

车近松,李施达,邵金泉,等.传统调味品仙居麦酱的抗氧化功能研究[J].华中农业大学学报,2025,44(5):208-217.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.021

传统调味品仙居麦酱的抗氧化功能研究

车近松¹,李施达¹,邵金泉²,李秀娟¹

1.华中农业大学食品科学技术学院,武汉 430070; 2.荆门市东宝区仙居麦酱产业协会,荆门 448000

摘要 为挖掘传统调味品仙居麦酱的功能性质,采用高速匀浆法提取仙居麦酱中的抗氧化成分,优化提取条件,对不同作坊和不同贮藏时间的仙居麦酱进行抗氧化能力评价。结果显示:最佳提取工艺参数为料液比1:35(g/mL),乙醇体积分数60%,提取时间6 min,转速8 800 r/min。不同作坊的仙居麦酱提取物以每克麦酱相当于Vc的抗氧化能力表示,DPPH自由基、OH自由基、ABTS自由基清除能力分别为3.47~7.30、55.32~70.75、24.32~42.85 mg/g,FRAP值为5.8~11.3 μmol/(L·g)。随着储藏时间的延长,仙居麦酱的抗氧化能力显著增强。结果表明,仙居麦酱具有较强的抗氧化活性,拥有向功能型调味品转型并释放巨大价值的深厚潜力。

关键词 仙居麦酱;抗氧化;调味品;高速匀浆法

中图分类号 TS254.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0208-10

随着健康消费理念的深化,调味品产业正经历从单一风味调节向多功能整合的转型。作为这一变革的核心载体,功能性调味品备受关注。目前,功能性调味品的开发主要通过在调味品中添加微量营养素来进行营养功能强化^[1-2],但该方法存在局限:消费者对非天然标签的排斥导致市场推广受阻;化学修饰的营养素可能改变产品的感官特性;人工添加的营养素可能引发基质稳定性问题。因此,功能调味品需要突破传统营养强化的技术瓶颈,转而深入挖掘天然发酵体系中的功能活性成分。传统发酵的食醋^[3-4]和酱油^[5]已经被证明具有抗氧化、抗炎、抗癌和抗疲劳等功能活性。

研究表明,摄入48 g/d全谷物可显著降低心血管疾病、癌症和2型糖尿病的发病风险^[6]。这些健康效益主要归因于全谷物中膳食纤维结合的抗氧化剂在肠道内缓慢而持续的释放机制^[7]。与精制谷物相比,全谷物不仅膳食纤维含量高出3倍以上,而且富含多种抗氧化成分^[8]。例如,多酚类物质(如阿魏酸、香草酸等)可以通过抑制COX-2酶活性进而减少前列腺素的合成,发挥其抗炎作用^[9]。然而,值得注意的是,全谷物中含有多种抗营养因子,这些因子可能会降低其营养品质,影响人体对营养物质的吸收利用。在众多生物改性技术中,发酵被认为是最有效

且安全的处理方法之一。在发酵过程中,底物中的抗营养因子可被微生物利用和转化,进而生成多种功能性和未知化合物^[10-12],包括生物活性肽、胞外多糖、γ-氨基丁酸、酚类化合物和短链脂肪酸等。这些成分赋予发酵食品多种生理功能,如抗氧化^[13-14]、抗炎^[15]和降低胆固醇^[16]等功效。

仙居麦酱是以精选小麦为主料,配以鲜红辣椒、花椒、食盐等辅料,经蒸煮、发酵、晾晒、研磨、搅拌、二次发酵等28道精细工序精制而成。其独特之处在于遵循自然节律,仅在秋分时节开始制作,并需经过180 d以上的自然发酵过程,最终形成稀稠适中、酱紫透红、香味醇厚、风味独特的优质酱品。从元末至今,仙居麦酱不仅承载着丰富的地方饮食文化,更成为推动区域经济发展的重要引擎。目前,仙居麦酱已成功获批国家地理标志产品认证,被列入荆门市非物质文化遗产名录,其产业化发展有效带动了当地农民增收,成为乡村振兴的特色产业之一。除了作为调味品在烹饪领域的广泛应用,仙居麦酱在民间还被视为一种具有药用价值的外用制剂,常用于治疗皮肤擦伤和动物咬伤,这一传统应用暗示了仙居麦酱可能具有显著的生物活性。

本研究采用高速匀浆法提取仙居麦酱中的抗氧化成分,通过体外抗氧化能力评价优化提取工艺参

收稿日期:2025-03-21

基金项目:湖北省农业科技创新中心创新团队项目(2025-620-000-001-027);仙居麦酱生产关键技术及工艺研发项目(70712213101)

车近松,E-mail:15281885349@163.com

通信作者:李秀娟,E-mail:lixiujuan@mail.hzau.edu.cn

数,评估不同作坊及贮藏时间的仙居麦酱的抗氧化活性,挖掘麦酱潜在的营养和健康功能,助力传统发酵调味品的健康发展和转型升级,提高产品的经济效益,提升消费者健康水平。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

4个作坊(XJ-A、XJ-B、XJ-C、XJ-D)的仙居麦酱成品和3个作坊(XJ-B、XJ-D、XJ-E)不同贮藏时间(新酱、储藏2 a和3 a)的仙居麦酱成品均由湖北省荆门市东宝区仙居麦酱产业协会提供;2,2'-联氮-双-3乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate), ABTS]购自上海源叶有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;甲醇(LC-MS级)和乙腈(LC-MS级)购自德国CNW Technologies GmbH公司;乙酸(LC-MS级)购自美国Fisher Chemical公司;无水乙醇,L-抗坏血酸(L-ascorbic acid, Vc)、硫酸亚铁、水杨酸、过氧化氢、过硫酸钾、三氯化铁(均为分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司;TPTZ溶液(10 mmol/L)购自福州飞净生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Vanquish型超高效液相色谱仪、Orbitrap Exploris 120型高分辨质谱,美国Thermo Fisher Scientific公司;XFH-D型高速分散器,宁波新芝生物科技股份有限公司;VM-800型涡旋振荡器,群安实验仪器有限公司;M200型酶标仪,北京东胜创新生物科技有限公司;PS-60AL型超声仪,深圳市雷德邦电子有限公司;22331型冷冻离心机,德国艾本德有限公司;ME104E/02型分析天平,梅特勒-托利多(上海)有限公司。

1.3 LC-MS分析

选取3个作坊仙居麦酱XJ-B、XJ-C、XJ-D,称取1.0 g置于离心管中,用4 mL 80%乙醇(去离子水配制)进行均质。将均质后的样品于100 W功率下超声处理5 min后,于4 °C、4 000 r/min离心20 min。将上清液移入小试管中,重复提取1次,2次上清液混合并在氮气流下蒸发。最后,用1.5 mL含有0.1%甲酸的去离子水加入到蒸发后的残留物复溶,制好的样品密封保存在-20 °C直到分析。

移取100 μL样品至EP管中,加入400 μL提取液($V_{\text{甲醇}}:V_{\text{乙腈}}=1:1$,含同位素标记内标混合物),涡

旋混匀30 s,冰水浴下超声10 min,-40 °C静置1 h。将样品于4 °C、12 000 r/min离心15 min,取上清液于进样瓶中上机检测。

采用Vanquish超高效液相色谱仪,通过Phenomenex Kinetex C18(2.1 mm×50 mm, 2.6 μm)液相色谱柱对目标化合物进行色谱分离。流动相A为0.1%乙酸于1 L超纯水,流动相B为 $V_{\text{乙腈}}:V_{\text{异丙醇}}=1:1$ 。梯度洗脱(0~0.5 min, 1% B; 0.5~4 min, 1%~99% B; 4~4.5 min, 99% B; 4.5~4.55 min, 99% B~1% B; 4.55~6 min, 1% B);柱温25 °C,进样室温度4 °C,流速0.3 mL/min,进样量2 μL。

Orbitrap Exploris 120质谱仪在控制软件(Xcalibur,版本:4.4, Thermo)控制下进行一级、二级质谱数据采集。详细参数:鞘气流量,50 Arb;辅助气流量,15 Arb;毛细管温度,320 °C;完整质谱分辨率,60 000 ms/ms;分辨率,15 000;碰撞能量,SNCE 20/30/40;喷雾电压,3.8 kV(正)或-3.4 kV(负)。

原始数据经ProteoWizard软件转成mzXML格式后,使用自主编写的R程序包(内核为XCMS)进行峰识别、峰提取、峰对齐和积分等处理,然后与BiotreeDB(V2.1)自建二级质谱数据库匹配进行物质注释,算法打分的Cutoff值设为0.3。

1.4 仙居麦酱抗氧化成分的提取

准确称取仙居麦酱XJ-D 10.00 g于500 mL烧杯中,以一定料液比与一定含量的乙醇混合,利用高速匀浆器在一定转速下提取一定时间。提取液以8 000 r/min离心10 min,取上清液过0.45 μm滤膜,加入与提取剂同含量的乙醇溶液,使其中的提取物质量浓度按原料麦酱的质量计算为10 mg/mL。

以DPPH自由基、OH自由基和ABTS自由基清除率以及铁离子还原能力(FRAP值)为衡量指标,分别对影响提取的因素包括乙醇含量(体积分数)、料液比、提取时间和转速进行优化。在单因素试验结果基础上,选取提取时间、乙醇含量和转速3个因素为自变量,每个因素选取3个水平,按照 $L_9(3^3)$ 正交表开展试验。正交试验因素及水平设计如表1。

在优化条件下,称取不同作坊及不同贮藏时间

表1 正交试验因素水平设计

Table 1 Design of orthogonal test

水平 Level	A 提取时间/min Extraction time	B 乙醇含量/% Ethanol content	C 转速/(r/min) Rotational speed
1	6	30	10 800
2	8	0	6 800
3	10	60	8 800

的仙居麦酱样品,经提取处理后,配制质量浓度为50 mg/mL的样品提取液,备用待测。

1.5 抗氧化能力分析

DPPH自由基清除试验参照何军波等^[17]的方法,OH自由基清除试验参考吕世鑫等^[18]的方法,ABTS自由基清除试验参考侯敏娜等^[19]的方法,FRAP值的测定参考Qie等^[20]和闫峻等^[21]的方法。

麦酱的FRAP值最终结果以等量抗氧化能力(Vc equal antioxidant capacity, VcE)表示, $\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{g})$ 。DPPH、OH、ABTS自由基清除试验结果以IC₅₀值表示, IC₅₀值为降低初始吸光度值50%所需的样品的浓度, IC₅₀值越小, 表示其清除自由基的能力越强, 即抗氧化活性越强。

1.6 数据统计与分析

所有提取与分析测试均进行3次平行试验,结果取3次数据的平均值。采用IBM SPSS Statistics 26进行正交设计和相关性分析,采用Origin 2022软件进行图形制作分析。

2 结果与分析

2.1 仙居麦酱功能性成分

根据现代药理学文献,将鉴定到的918种代谢物进行筛选,共筛选到90种功效物质,功效物质数量较多的类别主要集中在黄酮类、氨基酸、维生素类、脂肪酸类、木脂素、倍半萜。黄酮类物质具有广泛的生物学活性,检出的代谢物中包括槲皮素、儿茶素、山奈酚、异鼠李素等18种;检出的氨基酸含有L-赖氨酸、D-色氨酸等人体必需氨基酸,还有茶氨酸和水苏碱等功能性氨基酸。检出的维生素类包括维生素E、核黄素、烟酸、D-生物素、7-甲基黄嘌呤、维生素A、维生素C,具有抗氧化、维持皮肤和神经健康,促进消化、促进机体的发育生长、预防近视等功效;检出的脂肪酸包括壬二酸、 α -亚麻酸、 γ -亚麻酸、亚油酸、花生四烯酸、二十二碳六烯酸,具有增加血管弹性,降低血液黏稠度,增强机体免疫力、抗菌、抗炎等功效;检出的木脂素包括芥子酸、连翘脂素、芥子碱、去氢二异丁香酚、秦皮素,具有清除自由基、抑制脂质过氧化、抗菌、抗癌和消炎、抗焦虑、改善记忆力等功效;检出的倍半萜有花姜酮、原莪术烯醇、青蒿素、一枝蒿酮酸,具有抗氧化、抗炎、抗菌、抗疟疾等功效。

2.2 高速匀浆法提取条件单因素优化

1)乙醇含量。图1A展示了不同乙醇含量对麦酱提取物体外抗氧化活性的影响。结果表明,DPPH

自由基清除率与乙醇含量呈负相关关系,其清除率从最高值28.23%逐渐降低至10.58%。相比之下, OH自由基、ABTS自由基清除率以及FRAP值均呈现先升高后降低的趋势。其中,OH自由基清除率在乙醇含量80%时达到峰值(35.01%),而ABTS自由基清除率(62.12%)和FRAP值(114.36 $\mu\text{mol}/\text{L}$ Vc当量)则在乙醇含量30%时达到最大值。基于上述试验结果,选择3个乙醇含量0%、30%和60%进行后续试验。

2)料液比。图1B显示了不同料液比对麦酱提取物体外抗氧化活性的影响。4个指标对料液比的变化均未表现出显著差异,相比之下,可以选择1:35 (g/mL)用于后续正交试验,并不纳入正交试验设计因素。

3)提取时间。图1C展示了提取时间对麦酱提取物体外抗氧化活性的影响。DPPH自由基清除率和FRAP值随提取时间呈现先下降后上升的变化趋势,二者均在10 min时达到峰值,分别为29.39%和116.18 $\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{g})$ Vc当量。OH自由基和ABTS自由基清除率则表现为先升高后降低的单峰曲线,其最大值(分别为33.64%、61.97%)均出现在8 min时。基于能耗与提取效果考虑,确定6~10 min进行正交试验。

4)转速。不同转速对麦酱提取物抗氧化能力的影响如图1D所示。随着转速的增加,DPPH、OH、ABTS自由基清除率均先增大后减小,其中DPPH和OH自由基清除率均在转速为8 800 r/min时达到最大,ABTS自由基清除率在转速为4 800 r/min时达到最大;而FRAP值随转速的增加变化不显著,在转速为10 800 r/min时达到最高值。基于上述结果,选择6 800~10 800 r/min进行后续优化。

2.3 正交试验结果

正交试验方案和结果如表2所示。通过直观分析和方差分析对DPPH、OH、ABTS自由基清除率及FRAP值进行综合评价(表3,表4)。直观分析结果表明:对于DPPH和OH自由基清除率,影响因素的主次顺序均为B>C>A,最优工艺组合分别为B₁C₂A₁和B₃C₃A₃;对于ABTS自由基清除率和FRAP值,影响因素顺序则为B>A>C,最优组合分别为B₃C₁A₃和B₃A₂C₁。方差分析进一步验证了上述结果:DPPH和OH自由基清除率均显示因素B的影响最显著($P<0.01$),其中,OH自由基清除率同时受因素C显著影响($P<0.01$);ABTS自由基清除率则

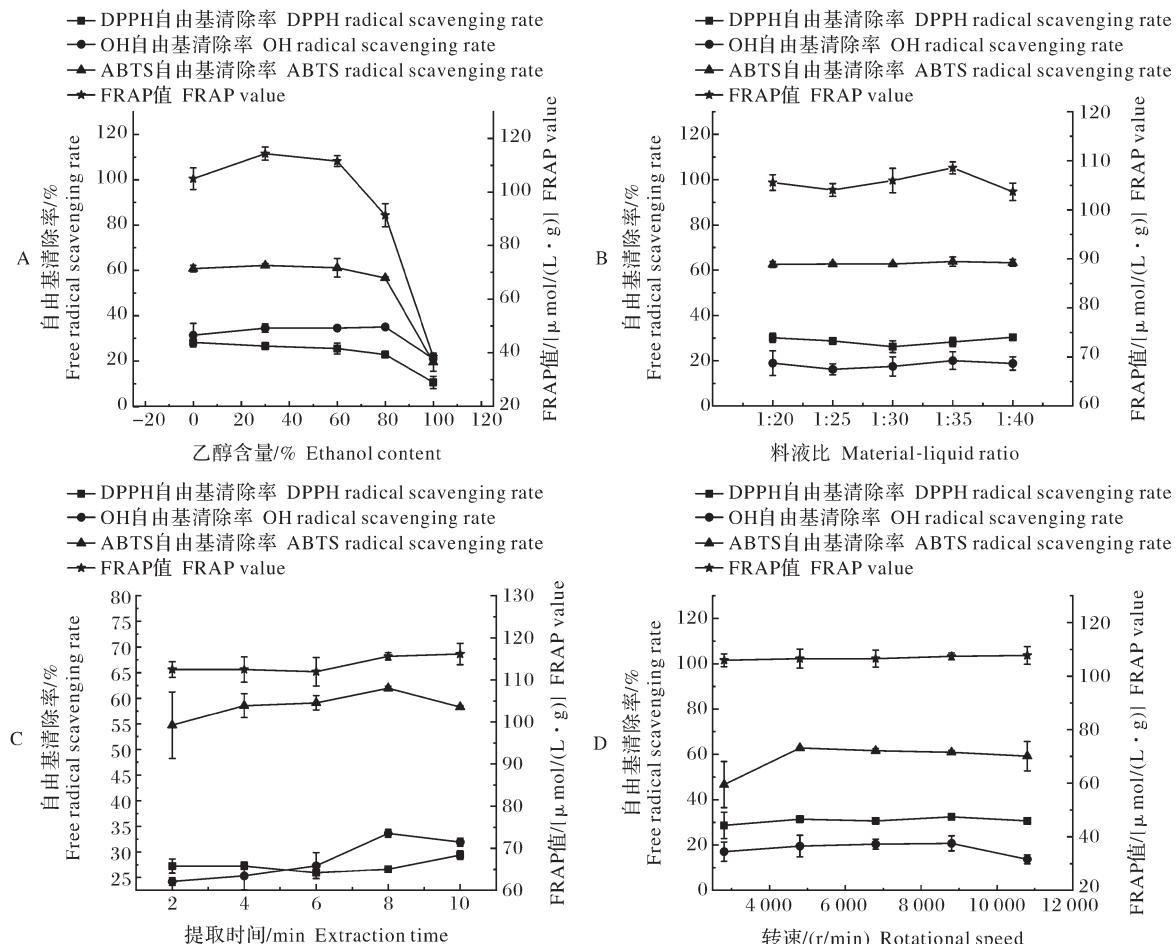


图1 乙醇含量(A)、料液比(B)、提取时间(C)和转速(D)对仙居麦酱提取物体外抗氧化能力的影响

Fig.1 Effect of ethanol content(A), the ratio of material to liquid(B), extraction time(C) and rotational speed(D) on the antioxidant capacity of Xianju wheat paste extracts

表2 正交试验设计方案及结果

Table 2 Orthogonal experimental design and results

试验编号 Number	A	B	C	DPPH自由基清除率/% DPPH free radical scavenging rate	OH自由基清除率/% OH free radical scavenging rate	ABTS自由基清除率/% ABTS free radical scavenging rate	FRAP值/ [μmol/(L·g)] FRAP value
1	1	1	1	28.87±1.51	27.89±0.48	64.53±6.25	118.63±1.09
2	1	2	3	29.75±0.67	20.50±2.09	59.07±4.13	116.30±4.77
3	1	3	2	23.97±1.71	33.70±0.43	65.24±4.07	124.08±2.02
4	2	1	3	27.55±0.75	27.42±1.58	66.14±1.80	116.24±2.15
5	2	2	2	30.18±2.03	18.74±3.23	62.39±3.60	115.80±4.44
6	2	3	1	23.33±1.69	34.11±1.41	69.99±2.49	129.36±5.26
7	3	1	2	28.52±1.21	26.78±1.56	68.28±0.22	117.97±0.58
8	3	2	1	24.48±3.58	20.98±2.08	63.77±0.95	113.74±0.19
9	3	3	3	25.07±0.67	35.15±3.16	72.65±1.64	124.86±3.66

显示因素B具有显著影响($P<0.05$)。所有指标的方差分析结果与极差分析完全一致,证实了分析结果的可靠性。

综上所述,对结果影响最大的因素为乙醇含量,最佳水平为60%;提取时间在各因素的方差分析中

均不显著,出于能耗和提取效率考虑,选取6 min为最佳提取时间;对于转速,虽然从ABTS自由基清除率和FRAP值的直观分析看最优水平为10 800 r/min,但考虑到OH自由基清除率在8 800 r/min时达到极值($P<0.01$),综合功耗和机器产热的影响,

表3 正交试验直观分析
Table 3 Visual analysis by orthogonal test

抗氧化指标 Antioxidant indicators	项目 Item	A	B	C
DPPH自由基清除率 DPPH free radical scavenging rate	k_1	27.53	28.31	25.56
	k_2	27.02	28.13	27.55
	k_3	26.02	24.12	27.46
	R	1.51	4.19	2.00
OH自由基清除率 OH radical scavenging rate	因素主次 Primary and secondary factors		B>C>A	
	优方案 Excellent solution		B ₁ >C ₂ >A ₁	
	k_1	27.36	27.36	27.66
	k_2	26.76	20.07	26.41
ABTS自由基清除率 ABTS radical scavenging rate	k_3	27.63	34.32	27.69
	R	0.87	14.24	1.28
	因素主次 Primary and secondary factors		B>C>A	
	优方案 Excellent solution		B ₃ >C ₃ >A ₃	
FRAP值 FRAP value	k_1	62.95	66.32	66.10
	k_2	66.18	61.74	65.31
	k_3	68.23	69.29	65.95
	R	5.29	7.55	0.79
因素主次 Primary and secondary factors			B>C>A	
	优方案 Excellent solution		B ₃ >C ₁ >A ₃	
	k_1	119.67	117.61	120.58
	k_2	120.47	115.28	119.28
因素主次 Primary and secondary factors	k_3	118.86	126.10	119.13
	R	1.61	10.81	1.44
			B>A>C	
	优方案 Excellent solution		B ₃ >A ₂ >C ₁	

选取转速8 800 r/min为最佳水平。因此,高速匀浆法提取仙居麦酱的最优工艺参数为乙醇含量60%,提取时间6 min,转速8 800 r/min。

2.4 工艺验证

在最优提取工艺条件下进行了3次验证试验。ABTS自由基清除率达到(74.94±1.23)%,显著高于正交试验中的所有组;OH自由基清除率为(31.49±0.99)%,优于正交试验中大部分组;DPPH自由基清除率(23.43±0.91)%和FRAP值[(112.15±1.45) μmol/(L·g) Vc当量]均呈现良好性能。上述结果证实该工艺条件能获得良好的抗氧化性能。3次验证试验结果的相对标准偏差均低于4%,表明该工艺参数具有优异的稳定性和重现性。

2.5 不同新鲜仙居麦酱的抗氧化能力

1)DPPH自由基清除率。分别配制4个作坊新鲜仙居麦酱不同质量浓度(3.125、6.25、12.5、25、50 mg/mL)的提取物,测定其对DPPH自由基的清除率,结果见图2A。同一作坊仙居麦酱样品随着提取物质量浓度的增大,其DPPH自由基清除能力逐渐增大。4个新鲜仙居麦酱样品的DPPH自由基清除率在5%~89%,其中不同作坊新鲜仙居麦酱的抗氧化能力大小顺序为XJ-D>XJ-B>XJ-C>XJ-A。以Vc作为阳性对照,其IC_{DPPH50}值为0.11 mg/mL,新鲜仙居麦酱的IC_{DPPH50}值在15.06~31.70 mg/mL,与Vc进行当量换算,新鲜仙居麦酱清除DPPH自由基能力在3.47~7.30 mg/g。

2)OH自由基清除率。图2B为不同作坊新鲜仙居麦酱提取物对OH自由基的清除效果。提取物的质量浓度越高,清除率越强,质量浓度为50 mg/mL时,OH自由基清除率达81.87%。不同作坊新鲜仙居麦酱的抗氧化能力大小顺序为XJ-B>XJ-A>XJ-C>XJ-D。4种新鲜仙居麦酱对OH自由基的IC₅₀值在14.84~18.98 mg/mL,与Vc(IC₅₀=1.05 mg/mL)进行当量换算,新鲜仙居麦酱清除OH自由基能力在55.32~70.75 mg/g。

3)ABTS自由基清除率。由图2C可以看出,不同作坊新鲜仙居麦酱提取物对ABTS自由基的清除呈剂量依赖关系。当提取物的质量浓度为10 mg/mL时,ABTS自由基清除率最高可达94.67%,不同作坊新鲜仙居麦酱的抗氧化能力大小顺序为XJ-D>XJ-B>XJ-A>XJ-C。Vc对ABTS自由基的IC₅₀值为0.09 mg/mL,以Vc作为阳性对照,4种新鲜仙居麦酱对ABTS自由基的IC₅₀值在2.10~3.70 mg/mL,与Vc进行当量换算,新鲜仙居麦酱清除ABTS自由基能力在24.32~42.85 mg/g。

4)铁离子还原能力。将不同作坊新鲜仙居麦酱提取物质量浓度稀释至10 mg/mL,根据Vc当量得出其FRAP值,FRAP值越大,其抗氧化性越强。由表5可知,不同作坊的新鲜仙居麦酱提取物FRAP值范围为58~113 μmol/(L·g)。新鲜仙居麦酱抗氧化能力的大小顺序为XJ-D>XJ-B>XJ-C>XJ-A,以每克麦酱相当于μmol/L Vc的抗氧化能力来表示,新鲜仙居麦酱的铁离子还原能力在5.80~11.27 μmol/(L·g)。

2.6 不同贮藏时间麦酱的抗氧化能力

仙居麦酱的原辅料主要为麦曲粉、辣椒、花椒、

表4 抗氧化指标方差分析

Table 4 Analysis of variance for antioxidant indicators

抗氧化指标 Antioxidant indicators	来源 Source	第III类平方和 Class III sum of squares	自由度 DF	平均值平方 Average square	F	显著性 Significance
	修正的模型 Modified model	44.835a	6	7.473	1.302	
DPPH自由基清除率 DPPH free radical scavenging rate	截距 Intercept	6 491.353	1	6 491.353	1 131.206	
	A	3.527	2	1.764	0.307	
	B	33.701	2	16.850	2.936	
	C	7.607	2	3.804	0.663	
	误差 Error	11.477	2	5.738		
	总计 Total	6 547.665	9			
	校正的总计 Corrected total	56.312	8			
	修正的模型 Modified model	308.841a	6	51.473	1 264.106	
	截距 Intercept	6 684.260	1	6 684.260	164 154.669	
	A	1.202	2	0.601	14.758	
OH自由基清除率 OH free radical scavenging rate	B	304.416	2	152.208	3 737.987	**
	C	3.223	2	1.611	39.573	**
	误差 Error	0.081	2	0.041		
	总计 Total	6 993.182	9			
	校正的总计 Corrected total	308.922	8			
	修正的模型 Modified model	130.452a	6	21.742	13.379	
	截距 Intercept	38 949.690	1	38 949.690	23 967.313	
	A	42.606	2	21.303	13.109	
ABTS自由基清除率 ABTS free radical scavenging rate	B	86.778	2	43.389	26.699	*
	C	1.068	2	0.534	0.329	
	误差 Error	3.250	2	1.625		
	总计 Total	39 083.393	9			
	校正的总计 Corrected total	133.703	8			
	修正的模型 Modified model	202.023a	6	33.670	4.412	
	截距 Intercept	128 875.682	1	128 875.682	16 888.436	
	A	3.894	2	1.947	0.255	
FRAP值 FRAP value	B	194.340	2	97.170	12.734	
	C	3.789	2	1.894	0.248	
	误差 Error	15.262	2	7.631		
	总计 Total	129 092.966	9			
	校正的总计 Corrected total	217.285	8			

注:*, 显著; **, 极显著。Note: * indicates significant and ** indicates extremely significant.

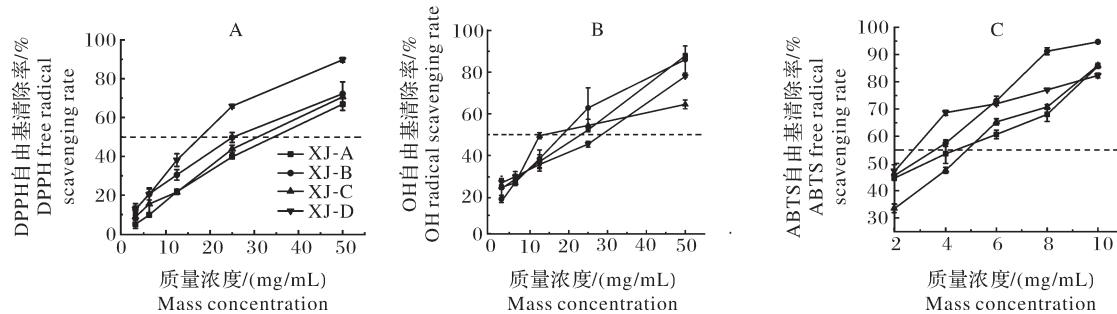


图2 4个作坊仙居麦酱提取物对DPPH自由基(A)、OH自由基(B)和ABTS自由基(C)的清除效果

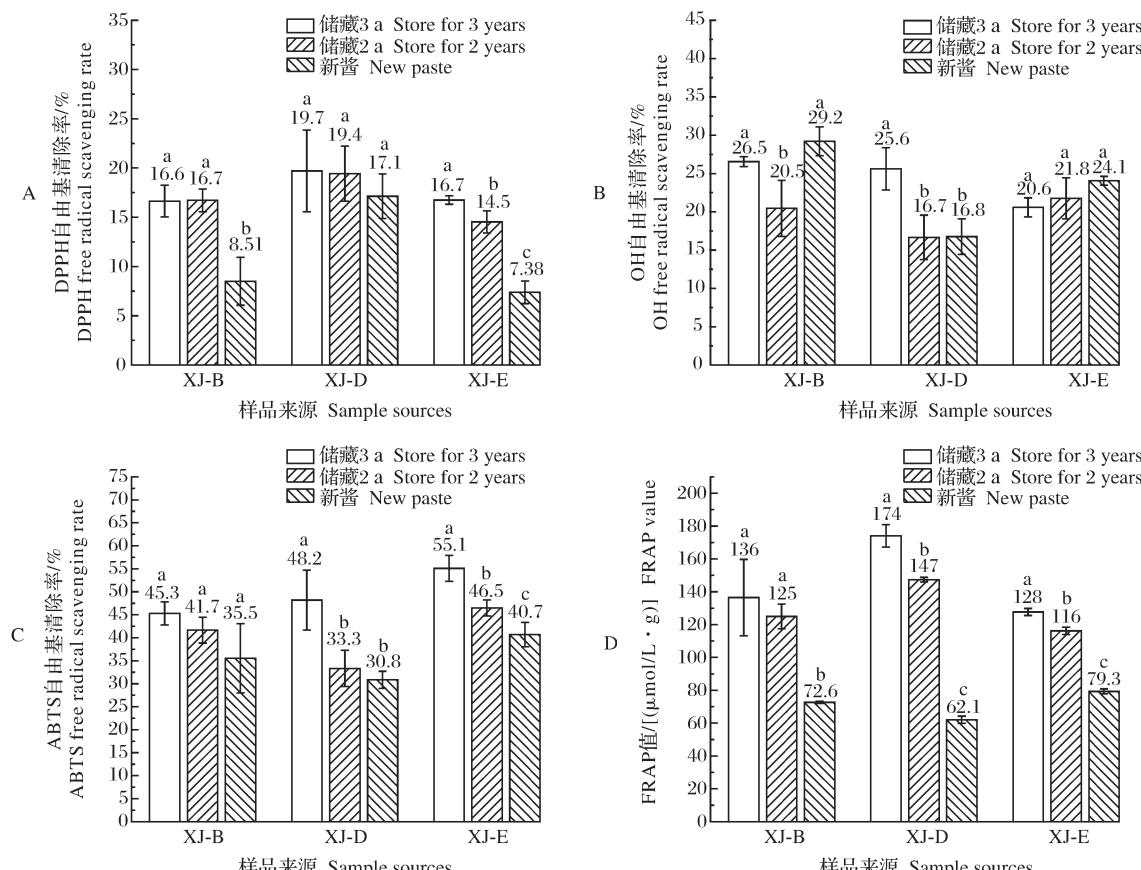
Fig.2 Scavenging effect of extracts from four kinds of Xianju wheat paste on DPPH free radicals(A), hydroxyl free radicals(B) and ABTS free radicals(C)

表5 4个作坊仙居麦酱提取物的抗氧化能力

Table 5 Antioxidant capacity of extracts from four kinds of Xianju wheat paste

编号 Number	$IC_{DPPH50}/$ (mg/mL)	$IC_{OH50}/$ (mg/mL)	$IC_{ABTS50}/$ (mg/mL)	FRAP/ [(μ mol/L·g)]
XJ-A	31.70±1.50a	15.20±0.67a	2.99±0.21a	5.80±0.02a
XJ-B	23.63±3.50b	14.84±2.48a	2.62±0.04b	6.84±0.14b
XJ-C	28.41±0.29a	18.72±1.54b	3.70±0.12c	6.08±0.05a
XJ-D	15.06±0.61c	18.98±1.64b	2.10±0.14d	11.27±0.34c

注:不同小写字母表示不同作坊的仙居麦酱提取物对同一抗氧化指标的 IC_{50} 差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the IC_{50} values of Xianju wheat paste extracts from different workshops for the same antioxidant index ($P<0.05$)。



A:DPPH自由基清除率 DPPH free radical scavenging rate; B:OH自由基清除率 Hydroxyl radical clearance; C:ABTS自由基清除率 ABTS free radical clearance; D:铁离子还原能力 Iron reduction capacity; 不同小写字母表示不同储藏时间的仙居麦酱提取物对同一抗氧化指标差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences in the same antioxidant index of Xianju wheat paste extracts from different storage times ($P<0.05$)。

图3 不同贮藏时间仙居麦酱提取物的抗氧化能力

Fig.3 Antioxidant capacity of Xianju wheat paste extracts under different storage time

3 讨论

随着公众健康意识的持续增强,调味品行业正加速向功能化方向转型升级。功能性调味品不仅能够赋予食品独特的风味体验,更通过整合营养强化、健康干预等属性,满足消费者对膳食健康的多元化需求^[23]。仙居麦酱作为湖北省荆门市东宝区仙居乡

食盐等,在贮藏过程中随着微生物的生长活动,原料中的大分子物质(淀粉、蛋白质、纤维素等)被进一步分解,小分子也得以释放。如图3所示,不同贮藏年份的麦酱的抗氧化能力有所不同,随着贮藏时间的延长,麦酱对ABTS和DPPH自由基清除能力以及FRAP值均不断增强;XJ-D对OH、ABTS自由基清除率以及FRAP值均在贮藏2 a后显著增强($P<0.05$),尤其是FRAP值,储藏3 a的XJ-D比新酱的FRAP值高出1.8倍,由此可见,在研究的样品中,贮藏时间越长的仙居麦酱,其抗氧化能力表现越好。这可能是麦酱在贮藏过程中,在微生物的分解代谢作用下,原料被进一步分解,使得具有抗氧化活性的物质逐渐积累^[22],从而体现出更强的抗氧化能力。

的传统全谷物发酵调味品,其制作历史可追溯至元末,现已被列为国家地理标志产品和荆门市非物质文化遗产,并发展成为当地农民增收的主导产业。该产品以全谷物为原料,经传统工艺发酵后兼具调味与功能特性,不仅能替代酱油、辣椒、盐等常规调味品,更因含有多种生物活性成分被当地居民广泛应用于外伤处理。

采用LC-MS分析从仙居麦酱中共鉴定出90种具有潜在生物活性的化合物,主要包括黄酮类(18种,如槲皮素、儿茶素、山奈酚和异鼠李素等)、氨基酸类、维生素类(包括维生素E、核黄素、烟酸、D-生物素、7-甲基黄嘌呤、维生素A和维生素C等)、木脂素类(如芥子酸、连翘脂素、芥子碱、去氢二异丁香酚和秦皮素等)以及倍半萜类化合物(如花姜酮、原莪术烯醇、青蒿素和一枝蒿酮酸等)。这些物质均被文献报道具有显著的抗氧化活性,表明仙居麦酱作为传统发酵食品具有潜在的抗氧化功能特性。

提取参数对提高提取效率及维持抗氧化活性至关重要。乙醇含量显著影响提取物的抗氧化能力。乙醇含量<50%时,因其高极性,利于水溶性成分(如多糖、黄酮苷)的溶出,但对脂溶性物质(如多酚、类胡萝卜素)提取效率较低;乙醇含量50%~70%时候,极性适中,可有效破坏细胞膜结构并平衡水溶性与脂溶性成分(如游离多酚、黄酮类)的溶解,通常表现出最佳提取效率;而乙醇>70%时候,可能导致蛋白质变性或细胞壁过度脱水,阻碍成分释放,且部分多酚在高乙醇中溶解度降低,反而降低提取率。转速通过机械剪切力影响细胞破碎效率和成分稳定性。过低转速导致细胞破碎不完全,抗氧化成分释放不足;过高转速则可能引起局部升温,使热敏性成分(如维生素C、某些酶类)降解,同时剧烈剪切可能破坏大分子抗氧化物质(如多糖)的结构,降低其活性。提取时间直接影响溶质扩散与成分稳定性。时间过短,提取不完全;时间过长,已溶出的抗氧化成分可能因氧化(如酚类聚合)或酶解而失活,且持续剪切可能破坏分子结构。料液比影响传质效率与溶剂利用率。过低料液比导致溶剂不足,提取不完全;过高料液比则可能稀释提取液,增加浓缩成本,并加速部分成分(如多酚)的氧化降解。在仙居麦酱长期存放过程中,微生物通过持续代谢作用产生细菌素等代谢产物,这些物质不仅能够有效抑制腐败菌的生长繁殖,还可能显著提升体系的抗氧化活性;同

时,蛋白质和多糖在酶或微生物作用下逐渐水解为小分子多肽、寡糖等,这些小分子物质可能具有更强的自由基清除能力。

本研究采用高速匀浆法对仙居麦酱的抗氧化成分进行提取,通过单因素试验结合正交试验优化工艺参数。结果显示,最佳提取条件为料液比1:35(g/mL)、乙醇体积分数60%、提取时间6 min、转速8 800 r/min。对4家代表性作坊样品的分析表明,其新鲜仙居麦酱的抗氧化能力以Vc当量计分别为:DPPH自由基清除能力3.47~7.30 mg/g,羟基自由基清除能力55.32~70.75 mg/g,ABTS自由基清除能力24.32~42.85 mg/g,FRAP值5.8~11.3 μmol/(L·g)。贮藏时间对产品抗氧化活性具有显著影响。针对1~3 a陈酿样品的分析显示,ABTS和DPPH自由基清除能力及FRAP值均随贮藏年限增加呈正向累积趋势。其中,2个贮藏2 a的样品DPPH自由基清除率和FRAP值显著增强,其中1个样品的FRAP值比新鲜酱高出1.8倍,表明陈化可能通过持续的生物转化作用提升其抗氧化潜能。

与其他发酵调味品相比,仙居麦酱展现出显著优势。Verzelloni等^[24]报道传统香醋的FRAP和ABTS自由基清除能力的抗氧化当量分别为2.185和2.98 mg/mL;冯拓等^[25]测得黑豆酱油还原力为12.08 mg/mL;杨春晖等^[26]研制的3种酱油ABTS和DPPH自由基清除能力分别为6.43~8.57和3.53~5.30 mg/mL。换算对比显示,仙居麦酱单位质量的抗氧化活性指标普遍优于上述食醋及酱油产品,这为传统调味品的功能化应用提供了新的选择。

本研究立足地理标志品牌建设与产业高质量发展的双重需求,聚焦仙居麦酱的抗氧化功能活性研究,在科学层面上阐明传统发酵调味品的现代健康内涵,为地理标志产品的功能化升级提供科学证据;在文化层面上通过科技赋能提升产品附加值,促进非遗工艺保护与地方特色产业协同发展,为乡村振兴提供“科技+文化”双驱模式。未来研究将聚焦于:基于代谢组学技术解析特征活性成分及其形成机制;开展动物模型验证其体内抗氧化功效研究;开发基于传统工艺改良的标准化生产体系。需要指出的是,当前研究仅限于体外抗氧化评价,后续需通过建立生物相关性更强的体内实验模型,系统评估其在复杂生理环境中的功能表现,为传统发酵食品的功能宣传提供更坚实的科学依据。

参考文献 References

- [1] DIKKALA P K, KAUR A, KAUR K, et al. Valorization of peanut skin: development of functional skin-on peanut butter and quality characteristics[J]. Waste and biomass valorization, 2024, 15(10):5719-5728.
- [2] FAUSTINO M, MACHADO D, RODRIGUES D, et al. Design and characterization of a cheese spread incorporating *Osmunda pinnatifida* extract[J/OL]. Foods, 2023, 12(3): 611 [2025-03-21].<https://doi.org/10.3390/foods12030611>.
- [3] BAI H, WANG S, WANG Z M, et al. Investigation of bioactive compounds and their correlation with the antioxidant capacity in different functional vinegars[J/OL]. Food research international, 2024, 184: 114262 [2025-03-21].<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114262>.
- [4] 王宗敏,白桦,王辛禹,等.食醋中功能物质及其研究进展[J].食品科学,2023,44(11):196-204. WANG Z M, BAI H, WANG X Y, et al. Advances in research on functional substances in vinegar[J]. Food science, 2023, 44(11): 196-204(in Chinese with English abstract).
- [5] GAO X L, ZHAO X, HU F, et al. The latest advances on soy sauce research in the past decade: emphasis on the advances in China[J/OL]. Food research international, 2023, 173: 113407 [2025-03-21].<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113407>.
- [6] LIU S M, STAMPFER M J, HU F B, et al. Whole-grain consumption and risk of coronary heart disease: results from the Nurses' Health Study* 2[J]. The American journal of clinical nutrition, 1999, 70(3):412-419.
- [7] VITAGLIONE P, NAPOLITANO A, FOGLIANO V. Cereal dietary fibre: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut[J]. Trends in food science & technology, 2008, 19(9):451-463.
- [8] BROUNS F, HEMERY Y, PRICE R, et al. Wheat aleurone: separation, composition, health aspects, and potential food use [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2012, 52(6): 553-568.
- [9] VITAGLIONE P, MENNELLA I, FERRACANE R, et al. Whole-grain wheat consumption reduces inflammation in a randomized controlled trial on overweight and obese subjects with unhealthy dietary and lifestyle behaviors: role of polyphenols bound to cereal dietary fiber2 3 4[J]. The American journal of clinical nutrition, 2015, 101(2):251-261.
- [10] YUE X Q, LI M H, LIU Y M, et al. Microbial diversity and function of soybean paste in East Asia: what we know and what we don't[J]. Current opinion in food science, 2021, 37: 145-152.
- [11] DIEZ-OZAETA I, ASTIAZARAN O J. Fermented foods: an update on evidence-based health benefits and future perspectives [J/OL]. Food research international, 2022, 156: 111133 [2025-03-21].<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111133>.
- [12] 余青松,马欣龙,陈玉霞,等.茯苓菌固态发酵香菇柄基质的酶活力、营养成分及抗氧化活性变化[J].华中农业大学学报,2024,43(4):230-238. YU Q S, MA X L, CHEN Y X, et al. Changes in enzyme activity, nutritional components and antioxidant activity of *Lentinula edodes* stalk substrate during solid-state fermentation of *Poria cocos* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43 (4) : 230-238 (in Chinese with English abstract).
- [13] QIN H B, WU H B, SHEN K, et al. Fermented minor grain foods: classification, functional components, and probiotic potential [J/OL]. Foods, 2022, 11 (20) : 3155 [2025-03-21].<https://doi.org/10.3390/foods11203155>.
- [14] CHEN L H, LIU B, LI D N, et al. Effects of fermentation on flavor and antioxidant activity in *Ginkgo* rice wine [J/OL]. Food bioscience, 2023, 53: 102652 [2025-03-21].<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102652>.
- [15] PALLA M, CONTE G, GRASSI A, et al. Novel yeasts producing high levels of conjugated linoleic acid and organic acids in fermented doughs[J/OL]. Foods, 2021, 10(9): 2087 [2025-03-21].<https://doi.org/10.3390/foods10092087>.
- [16] WANG C Y, WU S J, FANG J Y, et al. Cardiovascular and intestinal protection of cereal pastes fermented with lactic acid bacteria in hyperlipidemic hamsters[J]. Food research international, 2012, 48(2):428-434.
- [17] 何军波,贾庆超.模糊数学评价结合响应面法优化黑蒜香菇酱制备工艺及抗氧化活性和储藏分析[J].食品工业科技,2023,44(19):47-56. HE J B, JIA Q C. Optimization of preparation technology, antioxidant activity and storage analysis of black garlic mushroom paste by fuzzy mathematical evaluation and response surface methodology[J]. Science and technology of food industry, 2023, 44(19):47-56 (in Chinese with English abstract).
- [18] 吕世鑫,田潇然,王洪涛,等.西洋参不定根总皂苷的响应面优化提取工艺及抗氧化活性研究[J].食品科技,2019,44(9): 248-254. LÜ S X, TIAN X R, WANG H T, et al. Extracting process and antioxidant activity analysis of total ginsenoside from adventitious roots of *Panax quinquefolius* by response surface methodology[J]. Food science and technology, 2019, 44(9):248-254 (in Chinese with English abstract).
- [19] 侯敏娜,侯少平,许海燕,等.陕产长春七挥发油提取工艺优化及抗氧化活性研究[J].化学与生物工程,2020,37(7):15-20. HOU M N, HOU S P, XU H Y, et al. Optimization in extraction process of volatile oil from *Libanotis buchtormensis* of Shaanxi and their antioxidant activity[J]. Chemistry & bioengineering, 2020, 37 (7) : 15-20 (in Chinese with English abstract).
- [20] QIE X J, CHEN Y, QUAN W, et al. Analysis of β -lactoglobulin-epigallocatechin gallate interactions: the antioxidant capacity and effects of polyphenols under different heating conditions in polyphenolic-protein interactions [J]. Food & function,

- 2020, 11(5):3867-3878.
- [21] 闫峻, 冯硕, 吴韬, 等. 亚麻子发芽前后化学成分及抗氧化活性的研究 [J]. 质谱学报, 2018, 39(1): 112-119. YAN J, FENG S, WU T, et al. Chemical constituents and antioxidant activity of flaxseed during germination [J]. Journal of Chinese mass spectrometry society, 2018, 39(1): 112-119 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王福, 张鑫, 卢俊宇, 等. 陈皮“陈久者良”之黄酮类成分增加原因探究 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(24): 4890-4896. WANG F, ZHANG X, LU J Y, et al. Study of reason of “the older, the better” of Pericarpium Citri Reticulatae (PCR) which contributed increase of flavonoids [J]. China journal of Chinese materia medica, 2015, 40(24): 4890-4896 (in Chinese with English abstract).
- [23] ZHOU Y L, XIANG N C. The development trend and problems of Chinese condiments [J/OL]. IOP conference series: earth and environmental science, 2020, 615(1):012088[2025-03-21]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/615/1/012088>.
- [24] VERZELLONI E, TAGLIAZUCCHI D, CONTE A. Relationship between the antioxidant properties and the phenolic and flavonoid content in traditional balsamic vinegar [J]. Food chemistry, 2007, 105(2):564-571.
- [25] 冯拓, 单培, 盛明健, 等. 5种不同酱油抗氧化活性的对比分析 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(3):159-167. FENG T, SHAN P, SHENG M J, et al. Comparative analysis of antioxidant activity of five kinds of soy sauces [J]. Modern food science and technology, 2022, 38(3):159-167 (in Chinese with English abstract).
- [26] 杨春晖, 王文平, 续丹丹, 等. 不同原料酿造酱油功能成分及抗氧化活性比较 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14):318-325. YANG C H, WANG W P, XU D D, et al. Comparison of functional components and antioxidant activities of soy sauces brewed with different raw materials [J]. Science and technology of food industry, 2023, 44(14): 318-325 (in Chinese with English abstract).

Antioxidant capacity of Xianju wheat paste as a traditional condiment

CHE Jinsong¹, LI Shida¹, SHAO Jinquan², LI Xiujuan¹

1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Xianju Industry Association of Wheat Paste, Dongbao District, Jingmen City, Jingmen 448000, China

Abstract The antioxidant components were extracted from Xianju wheat paste with a high-speed homogenization method to mine the functional properties of Xianju wheat paste as a traditional condiment. The conditions for extraction were optimized. The antioxidant capacities of Xianju wheat paste from different workshops and with storage times were evaluated. The results showed that the optimal parameters for extraction were material-to-liquid ratio of 1:35 (g/mL), ethanol concentration of 60% (volume fraction), extraction time of 6 min, and rotational speed of 8 800 r/min. The antioxidant capacity of Xianju wheat paste extracts from different workshops, expressed as the equivalent of Vc per gram of wheat paste, was 3.47-7.30 mg/g for DPPH radical scavenging ability, 55.32-70.75 mg/g for OH radical scavenging ability, and 24.32-42.85 mg/g for ABTS radical scavenging ability, with FRAP value of 5.8-11.3 μmol/(L·g). It is indicated that Xianju wheat paste has strong antioxidant capacity and holds great potential for translating into a functional condiment and releasing the profound potential of immense value.

Keywords Xianju wheat paste; antioxidant; condiment; high-speed homogenization

(责任编辑:陆文昌)