

农作物和食品中链格孢毒素污染及其 脱毒方法研究进展

杨野, 于丹, 都晓伟*

(黑龙江中医药大学药学院, 哈尔滨 150004)

摘要: 链格孢菌是多种重要农作物的病原体, 可产生 70 余种链格孢毒素, 不仅造成农作物减产和品质下降, 也会存在于食品加工制品中, 对人类和动物造成安全威胁。链格孢毒素可污染粮食、水果和蔬菜等农作物, 在番茄及其产品、小麦和果干等食品中的含量较高, 尤其以细交链格孢菌酮酸的含量最高。脱除链格孢毒素的方法主要包括物理法、化学法和微生物法, 通过降解、吸附毒素或者抑制真菌产毒以降低农作物或食品中链格孢毒素的含量。本文总结了农作物和食品中链格孢毒素污染现状及其脱毒方法, 旨在为降低链格孢菌毒素对农作物的危害, 提高食品安全提供参考。

关键词: 链格孢毒素; 污染现状; 脱除方法; 农作物

Research progress on *Alternaria* toxins contamination in crops and food and their removal

YANG Ye, YU Dan, DU Xiao-Wei*

(College of Pharmaceutical, Heilongjiang University of Traditional Chinese Medicine, Harbin 150004, China)

ABSTRACT: *Alternaria* is a pathogen of many important crops and can produce more than 70 kinds of *Alternaria* toxins, which not only cause yield loss and quality deterioration of crops, but also exist in processed food products, posing a safety threat to humans and animals. *Alternaria* toxins can contaminate crops such as grains, fruits and vegetables, and are present in high levels in foods such as tomatoes and their products, wheat and dried fruits, especially in tenuazonic acid. The methods of *Alternaria* toxins removal mainly include physical, chemical and microbiological methods to reduce the content of *Alternaria* toxins in crops or foods by degradation, adsorption of toxin or inhibition of fungal toxicity. This review summarized the contaminated status of *Alternaria* toxin in crops and food and the detoxification method of that, in order to provide a reference for reducing the harm of *Alternaria* toxin to crops and improving the food safety.

KEY WORDS: *Alternaria* toxins; contamination status; removal methods; crop

0 引言

链格孢(*Alternaria* spp.)属于子囊菌门(Ascomycota)格孢腔菌科(Pleosporaceae)真菌, 是引发谷物、果蔬和其他农

作物病害的主要病菌之一, 目前全球已报道的链格孢菌多达 100 余种^[1]。链格孢毒素(*Alternaria* toxins)是链格孢菌寄生在植物体内代谢生成的毒性物质, 可促使病原菌繁殖和植物病症恶化并对人类和其他动物造成威胁^[2-3], 例如作

*通信作者: 都晓伟, 教授, 主要研究方向为天然药物质量评价及开发研究。E-mail: xiaoweidu@hotmail.com

*Corresponding author: DU Xiao-Wei, Professor, College of Pharmaceutical, Heilongjiang University of Traditional Chinese Medicine, No.24, Heping Road, Xiangfang District, Harbin 150004, China. E-mail: xiaoweidu@hotmail.com

物减产、植株枯萎,人畜食用后产生致突变、致癌、致畸和急性慢性中毒。据报道,河南林县食道癌的高发病率、非洲出现的一种人类血液紊乱疾病“奥尼赖病”(onyalai)都可能与摄入链格孢毒素污染的食物有关^[4-5]。近年来由于此类毒素在许多食品中有着很高的检出率,链格孢毒素污染已成为一个重要的食品安全问题。

已知的链格孢毒素超过 70 种,按照化学结构的不同,对人或动物有潜在威胁的链格孢毒素主要分为吡喃酮类、花醌类、四氨基酸衍生物、环肽类、一系列长链氨基酸多元醇的丙三羧酸酯和酚类等。细交链孢菌酮酸(tenuazonic acid, Te A)、交链孢酚(alternariol, AOH)、交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)和腾毒素(tentoxin, TEN)是在各种农作物中检出率较高的 4 种链格孢毒素,尤其易在番茄及其制品、果干、小麦和油籽等食品中蓄积。4 种链格孢毒素化学结构见图 1。

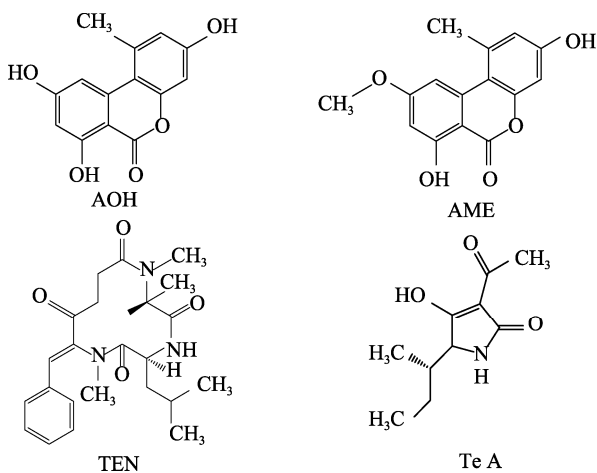


图 1 AOH、AME、TEN 和 Te A 的化学结构
Fig.1 Chemical structures of AOH, AME, TEN and Te A

基于链格孢毒素的危害性,如何将其脱除是解决此类毒素污染问题的关键。近年来有关链格孢毒素脱除方法的研究受到广泛关注,采用物理脱毒法、化学脱毒法和微生物脱毒法,通过直接降解真菌毒素,抑制链格孢菌中与毒素生成相关的基因表达,或者特异性吸附毒素等途径可降低农作物或食物中的链格孢毒素含量。本文对近年来链格孢毒素在农作物和食品中的污染现状、毒性和脱除方法进行总结,为降低链格孢毒素对农作物的危害,保障食品安全提供参考。

1 链格孢毒素的污染现状

链格孢菌在环境中普遍存在,通常为腐生菌或植物病原菌,不仅在收获前侵染田间作物,引起茎枯病、叶斑病,还在采后阶段于植物的果实和籽粒中大量繁殖,积累链格孢毒素。此类真菌毒素广泛分布于谷物、水果、蔬菜

和油籽中,一方面对人类和动物具有毒性作用,另一方面影响作物的品质和产量。染病的斯佩尔特小麦中 AOH 和 AME 的含量较对照组高出 246% 和 186%,采收后染病小麦的千粒重与容重分别减少了 2.45 g 和 0.71 kg/hL,而且蛋白质含量、淀粉品质、湿面筋含量和面团流变学特性均有所下降^[6]。目前中国和世界许多地区都有农作物和食品加工业受到链格孢毒素污染的报道(详见表 1),谷物、水果、中药材都受到不同程度的污染,局部地区和特定食品种类污染水平较高,在番茄酱、果干、小麦等食品中的污染情况较为严重,这可能与食品本身的基质有关,而且 Te A 的含量和检出率远高于其他链格孢毒素,严重威胁人畜健康。BABIČ 等^[7]调查了 2014 至 2016 年间斯洛文尼亚 433 份谷物样本真菌毒素的存在情况,Te A、TEN、AOH 和 AME 的污染率分别为 51%、26%、10%、9%,平均含量为 397、42、150、115 μg/kg。SANZANI 等^[8]对意大利阿普利亚的番茄及番茄制品的污染情况进行了研究,番茄制品的 Te A 含量高达 425~81592 μg/kg,新鲜西红柿的 Te A 含量为 11~4560 μg/kg,而样品中其他链格孢毒素的含量未超过 100 μg/kg。Te A 在番茄及番茄制品中极高的含量应该引起研究者的重视,进一步监控番茄制品生产流程中链格孢毒素含量变化,研究此过程 Te A 如何迅速积累,采取相应的措施,才能解决番茄产品的链格孢毒素污染问题。由表 1 可见 Te A、TEN、AOH 和 AME 是污染农作物和食品的主要链格孢毒素,对食品安全威胁较大,值得重点关注。自 2012 年以来,欧盟委员会要求欧洲国家进行食品和饲料中链格孢毒素的污染状况调查,与欧美等发达国家相比,我国链格孢毒素污染粮食、果蔬的相关研究刚刚起步,需要在未来进行系统的调查,以地区、食物种类的污染情况为基础建立数据库将有利于保护食品安全。

2 链格孢毒素的毒性

2011 年 10 月,欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)对链格孢毒素首次进行了风险评估,指出这些真菌毒素具有细胞毒性、胚胎毒性、急性慢性毒性、致癌性等毒性^[21]。

2.1 细胞毒性

链格孢毒素具有显著的细胞毒性,目前对链格孢毒素的细胞毒性研究主要集中在 AOH、AME 和 Te A 上。使用 AOH、AME 和 Te A 处理人肝癌细胞(HepG2)和人结肠腺癌细胞(Caco-2)后,两种细胞的活力均随给药剂量的增加而下降,且当 AME 和 TeA, AOH 和 AME 同时存在时,毒性显著增强^[22],由此可见多种链格孢毒素间存在着显著的协同作用,能够以较少的暴露量产生较大的毒性。人畜食用被污染的食物时,往往同时摄入多种不同的链格孢毒素,今后的研究可以重点关注此类毒素的协同作用和加性作用。

表1 国内外农作物中链格孢毒素的污染情况
Table 1 Pollution of *Alternaria* toxin in crops in China and abroad

样品	国家	年份	样本数量	毒素种类	检出率/%	含量/平均含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	参考文献
黑小麦	斯洛文尼亚	2014—2016	433	Te A	51	397	[7]
				AOH	10	150	
				AME	19	115	
				TEN	26	42	
番茄	意大利阿普利亚	2018	10	Te A	100	10740.25	[8]
				AOH	10	2.2	
				AME	40	25	
				TEN	10	3.8	
干番茄	意大利阿普利亚	2018	10	Te A	100	391.08	[8]
				AOH	10	1.64	
				AME	30	13.63	
				TEN	10	3.6	
小麦	中国河南	2020	66	Te A	75.80	2.10~168.34	[9]
				AOH	16.70	2.50~14.00	
				AME	75.80	1.11~15.32	
大米	中国河南	2020	66	TEN	68.20	1.12~15.32	[9]
				Te A	36.40	3.01~19.13	
				Te A	8	28.62~47.29	
高良姜	中国	2021	25	AOH	40	44.24~177.91	[10]
				AME	44	0.94~15.97	
				Te A	30	276.46~2102.31	
桑葚	中国	2021	10	AME	80	0.41~3.55	[10]
				TEN	10	4.34	
				Te A		40.76~963.95	
陈皮	中国	2021	11	AOH	20	79.14~82.25	[10]
				TEN	10	5.41	
				Te A	30	339~1287	
玉米	塞尔维亚	2016—2017	458	AOH	9	0.16~33	[11]
				AME	12	LOD~14	
				TEN	1	0.35~2.7	
				Te A	78.50	243 \pm 725	
浓缩番茄酱	意大利皮亚琴察	2018—2019	79	Te A	76.90	28.7 \pm 38.8	[12]
番茄酱	意大利皮亚琴察	2018—2019	13	Te A	100	25~2345	[13]
无花果干	荷兰	2014	5	Te A	50.9	65.7~6260	
葵花籽	南非	2016	159	AOH	8.2	4.6~246	[14]
				AME	11.3	0.7~197	
				TEN	73	1.3~130	
				Te A	25	1.21~4.3	
橘汁	中国	2014	36	AME	11.10	0.11~0.20	[15]
				Te A	90	ND~99.6	
				AOH	96.70	ND~6.29	
小麦粉	中国内蒙古	2021	120	AME	96.70	ND~5.37	[16]
				TEN	100	0.82~16	
				Te A	59.10	0.78~12.18	
大米	中国	2021	22	AOH	22.73	0.45~1.20	[17]
				AME	9.06	0.42~0.43	
				TEN	4.55	ND~1.12	
				Te A	95.45	2.52~163.32	
小麦粉	中国	2021	25	AOH	81.82	0.45~2.18	[17]
				AME	77.27	0.37~18.56	
				TEN	95.45	0.42~38.14	
				Te A	95.45	0.42~38.14	

表 1(续)

样品	国家	年份	样本数量	毒素种类	检出率/%	含量/平均含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	参考文献
玉米	河南	2018	40	Te A	23.40	1.24~32.51	[18]
				AOH	10.60	1.24~8.14	
				AME	63.80	0.12~6.70	
				TEN	4.30	1.02~1.05	
枸杞	中国西北地区	2018	155	Te A	29.70	ND~7024	[19]
				AOH	20.00	ND~2607	
				AME	16.36	ND~1825	
				TEN	12.90	ND~1964	
葡萄干	中国	2016	57	ALT	1.82	ND~2059	[20]
				Te A	35.10	6.9~594.4	
				AOH	19.30	3.5~15.6	
				AME	5.30	0.3~13.5	
杏干	中国	2016	56	Te A	37.50	10.4~1231.8	[20]
				AME	7.10	0.5~2.1	
				TEN	5.40	2.7~28.0	
干枣	中国	2016	53	Te A	34.00	9.6~4411.4	[20]
				TEN	13.20	1.4~11.2	
				Te A	64.80	23.8~5665.3	
枸杞	中国	2016	54	AOH	3.70	5.9~27.4	[20]
				AME	7.40	0.2~15.0	
				TEN	63.00	11.7~1032.6	

注: ND: 未达检出限; ALT: 交链孢霉烯(altenuene); 检出限(limit of detection, LOD)。

研究者应用艾氏腹水癌细胞和大鼠肝细胞考察了 Te A 的毒性作用机制, 发现 Te A 可阻碍细胞对氨基酸的摄取, 抑制核糖体释放多肽, 从而抑制蛋白质的合成, 影响细胞正常生命活动^[23]。一项研究中发现 AOH 和 AME 的细胞毒性较强, 大约是 Te A 的 3 倍^[24], 但 Te A 更易于在食物中蓄积, 其含量往往是 AOH、AME 数十倍至数百倍, 因此 Te A 的毒性更应受到重视。

2.2 胚胎毒性

链格孢毒素具有胚胎毒性, 但毒性强度不一^[25-26], 将 AME 和 ALT 单独作用于鸡胚, 均未见胚胎毒性和致畸性, 但二者联合使用则对鸡胚有致死性, 该结果说明 AME 和 ALT 之间存在着协同增毒的作用。HUANG 等^[27]证明了 AOH 对哺乳动物(小鼠)囊胚期胚胎具有毒性, 连续 4 d 对妊娠小鼠注射 AOH (1、3、5 mg/kg), 可引起囊胚期胚胎细胞凋亡, 造成胚胎退化, 体重下降, 新生小鼠则表现为免疫能力下降, 其毒理机制可能与诱导机体氧化应激和上调胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)水平有关。相比成年人, 链格孢毒素可能对孕妇和胎儿有更大的健康威胁。

2.3 致癌性

长期摄入含链格孢毒素的食物可能是食道癌的诱发因素之一。AOH 和 AME 可导致仓鼠肺细胞(V79)、人肝癌细胞(HepG2)和人结肠癌细胞(HT-29)的 DNA 链断裂^[28-29]。AME 和 AOH 能与自人胚胎食管上皮细胞提取的 DNA 结合, 激活其中的癌基因 *cH-ras* 和 *c-mys*, 诱发胎儿食管鳞状细胞癌^[30], 互隔交链孢菌的培养物不但可激活多种细胞

的癌基因, 还可造成食管上皮细胞特异性损伤, 并在动物整体水平产生致癌性^[31-33]。杨胜利等^[4]的一项回顾性调查研究也显示链格孢毒素是诱导食管癌发生的原因之一。

2.4 急、慢性毒性

链格孢毒素具有明显的急性毒性, 尤以 Te A 的急性毒性最为显著。将链格孢毒素与受试动物饲料混合, 喂养 3 周后发现含 Te A 的饲料对雏鸡和大鼠均有致死作用, 含 AOH、AME 和 ALT 的饲料仅有弱毒作用, 可见 Te A 的急性毒性强于 AOH、AME 和 ALT^[34]。同时, 多项研究发现, Te A 对雄性和雌性小鼠具有显著的急性毒性作用, 半数致死量(median lethal dose, LD₅₀)分别为 125~225 和 81~115 mg/kg, 中毒症状包括腹泻、肌肉震颤、惊厥和内脏出血等^[35-36]。交链孢毒素(alt toxins, ATXs)的急性毒性也较强, 将 ATX-I 和 ATX-II 腹腔注射给药于正常小鼠, 二者的 LD₅₀ 均为 150 mg/kg。200 mg/kg 的 ATX-I 和 ATX-II 即可引起小鼠中毒甚至死亡, 毒性特征体现为倦怠、心内膜下及蛛网膜下出血等^[37]。MIAO 等^[38-40]对大鼠分别口服给予 AOH、AME 和 ATX-I 28 d 后, 组织病理学检查显示以上 3 种链格孢毒素均可引起肝脏(炎症细胞浸润、脂肪变性和水肿)、肾脏(肾小球萎缩)、和脾脏(白髓萎缩)损伤。此外, 一些研究报道了 AOH 可通过激活芳香烃受体(AhR)干扰内分泌系统, 且可以与植物雌激素发生协同作用, 这种异体雌激素可能对动物的生殖系统造成损害, 引发不良妊娠结局^[41-43]。

人们日常生活摄入链格孢毒素水平较低, 未表现出急性毒性, 但长期食用被链格孢毒素污染的食物可能产生

不良影响,因此链格孢毒素的急、慢性毒性仍需长期毒理学实验进行深入研究。

3 链格孢毒素的脱毒方法

3.1 物理脱毒法

3.1.1 等离子体处理法

等离子体(plasma)被称为物质的第4态,是中性气体被施加足够高的能量后气体分子发生电离而形成的混合物^[44]。等离子体中存在的离子、电子以及中性粒子可以相互作用,产生ROS和活性氮(reactive nitrogen species, RNS),当真菌毒素暴露时,会将其降解为弱毒物质^[45]。近10年发展起来的非热平衡等离子体技术,环保、成本低,显示出良好的技术优势。低温大气等离子体(cold atmospheric plasma, CAP)可以在接近室温的条件下,稳定产生高浓度高活性的化学粒子^[46]。JANIĆ等^[47]首次采用常压低温大气等离子体技术去除面粉中的链格孢毒素,用高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)检测处理后样品中链格孢毒素的降解率, AOH、AME和TEN的降解率分别高达60.6%、73.8%和54.5%。WANG等^[48]使用介质阻挡放电冷等离子体处理AOH和AME,并考察了毒素状态和等离子体条件对降解效果的影响,在固体介质、碱性条件、有催化剂参加反应时链格孢毒素降解更快。等离子体技术环保、成本低、安全性高,可以高效降解食品中的链格孢毒素并同时杀灭微生物,适用范围广泛,不影响食品本身性质,适用于新鲜农作物、液体食品和肉制品,作为一种创新技术在食品领域有巨大应用潜力。

3.1.2 辐照处理法

辐照技术作为一种有效的食品脱毒方法,近年来得到了广泛应用。辐照技术借助电离辐射或放射性元素产生的 γ 、X射线以及电子加速器产生的高能电子束,将目标原子电离,使处理物发生一系列物理、化学或生物反应^[49]。X射线、 γ 射线和电子束是世界上广泛使用的3种食品辐照技术, γ 辐照是目前使用较普遍的类型。BRAGHINI等^[50]研究了不同吸收剂量的 γ 射线辐照对互隔交链孢菌生长及向日葵种子中AOH和AME产生的影响。与未受辐照的对照组相比,当吸收剂量为7kGy时,真菌死亡率达到98.5%,当吸收剂量为5kGy时,毒素降解率达到99%。 γ 射线能量较大,毒素降解效果好,但食品经辐射后可能发生质构的变化,出现口味不佳、营养流失等问题。

3.1.3 紫外照射

紫外线(ultraviolet, UV)是一种非电离辐射的杀菌消毒方式。大多数真菌毒素的键能与紫外光谱中的波长相对应,当链格孢毒素吸收紫外线范围内的光子时,就会发生光降解,短波紫外线(ultraviolet-C, UV-C)照射降解真菌毒素效果十分理想,现已用于降解黄曲霉毒素、棒曲霉毒素、

赭曲霉毒素A和脱氧雪腐镰刀菌烯醇等多种毒素^[51]。在去除链格孢毒素方面,采用UV-C照射后,AOH、AME、TEN3种毒素的降解率分别为63.92%、16.10%、89.99%,表明紫外线照射可以引起链格孢毒素降解,但效果因毒素种类而异^[52]。JIANG等^[53]采用0.25kJ/m²的UV-C处理可显著抑制创伤接种*A. alternata* FQ 18的成熟番茄感染黑腐病,同时采用UV-C照射番茄腐烂部分可使其中的AOH、AME和TeA含量分别降低44.5%、37.1%和34.5%,且AOH、AME和TeA向健康组织的渗透率也分别降低了79.6%、76.4%和51.4%。紫外照射在杀灭微生物的同时对链格孢毒素具有光降解作用,且价格低廉,使用方便,不影响食品品质,应用前景广阔。

3.1.4 吸附法

吸附法不同于降解方法,它不破坏链格孢毒素的化学结构,而是通过特异性吸附作用与毒素结合,通过沉淀、过滤等方法完成链格孢毒素的脱除,或者将吸附剂混入食品中以阻止链格孢毒素摄入后被肠道吸收,从而减轻链格孢毒素的毒性作用^[54]。环糊精(cyclodextrin, CD)是一种较好的去除链格孢毒素的吸附剂,它外部的亲水部分为自身提供了极好的水溶性,而其非极性内腔可以容纳亲脂化合物^[55],这是环糊精吸附具糖蛋白性质链格孢毒素的结构基础。被CD包覆的真菌毒素水溶性得到极大提升,使用一定浓度的CD溶液处理粮食、油料等,可将毒素从粮食中“萃取”出来^[56]。FLISZÁR-NYÚL等^[57]研究发现,AOH与天然 γ -CD(logK=3.2)和季铵盐(logK=3.4~3.6)分别在生理pH和pH10.0条件下形成稳定的络合物, β -CD珠状聚合物能够以较少的使用量结合大量的AOH,是一种十分理想的吸附剂。CD对人体无害,对环境无污染,将其加入到食品中可以有效减少人体对链格孢毒素的摄入。

3.1.5 食品加工过程中的链格孢毒素降解

链格孢毒素也会在一些食品的加工过程中发生降解。挤压膨化过程中粮食受到高温、高压和高剪切力作用,发生多种化学反应,包括蛋白质变性、淀粉糊化和真菌毒素降解^[58]。小麦在挤压膨化处理过程中,当含水量为24g/100g,进料速度为25kg/h,螺杆转速为390r/min时,TeA、AOH和AME的降解率分别为65.6%、87.9%和94.5%^[59]。SIEGEL等^[60]发现面包在230°C下烘焙1h,AME、AOH和ALT分别降解了50%、70%和90%。对于链格孢毒素污染较严重的食品,建议在优化加工条件时将链格孢毒素降解率作为评价指标之一。

3.2 化学脱毒法

3.2.1 传统化学方法

传统的化学脱毒法是通过使用酸、碱、盐、氧化剂和还原剂等化学物质与真菌毒素发生反应,产生新的弱毒或无毒物质,进而实现链格孢毒素的脱除。SIEGEL等^[61]研究发现TeA在pH为3.5,温度为25和40°C时容易发生降

解, 半衰期分别为(73.8±0.4) d 和(14.0±0.1) d, 水解产生的 iso-DTA (Te A 去乙酰基后差向异构化的混合物)是最终降解的稳定产物。但 iso-DTA 是否对人或动物具有毒性作用目前尚未见报道。AOH、AME 和 ALT 在酸性 pH 下比较稳定, 但在碱性环境下易发生内酯环水解和脱羧反应^[61]。李祖梁等^[52]发现不同短波紫外线照射距离对 3 种链格孢毒素的降解无影响, 推测可能由于辐照将氧气电离产生臭氧, 而臭氧对链格孢毒素有一定的降解作用。目前的研究表明链格孢毒素可以在酸性、碱性条件和氧化剂存在下发生降解。

3.2.2 天然植物成分处理法

使用天然植物成分处理被链格孢菌污染的食物, 可以通过调控毒素合成基因表达等方式抑制链格孢菌产毒, 减轻链格孢毒素在食物中的积累作用。当 *A. alternata* FQ 18 液体发酵时加入 1 mmol 香豆酸、阿魏酸和焦儿茶酸, 阿魏酸使 AOH 和 AME 的生成分别减少了 59.4%和 79.1%, 焦儿茶酸抑制这两种毒素合成的效果略差, 香豆酸对 Te A 合成的抑制率可高达 60.2%^[53]。

JIANG 等^[62]探究了厚朴酚作为一种化学降解剂来减少小麦中链格孢毒素的可能性, 厚朴酚对链格孢菌丝生长有抑制作用, 呈剂量依赖性。25 μmol/L 厚朴酚处理使互隔交链孢霉和细交链孢霉产 Te A 量分别降低了 85.19%和 82.55%; 在厚朴酚胁迫下, 与 Te A 合成相关的 *TASI* 基因相对表达水平下调, 直接导致 Te A 生物合成减少, 使用 50 μmol/L 的厚朴酚处理互隔交链孢菌后, Te A 产量下降了 96.28%, 细极链格孢菌的 Te A 合成几乎被完全抑制, 可见厚朴酚具有抑制链格孢菌丝体生长和真菌毒素生物合成的双重作用, 在减少食品中链格孢毒素的积累方面有较好的应用前景。

使用肉桂醛处理互隔交链孢霉菌, 互隔交链孢霉菌的生长未受到抑制, 但是与链格孢毒素生物合成相关的 4 个聚酮合成酶基因(*pksI*、*pksJ*、*pksF* 和 *pksA*)的表达水平显著降低, 互隔交链孢霉的 ROS 水平较低, 该结果表明肉桂醛可通过下调毒素生物合成基因表达和 ROS 信号转导途径来抑制互隔交链孢霉生成 AOH、AME 和 Te A^[63]。

WANG 等^[64]研究了柠檬醛对链格孢菌生长及产毒的影响。柠檬醛的最低抑菌浓度为 222.5 μg/mL, 对菌丝生长有完全抑制作用, 1/2 此浓度的柠檬醛可减少 97%以上的链格孢毒素产生, 研究者还发现在柠檬醛的胁迫下, 链格孢毒素生物合成基因 *pksI* 和 *omtI* 下调, 使得毒素的生物合成受到抑制。

REDDY 等^[65]对链格孢菌侵染的番茄喷洒 10 g/L 的壳聚糖溶液, 发现链格孢菌的繁殖受到抑制, AOH 和 AME 的含量显著降低, 番茄组织产生植物保卫素的能力提高, 可见壳聚糖也具有减少毒素生成的作用。天然植物成分处理被污染的食品, 在抑制真菌繁殖的同时抑制毒素生物合成基因的表达, 绿色环保, 安全性高, 是链格孢毒素降解的

重点研究方向。

3.3 微生物脱毒法

微生物脱毒法根据原理不同可分为 3 种, 微生物拮抗法利用微生物与链格孢菌间的拮抗作用, 抑制毒素产生; 微生物分解法以微生物直接破坏毒性基团实现毒素降解; 微生物吸附法可通过微生物细胞与毒素的吸附作用进行毒素脱除。与物理、化学方法相比, 微生物脱毒法具有特异性强、高效和无降解产物二次污染等优势, 因此是未来真菌毒素降解研究的重要方向之一, 而且有越来越多的适用于其他真菌毒素的微生物脱毒方法正在被学者尝试用来降解链格孢毒素。

3.3.1 微生物拮抗法

微生物拮抗法是利用微生物种间的拮抗作用, 影响链格孢菌的生命活动, 抑制链格孢菌产毒和生长。链格孢毒素是酿酒葡萄的主要污染物, PRENDES 等^[66]研究了 14 种酿酒葡萄拮抗酵母对链格孢菌生长和产毒的影响, 成功筛选出菌株 *Metschnikowia* sp., 其可以有效地抑制链格孢菌生长并减少 AOH、AME 和 Te A 的产生。

3.3.2 微生物分解法

生防菌可将链格孢毒素分解, 并作为营养物质吸收、代谢。朱慧敏^[67]通过对贮藏过程中的葡萄果实、果园土壤、泡菜中的微生物富集培养, 以 AOH 为唯一碳源进行筛选, 得到 1 株能够降解 AOH 的菌株, 命名为酿酒酵母 A20, 初步验证其对链格孢菌无拮抗活性, AOH 降解效率达到 50%以上。

MAHESWARI 等^[68]发现枯草芽孢杆菌 BsW1 可将链格孢毒素降解, 该降解作用可能与枯草芽孢杆菌 BsW1 分泌的 68 kDa 胞外蛋白有关。多项研究表明, 一些植物内生细菌具有降解毒素的能力^[69-70]。例如棉花叶片中的内生细菌解淀粉芽孢杆菌 EBs2 对链格孢毒素具有降解作用, 使棉花枯萎叶片的病情减轻^[71]。

3.3.3 微生物吸附法

现已发现乳酸菌具有吸附去除多种真菌毒素的作用, 其细胞壁上的多糖和蛋白质被认为是吸附真菌毒素的关键物质^[72-73]。葛娜等^[74]利用灭活乳酸菌菌体细胞作为吸附剂去除了橘汁中的 Te A, 清除率可高达 86.98%。WANG 等^[75]将 40 g 灭活酵母粉加入到含 100 mg 链格孢毒素的 1 L 水溶液中, 酵母粉可以完全吸附溶液中的 AOH 和 AME。可食用的酵母菌与乳酸菌安全性高, 对链格孢毒素吸附作用强, 是缓解食品链格孢毒素污染的理想菌株。

4 结 语

链格孢菌在宿主植物体内可产生数十种链格孢毒素, 这些毒素不仅能降低植物的抗病性, 对农业生态系统造成危害, 导致作物减产和品质下降, 还会污染粮食, 对人类有急、慢性毒性、细胞毒性、胚胎毒性、致突变性和致癌性等, 而且人们食用被链格孢毒素污染的食物时往往同时

摄入多种毒素,链格孢毒素之间、链格孢毒素与其他真菌毒素之间可产生协同作用和加性作用,对人类产生更大威胁。链格孢毒素的污染范围极广,涉及多种粮食、水果、蔬菜和果干等众多农作物和食物加工品。目前使用的链格孢毒素脱除方法主要包括物理法、化学法和生物法。物理法通过等离子体、电离辐射处理链格孢毒素,效率高、成本低;新兴的化学方法主要通过天然植物成分抑制真菌产毒,相比传统方法安全无污染;生物法可通过降解、吸附毒素和抑制真菌产毒等方式去除链格孢毒素,优势明显。虽然对链格孢毒素的研究取得了一些进展,但仍需从以下几个方面进行深入的探索:

1)链格孢毒素在农作物中检出率较高,对人类健康的危害不容忽视,应重视对粮食作物中链格孢毒素含量的检测,以准确把控链格孢毒素在谷物中的污染水平。链格孢毒素尤其在小麦、油籽、番茄酱和果干等食品中含量较高,可能对消费者的健康产生影响,对于番茄酱等食品建议密切监控链格孢毒素含量在整个加工过程中的动态变化,加强食品原材料管理,从采收与仓储阶段减少链格孢菌污染,同步优化生产工艺。目前欧美发达国家还未出台链格孢毒素的限量标准,多种易染链格孢菌食品并未在生产后进行毒素含量检测,这可能会对消费者的健康产生不良影响,应尽快制定严格的限量标准,保障食品安全。

2)链格孢毒素脱毒研究尚处于起步阶段,一些降解方法存在着效率不高、适用范围窄、残留化学物质或降解产物等缺点。物理脱毒法中的低温等离子体处理法高效环保、成本低廉,对食品组分影响小,可广泛应用。目前关于等离子体降解链格孢毒素的研究均在实验室条件下进行,处理样品量小,未能明确工业化生产后是否仍能保证食品品质,在日后的研究中可以继续探索等离子体技术工厂化对食品组分的含量、活性、结构和物理性质等方面影响;传统化学方法存在化学残留、降解产物性质不明和适用范围窄等缺点,天然植物成分处理法直接抑制毒素生物合成基因的表达,相比传统化学方法对人类、环境无不良影响,安全性高,但减毒效果较弱,起效较慢,应该把研究的重点放在寻找更加高效、廉价的天然植物成分上;微生物脱毒法利用微生物种间天然的拮抗作用来减少链格孢毒素的污染,呈现出多样化的趋势,一些生物防菌可以抑制链格孢菌产毒和生长,酵母菌和乳酸菌细胞壁上的蛋白可以特异性结合链格孢毒素,还有少数微生物可以将链格孢毒素作为营养物质吸收、代谢。微生物脱毒法降解速度快,针对性强,但目前相关的研究较少,处于起步阶段,需要进一步筛查有减毒作用的生防菌。上述3种方法为当下真菌毒素脱毒研究的主要方向,各有优劣,或许可以通过毒素脱除技术串联的方法弥补各自的不足,具有进一步深入探讨、应用的价值。

3)生物酶法是从可降解真菌毒素的微生物中发掘其关键基因,利用基因技术构建生物酶的高效表达工程菌,

发酵后提取生物酶,加入到食品中将真菌毒素降解。酶法降解真菌毒素优势巨大,相比传统方法廉价、环保、高效,采用蛋白质工程可对目标酶加以改造,增加酶活性及pH、温度稳定性,还可利用基因工程投入工业化生产。目前已经开发出了多种适合玉米赤霉烯酮和黄曲霉毒素的降解酶,如Zhd101降解酶或Oxa氧化酶。但目前尚未见酶法降解链格孢毒素的报道,随着生物信息学的发展这或许是脱除链格孢毒素的未来方向之一,继续研究与寻找降解链格孢毒素的新方法仍是一项重要的任务。

参考文献

- [1] THOMMA BP. *Alternaria* spp.: From general saprophyte to specific parasite [J]. Mol Plant Pathol, 2003, 4: 225–236.
- [2] HOWLETT BJ. Secondary metabolite toxins and nutrition of plant pathogenic fungi. Curr Opin [J]. Plant Biol, 2006, 9: 371–375.
- [3] TSUGE T, HARIMOTO Y, AKIMITSU K, et al. Host-selective toxins produced by the plant pathogenic fungus *Alternaria alternata* [J]. FEMS Microbiol Rev, 2013, 37: 44–66.
- [4] 杨胜利, 董子明, 裴留成, 等. 河南林县居民粮食中互隔交链孢霉及其毒素污染和人群暴露状况研究[J]. 癌变, 畸变, 突变, 2007, 1: 44–46. YANG SL, DONG ZM, PEI LC, et al. Study on contamination of *Alternaria alternata* in grains and exposure to its toxins in residents from Henan Linxian [J]. Carcinogenesis, 2007, 1: 44–46.
- [5] PANIGRAHI S. *Alternaria* toxins. In: Handbook of plant and fungal toxicants [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [6] DISALOV JN, BODROŽA-SOLAROV MI, KRULJ JA, et al. Impact of *Alternaria* spp. and *Alternaria* toxins on quality of spelt wheat [J]. J Agric Sci, 2018, 10(2): 89–97.
- [7] BABIČ J, TAVČAR-KALČER G, CELAR FA, et al. Occurrence of *Alternaria* and other toxins in cereal grains intended for animal feeding collected in Slovenia: A three-year study [J]. Toxins (Basel), 2021, 13(5): 304.
- [8] SANZANI SM, GALLONE T, GARGANESE F, et al. Contamination of fresh and dried tomato by *Alternaria* toxins in southern Italy [J]. Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2019, 36(5): 789–799.
- [9] 张洁, 王谢, 马青青, 等. 谷物中4种交链孢毒素污染情况及检验方法探讨[J]. 江苏预防医学, 2021, 32(2): 143–144, 152. ZHANG J, WANG X, MA QQ, et al. Contamination status and discussion of detection methods of 4 kinds of *Alternaria* toxins in cereals [J]. Jiangsu J Prev Med, 2021, 32(2): 143–144, 152.
- [10] ZHAO XS, LIU D, YANG XQ, et al. Detection of seven *Alternaria* toxins in edible and medicinal herbs using ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Chem X, 2021, 12: 11–13.
- [11] JANIĆ HE, KOS J, PEZO L, et al. Presence of *Alternaria* toxins in maize from republic of Serbia during 2016–2017 [J]. J Food Process Preserv, 2021, 46(10): e15827.
- [12] BERTUZZI T, RASTELLI S, PIETRI A, et al. *Alternaria* toxins in tomato products in Northern Italy in the period 2017–2019 [J]. Food Addit Contam Part B Surveill, 2021, 14(3): 170–176.
- [13] LÓPEZ P, VENEMA D, RIJK T, et al. Occurrence of *Alternaria* toxins in food products in the Netherlands [J]. Food Control, 2016, 60: 196–204.
- [14] HICKERT S, HERMES L, MARQUES LMM, et al. *Alternaria* toxins in South African sunflower seeds: Cooperative study [J]. Mycotoxin Res,

- 2017, 33(4): 309–321.
- [15] ZHAO K, SHAO B, YANG D, *et al.* Natural occurrence of four *Alternaria* mycotoxins in tomato and citrus-based foods in China [J]. *Agric Food Chem.* 2015, 63(1): 343–348.
- [16] 代永霞, 李萌萌, 刘清涛. 赤峰市售小麦粉交链孢霉毒素污染研究[J]. *现代农业科技*, 2022, 2: 197–199.
- DAI YX, LI MM, LIU QT. Research on *Alternaria* mycotoxin contamination of commercial wheat flour in Chifeng City [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2022, 2: 197–199.
- [17] 何迎迎, 张淑琴, 姚卫蓉. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定粮食中4种交链孢霉毒素[J]. *中国粮油学报*, 2022, 9: 1–14.
- HE YY, ZHANG SQ, YAO WR. Simultaneous determination of four individual *Alternaria* toxins in cereal grains by ultra-high performance liquid [J]. *J Chin Cere Oil Ass*, 2022, 9: 1–14.
- [18] 苏爽, 张二鹏, 韩月哲, 等. 玉米中4种交链孢霉毒素的测定方法研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3): 72–77.
- SU S, ZHANG ERP, HAN YZ, *et al.* Study on the determination methods of four *Alternaria* mycotoxins in maize [J]. *J Hehan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2020, 41(3): 72–77.
- [19] XING L, ZOU L, LUO R, *et al.* Determination of five *Alternaria* toxins in wolfberry using modified QuEChERS and ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2020, 311: 125975–125999.
- [20] WEI D, WANG Y, JIANG D, *et al.* Survey of *Alternaria* toxins and other mycotoxins in dried fruits in China [J]. *Toxins (Basel)*, 2017, 9(7): 200–212.
- [21] EFSA on contaminants in the food chain (CONTAM). Scientific opinion on the risks for animal and public health related to the presence of *Alternaria* toxins in feed and food [J]. *EFSA J*, 2011, 9(10): 2407–2504.
- [22] VEJDOVSKY K, WARTH B, SULYOK M, *et al.* Non-synergistic cytotoxic effects of *Fusarium* and *Alternaria* toxin combinations in Caco-2 cells [J]. *Toxicol Lett*, 2016, 241: 1–8.
- [23] WANG H, GUO Y, LUO Z, *et al.* Recent advances in *Alternaria* phytotoxins: A review of their occurrence, structure, bioactivity, and biosynthesis [J]. *J Fungi (Basel)*, 2022, 8(2): 168–190.
- [24] HOLLANDER D, HOLVOET C, DEMEYERE K, *et al.* Cytotoxic effects of alternariol, alternariol monomethyl-ether, and tenuazonic acid and their relevant combined mixtures on human enterocytes and hepatocytes [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 849243–849255.
- [25] PINTO VE, PATRIARCA A. *Alternaria* species and their associated mycotoxins [J]. *Methods Mol Biol*, 2017, 1542: 13–32.
- [26] GRIFFIN GF, CHU FS. Toxicity of the *Alternaria* metabolites alternariol, alternariol methyl ether, altenuene, and tenuazonic acid in the chicken embryo assay [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1983, 46(6): 1420–1422.
- [27] HUANG CH, WANG FT, CHAN WH. Alternariol exerts embryotoxic and immunotoxic effects on mouse blastocysts through ROS-mediated apoptotic processes [J]. *Toxicol Res (Camb)*, 2021, 10(4): 719–732.
- [28] PFEIFFER E, ESCHBACH S, METZLER M. *Alternaria* toxins: DNA strand-breaking activity in mammalian cells *in vitro* [J]. *Mycotoxin Res*, 2007, 23(3): 152–157.
- [29] FLECK SC, BURKHARDT B, PFEIFFER E, *et al.* *Alternaria* toxins: Alternariol II is a much stronger mutagen and DNA strand breaking mycotoxin than alternariol and its methyl ether in cultured mammalian cells [J]. *Toxicol Lett*, 2012, 214(1): 27–32.
- [30] AICHINGER G, PUNTSCHER H, BEISL J, *et al.* Delphinidin protects colon carcinoma cells against the genotoxic effects of the mycotoxin alternariol II [J]. *Toxicol Lett*, 2018, 284: 136–142.
- [31] XING Y, NING Y, RU LQ, *et al.* Expressions of PCNA, p53, p21(WAF-1) and cell proliferation in fetal esophageal epithelia: Comparative study with adult esophageal lesions from subjects at high-incidence area for esophageal cancer in Henan, North China [J]. *World J Gastroenterol*, 2003, 9(7): 1601–1603.
- [32] BRUGGER EM, WAGNER J, SCHUMACHER DM, *et al.* Mutagenicity of the mycotoxin alternariol in cultured mammalian cells [J]. *Toxicol Lett*, 2006, 164(3): 221–230.
- [33] TIESSEN C, ELLMER D, MIKULA H, *et al.* Impact of phase I metabolism on uptake, oxidative stress and genotoxicity of the emerging mycotoxin alternariol and its monomethyl ether in esophageal cells [J]. *Arch Toxicol*, 2017, 91(3): 1213–1226.
- [34] SAUER DB, SEITZ LM, BURROUGHS R, *et al.* Toxicity of *Alternaria* metabolites found in weathered sorghum grain at harvest [J]. *Agric Food Chem*, 1978, 26(6): 1380–1393.
- [35] FRAEYMAN S, CROUBELS S, DEVREESE M, *et al.* Emerging *Fusarium* and *Alternaria* mycotoxins: Occurrence, toxicity and toxicokinetics [J]. *Toxins (Basel)*, 2017, 9(7): 228–258.
- [36] PUNTSCHER H, HANKELE S, TILLMANN K, *et al.* First insights into *Alternaria* multi-toxin *in vivo* metabolism [J]. *Toxicol Lett*, 2019, 301: 168–178.
- [37] BASHYAL BP, WELLENSIEK BP, RAMAKRISHNAN R. AAL altertoxins with potent anti-HIV activity from *Alternaria tenuissima* QUE1Se, a fungal endophyte of *QUERCUS emoryi* [J]. *Bioorg Med Chem*, 2014, 22: 6112–6116.
- [38] MIAO Y, WANG D, CHEN Y, *et al.* General toxicity and genotoxicity of alternariol: A novel 28-day multi-endpoint assessment in male Sprague-Dawley rats [J]. *Mycotoxin Res*, 2022, 1: 1–11.
- [39] XIA Z, CHEN Y, TANG X, *et al.* General toxicity and genotoxicity of altertoxin I: A novel 28-day multiendpoint assessment in male Sprague-Dawley rats [J]. *J Appl Toxicol*, 2022, 42(8): 1310–1322.
- [40] TANG X, CHEN Y, XIA Z, *et al.* Alternariol monomethyl ether toxicity and genotoxicity in male Sprague-Dawley rats: 28-Day *in vivo* multi-endpoint assessment [J]. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, 2022, 873: 503435–503449.
- [41] BALÁZS A, FAISAL Z, CSEPREGI R, *et al.* *In vitro* evaluation of the individual and combined cytotoxic and estrogenic effects of zearalenone, its reduced metabolites, alternariol and genistein [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(12): 6281–6296.
- [42] FRIZZELL C, NDOSSI D, KALAYOU S. An *in vitro* investigation of endocrine disrupting effects of the mycotoxin alternariol [J]. *Appl Pharmacol*, 2013, 271: 64–71.
- [43] AICHINGER G, KRÜGER F, PUNTSCHER H, *et al.* Naturally occurring mixtures of *Alternaria* toxins: Anti-estrogenic and genotoxic effects *in vitro* [J]. *Arch Toxicol*, 2019, 93(10): 3021–3031.
- [44] LIEBERMAN MA, LICHTENBERG AJ. Principles of plasma discharges and materials processing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [45] HOJNIK N, CVELBAR U, TAVČAR-KALCHER G, *et al.* Mycotoxin decontamination of food: Cold atmospheric pressure plasma versus “Classic” decontamination [J]. *Toxins (Basel)*, 2017, 9(5): 151–170.
- [46] WELTMHANN KD, VON WT. Plasma medicine-current state of research and medical application [J]. *Control Fusion*, 2017, 59: 14–31.
- [47] JANIĆ HE, VUKIĆ M, PEZO L, *et al.* Effect of atmospheric cold plasma treatments on reduction of *Alternaria* toxins content in wheat flour [J]. *Toxins (Basel)*, 2019, 11(12): 704–721.
- [48] WANG X, WANG S, YAN Y, *et al.* The degradation of *Alternaria* mycotoxins by dielectric barrier discharge cold plasma [J]. *Food Control*, 2020, 117: 107333–107340.
- [49] PI X, YANG Y, SUN Y, *et al.* Food irradiation: A promising technology to

- produce hypoallergenic food with high quality [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 62(24): 6698–6713.
- [50] BRAGHINI R, SUCUPIRA M, ROCHA LO, *et al.* Effects of gamma radiation on the growth of *Alternaria alternata* and on the production of alternariol and alternariol monomethyl ether in sunflower seeds [J]. *Food Microbiol*, 2009, 26(8): 927–931.
- [51] ZHU Y, KOUTCHMA T. UV light technology for mycotoxins reduction in foods and beverages [J]. *Ref Mod Food Sci*, 2021. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22686-3
- [52] 李祖梁, 姜楠, 王刘庆, 等. 短波紫外线处理对3种链格孢毒素的降解作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(7): 2033–2037.
LI ZL, JIANG N, WANG LQ, *et al.* Study on degradation of 3 kinds of *Alternaria* toxins by short-wave ultraviolet treatment [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(7): 2033–2037.
- [53] JIANG N, LI Z, WANG L, *et al.* Effects of ultraviolet-c treatment on growth and mycotoxin production by *Alternaria* strains isolated from tomato fruits [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 311: 108333–108362.
- [54] 施晶晶, 何贝贝, 刘宽博, 等. 真菌毒素吸附剂开发及吸附效果评价方法研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(3): 177–185.
SHI JJ, HE BB, LIU KB, *et al.* Research progress on mycotoxin adsorbent and evaluation methods of adsorption effect [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2022, 30(3): 177–185.
- [55] VALLE D, MARTIN EM. Cyclodextrins and their uses: A review [J]. *Process Biochem*, 2004, 39: 1033–1046.
- [56] 黄和, 高辉辉, 汪振炯, 等. 金属有机骨架材料用作脱除剂脱除食品原料中真菌毒素的用途: 中国, CN113243479A[P]. 2021-05-18.
HUANG H, GAO HH, WANG ZJ, *et al.* The use of metal organic framework as a remover to remove mycotoxins from food materials: China, CN113243479A [P]. 2021-05-18.
- [57] FLISZÁR-NYÚL E, LEMLI B, KUNSÁGI-MÁTÉ S, *et al.* Interactions of mycotoxin alternariol with cyclodextrins and its removal from aqueous solution by beta-cyclodextrin bead polymer [J]. *Biomol*, 2019, 9(9): 428–436.
- [58] WU Q, LOHREY L, CRAMER B, *et al.* Impact of physicochemical parameters on the decomposition of deoxynivalenol during extrusion cooking of wheat grits [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(23): 12480–12485.
- [59] JANIĆ HE, ČOLOVIĆ R, PEZO L, *et al.* Possibility of *Alternaria* toxins reduction by extrusion processing of whole wheat flour [J]. *Food Chem*, 2016, 213: 784–790.
- [60] SIEGEL D, FEIST M, PROSKE M, *et al.* Degradation of the *Alternaria* mycotoxins alternariol, alternariol monomethyl ether, and altenuene upon bread baking [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(17): 9622–9630.
- [61] SIEGEL D, MERKEL S, BREMSER W, *et al.* Degradation kinetics of the *Alternaria* mycotoxin tenuazonic acid in aqueous solutions [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2010, 397(2): 453–462.
- [62] JIANG D, WEI D, LI H, *et al.* Natural occurrence of *Alternaria* mycotoxins in wheat and potential of reducing associated risks using magnolol [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101(7): 3071–3077.
- [63] LIU M, XU L, LIU W, *et al.* Cinnamaldehyde regulates the synthesis of *Alternaria alternata* non-host selective toxins by influencing *PKS* gene expression and oxidoreductase activity [J]. *Ind Crops Prod*, 2020, 145: 112074–112082.
- [64] WANG L, JIANG N, WANG D, *et al.* Effects of essential oil citral on the growth, mycotoxin biosynthesis and transcriptomic profile of *Alternaria alternata* [J]. *Toxins (Basel)*, 2019, 11(10): 553–571.
- [65] REDDY MVB, ANGERS P, CASTAIGNE F, *et al.* Chitosan effects on blackmold rot and pathogenic factors produced by *Alternaria alternata* in postharvest tomatoes [J]. *J Am Soc Hortic Sci*, 2000, 125(6): 742–747.
- [66] PRENDES LP, MERÍN MG, ZACHETTI VGL, *et al.* Impact of antagonistic yeasts from wine grapes on growth and mycotoxin production by *Alternaria alternata* [J]. *Appl Microbiol*, 2021, 131(2): 833–843.
- [67] 朱慧敏. 酿酒酵母 *Saccharomyces cerevisiae* A20 降解链格孢毒素的初步研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
ZHU HM. Preliminary study on degradation of alternariol by *Saccharomyces cerevisiae* A20 [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [68] MAHESWARI CU, SANKARALINGAM A. Role of toxin produced by *Alternaria alternata* in leaf blight of watermelon and its degradation by biocontrol agents [J]. *Arch Phytopathol Plant Protect*, 2010, 43(1): 41–50.
- [69] MÜLLER T, LENTZSCH P, BEHRENDT U, *et al.* *Pseudomonas simiae* effects on the mycotoxin formation by fusaria and *Alternaria in vitro* and in a wheat field [J]. *Mycotoxin Res*, 2020, 36: 147–158.
- [70] GERMAINE KJ, LIU X, CABELLOS GG, *et al.* Bacterial endophyte-enhanced phytoremediation of the organochlorine herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid [J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2006, 57: 302–310.
- [71] RAJESHA G, NAKKEERAN S, HUBBALLI M, *et al.* Endophytic bacterial biocontrol agents degrade a putative toxin of *Alternaria macrospora* responsible for the severity of cotton leaf blight [J]. *J Plant Pathol*, 2021, 103(4): 1283–1293.
- [72] HASKARD C, BINNION C, AHOKAS J. Factors affecting the sequestration of aflatoxin by *Lactobacillus rhamnosus* strain GG [J]. *Chem-Biol Interact*, 2000, 128: 39–49.
- [73] EL-NEZAMI H, POLYCHRONAKI N, LEE YK, *et al.* Chemical moieties and interactions involved in the binding of zearalenone to the surface of *Lactobacillus rhamnosus* strains GG [J]. *Agric Food Chem*, 2004, 52: 4577–4581.
- [74] 葛娜, 彭帮柱, 徐晓云, 等. 失活乳酸菌去除柑橘汁中链格孢毒素 Te A 工艺优化[J]. *食品科学*, 2017, 38(14): 256–262.
GE N, PENG BZ, XU XY, *et al.* Optimization of adsorption removal of *Alternaria* mycotoxin Te A from citrus juice by inactive lactic acid bacteria [J]. *Food Sci*, 2017, 38(14): 256–262.
- [75] WANG X, HAN Y, ZHANG L, *et al.* Removal of *Alternaria* mycotoxins from aqueous solution by inactivated yeast powder [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(14): 5182–5190.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



杨野, 硕士, 主要研究方向为天然药物质量评价及开发研究。
E-mail: 1614435046@qq.com



都晓伟, 教授, 主要研究方向为天然药物质量评价及开发研究。
E-mail: xiaoweidu@hotmail.com