福建农业学报 2022, 37（7）: 912−920 http://www.fjnyxb.cn
*Fujian Journal of Agricultural Sciences* doi: 10.19303/j.issn.1008-0384.2022.007.012

吴俐，汤葆莎，赖谱富，等. 不同类型红曲的功能活性成分含量及体外抗氧化活性比较研究［J］. 福建农业学报，2022，37（7）：912−920.
WU L, TANG B S, LAI P F, et al. Functional Components and *In Vtro* Antioxidant Activities of Different Types of *Hongqu*［J］. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*，2022，37（7）：912−920.

# 不同类型红曲的功能活性成分含量及体外抗氧化活性比较研究

吴　俐[1,2,3]，汤葆莎[1]，赖谱富[1]，李怡彬[1]，翁敏劼[1]，陈君琛[1]，吕旭聪[2,3*]

（1. 福建省农业科学院农业工程技术研究所，福建　福州　350003；2. 福州大学化学学院，福建　福州　350108；
3. 福州大学食品科学与技术研究所/福建省食品生物技术创新工程技术研究中心，福建　福州　350108）

**摘　要：【目的】** 分析功能曲（Functional Qu，FQ）、色曲（Coloring Qu，CQ）、乌衣红曲（Wuyi Qu，WQ）和古田红曲（Gutian Qu，GQ）4类红曲的主要功能活性成分和体外抗氧化活性，促进红曲抗氧化资源的开发利用。**【方法】** 首先，通过紫外可见分光光度法、色差法和高效液相色谱法分析4类红曲的色素、莫拉可林K（MK）、γ-氨基丁酸（GABA）、麦角固醇、多糖等主要功能活性成分。其次，通过铁离子还原抗氧化能力（Ferric ion reducing antioxidant power，FRAP）、DPPH（1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical）自由基清除试验、ABTS（2,2'-Azinobis-（3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate）自由基清除试验分别测定4类红曲的铁离子还原力、DPPH自由基清除能力和ABTS自由基清除能力等体外抗氧化活性。最后，采用SIMCA和SPSS软件分析主要功能活性成分和抗氧化活性的相关性。**【结果】** 4类红曲的主要功能活性成分结果显示：CQ的橙色价、黄色价和红色价显著高于FQ、GQ和WQ，GQ的橙色价、黄色价和红色价显著高于FQ和WQ，FQ的橙色价显著高于WQ。FQ的MK含量显著高于CQ、GQ和WQ。WQ的GABA含量显著高于CQ、FQ和GQ。WQ和FQ的麦角固醇含量显著高于CQ和GQ。FQ的多糖含量最高，其次是CQ。4类红曲的体外抗氧化活性测定结果显示：CQ的铁离子还原力、清除DPPH自由基和ABTS自由基清除能力均显著强于FQ、WQ和GQ，FQ的铁离子还原力强于WQ和GQ。4类红曲的主要功能活性成分和抗氧化活性的相关性分析显示，铁离子还原能力与色价之间极显著正相关（0.733 ≥ $r$ ≥ 0.703），DPPH $IC_{50}$ 和ABTS $IC_{50}$ 与色价之间极显著负相关（−0.896 ≤ $r$ ≤ −0.880 和−0.773 ≤ $r$ ≤ −0.758），说明在4类红曲主要功能活性成分中，色素是抗氧化活性的主要功效成分，MK、GABA、麦角固醇和多糖等功能活性成分与抗氧化活性无明显相关性。**【结论】** CQ的色素含量和抗氧化活性明显强于FQ、GQ、和WQ，抗氧化活性与色素极显著正相关，说明红曲中色素是抗氧化活性的主要功效成分。研究结果为红曲抗氧化资源的开发和应用提供了理论基础。

**关键词：** 红曲；抗氧化活性；色素；次生代谢物

**中图分类号：** S 646.9　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1008-0384（2022）07−0912−09

# Functional Components and *In Vtro* Antioxidant Activities of Different Types of *Hongqu*

WU Li[1,2,3]，TANG Baosha[1]，LAI Pufu[1]，LI Yibin[1]，WENG Minjie[1]，CHEN Junchen[1]，LYU Xucong[2,3*]

（1. *Institute of Agri-engineering Technology*, *Fujian Academy of Agricultural Sciences*, *Fuzhou*, *Fujian*　350003, *China*;
2. *College of Chemistry*, *Fuzhou University*, *Fuzhou*, *Fujian*　350108, *China*; 3. *Fujian Innovation Engineering Technology Research Center for Food Biotechnology/Institute of Food Science and Technology*, *Fuzhou University*, *Fuzhou*, *Fujian*　350108, *China*）

**Abstract:**【Objective】 Key functional components and *in vitro* antioxidant activities of 4 types of *Hongqu* (*Monascus*-rice fermentation paste) were determined for product development.【Method】 Color value, monacolin K (MK), γ-aminobutyric acid (GABA), ergosterol, and polysaccharide of Functional Qu (FQ), Coloring Qu (CQ), Wuyi Qu (WQ), and Gutian Qu (GQ)

**收稿日期：** 2022−04−29 初稿；2022−07−08 修改稿

**作者简介：** 吴俐（1985−），女，硕士，助理研究员，研究方向：功能营养食品（E-mail：xxj1963@163.com）
* 通信作者：吕旭聪（1984−），男，博士，研究员，研究方向：食品生物技术（E-mail：xucong1154@qq.com）

**基金项目：** 福建省科技计划公益类专项（2020R1032004、2021R10320011）；福建省农业高质量发展超越“5511”协同创新工程项目（XTCXGC2021014）；福建省科技创新团队建设项目（CXTD2021018-2）；福建省农业科学院科研项目（YC20210007）

were measured by means of UV-Vis, colorimeter, and HPLC. Antioxidant activity of the *Hongqu* was determined by *in vitro* chemical assays including the ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) and 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate (ABTS) radical scavenging capacities. Correlation between the functional components and the antioxidant activities of *Hongqu* was analyzed using SIMCA and SPSS software. 【Result】 The *Hongqu* specimens varied in the following aspects. CQ was measured significantly higher on orange, yellow, and red color value than FQ, GQ, and WQ, while GQ on orange, yellow, and red color value than FQ and WQ, and FQ on orange color value than WQ. FQ contained significantly more MK than CQ, GQ, and WQ, whereas WQ significantly more GABA than CQ, FQ, and GQ, but WQ and FQ significantly more ergosterol than CQ and GQ, and FQ had the highest content of polysaccharides, which was followed by CQ. The FRAP and DPPH and ABTS scavenging abilities of CQ were significantly higher than those of FQ, WQ, and GQ, and FQ was stronger in FRAP than WQ or GQ. The color value of *Hongqu* positively correlated with FRAP ($0.733 \geqslant r \geqslant 0.703$) and negatively with the scavenging 50% DPPH ($-0.896 \leqslant r \leqslant -0.880$) and ABTS ($-0.773 \leqslant r \leqslant -0.758$). It appeared that pigment was the critical antioxidant components in the *Hongqu*. On the other hand, neither MK, GABA, ergosterol, nor polysaccharides significant correlated with the *in vitro* antioxidant activity of the 4 *Hongqu*. 【Conclusion】 An extremely significant correlation between the pigment and antioxidant activity were demonstrated in CQ more than the other 3 *Hongqu*. In the development of natural antioxidant products, *Monascus* pigment could be a viable potential candidate.

**Key words:** *Hongqu* (*Monascus* fermented red mold rice)；antioxidant activity；pigment；secondary metabolites

## 0　引言

【研究意义】红曲由红曲菌接种于蒸熟摊凉的大米发酵而得[1]，在中国已有千年的食用和药用历史。红曲菌（*Monascus*），又称为红曲霉，属于真菌界（Eumyeophyta）、子囊菌门（Aseomycota）、真子囊菌纲（Euaseomycetes）、散囊菌目（Eurotiales）、红曲科（Monascaeeae）[1-2]。红曲霉代谢过程中产生红曲色素、莫纳克林 K（MK）、γ-氨基丁酸（GABA）、多糖、麦角固醇等，具降胆固醇、降血压、抗氧化、降血糖等多种药理活性[3]。因此，红曲是优良的功能活性资源。作为红曲主产区，福建省和浙江省代表性红曲中抗氧化资源的研究少见报道，阻碍了后续的针对性开发利用。对红曲功能活动成分及体外抗氧化活性的研究可以为福建省红曲资源的开发利用提供数据支撑。【前人研究进展】近年来，红曲色素的分离鉴定和功能活性研究有了较大的突破。首先，已经鉴定的单一色素成分超过 100 种[4]；其次，红曲色素的降胆固醇、降血压、抗氧化、降血糖、缓解阿茨海默症等多种药理活性均与抗氧化活性密切相关[5]。MK 是胆固醇合成限速酶 HMG-CoA 还原酶的竞争性抑制剂[6]，通过消除自由基及抑制脂质过氧化、抑制炎性因子渗出，较小剂量产生理想的抗炎效果，其抗炎机制与抗氧化活性有关[7−8]。GABA 提高肝脏抗氧化酶活性的同时降低自由基和丙二醛含量，抑制高脂诱导肥胖小鼠肝脏氧化应激[9]。红曲发酵酱油的清除 DPPH 自由基能力与 MK、GABA、多酚含量密切相关[10]。红曲霉胞外多糖质量浓度 142.3 mg·mL$^{-1}$，具有较强的清除 DPPH 自由基能力 [11]。麦角甾醇是红曲发酵产生的主要维生素类化合物，也是微生物细胞膜的主要成分之一，具有抗氧化功效[12]。红曲还含有二聚酸、亚油酸、α-亚麻酸等其他抗氧化物质[13]。以上研究结果显示，红曲主要功能活性物质也是潜在的抗氧化资源。【本研究切入点】红曲色素、MK、多糖等主要的功能活性成分对红曲的抗氧化活性具有一定的贡献，但其抗氧化的主要起效成分还有待进一步确定，特别是针对红曲主产区福建省和浙江省代表性红曲的抗氧化功效成分研究还有待深入。【拟解决的关键问题】从福建、浙江两地搜集功能曲、色曲、乌衣红曲和古田红曲等 4 类红曲代表性样品，分析主要功能活性成分和体外抗氧化活性，将主要功能活性成分与抗氧化活性等指标进行相关分析，筛选抗氧化活性的主要作用成分，为红曲抗氧化资源的开发利用提供科学支撑。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料

1.1.1　材料与试剂　红曲搜集自福建省宁德市、泉州市、龙岩市和福州市和浙江省江山市等 10 个地区，生产上按照用途或功能活性成分的特点可以分为 4 类：功能曲（FQ）、色曲（CQ）、乌衣红曲（WQ）和古田红曲（GQ）。每种红曲收集 5 份资源，共计 20 份代表性样品。药用的 FQ 和着色用的 CQ 的最主要功能活性物质分别为 MK 和色素。FQ 样品的 MK 含量为 0.5%～3.5%，符合功能红曲 MK 含量≥0.4%（干重计）的要求；CQ 样品的色价为 2 000～6 000 U·g$^{-1}$，符合色曲色价≥1 000 U·g$^{-1}$（干重）的要求。乌衣红曲和古田红曲均是红曲黄酒酿造曲，二者发酵活性有一定差异[14]。取样的红曲水分含量 2.78%～9.43%，均符合标准[15−17]。95%乙醇、无水乙

醇、2,2-联苯基-1-苦基肼基（DPPH）、2,2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐均为分析纯，液相色谱使用的甲醇、乙腈等试剂均为色谱纯。

1.1.2 仪器与设备 BL60S 电子天平（德国 Sartrius）；GL10MD 高速冷冻离心机（湖南湘仪试验仪器开发有限公司）；R205B 旋转蒸发器（上海申生科技有限公司）；CLARIO Star 多功能酶标仪（德国 BMG LABTECH 公司）；KQ-600DV 数控超声波清洗器（昆山市超声仪器有限公司）；Waters e2695 高效液相色谱仪（美国沃特世公司）；LC600A 高效液相色谱仪（南京科捷分析仪器有限公司）；MB25 水分分析仪 [ 奥豪斯仪器（上海）有限公司制造 ]；NS810 分光测色仪 (深圳市三恩池科技有限公司)。

## 1.2 试验方法

1.2.1 红曲前处理 红曲粉的制备：称量 1 kg 红曲米，采用高速粉碎机粉碎，过 50 目筛，收集粉末混合均匀，4 ℃ 保存备用。

1.2.2 不同红曲主要功能活性成分的测定方法

（1）色素的测定方法。红曲色素是混合色素，采用色价表征色素，按照 GB 1886.19—2015《食品安全国家标准 食品添加剂 红曲》[15] 中色价的检测方法，测定红色素色价 $E_{510}$、黄色素色价 $E_{390}$、橙色素色价 $E_{465}$。色价 E ($U\cdot g^{-1}$) 按下式计算：

$$E = A \times \frac{100}{m_1} \times \frac{50}{V}$$

式中，$A$——浸泡稀释液的吸光度；100、50——换算系数；$m_1$——称取试样的质量，g；$V$——吸取乙醇浸泡液的体积，mL。

红曲色素也可以采用色差表征色素。色差测定方法：取 1 g 红曲粉，置于直径 3 cm 的透明培养皿中，使粉末均匀散开。开启分光测色仪，以白板校准，测定红曲粉末的色差指标（总色差 $\triangle E$、白/黑差值 $\triangle L^*$、红/绿差值 $\triangle a^*$、黄/蓝差值 $\triangle b^*$）。

（2）莫纳克林 K（MK）的测定方法。按照轻工行业标准 QB/T 2847—2007《功能性红曲（粉）》[16] 中 MK 的检测方法进行试样处理、酸式 MK 制备。液相条件：采用 Waters e2695 高效液相色谱仪，C18 色谱柱（5 μm×250 mm×4.6 mm）；二极管阵列检测器（DAD），紫外检测器，检测波长 238 nm，流动相 $V$（甲醇）:$V$（水）:$V$（磷酸）= 385∶115∶0.14，流速 1.0 $mL\cdot min^{-1}$，进样量 20 μL。内酯式和酸式 MK 标曲的绘制：采用 75% 乙醇溶液配制内酯式 MK 标准液，质量浓度分别为 0.00、6.25、12.50、25.00、50.00、100.00、200.00、300.00 $\mu g\cdot mL^{-1}$，每一样品重复进样 2 次。以内酯式 MK 标准液浓度为横坐标，峰面积为纵坐标，绘制内酯式洛伐他丁标准曲线 $y$ = 61 251$x$ − 84 848，$R^2$ = 0.979。相同方法绘制酸式洛伐他丁标准曲线 $y$ = 71 682$x$，$R^2$ = 0.999。MK ($mg\cdot g^{-1}$) 按下式计算：

$$\mathrm{MK} = \frac{(h_1 + h_2) \times C \times 50}{h_3 \times m_1}$$

式中，$h_1$——样品中内酯式 MK 峰面积；$h_2$——样品中酸式 MK 峰面积；$h_3$——标准内酯式 MK 溶液峰面积；50——试样定容体积，mL；$C$——标准内酯式洛伐他溶液浓度，$mg\cdot mL^{-1}$；$m_1$——试样称取量，g。

（3）不同红曲 γ-氨基丁酸（GABA）的测定方法。试样处理和柱前衍生化按照 QB/T 4587—2013《γ-氨基丁酸》法[18] 进行测定。液相条件：Waters e2695 高效液相色谱仪，配紫外或蒸发光衍射检测器，A 相：0.1 $mol\cdot L^{-1}$ 乙酸钠溶液（三乙胺 0.22‰，四氢呋喃 5‰）。B 相：$V$（0.1 $mol\cdot L^{-1}$ 乙酸钠溶液）:$V$（乙腈）:$V$（甲醇）=1∶2∶2。梯度洗脱。柱温：40 ℃。流速：1.0 $mL\cdot min^{-1}$。检测波长 338 nm。GABA 标准曲线：准确吸取 0.5 $mg\cdot mL^{-1}$ 标准溶液 2、4、5、10、12 μL 进行色谱分析，标准曲线为：$y = 2\times10^7x - 1\times10^6$，$R^2$ = 0.999。GABA (%) 按公式计算：

$$GABA = \frac{A_i \times m_S / V_S}{A_S \times m / V} \times 100\%$$

式中，$A_i$——样品中 GABA 的峰面积；$m_s$——GABA 标准品的质量，g；$V_s$——GABA 标准品的稀释体积，mL；$A_s$——GABA 标准品的峰面积；m——称取样品的质量，g；$V$——样品的稀释体积，mL。

（4）不同红曲麦角固醇的测定方法。麦角固醇提取参考文献 [19]。液相条件：LC600A高效液相色谱仪，南京科捷分析仪器有限公司。C18柱（5 μm×250 mm×4.6 mm），紫外检测器：282 nm。流动相为 $V$（甲醇）:$V$（二氯甲烷）= 75∶25。流速 1.0 $mL\cdot min^{-1}$。进样量 20 μL。麦角固醇标准曲线：10、20、30、40、60、80、100 $\mu g\cdot mL^{-1}$ 的麦角固醇标准溶液浓度，麦角固醇浓度为横坐标，峰面积为纵坐标，标准曲线为 $y$ = 2 118$x$ + 1 634。$R^2$ = 0.999。

（5）不同红曲多糖的测定方法。多糖提取：称量 1 g 红曲粉，置于 50 mL 离心管，按照 1∶10（$m/V$）加入蒸馏水，450 W 超声提取 60 min，3 500 $r\cdot min^{-1}$，离心 10 min，取上清液。4 倍体积无水乙醇沉淀，离心获得残渣即红曲多糖。多糖蒸馏水复溶，苯酚硫酸法测定[20]。葡萄糖标准曲线及多糖测定：精确量取 40 $\mu g\cdot mL^{-1}$ D-葡萄糖标准溶液 0.00、0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、1.75、2.00 mL 分别加到 20 mL 的具塞试管中，各以蒸馏水补至 2.0 mL；加入 6% 苯酚 1.0 mL，摇匀；再加入浓硫酸 5 mL，静置 10 min，再摇匀；室温放置 20 min；于 490 nm波长处测定吸光度。葡萄糖微克数为横坐标，吸光度值为纵坐标，标准曲线为：$y$ = 0.006 7$x$ + 0.087 7，$R^2$ = 0.999 3。

1.2.3 不同红曲的体外抗氧化性测定　红曲醇提液的制备：称量 10 g 红曲粉，按照 1∶10（*m*/*V*）料液比加入 70% 乙醇溶液，50 ℃，540 W 超声 30 min，超声提取 3 次，合并滤液。30 r·min$^{-1}$，50 ℃，将滤液旋转真空浓缩至膏状。80 ℃ 烘干称重。用 70% 乙醇复溶 0.1 g·mL$^{-1}$，−20 ℃ 保存。

采用 Uv/Vis 检测技术，通过铁离子还原力[21]、DPPH 自由基清除试验[5] 和 ABTS 自由基清除试验[3] 测定红曲醇提液的体外抗氧化活性。

铁离子还原抗氧化能力（Ferric ion reducing antioxidant power，FRAP）为样品 700 nm 吸光值，吸光值高表示样品的铁原子还原力较强。

DPPH 自由基（1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical，DPPH）清除率计算公式如下：

$$\text{DPPH 自由基清除率}=\left(1-\frac{A_i-A_j}{A_c}\right)\times 100\%$$

式中：$A_i$——待测样品与等体积 0.2 mmol·L$^{-1}$ DPPH 混合液的吸光度；$A_c$——0.2 mmol·L$^{-1}$ DPPH 溶液与等体积无水乙醇混合液的吸光度；$A_j$——待测液与等体积无水乙醇混合液的吸光度。

拟合红曲醇提液的浓度与 DPPH 自由基清除率的线性方程，计算清除一半 DPPH 自由基的红曲醇提液的浓度，即 DPPH 自由基半数抑制率（DPPH $IC_{50}$）。

ABTS 自由基 [2,2′-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate），ABTS] 清除率按以下公式计算：

$$\text{ABTS 自由基清除率}=\left(\frac{A_0-A}{A_0}\right)\times 100\%$$

式中，$A_0$ 值：取 ABTS 自由基工作液 160 μL 加入到 96 孔板中，加无水乙醇 40 μL，734 nm 吸光值为 $A_0$（0.70±0.02）。A 值：取（40−$x$）μL 无水乙醇加入到 96 孔板中，加样品液 $x$ μL，再加 ABTS 自由基溶液 160 μL，734 nm 吸光值 A。

拟合红曲醇提液的浓度与 ABTS 自由基清除率的线性方程，计算清除一半 ABTS 自由基的红曲醇提液的浓度，即 ABTS 自由基半数抑制率（ABTS $IC_{50}$）。

### 1.3 数据分析

测量数据以平均值±标准差表示，组间的方差分析采用 $t$ 检验。采用 SPSS22.0 软件对数据进行 Spearman 相关系数计算。采用 SIMCA 14.1 软件进行主要功能活性成分和抗氧化指标的关联分析，并绘制载荷图和聚类图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同红曲的主要功能活性成分分析

2.1.1 不同红曲的色素含量　4 类红曲的橙色价（$E_{465}$）、黄色价（$E_{390}$）和红色价（$E_{510}$）以及总色价 $E$（$E_{465}$+$E_{390}$+$E_{510}$）结果（表 1）显示，色曲（CQ）的红色价、黄色价、橙色价显著高于古田红曲（GQ）、功能曲（FQ）和乌衣红曲（WQ），GQ 的红色价、黄色价、橙色价显著高于 FQ 和 WQ，FQ 的橙色价显著高于 WQ。CQ 总色价均值 3911.23 U·g$^{-1}$ 符合 GB 1886.19—2015 中规定的总色价≥1000 U·g$^{-1}$[14]，WQ、FQ 和 GQ 的总色价低于该标准。4 类红曲中 3 种色价的占比相对均衡。

表 1　不同红曲的橙色价（$E_{465}$）、黄色价（$E_{390}$）和红色价（$E_{510}$）

Table 1　Orange, yellow, and red color value of various *Hongqu*

| 样品 Sample | 橙色价 $E_{465}$ | 黄色价 $E_{390}$ | 红色价 $E_{510}$ | 总色价 E |
|---|---|---|---|---|
| 功能曲 FQ | 98.80±47.02 c | 128.51±50.11 c | 121.72±54.38 c | 349.02±150.98 c |
| 色曲 CQ | 1045.98±416.39 a | 1426.66±499.59 a | 1438.60±484.91 a | 3911.23±1395.19 a |
| 乌衣红曲WQ | 73.26±19.40 d | 112.36±38.07 c | 101.81±34.26 c | 287.43±91.12 d |
| 古田红曲 GQ | 187.15±23.73 b | 274.72±43.72 b | 292.63±36.64 b | 754.50±97.13 b |

同一列数据后不同小写字母表示差异显著（$P$ < 0.05），表2、3同。

Different letters on the same column mean significant difference($P$<0.05). The same for Table 2,3.

从表 2 可见，以白板为对照，4 类红曲（粉）的色差值△$E$ 差异非常明显，CQ、GQ、FQ 和 WQ 分别呈现暗红、鲜红、粉红、灰粉色。4 类红曲白/黑差△$L$*为负，说明红曲的白/黑差是偏黑；红/绿差△$a$*为正，说明 4 类红曲在红绿轴上偏红；黄/蓝差△$b$*为正，说明 4 类红曲在黄蓝轴上偏黄。CQ 和 GQ 的色差值较大，其次是 FQ，WQ 的色差值最小（乌衣红曲含有黑曲霉，亮度偏暗）。一般色差△$E$ > 2，认为存在肉眼可辨差异，因此凭借色差值可以区分 WQ、FQ，但是无法区分 GQ 和 CQ。

2.1.2 不同红曲的莫拉可林 K（MK）　根据 QBT 2847—2007《功能性红曲米（粉）》规定莫拉可林

表 2 不同红曲的色差

Table 2 Chromatism of various *Hongqu*

| 样品编号 Sample | 白/黑差 △$L^*$ | 红/绿差 △$a^*$ | 黄/蓝差 △$b^*$ | 总色差 △$E$ |
|---|---|---|---|---|
| FQ | −51.81±1.02 b | 11.54±2.52 a | 5.80±0.60 ab | 53.45±0.55 b |
| CQ | −53.97±0.76 c | 11.78±1.12 a | 8.15±2.06 a | 55.88±0.31 a |
| WQ | −44.80±1.79 a | 10.60±2.88 a | 6.43±1.42 ab | 46.55±2.40 c |
| GQ | −54.53±0.24 c | 10.94±0.68 a | 4.75±0.76 b | 55.83±0.28 a |

K（monacolin K，MK）≥0.40%（以绝干计，即 4 mg·g$^{-1}$）。从表 3 可见，FQ 的 MK 含量分别为 6.98～33.73 mg·g$^{-1}$，达到行业标准的要求。FQ 的 MK 含量显著高于 CQ、WQ 和 GQ。CQ 的 MK 含量均值 0.26 mg·g$^{-1}$，明显高于 WQ 和 GQ，但低于行业标准。MK 包含酸式和内酯式，内酯式 MK 需要人体内羟基酯酶的参与发挥降胆固醇的作用，所以酸式 MK 的降胆固醇的作用效果优于内酯式 MK。FQ 的酸式占比分别为 12.88%～27.01%，为后续活性评价提供参考。

2.1.3 不同红曲的γ-氨基丁酸（GABA）、麦角固醇、多糖含量 从图 1-A 可见，不同红曲的 GABA 显示，WQ 的 GABA 含量 0.71 μg·g$^{-1}$，显著高于 GQ、FQ 和CQ。GQ、FQ 和CQ 的GABA 含量，分别为0.13、0.24、0.15 μg·g$^{-1}$，差异不显著。

4 类红曲的麦角固醇含量差异较大（图 1-B），WQ 和 FQ 的麦角固醇含量平均为 472.12、449.65 μg·g$^{-1}$，显著高于 CQ（247.21 μg·g$^{-1}$）和 GQ（156.64 μg·g$^{-1}$）。说明 WQ 和 FQ 的真菌生物量比 CQ 和 GQ 的更高，培养基质的转化利用更加充分。

4 类红曲的多糖含量（图 1-C）的结果显示，FQ 的多糖含量最高（39.97 mg·g$^{-1}$），显著高于其他 3 类红曲；CQ 的多糖含量（15.32 mg·g$^{-1}$）次之，显著高于 WQ（6.22 mg·g$^{-1}$）和 GQ（7.29 mg·g$^{-1}$）；WQ 和 GQ 多糖含量没有显著差异。

## 2.2 不同红曲的体外抗氧化活性

不同红曲的 1 mg·mL$^{-1}$ 乙醇提取物的铁离子还原抗氧化能力（FRAP）测定结果见图 2-A。1 mg·mL$^{-1}$ 阳性对照维生素 C 的吸光值为 0.918，CQ 的铁离子还原力最强，为 0.712，显著高于其他 3 类红曲，WQ 和 GQ 的吸光值显著高于 FQ。说明 CQ 的还原铁离子的抗氧化能力最强。

表 3 不同红曲的莫纳克林 K（MK）

Table 3 MK contents in various *Hongqu*

| 样品编号 Sample No. | 内酯式莫纳克林K Lactone forms of MK/(mg·g$^{-1}$) | 酸式莫纳克林K Acid forms of MK/(mg·g$^{-1}$) | 莫纳克林K MK/(mg·g$^{-1}$) | 平均莫纳克林K MK/(mg·g$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| FQ1 | 29.13±0.02 | 4.60±0.01 | 33.73±0.00 | |
| FQ2 | 17.66±0.08 | 2.61±0.02 | 20.27±0.11 | |
| FQ3 | 7.38±0.04 | 1.64±0.03 | 9.02±0.07 | 16.13±11.08 a |
| FQ4 | 7.78±0.04 | 2.88±0.01 | 10.66±0.05 | |
| FQ5 | 5.11±0.01 | 1.88±0.02 | 6.98±0.03 | |
| CQ1 | — | 0.10±0.04 | 0.10±0.04 | |
| CQ2 | — | 0.41±0.01 | 0.41±0.01 | |
| CQ3 | — | 0.26±0.01 | 0.26±0.01 | 0.26±0.13 b |
| CQ4 | — | 0.38±0.00 | 0.38±0.00 | |
| CQ5 | — | 0.17±0.02 | 0.17±0.02 | |
| WQ1 | — | 0.03±0.00 | 0.03±0.00 | |
| WQ2 | — | 0.03±0.00 | 0.03±0.00 | |
| WQ3 | — | 0.03±0.00 | 0.03±0.00 | 0.03±0.01 c |
| WQ4 | — | 0.04±0.00 | 0.04±0.00 | |
| WQ5 | — | 0.04±0.00 | 0.04±0.00 | |
| GQ1 | — | 0.02±0.00 | 0.02±0.00 | |
| GQ2 | — | 0.02±0.00 | 0.02±0.00 | |
| GQ3 | — | 0.02±0.00 | 0.02±0.00 | 0.02±0.01 c |
| GQ4 | — | 0.03±0.00 | 0.03±0.00 | |
| GQ5 | — | 0.03±0.00 | 0.03±0.00 | |

“—”表示未检出。

“—” means no detected.

**4** 类红曲的醇提取物的 DPPH 自由基清除能力（DPPH $IC_{50}$）的测定结果（图 2-B），DPPH $IC_{50}$ 越小，抗氧化能力越强。CQ 的 DPPH 自由基清除能力最强，DPPH $IC_{50}$ 达到 0.11 mg·mL$^{-1}$；其次为 FQ 和

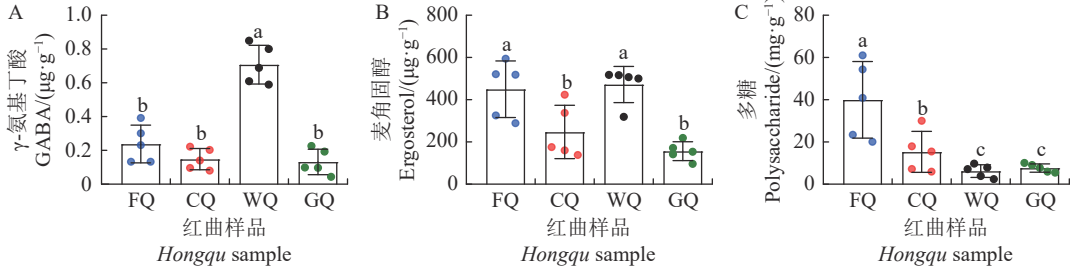



图 1 不同红曲的 GABA、麦角固醇、多糖

**Fig. 1 Contents of GABA, ergosterol, and polysaccharide in various *Hongqu***

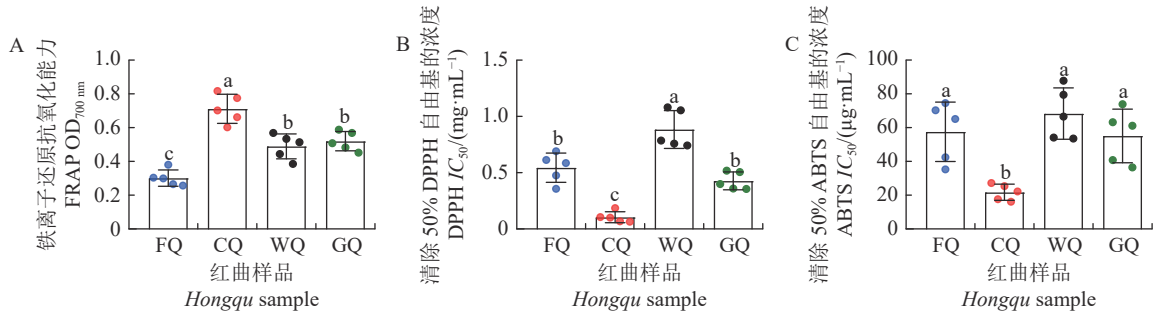



图 2　不同红曲的体外抗氧化活性

**Fig. 2　Antioxidant activity *in vitro* of various *Hongqu***

GQ，分别为 0.54 、0.43 mg·mL$^{-1}$，二者没有显著差异； WQ 的 DPPH 自由基清除能力最弱，DPPH $IC_{50}$ 为 0.88 mg·mL$^{-1}$。阳性对照维生素 C 清除 DPPH 自由基的 $IC_{50}$ 为 0.02 mg·mL$^{-1}$。

4 类红曲的醇提取物的 ABTS 自由基清除能力（ABTS $IC_{50}$）的测定结果（图 2-C），ABTS $IC_{50}$ 越小，抗氧化能力越强。CQ 的 ABTS $IC_{50}$ 为 21.72 μg·mL$^{-1}$，抗氧化能力显著强于其他三者，而 FQ、GQ 和 WQ 之间 ABTS 自由基清除能力没有差异。阳性对照维生素 C 清除 ABTS 自由基的 $IC_{50}$ 为 4.94 μg·mL$^{-1}$。

### 2.3　不同红曲主要功能活性成分、抗氧化等指标的相关性分析

从表 4 可见，红/黄/橙色价 $E_{510}/E_{390}/E_{465}$ 之间具有强相关（$r \geqslant 0.98$），$\triangle E$ 与色价极显著相关（$r \geqslant 0.778$）；铁离子还原抗氧化能力 FRAP 与色价极显著正相关（$0.733 \geqslant r \geqslant 0.703$），但是 FRAP 与麦角固醇极显著负相关（$r = -0.448$），与 MK、GABA 和多糖负相关，说明色素是 4 类红曲中发挥还原铁离子的抗氧化作用的主要成分。DPPH $IC_{50}$ 与色价极显著负相关（$-0.880 \leqslant r \leqslant -0.896$），但是 DPPH $IC_{50}$ 和 GABA、麦角固醇正相关（$r = 0.596$、$r = 0.412$），ABTS $IC_{50}$ 与色价极显著负相关（$-0.773 \leqslant r \leqslant -0.758$），但 ABTS $IC_{50}$ 与 GABA、麦角固醇正相关（$r = 0.319$、$r = 0.211$），DPPH $IC_{50}$、ABTS $IC_{50}$ 分别和 MK、多糖呈弱负相关，说明色素是 4 类红曲中发挥清除 DPPH 自由基、ABTS 自由基的抗氧化作用的主要成分。这与文献报道红曲黄色素具有较强清除自由基和细胞抗氧化活性是一致的[21]。

不同红曲主要功能活性成分和抗氧化活性指标

表 4　不同红曲主要功能活性成分、抗氧化等指标的相关系数

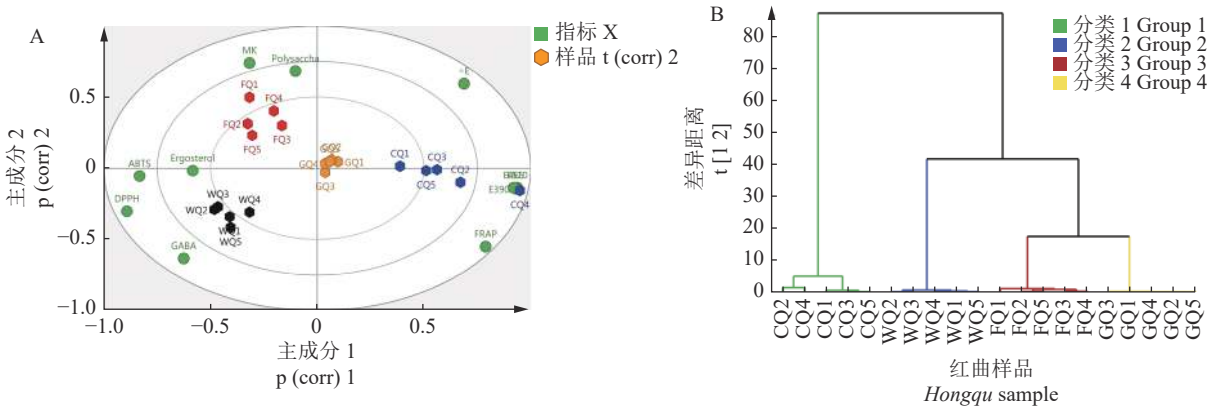
**Table 4　Correlation coefficients on key functional components and antioxidant indices of various *Hongqu***

| 指标 Index | 红色价 $E_{510}$ | 黄色价 $E_{390}$ | 橙色价 $E_{465}$ | 总色差 $\triangle E$ | 麦角固醇 Ergosterol | 莫纳克林 K MK | γ-氨基丁酸 GABA | 多糖 Polysaccharide | 铁离子还原力 FRAP | 清除50% DPPH 的浓度 DPPH $IC_{50}$ | 清除50% ABTS 的浓度 ABTS $IC_{50}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 红色价 $E_{510}$ | 1 | 0.983** | 0.985** | 0.810** | −0.477* | −0.135 | −0.536* | −0.053 | 0.703** | −0.880** | −0.759** |
| 黄色价 $E_{390}$ | | 1 | 0.980** | 0.778** | −0.477* | −0.138 | −0.505* | −0.057 | 0.733** | −0.886** | −0.758** |
| 橙色价 $E_{465}$ | | | 1 | 0.825** | −0.493* | −0.097 | −0.556* | 0.005 | 0.704** | −0.896** | −0.773** |
| 总色差 $\triangle E$ | | | | 1 | −0.627** | −0.112 | −0.798** | −0.042 | 0.427 | −0.805** | −0.569** |
| 麦角固醇 Ergosterol | | | | | 1 | 0.386 | 0.773** | 0.362 | −0.448* | 0.412 | 0.211 |
| 莫纳克林K MK | | | | | | 1 | −0.061 | 0.657** | −0.259 | −0.187 | −0.180 |
| γ-氨基丁酸 GABA | | | | | | | 1 | 0.001 | −0.236 | 0.596** | 0.319 |
| 多糖Polysaccharide | | | | | | | | 1 | −0.323 | −0.179 | −0.140 |
| 铁离子还原力FRAP | | | | | | | | | 1 | −0.585** | −0.635** |
| 清除50%DPPH的浓度 DPPH $IC_{50}$ | | | | | | | | | | 1 | 0.788** |
| 清除50%ABTS的浓度 ABTS $IC_{50}$ | | | | | | | | | | | 1 |

“ **”表示极显著（$P<0.01$），“*”表示显著（$P<0.05$）。

“**” means extremely significant difference ($P<0.01$), “*” means significant difference($P<0.05$).

关联分析的主成分分析（Bioplot）结果（图 3-A）显示：4 类红曲分散在不同区域，说明 4 类红曲的功能活性成分和抗氧化活性有明显的差异。CQ 与色素（色价 $E_{510}$、$E_{390}$、$E_{465}$ 和色差△$E$）和铁离子还原抗氧化能力 FRAP 之间的距离近，和 ABTS $IC_{50}$、DPPH $IC_{50}$ 最远，说明 CQ 中色素含量最多，CQ 的还原铁离子能力和清除 ABTS、DPPH 自由基的能力最强。FQ 与 MK、多糖距离最近，说明 FQ 的 MK 和多糖含量最大。WQ 和 GABA、麦角固醇、ABTS $IC_{50}$、DPPH $IC_{50}$ 最近，说明 WQ 中麦角固醇和 GABA 的含量最大，同时其清除 ABTS、DPPH 自由基的抗氧化能力最弱。GQ 处于所有指标和样品的最中间，功能活性物质组成和抗氧化与 FQ 最为接近。层次聚类图（HCA）也显示 4 类红曲分别聚类，与生物图结果一致（图 3-B）。




A：主成分分析双标图（Bioplot）；B：层次聚类图（HCA）。

A: Bioplot; B: Hierarchical clustering alg (HCA).

**图 3 不同红曲主要功能活性成分、抗氧化等指标的关联分析**

**Fig. 3 Correlations between key functional components and antioxidant indices of various *Hongqu***

## 3 讨论

红曲菌具有丰富的淀粉酶、糖化酶和酯化酶等，通过固态发酵谷物、高粱和玉米等农副产品，能够合成红曲色素、莫纳克林类、γ-氨基丁酸、麦角固醇、多糖等功能活性代谢产物，明显提高农副产品的抗氧化性等功能性价值[22]。红曲菌液体发酵或酿造应用中具有耐受高浓度乳酸和乙醇的特性，这与其代谢产物的抗氧化活性能缓解氧化胁迫密切相关[23]。由于不同菌种在不同发酵条件下会产生复杂的红曲色素混合物，使其色调和色价的表征依据多样化，导致色价检测方法缺乏统一标准，即使是现行国家标准，也尚存矛盾之处：GB 1886.66—2015[24] 中以 $OD_{476\pm10\ nm}$ 作为还原型红曲黄色素的黄色价，GB 1886.181—2016[25] 中以 $OD_{495\pm10\ nm}$ 作为红色价，黄色价和红色价存在波长交集；GB 1886.19—2015 中黄色价 $OD_{388\ nm}$，符合大多数文献报道天然红曲黄色素波长 330～450 nm。天然和还原型红曲黄色素的黄色价检测波长截然不同；总色价 $OD_{505\ nm}$ 偏向红色价。因此，综合文献报道和国家标准，本文参照现有文献对 4 类红曲样品进行规范化测定。GB 1886.19—2015 规定色曲的总色价 ≥ 1 000 U·g$^{-1}$，DB S35/002—2017 规定古田红曲和乌衣红曲的总色价≥ 400 U·g$^{-1}$[17]，色曲和古田红曲的总色价达标，功能曲的色价没有限定。值得注意的是色差和色价极显著正相关，凭借色差能较好地区分不同红曲，操作简便。色曲主要产品红曲红通过菌种诱变、固定化细胞技术、菌种联合培养和优化培养基等多种途径不断提高色素产量[26]，作为着色剂广泛应用于食品加工领域。MK 数据变异度大，是以代表性企业的不同 MK 含量的功能红曲产品为试验对象导致的。黄酒抗氧化能力高于白葡萄酒但低于红葡萄酒，是游离氨基酸、蛋白质和 GABA 的良好来源，其中 GABA 含量约为 10 μg·mL$^{-1}$ [27]。乌衣红曲和古田红曲都是黄酒酿造曲，其中乌衣红曲的 GABA 含量在 4 类红曲中最高，与其菌群结构多样性密不可分，除红曲霉外，乳酸杆菌和酵母菌同样具有高产 GABA 能力，通过菌种诱变和培养基优化后产量高达 9.3 g·L$^{-1}$[28] 和 2.6 g·L$^{-1}$[29]。麦角固醇可以显著降低喂食高脂肪饮食的 C57BL/6J 小鼠的血清总胆固醇、甘油三酯、和低密度脂蛋白胆固醇的水平[30]。麦角固醇作为真菌细胞膜的重要组成成分，成为固体发酵混合物中真菌生物量的重要表征。乌衣红曲和功能曲中麦角固醇含量（真菌的生物量）比色曲和古田红曲更高，与功能曲由红

曲霉较长周期的发酵制成有关，而乌衣红曲具有红曲霉、根曲霉和酵母等复杂真菌构成相关[31]。红曲多糖和改性产品具有一定的抗氧化活性[32]。固态发酵红曲的多糖含量随发酵时间的延长不断积累，30 d 达峰值 6.14%，30～75 d 内基本稳定，随后下降[33]。乌衣红曲和古田红曲发酵周期为 5～7 d，色曲 9～14 d，功能曲 38～45 d，多糖含量随着发酵周期阶梯式上升，符合文献报道的多糖变化规律。GABA、多糖和麦角甾醇可能是抗氧化活性的潜在贡献者。屈炯等测定了红曲红色素组分 2 清除羟基自由基（•OH）、二苯代苦味肼自由基（DPPH）和超氧阴离子自由基（$\bullet O_2^-$）的能力，分别为 31.17%、63.53% 和 33.89%，抗氧化能力优于相同浓度维生素 C 溶液[5]。

本研究发现 4 类红曲醇提液的铁离子还原能力、清除 DPPH、ABTS 自由基的抗氧化能力与色素含量极显著相关，而抗氧化能力与 MK、GABA 和多糖含量等指标无显著正相关，试验结果与文献报道相一致。色曲、功能曲和酿造曲（乌衣红曲和古田红曲）因为用途不同，相应地生产菌种和制作工艺也不同，终产品的色素、MK 等主要功能活性及其物质组成各具特色。色曲以突出的色素组成与抗氧化活性为优势，是红曲抗氧化优良资源。功能曲以突出的 MK、多糖含量为特点，作为公认的降脂药物，也可作为调节免疫、糖脂代谢的研究材料。而乌衣红曲的麦角固醇、GABA 含量最多，提示乌衣红曲作酿造用途外，还可能是降血压活性的良好材料。古田红曲的主要功能活性物质的含量介于其他 3 类红曲中间，可以作为其他 3 类红曲特定生物活性研究的参考材料。

## 4　结论

通过比较分析曲功能曲（FQ）、色曲（CQ）、乌衣红曲（WQ）和古田红曲（GQ）的色价、MK、GABA、麦角固醇、多糖等主要功能活性成分和体外抗氧化活性，发现 CQ 的色价和抗氧化活性显著高于 FQ、WQ 和 GQ，且色价和抗氧化活性极显著相关，说明红曲色素是红曲抗氧化活性的功效成分。值得注意的是 4 类红曲具有不同的功能活性成分特征：CQ 的色素含量最高，FQ 的 MK 和多糖含量最高，WQ 的 GABA、麦角固醇含量最高，以上功能活性成分的特点可为未来抗氧化等生物活性研究提供借鉴和参考。

**参考文献：**


[1] 李钟庆, 郭芳. 红曲菌的形态与分类学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.

[2] BARBOSA R N, LEONG S L, VINNERE-PETTERSSON O, et al. Phylogenetic analysis of *Monascus* and new species from honey, pollen and nests of stingless bees [J]. *Studies in Mycology*, 2017, 86: 29−51.

[3] 姚青. 以麦麸为基质的红曲霉的固态发酵及抗氧化活性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
YAO Q. Study on *Monascus* solid-state fermentation and antioxidant activity of matrix in wheat bran[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015. (in Chinese)

[4] CHEN W P, FENG Y L, MOLNÁR I, et al. Nature and nurture: Confluence of pathway determinism with metabolic and chemical serendipity diversifies *Monascus* azaphilone pigments [J]. *Natural Product Reports*, 2019, 36（4）: 561−572.

[5] 屈炯, 王斌, 吴佳佳, 等. 红曲色素组份分离及其抗氧化活性研究 [J]. 现代食品科技, 2008, 24（6）：527−531.
QU J, WANG B, WU J J, et al. Study on separation of *Monascus* pigment and their antioxidative properties [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2008, 24（6）: 527−531.（in Chinese）

[6] ENDO A. Monacolin K, a new hypocholesterolemic agent that specifically inhibits 3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme A reductase [J]. *The Journal of Antibiotics*, 1980, 33（3）: 334−336.

[7] 周香珍, 林书发, 何书华. 红曲药学评价研究进展 [J]. 中国现代中药, 2016, 18（7）：936−941.
ZHOU X Z, LIN S F, HE S H. Research progress in pharmacodynamics evaluation red yeast rice [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2016, 18（7）: 936−941.（in Chinese）

[8] 温学伟, 马新, 周立平, 等. 红曲抗氧化的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2011, 32（2）：376−378.
WEN X W, MA X, ZHOU L P, et al. Research advances of antioxidant action in *Monascus* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32（2）: 376−378.（in Chinese）

[9] 谢振兴. GABA改善氧化应激和甲状腺功能及其机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
XIE Z X. Effects of GABA on oxidative stress and thyroid function and its mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014. (in Chinese)

[10] HSIAO W Y, GU K L, WENG Y M. Antioxidant activity and contents of total phenolic, monacolin K, GABA and citrinin of *Monascus*-fermented soy sauce [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 807/808/809: 2066−2070.

[11] 李月婵, 张子祎, 魏学源, 等. 红曲霉产胞外多糖的条件优化及功效活性的初步检测 [J]. 天津农学院学报, 2020, 27（2）：79−83.
LI Y C, ZHANG Z Y, WEI X Y, et al. Optimization of conditions for the production of exopolysaccharides by *Monascus* and preliminary detection of efficacy activity [J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2020, 27（2）: 79−83.（in Chinese）

[12] 汪帅, 孙宇, 李春梅, 等. 豆甾醇的研究进展概述 [J]. 中国药业, 2019, 28（23）：96−98.
WANG S, SUN Y, LI C M, et al. Research progress of stigmasterol [J]. *China Pharmaceuticals*, 2019, 28（23）: 96−98.（in Chinese）

[13] 张红林, 李桂玲, 苏国成, 等. 古田红曲米抗氧化活性物质的分离纯化 [J]. 现代食品科技, 2018, 34（5）：136−142,75.

ZHANG H L, LI G L, SU G C, et al. Separation and purification of the antioxidant compounds from Gutian red yeast rice [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34（5）: 136−142,75.（in Chinese）

[14] 王智耀, 卞丹, 何理琴, 等. 红曲黄酒酿造用曲真菌菌群分析 [J]. 中国食品学报, 2019, 19（1）：200−206.
WANG Z Y, BIAN D, HE L Q, et al. Studies on the fungal community of the traditional fermentation starter of Hong qu glutinous rice wine [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19（1）: 200−206.（in Chinese）

[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂 红曲米: GB 1886.19—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 功能性红曲米: QB/T 2847—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[17] 福建省卫生和计划生育委员会. 食品安全地方标准 酿造用红曲: DBS35/ 002—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[18] 中华人民共和国工业和信息化部. γ-氨基丁酸: QB/T 4587—2013[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014.

[19] 汤葆莎, 吴俐, 陈君琛, 等. LED光源在促进秀珍菇菌丝降解代谢麦麸中的作用 [J]. 福建农业学报, 2016, 31（4）：371−376.
TANG B S, WU L, CHEN J C, et al. Effect of LED on wheat bran digestion by *Pleurotus* geesteranus mycelia [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31（4）: 371−376.（in Chinese）

[20] 吴俐, 沈恒胜, 汤葆莎, 等. 油茶枝液体培养茶薪菇菌丝的营养基质动态分析 [J]. 福建农业学报, 2013, 28（9）：906−909.
WU L, SHEN H S, TANG B S, et al. Dynamic changes in nutrition of culture medium for *Agrocybe chaxingu* Huang with *Camellia oleifera* Abel extracts [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 28（9）: 906−909.（in Chinese）

[21] WU L, ZHOU K X, CHEN F, et al. Comparative study on the antioxidant activity of *Monascus* yellow pigments from two different types of *Hongqu*-functional qu and coloring qu [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 715295.

[22] 胡均亮, 陆方菊, 陈功, 等. 不同来源红曲米多酚类化合物和抗氧化活性的聚类分析 [J]. 中国酿造, 2017, 36（3）：39−43.
HU J L, LU F J, CHEN G, et al. Cluster analysis of polyphenol compounds and antioxidant activity of red kojic rice from different producing areas [J]. *China Brewing*, 2017, 36（3）: 39−43.（in Chinese）

[23] ZHOU K X, WU L, CHEN G M, et al. Development of a novel restrictive medium for *Monascus* enrichment from Hongqu based on the synergistic stress of lactic acid and ethanol [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 702951.

[24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂 红曲黄色素: GB 1886.66—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂 红曲红: GB 1886.181—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[26] 衣珊珊, 沈昌, 韩永斌, 等. 红曲色素形成机理及提高其色价的途径 [J]. 食品科学, 2005, 26（7）：256−261.
YI S S, SHEN C, HAN Y B, et al. Synthetic mechanism and approach to enhance the color value of *Monascus* pigments [J]. *Food Science*, 2005, 26（7）: 256−261.（in Chinese）

[27] LU Q Y, LEE R P, HUANG J J, et al. Quantification of bioactive constituents and antioxidant activity of Chinese yellow wine [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 44: 86−92.

[28] 刘婷婷. 高产γ-氨基丁酸乳酸菌菌株选育及其转化条件优化[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
LIU T T. Screening of lacotbacillus high-efficiency producing γ-aminobutyric acid from L-glutamate acid and optimization of biotransformation conditions[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010. (in Chinese)

[29] 郑鸿雁, 赵炜彤, 昌妍希, 等. GABA高产菌株的筛选、鉴定及诱变选育 [J]. 食品研究与开发, 2016, 37（2）：177−182.
ZHENG H Y, ZHAO W T, CHANG Y X, et al. Sceening and indentifiacation and mutagenesis of high-yielding strains for producing GABA [J]. *Food Research and Development*, 2016, 37（2）: 177−182.（in Chinese）

[30] LIANG J X, ZHANG Q Q, HUANG Y F, et al. Comprehensive chemical profiling of *monascus*-fermented rice product and screening of lipid-lowering compounds other than monacolins [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2019, 238: 111879.

[31] LV X C, WENG X, ZHANG W, et al. Microbial diversity of traditional fermentation starters for Hong Qu glutinous rice wine as determined by PCR-mediated DGGE [J]. *Food Control*, 2012, 28（2）: 426−434.

[32] 伍健萍. 红曲霉发酵多糖条件及抗氧化活性的初步研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011.
WU J P. Preliminary study on the conditions and antioxidant activity of *Monascus* fermented polysaccharides [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[33] 严敏嘉, 李小芳, 赵甜甜, 等. 红曲固态发酵过程中糖类物质的动态变化分析 [J]. 食品研究与开发, 2018, 39（3）：79−83.
YAN M J, LI X F, ZHAO T T, et al. Analysis of dynamic changes of sugars in the solid fermentation of *Monascus* [J]. *Food Research and Development*, 2018, 39（3）: 79−83.（in Chinese）

（责任编辑：张梅）