

## 基于 OPLS-DA 和聚类分析评价西瓜皮的品质与利用潜力

刘养冉<sup>1</sup>, 由守昌<sup>2</sup>, 辛国凤<sup>2</sup>, 徐康<sup>1</sup>, 吕尧<sup>3</sup>, 郭萌萌<sup>1\*</sup>

1. 山东省高等学校食品营养与健康重点实验室, 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018
2. 潍坊郭牌农业科技有限公司, 山东 潍坊 261100
3. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018

**摘要:** 为探究不同品种西瓜皮的潜在利用价值, 通过测定 21 种西瓜皮的外观、营养和活性物质含量等 26 个指标, 采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)筛选出决定西瓜皮品质差异的关键物质, 并通过聚类分析对西瓜皮的利用方式进行分类。结果表明, 西瓜皮的品种间品质差异显著( $P < 0.05$ ), 槲皮素含量的种间变异系数最大(78.49%), pH 值的最小(2.18%)。以总酸、总糖、还原糖、膳食纤维、总酚和单体酚含量为原始变量进行 OPLS-DA 分析, 筛选出对香豆酸、阿魏酸、杨梅素、总酚、总酸、总糖、还原糖和可溶性固形物等 8 个关键指标, 并以此作为依据进行聚类, 将 21 个品种的西瓜皮分为 4 类, A12G34、A21、B13W40、B23W82 为第 I 类, 瓜皮中酚类物质含量较高; A40G65、B21W79、B3、B5G19、B8W27 为第 II 类, 瓜皮中的糖含量较高; A10、A27、A48G96 等 9 个品种为第 III 类, 瓜皮中有机酸的含量较高; D14H26、D4H7、GP 为第 IV 类, 代表性关键差异物含量较少, 但膳食纤维含量占比 50% 以上, 是制备膳食纤维的理想原料。该研究结果为西瓜皮高值高效利用提供了参考依据。

**关键词:** 西瓜皮; 品种; 正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA); 聚类分析; 利用潜力

中图分类号: S651

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)05-0831-10

## Quality and Utilization Potential of Watermelon Peel Based on OPLS-DA and Cluster Analysis

LIU Yang-ran<sup>1</sup>, YOU Shou-chang<sup>2</sup>, XIN Guo-feng<sup>2</sup>, XU Kang<sup>1</sup>, LV Yao<sup>3</sup>, GUO Meng-meng<sup>1\*</sup>

1. Key Laboratory of Food Nutrition and Healthy in Universities of Shandong, College of Food Science and Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Weifang Guopai Agricultural Technology Co., Ltd, Weifang 261100, China
3. College of Horticulture Science and Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

**Abstract:** To explore the potential utilization value of watermelon peels from different varieties, this study determines 26 indexes including appearance, nutrient and active substances contents derived from 21 types of watermelon peels. It uses Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis (OPLS-DA) to screen out the key substances that determine the quality differences of watermelon peels, and employs cluster analysis to classify the utilization modes of watermelon peels. The results show that there are significant differences in the quality of watermelon peels among varieties ( $p < 0.05$ ). The interspecific coefficient of variation is the highest for quercetin content (78.49%) and the lowest for pH value (2.18%). With total acid, total sugar, reducing sugar, dietary fiber, total phenol and monomeric phenolic contents as original variables, this study performs OPLS-DA analysis to screen out 8 key indicators (i.e. p-coumaric acid, ferulic acid, myricetin, total phenol, total acid, total sugar, reducing sugar and soluble solid). Based on these indicators, it conducts cluster analysis, dividing the 21 varieties of watermelon peels into 4 categories: Class I - A12G34, A21, B13W40, B23W82, with high phenol content in their peels; Class II - A40G65, B21W79, B3, B5G19, B8W27, with high sugar content in their peels; Class III - A10, A27, A48G96 and six others (a total of 9 varieties), with high organic acid content in their peels; Class IV - D14H26, D4H7 and GP, which are low in representative key substances but contain more than 50% dietary fiber, making them ideal raw materials for dietary fiber preparation. The results of this study provide a reference for the high value and efficient utilization of watermelon peels.

**Keywords:** Watermelon peel; cultivars; Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis; cluster analysis; utilization potential

收稿日期: 2024-12-25

修回日期: 2025-08-24

基金项目: 山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)(2022TZXD0027)

第 1 作者简介: 刘养冉(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬精深加工。E-mail: 2723230800@qq.com

\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: guomm@sdau.edu.cn

西瓜皮占果实鲜重的30%左右,富含矿物质、维生素、氨基酸、膳食纤维等营养成分,既能用做食品原料,也可作为化妆品原料,具有清热、解暑、止渴、美白等多重生理功效。生活中西瓜皮通常被消费者当作生活垃圾丢弃,造成环境污染的同时导致食品原料中营养物质大量流失<sup>[1]</sup>。目前,已有众多研究者致力于西瓜皮的高值化利用技术研究。GUO等<sup>[2]</sup>利用西瓜皮中的多酚和果胶制备生物活性膜用于羊肉的超低温储藏。Al-sayed等<sup>[3]</sup>将西瓜皮加入到蛋糕配料中有效抑制游离酸和过氧化物的形成,延长其货架期。Letchipia等<sup>[4]</sup>利用西瓜皮制成的生物吸附剂对地下水中砷的去除率高达99.99%。因此明确种质差异下西瓜皮的营养特征是实现西瓜皮定向利用的必要条件,避免西瓜皮的盲目加工,造成资源浪费。

正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)作为一种多变量分析手段已广泛用于食品的可追溯性或代谢组学差异物的筛选和鉴定。Kang等<sup>[5]</sup>采用OPLS-DA法筛选牛肉的特异性定量肽;马

雪莲等<sup>[6]</sup>通过OPLS-DA法筛选出椒麻鸡汤料中受加热温度影响显著的16种关键呈香差异物。本试验通过比较西瓜皮的外观、质地、营养和功能性组分等,借助OPLS-DA和聚类分析针对性识别西瓜皮品种间的差异性物质,区分西瓜提质增效加工利用方向,最大程度的减少西瓜营养资源的浪费,变废为宝。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

不同品种西瓜由潍坊郭牌农业科技有限公司提供(见表1)。西瓜于26±2 °C恒温大棚生长,低喷浇灌,授粉后45 d采摘,取瓢后留瓜皮备用。

原儿茶素、新绿原酸、绿原酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、对香豆酸、阿魏酸、芥子酸、金丝桃苷、杨梅素、槲皮素、没食子酸(均为色谱纯),上海源叶生物科技有限公司;Folin-酚试剂,北京博奥拓达科技有限公司;其他化学试剂均为国产分析纯。

表1 不同品种西瓜皮的外观和营养品质

Table 1 Appearance and nutritional quality of watermelon peel from different cultivar

品种 Varieties	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	硬度/g Hardness	脆度/(g· sec <sup>-1</sup> ) Brittleness	pH值 pH value	总酸/(g· L <sup>-1</sup> ) Total acid	还原糖/ (g·L <sup>-1</sup> ) Reducing sugar	总糖/ (g·L <sup>-1</sup> ) Total sugar	膳食 纤维/% Dietary fiber	可溶性 固形物/% Soluble solid
A10	27.86± 0.78	-2.03± 0.68	3.11± 0.65	2 533.35± 19.56	7 851.32± 581.22	5.65± 0.00	1.04± 0.01	43.2± 0.57	53.2± 0.57	58.76± 0.11	7.17± 0.06
	46.52± 1.45	-12.96± 0.88	21.49± 2.43	1 075.49± 35.76	2 243.12± 148.46	5.56± 0.01	1.31± 0.02	29.1± 0.57	30.0± 0.85	55.11± 1.52	5.63± 0.06
A12G34	43.15± 0.14	-12.45± 1.65	20.34± 2.54	1 616.08± 54.33	4 820.86± 297.41	5.83± 0.04	1.50± 0.04	35.1± 0.71	39.0± 0.57	49.97± 0.55	6.30± 0.00
	32.55± 3.13	-8.73± 1.15	13.86± 2.14	1 644.38± 38.68	5 636.20± 296.25	5.63± 0.01	1.58± 0.04	40.5± 0.28	43.8± 0.28	62.47± 0.21	7.30± 0.00
A21	45.74± 2.60	-2.35± 0.59	19.89± 1.55	1 163.82± 79.69	4 097.93± 575.84	5.45± 0.01	1.77± 0.01	45.0± 0.35	51.4± 0.85	60.36± 0.27	8.17± 0.06
	45.59± 2.81	-11.51± 0.82	18.49± 1.95	1 261.98± 16.20	4 482.61± 96.05	5.73± 0.03	1.08± 0.03	48.7± 0.57	64.2± 0.28	74.12± 0.40	8.83± 0.06
A27	47.56± 1.74	-15.74± 0.47	27.73± 0.82	1 120.30± 127.56	3 107.52± 230.39	5.46± 0.01	1.28± 0.01	47.6± 0.28	49.3± 1.27	71.84± 0.21	7.20± 0.00
	45.78± 2.77	-13.44± 2.83	21.22± 4.59	1 346.66± 22.89	3 788.14± 135.43	5.69± 0.02	1.69± 0.01	29.2± 0.57	30.2± 0.57	69.89± 0.05	5.70± 0.00
A40G65	46.59± 1.31	-11.79± 0.52	19.73± 1.30	1 508.61± 139.27	5 431.89± 216.43	5.55± 0.01	1.74± 0.05	39.9± 0.28	52.2± 0.85	73.65± 0.40	8.13± 0.05
	43.66± 2.74	-11.67± 1.15	18.78± 2.46	777.88± 36.60	4 299.43± 303.32	5.45± 0.01	1.51± 0.03	44.5± 0.54	50.2± 0.78	49.01± 0.01	4.87± 0.05

续表

品种 Varieties	$L^*$	$a^*$	$b^*$	硬度/g Hardness	脆度/(g· sec <sup>-1</sup> ) Brittleness	pH值 pH value	总酸/(g· L <sup>-1</sup> ) Total acid	还原糖/ (g·L <sup>-1</sup> ) Reducing sugar	总糖/ (g·L <sup>-1</sup> ) Total sugar	膳食 纤维/% Dietary fiber	可溶性 固形物/% Soluble solid
B23W82	44.95±	-11.68±	20.23±	1 393.34±	3 270.20±	5.50±	1.48±	47.9±	50.0±	54.68±	7.43±
	2.67	0.80	1.16	45.57	22.44	0.00	0.01	0.14	0.00	0.00	0.06
B3	45.57±	-12.91±	20.57±	869.34±	3 503.46±	5.83±	1.46±	41.5±	43.2±	83.07±	5.70±
	1.38	0.91	1.17	22.31	81.91	0.01	0.05	0.71	1.70	0.99	0.00
B5G19	37.65±	-11.23±	18.21±	997.63±	2 451.27±	5.71±	1.56±	52.2±	60.0±	78.06±	8.23±
	5.07	2.80	5.01	76.65	123.56	0.01	0.01	0.14	0.00	0.21	0.06
B8	43.16±	-11.66±	19.15±	1 358.01±	4 623.24±	5.54±	1.61±	40.5±	47.0±	62.20±	7.40±
	3.89	1.93	4.16	118.52	131.50	0.02	0.02	0.28	0.85	0.00	0.00
B8W27	43.12±	-10.33±	16.01±	1 133.11±	2 117.18±	5.67±	1.41±	44.5±	59.4±	49.02±	8.37±
	3.49	1.19	2.40	97.30	330.48	0.01	0.02	0.28	0.57	1.47	0.06
CK	40.68±	-10.84±	17.25±	1 456.77±	4 468.79±	5.72±	0.99±	39.5±	46.6±	58.84±	7.27±
	7.73	2.86	5.26	40.59	217.92	0.01	0.02	0.28	0.00	4.31	0.06
D14H26	28.14±	-3.21±	4.35±	2 342.42±	5 994.41±	5.66±	0.77±	26.5±	28.6±	57.89±	3.83±
	0.49	0.96	0.79	257.13	168.29	0.01	0.00	0.64	0.28	0.04	0.06
D4H7	28.29±	-4.06±	5.20±	1 598.45±	3 228.85±	5.57±	0.77±	26.5±	27.4±	72.15±	4.50±
	1.73	1.27	1.84	32.10	200.50	0.03	0.01	0.42	0.00	1.54	0.00
D6H17	24.95±	-2.29±	3.73±	3 052.46±	4 563.48±	5.71±	0.98±	38.0±	40.8±	65.63±	6.17±
	0.63	1.30	1.63	301.80	150.27	0.02	0.00	0.14	0.85	2.68	0.06
GP	39.17±	-12.36±	19.32±	1 488.76±	4 466.51±	5.86±	0.58±	22.2±	24.8±	54.20±	4.23±
	1.67	0.50	0.98	83.95	484.03	0.00	0.01	0.14	0.57	5.08	0.06
W103	45.19±	-12.20±	19.02±	1 706.36±	4 901.21±	5.63±	1.68±	35.1±	38.2±	52.38±	6.23±
	4.25	1.21	2.13	49.98	293.02	0.00	0.01	0.14	0.00	1.27	0.06
变异 系数/%	18.23	43.25	40.50	36.98	31.70	2.18	26.67	21.25	25.57	16.11	22.00

## 1.2 仪器与设备

Hanmeidun F6 破壁机,广州双邦电器有限公司;真空冷冻干燥机,美国 Labconco FreeZone 公司;PAL-1 数显式折光仪,ATAGO 科学仪器有限公司;PHS-3C 型 pH 计,瑞士 Mettler Toledo 公司;UV-5200 紫外可见分光光度计,瑞士 Mettler Toledo 公司;CE-10 型分光色差计,深圳市三恩时科技有限公司;TA.XT Plus 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;LC-20A 型 HPLC,日本 Shimadzu 公司。

## 1.3 实验方法

1.3.1 样品预处理 西瓜瓜皮经破碎、榨汁和过滤等步骤得西瓜皮汁(出汁率 91%~94%)。剩余的西瓜皮经切片、冷冻干燥后磨粉,过 40 目标准筛(粒径≤0.425 mm)得西瓜皮粉。

1.3.2 外观与质构分析 采用色差计法测定新

鲜西瓜外表皮的颜色( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ );采用质构仪法测定新鲜瓜皮的硬度、脆度,质构测试参数<sup>[7]</sup>:P/2 探头,随机取点进行压缩穿刺测试,测前速度 1 mm/s,测试速度 1 mm·s<sup>-1</sup>,测后速度 10 mm·s<sup>-1</sup>,穿刺距离 4 mm,触发力 5 g。每个样品至少重复测试 10 次。

1.3.3 营养指标测试 取 1.3.1 获得的西瓜皮汁,测定 pH 值(GB 5009.237)、可溶性固形物(NY/T 2637)、总酸(GB 12456)、还原糖和总糖(GB 5009.7)。西瓜皮粉用于膳食纤维(GB 5009.88)含量测定。

1.3.4 酚类物质及其抗氧化活性分析 参考 Guo 等<sup>[8]</sup>的方法从西瓜皮粉中提取酚类物质测定总酚、单体酚含量及其 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 值(总还原能力)。

1.3.4.1 总酚含量测定 以没食子酸为标准物,

采用福林酚比色法测定总酚含量<sup>[9]</sup>,标准曲线为 $y=0.0387x+0.0044$ , $R^2=0.9995$ 。

1.3.4.2 单体酚测定 提取液经0.22  $\mu\text{m}$ 有机膜滤膜过滤后,利用HPLC法分析单体酚的组成及含量<sup>[10]</sup>。测试条件如下:C18色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm,5  $\mu\text{m}$ ),流动相分别为A(0.1%甲酸水溶液,v/v)和B(乙腈);流速1.0 mL/min,进样量20  $\mu\text{L}$ ,柱温30  $^{\circ}\text{C}$ ,检测波长280 nm。梯度洗脱程序:0~5 min,5% $\rightarrow$ 10%B;5~6 min,10% $\rightarrow$ 14%B;6~20 min,14% $\rightarrow$ 18%B;20~30 min,18% $\rightarrow$ 21%B;30~40 min,21% $\rightarrow$ 25%B;40~47 min,25% $\rightarrow$ 60%B;47~50 min,60% $\rightarrow$ 80%B;50~55 min,80% $\rightarrow$ 5%B;55~60 min,5%B。

1.3.4.3 DPPH 自由基清除能力测定 参考 Gundel 等<sup>[11]</sup>的方法,用 $\text{IC}_{50}$ 表示 DPPH 自由基清除率,即抑制 50% 的 DPPH 活性所需的样品质量。

1.3.4.4 铁离子还原能力(FRAP)测定 参照 Pico 等<sup>[9]</sup>的方法,用去离子水反应管作空白调零,以 $\text{FeSO}_4$ 作为标准物质绘制标准曲线,结果以 $\text{Fe}^{2+}$ 当量表示,标准曲线为 $y=1.0768x+0.0008$ , $R^2=0.9993$ 。

## 1.4 数据处理

所有实验除特殊注明外均重复3次,使用 Excel 2016 进行数据统计(平均值 $\pm$ 标准差),使用 SPSS.26 软件、Chiplot 线上分析平台(<https://www.chiplot.online>)进行统计结果的差异性、相关性分析,使用 Metware Cloud 线上分析平台(<https://www.metware.cn>)进行 OPLS-DA 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 西瓜皮的外观与营养品质

21 个西瓜品种中,A10、D14H26、D4H7、D6H17 为黑皮西瓜,其余品种为翠皮西瓜。由表 1 可知,黑皮西瓜的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值范围分别为 24.95(D6H17)~28.29(D4H7),-4.06(D4H7)~-2.03(A10)和 3.11(A10)~5.20(D4H7);翠皮西瓜的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值范围分别为 32.55(A27)~47.56(A7G22),-15.74(A7G22)~-8.73(A27)和 1.86(A27)~27.73(A7G22)。黑色瓜皮和翠色瓜皮硬度分布范围分别为 1 598.45(D4H7)~3 052.46

(D6H17)g 和 777.88(B21W79)~1 706.36(W103)g,脆度分布范围分别为 3 228.85(D4H7)~7 851.32(A10)  $\text{g}\cdot\text{sec}^{-1}$  和 2 117.18(B8W27)~5 636.20(A27)  $\text{g}\cdot\text{sec}^{-1}$ 。

21 个品种西瓜皮测试指标间的变异系数不同,表明各测试指标的品种间差异明显。pH 值的变异系数最小,说明西瓜皮 pH 值受品种的影响最小。总糖和还原糖含量的变异系数分别为 26.67% 和 21.25%,还原糖、总糖含量的种间差异接近。西瓜皮中膳食纤维含量最高的品种可达 83.07%(B3),最低为 49.01%(B21W79)。21 种西瓜皮中,可溶性固形物的含量范围为 3.83%(D14H26)~8.83%(A48G96),变异系数为 22.00%,与还原糖含量的种间变异系数最接近,原因在于可溶性固形物主要由可溶性糖和有机酸等营养成分组成,而西瓜皮中有机酸含量较低,糖含量较高,可溶性固形物含量主要由还原糖的含量体现。

### 2.2 西瓜皮中酚类物质及其抗氧化能力

2.2.1 酚类物质的含量与组成 西瓜皮中酚酸类物质的测试结果如表 2 所示。不同品种西瓜皮中酚类物质含量的变异系数不同,其中槲皮素的种间变异系数最大,为 78.49%,丁香酸次之,为 76.22%;总酚的变异系数最小,为 20.77%。B23W82 品种的总酚含量最高(3.9 mgGAE/g),A48G96 总酚含量最低(1.61 mgGAE/g),Ho 等<sup>[12]</sup>研究结果中,红色和黄色瓜皮粉的总酚含量分别为 127.93~218.39 mgGAE/100 g 和 111.00~213.21 mgGAE/100 g,与本试验中总酚含量接近。就单一酚酸组分来看,原儿茶素、新绿原酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、对香豆酸、阿魏酸、芥子酸、槲皮素在所有品种西瓜皮中均能检测到,但是 A21 和 D14H26 中未检出绿原酸和金丝桃苷,A10、D14H26、D6H17、GP 中未检出杨梅素。A21 品种中的咖啡酸、丁香酸、阿魏酸含量最高,A12G34 中对香豆酸和杨梅素含量最高,B8W27 中原儿茶素和槲皮素含量最高,新绿原酸、绿原酸、表儿茶素、芥子酸、金丝桃苷分别在 GP、B23W82、A40G65、W103 和 CK 中含量最高。因此,不同品种的西瓜皮可针对性的用于单一酚类组分的制备。

表 2 不同品种西瓜皮中酚类物质的含量  
Table 2 Phenolics content in watermelon peels from different cultivar

品种 Varieties	原儿茶素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Protocatechin	新绿原酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Neochlorogenic acid	绿原酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Chlorogenic acid	咖啡酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Caffeic acid	丁香酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Syringic acid	表儿茶素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Epicatechin	对香豆酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) p-Coumaric acid	阿魏酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Ferulic acid	芥子酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Sinapic acid	金丝桃苷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Hyperin	杨梅素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Myricetin	槲皮素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Quercetin	总酚/(mgGA E·g <sup>-1</sup> ) Total phenols
A10	68.01±2.67	191.69±12.87	85.43±3.86	46.27±1.20	37.62±0.07	176.03±10.67	72.24±2.69	48.72±2.31	89.79±6.23	48.60±0.56	Nd	83.03±4.13	3.03±0.11
	123.87±3.80	169.29±10.97	162.59±7.51	89.88±4.39	115.98±10.40	140.75±0.61	141.33±4.94	123.63±7.80	144.09±3.67	179.34±7.89	171.21±11.85	345.57±13.87	3.29±0.07
A21	150.61±2.42	265.87±12.88	Nd	159.74±14.77	255.40±16.42	170.94±3.39	133.94±6.17	242.25±6.17	105.54±9.90	89.60±5.45	88.58±2.89	281.56±18.6	3.40±0.10
	41.24±1.45	301.69±27.55	66.97±5.04	63.73±3.87	49.98±2.91	142.66±11.68	49.45±1.86	62.22±0.16	102.53±4.63	74.46±4.93	71.38±2.06	83.82±4.04	2.62±0.11
A40G65	40.54±0.64	207.93±13.11	134.42±3.55	93.1±4.17	59.88±0.84	295.47±19.49	68.45±2.34	51.84±2.12	120.27±10.07	57.73±0.76	72.89±4.06	132.71±3.68	3.38±0.02
	37.89±1.06	74.71±1.63	58.52±2.09	40.89±0.22	39.64±0.30	76.17±5.09	32.99±0.04	36.52±1.33	56.88±4.92	44.07±1.59	65.83±1.09	160.72±7.55	1.61±0.02
A7G22	52.52±3.93	178.04±11.66	137.54±7.03	98.05±2.31	41.75±1.15	268.79±1.66	43.29±0.30	74.68±3.71	143.48±9.90	63.99±5.91	66.17±1.83	53.91±1.78	2.73±0.07
	58.55±1.47	136.94±2.38	83.54±5.39	75.76±2.89	61.84±1.17	125.98±4.00	135.84±7.23	44.45±2.39	51.04±0.19	159.90±15.45	127.79±3.56	55.19±2.53	2.94±0.08
B16	46.01±2.22	200.29±19.26	69.98±6.75	50.99±2.72	40.96±1.37	105.58±6.20	36.00±0.69	46.32±2.03	89.81±4.00	58.12±1.08	60.02±1.29	128.18±8.88	2.17±0.08
	83.23±2.70	381.48±15.20	89.87±2.36	54.07±1.07	46.42±0.76	178.17±7.54	36.24±0.28	53.54±1.28	92.45±3.11	105.77±3.59	81.95±2.09	188.23±5.43	3.09±0.07
B23W82	133.04±2.00	151.88±7.22	171.93±15.03	147.99±13.47	146.95±7.35	140.15±2.44	133.97±5.93	132.77±8.26	134.10±8.49	74.04±0.43	73.78±0.64	250.02±5.95	3.90±0.09
	53.72±2.15	164.88±9.51	72.03±4.52	49.18±2.85	36.65±1.44	133.28±7.92	34.93±0.13	45.25±1.45	65.27±3.10	76.69±3.55	65.26±1.43	73.76±3.88	2.71±0.07
B5G19	66.36±1.76	351.65±2.47	127.81±2.53	53.77±0.16	60.34±0.16	172.10±2.97	36.46±0.21	49.86±0.43	89.20±2.27	64.41±0.68	81.47±1.79	196.20±5.45	3.11±0.12
	59.60±4.33	192.89±15.37	84.02±7.97	52.6±1.89	52.48±2.25	143.08±3.11	43.84±2.97	37.58±0.99	84.19±0.59	59.22±3.14	66.09±0.50	197.21±11.29	2.05±0.03
B8W27	162.21±3.03	58.88±0.99	64.42±0.25	49.33±0.47	52.44±0.72	229.83±6.61	34.18±1.16	47.60±0.82	92.02±6.27	153.88±0.36	84.96±5.74	687.98±41.88	3.34±0.14
	33.32±1.39	65.43±4.44	79.69±7.80	47.16±2.08	48.89±3.16	208.02±9.12	34.21±0.34	46.65±2.16	40.78±1.79	209.72±16.38	92.74±5.96	237.18±5.88	2.42±0.06
D14H26	133.50±9.23	161.10±9.50	154.26±4.80	136.8±4.58	134.07±8.44	160.18±10.91	132.66±7.89	132.64±1.98	136.73±8.37	Nd	Nd	144.87±12.99	2.29±0.06
	75.08±5.35	118.16±8.37	106.05±6.91	55.07±2.46	35.69±0.18	177.04±16.00	44.66±2.28	79.13±6.48	78.03±7.05	93.83±6.28	63.04±1.38	95.64±8.95	2.65±0.08
D6H17	48.13±2.12	116.62±5.17	65.29±1.32	51.17±1.22	46.34±1.07	90.40±3.12	40.34±0.83	40.40±0.70	52.22±1.37	119.26±5.56	Nd	93.18±0.17	1.85±0.07
	47.31±2.35	532.05±27.37	70.49±1.01	48.99±0.60	41.98±0.32	112.05±5.35	36.95±0.39	43.10±0.79	61.44±1.97	63.80±0.61	Nd	68.47±0.34	2.72±0.08

续表

品种 Varieties	原儿茶素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Protocatechin	新绿原酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Neochlorogenic acid	绿原酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Chlorogenic acid	咖啡酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Caffeic acid	丁香酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Syringic acid	表儿茶素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Epicatechin	对香豆酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) p-Coumaric acid	阿魏酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Ferulic acid	芥子酸/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Sinapic acid	金丝桃苷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Hyperin	杨梅素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Myricetin	槲皮素/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Quercetin	总酚/(mgGA E·g <sup>-1</sup> ) Total phenols
W103	47.91±0.61	272.65±7.27	76.76±2.33	93.44±1.51	55.71±1.63	197.69±14.99	38.04±0.81	50.43±2.30	147.99±1.37	46.47±1.75	64.77±1.81	243.28±8.98	2.44±0.01
CV/%	54.30	56.16	44.24	48.19	76.22	33.38	64.60	69.81	35.46	58.00	62.45	78.49	20.77

注: Nd, 未检出; CV, 变异系数。

Note: Nd, not detected; CV, coefficient of variation.

2.2.2 西瓜皮抗氧化能力 如图 1 所示, A21、B8 和 B8W27 品种的 DPPH 自由基清除能力最高, B16、CK、D6H17 和 W103 的 DPPH 自由基清除能力最差。A21、B8W27 的 FRAP 值最高,

B16、CK、D6H17 和 W103 的 FRAP 值最低。两种评价方法对西瓜皮抗氧化能力的判定结果基本一致, 说明西瓜皮中抗氧化物质存在协同效应<sup>[13]</sup>。

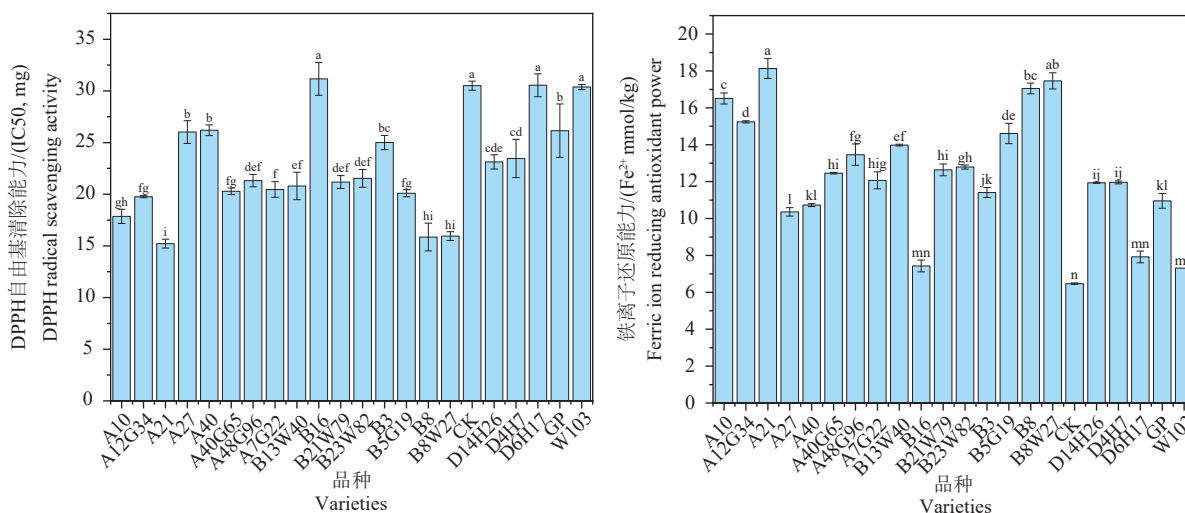


图 1 不同品种西瓜皮的抗氧化能力

Fig. 1 Antioxidant capacities of watermelon peel from different cultivar

注: 不同小写字母表示具有显著性差 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

2.2.3 酚类物质与抗氧化能力的相关性 如图 2 所示, 原儿茶素与咖啡酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、槲皮素和总酚含量呈极显著正相关性; 绿原酸和芥子酸呈极显著正相关性; 咖啡酸与丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、芥子酸呈极显著正相关性, 与总酚呈显著正相关性; 阿魏酸与芥子酸、总酚含量呈显著正相关性; 金丝桃苷和杨梅素呈极显著正相关。所有酚类物质之间均呈现显著或极显著正相关性, 主要源于酚类物质共同的结构特征和生物合成途径<sup>[14]</sup>。西瓜皮 DPPH 自由基清除能力主要受总酚含量影响, 而 FRAP

主要受原儿茶素含量影响 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 基于 OPLS-DA 筛选西瓜皮种间差异的关键性物质

将 21 种西瓜皮的总酸、总糖、还原糖、膳食纤维、总酚以及 12 种酚酸作为原始变量, 以 VIP (Variable Importance in Projection, 变量投影重要性) 大于 1 为筛选标准, 进行 OPLS-DA 分析。如图 3(A) 所示, 不同品种西瓜皮间未发生重合, 表明采用该方法对测试西瓜品种的区分效果较好, 适用性强。图 3(B) 为 OPLS-DA 的验证图, 横坐标表示模型的准确率, 纵坐标表示随机排列组合

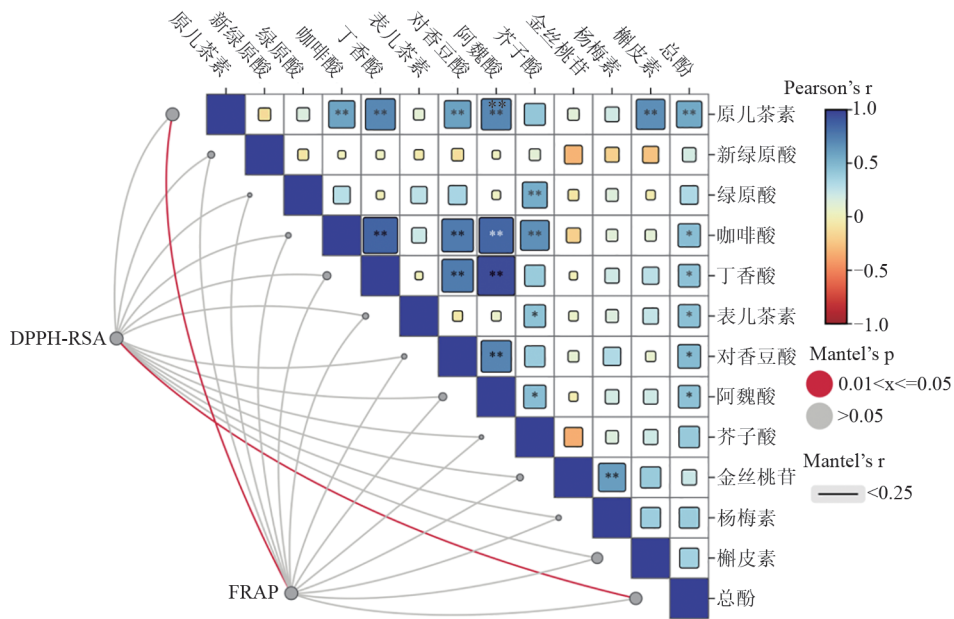


图 2 西瓜皮中酚类物质含量与抗氧化能力间的相关性

Fig. 2 Correlation between phenolics content and antioxidant capacities of watermelon peel

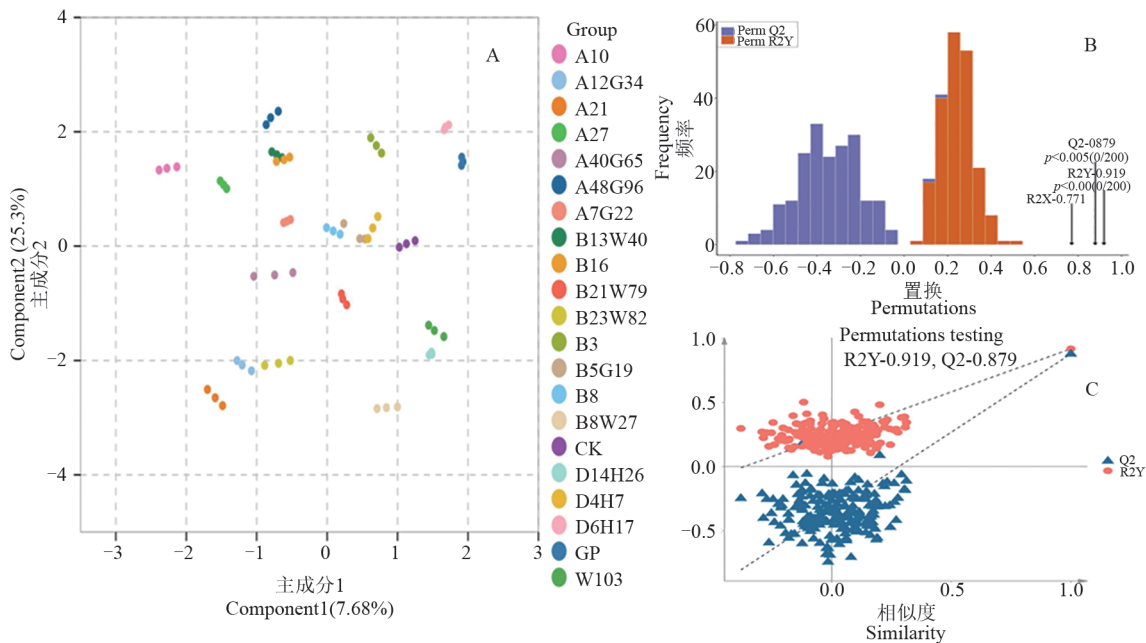


图 3 OPLS-DA 得分图(A); OPLS-DA 验证图(B); OPLS-DA 置换检验图(C)

Fig. 3 OPLS-DA score plot (A); OPLS-DA validation plot (B); OPLS-DA permutation test plot (C)

实验中 200 个模型分类效果出现的频率, 一般情况下,  $P < 0.05$  时模型最佳<sup>[15]</sup>。OPLS-DA 模型的预测参数 R2X 和 R2Y 分别表示所建模型对 X 和 Y 矩阵的解释率, Q2 表示模型的预测能力, 这三个参数越接近 1, 模型的可预测性或解释性就越高表示模型越稳定可靠,  $Q2 > 0.4$  即可接受<sup>[16]</sup>。经过 OPLS-DA 置换检验, 测得  $R2X=0.771$ ,

$R2Y=0.919$ ,  $Q2=0.879$ , 均大于 0.5, 表明模型拟合度良好, 且预测结果可接受。从图 3(C) 看出,  $Q2$  回归线交于纵轴负半轴, 表明模型未过拟合, 模型可靠。通过 VIP 值筛选决定不同品种西瓜皮差异的关键性物质时, 一般认为, 在建立的 OPLS-DA 模型中, VIP 值大于 1 的变量在不同类别之间具有显著差异, VIP 值越大, 不同种类间

变量含量的差异越大<sup>[17]</sup>。如图4所示,对香豆酸、阿魏酸、杨梅素、总酚、总酸、总糖、还原糖和可溶

性固形物等 8 个变量的 VIP 值均大于 1,说明这 8 种成分是决定西瓜皮种间差异的关键性物质。

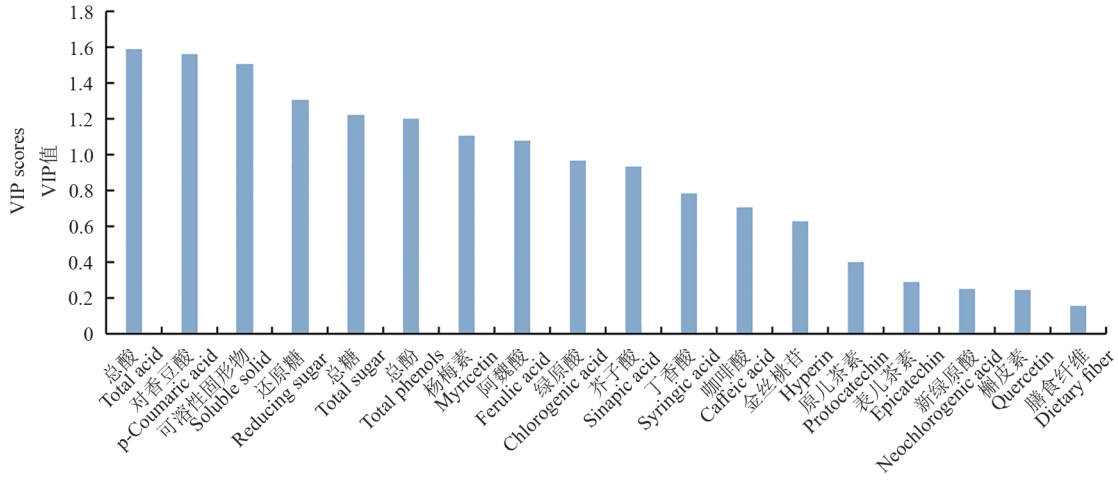


图4 VIP值分布图

Fig. 4 Distribution chart of VIP values

### 2.4 不同品种西瓜皮的聚类分析

由图5可知,21种西瓜皮可分为4大类,第I类包括A12G34、A21、B13W40、B23W82等4个品种,该类西瓜皮中含有较高的酚类化合物,可作为富含膳食多酚的营养健康食品原料和食品保鲜中的抗菌基质使用<sup>[2]</sup>。第II类包含A40G65、B21W79、B3、B5G19、B8W27等5个品种,该类品种西瓜皮的糖含量较高,可作为添加

剂用于改善食品风味<sup>[18]</sup>。A10、A27、A48G96、A7G22、B16、B8、CK、D6H17、W103为第III类,该类西瓜皮的酸含量和可溶性固形物较高,可用于制作果酱、果汁或作为饲用营养物质的主要来源<sup>[19]</sup>;第IV类包含D14H26、D4H7、GP等3个品种,此类西瓜皮中各关键性差异物质的含量均较少,聚类评价结果不显著,但可作为良好的膳食纤维来源应用于食品加工<sup>[20]</sup>,还可以作

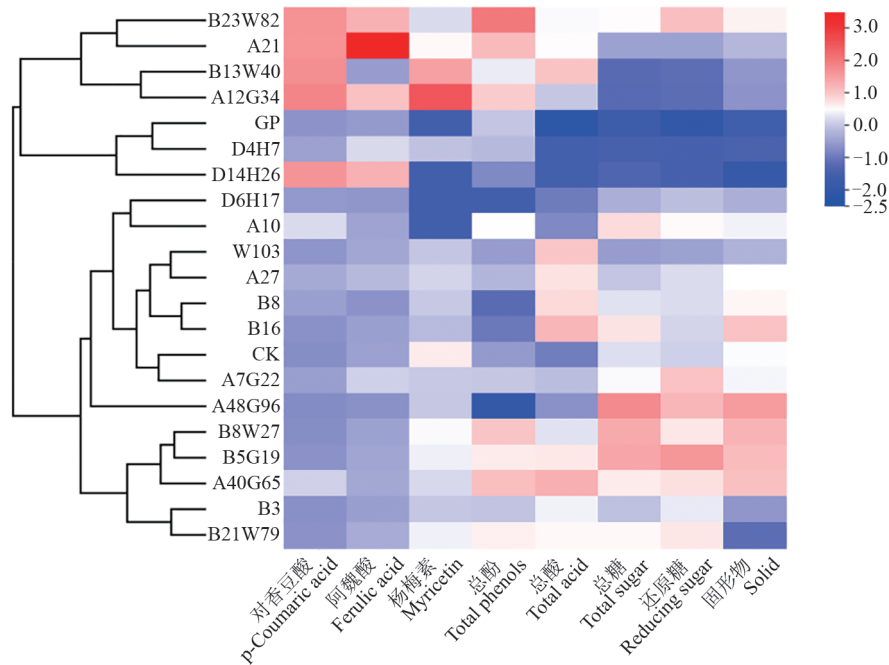


图5 不同品种西瓜皮的聚类分析热图

Fig. 5 Cluster analysis heatmap of watermelon peel from different cultivar

为生物吸附剂用于染料和金属的吸收脱离等<sup>[21]</sup>。

### 3 讨论

合理的评价指标、科学的评价方法是准确评估食品品质的前提。李文静等<sup>[22]</sup>利用主成分分析将18个品质指标降维为5个主成分,结合聚类分析和感官评分全面评价了陕西扶风地区海棠的果实品质;钜晓艳等<sup>[23]</sup>通过模糊教学评价消除了感官评价的模糊性,结合主成分分析确定了保持鲈鱼品质的最大辐照剂量;马军辉等<sup>[24]</sup>以50种浙江香茶为研究对象,采用相关性分析、线性判别分析、随机森林回归等方法构建了香茶批发交易参考价模型,为大众茶交易价提供参考。本文中采用的OPLS-DA是改进的PLS-DA法,该方法可用于鉴定不同类别样本间的差异,通过正交化消除与类别信息无关的数据,筛选出样本的特征变量,然后根据其特征变量探讨西瓜皮在不同领域的利用潜力,判定结果更准确。

### 4 结论

西瓜皮的DPPH自由基清除能力主要受总酚含量影响,而FRAP值主要受原儿茶素含量影响。各指标影响西瓜皮品质的先后顺序为总酸>对香豆酸>可溶性固形物>还原糖>总糖>总酚>杨梅素>阿魏酸>绿原酸>芥子酸>丁香酸>咖啡酸>金丝桃苷>原儿茶素>表儿茶素>新绿原酸>槲皮素>膳食纤维。以对香豆酸、阿魏酸、杨梅素、总酚、总酸、总糖、还原糖和可溶性固形物8个关键指标为依据,将21种西瓜皮分为4类,第I类(A12G34、A21、B13W40、B23W82)含有丰富的酚类化合物;第II类(A40G65、B21W79、B3、B5G19、B8W27)和第III类(A10、A27、A48G96、A7G22、B16、B8、CK、D6H17、W103)西瓜皮分别具有较高的糖含量和有机酸含量;第IV类(D14H26、D4H7、GP)可作为膳食纤维的良好来源。上述研究结果可为西瓜皮的定向加工提供数据参考,有利于西瓜皮的绿色循环利用。

### 参考文献

[1] Liu ZQ, Wu SZ, Zuo HX, et al. Freeze-drying pretreatment of watermelon peel to improve the

efficiency of pectin extraction: RSM optimization, extraction mechanism, and characterization [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 249: 125944.

- [2] Guo ZL, Wu SZ, Lin J, et al. Active film preparation using pectin and polyphenols of watermelon peel and its applications for super-chilled storage of chilled mutton [J]. *Food Chemistry*, 2023, 417: 135838.
- [3] Hanan MAAS, Abdelrahman BRA. Utilization of watermelon rinds and sharlyn melon peels as a natural source of dietary fiber and antioxidants in cake [J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2013, 58 (1): 83-95.
- [4] Jennifer OL, Julian GT, Hugo EJJ, et al. Removal of arsenic from semiarid area groundwater using a biosorbent from watermelon peel waste[J]. *Heliyon*, 2023, 9(2): e13251.
- [5] Kang C, Zhang YY, Zhang MY, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC - MS/MS coupled with OPLS-DA[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132932.
- [6] 马雪莲, 王 鹏, 耿敬章, 等. 感官评价联合GC-MS与OPLS-DA解析加热温度对椒麻鸡赋味汤料呈香品质影响规律[J]. *食品科学*, 2024, 45(17): 127-134.
- [7] Li SH, Li QQ, Cao JK, et al. Comparative transcriptomic analysis provides novel insights into the difference in textural alteration between mealy and crisp apple patterns [J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112941.
- [8] Guo MM, Xu K, Yee J, et al. Comparative rheology and antioxidant potential of high-methoxyl sugar acid gels of unrefined powder and acid-extracted pectin from two hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) fruit cultivars [J]. *LWT-food Science and Technology*, 2024, 203: 116331.
- [9] Pico J, Xu K, Guo M, et al. Manufacturing the ultimate green banana flour: Impact of drying and extrusion on phenolic profile and starch bioaccessibility [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124990.
- [10] Alongi M, Lanza U, Gorassini A, et al. The role of processing on phenolic bioaccessibility and antioxidant capacity of apple derivatives [J]. *Food Chemistry*, 2025, 463: 141402.
- [11] Samanta DSG, Bruna Z, Fernanda RF, et al. Redispersible dry powders containing nanoencapsulated curcumin increase its antioxidant activity [J]. *Journal*

- of Food Engineering, 2024, 386: 112288.
- [12] Lee HH, Nor FR, Thuan CT, et al. Effect of extraction solvents and drying conditions on total phenolic content and antioxidant properties of watermelon rind powder [J]. *Sains Malaysiana*, 2018, 47(1): 99-107.
- [13] 梁 丽, 朱雯绮, 刘晓芳, 等. 茶叶籽油中酚类化合物的提取工艺优化及其抗氧化相互作用动力学研究[J]. *中国油脂*, 2022, 47(09): 76-83.
- [14] 王玲平, 周生茂, 戴丹丽, 等. 植物酚类物质研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2010, 22(05): 696-701.
- [15] 马雪莲, 王 鹏, 耿敬章, 等. 感官评价联合 GC-MS 与 OPLS-DA 解析加热温度对椒麻鸡赋味汤料呈香品质影响规律[J]. *食品科学*, 2024, 45(17): 127-134.
- [16] 邝格灵, 李 树, 宁甜甜, 等. 基于 GC-MS 指纹图谱和多元统计学区分四川保宁醋和山西老陈醋的挥发性差异代谢产物[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 227-232.
- [17] Tu T, Wu WD, Tang XY, et al. Screening out important substances for distinguishing Chinese indigenous pork and hybrid pork and identifying different pork muscles by analyzing the fatty acid and nucleotide contents [J]. *Food Chemistry*, 2021, 350: 129219.
- [18] Parkash M, Syed MGS, Alexandros T, et al. Effect of electrolyzed watermelon rind flour on unleavened flatbread quality, techno-functional properties, minerals, bioactivities, and consumer preferences [J]. *Food Bioscience*, 2024, 61: 104564.
- [19] 柯虹瑜, 王媛媛, 张 鑫, 等. 饲料中添加有机酸复合物对凡纳滨对虾生长、营养物质利用、血清生化指标和肠道微生物的影响[J]. *淡水渔业*, 2024, 54(01): 76-85.
- [20] Lekshmi V, Manikandan A, Sivagaami P, et al. Utilization of sustainable agri-waste watermelon rind for fishmeal in *Labeo rohita* diets: Effects on nutritional indices, hemato-biochemical properties, histoarchitectural traits, amino acid and fatty acid profiles [J]. *Aquaculture Reports*, 2024, 36: 102045.
- [21] Chiranjit B, Suman D, Vinod KS. A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent [J]. *Environmental Advances*, 2020, 2: 100007.
- [22] 李文静, 刘一心, 陈明堃, 等. 14 种海棠果实品质分析及综合评价[J]. *食品科学*, 2024, 45(16): 121-130.
- [23] 鉏晓艳, 王伟琼, 熊光权. 模糊数学评价和主成分分析电子束辐照处理后的鲈鱼品质[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 38-42.
- [24] 马军辉, 仝 晨, 冯海强, 等. 香茶品质因子的多变量分析及判别[J]. *食品科学*, 2024, 45(06): 130-135.