

# *Mucoromycotina* sp. HS-3 对苯胺蓝染料的降解

林永慧 陈亮 何兴兵\* 何瑶庆 周霞

(吉首大学生物资源与环境科学学院 湖南 吉首 416000)

**摘要:** 采用静置开敞式培养法研究了碳源、氮源、盐度、金属离子对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 菌降解苯胺蓝的影响。结果表明, 菌株脱色最适合条件为葡萄糖 1 g/L, 硫酸铵 0.6 g/L,  $\text{Fe}^{3+}$  0.15 mmol/L, 盐度小于 50 g/L, 在上述各培养条件下, 对浓度为 100 mg/L 不灭菌的苯胺蓝溶液静止培养 5 d, 脱色率达 95% 以上。此外, 通过降解前后的苯胺蓝溶液对豇豆和枯草芽孢杆菌进行毒性测试发现, 降解后的苯胺蓝溶液毒性明显降低。因此, 该菌对处理以苯胺蓝为主要成分的印染废水具有较好的应用潜力。

**关键词:** 苯胺蓝, 降解, *Mucoromycotina* sp., 毒性测试

## Biodegradation of Aniline Blue Dye by a Fungus *Mucoromycotina* sp. HS-3

LIN Yong-Hui CHEN Liang HE Xing-Bing\* HE Yao-Qing ZHOU Xia

(College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

**Abstract:** An experiment on the effect of carbon source, nitrogen source, metal ion and salinity on degradation of aniline blue dye by *Mucoromycotina* sp. HS-3 was carried out under statically air-opened condition. The results showed that the optimum medium for single factor were 1 g/L glucose, 0.6 g/L ammonium sulfate, 0.15 mmol/L  $\text{Fe}^{3+}$ , and less than 50 g/L salinity, respectively. Under each optimum condition above, the decolorization rate of aniline blue dye (100 mg/L initial concentration) was over 95% after 5 days. In addition, a toxicity test was carried out using a bioassay based on growth inhibition of *Vigna unguiculata* (a plant species) and *Bacillus subtilis* (a bacterial species) by aniline blue solution before and after degradation. The result showed that the toxicity of aniline blue after degradation had reduced obviously. So this strain had a good application potential for treating dyeing wastewater mainly consisted of aniline blue.

**Keywords:** Aniline blue, Degradation, *Mucoromycotina* sp., Toxicity test

合成染料是工业废水中常见的水体污染物, 如数具有毒性, 且可以致突变、致癌<sup>[1]</sup>。目前染料废水  
蒽醌、染料、三芳基甲烷和酞菁类, 这些染料大多水的处理是用物理或化学的方法, 如吸附、离子交

**基金项目:** 湖南省科技厅项目(No. 2009FJ3041); 湖南省教育厅项目(No. 08C674, 10C118); 湖南省自然科学基金项目(No. 10JJ6053); 国家自然科学基金项目(No. 40971151); 吉首大学科研基金项目(No. 10JD028); 大学生研究性学习和创新性试验计划项目(No. JSU-CX-2009-35)

\* 通讯作者: ✉ hexb2004@163.com

收稿日期: 2010-04-30; 接受日期: 2010-09-29

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

换、凝聚和膜过滤臭氧化<sup>[2-4]</sup>, 然而由于这些方法大多数存在成本高、耗时长等问题, 没有被广泛应用<sup>[5]</sup>。目前, 许多研究开始集中到能高效脱色与分解染料的微生物方面<sup>[6]</sup>, 国内外已有研究结果显示许多白腐真菌对染料有较好的降解效果<sup>[7-12]</sup>。本研究选择苯胺蓝为研究对象, 通过对白腐真菌 *Mucoromycotina* sp. HS-3 降解条件的优化探讨各种因素对该菌种降解效果的影响, 分析其降解潜力, 为实际应用提供一定的技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 受试菌种:** 菌株 *Mucoromycotina* sp. HS-3 为纯菌种, 由吉首大学生物资源与环境科学学院环境微生物实验室提供。

**1.1.2 染料与试剂:** 苯胺蓝( $C_{32}H_{25}N_3O_9S_3Na_2$ , 分子量为 737.72), 试验中所用试剂为国产分析纯。配制 1 g/L 的苯胺蓝溶液置于 4°C 冰箱中储存备用。

**1.1.3 培养基:** LB 培养基(g/L): 牛肉膏 5.0, 蛋白胨 10.0, NaCl 5.0, pH 7.2; PDA 培养基(g/L): 土豆浸出液 200, 葡萄糖 20.0, 琼脂 20.0; PDB (Potato Dextrose Broth)培养基(g/L): 土豆浸出液 200, 葡萄糖 20.0; 染料-Kirk 培养基(g/L):  $C_{32}H_{25}N_3O_9S_3Na_2$  0.1,  $C_4H_{12}N_2O_6$  0.22,  $KH_2PO_4$  0.2,  $CaCl_2$  0.01,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  0.05, 1 g/L VB<sub>1</sub> 1 mL, 10% 吐温-80 10 mL, 100 mmol/L 黎芦醇 10 mL, 微量元素 10 mL; 其中微量元素(g/L):  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  0.125,  $MnSO_4 \cdot H_2O$  0.0547,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  0.043,  $Fe_2(SO_4)_3$  0.05,  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$  0.054。

**1.1.4 主要仪器设备:** 紫外分光光度计, 恒温培养箱, 全温振荡培养箱和电子分析天平等。

### 1.2 方法

**1.2.1 菌膜的培养:** 将培养于 PDA 培养基上的菌种接种于装有 50 mL PDB 培养基的 150 mL 锥形瓶中, 28°C 恒温摇瓶培养 5 d, 形成菌丝球, 用灭菌玻璃棒将摇瓶中菌丝球充分打碎, 用移液枪吸取 1 mL 接种于装有 20 mL PDB 培养基的直径为 9 cm 的平板中。28°C 恒温静止培养 5 d, 得到试验所需菌膜。

**1.2.2 染料降解优化设计:** 分不同批次研究碳源、氮源、盐度和金属离子对受试菌株降解能力的影响, 在研究某一因素的影响时, 仅该因素设不同变化梯度, 其他影响因素保持不变, 后面因素以前面优化

结果为前提进行。盐度优化在最优碳源、氮源、pH 条件下进行, 每个影响因素设置不同浓度梯度, 每种梯度设置 3 个重复水平。将培养好的菌膜加入到装有 50 mL 不灭菌苯胺蓝-Kirk 培养基的 150 mL 锥形瓶中(苯胺蓝浓度为 100 mg/L)。28°C 恒温静置培养, 并以加入菌膜时间为起点, 每 24 h 对锥形瓶中的降解液进行离心, 测其吸光值。

**1.2.3 染料吸附:** 将受试菌株接种于装有 100 mL PDB 培养基的 250 mL 锥形瓶中, 28°C 摇瓶培养 5 d, 以获得大量菌丝体。将获得的菌丝体用 4 层纱布过滤, 并用大量蒸馏水冲洗菌丝体, 直到滤液为无色。将冲洗干净的菌丝体置于 45°C 烘箱 24 h, 烘干后研磨制成粉状。分别设置质量梯度为 10、20、30、50 mg 粉状菌丝体对 100 mg/L 的苯胺蓝溶液进行吸附试验。

**1.2.4 染料脱色前后毒性测试试验设计:** (1) 植物毒性测试。以豇豆为试验材料(购买于种子市场), 对豇豆进行预处理时, 用 25°C 温水浸泡 12 h, 使种子充分吸水膨胀。以无染料的 Kirk 培养基作为对照, 分别用无染料的 Kirk 培养基, 降解前、后的苯胺蓝溶液 2 mL 对加入铺有 3 层滤纸并经干灭菌的培养皿进行润湿处理, 然后每个培养皿均匀放入 10 粒种子, 每种处理设置 5 个重复。28°C 恒温培养 5 d, 每天观察记录发芽情况, 发现长有霉菌种子立即用蒸馏水冲洗, 然后放回原处<sup>[13]</sup>。定期对 3 种处理的培养皿等量加入对应培养液使培养皿内的滤纸始终处于湿润状态。

(2) 细菌毒性测试。以枯草芽孢杆菌为试验材料(由本实验室提供), 对枯草芽孢杆菌进行毒性测试时采用圆纸片法<sup>[14]</sup>, 用无染料的 Kirk 培养基做对照。用打孔器将滤纸打成直径为 4 mm 小圆纸片, 选出边缘整齐的圆纸片分别用无染料的 Kirk 培养基, 降解前、后的苯胺蓝溶液浸泡, 每个处理挑选 3 片置于盛有无菌牛肉膏蛋白胨固体培养基的平板中, 在超净工作台中风干。用涂布法将枯草芽孢杆菌涂布于 3 种处理的培养皿中并分别标记, 28°C 恒温培养 24 h。每个处理设置 16 个重复。

**1.2.5 脱色能力的测定:** 菌株对染料的脱色能力采用比色法测定。每 24 h 取 1 次培养液, 于 5000 r/min 离心 15 min, 所得上清液于染料的最大吸收波长(苯胺蓝为 585 nm)下测定其吸光度  $A_{585}$ , 以不接种菌悬

液的染料培养基的吸光度  $A_2$  为对照。其脱色率用下列公式计算:

$$\text{脱色率}(\%) = (A_2 - A_1)/A_2 \times 100\%$$

**1.2.6 数据分析:** 对不同处理间数据的差异比较采用 SPSS 统计软件进行单因素方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同碳源对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 降解苯胺蓝的影响

碳源是微生物正常生长的必需元素之一, 分别将葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖和可溶性淀粉添加到 Kirk 培养基中, 使最终浓度均为 5 g/L。将 pH 值调至 5 左右, 28°C 恒温静止培养 5 d, 测得各组试验 5 d 时的脱色率如图 1A。结果表明, HS-3 在以添加葡萄糖为碳源的 Kirk 培养基中降解效果最佳, 降解率为 79.94%, 蔗糖和乳糖次之, 分别为 76.45% 和 75.35%, 可溶性淀粉对菌株的影响最小, 说明相对于其他碳源 HS-3 更容易利用单糖类的葡萄糖。已有研究报道一些降解菌可以高效利用葡萄糖作为碳源进行染料降解, Raghukumar 和 Rivonkar<sup>[15]</sup> 研究表明白腐真菌 *Flavodon flavus* 可以高效利用葡萄糖降解染料废水; 梁红昌等<sup>[16]</sup> 研究报道泡盛曲霉 (*Aspergillus awamori*) 在以葡萄糖为碳源的查氏培养基中生长量最大, 且脱色效果最好。

### 2.2 葡萄糖浓度对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 降解效果的影响

由图 1A 可知, 菌株以葡萄糖为碳源时对苯胺蓝脱色效果最佳。相同条件下, 在苯胺蓝浓度为 100 mg/L 的 Kirk 培养基中设置葡萄糖的浓度梯度为 1、3、5、7、9 g/L, 通过不同质量浓度的葡萄糖对菌株降解效果的影响, 优化出降解效果最佳时的葡萄糖质量浓度, 优化结果如图 1B 所示, 在 5 d 时葡萄糖质量浓度为 1、3、5、7 g/L 时降解效果并没有明显区别, 脱色率分别为 88.48%、87.29%、87.44% 和 88.20%, 其中以 1 g/L 时的脱色率最高。当葡萄糖浓度为 9 g/L 时, 脱色率明显偏低。已有研究报道了类似结果, Ösoy 等<sup>[17]</sup> 利用真菌 *Fulani trogon* ATCC 200800 降解染料 Drimarene Blue X3LR 和 Remazol Brilliant Blue R 时, 降解率随着葡萄糖浓度的增大而降低。这可能是因为高浓度的葡萄糖对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 降解苯胺蓝在一定程度上有抑制作用。

### 2.3 不同氮源对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 降解效果的影响

氮源是促进微生物生长的重要营养元素之一。在 pH 5, 葡萄糖浓度为 1 g/L 的前提下, 分别用硫酸铵(AS)、硝酸铵(AN)、硝酸钾(PN)、酒石酸铵(AT)和蛋白胨(PP)作为 Krik 培养基中的氮源, 各组氮源浓度均为 0.2 g/L, 加入预先准备的菌膜, 28°C 静置培养 5 d, 结果如图 1C 所示, 硫酸铵对该菌降解苯胺蓝影响效果最明显, 硝酸铵次之, 脱色率分别达到 89.97% 和 84.54%, 蛋白胨的脱色率最低, 仅为 34.45%。试验结果表明, 该菌能够高效的利用硫酸铵作为氮源进行染料脱色, 可能主要由于硫酸铵促进 HS-3 菌丝量的生长, 进而促进菌株对苯胺蓝的降解。类似报道如梁红昌等<sup>[16]</sup> 研究证实泡盛曲霉 (*Aspergillus awamori*) 可更好利用硫酸铵等无机氮进行染料降解, 而对蛋白胨的利用效果相对较低, 而 Xu 等<sup>[18]</sup> 研究报道真菌 *Ceriporia lacerate strain* P2 可利用尿素作为自己氮源对染料 Alizarin Red 和 Methyl Orange 进行高效降解。可能由于种的特异性, 使得不同菌株可以利用不同的氮源对染料进行高效降解。

### 2.4 硫酸铵浓度对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 脱色效果的影响

保持其他条件不变, 设置硫酸铵的浓度分别为 0.05、0.10、0.20、0.40 和 0.60 g/L, 探讨不同浓度的硫酸铵对该菌脱色效果的影响, 结果如图 1D 所示。随着硫酸铵浓度的增加, 菌株对苯胺蓝的脱色率也逐渐增加, 当氮源浓度为 0.60 g/L 时 *Mucoromycotina* sp. HS-3 对苯胺蓝脱色效果处于最佳状态, 脱色率为 90.93%。已有研究报道了类似结果, 如 Xu 等<sup>[18]</sup> 研究报道了真菌 *Ceriporia lacerate strain* P2 在以尿素为氮源降解 Methyl Orange 时, 降解率随着尿素增长呈线性增加。也有报道表明一些白腐真菌可以在低浓度氮源(0.2 g/L)中对染料进行高效降解<sup>[19-20]</sup>。

### 2.5 不同金属离子对 HS-3 脱色效果的影响

金属离子在真菌降解染料系统中起着重要作用。本实验采用  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mo}^{6+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{+}$ 、 $\text{Ag}^{+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  研究金属离子对 HS-3 脱色效果的影响, 且保持其他条件不变(pH 5, 葡萄糖浓度为 1 g/L, 硫酸铵浓度为 0.6 g/L), 设置各种金属离子的浓度均为 0.1 mmol/L, 28°C 恒温静止培养 5 d, 所得

试验结果如图 1E 所示。在相同浓度的各种金属离子中,  $\text{Fe}^{3+}$  对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 降解苯胺蓝的效果最佳, 第 5 天的脱色率为 95.74%,  $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Ni}^+$  次之, 分别为 95.32%、95.16%;  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  对该菌的脱色效果明显偏低, 脱色率分别为: 82.32%、81.13%, 说明铜离子、铅离子对 HS-3 降解染料苯胺蓝有一定程度的抑制作用。其他几种金属离子对 HS-3 的脱色效果都有不同程度的促进作用。由本实验结果可知,  $\text{Fe}^{3+}$

可以增强 HS-3 对苯胺蓝的降解的效果, 主要由于 Fe 是微生物体内细胞色素、水解酶、氧化酶、氢化酶以及歧化酶等的主要成分, 为细胞内氧化还原反应提供电子载体<sup>[21]</sup>。Hatvani 和 Mécés<sup>[22]</sup> 研究重金属对真菌 *Lentinula edodes* 生长, 染料降解以及酶活性的影响时得出类似结论; 吴锦华等<sup>[23]</sup> 在研究金属离子对硝基苯厌氧生物降解的影响时也报道  $\text{Fe}^{3+}$  对生物降解有很大促进作用。

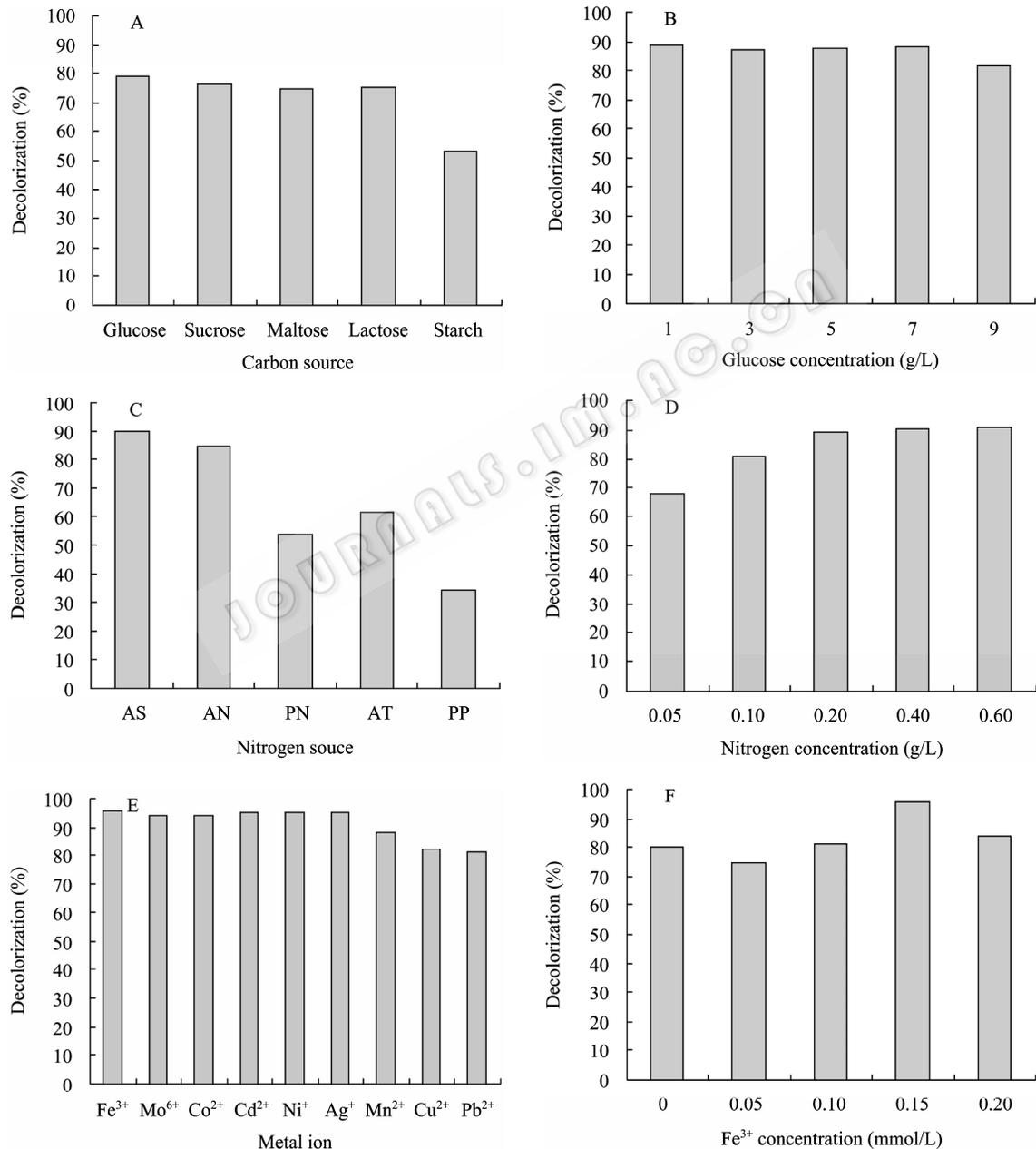


图 1 不同碳源、氮源、金属离子及浓度对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 脱色效果的影响

Fig. 1 Effects of carbon source, nitrogen source, metal ion and their concentration on decolorization of aniline blue by *Mucoromycotina* sp. HS-3

## 2.6 $\text{Fe}^{3+}$ 浓度对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 脱色效果的影响

由图 1E 可知,  $\text{Fe}^{3+}$  对菌株脱色效果影响最为明显, 保持其他条件不变, 设置  $\text{Fe}^{3+}$  的浓度梯度为: 0.05、0.10、0.15、0.20 mmol/L 研究不同浓度的  $\text{Fe}^{3+}$  对菌株脱色效果的影响。结果如图 1F 所示,  $\text{Fe}^{3+}$  浓度为 0.15 mmol/L 时脱色效果最佳, 脱色率为 95.78%, 而浓度为 0.1、0.2 mmol/L 时, 脱色率分别为 93.31%、95.23%。因此可知菌株脱色效果最佳时  $\text{Fe}^{3+}$  的浓度为 0.15 mmol/L。

本试验采用的是静置开敞式, 允许空气中微生物进入降解液中, 即使在这种情况下, 优化后的受试菌种对苯胺蓝的降解率仍高达 95.78%, 说明该受试菌种在与外源微生物共存情况下仍能具备高效的降解能力。

## 2.7 盐度对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 脱色效果的影响

溶液的渗透压对菌株降解染料污染物有重要影响。本实验保持其他条件不变(pH 5、葡萄糖浓度为 1 g/L、硫酸铵浓度为 0.6 g/L), 设置 0、2、4、6、8、50、100、150 g/L 8 个 NaCl 浓度梯度研究溶液渗透压对 HS-3 脱色效果的影响, 各梯度染料 5 d 后的脱色率如图 2 所示, 在低浓度盐溶液中( $\leq 50$  g/L), 各盐浓度的染料脱色率与对照组并没有明显区别, 为 90%左右, 当盐浓度升高时(100、150 g/L) *Mucoromycotina* sp. HS-3 对苯胺蓝溶液仍有脱色效果, 脱色率均达到 70%以上。试验结果表明, 低浓度的盐溶液对菌株降解苯胺蓝溶液并没有明显影响,

然而该菌在高盐浓度溶液中却仍具有较好的脱色效果, 说明该菌株为耐高盐浓度的真菌。李艳红等<sup>[24]</sup>研究高盐度工业废水优势降解菌生长特性时得到了一株可以在盐度为 6%–8%的工业废水中进行高效降解的菌株 XA3, 对比可知菌株 HS-3 更具有在高盐度染料废水中对染料进行高效降解的应用潜力。

## 2.8 *Mucoromycotina* sp. HS-3 对苯胺蓝吸附效果测定

设置质量梯度为 10、20、30、40、50 mg 的菌粉(每个梯度 3 个重复), 研究其对染料的吸附效果。分别将其加入装有 8 mL 苯胺蓝-Kirk 培养基的 10 mL 离心管中(苯胺蓝浓度为 100 mg/L), 水平放置在 135 r/min 的摇床中。24 h 后 5000 r/min 下离心 15 min, 测得各梯度的平均脱色率如图 3 所示:

由图 3 可知, 随着菌丝量的增加, 脱色率呈明显的上升趋势, 说明该菌种具有较强的吸附能力。在随后的实验过程中可以发现, 苯胺蓝首先被吸附在菌膜表面, 使菌膜成蓝色, 随着时间延续, 菌膜表面蓝色又逐渐变成白色, 且培养液澄清, 由此可得出, 该菌对苯胺蓝的降解是先吸附后降解的过程, 苯胺蓝被吸附到菌膜表面后, 再由菌体分泌降解酶将染料降解, 这种染料吸附由染料分子的结构和性质以及染料和菌体所带电荷所共同决定的<sup>[25]</sup>。Yesiladal 等<sup>[26]</sup>在研究真菌 *Trichophyton rubrum* LSK-27 对偶氮染料 Supranol Turquoise GGL 降解时报道了类似现象; Yang 等<sup>[27]</sup>研究报道了一株只靠吸附脱色的真菌。

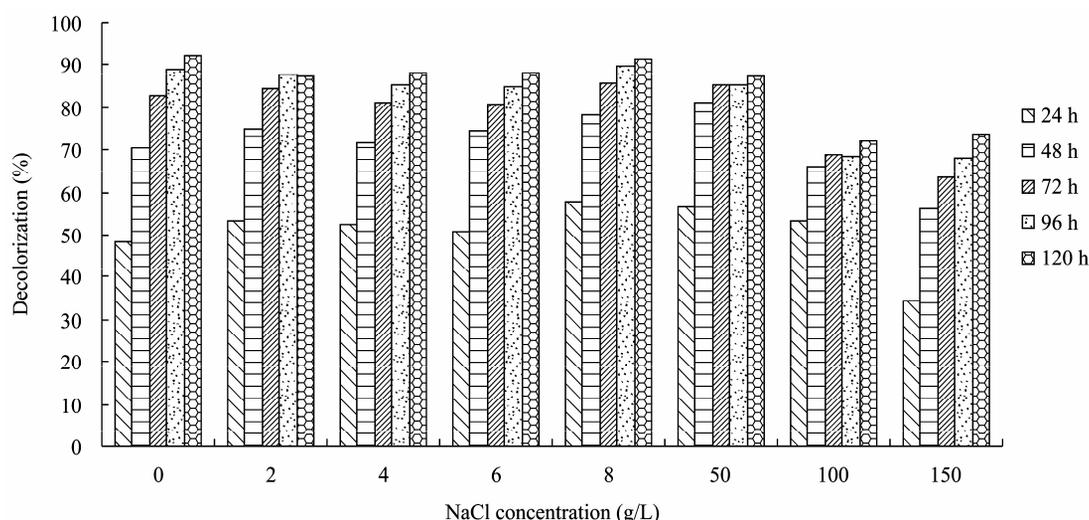


图 2 盐度对 *Mucoromycotina* sp. HS-3 脱色效果的影响  
Fig. 2 Effect of salinity on decolorization of aniline blue by *Mucoromycotina* sp. HS-3

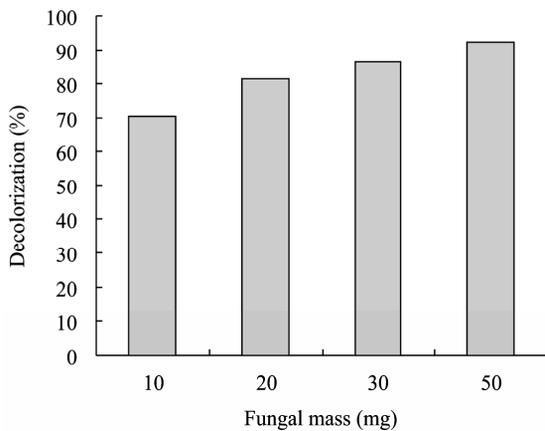


图3 *Mucoromycotina* sp. HS-3 对苯胺蓝吸附效果测定  
Fig. 3 A test on biosorption of aniline blue by *Mucoromycotina* sp. HS-3 biomass

## 2.9 降解前后苯胺蓝溶液的毒性测试

对各重复中种子的胚根长、胚芽长和胚轴长,以及三者的干重用单因素方差分析进行差异显著性检

验,试验数据如表1所示。对胚根、胚芽、胚轴的长度进行LSD检验结果显示:对于胚根,降解后的处理( $10.56 \text{ cm} \pm 0.56 \text{ cm}$ )与对照组( $7.62 \text{ cm} \pm 0.61 \text{ cm}$ )、降解前( $7.17 \text{ cm} \pm 0.45 \text{ cm}$ )的处理均存在极显著的差异( $P < 0.01$ ),而对照组与降解前之间的差异不显著。对胚芽进行的LSD检验结果显示,3种处理之间的差异均不显著。而对于胚轴,LSD检验结果说明降解前的处理( $4.72 \text{ cm} \pm 0.29 \text{ cm}$ )与对照组( $5.41 \text{ cm} \pm 0.35 \text{ cm}$ )、降解后的处理( $4.49 \text{ cm} \pm 0.27 \text{ cm}$ )差异均不显著,对照组与降解后的处理之间存在极显著的差异( $P < 0.01$ )。对胚根、胚芽、胚轴的干重进行LSD检验的结果表明,胚根、胚芽、胚轴的干重经降解前、后的苯胺蓝处理后差异均不显著。由于胚根是种子最先长出的结构,因此在相同的时间内胚根与苯胺蓝接触时间最长,所以苯胺蓝对豇豆胚根的影响最显著。

表1 苯胺蓝溶液脱色前后对豇豆生长的影响

Table 1 Effect of aniline blue solution on the growth of *Vigna unguiculata* before and after the decolorization

胚结构 Embryonic structure	长度(平均值 $\pm$ SE, cm) Length (Mean $\pm$ SE, cm)			干重(平均值 $\pm$ SE, g) Dry weight (Mean $\pm$ SE, g)		
	对照组 Control	降解前 Before decolorization	降解后 After decolorization	对照组 Control	降解前 Before decolorization	降解后 After decolorization
胚根 Embryonic root	$7.62 \pm 0.61$	$7.17 \pm 0.45$	$10.56 \pm 0.56$	$0.13 \pm 0.02$	$0.11 \pm 0.01$	$0.12 \pm 0.01$
胚芽 Embryonic bud	$1.29 \pm 0.06$	$1.21 \pm 0.05$	$1.19 \pm 0.04$	$0.04 \pm 0.02$	$0.04 \pm 0.00$	$0.04 \pm 0.10$
胚轴 Embryonic axis	$5.41 \pm 0.35$	$4.72 \pm 0.29$	$4.49 \pm 0.27$	$0.18 \pm 0.03$	$0.16 \pm 0.00$	$0.16 \pm 0.02$

枯草芽孢杆菌的抑菌试验结果显示,在对照组和经降解后溶液处理滤纸片周围均未发现抑菌圈,而在经降解前苯胺蓝溶液处理的滤纸片周围有明显的抑菌圈,各抑菌圈平均直径为  $0.93 \text{ cm} \pm 0.06 \text{ cm}$ 。由此可知,苯胺蓝对枯草芽孢杆菌具有明显的毒性,降解前后的苯胺蓝溶液对枯草芽孢杆菌的毒性有明显的减弱。

## 3 结论

*Mucoromycotina* sp. HS-3降解水溶苯胺蓝的单因子优化最适条件是:碳源为1 g/L葡萄糖,氮源为0.6 g/L硫酸铵,金属离子为0.15 mmol/L  $\text{Fe}^{3+}$ ,盐度小于50 g/L,在上述条件下对浓度为100 mg/L的不灭菌苯胺蓝溶液静止降解5 d,水溶苯胺蓝的脱色率达95%以上。当直接利用该菌进行印染废水处理时,

为避免水体引入过高的COD和氨氮,外源添加的碳源、氮源浓度对脱色率影响差别不大时,尽量选择低浓度的碳源与氮源,并适当延长废水的处理时间。同时该菌株在高达15%的高盐度下对苯胺蓝的脱色率达70%以上,说明该菌为耐高盐菌株,而染料废水一般为高盐度溶液,使该菌的应用成为可能。脱色过程也包含了吸附过程,染料首先吸附在菌体表面,然后再进行降解。毒性测试表明,降解后苯胺蓝溶液对枯草芽孢杆菌的毒性作用明显降低,但对豇豆萌发影响较小,只在一定程度上抑制了胚根的生长。

## 参考文献

- [1] Chung KT, Cerniglia CE. Mutagenicity of azo dyes: structure-activity relationships. *Mutat Res Rev Genet*

- Toxicol*, 1992(277): 201–220.
- [2] Zhang W, An T, Xiao X, *et al.* Photoelectrocatalytic degradation of reactive brilliant orange K–R in a new continuous flow photoelectrocatalytic reactor. *Appl Cata Gen*, 2003(255): 221–229.
- [3] Pala A, Toket E. Color removal from cotton textile industry wastewater by an activated sludge system with various additives. *Water Res*, 2002(36): 2920–2925.
- [4] Fu Y, Viraraghavan T. Fungal decolorization of dye wastewaters: a review. *Bioresour Technol*, 2001(79): 251–262.
- [5] Robinson T, McMullan G, Marchant R, *et al.* Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour Technol*, 2001(77): 247–255.
- [6] Mechichi HZ, Mechichi T, Dhouib A, *et al.* Laccase purification and characterization from *Trametes trogon* isolated in Tunisia: decolorization of textile dyes by the purified enzyme. *Enzyme Microb Technol*, 2006(39): 141–148.
- [7] Eichlerová I, Homolka L, Lisá L, *et al.* Orange G and Remazol Brilliant Blue R decolorization by white rot fungi *Dichomitus squalens*, *Ischnoderma resinum* and *Pleurotus calypratus*. *Chemosphere*, 2005(60): 398–404.
- [8] Wesenberg D, Kyriakides I, Agathos SN. White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. *Biotechnol Adv*, 2003(22): 161–187.
- [9] Chander M, Arora DS. Evaluation of some white-rot fungi for their potential to decolourise industrial dyes. *Dyes Pigments*, 2007(72): 192–198.
- [10] Kapdan I, Kargi F, McMullan G, *et al.* Comparison of white-rot fungi cultures for decolorization of textile dye-stuffs. *Bioproc Eng*, 2000(22): 347–351.
- [11] 许玫英, 郭俊, 岑英华, 等. 染料的生物降解研究. *微生物学通报*, 2006, **33**(1): 138–143.
- [12] 龙良俊. 白腐菌对染料脱色及降解的研究进展. *重庆工商大学学报: 自然科学版*, 2006, **23**(1): 25–28.
- [13] 宋松泉, 程红焱, 龙春林, 等. 种子生物学研究指南. 第1版. 北京: 科学出版社, 2005: 57–58.
- [14] 周琳琳, 杨策, 王海燕, 等. 珊瑚姜油对常见耐药菌的抑菌作用及急性毒性试验. *第三军医大学学报*, 2010, **32**(2): 111–114.
- [15] Raghukumar C, Rivonkar G. Decolorization of molasses spent wash by the white-rot fungus *Flavodon flavus*, isolated from a marine habitat. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2001(55): 510–514.
- [16] 梁红昌, 千英花, 张庆华, 等. 一株脱色真菌的鉴定及脱色特性的初步探讨. *微生物学通报*, 2009, **36**(7): 956–961.
- [17] Özsoy HD, Ünyayar A, Mazman MA. Decolourisation of reactive textile dyes Drimarene Blue X3LR and Remazol Brilliant Blue R by *Funalia trogii* ATCC 200800. *Bio-degradation*, 2005(16): 195–204.
- [18] Xu L, Zhu Y, He XB, *et al.* Evaluation of a new fungus *Ceriporia Lacerate* strain P2—its ability to decolorize Alizarin Red and Methy Orange. *World J Microbiol Biotechnol*, 2008(24): 3097–3104.
- [19] Leung PC, Pointing SB. Effect of different carbon and nitrogen regimes on Poly R decolorization by white-rot fungi. *Mycol Res*, 2002(106): 86–92.
- [20] Asgher M, Kausar S, Bhatti HN, *et al.* Optimization of medium for decolorization of solar golden yellow R direct textile dye by *Schizophyllum commune* IBL-06. *Int Biodeter Biodegr*, 2008(61): 189–193.
- [21] 赵阳国, 任南琪, 王爱杰, 等. 铁元素对硫酸盐还原过程的影响及微生物群落响应. *中国环境科学*, 2007, **27**(2): 199–203.
- [22] Hatvani N, Mécs I. Effects of certain heavy metals on the growth, dye decolorization, and enzyme activity of *Lentinula edodes*. *Ecotox Environ Safe*, 2003(55): 199–203.
- [23] 吴锦华, 韦朝海, 李平. 金属离子及盐度对硝基苯氧生物降解过程的影响. *环境科学研究*, 2009, **22**(1): 99–102.
- [24] 李艳红, 解庆林, 雷云, 等. 高盐度工业废水优势降解菌的生长特性及应用. *城市环境与城市生态*, 2008, **21**(5): 5–8.
- [25] 肖继波, 胡勇有. 菌株HX5对多种染料的吸附作用. *环境科学学报*, 2005, **25**(4): 525–529.
- [26] Yesiladali SK, Pekin G, Bermek H, *et al.* Bioremediation of textile azo dyes by *Trichophyton rubrum* LSK-27. *World J Microbiol Biotechnol*, 2006, **22**(10): 1027–1031.
- [27] Yang Q, Yang M, Pritsch K, *et al.* Decolorization of synthetic dyes and production of manganese-dependent peroxidase by new fungal isolates. *Biotechnol Lett*, 2003(25): 709–713.