

食用槟榔中苯并芘检测方法研究进展

Research progress of determination of benzo- α -pyrene in edible areca nut

傅孝美^{1,2}

李宗军¹

赵志友²

罗凤莲¹

FU Xiao-mei^{1,2} LI Zong-jun¹ ZHAO Zhi-you² LUO Feng-lian¹

(1. 湖南农业大学食品科技学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南宾之郎食品科技有限公司, 湖南 湘潭 411100)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Hunan Binzhilang Food Science & Technology Co. Ltd., Xiangtan, Hunan 411100, China)

摘要:综述了食用槟榔中苯并芘的污染来源以及检测食用槟榔中苯并芘的前处理方法,归纳了几种常用的检测食品中苯并芘的仪器分析方法,指出目前已有的苯并芘检测方法的不足之处,并对槟榔中苯并芘的检测方法的研究方向进行了展望。

关键词:槟榔;苯并芘;检测方法

Abstract: Smoked areca nuts contain harmful substances such as benzo- α -pyrene on its surface, because they are cured in wood smoke in the initial processing process. People's health is seriously threatened by these harmful substances. It is crucial for people to monitor the residues of benzo- α -pyrene effectively in areca nut to ensure the food safety. The sources of benzo- α -pyrene pollution in edible areca nut and the pretreatment methods for detecting benzo- α -pyrene in edible areca nut are summarized in this study, and several instrumental methods for the determination of benzo- α -pyrene in food are also evaluated. Our study is helpful to improving deficiencies and further research.

Keywords: edible areca nut; benzo- α -pyrene; detection methods

槟榔(*Areca catechu* Linn)是槟榔属棕榈科槟榔亚科槟榔族槟榔亚族的常绿乔木^[1]。槟榔主要种植在中国的海南和台湾,海南 95% 以上的槟榔以干果的形式直接销往湖南加工成食用槟榔(亦称槟榔嚼块),还有少部分以鲜品形式直接作为咀嚼嗜好品在本地食用;在台湾是以直接嚼食鲜品为主,并衍生出“槟榔西施”“红唇族”等台湾特有的槟榔文化^[2]。如今,槟榔已发展成为海南第二大热带经济作物,仅次于天然橡胶^[1,3]。

随着槟榔产业的不断发展壮大,食用槟榔的质量安

全也备受关注。鲜果槟榔在干制烟熏成黑果时会污染苯并芘等有毒有害物质,国际癌症研究机构已将苯并芘鉴定为 1 类致癌物(人类致癌物)^[4]。文章归纳了食用槟榔中苯并芘的污染来源,对比介绍了几种槟榔中苯并芘的检测方法,旨在为食用槟榔中苯并芘的检测提供参考。

1 食用槟榔中苯并芘的污染来源

食品中苯并芘的污染来源主要包括木材、石油不完全燃烧、食品加工过程、包装材料污染以及沥青中的苯并芘污染等途径^[5]。槟榔鲜果通常在绿熟期进行采摘,在海南经初加工制成干果,再运销湖南进一步加工制成槟榔嚼块。槟榔初加工产品分为青果和黑果,青果是将槟榔鲜果进行蒸煮杀青,再烘干至水分含量为 20% 左右,制成无烟熏味的槟榔干果^[6];黑果则是利用传统的烟熏烤炉将蒸煮杀青后的槟榔鲜果熏干,制成水分含量约 26% 的槟榔干果。经烟熏的槟榔干果因有大量熏烟颗粒附着在其表皮而发黑,故称为黑果^[7]。传统的烟熏烤炉是利用橡胶木材碎屑暗火燃烧熏干槟榔或是用蜂窝煤球直接熏干槟榔,熏烟中含有苯并芘,在高温下随着熏烟附着到槟榔表面,并逐步渗入内部。康效宁等^[8]研究发现,经传统烟熏烘烤方式加工制成的槟榔干果,其苯并芘残留量高达 26.52 $\mu\text{g}/\text{kg}$,参照 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中谷物及其制品苯并芘残留限量 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其含量为限量标准的 5.3 倍,而经后加工制成食用槟榔后,苯并芘的含量降低到安全标准内。在槟榔干果加工成槟榔嚼块的过程中,经泡籽、清洗、煮籽、蒸籽、烘烤、发制等多个加工工序,苯并芘含量大幅度下降^[9],严聘等^[10]研究发现在食用槟榔加工过程中,通过清水反复清洗可使槟榔表面烟垢吸胀疏松,有利于后工序除去烟垢,再经 0.5% 纯碱和 0.2% CMC 混合液浸泡槟榔烟果,苯并芘残留基本无检出。但烟果槟榔加工过程中苯并芘的变化规律还有待进一步研究。

基金项目:湖南省科技创新计划项目(编号:2017SK2430)

作者简介:傅孝美,女,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:罗凤莲(1973—),女,湖南农业大学副教授,博士。

E-mail: 1351600014@qq.com

收稿日期:2019-05-15

2 苯并芘的性质及危害

苯并芘由 5 个熔融的苯环组成^[11],呈无色或淡黄色针状晶体,熔沸点较高,不溶于水,密度比水大,微溶于甲醇、乙醇,易溶于苯、甲苯、正己烷等有机溶剂。苯并芘是多环芳烃类化合物的代表,具有很强的致癌性、致畸性和诱变性,常被作为多环芳烃的指标化合物^[12]。苯并芘主要通过食物、饮用水及吸入污染空气而进入人体,随血液循环遍布全身,并在脂肪和乳腺细胞中不断蓄积。Malik 等^[13]证实了苯并芘诱导乳腺癌发生的发病机理。张雪莲等^[14]研究表明,苯并芘暴露会增加肺癌发病率,并且随诱导时间的延长,肺癌发病率和肿瘤数不断升高。Widziewicz 等^[15]研究了部分燃烧煤炭、木材较多的地区,发现空气中的苯并芘浓度高于 2007/107/EC 指令中苯并芘浓度目标值(1 ng/m^3)2~5 倍,长期暴露在含有苯并芘的空气环境中,会造成慢性中毒,吸入性肺癌的发病率明显提高。苯并芘还有生殖毒性,会导致哺乳类动物精子畸变^[16],导致胚胎畸变或死亡^[17]。由于苯并芘的强致癌性,美国环境保护署已将其作为优先污染物,并对其进行日常环境监测^[18]。

3 食用槟榔中苯并芘的检测方法

3.1 前处理方法

被污染的食品中苯并芘含量极低,但微量的苯并芘对人体的危害也较大,且苯并芘性质稳定,因此对于较复杂的食品基质,做好样品的前处理对检测结果的准确性尤为重要。目前,检测苯并芘的前处理方法有固相萃取法^[19]、超声辅助基质分散固相萃取法^[20]、涡旋辅助液液萃取法^[21]、QuEChERS 法^[22]等,其中固相萃取法是应用最广泛的前处理方法。槟榔中粗纤维含量高,有机酸、多酚类物质、生物碱等种类多样,含量丰富,而脂肪、蛋白质等高分子物质含量较少,且主要分布在槟榔果核中,果皮和果肉中含量较低^[23-26]。基于食用槟榔这种特殊基质,苯并芘检测的前处理方法主要有固相萃取法(Solid Phase Extraction, SPE)、凝胶渗透色谱法(Gel Permeation Chromatography, GPC)和分散固相萃取法(Dispersive Solid Phase Extraction, DSPE)。

3.1.1 固相萃取法 SPE 法是利用固体吸附剂将样品中的待测组分与干扰组分分离的方法,该方法将待测组分吸附在萃取柱上,而干扰组分被洗脱除去,达到样品净化的目的。通常根据样品性质和提取溶剂性质,选择不同的吸附填料。常用的固相萃取柱有中性氧化铝柱、分子印迹柱、PSA 固相萃取柱、弗洛里硅土固相萃取柱等。现行苯并芘国家检测标准(GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并芘的测定》)采用的前处理方法为正己烷溶剂提取,再用中性氧化铝柱或分子印迹柱净化样品,液相色谱—荧光法检测。梁振纲^[27]基于国标方法对

槟榔中苯并芘的前处理方法进行了改进,用正己烷提取,再用二甲基亚砜二次提取,采用 PSA 固相萃取柱净化样品,将净化液用液相色谱—荧光检测器进行检测。由于 PSA 固相萃取柱对槟榔中的有机酸、色素、酚类等物质有较好的分离效果,该方法显著减少了图谱杂峰,干扰峰响应降低了 60%,而苯并芘响应无明显变化,方法平均回收率为 83.0%~114.5%,RSD 为 1.27%~6.78%,检出限为 $1\text{ }\mu\text{g/kg}$ 。何秀芬等^[28]提出了一种测定干槟榔中痕量苯并- α -芘的气相色谱—质谱联用法,样品经氢氧化钾皂化,用正己烷溶剂提取,再用弗洛里硅土固相柱净化,正己烷—二氯甲烷混合液(6+2)洗脱、浓缩,最后以气—质联用进行检测,该方法检出限为 $0.5\text{ }\mu\text{g/kg}$ 。

3.1.2 凝胶渗透色谱法 GPC 法的分离原理为物理分离,不同体积大小的粒子流经不同孔径的色谱柱时,根据相对分子质量的不同将分子进行分离,从而使样液达到分离纯化的效果^[29]。喻玺等^[30]研究了高效液相色谱—荧光检测法检测食用油中的苯并芘,发现凝胶渗透色谱法精密度高于中性氧化铝柱和分子印迹柱两种方法;凝胶渗透色谱、氧化铝柱法、分子印迹柱法的平均回收率分别为 100%,119%,90%,前者准确度高于后两者。凝胶色谱能有效分离待测样品中的油脂、蛋白质等高分子物质,适用于脂肪等高分子物质含量较高的物质的检测。

3.1.3 分散固相萃取法 DSPE 法是将吸附填料直接加入到样品提取液中,使之充分混合。干扰物则通过吸附剂吸附除去,得到净化液,再上机分析^[31-33]。王利等^[34]建立了检测食用槟榔中多环芳烃的气相色谱—质谱联用的方法,该方法将样品用正己烷提取,提取液先经凝胶渗透色谱柱净化分离,收集净化液,再选用硅胶作为分散吸附剂,与净化液充分混合得到二次净化液,再上机分析;同时对比了硅胶、Alumina-N、PSA 3 种分散吸附剂,发现硅胶的加标回收效果最好,准确度最高;检出限为 $0.2\sim 1.0\text{ ng/mL}$, $RSD\leq 4.38\%$ 。

3.1.4 其他方法 鉴于只针对食用槟榔中苯并芘的检测方法研究较少,而谷物类基质与槟榔基质相接近,以谷物及其制品为参考对象,学习借鉴谷物中苯并芘的检测方法。黄坤等^[35]建立了一种简单、快速、准确可靠的高效液相色谱—荧光法检测大米和小麦粉中苯并芘残留的方法,该方法的检出限为 $0.1\text{ }\mu\text{g/kg}$,加标回收率为 86.08%~98.17%。于海燕等^[36]应用液相色谱—荧光法检测谷物中 15 种多环芳烃,该方法的检出限为 $0.02\text{ }\mu\text{g/kg}$,加标回收率为 90.0%~110%,灵敏度高、重现性好。阮丽萍等^[37]建立了高效液相色谱—荧光法测定果蔬及谷物中 PHAs 的检测方法,该方法的检出限为 $0.1\text{ }\mu\text{g/kg}$,回收率为 60.0%~137.8%。上述方法简化了前处理过程,精密度高、回收率稳定,同时降低了检测成本。

3.2 仪器分析方法

常见的食品中苯并芘的仪器分析方法有高效液相色谱—荧光法 (High Performance Liquid Chromatography-Fluorescence Detection, HPLC-FLD)、液相色谱—质谱联用检测法 (Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer, LC-MS)、气相色谱—质谱联用检测法 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)、表面增强拉曼光谱检测法 (Surface-enhanced Raman Spectroscopy, SERS)^[38]。最常用的方法是 HPLC-FLD 法和 GC-MS 法。

3.2.1 HPLC-FLD 法 利用苯并芘的荧光属性,其荧光响应值与浓度构成一定比例关系,可根据响应值计算出样品中的苯并芘含量。该方法结合了液相色谱的高效分离和荧光检测器高灵敏度的优点,但对样品前处理要求较高。与液相色谱—紫外检测法相比,HPLC-FLD 法灵敏度和准确度更高。宋长虹等^[39]比较了检测食品中苯并芘的 4 种不同的前处理方法和 2 种不同的检测器,发现荧光检测器精密度高于紫外检测器,最低检出限分别为 0.1, 2.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。张海龙等^[40]建立了高效液相色谱法检测菜籽油中苯并芘的方法,该方法的加标回收率为 87.0%~98.5%。

3.2.2 GC-MS 法 利用气相色谱将待测组分与干扰组分分离,再用质谱对待测组分进行定性定量分析。质谱检测器具有高定性能力的优点,几乎能检测出经气相色谱分离后的所有组分,但对色谱柱要求较高^[41]。王磊等^[42]利用 GPC-GC-MS 技术结合选择离子扫描模式 (Selective ion mode, SIM) 建立了检测花生油中苯并芘的方法,该方法的检出限为 0.5 ng/kg ,平均回收率为 93.2%~98.6%。杨玲等^[43]对比了 GC-MS 和 HPLC 两种测定苯并芘的仪器方法,发现 GC-MS 法的保留时间略短,两种方法的精密度和检出限均能较好地满足环境水样中苯并芘的检测,但对基质较复杂的实样,GC-MS 法可较好地避免杂峰的干扰。

3.2.3 LC-MS 法 结合了液相色谱有效分离热不稳定性及高沸点化合物的分离能力和质谱仪较强的定性定量分析能力,具有快速分析、高灵敏度、高分辨率鉴定和可分析多个化合物等优点,是一种分离分析复杂有机混合物的有效方法。吴春英等^[44]建立了超高效液相色谱质谱联用法检测地沟油中黄曲霉毒素和苯并芘的分析方法,该方法的回收率为 80.9%~115.6%,各目标物检出限为 0.091~0.210 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。目前该方法由于溶剂难挥发,基质效应高,不利于分辨,还处于发展阶段,应用不够普遍。

3.2.4 SERS 法 利用待测物被吸附在金、银等粗金属表面时,拉曼散射的信号会较大幅度地提高的原理,将待测物与表面增强拉曼光谱的活性基底结合,再利用光的拉曼散射效应对待测物进行定性定量分析。由于该方法具有快速、无标记、无损检测等优点,已被广泛应用于食品

和生物样品中化学物质的检测。肖旺^[45]制备了硫醇修饰的银纳米点阵列作为 SERS 活性基底,实现了水中苯并芘的快速检测,并结合分子印迹技术分离净化待测物, SERS 方法进行分析,实现了食用油中苯并芘的检测。王珊^[46]制备了纳米金修饰的氨基改性硅烷化担体新材料作为 SERS 活性基底,用于快速检测食用油中苯并芘残留,检出限为 5.6 ng/mL 。目前, SERS 法还不够成熟,不同物质对基底的选择性要求较高,不同材料同基底的吸附性也存在差异,稳定性和重复性难以控制。

4 结论与展望

研究表明,苯并芘的前处理过程分为提取和净化两个过程,用固相萃取技术净化居多,前处理过程仍存在操作繁琐、耗时长、试剂毒性大等问题,且净化过程中由于吸附剂会对待测物有一定吸附作用而造成待测物的损失,使得检测结果偏低。由于目前对食用槟榔中的苯并芘残留检测技术研究较少,急需研究简单、快速、准确的槟榔中苯并芘的检测技术。

鉴于食用槟榔基质相对简单,在研究苯并芘化学检测方法时可参考谷物类,省略净化过程,改进仪器分析条件来提高目标物与杂质的分离度。目前最常用的分析仪器是 HPLC-FLD,具有较高的精密度和灵敏度,能满足低含量样品的精确定量分析。GC-MS 和 LC-MS 具有高灵敏度和高分离能力,但成本较大,且耗时长,不适于大批量样品的快速检测。SERS 技术适用于基质简单的样品的快速检测,具有简单便携、无标记、无损检测等优点,但目前技术发展还不够成熟,对槟榔嚼块中苯并芘的检测有待研究。

参考文献

- [1] 巢雨舟, 柳毅, 陈洁, 等. 湘潭市食用槟榔产业现状及发展对策[J]. 农产品加工, 2019(2): 74-77.
- [2] 游小珺, 韦素琼, 戴文远. 台湾槟榔产业可持续发展研究[J]. 台湾农业探索, 2010(6): 20-24.
- [3] 谢龙莲, 张慧坚, 方佳. 我国槟榔加工研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 34(4): 96-98.
- [4] STANISZEWSKA M, GRACA B, BELDOWSKA M, et al. Factors controlling benzo-a-pyrene concentration in aerosols in the Urbanized coastal zone(a case study): Gdynia, Poland (southern Baltic Sea) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(6): 4 154-4 163.
- [5] 汪敏. 肉制品中苯并芘研究进展[J]. 肉类工业, 2016(10): 49-51.
- [6] 张容韵, 莫志浩. 海南槟榔初加工状况调研分析[J]. 农业开发与装备, 2014(12): 41-42.
- [7] 邓建阳, 李浩, 蒋雪薇, 等. 食用槟榔加工工艺及其化学与微生物污染研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 173-176.

- [8] 康效宁, 吉建邦, 李梁. 槟榔烘制工艺中不安全因子分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 68-70.
- [9] 王斌, 杨大伟, 匡理. 槟榔生理活性及危害控制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(10): 219-224.
- [10] 严聃, 李彦. 食用槟榔的加工工艺研究[J]. 食品与机械, 2003(6): 34-35.
- [11] BHATTACHARYA S, DAS A, PRASHANTHI K, et al. Mycoremediation of benzo-*a*-pyrene by pleurotus ostreatus in the presence of heavy metals and mediators [J]. 3 Biotech, 2014, 4(2): 205-211.
- [12] 王广峰. 苯并芘对人体的危害和食品中苯并芘的来源及防控[J]. 菏泽学院学报, 2014, 36(2): 66-70.
- [13] DURR-E-SHAHWAR M, DAVID R M, GOODERHAM N J. Mechanistic evidence that benzo-*a*-pyrene promotes an inflammatory microenvironment that drives the metastatic potential of human mammary cells[J]. Archives of Toxicology, 2018, 92(10): 3 223-3 239.
- [14] 张雪莲, 刘伟丽, 张坤明, 等. 苯并芘致小鼠肺癌模型实验研究[J]. 解放军预防医学杂志, 2017, 35(11): 1 343-1 346.
- [15] WIDZIEWICZ K, ROGULA K W, MAJEWSKI G. Lung cancer risk associated with exposure to benzo-*a*-pyrene in polish agglomerations, cities, and other areas[J]. International Journal of Environmental Research, 2017, 11(5): 685-693.
- [16] ZHANG C M, SUN Z X, WANG Z L, et al. Abnormal methylation of spermatozoa induced by benzo-*a*-pyrene in rats[J]. Human and Experimental Toxicology, 2019, 38(7): 846-856.
- [17] 邹晓萍, 吴维光. 苯并芘体外对人胎盘滋养细胞增殖和凋亡的影响及其机制[J]. 武警医学, 2019, 30(4): 334-337.
- [18] WILSON W B, WISE S A, SANDER L C. Development of a reversed-phase liquid chromatography and fluorescence method with multichannel selective wavelength detection for the determination of benzo-*a*-pyrene and six of its isomers[J]. Chromatographia, 2019, 82(1): 499-508.
- [19] GAZIOGLU I, TEKKELI S E K. Development and validation of a HPLC method for the determination of benzo-*a*-pyrene in human breast milk[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(2): 319-322.
- [20] LIU Hong-cheng, SHAO Jin-liang, LIN Tao, et al. Detection of benzo-*a*-pyrene in fried food by ultrasound-assisted matrix solid-phase dispersion and isotope dilution GC-MS[J]. Chromatographia, 2013, 76(23/24): 1 785-1 789.
- [21] MO Run-hong, ZHANG Yan-ping, NI Zhang-lin, et al. Determination of benzo-*a*-pyrene in camellia oil via vortex-assisted extraction using the UPLC-FLD method[J]. Food science and biotechnology, 2017, 26(1): 15-19.
- [22] SURMA M, SADOWSKA-ROCEK A, CIESLIK E. The application of d-SPE in the QuEChERS method for the de-termination of PAHs in food of animal origin with GC-MS detection[J]. European Food Research and Technology, 2014, 238(6): 1 029-1 036.
- [23] SAZWI N N, NALINA T, RAHIM Z H A. Antioxidant and cytoprotective activities of piper betle, areca catechu, nncaria gambir and betel quid with and without calcium hydroxide[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2013, 13(1): 351.
- [24] PAWAR A B, MORE S P, ADIVAREKAR R V. Dyeing of polyester and nylon with semi-synthetic azo dye by chemical modification of natural source areca nut [J]. Natural Products and Bioprospecting, 2018, 8(1): 23-29.
- [25] 曾琪. 槟榔化学成分的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007: 6-9.
- [26] 周文化, 李忠海, 张海德, 等. 不同槟榔果常规营养成分和槟榔碱含量分析[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 27-30.
- [27] 梁振纲. 槟榔主要外源性有害物质检测分析[D]. 海口: 海南大学, 2015: 27-33.
- [28] 何秀芬, 罗金辉, 陈歆, 等. 气-质联用法测定干槟榔中苯并-*a*-芘含量[J]. 热带农业科学, 2012, 32(1): 61-63, 68.
- [29] 王静静, 李学才. 凝胶渗透色谱的应用及进展[J]. 农业开发与装备, 2017(10): 35, 45.
- [30] 喻玺, 李素媛, 刘恒. 3种前处理对食用油中苯并芘测定的影响[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(Z1): 76-77, 115.
- [31] ZAIDON S Z, HO Y B, HAMSAN H, et al. Improved quechers and solid phase extraction for multi-residue analysis of pesticides in paddy soil and water using ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2019, 145: 614-621.
- [32] EZODDIN M, MAJIDI B, ABDI K, et al. Magnetic graphene-dispersive solid-phase extraction for preconcentration and determination of lead and cadmium in dairy products and water samples[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, 95(6): 830-835.
- [33] 滕晓宇, 李建勋, 胡雪艳, 等. 分散固相萃取结合气相色谱—四极杆—飞行时间质谱测定茶叶中 13 种三唑类农药残留[J]. 食品科学技术学报. (2019-04-05) [2019-05-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1151.TS.20190405.1606.002.html>.
- [34] 王利, 符有辉, 陈立坚, 等. 气相色谱—质谱法测定食用槟榔中多环芳烃[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(4): 130-134.
- [35] 黄坤, 王幸平, 尹佳, 等. 高效液相色谱法测定大米和小麦粉中的苯并-*a*-芘[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(10): 86-88.
- [36] 于海燕, 徐向阳, 刘瀚升. 应用高效液相色谱法测定谷物中 15 种多环芳烃[J]. 实用预防医学, 2018, 25(12): 1 531-1 533.
- [37] 阮丽萍, 刘华良, 马永建, 等. 高效液相色谱—荧光法测定果蔬及谷物中 15 种欧盟优先控制的多环芳烃[J]. 江苏预防医学, 2018, 29(1): 11-13, 17.

(下转第 225 页)

- 194-199.
- [33] CHENG Lina, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Effects of high pressure freezing (HPF) on denaturation of natural actomyosin extracted from prawn (*Metapenaeus ensis*) [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 252-259.
- [34] SMITH N A S, BURLAKOV V M, RAMOS Á M. Mathematical modeling of the growth and coarsening of ice particles in the context of high pressure shift freezing processes [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117(29): 8 887-8 895.
- [35] SU Wei, XU Xiao-bin, ZHANG Hong, et al. Effects of dipole polarization of water molecules on ice formation under an electrostatic field [J]. Cryobiology, 2008, 56(1): 93-99.
- [36] ORLOWSKA M, HAVET M, LE-BAIL A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions [J]. Food Research International, 2009, 42 (7): 879-884.
- [37] SAIDEHF J, NASSER H, EZAT K, et al. Evaluation of the static electric field effects on freezing parameters of some food systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2019(99): 30-36.
- [38] MOK J H, CHOI W, PARK S H, et al. Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 50: 137-145.
- [39] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016(37): 68-73.
- [40] JIA Guo-liang, HE Xiang-li, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 204: 18-26.
- [41] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on selected properties of an agar gel [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42: 151-156.
- [42] 高文宏, 陈秋妍, 王启军, 等. 静电场对葡萄糖溶液和蔗糖溶液冰晶生长的影响 [J]. 现代食品科技, 2017, 33(10): 21-29.
- [43] 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同隔距冻结—解冻对牛肉品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2017(8): 286-293.
- [44] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结—解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(3): 157-162.
- [45] CAI Ran, YANG Hong-wei, HE Jin-song, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds [J]. Journal of Molecular Structure, 2009, 938(1/2/3): 15-19.
- [46] 单亮亮, 刘斌. 电磁场对水及其盐溶液的冻结影响 [J]. 制冷, 2017, 36(1): 29-35.
- [47] 王鹏飞. 电磁场对细胞冻结特性的影响 [D]. 天津: 天津商业大学, 2015: 50-68.
- [48] 展曦鸣. 极低频电磁场对两种液体体系冷冻过程的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 22-29.
- [49] JAMES C, REITZ B, JAMES S J. The freezing characteristics of garlic bulbs (*Allium sativum* L.) frozen conventionally or with the assistance of an oscillating weak magnetic field [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(3): 702-708.
- [50] OTERO L, PÉREZ-MATEOS M, RODRÍGUEZ A, et al. Electromagnetic freezing: Effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 200: 87-94.
- [51] ZHAO Hong-xia, HU Han-qing, LIU Sheng, et al. Experimental study on freezing of liquids under static magnetic field [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(9): 1 288-1 293.
- [52] 王亚会, 邱倩倩, 刘斌, 等. 直流磁场辅助冻结对西兰花品质的影响 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 195-199.
- [53] 顾思忠, 刘斌, 宋健飞, 等. 直流磁场对豌豆冻结特性的影响 [J]. 冷藏技术, 2017, 40(4): 23-26.
- [54] 龙超, 吴子健, 宋健飞. 磁场辅助冻结对马铃薯块冻结及贮藏特性影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 272-274, 305.
- [55] ZHAN Xi-ming, ZHU Zhi-wei, SUN Da-wen. Effects of extremely low frequency electromagnetic field on the freezing processes of two liquid systems [J]. LWF Food Science and Technology, 2019, 103: 212-221.

(上接第 219 页)

- [38] 孔蒙蒙, 黄忠民, 潘志利, 等. 检测食品中苯并芘的方法研究 [J]. 食品与营养科学, 2018, 7(4): 251-256.
- [39] 宋长虹, 唐生, 佟馨, 等. 食用油脂中苯并- α -芘检测方法比较与优化 [J]. 食品研究与开发, 2014, 35(23): 83-86.
- [40] 张海龙, 张维, 舒楠, 等. 高效液相色谱法定量分析菜籽油中的苯并芘 [J]. 农产品加工, 2017(18): 26-28.
- [41] 谈义萌. 超分子溶剂微萃取—液相色谱荧光法测定多环芳烃 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 1-9.
- [42] 王磊, 樊蕊. 凝胶色谱—气质联用测定花生油中苯并芘残留 [J]. 食品工业, 2019, 40(5): 322-324.
- [43] 杨玲, 张姝姝, 林蔓. 气质联用法和高效液相色谱法测定苯并芘的对比研究 [J]. 湖北师范学院学报: 自然科学版, 2016, 36(4): 11-13.
- [44] 吴春英, 白鹭, 谷风, 等. UPLC-MS/MS 测定地沟油中黄曲霉毒素和苯并芘 [J]. 食品工业, 2017, 38(1): 285-288.
- [45] 肖旺. 基于表面增强拉曼光谱技术快速检测苯并- α -芘的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 23-46.
- [46] 王珊. 表面增强拉曼光谱技术(SERS)快速检测食用油脂苯并- α -芘的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 24-38.