

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250123001

引用格式: 黄春燕, 周怡, 张彩玲, 等. 钦州市市售马铃薯中27种无机元素含量及其重金属污染评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 187-194.

HUANG CY, ZHOU Y, ZHANG CL, et al. Analysis of 27 kinds of inorganic elements content and heavy metal pollution assessment in commercially available *Solanum tuberosum* L. in Qinzhou City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 187-194. (in Chinese with English abstract).

钦州市市售马铃薯中27种无机元素含量及其 重金属污染评估

黄春燕, 周怡, 张彩玲, 黄秋银, 邓哲, 谭得燕, 何敏*

(钦州市检验检测中心, 钦州 535000)

摘要: **目的** 测定钦州市市售马铃薯中27种无机元素含量, 并评估其重金属污染情况。**方法** 采用GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中电感耦合等离子体质谱法对马铃薯中27种无机元素进行定量分析, 根据元素危害性运用单因子污染指数法及内梅罗综合指数法结合化学计量法, 综合评价样品的安全性及其特征元素的分布。**结果** 市售马铃薯中含有丰富的微量元素, 包括人体必需常量元素Na (7.50~458.20 mg/kg)、Mg (66.40~429.40 mg/kg)、K (1620.80~7397.60 mg/kg)、Ca (15.00~123.60 mg/kg); 必需微量元素Mn (0.46~5.16 mg/kg)、Fe (3.00~142.10 mg/kg)、Cu (0.24~1.12 mg/kg); 危害元素Pb (0~0.08 mg/kg)、Cd (0~0.03 mg/kg)、As (0~0.08 mg/kg)、Cr (0~0.32 mg/kg)。危害元素Hg、Sn、Ni均未检出。危害元素含量越低, 安全性越好; 单因子污染指数法及内梅罗综合指数值显示, 所有样品中的Pb、Cd、总Hg、总As、Cr 5种重金属元素的单因子污染指数和内梅罗综合指数均小于0.7, 为优良等级, 污染程度为安全级; 主成分分析预测Li、Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、As、Mg、K、Cu、Zn、Na、Ca、Sr为特征无机元素; 聚类分析将样品分为两大类。**结论** 该市市售马铃薯危害元素含量低、受污染程度低, 含量未超过GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的限量要求, 因此, 本次所有受试的马铃薯样品均为安全食品, 其生长环境没有受到重金属污染。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 马铃薯; 无机元素; 污染评估

Analysis of 27 kinds of inorganic elements content and heavy metal pollution assessment in commercially available *Solanum tuberosum* L. in Qinzhou City

HUANG Chun-Yan, ZHOU Yi, ZHANG Cai-Ling, HUANG Qiu-Yin,

DENG Zhe, TAN De-Yan, HE Min*

(Qinzhou Inspection and Testing Institute, Qinzhou 535000, China)

ABSTRACT: Objective To determine the content of 27 kinds of inorganic elements in commercially available

收稿日期: 2025-01-23

第一作者: 黄春燕(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品药品安全检验检测技术, 食品药品质量控制等方面。E-mail: 441997223@qq.com

*通信作者: 何敏(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全等方面研究。E-mail: 543474445@qq.com

Solanum tuberosum L. in Qinzhou City and evaluate the situation of heavy metal pollution. **Methods** Quantitative analysis of 27 kinds of inorganic elements in *Solanum tuberosum* L. was conducted using the inductively coupled plasma mass spectrometry method from GB 5009.268—2016 *National food safety standard—Determination of multiple elements in foods*. The safety of the samples and the distribution of characteristic elements were comprehensively evaluated by combining the single-factor pollution index method, Nemerow comprehensive index method, and chemometrics based on the toxicity of the elements. **Results** The commercial *Solanum tuberosum* L. from Qinzhou City contained abundant trace elements, including the essential constants of human body such as Na (7.50–458.20 mg/kg), Mg (66.40–429.40 mg/kg), K (1620.80–7397.60 mg/kg), Ca (15.00–123.60 mg/kg); essential trace elements such as Mn (0.46–5.16 mg/kg), Fe (3.00–142.10 mg/kg), Cu (0.24–1.12 mg/kg); hazardous elements such as Pb (0–0.08 mg/kg), Cd (0–0.03 mg/kg), As (0–0.08 mg/kg), Cr (0–0.32 mg/kg). The hazardous elements Hg, Sn, Ni were not detected. The content of potentially harmful elements was low, indicating good safety. Single-factor pollution index and Nemerow comprehensive index analyses demonstrated that the single-factor pollution index values and Nemerow comprehensive index values for Pb, Cd, total Hg, total As, and Cr in all samples were less than 0.7, categorizing them as excellent grade with safe pollution levels. Principal component analysis identified Li, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, As, Mg, K, Cu, Zn, Na, Ca and Sr as characteristic inorganic elements. Cluster analysis classified the samples into two major categories. **Conclusion** The *Solanum tuberosum* L. are sold in the market in that city, which has a very low content of harmful elements and a low degree of pollution, and the content does not exceed the limit requirements of GB 2762—2022 *National food safety standard—Maximum levels of contaminants in foods*. Therefore, all the tested *Solanum tuberosum* L. samples are safe food, and their growing environment is not polluted by heavy metals.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; *Solanum tuberosum* L.; inorganic elements; pollution assessment

0 引言

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.), 茄科茄属的块茎, 别名土豆、地蛋、洋芋等, 是两用型的农产品, 含有丰富的维生素和矿物质元素^[1], 研究表明, 马铃薯维生素的含量丰富, 可作为主食和蔬菜, 是中国四大主食之一, 种植面积 666.67 万公顷左右^[2], 中国马铃薯种植面积和总产量均居世界第一^[3]。但是目前, 我国大部分地区的土壤重金属污染问题比较明显, 严重影响了农产品质量问题^[4], 马铃薯是生长在土壤下成熟的块根, 因此, 探究马铃薯块根在此过程中受到的污染显得尤为重要。其次, 金属元素是维持人体正常新陈代谢和生命活动的重要物质^[5], 马铃薯本身含有丰富的对人体有益的微量元素, 特别是 Fe、Ca、Se 等, 但也有对人体肺、肾脏等造成潜在损害的重金属元素, 如 Pb、Cd、Hg、Cu、As 等^[6]。食用马铃薯可以提供人体不能合成的矿质元素, 但是矿质元素在人体生理需要量和中毒剂量都有一定范围^[7], 因此, 探讨研究马铃薯中的元素含量情况具有重要意义。目前, 检索相关文献, 赖文锋等^[8]通过微波消解结合电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定白萝卜、胡萝卜、马铃薯和生姜 4 种块根块茎类蔬菜中 Cr、As、Cd 和 Pb 的含量, 侧重于重金属污染; 姚茜等^[9]通过比较超级微波与传统微波处理马铃薯样品的优缺点, 测定了马铃薯中 30 种无机元素; 赵振杰等^[10]通过田间试

验研究重金属 Cd、Pb 复合污染地区不同马铃薯品种 Cd 和 Pb 的富集特性等, 探究马铃薯的安全生产和降低人体健康风险的研究, 但目前鲜少检索到有关马铃薯本身含有的无机元素的含量情况及通过化学计量学分析的报道。

因此, 参照马铃薯富含的营养元素、危害元素情况^[6]及本研究通过检测钦州市不同县(区)农贸市场随机监督抽检回来的 66 批次马铃薯, 采用 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法检测 27 种无机元素, 评估本次受试马铃薯的各个无机元素的含量及其健康危害情况, 以期为市场监管提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

标准物质[Li、B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Cd、Sn、Sb、Ba、Tl、Pb 26 种元素的混合标准溶液(批号: 23DB1147), 质量浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$, Hg(批号: 226020-4), 质量浓度为 1000 $\mu\text{g/mL}$ 、内标[Bi、Ge、In、Re、Rh、Sc 元素的混合溶液(批号: 23D81216), 质量浓度为 10 $\mu\text{g/mL}$](国家有色金属及电子材料分析测试中心); 65%硝酸(UP-S 级, 成都市科隆化学品有限公司)。

马铃薯 66 批次, 所有样品经市场随机抽样得到, 抽检时间为 2023 年 10 月—2024 年 1 月, 详细信息见表 1。

表 1 马铃薯样品信息
Table 1 Sample information of *Solanum tuberosum* L.

编号	来源	采样时间	采样量 /kg	品种	编号	来源	采样时间	采样量 /kg	品种	编号	来源	采样时间	采样量 /kg	品种
S1	钦州市	2023.10.20	3.146	黄皮	S23	浦北	2023.11.01	3.000	黄皮	S45	灵山	2023.11.17	3.000	黄皮
S2	钦州市	2023.10.23	3.128	红皮	S24	灵山	2023.11.02	3.214	黄皮	S46	钦州港	2024.01.08	3.000	黄皮
S3	灵山	2023.10.23	3.100	黄皮	S25	浦北	2023.11.02	3.050	黄皮	S47	钦北	2024.01.08	3.150	黄皮
S4	灵山	2023.10.23	3.100	黄皮	S26	钦州港	2023.11.03	3.150	黄皮	S48	钦北	2024.01.09	3.058	黄皮
S5	灵山	2023.10.24	3.000	黄皮	S27	钦州港	2023.11.03	3.200	黄皮	S49	灵山	2024.01.10	3.150	黄皮
S6	灵山	2023.10.24	3.400	黄皮	S28	钦北	2023.11.03	3.220	黄皮	S50	灵山	2024.01.11	3.200	红皮
S7	灵山	2023.10.24	3.200	黄皮	S29	钦南	2023.11.06	3.160	白皮	S51	灵山	2024.01.11	3.200	黄皮
S8	浦北	2023.10.24	3.050	黄皮	S30	灵山	2023.11.06	3.100	黄皮	S52	钦南	2024.01.15	3.200	黄皮
S9	浦北	2023.10.24	3.050	黄皮	S31	浦北	2023.11.07	3.160	黄皮	S53	钦北	2024.01.15	3.100	黄皮
S10	钦北	2023.10.25	3.250	黄皮	S32	钦北	2023.11.07	3.100	黄皮	S54	浦北	2024.01.16	3.100	黄皮
S11	钦北	2023.10.25	3.150	黄皮	S33	灵山	2023.11.08	3.100	黄皮	S55	钦南	2024.01.17	3.100	黄皮
S12	浦北	2023.10.25	3.100	黄皮	S34	钦南	2023.11.08	3.150	黄皮	S56	浦北	2024.01.18	3.250	黄皮
S13	浦北	2023.10.25	3.000	黄皮	S35	钦南	2023.11.08	3.050	黄皮	S57	钦州港	2024.01.19	3.350	黄皮
S14	灵山	2023.10.26	3.350	黄皮	S36	灵山	2023.11.09	3.160	黄皮	S58	钦南	2024.01.22	3.200	黄皮
S15	灵山	2023.10.26	3.200	黄皮	S37	钦北	2023.11.10	3.113	黄皮	S59	钦北	2024.01.22	3.200	黄皮
S16	灵山	2023.10.27	3.400	黄皮	S38	钦北	2023.11.13	3.200	黄皮	S60	灵山	2024.01.24	3.150	黄皮
S17	钦州市	2023.10.30	3.200	黄皮	S39	钦南	2023.11.13	3.100	黄皮	S61	浦北	2024.01.25	3.264	黄皮
S18	钦南	2023.10.30	3.130	红皮	S40	钦南	2023.11.13	3.250	黄皮	S62	钦南	2024.01.29	3.200	黄皮
S19	钦南	2023.10.31	3.210	黄皮	S41	浦北	2023.11.14	3.050	黄皮	S63	钦北	2024.01.29	3.190	黄皮
S20	灵山	2023.10.31	3.100	黄皮	S42	灵山	2023.11.15	3.250	黄皮	S64	浦北	2024.01.30	3.200	黄皮
S21	灵山	2023.10.31	3.200	白皮	S43	钦南	2023.11.15	3.030	黄皮	S65	钦北	2024.01.30	3.100	黄皮
S22	灵山	2023.11.01	3.100	黄皮	S44	灵山	2023.11.16	3.200	黄皮	S66	钦州港	2024.01.31	3.250	黄皮

1.2 仪器与设备

NexION 1000G 电感耦合等离子体质谱仪(美国铂金埃尔默股份有限公司); Expec786 C 超级微波消解仪(杭州谱育科技发展有限公司); CM100M 复合式研磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司); LS220ASCS 万分之一电子天平(瑞士普利赛斯公司); Center-Edi45FV 纯水机[泽拉布仪器科技(上海)有限公司]。

1.3 无机元素检测方法

本研究中的 Li、B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Cd、Sn、Sb、Ba、Hg、Tl、Pb 元素检测依据 GB 5009.268—2016 第一法。

1.3.1 标准品溶液配制

(1)内标溶液配制

以 Ge、In、Bi 为混合内标液。其中 Li、B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn 元素以 Ge 为内标; As、Se、Sr、Mo、Cd 元素以 In 为内标; Sn、Sb、Ba、Hg、Tl、Pb 元素以 Bi 为内标。

(2)对照品溶液配制

精密吸取 Li、B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Cd、Sn、Sb、Ba、Tl、Pb 26 种元素的混合标准溶液, 用 5% 硝酸溶液逐级稀释, 得到上机质量浓度分别为 0.10、0.25、0.50、1.00、2.50、5.00、10.00、25.00、50.00、100.00、250.00、500.00 ng/mL 系列混合元素对照品溶液; 精密吸取 Hg 元素标准溶液, 用 5% 硝酸溶液逐级稀释, 得到上机质量浓度分别为 0.10、0.25、0.50、1.00、2.50 ng/mL 系列对照品溶液。

1.3.2 供试品溶液的制备

精密称取制备均匀后的样品 1 g, 置于微波消解管中, 加入 5 mL 65% 浓硝酸, 按照如下程序进行消解: 0~20 min, 以 1000 W 的功率, 消解温度升至 240 °C; 20~50 min, 功率为 1000 W, 消解温度为 240 °C; 50~60 min, 功率为 1600 W, 消解温度为 60 °C。待消解结束, 转移消解完全的样品至 50 mL 量瓶中, 同时用超纯水洗涤消解管 3 次, 合并, 定容至刻度。供试品溶液根据上机浓度适当稀释。

1.3.3 ICP-MS 工作条件

将射频功率设为 1600 W; 雾化室温度设为 2 °C; 等离子气流量设为 15.0 L/min; 动能歧视(kinetic energy discrimination, KED)碰撞气流量设为 5.5 mL/min; 辅助气流量设为 1.3 L/min; 雾化气流量设为 0.92 L/min; 重复次数 3 次; 扫描次数 20 次, 以跳峰模式为扫描模式进行样品数据采集。

1.4 危害元素污染程度评价方法

1.4.1 单因子污染指数法

单因子污染指数(P_i)计算如公式(1):

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为污染元素 i 的污染指数; C_i 为测得值; S_i 为限量指导值。其中, P_i 值大小与污染程度有关。 $P_i \leq 0.7$, 优良; $0.7 < P_i \leq 1.0$, 安全; $1.0 < P_i \leq 2.0$, 轻度污染; $2.0 < P_i \leq 3.0$, 中度污染; $P_i > 3.0$, 重度污染^[11-12]。

1.4.2 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数($P_{综}$)计算如公式(2):

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

式中: $P_{综}$ 为样品重金属污染综合指数; P_{max} 为单因子污染指数的最大值; P_{ave} 为单因子污染指数的平均值。 $P_{综} \leq 0.7$, 安全级; $0.7 < P_{综} \leq 1.0$, 警戒线; $1.0 < P_{综} \leq 2.0$, 轻度污染; $2.0 < P_{综} \leq 3.0$, 中度污染; $P_{综} > 3.0$ 重度污染^[11-13]。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2021 软件对 66 批次马铃薯样品原始无机元素数据进行统计和分析, 使用 SPSS 22.0 软件对马铃薯样品原始无机元素数据进行主成分分析和聚类分析, 并从中提取分析图表。

2 结果与分析

2.1 马铃薯样品中 27 种无机元素的含量

市售 66 批次马铃薯中各无机元素含量, 测定结果显示, 马铃薯中含有丰富的无机元素, 其中 Na、Mg、K、Ca、Mn、Fe、Cu 等元素含量较高, 其中人体必需常量元素 Na: 7.50~458.20 mg/kg、Mg: 66.40~429.40 mg/kg、K: 1620.80~7397.60 mg/kg、Ca: 15.00~123.60 mg/kg; 而必需微量元素 Mn: 0.46~5.16 mg/kg、Fe: 3.00~142.10 mg/kg、Cu: 0.24~1.12 mg/kg, 表明了马铃薯中含有丰富人体所需的矿物质元素。

根据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量规定》规定, 马铃薯中各污染物限值如下: Pb \leq 0.2 mg/kg、Cd \leq 0.1 mg/kg、总 Hg \leq 0.01 mg/kg、总 As \leq 0.5 mg/kg、Cr \leq 0.5 mg/kg, 66 批次马铃薯样品的 Pb (0~0.08 mg/kg)、Cd (0~0.03 mg/kg)、Hg(未检出)、As (0~0.08 mg/kg)、Cr (0~0.32 mg/kg) 含量均在限值以下, 其中在 GB 2762—2022 中未规定马铃

薯中 Sn 和 Ni 的限值, 但本研究检测了这两种元素, 含量均为未检出。由此可见, 本研究采集的马铃薯样品中, 重金属符合我国相关标准的食品安全性要求, 也表明了钦州市市场上售卖的马铃薯生长环境没有受到重金属污染。

2.2 马铃薯重金属的安全性评价

虽然 GB 2762—2022 中规定食品中 Pb、Cd、Hg、As、Sn、Ni、Cr 的限值范围, 检测结果也均在限值以下, 但是有些重金属有检出, 人体如若长期摄入这些重金属, 还是会对人体造成不可逆转的损伤^[14]。研究表明, Pb 会对人体神经系统、消化系统及免疫系统造成不同程度的影响, 引起头痛、注意力不集中、易怒、记忆力丧失和迟钝^[15-16], Cd 进入人体后很难排出, 长期累积后侵害组织器官而出现细胞癌变、器官发育不完全等最终损害人体健康^[17], Hg 会破坏中枢神经系统^[18], 具有遗传毒性和致癌潜力^[19], 无机砷 As 和甲基 Hg 均是生物毒性元素, 影响人体的智力、体质和免疫功能, 对人体肝、肾等内脏的危害尤为严重^[20], Cr 具有生物毒性, 特别是六价铬具有相当强的氧化性, 造成皮肤过敏^[21-22], 会对人体造成危害^[23]。因此有必要评估其健康风险, 明确其安全性。

根据单因子污染指数计算, 结果如表 2 数据显示所有样品中的 Pb、Cd、总 Hg、总 As、Cr 等 5 种重金属元素的单因子污染指数 P_i 值均小于 0.7, 为优良等级。表明该市 66 批次市售马铃薯未受到重金属有害元素的污染。

根据内梅罗综合指数法计算, 评估结果表明, 所有样品中 Pb、Cd、Hg、As、Cr 等 5 种重金属的内梅罗综合指数值 $P_{综}$ 均小于 0.7, 污染程度为安全级, 表明该市 66 批次市售马铃薯受到重金属污染为安全级。

2.3 主成分分析

为了评价无机元素对样品的分辨能力, 由于其中 5 种元素(Ni、Se、Sn、Sb、Hg)在本研究中未检出, 因此, 采用主成分分析法对 66 批次马铃薯样品 22 种无机元素含量进行降维因子处理分析, 以明确不同无机元素主成分的特征值及贡献率, 结果见表 3。由表 3 可知, 以主成分的特征值大于 1 为选择依据^[24], 得到 5 个主成分, 累计贡献率为 78.970%, 表明这 5 个主成分代表的信息量较大, 能够说明样品之间的差异信息。

为进一步明确造成样品间差异的微量元素, 通过载荷因子筛选出能区别马铃薯样品的特征元素, 结果见表 4。以因子载荷量大于 0.6 为选择标准^[24], 从表 4 中可以得出, Li、Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、As 8 种无机元素在第一主成分中有较高正负荷值; Mg、K、Cu、Zn 在第二主成分中有较高正负荷值; Na、Ca、Sr 在第三主成分中均有较高正负荷值。因此, 可以预测 Li、Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、As、Mg、K、Cu、Zn、Na、Ca、Sr 为区分这些马铃薯样品的特征无机元素。

表 2 重金属元素的污染评价结果
Table 2 Pollution assessment results of heavy metal elements

编号	单因子污染指数 P_i					内梅罗 综合指数 P_N	污染 程度	编号	单因子污染指数 P_i					内梅罗 综合指数 P_N	污染 程度
	Pb	Cd	Hg	As	Cr				Pb	Cd	Hg	As	Cr		
S1	0.42	0.00	0.00	0.16	0.64	0.45	安全	S34	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.02	安全
S2	0.35	0.15	0.00	0.05	0.00	0.36	安全	S35	0.00	0.20	0.00	0.02	0.00	0.03	安全
S3	0.00	0.18	0.00	0.04	0.00	0.03	安全	S36	0.00	0.18	0.00	0.04	0.00	0.03	安全
S4	0.00	0.31	0.00	0.03	0.00	0.05	安全	S37	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	安全
S5	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	安全	S38	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	安全
S6	0.00	0.13	0.00	0.04	0.00	0.02	安全	S39	0.00	0.09	0.00	0.03	0.00	0.02	安全
S7	0.00	0.10	0.00	0.01	0.00	0.02	安全	S40	0.00	0.08	0.00	0.02	0.00	0.01	安全
S8	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	安全	S41	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	安全
S9	0.00	0.16	0.00	0.03	0.00	0.03	安全	S42	0.00	0.08	0.00	0.02	0.00	0.01	安全
S10	0.00	0.10	0.00	0.04	0.00	0.02	安全	S43	0.35	0.06	0.00	0.10	0.00	0.35	安全
S11	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	安全	S44	0.00	0.08	0.00	0.04	0.00	0.02	安全
S12	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	安全	S45	0.00	0.14	0.00	0.02	0.00	0.02	安全
S13	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	安全	S46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	安全
S14	0.00	0.11	0.00	0.03	0.00	0.02	安全	S47	0.00	0.08	0.00	0.03	0.00	0.02	安全
S15	0.00	0.12	0.00	0.04	0.00	0.02	安全	S48	0.00	0.06	0.00	0.03	0.00	0.01	安全
S16	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	安全	S49	0.00	0.11	0.00	0.03	0.00	0.02	安全
S17	0.00	0.10	0.00	0.01	0.00	0.02	安全	S50	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	安全
S18	0.00	0.17	0.00	0.02	0.00	0.03	安全	S51	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	安全
S19	0.32	0.00	0.00	0.08	0.00	0.33	安全	S52	0.00	0.00	0.00	0.08	0.40	0.07	安全
S20	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	安全	S53	0.00	0.07	0.00	0.09	0.57	0.10	安全
S21	0.00	0.14	0.00	0.05	0.00	0.03	安全	S54	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	安全
S22	0.00	0.20	0.00	0.05	0.00	0.04	安全	S55	0.00	0.07	0.00	0.04	0.00	0.01	安全
S23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	安全	S56	0.00	0.13	0.00	0.02	0.00	0.02	安全
S24	0.00	0.09	0.00	0.01	0.00	0.01	安全	S57	0.00	0.21	0.00	0.05	0.00	0.04	安全
S25	0.00	0.29	0.00	0.02	0.00	0.04	安全	S58	0.00	0.11	0.00	0.02	0.00	0.02	安全
S26	0.00	0.12	0.00	0.02	0.00	0.02	安全	S59	0.00	0.18	0.00	0.03	0.00	0.03	安全
S27	0.00	0.16	0.00	0.04	0.00	0.03	安全	S60	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	安全
S28	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	安全	S61	0.00	0.08	0.00	0.02	0.00	0.01	安全
S29	0.00	0.28	0.00	0.03	0.00	0.04	安全	S62	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.01	安全
S30	0.00	0.34	0.00	0.05	0.00	0.05	安全	S63	0.00	0.19	0.00	0.02	0.00	0.03	安全
S31	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.01	安全	S64	0.00	0.08	0.00	0.02	0.00	0.01	安全
S32	0.00	0.17	0.00	0.02	0.00	0.03	安全	S65	0.00	0.10	0.00	0.03	0.00	0.02	安全
S33	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	安全	S66	0.00	0.10	0.00	0.03	0.00	0.02	安全

表 3 特征值与贡献率
Table 3 Eigenvalues and contribution rates

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%	主成分	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	7.787	35.396	35.396	12	0.297	1.352	95.852
2	3.796	17.252	52.649	13	0.271	1.233	97.085
3	3.526	16.029	68.678	14	0.187	0.851	97.936
4	1.208	5.491	74.169	15	0.133	0.604	98.540
5	1.056	4.801	78.970	16	0.127	0.578	99.118
6	0.786	3.573	82.543	17	0.062	0.282	99.400
7	0.725	3.297	85.840	18	0.053	0.243	99.643
8	0.692	3.145	88.985	19	0.042	0.190	99.833
9	0.529	2.403	91.388	20	0.022	0.100	99.933
10	0.377	1.713	93.101	21	0.008	0.037	99.970
11	0.308	1.399	94.500	22	0.007	0.030	100.000

表 4 因子负荷矩阵
Table 4 Factor load matrix

特征峰	主成分				
	1	2	3	4	5
Li	0.972	-0.021	-0.006	-0.002	-0.063
B	0.307	0.552	0.361	0.207	-0.013
Na	-0.177	-0.268	0.636	0.500	0.346
Mg	0.404	0.807	0.104	0.019	0.081
Al	0.962	-0.117	-0.153	-0.008	-0.094
K	0.224	0.895	0.032	-0.039	0.054
Ca	0.487	-0.088	0.764	0.184	0.012
Ti	0.877	-0.033	-0.161	0.003	-0.077
V	0.950	-0.174	-0.123	-0.045	-0.135
Cr	0.739	-0.094	0.120	0.041	-0.114
Mn	0.610	0.431	-0.272	0.085	0.263
Fe	0.960	-0.224	-0.036	0.014	-0.043
Co	0.296	0.047	-0.724	0.336	-0.030
Cu	0.430	0.605	0.344	-0.048	0.028
Zn	0.300	0.648	0.307	-0.201	0.363
As	0.886	-0.246	-0.053	-0.154	-0.036
Sr	0.207	-0.420	0.785	0.275	0.121
Mo	-0.069	0.122	0.573	0.017	-0.565
Cd	-0.035	0.033	-0.686	0.355	0.328
Ba	0.365	-0.676	0.132	-0.152	0.362
Tl	0.418	-0.063	-0.257	0.565	-0.190
Pb	0.569	-0.411	0.068	-0.381	0.249

2.4 聚类分析

为了挖掘样品间的相似性,通过 SPSS 22.0 软件,采用平均组间连接聚类方法^[20]对 66 批次马铃薯样品中 27 种无机元素进行聚类,结果见图 1。当分类距离为 10 时,66 批次马铃薯样品可聚成两大类:第一类为样品 S58、S63、S51、S55、S27、S45、S12、S21、S49、S20、S4、S7、S52、S57、S61、S14、S37、S60、S64、S53、S47、S62、S13、S59、S56、S50、S5、S10;第二类为样品 S15、S35、S8、S34、S30、S6、S40、S19、S29、S2、S66、S26、S33、S48、S65、S25、S32、S28、S3、S54、S18、S36、S41、S44、S39、S31、S9、S1、S17、S42、S46、S22、S24、S43、S16、S23、S38、S11。结果表明,马铃薯样品无机元素的含量可能与收购产地、生长环境等因素有关,总体差别不大。

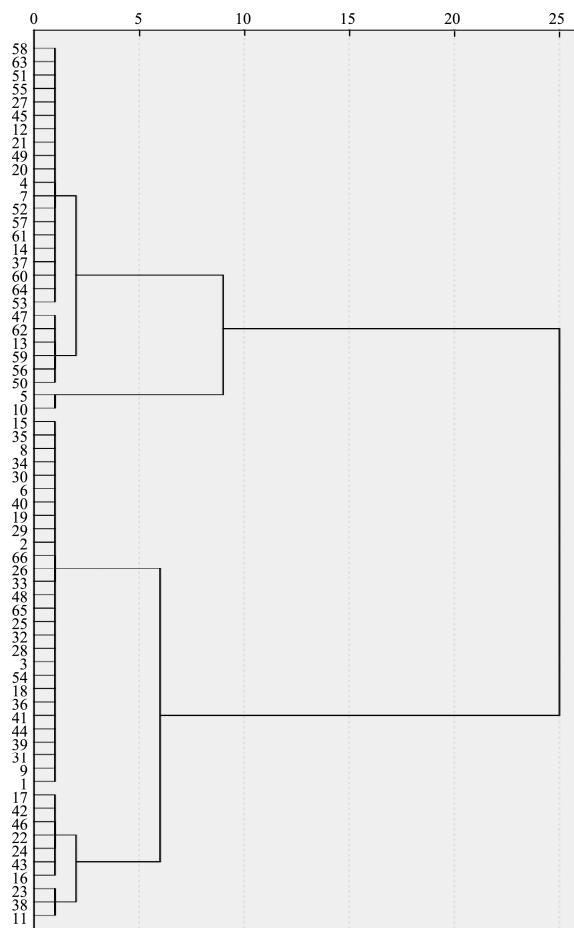


图 1 马铃薯样品聚类分析结果

Fig.1 Cluster analysis results of *Solanum tuberosum* L. samples

3 讨论与结论

本研究结果表明,在本次受试的马铃薯样品中,其含有丰富的无机元素,特别是 Na、Mg、K、Ca、Mn、Fe、Cu 等元素含量较高,其中人体必需常量元素 Na: 7.50~458.20 mg/kg、Mg: 66.40~429.40 mg/kg、K: 1620.80~7397.60 mg/kg、Ca: 15.00~123.60 mg/kg; 而必需微量元素 Mn: 0.46~5.16 mg/kg、Fe: 3.00~142.10 mg/kg、Cu: 0.24~1.12 mg/kg, 危害元素如 Pb、Cd、Hg、As、Cr 等含量均在安全限度范围。在人体必需元素中,Na 可维持机体正常的渗透压和新陈代谢,维持体内酸碱的平衡^[25]; Mg 能激活肌肉和神经,增加身体能量,消化蛋白质、碳水化合物和脂肪等^[26]; K 在维持体内渗透压、酸碱平衡、物质代谢等具有重要作用^[27]; Ca 能促进骨质的融合和发育,有助于人体的骨骼生长发育^[27]; Mn 可增强蛋白质代谢,影响糖代谢中若干酶的活性^[28],具有改善心脏及心肌的功能,维持体内糖和脂肪的正常代谢^[29],Fe 具有维持红细胞代谢、辅助骨髓造血功能^[28],在体内主要参与氧的转运、交换和组织呼吸的过程^[27]。实验结果表明,马铃薯中含有丰

富的人体必需的矿物质元素, 通过对马铃薯样品中 Pb、Cd、Hg、As、Cr 5 种重金属有害元素的安全性进行单因子污染指数和内梅罗综合指数法统计分析结果均表明受试马铃薯安全性良好。因此, 本次所有受试的马铃薯样品均为安全食品。此外, 通过 SPSS 22.0 统计软件对本次 66 批次马铃薯样品进行数据统计分析, 主成分分析结果可以预测 Li、Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、As、Mg、K、Cu、Zn、Na、Ca、Sr 为区分这些马铃薯样品的特征无机元素; 聚类结果分为两类。

食品中重金属污染是世界卫生组织重点关注的食品安全问题^[30]。在食品安全问题特别是重金属污染日益受关注的当前, 做好食品安全检验检测意义重大。综上, 在本研究中, 该市市场上售卖的马铃薯危害元素含量很低、受污染程度低, 含量未超过 GB 2762—2022 的限量要求, 因此, 本次所有受试的马铃薯样品均为安全食品, 其生长环境没有受到重金属污染, 为市场监管提供数据参考。

参考文献

- [1] 屈冬玉, 谢开云, 金黎平, 等. 中国马铃薯产业发展与粮食安全[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 358–362.
QU DY, XIE KY, JIN LP, *et al.* Development of potato industry and food safety in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2005, 38(2): 358–362.
- [2] 国家统计局. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2023.
- [3] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 中国马铃薯主产区生产特点、限制因子和对策分析[J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 374–382.
LI Y, WANG J, TANG JZ, *et al.* Analysis of production characteristics, limiting factors, and countermeasures in major potato production areas in China [J]. China Potato, 2020, 34(6): 374–382.
- [4] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186–194.
ZENG XB, XU JM, HUANG QY, *et al.* Several thoughts on heavy metal issues in Chinese farmland [J]. Journal of Soil Science, 2013, 50 (1): 186–194.
- [5] 赖志坚, 陈秋玲, 刘国伟, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定不同产地莲子心中 19 种金属元素及其主成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 185–193.
LAI ZJ, CHEN QL, LIU GW, *et al.* Determination and principal component analysis on 19 kinds of metal elements in *Nelumbo nucifera Gaertn* from different origins by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 185–193.
- [6] 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]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 225–233.
- [7] 林杰, 郭昱娇, 郭俊明. 不同色泽大米中 5 种金属元素检测及膳食风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 287–293.
LIN J, GUO YJ, GUO JM. Detection and dietary risk analysis of 5 metal elements in different color rice [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(21): 287–293.
- [8] 赖文锋, 胥廷良, 梁施韵. 微波消解结合电感耦合等离子体质谱法测定 4 种块根块茎类蔬菜中铬、砷、镉和铅的含量[J]. 食品安全导刊, 2024(32): 91–95.
LAI WF, XU TL, LIANG SY. Microwave digestion combined with inductively coupled plasma mass spectrometry for the determination of chromium, arsenic, cadmium, and lead content in four types of root and tuber vegetables [J]. China Food Safety Magazine, 2024(32): 91–95.
- [9] 姚茜, 胡俊忠. 超级微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定马铃薯中 30 种无机元素的含量[J]. 实用预防医学, 32(4): 498–502.
YAO Q, HU JZ. Determination of 30 inorganic elements in potatoes by super microwave digestion inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Practical preventive medicine, 32(4): 498–502.
- [10] 赵振杰, 任超, 杜倩倩, 等. 不同马铃薯品种 Cd、Pb 富集特性及多元素互作机制[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(19): 239–252.
ZHAO ZJ, REN C, DU QQ, *et al.* Enrichment characteristics and multi-element interaction mechanisms of Cd and Pb in different potato varieties [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2024, 52(19): 239–252.
- [11] 黄彬彬, 陈明, 施雪敏, 等. ICP-MS 结合化学计量法分析牛大力中金属元素含量及健康风险评估[J]. 中药材, 2022, 45(5): 1168–1172.
HUANG BB, CHEN M, SHI XM, *et al.* ICP-MS combined with chemical stoichiometry analysis of metal element content and health risk assessment in Niudali [J]. Chinese Herbal Medicine, 2022, 45(5): 1168–1172.
- [12] 师敏, 安妮, 吴冀东, 等. 不同干制柴达木枸杞重金属含量测定及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 299–308.
SHI M, AN N, WU JD, *et al.* Determination of heavy metal content and health risk evaluation of different dried Chaidamu *Lycium barbarum* L. [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 299–308.
- [13] 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, 2025, 15(16): 98–106.
WU M, CHEN ZJ, CHEN R, *et al.* Content of 15 kinds of metal and metalloid in tea, tea bag and tea powder and their health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 15(16): 98–106.
- [14] 揭琴丰, 王杉, 杨莹, 等. 江西省市售不同类别代用茶中水分含量及重金属污染状况分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 301–307.
JIE QF, WANG S, YANG Y, *et al.* Analysis of water content and heavy metal pollution in different kinds of substitute tea in Jiangxi Province [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(15): 301–307.
- [15] 王凤芹. 电感耦合等离子体质谱法在食品中多元素分析的发展与应用[J]. 食品安全导刊, 2023(35): 172–174.
WANG FQ. Development and application of inductively coupled plasma mass spectrometry in multi element analysis of food [J]. China Food Safety Magazine, 2023(35): 172–174.
- [16] 徐晓伟, 肖景成. 电感耦合等离子体质谱法测定大米粉中砷、铬、镉和铅元素的两种前处理方法对比研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 87–92.
XU XW, XIAO JC. Comparison of two pretreatment methods for determination of arsenic, chromium, cadmium and lead in rice flour by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(21): 87–92.

- [17] 万子栋, 高天鹏, 周玉霞, 等. 重金属复合胁迫下碱蓬萌发生长及富集特征[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 493-507.
WAN ZD, GAO TP, ZHOU YX, *et al.* Germination, growth, and enrichment characteristics of *suaeda salsa* under heavy metal compound stress [J]. Chinese Journal of Bioengineering, 2020, 36 (3): 493-507.
- [18] GARDNER RM, NYLAND JF, SILBERGELD EK. Differential immunotoxic effects of inorganic and organic mercury species in vitro [J]. Toxicology Letters, 2010,198(2):182-190.
- [19] 张涛, 王成尘, 李立新, 等. 食品中汞的人体生物有效性与健康危害[J]. 科学通报, 2024, 69(32): 4716-4729.
ZHANG T, WANG CC, LI LX, *et al.* The human bioavailability and health hazards of mercury in food [J]. Scientific Bulletin, 2024, 69(32): 4716-4729.
- [20] 杨宝红, 鄢中妮, 熊福平, 等. 微波消解-原子荧光光谱法同时测定人体血液中砷和汞[J]. 化工管理, 2024(8): 69-71, 89.
YANG BH, YAN ZN, XIONG FP, *et al.* Simultaneous determination of arsenic and mercury in human blood by microwave digestion atomic fluorescence spectrometry [J]. Chemical Management, 2024(8): 69-71, 89.
- [21] 王晓波, 李建国, 赵春香, 等. 广州市售食品总铬和六价铬的含量分析[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(22): 86-89.
WANG XB, LI JG, ZHAO CX, *et al.* Analysis of total chromium and hexavalent chromium content in food sold in Guangzhou City [J]. Food Research Development, 2014, 35(22): 86-89.
- [22] 童磊, 范明月, 程永红, 等. 重庆市万州区市售鲜辣椒中镉和铬污染现状评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(18): 6398-6401.
TONG L, FAN MY, CHENG YH, *et al.* Assessment of cadmium and chromium pollution in fresh chili peppers sold in Wanzhou District, Chongqing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(18): 6398-6401.
- [23] 谢文强. 六价铬对人体急性与慢性危害探究[J]. 资源节约与环保, 2016(7): 131-135.
XIE WQ. Exploration of acute and chronic hazards of hexavalent chromium to human body [J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2016(7): 131-135.
- [24] 何秋云, 何敏, 陈明, 等. 基于 ICP-MS 结合化学计量学分析五指毛桃中微量元素含量及健康风险评估[J]. 中药材, 2024(10): 2549-2554.
HE QY, HE M, CHEN M, *et al.* Analysis of trace element content and health risk assessment in five finger peach by ICP-MS combined with chemometrics [J]. Chinese Herbal Medicine, 2024(10): 2549-2554.
- [25] 段亚军, 马海军, 王博, 等. 瓷坩埚和石英坩埚对火焰原子吸收光谱法检测牛奶中钠元素的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(21): 5739-5742.
DUAN YJ, MA HJ, WANG B, *et al.* Comparative study of porcelain crucible and quartz crucible for detecting sodium element in milk by flame atomic absorption spectroscopy [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(21): 5739-5742.
- [26] 张宝华. “镁”食营养丰富有助养生延年[J]. 健康生活, 2021(12): 48-49.
ZHANG BH. Magnesium rich diet is beneficial for health preservation and longevity [J]. Healthy Living, 2021(12): 48-49.
- [27] 孙继春, 赵法兰, 王秋菊, 等. 金丝枣中 11 种元素的定量分析及其与健身防病的相关研究[J]. 微量元素与健康研究, 2001, 18(2): 46-48.
SUN JC, ZHAO FL, WANG QJ, *et al.* Quantitative analysis of 11 elements in golden jujube and their correlation with fitness and disease prevention [J]. Trace Elements and Health Research, 2001, 18(2): 46-48.
- [28] 段玉梅. 必需微量元素金属元素在人体中的作用及毒性[J]. 生物学通报, 2004(6): 25-26.
DUAN YM. The role and toxicity of essential trace metal elements in the human body [J]. Biological Bulletin, 2004(6): 25-26.
- [29] 胡杨, 郭小凤, 杜军良. 火焰原子吸收法测定柚子皮中微量元素 Fe Mn 的含量[J]. 微量元素与健康研究, 2013, 30(3): 44-45.
HU Y, GUO XF, DU JL. Determination of trace elements Fe and Mn in pomelo peel by flame atomic absorption spectroscopy [J]. Trace Elements and Health Research, 2013, 30(3): 44-45.
- [30] 刘冬妮, 陈贻钢, 黄圣南, 等. 海南省 17 种野菜重金属污染风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 90-97.
LIU DN, CHEN YG, HUANG SN, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in 17 wild vegetables in Hainan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 90-97.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)