

引用:张晓雨,刘华,李京洋,等. ZnS 量子点对米曲霉生长的影响[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026,39(2):282-289.

Citation: ZHANG Xiaoyu, LIU Hua, LI Jingyang, CHEN Zhong. The effect of ZnS quantum dots on the growth of *Aspergillus oryzae*[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2026,39(2): 282-289.

文章编号 1672-6634(2026)02-0282-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025100001

ZnS 量子点对米曲霉生长的影响

张晓雨,刘华,李京洋,陈忠

(江西科技师范大学 材料与能源学院,江西 南昌 330036)

摘要 采用低温固相法制备了 ZnS 量子点(Quantum Dots, QDs),并研究了其晶体结构、表面形貌、细胞毒性以及对米曲霉生长与发酵周期的影响。结果表明,所得 ZnS 样品具有立方闪锌矿结构,晶粒尺寸在 3.5~5.3 nm 之间;在浓度低于 100 $\mu\text{g/mL}$ 时,该 ZnS QDs 对 HeLa 细胞无毒性,细胞存活率达 90.93%。米曲霉应用结果显示,添加 75 $\mu\text{g/mL}$ 的 ZnS QDs 可使米曲霉生物量和菌球尺寸分别提高至空白对照组的 1.43 和 2.08 倍,并将其稳定生长期由 108 h 延长至 144 h。光致发光(PL)结果显示,经 ZnS QDs 处理的米曲霉发光强度增强了 3.23 倍,表明其代谢活性和 DNA 合成能力得到显著提升。本研究为利用 ZnS QDs 优化米曲霉工业发酵工艺、提升其生物量与代谢产物产量、并延长发酵周期,提供了一种可行策略。

关键词 ZnS;量子点;米曲霉;细胞毒性;光致发光

中图分类号 TS201.3

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



The effect of ZnS quantum dots on the growth of *Aspergillus oryzae*

ZHANG Xiaoyu, LIU Hua, LI Jingyang, CHEN Zhong

(School of Materials and Energy, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330036, China)

Abstract ZnS quantum dots (QDs) were synthesized by a low-temperature solid-phase method. The crystal structure, morphology and cytotoxicity of ZnS QDs and their effects on the growth and fermentation cycle of *Aspergillus oryzae* (*A. oryzae*) were investigated. The results showed that the synthesized ZnS samples exhibited a cubic zinc blende crystal structure with a grain size of 3.5~5.3 nm. When the concentration of QDs was lower than 100 $\mu\text{g/mL}$, ZnS QDs were non-toxic to HeLa cells and the cell survival rate reached 90.02%. The results of *A. oryzae* application indicated that the addition of 75 $\mu\text{g/mL}$ ZnS QDs increased the biomass and pellet size of *A. oryzae* to 1.43-fold and 2.08-fold of the blank control, respectively, while also extending the stable growth period from 108 h to 144 h. The photoluminescence (PL) results revealed that the PL intensity of *A. oryzae* treated with ZnS QDs was about 3.23 times stronger than that of control sample, indicating a significant improvement in its metabolic activity and DNA synthesis ability. This work provided a feasible strategy for optimizing *A. oryzae* industrial ferment-

收稿日期:2025-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(61964008);江西省研究生创新专项资金项目(YC2025-S676)资助

通信作者:陈忠,男,汉族,博士,副教授,研究方向:新型功能纳米材料,E-mail:chenzhonglzu@sina.com.

tation processes, enhancing yield, and prolonging the fermentation cycle using ZnS QDs.

Keywords ZnS; quantum dots; aspergillus oryzae; cytotoxicity; photoluminescence

0 引言

米曲霉(*Aspergillus oryzae*, *A. oryzae*)是一种公认的食品安全生产菌株,通过固态发酵,它能产生大量的酶制剂(如:蛋白酶及淀粉酶等)和有机酸,这些产物不仅用于传统发酵工业(如酱油、豆豉的生产),也广泛用于初级、次级代谢产物及酶类的制备,同时还是研究基因表达和蛋白分泌的理想对象^[1]。因此,关于提高米曲霉产量的研究备受重视,是米曲霉基础研究的重要领域,也是扩大米曲霉推广应用的关键技术难点之一。

目前,关于提高米曲霉生物量及其代谢物产量的研究工作已有不少报道,如:Bi等人^[2]建立了一套基于中生霉素的遗传转化系统,并以诺尔索硫霉素乙酰转移酶作为抗性标记,成功在米曲霉中表达了外源蛋白 β -葡萄糖醛酸酶,转化率高达85.71%。Baihaqqi等人^[3]构建了两种特异性表达的自克隆米曲霉,并通过优化培养条件发现:在酸性pH(4.5)环境下,采用MB叶轮进行分批发酵,可显著提高菌体生物量与酶产量,其中干菌丝重达到约19 g/L。Kudo等人^[4]通过米芽孢杆菌的液体和平板培养中的HirA基因研究调控曲酸产生的机制,结果显示:破坏HirA基因的菌株在液体培养中曲酸产量下降,而在平板培养中则会增加,这是由于HirA基因在转录层次的破坏所致。Nishitani等人^[5]采用过表达ChlH和ChlK来提高米曲霉中二羧酸的产量,其产量能够由8.1%提升到14.5%。Suryadi等人^[6]发现采用物理诱变剂(如紫外线)、化学诱变剂(如NTG)、离子束和等离子体技术均能诱变产曲酸基因从而增加曲酸的产量,但离子束和等离子体技术的效果更佳。Chen等人^[7]通过过表达AoKat1(OEAoKat1)基因,将米曲霉的代谢产物(曲酸)产量提升至约43.9 g/L,较野生型菌株提高了31%,并发现该基因的表达还会影响菌落的形态、产孢、碳源利用及氧化应激敏感性。总之,前人的研究成果显示:物理诱变、化学诱变、原生质体融合、复合诱变以及基因工程育种等技术均可以有效提高米曲霉及其代谢产物的产量,但这些技术存在复杂、昂贵且费时的缺点。因此,急需寻找一种简单的、廉价的、易操作的新技术。量子点(Quantum Dots, QDs)作为一种纳米尺度的半导体材料,因其独特的光电特性、激活效应和稳定性在上述背景下备受关注^[8-10]。

锌是所有生命形式的基本元素,因为它在许多细胞功能中起着重要的作用,如:催化剂、辅助因子和蛋白质结构稳定剂^[11]。在众多的Zn基纳米材料中,ZnS材料不仅对生命体无毒或低毒,且具有宏观尺寸材料所不具备的优异性能,已在光电探测器、太阳能电池,尤其是生物传感器和生物荧光标记等领域展现出了巨大的应用潜力^[12-16]。在课题组前期的研究中^[17-20],发现:在培养基中的ZnS QDs能被米曲霉吸收并作为营养物质,提高米曲霉的产量。但ZnS QDs对米曲霉的时间依赖性效应,特别是其对不同生长阶段及全周期的影响,仍有待深入与系统研究。

因此,本研究采用低温固相法制备了ZnS QDs,在评估其HeLa细胞毒性的基础上,首次探讨了ZnS QDs在不同培养时间下对米曲霉产量及生长周期的影响。本研究旨在为通过纳米材料调控米曲霉发酵过程提供新策略,对优化其工业发酵效率具有参考意义。

1 实验

1.1 ZnS QDs的合成

本研究所涉及的化学试剂均来源于国药集团化学试剂有限公司。准确称量2.275 4 g $\text{ZnAc}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (AR(99%))和0.778 8 g $\text{C}_2\text{H}_5\text{NS}$ (TAA) (AR(99%)),置于研钵。加入10 mL无水乙醇,充分研磨后,将混合物转移至陶瓷坩埚,并于100 °C干燥箱中反应3 h。待产物自然冷却后,分别用去离子水和乙醇进行离心分离,以去除残留物。最后,将沉淀物置于60 °C烘箱中干燥8 h,得到目标产物。

1.2 材料的表征测试

1.2.1 X射线粉末衍射(XRD)。XRD是一种基于晶体对X射线的衍射效应,用于分析物质结构与物相组成的技术。本实验采用 $\text{CuK}\alpha$ 射线(波长 $\lambda = 0.154\ 056\ \text{nm}$),在40 kV工作电压和60 mA工作电流下进

行。扫描范围为 $20^{\circ} \sim 65^{\circ}$, 扫描步进为 0.02° , 扫描速度为 $2^{\circ}/\text{min}$ 。

1.2.2 透射电镜测试(TEM)。试样的制备:取适量样品与无水乙醇混匀,进行充分的超声后形成悬浮液,在取液之前先上下震荡,然后用移液枪在中间取几滴滴在电镜铜网上,后放入烘箱中完全干燥后,得到透射电镜的待测样品。

样品的表征:使用工作电压为 200 kV,型号为 FEI G2 20 STWIN 的透射电镜对样品进行基础形貌以及晶格条纹的观察。

1.2.3 光致发光测试(Photoluminescence, PL)。样品的制备:将液体培养基中培养至预定时间的米曲霉培养物进行过滤,收集菌丝体。该菌丝体经 60°C 烘箱彻底烘干后,在研钵中研磨至粉末状。最终,将所得菌丝粉末收集于离心管中,密封并置于干燥器内保存备用。

样品表征:采用配有 He-Cd 激光器的卓立汉光光谱仪(Zolix, Omni PL-LF325)表征样品的光致发光光谱,其中,激发波长为 325 nm,扫描范围为 $350 \sim 650 \text{ nm}$,扫描速度为 $60 \text{ nm}/\text{min}$,扫描步长为 $1 \text{ nm}/\text{s}$ 。

1.2.4 细胞毒性测试。将 $200 \mu\text{L}$ 的人宫颈癌细胞(HeLa)(购自武汉博斯特生物工程有限公司)于 96 孔平底组织培养板中, 37°C , $5\% \text{ CO}_2$ 的潮湿气氛下维持 24 h,培养板中补充有胎牛血清(10%)、青霉素($100 \mu\text{g}/\text{mL}$)、链霉素($100 \mu\text{g}/\text{mL}$)。将 $20 \mu\text{L}$ ZnS QDs (终浓度分别为 0、25、50、75 和 $100 \mu\text{g}/\text{mL}$) 分别添加到每个孔中,加入 $5 \text{ mg}/\text{mL}$ 的 MTT, 37°C 条件下孵育 4 h 后,每个孔再加入 $100 \mu\text{L}$ 二甲基亚砜(DMSO) 孵育 15 min,每组重复 3 次。使用 Biotek ELX808 酶标仪在 494 nm 处记录它们的吸光度(Optical density, OD)。根据以下示意方程计算得细胞的存活率^[21]

$$\rho_{\text{细胞存活率}} = \frac{5 \text{ 次实验组样品 OD 值}}{5 \text{ 次空白组样品 OD 值}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3 培养基的配制

菌种:米曲霉菌株(3.042)购自中国工业微生物菌种保藏管理中心,编号为 CICC 40092;传代复苏后,以甘油管形式保存于本实验室 -80°C 超低温冰箱。

察氏(Czapek-Dox, CD)液体培养基:硝酸钠 0.2%,磷酸二氢钾 0.1%,硫酸镁 0.05%,氯化钠 0.05%,氯化钾 0.05%,七水合硫酸亚铁 0.002 5%,葡萄糖 2.0%,去离子水,在 121°C 条件下高压灭菌 20 min 备用。

1.4 米曲霉的培养

米曲霉表型:将米曲霉孢子液于超净工作台上解冻,摇匀后接种 $100 \mu\text{L}$ 于灭菌冷却后的液体培养基中,每个变量设置三组重复,放置摇床中培养,培养到对应时间后取出拍照记录其表型。

米曲霉生长曲线:将米曲霉孢子液于超净工作台上解冻,摇匀后接种于 $200 \mu\text{L}$ 于灭菌冷却后的液体培养基中,每个变量设置三组重复,放置摇床中培养,培养到对应时间后取出,过滤并收集菌丝,将菌丝在 50°C 烘箱中烘干后称量并记录菌丝的干物质重量,以此绘制米曲霉的生长曲线图。

2 结果与讨论

2.1 ZnS QDs 的表征

图 1(a)为 ZnS QDs 的 XRD 图谱,由图可观察到 28.47° , 32.97° , 47.34° 和 56.05° 处四个衍射峰,分别对应于立方闪锌矿 ZNS 晶体结构的(111), (200), (220) 和 (311) 晶面,样品的晶格常数为 $a = b = c = 0.540 52 \text{ nm}$,与 JCPDS 卡片(NO. 77-2100, $a = 0.541 5 \text{ nm}$) 参数一致。通过 Debye-Scherrer 公式^[21] 可得到 ZnS 样品的平均晶粒尺寸为 4.9 nm 。图 1(b) 及其插图分别为 ZnS QDs 的 TEM 和 HRTEM 图,从图 1 可以看出, ZnS QDs 是不规则的球形颗粒,晶粒大小为 $3.5 \sim 5.3 \text{ nm}$,晶格间距约为 0.269 nm ,这与 JCPDS 数据中(200)晶面的 d 值($0.270 7 \text{ nm}$) 和 XRD 结果($0.270 3 \text{ nm}$) 一致,说明所获得的样品确实为 QDs。

2.2 ZnS QDs 的细胞毒性

ZnS QDs 在微生物/生物领域中应用时,需考虑其细胞毒性,确保材料的安全性。因此,本研究将 HeLa 细胞与不同浓度的 ZnS QDs 共同培养 24 h,以此评估 QDs 的细胞毒性。图 2(a) 为 ZnS QDs 作用下 HeLa

细胞的存活率。结果表明 HeLa 细胞的存活率随着 QDs 浓度的增加而下降,当 ZnS QDs 的浓度达到 100 $\mu\text{g/mL}$ 时,细胞的存活率为 90.93%。根据美国药典^[22],所有样品对 HeLa 细胞显示的细胞毒性等级为 0~1,这表明 ZnS QDs 在浓度低于 100 $\mu\text{g/mL}$ 时是无毒的,可用于生物领域中。图 2(b)~(f)显示了不同浓度的 ZnS QDs 对 HeLa 细胞形态的影响的共聚焦显微镜图像,图中呈球形的细胞是已经死亡或即将死亡的细胞。从图中可以观察到,随着 ZnS QDs 浓度的增加,死细胞的数量开始缓慢增加,但是活细胞的数量是远大于死亡的细胞数量,说明 ZnS QDs 对 HeLa 细胞是无毒性的,这与图 2(a)的结果相一致。

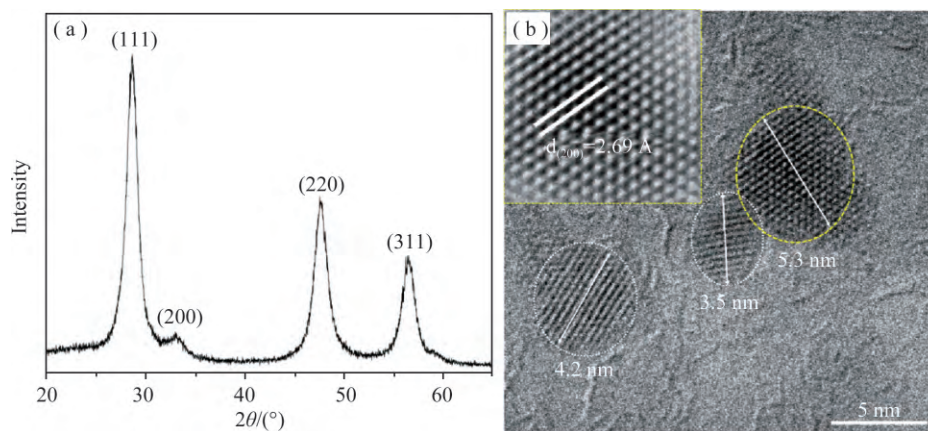


图1 ZnS QDs 的 XRD (a),TEM (b)和 HRTEM(插图)图

Fig. 1 XRD (a), TEM (b) and HRTEM (inset) patterns of ZnS QDs

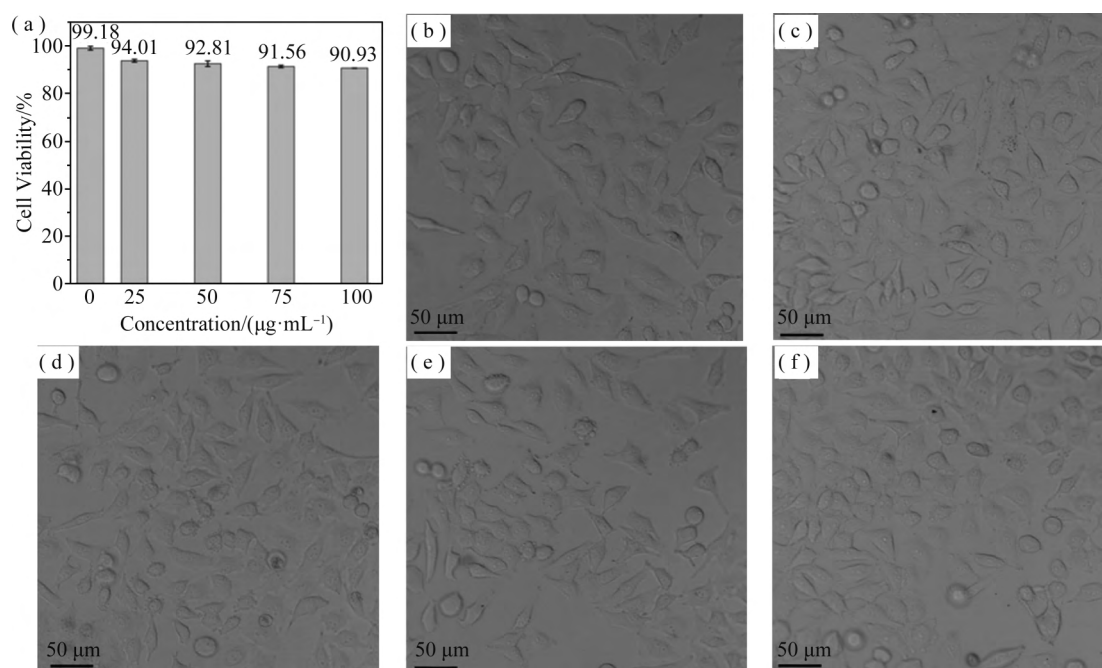


图2 不同 ZnS QDs 浓度下 HeLa 细胞的细胞存活率 (a) 和形态特征 ((b) 0, (c~f) 分别为 25, 50, 75 和 100 $\mu\text{g/mL}$)

Fig. 2 Cell viability (a) and morphological characteristics (b~f) of HeLa cells at different ZnS QDs concentrations ((b) 0, (c~f) is related to 25, 50, 75 and 100 $\mu\text{g/mL}$, respectively)

2.3 米曲霉表型及生物量

图 3(a~e)和(f)分别给出了液体培养基中加入 0、25、50、75、100 $\mu\text{g/mL}$ 的 ZnS QDs 培养 72 h 后米曲霉的表型和生物量。由图 3 可得,未添加和添加 ZnS QDs 的菌体的平均尺寸分别约为 1.2、1.8、2.2、2.5 和 2.5 mm,生物量分别为 0.125、0.157、0.175、0.179 和 0.132 g。这意味着 ZnS QDs 能改善米曲霉的生长,且米曲霉的生物量随 QDs 浓度的增加而增加,直至 QDs 的浓度为 75 $\mu\text{g/mL}$,此时的生物量达到最大值(约

为对比样的 1.43 倍),然后随之下降。米曲霉产量提高源于 QDs 的物理与生化双重作用:在物理层面,QDs 与孢子的碰撞产生剪切应力,减少孢子聚集以增加菌球数量^[23];其微小粒径也利于其吸附并穿透细胞膜,为米曲霉提供生长所需的锌源^[24-25]。在生化层面,QDs 提供的锌元素既催化葡萄糖转化并促进氮利用以增加菌体干重,也通过促进 DNA 与 RNA 聚合酶的合成来加速菌丝生长与孢子形成^[26]。这些机制共同导致了米曲霉生物量的增加。当 QDs 浓度超过 75 时,生物量下降的原因可能是 ZnS QDs 浓度越高,释放出的重金属锌离子越多,对米曲霉生长的抑制越强。因此,选择 ZnS QDs 浓度为 75 $\mu\text{g/mL}$ 来探究 ZnS QDs 对米曲霉生长的影响。

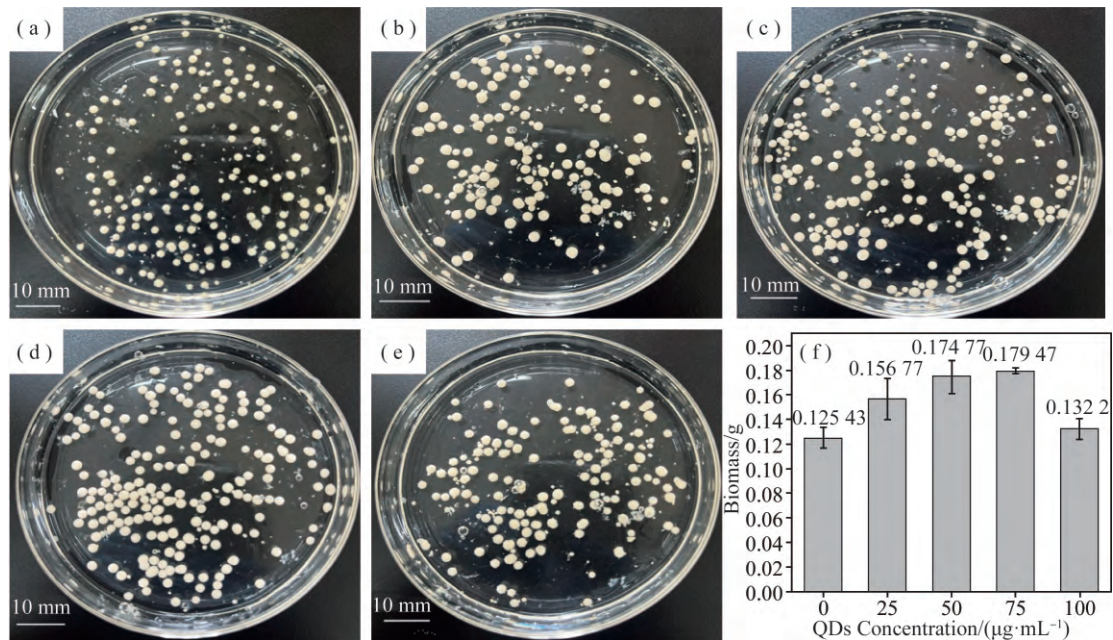


图3 不同 QDs 浓度(a) 0, (b) 25, (c) 50, (d) 75 和 (e) 100 $\mu\text{g/mL}$ 下米曲霉的表型图和生物量(f)

Fig. 3 Phenotypes (a~e) and biomass (f) of *A. oryzae* at different QDs concentrations (a) 0, (b) 25, (c) 50, (d) 75, and (e) 100 $\mu\text{g/mL}$)

表 1 米曲霉在未含有和含有 QDs 培养基中的生长情况

Tab. 1 Growth details of *A. oryzae* in medium without and with QDs

时间/h	CD 培养基	含 QDs 的培养基
72	菌球平均粒径 1.2 mm, 菌球大小不一, 小菌球较多, 数量较少, 颜色为白色, 菌丝松散	菌球平均直径为 2.5 mm, 菌球大小均匀, 数量较多, 菌球颜色为白色, 菌丝松散
96	菌球平均直径 1.8 mm, 菌球大小不一, 但小菌球变少, 颜色变深, 为淡黄色, 菌丝较为松散	菌球平均直径为 2.8 mm, 菌球大小均匀, 数量较多, 菌球颜色为白色, 菌丝较为松散
120	菌球平均直径 2.3 mm, 菌球大小均匀, 颜色变深, 为浅黄色, 菌丝较为紧密	菌球平均直径为 3.2 mm, 菌球大小均匀, 数量较多, 菌丝较为紧密, 菌球颜色为淡黄色
144	菌球平均直径 2.5 mm, 菌球大小均匀, 颜色变深, 为黄色, 菌丝紧密	菌球平均直径为 3.4 mm, 菌球大小均匀, 数量较多, 菌丝紧密, 菌球颜色为浅黄色
168	菌球平均直径 2.6 mm, 菌球大小均匀, 颜色变深, 为黄褐色, 菌丝十分紧密	菌球平均直径为 3.4 mm, 菌球大小均匀, 数量较多, 菌丝十分紧密, 菌球颜色为浅黄色
196	菌球平均直径 2.6 mm, 菌球大小均匀, 颜色变深, 为褐色, 菌丝十分紧密	菌球平均直径为 3.4 mm, 菌球大小均匀, 数量较多, 菌丝十分紧密, 菌球颜色为黄褐色

表 1 为不同培养时间下米曲霉在含与不含 75 $\mu\text{g/mL}$ ZnS QDs 的液体培养基中的生长情况。研究结果显示,在菌球大小方面,不含 ZnS QDs 的培养基中,菌球平均直径从 72 h 的 1.2 mm 增长至 168 h 的 2.6 mm 后趋于稳定;而含 ZnS QDs 的培养基中,菌球直径始终更大(72 h 为 2.5 mm,168 h 达 3.4 mm),并表

现出更快的生长速度,这表明 ZnS QDs 可能促进了米曲霉菌球的膨大。在菌球均匀性方面,含 ZnS QDs 的培养基中菌球大小始终均匀;而对照组在早期(72~96 h)则存在大小不一的现象,这表明 ZnS QDs 可能促进了菌球生长的同步性。在菌丝状态方面,两组菌丝均随培养时间延长由松散转为紧密,但含 ZnS QDs 的菌丝紧密化进程更快,在 120 h 已达到较为紧密的状态。在颜色变化方面,不含 ZnS QDs 的对照组菌球由白色逐渐加深为褐色,显示其代谢产物可能持续积累;而含 ZnS QDs 的实验组颜色变化缓慢,仅由白色经淡黄色、浅黄色转为黄褐色,表明 ZnS QDs 可能延缓了色素的生成或相关的代谢进程。

2.4 液体米曲霉生长曲线

图 4 为米曲霉在两种培养基中于不同培养时间下的生长曲线。该曲线通过测定在 30 ℃、180 r/min、自然 PH 条件下培养不同时间所获菌体的干重而绘制。图 4 结果显示,空白对照组的米曲霉在 24~108 h 内生长量急剧上升,并于 108 h 达到峰值。由于此阶段营养被大量消耗,培养环境随后恶化,致使菌体死亡率超过新生速率,在 108 h 后出现“负增长”现象。而在添加了 75 μg/mL ZnS QDs 的实验组中,米曲霉的生长量在 24~96 h 内急剧上升;随后,可能由于生长环境的改变,其在 96~108 h 经历了一个短暂的调整期,生长量略有回落。在此之后,菌体似乎适应了变化的环境,生长得以恢复,并于 144 h 达到生长峰值。随着培养时间进入 144~168 h,培养基中营养物质的持续消耗与 PH 值的改变,共同引发培养环境的逐步恶化。此条件下,米曲霉死亡率上升,活菌数量显著减少,故而出现“负增长”现象。与空白对照组相比,添加 ZnS QDs 使米曲霉进入负增长阶段的时间延迟了 36 h,表明 ZnS QDs 能显著延缓其液体发酵的衰老进程。该结果与表 1 所示的菌体生长特征高度一致,共同提示 ZnS QDs 可能通过促进菌体生长同步性并延长稳定期,在工业发酵中发挥积极作用,为通过优化发酵周期以提高目标产物产量提供了潜在策略。

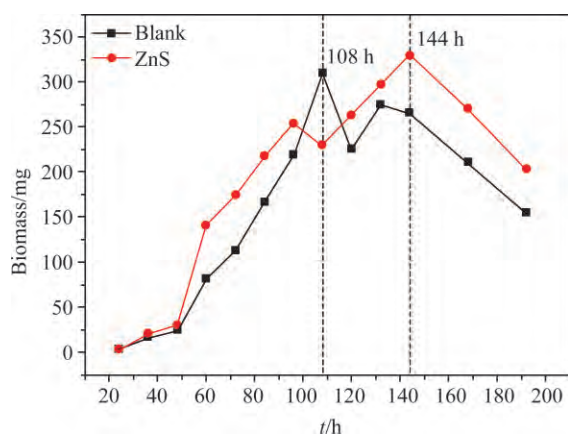


图 4 米曲霉的生长曲线

Fig. 4 Growth curve of *A. oryzae*

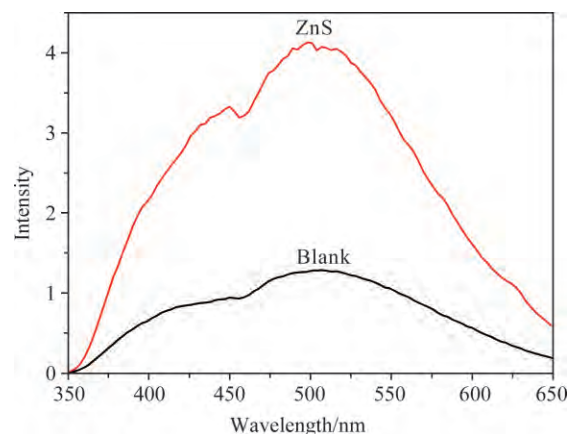


图 5 添加和未添加 QDs 的液体培养基中培养了 72 h 的米曲霉的 PL 图

Fig. 5 PL of *A. oryzae* cultured in liquid media with and without QDs for 72 hours

2.5 米曲霉的光致发光

图 5 给出了在两种培养基中培养 72 h 后米曲霉的光致发光(PL)图谱。米曲霉的发光是由 DNA 碱基^[27]和自由基^[28]之间的电子激发引起的。从图中可以发现,在 450 nm 处有一个来自单线态分子氧的峰肩^[29],在 500 nm 处有一个与 DNA 发光有关的发射峰^[30]。可以看出,经 QDs 培养后,米曲霉的 PL 发光强度有所增强,其积分发射强度相较于未处理组高出约 3.23 倍。众所周知,米曲霉的发光属于超弱光子发射,包括自发辐射和光发射,但光发射的强度比自发辐射的强度高 3~4 个数量级,而自发辐射的强度一般很弱,远小于噪声,甚至低几个数量级。以目前的技术和设备很难研究自发辐射的特性,所以一般只研究生物系统的光子发射特性。生物光子发射的机制主要包括代谢发光和相干辐射。因此,用 QDs 培养的米曲霉的 PL 强度增强可能是由以下原因造成的。一方面,ZnS QDs 释放的 Zn^{2+} 可作为 Zn(II)2Cys6 转录因子的中心原子,增加该类蛋白丰度,进而调控曲酸合成等代谢途径,最终增强了米曲霉的代谢发光强度^[31,32]。另一方

面,米曲霉生长越旺盛,DNA 合成越多,相干辐射的强度越高。因此,这两个因素的结合导致了用 QDs 培养的米曲霉的发射强度的明显增加。这些结果意味着 ZnS QDs 的光学特性可能被用于研究米曲霉的生长和代谢过程,也进一步证实了米曲霉的生长和代谢产量受到了 ZnS QDs 的影响。

5 结论

本文系统考察了 ZnS QDs 的晶体结构、细胞毒性及其对米曲霉生长及代谢的影响。研究结果显示,在浓度低于 100 $\mu\text{g/mL}$ 时,ZnS QDs 对 HeLa 细胞无显著毒性,细胞存活率超过 90%,显示出良好的生物相容性。在液体 CD 培养基中添加 75 $\mu\text{g/mL}$ 的 ZnS QDs 可使米曲霉生物量提高至对照组的 1.43 倍,菌球平均直径从 1.2 mm 增大至 2.5 mm,表明 ZnS QDs 能有效促进米曲霉的生长活性。此外,ZnS QDs 显著延缓了米曲霉进入衰老期的时间,使其稳定生长期延长 36 h。通过 PL 光谱分析发现,经 ZnS QDs 处理的米曲霉发光强度增强 3.23 倍,证实其通过促进核酸合成和代谢活性来调控真菌生长。本研究不仅揭示了 ZnS QDs 作为纳米营养剂在真菌培养中的积极作用,还为优化米曲霉工业发酵工艺提供了新思路。未来研究可进一步探索 ZnS QDs 对其他丝状真菌的普适性影响及其分子机制。

参 考 文 献

- [1] TU Z, CHOI D, CHEN Y, et al. The food fermentation fungus *Aspergillus oryzae* is a source of natural antimicrobials against *Listeria monocytogenes*[J]. *Journal of Dairy Science*, 2025, 108(4): 3444-3454.
- [2] BI F, HUANG Q, PAN B, et al. Development of a novel transformation system using zhongshengmycin in *Aspergillus oryzae* and *Aspergillus niger*[J]. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2026, 11: 205-215.
- [3] BAIHAQQI F, WAKAI S, PUTRA F J N, et al. Enhancing isoprimeverose-producing enzyme in genetically engineered *Aspergillus oryzae* through impeller shape and pH control for the large-scale fermentation[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2026, 192: 110758-110767.
- [4] KUDO H, ARAKAWA G, SHIRAI S, et al. New role of a histone chaperone, HirA: Involvement in kojic acid production associated with culture conditions in *Aspergillus oryzae*[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2022, 133(3): 235-242.
- [5] NISHITANI A, HIRAMATSU K, KADOOKA C, et al. Overexpression of the DHA1 family, ChlH and ChlK, leads to enhanced dicarboxylic acids production in koji fungi, *Aspergillus luchuensis* mut. kawachii and *Aspergillus oryzae*[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2024, 137(4): 281-289.
- [6] SURYADI H, IRIANTI M I, SEPTIARINI T H. Methods of random mutagenesis of aspergillus strain for increasing kojic acid production[J]. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 2022, 23(4): 486-494.
- [7] CHEN Y, CHAO C, HAN T, et al. Functional characterization of AoKat1, a major facilitator superfamily transporter involved in kojic acid production in *Aspergillus oryzae*[J]. *Gene*, 2025, 972: 149807-149815.
- [8] LIU Z, HOU X, YOU H, et al. Surface copassivation strategy for developing water-soluble InP colloidal quantum dots with high luminescence and suppressed blinking[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147 (6): 4778-4789.
- [9] 汪鲜艳,欧阳胜男,铁烈华. 植硅体在封存有机碳中的作用及其研究进展[J]. *山地农业生物学报*, 2025, 44(4): 40-50.
- [10] 赵斐,谢可慧,王广博,等. 共价有机框架材料用于光合成 H₂O₂ 研究进展[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 40(4): 325-351.
- [11] 陈丽萍,赵杰宏,王娇,等. 蝉花预防治疗阿尔兹海默病的网络药理学分析[J]. *山地农业生物学报*, 2024, 43(4): 11-17.
- [12] MAHMOUD G A E, IBRAHIM A B M, MAYER P. Zn (II) and Cd (II) thiosemicarbazones for stimulation/inhibition of kojic acid biosynthesis from *Aspergillus flavus* and the fungal defense behavior against the metal complexes' excesses[J]. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2020, 25(5): 797-809.
- [13] HAN M, KARATUM O, NIZAMOGLU S. Optoelectronic neural interfaces based on quantum dots[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(18): 20468-20490.
- [14] CHEN H, WU Y Y, XIE W W, et al. InP/ZnS quantum dots cause liver damage in rare minnow (*Gobiocypris rarus*) larvae[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology C*, 2023, 266: 109546-109556.
- [15] MARTINS C S M, LAGROW A P, PRIOR J A V. Quantum dots for cancer-related miRNA monitoring[J]. *Acs Sensors*, 2022, 7(5): 1269-1299.
- [16] KHAN A U, TAHIR K, ALBALAWI K, et al. Synthesis of ZnO and ZnS nanoparticles and their structural, optical, and photocatalytic

- properties synthesized via the wet chemical method[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 291: 126667-1216675.
- [17] LEI Y, ZHU G, DAN J, et al. Synthesis, optical properties, cytotoxicity and *Aspergillus oryzae* application of bio-synthesized ZnS quantum dots[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(7): 11477-11485.
- [18] LEI Y, ZHANG G, YAO Y, et al. An experimental and theoretical study on photoluminescence of Ce^{3+} -doped ZnS quantum dots and their application in *Aspergillus oryzae*[J]. *Journal of Rare Earths*, 2024, 42(6): 1020-1028.
- [19] HUANG X, LI X X, YAO Y, et al. Cytotoxicity and First-principles Calculations of ZnS: 6.25% Br quantum dots and their effect on the growth of *Aspergillus oryzae*[J]. *Nano*, 2023, 18(02): 2350006-2350016.
- [20] ZHANG G, LI X X, LIU N, et al. Effect of l-cysteine modified ZnS quantum dots on the growth of *Aspergillus oryzae*[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(1): 503-507.
- [21] WANG X X, DAI W, LI X X, et al. Effects of L-cysteine on the photoluminescence, electronic and cytotoxicity properties of ZnS: O quantum dots[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 825: 154052-154059.
- [22] XXII U, XVII N. Toxicity classification in US Pharmacopeia[S]. United States Pharmacopeial Convection, Inc, 1990.
- [23] KARAHALIL E, COBAN H B, TURHAN I. A current approach to the control of filamentous fungal growth in media: microparticle enhanced cultivation technique[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019, 39(2): 192-201.
- [24] JAYASEELAN C, RAHUMAN A A, KIRTHI AV, et al. Novel microbial route to synthesize ZnO nanoparticles using *Aeromonas hydrophila* and their activity against pathogenic bacteria and fungi[J]. *Spectrochimica Acta A*, 2012, 90: 78-84.
- [25] QIU J J, SONG X W, LI S S, et al. Experimental and modeling studies of competitive Pb (II) and Cd (II) bioaccumulation by *Aspergillus niger*[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, 105(16): 6477-6488.
- [26] JACKSON M A, SLININGER P J, BOTHAST R J. Effects of zinc, iron, cobalt, and manganese on *Fusarium moniliforme* NRRL 13616 growth and fusarin C biosynthesis in submerged cultures [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, 55(3): 649-655.
- [27] POPP F A, NAGL W, LI K H, et al. Biophoton emission: new evidence for coherence and DNA as source[J]. *Cell Biophysics*, 1984, 6(1): 33-52.
- [28] 刘颂豪, 孟耀勇, 刘承宜. 生物光子学及其应用[J]. *激光与红外*, 1996, 26(1): 7-9.
- [29] 马玉琴, 丁明珠, 张月敬, 等. 电离辐射对活细胞超弱发光的影响[J]. *生物物理学报*, 1988, 4(3): 215-220.
- [30] 顾樵. 生物系统的超弱光子辐射[J]. *量子电子学*, 1994, 5(2): 97-108.
- [31] 胡大喜, 陈杞, 陈克明, 等. 发光分析与医学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1990.
- [32] MARUI J, YAMANE N, OHASHI-KUNIHIRO S, et al. Kojic acid biosynthesis in *Aspergillus oryzae* is regulated by a Zn (II) 2Cys6 transcriptional activator and induced by kojic acid at the transcriptional level[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2011, 112(1): 40-43.

(责任编辑:刘庆松)