

链霉菌红色素的稳定性及其对蚕丝织物的抗菌染色性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.4003

邹雯婷^{1,2} 胡长春¹
吕舒婷¹ 言峥嵘³
曾晓希¹ 马 靓^{1,2}

1. 湖南工业大学
生物与医学工程学院
湖南 株洲 412007
2. 湖南工业大学
百合种质资源创新与深加工湖南省工程研究中心
湖南 株洲 412007
3. 湖南工业大学
包装工程学院
湖南 株洲 412007

摘 要: 为了拓宽微生物色素在纺织印染、智能包装、医药健康等领域的适用性,对壮观链霉菌(*Streptomyces spectabilis*)菌株 S-13 所产红色素的稳定性及其对蚕丝织物的抗菌染色性能进行了初步探究。结果显示,色素最大吸收峰为 535 nm,在不同温度、光照、黑暗久置、常见食品添加剂下均具有较高的稳定性;紫外光和还原剂 $\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$ 对其有消色作用,而红光、氧化剂 H_2O_2 和金属离子对其有增色作用。当 pH 在 4.0~10.0 范围内逐渐增大时,色素由玫红色变为鲜红色直至黄色,证实其为 pH 敏感性色素。此外,该色素对蚕丝织物具有良好的匀染性和透染性,染色蚕丝织物的耐皂洗、耐摩擦、耐汗渍色牢度均为 5 级,耐光色牢度为 1 级。染色蚕丝织物对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别可达 49.7% 和 96.7%。

关键词: 壮观链霉菌;红色素;稳定性;蚕丝织物染色;抑菌活性

中图分类号: Q939.97

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)04-0024-09

引文格式: 邹雯婷,胡长春,吕舒婷,等.链霉菌红色素的稳定性及其对蚕丝织物的抗菌染色性能研究[J].包装学报,2025,17(4):24-32.

1 研究背景

与人工合成色素相比,天然色素因其具有良好的安全性、环境相容性和生物可降解性而逐渐成为全球研究的热点。天然色素根据其来源可分为植物色素、动物色素、矿物质色素和微生物色素^[1]。植物色素是目前应用最广泛的天然色素类型^[2],在食品^[3]、纺织品^[4]、彩妆^[5]等领域崭露头角。微生物色素是细菌、放线菌、真菌等微生物发酵过程中产生的一种次级代谢产物,其生产过程具有生产周期短、不受地域及季节限制、经济节能等优点,将成为天然色素工业化生

产的必然选择^[6,7]。微生物色素除了具有鲜艳的色泽、较高的生物安全性和稳定性外,还具有显著的抗病毒、抗疟疾、抑制肿瘤细胞增殖等重要的生物学功能^[8,9]。放线菌作为一类重要的微生物资源,因其发酵过程中产生多种抗生素及包含天然色素在内的多种非抗生素类活性物质,在发酵工业菌种中独具优势^[10]。其中链霉菌色素不仅具有优良的染色性能和对 pH 值变化的响应性,还对多种病原细菌和真菌具有显著的抑制作用,使其在纺织印染、智能食品包装、食品加工、医药健康、涂装等领域具有广阔的市场应用前景^[11-13],并在天然色素产品中具有核心竞争优势。

收稿日期: 2025-02-23

基金项目: 湖南省重点研发基金资助项目(2023NK2026);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ50168);湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(22A0402);国家级大学生创新创业训练计划项目(S202311535015)

作者简介: 邹雯婷,女,硕士生,主要研究方向为产生物活性物质微生物的筛选及应用, E-mail: 1453249768@qq.com

通信作者: 马 靓,女,讲师,博士,主要从事资源微生物开发与利用研究, E-mail: claralin527@hut.edu.cn

本研究对前期从校园土壤中筛选得到的壮观链霉菌(*Streptomyces spectabilis*, *S. spectabilis*)菌株 S-13 的红色素进行理化性质与功能特性分析, 并将其初步应用于蚕丝织物染色中, 旨在探究该色素的光谱学特性、稳定性以及针对蚕丝织物的染色性能, 以评估该色素的潜在应用与价值, 并初步建立研究色素理化性质和功能特性的实验方法。

2 实验

2.1 实验材料与仪器

2.1.1 主要试剂

冰醋酸、NaCl, 湖南汇虹试剂有限公司; CaCl_2 、 MgSO_4 、KCl、 AgNO_3 、 H_2O_2 、 $\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 KNO_3 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、可溶性淀粉、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 国药集团化学试剂有限公司; ZnSO_4 、柠檬酸钠, 上海泰坦科技股份有限公司; 蔗糖, 天津博迪化工股份有限公司; 市售化工色素染料; Yeast extract, 英国 Oxoid 公司; 高氏一号培养基、营养肉汤、营养琼脂, 杭州百思生物技术有限公司。

2.1.2 主要仪器

超净工作台, YJ-S/VD 型, 无锡一净净化设备有限公司; 双光束紫外-可见分光光度计, TU-1810 型, 北京普析通用仪器有限责任公司; 全温振荡器, BS-1E 型, 金坛市科杰仪器厂; 数显电热恒温干燥箱, DHG-9303-3SA 型, 金坛市盛蓝仪器制造有限公司; 生化培养箱, PYX-250S-A 型, 韶关市泰宏医疗器械有限公司; 立式压力蒸汽灭菌器, LDZX-50KBS 型, 上海市申安医疗器械厂; 数控超声波清洗器, KQ-500VDE 型, 昆山市超声仪器有限公司; 电脑测色配色仪, Datacolor 600 型, 美国德塔 (Datacolor) 公司。

2.1.3 菌株来源

本研究用于红色素发酵生产的 *S. spectabilis* 菌株 S-13 为前期研究工作中从湖南工业大学校园内生活区土壤中分离、纯化并保存。抑菌实验的受试菌金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*, ATCC 6538) 和大肠杆菌 (*Escherichia coli*, *E. coli*, ATCC 8739) 均购自广东省微生物菌种保藏中心。

2.1.4 主要培养基

高氏一号液体培养基: $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.05% (质量分数, 下同), NaCl 0.05%, KNO_3 0.1%, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.001%, 可溶性淀粉 2%, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05%, Yeast extract 0.03%, pH = 7.3 ± 0.2, 121 °C 灭

菌 20 min;

高氏一号固体培养基: $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.05%, NaCl 0.05%, KNO_3 0.1%, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.001%, 可溶性淀粉 2%, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05%, 琼脂粉 2%, pH = 7.3 ± 0.2, 121 °C 灭菌 20 min;

营养肉汤培养基: 牛肉膏 1%, NaCl 0.05%, 蛋白胨 0.05%, pH = 7.3 ± 0.2, 121 °C 灭菌 20 min;

营养琼脂培养基: 牛肉膏 1%, NaCl 0.05%, 蛋白胨 0.05%, pH = 7.3 ± 0.2, 琼脂粉 2%, 121 °C 灭菌 20 min。

2.2 实验方法

2.2.1 链霉菌菌株的活化及液体发酵培养

将 -80 °C 保存的 *S. spectabilis* S-13 菌株孢子悬浮液涂布于高氏一号固体平板上, 于 30 °C 下培养 7~14 d, 以活化菌种并制备新鲜的孢子悬浮液。以体积分数为 3% 的接种量将孢子悬浮液接种于高氏一号液体培养基中, 于 30 °C、175 r/min 振荡避光培养 9~14 d, 将发酵产物离心过滤, 以收集菌丝体。

2.2.2 链霉菌红色素的提取及色价测定

将菌丝体于 50 °C 下干燥至恒重, 充分研磨得质地均一且细腻的菌粉; 称取 0.5 g 菌粉于 50 mL 冰醋酸中, 于 120 W、30 °C 下避光超声提取 1 h。将色素提取液于 4 °C、9600 r/min 下离心, 收集上清液并转移至旋转蒸发仪中, 于 40 °C 下旋蒸浓缩后, 再置于真空干燥箱中干燥得色素浸膏。称取 0.1 g 色素浸膏溶于 10 mL 冰醋酸制得色素溶液, 再用冰醋酸稀释 3 倍后, 通过紫外-可见分光光度计于 250~700 nm 范围内进行全波长光谱扫描, 按照式 (1) 计算色素色价 ($E_{1\text{cm}}^{1\%}$)。

$$E_{1\text{cm}}^{1\%} \lambda_{\text{max}} = A \times \alpha, \quad (1)$$

式中: λ_{max} 为最大吸收波长; A 为实测试样的吸光度; α 为稀释倍数。

2.2.3 链霉菌红色素的稳定性研究

1) 温度、光照对色素稳定性的影响

各取色素溶液 5 mL, 分别置于 25, 40, 50, 70, 90, 100 °C 下保温 30 min; 各取色素溶液 5 mL, 分别置于紫外光、白光、红光下照射 30, 60, 90, 120 min。将各组样品取出静置 30 min 后观察其颜色变化, 经冰醋酸稀释后测定 $\lambda=535\text{ nm}$ (最大吸收波长) 处的吸光度并进行比较。

2) pH 值、金属离子对色素稳定性的影响

各取色素溶液 5 mL, 将 pH 值调节至 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 观察各组样品的颜色变化, 经冰醋酸稀释后于 400~650 nm 范围内进行光谱扫描。

各取色素溶液 0.9 mL, 分别加入 0.1 mL 5 nmol/L 的 CaCl_2 、 KCl 、 MgSO_4 、 AgNO_3 、 ZnSO_4 溶液, 充分混匀后静置 30 min 观察其颜色变化, 再经冰醋酸稀释后测定 $\lambda=535$ nm 处的吸光度并进行比较。

3) 氧化剂、还原剂、食品添加剂对色素稳定性的影响

各取色素溶液 5 mL, 分别加入等体积不同体积分数 (4%, 8%, 12%, 16%, 20%) 的氧化剂 (H_2O_2)、还原剂 ($\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$)、食品添加剂 (NaCl 、柠檬酸钠和蔗糖) 溶液, 充分混匀后静置 30 min, 观察其颜色变化, 再经冰醋酸稀释后测定 $\lambda=535$ nm 处的吸光度并进行比较。

4) 黑暗久置对色素稳定性的影响

取适量色素溶液避光存放于室温下, 每天取 1 mL 色素溶液, 于 4000 r/min 离心 5 min 后, 再经冰醋酸稀释并测定 $\lambda=535$ nm 处的吸光度, 连续测定 10 d。

2.2.4 链霉菌红色素对蚕丝织物的染色性能测定

在室温下将蚕丝织物按浴比 50 : 1 置于含有 *S. spectabilis* S-13 色素的乙醇水溶液中直接浸染, 调节染料的 pH 为 5.0, 以 3 °C/min 的速率升温至 80 °C 后保持恒温染色 60 min。染色结束后用冷水洗去浮色, 再于 40 °C 下皂煮 30 min, 清洗后可得染色蚕丝织物。

根据 GB/T 8629—2017《纺织品 试验用家庭洗涤和干燥程序》对染色蚕丝织物进行数次洗涤和干燥, 利用测色配色仪测定染色织物的 K/S 值和 L^* 、 a^* 、 b^* 等颜色特征值。利用紫外-可见分光光度计测定蚕丝织物染色前后 *S. spectabilis* S-13 色素染料在 $\lambda=535$ nm 处的吸光度, 根据式 (2) 计算色素染料对蚕丝织物的上染率 (F)。通过式 (3)~(4) 计算染色蚕丝织物 K/S 的平均值 ($\bar{K}/\bar{S}$) 和相对标准偏差 Sr , 以评价染色织物的匀染性。通过光学显微镜对比观察蚕丝织物纤维横截面的着色程度, 以评价染色织物的透染效果。

$$F = \frac{A_0 - A_n}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_0 表示染色前染料的吸光度; A_n 表示染色后残液的吸光度。

$$\bar{K}/\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K/S)_i \quad (3)$$

$$Sr = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(K/S)_i}{\bar{K}/\bar{S}} - 1 \right]^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中: Sr 表示染色织物上测量点的 K/S 值对样本平均值的相对标准偏差; n 表示测定总次数 ($n=5$)。

以市售同色系化工染料作为对照, 参照国家标准 GB/T 3920—2008《纺织品 色牢度试验 耐摩擦色牢度》、GB/T 3921—2008《纺织品 色牢度试验 耐皂洗色牢度》、GB/T 8426—1998《纺织品 色牢度试验 耐光色牢度: 日光》、GB/T 3922—2013《纺织品 色牢度试验 耐汗渍色牢度》分别测定不同色素染料染色织物的耐摩擦、耐皂洗、耐光和耐汗渍色牢度。

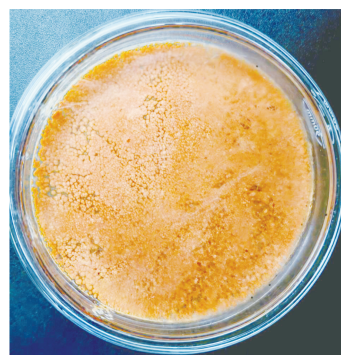
2.2.5 染色蚕丝织物的抑菌性能评价

分别采用 *S. aureus*、*E. coli* 作为受试菌, 根据国家标准 GB/T 209443—2008《纺织品 抗菌性能的评价 第 3 部分: 振荡法》评价染色蚕丝织物的抑菌性能。

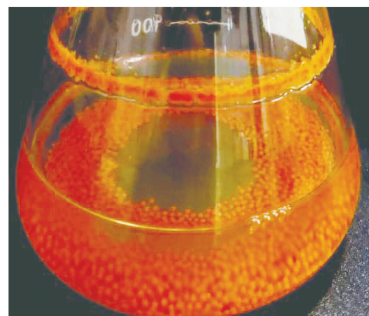
3 结果与分析

3.1 链霉菌菌株的活化及液体发酵培养

将 -80 °C 保存的 *S. spectabilis* S-13 菌株孢子悬浮液涂布于高氏一号固体平板上进行活化, 收集固体平板上的孢子悬浮液接种于高氏一号液体培养基中进行发酵培养, 通过抽滤获得含有红色色素的菌丝体, 结果如图 1 所示。



a) *S. spectabilis* S-13 在高氏一号平板上形成的红色菌落



b) *S. spectabilis* S-13 菌株的液体发酵产物



c) 含红色素的菌丝体

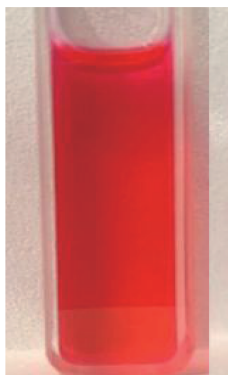
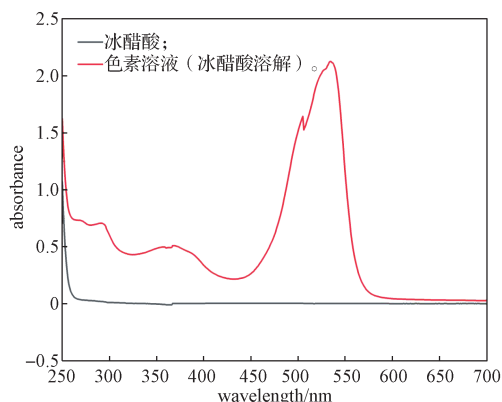
图1 *S. spectabilis* S-13 菌株的活化和液体发酵培养Fig. 1 Activation and liquid fermentation of *S. spectabilis* strain S-13

由图1可知, *S. spectabilis* S-13 菌株经活化后, 可在高氏一号固体培养基上形成密集的橙红色菌落。将其置于高氏一号液体培养基中培养 10 d 后, 即可获得含有大量胞内红色素的菌丝体。

3.2 链霉菌红色素的提取及色价测定

将链霉菌红色素的冰醋酸提取液干燥后获得的色素浸膏溶于冰醋酸制得色素溶液, 再用冰醋酸稀释 3 倍后, 通过紫外-可见分光光度计进行全波长光谱扫描, 获得链霉菌红色素的紫外-可见光谱图, 如图2所示。

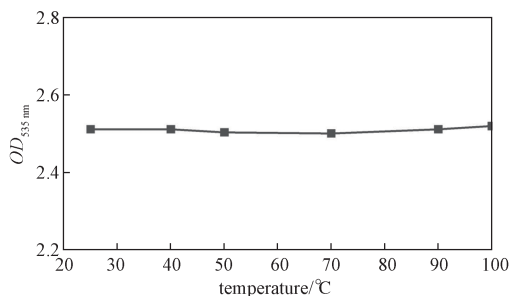
由图2a可知, 将链霉菌红色素的色素浸膏重新溶于冰醋酸后, 可得到红色的色素溶液。由图2b可知, 该色素在 535 nm 存在最大吸收峰, 这与文献[14-16]报道基本一致。因此, 可选用 $\lambda=535$ nm 作为后续实验的测定波长。链霉菌红色素在该波长处的吸光度为 2.125, 由式(1)计算可得该色素色价为 127.5 U/g; 在相同浓度和稀释倍数下, 与葛雯^[14]、顾晓月^[17]等所获链霉菌红色素的色价相比均较高, 证明通过冰醋酸提取的 *S. spectabilis* S-13 菌株胞内红色素可获得较高的色素产量。

a) *S. spectabilis* S-13 所产红色素溶液b) *S. spectabilis* S-13 色素的紫外-可见光谱图图2 *S. spectabilis* S-13 所产红色素溶液及其光谱学特征Fig. 2 Pigment produced by *S. spectabilis* S-13 and its spectroscopic characteristics

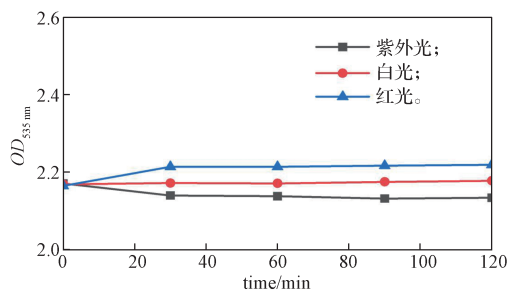
3.3 链霉菌红色素的稳定性研究

3.3.1 温度、光照对色素稳定性的影响

取色素溶液分别置于不同温度、不同光照条件下处理一段时间后, 将各组样品取出静置 30 min 并观察其颜色变化, 经冰醋酸稀释后测定 $\lambda=535$ nm 处的吸光度 ($OD_{535\text{ nm}}$), 结果如图3所示。



a) 不同温度下色素的吸光度 (535 nm 处)



b) 不同光照下色素的吸光度 (535 nm 处)

图3 温度、光照条件对色素稳定性的影响

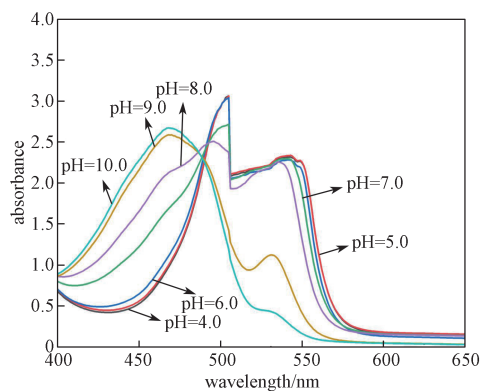
Fig. 3 Effects of temperature and light conditions on the stability of pigment

由图3可知, 当色素溶液在 25~100 °C 下分别处理 30 min, 以及经白光处理 30~120 min 后, 其在 535 nm 处的吸光度无明显变化, 说明色素在不同温

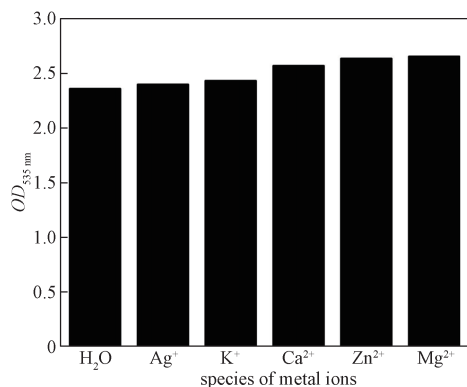
度和白光处理下具有较高的稳定性。经紫外光和红光进行相同处理后,色素在 535 nm 处的吸光度略有变化,说明紫外光和红光对色素具有一定的消色作用和增色作用。

3.3.2 pH 值、金属离子对色素稳定性的影响

取色素溶液分别在不同的 pH 值 (4.0~10.0) 以及不同的金属离子 (Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Ag^{+} 、 Zn^{2+}) 条件下,观察各组样品的颜色变化,经冰醋酸稀释后进行光谱扫描,结果如图 4 所示。



a) 不同 pH 值下色素的光谱图



b) 不同金属离子下色素的吸光度 (535 nm 处)

图 4 pH 值及金属离子对色素稳定性的影响

Fig. 4 Effects of pH values and metal ions on the stability of pigment

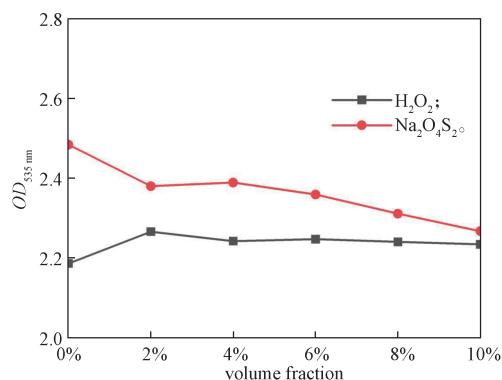
由图 4a 可知,当 pH 在 4.0~10.0 范围内逐渐增大时,色素由玫红色变为鲜红色直至黄色,同时色素的特征性吸收峰在 400~650 nm 范围内变化显著,说明该色素为 pH 敏感型色素^[18]。pH 的变化会直接影响天然色素的颜色,这是因为 pH 的变化会改变天然色素分子的电离状态、分子构象和化学反应等方面,从而导致天然色素的吸收光谱发生改变。例如,花青素在酸性条件下呈红色,在碱性条件下呈蓝色^[19]。

由图 4b 可知,当 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 存在时,色

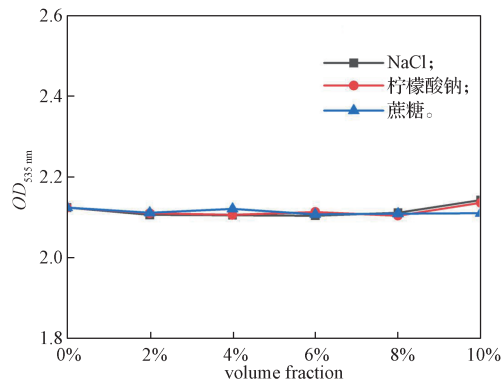
素在 535 nm 处的吸光度均明显升高,说明这些金属离子对色素具有一定的增色作用。金属离子对天然色素增色的原因主要包括形成配合物、影响分子结构和电子分布以及协同作用等方面,这些因素相互作用,共同影响着天然色素的颜色和稳定性^[20]。

3.3.3 氧化剂、还原剂、食品添加剂对色素稳定性的影响

取色素溶液分别加入等体积不同浓度的 H_2O_2 、 $\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$ 、NaCl、柠檬酸钠和蔗糖溶液,充分混匀后静置 30 min 观察其颜色变化,再经冰醋酸稀释后测定 $\lambda=535$ nm 处的吸光度,结果如图 5 所示。



a) H_2O_2 和 $\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$ 溶液



b) NaCl、柠檬酸钠和蔗糖溶液

图 5 不同浓度的溶液对色素稳定性的影响

Fig. 5 Effects of different concentration of solutions on the stability of pigment

由图 5a 可知,经不同浓度的氧化剂 H_2O_2 、还原剂 $\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$ 处理色素溶液后, H_2O_2 对色素具有一定的增色作用,当体积分数为 2% 时增色作用最显著;而 $\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}_2$ 则对色素具有消色作用,并随着浓度的增加,消色作用更加显著。由图 5b 可知,经不同浓度的 NaCl、柠檬酸钠、蔗糖等食品添加剂处理后,色素在 535 nm 处的吸光度几乎不变,稳定性良好。

3.3.4 黑暗久置对色素稳定性的影响

取适量色素溶液避光存放于室温下, 每天取 1 mL 色素溶液, 离心后, 经冰醋酸稀释后测定 $\lambda=535$ nm 处的吸光度, 连续测定 10 d, 结果如图 6 所示。

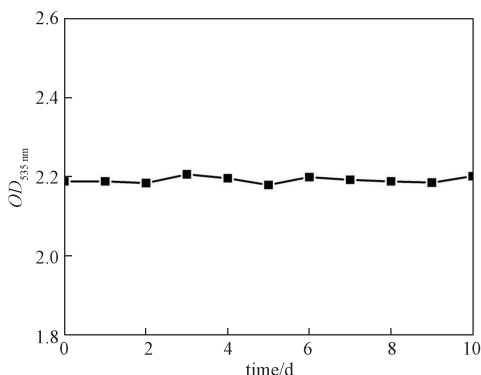


图 6 黑暗久置对色素稳定性的影响

Fig. 6 Effects of prolonged darkness on the stability of pigment

由图 6 可知, 将色素溶液在黑暗处连续静置 10 d 后, 未出现明显褪色现象, 色素在 535 nm 处的吸光度变化不明显, 说明色素在避光条件下具有良好的久置稳定性。

3.4 链霉菌红色素对蚕丝织物的染色性能测定

3.4.1 上染率

使用 *S. spectabilis* S-13 色素染料对蚕丝织物分别直接浸染 0, 5, 15, 25, 35, 45, 55 min 后, 通过式 (2) 计算色素染料对蚕丝织物的上染率, 构建上染率曲线, 结果如图 7 所示。

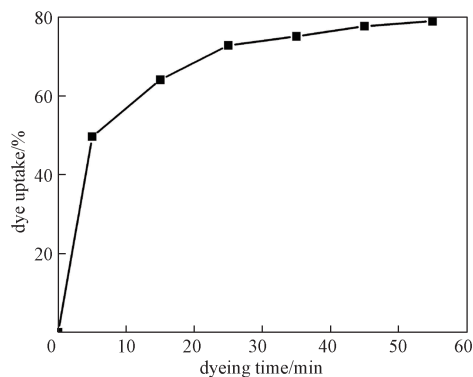


图 7 *S. spectabilis* S-13 色素染料染色蚕丝织物的上染速率曲线

Fig. 7 Dyeing rate curve of silk fabric dyed with *S. spectabilis* S-13 pigment

由图 7 可知, 在 5 min 内色素染料对蚕丝织物的上染率提高得最快; 随着染色时间不断延长, 上

染率逐步缓慢提高, 在染色 55 min 后达到最高值 78.9%, 并基本趋于染色平衡。这是由于染色初期蚕丝织物的结构较为疏松, 同时织物内外色素浓度差较大, 易于上染; 随着染色时间的增加, 染色体系中色素浓度逐渐降低, 织物内外色素浓度差减小, 其吸附色素分子的速率变慢, 最终达到平衡。

3.4.2 匀染性

S. spectabilis S-13 色素染料及染色蚕丝织物如图 8 所示。利用测色配色仪测定染色织物的 K/S 值和 L^* 、 a^* 、 b^* 等颜色特征值, 并通过式 (3)、(4) 计算染色蚕丝织物的 $\bar{K}/\bar{S}$ 和 S_r , 以评价染色织物的匀染性。



a) *S. spectabilis* S-13 色素染料



b) 染色蚕丝织物

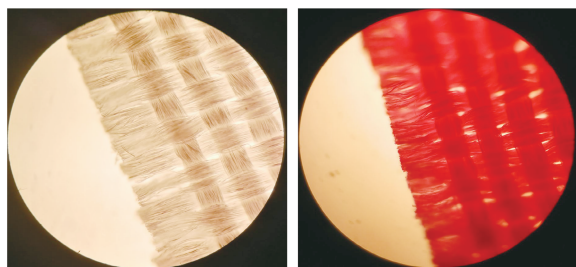
图 8 *S. spectabilis* S-13 色素染料染色蚕丝织物匀染性

Fig. 8 Levelness of silk fabric dyed with *S. spectabilis* S-13 pigment

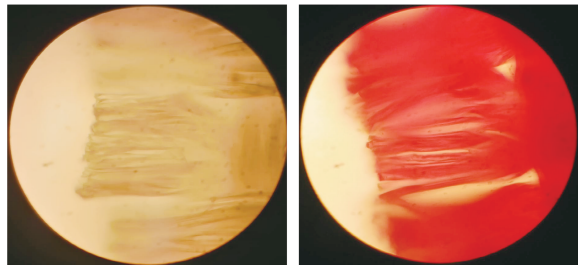
经 *S. spectabilis* S-13 色素染料染色后的蚕丝织物 K/S 值为 1.4216, L^* 值为 57.16, a^* 值为 59.72, b^* 值为 1.78, S_r 值为 0.002 270。由图 8 可知, *S. spectabilis* S-13 色素染料对蚕丝织物具有良好的匀染性, 染色蚕丝织物具有较高的明度, 颜色红中偏黄。

3.4.3 透染性

通过光学显微镜对比观察蚕丝织物纤维横截面的着色程度, 以评价染色织物的透染效果, 结果如图 9 所示。



a) 未染色标准蚕丝织物 (100 ×) b) 染色蚕丝织物 (100 ×)



c) 未染色标准蚕丝织物 (400 ×) d) 染色蚕丝织物 (400 ×)

图 9 光学显微镜观察染色蚕丝织物的透染性

Fig. 9 The dye permeability of silk fabric observed by optical microscope

由图 9 可知, 染色蚕丝织物纤维内外均已染成色泽鲜艳而均匀红色, 且未出现环染现象和明显色差, 说明 *S. spectabilis* S-13 色素染料对蚕丝织物均具

有良好的透染性。

3.4.4 色牢度

以市售同色系化工染料作为对照, 参照国家标准分别测定不同色素染料染色织物的耐摩擦、耐皂洗、耐光和耐汗渍色牢度, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 经 *S. spectabilis* S-13 色素染料染色后蚕丝织物的耐摩擦、耐汗渍、耐皂洗色牢度均已达到 5 级, 其固色效果远超市售同色系化工染料; 然而蚕丝织物经 *S. spectabilis* S-13 色素染料染色后的耐光色牢度则相对较低, 仅为 1 级。该结论与文献 [21–23] 中报道的结果一致, 推测可能是因为天然色素的分子结构在日光照射下易发生化学键的改变或断裂, 使得染料的发色体系遭到破坏从而褪色 [24]。后续可通过对织物改性、添加合适的染色固色剂或优化染色工艺条件 [25] 等方式来改善染色织物的耐光色牢度, 以拓宽天然色素染料在织物染色领域的适用范围。

3.5 染色蚕丝织物的抑菌性能评价

分别采用 *S. aureus*、*E. coli* 作为受试菌, 评价染色蚕丝织物的抑菌性能, 结果如表 2 和图 10 所示。

由表 2 和图 10 可知, *S. spectabilis* S-13 菌株胞内红色素本身的抑菌性能可赋予染色蚕丝织物以较强的抑菌效果, 其对受试菌 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别可达 49.7% 和 96.7%。

表 1 经不同染料染色后蚕丝织物的色牢度

Table 1 Colour fastness of silk fabrics dyed with different dyes

指标	耐摩擦色牢度		耐汗渍 (酸 / 碱) 色牢度		耐皂洗色牢度		耐光色牢度	
	<i>S. spectabilis</i> S-13 色素染料	化工染料	<i>S. spectabilis</i> S-13 色素染料	化工染料	<i>S. spectabilis</i> S-13 色素染料	化工染料	<i>S. spectabilis</i> S-13 色素染料	化工染料
棉沾			5 级	2~3 级	5 级	2~3 级		
丝沾			5 级	1 级	5 级	2 级		
丝变			5 级	4~5 级	5 级	3~4 级		
干摩擦	5 级	4~5 级						
湿摩擦	5 级	5 级						
日晒							1 级	4 级

表 2 染色蚕丝织物对不同受试菌的抑菌活性

Table 2 Antibacterial activities of dyed silk fabric against different tested bacteria

受试菌	空白对照样	标准棉织物对照样		标准蚕丝织物对照样	染色蚕丝织物试样	
	$K/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1})$	$K/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1})$	F	$K/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1})$	$K/(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1})$	$Y/\%$
<i>E. coli</i>	53 000	99 600	1.26	37 300	50 100	49.7
<i>S. aureus</i>	65 000	112 000	1.46	6500	3700	96.7

注: K 代表试管中的活菌浓度; F 代表对照样实验菌的增长值; Y 代表试样的抑菌率。

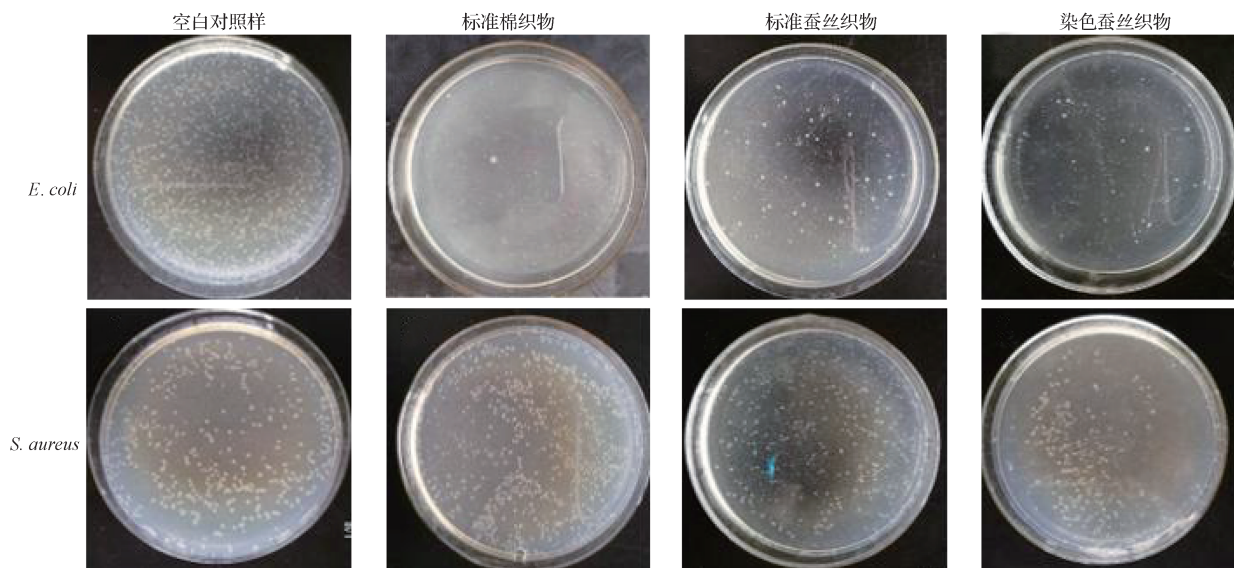


图 10 染色蚕丝织物对不同受试菌的抑菌活性

Fig. 10 Antibacterial activities of dyed silk fabric against different tested bacteria

4 结语

微生物色素除了具有鲜艳的色泽、较高的生物安全性和稳定性, 还被证明具有抗菌、抗氧化等多种生物学活性。本研究选用的 *S. spectabilis* S-13 菌株所产胞内红色素产量较高, 其色价可达 127.5 U/g。通过探究温度、光照、pH 值、黑暗久置等环境因素和金属离子、氧化剂、还原剂、食品添加剂等对色素稳定性的影响, 证实该色素具有较高的稳定性和 pH 敏感性。此外, 由该色素制备的天然织物染料具有良好的匀染性、透染性, 并可对蚕丝织物重复染色; 染色织物具有优良的耐摩擦、耐汗渍、耐皂洗色牢度, 其固色效果远超市售同色系化工色素染料, 后续需进一步改善染色工艺条件以提高其耐光色牢度。同时, 色素本身的抑菌性能可赋予染色织物较强的抑菌效果, 其对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别可达 49.7% 和 96.7%。本研究探究了链霉菌红色素的稳定性及其用于以蚕丝为代表的高端织物抗菌染色领域的可行性, 也证实了该色素在印染、包装、食品、医药保健等领域的潜在应用前景。

参考文献:

- [1] 邢金锋, 王稳航. 天然色素的来源、分类、稳定化及其在可食包装中的应用 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 286-295.
- [2] SOLYMOSI K, MYSLIWA-KURDZIEL B. Chlorophylls

and Their Derivatives. Used in Food Industry and Medicine[J]. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 2017, 17(13): 1194-1222.

- [3] 宋瑞龙, 马碧霞, 赵 廉, 等. 食品中虾青素的研究进展 [J]. 美食研究, 2019, 36(4): 73-76.
- [4] 顾家玉, 孙 璇, 伏立松, 等. 黑果枸杞色素的提取及对羊毛织物的染色 [J]. 印染, 2023, 49(2): 37-41.
- [5] 冯海锴, 张 鏖, 胡 悦, 等. 天然色素口红的制备及质量稳定性考察 [J]. 香料香精化妆品, 2020(3): 25-28.
- [6] 于 雪, 张 威, 吴玉洁, 等. 微生物产色素机制及其生物活性 [J]. 微生物学报, 2022, 62(4): 1231-1246.
- [7] 任燕飞, 巩继贤, 付冉冉, 等. 微生物合成纳米灵菌红素及其对羊毛织物抗菌染色 [J]. 纺织学报, 2018, 39(2): 91-96.
- [8] RAMESH C, VINITHKUMAR N V, KIRUBAGARAN R, et al. Multifaceted Applications of Microbial Pigments: Current Knowledge, Challenges and Future Directions for Public Health Implications[J]. Microorganisms, 2019, 7(7): 186-231.
- [9] TULI H S, CHAUDHARY P, BENIWAL V, et al. Microbial Pigments as Natural Color Sources: Current Trends and Future Perspectives[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4669-4678.
- [10] 张超群, 戴建荣. 放线菌的研究现状与展望 [J]. 中国病原生物学杂志, 2019, 14(1): 110-113.
- [11] 赵文茹, 成美林, 李 政, 等. 有机酸调控的吡咯结构微生物色素对羊毛染色 [J]. 针织工业, 2021(6): 33-37.

- [12] FENG T L, CHEN H Z, ZHANG M. Applicability and Freshness Control of pH-Sensitive Intelligent Label in Cool Chain Transportation of Vegetables[J]. Foods, 2023, 12(18): 3489.
- [13] AKILANDESWARI P, PRADEEP B V. Exploration of Industrially Important Pigments from Soil Fungi[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(4): 1631-1643.
- [14] 葛雯, 廖淑敏, 蔡婉瑶, 等. 壮观链霉菌红色素的结构解析及其稳定性研究[J]. 生物化工, 2023, 9(1): 46-52.
- [15] 张正波, 易小莉, 郑怡, 等. 壮观链霉菌红色素稳定性和抑菌活性的初步研究[J]. 科技通报, 2012, 28(1): 91-94.
- [16] 何天豪. 壮观链霉菌所产红色素的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [17] 顾晓月. 链霉菌 TD-1 中生物色素的提取纯化工艺及应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [18] 王玉洁, 孙诗清, 朱长俊, 等. 天然红色素灵菌红素的抗菌性能及应用[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(11): 1626-1629.
- [19] GUO C, LI Y, ZHANG H, et al. A Review on Improving the Sensitivity and Color Stability of Naturally Sourced pH-Sensitive Indicator Films[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(4): e13390.
- [20] SIGURDSON G T, TANG P P, GIUSTI M M. Natural Colorants: Food Colorants from Natural Sources[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2017, 8: 261-280.
- [21] 俞建伟, 侯战昌, 陈超, 等. 茜草植物染料染色羊绒纤维的摩擦牢度[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(2): 105-111.
- [22] 陆雅婷, 林钰琳, 李诗洁, 等. 荷叶天然染料的提取及对改性棉织物的染色[J]. 中国纤检, 2024(4): 106-110.
- [23] 方娇娇, 赵培宏, 赵宜涛, 等. 茶梗儿茶素的制备及其对蚕丝织物的染色和功能改性[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(6): 1-8.
- [24] 徐艺玮, 赵文茹, 巩继贤, 等. 生物质色素耐日晒色牢度提升的研究进展[J]. 针织工业, 2021(1): 43-47.
- [25] 涂莉, 孟家光. 天然织物所用染料及其染色性能的改善研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2019, 36(3): 95-101.

(责任编辑: 李玉华)

Study on Stability of Red Pigment from *Streptomyces spectabilis* and Its Antibacterial Dyeing Performance on Silk Fabrics

ZOU Wenting^{1,2}, HU Changchun¹, LÜ Shuting¹, YAN Zhengrong³, ZENG Xiaoxi¹, MA Liang^{1,2}

(1. School of Biological Science and Medical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Lily Germplasm Resources Innovation and Deep Processing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 3. School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: To enhance the versatility of microbial pigments in textile printing and dyeing, intelligent packaging, medical health and other fields, the stability of red pigment produced by *Streptomyces spectabilis* strain S-13 and its antibacterial dyeing performance on silk fabrics were preliminarily studied. The results showed that the pigment had a maximum absorption peak at 535 nm and exhibited high stability under different temperatures, illumination conditions, darkness, and in the presence of common food additives. The red pigment was decolorized upon exposure to ultraviolet light and the reducing agent sodium dithionite, whereas its color intensity was enhanced by red light, the oxidant hydrogen peroxide and metal ions. As the pH increased from 4.0 to 10.0, the pigment transitioned from rose red to bright red until yellow, indicating that it was a pH-sensitive pigment. Moreover, the pigment exhibited good levelness and dye permeability to silk fabrics, and the color fastness to soaping, rubbing and perspiration of the dyed silk fabrics were all Grade 5, while the color fastness to sunlight was only Grade 1. Furthermore, the antibacterial efficacy of the dyed silk fabric against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* was found to be 49.7% and 96.7%, respectively.

Keywords: *Streptomyces spectabilis*; red pigment; stability; silk fabric dyeing; antibacterial activity