

# 四川阿坝中蜂蜜的营养品质研究

丁佳 刘西子 贾茹 薛晓锋 张琳\* 胡茵\*  
(中国农业科学院蜜蜂研究所, 北京 100193)

**摘要:** 为深入探究阿坝中蜂蜜的独特营养品质, 本研究选取四川省阿坝州地区两种获得农产品地理标志认证的高原特色中蜂蜜, 分别是黑水中蜂蜜和九寨沟蜂蜜, 对其基础理化指标和特征活性成分进行检测分析。理化参数结果表明阿坝州地区中蜂蜜品质优良, 各项指标均符合蜂蜜的国家标准。采用非靶向代谢组学在两地区中蜂蜜中共鉴定到5244种小分子化合物, 其中200种化合物差异显著。功能分析发现阿坝中蜂蜜富含黄酮类、酚酸类和氨基酸类等活性物质, 主要涉及氨基酸代谢通路、能量代谢通路、脂肪酸代谢通路和脂质代谢通路。本研究为阿坝中蜂蜜的营养品质评价提供了全新的数据支撑和科学依据, 并将助力于阿坝州地区蜂产业的高质量发展。

**关键词:** 中蜂蜜; 营养品质; 特征活性成分; 非靶向代谢组学

蜂蜜, 是蜜蜂采集植物花蜜、分泌物或蜜露, 与自身分泌物混合后经充分酿造的天然甜味物质<sup>[1]</sup>。蜂蜜中的氨基酸、有机酸和酚类等小分子化合物是赋予蜂蜜抗氧化、抑菌等功能的主要活性物质, 这些小分子生物活性物质主要来源于蜜蜂采集的蜜源植物<sup>[2]</sup>, 其组成和含量差异造就了不同种类蜂蜜独特的感官特征, 更赋予其各具特色的风味和食用功能<sup>[3]</sup>。基于超高效液相色谱-质谱联用技术(Ultra High Performance Liquid Chromatography-Mass Spectrometry, UHPLC-MS)的非靶向代谢组学, 是以分子量为1000以下的小分子化合物为研究对象, 旨在分离和鉴定复杂样品中全组分信息<sup>[4]</sup>。该技术在解析蜂蜜中营养物质组成、区分蜜源特性以及评估蜂蜜质量等研究方面已有广泛的应用<sup>[5,6]</sup>。

中华蜜蜂(又称中蜂)是中国本土特有的东方蜜蜂品种, 擅长采集山区药用植物为主的零星蜜源, 所酿中蜂蜜(也称土蜂蜜)是我国特有的蜂蜜品种。阿坝藏族羌族自治州, 简称阿坝州, 地处青藏高原东南缘, 其独特的高原气候与垂直植被带孕育了丰富的蜜源植物。阿坝中蜂(*Apis cerana abanisis*)作为本土高质蜜蜂蜂种, 具有耐寒、抗病性强等特性, 所采集的高原百花蜜品质优异, 以高活性酶值、低含水量及药用成分丰富著称<sup>[7]</sup>。目前, 阿坝地区的黑水中蜂蜜和九寨沟蜂蜜均于2014年通过国家农产品地理标志认证, 其独特的品质和地域特色深受消费者喜爱<sup>[8]</sup>。

本研究采集了黑水县和九寨沟县两地的阿坝中蜂蜜, 通过检测其水分、糖、淀粉酶活性等关键理化指标, 评价两地蜂蜜的基础品质; 同时借助非靶向代谢组学技术, 对蜂蜜中含有的黄酮类、酚酸类、氨基酸等小分子化合物进行定性和定量分析, 旨在深入发掘其独特的营养特征成分和潜在的生物学功能。研究不仅能为表征阿坝中蜂蜜的特征营养品质提供科学依据, 更为阿坝地区特色蜂蜜产品的差异化开发、增加产品附加值以及品牌价值提升提供坚实的理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 实验材料

蜂蜜样品均于2023年8月花期采集自然酿造的蜂蜜。在阿坝州黑水县(知木林村、沙多石镇、俄瓜村、沙石多镇、芦花镇)采集黑水中蜂蜜样本(n=6; 编号HS-1至HS-6), 在九寨沟县(芝麻村、顺河村、甲勿村、大寨村)采集九寨沟蜂蜜样本(n=5; 编号JZG-1至JZG-5)。同步记录蜜源植物种类, 样本收集于500 g/瓶的收集瓶, 待测前贮存于2~8℃, 检测前复温至室温。

#### 1.1.2 实验试剂

甲醇(GR级), 购自赛默飞世尔科技; 甲酸(AR≥98%), 购自北京百威灵科技有限公司; 果糖(S11016)、葡萄糖(S11022)、蔗糖(S11055)标准品(纯度均≥99%), 均购自上海源

叶生物有限公司；硝基咪唑混标溶液（1ST9280）、氯霉素（1ST7001）、硝基咪唑类药物混标溶液（1ST47455）、喹诺酮混标（1ST47750），均购自天津阿尔塔科技有限公司。

### 1.1.3 实验仪器

阿贝折光仪，北京万成北增精密仪器有限公司；高效液相色谱仪-示差折光检测器（HPLC-RID），美国 Agilent 公司；UV-2550 型紫外-可见分光光度计，日本岛津公司；超高效液相色谱-串联高分辨质谱仪（Q Exactive Plus），美国 Thermo Fisher 公司；高效液相色谱-串联三重四极杆质谱仪（Agilent 6495），美国 Agilent 公司；超高效液相色谱-光电二极管阵列检测器（UPLC-PDA），美国 Waters 公司；色谱柱 ZORBAX Eclipse Plus C18（3.0 mm × 150 mm, 1.8 μm）和 ACQUITY UPLC BEH Amide（150 mm × 2.1 mm, 1.7 μm），美国 Agilent Technologies 公司；Waters oasis HLB 固相萃取柱，美国 waters 公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 理化性质分析

参照 SN/T 0852—2012《进出口蜂蜜检验规程》，使用阿贝折光仪对阿坝中蜂蜜的水分含量进行测定。

参照 GB 5009.8—2023《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》对蜂蜜中的果糖、葡萄糖、蔗糖含量进行测定。

参照 GB/T 18932.16—2003《蜂蜜中淀粉酶值的测定方法 分光光度法》，使用 UV-2550 型紫外分光光度计于 660 nm 波长处测定反应溶液吸光度值。

参照 GB/T 18932.18—2003《蜂蜜中羟甲基糠醛含量的测定方法》，采用 UPLC-PDA 测定样品中的羟甲基糠醛含量。

本研究中涉及各类兽药残留均采用液质联用仪 Agilent 6495 进行测定。氯霉素、硝基咪唑类兽药残留代谢物（包括咪唑妥因、咪唑西林、咪唑唑酮、咪唑它酮）、硝基咪唑类兽药残留（包括甲硝唑、洛硝唑、地美硝唑）、喹诺酮类兽药残留（包括培氟沙星、氧氟沙星、诺氟沙星）的具体检测方法，分别依据 GB/T 18932.19—2003《蜂蜜中氯霉素残留量的测定方法 液相色谱-串联质谱法》、GB/T 18932.24—

2005《蜂蜜中咪唑它酮、咪唑西林、咪唑妥因和咪唑唑酮代谢物残留量的测定方法 液相色谱-串联质谱法》、GB/T 20744—2006《蜂蜜中甲硝唑、洛硝唑、二甲硝唑残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》和 GB 31657.2—2021《蜂产品中喹诺酮类药物多残留的测定》的标准执行。

### 1.2.2 阿坝中蜂蜜特征成分分析

#### 1.2.2.1 特征成分测定

本研究参考刘西子等的方法<sup>[9]</sup>，采用 SPE 小柱对蜂蜜样品中的小分子活性物质进行富集，采用超高效液相色谱-串联高分辨质谱仪进行上机检测。数据由 Xcalibur 软件收集，存为 Raw 格式。

#### 1.2.2.2 特征物质的鉴定和统计分析

利用 Compound Discoverer 3.3 软件对原始数据进行分析鉴定。使用 SIMCA 14.1 软件进行多变量统计分析，利用相对峰强度执行偏最小二乘判别分析（partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA），再对 OPLS-DA 模型进行置换检验来确保模型的稳定性和可靠性。最后利用变量重要性投影法（variable importance in projection, VIP > 1）、单变量统计分析（ $P < 0.01$ ）和倍性变化（fold change, FC > 1.3）筛选具有统计学意义的蜂蜜高表达代谢物进行火山图分析。并借助 MetaboAnalyst 平台通过 KEGG 分析实现化合物的功能注释分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 阿坝中蜂蜜基础理化性质分析

我们对黑水中蜂蜜和九寨沟蜂蜜的基础理化指标，包括水分、还原糖（果糖和葡萄糖）、蔗糖、淀粉酶值及羟甲基糠醛含量，以及各类兽药残留量进行了检测，结果如表 1 所示。研究采集的 11 份阿坝州中蜂蜜样本均属于自然成熟蜂蜜，黑水中蜂蜜水分平均含量为  $18.85 \pm 1.53\%$ ，九寨沟蜂蜜水分含量为  $19.92 \pm 1.13\%$ ，均低于行业标准规定的一级品蜂蜜上限值  $20\%$ <sup>[10]</sup>。果糖和葡萄糖等单糖作为蜂蜜中的主要糖分，黑水中蜂蜜和九寨沟蜂蜜分别为  $67.37 \pm 2.70 \text{ g}/100\text{g}$  和  $67.70 \pm 0.89 \text{ g}/100\text{g}$ ，远超国标 GB 14963—2011 下限值  $60\%$ <sup>[11]</sup>，略高于长白山中蜂蜜单糖含量（ $60.54\% \sim 67.56\%$ ）<sup>[11]</sup>，符合优质成熟蜂蜜高单糖的特征。

表1 蜂蜜理化指标  
Table 1 Physical and chemical indicators of honey

理化参数	黑水中蜂蜜 (n=6)	九寨沟蜂蜜 (n=5)
水分含量/%	18.85 ± 1.53	19.92 ± 1.13
果糖和葡萄糖 (g/100g)	67.37 ± 2.70	67.70 ± 0.89
淀粉酶活性/[mL/(g · h)]	20.32 ± 1.73	18.24 ± 5.59
蔗糖 (g/100g)	ND	ND
羟甲基糠醛 (mg/kg)	ND	ND
兽药残留 (μg/kg) <sup>a</sup>	ND	ND

注：ND 表示低于检测限；<sup>a</sup> 兽药残留包括氯霉素、硝基呋喃类、硝基咪唑类和喹诺酮类兽药。

淀粉酶活性是衡量蜂蜜新鲜度的重要指标，酶值越高一定程度上代表蜂蜜品质越好。我国行业标准GH/T 18796-2012《蜂蜜》规定蜂蜜中淀粉酶活性（1%淀粉溶液）必须≥4 mL/(g · h)。黑水中蜂蜜的淀粉酶活性为20.32 ± 1.73mL/(g · h)，九寨沟蜂蜜为18.24 ± 5.59mL/(g · h)。阿坝中蜂蜜酶值与云南中蜂蜜淀粉酶值20.56 ± 7.86mL/(g · h)含量相当，高于研究报道的甘孜州中蜂蜜16.19 ± 6.8 mL/(g · h)和江西特色中蜂蜜7.08 ~ 13.36mL/(g · h)淀粉酶值<sup>[7,12-13]</sup>。阿坝中蜂蜜作为百花蜜，得益于丰富的复合蜜

源，不仅具有较高的淀粉酶含量，还带来更为丰富的营养活性成分，这一系列特征充分体现了阿坝州蜜源地的蜂蜜品质优势。

此外，蔗糖、羟甲基糠醛、氯霉素、硝基呋喃类、硝基咪唑类和喹诺酮类等11份样本中均未检出，表明两地中蜂蜜经过了充分酿造，自然成熟度较高，且养殖环节管控规范，蜂蜜质量安全得到有效保障。综上所述，阿坝州地区中蜂蜜理化品质优良，展现出“高活性、高纯净度”的双重优势。

## 2.2 蜂蜜中特征活性成分鉴定

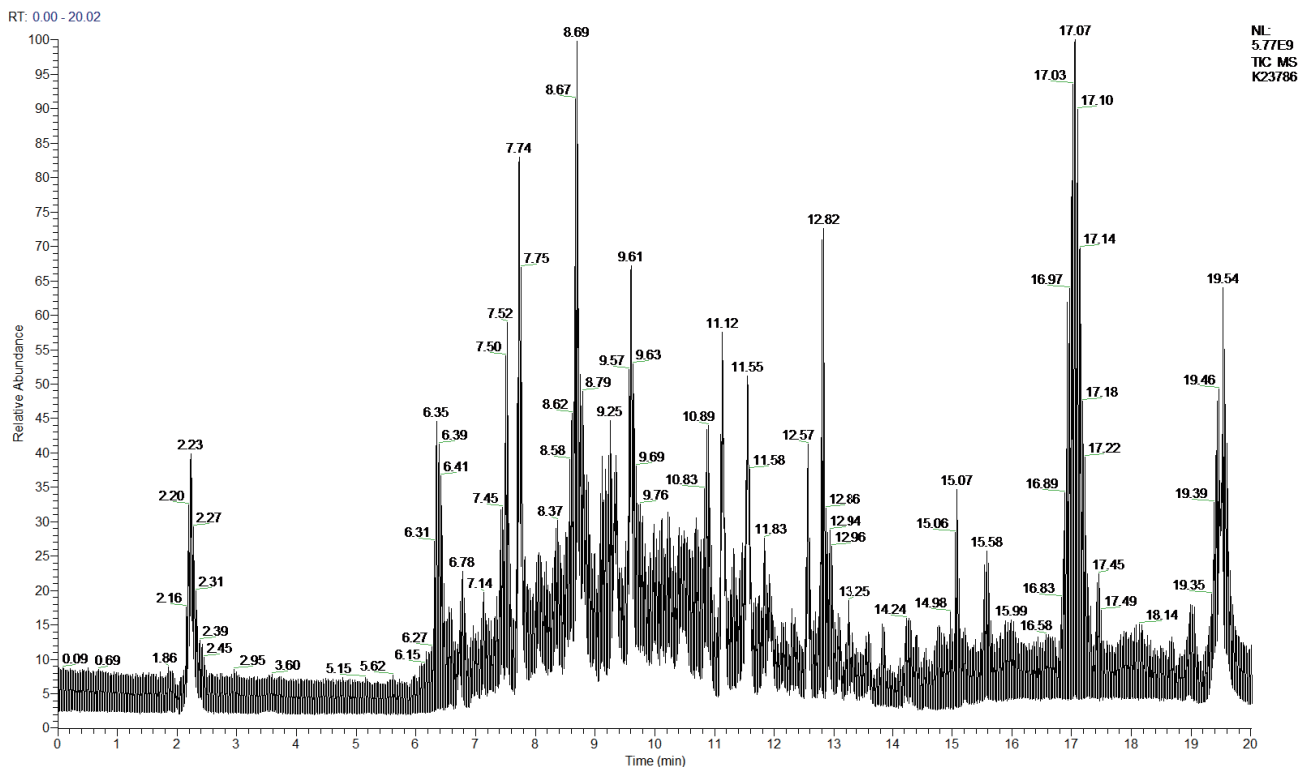


图1 蜂蜜 QC 样本总离子流图  
Fig.1 Total ion chromatogram of honey QC samples

### 2.2.1 小分子化合物的鉴定

采用UHPLC-MS技术鉴定阿坝州地区蜂蜜样本的小分子化合物，质量控制样本（Quality Control, QC）是11批次样品上机液的等量混合，用于监测分析系统的稳定性，QC样本离子流图见图1。基于匹配数据库得到的初始数据，以保留时间和峰图为标准进行结果去冗余处理后，从阿坝州地区11份中蜂蜜样品中，共鉴定出5244种小分子化合物。

### 2.2.2 两个地区中蜂蜜特征活性成分分析

为明确阿坝州中蜂蜜作为地理标志蜂蜜的营养特征成分，基于t检验构建火山图，对两地区阿坝中蜂蜜的特征组分进行筛选。设定单因素方差分析（ $P < 0.01$ ）及差异倍数（ $FC > 1.3$ ）的筛选条件，共筛选出200种差异小分子化合物（图2）。

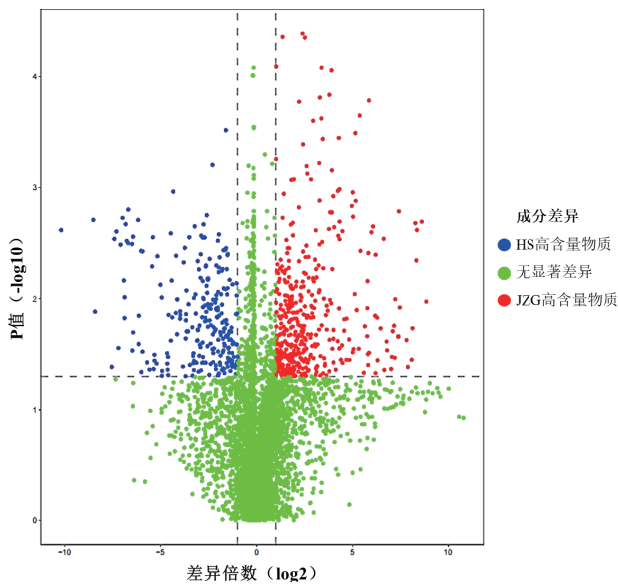


图2 蜂蜜小分子化合物火山图分析结果

Fig.2 Shows the analysis results of the volcanic graph of secondary metabolites of honey

黑水中蜂蜜中74种含量显著较高化合物，包括黄酮类（如3-甲氧基-5,7,3',4'-四羟基黄酮）、酚酸类（如水杨酸）、酚类（如焦性没食子酸）及呋喃类衍生物（如呋喃甲醇、呋喃酮）等，这些特征成分均具有明确的生物活性，如抗菌、抗炎、抗氧化<sup>[14]</sup>。其中，水杨酸可抑制细菌生长，增强蜂蜜的防腐能力，在蜂蜜中可能有助于维持其品质和稳定性<sup>[15]</sup>。呋喃酮既具有一定的香气，又具有抑菌和调节代谢的作用<sup>[16]</sup>。

九寨沟蜂蜜中含量显著较高的126种化合物，包括萜类（如柠檬醛）、羧酸类（如葡萄糖酸、龙胆酸、茉莉酸）及糖类如D-(+)-麦芽糖等。柠檬醛是具有强烈抗菌活性的萜类物质，能抑制多种细菌和真菌生长，延长蜂蜜保质期；同时也是重要的香气成分，赋予蜂蜜清新的柠檬样风味，提升感官品质<sup>[17]</sup>。葡萄糖酸可调节蜂蜜的pH值，影响蜂蜜的稳定性和口感，且具有抗氧化性，能保护蜂蜜中的有效营养成分不被氧化<sup>[18]</sup>。

这些活性成分的特异性积累与阿坝州高海拔、多样蜜源植物的地理环境及中蜂采蜜习性相关。后续可结合靶向代谢组学验证关键标志物含量，为阿坝州中蜂蜜的营养品质评价及溯源提供科学依据。

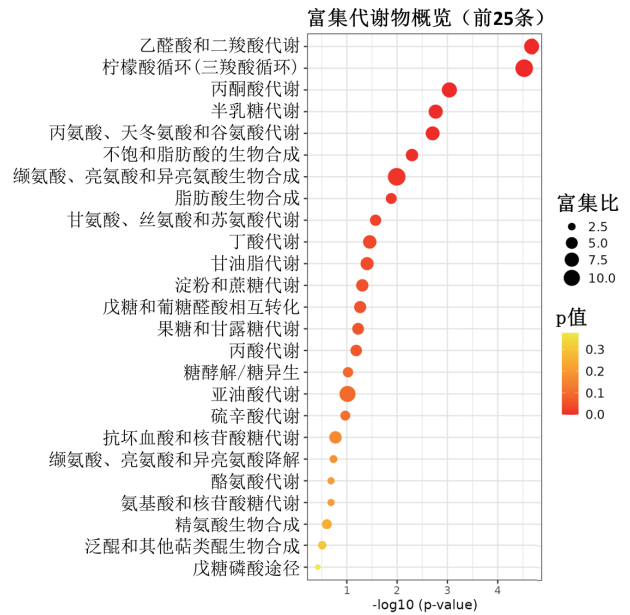


图3 阿坝中蜂蜜特征活性成分KEGG通路分析

Fig.3 KEGG analysis of secondary metabolites in honey

### 2.2.3 阿坝中蜂蜜活性成分功能注释

为进一步解析阿坝州地区蜂蜜的潜在生物学功能，在鉴定到的小分子化合物中，选择样本中保留时间一致，且二级谱图与数据库高度匹配的987种成分进行了KEGG通路富集分析。共有67种成分获得功能注释，共富集到35条代谢通路，其中，25条通路主要涉及氨基酸代谢通路、能量代谢通路、脂肪酸代谢通路和脂质代谢通路（图3）。

在KEGG通路分析中，阿坝中蜂蜜中的活性成分

显著富集在能量代谢通路上。其中,有31种物质显著富集到了乙醛酸盐和二羧酸盐通路上。乙醛酸盐循环作为连接糖循环和脂代谢的关键环节,通过调节体内代谢中间物对人体能量代谢稳态起到辅助作用,为人体细胞供能提供支持<sup>[19]</sup>。TCA循环通路是人体细胞能量代谢的核心通路,共有20种活性物质高富集到该通路。其中柠檬酸盐、 $\alpha$ -酮戊二酸等活性成分可在TCA循环并参与ATP合成的关键环节,进而增强细胞能量供应,为机体的肌肉运动、神经传导等生理活动提供动力,对维持机体代谢功能至关重要<sup>[20]</sup>。

阿坝中蜂蜜中还含有丰富的氨基酸及其衍生物,有28种主要富集在丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸等氨基酸通路上;此外,还有36种营养物质富集在不饱和脂肪酸的生物合成通路上,这些活性营养成分赋予阿坝中蜂蜜在抗氧化、抗炎及免疫调节等方面的生物学功能<sup>[21]</sup>。阿坝中蜂蜜的独特的蜜源环境和科学的管理模式,形成了其独特的化学组成、营养品质和生物学功能。这些生物活性成分参与代谢通路的深入研究,不仅有助于揭示蜂蜜的营养物质形成机制,还为其在食品、医药等领域的应用提供了科学依据。

### 3 展望

本研究所采集的阿坝州黑水中蜂蜜和九寨沟蜂蜜为优质蜂蜜,其水分、单糖、淀粉酶活性等理化指标优异,且无蔗糖、羟甲基糠醛及多种兽药残留,体现了该地区蜂蜜“高活性、高纯净度”特质。同时,通过非靶向代谢组学技术,在阿坝中蜂蜜中共鉴定到5244种小分子化合物,其中67种富集于35条代谢通路,并主要集中于能量代谢、氨基酸代谢和脂肪酸代谢。本研究成果为阿坝地区高原特色中蜂蜜的品质评价和资源开发利用提供了科学支撑。后续将结合特征物靶向定量分析及生物活性功能进一步开展研究,探索其在食品、医药领域的应用,助力阿坝中地区蜂产业发展升级。

### 参考文献

[1] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 蜂蜜: GB 14963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
[2] 赵圆, 陈思淮, 孙玉敬, 等. 中国特色蜂蜜调节肠道菌群的研究[J]. 中国食品学报, 2024, 24(12): 78–93.  
[3] 袁洁, 吴倩, 赵振松, 等. 枸杞蜂蜜的广泛靶向代谢组学分析

及其对炎症性肠病小鼠肠道菌群的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1–23[2025–08–09].

[4] 陈思南, 赵浩安, 曹炜. 蜂蜜对代谢综合征的作用机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(01): 285–293.

[5] 沈施, 杨奕, 王晶波, 等. 基于超高效液相色谱–四极杆飞行时间质谱的非靶向代谢组学用于不同来源单花蜜的差异分析[J]. 色谱, 2021, 39(03): 291–300.

[6] 林聪聪, 赵妍, 刘睿, 等. 蛋白质组学和代谢组学技术在蜂产品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 377–386.

[7] 周静月. 甘孜州特有蜂种和特色蜂蜜的研究[D]. 四川农业大学, 2023.

[8] 李刚. 阿坝中蜂优质高产技术探讨[J]. 中国蜂业, 2023, 74(11): 22–24.

[9] 刘西子, 齐宁馨, 李泓飞, 等. 胡柚蜂蜜主要理化指标及标志性成分分析[J/OL]. 食品与发酵工业, 1–11[2025–07–28].

[10] 中华人民共和国供销合作行业标准 GH/T 18796–2012 蜂蜜[J]. 中国蜂业, 2012, 63(19): 39–42.

[11] 刘楠楠, 徐新贺, 石广亮. 长白山中华蜜蜂蜂蜜的营养品质及挥发性成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 311–320.

[12] 赵洪木, 冯毅楠, 胡宗文, 等. 云南6种蜜蜂所产蜂蜜主要成分差异分析[J]. 蜜蜂杂志, 2021, 41(11): 19–21.

[13] 伊作林, 张雪琦, 张猛, 等. 江西省4种特色中蜂蜜的理化指标及其品质分析[J]. 蜜蜂杂志, 2024, 44(07): 1–6.

[14] 曾林晖, 熊增星, 周晓晴, 等. 蜂蜜中酚类物质的测定及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2023, 44(03): 287–292.

[15] 武鑫, 陈子龙, 郑敏, 等. 椴树蜜体外抑菌活性分析[J]. 食品科技, 2024, 49(02): 67–71.

[16] 郑亚杰, 刘秀斌, 林莉, 等. 蜂蜜中植物源性毒性成分的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(03): 307–316.

[17] 李秉成, 张宏, 殷珍吉, 等. 刺槐蜂蜜的高特异性PCR检测技术体系的建立[J]. 中国测试, 2025, 51(07): 104–110.

[18] 代晓斐. 蜜蜂肠道乳酸菌多样性及糖代谢特性的研究[D]. 东北农业大学, 2021.

[19] 付佳豪. MOF基荧光探针在蜂蜜和蜂花粉中有害物质的检测研究[D]. 江西农业大学, 2024.

[20] 伏荣桃, 陈诚, 王剑, 等. 5种植物精油对稻曲病菌的抑菌活性比较及薰衣草精油抑菌机制分析[J]. 植物保护, 2025, 51(04): 72–80.

[21] 江慧枝, 陈伟轩, 徐敏, 等. 蜂蜜抗氧化活性和抗衰老功能研究进展[J/OL]. 应用昆虫学报, 1–14[2025–08–10].