

基于ICP-MS法比较广西不同产地虫茶无机元素的差异

缪璐¹, 雷向荣¹, 温立香^{2*}

(1. 广西壮族自治区产品质量检验研究院, 广西南宁 530200)

(2. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001)

摘要: 为了研究广西不同产地虫茶无机元素含量差异及安全性, 采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定广西三江、龙胜、融安、平南、梧州五大产地虫茶中 K、Ca、Mg 等 29 种无机元素含量, 结合方差分析、Duncan 多重比较、Pearson 相关性分析以及主成分分析 (PCA) 等多种统计分析方法对不同产地虫茶无机元素含量的差异性进行分析, 结果表明, 各元素在不同产地的分布呈现出复杂且多样的差异特征 ($P<0.05$); 相关性分析发现, 广西虫茶中部分元素存在显著或极显著相关, 其中 B 与 K、Ca 与 Ti、Zn 与 Na 两两之间极显著正相关 ($P<0.01$), Ca 与 Sr、Al 与 Cu、Mn 与 Ni、Sr 与 Ti、Ba 与 B、Ba 与 Sr 两两之间显著正相关 ($P<0.05$), 而 Mg 与 Ba、Mg 与 Sr 两两之间显著负相关 ($P<0.05$); 主成分分析 (PCA) 提取出 3 个主成分, 累积方差贡献率达 93.26%, 明确了 K、Ca 等多种元素是造成不同产地虫茶无机元素组成差异的主要特征元素, 基于主成分得分图, 能够有效区分虫茶的五大产区; 在安全性评估方面, 虽目前虫茶重金属含量未超茶叶标准, 但三江产区 Pb、Cr 含量相对偏高。该研究为广西虫茶的产地判别、品质评价和质量控制提供了理论依据和数据支持。

关键词: 广西虫茶; 无机元素; 电感耦合等离子体质谱法; 统计分析

文章编号: 1673-9078(2026)4-296-302

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0219

Analysis of Differences in Inorganic Elements of Insect Tea from Different Production Areas in Guangxi by Using the ICP-MS Method

MIAO Lu¹, LEI Xiangrong¹, WEN Lixiang^{2*}

(1. Guangxi Institute of Product Quality Inspection, Nanning 530200, China)

(2. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China)

Abstract: To investigate differences in the inorganic element content and safety of insect tea from various production areas in Guangxi, inductively coupled plasma mass spectrometry was used to determine the contents of 29 inorganic elements, such as potassium, calcium, and magnesium, in insect tea from five major production areas in Guangxi (i.e., Sanjiang, Longsheng, Rong'an, Pingnan, and Wuzhou). Multiple statistical analyses were conducted, including variance analysis, Duncan's multiple range test, Pearson's correlation analysis, and principal component analysis (PCA), to analyze differences in the contents of inorganic elements in insect tea from different production areas. The results showed complex and diverse differences ($P<0.05$) in the contents of various

引文格式:

缪璐,雷向荣,温立香.基于ICP-MS法比较广西不同产地虫茶无机元素的差异[J].现代食品科技,2026,42(4):296-302.

MIAO Lu, LEI Xiangrong, WEN Lixiang. Analysis of differences in inorganic elements of insect tea from different production areas in Guangxi by using the ICP-MS method [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 296-302.

收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-04-27; 接受日期: 2025-05-01

基金项目: 广西科技厅重点研发项目 (桂科 AB24010126); 国家现代农业产业体系广西茶叶创新团队建设专项 (nycytxgxcxt-2024-18-07)

作者简介: 缪璐 (1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品安全检测技术研究, E-mail: 37634635@qq.com

通讯作者: 温立香 (1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 茶叶加工与质量评价, E-mail: 864655377@qq.com

inorganic elements in insect tea from different production areas. Correlation analysis revealed that some elements in Guangxi insect tea were significantly or extremely significantly correlated. Specifically, extremely significant positive correlations ($P<0.01$) were found between boron and potassium, calcium and titanium, and zinc and sodium. Significant positive correlations ($P<0.05$) were found between calcium and strontium, aluminum and copper, manganese and nickel, strontium and titanium, barium and boron, as well as barium and strontium. In contrast, significant negative correlations ($P<0.05$) were observed between magnesium and barium as well as magnesium and strontium. Through PCA, three principal components were extracted, with a cumulative variance contribution rate of 93.26%. Multiple elements, including potassium and calcium, were determined to be the main characteristic elements contributing to the differences in the composition of inorganic elements in insect tea from different production areas. Based on the principal component score plot, five major production areas of insect tea were effectively distinguished. In terms of safety assessment, although the contents of heavy metals in the insect tea samples were not found to exceed the standards for tea, the contents of lead and chromium in insect tea from the Sanjiang production area were relatively high. These results provide a theoretical basis and data support for the origin identification, quality evaluation, and quality control of insect tea in Guangxi.

Key words: Guangxi insect tea; inorganic elements; inductively coupled plasma mass spectrometry; statistical analysis

虫茶又名“茶沙”、“茶精”，是我国湘桂黔等山区特有的传统饮品，具有悠久的历史 and 独特的文化内涵，这种以特定昆虫取食特殊植物后，经体内代谢排出的排泄物再经加工而成的特殊茶饮，在民间流传已久，早在明代李时珍《本草纲目》中就有饮用虫茶的记载。因其香气浓郁、滋味清爽，虫茶不仅深受国内消费者喜爱，更在东南亚市场享有盛誉，成为我国特色出口农产品的重要代表^[1-3]。广西因独特的地理环境、丰富的少数民族文化以及民众对凉茶的喜爱，成为虫茶的主要产区之一，分布广泛，如三江、龙胜、融安、平南、梧州等地^[4,5]。

随着人们对健康饮品需求的增加，虫茶因其具有多种保健功效而备受关注，虫茶既能健脾胃，又能清热祛湿、解毒消肿、对降血压、降血糖、降血脂也有一定疗效^[6-11]。在虫茶的众多研究中，无机元素的组成和含量是评估其品质和营养价值的重要指标之一^[12]。无机元素不仅影响虫茶的口感和风味，还与人体健康密切相关，对维持人体正常生理功能具有重要作用。

目前，国内外对虫茶氨基酸含量、脂肪酸含量、品质分析、生物功能特性等研究较为广泛^[12-17]，但针对广西不同产地虫茶无机元素特性的研究相对较少。不同产地的虫茶由于其生长环境（如土壤、气候、水质等）、昆虫种类以及加工工艺的差异，可能导致其无机元素含量和特性存在显著差异。因此，深入研究广西不同产地虫茶的无机元素特性，对于全面了解虫茶的品质、营养价值以及开发利用具有重要意义。该研究旨在通过对广西不同产地虫茶无机元素的系统分析，为虫茶的质量评价、产地溯源以及合理开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

依广西虫茶主产区分布，选取融安、龙胜、三江、梧州、平南等地代表性虫茶，不同产区虫茶的虫源和植物原料见表 1，遵循随机抽样、多点采集原则，每份约 500 g，置于阴凉干燥处密封保存，防污染变质。

表 1 不同产区虫茶的虫源和植物原料

Table 1 Insect sources and plant raw materials of insect tea from different producing areas				
序号	样品编号	产区	虫源	植物原料
1	RA	融安	双直巢螟	酸枣叶
2	LS	龙胜	紫斑谷螟	钩藤
3	SJ	三江	化香叶蛾	钩藤
4	WZ	梧州	米织蛾	茶叶
5	PN	平南	米织蛾	枫香树叶

1.1.2 试剂

单元素标准液：钾（K）、钙（Ca）、镁（Mg）、铝（Al）、铁（Fe）、锰（Mn）、钡（Ba）、锌（Zn）、钠（Na）、硼（B）、锶（Sr）、钛（Ti）、铜（Cu）、镍（Ni）、锡（Sn）、锑（Sb）、硒（Se）、钒（V）、钴（Co）、钼（Mo）、铈（Ti）、锂（Li）、铍（Be）、银（Ag）、铅（Pb）、砷（As）、镉（Cd）、铬（Cr）、汞（Hg）质量浓度均为 1 000 μg·mL⁻¹，均购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。

内标溶液：Rh（国家标准样品编号 GSB 04-1746-2004）、Sc（国家标准样品编号 GSB 04-1750-2004）、Ge（国家标准样品编号 GSB 04-1728-2004）、In（国家

标准样品编号 GSB 04-1731-2004)、Re (国家标准样品编号 GSB 04-1745-2004) 质量浓度均为 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 均购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。

调谐混合溶液: Ba、Bi、Ce、Co、In、Li、U 质量浓度为 1.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Thermo Fisher Scientific, 批号 1243204。

硝酸: 电子 UP 级, 成都市科隆化学品有限公司, 批号 2024082901。

所用水均为超纯水。

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 微波消解仪, 美国 CEM; EHD-24 电热消解仪, 北京东航科仪仪器有限公司; ME204 电子分析天平 (精度 0.1 mg), 瑞士梅特勒-托利多有限公司; GK-EDL-500/H 超纯水制备系统, 广州市诚泉水处理科技有限公司。

1.3 实验方法

虫茶中元素定量方法参照国标 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[18]。

1.3.1 标准溶液制备

由于虫茶中 29 种无机元素的含量差异很大, 为确定各元素适宜的标准曲线浓度范围, 对虫茶样品中各元素进行预试验。通过预试验确定各元素的质量浓度, 详见表 2。

表 2 多元素标准溶液系列质量浓度
Table 2 Mass concentration series of multi-element standard solutions

元素	单位	标准系列质量浓度						
		std1	std2	std3	std4	std5	std6	std7
K、Ca、Na、Mg、Al、Fe、Mn、Ba	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.25	0.50	1.00	3.00	5.00	10.0
Ni、Cu、B、Ti、Sr、Zn	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0	10.0	50.0	100.0	300.0	500.0	—
Pb、As、Cd、Cr、Sn、Sb、Se、Ag、Li、Be、V、Co、Mo、Tl	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.50	1.00	3.00	5.00	10.0	20.0
Hg	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.10	0.50	1.00	1.50	2.00	—

1.3.2 内标溶液制备

精密吸取 Rh、In、Re、Ge、Sc 内标标准溶液适量, 用 (5+95) 硝酸溶液配制成 Rh、In、Re 质量浓度为 25 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Ge、Sc 为 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的混合内标使用液。

1.3.3 样品前处理

称取试样 0.2 g (精确至 0.000 1 g), 置于聚四氟

乙烯消解罐中, 加入 7 mL 硝酸, 于电热消解仪中 100 $^{\circ}\text{C}$ 预消解 30 min, 冷却至室温后, 放入微波消解仪中进行消解, 微波消解程序如表 3 所示。消解完毕, 冷却后取出, 缓慢打开罐盖排气, 用少量水冲洗内盖, 将消解罐放在电热消解仪中 100 $^{\circ}\text{C}$ 加热赶酸 1 h, 用水定容至 50 mL, 混匀, 过滤, 作为样品溶液备用, 同时做空白试验。

表 3 微波消解程序
Table 3 Microwave digestion program

步骤	升温时间/min	控制温度/ $^{\circ}\text{C}$	保持时间/min	功率/W
1	10	130	5	1 800
2	5	160	10	1 800
3	5	190	30	1 800

1.3.4 ICP-MS测定条件

分析测量前, 使用质量浓度为 1.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Ba、Bi、Ce、Co、In、Li、U 混合调谐溶液对仪器进行自动调谐, 使仪器的质量轴、灵敏度、分辨率、氧化物及双电荷产率等达到测试要求。调谐后的仪器工作参数: 射频功率 1 550 W, 等离子体气流量 14 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 辅助气流量 0.8 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 雾化气流量 1.03 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 碰撞池氦气流量 5.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 检测模式为 KED 模式, 每个样品重复测量 3 次。

1.4 数据分析

检测结果表示为平均值 $\pm$ 标准差, 采用 SPSS 27.0 对测试数据进行方差分析、Duncan 多重比较分析、Pearson 相关性分析以及主成分分析。

2 结果与讨论

2.1 广西不同产地虫茶间无机元素质量分数的差异分析

采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 技术, 对广西不同产地虫茶中的 29 种无机元素含量进行测定。由表 4 可知, 广西虫茶蕴含丰富的无机元素, 不同产地的无机元素含量呈现出明显的特征, 其中, K、Tl 元素平均质量分数分布区间分别为 8.47~18.31 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 13.67~31.48 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同产区按照质量分数由高到低排序均为 LS>SJ>WZ>PN>RA; Ca、Ti、Sn、Li 分别为 9.84~27.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 22.37~68.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0~52.60 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 46.86~468.20 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 产区含量由高到低均呈现 WZ>LS>SJ>PN>RA 的规律; 此外, Mg、Ni、V 等元素在不同产区也有各自的分布特点, Mg 含量为 3.49~4.28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 排序为 PN>RA>SJ>LS>WZ。同

时，部分元素在特定产区呈现最高或最低含量，例如 Al、Cu 含量最高产区均为 WZ，最低产区均为 RA；Fe、Mn、Co 最高产区均为 PN，最低产区均为 RA 等。这与文献^[19,20]对贵州地区虫茶中同样检测出丰富的 Ca、Mg 等元素的结论具有一致性，表明不同产区元素质量分数分布特征具有一定的普遍性与规律性。

对 29 种元素测定结果进行方差分析和 Duncan 多重比较分析^[21,22]，各元素在不同产地的分布呈现出复杂且多样的差异特征。K、Ca、Mn、B、Sr、Sn、Sb、Se、V、Co、Mo、Ag、Cr 等元素在不同产地均存在显著性差异 ($P<0.05$)；Mg、Al、Ba、Ti、Cu、Li、Be、As、Cd 等元素均在融安、梧州和平南间存在显

著差异 ($P<0.05$)；Fe、Ni、Tl 等元素均在融安、梧州、平南和龙胜间存在显著差异 ($P<0.05$)；Zn、Na、Pb、Cd 等元素，均在融安和三江间存在显著差异 ($P<0.05$)；Hg 元素在平南、龙胜和三江存在显著差异 ($P<0.05$)。这意味着这些元素受产地环境因素的影响广泛，不同产地的土壤成分、水源矿物质含量、气候条件以及昆虫食物来源等的综合差异，对这些元素在虫茶中的积累产生了显著作用。

不同产地虫茶的无机元素组成特征与其产地环境紧密相关，这些差异不仅为虫茶的产地溯源研究提供了重要依据，也对深入了解虫茶的品质形成机制以及评估其潜在的营养价值和安全性具有重要意义。

表 4 不同产地广西虫茶中无机元素检测结果

Table 4 Detection results of inorganic elements in Guangxi insect tea from different producing areas						
序号	元素	RA	WZ	PN	LS	SJ
1	K/(g·kg ⁻¹)	8.47±0.12 ^a	13.18±0.14 ^c	10.55±0.07 ^b	18.31±0.21 ^c	15.27±0.47 ^d
2	Ca/(g·kg ⁻¹)	9.84±0.18 ^a	27.22±0.23 ^e	12.02±0.15 ^b	23.56±0.48 ^d	22.16±0.79 ^c
3	Mg/(g·kg ⁻¹)	3.77±0.08 ^b	3.49±0.02 ^a	4.28±0.05 ^c	3.56±0.04 ^a	3.71±0.13 ^{ab}
4	Al/(g·kg ⁻¹)	0.11±0.01 ^a	1.33±0.01 ^c	1.01±0.03 ^d	0.82±0.01 ^{bc}	0.84±0.03 ^{bc}
5	Fe/(mg·kg ⁻¹)	152.61±14.10 ^a	439.38±13.37 ^c	622.30±28.18 ^{de}	208.01±1.70 ^b	595.33±29.87 ^{de}
6	Mn/(mg·kg ⁻¹)	164.56±5.42 ^a	758.99±4.59 ^d	3 189.00±37.52 ^c	456.23±4.31 ^b	735.24±11.65 ^c
7	Ba/(mg·kg ⁻¹)	110.37±2.46 ^b	163.95±2.25 ^d	70.95±2.35 ^a	169.12±4.13 ^{de}	162.06±3.05 ^{cde}
8	Zn/(mg·kg ⁻¹)	14.70±0.20 ^a	19.39±0.16 ^{cd}	20.64±0.95 ^{cd}	17.41±0.37 ^b	62.54±0.87 ^c
9	Na/(mg·kg ⁻¹)	11.56±0.40 ^a	87.98±1.62 ^d	86.91±2.04 ^{cd}	86.10±4.77 ^{bcd}	526.11±6.25 ^e
10	B/(mg·kg ⁻¹)	19.96±0.12 ^b	33.92±0.47 ^c	16.13±0.32 ^a	52.78±1.83 ^c	41.86±0.55 ^d
11	Sr/(mg·kg ⁻¹)	44.73±0.94 ^b	96.66±0.68 ^e	19.98±0.38 ^a	74.62±0.78 ^c	77.76±0.59 ^d
12	Ti/(mg·kg ⁻¹)	22.37±0.43 ^a	68.42±1.33 ^e	31.87±1.38 ^b	56.52±1.02 ^{cd}	54.14±1.33 ^{cd}
13	Cu/(mg·kg ⁻¹)	5.29±0.08 ^a	11.68±0.12 ^c	11.16±0.27 ^c	10.94±0.29 ^{bc}	11.65±0.31 ^{cde}
14	Ni/(mg·kg ⁻¹)	5.56±0.06 ^a	6.51±0.10 ^b	10.36±0.50 ^c	6.84±0.08 ^d	5.38±0.14 ^a
15	Sn/(μg·kg ⁻¹)	ND	18.21±0.35 ^c	7.47±0.26 ^a	9.57±0.25 ^b	52.60±3.04 ^d
16	Sb/(μg·kg ⁻¹)	12.00±0.38 ^a	95.80±1.85 ^b	ND	187.27±3.20 ^d	169.93±5.67 ^c
17	Se/(μg·kg ⁻¹)	431.30±17.69 ^b	812.90±9.30 ^d	329.20±22.20 ^a	667.80±40.68 ^c	1 009.80±43.28 ^c
18	V/(μg·kg ⁻¹)	150.80±4.04 ^a	1 183.00±10.55 ^d	645.60±33.24 ^b	1 367.00±25.95 ^c	720.70±14.04 ^c
19	Co/(μg·kg ⁻¹)	132.70±2.77 ^a	703.60±6.68 ^d	1 175.70±65.27 ^c	278.70±5.61 ^b	399.80±9.94 ^c
20	Mo/(μg·kg ⁻¹)	ND	309.63±7.18 ^c	103.34±9.42 ^b	3 182.67±53.98 ^d	21.95±0.55 ^a
21	Tl/(μg·kg ⁻¹)	13.67±0.39 ^a	21.66±0.39 ^b	17.61±1.58 ^c	31.48±0.57 ^d	21.95±0.55 ^{bc}
22	Li/(μg·kg ⁻¹)	46.86±0.76 ^a	498.20±7.98 ^c	176.18±14.14 ^b	485.67±27.88 ^{de}	340.43±28.56 ^c
23	Be/(μg·kg ⁻¹)	28.14±0.64 ^b	136.00±3.92 ^{de}	14.97±0.99 ^a	117.17±6.59 ^{cd}	127.95±13.30 ^{cde}
24	Ag/(μg·kg ⁻¹)	6.87±0.23 ^b	18.86±0.34 ^d	5.09±0.39 ^a	34.59±1.75 ^c	15.68±0.51 ^c
25	Pb/(mg·kg ⁻¹)	1.38±0.02 ^a	2.34±0.03 ^b	1.48±0.09 ^a	2.46±0.03 ^c	3.17±0.13 ^d
26	As/(mg·kg ⁻¹)	0.28±0.01 ^a	0.54±0.01 ^c	0.33±0.02 ^b	0.63±0.01 ^{de}	0.65±0.02 ^{de}
27	Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.073±0.001 ^a	0.302±0.004 ^{de}	0.142±0.006 ^b	0.306±0.008 ^{de}	0.247±0.010 ^c
28	Cr/(mg·kg ⁻¹)	0.38±0.02 ^a	3.20±0.05 ^d	1.47±0.04 ^c	1.06±0.04 ^b	3.81±0.12 ^c
29	Hg/(mg·kg ⁻¹)	0.081±0.001 ^{bc}	0.082±0.001 ^{bc}	0.044±0.003 ^a	0.089±0.002 ^d	0.101±0.005 ^c

注：“ND”表示未检出；同行不同字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)，从均值最小开始标注为 a，然后依次向后，无显著差异的归为同一字母。

表 5 元素间皮尔逊相关性分析结果
Table 5 Results of pearson correlation analysis among elements

	K	Ca	Mg	Al	Fe	Mn	Ba	Zn	Na	B	Sr	Ti	Cu	Ni
K	1	0.779	-0.533	0.42	0.005	-0.277	0.756	0.323	0.390	0.960**	0.618	0.749	0.649	-0.201
Ca	0.779	1	-0.744	0.697	0.121	-0.354	0.867	0.268	0.328	0.785	0.917*	0.995**	0.703	-0.329
Mg	-0.533	-0.744	1	-0.089	0.489	0.874	-.945*	-0.045	-0.084	-0.72	-.921*	-0.687	-0.051	0.787
Al	0.420	0.697	-0.089	1	0.627	0.397	0.247	0.126	0.172	0.25	0.415	0.761	0.912*	0.378
Fe	0.005	0.121	0.489	0.627	1	0.697	-0.274	0.583	0.58	-0.191	-0.115	0.195	0.692	0.459
Mn	-0.277	-0.354	0.874	0.397	0.697	1	-0.756	-0.064	-0.075	-0.535	-0.664	-0.272	0.379	0.943*
Ba	0.756	0.867	-0.945*	0.247	-0.274	-0.756	1	0.271	0.321	0.884*	0.952*	0.817	0.313	-0.709
Zn	0.323	0.268	-0.045	0.126	0.583	-0.064	0.271	1	0.997**	0.317	0.270	0.263	0.400	-0.347
Na	0.390	0.328	-0.084	0.172	0.580	-0.075	0.321	0.997**	1	0.379	0.314	0.323	0.451	-0.345
B	0.960**	0.785	-0.720	0.250	-0.191	-0.535	0.884*	0.317	0.379	1	0.736	0.735	0.461	-0.456
Sr	0.618	0.917*	-.921*	0.415	-0.115	-0.664	0.952*	0.270	0.314	0.736	1	0.888*	0.387	-0.658
Ti	0.749	0.995**	-0.687	0.761	0.195	-0.272	0.817	0.263	0.323	0.735	0.888*	1	0.751	-0.256
Cu	0.649	0.703	-0.051	0.912*	0.692	0.379	0.313	0.400	0.451	0.461	0.387	0.751	1	0.322
Ni	-0.201	-0.329	0.787	0.378	0.459	0.943*	-0.709	-0.347	-0.345	-0.456	-0.658	-0.256	0.322	1

注：* 在 0.05 水平（双尾），相关性显著；** 在 0.01 水平（双尾），相关性显著。

2.2 广西不同产地虫茶间无机元素质量分数的相关性分析

为进一步探究广西虫茶中无机元素之间的内在联系，该研究针对质量分数大于 5 mg·kg⁻¹ 的元素开展了 Pearson 相关性分析^[23,24]。从表 5 可知，广西虫茶中部分元素之间存在显著相关性，其中在 0.01 的显著性水平下，B 与 K，Ca 与 Ti，Zn 与 Na 两两之间正相关极为显著，这表明在虫茶的形成过程中，这些元素的积累可能存在协同作用机制，推测其可能借助共同的离子通道或者转运蛋白实现吸收过程，从而在含量变化上呈现出紧密的正相关关系。在 0.05 的显著性水平下，Ca 与 Sr、Al 与 Cu、Mn 与 Ni、Sr 与 Ti、Ba 与 B、Ba 与 Sr 两两之间正相关显著，表明这些元素在虫茶形成的过程中相互影响、共同积累。而 Mg 与 Ba，Mg 与 Sr 两两之间负相关显著，表明这些元素在虫茶形成过程中可能存在一定的拮抗关系，可能竞争相同的结合位点或代谢途径，从而导致其含量呈现负相关关系。这种相关性分析有助于深入理解虫茶中无机元素的生物化学行为。

2.3 广西不同产地虫茶间无机元素质量分数的主成分分析

由于虫茶各元素指标在数量级上存在较大差异，为降低数量级对分析结果的影响偏差，将原始数据进行标准化处理后，采用 SPSS 27.0 进行主成分分析

(Principal Component Analysis, PCA)，得到特征值及各主成分的贡献率^[25-27]。如图 1 所示，29 个特征值中，共有四个数值大于 1，因此用于分析的特征指标可简化为 4 个主成分。

如图 2，提取的前 3 个主成分的累积方差贡献率达到 93.26%，已经涵盖了大部分原始变量的信息，其中第 1 主成分（PC1）解释了 58.42% 的变量信息，第 2 主成分（PC2）解释了 20.69% 的变量信息，第 3 主成分（PC3）解释了 14.15% 的变量信息，表明这 3 个主成分能够代表最初的 29 个指标来分析虫茶的元素分布特征。PCA 得分图可以直观看出五大产区的虫茶被有效的区分开，说明根据虫茶元素特征构建产地溯源模型是可行的。

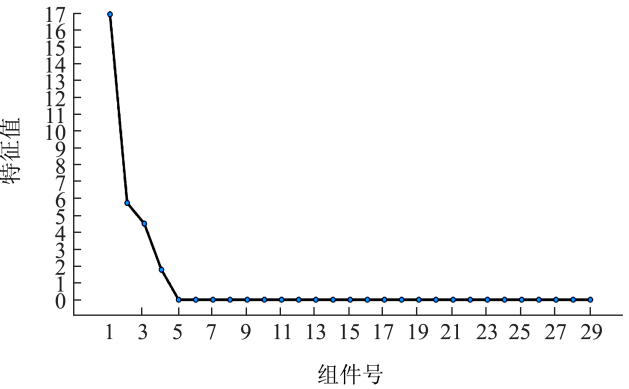


图 1 29 个特性指标的碎石图
Fig.1 Scree plot of 29 characteristic indicators

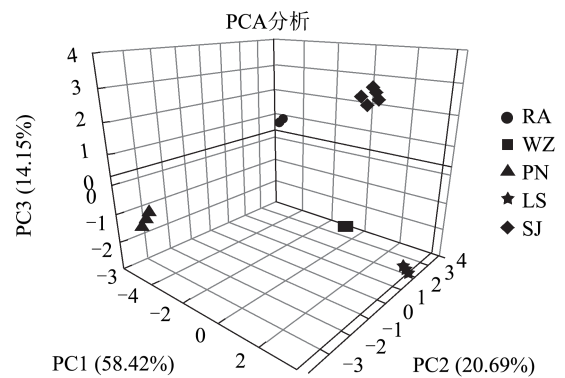


图 2 PCA 得分图

Fig.2 PCA score plot

表 6 主成分载荷矩阵

Table 6 Principal component load matrix

序号	指标	主成分		
		1	2	3
1	K	0.89	0.019	0.272
2	Ca	0.94	0.135	0.149
3	Mg	-0.764	0.534	0.017
4	Al	0.487	0.739	0.334
5	Fe	0.045	0.96	-0.272
6	Mn	-0.48	0.818	0.264
7	Ba	0.947	-0.286	-0.061
8	Zn	0.448	0.358	-0.75
9	Na	0.513	0.361	-0.699
10	B	0.925	-0.217	0.148
11	Sr	0.893	-0.167	-0.086
12	Ti	0.912	0.22	0.166
13	Cu	0.622	0.749	0.222
14	Ni	-0.482	0.651	0.561
15	Sn	0.624	0.389	-0.658
16	Sb	0.948	-0.111	-0.009
17	Se	0.888	0.082	-0.442
18	V	0.776	0.178	0.603
19	Co	-0.302	0.895	0.301
20	Mo	0.531	-0.343	0.635
21	Tl	0.802	-0.048	0.497
22	Li	0.9	0.161	0.368
23	Be	0.979	0.004	-0.063
24	Ag	0.815	-0.29	0.469
25	Pb	0.919	0.163	-0.322
26	As	0.977	0.104	-0.036
27	Cd	0.931	0.177	0.303
28	Cr	0.633	0.566	-0.462
29	Hg	0.752	-0.49	-0.439

计算各变量在各主成分上的载荷值，载荷的相对值越大，说明该变量与该主成分的相关性越强。由表 6 可知，主成分 1 与 K、Ca、Ba、B、Sr、Ti、Sb、Se、V、Tl、Li、Be、Ag、Pb、As、Cd、Hg 等元素具有较高的正载荷，Mg 元素具有较高的负载荷；主成分 2 与 Fe、Al、Mn、Cu、Co 等元素较高的正载荷；主成分 3 与 Zn 等元素较高的负载荷。

2.4 不同产地虫茶重金属安全性评估

重金属含量与虫茶的食用安全密切相关，该研究对不同产地虫茶中 Pb、As、Cd、Cr、Hg 等重金属元素的含量进行了分析。由图 3 可知，Pb 含量处于 1.38~3.17 mg·kg⁻¹ 的范围，该范围均低于 GB 2762-2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中针对茶叶的限量要求（≤5.0 mg·kg⁻¹）^[28]。而 Cr 元素的含量范围为 0.377~3.81 mg·kg⁻¹，Cd、As、Hg 元素的含量均小于 0.7 mg·kg⁻¹。其中，Pb、Cr 含量相对较高的情况与文献^[29,30]的研究结果具有一致性。然而，目前在食品相关标准体系中，针对虫茶这类特殊产品，尚缺乏对其污染物的明确限量要求，这使得虫茶重金属安全性评估存在一定的不确定性。通过对不同产区虫茶的检测数据进行深入的对比分析，发现三江产区的虫茶中 Pb、Cr 含量均高于其他产区。尽管当前的含量水平尚未超出已知的茶叶类相关标准，但这种情况可能预示着潜在的食用安全风险，应当加强对虫茶中这些元素的监测，并进一步探讨其安全性问题，为保障食品安全提供更科学的依据。

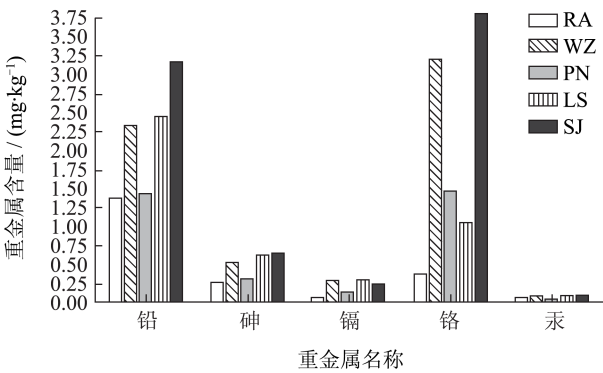


图 3 广西不同产地虫茶重金属含量

Fig.3 Content of heavy metal in insect tea from different producing areas in Guangxi

3 结论

该研究通过 ICP-MS 技术测定不同产地广西虫茶中无机元素含量，并进行多种统计分析，明确了各元素在不同产地的分布呈现出复杂且多样的差异特征，其中 K、Ca、Mn、B、Sr、Sn、Sb、Se、V、Co、

Mo、Ag、Cr 等元素在不同产地均存在显著性差异 ($P<0.05$)。这些差异不仅体现在各元素的质量分数水平上,还表现在元素之间的相关性和组合特征方面。产地环境因素(如土壤类型、气候条件)对广西虫茶无机元素含量具有重要影响,是导致不同产地虫茶元素组成差异的主要原因;相关性分析揭示了虫茶中部分无机元素之间存在协同或拮抗作用,为深入理解虫茶中无机元素的生物有效性和相互作用机制提供了线索;主成分分析成功提取了能够表征不同产地虫茶差异的特征元素组合和类别信息,为产地判别提供了依据;安全性评估结果表明,三江产区的虫茶中 Pb、Cr 含量均高于其他产区,但当前的含量水平尚未超出已知的茶叶类相关标准。该方法可为广西虫茶的产地判别、品质评价和质量控制提供科学有效的参考指标和依据。

参考文献

- [1] 孙雷鸣,卢晓黎.中国虫茶资源及研究现状[J].食品科学,2001,22(11):100-102.
- [2] 袁冬寅,陈家献,张芬,等.虫茶的研究现状及发展前景[J].食品研究与开发,2021,42(9):198-204.
- [3] WANG K J, WU K F, LI N. Insect tea originated from ethnic minority regions in Southwest China: A review on the types, traditional uses, nutrients, chemistry and pharmacological activities [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 309: 116340.
- [4] 温立香,袁冬寅,欧淑琼,等.广西三个产区虫茶主要茶特征成分、挥发性成分分析及氨基酸营养评价[J].食品工业科技,2022,43(20):329-336.
- [5] 温立香,张芬,袁冬寅,等.广西虫茶毒理学安全性评价研究[J].茶叶通讯,2022,49(1):102-107.
- [6] XU L J, PAN H M, LEI Q F, et al. Insect tea, a wonderful work in the Chinese tea culture [J]. Food Research International, 2013, 53(2): 629-635.
- [7] FENG X, CHEN Y, LUO L, et al. Liubao insect tea polyphenols ameliorate DSS-induced experimental colitis by protecting intestinal barrier and regulating intestinal microbiota [J]. Food Chemistry, 2024, 467: 142156.
- [8] SHENG Q, YAO X, CHEN H, et al. Identification of nutritional ingredients and medicinal components of Hawk tea and insect tea using widely targeted secondary metabolomics [J]. Horticulturae, 2023, 9(4): 19.
- [9] TAKAHASHI Y, KURIBAYASHI H, TASAKI E, et al. Insect feces tea of locust (*Locusta migratoria*) suppresses lipid accumulation in 3T3-L1 cells and mice: Notes [J]. Food Science and Technology Research, 2021, 27(5): 807-816.
- [10] ZHANG J S, WANG N, ZHANG W P, et al. UPLC-Q-Exactive-MS based metabolomics reveals chemical variations of three types of insect teas and their *in vitro* antioxidant activities [J]. LWT, 2022, 160(15): 113332.
- [11] LIAO Y J, ZOU X C, WANG C, et al. Insect tea extract attenuates CCl4-induced hepatic damage through antioxidant capacities in ICR mice [J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(2): 581-587.
- [12] 李莉,曾祥谓,周永红,等.虫茶营养成分及功能特性研究进展[J].林产化学与工业,2025,45(1):162-172.
- [13] 熊云梅,王加真,刘义富,等.不同产地虫茶成分及品质分析[J].现代农业科技,2022,9:178-180,193.
- [14] 袁冬寅,张芬,陈家献,等.不同虫茶及其植物原料的抗氧化作用效果比较[J].食品安全质量检测学报,2024,15(3):310-319.
- [15] MU J F, YANG F P, TAN F, et al. Determination of polyphenols in *Ilex kudingcha* and insect tea (leaves altered by animals) by ultra-high-performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry (UHPLC-QqQ-MS) and comparison of their anti-aging effects [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 11: 600219.
- [16] ZHU K, ZENG X F, TAN F, et al. Effect of insect tea on D-galactose-induced oxidation in mice and its mechanisms [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(12): 4105-4115.
- [17] SUO H Y, SUN P, WANG C, et al. Apoptotic effects of insect tea in HepG2 human hepatoma cells [J]. CyTA-Journal of Food, 2015, 14(2): 169-175.
- [18] GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- [19] 杨立昌,乙引,秦樊鑫,等.比较分析黔产虫茶矿质元素及氨基酸含量[J].光谱实验室,2011,28(5):2232-2235.
- [20] 许乾丽,周雪松,茅向军.老鹰茶和虫茶的6种生命元素分布状态和存在形态研究[J].贵州科学,1999,2:140-143.
- [21] GELGELO K, KECHERO Y, ANDUALEM D. Use of a novel fodder herb, commelina species, in black head oga-den lambs: nutrient utilization, weight gain performance, and economic viability [J]. Journal of Applied Animal Research, 2024, 52(1): 2288613.
- [22] YAO L, QIAO D H, JING T T, et al. Extensive ICP-MS and HPLC-QQQ detections reveal the content characteristics of main metallic elements and polyphenols in the representative commercial tea on the market [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1450348.
- [23] ROSIER C, GUIARD P B, GOTTI G. Application of Doehlert design combined with chemometrics tools: Example of the optimization of the elution of neurotransmitters and metabolites by HPLC [J]. Heliyon, 2025, 11(4): e42690.
- [24] 潘少香,孟晓萌,郑晓冬,等.基于ICP-MS的不同品种柑橘中矿物元素的差异性分析[J].现代食品科技,2020,36(8):333-339.
- [25] NGUYEN Q T, NGUYEN T T, LE V N, et al. Towards a standardized approach for the geographical traceability of plant foods using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and principal component analysis (PCA) [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(9): 1848.
- [26] VERMA A, CHAUHAN A, PANT A, et al. Principle component analysis (PCA) of wheat genotypes concerning morphological responses to heat stress [J]. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 2025, 28(2): 443-453.
- [27] ZHENG F L, GAN S Y, ZHAO X Y, et al. Unraveling the chemosensory attributes of Chinese black teas from different regions using GC-IMS combined with sensory analysis [J]. LWT, 2023, 184: 114988.
- [28] GB 2762-2022,食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [29] 李镇坤,李倩雯,岑昕霖.微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定六堡虫茶中的6种重金属含量[J].现代食品,2020,36(9):138-141.
- [30] 杨立昌,乙引,秦樊鑫,等.贵州省不同产地虫茶重金属元素含量的测定[J].江苏农业科学,2011,39(4):392-393.