

食用植物油中安全风险物质的研究进展

黄志宁^{1,2}, 郭新东^{1,2*}, 寻知庆², 黄金凤², 刘丹阳², 戴伟杰³, 李一峰³, 康梦¹, 曹庸^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)

(2. 广州质量监督检测研究院(广州市NQI-质量安全科技协同创新中心), 广东广州 511447)

(3. 广东惠尔泰生物科技有限公司, 广东广州 510642)

摘要: 食用植物油的质量安全对植物油产业的发展和人体健康的保障至关重要, 受到了越来越多的关注。该文综述了食用植物油中可能存在的安全风险物质, 包括重金属、真菌毒素、农药残留和其他有害物质的污染来源、污染现状以及检测技术。同时, 详细介绍了每种安全风险物质对人体可能产生的影响, 以加强研究的实际意义。建议我国食品安全监管部门通过评估食用植物油的行业发展和安全风险物质的风险等级, 修订食用植物油中安全风险物质的种类范围和限量要求, 鼓励食品检测机构开发建立食用植物油中安全风险物质的快速检测方法, 以期食用植物油中安全风险物质的监测和控制提供支持。

关键词: 食用植物油; 重金属; 真菌毒素; 农药残留; 检测技术; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2025)01-359-369

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1474

Research Progress on Safety Risk Substances in Edible Vegetable Oils

HUANG Zhining^{1,2}, GUO Xindong^{1,2*}, XUN Zhiqing², HUANG Jinfeng²,

LIU Danyang², DAI Weijie³, LI Yifeng³, KANG Meng¹, CAO Yong^{1*}

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, Guangzhou 510642, China) (2. Guangzhou Quality Supervision and Testing Institute (Collaborative Innovation Center for NQI-Quality Safety of Guangzhou), Guangzhou 511447, China)

(3. Guangdong Huiertai Biotechnology Co. Ltd., Guangzhou 510642, China)

Abstract: The quality and safety of edible vegetable oils are crucial for the development of the vegetable oil industry and the protection of human health. This paper provides a comprehensive review of potential safety risk substances in edible vegetable oils, including pollution sources, pollution status and detection techniques of heavy metals, mycotoxins, pesticide residues, and other harmful substances. In the meantime, this paper describes in detail the potential impact of each safety risk substance on human health, in order to enhance the practical significance of the research. It is recommended that China's food safety regulatory authorities should revise the category, scope and limit requirements for safety risk substances in edible vegetable oil through evaluating the development of edible vegetable oil industry and the risk level of safety risk substances.

引文格式:

黄志宁, 郭新东, 寻知庆, 等. 食用植物油中安全风险物质的研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 359-369.

HUANG Zhining, GUO Xindong, XUN Zhiqing, et al. Research progress on safety risk substances in edible vegetable oils [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 359-369.

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2019B020211001); 酱油渣中神经酰胺制备工艺研发项目(h20230315); 广州市科技计划项目(2023B04J0407)

作者简介: 黄志宁(1996-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 食品安全检测技术, E-mail: 1445069697@qq.com

通讯作者: 郭新东(1976-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 食品营养与安全检测技术, E-mail: gdone@21cn.com; 共同通讯作

者: 曹庸(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 天然活性物的分离纯化鉴定及活性研究, E-mail: caoyong2181@scau.edu.com

Furthermore, food testing institutions are encouraged to develop and establish rapid detection methods for safety risk substances in edible vegetable oils, so as to provide support for the monitoring and control of safety risk substances in edible vegetable oils.

Key words: edible vegetable oils; heavy metals; mycotoxins; pesticide residues; detection technologies; research advances

植物油是以植物种子或果实为原料, 通过各种工艺加工而成的常温下呈液态的脂类物质。生活中食用的植物油主要有大豆油、玉米油、花生油、菜籽油、葵花籽油和芝麻油, 以及由两种及以上植物油调和而成的调和油等^[1,2]。植物油中含有丰富的维生素 E、多酚、植物甾醇、类胡萝卜素和角鲨烯等多种营养成分, 尤其富含不饱和脂肪酸, 包括人体无法自身合成的亚油酸和 α - 亚麻酸^[3,4], 对维持细胞正常生理功能^[5]、促进血清胆固醇代谢^[6]、预防心血管疾病^[7]、糖尿病^[8]以及抗癌^[9]等方面起着重要作用。

随着中国人口大国地位的确立, 在过去二十年间, 对食用油的需求量呈显著增长趋势。据统计, 我国食用植物油消费量从 2000 年的 1 300 万 t 增长至 2021 年的 4 254.5 万 t, 人均食用油消费量为 30.1 kg, 高于全球人均食用油消费量 27.0 kg^[10]。这一趋势不仅反映了我国人民生活水平的提高, 也带来了食用植物油行业的发展机遇。

然而, 近年来, 随着食用植物油消费量的增加和环境污染的加剧, 食用植物油的质量安全问题逐渐引起人们的关注, 为这一行业带来了新的机遇与挑战^[11]。由于植物种植、加工或存储不当, 植物油中可能产生一些危害人体健康的有害物质^[12,13]。农药残留、重金属、真菌毒素和多环芳烃等成为食用植物油中常见的安全风险物质。我国相应地制定了一系列食品安全国家标准, 如 GB 2761-2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》、GB 2716-2018《食品安全国家标准 植物油》、GB 2763-2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》和 GB 2762-2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》等, 这些标准规定了这些危害人体健康的安全风险物质的限量要求。

因此, 及时整理和分析食用植物油中的风险物质显得尤为重要。本文综述了食用植物油中重金属、真菌毒素、农药残留和其他有害物质的污染来源、污染现状及相应检测技术, 为食用植物油中安全风险物质的监测和控制提供了一定的参考依据。

1 重金属

重金属是指密度大于 5 g/cm^3 的金属元素, 通常包括铁、铜、铅、锌、镉、汞、铬、镍等, 因难以生物降解或热降解而在环境中长期存在。重金属具有高密度、高熔点和良好的导电性能, 但也具有较强的毒性和环境污染风险^[14,15]。

1.1 污染来源

食用植物油中的重金属污染主要来源于食用植物油原料种植地的土壤、大气、水体、农药和化肥等, 其中土壤是共有的污染途径^[16]。土壤污染: 如果土壤受到重金属污染, 植物会吸收这些重金属, 并在生长和发育过程中将其积累到不同程度, 最终进入植物油中。大气污染: 工业废气中的重金属可经由空气中的颗粒物沉降到农田中, 被作物吸收后进入食物链。水体污染: 一些工业废水、农业排放和城市污水都可能含有重金属, 如果这些污水未经有效处理就排放到水体中, 其中的重金属会进入植物根系并随着植物生长而最终进入植物油中。农药和化肥污染: 常用的农药和化肥中含有较高含量的铬、砷和铅等重金属, 如果使用不当会造成土壤污染和作物内部的重金属积累, 从而导致植物油中也含有这些重金属^[17]。植物油中的重金属还可能来源于在植物油生产和运输存贮过程中接触的机械设备和管道。另外, 植物油中使用的添加剂和加工助剂如果不经过正确处理和控制, 也有可能引起重金属污染。

1.2 污染现状

目前, 食用植物油中已报道的重金属包括铬、砷、镉、铅、镍、汞、铊等, 其中铬、砷、铅具有显著毒性^[18]。我国台湾新竹市政府曾查出当地多家大厂生产的植物油含重金属铬, 送检的 7 种植物油中铬的检出率为 100%, 含量为 0.03~0.04 mg/kg。江波等^[19]对来自不同产地的 10 种市售食用植物油进行了重金属元素分析, 在花生油、玉米油和山茶油中均检出了镍、砷、镉、铊、汞和铅这 6 种重金

属元素, 其中砷和铅的含量均符合 GB 2762-2022 的限量要求 (铅 ≤ 0.08 mg/kg、总砷 ≤ 0.1 mg/kg), 镍、镉、锑、汞无限量要求, 且含量均处于较低水平 (≤ 0.1 mg/kg), 对人体健康不会造成威胁。邱会东等^[20]的一项植物油中重金属污染风险评价研究表明, 在食用植物油中非致癌性重金属元素铅、铜、锌、镍、锰所引起的致癌健康风险可忽略不计, 不会对社会人群构成明显的危害, 但致癌性重金属铬通过食用植物油经口摄入途径对社会人群健康产生的危害不可小视。Niu 等^[21]通过风险评估分析也认为植物油中的铬污染对暴露人群的致癌风险不容忽视。

植物油中的重金属主要受油料的影响, 避免持续的高温和过度加工可以避免油料组织结构被严重破坏, 有效减少重金属的迁移。刘海等^[22]通过实验发现, 低温烘制工艺油茶籽油中的镍和铬要比高温炒制工艺的含量低, 初次压榨油茶籽油中的铬含量比二次压榨含量要低。

1.3 检测技术

目前, 在检测机构、科研院所和研发单位中使用较多的仪器分析方法有原子吸收光谱分析 (AAS)、电感耦合等离子体质谱分析 (ICP-MS)、原子荧光光谱分析 (AFS)、共振光散射 (RLS) 和电化学分析 (EA) 等^[23]。AAS 是近年来最常用的重金属检测方法, 在植物油中重金属含量的检测中被广泛应用。魏军晓等^[24]通过炭化结合湿法消解的前处理, 利用石墨炉原子吸收光谱仪 (GFAAS) 开发了一种测定植物油中镉、铬和铅 3 种重金属的分析方法, 方法精密度高, 并对 219 份植物油样品进行测定发现调味油的铅、镉和铬含量普遍高于食用油中的含量。由于 AAS 是单元素分析方法, 不适合大批量样品中多元素的快速测定, 而 ICP-MS 具有检测限低、灵敏度高且能进行多元素快速测定的分析特性, 正逐步成为食用植物油中重金属检测技术的重要发展方向^[25]。随着科学技术的发展, 用于重金属检测的大型精密分析仪器不断创新, 食用植物油中重金属的检测和分析方法不断丰富和更新, 分析方法的灵敏度、准确性和及时性达到了更高的水平。

2 真菌毒素

真菌毒素是由某些真菌物种产生的有毒化合

物, 它们能够在食品、饲料、水果等物品中积累, 并对人类和动物的健康产生负面影响。真菌毒素可以引起多种毒性反应, 包括肝脏损伤、神经系统损伤、免疫系统抑制等^[26,27]。常见的真菌毒素包括黄曲霉毒素 (AFs)、赭曲霉毒素 (OT)、玉米赤霉烯酮 (ZEN)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON)、伏马菌素 (FB) 和 T-2 毒素 (TS) 等^[28]。

2.1 污染来源

植物油中的真菌毒素污染主要来源于油料。在种植阶段和储存阶段, 真菌和霉菌可以通过空气、土壤、水或其他污染源进入油料中, 油料给真菌和霉菌提供了适宜的生长条件, 包括水分、温度和营养物质。在适宜的环境下, 真菌和霉菌迅速繁殖并产生大量毒素, 这些真菌毒素大多数具有稳定的化学结构, 在油料加工过程容易直接进入成品植物油中, 使成品食用植物油被真菌毒素污染^[29,30]。成品植物油在储存过程中, 如果温度、湿度等条件控制不当, 也容易造成真菌的污染和生长。Singh^[31]分析了从真菌污染的储存样品中提取的油, 发现 AFs 会自然产生。

2.2 污染现状

AFs 由黄曲霉和黄曲孢等真菌产生, 是一类强烈致癌物质, 容易在谷物、豆类、坚果和植物油等食品中出现。AFs 主要包括黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁)、黄曲霉毒素 B₂ (AFB₂)、黄曲霉毒素 G₁ (AFG₁) 和黄曲霉毒素 G₂ (AFG₂), 其中 AFB₁ 是食用植物油中最常见的真菌毒素, 长期暴露于 AFB₁ 可能导致肝癌和其它健康问题。眭世闰等^[32]对 2018~2022 年广西壮族自治区贵港市食用植物油中 AFB₁ 污染状况进行分析, 发现 AFB₁ 的检出率高达 96.80%、超标率为 20.00%, 其中散装的花生油中 AFB₁ 的污染及暴露风险最高。朱波等^[33]在深圳地区 160 份定型包装的 6 类植物油中检测出了 AFB₁ (23.13%)、AFB₂ (6.25%) 和 AFG₁ (1.88%), 而未检出 AFG₂, 并且发现花生油最容易被 AFs 联合污染, 这可能是因为花生在地下结实较容易受到黄曲霉侵染。

OT 是一类由赭曲霉属真菌产生的毒素, 主要包括赭曲霉毒素 A (OTA) 和赭曲霉毒素 B (OTB), 这些毒素在花生、水稻、小麦、玉米、大豆等农产品中都有可能出现, 并随着这些油料被加工而进入到植物油中。人体长期暴露于 OT 可能产生多种健康问题, 如肝脏损伤、免疫抑制、肿瘤等^[34]。孙嘉

笛等^[29]随机抽取检测市面上售卖的 290 份食用植物油, OTA 检出率为 13.4%, OTB 检出率为 8.3%。邓春丽等^[35]研究发现, OTA 在花生油中的污染程度较玉米油和调和油大,花生是 OTA 的主要污染对象。

ZEN 及其衍生物主要是镰刀菌产生的非甾体雌激素类真菌毒素。它们广泛分布于玉米、大麦、小麦和高粱等谷物饲料中,通过食物链进入人体后能够与雌激素受体、17 种 β -雌二醇特异性受体结合,导致生殖障碍,对人类健康造成严重危害^[36-38]。裴娅晓等^[39]对市售 8 个玉米油样品进行检测, ZEN 检出最高含量为 769.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 两个样品的含量高于欧盟对植物油中的 ZEN 的限量标准 400 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。甄阳光等^[40]对我国多个区域共一千多份谷物及饲料样品进行 ZEN、DON 和 FB 三种镰刀菌毒素检测, 研究结果表明我国大部分地区的饲料原料均受到了 ZEN 污染, 其中中华华北地区的玉米和东北地区的小麦受污染程度最严重。

DON 是一种单端孢霉烯族毒素, 通常存在于某些真菌(如雪腐镰刀菌)所感染的谷类作物中, 例如小麦、玉米和大麦等。人们长期摄入含有高水平 DON 的食品可能会导致胃肠道问题、免疫系统紊乱和神经系统损伤等^[41]。调查发现, 国内已有大量关于粮食谷物被 ZEN 污染的报道^[42-44], 但关于植物油被 DON 污染却鲜有报道。谢丹等^[45]对北京地区 30 个市售食用植物油样进行 DON 和 ZEN 测定, ZEN 检出率为 100%, 而 DON 均为未检出。Xu 等^[46]和 Guo 等^[47]研究发现无论采用溶剂萃取或压榨工艺, 玉米胚芽中的 DON 转移到粗玉米油中的量都较少, 在精炼过程中, 部分 DON 会降解为 norDON B 并转移到废渣中。此外, DON 为亲水性物质, 因此相比其他真菌毒素, 植物油中 DON 污染不严重, 污染范围不广, 健康风险较低。

在植物油生产过程中, 除了控制油料质量, 避免油料被真菌毒素污染, 通过合理的精炼工艺也可以减少植物油中的真菌毒素含量。目前, 已有大量关于植物油中真菌毒素脱除和消减技术的研究报道^[48,49], 主要有物理法、化学法和生物法。物理法主要是通过离心过滤和材料吸附去除真菌毒素, 还可以通过高温水蒸气蒸馏破坏真菌毒素的结构。化学法主要有乙醇提取、光催化和碱处理, 碱处理是植物油常用的精炼方法。生物法主要有菌体吸附和酶降解, 生物法是最高效和环保的方法, 但因其成本较高, 未被广泛推广。

2.3 检测技术

植物油中真菌毒素污染物传统的检测技术主要有酶联免疫分析法(ELISA)、毛细管电泳法(CE)、气相色谱法(GC)、高效液相色谱法(HPLC)、薄层色谱分析法(TLC)、气质联用法(GC-MS/MS)和液质联用法(LC-MS/MS)等^[50]。其中, 由于 LC-MS/MS 分离效率高, 灵敏度高, 分析速度快, 能同时检测分析多种真菌毒素, 在植物油真菌毒素的检测中应用最为广泛^[51,52]。张宇等^[53]建立的同位素稀释结合 HPLC-MS/MS 同时测定植物油中 16 种真菌毒素的分析方法, 适合对各种植物油中的真菌毒素进行快速筛查, 通过对市售的 40 份植物油进行检测发现 AFB₁、ZEN 和 FB₁ 的污染风险相对较高。近年来, 基于传感器的检测技术已逐渐应用于真菌毒素的快速检测^[54], 快捷灵敏的优点使其在真菌毒素方面具有的良好发展前景, 郭倩^[55]研究了一种可以同时检测 AFB₁ 和 OTA 的适配体生物传感器, 二者的检测限分别可达 0.23 ng/mL 和 0.39 ng/mL, 灵敏度均优于国标中采用的酶联免疫快速检测方法。随着检测技术的不断发展, 方便、快捷、灵敏、特异、低耗的真菌毒素检测方法是未来发展的重要方向。

3 农药残留

农药残留是指食品、农产品和动物饲料中因使用农药而产生的任何特定物质, 包括农药的母体及其具有毒理学意义的衍生物, 如反应产物、代谢产物和转化物等^[56]。农药残留一般有几类: 有机氯类(如滴滴涕、六六六等)、有机磷类(如敌百虫、甲胺磷、毒死蜱等)、氨基甲酸酯类(如克百威、甲萘威等)和拟除虫菊酯类(如氯氰菊酯、联苯菊酯等)。农药残留具有免疫系统毒性、生殖毒性、神经毒性等毒性, 当达到一定的浓度时可致畸、致突变和致癌, 对人和动物的健康造成严重的威胁^[57]。

3.1 污染来源

植物油中的农药残留主要来源于粮油作物种植环节以及油料储存加工环节。在种植阶段, 对粮油作物进行病虫害防治过程中, 会使用一些杀虫剂和除草剂等农药, 这些农药会直接吸附在油料的表面; 另一方面, 长期使用农药易造成土壤和水体农药残留^[58,59], 这些农药被油料作物的根部吸收,

随着植物的生长进入油料中，最终这些残留在油料表面和内部的农药通过油料加工进入植物油中。在油料存储时，也可能使用一些杀虫剂来防止油料被害虫侵蚀^[60]，若使用不规范，将通过加工进入植物油中造成污染。

3.2 污染现状

虽然我国制定的 GB 2763-2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》中对植物油中的农药残留有最大允许残留限量要求，但植物油中的农药残留并不是我国重点监测项目，因此，植物油中农药残留污染现状监督抽查数据相对缺乏。通过多项研究表明^[61-63]，植物油加工过程中的清洗、漂白、除臭和烘烤等工艺会使亲水性的农药残留水平普遍降低，在一定程度上降低植物油中的农药残留水平。然而，亲脂性农药如对硫磷在植物油加工过程中却表现为浓缩效应，而且压榨提取法比浸提法更容易在植物油中留下有机氯农药。尽管部分农药在植物

油加工过程中会降解，然而，在植物油中依然能够检测出多种农药。近年来有不少学者对我国的植物油进行了农药残留检测分析（见表1）。

尽管表1中的检出农药大部分符合我国食品安全国家标准 GB 2763-2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》和 GB 2763.1-2022《食品安全国家标准 食品中2,4-滴丁酸钠盐等112种农药最大残留限量》中农药在植物油中的最大残留限量，但总体上来看植物油中农药的检出率较高，检出率最高达52.2%，我国植物油中农药残留污染的现状仍不容乐观。植物油中主要的农药污染是有机磷类农药，使用这些高毒高残留的农药将直接影响人民群众身体健康和生命安全。

植物油中的农药残留主要是从油料中带入，目前鲜有关于去除植物油中农药残留的技术研究。但有研究发现^[72]，对油料进行适当的晾晒和干燥，可以使部分农药的残留水平降低，可能是因为在光照和一定温度的条件下，农药发生了降解或挥发。

表1 植物油中农药污染情况

Table 1 Pesticide pollution in vegetable oils

样本类别	检测数量/份	检出农药样品数量/检出率	检测目标	检出农药	参考文献
花生油	10	4 (40.0%)	172 种农药	百治磷 ^a 、地虫硫磷 ^a 、氟酰胺 ^a 、乙丁氟灵 ^a 、倍硫磷 ^b 、噻草酮 ^c 、戊菌唑 ^c 、禾草丹 ^c 、乙霉威 ^c 、增效醚 ^c 、敌草腈 ^c	[64]
芝麻油、橄榄油、玉米油、菜籽油、花生油、大豆油、葵花籽油、稻米油和花椒油	35	4 (11.4%)	38 种农药	苯线磷 ^a 、倍硫磷 ^b 、辛硫磷 ^b	[65]
花生油、橄榄油、大豆油、菜籽油和芝麻油	23	12 (52.2%)	197 种农药	毒死蜱 ^b 、联苯菊酯 ^b 、吡蚜胺 ^b 、溴螨酯 ^c 、乙酯杀螨醇 ^c 、甲氧菊酯 ^c 、噁草酮 ^c 、氯菊酯 ^c 、环唑醇 ^c 、甲基嘧啶磷 ^c 、乙草胺 ^c 、肟菌酯 ^c 、乙氧氟草醚 ^c	[66]
茶油	30	2 (6.67%)	11 种有机磷	二嗪磷 ^b 、毒死蜱 ^b 、倍硫磷 ^b	[67]
花生油、大豆油、菜籽油、橄榄油和葵花籽	10	1 (10.0%)	7 种农药	多效唑 ^b	[68]
花生油、大豆油、菜籽油	6	1 (16.7%)	8 种农药	腐霉利 ^c	[69]
植物油	500	9 (1.80%)	5 种酰胺基吡唑类	氟唑菌苯胺 ^c	[70]
菜籽油	10	1 (10.0%)	3 种邻氨基苯甲酰胺类	氯虫苯甲酰胺 ^c	[71]

注：a. 高毒农药；b. 中毒农药；c. 低毒农药。

3.3 检测技术

植物油中农药残留检测的常用方法包括气质联用法 (GC-MS/MS) 和液质联用法 (HPLC-MS/MS)。GC-MS/MS 具有灵敏度高、质量精度高、质量稳定性好和识别能力强等优点, 在检测拟除虫菊酯、有机磷和有机氯类农药等热稳定性可挥发有机化合物上具有明显优势。侯靖等^[66]建立了气相色谱-飞行时间质谱法测定食用植物油中 197 种农药残留分析方法, 方法中大部分农药的定量限能达到 0.01 mg/kg, 满足限量标准要求, 但存在的不足是绝大多数农药均出现了基质增强效应, 这可能跟质谱检测器 (MS) 的检测原理有关。HPLC 适用于分析高沸点和热不稳定性化合物, 串联质谱检测器 (MS) 后可实现多种农药的同时测定。李凌云等^[73]采用超高效液相色谱 (UHPLC) 串联三重四极杆质谱仪 (MS/MS) 同时测定植物油中 28 种氨基甲酸酯类农药, 适合用于植物油中氨基甲酸酯类农药的快速筛查检测。近年来, TOF 和 Orbitrap 等高分辨质谱由于其高通量、灵敏度高、分辨率高和分析速度快等特点, 也逐步发展应用于植物油中农药残留的靶向和非靶向分析。此外, 植物油中农药残留的检测方法还包括新兴的生物传感器法, 但由于其只能测定一种或一类农药, 存在一定的局限性, 无法用于多种农药残留的同时检测, 较适用于单一农药残留的选择性检测。

4 其他有害物质

食用植物油中其他常见的有害物质包括多环芳烃 (PAHs)、邻苯二甲酸酯类塑化剂 (PAEs)、氯丙醇酯 (MCPDE)、缩水甘油酯 (GEs)、甾醇氧化物 (POPs)、溶剂残留 (RSs)、多氯联苯 (PCBs)、壬基酚 (NPs) 和矿物油 (MOHs) 等 (见表 2)。

4.1 污染来源

植物油中有害物质的污染来源可分为加工过程产生和外源性。加工过程产生的有害物质主要是由植物油中的固有成分在一定条件下转变而成, 主要包括 MCPDE、GEs 和 POPs。例如在高温条件下, 植物油中的小分子碳氢化合物不完全燃烧生成 C4-C6 化合物, 然后再经过脱氢反应生成苯并芘等多环芳烃类物质^[74]; 植物油中的甘油酯和含氯化合物在加工过程中通过亲核取代反应和自由基介导作用生成 MCPDE 和 GEs, 且其含量与加热温度和时

间呈正相关^[75]; 植物油中的天然活性物质植物甾醇, 在光照和存在金属离子的条件下, 加热发生氧化生成 POPs^[76]。

植物油中外源性有害物质主要是在油料作物种植、油料晾晒和烘烤、植物油浸提、脱臭和储存等过程中受环境、溶剂和接触材料中的污染引入的有害物质, 包括 PAEs、RSs、PCBs 和 NPs 等。其中, PAEs 和 NPs 作为增塑剂被广泛用于塑料制品加工, 在与油料和植物油接触时发生迁移从而扩散到植物油中^[77,78]。煤、石油、天然气、橡胶和塑料高温燃烧时, 会产生大量环境污染物, 其中包括 PAHs 和 PCBs, 这些污染物会通过空气、水体和土壤传播到油料或植物油中, 最终使植物油受到污染^[79,80]。在浸提植物油过程中使用的溶剂主要成分是正己烷, 当加工工艺不合理未彻底去除残留溶剂时会造成植物油中溶剂残留的现象。植物油中的 MOHs 污染来源广泛, 主要是源自植物油加工和运输过程中接触到的发动机油和润滑油等矿物油产品。需要注意的是, PAHs 既是加工过程产生也是外源性有害物质。

4.2 污染现状

近年来, 随着人们对植物油食用安全重视程度的增加以及食品检测技术的发展, 越来越多学者和检测机构对植物油加工过程产生及外源性有害物质的展开研究分析, 发现植物油被有害物质污染的情况严重, 如表 2 所示, PAEs 等代表污染物检出率均高达 100%, 检出率最低的 4-壬基酚也达到 76%。

PAHs 是指分子中含有 2 个或 2 个以上苯环以线状、角状或簇状排列的碳氢化合物, 是一种具有强烈致癌性和致突变性的环境污染物^[81]。植物油中 PAHs 主要污染代表物是苯并芘, 我国 GB 2762-2022 标准规定植物油中苯并芘的最高残留限量是 $\leq 10 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。植物油中的苯并芘检出率较高, 其中受污染最严重的是压榨芝麻油, 这可能跟压榨芝麻油所需的炒制温度要比其他植物油温度要高有关。

PAEs 是一类常用于软化和增加塑料、橡胶等材料柔韧性和可塑性的塑化剂, 有调查研究显示^[82], 长期暴露 PAEs 会导致男性精子质量下降和诱发儿童注意力缺陷多动障碍症。随着塑化剂的在塑料管道和其他塑料制品加工中广泛应用, 在大气、水、土壤和植物中均能检测到 PAEs, 植物油不可避免的受到 PAEs 的污染, PAEs 已成为食用油的普遍污染物^[83]。

表 2 植物油中其他有害物质相关情况
Table 2 Occurrence of adverse substances in vegetable oils

有害物 质类别	代表物	污染类型	污染因素	文献报道最 高检出率/%	检测技术	参考 文献
POPs	7- 酮基甾醇和 7- 羟基甾醇	加工过程产生	光照强度、加热温度、 金属离子	100	GC、GC-MS、HPLC、HPLC-MS	[76]
PAHs	苯并芘	加工过程产生 和外源性	小分子碳氢化合物、 空气、水体、土壤	98.5	HPLC-FLD、GC-MS、GC-MS/MS、 ELISA、FS、SERS	[100]
CEs	缩水甘油	加工过程产生	氯离子、焙炒温度和时间、 脱臭温度和时间	86.2	GC-MS、HPLC-MS	[101]
MCPDE	3- 氯 -1,2- 丙二醇	加工过程产生	氯离子、焙炒温度和时间、 脱臭温度和时间	83.3	GC、GC-MS、LC-MS、 LC-MS/MS、HPLC-FLD	[102]
PAEs	邻苯二甲酸二(2- 乙 基)己酯、邻苯二甲 酸二异壬酯、邻苯二 甲酸二丁酯	外源性	土壤、塑料材料、浸 提溶剂、加工助剂	100	HPLC、GC、GC-MS、 HPLC-MS、SERS、NIRS	[103]
RSs	正己烷	外源性	浸提溶剂	100	GC-FID、GC-ECD、GC-MS	[104]
PCBs	PCB28、PCB52、 PCB101、PCB118、 PCB138、PCB153 和 PCB180	外源性	空气、水体、土壤	100	GC-ECD、GC-MS、GC-MS/MS	[105]
MOHs	饱和烃矿物油和芳香 烃矿物油	外源性	发动机油、润滑油等	100	LC-GC-FID	[106]
NPs	4- 壬基酚	外源性	塑料制品	76	GC-MS、GC-MS/MS、 HPLC-MS/MS	[92]

MCPDE 是脂肪酸与氯丙醇类物质经过酯化形成的产物，也是三酰基甘油上的酰基被氯原子取代而形成的一类化合物，其在人体内分解产生的 3- 氯 -1,2- 丙二醇具有肾脏及生殖毒性、免疫抑制和致癌性^[84]。GEs 是指缩水甘油和游离脂肪酸的酯化产物，与 MCPDE 一样本身不具有致癌性，但可能在人体肠道内酯解产生致癌性的 3- 氯丙二醇酯和缩水甘油^[85]。有研究显示，成品植物油的 MCPDE 和 GEs 含量远大于未精炼油的含量，在常见植物油中，棕榈油中的 MCPDE 和 GEs 含量最高^[75]。

POPs 是植物油中的天然活性物质植物甾醇在高温煎炸等条件下的氧化产物，对人体具有一定的毒副作用^[86]。食用植物油中的 POPs 主要有谷甾醇氧化物、菜油甾醇氧化物、豆甾醇氧化物、菜籽甾醇氧化物和燕麦甾醇氧化物等。在相关文献报道中^[87]，POPs 含量最高的植物油为菜籽油，含量高达 101.9 mg/kg。

RSs 指在浸提植物油工艺的过程中使用的溶剂（如己烷、乙醇、丙酮等）没有完全挥发，残留在最终成品中的化学物质，这些化学物质可导致急性毒性，长期暴露会导致慢性疾病。浸出法和压榨法

是制取食用植物油最主要的两种方法，植物油中 RSs 主要在浸提植物油中检出，其中较明显的植物油有菜籽油、大豆油和棉籽油^[76]。压榨工艺的植物油中理论上不存在溶剂残留，但在实际中也存在压榨植物油溶剂残留超标问题^[88]，有可能是生产企业故意掺入了浸提植物油或其他劣质油，以获得更大的利益。

PCBs 是一类由两个苯环通过共轭的单双键连接而成的有机氯代化合物，广泛存在于环境中，对许多脊椎动物能造成严重的生殖毒性^[89]。关于 PCBs 污染物的限量，我国仅对水产动物油脂有要求，对植物油没有限量要求。鱼类水产品是受 PCBs 污染最严重的食品，在植物油中也有发现被 PCBs 污染的现象^[90]。

NPs 是化工行业表面活性剂壬基酚聚氧乙烯醚的降解产物，对男性的生殖发育具有强烈的毒性作用，有“精子杀手”之称^[91]。NPs 是一种新发现的植物油污染物，近年来才逐渐引起重视。宋鑫等^[92]对 42 份来自全国各地的植物油进行检测分析，NPs 检出率高达 76%。

MOHs 是来源于石油，碳链长度在 C₁₀~C₅₀ 的烃类混合物，主要包括饱和烃矿物油（MOSH）和

芳香烃矿物油 (MOAH), 常见的 MOHs 有柴油、煤油、石蜡和润滑油等。MOSH 具有蓄积效应, 使肝脏发生炎症并引起微肉芽肿, 而 MOAH 则具有致癌性和遗传毒性^[93]。由于 MOHs 被广泛应用在食品生产加工中, 造成植物油在加工中普遍被 MOHs 污染。

植物油从油料种植到成品罐装过程中, 极易受到多种其他有害物质的污染。在植物油的加工过程中, 严格控制好工艺参数, 避免污染因素的形成能够有效减少植物油中有害物质的含量^[94]。植物油的精炼工艺按顺序通常包括脱胶、脱酸、脱色、脱臭和脱蜡, 毛油经过脱胶后为四级油, 经过脱酸后为三级油, 经过脱色后为二级油, 经过脱臭和脱蜡后为一级油。通过精炼工艺, 可以去除掉植物油中的胶质、游离脂肪酸和色素等杂质, 脱臭阶段还能除去多种其他有害物质, 如 PAHs、PAEs 和 MOHs 等^[12]。因此, 级别越高, 其精炼程度越高, 有害物质存在的风险也越低。除此以外, 也还可以利用生物炭、活性炭、纳米管等材料吸附的方法来去除植物油中的 PAHs、PAEs、MCPDE 和 GEs 等有害物质^[95-97]。总体而言, 虽然在植物油的后续加工中能去除部分有害物质, 但对植物油生产的上游进行干预控制可能是最有效和最实用的措施。

4.3 检测技术

植物油中 PAHs、PAEs、MCPDE、GEs、POPs、RSs、PCBs、NPs 和 MOHs 等物质种类繁多, 均为可挥发低沸点物质, 且都具有热稳定性, 相比起 HPLC, GC 是一种较为普遍适用的检测方法 (见表 2)。由于 PAHs、PAEs 和 PCBs 等物质的同系物之间分子量差别很小、含量低、基体复杂, 而 MS 可通过化合物碎片离子质荷比 (m/z) 的高选择性来达到较低的基线, 从而实现高灵敏度的性能, 因此, 最常用的检测器为 MS。刘宇星等^[98]利用 GC-MS/MS 建立了高通量测定食用植物油中 57 种有机污染物的分析方法, 其中包括 PAHs、PAEs 和 PCBs 等, 检出限最低可达 0.16 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在上述物质的检测中, 如何尽量减少植物油复杂基质带来的干扰, 获得较干净的前处理液一直是研究的重点, 刘青等^[99]建立的 GC-MS/MS 同时测定食品中 3-MCPDE、2-MCPDE 和 GE 的检测方法中, 通过优化前处理中酯交换和衍生化的条件, 有效减少杂质干扰, 得到了较高峰强度, 提高了实验的灵敏度。

5 展望

目前, 我国对植物油的需求量庞大, 市场供需矛盾突出, 且对植物油的进口依赖度极高^[107]。在积极推动植物油产业发展的同时, 必须加强对食用油安全的监管和监测。值得关注的是, 我国植物油中受限制的污染物种类较少, 而且其限量标准相较于欧盟较为宽松。以植物油中真菌毒素为例, 我国食品安全国家标准 GB 2761-2017 目前只对黄曲霉毒素 B₁ 提出了限量要求, 而欧盟委员会不仅对黄曲霉毒素 B₁ 制定了更严的限量标准, 还设定了 4 种黄曲霉毒素 (B₁、B₂、G₁ 和 G₂) 含量之和、玉米赤霉烯酮等的限量要求。除此以外, 欧盟委员会还对植物油中苯并芘、4 种多环芳烃 (苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[a]荧蒽和屈) 的含量之和、二噁英及多氯联苯等安全风险物质也制定了相应的限量标准^[108,109], 而我国只有食品安全国家标准 GB 2762-2022 对其中的苯并芘制定了限量要求。由此可见, 我国植物油在食用安全方面存在较大的潜在风险, 建议我国食品安全监管部门通过评估食用植物油的行业发展和安全风险物质的风险等级, 重新修订食用植物油中安全风险物质的种类范围和限量要求。

综上所述, 亟需积极推进植物油中风险物质的快速检测方法, 并预先建立植物油风险物质数据库。通过对植物油生产全产业链中可能引入的环境污染物或者产业链中可能生成的有害物质进行筛选, 深入研究其残留规律和风险等级, 将为食用植物油中安全风险物质的监测和控制提供必要的理论依据。这一举措有望为我国植物油产业的健康可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 薛莉, 黄晓荣, 汪雪芳, 等. 食用植物油营养成分及检测技术的研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 446-451.
- [2] KUMAR A, SHARMA A, C UPADHYAYA K. Vegetable oil: nutritional and industrial perspective [J]. Current Genomics, 2016, 17(3): 230-240.
- [3] 燕志, 朱江煜, 魏继燕, 等. n-3/n-6 多不饱和脂肪酸的生理功能与膳食平衡研究 [J]. 江苏调味副食品, 2022, 3: 1-3, 44.
- [4] TIAN M K, BAI Y C, TIAN H Y, et al. The chemical composition and health-promoting benefits of vegetable oils - A review [J]. Molecules, 2023, 28(17): 6393.
- [5] CONIGLIO S, SHUMSKAYA M, VASSILIOU E. Unsaturated

- fatty acids and their immunomodulatory properties [J]. *Biology*, 2023, 12(2): 279.
- [6] TELLE-HANSEN V H, GAUNDAL L, MYHRSTAD M C W. Polyunsaturated fatty acids and glycemic control in type 2 diabetes [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1067.
- [7] DE OLIVEIRA P A, KOVACS C, MOREIRA P, et al. Unsaturated fatty acids improve atherosclerosis markers in obese and overweight non-diabetic elderly patients [J]. *Obesity Surgery*, 2017, 27(10): 2663-2671.
- [8] 李亦芳.n-3多不饱和脂肪酸对2型糖尿病患者的协助治疗效果研究[J].*糖尿病新世界*,2022,25(18):106-109.
- [9] 俞蕾,谢明仁,俞发荣.植物不饱和脂肪酸对肺癌细胞毒性作用[J].*甘肃科技*,2021,37(24):160-164.
- [10] 王瑞元.2021年我国粮油产销和进出口情况[J].*中国油脂*,2022,47(6):1-7.
- [11] 狄强,刘渝阳.食物安全观视角下的我国食用植物油安全保障体系构建[J].*农村经济*,2021,10:27-34.
- [12] GHARBY S. Refining vegetable oils: Chemical and physical refining [J]. *The Scientific World Journal*, 2022, 2022: 6627013.
- [13] JI N, DIAO E J, LI X Y, et al. Detoxification and safety evaluation of aflatoxin B1 in peanut oil using alkali refining [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(12): 4009-4014.
- [14] MUKHERJEE A G, WANJARI U R, RENU K, et al. Heavy metal and metalloid-induced reproductive toxicity [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2022, 92: 103859.
- [15] 叶萌祺,杜宗军,陈冠军.食品中重金属去除技术研究进展[J].*现代食品科技*,2017,33(10):308-318,307.
- [16] 高琳,张瑶,王紫昕,等.食用植物油中常见污染物的来源、控制及检测方法[J].*食品安全导刊*,2022,12:156-158.
- [17] REBOREDO F, SIMOES M, JORGE C, et al. Metal content in edible crops and agricultural soils due to intensive use of fertilizers and pesticides in Terras da Costa de Caparica (Portugal) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(3): 2512-2522.
- [18] 张小敏.食用植物油中铬、砷、铅的分析及风险评估[D].重庆:重庆科技学院,2018.
- [19] 江波,陈林.电感耦合等离子体发射光谱测定食用植物油中的重金属元素[J].*中国油脂*,2022,47(1):126-130.
- [20] 邱会东,赵波,张红,等.食用植物油中重金属分析及其健康风险评估[J].*中国油脂*,2017,42(3):91-94.
- [21] NIU B, ZHANG H, ZHOU G Y, et al. Safety risk assessment and early warning of chemical contamination in vegetable oil [J]. *Food Control*, 2021, 125: 107970.
- [22] 刘海,王进,许杰,等.产地、物种及加工工艺对油茶籽油中的微量元素及重金属含量的影响[J].*中国油脂*,2022, 47(4):24-28.
- [23] 邱会东,赵波,张红,等.食用植物油中重金属分析方法的研究进展[J].*中国油脂*,2017,42(1):76-79.
- [24] 魏军晓,耿元波,岑况.炭化-湿法消解-石墨炉原子吸收光谱法测定植物油中铅、镉和铬的研究[J].*中国油脂*,2018,43(7):135-140.
- [25] 孔小华.粮油食品中重金属检测技术发展研究[J].*中国食品工业*,2023,7:68-70,76.
- [26] CIMBALO A, ALONSO-GARRIDO M, FONT G, et al. Toxicity of mycotoxins *in vivo* on *vertebrate organisms*: A review [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 137: 111161.
- [27] BROWN R, PRIEST E, NAGLIK J R, et al. Fungal toxins and host immune responses [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 697.
- [28] 李双青,李晓敏,张庆合.植物油中真菌毒素检测技术的研究进展[J].*色谱*,2019,37(6):569-580.
- [29] 孙嘉笛,徐洪文,徐一达,等.食用植物油中黄曲霉毒素和赭曲霉毒素的污染状况及特征分析[J].*中国油脂*,2022,47(9):35-43.
- [30] MANKEVICIENE A, SUPRONIENE S, BRAZAUSKIENE I, et al. Natural occurrence of *fusarium* mycotoxins in oil crop seed [J]. *Plant Breeding and Seed Science*, 2011, 63(1): 109-116.
- [31] SINGH P K. Assessment of mycotoxins in edible tree borne oil seeds (TBOS) [J]. *Journal of Food Research*, 2012, 1(3): 92.
- [32] 睦世闰,曾肖寒,李凤标,等.2018-2022年广西壮族自治区贵港市食用植物油中黄曲霉毒素B₁监测结果分析及暴露风险评估[J].*中国油脂*,2023,48(10):87-92.
- [33] 朱波,倪一平,叶小莉.2018-2020年深圳市部分市售定型包装食用植物油中黄曲霉毒素监测结果分析[J].*现代食品*,2022,28(12):162-164,176.
- [34] HEUSSNER A H, BINGLE L E. Comparative ochratoxin toxicity: A review of the available data [J]. *Toxins*, 2015, 7(10): 4253-4282.
- [35] 邓春丽,李承龙,谢丹,等.植物油中赭曲霉毒素和伏马毒素的污染调查分析[J].*卫生研究*,2016,45(6):1007-1009, 1015.
- [36] BULGARU C V, MARIN D E, PISTOL G C, et al. Zearalenone and the immune response [J]. *Toxins*, 2021, 13(4): 248.
- [37] LI S, YU Q, ZHOU Y, et al. Progress in bio-degradation of mycotoxin zearalenone [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2018, 34(4): 489-500.
- [38] 宁春妹,安佳秀,赵颖,等.玉米赤霉烯酮对动物繁殖性能的毒性作用及其机制[J].*动物营养学报*,2023,35(4):2166-2174.
- [39] 裴娅晓.玉米油中玉米赤霉烯酮的控制和脱除方法研究[D].郑州:河南工业大学,2016.
- [40] 甄阳光.我国主要饲料原料及产品镰刀菌毒素污染及分布规律的研究[D].成都:四川农业大学,2009.
- [41] SOBROVA P, ADAM V, VASATKOVA A, et al. Deoxynivalenol and its toxicity [J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2010, 3(3): 94-99.
- [42] 雷元培,周建川,郑文革,等.2019-2020年中国饲料原料

- 和饲料中霉菌毒素污染调查报告[J].饲料工业,2022,43(20):59-64.
- [43] 宋丹,李蕴玉,杨彩然,等.河北省蛋鸡配合饲料及原料中霉菌毒素的污染情况[J].中国家禽,2019,41(10):78-80.
- [44] 张正征,王丹,李娜,等.山东省谷物粮食脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量检测分析[J].中国预防医学杂志,2019,20(11):1063-1066.
- [45] 谢丹,邓春丽,赵云峰,等.北京地区部分市售食用植物油中玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇的污染状况分析[J].食品安全质量检测学报,2016,7(5):2105-2113.
- [46] XU L L, WEN Y Q, LIU Y L, et al. Occurrence of deoxynivalenol in maize germs from North China Plain and the distribution of deoxynivalenol in the processed products of maize germs [J]. Food Chemistry, 2018, 266: 557-562.
- [47] GUO Y Q, LU T Y, SHI J C, et al. Identification of deoxynivalenol and degradation products during maize germ oil refining process [J]. Foods, 2022, 11(12): 1720.
- [48] 纪俊敏,吕雅芳,张岩,等.食用植物油中常见真菌毒素及其脱除方法[J].粮油食品科技,2021,29(2):50-58.
- [49] DU Q L, ZHANG W, XU N, et al. Efficient and simultaneous removal of aflatoxin B1, B2, G1, G2, and zearalenone from vegetable oil by use of a metal-organic framework absorbent [J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135881.
- [50] LI S Q, LI X M, ZHANG Q H. Advances in the development of detection techniques for mycotoxins in vegetable oil [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2019, 37(6): 569-580.
- [51] GUAN X, FENG Y C, SUO D C, et al. Simultaneous determination of 11 mycotoxins in maize via multiple-impurity adsorption combined with liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Foods, 2022, 11(22): 3624.
- [52] DE GIROLAMO A, LIPPOLIS V, PASCALE M. Overview of recent liquid chromatography mass spectrometry-based methods for natural toxins detection in food products [J]. Toxins, 2022, 14(5): 328.
- [53] 张宇,李俊玲,王书舟,等.同位素稀释-超高效液相色谱串联质谱法快速测定植物油中16种真菌毒素[J].中国卫生检验杂志,2021,31(16):1921-1926.
- [54] CHAUHAN R, SINGH J, SACHDEV T, et al. Recent advances in mycotoxins detection [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 81: 532-545.
- [55] 郭倩.基于纸基微流控生物纳米传感技术的食品安全快速检测[D].成都:电子科技大学,2021.
- [56] 蒋俊树.浅论农药标准样品(物质)与食品安全[C]//食品安全的理论与实践——安徽食品安全博士科技论坛论文集.合肥:安徽省科学技术协会学会部,2005:605-611.
- [57] 孙新琪,安芳,鹿倩,等.我国中药材禁用农药残留现状、毒性及分析方法研究进展[J].中国中药杂志,2022,47(3):611-627.
- [58] LIU Y H, LI S L, NI Z L, et al. Pesticides in persimmons, jujubes and soil from China: Residue levels, risk assessment and relationship between fruits and soils [J]. The Science of the Total Environment, 2015, 542(Pt A): 620-628.
- [59] LIANG H C, BILON N, HAY M T. Analytical methods for pesticide residues in the water environment [J]. Water Environment Research, 2015, 87(10): 1923-1937.
- [60] 陶健.我国食品中铝污染管理的历史沿革与现实困境[J].中国食品添加剂,2016,10:204-210.
- [61] FUKAZAWA T, KOBAYASHI T, TOKAIRIN S, et al. Behavior of N-methylcarbamate pesticides during refinement processing of edible oils [J]. Journal of Oleo Science, 2007, 56(2): 65-71.
- [62] ZHAO L, GE J, LIU F M, et al. Effects of storage and processing on residue levels of chlorpyrifos in soybeans [J]. Food Chemistry, 2014, 150: 182-186.
- [63] MUNJANJA B K, NOMNGONGO P N, MKETO N. Organochlorine pesticides in vegetable oils: An overview of occurrence, toxicity, and chromatographic determination in the past twenty-two years (2000-2022) [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 19: 1-17.
- [64] 蒋康丽,扈斌,吴兴强,等.自动QuEChERS结合气相色谱-串联质谱法测定花生油中172种农药残留[J].食品安全质量检测学报,2021,12(17):6857-6864.
- [65] 吕曦.大豆油中多种农药残留液相色谱-串联质谱检测方法的建立及加工因子研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [66] 侯靖,陈丹,涂凤琴,等.气相色谱-飞行时间质谱法测定食用植物油中197种农药残留[J].色谱,2021,39(11):1261-1272.
- [67] 张帆,白珊,王美玲,等.MWCNT-分散固相萃取-气相色谱-串联质谱法检测茶油中11种有机磷农药残留[J].湖南师范大学自然科学学报,2017,40(2):49-55.
- [68] 蔡燕斌,丁萍,吴伟燕,等.气相色谱-质谱法快速测定食用植物油中7种农药残留[J].食品科技,2021,46(8):284-288.
- [69] 沈祥震,张红霞,王艳丽,等.QuEChERS-气相色谱-质谱法对植物油中农药残留的快速检测[J].中国粮油学报,2019,34(9):125-129.
- [70] 沈伟健,吴斌,王红,等.气相色谱-负化学电离质谱法测定食用植物油中5种酰胺基吡啶类农药残留[J].色谱,2019,37(1):27-31.
- [71] 张云,陈俊玉,陈泽宇,等.植物油中邻氨基苯甲二酰胺类农药残留检测技术研究[J].中国粮油学报,2017,32(8):118-122.
- [72] 段丽芳.7种典型农药在食用油加工过程残留变化规律及膳食风险评估[D].北京:中国农业科学院,2022.
- [73] 李凌云,许晓敏,林桓,等.超高效液相色谱-串联质谱法检测谷物、油料和植物油中氨基甲酸酯类农药残留[J].农产品质量与安全,2018,5:44-48,63.
- [74] BADGER G M, NOVOTNY J. Mode of formation of 3,4-benzopyrene at high temperatures [J]. Nature, 1963, 198(4885): 1086-1086.
- [75] 安浩.葵花籽油加工过程中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成及抑制研究[D].郑州:河南工业大学,2022.
- [76] 胡银洲.食用油中植物甾醇氧化物风险评估、劣变机理

- 及控制技术[D].杭州:浙江大学,2017.
- [77] 云鹏,路杨,刘印平,等.气相色谱-质谱法测定植物油中壬基酚含量[J].食品安全质量检测学报,2021,12(5):1705-1710.
- [78] 陈莉.食用植物油中邻苯二甲酸酯类塑化剂(PAEs)的脱除研究[D].郑州:河南工业大学,2019.
- [79] SAHOO B M, RAVI KUMAR B V V, BANIK B K, et al. Polyaromatic hydrocarbons (PAHs): Structures, synthesis and their biological profile [J]. *Current Organic Synthesis*, 2020, 17(8): 625-640.
- [80] FERNANDEZ-GONZALEZ R, YEBRA-PIMENTEL I, MARTINEZ-CARBALLO E, et al. A critical review about human exposure to polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) through foods [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(11): 1590-1617.
- [81] BARBOSA F JR, ROCHA B A, SOUZA M C O, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part B, Critical Reviews*, 2023, 26(1): 28-65.
- [82] CHANG W H, HERIANTO S, LEE C C, et al. The effects of phthalate ester exposure on human health: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 786: 147371.
- [83] HUANG L, ZHU X Z, ZHOU S X, et al. Phthalic acid esters: Natural sources and biological activities [J]. *Toxins*, 2021, 13(7): 495.
- [84] 李荷丽,罗季阳,咎蔚东,等.食品中氯丙醇酯的毒性及代谢动力学研究进展[J].食品科技,2018,43(10):357-361.
- [85] SCHILTER B, SCHOLZ G, SEEFELDER W. Fatty acid esters of chloropropanols and related compounds in food: Toxicological aspects [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2011, 113(3): 309-313.
- [86] 姜绍通,王华林,庞敏,等.植物油脂中风险因子生成与控制研究进展[J].中国食品学报,2011,11(9):209-219.
- [87] 郭锐.油脂和食品体系中甾醇的热迁移及氧化稳定性研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [88] 杨朝慧,吴炜亮,张朵,等.2015-2020年我国食用植物油质量安全风险因素分析[J].中国油脂,2021,46(12):69-78.
- [89] SINGLEMAN C, ZIMMERMAN A, HARRISON E, et al. Toxic effects of polychlorinated biphenyl congeners and aroclors on embryonic growth and development [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2021, 40(1): 187-201.
- [90] 张建清,蒋友胜,周健,等.深圳市市售食品中二恶英、多氯联苯污染现状研究[J].华南预防医学,2009,35(6):4-8.
- [91] LU Z J, GAN J. Analysis, toxicity, occurrence and biodegradation of nonylphenol isomers: A review [J]. *Environment International*, 2014, 73: 334-345.
- [92] 宋鑫,杭学宇,王芹,等.高效液相色谱-串联质谱法测定食用植物油中4-壬基酚的含量[J].理化检验(化学分册),2018,54(5):611-615.
- [93] SCHRENK D, BIGNAMI M, BODIN L, et al. Update of the risk assessment of mineral oil hydrocarbons in food [J]. *EFSA Journal*, 2023, 21(9): e08215.
- [94] 后萍.浅析精炼工艺对植物油品质的影响[J].现代食品,2023,29(18):56-58.
- [95] 王奇,王传明,李俊霞,等.食用植物油中邻苯二甲酸酯类塑化剂风险和控制的研究进展[J].粮食与油脂,2023,36(11):17-20,24.
- [96] 刘壮,刘萱,罗日明,等.植物油精炼过程中缩水甘油酯和3-氯丙醇酯的形成及脱除研究进展[J].中国油脂,2023,48(3):64-70.
- [97] 纪俊敏,侯杰,姜苗苗,等.吸附法脱除植物油中多环芳烃的研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2023,44(3):129-140.
- [98] 刘宇星,易守福,徐文泱,等.气相色谱-三重四极杆质谱法测定食用植物油中57种有机污染物[J].食品与机械,2023,39(6):65-74.
- [99] 刘青,阮君,曾广丰,等.气相色谱-串联质谱法同时测定食品中的氯丙醇酯和缩水甘油酯[J].现代食品科技,2018,34(4):242-248,257.
- [100] BERTOZ V, PURCARO G, CONCHIONE C, et al. A review on the occurrence and analytical determination of PAHs in olive oils [J]. *Foods*, 2021, 10(2): 324.
- [101] 樊继彩,胡琰,何华丽,等.市售食用植物油和婴幼儿配方奶粉中缩水甘油酯污染水平及其暴露风险评估[J].中国卫生检验杂志,2022,32(4):504-507.
- [102] 熊丽,王艳敏,李娟,等.2016-2020年江西省市售食用植物油中氯丙醇酯污染调查[J].现代预防医学,2021,48(13): 2351-2354.
- [103] QI M H, LI Y Y, ZHU Z, et al. Current sample preparation methods and determination techniques for the determination of phthalic acid ester plasticizers in edible oils [J]. *Molecules*, 2023, 28(13): 5106.
- [104] 杨柳,尚素微,欧菊芳,等.顶空-气质联用法鉴别压榨植物油和浸出植物油[J].中国油脂,2023,48(9):138-143.
- [105] ROSZKO M, SZTERK A, SZYMCZYK K, et al. PAHs, PCBs, PBDEs and pesticides in cold-pressed vegetable oils [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2012, 89(3): 389-400.
- [106] 唐超,叶琳洋,李刚,等.气液微萃取-气相色谱法快速测定植物油中的饱和烃类矿物油成分[J].粮食与油脂,2019,32(9):66-70.
- [107] 王凛彬,赵金言.从印尼棕榈油出口政策反复看我国食用植物油安全[J].农业发展与金融,2022,8:54-57.
- [108] 翟晨,穆蕾,杨悠悠.中国及欧盟粮油食品真菌毒素限量及减控措施对比[J].现代食品科技,2020,36(3):302-309.
- [109] 初柏君,李世磊,惠菊.我国与欧盟植物油中污染物的限量标准比较[J].粮食与食品工业,2017,24(5):13-15,18.