袁蜜, 敬磊, 陈乐乐, 等. 原花青素微胶囊酸奶片对 D-gal 致衰老小鼠的体内抗氧化作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 413−424. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120411
YUAN Mi, JING Lei, CHEN Lele, et al. *In Vivo* Antioxidant Effects of Proanthocyanidin Microencapsulated Yogurt Tablets in D-galactose-induced Aging Mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 413−424. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120411

·营养与保健·

原花青素微胶囊酸奶片对 D-gal 致衰老小鼠的体内抗氧化作用

袁　蜜, 敬　磊, 陈乐乐, 杨晓君*
（新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052）

摘　要: 目的：研制具有抗氧化作用的原花青素微胶囊酸奶片，为原花青素产品的开发提供新的途径。方法：通过单因素实验及响应面优化方法，确定原花青素微胶囊酸奶片的最佳配方，对酸奶片的营养成分及货架期进行测定；通过小鼠跳台实验和避暗实验对小鼠的短时记忆能力进行评价；建立 D-半乳糖（D-gal）诱导衰老小鼠模型，分为空白组、模型组、阳性组，美拉德反应高、中、低剂量组，未发生美拉德反应组、原花青素组和未含原花青素组，每组 10 只，干预 42 d 后，测定小鼠血清、肝脏及脑组织中谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）、总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性以及丙二醛（MDA）含量；结合对小鼠肝脏和脑组织的细胞形态观察，综合分析原花青素微胶囊酸奶片对 D-gal 致衰老模型小鼠的影响。结果：原花青素微胶囊酸奶片的配方为：发酵乳粉 70.5%、原花青素微胶囊 20.0%、麦芽糊精 5.1%、乳粉 3.8%、二氧化硅添加量 0.6%。发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（ME-MRPs-PC）高剂量组（MH：202.5 mg/10 g）能显著延长衰老小鼠潜伏期，并减少错误次数（$P<0.05$，$P<0.01$）。在生理指标方面，MH 组小鼠血清的 GSH-Px（$P<0.01$）、SOD 活性极显著提高（$P<0.01$），降低 MDA 含量（$P<0.05$，$P<0.01$）。MH 组小鼠肝脏组织少部分细胞出现凋亡、空泡，被炎症细胞浸润，大部分的细胞排列紧密有序；脑组织少部分神经细胞出现空泡，胞核固缩深染，大部分的细胞排列紧密有序。结论：原花青素微胶囊酸奶片具有潜在的抗衰老作用，可能通过改善氧化应激状态和维持生理功能来延缓衰老过程。

关键词: 原花青素微胶囊, 酸奶片, 美拉德反应, 抗氧化, 小鼠衰老模型
中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0413−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120411
本文网刊:

In Vivo Antioxidant Effects of Proanthocyanidin Microencapsulated Yogurt Tablets in D-galactose-induced Aging Mice

YUAN Mi, JING Lei, CHEN Lele, YANG Xiaojun*
（College of Food Science and Pharmacology, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China）

Abstract: To develop proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets with antioxidant properties, providing a new avenue for the development of proanthocyanidin-based products. Methods: The optimal formulation of the proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets was determined through single-factor experiments and response surface optimization. The nutritional composition and shelf life of the yogurt tablets were assessed. The short-term memory of mice was evaluated using the step-down test and the dark avoidance test. A D-galactose (D-gal)-induced aging mouse model was established, with groups including the control group, model group, positive control group, high, medium, and low Maillard reaction dose groups, the non-Maillard reaction group, the proanthocyanidin group, and the non-proanthocyanidin group, each consisting of 10 mice. After 42 days of intervention, the activities of glutathione peroxidase (GSH-Px) and total superoxide dismutase (T-SOD), as well as the malondialdehyde (MDA) content in the serum, liver, and brain tissues of the mice were measured. Additionally, cell morphology of liver and brain tissues was observed, and the effects of

收稿日期: 2025−01−02
作者简介: 袁蜜（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: yuanmi0823@163.com。
*** 通信作者:** 杨晓君（1971−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 天然产物活性成分与功能性评价, E-mail: xjxiaojuny@163.com。

proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets on the D-gal-induced aging mouse model were comprehensively analyzed. Results: The optimal formulation of the proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets was found to be as follows: 70.5% fermented milk powder, 20.0% proanthocyanidin microcapsules, 5.1% maltodextrin, 3.8% milk powder, and 0.6% silica. The high-dose Maillard reaction group (MH: 202.5 mg/10 g) of proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets (ME-MRPs-PC) significantly prolonged the latency period of aging mice and reduced error frequency (P<0.05, P<0.01). In terms of physiological indices, the MH group extremely significantly increased serum GSH-Px (P<0.01) and SOD activity (P<0.01), while decreasing MDA levels (P<0.05, P<0.01). In the liver tissue of MH group mice, some cells exhibited apoptosis, vacuolation, and were infiltrated by inflammatory cells, while most cells were tightly and orderly arranged. In brain tissue, some neurons showed vacuolation and nuclear pyknosis and hyperchromasia, while the majority of cells were closely and orderly arranged. Conclusion: Proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets have potential anti-aging effects, likely through improving oxidative stress and maintaining physiological functions to delay the aging process.

Key words: proanthocyanidin microcapsules; yogurt tablets; Maillard reaction; anti-aging; aging model mice

生物体的衰老过程主要表现为机体组织和细胞中自由基的累积[1]。自由基是具有未配对电子的分子或原子,通过氧化还原反应生成[2]。它们的形成受氧化应激、环境污染、辐射和不良生活习惯的影响。过量的自由基会引发衰老、心血管疾病和癌症等问题[3]。食物污染是体内自由基的重要来源之一[4]。尽管无法完全避免自由基的产生,抗氧化剂可以有效清除过量自由基,维持体内平衡。研究表明,抗氧化剂能抵消自由基的危害[5]。随着功能性食品需求的增长,富含抗氧化成分的天然产物受到广泛认可[6]。

原花青素(Proanthocyanidins, PC)是一种天然成分,安全且来源广泛。它不仅可丰富口感,还具有营养价值,可用于酸奶、蛋糕等食品中以改善其性状;也可添加到功能性饮料和果汁中,增强抗氧化能力,为健康提供益处;此外,它常以胶囊、片剂或粉末形式作为保健品和营养补充剂的主要成分之一[7]。微胶囊化[8]是将活性成分包裹在微小胶囊中的过程,具有保护、控释和提高稳定性等功能。该技术可以精确控制活性成分的释放速率、时间和位置,使其成为长效药物运输系统的优选方案,适用于不同物质的释放需求[9]。

随着食品安全问题的关注度提升,消费者对食品成分的要求越来越高。当前,新疆乳品企业主要生产酸奶、巴氏灭菌乳和奶酪等产品,干乳制品种类较少。特别是奶片产品种类相对单一,缺乏新品开发[10]。为进一步满足市场需求,本研究旨在研制一款具有抗氧化功能的酸奶片。采用发酵乳冻干粉为主料,添加原花青素微胶囊[11],制备酸奶片;并通过响应面优化确定最佳配方,进行理化指标分析。同时,基于 D-半乳糖诱导的小鼠衰老模型探讨 ME-MRPs-PC 的抗氧化作用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

至简酸奶(零蔗糖、无添加)、乳粉(全脂乳粉) 新疆西域春乳业有限责任公司;二氧化硅(食品级) 上海泰鑫食品有限公司;原花青素微胶囊(ME-MRPs-PC) 实验室自制;谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)比色法测实盒、总超氧化物歧化酶(T-SOD)比色法测实盒、丙二醛(MDA)比色法测实盒、BCA 蛋白浓度测定实剂盒 北京索莱宝科技有限公司;昆明小鼠(18±2 g) 均购自新疆医科大学实验动物中心,动物使用许可证号:SYXJ(新)2022-0002。

LGJ-12 真空冷冻干燥机 上海腾方仪器设备有限公司;DP30 单冲压片机 上海天凡药机制造厂;CF07X7-100B 储存封口机 广东美的生活电器制作有限公司;SPX-100 生化培养箱 上海申贤恒温设备厂;DT-200 小鼠跳台仪、BA-200 小鼠避暗仪 成都泰盟软件有限公司;Epoch 多功能酶标仪 美国伯腾仪器有限公司(BioTek);D1008E 涡旋仪 美国赛洛捷克公司(SCILOGEX);ICV-450 电热恒温培养箱 日本 ASONE 公司;H1650-W 台式微量高速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;Hrr6 数显恒温水浴锅 上海力辰仪器科技有限公司;UA-1800 紫外分光光度计 上海翱艺仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原花青素微胶囊酸奶片工艺流程 工艺流程:原辅料→备料→配料(预混)→混料→投料→压片→包装。称取真空冷冻干燥获得的发酵乳粉与辅料进行预混,再添加二氧化硅混合均匀,干法制粒,压制成片,塑封袋真空独立包装[11]。

1.2.2 原花青素微胶囊酸奶片配方设计原则 参考《中国居民膳食指南(2022)》[12]建议每天摄入 300 g 以上液态奶制品。发酵乳粉在复溶比例 1∶8 时其营养价值与酸奶类似。因此,设置原花青素微胶囊酸奶片质量规格为 30 g/包,相当于每天饮用 270 g 酸奶。

1.2.3 原花青素微胶囊酸奶片配方优化的单因素及响应面试验

1.2.3.1 单因素实验 参照 DBS 65/021-2020《食品安全地方标准 奶片》[13]。原花青素微胶囊酸奶片所添加的发酵乳粉,均为新疆西域春“至简”酸奶经真空冷冻干燥后所得,其在酸奶片中的添加量需 70%。

《中国居民膳食营养素参考摄入量速查手册

（2013版）》[14] 中建议原花青素每日摄入上限为 800 mg，原花青素微胶囊酸奶片中的原花青素微胶囊均为实验室自制[11]，选择 ME-MRPs-PC 作为实验原料，原花青素含量为 50 mg/g，结合原花青素微胶囊酸奶片 30 g/包的规格，其在酸奶片中的添加量需 53%。

GB 2760-2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》[15] 中规定在奶片产品中，二氧化硅的添加限量为 15 g/kg，其在原花青素微胶囊酸奶片中的添加量需 1.5%；乳粉的添加根据需要，适量即可；选用麦芽糊精对专用奶粉设计量进行补充。当葡萄糖值（Dextrose Equivalent, DE）在 9~12 时，麦芽糊精无甜味、不易吸潮及褐变。

以原花青素微胶囊 20.00%，二氧化硅 0.60%，乳粉 3.00% 为固定因素水平，以发酵乳粉的添加量（70.00%、70.50%、71.00%、71.50%、72.00%），原花青素微胶囊的添加量（18.00%、19.00%、20.00%、21.00%、22.00%），乳粉的添加量（1.00%、2.00%、3.00%、4.00%、5.00%），二氧化硅的添加量（0.20%、0.40%、0.60%、0.80%、1.00%）为单因素，考察发酵乳粉、原花青素微胶囊、二氧化硅和乳粉的添加量对原花青素微胶囊酸奶片感官的影响，总量不足 100% 时用麦芽糊精进行补充。

1.2.3.2　响应面试验　根据单因素实验得出的结果，选择对感官评分影响较大的发酵乳粉添加量、原花青素微胶囊添加量、乳粉添加量三个因素为考察对象进行 Box-Behnken 设计，以感官评价为指标，优化原花青素微胶囊酸奶片配方，表 1 为各因素的水平设计，二氧化硅的添加量为 0.60%，总量不足 100% 用麦芽糊精进行补充。

表 1　Box-Behnken 设计因素设计水平

Table 1　Box-Behnken design factor design level

水平	因素		
	A发酵乳粉添加量（%）	B原花青素微胶囊添加量（%）	C乳粉添加量（%）
−1	70.00	19.00	3.00
0	70.50	20.00	4.00
+1	71.00	21.00	5.00

1.2.4　感官评价　结合 DBS 65/021-2020《食品安全地方标准 奶片》[13] 中的感官要求，以原花青素微胶囊酸奶片的外观、滋气味、色泽等综合情况，设置感官评分标准，见表 2，邀请食品专业人员 20 名按照表格进行打分。

1.2.5　营养成分、污染物、真菌毒素及微生物检测　参考 DBS 65/021-2020《食品安全地方标准 奶片》[13] 中风味发酵牛（羊）奶片理化指标要求、污染物限量、真菌毒素限量要求及微生物限量要求。

1.2.6　货架期预测实验　通过应用加速货架寿命实验方法（Accelerated Shelf Life Testing, ALST），加速

表 2　感官评分标准

Table 2　Sensory scoring standard

项目	特征	得分（分）
外观（10%）	成型不完整，有破损	1~3
	成型较为完整，有轻微破损	4~6
	成型完整，无破损，表面无粉尘	7~10
滋气味（20%）	异常不愉快气味，腐败味	<11
	酸奶香味不太明显，或酸甜有一方明显偏重	11~15
	浓郁的酸奶味，酸甜适中	16~20
色泽（10%）	浅黄色到暗黄色，原花青素颗粒多数破碎	1~3
	乳白色到浅黄色，原花青素颗粒微量破碎	4~6
	乳白色，原花青素颗粒完好无破碎	7~10
组织状态（30%）	表面有杂质或霉斑，破损严重，不成型	<11
	形态基本完整，薄厚可接受，硬度或酥脆度有一方明显偏重	11~20
	形态完整，大小均匀，无肉眼可见杂质，硬度酥脆度适中	21~30
口感（30%）	较糊口，明显粉粒感，咀嚼性差	<11
	顺滑，不糊口，粉粒感较轻，咀嚼性好	11~20
	爽口，细腻，顺滑，咀嚼性好	21~30

产品品质变化，对原花青素微胶囊酸奶片的货架期进行快速的预测[16−17]。Q_{10} 指温度对反应的灵敏度。

原花青素微胶囊酸奶片属于干燥类食品，Q_{10} 一般为 1.5~10，本款原花青素微胶囊酸奶片 Q_{10} 暂定为 2，把真空包装后的成品置于三个不同的贮藏温度（4、25、35 ℃）中，4 ℃ 为对照实验温度，25 ℃ 及 35 ℃ 为加速实验温度，35 ℃ 实验组的样品每 5 d 检测一次，根据公式，25 ℃ 实验组的样品每 10 d 检测一次。预计实验 90 d，4 ℃ 实验组的样品每 15 d 检测一次，检测时随机取 3 片平行样进行检测，测定感官评定分数。

$$f_1 = f_2 \times Q_{10}^{\frac{\Delta T}{10}}$$

$$Q_{10} = \frac{C_1}{C_2}$$

$$Q_s(T_1) = Q_s(T_2) \times Q_{10}^{\frac{\Delta T}{10}}$$

式中：f_1 为较低温度 T_1 每次测样的时间间隔；f_2 为较高温度 T_2 每次测样的时间间隔；C_1 为 T 温度下货架期；C_2 为 T+10 温度下货架期；Q_S 为货架期；T_1 为较低温度；T_2 为较高温度；ΔT 为 T_1 与 T_2 的温度差，℃。

1.2.7　衰老小鼠模型建立及动物分组　动物实验经过新疆农业大学伦理委员会批准（伦理号：2021003）。参考文献 [18−19]，选取体重 18±2 g 的健康成年雄性昆明小鼠 90 只，适应性喂养 7 d 后，随机分组，分为模型组（D-gal）、空白组（con）、阳性组（V_C）、每组 10 只，设计实验。剂量计算：按照成年人（以体重 60 kg 计）每日推荐食用 30.0 g 乳制品换算，小鼠的推荐食用量为 45.0 mg/10 g·bw，故小鼠给药剂量为低（90.0 mg/10 g·bw），中（135.0 mg/10 g·bw），高（202.5 mg/10 g·bw）。阳性组（V_C）灌胃 V_C 2.0 mg/

10 g·bw, 空白组(Con)与 D-gal 模型组灌胃等量的生理盐水。

除空白组(Con)外, 其余组每日腹腔注射 D-gal 500.0 mg/kg.bw, Con 每日腹腔注射等量的生理盐水, 持续 42 d, 从第 21 d 开始, 对各组小鼠进行腹腔注射及灌胃, 腹腔注射及灌胃的补充剂溶媒均为生理盐水。实验具体分组灌胃剂量及注射量如表 3 所示。

表 3 原花青素微胶囊酸奶对 D-半乳糖致衰老模型小鼠的影响实验分组

Table 3 Effect of proanthocyanidins microencapsulated yogurt on D-galactose-induced aging model mice test groups

分组	简写	腹腔注射		灌胃	
		补充剂	剂量	补充剂	剂量
空白组	Con	生理盐水	0.1 mL/10 g	生理盐水	0.2 mL/10 g
模型组	D-gal			生理盐水	0.2 mL/10 g
阳性组	V_C			V_C	2.0 mg/10 g
ME-MRPs-PC 酸奶片组	ML			ME-MRPs-PC 酸奶片	90.0 mg/10 g
	MM				135.0 mg/10 g
	MH	D-gal	500.0 mg/kg		202.5 mg/10 g
ME-WPI-X-PC 酸奶片组	WH			ME-WPI-X-PC 酸奶片	202.5 mg/10 g
PC酸奶片组	PH			PC酸奶片	202.5 mg/10 g
酸奶片组	YH			酸奶片	202.5 mg/10 g

依照原花青素微胶囊酸奶片配方, 制备相同原花青素含量的发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片(ME-MRPs-PC 酸奶片)[11]、未发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片(ME-WPI-X-PC 酸奶片)、原花青素酸奶片(PC 酸奶片)和不含原花青素的酸奶片(酸奶片)。

1.2.8 小鼠行为学实验

1.2.8.1 跳台实验 将小鼠放入反应箱内平台上, 适应环境 3 min 后立即通以 32 V 的交流电使小鼠受到电击, 并开始计时, 小鼠首次跳下平台的计时值为潜伏期。本实验训练小鼠时间设置为 5 min, 记录训练时间内的错误次数, 以此作为学习成绩。间隔 24 h 后进行第 2 次实验。给药后, 记录每只小鼠的潜伏期以及在 5 min 内出现的错误次数[18,20]。

1.2.8.2 避暗实验 将小鼠头部背向洞口放入避暗仪明室, 适应环境 3 min 后立即通以 33 V 的交流电使小鼠受到电击, 并开始计时, 小鼠首次进入洞口到达暗室时的计时值为潜伏期。本实验训练小鼠时间设置为 5 min, 记录训练时间内的错误次数, 并记录在 5 min 内小鼠的错误次数, 以此作为学习成绩。间隔 24 h 后进行第 2 次实验。给药后, 记录每只小鼠的潜伏期以及在 5 min 内出现的错误次数[21−22]。

1.2.8.3 小鼠体重及脏器指数 喂养期间, 需每天观察各组小鼠的基本情况, 每 3 d 称量小鼠体重; 并在各组末次灌胃后, 禁食 12 h, 将各组小鼠最后一次称重, 采血后, 分离心脏、肝脏、脾脏、肺、肾脏、胸腺, 准确称取其重量, 并计算各组的脏器指数。

$$\text{脏器指数(mg/g)} = \frac{\text{脏器质量(mg)}}{\text{小鼠最终体重(g)}}$$

1.2.8.4 小鼠样本处理 按照试剂盒方法对小鼠血清及肝脏组织进行前处理, 待测。将新鲜组织固定于 4% 多聚甲醛 24 h 以上, 经修切、脱水、包埋、切片、脱蜡、染色、脱水及封片, 制备组织切片。显微镜镜检, 图像采集分析。

1.2.8.5 小鼠生化指标测定 按试剂盒说明书配制好相应实剂, 对小鼠血清、肝脏及脑组织中谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活力、超氧化物歧化酶(SOD)活力、丙二醛(MDA)含量进行测定。

1.3 数据处理

所有测量至少重复 3 次, 所有结果均显示为平均值±标准差($\overline{X}\pm S$)。本实验使用 IBM SPSS Statistics 27、Design-Expert 13 对数据进行统计及分析, $P<0.05$ 作为差异显著的界值, $P<0.01$ 作为差异极显著的界值; 利用 Origin 2021 和 GraphPad Prism 9 软件对分析数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

由图 1(A)所示, 随着发酵乳粉添加量的增加, 在添加量 70.00%~72.00% 的范围内感官评分呈现先上升后降低的趋势, 当发酵乳粉添加量达到 70.50% 时, 原花青素微胶囊酸奶片的感官评分为 90.59±1.55 分, 达到最高值, 发酵乳粉添加过高时可能导致原花青素微胶囊酸奶片整体口感偏酸, 打破酸甜平衡, 并不适宜, 故后续实验中发酵乳粉添加量的取值范围应为 70.00%、70.50%、71.00%。

由图 1(B)所示, 随着原花青素微胶囊添加量的增加, 在添加量 18.0%~22.0% 的范围内感官评分呈现先缓慢上升后下降的趋势, 当添加量达到 20.0% 时, 原花青素微胶囊酸奶片的感官评分为 90.54±1.22 分, 达到最高值。根据感官评价标准判断, 可能是因为原花青素微胶囊量添加过高, 导致原花青素微胶囊酸奶片表面存在大量的微囊碎片, 外观不适, 同时影响口感颗粒感较重, 并不适宜, 故后续实验中原花青素微胶囊添加量的取值范围应为 19.00%、20.00%、21.00%。

由图 1(C)所示, 随着乳粉添加量的增加, 在添加量 1.0%~5.0% 的范围内感官评分呈现先上升后降低的趋势, 当乳粉添加量达到 4.0% 时, 原花青素微胶囊酸奶片的感官评分为 90.46±1.28 分, 达到最高值, 乳粉添加量较少时可能导致原花青素微胶囊酸奶片整体口感偏酸, 奶香味较弱, 并不适宜, 故后续实验中乳粉添加量的取值范围应为 3.00%、4.00%、5.00%。

由图 1(D)所示, 随着二氧化硅添加量的增加, 在添加量 0.2%~1.0% 的范围内感官评分无明显变化。参考任敏等[23] 的奶片配方, 二氧化硅作为防絮剂可

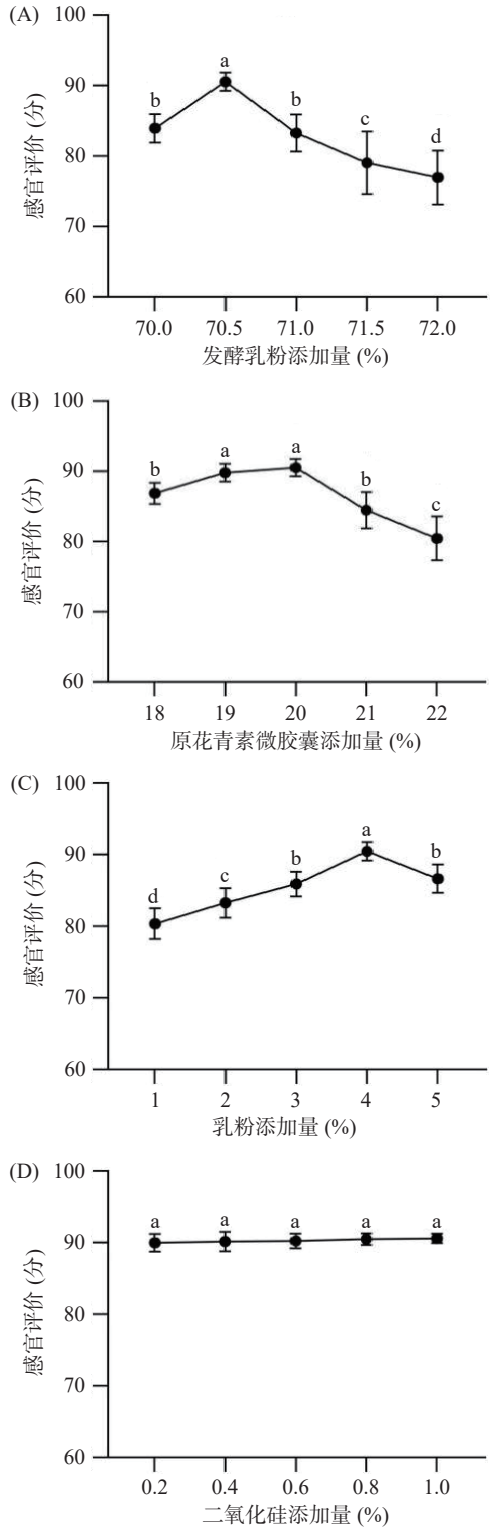


图 1　各因素对原花青素微胶囊感官评分的影响

Fig.1　Effects of various factors on the sensory score of proanthocyanidin microcapsules

注：不同小写字母表示有显著性差异（P<0.05）。

以有效保持奶片的均匀性和口感，且具有一定的吸湿性，可以吸收产品中的一部分水分，有助于延长奶片的保质期并减少霉菌和细菌的生长。以尽量减少添加剂为原则，后续实验中二氧化硅添加量为 0.6%。

2.2　响应面试验结果

在单因素实验的基础上，选择原花青素微胶囊酸奶片感官评分作为响应值，发酵乳粉（A）、原花青素微胶囊（B）、乳粉（C）添加量三者为变量，进行响应面试验，响应面试验结果如表 4 所示。

表 4　Box-Behnken 响应面试验设计与结果

Table 4　Design and results of Box-Behnken response surface experimental

实验号	A: 发酵乳粉添加量(%)	B: 原花青素微胶囊添加量(%)	C: 乳粉添加量(%)	感官评分(分)
1	70.0	20	5	79.8
2	71.0	21	4	81.7
3	70.5	20	4	92.5
4	71.0	20	3	83.6
5	70.0	21	4	80.6
6	70.0	19	4	80.4
7	70.5	20	4	91.2
8	70.5	21	3	82.7
9	71.0	20	5	79.2
10	70.5	19	3	87.6
11	70.5	19	5	81.7
12	70.0	20	3	81.8
13	70.5	20	4	91.1
14	70.5	20	4	92.3
15	71.0	19	4	85.5
16	70.5	20	4	92.0
17	70.5	21	5	80.8

2.2.1　回归模型的建立及方差分析　对表 4 进行二次多项回归模型的拟合，回归模型方程为：$Y=91.82+0.925A-1.175B-1.775C-AB-0.6AC+BC-5.935A^2-3.835B^2-4.785C^2$。

二次多项回归模型的各因素方差分析结果见表 5，回归模型 P 值远小于 0.0001，表明模型中的自变量对因变量的影响是显著的，失拟项 P 值为 0.1420，表现为不显著，说明其他因素对该实验结果影响很小，回归方程拟合效果较好，该实验设计方案合理可靠，模拟具有统计学意义。决定系数 R^2 为 0.9860，校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.9679，两者数值接近，说明该模型可以解释绝大部分的响应值变化，可

表 5　二次回归模型方差分析结果

Table 5　Results of variance analysis of quadratic regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	393.69	9	43.74	54.65	<0.0001
A-发酵乳粉添加量	6.85	1	6.85	8.55	0.0222
B-原花青素微胶囊添加量	11.04	1	11.04	13.80	0.0075
C-乳粉添加量	25.20	1	25.20	31.49	0.0008
AB	4.00	1	4.00	5.00	0.0605
AC	1.44	1	1.44	1.80	0.2217
BC	4.00	1	4.00	5.00	0.0605
A^2	148.31	1	148.31	185.29	<0.0001
B^2	61.93	1	61.93	77.37	<0.0001
C^2	96.41	1	96.41	120.44	<0.0001
残值	5.60	7	0.8004		
失拟值	3.98	3	1.33	3.26	0.1420
纯误差	1.63	4	0.4070		
总离差	399.30	16			

以用于优化原花青素微胶囊酸奶片的配方组成。变异系数 CV 为 1.05%, 远小于 10.0%, 表明该实验结果的可信度和精确度较好。从二次回归模型方差分析中可以看出 A、B、C 均对模型影响显著(P<0.01), 且各因素对原花青素微胶囊酸奶片感官评分的影响从大到小依次为 C(乳粉)>B(原花青素微胶囊)>A(发酵乳粉)。

2.2.2 验证试验 运用 Design-Expert 13 软件对原花青素微胶囊酸奶片的配方进行优化, 得出各组分最佳添加量为: 发酵乳粉添加量 70.55%, 原花青素微胶囊添加量 19.80%, 乳粉添加量 3.78%, 对应的感官评价得分为 92.2。根据上述实验条件并结合实际情况, 将各组分添加量调整为: 发酵乳粉 70.50%, 原花青素微胶囊 20.0%, 乳粉 3.80%, 在此条件下进行实验, 得到原花青素微胶囊酸奶片的感官评分为 92.5±1.4, 与预测值相接近, 说明该拟合模型所优化出的原花青素微胶囊酸奶片配方较为准确。

2.3 原花青素微胶囊酸奶片基本指标检测

2.3.1 营养成分及理化指标检测 原花青素微胶囊酸奶片营养成分及理化指标见表 6。奶片蛋白质含量为 23.77% 大于规定指标; 水分含量为 4.58% 小于规定指标, 均符合要求。

表 6 原花青素微胶囊酸奶片营养成分及理化检测

Table 6 Proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets nutritional components and physical and chemical detection

项目	指标	原花青素微胶囊酸奶片
蛋白质(%)≥	16.50	23.77
水分(%)≤	5.00	4.58
碳水化合物(g/100 g)	–	64.9
能量(kJ/100 g)	–	1567
钙(mg/kg)	–	9.16×10^3
钠(mg/100 g)	–	266

2.3.2 污染物和真菌毒素检测 原花青素微胶囊酸奶片污染物和真菌毒素情况见表 7。奶片铅、总砷、铬含量均低于规定指标, 未检测出亚硝酸盐、黄曲霉毒素 M1, 符合要求。

表 7 原花青素微胶囊酸奶片污染物和真菌毒素情况

Table 7 Contaminants and mycotoxins of proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets

项目	指标	原花青素微胶囊酸奶片
铅(mg/kg)≤	0.30	0.0390
总砷(mg/kg)≤	0.50	0.0155
铬(mg/kg)≤	2.00	1.40
亚硝酸盐(mg/kg)≤	2.00	未检出
黄曲霉毒素M1(μg/kg)≤	4.00	未检出

2.3.3 微生物检测 原花青素微胶囊酸奶片微生物情况见表 8。微生物检测中, 各项菌落均符合要求, 表明该短双歧杆菌微胶囊奶片方案可行。

表 8 原花青素微胶囊酸奶片微生物检测

Table 8 Proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets microbial detection

项目	指标				原花青素微胶囊酸奶片
	n	c	m	M	
大肠菌群(CFU/g)	5	1	10	100	<10
金黄色葡萄球菌(CFU/g)	5	2	10	100	<10
沙门氏菌(25 g)	5	0	0/25 g	–	未检出

注: n: 同一批次产品应采集的样品件数; c: 最大可允许超出m值的样品数; m: 微生物指标可接受水平的限量值; M: 微生物指标的最高安全限量值。

2.3.4 货架期预测 由图 2 可知, 当贮藏温度为 35 ℃, 贮藏时间为 28 d 时, 感官评分在 50 分附近; 当贮藏温度为 25 ℃, 贮藏时间为 60 d 时, 感官评分在 50 分附近, 因此, 本实验实际 Q_{10}: 60/28=2.1。

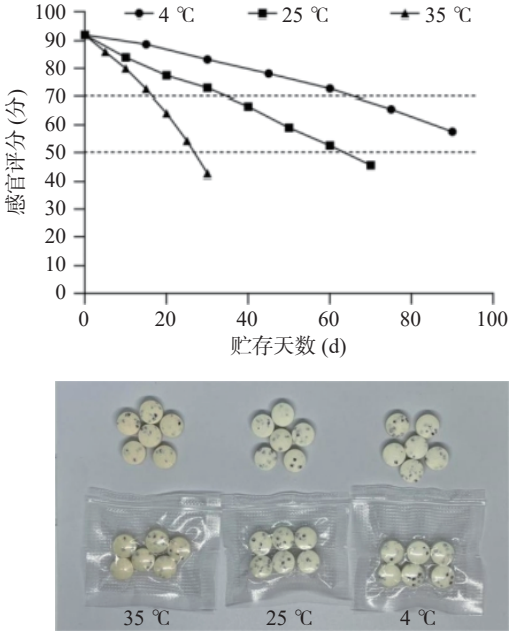


图 2 原花青素微胶囊酸奶片加速贮藏的感官评价(上)及外观情况(下)

Fig.2 Proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets sensory evaluation of accelerated storage (up) and appearance (down)

温度为 4 ℃ 时, ΔT=35−4=31, 货架期为 Q_S(4 ℃)=Q(35 ℃)×$Q_{10}^{\Delta T/10}$=28×$2.1^{3.1}$=279 d; 温度为 25 ℃ 时, ΔT=35−25=10, 货架期为 Q_S(25 ℃)=Q(35 ℃)×$Q_{10}^{\Delta T/10}$=28×$2.1^{1.0}$=58 d。综上所述, ASLT 法进行预测原花青素微胶囊酸奶片的货架期, 结果表明, 在 4 ℃ 条件下的货架期为 279 d、25 ℃ 条件下的样品货架期为 58 d。

由图 2 外观情况所示, 贮藏温度为 35 ℃, 原花青素微胶囊酸奶片颜色加深, 表明已发生褐变; 温度为 25 ℃, 酸奶片颜色保持较好, 无明显变化; 温度 4 ℃ 时, 原花青素酸奶片颜色与 25 ℃ 时外观上较为接近, 保存良好。

2.4 原花青素微胶囊酸奶片对小鼠行为学的影响

2.4.1 跳台实验 本实验结果如图 3 所示。与 Con 组相比, D-gal 组潜伏期极显著缩短, 错误次数极显著增加(P<0.01), 即造模有效; 与 D-gal 组比, V_C、

MM、MH 和 WH 组能显著延长衰老小鼠潜伏期，并减少错误次数（$P<0.05$，$P<0.01$）；与 MH 组比，WH、PH 和 YH 组衰老小鼠潜伏期缩短，错误次数增加，其中 YH 组具有极显著性差异（$P<0.01$）。综上所述，V_C、MM、MH 和 WH 组能够有效改善衰老小鼠的记忆功能。

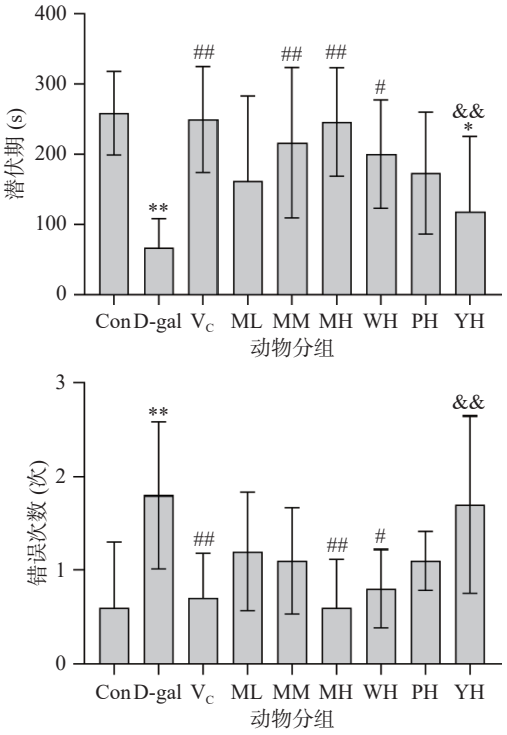


图 3　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠跳台实验的影响（n=10）

Fig.3　Effects of proanthocyanidins microcapsule yoghurt tablets on step-down test in mice (n=10)

注：与 Con 组间差异显著（$P<0.05$）记作*，差异极显著（$P<0.01$）记作**；与 D-gal 组间差异显著（$P<0.05$）记作#，差异极显著（$P<0.01$）记作##，与 MH 组间差异显著（$P<0.05$）记作&，差异极显著（$P<0.01$）记作&&，图 4~图 8 同。

2.4.2　避暗实验　本实验结果如图 4 所示。与 Con 组相比，D-gal 组潜伏期极显著缩短，错误次数极显著增加（$P<0.01$）；与 D-gal 组相比，V_C、MH 组潜伏期显著延长，错误次数显著减少（$P<0.05$，$P<0.01$）；与 MH 组比，WH、PH 和 YH 组衰老小鼠潜伏期缩短，错误次数增加。综上所述，V_C 和 MH 组在改善衰老小鼠记忆功能方面具有明显的效果。

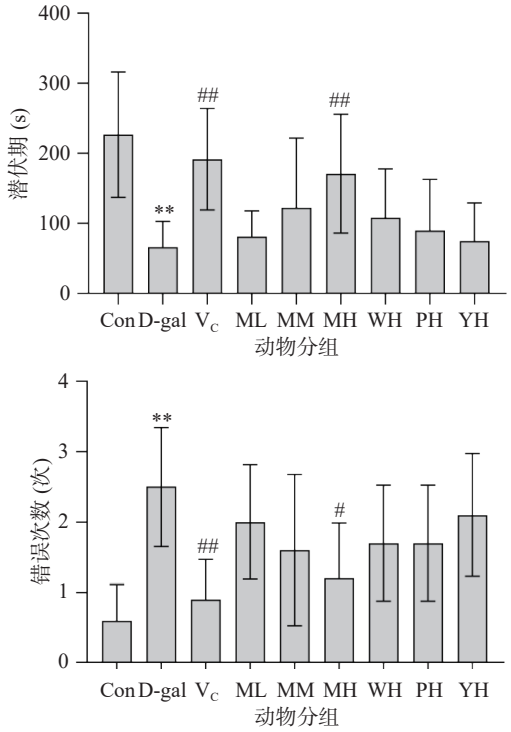


图 4　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠避暗实验的影响（n=10）

Fig.4　Effects of proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets on dark avoidance test in mice (n=10)

2.5　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠脏器指数的影响

脏器指数可以反映出动物器官的重量变化情况，机体随着年龄的增长各个组织器官的功能逐渐减退，会呈现出器官萎缩或肥大的现象，是判断小鼠是否衰老的重要指标[24]。

由图 5 可知，与 Con 组比，D-gal 组小鼠的肾脏

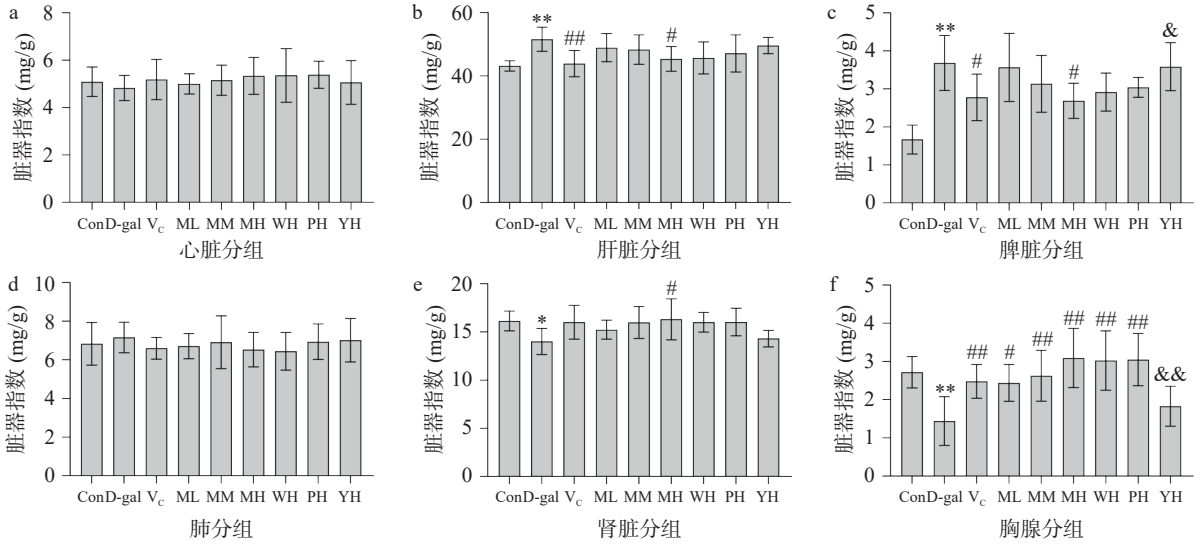


图 5　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠脏器指数的影响（n=10）

Fig.5　Effects of proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets on organ index in mice (n=10)

和胸腺的脏器指数均显著降低(P<0.05, P<0.01), 且肝脏和脾脏的脏器指数极显著增加(P<0.01); 与 D-gal 组比, 各给药组的胸腺脏器指数变化较为明显, 其中 V_C、MH 组小鼠的肝脏、脾脏和胸腺脏器指数均有一定程度的改善(P<0.05, P<0.01)。综上所述, 美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片可以减少 D-gal 对小鼠脏器组织的损伤。

2.6 原花青素微胶囊酸奶片对小鼠体内生化指标的影响

2.6.1 GSH-Px 活力测定 谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)可以特异性催化还原型谷胱甘肽过氧化物的还原反应, 阻断过氧化物形成自由基, 从而保护细胞膜结构和功能完整, 免受损伤[25]。本实验小鼠血清、肝脏和脑组织的 GSH-Px 活力测定结果见图 6。与 Con 组相比, D-gal 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 GSH-Px 活力均极显著降低(P<0.01); 与 D-gal 组相比, V_C、MH 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 GSH-Px 活力均极显著提高(P<0.01), ML、MM、WH 和 PH 组小鼠在血清及脑组织中的 GSH-Px 活力均极显著提高(P<0.01); 与 MH 组相比, YH 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 GSH-Px 活力均极显著降低(P<0.01), WH、PH 组小鼠在血清和肝脏组织中的 GSH-Px 活力均极显著降低(P<0.01)。结果表明: 发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片(MH 组)可提高小鼠体内血清、肝脏及脑组织中的 GSH-Px 活力; 未发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片(WH 组)及未包埋的原花青素酸奶片(PH 组)可以较小幅度提高小鼠血清和脑组织中的 GSH-Px 活力。

2.6.2 SOD 活力测定 超氧化物歧化酶(SOD)对机体的氧化与抗氧化平衡起着至关重要的作用, 该酶能清除超氧阴离子自由基, 保护细胞免受损伤, 其活力大小反映机体清除自由基的能力[26]。本实验小鼠血清、肝脏和脑组织的 SOD 活力测定结果见图 7。与

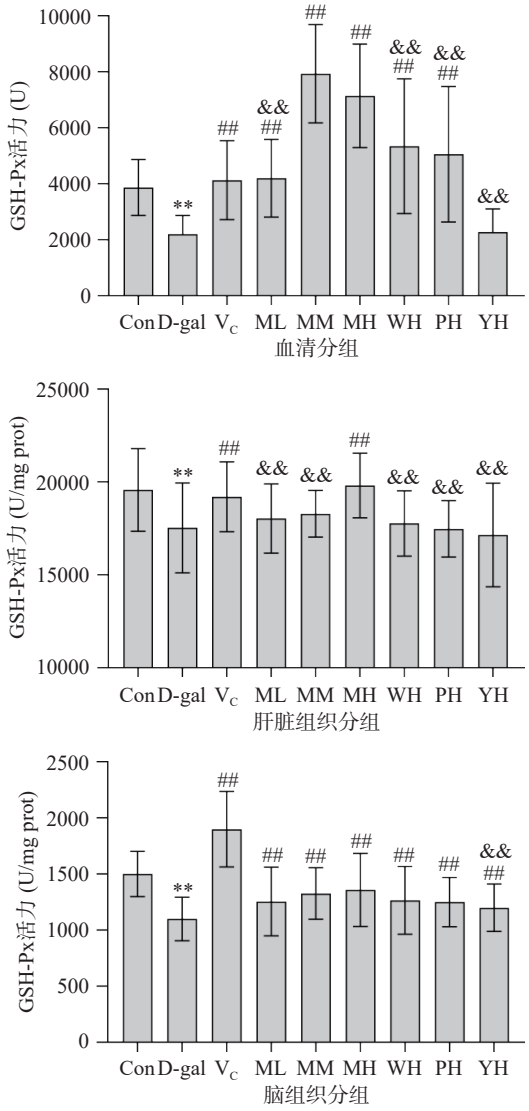


图 6 原花青素微胶囊酸奶片对小鼠血清、肝脏及脑组织 GSH-Px 活力的影响(n=10)

Fig.6 Effects of proanthocyanidins microencapsulated yogurt tablets on GSH-Px activity in serum, liver and brain of mice (n=10)

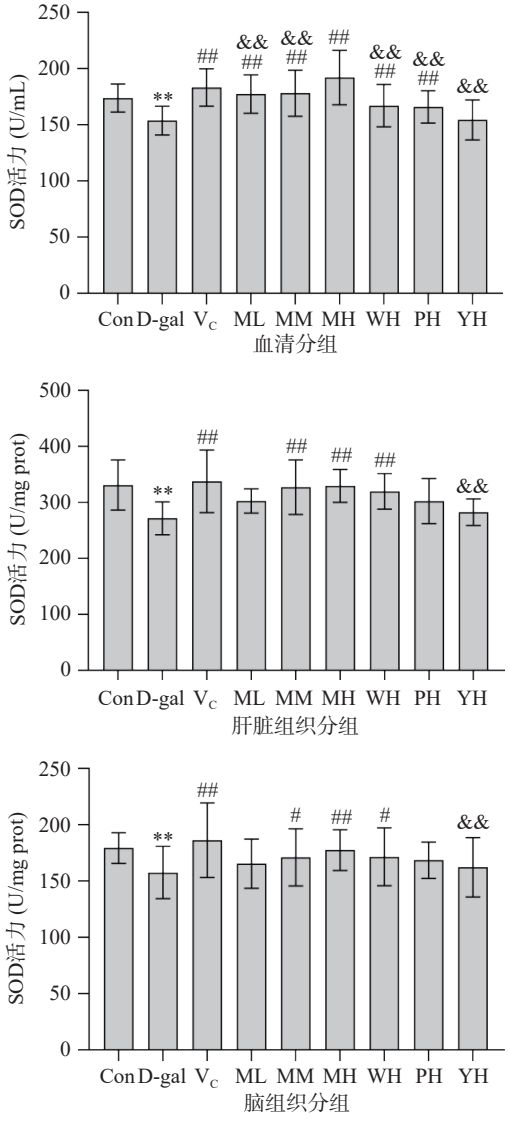


图 7 原花青素微胶囊酸奶片对小鼠血清、肝脏及脑组织 SOD 活力的影响(n=10)

Fig.7 Effects of proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets on SOD activity in serum, liver and brain tissue of mice (n=10)

Con 组相比，D-gal 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 SOD 活力均极显著降低（P<0.01）；与 D-gal 组相比，V_C、MM、MH、WH 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 SOD 活力均显著提高（P<0.05，P<0.01），ML、PH 组小鼠在血清中的 SOD 活力均极显著提高（P<0.01）；与 MH 组相比，YH 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 SOD 活力均极显著降低（P<0.01），WH、PH 组小鼠在血清中的 SOD 活力极显著降低（P<0.01）。结果表明：发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（MH 组）可提高小鼠体内血清、肝脏及脑组织中的 SOD 活力，发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（MM 组）和未发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（WH 组）可以较小幅度提高小鼠体内血清、肝脏及脑组织中的 SOD 活力，未包埋的原花青素酸奶片（PH 组）可以较小幅度提高小鼠体内血清中的 SOD 活力。

2.6.3　MDA 含量测定　丙二醛（MDA）是膜脂过氧化的最终分解产物，其含量可以反映机体脂质过氧化强度，也能间接反映组织过氧化损伤程度[27]。本实验小鼠血清、肝脏和脑组织的 MDA 含量测定结果见图 8。与 Con 组相比，D-gal 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 MDA 含量均极显著增加（P<0.01）；与 D-gal 组相比，V_C、MH、WH 和 PH 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 MDA 含量均降低（P<0.05，P<0.01），MM 组小鼠在血清和脑组织中的 MDA 含量均显著降低（P<0.05，P<0.01）；与 MH 组相比，YH 组小鼠在血清、肝脏及脑组织中的 MDA 含量均极显著增加（P<0.01），WH、PH 组小鼠在血清中的 MDA 含量极显著增加（P<0.01）。结果表明：发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（MH 组）、未发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（WH 组）和未包埋的原花青素酸奶片（PH 组）可以有效降低小鼠体内血清、肝脏及脑组织中的 MDA 含量；发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片（MM 组）可以较小幅度降低小鼠体内血清和脑组织中的 MDA 含量。

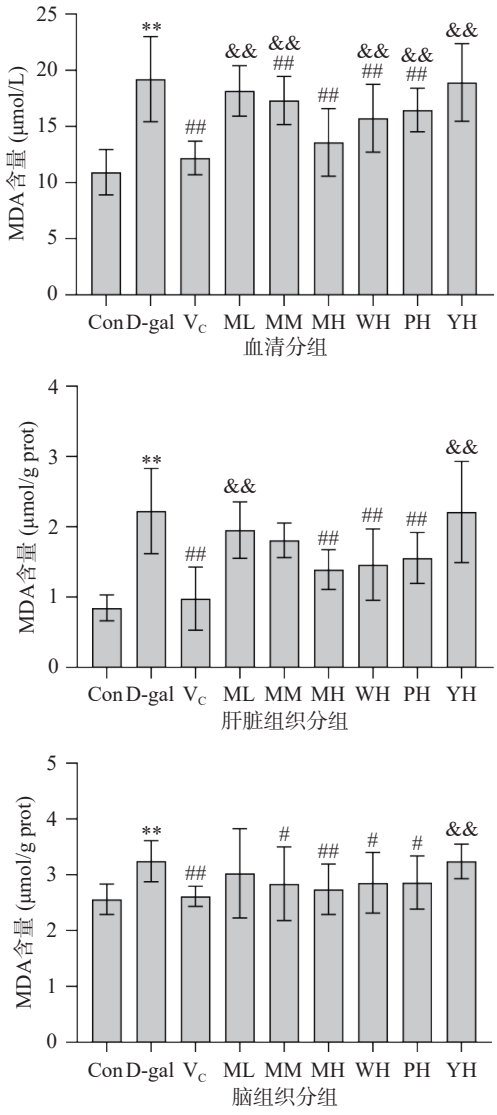


图 8　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠血清、肝脏及脑组织 MDA 活力的影响（n=10）

Fig.8　Effects of proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets on MDA activity in serum, liver and brain tissue of mice (n=10)

2.7　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠病理切片的影响

2.7.1　肝脏组织切片　研究表明，肝脏损伤时细胞会出现结构破坏、核消失，脂肪堆积等表现[28]。本研究 HE 染色结果见图 9 所示，Con 组（图 a）中肝脏组织细胞排列整齐，密度、大小均匀，结构完整，胞质清晰，而 D-gal 组（图 c）出现大范围组织细胞凋亡、坏死，炎症细胞浸润，且细胞排列疏松，呈现网状分布。MM 组（图 f）和 ML 组（图 g）较 D-gal 组有了一定的改善，表现为肝组织细胞坏死和炎症浸润减少。而 PH 组（图 i）与 D-gal 组相比，细胞凋亡的现象没有得到改善，大部分细胞坏死，细胞排列疏松，结构不清晰等。而 V_C 组（图 d）、MH 组（图 e）和 WH 组（图 h）与 D-gal 组相比，少部分细胞出现凋亡、空泡，被炎症细胞浸润，大部分的细胞排列紧密有序。这些病理结果表明，过量的 D-半乳糖诱导了肝脏损伤，本研究肝损伤动物模型造模成功；而 ME-MRPs-PC 酸奶片

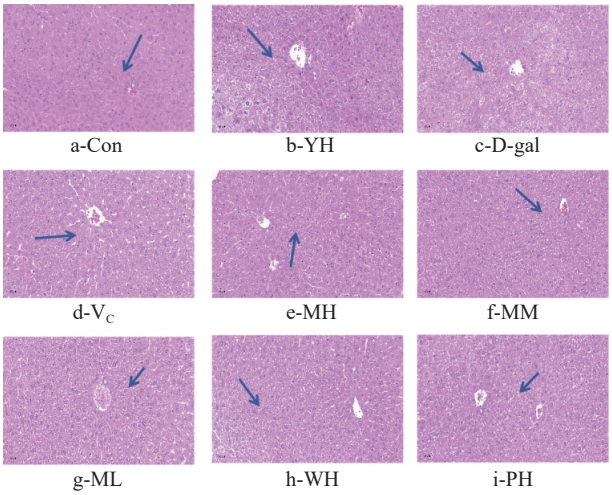


图 9　原花青素微胶囊酸奶片对小鼠肝脏切片的影响

Fig.9　Effects of proanthocyanidins microcapsule yoghurt tablets on liver slices of mice

可以明显改善小鼠肝脏组织受损，发挥保护肝脏的作用。

2.7.2 脑组织切片 HE 染色结果见图 10 所示，对照组（图 a）大脑皮层神经元细胞轮廓清晰，排列整齐紧密，细胞核圆而大，染色浅；D-gal 组（图 c）神经元细胞排列疏松，核固缩及坏死神经元细胞数量增加造成深染，而 ML 组（图 g）与 MM 组（图 f）可有效改善该神经元细胞形态损伤。而 PH 组（图 i）与 D-gal 组相比，神经元细胞排列杂乱，胞核固缩，细胞结构不清晰。而 V_C 组（图 d）、MH 组（图 e）和 WH 组（图 h）与 D-gal 组相比，少部分神经细胞出现空泡，胞核固缩深染，大部分的细胞排列紧密有序。从脑组织结果来看，表明 ME-MRPs-PC 酸奶片对衰老造成的脑组织损伤具有显著的改善作用。

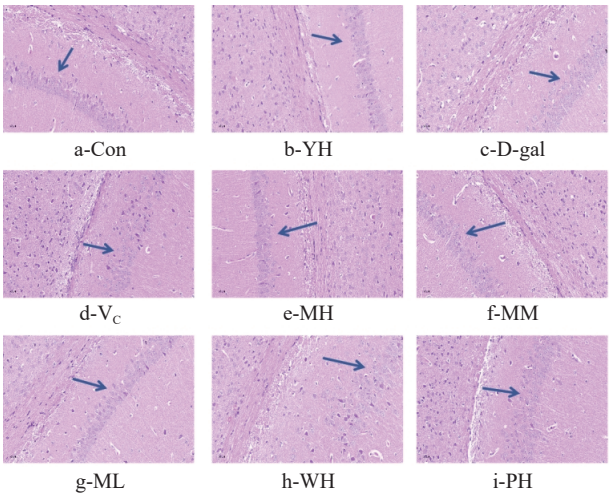


图 10 原花青素微胶囊酸奶片对小鼠脑组织切片的影响

Fig.10 Effects of proanthocyanidins microcapsule yogurt tablets on brain tissue sections of mice

3 讨论与结论

本研究以原花青素微胶囊和通过真空冷冻干燥获得的发酵乳粉为主要原料，设计原花青素微胶囊酸奶片配方，并制备酸奶片。实验结果表明，原花青素微胶囊酸奶片的最佳配方为发酵乳粉 70.5%、原花青素微胶囊 20.0%、麦芽糊精 5.1%、乳粉 3.8% 和二氧化硅 0.6%。

参考 DBS65/021-2020《食品安全地方标准 奶片》[13] 中对风味发酵牛（羊）奶片的指标要求，对原花青素微胶囊酸奶片的营养成分、理化指标、污染物和真菌毒素、微生物等进行了检测，符合相关标准要求，产品质量可靠。同时运用加速实验方法预测了产品在不同温度下的货架期，结果表明在 4 ℃ 条件下货架期最长，为 279 d，符合实际需求。在实际生产过程中可将原花青素微胶囊与发酵乳粉经造粒后再进行压片，使原花青素微胶囊分布相对均匀；同时可引入静电喷雾技术，真空冷冻喷雾干燥机等，有望实现工业化生产。

过量半乳糖的积累引发机体的炎症反应，包括细胞因子的释放、炎性细胞的浸润等，从而加速衰老过程，使 D-gal 组小鼠呈现出记忆力下降等衰老表现[17,25]。本实验未添加原花青素的酸奶片（YH 组）小鼠，在跳台实验、避暗实验以及生化指标测定结果中与模型组小鼠（D-gal 组）基本一致，无明显差异；添加未包埋原花青素的酸奶片（PH 组）小鼠与 YH 组和 D-gal 组相比，均得到一定程度的改善，对衰老程度有所减缓；证明原花青素（PC）是起到改善衰老指标的关键成分。这与张茹等[29] 的研究结果基本一致。

D-gal 诱导的小鼠衰老模型可引起机体内氧化应激的加剧，导致体内自由基增多、抗氧化能力下降，从而损伤细胞结构和功能[30]。将原花青素微胶囊化后，制备发生美拉德反应以及未发生美拉德反应的原花青素微胶囊，分别添加到酸奶片中，进行小鼠体内抗氧化实验。GSH-Px 与 SOD 的活性高低间接反映小鼠对自由基的消除能力的大小；MDA 含量的大小反映机体受自由基攻击的严重程度[31]。高剂量的发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片能显著提高血清中 GSH-Px 和 SOD 的活性，降低 MDA 含量，改善 D-gal 对小鼠肝脏、脾脏和胸腺的损伤，这表明衰老小鼠体内抗氧化能力下降，体内氧化应激水平显著提高。这与刘鑫颖[32] 的研究结果基本一致。同时 V_C 组小鼠相较于 D-gal 组小鼠各指标水平差异显著，表明 V_C 药物可以很好地调节小鼠体内氧化应激程度，减慢衰老进程，即本实验成功建立衰老小鼠模型[26,28]。小鼠体内抗氧化实验相比较发现：发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片高剂量组小鼠效果趋势更加趋向于 V_C 组小鼠且优于未发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片高剂量组小鼠，更优于 PC 酸奶片（PH 组）小鼠，与原花青素微胶囊体外抗氧化活性实验结果一致[11]。产生这种现象的原因可能是因为被微囊化后的原花青素，在体内受消化液的影响较小，更大程度的保留了原花青素的活性。发生美拉德反应的壁材能够更好维持原花青素的稳定性，其效果优于未发生美拉德反应的壁材，更进一步提高原花青素的稳定性，从而可能使原花青素在小鼠体内的生物利用度得到提升，改善小鼠的衰老程度。综上所述，原花青素微胶囊酸奶片不仅在感官和营养方面表现优异，并且安全可靠，具有良好的市场前景。发生美拉德反应的原花青素微胶囊酸奶片具有抗氧化效果，为开发新型功能性食品提供了有益参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 方欢乐，于晋茹，陶炎炎，等. 葡萄籽原花青素抗衰老作用的研究[J]. 食品与药品，2020，22(6)：448−452. [FANG H L，YU J R，TAO Y Y，et al. Study on anti-aging effect of grape seed proanthocyanidins[J]. Food and Drug，2020，22(6)：448−452.]

［2］ 郭浩彬, 李敏杰, 张陆燕, 等. 美拉德反应优化藜麦多肽抗氧化活性的研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 59−68. ［GUO H B, LI M J, ZHANG L Y, et al. Study on optimization of antioxidant activity of quinoa polypeptide by Maillard reaction[J]. China Condiment, 2023, 48(12): 59−68.］
［3］ 南鑫, 朱振宝, 梁蕾, 等. 食用菌抗氧化肽研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 316−324. ［NAN Xin, ZHU Zhenbao, LIANG Lei, et al. Research progress on antioxidant peptides from edible fungi[J]. Food Science, 2025, 46(12): 316−324.］
［4］ 王春生, 王娟, 焦岗华. CEB 抗氧化大米: 中国原创水稻新科技产物(下)[N]. 西部时报, 2008-08-29(8). ［WANG C S, WANG J, JIAO G H. CEB antioxidant rice: China's original new technology product of rice (Part 2)[N]. Western Times, 2008-08-29(8).］
［5］ 王春霞, 尹宗美, 范素琴, 等. 褐藻中岩藻聚糖硫酸酯的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(5): 57−61. ［WANG C X, YIN Z M, FAN S Q, et al. Research progress on fucoidan sulfate from brown algae[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2015, 51(5): 57−61.］
［6］ 王城. 专家认为: 追求健康价值成为未来饮料发展方向[N]. 中国食品报, 2009-10-06(7). ［WANG C. Experts believe that pursuing health value is the future direction of beverage development [N]. China Food News, 2009-10-06(7).］
［7］ DÍAZ-GARCÍA M C, CASTELLAR M R, OBÓN J M, et al. Production of an anthocyanin-rich food colourant from *Thymus moroderi* and its application in foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1283−1293.
［8］ 黄昭宁, 罗舒, 宋怡, 等. 包裹技术在药食同源中药的应用研究进展[J]. 农产品加工, 2024(1): 87−92. ［HUANG Zhaoning, LUO Shu, SONG Yi, et al. Research progress on application of encapsulation technology in medicinal and edible herbs[J]. Farm Products Processing, 2024(1): 87−92.］
［9］ YAN Cuie, KIM S R. Microencapsulation for pharmaceutical applications: A review[J]. ACS Applied Bio Materials, 2024, 7(2): 692−710.
［10］ 刘晓芬, 陈法杰. 新疆乳制品加工业发展现状及对策[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 262−265. ［LIU Xiaofen, CHEN Fajie. The development status and countermeasures of Xinjiang dairy processing industry[J]. The Food Industry, 2020, 41(8): 262−265.］
［11］ 敬磊, 陈乐乐, 赵得秀, 等. 乳清分离蛋白-D-木糖的美拉德反应产物制备原花青素微胶囊及其性能研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 59−68. ［JING L, CHEN L L, ZHAO D X, et al. Preparation and properties of proanthocyanidin microcapsules from Maillard reaction products of whey protein isolate-D-xylose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 59−68.］
［12］ 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022. ［Chinese Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents: 2022[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.］
［13］ 新疆维吾尔自治区卫生健康委员会. 食品安全地方标准 奶片: DBS65/021-2020[S]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区卫生健康委员会, 2020. ［Health Commission of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Local food safety standard: Milk tablet: DBS65/021-2020[S]. Urumqi: Health Commission of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2020.］
［14］ 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量速查手册(2013)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013. ［Chinese Nutrition Society. Chinese dietary reference intakes quick reference handbook: 2013 edition[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.］
［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 食品添加剂使用标准: GB 2760-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. ［National Health Commission of the People's Republic of China. National food safety standard: Standards for use of food additives: GB 2760-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］
［16］ 李娜. 橙与梨两种果汁产品配方研发及其货架期的预测[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015. ［LI N. Development and shelf-life prediction of orange and pear juice products[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2015.］
［17］ 阿依帕夏·热合曼. 基于超高压技术对石榴-苹果复合果汁饮料工艺优化及其贮藏期间品质变化的研究[D]. 喀什: 喀什大学, 2020. ［REHEMAN A Y X. Study on process optimization and quality changes of pomegranate-apple compound juice based on ultra-high pressure technology during storage[D]. Kashi: Kashi University, 2020.］
［18］ 沈烨相, 田华, 金胜利, 等. "柚子皮+绿茶"颗粒冲剂对阿尔茨海默病模型小鼠学习记忆能力的改善作用[J]. 时珍国医国药, 2023, 34(3): 592−596. ［SHEN Y X, TIAN H, JIN S L, et al. Effect of "grapefruit peel+green tea" granule powder on learning and memory ability of Alzheimer's disease model mice[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2023, 34(3): 592−596.］
［19］ 白栋文, 包晓玮, 曾兰君, 等. 管花肉苁蓉提取物对 D-半乳糖致衰老模型小鼠的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 380−386. ［BAI Dongwen, BAO Xiaowei, ZENG Lanjun, et al. Effects of *Cistanche deserticola* extract on D-galactose-induced aging model mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 380−386.］
［20］ 成静, 陈大伟, 曲敏, 等. 核桃肽制备工艺的优化及其改善记忆功能研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 135−141. ［CHENG J, CHEN D W, QU M, et al. Study on optimization of preparation process of walnut peptide and its memory improvement function[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 135−141.］
［21］ 闫磊, 胡江平, 孙晓冬, 等. 肉苁蓉多糖对 D-半乳糖致衰老小鼠抗疲劳作用及机制研究[J]. 河北中医, 2019, 41(1): 96−100. ［YAN Lei, HU Jiangping, SUN Xiaodong, et al. Study on the anti-fatigue effect and mechanism of *Cistanche deserticola* polysaccharide on D-galactose-induced aging mice[J]. Hebei Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 41(1): 96−100.］
［22］ 付梦凡, 张纯, 刘炳浩, 等. 多酚复合配方缓解小鼠运动疲劳[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 145−152,161. ［FU Mengfan, ZHANG Chun, LIU Binghao, et al. Effect of polyphenol compound formula on relieving exercise fatigue in mice[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 145−152,161.］
［23］ 任敏, 李志国, 宗学醒, 等. 一种无蔗糖奶片及其制备方法: 中国, CN116135030B[P]. 2023-12-26. ［REN M, LI Z G, ZONG X X, et al. Sucrose-free milk tablet and its preparation method: China, CN116135030B[P]. 2023-12-26.］
［24］ 侯晓宁, 张育昆, 陈社晴, 等. 虾青素对 D-半乳糖致衰老大鼠肾脏和心脏组织氧化损伤的修复作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 146−153. ［HOU X N, ZHANG Y K, CHEN Z Q, et al. Repairing effect of astaxanthin on oxidative damage in kidney and heart tissues of D-galactose-induced aging rats[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 146−153.］
［25］ AVERILL-BATES D A. The antioxidant glutathione [M]//Vitamins and hormones. San Diego: Academic Press, 2023: 109−141.

［26］ SAXENA P, SELVARAJ K, KHARE S K, et al. Superoxide dismutase as multipotent therapeutic antioxidant enzyme: Role in human diseases[J]. Biotechnology Letters, 2022, 44(1): 1−22.

［27］ WU Wei, LIN Qinlu, HUA Yufei, et al. Study on mechanism of soy protein oxidation induced by lipid peroxidation products[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2013, 5(1): 46−53.

［28］ 尤佳伟, 韩如意, 陈月晓, 等. 蒲公英红枣汁对 D-半乳糖诱导大鼠肝损伤保护作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 331−337. ［YOU Jiawei, HAN Ruyi, CHEN Yuexiao, et al. Protective effect of dandelion jujube juice on D-galactose-induced liver injury in rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 331−337.］

［29］ 张茹, 曲中原, 杜娟. 葡萄籽原花青素通过 Nrf2/HO-1 通路减轻镉诱导的幼龄大鼠认知功能损伤[J]. 中药药理与临床, 2021, 37(4): 32−36. ［ZHANG Ru, QU Zhongyuan, DU Juan. Proanthocyanidins in grape seeds protects against cadmium-induced cognitive impairment in young rats by regulating nrf-2/HO-1 pathway[J]. Pharmacology and Clinics of Chinese Materia Medica, 2021, 37(4): 32−36.］

［30］ 王玉倩. 大米活性肽对 D-半乳糖致衰老小鼠氧化应激的保护作用[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019. ［WANG Yuqian. The protective effect of rice bran active peptide on oxidative stress in D-galactose-induced aging mice[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.］

［31］ 高璐, 王滢, 饶胜其, 等. 葡萄籽原花青素提取物对衰老模型小鼠抗氧化作用[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 253−256. ［GAO L, WANG Y, RAO S Q, et al. Antioxidant effect of grape seed proanthocyanidin extract on aging model mice[J]. Food Science, 2014, 35(23): 253−256.］

［32］ 刘鑫颖. 沙棘籽原花青素抗皮肤衰老作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024. ［LIU Xinying. Study span anti-aging effect of proanthocyanidins from *Hippophae rhamnoides* seeds[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024.］