食品与发酵科技
Food and Fermentation Science & Technology
引用格式:张嘉莉,郑洁洵,阮方,等.花青素微胶囊体外消化特性研究及饮料的研制[J].食品与发酵科技,2024,60(6):109-114.

花青素微胶囊体外消化特性研究及饮料的研制

张嘉莉,郑洁洵,阮　方,黄国龙,邓蔼杏,王　硕*
(广州工商学院,广州 510850)

摘　要:利用微胶囊包埋技术,以蓝莓花青素作为芯材,酪蛋白和海藻酸钠作为复合壁材,制备花青素微胶囊,对其进行抗氧化性评价及体外消化特性研究,并进行花青素复合饮料的研制。该研究通过模拟体外胃肠消化环境,以总抗氧化能力为评价指标,对花青素微胶囊消化特性进行评价。结果表明,花青素微胶囊在胃消化阶段表现出较好的稳定性,在肠消化阶段可发挥生物活性。通过单因素和正交试验,以感官评分为评价指标,确定了花青素复合饮料的最优配方为:在600 mL体系中,胡萝卜汁添加量120 mL、豆浆添加量20 mL、花青素微胶囊溶液添加量150 mL、复合甜味剂25 g,在此条件下感官评分为78.00分。

关键词:花青素微胶囊;抗氧化性;体外消化;饮料;加工工艺
中图分类号:TS275.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1674-506X(2024)06-0109-0006

Study on the *in Vitro* Digestion Characteristics of Anthocyanin Microcapsules and Development of Their Beverages

ZHANG Jiali, ZHENG Jiexun, RUAN Fang, HUANG Guolong, DENG Aixing, WANG Shuo*
(*Guangzhou College of Technology and Business, Guangzhou 510850, China*)

Abstract: Using microcapsule embedding technology, anthocyanin microcapsules were prepared by using blueberry anthocyanin as the core material and casein and sodium alginate as the composite wall material, their antioxidant evaluation and *in vitro* digestive characterization study were carried out as well as the beverage development. In this study, the digestive properties of anthocyanin microcapsules were evaluated by simulating the *in vitro* gastrointestinal digestive environment with the total antioxidant capacity as the evaluation index. The results showed that anthocyanin microcapsules embodied a better stability in the gastric digestive stage, and exerted biological activity in the intestinal digestive stage. The optimum anthocyanin composite beverage formulation was determined by single factor and orthogonal tests with sensory score as the main evaluation index: 120 mL of carrot juice, 20 mL of soy milk, 150 mL of anthocyanin microcapsule solution and 25 g of composite sweetener in 600 mL system. The sensory score under this condition was 78.00.

Keywords: anthocyanin microcapsules; antioxidant properties; *in vitro* digestion; beverage; processing
doi:10.3969/j.issn.1674-506X.2024.06-016

微胶囊技术一般指以天然或合成的高分子材料为物质壁材,经过特定加工手段,将形成连续的薄膜包覆于以微小颗粒或微小液滴状态存在的芯材表面的技术[1]。该技术可以降低食品成分在加工、贮藏过程中因光、氧、热等外界因素造成的损失和影响,还能够避免食品中各成分间发生相互作用[2],

收稿日期:2023-12-11
基金项目:2023年广州工商学院校级大学生创新创业训练计划项目(xj202313714116)
作者简介:张嘉莉(2001-),女,本科。研究方向:食品质量与安全。
*__通信作者__:王硕(1987-),女,硕士,助理研究员。研究方向:食品生物活性成分研究。

中国知网　https://www.cnki.net

以达到控制食品成分在特定环境或载体中的释放速度。随着这项技术的不断成熟和完善，其在食品加工领域也愈来愈受到重视。花青素具有抗氧化、保护神经、抗病毒、保护心脏、抗菌等生理功能，但其稳定性较差，限制了其在食品加工生产等领域的应用。采用微胶囊包埋法制备花青素微胶囊，并对其稳定性进行研究具有重要意义，可进一步推动花青素相关功能性食品的发展。体外模拟胃肠消化工程是指在实验室中模拟生物消化的方法，常常被用作替代体内生物环境[3]。相比于体内消化实验，体外消化实验具有成本较低、实验周期短、可重复等优点[4]。因此其也被广泛应用于食品和药品分析领域。

本研究利用微胶囊包埋技术，以花青素作为芯材，酪蛋白和海藻酸钠作为复合壁材，制备花青素微胶囊，通过体外消化实验稳定性研究其稳定性，在此基础上进行花青素复合饮料的研发，以期拓展微胶囊技术在功能性食品研发中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白砂糖、胡萝卜，市售；蓝莓花青素，西安圣青生物科技有限公司；酪蛋白，丰澍（沈阳）食品科技有限公司；海藻酸钠，河南妙味轩食品有限公司；胃蛋白酶、胰蛋白酶，美国Sigma公司；脂肪酶，江苏恒迪生物科技有限公司；猪胆盐，北京华迈科生物技术有限责任公司；磷酸二氢钾、碳酸氢钠，均为分析纯，连云港冠苏实业有限公司；磷酸盐缓冲液，广州和为医药科技有限公司；酶联免疫检测试剂盒，南京博研生物科技有限公司；低聚果糖，山东百龙创园生物科技有限公司；黄豆粉，广西梧州冰泉实业股份有限公司。

1.2 仪器与设备

SHZ-82A气浴恒温振荡培养箱，常州金坛宏华仪器厂；FA1004B电子天平，上海市安亭电子仪器厂；LGJ-12D真空冷冻干燥机，北京四环起航科技有限公司；UV-1000紫外可见光分光光度计，翱艺仪器（上海）有限公司；TGL-16MS台式高速离心机，上海利鑫坚离心机有限公司；BCD-511WP9CZX冰箱，中科美菱低温科技股份有限公司；3205 FP3010打浆机，德国博朗公司。

1.3 试验方法

1.3.1 花青素微胶囊制备

按照酪蛋白∶海藻酸钠∶花青素＝1∶1∶8（*m*/*m*/*m*）的比例分别称量5、5、40 g，充分溶解于50 mL蒸馏水中，静置、过滤后，于－80 ℃、20 Pa条件下进行真空冷冻干燥，得到花青素微胶囊。

1.3.2 花青素微胶囊体外消化特性研究

1.3.2.1 模拟胃液的配制

准确称取2.5 g胃蛋白酶，加少量蒸馏水将其溶解后加入4 mL 0.1 mol/L HCl并用蒸馏水定容至250 mL，用1 mol/L HCl调pH至1.3后置于4 ℃冰箱中保存。

1.3.2.2 模拟肠液的配制

准确称取0.68 g磷酸二氢钾，加少量蒸馏水将其溶解后用4% NaOH溶液定容至100 mL，用1 mol/L NaOH溶液调pH至7.0；另准确称取10.00 g胰蛋白酶用100 mL蒸馏水将其充分溶解；两溶液混合后置于4 ℃冰箱中保存备用[5]。

1.3.2.3 模拟胃消化

准确称取“1.3.1”中制备的花青素微胶囊1.0 g，加50 mL水溶解，得到花青素微胶囊溶液；准确称取1.0 g花青素溶于50 mL水，得到游离花青素溶液。用1 mol/L HCl将花青素微胶囊溶液和游离花青素溶液调pH至1.3，加入模拟胃液75 mL，在37 ℃、100 r/min恒温振荡培养箱中模拟胃消化，并分别在0、1、2、3、4 h取适量样品，于4 ℃、12 000 r/min条件下离心15 min，取上清液，于－20 ℃避光保存，进行总抗氧化能力测定。

1.3.2.4 模拟肠消化

胃消化结束后，向经体外胃消化4 h的游离花青素和花青素微胶囊溶液中加入1 mol/L $NaHCO_3$调pH至7.6，加入模拟肠液和磷酸盐缓冲液各75 mL。将猪胆盐（10 mg/mL）与磷酸盐缓冲液（5 mmol/L，pH 7.0）在室温下连续搅拌过夜制备猪胆盐溶液[5-6]，利用胰蛋白酶配制胰液，然后将上述胃消化液与模拟肠液、胰液、脂肪酶及猪胆盐溶液混合，使胰液、脂肪酶和猪胆盐的最终浓度分别为2.4 mg/mL、3.6 mg/mL和20 mg/mL[7-8]，用1 mol/L $NaHCO_3$调节pH至7.6，然后在37 ℃、100 r/min恒温振荡培养箱模拟肠消化，并分别在0、1、2、3、4 h时取适量样品，于4 ℃、12 000 r/min条件下离心15 min，取上清液，进行总抗氧化能力测定。

1.3.2.5 总抗氧化能力的测定

采用ELISA酶联试剂盒法进行测定，如图1所示，得到标准曲线为$y = 0.037\,5x - 0.026\,2$（$R^2 = 0.998\,5$），线性关系良好，从标准曲线上获得的水溶性维生

中国知网 https://www.cnki.net

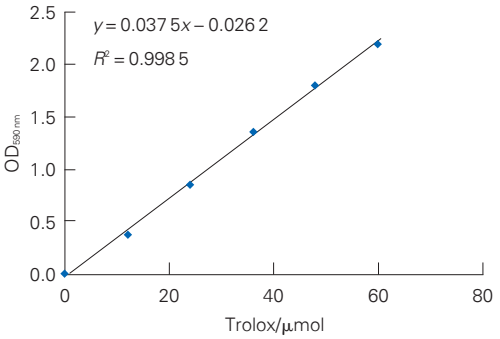

图1　水溶性维生素E标准曲线图

Fig.1　Standard curve of water-soluble vitamin E

素E(Trolox)的量表示样本的总抗氧化能力(μmol Trolox/g)。

1.3.3　花青素复合饮料的研制

1.3.3.1　单因素试验

以花青素微胶囊溶液添加量200 mL、复合甜味剂(白砂糖与低聚果糖质量比为1∶1)添加量20 g、豆浆(黄豆粉与沸水按质量比2∶1进行混合搅拌)添加量30 mL、胡萝卜汁(胡萝卜与水按质量比2∶1进行榨汁后过滤)添加量100 mL为基础配方,上述原料混合后,加入适量蒸馏水搅拌均匀至全部溶解,再用蒸馏水定容至600 mL。分别考察花青素微胶囊溶液添加量(150、200、250、300、350 mL)、复合甜味剂添加量(10、15、20、25、30 g)、豆浆添加量(20、30、40、50、60 mL)、胡萝卜汁添加量(60、80、100、120、140 mL)对感官评分的影响。

1.3.3.2　正交试验

在单因素试验的基础上,确定考察因素为胡萝卜汁添加量、豆浆添加量、花青素微胶囊溶液添加量、复合甜味剂添加量,以感官评分为评价指标,选用$L_9(3^4)$四因素三水平正交试验确定花青素复合饮料的最优配方,正交因素水平见表1。

1.3.3.3　感官评价

选择经过食品感官分析专业训练的10人组成品鉴小组。花青素复合饮料的感官评价总分为100分,分别从色泽(20分)、口感(30分)、香气(20分)、组织状态(30分)四个方面进行评价,感官评价见表2。

表1　正交因素水平表

Tab.1　Orthogonal factors and levels table

水平	因素			
	A 胡萝卜汁添加量/mL	*B* 豆浆添加量/mL	*C* 花青素微胶囊溶液添加量/mL	*D* 复合甜味剂添加量/g
1	80	20	150	15
2	100	30	200	20
3	120	40	250	25

表2　感官评分表

Tab.2　Sensory score table

评价指标	评分标准	得分/分
色泽(20分)	色泽均匀、光泽度较好	15～20
	色泽较均匀、有一定光泽	10～14
	色泽不均匀、光泽度差	0～9
口感(30分)	甜味适中、无苦涩味、豆浆胡萝卜风味协调	20～30
	偏甜、略有苦涩味、豆浆胡萝卜风味较协调	9～19
	过甜、苦涩味较重、豆浆胡萝卜风味不协调	0～8
香气(20分)	豆浆胡萝卜香味协调	15～20
	豆浆胡萝卜香味较协调	9～14
	豆浆胡萝卜香味不协调	0～8
组织状态(30分)	无沉淀、无分层现象	20～30
	少许沉淀、有分层现象	9～19
	有沉淀、有分层现象	0～8

中国知网　https://www.cnki.net

1.4 数据处理

利用Excel 2010进行数据分析与图表制作。

2 结果分析

2.1 花青素微胶囊体外消化特性研究结果

2.1.1 不同消化时间下花青素体外模拟胃消化结果

如图2所示，经胃部的初步消化，游离花青素的总抗氧化能力在0～1 h内从0.139 μmol Trolox/g降到0.111 μmol Trolox/g；而后未被消化的游离花青素在胃部持续发挥作用，在2 h时总抗氧化能力上升至0.219 μmol Trolox/g，说明胃的消化作用刺激花青素发挥生物活性；在2～4 h内，经胃酸的持续作用，游离花青素被反应消耗导致总抗氧化能力开始下降，并在胃部消化结束时降至0.166 μmol Trolox/g。随着胃消化的进行，花青素微胶囊开始发生部分分解，部分花青素逸出微胶囊体系，花青素微胶囊的总抗氧化能力上升且趋于稳定。在0～2 h花青素微胶囊总抗氧化能力随消化时间增加缓慢升高，从0.084 μmol Trolox/g逐步上升至0.145 μmol Trolox/g。体外模拟胃消化各阶段过程中花青素微胶囊的总抗氧化能力均小于游离花青素的总抗氧化能力，说明微胶囊壁材对芯材花青素起到保护作用，芯材未完全释放，证明花青素微胶囊在胃消化阶段具有较好的稳定性。

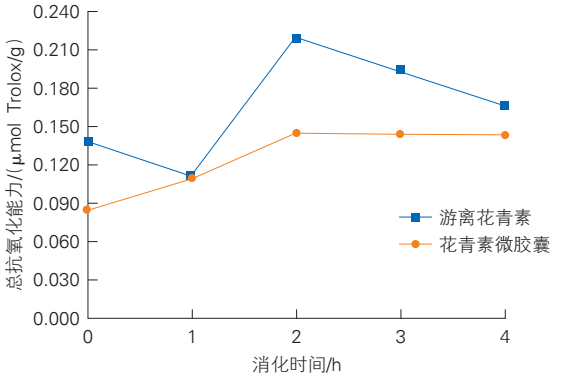

图2 不同消化时间下花青素体外模拟胃消化过程的总抗氧化能力变化

Fig.2 Changes in total antioxidant capacity of anthocyanins in different time *in vitro* simulating gastric digestion process

2.1.2 不同消化时间下花青素体外模拟肠消化结果

如图3所示，体外模拟肠消化各阶段过程中花青素微胶囊的总抗氧化能力均大于游离花青素的总抗氧化能力，说明花青素微胶囊在肠消化阶段逐步释放活性物质。

由于胃消化液转移至肠消化过程中，消化仍在

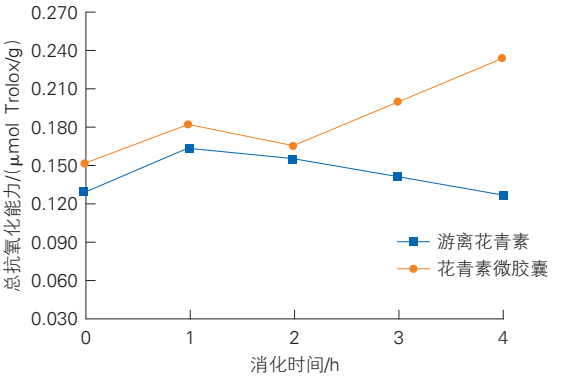

图3 不同消化时间下花青素体外模拟肠消化过程的总抗氧化能力变化

Fig.3 Changes in total antioxidant capacity of anthocyanins in different time *in vitro* simulating the intestinal digestion process

继续，且消化液中的花青素在转移过程中，会造成一定的消耗，导致总抗氧化能力有轻微变动，故肠消化0 h时的总抗氧化能力比胃消化结束时略低。肠消化过程中，游离花青素的总抗氧化能力始终处于较低水平，0～1 h总抗氧化能力升高，之后逐渐降低，说明经体外模拟胃消化后进行体外模拟肠消化的游离花青素活性物质大部分已在胃消化阶段被消化分解，仅有小部分能够进入肠消化阶段发挥生物活性，生物利用率低。

肠消化阶段，0～2 h花青素微胶囊的总抗氧化能力变化不明显，2～4 h总抗氧化能力逐渐上升，说明随消化时间的增加，复合微胶囊壁材逐渐溶解，被包裹的花青素暴露后开始逐渐发挥生物活性，表明复合壁材减少了花青素在胃液中的降解损失，使活性物质进入肠液中发挥作用，提高了花青素的生物利用率。

2.2 花青素复合饮料的研制结果分析

2.2.1 单因素试验结果分析

2.2.1.1 豆浆添加量的确定

由图4可知，当豆浆添加量过少时，复合饮料中豆浆香气不足，感官评分较低。当豆浆添加量为30 mL时，感官评分达到最高为72.50分。随着豆浆添加量的增加豆腥味加重，导致感官评分降低。

2.2.1.2 胡萝卜汁添加量的确定

由图5可知，当胡萝卜汁添加量在60～100 mL范围内，复合饮料的感官评分呈上升趋势，在添加量为100 mL时，复合饮料感官评分达到最高为76.10分。当胡萝卜汁添加量超过100 mL时，由于胡萝卜汁添加量的增加，导致胡萝卜味道过于突

中国知网 https://www.cnki.net

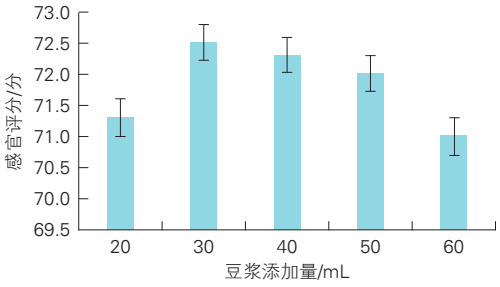

图4　豆浆添加量对饮料品质的影响

Fig.4　Effect of soy milk addition on beverage quality

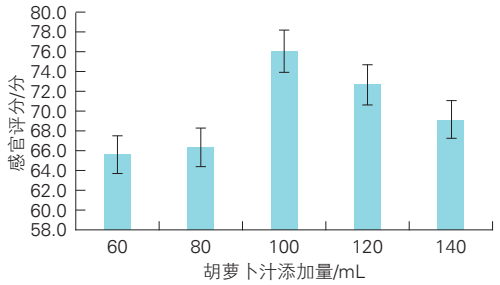

图5　胡萝卜汁添加量对饮料品质的影响

Fig.5　Effect of carrot juice addition on beverage quality

出,造成感官评分开始降低。

2.2.1.3　花青素微胶囊溶液添加量的确定

由图6可知,当花青素微胶囊溶液添加量逐渐增多时,感官评分先升高后降低。当花青素微胶囊溶液添加量为200 mL时,复合饮料的感官评分达到最高为70.30分。随着花青素微胶囊溶液添加量继续增加,导致口感略带苦涩味,因此感官评分开始下降。

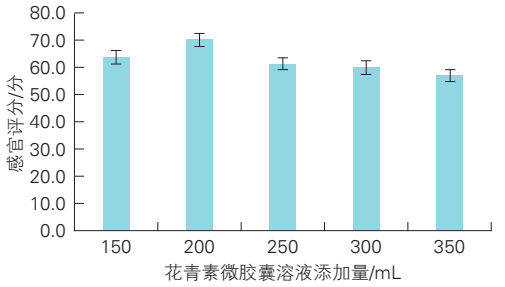

图6　花青素微胶囊溶液添加量对饮料品质的影响

Fig.6　Effect of anthocyanin microcapsule solution addition on beverage quality

2.2.1.4　复合甜味剂添加量对饮料品质的影响

由图7可知,随复合甜味剂添加量的增加,感官评分呈先降低再升高后降低的趋势。当复合甜味剂添加量为20 g时,感官评分达到最高为70.30分。随着复合甜味剂添加量的继续增加,花青素复合饮料因甜度过大导致感官评分开始下降。

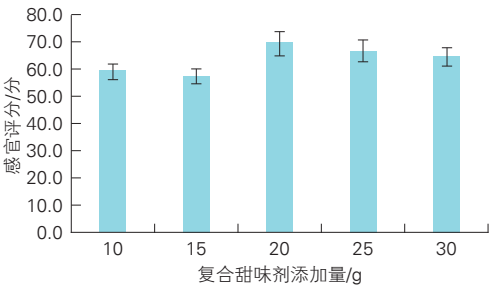

图7　复合甜味剂对饮料品质的影响

Fig.7　Effect of composite sweetener on beverage quality

2.3　正交试验结果分析

正交试验结果见表3,由极差结果可知,影响花青素复合饮料感官评分的因素大小为$A>D>B>C$,即胡萝卜汁添加量>复合甜味剂添加量>豆浆添加量>花青素微胶囊溶液添加量。由k值得到的最优组合为$A_3B_1C_1D_3$,即胡萝卜汁添加量为120 mL、豆浆添加量为20 mL、花青素微胶囊溶液添加量为150 mL、复合甜味剂添加量为25 g。将$A_3B_1C_1D_3$与正交试验中感官评分最高的组合($A_3B_1C_3D_2$)进行对比验证试验,结果表明,$A_3B_1C_3D_2$组合感官评分为75.00分,$A_3B_1C_1D_3$组合感官评分为78.00分,因此,最佳配方组合为$A_3B_1C_1D_3$。

3　结论

本研究采用微胶囊包埋技术以酪蛋白和海藻酸钠作为复合壁材制备蓝莓花青素微胶囊溶液,并

表3　正交试验结果与分析表

Tab.3　Orthogonal test results and analysis table

试验号	A	B	C	D	感官评分/分
1	1	1	1	1	64.90
2	1	2	2	2	57.70
3	1	3	3	3	62.30
4	2	1	2	3	67.50
5	2	2	3	1	53.60
6	2	3	1	2	63.00
7	3	1	3	2	76.20
8	3	2	1	3	75.10
9	3	3	2	1	60.80
k_1	61.63	69.53	67.67	59.77	
k_2	61.37	62.13	62.00	65.63	
k_3	70.70	62.03	64.03	68.30	
R	9.33	7.50	5.67	8.53	

中国知网　https://www.cnki.net

将其应用于饮料的研制。结果表明，微胶囊包埋法能有效提高花青素的消化稳定性，缓解胃消化环境对芯材的影响，并在肠消化环境中表现出较好的生物活性。

试验以花青素微胶囊溶液、胡萝卜汁、豆浆、复合甜味剂为主要原料，进行复合饮料的研制。通过单因素试验和正交试验确定了饮料最优配方，即在600 mL体系中，胡萝卜汁添加量为120 mL、豆浆添加量为20 mL、花青素微胶囊溶液添加量为150 mL、复合甜味剂为25 g，按照此配方制作的饮料感官评分为78.00分。本研究拓展了微胶囊包埋技术在饮料研发中的应用。

参考文献

[1] VANEGAS-ESPINOZA P E, PÉREZ-ESCALANTE V, AGUIRRE-GUZMAN G, et al. Microencapsulation of anthocyanins from roselle (*Hibiscus sabdariffa*) and its application on a pigment supplied diet to fantail goldfish (*Carassius auratus*)[J]. Aquaculture International, 2019, 27(6):1801-1811.

[2] 沙飞翔，程国君，唐忠锋，等.相变材料微胶囊化封装技术的研究进展[J].化学世界，2023，64(3)：141-148.

[3] 焦梦彦，姜亚明，刘元军，等.基于微胶囊技术的芳香纺织品研究进展[J].丝绸，2023，60(5)：42-51.

[4] 徐雯，王振南，蒲仕文，等.体外消化模型研究进展及其在食品中的应用[J].食品与发酵工业，2022，48(10)：321-327.

[5] 郑敏，苏福联，黄东海，等.葛根固体饮料的配方优化及体外模拟消化研究[J].食品安全质量检测学报，2023，14(2)：287-296.

[6] 范利君，宋安康，王志鹏，等.葡萄籽多酚提取物在体外模拟消化过程中抗氧化成分及抗氧化活性的变化[J].食品科技，2022，47(6)：235-242.

[7] 纪秀凤，吕长鑫，芦宇，等.红树莓籽黄酮微胶囊工艺优化及其体外模拟胃肠消化[J].食品工业科技，2019，40(5)：182-187.

[8] 马娟娟.基于玉米醇溶蛋白构建槲皮素输送载体的生物活性及生物利用度研究[D].广州：华南理工大学，2021.

（上接第104页）

[8] LIU M H, ZHANG Q, ZHANG Y H, et al. Chemical analysis of dietary constituents in *Rosa roxburghii* and *Rosa sterilis* fruits[J]. Molecules, 2016, 21(9):1204.

[9] KARAMI F, GHORBANI M, MAHOONAK A S, et al. Green technology for production of potent antioxidants and alkyl glucosides by *Aspergillus niger* β-glucosidase: prospects for broad application in the food industry[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16:1834-1846.

[10] RUVIARO A R, BARBOSA P D P M, MACEDO G A. Enzyme-assisted biotransformation increases hesperetin content in citrus juice by-products[J]. Food Research International, 2019, 124:213-221.

[11] SHENG X F, HUANG M Z, LI T T, et al. Characterization of aroma compounds in *Rosa roxburghii* Tratt using solvent-assisted flavor evaporation headspace-solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18:100632.

[12] 张波，杨若琦，孙红艳.西柚皮多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J].食品研究与开发，2023，44(9)：106-111.

[13] 李美凤，赵建伟，王晓雅，等.松露多酚的提取纯化工艺研究[J].中国调味品，2023，48(5)：131-135.

[14] LIU Y J, ZHANG S, TANG L, et al. Analysis of the effects of *Rosa roxburghii* Tratt fruit polyphenols on immune function in mice through gut microbiota and metabolomics: an *in vivo* preclinical trial study [J]. Journal of Functional Foods, 2023, 102:105464.

[15] 施森，李飞雪，张倩勉.奶茶中茶多酚含量测定方法的优化[J].轻工科技，2023，39(1)：27-30.

[16] ZHOU M, WEN C J, MING Y, et al. Distribution and bioactivity of polyphenols in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill[J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(3): 463-469.

[17] 张澜，段耿婷，刘森林，等.影响茶树硒积累的单因素及正交实验分析[J/OL].分子植物育种，1-15[2023-12-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230322.1117.007.html.

[18] 黄浩天，朱嘉贤，谭慧琳，等.响应面优化复方茶多酚口腔溃疡喷膜剂制备处方[J].生物化工，2023，9(1)：35-42.

[19] 杨赐珠，许萍，黄静榕，等.响应面法优化索氏提取甘蔗梢多酚和黄酮的工艺条件[J].福建师范大学学报(自然科学版)，2023，39(2)：104-112.

[20] 杨东松，张嘉琪，张海福，等.响应面法优化紫苏干贝海鲜酱工艺研究[J].中国调味品，2021，46(12)：119-125.

[21] CHEN S F, YU Y. Response surface methodology for optimization of bisphenol a degradation using Fe_3O_4-activated persulfate[J]. Catalysts, 2023, 13(1):128.

[22] VAN N T T, GASPILLO P A, THANH H G T, et al. Cellulose from the banana stem: optimization of extraction by response surface methodology (RSM) and charaterization[J]. Heliyon, 2022, 8(12):e11845.

中国知网 https://www.cnki.net