ni、As、Cd^[23]。每日摄入量的计算方法按公式(6):

$$D = \frac{C \times E_f \times E_d \times IR}{T_a \times WAB} \quad (6)$$

公式(6)中: D -每日摄入量, mg/(kg·d); C -茶汤中金属及类金属的浓度, mg/kg; E_d -暴露期间, 为 70 a; IR -每日消耗茶汤, 为 8 g/(人·d); E_f -暴露频率, 为 365 d/a; WAB -平均体重, 为 64.3 kg; T_a -平均暴露时间($E_f \times E_d$), d。

非致癌物风险人体健康风险评价模型^[24], 其计算如公式(7)、(8):

$$R_j^n = \frac{\left(\frac{D}{RfD_0}\right) \times 10^{-6}}{70} \quad (7)$$

$$R_{\text{总}}^n = \sum_{j=1}^k R_j^n \quad (8)$$

式(7)中, R_j^n -非致癌风险物经食入途径产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; RfD_0 -摄入参考剂量见表 3, mg/(kg·d)。式(8)中, $R_{\text{总}}^n$ -非致癌风险物总风险, a^{-1} 。

致癌物风险人体健康风险评价模型^[24], 其计算如公式(9)、(10):

$$R_i^c = \frac{1 - \exp(-D \times SF_0)}{70} \quad (9)$$

$$R_{\text{总}}^c = \sum_{i=1}^k R_i^c \quad (10)$$

式(9)中, R_i^c -致癌风险物经食入途径产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; SF_0 -经口摄入斜率因子见表 3, [mg/(kg·d)]⁻¹。

式(10)中, $R_{\text{总}}^c$ -致癌风险物总风险, a^{-1} 。

US EPA 推荐的年最大可接受风险水平为 $1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$, 国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)推荐的年最大可接受风险水平为 $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ 。参考 US EPA 和 ICRP 的风险评价标准, 将风险评价分为 6 个等级见表 4^[25]。

1.5 数据处理

用 SPSS 27.0 进行统计分析, 经正态性检验, 检测结果为非正态分布, 采用中位数。小于检出限的值, 均按 1/2 检出限的值参与风险评估的计算。

表 4 风险等级、风险程度及风险值范围评价标准

Table 4 Evaluation criteria for risk level, risk degree and risk value range

| 风险等级 | 风险程度 | 风险值范围 |
|------|------|---|
| I | 低 | $1.0 \times 10^{-6} \sim (\leq 1.0 \times 10^{-5})$ |
| II | 低-中 | $(< 1.0 \times 10^{-5}) \sim (\leq 5.0 \times 10^{-5})$ |
| III | 中 | $(< 5.0 \times 10^{-5}) \sim (\leq 1.0 \times 10^{-4})$ |
| IV | 中-高 | $(< 1.0 \times 10^{-4}) \sim (\leq 5.0 \times 10^{-4})$ |
| V | 高 | $(< 5.0 \times 10^{-4}) \sim (\leq 1.0 \times 10^{-3})$ |
| VI | 极高 | $(< 1.0 \times 10^{-3}) \sim (\leq 5.0 \times 10^{-3})$ |

2 结果与分析

2.1 不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属含量分析

由权泰鹏等^[26]研究可知, 茶叶金属及类金属溶出量随着浸泡时间的增加而增加, 当 60 min 后溶出量增幅不明显, 所以对浸泡 60 min 的茶叶茶汤进行金属及类金属溶出量分析, 得出不同金属及类金属溶出量的大小顺序结果为: 绿茶中 $Mn > Al > Zn > Ni > Fe > Cu > Ba > Pb > Li > Cr > Se > Mo > As > Cd > Sb$, 红茶中 $Mn > Al > Zn > Ni > Cu > Fe > Ba > Pb > Li > Cr > Cd > As > Mo = Se > Sb$, 乌龙茶中 $Al > Mn > Zn > Ni > Fe > Cu > Ba > Pb > Li > Cr > As > Mo = Cd > Se > Sb$ 。Al、Mn、Zn 的溶出量在 3 大类茶叶的 15 种金属及类金属含量中居前。其中 Al 在乌龙茶叶中的溶出量最高, 达 153.140 mg/kg; Mn 在红茶茶叶中的溶出量最高, 达 129.953 mg/kg; Zn 在绿茶茶叶中的溶出量最高, 达 14.806 mg/kg。

浸泡 60 min 的袋装茶中的金属溶出量大小顺序为: 绿茶袋装茶中 $Mn > Al > Zn > Ni > Fe > Cu > Ba > Pb > Cr > Li > Cd > As > Mo = Se > Sb$; 红茶袋装茶中 $Al > Mn > Zn > Fe > Ni > Cu > Ba > Pb > Cr > Li > Se > As = Mo = Cd > Sb$; 乌龙袋装茶中 $Mn > Al > Zn > Fe > Cu > Ni > Ba > Pb > Cr > Li > Se > As > Mo > Cd > Sb$ 。Al、Mn、Zn 的溶出量在 3 大类袋装茶叶的 15 种金属及类金属含量中居前。Al 在袋装红茶的溶出量最高, 达 231.735 mg/kg; Mn、Zn 在袋装绿茶的溶出量最高, 分别为 144.604、9.621 mg/kg。

茶粉中金属溶出量大小顺序为: 绿茶茶粉中 $Mn > Al > Zn > Cu > Ni > Fe > Cr > Ba > Pb > As > Se > Li > Cd > Mo > Sb$; 红茶茶粉中 $Mn > Al > Zn > Ni > Fe > Cu > Ba > Li > Cr > Pb > Se > As > Cd > Mo > Sb$, 乌龙茶粉中 $Al > Mn > Zn > Ni > Fe > Cu > Cr > Ba > Li > Pb > Mo > Se > As > Cd = Sb$ 。Al、Mn、Zn 的溶出量在 3 大类茶粉的 15 种金属及类金属含量中居前。Al 在乌龙茶粉的溶出量最高, 达 723.950 mg/kg; Mn 在红茶茶粉的溶出量最高, 达 661.652 mg/kg; Zn 在绿茶茶粉的溶出量最高, 为 21.832 mg/kg。

茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中 Al、Mn、Zn 溶出量都居前。15 种金属及类金属溶出总量中茶粉最高, 袋装茶次之(乌龙茶叶除外), 茶叶溶出量相对较低, 其中乌龙袋装茶的 15 种金属及类金属溶出总量比乌龙茶叶低, 是由于乌龙袋装茶内还含有水果等非茶叶。茶粉是全部溶解在茶汤中, 袋装茶和茶叶是冲泡溶出, 溶出量低于茶粉。袋装茶中的茶叶较茶叶更细, 与水接触更充分, 溶解性更好, 溶出量比茶叶稍高(表 5)。

表 5 不同种类茶叶、袋装茶和茶粉茶汤中金属及类金属溶出量(mg/kg)
Table 5 Dissolution of metal and metalloid in different tea soups of tea, tea bag and tea powder (mg/kg)

| 分类 | 茶叶 | | | 袋装茶 | | | 茶粉 | | |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 |
| Li | 0.089 | 0.047 | 0.093 | 0.074 | 0.044 | 0.074 | 0.028 | 0.283 | 0.259 |
| Al | 18.520 | 52.196 | 153.140 | 114.501 | 231.735 | 92.411 | 234.169 | 626.466 | 723.950 |
| Cr | 0.074 | 0.042 | 0.040 | 0.086 | 0.096 | 0.079 | 0.273 | 0.235 | 0.413 |
| Mn | 67.958 | 129.953 | 99.182 | 144.604 | 42.590 | 100.036 | 577.626 | 661.652 | 498.377 |
| Fe | 2.462 | 1.128 | 1.851 | 2.960 | 3.280 | 3.065 | 4.296 | 3.977 | 3.979 |
| Ni | 4.629 | 3.295 | 2.133 | 5.193 | 1.422 | 2.386 | 6.957 | 4.345 | 4.237 |
| Cu | 0.865 | 1.583 | 1.242 | 2.085 | 1.323 | 2.511 | 8.521 | 2.718 | 1.398 |
| Zn | 14.806 | 8.711 | 4.609 | 9.621 | 5.544 | 7.378 | 21.832 | 16.010 | 9.574 |
| As | 0.013 | 0.013 | 0.010 | 0.011 | 0.007 | 0.011 | 0.036 | 0.044 | 0.035 |
| Se | 0.037 | 0.010 | 0.004 | 0.009 | 0.025 | 0.030 | 0.034 | 0.049 | 0.044 |
| Mo | 0.019 | 0.010 | 0.007 | 0.009 | 0.007 | 0.010 | 0.004 | 0.005 | 0.058 |
| Cd | 0.006 | 0.022 | 0.007 | 0.024 | 0.007 | 0.008 | 0.009 | 0.008 | 0.004 |
| Sb | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.004 |
| Ba | 0.422 | 0.645 | 0.996 | 0.847 | 0.521 | 0.822 | 0.250 | 1.029 | 0.278 |
| Pb | 0.171 | 0.270 | 0.353 | 0.371 | 0.180 | 0.208 | 0.069 | 0.148 | 0.086 |
| 总量 | 110.073 | 197.927 | 263.669 | 280.397 | 286.783 | 209.030 | 854.106 | 1316.971 | 1242.696 |

2.2 不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属健康风险评估

2.2.1 单项污染评价和内梅罗法综合污染评价结果

对不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属含量最大值进行污染评估, 国家茶叶标准只规定了 Cr、Cu、As、Cd、Pb 的限值, 故对茶汤中的这 5 种金属及类金属污染指标进行单项污染评价和内梅罗法综合污染评价(见表 6)。茶汤中金属及类金属单项污染指数和综合污染指数均小于 0.7, 达到安全等级, 说明污染比较轻。在乌龙茶叶、绿茶袋装茶、乌龙袋装茶中 Pb 的 P_i 值最高, 在红茶茶粉、乌龙茶粉中 Cr 的 P_i 值最高, 其余均为 Cu 的 P_i 值最高。茶汤中金属及类金属综合污染指数均小于 0.7, 为安全等级。其中绿茶茶粉中的综合污染指数最高。

2.2.2 靶标危害系数和危害指数评估结果

对浸泡 60 min 后茶汤中的金属含量进行污染评估, 由表 7 可知, HI (THQ 之和, 比较 THQ 大小) 中占比较大的元素整体为 Al、Mn、Ni、Cu。HI 排名依次为: 绿茶茶粉>红茶茶粉>乌龙茶粉>绿茶袋装茶>红茶茶叶>乌龙袋装茶>乌龙茶茶叶>绿茶茶叶>红茶袋装茶。对 HI 贡献最高的总体上是 Mn 和 Ni, 是主要风险因素。茶粉的 HI 值明显高于茶叶和袋装茶, 接近于 1, 主要原因是茶粉中的 Mn 和 Al 的 THQ 偏高, 茶粉中 Cr 和 As 的 THQ 也较茶叶和袋装茶高。茶粉中绿茶茶粉的 HI 值最高, 主要原因是 Ni 和 Cu 的 THQ 值较红茶茶粉和乌龙茶粉相对偏高; 袋装茶中绿茶袋装茶的 HI 值最高为 0.372, 主要原因是 Mn 和 Ni 的 THQ 值较红茶袋装茶和乌龙袋装茶相对偏高; 茶叶中红茶的 HI 值最高为 0.282, 主要原因是 Mn 的 THQ 值较

表 6 不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属单项污染指数和综合污染指数
Table 6 Single pollution assessment and comprehensive pollution assessment of metals and metalloid in different tea soups of tea, tea bag and tea powder

| 评价分类 | 茶叶 | | | 袋装茶 | | | 茶粉 | | | |
|-----------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | |
| 单项污染指标(P_i) | Cr | 0.015 | 0.014 | 0.056 | 0.021 | 0.034 | 0.027 | 0.158 | 0.148 | 0.140 |
| | Cu | 0.177 | 0.092 | 0.090 | 0.090 | 0.089 | 0.104 | 0.305 | 0.092 | 0.104 |
| | As | 0.015 | 0.012 | 0.011 | 0.010 | 0.004 | 0.007 | 0.027 | 0.023 | 0.075 |
| | Cd | 0.024 | 0.037 | 0.010 | 0.050 | 0.028 | 0.059 | 0.010 | 0.040 | 0.019 |
| | Pb | 0.081 | 0.077 | 0.097 | 0.145 | 0.076 | 0.151 | 0.019 | 0.038 | 0.109 |
| 综合污染指标 | $P_{综}$ | 0.132 | 0.073 | 0.078 | 0.112 | 0.071 | 0.117 | 0.228 | 0.115 | 0.117 |

表 7 不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属的 THQ 和 HI 值
Table 7 THQ and HI values of metals and metalloid in different tea soups of tea, tea bag and tea powder

| 评价分类 | 茶叶 | | | 袋装茶 | | | 茶粉 | | | |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | |
| THQ | Li | 5.52E-03 | 2.91E-03 | 5.78E-03 | 4.57E-03 | 2.71E-03 | 4.62E-03 | 1.71E-03 | 1.76E-02 | 1.61E-02 |
| | Al | 2.30E-03 | 6.49E-03 | 1.91E-02 | 1.42E-02 | 2.88E-02 | 1.15E-02 | 2.91E-02 | 7.79E-02 | 9.01E-02 |
| | Cr | 3.08E-03 | 1.73E-03 | 1.67E-03 | 3.59E-03 | 3.99E-03 | 3.27E-03 | 1.13E-02 | 9.73E-03 | 1.71E-02 |
| | Mn | 6.04E-02 | 1.15E-01 | 8.81E-02 | 1.29E-01 | 3.78E-02 | 8.89E-02 | 5.13E-01 | 5.88E-01 | 4.43E-01 |
| | Fe | 1.02E-03 | 4.68E-04 | 7.68E-04 | 1.23E-03 | 1.36E-03 | 1.27E-03 | 1.78E-03 | 1.65E-03 | 1.65E-03 |
| | Ni | 1.07E-01 | 7.59E-02 | 4.91E-02 | 1.20E-01 | 3.28E-02 | 5.50E-02 | 1.60E-01 | 1.00E-01 | 9.76E-02 |
| | Cu | 2.15E-02 | 3.94E-02 | 3.09E-02 | 5.19E-02 | 3.29E-02 | 6.25E-02 | 2.12E-01 | 6.76E-02 | 3.48E-02 |
| | Zn | 6.14E-03 | 3.61E-03 | 1.91E-03 | 3.99E-03 | 2.30E-03 | 3.06E-03 | 9.05E-03 | 6.64E-03 | 3.97E-03 |
| | As | 5.35E-03 | 5.23E-03 | 3.96E-03 | 4.38E-03 | 2.80E-03 | 4.64E-03 | 1.49E-02 | 1.84E-02 | 1.45E-02 |
| | Se | 9.31E-04 | 2.50E-04 | 9.95E-05 | 2.24E-04 | 6.10E-04 | 7.56E-04 | 8.51E-04 | 1.22E-03 | 1.10E-03 |
| | Mo | 4.65E-04 | 2.54E-04 | 1.73E-04 | 2.14E-04 | 1.67E-04 | 2.59E-04 | 1.05E-04 | 1.19E-04 | 1.44E-03 |
| | Cd | 1.47E-03 | 5.55E-03 | 1.74E-03 | 5.96E-03 | 1.65E-03 | 1.94E-03 | 2.24E-03 | 1.89E-03 | 1.09E-03 |
| | Sb | 7.47E-04 | 4.67E-04 | 7.31E-04 | 5.13E-04 | 6.22E-04 | 3.42E-04 | 7.15E-04 | 7.47E-04 | 1.29E-03 |
| | Ba | 2.62E-04 | 4.01E-04 | 6.20E-04 | 5.27E-04 | 3.24E-04 | 5.12E-04 | 1.56E-04 | 6.40E-04 | 1.73E-04 |
| | Pb | 1.52E-02 | 2.40E-02 | 3.14E-02 | 3.29E-02 | 1.60E-02 | 1.84E-02 | 6.14E-03 | 1.31E-02 | 7.63E-03 |
| HI | 0.231 | 0.282 | 0.236 | 0.372 | 0.165 | 0.257 | 0.964 | 0.905 | 0.732 | |

绿茶和乌龙茶相对偏高。茶汤中金属及类金属的 THQ 和 HI 值均小于 1, 说明茶汤中 15 种金属及类金属的污染程度对人体不具有显著的风险。

2.2.3 健康风险评估结果

由表 8 可知, 本研究中的致癌物质有 Cr、Ni、As、Cd, 茶汤中金属及类金属的致癌总风险为 $6.44 \times 10^{-6} \sim 3.73 \times 10^{-5} a^{-1}$, 低于 ICRP ($5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$) 和 US EPA ($1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$) 推荐的最大可接受风险水平。绿茶、绿茶袋装茶以及所有茶粉茶汤中的致癌总风险值均大于 $1.0 \times 10^{-5} a^{-1}$, 属于 II 级, 位于低-中风险等级, 主要来源于 Cr 和 Ni 的致癌风险。其他茶汤

均位于低风险等级。Cr 的单个致癌物风险最高的达 $3.00 \times 10^{-5} a^{-1}$, Ni 的单个致癌物风险最高的达 $1.04 \times 10^{-5} a^{-1}$ 。Cr、Ni 是潜在主要风险污染物, 应引起关注。

本研究中的非致癌物质有 Li、Al、Mn、Fe、Cu、Zn、Se、Mo、Sb、Ba、Pb; 由表 8 可知, 茶汤中金属及类金属的非致癌总风险 $1.77 \times 10^{-9} \sim 2.77 \times 10^{-6} a^{-1}$, 小于 I 级, 属于低风险等级, 茶汤中的非致癌物风险远低于 US EPA 和 ICRP 推荐的最大可接受风险水平。表明茶汤中非致癌物引起的健康危害极小, 对暴露人群造成的健康危害可忽略, 这与刘文政等^[27]研究结果相同。

表 8 不同种类茶叶、袋装茶、茶粉茶汤中金属及类金属致癌物质风险(a^{-1})
Table 8 Risk of metal and metalloid carcinogens in different tea soups of tea, tea bag and tea powder (a^{-1})

| 评价分类 | 茶叶 | | | 袋装茶 | | | 茶粉 | | | |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | |
| 致癌物 风险 (R_i/a) | Cr | 5.41E-06 | 3.05E-06 | 2.93E-06 | 6.30E-06 | 7.02E-06 | 5.75E-06 | 1.99E-05 | 1.71E-05 | 3.00E-05 |
| | Ni | 6.91E-06 | 4.92E-06 | 3.18E-06 | 7.75E-06 | 2.12E-06 | 3.56E-06 | 1.04E-05 | 6.49E-06 | 6.33E-06 |
| | As | 3.44E-07 | 3.36E-07 | 2.55E-07 | 2.81E-07 | 1.80E-07 | 2.99E-07 | 9.60E-07 | 1.18E-06 | 9.33E-07 |
| | Cd | 6.40E-08 | 2.42E-07 | 7.59E-08 | 2.60E-07 | 7.21E-08 | 8.46E-08 | 9.76E-08 | 8.24E-08 | 4.77E-08 |
| 致癌总风险 (R_{Σ}^n/a) | 1.27E-05 | 8.55E-06 | 6.44E-06 | 1.46E-05 | 9.39E-06 | 9.69E-06 | 3.14E-05 | 2.49E-05 | 3.73E-05 | |
| 非致癌 物风险 (R_i/a) | Li | 7.89E-08 | 4.16E-08 | 8.25E-08 | 6.53E-11 | 3.87E-11 | 6.60E-11 | 2.44E-11 | 2.51E-10 | 2.30E-10 |
| | Al | 3.29E-08 | 9.28E-08 | 2.72E-07 | 2.04E-10 | 4.12E-10 | 1.64E-10 | 4.16E-10 | 1.11E-09 | 1.29E-09 |
| | Mn | 8.63E-07 | 1.65E-06 | 1.26E-06 | 1.84E-09 | 5.41E-10 | 1.27E-09 | 7.33E-09 | 8.40E-09 | 6.33E-09 |
| | Fe | 1.46E-08 | 6.68E-09 | 1.10E-08 | 1.75E-11 | 1.94E-11 | 1.82E-11 | 2.55E-11 | 2.36E-11 | 2.36E-11 |
| | Cu | 3.08E-07 | 5.63E-07 | 4.42E-07 | 7.41E-10 | 4.70E-10 | 8.93E-10 | 3.03E-09 | 9.66E-10 | 4.97E-10 |
| | Zn | 8.77E-08 | 5.16E-08 | 2.73E-08 | 5.70E-11 | 3.28E-11 | 4.37E-11 | 1.29E-10 | 9.49E-11 | 5.67E-11 |

表 8(续)

| 评价分类 | 茶叶 | | | 袋装茶 | | | 茶粉 | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 | 绿茶 | 红茶 | 乌龙 |
| Se | 1.33E-08 | 3.57E-09 | 1.42E-09 | 3.20E-12 | 8.71E-12 | 1.08E-11 | 1.22E-11 | 1.74E-11 | 1.58E-11 |
| Mo | 6.65E-09 | 3.63E-09 | 2.47E-09 | 3.06E-12 | 2.38E-12 | 3.70E-12 | 1.49E-12 | 1.71E-12 | 2.05E-11 |
| Sb | 1.07E-08 | 6.67E-09 | 1.04E-08 | 7.33E-12 | 8.89E-12 | 4.89E-12 | 1.02E-11 | 1.07E-11 | 1.84E-11 |
| Ba | 3.75E-09 | 5.73E-09 | 8.85E-09 | 7.52E-12 | 4.63E-12 | 7.31E-12 | 2.22E-12 | 9.14E-12 | 2.47E-12 |
| Pb | 2.18E-07 | 3.42E-07 | 4.48E-07 | 4.71E-10 | 2.28E-10 | 2.63E-10 | 8.77E-11 | 1.88E-10 | 1.09E-10 |
| 非致癌总风险 ($R_{\text{a}}^{\text{c}}/a$) | 1.64E-06 | 2.77E-06 | 2.57E-06 | 3.42E-09 | 1.77E-09 | 2.74E-09 | 1.11E-08 | 1.11E-08 | 8.59E-09 |
| 健康危害 年风险总和 | 1.44E-05 | 1.13E-05 | 9.01E-06 | 1.46E-05 | 9.39E-06 | 9.70E-06 | 3.14E-05 | 2.49E-05 | 3.73E-05 |

在不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中 15 种金属及类金属个人健康危害年风险总和为 $9.01 \times 10^{-6} \sim 3.73 \times 10^{-5} a^{-1}$, 属于低、低-中风险等级, 茶汤中存在一定的 Cr、Ni 污染, 可能对暴露人群存在一定的潜在健康危害, 茶汤中的 Cr、Ni 应成为主要的监控风险物。

3 讨论与结论

本研究分析了 39 份茶叶、袋装茶以及茶粉的茶汤中 Li、Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Sb、Ba、Pb 15 种金属及类金属含量。茶汤中 Mn、Al、Zn 含量较高, 与李张伟^[28]和殷国英等^[29]的研究结果相近。

不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属单项污染指标和综合污染指标均小于 0.7, 属于优良等级, 达到安全标准。表明 Cr、Cu、As、Cd、Pb 的污染含量较低。Pb 在乌龙茶叶、绿茶袋装茶、乌龙袋装茶茶汤中的污染指数最大, 在红茶茶粉、乌龙茶粉中 Cr 的 P_i 值最高, 其他为 Cu 的污染指数最大。单项污染指标最大值是 Cu 在绿茶茶粉茶汤的单项污染指数。可能是制作加工采用较嫩的茶叶, 或者是制作过程中使用了铜制品的仪器^[29]。

进行 THQ 和 HI 评估发现, THQ 和 HI 值均小于 1, 表明对人体健康没有明显健康风险。茶粉的 HI 值高于茶叶和袋装茶, 由于茶粉是用茶鲜叶、碎茶、茶副产品、少量花茶为原料, 经过提取、过滤、浓缩、冷冻干燥制作而成^[30], 同样质量的茶粉较茶叶和袋装茶浓度更高。绿茶茶粉、红茶茶粉、乌龙茶粉的 HI 分别为 0.964、0.905、0.732, 虽然低于最大可接受水平, 但是与 1 相接近。由于 THQ 是按人日均摄入茶量为 8 g 计算的, 茶粉作为茶饮料摄入人体, 饮用习惯为一次冲泡一包(不大于 1 g), 故日均摄入量远小于茶叶的 8 g。实际摄入人体的茶粉 HI 值小于计算值, 茶粉对其暴露人群没有明显的健康风险。其健康风险以 Mn、Ni 为主, 可能由于土壤中 Ni 对于低种植年限植物影响更大, 与孙玲玲等^[31]研究结果相近。

对不同种类茶叶、袋装茶、茶粉茶汤中金属及类金属

的致癌风险评估发现, 茶汤中金属及类金属产生的个人健康危害年风险总和为 $9.01 \times 10^{-6} \sim 3.73 \times 10^{-5} a^{-1}$, 低于 US EPA 和 ICRP 推荐的最大可接受风险水平, 表明 Li、Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Sb、Ba、Pb 引起的健康危害很小。致癌物质中以 Cr 和 Ni 的健康风险为主, 有相关研究显示土壤中的 Cr、Ni 受自然来源影响控制^[32-33]。

本研究采用内梅罗法对不同种类茶叶、袋装茶、茶粉的茶汤中金属及类金属的健康风险进行评价, 运用 THQ 和 HI 评估, 以及 US EPA 和 IARC 推荐的健康风险评估模型进行评估, 结果得出均低于最大可接受风险水平, 对暴露人群的健康危害较低。茶叶、袋装茶、茶粉茶汤中的金属及类金属均处于安全饮用范围。

茶叶及其茶制品作为日常快消品, 占有很大一块市场, 本研究可为市民的健康饮茶提供科学依据。但本次研究未考虑冲泡茶叶的生活饮用水中的金属及类金属污染物, 后续将进一步补充研究。

参考文献

- [1] 葛高飞, 沈旭松, 陈诺, 等. 茶多酚和钙离子添加对茶树叶片铅吸收和亚细胞分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1682-1688. GE GF, SHEN XS, CHEN N, *et al.* Effects of tea polyphenols and calcium ions on absorption and subcellular distribution of lead in tea leaves [J]. J Agro-Environ Sci, 2022, 41(8): 1682-1688.
- [2] 张晓凤, 邓志华, 蓝增全. 基于 CiteSpace 的普洱茶及其污染物研究现状可视化分析[J]. 茶叶通讯, 2022, 49(4): 443-452. ZHANG XF, DENG ZH, LAN ZQ. The based on CiteSpace metrology analysis of the research progress in Pu'er tea and its pollutants [J]. J Tea Commun, 2022, 49(4): 443-452.
- [3] CLEMENS S, AARTS MG, THOMINE SE. Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning [J]. Trends Plant Sci, 2013, 18(2): 92-99.
- [4] 方嘉, 何影, 黄乃涛, 等. 基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价: 以浙江省某电子垃圾拆解区为例[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 4027-4038. FANG J, HE Y, HUANG NT, *et al.* Integrated analysis on source-exposure

- risk of heavy metals in farmland soil based on PMF model: A case study in the E-waste dismantling area in Zhejiang Province [J]. *Environ Sci*, 2023, 44(7): 4027–4038.
- [5] HE S, WU J. Hydrogeochemical characteristics, groundwater quality, and health risks from hexavalent chromium and nitrate in groundwater of Huanhe formation in Wuqi County, Northwest China [J]. *Expos Health*, 2019, 11(2): 125–137.
- [6] DONG M, HUANG R, MAO P, *et al.* Immobilization of cadmium by molecular sieve and wollastonite is soil pH and organic matter dependent [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(10): 5128.
- [7] HASANVAND M, MOHAMMADI R, KHOSHNAMVAND N, *et al.* Dose-response meta-analysis of arsenic exposure in drinking water and intelligence quotient [J]. *J Environ Health Sci Eng*, 2020, 18(2): 1691–1697.
- [8] 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.
CHEN JH, CHEN JR, FENG P, *et al.* Probabilistic risk assessment of dietary exposure to lead among Chongqing residents [J]. *J Hyg Res*, 2023, 52(4): 611–617.
- [9] 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 evaluation of aluminium, lead, arsenic, mercury, chromium and cadmium content in tea [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(1): 291–297.
- [10] SOFUOGLU SC, KAVCAR PI. An exposure and risk assessment for fluoride and trace metals in black tea [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 158(2-3): 392–400.
- [11] 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.* Contamination characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil and tea in the Jiaodong main tea producing area [J]. *Chin J Food Hyg*, 2023, 35(8): 1174–1182.
- [12] 张丽娜, 魏成熙. 贵州北部土壤与灌溉水重金属含量及评价[J]. *耕作与栽培*, 2007, (6): 32–33, 58.
ZHANG LN, WEI CX. Heavy metal content and evaluation of soil and irrigation water in Northern Guizhou [J]. *Till Cultiv*, 2007, (6): 32–33, 58.
- [13] 邱孝焯, 黄东风, 蔡顺香, 等. 福州蔬菜污染及污染源调查和治理研究[J]. *福建农业学报*, 2000, 15(1): 16–21.
QIU XX, HUANG DF, CAI SX, *et al.* Investigation on Fuzhou vegetable pollution and pollutant sources and its control [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2000, 15(1): 16–21.
- [14] 胡承成, 何洁, 刘文锋. 黎平茶叶重金属含量与安全性评价[J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(6): 126–129.
HU CC, HE J, LIU WF. Heavy metals content and safety evaluation of tea produced in Liping County [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2018, 46(6): 126–129.
- [15] 牟明辉, 石杨程, 张晓晴, 等. 恩施富硒茶园土壤重金属和氟含量及风险评估[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(5): 61–65.
MOU MH, SHI YC, ZHANG XQ, *et al.* Content and risk assessment of heavy metal and fluorine in selenium enriched tea garden soils in Enshi area [J]. *J Henan Agric Sci*, 2016, 45(5): 61–65.
- [16] 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.
- [17] 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]. *Environ Monit Assess*, 2015, 187(5): 1–12.
- [18] 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 Addit Contam B*, 2014, 7(2): 99–105.
- [19] 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.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in drinking water source of Guiyang [J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, 31(10): 2039–2047.
- [20] 云奋, 叶海涓, 黄涵. 海南省市售苦丁茶和鹧鸪茶及茶汤中9种元素污染特征及健康风险评估[J]. *实用预防医学*, 2021, 28(9): 1054–1058.
YUN F, YE HM, HUANG H. Pollution characteristics and health risk assessment of nine elements in commercially available Kuding and Partridge tea leaves and their infusions in Hainan Province [J]. *Pract Prev Med*, 2021, 28(9): 1054–1058.
- [21] 顾丰颖, 丁雅楠, 朱金锦, 等. 我国小麦镍的污染调查及健康风险评估[J]. *核农学报*, 2022, 36(12): 2447–2454.
GU FY, DING YN, ZHU JJ, *et al.* Investigation and health risk assessment of nickel pollution in wheat in China [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2022, 36(12): 2447–2454.
- [22] 林新校, 吴泽. 食品中重金属的健康风险评估研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(12): 225–233.
LIN XX, WU Z. Research progress on health risk assessment of heavy metals in food [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(12): 225–233.
- [23] 陈祝军, 钱志荣, 秦园, 等. 某市生活饮用水中 10 种金属污染物含量及其健康风险初步评价[J]. *医学动物防制*, 2022, 38(4): 361–364, 369.
CHEN ZJ, QIAN ZR, QIN Y, *et al.* Assessment on the levels and health risks of 10 kinds of metal pollution in a city's drinking water [J]. *J Med Pest Control*, 2022, 38(4): 361–364, 369.
- [24] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1550–1560.
WANG SY, WU WY, LIU F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas [J]. *China Environ Sci*, 2018, 38(4): 1550–1560.
- [25] 祝慧娜, 袁兴中, 曾光明, 等. 基于区间数的河流环境健康风险模糊综合评价模型[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(7): 1527–1533.
ZHU HN, YUAN XZ, ZENG GM, *et al.* An integrated fuzzy model based on interval numbers for assessment of environmental health risks of water sources [J]. *J Environ Sci*, 2009, 29(7): 1527–1533.
- [26] 权泰鹏, 渠凌丽, 朱利明. ICP-MS 法同时测定茶叶中 18 种元素[J]. *现代预防医学*, 2016, 43(12): 2171–2174.
QUAN TP, QU LL, ZHU LM. Simultaneous determination of 18 kinds of elements in tea by ICP-MS [J]. *Mod Prev Med*, 2016, 43(12): 2171–2174.
- [27] 刘文政, 杨绍群, 殷忠, 等. 黔产市售绿茶重金属的含量特征及健康风险评估[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(6): 19–25.
LIU WZ, YANG SQ, YIN Z, *et al.* Health risk assessment and characteristics of heavy metals in green tea samples from urban markets in Guizhou Province [J]. *Chin J Inorg Anal Chem*, 2022, 12(6): 19–25.
- [28] 李张伟. 粤东凤凰山区茶园茶叶重金属含量的调查和污染评价[J]. *环*

- 境科学与技术, 2010, 33(9): 183–186.
- LI ZW. Investigation and evaluation of heavy metals in tea of Fenghuang Moutain tea gardens in east Guangdong Province [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 33(9): 183–186.
- [29] 殷国英, 袁建娟, 苗思慧. 惠州市 2019 年市售茶叶中金属污染现状及健康风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(15): 1892–1896.
- YIN GY, YUAN JJ, MIAO SH. Current status and health risk assessment of metal contamination in commercial tea in Huizhou City in 2019 [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2021, 31(15): 1892–1896.
- [30] 黄丽卿, 邹少强, 王文成, 等. 速溶茶中试冻干过程模拟研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(14): 245–253.
- HUANG LQ, ZOU SQ, WANG WC, *et al.* Simulation study of freeze-drying process in pilot-scale production of instant tea powder [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(14): 245–253.
- [31] 孙玲玲, 张鸿龄, 陈亮亮, 等. 不同种植年限设施菜地土壤重金属分布、累积特征及风险评估[J/OL]. *环境科学*, 1-13. [2024-04-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202312274>
- SUN LL, ZHANG HL, CHEN LL, *et al.* Distribution, accumulation characteristics, and risk assessment of heavy metals in vegetable soils of different planting years [J/OL]. *Environ Sci*, 2024, 1-13. [2024-04-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202312274>
- [32] LIU H, ZHANG Y, YANG J, *et al.* Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 767: 144879.
- [33] 赵吉洋, 陈星, 郑刘根, 等. 典型煤矸石堆积区土壤重金属特定源健康风险评估及优先控制源分析[J/OL]. *环境科学*, 2024, 1-13. [2024-05-17]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202403056>
- ZHAO JY, CHEN X, ZHENG LG, *et al.* Identification of priority source for heavy metals in soils of typical coal gangue accumulation areas based on source-specific health risk assessment [J/OL]. *Environ Sci*, 2024, 1-13. [2024-05-17]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202403056>

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



吴梅, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全质量检测。

E-mail: 240986276@qq.com



陈祝军, 主任技师, 主要研究方向为食品安全质量检测。

E-mail: 13913618154@126.com