

综述

坚果及籽类食品中霉菌与真菌毒素防控技术研究进展

孙忠清¹,林滢¹,密叶¹,于维森¹,杨大进²,彭子欣²

(1. 青岛市疾病预防控制中心,青岛市预防医学研究院,山东 青岛 266033;2. 国家食品安全风险评估中心,国家卫生健康委员会食品安全风险评估重点实验室,中国医学科学院创新单元(2019RU014号),北京 100021)

摘要:坚果及籽类食品富含蛋白质、脂肪酸等多种营养素,深受消费者喜爱。然而这类食品易被霉菌及其产生的真菌毒素污染,危害人体健康。本文综述了国内外坚果及籽类食品中霉菌与真菌毒素防控技术的研究进展,旨在为坚果及籽类食品的安全生产和有效监管提供科学依据。

关键词:坚果;籽类;霉菌;真菌毒素;检测技术;预防控制

中图分类号:R155 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-8456(2023)05-0795-06

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.05.027

Research progress in prevention and control of mold and mycotoxin in nuts and seed foodsSUN Zhongqing¹, LIN Ying¹, MI Ye¹, YU Weisen¹, YANG Dajin², PENG Zixin²

(1. Qingdao Municipal Center for Disease Control&Prevention, Qingdao Institute of Preventive Medicine, Shandong Qingdao 266033, China;2. NHC Key Laboratory of Food Safety Risk Assessment, Chinese Academy of Medical Sciences Research Unit (No. 2019RU014), China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100021, China)

Abstract: Nuts and seed foods are rich in protein, fatty acids, and other nutrients, which are popular among consumers. However, these foods were easily contaminated by mold and mycotoxins, posing potential safety risks to human health. In this paper, the prevention and control research progress of mold and it produced mycotoxin in nut and seed foods were reviewed, aiming to provide a scientific basis for the safe production and effective supervision of nut and seed foods.

Key words: Nuts; seeds; mold; mycotoxin; detection technology; prevention and control measures

坚果及籽类食品营养价值高,富含蛋白质、不饱和脂肪酸、矿物质、维生素等多种营养元素,可促进生长发育、增强免疫、降低心脑血管疾病和癌症的发病率。我国坚果及籽类食品种类丰富,主要包括核桃、板栗、花生、杏仁、榛子、松子、白果、扁桃、开心果和腰果等。随着经济发展和人民生活水平的提高,居民对坚果及籽类食品的需求量大增。据2015年我国15省居民坚果摄入调查显示,在15~59岁居民中,坚果的总体消费率为18%^[1];在60岁及以上居民中,坚果的总体消费率为17.8%,在60

岁及以上坚果消费人群中,有81.1%的人达到或超过《中国居民膳食指南(2016)》坚果推荐摄入量^[2]。

虽然坚果及籽类食品生产量持续增加,但产品中污染的霉菌及其产生的真菌毒素应引起足够重视。调查结果显示,霉菌、黄曲霉毒素B₁超标^[3]是影响我国坚果及籽类食品质量安全的主要因素。据欧盟食品和饲料快速预警体系(The Rapid Alert System for Food and Feed, RASFF)通报数据显示,2010—2019年真菌毒素超标是我国坚果及籽类食品出口欧盟的最大阻碍^[4]。研究表明,真菌毒素具有较强的致病性和潜在的致癌性,其中黄曲霉毒素的毒性最强,已被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)划定为I类致癌物。

我国大部分地区气候温和、降雨量多,适宜霉菌生长及产生真菌毒素,且坚果及籽类在种植、采摘、去壳、清洗、运输及储藏全链条中任一环节都有

收稿日期:2022-08-31

基金项目:国家自然科学基金(32172314)

作者简介:孙忠清 女 副主任技师 研究方向为营养与食品卫生学 E-mail:s_zhongqing@163.com

通信作者:彭子欣 女 研究员 研究方向为食品微生物

E-mail:pengzixin@cfsa.net.cn

可能被霉菌污染,进而产生真菌毒素^[5-11]。然而目前我国对坚果及籽类食品中霉菌及真菌毒素污染的监测数据较少,亟须完善的监管机制及有效的防控措施。本文综述了坚果与籽类食品中常见霉菌及真菌毒素种类、污染途径、国内外产品限量标准、检测技术及防控措施,旨在为坚果及籽类食品的安全生产和科学监管提供理论依据。

一 坚果及籽类食品中霉菌污染现状

1.1 坚果及籽类食品中霉菌污染

坚果是指具有坚硬外壳的木本类植物籽粒,包括核桃、板栗、杏核、扁桃仁和开心果等。籽类是指瓜、果、蔬菜和油料等植物的籽粒,包括葵花籽、西瓜籽、南瓜籽等。美国一项关于真菌在坚果上的发病率及真菌间的相关性研究显示,将100个开心果、杏仁、核桃和巴西坚果分别置于培养皿上培养,观察真菌的生长情况,结果发现每个坚果能检出0~9种真菌,平均带菌1.9种^[7]。美国生产的杏仁,伊朗、土耳其和突尼斯生产的开心果,埃及、印度和加纳生产的花生,土耳其生产的榛子,意大利生产的板栗和巴西生产的坚果等都曾检出曲霉污染^[8-10]。根据GB 19300—2014《食品安全国家标准 坚果与籽类食品》中规定,烘炒工艺加工的熟制坚果与籽类食品中霉菌计数不得超过25 CFU/g^[11]。据2016—2018年坚果炒货食品国家食品安全监督抽检结果显示,我国开心果、松仁、核桃等坚果炒货食品的不合格率约为7%,其中霉菌计数超标是造成产品不合格的主要原因之一^[12]。

1.2 霉菌污染的途径及种类

坚果及籽类食品在种植、采摘、运输、储藏、去壳、清洗、分拣、包装及加工等诸多过程中可被上百种霉菌污染^[5-10,13-19]。按污染环节分类,可分为田间霉菌和仓储霉菌。田间霉菌以青霉菌、麦角菌和镰刀菌为主,多在采收前污染;仓储霉菌以曲霉菌为主,主要在存储环节产生^[5-10,13-19]。

1.2.1 田间霉菌

采收前的坚果及籽类可因空气传播、土壤带菌、植株疫病被田间霉菌污染。常见菌属有曲霉属(*Aspergillus* spp.)、根霉属(*Rhizopus* spp.)和青霉属(*Penicillium* spp.),其次是链格孢霉属(*Alternaria* spp.)、枝孢霉属(*Cladosporium* spp.)、镰刀菌属(*Fusarium* spp.)、木霉属(*Trichoderma* spp.)和轮枝霉属(*Rotrichoderma* spp.)等上百种^[13-15]。曲霉属中最常见的是黑曲霉(*Aspergillus niger*)、黄曲霉(*Aspergillus flavus*)、构巢曲霉(*Aspergillus stellatus*)、怪柳曲霉(*Aspergillus oryzae*)和赭曲霉(*Aspergillus ochratus*)^[13-14]。

这些霉菌在坚果及籽类的外果壳、内果壳、种皮、果仁中的分布还有待进一步研究。

1.2.2 仓储霉菌

坚果及籽类食品在采摘、加工等过程易因机械损伤、交叉污染、空气传播等因素被曲霉属(*Aspergillus* spp.)、镰刀菌属(*Fusarium* spp.)、青霉属(*Penicillium* spp.)、毛霉属(*Mucor* spp.)等多种霉菌污染^[16-17]。在仓储环节可因自身带菌、交叉污染、空气传播等因素引发霉变。常见菌属包括曲霉属(*Aspergillus* spp.),其次是青霉属(*Penicillium* spp.)、根霉属(*Rhizopus* spp.)、毛霉属(*Mucor* spp.)和镰刀菌(*Fusarium* spp.)属等上百种霉菌^[18-19]。

二 常见真菌毒素及其毒性

2.1 常见真菌毒素

真菌毒素是霉菌产生的对人体健康有害的次级代谢产物,目前已发现并报道了400多种真菌毒素。在坚果及籽类食品中,常见真菌毒素有4大类:黄曲霉毒素(Aflatoxins, AFs)、单端孢霉烯族毒素(Trichothecene toxins, TCs)、链格孢菌毒素(*Alternaria* toxins, ATs)和赭曲霉毒素(Ochratoxins, OTs)^[20]。

2.2 常见真菌毒素的毒性

2.2.1 黄曲霉毒素

目前已知真菌毒素中黄曲霉毒素的毒性最强,已被IARC划定为I类致癌物,由黄曲霉和寄生曲霉产生。可污染坚果及籽类食品的主要有黄曲霉毒素B₁(Aflatoxin B₁, AFB₁)、AFB₂、AFG₁、AFG₂、AFM₁、AFM₂。黄曲霉毒素具有遗传毒性,大量摄入会损伤肝脏,导致急性中毒,并可诱发肝癌。

2.2.2 单端孢霉烯族毒素

单端孢霉烯族毒素包括T-2毒素(T-2 toxin, T-2)、玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEA)、白僵菌毒素(Beauvericin, BEA)、恩镰孢菌素A(Enniatin A, ENA)、ENA₁、ENB、ENB₁等,目前已鉴定出200余种。单端孢霉烯族毒素可导致人类急性中毒,快速刺激皮肤或肠黏膜并导致腹泻,其慢性毒性包括免疫抑制,损害造血系统、消化系统、神经系统和肾脏,以及致癌、致畸和致突变等。

2.2.3 链格孢菌毒素

链格孢菌毒素包括藤毒素(Tentoxin, TEN)、交链孢醇(Altemariol, AOH)、链格孢酚甲醚(Alternarine methyl ether, AME),具有致畸、致癌、致突变等毒性。

2.2.4 赭曲霉毒素

赭曲霉毒素毒性较强,已被IARC划定为II B类致癌物,可由曲霉菌和青霉菌产生,包括赭曲霉

毒素 A (Ochratoxin A, OTA) 和赭曲霉毒素 B (Ochratoxin B, OTB)。赭曲霉毒素具有肝毒性、肾毒性和神经毒性,可引起肾癌,影响胎儿发育、损害免疫系统,还具有致癌、致畸、致突变的作用。

2.3 坚果及籽类食品中真菌毒素污染情况

坚果及籽类食品或其制品中存在真菌毒素污染情况^[9,21-26]。芝麻酱及芝麻油曾检出 16 种真菌毒素,分别是 AFB₁、AFB₂、AFG₁、AFG₂、AFM₁、OTA、T-2、伏马菌素 B₂ (Fumonisin B₂)、伏马菌素 B₁ (Fumonisin B₁)、O-甲基杂色曲霉素 (O-methyl sterigmatocystin)、蛇形菌素 (Serpentine)、新茄镰孢菌醇 (Fusarium solanol)、杂色曲霉素 (Paetromycin)、曲酸 (Kojic acid, KA)、青霉酸 (Penicillamic acid)、橘青霉素 (Tangerine penicillin)^[24]。开心果曾检出 AFs、TCs、KA 和曲酸衍生物 (Kojic acid derivative)^[25]。核桃及核桃油曾检出 AFs,大豆油曾检出 ZEA^[26],板栗及其制品曾检出 AFs、OTA、环吡嗪酸 (Cyclopyrazinic acid)、桔青霉素 (Citrinin)、罗奎弗汀 C (Roquifotin C) 和霉酚酸 (Mycophenolic acid)^[9]。

2.4 坚果及籽类食品中真菌毒素相关限量标准

鉴于真菌毒素对健康的危害,许多国家已制定食品中真菌毒素限量标准和法规。我国 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定,熟制坚果中 AFB₁ 限量值为 5 μg/kg,杏仁、榛子中 AFB₁ 限量值为 15 μg/kg^[27]。在国际上,国际食品法典委员会 (Codex Alimentarius Commission, CAC) 下辖食品污染物专业委员会 (Codex Committee on Contaminants in Foods, CCCF) 于 2010 年修订的《食品和饲料中污染物和毒素通用标准》规定,即食杏仁、巴西坚果(去壳)和开心果中 AFs 总含量 (AF_{tot}) 限量值为 10 μg/kg^[20]。欧盟对坚果及籽类制品中 AF_{tot} 进行了限量,花生、榛子和巴西坚果的 AFB₁ 限量值为 8 μg/kg,AF_{tot} 限量值为 15 μg/kg,杏仁和开心果的 AFB₁ 限量值为 12 μg/kg,AF_{tot} 限量值为 15 μg/kg^[28]。美国、墨西哥规定坚果中 AF_{tot} 限量值为 20 μg/kg,加拿大规定坚果中 AF_{tot} 限量值为 15 μg/kg,巴西规定坚果中 AF_{tot} 限量值为 10 μg/kg (巴西坚果除外) 和 10~20 μg/kg (巴西坚果),智利规定坚果中 AF_{tot} 限量值为 5 μg/kg^[29]。

三 霉菌及真菌毒素污染影响因素

影响霉菌生长繁殖及产毒的因素很多,例如水活度、温度、湿度、带菌量、菌种等。

3.1 水活度

水活度是指在密闭空间中,某一食品的平衡蒸气压与相同温度下纯水的饱和蒸气压的比值。纯

水的水活度等于 1.0。水活度度量的是食品中的自由水分子,而这些水分子是微生物繁殖和存活的必需品。水活度为 0.98 时,微生物最易生长繁殖,水活度 < 0.93 时,微生物生长繁殖受到抑制,但霉菌仍能生长,水活度 < 0.7 时,霉菌的生长繁殖受到抑制。

3.2 温度

温度对霉菌的生长及产毒均有重要影响。不同种类的霉菌最适生长温度不同,大多数霉菌最适生长温度为 25 °C~30 °C。在 0 °C 以下或 30 °C 以上,霉菌不能产毒或产毒力减弱。黄曲霉的最低生长温度为 6 °C~8 °C,最高生长温度为 44 °C~46 °C,最适生长温度为 37 °C 左右,最适产毒温度为 28 °C~32 °C。有研究表明,即使 50 °C 水浴 45 min 也不能完全灭活板栗上的霉菌或抑制真菌毒素产生^[30]。

3.3 霉菌属

不同属霉菌可产生不同的真菌毒素,即使是相同属的霉菌,也可产生不同的真菌毒素,例如从花生分离到的黄曲霉大部分能产生黄曲霉毒素。黄曲霉和寄生曲霉都可产生黄曲霉毒素。

综上,减少土壤中霉菌含量、降低虫害,采收后快速干燥,减少运输、包装和机械加工对果仁的损伤,良好的通风,合理的前处理技术等可减少坚果及籽类中霉菌和真菌毒素污染^[31-33]。

四 坚果及籽类食品中霉菌及真菌毒素检测技术

对霉菌及真菌毒素进行快速、灵敏的检测是保证坚果及籽类食品质量安全的必要条件。即使感官性状良好的坚果及籽类食品,也可污染霉菌及真菌毒素。

4.1 霉菌检测技术

4.1.1 国标法

食品安全国家标准 GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》规定,坚果及籽类食品中霉菌计数可用直接镜检计数法和平板计数法检测。直接镜检计数法是将样品稀释涂片后,在显微镜标准视野下进行观察计数^[34]。平板计数法是样品经稀释涂布,在马铃薯葡萄糖琼脂或孟加拉红琼脂培养基 (28±1) °C 培养 5 d 后进行菌落计数^[34]。国标方法检测成本较低,但检测周期长,检出限较高,较为费时费力,适用于质量抽检。

4.1.2 酶联免疫法

酶联免疫法是利用抗体和抗原之间特异性相互作用快速检测目标物的方法。酶联免疫法通过使用荧光标记的抗体(包括多克隆抗体、单克隆抗体、单链抗体等)与霉菌细胞壁蛋白或细胞壁表面蛋白结

合,可同时特异性识别多种霉菌,其中单链抗体可将花生基质中黄曲霉和寄生曲霉检测的灵敏度提高到 $1\ \mu\text{g}/\text{g}$ ^[35]。酶联免疫法快速高效、检出限低、省时省力,但检测成本较高,适用于质量抽检。

4.1.3 近红外高光谱图像技术

近红外高光谱图像技术是一种快速、无损评价坚果及籽类食品质量的新方法。该方法通过采集坚果及籽类食品在近红外高光谱的数据信息,结合多元统计分析模型,可快速无损地定性或定量分析样品的霉菌污染程度^[36],但尚未普遍推广。

4.1.4 电子鼻检测技术

坚果及籽类食品在霉变过程中可产生较多的芳香族化合物、碳氢化合物、胺类化合物与烷烃类气体。电子鼻检测技术通过分析这些物质对传感器信号的响应及权重,判断样品霉变程度及污染霉菌种类^[37]。电子鼻检测技术是目前国内外正在快速发展的无损检测技术。

4.1.5 聚合酶链式反应快速检测技术

聚合酶链式反应(Polymerase chain reaction, PCR)快速检测技术是通过将霉菌特异基因区设置引物,经PCR扩增,对坚果及籽类食品中污染霉菌进行检测。PCR快速检测技术可同时检测多种霉菌污染,检测限可达 $10\ \text{CFU}/\text{g}$,且高效、快速、准确^[38]。

五 真菌毒素检测技术

真菌毒素常用的检测方法包括高效液相色谱法、薄层色谱法、毛细管电泳法、液质联用法、气相色谱法、液相色谱法、荧光光度法、液相色谱串联质谱法、气相色谱串联质谱法、超高液相色谱串联质谱法和超高气相色谱串联质谱法等。其中,超高液相色谱串联质谱法和超高气相色谱串联质谱法使用频率较高,因为这两种分析方法能同时满足多组分、高通量、快速定性和定量分析的需求^[20]。

六 发展前景和展望

霉菌及真菌毒素污染不仅影响坚果及籽类食品的质量,还会造成健康风险。目前,国内关于坚果及籽类食品中霉菌及真菌毒素污染状况的研究较少,缺少坚果及籽类食品中各类霉菌及常见真菌毒素的相关检测数据,真菌毒素的限量标准只能参考国外标准。由于国内外种植环境、生产工艺和膳食结构的差异,国外标准未必适合国内情况,不能准确评估消费者暴露于霉菌及真菌毒素的健康风险。综上,亟须深入开展坚果及籽类食品中霉菌及真菌毒素防控及相关标准研究,促进产业健康

发展。

参考文献

- [1] 欧阳一非,张兵,王志宏,等.2015年中国15省(自治区、直辖市)18-59岁居民坚果摄入状况[J].卫生研究,2018,47(2):173-177.
OUYANG Y F, ZHANG B, WANG Z H, et al. Intake of nuts and nuts products among Chinese adults aged 18-59 years old in 15 provinces, 2015 [J]. Journal of Hygiene Research, 2018, 47(2): 173-177.
- [2] 欧阳一非,王惠君,王志宏,等.2015年中国十五省(自治区、直辖市)老年居民坚果摄入状况[J].卫生研究,2019,48(4):526-530.
OUYANG Y F, WANG H J, WANG Z H, et al. Intake of nuts among Chinese elderly residents in 15 provinces, 2015 [J]. Journal of Hygiene Research, 2019, 48(4): 526-530.
- [3] 曹扬,赵琴,俞淑.我国坚果炒货行业质量调研报告[J].质量与标准化,2016(1):37-39.
CAO Y, ZHAO Q, YU S. Research report of the quality in nuts and roasted goods in China [J]. Quality and Standardization, 2016(1): 37-39.
- [4] 李润妍,潘琳,柳家鹏,等.2010—2019年欧盟食品和饲料快速预警系统对华通报食品真菌毒素污染分析及应对策略[J].核农学报,2021,35(8):1883-1892.
LI R Y, PAN L, LIU J P, et al. Analysis and countermeasures to the data of mycotoxin contamination in food notified by EU Rapid Alert System of Food and Feed to China from 2010 to 2019 [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(8): 1883-1892.
- [5] 王龔,管乐,韩紫怡,等.我国花生黄曲霉毒素污染影响因素分析[J].食品安全质量检测学报,2021,12(19):7818-7825.
WANG Y, GUAN Y, HAN Z Y, et al. Analysis of influencing factors of aflatoxin pollution of peanut in China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(19): 7818-7825.
- [6] 朱梦洁,王雪,张姝娟,等.襄阳两种土壤类型对花生贮藏期黄曲霉及其毒素污染风险的影响研究[J].花生学报,2021,50(4):81-86.
ZHU M J, WANG X, ZHANG S J, et al. Study on the effects of two soil types on the risk of *Aspergillus flavus* and its toxin contamination during storage of peanuts in Xiangyang [J]. Journal of Peanut Science, 2021, 50(4): 81-86.
- [7] BAYMAN P, BAKER J L, MAHONEY N E. *Aspergillus* on tree nuts: incidence and association [J]. Mycopathologia, 2002, 155(3): 161-169.
- [8] ORTEGA-BELTRAN A, MORAL J, PICOT A, et al. Atoxigenic *Aspergillus flavus* isolates endemic to almond, fig, and pistachio orchards in California with potential to reduce aflatoxin contamination in these crops [J]. Plant Dis, 2019, 103(5): 905-912.
- [9] TEREZIO B, SILVIA R, AMEDEO P. *Aspergillus* and penicillium toxins in chestnuts and derived products produced in Italy [J]. Food Control, 2015, 50: 876-880.
- [10] GHALI R, BELOUAER L, HDIRI S, et al. Simultaneous HPLC

- determination of aflatoxins B₁, B₂, G₁ and G₂ in Tunisian sorghum and pistachios [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2009, 22(7-8): 751-755.
- [11] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 坚果与籽类食品: GB 19300—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. National Health and Family Planning Commission. National Standard for Food Safety Nuts and Seed foods: GB 19300—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [12] 刘敏, 邢书霞, 吕冰峰, 等. 2016—2018年坚果炒货食品国家食品安全监督抽检结果分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(4): 1338-1344.
LIU M, XING S X, LYU B F, et al. Analysis of the sampling inspection results on roasted nut food in food safety supervision from 2016 to 2018 in China [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(4): 1338-1344.
- [13] 赵玉美. 云南核桃枝干病害病原真菌的鉴定及多样性研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2018.
Zhao Y M. Identification and diversity Study of the pathogenetic fungi on the diseased walnut branches from Yunnan province [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2018.
- [14] 朱婷婷. 花生土壤中产黄曲霉毒素菌的分布、产毒力与毒素污染研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
ZHU T T. Study on the distribution, potential of aflatoxigenic fungi and toxins Contamination in Peanut Soils [D]. Beijing: Chinese academy of agricultural sciences, 2018.
- [15] MICHAEL B, STEPHEN D R, TRACEY L N, et al. Persistence of *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales) as an endophyte following inoculation of radiata pine seed and seedlings [J]. *Biological Control*, 2012, 61(3): 194-200.
- [16] 赵辉, 倪云霞, 鲁晓阳, 等. 芝麻种子带菌检测及药剂消毒处理效果[J]. *中国油料作物学报*, 2012, 34(2): 206-209.
ZHAO H, NI Y X, LU X Y, et al. Test of seed-borne fungi and disinfection effects of fungicides on sesame [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2012, 34(2): 206-209.
- [17] GIBSON I A S. Saprophytic fungi as destroyers of germinating pine seeds [J]. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 2015, 22(4): 203-206.
- [18] 李勇鹏, 潘莉, 宁德鲁, 等. 冷藏期间鲜食核桃霉菌总数变化及主要种类鉴定[J]. *西部林业科学*, 2021, 50(3): 87-91.
LI Y P, PAN L, NING D L, et al. Test of seed-borne fungi and disinfection effects of fungicides on sesame [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, 50(3): 87-91.
- [19] 冯丽娜, 温晓蕾, 杨文杰, 等. 贮存期板栗致病青霉菌的分离鉴定[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(18): 164-168.
FENG L N, WEN X L, YANG W J, et al. Isolation and identification of pathogenic penicillium of chestnut during storage [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(18): 164-168.
- [20] 王玉娇. 坚果和干果真菌毒素污染及风险评估研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
WANG Y J. Study on contamination and risk assessment of mycotoxins in nuts and dried fruits [D]. Beijing: Chinese academy of agricultural sciences, 2018.
- [21] 王姝婷, 黄希汇, 刘少颖, 等. 2018年—2019年杭州市售花生制品中4种黄曲霉毒素污染水平调查[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(9): 1127-1129, 1132.
WANG S T, HUANG X H, LIU S Y, et al. Investigation on contamination of 4 aflatoxins in peanut products in Hangzhou from 2018 to 2019 [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory*, 2021, 31(9): 1127-1129, 1132.
- [22] 杨博磊, 张秀娟, 王刚, 等. 我国土榨花生油黄曲霉毒素B₁及圆弧偶氮酸毒素污染调查[J]. *中国油脂*, 2020, 45(9): 34-37, 53.
YANG B L, ZHANG X J, WANG G, et al. Investigation of aflatoxin B₁ and cyclopiazonic acid in bulk peanut oil in China [J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(9): 34-37, 53.
- [23] 刘晓晗, 白艺珍, 岳晓凤, 等. 农产品及食品黄曲霉毒素污染研究[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(4): 729-738.
LIU X H, BAI Y Z, YUE X F, et al. Investigation of aflatoxin contamination in agricultural products and foods [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(4): 729-738.
- [24] 郭礼强, 崔晓娜, 丁葵英, 等. 超高效液相色谱-串联质谱测定芝麻酱中16种真菌毒素[J]. *中国调味品*, 2017, 42(10): 154-159.
GUO L Q, CUI X N, DING K Y, et al. Determination of 16 mycotoxins in sesame paste by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *China Condi-ment*, 2017, 42(10): 154-159.
- [25] 吴启芳. 激光诱导荧光光谱的开心果黄曲霉毒素B₁污染检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
WU Q F. Detection of Aflatoxin B₁ Contamination in pistachio using laser induced fluorescence spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [26] 张毅, 林肖惠, 夏义平, 等. 2017年天津市市售植物油部分真菌毒素污染状况[J]. *职业与健康*, 2018, 34(24): 3353-3356.
ZHANG Y, LIN X H, XIA Y P, et al. Contamination status of some fungal toxins in commercially available vegetable oil in Tianjin in 2017 [J]. *Occup and Health*, 2018, 34(24): 3353-3356.
- [27] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量: GB 2761—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. National Health and Family Planning Commission, National Food and Drug Administration. National standards for food safety Maximum limits of fungal toxins in food: GB 2761—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [28] European Commission E. Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs [J]. *Official Journal of the European Union*, 2006, 364: 5-24.
- [29] MARÍN S, RAMOS A J. *Molds and mycotoxins in nuts* [M]. Food Hygiene and Toxicology in Ready-to-Eat Foods. Academic Press, 2016: 295-312.
- [30] CARMEN M R, GIORGIA B, ROMINA C, et al. Impact of 'brown rot' caused by *Gnomoniopsis castanea* on chestnut fruits during the post-harvest process: critical phases and proposed solutions [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(2): 680-687.

- [31] BEDAKO K A, OFORI K, OFFEI S K, et al. Aflatoxin contamination of groundnut (*Arachis hypogaea* L.): Predisposing factors and management interventions [J]. Food Control, 2018, 98(1): 61-67.
- [32] 杜献明, 韩青, 魏海, 等. 不同剥壳模式对花生籽仁霉菌污染的影响 [J]. 花生学报, 2010, 39(4): 5-8.
DU X M, HAN Q, WEI H, et al. Effects of different shelling mode on mold contamination in peanut kernels [J]. Journal of Peanut Science, 2010, 39(4): 5-8.
- [33] SULTAN Y, MAGAN N. Potential for control of A. Flavis and aflatoxin B1 *in vitro* and in stored egyptian shelled peanuts using gaseous ozone treatment [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(6): 38-45.
- [34] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数: GB 4789.15—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. National food safety standard-food microbiology test mold and yeast count: GB 4789.15—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [35] 薛升. 黄曲霉菌特异单链抗体及其基因的分离鉴定和应用 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
XUE S. Characterization and Application of aspergillus-specific single-chain antibodies and their encoding genes [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [36] 章林忠, 丁玲玲, 蔡雪珍, 等. 基于近红外高光谱图像技术的栗果品质无损检测 [J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(1): 160-166.
ZHANG L Z, DING L L, CAI X Z, et al. Non-destructive detection of Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) nut qualities based on near-infrared hyperspectral imaging techniques [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(1): 160-166.
- [37] 刘鹏. 花生有害霉菌污染的快速无损检测方法研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
LIU P. Rapid non-destructive inspection of hazard fungal contamination in peanuts [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [38] 袁爱华, 骆瑜, 王维亚, 等. PCR快速检测坚果及籽类制品中的霉菌 [J]. 实验与检验医学, 2020, 38(6): 1129-1132.
YUAN A H, LUO Y, WANG W Y, et al. Rapid detection of mold in nuts and seeds by PCR [J]. Experimental and Laboratory Medicine, 2020, 38(6): 1129-1132.