

物理方法对病原真菌 及其产毒的防控作用研究进展

姜楠,王瑶,姜冬梅,韦迪哲,王蒙*

(北京农业质量标准与检测技术研究中心,农业部农产品质量安全
风险评估实验室(北京),农产品产地环境监测北京市重点实验室,北京 100097)

摘要:农产品受病原真菌侵染发生腐烂变质,失去感官品质、营养品质、商用品质,进而造成严重的经济损失。虽然病原真菌生长和病原真菌产毒是两种不同的生理过程,但是有效的防控措施对两种生理过程均会产生抑制作用。物理防控方法是一种操作简单、无化学污染、绿色的防控手段,某些技术处理农产品后,不仅有效去除病原真菌,抑制其产毒,还可以增强农产品自身组织抗性,起到改善食品品质、贮藏保鲜、延长货架期的作用。本文就应用广泛的热处理、辐射处理、紫外处理等物理技术的应用现状进行综述,并重点阐述了三种物理技术对病原真菌生长及其产毒的防控作用,以期为该领域的研究者提供理论参考。

关键词:病原真菌,毒素,物理方法,防控作用

Progress on prevention and control of physical methods on pathogenic fungi and its toxins

JIANG Nan, WANG Yao, JIANG Dong-mei, WEI Di-zhe, WANG Meng*

(Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing(BRCST),
Risk Assessment Laboratory for Agro-products(Beijing), Ministry of Agriculture,
Beijing Municipal Key Laboratory of Agriculture Environment Monitoring, Beijing 100097, China)

Abstract: Agro-products were decayed easily after infected by pathogenic fungi which can lead to decline of sensory, nutrition and commercial quality. Although fungi growth and mycotoxin-producing are two different processes, the effective prevention and control measures can inhibit both physiological processes. The physical method is easy-to-use and it's also a green control measure without any chemical pollution. Some physical techniques can not only remove the pathogenic fungi and inhibit the production of their toxins effectively, but also can enhance the resistance to the fungus, improve quality, and extend the storage and shelf life of agro-products. In this paper, the present situation of widely applicable physical techniques included heat, radiation and UV treatment were reviewed, and the control effect of the three physical technologies for fungus and mycotoxin were also summarized, so as to provide theoretical reference for other researchers in this field.

Key words: pathogenic fungi; toxins; physical methods; control function

中图分类号:TS201.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2017)22-0346-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.22.067

农产品因病原真菌侵染导致腐烂变质不仅造成巨大的经济损失,而且会在其腐烂部位及其周围健康组织中积累大量的真菌毒素,进而对人类和动物健康造成潜在的威胁,包括致癌、致畸、致突变等作用。目前在农产品中都有不同程度的真菌毒素检出,常见的毒素主要包括:曲霉属(*Aspergillus* spp.)产生的赭曲霉毒素(ochratoxin)和黄曲霉毒素(aflatoxin),扩展青霉(*Penicillium expansum*)产生的展青霉素(patulin);交链孢属(*Alternaria* spp.)产生的

交链孢毒素(*Alternaria* toxin)及镰刀菌属(*Fusarium* spp.)产生的单端孢霉烯族毒素(trichothecenes)、玉米赤霉烯酮毒素(zearelenone)等。

由于农产品中真菌及真菌毒素的污染是不可避免的,那么良好的预防措施和操作规程可有效降低污染率和污染程度。但如果污染已经发生,必须采取适当的方法将其去除。因此,关于有效控制真菌污染及其产毒的研究越来越受到国内外学者的重视。目前常用的防控方法大致分为化学方法、生物

收稿日期:2017-06-02

作者简介:姜楠(1988-),女,硕士,助理研究员,研究方向:农产品质量安全与标准,E-mail:jiangnan_fx@163.com。

*通讯作者:王蒙(1980-),女,博士,副研究员,研究方向:农产品质量安全与标准,E-mail:ameng-001@163.com。

基金项目:2017年北京市农林科学院青年基金(QNJJ201710);公益性行业(农业)科研专项(201303075);国家农产品质量安全风险评估重大专项(GJFP2017013)。

方法及物理方法等。化学方法是添加化学试剂,如亚硫酸氢钠、次氯酸钠、双氧水等成分来降低或控制真菌毒素的危害,但是化学降解法可能会给食品及原料带来新的污染,目前在世界上很多国家和地区被禁止;生物方法主要原理是采用富集培养的土壤细菌、益生菌等菌株对真菌毒素进行分解或通过拮抗作用来阻碍真菌生长进而抑制真菌毒素的增加,但是存在见效周期长、操作复杂、很难在短时间内实现大规模普及等缺点;物理方法常见手段有紫外线或 ^{60}Co - γ 射线辐照法、热处理法、吸附法、微波处理、放电等离子体作用等,虽然也存在一些问题,比如加热过程会影响食品风味和营养价值,但通过控制反应条件可避免上述问题的发生。物理防控技术实用性强,副作用小,尤其适合果蔬及其制品中病原真菌及毒素的防控。本文就应用广泛的针对病原真菌及其毒素的物理防控措施进行综述,主要包括热处理、电离辐射、紫外照射等技术,分别阐述了上述技术对病原真菌的抑制作用及对毒素的降解作用,通过对现有文献的总结以期为该领域研究者提供参考。

1 热处理

热处理在病原真菌及毒素上的研究和应用最早始于防治病虫害。Fawcett^[1]首次报道了用热处理防治柑橘炭疽病引起的腐烂。根据其传热介质的不同,热处理可以分为热蒸汽处理、热空气处理和热水处理,它是国内外广泛研究的一种物理保鲜技术,对农产品表面的真菌和幼虫有很好的杀灭和抑制作用,具有无化学药剂残留的优点,是一种无毒、无农药残留的物理处理方法,因而在农产品,尤其是果蔬贮藏中具有较好的应用前景。

1.1 热处理对病原真菌的抑制作用

热处理可钝化病原真菌的胞外酶,使病原真菌的蛋白变性、脂质降解、激素破坏、营养消耗,进而导致病原真菌代谢失调从而达到对其致死或半致死作用,热处理的抑制作用一般是上述多种机制共同作用的结果^[2]。目前关于热处理对病原真菌的影响的研究主要集中于病原真菌生物学特性领域,包括热处理对菌丝体生长、孢子萌发、致病性等方面。热处理通过减慢孢子芽管的伸长或直接杀死萌发的孢子而降低其致病性,已有证据显示孢子的萌发与真菌的致病力密切相关^[3-4]。热处理能显著抑制扩展青霉、互隔交链孢、黄曲霉、尖刀镰孢菌等的孢子萌发^[5-7]。

病原真菌的热敏感性因种属的不同而存在差异,如扩展青霉比互隔交链孢更耐热,而互隔交链孢菌的耐热性大于灰葡萄孢菌^[8],因此杀死或抑制各种真菌孢子萌发、芽管伸长和菌丝体生长的温度也存在显著差异^[9-10]。同时,真菌热敏感性也依赖于其生理状态,如细极交链孢未萌发的孢子比萌发的孢子更耐热^[11]。42℃的热水处理能显著抑制互隔交链孢的孢子萌发,但对休眠的孢子活力没有影响^[12]。Gabler^[13]等研究了10%~30%乙醇结合热处理(25~50℃,30 s)对孢子生活力的影响。结果表明:在40℃,互隔交链孢和炭黑曲霉的孢子半数致死所需乙醇浓度分别为14%和20%,炭黑曲霉要比互隔交

链孢更耐热;20%乙醇结合50℃处理可完全抑制互隔交链孢和炭黑曲霉的孢子萌发。

1.2 热处理对毒素的降解作用

加热处理是最早使用的真菌毒素降解方法。由于大多数真菌毒素具有热稳定性,这在很大程度上增加了脱毒的困难,但是热处理并非完全无效,不同的真菌毒素对高温处理的敏感性各不相同^[14]。在150℃和180℃条件下,添加1%的焦亚硫酸钠对玉米粉中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)有明显的解毒作用,但几乎不能去除黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1 , AFB_1)^[15]。热处理温度达237~306℃才能部分破坏黄曲霉毒素^[16-17],因此通过沸水 and 高压灭菌等热处理方法无法完全将其破坏。含有交链孢酚(alternariol, AOH)、交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)和细交链格孢酮酸(tenuazonic acid, TeA)的葵花籽粉经100℃处理90 min 含量无明显变化,但在121℃下处理60 min 可有效降低AOH和AME含量,而TeA含量仅降低50%^[18]。高温下烘焙是降低食品中黄曲霉毒素的最有效方法。分别在90、120和150℃烘烤开心果30、60和120 min,结果发现开心果中的黄曲霉毒素随着烘烤时间和温度的不同而降低了17%~63%^[19]。对开心果加工之前挑拣出被污染的部分,有助于降低最终干燥的开心果产品中黄曲霉毒素的含量^[20-21]。Suárez-Quiroz^[22]等研究也表明,在200℃烘焙咖啡4.4~5.3 min,初始含量为16.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的赭曲霉毒素A(ochratoxin, OTA)被完全去除,而初始含量为53.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 时,OTA降低了58.7%~82.9%。

原料中真菌毒素的最初含量、热处理温度和处理时间决定了毒素能被减少的程度。在169℃下15 min、205℃下2.5 min和243℃下1 min三个热处理条件下,小麦中初始含量为1.20 mg/kg的DON分别降低28%、21%和20%;而初始含量为0.26 mg/kg的DON分别降低66%、43%和38%^[23]。展青霉素(patulin, PAT)在不同热处理条件下的降解效率也不一样。在70℃和80℃热处理20 min后,苹果汁中的PAT分别减少了9.4%和14.1%;增加温度到90℃和100℃,PAT降解率分别为18.8%和26.0%^[24]。

原料中水分含量和离子强度也会影响热处理对真菌毒素的去除作用。Boudra^[25]等研究了热处理对不同含水量小麦中OTA的降解效果,结果表明:在100℃下热处理40~160 min,干燥小麦中OTA的污染量无显著变化,而在此温度下热处理120 min后,含有50%水分的小麦中OTA减少了51%。有报道增加离子强度有利于 AFB_1 的降解。在150℃烘烤花生30 min,未加盐的花生所含 AFB_1 下降了38%,而添加20 g/kg和50 g/kg盐的咸花生 AFB_1 含量分别下降了42%和56%^[26]。

热处理还可以和目前国际上公认较安全的拮抗菌剂及碳酸氢钠、氯化钙、气调贮藏、辐射处理、紫外线等结合应用,不但可以协同增效,还可降低化学药物用量,减少热伤害和能源消耗,在保证绿色环保的同时增强抑制病原真菌生长及产毒的效果。随着对

热处理技术研究的深入和不断的完善,热处理技术会在真菌及毒素防控上发挥更大的作用。

2 电离辐射

电离辐射是食品经过一定剂量的电离射线的辐照,以达到贮藏保鲜目的的一种物理方法,是一种有效的非热杀菌技术。该技术主要利用钴 60 (^{60}Co)、铯 137 (^{137}Cs)等产生的伽玛(γ)射线、5 MeV 以下的 X 射线和电子加速器生成的 10 MeV 以下电子束^[27]。目前以 ^{60}Co 作为辐射源的 γ 射线照射应用最广,其原因在于 ^{60}Co 制备相对容易,释放出的 γ 射线能力大,穿透力强,半衰期较适中^[28]。电离辐照技术不仅具有穿透食品包装消除病原真菌、杀灭害虫的广谱性和高效性,还具有防止农产品发芽、改善农产品品质及延长货架期等作用,因而被广泛应用于真菌毒素的脱毒中。

2.1 电离辐射对病原真菌的抑制作用

电离辐射对病原真菌抑制作用的强弱受很多因素影响,不同真菌的抗辐射能力差异较大。通常,越复杂的生物体抗辐照的能力越强,真菌的抗辐照能力要强于昆虫和寄生虫,而病毒的抗辐照能力要比真菌强。病原真菌来源不同抗辐照能力也存在显著差异。2.5 kGy 的 γ 射线能有效抑制互隔交链孢菌丝体的生长,而 γ 射线剂量达到 3.0 kGy,才能抑制黄曲霉菌丝体的生长^[29]。Geweely^[30]研究了 γ 射线对极细交链孢、扩展青霉等梨果实致病菌的影响,结果表明完全灭活扩展青霉的辐照剂量为 1.0 kGy,远远低于灭活极细交链孢的辐照剂量(3.0 kGy)。

辐照处理对病原真菌的抑制作用因剂量不同而效果不同。一般辐照剂量为 0.1~1.0 kGy,即可抑制微生物的生长和繁殖;辐照剂量在 5~10 kGy 时,可杀灭一些非芽孢致病菌(如沙门氏菌、大肠杆菌和葡萄球菌等);而高辐照剂量 10~50 kGy 主要用于某些特定产品的无菌要求^[28]。一般而言,辐照处理对病原真菌的抑制作用随剂量的增加而增强。辐照剂量 4~6 kGy 可以完全抑制食品中病原真菌的生长,而种子中病原真菌的辐照致死剂量为 6 kGy^[31]。

电离辐射对病原物的菌落生长、孢子萌发、芽管生长和产孢能力都有影响,经辐照处理的互隔交链孢、黄曲霉等致病菌表现出菌落生长缓慢、芽管的长度和直径变小,甚至在某些情况下会形成多芽管^[29]。Ribeiro^[32]等研究了 2 kGy 的 γ 射线对黄曲霉和赭曲霉的影响,结果表明经辐照后菌丝颜色会发生改变,同时分生孢子梗的大小、形态等也会发生改变。一般孢子比菌丝体更耐辐照,这是由于真菌的孢子所含的 DNA 量较少。在研究 γ 射线对黄曲霉孢子辐照效应中,发现辐照不仅能杀灭霉菌孢子,也能抑制霉菌毒素的产生^[33]。但也有一些学者认为,经辐照后的病原真菌产毒能力增强^[34],这可能是由于不适宜的辐照处理导致病原真菌发生突变,并产生新的抗性菌株,进而使其产毒能力发生改变。

2.2 电离辐射对毒素的降解作用

电离辐射降解技术与其他物理降解法、化学降解法及微生物降解法相比,有其自身的优势,传统的

降解法不能完全解决真菌毒素的污染问题,有些要改变产品的物理属性,成本高且局限性较大。而辐照能够直接破坏毒素,降低毒素毒性;还能最大程度地保留食品原有品质。真菌毒素辐照降解过程受多种因素的影响,如吸收剂量、初始毒素浓度、真菌数量、水分含量和基质成分等。

真菌毒素的降解效果受辐照剂量和毒素初始质量浓度的双重影响。彭春红^[35]等研究了 2.5~25 kGy 辐照处理对不同初始浓度(50、100、200 ng/mL) OTA 的降解效果,结果表明:辐照剂量低于 7.5 kGy 时,初始质量浓度越低,其降解率越高,这可能是由于当辐照剂量较低时,产生的自由基较少,低质量浓度的 OTA 与自由基碰撞的几率高,当质量浓度增大,活性自由基不足以作用于所有的 OTA 分子,降解率下降。高剂量辐照时,产生足够量的自由基,初始质量浓度的 OTA 对降解率的影响不明显。Wang^[36]等研究发现,初始浓度越低,AFB₁ 降解率越高;0.1 mg/L 的 AFB₁ 溶液在 3 kGy 时降解率 58.8%,而 10 mg/L 的 AFB₁ 要达到相同的降解率,其辐照剂量需达到 6 kGy。

干燥的真菌毒素比溶液中的更耐辐照。Frank^[37]对干燥 AFB₁ 和溶解在磷酸盐溶液中的 AFB₁ 进行了辐照降解研究,发现干燥的 AFB₁ 耐辐照,溶液中的 AFB₁ 对辐照较敏感,1~2.5 kGy 的辐照剂量可将毒素降解近 90%。这表明了水分含量可以显著影响 γ 射线降解黄曲霉毒素的能力。水分子在辐照过程中分解会形成高活性的自由基,这些自由基可以与 AFB₁ 末端的呋喃环反应生成低毒结构,以降低其毒性^[38]。同样,辐照对赭曲霉毒素和单端孢霉烯族毒素的降解效果与黄曲霉毒素类似。Kumar^[39]等分别辐照处理 OTA 干粉、溶于水溶液中和溶于甲醇中的 OTA,结果表明,水溶液中的 OTA 在 1、2.5 和 5 kGy 的辐照剂量下分别降解了 30%、79% 和 93%;在 10 kGy 的剂量下,甲醇溶液中 OTA 仅有 24% 被降解,而干粉状态下的 OTA 几乎未被降解。O' Neill^[40]等研究了 DON 和 3-乙酰基 DON 在水溶液、基质和干燥状态三种条件下 γ 射线辐照的降解效果,结果表明,在水溶液条件下,DON 和 3-乙酰基 DON 对 γ 射线都很敏感。DON 在 1 kGy 时已经开始降解,而 3-乙酰基 DON 在 5 kGy 时开始降解。当辐照剂量达到 50 kGy 时,二者都被完全降解,而干粉状态下的 DON 和 3-乙酰基 DON 几乎未被降解。由此可见,辐照对水溶液中的毒素有较好的降解效果,而对溶解在干粉状态下的毒素降解效果较差,进一步证明了水可能参与了真菌毒素的辐照降解,其机理可能是由于水经辐照后产生的活性自由基介导了降解过程。

不同毒素可耐受的辐照剂量不同。Mutluer and Erkoç^[41]研究了 γ 辐照对 AFB₁、AFB₂、AFG₁ 和 AFG₂ 的降解效应,发现 AFB₁ 对辐照最为敏感,AFB₂ 对辐照的抗性最强;Jalili^[42]等研究结果也表明 AFB₂ 和 AFG₂ 对辐照的抗性要强于 AFB₁ 和 AFG₁。这可能是由于 AFB₁ 和 AFG₁ 呋喃环中具有 C8、9 不饱和双

键,是自由基功能的位点,而 AFB₂ 和 AFG₂ 呋喃环中不存在 C8、9 双键,因而不易被自由基攻击而分解^[43]。赭曲霉毒素 A 的抗辐照能力要强于黄曲霉毒素。Aziz^[44] 研究表明:20 kGy 辐照剂量能完全降解黄曲霉毒素,仅 72%~76% 的赭曲霉毒素被降解。展青霉素的抗辐照能力最弱;1 kGy 的辐照剂量就可完全降解水溶液中的展青霉素^[45]。

3 紫外照射

紫外线是一种非电离辐射的杀菌消毒方法。根据紫外线自身波长的不同,可将紫外线分为短波紫外线(UV-C,波长 200~280 nm)、中波紫外线(UV-B,波长 280~320 nm)、长波紫外线(UV-A,波长 320~400 nm)和真空紫外线(波长 100~200 nm)。短波紫外线(尤其是波长为 254 nm)能穿透微生物的细胞膜,引起同一 DNA 链中相邻的胸腺嘧啶和胞嘧啶之间发生交联,导致 DNA 复制和翻译受阻,使细胞遗传物质活性丧失,进而导致微生物失去繁殖能力或者死亡^[46-47]。240~260 nm 的短波紫外线被认为是安全的,目前尚没有短波紫外线照射食品会形成已知的有毒物质或显著的无毒副产物的报道^[48]。2002 年,美国食品药品监督管理局(FDA)批准了短波紫外线可以作为一种杀菌消毒技术用于食品的表面处理。因此,短波紫外线目前被广泛应用于医疗卫生、食品、水处理及一些工业领域的消毒杀菌。

3.1 紫外照射对病原真菌的抑制作用

波长为 250~260 nm 的短波紫外线(UV-C)能杀灭大多数微生物,包括食源性微生物、真菌、病毒等,这主要是由于低剂量(0.25~8.0 kJ/m²)的 UV-C 能破坏微生物的 DNA 结构,在 DNA 分子中产生嘧啶二聚体,引发突变,使细胞遗传物质的活性丧失,导致微生物失去繁殖能力或死亡^[49]。1 kJ/cm² 的 UV-C 照射可显著抑制互格交链孢的生长,而 5 kJ/cm² 剂量则可完全灭活交链孢^[50]。最新研究结果表明:UV-A 和 UV-B 都可显著抑制炭黑曲霉和寄生曲霉菌落(直径、物质干重和菌落密度)的生长,且 UV-B 的抑菌能力要强于 UV-A,进而推测 UV-A 可能导致真菌发生突变,而 UV-B 会导致真菌的生长和代谢停滞。在 UV-B 照射下的菌落颜色也会发生改变。同时紫外线的影响程度在不同菌种间有所差异,其中炭黑曲霉对紫外线的抗性要强于寄生曲霉^[51]。

通常情况下,随着紫外线照射时间的延长,真菌孢子的萌发和菌丝的生长都被显著抑制。240 nm 的短波紫外线和 365 nm 的长波紫外线照射 30 min 后,黄曲霉的菌丝生长分别减缓 84.7% 和 81.5%;照射时间延长到 60 min,菌丝生长的抑制率分别增加 4.4% 和 15.9%^[52]。不同真菌抗紫外线的能力不同,含黑色素的孢子更耐紫外照射,黑色素产生能力较强的炭黑曲霉抗紫外线照射能力要强于青霉菌和黄曲霉^[53],这可能是由于色素可淬灭由光敏物质产生的单线态氧。此外,有研究表明:马铃薯培养基表面的真菌孢子比溶液中的孢子更易被紫外线灭活。对于炭黑曲霉而言,4.6 kJ/m² 的 254 nm 短波紫外线照射

30~60 s,可使培养基表面的病原真菌孢子降低 2 个数量级;而在吐温-80 的溶液中降低同样数量级的孢子需要 120~180 s。4.6 kJ/m² 的短波紫外线照射 60 s 后,固体培养基中黄曲霉孢子降低了 3 个数量级,而溶液中的孢子仅降低 1 个数量级^[54]。

3.2 紫外照射对毒素的降解作用

目前紫外照射对黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、单端孢霉烯族毒素、展青霉素都有显著的降解效果,且对其研究比较广泛而深入。除毒素自身原因以外,外界因素对毒素降解效果的影响也比较显著,如紫外线的波长、照射时间、照射强度、基质性质、环境温度等。

黄曲霉毒素对紫外光特别敏感,早在 1962 年,就有学者发现黄曲霉毒素在紫外光照射下会逐渐消失。黄曲霉毒素的降解效果受照射时间、波长、pH 等多种因素的影响。通过比较 254、365 和 420 nm 三种不同波长的紫外灯对油脂中黄曲霉毒素 B₁ 的去除效果,结果表明,在 AFB₁ 的最大吸收波长 365 nm 的紫外灯照射下,毒素的去除效果最佳,降解率为 96.4%^[55]。Mazaheri^[56] 利用 87.5 μW/cm² 的紫外照射 AFB₁ 初始浓度为 100 μg/kg 的开心果,经 3 h 和 13 h 后,毒素含量分别降低了 21.8% 和 57.8%。紫外光对 AFB₁ 的降解效果存在介质间的差异。通过研究紫外光对不同介质中 AFB₁ 的降解速率时发现,花生油中降解速率最快,在 30 min 内已彻底降解,而水溶液需要 100 min 方可完全降解,在乙腈体系中降解最慢。花生油中成分复杂,易氧化产生大量自由电子,自由基越多反应越剧烈,因此降解速率最快;水中只有氢离子和氢氧根两种自由电子,因此反应速率和剧烈程度大幅下降;而乙腈为一种较为稳定的分析溶剂,不产生自由电子,因此在其中反应最为缓慢^[57-58]。

紫外线波长会影响 OTA 的降解效果。UV-A 照射 14 d 时,炭黑曲霉产 OTA 的能力降低了 89.1%,而 UV-B 照射同样时间后,其产毒能力仅降低了 55.7%^[51]。因此,UV-A 比 UV-B 更有利于抑制炭黑曲霉产毒,这可能与 OTA 在 UV-A(330 nm)下有紫外吸收有关。Cheong^[59] 等研究也发现 UV-A(366 nm)和短波蓝光(445 nm)照射能显著抑制炭黑曲霉和赭曲霉产 OTA。紫外线对赭曲霉毒素的降解与环境温度、pH 有关。温度越高,相同条件下 OTA 的降解速率越快。如 255 nm 的短波紫外线在 15 ℃ 下照射 12 min 后,可使 83% 的 OTA 降解;而在 45 ℃ 下照射 6.5 min 后,就可获得相同的降解效果^[60]。

紫外光辐照对单端孢霉烯族毒素、展青霉素的去除也有一定效果。Murata^[61] 等用中等强度(0.1 mW/cm²)和高强度(24 mW/cm²)的 254 nm 紫外光对样品进行照射,结果发现,在中等强度的紫外光照射下,DON 的浓度随着时间的推移逐渐降低,60 min 后便检测不到 DON;在高强度的紫外光条件下,DON 含量降低的效果更好。Zhu^[62] 等发现在 222、254 和 282 nm 的紫外照射下,降解 90% 的 PAT

的所需剂量不同,分别为 19.6、84.3 和 55.0 mJ/cm², 222 nm 的短波紫外线照射下,PAT 获得最大的降解效率。

4 结论

综上所述,物理防控技术在病原真菌及其产毒方面作用效果显著,但也存在各自的局限性。热处理技术作为一种无毒、无残留的物理方法可以有效去除真菌污染,但是它更局限用于果蔬的处理,对于粮食、谷物等农产品应用较少。此外,由于果蔬的热敏感性不同,热处理温度过高或处理时间过长都会造成果实损伤,这些损伤可能立刻出现或贮藏一段时期才显现的伤害,主要包括表皮出现褐变、凹陷、黑色斑点等、果肉变黑、失水、不能后熟、腐烂加重等。因此,今后应重点针对不同基质筛选影响热处理效果的关键因素,探索热处理的机制,开发便于使用的热处理设备,进而提高其商业化应用进程。电离辐射技术具有方便快捷、安全性高、不存在化学残留和环境污染等特点,但目前由于消费者对辐照食品认可和接受程度有限,加之国内外对辐照降解真菌毒素机理、降解产物及其毒性的研究较少,进而限制辐照技术在食品领域的应用。低剂量的紫外线照射可以直接杀死致病菌,更重要的是它可诱导机体自身抗病性提高,减少化学保鲜剂的应用,是一条绿色环保的贮藏保鲜途径。然而,紫外照射只能穿透食品表面组织,对侵染到内部的病菌起不到杀灭作用,而且剂量过高会导致食品表面组织受到伤害。因此,应明确不同食品紫外处理的最佳剂量和限制,深入探讨紫外处理减轻病害的机制,明确其对病原真菌和毒素的降解机制及降解产物的安全性。

参考文献

- [1] Facett HS. Packing house control of brown rot [J]. Cofog Citrogo, 1922, 7: 232-254.
- [2] 毕阳. 果蔬采后病害原理与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] Nesher I, Minz A, Kokkelink L, et al. Regulation of pathogenic spore germination by CgRac1 in the fungal plant pathogen *Colletotrichum gloeosporioides* [J]. Eukaryot Cell, 2011, 10: 1122-1130.
- [4] Ramos B, González-melendi P, Sánchez-vallet A, et al. Functional genomics tools to decipher the pathogenicity mechanisms of the necrotrophic fungus *Plectosphaerella cucumerina* in *Arabidopsis thaliana* [J]. Molecular Plant Pathology, 2013, 14: 44-57.
- [5] Fallik E, Aharoni Y, Copel A, et al. Reduction of postharvest losses of Galia melon by a short hot - water rinse [J]. Plant Pathology, 2000, 49(3): 333-338.
- [6] Araujo R, Rodrigues AG, Pina-vaz C. Susceptibility pattern among pathogenic species of *Aspergillus* to physical and chemical treatments [J]. Medical Mycology, 2006, 44: 439-443.
- [7] Sui Y, Droby S, Zhang D, et al. Reduction of *Fusarium* rot and maintenance of fruit quality in melon using eco-friendly hot water treatment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21: 13956-13963.
- [8] Chen HZ, Cheng Z, Wisniewski M, et al. Ecofriendly hot water treatment reduces postharvest decay and elicits defense response in kiwifruit [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22: 15037-15045.
- [9] Castejón-Muñoz M, Bollen GJ. Induction of heat resistance in *Fusarium oxysporum* and *Verticillium dahliae* caused by exposure to sublethal heat treatments [J]. European Journal of Plant Pathology, 1993, 99(2): 77-84.
- [10] Maxin P, Weber RWS, Pedersen HL, et al. Hot - water dipping of apples to control *Penicillium expansum*, *Neonectria galligena* and *Botrytis cinerea*: effects of temperature on spore germination and fruit rots [J]. European Journal of Horticultural Science, 2012, 77: S1-S9.
- [11] 胡美姣, 李敏, 高兆银, 等. 热处理对果蔬采后品质及病虫害的影响 [J]. 果树学报, 2005, 22(2): 143-148.
- [12] Barkai - golan R. Postharvest heat treatment to control *Alternaria tenuis* Auct. Rot in tomato [J]. Phytopathologia Mediterranea, 1973, 12: 108-111.
- [13] Gabler FM, Mansour MF, Smilanick JL, et al. Survival of spores of *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Botrytis cinerea* and *Alternaria alternata* after exposure to ethanol solutions at various temperatures [J]. Journal of Applied Microbiology, 2004, 96: 1354-1360.
- [14] Kabak B. The fate of mycotoxins during thermal food processing [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(4): 549-554.
- [15] Cazzaniga D, Basoalico JC, González RJ, et al. Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour [J]. Letters in Applied Microbiology, 2001, 33(2): 144-147.
- [16] Samarajeewa U, Sen AC, Cohen MD, et al. Detoxification of aflatoxins in foods and feeds by physical and chemical methods [J]. Journal of Food Protection, 1990, 53: 489-501.
- [17] Rustomiys. Aflatoxin in food and feed: occurrence, legislation and inactivation by physical methods [J]. Food Chemistry, 1997, 59: 57-67.
- [18] Combina M, Dalcero A, Varsavsky E, et al. Effect of heat treatments on stability of alternariol, alternariol monomethyl ether and tenuazonic acid in sunflower flour [J]. Mycotoxin Research, 1999, 15(1): 33-38.
- [19] Yazdanpanah H, Mohammadi T, Abouhossain G, et al. Effect of roasting on degradation of aflatoxins in contaminated pistachio nuts [J]. Food and Chemical Toxicology, 2005, 43: 1135-1139.
- [20] Shakerardekani A, Karim R, Mirdamadiha F. The effect of sorting on aflatoxin reduction of pistachio nuts [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2012, 10(1): 459-461.
- [21] Womack ED, Brown AE, Sparks DL. A recent review of non-biological remediation of aflatoxin-contaminated crops [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(9): 1706-1714.
- [22] Suárez- quiroz M, De louise B, Gonzalez-rios O, et al. The impact of roasting on the ochratoxin A content of coffee [J].

International Journal of Food Science and Technology, 2005, 40: 605–611.

[23] Samar M, Resnik SL, González HHL, et al. Deoxynivalenol reduction during the frying process of turnover pie covers. [J] Food Control, 2007, 18(10): 1295–1299.

[24] Kadakal C, Nas S. Effect of heat treatment and evaporation on patulin and some other properties of apple juice [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003, 83: 987–990.

[25] Boudra H, Le BP, Le BJ. Thermostability of ochratoxin A in wheat under two moisture conditions [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61: 1156–1158.

[26] Ozkarsli M. Effect of traditional-roasting and microwave-roasting on aflatoxin B₁ in peanuts [D]. MSc Thesis, Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, Turkey, 2003.

[27] Farkas J, Mohácsi-farkas C. History and future of food irradiation [J]. Trends in Food Science and Technology, 2011, 22: 121–126.

[28] Calado T, Venancio A, Abrunhosa L. Irradiation for mold and mycotoxin control: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(5): 1049–1061.

[29] Maity JP, Kar S, Banerjee S, et al. Effects of gamma radiation on fungi-infected rice (*in vitro*) [J]. International Journal of Radiation Biology, 2011, 87: 1097–1102.

[30] Geweely NSI, Nawar LS. Sensitivity to gamma irradiation of post-harvest pathogens of pear [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2006, 8: 710–716.

[31] Aziz NH, Moussa LAA. Reduction of fungi and mycotoxins formation in seeds by gamma-radiation [J]. Journal of Food Safety, 2004, 24: 109–127.

[32] Ribeiro J, Cavaglieri L, Vital H, et al. Effect of gamma radiation on *Aspergillus flavus* and *Aspergillus ochraceus* ultrastructure and mycotoxin production [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2011, 80: 658–663.

[33] 钟凯, 高翔, 计融. ⁶⁰Co γ 射线对生理盐水和玉米中黄曲霉孢子的辐照效应研究 [J]. 卫生研究, 2011, 40(3): 352–354.

[34] Ribeiro JMM, Cavaglieri Lr, Vital HD, et al. Gamma radiation on the mycoflora of poultry feed and *Aspergillus* species [J]. Ciencia Rural, 2009, 39: 1452–1458.

[35] 彭春红, 周林燕, 李淑荣, 等. ⁶⁰Co-γ 射线对赭曲霉毒素 A 辐照的降解效果 [J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 174–179.

[36] Wang F, Xie F, Xue X, et al. Structure elucidation and toxicity analyses of the radiolytic products of aflatoxin B₁ in methanol-water solution [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1192–1202.

[37] Frank HK, Grunewald T. Radiation resistance of aflatoxins [J]. Irradiat Aliments, 1970, 11(1/2): 15–20.

[38] Aquino S, Ferreira F, Ribeiro DHB, et al. Evaluation of viability of *Aspergillus flavus* and aflatoxins degradation in irradiated samples of maize [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2005, 36: 352–356.

[39] Kumar S, Kunwar A, Gautam S, et al. Inactivation of *A. ochraceus* spores and detoxification of ochratoxin A in coffee beans

by gamma irradiation [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(2): 44–51.

[40] O'neill K, Damoglou AP, Patterson MF. The stability of deoxynivalenol and 3-acetyl deoxynivalenol to gamma irradiation [J]. Food Additives and Contaminants, 1993, 10(2): 209–215.

[41] Mutluer B, Erkoç FU. Effects of gamma irradiation on aflatoxins [J]. European Food Research and Technology, 1987, 185(5): 398–401.

[42] Jalili M, Jinap S, Noranizan MA. Aflatoxins and ochratoxin A reduction in black and white pepper by gamma radiation [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, 81: 1786–1788.

[43] 刘斌, 熊善柏, 熊光权, 等. 辐照技术在食品污染物控制方面的研究进展 [J]. 核农学报, 2010, 24(4): 784–789.

[44] Aziz NH, Youssef BM. Inactivation of naturally occurring of mycotoxins in some egyptian foods and agricultural commodities by gamma irradiation [J]. Egyptian Journal of Food Science, 2002, 30(1): 167–177.

[45] Yun H, Lim S, Jo C, et al. Effects of organic acids, amino acids and ethanol on the radio-degradation of patulin in an aqueous model system [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2008, 77: 830–834.

[46] Tipathi S, Mishra HN. Studies on the efficacy of physical, chemical and biological aflatoxin B₁ detoxification approaches in red chilli powder [J]. International Journal of Food Safety, Nutrition and Public Health, 2009, 2(1): 69–77.

[47] Gómez PL, Alzamora SM, Castro MA, et al. Effect of ultraviolet C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behavior [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98: 60–70.

[48] 芦菲, 南海娟, 孙俊良, 等. 短波紫外线照射在果蔬和食用菌保鲜中的应用研究 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 355–358.

[49] Terry LA, Joyce DC. Elicitors of induced disease resistance in postharvest horticultural crops: a brief review [J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 32: 1–13.

[50] Guo DQ, Zhu LX, Hou XJ. Combination of UV-C treatment and *Metschnikowia pulcherrima* for controlling *Alternaria* rot in postharvest winter jujube fruit [J]. Journal of Food Science, 2015, 80: M137–M141.

[51] García-cela E, Marin S, Sanchis V, et al. Effect of ultraviolet radiation A and B on growth and mycotoxin production by *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus parasiticus* in grape and pistachio media [J]. Fungal Biology, 2015, 119(1): 67–78.

[52] Hussein HZ, Tuama RH, Ali AM. Study the effect of ozone gas and ultraviolet radiation and microwave on the degradation of aflatoxin B₁ produce by *Aspergillus flavus* on stored maize grains [J]. IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science, 2015, 5(8): 5–12.

[53] Valero A, Begum M, Leong S, et al. Fungi isolated from grapes and raisins as affected by germicidal UVC light [J]. Letters in Applied Microbiology, 2007, 45: 238–243.

[54] Begum MARIAM, Hocking AD, Miskelly D. Inactivation of food spoilage fungi by ultra violet (UVC) irradiation [J].

International Journal of Food Microbiology, 2009, 129 (1) : 74-77.

[55] 张小勇,倪芳妍,方晓璞,等.不同波长紫外灯对油脂中 AFB₁ 去除效果的比较[J].粮食与食品工业,2015,22(6): 41-43.

[56] Mazaheri M. Effect of UV radiation on different concentrations of aflatoxin B₁ in pistachio[J].Acta Horticulturae, 2012,963:41-46.

[57] Liu RJ, Jin QZ, Tao GJ, et al.LC-MS and UPLC-quadrupole time-of-flight MS for identification of photodegradation products of Aflatoxin B₁ [J].Chromatographia,2010a,71(1/2):107-112.

[58] Liu RJ, Jin QZ, Tao GJ, et al.Photodegradation kinetics and byproducts identification of the Aflatoxin B₁ in aqueous medium by UPLC-Q-TOF MS[J].Journal of Mass Spectrometry,2010b, 45:553-559.

(上接第345页)

aqueous and methanolic extracts of the truffle *Terfezia clavaryi* against *Pseudomonas aeruginosa* [J].Saudi Medical Journal, 2005,26(6):952-955.

[40] 王宁丽.基于细胞代谢组学的抗氧化活性评价方法的建立及应用[D].兰州:兰州大学,2016.

[41] Yong F, Wen W.Antioxidant Activity And Characterization of One New Polysaccharide Obtained from Perigord Truffle (*Tuber huihongense*) [J].Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine,2016,2016(1):1-7.

[42] 郭坦,侯成林,魏磊,等.印度块菌提取物抗氧化活性的研究[J].菌物学报,2010,29(4):569-575.

[43] Laith A.Antioxidant components and antioxidant/antiradical activities of desert truffle (*Tirmania nivea*) from various Middle Eastern origins [J].Journal of Food Composition and Analysis, 2010,23:15-22.

[44] Saad D, Sawsan S, Al - Rawi. Antioxidant, anticancer,

[59] Cheong KK, Strub C, Montet D, et al.Effect of different light wavelengths on the growth and ochratoxin A production in *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus westerdijkiae* [J]. Fungal Biology,2016,120(5):745-751.

[60] Ibarz R, Garvín A, Azuar E, et al.Modelling of ochratoxin A photo-degradation by a UV multi-wavelength emitting lamp[J]. Food Science and Technology,2015,61(2):385-392.

[61] Murata H, Mitsumatsu M, Shimada N.Reduction of feed-contaminating mycotoxins by ultraviolet irradiation: an *in vitro* study [J]. Food Additives and Contaminants, 2008, 25 (9) : 1107-1110.

[62] Zhu Y, Koutchma T, Warriner K, et al.Reduction of patulin in apple juice products by UV light of different wavelengths in the UVC range [J]. Journal of Food Protection, 2014, 77 (6) : 963-971.

apoptosis properties and chemical composition of black truffle *Terfezia clavaryi* [J].Saudi Journal of Biological Sciences, 2016 (1):1-11.

[45] Fratianni F, Aldo D L, Raffaele C, et al. Mutagenic and antimutagenic properties of aqueous and ethanolic extracts from fresh and irradiated *Tuber aestivum* black truffle: a preliminary study[J].Food Chemistry,2007,102:471-474.

[46] Janakat S, Nassar M. Hepatoprotective activity of desert truffle(*Terfezia clavaryi*) in comparison with the effect of *Nigella sativa* in the rat [J].Pakistan Journal of Nutrition,2010,9(1): 52-56.

[47] 曲清莉,傅茂润,代红飞.脂氧合酶(LOX)在脂肪酸氧化中的作用研究进展[J].食品研究与开发,2015,36(10): 137-142.

[48] 李博,孙丽华.中国块菌研究现状[J].阴山学刊:自然科学版,2015,34(4):49-56.

欢迎光临我们的网站
www.spgykj.com