李晓琪, 赵彤, 刘平香, 等. 冷等离子体处理‘阳光玫瑰’葡萄工艺优化及其对挥发性物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 232−242. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080305
LI Xiaoqi, ZHAO Tong, LIU Pingxiang, et al. Optimization of Cold Plasma Treatment for 'Shine Muscat' Grapes and Its Effect on Volatile Compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 232−242. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080305

· 工艺创新与智能制造 ·

冷等离子体处理‘阳光玫瑰’葡萄工艺优化及其对挥发性物质的影响

李晓琪[1,2], 赵　彤[2], 刘平香[2], 马骧骏[2], 毕京秀[2], 苑学霞[2], 高　瑞[2], 郝海宁[2], 王永霞[1,*], 王玉涛[2,*]
（1.河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056000;
2.山东省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 山东 济南 250100）

摘　要: 为探究冷等离子体（Cold Plasma，CP）处理‘阳光玫瑰’葡萄的最佳工艺参数及其对挥发性物质的影响，本研究以‘阳光玫瑰’葡萄为研究对象，以处理时间和处理电压为因素，抑菌率和色差（Δ*E*）为评价指标，采用响应面法优化 CP 处理条件，并结合全二维气相色谱-飞行时间质谱法，系统评估 CP 处理前后‘阳光玫瑰’葡萄挥发性风味的变化。结果表明，处理时间和处理电压对葡萄的Δ*E* 值和抑菌率均具有显著影响。优化后获得最佳工艺参数为处理时间 252 s、电压 24 kV，此条件下葡萄的抑菌率达 84.8%，Δ*E* 为 1.94。进一步测定葡萄果实的香气成分，共检测到 59 种挥发性物质，其中醇类、醛类和萜烯类化合物含量在 CP 处理后显著增加，挥发性物质总量提升 43.99%。通过正交偏最小二乘判别分析，对 CP 处理前后的葡萄样品进行了有效区分。气味活性值分析显示，正己醇、反式-2-己烯-1-醇、苯乙醇、芳樟醇及正己醛等关键香气物质含量均上升，赋予果实更为浓郁的香气特征。综上，CP 处理可有效保持‘阳光玫瑰’葡萄的香气品质。该研究为 CP 技术在葡萄果实采后风味调控中的应用提供了理论依据与实践参考。

关键词: ‘阳光玫瑰’葡萄, 冷等离子体, 响应面法, 挥发性物质, 正交偏最小二乘判别分析, 气味活性值
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0232−11　　本文网刊:
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080305

Optimization of Cold Plasma Treatment for 'Shine Muscat' Grapes and Its Effect on Volatile Compounds

LI Xiaoqi[1,2], ZHAO Tong[2], LIU Pingxiang[2], MA Xiangjun[2], BI Jingxiu[2], YUAN Xuexia[2], GAO Rui[2], HAO Haining[2], WANG Yongxia[1,*], WANG Yutao[2,*]
（1.College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China;
2.Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China）

Abstract: To investigate the optimal processing parameters of cold plasma (CP) treatment for 'Shine Muscat' grapes and its effects on volatile compounds, 'Shine Muscat' grapes were treated with CP using processing time and voltage as experimental factors, while bacteriostatic rate and color difference (Δ*E*) were used as evaluation indices. Response surface methodology was applied to optimize the CP conditions, and comprehensive volatile profiling was conducted using comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS). The results showed that both processing time and voltage had significant effects on Δ*E* and bacteriostatic rate. The optimized

收稿日期: 2025−08−29
基金项目: 日喀则市绿色产业发展项目。
作者简介: 李晓琪（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工, E-mail: 799874208@qq.com。
*** 通信作者:** 王永霞（1972−）, 女, 硕士, 教授, 研究方向: 功能性食品研究与开发, E-mail: wyxhd2004@126.com。
王玉涛（1980−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全与营养品质评价, E-mail: wangyutaozbs@163.com。

parameters (252 s and 24 kV) yielded a bacteriostatic rate of 84.8% and a Δ*E* value of 1.94. A total of 59 volatile compounds were identified in grape berries, and the contents of alcohols, aldehydes, and terpenes increased significantly after CP treatment, resulting in a 43.99% increase in total volatile abundance. Orthogonal partial least-squares discriminant analysis effectively distinguished grape samples before and after CP treatment. Odor activity value analysis further revealed increases in key aroma compounds, including 1-hexanol, (E)-2-hexen-1-ol, phenethyl alcohol, linalool, and hexanal, which contributed to a more pronounced aromatic profile. Overall, CP treatment effectively preserved and enhanced the aroma quality of 'Shine Muscat' grapes. This study provides theoretical support and practical guidance for the application of CP technology in postharvest flavor modulation of table grapes.

Key words: 'Shine Muscat' grapes; cold plasma (CP); response surface methodology; volatile compounds; orthogonal partial least-squares discriminant analysis (OPLS-DA); odor activity value (OAV)

葡萄（*Vitis vinifera* L.）作为全球广泛栽培的水果之一[1]，因丰富的营养价值及独特的风味特征而备受关注。其中，‘阳光玫瑰’葡萄（'Shine Muscat' grapes）是日本农业与食品研究机构以‘安芸津 21 号’（'Steuben'×'Muscat of Alexandria'）为母本，‘白南’（'Katta Kurgan'×'Neo Muscat'）为父本杂交选育出的葡萄品种[2]。该品种引入我国后，凭借浓郁的玫瑰花香、清脆的果肉和优异的外观品质[3−4]迅速赢得消费者青睐，已成为我国乃至东亚地区高端鲜食葡萄的代表品种之一[5]。

‘阳光玫瑰’葡萄的香气是决定其风味品质的关键因素之一，其形成主要依赖于葡萄果实中多种挥发性化合物（Volatile Organic Compounds, VOC）的协同作用，包括醇类、醛类、酯类、萜烯类、酮类及部分含氮化合物等[6]。但‘阳光玫瑰’葡萄因为高糖度、果皮薄、果实紧密和采后生理活动旺盛[7−9]等特性，易受到微生物侵染，导致变质，从而影响风味。冷等离子体（Cold Plasma, CP）作为一种新兴非热物理处理技术，通过对气体施加高压电场产生富含活性粒子的等离子体（如臭氧、羟基自由基、一氧化氮等）[10]，可以在保持水果的原有风味品质的前提下，实现对微生物的破坏与酶活性的调控[11]。研究表明，适度 CP 处理能延缓哈密瓜成熟进程并保持风味平衡[12]；另有研究指出，CP 可通过调控脂质氧化、氨基酸降解及萜烯生物合成等途径，间接影响芳香化合物的生成[13−15]。此外，LI 等[16]通过 CP 处理诱导酚类积累并增强鲜切火龙果的抗氧化活性，激活植物次生代谢途径，促进芳香化合物的合成与释放。

然而，当前针对 CP 处理对‘阳光玫瑰’葡萄挥发性风味物质代谢网络的影响尚未明确，且缺乏基于工艺优化处理的参数探讨。因此，本研究采用响应面法优化 CP 处理‘阳光玫瑰’葡萄的工艺参数，并结合全二维气相色谱-飞行时间质谱法（Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography-Time of Flight Mass Spectrometry, GC×GC-TOFMS）、正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal Projections to Latent Structures Discriminant Analysis, OPLS-DA）与气味活性值（Odor Activity Value, OAV）评价，系统探讨 CP 处理对‘阳光玫瑰’葡萄 VOC 的调控效应，明确其对葡萄关键香气化合物的影响机制，为 CP 技术在葡萄果实采后风味调控中的应用提供理论依据与实践参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

‘阳光玫瑰’葡萄　于 2024 年 12 月采自云南宾川产区；2-壬酮　天津阿尔塔科技有限公司；氯化钠　国药集团化学试剂有限公司；平板计数琼脂培养基　青岛高科技工业园海博生物技术有限公司；所有试剂均为分析纯。

冷等离子体设备　中国农业科学院（北京）自主研制，装置示意图如图 1 所示。本研究采用的等离子体系统由常规电压、等离子体发生器和反应器组成。反应器包含正负两个电极，示波器用来控制电压和频率。工作气体是环境空气，电极间距固定为 20 mm，输出频率固定为 10 kHz；SQP 电子天平　赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；LDZX-75L 立式高压蒸汽灭菌器　上海申安医疗器械厂；LS173 色差仪　深圳市林上科技有限公司；SW-CJ-1FD 型单人超净工作台　苏州安泰空气技术有限公司；PEGASUS4D GC×GC-TOFMS 全二维气相色谱-飞行时间质谱联用仪　美国 Leco 公司；顶空固相微萃取（Headspace Solid-Phase Microextraction, HS-SPME）装置　青岛贞正分析仪器有限公司；50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头　美国 Supelco 公司。

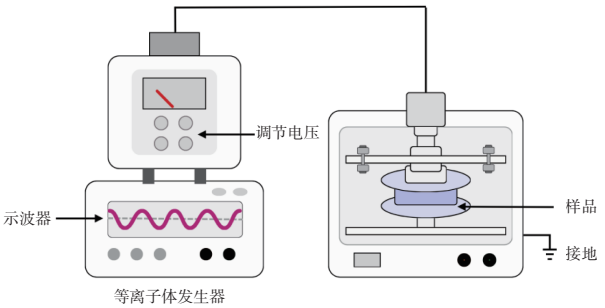


图 1　CP 装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of the CP experimental setup

1.2　实验方法

1.2.1　冷等离子体处理葡萄及单因素实验　以‘阳光玫瑰’葡萄为研究对象，在 15~35 kV 处理电压及 120~360 s 处理时间的范围内进行了预实验，结果表

明，在该参数区间内，葡萄的可溶性固形物含量为16.3%~17.2%，可滴定酸含量为 1.65%~1.78%，糖酸比为 9.25~9.89，CP 处理组与对照组均无显著差异（P>0.05），且未观察到明显外观损伤，表明适宜的 CP 处理不会引起‘阳光玫瑰’葡萄基本理化指标与外观品质的劣变，证实了 CP 技术在‘阳光玫瑰’葡萄采后处理中具有良好的应用潜力。

基于预实验结果，本研究选取果形均匀、无机械损伤及病变斑块且成熟度一致的葡萄样品，进一步开展优化试验。固定处理时间为 240 s，调节处理电压（15、20、25、30、35 kV）；固定处理电压为 25 kV，调节处理时间（120、180、240、300、360 s），进行 CP 处理，测定色差和菌落总数，并计算其抑菌率。

1.2.2 响应面优化试验 在单因素实验的基础上，选取 CP 处理时间和处理电压两因素，以抑菌率和色差 ΔE 为评价指标，进行中心复合设计，试验因素和水平见表 1。

表 1 响应面中心组合试验的因素和水平

Table 1 Factors and levels of response surface center combination test

水平	处理时间(s)	处理电压(kV)
-1	180	20
0	240	25
1	300	30

1.2.3 微生物指标的测定 菌落总数的测定参照 GB 4789.2-2016，称取 25 g‘阳光玫瑰’葡萄样品表皮置于盛有 225 mL 无菌生理盐水的均质杯内，8000 r/min 均质 2 min，制成 1∶10 的样品匀液。随后依次制备 10 倍系列样品稀释液。将 20 mL 冷却至 46~50 ℃ 的平板计数琼脂培养基倾注培养皿，待琼脂凝固后将平板翻转，36±1 ℃ 培养 48±2 h。抑菌率按照式（1）计算。

$$抑菌率(\%)=\frac{处理前菌落总数-处理后菌落总数}{处理前菌落总数}\times 100 \quad 式（1）$$

1.2.4 色泽的测定 采用 LS173 色差仪测量‘阳光玫瑰’葡萄的 L^*、a^*、b^*值，选取整粒葡萄果实中心赤道面上两个相互对称的点为测定点，将仪器测量口径垂直紧贴在葡萄表面，保持仪器稳定至测量完成，并记录测量数据。L^*值表示样品的明度，a^*值表示样品红绿值，b^*值表示样品黄蓝值，色差ΔE 按式（2）计算。

$$\Delta E=\sqrt{(L_0^*-L^*)^2+(a_0^*-a^*)^2+(b_0^*-b^*)^2} \quad 式（2）$$

式中：L_0^*表示新鲜未处理葡萄的明度；L^*表示 CP 处理葡萄的明度；a_0^*表示新鲜未处理葡萄的红绿值，a^*表示 CP 处理葡萄的红绿值；b_0^*表示新鲜未处理葡萄的黄蓝值，b^*表示 CP 处理葡萄的黄蓝值。

1.2.5 挥发性物质的测定

1.2.5.1 前处理方法 参照王颖[17]的方法并进行修改，将‘阳光玫瑰’葡萄清洗干净，随机选取不同侧面的葡萄样品，带皮切成 0.5 cm 的厚片，随后切成 0.5 cm×0.5 cm 的小块，混合均匀。随后，取 3.0 g 样品放入 15 mL 顶空瓶中，加入 50 μL 的 2-壬酮内标溶液（200 mg/kg）。盖紧盖子静置 10 min 后于固相微萃取装置上，在 50 ℃ 下吸附 40 min 后进行 GC×GC-TOFMS 分析，每个样品进行 3 次分析。

1.2.5.2 色谱条件 色谱柱：一维色谱柱为 Rxi-5MS（30 m×250 μm×0.25 μm），二维色谱柱为 Rxi-17Sil MS（2 m×250 μm×0.25 μm）；升温程序：一维柱温箱初温 40 ℃ 保持 2 min，以 5 ℃/min 升至 200 ℃，再以 20 ℃/min 升至 280 ℃，并恒温 2 min；二维柱箱温度始终高于一维柱箱 5 ℃，调制补偿温度设为 15 ℃；载气（He），流速 1.4 mL/min，压力 2.4 kPa，分流比 5∶1。

1.2.5.3 质谱条件 电子轰击离子源；电子能量 70 eV；传输线温度 280 ℃；离子源温度 250 ℃；采集电压 1550 V；扫描速率 100 spectra/s；扫描范围 m/z 35~550；调制周期 2 s。

1.2.5.4 定性分析 采用 NIST2017 对每个色谱峰对应的质谱片段进行检索，选择相似度>700 的挥发性香气化合物进一步分析。

1.2.5.5 定量分析 采用内标法定量‘阳光玫瑰’葡萄中的挥发性风味物质含量，通过与内标物的峰面积比较，得到香气成分的含量，即：

香气成分含量（μg/g）=香气成分物质峰面积×内标物含量/内标物峰面积。

1.2.6 气味活性值（OAV）测定 通过气味活性值（OAV）来判断不同挥发性化合物对‘阳光玫瑰’葡萄的贡献。OAV 是挥发性风味物质的质量浓度与其阈值的比值，按式（3）计算：

$$OAV_i=\frac{C_i}{OT_i} \quad 式（3）$$

式中：OAV_i 为风味物质的气味活性值；C_i 为挥发性风味物质的质量浓度，μg/g；OT_i 为各挥发性风味化合物在水中的气味阈值，mg/L。

1.3 数据处理

试验数据通过 Excel 2010 进行整理与统计，响应面试验设计与分析应用 Design-Expert 13.0 软件进行，显著性差异检验采用 SPSS 20.0 软件，图表绘制使用 Graphpad Prism 10.1.2，所有试验均重复三次。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 不同 CP 处理时间对‘阳光玫瑰’葡萄色差和抑菌率的影响 如图 2a 所示，固定处理电压 25 kV，伴随 CP 处理时间的增加，ΔE 呈现不断上升的趋势。处理时间为 120 s 时，ΔE 最小，为 4.23；当处理时间为

360 s 时，ΔE 最大，为 8.19。当处理时间为 180、240 和 300 s 时，三组‘阳光玫瑰’葡萄的ΔE 无显著差异（P>0.05）。但处理时间过长，在 360 s 时，表皮颜色肉眼可见的褐变，可能导致细胞膜完整性受损，使多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）等酶类与底物（酚类化合物）接触[18]，发生酶促褐变反应。此外，处理过程中等离子体的化学作用会削弱表皮的蜡质保护层[19]，使氧气更易渗入细胞组织内部，加剧 PPO 反应。

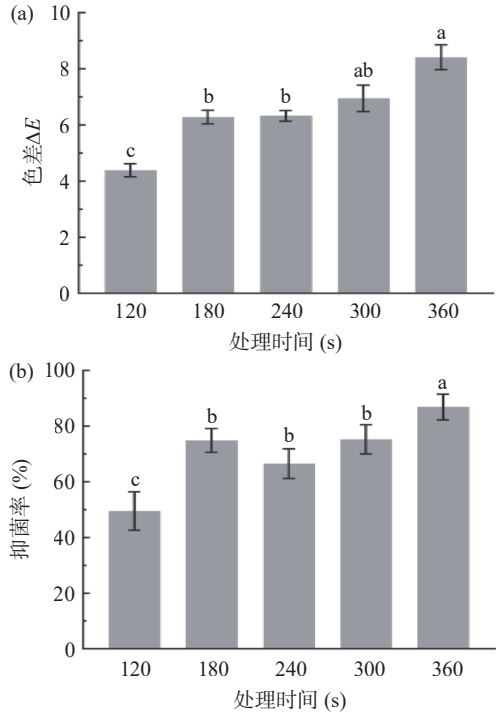


图 2　不同的 CP 处理时间对葡萄色差和抑菌率的影响

Fig.2　Effects of different CP processing times on grape color difference and antibacterial efficacy

注：a 为处理时间对色差的影响；b 为处理时间对抑菌率的影响；不同小写字母表示差异显著（P<0.05），图 3 同。

处理时间是影响微生物灭活的主要因素之一。CP 处理时长与鲜食葡萄抑菌率呈显著正相关（P<0.05），抑菌效果随处理时间延长而增强（图 2b）。处理时间从 120 s 增加至 180 s 时，葡萄表面的菌落总数显著降低（P<0.05），抑菌率达到 74.91%；当处理时间为 180~300 s 时，抑菌率无显著性差异（P>0.05）。当处理时间增加至 360 s 时抑菌率达到最高，为 86.89%，相比之下，崔偲旻等[20] 采用中药提取物处理鲜食葡萄，需浸泡 1 h 才能达到约 85% 的抑菌率。宁密密[21] 采用 SO_2 保鲜剂处理‘阳光玫瑰’葡萄可达到约 64% 的抑菌率。但处理时间为 360 s 时ΔE 较大，为 8.41。此时葡萄表皮损伤严重，造成肉眼可见的褐变。综合上述研究结果，最终选择处理时间为 180、240、300 s 进一步进行响应面试验。

2.1.2　不同 CP 处理电压对‘阳光玫瑰’葡萄色差和抑菌率的影响　如图 3a 所示，固定处理时间 240 s，伴随 CP 处理电压的增加，ΔE 呈现不断上升的趋势。研究表明，高电压条件下，冷等离子体会产生更多的高能活性粒子[22]，这些粒子对葡萄表皮中的天然色素（如类黄酮、花青素、叶绿素等）具有较强的氧化作用[23]，进而影响表皮颜色的变化。

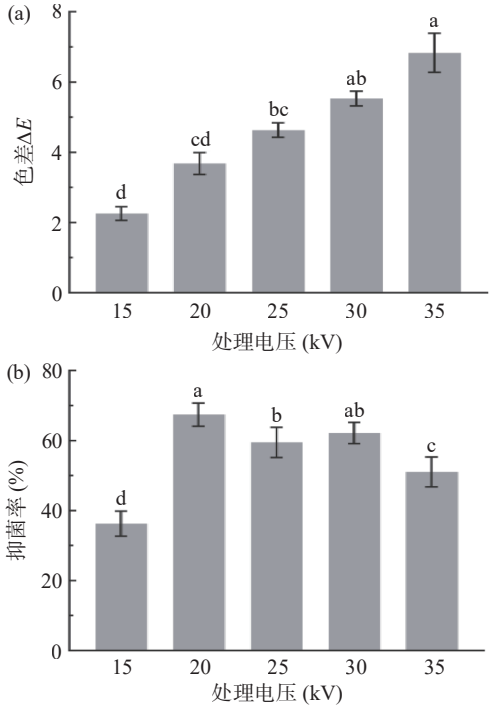


图 3　不同的 CP 处理电压对葡萄色差和抑菌率的影响

Fig.3　Effects of different CP processing voltages on grape color difference and antibacterial efficacy

注：a 为处理电压对色差的影响；b 为处理电压对抑菌率的影响。

如图 3b 所示，CP 处理‘阳光玫瑰’葡萄的抑菌率随着处理电压的增加表现出先上升后下降的趋势。处理电压从 15 kV 增加至 20 kV 时，葡萄表面的菌落总数显著降低（P<0.05），抑菌率达到最高，为 64.58%；当处理电压为 25 kV 时，抑菌率发生下降。通过施加较高的电压，含氧活性物质激发的速度加快，自由电子能量升高，产生的自由基和活性粒子增多，对菌体细胞的损伤速度加快，可实现更强的灭菌效果[24]。但当处理电压上升到某一时间节点时，处理电压与抑菌率可能会失去线性关系[25]，所以在处理电压达到 35 kV 时，抑菌率反而呈下降趋势。该现象可能由于电压升高到一定阈值后，等离子体内部会产生过高浓度的活性物种，自由基之间易发生二次反应[26]，反而降低了自由基浓度。综合考虑处理电压对色差和抑菌率的影响，选择 20、25、30 kV 进一步进行响应面试验。

2.2　响应面试验结果与分析

2.2.1　响应面试验结果　在单因素实验的基础上以ΔE 和抑菌率为指标，采用 Design-Expert 13.0 软件进行试验设计，确定冷等离子体处理的最佳条件，试验设计及结果见表 2。

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Response surface test design and results

编号	A处理时间(s)	B处理电压(kV)	Y_1ΔE	Y_2抑菌率(%)
1	240	25	1.57±0.21	90.68±1.66
2	300	30	3.45±0.17	91.84±0.83
3	180	30	2.15±0.32	70.86±2.35
4	240	25	1.83±0.23	89.51±1.84
5	240	25	1.85±0.05	94.17±1.92
6	240	25	1.91±0.09	87.18±0.74
7	240	30	2.42±0.13	86.01±1.63
8	240	25	1.95±0.19	91.84±0.49
9	180	20	1.66±0.11	49.88±0.88
10	180	25	1.90±0.23	61.54±2.47
11	300	20	2.13±0.33	82.52±3.01
12	300	25	2.30±0.16	93.01±0.79
13	240	20	1.72±0.25	79.02±1.45

2.2.2 回归模型的建立与方差分析 对表 2 试验数据进行回归分析，得到ΔE(Y_1)和抑菌率(Y_2)的回归方程如下。

$$Y_1=1.82+0.36A+0.42B+0.21AB+0.28A^2+0.25B^2$$

$$Y_2=90.03+14.18A+6.21B-2.91AB+11.15A^2-5.91B^2$$

ΔE 回归方程的方差分析结果见表 3。模型检验显示 $P<0.001$，极显著；而失拟项 $P>0.05$，说明无显著失拟；该方程的拟合优度较高($R^2=0.9355$，$R^2_{Adj}=0.8894$，$R^2_{pred}=0.6185$)，可用于冷等离子体处理'阳光玫瑰'葡萄杀菌工艺的分析与预测。因素分析表明，处理时间(A)和处理电压(B)均对ΔE 产生极显著影响($P<0.001$)，且电压(B)的作用强于时间(A)。

表 3 ΔE 的回归方程的方差分析

Table 3 Analysis of variance for the regression equation of ΔE

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值	显著性
模型	2.62	5	0.5248	20.31	0.0005	**
A时间	0.7848	1	0.7848	30.37	0.0009	**
B电压	1.05	1	1.05	40.63	0.0004	**
AB	0.1722	1	0.1722	6.66	0.0364	*
A^2	0.2131	1	0.2131	8.25	0.0239	*
B^2	0.1695	1	0.1695	6.56	0.0375	*
残差	0.1809	7	0.0258			
失拟项	0.0924	3	0.0308	1.39	0.3669	
净误差	0.0885	4	0.0221			
总离差	2.80	12				

注：*表示差异显著($P<0.05$)，**表示差异极显著($P<0.01$)，表4~表6同。

抑菌率回归方程的方差分析结果见表 4。模型检验显示 $P<0.001$，极显著；而失拟项 $P>0.05$，说明无显著失拟；该方程的拟合优度较高($R^2=0.9678$，$R^2_{Adj}=0.9448$，$R^2_{pred}=0.8012$)，可用于冷等离子体处理'阳光玫瑰'葡萄杀菌工艺的分析与预测。因素分析表明，处理时间(A)和处理电压(B)均对抑菌率产生极显著影响($P<0.01$)，且时间(A)的作用强于电压(B)。

表 4 抑菌率的回归方程的方差分析

Table 4 Analysis of variance for the regression equation of bactericidal rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值	显著性
模型	2149.30	5	429.86	42.05	<0.0001	**
A时间	1206.72	1	1206.72	118.04	<0.0001	**
B电压	231.76	1	231.76	22.67	0.0021	**
AB	33.99	1	33.99	3.32	0.1110	
A^2	343.42	1	343.42	33.59	0.0007	**
B^2	96.50	1	96.50	9.44	0.0180	*
残差	71.56	7	10.22			
失拟项	44.42	3	14.81	2.18	0.2328	
净误差	27.14	4	6.79			
总离差	2220.87	12				

2.2.3 响应面各因子间交互作用分析 图 4a 和图 4b 分别为响应值(ΔE 和抑菌率)和试验因子(处理时间和处理电压)构成的三维响应曲面图展示了其交互作用对ΔE 和抑菌率的影响。由图 4a 可知，当电压保持恒定时，随着处理时间延长，ΔE 呈现平稳上升趋势；而固定处理时间不变，处理电压升高导致ΔE 呈现逐渐上升的变化趋势。比较两因素的曲面斜率可以看出，电压的影响幅度大于时间，说明电压是影响ΔE 的主要因素，这一结果与 Carbonell 等[27] 的研究结论相符。随着电压的升高和时间的延长，产生的含

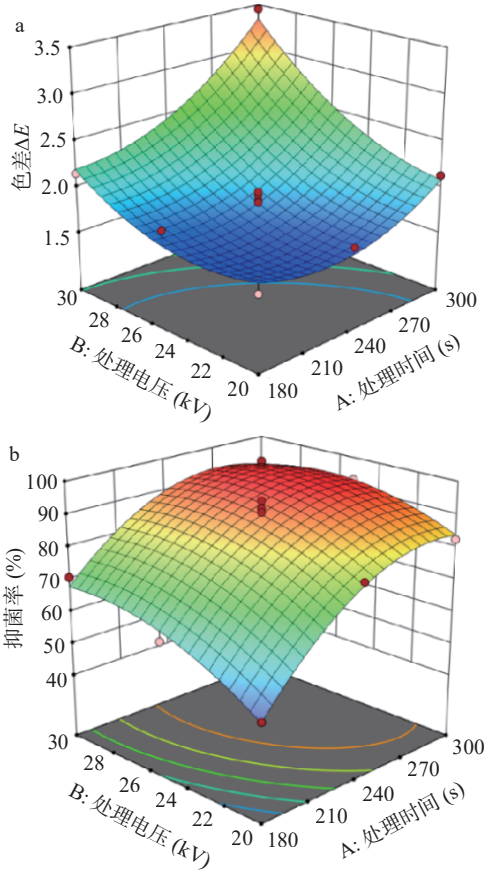


图 4 各因素交互作用对色差和抑菌率影响的响应面图

Fig.4 Response surface plots of factor interactions affecting color difference and antibacterial rate

氧活性物质数量增多，引发葡萄表面发生酶促褐变，使ΔE增大。由图 4b 可知，冷等离子体的处理时间不变，随着处理电压的增加，抑菌率呈现上升趋势；处理电压不变，随着处理时间的延长，抑菌率也不断升高。处理时间的曲面斜率比电压的曲面斜率大，说明处理时间对抑菌率的影响大于处理电压对抑菌率的影响，这与乔维维等[28]的研究结果一致。

2.2.4　响应面优化及验证试验　通过 Design-Expert 13.0 对模型优化，得到冷等离子体处理工艺的最佳工艺条件为：处理时间 251.835 s、处理电压 23.799 kV，预测此时的色差改变量为 1.808，抑菌率为 88.702%。为了验证该模型的准确性，结合实际操作情况，将处理工艺修改为处理时间 252 s、处理电压 24 kV。在此条件下进行 3 组验证试验，所得ΔE为 1.94，抑菌率为 84.8%，与预测值接近（P>0.05），表明该模型优化得到的工艺条件可靠，具有可行性。

2.3　‘阳光玫瑰’葡萄挥发性物质的测定

2.3.1　CP 处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实挥发性物质的影响　为研究 CP 处理前后‘阳光玫瑰’葡萄果实的香气变化，利用 HS-SPME 与 GC×GC-TOFMS 联用的方法分别对葡萄样品的香气成分及相对含量进行分析鉴定。由表 5 可知，共检测到 59 种香气成分，其中醇类化合物 14 种、醛类化合物 19 种、酮类化合物 6 种、酯类化合物 3 种、酸类化合物 1 种、萜烯类化合物 4 种、烃类化合物 12 种。与 CK 组相比，CP 处理组葡萄果实中挥发性物质的总量提升了 43.99%。其中，醇类、醛类和酯类物质的含量在 CP 处理后均显著增加（P<0.05）（图 5）。

表 5　不同处理下‘阳光玫瑰’葡萄的香气成分

Table 5　Aroma composition of 'Shine Muscat' grapes under different treatments

序号	CAS	保留时间(s)		香气成分	相对含量(μg/g)		VIP值
		1D(s)	2D(s)		CP处理	CK	
1	42890-76-6	1764	1.65	(S)-(-)-1,2,4-丁三醇	0.15±0.02	0.16±0.03	0.85
2	111-27-3	532	0.73	正己醇	1.85±0.31*	0.87±0.16	1.23
3	104-76-7	850	1.20	2-乙基己醇	0.33±0.02	0.21±0.01	1.26
4	143-08-8	1096	0.56	1-壬醇	0.16±0.02	0.15±0.02	1.24
5	111-87-5	750	1.53	正辛醇	0.12±0.01	0.13±0.01	1.14
6	3191-86-4	742	0.45	3-辛醇	0.05±0.01	0.03±0	1.18
7	106-25-2	1254	1.42	橙花醇	0.40±0.03	0.28±0.01	1.25
8	928-95-0	524	1.84	反式-2-己烯-1-醇	2.44±0.72*	1.45±0.02	1.01
9	1576-95-0	370	0.63	顺-2-戊烯-1-醇	0.13±0.02	0.13±0.02	1.26
10	556-82-1	1270	0.91	3-甲基-2-丁烯-1-醇	0.12±0.01	0.11±0.01	1.19
11	162744-59-4	1806	0.66	4-溴-2,6-二氟苯甲醇	0.04±0.01	0.02±0.01	1.08
12	106-22-9	1194	1.65	香茅醇	0.05±0.03	ND	1.24
13	60-12-8	148	0.72	苯乙醇	7.24±0.61*	2.10±0.22	1.26
14	78-70-6	970	0.59	芳樟醇	5.61±0.36*	3.23±0.17	1.28
15	142-83-6	612	1.90	(E,E)-2,4-己二烯醛	1.37±0.27*	0.87±0.15	1.03
16	1194-98-5	990	1.11	2,5-二羟基苯甲醛	0.10±0.04	0.06±0.02	0.89
17	557-48-2	1066	0.84	反,顺-2,6-壬二烯醛	0.03±0.01	0.03±0.01	0.89
18	18829-55-5	700	0.68	反-2-庚醛	0.05±0.01	0.02±0.01	1.13
19	505-57-7	954	0.96	2-己烯醛	0.01±0	ND	1.08
20	6728-26-3	526	1.80	反式-2-己烯醛	33.14±3.13*	24.55±2.76	1.16
21	1576-87-0	346	0.81	反式-2-戊烯醛	0.22±0.03	0.17±0.03	1.18
22	4440-65-7	422	1.18	3-己烯醛	0.42±0.01	0.32±0.17	0.55
23	2492-43-5	706	1.25	反-2-己烯-4-氧代-醛	0.20±0.02	0.17±0.01	1.06
24	100-52-7	712	1.18	苯甲醛	0.02±0.01	0.01±0.01	0.85
25	122-78-1	866	1.03	2-苯基乙醛	0.40±0.06	0.34±0.04	0.88
26	96-17-3	238	0.28	2-甲基丁醛	0.07±0.01	0.06±0.03	0.52
27	590-86-3	238	0.92	异戊醛	0.14±0.04	0.13±0.01	0.58
28	112-31-2	1172	1.30	癸醛	0.24±0.03*	0.17±0.05	0.95
29	111-71-7	594	1.69	正庚醛	0.04±0.01	0.02±0.01	1.26
30	66-25-1	424	1.15	正己醛	13.94±2.15*	12.54±1.72	1.22
31	124-19-6	990	1.30	正壬醛	0.30±0.01	0.18±0.02	1.26
32	124-13-0	786	1.56	正辛醛	0.12±0.11*	0.03±0.01	0.81
33	18829-56-6	1078	0.72	反-2-壬醛	0.03±0.01	0.03±0.01	0.88
34	33467-73-1	510	1.53	顺式-3-己烯醇甲酸酯	0.07±0.04	0.06±0.03	0.39
35	141-78-6	208	0.83	乙酸乙酯	0.40±0.07*	0.19±0.01	1.17

续表 5

序号	CAS	保留时间(s)		香气成分	相对含量(μg/g)		VIP值
		1D(s)	2D(s)		CP处理	CK	
36	111-11-5	1026	1.26	辛酸甲酯	0.05±0.01	0.03±0.01	0.79
37	112-12-9	2076	1.28	2-十一酮	0.01±0.00	ND	0.81
38	18641-70-8	1314	1.23	2,4-二甲基-3-己酮	0.02±0.01	0.01±0.00	0.87
39	20426-12-4	2148	0.61	4-羟基查耳酮	0.03±0.01	0.03±0.01	0.61
40	110-93-0	756	1.66	甲基庚烯酮	0.34±0.19*	0.22±0.01	0.62
41	98-86-2	914	0.31	苯乙酮	0.03±0.01	0.04±0.02	0.22
42	3796-70-1	1554	1.79	香叶基丙酮	0.19±0.11	0.26±0.02	0.58
43	53137-27-2	2110	0.06	2,4-二甲基-1,3-噻唑-5-羧酸	0.04±0.01	0.03±0.01	0.53
44	123-35-3	762	1.58	月桂烯	0.04±0.01	0.05±0.01	0.64
45	25377-72-4	152	1.78	戊烯	0.03±0.02	ND	0.98
46	5989-54-8	854	1.13	(S)-(-)-柠檬烯	0.01±0.00	0.01±0.00	0.84
47	18794-84-8	1638	1.58	(E)-β-金合欢烯	0.11±0.01	0.11±0.01	0.89
48	4282-42-2	1896	1.51	1-碘壬烷	0.03±0.00	0.02±0.00	1.26
49	294-62-2	1584	1.58	环十二烷	0.01±0.00	0.01±0.00	0.24
50	62108-21-8	1328	1.02	6-乙基-2-甲基癸烷	0.04±0.02	0.01±0.01	1.09
51	629-78-7	1620	1.28	正十七烷	0.14±0.02*	0.08±0.02	1.16
52	544-76-3	1776	1.05	正十六烷	0.22±0.01*	0.09±0.01	1.27
53	75-09-2	234	0.96	二氯甲烷	0.01±0.00	0.01±0.00	0.17
54	111-84-2	794	0.91	正壬烷	0.02±0.00	0.02±0.00	1.23
55	1072-16-8	1426	0.24	2,7-二甲基辛烷	0.03±0.01	0.03±0.01	1.28
56	629-50-5	900	1.12	正十三烷	0.02±0.01	0.02±0.01	1.28
57	62108-27-4	1692	1.48	2,4,6-三甲基癸烷	0.01±0.00	0.01±0.00	0.79
58	1002-17-1	1566	1.25	2,9-二甲基-癸烷	0.01±0.02	0.01±0.01	1.15
59	17453-93-9	1552	0.25	5-甲基-十二烷	0.01±0.01	0.01±0.00	1.15

注: 1D、2D分别表示CP组在一维和二维色谱柱上的保留时间; “ND”表示未检出; “*”表示与CK组比, 差异显著, $P<0.05$; 表6同。

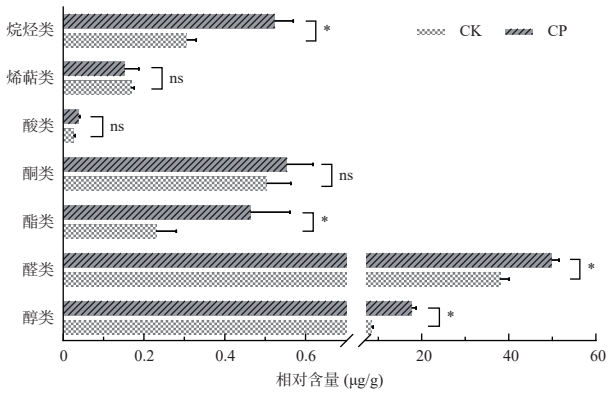


图 5 处理前后挥发性化合物含量对比

Fig.5 Comparison of volatile compound contents before and after treatment

注: *表示差异显著($P<0.05$)。

醇类物质中, 正己醇(青草香、果香)、反式-2-己烯-1-醇(青草香)和苯乙醇(玫瑰花香)的含量分别增加了 1.13 倍、0.68 倍和 2.45 倍。具有典型玫瑰花香气的芳樟醇含量提升 0.74 倍。这些化合物含量的增加, 可能与 CP 诱导的脂质氧化和苯丙氨酸代谢增强有关[29−30]。此外, 与未处理组相比, CP 处理后检测出香茅醇和 2-己烯醛等香气物质, 为‘阳光玫瑰’葡萄果实提供了更多的玫瑰花香、果香与青草香。

作为脂质氧化的直接产物, 醛类物质在 CP 处理后的总量也显著上升($P<0.05$)。正己醛(青草香、苹果香)、(E,E)-2,4-己二烯醛(花香)和反式-2-己烯醛(青香)作为含量最高的醛类, 在 CP 处理后含量均显著($P<0.05$)高于 CK 组。乙酸乙酯(果香、甜香)的含量也在 CP 处理后显著($P<0.05$)增加, 相对含量提升 1.11 倍。酯类通常由醇和酰基辅酶在酯基转移酶作用下生成, 其含量的增加间接反映了 CP 处理增强了合成通路中酯基转移酶的活性[31]。

萜烯类物质作为‘阳光玫瑰’葡萄的特征玫瑰香气的关键物质, 除芳樟醇和香茅醇的增加外, 月桂烯、(S)-(-)-柠檬烯和(E)-β-金合欢烯的含量在处理前后未发生显著变化。这表明 CP 处理可能特异性激活了部分萜烯的合成途径, 并非对所有萜类物质都有影响。这与李靖靖等[32] 关于壳聚糖与臭氧处理可特异性提升‘阳光玫瑰’葡萄中萜烯类化合物含量的研究结果相一致。

以 59 种香气组分作为因变量, 是否 CP 处理作为自变量, 通过正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)(图 6a), 可以实现不同处理组别葡萄样品的有效区分。本次分析中的自变量拟合指数(R^2_x)为 0.605, 因变量拟合指数(R^2_y)为 0.987, 模型预测指数(Q^2)为 0.959, R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受[33]。经过 200 次置换检验, 如图 6b 所示, Q^2 的回归线与纵轴的相交点小于 0, 说明模型不存在过拟合[34], 即模型验证有效, 该结果可用于不同处理组别

葡萄的香气鉴别分析。为了进一步分析 CP 处理对‘阳光玫瑰’葡萄挥发性物质的影响，根据 VIP>1 的标准，筛选出 21 种差异香气物质，其中醇类 11 种、醛类 9 种、酯类 1 种（表 5）。

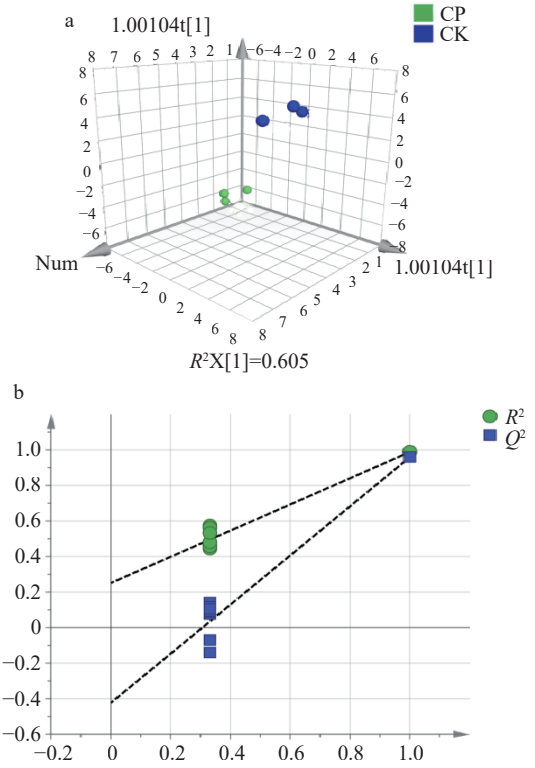


图 6　CP 处理‘阳光玫瑰’葡萄香气物质的多元统计分析

Fig.6　Multivariate statistical analysis of aroma compounds in CP 'Shine Muscat'

注：a. OPLS-DA 模型；b. 交叉验证。

2.3.2　CP 处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实特征香气物质的影响　香气成分含量的高低并不能够作为准确判定‘阳光玫瑰’葡萄香气特征依据，通常赋予葡萄果实香气特征的是具有较高 OAV 的香气成分[35]。VIP>1 的 21 种差异香气成分中，有 17 种可计算 OAV。结果显示，CP 处理后的葡萄中正己醇、苯乙醇、芳樟醇等香气物质的 OAV 存在显著差异（P<0.05）。单个香气成分对葡萄果实整体香气的贡献取决于其浓度和气味阈值。结果表明（表 6），这些差异香气物质可能对判别处理前后葡萄果实的香气特征具有重要作用。与未处理组相比，CP 处理后的葡萄果实中 OAV 较为突出的是正己醇、反式-2-己烯-1-醇、苯乙醇、芳樟醇、反式-2-己烯醛、正己醛、正壬醛等，多具有玫瑰花香、青草香特征。处理组中正己醇、苯乙醇、芳樟醇的 OAV 超过未处理组的 1.5 倍以上。此外，正己醇、反式-2-己烯-1-醇、苯乙醇、正己醛、正壬醛、反式-2-己烯醛以及芳樟醇等关键香气物质含量均有明显增加，并出现香茅醇、2-己烯醛等新生成的香气成分。

研究表明，冷等离子体中的高能活性物种（如臭氧、羟基自由基、过氧化氢以及一氧化氮等），会在果皮表面诱导轻度氧化胁迫，激活果实的信号转导系统[42]，从而上调次生代谢通路活性。尤其是在脂氧合酶代谢途径中，亚油酸和亚麻酸被氧化生成醛类[29]，如正己醛、反式-2-己烯醛等，再经醛还原酶作用转化为相应醇类，赋予果实青草香等特征气味[43]。此外，通过 CP 处理可增强苯丙氨酸的代谢转化，进而合成苯乙醇，该化合物具有明显的玫瑰花香[30]，是‘阳光玫瑰’葡萄典型香气的重要来源之一。同时，CP 可诱导萜烯类物质的积累，以芳樟醇和香茅醇为代表的萜烯类物质来源于甲羟戊酸和甲基赤藓糖磷酸代谢通路[44]。并且，CP 处理能够诱导果实中 β-葡萄糖苷酶活性的增强，促进结合态风味物质的水解释放[45]，使原本潜伏的芳香前体以游离状态释放。

表 6　不同处理下‘阳光玫瑰’葡萄的差异香气成分 OAV

Table 6　OAV of differential aroma compounds in 'Shine Muscat' grapes under different treatments

序号	香气成分	阈值（mg/L）[31,36–41]	OAV		香气描述[31,36–41]
			CP处理	CK	
1	正己醇	8	0.23*	0.11	青草香、果香
2	1-壬醇	600	<0.10	<0.10	蜂蜜香、甜香
3	正辛醇	12	<0.10	<0.10	玫瑰花香、浓郁的柑橘香
4	3-辛醇	80	<0.10	<0.10	坚果香
5	橙花醇	40	<0.10	<0.10	玫瑰花香、甜木香
6	反式-2-己烯-1-醇	15	0.16*	0.10	青草香
7	顺-2-戊烯-1-醇	72	<0.10	<0.10	青草香
8	3-甲基-2-丁烯-1-醇	–	–	–	浓酯香
9	苯乙醇	140	0.52*	0.15	玫瑰香、蜂蜜香
10	芳樟醇	25	0.22*	0.13	玫瑰花香、薰衣草香
11	香茅醇	40	<0.10	–	玫瑰花香
12	（E,E）-2,4-己二烯醛	–	–	–	青草香
13	反-2-庚烯醛	13	<0.10	<0.10	果香、甜香
14	2-己烯醛	88	<0.10	0	青香
15	反式-2-己烯醛	17	1.95*	1.44	青香
16	反式-2-戊烯醛	–	–	–	青草香、果香
17	反-2-己烯-4-氧代-醛	–	–	–	青香
18	正庚醛	10	<0.10	<0.10	青香
19	正己醛	70	0.19	0.18	青草香、苹果香
20	正壬醛	15	0.20*	0.12	青草香
21	乙酸乙酯	750	<0.10	<0.10	果香、甜香

注：“–”表示未查到。

CP 处理引起的细胞膜通透性增强也是风味物质释放的关键因素。处理过程中，活性粒子对果实表皮细胞结构造成轻度损伤，原本被包裹在细胞器中的底物得以释放[46]，与游离态酶类接触反应，从而促进风味物质的合成和释放。例如，细胞质中的脂肪酶与脂肪酸底物反应生成 C6 醇醛类，叶绿体中前体物质释放也有助于萜类风味物质的积累。更有研究表明，CP 处理不仅影响已有风味物质的含量，还可能通过调控相关基因的表达，如萜烯合酶基因、脂氧合酶、醇脱氢酶等，间接增强原本不活跃或低活性的代谢通

路[47−48]，进一步增强果实合成芳香物质的能力，促进新的风味代谢物的产生。通过调节果实中氧化还原状态，使抗氧化物质浓度下降，间接促进挥发性物质氧化生成新的风味成分。这一过程中，2-己烯醛等氧化裂解产物可能正是由冷等离子体诱导形成的。这类新物质的产生可能与非酶促氧化反应、游离脂肪酸自动氧化及次生代谢信号的激活有关，进一步拓展葡萄果实的风味维度，改善果实的芳香品质，也为采后风味调控和高品质果实供应提供了新的理论依据和技术路径。

3 结论

本研究通过响应面法对 CP 处理‘阳光玫瑰’葡萄的工艺参数进行优化，获得的最优条件为处理时间 252 s、处理电压 24 kV，此条件下葡萄果实的抑菌率达到 84.8%，ΔE 为 1.94，能有效保障葡萄果实的外观品质，并起到较好的抑菌效果。在此基础上，利用 HS-SPME 结合 GC×GC-TOFMS 对其挥发性风味物质进行分析。结果表明，CP 处理使葡萄中挥发性物质的总量提升了 43.99%，其中芳樟醇、苯乙醇、正己醇、反式-2-己烯-1-醇、正己醛等关键风味物质的含量和 OAV 值显著上升，使葡萄香气更加浓郁。冷等离子体所释放的活性物种可能在果皮细胞中诱导轻度氧化胁迫，同时提高糖苷酶活性，促进糖苷结合态风味前体的释放。CP 处理更能增强细胞膜通透性，促进风味前体物质与相关酶的接触反应，生成更多具有感官价值的挥发性物质，进而提升葡萄整体的香气表现。综上所述，适度 CP 处理不仅具有良好的杀菌效果，还可显著改善‘阳光玫瑰’葡萄的挥发性风味品质，为无残留、非热物理保鲜技术在葡萄果实采后处理中的应用提供新路径。后续研究将进一步结合代谢组学与转录组技术，从分子层面揭示冷等离子体调控香气代谢的关键基因与信号网络，推动该技术在果蔬风味保持与品质提升中的深入发展。

© 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] 张松霖. 葡萄转录因子 VvMADS39 和 VvMADS28 功能分析及其对胚珠发育的调控研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023. [ZHANG Songlin. Functional analysis of grape transcription factors VvMADS39 and VvMADS28 and their regulatory roles in ovule development[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.]

[2] 宁密密，张群，刘伟，等. 二氧化硫保鲜剂处理对‘阳光玫瑰’葡萄贮藏期褐变的影响[J]. 食品与发酵工业，2023，49(8)：75−83. [NING Mimi, ZHANG Qun, LIU Wei, et al. Effect of SO_2 treatment on browning of ‘Sunshine Rose’ grape during storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(8): 75−83.]

[3] 张化阁，魏启航，田林垚，等. 不同处理对阳光玫瑰葡萄鲜食品质的影响[J]. 现代农业科技，2022(21)：63−67,71. [ZHANG Huage, WEI Qihang, TIAN Linyao, et al. Effects of different treatments on fresh quality of shine Muscat grape[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(21): 63−67,71.]

[4] 胡福初，罗激光，张晶，等. 不同时间段补光在海南阳光玫瑰葡萄上的应用效果比较[J]. 中国果树，2025(6)：26−32. [HU Fuchu, LUO Jiguang, ZHANG Jing, et al. Comparative study on the effects of supplemental lighting at different time periods on ‘Shine Muscat’ grapes in Hainan[J]. China Fruits, 2025(6): 26−32.]

[5] 萨莉·伊斯顿. 葡萄种植与葡萄酒酿造[M]. 钱晓东，译. 上海：上海交通大学出版社，2023. [SALLY Easton. Vines & vinification[M]. QIAN Xiaodong, trans. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2023.]

[6] 龙盼，尹乐斌，何攀，等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析栽培模式对阳光玫瑰葡萄挥发性风味的影响[J]. 邵阳学院学报(自然科学版)，2025，22(2)：84−94. [LONG Pan, YIN Lebin, HE Pan, et al. Effect of cultivation models on the volatile flavor of Shine Muscat grapes analyzed by HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2025, 22(2): 84−94.]

[7] 李明. 阳光玫瑰葡萄的引种表现和优质栽培技术[J]. 中国南方果树，2021，50(3)：163−166. [LI Ming. Introduction performance and high-quality cultivation techniques of sunshine rose grape[J]. South China Fruits, 2021, 50(3): 163−166.]

[8] 杨丽. 不同葡萄品种在宁夏设施栽培表现评价[D]. 银川：宁夏大学，2024. [YANG Li. Performance evaluation of different grape varieties in protected cultivation in Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.]

[9] 谢林君，成果，周咏梅，等. 贮藏温度对阳光玫瑰葡萄采后贮藏品质的影响[J]. 中国果菜，2020，40(11)：1−7,58. [XIE Linjun, CHENG Guo, ZHOU Yongmei, et al. Effect of storage temperature on postharvest storage quality of shine Muscat grape[J]. China Fruit AVegetable, 2020, 40(11): 1−7,58.]

[10] 熊小迪，刘群，李丽，等. 冷等离子体结合气调包装对杨梅贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工，2023，23(12)：10−17. [XIONG Xiaodi, LIU Qun, LI Li, et al. Effects of cold atmospheric plasma combined with modified atmosphere packaging on storage quality of bayberry[J]. Storage and Process, 2023, 23(12): 10−17.]

[11] DIKMETAS D N, ZARGARCHI S, SCHARF S, et al. Low pressure cold plasma treatment for microbial decontamination, improvement of bioaccessibility and aroma profile of dried red peppers[J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146424.

[12] ZHOU Dandan, LI Tingting, CONG Kaiping, et al. Influence of cold plasma on quality attributes and aroma compounds in fresh-cut cantaloupe during low temperature storage[J]. LWT, 2022, 154: 112893.

[13] CAO Panpan, LU Yilin, HUANG Qing, et al. Influence of cold plasma treatment on NaCl diffusion and consequent effects on the flavor of dry-cured grass carp fillets[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145651.

[14] JIA Sitong, ZHENG Pufan, LI Mo, et al. The effect of cold plasma treatment on the fruit quality and aroma components of winter jujubes (*Ziziphus jujuba* Mill. ‘Dongzao’)[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(10): 6350−6361.

[15] 黄惠梅，邓伟丽，陈杰博，等. HS-SPME-GC-MS 和电子鼻分析低温等离子杀菌对甘蔗汁挥发性风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业，2023，49(7)：282−288. [HUANG Huimei, DENG Weili, CHEN Jiebo, et al. Effect of cold plasma sterilization on the volatile compounds of sugarcane juice analyzed by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 282−288.]

［16］ LI Xiaoan, LI Meilin, JI Nana, et al. Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit[J]. LWT, 2019, 115: 108447.
［17］ 王颖. 基于固相微萃取的全二维气相色谱/飞行时间质谱测定梨果挥发性香气物质[D]. 济南：齐鲁工业大学, 2019. ［WANG Ying. Determination of volatile aroma compounds in pear fruits by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry based on solid-phase microextraction[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019.］
［18］ 杨帅, 李毅, 柳佳清, 等. 低温等离子体对枸杞鲜果保鲜效果及其贮藏期品质的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(3): 83−95. ［YANG Shuai, LI Yi, LIU Jiaqing, et al. Effect of cold atmospheric plasma on the preservation and storage quality of fresh Goji berries[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(3): 83−95.］
［19］ NORIEGA E, SHAMA G, LACA A, et al. Cold atmospheric gas plasma disinfection of chicken meat and chicken skin contaminated with *Listeria innocua*[J]. Food Microbiology, 2011, 28(7): 1293−1300.
［20］ 崔偲旻, 任航, 刘清逸, 等. 中药提取物对‘红地球’葡萄保鲜效果的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2023(2): 16−22. ［CUI Simin, REN Hang, LIU Qingyi, et al. Effects of Chinese herbal extracts on keeping fresh of ‘red globe' grape[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2023(2): 16−22.］
［21］ 宁密密. 不同剂型 SO_2 保鲜剂对‘阳光玫瑰’葡萄采后品质的影响[D]. 长沙：湖南大学, 2023. ［NING Mimi. Effects of different dosage forms of SO_2 preservative on postharvest quality of 'Shine Muscat' grape[D]. Changsha: Hunan University, 2023.］
［22］ 许博文, 石翀, 周丹丹, 等. 低温等离子体诱导乳清分离蛋白-壳聚糖复合颗粒的结构特性及其花青素负载性能[J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 143−152. ［XU Bowen, SHI Chong, ZHOU Dandan, et al. Structural characteristics and anthocyanin loading performance of whey protein isolate-chitosan composite particles induced by cold plasma[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 143−152.］
［23］ 马海乐, 陈文庆. 基于电磁波和等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术研究现状与展望[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(4): 1−15. ［MA Haile, CHEN Wenqing. Research status and prospect of emerging physical sterilization technology of solid food based on electromagnetic wave and plasma[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(4): 1−15.］
［24］ 邱月, 王旭骅, 谢雪华, 等. 低温等离子体杀菌对肉品食用品质的影响规律与机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(6): 332−340. ［QIU Yue, WANG Xuhua, XIE Xuehua, et al. Overview on changes and mechanism of low-temperature plasma sterilization on edible quality of meat products[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(6): 332−340.］
［25］ WANG Xuehua, CHEN Fang, MA Lingjun, et al. Non-volatile and volatile metabolic profiling of tomato juice processed by high-hydrostatic-pressure and high-temperature short-time[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131161.
［26］ HAJIANI S, GHASSEMPOUR A, SHOKRI B. Improving detection of BSA protein by applying atmospheric pressure plasma jets in MALDI-TOF mass spectrometry[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2021, 466: 116615.
［27］ CARBONELL-CAPELLA J M, BUNIOWSKA M, CORTES C, et al. Influence of pulsed electric field processing on the quality of fruit juice beverages sweetened with *Stevia rebaudiana*[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 101: 214−222.
［28］ 乔维维, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体对生鲜牛肉杀菌效果及色泽的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 237−242. ［QIAO Weiwei, HUANG Mingming, WANG Jiamei, et al. Effect of cold plasma on sterilization and color of fresh beef[J]. Food Science, 2017, 38(23): 237−242.］
［29］ RISTICEVIC S, SOUZA-SILVA E A, GIONFRIDDO E, et al. Application of *in vivo* solid phase microextraction (SPME) in capturing metabolome of apple (*Malus×domestica* Borkh.) fruit[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 6724.
［30］ 李荣芳, 刘金金, 朱海, 等. 不同品种大泽山葡萄及其提取物的挥发性成分分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 35−47. ［LI Rongfang, LIU Jinjin, ZHU Hai, et al. Analysis of the volatile components in different varieties of dazeshan grapes and their extracts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 35−47.］
［31］ FU Hongbo, YANG Yongchao, LI Jie. Optimization of fermentation conditions and volatile substance analysis of wine[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17044.
［32］ 李靖靖, 洪平静, 王晶, 等. 壳聚糖与臭氧对采后'阳光玫瑰'香气及品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(6): 1058−1069. ［LI Jingjing, HONG Pingjing, WANG Jing, et al. The effect of chitosan and ozone on the aroma and quality of postharvest 'Shine Muscat'[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(6): 1058−1069.］
［33］ 胡晓婷, 陈浩, 赵聃, 等. 基于响应面法和人工神经网络优化百香果豆清饮料发酵工艺[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(6): 211−221. ［HU Xiaoting, CHEN Hao, ZHAO Dan, et al. Optimization of fermentation process of passion fruit soy whey beverage based on response surface methodology and artificial neural network[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(6): 211−221.］
［34］ 陈艾琳, 杨清华, 赖谦, 等. 冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺优化及风味品质分析[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 251−261. ［CHEN Ailin, YANG Qinghua, LAI Qian, et al. Process optimization and flavor quality analysis of *Eurotium* cristatum fermented *Penthorum chinense* pursh leaf tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 251−261.］
［35］ WANG Mengqi, MA Wanjun, SHI Jiang, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination[J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.
［36］ 张腾旬. 百合花香单萜合成关键酶 LiDXS 基因的克隆与分析[D]. 北京：北京林业大学, 2017. ［ZHANG Tengxun. Cloning and analysis of LiDXS gene encoding key enzyme for lily floral monoterpene synthesis[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.］
［37］ 徐邢燕. 基于代谢组学的武夷肉桂茶不同烘焙程度、等级及地域品质差异研究[D]. 福州：福建农林大学, 2020. ［XU Xingyan. Metabonomics-based study on the difference of different baking degree, grade and regional quality of Wuyi cinnamon tea[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.］
［38］ HUA Jinjie, ZHU Xizhe, OUYANG Wen, et al. Non-target and target quantitative metabolomics with quantitative aroma evaluation reveal the influence mechanism of withering light quality on tea aroma and volatile metabolites evolution[J]. Food Research International, 2024, 192: 114773.

［39］ 孔维涓, 庞道睿, 杜冰, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 GC-O 分析不同叶位桑叶挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 282−291. ［KONG Weijuan, PANG Daorui, DU Bing, et al. Analysis of volatile flavor substances in different leaf positions of mulberry leaves using HS-SPME-GC-MS combined with GC-O[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 282−291.］

［40］ ZHANG Mengzhen, ZHANG Ying, LIN Yeyun, et al. Aroma-driven differentiation of Wuyi Shuixian tea grades: The pivotal role of linalool revealed by OAV and multivariate analysis[J]. Foods, 2025, 14(13): 2169.

［41］ 陈建英, 吕迪瑚, 杨春. 基于 HS-SPME-GC-MS 和感官评价分析不同时期木枣的挥发性物质[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 330−336. ［CHEN Jianying, LÜ Dihu, YANG Chun. Analysis of volatile substances in different periods of Muzao by HS-SPME-GC-MS and sensory evaluation[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 330−336.］

［42］ YANCLO L A, VORSTER A, van HEERDEN C, et al. Mapping the microbial diversity associated with mango fruit during postharvest handling, cold plasma treatment, storage and after drying[J]. Applied Food Research, 2025, 5(2): 101101.

［43］ ZHAO Yu, ZHAN Ping, TIAN Honglei, et al. Insights into the aroma profile in three kiwifruit varieties by HS-SPME-GC-MS and GC-IMS coupled with DSA[J]. Food Analytical Methods, 2021, 14(5): 1033−1042.

［44］ 陈春霞. ‘霞多丽’葡萄果实不同发育期 BTH 处理对其品质的影响分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023. ［CHEN Chunxia. Effects of BTH treatment at different developmental stages on the quality of ‘Chardonnay’ grape fruits[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.］

［45］ 周洁, 丁鹏, 汪桂宇, 等. 茶叶中的糖苷类香气前体物质研究进展[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(1): 152−159. ［ZHOU Jie, DING Peng, WANG Guiyu, et al. Advances in glycosidically bound aroma precursors in tea (*Camellia sinensis*)[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(1): 152−159.］

［46］ LI Jiangfei, ZHOU Yajun, LU Weihong. Enhancement of haskap vacuum freeze-drying efficiency and quality attributes using cold plasma pretreatment[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(4): 1059−1071.

［47］ RÍO SEGADE S, VILANOVA M, GIACOSA S, et al. Ozone improves the aromatic fingerprint of white grapes[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 16301.

［48］ NASIRU M M, BOATENG E F, ALNADARI F, et al. Deciphering metabolomics modulations in peanut induced by non-thermal plasma: A quasi-targeted approach[J]. Food Chemistry, 2025, 490: 145156.