

Study on the Influence of Pre-storage Light Selective Machine Processing on Post-harvest Grain Toxicity Risk

Xiaoliang Huo Liying Qin Xuxin Zhang

China Grain Reserves Jilin Quality Inspection Center Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract

The quality of post-harvest grain processing directly impacts storage stability and supply chain safety, with micro-damaged grains, moldy grains, and imperfect grains being key risk sources for toxin accumulation during storage. Optical sorters, by identifying grain color, spectral reflection, and surface defects, can effectively eliminate latent moldy grains and high-risk grains, significantly reducing initial toxin levels. This study focuses on major mycotoxins (Aflatoxin, Ochratoxin, Vomaxin, and Fumaxin) and establishes an analytical framework of “optical recognition—risk classification—toxin migration” to systematically evaluate the intervention effects of optical sorting on the toxin formation chain. The research demonstrates that optical sorting reduces the sources of pathogenic fungi, optimizes the microecological structure during storage, and diminishes the potential for toxin regeneration and diffusion, thereby making the storage process more conducive to maintaining a safe state. This provides crucial technical support for building a green, low-risk modern grain storage system.

Keywords

optical sorter; post-harvest grain processing; toxin control; storage safety; mold risk

仓储前光选机处理对粮食产后毒素超标风险的影响研究

霍晓亮 秦丽莹 张旭昕

中储粮吉林质检中心有限公司, 中国·吉林 长春 130000

摘要

粮食产后处理的质量直接影响储藏稳定性与供应链安全, 其中微损伤粒、霉变粒及不完善粒是储藏期毒素累积的关键风险源。光选机通过识别粮粒颜色、光谱反射与表面缺陷, 可有效剔除隐性霉变粒和高风险颗粒, 显著降低初始毒素水平。本文以主要真菌毒素(黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、呕吐毒素、伏马毒素)为对象, 构建“光学识别—风险分级—毒素迁移”分析框架, 系统评估光选对毒素形成链条的干预作用。研究表明, 光选减少致毒菌来源、优化储藏微生态结构并削弱毒素再生与扩散潜能, 使储藏过程更易维持安全状态, 为构建绿色、低风险的现代储粮体系提供了重要技术支撑。

关键词

光选机; 粮食产后处理; 毒素控制; 储藏安全; 霉菌风险

1 引言

粮食安全管控正逐渐将重点前移至产后处理阶段。受气候波动、种植制度变化及机械化收获强度提升等因素影响, 粮粒在脱粒、运输与晾晒环节更易产生微裂纹与隐性霉变, 使高风险颗粒比例持续上升。已有研究表明, 受损粮粒在储藏中更容易吸湿并被霉菌侵染, 形成毒素富集点, 局部污染进而可能扩散为区域性甚至系统性超标。当曲霉属、镰刀菌属等致毒菌群占据优势时, 储藏温湿度的轻微波动即可触发毒素快速累积。在此背景下, 光选机通过对霉变粒、破损粒及色差粒的光电识别与精准剔除, 为减少高风险颗粒入仓提供有效途径, 使储藏初始状态更为安全。本文据此探讨

光选干预在阻断毒素形成链条中的作用机制, 为提升产后处理阶段的储粮安全管理提供理论依据。

2 光选机在粮食产后处理中的技术基础与应用逻辑

2.1 光学识别机制与霉变粒检测能力的形成逻辑

光选机的核心识别单元由高光谱成像器、可见光摄取装置及多维特征提取算法共同组成, 其识别能力建立在粮粒表面纹理、光谱反射率及色度差异的综合判别基础之上。霉变粒由于菌丝生长、胞外代谢物沉积与细胞结构破坏, 使其表面呈现出颜色异常、光泽减弱或局部斑状暗沉等特征, 反射光谱曲线与正常粮粒存在明显差别。在高光谱识别过程中, 不同毒素相关霉菌在代谢阶段产生的色素种类各异, 使其在特定波段出现特征吸收峰, 从而为“隐性霉变粒”的识别提供重要线索。通过模型训练, 光选机能够对不同等级

【作者简介】霍晓亮(1985-), 女, 中国吉林公主岭人, 本科, 副高级工程师, 从事粮油检验研究。

的色差粒进行精细划分,为产后环节的风险剔除提供稳定基础。由于光学识别过程具有高速性与非接触性特征,使其在大规模粮食流量处理中表现出良好适配性,是传统人工挑拣与物理分级无法比拟的。

2.2 受损粒与缺陷粒剔除在储藏期毒素控制中的基础作用

产后粮食的破碎粒与机械损伤粒是储藏过程中霉菌感染的主要入口。裂纹会破坏籽粒的保护结构,使内部淀粉与蛋白质暴露在外环境中,极易成为曲霉、镰刀菌等致毒“先入菌”的侵染位点。受损粒在温湿交替的仓储环境中吸湿速度更快,使其局部水活度迅速提升,进而形成霉菌生长的微气候环境。光选机利用表面纹理识别与强光照射反射差异,将这类隐性高风险颗粒剔除,可显著降低仓储粮堆中潜在生物风险源的数量。在同等仓储条件下,受损粒比例较高的粮堆往往出现毒素上升速率快、局部污染点扩散范围大的特点,而经光选处理的粮食因初始微生物负荷低、破损率低,使霉菌难以在储藏早期建立优势群落,从源头上减弱毒素上升趋势。

2.3 光选处理对粮食批次毒素分布均匀性的改善意义

未经筛选的粮食往往存在“毒素偏聚”现象,即部分批次中极少量高污染颗粒造成整体毒素水平波动,使储藏管理难度显著增加。光选机通过高风险颗粒的分离,使毒素在剩余粮粒中的分布更加均匀,降低了局部高污染点扩散的概率。在毒素监测中,均匀度提升意味着检测结果更加稳定,使储粮工程能够精准掌握风险变化趋势,减少因样品代表性不足导致的误判。均匀化作用对于赭曲霉毒素和呕吐毒素具有尤为重要的意义,这些毒素具有潜在扩散性与显著的蓄积效应,只有减少高毒素颗粒的进入才能在储藏初期实现稳定控制。

3 光选机处理对粮食主要毒素风险的作用机理分析

3.1 对黄曲霉毒素风险的抑制路径与作用特征

黄曲霉毒素多来源于黄曲霉、寄生曲霉等真菌,它们通常偏好高温偏干环境,但在受损粒中即便在较低湿度环境下也能完成快速定殖。光选机的应用可有效降低霉变粒比例,使储藏粮堆的初始菌群结构发生显著变化。由于高风险粒被剔除,仓储环境中的“初始菌源压力”下降,使致毒菌在粮粒间的扩散速率受到抑制。同时,黄曲霉毒素往往集中在极少数高度霉变颗粒中,光选的去除此类颗粒使整体毒素水平呈现明显下降趋势。光选处理后,后续仓储期即便温湿条件出现波动,霉菌的生长优势仍难以建立,从而降低储藏期间二次增毒的可能性。工程实践表明,经光选处理后的玉米在储藏6个月内的黄曲霉毒素增幅显著低于未处理样品,反映了该技术的前端抑制效果。

3.2 对呕吐毒素与伏马毒素等镰刀菌属毒素的影响机制

镰刀菌属霉菌通常依赖在田间生长阶段形成的初始感染,因此呕吐毒素及伏马毒素在原粮中的初始含量往往与种植管理、天气条件及收获时间相关。光选机虽然无法逆转田间感染,但能够去除多数表面具有隐性霉变特征的颗粒,使具有潜在毒素富集风险的籽粒不进入仓储体系。镰刀菌毒素在储藏期的再度上升往往依赖于粮粒的含水量变化和温度波动,通过减少受损粒比例可以减弱镰刀菌在仓储环境中的活性来源,使基于营养物质泄露的再污染链条难以形成。实验结果显示,经光选处理的粮食样品在储藏后期的呕吐毒素含量趋于稳定,而未经处理样品在温度升高阶段存在明显增长,说明光选对于储藏阶段的生物链条具有一定阻断作用。

3.3 光选机处理对赭曲霉毒素风险传播链的干扰效应

赭曲霉毒素的形成过程往往与局部湿度异常、粮堆通风不均及微损伤颗粒的水分吸附能力密切相关。光选机在处理阶段减少隐性霉变粒与吸湿性强的缺陷粒,使储藏粮堆内部的湿度梯度更加平缓,从而减弱局部高湿区域的形成倾向。赭曲霉毒素的扩散容易沿着“高湿点—微损伤粒—霉菌代谢增强”路径传播,当高湿点减少后,其扩散链条被显著削弱。由于光选处理使粮粒整体物理完整性提高,表面结构均匀度增强,储藏阶段的传湿过程更加稳定,进而抑制了赭曲霉污染点的扩展范围。

4 光选处理在粮食储藏生态系统中的协同效应与机制衍生

4.1 光选干预对储藏微生态结构演化轨迹的影响

粮食储藏微生态系统由多类真菌与细菌共同构成,其内部竞争格局受粮粒健康度、营养暴露程度以及局部温湿动态影响。光选处理在产后环节剔除了霉变粒、破损粒及潜在高风险颗粒,使入仓粮粒的微生物负荷显著下降,初始菌群结构向低毒性、弱竞争性的菌属倾斜。这种改变使致毒菌群在储藏早期难以建立优势定殖点,菌群间的竞争关系由“高侵染压力模式”转向“弱竞争平衡模式”。随着储藏周期延长,各菌群在较为均质的基质环境中逐步形成稳定结构,使致毒菌的生长空间进一步受限,毒素合成途径随之受到抑制。从生态系统视角看,光选不仅降低了初始污染源,还通过改变微生态演化轨迹,削弱了毒素生成链条的连续性,是储藏安全系统中极具基础性意义的关键干预措施。

4.2 光选机减少水分异常点并推动仓储环境参数向安全区间收敛

储粮过程中,不均匀的水分迁移常由破损粒或表层结构受损的籽粒形成,它们因吸湿能力过强而成为局部湿度异常中心,诱发温度升高、生物热积累与霉菌快速繁殖。光选处理显著减少此类“微环境触发点”,使粮堆内部的传热与

传湿路径更趋均质, 阻断了局部环境向高湿、高温方向偏移的趋势。在缺少易吸湿的高风险粒条件下, 粮堆中水分迁移速度更加缓和, 温度梯度也随之减弱, 使整体环境逐步收敛至安全区间。由于毒素形成往往需要特定温湿度窗口, 当局部异常被有效削弱后, 真菌的生长条件难以同步满足, 毒素积累链条被迫中断。光选处理在宏观上提升粮堆的稳定性, 在微观上减少局部波动, 为长周期储藏构建出更加平衡、可控的物理环境, 是抑制毒素上升的重要环境调控机制。

4.3 光选处理提升储粮管理可控性与监测效率的意义

光选处理带来的粮堆均质化效应, 使储藏管理的可控性显著提升。在杂质含量低、破损粒比例受控的条件下, 粮堆内部孔隙结构更为规则, 空气渗透性增强, 使通风与气调措施得以充分发挥作用。温湿度调控的响应速度加快, 使仓储环境能够在更短时间内回到设定的安全区间。均质粮堆还提高了样品检测的代表性, 使监测数据更符合实际情况, 减少因局部异常导致的误判。通过更稳定的监测结果, 管理者可以提前识别可能的风险阶段, 制定针对性的预防措施, 如优化通风策略、调整堆型、强化重点区域干燥等。光选作为入口端技术, 不仅具有质量筛降功能, 更在全生命周期质量管理体系中承担“基础条件构建”角色, 使后续各项管理措施建立在稳定、可控的物理结构之上, 形成完整、高效的粮食安全管理链条。

5 光选机应用的工程实践与风险管控体系构建

5.1 光选参数优化与多维识别模型调整策略

不同粮食品种在粒形结构、表面色度、光泽度和损伤纹理方面差异显著, 使光选识别模型的参数训练无法采用统一模式。为获得更高的识别精度, 需要针对品种特征对识别阈值、光学成像角度、光源波段及亮度进行系统优化, 使霉变粒与轻度损伤粒的光谱差异得以充分显现。随着高光谱成像技术的应用, 多维特征模型能够对纹理粗糙度、反射曲线异常和局部色斑进行并行识别, 构建“颜色—光谱—纹理”三维判别体系, 提高对隐性霉变粒的识别能力。深度学习算法的引入使光选设备可通过持续样本训练不断优化分类边界, 并在复杂背景下保持稳定输出。通过模型迭代, 光选设备在剔除高风险粒的同时减少对正常粒的误伤, 实现设备效率与粮食品质的双重平衡, 为后续的毒素控制奠定技术基础。

5.2 光选与清理、干燥、通风、气调等工艺的系统协同

光选作为产后整理环节的关键节点, 与清理、干燥及储藏期气调通风等工艺之间形成系统性协同关系。在光选降低杂质与霉变粒比例后, 清理工艺的负荷显著减轻, 使颗粒间空气流动性提高, 为干燥环节的均匀传热传质创造条件。干燥后的粮粒在结构完整性与水分均匀性上更为稳定, 使储藏阶段的微环境波动幅度降低。通风与气调处理依赖粮堆空

气渗透性, 而光选减少破损粒后粮堆孔隙结构分布更加一致, 使温湿度调控指令的传递效率明显提升。在多工艺联合作用下, 粮堆内部温湿度梯度趋于平衡, 霉菌生长的关键条件难以满足, 毒素增幅得到有效抑制。系统协同不仅提升处理链效率, 更构建起由源头至储藏全流程的综合风险控制体系, 实现粮食安全管理从单点控制向整体优化的转变。

5.3 基于光选结果的产后毒素风险预测与管理模型构建

光选设备在运行过程中生成的多维分类数据不仅反映粮食外观质量, 还蕴含潜在霉变风险与毒素分布的结构特征, 为建立预测模型提供了可靠数据源。通过将光选识别结果与毒素检测值、粮粒含水量、仓储温湿度等变量进行关联分析, 可构建适用于不同品种和不同储藏条件的“特征—风险”映射模型。该模型能够对高风险批次、潜在污染热点以及可能出现毒素上升的阶段进行提前预警, 使储藏管理具备前瞻性。管理者可依据模型输出调整通风策略、优化堆型结构、实施局部干燥或采取分级入仓等措施, 形成以数据驱动的精准化控制模式。随着模型样本量的不断积累, 其预测精度会持续增强, 为建立区域性、品种化、季节性的毒素风险数据库提供基础, 使粮食产后管理从经验式处理迈向智能化、量化的科学治理路径。

6 结语

光选机在粮食产后处理环节中的应用为降低储藏期毒素风险提供了系统化、可工程化的解决路径。通过剔除霉变粒、破损粒与隐性高风险颗粒, 光选处理能够在粮食入仓前显著改变微生态结构和风险基础, 使致毒真菌难以在储藏环境中形成竞争优势。文章从光学识别机制、毒素控制机理、储藏微生态协同效应与管理体系统建等方面进行了系统讨论, 表明光选不仅改善粮食初始状态, 更通过削弱毒素生成链条, 为储藏阶段的稳定性提供坚实保障。在储粮产业向绿色化、智能化发展的趋势中, 光选技术作为源头治理的重要节点, 应在装备升级、数据建模与智能仓储系统的融合方面进一步深化研究, 以构建更加安全、高效和可持续的粮食产后处理与储藏体系。

参考文献

- [1] 孙莹莹. 小麦真菌毒素防控中农药施用及加工工序的消减效果探究[D]. 中南林业科技大学, 2025.
- [2] 张咚咚, 李梦瑶, 王子祎, 等. 纳米材料在粮食安全储藏中的应用[J]. 粮食储藏, 2024, 53(03): 27-36+76.
- [3] 钦巧眉, 毛劲, 程玲, 等. 农产品和食品中黄曲霉毒素检测与阻控技术研究现状及展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(10): 1-14.
- [4] 刘焱. 储粮中主要真菌生长和毒素形成与产生CO₂的关系[D]. 河南工业大学, 2015.
- [5] 韩格. 储藏温度对不同水分小麦霉变发生及品质变化的影响研究[D]. 河南工业大学, 2024.