DOI:10.12441/spyswjs.20240113002 [文章编号] 1673-1689(2025)05-0072-06

太赫兹光谱用于蜂蜜真伪鉴定的检测研究

黄略略[1] 王志琪[2] 刘妙玲[1] 李 彬[1*]

(1. 深圳职业技术大学食品药品学院,广东 深圳 518055; 2. 深圳市太赫兹科技创新研究院,广东 深圳 518102)

摘要:【目的】采用太赫兹(terahertz,THz)光谱技术鉴定蜂蜜的真伪。**【方法】**采用稳定同位素比值质谱(IRMS)仪对不同蜂蜜样品进行检测,其结果作为太赫兹光谱检测的参考,通过比对2种检测方法的结果,来验证太赫兹光谱检测的样品要求和分析条件。**【结果】**液态蜂蜜没有明显的吸收峰,但不同样品的折射率存在明显差异,且液态蜂蜜中含有一定的水,水分质量分数偏高的时候会影响样品的折射率,从而导致结果误判。将液态蜂蜜中的水分通过冷冻干燥去除,再进行太赫兹衰减全反射检测,结果表明冻干蜂蜜样品仍然没有明显的吸收峰,但冻干样品的折射率差异明显,可分为2类:一类样本折射率波动较小,平均折射率范围为2.04~2.29;另一类样本折射率波动较大,平均折射率范围为0.86~2.22。**【结论】**2种检测方法的数据分析结果一致,表明太赫兹光谱可以用于蜂蜜样品的真伪鉴定。

关键词:太赫兹光谱;蜂蜜;真伪鉴定;冷冻干燥

Identification of Honey Authenticity by Terahertz Spectroscopy

HUANG Luelue[1] *WANG Zhiqi*[2] *LIU Miaoling*[1] *LI Bin*[1*]

(1. School of Food and Drug, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Institute of Terahertz Technology and Innovation, Shenzhen 518102, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to identify honey authenticity by terahertz (THz) spectroscopy. [**Method**] Different honey samples were analyzed by stable isotope ratio mass spectrometry (IRMS), and the results served as a reference for terahertz spectroscopy. The sample requirements and analytical conditions of terahertz spectroscopy were verified by comparing the results of these two methods. [**Result**] Liquid honey samples exhibited no discernible absorption peaks. However, significant differences in refractive index were observed among samples. The presence of water in liquid honey, particularly at high levels, affected the refractive index, potentially leading to misjudgment. After removal of water from liquid honey *via* freeze-drying, terahertz attenuated total reflection was employed for identification. The freeze-dried honey samples still showed no discernible absorption peaks but exhibited distinct refractive index variations, being grouped into two categories: one with minor refractive index fluctuations and average values ranging from 2.04 to 2.29, and the other with considerable fluctuations and average values ranging from 1.03 to 2.22. [**Conclusion**] Consistent results from both analytical methods demonstrate that terahertz spectroscopy can be employed for authenticity identification of honey samples.

Keywords: terahertz spectroscopy; honey; authenticity identification; freeze drying

蜂蜜含有约200种化合物,主要由糖(果糖质量分数25%~45%,葡萄糖质量分数20%~40%)、水和其他物质组成,如氨基酸、酶、酚类、类黄酮化合物、蛋白质、矿物质等,这些物质对蜂蜜生物活性有很大贡献[1]。蜂蜜具有较高的营养和药用价值,但天然蜂蜜价格较其他甜味剂偏高[2]。伪品

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31972207);广东省食品安全与质量控制科研创新团队项目(2021KCXTD069)。

通信作者:李彬(1973—),女,博士,研究员,主要从事分析检测研究。E-mail: libin0607@szpu.edu.cn

收稿日期:2024-01-13 **修回日期:**2024-02-21

蜂蜜一般是人为掺入廉价甜味剂或者伪造植物、地理来源以获取更高的利润[3]。

对蜂蜜的真伪鉴定有光谱法、化学法、生物法等，光谱法主要有核磁共振[4]、近红外光谱[5]、太赫兹光谱[6]等；化学法有电子鼻[7]、电子舌[8]、IRMS[9]等，以及通过测定蜂蜜中的糖、水分、多酚、羟甲基糠醛、淀粉酶活性等来进行真伪鉴别[10-11]；生物法主要是采用核酸提取、扩增，然后进行基因测序来进行判别[12]。每种方法都有其优缺点，因此也有越来越多关于不同方法之间联用的研究，例如IRMS与液相色谱-质谱联用相结合[9]、液相色谱与统计方法相结合[13]等，前者用于判断是否掺入外源的C4植物糖（如蔗糖等），后者则可以同时分析典型的C3植物糖的糖浆特征物（如大米糖浆、甜菜糖浆和木薯糖浆等）。研究各类蜂蜜鉴别技术都是为了寻找用时更短、环境友好、准确度高的现代检测技术来实现蜂蜜的真伪鉴定或者质量检测。

太赫兹光谱频率位于0.1~3.0 THz，3.3~100.0 cm^{-1}的谱段，介于红外线和微波之间[14]。由于太赫兹光谱具有能量低、非离子化、穿透性和指纹特性等特点，近年来，太赫兹光谱作为一种新兴检测技术，逐渐应用于食品领域的检测研究[10,15-16]。目前，已有采用太赫兹光谱技术鉴定蜂蜜真伪的研究，主要是先利用太赫兹光谱技术获得相应数据，再结合数学模型分析来进行鉴别[10,17]。

作者利用太赫兹光谱技术对15种来源的蜂蜜进行检测，并尝试通过所测数据进行区分，且将结果与IPMS法测定结果进行比对，旨在探寻并建立一种更为快速且准确的蜂蜜真伪鉴定方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蜂蜜：采购于广东省内不同果园，包括龙眼蜜、荔枝蜜、冬蜜、春蜜、百花蜜和桂花蜜6个品种，共15个样本；高纯氦气（纯度≥99.999%）、工作标准参考气（CO_2）、高纯助燃气（O_2）、钨酸钠、过硫酸钠：美国Sigma-Aldrich公司；硫酸（优级纯）：南京化学试剂股份有限公司；磷酸：阿拉丁生化科技股份有限公司；标准品USGS40、USGS41、IAEA-CH-6（蔗糖，$\delta^{13}C_{VPDB}$=−10.449‰）：上海元能生物科技有限公司；锡囊（8 mm×5 mm）：英国Elemental Mircoanalysis公司；*β*-环糊精：华兴生物化工有限责任公司。

1.2 仪器与设备

太赫兹脉冲光谱仪：TeraPulse 4000型，英国TeraView公司；IRMS仪：Delta V Advantage型，美国Thermo Fisher Scientific公司；高温热解转化元素分析仪：Flash 2000 HT型，美国Thermo Fisher Scientific公司；高效液相色谱仪：UltiMate 3000型，美国Thermo Fisher Scientific公司；在线氧化接口：LC-Isolink型，美国Thermo Fisher Scientific公司；高纯水发生器：Milli-Q IQ7000型，美国Millipore公司；十万分之一天平：ESJ-2100W型，德国赛多利斯公司；冷冻干燥机：EPSILON 2-4LSC PLUS型，德国Christ公司。

1.3 IRMS法检测蜂蜜

1.3.1 蛋白质的提取与制备

参照GB/T 18932.1—2002的方法，称取蜂蜜样品10~12 g，放入50 mL离心管中，加入4 mL一级水，充分混匀待用。取2.0 mL的10 g/dL钨酸钠溶液与2.0 mL的0.335 mol/L硫酸溶液快速混匀，加到待测蜂蜜样品中再次混匀。接着将离心管置于水浴锅中，80 ℃加热不少于30 min，加热过程中每5 min取出混匀20 s，直至离心管中有絮状物析出。接着往离心管中加入去离子水直至注满，混合均匀后在相对离心力为1 500 *g*下离心5 min，随后弃去上清液，用去离子水充分洗涤沉淀物，重复5次，最后将离心管放入烘箱中，75 ℃干燥4 h[18-19]。称取80~120 μg烘干的蛋白质粉末于锡囊中，每个样品制备2份。

1.3.2 检测条件

元素分析仪条件：燃烧炉温度980 ℃；GC温度50 ℃；载气流量100 mL/min；进样口吹扫流量200 mL/min；喷氧流量175 mL/min，时间3 s。质谱条件：真空度2.0×10^{-4} Pa；离子源为电子轰击离子源；加速电压2 549 V；离子源线性响应（测试气体为CO_2，*m*/*z* 44）：$|\Delta\delta^{13}C/\Delta I|\leqslant0.01‰/nA$；质量分析器为扇形电磁体，有效磁场半径19.1 cm；CO_2气体经电子轰击离子源电离后，生成分子离子束（主要包括$[^{12}C^{16}O_2]^+$、$[^{13}C^{16}O_2]^+$和$[^{12}C^{16}O^{18}O]^+$）。这些离子按*m*/*z*进行空间分离，并聚焦至通用三杯接收器的独立法拉第杯。各杯分别捕获对应离子流，经高阻放大器转换为电压信号。最终，通过计算$^{13}C/^{12}C$同位素比值，获得样品的$\delta^{13}C$值。

1.4 液相色谱同位素质谱法(LC-IRMS)检测蜂蜜

1.4.1 样品预处理

将 1 g/L 蜂蜜稀释液(称取蜂蜜样品 0.2 g,置于 200 mL 容量瓶中,用一级水定容至刻度,充分摇匀,备用)和 10 g/L 蜂蜜稀释液(称取蜂蜜样品 2.0 g,置于 200 mL 容量瓶中,用一级水定容至刻度,充分摇匀,备用)分别用于测定果糖/葡萄糖以及二糖/三糖中的 $\delta^{13}C$。采用一次性注射器(规格 5 mL)抽取蜂蜜稀释液,通过 0.45 μm 水系滤膜,过滤至 2 mL 的样品瓶中,备用。同一类型的样品设置 3 个重复。

1.4.2 检测条件

色谱条件:色谱柱 Phenomenex Rezek RCM (Ca^{2+}),规格 300 mm×8 mm×8 μm;洗脱剂为一级水,流量 0.3 mL/min;进样体积 10 μL;柱箱温度 55 ℃;酸泵(H_3PO_4 0.5 mol/L)和氧化泵($Na_2S_2O_8$ 0.5 mol/L)的流量均为 0.05 mL/min;氧化炉温度 99.9 ℃。质谱条件:真空度 2.0×10^{-4} Pa;离子源采用电子轰击离子源;加速电压 2 970 V;离子源线性响应(测试气体为 CO_2,m/z 44):$|\Delta\delta^{13}C/\Delta I|\leqslant$ 0.015‰/nA;质量分析器为扇形电磁体,有效磁场半径 19.1 cm;CO_2 气体经电子轰击离子源电离后,生成分子离子束(主要包括$[^{12}C^{16}O_2]^+$、$[^{13}C^{16}O_2]^+$和$[^{12}C^{16}O^{18}O]^+$)。这些离子按 m/z 进行空间分离,并聚焦至通用三杯接收器的独立法拉第杯。各杯分别捕获对应离子流,经高阻放大器转换为电压信号。最终,通过计算 $^{13}C/^{12}C$ 同位素比值,获得样品的 $\delta^{13}C$ 值。

1.5 太赫兹衰减全反射法检测蜂蜜

1.5.1 样品预处理

称取 3.0 g 蜂蜜于培养皿中,加入 1.5 g β-环糊精,于−60 ℃冷冻 48 h,再真空干燥 72 h[20],制成蜂蜜块状样本,采用玛瑙研磨样本,得到蜂蜜固体粉末,过 200 目筛备用。

1.5.2 检测条件

太赫兹脉冲光谱仪的检测原理见图 1。该设备的有效频谱范围在 0.1~3.5 THz,能够测量固体和液体样本。采用衰减全反射模式获取样本太赫兹时域信号,再经过相关变换及计算后输出频域、吸收谱等光学参数[21]。液体蜂蜜的检测:将 60 μL 待测液体蜂蜜样本滴入干净无污染的衰减全反射模块上,随后直接测试分析。检测时向系统中持续吹扫氮气,消除空气中的水蒸气对太赫兹光谱的影响。将不加任何测试样品、仅氮气吹扫后的太赫兹信号作为参考信号。设置参数为 1 000 次扫描,1 000 次的平均值作为该测试样品的光谱值。固体粉末蜂蜜的检测:称取 0.3 g 待测固体粉末蜂蜜于衰减全反射模块上快速测试分析,其余操作与液体蜂蜜检测一致。

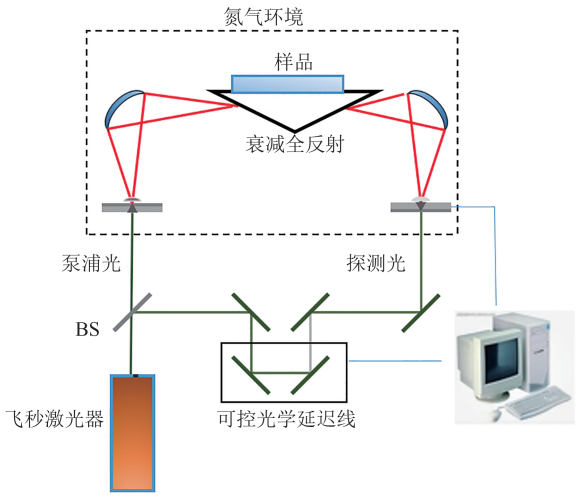


图 1 太赫兹脉冲光谱仪的工作原理

Fig. 1 Working principle of terahertz pulsed spectroscopy

1.6 数据处理

利用 Origin 软件分析数据集,获得液体蜂蜜和固体粉末蜂蜜的吸收光谱图和折射光谱图。

2 结果与讨论

2.1 IRMS 和 LC-IRMS 检测数据与分析

根据国家标准,真实纯蜂蜜的 C4 植物糖质量分数≤7%[17]。已有研究表明,蛋白质和蜂蜜的 $\delta^{13}C$ 差值 $\Delta\delta^{13}C_{P\text{-}H}\geqslant-1.0$‰,葡萄糖和果糖的 $\delta^{13}C$ 差值 $\Delta\delta^{13}C_{Fru\text{-}Glu}$ 为−1.0‰~1.0‰,果糖、葡萄糖、二糖和三糖的 $\delta^{13}C$ 的最大差值 $\Delta\delta^{13}C_{Max}<2.1$‰[22-23]。因此,采用 IRMS 法对蜂蜜中蛋白质和蜂蜜的 $\delta^{13}C$ 值进行测定,计算 C4 植物糖质量分数。由表 1 可知,C4 植物糖质量分数>7% 的有 5#、12#、13#、14# 样品,所以这 4 个样品被判为掺假样品。再采用 LC-IRMS 法对 15 个蜂蜜样品进行检测,根据碳同位素比值计算出蛋白质和蜂蜜的 $\delta^{13}C$ 差值 $\Delta\delta^{13}C_{P\text{-}H}$、果糖与葡萄糖的 $\delta^{13}C$ 差值 $\Delta\delta^{13}C_{Fru\text{-}Glu}$ 和 6 项同位素的 $\delta^{13}C$ 的最大差值 $\Delta\delta^{13}C_{Max}$。在剩下 11 个 C4 植物糖质量分数≤7% 样品中,蜂蜜中各糖组分的最大差值 $\Delta\delta^{13}C_{Max}\geqslant2.1$‰ 的样品有 1#、8#,

说明这2个样品也属于掺假样品。采用IRMS法结合LC-IRMS法共鉴别出6个掺假的蜂蜜样品，分别为1#、5#、8#、12#、13#、14#。这个鉴定结果可为后续太赫兹衰减全反射法检测结果的判定提供参考。

表1　15个蜂蜜样品IRMS和LC-IRMS测定结果

Table 1　Results of IRMS and LC-IRMS for 15 honey samples

样品序号	IRMS法	LC-IRMS法		
	C4植物糖质量分数/%	$\Delta\delta^{13}C_{Max}$	$\Delta\delta^{13}C_{Fru\text{-}Glu}$	$\Delta\delta^{13}C_{P\text{-}H}$
1#蜂蜜	0	5.61	0.41	1.42
2#蜂蜜	0	1.84	−0.16	0.33
3#蜂蜜	0	2.02	−0.75	0.39
4#蜂蜜	0	1.82	0.61	0.52
5#蜂蜜	10.20	6.63	0.51	−1.50
6#蜂蜜	0	1.52	−0.52	1.24
7#蜂蜜	3.40	1.95	0.02	−0.62
8#蜂蜜	0	3.33	0.25	1.16
9#蜂蜜	0	1.14	0.54	1.01
10#蜂蜜	3.16	1.46	−0.43	−0.43
11#蜂蜜	0	2.00	−0.16	0.12
12#蜂蜜	12.81	10.66	0.22	−1.72
13#蜂蜜	31.25	5.59	0.35	−3.64
14#蜂蜜	23.01	7.20	0.48	−3.01
15#蜂蜜	1.35	2.05	−0.02	0.09

2.2　太赫兹衰减全反射法测定液体蜂蜜的结果

利用太赫兹衰减全反射法测定了液体蜂蜜的吸收光谱，结果见图2。随着频率的增加，样品的吸收系数逐渐减小，液体蜂蜜样品无明显特征吸收峰，这与刘文[10]的检测结果一致，且蜂蜜之间的差异性较小，因此无法根据太赫兹吸收光谱区分不同蜂蜜样品。

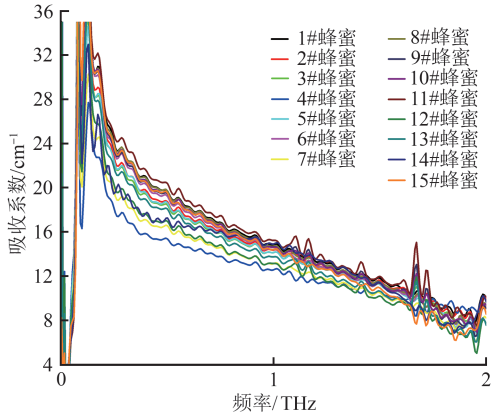


图2　液体蜂蜜样本的太赫兹吸收光谱

Fig. 2　Terahertz absorption spectrum of liquid honey samples

液体蜂蜜的太赫兹折射率见图3。根据太赫兹折射率曲线的趋势可以将样品分为2类，一类为1#、2#、3#、7#、11#、14#，折射率曲线整体波动较小；另一类为4#、5#、6#、8#、9#、10#、12#、13#、15#，折射率曲线波动较大，先出现了一个峰值，而后逐渐平稳。将液体蜂蜜的折射率分类结果与IRMS和LC-IRMS结果进行对比，发现2种检测方法的结果并不完全一致，说明通过液体蜂蜜样品的太赫兹折射率进行真伪鉴定存在一定的误判率。由图3可知，折射率较高的4#、5#、15#等样本的水分质量分数较低，且折射率谱图在一定程度上可以表征该样本中特征成分的水平高低。液体蜂蜜中有一定的水分，而太赫兹光谱仪对水分非常敏感[10]，因此液体蜂蜜中的水分可能是影响真伪鉴定的主要因素。

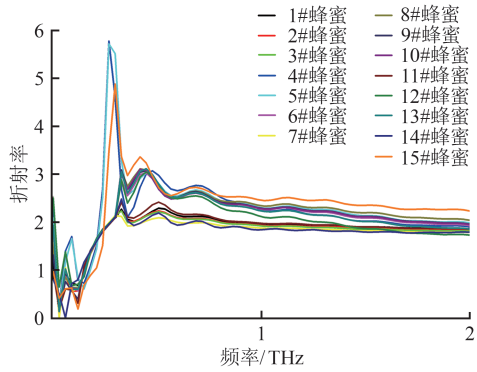


图3　液体蜂蜜样本的太赫兹折射率

Fig. 3　Terahertz refractive index of liquid honey samples

2.3　太赫兹衰减全反射法测定固体粉末蜂蜜的结果

将液体蜂蜜进行冷冻干燥后再进行测试，排除水分对太赫兹吸收光谱和折射率的影响。太赫兹吸收光谱的测定结果见图4，折射率结果见图5。由图4可知，太赫兹吸收光谱仍无明显特征吸收峰，分类效果不明显。

由图5可知，15个冻干蜂蜜样本的折射率曲线存在差异。基于折射率曲线趋势，可将蜂蜜样本分为2类：一类为1#、5#、8#、12#、13#、14#，这类样本折射率曲线趋势较为平缓；另一类为2#、3#、4#、6#、7#、9#、10#、11#、15#，这类样本折射率曲线趋势波动较大，即样本的平均折射率变化较大。

图6为冻干蜂蜜样本的平均折射率。折射率可反映物质的色散特性，一定程度上可以表征样本中特征成分水平的高低。第一类样本的平均折

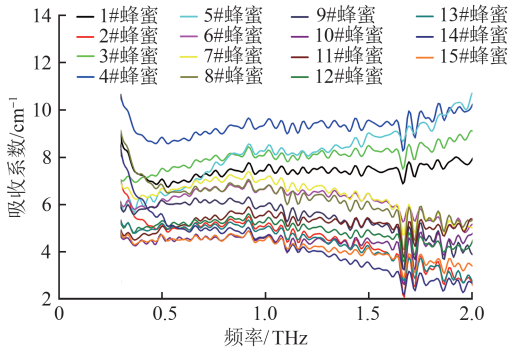


图 4 固体粉末蜂蜜样本的太赫兹吸收光谱

Fig. 4 Terahertz absorption spectrum of solid powdered honey samples

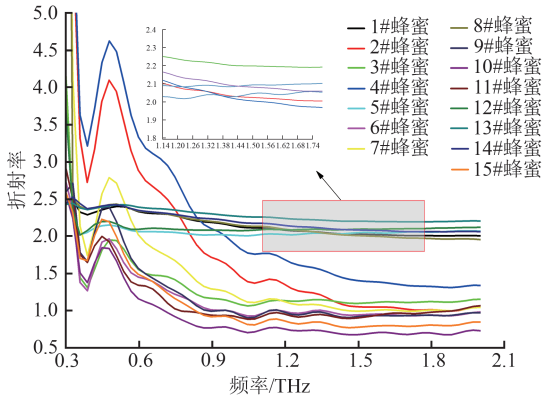


图 5 固体粉末蜂蜜样本的太赫兹折射率

Fig. 5 Terahertz refractive index of solid powdered honey samples

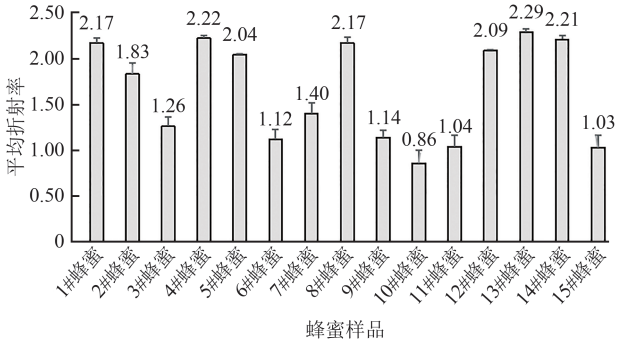


图 6 冻干蜂蜜样本在 0. 5~1. 5 THz 上的平均折射率

Fig. 6 Average refractive index of freeze-dried honey samples in the 0. 5~1. 5 THz range

射率范围为 2.04~2.29，第二类样本的平均折射率范围为 0.86~2.22，这说明不同的冻干蜂蜜样本在色散特性上有较大差异，同时也说明冻干蜂蜜样本能更好地反映特征成分水平。冻干蜂蜜样本的折射率分类结果与 IRMS 和 LC-IRMS 的结果一致，说明对蜂蜜采用冻干前处理再进行太赫兹光谱分析，可以直接使用样本折射率对蜂蜜进行真伪判别。

3 结论

太赫兹光谱可以用于蜂蜜真伪的鉴定。作者以冻干后的蜂蜜粉末为样本进行太赫兹光谱检测，折射率曲线趋势平稳、平均值较小的可判定为伪品；而折射率曲线波动较大、平均值较大的可判定为真品。相比太赫兹光谱检测结合数学模型的鉴别方法，作者直接采用冻干样本的折射率即可对蜂蜜样本进行真伪鉴别，可操作性更强，为蜂蜜的真伪鉴定提供了一种新方法。

此方法需要对样品进行冻干前处理，而冻干过程耗时较长，下一步将继续开展前处理方法的研究以及太赫兹光谱各项检测数据的分析，探索更加省时、环境友好且准确度高的太赫兹光谱检测方法。

参考文献

[1] MARTINELLO M，MUTINELLI F. Antioxidant activity in bee products：a review[J]. Antioxidants，2021，10(1)：71.

[2] QIAO J T，CHEN L H，KONG L J，et al. Characteristic components and authenticity evaluation of rape，*Acacia*，and linden honey[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2020，68(36)：9776-9788.

[3] 高西贝，杜欣玥，王琪琦，等. 蜂蜜的真实性鉴别方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2022，13(18)：5842-5848.
GAO X B，DU X Y，WANG Q Q，et al. Research progress on the detection technologies of honey authenticity[J]. Journal of Food Safety & Quality，2022，13(18)：5842-5848.(in Chinese)

[4] SIMOVA S，ATANASSOV A，SHISHINIOVA M，et al. A rapid differentiation between oak honeydew honey and nectar and other honeydew honeys by NMR spectroscopy[J]. Food Chemistry，2012，134(3)：1706-1710.

[5] ULLOA P A，GUERRA R，CAVACO A M，et al. Determination of the botanical origin of honey by sensor fusion of impedance e-tongue and optical spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2013，94：1-11.

[6] LIU W，YIN X R，CHEN Y J，et al. Quantitative determination of *Acacia* honey adulteration by terahertz-frequency dielectric properties as an alternative technique[J]. Spectrochimica Acta Part A：Molecular and Biomolecular Spectroscopy，2022，274：121106.

[7] ZULUAGA-DOMÍNGUEZ C M，NIETO-VELOZA A，

QUICAZÁN-DE-CUENCA M. Classification of Colombian honeys by electronic nose and physical-chemical parameters, using neural networks and genetic algorithms[J]. Journal of Apicultural Research, 2018, 57(1): 145-152.

[8] SOUSA M E B C, DIAS L G, VELOSO A C A, et al. Practical procedure for discriminating monofloral honey with a broad pollen profile variability using an electronic tongue[J]. Talanta, 2014, 128: 284-292.

[9] 王永健，钱宁，施滔，等. 联合EA-IRMS和LC-MS/MS技术构建蜂蜜掺假基本鉴定体系[J]. 中国口岸科学技术，2021，3(5)：88-95.
WANG Y J, QIAN N, SHI T, et al. The basic identification system of adulteration of honey by combining EA-IRMS with LC-MS/MS method [J]. China Port Science and Technology, 2021, 3(5): 88-95.(in Chinese)

[10] 刘文. 基于太赫兹时域光谱技术的糖和蜂蜜检测基础及应用研究[D]. 北京：中国农业大学，2018.

[11] PUŚCION-JAKUBIK A, BORAWSKA M H, SOCHA K. Modern methods for assessing the quality of bee honey and botanical origin identification [J]. Foods, 2020, 9(8): 1028.

[12] CHIARA B, FRANCESCO C, FULVIO B, et al. Exploring the botanical composition of polyfloral and monofloral honeys through DNA metabarcoding [J]. Food Control, 2021, 128: 108175.

[13] 许艳超，陈尚卫，朱松，等. 基于HPLC-ELSD和偏最小二乘判别分析法的蜂蜜掺假鉴别[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(5)：147-152.
XU Y C, CHEN S W, ZHU S, et al. Identification of adulterated honey based on HPLC-ELSD and partial least squares-discriminant analysis[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(5): 147-152.(in Chinese)

[14] 黄略略，李辰，李彬，等. 太赫兹波谱用于违法添加工业明胶的检测[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(11)：33-39.
HUANG L L, LI C, LI B, et al. Studies on illegal additive industrial gelatin detection by terahertz spectroscopy[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(11): 33-39.(in Chinese)

[15] 张仲雄，张东莉，田世杰，等. 太赫兹波谱技术在食品掺假检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(5)：1379.
ZHANG Z X, ZHANG D L, TIAN S J, et al. Research progress of terahertz spectroscopy technique in food adulteration detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1379.(in Chinese)

[16] 马皓，黄略略，段续，等. 太赫兹光谱技术在食品工业中的应用[J]. 食品与机械，2025，41(2)：197-205.
MA H, HUANG L L, DUAN X, et al. Applications of terahertz spectroscopy in food industry [J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 197-205.(in Chinese)

[17] LIU W, ZHANG Y Y, LI M, et al. Determination of invert syrup adulterated in *Acacia* honey by terahertz spectroscopy with different spectral features[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 1913-1921.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 蜂蜜中碳-4植物糖含量测定方法 稳定碳同位素比率法：GB/T 18932.1—2002[S]. 北京：中国标准出版社，2003.

[19] 黄学者，王蕾，魏红跃，等. 云南3种特色蜂蜜糖组分的稳定碳同位素比值测定与分析[J]. 核农学报，2020，34(1)：79-88.
HUANG X Z, WANG L, WEI H Y, et al. Determination and analysis of stable carbon isotope ratio of sugar components in three kinds of characteristic honey in Yunnan[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(1): 79-88.

[20] 周治德，李桂银，章军. 蜂蜜粉冷冻干燥工艺参数的研究[J]. 食品工业科技，2010，31(9)：254-255，258.
ZHOU Z D, LI G Y, ZHANG J. Study on technical parameters of the freeze-dried honey powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(9): 254-255, 258.(in Chinese)

[21] 聂美彤，徐德刚，王与烨，等. 基于衰减全反射式太赫兹时域光谱技术的食用油光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(7)：2016.
NIE M T, XU D G, WANG Y Y, et al. Investigation on characteristics of edible oil spectra with terahertz time-domain attenuated total reflection spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2016.(in Chinese)

[22] DONG H, XIAO K J, XIAN Y P, et al. Authenticity determination of honeys with non-extractable proteins by means of elemental analyzer (EA) and liquid chromatography (LC) coupled to isotope ratio mass spectroscopy (IRMS) [J]. Food Chemistry, 2018, 240: 717-724.

[23] XU J Z, LIU X H, WU B, et al. A comprehensive analysis of ^{13}C isotope ratios data of authentic honey types produced in China using the EA-IRMS and LC-IRMS[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1216-1232.

（责任编辑：史润东东）