

现代光学方法去除黄曲霉毒素的研究进展

徐宇阳¹, 杨儒颖¹, 张彦哲¹, 刘延东¹, 李可奕¹, 卫泽辉^{1,2,*}

¹ 江苏海洋大学药学院, 江苏 连云港 222005

² 江苏省海洋药物筛选重点实验室, 江苏 连云港 222005

摘要: 黄曲霉毒素是主要由曲霉真菌产生的毒性次生代谢产物, 在食品、药材等产品的运输、存储过程中极易产生, 对人和动物能够产生高致癌效力, 已成为一种全球性广泛关注的的危害因素。一直以来, 研究者们努力开发各种有效的策略来降解食品和药材中的黄曲霉毒素, 这些方法涵盖了物理、化学以及生物学等各类技术手段, 其中光辐射消除方法因其操作简单、成本低廉、消除效率高和不破坏样品成分等特点而受到广泛的关注。因此, 本文重点综述了现代光学方法在去除黄曲霉毒素上的应用, 包括紫外、红外、脉冲强光、光催化、等离子体等方法, 为开发高效便捷、安全可控的黄曲霉毒素去除方法提供参考。

关键词: 黄曲霉毒素; 光学消杀方法; 研究进展

中图分类号: G64; O6

Research Progress of Aflatoxins Removal by Modern Optical Methods

Yuyang Xu¹, Ruying Yang¹, Yanzhe Zhang¹, Yandong Liu¹, Keyi Li¹, Zehui Wei^{1,2,*}

¹ College of Pharmacy, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu Province, China.

² Jiangsu Key Laboratory of Marine Drug Screening, Lianyungang 222005, Jiangsu Province, China.

Abstract: Aflatoxins are toxic secondary metabolites mainly produced by *Aspergillus* fungi, which are easily generated during the transportation and storage of food, medicinal materials, and other products. These toxins have high carcinogenic effects on humans and animals, making them a global safety hazard. Researchers have long been developing various effective strategies to degrade aflatoxins in food and medicinal materials, including physical, chemical, and biological techniques. Among these, optical radiation elimination method has garnered significant attention due to their simple operation, low cost, high elimination efficiency, and non-destructive nature. This paper reviews the application of modern optical methods in the removal of aflatoxins, including ultraviolet, infrared, pulsed strong light, photocatalysis, plasma techniques, providing a reference for the development of efficient, convenient, safe, and controllable aflatoxins removal methods.

Key Words: Aflatoxins; Optical elimination method; Research progress

黄曲霉毒素(AFT)主要是由黄曲霉菌产生的一种毒性极强、污染范围最广的代谢产物, 常见的有黄曲霉毒素B₁ (简称AFB₁)、B₂、G₁、G₂、M₁和M₂, 结构如图1所示。所有黄曲霉毒素中, AFB₁致癌性、毒性最强, 占有所有食品和饲料相关的黄曲霉毒素污染总量75%以上^[1,2], 其产生的毒性被称为黄曲霉毒素中毒, 主要表现为: (i) 短期接触大量黄曲霉毒素引起“急性中毒”, 其特征是严重的肝损

收稿: 2024-02-28; 录用: 2024-05-10; 网络发表: 2024-08-21

*通讯作者, Email: wei.zehui@163.com

基金资助: 江苏省2023年大学生创新创业训练计划项目资助(SY202311641640005)

伤、黄疸、出血、水肿并最终死亡；(ii) “慢性亚致死暴露”，导致免疫抑制、营养障碍和癌症^[3]。国际癌症研究机构(IARC)已将AFB₁列为I类人类致癌物^[4]。据统计，全球有超过50亿人长期接触AFB₁^[5]。在我国，对AFB₁的法定限量范围已做了严格规定，其中谷类制品5–10 μg·kg⁻¹，动物饲料20–50 μg·kg⁻¹，中药材不得过5 μg·kg⁻¹。因此，食品和药材中黄曲霉毒素消除方法是目前的研究热点，也是保障广大人民饮食和用药安全中亟待解决的技术难题^[1]。

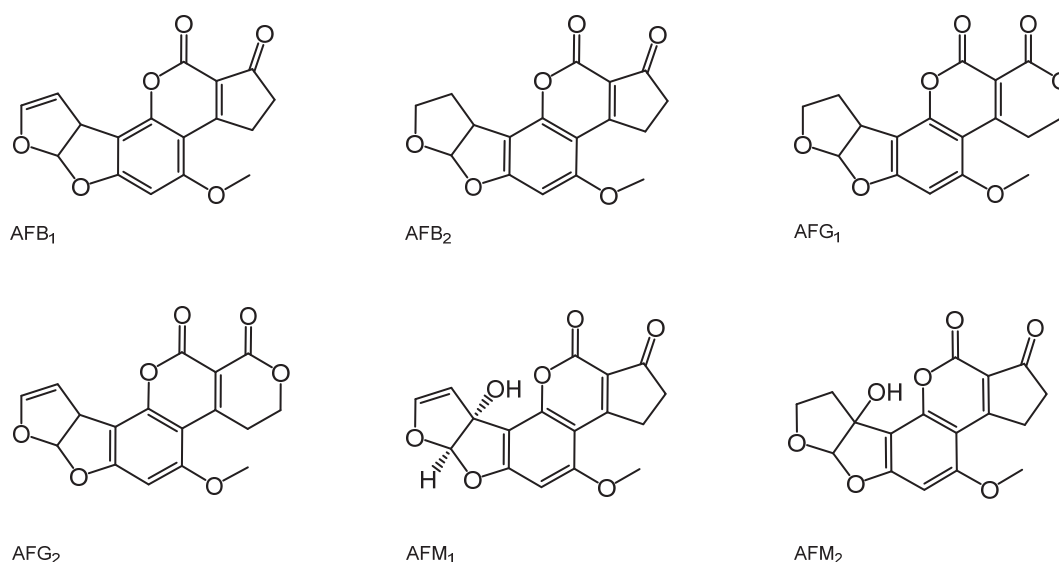


图1 黄曲霉毒素B₁、B₂、G₁、G₂、M₁、M₂的化学结构

目前黄曲霉毒素去除方法主要分为三类：物理方法、化学方法、生物方法^[6]。物理方法通常包括人工挑选加工、吸附法和辐射处理法等^[6]。化学方法包括有机溶剂提取、强氧化剂破坏和碱性溶液降解等方法^[6,7]。生物学方法则是利用微生物吸附或生物酶促降解等手段除去黄曲霉毒素^[7–9]。在上述三种方法中，化学方法成本低，使用方便，降解效率高，但大量化学试剂应用会对人体或设备产生危害，且化学试剂残留可能会影响产品的成分和口感；生物方法安全有效，作用条件温和、环保，但存在菌种吸附能力弱、培育菌种过程复杂耗时、成本高等缺陷。相对于化学和生物学方法，物理方法尤其是辐射处理法，节约人力，消除效果明显，便于大规模工业应用，是目前开发高效经济去除黄曲霉毒素的主要方向之一。因此本论文主要从紫外辐射法、红外辐射法、脉冲强光照法、光催化降解法、冷等离子体辐射法和其他辐射法等方面^[10]综述了现代光学方法去除黄曲霉毒素主要途径，并对比了每种方法的辐射条件、照射时间、强度等参数对黄曲霉毒素去除效果的影响，为开发更加简便、安全可控的现代光学去除黄曲霉毒素方法提供参考。

1 紫外辐射法

紫外辐射法(UV)具有实用、消耗人力少、环保的优点，其辐射波长的选择主要依赖设备以及被辐射物质本身。相关研究认为AFB₁在222 nm、265 nm和362 nm处有紫外吸收，在362 nm处具有最大吸收^[11]。沈祥震^[12]通过实验发现365 nm紫外照射对花生油中黄曲霉毒素的降解效果明显优于254 nm的处理组；张小勇等^[13]将花生油分别用254 nm、365 nm、420 nm波长的紫外灯辐射30 min，发现365 nm紫外辐射对AFB₁的去除率最佳，达到96.4%，254 nm去除率次之，为59.5%，420 nm去除效果最差，去除率仅有11.7%；栗凌云等^[14]研究了紫外线照射强度、时间以及花生油铺展厚度对黄曲霉毒素B₁降解效果的影响，结果发现AFB₁残留量与紫外线照射强度和时间成正比，与铺展厚度成反比，而且辐射后花生油的色泽、气味未发生改变。因此对于花生油，其黄曲霉毒素降解最佳紫外波长一般

为362 nm至365 nm之间, 但其他物质的最佳辐照波长则需进一步实验确定。如研究表明小麦样品中黄曲霉毒素消除的UV照射波长为254 nm, 照射时间为160 min, 除去效率达到80%以上^[15]。除了采用单一紫外照射降解黄曲霉毒素之外, 靳志强等^[16]建立了UV/O₃组合处理黄曲霉菌的试验方法, 其孢子致死量对数值可达3.03且不会引起玉米品质的显著变化; 而单一紫外线照射60 s和240 s, 黄曲霉孢子数对数值分别下降1.03和2.63; 微波处理5 min和15 min, 黄曲霉活孢子数对数值分别下降1.45和3.37; 单独臭氧熏蒸2 h和5 h, 黄曲霉孢子数没有显著变化。因此联用技术为开发高效便捷的黄曲霉毒素去除方法提供一种有效的策略。

研究报道紫外线辐照法机理为通过照射引发生成羟基自由基(OH[•]), 可以攻击AFB₁ C₈-C₉位置的末端双键, 使C₈位羟基化^[17], 进而减低毒性。Ames试验和细胞活力测定结果表明, 光降解产物的致突变性和细胞毒性远低于AFB₁^[18]。尽管紫外线可以很容易地穿透清澈或透明的液体样品进行黄曲霉毒素去除, 但是它对固体材料的渗透能力有限, 导致悬浮固体含量高的食品脱毒效率较低; 同时紫外线可能会将AFB₁降解为比AFB_{2a}更具毒性的副产品, 并且在固体材料上需要考虑“阴影效应”, 否则会导致毒素降解不完全, 对生命健康造成伤害^[19,20]。因此, 未来使用紫外辐照法用于食品和中药材黄曲霉毒素脱毒中不仅需要考虑是否将样品加工成相应饮片进行处理, 同时还要注意紫外线辐照对其产生的异变现象, 需要改进消杀后的检测方法或方式。

2 红外辐照法

红外线波长位于0.76–1000 μm, 依靠热效应以及菌体的特征吸收, 导致蛋白质变性、酶失活, 使菌体代谢受到影响。食品中的有机成分可以大量吸收远红外波段(3–1000 μm), 可用于液态或固态食品表面的杀菌, 是红外杀菌技术使用的主流方法^[21,22]。姜婧等^[23]利用远红外辐照杀菌技术, 经115 °C、5 min辐照处理含水量30%大米, 发现黄曲霉对数降低值(lgS)为2.96 ± 0.28, AFB₁总量下降63.09%, 单位菌体产毒降低38.44%, 结果表明远红外辐照能有效降低黄曲霉孢子数量以及黄曲霉菌产毒能力, 但不能很好地直接降解黄曲霉毒素。将红外加热与其他杀菌技术结合, 能够有效提高杀菌能力。季萌萌等^[24]采用联合牛至精油熏蒸与红外加热的方法, 按精油熏蒸6 h联合65 °C红外加热1 h处理花生表面, 黄曲霉孢子的初始数量减少了5个对数值, 并能完全抑制黄曲霉孢子的萌发、生长以及毒素的合成, 极大程度上破坏了黄曲霉孢子的细胞膜结构及功能。由此可见, 联合方法为红外线消杀黄曲霉孢子提供了新的思路, 同时也需要意识到红外线消杀黄曲霉毒素通常需要较高的温度, 这可能会导致药品或食物中的有效成分遭到破坏, 影响质量, 并且如果消杀物体较厚或结构复杂可能会导致消杀不彻底, 会有一些的安全隐患; 从成本上来看, 红外线消杀设备的初始投入、运行成本和维护成本可能不适合微小企业, 因此降低红外消杀设备成本、改进技术也是一种很好的方式。

3 脉冲强光照法

脉冲强光是一种全新的杀菌技术, 通过光热和光化协同作用杀灭微生物^[25], 对固体表面、气体和透明液体中微生物均有较好的杀灭作用, 具有耗能低、瞬时、广谱的优点^[26]。田芳等^[27]以杀菌率为指标, 在接种数为1000 CFU、闪照距离为2 cm的基础上, 采用先包装再照射方式, 通过闪照5次、闪照电压7 kV, 达到霉菌杀菌率92.0%的效果。王蓓等^[25]在强度2.86 W·cm⁻²脉冲强光下对固体培养基中黄曲霉菌孢子处理, 19 s即可全部被杀死初始菌落数为5.15 lg(CFU/mL)的孢子。Moreau等^[28]报道了8次脉冲闪光(一次300 ms闪光期间光通量为1 J·cm⁻²)降解水中92.7%的AFB₁。同样, Abuagela等^[29]观察到脉冲强光(0.4 J·cm⁻²/脉冲)处理后去皮花生中的黄曲霉毒素减少了91%。而且研究表明, 脉冲强光处理对花生油的过氧化值、脂肪酸含量和酸值等化学性质没有显著影响。因此, 脉冲强光处理技术未来有望开发成一种快速有效的黄曲霉毒素脱毒技术。虽然脉冲强光在进行杀菌的同时可以尽可能地减少对照射品质的影响, 但是因为其操作技术要求还没有大规模实现工业化, 同时, 如

果照射品结构复杂会降低消杀效果，而且因为其消杀机理尚未明确，无法保证消杀过程中不会使照射品生成有毒副产物。

4 光催化降解法

最近研究表明，紫外-可见光照射与半导体光催化剂相结合可以提高黄曲霉毒素在液体基质中的降解效率。最广泛使用的光催化剂是TiO₂，因为它在紫外线照射下具有高活性、无毒、高效和长期光稳定性。孙淑敏等人^[30]评估了活性炭负载的TiO₂催化剂(AC/TiO₂)在紫外-可见光下对甲醇中AFB₁的光催化降解效果，在6 mg·mL⁻¹ AC/TiO₂存在下，紫外-可见光照射120 min降解率达到95%，而单独的紫外-可见光照射仅降解了50%的AFB₁。为克服TiO₂光催化剂对紫外线依赖的不足，Jamil等人^[31]合成了Sc掺杂的SrTi_{0.7}Fe_{0.3}O₃纳米颗粒，在可见光条件下，10 mol% Sc掺杂的SrTi_{0.7}Fe_{0.3}O₃可将AFB₁完全降解为二氧化碳和水，120 min内解毒率为88.2%。

除此之外，Wei等^[32]在乙二醇与乙醇3:7 (v/v)、160 °C下制备的钼酸铋(Bi₂MoO₆) (3:7)-160，对样品中AFB₁具有良好的可见光催化降解效率和光催化稳定性，120 min后AFB₁的降解率可达99.8%。Samuel等^[33]利用活性炭辅助的GO/Cu₃(BTC)₂/Fe₃O₄(GO指氧化石墨烯，BTC指苯并三嗪酸)光催化剂，通过更大的表面积和改进的光触媒，使得AFB₁在紫外辐照下，降解效率达到了99%，并且可以利用过滤的手段将催化剂从溶液中除去，然后用乙醇和水洗涤光催化剂，并在60 °C的烘箱中干燥3小时即可重复使用。李佳骏等^[34]通过核酸适配体对MGO/TiO₂(MGO指磁性氧化石墨烯)进行选择修饰，合成的MGO/TiO₂-aptamer对低质量浓度AFB₁和混合毒素中AFB₁的降解率显著提高，在优化条件下，降解率可达98.3%。Zhang等^[35]在水热法的基础上采取原位溶剂热法成功制备的TiO₂/UiO-67(UiO-67-一种含有锆的金属有机框架材料光催化剂)，在可见光照射下80 min内AFB₁的降解率即可达到98.9%，优于市售的P25、TiO₂和大部分报道的光催化剂。

因此，光催化剂在紫外可见光照射下都表现出了较好的降解效率，是一种很有前途的降解AFB₁技术，但是在食品和药材处理中，光催化本身的稳定性和安全性有待进一步研究探讨，通过对其机制研究，研制出使AFB₁降解过程、产物可控的光催化剂可能会成为未来的重要研究方向。

5 等离子体辐射法

冷等离子体概念在1928年由Langmuir提出，将含有平衡电荷的电离气体定义为等离子体，它是一种特殊的物质状态，在这个状态下离子和电子的数量基本相等^[36]。等离子体辐射法是利用物质在常温下产生的高活性化学物种，由部分电离的气体组成的，其中包含自由电子、离子、自由基和激发态分子等活性组分，以此来处理食品，可提高食品安全性和延长食品的保质期，是一种可行的食品和饲料中黄曲霉毒素净化技术，已被证明能够在环境温度和压力条件下快速解毒黄曲霉毒素^[37]。例如Sakudo等人^[38]使用1.5 kpps的N₂等离子体处理15 min可将AFB₁降低90%以上，并消除其对HepG2细胞的毒性。Siciliano等人^[39]使用1150 W介质阻挡放电N₂等离子体处理去皮榛子12 min，约70%的AFB₁和总黄曲霉毒素被降解。

根据等离子体中重粒子和电子是否处于热力学平衡可将等离子体分为热和非热等离子体，其中非热等离子体(简称NTP)是由大气压下的高压放电产生，活性氧和氮物质(RONS)被认为在NTP中起着主要的去污作用，可有效抑制食物中黄曲霉菌的生长，也可降低霉菌毒素含量^[40,41]。如赵璐玲等^[41]通过采用Weibull + Tail模型，使用50 Hz的频率和160 kV的电压处理120 s，孢子计数减少了5.39 Log₁₀ CFU/cm²，这主要归功于NTP产生的活性氧和氮物种(RONS)通过积累细胞内的活性氧和一氧化氮，扰乱细胞抗氧化和能量代谢系统，并诱导细胞凋亡，从而有效灭活黄曲霉孢子。也有学者研究常压等离子体对黄曲霉毒素的降解效果，通过回归模型预测并通过实验发现在AFB₁初始浓度为5 mg·L⁻¹，处理电压170 V、放电236 s、放电间距2 cm时，AFB₁的降解效果达到92.45%^[42]。

冷等离子体技术因其环保、处理速度快等优势而被广泛研究运用，但该方法仍处于早期开发阶

段, 其样品处理条件、冷等离子体产生的氧化物质对食品或药品的成份组成影响需要进一步研究。

6 其他辐射法

除了上述提及的方法之外, Iqbal等人^[43]通过6 kGy的伽马射线降解了红辣椒中86%以上AFB₁水平。Markov等人^[44]报道, 用5 kGy的伽马射线处理可使玉米中AFB₁水平降低69.8%, 而10 kGy伽马射线可降解94.5%的AFB₁。另外, Assuncao等人^[45]使用5和10 kGy剂量的电子束照射巴西坚果可以导致AFB₁含量分别降低53.3和65.7%。

表1列出了不同光学方法对黄曲霉毒素的消杀效果。图2列出了部分光学方法消除黄曲霉毒素的降解机理。总的来说, 现代光学方法均具有便捷快速高效的特点, 并且对于被消杀物品本身不会产生太大损伤, 但是现代光学方法对于设备的要求较高, 而且降解机制及产物的安全性有待进一步研究。

表1 不同光学方法对黄曲霉毒素的消杀效果

名称	方法	条件	消杀时间/ 次数	效果	文献
紫外辐射	紫外线照射	ABF ₁ 含量50 μg·kg ⁻¹ 花生油厚度5 cm 紫外照射强度1000 MW·cm ⁻²	15 min	ABF ₁ 降解至20 μg·kg ⁻¹	[14]
	紫外线、臭氧联合处理	紫外短波照射 18 mg·L ⁻¹ 臭氧熏蒸	30 min 10 h	AFB ₁ 含量降低63.6%	[16]
红外辐射	远红外照射	大米含水量30%	5 min	AFB ₁ 总量下降63.09%, 单位菌体产毒降低38.44%	[23]
		远红外115 °C 远红外辐照115 °C	5 min	大米初始含水率越高, 黄曲霉孢子热损伤越严重	[23]
	联合牛至精油熏蒸与红外加热	精油熏蒸 65 °C红外加热	6 h 1 h	AF孢子的初始数量减少了5个对数降低值	[23]
脉冲强光	脉冲强光处理	接种数为1000 CFU 闪照距离为2 cm 先包装再照射 闪照电压为7 kV	闪照5次	霉菌杀菌(含AF)率可达92.0%	[27]
		脉冲强光强度2.86, 1.60, 1.08, 0.93 W·cm ⁻²	1-60 s	初始菌落数为5.15lg (CFU/mL)的孢子在2.86 W·cm ⁻² 下处理19 s可被全部杀死	[25]
光催化降解	半导体+紫外辐射	10 mol% Sc掺杂的SrTi _{0.7} -Fe _{0.3} O ₃ 联合紫外照射	120 min	AFB ₁ 去除88.2%	[30]
	光催化剂+可见光辐射	钨酸铋+紫外照射 GO/Cu ₃ (BTC) ₂ /Fe ₃ O ₄ MGO/TiO ₂ -aptamer TiO ₂ /UiO-67	120 min - - 可见光照射 80 min	AFB ₁ 降解率达99.8% 降解性能提高99% AFB ₁ 降解率达98.3% AFB ₁ 降解率达98.9%	[32] [33] [34] [35]
冷等离子体辐射	N ₂ 等离子体处理	1.5 kpps N ₂ 等离子体	15 min	AFB ₁ 降低90%以上	[38]

(待续)

(续表1)

名称	方法	条件	消杀时间/ 次数	效果	文献
冷等离子体 辐射	N ₂ 等离子体处理	1150 W介质阻挡放电	12 min	约70%的AFB ₁ 和总黄曲霉毒素被降解	[39]
其他辐射法	伽马射线降解	6 kGy伽马射线	—	86%以上AFB ₁ 水平	[43]
		5 kGy伽马射线	—	AFB ₁ 水平降低69.8%	[43]
		10 kGy伽马射线	—	AFB ₁ 水平降低94.5%	
	电子束照射	5 kGy剂量电子束	—	AFB ₁ 含量降低53.3%	[45]
		10 kGy剂量电子束	—	AFB ₁ 含量降低65.7%	

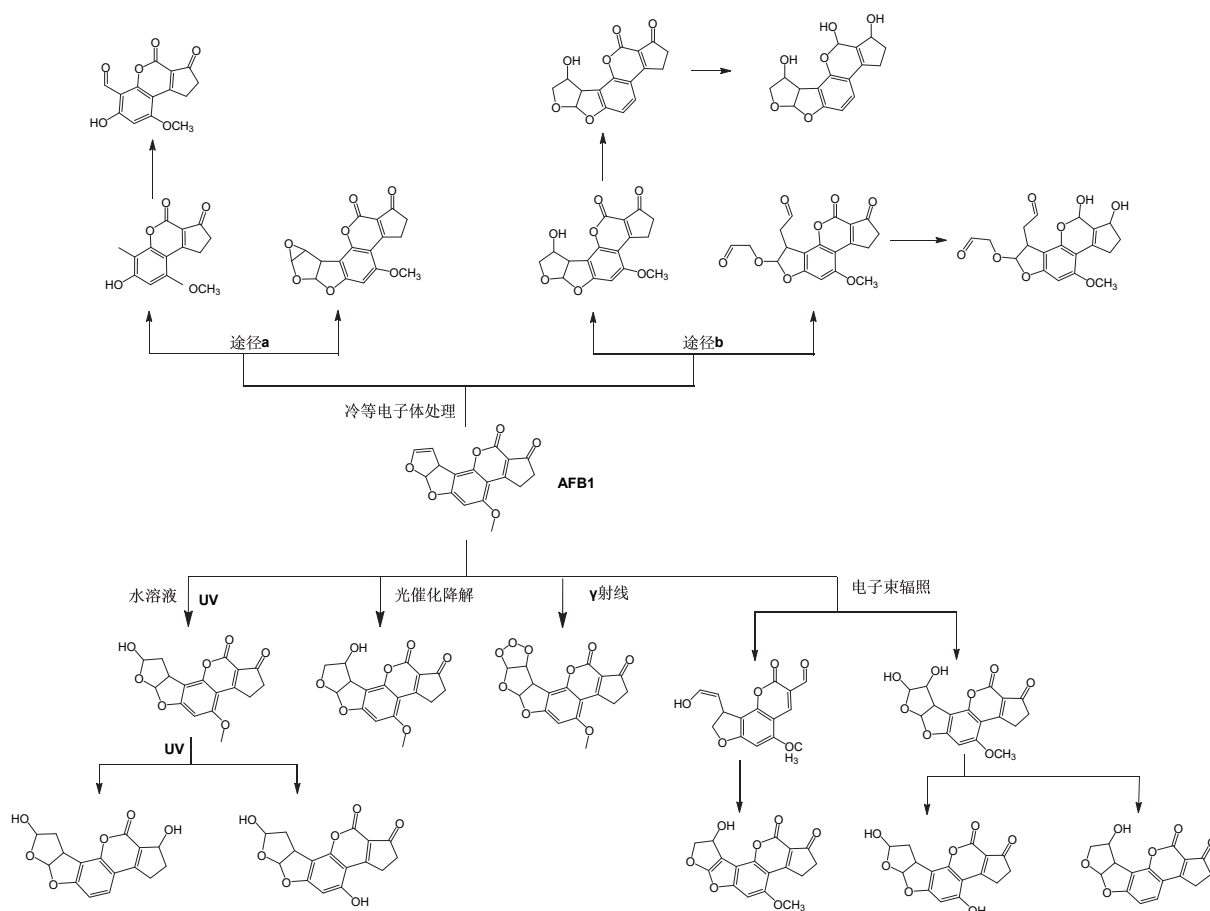


图2 部分光学方法消杀AFB₁的降解机理图；途径a涉及由高压大气冷等离子体(HVACP)处理产生的自由基，包括氢自由基(H•)、羟基自由基(OH•)和甲酰自由基(CHO•)对AFB₁分子的加成反应；途径b包括由HO₂•自由基引发的环氧化反应，以及由羟基自由基(OH•)、过氧化氢(H₂O₂)和臭氧(O₃)的协同氧化作用导致的AFB₁的氧化^[46,47]

7 结语

现代光学方法去除黄曲霉毒素、消杀黄曲霉菌或其孢子具有高效便捷、经济实用的特点，同时还可以抑制黄曲霉菌的生长繁殖。国内外目前对黄曲霉素光降解研究已经较为丰富，但多数方法都是基于单一方法进行黄曲霉毒素降解效果的考察研究，对于不同光学方法之间联用或物理-化学或生物学联合应用技术研究较少，未来有较大的研究空间。而将现有光学设备通过节能、操作简化等方

向进行升级，对工业化食品和药材的保存起到至关重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 袁京磊. 现代食品, **2022**, 28 (1), 14.
- [2] My, A.; Ds, S. *January* **1997**, 3, 161.
- [3] Marchese, S.; Polo, A.; Ariano, A.; Velotto, S.; Costantini, S.; Severino, L. *Toxins* **2018**, 10 (6), 214.
- [4] Ostry, V.; Malir, F.; Toman, J.; Grosse, Y. *Mycotoxin Res.* **2017**, 33 (1), 65.
- [5] Pandey, M. K.; Kumar, R.; Pandey, A. K.; Soni, P.; Gangurde, S. S.; Sudini, H. K.; Fountain, J. C.; Liao, B.; Desmae, H.; Okori, P.; *et al.* *Toxins* **2019**, 11 (6), 315.
- [6] 吴兆蕃. 甘肃科技, **2010**, 26 (18), 89.
- [7] 李智高, 毛永杨, 狄朋敏, 苏涛, 田金兰. 食品安全质量检测学报, **2019**, 10 (14), 1.
- [8] 常程程, 丁梓雪, 王彦钦, 杨帆, 孟宪刚. 中国饲料, **2023**, 23, 138.
- [9] 肖军霞, 张岩, 黄国清, 姜文利, 王世清. 食品安全质量检测学报, **2012**, 3 (5), 395.
- [10] 李雨薇, 吕家硕, 于一凡, 刘晓晖, 刘成珍. 生物技术进展, **2023**, 13 (6), 853.
- [11] Samarajewu, U.; Sen, A. C.; Cohen, M. D.; Wei, C. I. *J. Food Prot.* **1990**, 53 (6), 489.
- [12] 沈祥震. 花生油中黄曲霉毒素B₁紫外降解及安全性评价[硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [13] 张小勇, 倪芳妍, 方晓璞, 蒋敏. 粮食与食品工业, **2015**, 22 (6), 41.
- [14] 栗凌云, 吴瑞阁, 武建锋, 焦志莎, 贾新国. 食品安全导刊, **2022**, No. 4, 83.
- [15] Allah, B. G.; Mahvish, J. C.; Saghir, A. S.; Shafi, M. N.; Irshad, H. G. *Int. J. Biosci.* **2016**, 8, 8.
- [16] 靳志强, 王顺喜. 西北农林科技大学学报(自然科学版), **2018**, 46 (4), 147.
- [17] Liu, R.; Jin, Q.; Tao, G.; Shan, L.; Huang, J.; Liu, Y.; Wang, X.; Mao, W.; Wang, S. *J. Mass Spectrom.* **2010**, 45 (5), 553.
- [18] Shen, N.; Zhang, X. Z.; Zheng, W. W.; Diao, E. J.; Dong, H. Z. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2015**, 50 (1), 41.
- [19] Fan, X.; Huang, R.; Chen, H. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, 70, 9.
- [20] Shen, M.; Singh, R. K. *Lwt* **2021**, 142, 110986.
- [21] 易志, 潘忠礼, 马海乐, 吴本刚. 食品工业, **2014**, 35 (10), 230.
- [22] 毕延娣, 陈芹芹, 毕金峰, 颜廷才, 彭健, 吴昕烨, 赵悦. 现代食品科技, **2016**, 32 (6), 213.
- [23] 蒋婧, 张玉明, 全俊成, 范柳萍. 食品与机械, **2018**, 34 (4), 75.
- [24] 季萌萌. 精油熏蒸联合红外加热对黄曲霉杀灭作用的研究[硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [25] 王蓓, 洪晨, Khir, R., 潘忠礼, 马海乐, 周存山. 中国食品学报, **2020**, 20 (4), 10.
- [26] 张瑞雪, 张文柱, 管峰, 袁勇军. 食品科学, **2017**, 38 (23), 305.
- [27] 田芳, 张卓佳, 唐娇艳, 京舒婷, 欧露真, 曾凡红. 食品安全导刊, **2023**, No. 24, 156.
- [28] Moreau, M.; Lescure, G.; Agoulon, A.; Svinareff, P.; Orange, N.; Feuilloley, M. *J. Appl. Toxicol.* **2013**, 33 (5), 357.
- [29] Abuagela, M. O.; Iqdiem, B. M.; Mostafa, H.; Gu, L.; Smith, M. E.; Sarnoski, P. J. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2018**, 53 (11), 2567.
- [30] Sun, S.; Zhao, R.; Xie, Y.; Liu, Y. *Food Control.* **2019**, 100, 183.
- [31] Tarek, S. J.; Abbas, H. A.; Rabab, A. N.; Ahmed, A. El-K.; Mohamed, I. M. I. *J. Photochem. Photobiol. A* **2017**, 341, 127.
- [32] Wei, L.; Chen, S.; Yang, X.; Zhang, H.; Mo, Z.; Yang, J.; Wang, H. *Inorg. Chem. Commun.* **2024**, 160, 111886.
- [33] Samuel, M. S.; Mohanraj, K.; Chandrasekar, N.; Balaji, R.; Selvarajan, E. *Chemosphere* **2022**, 291, 132684.
- [34] 李佳骏, 孙淑敏, 杨佳毅, 谢岩黎. 河南工业大学学报自然科学版, **2023**, 44 (3), 66.
- [35] Zhang, J.; Gao, X.; Guo, W.; Wu, Z.; Yin, Y.; Li, Z. *RSC Adv.* **2022**, 12 (11), 6676.
- [36] 雷雨晴, 张海洋, 田琳, 祁智慧, 李金东, 唐芳. 粮油食品科技, **2024**, 32 (1), 120.
- [37] Gavahian, M.; Cullen, P. *Food Rev. Int.* **2020**, 36 (1/4), 193.
- [38] Sakudo, A.; Toyokawa, Y.; Misawa, T.; Imanishi, Y. *Food Control.* **2016**, 73, 619.

- [39] Siciliano, I.; Spadaro, D.; Prella, A.; Vallauri, D.; Cavallero, M.; Garibaldi, A.; Gullino, M. *Toxins* **2016**, 8 (5), 125.
- [40] 张海宝, 陈强. 物理学报, **2021**, 70 (9), 22.
- [41] Zhao, L.; Wang, J.; Sheng, X.; Li, S.; Yan, W.; Qian, J.; Zhang, J.; Raghavan, V. *Chem. Eng. J.* **2023**, 475, 146017.
- [42] 任翠荣, 熊旭波, 王世清, 王振斌, 张岩, 姜文利. 粮油食品科技, **2017**, 25 (4), 64.
- [43] Iqbal, S. Z.; Bhatti, I. A.; Asi, M. R.; Zuber, M.; Shahid, M.; Parveen, I. *Radiat. Phys. Chem.* **2013**, 82, 80.
- [44] Markov, K.; Mihaljević, B.; Domijan, A.; Pleadin, J.; Delaš, F.; Frece, J. *Food Control.* **2015**, 54, 79.
- [45] Assunção, E.; Reis, T. A.; Baquião, A. C.; Corrêa, B. *J. Food Prot.* **2015**, 78 (7), 1397.
- [46] Guo, Y.; Zhao, L.; Ma, Q.; Ji, C. *Food Res. Int.* **2021**, 140, 109878.
- [47] 魏东升, 翟新军, 陈磊, 徐丹, 莫海珍. 粮食与油脂, **2023**, 36 (10), 11.