谢家喜, 杨睿然, 欧佳慧, 等. 富硒堇叶碎米荠粉及其蛋白提取物对减钠腊肠品质和贮藏稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 467−477. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100019

XIE Jiaxi, YANG Ruiran, OU Jiahui, et al. Effects of Selenium-enriched *Cardamine violifolia* Powder and Its Protein Extract on the Quality and Storage Stability of Reduced-sodium Chinese Sausages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 467−477. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100019

· 贮运保鲜 ·

富硒堇叶碎米荠粉及其蛋白提取物对减钠腊肠品质和贮藏稳定性的影响

谢家喜[1], 杨睿然[1], 欧佳慧[1], 王　琦[1,2,*], 彭利娟[1,2], 王海滨[1,2,*], 幸　硕[3], 梁博识[3], 董龙龙[4], 鞠云龙[4], 姚现琦[4]

（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023;
2.武汉轻工大学肉类加工与安全研究所, 湖北武汉 430023;
3.湖北农发零号食品有限公司, 湖北武汉 430023;
4.临沂金锣文瑞食品有限公司, 山东临沂 276002）

摘　要: 为探究富硒堇叶碎米荠粉（SeCvP）及其蛋白提取物（SeCvP-P）对减钠腊肠的品质及贮藏稳定性的影响，本研究首先对 SeCvP 和 SeCvP-P 的活性成分及体外抗氧化活性进行了表征，随后将不同添加量（0.01%、0.02%、0.03%）的 SeCvP 和 SeCvP-P 分别加入到减钠腊肠中，以不添加 SeCvP 和 SeCvP-P 的减钠腊肠为空白组，系统评估其对产品基本品质的影响，并重点探究在 28 d 贮藏期内，二者对减钠腊肠的硒含量、过氧化值（POV）、硫代巴比妥酸反应物（TBARS）值及感官品质等指标的影响。结果表明，SeCvP 和 SeCvP-P 的添加能显著提高并维持减钠腊肠在贮藏期的硒含量（P<0.05）。在 28 d 贮藏期内，所有实验组的硒含量均符合富硒肉制品标准（15~50 μg/100 g），且稳定性远优于空白组，其中 0.03%SeCvP 组与 0.01%SeCvP-P 组的硒含量降幅（分别为 38% 和 34%）显著低于空白组的 70%。在品质方面，电子舌与电子鼻分析显示，二者未对产品原有滋味与气味产生不良影响。在抑制脂质氧化方面，0.01%SeCvP-P 和 0.03%SeCvP 表现最佳。与空白组相比，在贮藏末期，0.01%SeCvP-P 和 0.03%SeCvP 分别使 POV 值降低了 81.14% 和 83.83%，TBARS 值降低了 35.46% 和 43.25%，均能显著延缓脂质氧化（P<0.05），更好地维持感官评分。因此，适量地添加 SeCvP 和 SeCvP-P 可有效提升减钠腊肠的硒营养素含量与氧化稳定性，本研究结果为开发兼具富硒功能与清洁标签特性的新型肉制品提供了科学的理论依据和实践参考。

关键词: 富硒堇叶碎米荠粉, 富硒堇叶碎米荠蛋白提取物, 减钠腊肠, 抗氧化, 硒含量, 贮藏期
中图分类号: TS202.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0467−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100019
本文网刊:

Effects of Selenium-enriched *Cardamine violifolia* Powder and Its Protein Extract on the Quality and Storage Stability of Reduced-sodium Chinese Sausages

XIE Jiaxi[1], YANG Ruiran[1], OU Jiahui[1], WANG Qi[1,2,*], PENG Lijuan[1,2], WANG Haibin[1,2,*], XING Shuo[3], LIANG Boshi[3], DONG Longlong[4], JU Yunlong[4], YAO Xianqi[4]

（1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2.Institute of Meat Processing and Safety, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
3.Hubei Nongfa Zero Food Co., Ltd., Wuhan 430023, China;
4.Linyi Jinluo Winray Food Co., Ltd., Linyi 276002, China）

收稿日期: 2025−10−10
基金项目: 湖北农发零号食品有限公司技术开发项目（101-08023209）; 2024 年山东省企业技术创新项目计划（2024637130000277）。
作者简介: 谢家喜（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜禽水产制品绿色加工技术及机理, E-mail: 1078933708@qq.com。
*** 通信作者:** 王琦（1981−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: wq311zb@whpu.edu.cn。
王海滨（1964−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜禽与水产品加工及贮藏工程, E-mail: whb6412@163.com。

Abstract: This study investigated the effects of selenium-enriched *Cardamine violifolia* powder (SeCvP) and its protein extract (SeCvP-P) on the quality and storage stability of reduced-sodium Chinese sausages. First, the active components and *in vitro* antioxidant activity of SeCvP and SeCvP-P were characterized. Subsequently, different addition levels (0.01%, 0.02%, 0.03%) of SeCvP and SeCvP-P were added to reduced-sodium Chinese sausages respectively. Using sausages without SeCvP or SeCvP-P as the control group, the study systematically evaluated their effects on the basic quality of the product, with a focus on selenium content, POV, TBARS value, and sensory attributes during the 28 d storage period. The results showed that the addition of SeCvP and SeCvP-P significantly increased and maintained the selenium content in the sausages during storage (P<0.05). Throughout the 28 d storage, all treatment groups maintained selenium levels within the standard for selenium-enriched meat products (15~50 μg/100 g) and exhibited far greater stability than the control. Specifically, the 0.03% SeCvP and 0.01% SeCvP-P groups lost only 38% and 34% of their selenium content, respectively, which were significantly less than the 70% loss in the control group (P<0.05). Electronic tongue and nose analysis confirmed that the SeCvP and SeCvP-P did not negatively affect flavor or aroma. Most importantly, the 0.01% SeCvP-P and the 0.03% SeCvP were the most effective inhibitors of lipid oxidation. Compared to the control, both treatments reduced the POV by 81.14% and 83.83%, and the TBARS value by 35.46% and 43.25%, respectively. The two groups also significantly retarded lipid oxidation (P<0.05) and maintained better sensory scores than the control. In conclusion, appropriate amounts of SeCvP and SeCvP-P were effective in enhancing selenium content and improving oxidative stability of reduced-sodium Chinese sausages, which could be considered for developing novel meat products with selenium-enriched and clean-label appeals.

Key words: selenium-enriched *Cardamine violifolia* powder (SeCvP); selenium-enriched *Cardamine violifolia* protein powder (SeCvP-P); reduced-sodium Chinese sausages; antioxidant activity; selenium content; storage period

腊肠作为一种传统腌腊肉制品，因其独特的风味而备受消费者青睐[1]。然而，在品质提升方面，腊肠面临着两大亟待解决的挑战：一是传统腊肠在加工过程中通常需要添加较多食盐，导致腊肠存在高盐高钠的问题。高钠摄入与多种健康问题密切相关，如高血压、心血管疾病等[2]，因此开发低钠腊肠已成为当前食品研究的重要方向之一。Qin 等[3] 的研究表明，在传统干发酵香肠中使用 30%KCl 替代 NaCl 可在不影响风味和感官品质的前提下实现钠含量的有效降低。Chen 等[4] 进一步通过复合风味增强剂（如赖氨酸、麦芽糊精等）与 KCl 协同使用，在维持产品整体风味的同时成功将钠含量降低 30%，并有效掩盖了 KCl 可能带来的不良风味。基于此，本实验前期研究已成功对腊肠配方进行优化，在降低钠含量方面取得了显著成效，为健康型腊肠的开发奠定了坚实的工艺基础。二是腊肠因其较高的脂肪含量在加工与贮藏过程中易发生脂质氧化，导致产品出现哈败味、色泽暗淡等品质劣变现象，影响腊肠的品质和安全性[5−6]。因此，在减钠基础上寻求有效抑制氧化的方案，对于产品整体品质至关重要。尽管丁基羟基茴香醚（BHA）和二丁基羟基甲苯（BHT）等合成抗氧化剂在抑制脂质氧化方面非常有效，但随着消费者对清洁标签和天然食品配料的需求日益增长，探索安全、高效的天然抗氧化剂替代物已成为肉制品工业的一个重要研究方向[7]。

硒是人体必需的微量元素，具有抗氧化等多种生理功能，但我国人均每日硒摄入量普遍不足，且人体无法自行合成，必须依靠外源补充[8]。传统富硒肉制品通常通过含硒饲料喂养动物来实现，但存在硒含量不稳定、分布不均等问题。相比之下，直接将含量稳定可控的外源硒添加到肉制品中，成为了一种更经济有效的方法。2021 年国家卫生健康委员会已批准将堇叶碎米荠作为新型食品原料。在此背景下，湖北恩施所产的富硒堇叶碎米荠（Selenium-enriched *Cardamine violifolia*）因其突出的硒富集能力受到了广泛关注[9]。以其为原料制备的富硒堇叶碎米荠粉（Selenium-enriched *Cardamine violifolia* Powder, SeCvP）及其蛋白提取物（Selenium-enriched *Cardamine violifolia* Protein Powder, SeCvP-P），富含多种生物活性物质，其硒元素以低毒的有机形态存在，并具备良好的抗氧化性能[10−11]。Wang 等[12] 研究表明堇叶碎米荠作为一种富硒植物，具有优异的抗氧化能力，可以通过增强老龄蛋鸡的卵巢抗氧化能力来改善产蛋性能和鸡蛋质量。此外，雷红灵等[13] 研究证实，从湖北恩施堇叶碎米荠中提取的硒蛋白能够有效促进小鼠生长并增强其体内的抗氧化能力。这些研究已初步揭示了堇叶碎米荠在增强机体抗氧化能力方面的潜力。然而，这些研究目前多局限于动物模型，如何将其作为一种功能性食品配料，应用于复杂食品体系（如肉制品）以同时实现营养强化与品质提升，仍是一个未被深入探索的领域。特别是在腌腊肉制品体系中，脂质氧化问题更为突出，亟需安全有效的天然抗氧化方案。

因此，本研究聚焦于 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠品质及贮藏稳定性的影响，通过表征 SeCvP 和 SeCvP-P 的活性成分及其体外抗氧化能力，并将其分别添加到减钠腊肠中，全面评估其对减钠腊肠质构、滋味、气味等基本品质特性的影响。最后重点探究在腊肠贮藏期间，SeCvP 和 SeCvP-P 对过氧化值、TBARS 值、硒含量及感官品质的影响。综上所述，

可以通过精准控制硒添加量，确保产品的硒含量，从而推动富硒肉制品走向标准化生产，并为开发减钠富硒的营养健康型腊肠产品提供科学的理论依据与实践指导，同时也为 SeCvP 和 SeCvP-P 在肉制品的应用方面提供有益的参考借鉴。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

富硒堇叶碎米荠粉（硒含量 2390 mg/kg）及其蛋白提取物（硒含量 1920 mg/kg）　富硒堇叶碎米荠粉是将富硒堇叶碎米荠直接经干燥、粉碎制成，蛋白提取物则以该粉为原料，经水提、酶解、分离去除不溶性成分后，添加麦芽糊精辅助成型，再经喷雾干燥制成，恩施德源硒材料工程科技有限公司；冷鲜猪前腿肉、食盐、氯化钾（食品级）、氯化钙（食品级）、白砂糖、十三香、白胡椒粉、鸡精、53°汾酒　均购于湖北武汉中百超市；亚硝酸钠（食品级）　武汉飞扬生物科技有限公司；三氯甲烷、石油醚、无水乙醇　国药集团化学试剂有限公司；1,1-二苯基-2-苦基肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazide, DPPH）　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；2, 2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（2,2'-azino-bis（3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid）, ABTS）　生工生物工程（上海）股份有限公司；2-硫代巴比妥酸、三氯乙酸　上海麦克林生化科技有限公司；所有化学试剂均为分析纯。

HH-2S 恒温水浴锅　长沙米淇仪器有限公司；YRE-301 旋转蒸发器　巩义市予华仪器有限责任公司；8530 原子荧光光谱仪、8500 液相色谱-原子荧光联用仪　北京海光仪器有限公司；Enspire 多功能酶标仪　美国珀金埃尔默公司；TDZ5-WS 离心机　长沙市平凡仪器仪表有限公司；XHF-DY 高速分散器　宁波新芝生物科技股份有限公司；TA-XT plus 质构分析仪、cNose-18 电子鼻　上海保圣实业发展有限公司；TS-5000Z 电子舌　日本 Insent 公司；HGZF-101-2 恒温干燥箱　上海跃进医疗器械有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　SeCvP 和 SeCvP-P 的活性成分测定

1.2.1.1　总黄酮测定　参照 SN/T 4592-2016《出口食品中总黄酮的测定》[14]，以芦丁为标准品，采用分光光度法进行测定。

1.2.1.2　总多酚测定　参照 T/AHFIA 005-2018《植物提取物及其制品中总多酚含量的测定 分光光度法》[15]，采用分光光度法测定富硒堇叶碎米荠粉与富硒堇叶碎米荠蛋白粉中的总多酚含量。

1.2.1.3　叶绿素测定　参照 NY/T 3082-2017《水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定 分光光度法》[16]进行测定。

1.2.1.4　硒含量测定　根据 GB 5009.93-2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》[17]，选取氢化物原子荧光光谱法对 SeCvP、SeCvP-P 和腊肠中总硒含量进行测定；有机硒含量采用差减法，即总硒含量减去无机硒含量等于有机硒含量。无机硒含量根据 DBS42/010-2018《湖北省食品安全地方标准 富硒食品中无机硒的测定方法》中第一法（原子荧光形态分析法）[18] 进行测定。

1.2.1.5　硒形态测定　参考 NY/T 3870-2021《硒蛋白中硒代氨基酸的测定》[19] 方法稍作修改，称量约 0.5 g 样品于 50 mL 离心管中，依次加入 1.0 mL 的蛋白酶溶液、120 μL 的抗坏血酸溶液、3.88 mL 的 Tris-HCl 缓冲溶液，涡旋混匀后于 37 ℃ 的温度下振荡提取 12 h，8000 r/min 离心 10 min，取上清液过 0.22 μm 滤膜，用 0.1% 甲酸水稀释 50 倍。利用液相色谱-原子荧光光谱法对硒形态进行测定。色谱柱：Waters XSelect ® HSS T3（2.1×150 mm, 2.5 μm）；柱温：30 ℃；进样体积：5 μL。流速：0.40 mL/min；流动相：A：0.1% 甲酸水溶液，B：乙腈进行梯度洗脱。质谱参数为扫描类型：MRM；气帘气：35 psi；喷雾电压：+3500 V；雾化气压力：60 psi；辅助气压力：60 psi；雾化温度：300 ℃。

1.2.2　SeCvP 和 SeCvP-P 的体外抗氧化活性测定

1.2.2.1　DPPH 自由基清除能力测定　参考 Teng 等[20] 的方法并作修改。精确称取 0.1 g SeCvP 和 0.1 g SeCvP-P，分别用蒸馏水定容至 10 mL，配制成 10 mg/mL 的样品储备液。随后，通过梯度稀释法，得到浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL 的样品溶液。取 7.9 mg DPPH 溶于 80% 乙醇中，转移到 100 mL 容量瓶中，用 80% 乙醇定容得 DPPH 工作液。取各浓度样品溶液 100 μL，加入 100 μL 的 DPPH 工作液，混匀静置 30 min 后，置于酶标板中，测定 520 nm 处吸光度。每个样品重复 3 次。清除率计算公式如下：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_i-A_j}{A_0}\right)\times 100$$

式中：A_0 为 80% 乙醇+DPPH 工作液的吸光度值；A_i 为样品溶液+DPPH 工作液的吸光度值；A_j 为样品溶液+80% 乙醇的吸光度值。

1.2.2.2　$ABTS^+$ 自由基清除率测定　参考郭丽丽等[21] 的方法并稍作修改。精确称取 0.1 g SeCvP 和 0.1 g SeCvP-P，分别用蒸馏水定容至 10 mL，配制成 10 mg/mL 的样品储备液。随后，通过梯度稀释法，得到浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL 的样品溶液。配制 7 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液，使其等体积混合，室温避光反应 12~16 h，制备 $ABTS^+$ 储备液。用纯水将储备液稀释至在 734 nm 处的吸光度为 0.7±0.02，备用。取各浓度样品溶液 50 μL，加入 150 μL 的 ABTS 溶液，于暗处反应 5 min，测定其在 734 nm 处的吸光度。每个样品重复 3 次。清除率计算公式如下：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_i-A_j}{A_0}\right)\times 100$$

式中：A_0 为蒸馏水+ABTS 溶液的吸光度值；A_i 为样品溶液+ABTS 溶液的吸光度值；A_j 为样品溶液+蒸馏水的吸光度值。

1.2.2.3 羟基自由基清除率测定 参考邱现创等[22]的方法并稍作修改。精确称取 0.1 g SeCvP 和 0.1 g SeCvP-P，分别用蒸馏水定容至 10 mL，配制成 10 mg/mL 的样品储备液。随后，通过梯度稀释法，得到浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL 的样品溶液。取 1.0 mL 不同浓度的样品溶液，依次加入相同体积的 2 mmol/L $FeSO_4$ 溶液、2 mmol/L H_2O_2 溶液至干净试管中，将以上三种试剂混合均匀后放置于室温环境中，反应 10 min，待反应结束后加入 1.0 mL 2 mmol/L 水杨酸溶液，混匀，在 37 ℃ 条件下恒温反应 30 min。空白组为使用蒸馏水代替样品溶液，对照组为蒸馏水代替水杨酸溶液，其他处理均与样品组相同。在 510 nm 波长处测定吸光值。计算公式如下：

$$羟基自由基清除率(\%)=\frac{A_{空白}-(A_{样品}-A_{对照})}{A_{空白}}\times 100$$

1.2.2.4 总还原力测定 还原力的测定参照 Ye 等[23]的方法并略作修改。精确称取 0.1 g SeCvP 和 0.1 g SeCvP-P，分别用蒸馏水定容至 10 mL，配制成 10 mg/mL 的样品储备液。随后，通过梯度稀释法，得到浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL 的样品溶液。2.5 mL 不同浓度的样品溶液与 2.5 mL 1%(质量分数)铁氰化钾溶液混匀，50 ℃ 水浴反应 20 min，混合液冷却至 25 ℃ 后再加入 2.5 mL 10%(质量分数)三氯乙酸，将反应液 650×g 离心 10 min，然后取 2.5 mL 上清液，依次加入 2.5 mL 双蒸水和 0.5 mL 0.1%(质量分数)氯化铁，空白组以等体积双蒸水代替氯化铁溶液，充分混匀后分别测定混合溶液 700 nm 波长处吸光度，用样品组与空白组吸光度的差值表征样品的还原力。

1.2.3 减钠富硒腊肠的制作与实验设计 采用经前期研究确定的减钠最佳配方(以 0.4% 氯化钾和 0.1% 氯化钙等量替代 0.5% 氯化钠，使食盐添加量降至 1.0%，均以原料肉质量计)，具体工艺如下：精选冷鲜猪前腿肉，将瘦肉部分与肥膘部分分离，肥瘦比为 3∶7(w/w)，瘦肉与腌制剂(食盐 1%、氯化钾 0.4%、氯化钙 0.1%、亚硝酸钠 0.01%，以原料肉质量计)搅拌混匀，4 ℃ 腌制 4 h 后取出，加入肥肉部分拌匀后再加入调味料(白糖 2.8%、十三香 0.8%、白胡椒粉 0.3%、鸡精 0.2%、汾酒 2%)，按分组剂量加入富硒堇叶碎米荠粉、富硒堇叶碎米荠蛋白提取物，再次搅拌均匀，接着灌入天然羊肠衣，系绳排气后 55 ℃ 热风风干 24 h，最后取出晾凉进行真空包装，置于常温条件下贮藏备用。

实验设计：按照 DBS42/002-2022《食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》[24] 中对鲜、冻肉及其制品的硒含量要求(15~50 μg/100 g)，和富硒堇叶碎米荠粉中的硒含量(2390 mg/kg)及其蛋白提取物中的硒含量(1920 mg/kg)为依据，设置 SeCvP、SeCvP-P 添加量分别为 0.01%、0.02%、0.03%(以原料肉质量计)。CK 为空白组，0.01%SeCvP 为 0.01% 富硒堇叶碎米荠粉组，0.02%SeCvP 为 0.02% 富硒堇叶碎米荠粉组，0.03%SeCvP 为 0.03% 富硒堇叶碎米荠粉组，0.01%SeCvP-P 为 0.01% 富硒堇叶碎米荠蛋白提取物组，0.02%SeCvP-P 为 0.02% 富硒堇叶碎米荠蛋白提取物组，0.03%SeCvP-P 为 0.03% 富硒堇叶碎米荠蛋白提取物组。贮藏条件：常温避光，取样时间点 5 个：分别为 0、7、14、21、28 d，取腊肠整体进行指标检测。

1.2.4 富硒减钠腊肠品质测定

1.2.4.1 质构测定 将腊肠切成 2 cm 高的圆柱体进行质构特性的测定。测定参数为：测前速度 1.0 m/s，测中速度和测后速度均为 2.0 m/s，压缩比为 30%[25]。每个实验组重复 5 次。

1.2.4.2 电子舌测定 参考赵立等[26]的方法稍作修改，将 5 g 绞碎的腊肠样用 100 mL 去离子水均化(10000×g，30 s)，置于在超声波清洗器中超声 10 min 后取出，用滤纸过滤，取滤液进行电子舌分析。每个样品采集四组数据，第一组数据舍去。

1.2.4.3 电子鼻测定 参考杨江等[27]的方法并稍作修改。取 10 g 泥状腊肠样品于 50 mL 电子鼻样品瓶中并封口，置于 60 ℃ 水浴加热 30 min，室温平衡 10 min 后插入电子鼻探头进行顶空进样。电子鼻参数：样品间隔时间 3 min，管路清洗时间 95 s，平衡时间 5 s，探头插入时间 5 s，进样时间 60 s，进样流量 200 mL/min，空气流量 200 mL/min。平行测定 3 次。电子鼻传感器性能描述见表 1。

1.2.5 富硒减钠腊肠贮藏稳定性测定

1.2.5.1 过氧化值测定 参照 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》[28] 中的滴定法测定腊肠中过氧化值，结果以 g/100 g 表示。

1.2.5.2 TBARS 值测定 参考王德宝[29]的方法并稍作修改。在 25 mL 三氯乙酸溶液(W/W，7.5%，含 0.1%EDTA)中加入 5 g 切碎的腊肠肉样，涡旋 10 s，8000×g 冰水浴匀浆 30 s(两次)，双层滤纸过滤。在 5 mL 滤液中加入 0.02 mol/L 的硫代巴比妥酸溶液 5 mL，混合均匀，90 ℃ 下水浴保温 40 min，冷却至室温。加入 5 mL 三氯甲烷并旋涡混匀，静置分层后，测定上清液在 532 nm 和 600 nm 处的吸光度，结果以 mg/kg 表示。

$$TBARS(mg/kg)=\left(\frac{A_{532}-A_{600}}{155}\right)\times\frac{1}{10}\times 72.6\times 1000$$

1.2.5.3 感官评价 腊肠经温水洗净后蒸汽加热 15 min，取出后切片备用。选取 10 名具有感官分析经验的食品安全专业的学生对腊肠的感官特性进行

表 1　电子鼻传感器

Table 1　Electronic nose sensors

传感器	响应物质	性能描述
S1	短链烷烃	丙烷、烟雾等
S2	含碳物质等	酒精、烟雾、异丁烷、甲醛等
S3	氢气	氢气，含氢气体等
S4	硫化物	硫化氢，硫化物等
S5	含氮类物质	氨气，胺类等
S6	醛酮类	甲苯、丙酮、乙醇氢气等
S7	短链烷烃类可燃性气体	甲烷、天然气、沼气等
S8	液化气	液化气
S9	烷烃，醇类、酮类等	甲苯、甲醛、苯、酒精、丙酮等
S10	氢气，含氢物质	氢气等
S11	烷烃，一氧化碳等	液化气，烷烃等
S12	部分有机溶剂	液化气，甲烷等
S13	短链烷烃类	甲烷等
S14	短链烷烃	甲烷，燃气，烟雾等
S15	对含氮类物质敏感	氨气，胺类等
S16	硫对化物敏感	硫化氢，硫化物等
S17	含氢物质	氢气等含氢物质
S18	酒精，部分有机溶剂等	芳香烃类，脂肪烃类，脂环烃类，卤化烃类，醚类，酯类，二醇衍生物，乙腈，吡啶，苯酚等
S19	对醇类，醛类，酮类，苯类敏感	醇类，酮类，醛类，芳香族化合物等
S20	对短链烷烃类敏感	甲烷，沼气，天然气等
S21	可燃性气体等	可燃性气体等
S22	VOC	苯酚，酮类，乙酸乙酯，环己酮，氯苯，甲基苯，醚等
S23	对烷烃，烯烃，芳烃等敏感	液化气，天然气，煤气，丙烷，丙烯，丁烷，丁烯等
S24	对烷烃，烯烃，氢气等敏感	液化气，可燃性气体等
S25	对烷烃，一氧化碳，烯醛类、醇类、氮氧化物、酮类、醛类等敏感	烷烃，酒精，天然气，烟雾等
S26	对部分有机溶剂敏感	醇类，醚类，酯类，酮类，芳香烃类，脂肪烃类，脂环烃类，卤化烃类
S27	硫化物，氮化物，碳化物，碳氢化合物以及氮氧化合物等	烟气，烹调臭味等
S28	对短链烷烃敏感	甲烷，燃气等

评价。感官评分标准见表 2。

1.3　数据处理

所有数据至少由三次实验测定所得，结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 19 分析软件对所有数据进行统计分析，采用 Duncan's 法检验差异显著性，以 $P<0.05$ 表示差异显著，采用 Origin 2019 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　SeCvP 和 SeCvP-P 的活性成分分析

SeCvP 和 SeCvP-P 的活性成分分析结果如表 3 所示。从数据中可以看出，SeCvP 在总黄酮、总多酚和叶绿素含量方面均显著高于 SeCvP-P（$P<0.05$）。黄酮类与多酚类物质是植物中重要的抗氧化成分，叶绿素则具有一定的抗炎、抗氧化与健康促进作用[30−31]。因此，从成分构成的角度来看，SeCvP 在保留更多天然植物活性成分的基础上，可能具备更强的抗氧化与生理调节潜力。进一步分析总硒含量以及硒形态发现，SeCvP 在总硒含量及多种硒代氨基酸（包括硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸、甲基硒代半胱氨酸等）的含量上均显著高于 SeCvP-P（$P<0.05$）。两种样品中均未检出无机硒，这表明硒元素几乎全部以有机形态存在，因此测得的有机硒含量与总硒含量一致，这与李瑜等[32]、吴红梅等[33] 研究结果较为一致。硒代半胱氨酸是人体内抗氧化酶（谷胱甘肽过氧化物酶 GPx）活性中心的必需组分，GPx 能直接催化还原过氧化氢和脂质过氧化物，保护细胞膜及生物大分子免受氧化损伤[34]。此外，硒代蛋氨酸可非特异性掺入机体蛋白，形成硒储备，实现硒的长期、稳定供应，从而维持机体长效的抗氧化能力[35]；而甲基硒代半胱氨酸是活性代谢物甲基硒醇的直接前体，在调控氧化应激中发挥重要作用[36]。尽管 SeCvP 和 SeCvP-P 在各类硒形态的具体含量上存在差异，但二者均富含以硒代氨基酸为主要形态的有机硒。此类有机硒通常表现出更高的生物利用率与较低的毒性风险，能够通过多种机制协同增强机体的抗氧化防御能力[37]。因

表 2　腊肠的感官评分标准

Table 2　Criteria for sensory evaluation of Chinese sausages

项目	评分标准	分值
色泽（20%）	瘦肉呈红色或枣红色，脂肪呈乳白色，切面有光泽	14~20
	瘦肉呈淡红棕色，脂肪部分呈乳白色，切面光泽较暗淡	7~13
	瘦肉呈紫色，脂肪灰红，切面无光泽	0~6
香气（20%）	具有浓郁的腌腊肉香味，香味突出，无异味	14~20
	腌腊肉香味较浓郁，无异味	7~13
	没有明显的腌腊肉香味或出现不良异味	0~6
滋味（20%）	滋味鲜美，咸味适中	14~20
	滋味较好，咸味不均，稍咸	7~13
	滋味差	0~6
形态（20%）	外形完整、均匀，表面干爽，表面皱纹明显	14~20
	外形较完整，较均匀，表面皱纹较明显	7~13
	外形松散，不均匀，表面皱纹不明显	0~6
可接受性（20%）	总体接受性满意	14~20
	总体可接受性一般	7~13
	不可接受	0~6

表 3　SeCvP 和 SeCvP-P 的活性成分分析

Table 3　Analysis of active components in SeCvP and SeCvP-P

活性成分	SeCvP	SeCvP-P
总黄酮（%）	0.53 ± 0.01^{A}	0.14 ± 0.00^{B}
总多酚（mg/g）	8.70 ± 0.10^{A}	1.50 ± 0.00^{B}
叶绿素（mg/g）	1.87 ± 0.02^{A}	0.03 ± 0.00^{B}
总硒含量（mg/kg）	2390.00 ± 45.83^{A}	1920.00 ± 85.44^{B}
有机硒含量（mg/kg）	2390.00 ± 45.83^{A}	1920.00 ± 85.44^{B}
硒代半胱氨酸（μg/g）	25.03 ± 0.05^{A}	22.55 ± 0.33^{B}
硒代胱氨酸（μg/g）	29.18 ± 0.36^{A}	24.06 ± 0.1^{B}
甲基硒代半胱氨酸（μg/g）	19.29 ± 0.15^{A}	6.64 ± 0.03^{B}
硒代蛋氨酸（μg/g）	13.46 ± 0.09^{A}	3.29 ± 0.04^{B}

注：同行不同大写字母表示样品间差异显著（$P<0.05$）。

此，SeCvP 和 SeCvP-P 均具备作为优质膳食硒源的潜力，适用于富硒功能性食品的开发。

2.2 SeCvP 和 SeCvP-P 的体外抗氧化活性分析

由图 1 可知，SeCvP 和 SeCvP-P 的自由基清除率及还原力均与试样浓度成正比关系，存在明显的浓度依赖效应。尽管 SeCvP 在总黄酮、总多酚以及硒代氨基酸等关键活性成分的含量上显著高于 SeCvP-P，然而，在 DPPH、$ABTS^{+}$和羟自由基清除能力以及还原力测定中，SeCvP 在所有测试浓度下的体外抗氧化活性却均低于 SeCvP-P。本研究结果与杜朝东等[38] 对富硒碎米荠不同提取物的抗氧化性能研究结论一致，碎米荠硒多肽(SPI)因其小分子肽结构，使得活性成分更易暴露并与自由基反应，因而表现出最强的自由基清除能力；而堇叶碎米荠粗提取物(CE)虽含有丰富的黄酮、多酚等抗氧化成分，但因未经过充分破坏细胞结构，其抗氧化成分的释放与反应效率相对较低。同理，SeCvP 作为原始植物原料，其丰富的黄酮、多酚和硒氨基酸被包裹在完整的植物细胞壁基质中。相反，SeCvP-P 在提取制成蛋白粉的过程中，其植物细胞结构被破坏，这使得其中含有的小分子肽、游离氨基酸以及部分被释放出的抗氧化物质能够更迅速地溶出，并与自由基发生反应，从而表现出更高的自由基清除能力。该结果表明，在需要延缓脂质氧化、保持食品新鲜度和营养价值的食品加工过程中，SeCvP-P 可以提供有效的保护作用。但是，实际应用效果还需通过进一步的实验来验证。

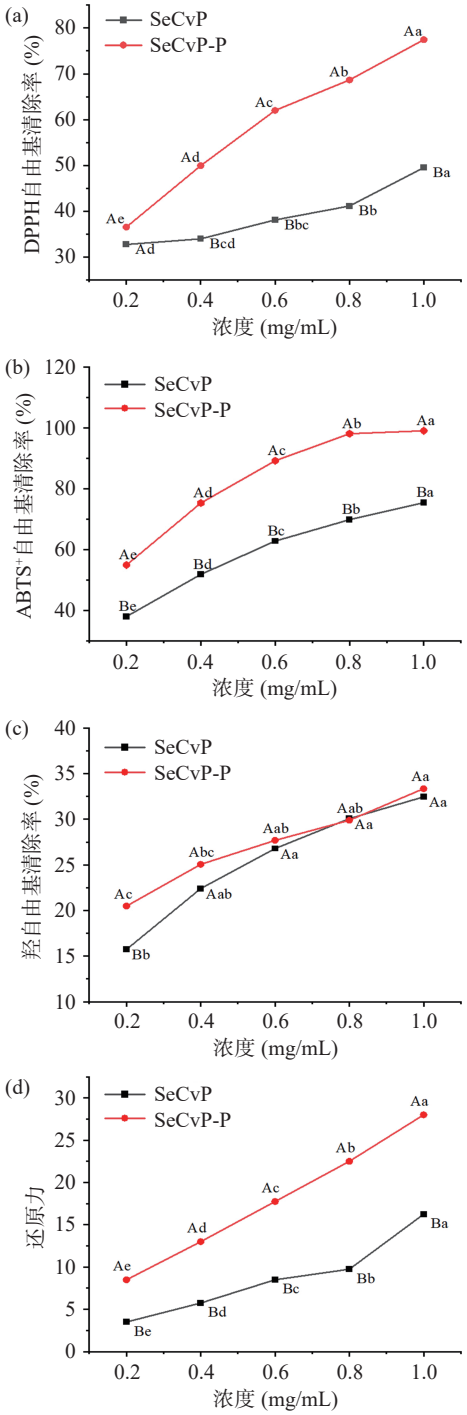


图 1 SeCvP 和 SeCvP-P 的体外抗氧化活性

Fig.1 *In vitro* antioxidant activity of SeCvP and SeCvP-P

注：(a)为 DPPH 自由基清除率，(b)为 $ABTS^{+}$自由基清除率，(c)为羟自由基清除率，(d)为还原力；不同小写字母表示同一样品不同浓度间差异显著(P<0.05)，不同大写字母表示样品间差异显著(P<0.05)。

2.3 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠品质特性的影响

2.3.1 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠质构的影响

质构特性是衡量腊肠食用品质的关键指标，其特性受肌肉纤维密度等多种内在因素影响[39]，直接影响到产品的口感与消费者接受度。SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠质构的影响如表 4 所示。在硬度方面，所有实验组的硬度值均显著高于 CK 组(P<0.05)，这表明 SeCvP 与 SeCvP-P 的添加能够有效提升减钠腊肠的质地紧实度。Xu 等[40] 研究中同样发现在广式腊肠中添加低浓度(100~300 mg/kg)的绿茶提取物可显著增加产品的硬度。在弹性、胶着性和咀嚼性方面，0.03%SeCvP 组表现尤为突出，其弹性与咀嚼性均显著优于 CK 组及其它实验组(P<0.05)，而其胶着性显著优于 CK 组(P<0.05)。这表明在适宜的添加浓度下，SeCvP 能有效改善减钠腊肠的回弹性与耐咀嚼性，这对于提升产品的感官品质具有重要意义。SeCvP-P 组对质构的改善效果整体上弱于 SeCvP 组，且未表现出明显的浓度依赖性。这一差异可能与两种粉末不同的组分构成有关。SeCvP 含有较高的蛋白质、总硒和多糖含量[10]。丰富的多糖类物质可与腊肠中的肌原纤维蛋白通过交联作用，形成更为致密、均匀的三维凝胶网络，从而显著提升产品的弹性和咀嚼性[41]。其次 SeCvP 中含有的植物蛋白，也可以作为活性填充物充实腊肠的网络孔隙，有助于形成更致密的凝胶结构。而 SeCvP-P 在制备过程中引入了适量的麦芽糊精，这稀释了其中活性多糖、蛋白质等成分的浓度，因此其在改善弹性和咀嚼性方面弱于 SeCvP。在回复性方面，各组间数据差异较小且无规律变化。综上，SeCvP 和 SeCvP-P 的添加改变了减钠腊肠的质构特性，其中 SeCvP 在 0.03% 的浓度下，能有效提升产品的硬度、弹性和咀嚼性。

表 4　SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠质构的影响

Table 4　Effect of SeCvP and SeCvP-P on the texture of reduced-sodium Chinese sausages

样品组	硬度(N)	弹性	咀嚼性(N)	胶着性(N)	回复性
CK	42.54±3.12^{B}	0.78±0.04^{B}	27.34±4.34^{B}	34.85±4.35^{B}	0.39±0.04^{AB}
0.01%SeCvP	53.41±5.01^{A}	0.77±0.06^{B}	29.61±3.38^{B}	37.60±3.30^{AB}	0.34±0.02^{B}
0.02%SeCvP	50.15±5.22^{A}	0.79±0.05^{B}	32.99±8.97^{B}	40.56±2.72^{AB}	0.41±0.04^{A}
0.03%SeCvP	50.46±5.84^{A}	0.87±0.04^{A}	49.08±5.00^{A}	42.21±4.53^{A}	0.35±0.03^{AB}
0.01%SeCvP-P	48.75±4.03^{A}	0.82±0.04^{AB}	29.25±5.99^{B}	36.64±8.40^{AB}	0.36±0.04^{AB}
0.02%SeCvP-P	50.00±3.41^{A}	0.80±0.08^{AB}	28.19±8.30^{B}	35.63±5.72^{AB}	0.36±0.07^{AB}
0.03%SeCvP-P	54.96±4.57^{A}	0.76±0.07^{B}	25.88±6.84^{B}	35.93±2.71^{AB}	0.35±0.02^{B}

注：同列不同大写字母表示样品间差异显著(P<0.05)。

2.3.2　电子舌测定 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠滋味的影响　电子舌分析能够客观地反映样品的整体滋味轮廓，根据电子舌响应值绘制雷达图，结果如图 2 所示。各处理组在咸味、酸味、苦味、涩味、鲜味等滋味维度上的评分与 CK 组基本接近，这一结果表明，在 0.01%~0.03% 添加量范围内，SeCvP 和 SeCvP-P 没有引入不良的滋味特征，也没有对减钠腊肠原有的鲜味、咸味等主要滋味成分产生干扰或抑制作用。类似地，赵红姣等[42] 在研究低钠复合盐对茶肠贮藏期间品质的影响时，也通过电子舌分析发现，添加了功能性成分的低钠复合盐处理组(SS2)在咸味、酸味、苦味、涩味、鲜味等滋味维度上与全盐对照组最为接近，说明适量添加功能性成分能较好地保持产品原有的风味特征。本研究说明添加 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠的滋味并无负面影响，具有制备富硒腊肠的应用潜力。

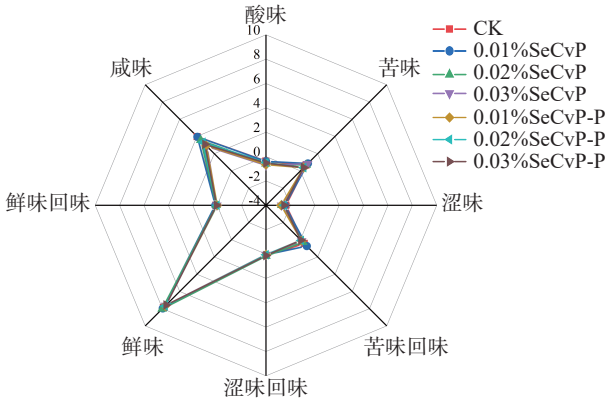


图 2　添加 SeCvP 和 SeCvP-P 的减钠腊肠电子舌雷达图

Fig.2　Radar plot of electronic tongue for reduced-sodium Chinese sausages with SeCvP and SeCvP-P

2.3.3　电子鼻测定 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠气味的影响　电子鼻是一种气味分析技术，它模仿人类的嗅觉系统，能够灵敏和无损地鉴定样品，并客观地反映出所测样品的信息[43]。为探究 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠风味的影响，本研究采用主成分分析(PCA)对电子鼻所获数据进行处理，以评估不同处理组之间的气味差异。结果显示(图 3)，PCA 模型的第一主成分(PC1)与第二主成分(PC2)的方差贡献率分别为 86.4% 与 9.0%，累计贡献率达 95.4%，说明 PCA 能较好地反映减钠腊肠样品的整体气味信息。由图 3 可见，各处理组在 PCA 图谱中分布区域高度重叠，说明其气味轮廓较为接近，未出现明显分离趋势。由此可知，在实验设定的浓度范围内，添加 SeCvP 与 SeCvP-P 并未引显著改变腊肠原有的主体气味轮廓。这一发现表明在开发富硒功能性肉制品时，使用这两种添加剂可以在不改变产品原有气味品质的前提下，成功实现硒强化目标。因此，SeCvP 与 SeCvP-P 在后续富硒减钠腊肠的产品开发中展现出良好的应用潜力。

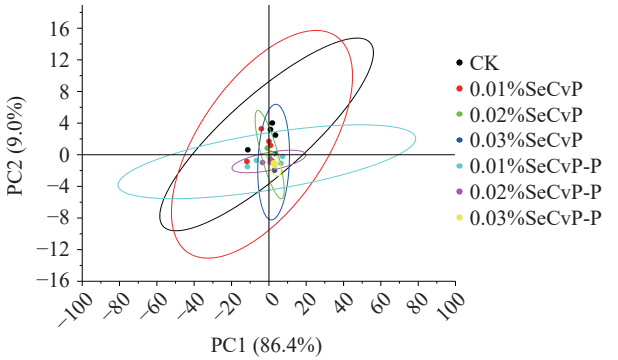


图 3　添加 SeCvP 和 SeCvP-P 的减钠腊肠电子鼻分析 PCA 图

Fig.3　PCA plot of electronic nose analysis for reduced-sodium Chinese sausages with SeCvP and SeCvP-P

2.4　SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏稳定性的影响

2.4.1　SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间硒含量的影响　图 4 反映了 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间硒含量的影响，可以看出各组腊肠的硒含量都在随着贮藏时间的延长呈现出显著下降趋势(P<0.05)。此外，所有处理组的硒含量都在贮藏 0~14 d 时出现了显著下降(P<0.05)。赵南祁等[44] 研究发现在不同低温真空蒸煮条件下，富硒猪肉中的硒含量会因热处理而发生显著变化，这反映了硒对环境因素(如温度、时间)的敏感性。本研究结果表明，即使在常温贮藏阶段，这种不稳定性依然存在，并在时间维度上表现为持续的损失趋势。无论是 SeCvP 组还是 SeCvP-P 组，在同一时间点，硒含量均表现出明显的剂量依赖性，这表明两种富硒添加剂都是有效的硒来源。在贮藏 0 d 时，0.03%SeCvP 硒含量略高于

0.03%SeCvP-P, 但差异极小, 说明两者在初始添加时的富硒能力相当。SeCvP 组的硒含量衰减幅度普遍大于 SeCvP-P 组。例如, 整个贮藏期间内 0.01% SeCvP 硒含量降幅 57%; 而 0.01%SeCvP-P 硒含量降幅 34%。空白组的硒含量始终远低于所有实验组, 且自身硒含量也随时间显著下降(P<0.05), 降幅达到了 70%。所有实验组均处于同一可控的贮藏环境中, 空白组的硒含量显著下降(P<0.05), 这表明下降主要源于肉制品内源硒自身的不稳定性, 而非外源性污染或损失。因此, 添加稳定的外源硒是非常必要的。同时空白组初始硒含量仅为 14.67 μg/100 g, 低于富硒肉制品中硒含量的最低下限值, 因此也可推断出由于空白组的硒本底值较低, 并且所有实验组均处于相同的、无外源硒污染的贮藏环境, 所以处理组的变化确实源自添加剂本身。而其它富硒处理组虽然在贮藏期间硒含量有所下降, 但在贮藏 14~28 d 时间范围硒含量下降幅度明显缓慢和平缓, 在 28 d 时其硒含量仍旧达到了富硒肉制品的硒含量标准(15~50 μg/100 g), 该结果再次印证了 SeCvP 和 SeCvP-P 可以作为一种稳定有效的外源硒添加到肉制品中。

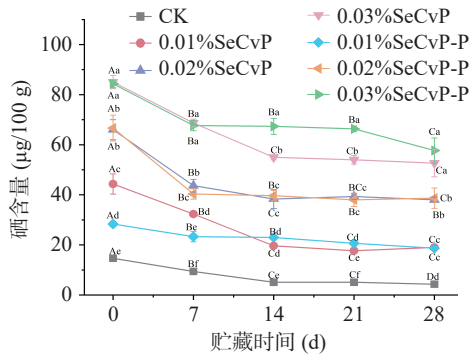


图 4 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间硒含量的影响
Fig.4 Effect of SeCvP and SeCvP-P on selenium content in reduced-sodium Chinese sausages during storage

注: 不同大写字母表示同一样品不同天数间差异显著(P<0.05), 不同小写字母表示样品间差异显著(P<0.05), 图 5~图 7 同。

2.4.2 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间过氧化值(POV)的影响 过氧化值是反映肉类中脂质氧化酸败的重要指标, 其值越高表明肉类中脂质氧化程度越大[45]。如图 5 所示, 随着贮藏时间的增加, 所有处理组的 POV 整体呈现上升趋势, 这表明氧化程度随时间逐渐加剧。该变化规律与许明映等[46] 在研究金针菇多糖螯合钙对广式腊肠氧化的影响中观察到的趋势一致。在整个 28 d 的贮藏期内, 所有组别的 POV 均远低于 GB 2730-2015《食品安全国家标准腌腊肉制品》中对于腊肠的过氧化值限量要求(≤0.50 g/100 g)。贮藏 14 d 前, CK 的 POV 显著低于添加了 SeCvP 和 SeCvP-P 的所有实验组(P<0.05), 可能是在贮藏早期 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠延缓脂质氧化的效果并没有显现出来。贮藏 14 d 后, CK 的 POV 增长速率极快, 显著高于实验组(P<0.05)。这一贮藏前后期的显著差异表明, SeCvP 和 SeCvP-P 的抗氧化作用存在一定的滞后性。这与 Cocan 等[47] 的研究结果类似, 该研究表明彩椒副产物作为一种天然抗氧化剂, 其抑制脂质氧化的能力在贮藏后期(21~28 d)表现得更为突出。在贮藏初期(0~7 d), 相同添加浓度下, SeCvP-P 组的 POV 均低于 SeCvP 组, 表明在此阶段 SeCvP-P 可能具有更好的抗氧化效果。然而, 在随后的贮藏期间(14~28 d), 不同浓度下 SeCvP-P 和 SeCvP 组的 POV 未呈现规律性差异。进一步分析发现, 0.01%SeCvP-P 和 0.03%SeCvP 处理组在贮藏 28 d 表现出最优的抗氧化效果, 其 POV 相较于 CK 组分别显著降低了 81.14% 与 83.83%。

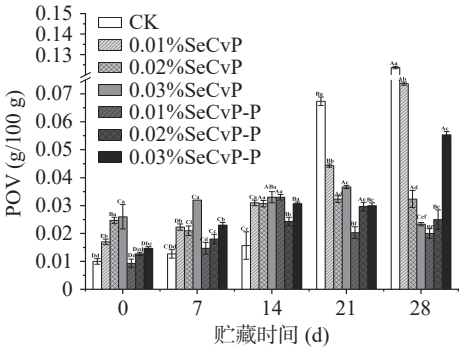


图 5 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间 POV 的影响
Fig.5 Effect of SeCvP and SeCvP-P on the POV of reduced-sodium Chinese sausages during storage

2.4.3 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间 TBARS 值的影响 硫代巴比妥酸反应物(TBARS)值作为评价脂质二次氧化的关键指标, 能够直接反映食品的氧化与变质程度[48]。从图 6 可以看出, 所有处理组的 TBARS 值均随贮藏时间的延长而显著升高(P<0.05), 表明减钠腊肠中的脂质氧化随贮藏时间延长而逐渐加剧。这种 TBARS 值在贮藏期间持续上升的趋势, 是肉制品脂质氧化劣变的典型特征。例如, 聂鑫等[49] 在研究四川腊肉的氧化过程时, 也发现了 TBARS 值随冷藏时间延长而上升的规律。整个贮藏期间, CK 组的 TBARS 值始终显著高于其它实验组(P<0.05), 表明 SeCvP 和 SeCvP-P 起到了良好的抗氧化效果, 提高了减钠腊肠贮藏期间的氧化稳定性。这一抗氧化效果可能源于两方面的协同作用: 一方面, SeCvP 和 SeCvP-P 中所含的有机硒形态(如硒代半胱氨酸与硒代蛋氨酸)可能通过其特有的代谢途径发挥抗氧化活性; 另一方面, 两者中存在的多酚类物质也能通过其酚羟基清除自由基, 阻断脂质氧化的链式反应[50]。de Almeida 等[51] 的研究也表明, 酚类化合物通过其芳香环上的羟基提供电子和氢原子, 从而中和自由基, 并抑制丙二醛等有害次级产物的生成。不同实验组的 TBARS 值存在明显差异, 反映出其抗氧化效果的不同。在 SeCvP 组中, TBARS 值随添加量的增加逐渐降低, 表现出一定的浓度依赖性;

而在 SeCvP-P 组中则呈现相反趋势，0.01%SeCvP-P 的抗氧化效果优于 0.02%SeCvP-P 和 0.03%SeCvP-P。综合来看，0.03%SeCvP 与 0.01%SeCvP-P 在各自组别中表现出最佳的抗氧化效果。此外，在相同添加浓度下，SeCvP-P 组的 TBARS 值普遍低于 SeCvP 组，说明其在减钠腊肠体系中具有更强的抗氧化能力，该结果与前述 POV 的变化规律一致，进一步验证了 SeCvP-P 在抑制脂质氧化方面的优势。

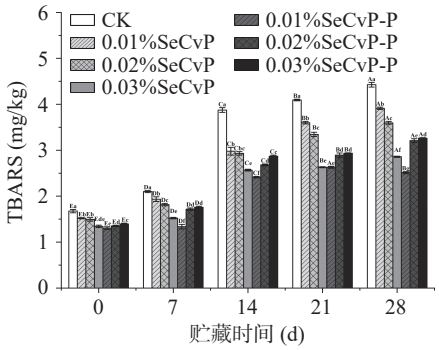


图 6　SeCvP 与 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间 TBARS 值的影响

Fig.6　Effect of SeCvP and SeCvP-P on the TBARS of reduced-sodium Chinese sausages during storage

2.4.4　SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间感官评价的影响　SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间感官评价的影响如图 7 所示。在贮藏过程中，各组腊肠的感官评分整体呈下降趋势，但 0.02%SeCvP、0.03%SeCvP、0.01%SeCvP-P 组的评分下降较缓，表明这些组的腊肠在贮藏期间能较好地维持其感官品质。同一贮藏时间内，随着 SeCvP 添加量的增加，腊肠的感官评分有所提升，但变化不显著（P>0.05）。相比之下，SeCvP-P 组的感官评分呈现相反趋势，尤其在贮藏后期，这种差异更为明显。贮藏前期（0~14 d），各处理组的腊肠在感官评价上差异不大。然而，在贮藏后期（21~28 d），0.03%SeCvP 和 0.01%SeCvP-P 的感官评分高于其它处理组。这一变化趋势与贮藏期间 POV 的变化相呼应，14 d 后，CK 组的 POV 迅速升高，同时其感官评分也明显下降，说明贮藏后期脂质氧化的加剧可能是导致减钠腊肠感官品质劣变的重要原因[52]。当 SeCvP 添加量为 0.03% 或 SeCvP-P 添加量为 0.01% 时，对腊肠的感官评分具有积极影响，可以较好地保持减钠腊肠的品质。

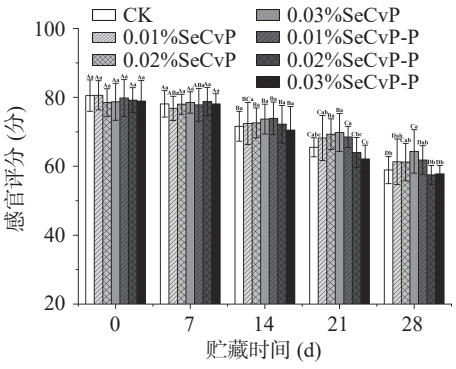


图 7　SeCvP 与 SeCvP-P 对减钠腊肠贮藏期间感官评价的影响

Fig.7　Effect of SeCvP and SeCvP-P on the sensory evaluation of reduced-sodium Chinese sausages during storage

3　结论

本研究系统探讨了 SeCvP 和 SeCvP-P 对减钠腊肠品质与贮藏稳定性的影响。结果表明，尽管 SeCvP 在总黄酮、总多酚和总硒含量上高于 SeCvP-P，但 SeCvP-P 因细胞结构在提取制备时被破坏，其活性成分更易释放，从而在添加量相对较低的情况下在体外也表现出更强的抗氧化活性，也说明其中的硒化合物形态及含量在适量时的作用更好。在应用于减钠腊肠体系后，发现二者对产品基本品质无负面影响。在质构方面，SeCvP 与 SeCvP-P 均能有效提升腊肠的硬度和弹性，其中 0.03%SeCvP 改善最为显著；电子舌与电子鼻分析进一步证实，在实验添加量范围内，SeCvP 和 SeCvP-P 未对腊肠原有的主体滋味和气味产生不良影响。此外，研究还发现二者均能作为有效的外源硒添加剂，显著提升腊肠的硒含量（P<0.05），并在贮藏末期硒含量下降幅度明显平缓，在 28 d 时其硒含量还是达到了富硒肉制品的硒含量标准。考虑到腌腊肉产品贮藏期一般为 3~6 个月，未来计划进行更长期的贮藏实验以系统探究腊肠中的硒衰减及品质变化规律。在抑制贮藏期间的脂质氧化方面，SeCvP 和 SeCvP-P 也均表现出显著效果（P<0.05），其中 SeCvP-P 在 0.01% 添加量时抗氧化效果最佳，而 SeCvP 则在 0.03% 添加量时抑制氧化最为有效。综上所述，本研究证实了富硒堇叶碎米荠粉及其蛋白提取物在减钠腊肠中兼具“天然抗氧化剂”与“功能配料”的双重价值。该发现不仅从“天然抗氧化剂-功能配料”协同视角为精准定量补硒型肉制品的开发提供了理论依据，也契合了“清洁标签”的产业发展趋势，为富硒植物原料在营养健康肉制品中的实际应用提供了切实可行的理论支撑与实践参考。

© 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] XIN B, ZHOU T, GAO H, et al. Flavor evolution of normal- and low-fat Chinese sausage during natural fermentation[J]. Food Research International, 2023, 169: 112937.

[2] LAW M R. Epidemiologic evidence on salt and blood pressure[J]. American Journal of Hypertension, 1997, 10(S4): 42S−45S.

[3] QIN L G, LI X A, HUANG Y X, et al. Flavour profile of traditional dry sausage prepared with partial substitution of NaCl with KCl[J]. Foods, 2023, 12(2): 388.

[4] CHEN Q, HU Y, WEN R, et al. Characterisation of the flavour profile of dry fermented sausages with different NaCl substitutes using HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose and electronic tongue[J]. Meat Science, 2021, 172: 108338.

[5] 阳运军, 聂春霖, 高彤, 等. 半胱氨酸、大豆肽及大豆分离蛋白对添加茶多酚广式腊肠品质的影响[J/OL]. 现代食品科技, 1−8 [2025-10-03]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0855. [YANG Y J, NIE C L, GAO T, et al. Effects of cysteine, soybean protein peptide and soybean protein isolation on the quality of Cantonese-style sausages containing phenols[J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1−8[2025-10-03]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0855.]
[6] GU X, SUN Y, TU K, et al. Evaluation of lipid oxidation of Chinese-style sausage during processing and storage based on electronic nose[J]. Meat Science, 2017, 133: 1−9.
[7] 陶思琪, 封炳迪, 孟彩云, 等. 清洁标签在食品加工中的应用及研究进展[J]. 农产品加工, 2025(5): 95−98. [TAO S Q, FENG B D, MENG C Y, et al. Application and research progress of clean label in food processing[J]. Farm Products Processing, 2025(5): 95−98.]
[8] 王宇璇, 孟淑娟, 王雅栋, 等. 人体内硒检测与富硒食品开发的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 428−437. [WANG Y X, MENG S J, WANG Y D, et al. Research progress of selenium detection in human body and development of selenium-rich food[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(4): 428−437.]
[9] YUAN L, ZHU Y, LIN Z Q, et al. A novel selenocystine-accumulating plant in seleniummine drain-age area in Enshi, China[J]. PLoS One, 2013, 8: e65615.
[10] 徐辉. 富硒蔬菜堇叶碎米荠营养保健成分及其硒产品开发探讨[J]. 农产品加工, 2023(21): 102−104. [XU H. Nutritional and health components of selenium-enriched vegetable *Cardamine violifolia* and development of its selenium products[J]. Farm Products Processing, 2023(21): 102−104.]
[11] ZHU S, YANG W, LIN Y, et al. Antioxidant and anti-fatigue activities of selenium-enriched peptides isolated from *Cardamine violifolia* protein hydrolysate[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 79: 104412.
[12] WANG H, CONG X, QIN K, et al. Se-enriched *Cardamine violifolia* improves laying performance and regulates ovarian antioxidative function in aging laying hens[J]. Antioxidants, 2023, 12(2): 450.
[13] 雷红灵, 方响亮, 周大寨. 堇叶碎米荠硒蛋白的体内抗氧化作用研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 201−205. [LEI H L, FANG X L, ZHOU D Z. *In vivo* antioxidation of selenoprotein in *Cardamine violifolia*[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 201−205.]
[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. SN/T 4592-2016 出口食品中总黄酮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. SN/T 4592-2016 Determination of total flavonoids in food for export[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
[15] 安徽省食品行业协会团体标准. T/AHFIA 005-2018 植物提取物及其制品中总多酚含量的测定 分光光度法[S]. 安徽: 食品行业协会, 2019. [Anhui Provincial Food Industry Association Group Standard. T/AHFIA 005-2018 Determination of polyphenols in plant extracts and their products by spectrophotometry[S]. Anhui: Food Industry Association, 2019.]
[16] 全国果品标准化技术委员会. NY/T 3082-2017 水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定分光光度法[S]. 北京: 中国科学出版社, 2017. [National Technical Committee for the Standardisation of Fruit Products. NY/T 3082-2017 Determination of chlorophyll content in fruits, vegetables and their products spectrophotometric method[S]. Beijing: China Science Press, 2017.]
[17] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.93-2017 食品安全国家标准 食品中硒的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. GB 5009.93-2017 National food safety standard determination of selenium in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[18] 湖北省食品安全标准评审委员会. DBS42/010-2018 食品安全地方标准 富硒食品中无机硒的测定方法[S]. 湖北: 湖北省卫生健康委员会, 2018. [Hubei Provincial Food Safety Standards Review Committee. DBS42/010-2018 Local food safety standard determination method of inorganic selenium in selenium-enriched foods[S]. Hubei: Hubei Provincial Health Commission, 2018.]
[19] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 3870-2021 硒蛋白中硒代氨基酸的测定液相色谱原子荧光光谱法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 3870-2021 Determination of selenoamino acid in selenoprotein-Liquid chromatography atomic fluorescence spectrometry[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.]
[20] TENG C, QIN P, SHI Z, et al. Structural characterization and antioxidant activity of alkali-extracted polysaccharides from quinoa[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106392.
[21] 郭丽丽, 李小兰, 田小丽, 等. 黄芪茎叶总皂苷的响应面提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(4): 158−167. [GUO L L, LI X L, TIAN X L, et al. Optimization of extraction technology of total saponins from stems and leaves of *Astragalus membranaceus* by response surface methodology and their antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2023, 34(4): 158−167.]
[22] 邱现创, 赵宁, 李晨, 等. 铁皮石斛多糖提取工艺优化及对果蝇抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 273−280. [QIU X C, ZHAO N, LI C, et al. Optimization of extraction of polysaccharide from *Dendrobium officinale* and its antioxidant effect on *Drosophila melanogaster*[J]. Food Science, 2018, 39(2): 273−280.]
[23] YE Z, WANG W, YUAN Q, et al. Box-Behnken design for extraction optimization, characterization and *in vitro* antioxidant activity of *Cicer arietinum* L. Hull polysaccharides[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 147: 354364.
[24] 湖北省食品安全标准评审委员会. DBS42/002-2022 食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求[S]. 湖北: 湖北省卫生健康委员会, 2022. [Hubei Provincial Food Safety Standards Review Committee. DBS42/002-2022 Local food safety standard-Selenium content requirements for selenium-enriched organic foods[S]. Hubei: Hubei Provincial Health Commission, 2022.]
[25] 邱舒娴, 聂春霖, 阳运军, 等. 不同茶叶提取物对广式腊肠品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 170−176. [QIU S X, NIE C L, YANG Y J, et al. Effects of different tea extracts on the quality of Cantonese sausage[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 170−176.]
[26] 赵立, 曹雨欣, 宋子伟, 等. 咸味猪骨肽部分替代 NaCl 对低盐香肠品质和风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 70−78. [ZHAO L, CAO Y X, SONG Z W, et al. Effect of partial replacement of NaCl with salty pig bone peptides on the quality and flavor of low-NaCl sausages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 70−78.]
[27] 杨江, 杨成聪, 凌霞, 等. 基于电子鼻和气相色谱-质谱联用技术评价襄阳地区腊肠风味品质[J]. 肉类研究, 2018, 32(8): 46−50. [YANG J, YANG C C, LING X, et al. Evaluation of flavor quality of Chinese sausages from Xiangyang by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Meat Research, 2018, 32(8): 46−50.]
[28] 全国食品工业标准化技术委员会. 食品中过氧化值的测定 GB 5009.227-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 6−8. [National Technical Committee for Standardization of Food

Industry. Determination of peroxide value in foods GB 5009.227-2023[S]. Beijing: China Standards Press, 2023: 6−8.]
[29] 王德宝. 发酵剂对发酵羊肉香肠蛋白质、脂质分解代谢及风味物质生成机制影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [WANG D B. Effects of starter cultures on protein and lipid catabolism and the formation mechanism of flavor substances in fermented mutton sausage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.]
[30] DAR F A, TAHIR I, HAKEEM K R, et al. Silicon application enhances the photosynthetic pigments and phenolic/flavonoid content by modulating the phenylpropanoid pathway in common buckwheat under aluminium stress[J]. Silicon, 2022, 14(1): 323−334.
[31] MARTINS T, BARROS A N, ROSA E, et al. Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: A comprehensive review[J]. Molecules, 2023, 28(14): 5344.
[32] 李瑜, 马俊, 高海娜, 等. 硒在堇叶碎米荠中的赋存形态及分布规律[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(7): 26−28. [LI Y, MA J, GAO H N, et al. Occurrence form and distribution of selenium in *Cardamine violifolia*[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(7): 26−28.]
[33] 吴红梅, 杨伟, 丛欣, 等. 超聚硒植物堇叶碎米荠研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(11): 26−32. [WU H M, YANG W, CONG X, et al. Research advances of the selenium hyperaccumulating plant *Cardamine enshiensis*[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(11): 26−32.]
[34] 刘海远, 杨伟, 徐波, 等. 不同植物中硒含量及存在形态的研究进展[J]. 农产品加工, 2024(4): 109−113,120. [LIU H Y, YANG W, XU B, et al. A review on the content and forms of selenium in different plants[J]. Agricultural Products Processing, 2024(4): 109−113,120.]
[35] THIRY C, RUTTENS A, DE TEMMERMAN L, et al. Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 767−784.
[36] XIE Y, LIU Q, ZHENG L, et al. Se-methylselenocysteine ameliorates neuropathology and cognitive deficits by attenuating oxidative stress and metal dyshomeostasis in Alzheimer model mice[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2018, 62(12): 1800107.
[37] 马吉锋, 黄金涛, 魏哲, 等. 硒在动物生产中的应用进展[J]. 中国畜禽种业, 2021, 17(1): 35−38. [MA J F, HUANG J T, WEI ZH, et al. Application progress of selenium in animal production[J]. China Livestock and Poultry Breeding, 2021, 17(1): 35−38.]
[38] 杜朝东, 朱松, 于添, 等. 富硒碎米荠不同提取物抗氧化性能研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 174−178. [DU C D, ZHU S, YU T, et al. Study on antioxidant capacity of selenium-substance form cardamine[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 174−178.]
[39] ZHU Y C, YAN Y W, YU Z H, et al. Effects of high pressure processing on microbial, textural and sensory properties of low-salt emulsified beef sausage[J]. Food Control, 2022, 133: 108596.
[40] XU W, NIE C, LI Z, et al. Effect of green tea or black tea extract on lipid and protein oxidation in Cantonese sausage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(3): 1683−1690.
[41] 张蕾, 孙海磊, 毛衍伟, 等. 影响肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的机制研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(18): 393−404. [ZHANG L, SUN H L, MAO Y W, et al. Factors affecting heat-induced gel properties of myofibrillar protein and their mechanisms of action: A review[J]. Food Science, 2025, 46(18): 393−404.]
[42] 赵红姣, 李悦欣, 陈倩, 等. 低钠复合盐对茶肠贮藏期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 189−198. [ZHAO H J, LI Y X, CHEN Q, et al. Effect of low-sodium composite salt on the quality of tea sausages during storage[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(14): 189−198.]
[43] MUNEKATA P E S, FINARDI S, DE SOUZA C K, et al. Applications of electronic nose, electronic eye and electronic tongue in quality, safety and shelf life of meat and meat products: A review[J]. Sensors, 2023, 23(2): 672.
[44] 赵南祁, 刘紫瑶, 张立君, 等. 不同低温真空蒸煮条件对富硒猪肉硒含量及产品品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 249−198. [ZHAO N Q, LIU Z Y, ZHANG L J, et al. Effects of different low-temperature vacuum cooking conditions on the selenium content and product quality of selenium-enriched pork[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(18): 249−198.]
[45] 董科, 朱晨豪, 郭文婷, 等. 姜提取物挥发性风味成分分析及对冷吃兔贮藏品质的影响[J/OL]. 食品科学: 1−23[2025-10-04]. https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20250707-048. [DONG K, ZHU C H, GUO W T, et al. Analysis of volatile flavor components in ginger extract and its effect on storage quality of cold-eating rabbit[J/OL]. Food Science: 1−23[2025-10-04]. https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20250707-048.]
[46] 许明映, 程镜蓉, 刘学铭, 等. 金针菇多糖螯合钙对广式腊肠品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 69−74,94. [XU M Y, CHENG J R, LIU X M, et al. Effect of F*lammulina velutipes* polysaccharide chelated calcium on the quality of Cantonese sausage[J]. Food Industry Science and Technology, 2017, 38(16): 69−74,94.]
[47] COCAN I, CADARIU A I, NEGREA M, et al. Investigating the antioxidant potential of bell pepper processing by-products for the development of value-added sausage formulations[J]. Applied Sciences, 2022, 12(23): 12421.
[48] PRAKASH J, NIKOUSALEH A. Antioxidant properties of selected spices used in Iranian Cuisine and their efficacy in preventing lipid peroxidation in meat sausages[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(1): 67−78.
[49] 聂鑫, 赵志平, 吉莉莉, 等. 类球红细菌粗提物对冷藏期四川腊肠脂肪和蛋白质氧化的影响[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(1): 12−16. [NIE X, ZHAO Z P, JI L L, et al. Effect of crude extract from *Rhodobacter sphaeroides* on lipid and protein oxidation of cold storage Sichuan sausage[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2021, 57(1): 12−16.]
[50] ZHANG Y, YANG L, ZU Y, et al. Oxidative stability of sunflower oil supplemented with carnosic acid compared with synthetic antioxidants during accelerated storage[J]. Food Chemistry, 2010, 118(3): 656−662.
[51] de ALMEIDA P L, DE LIMA S N, COSTA L L, et al. Effect of Jabuticaba peel extract on lipid oxidation, microbial stability and sensory properties of Bologna-type sausages during refrigerated storage[J]. Meat Science, 2015, 110: 9−14.
[52] 葛月婷, 寇博洋, 张春语. 天然抗氧化剂在肉制品加工中的应用研究进展[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2025, 38(4): 497−505. [GE Y T, KOU B Y, ZHANG C Y. Advancements in the application of natural antioxidants in meat processing[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2025, 38(4): 497−505.]