



李震, 李淑云, 曾青, 等. 江西 5 种中蜂蜂蜜的理化性质及抗氧化活性研究[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(3): 730–743.

LI Z, LI S Y, ZENG Q, et al. Study on physicochemical properties and antioxidant activities of five kinds of *Apis cerana cerana* honey from Jiangxi Province[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(3): 730–743.

江西 5 种中蜂蜂蜜的理化性质 及抗氧化活性研究

李 震^{1,2,3}, 李淑云⁴, 曾 青^{1,2,3}, 颜伟玉^{1,2,3*}

(1. 江西农业大学 蜜蜂研究所, 江西 南昌 330045; 2. 蜜蜂生物学与饲养江西省重点实验室, 江西 南昌 330045; 3. 江西安远蜜蜂科技小院, 江西 赣州 342100; 4. 赣州职业技术学院 动物科学学院, 江西 赣州 341000)

摘要:【目的】旨在探究江西省 5 种中华蜜蜂(*Apis cerana cerana*, 简称中蜂)蜂蜜理化成分及抗氧化活性, 为江西特色中蜂蜂蜜的开发与利用提供理论依据。【方法】以江西省中蜂采集的锥属蜜、树参蜜、赤楠蜜、壳斗蜜及五倍子蜜等 5 种蜂蜜为试验材料, 分别对其进行孢粉学鉴定, 并测定葡萄糖、果糖、蔗糖、水分、酸度、淀粉酶活性、灰分、电导率、羟甲基糠醛(HMF)等基本理化指标, 以及总酚酸与总黄酮含量的测定分析; 通过 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基清除能力和铁离子还原/抗氧化能力对中蜂蜂蜜和麦卢卡蜂蜜(UMF10+)的抗氧化能力进行评价; 并对理化成分、总酚酸、总黄酮、DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力、铁离子还原/抗氧化能力进行相关性分析。【结果】(1)除赤楠蜜的灰分[(0.421±0.034) g/100g]、电导率[(0.804±0.044) ms/cm]不符合行业标准外, 中蜂蜂蜜中葡萄糖、果糖、蔗糖、酸度、羟甲基糠醛均符合行业标准; (2)总酚酸、总黄酮含量最高的分别为锥属蜜[(0.375±0.040) mg/g]和壳斗蜜[(0.165±0.012) mg/g]。DPPH 自由基清除力最强为壳斗蜜[(34.24±6.44) mg/mL], ABTS 阳离子自由基清除力最强为锥属蜜[(62.46±4.08) mg/mL], 铁离子还原/抗氧化能力最强为赤楠蜜[(0.751±0.060) μmol/g], 但均次于麦卢卡蜂蜜(UMF10+)($P<0.05$); (3)HMF、总酚酸、总黄酮含量与自由基清除能力的 IC₅₀ 呈显著负相关($P<0.01$), 与铁离子还原/抗氧化能力呈显著正相关($P<0.01$)。【结论】江西 5 种中蜂蜂蜜的理化性质、总酚酸、总黄酮及抗氧化能力差异较大, 其中壳斗蜜抗氧化能力最强, 树参蜜最弱; 麦卢卡蜂蜜(UMF10+)的抗氧化能力均高于 5 种中蜂蜂蜜; 此外, 5 种中蜂蜂蜜的 HMF、总酚酸及总黄酮含量与其抗氧化能力均呈显著正相关。

关键词: 江西省; 中蜂蜂蜜; 理化性质; 抗氧化活性

中图分类号: S896 **文献标志码:** A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2025)03-0730-14

CSTR: 32399.14.aauj.2025063



Study on physicochemical properties and antioxidant activities of five kinds of *Apis cerana cerana* honey from Jiangxi Province

LI Zhen^{1,2,3}, LI Shuyun⁴, ZENG Qing^{1,2,3}, YAN Weiyu^{1,2,3*}

收稿日期: 2025-01-17 **修回日期:** 2025-02-19

基金项目: 江西省重点研发项目(20232BBF60008)和国家自然科学基金项目(32160133)

Project supported by Key R&D Program of Jiangxi Province (20232BBF60008) and the National Natural Science Foundation of China (32160133)

作者简介: 李震, 硕士生, orcid.org/0009-0000-0960-0203, 1615604423@qq.com; *通信作者: 颜伟玉, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事蜜蜂资源开发与利用研究, orcid.org/0000-0002-5183-7543, 36160174@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1. Institute of Honeybee, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Honeybee Biology and Beekeeping, Nanchang 330045, China; 3. Jiangxi Anyuan Honeybee Science and Technology Backyard, Ganzhou, Jiangxi 342100, China; 4. College of Animal Science, Ganzhou Vocational and Technical College, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the physicochemical components and antioxidant activities of 5 kinds of *Apis cerana cerana* honey in Jiangxi Province, thus providing theoretical basis for the development and utilization of the characteristic *Apis cerana cerana* honey in Jiangxi Province. [Method] Five kinds of honey were collected from *Apis cerana cerana* in Jiangxi Province, including *Castanopsis* honey, *Dendropanax dentiger* honey, *Syzygium buxifolium* honey, *Fagaceae* honey, *Rhus chinensis* honey. The palynological identification was carried out. The basic physicochemical indexes such as glucose, fructose, sucrose, moisture, acidity, amylase activity, ash, electrical conductivity, hydroxymethylfurfural, total phenolic acids and total flavonoids content were determined. The antioxidant capacity of *Apis cerana cerana* honey and Manuka honey (UMF10+) were evaluated by DPPH free radical, ABTS cationic radical scavenging activities, and ferric ion reducing/antioxidant power (FRAP) assay. At the same time, the correlation analysis of the basic physicochemical composition, total phenolic acids, total flavonoids, DPPH free radical scavenging ability, ABTS free radical scavenging ability, ferric ion reducing/antioxidant power was conducted. [Result] (1) The results showed that glucose, fructose, sucrose, acidity and hydroxymethylfurfural in *Apis cerana cerana* honey were all in line with national standards, except for ash content [(0.421 ± 0.034) g/100g], electrical conductivity [(0.804 ± 0.044) ms/cm] of *Syzygium buxifolium* honey. (2) The highest contents of total phenolic acids and total flavonoids were found in *Castanopsis* honey [(0.375 ± 0.040) mg/g] and *Fagaceae* honey [(0.165 ± 0.012) mg/g], respectively. The strongest scavenging ability of DPPH free radical was found in *Fagaceae* honey [(34.244 ± 6.445) mg/mL], and the strongest ABTS free radical scavenging power was found in *Castanopsis* honey [(62.458 ± 4.078) mg/mL]. *Syzygium buxifolium* honey [(0.751 ± 0.060) μ mol/g] had the strongest ferric ion reducing/antioxidant power. However, they were all inferior to Manuka honey (UMF10+) ($P < 0.05$). (3) The contents of HMF content, total phenolic acids and total flavonoids were significant negatively correlated with the IC_{50} value of free radical scavenging ability ($P < 0.01$), and significant positively correlated with ferric ion reducing/antioxidant power ($P < 0.01$). [Conclusion] The physicochemical properties, total phenolic acids, total flavonoids and antioxidant capacity of 5 kinds of *Apis cerana cerana* honey were significantly different. *Fagaceae* honey had the best antioxidant capacity, while *Dendropanax dentiger* honey was the weakest. The antioxidant activity of Manuka honey (UMF10+) were higher than those of the five kinds of *Apis cerana cerana* honey. The content of HMF content, total phenolic acids and total flavonoids had a significant positive correlation with the antioxidant capacity.

Keywords: Jiangxi Province; *Apis cerana cerana* honey; physicochemical properties; antioxidant activity

【研究意义】蜜蜂作为自然界重要的传粉昆虫,在维持生态系统平衡和保障农业生产方面具有不可替代的作用^[1-2],同时为人类提供了种类丰富的蜂产品。蜂蜜是指蜜蜂[我国主要指中华蜜蜂(*Apis cerana cerana*)和意大利蜜蜂(*Apis mellifera* L.)]采集植物的花蜜、蜜露或昆虫含糖代谢物,与自身唾液腺产生的分泌物充分混合后,经过转化、脱水、成熟、贮藏在巢脾内的甜味物质^[1-3]。其化学成分复杂多样,以糖类为主,同时含有水分、氨基酸、酶类、矿物质、维生素、多酚化合物及有机酸等。不同地域蜂蜜因蜜源植物种类、地理环境特征、气候条件及加工储存方式的差异,形成了具有显著化学组成特征与风味品质的地域特色蜂蜜^[4-5]。现代药理学研究证实,蜂蜜具有抗氧化、抑菌等多种生物活性^[6],在功能性食品开发与医药健康领域展现出广阔的应用前景。江西省作为我国传统养蜂大省,中华蜜蜂饲养数量稳居全国前列^[7]。深入挖掘该地区特色中蜂蜂蜜的理化特性及抗氧化活性,对于构建地域蜂蜜质量评价体系、推动中蜂蜂蜜开发与利用、破解销售困境、提升产品附加值及促进蜂农增收具有重要的理论价值和现实意

义。【研究进展】蜂蜜作为一种天然的抗氧化剂,其多酚类化合物具有显著的抗氧化功效^[8-9],能够有效抵御由氧化应激引发的肝损伤^[10]、肾损伤^[11]等。张国志等^[12]通过分析茴香蜜、枸杞蜜和玄参蜜的理化性质及抗氧化活性,发现蜂蜜抗氧化能力与电导率、色值及总酚含量存在显著相关性。王会迪^[8]对不同成熟度的椴树蜜的研究表明,总酚、总黄酮及脯氨酸含量均与抗氧化活性呈极显著正相关。朱明元等^[13]通过动物试验证实,蜂蜜可降低血清丙二醛(malondialdehyde,MDA)及肝脏脂褐质水平,同时提升血清超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)活力,发挥抗脂质过氧化作用。祝敏^[14]研究发现沙枣蜜可以调控炎症因子基因表达,对酒精性胃损伤具有显著预防效果。张金萍^[15]基于小鼠酒精肝模型的研究进一步表明,山乌柏蜂蜜可以有效降低丙氨酸氨基转移酶(alanine aminotransferase,ALT)和天门冬氨酸氨基转移酶(aspartate aminotransferase,AST)水平,显著改善酒精肝损伤。

【本研究切入点】目前,关于蜂蜜的理化性质及抗氧化活性研究多聚焦于西方蜜蜂蜂蜜,而对中华蜜蜂蜂蜜的系统性研究仍较匮乏,特别是江西地区特色中蜂蜂蜜的基础研究未见系统性报道。五倍子(*Rhus chinensis*)、树参(*Dendropanax dentiger*)、赤楠(*Syzygium buxifolium*)、壳斗科(Fagaceae)等蜜源植物在江西省域内广泛分布,具备开发成特色蜂蜜的基础,然而其蜂蜜产品的营养价值及功能特性尚不明确,亟需开展深入研究。【拟解决的关键问题】本研究以采自江西省的五倍子蜜、树参蜜、赤楠蜜、壳斗蜜、锥属(*Castanopsis*)蜜等5种中蜂蜂蜜为试验材料,开展孢粉学鉴定、理化性质分析,以及总酚酸、总黄酮和抗氧化能力测定,研究结果可为江西特色中蜂蜂蜜的营养价值评价、质量标准制定及高质量开发提供试验依据,助力蜂产业提质增效。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蜂蜜样品于2023年5—9月份采集自江西省赣州市不同县(区)生产的中蜂蜂蜜。同时,购买新西兰麦卢卡蜂蜜UMF10+(Unique Manuka Factor10+)作为抗氧化性比较(表1)。所有蜂蜜样品避光保存在-20℃冰箱,备用。

表1 蜂蜜样品信息

Tab.1 Honey sample information

名称及简称 Name and abbreviation	采集地点及坐标 Collection location and coordinates	采集/购买时间 Collection/purchase time
壳斗蜜(Fagaceae honey, QDM)	赣州市信丰县(25°21'48"N, 115°14'46"E)	2023.06
赤楠蜜(<i>Syzygium buxifolium</i> honey, CNM)	赣州市赣县区(25°41'34"N, 115°04'18"E)	2023.06
树参蜜(<i>Dendropanax dentiger</i> honey, SSM)	赣州市宁都县(26°28'16"N, 116°0'49"E)	2023.07
五倍子蜜(<i>Rhus chinensis</i> honey, WBZM)	赣州市宁都县(26°28'15.5"N, 116°0'49"E)	2023.09
锥属蜜(<i>Castanopsis</i> honey, ZSM)	赣州市安远县(25°10'5"N, 115°31'27"E)	2023.05
麦卢卡蜂蜜(Manuka honey, MLK)	康维他(COMVITA)线上商店	2023.10

1.2 中蜂蜂蜜孢粉学鉴定

孢粉学鉴定参考GB/T 23194—2008^[16],并将方法予以适当优化。具体操作如下:准确称取10 g蜂蜜样品,置于洁净容器中,加入50 mL ddH₂O,充分震荡使蜂蜜完全溶解。将所得蜂蜜水溶液转移至离心管中,以4 000 r/min离心10 min。离心结束后,弃去约2/3的上清液,接着加入与剩余蜂蜜水溶液等体积的ddH₂O,重复上述离心、水洗3~5次后,保留剩余样液体积约5 mL,用移液器吸取10 μL加至细胞计数板上,放置于电子显微镜下进行观察。剩余样液加入1 mL 50%甘油及2~3滴5%苯酚充分混匀后,置于4℃冰箱中妥善保存。

将滴有样液的血细胞计数板置于400倍电子显微镜[MODEL ECLIPSE Ci-L电子显微镜,尼康仪器(上海)有限公司]下进行观察。鉴于蜂蜜中花粉粒含量相对较少,需对整个计数区进行全面观察与计数。花粉率依据公式(1)进行计算。

$$\text{花粉率} = N_1 / N_2 \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: N_1 为某种蜜源植物花粉粒数,个; N_2 为蜂蜜中花粉粒数总数,个。

1.3 中蜂蜂蜜理化性质的测定

葡萄糖、果糖、蔗糖含量测定参照GB 5009.8—2016^[17]规定的方法;水分、酸度测定参照SN/T 0852—2012^[18]规定的方法;淀粉酶活性测定参照GB/T 18932.16—2003^[19]规定的方法;灰分测定参照GB 5009.4—2016^[20]规定的方法;电导率测定参照GB/T 18932.15—2003^[21]规定的方法;羟甲基糠醛测定参照GB/T 18932.18—2003^[22]规定的方法。

1.4 中蜂蜂蜜总酚酸、总黄酮的测定

1.4.1 中蜂蜂蜜样品的制备

各试验样品称取约0.1 g蜂蜜,加入1.5 mL 60%乙醇提取液,充分震荡,25 °C、12 000 r/min离心10 min,取上清液,室温,备用。

1.4.2 中蜂蜂蜜总酚酸的测定

采用福林酚(Folin-Ciocalteu)法测定总酚含量。取蜂蜜待测液和试剂于96孔板中并按照总酚(total phenols, TP)试剂盒(上海江莱生物科技有限公司)说明书上的步骤进行加样,使用多功能微孔板检测仪(200518A,美国BioTek 伯腾仪器有限公司)在760 nm处测量吸光度值。其中,总酚酸标准曲线为 $y=0.3494x-0.0006$ ($R^2=0.9999$),蜂蜜中总酚酸含量依据公式(2)计算。

$$\text{总酚酸含量} = 0.2862 \times (A_{\text{测}} - A_{\text{空}} + 0.0006) \times V \div W \quad (2)$$

式(2)中: $A_{\text{测}}$ 为试验组吸光度值; $A_{\text{空}}$ 为对照组吸光度值; V 为加入提取液体积,1.5 mL; W 为样品质量,g。

1.4.3 中蜂蜂蜜总黄酮的测定

采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3$ 显色法测定黄酮总含量。取蜂蜜待测液和试剂于96孔板中并按照总黄酮(flavonoid)试剂盒(上海江莱生物科技有限公司)说明书上的步骤进行加样,使用多功能微孔板检测仪在510 nm处测量吸光度值。其中,总黄酮标准曲线为 $y=1.6277x-0.0049$ ($R^2=0.9999$),蜂蜜中总黄酮含量依据公式(3)计算。

$$\text{总黄酮含量} = 0.6 \times (A_{\text{测}} - A_{\text{空}} + 0.0049) \times V \div W \quad (3)$$

式(3)中: $A_{\text{测}}$ 为试验组吸光度值; $A_{\text{空}}$ 为对照组吸光度值; V 为加入提取液体积,1.5 mL; W 为样品质量,g。

1.5 中蜂蜂蜜总抗氧化能力的测定

1.5.1 DPPH 自由基清除率测定

蜂蜜样品的制备。称取5 g蜂蜜样品,置于50 mL容量瓶中,加入超纯水(ddH₂O)溶解并定容至刻度,配制成100 mg/mL母液。采用倍比稀释法依次制备50.00,25.00,12.50,6.25 mg/mL的系列质量浓度溶液各5 mL,备用。

DPPH溶液的制备。准确称取1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH)(福州飞净生物科技有限公司)2 mg,用无水乙醇充分溶解并定容至50 mL,配制成40 mg/L DPPH溶液,现用现配,避光保存。

中蜂蜂蜜样品的测定。DPPH自由基清除率的测定参考王会迪^[8]的方法,并适当优化。具体操作如下:在96孔板中依次加入蜂蜜待测液100 μL和DPPH溶液100 μL,设置样品空白组(蜂蜜待测液100 μL+无水乙醇100 μL)和空白对照组(无水乙醇100 μL+DPPH溶液100 μL),避光反应30 min,使用多功能微孔板检测仪在517 nm处测量吸光度值。DPPH自由基的清除率依据公式(4)计算,根据试验结果绘制清除率-浓度曲线,计算IC₅₀(自由基清除率达50%时的蜂蜜浓度)。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = [1 - (A_1 - A_0) / A_2] \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, A_0 为样品空白组的吸光值, A_1 为样品清除DPPH自由基的吸光值, A_2 为空白对照组的吸光值。

1.5.2 ABTS阳离子自由基清除率测定

ABTS工作液的制备。取总抗氧化能力检测试剂盒(ATBS微板法)(上海源叶生物科技有限公司)中ABTS溶液和氧化剂按照1:1的体积比进行混合配制为ABTS工作母液,室温避光12 h后用ddH₂O稀释30倍成ABTS工作液。

蜂蜜样品的测定。ABTS阳离子自由基清除试验参考Re等^[23]的试验方法并优化。取1.5.1试验中制备的蜂蜜待测液40 μL和ABTS工作液160 μL于96孔板,设置样品空白组(蜂蜜待测液40 μL+无水乙醇160 μL)和空白对照组(无水乙醇40 μL+ABTS工作液160 μL),避光反应10 min,使用多功能微孔板检测

仪在 734 nm 处测量吸光度值。ABTS 阳离子自由基清除率依据公式(5)计算。根据试验结果绘制清除率—浓度曲线,计算 IC_{50} 。

$$ABTS \text{ 阳离子自由基清除率} = [1 - (A_1 - A_0) / A_2] \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中: A_0 为样品空白组的吸光值, A_1 为样品清除 ABTS 阳离子自由基的吸光值, A_2 为空白对照组的吸光值。

1.5.3 铁离子还原/抗氧化能力(ferric ion reducing/antioxidant power, FRAP)测定

蜂蜜样品的制备。称取 5 g 蜂蜜样品,置于 50 mL 容量瓶中,加入 ddH₂O 溶解并定容至刻度,配制成 100 mg/mL 蜂蜜溶液。

FRAP 溶液的制备。取总抗氧化能力检测试剂盒(FRAP 法)(上海酶联生物科技有限公司)中试剂一、二、三按照体积比 10:1:1 进行混合,配置 FRAP 工作液,现用现配,使用前用 37 °C 水浴加热 10 min。

蜂蜜样品的测定。铁离子还原/抗氧化能力(FRAP)测定参考张敏等^[24]的试验方法并做优化。取蜂蜜待测液 10 μ L 和 FRAP 工作液 190 μ L 于 96 孔板,以无水乙醇 10 μ L 和 FRAP 工作液 190 μ L 为空白对照组,混合均匀,避光反应 20 min。使用前将多功能微孔板检测仪预热至 37 °C,在 593 nm 处测量吸光度值。其中,铁离子还原/抗氧化能力标准曲线为 $y = 1.2416x + 0.0134$ ($R^2 = 0.9996$),根据公式(6)计算蜂蜜铁离子还原/抗氧化能力。

$$\text{铁离子还原/抗氧化能力} = (\Delta A - 0.0134) \div 1.2416 \times V_{\text{样总}} \div W \quad (6)$$

式(6)中: $\Delta A = A_{\text{测}} - A_{\text{空}}$, $A_{\text{测}}$ 为试验组吸光度值, $A_{\text{空}}$ 为对照组吸光度值; $V_{\text{样总}}$ 为样品总体积, 50 mL; W 为样品总质量, g。

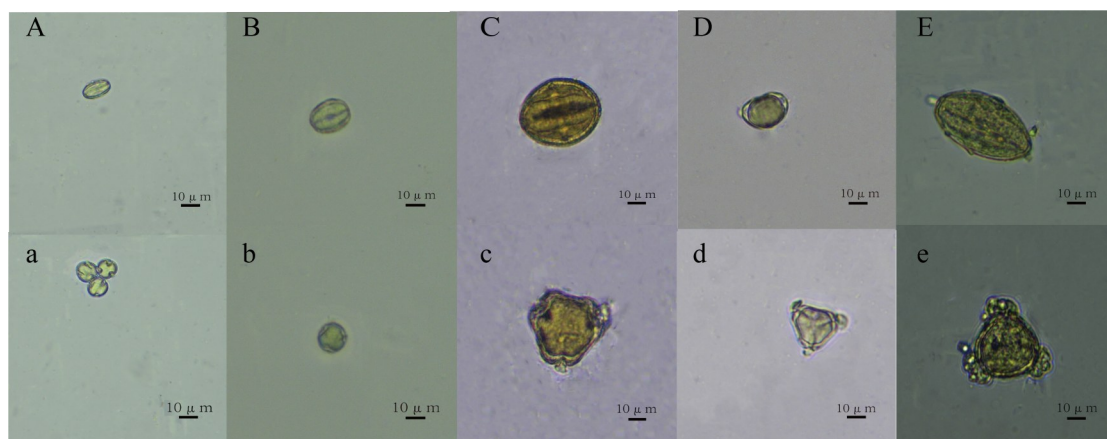
1.6 数据统计与分析

试验数据通过 Excel 进行分析,利用 SPSS Statistics 26 使用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各组间的差异,并使用 Spearman 相关系数分析检验各组间的相关性,数据均以平均值 $\pm$ 标准偏差(mean $\pm$ SE)表示($n \geq 3$),使用 GraphPad Prism 8 制作统计图形。

2 结果与分析

2.1 中蜂蜂蜜花粉学鉴定

参考《中国蜜粉源植物》^[25]和《中国植物花粉形态》^[26]中的方法对蜂蜜花粉进行鉴定,以单花种花粉含量 $\geq 45\%$ 作为单花蜜的判定标准^[27],对 5 种中蜂蜂蜜样品进行检测分析。结果发现,壳斗蜜(单花粉占有率 $\bar{x} = 65.01\%$)、树参蜜($\bar{x} = 57.73\%$)、赤楠蜜($\bar{x} = 52.90\%$)、五倍子蜜($\bar{x} = 72.30\%$)、锥属蜜($\bar{x} = 53.66\%$)等 5 种样品均符合单花蜜标准。其中,壳斗蜜主要为中蜂采集栗属植物与锥属植物花蜜酿造而成。鉴于栗属植物与锥属植物同属于壳斗科,二者花期重叠且在江西省内广泛共生,故以壳斗蜜命名。



A~E:分别为栗属植物、锥属植物、树参、赤楠、五倍子花粉的赤道面观;a~e:分别为栗属植物、锥属植物、树参、赤楠、五倍子花粉的极面观。

A~E:The equatorial view of the pollen of *Castanea*, *Castanopsis*, *Dendropanax dentiger*, *Syzygium buxifolium*, *Rhus chinensis*; a~e:The polar view of the pollen of *Castanea*, *Castanopsis*, *Dendropanax dentiger*, *Syzygium buxifolium*, *Rhus chinensis*.

图 1 中蜂蜂蜜花粉电镜形态(400 $\times$)

Fig.1 Electron microscopic morphology of main pollen in honey collected by *Apis cerana cerana* honey(400 $\times$)

花粉形态学特征分析表明:锥属植物与栗属植物的花粉粒结构相似,赤道面观呈长球形,极面观呈三裂圆形,具有三孔沟结构,但栗属植物花粉要略长于锥属植物,且三孔沟结构更为明显。树参花粉粒体积较大,赤道面观呈长球形,极面观呈钝三角形,具有三孔沟。赤楠花粉粒赤道面观呈扁球形,极面观呈三角形,具有三孔沟。五倍子花粉粒体积较大,赤道面观呈卵形,极面观呈近圆形,具有三孔沟,具体形态特征如图 1 所示。

2.2 中蜂蜂蜜理化性质

参照现有标准对采集样品中葡萄糖、果糖、蔗糖、水分、酸度、淀粉酶活性、灰分、电导率、羟甲基糠醛(hydroxymethylfurfural, HMF)进行检测,依据 GH/T 18796—2012《蜂蜜》^[28]和国际食品法典《蜂蜜》标准^[29]对蜂蜜样品进行评价。由表 2 可知,试验样品中葡萄糖、果糖总量均大于 65%,蔗糖含量均小于 5%,符合行业标准^[28]。除锥属蜜水分($\bar{x}$ =19.86%)达到一级品($\leq 20\%$)外,其余蜂蜜样品均满足二级品要求($\leq 24\%$)^[28]。淀粉酶活性检测结果为 4.26~21.62 mL/(g·h),均高于行业要求 4 mL/(g·h)^[28]。除赤楠蜜外,其余蜂蜜样品的总灰分、电导率均符合标准^[28-29]。酸度为 11.98~20.69 mL/kg(1 mol/L NaOH 溶液),均在行业标准允许范围内^[28]。HMF 含量显著低于蜂蜜的行业标准(HMF ≤ 40 mg/kg)^[28]。

表 2 中蜂蜂蜜的理化性质
Tab.2 Physicochemical properties of honey collected by *Apis cerana cerana* honey

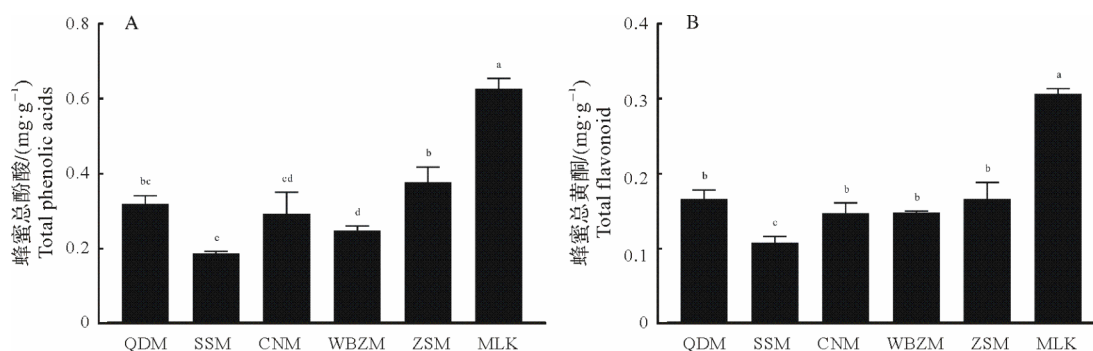
成分 Component	壳斗蜜	树参蜜	赤楠蜜	五倍子蜜	锥属蜜	标准		参考
	QDM	SSM	CNM	WBZM	ZSM	一级	二级	
水分/% Moisture content	20.48±0.14 ^a	23.78±0.04 ^a	21.33±0.08 ^c	22.82±0.34 ^b	19.86±0.63 ^c	≤20	≤24	GH/T 18796—2012 ^[28]
每 100 g 葡萄糖/g Glucose	32.86±0.47 ^a	31.45±0.20 ^{bc}	30.54±1.15 ^c	32.13±0.74 ^{ab}	33.23±0.22 ^a			
每 100 g 果糖/g Fructose	36.87±0.17 ^b	40.19±0.37 ^a	35.28±1.00 ^c	36.85±0.24 ^b	34.71±0.39 ^c			
每 100 g 葡萄糖+果糖/g Glucose+Fructose	69.72±0.54 ^{ab}	71.64±0.48 ^a	65.81±2.15 ^c	68.98±0.72 ^b	67.94±0.35 ^b	≥60		GH/T 18796—2012 ^[28]
每 100 g 蔗糖/g Sucrose	0.28±0.04 ^b	ND	ND	0.32±0.02 ^b	0.85±0.09 ^a	≤5		GH/T 18796—2012 ^[28]
酸度/(mL·kg ⁻¹) Acidity	17.30±0.25 ^b	11.98±0.13 ^c	20.69±0.61 ^a	18.84±0.35 ^{ab}	18.50±3.02 ^{ab}	≤40		GH/T 18796—2012 ^[28]
淀粉酶活性/(mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Amylase activity	4.26±0.48 ^d	6.27±0.53 ^{cd}	7.68±1.32 ^c	11.87±0.43 ^b	21.62±3.25 ^a	≥4		GH/T 18796—2012 ^[28]
每 100 g 灰分/g Ash content	0.195±0.016 ^d	0.224±0.015 ^d	0.421±0.034 ^a	0.238±0.031 ^d	0.095±0.003 ^c	≤0.4		GH/T 18796—2012 ^[28]
电导率/(mS·cm ⁻¹) Conductivity	0.380±0.012 ^c	0.242±0.005 ^c	0.804±0.044 ^a	0.556±0.013 ^b	0.31±0.030 ^d	≤0.8		国际食品法典《蜂蜜》标准 (CAC 2019 年修订) ^[29]
羟甲基糠醛/(mg·kg ⁻¹) HMF	4.295±0.289 ^a	1.157±0.045 ^c	1.679±0.600 ^c	ND	2.46±0.501 ^b	≤40		GH/T 18796—2012 ^[28]

“ND”表示“未检出”;同行不同上标字母表示具有显著差异, $P<0.05$ 。
“ND” indicates “not detected”; different superscript letters in the same row indicate a significant difference, $P<0.05$.

2.3 中蜂蜂蜜总酚酸、总黄酮含量

本试验中中蜂蜂蜜样品中总酚酸含量最高的为锥属蜜[(0.375±0.040) mg/g],最低的为树参蜜[(0.185±0.006) mg/g],5 种中蜂蜂蜜样品的总酚酸含量均显著低于麦卢卡蜂蜜[(0.624±0.027) mg/g]($P<0.05$)。其中,锥属蜜的总酚酸含量显著高于树参蜜、赤楠蜜[(0.291±0.057) mg/g]和五倍子蜜[(0.246±0.012) mg/g]($P<0.05$),与壳斗蜜[(0.317±0.022) mg/g]差异不显著($P>0.05$);树参蜜的总酚酸含量显著低于其余 4 种中蜂蜂蜜($P<0.05$)。总酚酸含量从高到低依次为锥属蜜、壳斗蜜、赤楠蜜、五倍子蜜和树参蜜。

蜂蜜样品中总黄酮含量最高为壳斗蜜[(0.165±0.012) mg/g],最低为树参蜜[(0.107±0.008) mg/g],所有样品的总黄酮含量均显著低于麦卢卡蜂蜜[(0.305±0.007) mg/g]($P<0.05$)。壳斗蜜、赤楠蜜[(0.146±0.014) mg/g]、五倍子蜜[(0.147±0.002) mg/g]和锥属蜜[(0.165±0.022) mg/g]的总黄酮含量差异不显著($P>0.05$),但均显著高于树参蜜($P<0.05$)。中蜂蜂蜜总黄酮含量从高到低依次为:壳斗蜜、锥属蜜、五倍子蜜、赤楠蜜和树参蜜。



QDM-壳斗蜜;SSM-树参蜜;CNM-赤楠蜜;WBZM-五倍子蜜;ZSM-锥属蜜;MLK-麦卢卡蜂蜜。不同上标字母表示具有显著差异, $P<0.05$ 。

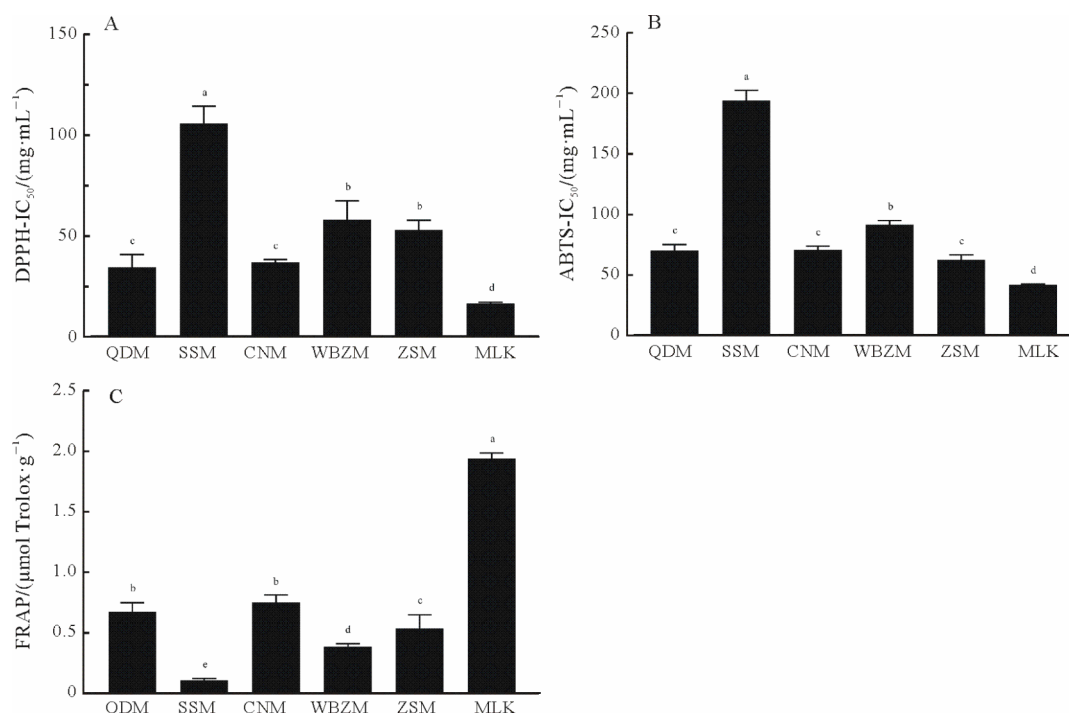
QDM-Fagaceae honey;SSM-*Dendropanax dentiger* honey;CNM-*Syzygium buxifolium* honey;WBZM-*Rhus chinensis* honey;ZSM-*Castanopsis* honey;MLK-Manuka honey.Different superscript letters indicate significant difference, $P<0.05$.

图2 中蜂蜂蜜中总酚酸(A)和总黄酮(B)的含量

Fig.2 Total phenolic acids(A)and total flavonoids(B)content of *Apis cerana cerana* honey

2.4 中蜂蜂蜜抗氧化能力

本研究中5种中蜂蜂蜜样品的抗氧化能力测定采用DPPH法、ABTS法和FRAP法, IC_{50} 表示自由基清除率达到50%的数值, IC_{50} 数值越低,代表其对自由基的清除能力越强,抗氧化效果越好^[30]。由图3A可知,在DPPH自由基清除方面,树参蜜的DPPH清除自由基 IC_{50} [(105.76±8.48) mg/mL]最高,壳斗蜜[(34.24±6.44) mg/mL]最低,所有中蜂蜂蜜的DPPH清除自由基 IC_{50} 均显著高于麦卢卡蜂蜜[(16.65±0.53) mg/mL]($P<0.05$)。不同中蜂蜂蜜样品DPPH自由基清除力也存在差异,树参蜜DPPH自由基清除能力 IC_{50} 显著高于其余4种中蜂蜂蜜($P<0.05$),DPPH自由基清除力最弱。五倍子[(58.01±9.26) mg/mL]、锥属蜜[(52.86±4.83) mg/mL]的DPPH清除自由基 IC_{50} 显著高于壳斗蜜、赤楠蜜[(36.80±1.36) mg/mL]($P<0.05$)。DPPH自由基清除能力从高到低依次为壳斗蜜、赤楠蜜、锥属蜜、五倍子蜜和树参蜜。



QDM-壳斗蜜;SSM-树参蜜;CNM-赤楠蜜;WBZM-五倍子蜜;ZSM-锥属蜜;MLK-麦卢卡蜂蜜。不同上标字母表示具有显著差异, $P<0.05$ 。

QDM-Fagaceae honey;SSM-*Dendropanax dentiger* honey;CNM-*Syzygium buxifolium* honey;WBZM-*Rhus chinensis* honey;ZSM-*Castanopsis* honey;MLK-Manuka honey.Different superscript letters indicate significant difference, $P<0.05$.

图3 中蜂蜂蜜的DPPH自由基清除 IC_{50} (A)、ABTS阳离子自由基清除 IC_{50} (B)和铁离子还原/抗氧化能力(C)

Fig.3 DPPH free radical scavenging IC_{50} (A),ABTS free radical scavenging IC_{50} (B), and ferric ion reducing/antioxidant power(C)of *Apis cerana cerana* honey

对 ABTS 阳离子自由基清除能力分析表明(图 3B),树参蜜的 ABTS 阳离子自由基清除率 IC_{50} [(193.89±8.56) mg/mL]最高,锥属蜜[(62.46±4.08) mg/mL]最低,且中蜂蜂蜜的 ABTS 阳离子自由基清除率 IC_{50} 均显著高于麦卢卡蜂蜜[(41.61±0.84) mg/mL]($P<0.05$)。其中,壳斗蜜[(70.02±4.94) mg/mL]、赤楠蜜[(70.66±3.46) mg/mL]和锥属蜜的 ABTS 阳离子自由基清除率 IC_{50} 无显著差异($P>0.05$),但均显著优于五倍子蜜[(91.36±3.46) mg/mL]和树参蜜($P<0.05$)。ABTS 阳离子自由基清除能力从高到低依次为锥属蜜、壳斗蜜、赤楠蜜、五倍子蜜和树参蜜。

铁离子还原/抗氧化能力(FRAP)测定结果如图 3C 所示。赤楠蜜[(0.751±0.060) μ mol/g]铁离子还原/抗氧化能力最强,树参蜜[(0.108±0.015) μ mol/g]最弱,中蜂蜂蜜的 FRAP 均显著低于麦卢卡蜂蜜[(1.935±0.048) μ mol/g]($P<0.05$)。不同中蜂蜂蜜的 FRAP 也具有显著差异,赤楠蜜的 FRAP 显著高于壳斗蜜[(0.673±0.075) μ mol/g]和锥属蜜[(0.537±0.111) μ mol/g]($P<0.05$),壳斗蜜与锥属蜜无显著差异($P<0.05$);五倍子蜜[(0.386±0.024) μ mol/g]显著高于树参蜜($P<0.05$)。铁离子还原/抗氧化能力从高到低依次为赤楠蜜、壳斗蜜、锥属蜜、五倍子蜜和树参蜜。

2.5 中蜂蜂蜜理化成分、总酚酸、总黄酮含量与抗氧化能力相关性分析

对中蜂蜂蜜中理化成分、总酚酸、总黄酮含量与抗氧化能力(清除 DPPH 自由基 IC_{50} 、清除 ABTS 阳离子自由基 IC_{50} 、铁离子还原/抗氧化能力)进行相关性分析(表 3)发现,中蜂蜂蜜 HMF 含量($r=-0.769$, $P<$

表 3 中蜂蜂蜜理化成分、总酚酸、总黄酮与抗氧化能力相关性分析

Tab.3 Correlation between physicochemical composition total phenolic acids,total flavonoids and antioxidant activity in <i>Apis cerana cerana</i> honey														
项目 Items	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.水分 Moisture content	1													
2.葡萄糖 Glucose	-0.069	1												
3.果糖 Fructose	0.560**	-0.202	1											
4.蔗糖 Sucrose	-0.042	0.865**	-0.267	1										
5.酸度 Acidity	-0.473*	-0.247	-0.626**	-0.122	1									
6.淀粉酶活性 Amylase activity	-0.189	-0.347	-0.332	-0.275	0.494*	1								
7.灰分 Ash content	0.132	-0.551**	-0.033	-0.494*	0.296	-0.077	1							
8.电导率 Conductivity	-0.322	-0.336	-0.400	-0.152	0.731**	0.088	0.675**	1						
9.羟甲基糠醛 HMF	-0.648**	0.304	-0.309	0.213	0.011	-0.467*	0.107	0.183	1					
10.总酚酸 Total phenolic acids	-0.825**	0.138	-0.579**	0.082	0.549**	0.255	-0.095	0.280	0.495*	1				
11.总黄酮 Total flavonoids	-0.782**	0.149	-0.409	0.216	0.361	-0.010	0.005	0.362	0.639**	0.840	1			
12.DPPH IC ₅₀	0.566**	-0.182	0.407	-0.253	-0.397	0.416	-0.361	-0.654**	-0.769**	-0.641**	-0.724**	1		
13.ABTS ⁺ IC ₅₀	0.852**	-0.216	0.716**	-0.300	-0.497*	-0.095	0.031	-0.381	-0.697**	-0.837**	-0.810**	0.782**	1	
14.FRAP	-0.591	0.073	-0.586**	0.196	0.549**	-0.265	0.388	0.703**	0.706**	0.669**	0.719**	-0.956**	-0.848**	1

*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著,**表示在 0.01 级别(双尾),相关性极显著。
* indicates significant correlation at the 0.05 level(two-tailed), ** indicates highly significant correlation at the 0.01 level (two-tailed).

0.01)、总酚酸($r=-0.641, P<0.01$)、总黄酮($r=-0.724, P<0.01$)与清除 DPPH 自由基 IC_{50} 呈显著负相关, HMF 含量($r=-0.697, P<0.01$)、总酚酸($r=-0.837, P<0.01$)、总黄酮($r=-0.810, P<0.01$)与清除 ABTS 阳离子自由基 IC_{50} 均呈显著负相关, 蜂蜜中 HMF($r=0.706, P<0.01$)、总酚酸($r=0.669, P<0.01$)、总黄酮($r=0.719, P<0.01$)与铁离子还原/抗氧化能力存在显著正相关性关系, 表明蜂蜜中 HMF、总酚酸、总黄酮含量越高, 其自由基清除能力 IC_{50} 越小、铁离子还原/抗氧化能力越强, 抗氧化能力越强。此外, 蜂蜜的抗氧化能力还与水分、果糖、蔗糖、酸度及电导率等相关。DPPH 自由基清除能力 IC_{50} 与水分($r=0.566, P<0.01$)呈显著正相关, 与电导率($r=-0.654, P<0.01$)、酸度($r=-0.654, P<0.01$)呈显著负相关。ABTS 阳离子自由基清除能力 IC_{50} 与水分($r=0.852, P<0.01$)、果糖($r=0.716, P<0.01$)呈显著正相关, 与酸度($r=-0.497, P<0.05$)呈负相关。铁离子还原/抗氧化能力值与水分($r=-0.591, P<0.01$)、果糖($r=-0.586, P<0.01$)呈显著负相关, 与酸度($r=0.549, P<0.01$)、电导率($r=0.703, P<0.01$)呈显著正相关。

2.6 中蜂蜂蜜的综合抗氧化能力比较

试验采用克拉默(Kramer)检验法^[31]对蜂蜜综合抗氧化能力进行评价, Q_i 表示蜂蜜 DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力、铁离子还原/抗氧化能力 3 个指标的评分总和, 其中 $Q_{imin}=3, Q_{imax}=18$, 在置信度为 5%(上段数据 4~17, 下段数据 6~15)时蜂蜜样品之间存在差异, 蜂蜜的综合抗氧化能力从大到小依次为麦卢卡蜂蜜、壳斗蜜、赤楠蜜、锥属蜜、五倍子蜜和树参蜜(表 4)。

表 4 中蜂蜂蜜的综合抗氧化能力

Tab.4 Total antioxidant abilities of 5 kinds of *Apis cerana cerana* honey

名称 Name	DPPH 自由基清除能力 DPPH free radical scavenging ability	ABTS 阳离子自由基清除能力 ABTS free radical scavenging ability	铁离子还原/抗氧化能力 iron ion reducing/ antioxidant power	Q_i
壳斗蜜/QDM	5	4	4	13
树参蜜/SSM	1	1	1	3
赤楠蜜/CNM	4	3	5	12
五倍子蜜/WBZM	2	2	2	6
锥属蜜/ZSM	3	5	3	11
麦卢卡蜂蜜/MLK	6	6	6	18

3 讨论与结论

江西省蜜粉源植物资源丰富, 养蜂历史悠久, 年产中蜂蜂蜜可达 1 万 t^[32]。本研究对 5 种中蜂蜂蜜的常规理化指标(葡萄糖、果糖、蔗糖、水分、酸度、淀粉酶活性、灰分、电导率、HMF)进行测定, 结果表明除赤楠蜜的灰分、电导率不符合行业标准外, 其余蜂蜜样品的各项指标均符合标准要求, 其中锥属蜜达到一级品标准。赤楠蜜的总灰分和电导率偏高, 推测可能与赤楠蜜自身的蛋白质含量^[33]或矿物质含量^[34]较高有关。水分是蜂蜜质量评判的一个重要指标^[35]。试验中蜂蜜样品的含水量大部分介于 20%~24%, 水分含量偏高, 推测可能是由于蜂蜜在巢脾内的封盖时间较短所致。江慧枝等^[36]研究发现, 通过延长蜂蜜封盖成熟时间及采用多箱体强群生产模式, 可显著降低蜂蜜水分含量, 提升蜂蜜品质。淀粉酶作为蜂蜜中重要的活性酶, 主要来源于蜜蜂咽下腺分泌的唾液, 少量来自蜜源植物的花蜜和花粉^[37]。淀粉酶活性不仅是判断蜜蜂成熟度的核心指标, 也是鉴别蜂蜜新鲜度及真伪的重要依据^[38-39]。Zhang 等^[40]对油菜蜜的研究表明, 随着封盖成熟时间由 1 d 延长至 16 d, 蜂蜜水分含量从 26.9% 降低至 18.5%, 淀粉酶活性从 16 mL/(g·h) 提升至 29 mL/(g·h)。范路军等^[41]研究发现, 在冷冻条件下蜂蜜淀粉酶活性基本稳定, 而在其他储存条件下淀粉酶活性会随着时间的延长而显著降低。李军生等^[39]对真假蜂蜜鉴别研究表明, 真蜂蜜中淀粉酶活性随温度、时间的变化具有显著差异, 而假蜂蜜中淀粉酶活性则相对稳定, 受温度和时间的影响较小。在本试验中, 部分中蜂蜂蜜的淀粉酶值偏低、整体水分含量偏高, 这可能与蜂蜜封盖时间较短有关, 也可能与特定的蜜源植物有关^[36]。

多酚类化合物具有较强的生物活性,在心血管疾病防治、糖尿病辅助治疗和癌症预防等^[42-44]方面展现出显著功效。蜂蜜中的多酚类化合物主要通过蜜蜂采集花蜜获得,是蜂蜜主要的抗氧化物质^[45-47],其含量与蜜源植物种类和地理位置密切相关^[48-49]。杨雪梅等^[50]对新疆不同地区的薰衣草蜂蜜研究发现,不同地区蜂蜜所含的总酚酸、总黄酮含量存在显著差异。张敏等^[24]通过对10种单花种蜂蜜的分析进一步证实,总酚酸和总黄酮的含量不仅受地理位置影响,还与蜜源植物的种类密切相关,这与本试验结果一致。此外,蜂蜜颜色与其总酚酸、总黄酮的含量存在一定的相关性,Estevinho等^[51]研究表明,深色蜂蜜的总酚含量要显著高于浅色蜂蜜,对DPPH自由基的清除能力也显著优于浅色蜂蜜。在本试验中,中蜂蜂蜜展现出良好的抗氧化能力,其清除DPPH自由基清除率 IC_{50} 低于刺槐蜜^[52]、黄芪蜜和油菜蜜^[24]。

已有研究表明,蜂蜜的抗氧化能力与其理化性质、化学成分密切相关。张国志等^[12]通过分析发现,蜂蜜的电导率、色值及总酚酸含量能够影响其抗氧化能力。黄伦等^[53]指出,蜂蜜中的蔗糖含量与其抗氧化能力呈正相关性。Socha等^[54]的研究进一步表明,蜂蜜中的多酚类化合物与自由基清除力之间存在显著的正相关性。Zhang等^[55]对9种蜂蜜研究证实,蜂蜜中总黄酮含量与自由基清除力之间呈显著正相关。本研究通过相关性分析,进一步验证了中蜂蜂蜜中总酚酸和总黄酮含量与抗氧化能力之间的正相关性,总酚酸、总黄酮含量越高,抗氧化能力越强。然而,不同类型的酚酸和黄酮类化合物的抗氧化能力也存在显著差异^[56-57]。穆雪峰^[56]在测定枣花蜜中咖啡酸、山奈酚等5种多酚类化合物的DPPH自由基清除能力时发现,不同化合物的抗氧化能力存在显著差异,其中咖啡酸、山奈酚的DPPH自由基清除效果要显著优于对香豆酸、柚皮素、白杨素。

羟甲基糠醛(HMF)作为天然呋喃类化合物,广泛存在于各类植物性药材中,是熟地黄^[58]、山茱萸^[59]等的有效成分,具有抗炎、抗缺氧等生物活性^[60],但过量的HMF存在致癌风险^[61]。在蜂蜜中,HMF是由葡萄糖或者果糖通过美拉德反应生成^[45],是衡量蜂蜜新鲜度的重要指标之一^[62]。HMF含量过高通常代表蜂蜜经过高温加工或长期储存^[63]。根据GH/T 18796—2012^[28],蜂蜜中的HMF含量不得超过40 mg/kg。在本试验中,中蜂蜂蜜样品的HMF含量远低于限值,符合行业标准要求^[28]。相关性分析显示,蜂蜜中HMF含量与其抗氧化能力呈显著正相关,这与雷露等^[64]的研究结果一致。

本研究对江西省5种中蜂蜂蜜的葡萄糖、果糖、蔗糖、水分、酸度、淀粉酶活性、灰分、电导率、羟甲基糠醛等基本理化指标,总酚酸与总黄酮含量,以及DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力和铁离子还原/抗氧化能力进行了全面的分析。结果表明,除赤楠蜜的灰分、电导率外,5种中蜂蜂蜜样品理化指标均符合行业标准。研究发现,不同种类的中蜂蜂蜜在酚酸和黄酮的含量上存在显著差异,其总量从高到低依次为锥属蜜、壳斗蜜、赤楠蜜、五倍子蜜和树参蜜。综合抗氧化能力由大到小依次为壳斗蜜、赤楠蜜、锥属蜜、五倍子蜜和树参蜜。进一步相关性分析表明,蜂蜜中总酚酸、总黄酮和HMF含量均与抗氧化能力呈正相关性。然而,未来还需要进一步对赤楠蜜等5种中蜂蜂蜜进行抑菌活性研究,明确其抗氧化、抑菌机制及多酚类物质组成。通过系统研究,不仅能有力推动特色中蜂蜂蜜的深度开发,助力打造具有地域标识性的江西特色中蜂蜂蜜品牌,还将为中蜂蜂蜜在食品和药品领域的应用奠定理论基础。

参考文献 Reference:

- [1] 曾志将. 养蜂学[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2023: 1-20.
ZENG Z J. Apiculture[M]. 4th ed. Beijing: China Agricultural Press, 2023: 1-20.
- [2] 李震, 易瑶, 何旭江, 等. 全基因组DNA甲基化揭示西方蜜蜂表观遗传印迹[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 968-975.
LI Z, YI Y, HE X J, et al. Genome-wide DNA methylation revealing epigenetic inheritance marks in honeybee (*Apis mellifera*) [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(4): 968-975.
- [3] DA SILVA P M, GAUCHE C, GONZAGA L V, et al. Honey: chemical composition, stability and authenticity[J]. Food chemistry, 2016, 196: 309-323.
- [4] SERAGLIO S K T, SCHULZ M, BRUGNEROTTO P, et al. Quality, composition and health-protective properties of citrus

- honey: a review[J]. Food research international, 2021, 143: 110268.
- [5] KEČKEŠ J, TRIFKOVIĆ J, ANDRIĆ F, et al. Amino acids profile of Serbian unifloral honeys[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2013, 93(13): 3368-3376.
- [6] ETERAF-OSKOEI T, NAJAFI M. Traditional and modern uses of natural honey in human diseases: a review[J]. Iranian journal of basic medical sciences, 2013, 16(6): 731-742.
- [7] 刘赞, 李倩, 刘锋, 等. 江西省蜂产业发展现状及对策[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2021(6): 6-9.
LIU Y, LI Q, LIU F, et al. Current status and countermeasures of beekeeping industry in Jiangxi Province[J]. Jiangxi journal of animal husbandry and veterinary medicine, 2021(6): 6-9.
- [8] 王会迪. 不同成熟阶段椴树蜜的成分分析及其体外抗氧化和抑菌作用的研究[D]. 延吉: 延边大学, 2022.
WANG H D. Component analysis of *linden* honey at different maturity stages and its antioxidant and antibacterial effects in vitro[D]. Yanji: Yanbian University, 2022.
- [9] BERETTA G, ORIOLI M, FACINO R M. Antioxidant and radical scavenging activity of honey in endothelial cell cultures (EA.hy926)[J]. Planta medica, 2007, 73(11): 1182-1189.
- [10] SEEN S. Chronic liver disease and oxidative stress—a narrative review[J]. Expert review of gastroenterology & hepatology, 2021, 15(9): 1021-1035.
- [11] DUNI A, LIAKOPOULOS V, ROUMELIOTIS S, et al. Oxidative stress in the pathogenesis and evolution of chronic kidney disease: untangling Ariadne's thread[J]. International journal of molecular sciences, 2019, 20(15): 3711.
- [12] 张国志, 韩凌云, 李珊珊, 等. 三种药用植物来源的蜂蜜抗氧化和抗菌活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(6): 100-108.
ZHANG G Z, HAN L Y, LI S S, et al. Antioxidant and antimicrobial properties of three monofloral kinds of honey from medicinal plants[J]. Food and fermentation industries, 2024, 50(6): 100-108.
- [13] 朱明元, 周光宇, 林茜, 等. 蜂蜜对小白鼠脂质过氧化影响的研究[J]. 中国公共卫生, 2002(3): 12-13.
ZHU M Y, ZHOU G Y, LIN X, et al. Study on influence of honey on lipid peroxidation in mice[J]. Chinese journal of public health, 2002(3): 12-13.
- [14] 祝敏. 西北五种特色单花种蜂蜜花源特征性成分及其对酒精性胃损伤的保护作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
ZHU M. Characteristic components of five special monofloral honeys from Northwest China and the gastroprotective effect against ethanol-induced gastric injury[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [15] 张金萍. 山乌柏蜜改善小鼠酒精肝损伤及肠道菌群的作用和机制[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
ZHANG J P. The mechanism of *Triadica cochinchinensis* honey ameliorating alcohol liver damage of mice by adjusting the gut microbiota[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 蜂蜜中植物花粉的测定方法: GB/T 23194—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Method for the determination of plant pollen in honey: GB/T 23194—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] 中华人民共和国国家食品药品监督管理总局. 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定: GB 5009.8—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Medical Products Administration of the People's Republic of China. Determination of fructose, glucose, sucrose, maltose, and lactose in Foods: GB5009.8—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 进出口蜂蜜检验规程: SN/T 0852—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Regulations for the inspection of imported and exported honey: SN/T 0852—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 蜂蜜中淀粉酶值的测定方法: 分光光度法: GB/T 18932.16—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Method for the determination of diastase number in honey: spectrometric method: GB/T 18932.16—2003[S]. Beijing: Standards Press of

- China, 2003.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中灰分的测定:GB/T 5009.4—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of ash in food: GB/T 5009.4—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 蜂蜜电导率测定方法:GB/T 18932.15—2003[S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Method for determining the electrical conductivity of honey: GB/T 18932.15—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 蜂蜜中羟甲基糠醛含量的测定方法:液相色谱-紫外检测法:GB/T 18932.18—2003[S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Method for the determination of hydroxymethylfurfural in honey-HPLC-UV detection method: GB/T 18932.18—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [23] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. Free radical biology and medicine, 1999, 26(9/10): 1231-1237.
- [24] 张敏, 黄京平, 赵文, 等. 不同蜂蜜抗氧化活性和抑制酪氨酸酶活性的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 113-119.
- ZHANG M, HUANG J P, ZHAO W, et al. Comparison of antioxidant and tyrosinase inhibition activity of different types of honey[J]. Modern food science and technology, 2023, 39(1): 113-119.
- [25] 徐万林. 中国蜜粉源植物[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 1983:38-466.
- XU W L. Nectar and pollen plants of China[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1993:38-466.
- [26] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态[M]. 2版. 北京:科学出版社, 1983:38-466.
- WANG F X, QIAN N F, ZHANG Y L, et al. Pollen flora of China[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1995:38-434.
- [27] RODOPOULOU M A, TANANAKI C, DIMOU M, et al. The determination of the botanical origin in honeys with over-represented pollen: combination of melissopalynological, sensory and physicochemical analysis[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2018, 98(7): 2705-2712.
- [28] 佚名. 蜂蜜:GH/T 18796—2012[J]. 中国蜂业, 2012, 63(19): 39-42.
- Anon. Honey: GH/T 18796—2012[J]. Apiculture of China, 2012, 63(19): 39-42.
- [29] 陈黎红, 方兵兵. 国际食品法典《蜂蜜》标准(CAC 2019年修订)[J]. 中国蜂业, 2021, 72(7): 12-13.
- CHEN L H, FANG B B. International codex alimentarius standard for honey (CAC 2019 Revision)[J]. Apiculture of China, 2021, 72(7): 12-13.
- [30] 王荣, 罗倩, 冯怡. DPPH、ABTS和FRAP微量法测定山奈酚的抗氧化能力[J]. 广州化工, 2021, 49(3): 58-59.
- WANG R, LUO Q, FENG Y, et al. Determination of antioxidant effects of kaempferol by micro-model of DPPH, ABTS and FRAP assay[J]. Guangzhou chemical industry, 2021, 49(3): 58-59.
- [31] 李里特. 食品物性学[M]. 北京:中国农业出版社, 2001:91-92.
- LI L T. Physical properties of foods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001:91-92.
- [32] 熊卓林, 赵者云, 袁芳, 等. 江西省西方蜜蜂多箱体成熟蜂蜜生产技术要点[J]. 中国蜂业, 2024, 75(3): 19-20.
- XIONG Z L, ZHAO Z Z, YUAN F, et al. Key technical points of *Apis mellifera* multi-box mature honey production in Jiangxi Province[J]. Apiculture of China, 2024, 75(3): 19-20.
- [33] EL SOHAIFY S A, MASRY S H D, SHEHATA M G. Physicochemical characteristics of honey from different origins[J]. Annals of agricultural sciences, 2015, 60(2): 279-287.
- [34] TERRAB A, GONZALEZ A G, DÍEZ M J, et al. Mineral content and electrical conductivity of the honeys produced in North-west Morocco and their contribution to the characterisation of unifloral honeys[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2003, 83(7): 637-643.
- [35] 岳锦萍, 高寒, 王丹丹, 等. 利用理化参数鉴别掺假蜂蜜[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(3): 48-55.
- YUE J P, GAO H, WANG D D, et al. Identification of adulterated honey based on physical and chemical parameters[J].

- Journal of food science and technology, 2018, 36(3):48-55.
- [36] 江慧枝,江武军,李震,等.优质山乌柏蜂蜜生产及其成分分析[J].江西农业大学学报,2023,45(6):1473-1485.
- JIANG H Z,JIANG W J,LI Z,et al.Production and composition analysis of high-quality *Triadica cochinchinensis* honey[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(6):1473-1485.
- [37] BABACAN S,RAND A G.Characterization of honey amylase[J].Journal of food science, 2007, 72(1):50-55.
- [38] 张国志,张言政,李珊珊,等.蜂蜜中的酶及其在蜂蜜质量控制中的应用[J].食品安全质量检测学报,2021,12(21):8313-8320.
- ZHANG G Z,ZHANG Y Z,LI S S,et al.Enzymes in honey and their application in honey quality control[J].Journal of food safety & quality, 2021, 12(21):8313-8320.
- [39] 李军生,黄位明,张嘉婧,等.淀粉酶在真假蜂蜜中的区别[J].食品与发酵工业,2006(1):75-78.
- LI J S,HUANG W M,ZHANG J J,et al.Difference of amylase in nature and adulterated honey[J].Food and fermentation industries, 2006(1):75-78.
- [40] ZHANG G Z,TIAN J,ZHANG Y Z,et al.Investigation of the maturity evaluation indicator of honey in natural ripening process:the case of rape honey[J].Foods, 2021, 10(11):2882.
- [41] 范路军,张永云,颜平萍,等.不同贮存条件下野坝子蜜淀粉酶活性随时间的变化规律研究[J].家畜生态学报,2012,33(6):59-62.
- FAN L J,ZHANG Y Y,YAN P P,et al.Variation of different storage conditions on amylase activity of *Elsholtzia rugulosa* honey with time[J].Journal of domestic animal ecology, 2012, 33(6):59-62.
- [42] ABBAS M,SAEED F,ANJUM F M,et al.Natural polyphenols: an overview [J].International journal of food properties, 2017, 20(8):1689-1699.
- [43] BELŠČAK-CVITANOVIĆ A,DURGO K,HUDEK A,et al.Overview of polyphenols and their properties [M]//Polyphenols: properties, recovery, and applications. Woodhead Publishing, 2018:3-44.
- [44] DO VALLE I F, ROWETH H G, MALLOY M W, et al. Network medicine framework shows that proximity of polyphenol targets and disease proteins predicts therapeutic effects of polyphenols [J]. Nature food, 2021, 2(3):143-155.
- [45] BOBIS O, MOISE A R, BALLESTEROS I, et al. Eucalyptus honey: quality parameters, chemical composition and health-promoting properties [J]. Food chemistry, 2020, 325:126870.
- [46] KARAPETKOVSKA-HRISTOVA V, MUSTAFA S K. Natural honey beneficial to health, its chemical composition, and biochemical activities: a review [J]. Current journal of applied science and technology, 2022, 41(42):1-14.
- [47] MUSA ÖZCAN M, AL JUHAIMI F. Honey as source of natural antioxidants [J]. Journal of apicultural research, 2015, 54(3):145-154.
- [48] ALZAHIRANI H A, BOUKRAË L, BELLIK Y, et al. Evaluation of the antioxidant activity of three varieties of honey from different botanical and geographical origins [J]. Global journal of health science, 2012, 4(6):191-196.
- [49] ALZAHIRANI H A, ALSABEHI R, BOUKRAË L, et al. Antibacterial and antioxidant potency of floral honeys from different botanical and geographical origins [J]. Molecules, 2012, 17(9):10540-10549.
- [50] 杨雪梅,朱鑫麗,张楠,等.薰衣草蜂蜜抗氧化成分及其抗氧化能力分析[J].食品科技,2023,48(7):57-63.
- YANG X M,ZHU X L,ZHANG N,et al. Analysis on antioxidant substances and antioxidant capacity of *Lavender* honey [J]. Food science and technology, 2023, 48(7):57-63.
- [51] ESTEVINHO L, PEREIRA A P, MOREIRA L, et al. Antioxidant and antimicrobial effects of phenolic compounds extracts of Northeast Portugal honey [J]. Food and chemical toxicology, 2008, 50:258-264.
- [52] FLANJAK I, KENJERIĆ D, BUBALO D, et al. Characterisation of selected Croatian honey types based on the combination of antioxidant capacity, quality parameters, and chemometrics [J]. European food research and technology, 2016, 242:467-475.
- [53] 黄伦,周静月,倪伟成,等.甘孜州3种特色中蜂蜜抗氧化和抑菌活性分析[J].蜜蜂杂志,2023,43(11):1-5.
- HUANG L,ZHOU J Y,NI W C,et al.Determination of antioxidant and antibacterial activities of three kinds of *Apis Cerana* honey in Ganzi Prefecture [J]. Journal of bee, 2023, 43(11):1-5.
- [54] SOCHA R, JUSZCZAK L, PIETRZYK S, et al. Phenolic profile and antioxidant properties of Polish honeys [J]. International

- journal of food science & technology, 2011, 46(3): 528-534.
- [55] ZHANG Y Z, SI J J, LI S S, et al. Chemical analyses and antimicrobial activity of nine kinds of unifloral Chinese honeys compared to Manuka honey (12+ and 20+) [J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2778.
- [56] 穆雪峰. 枣花蜜中抗氧化成分的提取、测定及其活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- MU X F. Study on extract, determination and activity of antioxidant compounds from *Date* honey [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
- [57] 孙丽萍, 穆雪峰, 施海燕, 等. 北京洋槐蜜化学成分及其抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2012, 33(9): 77-80.
- SUN L P, MU X F, SHI H Y, et al. Chemical components and antioxidant activity of *Acacia* honey from Beijing [J]. *Food science*, 2012, 33(9): 77-80.
- [58] 张丽娜, 金国琴. 熟地黄有效成分 5-HMF 对皮质酮损伤型海马神经元 GCR、BDNF、SGK 表达的影响[J]. *中华中医药杂志*, 2012, 27(4): 853-857.
- ZHANG L N, JIN G Q. Influence of *Rehmannia glutinosa*'s 5-HMF on protein expression of GCR、BDNF、SGK in hippocampal neurons with corticosterone injury [J]. *China journal of traditional Chinese medicine and pharmacy*, 2012, 27(4): 853-857.
- [59] 姜泽群, 马艳霞, 段煜, 等. 山茱萸羟甲基糠醛对肿瘤坏死因子 α 致肝细胞凋亡的保护作用研究[J]. *时珍国医国药*, 2015, 26(3): 591-594.
- JIANG Z Q, MA Y X, DUAN Y, et al. Protective effect of hydroxymethylfurfural from *Cornus officinalis* on hepatocyte apoptosis induced by TNF- α [J]. *Lishizhen medicine and materia medica research*, 2015, 26(3): 591-594.
- [60] 姜哲轶, 吴婷月, 沈传斌, 等. 5-羟甲基糠醛的药理作用研究进展[J]. *新乡医学院学报*, 2022, 39(1): 92-95.
- JIANG Z T, WU T Y, SHEN C B, et al. Research progress on pharmacological effects of 5-hydroxymethylfurfural [J]. *Journal of Xinxiang medical university*, 2022, 39(1): 92-95.
- [61] FARAG M R, ALAGAWANY M, BIN-JUMAH M, et al. The toxicological aspects of the heat-borne toxicant 5-hydroxymethylfurfural in animals: a review [J]. *Molecules*, 2020, 25(8): 1941.
- [62] SINGH N, BATH P K. Quality evaluation of different types of Indian honey [J]. *Food chemistry*, 1997, 58(1/2): 129-133.
- [63] 宋玉蓉, 刘云, 乐国伟, 等. 低聚蔗糖及其 5-羟甲基糠醛抗氧化能力研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(4): 342-345.
- SONG Y R, LIU Y, LE G W, et al. Study on antioxidation capability of fructose-oligosaccharide and 5-hydroxymethylfurfural [J]. *Science and technology of food industry*, 2010, 31(4): 342-345.
- [64] 雷露, 许浩翔, 李婷, 等. 黄花梨蜂蜜与其他蜜源蜂蜜的抗氧化特性研究[J]. *轻工学报*, 2025, 40(1): 32-40.
- LEI L, XU H X, LI T, et al. Study on antioxidant properties of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey and honey from other nectar sources [J]. *Journal of light industry*, 2025, 40(1): 32-40.