

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240517001

# 不同色泽大米中5种金属元素检测及膳食风险分析

林杰<sup>1</sup>, 郭昱娇<sup>1\*</sup>, 郭俊明<sup>2</sup>

(1. 昆明市生态环境局五华分局生态环境监测站, 昆明 650031; 2. 昭通学院, 昭通 657000)

**摘要:** **目的** 建立湿法消解和火焰原子吸收光谱法检测3种大米中Ca、Fe、Mn、Cu和Zn等5种金属元素含量的方法, 并评估其膳食风险。**方法** 以云南省红河县紫米、红米和白米为实验对象, 湿法消解处理大米样品, 采用火焰原子吸收光谱法分别检测分析3种大米中5种金属元素含量, 结合单一元素可耐受最高摄入量及靶标危害商值(target hazard quotient, THQ)进行大米膳食风险分析。**结果** 3种大米中均检测出Ca、Fe、Mn、Cu和Zn元素; 紫米和白米中各元素回收率分别在97.96%~101.45%和97.27%~102.97%之间, 相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)值分别在1.52%~2.31%和0.42%~2.41%之间, 方法可靠。**结论** 湿法消解和火焰原子吸收法精密度好、准确度高, 适用于测定3种大米中Ca、Fe、Mn、Cu和Zn元素含量, 所测元素的THQ均小于1, 食用3种大米均不会产生非致癌健康风险。

**关键词:** 紫米; 白米; 红米; 火焰原子吸收法; 金属元素; 膳食风险分析

## Detection and dietary risk assessment of 5 kinds of metallic elements in different color rice

LIN Jie<sup>1</sup>, GUO Yu-Jiao<sup>1\*</sup>, GUO Jun-Ming<sup>2</sup>

(1. Eco-environment Monitoring Station of Wuhua Branch, Kunming Eco-environment Bureau, Kunming 650031, China; 2. Zhaotong University, Zhaotong 657000, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for the determination of the content of 5 kinds of metallic elements, including Ca, Fe, Mn, Cu, and Zn, in 3 kinds of rice using wet digestion and flame atomic absorption chromatography, and evaluate their dietary risk assessment. **Methods** Purple rice, red rice and white rice from Honghe County of Yunnan Province were taken as experimental objects. The samples were processed by wet digestion, and the content of 5 metal elements in 3 kinds of rice was detected and analyzed by flame atomic absorption spectrometry. The dietary risk of rice was analyzed by combining the maximum tolerable intake of a single-element and the target hazard quotient (THQ). **Results** Ca, Fe, Mn, Cu and Zn elements were detected in all 3 kinds of rice. The recoveries of elements in purple rice and white rice were 97.96%~101.45% and 97.27%~102.97%, respectively, and the relative standard deviations (RSDs) values were 1.52%~2.31% and 0.42%~2.41%, respectively. The method was

基金项目: 国家自然科学基金项目(51972282)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51972282)

\*通信作者: 郭昱娇, 高级工程师, 主要研究方向为水环境与生态风险评估及绿色新型化学电源材料研究。E-mail: guoyujiao1988@163.com

\*Corresponding author: GUO Yu-Jiao, Senior Engineer, Eco-environment Monitoring Station of Wuhua Branch, Kunming Eco-environment Bureau, No.318, Hongling Road, Wuhua District, Kunming 650031, China. E-mail: guoyujiao1988@163.com

reliable. **Conclusion** The wet digestion method and flame atomic absorption method have good precision and high accuracy, and are suitable for the determination of Ca, Fe, Mn, Cu and Zn content in 3 kinds of rice. The THQ of the measured elements is less than 1, and the consumption of 3 kinds of rice will not cause non-carcinogenic health risks.

**KEY WORDS:** purple rice; white rice; red rice; flame atomic absorption method; metallic element; dietary risk assessment

## 0 引言

大米是我国的主要粮食之一, 尤其南方均以大米为主食, 也是全球消费量最大的谷物之一<sup>[1-2]</sup>。除栽培白米外, 我国人民培育出了丰富多彩、各具特色的有色稻米地方品种, 如紫米、黑米、红米、黄米和绿米, 其中以红米和紫(黑)米最常见<sup>[3]</sup>, 红米与紫米是稻米中重要的特异种质资源和功能稻米。根据《隋书》记载“海陵盛产桃花米”, 我国已有数千年栽培红米稻的历史, 红米富含营养, 尤以蛋白质含量高和富含铁质微量元素而著称<sup>[4-5]</sup>。红米除富含矿物质元素外, 还有很好的药用价值, 可滋阴补肾、健脾暖胃, 以及活血补血、润肤止痒、消肿散淤等功效, 被称之为神仙米、长寿米等<sup>[6-9]</sup>。紫米是我国珍贵有色稻米种质资源, 仅湖南、四川、贵州、云南等地有少量栽培, 大多为籼型紫糯水稻<sup>[9-11]</sup>。与普通白米相比, 紫米营养价值更高, 不仅提供基本的蛋白质、维生素、膳食纤维和矿物质营养, 其丰富的花青素已被证明可以降低患癌症和肥胖等疾病的风险, 具有抗癌、消炎、抗糖尿病和降血脂等生物活性<sup>[6,9-13]</sup>。

矿物质元素在人体内不能合成, 必需通过食物或饮水等补充, 矿物质元素参与人体正常生理、生化过程, 人体生理需要量和中毒剂量都有一定范围, 摄入不足会导致人体部分功能失调, 摄入过量则产生中毒<sup>[1,14]</sup>。随着人民生活水平的提高, 人们越来越注重大米的安全和内在品质特性, 大米含有丰富的有益矿物质元素, 是人体吸收矿物质元素的主要来源<sup>[13-19]</sup>, 矿物质元素含量的高低也是判别大米品质的标准<sup>[17]</sup>。李倩等<sup>[15]</sup>测定了云南不同产地大米中 Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、P、Zn、Se 等矿物质元素, 表明不同品种、不同产地大米中矿物质元素含量差异较大。何露露等<sup>[16]</sup>检测了东北、华东和华南不同产地大米中的 22 种金属元素含量, 表明不同产地大米中的金属元素含量有较大差别, 如东北大米的铅含量和汞含量明显低于华东和华南大米等。杨晓忱<sup>[17]</sup>测定宁夏富硒大米发现富硒大米除了 Se 含量高外, Ca、Sn、K、Mg 4 种元素在富硒大米中含量也较高, 并可以用于判别富硒大米和普通大米。可见, 产地和品种是矿物质元素成分差异的主要原因。另一方面, 城市垃圾、工业废水以及含有重金属的农药和化肥等的使用, 对农业生产环境构成了威胁, 会造成土壤金属元素富集<sup>[16,20-24]</sup>, 从而影响大米的矿物质元素膳食风险。消解大米的前处理方法主要有湿法消解、微波消解、干灰

化法等<sup>[1,25-26]</sup>, 其中湿法消解主要是采用混合酸溶液在电热板上直接加热对大米样品进行消解, 湿法消解的消解温度较低, 通常不会造成易挥发元素的损失<sup>[1]</sup>。本研究采用湿法消解和火焰原子吸收光谱法测定云南省紫米、红米和白米中的 Ca、Fe、Mn、Cu 和 Zn 等 5 种金属元素的含量水平, 并参考 GB/T 1354—2018《大米》、GB 2715—2016《食品安全国家标准 粮食》、GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》等, 以靶标危害指数法(target hazard quotient, THQ)评价大米中金属元素对人体的膳食风险, 以期为不同色泽大米中金属元素含量的测定提供快速、准确的检测方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

AA-6300 原子吸收分光光度计(日本岛津公司); Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 空心阴极灯(北京有色金属研究所); AR224CN 电子分析天平(精度 0.1 mg, 奥豪斯仪器上海有限公司); DHG-9053A 型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学有限公司); SG1501E 不锈钢电热板(上海硕光电子科技有限公司); WL-200 高速中药粉碎机(浙江省瑞安市威力制药机械厂); 玻璃仪器, 使用前于 5%硝酸溶液中浸泡 24 h 以上。

Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 标准储备溶液(1000 μg/mL, 国家钢铁材料测试中心), 使用时用 1%硝酸分别稀释成 100 μg/mL 标准操作液; 68%硝酸、37%盐酸、30%过氧化氢(分析纯)、72%高氯酸(优级纯)(国药集团化学试剂有限公司); 实验用水为二次去离子水(高纯水, 自制)。

### 1.2 材料来源及处理

紫米、白米和红米样品材料随机采集于云南省红河县自由交易市场的散装米, 每种米各采集 1 kg。3 种米样品按取样规则分别缩分为 200 g, 模拟日常生活水淘洗米, 先将 3 种米用自来水分别各淘洗 2 次, 然后再用高纯水各淘洗 2 次, 晾干水分后置于 60 °C 烘箱中烘烤 6 h, 冷却后用粉碎机粉碎, 分别得到大米样品粉末装入密封袋备用。

### 1.3 火焰原子吸收光谱法工作条件

Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 5 种金属元素均用火焰原子吸收分光光度法在各元素的最佳条件进行测定, 经优化后所选择的最佳仪器工作条件见表 1。

表 1 火焰原子吸收光谱仪操作条件  
Table 1 Operating conditions for flame atomic absorption spectrometry

元素	波长/nm	狭缝宽度/nm	灯电流/mA	燃烧器高度/mm	空气流量/(L/min)	乙炔流量/(L/min)
Ca	422.6	0.7	10	7	15	2.0
Mn	279.5	0.2	10	7	15	2.0
Fe	248.3	0.2	12	9	15	2.2
Zn	213.9	0.7	8	7	15	2.0
Cu	324.8	0.7	6	7	15	1.8

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 湿法消解处理大米

分别称取紫米、白米和红米粉末各 2 g(精确到 0.0001 g)于烧杯中, 分别各加入 20 mL 浓硝酸浸泡 24 h, 然后分别再加入 5 mL 浓高氯酸, 分别置于恒温电加热板上加热消解, 消解完成, 用 1%硝酸溶解, 移入 50 mL 容量瓶中定容待测。分别平行 3 份湿法消解每种大米, 同法制备空白试液。

### 1.4.2 标准曲线的绘制

按照表 2 中各元素标准溶液浓度, 以 1%硝酸为介质逐级稀释各元素标准储备液, 定容为 50 mL。在各元素火焰原子吸收光谱仪的最佳工作条件下, 分别测定标准溶液中的各元素吸光度, 重复 3 次取其平均值, 5 种元素标准溶液浓度与吸光度具有良好的线性关系, 相关系数在 0.9987~0.9999 之间, 见表 2。

### 1.4.3 测定大米中各元素含量

按绘制各元素标准曲线的绘制条件, 分别测定大米中各金属元素含量, 每种金属元素重复测定 3 次, 取其平均值为实验测定结果。测定时若超出线性范围, 稀释后再测定。

### 1.4.4 3 种大米中 5 种金属元素的膳食风险分析模型

采用美国国家环保署(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)制定的非致癌风险评价方法, 评价紫米、

白米和红米中 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 单一非致癌金属元素对人体健康所产生的健康风险, 该方法假定人体吸收单元素剂量等于其摄入量, 以测定的人体摄入元素量与参考剂量的比值(靶标危害商值, THQ)作为评价标准。若比值 THQ 小于 1, 则单元素无显著非致癌健康风险; 若比值 THQ 大于 1, 单元素对人体有明显非致癌健康风险<sup>[16,20,26-29]</sup>。THQ 值越大, 相应的非致癌健康风险越大。其 THQ 计算公式为式(1)<sup>[28-30]</sup>:

$$THQ=(w_i \times E_F \times E_D \times F_{IR}) / (W_{AB} \times T_A \times R_{FD}) \quad (1)$$

式中:  $w_i$  是大米中  $i$  金属元素的平均含量, mg/kg;  $E_F$  为人群暴露频率, 365 d/a;  $E_D$  为人群暴露时间, 70 a;  $F_{IR}$  为大米摄入量, kg/(人·d);  $W_{AB}$  为人体平均体重, 60 kg;  $T_A$  为人群非致癌性平均暴露时间(365 d/年×暴露年数, 假定为 70 年), d;  $R_{FD}$  为  $i$  金属元素每日允许摄取最大量, mg/(人·kg·d)。

## 1.5 数据处理

实验所有指标测定均重复 3 次, 结果数据均为 3 次平行实验的平均值; Origin 2021 软件和 Excel 2019 进行相关数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 种大米中 5 种金属元素含量分析

紫米、白米和红米中 5 种金属元素含量测定结果见表 3。

表 2 标准溶液浓度和相关系数  
Table 2 Standard solution concentration and correlation coefficient

元素	标准溶液质量浓度/( $\mu\text{g/mL}$ )	相关系数( $r$ )	检出限/( $\mu\text{g/mL}$ )
Ca	0.00、1.00、3.00、5.00、8.00	0.9987	0.004
Mn	0.00、1.00、3.00、4.00、5.00	0.9996	0.003
Fe	0.00、1.00、3.00、5.00、8.00	0.9998	0.007
Zn	0.00、0.10、0.30、0.40、2.00	0.9999	0.003
Cu	0.00、0.10、0.20、0.30、0.40	0.9998	0.003

表 3 3 种大米中 5 种金属元素的测定结果( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 3 Determination results of 5 kinds of metallic elements in 3 kinds of milled rice ( $\mu\text{g/g}$ )

元素	Ca	Mn	Fe	Zn	Cu
紫米	4.5800	12.4175	8.7375	9.8875	2.1038
白米	9.0263	3.9325	1.2113	6.5825	1.6825
红米	14.1725	5.6575	10.5413	9.6250	1.6050

由表 3 可知, 第一, 紫米、白米和红米中含有丰富的 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 矿物元素, 但在 3 种大米中金属元素含量均有差别。研究者已开展了许多不同产地、不同品种大米中的 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 元素的检测分析, 如冉俊<sup>[31]</sup>采用电感耦合等离子体质谱法测定渝东南某矿区大米中 Cu 和 Zn 的含量分别为 2.279  $\mu\text{g/g}$  和 12.705  $\mu\text{g/g}$ , Cu、Zn 元素含量较高。钱丽丽等<sup>[32]</sup>测定五常大米中 Ca、Mn、Fe、Cu 和 Zn 的含量分别为 110.82、10.9、4.19、3.64 和 18.1  $\mu\text{g/g}$ , Ca、Mn、Fe、Cu 和 Zn 元素含量均较高; 姚小云等<sup>[33]</sup>测定新疆大米金属元素含量, 其中伊犁州大米中 Mn、Fe 和 Cu 含量分别为 6.856、3.115 和 2.024  $\mu\text{g/g}$ , Mn 元素含量较高; 张芬等<sup>[34]</sup>测定 6 种大米中金属元素含量, 其中 1 号样品大米中 Ca、Mn、Fe、Cu 和 Zn 含量分别为 58.4、9.72、3.64、2.14 和 14.20  $\mu\text{g/g}$ , Ca、Mn 和 Zn 元素含量较高; 刘丽南等<sup>[35]</sup>分析测定了黑龙江、广州、河北等地 5 种大米中的 30 种金属元素含量, 不同大米中金属元素含量不同, 但同种元素(尤其是微量元素)在不同大米中的含量高低趋势基本相同, 如在 1~5 号大米中 Cu 元素含量分别为 1.55、2.31、3.15、1.26 和 1.72  $\mu\text{g/g}$ , Zn 元素含量分别为 12.5、14.8、11.9、10.4 和 13.6  $\mu\text{g/g}$ , 其中 1 号大米 Ca、Mn、Fe、Cu 和 Zn 含量分别为 54.1、10.6、2.22、1.55 和 12.5  $\mu\text{g/g}$ 。从上述报道大米中金属元素含量文献值可知, 大米中均含有丰富的金属元素, 但不同地区和不同品种大米中金属元素含量有较大差别, 其中宏量元素 Ca 和微量元素 Mn、Zn 的含量均相对较高, 这是由于: (1)不同基因型大米对金属元素的吸收种类和程度不同; (2)不同地域土壤中相关元素含量水平不同, 所以引起不同产地、不同品种大米间金属元素含量的较大差异<sup>[36]</sup>。此外, 根据大米中元素含量水平的不同, 研究者们开展了许多的矿物元素指纹图谱溯源大米产地的研究, 以期希望通过从矿物元素的含量可以科学、直观区分出不同场地及品种的大米<sup>[17,36-39]</sup>。大米作为人类的重要主食, 不仅可以提供人体所需的热量、蛋白质等营养成分, 还可以摄入必须的矿物元素, 是人体矿物元素的主要来源食物<sup>[1,37]</sup>。

第二, 从本研究的 3 种大米中 5 种元素含量大小看, 在紫米中 5 种金属元素含量大小顺序为 Mn>Zn>Fe>Ca>Cu, 白米 Ca>Zn>Mn>Cu>Fe, 红米 Ca>Fe>Zn>Mn>Cu。紫米和红米中矿物元素含量总体比白米的高, 食用紫米和红米更有利于摄入矿物元素<sup>[4,13,15]</sup>。紫米中的 Mn、Cu 和 Zn 含量在 3 种大米中最高, 红米中 Ca 和 Fe 元素含量最高, 白米

中 Ca 和 Cu 元素含量相对较高, 但紫米 Ca 含量和红米 Cu 含量均最低, 白米 Mn、Fe 和 Zn 元素含量相对较低, 而有色米的 Mn、Fe 和 Zn 含量高于白米。裘凌沧等<sup>[37]</sup>的研究表明, Mn、Fe 为形成有色大米色素的主要元素组分, 且 Mn 的影响可能大于 Fe。李轶等<sup>[13]</sup>测定产自湖南新化紫鹊界、云南墨江、陕西洋县紫米中矿质元素的含量表明, 3 种紫米中都含有较丰富的矿质元素, 但 3 种紫米中矿质元素的含量各有特点, 如 Mn、Zn、Cu、Fe 和 Ca 元素在紫鹊界紫米中分别为 32.3、28.2、2.08、15.8 和 155 mg/kg, 墨江紫米中分别为 15.9、21.7、1.54、9.91 和 87.4 mg/kg, 洋县紫米中分别为 28.2、19.1、2.18、12.1 和 130 mg/kg, 其中 Mn、Fe 元素含量较高; 师江等<sup>[11]</sup>检测不同产地紫米金属元素含量, 其中 Mn 和 Fe 元素含量均较高。但, 对于大米中 Mn 和 Fe 元素含量高低是否可作为有色米的品质标志, 需进一步研究其科学依据。另外, 本研究的 3 种大米中, Ca 元素含量均比文献值低得多, 这可能是本研究的大米经过水淘洗处理, 流失了存在于米糠中的 Ca 元素<sup>[4,11,13]</sup>, 因此食用时不宜过多淘洗以免流失 Ca 元素。Ca 是构成骨骼和牙齿的组成元素, 可以保持血液及组织液的碱性, 防止人体酸化, 凝固受伤后流血的伤口, 防止细菌感染, 降低人体胆固醇含量等<sup>[17]</sup>。而本研究中 Mn、Fe、Cu 和 Zn 元素含量与文献值比较总体相差不大, 暗示 Mn、Fe、Cu 和 Zn 微量元素主要存在于大米籽粒中, Mn 和 Zn 元素含量在本研究和文献值中均较高。但本研究紫米和红米中 Mn、Fe、Cu 和 Zn 微量元素比文献值均稍高, 表明紫米和红米营养价值更高, 食用紫米和红米更有利于补充矿物质元素<sup>[15,35]</sup>。Mn、Fe、Cu 和 Zn 元素含量低或高都会影响人体健康, Mn 元素缺乏时会影响生殖系统、葡萄糖耐量, 导致神经衰弱综合征, 影响智力与骨骼发育; Fe 元素又被称为“补血素”, 缺铁会引起贫血<sup>[4]</sup>; Cu 是多种氧化酶的组成成分, 参与各种生理活动和代谢过程, 能增强免疫和机体的防御机能等; Zn 是生命活动中 160 多种酶的组成成分, 缺 Zn 影响人的智力、食欲和生殖机能等<sup>[37]</sup>。

## 2.2 回收率实验

为了检验测定方法的可靠性, 本研究选择紫米和白米为对象, 分别对 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 元素进行加标回收率实验。紫米和白米样品均准确称取 2.0000 g, 结果见表 4 和 5。从表 4 和 5 可以看出, 紫米和白米中各元素回收率分别在 97.96%~101.45%和 97.27%~102.97%之间,

表 4 紫米中 5 种金属回收率和 RSDs 的测定结果

Table 4 Determination results of recovery rates and RSDs of 5 kinds of metal elements in purple rice

元素	测定值/( $\mu\text{g/g}$ )	加标量/( $\mu\text{g/g}$ )	测得总量/( $\mu\text{g/g}$ )	回收率/%	RSDs/%
Ca	4.5800	2.5000	7.0290	97.96	2.23
Mn	12.4175	2.5000	14.8863	98.75	2.14
Fe	8.7375	2.5000	11.2738	101.45	2.31
Zn	9.8875	2.5000	12.4105	100.92	1.52
Cu	2.1038	2.5000	4.5896	99.43	1.61

注: 对标准偏差(relative standard deviations, RSDs), 下同。

表 5 白米中 5 种金属元素回收率和 RSDs 差的测定结果  
Table 5 Determination results of recovery rate and RSDs of 5 kinds of metal elements in white rice

元素	测定值/( $\mu\text{g/g}$ )	加标量/( $\mu\text{g/g}$ )	测得总量/( $\mu\text{g/g}$ )	回收率/%	RSDs/%
Ca	9.0263	2.5000	11.4878	98.46	2.41
Mn	3.9325	2.5000	6.3642	97.27	1.86
Fe	1.2113	2.5000	3.6960	99.39	1.97
Zn	6.5825	2.5000	9.1568	102.97	0.42
Cu	1.6825	2.5000	4.2215	101.56	0.63

RSDs 值分别在 1.52%~2.31%和 0.42%~2.41%之间( $n=6$ ), 分析结果令人满意, 表明方法可靠。

### 2.3 3 种大米中 5 种金属元素的膳食风险分析

通过公式(1)可以计算 3 种大米中 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 单一非致癌金属元素对人体健康所产生的 THQ。根据我国平均食物消费结构人均每年消费稻麦等谷类粮食作物 206 kg<sup>[27]</sup>, 设谷类全部为大米, 则成人每天消费稻米的  $F_{IR}$  取值为 0.564 kg/(人·d);  $R_{ID}$  选取《中国居民膳食营养素参考摄入量(2013 版)》中 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 的每日可耐受最高摄入量分别为 2000、11、42、40 和 8 mg/(人·d)<sup>[40]</sup>, 按照人体平均 60 kg, 分别换算为 33.333、0.183、0.700、0.667 和 0.133 mg/(人·kg·d)。THQ 值计算结果见表 6。

从表 6 可知, 紫米、白米和红米中 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 的 THQ 都小于 1, 尤其 Ca 的 THQ 值均很小, 说明长期食用这 3 种大米, 其 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 元素都不会产生非致癌健康风险<sup>[41]</sup>, 也暗示仅通过食用大米摄入 Ca 元素量严重不足。另一方面, 以成人每天消费大米 0.564 kg 计, 若每天食用白米则摄入 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 元素量分别为 5.09、2.22、0.68、0.95 和 3.71 mg, 食用紫米则摄入元素量分别是 2.58、7.00、4.93、1.19 和 5.78 mg, 根据中国居民膳食营养素参考摄入量, 以 18 岁为例, Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 的人群推荐日摄入量分别为 800、4.5、12(女 20)、12.5(女 7.5)和 0.8 mg/(人·d)<sup>[40]</sup>, 对比可以发现, 食用白米只有 Cu 元素大于居民膳食营养素参考摄入量, 紫米仅有 Mn 和 Cu 可满足元素参考摄入量, 其余元素均不能满足, 所以仅食用大米不足以提供足量的矿物元素, 尤其 Ca 摄入量不足<sup>[42]</sup>, 在日常生活中要食用各种不同食物及水, 形成食物均衡, 以满足不同宏量元素和微量元素的摄入需求。

表 6 3 种大米中 5 种金属元素的 THQ 值  
Table 6 THQ values of 5 kinds of metallic elements in 3 kinds of rice

大米	THQ				
	Ca	Mn	Fe	Zn	Cu
紫米	$1.29 \times 10^{-3}$	0.636	0.118	0.139	0.148
白米	$2.55 \times 10^{-3}$	0.201	0.016	0.093	0.119
红米	$4.00 \times 10^{-3}$	0.290	0.142	0.136	0.035

## 3 结 论

本研究采用湿法消解和火焰原子吸收光谱法测定了云南省 3 种大米中 5 种金属元素的含量水平, 结果表明, 3 种大米中均含有丰富的 Ca、Fe、Mn、Cu 和 Zn 元素, 紫米中 Mn、Cu 和 Zn 含量最高, 而红米中 Ca 和 Fe 元素含量最高, 紫米和红米中的微量元素含量高于白米; 紫米、白米和红米中的 Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cu 的 THQ 均小于 1, 不会产生非致癌健康风险。在 3 种大米中 Ca 的 THQ 值均很小, 预示食用大米摄入 Ca 元素量严重不足, 在日常生活中需要食用不同食物, 以满足人体不同矿物元素的摄入需求。对紫米和白米测定分析 5 种金属元素的加标回收实验结果表明, 紫米和白米中各元素回收率分别在 97.96%~101.45%和 97.27%~102.97%之间, RSDs 值分别在 1.52%~2.31%和 0.42%~2.41%之间, 分析结果令人满意, 表明方法可靠。本次测定的 3 种大米样品采自云南省红河县本地地产大米, 仅分析检测了部分有益元素含量水平, 为科学评价云南各地区大米中金属含量水平, 尤其是有毒元素(如 Pb、Cd、Hg 等)对人体非致癌健康风险影响, 建议研究不同地域和大米品种中其他微量元素和有毒元素的含量水平, 为评价大米中金属元素的膳食风险分析提供科学依据。

## 参考文献

- [1] 杨辰, 黄建立, 林混, 等. 稻米中矿物质元素的检测及其在产地溯源中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 1-8.  
YANG C, HUANG JL, LIN H, et al. Research progress on the detection of mineral elements in rice and the elements-based identification of rice geographical origin [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(20): 1-8.
- [2] KHAN A, KHAN MS, SHAFIQUE MA, et al. Assessment of potentially toxic and mineral elements in paddy soils and their uptake by rice (*Oryza sativa* L.) with associated health hazards in district Malakand, Pakistan [J]. Heliyon, 2024, 10(7): e28043
- [3] 童继平, 李素敏, 刘学军, 等. 有色稻米研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(1): 13-18.  
TONG JP, LI SM, LIU XJ, et al. Research advances in colored rice [J]. J Plant Genet Resour, 2011, 12(1): 13-18.
- [4] 曹学伟, 王熙, 唐晓清, 等. 红米杂草稻中矿质元素及蛋白质含量分析[J]. 江苏农业科学, 2010(3): 368-370.

- CAO XW, WANG X, TANG XQ, *et al.* Analysis of mineral elements and protein content in red rice weedy rice [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2010(3): 368–370.
- [5] 周云, 张守文. “特种稻米”功能特性及其开发利用[J]. *粮食与油脂*, 2002(7): 36–38.
- ZHOU Y, ZHANG SW. Functional characteristics and development and utilization of “special rice” [J]. *Cere Oil*, 2002(7): 36–38.
- [6] 马静, 陈起萱, 凌文华. 红、黑米的保健功效研究[J]. *食品科学*, 2000, 21(12): 139–140.
- MA J, CHEN QX, LING WH. Study on health care effect of red and black rice [J]. *Food Sci*, 2000, 21(12): 139–140.
- [7] 魏毅, 靳西彪, 杨海亮, 等. 红米色素与微量元素硒之间关系的初步研究[J]. *种子*, 2010, 29(5): 1–4.
- WEI Y, JIN XB, YANG HL, *et al.* Preliminary study on relationship between the pigment and the contents of microelement selenium in red rice [J]. *Seed*, 2010, 29(5): 1–4.
- [8] 颜亮, 罗强, 聂远洋, 等. 功能性红米杂交稻微生物发酵研究及微量元素分析[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2010, 47(5): 1177–1182.
- YAN L, LUO Q, NIE YY, *et al.* Studies on the fermentation of functional hybrid red rice and analysis of the content of trace elements [J]. *J Sichuan Univ (Nat Sci Ed)*, 2010, 47(5): 1177–1182.
- [9] 武文豪, 何冲冲, 王传波, 等. 特种稻黑米和红米研究进展[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(7): 1046–1055.
- WU WH, HE CC, WANG CB, *et al.* Research progress on black and red rice of special varieties [J]. *J Plant Genet Resour*, 2024, 25(7): 1046–1055.
- [10] 熊杨苏, 龚加顺, 郭应忠. 云南墨江紫米安全指标评价[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(24): 75–77.
- XIONG YS, GONG JS, GUO YZ. Security index evaluation of purple rice in Mojiang county of Yunnan Province [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2016, 44(24): 75–77.
- [11] 师江, 李倩, 李维峰, 等. 不同产地紫米营养成分比较及其相关性分析[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(11): 2324–2333.
- SHI J, LI Q, LI WF, *et al.* Comparison of nutritional components and correlation analysis in different purple rice varieties [J]. *Chin J Trop Crop*, 2022, 43(11): 2324–2333.
- [12] 张晓文. 发挥优势加快推进紫米产业高质量融合发展[J]. *云南农业*, 2023(8): 34–36.
- ZHANG XW. Give full play to the advantages and accelerate the high-quality integrated development of purple rice industry [J]. *Yunnan Agric*, 2023(8): 34–36.
- [13] 李轶, 卢岚, 李帮锐, 等. 紫米中花青素和矿质元素的测定及评价[J]. *中国卫生检验杂志*, 2022, 32(24): 2966–2971.
- LI Y, LU L, LI BR, *et al.* Determination and evaluation of anthocyanidins and minerals in purple rice [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2022, 32(24): 2966–2971.
- [14] 胡桂霞, 曹美萍, 张燕峰. 电感耦合等离子体-质谱法测定上海市售大米中 40 种元素含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(10): 3902–3912.
- HU GX, CAO MP, ZHANG YF. Determination of 40 kinds of elements in rice sold in Shanghai by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(10): 3902–3912.
- [15] 李倩, 杨旭昆, 杜丽娟, 等. 基于主成分分析的云南大米矿质元素品质评价[J]. *食品工业*, 2023, 44(1): 329–334.
- LI Q, YANG XK, DU LJ, *et al.* Comprehensive evaluation of mineral elements of Yunnan rice quality based on principal component analysis [J]. *Food Ind*, 2023, 44(1): 329–334.
- [16] 何露露, 贾非然, 李欣童, 等. 南京市市售大米、蔬菜中 6 种微量元素含量调查及健康风险评估[J]. *职业与健康*, 2020, 36(24): 3364–3367.
- HE LL, JIA FR, LI XT, *et al.* Content survey and health risk assessment of six trace elements in rice and vegetables sold in Nanjing City [J]. *Occup Health*, 2020, 36(24): 3364–3367.
- [17] 杨晓忱. 宁夏富硒大米的矿物元素判别及品质评价[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 89–94.
- YANG XC. Mineral element discrimination of selenium-enriched rice in Ningxia and its quality evaluation [J]. *Food Mach*, 2022, 38(4): 89–94.
- [18] MENON M, NICHOLLS A, SMALLEY A, *et al.* A comparison of the effects of two cooking methods on arsenic species and nutrient elements in rice [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 914: 169653.
- [19] ASHRAF MW, ALANEZI F. Trace element levels in rice varieties consumed in Saudi Arabia [J]. *Curr Nutr Food Sci*, 2024, 20(2): 205–209.
- [20] 蒋沙沙, 霍永红, 李德海, 等. 大米中主要重金属污染分析及风险评估研究现状[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 417–426.
- JIANG SS, HUO YH, LI DH, *et al.* Analysis of heavy metal pollution in rice and its status of risk assessment [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(2): 417–426.
- [21] TAVAREZ M, GRUSAK MA, SANKARAN RP. The effect of exogenous cadmium and zinc applications on cadmium, zinc and essential mineral bioaccessibility in three lines of rice that differ in grain cadmium accumulation [J]. *Foods*, 2023, 12(21): 4026.
- [22] ZHAO P, HUANG P, YAN X, *et al.* Inhibitory effect of exogenous mineral elements (Si, P, Zn, Ca, Mn, Se, Fe, S) on rice Cd accumulation and soil Cd bioavailability in Cd-contaminated farmlands: A meta-analysis [J]. *Chemosphere*, 2023, 1: 140282.
- [23] SURIYAGODA L, SIRISENA D, RATHNAYAKE U, *et al.* Variation in essential mineral element and toxic trace element concentrations in the seeds of Sri Lankan rice varieties as affected by milling and soil fertility [J]. *J Plant Nutr*, 2023, 46(18): 4401–4419.
- [24] WELNA M, SZYMZYCHA-MADEJA A, POHL P. Rice water—more a source of nutrition elements or toxic arsenic? multi-element analysis of home-made (natural) rice water and commercialized rice-based products using (HG)-ICP/OES [J]. *Processes*, 2023, 11(9): 2674.
- [25] 李霞, 王棚, 罗丽卉, 等. 湿法快速消解-原子荧光光谱法测定农产品中汞[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(1): 41–45.
- LI X, WANG P, LUO LH, *et al.* Determination of total mercury in agricultural products by rapid wet digestion-atomic fluorescence spectrometry [J]. *Chin J Inorg Anal Chem*, 2022, 12(1): 41–45.
- [26] 匡立学, 聂继云, 李志霞, 等. 辽宁省 4 种主要水果矿质元素含量及其膳食暴露评估[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3993–4003.
- KUANG LX, NIE JY, LI ZX, *et al.* Mineral element contents of four main fruits from Liaoning Province and their dietary exposure assessment [J]. *Sci Agric Sin*, 2016, 49(20): 3993–4003.
- [27] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. *环境科学*, 2003, 24(3): 112–115.
- LI ZW, ZHANG YL, PAN GX, *et al.* Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake [J]. *Environ Sci*, 2003, 24(3): 112–115.

- [28] PAN XD, HAN JL, SHEN HT. Distribution and risk assessment of multiple elements in rice from southeast China using Monte Carlo simulation [J]. *J Food Compos Anal*, 2024, 129: 106103.
- [29] IMRAN W, RICHARDSON JB. Trace element (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Se, U) concentrations and health hazards from drinking water and market rice across Lahore City, Pakistan [J]. *Sustain*, 2023, 15(18): 13463.
- [30] SARKAR MIU, ISLAM S, HOSAIN MT, *et al.* Distribution of essential and non-essential elements in rice-based products sold in Australian markets: Exposure assessment [J]. *J Food Compos Anal*, 2023, 120: 105339.
- [31] 冉俊. 电感耦合等离子体质谱法同时测定渝东南某矿区大米中的 15 种元素[J]. *食品与药品*, 2019, 2(5): 387–391.  
RAN J. Simultaneous determination of 15 elements in rice from a mining area in Southeastern Chongqing by ICP-MS [J]. *Food Drug*, 2019, 2(5): 387–391.
- [32] 钱丽丽, 邱彦超, 李殿威. 母质土壤对大米矿物元素含量的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 8–14.  
QIAN LL, QIU YC, LI DW. Effect of parent soil on rice mineral element content [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2021, 36(6): 8–14.
- [33] 姚小云, 蒋琪, 杨滨银, 等. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定大米中 20 种元素[J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(4): 245–251.  
YAO XY, JIANG Q, YANG BY, *et al.* Determination of 20 kinds of elements in rice by ICP-MS [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2023, 58(4): 245–251.
- [34] 张芬, 赵亚晴, 徐萍. ICP-MS/MS 技术同时测定大米中多种元素含量[J]. *现代食品*, 2024, 30(3): 158–161.  
ZHANG F, ZHAO YQ, XU P. Simultaneous determination of multiple element content in rice using ICP-MS/MS technology [J]. *Mod Food*, 2024, 30(3): 158–161.
- [35] 刘丽南, 吴春敏, 高颀, 等. 基于 ICP-MS/MS 技术测定大米中 30 种微量元素[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(23): 259–265.  
LIU LN, WU CM, GAO Z, *et al.* Determination of 30 trace elements in rice based on ICP-MS/MS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(23): 259–265.
- [36] 杨小芳, 陈育才, 刘建福, 等. 不同产地姜黄属植物中姜黄素类成分及矿质元素分析[J]. *植物学报*, 2019, 54(3): 335–342.  
YANG XF, CHEN YC, LIU JF, *et al.* Analysis of curcuminoids and mineral elements in curcuma from different habitats [J]. *Chin Bull Bot*, 2019, 54(3): 335–342.
- [37] 裴凌沧, 潘军, 段彬伍. 有色米及白米矿质元素营养特征[J]. *中国水稻科学*, 1993(2): 95–100.  
QIU LC, PAN J, DUAN BW. The mineral nutrient component and characteristics of color and white rice [J]. *Chin J Rice Sci*, 1993(2): 95–100.
- [38] 颜治, 林起辉, 雷红琴, 等. 基于无机多元素分析鉴别我国主要进口大米产地[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(13): 5455–5462.  
YAN Z, LIN QH, LEI HQ, *et al.* Geographical origin identification of major rice imported to China based on inorganic multi-element analysis [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(13): 5455–5462.
- [39] 石春红, 曹美萍, 胡桂霞. 基于矿物元素指纹图谱技术的松江大米产地溯源[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 300–306.  
SHI CH, CAO MP, HU GX. Geographical origin traceability of Songjiang rice based on mineral elements fingerprints [J]. *Food Sci*, 2020, 41(16): 300–306.
- [40] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2013 版)[M]. 北京: 中国科学出版社, 2014.  
Chinese Nutrition Society. Chinese DRIs (2013 edition) [M]. Beijing: China Science Press, 2014.
- [41] 王奇, 陈丽娜, 彭韵洁, 等. 五味子中金属元素分析及膳食风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(4): 1310–1317.  
WANG Q, CHEN LN, PENG YJ, *et al.* Analysis of metallic elements in *Schisandra chinensis* and assessment of dietary risk [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(4): 1310–1317.
- [42] LIU Q, LU W, BAI C, *et al.* Cadmium, arsenic, and mineral nutrients in rice and potential risks for human health in South China [J]. *Environ Sci Poll Res*, 2023, 30(31): 76842–76852.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)

## 作者简介

林 杰, 高级工程师, 主要研究方向为环境监测分析。  
E-mail: 55255507@qq.com

郭昱娇, 高级工程师, 主要研究方向为水环境与生态风险评价及绿色新型化学电源材料研究。  
E-mail: guoyujiao1988@163.com