

燕窝真伪鉴别研究发展趋势剖析与展望

马雪婷^{1,2}, 张九凯², 陈颖^{2,*}, 梁金钟¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150076; 2. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100176)

摘要: 燕窝是由金丝燕及多种同属燕类所筑的巢窝, 主产于马来西亚、印度尼西亚等东南亚国家和地区, 自古以来一直被视为一种名贵中药和珍稀食品。近年来, 燕窝在我国消费量呈逐年上升趋势, 与此同时, 燕窝的进口价格也在逐渐攀升。受巨额经济利益的驱使, 市场中燕窝的掺假掺杂现象严重。为了实现对燕窝质量的有效监管, 燕窝真伪鉴别研究一直处于不断发展和创新中。本文从燕窝掺假、物种来源和产地及生产方式溯源等方面对燕窝真伪鉴别研究的现状进行了分析, 并展望了未来的研究热点和发展趋势, 为从事燕窝真伪鉴别研究的科研人员提供参考。

关键词: 燕窝; 真伪鉴别; 食品欺诈; 掺假; 溯源

Recent Advances and Future Prospects in Analytical Techniques for Authentication of Edible Bird's Nest

MA Xueting^{1,2}, ZHANG Jiukai², CHEN Ying^{2,*}, LIANG Jinzhong¹

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China;

2. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100176, China)

Abstract: Edible bird's nest (EBN) is the nest of swiftlet and other closely related species of the *Aerodramus* genus, which mainly inhabit in Southeast Asian countries such as Malaysia and Indonesia. Since ancient times, EBN has been regarded as a precious and valuable traditional Chinese medicinal material and food material. In recent years, the consumption of EBN in China is growing annually. Driven by huge profits, economically motivated adulteration has been found in the whole supply chain of EBN. Authentication of EBN has been moving forward with innovations in order to realize the effective supervision of EBN quality. In this article, we illustrate the current status of EBN authentication with respect to adulteration identification, identification of species and geographical origin and traceability. Future research priorities and trends are also discussed. This review is expected to provide useful information for researchers interested in this field.

Keywords: edible bird's nest; authentication; food fraud; adulteration; traceability

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180322-289

中图分类号: TS201.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 07-0296-08

引文格式:

马雪婷, 张九凯, 陈颖, 等. 燕窝真伪鉴别研究发展趋势剖析与展望[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 296-303. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180322-289. <http://www.spkx.net.cn>

MA Xueting, ZHANG Jiukai, CHEN Ying, et al. Recent advances and future prospects in analytical techniques for authentication of edible bird's nest[J]. Food Science, 2019, 40(7): 296-303. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180322-289. <http://www.spkx.net.cn>

燕窝是由雨燕科动物金丝燕 (*Aerodramus* 和 *Collocalia*) 及多种同属燕类用唾液与绒羽等混合凝结所筑成的巢窝。可用于筑造“食用燕窝”(edible bird's nest)的金丝燕种类有: 爪哇金丝燕 (*Aerodramus fuciphagus*) 及其亚种、大金燕 (*Aerodramus*

maximus) 及其亚种、白腹金丝燕 (*Collocalia esculenta*) 和穴金丝燕 (*Collocalia linchi*) 等。此外, 雨燕科雨燕属 (*Apus*) 的白腰雨燕 (*Apus pacificus*) 也可生产供人类食用的燕窝^[1]。

金丝燕在世界上的分布范围横跨印度洋西部至西

收稿日期: 2018-03-22

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0401104); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31501567)

第一作者简介: 马雪婷(1983—)(ORCID: 0000-0002-3110-6276), 女, 博士研究生, 研究方向为食品质量与安全。

E-mail: liushuling1688@163.com

*通信作者简介: 陈颖(1972—)(ORCID: 0000-0002-8433-3341), 女, 研究员, 博士, 研究方向为食品质量与安全。

E-mail: chenyingcaiq@163.com

太平洋和南太平洋上的群岛,中间越过南亚大陆、印度尼西亚、澳大利亚北部和新几内亚。印度尼西亚因其得天独厚的自然条件和燕屋的成功应用而成为全球最大的燕窝输出国,年产量约为全球产量的85%,其次是马来西亚、泰国、越南等国家^[2]。中国产燕窝之地有广东肇庆市怀集县燕岩、云南红河州建水县燕子洞和海南大洲岛,但产量极低^[3]。燕窝根据其不同的特征有如下几种分类方式:根据生产方式分为屋燕和洞燕;根据颜色分为白燕、黄燕和血燕;根据品质分为官燕、毛燕和草燕;根据外形分为燕盏、燕条、燕角、燕碎、燕饼;根据商品形态分为干燕窝和燕窝制品等^[4]。燕窝的主要成分有水溶性蛋白质、碳水化合物、微量元素^[5-6]以及对促进人体活力起重要作用的水解氨基酸如苯丙氨酸、蛋氨酸、氨酸、赖氨酸、亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸等8种必需氨基酸^[7-8],同时含有10%的唾液酸、表皮生长因子(epidermal growth factor, EGF)和唾液酸糖蛋白等^[1],具有滋阴润肺、止咳化痰^[9]、促表皮生长^[10-11]、抗氧化^[12]和抗病毒^[13]等功效,对人体的骨骼、消化、呼吸、神经等多个系统具有积极作用。人类食用燕窝的历史悠久,最早可以追溯到我国唐代,时至今日在华人人群中食用燕窝已经演变成了一种养生文化而世代相传^[14]。据统计2016年仅我国大陆燕窝年消费量就可达500 t,销售额达200亿元人民币^[15]。

燕窝产业具有附加值高、产业链长、供小于求、劳动力密集等特点,从而导致经济利益驱动的掺假、造假和虚假宣传等食品欺诈行为长期存在于燕窝的生产和流通环节。燕窝的造假、掺假主要包括:将猪皮、银耳、蛋清、鱼鳔和琼脂等掺入到燕窝中以达到获取暴利的目的;通过“翻新”低品质燕窝(草燕、毛燕等)来冒充高品质燕窝,如增味燕窝(浓浓蛋清味)、染色燕窝(黄燕、血燕等)、漂白燕窝、刷胶燕窝等;假冒燕窝产地和生产方式等。2011年,马来西亚“假血燕事件”的爆发将燕窝的食品安全问题推到了风口浪尖。据2016年口岸统计数据,我国燕窝进口量为39.3 t^[15],仅占燕窝实际年消费量的8%,92%未经检验检疫的燕窝以非正常贸易形式输入我国。在食品掺假和欺诈成为全球性问题的背景下,实现对燕窝市场的有效监管的关键在于燕窝真伪鉴别研究的不断发展和创新。

本文以目标为导向,将燕窝真伪鉴别研究划分为3个方向:以识别样品中燕窝成分、鉴别燕窝是否掺假及鉴定掺假物种类为目标的燕窝及掺假物甄别;以鉴定生产燕窝的金丝燕种类为目标的燕窝物种来源鉴定;以鉴别燕窝产地及生产方式等品质为目标的燕窝产地及生产

方式溯源鉴定(图1)。通过对燕窝真伪鉴别研究体系各个研究方向现状的分析,展望了燕窝真伪鉴别的研究热点和趋势。

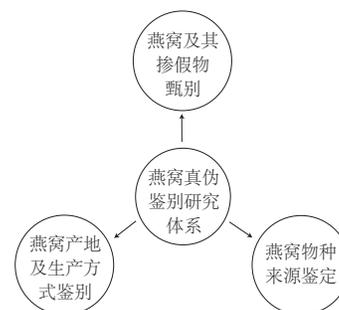


图1 燕窝真伪鉴别研究体系

Fig. 1 Research system for EBN authentication

1 基于文献分析的燕窝真伪鉴别研究概况

目前,本研究共搜集了1991—2017年10月的国内外燕窝真伪鉴别研究文献87篇,其中综述10篇、研究性文献77篇。根据历年国内外燕窝真伪鉴别文献发表量情况(图2)分析发现,燕窝真伪鉴别研究工作始于20世纪90年代的中国,自2005年起燕窝真伪鉴别研究的文献发表量呈明显上升趋势,2011年底“假血燕事件”的发生致使2012年燕窝真伪鉴别研究文献发表量急剧下降。随着我国对马来西亚、印度尼西亚燕窝进口贸易的恢复,2013年燕窝真伪鉴别研究的文献发表量又开始呈现逐年上升的趋势,文献发表量在2015年达到了顶峰,随后呈现下降趋势,2016年较2015年下降了18%,2017年较2015年下降73%。不同国家燕窝真伪鉴别研究文献发表情况分析表明(图3),中国、新加坡和马来西亚的文献发表量位居前3位,我国的燕窝真伪鉴别研究起步于1995年刘璇等^[16]的研究,而新加坡和马来西亚却仅在近几年才开始燕窝的真伪鉴别研究。我国因起步最早、发展最快,在该领域处于领跑地位,其原因在于我国燕窝市场需求巨大、进口比重较高,亟需不断创新的燕窝真伪鉴别研究以支撑流通环节燕窝质量的有效监管。新加坡和马来西亚都是华人群体较多的国家,对燕窝的消费量较大,同时马来西亚更是燕窝的第二大出口国,2011年“假血燕事件”后与我国签署了《中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和马来西亚农业部关于从马来西亚输入燕窝产品的检验检疫和卫生条件议定书》,这些都促使两国燕窝真伪鉴别研究工作的开展。在我国从事燕窝真伪鉴别研究的机构以燕窝监管技术机构和高等院

校为主, 其中在该研究领域处于领先地位的机构有中国检验检疫科学研究院、广州中医药大学中药学院、深圳市计量质量检测研究院、集美大学等。

燕窝真伪鉴别研究根据其发展历程可分为3个阶段: 初步发展阶段(1991—2004年)、快速发展阶段I(2004—2009年)和快速发展阶段II(2009年至今)。文献分析表明, 在燕窝真伪鉴别研究的初步发展阶段和快速发展阶段I, 以燕窝及其掺假物甄别研究为主, 其发文量呈上升趋势; 在快速发展阶段II, 燕窝及其掺假物甄别研究得到了深入发展的同时, 拓展了燕窝物种来源鉴定和产地及生产方式鉴别两个研究方向(表1)。上述3个阶段的发展趋势表明, 燕窝真伪鉴别研究目的的改变推动了燕窝鉴伪技术的发展, 而燕窝鉴伪技术的发展又促进了燕窝真伪鉴别研究体系中不同研究方向的形成。

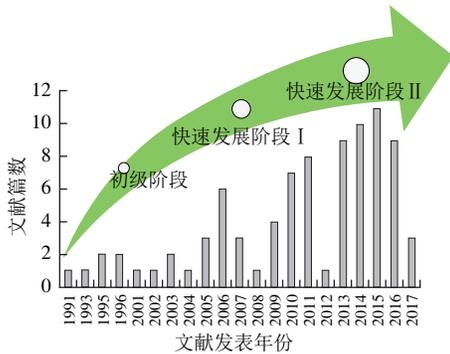


图2 国内外燕窝真伪鉴别文献历年发表情况

Fig. 2 Yearly number of published literature regarding EBN authentication

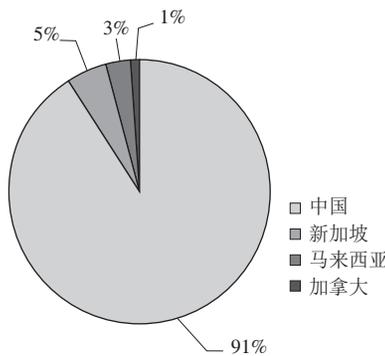


图3 不同国家燕窝真伪鉴别研究文献发表情况 (1991—2017年)

Fig. 3 Proportion of published literature concerning EBN authentication from different countries (from 1991 to 2017)

表1 燕窝真伪鉴别研究方向在各阶段的发展情况

阶段	燕窝及其掺假物甄别	燕窝物种来源鉴定	燕窝产地及生产方式鉴别
初步发展阶段	*		
快速发展阶段 I	*		
快速发展阶段 II	*	*	*

注: *代表该研究方向在对应的阶段得到了发展。

2 燕窝真伪鉴别研究体系现状

目前, 燕窝真伪鉴别研究体系主要涉及燕窝及其掺假物甄别、燕窝物种来源鉴别和燕窝产地和生产方式鉴别等三方面的内容, 所使用的技术涵盖了色谱、质谱、光谱和分子生物学等领域(表2)。

表2 燕窝真伪鉴别技术在不同研究方向上的应用

Table 2 Application of EBN authentication technologies in three different aspects

应用	研究对象	主要技术	特征指标	参考文献
燕窝及其掺假物甄别	燕窝及其掺假物	GC和LC-MS/MS	单糖	[25,35]
	燕窝及其掺假物	电泳技术	蛋白质	[26-27]
	燕窝及其掺假物	氨基酸自动分析法、TLC和GC法	氨基酸	[27-30]
	燕窝	SYBR Green PCR和TaqMan实时荧光PCR	核酸	[33-34]
	燕窝及其掺假物	FTIR、NMR、代谢组学和氨基酸分析方法	蛋白质、碳水化合物、脂质和氨基酸等	[36-37, 39-40]
	掺假燕窝	分光光度法、HPLC和LC-MS	唾液酸	[27,41-53]
	掺假燕窝	ELISA	糖蛋白	[55-58]
	掺假燕窝	IR、FTIR和拉曼光谱等光谱法	蛋白质、碳水化合物和脂质等	[60-61,69]
	掺假燕窝	高效薄层层析法	牛磺酸	[63]
	掺假燕窝	氨基酸分析法	氨基酸比值	[64]
燕窝物种来源鉴定	掺假燕窝	TG/DTG和DSC等热分析技术	自由水和结合水量	[65]
	燕窝及其掺假物	2-DE和CE	蛋白质	[33,67]
	燕窝及其掺假物	TaqMan实时荧光PCR方法	核酸	[66]
	掺假物猪明胶	ELISA	胶原蛋白	[68]
	燕窝及其掺假物	ICP-MS	元素	[70,71]
	爪哇金丝燕、淡腰金丝燕、大金丝燕	DNA条形码技术	Cytb基因	[72]
	爪哇金丝燕和小白腰雨燕	DNA条形码技术	Cytb、ND2、COI和12S rRNA基因	[1]
	爪哇金丝燕	DNA条形码技术	COI基因	[73]
	不同产地燕窝	GC-MS	小分子化合物	[39,76]
	不同生产方式燕窝	GC、GC-MS	氨基酸和小分子化合物	[76-77]
燕窝产地及生产方式鉴别	不同生产方式燕窝	SDS-PAGE	蛋白质	[61]
	不同产地的燕窝	GC	氨基酸	[77]
	不同产地的燕窝	实时荧光PCR	DNA	[79]

注: GC.气相色谱 (gas chromatography); LC-MS/MS.液相色谱-串联质谱 (liquid chromatography-tandem mass spectrometry); GC-MS.气相色谱-质谱联用 (gas chromatography-mass spectrometry); TLC.薄层层析色谱 (thin layer chromatography); PCR.聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction); FTIR.傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy); IR.红外光谱 (infrared spectroscopy); NMR.核磁共振 (nuclear magnetic resonance); HPLC.高效液相色谱 (high performance liquid chromatography); ELISA.酶联免疫吸附检测 (enzyme-linked immunosorbent assay); TG.热重分析 (thermogravimetry); DTG.微分热重 (differential thermogravimetry); DSC.差示扫描量热 (differential scanning calorimetry); 2-DE.双向电泳 (two-dimensional electrophoresis); CE.毛细管电泳 (capillary electrophoresis); ICP-MS.电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled plasma mass spectrometry); SDS-PAGE.十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis)。

2.1 燕窝及其掺假物甄别

燕窝及其掺假物甄别的根本目的在于将燕窝“验

明正身”，以解决狭义上燕窝“真与假”的问题，其整体的研究策略：针对燕窝与常见掺假物在微观结构、宏观结构、性状、分子、理化、光谱和色谱等方面的特性进行研究，挖掘特异性指标，从而实现对燕窝及其掺假物的甄别。随着分析手段的日新月异，燕窝及其掺假物甄别在精准化程度逐渐加深的同时也在不断迎接新的挑战。纵观燕窝及其掺假物甄别研究，根据甄别程度的不同可以分为3个层次：首先是解决了的“是否含有燕窝成分？”问题；其次是解决了的“是否只含有燕窝一种成分？”问题；最后是正在解决的“燕窝中掺假物是什么？”问题以及将要解决的“燕窝中有多少掺假物？”问题。

关于“是否含有燕窝成分？”的问题，在燕窝真伪鉴别初步发展阶段（1991—2004年）的研究方法几乎都是基于物理或化学现象的宏观或微观观察法，判定结果只有真或假两个选项，而且人为因素在结果的判定中占主导地位。1995年刘璇等^[16]首次应用宏观结构肉眼鉴别、微观结构显微镜鉴别、燃烧实验、水解实验、茚三酮实验、溴麝香草酚蓝实验和染色鉴别实验等方法对市售的31种燕窝及燕窝制品中的燕窝真实身份进行检验，结果发现26个燕窝制品中14个检出燕窝成分，5个固体燕窝中4个鉴别为真，同时发现水解实验稳定性好、特异性强，是燕窝身份识别的关键步骤。随后文惠玲^[17]、李曼^[18]、曾聪彦^[19]等针对真假燕窝药材在性状、微观结构和理化性质上的差异，分别提出纸色谱法、茚三酮反应结合显微镜观察法和水浸泡现象观察法。2006年以来，一些基于仪器设备的观察方法开始被应用到燕窝成分鉴别上：林洁茹等^[20]利用体视镜观察有效地对样品中的燕窝成分进行识别，认为体视镜既可弥补肉眼观察的不足，又可避免显微镜观察缺乏整体特征描述的缺点；宋琳等^[21]利用FTIR无损技术对采自菲律宾的5批燕窝中的FTIR特征吸收进行了分析，认为位于 $165\sim 1\,640\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,535\sim 1\,515\text{ cm}^{-1}$ 的蛋白质特征吸收、位于 $1\,035\sim 1\,050\text{ cm}^{-1}$ 的多糖特征吸收和位于 875 cm^{-1} 的无机盐特征吸收可以作为燕窝的特征峰；赵斌等^[22]利用紫外光谱法对白燕、血燕和黄燕的分析发现所有燕窝在 $(276\pm 2)\text{ nm}$ 波长处有特征吸收波峰，在 $(257\pm 3)\text{ nm}$ 波长处有特征吸收波谷，而且二者的吸光度比值在 $1.05\sim 1.15$ 之间，查圣华等^[23]也发现白燕在 276 nm 波长处有紫外特征吸收峰，但是血燕的紫外特征吸收峰却在 265 nm 波长处^[24]。然而，到了燕窝真伪鉴别研究快速发展阶段I和II，关于“是否含有燕窝成分？”问题的研究方法更倾向于精密仪器设备的使用，使得甄别的结果更

客观、更准确。2006年王慧等^[25]建立了燕窝中甘露糖、半乳糖、*N*-乙酰葡萄糖和*N*-乙酰半乳糖等四种醛糖的气相色谱检测方法，通过检测发现这四种醛糖是燕窝特有的成分。林洁茹^[26]和曹国杰^[27]等先后对燕窝的蛋白质进行了SDS-PAGE和等电聚焦电泳研究，发现不同品种燕窝的特征SDS-PAGE谱图，能够成为燕窝鉴伪的初筛方法。陆源^[28]、朱春红^[29]、曹国杰^[27]和陈哲妮^[30]等先后用氨基酸自动分析仪和薄层层析法对燕窝中的氨基酸组成进行了分析，发现燕窝中含有7种必需氨基酸且氨基酸总量大于40%，其中Asp、Leu、Tyr、Glu、Val、Ser、Phe氨基酸所占比例偏高。黄雪珍^[31]用乙酸对燕窝及其替代物猪皮、银耳、鱼鳔、琼脂和树胶进行水解后，发现燕窝水解物中的唾液酸能够与茚三酮反应并在 470 nm 有最大吸收，可作为燕窝质量控制的方法。秦沛^[32]利用毛细管电泳技术对同仁堂的真品燕窝进行分析，找到两个燕窝的特征蛋白峰，并利用二者的保留时间和比例成功地对其他3个品牌的燕窝进行了鉴伪。2010年，Wu Yajun等^[33]基于E1 beta fibrinogen基因设计了燕窝特异的上下游引物，建立的SYBR Green PCR方法最低能够检测出0.5%的燕窝成分。何国林等^[34]基于细胞色素基因设计了一条特异靶向雨燕属和金丝燕属的TaqMan探针，同样可检测到痕量的燕窝成分。2015年，Chua等^[35]采用GC和LC-MS/MS方法检测燕窝中的氨基酸和单糖，并用Hotelling T2阈值检验甄别了燕窝成分。赵斌^[36]、孔晨^[37]、高志亮^[38]、于海花^[39]和庄俊钰^[40]等分别研究了燕窝在FTIR谱图、NMR一维氢谱、代谢物和氨基酸组成，结合化学计量学方法建立了判别模型，用于燕窝成分的甄别。

关于“是否只含有燕窝一种成分？”问题的研究方法主要是利用现有技术探索燕窝恒定的、可量化的特征指标，并根据其衰减情况来推断燕窝是否掺假。唾液酸（又名燕窝酸）是研究最早、也是研究最多的燕窝特征指标。2004年，黄华军等^[41]首次建立了燕窝中唾液酸检测的分光光度法，并得到12个标准燕窝唾液酸含量的平均值10.75%（以此作为标准燕窝的唾液酸含量），将样品中的唾液酸含量代入公式计算出燕窝样品及其制品中燕窝的含量，以此判断燕窝是否掺假。2008—2016年，8年间燕窝中唾液酸的检测方法得到了快速地、多元化地发展，主要有GC法、离子色谱法、LC-MS法、GC-MS法、分光光度法等（表3），这些方法的基本原理主要是通过酸解释放糖蛋白中的唾液酸然后再利用相应仪器进行分析，并且我国已于2014年发布实施了燕窝及其制品中唾液酸测定的国家标准GB/T 30636—2014《燕窝及其制品中唾液酸的测定 液相色谱法》。

表3 2008—2016年间燕窝中唾液酸检测方法研究情况

Table 3 Analytic methods for detection of sialic acid in EBN reported in the literature from 2008 to 2016

年份	检测技术	提取方法	特征参数	参考文献
2008	阳离子交换液相色谱法	50% (体积分数, 下同) 乙酸水解	紫外检测器 (205 nm)	[42]
2009	HPLC	100 g/L 硫酸氢铵水解、100 g/L 邻苯二胺盐酸盐衍生化	二极管阵列检测器 (230 nm)	[27]
2010	HPLC	0.5 mol/L 硫酸氢钠水解、邻苯二胺盐酸盐衍生化	二极管阵列检测器 (201 nm)	[43]
2010	二极管阵列/荧光检测器串联的HPLC	0.5 mol/L 硫酸氢钠水解、20 mg/mL 邻苯二胺盐酸盐衍生化	二极管阵列检测器 (230 nm)、荧光检测器 (230 nm 激发波长、425 nm 发射波长)	[44]
2011	分光光度法	50% 乙酸水解	分光光度计 (470 nm)	[45]
2013	超高效液相色谱-串联质谱法	1.0% 磷酸水解	负离子模式下的MRM扫描模式/定量离子对 308.02 m/z > 86.86 m/z	[46]
2013	分光光度法	50% 乙酸水解	分光光度计 (470 nm)	[47]
2013	HPLC	0.5 mol/L 硫酸氢钠水解、10 mg/mL 邻苯二胺盐酸盐衍生化	紫外可见检测器 (230 nm)	[48]
2014	高效阴离子交换色谱-脉冲冲安培法	0.02 mol/L 盐酸水解	ED5000安培检测器	[49]
2014	离子色谱-积分脉冲安培法	0.1 mol/L 三氟乙酸水解	电导检测器	[50]
2014	GC-MS	1 mol/L 硫酸水解、吡啶和乙酸酐衍生化	电子轰击离子源 (70 eV 电子能量)	[51]
2015	LC-MS/MS	50% 乙酸水解	负离子模式下的选择离子扫描模式 (定量离子、m/z 380.25)	[52]
2016	HPLC	0.5% 磷酸水解、10 mg/mL 邻苯二胺盐酸盐衍生化	二极管阵列检测器 (228 nm)	[53]

然而, 有学者认为随着唾液酸的工业化生产, 唾液酸已经不适合作为燕窝的特征指标, 并推荐燕窝糖蛋白作为燕窝鉴别真伪的特征指标^[54]。崔慧娥^[55]、Zhang Shiwei^[56]、赖心田^[57]、张世伟^[58]等通过对燕窝中糖蛋白的研究, 分别从燕窝中纯化得到了60 kDa和106 kDa的糖蛋白, 在兔子体内获得了相应糖蛋白的抗血清, 建立了燕窝中唾液酸糖蛋白的ELISA方法, 并将方法用于检测市售燕窝中的特征糖蛋白含量, 进而对燕窝是否掺假进行鉴别。除了唾液酸和特征糖蛋白外还有其他特征指标: 2005年Marcone^[59]认为在燕窝中掺入10%左右的卡拉胶、银耳和红藻可以使得燕窝的蛋白质质量分数降低1.1%~6.2%, 燕窝中蛋白质含量的变化可以作为辨别燕窝是否掺假的特征指标; 邓月娥^[60]、Guo Lili^[61]和孙素琴^[62]等将燕窝中蛋白质、多糖和氨基酸的FTIR特征吸收峰强度作为辨别燕窝是否掺假的特征指标; 2013年Teo等^[63]将燕窝中牛磺酸含量辨别燕窝是否掺假的特征指标 (燕窝中含有微量牛磺酸, 而牛磺酸又普遍且大量存在于动植物中); 林丹等^[64]将必需氨基酸与总氨基酸的比值和必需氨基酸与非必需氨基酸的比值变化作为辨别燕窝是否掺假的特征指标; 2017年Shim等^[65]将燕窝中自由水和结合水的含量作为辨别燕窝是否掺假的特征指标。

关于“燕窝中掺假物是什么?”以及“燕窝中有多少掺假物?”问题的研究是在燕窝真伪鉴别研究快速发

展阶段II开展的, 通过该研究能够获得掺假物的具体信息, 可以为监管部门执法提供依据。目前燕窝中的常见掺假物主要有猪皮、银耳、蛋清、鱼鳔、琼脂、海藻、卡拉胶、多肽、糖类和盐类等。掺假物的定性分析方法主要有双向电泳法、分子生物学方法、CE法、ELISA法、拉曼光谱法和ICP-MS法等。2010年, Wu Yajun等^[33]建立了燕窝中银耳成分的2-DE检测方法, 银耳的最低检出限是10%。2014年Guo Lili等^[66]建立了TaqMan实时荧光PCR方法可以特异性地检测燕窝中的燕窝、猪皮、银耳、蛋清和琼脂成分, 最低检出限分别为: 0.5%燕窝在银耳中、0.001%银耳在燕窝中、0.5%琼脂在燕窝中和0.001%猪皮在燕窝中。2015年, 刘鸣畅等^[67]用CE技术对燕窝及银耳的水溶性蛋白质进行分离, 找到了燕窝和银耳的特征蛋白峰, 可以用于燕窝中银耳成分的定性检测, 并对该方法的定量可能性进行了初探。2016年, Tukiran等^[68]用猪胶原蛋白的pAb1 (包含14个氨基酸残基的多肽)、pAb2 (包含15个氨基酸残基的多肽) 和pAb3 (包含22个氨基酸残基的多肽) 3条特异多肽注射到雌性新西兰白兔体内制备多克隆抗体, 选择灵敏度高且与燕窝、蛋清和牛明胶无交叉反应的抗体pAb3建立了酶联免疫方法, 用于检测燕窝中掺入的猪明胶。2016年Shim等^[69]建立了快速、无损、非标记的拉曼光谱法, 根据碳水化合物和蛋白质等分子的特征振动谱线可以实现对燕窝中常见掺假物猪皮、鱼鳔、银耳、卡拉胶、红藻、糖类、多肽和盐类等定性。侯真真^[70]、郭秋兰^[71]等利用ICP-MS对燕窝中的14种元素的含量进行了分析, 并选择钠、镁、铁、锰等9种元素作为主成分分析的变量能够鉴别燕窝中掺入的猪皮、银耳和琼脂。

2.2 燕窝物种来源鉴定

燕窝物种来源鉴定是针对“燕窝是哪一种金丝燕产的?”这个问题展开研究的, 其研究策略: 主要是利用分子生物学技术设计出金丝燕种间特异的上下游引物, 对特定基因片段进行PCR扩增, 利用DNA条码技术对产燕窝金丝燕种类进行鉴定。据文献报道全球金丝燕共有24种, 能够产燕窝的金丝燕种类仅占30%左右, 燕窝的物种来源鉴别特指对产燕窝的金丝燕种类的鉴定。早在1991年, 陆源等^[28]就已经开始关注不同物种来源的燕窝之间的差异, 并对我国产自短嘴金丝燕和白腰雨燕的两种土燕窝与进口燕窝在蛋白质和氨基酸组成上进行了比较研究, 发现短嘴金丝燕在蛋白质和氨基酸组成上与进口燕窝的相似, 它们的生物亲缘关系较近且同属雨燕科金丝燕属, 而白腰雨燕属于雨燕科雨燕属, 与二者的生物亲缘关系较远。2009年, Lin Jieru等^[72]首次用雨燕基因库中线粒体DNA上的Cytb基因构建系统进化树, 对11个燕窝样品、1个即食燕窝制品和1个怀集燕窝的DNA进行检测, 11个燕窝和即食燕窝的物种来源都鉴定为爪哇金丝燕 (*Aerodramus fuciphagus*), 而怀集燕窝的物种来源为小白腰雨燕 (*Apus nipalensis*), 并认为小白腰

雨燕是白腰雨燕的东部亚洲的亚种, 这个结果证实了基于线粒体 *Cytb* 基因的DNA条形码技术能够对燕窝物种来源的鉴定, 同时还提出该方法具有鉴别爪哇金丝燕亚种的潜力。2013年, 赖心田等^[57]利用Lin等设计的特异性引物对 *Cytb* 基因进行扩增获得了1 250 bp的片段, 成功鉴定19个燕窝参照品的物种来源为爪哇金丝燕。2015年王风云^[1]收集了32种不同来源的燕窝样品, 分别针对 *Cytb*、*ND2*、*COI*、*12S rRNA* 基因序列设计引物进行PCR扩增, 利用Kimura2-parameter model计算遗传距离, 构建Neighbor-joining系统发育树, 建立了用于燕窝物种来源鉴定的 *Cytb*、*ND2*、*COI*、*12S rRNA* 条形码序列。实验结果表明市场上官燕窝的物种来源为爪哇金丝燕 *Aerodramus fuciphagus* 或其亚种淡腰金丝燕 *Aerodramus fuciphagus germani*, 毛燕窝的物种来源为大金丝燕, 但是王风云选用的 *Cytb* 基因的290 bp片段不能区分大金丝燕 *Aerodramus maximus* 及其亚种 *Aerodramus maximus lowi*。2017年刁雅欣等^[73]用动物物种通用的 *CO I* 基因设计了通用引物进行DNA扩增, 利用爪哇金丝燕、纯色金丝燕、怀氏金丝燕、侏金丝燕、大金丝燕和白腰雨燕的 *CO I* 序列构建NJ系统发育树, 对13个燕窝样品的物种来源进行鉴定, 结果显示13个燕窝样品均与爪哇金丝燕的 *CO I* DNA序列相似度99%。随后陈月娟等^[74]用GenBank下载的爪哇金丝燕、戈氏金丝燕、白腰雨燕、小灰腰金丝燕和大金丝燕的 *Cytb* 序列构建了系统进化树, 并对两个燕窝样品的物种来源进行了鉴定, 其结果与BLAST搜索结果一致。

目前世界上大部分市售燕窝产自爪哇金丝燕和大金丝燕, 而我国产的一小部分怀集燕窝则是白腰雨燕生产的。燕窝物种来源的鉴定主要是通过基于 *Cytb* 和 *COI* 基因的DNA条码技术实现的, 正向引物ND5和反向引物H15709能够对 *Cytb* 基因进行有效PCR扩增, 通过对不同目标片段的比对分析能够将爪哇金丝燕及其亚种、大金丝燕和白腰雨燕区别开来, 但是还不能够区分大金丝燕及其亚种。

2.3 燕窝产地及生产方式鉴别

燕窝产地及生产方式鉴别是针对“燕窝的产地在哪? 屋燕还是洞燕?”这两个燕窝品质问题展开的。不同品质的燕窝因产地和生产方式等因素的影响而具有不同的经济价值, 蓄意混淆燕窝产地和生产方式的食品欺诈行为时有发生, 因此亟需能够对燕窝产地和生产方式进行鉴别的技术。2014年戴洁等^[75]以吸水膨胀倍数为指标对马来西亚、印度尼西亚、越南和泰国的燕窝进行研究, 结果发现不同产地燕窝的吸水膨胀倍数存在差异, 马来西亚和印度尼西亚产燕窝的吸水膨胀倍数最高, 越南的次之而泰国的最小。同年, Chua等^[76]采用GC-MS/MS和LC-MS/MS对燕窝的代谢产物进行分析, 发现基于GC-MS/MS的OPLD-DA模型优于基于LC-MS/MS的模型, 该方法能够区分燕窝的颜色、产地和生产方式。

2016年Seow等^[77]随机收集了马来西亚和印尼的60个燕窝样品, 并采用GC法对燕窝的氨基酸组成进行了分析, 采用OPLS-DA法建立的模型能够将马来西亚屋燕和洞燕区分开来, 其中酪氨酸和谷氨酸是含量相差较大的两种氨基酸, 其他氨基酸含量相差无几。但是, 于海花^[39]用1%甲酸对来自马来西亚和印度尼西亚未经加工的燕窝进行提取, 采用液相色谱四极杆飞行时间质谱联用技术提取的小分子化合物进行分析, 通过聚类评估发现并不能将不同产地的燕窝区分开。蔡翔宇等^[78]对马来西亚和印度尼西亚燕窝的唾液酸含量进行了分析, 发现两个国家产的燕窝中唾液酸含量相近, 因此唾液酸含量检测不能作为划分燕窝产地的依据。2017年Guo Lili等^[61]采用基于SDS-PAGE条带的层次聚类分析、主成分分析和线性判别分析等多元变量分析建立的模型, 能够区别马来屋燕和印尼屋燕, 也能区别屋燕和洞燕, 但是并不能区分马来洞燕和印尼洞燕。2017年Quek等^[79]收集了2012—2013年产于马来西亚不同地区的 *Aerodramus fuciphagus* 和 *Aerodramus maximus* 两种金丝燕产的燕窝, 利用SYBR Green I实时荧光PCR技术对 *Cytb*、*ND2*、*12S* 和 *Fib7* 基因进行扩增, 对PCR扩增产物进行FINS测序后, 得到区分物种和产地的两个进化树, 该方法仅能将同一物种、同一产地产的燕窝进行聚类, 而不能将同一产地的不同种金丝燕产的燕窝进行聚类。

燕窝产地及生产方式鉴别是燕窝真伪鉴别研究体系中新兴的研究方向, 旨在通过燕窝产地的溯源和生产方式的鉴别客观地评价燕窝的品质及商品价格, 杜绝燕窝以次充好和虚假宣传等现象。目前燕窝产地及生产方式鉴别的研究思路来源于化学计量学方法与代谢物、蛋白质和氨基酸等分析技术的有机结合。

3 结语

燕窝真伪鉴别研究经历了20多年的发展衍生出3个不同的研究方向: 燕窝及掺假物甄别、燕窝物种来源鉴定和燕窝产地及生产方式鉴别。燕窝及掺假物甄别贯穿燕窝真伪鉴别研究体系发展的始终, 为了适应不同时期对燕窝掺假甄别的需求, 在研究手段、研究策略、研究内容和研究目标等方面进行了不同程度的调整。目前, 燕窝及掺假物甄别的研究重点集中在掺假物的定性上, 还未有掺假物的定量研究报道, 随着我国燕窝市场的然而燕窝监管的精细化、标准化和法治化将推动掺假物定量技术的发展。燕窝的物种来源鉴定前期已经取得了一些成果, 但因金丝燕基因数据库不完善以及鉴定需求不旺盛等因素的制约并未得到进一步的发展, 就目前的研究成果而言或许可以为官燕、毛燕和草燕的鉴别、燕窝产地的溯源、品质的识别等提供技术支持。燕窝因产地和生产方式的不同而具有不同的市场价格, 由此导致的

掺假、造假现象层出不穷,亟需能够对燕窝产地和生产方式进行溯源的技术来支撑燕窝市场监管的规范化,同时燕窝产地及生产方式鉴别在食品安全溯源体系构建政策导向下已经发展为燕窝真伪鉴别研究体系中的又一研究方向。

燕窝真伪鉴别研究中现有的技术主要以基于唾液酸、燕窝糖蛋白、氨基酸、核酸的光谱、核磁共振、色谱、质谱、电泳和分子的分析技术为主。然而随着大数据时代的到来,蛋白组学、基因组学、代谢组学、脂质组学和糖组学等多组学技术的发展或许可以为燕窝真伪鉴别能力的提升提供新的契机。因此,无论从技术发展层面还是从政策导向层面,基于食品组学技术的燕窝及掺假物甄别中掺假物的定性与定量和燕窝产地及生产方式鉴别将成为燕窝真伪鉴别领域的研究热点。

参考文献:

- [1] 王凤云. 基于DNA条形码及实时荧光定量PCR技术的燕窝鉴别研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2015: 1-4.
- [2] 林洁茹. 燕窝DNA基原鉴定及抗病毒作用研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2010: 6.
- [3] 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: 1-2.
- [4] 乌日罕, 陈颖, 吴亚君, 等. 燕窝真伪鉴别方法及国内外研究进展[J]. 检验检疫科学, 2007, 17(4): 60-62. DOI:10.3969/j.issn.1674-5354.2007.04.017.
- [5] SAENGKRAJANG W, MATAN N, MATAN N. Nutritional composition of the farmed edible bird's nest (*Collocalia fuciphaga*) in Thailand[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 31: 41-45. DOI:10.1016/j.jfca.2013.05.001.
- [6] 曹妍, 徐杰, 高焱, 等. 白燕与血燕的营养成分分析和比较[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 414-417. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.10.020.
- [7] 赵斌, 黎小鹏, 刘敬, 等. 东南亚进口燕窝中总氮和氨基酸分析[J]. 中药材, 2014, 37(6): 949-952.
- [8] 黄永连, 陈晓嘉, 韩秋珍. 氨基酸自动分析仪测定燕窝氨基酸组成[J]. 现代食品, 2016(12): 99-103. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2016.12.036.
- [9] 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. DOI:1673-0925(2016)02-0136-09.
- [10] CHAN G K L, WONG Z C F, LAM K Y C, et al. Edible bird's nest, an Asian health food supplement, possesses skin lightening activities: identification of *N*-acetylneuraminic acid as active ingredient[J]. Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications, 2015, 5(4): 262-274. DOI:10.4236/jcdsa.2015.54032.
- [11] MA F C, LIU D C. Sketch of the edible bird's nest and its important bioactivities[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 559-567. DOI:10.1016/j.foodres.2012.06.001.
- [12] ZHANG Y D, IMAM M U, ISMAIL M. *In vitro* bioaccessibility and antioxidant properties of edible bird's nest following simulated human gastro-intestinal digestion[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2014, 14: 468-474. DOI:10.1186/1472-6882-14-468.
- [13] HAGHANI A, MEHRBOD P, SAFI N, et al. Edible bird's nest modulate intracellular molecular pathways of influenza A virus infected cells[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2017, 17: 22-34. DOI:10.1186/s12906-016-1498-x.
- [14] 郭天雨. 燕窝的古今系统评述[D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2015: 1-2.
- [15] 孙利, 蒋萍萍, 王欣, 等. 进口燕窝溯源系统的构建和应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(5): 1894-1898.
- [16] 刘璇, 张锦身. 燕窝及其产品的真假鉴别的研究[J]. 旅行医学科学, 1995, 1(4): 26-28.
- [17] 文惠玲, 汪治, 申欣. 3种伪品燕窝的鉴别[J]. 中国中药杂志, 1996, 21(10): 10-11.
- [18] 李曼. 三种伪品燕窝的鉴别[J]. 基层中药杂志, 1996, 10(2): 15.
- [19] 曾聪彦. 燕窝真伪的简易鉴别[J]. 基层中药杂志, 2002, 16(6): 34. DOI:10.3969/j.issn.1673-6427.2002.06.019.
- [20] 林洁茹, 周华, 赖小平. 体视镜在燕窝鉴别中的应用[J]. 中药材, 2006, 29(3): 219-221. DOI:10.3321/j.issn:1001-4454.2006.03.007.
- [21] 宋琳, 周群, 孙素琴. FTIR光谱法与燕窝的品质分析[C]//第十四届全国分子光谱学学术会议. 长春: 中国化学会, 中国光学学会, 2006: 7-8.
- [22] 赵斌, 王羚娜, 刘敬, 等. 东南亚进口燕窝紫外光谱鉴别研究[J]. 时珍国医国药, 2014(5): 1129-1130. DOI:10.3969/j.issn.1008-0805.2014.05.042.
- [23] 查圣华, 姜水红, 张宏. 燕窝及其伪品鉴定方法研究[J]. 食品科技, 2010, 35(4): 281-283. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2010.04.030.
- [24] 查圣华, 姜水红, 王泽凤, 等. 燕窝中白燕和血燕对比研究[J]. 现代中药研究与实践, 2011, 25(2): 23-25. DOI:10.13728/j.1673-6427.2011.02.016.
- [25] 王慧, 王玉, 倪坤仪. 气相色谱法测定燕窝中醛糖的含量[J]. 中国药学杂志, 2006, 41(14): 1108-1110. DOI:10.3321/j.issn:1001-2494.2006.14.019.
- [26] 林洁茹, 董燕, 周华, 等. 燕窝鉴别中的蛋白质电泳研究[J]. 世界科学技术(中医药现代化), 2006, 8(3): 30-32; 90. DOI:10.3969/j.issn.1674-3849.2006.03.007.
- [27] 曹国杰. 燕窝及其相关产品鉴别方法的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2009: 25-53.
- [28] 陆源, 王建云, 王达瑞, 等. 三种燕窝的蛋白质氨基酸分析[J]. 氨基酸杂志, 1991(2): 30-31. DOI:10.14188/j.ajsh.1991.02.010.
- [29] 朱春红, 雍炜, 徐厉, 等. 燕窝真假鉴定技术研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2007, 19(3): 206-209. DOI:10.3969/j.issn.1004-8456.2007.03.004.
- [30] 陈哲妮, 黄婉锋. 燕窝及冰糖燕窝的鉴别[J]. 现代中药研究与实践, 2011, 25(2): 22-23. DOI:10.13728/j.1673-6427.2011.02.015.
- [31] 黄雪珍. 分光光度法鉴别燕窝真伪及半定量测定燕窝的百分含量[J]. 海峡药学, 2007, 19(8): 78-79. DOI:10.3969/j.issn.1006-3765.2007.08.041.
- [32] 秦沛. 燕窝蛋白毛细管电泳分离方法的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011: 38-40.
- [33] WU Yajun, CHEN Ying, WANG Bin, et al. Application of SYBR Green PCR and 2DGE methods to authenticate edible bird's nest food[J]. Food Research International, 2010, 43(8): 2020-2026. DOI:10.1016/j.foodres.2010.05.020.
- [34] 何国林, 陈念, 刘鹏, 等. TaqMan实时荧光定量PCR鉴定燕窝方法的建立[J]. 生物技术通讯, 2015, 26(1): 111-115. DOI:10.3969/j.issn.1009-0002.2015.01.024.
- [35] CHUA Y G, CHAN S H, BLOODWORTH B C, et al. Identification of edible bird's nest with amino acid and monosaccharide analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(1): 279-289. DOI:10.1021/jf503157n.
- [36] 赵斌, 邓仙梅, 刘敬, 等. FTIR结合化学计量学法鉴别燕窝的真伪[J]. 中成药, 2015, 37(10): 2243-2246. DOI:10.3969/j.issn.1001-1528.2015.10.031.

- [37] 孔晨, 徐敦明, 黄慧英. 基于核磁共振-维氢谱法鉴定燕窝真伪的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 54(6): 819-824.
- [38] 高志亮. 燕窝的真伪鉴定技术及安全性研究[D]. 厦门: 集美大学, 2013: 32-40.
- [39] 于海花. 基于LC/Q/TOF和拉曼技术的燕窝甄别方法研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015: 12-42.
- [40] 庄俊钰, 许佩勤, 林丹, 等. 基于特征氨基酸指纹图谱的白燕窝识别掺假模型建立与验证[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(11): 133-138. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2016.11.031.
- [41] 黄华军, 奚星林, 陈文锐, 等. 分光光度法检测燕窝及其制品中燕窝含量[J]. 广州食品工业科技, 2003, 19(3): 68-69. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2003.03.028.
- [42] 杨亮. 燕窝及其制品掺伪鉴别和含量测定技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 14-28.
- [43] 华永有, 杨艳, 林美华. 高效液相色谱法测定燕窝类保健品中唾液酸[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(10): 2454-2456.
- [44] 冯婷玉, 薛长湖, 孙通, 等. 燕窝中唾液酸的DAD/FLD串联HPLC测定方法研究[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 233-236.
- [45] 李敏, 黄华军, 奚星林, 等. 燕窝中唾液酸含量的分光光度测定方法[J]. 中国卫生检验杂志, 2011, 21(3): 598-600.
- [46] 侯向昶, 朱丽萍, 刘春生, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定燕窝中唾液酸的含量[J]. 现代食品科技, 2013, 29(7): 1706-1709; 1720.
- [47] 王羚娜, 吴国洪, 邱子博, 等. 九种燕窝中唾液酸含量的紫外可见分光光度法测定[J]. 时珍国医国药, 2013, 24(11): 2571-2573. DOI:10.3969/j.issn.1008-0805.2013.11.002.
- [48] 王羚娜, 李远彬, 邱子博, 等. 25种燕窝样品中唾液酸含量的测定与分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013(19): 64-67. DOI:10.11653/syjf2013190064.
- [49] 王勇, 陈硕, 卢端萍, 等. 高效阴离子交换色谱-脉冲安培法测定燕窝中唾液酸的含量[J]. 药物分析杂志, 2016, 36(11): 1993-1998. DOI:10.16155/j.0254-1793.2016.11.15.
- [50] 李耿, ASANTE J O, 戴洁, 等. 离子色谱-积分脉冲安培法测定燕窝中N-乙酰神经氨酸的含量[J]. 广东药学院学报, 2014, 30(1): 40-43. DOI:10.3969/j.issn.1006-8783.2014.01.009.
- [51] YANG M, CHEUNG S H, LI S C, et al. Establishment of a holistic and scientific protocol for the authentication and quality assurance of edible bird's nest[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 271-278. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.11.007.
- [52] 赖源发, 胡佳, 王鋆萍, 等. 液相色谱-串联质谱法测定冰糖燕窝中的唾液酸[J]. 中国食品添加剂, 2015(4): 185-189. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2015.04.027.
- [53] 卢端萍, 程佳华, 陈硕, 等. 不同产地燕窝中唾液酸含量的高效液相色谱法测定[J]. 时珍国医国药, 2016, 27(2): 371-373.
- [54] 杨国武, 张世伟, 黄秀丽, 等. 唾液酸检测研究现状及其用于燕窝产品质量控制评析[J]. 检验检疫学刊, 2010, 20(2): 70-73. DOI:10.3969/j.issn.1674-5354.2010.02.023.
- [55] 崔慧娥. 燕窝糖蛋白酶联免疫检测方法的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2009: 24-29.
- [56] ZHANG Shiwei, LAI Xintian, LIU Xiaoqing, et al. Competitive enzyme-linked immunoassay for sialoglycoprotein of edible bird's nest in food and cosmetics[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3580-3585. DOI:10.1021/jf300865a.
- [57] 赖心田, 张世伟, 陈血建, 等. 酶联免疫法定量检测市售燕窝及其加工制品中特征蛋白含量[J]. 农产品加工(学刊), 2013(9): 4-7; 12. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2013.09.030.
- [58] 张世伟, 赖心田, 陈血剑, 等. 双抗夹心酶联免疫分析法检测燕窝中唾液酸糖蛋白[J]. 食品工业, 2013, 34(6): 195-198.
- [59] MARCONE M F. Characterization of the edible bird's nest the "caviar of the east"[J]. Food Research International, 2005, 38(10): 1125-1134. DOI:10.1016/j.foodres.2005.02.008.
- [60] 邓月娥, 孙素琴, 周群, 等. FTIR光谱法与燕窝的品质分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(7): 1242-1245. DOI:10.3321/j.issn:1000-0593.2006.07.015.
- [61] GUO Lili, WU Yajun, LIU Mingchang, et al. Determination of edible bird's nests by FTIR and SDS-PAGE coupled with multivariate analysis[J]. Food Control, 2017, 80: 259-266. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.05.007.
- [62] 孙素琴, 梁曦云, 杨显荣. 6种燕窝的傅里叶变换红外光谱法原性状快速鉴别[J]. 分析化学, 2001, 29(5): 552-554. DOI:10.3321/j.issn:0253-3820.2001.05.014.
- [63] TEO P, MA F C, LIU D C. Evaluation of taurine by HPTLC reveals the mask of adulterated edible bird's nest[J]. Journal of Chemistry, 2013, 2013: 1-5. DOI:10.1155/2013/325372.
- [64] 林丹, 庄俊钰, 黄永连, 等. 白燕窝的氨基酸指纹图谱构建及识别研究[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 269-273.
- [65] SHIM E K, CHANDRA G F, LEE S Y. Thermal analysis methods for the rapid identification and authentication of swiftlet (*Aerodramus fuciphagus*) edible bird's nest: a mucin glycoprotein[J]. Food Research International, 2017, 95: 9-18. DOI:10.1016/j.foodres.2017.02.018.
- [66] GUO Lili, WU Yajun, LIU Mingchang, et al. Authentication of edible bird's nests by TaqMan-based real-time PCR[J]. Food Control, 2014, 44: 220-226. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.04.006.
- [67] 刘鸣畅, 吴亚君, 郭丽丽, 等. 毛细管电泳法检测掺假燕窝中银耳成分[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 191-196. DOI:10.16429/j.1009-7848.2015.10.026.
- [68] TUKIRAN N A, ISMAIL A, MUSTAFA S, et al. Determination of porcine gelatin in edible bird's nest by competitive indirect ELISA based on anti-peptide polyclonal antibody[J]. Food Control, 2016, 59: 561-566. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.06.039.
- [69] SHIM E K, CHANDRA G F, PREDIREDDY 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. DOI:10.1007/s13197-016-2344-3.
- [70] 侯真真, 庄俊钰, 冯志强, 等. 掺假燕窝的元素组成分析及鉴别研究[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 287-291.
- [71] 郭秋兰, 孙艺, 宋美英. 电感耦合等离子体质谱法同时测定燕窝中14种元素含量[J]. 现代食品, 2016(9): 103-106. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2016.09.044.
- [72] LIN Jieru, ZHOU Hua, LAI Xiaoping, et al. Genetic identification of edible birds' nest based on mitochondrial DNA sequences[J]. Food Research International, 2009, 42(8): 1053-1061. DOI:10.1016/j.foodres.2009.04.014.
- [73] 刁雅欣, 刘德星, 邱德义, 等. 应用DNA条形码技术鉴别燕窝的基源[J]. 检验检疫学刊, 2017, 27(3): 14-18.
- [74] 陈月娟, 刘文简, 陈丹娜, 等. 燕窝DNA条形码的鉴定研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(27): 4593-4597. DOI:10.19540/j.cnki.cjcm.20171030.018.
- [75] 戴洁, 李耿, 梁月亮, 等. 燕窝“发头”测定方法的优化及其在质量评价中的应用[J]. 医学研究杂志, 2014, 43(10): 46-48.
- [76] CHUA Y G, BLOODWORTH B C, LEONG L P, et al. Metabolite profiling of edible bird's nest using gas chromatography/mass spectrometry and liquid chromatography/mass spectrometry[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2014, 28(12): 1387-1400. DOI:10.1002/rcm.6914.
- [77] SEOW E K, IBRAHIM B, MUHAMMAD S A, et al. Differentiation between house and cave edible bird's nests by chemometric analysis of amino acid composition data[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 428-435. DOI:10.1016/j.lwt.2015.08.047.
- [78] 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.
- [79] QUEK M C, CHIN N L, TAN S W, et al. Molecular identification of species and production origins of edible bird's nest using FINS and SYBR Green I based real-time PCR[J]. Food Control, 2018, 84: 118-127. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.07.027.