

# 一株串珠镰刀菌胞内红色素稳定性 及部分生理活性研究

孙月娥<sup>1</sup>, 邵颖<sup>1</sup>, 陈安徽<sup>1</sup>, 刘晓娟<sup>2</sup>, 樊美珍<sup>2</sup>

(1.徐州工程学院食品(生物)工程学院, 江苏 徐州 221008; 2.安徽省微生物防治重点实验室, 安徽 合肥 230036)

**摘要:** 研究串珠镰刀菌 RCEF4029 菌株胞内红色素的稳定性及其部分生理活性。采用分光光度法测定红色素溶液的吸光度评价红色素的稳定性; DPPH 自由基酶标仪法测定红色素溶液的抗氧化活性; 中国仓鼠卵巢肿瘤细胞 CHO Cytotoxicity Assay 模型检测红色素溶液的抗肿瘤活性。结果显示: 串珠镰刀菌 RCEF4029 菌株胞内红色素的热稳定性及光稳定性较好; 常用金属离子中  $Zn^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  对红色素稳定性基本无影响,  $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  具有增色效应, 而  $Fe^{3+}$  却破坏了色素的稳定性; 氧化剂、还原剂、维生素、酸度调节剂、常用食品添加剂对胞内红色素稳定性影响较小, 其中柠檬酸、氢氧化钠、VE、明胶和苯甲酸钠具有轻微增色作用。红色素对 DPPH 自由基具有一定的清除活性。

**关键词:** 串珠镰刀菌; 胞内红色素; 稳定性; 生理活性

## Stability and Biological Activity of Intracellular Red Pigment from *Fusarium momiforme*

SUN Yue-e<sup>1</sup>, SHAO Ying<sup>1</sup>, CHEN An-hui<sup>1</sup>, LIU Xiao-juan<sup>2</sup>, FAN Mei-zhen<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Biotechnology, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Anhui Provincial Key Laboratory of Microbial Pest Control, Hefei 230036, China)

**Abstract:** In order to explore the stability and biological activity of intracellular red pigment from *Fusarium momiforme* RCEF4029, spectrophotometry was used to determine the stability of the red pigment and DPPH-microplate assay was used to evaluate its free radical scavenging activity. Meanwhile, a resazurin cytotoxicity assay model of Chinese hamster ovary (CHO) cells was employed to study anti-tumor activity of the pigment. The results showed that the red pigment had good thermal and light stability. Metal ions such as  $Zn^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  had no obvious effect on the stability of the red pigment, while  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  and  $Al^{3+}$  revealed hyperchromic effect on the red pigment; in contrast,  $Fe^{3+}$  had destructive effect on its stability. Oxidants, reductants, vitamins, acidity regulators and food additives had little effect on the stability of the red pigment. Citric acid, sodium hydrate, VE, gelatin and sodium benzoate had slight hyperchromic effect on its stability. Furthermore, the red pigment also exhibited some free radical scavenging activity. Therefore, the intracellular red pigment is a kind of stable natural pigment with wide utilization potential.

**Key words:** *Fusarium momiforme*; intracellular red pigment; stability; biological activity

中图分类号: TS202.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)19-0054-06

色素是食品、化妆品、医药、印染等领域的着色剂<sup>[1]</sup>。常用色素中合成色素因色泽鲜艳、着色能力强、使用经济而被大量应用, 但现代医学表明, 许多合成色素对人体有一定的危害, 有的甚至还有致癌作用, 因此许多国家已经禁止或严格限量使用合成色素<sup>[2-4]</sup>。与合成色素相比, 天然色素具有安全性高、着色色调自然等优点<sup>[5-7]</sup>。目前, 许多学者对植物来源的天然色素进

行了大量研究。邸翔等<sup>[8]</sup>从新疆伊犁河流域一带的红果小檗中提取出了一种较稳定的红色素。杨青珍等<sup>[9]</sup>对甜樱桃果实中的红色素进行了提取和稳定性研究。赵桃等<sup>[10]</sup>提取了青稞种皮中的紫色素, 并研究了该色素的基本性质及抗氧化活性。植物虽是天然色素的主要来源, 但因受到季节和区域的限制而无法满足实际的生产需要。微生物生长不受环境、空间的限制且代谢产物

收稿日期: 2011-04-28

作者简介: 孙月娥(1973—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为功能性食品。E-mail: sunyuee416@yahoo.com.cn

种类繁多,可以为天然色素的开发提供广阔的空间<sup>[11]</sup>。目前,已有许多种类的微生物被发现可产生天然色素。叶明等<sup>[12]</sup>从暗盘菌发酵代谢产物中提取了一种较稳定的黑色素,赵东红等<sup>[13]</sup>用一株链霉菌进行液体深层发酵并从发酵代谢物中获得了蓝色的天蓝菌素(coelicolorin),袁保红等<sup>[14]</sup>分离到一株海洋细菌产灵菌红素。虽然已对微生物来源天然色素进行了大量的研究工作,但至今未见有以串珠镰刀菌为产生菌的天然红色素的研究报道。

本实验从采自黄山的健康葛根中分离到一株串珠镰刀菌,并对该菌株胞内红色素的稳定性、抗氧化活性和抗肿瘤活性进行初步探讨,以期为该天然来源的微生物胞内红色素在食品、保健品、化妆品、医药等领域的应用提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料、试剂与培养基

串珠镰刀菌(*Fusarium momiforme*)RCEF4029菌株分离于采自黄山的健康葛根,保存于安徽省微生物防治重点实验室;CHO细胞株由中国科技大学细胞免疫实验室提供。

二甲基亚砜(DMSO)、刃天青(Resazurin) 美国Sigma公司;其他试剂均为国产分析纯。

固体培养基:马铃薯200g(去皮,切成小块煮沸20min,纱布过滤)、葡萄糖20g、琼脂20g,定容至1000mL;液体摇瓶培养基:马铃薯200g(去皮,切成小块煮沸20min,纱布过滤)、葡萄糖20g,定容至1000mL。

### 1.2 仪器与设备

PT3100高速分散器 瑞士Polytron公司;YXQ-SG4/280手提式压力蒸汽灭菌器 上海华线医用核子仪器有限公司;Spectra Max M2全波长扫描酶标仪 美国Molecular Device公司;DHG-9053A电热鼓风干燥箱 上海益恒实验仪器有限公司;ShellabCO<sub>2</sub>培养箱 美国Shellab公司;Air Tech超净工作台 苏净集团安泰公司;LRH-250-G光照培养箱 广东省医疗器械厂;AE200型梅特勒电子天平 上海分析仪器厂;96孔板Costar公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 菌株的培养及胞内色素最佳吸收波长的确定

将串珠镰刀菌(*Fusarium momiforme*)RCEF4029菌株的一级斜面种子接入液体摇瓶培养基中,于(25±0.5)℃,转速150r/min的全控温培养箱中培养。10d后将菌株发酵醪液进行固液分离,获得的菌丝体用蒸馏水冲洗3~5次后于50℃电热鼓风干燥箱中烘干备用。准确称取菌丝体0.05g(精确到0.002g)于50mL烧杯中,加入70%乙醇溶液振荡30min,静置24h后于8000r/min离心10min,

上清液移入100mL容量瓶并用70%乙醇定容至刻度。取1.0mL该溶液,加70%乙醇溶液9.0mL并混匀,用70%乙醇溶液作空白对照,于350~750nm波长范围内进行扫描以确定胞内红色素的最佳吸收波长。

#### 1.3.2 胞内红色素提取液的制备

将串珠镰刀菌菌丝体和石英砂按质量比1:5的比例于研钵中研磨,获得的粉末按照料液比1:30(m/V)加入二氯甲烷-丙酮(体积比2:1)的混合溶液,充分混匀后置于40℃水浴锅中浸提180min,然后取出于8000r/min离心10min,收集上清液。上清液即为红色素提取液,用以进行红色素稳定性研究。

#### 1.3.3 胞内红色素稳定性研究

##### 1.3.3.1 pH值对红色素稳定性的影响

采用盐酸和氢氧化钠调节红色素提取液pH值,分别在溶液pH2~12时测定435nm波长处的吸光度。

##### 1.3.3.2 温度对红色素稳定性的影响

取胞内红色素提取液6份,分别于20、30、40、50、60、70℃的水浴锅中保温,每隔1h测定色素提取液在435nm波长处的吸光度。

##### 1.3.3.3 光照对红色素稳定性的影响

取胞内红色素提取液3份,分别避光、室内散射光、室外日光条件下存放,每隔5h测定提取液于435nm波长处的吸光度。

##### 1.3.3.4 金属离子对红色素稳定性的影响

分别测定了浓度为 $1.25 \times 10^{-3}$ 、 $2.50 \times 10^{-3}$ 、 $5.00 \times 10^{-3}$ mmol/L各种金属离子的红色素溶液于435nm波长处的吸光度,并观察溶液颜色的变化。

##### 1.3.3.5 氧化剂对红色素稳定性的影响

将使用胞内红色素提取液配制质量浓度为5、15、30mg/mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液混合均匀后于室内暗处放置,每隔5h测定溶液435nm波长处的吸光度。

##### 1.3.3.6 还原剂对红色素稳定性的影响

将使用胞内红色素提取液配制质量浓度为1mg/mL抗坏血酸和Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>溶液于室内暗处放置,每隔5h测定其在435nm波长处的吸光度。

##### 1.3.3.7 酸度调节剂对红色素稳定性的影响

分别向盛有9mL胞内红色素提取液的4支试管中各加入1mL质量浓度为10mg/mL的柠檬酸、苹果酸、氢氧化钠和柠檬酸钠溶液,于室内暗处放置,定时测定435nm波长处的吸光度。

##### 1.3.3.8 维生素对红色素稳定性的影响

分别向盛有9mL胞内红色素提取液的4支试管中各加入1mL质量浓度为10mg/mL的VA、VB、VD和VE试剂,于室内暗处放置,每隔5h测定435nm波长处的吸光度。

### 1.3.3.9 常用食品添加剂对红色素稳定性的影响

分别向盛放9mL胞内红色素提取液的5支试管中加入1mL质量浓度为10mg/mL的葡萄糖、蔗糖、明胶、氯化钠和苯甲酸钠溶液,混匀后于室内暗处存放,每隔5h测定溶液435nm波长处的吸光度。

### 1.3.4 红色素粗提物抗氧化活性实验

参考胡丰林等<sup>[15]</sup>DPPH自由基酶标仪法并改进。红色素提取液经氮气吹干后获得红色素粗提物粉末,再用12.5% DMSO溶液配制成质量浓度为0.5mg/mL的红色素粗提物溶液(样品I)。加样品I 100 $\mu$ L和用95%乙醇配好的0.4mg/mL的DPPH自由基试剂100 $\mu$ L于96孔酶标板中,每个样品设3个重复。样品加入后将96孔酶标板置于酶标仪中振动30s,在37 $^{\circ}$ C和517nm波长处测定其吸光度( $A_p$ );37 $^{\circ}$ C保温10min后再测定一次。同时测定不加DPPH自由基试剂的样品空白吸光度( $A_c$ )和加DPPH自由基试剂但不加样品(以80%甲醇100 $\mu$ L代替样品)的吸光度( $A_{max}$ )。最后按公式(1)计算。

$$\text{自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_p - A_c}{A_{max}}\right) \times 100 \quad (1)$$

### 1.3.5 红色素粗提物抑制中国仓鼠卵巢肿瘤细胞生长实验

参照陆荣等<sup>[16]</sup>的方法。红色素提取液经氮气吹干后获得红色素粗提物粉末,再用12.5%的DMSO溶液配制成质量浓度为50 $\mu$ g/mL的红色素粗提物溶液(样品II)进行抗肿瘤实验。

采用体外细胞毒性测定的Resazurin法进行检测。中国仓鼠卵巢肿瘤细胞CHO经0.25%胰酶消化后加新鲜培养液,与37 $^{\circ}$ C、5% CO<sub>2</sub>培养箱中培养,每隔2~3d更换一次培养液,待细胞进入对数分裂期,将细胞从培养瓶中转移到96孔板中培养,以每孔4.0 $\times$ 10<sup>4</sup>个细胞接种于96孔细胞培养板中,每孔体积100 $\mu$ L,同时留出3个空白孔(不加细胞),于37 $^{\circ}$ C、5% CO<sub>2</sub>培养箱中培养24h。细胞在96孔板中培养24h且贴壁后,用移液器吸出旧的培养液,然后每孔加90 $\mu$ L新鲜培养液和10 $\mu$ L样品II,同时设100%、0%对照孔,100%、0%对照孔中分别加90 $\mu$ L新鲜培养液和10 $\mu$ L 12.5% DMSO(100%对照孔是3个无细胞的空白孔),每组设3个重复,于37 $^{\circ}$ C、5% CO<sub>2</sub>培养箱中培养72h。细胞加样品共培养72h后,每孔加20 $\mu$ L 0.05% Resazurin,于培养箱中保温2h,用酶标仪检测荧光强度Flu。激发波长为530nm,发射波长为590nm。

$$\text{细胞生长抑制率}/\% = \left(1 - \frac{\text{Flu}_{\text{样品}} - \text{Flu}_{100\%}}{\text{Flu}_{0\%} - \text{Flu}_{100\%}}\right) \times 100 \quad (2)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 胞内红色素提取液扫描图谱

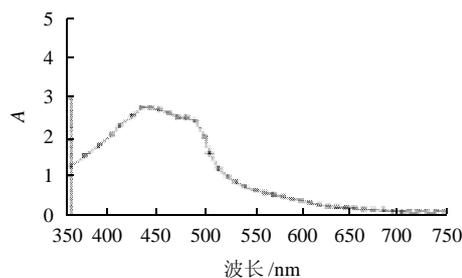


图1 胞内红色素提取液扫描图谱  
Fig.1 Absorption spectrum of the red pigment

由图1胞内红色素提取液于350~750nm波长范围内扫描图谱可知,红色素在波长435nm处具有最大吸收峰。因此,选定波长435nm为胞内红色素的特征吸收波长。

### 2.2 色素稳定性

#### 2.2.1 pH值对红色素稳定性的影响

表1 色素在pH2.0~12.0缓冲液中的颜色特征

Table 1 Color characteristics of intracellular red pigment from *Fusarium momiforme* RCEF4029 in pH 2.0~12.0 buffer

溶液pH值	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
色素颜色	黄色	黄绿	浅红	红色	红色	玫瑰红	紫红	紫红	紫红	深紫红	暗红

串珠镰刀菌胞内红色素提取液的pH值不同,其颜色也不同。由表1可知,红色素在pH值为5~11的溶液中均能保持稳定,溶液pH值越大,溶液的颜色越深。说明弱酸性溶液可以保持红色素的稳定,但中性或弱碱性溶液对色素具有增色效应。宽泛的pH值稳定性决定了红色素其较大的应用空间。

#### 2.2.2 温度对红色素稳定性的影响

温度对串珠镰刀菌胞内红色素的稳定性会产生一定的影响。由图2可知,在20~60 $^{\circ}$ C的温度范围内,红色素吸光度随时间变化的总体趋势保持一致,随着时间的延长,红色素于3h后吸光度略有上升,但上升幅度较小,这可能是由于红色素提取液存放过程中有机溶剂的挥发使得红色素在溶液中的质量浓度相对提高造成的。当红色素溶液于70 $^{\circ}$ C条件下保存2h时,溶液吸光

度明显降低, 说明 70℃ 及以上温度不利于胞内红色素稳定性的维持。该色素适宜于 60℃ 以下的温度条件下使用。

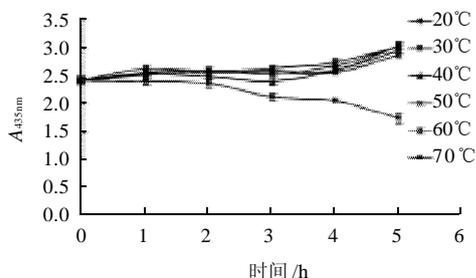


图 2 温度对红色素稳定性的影响

Fig.2 Effect of temperature on the stability of the red pigment

2.2.3 光照对红色素稳定性的影响

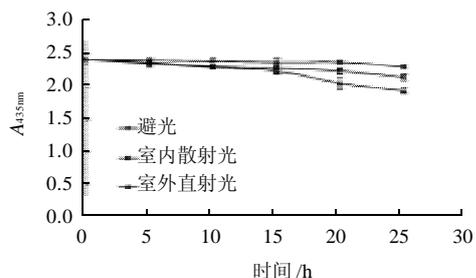


图 3 不同光照对红色素稳定性的影响

Fig.3 Effect of light illumination on the stability of the red pigment

由图 3 可知, 在避光和室内散射光照射下, 胞内红色素溶液的吸光度随存放时间的延长未出现大的变化。但是, 溶液在室外存放 15h 后, 其吸光度的下降趋势较其他两种情况明显, 但从数值上分析其变化幅度较小。说明胞内红色素溶液具有较好的光稳定性, 不会因为光照的原因而影响其着色能力。

2.2.4 金属离子对红色素稳定性的影响

由表 2 可知, 不同的金属离子会对红色素的稳定性产生不同的影响。红色素溶液中加入 Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 金属离子后, 红色素溶液的吸光度随着金属离子浓度的增加而增加, 溶液的颜色加深, 说明 Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 对红色素具有稳定作用和护色作用; Fe<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 金属离子使串珠镰刀菌胞内红色素溶液的吸光度下降, 其中不同浓度的 Zn<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 金属离子使红色素溶液的吸光度下降幅度不大, 溶液颜色也无明显变化; 但 Fe<sup>3+</sup> 金属离子使色素溶液的吸光度明显降低, 浓度越高, 吸光度降低幅度越大, 红色素溶液的颜色也由原来的红色变为了加入 Fe<sup>3+</sup> 金属离子后的暗红色, 并且伴随着沉淀的产生, 说明 Fe<sup>3+</sup> 金属离子不利于红色素的稳定。

表 2 金属离子对红色素稳定性的影响

Table 2 Effect of metal ion on the stability of the red pigment

金属离子浓度/(mmol/L)	处理前 A <sub>435nm</sub>	处理后 A <sub>435nm</sub>	色素残存率/%	颜色变化	
对照	0	2.55	2.55	100.00	无变化
Na <sup>+</sup>	1.25 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.61	102.35	红色加深
	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.79	109.41	
	5.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.92	114.51	
Mg <sup>2+</sup>	1.25 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.69	105.49	红色加深
	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.76	108.24	
	5.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.87	112.55	
Al <sup>3+</sup>	1.25 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.57	100.78	红色加深
	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.60	101.96	
	5.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.71	106.27	
Fe <sup>3+</sup>	1.25 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.45	96.08	颜色由红变暗红, 有沉淀生成
	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.21	86.67	
	5.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.09	81.96	
Zn <sup>2+</sup>	1.25 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.42	94.90	无明显变化
	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.38	93.33	
	5.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.37	92.94	
Ca <sup>2+</sup>	1.25 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.43	95.29	无明显变化
	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.38	93.33	
	5.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	2.37	92.94	

2.2.5 氧化剂对红色素稳定性的影响

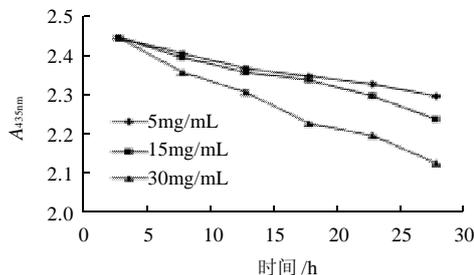


图 4 氧化剂对红色素稳定性的影响

Fig.4 Effect of oxidant on the stability of the red pigment

由图 4 可知, 随着时间的延长, 各质量浓度的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 红色素溶液的吸光度均有不同程度下降, 且 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度越大, 吸光度越低, 但溶液的颜色本身却未发生明显变化。说明色素对氧化剂 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 表现较稳定。

2.2.6 还原剂对红色素稳定性的影响

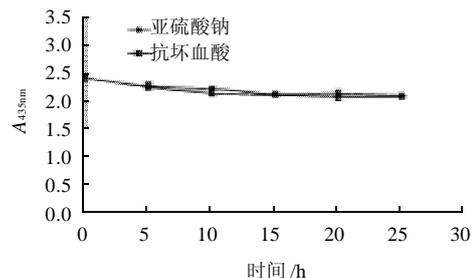


图 5 还原剂对红色素稳定性的影响

Fig.5 Effect of reducing agent on the stability of the red pigment

由图 5 可知,随着放置时间的延长,溶液吸光度未出现明显降低。说明还原剂的添加不会影响红色素的稳定性。

### 2.2.7 酸度调节剂对红色素稳定性的影响

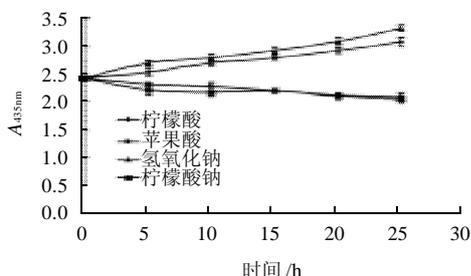


图 6 酸度调节剂对红色素稳定性的影响

Fig.6 Effect of acidity regulator on the stability of the red pigment

由图 6 可知,随着时间的推移,柠檬酸和氢氧化钠色素溶液的吸光度逐渐增加,而苹果酸和柠檬酸钠色素溶液的吸光度却缓慢降低,但曲线总体变化趋势不明显,溶液颜色也未发生改变,说明色素对酸度调节剂稳定。其中,柠檬酸和氢氧化钠还具有色素增色作用,而柠檬酸是一种具有营养价值的常用食品添加剂,说明该色素适用于食品、饮料加工行业。

### 2.2.8 维生素对红色素稳定性的影响

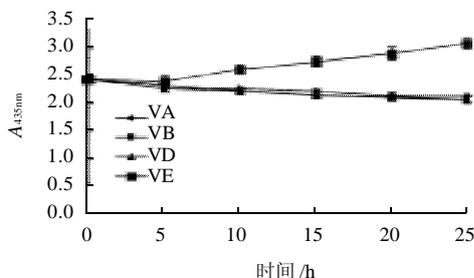


图 7 维生素对红色素稳定性的影响

Fig.7 Effect of vitamin on the stability of the red pigment

由图 7 可知,不同种类的维生素对红色素稳定性产生的影响不同。从溶液吸光度随时间变化曲线上看,VA、VB、VD 对色素稳定性未产生不良影响,而 VE 则对色素起到了保护和增色效应。

### 2.2.9 常用食品添加剂对红色素稳定性的影响

由图 8 可知,胞内红色素溶液中加入明胶和苯甲酸钠后,溶液的吸光度在前 5h 基本保持恒定,5h 后苯甲酸钠溶液的吸光度随着时间的延长而显著提高;加入明胶的色素溶液在 5h 后吸光度出现了先下降后上升的趋势,上升趋势也较明显,说明苯甲酸钠和明胶有助于

红色素的稳定。加入葡萄糖、氯化钠和蔗糖后,随着时间的延长,红色素溶液的吸光度略有降低,但是总体来说下降的幅度较小,所以葡萄糖、氯化钠和蔗糖对红色素稳定性基本上无影响。红色素对食品中常用添加剂表现稳定。

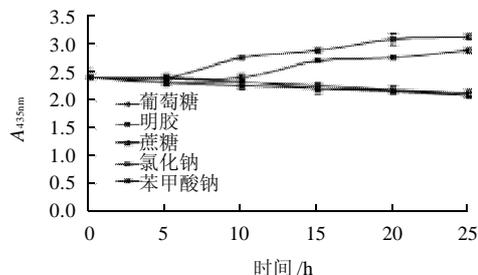


图 8 常用食品添加剂对红色素稳定性的影响

Fig.8 Effect of food additive on the stability of the red pigment

### 2.3 红色素粗提物抗氧化活性及抗肿瘤活性

表 3 红色素粗提物对 DPPH 自由基的清除率及对 CHO 细胞的生长抑制率

Table 3 DPPH free radical scavenging activity of the red pigment and its inhibition rate against the growth of CHO cells

样品 I 的 DPPH 自由基清除率/%		样品 II 的 CHO 肿瘤细胞生长抑制率/%
0min	10min	
18.59 ± 0.17	21.99 ± 0.32	3.02 ± 0.23

由表 3 可知,串珠镰刀菌 RCEF4029 菌株胞内红色素粗提物具有 DPPH 自由基清除活性。红色素粗提物溶液质量浓度为 0.5mg/mL 时,其 DPPH 自由基清除率为 18.59%,随着保温时间的延长红色素粗提物溶液的自由基清除活性也增强,保温 10min 后清除率达到 21.99%。另外,质量浓度为 50 $\mu$ g/mL 的红色素粗提物溶液对中国仓鼠卵巢 CHO 细胞株的细胞生长抑制率为 3.02%,无显著的肿瘤细胞抑制活性。

### 3 讨论

串珠镰刀菌(*Fusarium momiforme*)部分菌株在特定条件<sup>[17]</sup>下可以产生包括水溶性毒素-伏马菌素、串珠镰刀菌毒素在内的毒素,菌株培养过程中避免产毒条件可以减少毒素的产出量,对色素高产菌株进行诱变育种工作改变毒素代谢途径还可以避免毒素的产出。本研究的出发菌株为一株分离自生长于黄山的健康葛根,且提取的红色素为一种脂溶性色素,为了将该色素应用于食品、保健品等相关领域,有待于对该脂溶性色素的分离、纯化及毒性进行进一步研究。

使用二氯甲烷-丙酮(体积比 2:1)的混合有机溶液对

串珠镰刀菌胞内红色素进行提取并直接对红色素提取液进行稳定性研究。研究发现,该微生物来源的胞内红色色素色调在不同的pH值条件下可呈现出黄、黄绿、红、玫瑰红、紫红等不同的颜色,可以满足不同的着色要求。胞内红色素在pH5~11的溶液中可以保持其主色调红色,说明溶液的pH值没有对该色素的结构产生大的影响,在实际应用中具有较大的应用空间。胞内红色素对热、光的稳定性较强,无需对色素进行特殊保存。金属离子 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 对红色素具有一定的护色和增色作用,而 $\text{Fe}^{3+}$ 金属离子却会影响胞内红色素的稳定并使色素沉淀,可能是因为 $\text{Fe}^{3+}$ 金属离子的加入改变了红色素生色团或助色团的化学结构,从而影响了色素溶液的颜色,所以应尽量避免使用铁质容器盛放串珠镰刀菌胞内红色素。另外,该色素对大多数的氧化剂、还原剂、维生素、酸度调节剂、常用食品添加剂稳定性均较好,而且柠檬酸、氢氧化钠、VE、明胶和苯甲酸钠对色素还具有护色、增色效应,至于其增色机理值得深入研究。

现代医学研究表明,自由基是造成DNA、蛋白质和脂肪细胞分子氧化损伤的主要原因,当生物体内受大量刺激超过生物体内抗氧化能力时将导致大量病理现象产生<sup>[18]</sup>。本研究中串珠镰刀菌RCEF4029菌株胞内红色素显示了一定的DPPH自由基清除活性,说明该色素是一种天然抗氧化剂。目前,随着食品工业的飞速发展和消费者对食品安全意识的不断加强,对色素的要求也已从传统的着色需要向兼具保健功能转变<sup>[19]</sup>,本研究对象串珠镰刀菌胞内红色素是可以顺应此要求的着色剂。该色素作为一种保健型添加剂应用于食品、保健品、化妆品和医药等领域具有巨大的潜在应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 车双辉,杜琪珍,夏明.天然蓝色素的研究进展[J].食品研究与开发,2003,24(2):18-20.
- [2] 潘淮.健康的美丽杀手:合成色素[J].广州食品工业科技,2003(1):54-55.
- [3] 王清滨,陈国良.食品着色剂及其分析方法[M].北京:化学工业出版社,2007:7-12.
- [4] 高彦祥,许正虹.食用天然色素安全性研究进展[J].食品科学,2005,26(5):158-160.
- [5] 刘程,周汝忠.食品添加剂实用大全[M].北京:化学工业出版社,2000:85-86.
- [6] PAZINO-DURAN E A, GIRSTI M M, WROLSTAD R E, et al. Anthocyanins from *Oxalis tiangularis* as potential food colorants[J]. Food Chemistry, 2001, 75(2): 211-216.
- [7] 甄锋,罗傲雪,罗傲霜,等.优选黄柏多糖超声波辅助提取工艺的研究[J].安徽农业科学,2008,36(29):1247-1249.
- [8] 邸翔,刘长涛,高丽,等.红果小檗色素的提取及其稳定性研究[J].食品与发酵工业,2010,36(6):184-189.
- [9] 杨青珍,王锋,孙元琳.甜樱桃果实红色素的提取和稳定性研究[J].食品科学,2010,31(4):120-122.
- [10] 赵桃,唐亚伟,单月琴,等.青裸紫色素的基本性质及其抗氧化能力[J].食品与发酵工业,2010,36(8):68-73.
- [11] 王君,张宝善.微生物生产天然色素的研究进展[J].微生物学通报,2007,34(3):580-583.
- [12] 叶明,陈晓,朱立,等.暗盘孢属YM421黑色素稳定性及其抗氧化活性[J].菌物学报,2010,29(2):254-260.
- [13] 赵东红,陆玲,秦怀兰.一种微生物发酵产蓝色素的稳定性及毒性研究[J].食品与发酵工业,1998,24(5):21-24.
- [14] 袁保红,杜青平,蔡创华,等.海洋细菌 *Pseudomonas* sp.色素的提取及稳定性的研究[J].海洋通报,2005,24(6):92-96.
- [15] 胡丰林,陆瑞丽.蔷薇科一些植物鲜叶提取物清除DPPH自由基活性的研究[J].植物学通报,2004,21(1):74-78.
- [16] 陆荣,刘小娟,樊美珍,等.喜树内生真菌的分离及其抗肿瘤活性菌株的筛选[J].安徽农业大学学报,2008,35(1):76-79.
- [17] 田雪亮,陈锡岭,王洪亮.串珠镰刀菌产生毒素条件研究[J].微生物学杂志,2006,26(6):45-47.
- [18] DROGE W. Free radicals in the physiological control of cell function[J]. Physiological Review, 2002, 100: 119-128.
- [19] 刘钟栋.食品添加剂[M].南京:东南大学出版社,2006:249-250.