

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202004012

枫香黑色素提取工艺优化及其对糯米的染色特性研究*

弘子姗, 王君毅, 刘俊佑, 龚加顺**
(云南农业大学 食品科学技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】优化枫香黑色素的提取工艺, 对其染色糯米的表观性能、感官品质及抗氧化活性进行研究。【方法】以云南产的枫香为原料, 通过单因素和响应面优化设计, 对枫香黑色素提取工艺进行优化; 用枫香黑色素对糯米进行染色, 探讨糯米染色后的感官品质、抗氧化活性及微观结构的变化。【结果】枫香黑色素的提取工艺为提取温度 70 ℃、提取时间 6 h、料液比 1 : 50 (g/mL)。抗氧化研究表明: 枫香黑色素具有较强的抗氧化活性, 糯米染色后抗氧化活性极显著升高 ($P < 0.001$); 但染色糯米饭的感官评分显著低于白糯米饭 ($P < 0.05$)。扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 分析表明: 淀粉粒与色素发生相互作用, 导致淀粉粒形态改变, 尺寸增大, 染色后糯米糊化度降低。【结论】本研究为枫香开发利用和功能性彩色米的产业化生产奠定了基础。

关键词: 枫香黑色素; 提取工艺; 抗氧化性; 感官评价; 扫描电子显微镜

中图分类号: S 889⁺.4; TS 201.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 06-1028-09

Optimization of Extraction Conditions of Melanin from *Liquidambar formosana* Hance and Its Dyeing Characteristic on Glutinous Rice

HONG Zishan, WANG Junyi, LIU Junyou, GONG Jiashun

(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To optimize the extraction process of melanin from *Liquidambar formosana* Hance, and to study the apparent performance, sensory quality and antioxidant activity of dyed glutinous rice. [Method] The melanin from *L. formosana* from Yunnan was optimized by one-factor-at-a-time method and response surface methodology, the melanin was used to dye glutinous rice, and the sensory quality, antioxidant activity and microstructure changes after dyeing were discussed. [Results] The best conditions were as follows: the extraction temperature was 70 ℃, the extraction time was 6 hours, the ratio of solid to liquid was 1 : 50 (g/mL). Antioxidant studies showed that melanin had strong antioxidant activity, and the antioxidant activity of glutinous rice was extremely significantly increased after dyeing ($P < 0.001$). However, the sensory score of dyed glutinous rice was significantly lower than that of white glutinous rice ($P < 0.05$). The scanning electron microscope

收稿日期: 2020-04-08

修回日期: 2021-05-27

网络首发时间: 2021-11-20 08:40:58

*基金项目: “十三五”国家重点研发计划子课题 (2018YFD0400103-5)。

作者简介: 弘子姗 (1995—), 女, 广东惠州人, 在读博士研究生, 主要从事食品化学与营养代谢研究。

E-mail: 15287190113@163.com

**通信作者 Corresponding author: 龚加顺 (1971—), 男, 云南曲靖人, 博士, 教授, 主要从事食品科学与茶叶化学研究。E-mail: gong199@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211118.1633.003.html>



(SEM) results showed that the starch grains interact with melanin, resulting in an obvious increase in the size of starch grains, the changes of morphological. Meanwhile the gelatinization degree of dyed glutinous rice was lower than that of undyed glutinous rice. [Conclusion] This study laid a foundation for the development and utilization of the *L. formosana* and the industrialization of functional color rice.

Keywords: melanin from *Liquidambar formosana* Hance; extraction technology; antioxidant activity; sensory evaluation; scanning electron microscope (SEM)

枫香树 (*Liquidambar formosana* Hance) 又名枫树、大叶枫、黑饭木, 是金缕梅科枫香属落叶乔木^[1-2]。枫香性平, 味辛、苦, 具有祛风除湿、行气止痛和解毒之功效^[3]。枫香常被民间用作食物着色的色素原料^[4], 用其汁液染制糯米, 蒸出的米饭乌黑发亮, 味道诱人, 是云南和贵州等地少数民族的特色食品“五彩饭”之一^[5]。枫香树叶黑色素是一种多酚类物质^[6-7], 具有抗氧化^[8-9]、抗衰老^[10]、抗病毒^[11]、抗炎^[12-13]、降血压^[14]和抗过敏^[15]等生物活性。

针对植物天然色素提取及其抗氧化活性的研究很多, 如邹青飞等^[16]和黄建蓉等^[17]对不同植物色素的提取工艺及抗氧化活性进行了研究; 也有针对枫香黑色素的研究, 如张莉等^[18]研究得出枫香树叶黑色素的最佳提取工艺条件为 60% 提取剂质量分数、微波功率 700 W、料液比为 1:30、提取时间 55 s; 谢宇奇等^[19]对枫香树叶黑色素进行研究发现其具有一定的清除 DPPH 自由基能力, 且清除能力大于二丁基羟基甲苯 (BHT)。但目前天然色素对糯米染色方面的研究极少, 特别是针对地方特色“五彩饭”中枫香色素对糯米的染色作用研究鲜见报道。枫香色素染制大米, 除赋予大米天然色泽外, 染色后的米可能具有抗氧化活性等功能, 这可能是少数民族热衷于利用天然植物制作“五彩饭”的主要原因之一。徐源等^[20-22]对乌饭树叶色素对大米蛋白和淀粉的相互作用进行研究, 认为乌饭树叶色素与大米蛋白之间以疏水作用和氢键作用进行结合, 因此, 理论上认为枫香色素与糯米淀粉和蛋白质等的相互作用存在类似情况。

本研究以云南产的人工种植枫香树叶为原料, 采用单因素和响应面优化设计, 对枫香黑色素进行提取工艺优化; 通过体外抗氧化试验, 评价枫香提取物和糯米在染色前后的抗氧化活性变化; 以气味、外观结构、适口性、滋味和冷饭质

地等为评价指标, 对枫香黑米饭感官品质进行综合比较; 通过扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 初步研究优化提取的色素对糯米的染色表现性能。综合以上结果以期获得枫香色素最佳提取工艺, 明确染色糯米的抗氧化活性, 初步揭示枫香色素染色糯米的作用, 为枫香染制糯米的产业化生产和枫香色素的开发利用提供理论依据, 为少数民族特色食品“五彩饭”的开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

枫香树叶: 采自云南省曲靖市师宗县人工栽培的枫香, 枫香鲜叶于 30 ℃ 低温干燥, 避光于室温储存备用。糯米: 2019 年产自云南昆明, 购于云南滇鹏产业有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 单因素试验

参照谢宇奇等^[23]的研究结果, 以 60% 乙醇溶液为提取溶剂, 以 270 nm 处的吸光度为指标, 考察提取时间 (1~8 h)、提取温度 (30~70 ℃) 和料液比 [1:25~1:50 (g/mL)] 等 3 个因素对提取效果的影响, 确定最佳工艺的因素水平。

1.2.2 响应面优化试验设计

采用响应面优化试验设计 (表 1) 对枫香黑色素的提取工艺进行优化。

表 1 响应面试验因素与水平设计
Tab. 1 Independent variables and their levels used in response surface analysis

水平 level	A	B	C
	提取时间/h extraction time	提取温度/℃ extraction temperature	料液比/(g·mL ⁻¹) solid-liquid ratio
-1	5	50	1:30
0	6	60	1:40
1	7	70	1:50

1.2.3 枫香黑米饭制作及其感官评价

(1) 样品制备

参考传统民间植物染饭工艺,经多次试验确定枫香黑米饭的制作流程。按照确定的最优色素提取工艺提取色素溶液(即染料),将染料加热至 60 ℃,称取原料糯米,淘洗干净后倒入染料于室温下浸泡染色 30 min,倒出米,将染料加热至 60 ℃,再次倒入米浸泡染色,重复 3 次后将米滤干,于 100 ℃ 蒸制 15 min,以备感官评价。

(2) 枫香黑米饭感官评价

枫香黑米饭及对照白米饭感官评价参照 GB/T 15682—2008 进行并略作修改,由气味(20 分)、外观结构(30 分)、适口性(25 分)、滋味(20 分)和冷饭质地(5 分)等 5 个部分组成,分别设立评分标准,以有效地对枫香黑米饭产品感官品质进行综合评比。每组产品由 10 位品评员评分,并以平均分作为产品的最终得分。

1.2.4 枫香黑糯米的微观形貌分析

样品制备同 1.2.3 节。观察未染色生糯米和糊化糯米及枫香树叶黑色素染色生糯米和糊化糯米的微观结构。用刀片将糯米横向切断,米粒的断面朝上,用离子衍射仪(Cressington 108,英国)在糯米横断面表面进行喷金和固定。色素粉末均匀地分散在样品处理台上,采用 S-4800 SEM 在 10.0 kV 工作电压下分别放大 200、5 000 和 10 000 倍观察并记录。

1.2.5 枫香黑糯米的抗氧化活性评价^[24-27]

样品制备同 1.2.3 节。以 Trolox 作为标准品绘制标准曲线并建立回归方程,DPPH 自由基清除能力回归方程为: $y=0.055x+8.636$, $R^2=0.995$;ABTS 自由基清除能力回归方程为: $y=0.136x+$

24.664 , $R^2=0.993$;铁离子还原能力(FRAP)回归方程为: $y=0.004x+0.098$, $R^2=0.991$;氧自由基吸收能力(ORAC)回归方程为: $y=0.421x+7.477$, $R^2=0.998$ 。根据标准曲线计算样品的抗氧化活性,结果以每克样品所需 Trolox 的量表示($\mu\text{mol/g}$)。

1.3 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据整理;利用 SPSS 19.0 进行方差分析和显著性分析;采用 Design-Expert 8.0.6 进行响应面分析;采用 Origin 9.1 和 Graphpad Prism 6.01 作图。所有试验重复 3 次以上,结果以平均值表示。

2 结果与分析

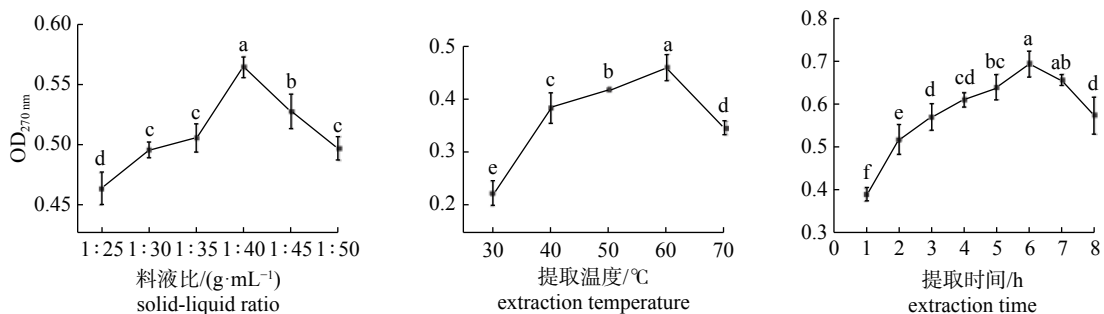
2.1 不同提取条件对枫香树叶黑色素提取效果的影响

由图 1 可知:枫香黑色素提取效果随料液比、提取温度和提取时间的增加而均呈先增加后降低的变化趋势。当料液比达到 1:40 (g/mL) 时提取效果最好,且与其他料液比相比差异显著($P<0.05$);当提取温度达到 60 ℃ 时提取效果最好,且与其他提取温度相比差异显著($P<0.05$);当提取时间达到 6 h 时提取效果最好,且与除提取时间 7 h 外的其他提取时间相比差异显著($P<0.05$)。

2.2 响应面优化枫香树叶黑色素提取工艺

2.2.1 响应面试验设计结果

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 进行多元回归拟合,得到吸光度与提取时间(X_1)、提取温度(X_2)、料液比(X_3)的二次方程模型为: $Y=0.0738+0.4673X_1-0.0371X_3+0.0006X_1X_2-0.0010X_1X_3+0.0002X_2X_3-0.0397X_1^2-0.0001X_2^2+0.0004X_3^2$ 。回归模型的方差分析结果见表 3。



注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters mean significant difference ($P<0.05$).

图 1 不同提取条件对色素提取效果的影响

Fig. 1 Effect of extraction factors on the yield of pigments

表 2 响应面分析结果				
Tab. 2 Experimental design and results of response surface analysis				
编号 No.	提取时间/h extraction time	提取温度/℃ extraction temperature	料液比/(g·mL ⁻¹) solid-liquid ratio	OD _{270 nm}
1	6	70	1 : 50	0.760
2	5	60	1 : 50	0.734
3	6	60	1 : 40	0.703
4	7	60	1 : 30	0.708
5	7	70	1 : 40	0.671
6	6	60	1 : 40	0.722
7	6	60	1 : 40	0.712
8	5	60	1 : 30	0.716
9	6	60	1 : 40	0.712
10	5	70	1 : 40	0.679
11	6	50	1 : 50	0.709
12	7	60	1 : 50	0.685
13	6	70	1 : 30	0.732
14	6	60	1 : 40	0.711
15	7	50	1 : 40	0.636
16	5	50	1 : 40	0.668
17	6	50	1 : 30	0.764

由表 3 可知: 模型中一次项 X_1 对色素提取效果达到极显著水平 ($P<0.01$), X_2 对色素提取效果达到显著水平 ($P<0.05$); 模型中交互项 X_2X_3 对色素提取效果达到极显著水平 ($P<0.01$), X_1X_3 对色素提取效果达到显著水平 ($P<0.05$); 模型中二次项 X_1^2 和 X_3^2 对色素提取效果达到极显著水平 ($P<0.01$)。枫香黑色素提取工艺回归模型显著性检验 $P<0.000\ 1$, 说明该模型达到极显著水平; 枫香黑色素提取工艺回归模型失拟项检验=0.386 9>0.05, 可以认为所选提取二次回归模型与实际试验拟合性充分模型失拟不显著。试验模型决定系数 $R^2=0.978\ 6$, 表明方程的拟合度良好, 可用于预测枫香黑色素提取效果。离散系数 (CV 值) 为 1.014 6%, 表明试验的可靠性较高。综上所述, 回归模型拟合程度良好, 试验误差小, 能够准确的分析和预测枫香黑色素提取工艺, 说明试验操作可信度高。由回归系数显著性表明: 在所取因素水平范围内, 各因素对枫香黑色素提取工艺影响的顺序为: 提取时间>提取温度>料液比。

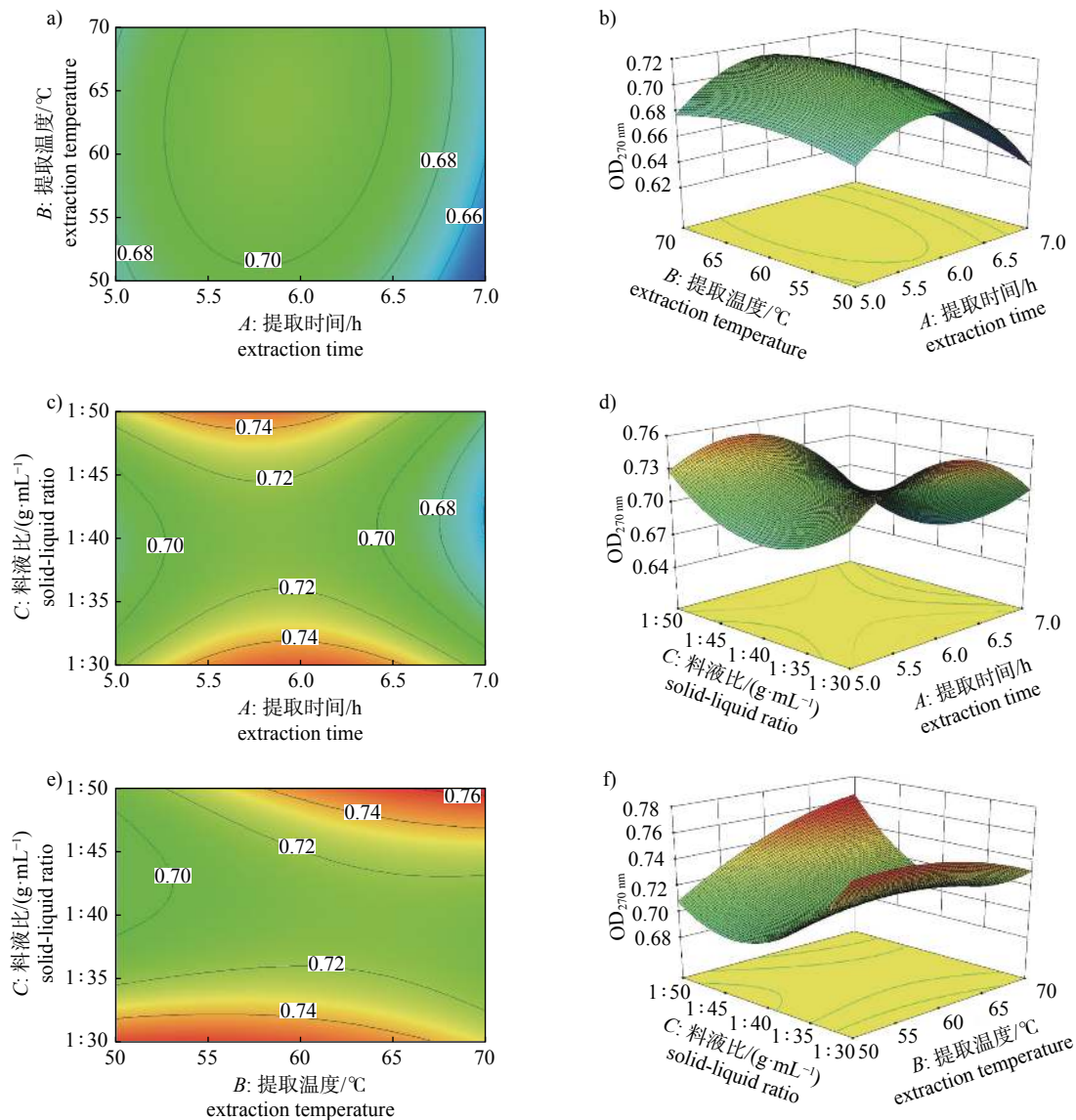
表 3 枫香黑色素提取效果回归模型方差分析表						
Tab. 3 Analysis of variance analysis of degree of the effect of pigments						
来源 source	平方和 sum of squares	自由度 df	均方 mean square	F值 F-value	P值 P-value	显著性 significant
模型 model	0.016 50	9	0.001 834	35.628 151	<0.000 1	**
X_1	0.001 19	1	0.001 194	23.199 871	0.001 9	**
X_2	0.000 50	1	0.000 504	9.783 439	0.016 7	*
X_3	0.000 13	1	0.000 128	2.492 323	0.158 4	
X_1X_2	0.000 15	1	0.000 150	2.923 770	0.131 0	
X_1X_3	0.000 40	1	0.000 403	7.824 212	0.026 6	*
X_2X_3	0.001 71	1	0.001 708	33.196 400	0.000 7	**
X_1^2	0.006 63	1	0.006 630	128.832 243	<0.000 1	**
X_2^2	0.000 36	1	0.000 362	7.036 818	0.032 8	*
X_3^2	0.006 05	1	0.006 046	117.471 641	<0.000 1	**
残差 residual	0.000 36	7	0.000 051			
失拟项 lack of fit	0.000 18	3	0.000 060	1.310 795	0.386 9	ns
纯误差 pure error	0.000 18	4	0.000 045			
总方差 total variance	0.016 86	16				

注: “*”表示差异显著, $P<0.05$; “**”表示差异极显著, $P<0.01$; ns. 无显著差异。
Note: “*” indicates significant difference, $P<0.05$; “**” indicates extremely significant difference, $P<0.01$; ns. no significant difference.

2.2.2 最佳条件的确定和回归模型的验证

响应面图中越陡峭显示该因素对其影响越明显, 反之, 越平坦则影响不明显^[28]。由图 2a、2b 可知: 提取时间和提取温度交互作用的等高线图呈圆形, 响应面曲面坡度较平缓, 表示两因素

交互作用不显著; 而图 2c、2d 中提取时间和料液比、图 2e、2f 中提取温度和料液比交互作用的等高线图和响应面曲面呈马鞍形, 表示两因素交互作用显著^[29]。在提取温度和料液比交互作用的等高线图中, 等高线沿料液比的增加方向密集、



注: a)、c) 和 e) 为各两因素交互作用对色素提取率的等高线图, 图上数值为 $OD_{270\text{ nm}}$; b)、d) 和 f) 为各两因素交互作用对色素提取率的三维响应面图。

Note: a), c) and e) are contour plots of the interaction of the two factors on the extraction rate of pigment, and the data on the contour plots are $OD_{270\text{ nm}}$; b), d) and f) are three-dimensional response surface curve of the interaction of the two factors on the extraction rate of pigment.

图 2 各两因素交互作用对色素提取率的响应面

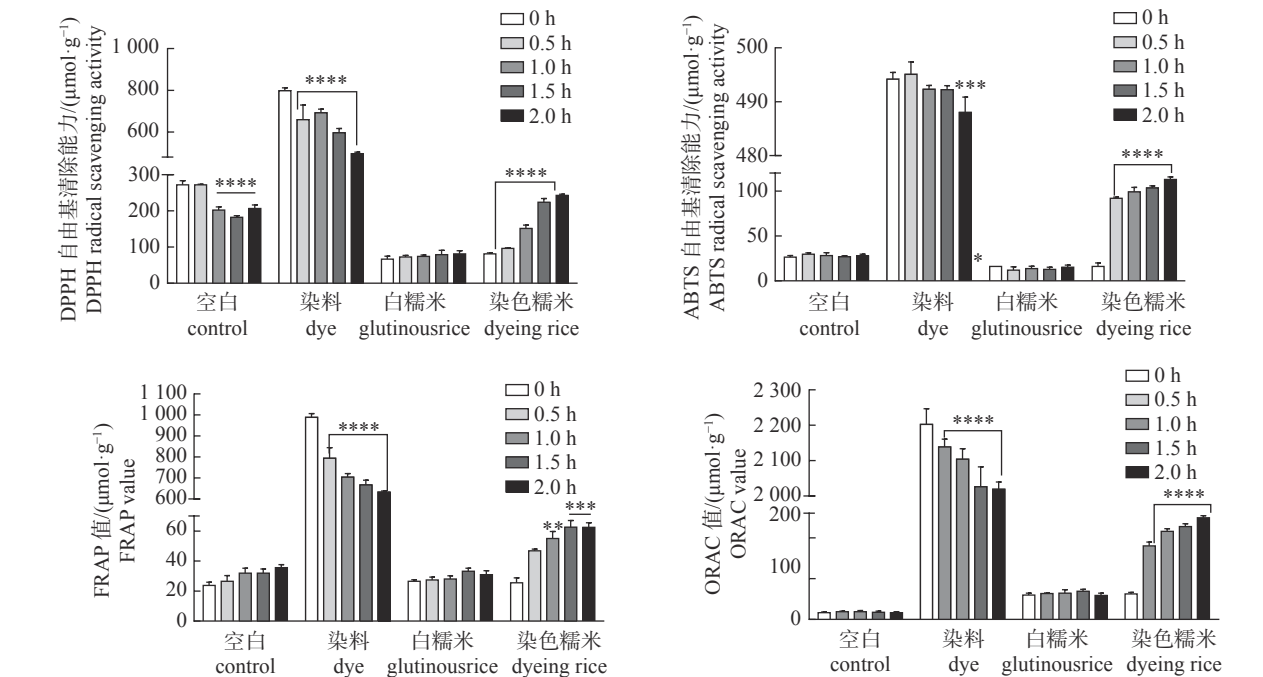
Fig. 2 The response surface interaction of various factors to the yield of pigments

降低方向稀疏, 说明增加料液比会更显著地影响色素提取效果。同理, 增加提取时间会更显著地影响色素提取效果。

二次回归模型拟合结果显示: 提取时间 5.74 h、提取温度 69.55 $^{\circ}\text{C}$ 、料液比 1 : 49.98 (g/mL) 时预测吸光度为 0.766 3。为了验证模型的有效性并考虑到实际情况, 将最佳工艺条件改进为提取时间 6 h、提取温度 70 $^{\circ}\text{C}$ 、料液比 1 : 50 (g/mL), 并在此条件下的 6 次重复试验结果表明吸光度为 0.734, 与预测值接近, 说明模型准确可靠。

2.3 枫香黑米饭的抗氧化活性评价

由图 3 可知: 枫香染料具有较强的抗氧化活性, 随着染色时间的增加, 其抗氧化活性逐渐降低, 其 DPPH、ABTS、FRAP 和 ORAC 活性显著降低 ($P < 0.001$), 而糯米经染色后其抗氧化活性极显著增加 ($P < 0.001$)。此外, 空白组 (空白水溶液、白糯米) 的 ABTS、FRAP 和 ORAC 变化均无显著性差异 ($P > 0.05$)。因此, 糯米在染色后可以从枫香黑色素中得到较强的抗氧化能力, 且差异极显著 ($P < 0.001$)。



注: “*”表示不同组之间不同时间段与初始时间 (0 h) 之间的差异性 (* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, **** $P<0.0001$)。
Note: “*” in the figure indicates the difference between different time and the initial time in each group (* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, **** $P<0.0001$).

图 3 样品的抗氧化活性
Fig. 3 Antioxidant activity of samples

2.4 枫香黑米饭感官评价及其微观形貌分析

2.4.1 枫香黑米饭染色感官评价

由表 4 可知: 染色糯米饭的气味和滋味、弹性和粘性以及总体评分均显著低于白米饭 ($P<0.05$)。

表 4 米饭感官评定结果 Tab. 4 Results of sensory evaluation for rice		
感官评价指标 index of sensory evaluation	白米饭 glutinous rice	染色米饭 dyeing rice
气味 flavor	17.82±0.60 a	13.64±1.50 b
颜色 color	12.00±1.48 a	11.18±1.72 a
光泽 luster	7.09±0.70 a	7.09±0.54 a
完整性 integrity	6.36±0.50 a	6.18±0.60 a
粘性 viscosity	6.73±1.01 a	5.73±1.01 b
弹性 springiness	6.55±0.69 a	5.55±0.69 b
软硬度 hardness	4.91±1.50 a	5.91±1.04 a
滋味 taste	16.45±1.29 a	11.82±1.94 b
冷饭质地 texture of cold cooked rice	3.36±0.67 a	3.36±1.12 a
总分 total score	81.27±3.72 a	70.45±2.42 b

注: 同行中不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上具有显著性差异。
Note: Different letters mean significant difference in the same line ($P<0.05$).

2.4.2 枫香黑米饭的 SEM 分析

(1) 枫香黑色素微观形貌

在 SEM 扫描电镜下观察枫香黑色素的形貌

如图 4 所示: 枫香黑色素颗粒不规则且多样, 呈现棉絮状、扁片状等。

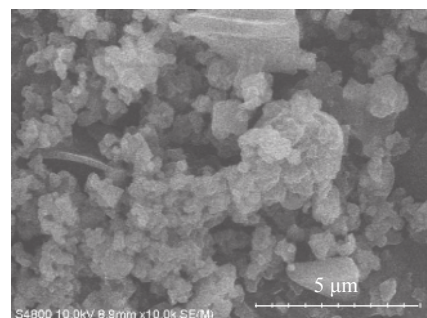
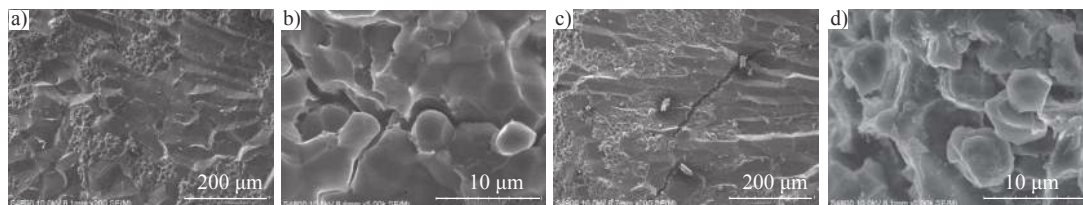


图 4 枫香黑色素颗粒微观结构 (10 000×)
Fig. 4 Microstructure of melanin from *Liquidambar formosana*

(2) 生糯米染色前后微观形貌变化

未染色糯米 (简称“白糯米”) 和枫香树叶黑色素染色糯米 (简称“黑糯米”) 的微观形态见图 5。由图 5c 可以明显看出胚乳细胞颗粒表面有碎屑, 可能是淀粉粒与色素发生相互作用所致。由图 5b、5d 可看出: 淀粉粒表面由光滑变成皱缩、凹凸不平、粗糙且不均匀, 且淀粉粒尺寸明显增大。



注: a) 未染色糯米胚乳细胞微观结构 (200×); b) 未染色糯米胚乳细胞微观结构 (5 000×); c) 染色糯米胚乳细胞微观结构 (200×); d) 染色糯米胚乳细胞微观结构 (5 000×)。

Note: a) microstructure of albuminous cells of undyed rice (200×); b) microstructure of albuminous cells of undyed rice (5 000×); c) microstructure of albuminous cells of dyeing rice (200×); d) microstructure of albuminous cells of dyeing rice (5 000×).

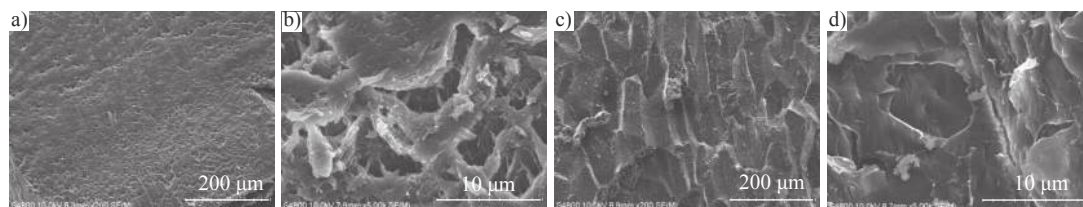
图 5 染色前后生糯米胚乳细胞表面微观结构

Fig. 5 Microstructure of albuminous cells of raw glutinous rice before and after dyeing

(3) 糊化糯米染色前后微观形貌变化

糊化白糯米和糊化黑糯米的微观形态见图 6。由图 6c 可看出: 糯米胚乳细胞结构仍处于完整未分解状态, 而图 6a 无胚乳细胞结构, 说明相同处理条件的白糯米糊化度明显高于黑糯米, 因此可以推断色素对淀粉粒的附着包埋会降低糯米

粒的吸水作用, 阻碍淀粉分子散开, 减慢糊化进程。由图 6d 可以看出: 黑糯米的淀粉粒糊化是混乱无序的, 糯米胚乳细胞截面孔洞大小不一, 裂缝为撕裂形态, 与白糯米形成整齐的网络状结构完全不同。



注: a) 未染色糊化糯米胚乳细胞微观结构 (200×); b) 未染色糊化糯米胚乳细胞微观结构 (5 000×); c) 染色糊化糯米胚乳细胞微观结构 (200×); d) 染色糊化糯米胚乳细胞微观结构 (5 000×)。

Note: a) microstructure of albuminous cells of gelatinized undyed rice (200×); b) microstructure of albuminous cells of gelatinized undyed rice (5 000×); c) microstructure of albuminous cells of gelatinized dyeing rice (200×); d) microstructure of albuminous cells of gelatinized dyeing rice (5 000×).

图 6 染色前后糊化糯米胚乳细胞表面微观结构

Fig. 6 Microstructure of albuminous cells of gelatinized glutinous rice before and after dyeing

3 讨论

枫香黑色素作为天然色素具有广阔的开发利用前景。ZHANG 等^[30]研究发现: 枫香树叶提取物中含有丰富的酚类和单宁物质, 其 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力分别为 IC_{50} 12.04 $\mu\text{g/mL}$ 和 IC_{50} 17.11 $\mu\text{g/mL}$; WANG 等^[31]对枫香叶提取物进行抗氧化性研究发现: 所有提取物均有较高的抗氧化活性, 且抗氧化活性强弱为: 乙醇提取物>水提取物>丙酮提取物。本研究表明: 枫香黑色素具有较强的抗氧化活性, 其对 DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力、 Fe^{3+} 还原能力和氧自由基吸收能力分别为 (798.516±13.544)、(494.664±0.957)、(993.000±20.418) 和 (2202.293±51.375) $\mu\text{mol/g}$, 与上述研究结果一致。本研究还

发现: 糯米经染色后, 其抗氧化能力随着染色时间的增加而极显著增加 ($P<0.001$), 枫香色素染制糯米不仅对糯米赋色, 还赋予糯米抗氧化功效。少数民族“五彩饭”中其他颜色可能存在类似功效, 还需进行后续研究。

枫香黑米饭感官评价结果表明: 糯米经枫香染色后, 对糯米饭的感官品质有一定影响, 其感官评分与白糯米饭相比显著下降 ($P<0.05$), 特别是气味和滋味, 需要进一步改进。原因可能是枫香植物中具有独特的气味物质成分, 部分人不能接受其气味和风味。因此, 对枫香黑米饭染色工艺进行优化, 特别是对染色糯米饭风味物质的研究尤其重要, 染色米饭中影响感官品质气味和滋味的问题亟待解决。本研究还发现: 染色米饭的粘性和弹性也显著下降 ($P<0.05$), 且染色米饭的

糊化程度明显较白米饭低,表明多酚类物质与淀粉的结合会显著降低淀粉的糊化及消化^[32-34]。枫香黑色素的吸附导致黑糯米在相同处理条件下的糊化度较低,从而影响其粘性和弹性,因此,后续研究需考虑如何避免此情况引起的染色糯米饭感官品质下降。

前人主要通过多酚或黄酮类物质与淀粉或蛋白之间的相互作用对天然色素进行研究。徐塬等^[20-22]对乌饭树叶色素对大米蛋白和淀粉的相互作用进行研究,认为乌饭树叶色素与大米蛋白之间以疏水作用和氢键作用进行结合。刘立增等^[35]研究发现:羟基红曲红色素分子与淀粉颗粒间的吸附是以氢键为主的物理吸附。AMOAKO等^[36]研究发现:直链淀粉和聚合原花青素之间形成Ⅱ型半结晶Ⅴ型包合物。TAKAHAMA等^[37]在研究淀粉与花青素—儿茶素色素的相互作用中发现:淀粉与多酚络合物的疏水作用可能会抑制淀粉消化。枫香黑色素属于多酚类物质,其对糯米的染色与糯米淀粉和蛋白质等物质的相互作用存在类似情况,但目前针对“五彩饭”中枫香色素对糯米的染色作用研究鲜见报道。本研究用枫香对糯米进行染色,通过观察其微观结构确定其与色素发生了相互作用,为后期与淀粉和蛋白互作的基础。扫描电镜发现:经染色后糯米淀粉粒由表面光滑变为皱缩、凹凸不平、粗糙且不均匀,在同一放大倍数下,糯米胚乳细胞中淀粉粒粒径明显增大,这一现象与刘立增等^[35]的研究结果一致。同时,还发现色素吸附会影响淀粉的糊化,糊化程度降低,导致淀粉粒糊化状态由三维网络状结构变为混乱无序的撕裂状态,原因可能是色素的吸附影响了蒸制过程中淀粉的吸水作用,阻碍淀粉分子散开,使糊化进程减慢,但在此过程中分子是如何推动这些现象的发生亟待深入研究。

4 结论

提取枫香黑色素的最佳提取工艺为提取温度70℃、提取时间6h、料液比1:50(g/mL),此条件下枫香黑色素的吸光度可达0.734。枫香黑色素具有较强的抗氧化活性,糯米在染色后可以从枫香黑色素中获得较强的抗氧化性。染色对糯米的感官品质有一定影响,特别是气味和滋味。糯米淀粉粒与色素发生相互作用,导致淀粉粒形

态改变,尺寸增大,染色后糯米糊化度降低。

[参考文献]

- [1] LUO Z D, GUAN H D, ZHANG X P, et al. Photosynthetic capacity of senescent leaves for a subtropical broadleaf deciduous tree species *Liquidambar formosana* Hance[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6323. DOI: 10.1038/s41598-017-06629-7.
- [2] 刘竹枝, 夏梦, 陆宽, 等. 黔西南南龙布依古寨4种染食植物研究进展[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(8): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2017.08.002.
- [3] 袁惠. 枫香树叶化学成分及质量标准研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [4] 覃勇荣, 梁严丹, 刘旭辉. 枫叶食用黑色素的提取及工艺条件优化[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 177. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2016.12.036.
- [5] 方玉梅, 张萍, 王毅红, 等. 黔产枫香树叶黑色素的生物活性研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(14): 36. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2015.14.010.
- [6] 谢跃生, 郑小军, 郑丽蓉, 等. 枫香树叶中某些水溶性微量元素的分析[J]. 广西师院学报(自然科学版), 2000, 17(3): 5. DOI: 10.16601/j.cnki.issn1001-8743.2000.03.002.
- [7] 郑毅, 张青. 江西野生枫香活性成分提取及鞣质含量研究[J]. 江西化工, 2004(2): 99. DOI: 10.14127/j.cnki.ji-angxihuagong.2004.02.024.
- [8] CARLA D C J, CARLOS S F, HE J, et al. Characterisation and preliminary bioactivity determination of *Berberis boliviensis* Lechler fruit anthocyanins[J]. Food Chemistry, 2011, 128(3): 717. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.03.094.
- [9] MARYAM A, SEPIDEH H, ZAHRA-SADAT A. Optimization of total phenol and anthocyanin extraction from the peels of eggplant (*Solanum melongena* L.) and biological activity of the extracts[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 15. DOI: 10.1007/s11694-019-00241-1.
- [10] KHALIFA I, XIA D, DUTTA K, et al. Mulberry anthocyanins exert anti-AGEs effects by selectively trapping glyoxal and structural-dependently blocking the lysyl residues of β -lactoglobulins[J]. Bioorganic Chemistry, 2020, 96: 103615. DOI: 10.1016/j.bioorg.2020.103615.
- [11] MOHAMMADI P P, FAKHRI S, ASGARY S, et al. The signaling pathways, and therapeutic targets of antiviral agents: focusing on the antiviral approaches and clinical perspectives of anthocyanins in the management of viral diseases[J]. Frontiers in Pharmacology, 2019, 10: 1207. DOI: 10.3389/fphar.2019.01207.
- [12] GRACE M H, XIONG J, ESPOSITO D, et al. Simultaneous LC-MS quantification of anthocyanins and non-anthocyanin phenolics from blueberries with widely divergent profiles and biological activities[J]. Food Chemistry, 2019, 277: 336. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.10.101.
- [13] SANG J, ZHANG Y, SANG J, et al. Anthocyanins from

- Nitraria tangutorum*: qualitative and quantitative analyses, antioxidant and anti-inflammatory activities and their stabilities as affected by some phenolic acids[J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2019, 13: 421. DOI: [10.1007/s11694-018-9956-4](https://doi.org/10.1007/s11694-018-9956-4).
- [14] OJEDA D, JIMÉNEZ-FERRER E, ZAMILPA A, et al. Inhibition of angiotensin convertin enzyme (ACE) activity by the anthocyanins delphinidin- and cyanidin-3-O-sambubiosides from *Hibiscus sabdariffa*[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 127: 7. DOI: [10.1016/j.jep.2009.09.059](https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.09.059).
- [15] ODETTE M S, TAFADZWA N, TONY K M, et al. Blackcurrant anthocyanins modulate CCL11 secretion and suppress allergic airway inflammation[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2017, 61(9): 1600868. DOI: [10.1002/mnfr.201600868](https://doi.org/10.1002/mnfr.201600868).
- [16] 邹青飞, 吴跃中, 杨士花, 等. 仙人掌果色素的提取工艺优化及体外抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 33. DOI: [10.3969/j.issn.1005-6521.2018.13.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6521.2018.13.007).
- [17] 黄建蓉, 李慕紫, 陈颖蕾, 等. 鸚尾科红葱红色素的提取及抗氧化活性评价[J]. 食品工业, 2017, 38(7): 75.
- [18] 张莉, 陈燕仪, 钟红梅, 等. 响应面法优化枫香树叶黑色素微波法提取工艺及其稳定性研究[J]. 食品科技, 2016, 41(11): 190. DOI: [10.13684/j.cnki.spkj.2016.11.043](https://doi.org/10.13684/j.cnki.spkj.2016.11.043).
- [19] 谢宇奇, 莫春风, 奚文权. 枫香黑色素粗产品清除 DPPH 自由基活性研究[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 83. DOI: [10.16210/j.cnki.1007-7561.2016.05.019](https://doi.org/10.16210/j.cnki.1007-7561.2016.05.019).
- [20] 徐源, 王立. 乌饭树叶色素对大米蛋白的染色机理[J]. 中国食品学报, 2016, 16(4): 58. DOI: [10.16429/j.1009-7848.2016.04.009](https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2016.04.009).
- [21] 徐源, 王立, 钱海峰, 等. 乌饭树叶色素与大米蛋白相互作用的研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 121. DOI: [10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.12.018](https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.12.018).
- [22] 徐源. 乌饭树叶提取物与大米蛋白和淀粉相互作用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- [23] 谢宇奇, 零学仕, 周作树, 等. 枫香树叶黑色素粗产品提取工艺的优化[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 348. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.109](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.109).
- [24] BRAND-WILLIAMS W, CUVELIER M E, BERSET C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity[J]. LWT-Food science and Technology, 1995, 28(1): 25. DOI: [10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).
- [25] ARNAO M B, CANO A, ACOSTA M. The hydrophilic and lipophilic contribution to total antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2001, 73(2): 239. DOI: [10.1016/S0308-8146\(00\)00324-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00324-1).
- [26] KATALINIĆ V, MILOŠ M, MODUN D, et al. Antioxidant effectiveness of selected wines in comparison with (+)-catechin[J]. Food Chemistry, 2004, 86(4): 593. DOI: [10.1016/j.foodchem.2003.10.007](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.10.007).
- [27] OU B X, HUANG D J, HAMPSCH-WOODILL M, et al. Analysis of antioxidant activities of common vegetables employing oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays: a comparative study[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2002, 50(11): 3122. DOI: [10.1021/jf0116606](https://doi.org/10.1021/jf0116606).
- [28] XU D P, ZHENG J, ZHOU Y, et al. Ultrasound-assisted extraction of natural antioxidants from the flower of *Limonium sinuatum*: optimization and comparison with conventional methods[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 552. DOI: [10.1016/j.foodchem.2016.09.013](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.013).
- [29] 赵存朝, 王雪峰, 黄梦, 等. 贯筋藤酶解山羊乳酪蛋白糖巨肽的工艺研究[J]. 中国乳品工业, 2017, 46(9): 25. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2230.2018.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2230.2018.09.005).
- [30] ZHANG L, ZHU M F, TU Z C, et al. α -Glucosidase inhibition, anti-glycation and antioxidant activities of *Liquidambar formosana* Hance leaf, and identification of phytochemical profile[J]. South African Journal of Botany, 2017, 113: 239. DOI: [10.1016/j.sajb.2017.08.010](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.08.010).
- [31] WANG K, PAN Y M, WANG H S, et al. Antioxidant activities of *Liquidambar formosana* Hance leaf extracts[J]. Medicinal Chemistry Research, 2010, 19(2): 166. DOI: [10.1007/s00044-009-9181-0](https://doi.org/10.1007/s00044-009-9181-0).
- [32] XIE F, HUANG Q, FANG F, et al. Effects of tea polyphenols and gluten addition on *in vitro* wheat starch digestion properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 525. DOI: [10.1016/j.ijbio-mac.2018.12.224](https://doi.org/10.1016/j.ijbio-mac.2018.12.224).
- [33] SUN L J, MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: a review[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2020, 60(4): 541. DOI: [10.1080/10408398.2018.1544883](https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1544883).
- [34] GUO Z B, ZHAO B B, CHEN J, et al. Insight into the characterization and digestion of lotus seed starch-tea polyphenol complexes prepared under high hydrostatic pressure[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124992. DOI: [10.1016/j.foodchem.2019.124992](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124992).
- [35] 刘立增, 孟宪昉, 郭俊杰, 等. 红曲红色素在淀粉颗粒表面吸附机制研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(14): 41. DOI: [10.3969/j.issn.1005-6521.2015.14.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6521.2015.14.011).
- [36] AMOAKO D B, AWIKA J M. Resistant starch formation through intrahelical V-complexes between polymeric proanthocyanidins and amylose[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 326. DOI: [10.1016/j.foodchem.2019.01.173](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.173).
- [37] TAKAHAMA U, YAMAUCHI R, HIROTA S. Interactions of starch with a cyanidin-catechin pigment (vignacyanidin) isolated from *Vigna angularis* bean[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2600. DOI: [10.1016/j.foodchem.2013.04.065](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.065).

责任编辑: 何承刚