ZnO@ZIF−8 对稻谷储藏过程中主要品质指标的影响研究

王子祎，王欣睿，刘忠濠，胡陆祯怡，张敏，张玉荣，张咚咚*

（河南工业大学粮食和物资储备学院，粮食储藏与安全教育部工程研究中心，郑州　450001）

摘要：稻谷是我国三大主粮之一，也是我国重要的储备粮种，高温高湿条件下稻谷易发生霉变与品质劣变。本研究在制备 ZnO@ZIF−8 核壳纳米复合材料基础上，在 35 ℃、35 d 模拟储藏条件下，探究了 ZnO@ZIF−8 不同添加质量浓度对稻谷储藏过程中霉菌菌落总数、出糙率、脂肪酸值等微生物及主要品质指标的影响。结果表明，ZnO@ZIF−8 的作用呈现明显质量浓度依赖性，高质量浓度添加抑菌效果最优，霉菌菌落总数较对照组降低 43.6%，但对稻谷生理指标的影响也最大；低质量浓度 ZnO@ZIF−8 处理，在抑制霉菌生长的同时，能够减缓稻谷出糙率的下降与脂肪酸值的升高，综合应用效果最优。本研究证实了 ZnO@ZIF−8 对稻谷储藏中霉菌的抑制和品质指标的保护作用，为新型绿色稻谷储藏防护材料的开发与应用提供了理论依据与数据支撑。

关键词：稻谷；ZnO@ZIF−8；储存品质；抑菌作用

中图分类号：TS210.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−2513（2026）9−0001−0008

doi：10.19804/j.issn1006−2513.2026.9.001

Effects of ZnO@ZIF−8 on main quality of paddy during storage

WANG Ziyi，WANG Xinrui，LIU Zhonghao，HU Luzhenyi，ZHANG Min，ZHANG Yurong，ZHANG Dongdong*

（School of Food and Strategic Reserves，Henan University of Technology，Engineering Research Center of Grain Storage and Security of Ministry of Education，Zhengzhou　450001）

Abstract：Paddy is one of the three major staple foods and a crucial reserve grain species in China. It is highly susceptible to mildew and quality deterioration under high temperature and high humidity conditions. Based on the preparation of ZnO@ZIF−8 core−shell nanocomposite，the effects of different addition concentrations of ZnO@ZIF−8 on microbial indicators（represented by total mold colony count）and key quality indicators（including husked rice yield，fatty acid value，et al.）of paddy under simulated storage at 35 ℃ for 35 days were investigated. The results indicated that the effects of ZnO@ZIF−8 exhibited significant concentration dependence. The high−concentration treatment achieved the optimal antibacterial effect，with the total mold colony count reduced by 43.6% compared with the control，but it also exerted the most severe impact on the physiological indicators of paddy. In contrast，the low−concentration treatment of ZnO@ZIF−8 could inhibit mold growth while effectively slow down the decrease of

收稿日期：2026−06−15

基金项目：国家自然科学基金项目（32001745）；国家现代农业产业技术体系岗位科学家（小麦贮藏）项目（CARS−03）；河南工业大学粮油食品学院一流专业建设本科生科创项目（LYYLZYKC031）

作者简介：王子祎（2004−），女，本科，研究方向：粮食中微生物及品质的管控。

＊通信作者：张咚咚（1988−），男，博士，副教授，研究方向：粮食储藏安全。

husked rice yield and the increase of fatty acid value，presenting the best comprehensive application performance. This study verified the mold inhibitory effect and quality protective effect of ZnO@ZIF−8 during paddy storage，providing theoretical basis and data support for the development and application of novel green protective nanomaterials for paddy storage.

Keywords：paddy；ZnO@ZIF8；storage quality；antibacterial activity

稻谷作为我国口粮消费的核心主食，近些年来年总产量稳步保持在 2 亿吨以上[1]，是维系人们口粮安全、支撑国家粮食安全战略的重要粮食作物。稻谷在储藏期间，其储藏品质易受水分、酶及微生物等因素影响发生劣变，如脂肪的水解氧化导致脂肪酸值升高[2]，膜脂过氧化破坏细胞膜结构[3]，霉菌代谢产生的黄曲霉毒素等严重威胁食品安全[4]。

目前，稻谷在库储藏期间以机械通风、低温储藏、气调储藏等仓储技术为主，以降低稻谷储藏环境中的温度、氧气含量等，从而抑制微生物的生长、繁殖，抑制稻谷品质的劣变[5]。但是，应用过程中，无论是低温储粮技术、还是氮气气调技术，能耗高且需要长时间反复使用，费时费力。随着纳米制备技术的快速发展，金属、MOF 基纳米复合材料凭借独特小尺寸效应、超大比表面积以及广谱抑菌特性，对霉菌、致病菌均具备良好抑制效果[6−7]，在防霉、保鲜等领域展现出较强的应用前景；其中氧化锌纳米材料生物相容性良好，对粮油储藏过程中常见细菌、霉菌等具有较好的抑菌效果[8]。课题组先后围绕氧化锌及其修饰材料的制备应用开展了部分研究工作，在应用过程中多数研究工作聚焦于玉米的防霉保质应用，证实了氧化锌纳米颗粒可有效抑制玉米霉变、延缓玉米储存品质劣变，表现了在粮食储藏中的应用潜力[9]。

ZIF−8 作为典型锌基金属有机框架材料，由锌离子与 2− 甲基咪唑配位自组装而成，具备孔径规整、比表面积超大、化学及热稳定性优异等结构特点[10]；同时，ZIF−8 具有良好吸附性能与载体功能[11−12]，可以作为氧化锌纳米颗粒的有效载体，不但可以改善氧化锌纳米颗粒的表面特性，而且可以实现协同抑菌功能，制备成为抑菌特性更强的氧化锌纳米复合物，在粮食储藏中可更加有效的抑制微生物的生长繁殖和真菌毒素代谢[13]。稻谷的表面具有一层坚硬的保护层外壳，在储藏过程中可抵御恶劣环境的影响，但是表面易被霉菌等微生物污染，尤其在高温高湿的环境下，极易导致稻谷的霉变，影响大米的品质。

基于此，本研究将所制备的 ZnO@ZIF−8 纳米复合物应用于稻谷模拟储藏过程中，通过对表面霉菌菌落总数、色泽、出糙率、脂肪酸值等指标的研究，既能丰富基于氧化锌纳米颗粒的无机纳米抑菌材料对粮食表面微生物影响的理论研究体系，为研究该类纳米抑菌材料的穿透性影响提供相应的基础数据，也可为实际仓储过程中的应用提供数据支撑与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本实验所用稻谷为当年收获的粳稻谷，初始水分含量 13.2%，去除杂质、不完善粒、谷外糙米后备用。

ZnO@ZIF−8 复合材料的制备参照 Xu[14] 的制备方法基于自组装机制中一种“自上而下”的模版法制备。所制备的 ZnO@ZIF−8 具有典型的二维片状结构，各组成单元具有典型的核壳形貌，平均粒径为 2350 nm，PDI=0.158，ZnO 内核与 ZIF−8 骨架形成 Zn−O−N 界面键合。

二水合乙酸锌、2− 甲基咪唑（2−MIM）、硫代巴比妥酸：上海阿拉丁试剂有限公司；马铃薯葡萄糖琼脂（PDA）培养基：北京奥博星生物技术有限责任公司；过氧化氢酶（CAT）活性检测试剂盒、直链淀粉含量检测试剂盒：北京索莱宝生物科技有限公司；其他通用化学试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

CR−400 色差仪：日本柯尼卡美能达公司；JLGJ−45 实验砻谷机、JNMJ3 实验碾米机：台州粮仪厂；TDW−4000 锤式旋风磨：北京同信天博科技发展有限公司；DDS−307A 电导仪：上海

雷磁仪器厂；VELOCITY14R 高速冷冻离心机：Dynamica 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 稻谷的模拟储藏

不添加 ZnO@ZIF−8 的为空白对照组（CK），三个处理组分别为：添加 0.5 g/kg（T_1）、1.5 g/kg（T_2）、2.5 g/kg（T_3），每个处理组分别设 3 个独立平行样。

依据《食品安全国家标准　食品中水分的测定》[15] 中的直接干燥法对清理后的稻谷水分进行测定。计算将稻谷调至水分含量为 15.5% 的用水量，将对应质量的二维 ZnO@ZIF−8 加入无菌去离子水中，制备均匀悬浮液。将每袋稻谷平铺于无菌托盘中，用小型喷雾器将对应悬浮液均匀喷洒于稻谷表面，边喷洒边翻动稻谷，确保材料与稻谷充分接触，喷洒后将稻谷装入无菌自封袋，密封平衡 24 h，再次测定水分，确保所有样品水分稳定在（15.5±0.2)%。

将平衡后的稻谷装入透气袋，置于（35±1）℃恒温培养箱中储藏 35 d，分别在储藏第 0、7、14、21、28、35 天取样，用于微生物指标和品质指标测定。

1.3.2 霉菌菌落总数的测定

称取 25 g 不同储藏时间的稻谷样品，加入 225 mL 无菌去离子水，充分摇匀后，利用拍打器进行拍打处理，获得菌悬液，以此为基础制备不同质量浓度梯度的菌悬液。取 0.1 mL 的菌悬液均匀涂布于 PDA 培养基，放置于 28 ℃培养，计数平板菌落数，结果以 CFU/g 表示。

1.3.3 色泽的测定

采用色差仪测定大米的色泽参数。对色差仪进行空白校准，将稻谷样品平铺整个凹槽，随后进行测量，并记录 L^* 值（明度）、a^* 值（红绿值）、b^* 值（黄蓝值），每个样品重复测定 5 次，取平均值。b^* 值越高表示大米黄变越严重。

1.3.4 出糙率的测定

从每份样品中随机称取净稻谷 25 g，若样品含生芽粒，需先将其挑出并剥壳称重，剩余样品经试验砻谷机脱壳处理后，称量所得糙米的质量，再从糙米中拣出不完善粒并记录其质量。试样出糙率的计算公式为：

$$X/\%=\frac{(m_1+m_2)-\frac{m_1+m_3}{2}}{m_0}\times 100 \quad (1)$$

式中：X 为出糙率（%）；m_0 为试样质量（g）；m_1 为生芽稻粒质量（g）；m_2 为砻谷后糙米质量（g）；m_3 为砻谷后糙米中不完善粒质量（g）。

1.3.5 脂肪酸值的测定

糙米样品经粉碎后，称取 10 g 试样，用无水乙醇振荡提取游离脂肪酸，过滤后取滤液，用氢氧化钾标准滴定溶液滴定至微红色 30 s 不褪色，同时做空白试验，计算脂肪酸值，结果以 mg/100g（干基）表示。

$$S=(V_1-V_0)\times c\times 56.1\times\frac{50}{25}\times\frac{100}{m(100-w)}\times 100 \quad (2)$$

式中：S 为样的脂肪酸值（mg/100g）；V_1 为滴定试样液所耗氢氧化钾标准滴定溶液体积（mL）；V_0 为滴定空白液所耗氢氧化钾标准滴定溶液体积（mL）；c 为氢氧化钾标准滴定溶液的摩尔浓度（mol/L）。

1.3.6 丙二醛的测定

采用 Li 等人 [16] 的方法，并稍作修改。取 1.00 g 样品，加入 5 mL 10% 的三氯乙酸混匀 1 min，随后离心（4 ℃、10000 r/min、10 min）。收集上清液于比色管中，用 10% 的三氯乙酸溶液定容至 7 mL。吸取 2 mL 上清液加入 2 mL 0.6% TBA 混合，沸水浴 15 min。迅速冷却后离心（4 ℃，10000 r/min、10 min）。随后测定 450、532、600 nm 处波长的吸光度。计算丙二醛（MDA）含量见公式（3）、（4），结果以 mg/kg 表示。

$$C_{MDA}=6.45\times(A_{532}-A_{600})-0.56\times A_{450} \quad (3)$$

$$\text{MDA 含量}=(C\times V)/W \quad (4)$$

式（3）、（4）中：V 为提取液体积（mL）；W 为样品质量（g）；A 为吸光度（L/(g·cm)）。

1.3.7 电导率的测定

参照申屠婉铃等 [17] 的方法，并稍作修改，随机选取砻谷后完整饱满的糙米 25 粒，蒸馏水冲洗 3 次，放入烧杯中加入 50 mL 蒸馏水，30 ℃恒温静置 13 h 后，用电导仪测定浸泡液的电导率，结果以 μS/cm 表示。

1.3.8 过氧化氢酶活性的测定

过氧化氢酶活性测定参考过氧化氢酶活性（CAT）试剂盒（BC0200：北京索莱宝科技有限公司），测定在 240 nm 处的吸光值，结果用 U/g 表示。

1.4 数据处理

采用 EXCEL 2021 记录试验数据，计算平均值及标准误；所有数据的差异显著性分析、Probit 回归分析均采用 SPSS 17.0 软件完成，试验结果的可视化绘图均采用 Origin 9 软件实现。

2 结果与分析

2.1 对稻谷储藏过程中霉菌菌落总数的影响

霉菌是导致稻谷储藏期间霉变、品质劣变的重要因素，其大量繁殖会分解稻谷籽粒中的淀粉、蛋白质等营养物质，同时产生黄曲霉毒素等有害代谢产物[18]，直接威胁稻谷的储藏安全与食用安全。霉菌菌落总数是直观反映稻谷微生物污染程度、评价储藏卫生状况的重要指标[19−20]。

随着储藏时间延长，稻谷表面霉菌菌落总数均呈持续上升趋势，而 ZnO@ZIF−8 处理组的霉菌增长速率显著低于对照组，抑菌效果呈明显的剂量依赖性。储藏至 35 d 时，对照组霉菌总数达 3.9×10^4 CFU/g，较初始值增幅 160.0%；T_1、T_2、T_3 组霉菌总数分别为 3.1×10^4、2.5×10^4、2.2×10^4 CFU/g，较对照组分别降低 20.5%、35.9% 和 43.6%（图 1）。结果表明，ZnO@ZIF−8 可显著抑制稻谷储藏过程中霉菌的生长繁殖，且高质量浓度处理的抑菌效果最优，能有效延缓稻谷霉变进程。

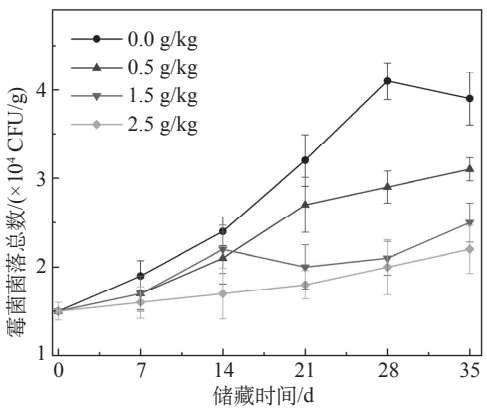

图 1 稻谷储藏期间霉菌菌落总数的变化

Figure 1 Changes in the total mold colony count during paddy storage

从菌群增长动态来看，空白对照组在储藏第 14 天进入霉菌快速增殖阶段，后期菌群数量趋于平稳；而处理组霉菌增殖进程被明显抑制，未出现爆发式滋生现象。这与课题组前期在氧化锌基纳米材料抑菌研究中的结论相近[9]，ZnO 复合材料可通过破坏霉菌细胞膜结构、干扰胞内代谢酶活性，显著抑制储粮霉菌生长；同时，相关研究表明 MOF 修饰后的 ZnO 复合材料具备更大比表面积，结合其协同抑菌作用，其抑菌效果优于单一纳米氧化锌颗粒[13]，这也解释了该研究中 ZnO@ZIF−8 的长效抑菌作用特征。

2.2 对大米色泽的影响

稻谷储藏期间受高温高湿、微生物侵染、自身酶促氧化及膜脂过氧化等多重作用，籽粒会出现亮度变暗、红度与黄度增加等外观劣变。色差参数 L^*（亮度值）、a^*（红绿值）、b^*（黄蓝值）可客观量化稻谷储藏过程中色泽变化[21]，L^* 值越低代表籽粒色泽越暗沉，a^* 值偏高代表红度增加，b^* 值升高表示稻谷黄变程度加剧，是评价稻谷外观新鲜度的重要指标。

稻谷经模拟储藏 35 d 后，空白对照组稻谷 L^* 值下降 6.57%，a^* 值上升 14.29%，b^* 值上升 26.47%，籽粒出现明显的亮度降低、红度增加及黄变加深。添加 ZnO@ZIF−8 后的处理组色泽变化幅度均小于对照组，且不同添加浓度间的差异并不显著。具体而言：L^* 值方面，T1、T2、T3 组分别下降 5.84%、3.36% 和 0.15%，以 T3 组降幅最小（图 2A）；a^* 值方面，T1 组上升 6.58%，而 T2、T3 组分别下降 5.64% 和 3.57%（图 2B）；b^* 值方面，T1、T2、T3 组分别上升 24.12%、19.85% 和 11.75%，均低于对照组的 26.47%（图 2C）。

ZnO@ZIF−8 对稻谷储藏期间的色泽劣变具有延缓作用，且随添加质量浓度升高效果略有增强。其机制可能在于：该纳米材料通过抑制霉菌生长，减少了微生物代谢产生的色素沉积及对天然色素的分解；同时其抗氧化活性可清除储藏过程中积累的活性氧自由基，保护类胡萝卜素等色素分子的共轭双键结构，并抑制多酚类物质的酶促褐变，从而维持稻谷的良好外观。

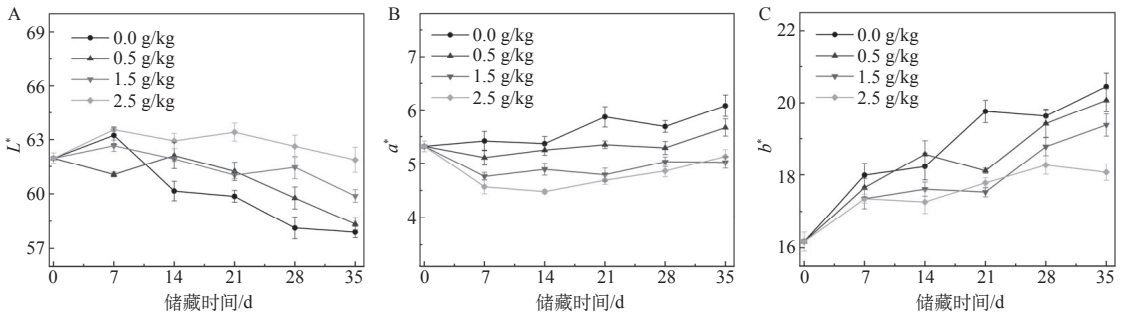

图 2　稻谷储藏期间大米 L^*（A）、a^*（B）、b^*（C）值的变化

Figure 2　Changes of L^* (A), a^* (B), b^* (C) values of milled rice during paddy storage

需要指出的是，各处理组与对照组之间的色泽差异绝对值较小。造成这一现象的原因主要有两点：长期高温高湿储藏环境对稻谷色泽的劣变占据主导地位，纳米材料的干预效果相对有限[22]；此外，ZnO@ZIF−8 颗粒附着于籽粒表面，其白色外观和光散射效应会干扰色度计的测量结果，表现为 L^* 值的保持或升高、a^* 与 b^* 值的波动，这些变化并不能完全等同于籽粒内部色素组成的真实改善。因此，在解读色泽参数时，应将纳米材料表面附着引起的光学效应与其对稻谷内在品质的实际保护作用加以区分。综合来看，较高质量浓度（2.5 g/kg）的 ZnO@ZIF−8 处理在维持稻谷表观色泽方面相对更优，但其改善幅度有限，建议结合脂肪酸值、霉菌数量等其他品质指标综合评估其储藏保鲜效果。

2.3　对稻谷出糙率的影响

出糙率是评价稻谷加工品质的核心指标之一，直接反映稻谷的经济价值，其变化与稻谷籽粒的结构完整性和营养成分降解程度密切相关是决定稻谷经济价值的重要参数[23]。

稻谷出糙率初始值为 82.99%，随着储藏时间延长，所有组的出糙率均呈持续下降趋势，且储藏 21 d 后下降速率明显加快。储藏至 35 d 时，对照组出糙率下降至 81.21%，较初始值降低 1.78%；T_1、T_2、T_3 组分别下降至 81.42%、81.40% 和 81.13%，较初始值分别降低 1.57%、1.59% 和 1.86%（图 3）。T_1、T_2 组出糙率分别比对照组高出 0.21%、0.19%。结果表明，ZnO@ZIF−8 的添加抑制霉菌生长繁殖[23]，减少了微生物对籽粒细胞壁和胚乳结构的侵蚀，维持籽粒硬度与完整性，从而延缓出糙率下降。

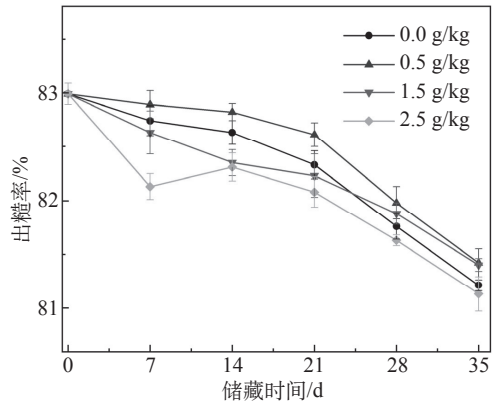

图 3　稻谷储藏期间出糙率的变化

Figure 3　Changes in brown rice yield during paddy storage

2.4　对稻谷脂肪酸值的影响

稻谷在储藏过程中，脂肪在自身酶及微生物共同作用下发生水解与氧化，游离脂肪酸不断积累，造成脂肪酸值的不断升高，脂肪酸值是衡量稻谷酸败劣变、储藏品质的关键指标之一，脂肪酸值越高，稻谷陈化酸败程度越严重[24]。

在 35 d 储藏周期内，稻谷脂肪酸值均随储藏时间延长呈持续上升趋势。其中，对照组脂肪酸值上升幅度最大，第 35 天时达到 33.9 mg/100g，较初始值增加 33.99%（图 4），这是微生物活动旺盛，加上高温高湿的影响，脂肪氧化水解加剧，导致稻谷酸败进程加快。添加 ZnO@ZIF−8 后，能显著抑制稻谷脂肪酸值的升高，T_1、T_2、T_3 组脂肪酸值分别为 32.1、32.65、33.1 mg/100g，与对照组相比，分别降低 7.11%、4.94% 和 3.16%，不同处理组的抑制效果呈现一定的质量浓度依赖性。

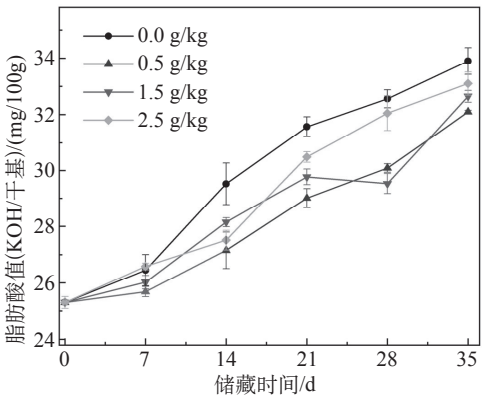

图 4　稻谷储藏期间脂肪酸值的变化

Figure 4　Changes in fatty acid value of paddy during storage

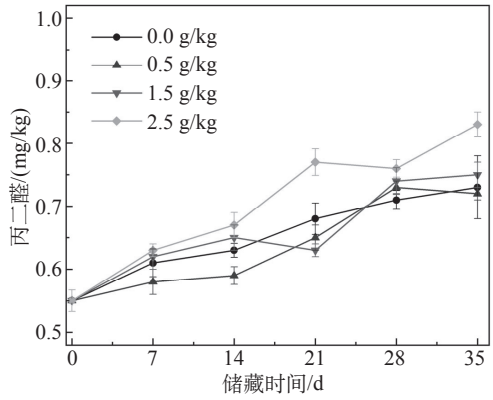

图 5　稻谷储藏期间丙二醛含量的变化

Figure 5　Changes in malondialdehyde content of paddy during storage

结果表明，ZnO@ZIF−8 可能通过抑制霉菌繁殖、降低脂肪水解氧化酶活性，阻滞了稻谷脂质酸败，延缓游离脂肪酸积累，维持储藏品质稳定。高质量浓度处理组的效果有所减弱，可能是由于较高质量浓度纳米材料对稻谷籽粒表皮产生轻微损伤，导致内源脂肪酶释放增加，部分抵消了抑菌带来的正向作用 [25]。

2.5　对稻谷丙二醛含量的影响

丙二醛（MDA）是细胞膜脂过氧化作用的主要标志物，其含量高低可直接反映细胞膜脂过氧化的程度和细胞膜损伤的严重程度，是评价稻谷陈化劣变程度的重要指标 [26]。

随着储藏时间的延长，丙二醛含量均呈持续上升趋势，表明稻谷在储藏过程中发生了不同程度的膜脂过氧化反应。对照组的丙二醛含量上升最为迅速，至 35 d 时达到 0.73 mg/kg，较初始值增加 32.73%（图 5），表明该组稻谷细胞膜受到了明显的氧化损伤。处理组的丙二醛积累呈现明显的质量浓度差异，T_1 组丙二醛含量为 0.72 mg/kg，较初始值增加 30.91%；T_2 组丙二醛含量为 0.75 mg/kg，较初始值增加 36.36%；T_3 组丙二醛含量为 0.83 mg/kg，较初始值增加 50.91%，加剧了丙二醛的积累。

结果表明，低质量浓度 ZnO@ZIF−8 可在一定程度上减轻稻谷籽粒的膜脂过氧化作用。一方面，其抑菌作用减少了霉菌代谢产生的氧化应激对细胞膜的损伤；另一方面，ZnO@ZIF−8 可产生 ROS，从而诱导籽粒内部的抗氧化活性，及时清除稻谷籽粒内产生的过氧化自由基，从而轻微减少丙二醛的生成。但当添加质量浓度过高时，过量的纳米材料可能产生超量的过氧化物，超出了籽粒自身抗氧化系统的清除能力，反而加剧了膜脂过氧化的链式反应 [27]，导致丙二醛含量显著升高，加重了细胞膜的氧化损伤。

2.6　对稻谷电导率的影响

稻谷籽粒细胞膜的完整性与细胞内电解质的外渗程度密切相关，当细胞膜受到损伤时，细胞内的钾离子、钙离子等电解质会大量外渗，导致浸泡液的电导率升高 [28]。因此，电导率是反映细胞膜完整性的另一个重要指标。

随着储藏时间的延长，稻谷电导率呈逐渐上升趋势，表明稻谷在储藏过程中细胞膜完整性均受到不同程度的破坏，电解质外渗量逐渐增加。储藏至 35 d 时，对照组电导率上升至 40.32 μs/cm，较初始值增加 14.84%；T_1、T_2、T_3 组分别上升至 39.66、42.12、43.46 μs/cm，较初始值分别增加 12.96%、19.97% 和 23.78%（图 6）。与对照组相比，T_1 组电导率降低了 0.66 μs/cm，表现出一定的细胞膜保护效果；T_2 和 T_3 组电导率则分别升高 1.80、3.14 μs/cm，细胞膜损伤程度有所升高。

上述结果与丙二醛含量的变化趋势一致，进一步证明了 ZnO@ZIF−8 对细胞膜的影响具有质量浓度依赖性。低质量浓度（0.5 g/kg）ZnO@ZIF−8 可通过抑制霉菌生长、减轻膜脂过氧化程度，维持细胞膜结构的完整性，减少电解质外渗。

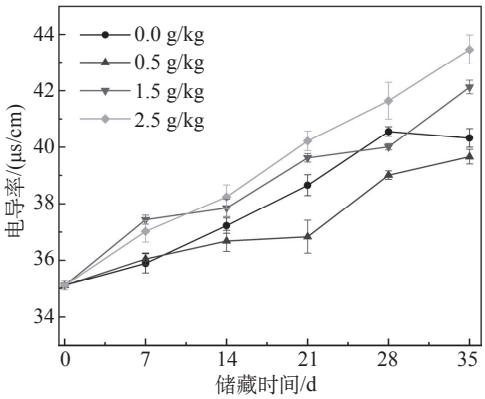

图 6　稻谷储藏期间电导率的变化

Figure 6　Changes in electrical conductivity of paddy during storage

这主要得益于其良好的抑菌和产生 ROS 信号分子的双重作用，既减少了微生物对细胞膜的破坏，又激活了籽粒自身的抗氧化级联反应，从而维持了细胞膜的正常生理功能。

2.7　对过氧化氢酶（CAT）活性的影响

过氧化氢酶（CAT）是稻谷体内重要的抗氧化防御酶之一，能够催化分解细胞内过量的过氧化氢，减少活性氧对细胞的氧化损伤，其活性高低直接反映稻谷抗氧化系统的功能状态 [29]。

随着储藏时间的延长，籽粒内过氧化氢酶活性均呈先短暂升高后持续下降的趋势：储藏初期，稻谷受到轻微氧化应激，诱导抗氧化酶系统激活，酶活性短暂上升；随着储藏时间延长，氧化损伤不断积累，酶蛋白逐渐变性失活，导致活性持续下降。储藏至 35 d 时，处理组的过氧化氢酶活性呈现显著的质量浓度依赖性差异，对照组活性降至 52.65 U/g，降幅达 18.05%（图 7），其抗氧化防御系统已出现明显损伤；T_1 组活性最高，为 57.65 U/g，降幅 10.27%；T_2 组活性为 55.51 U/g，降幅 13.60%；T_3 组为 50.31 U/g，降幅 21.70%，表明该质量浓度处理加速了酶活性的下降。

结果表明，低质量浓度 ZnO@ZIF−8 能够有效保护稻谷体内抗氧化酶的活性，维持其抗氧化防御系统的正常功能。这可能是因为氧化锌纳米复合物抑制了霉菌的生长繁殖，降低了微生物代谢对籽粒抗氧化系统的破坏，同时籽粒内清除了过量的活性氧自由基，减少了酶蛋白的氧化损伤，从而使稻谷保持较强的抗氧化能力 [30]，延缓品质

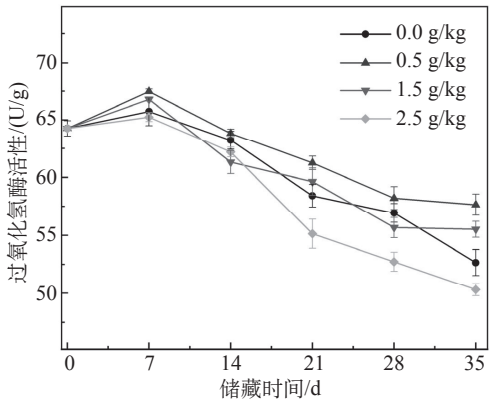

图 7　稻谷储藏期间过氧化氢酶活性的变化

Figure 7　Changes in catalase activity of paddy during storage

劣变。但当添加质量浓度过高时，过量的纳米复合物会诱导细胞内活性氧爆发式产生，超出了抗氧化系统的清除能力，同时对酶蛋白结构造成直接损伤，反而加速了过氧化氢酶的失活，削弱了稻谷自身的抗氧化防御能力。

3　结论

ZnO@ZIF−8 在稻谷储藏过程中可发挥抑菌与品质调控双重作用，其效应呈现明显的质量浓度依赖性。在 35 d 的模拟储藏过程中添加质量浓度越高，抑菌效果越显著，T3 组的霉菌总数较空白对照组降低 43.6%，可有效延缓霉菌的快速增长、降低稻谷霉变风险，但该质量浓度会对稻谷使出糙率、脂肪酸值的抑制效果较弱；而合适质量浓度处理在有效抑制霉菌生长的同时，同时显著延缓出糙率下降与脂肪酸值升高，且能轻微抑制丙二醛积累、减少电解质外渗并维持较高的过氧化氢酶活性。通过对 ZnO@ZIF−8 在稻谷储藏中的应用研究，为新型绿色稻谷储藏防护材料的开发与应用提供了理论依据与数据支撑。

参考文献：

[1] 朱大伟，邵雅芳，章林平，等 . 稻谷产后干燥储藏技术研究进展 [J]. 中国稻米，2026，32（3）：86−90.

[2] 陈月银，黄东阳，何梦婷，等 . 6 种优质稻谷在准低温储藏条件下的品质变化规律研究 [J]. 粮食储藏，2025，54（2）：51−57.

[3] 李梦瑶，童俊杰，王子祎，等 . 氧化锌纳米颗粒对玉米储

藏过程中细胞结构及生理活性的影响 [J]. 食品与发酵工业，2025，51（5）：219−226.
[4] 张一盟，樊凤娇，刘雨霏，等 . 不同温度对稻谷贮藏过程中食用品质的影响 [J/OL]. 食品研究与开发，2026−05−20. https://link.cnki.net/urlid/12.1231.ts.20260520.0927.002.
[5] 刘菲，杭幸聪，鲁玉杰，等 . 绿色低碳低温智能粮仓研究进展 [J]. 粮食储藏，2026，55（2）：62−70.
[6] Raghupathi K R，Koodali R T，Manna A C. Size−dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles [J]. Langmuir，2011，27（7）：4020−4028.
[7] Premanathan M，Karthikeyan K，Jeyasubramanian K，et al. Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram−positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation [J]. Nanomedicine：Nanotechnology，Biology and Medicine，2011，7（2）：184−192.
[8] Zhou X Q，Hayat Z，Zhang D D，et al. Zinc oxide nanoparticles：Synthesis，characterization，modification，and applications in food and agriculture [J]. Processes，2023，11（4）：1193.
[9] 张咚咚，胡思，Zakir H，等 . 氧化锌纳米颗粒对玉米储藏过程中微生物的抑制作用 [J]. 食品科学，2021，42（21）：137−144.
[10] Kalati M，Akhbari K. Optimizing the metal ion release and antibacterial activity of ZnO@ZIF−8 by modulating its synthesis method [J]. New Journal of Chemistry，2021，45（48）：22924−22931.
[11] Van Tran T，Dang H H，Nguyen H，et al. Synthesis methods，structure，and recent trends of ZIF−8−based materials in the biomedical field [J]. Nanoscale Advances，2025，7（13）：3941−3960.
[12] Tarin M，Oryani M A，Javid H，et al. Advancements in chitosan−based nanocomposites with ZIF−8 nanoparticles：Multifunctional platforms for wound healing applications [J]. Carbohydrate Polymers，2025，362：123656.
[13] Xu S Y，Wang Z Y，Wu Q，et al. Inhibition of fungal mycelial growth and mycotoxin production using ZnO@mSiO$_2$ nanocomposite during maize storage [J]. Food Bioscience，2025，63：105730.
[14] Xu S Y，Mei C S，Zhou K Y，et al. Construction of antibacterial−enhanced 2D ZnO@ZIF−8 nanocomposites based on synergistic antimicrobial mechanisms and application in maize long−term storage [J]. Food Chemistry，2025，495：146542.
[15] GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定 [S].
[16] Li X Y，He Y T，Xie Y M，et al. Effect of catalase on lipid oxidation and flavor substances of α− instant rice during storage [J]. Food Science and Technology，2022，42：e46822.
[17] 申屠婉铃，蒋俊浩，周旭，等 . CO$_2$ 气调储藏中稻谷水分变化对稻谷储藏品质的影响 [J]. 粮食储藏，2022，51（3）：35−39.
[18] 张景景 . 粮食仓储过程中霉菌污染的控制与应对策略 [J]. 中国食品工业，2024（21）：59−61.
[19] 田琳，张海洋，祁智慧，等 . 储藏稻谷及糙米表面霉菌检测情况的分析比较 [J]. 中国粮油学报，2021，36（8）：101−107.
[20] 詹展，张威，王平坪，等 . 储藏稻谷粮堆中霉菌区系的演替研究 [J]. 粮食与油脂，2021，34（7）：62−65.
[21] 赵宛廷 . 储藏条件对稻谷“盐丰 −47”及其加工后大米品质影响的研究 [D]. 沈阳：沈阳农业大学，2023.
[22] 张瑛，吴先山，吴敬德，等 . 稻谷储藏过程中理化特性变化的研究 [J]. 中国粮油学报，2003，18（6）：20−24，28.
[23] 毛钰琳 . 高 CO$_2$ 浓度对不同源库类型水稻产量形成及品质性状的影响 [D]. 扬州：扬州大学，2025.
[24] Hua B L，He Z Y，Zheng L，et al. Self−assembly of three−dimensional zeolite imidazolate framework/anionic polyacrylamide network with enhanced hydrophilicity and water dispersibility for highly efficient water purification [J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2021，631：127704.
[25] Tuncel D，Ökte A N. Improved adsorption capacity and photoactivity of ZnO−ZIF−8 nanocomposites [J]. Catalysis Today，2021，361：191−197.
[26] Kaneti Y V，Tang J，Salunkhe R R，et al. Nanoarchitectured design of porous materials and nanocomposites from metal−organic frameworks [J]. Advanced Materials，2017，29（12）：1604898.
[27] 杨慧 . 金属离子胁迫产生植物膜脂过氧化的能力与离子的极化能力正相关 [J]. 植物分类与资源学报，2011，33（3）：293−298.
[28] 叶佳琳，杜京霖，吴光玥，等 . 温度及水分含量对二氧化碳气调储藏稻谷品质的影响 [J]. 中国稻米，2024，30（6）：60−65.
[29] 宋伟，陈瑞，刘璐 . 不同储藏条件下糙米中过氧化氢酶活动度的变化规律 [J]. 粮食储藏，2010，39（6）：28−33.
[30] 侯帅，张祎佳，周丹丹，等 . 基于介质阻挡放电低温等离子体分析储藏稻谷高温胁迫下酚类代谢规律 [J]. 中国农业科学，2024，57（6）：1180−1190.

《中国食品添加剂》杂志—中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊、CACJ中国应用型核心期刊
欢迎您通过唯一渠道—本刊在中国知网的期刊编审系统投稿
网　址：https://zstj.cbpt.cnki.net