

一株产红色素真菌的分离鉴定与特性分析

潘戈帆¹, 丰颖¹, 徐月华¹, 彭思琰¹, 许爱清^{1,2*}

¹湖南科技大学生命科学与健康学院, 湖南 湘潭

²重金属污染土壤生态修复与安全利用湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年4月20日; 录用日期: 2023年5月22日; 发布日期: 2023年5月30日

摘要

从柚子皮壳上分离得到一株产红色素丝状真菌菌株RedF, 通过形态学特性指标和基因组多位点序列分型法鉴定菌株为暗玫瑰篮状菌。镉离子对菌落形态建成影响在遗传上是可逆转的。水溶性红色素的最大吸收峰为503 nm。以察氏培养基为基础, 添加0.3%羧甲基纤维素钠时, 红色素产量最大; 理化条件稳定性实验表明, 红色素粗提液20℃~60℃条件下较稳定; 低浓度(0.002 g/L)亚硫酸钠对红色素粗提液有增色效应; 红色素在含H₂O₂微环境下稳定性下降; 在NaCl盐度的增加时, 红色素的稳定性下降。红色素粗提液对蛋白类、淀粉类食材物质的着色能力与稀释100倍的红曲色素相当。研究结果能为微生物红色素资源的开发利用提供参考。

关键词

丝状真菌, 红色素, 多位点序列分型, 暗玫瑰篮状菌

Identification of a Red Pigment-Producing Filamentous Fungus and Characterization of Its Pigments

Gefan Pan¹, Ying Feng¹, Yuehua Xu¹, Siyan Peng¹, Aiqing Xu^{1,2*}

¹School of Life and Health Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Ecological Remediation and Safe Utilization of Heavy Metal-Polluted Soils, College of Hunan Province, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 20th, 2023; accepted: May 22nd, 2023; published: May 30th, 2023

Abstract

A red pigment producing fungal strain RedF was isolated from pomelo peel. The strain was identified as *Aspergillus roseus*. Cadmium ion's effect on colony morphology formation is reversible. The maximum absorption peak of water-soluble red pigment is 503 nm. Based on Czapek medium, the maximum red pigment yield was achieved with 0.3% sodium carboxymethyl cellulose. Stability experiments showed that the red pigment crude extract was relatively stable under 20°C~60°C conditions; low concentration (0.002 g/L) sodium sulfite had a color-enhancing effect on the red pigment crude extract; the stability of red pigment decreased in a micro-environment containing H₂O₂; the stability of red pigment decreased with the increase of NaCl salinity. The coloring ability of red pigment crude extract on protein and starch food materials was equivalent to that of 100-fold diluted red yeast pigment. The research results can provide a reference for the development and utilization of microbial red pigment resources.

文章引用: 潘戈帆, 丰颖, 徐月华, 彭思琰, 许爱清. 一株产红色素真菌的分离鉴定与特性分析[J]. 食品与营养科学, 2023, 12(2): 142-151. DOI: 10.12677/hjfn.2023.122018

fied to *Talaromyces atrovirens* depending on the morphology property indexes and genome multilocus sequence typing method. The effects of cadmium ion on the colony morphogenesis were reversible in heredity. The maximum absorption wavelength of crude red pigment extraction solution is 503 nm. The production of the red pigment reaches maximum capacity under 0.3% of CMC-Na added to the Czapek-Dox Medium solution. The results of chemical and physical stability experiments shows that the crude red pigment extraction solution is relatively stable under temperate range from 20°C to 60°C, the 0.002 g/L of sodium sulphite has hyperchromic effect on the crude red pigment extraction solution, the stability declines when hydrogen peroxide added into the crude red pigment extraction solution, and the stability declines when the salinity content of NaCl increases. The dyeing effect of crude red pigment solution on the protein and starch food materials was equivalent to that of the monascus pigment solution diluted by 100 times. The research result could provide reference to the development of microbial red pigment resources.

Keywords

Filamentous Fungus, Red Pigment, Multilocus Sequence Typing, *Talaromyces atrovirens*

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微生物生物合成的天然色素, 具备丰富的色彩种类、独特的生物活性、生物相容性和对环境友好性, 一些天然色素具有抗菌、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血脂等生物活性, 同时具有高营养、高安全性的特性[1] [2]。红色素以红曲菌发酵生产研究居多, 但红曲菌发酵能够产生一种真菌毒素——桔霉素(Citrinin), 具有肝脏毒性和肾毒性; 也产生一种食品工业中禁止添加的抗胆固醇药物——梅奴灵(Mevinolin), 这些因素使红曲色素在实际应用中受到了极大的限制[3]。丝状真菌菌种资源丰富, 其产色素的性能也得到不断挖掘利用。近年来, 国内外研究报道产红色素的真菌主要有血红红曲菌(*Monascus sanguineus*) [4]、产紫青霉(*Penicillium purpurogenum*)、草酸青霉(*Penicillium oxalicum*)、紫色红曲菌(*Monascus purpureus*)、拟分枝孢镰刀菌(*Fusarium sporotrichioides*)、偏侧蛇虫草菌(*Ophiocordyceps unilateralis*)、黑曲霉(*Aspergillus niger*) [3] [5]、产紫篮状菌(*Talaromyces purpurogenum*) [6]、白双轮篮状菌(*Talaromyces albobiverticillius*) [7] [8]、暗玫瑰篮状菌(*Talaromyces atrovirens*) [9]、萨氏曲霉(*Aspergillus sydowii*) [1]和一种南极采样分离的地丝霉(*Geomyces* sp.) [10]。

本研究分离产木质纤维素降解酶丝状真菌的过程中, 分离纯化到一株产水溶性红色素的篮状菌, 对菌株进行了形态学和分子生物学特性鉴定, 红色素合成影响因素, 红色素粗提液的稳定性、染色性展开研究, 以期对红色素的开发利用提供科学依据和理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 材料与仪器

菌种分离来源基质物: 发霉的柚子皮。

羧甲基纤维素钠(CMC-Na, 食品级, 重庆力宏精细化工有限公司), Cd(NO₃)₂·4H₂O (AR, 天津市科密欧化学试剂有限公司), 无水乙醇, 亚硫酸钠, 双氧水, 氯化钠, 红曲色素。

全自动高压蒸汽灭菌器(登冠医疗), 电热恒温鼓风干燥箱, 立式恒温振荡器, 洁净工作台, 人工气候

培养箱(上海一恒), 高速冷冻离心机(卢湘仪), 光学显微镜(Olympus), 紫外可见分光光度计。

产纤维素酶真菌分离培养基: 以纤维素为唯一碳源。按察氏液体培养基配方[11], 用含 1.5% 羧甲基纤维素钠替代配方中的蔗糖, 121℃, 灭菌 30 min。

马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)、察氏固体培养基、以及以察氏培养基为基础的培养基, 均按配方配制[11], 121℃, 灭菌 30 min。

2.2. 实验方法

2.2.1. 菌株的分离与形态学的观察

制作产纤维素酶真菌分离培养基固体平板, 用镊子夹取少量发霉的柚子皮壳样品, 放置在平板中央, 28℃培养 7 d, 生长出能产纤维素酶的丝状真菌菌落。待菌落产生孢子后, 继续分离纯化, 得到一株能利用纤维素生长产红色素的菌株 RedF。

菌株斜面培养物孢子三点法接种到 PDA 培养基平板上, 27℃培养 7 d, 跟踪观察菌落生长特征, 观察显微镜下菌丝体的形态结构。

2.2.2. 镉离子对菌落形态建成的影响

将菌株 RedF 斜面孢子接种到 Cd²⁺ 含量为 10 mg/L 的 PDA 培养基平板上, 27℃培养 7 d, 观察菌落特征。将含镉平板上生长的菌落的孢子, 再转接于普通 PDA 培养基平板, 观察传代培养后生长菌落特征。比较分析菌株生长在含镉和无镉平板上菌落的大小、孢子的颜色、菌丝的发达程度、以及产生红色素量的差异性。

2.2.3. 菌株的基因组多位点序列分型鉴定

将菌株 RedF 接种培养于 PDA 液体培养基, 27℃振荡培养 7 d, 移取 10 ml 培养液, 10000 rpm 离心 10 min, 收集菌丝体沉淀物样品, 寄送上海生工生物工程有限公司测序。测定 rRNA 基因的 ID 区、 β -微管蛋白基因(BT2)、钙调素基因(CaM)和 RNA 多聚酶 II 基因(RBP2)等 4 个保守基因的序列。

将所测定的 4 个序列分别在 GenBank 中进行 BLAST 搜索, 根据 BLAST 结果初步判断菌株的种属类别。从 GenBank 中 nucleotide 数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucleotide>)中搜索下载青霉菌的有性型篮状菌属(*Talaromyces*)中 *Trachyspermi* 组的 18 个种的代表菌株(含模式菌株)的 4 个基因位点的序列(见表 1), 用作参考序列。对于 ITS 基因测序, 通常采用通用引物为 ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')和 ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')。因本次序列测定的 ID 区序列较长, 测得序列中包含通用反向引物 ITS4 的反向互补保守序列(5'-GCATATCAATAAGCGGAGGA-3'), 截去其下游序列而得到完整的 ITS 区序列用于后续比对分析。从 GenBank 数据库中下载的其他 7 个菌种如 *T. aerius*, *T. diversus*, *T. erythromellis*, *T. minioluteus*, *T. minnesotensis*, *T. purpureogenus* 和 *T. udagawae* 的基因序列都同样包括 ITS4 的反向互补保守序列, 都对其下游序列截除处理, 以保证用于比对的基因序列都是基于真正意义上的 ITS 区序列。

首先将 19 个菌株(除因只检索到 3 个基因的 *Talaromyces systylus* 外)的单个基因位点片段序列用 ClustalW 1.83 程序进行多序列比对生成等长的序列。四个位点都比对完毕后, 将每一个菌株的 4 个基因位点合并成独立的序列片段, 即 ITS-BT2-CaM-RPB2, 其长度为 3281 字符。以软件 PAUP v4.0b10 将合并后等长的 19 个多基因位点合并序列生成最简约系统发育树严格一致树(Strict consensus tree), 自举值(Bootstrap Value)设定 1000 次, 以菌株 *Talaromyces purpureogenus* CBS 122434 作外群。并用软件 MrBayes 3.2.7 计算一致树分支节点的贝叶斯后验概率(Bayesian Posterior Probabilities)。通过比较系统发育树上待测菌株 RedF 与已知模式株的系统发育关系, 确定待测菌株的种名。

Table 1. Reference strains for phylogenetic analysis and accession number of four genes of each strain in GenBank
表 1. 系统发育分析用的参考模式株及其四个基因在 GenBank 中的编号

序号	模式株	ITS	BT2	CaM	RPB2
1	<i>T. atrovirens</i> CBS 133442	KF114747	KF114789	KJ775418	KM023288
2	<i>T. aerius</i> CBS 140611	KU866647	KU866835	KU866731	KU866991
3	<i>T. albisclerotius</i> CBS 141839	MN864276	MN863345	MN863322	MN863334
4	<i>T. albobiverticillius</i>	KJ775732	KJ775225	KJ885258	KM023310
5	<i>T. assiutensis</i> CBS 147.78	MH861122	KJ865720	KJ885260	KM023305
6	<i>T. austrocalifornicus</i> CBS 644.95	JN899357	KJ865732	KJ885261	MN969147
7	<i>T. brasiliensis</i> URM 7618	MF278323	LT855560	LT855563	MN969198
8	<i>T. convolutus</i> CBS 100537	JN899330	KF114773	MN969316	JN121414
9	<i>T. diversus</i> CBS 320.48	JN899341	JX494304	KF741953	KM023285
10	<i>T. erythromellis</i> CBS 644.80	JN899383	HQ156945	KJ885270	KM023290
11	<i>T. heiheensis</i> HMAS 248789	KX447526	KX447525	KX447532	KX447529
12	<i>T. minioluteus</i> CBS 642.68	JN899346	MN969409	KJ885273	JF417443
13	<i>T. minnesotensis</i>	LT558966	LT559083	LT795604	LT795605
14	<i>T. solicola</i> CBS133445	KF114731	KF114776	LR535946	LR535948
15	<i>T. systylus</i>	KP026917	KR233838	KR233837	ND
16	<i>T. trachyspermus</i> CBS 373.48	MH856401	AY753371	KJ885281	JF417432
17	<i>T. ucrainicus</i>	JN899394	MK450915	KJ885282	KM023289
18	<i>T. udagawae</i>	JN899350	KF114796	KX961260	MN969148
19	<i>T. purpurogenus</i> CBS 122434	JX315663	JX315640	JX315659	JX315701

2.2.4. 红色素粗提液最大吸收波长的确定

将菌株 RedF 斜面孢子接种于添加 0.3% CMC-Na 的察氏液体培养基中, 27°C 振荡培养 7 d, 10,000 rpm 离心 10 min, 收集含红色素上清。向上清添加无水乙醇(色素液 V₁: 无水乙醇 V₂ = 3:1), 静置 30 min 沉淀其中细胞碎片、蛋白质、多糖和核酸等, 离心后, 置于 80°C 电热烘箱挥发掉乙醇组分得到红色素粗提液。以去离子水为参照物, 进行紫外 - 可见光全波长扫描, 测定红色素最大吸收波长。

2.2.5. 培养基中 CMC-Na 对红色素合成的影响

将菌株 RedF 斜面孢子分别接种到 CMC-Na 含量为 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 的察氏液体培养基中, 27°C 振荡培养 7 d, 观察菌株产色素情况并在 λ_{\max} 处测定各处理粗提液的吸光度值。

2.2.6. 红色素的理化条件稳定性

检测温度、还原剂、氧化剂及盐度等因素对红色素稳定性的影响[9]。分别对色素粗提液进行以下操作: 将红色素粗提液分别置于 20°C、40°C、60°C、80°C 和 100°C 下; 配制含 Na₂SO₃ 浓度为 0、0.002 g/L、0.02 g/L 和 0.05 g/L 的红色素溶液; 配制含 H₂O₂ 浓度为 0、0.03%、0.3%、1.5% 和 3% 的红色素溶液; 配制含 NaCl 浓度为 0、3 g/L、6 g/L、10 g/L 和 40 g/L 的红色素溶液。在室温下避光静置 30 min 后, 在 λ_{503} 处测定各处理的吸光度值, 比较分析各处理下红色素的稳定性。

2.2.7. 蛋白质、淀粉染色性能试验

取加去离子水稀释 100 倍红曲色素溶液、色素粗提液, 各两份分装 40 mL 和 30 mL, 测定两种色素

溶液的吸光度($\lambda_{\max} = 503 \text{ nm}$)初始值;各加入 4 g 新鲜豆腐块(切成 8 块 1 cm^3 正方体小块)于 40 mL 的色素溶液中,加 0.3 g 玉米淀粉于 30 mL 的色素溶液中, 25°C 浸泡静置 0.5 h, 经 $40 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后,再测定染色后色素溶液的吸光度残余值,按照式(1)计算出其染色率 D 值[12]。式中 D_1 为染色前色素液吸光值(初始值), D_2 为染色后的色素液吸光值(残余值)。

$$D = \frac{D_1 - D_2}{D_1} \times 100\% \quad (1)$$

3. 结果与分析

3.1. 菌株的形态学观察

菌株 RedF 在 PDA 培养基上培养,其菌落形态及菌丝体的显微形态见图 1。菌落直径 3 cm 左右;菌丝体不发达,紧贴培养基表面不容易挑取;产深绿色分生孢子;菌落边缘菌丝白色,绒毛状;菌落向周围分泌红色水溶性色素。在显微镜下观察菌丝体结构,可见典型的特化为帚状枝样分生孢子头,帚状枝双轮生,孢子椭圆形,量大。这些特性与青霉属真菌的形态特性描述相符[13],初步鉴定菌株为青霉属真菌。

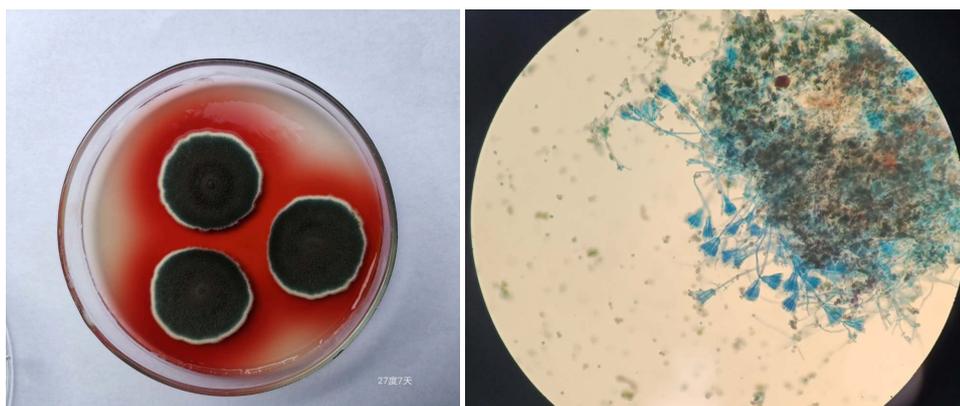


Figure 1. Colony morphology of the strain growing on PDA and microscopic morphology of the mycelia
图 1. PDA 平板上生长的菌落形态及菌丝体显微形态图

3.2. 镉离子对菌落形态建成的影响

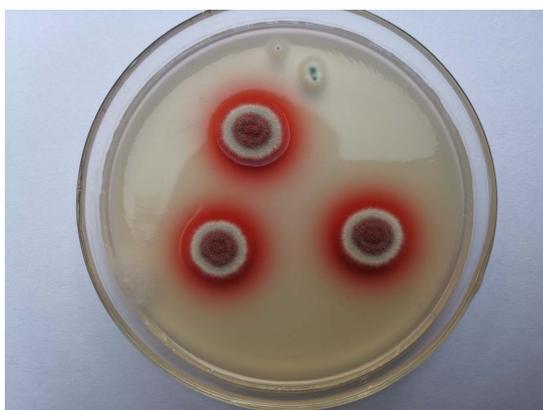


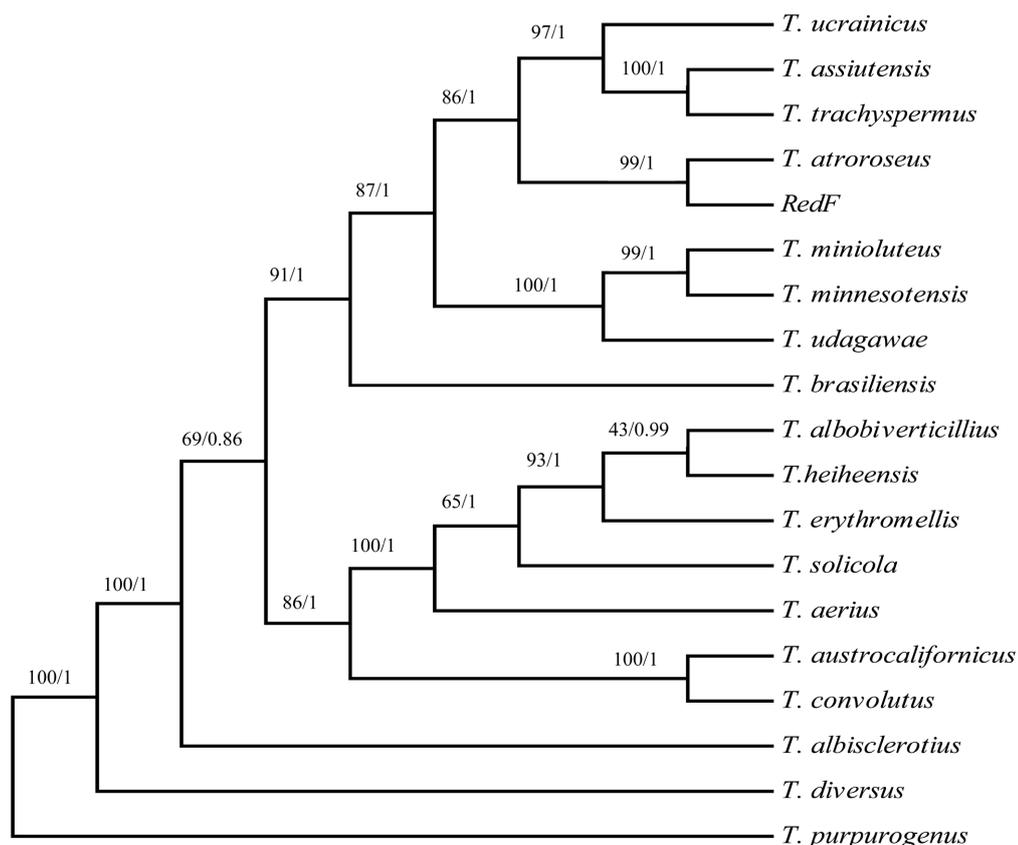
Figure 2. Colony morphology of the strain growing on PDA containing 10 mg/L of cadmium ion
图 2. 含 10 mg/L 镉离子的 PDA 平板上生长的菌落形态

菌株 RedF 在含 10 mg/L Cd²⁺ 的 PDA 平板上生长的菌落形态见图 2, 与图 1 的菌落形态有明显差别。在含 Cd²⁺ PDA 平板上, 菌丝长速迟缓, 菌落直径约 1.5 cm, 表面中部较厚或中间有脐状突起, 产生分生孢子呈粉红色, 菌落边缘新生菌丝呈白色, 菌落向周围分泌红色色素液, 产生量相对较小。将含镉平板上的菌丝体和孢子再接种到不含镉 PDA 平板上, 菌落生长状态会恢复到与图 1 一样的正常状态。表明镉离子对菌株 RedF 的菌落建成影响在遗传上是可逆转的。

3.3. 基因组多位点序列分型鉴定

序列测定得到 rRNA 基因中的 ID 区、BT2、CaM 和 RPB2 四个保守基因的序列分别为 1061 nt、510 nt、746 nt 和 1139 nt。将四个基因序列逐个分别在 GenBank 中进行 BLAST 搜索, 结果共同指向暗玫瑰篮状菌(*Talaromyces atroroseus*)的一些菌株为唯一的最高同源性(>97%)的亲缘菌, 可初步鉴定待测菌株 RedF 为暗玫瑰篮状菌。

四个保守基因基因位点序列合并后, 利用 PAUP 软件最简约法(Maximum Parsimony, MP)和 MrBayes 软件贝叶斯推断法(Bayesian Inference, BI)构建的系统发育树具有相同的拓扑结构, 生成的最简约(MP)系统发育树见图 3。待测菌株 RedF、篮状菌属(*Talaromyces*)中 Trachyspermi 组的 17 个种以及外群菌株 *T. purpurogenus* 的 4 基因合并序列建成系统发育树, 显示待测菌株 RedF 与 *T. atroroseus* 聚类在同一支系, 两者具有最近亲缘性。因此, 鉴定待测菌株 RedF 是一株暗玫瑰篮状菌, 命名为 *Talaromyces atroroseus* RedF。



注: 分枝节点显示自举值百分比(前/)和贝叶斯后验概率(/后), 菌株 *Talaromyces purpurogenus* CBS 122434 作外群。

Figure 3. Maximum parsimony phylogenetic tree constructed based on ITS-BT2-CaM-RBP2 gene loci sequences
图 3. 基于 ITS-BT2-CaM-RBP2 四基因位点合并序列构建的最简约系统发育树

3.4. 红色素最大吸收波长的确定

对色素粗提液进行紫外-可见光全波长扫描,显示最大吸光度的吸收峰在 503 nm。后续试验选取 503 nm 处波长测定红色素溶液的吸光度值(图 4)。

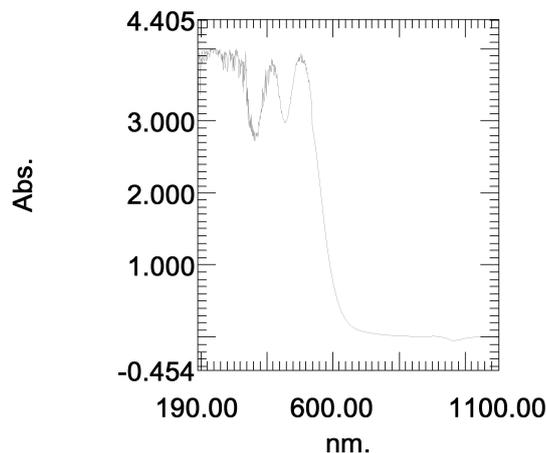
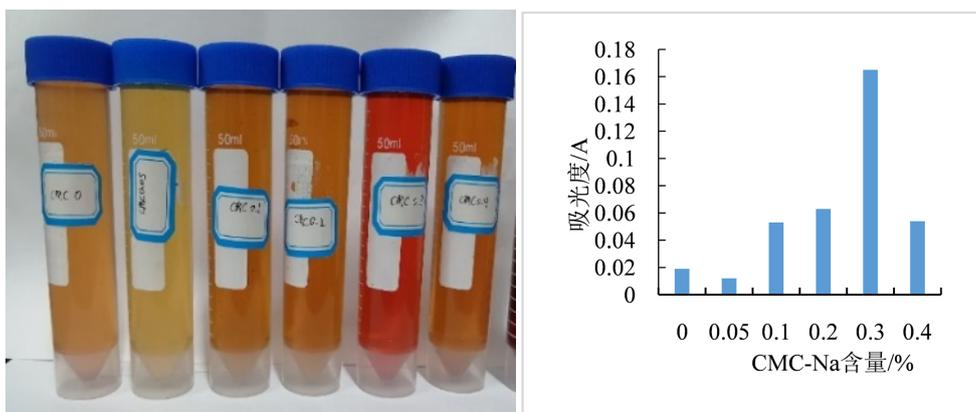


Figure 4. Diagram of the crude extraction solution of the red pigment scanned under wavelength range 190 to 1100 nm
图 4. 红色素粗提液在 190~1100 nm 波长的扫描图

3.5. 培养基中 CMC-Na 对红色素合成的影响

不同浓度 CMC-Na 培养后的色素溶液和其吸光度值(OD_{503})见图 5。培养液的颜色对比与吸光度值比较分析结果表明,在察氏培养基中添加 CMC-Na 会不同程度地影响菌株合成红色素的产量,当 CMC-Na 的含量为 0.3% 时,红色素的产量最高、吸光度值最大。



注:从左至右,CMC-Na 含量依次为 0, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3% 和 0.4%。

Figure 5. Diagram of the pigment solution under different concentration CMC-Na treatment and its absorption value
图 5. 不同浓度 CMC-Na 处理后色素溶液和其吸光度值

3.6. 红色素的理化条件稳定性

温度、亚硫酸钠、双氧水、氯化钠对红色素稳定性影响依次见图 6~9。图 6 显示红色素在 20~60℃ 条件下较稳定。图 7 显示亚硫酸钠浓度低于 0.002 g/L 时,对色素有一定的增色效果,当亚硫酸钠浓度高于 0.002 g/L 时,亚硫酸钠的浓度对色素稳定性几乎无影响。图 8 显示随着 H_2O_2 浓度的增加,色素稳定性逐

渐降低,表明 H_2O_2 对红色素的稳定性有负面影响,该红色素在含氧化剂的微环境下稳定性下降。图 9 显示随着 NaCl 浓度增加,红色素的稳定性下降,但在高浓度 NaCl 条件下仍保留较高的吸光度,具有染色应用潜力。

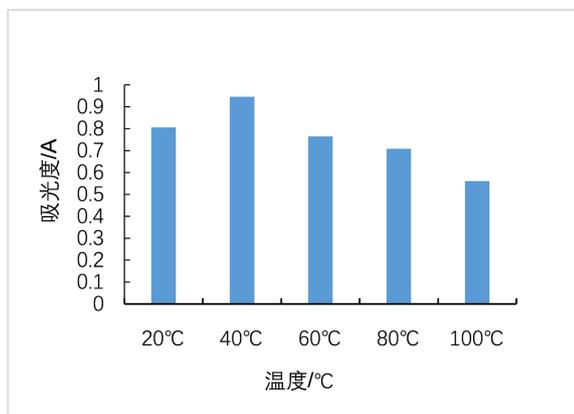


Figure 6. Diagram of the temperature effect on pigment solution stability

图 6. 温度对红色素稳定性的影响

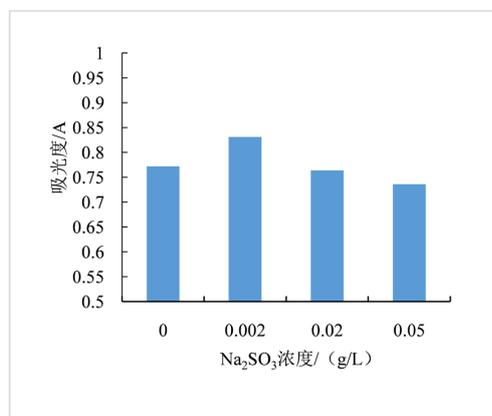


Figure 7. Diagram of the sodium sulphite effect on pigment solution stability

图 7. 亚硫酸钠对红色素稳定性的影响

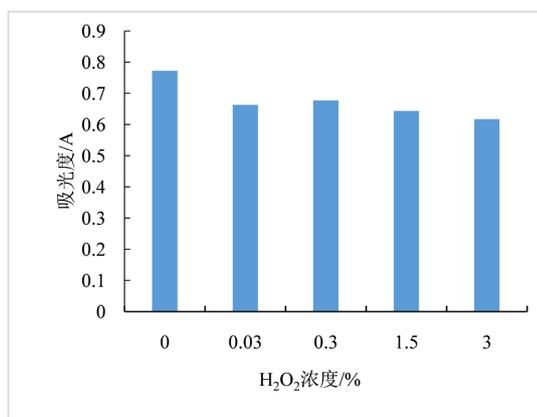


Figure 8. Diagram of the hydrogen peroxide effect on pigment solution stability

图 8. 氧化剂 H_2O_2 对红色素稳定性的影响

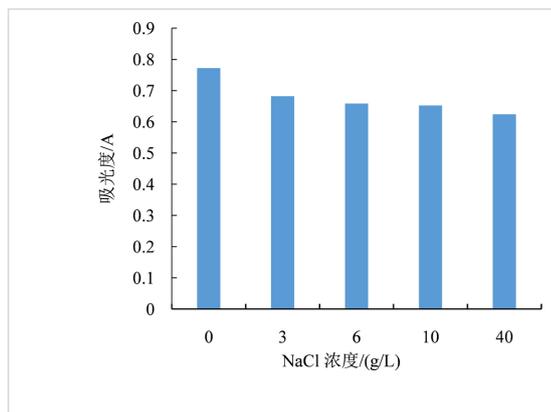


Figure 9. Diagram of the sodium chloride effect on pigment solution stability
图 9. NaCl 浓度对红色素稳定性的影响

3.7. 色素对蛋白质、淀粉染色性能

目测两种色素对豆腐块的染色效果一致(图 10)。在 $\lambda_{\max} = 503 \text{ nm}$ 的波长下测得色素对蛋白质, 淀粉染色前后吸光度值和着色率计算结果见表 2。菌株产生的红色素粗提液对蛋白质类食材具有一定的染色能力, 染着率为 40.8%, 略低于稀释 100 倍的红曲色素的染着率(57.1%)。红色素粗提液对淀粉粒的染色能力较差, 其染着率与稀释 100 倍的红曲色素溶液的染着率几乎相等。

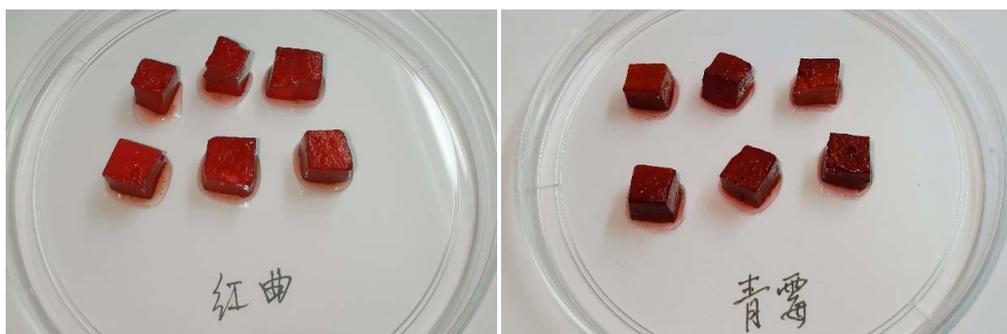


Figure 10. Photograph of the dyeing effect of crude red pigment solution (right) on the soybean curd cube
图 10. 红色素粗提液(右)对豆腐块的染色效果照片

Table 2. Coloration efficiency of the red pigment solution to protein and starch food materials

表 2. 红色素溶液对蛋白质、淀粉类食材的着色率

名称	蛋白质食材			淀粉质食材		
	染色前 Abs 值 (D1)	染色后 Abs 值 (D2)	染着率 (D)/%	染色前 Abs 值 (D1)	染色后 Abs 值 (D2)	染着率 (D)/%
红曲色素 (1:100)	1.263	0.542	57.1	1.263	1.167	7.6
菌株红色素	0.772	0.457	40.8	0.772	0.714	7.5

4. 结论

在分离产纤维素酶真菌的过程中, 从发霉柚子皮壳分离出一株丝状真菌 RedF。通过形态学特性分析和基因组多位点序列分型法鉴定菌株 RedF 为暗玫瑰篮状菌, 命名为 *Talaromyces atroroseus* RedF。在 PDA

平板中添加 10 mg/L 镉离子时, 菌落生长形态发生变化, 但镉离子对菌落形态建成影响在遗传接种上是可逆转的。水溶性红色素的最大吸收峰为 503 nm。以察氏培养基为基础, 添加 0.3% 羧甲基纤维素钠时, 红色素产量最大; 理化条件稳定性结果表明, 红色素粗提液 20℃~60℃ 条件下较稳定; 低浓度(0.002 g/L) 亚硫酸钠对红色素粗提液有增色效应; 红色素在含 H₂O₂ 微环境下稳定性下降; 在 NaCl 盐度的增加时, 红色素的稳定性下降。红色素粗提液对蛋白类、淀粉类物质的着色能力与稀释 100 倍的红曲色素相当。

微生物来源的水溶性天然色素在食品工业具有广泛应用前景。篮状菌属丝状真菌大多产生黄色和红色色素, 其主要成分是嗜氮酮类聚酮化合物(azaphilone poliketides), 其中红色素为红曲红色素。暗玫瑰篮状菌不产生任何已知的真菌毒素, 因而有可能用于食用色素的工业化生产[14]。基于本研究对红色素的稳定性和着色性能研究结果, 该菌株 RedF 可能作为水溶性红色素的生产菌, 其产生的红色素在食品、化妆品等行业中具有一定的应用潜力。此外, 菌株 RedF 在含有镉离子的 PDA 平板上生长形成特殊的菌落形态建成现象, 可以进一步探究通过菌落形态变化对环境中重金属镉污染状况进行生物监测。

基金项目

湖南省自然科学基金项目(2020JJ6026); 湖南省教育厅资助科研项目(19K030)。

参考文献

- [1] 赵宁, 乔晋楠, 张倩, 王雪晴, 罗修琪, 曾杰, 徐辉, 曹毅. 产紫色素真菌 H-1 的鉴定及其色素的理化性质和生物活性[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(3): 1156-1162.
- [2] 夏明, 杜琪珍. 天然红色素研究进展[J]. 食品研究与开发, 2002, 23(6): 38-41.
- [3] 刘洋, 许爽, 宋颖, 苏平, 涂俊铭. 一株产红色素菌株的初步鉴定及色素性质研究[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 42-48.
- [4] 何亚涛, 高丹丹, 甘森宁, 孙婷, 蔡葵蒸, 刘俊林. 怀地黄内生产红色素真菌血红红曲菌(*Monascus sanguineus*) 的分离与鉴定[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(1): 1-7.
- [5] 张立强, 梁华兵, 艾桃山, 喻运珍, 丁桂珍, 张光华. 一株产红色素真菌的鉴定及色素稳定性分析[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(12): 2863-2865.
- [6] 付金菊, 王强, 陈玉龙, 杨清香. 一株产红色素真菌的鉴定及其色素性质的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 139-144.
- [7] 马博, 张婷婷, 吴宝祥. 真菌 DWL-C010 的鉴定及其可溶性红色素热稳定性分析[J]. 生物技术通报, 2018(4): 186-193.
- [8] 张婷婷, 马博, 吴宝祥, 黄娇丽. 白二轮篮状菌 DWL-C010 红色素的降解动力学及稳定性[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 63-71.
- [9] 李哲, 杨书珍, 张美红, 刘寒寒, 彭丽桃. 一株踝节菌属丝状真菌 *Talaromyces atroroseus* 次生产物红色素的稳定性与抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 51-56+65.
- [10] 刘杰, 董龙龙, 郭昱东, 马跃, 藏家业, 王能飞. 南极真菌红色素与红曲红色素稳定性比较[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(2): 90-94.
- [11] 周德庆, 徐德强, 主编. 微生物学实验教程(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [12] 王超南, 石媛, 石晓骏, 蔡菁华. 食用板栗壳棕色素的染色特性[J]. 中国农学通报, 2013, 29(25): 108-111.
- [13] 孔华忠. 中国真菌志. 第 35 卷, 青霉属及其相关有性型属[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 21-37.
- [14] 孙剑秋, 阮永明, 金世宇, 王龙. 篮状菌属的重要性及其分类学研究概况[J]. 菌物研究, 2021, 19(2): 83-93.