

果蔬制品中链格孢霉毒素检测与控制研究进展

王 琦, 蔡 瑞, 王周利, 岳田利, 崔 璐*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 农业部农产品质量安全风险评估实验室,
国家杨凌农业综合试验工程技术研究中心, 杨凌 712000)

摘 要: 链格孢霉属(*Alternaria species*)是链格孢霉毒素这种次级代谢产物的已知生产者。链格孢霉毒素具有明显的毒理学潜力, 食用被其污染的果蔬和粮食产品会对消费者的健康造成威胁。果蔬营养丰富、含水量高, 更易于被链格孢霉毒素感染, 因此建立高效、简单、快速的检测技术和实现该毒素的高效控制一直是当今果蔬领域研究的热点。本文总结和分析了链格孢霉毒素常见的检测技术和控制方法, 以为链格孢霉毒素的快速检测和果蔬类食品安全控制与风险评估等提供参考。

关键词: 链格孢霉毒素; 检测方法; 控制方法; 理化性质; 毒性

Advances in detection and control of *Alternaria* toxin in fruits and vegetables

WANG Qi, CAI Rui, WANG Zhou-Li, YUE Tian-Li, CUI Lu*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment of Agricultural products of the Ministry of Agriculture, National Yangling Agricultural Comprehensive Experimental Engineering Technology Research Center, Yangling 712000, China)

ABSTRACT: *Alternaria species* are known as producers of secondary metabolites of *Alternaria* toxin. *Alternaria* toxin has obvious toxicological potential, and consumption of contaminated fruits and vegetables and food products can pose a threat to consumer health. Fruits and vegetables are rich in nutrients and high in water content, making them more susceptible to infection by *Alternaria* toxin. Therefore, the establishment of efficient, simple and rapid detection technology and the realization of efficient control of the toxin have been hot topics in the field of fruit and vegetables. This paper summarized and analyzed the common detection techniques and control methods of *Alternaria* mycotoxin in order to provide reference for rapid detection of *Alternaria* mycotoxin and food safety control and risk assessment.

KEY WORDS: *Alternaria*; detection method; control method; physical and chemical properties; toxicity

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ3044)、陕西省重点研发计划项目(2018SF-358)、西北农林科技大学基本科研业务费专项(2452016085)

Fund: Supported by the Basic Research Program of Natural Science of Shaanxi Province (2018JQ3044), Key Research and Development Program of Shaanxi (2018SF-358), and Fundamental Research Business Expenses of Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology (2452016085)

*通讯作者: 崔璐, 博士, 主要研究方向为农产品加工与安全控制。E-mail: cuiuctl@nwsuaf.edu.cn

*Corresponding author: CUI Lu, Ph.D, College of Food Science and Engineering, Northwest University of Agriculture and Forestry, Yangling 712000, China. E-mail: cuiuctl@nwsuaf.edu.cn

1 引言

大多数果蔬营养丰富、含水量高, 易于被链格孢霉毒素感染, 会对动物和人体健康造成威胁。有学者对来自位于意大利南部阿普利亚地区的市场和包装店的新鲜和干燥番茄样品进行了链格孢霉毒素分析, 证明所有样品均受到了细交链孢菌酮酸(tenuzonic acid, TeA)的污染, 尤其是干番茄的污染范围为 425~81592 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 而新鲜番茄的污染范围为 11~4560 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[1]。Puntscher 等^[2]更是发现奥地利零售市场的番茄酱中含有浓度高达 20、4、322 和 0.6 ng/g 的链格孢酚(alternariol, AOH)、链格孢酚甲基乙醚(alternariolmethyl ether, AME)、细交链孢菌酮酸(tenuzonic acid, TeA)和腾毒素(tentoxin, Ten)。因此, 寻找高效、安全、操作方便的检测技术以及防控技术以分析和降低果蔬及其制品中的链格孢霉毒素含量, 对于人们的饮食健康, 具有十分重要的意义。本文综述了链格孢霉毒素常见的检测技术及控制方法, 旨在为新鲜果蔬及其产品的安全加工和流通提供参考。

2 链格孢霉毒素的理化性质及毒性

2.1 理化性质

链格孢霉能在低温潮湿的环境下生长繁殖, 生长所需的水分活度在 0.84 以上(湿度 20%~30%), 因此会导致冷藏果蔬的腐败。链格孢霉毒素的母核结构多样, 其中 TeA 属于四氨基酸衍生物类; AOH、AME 为二苯并吡喃衍生物; Ten 为环形四肽结构^[3]。目前关注和研究较多的链格孢霉毒素的理化性质见表 1, 从中可以看出由于 AOH 与 AME 一致的母核结构, 使得二者在紫外灯下发蓝色荧光; TeA 的相对分子量最小, 形态呈油状; Ten 相对分子量最大, 熔点较 AOH 及 AME 低。

2.2 毒性

AOH 具有致突变性、细胞毒性、胚胎毒性、协同作用、遗传毒性、致癌性等, 并且 AOH 产生细胞毒性的机制是通过阻断细胞周期, 减少细胞增殖和增加坏死细胞^[4,5]。AME 则具有细胞毒性、致畸性、诱变性等^[6,7]。AOH 和 AME 都能够增加 DNA 断裂的速率, 且它们之间存在协同作用。TeA 的毒性

是链格孢霉毒素中最高的, 包括急性毒性、亚急性毒性、致癌性、致死性、细胞毒性等, 常会使哺乳类动物头晕、呕吐以及运动功能障碍等, 最终死亡^[8]。另外, 我国食管癌高发率可能与进食受链格孢霉毒素污染的食物密切相关^[9]。

3 检测技术研究进展

3.1 色谱检测法

3.1.1 薄层色谱法

薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)是通过观察毒素在紫外光线照射下产生蓝紫色荧光的强弱和斑点的大小, 判定毒素的种类和含量, 是用于测定食品中真菌毒素的较早的检测方法^[10]。Hasan^[11]采用薄层色谱分析法检测西红柿中链格孢霉毒素, 该法 TeA 的最低检测限为 0.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$, AOH、AME 的最低检测限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 为西红柿中链格孢霉毒素的检测提供了参考价值。

薄层色谱法在链格孢霉毒素检测上具有易于识别目标化合物、分析成本低、设备简单的特点, 常用在普通实验室检测真菌毒素。同时因薄层色谱法存在检出限高、展开时间长以及随机性大的缺点, 在实际使用中受到一定的限制。但随着科学技术的不断发展, 其可与现代化的前处理技术(如免疫亲和层析净化技术)结合使用, 在检测果蔬制品中链格孢霉毒素方面有良好的前景^[12]。

3.1.2 气相色谱法及气相色谱-质谱法

气相色谱法(gas chromatography, GC)对化合物进行分离分析是根据物质的沸点/极性。可与火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)或者电子捕获检测器(electronic capture detector, ECD)联用, 常用于分析易挥发、热稳定、有弱荧光或弱吸收, 或分子中不含发色基团和荧光基团的真菌毒素。Harvan 等^[13]将乙酰基三甲硅烷、三甲硅烷和吡啶的混合物(6:2:9, V:V:V)作为衍生剂, 随后利用气相色谱火焰电离检测器对 TeA 进行检测, 最低检测限为 0.1 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。Scott 等^[14]分别用三甲硅烷(trimethylsilane, TMS)和七氟丁酸乙酯(ethyl heptafluorobutyrate, HFB)对链格孢霉毒素衍生化, 再利用气相色谱-质谱法(gas chromatography mass spectrometry, GC-MS)测定果汁中的 AOH、AME、TeA 等链格孢霉毒素。发现经 TMS 衍生

表 1 链格孢霉毒素的理化性质
Table 1 Physicochemical properties of *Alternaria* toxin

毒素	分子量	分子式	性质
AOH	258.23	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_5$	无色针状晶体, 熔点 350 $^{\circ}\text{C}$, 沸点 586.89 $^{\circ}\text{C}$, 密度 1.56 g/cm^3 , 与氯化铁反应后呈紫色, 紫外灯下发蓝色荧光 ^[3]
AME	272.26	$\text{C}_{15}\text{H}_{12}\text{O}_5$	无色针状晶体, 熔点为 267 $^{\circ}\text{C}$, 紫外灯下发蓝色荧光 ^[4]
TeA	197	$\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{O}_3\text{N}$	褐色油状物质, 微溶于水, 易溶于多种有机溶剂, 螯合能力强 ^[5]
Ten	414.51	$\text{C}_{22}\text{H}_{30}\text{O}_4$	结晶状固体, 熔点为 172~175 $^{\circ}\text{C}$, 易溶于有机溶剂 ^[6]

化处理的 TeA 的比 HFB 衍生化后的检出限更低。上述实验表明, GC 及 GC-MS 具有灵敏、高效、进样量小、分辨率高的特点。但该法存在基于衍生化会导致重复性差、耗时、成本高等问题^[15]。故今后使用 GC 及 GC-MS 检测果蔬制品中链格孢霉毒素的关键是如何解决以上问题。

3.1.3 液相色谱-质谱联用法

液相色谱-质谱联用(liquid chromatography mass spectrometry, LC-MS)是将液相色谱与质谱通过接口装置相结合,使其具有高通量、应用范围广、分离性能好、灵敏度高、简便快速的特点。目前,由中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布的行业标准^[16]便是采用液相色谱-质谱/质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry, LC-MS/MS)测定出口水果蔬菜中的链格孢菌毒素^[16]。大气压化学电离(atmospheric-pressure chemical ionization, APCI)和电喷雾电离(electrospray ionization, ESI)是真菌毒素的两种电离模式。Benjamin 等^[17]分别用 APCI 和 ESI 对 AME 和 AOH 进行离子化,通过 LC-MS 最终检测出葡萄汁、苹果汁、酸果汁及红酒等饮料中 AME 的含量为 1.4 ng/mL, AOH 的含量为 6 ng/mL。

3.1.4 高效液相色谱法及高效液相色谱-质谱法

高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)是一种以液体为流动相的可同时检测多种真菌毒素的新型色谱技术,具有选择性好、灵敏度高、重现性好、操作自动化及定性定量检测均可的优点,但需要昂贵的仪器、试剂以及专业的操作人员,常用于真菌毒素的实验室仲裁检测^[18]。陈月萌等^[19]采用高效液相色谱-荧光分析方法同时检测水果中链格孢烯、链格孢酚和链格孢酚甲醚残留量。该法在 3 种链格孢霉毒素添加水平为 20, 40, 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 时,测得苹果、桃和梨的平均回收率均在 78.2%~103.6%范围内,相对标准偏差小于 8.6%,所以适用于水果中链格孢霉毒素残留量的测定。

3.2 免疫分析法

3.2.1 酶联免疫吸附法

酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)对抗原或抗体进行定性定量检测是利用抗原抗体高度特异性和酶的高效催化作用,是基于单克隆抗体和多克隆抗体的检测技术。在检测果蔬制品中 AOH、TeA 等链格孢霉毒素得到应用。如:朱帆^[20]研究果汁中的链格孢霉毒素 AOH,建立的基于抗血清 AHI 的 AOH-icELISA 法和 AOH-icCLEIA 法的检测限分别为 0.31 $\mu\text{g}/\text{L}$ 和 0.068 $\mu\text{g}/\text{L}$,检测结果可靠,准确度好。Gross 等^[21]采用琥珀酸酐对 TeA 进行衍生化,然后用活性酯法分别与牛血清白蛋白、钥孔血蓝蛋白偶联合成了 TeA 人工抗原,制得多克隆抗体;利用此抗体检测苹果及番茄制品中的检出限为 25~50 ng/g。此实验表明该法具有高灵敏度、高通量的特点。钟红等^[22]

建立了间接竞争酶联免疫吸附法检测食品中链格孢霉毒素残留,并研制了一种快速检测的试剂盒,该试剂盒检测线性范围 0.06~35.95 ng/mL($r^2=0.9941$),检测限为 0.02 ng/mL,具有现场快速检测的实用价值。但因该法存在重现性不佳、抗体制备不易等缺点,还需要通过进一步的研究来完善。

3.2.2 胶体金免疫层析法

胶体金免疫层析法(gold immune colloidal technique, GICT)是以胶体金作为示踪标记或显色剂的一种新型可视化免疫标记技术,具有快速高效、成本低廉、特异性强、灵敏度高、安全环保等优点。胶体金免疫层析法在黄曲霉毒素^[23]、玉米赤霉烯酮^[24]、脱氧雪腐镰刀菌烯醇^[25]、赭曲霉毒素 A^[26]等真菌毒素的检测中应用较多。近年来, GICT 逐渐应用于果蔬中链格孢霉毒素的检测,如:Man 等^[27]开发了一种快速、便携和半定量的胶体金免疫层析条带,用于快速和目视检测水果中的交链孢酮单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)。用该胶体金免疫层析条带测得樱桃和橙子果实中 AME 的回收率分别为 86.1%和 80.7%,在 10 min 内可以完成半定量检测。此外,免疫层析条带与 AME 类似物具有较低的交叉反应性,并且具有良好的稳定性能(储存 3 个月后)。该方法简化了检测步骤,缩短了检测时间。

4 控制方法

4.1 物理控制方法

4.1.1 剔除法

在果蔬采收贮藏与加工前利用人工、机械、电子设备对果蔬原料进行有效的分选,剔除腐烂变质果蔬,是一种用于降低新鲜果蔬及其产品中真菌毒素污染的有效方法。但链格孢菌属对葡萄产生的污染并不能通过人工分拣、冲洗等手段去除毒素,其能使内部果肉污染腐烂果实而表皮无明显变化,所以葡萄生长过程不仅要全过程控制链格孢霉毒素的转移,同时也要防治链格孢霉毒素的发生,才能降低葡萄及其制品中真菌毒素风险^[28]。

4.1.2 温度控制法

温度可以影响果蔬在贮藏和加工过程中产生真菌毒素的过程。链格孢侵染导致芒果随着贮藏时间的延长、贮藏温度的升高而腐烂加剧;当采用间歇光照条件处理芒果后,减轻了链格孢侵染的影响^[29]。Pose 等^[30]研究发现温度对生长在番茄酱琼脂培养基上的 AOH 的产生具有显著影响:链格孢产生 AOH 的最佳温度是 21 $^{\circ}\text{C}$,而将温度控制在 6 $^{\circ}\text{C}$ 未检测出 AOH,说明低温可以抑制 AOH 的生长。

最为常用的是热处理法中的热水浸洗和日光晾晒,且热处理方法可使部分果品中的真菌毒素污染水平降低 20%~70%^[31]。Muhammad 等^[32]采用 60 $^{\circ}\text{C}$ 的热水浸果 5 min 来防治芒果黑斑病,发现病斑直径(贮藏 20 d)达到最小,

但不能完全脱除。吴秀^[33]则研究了温度对西兰花中 *A.alternata* 生长和致病力的影响, 发现若用 55 °C 水浴、85 °C 水浴处理 10 min 的方法能有效地抑制西兰花中 *A.alternata* 的菌丝生长和孢子萌发。以上实验说明热处理具有投入低、操作简便等特点。

4.1.3 物理吸附法

一种利用具有吸附作用的物质(树脂、活性炭等)吸附果蔬制品中的真菌毒素的方法。物理吸附法虽然可以对果蔬制品中的真菌毒素产生一定的吸附作用, 降低毒素, 但存在吸附营养成分和微量元素的缺点。该方法在抑制赭曲霉毒素^[34]和棒曲霉毒素^[35]的污染方面有较多的应用, 目前对链格孢霉毒素吸附的相关研究较少。周兵等^[36]比较了 4 种大孔吸附树脂 HZ-803、DA201、D101、1300 及活性炭对链格孢菌 *Alternaria alternata* 毒素的吸附性能, 结果发现: 相较于其他大孔吸附树脂, DA201 对链格孢菌毒素吸附解吸效果最佳, 有高达 72.88% 的吸附率。

4.1.4 紫外光照处理

紫外光照处理也可以用于抑制果蔬中病原真菌的生长和毒素产生。Liu 等^[37]采用不同剂量(1.3~40 kJ/m²)的 UV-C 控制番茄链格孢病害, 结果表明低剂量(7.5 kJ/m²)的 UV-C 照射 10 min 后果实的发病率降低了 67%, 病斑直径则减小了 9 mm, 同时显著提高果实的硬度, 延缓其后熟衰老。钟小刚^[38]通过紫外诱变的方法对造成苹果链格孢叶斑病的 *A.mali* 强毒菌株进行了诱变, 证明了采用剂量为 10 W 紫外光照射 5 min 能使 *A.mali* 强毒菌株发生负突变, 致病力最小。因此, UV-C 可以作为一种有效控制链格孢属病害的方法, 但需明确不同果蔬制品中所需紫外处理的最佳剂量和限制。

4.2 化学控制方法

4.2.1 化学杀菌剂

化学杀菌剂如水杨酸、碳酸氢钠、脱氢醋酸钠、过氧乙酸、双氧水以及壳寡糖等可以达到降低或控制真菌毒素的危害以及防止病原微生物入侵果实的目的。张海子等^[39]研究了纳他霉素、脱氢醋酸钠、碳酸氢钠与大蒜在平板与活体上对链格孢霉、灰葡萄孢霉、果链核盘菌、青霉、根霉等 5 种常见的果蔬腐败菌的抑制作用。结果表明, 在活体上, 质量浓度 0.4 mg/mL 纳他霉素与 5% 的脱氢碳酸钠对 5 种病原菌有很好的抑制作用, 而高浓度的碳酸氢钠与大蒜水提取液对鸭梨病斑的抑制作用并不太强。祖庆勇^[40]通过研究证明菌丝生长以及交链孢菌孢子萌发率均受壳寡糖抑制, 前者需高浓度的壳寡糖, 后者低浓度即可。贾红晟等^[41]通过抑菌圈法测定不同化学抑菌剂对链格孢菌的抑制效果。结果表明: 过氧乙酸的抑菌效果较好, 1.5% 过氧乙酸对链格孢菌相对抑制率为 84.78%。以上实验结果表明: 采用合适的化学杀菌剂可对果蔬制品中的链格孢菌产生良好的抑菌效果, 从而控制链格孢霉毒素造成的危害。

4.2.2 天然产物控制法

目前, 人工合成杀菌剂如吡咯苯类、咪唑类等控制在真菌毒素污染上取得了良好的效果, 但因为其具有残留显著、难降解、污染环境、致癌性等缺点, 已经被禁止使用^[42]。植物精油因其具有矫正异味、赋有香气、安全卫生、抗真菌等特点, 已经成为了新的化学抑菌剂^[43]。许倩等^[44]研究发现: 天然产物提取的肉桂、大蒜精油对链格孢霉的生长有一定的抑制作用。当肉桂大蒜复配精油质量浓度比为 3:1 时对链格孢霉抑菌效果最好。余兴等^[45]经过采用 1~5 μL/L 的薰衣草精油, 薄荷精油和葡萄籽精油对链格孢霉进行滤纸熏蒸实验和 100~500 μL/L 3 种精油对病原菌的直接接触实验研究, 证明高浓度的薄荷精油一方面会抑制链格孢霉孢子萌发, 另一方面, 它还会使链格孢霉孢子畸形生长, 且生长过程中容易折断。

除精油和挥发性成分外, 中草药对果蔬在贮藏过程中真菌毒素的积累具有显著的抑制作用。刘畅等^[46]研究发现黄连根茎的提取液对柑橘链格孢的最小抑菌浓度为 0.05 g/L, 抑菌率达到 100%。郭东起等^[47]发现黄连提取液对骏枣黑斑病抑菌效果最好, 7 d 后测量含黄连提取液的 PDA 平板的菌落直径最小(1.52 cm), 抑菌率最大(84.8%)。李文香等^[48]研究证明不同中草药提取液对采后西兰花主要致腐微生物链格孢菌有不同程度的抑制作用, 其中山豆根、肉豆蔻提取液的抑菌效果较强。

4.3 生物控制法

生物方法主要是采用富集培养的菌株(如: 益生菌菌株、土壤细菌、枯草芽孢杆菌)或其代谢产物通过拮抗、抑制作用来阻碍链格孢菌的生长或对链格孢霉毒素进行分解。但因其存在操作复杂、见效周期长的缺点, 所以难在短时间内实现大规模普及。部分链格孢病原菌的抑菌菌株及抑菌机制见表 2, 从表 2 中可知: 抑菌菌株及其代谢产物在苹果、桃、桑葚及香瓜等水果中是通过产生抑菌物质、与病原菌竞争(例如: 营养和空间)或破坏孢子完整性来抑制链格孢菌的生长。

5 展 望

5.1 检测方法

传统的检测方法在果蔬制品中链格孢霉毒素的检测中得到了广泛的应用, 但随着科学技术的不断发展以及检测要求的不断提高, 链格孢霉毒素的检测技术还需要完善, 主要包括以下方面: (1) 向多种技术手段联用发展。单种检测技术越来越难以满足日益增长的链格孢霉毒素检测需求, 因此, 需要将多种检测技术结合使用。如: 竞争性间接化学发光酶免疫法同高效液相色谱串联质谱结合^[54]。(2) 从检测单种毒素向同时检测多种毒素发展。在一个果蔬制品中可能存在多种链格孢霉毒素, 如何快速检测出该多种毒

素的种类及含量依旧是当下及未来的研究重点。(3) 不断创制高灵敏、高特异性链格孢霉毒素特异性抗体^[55]。免疫分析法离不开高灵敏高特异性抗体, 因此可以通过创制更高水平的特异性抗体来显著提高免疫分析法的检测速度并且扩大其应用范围, 以期满足链格孢霉毒素的检测需求。

5.2 控制方法

目前尚无绝对有效的措施避免链格孢霉毒素的污染, 用于控制链格孢霉毒素的物理、化学以及生物方法都是通

过控制链格孢产毒、生长和消减毒素, 并不能完全清除链格孢霉毒素^[55]。物理控制方法是采用剔除、温度控制、吸附及紫外光照处理等方法降低毒性; 化学控制方法是采用化学杀菌剂、天然产物等抑制链格孢菌的生长; 生物控制法是通过采用富集培养的菌株或其代谢产物阻碍链格孢菌的生长或对链格孢霉毒素进行分解。以上 3 种方法各有优缺点, 但均有一定的局限性, 还需要在此基础上继续深入研究, 或将 3 种方法相互结合使用, 扬长避短。

表 2 部分链格孢病原菌抑菌菌株及抑菌机理

Table 2 Bacteriostatic strains of some *Alternaria* spp. pathogens and their bacteriostatic mechanism

病原菌或毒素	样品	抑菌菌株或物质	抑菌机理	参考文献
链格孢	苹果	银杏内生菌芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i> Q7	加剧了苹果链格孢霉细胞膜脂质过氧化, 提高了细胞膜透性, 影响其体内代谢酶 POD、SOD 以及 PPO 的酶活力	[49]
	苹果	拮抗酵母菌 <i>C.railenensis</i>	营养与空间竞争, 多种方式共同作用的综合结果	[50]
	早熟桃	芽孢杆菌	芽孢杆菌能在果实上提前定殖和生长, 与病原菌形成竞争优势	[51]
	桑葚	枯草芽孢杆菌泛革素类物质	分泌抑菌物质来抑制致腐菌的生长, 表现为营养竞争	[52]
	香瓜	鼠李糖乳杆菌 <i>RH-11</i>	破坏孢子完整性	[53]

参考文献

- [1] Sanzani SM, Gallone T, Garganese F, et al. Contamination of fresh and dried tomato by *Alternaria* toxins in southern Italy [Z]. 2019.
- [2] Puntsher, Hannes, Kütt, et al. Tracking emerging mycotoxins in food: development of an LC-MS/MS method for free and modified *Alternaria* toxins [J]. Anal Bioanal Chem, 2018, 18: 4481-4494.
- [3] 满燕, 梁刚, 李安, 等. 链格孢霉毒素检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 453-458.
Man Y, Liang G, Li A, et al. Research progress of detecting methods for *Alternaria* toxins [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(2): 453-458.
- [4] 姜冬梅, 王瑶, 姜楠, 等. 农产品及其制品中交链孢酮和交链孢酮单甲醚研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 287-293.
Jiang DM, Wang Y, Jiang N, et al. Advances in the research of oxysporin and acylphenol monomethyl ether in agricultural products and their products [J]. Food Sci, 2017, 38(21): 287-293.
- [5] Celia FB, Ana JG, Cristina J, et al. Alternariol induce toxicity via cell death and mitochondrial damage on caco-2 cells [J]. Food Chem Toxicol, 2016, 88: 32-39.
- [6] 何国鑫, 邓青芳, 周欣. 链格孢霉毒素的分析方法及其毒理机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 342-346.
He GX, Deng QF, Zhou X. Research on the analysis method and toxicological mechanism of *Alternaria* toxin [J]. Food Ind Technol, 2018, 39(4): 342-346.
- [7] Fatma B, Cindy G, Ossama S, et al. Mechanism of Alternariol monomethyl ether-induced mitochondrial apoptosis in human colon carcinoma cells [J]. Toxicology, 2011, 290(2): 230-240.
- [8] 吴春生, 马良, 江涛, 等. 链格孢霉毒素交链格孢菌酮酸的研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 295-301.
Wu CS, Ma L, Jiang T, et al. Research progress of *Alternaria alternata* with *Alternaria alternata* [J]. Food Sci, 2014, 35(19): 295-301.
- [9] 安玉会, 卢荣华, 冯文舟. 林县交链孢霉毒素-交链孢醇单甲醚和交链孢烯的协同毒性和致畸作用研究[J]. 癌症, 1988, (7): 54-55.
An YH, Lu RH, Feng WZ. Synergistic toxicity and teratogenic effect of *Alternaria-Alternaria* and *Alternaria* in Linxian county [J]. Cancer, 1988, (7): 54-55.
- [10] 赵晶晶, 张振华, 刘青. 粮油中真菌毒素检测技术及其应用解析[J]. 现代食品, 2019, (12): 98-100.
Zhao JJ, Zhang JH, Liu Q. Analysis of mycotoxins in grain and oil and its application [J]. Mod Food, 2019, (12): 98-100.
- [11] Hasan HA. *Alternaria* mycotoxins in black rot lesion of tomato fruit: Conditions and regulation of their production [J]. Mycopathologia, 1995, 130(3): 171-177.
- [12] 李志霞, 聂继云, 闫震, 等. 果品主要真菌毒素污染检测、风险评估与控制研究进展[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 332-347.
Li ZX, Nie JY, Yan Z, et al. Progress in research of detection, risk assessment and control of the mycotoxins in fruits and fruit products [J]. Sci Agric Sin, 2017, 50(2): 332-347.
- [13] Harvan DJ, Pero RW. Gas chromatographic analysis of the *Alternariametabolite*, tenuazonic acid [J]. J Chromatogr A, 1974, 101(1): 222-224.
- [14] Scott PM, Weber D, Kanhere SR. Gas chromatography-mass spectrometry of *Alternaria* mycotoxins [J]. J Chromatogr A, 1997, 765(2): 255-263.
- [15] 李晓丹. 真菌毒素检测技术研究概述[J]. 现代食品, 2018, (12): 93-97, 101.
Li XD. Overview of mycotoxin detection technology [J]. Mod Food, 2018,

- (12): 93–97, 101.
- [16] SN/T 4259-2015 出口水果蔬菜中链格孢菌毒素的测定液相色谱-质谱/质谱法[S].
SN/T 4259-2015 Determination of *Alternaria* toxin in exported fruits and vegetables by liquid chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry [S].
- [17] Benjamin PYL, Peter MS, David AL, *et al.* Liquid chromatography-mass spectrometry and liquid chromatography-tandem mass spectrometry of the *Alternaria* mycotoxins alternariol and alternariol monomethyl ether in fruit juices and beverages [J]. *J Chromatogr A*, 2003, 998: 119–131.
- [18] Lacey RN. Derivatives of acetoacetic acid. Part VII. α -Acetyltetramic acids [J]. *J Chem Soc*, 1954, 72: 850–854.
- [19] 陈月萌, 李建华, 张静, 等. 高效液相色谱-荧光检测法同时测定水果中的 3 种链格孢霉菌毒素[J]. *分析实验室*, 2012, 31(6): 70–73.
Chen YM, Li JH, Zhang J, *et al.* Simultaneous determination of three *Alternaria* toxins in fruits by high performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. *Chin J Anal Lab*, 2012, 31(6): 70–73.
- [20] 朱帆. 链格孢酚多克隆抗体的制备及其免疫分析方法的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
Zhu F. Preparation of polyclonal antibody against *Alternaria* and its immunoassay method [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [21] Gross C, Ackermann. Enzyme immunoassay for tenuazonic acid in apple and tomato products [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(23): 12317–12322.
- [22] 钟红, 马良, 张宇昊, 等. 细交链格孢菌酮酸间接竞争酶联免疫检测方法及其配套试剂盒的研制[J]. *分析科学学报*, 2017, 33(2): 195–200.
Zhong H, Ma L, Zhang YH, *et al.* Indirect competitive enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of *Alternaria alternata* and its supporting kits [J]. *J Anal Sci*, 2017, 33(2): 195–200.
- [23] Jin XY, Jin XF, Chen LG, *et al.* Piezoelectric immunosensor with gold nanoparticles enhanced competitive immunoreaction technique for quantification of aflatoxin B₁ [J]. *Biosens Bioelectron*, 2009, 24: 2580–2585.
- [24] Wang YK, Shi YB, Zou Q, *et al.* Development of a rapid and simultaneous immunochromatographic assay for the determination of zearalenone and fumonisin B1 in corn, wheat and feedstuff samples [J]. *Food Cont*, 2013, 31: 180–188.
- [25] Xu Y, Huang ZB, He QH, *et al.* Development of an immunochromatographic strip test for the rapid detection of deoxynivalenol in wheat and maize [J]. *Food Chem*, 2010, 119(2): 834–839.
- [26] Lai WH, Fung DYC, Xu Y, *et al.* Development of a colloidal gold strip for rapid detection of ochratoxin A with mimotope peptide [J]. *Food Cont*, 2009, 20(9): 791–795.
- [27] Man Y, Liang G, Jia FC, *et al.* Development of an immunochromatographic strip test for the rapid detection of alternariol monomethyl ether in fruit [J]. *Toxins*, 2017, 9(5): 152.
- [28] 谢汉忠, 黄玉南, 李君, 等. 葡萄及其制品中真菌毒素研究进展[J]. *农学报*, 2017, 7(12): 70–75, 121.
Xie HZ, Huang YN, Li J, *et al.* Research progress of mycotoxins in grape and its products [J]. *J Agron*, 2017, 7(12): 70–75, 121.
- [29] 李娇. 链格孢菌感染对芒果贮藏品质及生理的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
Li J. Effects of *Alternaria alternata* infection on the quality and physiology of mango storage [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.
- [30] Pose G, Patriarca A, Kyanko V, *et al.* Water activity and temperature effects on mycotoxin production by *Alternaria alternata* on a synthetic tomato medium [J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 142(3): 348–353.
- [31] Barkai-Golan R, Paster N. Mycotoxins in fruits and vegetables [M]. New York: Gale ECCO, Print Edit, 2008.
- [32] Muhammad M, Muhammad IH, Liaquat A, *et al.* Chemotherapeutic management of alternaria black spot (*Alternaria alternata*) in mango fruits [J]. *J Agric Res*, 2011, 49(4): 499–506.
- [33] 吴秀. 链格孢菌感染对西兰花品质的影响及致病机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
Wu X. Effect of *Alternaria alternata* infection on the quality of broccoli and its pathogenic mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [34] Var I, Kabak B, Erginkaya Z. Reduction in ochratoxin A levels in white wine, following treatment with activated carbon and sodium bentonite [J]. *Food Control*, 2008, 19(6): 592–598.
- [35] 王静, 雷宏杰, 岳珍珍, 等. 大孔树脂对红枣汁中棒曲霉素的吸附动力学[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 285–291.
Wang J, Lei HJ, Yue ZZ, *et al.* Adsorption kinetics of patulin in jujube juice by Xu Huaide's macroporous resin [J]. *Chin J Agric Eng*, 2015, 31(23): 285–291.
- [36] 周兵, 安传福, 董云发, 等. 用大孔吸附树脂分离链格孢菌毒素[J]. *浙江林学院学报*, 2007, (2): 198–202.
Zhou B, An CF, Dong YF, *et al.* Separation of *Alternaria* toxin by macroporous adsorption resin [J]. *J Zhejiang Forest Col*, 2007, (2): 198–202.
- [37] Liu J, Stevens C, Khan A, *et al.* Application of ultraviolet-C light on storage rots and ripening of tomatoes [J]. *J Food Prot*, 1992, 56(10): 868–872.
- [38] 钟小刚. 甘肃省苹果链格孢叶斑病病原鉴定及诱导抗病性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
Zhong XG. Identification of the pathogen of apple chain leaf spot disease and its induced disease resistance in Gansu province [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [39] 张海予, 李婉, 马磊, 等. 纳他霉素、脱氢醋酸、碳酸氢钠与大蒜对采后病原真菌的抑制作用[J]. *北京农学院学报*, 2007, (2): 43–46, 70.
Zhang HY, Li W, Ma L, *et al.* Inhibition of postharvest pathogenic fungi by natamycin, sodium dehydroacetate, sodium bicarbonate and garlic [J]. *Beijing J Agric Coll*, 2007, (2): 43–46, 70.
- [40] 祖庆勇. 壳寡糖诱导番茄抗交链格孢菌及菌毒素提取研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
Zu QY. Chitosan oligosaccharide-induced extraction of tomato against *Alternaria* and mycotoxin [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014.
- [41] 贾红晟, 郭立民, 索亮亮. 梨枣病原菌的抑制剂筛选研究[J]. *农业与技术*, 2018, 38(10): 9, 25.
Jia HS, Guo LM, Suo LL. Screening of inhibitors of pathogens of pear jujube [J]. *Agric Technol*, 2018, 38(10): 9, 25.
- [42] 海莹, 张应龙, 丁新丽, 等. 植物精油在控制真菌及其毒素方面的应用进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2014, (5): 23–26.
Hai Y, Zhang YL, Ding XL, *et al.* Progress in the application of plant essential oils in controlling fungi and their toxins [J]. *Food Feed Ind*, 2014, (5): 23–26.
- [43] 李燕君, 孔维军, 李梦华, 等. 植物精油抑制真菌及真菌毒素的研究进

- 展[J]. 中草药, 2016, 47(11): 2011–2018.
- Li YJ, Kong WJ, Li MH, *et al.* Research progress on inhibition of fungi and mycotoxins by plant essential oils [J]. *Chin Tradit Herbal Drugs*, 2016, 47(11): 2011–2018.
- [44] 许倩, 牛希跃, 李述刚, 等. 肉桂、大蒜精油对链格孢霉和青霉抑菌特性研究[J]. 食品工业, 2013, 34(4): 144–147.
- Xu Q, Niu XY, Li SG, *et al.* Study on antibacterial properties of essential oils of cinnamon and garlic against *Alternaria* and *Penicillium* [J]. *Food Ind*, 2013, 34(4): 144–147.
- [45] 余兴, 孔庆军, 任雪艳. 3 种精油对水果病原菌的抑菌效果研究[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(7): 714–719.
- Yu X, Kong QJ, Ren XY. Antibacterial effect of three essential oils on fruit pathogens [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2017, 36(7): 714–719.
- [46] 刘畅, 任艳芳, 何俊瑜, 等. 中草药提取液对 3 种柑橘病原菌的抑制作用[J]. 西南农业学报, 2011, 24(1): 132–136.
- Liu C, Ren YF, He JY, *et al.* Inhibition of three kinds of citrus pathogens by Chinese herbal extracts [J]. *Southwest Agric J*, 2011, 24(1): 132–136.
- [47] 郭东起, 蒋卉, 牛宁宁, 等. 新疆骏枣黑斑病病原菌的分离、鉴定及控制研究[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(12): 3–8.
- Guo DQ, Jiang H, Niu NN, *et al.* Isolation, identification and control of pathogens of black spot disease of jujube in southern Xinjiang [J]. *Chin Plant Prot Guide*, 2015, 35(12): 3–8.
- [48] 李文香, 王丽娇, 张圣杰, 等. 中草药提取液对采后西兰花主要致腐菌的抑制作用研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(9): 2053–2057, 2080.
- Li WX, Wang LJ, Zhang SJ, *et al.* Study on the inhibitory effect of Chinese herbal medicine extract on the main rot fungus of postharvest broccoli [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2013, 29(9): 2053–2057, 2080.
- [49] 徐志超, 王璐, 李静, 等. 银杏内生菌对苹果链格孢霉的抑制作用[J]. 大连工业大学学报, 2018, 37(6): 433–436.
- Xu ZC, Wang W, Li J, *et al.* Inhibition of endophytic bacteria of ginkgo biloba against *Alternaria alternata* [J]. *J Dalian Polytech Univ*, 2018, 37(6): 433–436.
- [50] 刘程惠, 吴祎男, 胡文忠, 等. 苹果腐败霉菌的拮抗酵母菌筛选鉴定及拮抗机理初探[J]. 食品工业科技, 2018, 39(12): 132–136, 163.
- Liu CH, Wu YN, Hu WZ, *et al.* Screening and identification of antagonistic yeast against apple spoilage mold and its antagonistic mechanism [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(12): 132–136, 163.
- [51] 郑香香, 张娜, 阎瑞香, 等. 不同芽孢杆菌对极早熟桃采后链格孢菌的防治效果及其发酵液挥发性物质成分分析[J]. 食品工业科技, 2019, 14: 144–150.
- Zheng XX, Zhang N, Yan RX, *et al.* Effect of different *Bacillus* sp. on the control of Alzheimer's disease in very early ripening peaches and analysis of volatile substances in fermentation broth [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 14: 144–150.
- [52] 陈成. 枯草芽孢杆菌对桑椹采后致腐真菌的抑制及机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
- Chen C. Inhibition and mechanism of *Bacillus subtilis* on post-harvest rot fungi [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016.
- [53] 马欢欢, 吕欣然, 缪璐欢, 等. 鼠李糖乳杆菌对互隔交链孢的抑制作用研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(17): 180–184.
- Ma HH, Lu XR, Miu LH, *et al.* Study on the inhibitory effect of *Lactobacillus rhamnosus* on *Alternaria alternata* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(17): 180–184.
- [54] Yao CY, Xu ZL, Wang H, *et al.* High affinity antibody based on a rationally designed hapten and development of a chemiluminescence enzyme immunoassay for quantification of alternariol in fruit juice, maize and flour [J]. *Food Chem*, 2019, 283: 359–366.
- [55] 李培武, 张奇, 丁小霞, 等. 食用植物性农产品质量安全研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3618–3632.
- Li PW, Zhang Q, Ding XX, *et al.* Advances in research on quality and safety of edible vegetable agricultural products [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(18): 3618–3632.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



崔 璐, 博士, 主要研究方向为农产品加工与安全控制。

E-mail: cuiuclt@nwsuaf.edu.cn



王 琦, 主要研究方向为食品安全检测控制。

E-mail: 2016013221@nwafu.edu.cn