



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. DOI: 10. 12187/2025. 01. 004

黄花梨蜂蜜与其他蜜源蜂蜜的抗氧化特性研究

雷露,许浩翔,李婷,周景瑞,齐婧,艾蓉,罗文菊,姜玲玲

贵州省农业科学院 畜牧兽医研究所,贵州 贵阳 550005

摘要:对4种黄花梨蜂蜜(H1—H4)、3种贵州特色蜂蜜(蓝莓、五倍子和枇杷蜂蜜)与麦卢卡蜂蜜的理化指标、抗氧化物质含量、抗氧化能力及相关性进行对比分析,研究黄花梨蜂蜜的抗氧化特性。结果表明:8种蜂蜜的理化指标均符合相关行业标准。4种黄花梨蜂蜜的总氨基酸含量高于麦卢卡蜂蜜,总酚和黄酮含量低于麦卢卡蜂蜜,但高于3种贵州特色蜂蜜;从整体上看,黄花梨蜂蜜对DPPH、ABTS⁺和·OH自由基的清除能力均与麦卢卡蜂蜜无显著性差异($P>0.05$),但强于3种贵州特色蜂蜜,且黄花梨蜂蜜中H1和H4对·OH自由基的清除能力显著强于麦卢卡蜂蜜($P<0.05$)。8种蜂蜜的总酚、总氨基酸、维生素C和维生素B₁含量与3种自由基清除率 IC_{50} 均呈正相关关系,而黄酮含量仅与·OH自由基清除率 IC_{50} 呈正相关关系。因此,黄花梨蜂蜜具有较好的营养品质和较强的抗氧化活性,适宜作为一种高端型新蜜源蜂蜜进行研究与推广。

关键词:黄花梨蜂蜜;抗氧化特性;理化指标;抗氧化物质;相关性分析

中图分类号:TS202.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)01-0032-09

0 引言

蜂蜜是蜜蜂采集植物蜜源并与自身分泌物混合,经充分酿造而形成的天然甜物质,除糖和水分之外,还含有蛋白质、维生素、矿物质、多酚、黄酮类物质等有益于人体健康的成分^[1-2],具有抗氧化、抗炎、抗菌、调节胃肠道等功能活性^[3-4]。蜂蜜的抗氧化特性一直是业界研究的热点,其抗氧化因子不仅可清除机体代谢过程中产生的过多自由基,还可有效抑制细胞内部丙二醛(MDA)含量的增加,进而保护细胞膜,维持细胞的正常功能^[5]。H. A. Zhao等^[6]研究表明,蜂蜜对小鼠急性酒精性肝损伤具有

抗氧化和保肝作用,不仅能降低MDA含量,还能显著提升超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性,且能通过干预氧化应激和炎症反应起到保护机体的作用。此外,蜂蜜还能显著降低H₂O₂诱导的小鼠淋巴细胞DNA氧化损伤,具有较强的预防氧化应激和抑制脂质过氧化的作用^[7]。

黄花梨(*Dalbergia odorifera* T. Chen),又名降香黄檀,是蝶形花科黄檀属的常绿乔木,国家二级保护植物,经济价值高,其树干和根的干燥心材可作为中药材,具有抗氧化、抗炎、抗凝血、抗高血脂、抗肿瘤等药理活性^[8]。在黄花梨林下进行蜜蜂养殖,

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-04-25;出版日期:2025-02-15

基金项目:贵州省科学技术厅支撑项目(黔科合支撑[2022]一般161)

作者简介:雷露(1992—),女,贵州省黔东南州人,贵州省农业科学院助理研究员,主要研究方向为畜禽和特种经济动物产品加工。E-mail:673311654@qq.com

通信作者:姜玲玲(1987—),女,河南省项城市人,贵州省农业科学院副研究员,主要研究方向为特种经济动物产品加工与动物疫病。E-mail:2056253464@qq.com

不仅能酿造黄花梨蜂蜜,还能提高黄花梨荚果的结实率和产量^[9]。目前,对黄花梨蜂蜜的研究仅限于营养成分和感官理化指标的测定。例如,潘成涛等^[10]对贵州黄花梨蜂蜜进行了营养成分和感官理化指标的检测,发现其各项指标均符合国标等相关规定,是健康安全的蜂蜜食品。而关于黄花梨蜂蜜抗氧化活性的研究尚未见报道。在“健康中国战略”的大背景下,挖掘具有特定营养健康功效的蜂蜜食品成为热点方向。

麦卢卡蜂蜜是新西兰的特色高价值蜂蜜,具有较高的市场占有率和认可度^[11]。本文拟以贵州黄花梨蜂蜜为研究对象,与3种贵州特色蜂蜜(蓝莓、五倍子和枇杷蜂蜜)和麦卢卡蜂蜜进行抗氧化特性比较分析,为进一步探究黄花梨蜂蜜营养功能提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 实验材料 黄花梨蜂蜜(H1,采集时间为2023年6月;H2、H3和H4,采集时间均为2023年5月)、五倍子蜂蜜(W,采集时间为2023年7月)、蓝莓蜂蜜(L,采集时间为2023年7月)、枇杷蜂蜜(P,采集时间为2023年7月),均采自贵州省内各蜂场,采酿的蜂种为中华蜜蜂,采集后置于4℃条件下保存;UMF10麦卢卡蜂蜜(M,采集时间为2023年6月),MELITA旗舰店。

1.1.2 主要试剂 芦丁、没食子酸标准品,上海源叶生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH),梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;2,2'-联氮-二(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS),上海易恩化学技术有限公司;维生素C、维生素B₁试剂盒,南京建成生物工程研究所有限公司。所用试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

UV-2600型分光光度计、SPD-20A型高效液相色谱仪,日本岛津公司;ELX800型酶标仪,美国BioTek公司。

1.3 实验方法

1.3.1 蜂蜜待测样品制备 取10.00g蜂蜜样品,

加入相同质量纯水,搅拌溶解,即得质量浓度为0.50g/mL的蜂蜜待测样品,置于4℃冰箱中,备用。

1.3.2 羟甲基糠醛(5-HMF)含量测定 参照《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)^[12]中的液相色谱法测定5-HMF含量。

1.3.3 淀粉酶值测定 参照《蜂蜜中淀粉酶值的测定方法 分光光度法》(GB/T 18932.16—2003)^[13]测定淀粉酶值。

1.3.4 水分含量测定 参照《进出口蜂蜜检验规程》(SN/T 0852—2012)^[14]测定水分含量。

1.3.5 蛋白质含量测定 参照《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2016)^[15]测定蛋白质含量。

1.3.6 维生素C、维生素B₁测定 按照维生素C、维生素B₁试剂盒说明测定维生素C、维生素B₁含量。

1.3.7 黄酮含量测定 采用NaNO₂-Al(NO₃)₃-NaOH比色法^[16],取1mL蜂蜜待测样品于试管中,加入1mL体积分数为70%的乙醇溶液和0.5mL质量分数为5%的NaNO₂溶液,静置6min,再加入0.5mL质量分数为10%的Al(NO₃)₃溶液,静置6min后,加入4mL 1mol/L的NaOH溶液和3mL体积分数为70%的乙醇溶液,混匀,静置15min后,在510nm波长处测其吸光度。以芦丁浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,所得标准曲线 $y = 0.579x + 0.052$, $R^2 = 0.9988$,在芦丁标准溶液浓度范围内线性关系良好,可利用该标准曲线计算黄酮含量。

1.3.8 总酚含量测定 采用福林酚比色法^[17],取1mL蜂蜜待测样品于试管中,分别加入5mL纯水、1mL福林酚试剂、3mL质量分数为20%的Na₂CO₃溶液,混匀后静置2h,在765nm波长处测其吸光度。以没食子酸浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,所得标准曲线 $y = 18.471x - 0.348$, $R^2 = 0.9990$,在没食子酸标准溶液浓度范围内线性关系良好,可利用该标准曲线计算总酚含量。

1.3.9 DPPH自由基清除率测定 参照张敏等^[18]的方法,略有修改。取1mL蜂蜜待测样品、1mL

1 mmol/L DPPH-无水乙醇溶液于试管中,涡旋混匀后,室温下避光反应 30 min,在 517 nm 波长处测其吸光度,记为 A_1 ;以 1 mL 无水乙醇与 1 mL 蜂蜜待测样品混合后的吸光度为对照组,记为 A_2 ;以 1 mL 无水乙醇与 1 mL 1 mmol/L DPPH-无水乙醇溶液混合后的吸光度为空白组,记为 A_3 。按照下式计算 DPPH 自由基清除率,并计算相应 IC_{50} (当抑制率达 50%时样品的质量浓度/(mg·mL⁻¹))。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = \left[1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3} \right] \times 100\%$$

1.3.10 ABTS⁺ 自由基清除率测定 参照 J. Lachman 等^[19]的方法,略有修改。取 5 mL 10 mmol/L ABTS 溶液与 88 μL 140 mmol/L K₂S₂O₈ 溶液混匀,在黑暗中静置 12~16 h,用无水乙醇在 734 nm 波长处将吸光度调节至 0.70±0.05,即得 ABTS⁺工作液。取 1 mL 蜂蜜待测样品、4 mL ABTS⁺工作液于试管中,充分混匀,避光静置 30 min,在 734 nm 波长处测其吸光度,记为 B_1 ;以无水乙醇与 ABTS⁺工作液混合后的吸光度为对照组,记为 B_2 。按照下式计算 ABTS⁺ 自由基清除率,并计算相应 IC_{50} 。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率} = \left[\frac{B_2 - B_1}{B_2} \right] \times 100\%$$

1.3.11 ·OH 自由基清除率测定 参照贾俊强等^[20]的方法,略有修改。取 2 mL 蜂蜜待测样品于试管中,依次加入 2 mL 6 mmol/L FeSO₄ 溶液、2 mL 6 mmol/L H₂O₂ 溶液,混匀后静置 10 min,加入 2 mL 6 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液,混匀静置 30 min,在 510 nm 波长处测其吸光度,记为 C_1 ;以蒸馏水代替水杨酸测定的吸光度为对照组,记为 C_2 ;以蒸馏水代替样品测定的吸光度为空白组,记为 C_3 。按照下式计算 ·OH 自由基清除率,并计算相应 IC_{50} 。

$$\cdot\text{OH 自由基清除率} = \left[1 - \frac{C_1 - C_2}{C_3} \right] \times 100\%$$

1.3.12 氨基酸含量测定 参照《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》(GB 5009.124—2016)^[21]测定氨基酸含量。

1.4 数据处理与分析

所有实验均重复 3 次,结果以(平均值±标准

差)表示。使用 SPSS 25.0 进行统计分析,采用 Pearson 积矩相关系数和 Spearman 秩相关系数进行相关性分析,利用 Origin 2018 和 Graphpad Prism 9.5.1 作图。

2 结果与分析

2.1 理化指标分析

5-HMF 含量和淀粉酶值是评判蜂蜜新鲜度的重要指标,5-HMF 含量越低,淀粉酶值越高,蜂蜜新鲜度越高^[22]。8 种蜂蜜的理化指标测定结果见表 1。由表 1 可知,8 种蜂蜜的 5-HMF 含量均显著低于 40.00 mg/kg,淀粉酶值均显著高于 4.00 mL/(g·h),符合蜂蜜行业标准《蜂蜜》(GB 14963—2011)^[1]中的品质要求。由于采集时间较早,H4 和 H3 的 5-HMF 含量较其他蜂蜜高,淀粉酶值较其他蜂蜜低;而 W 的 5-HMF 含量最低,淀粉酶值最高。4 种黄花梨蜂蜜的蛋白质含量均稍高于 2.00%,且显著高于 M、W、L 和 P。水分含量是评价蜂蜜品质标准的重要指标之一,过高的水分含量会影响蜂蜜的口感和保质期^[23]。H4、M、W 和 P 的水分含量均在 20.00%以下,符合一级品的标准;H1、H2、H3 和 L 的水分含量均在 23.00%以下,符合二级品的标准;M 的水分含量最低,为(18.40±0.06)%,其次是 H4、W 和 P。

2.2 抗氧化物质含量分析

2.2.1 维生素 C 和维生素 B₁ 含量分析 维生素具有调节免疫力、提高机体活力等功能,而蜂蜜中的维生素主要是维生素 C 和 B 族维生素^[24]。8 种蜂蜜的维生素 C 和维生素 B₁ 含量如图 1 所示,其中不同

表 1 8 种蜂蜜的理化指标测定结果

Table 1 The measurement results of physical and chemical indicators of eight kinds of honey

组别	5-HMF 含量/ (mg·kg ⁻¹)	淀粉酶值/ (mL·(g·h) ⁻¹)	水分 含量/%	蛋白质 含量/%
H1	4.64±0.17 ^c	23.58±0.41 ^c	21.50±0.01 ^b	2.10±0.11 ^a
H2	6.18±0.39 ^c	23.78±0.11 ^c	21.30±0.10 ^c	2.09±0.14 ^a
H3	6.60±0.99 ^{ab}	20.22±0.10 ^d	20.48±0.03 ^d	2.06±0.03 ^a
H4	7.73±0.71 ^a	20.13±0.56 ^d	19.50±0.01 ^e	2.06±0.01 ^a
M	4.49±0.07 ^c	22.86±0.27 ^{bc}	18.40±0.06 ^f	1.93±0.05 ^b
W	2.81±1.69 ^d	26.22±0.48 ^a	19.89±0.63 ^c	1.88±0.04 ^b
L	4.27±0.62 ^c	23.20±0.02 ^{cd}	22.29±0.26 ^a	1.05±0.05 ^c
P	4.19±0.06 ^c	23.53±0.14 ^c	19.34±0.66 ^c	1.12±0.11 ^c

注:同列不同肩标小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同。

标记小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同。由图 1 可知, M 和 L 的维生素 C 含量分别为(204.39 ± 0.77) $\mu\text{g/g}$ 和(174.71 ± 1.18) $\mu\text{g/g}$,均高于其他蜂蜜;其次是 4 种黄花梨蜂蜜,维生素 C 含量由大到小依次为 $H4 > H1 > H3 > H2$,均显著高于 P 和 W;W 的维生素 C 含量最低,为(115.87 ± 0.89) $\mu\text{g/g}$ 。

在 8 种蜂蜜中,维生素 B_1 含量最高的是 L,为(112.44 ± 4.39) $\mu\text{g/g}$,其次是 H4、H3 和 H1,且均高于 M(99.66 ± 0.22) $\mu\text{g/g}$);H2 和 W 的维生素 B_1 含量均较低,分别为(88.31 ± 0.29) $\mu\text{g/g}$ 和(87.31 ± 1.89) $\mu\text{g/g}$ 。维生素 B_1 是机体能量代谢的关键物质,与神经系统、肠胃功能、糖尿病等疾病的发生密切相关^[25]。H1、H3、H4 和 L 均含有较多维生素 B_1 ,表明摄入这些蜂蜜能在一定程度上帮助机体补充维生素 B_1 ,进而有效增强机体功能。

2.2.2 黄酮和总酚含量分析 黄酮和酚类化合物是蜂蜜中重要的生物活性物质和抗氧化物质,能够清除人体内的自由基。8 种蜂蜜的黄酮和总酚含量如图 2 所示。由图 2 可知, M 的黄酮含量最高,为(179.47 ± 1.55) $\text{mg}/100\text{g}$;其次是 4 种黄花梨蜂蜜,平均值为(87.10 ± 2.11) $\text{mg}/100\text{g}$,约为 M 的 48.6%,其中 H2、H3 和 H4 的黄酮含量无显著性差异($P > 0.05$),且 4 种黄花梨蜂蜜的黄酮含量均显著高于 P(65.10 ± 4.74) $\text{mg}/100\text{g}$ 、W(54.75 ± 3.90) $\text{mg}/100\text{g}$) 和 L(40.78 ± 3.91) $\text{mg}/100\text{g}$) ($P < 0.05$)。另外,本研究所测黄花梨蜂蜜的黄酮含

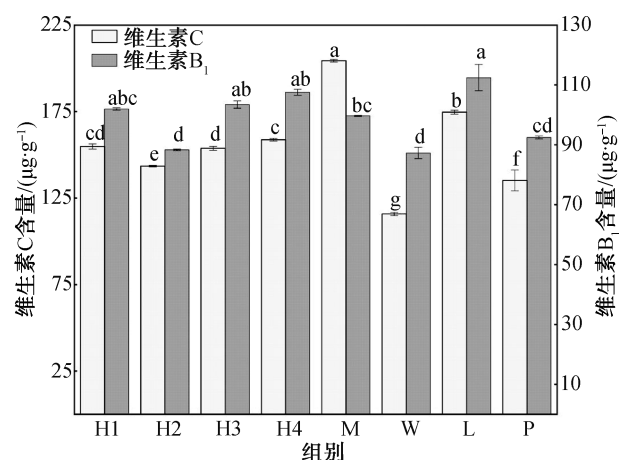


图 1 8 种蜂蜜的维生素 C 和维生素 B_1 含量

Fig. 1 Contents of vitamin C and vitamin B_1 in eight kinds of honey

量为(81.15 ± 2.37) ~ (91.50 ± 3.23) $\text{mg}/100\text{g}$,高于杨二林^[7]所测枣花蜜的黄酮含量($22.03 \sim 39.40$ mg/kg)。M 的总酚含量也最高,为(415.17 ± 0.53) $\text{mg}/100\text{g}$,其次是 H2(354.05 ± 0.53) $\text{mg}/100\text{g}$)、H1(347.49 ± 0.30) $\text{mg}/100\text{g}$) 和 H4(344.83 ± 0.61) $\text{mg}/100\text{g}$),而其他蜂蜜的总酚含量由大到小依次为 $L > H3 > P > W$ 。本研究所测黄花梨蜂蜜的总酚含量约为 M 的 80%。

2.3 抗氧化能力分析

2.3.1 DPPH 自由基清除能力分析 DPPH 是一种稳定的自由基,为暗紫色棱柱状结晶,在 517 nm 处有最大吸收波长,被消除时会表现出无色或淡黄色^[26]。本研究中蜂蜜的抗氧化活性程度用 IC_{50} 表示,其值越低,抗氧化活性越高。8 种蜂蜜的 DPPH 自由基清除率 IC_{50} 如图 3 所示。由图 3 可知,H4 的 DPPH 自由基清除率 IC_{50} 最低,为(0.01 ± 0.00) mg/mL ,表明 H4 对 DPPH 自由基清除能力最强。H1、H2、H4 的 DPPH 自由基清除率 IC_{50} 与 M 差异不显著($P > 0.05$),均显著低于 P 和 W($P < 0.05$)。因此,对 DPPH 自由基的清除能力,H1、H2 和 H4 均表现出与 M 相当的效果,即黄花梨蜂蜜具有良好的抗氧化能力。

2.3.2 ABTS⁺ 自由基清除能力分析 ABTS 与过硫酸钾反应会产生稳定的 $ABTS^+$,其与具有抗氧化活性的物质反应会褪色,可直观呈现该物质的 $ABTS^+$ 自由基清除能力的强弱^[19]。8 种蜂蜜的 $ABTS^+$ 自

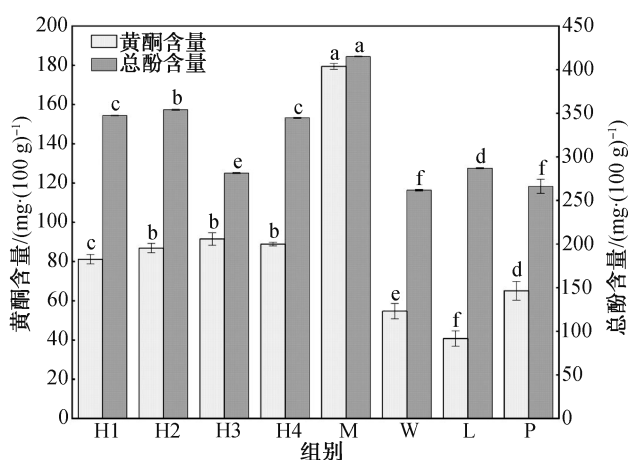


图 2 8 种蜂蜜的黄酮和总酚含量

Fig. 2 Flavonoids content and total phenol content of eight kinds of honey

由基清除率 IC_{50} 如图 4 所示。由图 4 可知, H1 的 $ABTS^+$ 自由基清除率 IC_{50} 最小, 为 (12.99 ± 0.11) mg/mL, 表明 H1 对 $ABTS^+$ 自由基清除能力最强; 其次是 M (14.72 ± 0.15) mg/mL; 4 种黄花梨蜂蜜的 $ABTS^+$ 自由基清除率 IC_{50} 与 M 无显著性差异 ($P > 0.05$), 均显著低于 L、W 和 P ($P < 0.05$)。这表明 4 种黄花梨蜂蜜与 M 的 $ABTS^+$ 自由基清除能力相当, 且强于其他 3 种蜂蜜。

2.3.3 ·OH 自由基清除能力分析 ·OH 自由基具有极强氧化能力, 其与水杨酸反应会生成紫色的 2,3-二羟基苯甲酸, 而具有抗氧化活性的物质能使紫色消退, 可直观呈现 ·OH 自由基的消除过程^[26]。8 种蜂蜜的 ·OH 自由基清除率 IC_{50} 如图 5 所示。由图 5 可知, H1 的 ·OH 自由基清除率 IC_{50} 最小, 为 (245.85 ± 0.09) mg/mL, 表明 H1 对 ·OH 自由基的清除能力最强; 其次是 H4 (245.84 ± 0.05) mg/mL 和 M (249.37 ± 0.08) mg/mL, 且 H1 与 H4 之间差异不显著 ($P > 0.05$), 二者对 ·OH 自由基的清除能力均强于 M; H2 和 H3 对 ·OH 自由基的清除能力弱于 M, 但 4 种黄花梨蜂蜜对 ·OH 自由基的清除能力均显著强于 P (288.75 ± 3.64) mg/mL)、W (300.36 ± 0.28) mg/mL 和 L (382.65 ± 0.30) mg/mL ($P < 0.05$)。研究^[27]发现, H_2O_2 会产生具有高活性的 ·OH 自由基, 从而诱导细胞氧化损伤, 而黄花梨蜂蜜能够抑制 ·OH 自由基产生, 表明黄花梨蜂蜜能有效保护细胞, 进而减轻炎症反

应, 但其具体生物功效有待深入研究。

2.3.4 氨基酸含量分析 相关研究^[28]表明, 蜂蜜中的脯氨酸 (Pro) 具有抗氧化能力, 因此在评价蜂蜜成熟度时, 常需要分析其氨基酸含量。8 种蜂蜜的氨基酸含量见表 2。由表 2 可知, W 的总氨基酸含量最高, 为 (243.28 ± 14.24) mg/100 g; 其次是 4 种黄花梨蜂蜜, 平均值为 (216.08 ± 2.46) mg/100 g, 且 4 种黄花梨蜂蜜之间无显著性差异 ($P > 0.05$), M 的总氨基酸含量低于 W 和 4 种黄花梨蜂蜜, 而 L 和 P 的总氨基酸含量均较低。8 种蜂蜜的主要氨基酸为苯丙氨酸 (Phe)、Pro、亮氨酸 (Leu)、天冬氨酸 (Asp)、丝氨酸 (Ser) 和谷氨酸 (Glu), 在氨基酸总含量中的占比均为 7% 以上; 其中, W 的 Phe 含量最

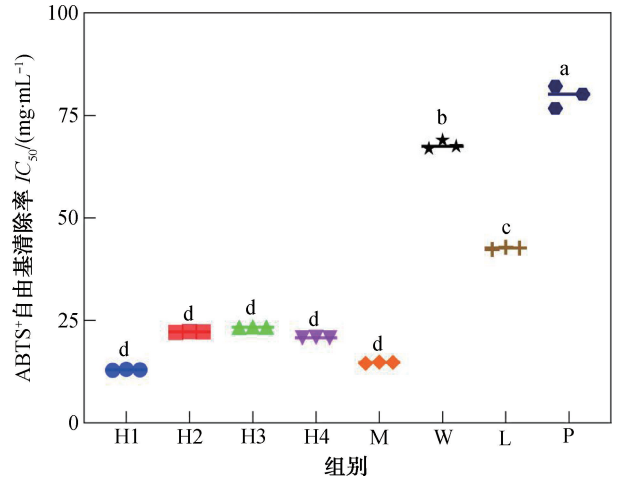


图 4 8 种蜂蜜的 $ABTS^+$ 自由基清除率 IC_{50}
Fig. 4 IC_{50} of $ABTS^+$ free radical clearance rate in eight kinds of honey

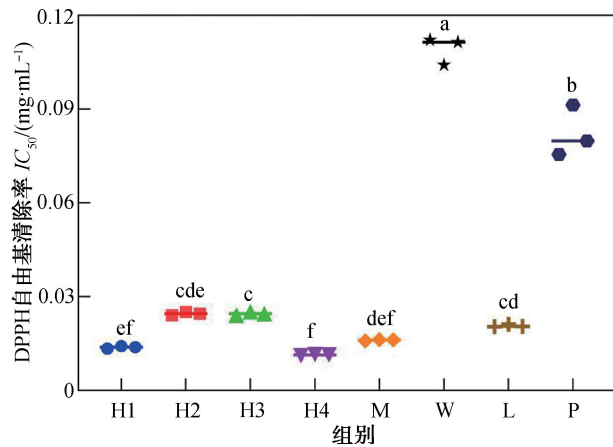


图 3 8 种蜂蜜的 DPPH 自由基清除率 IC_{50}
Fig. 3 IC_{50} of DPPH free radical clearance rate in eight kinds of honey

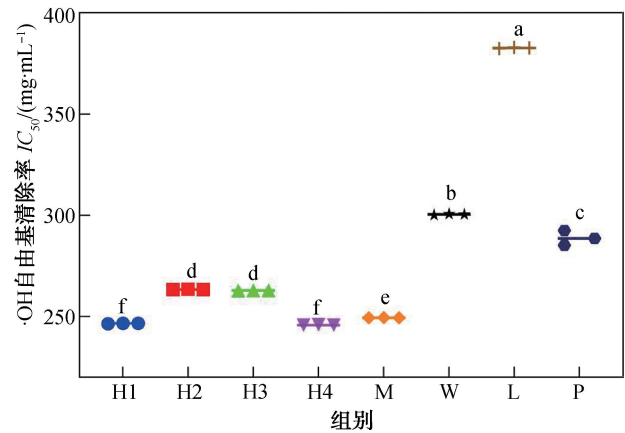


图 5 8 种蜂蜜的 ·OH 自由基清除率 IC_{50}
Fig. 5 IC_{50} of ·OH free radical clearance rate in eight kinds of honey

高, M 的 Pro 含量最高, H2、H4 和 L 的 Asp 含量最高, H2 的 Glu 含量最高, H1、H3 和 P 的 Ser 含量最高, H2、H4 和 L 的 Leu 含量最高。通常, 蜂蜜中含量最高的氨基酸为 Pro, 而本研究 4 种黄花梨蜂蜜中含量最高的氨基酸并非 Pro, 含量较高的氨基酸为 Asp、Glu、Leu 和 Phe, 这与潘成涛等^[10]的研究结果较一致。蜂蜜的后熟分为两个阶段, 前期是蔗糖的降低期, 后期是蔗糖的稳定期, 只有经过完整的后熟过程, 才能达到最佳状态, 而后熟度不足可能导致 Pro 含量较低。8 种蜂蜜的 Pro 含量存在差异, 这可能与蜜源植物生长的地理环境、蜂蜜酿制过程中环境的温度、湿度变化等多种因素有关^[30]。本研究中, 4 种黄花梨蜂蜜的采集地不同, 可能是导致其 Pro 含量有所差异的重要原因。

2.4 抗氧化能力相关性分析

将实验所测 8 种蜂蜜的理化指标、抗氧化物质含量和抗氧化能力数据通过皮尔逊和斯皮尔曼系数进行双尾显著性检验, 分析出相关性系数, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 8 种蜂蜜的 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率 IC_{50} 与总酚、总氨基酸、维生素 C、维生素 B₁ 含量呈正相关关系, 与黄酮含量呈负相关关系。酚类化合物能直接清除活性氧, 激活抗

氧化酶活性, 抑制氧化酶活性, 被认为是蜂蜜发挥抗氧化能力的主要物质^[31]。8 种蜂蜜的 3 种自由基清除率 IC_{50} 与总酚含量的相关性系数分别为 0.767、0.533 和 0.533, 与黄酮含量的相关性系数分别为 -0.491、-0.731 和 0.731, 与总氨基酸含量的相关性系数分别为 0.355、0.355 和 0.225, 与维生素 C 含量的相关性系数分别为 0.654、0.370 和 0.370, 与维生素 B₁ 含量的相关性系数分别为 0.381、0.177 和 0.177; 4 种抗氧化物质中, 总酚含量与 3 种自由基的清除能力相关性最强, 这与黄媛等^[32]的研究结果较一致。但蜂蜜的抗氧化特性并非由某一种抗氧化物质决定, 而是多种抗氧化物质共同作用的结果, 与维生素、游离氨基酸和黄酮类化合物都密切相关^[33]。本研究中, 4 种黄花梨蜂蜜的总酚、黄酮和维生素 C 含量均低于 M, 维生素 B₁ 含量与 M 无显著性差异 ($P>0.05$), 总氨基酸含量均高于 M ($P<0.05$), 对 3 种自由基的清除能力与 M 相当, 且 H1 和 H4 清除 ·OH 自由基的能力最强, 表明黄花梨蜂蜜中含有特殊的抗氧化活性物质, 可作进一步研究。

8 种蜂蜜的 ·OH 自由基清除率 IC_{50} 与总酚、黄酮、总氨基酸、维生素 C、维生素 B₁ 含量呈正相关关

表 2 8 种蜂蜜的氨基酸含量
Table 2 Amino acid content of eight kinds of honey

组别	Asp 含量	Thr 含量	Ser 含量	Glu 含量	Gly 含量	Ala 含量	Cys 含量	Val 含量	Met 含量
H1	18.55±0.25 ^b	6.85±0.08 ^b	15.03±0.12 ^a	15.66±0.11 ^c	12.89±0.09 ^b	10.55±0.23 ^c	0.00±0.00 ^b	10.23±1.21 ^b	—
H2	22.56±2.11 ^a	6.44±0.15 ^{bc}	11.25±0.36 ^c	20.55±2.11 ^a	9.03±0.89 ^d	9.85±0.36 ^d	0.00±0.00 ^b	10.55±1.78 ^b	—
H3	17.89±3.21 ^b	6.55±1.25 ^{ab}	14.69±2.22 ^a	14.88±1.21 ^c	13.45±0.67 ^a	10.23±1.64 ^c	0.00±0.00 ^b	9.91±0.22 ^c	—
H4	20.36±4.58 ^a	7.51±1.02 ^{ab}	11.23±0.88 ^b	18.05±1.69 ^b	13.01±1.55 ^a	12.55±2.05 ^{bc}	1.09±0.02 ^a	10.29±1.33 ^b	—
M	17.85±2.44 ^b	7.25±3.35 ^{ab}	12.25±5.87 ^b	17.25±2.36 ^b	10.66±1.45 ^c	13.25±2.25 ^a	0.00±0.00 ^b	11.56±3.65 ^{ab}	—
W	18.69±2.55 ^b	6.55±1.69 ^{bc}	13.02±1.02 ^b	14.05±2.22 ^c	11.69±1.48 ^{bc}	10.88±1.22 ^c	0.00±0.00 ^b	9.78±0.44 ^c	—
L	21.05±2.88 ^a	8.05±1.02 ^a	11.05±0.33 ^c	16.67±2.67 ^{bc}	12.66±2.55 ^b	13.05±3.42 ^{ab}	1.01±0.01 ^a	10.46±1.39 ^{bc}	—
P	18.02±3.66 ^{ab}	5.85±0.05 ^d	15.11±2.98 ^a	15.85±2.61 ^c	11.87±2.27 ^{bc}	9.66±0.02 ^d	0.00±0.00 ^b	9.55±2.29 ^c	—
组别	Iie 含量	Leu 含量	Tyr 含量	Phe 含量	Lys 含量	His 含量	Pro 含量	总氨基酸含量	
H1	5.66±0.32 ^b	19.21±1.56 ^b	5.22±0.66 ^a	61.25±3.25 ^b	16.66±2.11 ^a	5.98±0.21 ^b	15.88±0.33 ^c	219.62±6.87 ^b	
H2	6.05±0.66 ^b	22.23±2.44 ^a	5.08±0.36 ^a	56.12±2.85 ^c	12.88±2.14 ^c	3.48±0.08 ^c	21.33±3.28 ^c	217.40±11.26 ^b	
H3	5.02±0.54 ^c	18.88±1.69 ^b	4.98±0.55 ^a	59.87±3.69 ^c	15.23±0.44 ^b	6.88±0.23 ^a	15.45±1.25 ^c	213.91±14.57 ^b	
H4	7.35±0.15 ^a	21.52±3.69 ^a	4.19±0.33 ^b	16.25±0.18 ^e	7.46±1.47 ^e	2.61±0.29 ^d	16.58±2.25 ^d	215.40±15.23 ^b	
M	6.88±1.22 ^a	17.95±2.89 ^b	4.02±0.49 ^b	18.23±2.36 ^d	10.45±2.47 ^d	3.25±0.63 ^c	46.53±4.29 ^a	197.38±16.58 ^c	
W	5.66±1.58 ^b	18.39±3.22 ^b	4.15±0.69 ^b	87.63±5.66 ^a	12.58±3.02 ^c	3.55±0.41 ^c	26.66±2.99 ^b	243.28±14.24 ^a	
L	7.66±0.55 ^a	20.87±3.54 ^a	4.36±0.22 ^b	15.89±2.36 ^f	7.56±0.04 ^e	2.77±0.02 ^d	16.88±3.25 ^d	169.99±8.91 ^d	
P	5.44±0.15 ^{bc}	16.44±3.55 ^b	3.72±0.06 ^c	17.03±0.92 ^d	6.42±0.58 ^f	2.22±0.05 ^e	18.42±2.66 ^{cd}	155.60±10.25 ^c	

注:—表示未检测到。

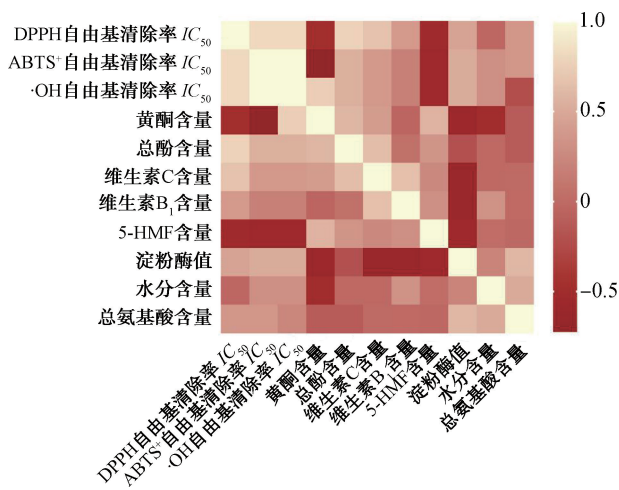


图6 8种蜂蜜的理化指标、抗氧化物质含量和抗氧化能力之间的相关性热图

Fig. 6 Correlation heat map between physical and chemical components, antioxidant substances and antioxidant capacity of eight kinds of honey

系。N. A. O. De Moraes 等^[34]研究发现, ·OH 自由基因受蛋白脂质体疏水区的包裹排列影响,可能与氨基酸残基、酚类化合物的偶极相互作用和 $\pi-\pi$ 相互作用的影响相关。维生素是维持机体正常生理功能的重要有机物质,研究^[35]表明,摄入一定量的维生素 C 可改善机体的免疫应答和抗氧化应激能力,而维生素 B₁ 能够延缓衰老,增加抗氧化物质的累积。相关性分析表明,8 种蜂蜜的维生素 C、维生素 B₁ 含量均与 3 种自由基清除率 IC_{50} 呈正相关关系,并与总酚共同发挥抗氧化作用。8 种蜂蜜的 3 种自由基清除率 IC_{50} 与 5-HMF 含量呈负相关关系,与淀粉酶值呈正相关关系,这表明蜂蜜的抗氧化能力与淀粉酶值密切相关,证实了已有研究^[36]的相关结论。

3 结论

本研究以 4 种黄花梨蜂蜜、3 种贵州特色蜂蜜和 1 种市场认可度较高的麦卢卡蜂蜜为研究对象,对其理化指标、抗氧化物质含量、抗氧化能力及相关性进行了分析,得到如下结论:所测 8 种蜂蜜的理化指标均符合相关行业标准。黄花梨蜂蜜作为贵州省新开发的一种单花蜜源蜂蜜,其总酚和黄酮含量均高于其他 3 种贵州特色蜂蜜,总氨基酸含量显著高于麦卢卡蜂蜜。值得关注的是,黄花梨蜂蜜的

抗氧化活性较高且抗氧化活性物质含量较丰富,对 DPPH、ABTS⁺ 自由基的清除能力与麦卢卡蜂蜜相当,而对 ·OH 自由基的清除能力强于麦卢卡蜂蜜,且均强于 3 种贵州特色蜂蜜。同时,所测 8 种蜂蜜的总酚、总氨基酸、维生素 C 和维生素 B₁ 含量与 3 种自由基清除率 IC_{50} 均呈正相关,黄酮含量仅与 ·OH 自由基清除率 IC_{50} 呈正相关。在后续研究中,将采用广泛代谢组学技术与靶向代谢组学技术相结合挖掘黄花梨蜂蜜中的抗氧化成分,并进一步探究极具特征性的抗氧化物质,为打造贵州高端蜂蜜奠定一定的研究基础。

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] ZHAO H A, ZHU M, WANG K R, et al. Identification and quantitation of bioactive components from honeycomb (*Nidus Vespa*) [J]. Food Chemistry, 2020, 314:126052.
- [3] KOCYIGIT A, GULER E M, KALELI S. Anti-inflammatory and antioxidative properties of honey bee venom on Freund's Complete Adjuvant-induced arthritis model in rats[J]. Toxicon, 2019, 161:4-11.
- [4] MAJTAN J, BUCEKOVA M, KAFANTARIS I, et al. Honey antibacterial activity: A neglected aspect of honey quality assurance as functional food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118:870-886.
- [5] ISSAAD F Z, FERNANDES I P G, ENACHE T A, et al. Honey and pollen phenolic composition, antioxidant capacity, and DNA protecting properties [J]. Electroanalysis, 2019, 31(4):611-618.
- [6] ZHAO H A, CHENG N, HE L L, et al. Antioxidant and hepatoprotective effects of *A. cerana* honey against acute alcohol-induced liver damage in mice[J]. Food Research International, 2017, 101:35-44.
- [7] 杨二林, 赵浩安, 徐元元, 等. 枣花蜜酚类化合物组成及其抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2021, 42(3):150-157.
- [8] 何欣, 杨云, 赵祥升, 等. 降香化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国现代中药, 2022, 24(6):1149-1166.
- [9] KLATT B K, HOLZSCHUH A, WESTPHAL C, et al. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value[J]. Proceedings Biological Sciences, 2013, 281(1775):20132440.
- [10] 潘成涛, 陈志敏, 范明玉, 等. 贵州黄花梨蜂蜜的品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17):

- 5747–5753.
- [11] 沙芳芳,赵瑞丽,张璐,等. 麦卢卡蜂蜜促健康功能研究进展[J]. 食品与发酵工业,2023,49(19):348–359.
- [12] 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,2004.
- [13] 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,2004.
- [14] 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,2013.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [16] 段鹏,蒋玉梅,李熠,等. 蜂蜜黄酮提取工艺优化及抑菌性分析[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(2):141–149,159.
- [17] 程佳,王发啟,李小双,等. 酚酸类化感物质种类、提取、分离和检测研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):8–15.
- [18] 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.
- [19] LACHMAN J, ORSÁK M, HEJTMÁNKOVÁ A, et al. Evaluation of antioxidant activity and total phenolics of selected Czech honeys [J]. LWT-Food Science and Technology,2010,43(1):52–58.
- [20] 贾俊强,马海乐,曲文娟,等. 超声预处理大米蛋白制备抗氧化肽[J]. 农业工程学报,2008,24(8):288–293.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定:GB 5009.124—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [22] BOGDANOV S. Nutritional and functional properties of honey[J]. Voprosy Pitaniia,2010,79(6):4–13.
- [23] DEMIR KANBUR E, YUKSEK T, ATAMOV V, et al. A comparison of the physicochemical properties of chestnut and highland honey: The case of senoz valley in the rize province of Turkey [J]. Food Chemistry, 2021, 345:128864.
- [24] NAGAI T, KAI N, TANOUE Y, et al. Chemical properties of commercially available honey species and the functional properties of caramelization and Maillard reaction products derived from these honey species [J]. Journal of Food Science and Technology,2018,55(2):586–597.
- [25] 左世梅. 与维生素 B1 相关的神经系统疾病研究进展[J]. 生物学教学,2021,46(8):69–71.
- [26] NOOR N, SARFRAZ R A, ALI S, et al. Antitumour and antioxidant potential of some selected Pakistani honeys [J]. Food Chemistry,2014,143:362–366.
- [27] KHALIL M I, ALAM N, MONIRUZZAMAN M, et al. Phenolic acid composition and antioxidant properties of Malaysian honeys[J]. Journal of Food Science,2011,76(6):C921–C928.
- [28] 曹珺,王禹,王海东,等. 复方前列康胶囊治疗慢性前列腺炎的活性作用研究[J]. 长春中医药大学学报,2023,39(9):973–979.
- [29] DE SILVA P M, GAUCHE C, GONZAGA L V, et al. Honey: Chemical composition, stability and authenticity [J]. Food Chemistry, 2016, 196:309–323.
- [30] 陈杰,杨玉杉,胡月婷,等. 油菜蜜和枣花蜜中脯氨酸含量的测定[J]. 中国蜂业,2010,61(10):11–13.
- [31] DŽUGAN M, TOMCZYK M, SOWA P, et al. Antioxidant activity as biomarker of honey variety [J]. Molecules, 2018,23(8):2069.
- [32] 黄媛,于娟,任玲,等. 不同品种白茶品质及抗氧化活性研究[J]. 食品科技,2023,48(7):64–70.
- [33] 曹联飞,何程豪,孙玉敬. 大蜜蜂和黑大蜜蜂蜂蜜的理化指标及抗氧化活性分析[J]. 食品与发酵工业,2021,47(9):262–267.
- [34] DE MORAES N A O, FELIPE K L T, POESTER C A, et al. *Spirulina* sp. LEB 18-extracted phycocyanin: Effects on liposomes' physicochemical parameters and correlation with antiradical/antioxidant properties [J]. Chemistry and Physics of Lipids,2021,236:105064.
- [35] RATHORE S S, HANUMAPPA S M, YUSUFZAI S I, et al. Dietary administration of engineered Nano-selenium and vitamin C ameliorates immune response, nutritional physiology, oxidative stress, and resistance against *Aeromonas hydrophila* in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Biological Trace Element Research,2023, 201(8):4079–4092.
- [36] TOMCZYK M, MIŁEK M, SIDOR E, et al. The effect of adding the leaves and fruits of *Morus alba* to rape honey on its antioxidant properties, polyphenolic profile, and amylase activity[J]. Molecules,2019,25(1):84.

Study on antioxidant properties of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey and honey from other nectar sources

LEI Lu, XU Haoxiang, LI Ting, ZHOU Jingrui, QI Jing, AI Rong, LUO Wenju, JIANG Lingling

Institute of Animal Husbandry and Veterinary, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550005, China

Abstract: This study conducted a comparative analysis of the physicochemical indices, antioxidant substance content, and antioxidant capacity of four types of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey, three types of Guizhou specialty honey (blueberry, galla chinensis, and loquat T. Chen honey), and manuka honey, aiming to investigate the antioxidant characteristics of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey. The results indicated that the physicochemical indices of all eight types of honey complied with relevant industry standards. The total amino acid content in the four types of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey was higher than that of manuka honey, while the total phenol and flavonoid contents were lower than those of manuka honey but higher than those of the three types of Guizhou specialty honey. Overall, the scavenging abilities of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey against DPPH, ABTS⁺, and ·OH radicals showed no significant difference compared to manuka honey ($P>0.05$), but were stronger than those of the three types of Guizhou specialty honey. Moreover, specific samples of *Dalbergia odorifera* T. Chen honey, H1 and H4, exhibited significantly stronger scavenging abilities against ·OH radicals than manuka honey ($P<0.05$). The content of total phenols, total amino acids, vitamin C, and vitamin B₁ in eight types of honey was positively correlated with the IC_{50} values of the three radical scavenging rates, while the flavonoid content was only positively correlated with the IC_{50} value of ·OH radical scavenging. Overall, the *Dalbergia odorifera* T. Chen honey possessed good nutritional quality and strong antioxidant activity, and suitable for further research and promotion as a high-end novel honey source.

Key words: *Dalbergia odorifera* T. Chen honey; antioxidant property; physical and chemical indicator; antioxidant substance; correlation analysis

[责任编辑:杨晓娟]