

“粮油真菌毒素”专题文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.009

施晶晶, 刘宽博, 王永伟, 等. 光催化技术降解粮油中真菌毒素的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 66-70.

SHI J J, LIU K B, WANG Y W, et al. Recent advances in mycotoxin degradation by photocatalytic technology in grain and oil[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 66-70.

光催化技术降解粮油中 真菌毒素的研究进展

施晶晶, 刘宽博, 王永伟✉, 何贝贝, 王 丽, 李爱科

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘 要: 粮油作物一直面临着真菌病害的问题, 真菌在一定条件下产生了真菌毒素, 这不仅造成食物浪费, 还严重危害人和动物机体健康。物理、化学和生物脱毒方法可以在一定程度上吸附或降解真菌毒素, 但存在解吸附、溶剂残留和降解产物复杂等问题。近年来兴起的光催化技术在真菌毒素降解上取得了良好的效果。简要综述光催化技术在粮油真菌毒素降解方面的最新研究进展, 为深入了解光催化降解真菌毒素机制, 促进光催化降解真菌毒素在粮油中的应用提供参考。

关键词: 粮油; 真菌毒素; 光催化降解

中图分类号: TS210; O644.1; TQ426 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)02-0066-05

Recent Advances in Mycotoxin Degradation by Photocatalytic Technology in Grain and Oil

SHI Jing-jing, LIU Kuan-bo, WANG Yong-wei✉, HE Bei-bei, WANG Li, LI Ai-ke

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: Grain and oil crops was always faced with the problem of fungal diseases. Fungi produce mycotoxin under certain conditions, which not only caused food waste, but also seriously endangered the health of human and animal. Physical, chemical and biological detoxification methods can remove some mycotoxin, but there were some problems to be considered, such as desorption, residual solvent and complex degradation product. In recent years, the photocatalytic technology had achieved great process in degradation of mycotoxin. In this work, the latest progress of photocatalysis technology in mycotoxin degradation in grain and oil was briefly summarized which providing a reference for further understanding the mechanism of photocatalytic degradation and promoting the application of photocatalytic mycotoxin degradation in grain and oil crops.

Key words: grain and oil; mycotoxin; photocatalytic degradation

收稿日期: 2020-07-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZX1907)

Supported by: Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No. ZX1907)

作者简介: 施晶晶, 男, 1990 年出生, 博士, 助理研究员, 研究方向为饲料中有害物质消减技术。E-mail: sjj@ags.ac.cn.

通讯作者: 王永伟, 男, 1983 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为生物饲料资源开发与应用。E-mail: wyw@ags.ac.cn.

据联合国粮食与农业组织 (FAO) 统计全球每年约 25% 的粮食遭受真菌毒素污染, 受污染的粮食会严重危害人和动物健康^[1]。真菌毒素作为结构稳定的有机化合物, 在粮食收储、流通、加工过程中很难被有效脱除^[2]。粮油中真菌毒素有 400 多种, 其中呕吐毒素、黄曲霉毒素和玉米赤霉烯酮的危害最为严重^[3-4]。

真菌毒素的脱毒方式包括物理法、化学法和生物法。活性炭、铝硅酸盐类、酵母细胞壁多糖等作为物理吸附剂, 吸附毒素进入动物消化道后, 真菌毒素会发生解吸附现象, 导致真菌毒素再次释放到消化道中造成危害。臭氧、氨气等化学脱毒剂可以破坏真菌毒素的结构, 但也存在营养成分损失和试剂残留等潜在风险^[5]。微生物吸附法可用益生菌吸附真菌毒素, 转变为毒素-菌体复合物, 但也存在解吸附的现象^[6]; 菌-酶降解法是利用降解菌分泌的酶破坏毒素结构达到脱毒目的, 该方法效果较好, 但也面临着微生物安全性、降解产物种类复杂、是否存在潜在毒性等问题^[7-8]。综上所述, 不同脱毒方法各有利弊。随着科技的发展, 利用新兴技术开发绿色、环保、高效脱毒方式变得尤为重要, 而光催化技术满足这个需求。

光催化剂是一类具有光功能性质的半导体材料, 可以完成光催化反应中 3 个主要途径: 光激发、光生电子空穴对的分离、发生氧化还原反应。光催化技术就是借助催化剂吸收光能产生电子 (e^-) 和空穴 (h^+) 对, 转化为强氧化能力的活性自由基 ($\cdot O_2$ 和 $\cdot OH$), 参与有机物的氧化反应。光催化技术的最大优势在于太阳能作为取之不尽的资源, 可以为光催化技术提供廉价的光能。其次, 光催化技术反应条件温和, 借助产生的活性自由基, 可以破坏有机物的结构, 最终实现矿化^[12], 脱毒方式比较彻底。该技术在污水净化、空气净化、杀菌消毒等领域得到了实际应用。在医疗领域, 光催化剂可杀死霉菌、肺炎杆菌、大肠杆菌等病原体, 同时分解病原体的有害代谢产物; 在农业领域, 可用于水果蔬菜的保鲜和提升种子发芽率^[9-11]。虽然光降解粮油产品中真菌毒素研究起步较晚, 但是已经在小麦、小麦粉和植物油中呕吐毒素和黄曲霉毒素降解上得到初步应用, 具有非常大的发展前景。本文将重点介绍近年来

光催化技术在真菌毒素降解上的研究进展, 为光降解真菌毒素的应用提供参考。

1 光催化降解真菌毒素

1.1 光催化降解呕吐毒素

呕吐毒素分子式为 $C_{15}H_{20}O_6$, 又称为脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (Deoxynivalenol, DON), 属于单端孢霉烯族毒素, 被列为 3 类致癌物, 主要污染小麦、大麦和玉米等粮食产品。人和动物食用污染的粮食后会出现厌食、呕吐、腹泻等不良反应^[13]。呕吐毒素具有非常稳定的结构, 能耐高温和高压, 因而在粮食加工生产过程中不易被脱除^[14]。光降解过程主要通过破坏呕吐毒素的环氧键和碳链来完成脱毒。光降解主要借助高能量的紫外光源, 被研究的光催化材料也很少, 而在光催化技术中光催化剂的研发一直是研究重点。光催化剂可分为紫外型 (200~400 nm) 和可见型 (400~800 nm)。

TiO_2 是一种紫外型光催化剂, 已实现商业化使用。 TiO_2 反蛋白石光子晶体是一种特殊的结构, 具有高的比表面积, 更利于呕吐毒素在其表面吸附。磁性材料的使用有助于光催化剂的分离和回收, 邓杨等^[15]构建 $Fe_3O_4-TiO_2-SiO_2$, 当 TiO_2 和 SiO_2 配比为 1:6 (v/v), 经过 5 h 的紫外光辐射, 降解率达到 49%。通过制备特殊结构的 TiO_2 抑制光催化剂的团聚, 增大了催化剂与毒素的接触面积, 而磁性 Fe_3O_4 的存在提升了催化剂的回收效率, 降低了应用成本。紫外型光催化剂只占太阳光谱的 4%, 而可见光催化剂的光谱利用率可达到 46%, 这类催化剂能够捕获更多的光能, 从而显著提升光降解率。Wang 等^[16]利用铁氰化钾为原料水热法合成树枝状的 $\alpha-Fe_2O_3$, 经过 2 h 的可见光辐射, 呕吐毒素的降解率达到 90.3%。在这过程中光降解率得到了显著提升, 呕吐毒素经历了碳链的断裂、C12-C13 的环氧键还原为烯烃、脱水等过程, 主要降解为 $C_{12}H_{18}O_4$ 和 $C_{12}H_{16}O_3$ 。

石墨烯 (RGO) 具有优异光吸收和光电性能, 可以显著提升光生电子空穴对的分离效率, 有助于提升光降解率。Bai 等^[17]水热法成功制备了 RGO/ZnO、RGO/ TiO_2 、RGO/g- C_3N_4 等一系列复合材料。其中 RGO/ZnO, 30 min 内紫外光降解水溶液中的呕吐毒素达到 99%, 光降解产物主要有

三种, m/z 为 281.87、333.09 和 298.89, 对应的产物分别为 DOM-1、 $[M+H^++2H_2O]^+$ 、 $[M+H]^+$, 降解过程中主要是环氧键被破坏。Z-Scheme 是一种特殊的催化剂结构, 该类型的催化剂具有更强的氧化能力, 有助于破坏呕吐毒素分子中的碳链和环氧键。Bai 等^[18]通过模板法构建 ZnO/g-C₃N₄/RGO 复合材料, 实现水溶液中呕吐毒素的高效降解。RGO 的引入改变了光催化机制, 充当双电子介质, Z-Scheme 的构建增强了催化剂对呕吐毒素的氧化能力。与体相 g-C₃N₄ 相比, 紫外光照射和可见光照射下降解率分别提升了 4.8 倍和 4 倍。

1.2 光催化降解黄曲霉毒素

黄曲霉毒素 (Aflatoxin, AFT) 是一类含有二呋喃环和氧杂萘邻酮结构的化合物, 主要存在于花生、大豆和玉米等作物中^[23]。目前, 光催化已在植物油中实现了 AFT 的降解, 而光催化剂的改性和设计依旧是提升光降解率的关键。

元素掺杂是调节带隙结构和增加活性位点的一种方式。Jamil 等^[20]通过前驱体法将钪元素掺入到 SrTi_{0.7}Fe_{0.3}O₃₉ 晶格内, 调控半导体的带隙结构, 同时增加 pH 促进羟基自由基 ($\cdot OH$) 的产生。可见光条件下, 2h 内黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 的降解率达到了 88.2%。气相色谱-质谱方法检测不同 m/z 的离子 (330、312、281.1、251、220、205.1、189.2、177、145.1、105.2、81.0、44、18), 推测 AFB₁ 氧化过程是环氧键破裂变成短链脂肪醇, 最终实现降解。活性炭是一种高吸附性的廉价碳材料, 多孔结构可提供大量的吸附位点。为提升光催化剂的吸附效果, Sun 等^[21]将 TiO₂ 负载在活性炭上, 利用活性炭高的吸附性和 TiO₂ 高催化活性。紫外可见光下, 通过 h^+ 和 $\cdot OH$ 氧化 AFB₁, 降解率达到了 98% (纯 TiO₂ 为 76%)。

纳米材料因其比表面积高等优势而被广泛研究, 高比表面积的光催化剂可以增大材料与真菌毒素的接触面积, 为光催化提供更多的活性位点。Mao^[22]等利用草酸稳定纳米材料, 构建 50~150 nm 纳米尺寸的 g-C₃N₄。相比于体相 g-C₃N₄ (~30.8%), 纳米 g-C₃N₄ (~70.2%) 降解水中 AFB₁ 效率提升了 2.28 倍。电子顺磁共振谱和自由基捕获证实超氧自由基 ($\cdot O_2^-$) 和 h^+ 在降解过程中其主要作用。高分辨质谱检测到 C₁₇H₁₄O₇、C₁₄H₁₆O₄、

C₁₂H₁₀O₄ 三个主要降解产物。C₁₇H₁₄O₇ 是由 -OH 和 -H 与呋喃环上双键加成所得, C₁₄H₁₆O₄ 是由呋喃环和内酯环发生自由基反应裂解而成, C₁₂H₁₀O₄ 是由苯环的分解和甲氧基的消除所得。为进一步提升 g-C₃N₄ 光降解效率, Mao 等^[23]通过构建 WO₃/RGO/g-C₃N₄ 复合材料来提升光催化剂的氧化能力。 $\cdot O_2^-$ 、 h^+ 和 $\cdot OH$ 为主要自由基参与水中 AFB₁ 的光降解。C₁₆H₁₆O₅ 和 C₁₆H₂₀O₅ 两种降解产物是活性自由基氧化所得, 而 C₁₃H₁₂O₃ 是由呋喃环和内酯环裂解而成。Mao 等^[24]还通过毛线状 WO₃ 耦合 CdS 构建二元全固态 Z-Scheme 光催化剂, 水中 AFB₁ 的降解率达到 95.5%, 而 $\cdot OH$ 与 C8=C9 的加成反应是 AFB₁ 脱毒的主要途径, 但是 CdS 的安全性需要进一步的考察。

值得注意的是, 光催化剂与霉菌毒素之间的浓度比可能会影响光降解效果。Sandor 等^[25]采用膨润土作为光催化剂, 在紫外光照下降解向日葵油中 AFB₁、AFB₂、AFG₂ 和 T-2 毒素, 这些真菌毒素共存下, 由于每一种毒素与膨润土都存在不同的光降解途径。根据动力学反应模型, 需要调控膨润土与霉菌毒素的最佳浓度比例, 从而实现高效的光降解率。

2 光催化降解粮油中真菌毒素的初步应用

目前真菌毒素的去除多利用蒙脱土、酵母细胞壁等吸附产品。光催化技术起步较晚, 但是也已经小麦、小麦粉和植物油中真菌毒素的脱毒上得到初步应用。且对粮油产品营养品质没有显著影响。单晓雪等^[26]选取 2018 年收获的小麦样品, 利用纳米 TiO₂ 通过固态搅拌方式光降解小麦中的 DON, 紫外光光照 6 h 后, 小麦粉和籽粒中 DON 的降解率分别达到了 40.0% 和 32.8%。通过实验组和对照组的对比发现, 添加 TiO₂ 对小麦的出粉率、色泽、气味、脂肪酸值、粗蛋白质等相关品质指标没有显著影响。在紫外光辐射下, TiO₂ 对呕吐毒素的降解率显著提升, 但紫外光只占太阳光能量的 4%, 太阳光能量的可开发利用潜能巨大。Wu 等^[27]利用上转换荧光材料 UCNP (NaYF₄:Yb,Tm) 复合 TiO₂, 全波段下 (200~2500 nm), 通过荧光共振能量转移和辐射再吸收的方式将红外光转化为紫外光, 实现对太阳光的高效利用。对小麦中呕吐毒素进行光降解, 2 h 内的降解率达

到了 69.8%。利用液相色谱-质谱方法鉴定出 $C_{15}H_{20}O_8$ 、 $C_{15}H_{20}O_7$ 、 $C_{15}H_{20}O_5$ 三种降解产物。 $C_{15}H_{20}O_8$ 由 C9-C10 与两个氧形成双键而成； $C_{15}H_{20}O_7$ 由 C9-C10 与两个氧形成双键且 C12-C13 环氧键被破坏； $C_{15}H_{20}O_5$ 由 C12-C13 环氧键开环而成。为评估降解产物的安全性^[28]，通过人肝癌细胞系 HepG2 的细胞活性、细胞形态、细胞周期、细胞内活性氧 (ROS) 水平、细胞凋亡和抗氧化能力等指标，证实降解产物毒性较低。对小麦营养品质的研究表明^[29]，光降解对小麦的淀粉含量、粗蛋白质含量、氨基酸含量和脂肪酸值影响很小，表明了光降解对小麦营养价值没有影响。

TiO_2 在光降解植物油中 AFT 得到了广泛应用，元素掺杂、薄膜化和催化剂负载等手段可提升 TiO_2 光降解率。Xu 等^[30]通过碘元素掺杂 TiO_2 方式，紫外光下降解花生油中的 AFB₁，最大降解率达到了 81.96%，降解产物包含 $C_{14}H_{10}O_6$ 和 $C_{16}H_{12}O_5$ 。 $C_{14}H_{10}O_6$ 来源于 AFB₁ 失去了一个有毒的呋喃环结构，且苯环上的 $-OCH_3$ 基团被氧化成 $C=O$ 结构，而 $C_{16}H_{12}O_5$ 是由 AFB₁ 上氧杂萘邻酮结构脱羧而成。为增强 TiO_2 催化效果，推动光催化设备的实用性，Xu 等^[31]设计一种闭环的光催化模拟器来增强植物油的流动性，将 TiO_2 旋涂在玻璃表面，通过循环的方式降解花生油中的 AFB₁，降解率可达 73.02%。这种流动性的模拟器不仅可以提升催化的效果，而且可以大量净化被 AFT 污染的植物油，证实了该模拟器具有良好的工业化应用前景。为了探究光降解前后植物油的营养价值变化，Magzoub 等^[32]将 TiO_2 固定在玻璃片上，降解花生油中的 AFB₁ 和 AFB₂，降解率分别达到了 99.4% 和 99.2%。降解前后，花生油中的脂肪酸、过氧化物值、皂化值、酸值、游离脂肪酸、碘值、水分和挥发性物质、折射率等指标没有明显的变化，证实光降解对花生油的营养价值没有影响。

3 研究展望

光降解作为新的化学脱毒技术已经在粮油产品真菌毒素降解上得到初步应用，应用过程中已关注到降解前后营养物质的变化、降解产物的初步结构和毒性，但是开发和实际应用上仍需要注意以下几个问题：(1) 材料的安全性需要被考虑，避免选用重金属和高毒性的有机化合物。可选取

天然提取物、矿土物质和生物医药材料，用于改性半导体材料，提高光降解率。实际研究和应用都需要基于粮油基质环境，磁性材料的使用和反应设备的设计，有助于材料的高效回收，增强降解的安全性。(2) 光源种类和光催化剂量需要被合理选择。目前大部分应用都停留在紫外光波段，而紫外光只占太阳光能量的 4%，占太阳能 46% 的可见光没被充分使用，成本上可见光更易获取。而最佳光催化剂量的选择有助于提升光降解率和节约成本。(3) 光降解后，降解产物的结构与毒性需要进一步研究，充分利用有机物的表征手段，如核磁共振谱、红外光谱、原位检测和同位素跟踪等技术，鉴定中间产物，明确光催化机制，确保真菌毒素被有效降解且产物安全。(4) 该技术在对粮油中真菌毒素降解和营养价值的影响需要进行全方面的研究。光降解前后，通过谷物 (出粉率、气味、色泽、氨基酸、脂肪酸值和粗蛋白质等) 或食用油 (脂肪酸、过氧化物值、皂化值、酸值、游离脂肪酸、水分和挥发性物质、碘值和折射率等) 的指标变化全面评估光降解对营养价值的影响。总之，光催化降解真菌毒素是最有前景的脱毒方式之一，具有高效、快速和安全等特点，可有效降解粮油中的真菌毒素，在未来应用过程中需选用合适催化剂和反应设备，突破这些关键技术问题，从而使光催化技术在粮油中得到广泛的应用。

参考文献：

- [1] 旭日干, 庞国芳. 中国食品安全现状、问题及对策战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
XU R G, PANG G F. Research on current problems and countermeasures of food safety in China [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] XIANGDONG S, PING S, HONG S. Mycotoxin contamination of rice in China[J]. Journal of food science, 2017, 82(3): 573-584.
- [3] SHI H, LI S, BAI Y, et al. Mycotoxin contamination of food and feed in China: Occurrence, detection techniques, toxicological effects and advances in mitigation technologies. Food Control, 2018, 91, 202-215.
- [4] TUMUKUNDE E, MA G, LI D, et al. Current research and prevention of aflatoxins in China[J]. World Mycotoxin Journal, 2020, 13(2): 121-138.
- [5] 徐子伟, 万晶. 饲料霉菌毒素吸附剂研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(12): 5391-5398.
XU Z W, WAN J. Advances in research on adsorbents of mycotoxins in feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(12): 5391-5398.
- [6] 张芳. 真菌毒素臭氧降解及其他脱毒方法研究[D]. 江南大学, 2014.

- ZHANG F. The research of ozone degradation mycotoxin and other detoxification methods[D]. Jiangnan University, 2014.
- [7] 吕聪, 邢福国, 刘阳. 国内外真菌毒素防控新技术[J]. 中国猪业, 2017, 12(6): 27-32.
 LV C, XING F G, LIU Y. New mycotoxin prevention and control technology at home and abroad [J]. China pig industry, 2017, 12(6): 27-32.
- [8] 杜稳, 常晓娇, 赵一凡, 等. 降解脱氧雪腐镰刀菌烯醇直投菌剂发酵制备工艺研究及初步应用[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(4): 152-158.
 DU W, CHANG X J, ZHAO Y F, et al. Research of fermentation preparation technology and preliminary application for deoxynivalenol-degrading direct inoculated microbial inoculum [J]. Science and Technology Cereals, Oil and Foods, 2020, 28(4): 152-158.
- [9] DAGHRIR R, DROGUI P, ROBERT D. Modified TiO₂ for environmental photocatalytic applications: a review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(10): 3581-3599.
- [10] 许明月, 仇唐彬, 吉田浩之, 等. 中日光触媒环境净化功能材料的市场开发与应用[J]. 北京联合大学学报, 2019, 33(4): 62-68.
 XU M Y, QIU T B, JI T T Z, et al. Market development and application of photocatalyst functional materials for environmental purification in China and Japan[J]. Journal of Beijing Union University, 2019, 33(4): 62-68.
- [11] 邹胜男, 郑科, 张华英, 等. 石墨烯光催化技术在黑臭河道治理中的应用[J]. 污染防治技术, 2018, 31(2): 12-14.
 ZOU S N, ZHENG K, ZHANG H Y, et al. Application of graphene photocatalysis in black smelly river regulation [J]. Pollution Control Technology, 2012, 31(2): 12-14.
- [12] 李森, 刘宁晶, 蔡娣, 等. 粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇风险预警研究进展[J/OL]. 中国粮油学报: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20200713.0952.006.html>.
 LI S, LIU N J, CAI D, et al. Recent advances in prediction of the risk of the deoxynivalenol contamination in grain[J/OL]. Journal of Chinese Cereals and Oil Association: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20200713.0952.006.html>.
- [13] 朱永法, 姚文清, 宗瑞隆, 等. 光催化: 环境净化与绿色能源应用探索[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
 ZHU Y F, YAO W Q, ZONG R L, et al. Photocatalysis: environmental purification and exploration of green energy application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [14] MISHRA S, SRIVASTAVA S, DEWANGAN J, et al. Global occurrence of deoxynivalenol in food commodities and exposure risk assessment in humans in the last decade: A survey[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(8): 1346-1374.
- [15] 邓杨. 基于磁性 TiO₂-SiO₂ 反蛋白石光子晶体微球光催化降解 DON 的研究[D]. 南京师范大学, 2018.
 DENG Y. Photocatalytic degradation of deoxynivalenol with magnetic TiO₂-SiO₂ inverse-opal photonic crystal microspheres [D]. Nanjing Normal University, 2018.
- [16] WANG H, MAO J, ZHANG Z, et al. Photocatalytic degradation of deoxynivalenol over dendritic-like α -Fe₂O₃ under visible light irradiation[J]. Toxins, 2019, 11(2): 105.
- [17] BAI X, SUN C, LIU D, et al. Photocatalytic degradation of deoxynivalenol using graphene/ZnO hybrids in aqueous suspension[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 204: 11-20.
- [18] BAI X, LI H, ZHANG Z, et al. Carbon nitride nested tubes with graphene as a dual electron mediator in Z-scheme photocatalytic deoxynivalenol degradation[J]. Catalysis Science & Technology, 2019, 9(7): 1680-1690.
- [19] 刘阳. 真菌毒素加工脱毒技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
 LIU Y. Research on mycotoxin processing and detoxification technology [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [20] JAMIL T S, ABBAS H A, NASR R A, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ using nano-sized Sc-doped SrTi_{0.7}Fe_{0.3}O₃ under visible light[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2017, 341: 127-135.
- [21] SUN S, ZHAO R, XIE Y, et al. Photocatalytic degradation of aflatoxin B₁ by activated carbon supported TiO₂ catalyst[J]. Food Control, 2019, 100: 183-188.
- [22] MAO J, ZHANG L, WANG H, et al. Facile fabrication of nanosized graphitic carbon nitride sheets with efficient charge separation for mitigation of toxic pollutant[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 342: 30-40.
- [23] MAO J, ZHANG Q, LI P, et al. Geometric architecture design of ternary composites based on dispersive WO₃ nanowires for enhanced visible-light-driven activity of refractory pollutant degradation[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 2568-2578.
- [24] MAO J, LI P, WANG J, et al. Insights into photocatalytic inactivation mechanism of the hypertoxic site in aflatoxin B₁ over clew-like WO₃ decorated with CdS nanoparticles[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 248: 477-486.
- [25] SANDOR G, AGACHI P S. The effect of bentonite on AFB₁, AFB₂, AFG₂ and T-2 mycotoxins decomposition in sunflower oil under the irradiation of ultraviolet light[J]. Studia Universitatis Babeş-Bolyai, 2011, 56(1): 249-259.
- [26] 单晓雪, 杨娟, 廖子龙, 等. 二氧化钛光催化对小麦呕吐毒素降解效果的研究[J]. 化学试剂: 1-7.
 SHAN X X, YANG J, LIAO Z L, et al. Degradation of wheat vomiting toxin by titanium dioxide photocatalysis [J]. Chemical Reagents : 1-7.
- [27] WU S, WANG F, LI Q, et al. Photocatalysis and degradation products identification of deoxynivalenol in wheat using upconversion nanoparticles@TiO₂ composite[J]. Food Chemistry, 2020: 126823.
- [28] ZHOU Y, WU S, WANG F, et al. Assessing the toxicity in vitro of degradation products from deoxynivalenol photocatalytic degradation by using upconversion nanoparticles@TiO₂ composite[J]. Chemosphere, 2020, 238: 124648.
- [29] WU S, WANG F, LI Q, et al. Detoxification of DON by photocatalytic degradation and quality evaluation of wheat[J]. RSC advances, 2019, 9(59): 34351-34358.
- [30] XU C, YE S, CUI X, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ in peanut oil by iodine doped supported TiO₂ thin film under ultraviolet light irradiation[J]. Current Nanoscience, 2019, 15(2): 188-196.
- [31] XU C, YE S, CUI X, et al. Modelling photocatalytic detoxification of aflatoxin B₁ in peanut oil on TiO₂ layer in a closed-loop reactor[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 87-95.
- [32] MAGZOUB R A M, YASSIN A A A, ABDEL-RAHIM A M, et al. Photocatalytic detoxification of aflatoxins in Sudanese peanut oil using immobilized titanium dioxide[J]. Food Control, 2019, 95: 206-214. 完