

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250418007

引用格式: 张小江, 白伟娟, 杨嘉颖, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱法构建即食燕窝挥发性成分指纹图谱[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 57-64.

ZHANG XJ, BAI WJ, YANG JY, *et al.* Construction of volatile components fingerprint spectrum of ready-to-eat bird's nest based on solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 57-64. (in Chinese with English abstract).

基于固相微萃取-气相色谱-质谱法构建即食燕窝 挥发性成分指纹图谱

张小江, 白伟娟, 杨嘉颖, 张晓婷, 郭宝忠, 柳训才*, 范群艳*

(厦门市燕之屋丝浓生物科技有限公司, 燕窝研究院, 厦门 361000)

摘要: 目的 基于固相微萃取-气相色谱-质谱法(solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)构建 A 品牌即食燕窝挥发性物质指纹图谱, 并对不同品牌 and 不同类型的即食燕窝产品进行差异分析。**方法** 以市售即食燕窝为研究对象, 采用 SPME-GC-MS 分析不同储存期共计 37 批次 A 品牌即食燕窝样品的挥发性物质, 通过 NIST 20 数据库和峰面积归一化法对挥发性物质进行分析研究, 并使用“中药色谱指纹图谱相似度评价系统”进行 A 品牌即食燕窝挥发性成分指纹图谱的建立。**结果** 利用 NIST 20 数据库在品牌 A 即食燕窝中共鉴定出 26 种特征挥发性成分, 主要包括 5-羟甲基糠醛、壬醇、月桂醇、四氢熏衣草醇、苯甲醛等化合物, 并建立了该款即食燕窝产品的挥发性物质指纹图谱。评价标准为: 以相匹配 26 个共有峰为基础, 相似度 $\geq 65.8\%$, 可较好地应用于不同市售即食燕窝差异分析。**结论** 通过分析即食燕窝挥发性物质的组成, 建立即食燕窝挥发性成分指纹图谱和相似度评价方法, 可有效区分不同类别的即食燕窝产品, 为即食燕窝的产品鉴别和分类提供了科学依据。

关键词: 即食燕窝; 固相微萃取-气相色谱-质谱法; 挥发性成分; 指纹图谱

Construction of volatile components fingerprint spectrum of ready-to-eat bird's nest based on solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

ZHANG Xiao-Jiang, BAI Wei-Juan, YANG Jia-Ying, ZHANG Xiao-Ting,
GUO Bao-Zhong, LIU Xun-Cai*, FAN Qun-Yan*

(Bird's Nest Research Institute, Xiamen Yan Palace Seelong Biotechnology Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

ABSTRACT: Objective To establish a fingerprint spectrum for the volatile compounds of A brand ready-to-eat bird's nest by solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS), and conduct

收稿日期: 2025-04-18

第一作者: 张小江(1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为食品安全与营养。E-mail: 18959082489@163.com

*通信作者: 柳训才(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品科学。E-mail: 18988700208@163.com

范群艳(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品科学。E-mail: 15860770426@163.com

differential analysis on different brands and types of ready-to-eat bird's nest products. **Methods** Using commercially available ready-to-eat bird's nest as the research object, SPME-GC-MS was used to analyze the volatile substances in 37 batches of A brand ready-to-eat bird's nest samples with different storage periods. The volatile substances were analyzed through the database of NIST 20 and the method of peak area normalization. The "TCM chromatographic fingerprint similarity evaluation system" was used to establish the volatile substances fingerprint spectrum of A brand ready-to-eat bird's nest. **Results** Under the service of NIST 20 database, 26 kinds of characteristic volatile components were identified in brand A's ready-to-eat bird's nest, mainly including unsaturated compounds such as 5-hydroxymethylfurfural, nonanol, lauryl alcohol, tetrahydro lavender alcohol, benzaldehyde, and so on. A fingerprint spectrum of the volatile substances in this ready-to-eat bird's nest product was established. The evaluation criteria were based on a total of 26 matching peaks, the similarity was greater than or equal to 65.8%, which could be well applied to evaluate the quality of different commercially available ready-to-eat bird's nests. **Conclusion** By analyzing the composition of volatile substances in ready-to-eat bird's nest and establishing a fingerprint and similarity evaluation method of volatile components for ready-to-eat bird's nest, it is possible to effectively distinguish different quality levels of ready-to-eat bird's nest, providing a scientific basis for quality control and authenticity identification of ready-to-eat bird's nest.

KEY WORDS: ready-to-eat bird's nest; solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; volatile components; fingerprint spectrum

0 引言

食用燕窝是一种天然食品,为雨燕科(Apodidae)金丝燕及多种同属燕类分泌的唾液与其绒羽混合凝结而筑成的巢窝,其主要产自东南亚地区,具有丰富的营养和药用价值^[1-2]。在中国古代,燕窝被认为是一种高端的滋补食品^[3]。现代研究表明,食用燕窝的主要营养成分包括蛋白质(56.34%~69.5%)、碳水化合物(17.12%~31.68%)、唾液酸(7.64%~12.52%)、多种常量和微量元素、维生素、表皮生长因子等^[4-10],具有诸多生物功效,例如抗氧化、延缓衰老、促进表皮生长、滋阴养肺、保护软骨组织等^[11-16]。随着人们生活水平的提高和生活方式的改变,即食燕窝与人工炖煮比较,一方面可以节省炖煮时间,方便消费者食用,另一方面即食燕窝通过严格的工艺生产,风味品质更优于人工炖煮,使得即食燕窝越来越受到消费者的青睐。目前对即食燕窝的风味研究已有相应的文献报道^[17-18],但通过研究即食燕窝的风味变化来控制产品的生产和评价品质鲜少有相应的文献报道。

随着即食燕窝市场不断扩大,即食燕窝的品类也呈现多种多样。由于燕窝化学组成复杂,对燕窝进行品质检测、营养评价、真假鉴别等方面分析往往需要复杂的前处理过程,同时需要对多个指标进行测定后评价^[19-21],该方式耗时耗力,而且常常涉及到有害试剂与试剂浪费的问题,增加成本。随着指纹图谱分析技术和现代仪器分析技术的快速发展,风味指纹图谱已经被广泛应用于水果的香气成分、肉类风味、酒类挥发性物质及香精香

料风味组分的鉴定^[22-24]。在现代仪器分析技术中,气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是较为常用的方法之一,与固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)联用具有操作时间短、样品量少、无需萃取溶剂、重现性好等优点^[25],适用于食品中易挥发性成分的检测,应用范围包括食品种类、产地溯源及食品质量评价等^[26-27]。基于此,结合 SPME-GC-MS 可全面准确分析即食燕窝风味组成,并根据分析结果筛选对即食燕窝风味起决定作用的特征成分,建立其指纹图谱中的特征指纹信息,构建即食燕窝挥发性成分指纹图谱,可为即食燕窝产品的开发和差异分析提供坚实的理论依据。

挥发性指纹图谱基于食品的固有品质特性,通过解析食品中挥发性成分的组成与变化,能够间接反映关键营养物质的含量、加工稳定性及功能活性^[28]。本研究以 A 品牌碗装燕窝为主要研究对象,通过 SPME-GC-MS 对不同批次即食燕窝产品的挥发性物质进行检测分析,利用 NIST 20 质谱库进行定性分析,结合“中药色谱指纹图谱相似度评价系统”建立即食燕窝挥发性成分指纹图谱相似度评价方法,以期提供高效、直观的分析手段应用于快速检测、工艺优化和产品溯源。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

品牌 A (37 批不同货架期碗装即食燕窝)(厦门市燕之屋丝浓生物科技有限公司); 品牌 B、C(市售碗装即食

燕窝样品); 品牌 D、E、F、G、H、I(市售瓶装即食燕窝样品)。

1.2 仪器与设备

GC/MS-TQ8040 气相色谱-质谱联用仪(日本岛津公司); 57347-U 固相微萃取手动进样手柄、75 μm CAR/PDMS 固相微萃取柱(美国 Supelco 公司); SHJ-4 数显恒温磁力水浴锅(常州金坛宏华仪器厂); T18DS25 均质器(德国 IKA 公司); JSC-THB-600 电子天平(精度 0.01 g, 台衡精密测控股份有限公司); DB-wax 石英毛细管柱(30 m \times 0.32 mm, 1.2 μm)(美国 Agilent 公司)。

1.3 实验方法

参照本实验室前期建立的即食燕窝中挥发性成分测定方法^[17-18], 并作适当调整, 具体实验条件如下。

1.3.1 样品前处理

样品开启后于均质机中迅速完成均质, 称取均质后的 40.0 g 样品于 250 mL 的 SPME 瓶中, 迅速盖上瓶盖, 将样品瓶放入到 60 $^{\circ}\text{C}$ 磁力搅拌恒温水浴锅中, 恒温平衡 5 min, 将预先于 230 $^{\circ}\text{C}$ 老化 5 min 的 SPME 萃取头(75 μm CAR/PDMS)插入样品瓶中, 推出纤维头, 顶空平衡吸附 30 min。吸附后, 立即收回纤维头, 将 SPME 移至 GC 中, 在 230 $^{\circ}\text{C}$ 条件下解析 5 min。

1.3.2 气相色谱条件

色谱柱: DB-wax 石英毛细管柱(30 m \times 0.32 mm, 1.2 μm); 进样口温度: 230 $^{\circ}\text{C}$; 柱升温程序: 初温 60 $^{\circ}\text{C}$ 保持 0.5 min, 以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温到 200 $^{\circ}\text{C}$, 保持 10 min, 再以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温到 230 $^{\circ}\text{C}$, 保持 6 min; 载气: 高纯氮气(99.999%); 柱流量: 1.61 mL/min; 不分流模式。

1.3.3 质谱条件

电子轰击源(electron impact, EI); 离子源温度: 230 $^{\circ}\text{C}$; 接口温度: 230 $^{\circ}\text{C}$; 溶剂延时: 2.5 min; 扫描方式: Q3 SCAN; 质量扫描范围 m/z 20~500。

1.4 即食燕窝挥发性成分指纹图谱的建立

在岛津 GC/MS Solution 工作站中导出经 NIST 20 数据库定性后的 GC-MS 数据文件, 运用 Excel 2019 软件进行指纹图谱数据处理转换为“中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 版)”格式文件, 将转换格式后的数据文件导入“中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 版)”进行分析, 以 S1 号样品的色谱图作为参照图谱, 时间窗宽度设定 0.1, 运用多点校正法手工标注进行 Mark 峰匹配, 以平均数法生成指纹图谱。

1.5 数据处理

每个样品进行 3 次独立平行实验, 结果以平均值作为指纹图谱建立所需数据, 通过《中药色谱指纹图谱相似度评价软件》对 37 批 A 品牌即食燕窝挥发性成分确认共有峰、建立对照图谱并进行相似度评价, 采用 Microsoft office

excel 2019 建立相似度分布图, 以及采用 SPSS 23 软件对 37 批 A 品牌即食燕窝挥发性成分进行聚类分析;

2 结果与分析

2.1 A 品牌即食燕窝特征挥发性成分的测定

为了保证所抽取的样品具有代表性, 随机抽取不同货架期的正常即食燕窝产品, 按照 1.3 的方法进行燕窝样品的处理, 测定 37 批即食燕窝中的挥发性成分, 同时作样品空白。测定结果扣除样品空白后, 对色谱峰逐一以 NIST 20 与 NIST 20s 质谱数据库进行检索分析, 结果见表 1。

表 1 A 品牌即食燕窝指纹图谱特征峰
Table 1 Fingerprint spectrum feature peaks in A brand ready-to-eat bird's nest

序号	保留时间/min	CAS 号	化合物	匹配度/%
1	4.65	543-49-7	2-庚醇	82
2	4.78	5582-82-1	3-甲基-3-庚醇	88
3	5.20	19549-74-7	3,5-二甲基-3-庚醇	89
4	5.32	1573-28-0	3,6-二甲基-3-庚醇	89
5	5.98	124-19-6	壬醛	83
6	6.15	78-69-3	四氢芳樟醇	82
7	6.22	23418-38-4	4-甲基-4-壬醇	92
8	7.19	104-76-7	2-乙基己醇	90
9	7.31	112-31-2	癸醛	83
10	7.49	1504-16-1	3-苯基-1H-咪唑	80
11	7.64	100-52-7	苯甲醛	96
12	8.01	111-87-5	辛醇	82
13	8.70	112-30-1	癸醇	82
14	9.04	1066-42-8	二甲硅烷二醇	87
15	9.15	143-08-8	壬醇	86
16	9.22	2051-33-4	四氢熏衣草醇	85
17	9.93	112-54-9	十二醛(月桂醛)	94
18	10.28	4389-50-8	2-氨基-6-甲基苯甲酸	87
19	11.64	6846-50-0	十六醇酯	88
20	12.57	112-53-8	十二醇(月桂醇)	83
21	12.94	110-15-6	琥珀酸(丁二酸)	90
22	16.09	96-76-4	2,4-二叔丁基苯酚	84
23	19.14	67-47-0	5-羟甲基糠醛	83
24	20.02	84-69-5	乙烯二乙酯	86
25	20.53	1654-86-0	正癸酸正癸酯	83
26	26.39	1020-31-1	3,5-二叔丁基邻苯二酚	85

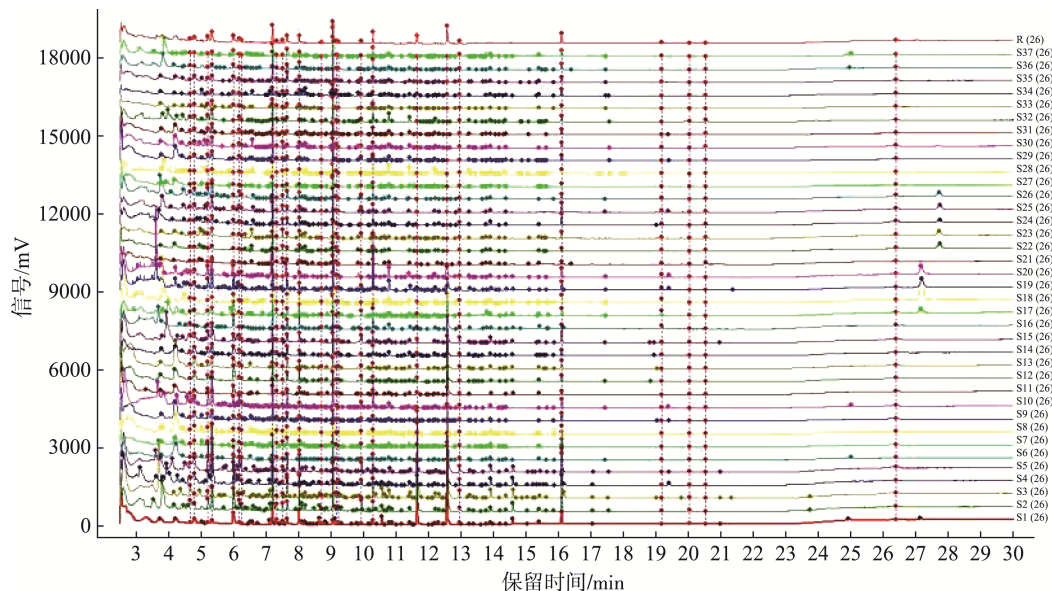
由特征挥发性成分可知, A 品牌即食燕窝挥发性物质的组成主要为醇类、醛类物质, 亦含少量酚类、酸类等物质。为了验证特征挥发性成分与燕窝风味差异的贡献程度, 采用样品量梯度实验进行考察, 即在样品前处理过程中,

样品取样量分别为 10、20、30 和 40 g, 分析不同样品量对特征挥发性成分的影响。结果发现, 随着取样量的增加, 26 种特征挥发性成分存在不同程度的增长。其中, 以 5-羟甲基糠醛、壬醇、月桂醇、四氢熏衣草醇、苯甲醛 5 种挥发性成分增长最为明显, 此类物质具有花香、泥土、蜂蜜等气味, 这可能源于金丝燕的生长环境和广泛的食谱。另一方面, 燕窝中富含蛋白质和碳水化合物, 在热处理过程中, 燕窝中部分氨基化合物与还原糖发生美拉德反应^[29], 生成 5-羟甲基糠醛等代表性产物, 具有烘焙、杏仁风味, 常常作为风味评价指标^[30-31]。综上, 燕窝中挥发性成分较为复杂, 单一的挥发性成分并不能很好地体现燕窝的风味差异, 26

种特征挥发性成分均对燕窝风味有着不同程度的贡献。因此, 此次研究以 26 种作为 A 品牌即食燕窝挥发性成分指纹图谱构建的基础。

2.2 A 品牌即食燕窝挥发性成分 GC-MS 指纹图谱的构建

利用“中药色谱指纹图谱相似度评价系统”建立了 37 批 A 品牌即食燕窝挥发性成分色谱峰的共有模式, 结果见图 1。以 S1 号样品的色谱图作为参照图谱, 运用多点校正法手工标注 26 个共有峰进行 Mark 峰匹配, 以平均数法生成对照图谱, 见图 2。统计相似度评价结果, 见表 2。



注: R 为 A 品牌 37 批样品合成对照色谱图; S1~S37 为编号 A1~A37 样品色谱图; 26 表示为 26 个共有特征峰。

图 1 A 品牌即食燕窝 GC-MS 叠加图谱

Fig.1 GC-MS superimposed map of A brand ready-to-eat bird's nest

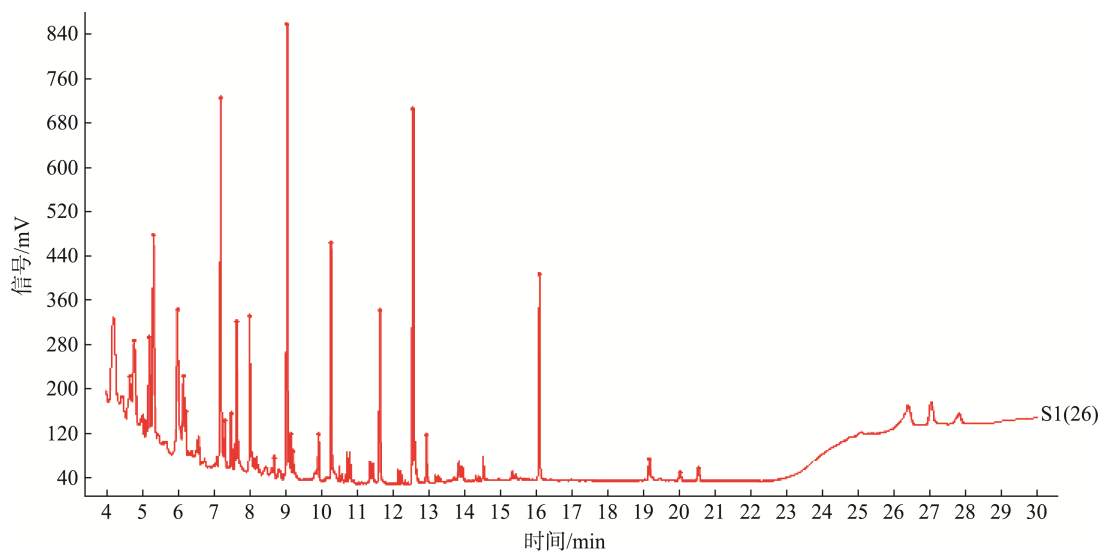


图 2 A 品牌即食燕窝样品对照图谱(平均数法)

Fig.2 Comparison map of A brand ready-to-eat bird's nest (method of averaging)

表 2 A 品牌即食燕窝的相似度评价结果

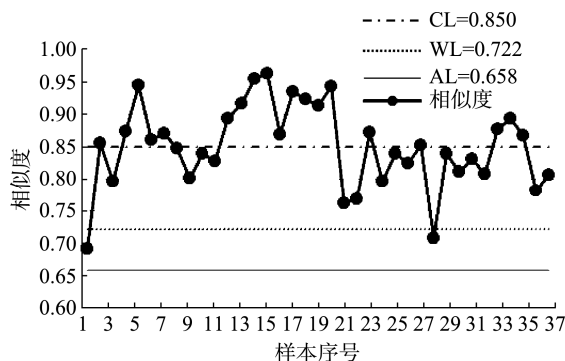
Table 2 Results of similarity evaluation in A brand ready-to-eat bird's nest

样品序号	样品编号	相似度	样品序号	样品编号	相似度
1	A1	0.692	20	A20	0.943
2	A2	0.855	21	A21	0.762
3	A3	0.797	22	A22	0.769
4	A4	0.874	23	A23	0.873
5	A5	0.945	24	A24	0.797
6	A6	0.861	25	A25	0.840
7	A7	0.870	26	A26	0.824
8	A8	0.848	27	A27	0.853
9	A9	0.801	28	A28	0.708
10	A10	0.840	29	A29	0.839
11	A11	0.828	30	A30	0.811
12	A12	0.893	31	A31	0.831
13	A13	0.917	32	A32	0.809
14	A14	0.955	33	A33	0.877
15	A15	0.962	34	A34	0.893
16	A16	0.869	35	A35	0.868
17	A17	0.934	36	A36	0.782
18	A18	0.923	37	A37	0.807
19	A19	0.913			

指纹图谱能够反映出一类产品的整体性^[32], 有利于对燕窝差异作出客观的评价。由表 2 可知, 37 批即食燕窝指纹图谱与标准指纹图谱的相似度范围为 0.692~0.962, 结果并不满足指纹图谱的基本要求, 主要由于即食燕窝产品中挥发性特征成分含量与燕窝产地、燕窝种类、加工工艺、配料添加等因素有关, 仅依据相似度并不能很好地区分不同燕窝产品的差异。

为了建立适用于即食燕窝的指纹图谱, 基于即食燕窝特征挥发性成分, 根据 CNAS-GL027 2018《化学分析实验室内部质量控制指南》中对警戒限(warning limit, WL)和行动限(action limit, AL)的规定, 建立即食燕窝相似度评价质量控制图, 结果见图 3。其中, 控制图的 CL 代表控制值的平均值, 控制图的警戒限为平均值(CL=0.850)的二倍标

准偏差(2S)距离处, 行动限为平均值的 3 倍标准偏差(3S)距离处。在服从正态分布的情况下, 数据落在警戒限(WL=0.722)之内的概率为 95%, 落在行动限(AL=0.658)之内的概率为 99.7%。综上, 确定即食燕窝指纹图谱质量控制标准为: 以共有峰匹配数量为 26 个为基础, A 品牌即食燕窝指纹图谱相似度 $\geq 65.8\%$ 。



注: 中心线(central line, CL)。

图 3 A 品牌即食燕窝样品相似度分布图

Fig.3 Similarity distribution chart of A brand ready-to-eat bird's nest

2.3 不同款即食燕窝差异分析

为了验证本研究所建立的即食燕窝指纹图谱的适用性, 选择 2 款市售碗装燕窝和 6 款市售瓶装燕窝作为考察对象, 分别进行相似度分析及聚类分析。

2.3.1 即食燕窝相似度分析

以本研究建立的 A 品牌即食燕窝产品的指纹图谱为标准指纹图谱, 分别比较市售的即食燕窝与标准指纹图谱共有峰匹配数量与相似度计算结果, 结果见表 3。在相似度评价中, 除 B 品牌(72.1%)与 C 品牌(74.6%)相似度超过指纹图谱控制线, 其余均不满足最低限。虽然碗装燕窝在峰的匹配与相似度计算更加接近标准指纹图谱, 但所有款式燕窝的共有峰匹配数量在 11~22 个, 均少于标准指纹图谱共有峰数量的 26 个, 依旧存在显著性差异。综上所述, 即食燕窝标准图谱的建立不仅要考虑相似度, 还需要关注特征共有成分的种类, 两者结合可应用于即食燕窝差异分析。

表 3 不同品牌市售即食燕窝与 A 品牌即食燕窝指纹图谱共有峰匹配结果

Table 3 Matching results of shared peaks in fingerprint spectrum of ready-to-eat bird's nest from different brands and A brand ready-to-eat bird's nest on the market

序号	CAS 号	化合物名称	B	C	D	E	F	G	H	I
1	543-49-7	2-庚醇	*	*						
2	5582-82-1	3-甲基-3-庚醇	*	*			*	*		
3	19549-74-7	3,5-二甲基-3-庚醇	*	*						
4	1573-28-0	3,6-二甲基-3-庚醇	*	*						
5	124-19-6	壬醛	*	*	*	*	*		*	*

表 3(续)

序号	CAS 号	化合物名称	B	C	D	E	F	G	H	I
6	78-69-3	四氢芳樟醇								
7	23418-38-4	4-甲基-4-壬醇	*	*			*	*		
8	104-76-7	2-乙基己醇			*		*	*	*	*
9	112-31-2	癸醛								
10	1504-16-1	3-苯基-1H-吡啶			*	*	*		*	*
11	100-52-7	苯甲醛	*	*		*		*		
12	111-87-5	辛醇			*	*			*	*
13	112-30-1	癸醇	*	*	*	*	*	*	*	*
14	1066-42-8	二甲基硅烷二醇	*	*	*	*	*	*	*	*
15	143-08-8	壬醇	*	*	*	*	*	*	*	*
16	2051-33-4	四氢熏衣草醇	*	*	*				*	
17	112-54-9	十二醛(月桂醛)	*	*	*	*	*		*	*
18	4389-50-8	2-氨基-6-甲基苯甲酸	*	*	*	*	*	*	*	*
19	6846-50-0	十六碳醇酯	*	*	*	*	*	*	*	*
20	112-53-8	十二醇(月桂醇)	*	*	*	*	*	*		*
21	110-15-6	琥珀酸(丁二酸)	*		*	*			*	
22	96-76-4	2,4-二叔丁基苯酚	*	*		*			*	*
23	67-47-0	5-羟甲基糠醛	*	*					*	
24	84-69-5	乙烯二乙酯	*	*				*		
25	1654-86-0	正癸酸正癸酯	*	*	*	*	*		*	
26	1020-31-1	3,5-二叔丁基邻苯二酚	*	*						
特征挥发性成分数量/个			22	22	14	14	13	11	15	11
相似度计算/%			72.1	74.6	52.8	54.6	43.1	44.1	55.4	46.2

注: *为共有峰。

2.3.2 即食燕窝聚类分析

以 A 品牌即食燕窝的 26 种特征挥发性成分为变量, 在 SPSS 23 系统软件分别输入 9 款即食燕窝相应峰面积 ($n=3$), 采取组间平均数联结法计算方法以及使用平方欧式距离法计算样品之间的实际距离, 对即食燕窝聚类展开系统的分析, 如图 4 所示。

按照分类距离可以看出, 当欧式平方距离为 25 时, 9 款即食燕窝聚成即食燕窝一个大类; 当欧式平方距离为 15 时, 将即食燕窝产品分类成“碗装燕窝”与“瓶装燕窝”; 进一步的, 当欧式平方距离为 5 时, 又将 A 品牌即食燕窝分离出来, 剩余两类包括“碗装燕窝 B、C”与“瓶装燕窝 D、E、F、G、H、I”。结果表明, 对于市售的即食燕窝产品存在不同差异, 可通过特征挥发性成分进行分类, 与相似度评价结果一致。

结合感官评价分析, 市售的即食燕窝产品通常为冰糖型即食燕窝, 即产品配方仅为冰糖、水及燕窝, 通过调整不同加工工艺得到的产品, 在工艺调整上差异并不显著。例如相似度接近的 B 品牌(72.1%)与 C 品牌(74.6%)即

食燕窝产品, 外观形态及口感差异并不显著, 仅通过感官很难进行差异区分。因此, 相似度分析与聚类分析反映了挥发性成分与产品风味差异的相关性, 验证了即食燕窝挥发性成分构建指纹图谱的可靠性。

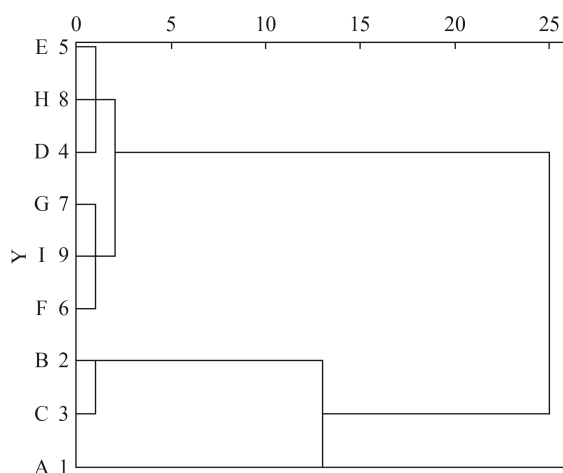


图 4 即食燕窝聚类分析树状图

Fig.4 Cluster analysis tree diagram of ready-to-eat bird's nest

3 结 论

本研究以 A 品牌即食燕窝为研究对象, 通过 SPME-GC-MS 对 37 批次 A 品牌即食燕窝挥发性物质进行检测分析, 确定了 26 种特征挥发性成分, 主要包括 5-羟甲基糠醛、壬醇、月桂醇、四氢熏衣草醇、苯甲醛等化合物, 并根据 CNAS-GL027 2018 建立了 A 品牌即食燕窝挥发性成分指纹图谱和相似度评价标准方法, 评价标准为: 以共有峰匹配数量为 26 个为基础, A 品牌即食燕窝指纹图谱相似度 $\geq 65.8\%$ 。本研究合理结合化学分析质量控制方法与指纹图谱的应用, 较好地对不同即食燕窝差异评价, 实现快速检测和差异分析。同时, 研究进一步通过聚类分析将即食燕窝分类成碗装燕窝与瓶装燕窝类别, 与相似度评价结果一致, 验证了即食燕窝挥发性成分构建指纹图谱的可靠性。在未来研究中, 可通过长期持续累积研究数据, 建立统一规范的燕窝指纹图谱数据库, 为今后即食燕窝的质量评价和真伪鉴别提供参考和指导。

参考文献

- [1] 樊耀华, 范群艳, 李宗晖, 等. 燕窝功效考[J]. 广东药科大学学报, 2020, 36(4): 590–593.
FAN YH, FAN QY LI ZH, *et al.* A Study on efficacy of bird's nest in traditional Chinese medicine [J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2020, 36(4): 590–593.
- [2] 蔡翔宇, 马燕娟, 吴玉杰. 马来西亚与印度尼西亚产燕窝中唾液酸含量的差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(9): 3487–3491.
CAI XY, MA YJ, WU YJ. Variance analysis of sialic acid content in Malaysia and Indonesia bird's nest production [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(9): 3487–3491.
- [3] 范群艳. 基于脑肠轴的燕窝对断乳后仔鼠智力影响的分子机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
FAN QY. Molecular mechanism of edible bird's nest affecting the intelligence of weanling rats based on the brain-gutaxis [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.
- [4] TING LH, CHIA LH, NURUL AA, *et al.* Characterization of polar and non-polar compounds of house edible bird's nest (EBN) from Johor, Malaysia [J]. Chemistry & Biodiversity, 2020, 17(1): 190–419.
- [5] MARCONE FM. Characterization of the edible bird's nest the "caviar of the east" [J]. Food Research International, 2005, 38(10): 1125–1134.
- [6] 白伟娟, 张小江, 张晓婷, 等. 燕窝加工及其营养成分分析概述[J]. 食品工业, 2022, 43(6): 342–346.
BAI WJ, ZHANG XJ, ZHANG XT, *et al.* Summary of edible bird's nest processing and its nutrient composition analysis [J]. The Food Industry, 2022, 43(6): 342–346.
- [7] BAI WJ, DENG FH, ZHANG XJ, *et al.* The determination of epidermal growth factor in edible bird's nest by enzyme-linked immunosorbent assay [J]. Applied Biological Chemistry, 2023, 66(1): 36.
- [8] 宋咏焯, 林咏惟, 张娜. 不同类型燕窝营养成分检测现状及成分分析[J]. 中国食物与营养, 2024, 30(2): 42–51.
SONG YY, LIN YW, ZHANG N. Detection status and composition difference of nutritional components in different types of edible bird's nests [J]. Food and Nutrition in China, 2024, 30(2): 42–51.
- [9] ZHANG XJ, LIANG RF, BAI WJ, *et al.* Determination of 3'-sialyllactose in edible bird's nests and the effect of stewing conditions on the 3'-sialyllactose content of edible bird's nest products [J]. Molecules, 2023, 28(4): 1703.
- [10] ZHANG XJ, DENG FH, BAI WJ, *et al.* Determination of glutathione in ready-to-eat edible bird's nest using a novel LC-MS method [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106082.
- [11] 简叶叶. 燕窝的营养功效与真伪鉴别研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2016, 12(2): 136–144.
JIAN YY. Advances in nutrition, functions and authenticity identification of cubilose [J]. Subtropical Agriculture Research, 2016, 12(2): 136–144.
- [12] 白伟娟, 柳训才, 张晓婷, 等. 燕窝成分及功效研究进展[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 96–100.
BAI WJ, LIU XC, ZHANG XT, *et al.* Research progress on edible bird's nest composition and functional [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(5): 96–100.
- [13] 黄知几. 燕窝对断乳后仔鼠智力水平及母鼠免疫功能的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
HUANG ZJ. The study of the changes of the intelligence of newborn mice and the immunity of female mice after lactation resulted from edible bird's nest [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [14] 简叶叶. 燕窝对肺阴虚小鼠免疫功能影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
JIAN YY. Effect of edible bird's nest on immune function of pneumonia mice [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [15] DAI Y, CAO J, WANG Y, *et al.* A comprehensive review of edible bird's nest [J]. Food Research International, 2021, 140: 109875.
- [16] CHOY KW, ZAIN ZM, MURUGAN DD, *et al.* Effect of hydrolyzed bird's nest on β -cell function and insulin signaling in type 2 diabetic mice [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 632169.
- [17] 柳训才, 张小江, 张晓婷, 等. 固相微萃取/气相色谱-质谱联用技术测定燕窝中挥发性成分[J]. 分析测试学报, 2020, 39(2): 205–211.
LIU XC, ZHANG XJ, ZHANG XT, *et al.* Detection of volatile compounds in edible bird's nest by using solid phase micro-extraction/gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(2): 205–211.
- [18] 张小江, 白伟娟, 黄玉容, 等. 即食燕窝中香气成分测定及评价[J]. 食品工业, 2022, 43(10): 265–270.
ZHANG XJ, BAI WJ, HUANG YR, *et al.* Determination and evaluation of aroma components in edible bird's nest [J]. Food Industry, 2022, 43(10): 265–270.
- [19] 阙茂垚, 张晓婷, 柳训才, 等. 燕窝营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品安全导刊, 2021(32): 92–95.
QUE MY, ZHANG XT, LIU XC, *et al.* Nutrient composition analysis and comprehensive quality evaluation of bird's nest [J]. Food Safety Guide, 2021(32): 92–95.
- [20] 赵婷, 闫雅婷, 徐菲菲, 等. 热处理温度对鲜炖燕窝制品安全性及食用品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(12): 24–31.
ZHAO T, LV YT, XU FF, *et al.* Effect of heat treatment temperature on safety and edible quality of fresh stewed bird's nest product [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(12): 24–31.
- [21] 钱楠, 张琳婧, 李秋实, 等. 原料蒸制预处理对即食燕窝品质的影响研

- 究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(20): 81–90.
- QIAN N, ZHANG LJ, LI QS, *et al.* Study on effect of steaming pre-treatment on quality of ready-to-eat edible bird's nest [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(20): 81–90.
- [22] 马赫迪, 薛康, 胡江涛, 等. 3 个年份浓香型白酒挥发性成分分析及指纹图谱的建立[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 420–433.
- MA HD, XUE K, HU JT, *et al.* Analysis of volatile compounds of strong-aroma liquors of three vintages and establishment of their fingerprints based on biomarkers [J]. Chinese Journal of Food Science, 2024, 24(9): 420–433.
- [23] 林园, 张小江, 柳训才, 等. 不同贮藏时间即食燕窝特征风味成分分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(4): 398–410.
- LIN Y, ZHANG XJ, LIU XC, *et al.* Analysis of characteristic flavor components of instant bird's nests at different storage time [J]. Chinese Journal of Food Science, 2024, 24(4): 398–410.
- [24] 韩亚平, 苟永桢, 李芬, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法不同地区驴乳粉挥发性风味物质指纹图谱分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 155–162.
- HAN YP, GOU YZ, LI F, *et al.* Fingerprint analysis of volatile flavor compounds in donkey milk powder from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 155–162.
- [25] 张宇航, 谷梦雅, 徐梦婷, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱对笔尖单瓣茉莉花不同开放阶段香气成分差异分析[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 94–103.
- ZHANG YH, GU MY, XU MT, *et al.* Headspace solid-phase microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry for analysis of differences in aroma composition of *Jasminum sambac* 'Bijian Danban Moli' flowers at different opening stages [J]. Food Science, 2024, 45(19): 94–103.
- [26] ZHANG CY, ZHANG Q, ZHONG CH, *et al.* Volatile fingerprints and biomarkers of three representative kiwifruit cultivars obtained by headspace solid-phase microextraction gas chromatography mass spectrometry and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 211–215.
- [27] 吕海鹏, 杨婷, 朱荫, 等. 西湖龙井茶 HS-SPME/GC-MS 香气指纹图谱研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(11): 1–10.
- LV HP, YANG T, ZHU Y, *et al.* Analysis of aroma fingerprint of Xihu Longjing tea Using HS-SPME/GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(11): 1–10.
- [28] 刘静, 亓超凡, 绪扩, 等. 指纹图谱技术在食品质量与安全中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3189–3197.
- LIU J, QI CF, XU K, *et al.* Research progress on the application of fingerprint technology in the field of food quality and safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(10): 3189–3197.
- [29] 瓮亚楠, 马晓蕊, 陈涛, 等. 基于气相色谱质谱和气相离子迁移色谱对谷氨酸-葡萄糖美拉德反应体系中挥发性风味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 320–330.
- WENG YN, MA XR, CHEN T, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in glutamic acid-glucose Maillard reaction system based on gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 320–330.
- [30] 任佳森, 赵亚周, 田文礼, 等. 不同蜜源蜂蜜的挥发性成分分析[J]. 中国食品学报, 2016, 16(3): 225–236.
- REN JM, ZHAO YZ, TIAN WL, *et al.* Analysis of volatile components in honeys from different nectar sources [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(3): 225–236.
- [31] 曹旭珍, 周志磊, 欧霞, 等. 西藏林芝蜂蜜与其他地区蜂蜜挥发性成分比较分析[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(12): 177–182.
- CAO XZ, ZHOU ZL, OU X, *et al.* Comparative analysis of volatile components between Nyingchi honey from Xizang and honey from other regions [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(12): 177–182.
- [32] 何亚芬, 余红, 张继红, 等. 基于气相色谱法的奇亚籽油脂肪酸指纹图谱构建及其掺伪鉴别[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(10): 251–260.
- HE YF, YU H, ZHANG JH, *et al.* Construction of fatty acid fingerprint of *Salvia hispanica* L. oil based on gas chromatography and adulteration identification [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(10): 251–260.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)