DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260302001
引用格式: 张小江. 气相色谱-质谱法构建燕窝单糖指纹图谱及其掺伪鉴别[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 84–93.
Zhang Xiaojiang. Construction of monosaccharides fingerprint and adulteration identification of edible bird's nest by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 84–93. (in Chinese with English abstract).

气相色谱-质谱法构建燕窝单糖指纹图谱及其掺伪鉴别

张小江*

(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 基于气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)构建食用燕窝单糖标准指纹图谱, 并对食用燕窝进行掺伪鉴别。**方法** 以食用燕窝为研究对象, 采集 34 批次不同供应商的食用燕窝作为样本, 对其单糖进行 GC-MS 分析, 通过“中药色谱指纹图谱相似度评价系统”建立食用燕窝单糖标准指纹图谱, 并以掺伪量分别为 1%、5%、10%、20%、30%、40%、50%的银耳多糖、黄明胶、果胶、结冷胶、卡拉胶和琼脂建立相应掺伪模型。**结果** 食用燕窝中含有岩藻糖、甘露糖、半乳糖、乙酰氨基葡萄糖和乙酰氨基半乳糖 5 种单糖成分, 平均相对质量比为 1:1.5:8.4:6.6:4.1, 总糖含量在 18.75~23.92 g/100 g, 通过相似度评价 34 批次食用燕窝的相似度均大于 99.5%, 符合指纹图谱相似度评价要求。以相似度为 99.8%作为食用燕窝鉴别标准, 在掺伪量在 1%~50%时, 利用指纹图谱掺伪模型, 可有效预测掺伪量, 实现掺伪鉴别。**结论** 本研究通过分析食用燕窝单糖组成并建立 GC-MS 单糖标准指纹图谱及掺伪模型, 可有效对常见掺伪物进行鉴别和掺伪量预测, 为市场监管提供了一定的数据及技术支撑。

关键词: 食用燕窝; 气相色谱-质谱法; 单糖组成; 指纹图谱; 掺伪鉴别
中图分类号: TS201.6 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0084–10

Construction of monosaccharides fingerprint and adulteration identification of edible bird's nest by gas chromatography-mass spectrometry

ZHANG Xiao-Jiang*

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

ABSTRACT: Objective To construct a standard fingerprint of monosaccharides in edible bird's nest by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and identify the adulteration of edible bird's nest. **Methods** Taking edible bird's nest as the research object, 34 batches of monosaccharides in edible bird's nest from different suppliers were analyzed by GC-MS. And a standard fingerprint of monosaccharides in edible bird's nest was established using the “similarity evaluation system of traditional Chinese medicine chromatographic fingerprint”. The fingerprint was used to

收稿日期: 2026-03-02
***通信作者/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

identify adulteration models of tremella fuciformis polysaccharide, yellow gelatin, pectin, gellan gum, carrageenan and agar with adulteration amounts of 1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%, respectively. **Results** Edible bird's nest contains 5 kinds of monosaccharide components: fucose, mannose, galactose, acetylglucosamine and acetylgalactosamine, with an average relative mass ratio of 1:1.5:8.4:6.6:4.1, and the total sugar content ranging from 18.75 g/100 g to 23.92 g/100 g, through similarity evaluation, the similarity of 34 batches of edible bird's nests was more than 99.5%, meeting the requirements of fingerprint similarity evaluation. Taking a similarity of 99.8% as the identification standard for edible bird's nests, when the adulteration level ranges from 1% to 50%, the fingerprint adulteration model could effectively predict the adulteration level and achieve adulteration identification. **Conclusion** This study analyzes the monosaccharide composition of edible bird's nest and established a GC-MS-based standard monosaccharide fingerprint and adulteration model. This approach enables effective identification of common adulterants and quantification of adulteration ratios, offering data and technical support for market supervision.

KEY WORDS: edible bird's nest; gas chromatography-mass spectrometry; monosaccharide composition; fingerprint; adulteration identification

0　引　言

食用燕窝是雨燕科(Apodidae)中的特定种属金丝燕在繁育期产生的唾液腺分泌物制成的巢穴, 是一种药食同源的天然产物[1–2]。在膳食方面, 常见于饮品、甜品、创意料理等日常佳肴中, 兼顾美味与养生。在食疗药膳方面, 具有益气补中、滋阴润肺、化痰止咳[3]等中医理念。现代医学研究, 食用燕窝还具备抗氧化衰老[4]、增强免疫力[5]、促进表皮生长、改善皮肤质量[6–7]、保护软骨组织[8]、改善糖脂代谢[9]等功能性。食用燕窝的主要生物活性成分包括燕窝酸、表皮生长因子[10]、唾液酸乳糖[11]、谷胱甘肽[12]、燕窝多肽[13]、燕窝糖蛋白[14–15]等, 主要营养成分包括蛋白质(56.34%~69.5%)和碳水化合物(17.12%~31.68%)[16], 其中, 燕窝多糖作为碳水化合物的主要组分, 含量仅次于蛋白质含量, 其单糖组成[17]包括岩藻糖(*L*-fucose, Fuc)、甘露糖(*D*-mannose, Man)、半乳糖(*D*-galactose, Gal)、乙酰氨基半乳糖(N-acetyl-*D*-galactosamine, GalNAc)、乙酰氨基葡萄糖(N-acetyl-*D*-glucosamine, GlcNAc)。有研究表明[14], 燕窝多糖以糖蛋白的形式存在于燕窝中, 其核心功效与单糖组成及空间构型密切相关, 尤以 Fuc 和乙酰氨基糖类对免疫调节与细胞识别具有特异性作用。宋咏烨等[16]通过分析燕窝营养检测现状及营养成分发现, 不同燕窝中的单糖种类相同且相对含量较为一致, 未呈现产地、种类差异。基于指纹图谱评价原则, 通过成分分析、含量比例差异及数据拟合处理方式, 可以对燕窝中单糖种类鉴定的相关数据信息进行统计分析, 提升燕窝在掺伪鉴别方面的准确性与科学性。

食用燕窝作为一种高端的滋补食品, 颜色越白、杂质越少, 越受消费者喜爱。因此, 不少商家为了提高产品重量、风味、口感或卖相来牟取高额利润, 使用化学品对燕窝进行漂白、增白、染色, 或使用食品添加剂对燕窝进行补形、增重、贴碎[18]。燕窝常见掺假物分为 3 类: 第 1 类为固体形式添加, 包括鱼鳔、猪皮、卡拉胶、珊瑚粉、琼脂和银耳[19]等; 第 2 类是水溶性物质, 如糖类(多糖提取物、蔗糖)、多肽(水解胶原蛋白)和盐, 在干燥时很容易被燕窝内部吸附形成复合物难以目视检测[20–21]; 第 3 类则是将低价燕碎用食用胶黏合在燕盏缝隙中, 增加密实度和重量[22], 降低成本 10%~30%。此类情况不断扰乱市场, 影响消费者对于燕窝价值的客观评价。通过对市面产品进行收集分析, 一些伪劣产品通常来源于小作坊或是未经正规渠道获得的低劣产品, 主要追求低投入高回报的掺假方式, 主要以刷胶(卡拉胶、果胶、结冷胶等)和形态造假(银耳多糖、海藻酸钠、猪皮胶原等)两种方式, 很难通过外观和气味快速鉴别。近年来, 为了推进燕窝行业的健康发展, 不少品牌企业联合出台多个行业标准, 包括《燕窝制品》《燕窝质量等级》《基于追溯码和定位技术的进口食品溯源指南第六部分 燕窝产品》等, 但在掺假物种类及含量并未作出相应规定[23]。因此, 燕窝真伪鉴别检测方法不断被学者所研究, 现有真伪鉴别方法包括分子生物方法[24–25]、酶联免疫吸附法[26–27]、光谱法[28–29]、色谱法[30]、凝胶电泳法[31]等。其中, 分子生物学技术操作烦琐, 酶联免疫法受到掺假物种类的限制, 光谱法灵敏度低。目前, 色谱法在现代仪器分析技术中最为常用, 通过对燕窝唾液酸、特征肽段[32–33]、寡糖标记等方式进行定性定量分析, 实现对燕窝及掺假物进行判别, 但同样存在操作烦琐, 技术手段要求较高等问题。为了建立一种简便、无需复杂数据分析的掺伪鉴别方法, 本研究基于食用燕窝特征糖谱, 运用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对燕窝中单糖组成进行测定, 无需对样品中单糖含量进行准确定量和采集数据的专业分析, 仅通过采集不同样品的总离子流色谱图, 将谱图转换成指纹图谱识别数据, 快速形成相似度评价。同时结合相似度分析, 实现燕窝中掺伪物的鉴别及含量测定, 有效为燕窝行业质量监控提供技术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

食用燕窝: 市售 34 批不同商家食用燕窝, 产地来源均为印度尼西亚(表 1)。

三氯甲烷(色谱纯, 美国 TEDIA 公司); 三氟乙酸、盐酸羟胺、乙酸酐、吡啶(分析纯, 广州西陇科学股份有限公司); 肌醇(inositol, Ins)标准品、Fuc 标准品、Man 标准品、葡萄糖(*D*-glucose, Glc)标准品、Gal 标准品、GalNAc 标准品、GlcNAc 标准品、核糖(*D*-ribose, Rib)标准品、阿拉伯糖(*D*-arabinose, Ara)标准品、木糖(*D*-xylose, Xyl)标准品、鼠李糖(*D*-rhamnose, Rha)标准品(纯度≥98%, 德国 SIGMA 公司)。

1.2 仪器与设备

GC/MS-TQ 8040 气相色谱-质谱联用仪、SH-Rtx-1701 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(日本岛津公司); LC-WB-6 数显恒温水浴锅(上海力辰邦西仪器科技有限公司); T18DS25 均质器(德国 IKA 公司); JSC-THB-600 电子天平(精度 0.01 g, 昆山台衡精密测控股份有限公司); BSA224S 万分之一分析天平(德国赛多利斯公司); AutoEVA-20Plus 氮吹平行浓缩仪(厦门睿科集团股份有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品的制备

食用燕窝经 105 ℃烘烤 40 min, 取出置于干燥器中冷却至室温。取 2~3 g 至研钵中快速研磨后过 100 目筛, 备用。

1.3.2 样品的测定

参照张小江等[17]燕窝多糖中单糖的测定方法进行处理, 具体实验条件如下:

准确称取过 100 目筛的样品粉末 10.0 mg, 置于 10 mL 水解管中, 加入 2 mL 的 1.0 mol/L 三氟乙酸溶液和 1 mg/mL Ins 内标 0.10 mL, 充氮气后密封, 于电热恒温干燥箱 110 ℃下进行酸水解 4 h。水解液冷却至室温后, 转移到氮吹管中, 在 80 ℃下氮吹完全除去三氟乙酸, 加 1 mL 水复溶, 移取水解样品 100 μL, 加入 100 μL 20 mg/mL 盐酸羟胺吡啶溶液, 封管于 90 ℃反应 30 min。冷至室温, 再加入 1 mL 乙酸酐, 封管于 90 ℃反应 30 min, 冷却后于 80 ℃下氮气吹干, 加入 1.00 mL 三氯甲烷溶解, 稀释 100 倍后采用 GC-MS 分析。

1.3.3 仪器参数

进样口温度: 240 ℃; 进样时间: 1 min; 程序升温: 初始温度 160 ℃ (2 min)以 11 ℃/min 升温速率升温至 230 ℃ (20 min), 以 10 ℃/min 升温速率升温至 250 ℃ (5 min); 载气: 氦气; 流速: 1.0 mL/min; 不分流进样, 1 min 后开启隔垫吹扫; 电子轰击(electron impact, EI)离子源, 230 ℃, 电子能量 70 eV; 接口温度 240 ℃; 溶剂延迟时间: 2 min; 扫描模式: 选择离子监测(selected ion monitoring, SIM)模式; 单糖及内标物的色谱保留时间及质谱分析参数见表 2。

1.4 食用燕窝单糖指纹图谱的建立

在岛津 GC/MS Solution 工作站中导出特征离子(*m*/*z*)分别为 145、168、187 的 GC-MS 采集数据, 运用 Excel 2019 软件进行指纹图谱数据处理转换, 导入“中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 版)”生成 S1~S34 图谱, 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

表 1 34 批食用燕窝样品信息

Table 1 Informations of 34 batches of edible bird's nest samples

样品序号	样品编号	供应商	样品序号	样品编号	供应商
Y-1	25022716	A-1	Y-18	25011625	B-7
Y-2	25022717	A-2	Y-19	25012319	C-5
Y-3	25020715	A-3	Y-20	25012029	A-5
Y-4	25022403	B-1	Y-21	25012025	A-6
Y-5	25021914	C-1	Y-22	25011627	C-6
Y-6	25031214	D-1	Y-23	25012026	A-7
Y-7	25032813	C-2	Y-24	25012326	C-7
Y-8	25031812	B-2	Y-25	23120122	D-4
Y-9	25031706	A-4	Y-26	23110716	E-1
Y-10	25033103	D-2	Y-27	23121328	A-8
Y-11	25031810	B-3	Y-28	23082217	E-2
Y-12	25031811	B-4	Y-29	23122219	F-1
Y-13	25032519	C-3	Y-30	23080222	G-1
Y-14	25032618	D-3	Y-31	23081816	C-8
Y-15	25031010	C-4	Y-32	23110718	E-3
Y-16	25012222	B-5	Y-33	23112703	B-8
Y-17	25012218	B-6	Y-34	23112709	A-9

表 2　单糖及内标物的色谱保留时间及质谱分析参数

Table 2　Chromatographic retention times and mass spectrometry analysis parameters of monosaccharides and internal standards

序号	名称	CAS 号	保留时间/min	定量离子(*m*/*z*)	定性离子(*m*/*z*)
1	Rha	6155-35-7	7.017	145	115, 102
2	Rib	50-69-1	7.237	145	103, 129
3	Fuc	2438-80-4	7.438	145	115, 103
4	Ara	5328-37-0	7.541	145	103, 129
5	Xyl	58-86-6	7.823	145	103, 115
6	Man	3458-28-4	9.716	145	103, 115
7	Glc	50-99-7	10.092	145	115, 212
8	Gal	59-23-4	10.437	145	103, 212
9	Ins	87-89-8	11.630	168	103, 212
10	GlcNAc	7512-17-6	14.690	187	126, 115
11	GalNAc	14215-68-0	19.005	187	127, 145

注: Ins 为内标物。

工标注进行所有峰匹配, 以平均数法生成燕窝单糖指纹图谱。

1.5　掺伪模型的建立

基于掺伪量 1%、5%、10%、20%、30%、40%、50%, 取银耳多糖、黄明胶、果胶、结冷胶、卡拉胶和琼脂, 分别与食用燕窝混合, 创建掺伪模型。

1.6　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 34 批食用燕窝单糖成分确认共有峰、建立对照图谱并进行相似度评价, 数据结果采用 Jamovi 进行统计分析, 其中通过单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA), 以 5%的显著性水平进行 Tukey's 检验, 即 P<0.05 具有显著性差异。

2　结果与分析

2.1　食用燕窝中单糖含量测定结果分析

10 种单糖标准品的气相色谱图, 见图 1。34 批食用燕窝样品的单糖组成及含量, 见表 3。由表 3 可知, 食用燕窝中 Gal 含量最高, 为 7.31~9.18 g/100 g, 其次为 GlcNAc, 含量为 5.63~7.84 g/100 g, 燕窝中 Fuc、Man、Gal、GlcNAc 和 GalNAc 的质量比为 1:1.5:8.4:6.6:4.1, 总糖含量在 18.75~23.92 g/100 g, 仅次于燕窝中蛋白质含量。比较各单糖的存在方式, Fuc、Man、Gal 在动物中较为常见, 而 Rha、Xyl 在植物中存在, Ara 存在于微生物中, 食用燕窝作为一种动物源食品, Rha、Xyl、Ara 在本次研究中并未检出, 符合单糖分布情况。

此次样品测定共涉及 7 个不同供应商, 由于 F 与 G 供应商样本量不足, 不纳入统计分析, 其余 5 个供应商利用单糖的种类和含量数据进行单因素方差分析。以供应商为因子, 以 Fuc、Man、Gal、GlcNAc 和 GalNAc 含量为因变量, 进行 ANOVA 分析, 结果均无显著性差异(P>0.05)。可能原因在于供应商原料来源主要为印度尼西亚, 现有研究表明, 不同燕窝中的单糖种类相同且相对含量较为一致。单糖组成比例存在差异, 但未呈现产地、种类差异[17]。

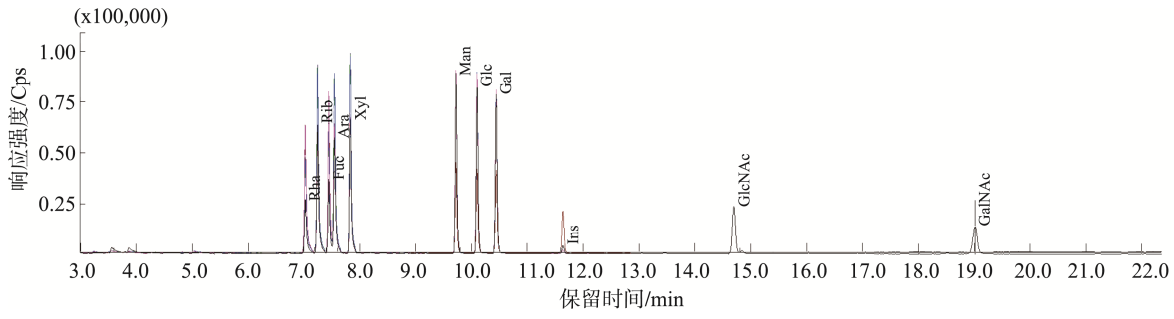


图 1　10 种单糖混合标准品衍生物的总离子流图

Fig.1　Total ion chromatograms of the 10 kinds of monosaccharide mixed derivatives

表 3 食用燕窝中单糖组成及含量(g/100 g)

Table 3 Composition and content of monosaccharides in edible bird's nest (g/100 g)

编号	Rha	Rib	Fuc	Ara	Xyl	Man	Glc	Gal	GlcNAc	GalNAc	TS
Y-1	N.D.	N.D.	0.98	N.D.	N.D.	1.52	N.D.	8.91	6.28	4.62	22.31
Y-2	N.D.	N.D.	0.93	N.D.	N.D.	1.44	N.D.	8.05	5.80	4.24	20.45
Y-3	N.D.	N.D.	1.00	N.D.	N.D.	1.47	N.D.	8.61	6.14	4.43	21.65
Y-4	N.D.	N.D.	0.87	N.D.	N.D.	1.33	N.D.	7.78	5.90	4.06	19.95
Y-5	N.D.	N.D.	0.95	N.D.	N.D.	1.47	N.D.	8.25	6.07	4.46	21.20
Y-6	N.D.	N.D.	0.93	N.D.	N.D.	1.41	N.D.	7.99	6.27	4.42	21.02
Y-7	N.D.	N.D.	0.90	N.D.	N.D.	1.39	N.D.	7.82	5.87	4.29	20.28
Y-8	N.D.	N.D.	0.97	N.D.	N.D.	1.45	N.D.	8.04	5.97	4.54	20.98
Y-9	N.D.	N.D.	1.00	N.D.	N.D.	1.53	N.D.	8.26	6.13	4.66	21.58
Y-10	N.D.	N.D.	0.96	N.D.	N.D.	1.49	N.D.	8.45	6.21	4.55	21.65
Y-11	N.D.	N.D.	0.93	N.D.	N.D.	1.43	N.D.	8.59	7.36	4.20	22.50
Y-12	N.D.	N.D.	0.99	N.D.	N.D.	1.47	N.D.	8.53	6.89	3.81	21.69
Y-13	N.D.	N.D.	0.97	N.D.	N.D.	1.52	N.D.	9.18	7.84	4.42	23.92
Y-14	N.D.	N.D.	0.96	N.D.	N.D.	1.44	N.D.	8.57	7.16	3.95	22.08
Y-15	N.D.	N.D.	0.99	N.D.	N.D.	1.49	N.D.	8.62	6.81	3.96	21.87
Y-16	N.D.	N.D.	1.04	N.D.	N.D.	1.50	N.D.	8.35	6.96	3.86	21.72
Y-17	N.D.	N.D.	0.99	N.D.	N.D.	1.45	N.D.	8.86	6.97	4.25	22.52
Y-18	N.D.	N.D.	1.01	N.D.	N.D.	1.50	N.D.	8.46	6.92	4.04	21.92
Y-19	N.D.	N.D.	1.03	N.D.	N.D.	1.48	N.D.	8.45	7.74	4.29	23.00
Y-20	N.D.	N.D.	0.96	N.D.	N.D.	1.49	N.D.	8.48	7.59	4.44	22.96
Y-21	N.D.	N.D.	0.95	N.D.	N.D.	1.32	N.D.	7.54	6.08	3.52	19.41
Y-22	N.D.	N.D.	0.92	N.D.	N.D.	1.37	N.D.	7.75	6.05	3.48	19.57
Y-23	N.D.	N.D.	0.93	N.D.	N.D.	1.31	N.D.	7.37	5.87	3.28	18.75
Y-24	N.D.	N.D.	0.90	N.D.	N.D.	1.31	N.D.	7.63	5.72	3.23	18.79
Y-25	N.D.	N.D.	0.89	N.D.	N.D.	1.32	N.D.	7.55	5.91	3.27	18.95
Y-26	N.D.	N.D.	0.97	N.D.	N.D.	1.38	N.D.	7.86	5.81	3.43	19.44
Y-27	N.D.	N.D.	1.02	N.D.	N.D.	1.38	N.D.	7.75	5.97	3.47	19.60
Y-28	N.D.	N.D.	0.94	N.D.	N.D.	1.37	N.D.	7.80	6.20	3.60	19.90
Y-29	N.D.	N.D.	0.96	N.D.	N.D.	1.38	N.D.	7.68	5.63	3.45	19.10
Y-30	N.D.	N.D.	0.97	N.D.	N.D.	1.34	N.D.	7.71	5.67	3.45	19.14
Y-31	N.D.	N.D.	0.94	N.D.	N.D.	1.27	N.D.	7.31	6.32	3.21	19.06
Y-32	N.D.	N.D.	0.94	N.D.	N.D.	1.31	N.D.	7.61	6.42	3.55	19.83
Y-33	N.D.	N.D.	0.96	N.D.	N.D.	1.30	N.D.	7.52	6.16	3.32	19.27
Y-34	N.D.	N.D.	0.94	N.D.	N.D.	1.34	N.D.	7.83	5.87	3.23	19.21

注: TS 为总糖(各单糖含量的总和, total sugar); N.D.表示未检出。表 4 同。

2.2 食用燕窝单糖指纹图谱的构建

将 34 批食用燕窝样品进行气相色谱-质谱分析, 采集单糖乙酰化产物特征离子数据。在实际构建过程中, 利用"中药色谱指纹图谱相似度评价系统", 结合色谱法保留时间和质谱特征离子的特性, 确定了 11 个共有特征峰。选择共有特征离子 145、168 与 187 作为构建图谱的基础, 得到 34 批食用燕窝的原始色谱图(指纹图谱里面的 S1~S34), 见图 2。以 S-1 为参照图谱, 经多点校正、自动匹配和时间宽度 0.1 的方式后获取对照指纹图谱 R, 见图 3。

指纹图谱的相关性能够反映出其整体性[34], 通过相似度计算可以客观评价食用燕窝的差异。基于中药色谱指纹图谱相似度评价系统对食用燕窝单糖特征图谱进行了系统的分析, 再借助夹角余弦法, 计算相似度, 可以得出 34 批食用燕窝指纹图谱, 其与标准指纹图谱的相似度为 99.8%~100.0%, 均大于 99.5%, 说明本次构建的食用燕窝单糖指纹图谱符合指纹图谱构建的基本要求, 重现性好、准确度高, 可为食用燕窝掺伪鉴别提供理论依据。

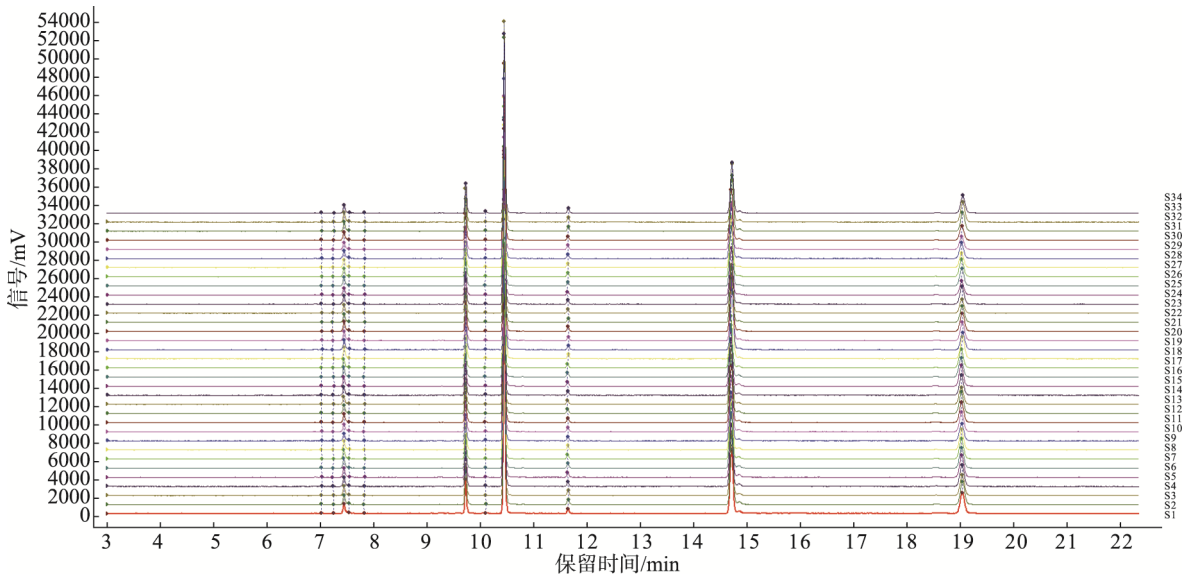


图 2　食用燕窝单糖特征离子叠加图谱

Fig.2　Characteristic ion superposition map of monosaccharides in edible bird's nests

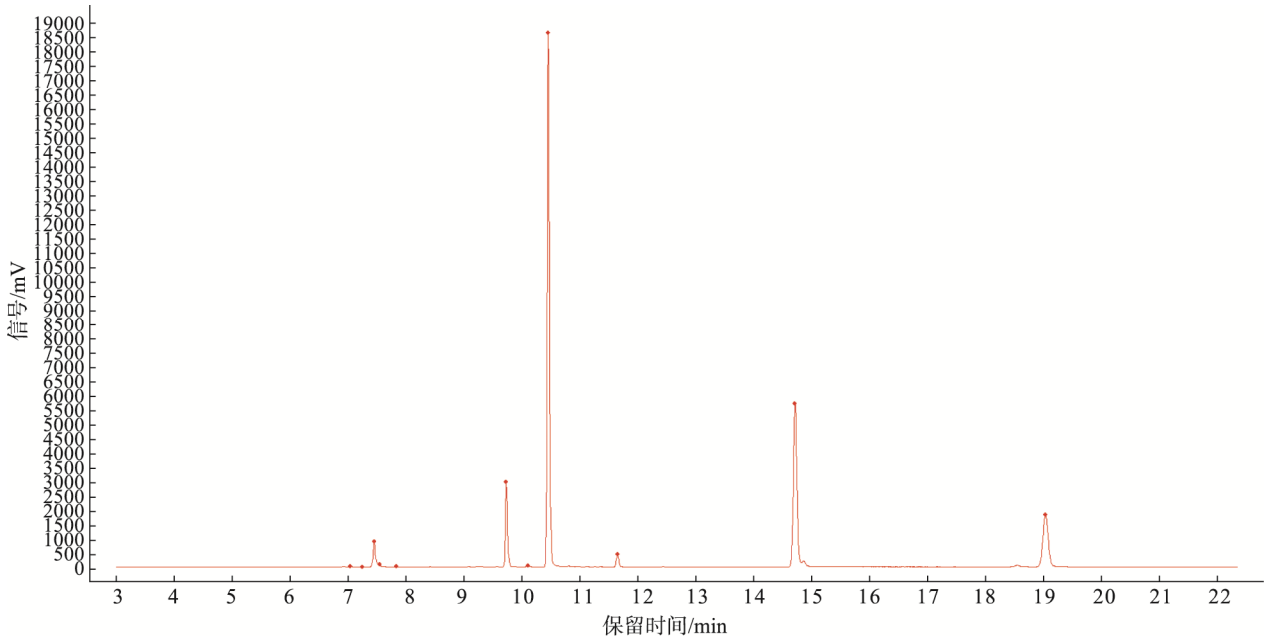


图 3　食用燕窝单糖标准指纹图谱

Fig.3　Standard fingerprint chromatogram of edible bird's nest monosaccharides

2.3　指纹图谱在食用燕窝掺假鉴别中的应用

2.3.1　不同掺假物单糖组成与食用燕窝的相似度分析

将不同掺假物单糖的特征离子色谱图与食用燕窝单糖标准图谱进行比较(表 4), 不同掺假物与燕窝的单糖组成存在显著性差异(P<0.05)。其中, 海藻酸钠主要以甘露糖醛酸与古洛糖醛酸组成, 银耳多糖含有较高的 Man (42.7%), 其余的如果胶、结冷胶、黄原胶、卡拉胶、琼脂均含有不同程度的 Glc, 均与食用燕窝存在较大差异。

基于不同掺假物含有的单糖组成并不相同, 结合指纹图谱进行相似度分析, 结果详见表 5。与食用燕窝单糖标准图谱比较, 相似度范围为 7.7%~75.3%, 以卡拉胶与食用燕窝标准图谱最为接近, 可能原因为此次研究是以平均数法建立指纹图谱, 并未考虑单糖组分的权重问题。虽然卡拉胶中检出 Xyl (1.7%)、Glc (8.2%), 且并不含有食用燕窝中存在的 Fuc、Man、GalNAc、GlcNAc, 与食用燕窝存在差异, 但卡拉胶的总糖(24.8%)与食用燕窝的总糖(21.7%±1.5%)较为接近。在中药领域, 品种规定指纹图谱相似度大于等于 0.90, 在食品或农产品领域, 相似度要求

可以略低, 但通常需要大于等于 0.85 才可接受。综上, 基于单糖的组成比例, 通过相似度分析, 掺假物与食用燕窝的相似度均小于 0.85, 可有效鉴别 8 种常见掺假物。

2.3.2 食用燕窝掺伪鉴别

燕窝市场掺伪手段多样, 主要包括黏合增重、表面涂刷、材质替代等手法, 掺伪量正常为 10%~30%[22]。为了更好地对食用燕窝掺伪量进行鉴别, 选择银耳多糖、黄明胶、果胶、结冷胶、卡拉胶和琼脂 6 种掺伪物和 7 个不同掺伪梯度(1%、5%、10%、20%、30%、40%、50%)作为试验条件, 分别与食用燕窝混合, 创建掺伪模型。

对比 6 种掺伪模型特征离子色谱图与食用燕窝标准指纹图谱的相似度, 绘制掺伪量与相似度关系曲线。从图 4 中可以看到, 掺伪量与指纹图谱的相似度呈现负相关, 即掺伪量上升, 相似度下降。通过调整指纹图谱的相似程度和 6 种掺伪量的拟合模型, 分别比较二阶拟合模型、指数衰减模型和逻辑斯蒂回归模型在真实值与预测值的误差, 其中以逻辑斯蒂回归模型表现最优, 6 种掺伪物(银耳多糖、果胶、黄明胶、结冷胶、卡拉胶和琼脂)的平均相对误差分别为 0.27%、0.58%、0.36%、0.36%、0.04%和 0.26%, 且拟合系数均为 0.999, 可有效针对掺伪相似度进行掺伪量预测。结果见表 6。

食用燕窝中单糖组成相对稳定, 根据 34 批食用燕窝糖谱相似度结果, 采用正态分布概率统计方式 3σ (P=99.7%)计算指纹图谱相似度可接受下限值为 99.8%, 高于中草药、食品领域对相似度评价的要求。当掺伪量为 1%时, 6 个掺伪模型相似度评价结果为 99.0%~99.7%, 可用于不同掺伪量的预测。其中, 卡拉胶掺伪鉴别能力较低, 主要源于指纹图谱采用平均数法建立标准模型, 依据卡拉胶掺伪量与相似度的模型关系, 相关系数 r^2 为 0.999, 能够较为准确地预测掺伪量, 以相似度 99.8%作为食用燕窝鉴别标准。综上, 结合食用燕窝单糖指纹图谱, 建立掺伪物掺伪评价模型, 可有效通过相似度分析, 预测掺伪量, 实现掺伪鉴别。

表 4 不同掺假物单糖组成(%)

Table 4 Monosaccharide composition of different adulterants (%)

名称	银耳多糖	猪皮胶原	海藻酸钠	果胶	结冷胶	黄原胶	卡拉胶	琼脂
Rha	N.D.	N.D.	N.D.	2.9	22.3	2.6	N.D.	N.D.
Rib	N.D.	N.D.	N.D.	2.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fuc	14.6	N.D.	N.D.	2.4	N.D.	2.4	N.D.	N.D.
Ara	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.0	N.D.	N.D.	N.D.
Xyl	14.3	N.D.	N.D.	1.3	N.D.	N.D.	1.7	N.D.
Man	42.7	N.D.	N.D.	26.2	N.D.	21.7	N.D.	3.7
Glc	2.7	1.7	N.D.	41.6	31.9	32.8	8.2	69.8
Gal	1.1	1.0	N.D.	N.D.	1.7	N.D.	14.9	2.8
GlcNAc	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
GalNAc	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
TS	75.5	2.7	N.D.	71.5	35.7	56.9	24.8	76.3

注: N.D.为未检出。

表 5 不同掺假物与食用燕窝标准指纹图谱相似度

Table 5 Similarity between different adulterants and the standard fingerprint spectrum of edible bird's nest

	燕窝标准图谱	果胶	海藻酸钠	黄原胶	猪皮胶原	结冷胶	卡拉胶	琼脂	银耳多糖
燕窝标准图谱	1	0.077	0.241	0.082	0.238	0.032	0.753	0.041	0.147
果胶	0.077	1	0.055	1	0.432	0.751	0.438	0.883	0.512
海藻酸钠	0.241	0.055	1	0.066	0.894	0.065	0.149	0.037	0.060
黄原胶	0.082	1	0.066	1	0.437	0.739	0.434	0.873	0.527
猪皮胶原	0.238	0.432	0.894	0.437	1	0.445	0.382	0.480	0.070
结冷胶	0.032	0.751	0.065	0.739	0.445	1	0.460	0.866	0.044
卡拉胶	0.753	0.438	0.149	0.434	0.382	0.460	1	0.532	0.042
琼脂	0.041	0.883	0.037	0.873	0.480	0.866	0.532	1	0.091
银耳多糖	0.147	0.512	0.060	0.527	0.070	0.044	0.042	0.091	1

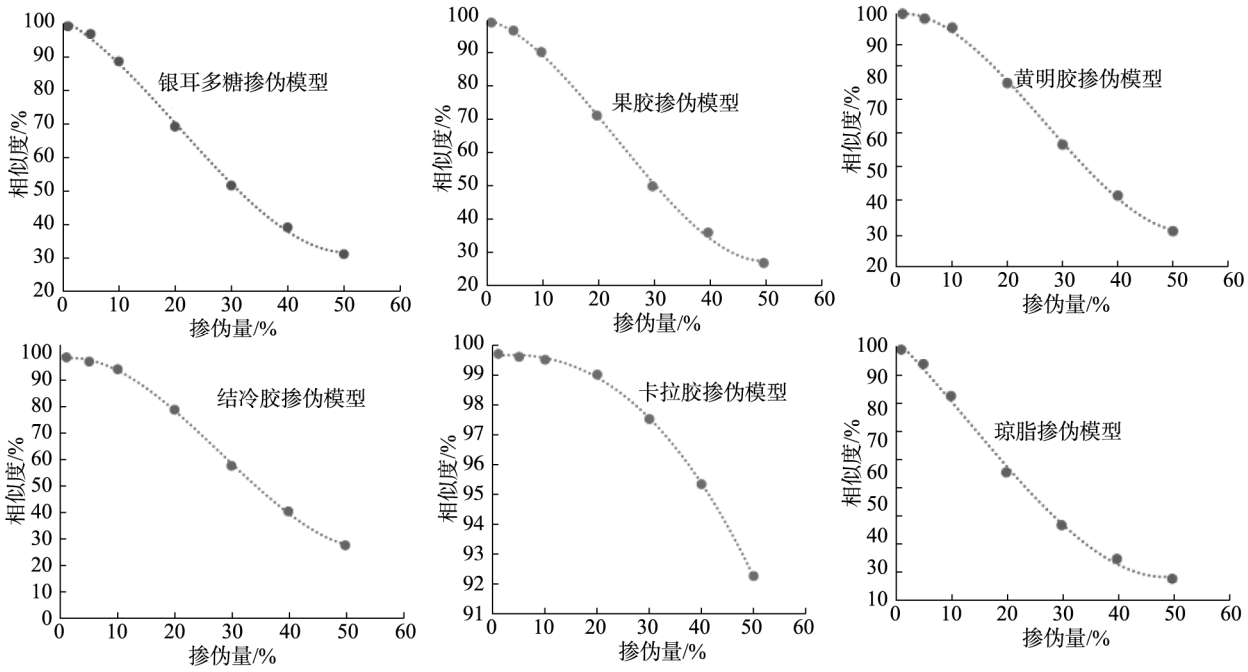


图 4　6 种掺伪模型与食用燕窝单糖指纹图谱的相似度关系

Fig.4　Similarity relationship between adulteration models of 6 kinds of adulterant and the fingerprint of edible bird's nest monosaccharide

表 6　掺伪模型与食用燕窝指纹图谱相似度的拟合方程

Table 6　Fitting equation of similarity between adulterated model and edible bird's nest fingerprint

掺伪物	拟合方程	决定系数(r^2)
银耳多糖	Y=8.020+(99.48–8.020)/[1+(X/28.57)^1.95]	0.999
果胶	Y=4.058+(98.65–4.058)/[1+(X/29.24)^2.22]	0.999
黄明胶	Y=6.634 +(99.03–6.634)/[1+(X/33.02)^2.24]	0.999
结冷胶	Y=–0.678+(98.72+0.678)/[1+(X/34.79)^2.52]	0.999
卡拉胶	Y=54.654+(99.65–54.654)/[1+(X/90.29)^2.74]	0.999
琼脂	Y=–0.345+(99.15+0.345)/[1+(X/22.71)^1.94]	0.999

3　讨论与结论

本研究利用气相色谱-质谱法，分析了 34 批次食用燕窝单糖组成，确定食用燕窝中含有 Fuc、Man、Gal、GlcNAc 和 GalNAc 5 种单糖成分，平均相对质量比为 1:1.5:8.4:6.6:4.1，总糖含量在 18.75~23.92 g/100 g。显著性分析结果表明，不同商家之间不存在显著性差异(P>0.05)，此次样本可作为建立燕窝单糖标准指纹图谱的基础。在建立指纹图谱时，采用了“中药色谱指纹图谱相似度评价系统”，并对 34 批次食用燕窝单糖相似度进行比较，相似度(99.8%~100.0%)>99.5%，表明食用燕窝单糖具有高度的一致性和质量稳定性。在掺假应用中，研究选用果胶、结冷胶、黄原胶、卡拉胶等 8 种掺假物进行相似度分析，相似度均小于 0.85，可有效鉴别 8 种常见掺假物。进一步地，选用其中 6 种掺假物进行不同掺伪量研究，确定以指纹图谱相似度 99.8%作为食用燕窝鉴别标准，在掺伪量为 1%~50%时，可有效鉴别银耳多糖、黄明胶、果胶、结冷胶、卡拉胶和琼脂掺伪物。同时，利用指纹图谱掺伪模型，可有效预测掺伪量，实现掺伪鉴别。在实际应用方面，本研究不仅为食用燕窝的质量控制提供了科学依据，也为食用燕窝的市场监管和消费者保护提供了有效掺伪鉴别工具。

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 Yaohua, Fan Qunyan, Li Zonghui, 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] 张小江，白伟娟，杨嘉颖，等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱技术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 Xiaojiang, Bai Weijuan, Yang Jiaying, et al. Construction of volatile components fingerprint of ready-to-eat bird's nest based on solid-phase microextraction-gas-chromatography/mass spectrometry technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 57–64.

[3] 郭宝忠. 燕窝肽及相关产物与健康: 研究概况[J]. 现代食品科技，2024, 40(9): 388–397.
Guo Baozhong. Research overview of edible bird's-nest peptide and related products in health promotion [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 388–397.

[4] Kim O, Kim D, Lee M, et al. Standardized edible bird's nest extract

prevents UVB irradiation-mediated oxidative stress and photoaging in the skin [J]. Antioxidants (Basel), 2021, 10(9): 1452.

[5] Zhao R, Li G, Kong X, et al. The improvement effects of edible bird's nest on proliferation and activation of B lymphocyte and its antagonistic effects on immunosuppression induced by cyclophosphamide [J]. Drug Design, Development and Therapy, 2016, 2016(1): 371–381

[6] 白伟娟, 李鸿铭, 柳训才, 等. 食用燕窝对皮肤状况改善作用的临床探究[J]. 食品工业, 2026, 47(1): 65–71.
Bai Weijuan, Li Hongming, Liu Xuncai, et al. Clinical study on the effects of edible bird's nest on the improvement of skin condition [J]. The Food Industry, 2026, 47(1): 65–71.

[7] 黎亿球, 黄俊昊, 马志浩, 等. 响应面法优化燕窝多肽制备及其护肤霜延缓衰老活性[J]. 精细化工, 2026, 1(14): 1–11.
Li Yiqiu, Huang Junhao, Ma Zhihao, et al. Response surface methodology for optimization on preparation of bird's nest peptide and anti-aging activity of its skin care cream [J]. Fine Chemicals, 2026, 1(14): 1–11.

[8] Choy K, Zain Z, Murugan D, 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.

[9] Zhang Wei, Zhu Meizhen, Liu Xuncai, et al. Edible bird's nest regulates glucose and lipid metabolic disorders via the gut-liver axis in obese mice [J]. Food and Function, 2024, 15(14): 7577–7591.

[10] Bai Weijuan, Deng Fenghong, Zhang Xiaojiang, 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.

[11] Zhang Xiaojiang, Liang Ruifang, Bai Weijuan, 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.

[12] Zhang Xiaojiang, Deng Fenghong, Bai Werijuan, 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.

[13] Bai Weijuan, Liu Xuncai, Fan Qunyan, et al. Study of the antiaging effects of bird's nest peptide based on biochemical, cellular, and animal models [J]. Journal of Functional Foods, 2023, 103: 105479.

[14] 于悦, 孔夏冰, 康文瀚, 等. 燕窝糖蛋白研究进展[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 417–429.
Yu Yue, Kong Xiabing, Kang Wenhan, et al. Research progress of glycoprotein from edible bird's nest [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(7): 417–429.

[15] 张晨曦. 燕窝唾液酸聚糖肽基于肠-脑轴干预脂多糖诱导的小鼠神经炎症作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024: 69.
Zhang Chenxi. Study on intervention effects of sialyted glycopeptide from edible bird's nest on neuroinflammation in miceinduced by lipopolysaccharides based on gut-brain axis [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024: 69.

[16] 宋咏烨, 林咏惟, 张娜. 不同类型燕窝营养检测现状及成分分析[J]. 中国食物与营养, 2024, 30(2): 42–51.
Song Yongye, Lin Yongwei, Zhang Na. 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.

[17] 张小江, 杨嘉颖, 萧月娥, 等. 气相色谱-质谱法分析燕窝多糖中单糖组成及含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(23): 333–339.
Zhang Xiaojiang, Yang Jiaying, Xiao Yuee, et al. Analysis of monosaccharide composition and content in bird's nest polysaccharides by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(23): 333–339.

[18] 邵建宏, 丁琦, 王珊, 等. 东南亚食用燕窝研究现状[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(5): 957–973.
Shao Jianhong, Ding Qi, Wang Shan, et al. Research status of the edible bird's nest from southeast Asia [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(5): 957–973.

[19] 汪楚语, 罗颖华, 董丽, 等. 燕窝掺假物鉴别方法的研究进展[J]. 食品与药品, 2024, 26(6): 604–610.
Wang Chuyu, Luo Yinhua, Dong Li, et al. Research progress on methods for authentication of edible bird's nest [J]. Food and Drug, 2024, 26(6): 604–610.

[20] 邱爽, 张新科, 孔文茹, 等. 燕窝真伪鉴别研究进展综述[J]. 食品工业, 2023, 44(7): 262–267.
Qiu Shuang, Zhang Xinke, Kong Wenru, et al. Review on the research progress for authentication of edible bird's nest [J]. The Food Industry, 2023, 44(7): 262–267.

[21] Shim E, Chandra G, Pedireddy S, et al. Characterization of swiftlet edible bird nest, a mucin glycoprotein, and its adulterants by Raman microspectroscopy [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(9): 3602–3608.

[22] 简叶叶, 李庆旺, 黄知几, 等. 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 Yeye, Li Qingwang, Huang Zhiji, et al. Advances in nutrition, functions and authenticity identification of cubilose [J]. Subtropical Agriculture Research, 2016, 12(2): 136–144.

[23] Hui B, Kim T, Fung S, et al. Potential residual contaminants in edible bird's nest [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 631136.

[24] Liu Kunfeng, Wu Maoyong, Lin Xuemei, et al. Molecular analysis of edible bird's nest and rapid authentication of *Aerodramus fuciphagus* from its subspecies by PCR-RFLP based on the *cyt b* gene [J]. Anal Methods, 2020, 12(21): 2710–2717.

[25] 白伟娟, 张小江, 萧月娥, 等. 燕窝分子生物学检测技术研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(20): 18–21.
Bai Weijuan, Zhang Xiaojiang, Xiao Yuee, et al. Research progress on molecular biology detection technology of edible bird's nest [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(20): 18–21.

[26] 何金麟, 王仍瑞, 张世伟, 等. 燕窝唾液酸糖蛋白间接竞争酶联免疫检测方法的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7630–7636.

He Jinlin, Wang Rengrui, Zhang Shiwei, et al. stablishment of indirect competitive enzyme linked immunosorbent assay for detection of sialoglycoprotein of edible bird's nest [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(23): 7630–7636.

[27] Tukiran N, Ismail A, Mustafa S, et al. Enzyme immunoassay for the detection of porcine gelatine in edible bird's nests [J]. Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2015, 32(7): 1023–1028.

[28] 丁融, 武秋娣, 邹银波, 等. 燕窝与银耳红外光谱、热分析及微观结构对比研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(16): 134–138.
Ding Rong, Wu Qiudi, Zou Yinbo, et al. Comparison on infrared spectrum, thermal properties and microstructure between edible bird's nest and tremella [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(16): 134–138.

[29] Cheng Chunsong, Lao Chichou, Cheng Qiqing, et al. Identification of blood-red color formation in edible bird's nests provides a new strategy for safety control [J]. Food Chemistry, 2021(5): 129454.

[30] Huang Xiaowei, Li Zhihua, Zou Xiaobo, et al. A low cost smart system to analyze different types of edible bird's nest adulteration based on colorimetric sensor array [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2019, 27(4): 876–886.

[31] 郭丽丽. 表征属性识别技术在燕窝真伪鉴别中的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 118.
Guo Lili. Study on the application of representative characteristics recognition technology in authentication of edible bird's nest [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 118.

[32] Ma Xueting, Zhang Jiukai, Liang Jinzhong, et al. Authentication of edible bird's nest (EBN) and its adulterants by integration of shotgun proteomics and scheduled multiple reaction monitoring (MRM) based on tandem mass spectrometry [J]. Food Research International, 2019, 125: 108639.

[33] Wu Wenjie, Li Lifeng, Cheng Huiyuan, et al. Qualitative and quantitative analysis of edible bird's nest based on peptide markers by LC-QTOF-MS/MS [J]. Molecules, 2022, 27(9): 2945.

[34] 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 Yafen, Yu Hong, Zhang Jihong, 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: 韩晓红　曹岱琳)