

韩凌云, 张国志, 刘瑶, 等. 不同植物来源特种蜂蜜生物活性评价 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (7): 857-867.

HAN L Y, ZHANG G Z, LIU Y, et al. Bioactivities of Honeys from Bees Fed on Different Plants [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (7): 857-867.

不同植物来源特种蜂蜜生物活性评价

韩凌云, 张国志, 刘瑶, 李珊珊, 胡福良*

(浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:【目的】特种蜂蜜具有较强的抗氧化能力和抗菌活性, 并拥有来自于植物的药用特性, 其开发利用具有巨大的潜力与价值。本研究旨在对中国境内的多种特种蜂蜜进行比对分析, 以期找到具有优异生物活性的样本, 为蜂蜜在医学和保健领域的应用提供科学依据。【方法】检测分析 33 种不同植物来源的特种蜂蜜的理化指标和生物活性, 通过自由基清除法和总抗氧化能力检测法对蜂蜜抗氧化活性进行评价, 并使用琼脂扩散法和微量肉汤稀释法检测样品的抗菌活性。【结果】所有蜂蜜样品的理化指标均符合国家标准规定; 在 33 种蜂蜜中, 米团蜜具有最强的抗氧化活性, 板栗蜜、藿香蜜也表现良好。对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌抗菌能力最强的分别为茴香蜜和枸杞蜜。此外, 蜂蜜的抗氧化能力与总酚含量呈显著正相关, 与抗菌能力的相关性不显著。【结论】米团、茴香、藿香蜂蜜等是具有优良生物活性的特种蜂蜜, 它们具有进一步开发利用的潜力和价值。本研究结果可为当前蜂蜜消费市场等级评定提供依据。

关键词: 特种蜂蜜; 氧化应激; 抗菌活性; 抗氧化能力

中图分类号: S896

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 07-0857-11

Bioactivities of Honeys from Bees Fed on Different Plants

HAN Lingyun, ZHANG Guozhi, LIU Yao, LI Shanshan, HU Fuliang*

(College of Animal Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: 【Objective】Specialized honeys exhibit strong antioxidant capabilities, antibacterial activities, and medicinal properties derived from plants, presenting significant potential and value for development and utilization. This study aims to conduct a comparative analysis of various specialized honeys within China, with the goal of identifying samples with outstanding biological activities. Ultimately, the research endeavors to provide a scientific basis for the medical and healthcare applications of honey. 【Method】Thirty-three honey samples from different regions in China were collected for physicochemical and biological activity analyses. Antioxidant activity was evaluated using the free radical scavenging and total antioxidant capacity tests, and antibacterial capacity assessed by means of agar diffusion and microdilution in broth. 【Result】All tested honeys met the national standards on physicochemical properties. Of the 33 specimens, the leucosceptrum honey exhibited the strongest antioxidative activity, the chestnut and agastache honeys performed well, while the fennel honey showed the highest antibacterial effect on *Staphylococcus aureus* and the Goji honey on *Escherichia coli*. The antioxidative, but not the antibacterial, capacity of the honeys significantly correlated with the total phenolic content in it. 【Conclusion】Not all sweet-tasting honeys are created equal. The nutritional, antioxidant, and antibacterial functions of some samples tested in this study stood out with special marketing and product development potentials. The evaluation protocol presented in this article might be useful in further investigations that might lead to extended utilization of the common food ingredient.

Key words: specialty honey; oxidative stress; antimicrobial activity; antioxidative capacity

收稿日期: 2024-02-21 修回日期: 2024-05-11

作者简介: 韩凌云 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事蜂蜜生物活性及质量控制研究, E-mail: 22117054@zju.edu.cn

* 通信作者: 胡福良 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事蜜蜂科学与蜂产品功能营养研究, E-mail: flhu@zju.edu.cn

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-44)

0 引言

【研究意义】蜂蜜是蜜蜂采集植物的花蜜、分泌物或蜜露,与自身分泌物混合后,经充分酿造而成的天然甜物质。蜂蜜含有 200 多种物质^[1],水和糖类所占比例较大,维生素、氨基酸、酶、多酚和黄酮类物质等含量虽低,却是重要的生物功能活性成分^[2,3]。蜂蜜的组成与其植物种类和地理来源^[4]、加工方式^[5]、储存条件等有关,并对其品质、风味及生物活性起决定作用^[6]。除抗氧化^[7]、抗菌^[8]、抗炎等作用外,一些含有特定有效成分的植物花蜜酿成的蜂蜜,往往具有独特的药用价值^[9]。麦卢卡蜂蜜(Manuka honey)是世界范围内特种蜂蜜研究的典型代表,来源于新西兰桃金娘科(Myrtaceae Juss.)的麦卢卡树。它具有天然抗菌活性物质甲基乙二醛(Methylglyoxal, MGO)^[10],并表现出了强大的抗菌和抗氧化能力,是临床中被用于清除感染、促进创伤愈合的医用级蜂蜜^[11]。因此,特种蜂蜜通常来自于单一的天然药用植物,具有采集难、产量低、品质优、价格高的特点,区别于洋槐、枣花等常见蜂蜜而备受消费者青睐。因此,对特种蜂蜜的生物活性进行研究具有重要意义。【前人研究进展】特种蜂蜜的生物活性及质量控制已受到广泛关注,诸多学者进行了研究。Wang 等^[12]研究表明夏枯草蜂蜜(*Prunella honey*)在急性结肠炎大鼠模型中抑制结肠病理变化,具有胃肠道保护活性;红花蜂蜜(*Safflower honey*)提取物被报道可通过调节 NF- κ B 信号通路实现体外抗炎活性^[13],特征标志性物质红花素 A 的发现为红花蜂蜜鉴定作出贡献^[14]。此外,抗氧化和抗菌活性的研究仍是热点。众所周知,氧化应激会导致细胞和组织的损伤,并与许多疾病的发生发展相关,如癌症、心血管疾病、神经退行性疾病等^[15,16]。抗生素滥用导致的“超级细菌”问题也给公共卫生和医疗带来了巨大挑战^[17]。大量研究表明蜂蜜可以清除自由基并减少氧化应激^[18],维持机体健康,其广谱抗菌活性^[19]也可以作为应对微生物的耐药性一种方法。例如,荞麦蜂蜜(*Buckwheat honey*)对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)展现出与麦卢卡蜂蜜相当的体外抗菌活性,且具有更高的抗氧化能力^[20];临床试验证明了蜂蜜可以杀死耐药菌株,并使被试皮肤表面的细菌定殖减少^[21]。蜂蜜还可以与抗生素共同使用,发挥协同作用,恢复微生物对抗生素的敏感性^[22]。【本研究切入点】中国蜜源植物资源丰富。据统计,蜜源植物种植面积达

0.3 亿 hm^2 ,有近万种已被利用^[23]。许多特种蜂蜜的功能活性尚未被报道,已有报道则多聚焦于单一花蜜的功能活性,鲜少有研究进行多样品对比分析。

【拟解决的关键问题】本研究收集了来自全国 12 个省的不同植物来源的特种蜂蜜共计 33 种,对其理化指标和抗氧化、抗菌活性进行检测分析,以期找到具有优异生物活性的中国特种蜂蜜,为蜂蜜在医学和保健领域的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 样品与试剂

33 种不同植物来源蜂蜜样品取自中国 12 个省、市、自治区,委托各地蜂农在盛花期的中间阶段进行收样,蜂蜜来源为单一植物,样品邮寄至实验室后在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内避光保存,详见表 1。

主要试剂:福林酚购自上海麦克林生化科技有限公司;1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)、水溶性维生素 E (Trolox) 购自默克生命科学技术有限公司;总抗氧化能力检测试剂盒(FRAP 法)购自上海碧云天生物技术有限公司;没食子酸、槲皮素、过氧化氢酶购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;胰蛋白胍大豆肉汤培养基、胰蛋白胍大豆琼脂培养基购自北京索莱宝科技有限公司;金黄色葡萄球菌(*S. aureus* ATCC 29213)、大肠杆菌(*Escherichia coli* ATCC 25922)购自上海北诺生物科技有限公司;碳酸钠、无水乙醇、苯酚等其他化学试剂购自国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

Synergy HTX 多功能酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;SW-CJ-1FD 型单人单面净化工作台超净台,上海沪净医疗器械有限公司;恒温振荡器,上海博迅实业有限公司;UV-2550 岛津分光光度计,日本岛津有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 基本理化指标

采用 SN/T 0852-2012 规定的方法对蜂蜜水分、色度值、淀粉酶值进行测定;采用 GB 5009.8—2016 规定的方法对蜂蜜中果糖、葡萄糖的含量进行测定,并计算果葡比;采用 GB/T 18932.18—2003 规定的方法对蜂蜜中 5-羟甲基糠醛(5-Hydroxymethylfurfural, HMF)的含量进行测定。采用 GB/T 18932.15—2003 规定的方法对蜂蜜电导率进行测定。

1.2.2 总酚含量

采用福林酚(Folin-Ciocalteu)法对蜂蜜样品总

表 1 蜂蜜样品信息
Table 1 Information on honey samples

样品名称 Sample name	植物来源 Plant origin	地理来源 Geographical origin	采样时间 Sampling time
板栗蜜	板栗 <i>Castanea mollissima</i> Blume	浙江	2022年
怪柳蜜	怪柳 <i>Tamarix chinensis</i> Lour.	西藏	2020年
鹅掌柴蜜	鹅掌柴 <i>Schefflera octophylla</i> (Linn.) Frodin	湖北	2021年
枸杞蜜	枸杞 <i>Lycium chinense</i> Miller	西藏	2020年
红柳蜜	多枝怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i> Ledeb.	新疆	2018年
黄芪蜜	黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i> (Fisch.) Bunge	甘肃	2020年
黄芩蜜	黄芩 <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	甘肃	2020年
茴香蜜	茴香 <i>Foeniculum vulgare</i> Mill.	甘肃	2020年
火炭母蜜	火炭母 <i>Persicaria chinensis</i> (L.) H. Gross	重庆	2021年
藿香蜜	藿香 <i>Agastache rugosa</i> (Fisch. & C. A. Mey.) Kuntze	重庆	2021年
九龙藤蜜	龙须藤 <i>Phanera championii</i> Benth.	广西	2021年
桔梗蜜	桔梗 <i>Platycodon grandiflorus</i> (Jacq.) A. DC.	安徽	2020年
咖啡蜜	咖啡树 <i>Coffea arabica</i>	云南	2021年
柯树蜜	柯树 <i>Lithocarpus glaber</i> (Thunb.) Nakai	浙江	2021年
苦丁茶蜜	大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i> Thunb.	浙江	2021年
狼牙刺蜜	白刺花 <i>Sophora davidii</i> Kom. ex Pavol.	西藏	2021年
罗布麻蜜	罗布麻 <i>Apocynum venetum</i> L.	新疆	2020年
米团蜜	米团花 <i>Leucosceptrum canum</i> Sm.	云南	2021年
木通蜜	木通 <i>Akebia quinata</i> (Houtt.) Decne.	重庆	2021年
枇杷蜜	枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	浙江	2021年
苹果蜜	苹果 <i>Malus pumila</i> Mill.	甘肃	2020年
蒲公英蜜	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.	新疆	2019年
沙枣蜜	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	新疆	2020年
苕子蜜	苕子 <i>Vicia dasycarpa</i> Ten.	云南	2021年
石榴蜜	石榴 <i>Punica granatum</i> L.	安徽	2020年
五倍子蜜	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i> Mill.	重庆	2021年
夏枯草蜜	夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i> L.	河南	2019年
玄参蜜	玄参 <i>Scrophularia ningpoensis</i> Hemsl.	重庆	2021年
薰衣草蜜	薰衣草 <i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	新疆	2020年
野桂花蜜	野桂花 <i>Osmanthus yunnanensis</i> (Franch.) P. S. Green	江西	2021年
野黄柏蜜	川黄檗 <i>Phellodendron chinense</i> Schneid.	重庆	2019年
益母草蜜	益母草 <i>Leonurus japonicus</i> Houtt.	云南	2019年
益智花蜜	益智 <i>Alpinia oxyphylla</i> Miq.	广东	2019年

酚含量进行测定，参考 Wilczynska 的方法^[24] 并作适当修改。配置 2 mg·mL⁻¹ 没食子酸溶液，按照梯度进行稀释用以制作标准曲线。将 50 μL 0.2 mol·L⁻¹ 福林

酚溶液与 10 μL 0.2 g·mL⁻¹ 蜂蜜样品溶液混合均匀，静置 5 min 后加入 40 μL 0.075 g·mL⁻¹ 碳酸钠溶液和 100 μL 蒸馏水。避光反应 2 h 后在 760 nm 波长下测定

吸光度, 结果以每克蜂蜜中没食子酸当量 (Gallic acid equivalent, GAE) 表示, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.2.3 抗氧化能力测定

(1) 总抗氧化能力测定 (铁离子还原/抗氧化能力法, Ferric ion reducing antioxidant power assay)。使用总抗氧化能力检测试剂盒 (FRAP 法) 对蜂蜜样品抗氧化能力进行检测, 配制不同浓度梯度 FeSO_4 溶液制作标准曲线。取 $180\ \mu\text{L}$ FRAP 工作液 (现配现用) 与 $20\ \mu\text{L}$ $0.2\ \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 蜂蜜样品溶液混合, 在 $37\ ^\circ\text{C}$ 培养箱中孵育 $5\ \text{min}$, 使用酶标仪在 $593\ \text{nm}$ 波长下测定吸光度。蜂蜜样品的总抗氧化能力以每克蜂蜜中 FeSO_4 当量 (FeSO_4 equivalent, FE) 进行表示, 单位为 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

(2) DPPH 自由基清除能力测定。参考 Bueno-Costa 的方法^[25]并作适当修改。取 $100\ \mu\text{L}$ $0.2\ \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 蜂蜜样品溶液与 $100\ \mu\text{L}$ $0.08\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ DPPH 乙醇溶液 (现配现用) 混合, 记作 A_1 ; $100\ \mu\text{L}$ 蜂蜜样品溶液与 $100\ \mu\text{L}$ 无水乙醇混合, 记作 A_0 ; $100\ \mu\text{L}$ DPPH 工作液与 $100\ \mu\text{L}$ 蒸馏水混合, 记作 A ; 室温下避光反应 $30\ \text{min}$, 使用酶标仪在 $517\ \text{nm}$ 波长下测定吸光度。配制不同浓度梯度 Trolox 溶液制作标准曲线, 蜂蜜样品的 DPPH 自由基清除能力以每千克蜂蜜中 Trolox 当量 (Trolox equivalent, TE) 进行表示, 单位为 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

DPPH 自由基清除率计算公式为:

$$\text{清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_0 - A_1}{A}\right) \times 100$$

1.2.4 抗菌能力测定

(1) 总抗菌能力测定。采用琼脂扩散法对蜂蜜样品抗大肠杆菌及金黄色葡萄球菌能力进行测定^[26]。使用胰蛋白胨大豆肉汤培养基对冷冻保存的菌种进行活化培养, 摇床过夜后测定吸光度, 稀释至 $1 \times 10^7\ \text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 备用。取胰蛋白胨大豆琼脂培养基倒平板, 待其冷却凝固后涂布菌悬液, 并用直径 $8\ \text{mm}$ 打孔器在培养基上打孔。制备 50% (m/V) 蜂蜜样品溶液、 50% (m/V) 蜂蜜样品 + H_2O_2 酶溶液, 分别取 $100\ \mu\text{L}$ 加入孔中, 并设置 10% 苯酚溶液阳性对照及蒸馏水阴性对照, 置于 $37\ ^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中培养 (金黄色葡萄球菌 $16\ \text{h}$; 大肠杆菌 $12\ \text{h}$), 最后使用游标卡尺测量抑菌圈直径大小。

(2) 最小抑菌浓度 (Minimal inhibit concentration, MIC) 测定。采用肉汤微量稀释法对蜂蜜样品最小抑菌浓度进行测定, 参考 Jahan^[27]的方法并稍作修改。使用胰蛋白胨大豆肉汤培养基制备浓度分别为 50% 、 25% 、 20% 、 12.5% 、 10% 、 6.25% 、 5% 、 3.125% 、

2.5% 、 1.25% (m/V) 的蜂蜜样品溶液, 预稀释菌悬液浓度为 $1 \times 10^7\ \text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。将被测蜂蜜溶液与菌悬液按照 $9:1$ 混合, 设置无蜂蜜有菌阳性对照和无菌有蜂蜜阴性对照, 置于 $37\ ^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中培养 (金黄色葡萄球菌 $16\ \text{h}$; 大肠杆菌 $12\ \text{h}$)。蜂蜜抑制微生物生长的最低浓度即为 MIC。

(3) 最小杀菌浓度 (Minimum bactericidal concentration, MBC) 测定。最小抑菌浓度测定试验后, 取无明显微生物生长的不同蜂蜜浓度菌液 $20\ \mu\text{L}$, 滴加在琼脂培养基上, 在 $37\ ^\circ\text{C}$ 下培养 $24\ \text{h}$, 没有菌落生长的最低浓度为 MBC。

1.3 数据处理

所有蜂蜜样品试验均设置 3 次重复, 结果以平均值 $\pm$ 标准差 ($\text{Mean} \pm \text{SD}$) 表示。蜂蜜样品之间的差异性分析采用 Tukey 检验进行 ($P < 0.01$)。各项指标之间的相关性通过 Pearson 检验得到, 在 $P < 0.01$ 水平上使用双尾检验评估显著性。

2 结果与分析

2.1 特种蜂蜜理化指标分析

33 种蜂蜜样品的基本理化参数见表 2。根据行业标准 GH/T 18796-2012, 除部分特殊蜂蜜外, 一级品含水量应低于 20% , 二级品低于 24% 。蜂蜜含水量与环境、季节、酿造时间、储存条件等有关^[28]。本研究中样品含水量在 $15.98\% \sim 23.96\%$, 属于合格范畴。蜂蜜的颜色是除了滋味和香气之外指示植物来源的特征之一^[29], 大量研究表明蜂蜜的颜色与其中的酚类物质含量呈正相关, 且深色蜂蜜具有更好的抗氧化活性^[30]。本研究中米团蜜的颜色最深, 呈接近黑色的暗褐色; 狼牙刺蜜则基本呈水白色, 色度值仅为 $4.00\ \text{mm}$ 。果糖、葡萄糖和蔗糖是蜂蜜中最主要的 3 种糖, 相比于单一糖类摄入具有更高的吸收利用率^[31]。蜂蜜的果葡比越高, 其升糖指数越低。5-羟甲基糠醛由蜂蜜储存或加工过程中的美拉德反应产生^[32], 并与生产季节、运输条件、植物来源等因素有关, 国家标准规定其含量应低于 $40\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。淀粉酶值也可以用于判定蜂蜜的新鲜度, 除荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.)、龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.)、柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco) 和鹅掌柴蜂蜜天然含量较低外, 其他应高于 $4\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。以上两项指标在本研究 33 种蜂蜜样品中均符合相关标准规定。

2.2 特种蜂蜜抗氧化活性分析

2.2.1 抗氧化活性检测

蜂蜜样品的抗氧化能力指标测定结果如表 3 所

表 2 不同特种蜂蜜样品理化参数
Table 2 Physicochemical parameters of honey

样品 Sample	水分 Hydration/%	色度值 Chrominance value/ mm	果葡比 Fructoglucose ratio	5-羟甲基糠醛 5-hydroxymethylfurfural/ (mg·kg ⁻¹)	淀粉酶值 Amylase value/ (mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	电导率 Conductivity/ (μs·cm ⁻¹)
板栗蜜	16.97±0.09	150.00±0.77	1.00±0.00	16.86±0.08	4.13±0.68	676.00±9.64
桤柳蜜	20.95±0.18	38.00±0.00	1.15±0.02	0.63±0.03	40.00±2.01	647.30±5.42
鹅掌柴蜜	20.63±0.10	23.00±0.00	1.02±0.00	0.33±0.03	10.00±0.79	207.60±4.17
枸杞蜜	18.41±0.08	22.00±0.00	1.17±0.00	0.38±0.01	30.00±1.47	284.00±2.35
红柳蜜	17.62±0.18	42.00±0.00	1.05±0.00	11.42±0.05	6.67±0.06	1067.00±5.50
黄芪蜜	18.41±0.18	25.00±0.00	1.10±0.01	0.44±0.05	42.86±1.51	323.20±2.49
黄芩蜜	19.19±0.03	22.00±0.00	1.13±0.00	0.51±0.03	33.33±1.17	278.10±0.77
茴香蜜	19.11±0.08	88.00±0.00	1.57±0.00	0.94±0.03	50.00±2.01	587.30±0.35
火炭母蜜	23.96±0.04	71.00±1.41	1.18±0.00	0.92±0.04	30.00±1.69	587.40±1.37
藿香蜜	20.28±0.11	67.00±1.41	1.44±0.01	4.10±0.16	37.5±0.85	374.00±0.28
九龙藤蜜	21.41±0.06	64.00±1.15	1.68±0.01	13.36±0.03	6.98±0.61	402.00±0.21
桔梗蜜	23.89±0.28	31.00±0.00	1.14±0.04	1.51±0.03	17.65±1.36	336.10±4.11
咖啡蜜	15.98±0.16	28.00±0.00	1.12±0.00	5.42±0.01	11.11±0.08	225.80±1.58
柯树蜜	21.14±0.01	75.00±2.83	1.23±0.00	1.23±0.01	8.57±0.94	940.00±3.82
苦丁茶蜜	19.11±0.08	83.00±1.41	1.58±0.01	8.71±0.03	6.32±0.22	758.80±3.28
狼牙刺蜜	17.23±0.15	4.00±0.00	1.13±0.01	0.60±0.04	33.33±1.87	141.20±1.14
罗布麻蜜	20.75±0.12	38.00±0.00	0.96±0.00	5.23±0.01	20.00±0.50	865.60±5.57
米团蜜	19.15±0.00	150.00±2.08	1.27±0.02	2.68±0.02	16.60±2.16	1722.00±6.49
木通蜜	19.34±0.31	32.00±0.00	1.00±0.01	0.34±0.03	9.52±1.40	219.00±1.38
枇杷蜜	22.27±0.36	19.00±0.00	1.12±0.01	0.48±0.04	9.38±0.64	237.80±4.42
苹果蜜	18.08±0.22	72.00±0.00	1.08±0.00	0.69±0.01	23.08±0.93	252.90±2.21
蒲公英蜜	16.65±0.17	34.00±1.73	1.17±0.00	1.05±0.01	14.29±0.12	314.40±0.86
沙枣蜜	21.06±0.09	37.00±0.00	1.04±0.00	2.03±0.03	25.00±1.32	320.30±2.71
苕子蜜	19.34±0.28	11.00±0.00	1.10±0.01	2.80±0.05	23.00±2.19	179.40±0.42
石榴蜜	22.04±0.04	20.00±0.00	1.24±0.00	0.40±0.01	30.00±1.34	245.40±3.49
五倍子蜜	23.73±0.03	41.00±0.00	0.92±0.01	0.84±0.03	4.76±0.03	315.60±2.46
夏枯草蜜	23.91±0.04	48.00±0.71	1.58±0.00	1.51±0.03	25.00±1.05	269.80±1.78
玄参蜜	20.67±0.01	79.00±0.00	1.19±0.00	0.70±0.03	9.09±0.45	487.70±0.28
薰衣草蜜	17.62±0.06	9.00±0.00	1.14±0.01	1.68±0.01	23.08±2.01	153.70±0.87
野桂花蜜	21.41±0.18	31.00±0.00	1.13±0.00	0.53±0.03	8.57±0.11	302.80±0.42
野黄柏蜜	19.97±0.07	30.00±0.00	0.99±0.00	2.39±0.02	4.23±0.48	299.40±3.16
益母草蜜	17.55±0.11	75.00±2.65	1.10±0.00	1.26±0.03	60.00±2.31	826.10±4.64
益智花蜜	19.11±0.05	70.00±0.71	1.10±0.01	6.18±0.02	8.57±1.04	503.20±2.21

表 3 蜂蜜样品的抗氧化活性
Table 3 Antioxidative activities of honeys

样品名称 Sample name	总酚含量 Total phenolic content/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	总抗氧化能力 (FRAP法) Total antioxidant capacity/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	DPPH自由基清除能力 DPPH radical scavenging capacity/ ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)
板栗蜜	1 050.16±213.67ab	7.53±1.42a	2.73±0.95b
桤柳蜜	357.84±131.10fghi	1.69±0.66a	0.67±0.05ef
鹅掌柴蜜	323.94±25.32hi	7.65±0.42fg	0.26±0.04ef
枸杞蜜	183.16±8.23fghi	0.94±0.33cdefg	0.27±0.04def
红柳蜜	315.08±47.77fghi	1.65±0.30cdefg	1.61±0.15c
黄芪蜜	287.13±78.18ghi	1.18±0.35efg	0.30±0.02ef
黄芩蜜	275.58±91.77ghi	0.88±0.32fg	0.27±0.02ef
茴香蜜	982.35±231.54bc	3.03±0.68cde	1.08±0.06cd
火炭母蜜	327.85±62.54fghi	1.47±0.26defg	0.53±0.08def
藿香蜜	676.83±170.85cde	3.37±0.91bcd	0.69±0.33def
九龙藤蜜	406.29±18.48efghi	1.98±0.71cdefg	0.69±0.06def
桔梗蜜	353.32±34.21fghi	0.94±0.32fg	0.28±0.02ef
咖啡蜜	722.86±134.11cd	0.83±0.21fg	0.33±0.05ef
柯树蜜	413.71±24.46efghi	2.27±0.72cdefg	0.70±0.04def
苦丁茶蜜	616.91±22.68def	2.35±0.17cdefg	0.86±0.04de
狼牙刺蜜	125.07±11.39i	0.69±0.38fg	0.16±0.03ef
罗布麻蜜	332.50±53.77fghi	2.02±0.41cdefg	1.64±0.19c
米团蜜	1 346.09±108.60a	9.07±1.36a	4.66±0.35a
木通蜜	263.84±21.02ghi	5.06±0.68b	0.23±0.04ef
枇杷蜜	152.58±48.86hi	0.46±0.19g	0.18±0.04ef
苹果蜜	340.77±50.61fghi	1.92±0.16cdefg	0.55±0.06def
蒲公英蜜	242.99±36.30ghi	1.00±0.21fg	0.31±0.05ef
沙枣蜜	256.78±40.65ghi	1.19±0.34efg	0.37±0.09def
苕子蜜	147.26±47.40i	0.63±0.44g	0.19±0.04ef
石榴蜜	234.48±43.94ghi	0.72±0.28fg	0.23±0.03ef
五倍子蜜	164.90±20.37hi	0.82±0.28fg	0.30±0.04ef
夏枯草蜜	519.92±49.41defg	3.55±0.26bc	0.75±0.07def
玄参蜜	294.20±29.87ghi	1.59±0.41cdefg	0.48±0.10def
薰衣草蜜	347.18±82.62fghi	0.58±0.44g	0.12±0.02f
野桂花蜜	252.93±3.70ghi	1.45±0.36defg	0.36±0.06def
野黄柏蜜	255.80±30.11ghi	1.14±0.18efg	0.31±0.03ef
益母草蜜	538.64±45.45defg	2.68±0.44cdef	0.88±0.05de
益智花蜜	457.65±40.73defgh	1.87±0.34cdefg	0.65±0.08def

同列数据后不同小写字母表示在0.01水平差异显著。表5同。
Data with different lowercase letters on same column indicate significant difference at 0.01 level. Same for Table 5.

示。33 种蜂蜜中，总酚含量排名前 8 位的由高至低依次为米团蜜、板栗蜜、茴香蜜、咖啡蜜、藿香蜜、苦丁茶蜜、益母草蜜、夏枯草蜜，3 种蜂蜜的总酚含量高于麦卢卡蜂蜜（UMF 20⁺，835.40 μg·g⁻¹）^[33]。米团蜜总酚含量为（1346.09±108.6）μg·g⁻¹，而狼牙刺蜜与之相差近十倍，在所有样品中含量最低，仅为（125.07±11.39）μg·g⁻¹，表明不同植物来源蜂蜜中总酚含量差异很大。

蜂蜜成分复杂，抗氧化活性物质种类丰富。由于不同物质发挥作用的功能基团不同。一种方法不可能检测到所有具有抗氧化活性的成分^[34]，因此本研究选择了 FRAP 总抗氧化能力检测和 DPPH 自由基清除能力检测两种方法进行评估，当量值越大表示抗氧化能力越强。FRAP 总抗氧化能力排名前 8 位的依次为米团蜜>鹅掌柴蜜>板栗蜜>木通蜜>夏枯草蜜>藿香蜜>茴香蜜>益母草蜜；DPPH 自由基清除能力排名前 8 位的依次为米团蜜>板栗蜜>罗布麻蜜>红柳蜜>茴香蜜>藿香蜜>益母草蜜>苦丁茶蜜；薰衣草蜜、枇杷蜜、狼牙刺蜜和苕子蜜的总抗氧化能力及自由基清除能力均较差。

2.2.2 抗氧化指标相关性分析

蜂蜜样品 3 项抗氧化活性指标之间的相关性分析结果如表 4 所示，结果表明，总酚含量、FRAP 总抗氧化能力与 DPPH 自由基清除能力两两之间均呈极显著正相关（*P*<0.01）。Gheldof 等^[35]的研究表明，蜂蜜的抗氧化能力似乎更多取决于组分中化合物的丰度，而非特定化合物，总酚含量和抗氧化能力之间存在很强的相关性这一结论也多次得到证实^[36]。虽然没有单一的测定方法可以准确地反映所有的抗氧化剂，但所采用的两种检测方法得出了良好的结果相关性数值（*r*=0.712，*P*<0.01）。

表 4 抗氧化指标的相关性分析
Table 4 Correlation between antioxidant indexes

指标 Index	总酚含量 Total phenolic content	FRAP总 抗氧化能力 Total antioxidant capacity	DPPH自由基 清除能力 DPPH radical scavenging capacity
总酚含量 Total phenolic content	1.000	0.695**	0.801**
FRAP总抗氧化能力 Total antioxidant capacity	0.695**	1.000	0.712**
DPPH自由基清除能力 DPPH radical scavenging capacity	0.801**	0.712**	1.000

**表示在0.01级别（双尾）相关性显著。表6同。
** indicates significance at 0.01 level (two-tailed). Same for Table 6.

2.3 特种蜂蜜抗菌活性分析

2.3.1 总抗菌能力分析

33 种蜂蜜样品对金黄色葡萄球菌（*S. aureus*）和大肠杆菌（*E. coli*）的琼脂扩散试验产生的抑菌圈直径见表 5。有 19 种蜂蜜表现出对金黄色葡萄球菌的抗菌活性，而仅有 4 种蜂蜜表现出对大肠杆菌的抗菌活性。这表明不同类型蜂蜜的抗菌效力存在相当大的差异，且多数对革兰氏阳性菌株具有更强的作用。Goslinski 等的研究^[37]也得到了相同结论。茴香蜜、藿香蜜和苹果蜜对两种菌均产生了抑菌圈，与麦卢卡蜂蜜的表现相同^[38]。在 19 种对金黄色葡萄球菌表现出抗菌活性的蜂蜜中，黄芪蜜、黄芩蜜、茴

表 5 蜂蜜样品对微生物的抑菌圈直径（琼脂扩散法）
Table 5 Microbial inhibition zone of honeys (diameters on agar diffusion medium)

样品名称 Sample name	抑菌圈直径 Inhibition zone/mm	
	金黄色葡萄球菌 <i>S. aureus</i>	大肠杆菌 <i>E. coli</i>
阳性对照（10%苯酚）	30.30±1.07a	29.99±0.62a
阴性对照（蒸馏水）	—	—
怪柳蜜	14.74±0.98fg	nd
枸杞蜜	—	11.35±0.43b
黄芪蜜	24.33±1.21bc	—
黄芩蜜	20.04±0.59de	—
茴香蜜	25.51±1.04b	12.82±0.48b
火炭母蜜	14.47±1.36fg	—
藿香蜜	23.74±1.06bcd	12.83±0.97b
九龙藤蜜	12.89±0.44g	—
罗布麻蜜	13.66±1.73ef	—
苹果蜜	21.06±1.18cde	10.51±0.70b
蒲公英蜜	15.07±1.16fg	—
沙枣蜜	14.44±1.27fg	—
苕子蜜	19.32±1.13e	—
石榴蜜	17.47±2.02ef	—
五倍子蜜	14.72±1.11fg	—
薰衣草蜜	13.14±1.16g	—
野桂花蜜	13.53±0.37fg	—
野黄柏蜜	13.44±0.59fg	—
益母草蜜	24.69±0.4bc	—
益智花蜜	12.82±1.36g	—

“—”表示未检出>8 mm的抑菌圈。
"—" indicates absence of inhibition zone larger than 8 mm in diameter.

香蜜、藿香蜜、苹果蜜、益母草蜜的抗菌能力相较于大部分蜂蜜好，茴香蜜的抑菌圈直径为（25.51±1.04）mm，效果最佳。4 种对大肠杆菌表现出抗菌活性的蜂蜜产生的抑菌圈大小无显著差异。

为了探究蜂蜜中发挥抗菌活性的主要成分，配制加入过氧化氢酶的 50% 蜂蜜样品溶液并进行相同的琼脂扩散试验。然而所有试验组均未出现抑菌圈，表明 33 个特种蜂蜜样品的主要抗菌活性成分为过氧化氢。

2.3.2 抗菌活性相关性分析

为了探究两种生物活性之间的相互关系，对蜂蜜的抗菌活性指标（抑菌圈大小）和抗氧化活性指标进行了相关性分析。结果（表 6）表明，蜂蜜对不同菌种的抗菌活性表现为相关性不显著，而抗菌活性与抗氧化活性的各项指标之间也无显著相关性。

表 6 抗菌活性与抗氧化活性之间的相关性
Table 6 Correlation between antibacterial and antioxidative activities of honey

指标 Index	对金黄色葡萄球菌 抗菌能力 Antibacterial activity against <i>S. aureus</i>	对大肠杆菌 抗菌能力 Antibacterial activity against <i>E. coli</i>
总酚含量 Total phenolic content	-0.089	0.213
FRAP总抗氧化能力 Total antioxidant capacity	-0.306	0.023
DPPH自由基清除能力 DPPH radical scavenging capacity	-0.212	-0.023
对金黄色葡萄球菌的抗菌能力 Antibacterial activity against <i>S. aureus</i>	1	0.321
对大肠杆菌的抗菌能力 Antibacterial activity against <i>E. coli</i>	0.321	1

2.3.3 MIC 和 MBC 分析

为了进一步探究各蜂蜜的抗菌能力，本研究对在琼脂扩散试验中产生抑菌圈的蜂蜜进行了最小抑菌浓度和最小杀菌浓度的测定。在液体环境下，抗菌物质与微生物的直接接触使微量肉汤稀释法准确性较高^[39]，适合用作对比分析。对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有抑菌效果的蜂蜜样品的 MIC 和 MBC 区间见表 7。在对金黄色葡萄球菌具有抑制作用的蜂蜜中，茴香蜜的 MIC 和 MBC 区间均为 1.25%~2.50%，这是本研究的最低稀释区间，实际值可能更低，表明茴香蜜具有优良的抗菌性能，在排序中依旧位列第一。其他蜂蜜样品的排序略有调整，但未发生明显变化。益智花蜜的 MIC 和 MBC 区间分别为 12.50%~20.00% 和 25.00%~50.00%，与九龙藤蜜的

表 7 蜂蜜样品对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的 MIC 和 MBC
Table 7 MIC and MBC ranges of honeys against *S. aureus* and *E. coli*

样品名称 Sample name	金黄色葡萄球菌 <i>S. aureus</i>		大肠杆菌 <i>E. coli</i>	
	最小抑菌浓度 MIC/%	最小杀菌浓度 MBC/%	最小抑菌浓度 MIC/%	最小杀菌浓度 MBC/%
枸杞蜜	—	—	6.25~10.00	6.25~10.00
茴香蜜	1.25~2.50	1.25~2.50	6.25~10.00	10.00~12.50
益母草蜜	1.25~2.50	2.50~3.13	—	—
藿香蜜	3.13~5.00	2.50~3.13	6.25~10.00	10.00~12.50
苹果蜜	3.13~5.00	3.13~5.00	10.00~12.50	12.50~20.00
黄芪蜜	3.13~5.00	3.13~5.00	—	—
桤柳蜜	3.13~5.00	3.13~5.00	—	—
苕子蜜	5.00~6.25	5.00~6.25	—	—
黄芩蜜	6.25~10.00	6.25~10.00	—	—
石榴蜜	6.25~10.00	6.25~10.00	—	—
沙枣蜜	6.25~10.00	6.25~10.00	—	—
蒲公英蜜	6.25~10.00	10.00~12.50	—	—
罗布麻蜜	6.25~10.00	12.50~20.00	—	—
野桂花蜜	6.25~10.00	12.50~20.00	—	—
野黄柏蜜	6.25~10.00	12.50~20.00	—	—
五倍子蜜	10.00~12.50	12.50~20.00	—	—
薰衣草蜜	12.50~20.00	12.50~20.00	—	—
火炭母蜜	12.50~20.00	20.00~25.00	—	—
九龙藤蜜	12.50~20.00	25.00~50.00	—	—
益智花蜜	12.50~20.00	25.00~50.00	—	—

结果一致，在 19 种样品中位列最末。茴香蜜对大肠杆菌的抑菌能力弱于其对金黄色葡萄球菌，且相对于枸杞蜜（6.25%~10.00%）需要更高浓度才能完全杀死大肠杆菌。藿香蜜对金黄色葡萄球菌的抗菌活性弱于茴香蜜，但二者对大肠杆菌的 MIC 和 MBC 区间相同，并优于苹果蜜。

3 讨论

近年来，研究人员愈加关注特种蜂蜜的生物活性，抗氧化和抗菌能力被认为是决定蜂蜜品质和价值的重要因素。蜂蜜的抗氧化活性主要是酚类化合物发挥作用，它们可以清除自由基，并通过供氢、单线态氧猝灭、金属离子螯合、参与级联反应等多种机制减少氧化应激发生^[18]。有多项研究已经证实了板栗蜂蜜的高抗氧化能力^[6, 34, 40]。本研究结果显示，鹅掌柴蜜（7.65±0.42 mmol·g⁻¹）的总抗氧化能

力与板栗蜜 ($7.53 \pm 1.42 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$) 相近, 差异不显著; 米团蜜的总抗氧化能力 ($9.07 \pm 1.36 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$)、DPPH 自由基清除能力 ($4.66 \pm 0.35 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) 均高于板栗蜜 ($7.53 \pm 1.42 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $2.73 \pm 0.95 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$), 自由基清除能力差异显著; 在 Bodó 等^[40]的研究中, 茴香蜜的抗氧化活性强于板栗蜜, 与本研究结果并不一致, 这可能与蜂蜜样品的地理来源有关。此外, 在各项抗氧化指标强相关的前提下, 本研究也有新的发现。鹅掌柴蜜的总酚含量和 DPPH 自由基清除能力在 33 种蜂蜜的排序中分别位列 18 和 25 位, 然而它的 FRAP 总抗氧化能力则位列第 2 位; 与之相反的是, 薰衣草蜂蜜的总酚含量位列 14 位, 其两项抗氧化活性指标却均为倒数。事实上, 酚类物质化学结构的差异 (芳香化合物中的 OH 和 CH_3O 基团的数量、位置和侧链的结构) 对酚酸的抗氧化活性起着关键作用^[41], 总酚含量本身并不足以确定抗氧化活性。不同蜂蜜在酚类物质种类或数量上的差异往往被用作区分植物来源的常用指标之一。此外, 非酚成分如酶、维生素、有机酸、蛋白质等发挥作用也会影响蜂蜜的抗氧化活性表现^[30]。

蜂蜜的抗菌活性与其高酸度 (低 pH)、高渗透性和抗菌成分的存在密切相关^[4, 42], 其机制是阻止细胞分裂和膜、壁形成, 从而起到抑菌作用^[43]。因此, 蜂蜜对革兰氏阳性和阴性菌的抑制效果存在差异。过氧化氢是葡萄糖氧化酶对葡萄糖进行酶促氧化反应的副产物, 是蜂蜜抗菌活性的主要作用成分^[44], 已被广泛报道。由于酶活性受温度影响较大, 蜂蜜热处理加工、运输储存不当等因素均会影响葡萄糖氧化酶水平^[27], 从而导致抗菌性能下降。有研究表明, 蜂蜜非过氧化氢抗菌成分中最重要的是酚酮类物质^[45], 许多酚类成分如对羟基苯甲酸、咖啡酸、对香豆酸^[46]和芦丁等也被证实具有抗菌活性。Pelaéz-Acero 等^[47]的研究表明部分蜂蜜的酚酮类化合物与抗菌活性之间存在显著相关性, 然而, Fyfe 等^[48]发现总酚含量或抗氧化能力与抗菌活性无关, 这与本研究结果一致, 可能是由于总酚含量低而不足以发挥抗菌作用。有研究对过氧化氢酶处理藿香蜜前后的 MIC 值进行了对比, 处理后的细菌抑制作用仅下降了 10%, 表明过氧化氢具有一定的抗菌贡献, 更揭示了其他抗菌物质的存在^[49]。在本研究中, 藿香蜜被过氧化氢酶处理后表现为抗菌活性消失, 这或与其地理来源有关: 土壤类型会影响蜂蜜的物质构成, 并对矿物元素的种类和含量起决定作用^[50]。实际上, 并非所有麦卢卡蜂蜜都具有抗菌活性, 只有在特定地区, 特别是新西兰北岛东开普

省生产的麦卢卡蜂蜜才被报道有高抗菌活性^[51], 可以解释藿香蜜不同的抗菌成分表现。本研究预试验中也进行了相同植物不同地理来源蜂蜜的检测, 同植物来源样品表现出的理化性质和生物活性基本相似, 但仍存在一定差异。不同地理来源特种蜂蜜的差异研究可以作为下一步的方向, 有潜力发掘出具有地区标识的优质蜂蜜。

4 结论

本研究中 33 种不同植物来源特种蜂蜜的基本理化指标均符合国家标准规定。所有蜂蜜均表现出了抗氧化活性, 其中米团蜂蜜的总酚含量及抗氧化能力在所有样品之中位列第一, 板栗蜜、茴香蜜和藿香蜜也表现较优。总酚含量、FRAP 总抗氧化能力与 DPPH 自由基清除能力两两之间均呈极显著正相关。在抗菌活性检测的琼脂扩散试验中, 19 种蜂蜜表现出了对金黄色葡萄球菌的抗菌活性, 仅有 4 种蜂蜜表现出了对大肠杆菌的抗菌活性; 茴香蜜、藿香蜜和苹果蜜对两种菌均产生了抑菌圈。茴香蜜对金黄色葡萄球菌的 MIC 和 MBC 值达到了最低稀释区间, 枸杞蜜对大肠杆菌表现出更强的抗菌活性。蜂蜜对不同菌种的抗菌活性表现、抗菌活性与抗氧化活性的各项指标之间无显著相关性。上述性能优良的几种特种蜂蜜可以根据其理化性质、生物活性等相关参数进行表征, 为质量控制提供理论支持; 也可进一步开发利用, 推动蜂蜜在医学和保健领域的应用。

参考文献:

- [1] FERREIRA I C F R, AIRES E, BARREIRA J C M, et al. Antioxidant activity of Portuguese honey samples: Different contributions of the entire honey and phenolic extract [J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(4): 1438–1443.
- [2] DE ALMEIDA-MURADIAN L B, STRAMM K M, HORITA A, et al. Comparative study of the physicochemical and palynological characteristics of honey from *Melipona subnitida* and *Apis mellifera* [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(8): 1698–1706.
- [3] GOMES S, DIAS L G, MOREIRA L L, et al. Physicochemical, microbiological and antimicrobial properties of commercial honeys from Portugal [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(2): 544–548.
- [4] SULAIMAN N H I, SARBON N M. Physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties of selected Malaysian honey as treated at different temperature: A comparative study [J]. *Journal of Apicultural Research*, 2022, 61(4): 567–575.
- [5] FARAZ A, FERNANDO W B, WILLIAMS M, et al. Effects of

- different processing methods on the antioxidant and antimicrobial properties of honey: A review [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(7): 3489–3501.
- [6] ZAWAWI N, CHONG P J, MOHD TOM N N, et al. Establishing relationship between vitamins, total phenolic and total flavonoid content and antioxidant activities in various honey types [J]. *Molecules*, 2021, 26(15): 4399.
- [7] HABIB H M, AL MEQBALI F T, KAMAL H, et al. Bioactive components, antioxidant and DNA damage inhibitory activities of honeys from arid regions [J]. *Food Chemistry*, 2014, 153: 28–34.
- [8] NGUYEN H T L, PANYOYAI N, PARAMITA V D, et al. Physicochemical and viscoelastic properties of honey from medicinal plants [J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 143–149.
- [9] WU F H, ZHAO H A, SUN J, et al. ICP-MS-based ionomics method for discriminating the geographical origin of honey of *Apis cerana* Fabricius [J]. *Food Chemistry*, 2021, 354: 129568.
- [10] MAVRIC E, WITTMANN S, BARTH G, et al. Identification and quantification of methylglyoxal as the dominant antibacterial constituent of Manuka (*Leptospermum scoparium*) honeys from New Zealand [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2008, 52(4): 483–489.
- [11] SINHA S, SEHGAL A, RAY S, et al. Benefits of manuka honey in the management of infectious diseases: Recent advances and prospects [J]. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 2023, 23(20): 1928–1941.
- [12] WANG K, WAN Z R, OU A Q, et al. Monofloral honey from a medical plant, *Prunella Vulgaris*, protected against dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis via modulating gut microbial populations in rats [J]. *Food & Function*, 2019, 10(7): 3828–3838.
- [13] SUN L P, SHI F F, ZHANG W W, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) honey extract [J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1039.
- [14] ZHAO L W, REN C J, XUE X F, et al. Safflomin A: A novel chemical marker for *Carthamus tinctorius* L. (Safflower) monofloral honey [J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130584.
- [15] ENGBA G A, ENNWEKEGWA F N, NKEH-CHUNGAG B N. Free radicals, oxidative stress-related diseases and antioxidant supplementation [J]. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 2022, 28(1): 114–128.
- [16] DRÖGE W. Free radicals in the physiological control of cell function [J]. *Physiological Reviews*, 2002, 82(1): 47–95.
- [17] GULUMBE B H, SAHAL M R, ABDULRAHIM A, et al. Antibiotic resistance and the COVID-19 pandemic: A dual crisis with complex challenges in LMICs [J]. *Health Science Reports*, 2023, 6(9): e1566.
- [18] 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.
- [19] ISRAILI Z H. Antimicrobial properties of honey [J]. *American Journal of Therapeutics*, 2014, 21(4): 304–323.
- [20] DENG J L, LIU R, LU Q, et al. Biochemical properties, antibacterial and cellular antioxidant activities of buckwheat honey in comparison to manuka honey [J]. *Food Chemistry*, 2018, 252: 243–249.
- [21] KWAKMAN P H S, VAN DEN AKKER J P C, GÜÇLÜ A, et al. Medical-grade honey kills antibiotic-resistant bacteria *in vitro* and eradicates skin colonization [J]. *Clinical Infectious Diseases: an Official Publication of the Infectious Diseases Society of America*, 2008, 46(11): 1677–1682.
- [22] JENKINS R E, COOPER R. Synergy between oxacillin and manuka honey sensitizes methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* to oxacillin [J]. *The Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2012, 67(6): 1405–1407.
- [23] GAO R R, HU Y T, DAN Y, et al. Chinese herbal medicine resources: Where we stand [J]. *Chinese Herbal Medicines*, 2020, 12(1): 3–13.
- [24] WILCZYŃSKA A. Effect of filtration on colour, antioxidant activity and total phenolics of honey [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 57(2): 767–774.
- [25] BUENO-COSTA F M, ZAMBAZI R C, BOHMER B W, et al. Antibacterial and antioxidant activity of honeys from the state of Rio Grande do Sul, Brazil [J]. *LWT*, 2016, 65: 333–340.
- [26] GUO N N, ZHAO L W, ZHAO Y Z, et al. Comparison of the chemical composition and biological activity of mature and immature honey: An HPLC/QTOF/MS-based metabolomic approach [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(13): 4062–4071.
- [27] JAHAN N, ISLAM M A, ALAM F, et al. Prolonged heating of honey increases its antioxidant potential but decreases its antimicrobial activity [J]. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 2015, 12(4): 134.
- [28] MOHAMMED M E A. Factors affecting the physicochemical properties and chemical composition of bee's honey [J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(6): 1330–1341.
- [29] BERTONCELJ J, DOBERŠEK U, JAMNIK M, et al. Evaluation of the phenolic content, antioxidant activity and colour of Slovenian honey [J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(2): 822–828.
- [30] KAYGUSUZ H, TEZCAN F, BEDIA ERIM F, et al. Characterization of Anatolian honeys based on minerals, bioactive components and principal component analysis [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 68: 273–279.
- [31] FERRARIS R P, DIAMOND J. Regulation of intestinal sugar transport [J]. *Physiological Reviews*, 1997, 77(1): 257–302.
- [32] ZAREI M, FAZLARA A, TULABIFARD N. Effect of thermal treatment on physicochemical and antioxidant properties of honey [J]. *Heliyon*, 2019, 5(6): e01894.
- [33] 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.
- [34] FLANJAK I, KENJERIĆ D, BUBALO D, et al. Characterization of selected Croatian honey types based on the combination of antioxidant capacity, quality parameters, and chemometrics [J]. *European Food Research and Technology*, 2016, 242(4): 467–475.
- [35] GHELDOLF N, WANG X H, ENGESETH N J. Identification and quantification of antioxidant components of honeys from various floral sources [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002,

- 50(21): 5870–5877.
- [36] KISHORE R K, HALIM A S, NURUL SYAZANA M S, et al. Tualang honey has higher phenolic content and greater radical scavenging activity compared with other honey sources [J]. *Nutrition Research*, 2011, 31(4): 322–325.
- [37] GOŚLIŃSKI M, NOWAK D, KŁĘBUKOWSKA L. Antioxidant properties and antimicrobial activity of manuka honey versus Polish honeys [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(4): 1269–1277.
- [38] ANTHIMIDOU E, MOSSIALOS D. Antibacterial activity of Greek and Cypriot honeys against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* in comparison to manuka honey [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2013, 16(1): 42–47.
- [39] HOSSAIN M L, LIM L Y, HAMMER K, et al. A review of commonly used methodologies for assessing the antibacterial activity of honey and honey products [J]. *Antibiotics*, 2022, 11(7): 975.
- [40] BODÓ A, RADVÁNYI L, KŐSZEGI T, et al. Quality evaluation of light- and dark-colored Hungarian honeys, focusing on botanical origin, antioxidant capacity and mineral content [J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2825.
- [41] GÜL A, PEHLIVAN T. Antioxidant activities of some monofloral honey types produced across Turkey [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25(6): 1056–1065.
- [42] KUŚ P M, SZWEDA P, JERKOVIĆ I, et al. Activity of Polish unifloral honeys against pathogenic bacteria and its correlation with colour, phenolic content, antioxidant capacity and other parameters [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2016, 62(3): 269–276.
- [43] ESCUREDO O, SILVA L R, VALENTÃO P, et al. Assessing *Rubus* honey value: Pollen and phenolic compounds content and antibacterial capacity [J]. *Food Chemistry*, 2012, 130(3): 671–678.
- [44] KRETAVIČIUS J, KURTINAITIENĖ B, RAČYS J, et al. Inactivation of glucose oxidase during heat-treatment de-crystallization of honey [J]. *Zemdirbyste Agriculture*, 2010, 97(4): 115–122.
- [45] WAHDAN H A. Causes of the antimicrobial activity of honey [J]. *Infection*, 1998, 26(1): 26–31.
- [46] STOJKOVIĆ D, PETROVIĆ J, SOKOVIĆ M, et al. *In situ* antioxidant and antimicrobial activities of naturally occurring caffeic acid, p-coumaric acid and rutin, using food systems [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(13): 3205–3208.
- [47] PELÁEZ-ACERO A, COBOS-VELASCO J E, GONZÁLEZ-LEMUS U, et al. Bioactive compounds and antibacterial activities in crystallized honey liquefied with ultrasound [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 76: 105619.
- [48] FYFE L, OKORO P, PATERSON E, et al. Compositional analysis of Scottish honeys with antimicrobial activity against antibiotic-resistant bacteria reveals novel antimicrobial components [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 79: 52–59.
- [49] ANAND S, DEIGHTON M, LIVANOS G, et al. Antimicrobial activity of *Agastache* honey and characterization of its bioactive compounds in comparison with important commercial honeys [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 263.
- [50] JANDRIĆ Z, FREW R D, FERNANDEZ-CEDI L N, et al. An investigative study on discrimination of honey of various floral and geographical origins using UPLC-QToF MS and multivariate data analysis [J]. *Food Control*, 2017, 72: 189–197.
- [51] BASSON N J, GROBLER S R. Antimicrobial activity of two South African honeys produced from indigenous *Leucospermum cordifolium* and *Erica* species on selected micro-organisms [J]. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 2008, 8: 41.

(责任编辑：张梅)