

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250304003

引用格式: 宋德云, 范忠秧, 黄颖, 等. 火焰原子吸收光谱法检测蜂巢中 8 种金属元素含量及分布特征[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 223–229.

SONG DY, FAN ZY, HUANG Y, *et al.* Content and distribution characteristics of 8 kinds of metal elements in honeycomb by flame atomic absorption spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 223–229. (in Chinese with English abstract).

火焰原子吸收光谱法检测蜂巢中 8 种金属元素含量及分布特征

宋德云, 范忠秧, 黄颖, 何爱明, 谢自彤, 刘号然, 姚莎, 张孟扬, 陈红云*
(大理大学公共卫生学院, 大理 671000)

摘要: **目的** 探究蜂巢中金属元素的分布规律及潜在食品安全风险。**方法** 本研究采用火焰原子吸收光谱法测定云南、广东、广西等地采集的蜂巢样品 7 个部位(巢膜、巢柱、巢壁、全巢、成蜂、巢底、蛹)中 Cd、Fe、Cr、Mg、Zn、Cu、Mn 和 Pb 等 8 种金属元素含量。**结果** 各元素标准曲线线性良好(相关系数 $r^2 \geq 0.993$), 方法灵敏度满足痕量检测需求(检出限 0.002~0.010 mg/kg)。蜂巢不同部位元素含量差异显著($P < 0.05$), 平均含量排序为 Mg (0.97 mg/kg) > Zn (0.15 mg/kg) > Mn (0.051 mg/kg) > Cu (0.0385 mg/kg) > Fe (0.02 mg/kg) > Cd (0.0060 mg/kg) > Pb (0.00027 mg/kg) > Cr (0.00003 mg/kg)。其中, Cd、Fe、Mg、Zn、Cu、Mn 在部位间分布差异显著($P < 0.05$), 而 Cr、Pb 无显著差异($P > 0.05$)。研究表明, 必需元素(如 Mg、Zn)的分布与蜂巢功能密切相关, 而 Cd、Pb 的局部富集可能受环境输入影响。**结论** 本研究系统揭示了蜂巢金属元素的分布特征, 为蜂产品质量控制及污染溯源提供了科学依据。

关键词: 火焰原子吸收光谱法; 蜂巢; 金属元素分布; 必需元素; 重金属污染; 食品安全评价; 环境溯源

Content and distribution characteristics of 8 kinds of metal elements in honeycomb by flame atomic absorption spectrometry

SONG De-Yun, FAN Zhong-Yang, HUANG Ying, HE Ai-Ming, XIE Zi-Tong,
LIU Hao-Ran, YAO Sha, ZHANG Meng-Yang, CHEN Hong-Yun*

(College of Public Health, Dali University, Dali 671000, China)

ABSTRACT: Objective To explore the distribution of metal elements in honeycomb and the potential food safety risks. **Methods** In this study, flame atomic absorption spectrometry was used to determine the content of Cd, Fe, Cr,

收稿日期: 2025-03-04

基金项目: 云南省昆虫生物医药研发重点实验室开放课题项目(AG2024010)

第一作者: 宋德云(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品与药物流行病学、卫生统计学、环境毒理学等。E-mail: 2551549008@qq.com

*通信作者: 陈红云(1981—), 男, 高级实验师, 主要研究方向为食品与药物流行病学、卫生统计学、环境毒理学等。E-mail: 529999016@qq.com

Mg, Zn, Cu, Mn and Pb in 7 parts (nest membrane, nest column, nest wall, whole nest, adult bee, nest bottom, pupae) of honeycomb samples collected from Yunnan, Guangdong and Guangxi. **Results** The standard curves exhibited excellent linearity with correlation coefficients (r^2) ≥ 0.993 , and the method sensitivity met trace detection requirements (limits of detection: 0.002–0.010 mg/kg). Significant differences in metal content was observed among different parts of the honeycombs ($P < 0.05$), with the average concentrations ranked as Mg (0.97 mg/kg) > Zn (0.15 mg/kg) > Mn (0.051 mg/kg) > Cu (0.0385 mg/kg) > Fe (0.02 mg/kg) > Cd (0.0060 mg/kg) > Pb (0.00027 mg/kg) > Cr (0.00003 mg/kg). The distributions of Cd, Fe, Mg, Zn, Cu and Mn showed significant variations across parts ($P < 0.05$), whereas Cr and Pb exhibited no significant differences ($P > 0.05$). The results suggested that the distribution of essential elements (Mg and Zn) was closely associated with the biological functions of honeycombs, while the localized accumulation of Cd and Pb might reflect environmental contamination. **Conclusion** This study systematically reveals the spatial distribution characteristics of metal elements in honeycombs, providing a scientific foundation for quality control of bee products and traceability of environmental pollutants.

KEY WORDS: flame atomic absorption spectrometry; honeycomb; distribution of metal elements; necessary elements; heavy metal pollution; food safety evaluation; environmental traceability

0 引言

蜂巢作为蜜蜂储存蜂蜜、花粉及哺育幼虫的场所,不仅是蜂群生存的核心结构,也是具有高营养价值的天然产物,其品质与安全性直接影响消费者的健康^[1-2]。蜜蜂在采集花蜜和花粉的过程中,可能通过物理接触或生物迁移将环境中的金属元素引入蜂巢,这些元素既包括铜(Cu)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)等对人体有益的必需微量元素,也包含铅(Pb)、镉(Cd)等具有潜在毒性的重金属^[3]。已有研究表明,适量摄入 Cu、Zn 等元素可强化免疫系统功能、缓解氧化应激并参与酶促反应,而 Cd、Pb 的过量蓄积则可能导致神经毒性和肝肾损伤^[4-6]。因此,系统分析蜂巢中金属元素的分布特征,对评估其营养价值和食品安全风险具有重要意义。近年来,国内外学者对蜂产品(如蜂蜜、蜂胶)中金属元素的检测已有较多报道^[7-9],但对蜂巢这一复杂基质的系统性研究仍较为匮乏。现有研究多集中于蜂巢整体元素含量的测定,而忽视了其内部不同功能部位(如巢膜、巢柱、巢底等)的分布差异^[10]。此外,蜂巢中金属元素的迁移机制及其与环境污染的关联尚未明确,导致对蜂巢污染来源的解析和安全性评价存在局限性。相较于已有研究,本研究的创新性在于:(1)揭示了蜂巢金属元素的部位特异性分布特征;(2)探讨了元素分布与蜂巢功能及环境暴露的潜在关联,为蜂巢污染溯源提供新视角。

本研究采用火焰原子吸收光谱法(flame atomic absorption spectrometry, FAAS),系统测定蜂巢 7 个部位(巢膜、巢柱、巢壁、全巢、成蜂、巢底、蛹)中 Cd、Fe、Cr、Mg、Zn、Cu、Mn 和 Pb 共 8 种金属元素的含量,并

结合统计学方法分析其分布规律。旨在为蜂巢产品的质量、营养价值评价及重金属污染防控提供科学依据,同时为制定蜂产品相关食品安全标准奠定理论基础。研究范围涵盖中国云南、广东、广西等主要养蜂区的代表性蜂巢样本,重点关注元素分布的异质性及其环境指示意义。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

蜂巢全巢样品来自云南、广东、广西等地的 7 个代表性养蜂场(广东湛江、广东清远佛冈、玉溪新平、广西梧州长洲区红岭、南涧、广州花都太平镇、大理),每个养蜂场独立取样 1 份,共计 7 份样本。所有样本预处理和分析均按统一流程进行,确保数据可比性。

Cu、Cr、Pb、Zn、Mg、Cd 标准物质(质量浓度 1000 mg/L)、Fe、Mn 标准物质(质量浓度 2000 mg/L)(坛墨质检标准物质中心);所有稀释液均采用超纯水(18.25 M Ω);HNO₃(优级纯,重庆川东化工有限公司)。

AA-6880 原子吸收分光光度计(日本岛津公司);T520 电子天平(精度 0.01 g,湖南长沙湘仪公司);实验所用到的所有器皿均用 10% HNO₃ 浸泡 24 h。

1.2 方法

1.2.1 样品预处理

干灰化法:采集所得的样品应立即进行烘干处理,确保水分被充分去除。蜂巢样品经烘干至恒重后测定含水率为 12.3% \pm 1.5%,所有元素含量值均以干重表示。待样品达到恒重状态后,使用研钵将其研碎,研磨程度需

保证均匀细致,以便后续实验精准进行。用精度万分之一的电子天平精确称取 0.5 g 样品,分别放入 3 个已提前洗净、烘干且做好标记的瓷坩埚当中,以此作为平行实验样本,确保实验结果的可靠性与可重复性。将放有样品的瓷坩埚置于电炉之上,开启电炉进行初步炭化操作,时长控制在 1~2 h,期间密切观察,直至坩埚内冒出的白色烟雾完全散尽,样品呈现初步灰化状态。随后,把瓷坩埚转移至已预热至设定温度的马弗炉内,精准调控马弗炉的温度恒定在 500 °C,持续灰化 7 h,让样品在高温环境下充分分解、灰化,直至得到质地纯净、色泽洁白的灰白色灰烬。

待马弗炉内的样品冷却至室温后,缓慢向每个装有灰烬的样品中加入适量 2% HNO₃ 溶液,取用洁净的玻璃棒沿着坩埚壁缓缓搅拌,促使白色灰烬充分溶解于酸液之中,确保反应完全。溶解完成后,采用滤纸进行过滤操作,将滤液仔细收集起来,并转移至 50 mL 的容量瓶内,再用 2% HNO₃ 溶液多次冲洗滤纸及相关器皿,将冲洗液一并收入容量瓶,最终用 2% HNO₃ 精准定容至刻度线,摇匀后妥善放置,以备后续检测分析。

1.2.2 标准曲线绘制

量取 Cu、Mn 和 Mg 标准液逐次稀释至 10 µg/mL 作为储备液,量取 Pb、Cr 标准液逐次稀释至 1 µg/mL 作为储备液,量取 Cd、Fe 和 Zn 标准液逐次稀释至 100 µg/mL 作为储备液,稀释过程中用 2% HNO₃ 定容。将 Cu 按 0.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 µg/mL 配制成 50 mL 的标准溶液;Mn 按 0.00、0.01、0.10、0.20、0.40、0.80 µg/mL 配制成 10 mL 的标准溶液;Mg 按 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 µg/mL 配制成 10 mL 的标准溶液;Pb 按 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 µg/mL 配制成 50 mL 的标准溶液;Cr 按 0.000、0.015、0.040、0.080、0.120、0.160 µg/mL 配制成 50 mL 的标准溶液。Cd 按 0.0、0.2、0.5、1.0、2.0、4.0 µg/mL 配制成 50 mL 的标准溶液;Fe 按 0.0、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0 µg/mL 配制成 10 mL 的标准溶液;Zn 按 0.0、

0.1、0.2、0.4、0.8、1.0 µg/mL 配制成 10 mL 的标准溶液。

1.2.3 仪器工作条件设置

根据 8 种元素测定的工作条件(表 1),利用火焰原子吸收分光光度计测量 8 种金属元素不同浓度标准溶液的吸光度值。写出回归方程和相关系数,各元素标准曲线方程相关系数(r^2) ≥ 0.9993 。

1.3 数据处理

1.3.1 数据整理与制表

原始吸光度数据经 Microsoft Excel 2010 整理,计算各元素含量的平均值、标准偏差及相对标准偏差(relative standard deviation, RSD),并以表格形式呈现。标准曲线方程(线性回归)通过 Excel 内置函数计算,确保相关系数(r^2) ≥ 0.993 。

1.3.2 统计学分析

正态性检验:采用 Shapiro-Wilk 检验(SPSS 27.0)评估数据分布。符合正态性($P>0.05$)的数据使用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA),非正态数据(如 Cr、Pb)采用 Kruskal-Wallis H 检验(显著性水平 $\alpha=0.05$)。

多重比较:对差异显著的元素(如 Cd、Fe、Mg 等),通过 Tukey 法(ANOVA)或 Dunn-Bonferroni 法(非参数检验)进行部位间两两比较。

相关性分析:元素间关联性通过 Pearson 相关系数(正态数据)或 Spearman 秩相关系数(非正态数据)评估(SPSS 27.0)。

1.3.3 实验重复次数与数据质量控制

每个蜂巢部位的样品独立测定 3 次平行实验,标准曲线各浓度点重复测定 3 次,确保数据可重复性。仪器校准后,所有样品吸光度值均位于标准曲线线性范围内($r^2 \geq 0.993$)。异常值通过 Grubbs 检验(置信度 95%)识别并剔除,确保数据可靠性。

每批次实验均设置空白样品(超纯水替代蜂巢样品)和加标回收样品(添加标准物质至蜂巢基质中)。空白样品未检出目标元素,加标回收率为 85%~110% (RSD<5%),符合痕量分析要求。

表 1 火焰原子吸收分光光度计工作条件

Table 1 Working conditions of flame atomic absorption spectrophotometer

元素	火焰类型	灯电流/mA	狭缝宽度/nm	燃气流量/(L/min)	助燃气流量/(L/min)	燃烧头高度/mm	波长/nm
Cd	Air-C ₂ H ₂	8	0.7	1.8	15.0	7.0	228.8
Fe	Air-C ₂ H ₂	12	0.2	2.2	15.0	9.0	248.3
Cr	Air-C ₂ H ₂	10	0.7	2.8	15.0	7.0	357.9
Mg	Air-C ₂ H ₂	8	0.7	1.8	15.0	7.0	285.2
Zn	Air-C ₂ H ₂	8	0.7	2.0	8.0	7.0	213.9
Cu	Air-C ₂ H ₂	8	0.7	1.8	8.0	7.0	324.8
Mn	Air-C ₂ H ₂	10	0.2	2.0	15.0	7.0	279.5
Pb	Air-C ₂ H ₂	10	0.7	2.0	15.0	7.0	283.3

2 结果与分析

2.1 8 种元素线性回归方程与相关系数

采用 AA-6880 原子吸收分光光度计建立标准曲线, 各元素标准溶液质量浓度范围分别为 Cd (0.200~4.000 mg/L), Fe (0.500~6.000 mg/L), Cr (0.015~0.160 mg/L), Mg (0.200~1.000 mg/L), Zn (0.100~1.000 mg/L), Cu (2.000~10.000 mg/L), Mn (0.010~0.800 mg/L), Pb (0.200~1.000 mg/L), 每个浓度点平行测定 3 次。如表 2 所示, 8 种元素的线性回归方程相关系数(r^2)均 ≥ 0.9993 , 其中 Cd、Fe、Mg 和 Cu 的 r^2 达到 1.0000, 表明吸光度与浓度间线性关系极强。Cu 的截距值(-0.1787)可能源于仪器基线漂移, 但其绝对值远低于实际检测信号, 对定量结果无显著影响。各元素检出限[(limit of detection, LOD), 3σ]为 0.002~0.010 mg/kg, 定量限[(limit of quantitation, LOQ), 10σ]为 0.007~0.030 mg/kg, 满足蜂巢痕量金属检测需求。

表 2 8 种元素线性回归方程与相关系数

Table 2 Linear regression equation and correlation coefficient of 8 kinds of elements

元素	标准曲线方程	相关系数(r^2)
Cd	$Y=0.00443X+0.0000211$	1.0000
Fe	$Y=0.1049X-0.000006$	1.0000
Cr	$Y=0.0751X+0.00002$	0.9995
Mg	$Y=0.0562X+0.5724$	1.0000
Zn	$Y=0.349X+0.035$	0.9993
Cu	$Y=0.1809X-0.1787$	1.0000
Mn	$Y=0.178X+0.001$	0.9997
Pb	$Y=0.0013X+0.001$	0.9997

表 3 蜂巢样品中 8 种元素含量及其在不同区域中的参数及非参数检验(mg/kg)

Table 3 Content of 8 kinds of elements in honeycomb samples and their parametric and non-parametric tests in different regions (mg/kg)

元素	巢膜	巢柱	巢壁	全巢(巢)	成蜂	巢底	蛹	均值	参数及非参数 检验 FH	P
Cd	0.0027± 0.0243	0.0041± 0.0250	0.0050± 0.0025	0.0101± 0.0025	0.0036± 0.0034	0.0119± 0.0069	0.0060± 0.0023	0.0060± 0.0049	4.827	0.001
Fe	0.023± 0.009	0.030± 0.015	0.036± 0.008	0.038± 0.014	0.025± 0.011	0.046± 0.014	0.025± 0.009	0.032± 0.014	3.130	0.016
Cr	0.00002± 0.00031	0.00001± 0.00002	0.00005± 0.00004	0.00001± 0.00002	0.00004± 0.00005	0.00007± 0.00008	0.00001± 0.00003	0.00003± 0.00005	9.727	0.137
Mg	0.96± 0.04	0.91± 0.10	0.99± 0.03	1.02± 0.01	0.94± 0.07	1.03± 0.03	0.98± 0.01	0.97± 0.07	15.695	0.015
Zn	0.05± 0.01	0.06± 0.03	0.14± 0.12	0.25± 0.06	0.17± 0.33	0.27± 0.12	0.19± 0.03	0.15± 0.11	23.405	<0.001
Cu	0.0367± 0.0003	0.0367± 0.0006	0.0376± 0.0011	0.0405± 0.0024	0.0389± 0.0020	0.0414± 0.0036	0.0385± 0.0005	0.0385± 0.0025	5.552	<0.001
Mn	0.008± 0.006	0.020± 0.018	0.053± 0.038	0.122± 0.054	0.006± 0.006	0.118± 0.089	0.060± 0.083	0.051± 0.065	4.855	0.001
Pb	0.0042± 0.0007	0.00009± 0.00024	0.0008± 0.0014	0.0004± 0.0007	0.0003± 0.0008	0.00008± 0.000020	0.00001± 0.00003	0.00027± 0.00068	3.132	0.792

注: 1. 表中数值为平均值±标准偏差($n=3$), 含量值均以干重计; ND 表示未检出(低于 LOD); 2. 有效数字根据方法 LOD 调整, 如 Cr 的 LOD 为 0.00001 mg/kg, 数据保留至小数点后 5 位; 3. 部分元素(如 Zn、Mn)标准偏差较高, 可能源于蜂巢功能部位异质性或环境输入差异。

2.2 蜂巢样品 7 个部位相同元素含量比较

将 8 种金属元素进行正态性检验。其中, Cr 和 Mg、Pb、Zn 不符合正态性, 进行 H 检验。结果显示, Cu、Zn、Mn、Mg、Fe 和 Cd 在 7 个部位之间差异均有统计学意义($P<0.05$), 而 Cr、Pb 在 7 个部位差异无统计学意义($P>0.05$)。Mg、Zn 元素含量在所有部位均为最高且 $Mg>Zn$ 。Cd 元素含量在大多部位中均为最低。Cu 元素含量在巢膜、巢柱、成蜂部位较高。Mn 在全巢、巢底中含量较高。Fe 在巢膜、巢柱、成蜂中含量较高(表 3)。

2.3 蜂巢样品中金属元素分布特征的综合分析

2.3.1 元素分布与蜂巢功能的关联性

从表 3 数据可以看出, Mg 和 Zn 在蜂巢所有部位中均呈现较高含量(Mg 均值 0.97 mg/kg, Zn 均值 0.15 mg/kg), 且在不同部位间差异显著($P<0.05$)。这一现象可能与蜂巢的生物学功能密切相关。Mg 是蜜蜂体内多种酶(如 ATP 酶)的必需辅因子, 参与能量代谢和蜂蜡合成过程, 而蜂蜡作为蜂巢的主要结构材料, 其化学组成中羧酸和酯类物质对 Mg^{2+} 具有较强亲和力, 可能导致 Mg 在全巢和巢底部位的高富集^[11-12]。Zn 则在免疫功能及表皮几丁质形成中起关键作用, 巢壁和巢底的高 Zn 含量(分别为 0.14 mg/kg 和 0.27 mg/kg)可能与其需要增强结构强度和抵御外界病原体入侵的功能需求相关^[13-15]。

此外, Cu 在巢膜、巢柱和成蜂部位含量较高(均值 0.0385 mg/kg), 推测与这些区域活跃的代谢活动有关。Cu 作为氧化还原酶(如超氧化物歧化酶)的核心组分, 可能被优先分配至蜜蜂频繁活动的区域以应对氧化应激^[16-17]。Mn 在全巢和巢底的高含量(均值 0.12 mg/kg)则可能支持幼虫发育所需的几丁质合成酶活性, 暗示巢底区域在幼虫生长中的特殊作用^[18-19]。

2.3.2 重金属元素的潜在污染特征

Cd 和 Pb 作为非必需重金属,其含量虽低(Cd 均值 0.0060 mg/kg, Pb 均值 0.00027 mg/kg),但在巢底和巢膜中呈现局部富集趋势(巢底 Cd 含量达 0.019 mg/kg)。这一分布特征可能与蜂巢的沉积效应及环境污染输入有关。巢底直接接触蜂箱底部,更易积累外界沉降的颗粒物,而巢膜作为蜜蜂出入通道,可能通过附着的花粉或粉尘引入重金属。值得注意的是,Cr 的分布无显著部位差异(均值 0.00003 mg/kg, $P=0.137$),提示其来源可能与蜂巢本底环境或蜜蜂均匀吸收机制相关,需结合蜂群活动区域的土壤和大气数据进一步验证。

2.3.3 元素间相关性及迁移特性

通过对比各元素含量分布,发现 Mg 与 Zn、Mn 之间存在弱正相关性($r=0.42$, $P<0.05$),可能反映蜜蜂对必需元素的协同吸收机制;而 Cd 与 Pb 的分布无显著相关性($r=0.11$, $P>0.05$),表明两者的污染来源或迁移途径存在差异。此外,Fe 在巢膜和巢柱的高含量(0.023~0.030 mg/kg)与其在氧运输中的功能一致,但巢底 Fe 含量(0.046 mg/kg)的异常升高可能暗示外部污染输入(如含铁工业粉尘)的影响。部分元素(如 Zn、Mn)的标准偏差较高,可能源于蜂巢不同功能部位的异质性或环境输入的不均匀性。

2.3.4 区域差异分析

云南、广东、广西 3 地蜂巢样本中, Mg、Zn 等必需元素含量无显著区域差异($P>0.05$),而 Cd 在广东样本中含量较高(均值 0.008 mg/kg vs. 云南 0.005 mg/kg),可能与当地工业活动相关。

2.3.5 与已有研究的对比与启示

本研究结果与黄怡^[20]关于蜂巢药用价值的报道中 Mg、Zn 高含量的结论一致,但发现 Cu 的分布较其研究更为集中。与武永福等^[21]对蜂巢结构的描述相比,本研究中巢壁的 Zn 和 Mn 含量显著高于其他部位,可能反映不同蜂种或地理环境的差异性。

2.4 统计结果的生物学意义

ANOVA 和 Kruskal-Wallis 检验表明, Cd、Fe、Mg、Zn、Cu、Mn 在蜂巢不同部位的差异具有统计学意义($P<0.05$),而 Cr 和 Pb 无显著差异。这一结果不仅验证了蜜蜂对必需元素的主动调控能力,也提示非必需元素的分布可能更依赖于环境暴露。例如, Mg 的显著差异($F=15.695$, $P=0.015$)反映其功能驱动的模式,而 Pb 的均匀分布($H=3.132$, $P=0.792$)可能暗示其被动扩散特性。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究通过 FAAS 对蜂巢中 8 种金属元素含量进行测定,发现其含量排序为 $Mg>Zn>Mn>Cu>Fe>Cd>Pb>Cr$,

其中 Mg 含量最高, Cr 含量最低。这一结果与其他相关研究存在一定的相似性与差异性。在对蜂巢不同部位的研究中,本研究发现 Cu、Zn、Mn、Mg、Fe 和 Cd 在 7 个部位间存在显著差异($P<0.05$),而 Cr、Pb 在不同部位差异不显著($P>0.05$)。

对于元素含量差异显著的元素,如 Mg、Zn 在所有部位含量均较高且 $Mg>Zn$,这可能与蜜蜂在构建蜂巢时对这些元素的选择性利用有关。Mg 在生物体内参与多种生理过程,如能量代谢、蛋白质合成等,蜜蜂可能会优先将其富集在蜂巢的各个部位^[22-23]。Zn 同样在酶活性调节、免疫功能等方面发挥重要作用,其较高的含量可能是为了满足蜂巢内各种生理活动的需求^[24-25]。Cu 在巢膜、巢柱、成蜂部位含量较高,可能与这些部位的生理功能对 Cu 元素的需求有关,例如 Cu 在一些氧化还原酶中起着关键作用,这些部位可能需要更多的 Cu 参与代谢过程^[26]。Mn 在全巢、巢底中含量较高,推测其与蜂巢的结构支撑或物质代谢过程相关, Mn 可能在这些部位的特定生物化学反应中发挥重要作用^[27]。Fe 在巢膜、巢柱、成蜂中含量较高,虽然同一块蜂巢样品中 Fe 元素含量大致相同,但在蜂巢不同部位的差异可能是由于蜜蜂在构建蜂巢时对 Fe 的分配差异所致, Fe 在氧气运输、电子传递等过程中具有重要功能,这些部位可能需要较多的 Fe 来维持正常生理活动^[27]。

而 Cr、Pb 在不同部位差异不显著,可能是因为这些元素并非蜜蜂构建蜂巢所必需的元素,所以其在蜂巢中的分布相对较为均匀,或者蜜蜂对其吸收和转运的机制相对简单,不受蜂巢部位差异的明显影响^[28-29]。

本研究进一步提示,蜂巢中金属元素的分布差异可能与蜜蜂的生物学行为及外部环境双重作用有关。蜜蜂在采集花蜜和花粉时,易受到周边农业活动(如农药施用)和工业排放的影响,导致重金属(如 Cd、Pb)通过食物链在蜂巢中积累^[30]。例如,巢底部位 Cd 含量较高可能与沉积效应有关,该区域长期接触蜂箱底部,更易富集来自外界环境的污染物。此外,不同地区蜂巢样本的采集地(广东、广西、云南等)地质背景差异亦可能影响元素本底值,未来需结合土壤及大气重金属监测数据,解析蜂巢污染物的来源途径(如农药使用、工业排放)进一步溯源分析。

值得注意的是, Mg 和 Zn 的高含量不仅体现了蜜蜂对必需元素的主动吸收,也可能与蜂蜡的化学特性相关。研究表明,蜂蜡中的脂肪酸和酯类物质对 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 等阳离子具有较强螯合能力,这可能是其在这些部位稳定富集的重要机制^[30-33]。此外, Mn 在巢底的高含量或与蜜蜂幼虫发育需求相关, Mn 作为多种酶的辅助因子,在幼虫几丁质合成及抗氧化防御中起关键作用。本研究样本量($n=7$)虽覆盖主要养蜂区,但未涵盖所有地理环境。未来需扩大样本量以验证结果的普适性。

3.2 结 论

本研究利用火焰原子吸收光谱法成功测定了蜂巢中 Cd、Fe、Cr、Mg、Zn、Cu、Mn 和 Pb 8 种金属元素的含量,并对蜂巢不同部位的元素含量进行了比较分析。结果表明,各元素在蜂巢不同部位的含量存在差异,其中 Mg、Zn、Mn、Cu、Fe 和 Cd 在不同部位间的差异具有统计学意义,Cr、Pb 在不同部位差异不显著。本研究为蜂巢金属元素含量研究提供了详细的数据支持,有助于深入了解蜂巢的营养成分和潜在的健康风险,同时也为蜂蜜产品的质量控制和进一步开发利用提供了理论依据。未来研究可进一步扩大样本量,探究不同环境因素对蜂巢金属元素含量的影响,以及这些元素在蜂巢生态系统中的具体作用机制。

4 实际应用建议

在蜂巢产品的质量控制方面,生产者应关注 Mg、Zn 等含量较高元素的稳定性,确保产品在加工和储存过程中这些有益元素的含量保持在合理范围内,同时严格监控 Cd、Pb 等重金属元素的含量,避免其超标对消费者健康造成潜在危害。消费者在选择蜂巢产品时,可参考本研究中不同部位元素含量的差异,根据自身需求选择合适部位的蜂巢产品。例如,若关注 Mg、Zn 等元素的补充,可优先选择全巢或巢底部分的产品;若对 Cu 元素有特定需求,巢膜、巢柱部位可能是较好的选择。

参考文献

- [1] 薛思佳, 黄晓. 蜂巢营养成分及其功能活性研究进展[J]. 中国蜂业, 2024, 75(10): 34–38.
XUE SY, HUANG X. Research progress on nutritional components and functional activities of honeycomb [J]. *Apiculture of China*, 2024, 75(10): 34–38.
- [2] 艾哈迈德·赫加齐, 艾哈迈德·F.M.AL 格塔米. 蜂产品的医学重要性(英文) 第四届世界蜂疗大会、世界中联蜂疗专业委员会第五届学术年会、中国民族医药学会蜂疗分会 2024 年学术年会论文集[C]. 北京: 国家研究中心, 阿尔·古塔米基金会, 2024.
AHMED HEGAZI, AHMED-F.M.AL GETAMI. The medical importance of bee products the 4th world apitherapy congress, the 5th annual academic conference of the world federation of apitherapy professional committees, and the 2023 annual academic conference of the apitherapy branch of the chinese society of ethnomedicine [C]. Beijing: National Research Centre, al Goutami Foundation, 2024.
- [3] 边丽娜, 冯平, 杨艳慧, 等. 重金属元素在食品中的检测及安全控制策略[J]. 食品界, 2024(11): 82–84.
BIAN LN, FENG P, YANG YH, *et al.* Detection and safety control strategy of heavy metals in food [J]. *Food Industry*, 2024(11): 82–84.
- [4] 潘自平, 潘昌滨, 郭双燕, 等. 贵州省典型富硒区土壤重金属地球化学分布特征及生态风险评价[J/OL]. 地球与环境, 1-11. [2025-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/52.1139.p.20250115.1034.001.html>
PAN ZP, PAN CB, GUO SY, *et al.* Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils of typical Se-rich areas in Guizhou Province [J/OL]. *Earth and Environment*, 1-11. [2025-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/52.1139.p.20250115.1034.001.html>
- [5] 王双庆, 王诺娅, 尹吉山, 等. 微量元素对机体调节的生物学效应研究进展[J]. 药科学报, 2024, 59(4): 811–821.
WANG SQ, WANG NY, YIN JS, *et al.* Research progress on biological effects of trace elements on body regulation [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2024, 59(4): 811–821.
- [6] 邓忠彬. 基胡蜂的生物学特性、营养价值及其趋避性物质研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
DENG ZB. Studies on biological characteristics, nutritive value and repellent substances of basal wasps [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014.
- [7] 邹婉宁, 赵发, 管蕊, 等. 电感耦合等离子体质谱仪测定蜂胶胶囊中 17 种金属元素[J]. 中国蜂业, 2022, 73(4): 54–59.
Kuai WN, Zhao F, Guan R, *et al.* Determination of 17 metal elements in propolis and propolis capsules by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Apiculture of China*, 2012, 73(4): 54–59.
- [8] 林宏, 鲁惠玲, 韩燃, 等. 7 种单花蜂蜜中矿物元素的测定及蜜种特征研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 5983–5989.
LIN H, LU HL, HAN R, *et al.* Determination of mineral elements and characteristics of honey species in seven monofloral honeys [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(15): 5983–5989.
- [9] 赵光升. 蜂胶原胶与加工品金属元素含量的测定[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(16): 2399–2400.
ZHAO GS. Determination of metal elements in propolis and processed products [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2014, 24(16): 2399–2400.
- [10] ANGELA RC, MÁRCIA MCF, GIUSEPPINA N, *et al.* Clustering of comb and propolis waxes based on the distribution of aliphatic constituents [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2003, 14(3): 354–357.
- [11] 许萌丹, 瞿义生, 张明, 等. 镁的生理功能、安全性及应用研究进展[J]. 中国食品, 2023(24): 90–95.
XU MD, QU YS, ZHANG M, *et al.* Research progress on physiological function, safety and application of magnesium [J]. *China Food*, 2023(24): 90–95.
- [12] 张忠诚, 徐祗云, 张素洁. 镁与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2006(4): 67–69.
ZHANG ZC, XU JY, ZHANG SJ. Magnesium and human health [J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2006(4): 67–69.
- [13] 田志梅, 崔艺燕, 邓盾, 等. 锌的生理功能及其在猪养殖中的应用[J]. 中国畜牧兽医, 2022, 49(11): 4228–4238.
TIAN ZM, CUI YY, DENG D, *et al.* Physiological function of zinc and its application in pig breeding [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2022, 49(11): 4228–4238.
- [14] 丁静静. 锌-Zn 缺乏症探究[J]. 农民致富之友, 2017(6): 239.
DING JJ. Research on Zinc-Zn deficiency [J]. *Friends of Farmers Getting Rich*, 2017(6): 239.
- [15] 胡福良. 蜂胶生物学活性研究进展 第四届世界蜂疗大会、世界中联蜂疗专业委员会第五届学术年会、中国民族医药学会蜂疗分会 2023 年学术年会论文集[C]. 浙江: 浙江大学蚕蜂研究所, 2023.
HU FL. Research progress on biological activity of propolis the fourth

- world apitherapy conference, the fifth academic annual meeting of the world apitherapy professional committee, and the 2023 academic annual meeting of the apitherapy branch of the chinese national medical association [C]. Zhejiang: Sericulture Institute of Zhejiang University, 2023.
- [16] 向思佳, 刘扬中. 微量元素铜与人体生理功能和疾病[J]. 大学化学, 2022, 37(3): 7-13.
XIANG SJ, LIU YZ. Trace element copper and human physiological function and disease [J]. University Chemistry, 2022, 37(3): 7-13.
- [17] 王晓梦, 杨喜, 高尚. 铜稳态和铜死亡在动脉粥样硬化中作用机制及其潜在干预措施的研究进展[J]. 实用心脑血管病杂志, 2025, 33(3): 35-38, 44.
WANG XM, YANG X, GAO S. Research progress on the mechanism of copper homeostasis and copper mortality in atherosclerosis and its potential intervention measures [J]. Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease, 2020, 33(3): 35-38, 44.
- [18] 付卫刚, 姚拓. 添加中、微量元素及组合对促生菌剂促生特性的影响研究[J]. 草业科学, 2024(12): 2859-2868.
FU WG, YAO T. Effects of addition of medium and trace elements and their combinations on the growth promotion characteristics of bacterial agents [J]. Pratacultural Science, 2024(12): 2859-2868.
- [19] 马彦平, 石磊, 何源. 微量元素铁、锰、硼、锌、铜、钼营养与人体健康[J]. 肥料与健康, 2020, 47(5): 12-17.
MA YP, SHI L, HE Y. Nutrition and human health of trace elements iron, Manganese, boron, zinc, copper and Molybdenum [J]. Fertilizer and Health, 2020, 47(5): 12-17.
- [20] 黄怡. 蜂巢的药用价值 第四届世界蜂疗大会、世界中联蜂疗专业委员会第五届学术年会、中国民族医药学会蜂疗分会 2023 年学术年会论文集[C]. 北京: 国家研究中心, 阿尔·古塔米基金会, 2023.
HUANG Y. Pharmaceutical value of honeycomb the fourth world apitherapy congress, the fifth academic annual meeting of the world federation of apitherapy professional committee, and the 2023 academic annual meeting of the apitherapy branch of the chinese national medical association [C]. Beijing National Research Centre, al Goutami Foundation, 2023.
- [21] 武永福, 王佛生, 付桐林. 额斑黄胡蜂蜂巢形态结构及其蜂群组成研究初报[J]. 陇东学院学报, 2016, 27(3): 65-68.
WU YF, WANG FS, FU TL. A preliminary report on the morphology and colony composition of wasp hornet [J]. Journal of Longdong University, 2016, 27(3): 65-68.
- [22] 孟君, 郭全海, 陈晨, 等. 相同生长环境下3种蔬菜对钾、钙、镁、铅元素的富集特性研究[J]. 轻工学报, 2019, 34(1): 21-26, 63.
MENG J, GUO QH, CHEN C, *et al.* Study on the enrichment characteristics of potassium, calcium, magnesium and lead in three kinds of vegetables in the same growing environment [J]. Journal of Light Industry, 2019, 34(1): 21-26, 63.
- [23] 张涛, 陈随清, 王利丽. 豫山茱萸对锌、锰、钾、铁、钙、镁6种微量元素的富集性初探[C]. 中国商品学会: 第二届全国中药商品学术大会论文集, 河南中医学院, 2010.
ZHANG T, CHEN SQ, WANG LL. Study on the enrichment of Zn, Mn, K, Fe, Ca and Mg in *Cornus officinalis* of Henan Province [C]. China Commodity Society: Proceedings of the second national TCM Commodity Science Conference, Henan University of Traditional Chinese Medicine, 2010.
- [24] 赵小红, 何慧, 贾蕾, 等. 植物生物强化硒与锌: 膳食补充剂的新探索[J]. 食品科技, 2022, 47(5): 95-101.
ZHAO XH, HE H, JIA L, *et al.* Plant biofortification of Selenium and zinc: a new exploration of dietary supplements [J]. Food Science and Technology, 2021, 47(5): 95-101.
- [25] 朱雯, 刘建新, 叶均安. 微量元素锌在奶牛中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(15): 83-86.
ZHU W, LIU JX, YE JA. Research progress on application of trace element zinc in dairy cows [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2014, 50(15): 83-86.
- [26] 赵静, 程楠, 王训. 金属元素铜与神经变性疾病的研究进展[J]. 安徽医学, 2009, 30(11): 1359-1361.
ZHAO J, CHENG N, WANG X. Research progress of copper and neurodegenerative diseases [J]. Anhui Medical Journal, 2009, 30(11): 1359-1361.
- [27] 刘世伟. 基于金属离子的生物成像及治疗研究[D]. 齐鲁工业大学, 2024.
LIU SW. Bioimaging and treatment based on metal ions [D]. Qilu University of Technology, 2024.
- [28] BESHAW T, DEMSSIE K, LEKA I. Levels and health risk assessment of trace metals in honey from different districts of Bench Sheko Zone [J]. Southwest Ethiopia. Heliyon, 2022, 8(9), e10535.
- [29] POGRZEBA M, RUSINOWSKI S, KRZYŻAK J. Macroelements and heavy metals content in energy crops cultivated on contaminated soil under different fertilization—case studies on autumn harvest [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-1490-8
- [30] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. 矿产综合利用, 2017(6): 5-9.
HAN ZX, WAN ZJ, HU JP, *et al.* Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(6): 5-9.
- [31] 孙建明, 朱锦蕊, 柳磊, 等. 蜂胶在食品保鲜中的保鲜机理及应用研究进展 [J/OL]. 现代食品科技, 1-10. [2025-03-01]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1656>.
Sun J M, ZHU J R, Liu L, *et al.* Research progress on the mechanism and application of propolis in food preservation [J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1-10. [2025-03-01]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1656>.
- [32] 葛怡青, 汪浅, 全涛. 蜂胶功能成分及生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1027-1035.
GE YQ, WANG Q, TONG T. Research progress of functional components and biological activities of propolis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(4): 1027-1035.
- [33] 王宇, 陈强. 蜂胶生物学功能研究进展及其在保健食品中的应用[J]. 食品安全导刊, 2021(27): 158-160.
WANG Y, CHEN Q. Research progress of biological functions of propolis and its application in health food [J]. China Food Safety Magazine, 2021(27): 158-160.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)