

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026077

引用格式:刘芳,李萌萌,卞科.臭氧对食品中真菌毒素的降解效果及影响因素研究进展[J].食品与发酵工业,2021,47(18):282-286;293. LIU Fang, LI Mengmeng, BIAN Ke. Recent progress in the degradation effects of mycotoxins in food with ozone and the related influencing factors[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18):282-286;293.

臭氧对食品中真菌毒素的降解效果及影响因素研究进展

刘芳,李萌萌,卞科*

(河南工业大学 粮油食品学院,河南 郑州,450001)

摘 要 该文对臭氧气体对谷物、果蔬、干果、调味品等多种食品中真菌毒素的降解研究进展以及影响臭氧降解效果的主要因素进行综述,阐述了臭氧对不同食品中多种真菌毒素的降解规律及其机理。臭氧对不同食品中不同类型的真菌毒素降解效果均不同,其降解机理是通过臭氧的强氧化性来破坏真菌毒素中的双键结构,产生多种中间产物,导致最终降解产物毒性降低,并且臭氧在降解食品中真菌毒素的同时,还能抑制微生物的生长并改善食品的品质。此外,该文综述了影响臭氧降解真菌毒素的主要因素,例如样品与臭氧的接触面积、水分含量、臭氧处理浓度和处理时间及其他环境因素,以期在臭氧在真菌毒素降解中的应用提供理论参考。

关键词 臭氧;真菌毒素;谷物;降解效果;影响因素

真菌毒素是产毒真菌在适宜的环境条件下产生的次级有毒代谢产物,是一种常见的天然真菌污染物,绝大部分具有毒性,多存在于谷物、果蔬、豆类、坚果及其制品中,常见的真菌毒素包括黄曲霉毒素(afatoxin, AF)、呕吐毒素(deoxynivalenol, DON)、赭曲霉毒素(ochratoxin, OTA)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEA)和伏马毒素(fumonisin, FUM)等,这些毒素不仅会给人和动物的健康带来巨大威胁,而且会给食品加工带来严重的经济损失^[1]。

随着消费者对健康饮食和食品安全重视程度不断升高,真菌毒素的降解研究日趋重要^[2]。食品中真菌毒素的消减可分为预防和降解2个途径,预防即在谷物收获前进行,通常使用杀真菌剂和生物防治剂来进行杀菌,或者在谷物中植入外源性基因以增强谷物的抗逆性^[3]。在预防过程中,可能会受到多种因素的影响,例如谷物的品种选择、播种日期、培育技术以及贮藏方法等都会导致谷物中真菌毒素分布的差异^[3]。真菌毒素的降解方法目前研究的主要有物理消减、化学降解和生物降解三大类,其中物理消减主要包括吸附、挤压蒸煮、热处理、辐照等方法;化学降解一般是使用化学剂脱毒,如碳酸钠、石灰水、氯气、氨气以及臭氧等气体或水溶液;生物降解可通过微生物代谢、发酵、添加酶制剂等方法来实现对真菌毒素的降解^[4]。本文重点综述了臭氧这一化学方法对食

品中真菌毒素的降解研究,分析了影响臭氧降解真菌毒素的主要因素,以期在臭氧在真菌毒素降解中的应用提供理论参考。

1 臭氧对食品中真菌毒素的降解研究进展

臭氧具有极强的氧化性、高效杀菌性,它能破坏真菌毒素结构中的双键,用来灭活产毒真菌和降解真菌毒素,且使用后可自行分解为氧气,无污染残留,因此,臭氧是降解食品中真菌毒素的一种有效的化学手段^[5]。目前,臭氧作为新的非热杀菌技术得到了越来越广泛的应用,现代臭氧发生器产生的臭氧浓度高,能耗低,不产生金属粉尘,这些优点使得臭氧在降解毒素的应用中日益广泛,世界卫生组织、粮食与农业组织、美国食品和药物管理局认为臭氧在食品工业中是一种安全有效的化学物质^[6]。

1.1 臭氧降解谷物中的真菌毒素

1.1.1 臭氧降解小麦中的真菌毒素

小麦中的DON是由镰刀菌产生的次级代谢产物,是小麦中检出率最高、危害最严重的真菌毒素之一。DON可以与核糖体结合,抑制蛋白质、RNA和DNA的合成,并诱导细胞凋亡,当人和动物摄入DON时,会产生呕吐、腹泻、厌食、恶心、神经紊乱等中毒反应^[7]。臭氧气体可使小麦中的镰刀菌失活,同时降低小麦中DON的含量^[8]。当用臭氧处理DON污染

第一作者:硕士研究生(卞科教授为通讯作者, E-mail: kebian@163.com)

基金项目:国家自然科学基金项目(318016542017; YFC1600904; 2018YFE0206000);国家现代农业(小麦)产业技术体系专项经费(CARS-03)

收稿日期:2020-11-03; 改回日期:2020-12-10

的高中低 3 个浓度的天然小麦时,在处理质量浓度为 60 mg/L、处理时间为 90 min 的情况下,DON 的降解率均能达到 50% 左右,且臭氧对 DON 污染程度较低的小麦降解效果较好^[9]。处理质量浓度为 8 mg/L 的气态臭氧,可在 15 s 内显著降解 2 $\mu\text{g/mL}$ DON 水溶液,其降解率达到 95.68%^[10];当 DON 标准溶液暴露于 14.50 mg/L 的臭氧 20 min 后,未在标液中检测到 DON^[11]。由此可知,臭氧不仅可以降解 DON 标准液,也可以降解小麦中的 DON,但臭氧对 DON 标品的降解效果要显著高于小麦,说明小麦组分对臭氧降解 DON 有一定影响。臭氧对 DON 的降解效果主要体现在:在降解过程中 DON 的毒性降低,这是因为 DON 结构中的双键被臭氧破坏,因此 DON 的活性会受到影响,故其产物的毒性相对较弱^[12]。

经臭氧处理后的面粉中的蛋白质、淀粉、氨基酸含量、脂肪酸值、羰基和羧基含量保持不变,具有较低的延展性,但具有较高的韧性和白度^[13];使用臭氧处理过的小麦粉制成的面包产品更耐咀嚼,且弹性和硬度变大,使得面包具有更大的比容和更白的面包屑^[14];臭氧还可以用于延长冷冻面条的货架期,抑制贮藏过程中微生物的生长^[15];在馒头制作过程中,臭氧会降低小麦的 α -淀粉酶活性,从而使面筋含量、弹性和硬度增加,使得馒头具有较好的色泽、结构和风味^[16]。由此可见,臭氧不仅能降低小麦粉中的真菌毒素的含量,而且能够改善面制品的品质。

1.1.2 臭氧降解玉米中的真菌毒素

玉米是我国重要的食品和饲料原料,在收获、加工和贮藏过程中,可能会受到真菌毒素的污染,其中较为常见的污染物为 OTA 和 AFB₁。OTA 会造成动物肾脏和肝脏的损害,有致畸和致癌的作用。AFB₁ 具有强烈的“三致能力”,且对人和动物肝脏有严重的损害作用,可致急性肝炎、肝癌甚至死亡^[17]。臭氧处理能有效降解 80 $\mu\text{g/L}$ OTA 标准品,并且臭氧处理浓度越大所需的处理时间越短,臭氧也能有效降解污染玉米中的 OTA,采用 60 mg/L 臭氧处理 10 h 后,能将玉米中的 OTA (80 $\mu\text{g/kg}$) 降低到国家粮食卫生标准规定 (5 $\mu\text{g/kg}$) 以下^[18]。

气态臭氧和臭氧水均可降解玉米中 AFB₁,在臭氧和臭氧水纯体系中,臭氧和臭氧水纯体系对 AFB₁ 的主要作用机制是 AFB₁ 与臭氧发生加成反应,在此过程中检测到 10 种降解产物,这些产物含量较低,且分子质量相近,通过对其结构-效应分析可知,AFB₁ 的最终降解产物毒性显著降低。臭氧降解 AFB₁ 的

机理是臭氧通过基于 Criegee 机理的亲电攻击,穿过 AFB₁ 二呋喃环的 C8=C9 双键,产生许多中间产物,与 AFB₁ 相比,大多数臭氧分解产物的毒性都有所降低^[19]。一般情况下,低剂量的臭氧足以将 AF 降解至国家限定标准范围以下,且农产品的营养价值和感官品质无明显损失。

1.1.3 臭氧降解稻谷中的真菌毒素

稻谷是我国南方主要的食物来源和储备粮品种,而在南方夏收时高温、高湿的气候下,使得高水分稻谷往往因不能及时干燥处理而发生霉变,并产生以 AF 为主的真菌毒素^[20]。有研究表明,经质量浓度为 95 mg/L 的臭氧处理 25 min 时,稻谷中的 AFB₁ 的降解率随着其初始含量的增加,呈现先上升后下降的趋势,可将 AFB₁ 初始含量为 68.42 $\mu\text{g/kg}$ 的稻谷降解到国家限量标准 (10 $\mu\text{g/kg}$),降解率最高可达 88.1%^[21]。臭氧对稻谷中 AFB₁ 的降解效果受到臭氧浓度、处理时间以及稻谷处理量等因素的影响,在一定范围内,AFB₁ 的降解率与臭氧处理浓度和处理时间成正比,与稻谷量的大小成反比,原因可能是稻谷量增大,臭氧的穿透性减弱,导致毒素降解效果下降^[22]。

臭氧处理还可以使稻谷水分含量下降,特别是高温时下降幅度更大,微生物由于缺乏水分,生长繁殖受到抑制^[23]。总而言之,臭氧处理可以有效降解稻谷中 AFB₁ 的含量,并且能够明显降低稻谷中微生物的含量以及细菌和霉菌总数,进而提高稻谷的食用安全及品质。

1.2 臭氧降解果蔬中的真菌毒素

果蔬的含水量高,营养丰富,所以在贮藏和加工过程中极易遭受病原真菌的侵袭而腐烂变质,同时这些真菌在果蔬的腐烂部位及其周围健康组织中也积累了大量真菌毒素。目前从新鲜果蔬及其产品中检测到的真菌毒素种类主要有 AF、DON、OTA、FUM、展青霉素 (patulin, PAT)、链格孢毒素 (altenuene, ALT) 等^[24],其中 PAT 是引起梨、苹果发生霉心病的主要病原菌。臭氧能够降低苹果汁中 PAT 的含量,其原因是臭氧攻击了 PAT 中的羟基,使得 PAT 降解为 2 个分子物质被破坏,因此通入臭氧气体可以作为工业上消除 PAT 的有效手段^[25]。臭氧还可以通过抑制柑橘和柠檬这 2 种水果中的青霉菌分生孢子的萌发率,进而抑制这 2 种水果中 OTA 的生成^[26]。臭氧水可以抑制青菜、生菜、黄瓜、番茄这几种蔬菜中真菌毒素的合成,并且臭氧水具有增强番茄的抗氧化活性

和降解果蔬农残等作用^[27]。

综上可知,臭氧不但可以利用强氧化作用破坏果蔬中真菌毒素的结构,起到降解毒素的效果,而且能够对果蔬中的微生物产生抑制作用,在一定程度上抑制孢子萌发和菌丝生长,进一步抑制了真菌毒素的产生和积累,从而确保果蔬的微生物安全和营养价值^[28]。

1.3 臭氧降解干果中的真菌毒素

真菌毒素的发生不仅存在于谷物和果蔬这两大食品中,在其他食品中也很常见,干果、调味品也是容易被真菌毒素污染的高危食品。有人对榛子和开心果中 AF 的降解进行了研究,结果表明,臭氧处理可以有效降解榛子和开心果中的 AF,与其他 AF 相比,AFB₁ 对臭氧更敏感,开心果在臭氧质量浓度为 9.0 mg/L 的条件下处理 7 h 后,可使 AFB₁ 和总 AF 的含量分别降低 23% 和 24%^[29]。臭氧还可以显著降解花生中 AFB₁ 的含量,且随着处理时间的增加,降解效果越好,在臭氧质量浓度为 50 mg/L、流速为 5 L/min 的条件下处理 40 h 时,最高降解率可达到 90.1%,经臭氧处理后,AFB₁ 的分子结构遭到破坏,毒性降低^[30]。

1.4 臭氧降解调味品中的真菌毒素

在调味品方面,有研究用臭氧处理含水率为 12.6%、AFB₁ 含量为 20 μg/kg 的红辣椒,以此来研究臭氧对红辣椒中 AF 的降解效果。实验结果表明,经质量浓度为 66 mg/L 的臭氧处理 60 min 后,红辣椒中的 AFB₁ 含量显著降低,且降解率超过 80%,并且总体上没有发现明显的颜色和质量变化^[31]。臭氧还能对青椒起到保鲜和杀菌作用^[32],对食用糖起到脱色作用^[33];臭氧在食品工业中的潜在应用包括对食品包装材料和食品接触面的净化,以及减少不良代谢物的存在,如异味或污染物^[34]。由此可见,臭氧已经广泛应用于食品安全和生产加工等领域。

2 影响臭氧对真菌毒素降解效果的因素

臭氧对食品中真菌毒素的降解效果会受到许多因素的影响,一方面是样品本身的影响,如样品的水分含量、感染方式和污染水平等;另一方面是臭氧的处理浓度、处理时间和臭氧流量等;此外,还有一些外界的因素也会对臭氧降解效果产生一定的影响,如温度、pH 以及大气压力等。

2.1 样品的形态

有研究对臭氧处理后的小麦籽粒和全麦粉中

DON 的降解率进行了对比,结果表明,在相同条件下,全麦粉中 DON 的降解率高于籽粒,在臭氧质量浓度为 60 mg/L 的条件下处理 120 min,小麦籽粒降解率为 17.1%,全麦粉为 26.4%,出现这种现象可能是由于全麦粉与臭氧的接触面积更大,DON 能更彻底地和臭氧发生反应^[35]。而在臭氧降解花生和花生粉中的 AFB₁ 时,花生籽粒的降解率高于花生粉,其原因可能是花生籽粒表面更易接触到臭氧,而花生粉在处理过程中容易形成结块,所以籽粒的降解效果较好^[36]。同理,开心果果仁在 9.0 mg/L 的臭氧中暴露 420 min 后,可使其中的 AFB₁ 和黄曲霉毒素总量分别降低 23% 和 24%,而在相同的条件下,开心果粉的 AFB₁ 和黄曲霉毒素总量只能降低 5%^[37]。这些研究表明,同一种样品的不同形态下,臭氧对真菌毒素的降解效果存在差异。

2.2 水分含量

在臭氧处理 DON 的过程中,水分含量是影响样品中 DON 降解效果的重要因素,它与 DON 的降解率呈正相关。有研究发现,润麦后水分含量为 16% 的小麦籽粒经过臭氧处理后,DON 的降解率比同条件下臭氧处理原始水分含量为 11.3% 的小麦籽粒高 17% 左右,水分含量为 20.10% 的小麦粉的降解率高于水分含量分别为 16.29% 和 11.79% 的小麦粉^[35];臭氧在干燥状态下半衰期为 2.5 h,在潮湿状态下为 15 min,臭氧的干法(只有气态臭氧)和湿法(通过水鼓泡产生的臭氧水)可以迅速分解小麦、玉米和水稻中的 AFB₁,在相同的处理条件下,湿法比干法更有效,原因可能是臭氧气体与水发生了反应。湿法虽然可以更有效的降低谷物中真菌毒素的含量,但是会增加粮食的水分含量,不利于后续的干燥与贮藏,因此气态臭氧在食品中的应用更为广泛^[38]。

2.3 样品感染方式

粮食在生产过程中的感染方式可分为天然感染和人工感染,其中天然感染是粮食种子的自然感染,人工感染是在不含有真菌毒素的种子中接种特定的真菌毒素。有研究结果表明,臭氧处理人工感染种子中的真菌毒素的降解率高于天然感染的种子,其原因可能是人工感染种子中的真菌毒素仅存在于产品表面,毒素在产品中的分布不均匀,而自然污染种子中的毒素可能存在于整个产品中,包括子叶内部^[29]。

2.4 臭氧处理浓度和处理时间

有文献研究了在不同臭氧浓度和不同处理时间下

臭氧对红辣椒中的 AFB₁ 的降解效果,发现在臭氧质量浓度分别为 16、33 mg/L 的条件下处理 60 min 后,红辣椒中 AFB₁ 的降低率分别为 62.5% 和 81.2%;将红辣椒在臭氧质量浓度为 66 mg/L 下分别处理 30、60 min 后,AFB₁ 的降解率分别为 87.5% 和 93.7%^[31]。由此可见,臭氧对真菌毒素的降解率随着臭氧处理浓度和处理时间的增加而升高,且在合理范围内增加臭氧处理浓度和处理时间时,产品的品质不会发生显著改变。

2.5 温度和 pH

臭氧是一种不稳定的气体,温度对于臭氧降解真菌毒素有一定的影响。有研究指出,随着温度(<50℃)的不断升高,臭氧对花生中 AFB₁ 的降解率不断提高,在温度>50℃时,降解率开始下降^[36]。所以在臭氧处理食品中真菌毒素时,温度控制在室温即可,这样也可以减少升温产生的经济成本。

在臭氧降解真菌毒素的过程中,臭氧发生氧化反应时对 pH 值比较敏感,当 pH 值为 4~6 时,小麦中的 DON 易被降解;在 pH 值为 7~8 时,臭氧降解率与 C8 位的氧化状态相关,氧化状态越低,毒素越容易被降解;当 pH 值为 9 时,则很少或基本不发生臭氧对真菌毒素的降解^[40]。由上述可知,在臭氧降解真菌毒素的过程中,只有找到合适的温度和 pH,才能使降解更加高效的进行。

3 结论

臭氧作为一种强氧化剂,可降低食品中真菌毒素的含量,无论是在谷物还是在水果蔬菜中,它都对食品中真菌毒素的降解起着重要的作用。臭氧对不同食品中不同类型的真菌毒素降解效果均不同,且降解率随着臭氧与样品的接触面积、样品水分含量以及臭氧处理浓度和处理时间的增大而升高。所以在处理过程中应尽量保证样品与臭氧充分接触,可采用适当搅拌的方法来防止粉状样品的结块;在选择臭氧的处理条件时,可适当提高臭氧的处理浓度和时间,同时也应该考虑高浓度的臭氧对食品的风味、品质以及营养价值等方面带来的负面影响。此外,臭氧的强氧化性可能会对人体健康造成威胁,因此在实验过程中要保证实验的安全性,应尽量在宽敞通风的环境中进行臭氧降解实验。

尽管臭氧技术具有巨大的潜力,但该技术尚未在食品工业中得到广泛应用,低渗透、短半衰期、残留气味和安全问题是臭氧在商业规模上应用的一些限制因素,因此需要更多的研究来解决这些问题,以期为

工业提供安全、经济、有效的臭氧氧化技术。尽管臭氧氧化技术在应用过程中存在种种挑战,但它在农业和食品工业中的应用前景良好,臭氧技术有潜力成为一种降解真菌毒素的新技术。

参 考 文 献

- [1] 王瑞鑫,张微,李书国.免疫传感器在粮油中真菌毒素快速检测的应用研究进展[J].粮油食品科技,2015,23(4):83-87.
WANG R X, ZHANG W, LI S G. Research progress on application of immunosensor in determination of mycotoxins in cereals and oils [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(4):83-87.
- [2] 蔡溢.中国食品进口需求趋势及优化策略[J].农业展望,2019,15(6):83-87.
CAI Y. Trends and optimization strategy of demand of China's food import[J]. Agricultural Outlook, 2019, 15(6):83-87.
- [3] KHANEGHAH A M, MARTINS L M, VON HERTWIG A M, et al. Deoxynivalenol and its masked forms: Characteristics, incidence, control and fate during wheat and wheat based products processing - A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 71:13-24.
- [4] PANKAJ S K, SHI H, KEENER K M. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 71:73-83.
- [5] 王莉,罗颖鹏,罗小虎,等.臭氧降解污染小麦中呕吐毒素的效果及降解产物推测[J].食品科学,2016,37(18):164-170.
WANG L, LUO Y P, LUO X H, et al. Efficacy of deoxynivalenol detoxification by ozone treatment in wheat and prediction of degradation products[J]. Food Science, 2016, 37(18):164-170.
- [6] GUZEL-SEYDİM Z B, GREENE N K, SEYDİM A C. Use of ozone in the food industry[J]. LWT- Food Science and Technology, 2004, 37(4):453-460.
- [7] AWAD W A, RUHNAV D, HESS C, et al. Feeding of deoxynivalenol increases the intestinal paracellular permeability of broiler chickens[J]. Archives of Toxicology, 2019, 93(7):2057-2064.
- [8] 姜冬梅,王荷,武琳霞,等.小麦中呕吐毒素研究进展[J].食品安全质量检测学报,2020,11(2):423-432.
JIANG D M, WANG H, WU L X, et al. Research progress of deoxynivalenol in wheat[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(2):423-432.
- [9] 许云.脱氧雪腐镰刀菌烯醇臭氧降解过程细胞毒性评价及产物分析[D].无锡:江南大学,2019.
XU Y. Cytotoxicity evaluation and product analysis of deoxynivalenol in ozone degradation process[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [10] LIM M, GUAN E Q, BIAN K. Structure elucidation and toxicity analysis of the degradation products of deoxynivalenol by gaseous ozone[J]. Toxins, 2019, 11(8):474.
- [11] REN D L, DIAO E J, HOU H X, et al. Cytotoxicity of deoxynivalenol after being exposed to gaseous ozone[J]. Toxins, 2019, 11(11):639.
- [12] SUN X L, JI J, GAO Y H, et al. Fate of deoxynivalenol and degradation products degraded by aqueous ozone in contaminated wheat [J]. Food Research International, 2020, 137:109357.
- [13] WANG L, SHAO H L, LUO X H, et al. Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and wheat quality [J]. PLoS One, 2016, 11(1):e0147613.
- [14] VIOLLEAU F, PERNOT A G, SUREL O. Effect of oxygreen®

- wheat ozonation process on bread dough quality and protein solubility[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(3):392-396.
- [15] 闵照永, 于心雨, 王跃强, 等. 乳酸及臭氧对鲜湿面保鲜的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2019(2):22-28.
MIN Z Y, YU X Y, WANG Y Q, et al. Preservation of fresh noodles by lactic acid and ozone[J]. Cereal & Feed Industry, 2019(2):22-28.
- [16] 李博, 高鑫. 臭氧熏蒸对小麦蒸制馒头品质的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(4):23-26.
LI B, GAO X, Effect of ozone treatment on quality of steamed breads[J]. Food & Machinery, 2015, 31(4):23-26.
- [17] 李智高, 毛永杨, 狄朋敏, 等. 食品中黄曲霉毒素的降解方法的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(14):4 597-4 602.
LI Z G, MAO Y Y, DI P M, et al. Research progress on the degradation methods of aflatoxin in food[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(14):4 597-4 602.
- [18] 邓捷, 陈文洁, 郭柏雪, 等. 臭氧降解玉米中赭曲霉毒素 A 的效果及对玉米脂肪酸的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(21):12-16.
DENG J, CHEN W J, GUO B X, et al. Effect of ozone treatment on the degradation of ochratoxin A and fatty acids in corn[J]. Food Science, 2011, 32(21):12-16.
- [19] DIAO E J, HOU H X, DONG H Z. Ozonolysis mechanism and influencing factors of aflatoxin B₁: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 33(1):21-26.
- [20] 周建新, 鞠兴荣, 孙肖东, 等. 不同储藏条件下稻谷霉菌区系演替的研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(5):133-136.
ZHOU J X, JU X R, SUN X D, et al. Succession of mould flora for paddy in different storage conditions[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(5):133-136.
- [21] 丁爱凤, 包月红, 周建新, 等. 臭氧降解稻谷中不同黄曲霉毒素 B₁ 初始含量效果研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23):72-74.
DING A F, BAO Y H, ZHOU J X, et al. Study on effects of ozone detoxification on different initial content of AFB₁ in paddy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(23):72-74.
- [22] 周建新, 吴萌萌, 包月红, 等. 臭氧处理稻谷降解黄曲霉毒素 B₁ 的工艺条件优化[J]. 粮食储藏, 2014, 43(4):17-21.
ZHOU J X, WU M M, BAO Y H, et al. Optimization to degradation of aflatoxins B₁ in paddy by ozone treatment [J]. Grain Storage, 2014, 43(4):17-21.
- [23] 周建新, 林姣, 张瑞, 等. 臭氧处理稻谷储藏过程中微生物的变化规律[J]. 食品科学, 2013, 34(7):24-27.
ZHOU J X, LIN J, ZHANG R, et al. Changes in microorganism populations during storage of ozone-treated paddy[J]. Food Science, 2013, 34(7):24-27.
- [24] 彭青枝, 杨冰洁, 朱晓玲, 等. 果蔬及其制品真菌毒素的控制研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5):380-384;389.
PENG Q Z, YANG B J, ZHU X L, et al. Research progress in Mycotoxins control in fruits and vegetables and their products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(5):380-384;389.
- [25] CATALDO F. Ozone decomposition of patulin-A micotoxin and food contaminant [J]. Ozone: Science & Engineering, 2008, 30(3):197-201.
- [26] PALOU, L, SMILANICK J L, CRISOSTO C H, et al. Effect of gaseous ozone exposure on the development of green and blue molds on cold stored *Citrus fruit*[J]. Plant Disease, 2001, 85(6):632-638.
- [27] 郭正红. 臭氧水对设施蔬菜病害的防治及其生理机制的研究[D]. 上海:上海师范大学, 2017.
GUO Z H. Effects of ozonated water on controlling of greenhouse vegetable disease and underlying physiological mechanism [D]. Shanghai:Shanghai Normal University, 2017.
- [28] 姜楠, 王蒙, 韦迪哲, 等. 果蔬中真菌毒素污染及臭氧防治研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(11):4 415-4 420.
JIANG N, WANG M, WEI D Z, et al. Progress on mycotoxins contamination and ozone degradation in fruits and vegetables[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(11):4 415-4 420.
- [29] KABAK B. Aflatoxins in hazelnuts and dried figs: Occurrence and exposure assessment[J]. Food Chemistry, 2016, 211:8-16.
- [30] 刁恩杰. 花生中黄曲霉毒素 B₁ 臭氧降解及安全性评价[D]. 泰安:山东农业大学, 2015.
DIAO E J. Ozonolysis and safety evaluation of aflatoxin B₁ in peanuts[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2015.
- [31] INAN F, PALA M, DOYMAZ I. Use of ozone in detoxification of aflatoxin B₁ in red pepper [J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4):425-429.
- [32] 李一卓. 鲜青椒保鲜及其农残降解技术的研究[D]. 重庆:西南大学, 2011.
LI Y Z. Studies on the preservation technology of fresh *Zanthoxylum schinifolium* sieb et Zucc. and degradation thchnology of pesticides on Z. S. sieb et Zucc. [D]. Chongqing:Southwest University, 2011.
- [33] 何惠欢, 李文, 项俊华, 等. 臭氧脱色技术在制糖工业中的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2015, 40(6):127-131.
HE H H, LI W, XIANG J H, et al. Application of ozone decoloration technology in sugar industry[J]. China Condiment, 2015, 40(6):127-131.
- [34] 高鑫, 梅俊, 李博. 臭氧在食品工业中的应用研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2017(2):35-39.
GAO X, MEI J, LI B. Application of ozone in food industry[J]. Cereal & Feed Industry, 2017(2):35-39.
- [35] 陶倩. 臭氧不同处理方式对呕吐毒素污染小麦的影响[D]. 武汉:武汉轻工大学, 2018.
TAO Q. Effect of different ozone treatments on wheat contaminated by DON[D]. Wuhan:Wuhan Polytechnic University, 2018.
- [36] PROCTOR A D, AHMEDNA M, KUMAR J V, et al. Degradation of aflatoxins in peanut kernels/flour by gaseous ozonation and mild heat treatment[J]. Food Additives and Contaminants, 2004, 21(8):786-793.
- [37] AKBAS M Y, OZDEMIR M. Effect of different ozone treatments on aflatoxin degradation and physicochemical properties of pistachios [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(13):2 099-2 104.
- [38] AFSAH-HEJRI L, HAJEB P, EHSANI R J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4):1 777-1 808.
- [39] KOTTAPALLI B, WOLF-HALL C E, SCHWARZ P. Evaluation of gaseous ozone and hydrogen peroxide treatments for reducing *Fusarium* survival in malting barley [J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(6):1 236-1 240.
- [40] YOUNG J C, ZHOU T, YU H, et al. Degradation of trichothecene mycotoxins by chicken intestinal microbes[J]. Food & Chemical Toxicology, 2007, 45(1):136-143.

(下转第 293 页)

- obesus*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 173-178;253.
- [46] BAI B, ZHAO K, LI X F. Application research of nano-storage materials in cold chain logistics of e-commerce fresh agricultural products[J]. Results in Physics, 2019, 13:102049.
- [47] DU J P, NIE B J, ZHANG Y P, et al. Cooling performance of a thermal energy storage-based portable box for cold chain applications[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28:101238.
- [48] MITKARI M S S. A survey paper on cold storage monitoring system using IoT [J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2020, 8(12):642-645.
- [49] YANG T R, WANG C J, SUN Q, et al. Study on the application of latent heat cold storage in a refrigerated warehouse [J]. Energy Procedia, 2017, 142:3 546-3 552.
- [50] 吴丽媛, 宋文吉, 高日新, 等. 基于板式冰蓄冷的冷藏库恒温特性的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(5):66-69.
- WU L Y, SONG W J, GAO R X, et al. Experimental study on insulation characteristics of cold storage with the phase change storage system[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(5):66-69.
- [51] 杨凤, 刘清江, 宋瑞亭, 等. 顶置蓄冷板对冷库融霜时库温波动的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(12):85-89.
- YANG F, LIU Q J, SONG R T, et al. Effect of overhead cool storage plate on the storage temperature fluctuation in the cold storage during defrosting[J]. Food & Machinery, 2020, 36(12):85-89.

Research progress of low temperature phase change storage materials and their applications in cold chain

YOU Hui^{1,3}, XIE Jing^{1,2,3,4 *}

1 (College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China) 2 (National Experimental Teaching Demonstration Center of Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306, China) 3 (Shanghai Cold Chain Equipment Performance and Energy Conservation Evaluation Professional Technical Service Platform, Shanghai 201306, China) 4 (Ministry of Education Collaborative Innovation Center of Key Technologies for Deep Processing of Marine Food (Shanghai), Shanghai 201306, China)

ABSTRACT With the spring up of the e-commerce industry of fresh foods, cold chain logistics has become more and more important. And phase change cold storage technology can realize energy transfer across time and space, which has become one of the important ways to reduce the energy consumption of mechanical refrigeration in the cold chain logistics industry. In this paper, the research of low-temperature organic phase change storage materials, low-temperature inorganic phase change storage materials and composite low-temperature phase change storage materials about -18°C were summarized, and the application of low-temperature phase change storage materials in cold chain equipment such as cold storage plate refrigerated truck, cold storage container and cold storage were reviewed. It was pointed out that improving the performance of low temperature phase change cold storage materials has attracted researchers attention, and further improvement should be made in the aspects of temperature control and transportation cost reduction of cold storage materials in cold chain application.

Key words phase-change cold storage; nano phase change cold storage material; cold chain; cold truck

(上接第 286 页)

Recent progress in the degradation effects of mycotoxins in food with ozone and the related influencing factors

LIU Fang, LI Mengmeng, BIAN Ke *

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT The research progress in degradation of mycotoxins in cereals, fruits, vegetables, nuts and condiments with ozone was reviewed in this paper. Besides, rules and the related mechanisms of mycotoxin degradation with ozone were also expounded. The degradation effects of mycotoxins varied significantly with the types of mycotoxins. During ozone fumigation, the double bonds in mycotoxin molecules were oxidized. As a result, the toxicity of degradation products was significantly lower than that of the corresponding mycotoxins. Meanwhile, microbial growth can also be inactivated, thus improving food quality. Furthermore, the main influencing factors of mycotoxin degradation with ozone were also reviewed. The factors that significantly affect the degradation effects of mycotoxins with ozone include the contact area of ozone with food materials, food moisture, ozone concentration, ozone fumigation time and the environmental condition. Through the above review, we aimed to provide theoretical foundation for the application of ozone on mycotoxin degradation.

Key words ozone; mycotoxin; cereals; degradation; influencing factors