陈华, 李天宇, 郑鄢燕, 等. 低压静电场对鲜食玉米采后色泽和风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 398−411. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080222

CHEN Hua, LI Tianyu, ZHENG Yanyan, et al. Effect of Low-voltage Electrostatic Field on the Post-harvest Color and Flavor of Sweet Corn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 398−411. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080222

· 贮运保鲜 ·

低压静电场对鲜食玉米采后色泽和风味的影响

陈　华[1,2], 李天宇[1,2], 郑鄢燕[2], 左进华[2], 王云香[2], 冯欣怡[2], 王利红[1,*]

（1.河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056107;
2.北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097）

摘　要: 为研究低压静电场（low-voltage electrostatic field，LVEF）对鲜食玉米采后色泽和风味的影响，本实验以‘农科糯 336’鲜食玉米为实验材料，在 1 kV 的 LVEF 条件下贮藏 8 d，分析贮藏期间鲜食玉米的色泽、皱缩率、感官评分、抗氧化酶（过氧化物酶（peroxidase，POD）、苯丙氨酸解氨酶（phenylalanine ammoniase，PAL）和多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO））活力、丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量、类黄酮含量、有机酸含量、糖类含量，以及挥发性有机化合物（volatile organic compounds，VOCs）的变化情况。结果表明，经过 1 kV LVEF 处理的鲜食玉米色泽变化幅度显著减小，处理组中 POD 和 PAL 活力相对稳定且维持在较高水平，MDA 含量和 PPO 活力上升幅度较小，而类黄酮含量下降程度较低，反映出 LVEF 减缓了细胞结构的氧化损伤。在贮藏阶段，LVEF 处理提高了鲜食玉米绿原酸、隐绿原酸和（R）-3-羟基丁酸等抗氧化性相关有机酸含量，降低了壬二酸和反式/顺式-乌头酸等酸涩味相关的有机酸含量；同时，LVEF 处理可有效减缓糖类的下降速度，促进乙酸甲酯、*β*-罗勒烯和 4-己烯-3-酮等 VOCs 的积累，抑制正丁醇和乙偶姻等带有霉味、酸腐味及发酵果酒味的不良风味物质的积累，以保持鲜食玉米的良好风味品质。总之，LVEF 处理可以延缓鲜食玉米采后色泽转暗，维持鲜食玉米在贮藏期间的风味品质，有效延长其保质期。

关键词: 低压静电场, 鲜食玉米, 色泽, 有机酸, 糖类, 风味

中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0398−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080222

本文网刊:

Effect of Low-voltage Electrostatic Field on the Post-harvest Color and Flavor of Sweet Corn

CHEN Hua[1,2], LI Tianyu[1,2], ZHENG Yanyan[2], ZUO Jinhua[2], WANG Yunxiang[2], FENG Xinyi[2], WANG Lihong[1,*]

（1.College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056107, China;
2.Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China）

Abstract: To investigate the effect of a low-voltage electrostatic field (LVEF) on the post-harvest color and flavor of sweet corn (*Zea mays* L. var. Nongke Nuo 336), samples were subjected to a 1 kV LVEF treatment during storage for 8 days. Changes in color difference, wrinkling rate, sensory score, the activities of antioxidant enzymes—peroxidase (POD), phenylalanine ammonia-lyase (PAL), and polyphenol oxidase (PPO), malondialdehyde (MDA) content, flavonoid content, organic acids, sugars, and volatile organic compounds (VOCs) were monitored throughout storage. The results showed that the variation in color difference was significantly smaller in the LVEF-treated group. POD and PAL activities remained relatively

收稿日期: 2025−08−22

基金项目: 北京市乡村振兴农业科技课题（NY2401080200）; 现代农业产业技术体系北京市创新团队（BAIC02-2025）。

作者简介: 陈华（1999−）, 男, 硕士, 研究方向: 农产品采后保鲜与冷链物流, E-mail: chenhua0901edu@163.com。

*** 通信作者:** 王利红（1986−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 18710354317@163.com。

stable and at higher levels, while the increases in MDA content and PPO activity were lower, and the decline in flavonoid content was slower, suggesting that LVEF mitigated oxidative damage to cellular structures. During storage, LVEF treatment enhanced the accumulation of antioxidant-related organic acids such as chlorogenic acid, neochlorogenic acid, and (R)-3-hydroxybutyric acid, while decreasing the levels of sourness-related organic acids such as azelaic acid and trans-/cis-aconitic acid. Moreover, LVEF treatment effectively slowed the reduction in sugar content, promoted the accumulation of desirable VOCs (e.g., methyl acetate, *β*-ocimene, and 4-hexen-3-one), and suppressed the formation of undesirable VOCs (e.g., 1-butanol and acetoin) associated with musty, sour, and fermented odors. Overall, LVEF treatment delayed post-harvest color darkening, preserved flavor quality, and effectively extended the shelf life of sweet corn.

Key words: low-voltage electrostatic field; sweet corn; color; organic acid; sugar; flavor

鲜食玉米（*Zea mays* L.）是指在乳熟期采收，如同水果与蔬菜那般直接食用其鲜嫩果穗的一类特用玉米，因其丰富的营养价值和独特的风味特征，已成为全球重要的果蔬消费品[1]。然而，其采后呼吸代谢旺盛[2]，易发生色泽劣变[3]、糖分降解及香气物质挥发[4]，严重制约产业链可持续发展。传统低温贮藏虽能延缓衰老，但存在能耗高，部分酶在低温下仍具有活性等问题，持续催化糖类等成分分解，加速挥发性风味物质的损失，造成风味品质下降[5−6]；而化学保鲜则存在潜在的安全风险。因此，开发绿色、高效的物理保鲜技术，精细调控采后代谢路径，已成为产业亟待突破的瓶颈。

低压静电场（Low voltage electrostatic field，LVEF）作为一种非热物理场技术，不仅可通过微电流效应影响细胞膜通透性和酶活性，还具备低能耗、无残留及操作简便等优势，在果蔬采后品质维持方面展现出良好的应用前景[7−8]。研究表明，静电场处理不仅能抑制微生物增殖、延缓水分流失，还有助于维持果蔬的抗氧化能力[9]。近年来，LVEF 在多种易腐果蔬的保鲜中取得积极效果，例如可降低樱桃番茄的质量损失率与腐烂发生率，并维持其质地[9]；在草莓中能够抑制丙二醛和超氧阴离子的积累，诱导超氧化物歧化酶的活性增加，并保留抗坏血酸和还原型谷胱甘肽的含量[10]；在鲜嫩方竹笋中提高了香豆酸、己醇和壬二酸的水平，抑制了 DL-苹果酸等的还原，也表现出对果实硬度、酶活性及香气组成的显著调控作用[11]。这些研究表明，LVEF 在调节果实糖酸组成与挥发性风味方面具有潜力。然而，LVEF 对含糖量高、代谢活跃的鲜食玉米采后“色、香、味”等多维感官评价，尤其是糖酸代谢平衡与挥发性风味物质动态变化的调控机制，尚缺乏系统研究。目前相关的研究多聚焦于果实失重率、硬度等宏观品质的调控[4]，或基于多组学测序技术探讨生理及遗传基础[4,12−13]，而对糖类、有机酸等关键风味因子的变化及其与感官评价的关联机制仍解析不足。

因此，本研究选取甜加糯型鲜食玉米作为研究对象，探究 LVEF 处理对其采后贮藏期间理化指标及挥发性风味物质的影响，旨在揭示 LVEF 延缓品质劣变的生理生化机制。研究结果有望为鲜食玉米采后保鲜提供新的技术思路，并为 LVEF 在鲜食农产品绿色保鲜中的进一步应用提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鲜食玉米　来自北京泰民同丰农业科技有限公司，当雄穗长度生长至 3~4 cm 时对植株进行挂牌标记，挂牌 23 d 后进行采收，并在 2 h 内运到实验室。挑选大小一致，无机械损伤，无病虫害，且成熟度一致的玉米进行试验；甲醇（色谱纯）、异丙醇（色谱纯）　德国默克集团（Merck KGaA）；乙腈（色谱纯）　上海星可高纯溶剂有限公司；甲酸（色谱纯）、甲氧胺盐（99 %）、吡啶（99 %）　西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司；有机酸标准品（甲醇配制，1 mg/mL，>99%）　西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司/上海甄准生物科技有限公司；正己烷（色谱纯）、糖类标准品（色谱纯，甲醇配制，2 mg/mL）　上海安谱实验科技股份有限公司和东京化成工业株式会社等公司；BSTFA（with 1% TMCS, 99%）、2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮、丙酮（均为分析纯）　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；过氧化物酶（POD）测定试剂盒、苯丙氨酸解氨酶（PAL）测定试剂盒、多酚氧化酶（PPO）测定试剂盒　北京盒子生工有限公司。

低压静电场装置　自主研发（图 1）；HGF-1500 保鲜盒　湖北盒工坊包装制品有限公司；FlavourSpec GC-IMS 分析仪　德国 G.A.S.公司；PEN3 电子鼻　德国 AIRSENSE Analytics 公司；QTRAP 6500+LC-MS/MS　荷兰 SCIEX 公司；5424R

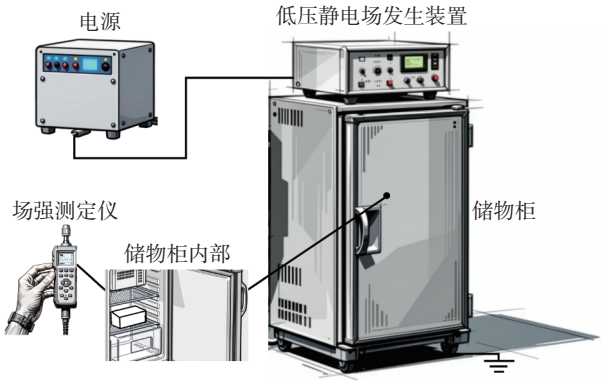


图 1　低压静电场发生装置

Fig.1　Low voltage electrostatic field generator

离心机　德国 Eppendorf 公司; AS 60/220.R2 电子天平　波兰 RADWAG 公司; MIX-200 多管涡旋振荡器　上海净信实业发展有限公司; KQ5200E 超声清洗仪　昆山市超声仪器有限公司; 8890-5977B GC-MS　美国 Agilent 公司; MM400 球磨仪　德国 Retsch 公司; CentriVap 冷冻干燥机　美国 LABCONCO 公司; DHG-9055A 烘箱　上海合恒仪器设备有限公司; XD-DCY-24Y 氮吹仪　上海析达仪器有限公司; Varioskan LUX 多功能酶标仪　美国 Thermo Fisher Scientific 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　处理方法　剥除玉米苞叶, 并清理其表面附着的玉米须, 采用 HGF-1500 保鲜盒盛放(规格: 25×15 cm)。置于 25 ℃、相对湿度为 80% 的环境中贮藏。处理组(LVEF)施加 1 kV 静电场, 设置 1 kV 电压时, 板件距离 55 cm(预实验: 将包装好的鲜食玉米, 随机分为 5 组, 每组 3 盒, 于 25 ℃ 相对湿度为 80%~85% 恒温库中贮藏, 分别施加 0、0.5、1、1.5、2 kV 五种不同电场强度的静电场, 每 2 d 进行一次感官评价, 以确定最适宜电场强度); 对照组(CK)不施加静电场。在贮藏期间, 每隔 2 d 进行一次样本采集, 直至第 8 d 结束采样。每次采样均将玉米籽粒浸泡于液氮中, 随后使用研磨器将玉米籽粒研磨成均匀的粉末状, 保存于−80 ℃ 的冰箱中待测。每组实验样本均设置 3 个生物学重复。

1.2.2　指标检测与分析方法

1.2.2.1　感官评价　参考时文林等[14] 的方法并加以修改, 感官评估团队由 10 名经过公司专业培训的鉴评人员组成, 其中包括 5 位男生与 5 位女生。感官鉴评小组将分别从每组鲜食玉米中随机抽取 9 棒, 根据表 1 评估标准, 逐一进行感官评分, 总分为 10.0, 低于 6.0 被视为失去商品价值。

1.2.2.2　色泽和皱缩率的测定　参考 Li 等[15] 的方法, 先对色差仪进行校准, 每组选取 3 棒玉米, 然后在玉米籽粒表面中心位置选取 3 个不同位点进行测定, 并同时记录 L^*、a^*值和 b^*值。L^*值代表亮度, a^*值代表红绿程度, b^*值代表黄蓝程度。玉米皱缩率为单棒皱缩籽粒数与总籽粒数的比值。

1.2.2.3　抗氧化酶活性、丙二醛(MDA)和类黄酮含量的测定　依照试剂盒说明, 分别称取 0.1 g 玉米样本, 制备成待测液后, 进行 POD、PAL 和 PPO 测定。MDA 和类黄酮含量的测定参照 Bai 等[16] 的方法, 类黄酮称取 0.1 g 玉米籽粒粉末, 加入 1 mL 体积分数为 1% 的盐酸-甲醇溶液进行溶解提取, 在 4 ℃ 的离心机中 9000×g 离心 20 min, 然后取上清液。以提取液为对照组, 用通用标准石英微孔板测定 325 nm 波长下两组的吸光度。MDA 称取 0.2 g 鲜食玉米粉末, 加入 1 mL 浓度为 6.7 g/L 的 TBA 溶液进行提取。离心机 4 ℃ 预冷 30 min 后, 以 8000×g 离心 20 min, 取上清液, 用 1.2 mL 浓度为 100 g/L 的 TCA 溶液作参考, 分别加入 TBA 溶液 1.2 mL, 煮制 20 min 后冷却放凉。用酶标仪测定其在 450、532 和 600 nm 处的吸光值。

1.2.2.4　有机酸检测　称取 50 mg 玉米粉末, 迅速加入 500 μL −20 ℃ 预冷的 70% 甲醇水提取液, 涡旋 3 min 混匀。于 4 ℃、12000 r/min 离心 10 min, 取 300 μL 上清液至新管。−20 ℃ 静置 30 min 后, 再次相同条件离心 10 min。移取 200 μL 上清液至进样小瓶, −20 ℃ 保存待测。采用 UPLC(ExionLC™ AD)与 MS/MS(QTRAP® 6500+)联用[17]。液相: ACQUITY HSS T3 柱(1.8 μm, 100 mm×2.1 mm i.d.), A 相为含 0.05% 甲酸的超纯水, B 相为含 0.05% 甲酸的乙腈, 梯度洗脱(0 min: A/B 95∶5; 8~9.5 min: 5∶95; 9.6~12 min: 95∶5), 流速 0.35 mL/min, 柱温 40 ℃, 进样量 2 μL。

质谱: ESI 温度 550 ℃, 正离子模式电压 5500 V, 负离子模式电压−4500 V, 气帘气压力 35 psi, 按优化 DP 和 CE 扫描检测离子对。定性: 基于 MWDB 数据库, 比对质谱数据与标准谱图识别代谢物。定量: 用 MRM 模式, 四级杆筛选前体离子, 经碰撞室电离形成碎片离子, 再过滤选择特征碎片离子, 排除干扰。对色谱峰积分, 用标准曲线定量分析样本中有机酸代谢物含量[18]。样本有机酸含量计算公式如下:

$$\text{有机酸含量(ng/g)} = c \times V/1000/m$$

式中: c: 样本中积分峰面积代入标准曲线得到的浓度值(ng/mL); V: 提取时所用溶液的体积(μL); m: 称取的样本质量(g)。

1.2.2.5　糖类检测　称 20 mg 玉米粉末置于离心管, 加 500 μL 甲醇∶异丙醇∶水(3∶3∶2, v/v/v)提取液, 涡旋 3 min、4 ℃ 水浴超声 30 min。4 ℃、12000 r/min 离心 3 min, 取 50 μL 上清液, 加 20 μL 1000 μg/mL 内标溶液, 氮吹后冻干。接着加 100 μL 甲氧铵盐吡啶(15 mg/mL)37 ℃ 孵育 2 h, 再加 100 μL BSTFA 37 ℃ 孵育 30 min 得衍生化溶液。取 50 μL 衍生化

表 1　鲜食玉米感官评分标准

Table 1　Evaluation standard for sensory quality of sweet corn

分值	色泽(15%)	气味(25%)	质地(20%)	新鲜度(25%)	可接受度(15%)
1~3	颜色暗淡	有酸败异味	籽粒凹陷严重, 韧性极差	萎蔫、褐变或霉变严重	不能接受
4~7	色泽较暗淡	无香气风味 芳香味道较淡	籽粒有轻微凹陷 柔韧性较差, 皮薄	局部稍有霉变或褐变	可以接受
8~10	色泽均匀且有光泽感	具有清新香甜的味道	籽粒鲜嫩饱满, 柔软皮厚	无褐变、霉变	接受度高

溶液，用正己烷稀释至 1 mL，0.22 μm 滤膜过滤，滤液保存于棕色进样瓶待 GC-MS 分析[19]。

参考 Gómez-González 等[20] 的方法并稍作修改。进样量 1 μL，分流模式 5∶1；载气 Helium，色谱柱 DB-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm），柱流速 1 mL/min；柱箱升温：160 ℃ 保持 1 min，6 ℃/min 升至 200 ℃，10 ℃/min 升至 270 ℃，20 ℃/min 升至 320 ℃ 并保持 5.5 min；传输线温度 280 ℃，离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃；电离电压 70 eV，质谱扫描模式选择离子监测模式（SIM），溶剂延迟 4 min。样本糖类含量计算公式如下：

$$糖含量(mg/g) = c \times V_1 \times V_2 / V_3 / m / 1000000$$

式中：c：样本中积分峰面积比值代入标准曲线得到的浓度值（μg/mL）；V_1：定容所用溶液的体积（μL）；V_2：样品提取过程中加入样本提取液的体积（μL）；V_3：样品提取过程中收集上清液的体积（μL）；m：称取的样本质量（g）。

1.2.2.6　电子鼻测定　参考 Tao 等[21] 的方法，并稍作调整。样品处理：准确称取 6 g 冷冻玉米粉末置于 20 mL 顶空瓶中，在 60 ℃ 下孵育 20 min。检测参数：间隔 1 s 采集数据、检测前空白时间 120 s、零点微调时间 10 s、预采样时间 5 s、测量时间 120 s、注射流速 350 mL/min。测得数据所代表的传感对象物质与电子鼻的 10 个金属氧化传感器一一对应，对第 117~119 s 采集到的数据进行分析。

1.2.2.7　气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）测定　参考 Tao 等[21] 的方法，并稍作调整。将 3 g 冷冻玉米粉置于 20 mL 顶空瓶中，并在 80 ℃ 下孵育 25 min 后进行进样。顶空采样针的温度保持在 85 ℃，进样体积为 500 μL。使用 MXT-5 色谱柱（15 m×0.53 mm，1 μm）。气相色谱条件包括：色谱柱温度为 60 ℃，初始柱流速为 2 mL/min，保持 2 min，然后在 8 min 内线性增加至 10 mL/min；随后在 10 min 内增加至 100 mL/min，最后在最后的 10 min 内增加至 150 mL/min。载气为高纯度氮气（≥99.999%）。漂移气流速设定为 150 mL/min，IMS 检测器温度为 45 ℃，总运行时间为 30 min。

GC-IMS 标准曲线的建立：各取 10 μL 的 2-丁酮至 2-壬酮及丙酮的分析纯标准品溶液，在相同 GC-IMS 参数下进行测定。将保留时间与 GC-IMS 内置的酮类化合物数据库进行匹配，并以保留指数（RI）的对数值为横坐标、实际保留时间为纵坐标进行线性拟合，建立标准曲线（R^2>0.99），该曲线仅用于计算保留指数以进行挥发性风味物质的定性鉴别，而非用于精确量化。VOCs 相关描述性词汇，从以下数据库中获取：National Center for Biotechnology Information、Food Flavor Laboratory 以及 Flavor Extract Manufacturers Association[22]。

1.3　数据处理

所有指标均重复测定 3 次，取平均值作为结果。利用 WPS Office Excel 软件进行数据处理，利用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素方差分析（one-way analysis of variance，ANOVA），最小显著差异法（least significant difference，LSD）进行显著性比较，P<0.05 表示差异显著，P<0.01 表示差异极显著。采用 WPS office、Metware Cloud 和 Origin 2022 软件进行绘图。

2　结果与分析

2.1　LVEF 处理对鲜食玉米感官评价和色泽的影响

贮藏期间，LVEF 组鲜食玉米的感官评分均极显著高于 CK 组，且随贮藏时间延长，两组间差值呈逐渐增大趋势（图 2A）。评分低于 6.0 被认为是失去商品价值的临界点，CK 组的鲜食玉米仅能维持 4 d 的良好品质状态，而 LVEF 组却能将这一状态延长至第 8 d。在贮藏期间，CK 组籽粒的皱缩率一直高于 LVEF 组，并且自第 4 d 起，两组间的差距进一步扩大，第 8 d CK 组的皱缩率比 LVEF 组高 8%（图 2B）。说明 LVEF 处理能够较好地维持鲜食玉米在贮藏期间的感官评分，有效延缓鲜食玉米的品质下降。

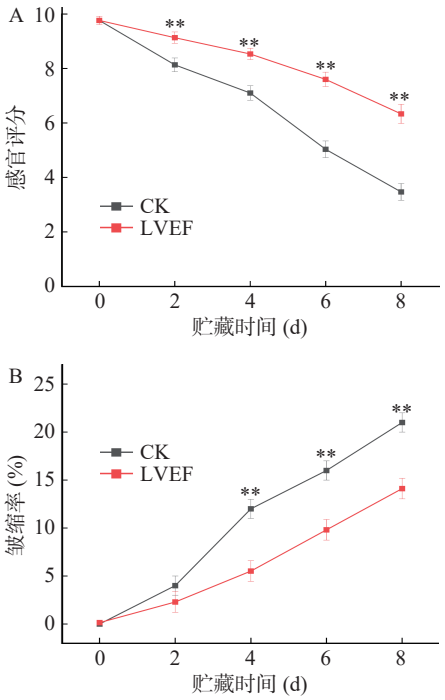


图 2　LVEF 处理对鲜食玉米感官评分（A）和皱缩率（B）的影响

Fig.2　Effects of LVEF treatment on sensory score (A), and shrinkage rate (B) of sweet corn

注：相较于 CK 组，同一贮藏时间内，标记*表示差异显著（P<0.05），**表示差异极显著（P<0.01）；图 3~图 5 同。

鲜食玉米采后贮藏期间依然进行着生命活动，会使组织氧化，进而导致颜色发生较大变化[13]。两组 L^*（明亮度）均随贮藏时间的延长呈下降趋势，但 LVEF 组的 L^* 始终高于 CK 组（图 3A）。a^* 表示红绿

色调，从−a^*到+a^*表明产品的颜色随着时间由绿转为红色。两组的 a^*随贮藏时间增加而降低且为负值，意味着绿色调逐渐增强（图 3B）。但 LVEF 组的 a^*值一直高于 CK 组，这表明 LVEF 处理能够延缓鲜食玉米变绿。b^*表示黄蓝色调，从−b^*到+b^*表明产品的颜色随着时间由蓝转为黄色（图 3C）。CK 组和 LVEF 组的值均随时间延长而上升，即黄色调逐渐增加，但 CK 组上升幅度更大。总体而言，LVEF 处理能够保持鲜食玉米原有色泽，延缓了因贮藏时间延长而导致的发黄变暗。

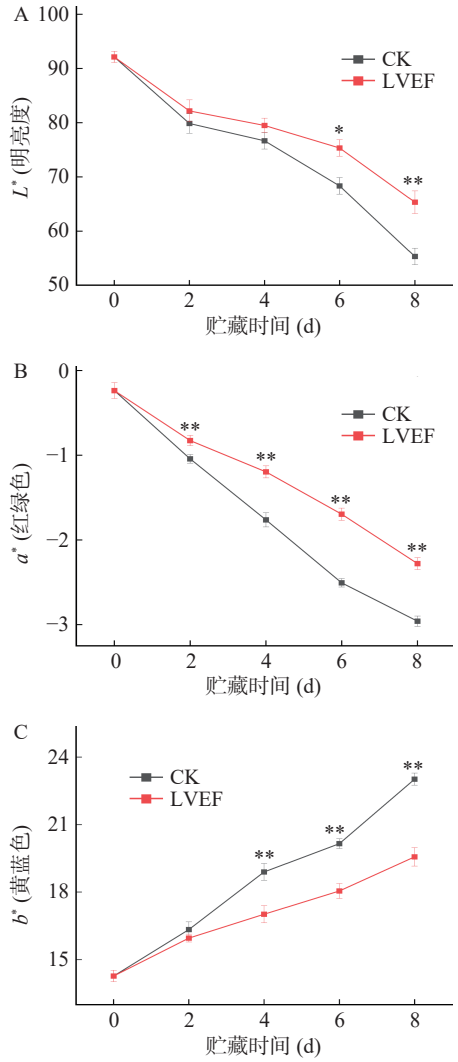


图 3 LVEF 处理对鲜食玉米色泽（A~C）的影响

Fig.3 Effects of LVEF treatment on color difference (A~C) of sweet corn

2.2 LVEF 处理对与鲜食玉米颜色相关抗氧化物质和酶活性的影响

丙二醛（MDA）是膜脂过氧化的最终产物，其含量增加会促进玉米颜色加深[23]。在贮藏过程中，CK 组的 MDA 含量的积累速度高于 LVEF 组，且从第 2 d 开始差异更显著（图 4A）。同时，类黄酮是一类广泛存在于植物中的天然黄色色素，具有多种生物活性的化合物，在抗氧化、抗炎等方面发挥着重要作用[24]。随着贮藏时间的延长，两组的类黄酮含量均呈现出先上升后下降的趋势。然而，LVEF 组的类黄酮含量在各个时间点均高于 CK 组（图 4B）。贮藏至第 4 d，两组鲜食玉米的类黄酮含量出现峰值，此时 CK 组和 LVEF 组的含量分别为 2.36 和 2.59 mg/g。结果表明，LVEF 处理通过增强鲜食玉米的抗氧化能力，有效缓解了膜脂过氧化，有助于维持细胞结构的完整性和玉米的良好色泽。

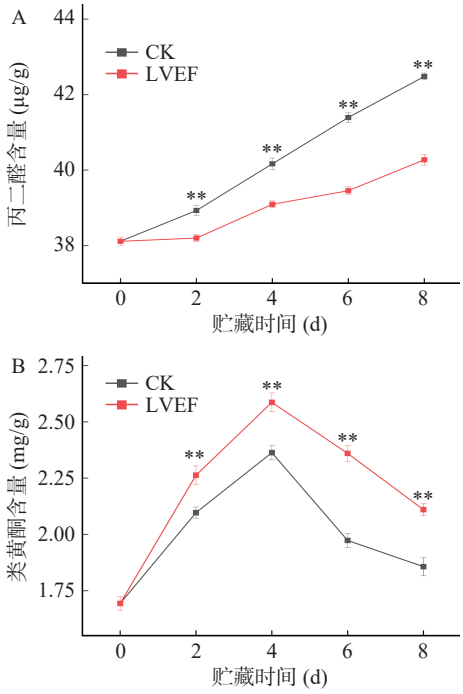


图 4 LVEF 处理对鲜食玉米丙二醛含量（A）和类黄酮含量（B）的影响

Fig.4 Effects of LVEF treatment on MDA content (A) and flavonoid content (B) of sweet corn

苯丙氨酸解氨酶（PAL）、多酚氧化酶（PPO）和过氧化物酶（POD）是苯丙烷代谢途径中的三类关键氧化酶。它们参与果蔬的酶促褐变反应，能够催化氧化果蔬内源的酚类物质，进而生成褐色物质，对果蔬的外观品质和商品价值产生重要影响。在贮藏期间，两组 POD 酶活力呈现先升高后降低的趋势，0~2 d 时，两组的变化趋势较为相近（图 5A）。自第 4 d 开始差异极显著（P<0.01），第 6 d 两组的 POD 酶活力出现峰值，这可能与 LVEF 处理诱导了鲜食玉米的抗胁迫能力有关。PAL 作为酚类物质合成的关键酶，其酶活力的变化与类黄酮的积累模式存在关联，CK 组第 4 d 出现谷值（1.21 U/g），而 LVEF 组第 6 d 才出现谷值（0.81 U/g）（图 5B），两组不同的变化轨迹揭示 LVEF 可能影响了酚类底物的供应。PPO 是催化褐变反应的关键酶，本研究中 CK 组的 PPO 酶活力始终高于 LVEF 组且持续上升（图 5C），表明其褐变趋势更为强烈。而 LVEF 处理显著抑制了 PPO 活性，这是其能够有效延缓鲜食玉米褐变、保持外观品质的核心原因。

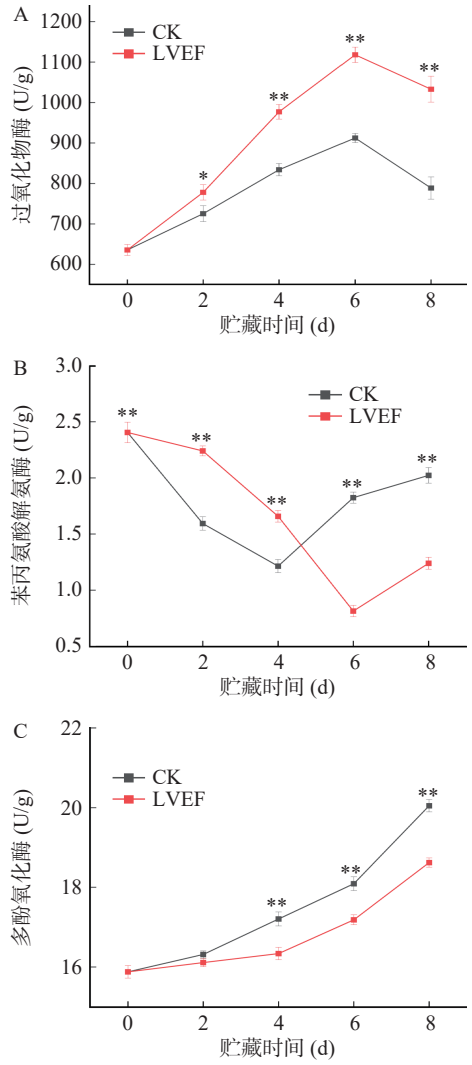


图 5　LVEF 处理对鲜食玉米过氧化物酶(A)、苯丙氨酸解氨酶(B)和多酚氧化酶(C)的影响

Fig.5　Effects of LVEF treatment on POD (A), PAL (B), and PPO (C) in sweet corn

2.3　LVEF 对鲜食玉米采后有机酸谱的影响

有机酸积累量是评估果实风味品质的关键指标。在鲜食玉米中，有机酸多以与钾、钠、钙等离子结合形成的盐或酯形式存在，仅少数呈游离态。这些有机酸具备抗氧化、抗菌抗炎、调节酸碱平衡及改善食品风味等多重功效。本研究基于 LC-MS/MS 平台的有机酸定量分析方法，检测了 65 种有机酸含量，其中达到检出限的有机酸共 49 种(表 2)。对 QC 样本进行皮尔逊(Pearson)相关性分析，$|r|\geq 0.9995$，说明检测过程稳定性好，数据质量高(图 6B)。对 QC 样本进行 PCA 分析以显示样品之间的物质含量差异(图 6A)。前三个主成分占总数据方差的 87.39%(PC1=52.34%，PC2=28.17%，PC3=6.88%)，较好地反映了原始数据的主要信息。以采收当日鲜食玉米的有机酸谱作为基准，将在自然贮藏条件或特定处理条件下所引发的有机酸谱显著性变化，作为评判其质量品质保持状况优劣的依据。刚采收的鲜食玉米含量最高的有机酸是 L-苹果酸、琥珀酸、乙酰丙酸、戊二酸和泛酸，其含量分别为 1391272.75、143318.71、32345.90、32021.02 和 11190.13 ng/g。

在 CK-8 d vs CK-0 d 中，显著上调的有机酸包括顺式-乌头酸、对羟基苯乙酸和富马酸等 6 种，显著下调的包括(R)-3-羟基丁酸、己二酸和隐绿原酸等 14 种(图 6D)。具有潜在鲜味和健康功能的 4-氨基丁酸较 CK-0 d 下降 71%。与抗氧化相关的有机酸含量大幅下降，如新绿原酸、隐绿原酸、(R)-3-羟基丁酸、DL-3-苯基乳酸和己二酸含量分别降低了 92%、81%、69%、99% 和 94%(图 6C)。此外，主要酸味物质 L-苹果酸含量相较于 CK-0 d 增加了 49 %，柠檬酸循环中间体顺式-乌头酸增加了 188%，富马酸也增加了 164%。在 LVEF-8 d vs CK-8 d 中差异

表 2　LVEF 对鲜食玉米有机酸含量的影响

Table 2　Effect of LVEF on the organic acid content of sweet corn

物质	CK-0 d(ng/g)	CK-8 d(ng/g)	LVEF-8 d(ng/g)
L-苹果酸	1391272.75±71613.06^{b}	2072048.07±37892.42^{a}	2235872.47±128614.45^{a}
琥珀酸	143318.71±2357.36^{a}	95990.88±5007.26^{b}	133243.38±6452.48^{a}
乙酰丙酸	32345.90±936.87^{a}	28097.17±460.16^{b}	32973.36±1082.36^{a}
戊二酸	32021.02±1777.89^{c}	37384.78±1294.29^{b}	48110.56±1949.01^{a}
泛酸	11190.13±500.99^{c}	18751.58±650.63^{b}	21623.35±579.13^{a}
乳酸	9142.46±1127.03^{b}	6480.08±1587.17^{b}	21491.26±2881.40^{a}
顺式-乌头酸	9068.55±443.17^{c}	26167.68±904.26^{a}	24063.73±1060.13^{b}
4-氨基丁酸	8952.56±285.24^{a}	2565.83±233.23^{b}	2649.15±552.21^{b}
富马酸	6060.09±1290.04^{b}	15983.50±177.27^{a}	19242.02±2397.18^{a}
反式-乌头酸	5774.04±377.39^{b}	11516.58±1857.02^{a}	11195.01±1384.31^{a}
酒石酸	5482.63±133.09^{b}	6325.94±179.58^{a}	6093.65±185.53^{a}
丙酮酸	4097.03±220.65^{b}	4778.90±331.72^{ab}	5657.00±637.13^{a}
α-酮戊二酸	2295.89±175.32^{c}	3157.48±16.43^{b}	4028.38±181.81^{a}
新绿原酸	2292.45±257.95^{a}	179.15±25.89^{c}	1038.86±30.56^{b}
5-羟基吲哚-3-乙酸	1617.64±130.67^{a}	968.64±132.49^{c}	1317.95±35.53^{b}
3-羟基异戊酸	1581.79±73.90^{a}	700.50±13.48^{c}	1140.08±22.54^{b}
L-焦谷氨酸	1155.59±100.42^{a}	975.09±47.3^{a}	1123.28±112.86^{a}
甲基丁二酸	893.32±27.94^{c}	1534.14±69.27^{b}	2246.22±46.03^{a}
阿魏酸	807.50±71.43^{a}	642.32±53.04^{b}	865.77±58.97^{a}

续表 2

物质	CK-0 d(ng/g)	CK-8 d(ng/g)	LVEF-8 d(ng/g)
己二酸	614.07±13.70^{a}	38.45±7.32^{c}	139.53±14.41^{b}
吲哚-3-乙酸	539.66±29.19^{a}	245.01±38.27^{b}	262.72±42.78^{b}
3-羟基-3-甲基谷氨酸	531.90±18.71^{b}	357.43±11.36^{c}	675.93±30.23^{a}
DL-3-苯基乳酸	483.50±60.19^{b}	149.63±36.75^{c}	1036.07±168.15^{a}
4-香豆酸	462.23±43.72^{a}	487.03±41.79^{a}	498.04±72.02^{a}
莽草酸	433.85±15.91^{c}	506.75±25.16^{b}	581.40±37.7^{a}
隐绿原酸	414.30±18.34^{a}	80.64±24.58^{c}	192.62±24.48^{b}
(R)-3-羟基丁酸	372.63±13.34^{a}	NA	110.59±30.14^{b}
咖啡酸	297.62±9.98^{a}	211.18±3.77^{b}	276.17±21.79^{a}
3-(4-羟基苯基)乳酸	283.03±42.44^{b}	276.92±31.89^{b}	1146.50±174.14^{a}
牛磺酸	250.65±7.03^{c}	462.20±25.94^{a}	385.44±35.84^{b}
对羟基苯甲酸	169.27±10.31^{a}	115.73±1.32^{b}	125.51±12.12^{b}
2-羟基-3-甲基丁酸	148.90±8.97^{a}	21.49±4.12^{c}	61.07±10.53^{b}
水杨酸	108.37±12.75^{a}	48.92±0.92^{c}	90.12±3.64^{b}
2-羟基-2-甲基丁酸	73.08±2.96^{a}	50.96±3.00^{b}	67.37±3.20^{a}
辛二酸	61.40±5.86^{a}	51.00±9.53^{a}	56.29±1.50^{a}
苯乙酰甘氨酸	39.78±8.94^{c}	145.00±20.13^{b}	432.22±12.66^{a}
3-甲基己二酸	38.33±8.17^{a}	14.21±3.99^{b}	29.16±7.67^{a}
壬二酸	35.45±6.94^{b}	150.07±22.04^{a}	134.14±33.06^{a}
3-吲哚乙酸	33.20±3.48^{a}	2.72±4.07^{c}	17.99±1.93^{b}
肉桂酸	28.29±2.93^{b}	37.23±10.82^{b}	63.35±5.68^{a}
4-羟基马尿酸	6.64±0.51	NA	NA
没食子酸	1.83±0.49^{a}	2.28±0.34^{a}	3.13±0.77^{a}
3-(3-羟基苯基)-3-羟基丙酸	1.78±0.30	NA	NA
邻氨基苯甲酸	1.33±0.28^{a}	1.86±0.47^{a}	1.93±0.37^{a}
癸二酸	1.20±0.23^{b}	1.86±0.15^{a}	0.60±0.28^{c}
3-羟基马尿酸	0.11±0.03^{a}	0.14±0.12^{a}	0.19±0.17^{a}
齐墩果酸	NA	3835023.43±142122.31^{b}	5056238.57±616831.94^{a}
对羟基苯乙酸	NA	95.15±10.54^{b}	178.92±4.74^{a}
邻羟基苯乙酸	NA	NA	0.88±0.13
总计	1674802.39±82246.11^{c}	6172830.40±193402.04^{ab}	7636782.58±765846.38^{a}

注: NA表示未检出, 同行不同小写字母表示有显著性差异(P<0.05); 表3同。

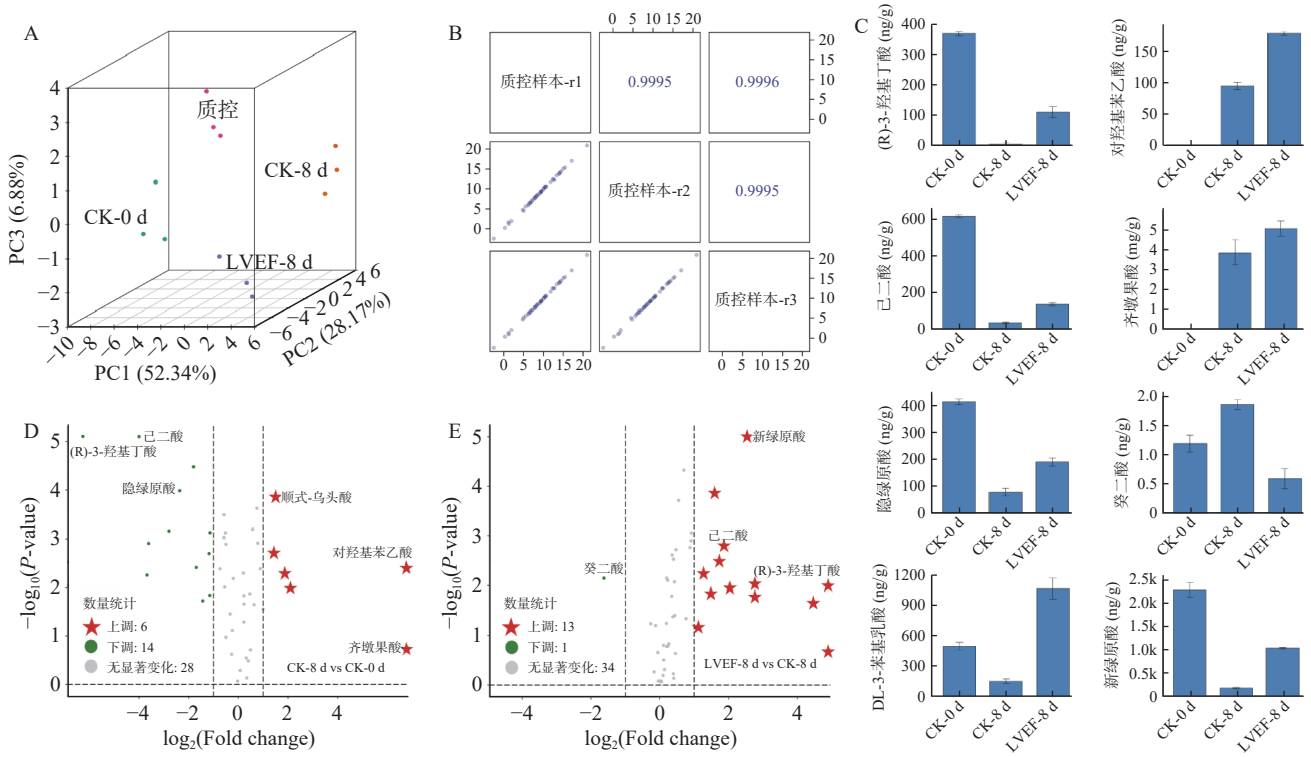


图 6 总体样本主成分分析(A)、质控样本相关性分析(B)、物质含量柱状图(C)和不同分组差异有机酸火山图(D~E)

Fig.6 Principal component analysis of the overall sample (A), correlation analysis of quality control samples (B), bar chart of substance contents (C), and volcano plots of differentially abundant organic acids among different groups (D~E)

表达的有机酸，除了癸二酸外，其余均上调（图 6E）。此外，反式/顺式-乌头酸在 LVEF-8 d 中的积累量低于 CK-8 d。对羟基苯乙酸和齐墩果酸在 CK-0 d 未检出，却在 CK-8 d 和 LVEF-8 d 出现大量积累，这或许是玉米品质劣变的关键参考指标。结果表明，LVEF 处理通过提高抗氧化性相关的有机酸含量延缓果实颜色转暗，还能降低壬二酸和反式/顺式-乌头酸的含量以减少贮藏过程中因品质劣变而导致的酸涩味。

2.4　LVEF 对鲜食玉米糖类代谢的影响

糖类是多羟基醛或酮类及水解后能生成多羟基醛或酮的一类化合物，由碳氢氧三种元素组成。鲜食玉米的风味特性与其所含糖分的种类和含量密切相关，因此本文建立了一种基于 GC-MS 平台的糖分析方法，对 32 种常见的糖类物质进行了靶向检测分析，涵盖木糖醇、阿拉伯糖醇、D-阿拉伯糖等 25 种单糖，蔗糖、海藻糖、麦芽糖等 6 种二糖以及棉子糖（三糖）。结果显示，达到检出限的糖类物质有 25 种，包括 20 种单糖、4 种二糖和 1 种三糖（图 7D）。

变异系数（CV）是原始数据标准差与原始数据平均数的比，可反映数据离散程度。CK-0 d 和 LVEF-8 d 的 CV 值超过 80% 的低于 0.2，CK-8 d 的 CV 值超过 80% 的低于 0.3，说明 3 组样本的实验数据稳定，经过 LVEF 处理的样本能更好地维持数据的稳定性（图 8）。采后鲜食玉米的糖类代谢呈现出下降趋势，总体表现为甜度降低。在新鲜样品中，蔗糖（205.0905 mg/g）占据主导地位，其含量远超其他糖类。常温贮藏 8 d 后，蔗糖含量降至 8.49 mg/g（降幅 96%），葡萄糖、果糖及 D-山梨醇分别下降 74%、88% 和 92%。绝大多数微量糖/糖醇（如肌醇、海藻糖、D-甘露糖、D-核糖等）也普遍呈现下降趋势。然而，LVEF 处理显著延缓了关键糖类的降解。LVEF-8 d 组蔗糖含量约为 CK-8 d 组的 5.2 倍，葡萄糖与果糖含量也分别提升 70% 和 96%。D-山梨醇在 LVEF 组保留量达 CK-8 d 组的 4.1 倍。同时，LVEF 有效维持了多种微量糖/糖醇的水平，并抑制了棉子糖的积累（表 3）。上述结果表明，LVEF 处理的核心机制在于有效减缓蔗糖等关键甜味物质的降解速率，维持 D-山梨醇等风味相关糖醇含量，并抑制棉子糖积累、提升磷酸化中间代谢产物稳态。

KEGG 代谢通路图中数字表示注释到该通路的差异代谢物个数，括号内为注释到该条目的差异代谢物数与所有注释到 KEGG 上差异代谢物的比例。CK-8 d vs CK-0 d 反映了玉米在自然贮藏 8 d 后与贮藏前的代谢差异（图 7A）。KEGG 富集共分为 3 个类别，代谢类别中淀粉和蔗糖代谢、半乳糖代谢、次生代谢产物的生物合成等代谢分类富集到较多糖类。细胞过程中的胞葬作用富集到了葡萄糖，说明在自然贮藏过程中，玉米的衰老与糖类组成相关。LVEF-8 d vs CK-8 d 体现了 LVEF 处理与 CK 处理在贮藏 8 d 后的代谢差异，与 CK-8 d vs CK-0 d 相比，该组代谢途径和半乳糖代谢的富集程度依然较高，但数量有所减少（图 7B）；而 ABC 转运蛋白的富集程度在 LVEF-8 d vs CK-8 d 中也很高，说明 LVEF 处理可能对物质运输相关的代谢活动有显著影响。两组之间淀粉与蔗糖代谢均为富集最显著的通路，其中 LVEF 处理主要通过减缓蔗糖的损失速率进而维持甜度（图 7C）。结果表明，LVEF 处理增强了糖类在玉

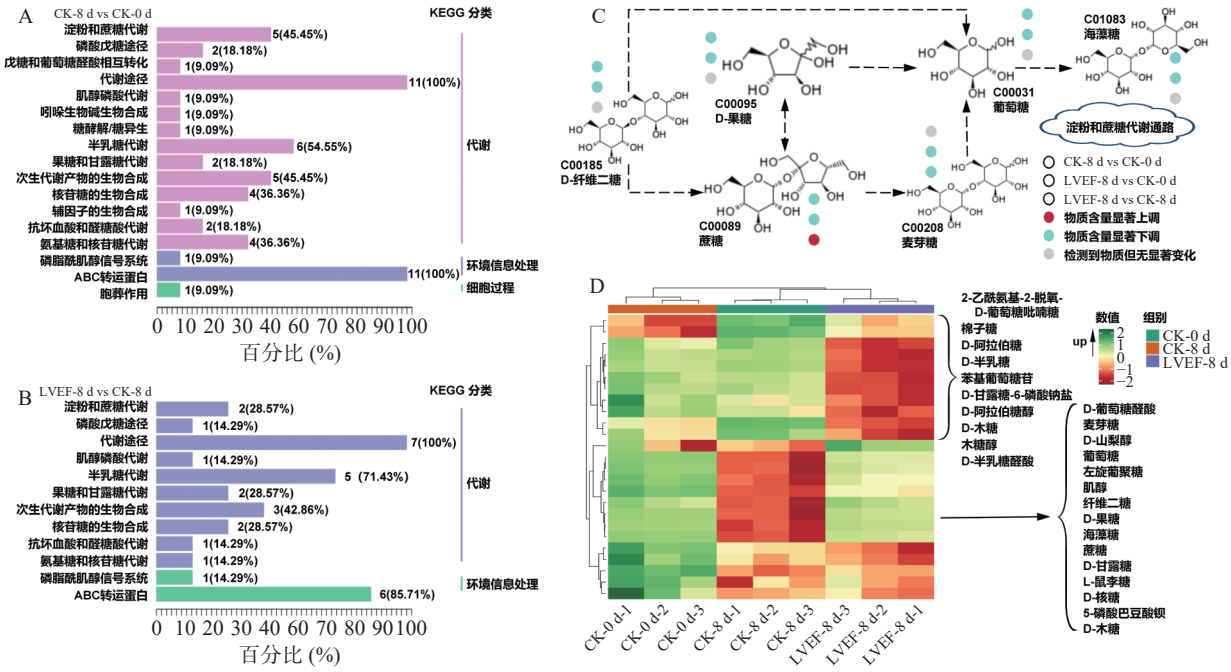


图 7　不同组别 KEGG 富集分析图（A~B）、淀粉与蔗糖代谢通路图（C）和糖类在各组的含量变化（D）

Fig.7　KEGG enrichment analysis diagrams of different groups (A~B), starch and sucrose metabolic pathway diagram (C), and changes in sugar content among groups (D)

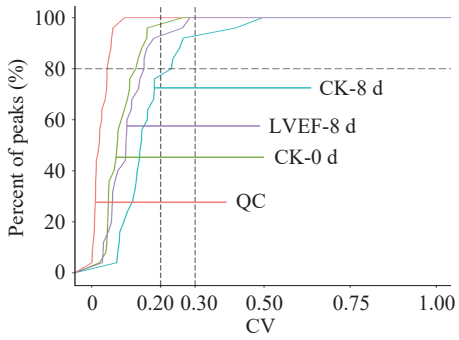


图 8 各组样本中 CV 分布图

Fig.8 Distribution plot of CV in each group of samples

表 3 LVEF 对鲜食玉米糖类含量的影响

Table 3 Effect of LVEF on the sugar content of sweet corn

物质	CK-0 d(mg/g)	CK-8 d(mg/g)	LVEF-8 d(mg/g)
蔗糖	205.09±19.98^{a}	8.49±2.14^{c}	44.49±6.96^{b}
葡萄糖	8.30±1.03^{a}	2.15±0.26^{c}	3.65±0.41^{b}
D-果糖	5.27±0.80^{a}	0.64±0.09^{b}	1.26±0.16^{b}
D-山梨醇	1.55±0.20^{a}	0.12±0.03^{c}	0.49±0.05^{b}
麦芽糖	0.55±0.08^{a}	0.50±0.25^{a}	0.23±0.06^{a}
肌醇	0.40±0.02^{a}	0.10±0.02^{c}	0.24±0.01^{b}
D-半乳糖	0.15±0.01^{b}	0.16±0.03^{b}	0.44±0.04^{a}
1,6-脱水-β-D-葡萄糖	0.10±0.01^{a}	0.03±0.00^{c}	0.06±0.01^{b}
海藻糖	0.08±0.01^{a}	0.01±0.01^{b}	0.01±0.00^{b}
D-纤维二糖	0.07±0.01^{a}	0.03±0.01^{b}	0.03±0.00^{b}
D-甘露糖-6-磷酸钠	0.06±0.00^{b}	0.05±0.01^{b}	0.15±0.01^{a}
棉子糖	0.05±0.01^{c}	0.24±0.04^{a}	0.17±0.02^{b}
D-甘露糖	0.05±0.00^{a}	0.03±0.00^{b}	0.06±0.01^{a}
D-葡萄糖醛酸	0.03±0.00^{b}	0.04±0.01^{b}	0.06±0.01^{a}
D-核糖	0.03±0.00^{a}	0.01±0.00^{b}	0.03±0.00^{a}
D-核糖-5-磷酸钡盐	0.03±0.01^{a}	0.01±0.00^{b}	0.02±0.01^{a}
阿拉伯糖醇	0.02±0.00^{b}	0.02±0.00^{b}	0.04±0.00^{a}
D-阿拉伯糖	0.02±0.00^{b}	0.02±0.00^{b}	0.03±0.00^{a}
N-乙酰氨基葡萄糖	0.01±0.00^{c}	0.03±0.00^{a}	0.02±0.00^{b}
D-半乳糖醛酸	0.01±0.00^{c}	0.03±0.00^{b}	0.05±0.00^{a}
木糖醇	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}
L-鼠李糖	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}
D-木糖	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}
苯基-β-D-吡喃葡萄糖苷	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}
D-木酮糖	0.01±0.00^{a}	NA	0.01±0.00^{a}
总计	221.91±22.17^{a}	12.72±2.90^{c}	51.58±7.76^{b}

米籽粒中的储存能力，减少了糖类向其他非甜味物质的转化，为维持玉米的甜味和品质提供了代谢支持。

2.5 基于电子鼻的挥发性有机化合物分析

通过对 10 个传感器的平均响应值进行主成分分析(PCA)，以探究鲜食玉米在特征风味上的差异。主轴 1(PC1)与主轴 2(PC2)的方差分别为 89.71%和 7.30%，累计贡献率达到 97.01%，有效概括了原始数据的主要特征(图 9C)。CK 组和 LVEF 组样本在 PC1 轴上完全分离，无交集。CK 组样本在 PC1 轴上的分布跨度明显大于 LVEF 组，这表明对照组样本间的风味差异较大，数据离散度高；而 LVEF 处理组的样本分布相对集中，表明 LVEF 处理有效减

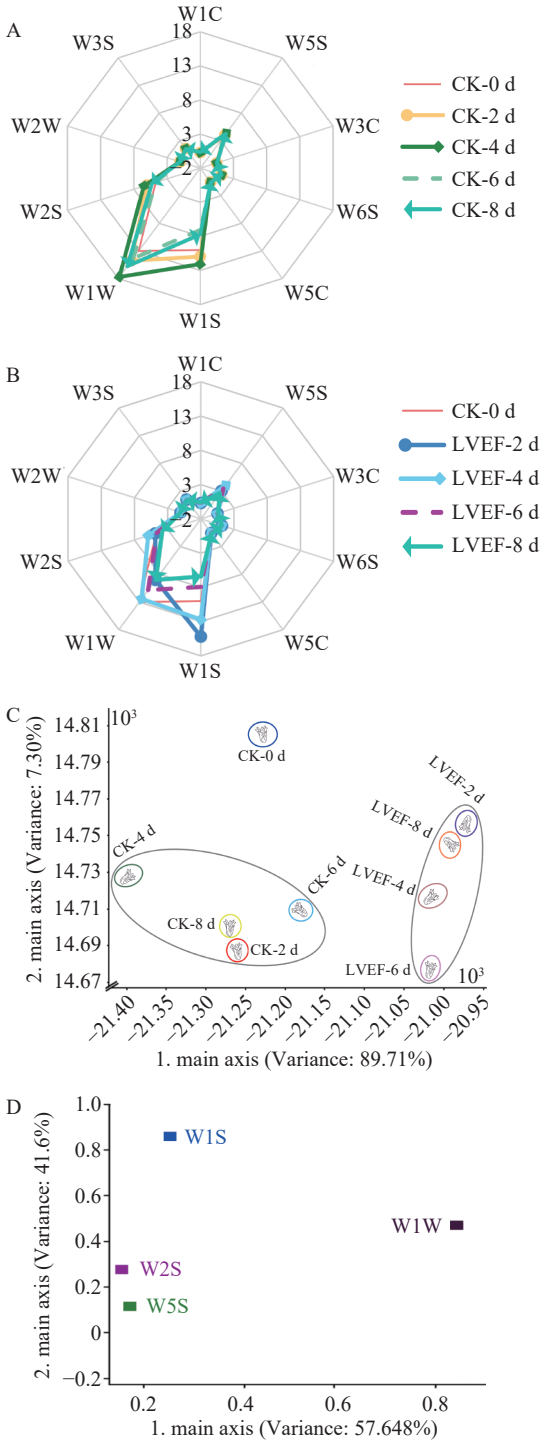


图 9 电子鼻的雷达图(A~B)、主成分分析图(C)和载荷分析图(D)

Fig.9 Electronic nose radar chromatogram (A~B), principal component analysis plot (C), and loading analysis plot (D)

缓了风味变化，组内的风味一致性更好。

载荷分析(Loading, LO)可评估传感器对挥发性气味的贡献度，传感器距坐标轴原点越远，其对香气分析起到的作用越大。供试玉米样本总贡献率为 99.25%，其中 W1W 对 PC1 的贡献率最大，W1S 对 PC2 的贡献率最大，W2S 和 W5S 也对 PC1 和 PC2 有较大贡献率(图 9D)。这四个传感器所提取的信息能够有效反映风味特征，具体而言，鲜食玉米的主要风味特征由硫化物、吡嗪、萜烯类物质、甲烷等短链

烷烃、氮氧化合物以及醇类共同构成。结合图 9A、B 分析可知，醇类、吡嗪、萜烯和硫化物等在鲜食玉米贮藏期含量逐步增加，对照组的积累速度大于处理组。氮氧化合物和短链烷烃在处理组仍呈现增长趋势，对照组的积累量减少。

2.6　基于 GC-IMS 的挥发性有机化合物（VOCs）分析

为进一步了解鲜食玉米的风味物质变化，进行了 GC-IMS 测定，光谱中独立光点代表一种特定的 VOCs，扣除背景干扰后，光点的红色与其浓度正相关，蓝色与其浓度负相关。对照组鲜食玉米在贮藏过程中 VOCs 呈现逐渐累积的趋势，第 6 d 开始大量累积，第 8 d 部分 VOCs 浓度有所降低（图 10B）。处理组 VOCs 浓度累积趋势与对照组一致，但累积速度较缓慢，没有突然激增。这表明 LVEF 处理能够较好地维持鲜食玉米的风味品质稳定。

通过将 VOCs 的保留指数（RI）和质谱与参考化合物的 RI 和质谱进行比较，在样本中初步鉴定了 43 种 VOCs，其中醇类 12 种、酯类 7 种、醛类 5 种、烯烃类 5 种、杂环化合物 5 种、酮类 4 种、硫化物 3 种、芳香族和酰胺类化合物各 1 种（表 4）。VOCs 指纹图谱直观展示了 LVEF 处理对鲜食玉米风味的

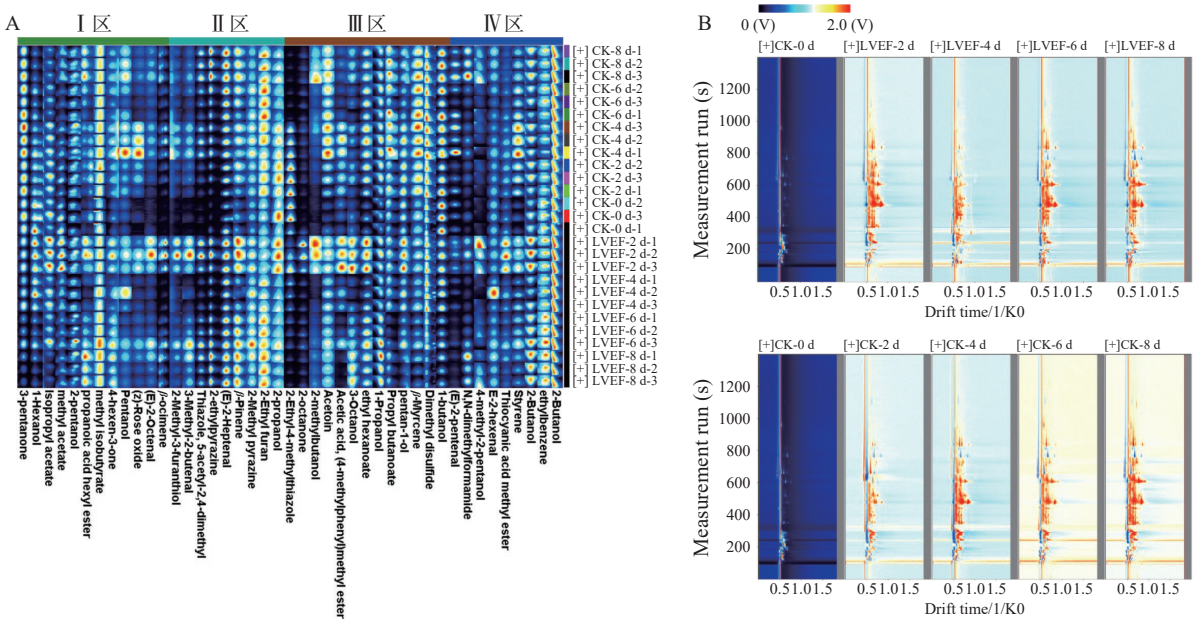


图 10　挥发性有机化合物指纹图谱（A）、处理组和对照组的不同贮藏时期鲜食玉米的 GC-IMS 比对二维谱图（B）

Fig.10　Volatile organic compound fingerprint (A), GC-IMS two-dimensional comparative spectra of sweet corn from the treatment group and the control group at different storage periods (B)

表 4　气相色谱-离子迁移谱法鉴定 LVEF 对鲜食玉米中挥发性成分的影响

Table 4　Effects of LVEF on the identification of volatile components in sweet corn by GC-IMS

CAS#	英文名称	化合物	分子式	保留指数	保留时间（s）	漂移时间（ms）	数据库风味描述词
醇类							
1	1-Hexanol	正己醇	$C_6H_{14}O$	1351,0	769,602	132,873	香蕉、花、草、香草
2	Pentanol	戊醇	$C_5H_{12}O$	1216,7	417,499	125,711	绿色青草味
3	2-Propanol	2-丙醇	C_3H_8O	930,3	170,61	108,619	花卉
4	Pentan-1-ol	1-戊醇	$C_5H_{12}O$	1268,0	522,042	12,479	香脂、水果、绿色、辛辣、酵母
5	1-Butanol	1-丁醇	$C_4H_{10}O$	1176,1	353,987	117,712	发酵、油、果味
6	2-Methylbutanol	2-甲基丁醇	$C_5H_{12}O$	1174,2	351,452	147,079	鱼油、绿色、麦芽、洋葱、葡萄酒
7	2-Pentanol	2-戊醇	$C_5H_{12}O$	1124,7	292,11	11,928	杂气油、绿色
8	3-Octanol	3-辛醇	$C_8H_{18}O$	1002,2	200,891	140,384	柑橘、苔藓、蘑菇、坚果
9	1-Propanol	1-丙醇	C_3H_8O	995,9	197,742	124,344	酒精、糖果、辛辣
10	4-Methyl-2-pentanol	4-甲基-2-戊醇	$C_6H_{14}O$	1168,9	344,162	127,058	–
11	2-Butanol(dimer)	仲丁醇(二聚体)	$C_4H_{10}O$	1039,3	222,128	116,583	–
12	2-Butanol(dimer)	仲丁醇(二聚体)	$C_4H_{10}O$	1001,6	200,566	132,768	–
芳香族							
13	Ethylbenzene	乙苯	C_8H_{10}	1097,4	265,904	108,492	–

续表 4

CAS#	英文名称	化合物	分子式	保留指数	保留时间(s)	漂移时间(ms)	数据库风味描述词
硫化物							
14	2-Methyl-3-furanthiol	2-甲基-3-呋喃硫醇	C_5H_6OS	1293,0	585,35	114,703	油炸、坚果、土豆、烤肉
15	Dimethyl disulfide	二甲基二硫化物	$C_2H_6S_2$	1094,9	263,739	11,347	卷心菜、大蒜、洋葱
16	Thiocyanic acid methyl ester	硫氰酸甲酯	C_2H_3NS	1275,3	539,627	118,041	–
其他							
17	N,N-Dimethylformamide	N,N-二甲基甲酰胺	C_3H_7NO	1282,0	556,51	125,153	–
醛类							
18	(E)-2-Octenal	(E)-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	1376,6	868,738	1,334	蒲公英、脂肪、水果、绿色、香料
19	(E)-2-Heptenal	(E)-2-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	1302,3	611,377	125,298	杏仁、脂肪、水果
20	3-Methyl-2-butenal	3-甲基-2-丁烯醛	C_5H_8O	1204,7	397,233	135,384	杏仁、烤
21	(E)-2-Pentenal	(E)-2-戊烯醛	C_5H_8O	1174,7	352,104	136,367	–
22	E-2-Hexenal	E-2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	1216,6	417,354	118,241	–
酮类							
23	4-Hexen-3-one	4-己烯-3-酮	$C_6H_{10}O$	1206,0	399,274	110,587	水果
24	3-Pentanone	3-戊酮	$C_5H_{10}O$	970,9	186,192	133,806	薄荷味
25	2-Octanone	2-辛酮	$C_8H_{16}O$	1320,1	664,837	133,062	脂肪、芳香、霉菌
26	Acetoin	乙偶姻	$C_4H_8O_2$	1302,6	612,08	132,264	黄油、奶油、青椒
烯烃类							
27	(z)-Rose oxide	(z)-玫瑰氧化物	$C_{10}H_{18}O$	1368,6	836,472	137,119	绿
28	*β*-Ocimene	*β*-罗勒烯	$C_{10}H_{16}$	1249,6	481,098	166,453	花卉
29	*β*-Pinene	*β*-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	1072,3	245,203	129,863	松木、木材
30	*β*-Myrcene	*β*-肉桂烯	$C_{10}H_{16}$	984,4	192,176	12,918	香脂、水果、天竺葵、香草、葡萄汁
31	Styrene	苯乙烯	C_8H_8	1250,5	482,979	142,497	–
杂环化合物							
32	Thiazole,5-acetyl-2,4-dimethyl	噻唑, 5-乙酰基-2,4-二甲基	C_7H_9NOS	1370,0	841,953	126,477	咸香
33	2-Ethyl-4-methylthiazole	2-乙基-4-甲基噻唑	C_6H_9NS	1321,6	669,409	115,792	辛辣
34	2-Methyl pyrazine	2-甲基吡嗪	$C_5H_6N_2$	1261,4	506,918	109,043	可可、绿色、榛子、爆米花、烤
35	2-Ethylpyrazine	2-乙基吡嗪	$C_6H_8N_2$	1301,9	610,092	151,206	烧焦、绿色、朗姆酒、木头
36	2-Ethyl furan	2-乙基呋喃	C_6H_8O	933,1	171,546	104,757	黄油、焦糖
酯类							
37	Propanoic acid hexyl ester	丙酸己酯	$C_9H_{18}O_2$	1338,7	726,17	142,137	水果
38	Isopropyl acetate	丙酸异丙酯	$C_5H_{10}O_2$	900,4	161,254	115,516	香蕉
39	Methyl acetate	甲酸甲酯	$C_3H_6O_2$	861,6	151,275	119,792	酯类、绿色
40	Methyl isobutyrate	异丁酸甲酯	$C_5H_{10}O_2$	676,6	125,079	113,516	花、水果
41	Ethyl hexanoate	己酸乙酯	$C_8H_{16}O_2$	1251,2	484,409	133,135	白兰地、果胶、熟透水果、菠萝
42	Acetic acid, (4-methylphenyl)methyl ester	乙酸, (4-甲基苯基)甲酯	$C_{10}H1_2O_2$	1266,8	519,247	148,462	辛辣、酸
43	Propyl butanoate	丙基丁酸酯	$C_7H_{14}O_2$	1122,9	290,219	125,713	杏、水果、菠萝、溶剂

影响，Ⅰ区 VOCs 对鲜食玉米“花”“果”“青草”和“绿色”贡献较大，其中 LVEF 条件下贮藏的鲜食玉米中甲酸甲酯、*β*-罗勒烯、(z)-玫瑰氧化物和 4-己烯-3-酮等 VOCs 的浓度总体上大于 CK 组(图 10A)。Ⅱ区 VOCs 含量随贮藏时间变化，对照组和处理组呈现相反的趋势，它们是对“松木”“坚果”“焦糖”和“咸香”做出贡献的 2-甲基-3-呋喃硫醇、3-甲基-2-丁烯醛、(E)-2-庚烯醛和 *β*-蒎烯。Ⅲ区鉴定出的 2-乙基-4-甲基噻唑、乙偶姻、丙基丁酸酯、*β*-肉桂烯和 1-丁醇带有霉味、酸腐气息和发酵果酒味，且大多具有刺激性气味，对照组鲜食玉米的浓度高于 LVEF 处理。Ⅳ区所涉及的物质，未在数据库中检索到与之相关的风味描述词。该区域存在一对用作增味剂的同分异构体仲丁醇，它们在两组样本中的表达趋势呈现出一致性，不过在 LVEF 组的色谱峰表现更为显著。结果表明，LVEF 处理促进了令人愉快的 VOCs 的产生，较好地维持了鲜食玉米的风味，同时抑制了不良风味化合物的生成。

3　讨论

鲜食玉米采后水分含量高，贮运过程中容易出现籽粒皱缩，甜味下降等现象，严重影响了其市场价值。LVEF 通过改变生物细胞膜电位影响代谢活动，可推迟果蔬采后呼吸高峰，降低细胞内氧化反应的发生频率与强度，从而有效保护易因氧化而损失的营养成分和风味物质，最终显著延长果蔬的采后货架期[7,10]。本研究系统解析了 LVEF 处理下鲜食玉米有机酸、糖类代谢物组成及其与色泽、风味特征的关联，构建了涵盖“色、香、味”多维度品质的数据集，为阐明 LVEF 调控机制提供了依据。

色泽作为衡量果蔬新鲜度与品质的关键外观指标，显著影响着消费者的购买意愿[25−26]。LVEF 处理显著抑制了 MDA 的积累，降低 PAL 与 PPO 活性（分别下降 8.33% 和 3.89%），同时激活抗氧化防御系统，类黄酮含量提升 10.94%，POD 活性增强 16.97%，有效延缓了鲜食玉米的色泽劣变。MDA 作为膜脂过氧化产物，其含量上升往往伴随色素降解与组织褐变[27]。本研究中色泽指标变化进一步表明，LVEF 处理减轻了脂质氧化对色素的破坏，与 Wang 等[23] 在类似电场处理中的发现一致。此外，类黄酮作为重要的抗氧化与呈色物质，其含量上升对维持外观品质具有积极意义，Lü等[24] 在不同色泽大球盖菇中的研究也提示类黄酮与颜色呈现密切相关。Harisha 等[28] 指出 PPO 是引起谷物产品褐变的关键酶，本研究中 LVEF 对 PPO 活性的抑制与前人结果相契合，进一步支持其在延缓采后褐变中的潜力。

鲜食玉米的气味组成主要受酯类、醛类、醇类、酮类及萜烯等挥发性有机物（VOCs）调控[29]。电子鼻分析显示，LVEF 处理组样本风味数据更为集中，特征波动小，有助于维持良好的风味稳定性。GC-IMS 结果进一步表明，对照组在常温贮藏下 VOCs 累积迅速，风味劣变快，与 Chen 等[3] 报道一致；而 LVEF 处理显著减缓了 VOCs 的异常累积，抑制不良风味形成，与低温贮存效果相近[30]。通过 VOCs 指纹图谱分析共鉴定出 43 种物质，LVEF 处理促进了“花”“果”类愉悦风味物质的生成，同时抑制了霉味与酸腐类不良气味，较好地维持了鲜食玉米的典型风味特征。

有机酸和糖类的含量和种类构成是影响水果和蔬菜滋味、口感和风味的关键因素[31]。适当的酸度不仅可提升甜味感知，还能增强果香与花香的清新感[32−33]。本研究以采收当日样品为基准，发现自然贮藏下 4-氨基丁酸等具鲜味与功能性的有机酸下降显著[34]，而 L-苹果酸等酸味物质则上升[35]；LVEF 处理则通过提高新绿原酸、（R）-3-羟基丁酸等抗氧化相关有机酸含量，延缓色泽转暗，并降低壬二酸与乌头酸等带来酸涩味的组分，从而改善整体风味。此外，LVEF 还促进了对酸感知敏感的丙酮酸、戊二酸等物质的积累，增强了果香与花香的释放强度。在糖类代谢方面，糖类降解是鲜食玉米品质劣变的主要表现[36]，其中蔗糖、葡萄糖与果糖为主要甜味物质，占总糖 98% 以上。与采收当日相比，对照组在第 8 d 糖类总量下降 94.27%，而 LVEF 处理组仅下降 76.76%，表明 LVEF 显著延缓了糖类降解，特别是蔗糖、葡萄糖和果糖等关键甜味成分。LVEF 对棉子糖（一种与籽粒硬化及风味劣变相关的抗营养因子）的积累具有抑制作用，这与维持甜味稳态和延缓品质劣变密切相关[37]。KEGG 富集分析显示，LVEF 处理下糖代谢通路如半乳糖代谢仍保持活跃，说明其并非完全抑制代谢，而是通过选择性调控减缓糖类分解速率，与 Liu 等[9] 关于 LVEF 延缓糖类降解的结论一致。

本研究明确了 LVEF 在维持鲜食玉米采后色泽、风味与糖酸平衡方面的积极作用，但也存在一定局限。结论主要基于生理指标与代谢物分析，尚未深入揭示 LVEF 调控糖酸代谢的分子机制。KEGG 分析提示 ABC 转运蛋白及淀粉-蔗糖代谢通路可能参与其中，但相关基因表达模式及电场信号传导路径尚未明确。后续研究如能结合转录组与蛋白组数据，解析 LVEF 通过 ROS 信号或钙离子通道调控下游基因表达的级联机制，将有助于构建“电场应激-基因响应-代谢表型”的调控网络，为 LVEF 在采后保鲜中的应用提供更深层次的理论支撑。

4　结论

本研究聚焦低电压电场（LVEF）处理对鲜食玉米采后色泽、风味和滋味的影响，首次系统解析其挥发性有机化合物、有机酸与糖类代谢物图谱的变化。研究结果显示，LVEF 延缓了色泽劣变，减少 MDA 积累，降低 PAL 和 PPO 等相关酶活力，抑制褐变；电子鼻和 GC-IMS 分析表明 LVEF 稳定鲜食玉米的风味特征，明确主要风味物质，减缓不良风味物质生成，促进愉悦风味产生，提升风味品质；LVEF 可延缓贮藏过程中鲜食玉米风味劣变，提高抗氧化相关有机酸含量，降低产生酸涩口感有机酸的含量，延缓糖类降解或代谢，抑制棉子糖积累，延长糖类储存期。综上所述，1 kV LVEF 处理可以有效延缓鲜食玉米的色泽变暗，延缓糖类代谢或转化速度，减少带酸涩味的有机酸积累量，进而维持良好风味品质，延长其货架期。

© 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] 徐丽，赵久然，卢柏山，等. 我国鲜食玉米种业现状及发展趋势[J]. 中国种业，2020(10)：14−18. [XU L, ZHAO J R, LU B S, et al. Current situation and development trend of fresh corn seed industry in China[J]. China Seed Industry, 2020(10): 14−18.]

[2] JOMNONG P, FUNSUEB S, THANAVANICH C, et al. Non-

destructive shelf-life prediction models for sweet corn via NIR spectroscopy and integrated postharvest quality parameters[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 227: 113567.
[3] CHEN S Q, ZHENG Y Y, FAN W G, et al. Unravelling the postharvest quality diversities of different sweet corn varieties[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 209: 112718.
[4] LIU S Y, ZHENG Y Y, WANG R H, et al. Chlorine dioxide affects metabolism of harvested sweet corn[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 211: 112834.
[5] 徐阳, 常婧, 姜冬, 等. 低温贮藏对软枣猕猴桃主要风味品质指标的影响[J]. 林业科技通讯, 2024(1): 90−93. [XU Y, CHANG J, JIANG D, et al. Effects of low temperature storage on main flavor and quality indexes of *Actinidia arguta*[J]. Forest Science and Technology, 2024(1): 90−93.]
[6] ZHAO Y, QI T J, CUI C Y, et al. Effects of different storage temperatures on the quality and metabolome of maize with high moisture content[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 214: 117117.
[7] YANG C G, ZHOU Z, NIU P R, et al. Transcriptomic and physiological analysis reveal the effects and potential mechanisms of low-voltage electrostatic field treatment on the quality retention of goji berries during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117762.
[8] QI Y Z, LIU F Y, CAO M X, et al. Influence of low voltage electrostatic field combined with microporous packaging on the quality and physiological metabolism of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 103: 104053.
[9] LIU F Y, ZHANG Y Z, ZENG M, et al. Quantified low voltage electrostatic field: The effects of intensity on cherry tomato preservation and mechanism[J]. Food Chemistry, 2025, 463(1): 141100.
[10] XU C, ZHANG X Y, LIANG J, et al. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112017.
[11] WANG X, MU Y C, SU W, et al. Metabolomics-based study on the effect of low-voltage electrostatic field treatment on the storage quality of postharvest square bamboo shoots[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102143.
[12] LIU S Y, ZHOU X Y, WANG Y X, et al. Storage temperature affects metabolism of sweet corn[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 219: 113232.
[13] REN Y TI, MU J L, ZHAO L Q, et al. Pulsed light treatment affects postharvest quality and regulatory mechanisms of sweet corn[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 221: 117584.
[14] 时文林, 赵雅琦, 姜清秀, 等. 不同厚度聚乙烯膜包装对甜玉米贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(1): 1−8. [SHI W L, ZHAO Y Q, JIANG Q X, et al. Effects of polyethylene films packaging with different thicknesses on the storage qualities of sweet corns[J]. Storage and Process, 2023, 23(1): 1−8.]
[15] LI F J, HU Y, SHAN Y X, et al. Hydrogen-rich water maintains the color quality of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 183: 111743.
[16] BAI C M, ZHENG Y Y, WATKINS C B, et al. Multiomics analyses of the effects of LED white light on the ripening of apricot fruits[J]. Journal of Advanced Research, 2025, 67: 1−13.
[17] RAMASAMY S, NAKAYAMA T, MORINO Y, et al. Nitrate radical, ozone and hydroxyl radical initiated aging of limonene secondary organic aerosol[J]. Atmospheric Environment: X, 2021, 9: 100102.
[18] ZHENG H W, ZHANG Q Y, QUAN J P, et al. Determination of sugars, organic acids, aroma components, and carotenoids in grapefruit pulps[J]. Food Chemistry, 2016, 205: 112−121.
[19] DONG Y H, SILBERMANN M, SPEISER A, et al. Sulfur availability regulates plant growth via glucose-TOR signaling[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1174.
[20] GÓMEZ-GONZÁLEZ S, RUIZ-JIMÉNEZ J, PRIEGO-CAPOTE F, et al. Qualitative and quantitative sugar profiling in olive fruits, leaves, and stems by gas chromatography-tandem mass spectrometry (GC-MS/MS) after ultrasound-assisted leaching[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(23): 12292−9.
[21] TAO J J, ZUO J H, WATKINS C B, et al. Low storage temperature affects quality and volatile compounds in fresh tomatoes [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140400.
[22] HE X L, WANG L H, TAO J J, et al. High-oxygen-modified atmospheric packaging delays flavor and quality deterioration in fresh-cut broccoli[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139517.
[23] WANG L H, LI Z Y, QIN J L, et al. Investigation on the impact of quality characteristics and storage stability of foxtail millet induced by air cold plasma[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1064812.
[24] LÜ G Y, ZHANG Z F, SHEN M, et al. Comparative analysis of the flavonoid components reveals the differences of color and antioxidant activity in two cultivars of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Food Bioscience, 2025, 69: 106932.
[25] 韩丽春, 何雪莲, 郑鄢燕, 等. 外源一氧化氮对扁豆采后贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 175−182. [HAN L C, HE X L, ZHENG Y Y, et al. Effect of exogenous nitric oxide on postharvest storage quality of hyacinth bean[J]. Food Science, 2023, 44(13): 175−182.]
[26] LIU L P, ZHAO L D, REN X J, et al. Optimal preservation technology investment and pricing policy for fresh food[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135: 746−756.
[27] PENG X, LI Y L, WANG S, et al. Electron beam irradiation inhibited potato sprouting by regulating the metabolism of membrane lipid peroxidation and antioxidant[J]. Potato Research, 2024, 68: 391−407.
[28] HARISHA R, SINGH S K, AHLAWAT A K, et al. Elucidating the effects on polyphenol oxidase activity and allelic variation of polyphenol oxidase genes on dough and whole wheat-derived product color parameters[J]. International Journal of Food Properties, 2023, 26(2): 2716−2731.
[29] 史亚兴, 董会, 徐丽, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 技术分析不同类型鲜食玉米的风味差异[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(11): 143−156. [SHI Y X, DONG H, XU L, et al. Flavor differences of different types of fresh corn based on electronic nose and GC-IMS technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(11): 143−156.]
[30] YAN X Y, CHEN X, HE X T, et al. Fresh Purple waxy corn maintains good flavor qualities under low temperature storage: a comprehensive evaluation using multi-scale molecular sensory tech-

niques[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025(prepublish): 1−10.
[31] XIANG Y, HUANG X Y, ZHAO Y W, et al. Optimization of apple fruit flavor by MdVHP1-2 via modulation of soluble sugar and organic acid accumulation[J]. Plant Physiol Biochem, 2024, 206: 108227.
[32] JOHANNINGSMEINER S D, MCFEETERS R F, DRAKE M, et al. A hypothesis for the chemical basis for perception of sour taste[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(2): 44−48.
[33] NIU Y W, WANG R L, XIAO Z B, et al. Characterization of ester odorants of apple juice by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, odour threshold, aroma intensity and electronic nose[J]. Food Research International, 2019, 120: 92−101.
[34] MU K W, YAO Y F, WANG D N, et al. Prooxidant capacity of phenolic acids defines antioxidant potential[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2023, 1867(7): 130371.
[35] SAENZ-NAVAJAS M P, AVIZCURI J M, FERREIRA V, et al. Insights on the chemical basis of the astringency of Spanish red wines[J]. Food Chemistry, 2012, 134(3): 1484−93.
[36] LIU H, LI D L, XU W C, et al. Application of passive modified atmosphere packaging in the preservation of sweet corns at ambient temperature[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 136: 110295.
[37] 武盟, 曹伟超, 程新, 等. 高产 α-半乳糖苷酶乳酸菌发酵对鹰嘴豆酸面团生化特性及其面包烘焙品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 146−153. [WU M, CAO W C, CHENG X, et al. Effect of fermentation with high-yield α-galactosidase-producing lactic acid bacteria on biochemical properties and breadmaking characteristics of chickpea sourdough[J]. Food Science, 2021, 42(10): 146−153.]