

不同物理场预处理对猕猴桃酵素品质的影响

戴芳, 吴宇昊, 祝振洲, 梅新, 隋勇, 李书艺, 陈学玲

Effects of Different Physical Field Pretreatment on the Quality of Kiwifruit Jiaosu

DAI Fang, WU Yuhao, ZHU Zhenzhou, MEI Xin, SUI Yong, LI Shuyi, and CHEN Xueling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲电场预处理在果蔬干燥中的应用研究进展

Research Progress on the Application of Pretreatment of Pulsed Electric Field in Fruit and Vegetable Drying

食品工业科技. 2023, 44(12): 430-436 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080281>

预处理方式对米糠酵素品质的影响

Effects of Pretreatment Methods on the Quality of Rice Bran Ferment

食品工业科技. 2021, 42(7): 150-155 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040257>

脉冲电场和pH偏移组合处理对大豆分离蛋白结构及功能特性的影响

Effect of Combination of Pulsed Electric Field and pH Shifting on Structure and Functional Properties of Soybean Protein Isolates

食品工业科技. 2025, 46(7): 112-122 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050128>

大豆分离蛋白/甲基纤维素浸泡预处理对猕猴桃脆片品质的影响

Effect of Soy Protein Isolate and Methylcellulose Soaking Pretreatment on the Quality of Kiwi Crispy Tablets

食品工业科技. 2020, 41(10): 63-67,74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.011>

1-MCP预处理对振动胁迫下猕猴桃冷藏品质的调控

Regulation of 1-MCP Pre-treatment on Refrigeration Quality of Kiwifruit under Vibration Stress

食品工业科技. 2025, 46(11): 313-320 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080300>

不同预处理对热风干燥山药片品质特性及微观结构的影响

Effects of Different Pretreatment on the Quality Characteristics and Microstructure of Hot Air Dried Yam Slices

食品工业科技. 2023, 44(20): 43-52 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110328>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

戴芳, 吴宇昊, 祝振洲, 等. 不同物理场预处理对猕猴桃酵素品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 96–105. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080302

DAI Fang, WU Yuhao, ZHU Zhenzhou, et al. Effects of Different Physical Field Pretreatment on the Quality of Kiwifruit Jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 96–105. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080302

· 研究与探讨 ·

不同物理场预处理对猕猴桃酵素品质的影响

戴芳^{1,2,3}, 吴宇昊^{1,2,3}, 祝振洲¹, 梅新^{2,3}, 隋勇^{2,3}, 李书艺^{1,*}, 陈学玲^{2,3,*}

(1. 武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院, 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北省绿色富硒农产品精深加工工程技术研究中心, 湖北武汉 430023;

2. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064;

3. 湖北省农业科技创新中心农产品加工研究分中心, 湖北武汉 430064)

摘要: 为了探究不同物理场预处理对猕猴桃酵素品质的影响, 采用超声 (US)、脉冲电场 (PEF) 及二者联合 (UP) 预处理猕猴桃果浆, 以植物乳杆菌发酵制备猕猴桃酵素。结果表明: 与 CK 相比, 3 种物理场处理组的猕猴桃酵素 SOD 活力显著升高 27.27%~31.81% ($P<0.05$), 总酸含量升高 0.77%~2.79%, DPPH、羟基和 ABTS⁺ 自由基清除率分别升高 3.17%~4.39%、0.9%~1.83%、1.88%~6.63%, 可溶性糖含量降低 3.23%~10.04%, pH 和总酚含量没有显著性差异 ($P>0.05$)。此外, GC-MS 结果显示 3 个物理场处理组的醇、酮类物质相对含量分别比 CK 组高 5.76%~56.75%、14.71%~32.73%, 庚醛、反-2-己烯醛和己醛相对含量升高; 经 OPLS-DA 分析, CK、US、PEF、UP 各组挥发性物质分布于不同象限。综上, 超声、脉冲电场及联合预处理均可以提升猕猴桃酵素的品质, 丰富挥发性物质, 以超声处理为佳。

关键词: 猕猴桃酵素, 植物乳杆菌, 超声, 脉冲电场, 预处理

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0096-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080302

本文网刊:



Effects of Different Physical Field Pretreatment on the Quality of Kiwifruit Jiaosu

DAI Fang^{1,2,3}, WU Yuhao^{1,2,3}, ZHU Zhenzhou¹, MEI Xin^{2,3}, SUI Yong^{2,3}, LI Shuyi^{1,*}, CHEN Xueling^{2,3,*}

(1. School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, National R & D Center for Se-rich Agricultural Products Processing, Hubei Engineering Research Center for Deep Processing of Green Se-rich Agricultural Products, Wuhan 430023, China;

2. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

3. Agro-product Processing Research Sub-center of Hubei Innovation Center of Agriculture Science and Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to explore the effects of different physical field pretreatment on the quality characteristics of kiwifruit Jiaosu, kiwifruit pulp was pretreated with ultrasound (US), pulsed electric field (PEF) and a combination of both (UP), then fermented with *Lactobacillus plantarum* to produce kiwifruit Jiaosu. The results showed that compared with CK group, the SOD activity in three kinds of physical field treatment groups significantly increased by 27.27%~31.81% ($P<0.05$), the total

收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 中国科学院猕猴桃产业技术工程实验室项目 (KFJ-PTXM-008); 湖北省农业科技创新中心项目 (2024-620-000-001-25)。

作者简介: 戴芳 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: 1592455465@qq.com。

* 通信作者: 李书艺 (1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能食品与天然产物化学, E-mail: lishuyisz@sina.com。

陈学玲 (1979-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: 17810686@qq.com。

acid content increased by 0.77%~2.79%, the DPPH $\cdot$, OH $\cdot$ and ABTS $^{+}$ scavenging rates increased by 3.17%~4.39%, 0.9%~1.83%, and 1.88%~6.63%, respectively, and the soluble sugar content decreased by 3.23%~10.04%. There was no significant difference in pH and total phenolic content ($P>0.05$). In addition, the GC-MS results showed that the relative contents of alcohols and ketones in the three physical field treatment groups were higher than those in the CK group by 5.76%~56.75% and 14.71%~32.73%, respectively, and the relative contents of heptanal, trans-2-hexenal, and hexanal were increased. By OPLS-DA analysis, the volatiles in CK, US, PEF and UP groups were distributed in different quadrants. In conclusion, ultrasound, pulsed electric field and their combined pretreatment can all improve the quality of kiwifruit Jiaosu and enrich the volatile substances of kiwifruit Jiaosu, and ultrasound pretreatment is the best.

Key words: kiwifruit Jiaosu; *Lactobacillus plantarum*; ultrasound; pulsed electric field; pretreatment

猕猴桃属于猕猴桃科、猕猴桃属,富含膳食纤维、多酚、维生素和矿物质等营养物质,其 V_C 含量是苹果、橘子等水果的数倍,被誉为“ V_C 之王”^[1]。猕猴桃除了鲜食,还可以加工成果干、果酱、果酒和酵素等,其中猕猴桃酵素备受欢迎。经过微生物发酵制得的猕猴桃酵素不仅增加了酚类、黄酮、有机酸等活性成分和营养物质含量^[2],其货架期也得到延长^[3],因此,使用微生物发酵制备酵素成为近年来的研究热点。

然而,使用传统发酵方式制备酵素耗时长、效率低,通过酶法^[4]、物理场^[5]等手段对原料进行预处理,有利于提高产品的产量和生物活性、改善风味等。物理场预处理可以在不添加化学试剂的情况下达到加快反应速度的目的,并且具有能耗低、绿色无污染等特点,如超声产生的声空化效应和脉冲电场产生的电刺激等^[6]。研究表明,超声处理有利于促进发酵银杏汁^[7]和山楂浆^[8]酚类、氨基酸和有机酸的代谢,提高体外抗氧化活性和感官品质。脉冲电场处理可以增加发酵葡萄汁的总酚含量^[9]、丰富枣酒的风味物质^[10]。目前,在猕猴桃酵素研究中,主要集中于菌种筛选、发酵工艺优化等方面^[11-12],在发酵前进行物理场预处理的研究鲜有报道。

因此,本研究采用超声、脉冲电场及二者联合对猕猴桃进行预处理,以植物乳杆菌发酵猕猴桃果浆,制备猕猴桃酵素。研究确定最佳物理场预处理参数,并对猕猴桃酵素的理化性质、抗氧化活性以及挥发性物质进行分析,为开发具备抗氧化功能活性的饮料提供数据支撑,拓展超声和脉冲技术在发酵食品中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘徐香’猕猴桃、白砂糖、碳酸氢钠(食品级) 市售;植物乳杆菌 Lp90 微康益生菌股份有限公司;MRS 肉汤培养基、无水葡萄糖、福林酚、邻苯三酚、无水碳酸钠、1,1-二苯-1-苦基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzo-thiazoline-6-sulfonic acid), ABTS)、过硫酸钾、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、水杨酸、没食子酸、蒽酮 分析纯试剂,国药集团化学试剂有限公司。

722N 可见分光光度计 上海仪电仪器有限公司;SQP 电子分析天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;7890A/5975C 气相色谱质谱联用仪 安捷伦科技有限公司;高压脉冲电场发生仪 自制;KQ3200DE 超声波清洗机 昆山市超声仪器有限公司;S210 pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DSX 高压蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂。

1.2 实验方法

1.2.1 植物乳杆菌菌悬液的制备 植物乳杆菌菌悬液制备参考王虎玄等^[13]的方法,本实验所培养的植物乳杆菌计数约为 10^9 CFU/mL。

1.2.2 猕猴桃酵素制备 工艺流程:猕猴桃原料→清洗、削皮→打浆→调糖、调 pH→物理场处理→灭菌→接种植物乳杆菌→发酵→过滤离心→灭菌→成品。

操作要点:猕猴桃原料选择糖度为 $14\%\pm 1\%$,加水打浆(水与猕猴桃质量比为 1:1),添加白砂糖将糖度调至 $10\%\pm 0.1\%$,再使用碳酸氢钠调节发酵初始 pH 至 4.0,经过超声和脉冲电场处理,采用巴氏杀菌($75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min)除去杂菌,接种所制备的植物乳杆菌菌悬液 1%(v/w),于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发酵 20 h,发酵结束后以 8000 r/min 离心 10 min,收集上清液,采用巴氏杀菌($75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min)灭活发酵菌即得成品。

1.2.3 超声预处理 根据预实验结果,设定超声时间(10、20、30、40、50 min),超声功率 270 W,超声频率 40 kHz;设定超声频率(25、33、40、59 kHz),超声功率 270 W,超声时间 20 min;设定超声功率(180、225、270、315、360 W),超声频率 40 kHz,超声时间 20 min;以超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活力和总酚含量为评价指标,明确最佳参数。以超声最佳参数进行预处理制备的猕猴桃酵素记为 US 组。

1.2.4 脉冲电场预处理 根据预实验结果,设定脉冲电场强度(0.67、1.33、2.00、2.67、3.33 kV/cm),脉冲时间 270 s;设定脉冲时间(90、180、270、360、450 s),脉冲电场强度 2 kV/cm,以 SOD 活力和总酚含量为评价指标,明确最佳参数。以脉冲电场最佳参数进行预处理制备的猕猴桃酵素记为 PEF 组。

1.2.5 超声-脉冲联合处理 根据 1.2.3 和 1.2.4 的实

验结果,对猕猴桃果浆先进行超声预处理,接着进行脉冲电场预处理,将制备的猕猴桃酵素记为UP组。不进行物理场预处理的记为CK组。

1.2.6 pH的测定 使用pH计测定。

1.2.7 总酸的测定 参照GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》进行。

1.2.8 总酚含量的测定 参照Ran等^[14]的方法稍作修改,取1 mL稀释后的猕猴桃酵素于试管中,加入5.0 mL体积分数10%的福林酚,摇匀静置3~8 min,加入4.0 mL 7.5 g/100 mL Na₂CO₃,避光反应1 h,于波长765 nm处测定吸光度,以没食子酸标准曲线定量总酚含量($y=10.04x+0.0222$, $R^2=0.9992$),计算公式为:

$$\text{总酚含量(mg GAE/100 mL)} = c \times A \times 100$$

式中:c表示根据吸光度值计算出的没食子酸浓度,mg/mL;A表示稀释倍数。

1.2.9 SOD活力的测定 参照GB/T 5009.171-2003《保健食品中超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定》进行。

1.2.10 可溶性糖含量的测定 参照Jiang等^[15]的方法稍作修改,取1 mL稀释后的猕猴桃酵素于带刻度的试管中,每管加入5 mL 蒽酮-硫酸溶液,充分振荡后置于沸水浴10 min,冷却至室温,于波长620 nm处测定吸光度,葡萄糖标准曲线: $y=5.835x-0.0045$, $R^2=0.9991$,计算公式为:

$$\text{可溶性糖含量(mg/mL)} = c \times A$$

式中:c表示根据吸光度值计算出的葡萄糖浓度,mg/mL;A表示稀释倍数。

1.2.11 抗氧化活性的测定 DPPH自由基清除能力、羟基自由基清除能力、ABTS⁺自由基清除能力参照Yang等^[16]的方法进行测定,具体步骤如下:

DPPH自由基清除能力测定:分别量取不同样品2 mL及DPPH乙醇溶液(0.2 mmol/L,避光4℃保存,现用现配)2 mL混合摇匀,室温避光放置30 min,517 nm波长处测定吸光度A₁,同时测定2 mL样品及2 mL无水乙醇混合液的吸光度A₂,2 mL乙醇及DPPH溶液混合液的吸光度A₀,计算公式如下:

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

羟基自由基清除能力测定:在比色管中依次加入10 mmol/L FeSO₄ 1 mL、10 mmol/L 水杨酸(用少量乙醇溶解)1 mL,再加入1 mL不同样品溶液,最后加1 mL 8.8 mmol/L的H₂O₂,37℃反应0.5 h,在510 nm测吸光度A₁,以蒸馏水作参比,测吸光度A₀,同时测定不加显色剂的样品空白作为对照A₂,计算公式如下:

$$\text{OH} \cdot \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

ABTS⁺自由基清除能力的测定:用5 mmol/L pH7.40的PBS缓冲液分别配制7 mmol/L ABTS溶液和2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液,将两者等体积混匀制成ABTS储备液,在室温下放置12~16 h后,用PBS缓冲液稀释ABTS储备液至734 nm处的吸光值A₀为0.7(±0.2),制成ABTS工作液,然后取0.15 mL样品溶液与2.0 mL ABTS工作液混合,室温下避光反应6 min,于734 nm处测定其吸光值A₁,计算公式如下:

$$\text{ABTS}^+ \cdot \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100$$

1.2.12 挥发性风味物质的测定 HS-SPME方法:参考余思洁^[17]的方法并略做修改,准确量取5 mL的样品放入顶空进样瓶中,用聚四氟乙烯隔垫进行密封,将萃取头插入顶空瓶中,于45℃水浴平衡20 min,吸附萃取40 min;萃取结束后取出萃取针并立即插入气相色谱仪的进样口,在250℃下解析5 min。

气相色谱条件:DB-WAX毛细管色谱柱(30 m×250 μm×0.25 μm),载气为He,柱流速1.0 mL/min,不分流进样,进样口温度250℃,升温程序为初始温度35℃,保持5 min,7℃/min升温至150℃,5℃/min升温至230℃,保持5 min。

质谱条件:离子源温度250℃,接口温度230℃,电离方式为EI,电子能量为70 eV,质量范围35~350 amu。

使用计算机谱库(NIST08)进行检索对比,选取匹配度大于等于80的化合物进行定性;相对含量的计算采用面积归一法。

1.3 数据处理

所有实验进行三次重复,数据采用Excel 2021处理,结果以平均值±标准差表示,采用SPSS 26.0进行单因素方差分析和Duncan's多重检验($P<0.05$),Origin 2019进行绘图,SIMCA 14.1进行正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)以及计算预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)。

2 结果与分析

2.1 超声时间对猕猴桃酵素总酚含量和SOD活力的影响

由图1可知,总酚含量随着超声时间增加呈先上升后下降趋势,其中超声时间为20 min时,发酵产生的总酚含量最高,为44.22 mg GAE/100 mL。其中超声10 min与20 min的总酚含量没有显著性差异($P>0.05$)。SOD活力呈下降的趋势,在10 min时最大,为90.70 U/mL。超声可以增大细胞之间的空隙,加快传质速率,加速发酵可利用物质如糖类、酚

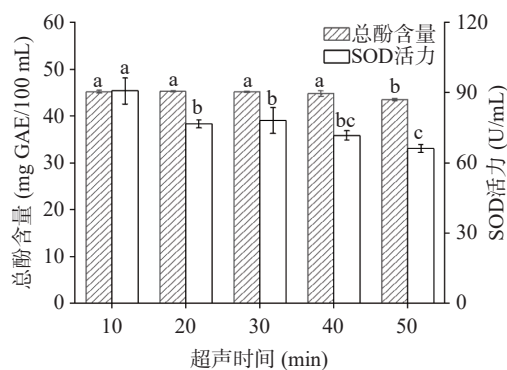


图 1 超声时间对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic time on the content of total phenol and activity of SOD in kiwifruit Jiaosu

注: 不同小写字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$), 图 2~图 5 同。

类的溶出。但是随着超声时间的增加会伴随热产生, 活性成分由于具有热不稳定的特性而损失^[18]。因此, 基于能耗和营养流失的考虑, 确定最佳的超声时间为 10 min。

2.2 超声频率对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

如图 2 所示, 随着超声频率的增加, 酵素饮料的总酚含量呈先上升后下降的趋势, 在超声频率 40 kHz 时最大, 为 47.21 mg GAE/100 mL。而 SOD 活力在超声频率为 59 kHz 时最大, 比 40 kHz 处理增加了 13.10%, 而总酚含量没有显著性差异 ($P > 0.05$)。超声在液体中传播且声压超过空化阈值时, 诱发重要的超声空化现象, 较高的频率会降低空化的累积效应, 反而不利于有效物质溶出^[19]。综上所述, 确定最佳的超声频率为 59 kHz。

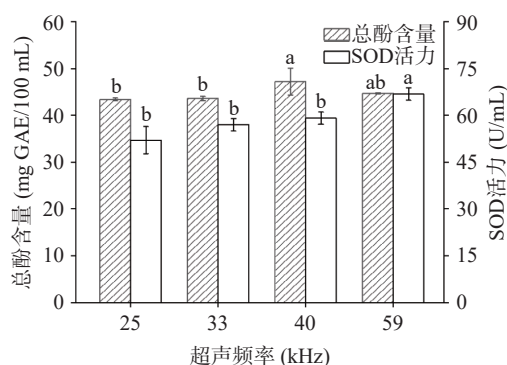


图 2 超声频率对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic frequency on the content of total phenol and activity of SOD in kiwifruit Jiaosu

2.3 超声功率对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

由图 3 可知, 当超声功率为 180~360 W 时, 总酚含量随着超声功率的增加而先增加后下降, 但各功率处理的总酚含量没有显著性差异 ($P > 0.05$)。SOD 活力呈先上升后下降的趋势, 当超声功率在 270 W 时, SOD 活力最大, 为 76.64 U/mL。总酚含量的增加可归因于超声功率越高使溶液中的气泡更快破裂,

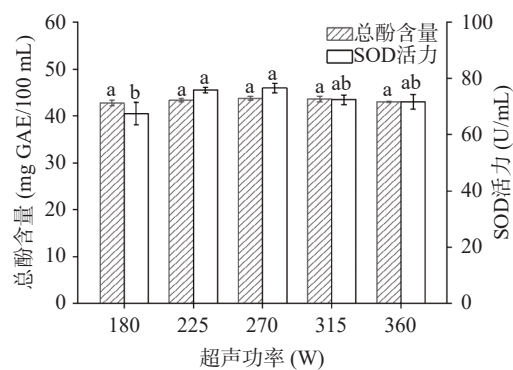


图 3 超声功率对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic power on the content of total phenol and activity of SOD in kiwifruit Jiaosu

更有利于组织细胞壁的破坏^[20]。而当超声功率进一步升高时, 总酚含量下降, 原因是高功率的超声对细胞的破坏程度过大, 破坏或者改变了生物活性化合物的分子结构^[21]。经综合考虑, 确定超声功率的最优条件为 270 W。

2.4 脉冲电场强度对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

脉冲电场强度对总酚含量和 SOD 活力的影响如图 4 所示, 均无显著性影响 ($P > 0.05$)。其中总酚含量在脉冲强度为 3.33 kV/cm 时最大, 为 44.99 mg GAE/100 mL; SOD 活力在 2.00 kV/cm 时最大, 为 60.47 U/mL。随着场强增加, 使猕猴桃细胞内外的电位差因其表面电荷聚集增多而增大, 细胞膜遭到破坏, 利于内容物溶出, 发酵效率增加^[22], 总酚含量增加。但因各个电场强度之间的总酚含量和 SOD 活力无显著性差异, 因此, 出于能耗考虑, 选择脉冲电场强度为 2.00 kV/cm。

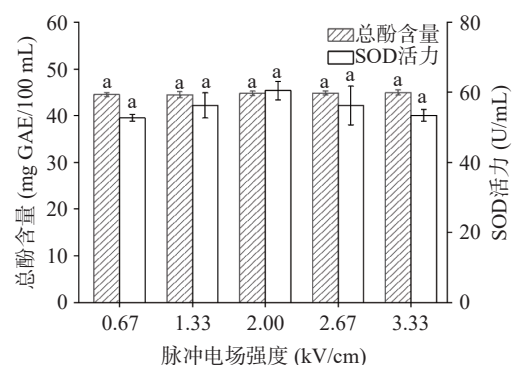


图 4 脉冲电场强度对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

Fig.4 Effect of pulsed electric field intensity on the content of total phenol and activity of SOD in kiwifruit Jiaosu

2.5 脉冲时间对猕猴桃酵素总酚含量和 SOD 活力的影响

由图 5 可知, 脉冲时间增加, 猕猴桃酵素中总酚含量先增加后减小, 脉冲电场处理 270 s 时, 总酚含量最大, 为 44.64 mg GAE/100 mL, 短时间脉冲 (90 s) 与长时间脉冲 (450 s) 均不利于总酚含量积

累。SOD活力呈先下降后上升再下降的趋势,脉冲处理270 s时达到最大,为59.77 U/mL。可能是因为脉冲时间过短时,脉冲所带来的电能还不足以使细胞膜遭到破坏;而随着脉冲时间的增加,细胞膜通透性增加,加快内容物溶出;但脉冲时间过长,导致酚类物质被破坏^[23]。因此确定最佳的脉冲时间为270 s。

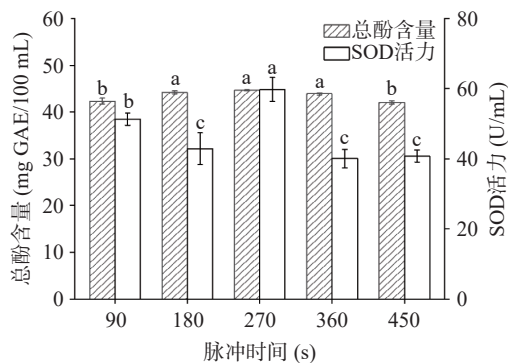


图5 脉冲时间对猕猴桃酵素总酚含量和SOD活力的影响

Fig.5 Effect of pulse time on the content of total phenol and activity of SOD in kiwifruit Jiaosu

2.6 不同预处理对猕猴桃酵素理化品质的影响

pH、可溶性糖、总酸均是植物酵素的特征指标,反映微生物的生长代谢情况。不同预处理对猕猴桃酵素理化品质的影响见表1。发酵初始pH为4.0,经过植物乳杆菌发酵产酸后导致酵素pH下降,但是不同预处理对猕猴桃酵素的pH影响不显著($P>0.05$)。这与Shokri等^[24]的研究一致,超声预处理后发酵的西兰花泥的pH未发生显著变化。四种处理的猕猴桃酵素中的可溶性糖含量存在显著性差异($P<0.05$),CK组可溶性糖含量最高,为104.23 mg/mL,UP组最低,为93.77 mg/mL。不同物理场预处理后的酵素总酸含量升高,CK组和US组的总酸含量无显著性差异($P>0.05$),与PEF和UP组差异显著($P<0.05$)。猕猴桃中的果糖、蔗糖和葡萄糖含量丰富,可以直接作为乳酸菌生长代谢所需碳源^[25]。研究发现,经过超声、脉冲处理后可以促进发酵底物中糖类物质水解,导致乳酸菌发酵后可溶性糖含量降低,而总酸含量升高^[26]。郑志超等^[27]研究发现脉冲电场预处理后玫瑰香葡萄酒的总酸含量升高,与本研究的結果一致。

表1 不同预处理猕猴桃酵素的理化品质

Table 1 Physicochemical properties of different pretreated kiwifruit Jiaosu

组别	CK	US	PEF	UP
pH	3.37±0.01 ^a	3.37±0.01 ^a	3.35±0.01 ^a	3.36±0.01 ^a
可溶性糖(mg/mL)	104.23±0.58 ^a	100.86±0.50 ^b	98.46±1.22 ^c	93.77±0.57 ^d
总酸含量(mg/mL)	10.38±0.04 ^c	10.46±0.04 ^{bc}	10.56±0.06 ^{ab}	10.67±0.06 ^a

注:同一行不同上标小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$),表2、表3同。

2.7 不同预处理对猕猴桃酵素活性成分和抗氧化活性的影响

抗氧化活性是用来评价抗氧化剂清除自由基的

能力。不同预处理猕猴桃酵素的抗氧化活性(DPPH自由基、羟基自由基和ABTS⁺自由基清除能力)如表2所示。DPPH自由基清除率、羟基自由基清除率与ABTS⁺自由基清除率均显著高于CK组($P<0.05$),其中,US组最优,对比CK组分别提高4.39%、1.83%、6.63%。有研究表明酵素的抗氧化活性可能与总酚含量和SOD活力有关,因此对各组的总酚含量和SOD活力进行测定,结果如表2所示。不同预处理组之间总酚含量没有显著性差异($P>0.05$),SOD活力均显著高于CK组($P<0.05$),US、PEF、UP组分别提高31.81%、27.27%、29.53%。多酚含量的变化与前人研究结果不同,可能是因为可溶性共轭酚类化合物或不溶性结合酚类化合物是由植物细胞壁释放的,而在发酵过程中结构复杂的多酚类物质被酶或微生物分解^[28],导致多酚含量差异不显著。另一方面,SOD是生物系统中清除活性氧的主要抗氧化酶之一,微生物可以促进发酵体系中SOD的产生,能有效地防止体内活性氧的损伤^[29],因此,处理组猕猴桃酵素的抗氧化能力增加可归因于SOD活力的增加。这与Li等^[30]的研究类似,他们发现猕猴桃发酵产物的SOD活力与DPPH自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率呈显著正相关。因此,超声和脉冲作为预处理手段可以增加猕猴桃酵素的SOD活性,从而提升抗氧化性能。

表2 不同预处理猕猴桃酵素的活性成分和抗氧化活性
Table 2 Active components and antioxidant activities of different pretreated kiwifruit Jiaosu

组别	CK	US	PEF	UP
总酚含量 (mg GAE/100 mL)	53.37±0.37 ^a	55.52±0.2 ^a	54.26±0.16 ^a	54.53±0.2 ^a
SOD活力 (U/mL)	76.45±2.46 ^b	100.77±4.26 ^a	97.30±6.50 ^a	99.03±2.46 ^a
DPPH自由基清除率(%)	59.63±0.04 ^c	62.25±0.28 ^a	61.52±0.15 ^b	61.75±0.45 ^{ab}
羟基自由基清除率(%)	86.65±0.23 ^c	88.24±0.43 ^a	87.44±0.07 ^b	87.67±0.29 ^{ab}
ABTS ⁺ 自由基清除率(%)	40.86±1.02 ^b	43.57±0.66 ^a	41.63±0.38 ^b	43.51±0.67 ^a

2.8 不同预处理对猕猴桃酵素挥发性物质的影响

利用HS-SPME-GC-MS技术对四组猕猴桃酵素的挥发性风味物质进行分析鉴定。由表3可知,共鉴定出83种挥发性物质,其中醇类化合物20种、醛类化合物26种、酮类化合物11种、酯类化合物2种、酸类化合物4种、烯萜类化合物7种、烷烃类化合物2种和其它类化合物11种。四种处理中CK组56种,US组60种,PEF组58种,UP组55种。

经过不同的预处理后,猕猴桃酵素的挥发性物质发生了一定的变化。在所有组中均检测出1-辛烯-3-醇、正己醇、桉叶油醇、庚醇、辛醇和(-)-4-萜品醇,赋予猕猴桃酵素水果、柑橘的香气。处理组中PEF组的桉叶油醇、正己醇、辛醇相对含量最低,US组及UP组均高于CK组,(-)-4-萜品醇相对含量

表 3 不同预处理猕猴桃醇素的挥发性物质相对含量
Table 3 Volatile substance relative contents of different pretreated kiwifruit Jiaosu

序号	保留时间 (min)	化合物名称	CAS号	相对含量(%)			
				CK	US	PEF	UP
醇类							
1	10.61	环戊醇	96-41-3	—	—	0.14±0.01 ^a	0.14±0.01 ^a
2	16.8	桉叶油醇	470-82-6	2.29±0.38 ^b	2.66±0.03 ^{ab}	2.42±0.27 ^b	3.22±0.16 ^a
3	17.56	3-甲基苄醇	587-3-1	—	—	0.04±0.00	—
4	17.61	戊醇	123-51-3	—	0.1±0.01 ^b	0.13±0.00 ^a	0.14±0.00 ^a
5	19.84	正己醇	111-27-3	4.11±0.33 ^a	4.1±0.15 ^a	3.42±0.00 ^b	4.61±0.24 ^a
6	20.05	反-3-己烯-1-醇	928-97-2	0.59±0.04	—	—	—
7	20.48	3-己烯-1-醇	544-12-7	0.15±0.00	—	—	—
8	20.68	叶醇	928-96-1	0.18±0.01 ^b	0.71±0.01 ^a	0.12±0.01 ^b	0.5±0.25 ^a
9	21.7	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	0.22±0.07 ^d	0.81±0.03 ^b	0.91±0.00 ^a	0.39±0.04 ^c
10	21.85	庚醇	111-70-6	0.42±0.04 ^a	0.39±0.07 ^a	0.41±0.03 ^a	0.47±0.01 ^a
11	22.5	2-乙基己醇	104-76-7	0.07±0.01	—	—	—
12	23.56	芳樟醇	78-70-6	0.08±0.00 ^b	—	0.16±0.02 ^a	0.1±0.00 ^b
13	23.81	辛醇	111-87-5	0.62±0.02 ^b	0.79±0.03 ^a	0.55±0.00 ^b	0.63±0.08 ^b
14	24.94	(-)-4-萜品醇	20126-76-5	0.23±0.01 ^a	0.23±0.00 ^a	0.22±0.03 ^a	0.23±0.03 ^a
15	25.73	2-亚甲基环戊醇	20461-31-8	—	0.06±0.01 ^c	5.57±0.01 ^a	3.93±0.03 ^b
16	25.76	1-壬醇	143-08-8	0.43±0.00 ^b	—	—	0.49±0.01 ^a
17	26.69	α -萜品醇	98-55-5	0.06±0.00 ^a	—	0.04±0.00 ^c	0.05±0.00 ^b
18	29.36	3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇	624-15-7	—	0.09±0.01	—	—
19	29.36	香叶醇	106-24-1	0.11±0.00 ^a	0.09±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a	0.06±0.03 ^b
20	29.84	2-十二烯醛醇	4826-62-4	—	0.07±0.01	—	—
醛类							
21	6.15	丙醛	123-38-6	—	0.05±0.01 ^a	0.04±0.00 ^b	—
22	7.2	丙烯醛	107-02-8	—	0.05±0.00	—	—
23	12.28	巴豆醛	123-73-9	0.47±0.11 ^b	0.71±0.11 ^{ab}	0.89±0.21 ^a	0.70±0.03 ^{ab}
24	13.41	己醛	66-25-1	1.19±0.07 ^b	2.43±0.41 ^a	2.67±0.6 ^a	2.04±0.36 ^{ab}
25	14.73	反-2-戊烯醛	1576-87-0	—	0.57±0.05 ^a	0.42±0.09 ^b	0.55±0.01 ^{ab}
26	16.07	庚醛	111-71-7	0.75±0.09 ^b	1.85±0.56 ^a	1.21±0.24 ^{ab}	1.07±0.03 ^b
27	17.02	反-2-己烯醛	6728-26-3	13.03±1.03 ^{bc}	14.37±0.4 ^{ab}	11.17±0.93 ^d	15.20±0.80 ^a
28	18.53	正辛醛	124-13-0	4.80±0.40 ^a	2.7±0.04 ^b	2.46±0.35 ^b	3.34±1.37 ^{ab}
29	19.37	2-庚烯醛	57266-86-1	3.06±0.56 ^a	0.23±0.02 ^b	2.64±0.00 ^a	—
30	19.338	(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	—	4.02±0.18 ^b	4.37±0.02 ^a	4.25±0.01 ^{ab}
31	20.75	壬醛	124-19-6	1.85±1.09 ^{ab}	3.22±0.19 ^a	2.89±0.42 ^a	1.36±0.46 ^b
32	21	(E,E)-2,4-己二烯醛	142-83-6	0.07±0.00 ^a	—	—	0.12±0.01 ^a
33	21.7	反-2-辛烯醛	2548-87-0	9.65±0.41 ^a	8.07±0.35 ^b	5.98±0.09 ^d	6.91±0.01 ^c
34	22.18	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-3-5	1.82±0.09 ^b	3.22±0.2 ^a	1.66±0.7 ^b	1.81±0.3 ^b
35	22.93	十三醛	10486-19-8	0.06±0.00	—	—	—
36	23.49	苯甲醛	100-52-7	0.17±0.05 ^b	0.3±0.00 ^a	0.22±0.04 ^b	0.18±0.04 ^b
37	23.56	反-2-壬醛	18829-56-6	1.57±0.02 ^{bc}	2.79±0.24 ^a	2.14±0.34 ^b	1.18±0.37 ^c
38	24.6	反-2,6-壬二醛	17587-33-6	—	0.18±0.02 ^a	0.17±0.04 ^a	0.09±0.01 ^b
39	24.68	(E,E)-2,4-辛二烯醛	30361-28-5	0.06±0.01 ^b	0.13±0.01 ^a	0.1±0.02 ^{ab}	0.09±0.03 ^b
40	25.46	β -环柠檬醛	432-25-7	—	—	0.05±0.00	—
41	26.44	cis-柠檬醛	106-26-3	0.16±0.00 ^a	0.12±0.02 ^b	0.08±0.01 ^b	0.08±0.02 ^b
42	26.82	(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	0.12±0.00 ^c	0.15±0.01 ^b	0.12±0.01 ^c	0.2±0.00 ^a
43	27.37	柠檬醛	5392-40-5	0.21±0.01 ^b	0.19±0.00 ^b	0.31±0.01 ^a	0.14±0.04 ^c
44	27.39	反式柠檬醛	141-27-5	0.07±0.00 ^c	0.17±0.00 ^a	0.16±0.00 ^b	—
45	27.99	2,4-癸二烯醛	2363-88-4	—	0.15±0.00	—	—
46	28.93	反-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	0.04±0.00 ^c	0.16±0.00 ^a	0.07±0 ^b	0.03±0.00 ^d
酮类							
47	6.50	丙酮	67-64-1	0.06±0.00 ^a	—	—	0.06±0.00 ^a
48	13.04	环丙基乙基甲酮	6704-19-4	—	—	—	0.13±0.00
49	17.75	3-辛酮	106-68-3	0.04±0.00 ^d	0.05±0.01 ^c	0.06±0 ^b	0.07±0.00 ^a

续表 3

序号	保留时间 (min)	化合物名称	CAS号	相对含量(%)			
				CK	US	PEF	UP
50	18.81	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	2.15±0.47 ^a	2.31±0.14 ^a	2.28±0.39 ^a	2.84±0.39 ^a
51	19.16	2,5-辛二酮	3214-41-3	0.13±0.04	—	—	—
52	19.17	2,3-辛二酮	585-25-1	—	0.12±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	—
53	20.65	2-壬酮	821-55-6	0.09±0.03 ^b	0.16±0.01 ^a	0.14±0.02 ^{ab}	0.13±0.03 ^{ab}
54	24.74	甲基壬基甲酮	112-12-9	0.1±0.03 ^b	0.15±0.01 ^a	0.13±0.02 ^{ab}	0.15±0.00 ^a
55	28.77	2-十三烷酮	593-8-8	0.04±0.00 ^b	0.05±0 ^b	0.07±0.01 ^a	0.05±0.00 ^b
56	29.26	大马士酮	23726-93-4	0.06±0.02 ^b	0.06±0 ^b	0.11±0.03 ^a	0.05±0.00 ^b
57	29.65	香叶基丙酮	3796-70-1	0.68±0.23 ^b	0.92±0.05 ^b	1.51±0.4 ^a	0.38±0.12 ^b
酯类							
58	23.81	甲酸辛酯	112-32-3	0.28±0.02 ^b	0.82±0.01 ^a	0.82±0.01 ^a	—
59	27.72	乙酸癸酯	112-17-4	—	—	0.05±0.00	—
酸类							
60	21.71	乙酸	64-19-7	0.28±0.00 ^b	—	0.72±0.00 ^a	0.33±0.11 ^b
61	29.51	己酸	142-62-1	0.21±0.07 ^a	0.18±0.08 ^a	0.2±0.05 ^a	0.12±0.00 ^a
62	31.64	2-乙基己酸	149-57-5	0.06±0.00	—	—	—
63	35.36	癸酸	334-48-5	—	—	0.08±0.01	—
烯萜类							
64	16.21	双戊烯	138-86-3	0.05±0.01 ^b	0.08±0.04 ^a	—	—
65	16.4	(+)-柠檬烯	5989-27-5	—	—	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a
66	16.51	氧化环己烯	286-20-4	0.32±0.00 ^b	0.4±0.00 ^a	0.31±0.04 ^b	0.4±0.02 ^a
67	17.54	1-乙酰环己烯	932-66-1	—	—	—	0.06±0.00
68	21.4	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	61142-36-7	0.14±0.00 ^a	0.1±0.00 ^a	—	—
69	22.08	(-)-A-萜澄茄油烯	17699-14-8	0.06±0.00 ^a	—	—	0.08±0.00 ^a
70	26.23	环辛二烯	1700-10-3	0.05±0.01 ^c	0.06±0.00 ^b	0.06±0.00 ^b	0.07±0.01 ^a
烷烃类							
71	20.28	异丙基环己烷	696-29-7	—	—	—	0.12±0.00
72	23.81	丙烯基环庚烷	2114-42-3	—	0.08±0.00 ^{ab}	0.05±0.00 ^b	0.09±0.03 ^a
其他类							
73	4.3	N-己基甲胺	35161-70-7	—	0.02±0.01	—	—
74	9.92	2-乙基呋喃	3208-16-0	—	0.12±0.02 ^a	0.12±0.00 ^a	—
75	13.02	2-甲基丙烯酸酐	760-93-0	0.1±0.00	—	—	—
76	17.16	2-正戊基呋喃	3777-69-3	—	0.23±0.09 ^b	0.26±0.00 ^a	—
77	18.11	间异丙基甲苯	535-77-3	—	0.07±0.00 ^a	—	0.06±0.00 ^a
78	18.14	4-异丙基甲苯	99-87-6	—	0.08±0.00 ^a	0.08±0.00 ^a	—
79	19.98	反-3-己烯醇	928-97-2	—	0.60±0.01 ^b	0.45±0.06 ^c	0.73±0.01 ^a
80	20.9	反-2-己烯醇	928-95-0	3.96±0.62 ^a	4.41±0.02 ^a	—	4.54±0.20 ^a
81	22.46	2-巯基-4-苯基噻唑	2103-88-0	—	0.47±0.05	—	—
82	25.55	4-甲基噻唑	693-95-8	0.07±0.01 ^a	0.07±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a
83	37.73	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	0.05±0.00	—	—	—

注：“—”代表未检出。

在所有处理组中差异不显著($P>0.05$)。仅在 CK 组中观察到反式-3-己烯-1-醇的存在,反式-3-己烯-1-醇具有青草味,在高浓度的情况下会影响产品的感官质量。US、PEF 和 UP 组的醇类物质相对含量比 CK 组分别增加 5.76%、49.11%、56.75%,更多的醇类物质可以使发酵制品具有更好的风味^[31]。

在所有检测出的醛类物质中,相对含量较高的有己醛、庚醛、反-2-己烯醛、正辛醛等,其中正辛醛相对含量较 CK 组显著下降,己醛、庚醛相对含量显著升高($P<0.05$)。庚醛、反-2-己烯醛和己醛被认为是猕猴桃的主要香气成分,具有青草香、蘑菇香、黄

瓜香^[32]。研究发现脉冲处理会发生酶促反应或焦耳热效应使反-2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛等特定化合物降解^[33]。如 PEF 组的(E,E)-2,4-庚二烯醛比 CK 和 US 组分别低 8.80%、48.45%。

另外还检测出 2-壬酮、3-辛酮、大马士酮、1-辛烯-3-酮、甲基壬基甲酮、2-十三烷酮、香叶基丙酮,酮类物质较 CK 组相对含量升高。其中 2-壬酮、3-辛酮、大马士酮具有水果、青草、玫瑰香气,与前人猕猴桃酒的研究一致^[34]。所有处理组检测出较少的酯类和酸类物质,但它们与其他挥发性物质相互作用产生了和谐的香气,这对产品的风味具有积极影响,

这与以往研究不同,可能与色谱柱的选择、发酵菌种类以及原料品种有关^[35]。

综上,3 种预处理猕猴桃酵素的挥发性成分种类和相对含量存在差异,超声处理使醇、醛、酮相对含量升高,脉冲会导致某些醛类化合物相对含量下降,其他挥发性物质相对含量升高,总体而言,预处理可以丰富猕猴桃酵素的挥发性成分。

为了进一步了解超声和脉冲与猕猴桃酵素化合物之间的关系,进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)(图 6A),发现 CK、US、PEF、UP 各组分布于不同象限,说明各组之间挥发性物质差异明

显。本次分析中的自变量拟合指数(R^2_X)为 0.913,因变量拟合指数(R^2_Y)为 0.997,模型预测指示(Q^2)为 0.985, R^2 和 Q^2 均大于 0.5 表示模型拟合结果可接受。经过 200 次置换检验, Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0,说明模型不存在过拟合,模型验证有效^[36],因此认为该结果可用于 4 种不同预处理猕猴桃酵素的鉴别分析,如图 6B 所示。其中,共有 48 种挥发性物质对于不同预处理方式的区分起重要作用(VIP>1),其中包括芳樟醇、(+)-柠檬烯、间异丙基甲苯、2-亚甲基环戊醇、环戊醇等,如图 6C 所示。所有的挥发性物质概况表明,超声和脉冲具有发酵预处理的潜力。

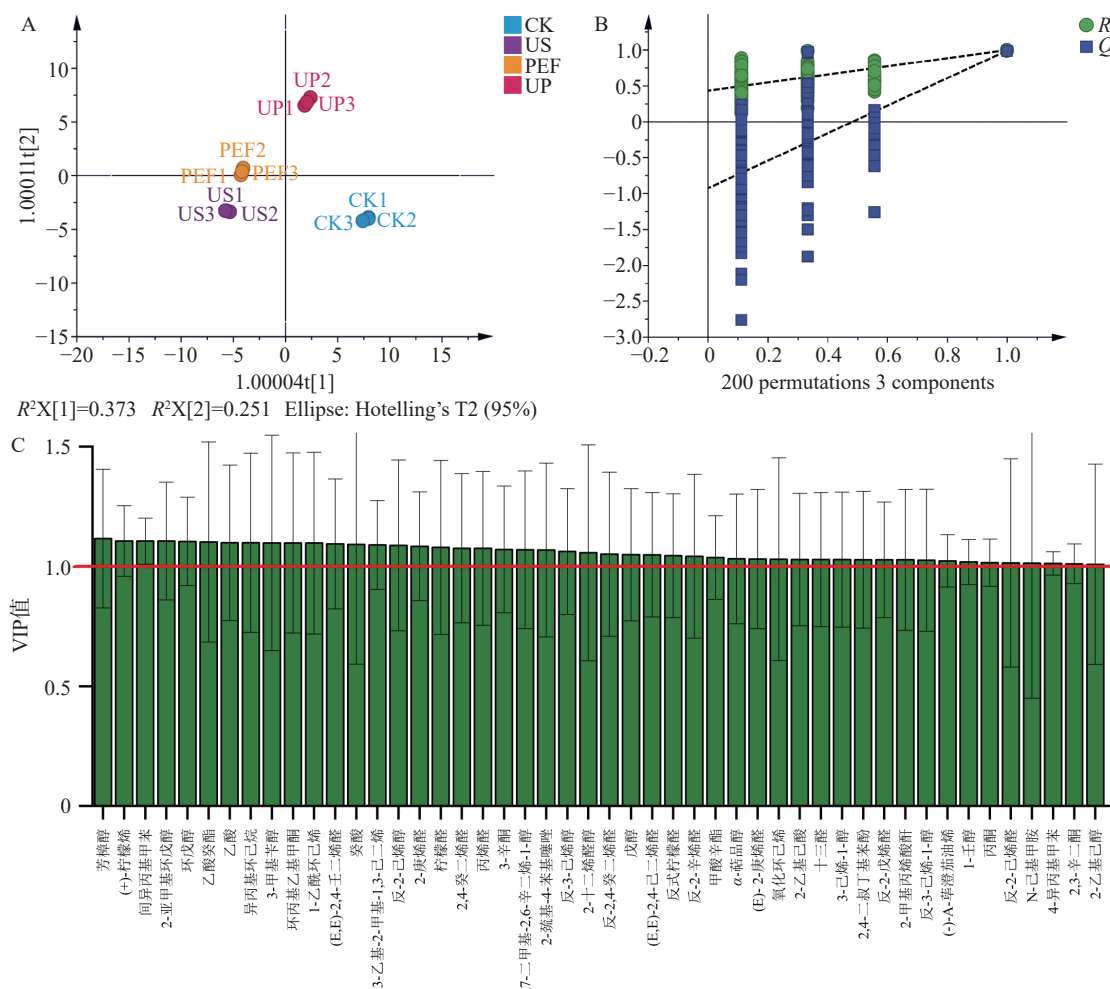


图 6 不同预处理猕猴桃酵素挥发性物质的 OPLS-DA 分析及 VIP 值

Fig.6 OPLS-DA analysis and VIP values of volatile substances of different pretreated kiwifruit Jiaosu

3 结论

本实验研究了超声和脉冲电场及联合预处理对猕猴桃酵素理化品质、抗氧化活性以及挥发性物质含量的影响。结果表明,在超声时间 10 min、频率 59 kHz、功率 270 W,脉冲电场强度 2.0 kV/cm、时间 270 s 及将二者联合处理的条件下得到的猕猴桃酵素可溶性糖含量降低,总酸含量、SOD 活力、DPPH、羟基与 ABTS⁺自由基清除率升高。超声预处理更有利于提高猕猴桃酵素活性成分和抗氧化活

性,其 SOD 活力、DPPH、羟基与 ABTS⁺自由基清除率为 100.77 U/mL、62.25%、88.24%、43.57%,高于对照、脉冲和联合处理组。3 种物理场处理组的醇、醛、酮类相对含量升高,使猕猴桃酵素具有更好的风味,物理场预处理还有利于猕猴桃主要香气成分如庚醛、反-2-己烯醛和己醛的释放。综上所述,超声、脉冲及联合预处理均可以提升猕猴桃酵素的品质,丰富猕猴桃酵素的挥发性物质,研究可为猕猴桃产品的开发、超声和脉冲电场在发酵产品中的应用提供新的思路。

© The Author(s) 2025. 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] 何佳佳, 张顶坤, 余海忠, 等. 混菌发酵对红心猕猴桃果酒品质及其抗氧化性的影响[J]. 中国酿造, 2024, 43(3): 217–222. [HE J J, ZHANG D K, YU H Z, et al. Effects of dual-yeast fermentation on the quality and antioxidant capacity of red kiwifruit wine[J]. China Brewing, 2024, 43(3): 217–222.]
- [2] WANG Z, FENG Y, YANG N, et al. Fermentation of kiwifruit juice from two cultivars by probiotic bacteria: Bioactive phenolics, antioxidant activities and flavor volatiles[J]. Food Chemistry, 2021, 373(Pt B): 131455–131455.
- [3] 兰天, 赵沁雨, 王家琪, 等. 益生菌发酵猕猴桃果汁的贮藏特性及货架期预测[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 301–308. [LAN T, ZHAO Q Y, WANG J Q, et al. Storage characteristics and shelf-life prediction of probiotic fermented kiwifruit juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 301–308.]
- [4] 刘宇欣, 王梦泽, 温福田, 等. 软枣猕猴桃发酵酒酶解工艺优化及指标分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 107–113. [LIU Y X, WANG M Z, WEN F T, et al. Enzymatic hydrolysis process optimization and index analysis of *Actinidia arguta* fermented wine[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 107–113.]
- [5] KEŞA A L, POP C R, MUDURA E, et al. Strategies to improve the potential functionality of fruit-based fermented beverages[J]. Plants, 2021, 10(11): 2263–2263.
- [6] OJHA K S, MASON T J, O'DONNELL C P, et al. Ultrasound technology for food fermentation applications[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 410–417.
- [7] CHEN J, WANG Q, WU Y, et al. Ultrasound-assisted fermentation of ginkgo kernel juice by *Lactiplantibacillus plantarum*: Microbial response and juice composition development[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106587–106587.
- [8] LIU Y, ZHU J, ZHU C. Effect of ultrasonic pretreatment on fermentation performance and quality of fermented hawthorn pulp by lactic acid bacteria[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 134774–138774.
- [9] EL DARRA N, RAJHA H N, DUCASSE M A, et al. Effect of pulsed electric field treatment during cold maceration and alcoholic fermentation on major red wine qualitative and quantitative parameters[J]. Food Chemistry, 2016, 213: 352–360.
- [10] XU L F, TANG Z S, WEN Q H, et al. Effects of pulsed electric fields pretreatment on the quality of jujube wine[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(11): 3109–3117.
- [11] 窦志霞, 何兴芬, 薛宇航, 等. 猕猴桃酵素的乳酸菌和酵母菌发酵特性及成分变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 322–332. [DOU Z X, HE X F, XUE Y H, et al. The fermentation characteristics and composition changes of fermented kiwifruit extract by lactic acid bacteria and yeasts[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 322–332.]
- [12] 陈林, 苏珊, 吴应梅, 等. 红阳猕猴桃酵素发酵工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4): 224–233. [CHEN L, SU S, WU Y M, et al. Optimization of fermentation process for Hongyang kiwifruit Jiaosu and antioxidant activity *in vitro*[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 224–233.]
- [13] 王虎玄, 柯西娜, 王聪, 等. 苹果酵素的制备及其抗氧化功能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(3): 37–46. [WANG H X, KE X N, WANG C, et al. Study on preparation and antioxidant function of apple enzyme[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2023, 41(3): 37–46.]
- [14] RAN J, TANG Y, MAO W, et al. Optimization of the fermentation process and antioxidant activity of mixed lactic acid bacteria for honeysuckle beverage[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1364448–1364448.
- [15] JIANG J, YIN R, XIE Y, et al. Effects of cofermentation of *Saccharomyces cerevisiae* and different lactic acid bacteria on the organic acid content, soluble sugar content, biogenic amines, phenol content, antioxidant activity and aroma of prune wine[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101502–101502.
- [16] YANG W, LIU S, MARSOL-VALL A, et al. Chemical composition, sensory profile and antioxidant capacity of low-alcohol strawberry beverages fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii*[J]. LWT, 2021, 149: 111910–111910.
- [17] 余思洁. 复合蔬菜酵素发酵、后熟过程中功能活性及体外消化特性的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [YU S J. The functional and *in vitro* digestive properties of compound vegetable Jiaosu during fermentation and post-ripening[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [18] OROIAN M, URSACHI F, DRANCA F. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from crude pollen[J]. Antioxidants, 2020, 9(4): 322–322.
- [19] LIAO J, ZHENG N, QU B. An improved ultrasonic-assisted extraction method by optimizing the ultrasonic frequency for enhancing the extraction efficiency of lycopene from tomatoes[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(8): 2288–2298.
- [20] 徐宜彬, 刘运伟, 李阳, 等. 塔拉多糖超声提取及其自由基清除能力研究[J]. 森林工程, 2024, 40(2): 168–175. [XU Y B, LIU Y W, LI Y, et al. Study on ultrasonic extraction of tara polysaccharides and scavenging ability of free radicals[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2): 168–175.]
- [21] JABBARI N, GOLI M, SHAHI S. Optimization of bioactive compound extraction from saffron petals using ultrasound-assisted acidified ethanol solvent: Adding value to food waste[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2024, 13(4): 542–542.
- [22] 李圣桡, 李若萌, 陈博朴, 等. 高压脉冲电场辅助提取蓝靛果花青素工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(8): 3242–3250. [LI S R, LI R M, CHEN B P, et al. Optimization of high voltage pulsed electric field assisted extraction of *Lonicera edulis* anthocyanin[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(8): 3242–3250.]
- [23] JIANG Y, XING M, KANG Q, et al. Pulse electric field assisted process for extraction of Jiuzao glutelin extract and its physicochemical properties and biological activities investigation[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132304–132304.
- [24] SHOKRI S, JEGASOTHY H, HLIANG M M, et al. Thermosonication of broccoli florets prior to fermentation increases bioactive components in fermented broccoli puree[J]. Fermentation, 2022, 8(5): 236–236.
- [25] HUANG T, XIONG T, PENG Z, et al. Genomic analysis revealed adaptive mechanism to plant-related fermentation of *Lactobacillus plantarum* NCU116 and *Lactobacillus* spp[J]. Genomics, 2020, 112(1): 703–711.
- [26] DOS SANTOS ROCHA C, MAGNANI M, JENSEN KLOSOSKI S, et al. High-intensity ultrasound influences the probi-

- otic fermentation of Baru almond beverages and impacts the bioaccessibility of phenolics and fatty acids, sensory properties, and *in vitro* biological activity[J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113372–113372.
- [27] 郑志超, 蔡锦林, 曾新安. 脉冲电场预处理对冷浸渍发酵葡萄酒品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(15): 72–76. [ZHENG Z C, CAI J L, ZENG X A. Effect of pulsed electric fields pretreatment on the quality of cold soaked fermented wine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(15): 72–76.]
- [28] ROSSI M, AMARETTI A, LEONARDI A, et al. Potential impact of probiotic consumption on the bioactivity of dietary phytochemicals[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(40): 9551–9558.
- [29] CHEN L, WU Y M, SUN G J. Variations of antioxidant properties and enzymes activities during the whole fruit fermentation of two kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.)[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2022, 22(1): 860–871.
- [30] LI Y, WANG W, DENG Y, et al. Antioxidant properties and changes *in vitro* digestion of the fermented kiwifruit extract prepared by lactic acid bacteria and yeasts[J]. *Food Chemistry*, 2024, 442: 138416–138416.
- [31] 金子灿. 发芽富硒糙小米及其乳酸菌发酵饮料的风味及抗氧化研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2021. [JIN Z C. Study on flavor and antioxidation of germinated selenium enriched rough millet and its fermented beverage by lactic acid bacteria[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.]
- [32] 张璐, 梁锦, 黄天姿, 等. 单一及混合益生菌发酵猕猴桃果汁的香气成分分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 213–220. [ZHANG L, LIANG J, HUANG T Z, et al. Analysis of aroma components of fermented kiwifruit juice inoculated with single and mixed probiotics[J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 213–220.]
- [33] DELBAERE S M, BERNARTS T, VANGRUNDERBEEK M, et al. The volatile profile of brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) as affected by pulsed electric fields in comparison to other pretreatments, selected to steer (bio)chemical reactions[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2022, 11(18): 2892–2892.
- [34] WEI J, WANG S, ZHANG Y, et al. Characterization and screening of non-*Saccharomyces* yeasts used to produce fragrant cider[J]. *LWT*, 2019, 107: 191–198.
- [35] 刘志刚, 韩琳, 谢晓林, 等. 顶空固相微萃取 GC-MS 法分析 8 种猕猴桃果酒成分[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(21): 121–127. [LIU Z G, HAN L, XIE X L, et al. Aromatic components in eight kiwi fruit wines by headspace solid-phase microextraction and GC-MS[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(21): 121–127.]
- [36] YUN J, CUI C, ZHANG S, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130033–130033.