DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251014004
引用格式: 甘宇萌, 陈钢, 刘凯莉. 赣南脐橙皮茶发酵工艺及抗氧化功能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 186–193.
GAN YM, CHEN G, LIU KL. Study on the fermentation process and antioxidant function of Gannan navel *Citrus sinensis* peel tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 186–193. (in Chinese with English abstract).

赣南脐橙皮茶发酵工艺及抗氧化功能研究

甘宇萌, 陈　钢*, 刘凯莉

(南昌大学食品学院, 南昌　330031)

摘　要: 目的　通过对赣南脐橙皮接种冠突散囊菌, 进行固态发酵, 开发出一款口感适宜、风味独特的脐橙皮发酵茶。**方法**　采用单因素试验并结合响应面分析法对赣南脐橙皮茶的发酵工艺参数进行优化, 并对得到的产品感官品质进行综合评价, 同时通过测定其对 1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH)自由基、2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]阳离子自由基的清除效果以评价其体外抗氧化活性。**结果**　赣南脐橙皮茶发酵最佳工艺参数为: 冠突散囊菌接种量 2.7%、发酵温度 27 ℃、发酵时间 7 d, 该条件下得到的赣南脐橙皮茶的感官评分高达 91.29。体外抗氧化结果显示, 以维生素 C (vitamin C, VC)作参照, 接种冠突散囊菌发酵后的赣南脐橙皮和未发酵的赣南脐橙皮均对 DPPH 自由基和 $ABTS^+$自由基具有清除作用; 当质量浓度低于 5 mg/mL 时, 接种冠突散囊菌发酵后的赣南脐橙皮和未发酵的赣南脐橙皮对 DPPH 自由基和对 $ABTS^+$自由基的清除能力均低于 VC; 当质量浓度在 5 mg/mL 时, 接种冠突散囊菌发酵后的赣南脐橙皮和未发酵的赣南脐橙皮对 DPPH 自由基和对 $ABTS^+$自由基的清除能力与 VC 相当; 这 3 者对 DPPH 自由基的半清除率分别为(2.1892±0.0583)、(0.7345±0.0052) 、(0.0024±0.0002) mg/mL, 对 $ABTS^+$自由基的半清除率分别为(2.2372±0.0672) 、(0.7461±0.0048)、(0.0026±0.0002) mg/mL, 说明赣南脐橙皮经冠突散囊菌发酵后具有更强的抗氧化活性, 但其抗氧化活性仍旧低于 VC。**结论**　本研究成功研制出一款兼具优良品质、口感较佳并具有较强抗氧化功能的脐橙皮发酵茶, 其工艺配方稳定可行, 可为脐橙皮的市场产业化推广提供理论和方法技术支持。

关键词: 赣南脐橙皮; 冠突散囊菌; 发酵; 响应面分析; 抗氧化

Study on the fermentation process and antioxidant function of Gannan navel *Citrus sinensis* peel tea

GAN Yu-Meng, CHEN Gang*, LIU Kai-Li

(*College of Food Science and Technology*, *Nanchang University*, *Nanchang* 330031, *China*)

ABSTRACT: Objective　To develop a navel *Citrus sinensis* peel tea with suitable taste and unique flavor by inoculating the peels of Gan Nan navel *Citrus sinensis* with the *Eurotium cristatum* and conducting solid-state fermentation. **Methods**　The single-factor experiment and response surface analysis method were adopted to

收稿日期: 2025-10-14
第一作者: 甘宇萌(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品资源的综合利用。E-mail: gym718447396@163.com
***通信作者:** 陈钢(1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品资源的综合利用。E-mail: zn_chengang@163.com

optimize the fermentation process parameters of Gannan navel *Citrus sinensis* peel tea, and the sensory quality of the obtained product was comprehensively evaluated. Meanwhile, the *in vitro* antioxidant activity was evaluated by measuring the scavenging effects on 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) positive ion free radicals. **Results** The optimal fermentation process parameters of Gannan navel *Citrus sinensis* peel tea were determined as follows: Inoculation *Eurotium cristatum* amount of 2.7%, fermentation temperature of 27 ℃, and fermentation time of 7 days. Under these conditions, the sensory score of the Gannan navel *Citrus sinensis* peel tea reached 91.29. The *in vitro* antioxidant results showed that the *in vitro* antioxidant results showed that, with vitamin C (VC) as the reference, the fermented Gannan navel *Citrus sinensis* peels inoculated with *Trichosporon cutaneum* and the unfermented Gannan navel *Citrus sinensis* peels both before and after fermentation had the ability to scavenge free radicals DPPH and $ABTS^+$. When the concentration was lower than 5 mg/mL, the scavenging ability of the fermented Gannan navel *Citrus sinensis* peels inoculated with Trichosporon cutaneum and the unfermented Gannan navel *Citrus sinensis* peels on DPPH and $ABTS^+$ free radicals was lower than that of VC; when the concentration was 5 mg/mL, the scavenging ability of the fermented Gannan navel *Citrus sinensis* peels inoculated with *Trichosporon cutaneum* and the unfermented Gannan navel *Citrus sinensis* peels on DPPH and $ABTS^+$ free radicals was comparable to that of VC; the half scavenging rates of these three for DPPH free radicals before and after fermentation were (2.1892 ± 0.0583), (0.7345 ± 0.0052), (0.0024 ± 0.0002) mg/mL, respectively, and for $ABTS^+$ free radicals were (2.2372 ± 0.0672), (0.7461 ± 0.0048), (0.0026 ± 0.0002) mg/mL, respectively. The numerical differences were significant, indicating that the Gannan navel *Citrus sinensis* peels after *Trichosporon cutaneum* fermentation have stronger antioxidant activity, but their antioxidant activity is still lower than that of VC. **Conclusion** This study successfully develop a navel *Citrus sinensis* peel fermented tea with excellent quality, good taste and strong antioxidant function. The process formula is stable and feasible, which can provide theoretical and methodological technical support for the market industrialization promotion of navel *Citrus sinensis* peels.

KEY WORDS: Gannan navel *Citrus sinensis* peel; *Eurotium cristatum*; fermentation; response surface analysis; antioxidant

0　引　言

冠突散囊菌(*Eurotium cristatum*), 是在对茯砖茶进行发酵过程中产生的一种优势真菌, 其大量聚集在一起时会形成一种色泽呈现金黄色的闭囊壳结构, 因此也俗称为“金环菌”[1–2]。冠突散囊菌是一类对人类有益的微生物, 其生长繁殖过程中产生的代谢产物具有抗炎[3]、抗氧化[4–5]、降血糖[6]、降胆固醇[7]、抑制肿瘤[8]、调节人体肠胃免疫平衡[9]等生物功效。研究人员在应用冠突散囊菌进行固态发酵时, 发现冠突散囊菌能对发酵底物的风味、功能特性和生物活性产生积极有益的影响。陈艾琳等[10]用冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶, 发现发酵后的赶黄草叶茶其苦味、刺激性等不良气味的挥发性成分明显下降很多, 而具有花果香、菌香的挥发性成分新产生或相对含量上升; 杜静[11]以冠突散囊菌作为发酵菌种, 对中药材三七进行发酵处理, 结果表明, 与未发酵相比, 发酵后的三七中三七皂苷 R1、人参皂苷 Re、人参皂苷 Rb1、人参皂苷 Rd 的含量均显著增加; ZHAO 等[12]研究冠突散囊菌发酵桑叶的作用机制, 结果显示, 发酵后的桑叶其活性成分的抗氧化性有明显的提升。

脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck)是一种植物甜橙, 分属于芸香科、柑橘属, 其果实富含多糖、维生素、有机酸以及类黄酮等活性物质, 因而深受人们的喜爱, 目前脐橙在世界各国均有种植[13]。我国脐橙产区主要集中于四川、重庆、湖南、湖北以及江西等地, 其中江西省赣州市是我国脐橙种植最适宜的区域之一[14]。赣州市南部地区生产的脐橙因其具有鲜艳的色泽、美观的外形以及饱满的果实, 得到广大消费者的深切欢迎, 所以此处的脐橙也被冠以赣南脐橙的美誉[15–16]。资料显示, 脐橙果肉占整个脐橙的 75%~85%, 剩余的为脐橙皮[17–18]。脐橙皮由内到外分别为白皮层、黄皮层, 白皮层富含多种活性成分如果胶[19]、黄酮类[20–21]、精油[22]、多糖[23]、膳食纤维[24]、碳水化合物以及柠檬苦素类物质[25]等; 而黄皮层则富含黄酮类色素和类胡萝卜素等色素成分[26–27]。陈皮茶是以柑橘类果实的外皮为原料研制而成的一款特色传统中草药饮品, 最早是由广东潮汕地区的人们在用陈皮煮水喝时发现陈皮独特的风味, 再经改良、创新, 逐渐形成现在的富有柑橘果香的茶饮料; 陈皮茶富含维生素 C (vitamin C, VC)、果胶、苹果酸、果脯分子等多种营养成分, 这些物质大多具有提高抵抗力、促进消化和吸收、缓解焦虑和压力、调节肠道菌群等生理功能,

这就使得陈皮茶兼具独特风味与养生保健效果，从而越来越受到人们的普遍欢迎[28]。传统的陈皮茶大多采用橘子皮作为主要原料，使用脐橙皮的则较少报道。本研究以赣南脐橙皮为研究材料，通过接种冠突散囊菌进行固态发酵，并对其发酵前后的抗氧化能力进行对比，以期得到一款口感适宜、风味独特的脐橙茶饮品，为脐橙的综合开发利用提供新的发展思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜赣南脐橙采购自江西省赣州市于都县；冠突散囊菌由上海麦克林生化科技股份有限公司提供；柠檬酸(食品级)为市售。

麦芽汁培养基(上海麦克林生化科技股份有限公司)；无水氯化钠、氢氧化钠、1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]、过硫酸钾、VC、无水乙醇、甲醇(分析纯，西陇科学股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

SI-114 电子分析天平[精度 0.1 mg，丹佛仪器(北京)有限公司]；750T 西厨多功能粉碎机(铂欧五金厂)；DHG9140A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏试验设备有限公司)；HHS 电热恒温水浴锅、YXQ-LS-18SI 型手提式高压蒸汽灭菌锅(上海博迅实业有限公司)；BCV-1FD 型超净工作台(上海一恒科技有限公司)；ZHP-160 智能恒温振荡培养箱(上海三发科学仪器有限公司)；RE-52A 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)；TG16-WS 台式高速离心机(湖南湘仪试验仪器开发有限公司)；SOCOREX 瑞士精密微量移液器(上海汇析精密仪器有限公司)；WZF-UN-2000 紫外可见分光光度计[尤尼科(上海)仪器有限公司]。

1.3 试验方法

1.3.1 冠突散囊菌孢子悬浮液制备

在超净工作台上，取一株冠突散囊菌，将其均匀涂布于麦芽汁培养基活化培养，培养温度设定 28 ℃、时间设定 7 d，待麦芽汁培养基上出现色泽金黄的菌落时，用无菌接种环将冠突散囊菌孢子刮落，置于锥形瓶中(瓶内事先装有玻璃珠以及 100 mL 无菌生理盐水)，振荡 20 min 后，将其稀释成 1×10^6 个/mL 的孢子悬浮液[29]。

1.3.2 赣南脐橙皮制备

挑选新鲜无虫害无腐烂变质的赣南脐橙，将皮剥落后清洗，用 0.5%柠檬酸溶液浸泡 30 min 护色，烘干。

1.3.3 赣南脐橙皮茶固态发酵

参照滕迎弟等[30]用冠突散囊菌发酵牛蒡茶的工艺方法，稍有改动。取处理好的脐橙片置于 250 mL 锥形瓶中，按照脐橙片与水比例 1:2 (*m*:*V*)的方式加入无菌蒸馏水，无菌封口膜封口，后经高压蒸汽灭菌锅 121 ℃灭菌 15 min，后放置于已灭菌的超净工作台上冷却至常温，接种冠突散囊菌孢子悬浮液，恒温培养，发酵后的脐橙皮经烘箱烘干至水分 10%以下，得到发酵脐橙皮茶。

(1)冠突散囊菌发酵赣南橙皮茶单因素试验

接种量对脐橙皮茶发酵效果的影响：取 50 g 按照 1.3.2 制备好的脐橙片置于 250 mL 锥形瓶中，加入无菌蒸馏水 100 g，分别接种 1%、2%、3%、4%、5%的冠突散囊菌孢子悬浮液，用无菌透气封口膜密封，于恒温 28 ℃条件下发酵 7 d，烘干泡茶，通过茶水感官评分确定接种量。

发酵温度对脐橙皮茶发酵效果的影响：取 50 g 按照 1.3.2 制备好的脐橙片置于 250 mL 锥形瓶中，加入无菌蒸馏水 100 g，接种 3%的冠突散囊菌孢子悬浮液，用无菌透气封口膜密封，于恒温 24、26、28、30、32 ℃条件下分别发酵 7 d，烘干泡茶，通过茶水感官评分确定发酵温度。

发酵时间对脐橙皮茶发酵效果的影响：取 50 g 按照 1.3.2 制备好的脐橙片置于 250 mL 锥形瓶中，加入无菌蒸馏水 100 g，接种 3%的冠突散囊菌孢子悬浮液，于恒温 28 ℃条件下分别发酵 3、5、7、9、11 d，烘干泡茶，通过茶水感官评分确定发酵时间。

(2)冠突散囊菌发酵赣南橙皮茶发酵条件 Box-Behnken 试验优化

通过单因素试验结果，以发酵脐橙茶感官评价评分为响应值进行 3 因素 3 水平 Box-Behnken 试验设计，优化冠突散囊菌发酵赣南橙皮茶的发酵工艺，设计方案如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 试验因素水平表

Table 1 Experimental factor levels table of Box-Behnken

试验因素	因素水平与编码		
	–1	0	1
A: 接种量/%	2	3	4
B: 发酵温度/℃	26	28	30
C: 发酵时间/d	5	7	9

(3)发酵脐橙茶的泡制方法及感官评价

以 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》为依据，取各试验组的发酵脐橙皮各 10 g 放入评审茶杯中，再往杯中分别倒入开水 200 mL，盖盖焖 2 min，之后邀请 30 名南昌大学食品学院师生(其中，教授 7 人、副教授 5 人、讲师 5 人、研究生 8 人、本科生 5 人)品尝并通过下表 2 的评分依据进行感官评分，评分结果取平均值。

1.3.4 赣南脐橙皮发酵茶体外抗氧化能力测定

(1)赣南脐橙皮发酵茶发酵产物的提取制备

在肖楠等[31]的试验方案基础上稍加改变，提取赣南脐橙皮发酵茶的有效活性物质。将 1.3.3 工艺得到的赣南脐橙皮发酵茶称取 10 g 粉碎，后采用醇提法进行提取(溶剂为 95%含量的乙醇，料液比为 1:15 (*m*:*V*)，在此条件下浸

泡过夜后超声辅助提取 3 次), 再经抽滤处理去掉残渣得到提取液, 提取液再在 50 ℃条件下旋转蒸发除去乙醇得到发酵物浸膏, 标记为 FJ。以未发酵的赣南脐橙皮作对照, 按照同样的方法提取得到浸膏, 记作 WJ。

表 2　感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation criteria

项目	评分标准	感官评分/分
滋味 (满分 30 分)	清甜, 无涩味	21~30
	清甜, 略带涩味	11~20
	涩味重	1~10
香气 (满分 30 分)	香气纯正, 浓郁无杂味	21~30
	香气较纯正, 清香芜杂味	11~20
	香气稍纯, 有杂味	1~10
外形 (满分 20 分)	金黄色, 冠突散囊菌覆盖均匀	15~20
	金黄色, 冠突散囊菌覆盖稍均匀	8~14
	杂色, 冠突散囊菌覆盖少	1~7
汤色 (满分 20 分)	色泽金黄明亮	15~20
	色泽橙黄较明亮	8~14
	色泽淡不明亮或者浑浊	1~7

(2)赣南脐橙皮发酵茶对 DPPH 自由基的清除测定

参照秦嫚嫚等[32]、SRIDHAR 等[33]的方法并加以改进。将 1.3.4(1)得到的样品, 用蒸馏水稀释至不同浓度, 后分别取 2 mL 各浓度梯度样品, 分别加入 2 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液, 振荡 10 min 摇匀, 25 ℃下避光反应 30 min, 后于 517 nm 处测其吸光度值, 数值记作 A_i; 以等量的甲醇代替 DPPH 溶液, 相同条件下测得吸光度值, 记为 A_j; 再以等量的 50%甲醇代替样品溶液, 相同条件下测定并记录吸光度数值, 记作 A_c。每组试验做 3 个平行, 以同样浓度的维生素 C 溶液作参照, 并用甲醇溶液调零。DPPH 自由基清除率的计算见公式(1):

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

(3)赣南脐橙皮发酵茶对 $ABTS^+$自由基清除率的测定

参照海力茜•陶尔大洪等[34]的方法并进行改进, 取 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液与 7 mmol/L 的 ABTS 溶液按相同比例混合, 室温条件下避光反应 12 h 即得 $ABTS^+$溶液, 使用前用蒸馏水将 $ABTS^+$溶液稀释至 0.7 吸光度。后取 1.3.4(1)得到的样品以及等量的抗坏血酸, 用蒸馏水分别稀释至不同浓度, 各加入 2 mL 上述稀释好的 $ABTS^+$溶液, 振荡摇匀 10 s 后静置避光反应 30 min, 后在 734 nm 波长处测定各自吸光度值, 用无水乙醇替代 $ABTS^+$溶液作对照组。$ABTS^+$自由基清除率的计算见公式(2):

$$ABTS^+\text{自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_a - A_b}{A_c}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_a 为样品或者维生素 C 溶液加入 $ABTS^+$溶液的吸光度值; A_b 为样品或者维生素 C 溶液加无水乙醇的吸光度值; A_c 为蒸馏水加 $ABTS^+$溶液的吸光度值。

1.4　数据处理

采用 SPSS 29.0 软件对数据进行分析处理, 运用 Origin 2019 软件进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　冠突散囊菌发酵赣南脐橙皮茶单因素实验结果分析

2.1.1　接种量对赣南脐橙皮发酵茶发酵效果的影响

接种量的增大一方面可以将发酵时间缩短, 另一方面又可以防止杂菌生长。在赣南脐橙皮发酵试验过程中, 本研究发现随着冠突散囊菌接种量的增大, 其在赣南脐橙皮上的菌丝覆盖率也越大, 其色泽也逐渐变为金黄色, 脐橙皮的香味也越发浓郁。当冠突散囊菌接种量低于 3%时, 在发酵 7 d 时间内, 冠突散囊菌在赣南脐橙皮上正常生长且未达饱和生长状态, 因此感官评分也就越高; 当接种量大于 3%时, 赣南脐橙皮茶感官评分降低, 这可能是脐橙皮所提供的营养不能满足大量冠突散囊菌生长的需要, 从而影响其生物合成, 并使其产生的代谢废物严重积累, 这就使得冠突散囊菌在脐橙皮上覆盖面稀疏不均匀, 影响了脐橙皮茶的色泽和风味, 感官评分自然也就下降了。因此, 冠突散囊菌的接种量优先选择 3%。

2.1.2　发酵温度对赣南脐橙皮发酵茶发酵效果的影响

温度能影响冠突散囊菌的生长情况, 并会对脐橙皮的活性成分产生影响。随着温度的升高, 赣南脐橙皮发酵茶的感官评分先上升后下降。当发酵温度在 28 ℃时, 脐橙皮茶的感官评分达到最高为 90.2 分, 此时赣南脐橙皮上均匀覆盖一圈金黄色的冠突散囊菌, 香味浓郁, 说明此温度下冠突散囊菌生长状况良好。温度过低或过高, 脐橙茶感官评分都较低, 可能是较低或较高的温度都会抑制冠突散囊菌的生长, 影响其对脐橙皮营养成分的利用, 从而间接影响脐橙皮茶的感官评价。根据试验情况, 选择发酵温度 28 ℃进行响应面进行试验优化条件。

2.1.3　发酵时间对赣南脐橙皮发酵茶发酵效果的影响

微生物生长繁殖过程中, 适当的发酵时间能使菌种对营养物质进行充分生物转化, 从而得到理想的发酵产物。赣南脐橙皮发酵茶的感官评分随着时间的延长呈现先上升后下降的趋势, 当发酵时间在第 7 d 时, 脐橙皮发酵茶的感官评分得分最高; 当发酵时间少于 7 d 时, 脐橙皮发酵茶的感官评分一直在上升, 说明冠突散囊菌正在快速生长, 逐步覆盖脐橙皮, 并在新陈代谢中将脐橙皮营养物分解聚合转化成具有浓香气味的小分子化合物, 从而使得脐橙皮发酵茶的感官评分得到提升; 当发酵时间大于 7 d 时, 脐橙皮发酵茶的感官评分逐渐下降, 这可能是发酵时

间过长，导致冠突散囊菌没有充分营养物质支撑造成菌株衰退并产生杂味。因此，发酵时间当控制在 7 d 左右。

2.2 赣南脐橙皮茶发酵工艺响应面优化试验结果

在表 3 试验结果基础上，运用 Design-Expert V10.0.3 软件对所有试验数据进行整理与分析，结果如下表 4 所示。

表 3 响应面试验结果

Table 3 Results of response surface experiment

试验序列号	*A*: 接种量/%	*B*: 发酵温度/℃	*C*: 发酵时间/d	感官评分/分
1	3	28	7	90.2
2	3	30	9	77.9
3	2	26	7	89.2
4	4	30	7	80.1
5	3	30	5	80.9
6	3	26	5	83.2
7	4	28	9	75.8
8	4	26	7	83.7
9	2	28	9	84.1
10	3	28	7	90.1
11	3	28	7	90.9
12	3	26	9	84.9
13	3	28	7	90.2
14	3	28	7	90.4
15	2	28	5	79.2
16	4	28	5	81.9
17	2	30	7	79.9

表 4 Box-Behnken 试验方差分析

Table 4 Variance analysis of Box-Behnken experiment

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	401.49	9	44.61	152.74	<0.0001	**
A: 接种量	14.85	1	14.85	50.85	0.0002	*
B: 发酵温度	61.60	1	61.60	210.92	<0.0001	**
C: 发酵时间	0.78	1	0.78	2.67	0.1460	
AB	8.12	1	8.12	27.81	0.0012	*
AC	30.25	1	30.25	103.57	<0.0001	**
BC	5.52	1	5.52	18.91	0.0034	*
A^2	78.03	1	78.03	267.17	<0.0001	**
B^2	33.72	1	33.72	115.46	<0.0001	**
C^2	141.89	1	141.89	485.79	<0.0001	**
残差	2.04	7	0.29			
失拟项	1.63	3	0.54	5.28	0.0708	不显著
纯误差	0.41	4	0.10			
总和	403.54	16				
R^2=0.9949			R^2_{Adj}=0.9884		R^2_{SN}=35.067	

注: *表示差异显著(*P*<0.05), **表示差异极显著(*P*<0.01)。

由表 4 可看出，试验回归模型 *F* 为 152.74，*P*<0.0001，说明设计模型极其显著，失拟项 *P*=0.0708>0.05 为不显著，说明这个回归方程是可信的；决定系数 R^2=0.9949，表明该回归方程具有极好的拟合性，可以用其来显示各个参数对响应值的影响。R^2_{Adj}=0.9884 表明该模型可以对 98.84%的感官评分作出合理的解释。因此，该模型可靠性绞好，误差也低，与实际相符合，可用其来分析和检测赣南脐橙皮发酵茶的发酵效果。由表 4 还可知，因素 *B*、*AC*、A^2、B^2、C^2 对赣南脐橙皮发酵茶的感官评分影响极显著(*P*<0.01)，因素 *A*、*AB*、*BC* 对赣南脐橙皮发酵茶的感官评分影响显著(*P*<0.05)。由表 4 中 *F* 数值可知，发酵条件对赣南脐橙皮发酵茶的影响程度由大到小依次为：*B*(发酵温度)>*A*(接种量)>*C*(发酵时间)。对上述相关试验数据进行回归拟合，以感官评分为因变量(*Y*)，以接种量(*A*)、发酵温度(*B*)、发酵时间(*C*)为自变量，建立二次多项回归方程，预测模型为：$Y=90.36-1.36A-2.77B-0.31C+1.42AB-2.75AC-1.18BC-4.31A^2-2.83B^2-5.80C^2$，模型相关系数 R^2=0.9926，信噪比 R^2_{SN}=35.067>4，说明回归方程的拟合程度良好[35]。赣南脐橙皮茶发酵工艺响应面如图 1 所示。

依据响应面试验模型，其预测的冠突散囊菌发酵赣南脐橙皮茶的最佳发酵工艺条件为接种量 2.714%、发酵温度 26.833 ℃，发酵时间 7.199 d，此工艺条件下预测的感官评分达 91.349 分。为方便实际操作，发酵工艺条件微调为接种量 2.7%、发酵温度 27 ℃、发酵时间 7 d，并在此工艺条件下再做 3 次平行试验进行验证，所得到的赣南脐橙皮发酵茶的感官评分为 91.29 分，与模型预测的得分十分接近，这表明此模型具有比较好的可靠性，优化的工艺条件比较合理。

2.3 赣南脐橙皮茶体外抗氧化能力测定

2.3.1 赣南脐橙皮发酵茶对 DPPH 自由基的清除率测定结果

从图 2 可以看出，随着样品浓度的增加，DPPH 自由基的清除率也随之提升，其中 VC 对 DPPH 的清除率最大，但当质量浓度均为 5.0 mg/mL 时，FJ、WJ、VC 这 3 者对自由基 DPPH 的清除率相当。样品质量浓度小于 5.0 mg/mL 时，FJ 对 DPPH 自由基的清除率远高于 WJ 的，这说明脐橙皮经接种冠突散囊菌发酵后其活性成分抗氧化能力要大于未发酵的脐橙皮，这可能是冠突散囊菌作用于脐橙皮使其有效活性成分更容易析出从而提高其抗氧化活性。FJ、WJ、VC 对自由基 DPPH 的半清除率见表 5，由表 5 可知，这 3 者的抗氧化活性由低到高分别为 WJ<FJ<VC。

2.3.2 赣南脐橙皮发酵茶对 $ABTS^+$自由基的清除率测定结果

由图 3 可以看出，样品对 $ABTS^+$自由基的清除率随着浓度的增加而不断上升，在质量浓度 0~5.0 mg/mL 范围内，FJ 对 $ABTS^+$自由基的清除率要显著大于 WJ，这说明冠突散囊菌能提高脐橙皮的抗氧化活性，其机制可能在

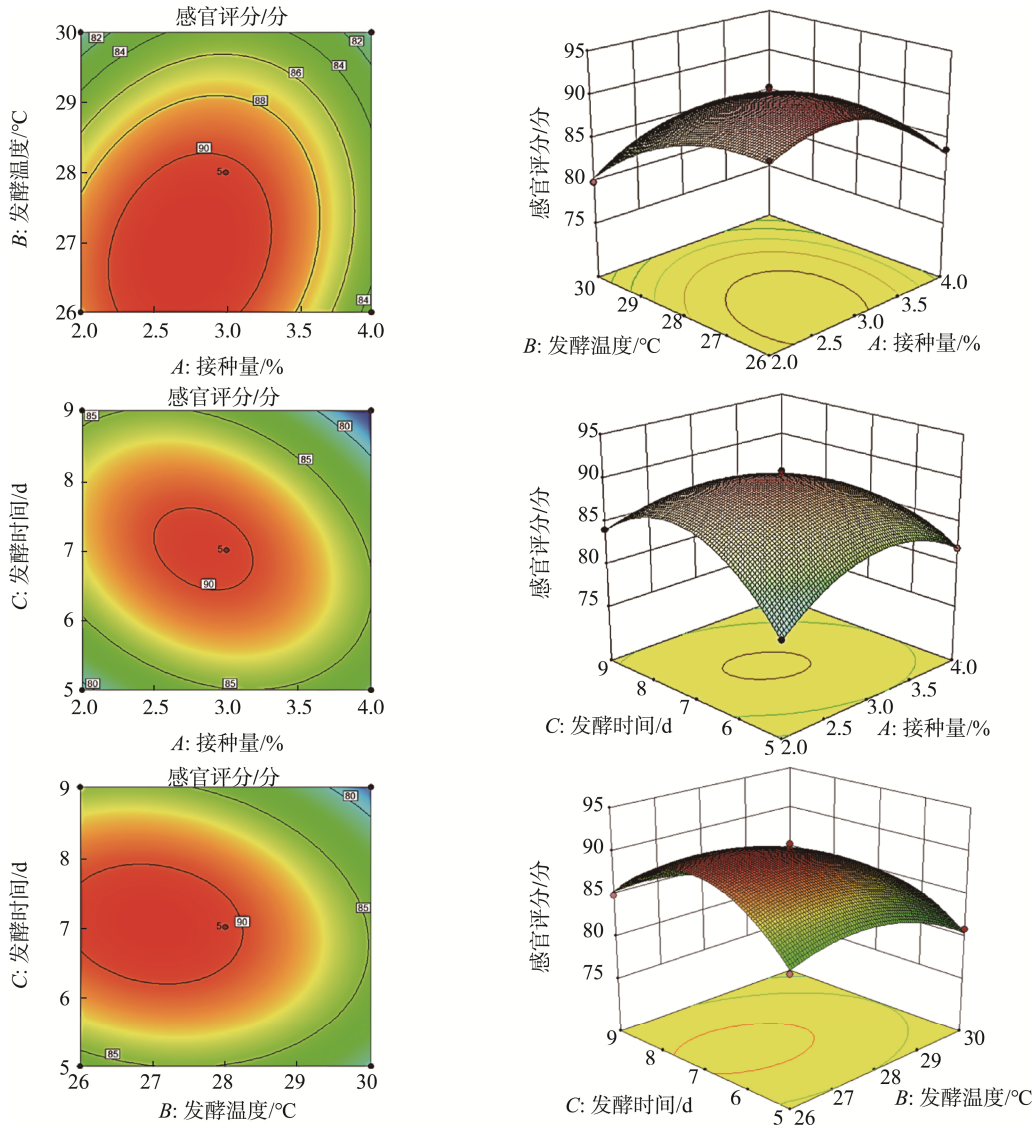


图 1　响应面图

Fig.1　Plot of response surface

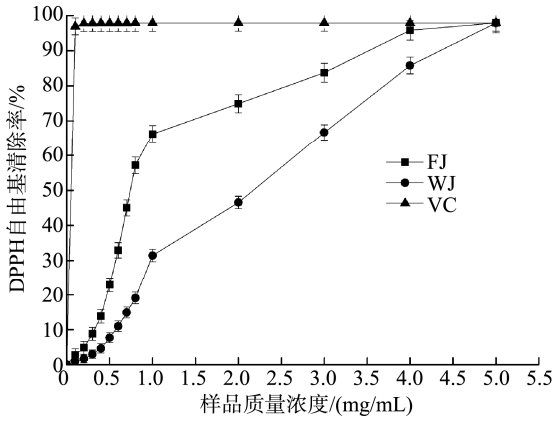


图 2　各样品质量浓度对 DPPH 自由基的清除效果

Fig.2　Scavenging effects of each sample mass concentration on DPPH free radicals

表 5　DPPH 半清除率对比(*n*=3)

Table 5　Comparison of semi-clearance rates of DPPH (*n*=3)

样品	半清除率/(mg/mL)
WJ	2.1892±0.0583
FJ	0.7345±0.0052
VC	0.0024±0.0002

于冠突散囊菌能够破坏脐橙皮的细胞壁结构，使其有效成分更容易析出从而提高脐橙皮的抗氧化活性。当质量浓度均为 5.0 mg/mL 时，FJ 和 WJ 对 $ABTS^{+}$自由基的清除率与 VC 相当。FJ、WJ、VC 对自由基 $ABTS^{+}$自由基的半清除率见表 6，由表 6 可知，这 3 者的抗氧化活性由低到高分别为 WJ<FJ<VC。

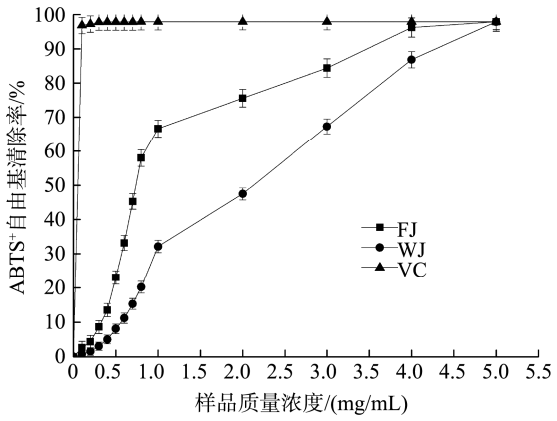


图 3 各样品质量浓度对 ABTS⁺自由基的清除效果

Fig.3 Scavenging effects of each sample mass concentration on ABTS⁺ free radicals

表 6 ABTS⁺自由基半清除率对比(*n*=3)

Table 6 Comparison of semi-clearance rates of ABTS⁺ radical (*n*=3)

样品	半清除率/(mg/mL)
WJ	2.2372±0.0672
FJ	0.7461±0.0048
VC	0.0026±0.0002

3 结 论

本研究应用冠突散囊菌固态发酵赣南脐橙皮，经单因素试验以及响应面软件优化，得到最佳发酵工艺条件为：冠突散囊菌接种量 2.7%、发酵温度 27 ℃、发酵时间 7 d。在此工艺条件下，发酵得到的赣南脐橙皮茶开水泡制后茶汤色泽金黄、澄清透明、香气浓郁、回味甘甜，总感官评分高达 91.29。通过对 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的清除测定结果表明，脐橙皮接种官图散囊菌发酵后的活性物质对 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基均具有较大的清除效果，具有比较好的抗氧化活性，且脐橙皮发酵后的抗氧化活性要远大于未发酵的脐橙皮，这可能是冠突散囊菌作用于脐橙皮使其有效活性物质更容易析出，从而提高了脐橙皮的抗氧化能力。综上，冠突散囊菌能有效改善赣南脐橙皮茶的风味，并提高其抗氧化活性。

参考文献

[1] 刘泽楠, 明朗, 汪洋. 茯砖茶中冠突散囊菌的保健功效研究进展[J]. 食品界, 2019, 5(4): 145.
LIU ZN, MING L, WANG Y. Research progress on the health benefits of *Eurotium cristatum* in Fuzhuan tea [J]. Food World, 2019, 5(4): 145.

[2] 黄彦, 石瑞, 苏二正. 冠突散囊菌的研究与应用进展[J]. 生物加工过程, 2017, 15(1): 49–56.
HUANG Y, SHI R, SU ERZ. Research and application progress of *Eurotium cristatum* [J]. Bioprocess Engineering, 2017, 15(1): 49–56.

[3] SHI J, LIU J, KANG D, *et al*. Isolation and characterization of benzaldehyde derivatives with anti-inflammatory activities from *Eurotium cristatum*, the dominant Fungi species in Fuzhuan Brick Tea [J]. ACS Omega, 2019, 4(4): 6630–6636.

[4] 赵楠楠, 石琳琳, 罗娟, 等. 冠突散囊菌及其次级代谢产物研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 208–212.
ZHAO NN, SHI LL, LUO J, *et al*. Research progress on *Eurotium cristatum* and its secondary metabolites [J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 208–212.

[5] 李玉婷, 吕嘉枥. 金花菌黄色素的稳定性及其抗氧化活性研究[J]. 微生物学通报, 2013, 40(11): 2030–2036.
LI YT, LV JL. Study on the stability and antioxidant activity of the yellow pigment from golden mushroom [J]. Microbiology Bulletin, 2013, 40(11): 2030–2036.

[6] ZHANG H, HUI J, YANG J, *et al*. Eurocristatine, a plant alkaloid from *Eurotium cristatum*, alleviates insulin resistance in db/db diabetic mice via activation of PI3K/AKT signaling pathway [J]. European Journal of Pharmacology, 2020, 887: 173557.

[7] LI T, LIU Z, LI J, *et al*. Lovastatin production by wild *Eurotium cristatum* isolated from Fuzhuan brick tea produced using forest resources in Auhua [J]. Forests, 2023, 14(7): 41.

[8] KIJJOA A, LIMA R, VASCONCELOS M, *et al*. The *in vitro* anticancer activity of the crude extract of the sponge-associated fungus *Eurotium cristatum* and its secondary metabolites [J]. Journal of Natural Pharmaceuticals, 2010, 1(1): 104.

[9] XIE Z, BAI Y, CHEN G, *et al*. Modulation of gut homeostasis by exopolysaccharides from *Aspergillus cristatus* (MK346334), a strain of fungus isolated from Fuzhuan brick tea, contributes to immunomodulatory activity in cyclophosphamide-treated mice [J]. Food & Function, 2020, 11(12): 10397–10412.

[10] 陈艾琳, 杨清华, 赖谦, 等. 冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺优化及风味品质分析[J]. 食品工业科技, 1-18. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040085
CHEN AL, YANG QH, LAI Q, *et al*. Optimization of the fermentation process for making Huangcao tea leaves from *Phellinus igniarius* and analysis of its flavor and quality [J]. Food Industry Science and Technology, 1-18. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040085

[11] 杜静. 冠突散囊菌对中药材三七成分的转化及机制研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
DU J. Biotransformation of bioactive compounds in *Pannax notoginseng* fermented by *Eurotium cristatum* and its mechanism [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.

[12] ZHAO Q, YAN X, YUE Y, *et al*. Improved flavonoid content in mulberry leaves by solid-state fermentation: Metabolic profile, activity, and mechanism [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103308.

[13] 单杨. 我国柑橘工业现状及发展趋势[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2014, 3(11): 13–17.
SHAN Y. Current situation and development trend of China's citrus industry [J]. Agricultural Engineering Technology (Agricultural Product Processing), 2014, 3(11): 13–17.

[14] 安亚杰. 我国柑橘主要分布区域[J]. 营销界(农资与市场), 2016, 2(16): 51–59.
AN YJ. The main distribution areas of citrus in our country [J]. Marketing World (Agricultural Inputs and Market), 2016, 2(16): 51–59.

[15] 赖九江, 习建龙, 马小焕. 赣南脐橙高品质栽培技术[J]. 现代园艺, 2022, 45(13): 79–81.
LAI JJ, XI JL, MA XH. High-quality cultivation techniques for Gan Nan pomelo [J]. Modern Horticulture, 2022, 45(13): 79–81.

[16] 李文彪, 赵昊, 段煜, 等. 赣南脐橙出口贸易现状及影响因素研究[J]. 北方经贸, 2024(8): 115–118.
LI WB, ZHAO H, DUAN Y, *et al*. Research on the current situation and influencing factors of Gan Nan pomelo export trade [J]. Northern Economy and Trade, 2024(8): 115–118.

[17] 杨飏. 规模化种植的赣南脐橙产地定价数学模型的相关研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
YANG Y. Research on the mathematical model for pricing in the scale-grown Guanan orange production area in Southern Jiangxi [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.

[18] 祝爱艳, 梁露, 侯金雪, 等. 赣南脐橙代谢组学研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 276–281.
ZHU AIY, LIANG L, HOU JX. *et al*. Metabolomics study on Gan Nan pomelo [J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(3): 276–281.

[19] 干鸿翔, 杨笑妮, 谢凡, 等. 脐橙皮果胶的提取、结构特征及流变特性[J]]. 食品与发酵工业, 2025, 51(7): 276–285.
GAN HX, YANG XN, XIE F, *et al*. Extraction, structural characteristics and rheological properties of pomelo peel pectin [J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(7): 276–285.

[20] MA Y, YE X, HAO Y *et al*. Ultrasound-assisted extraction of hesperidin from Penggan (*Citrus reticulata*) peel [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(3): 227–232.

[21] 杨佳. 赣南脐橙皮中橙皮苷的提取、纯化及其活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
YANG J. Research on the extraction, purification and activity of naringin from the peel of Gan Nan pomelo [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.

[22] 王千千. 赣南脐橙皮中精油和黄酮的联合提取与分离[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
WANG QQ. Combined extraction and separation of essential oils and flavonoids from the peel of Gan Nan pomelo [D]. Nanchang: Jiangnan University, 2014.

[23] 蔡新送. 赣南脐橙生长过程中糖类和酸类物质的含量变化及其生物活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
CAI XS. Study on the content changes of carbohydrates and acidic substances and their biological activities during the growth of Gan Nan pomelo [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

[24] 王月蓉, 赵广河, 赵丰丽, 等. 脐橙皮水溶性膳食纤维提取工艺优化及其体外益生活性评价格[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(1): 101–109.
WANG YR, ZHAO GH, ZHAO FL, *et al*. Optimization of extraction process for water-soluble dietary fiber from orange peel and evaluation of its in vitro health-promoting effects [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 43(1): 101–109.

[25] 汪建红, 廖立敏, 王碧, 等. 脐橙皮中柠檬苦素的双水相提取及显色研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(4): 48–51.
WANG JH, LIAO LM, WANG B, *et al*. Dual-water-phase extraction and colorimetric study of limonin from orange peel [J]. Food Research and Development, 2016, 37(4): 48–51.

[26] 汪葵, 周阳, 彭鹏. 超声波法提取赣南脐橙皮色素工艺[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(12): 182–185.
WANG K, ZHOU Y, PENG P. The extraction process of pigments from the peel of Gan Nan pomelo by ultrasonic method [J]. Food Research and Development, 2009, 30(12): 182–185.

[27] 汪建红, 许京倩. 奉节脐橙皮色素的提取工艺优化及稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33 (11): 118–125.
WANG JH, XU JQ. Optimization of extraction process and stability study of pigments from the peel of Fengjie pomelo [J]. Chinese Food Additives, 2022, 33(11): 118–125.

[28] 王治山. 陈皮茶: 将传统美食商业化的“香醇艺术创作”[J]. 商业观察, 2023, 9(36): 10–13.
WANG ZS. Chen Pi Tea: The artistic creation of “Delicacy commercialization” [J]. Business Observation, 2023, 9(36): 10–13.

[29] LIANG H, FENG Q, GUO H, *et al*. Twelve novel sesquiterpenes with anti-inflammatory and cholesterol-lowering activities from burdock leaves [J]. Bioorganic Chemistry, 2022, 127: 105940.

[30] 滕迎弟, 王解语, 唐业豪, 等. 响应面优化冠突散囊菌发酵牛蒡茶工艺[J]. 农产品加工, 2023, 7(22): 40–43, 48.
TENG YD, WANG JY, TANG YH. *et al*. Response surface optimization of the fermentation process of *Eurotium cristatum* for processing burdock tea [J]. Agricultural Product Processing, 2023, 7(22): 40–43, 48.

[31] 肖楠, 王路宏, 赵磊. HPLC 法测定五味子膏中葛根素的含量[J]. 中国药物评价, 2018, 35(4): 267–270.
XIAO N, WANG LH, ZHAO L. Determination of glucoside of *Pueraria lobata* in Wuwei pill by HPLC [J]. Chinese Pharmaceutical Evaluation, 2018, 35(4): 267–270.

[32] 秦嫚嫚, 冯育林, 邵崇钰, 等. DPPH 法测定芒果叶中总黄酮提取物的抗氧化活性[J]. 中药新药与临床药理, 2014, 25(2): 185–188.
QIN MM, FENG YL, SHAO CY, *et al*. Antioxidant activity of total flavonoid extracts from mango leaves measured by DPPH method [J]. New Drugs for Traditional Chinese Medicine and Clinical Pharmacology, 2014, 25(2): 185–188.

[33] SRIDHAR K, CHARLES AL. *In vitro* antioxidant activity of kyoho grape extracts in DPPH· and ABTS· assays: Estimation methods for EC50 using advanced statistical programs [J]. Food Chemistry, 2018, 275: 41–49.

[34] 海力茜•陶尔大洪, 叶宗鑫, 苑义瑾, 等. 库尔勒香梨复合固体饮料的研制、质量评价及抗氧化性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 73–82.
HAILIQIAN TERDH, YE ZX, YUAN YJ, *et al*. Study on development, quality appraisement and antioxidant property analysis of *Pyrus sinkiangensis* Yu. mixed solid beverage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 73–82.

[35] 耿英龙, 陈钢, 苏伟, 等. 粗糙脉孢菌产番茄红素发酵条件的优化[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 181–185.
GENG YL, CHEN G, SU W, *et al*. Optimization of fermentation conditions for producing lycopene by *Rhizopus truncatus* [J]. Food Science, 2014, 35(17): 181–185.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)