

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241225002

引用格式: 余思瀚, 赵紫汐, 车金鑫. 基于主成分分析和响应面法的腌制辣椒原料脱硫剂配方优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 219–227.

YU SH, ZHAO ZX, CHE JX. Formula optimization of desulfurizer for pickled pepper based on principal component analysis and response surface method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 219–227. (in Chinese with English abstract).

# 基于主成分分析和响应面法的腌制辣椒 原料脱硫剂配方优化

余思瀚, 赵紫汐, 车金鑫\*

(湘潭大学化工学院, 湘潭 411105)

**摘要:** **目的** 基于主成分分析和响应面法对腌制辣椒原料复配脱硫剂进行配方优化。**方法** 依据 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》拟定检出限, 采用单因素实验从9种常见脱硫剂中筛选出具有良好脱硫效果, 并对原料品质影响较小的3种脱硫剂, 采用响应面法设计三因素三水平实验, 通过主成分和响应面分析得到最佳复配比, 并得到最佳使用条件。**结果** 当复配脱硫剂中氢氧化钙质量分数为44.05%, 碳酸氢钠质量分数为35.57%, 二氧化氯质量分数为20.38%, 使用浓度为0.10%时, 脱硫率能够达到94.55%, 比未使用时提高了约36.50%, 同时腌制辣椒原料的色泽、硬度等指标无明显变化。**结论** 本研究得到了一种脱硫效果好, 同时对原料品质影响小的腌制辣椒复配脱硫剂, 具有较高应用价值。

**关键词:** 辣椒脱硫; 响应面法; 配方优化; 主成分分析

## Formula optimization of desulfurizer for pickled pepper based on principal component analysis and response surface method

YU Si-Han, ZHAO Zi-Xi, CHE Jin-Xin\*

(College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**ABSTRACT: Objective** To optimize a compound desulfurizer of pickled pepper raw material by principal component analysis and response surface method. **Methods** The limit of detection was based on GB 2760—2014 *National standard for food safety-Standards for the use of food additives*, selected 3 kinds of desulfurizers with good desulfurization effect and little influences on raw material quality from 9 kinds of common desulfurizers by single factor experiments, designed a 3-factor, 3-level experiment by response surface method, through principal component analysis and response surface analysis, the optimum compound ratio and the optimum operating conditions were obtained. **Results** When the mass fraction of calcium hydroxide was 44.05%, sodium bicarbonate was 35.57%, chlorine dioxide was 20.38%, and the concentration was 0.10%, the desulfurization rate could reach 94.55%, which

收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 湘潭市科技计划一般项目(NY-YB20221039)

第一作者: 余思瀚(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬贮藏与保鲜。E-mail: yusihanmail@sina.com

\*通信作者: 车金鑫(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品贮藏与保鲜。E-mail: chejinxin@163.com

was about 36.50% higher than that of no use. At the same time, the color and hardness of pickled pepper materials had no obvious changes. **Conclusion** The study obtains a kind of compound desulfurizer with good desulfurization effect and little influences on raw material quality, and has high application value.

**KEY WORDS:** pepper desulfurization; response surface method; formula optimization; principal component analysis

## 0 引言

辣椒为茄科(Solanaceae)辣椒属(*Capsicum*)一年或多年生植物,是重要的调味品和蔬菜<sup>[1]</sup>。我国是世界第一大辣椒生产国与消费国<sup>[2]</sup>,在我国辣椒年播种面积在 150 万~200 万  $\text{hm}^2$ ,居蔬菜首位<sup>[3]</sup>。辣椒主要销售方向包括饮食、加工和出口,其中加工消费占比约为 40%左右<sup>[4]</sup>。辣椒含水量高,不宜长期保存,采后极易腐烂和腐败<sup>[5-6]</sup>,为保证辣椒制品周年生产,通常采用腌制的方式对辣椒进行加工处理以延长腌制辣椒原料的贮藏时间<sup>[7-9]</sup>。二氧化硫是一种常见的食品添加剂,其防腐效果好,同时能够保持产品色泽鲜亮,在腌渍制品加工中广泛使用<sup>[10]</sup>。通常情况下利用二氧化硫气体熏蒸果蔬原料,或以焦亚硫酸钾、焦亚硫酸钠、亚硫酸钠等亚硫酸盐的形式添加于食品中,用于抑制原料中有害微生物的生长及氧化酶的活性<sup>[11-13]</sup>。但硫磺熏蒸易导致腌制品中二氧化硫残留量超标。摄入过量的二氧化硫会让人产生恶心、呕吐等胃肠道症状,还可能诱发哮喘和过敏性疾病,同时会破坏体内的维生素  $\text{B}_1$ ,影响生长发育<sup>[14]</sup>。国际食品法典委员会规定香辛料中二氧化硫类添加剂的最大使用量为 0.15 g/kg,GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中规定,腌制的蔬菜中的硫含量不得超过 0.10 g/kg(最大使用量以二氧化硫残留量计)。为了使辣椒制品中的硫含量达到国家标准要求,需要对其进行脱硫处理。传统工艺多采用多次漂洗结合脱硫剂脱硫,其操作一般为用大量清水浸泡原料 10~20 h,期间不断换水,如此反复,不仅耗时长,而且对原料损耗大<sup>[15]</sup>。常见的腌制食品脱硫剂包括磷酸氢二钠、脱氢乙酸钠、过氧化氢以及抗坏血酸等,为保证脱硫效果,单一脱硫剂使用浓度均较高,不仅会造成食品品质下降,严重时危害安全<sup>[16]</sup>。本研究综合脱硫效率及脱硫后腌制辣椒产品的色差、质构等评价指标,筛选具有良好脱硫效果的物质进行复配,得到一种具有优秀脱硫效率同时对原料品质影响小的复配脱硫剂,为腌制品原料脱硫提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料、试剂与仪器

腌制辣椒原料均来自湘潭市售。

氢氧化钙、碳酸氢钠、二氧化氯、30%过氧化氢(分析

纯,阿拉丁股份有限公司);浓盐酸(分析纯,湖南汇虹试剂有限公司)。

JE1002 型电子天平(精度 0.01 mg,上海精密科学仪器有限公司);FY-ZLY6C 玻璃充氮蒸馏器、10 mL 半微量滴定管(杭州菲跃仪器有限公司);DFT-100 组织捣碎机(上海冠森生物科技有限公司);Universal TA 质构仪(上海腾拔仪器科技有限公司);CM-2300d 分光测色计(日本柯尼卡美能达公司)。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 原料脱硫处理过程

参照俞根荣<sup>[17]</sup>的方法略作修改,将腌渍辣椒切成 1 cm 小段,装入锥形瓶中,按照料液比 1:6 加入不同浓度脱硫剂,在 25 °C 条件下静置处理 1.5 h。

#### 1.2.2 原料硫含量的测定

参考 GB 5009.34—2022《食品安全国家标准 食品中二氧化硫的测定》中的酸碱滴定法,将沥干水分并擦干的原料用粉碎机粉碎,称取 5.00 g 样品置于圆底烧瓶中,加入 300 mL 蒸馏水,用 10 mL 盐酸将原料中的硫元素置换成二氧化硫,随后将二氧化硫用高纯氮气吹入 3%过氧化氢吸收液中,用氢氧化钠标准滴定液(0.01 mol/L)进行滴定<sup>[18]</sup>。

#### 1.2.3 辣椒原料品质的测定

参考 LI 等<sup>[19]</sup>的方法,取得待测原料辣椒取 2 cm×1 cm×0.1 cm 的长方体薄片,将样品置于室温平衡 30 min 后利用质构仪测定果实硬度、咀嚼性和黏度,其中质构所用探头为通用型圆柱探头 P/5,触发力设置为 8 g,测试速度 1 mm/s,形变程度 50%。参考张秀玲等<sup>[20]</sup>的方法利用分光测色及测定果实色差参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 。 $L^*$ 表示果面色泽明亮度, $a^*$ 表示果面红(+)/绿(-)色度值, $b^*$ 表示果面黄(+)/蓝(-)色度值。

#### 1.2.4 响应面分析和主成分分析

响应面实验设计采用 Design Expert (V10.0.3)中的 Box-Behnken 进行设计,按照实验设计配方进行原料辣椒脱硫实验,分析不同脱硫剂配比对脱硫率及辣椒原料品质的影响,并用辣椒原料品质的各项指标数据进行主成分分析<sup>[21]</sup>。为消除量纲不同对主成分分析的影响,使用 SPSS 20.0 软件通过 KOM 检验法和 Bartlett 球体检验法得到原始数据的特征值、贡献率、累积贡献率以及特征向量值。对特征值大于 1 的因子提取主成分,对辣椒原料品质各指标的原始数据进行标准化(Z-score 法)处理<sup>[22]</sup>,辣椒原料品质的综合得分按式(1)进行计算<sup>[23-25]</sup>。

$$Y = F_1 y_1 + F_2 y_2 \quad (1)$$

式中:  $Y$  为综合得分;  $F_1$ 、 $F_2$  为主成分 1、2 的特征值;  $y_1$ 、 $y_2$  为主成分 1、2 的得分。

### 1.3 数据处理

所有数据均取平均值±标准偏差( $n \geq 3$ ), 采用 SPSS 20.0 软件进行显著性分析。使用 Design-Expert 10 软件进行响应面法试验设计与分析, 使用 SPSS 20.0 软件进行主成分分析与数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 脱硫剂的筛选

根据不同的脱硫原理, 本研究选用具有酸性、碱性和氧化性的 9 种不同的食品添加剂作为脱硫剂进行脱硫实验。如表 1 所示, 酸性脱硫剂的脱除率为 67.75%±11.19%~93.35%±3.63%, 原料中硫的残留量在 17.02~81.43 mg/kg 之间, 相较于清水处理(脱硫率 58.00%±7.21%), 具有更高的脱硫效率。其中, 柠檬酸脱硫效率最高为 93.35%±3.63%。经酸性脱硫剂处理, 原料硬度、咀嚼性和黏性略微降低, 颜色变深。碱性脱硫剂处理的脱除率如表 2 所示, 为 43.24%±1.83%~97.50%±0.16%, 原料中硫的残留量在 6.31~143.44 mg/kg 之间, 碳酸氢钠的脱硫效果最好, 能够将原料中的硫含量降低至 14.81 mg/kg 以下, 磷酸二氢钠次之, 氢氧化钙的使用量越高, 其脱硫效果越差。磷酸氢

二钠处理能略微降低原料硬度及咀嚼性。氢氧化钙由于钙离子的作用, 能够略微提高原料的表皮和内层硬度。钙处理通过维持细胞膜结构与功能完整性, 有效维持果蔬加工产品的品质, 而碱性钙处理可改善果肉硬度, 原因可能与钙处理可调控果肉生理代谢过程有关<sup>[26]</sup>。3 种碱性脱硫剂对于原料的亮度和红绿色整体上影响较小, 磷酸氢二钠和碳酸氢钠处理后颜色略微变深。经氧化性脱硫剂处理后脱除率如表 3 所示, 为 82.25%±1.13%~100.00%±0.00%, 原料中硫的残留量在 0.00~44.83 mg/kg 之间。其中以二氧化氯处理的脱硫效果最佳, 其次为过氧化氢处理, 脱氢乙酸钠处理的脱硫效果最差(表 3)。脱氢乙酸钠处理可提高原料的硬度, 二氧化氯对原料的咀嚼性略有影响, 氧化性脱硫剂都会造成原料的黏性降低, 但是这些变化人体难以察觉, 对原料品质基本无影响。3 种氧化性脱硫剂处理整体上会使原料颜色偏深, 其中二氧化氯处理对原料色泽影响最小。

综上, 根据对原料的脱硫率、硬度、黏性以及色差等方面的因素综合考虑, 挑选出氢氧化钙、二氧化氯和碳酸氢钠 3 种脱硫剂进行复配, 在保证最大脱硫效率的同时, 最大限度保持产品的品质。

### 2.2 响应面实验设计及主成分分析

对脱硫剂复配配方进行三因素三水平实验设计, 得到 17 组实验配比(表 4), 按照实验设计配方进行原料辣椒脱硫实验, 并分析不同脱硫剂配比对脱硫率及辣椒原料品质的影响。

表 1 酸性脱硫剂处理后原料主要指标

Table 1 Main indexes of materials treated with acid desulfurizers

处理	SO <sub>2</sub> 脱除率 /%	SO <sub>2</sub> 含量 / (mg/kg)	内层硬度/gf	表皮硬度/gf	咀嚼性/g	黏性 / (gf·mm)	ΔE	ΔL°	Δa°	Δb°
CK	-	252.73±8.50 <sup>a</sup>	834.80±12.85 <sup>ab</sup>	934.81±93.06 <sup>a</sup>	503.99±184.52 <sup>abc</sup>	0.39±0.23 <sup>a</sup>	-	-	-	-
CK0	58.00±7.21 <sup>c</sup>	106.23±18.72 <sup>b</sup>	786.12±19.08 <sup>bc</sup>	932.15±17.44 <sup>ab</sup>	551.44±26.51 <sup>a</sup>	0.22±0.07 <sup>ab</sup>	26.23±0.15 <sup>d</sup>	-2.70±1.16 <sup>f</sup>	1.27±0.05 <sup>f</sup>	-26.04±0.21 <sup>f</sup>
10 g/L 抗坏血酸	71.48±2.17 <sup>d</sup>	72.02±3.13 <sup>cd</sup>	770.14±12.13 <sup>c</sup>	898.12±13.11 <sup>abc</sup>	291.04±48.21 <sup>de</sup>	-0.06±0.09 <sup>bcd</sup>	7.21±0.55 <sup>b</sup>	-4.41±0.54 <sup>gh</sup>	1.38±0.15 <sup>ef</sup>	-5.53±0.32 <sup>b</sup>
20 g/L 抗坏血酸	80.48±1.10 <sup>b</sup>	49.41±3.73 <sup>c</sup>	793.12±15.73 <sup>bc</sup>	907.81±10.97 <sup>abc</sup>	312.53±138.76 <sup>de</sup>	-0.37±0.14 <sup>dc</sup>	11.49±0.81 <sup>e</sup>	-4.84±0.43 <sup>h</sup>	2.08±0.22 <sup>c</sup>	-10.22±0.67 <sup>c</sup>
30 g/L 抗坏血酸	75.28±4.02 <sup>bcd</sup>	62.31±8.18 <sup>de</sup>	822.46±10.79 <sup>b</sup>	904.13±8.89 <sup>abc</sup>	386.37±100.36 <sup>bcdde</sup>	-0.44±0.17 <sup>c</sup>	3.47±0.75 <sup>i</sup>	-0.27±0.74 <sup>e</sup>	0.38±0.13 <sup>e</sup>	-3.39±0.68 <sup>a</sup>
40 g/L 柠檬酸	77.35±2.89 <sup>bc</sup>	57.19±6.01 <sup>de</sup>	818.79±23.02 <sup>bc</sup>	821.79±21.55 <sup>de</sup>	392.37±66.62 <sup>bcdde</sup>	-0.27±0.12 <sup>cd</sup>	25.94±0.25 <sup>d</sup>	1.54±0.36 <sup>d</sup>	1.70±0.05 <sup>d</sup>	-25.84±0.27 <sup>f</sup>
50 g/L 柠檬酸	93.35±3.63 <sup>a</sup>	17.02±9.64 <sup>f</sup>	884.13±15.10 <sup>a</sup>	874.12±21.18 <sup>bcd</sup>	361.95±49.82 <sup>cdde</sup>	-0.36±0.04 <sup>dc</sup>	23.79±0.31 <sup>c</sup>	-2.89±0.20 <sup>f</sup>	2.27±0.14 <sup>bc</sup>	-23.51±0.32 <sup>c</sup>
60 g/L 柠檬酸	92.37±0.39 <sup>a</sup>	19.05±0.09 <sup>f</sup>	817.14±3.61 <sup>bc</sup>	829.49±17.97 <sup>de</sup>	263.29±25.12 <sup>c</sup>	-0.12±0.11 <sup>cd</sup>	21.21±0.46 <sup>f</sup>	-3.56±1.33 <sup>gh</sup>	1.53±0.13 <sup>de</sup>	-20.83±0.62 <sup>d</sup>
1.5 g/L 磷酸二氢钠	67.80±0.07 <sup>d</sup>	81.43±2.61 <sup>c</sup>	813.46±38.19 <sup>bc</sup>	856.80±39.72 <sup>cd</sup>	528.21±53.17 <sup>ab</sup>	0.05±0.23 <sup>bc</sup>	40.23±0.33 <sup>a</sup>	17.29±0.40 <sup>a</sup>	3.19±0.22 <sup>a</sup>	-36.18±0.20 <sup>i</sup>
2.5 g/L 磷酸二氢钠	67.75±11.19 <sup>d</sup>	81.10±26.71 <sup>c</sup>	805.46±7.57 <sup>bc</sup>	793.46±19.22 <sup>c</sup>	386.87±70.66 <sup>abcde</sup>	-0.05±0.25 <sup>bcd</sup>	33.51±1.04 <sup>e</sup>	14.21±1.07 <sup>b</sup>	2.28±0.20 <sup>bc</sup>	-30.25±0.67 <sup>e</sup>
3.5 g/L 磷酸二氢钠	72.01±3.54 <sup>cd</sup>	70.63±7.09 <sup>cd</sup>	770.79±72.35 <sup>c</sup>	836.80±18.04 <sup>de</sup>	447.39±69.04 <sup>abcd</sup>	-0.09±0.39 <sup>bcd</sup>	36.01±0.24 <sup>b</sup>	11.78±0.42 <sup>c</sup>	2.42±0.04 <sup>b</sup>	-33.94±0.14 <sup>b</sup>

注: 同列不同小写字母表示具有显著性差异( $P < 0.05$ ); -表示无此项, 表 2、3 同; CK 表示腌制辣椒原料直接测参数组, 表 2、3、9 同; CK0 表示用纯水对腌制辣椒原料进行浸泡脱硫组, 表 2、3 同。

表2 碱性脱硫剂处理后原料主要指标  
Table 2 Main indexes of materials treated with alkaline desulfurizers

处理	SO <sub>2</sub> 脱除率 /%	SO <sub>2</sub> 含量 /(mg/kg)	内层硬度/gf	表皮硬度 /gf	咀嚼性/g	黏性 /(gf·mm)	ΔE	ΔL*	Δa*	Δb*
CK	-	252.73± 8.50 <sup>a</sup>	834.80± 12.85 <sup>de</sup>	934.81± 93.06 <sup>de</sup>	503.99± 184.52 <sup>bcd</sup>	0.39± 0.23 <sup>abc</sup>	-	-	-	-
CK0	58.00± 7.21 <sup>c</sup>	106.23± 18.72 <sup>c</sup>	786.12± 19.09 <sup>ef</sup>	932.15± 17.44 <sup>de</sup>	551.44± 26.51 <sup>bc</sup>	0.22± 0.07 <sup>bcd</sup>	26.23± 0.15 <sup>b</sup>	-2.70± 1.16 <sup>bc</sup>	1.27± 0.05 <sup>bcd</sup>	-26.04± 0.21 <sup>c</sup>
1.5 g/L 磷 酸氢二钠	77.34± 0.61 <sup>c</sup>	57.27± 0.35 <sup>c</sup>	754.12± 13.86 <sup>f</sup>	879.47± 51.56 <sup>de</sup>	422.52± 70.33 <sup>cd</sup>	0.59± 0.06 <sup>s</sup>	22.42± 6.6 <sup>c</sup>	-2.27± 2.54 <sup>b</sup>	1.20± 1.07 <sup>cd</sup>	-22.16± 6.60 <sup>d</sup>
2.5 g/L 磷 酸氢二钠	81.84± 0.36 <sup>b</sup>	45.92± 0.68 <sup>f</sup>	758.12± 7.21 <sup>f</sup>	803.46± 36.36 <sup>e</sup>	383.23± 85.42 <sup>d</sup>	0.40± 0.16 <sup>abc</sup>	18.62± 1.15 <sup>d</sup>	-2.26± 1.17 <sup>b</sup>	0.86± 0.27 <sup>d</sup>	-18.44± 1.13 <sup>c</sup>
3.5 g/L 磷 酸氢二钠	84.75± 2.49 <sup>b</sup>	38.64± 7.01 <sup>f</sup>	828.80± 23.18 <sup>de</sup>	904.14± 9.17 <sup>de</sup>	463.54± 27.43 <sup>cd</sup>	0.39± 0.12 <sup>abc</sup>	20.64± 2.15 <sup>cd</sup>	-4.73± 1.47 <sup>cd</sup>	1.70± 0.13 <sup>bc</sup>	-20.00± 1.87 <sup>cd</sup>
1.0 g/L 氢 氧化钙	93.85± 1.06 <sup>a</sup>	15.62± 3.15 <sup>s</sup>	922.81± 24.85 <sup>c</sup>	1110.84± 178.76 <sup>bc</sup>	454.51± 48.82 <sup>cd</sup>	0.18± 0.16 <sup>cd</sup>	5.27± 0.51 <sup>f</sup>	-1.55± 1.73 <sup>b</sup>	2.96± 0.66 <sup>a</sup>	-3.65± 1.33 <sup>ab</sup>
1.2 g/L 氢 氧化钙	71.52± 2.95 <sup>d</sup>	71.96± 6.78 <sup>d</sup>	863.47± 16.78 <sup>cd</sup>	952.82± 23.18 <sup>d</sup>	522.97± 125.92 <sup>bcd</sup>	0.11± 0.02 <sup>d</sup>	9.03± 1.63 <sup>c</sup>	-6.53± 1.52 <sup>d</sup>	2.89± 0.26 <sup>a</sup>	-5.51± 0.77 <sup>b</sup>
1.4 g/L 氢 氧化钙	43.24± 1.83 <sup>f</sup>	143.44± 0.06 <sup>b</sup>	906.14± 56.72 <sup>c</sup>	978.15± 16.37 <sup>cd</sup>	630.81± 12.49 <sup>ab</sup>	0.40± 0.08 <sup>abc</sup>	5.70± 0.74 <sup>cf</sup>	-5.13± 0.66 <sup>d</sup>	1.67± 0.17 <sup>bc</sup>	-1.80± 0.64 <sup>a</sup>
0.2 g/L 碳 酸氢钠	94.16± 1.25 <sup>a</sup>	14.81± 3.57 <sup>s</sup>	873.47± 68.87 <sup>cd</sup>	1300.81± 161.99 <sup>a</sup>	444.62± 124.77 <sup>cd</sup>	0.41± 0.06 <sup>abc</sup>	29.52± 0.74 <sup>ab</sup>	1.27± 1.13 <sup>a</sup>	1.99± 0.16 <sup>b</sup>	-29.41± 0.77 <sup>ef</sup>
0.4 g/L 碳 酸氢钠	94.95± 0.14 <sup>a</sup>	12.78± 0.07 <sup>s</sup>	1063.50± 107.08 <sup>b</sup>	1166.14± 36.03 <sup>ab</sup>	738.27± 120.54 <sup>a</sup>	0.28± 0.06 <sup>bcd</sup>	29.56± 1.78 <sup>ab</sup>	-2.59± 0.34 <sup>bc</sup>	1.67± 0.24 <sup>bc</sup>	-29.40± 1.75 <sup>ef</sup>
0.6 g/L 碳 酸氢钠	97.50± 0.16 <sup>a</sup>	6.31± 0.24 <sup>s</sup>	1153.51± 16.17 <sup>a</sup>	938.15± 55.69 <sup>de</sup>	740.27± 6.26 <sup>a</sup>	0.43± 0.15 <sup>ab</sup>	30.25± 0.76 <sup>a</sup>	-0.71± 1.33 <sup>ab</sup>	2.00± 0.48 <sup>b</sup>	-30.15± 0.79 <sup>f</sup>

表3 氧化性脱硫剂处理后原料主要指标  
Table 3 Main indexes of materials treated with oxidizing desulfurizers

处理	SO <sub>2</sub> 脱除率 /%	SO <sub>2</sub> 含量 /(mg/kg)	内层硬度 /gf	表皮硬度 /gf	咀嚼性/g	黏性 /(gf·mm)	ΔE	ΔL*	Δa*	Δb*
CK	-	252.73± 8.50 <sup>a</sup>	834.80± 12.85 <sup>bcd</sup>	934.81± 93.06 <sup>de</sup>	503.99± 184.52 <sup>bcd</sup>	0.39± 0.23 <sup>a</sup>	-	-	-	-
CK0	58.00± 7.21 <sup>c</sup>	106.23± 18.72 <sup>b</sup>	786.12± 19.08 <sup>cde</sup>	932.15± 17.44 <sup>de</sup>	551.44± 26.51 <sup>abc</sup>	0.22± 0.07 <sup>ab</sup>	26.23± 0.15 <sup>b</sup>	-2.70± 1.16 <sup>c</sup>	1.27± 0.05 <sup>bc</sup>	-26.04± 0.21 <sup>ef</sup>
0.02%过氧 化氢	92.65± 0.21 <sup>c</sup>	18.57± 0.08 <sup>d</sup>	788.12± 50.32 <sup>cde</sup>	999.49± 52.56 <sup>cd</sup>	579.18± 114.83 <sup>ab</sup>	0.33± 0.19 <sup>ab</sup>	18.78± 1.13 <sup>d</sup>	0.90± 0.99 <sup>b</sup>	0.70± 0.33 <sup>d</sup>	-18.73± 1.08 <sup>c</sup>
0.04%过氧 化氢	97.33± 0.35 <sup>ab</sup>	6.75± 0.93 <sup>fg</sup>	754.12± 14.42 <sup>de</sup>	1094.15± 128.88 <sup>bc</sup>	412.84± 48.96 <sup>bcd</sup>	0.22± 0.10 <sup>ab</sup>	19.90± 3.12 <sup>d</sup>	1.70± 0.43 <sup>b</sup>	1.52± 0.48 <sup>b</sup>	-19.76± 3.09 <sup>c</sup>
0.06%过氧 化氢	97.66± 0.28 <sup>ab</sup>	5.91± 0.58 <sup>fg</sup>	712.11± 45.44 <sup>e</sup>	764.12± 17.09 <sup>f</sup>	346.57± 17.61 <sup>d</sup>	0.20± 0.05 <sup>ab</sup>	28.42± 2.37 <sup>b</sup>	-5.18± 1.39 <sup>c</sup>	2.34± 0.27 <sup>a</sup>	-27.83± 2.18 <sup>f</sup>
0.1 g/L 二 氧化氯	94.94± 0.14 <sup>bc</sup>	12.81± 0.06 <sup>def</sup>	884.14± 55.25 <sup>bc</sup>	945.48± 23.87 <sup>de</sup>	424.60± 115.76 <sup>bcd</sup>	0.13± 0.05 <sup>b</sup>	5.44± 0.85 <sup>c</sup>	-2.72± 0.76 <sup>c</sup>	-1.55± 0.13 <sup>f</sup>	-4.44± 0.56 <sup>a</sup>
0.2 g/L 二 氧化氯	93.70± 1.11 <sup>c</sup>	16.01± 3.29 <sup>de</sup>	917.48± 45.63 <sup>b</sup>	951.48± 9.02 <sup>cde</sup>	496.69± 65.97 <sup>abcd</sup>	0.13± 0.08 <sup>b</sup>	21.23± 1.91 <sup>cd</sup>	-10.37± 1.43 <sup>c</sup>	1.98± 0.27 <sup>a</sup>	-18.30± 2.82 <sup>c</sup>
0.3 g/L 二 氧化氯	100.00± 0.00 <sup>a</sup>	0.00± 0.00 <sup>s</sup>	874.81± 6.43 <sup>bc</sup>	813.46± 83.37 <sup>ef</sup>	363.80± 99.50 <sup>cd</sup>	-0.26± 0.25 <sup>c</sup>	8.06± 0.66 <sup>c</sup>	-1.92± 0.62 <sup>c</sup>	-1.27± 0.13 <sup>f</sup>	-7.71± 0.57 <sup>b</sup>
0.10 g/L 脱 氢乙酸钠	82.25± 1.13 <sup>d</sup>	44.83± 1.43 <sup>c</sup>	1223.53± 167.02 <sup>a</sup>	985.48± 111.06 <sup>cd</sup>	475.54± 111.76 <sup>abcd</sup>	0.16± 0.14 <sup>ab</sup>	20.80± 2.40 <sup>cd</sup>	-2.65± 1.52 <sup>c</sup>	0.09± 0.26 <sup>c</sup>	-20.58± 2.60 <sup>cd</sup>
0.15 g/L 脱 氢乙酸钠	85.45± 0.97 <sup>d</sup>	36.76± 1.28 <sup>c</sup>	1248.86± 90.18 <sup>a</sup>	1223.51± 167.04 <sup>ab</sup>	618.03± 36.09 <sup>a</sup>	0.27± 0.06 <sup>ab</sup>	23.49± 1.68 <sup>c</sup>	-1.64± 1.54 <sup>c</sup>	0.24± 0.26 <sup>c</sup>	-23.39± 1.75 <sup>de</sup>
0.20 g/L 脱 氢乙酸钠	84.55± 0.60 <sup>d</sup>	39.05± 0.41 <sup>c</sup>	864.14± 73.33 <sup>bc</sup>	1248.86± 90.18 <sup>a</sup>	624.42± 117.71 <sup>a</sup>	0.14± 0.07 <sup>b</sup>	28.69± 0.79 <sup>b</sup>	-2.90± 1.18 <sup>c</sup>	0.88± 0.09 <sup>cd</sup>	-28.51± 0.90 <sup>f</sup>

表 4 脱硫剂配方优化的响应面实验设计及结果  
Table 4 Response surface experiments design and results of desulfurizers formulation optimization

编号	A(氢氧化钙) /(g/L)	B(碳酸氢钠) /(g/L)	C(二氧化氯) /(g/L)	脱硫率/%	Δ内层硬度	Δ表皮硬度	Δ咀嚼性	Δ黏性	ΔE
1	1.5	0.6	0.5	86.69	-27.34	42.67	-55.83	-0.43	16.43
2	0.5	0.6	0.1	61.90	58.01	-0.67	29.99	-0.22	16.07
3	1.0	0.2	0.1	68.36	58.68	44.67	128.85	0.03	16.42
4	0.5	0.2	0.3	86.34	3.33	-22.01	-94.85	-0.51	17.37
5	1.0	0.2	0.5	67.24	15.33	-30.68	24.73	-0.15	8.59
6	1.5	0.6	0.1	66.83	32.00	-6.67	85.96	-0.39	4.61
7	0.5	1.0	0.3	63.58	22.00	6.66	-13.53	-0.04	1.91
8	1.0	0.6	0.3	75.79	29.33	18.00	71.49	-0.35	11.63
9	0.5	0.6	0.5	71.64	24.67	8.66	154.63	-0.05	3.63
10	1.5	1.0	0.3	72.79	101.35	85.34	183.78	-0.08	4.47
11	1.0	0.6	0.3	72.78	-10.00	-28.68	103.75	0.06	6.38
12	1.0	1.0	0.1	75.33	34.67	33.33	113.65	-0.26	5.12
13	1.0	1.0	0.5	70.00	83.34	54.67	125.09	-0.24	4.34
14	1.5	0.2	0.3	69.18	55.34	0.66	17.29	-0.05	5.20
15	1.0	0.6	0.3	71.08	9.34	-4.34	16.48	-0.13	10.80
16	1.0	0.6	0.3	70.20	12.01	30.66	29.64	-0.13	5.66
17	1.0	0.6	0.3	74.21	17.34	57.00	54.11	-0.23	7.85

如表 5 所示, 对特征值>1 的因子提取主成分, 累计贡献率达到 70.751%。对脱硫率、硬度、色差等主要指标的特征向量进行分析(表 6), 决定第 1 主成分的指标主要是Δ内层硬度、Δ表层硬度、Δ咀嚼性和Δ黏性; 决定第 2 主成分的指标是脱硫率和ΔE。表明提取得到的 2 个主成分

能够较为全面地反映脱硫剂处理后腌渍辣椒的品质信息。根据第 1 主成分、第 2 主成分得分, 按照式(1)计算辣椒原料实验组的综合得分 Y(表 7), 将综合得分作为响应值进行响应面分析。

表 5 原料品质中主成分分析的特征值及贡献率  
Table 5 Eigenvalues and contribution rates of principal component analysis in raw material quality

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.844	47.406	47.406
2	1.401	23.345	70.751
3	0.703	11.709	82.460
4	0.539	8.980	91.439
5	0.339	5.649	97.088
6	0.175	2.912	100.000

表 6 主要指标的特征向量  
Table 6 Eigenvectors of the main index

指标	第 1 主成分	第 2 主成分
Δ脱硫率	-0.694	0.516
Δ内层硬度	0.753	0.384
Δ表皮硬度	0.407	0.828
Δ咀嚼性	0.839	0.232
Δ黏性	0.698	-0.438
ΔE	-0.662	0.237

表 7 主成分得分值及综合得分  
Table 7 Principal component scores and composite scores

实验组	第 1 主成分	第 2 主成分	综合得分
1	-3.48	-0.34	-1.73
2	0.04	0.98	0.25
3	1.25	1.60	0.96
4	-4.05	0.49	-1.81
5	-0.39	0.10	-0.16
6	0.15	-0.49	-0.05
7	0.73	-1.36	0.03
8	-0.79	0.38	-0.29
9	1.25	0.09	0.62
10	2.85	0.27	1.41
11	0.16	0.41	0.17
12	0.43	-0.28	0.14
13	1.77	-0.21	0.79
14	0.73	-0.18	0.30
15	-0.69	0.13	-0.30
16	0.14	-0.89	-0.14
17	-0.10	-0.69	-0.21

### 2.3 回归方程方差分析

对 3 个因素及其对应的综合得分进行响应面模拟, 多元回归拟合模型方程为:  $Y=0.284+0.538A+0.255B+0.443C-0.695AB-0.630AC+0.325BC-0.557A^2+0.033B^2-0.082C^2$ 。

回归模型方差分析(表 8)显示, 失拟项( $P>0.05$ )不显著, 修正相关系数  $R^2_{Adj}=0.7949$ , 模型项( $P<0.01$ ), 显著性极高, 信噪较大(Adeq Precision=11.3681), 决定系数  $R^2=0.9103$ , 即建模成功且理论值和实验值相关性较好, 可用该模型来分析实验。各因素中, 一次项 A、C 的  $P<0.05$ , 即氢氧化钙和二氧化氯的使用量对所选指标的影响较大, 同理 B 不显著( $P>0.05$ ); 交互项 AB、AC 的  $P<0.05$ , 说明 A 与 B 混合使用和 A 与 C 混合使用的作用对原料品质的影响较大; 二次项  $A^2$  的  $P<0.05$ , 说明其对于原料品质影响显著。比较因素的  $F$  值可知, 影响原料品质的因素关系为: A(氢氧化钙) $>$ C(二氧化氯) $>$ B(碳酸氢钠)。

### 2.4 验证实验

根据响应面分析软件得出的理论最佳脱硫剂配方及推荐使用条件为: 氢氧化钙质量分数 44.05%, 碳酸氢钠质量分数 35.57%, 二氧化氯质量分数 20.38%。复配脱硫剂推荐使用浓度为 0.10%, 脱硫条件为料液比 1:6, 在温度 25 °C 的条件下浸泡原料 1.5 h。脱硫处理脱硫率达到 94.55%, 处理后原料含硫量为(14.66±3.14) mg/kg, 低于国标限量(100 mg/kg)。处理后辣椒原料硬度增加, 可能是由于脱硫剂中游离的  $Ca^{2+}$  抵消了部分腌制过程中  $Na^+$  的取代作用, 延缓了原果胶的

降解<sup>[27]</sup>。处理后辣椒原料的[表皮硬度(929.48±13.32) gf、内层硬度为(980.15±42.34) gf], 色泽呈黄绿色, 基本与处理前保持一致。详见表 9。

表 8 回归模型方差分析  
Table 8 Regression model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	9.70	9	1.08	7.89	0.0063	**
A	2.31	1	2.31	16.92	0.0045	**
B	0.52	1	0.52	3.81	0.0920	
C	1.57	1	1.57	11.47	0.0117	*
AB	1.93	1	1.93	14.14	0.0071	**
AC	1.59	1	1.59	11.62	0.0113	*
BC	0.42	1	0.42	3.09	0.1220	
$A^2$	1.31	1	1.31	9.56	0.0175	*
$B^2$	4.59E-03	1	4.59E-03	0.03	0.8598	
$C^2$	0.03	1	0.03	0.21	0.6627	
残差	0.96	7	0.14			
失拟项	0.21	3	0.07	0.38	0.7730	
纯误差	0.74	4	0.19			
总和	10.65	16		$R^2=0.9103$	$R^2_{Adj}=0.7949$	

注: \*代表差异显著( $P<0.05$ ); \*\*代表差异极显著( $P<0.01$ )。

表 9 不同浓度复配脱硫剂处理下辣椒品质参数  
Table 9 Quality parameters of peppers treated with desulfurizers of different concentrations

指标	CK	0.06%	0.08%	0.10%
SO <sub>2</sub> 含量/(mg/kg)	268.79±14.55 <sup>a</sup>	65.46±3.43 <sup>c</sup>	51.25±0.51 <sup>b</sup>	14.66±3.14 <sup>b</sup>
表皮硬度/gf	828.80±34.20 <sup>b</sup>	949.49±22.48 <sup>a</sup>	931.48±45.45 <sup>a</sup>	929.48±13.32 <sup>a</sup>
内层硬度/gf	946.82±28.59 <sup>a</sup>	970.82±19.63 <sup>a</sup>	980.15±26.00	980.15±42.34 <sup>a</sup>
咀嚼性/g	426.25±46.28 <sup>a</sup>	512.09±116.89 <sup>a</sup>	506.58±164.97 <sup>a</sup>	436.52±87.13 <sup>a</sup>
黏性/(gf-mm)	0.49±0.16 <sup>a</sup>	0.02±0.04 <sup>b</sup>	0.18±0.01 <sup>b</sup>	0.06±0.10 <sup>b</sup>
$L^*$	37.43±0.97 <sup>c</sup>	44.52±0.85 <sup>a</sup>	45.63±0.70 <sup>b</sup>	51.50±1.45 <sup>b</sup>
$a^*$	-1.85±0.06 <sup>a</sup>	-3.28±0.39 <sup>c</sup>	-3.64±0.16 <sup>b</sup>	-8.11±0.04 <sup>b</sup>
$b^*$	29.44±0.13 <sup>c</sup>	42.28±3.44 <sup>a</sup>	41.05±0.40 <sup>b</sup>	44.89±1.58 <sup>ab</sup>

注: 同行不同小写字母表示具有显著性差异( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

在酱腌菜、果脯蜜饯、精粉等食品中通常会添加焦亚硫酸钠、亚硫酸钠等, 以保持食品良好色泽, 并起到杀菌

防腐防虫的功效<sup>[28]</sup>。但是亚硫酸盐具有毒性, 能够与蛋白质的巯基发生可逆反应, 刺激消化道黏膜, 引起恶心、呕吐及腹泻等症状, 危害身体健康<sup>[29]</sup>。以脱硫剂浸泡腌制食品脱硫是目前较为普遍的脱硫方法。目前食品脱硫剂主要

剂型包括酸性、碱性以及氧化性3种。其中氧化性脱硫剂的效果最好<sup>[30-32]</sup>,但高浓度氧化性脱硫剂不仅会对产品表观黏度存在不同程度的影响,还会导致原料的硬度和咀嚼性降低,且残留的氧化性物质会对人体的皮肤、呼吸道等产生腐蚀,危害健康。碱性脱硫剂脱硫效率一般,同时会影响食品的酸度,人体摄入过量会引起肠胃不适等症状<sup>[33-34]</sup>。研究人员用亚硫酸盐还原酶实现亚硫酸盐的氧化,但该项研究在食品中应用的安全性、成熟性和氧化效率都还有待进一步深入研究<sup>[35]</sup>。为提升脱硫效果,通常采用增加脱硫剂浓度<sup>[36]</sup>、提高浸泡温度<sup>[37]</sup>或增加浸泡时间<sup>[38]</sup>等,因此对食品原料的硬度、颜色及营养成分造成极大的影响。本研究选取氢氧化钙、碳酸氢钠以及二氧化氯3种脱硫剂进行复配,通过综合不同的脱硫机制,达到协同增效的作用。最终得到的复配脱硫剂在室温条件下,0.10%使用浓度,浸泡1.5 h的脱硫率可达到94.55%,腌制辣椒中的硫含量降低至约15 mg/kg,显著低于国家标准规定的100 mg/kg。对辣椒品质的检测结果表明,复配脱硫剂的使用不仅提升了脱硫效率,还可以在保证原料色泽的情况下,增加腌辣椒的硬度,提升其口感,降低使用单一脱硫剂带来的危害。

## 4 结 论

通过单因素实验对9种不同性质的常见脱硫剂进行脱硫实验,并综合各种脱硫剂间相互作用以及对原料的硬度、色差等因素的影响,选用氢氧化钙、碳酸氢钠和二氧化氯进行复配,通过响应面结合主成分分析法优化3种物质配比,得到的复配脱硫剂成分比例为:氢氧化钙质量分数为44.05%,碳酸氢钠质量分数为35.57%,二氧化氯质量分数为20.38%。推荐使用方法为:复配脱硫剂使用浓度0.10%,料液比1:6,在温度25℃的条件下浸泡原料1.5 h。此法有效降低辣椒原料硫含量使其远低于国家标准限量,又有效保证辣椒原料的品质。复合脱硫剂的研究不仅为辣椒腌制产品品质的提高提供保障,并且为解决其他类似含硫半成品的脱硫问题提供了有效途径。

## 参 考 文 献

- [1] 王利群,张西露,戴雄泽.我国辣椒资源分类研究现状及探讨[J].辣椒杂志,2015,13(2):1-5,8.  
WANG LQ, ZHANG XL, DAI XZ. Status quo and discussion of hot pepper germplasm resources classification research in China [J]. Journal of China Capsicum, 2015, 13(2): 1-5, 8.
- [2] 杨创创,何娜,何建文,等.甘谷干辣椒风味品质评价[J].辣椒杂志,2024,22(1):16-21.  
YANG CC, HE N, HE JW, et al. Evaluation on the flavor quality of Gangu dried pepper [J]. Journal of China Capsicum, 2024, 22(1): 16-21.
- [3] 王立浩,刘伟,张宝玺.我国辣椒种业科技发展现状、挑战及其思考[J].辣椒杂志,2016,14(3):1-6.  
WANG LH, LIU W, ZHANG BX, et al. Opportunities and challenges of science and technology development of capsicum seed industry in china [J]. Journal of China Capsicum, 2016, 14(3): 1-6.
- [4] 吴璐瑶,乔立娟.我国城乡居民辣椒消费现状及趋势分析[J].中国瓜菜,2022,35(8):109-113.  
WU LY, QIAO LJ. Analysis on the current situation and trend of pepper consumption of urban and rural residents in China [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(8): 109-113.
- [5] 刘珣,童军茂.辣椒采后生理与贮藏保鲜研究进展[J].北方园艺,2007(11):88-90.  
LIU X, TONG JM. Physiology change of postharvest and technology of preservation of pepper fruit [J]. Northern Horticulture, 2007(11): 88-90.
- [6] 袁桂兴,吴伟,苏珊,等.干辣椒中二氧化硫残留现状及建议[J].现代食品,2020(80):180-184.  
YUAN GX, WU W, SU S, et al. Present situation and suggestions of sulfur dioxide residues in dried peppers [J]. Modern Food, 2020(80): 180-184.
- [7] 杜卫华,陈移平,鲍华军,等.陈泡辣椒汁接种腌渍辣椒的发酵工艺[J].浙江农业科学,2018,59(2):318-321.  
DU WH, CHEN YP, BAO HJ, et al. Fermentation technology of pickled pepper inoculated with old pickled pepper juice [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(2): 318-321.
- [8] 贾朝英.辣椒加工保藏原理与加工方法[J].现代农业科技,2009(13):352-356.  
JIA CY. Processing and preservation principle and processing method of pepper [J]. Modern Agricultural Sciences, 2009(13): 352-356.
- [9] 吴凯,覃业优,蒋立文,等.不同质量分数食盐腌渍艳红辣椒的风味物质分析[J].食品科学,2021,42(24):175-182.  
WU K, QIN YY, JIANG LW, et al. Analysis of flavor substances in pickled peppers with different salt content [J]. Food Science, 2021, 42(24): 175-182.
- [10] 赵甲慧,谭亚军.食品添加剂明胶中二氧化硫含量测定的不确定度评定[J].食品研究与开发,2020,41(19):177-181.  
ZHAO JH, TAN YJ. Uncertainty evaluation of determination of sulfur dioxide content in food additive gelatin [J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 177-181.
- [11] 曹扬,赵琨,孙颖宜,等.辣椒及其干制品中二氧化硫残留量的调查分析和快速准确检测方法的探究[J].包装与食品机械,2021,39(1):38-43.  
CAO Y, ZHAO K, SUN YY, et al. Investigation and analysis of sulfur dioxide residue in hot pepper and its dried products and exploration of

- rapid and accurate detection method [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2021, 39(1): 38–43.
- [12] 曾莉雅, 招原春, 钟舒洁. 食品中天然二氧化硫残留的溯源及本底值调查综述[J]. *现代食品*, 2021, 27(9): 130–133.  
ZENG LY, ZHAO YC, ZHONG SY. Review on the investigation of trace and background value of natural sulfur dioxide residue in food [J]. *Modern Food*, 2021, 27(9): 130–133.
- [13] 游金坤, 邓雅元, 杨璐敏, 等. 食用菌中二氧化硫残留问题的现状与探讨[J]. *中国食用菌*, 2021, 40(11): 92–95.  
YOU JK, DENG YY, YANG LM, *et al.* Present situation and discussion of sulfur dioxide residues in edible fungi [J]. *Edible Fungi of China*, 2021, 40(11): 92–95.
- [14] 白剑英. 食品添加剂亚硫酸盐的研究进展[J]. *环境与职业医学*, 2007, 24(4): 431–434.  
BAI JY. Progress in the research of sulfites as a food additive [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2007, 24(4): 431–434.
- [15] 刘树兴, 王乐. 正交试验法优化苹果片清水脱硫工艺[J]. *食品科技*, 2010, 35(12): 104–107  
LIU SX, WANG L. Optimize the desulfurization technology of apple slice by water and orthogonal design [J]. *Food Science and Technology*, 2010, 35(12): 104–107.
- [16] 黄苇, 付光亮, 宋贤良, 等. 硫藏橄榄清水浸泡脱硫工艺参数研究[J]. *食品科技*, 2009, 34(6): 62–66.  
HUANG W, FU GL, SONG XL, *et al.* Study on the technical parameters of desulfurization in sulfited Chinese olive by water [J]. *Food Science and Technology*, 2009, 34(6): 62–66
- [17] 俞根荣. 即食橘子片护色与脱硫技术的研究[J]. *发酵科技通讯*, 2018, 47(4): 221–225.  
YU GR. Effect of color retention agent on production quality of instant orange slices [J]. *Bulletin of Fermentation Science and Technology*, 2018, 47(4): 221–225.
- [18] 何攀, 邓洁红, 吴海智, 等. 辣椒制品质量风险分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, (11): 4591–4597.  
HE P, DENG JH, WU HZ, *et al.* Risk analysis on potential quality problems of pepper products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, (11): 4591–4597.
- [19] LI HJ, HONGMEI YANG HM, LI Y, *et al.* The use of inulin, maltitol and lecithin as fat replacers and plasticizers in a model reduced-fat mozzarella cheese-like product [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(12): 5586–5593.
- [20] 张秀玲, 杨宇. 蓝莓含量对涂抹型再制干酪的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(1): 112–117.  
ZHANG XL, YANG Y. Effect of blueberry contents on processed cheese spreads [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(1): 112–117.
- [21] 王乐. 低硫苹果片的护色及脱硫技术研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2011.  
WANG L. Study on color protection and desulfurization technologies of low sulfur apple slice [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2011.
- [22] CHUN MH, KIM EK, LEE KR, *et al.* Quality control of (*Schizonepeta tenuifolia*) Briq by solid-phase microextraction gas chromatography mass spectrometry and principal component analysis [J]. *Microchemical Journal*, 2010, 95(1): 25–31.
- [23] GHOSH D, CHATTOPADHYAY P. Application of principal component analysis (PCA) as a sensory assessment tool for fermented food products [J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2012, 49(3): 328–334.
- [24] GUILLEN-CASLA V, ROSALES-CONRADO N, EUGENIA LM, *et al.* Principal component analysis (PCA) and multiple linear regression (MLR) statistical tools to evaluate the effect of E-beam irradiation on ready-to-eat food [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(3): 456–464.
- [25] SIQUEIRA BS, BASSINELLO PZ, MALGARESI G, *et al.* Analyses of technological and biochemical parameters related to the HTC phenomenon in carioca bean genotypes by the use of PCA [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 939–945.
- [26] 龚恕, 阙斐. 乳酸钙的纯化工艺及对腌菜品质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(11): 2702–2706.  
GONG S, QUE F. The purification process of calcium lactate and application on the pickles [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(11): 2702–2706.
- [27] 张海燕, 康三江, 曾朝珍, 等. 碱性钙对‘秦冠’苹果块贮藏品质及生理特性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(4): 41–49.  
ZHANG H Y, KANG S J, ZENG C Z, *et al.* Effects of alkaline calcium on storage quality and physiological characteristics of ‘Qinguan’ apple lump [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(4): 41–49.
- [28] 宋金丽, 高全利, 冯亮, 等. 酱腌菜中二氧化硫残留量的检测方法探讨[J]. *现代食品*, 2023, 29(6): 189–192.  
SONG JL, GAO QL, FENG L, *et al.* Discussion on the detection method of sulfur dioxide residue in pickled vegetables [J]. *Modern Food*, 2023, 29(6): 189–192.
- [29] 张静. 食品中亚硫酸盐的检测与去除方法研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.  
ZHANG J. Study on detection and removal of sulfites in food [D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [30] 李金红. 辣椒腌制护色保脆和软包装工艺[J]. *江苏调味副食品*, 2009, 26(6): 38–40.  
LI JH. The color-and-crispy-keeping of pickled peppers and soft package

- technique [J]. *Jiangsu Condiment and Subsidiary Food*, 2009, 26(6): 38–40.
- [31] 付光亮, 黄苇, 陈清香, 等. 山楂片中二氧化硫脱除方法的研究[C]. 2007年中国农业工程学会农产品加工及贮藏工程分会学术年会暨中国中部地区农产品加工产学研研讨会论文集, 2007.
- FU GL, HUANG W, CHEN QX, *et al.* Study on reducing the sulfur dioxide content in hawthorn [C]. *Proceedings of the 2007 annual conference of the agricultural products processing and storage engineering branch of the Chinese society of agricultural engineering and the symposium on agricultural products processing in central China*, 2007.
- [32] 李斌. 魔芋精粉去除二氧化硫的研究[C]. 中国园艺学会魔芋协会第四届会员大会暨科技交流会论文集, 2008.
- LI B. Study on removing sulfur dioxide from Konjac powder [C]. *Proceedings of the 4th general meeting and science and technology exchange meeting of konjac association of Chinese horticultural Society*, 2008.
- [33] 徐宝民, 郑淑珍, 周君华, 等. 氢氧化钙在食品工业中的应用[J]. *中国食品添加剂*, 2013(1): 186–188.
- XU BM, ZHENG SZ, ZHOU JH, *et al.* The application of calcium hydroxide in food industry [J]. *China Food Additives*, 2013(1): 186–188.
- [34] 庞君保, 周朝辉, 许伟, 等. 降低脱硫废水中氯离子、氨氮及 COD 的研究[J]. *石化技术*, 2023, 30(1): 13–15.
- PANG JB, ZHOU CH, XU W, *et al.* Research on reducing chloride ion, ammonia nitrogen and COD in desulfurization wastewater [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(1): 13–15.
- [35] 黄国平. 食品中二氧化流脱除方法研究进展[J]. *食品科技*, 2007(12): 19–22.
- HUANG GP. Advances in the study of removing sulfur dioxide from food [J]. *Food Science & Technology*, 2007(12): 19–22.
- [36] 梅明鑫, 吴芳梅. 果蔬制品脱硫技术的研究进展[J]. *热带农业科学*, 2020, 40(5): 88–93.
- MEI MX, WU FM. Research progress in desulfurization of fruit and vegetable products [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2020, 40(5): 88–93.
- [37] 汪艳群, 廖小军, 胡小松. 低糖脆梅加工中脱硫与渗糖工艺的研究[J]. *食品工业科技*, 2004(10): 99–101.
- WANG YQ, LIAO XJ, HU XS. Research on sweetening and saccharifying technology in processing low sugar crisp plum [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2004(10): 99–101.
- [38] 宋倩, 刘春花, 王爽, 等. 硫藏双华李柠檬酸烫漂脱硫工艺参数及其对品质的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(19): 107–110.
- SONG Q, LIU CH, WANG S, *et al.* Study on the technical parameters and quality of desulfurization in sulfited Shuanghua Plum by citric acid solution [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(19): 107–110.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)