DOI:10.12441/spyswjs.20250429002 [文章编号] 1673-1689(2025)09-0141-12

低压静电场强度对冷冻沙棘叶品质的影响

董潇越[1] 董同力嘎[1] 特金微[2] 王秀宽[2] 郝 倩[3] 苗美树[3] 云雪艳[1*]

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 鄂尔多斯市高原圣果生态建设开发有限公司,内蒙古 鄂尔多斯 017099; 3. 鄂尔多斯市市场监督管理局, 内蒙古 鄂尔多斯 017099)

摘要:【目的】探讨不同冷冻保鲜技术对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)叶品质的影响。【方法】将低压静电场(low-voltage electrostatic field pretreatment, LVEF)技术应用于沙棘叶冷冻保鲜,探讨不同场强对沙棘叶冻结特性及活性成分保留的影响,分析不同静电场强度(距放电板0、20、40、60 cm)的沙棘叶冻结速率、水分损失率、活性成分保留率、抗氧化活性等,并与普通冷冻对比。之后将最优组和普通冷冻组的沙棘叶添加至牛奶中发酵制成沙棘叶酸奶,以普通酸奶(NY)为对照,测定其理化指标。【结果】距离静电板20 cm时,沙棘叶的冻结时间与普通冷冻相比缩短了16.6%,水分损失率为12.07%,黄酮与多酚保留率最高能达到新鲜沙棘叶的85.27%与90.97%,且DPPH和ABTS自由基清除率在低质量浓度时也能保持较高的水平,此外还能促进自由水向结合水迁移,减少沙棘叶在冷冻时的冰晶损伤。制成沙棘叶酸奶后,低压静电场处理沙棘叶组(LY)酸奶的黄酮、多酚质量分数分别比普通冷冻沙棘叶组(FY)高10.60%、15.70%,抗氧化能力显著增强(P<0.01)。【结论】LVEF能有效保留冷冻沙棘叶中的活性成分,改善其冷冻品质,为其产业化保鲜提供了理论依据。

关键词:低压静电场;沙棘叶;酸奶;抗氧化活性

Effects of Low-pressure Electrostatic Field-assisted Freezing at Different Field Strengths on the Quality of Sea Buckthorn Leaves

DONG Xiaoyue[1] *DONG Tongliga*[1] *TE Jinwei*[2] *WANG Xiukuan*[2] *HAO Qian*[3] *MIAO Meishu*[3] *YUN Xueyan*[1*]

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Ordos Plateau Shengguo Ecological Construction and Development Co., Ltd., Ordos 017099, China; 3. Ordos Administration for Market Supervision, Ordos 017099, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the effects of different freezing preservation techniques on the quality of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) leaves. [**Method**] A low-voltage electrostatic field (LVEF) pretreatment was applied during the freezing process of sea buckthorn leaves, and its effects on freezing characteristics and bioactive compound retention were evaluated. Field strengths at 0, 20, 40, and 60 cm from the discharge plate were compared with conventional freezing in terms of freezing rate, water loss rate, bioactive compound retention rate, and antioxidant activity of sea buckthorn leaves. The optimized and conventionally frozen leaves were subsequently used to prepare sea buckthorn leaf yogurt, with plain yogurt (NY) as the control. Physicochemical indexess of the yogurt samples were determined. [**Result**] LVEF treatment at a distance of 20 cm shortened the freezing time by 16.6% and reduced the moisture loss rate to 12.07% compared with

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2023YFHH0079);内蒙古自治区青年科技人才发展项目(NMGIRT2310)

通信作者:云雪艳(1990—),女,博士,副教授,博士研究生导师,主要从事食品包装与安全控制技术研究。E-mail: yun_imau@163.com

收稿日期:2025-04-29 **修回日期:**2025-06-10

conventional freezing. The retention rates of flavonoids and polyphenols reached 85.27% and 90.97% of those in fresh leaves, respectively. In addition, the treated samples also exhibited strong DPPH and ABTS radical scavenging activities at low concentrations and promoted the conversion of free water into bound water, mitigating ice crystal damage. The yogurt prepared with LVEF-treated leaves (LY) showed increases of 10.60% and 15.70% in flavonoid and polyphenol content, respectively, compared with that prepared from conventionally frozen leaves (FY), along with enhanced antioxidant activity (P<0.01). [**Conclusion**] LVEF-assisted freezing effectively preserves the bioactive compounds and improves the freezing quality of sea buckthorn leaves, providing theoretical support for their industrial-scale preservation.

Keywords: low-voltage electrostatic field; sea buckthorn leaf; yogurt; antioxidant activity

沙棘为胡颓子科落叶灌木或乔木，广泛分布于欧亚大陆温带及寒带地区[1]，具有固氮改良土壤、耐寒抗旱等生态适应性，在我国种植面积广泛[2]。2013 年，国家卫生健康委员会将沙棘叶列为新资源食品。沙棘叶富含多种活性成分，其中黄酮类、多酚类化合物含量较高[3]，具有抗氧化、抗炎及降血脂功能[4]。因此，沙棘叶被广泛用于食品、饲料、药品和化妆品等行业[5]。沙棘叶采后通常采用阴干、密封干燥等方法进行贮存，但因其含水量高[6]、内源酶活性强[7]及易受感微生物污染等特性，导致其贮藏稳定性差[8]。

低压静电场是一种非热、低成本物理加工技术，其作用机制在于形成负离子环境，诱导水分子产生同频共振。该技术可减少物料在冷冻过程中的损伤，从而较好地保持其品质[9-10]，目前多用于水产品、肉制品及果蔬制品的保鲜。刘丽芳等[11]用 LVEF 处理蝴蝶兰有效抑制了切花的膜脂过氧化，表现为丙二醛的质量摩尔浓度降低了 21.96 nmol/g，超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶的酶活性分别提高了 19.58、20.77、20.21 U/g。鲁梦情等[12]、牛培荣等[13]对油桃、樱桃番茄进行 LVEF 处理，发现 LVEF 可抑制多酚氧化酶和细胞壁降解酶活性，有效减缓其质地劣变与营养流失。此外，黄桂丽等[14]、沐楠智等[15]的研究表明，LVEF 还能通过调节水分迁移特性延缓失水，维持杨梅、青梅等果实的新鲜度。徐耀宗等[16]研究发现，与对照组相比，LVEF 处理能抑制双孢蘑菇采后贮藏的品质损失，双孢蘑菇的 L^* 值增加 4.20%，褐变值减少 23.10%，质量损失率减少 37.40%。然而，将低压静电场技术应用于沙棘叶保鲜的研究目前鲜有报道。

功能性酸奶对人体健康有诸多益处[17]，是一种非常受欢迎的发酵乳制品。近几年研究者已开发了各种功能性的酸奶，如添加枸杞提取液以调节血糖水平的功能性酸奶[18]；添加魔芋甘露寡糖用于增强免疫功能的酸奶[19-20]；添加姜黄素与滇黄精以提升抗氧化能力的酸奶[21]。目前沙棘资源的核心产业化应用主要集中在几大领域：特色饮品（如沙棘饮料）、油脂制品（如沙棘籽油和果油）及营养保健功能产品的开发[3]等，而将沙棘叶应用于酸奶中的研究较少。因此，作者以沙棘叶为原料，探究不同低压静电场强度对冷冻沙棘叶保鲜效果的影响，再将其添加至酸奶中，探究沙棘叶对酸奶品质的影响，为 LVEF 技术在沙棘叶保鲜中的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

沙棘叶：采自河北省张家口市沽源县，由内蒙古鄂尔多斯市生态建设开发有限公司提供；商业发酵剂：安琪酵母股份有限公司；纯牛乳：内蒙古伊利有限公司；蔗糖：呼和浩特市新荣昌食品有限公司；2，2-联氮-2（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐：上海凛恩科技发展有限公司；1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）：北京酷来搏科技有限公司；福林酚：分析纯，上海易恩化学技术有限公司；无水乙醇：分析纯，天津科茂化学试剂有限公司。

多功能微孔板检测仪：Synergy HI 型，美国 BioTek Instruments 公司；核磁共振成像分析仪：NMI20 型，上海纽迈电子科技有限公司；高速冷冻离心机：HC-2518R 型，安徽中科中佳科学仪器有限公司；鲜度保持电场装置：自制，由静电场发生装置（交流电压 220 V，50/60 Hz）和放电板（43 cm×23 cm）组成，试验装置见图 1 。

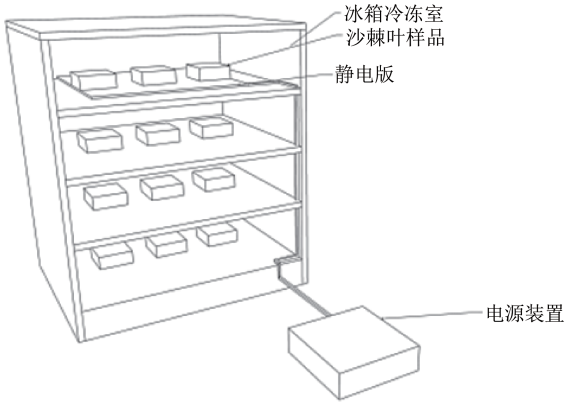


图 1　低压静电场试验装置图

Fig. 1　Experimental apparatus of low-voltage electrostatic field

1.2　方法

1.2.1　样品处理及分组

新鲜沙棘叶采后立即装箱，于次日运送至实验室。挑选形态、色泽均一且无病虫害的叶片，经清水冲洗后，放入正方体硅胶模具中备用，随机分为5组。选取其中4组放入设置了低压静电场的−20 ℃的冰箱中进行冷冻作为处理组。同时将剩下的1组放置在未设置低压静电场的−20 ℃的冰箱中冷冻（GF组）。按照电场强度的不同（电场强度分别为22 000、1 100、550、367 V/m）对沙棘叶进行编号，L-0组、L-20组、L-40组、L-60组（其中“L”表示添加静电场辅助冻结，数字表示离放电板的距离，单位为cm），同时将新鲜的沙棘叶于4 ℃保存作为对照组（CK组），在48 h内测试完所有指标。

1.2.2　冻结曲线的测定

采用JK-8U型多通道温度计实时监测沙棘叶冷冻过程的中心温度，采样间隔为3 s。待样品中心温度降至−18 ℃时视为冻结完成，终止监测。

1.2.3　水分损失率的测定

取GF组、L-0组、L-20组、L-40组及L-60组的沙棘叶样品称质量，于4 ℃冰箱解冻24 h，随后拭干表面水分，再次称质量，按式（1）计算解冻水分损失率。

$$X=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

X——沙棘叶的解冻水分损失率，%；

m_1——解冻前沙棘叶样品的质量，g；

m_2——解冻后沙棘叶样品的质量，g。

1.2.4　沙棘叶中黄酮质量分数的测定

样品制备：将CK组和解冻后的GF组、L-0组、L-20组、L-40组及L-60组的沙棘叶样品冷冻干燥后粉碎，取1 g粉碎后的沙棘叶粉与提取液（体积分数60%的乙醇）混合，40 ℃超声提取1 h，纱布过滤后取滤液备用。

参考Ma等[22]和田建华[23]的方法绘制标准曲线并进行试验。吸取2 mL滤液于20 mL具塞比色管中，加入1 mL亚硝酸钠溶液，振荡混匀，室温静置10 min。随后加入2 mL硝酸铝溶液，混匀，静置10 min。加入4 mL氢氧化钠溶液，用体积分数60%的乙醇溶液定容，振荡混匀后静置反应15 min。以不添加硝酸铝溶液的样液作为空白，用1 cm比色皿在波长510 nm处用酶标仪测定其吸光度，按式（2）计算黄酮质量分数。

$$\omega=\frac{m_3\times V}{M\times V_1}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

ω——黄酮质量分数，mg/100 g；

m_3——根据标准曲线算出试样溶液的总黄酮质量，mg；

V——提取液体积，mL；

M——样品质量，g；

V_1——测定时吸取的试样体积，mL。

1.2.5　沙棘叶中多酚质量分数的测定

按照Gou等[24]的方法并稍加修改。吸取1 mL滤液至10 mL比色管，依次加入2 mL福林酚试剂、2 mL 15 g/dL Na_2CO_3溶液，之后加水定容至刻度线，振荡混匀。在40 ℃水浴中保持45 min，取出后室温静置冷却15 min，于778 nm波长下测定吸光度。根据标准曲线计算待测液中的多酚质量分数。参照文献[25]绘制标准曲线，按式（3）计算多酚质量分数。

$$F=C\times 10\times n\times 0.11236 \quad (3)$$

式中：

F——样品中多酚质量分数，mg/100 g；

C——由标准曲线计算得出的待测液中多酚的质量浓度，mg/L；

n——稀释倍数；

0.112 36——换算系数，L/g。

1.2.6　抗氧化活性测定

按照田建华等[23]的方法并稍加修改。

DPPH自由基清除率测定：取制备的1 mL不同质量浓度的沙棘叶提取液，加入3 mL 0.005 g/dL的DPPH溶液，充分混匀，黑暗条件下静置30 min，以无水乙醇作空白对照，相同质量浓度的抗坏血酸（VC）作阳性对照，于517 nm处测定其吸光度。每一样品平行测3次，取平均值。根据式（4）计算DPPH自由基清除率。

$$P=(1-\frac{A_s-A_c}{A_b})\times 100\% \quad (4)$$

式中：

P——DPPH自由基清除率，%；

A_s——沙棘叶提取液与DPPH溶液反应后的吸光度；

A_c——沙棘叶提取液与无水乙醇反应后的吸光度；

A_b——DPPH溶液与体积分数60%乙醇溶液反应后的吸光度。

ABTS自由基清除率测定：称取200 mg ABTS和34.4 mg过硫酸钾，溶于50 mL蒸馏水，摇匀，室温避光放置24 h后作为ABTS母液。取适量ABTS母液，用体积分数95%的乙醇稀释至吸光度在0.70±0.02，作为ABTS测定溶液。测试时取0.4 mL质量浓度不同的沙棘叶提取液，加入3.6 mL ABTS溶液，充分混匀，以无水乙醇为对照，相应质量浓度的VC为阳性对照，黑暗条件下静置5 min，于734 nm处测定其吸光度。每一样品平行测3次，取其平均值。ABTS自由基清除率根据式（5）计算。

$$T=(\frac{A_d-A_T}{A_d})\times 100\% \quad (5)$$

式中：

T——ABTS自由基清除率，%；

A_T——沙棘叶提取液与ABTS溶液反应后的吸光度；

A_d——ABTS溶液与体积分数60%乙醇溶液反应后的吸光度。

1.2.7　水分分布的测定

取不同场强冷冻处理组解冻后的沙棘叶，用保鲜膜包裹成正方形，放于核磁共振管底部，利用低场核磁共振技术对解冻后的沙棘叶的水分分布进行检测。设备的主要参数为：核磁管腔体温度30 ℃，采样频率250 kHz，主频20 MHz，回波个数15 000，频率偏置796 383.67 Hz，90度脉冲7.00 μs，180度脉冲13.52 μs。扫描后进行反演得到样品的横向弛豫时间（T_2）分布情况，磁共振成像分析：脉冲序列3DHSE，模拟增益6，数字增益3，重复采样次数3。

1.2.8　沙棘叶酸奶制备

鲜牛乳经60 ℃预热后，加入质量分数6.5%白砂糖以及质量分数0.4%的沙棘叶粉，在95 ℃巴氏杀菌10 min，待冷却到室温后，接种商业发酵剂后进行罐装，在42 ℃的恒温培养箱中发酵6 h（发酵终点pH 4.5~4.6），冷却后放入4 ℃冰箱后熟24 h。不添加沙棘叶的酸奶编号为NY，添加GF组沙棘叶的酸奶编号为FY，添加L-20组沙棘叶的酸奶为LY。

1.2.9　沙棘叶酸奶的感官评定标准

感官评定小组由10名经过培训的人员组成，对沙棘叶酸奶的色泽、口感、组织状态、气味及滋味这几个方面进行评价，满分为100分，感官评分表按照GB 19302—2025《食品安全国家标准 发酵乳》中风味发酵乳相应的感官评分内容制作沙棘叶酸奶感官评分表，具体内容见表1。

表1　沙棘叶酸奶感官评定标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for sea buckthorn leaf yogurt

指标	标准	分数/分
色泽（20分）	呈黄绿色，色泽均匀且无杂色	11~20
	呈黄绿色，基本均匀	4~10
	无明显的颜色，或颜色不均匀	0~3
口感（20分）	口感均匀细腻，爽滑厚实	11~20
	口感较均匀，黏度较低	4~10
	口感粗糙，质地较稀薄	0~3
组织状态（30分）	组织细腻均匀，无气泡，无乳清析出	20~30
	组织细腻较均匀，无气泡，有少量乳清析出	10~19
	组织松散，有大量乳清析出，有分层	0~9
气味、滋味（30分）	具有沙棘叶的特色香味，香味浓郁	20~30
	具有沙棘叶的香味，气味不够浓郁	10~19
	沙棘叶气味不明显，无沙棘叶气味	0~9

1.2.10　沙棘叶酸奶pH和可滴定酸度测定

使用pH计对沙棘叶酸奶的pH值进行测定。

精确称取10 g试样，加入20 mL蒸馏水充分混匀。随后滴加2~3滴体积分数0.5 %的酚酞乙醇指示液，使用0.1 mol/L氢氧化钠标准溶液滴定。当溶液呈现浅粉色并保持30 s不褪色时，判定为滴定终点。按式（6）计算可滴定酸度。

$$S=\frac{C\times V_0\times 100}{m\times 0.1} \quad (6)$$

式中：

S——可滴定酸度，°T；

C——氢氧化钠溶液的浓度，mol/L；

V_0——消耗的氢氧化钠标准溶液的体积，mL；

m——沙棘叶酸奶的质量，g。

1.2.11　沙棘叶酸奶持水力的测定

准确称取20 g沙棘叶酸奶样品，转移至50 mL离心管。将样品在4 ℃以4 000 r/min离心15 min，离心完成后静置10 min，弃上清液。最后，使用电子天平称量装有沉淀物的离心管总质量。沙棘叶酸奶样品的持水力按式(7)计算。

$$L=\frac{m_5-m_3}{m_4-m_3}\times 100\% \quad (7)$$

式中：

L——沙棘叶酸奶的持水力，%；

m_3——空离心管的质量，g；

m_4——离心管加沙棘叶酸奶的质量，g；

m_5——去掉上清液后离心管与剩余沉淀物的质量，g。

1.2.12　沙棘叶酸奶中蛋白质质量分数的测定

沙棘叶酸奶中蛋白质质量分数依据GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》所规定的凯氏定氮法进行测定。

1.2.13　沙棘叶酸奶色泽的测定

采用色差仪测定沙棘叶酸奶的L^*值、a^*值和b^*值。其中L^*值表示亮度值，a^*值表示红度值，b^*值表示黄度值。

1.2.14　沙棘叶酸奶中黄酮、多酚质量浓度的测定

准确称取10 g酸奶试样，依次加入15 mL无水乙醇和0.5 mL的12 mol/L盐酸。将混合物转移至离心管，4 ℃于4 000 r/min离心15 min，离心结束后静置10 min，吸取上清液。该上清液经0.45 μm微孔滤膜过滤，所得滤液用于后续分析测定。

黄酮、多酚质量浓度分别按照1.2.4和1.2.5方法进行测定，单位按照每升酸奶计。

1.2.15　沙棘叶酸奶抗氧化活性的测定

抗氧化活性按照1.2.6的方法测定。

1.3　数据处理与分析

每组试验重复3次，使用IBM SPSS Statistics 27.0.1软件进行数据统计分析，并利用Origin 2021进行绘图。

2　结果与讨论

2.1　低压静电场强度对冷冻沙棘叶冻结速率的影响

在−20 ℃冷冻的条件下，不同场强处理的沙棘叶的冷冻温度随时间变化的曲线见图2。整个过程可分为3个典型阶段：初始预冷期（从初始温度至冰点）、相变阶段（−5~−1 ℃）和深度冷冻阶段[26]。预冷阶段中沙棘叶从初始温度迅速降至冰点温度，降温速度较快；相变阶段中沙棘叶温度从冰点温度降至−5 ℃左右，此时为最大冰晶形成区域，该区域的冻结速率在很大程度上影响了冻结时间和品质[27]；第三阶段为深度冷冻阶段，此阶段释放的热量来源于残余水分的持续结晶，故降温速率较高[28]。GF组所需的冻结时间为270 min，而L-20组的冻结时间为225 min，LVEF组冷冻的冻结速率显著高于普通冷冻（P<0.01）。这源于适宜场强下静电场有效降低了水分子成核所需的自由能，诱导冰核快速形成，进而加速样品通过最大冰晶生成带，提升冻结效率[29]。

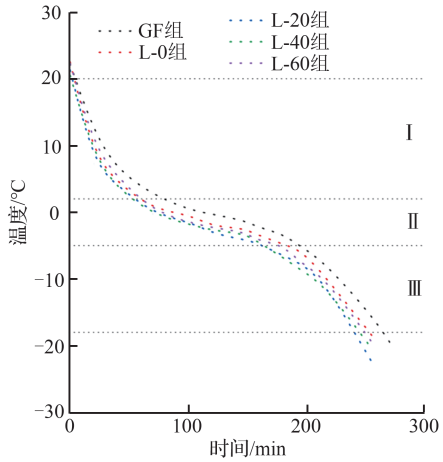


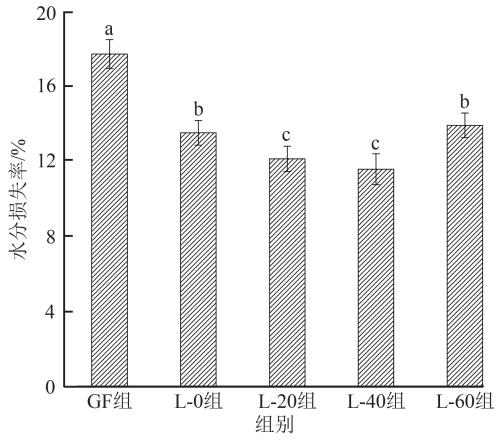
图2　不同场强下低压静电场中冷冻沙棘叶的冻结曲线

Fig. 2　Freezing curves of sea buckthorn leaves frozen with the assistance of low-pressure electrostatic fields at different field strengths

2.2　低压静电场强度对冷冻沙棘叶水分损失率的影响

在冷冻贮藏过程中，沙棘叶会发生失水，因此水分损失率是评价沙棘叶营养物质是否流失的重要指标之一[30]。在常规冷冻过程中，细胞外溶液先结冰，细胞内外水分随着渗透压差流动，导致细胞脱水收缩，随后细胞内剩余水分会形成大冰晶，刺破细胞膜和细胞壁。当细胞膜被刺破后，细胞

液会外流至细胞间隙，解冻时无法被重新吸收，导致水分流失[31]。不同场强下沙棘叶的水分损失率见图3。GF组水分损失率最高，达17.65%，L-0组为13.46%，L-20组为12.07%，L-40组水分损失率最低，为11.53%，L-60组为13.86%。LVEF组的水分损失率较低，可能是由于施加了静电场，改变了水分状态与分布，影响了水分子间氢键振动，抑制了冰点以下大冰晶的生成，减少了冰晶对细胞壁的挤压破坏，因此减少了水分的损失。这与高飞等[32]探究LVEF处理叠加微冻贮藏方式，能够更好地保持舟山海捕红虾的鲜度品质，降低其对肌肉组织的破坏，减少汁液流失的结果相似。



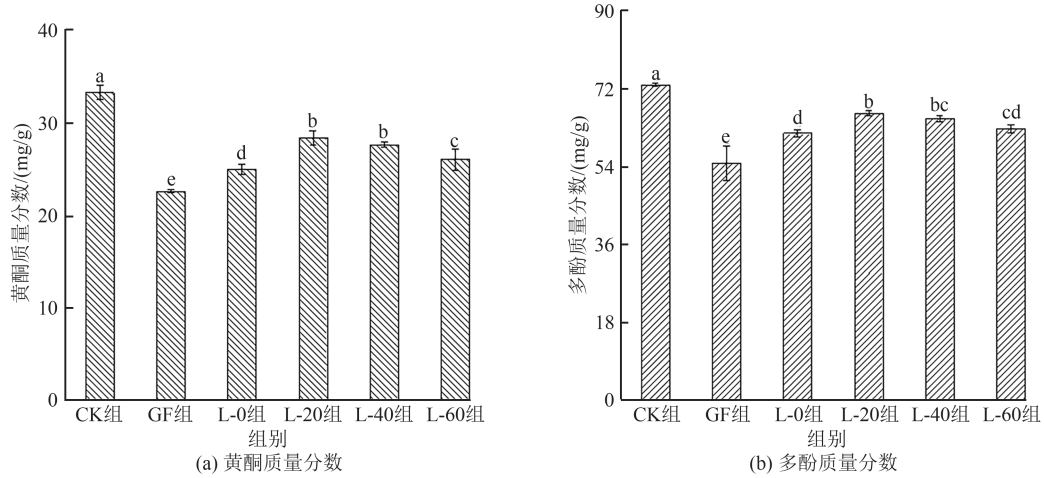
不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 3 低压静电场强度对冷冻沙棘叶中水分损失率的影响

Fig. 3 Effects of low-pressure electrostatic field-assisted freezing at different field strengths on water loss rate of sea buckthorn leaves

2.3 低压静电场强度对冷冻沙棘叶黄酮、多酚质量分数的影响

沙棘叶中多酚和黄酮类化合物含量是评价其品质的重要指标[23]。由图4可知，CK组中黄酮质量分数可达33.39 mg/g、多酚质量分数最高达73.07 mg/g。冷冻处理后，所有组的多酚、黄酮质量分数都下降，GF组下降最明显，黄酮、多酚质量分数分别为22.68 mg/g和54.83 mg/g，其原因可能是多酚类物质大部分为水溶性物质，解冻后随水分损失而流失[33]。L-20组的保留量最好，黄酮、多酚质量分数分别为28.49 mg/g和66.47 mg/g；其次是L-40组，黄酮、多酚质量分数分别为27.72 mg/g和65.19 mg/g。LVEF辅助冻结组的黄酮、多酚保留量均优于普通冷冻（$P<0.01$），其原因可能是在适宜的温度范围冷冻时受磁场的影响较大，形成的冰晶体积小，对温度细胞造成的机械损伤轻，水分损失少，因此黄酮、多酚的保留量较高。这一结果与Gonçalves等[34]对冷冻蔬菜的研究结果相似。



不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

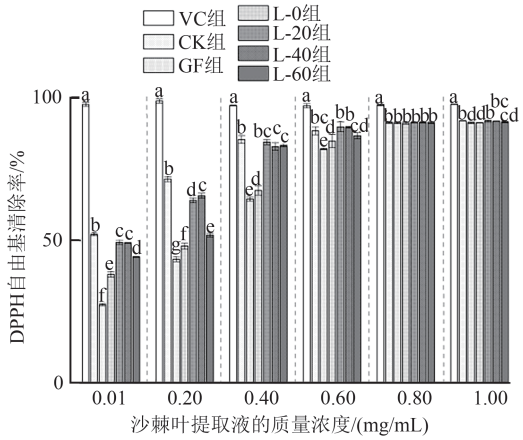
图 4 低压静电场强度对冷冻沙棘叶中黄酮、多酚质量分数的影响

Fig. 4 Mass fractions of flavonoids and polyphenols in sea buckthorn leaves frozen with the assistance of low pressure electrostatic fields at different field strengths

2.4 低压静电场强度对冷冻沙棘叶抗氧化活性的影响

沙棘叶中的酚类物质是影响抗氧化活性的关键因素[35]。从图5~6可以看出，抗氧化活性与沙棘叶提取液质量浓度呈正相关，即随着提取液质量浓度的升高，沙棘叶清除DPPH、ABTS自由基

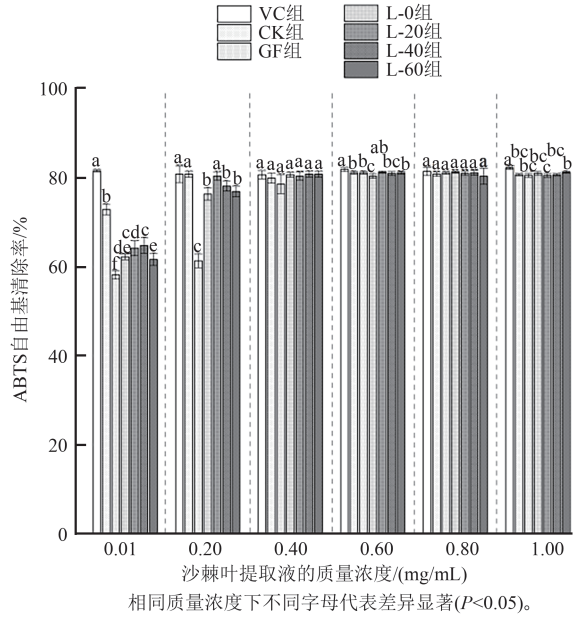
的能力明显增加。当沙棘叶提取液质量浓度达到0.80 mg/mL时，处理组的DPPH自由基清除率趋于稳定，最大值为91.31%；当沙棘叶提取液质量浓度超过0.40 mg/mL时，ABTS自由基清除能力无显著提升（P>0.05），稳定在80.36%。LVEF处理组的自由基清除能力显著优于GF组（P<0.05），尤其是在较低质量浓度范围内差异更为明显。当沙棘叶提取液的质量浓度为0.60 mg/mL时，L-20组的DPPH自由基清除率为89.82%，而GF组仅为82.06%；当沙棘叶提取液的质量浓度为0.40 mg/mL时，L-40组的ABTS自由基清除率能达到80.93%，GF组为78.68%。GF组的抗氧化活性最低，其自由基清除率在低质量浓度区间显著低于其他处理组。这与前期研究中观察到的GF组水分损失最大、黄酮和多酚物质流失最严重的现象一致，这可能是导致其总体抗氧化能力最弱的主要原因。总体来说，在LVEF辅助冷冻下，沙棘叶能够维持较高的抗氧化能力，更接近新鲜样品的水平，这一结论与李佳霖等[36]的研究结论相似。



相同质量浓度下不同字母代表差异显著(P<0.05)。

图5　不同沙棘叶提取液质量浓度下的DPPH自由基清除率

Fig. 5　DPPH radical scavenging rates at different mass concentrations of sea buckthorn leaf extracts



相同质量浓度下不同字母代表差异显著(P<0.05)。

图6　不同沙棘叶提取液质量浓度下的ABTS自由基清除率

Fig. 6　ABTS radical scavenging rates at different mass concentrations of sea buckthorn leaf extracts

2.5　低压静电场强度对冷冻沙棘叶组织中水分分布的影响

水分质量分数是评价植物保鲜效果的关键参数。在冷冻条件下，果蔬在自身生理活动与外部环境因素的共同影响下，品质下降主要受内部水分状态的影响，具体表现为T_2及核磁共振信号峰面积等参数的变化[37]。弛豫时间可反映组织内水分的相态分布和流动性，时间越短，表明水分结合越紧密；时间越长则水分自由度越高[38]。根据T_2谱的出峰位置，可将沙棘叶内部水分分为3种结合类型：强结合水（T_{21}，峰位置在1~10 ms）、弱结合水（T_{22}，峰位置在10~100 ms）、自由水（T_{23}，峰位置在100~1 000 ms）[39]。水分质量分数可由T_2弛豫谱中的峰面积反映[40]。图7中弛豫时间图谱的峰面积按照CK组、L-20组、L-40组、L-60组、L-0组、GF组顺序依次降低，强结合水相对信号强度较低，说明沙棘叶中强结合水占比较少。新鲜沙棘叶的总

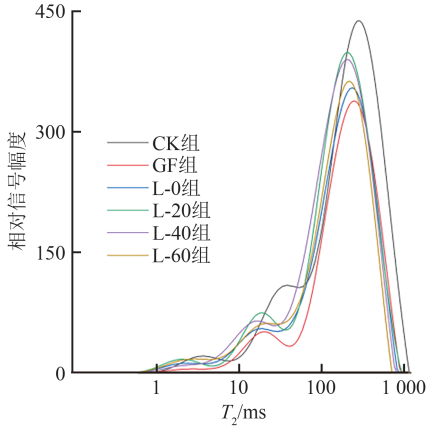
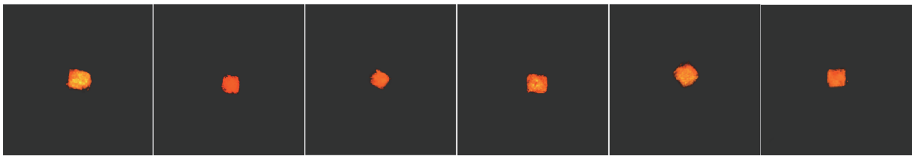


图7　低压静电场强度对冷冻沙棘叶中水分T_2的影响

Fig. 7　Effects of low-pressure electrostatic field-assisted freezing at different field strengths on the T_2 of water in sea buckthorn leaves

体峰面积最大，表明鲜叶的水分质量分数最大，组织结构最稳定。冷冻之后，所有组别中沙棘叶的峰信号都有所降低，其中自由水显著降低，说明冷冻主要影响沙棘叶中的自由水。在冷冻的过程中，LVEF处理组通过产生特殊频率的静电波与水分子产生相同频率的共鸣，加速沙棘叶冻结，导致峰信号整体向左偏移，且使得流动性较强的自由水逐渐向结合水迁移。GF组与LVEF辅助冷冻组相比，峰面积最小，说明水分流失最多，对沙棘叶细胞的破坏能力最大，该结论与水分损失率结果一致。

冷冻沙棘叶的含水率可由其氢质子密度图来表征。在相应的伪彩色密度图上，黄色表示高密度区即高含水率，红色表示低密度区即低含水率[41]。不同组的氢质子密度见图8。新鲜沙棘叶样品图像呈大面积黄色，表明水分质量分数较高，并可见大面积明亮区域。冷冻处理后的沙棘叶图像均呈现不同程度的红色，说明冻结过程中有水分迁移或流失。GF组样品图像以大面积红色为主，而L-20组与L-40组图像可见黄色区域，表明在20~40 cm处施加静电场辅助冷冻能有效保留沙棘叶水分。氢质子密度图像的颜色变化与水分T_2结果一致，证明低压静电场和冷冻相结合可减少水分流失，改善冻藏品质并减缓其劣变。



(a) CK组 (b) GF组 (c) L-0组 (d) L-20组 (e) L-40组 (f) L-60组

图8 不同低压静电场强度下沙棘叶氢质子密度加权伪彩图

Fig. 8 Hydrogen proton density-weighted pseudocolor images of sea buckthorn leaves under different field strengths

2.6 沙棘叶酸奶的感官评分及理化指标测定结果

添加沙棘叶的酸奶感官评分及理化指标见表2。NY组的感官评分为57.33分，FY组与LY组的感官评分分别为78.66分与77.02分，感官评分均较高。主要原因是沙棘叶酸奶有独特的色泽，整体上偏黄绿色，气味上带有沙棘叶的清香，口感较为细腻，组织状态均匀，伴有少量乳清析出，整体可接受度较高。NY组的pH为4.48，FY组的pH为4.56，LY组的pH为4.62，无显著差异。相比于NY组的蛋白质质量分数，FY、LY组的蛋白质质量分数略有上升，其原因可能是沙棘叶中含少量蛋白质，通过凯氏定氮法测定时计入总蛋白质，使得蛋白质质量分数上升，但并未产生显著影响（$P>0.05$）。而添加沙棘叶后酸奶的持水力变化明显，NY组的持水力达81.89%，而FY组与LY组的持水力显著下降（$P<0.01$），分别为79.72%、75.06%。原因在于沙棘叶中的多酚与酸奶中的酪蛋白结合，形成松散复合物，破坏了凝胶网络致密性，削弱了蛋白质交联，导致水分释放[42]；其次可能在于沙棘叶的植物纤维未完全溶解成颗粒，从而影响凝胶网络的形成，进一步影响持水力。

表2 沙棘叶酸奶的感官评分及理化指标

Table 2 Sensory score and physicochemical indexes of sea buckthorn leaf yogurt

组别	感官评分	pH	可滴定酸度/°T	蛋白质质量分数/%	持水力/%
NY组	57.33 ± 1.53^{b}	4.48 ± 0.03^{a}	0.89 ± 0.01^{a}	3.36 ± 0.12^{a}	81.89 ± 0.49^{a}
FY组	78.66 ± 0.58^{a}	4.56 ± 0.07^{a}	0.87 ± 0.02^{b}	3.68 ± 0.09^{a}	79.72 ± 0.84^{b}
LY组	77.02 ± 1.73^{a}	4.62 ± 0.11^{a}	0.83 ± 0.01^{c}	3.57 ± 0.04^{a}	75.06 ± 0.77^{c}

注：同列不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。

2.7 沙棘叶酸奶的色泽

食品的颜色是消费者判断食品品质好坏的最直观的标准之一。添加沙棘叶对酸奶色泽的影响见表3。L^*值代表亮度值；a^*值代表红绿值；b^*值代表黄蓝值[43]。NY组的L^*值为94.60，FY组的L^*值为83.33，LY组的L^*值为81.80，证明添加沙棘叶会使酸奶亮度明显下降。NY组的a^*值为−0.77，呈绿色调；FY组a^*值为0.27，LY组a^*值为0.80，2组均为红色调。NY组b^*值为8.37，FY组b^*值为13.50，LY组b^*值为14.77，表明添加沙棘叶后酸奶更偏黄色，且LY组偏黄色更明显。ΔE综合反映颜色变化，FY组ΔE为12.42，LY组ΔE为14.40，均表明与NY组颜色差异较大。添加沙棘叶对酸奶的色泽有极显著影响（$P<0.01$），这一结果与Mediza Romero等[44]的研究结果相似。

表3　沙棘叶酸奶的色泽

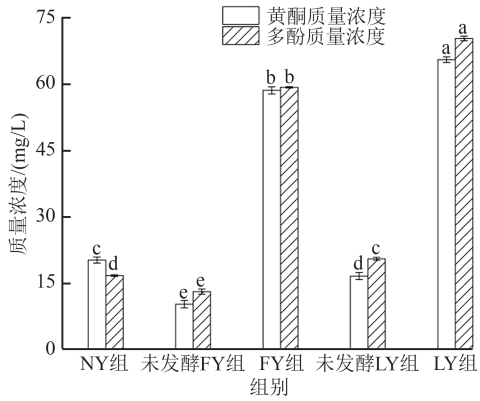
Table 3　Color of sea buckthorn leaf yogurt

组别	L^*值	a^*值	b^*值	ΔL值	Δa值	Δb值	ΔE值
NY组	94.60±0.10^a	−0.77±0.06^c	8.37±0.12^c				
FY组	83.33±0.15^c	0.27±0.06^a	13.50±0.10^a	−11.27±0.15	1.03±0.12	5.13±0.15	12.42±0.17
LY组	81.80±0.30^b	0.80±0.10^b	14.77±0.42^b	−12.80±0.30	1.57±0.06	6.40±0.53	14.40±0.47

注：同列不同字母代表差异显著（P<0.01）。

2.8　沙棘叶酸奶的黄酮和多酚质量浓度分析

沙棘叶酸奶的黄酮和多酚质量浓度见图9。黄酮和多酚主要存在于植物中，因此NY组酸奶含黄酮、多酚较少，仅为20.13 mg/L和16.63 mg/L，而添加了质量分数0.4%的沙棘叶粉的酸奶中黄酮、多酚有极显著提升（P<0.01）。FY组的黄酮、多酚质量浓度分别为58.54 mg/L和59.23 mg/L，LY组的黄酮、多酚质量浓度分别为65.48 mg/L、70.27 mg/L。未发酵时FY组的黄酮、多酚质量浓度分别为10.17 mg/L和13.01 mg/L，未发酵时LY组的黄酮、多酚质量浓度分别为16.51 mg/L和20.42 mg/L。与未发酵组相比，发酵后FY组、LY组的黄酮、多酚质量浓度均极显著上升（P<0.01）。此外，LY组的黄酮、多酚质量浓度始终高于FY组，其原因可能在于发酵过程中乳酸菌会降低酸奶的pH，从而抑制沙棘叶中多酚氧化酶活性，减少酚类物质氧化损失；其次，乳酸菌能分泌β-葡萄糖苷酶、酯酶等水解酶，分解沙棘叶细胞壁中的复杂多酚，释放出游离态的酚酸、黄酮类化合物，导致其含量上升[45-46]。LY组的黄酮、多酚质量浓度高于FY组，原因在于L-20组的沙棘叶中黄酮和多酚保留量高于GF组，这一结果与刘原野等[47]的研究结果一致。



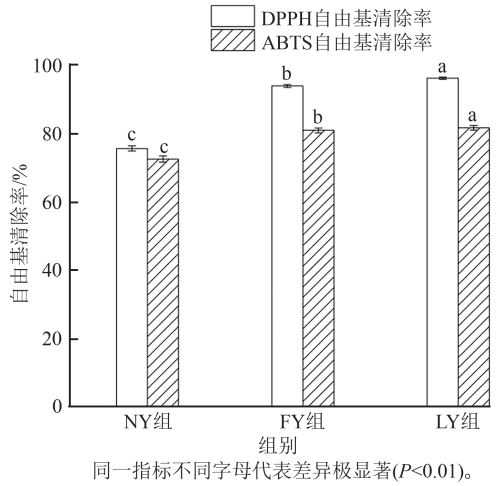
同一指标不同字母代表差异极显著(P<0.01)。

图9　不同处理的沙棘叶酸奶黄酮、多酚质量浓度

Fig. 9　Mass concentrations of flavonoids and polyphenols in sea buckthorn leaf yogurt

2.9　沙棘叶酸奶抗氧化活性

沙棘叶酸奶的抗氧化能力见图10。未添加沙棘叶的NY组本身具备一定的抗氧化活性，DPPH、ABTS自由基清除率分别为75.63%和72.52%，FY组、LY组的DPPH自由基清除率较NY组分别提高了19.52%、21.42%，ABTS自由基清除率分别提高了10.39%、11.21%，添加沙棘叶使得酸奶的抗氧化能力极显著提高（P<0.01），且LY组的抗氧化能力强于FY组。其原因在于LY组的沙棘叶中抗氧化类物质保留较好，在发酵后还能发挥作用；其次可能在于多种抗氧化成分的叠加效应，发酵后酸奶中同时富含酚酸、黄酮醇等多种抗氧化物质，其协同作用增强了整体清除自由基的能力[48]。



同一指标不同字母代表差异极显著(P<0.01)。

图10　沙棘叶酸奶的抗氧化活性

Fig. 10　Antioxidant properties of sea buckthorn leaf yogurt

3　结论

作者将LVEF应用于沙棘叶的冷冻过程中，探究电场强度对其冻结品质的影响。分别在离静电板0、20、40、60 cm处理沙棘叶，结果发现在离静电场板20~40 cm处可以缩短沙棘叶的冷冻时间。因为场强不同会导致冻结时间不同，其中LVEF辅助冷冻沙棘叶组与普通冷冻组相比显著缩短了冻结时间；其次可以显著减缓黄酮、多酚类活性成分流失，其作用机制可能是在适宜的静电场作用下，沙棘叶内部水分状态及分布发生改变，干扰了水分子间氢键的振动模式，进而在冻结过程中调控冰晶生长方式，最终缩短冻结时间并提升冻结速率。沙棘

叶添加到牛乳里发酵成酸奶后，添加LVEF辅助冷冻沙棘叶酸奶组的活性物质保留量与抗氧化能力优于添加普通冷冻沙棘叶酸奶组，表明用LVEF辅助冷冻且在离静电场板20 cm时可以使沙棘叶中的营养物质尽可能保留下来，因此沙棘叶经冷冻处理后的理化指标有显著提升。该研究为利用LVEF辅助冷冻沙棘叶的贮藏技术提供了理论依据。

参考文献

[1] 姚彤. 内蒙古沙棘产业发展现状及其对风沙的生态响应[J]. 中国果树，2022(5)：104-108.
YAO T. Current situation of seabuckthorn industry in Inner Mongolia and its ecological response to aeolian sand [J]. China Fruits，2022(5)：104-108.(in Chinese)

[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典：2020年版 一部[M]. 北京：中国医药科技出版社，2020.

[3] 王媛媛，冯勇荣，孙青占，等. 不同产地沙棘叶茶品质分析及综合评价[J]. 食品与发酵工业，2024，50(24)：331-338.
WANG Y Y，FENG Y R，SUN Q Z，et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of seabuckthorn leaf tea from different producing areas[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(24)：331-338.(in Chinese)

[4] GULIYEV V B，GUL M，YILDIRIM A. *Hippophae rhamnoides* L.：chromatographic methods to determine chemical composition，use in traditional medicine and pharmacological effects[J]. Journal of Chromatography B，2004，812(1/2)：291-307.

[5] 陈雪涛，赵三虎，张先廷，等. 不同提取方法对沙棘叶茶活性成分含量、抗氧化能力及α-糖苷酶抑制活性的影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(14)：35-42.
CHEN X T，ZHAO S H，ZHANG X T，et al. Effects of different extraction methods on active ingredient content，antioxidant capacity，and α-glycosidase inhibitory activity of sea buckthorn leaf tea [J]. Food Research and Development，2024，45(14)：35-42.(in Chinese)

[6] 王芳，陈海银，王海宾，等. 山西4个地区沙棘叶有机物组成及茶叶适制性分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，2021，41(3)：17-24.
WANG F，CHEN H Y，WANG H B，et al. Organic composition analysis and suitability for tea manufacture of sea-buckthorn leaves in four regions of Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)，2021，41(3)：17-24.(in Chinese)

[7] TRIVEDI V L，NAUTIYAL M C，SATI J，et al. Antioxidant enzyme activities in male and female plants of *Hippophae salicifolia* D. Don in different pheno-phases [J]. Acta Physiologiae Plantarum，2020，42(4)：64.

[8] 张玉凤. 浅谈布尔津县沙棘产业发展现状及建议[J]. 农业科学，2021，11(8)：711-714.
ZHANG Y F. Development Status and Suggestions of Hippophae rhamnoides Industry in Buerjin County [J]. Hans Journal of Agricultural Sciences，2021，11(8)：711-714.(in Chinese)

[9] 杨亚丽. 采前生理调节剂结合采后低温静电场对灵武长枣保鲜效果的研究[D]. 银川：宁夏大学，2020.

[10] 张莉会，张憨，朱启兵，等. 供应链中生鲜果蔬品质劣变机制、共性管控及智能检测技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(3)：1-13.
ZHANG L H，ZHANG M，ZHU Q B，et al. Research progress on quality degradation mechanism，common control strategies，and intelligent detection technologies of fresh fruits and vegetables in supply chain[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(3)：1-13.(in Chinese)

[11] 刘丽芳，邹诗晴，彭东辉，等. 低压静电场处理对蝴蝶兰切花保鲜效果的影响[J]. 农业工程学报，2025，41(2)：310-317.
LIU L F，ZOU S Q，PENG D H，et al. Preservation effect of cut *Phalaenopsis* by low voltage electrostatic field (LVEF) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2025，41(2)：310-317.(in Chinese)

[12] 鲁梦情，王云香，聂小宝，等. 低压静电场对油桃保鲜效果的研究[J]. 保鲜与加工，2025，25(1)：9-15.
LU M Q，WANG Y X，NIE X B，et al. Study on preservation effects of nectarine by low voltage electrostatic field[J]. Storage and Process，2025，25(1)：9-15.(in Chinese)

[13] 牛培荣，马存福，魏晓博，等. 低压静电场处理对樱桃番茄采后品质及线粒体氧化还原代谢的影响[J]. 食品科学技术学报，2024，42(6)：91-101.
NIU P R，MA C F，WEI X B，et al. Effect of low-voltage electrostatic field treatment on postharvest quality and mitochondrial redox metabolism of cherry tomatoes[J]. Journal of Food Science and Technology，2024，42(6)：91-101.(in Chinese)

[14] 黄桂丽，李江阔，全鑫瑶，等. 低压静电场对杨梅采后贮藏期间感官和营养品质的影响[J]. 保鲜与加工，2024，24(11)：22-30.
HUANG G L，LI J K，QUAN X Y，et al. Effect of low voltage electrostatic field on sensory and nutritional quality of bayberry during postharvest storage [J]. Storage and Process，2024，24(11)：22-30.(in Chinese)

[15] 沐楠智，谢超，周卓颖，等. 低压静电场对云南青梅采后贮藏品质及水分迁移特性的影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(22)：70-78.
MU N Z，XIE C，ZHOU Z Y，et al. Effect of low voltage electrostatic field on postharvest storage quality and moisture movement characteristics of Yunnan green plums (*Prunus mume*)[J]. Food Research and Development，

2024，45(22)：70-78.(in Chinese)

[16] 徐耀宗，刘丰怡，齐元之，等. 低压静电场处理对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程，2024，45(11)：88-95.
XU Y Z，LIU F Y，QI Y Z，et al. Effects of low voltage electrostatic field treatment on postharvest storage quality of *Agaricus* bisporus[J]. Packaging Engineering，2024，45(11)：88-95.(in Chinese)

[17] BULCA S，UMUT F，KOÇ A. The influence of microbial transglutaminase on camel milk yogurt[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，160：113339.

[18] 范亦菲，郭琳，靳文会，等. 枸杞酸奶体外抗氧化活性和保肝功能研究[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(4)：25-30.
FAN Y F，GUO L，JIN W H，et al. Study on antioxidant activity *in vitro* and hepatoprotective function of *Lycium barbarum* yogurt[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(4)：25-30.(in Chinese)

[19] 王丽爽，赵秀红. 燕麦膳食纤维酸奶的研制[J]. 食品研究与开发，2017，38(3)：91-95.
WANG L S，ZHAO X H. Preparation of the dietary fiber oat yogurt[J]. Food Research and Development，2017，38(3)：91-95.(in Chinese)

[20] 温永平，唐季清，韩冬，等. 魔芋甘露寡糖对酸奶免疫调节活性的影响[J]. 食品科学，2021，42(17)：133-142.
WEN Y P，TANG J Q，HAN D，et al. Effects of konjac mannanoligosaccharide fortification on immunomodulatory activity of yogurt[J]. Food Science，2021，42(17)：133-142.(in Chinese)

[21] 王宪青，白吉敏，陈文璐，等. 姜黄牛初乳发酵乳的制备及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技，2023，44(14)：163-170.
WANG X Q，BAI J M，CHEN W L，et al. Preparation and antioxidant activity of turmeric colostrum fermented milk[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(14)：163-170.(in Chinese)

[22] MA Y J，GUO X D，LIU H，et al. Cooking，textural，sensorial，and antioxidant properties of common and Tartary buckwheat noodles[J]. Food Science and Biotechnology，2013，22(1)：153-159.

[23] 田建华. 沙棘叶多酚提取物及其抗氧化活性研究[J]. 食品工程，2023(2)：48-50.
TIAN J H. Study on the antioxidant activity of polyphenol extracts from seabuckthorn leaves[J]. Food Engineering，2023(2)：48-50.(in Chinese)

[24] GUO X D，WU C S，MA Y J，et al. Comparison of milling fractions of Tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties[J]. Food Research International，2012，49(1)：53-59.

[25] 赵明慧. 沙棘黄酮的提取纯化工艺优化及应用研究[D]. 石河子：石河子大学，2023.

[26] 梁淇雅，黄忠民，苏艺萌，等. 不同冻结方式对青椒肉丝预制菜肴品质特性的影响[J]. 食品工业科技，2025，46(19)：150-157.
LIANG Q Y，HUANG Z M，SU Y M，et al. Effects of different freezing methods on the quality characteristics of prepared green pepper and pork strips dishes[J]. Food Industry Science and Technology，2025，46(19)：150-157.(in Chinese).

[27] 李晴晴，白小佳，林珩迅，等. 低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响[J]. 食品工业科技，2024，45(20)：49-58.
LI Q Q，BAI X J，LIN H X，et al. Effects of low voltage electrostatic field combined with low temperature and high humidity thawing on beef tenderness and water retention[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(20)：49-58.(in Chinese)

[28] HU F F，QIAN S Y，HUANG F，et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，150：111987.

[29] 李侠，孙圳，杨方威，等. 适宜冻结温度保持牛肉蛋白稳定性抑制水分态变[J]. 农业工程学报，2015，31(23)：238-245.
LI X，SUN Z，YANG F W，et al. Appropriate freezing temperature to maintain beef protein stability and inhibit myowater state changes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2015，31(23)：238-245.(in Chinese)

[30] LI D P，JIA S L，ZHANG L T，et al. Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities，degradation of adenosine triphosphate，and water loss when thawing lightly-salted，frozen common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Journal of Food Engineering，2017，212：226-233.

[31] 项德胜，朴新月，余海霞，等. 低压静电场协同微冻对小黄鱼贮藏过程中品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15(2)：112-121.
XIANG D S，PIAO X Y，YU H X，et al. Effects of low-voltage electrostatic field and micro-freezing on the quality of small yellow croaker during storage[J]. Journal of Food Safety & Quality，2024，15(2)：112-121.(in Chinese)

[32] 高飞，杨水兵，夏宇，等. 低压静电场对红虾微冻贮藏过程中品质的影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(10)：21-28.
GAO F，YANG S B，XIA Y，et al. Effect of low-voltage electrostatic field on the quality of red shrimp during micro-freezing storage[J]. Food Research and Development，2024，45(10)：21-28.(in Chinese)

[33] 张璐，董同力嘎，星全芳，等. 不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响[J]. 食品工业科技，2025，46(6)：120-127.

ZHANG L，DONG T L G，XING Q F，et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted freezing on quality of seabuckthorn fruit[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(6)：120-127.(in Chinese)

[34] GONÇALVES E M，ABREU M，BRANDÃO T R S，et al. Degradation kinetics of colour，vitamin C and drip loss in frozen broccoli(*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions[J]. International Journal of Refrigeration，2011，34(8)：2136-2144.

[35] SO V，POCASAP P，SUTTHANUT K，et al. Effect of harvest age on total phenolic，total anthocyanin content，bioactive antioxidant capacity and antiproliferation of black and white glutinous rice sprouts[J]. Applied Sciences，2020，10(20)：7051.

[36] 李佳霖，陈家齐，赵吉春，等. 1-MCP结合低压静电场复合处理对红托竹荪保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(1)：250-258.
LI J L，CHEN J Q，ZHAO J C，et al. Effect of 1-MCP combined with low-voltage electrostatic field composite treatment on the preservation of *Dictyophora rubrovalvata*[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(1)：250-258.(in Chinese)

[37] 陈毅，顾莹，宋平，等. 利用低场核磁共振分析蓝莓贮藏过程中水分含量及迁移变化[J]. 农业工程学报，2022，38(17)：321-328.
CHEN Y，GU Y，SONG P，et al. Analysis of the moisture content and migration changes of blueberries during storage by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2022，38(17)：321-328.(in Chinese)

[38] LIU Y H，ZENG Y，HU X Y，et al. Effect of ultrasonic power on water removal kinetics and moisture migration of kiwifruit slices during contact ultrasound intensified heat pump drying[J]. Food and Bioprocess Technology，2020，13(3)：430-441.

[39] 陈烨聪，康宏彬，杨忠强，等. 基于低场核磁的西梅干燥过程水分迁移规律[J]. 农业工程学报，2024，40(22)：264-272.
CHEN Y C，KANG H B，YANG Z Q，et al. Analysis of moisture transfer of prunes during drying using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(22)：264-272.(in Chinese)

[40] 李浩，杨雪莹，黄群，等. 基于低场核磁和扫描电镜分析槟榔卤水的水分迁移规律及微观结构[J]. 粮油食品科技，2025，33(2)：97-104.
LI H，YANG X Y，HUANG Q，et al. Studies on water migration and microstructure of *Areca* brine based on low-field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2025，33(2)：97-104.(in Chinese)

[41] YUN X Y，ZHANG X Y，CHENG P F，et al. Change of the frozen storage quality of concentrated Mongolian milk curd under the synergistic action of ultra-high pressure and electric field[J]. LWT-Food Science and Technology，2023，177：114462.

[42] AL-SHABIB N A，KHAN J M，MALIK A，et al. Molecular interaction of tea catechin with bovine β-lactoglobulin：a spectroscopic and in silico studies[J]. Saudi Pharmaceutical Journal，2020，28(3)：238-245.

[43] 董闯，周小波，祝亚辉，等. 不同处理方式对牦牛乳及酸奶理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(14)：97-105.
DONG C，ZHOU X B，ZHU Y H，et al. Effects of different processing methods on the physicochemical properties of yak milk and yogurt[J]. Food and Fermentation Industry，2025，51(14)：97-105.(in Chinese)，

[44] MEDIZA ROMERO M L，VON STASZEWSKI M，MARTÍNEZ M J. The effect of green tea polyphenols addition on the physicochemical，microbiological and bioactive characteristics of yogurt[J]. British Food Journal，2021，123(7)：2380-2397.

[45] 林登蕃，郑志豪，周映君，等. 植物基食品中多酚的生物转化及生物活性研究进展[J]. 食品科学，2024，45(14)：319-327.
LIN D F，ZHENG Z H，ZHOU Y J，et al. Research progress in biotransformation and biological activity of polyphenols in plant-based foods[J]. Food Science，2024，45(14)：319-327.(in Chinese)

[46] 李璞钰. 宁夏浆水微生物中高产β-葡萄糖苷酶乳酸菌筛选及其对沙棘果多酚生物转化的研究[D]. 银川：宁夏大学，2022.

[47] 刘原野，蔡文超，张琴，等. 乳酸菌对沙棘汁中酚酸及挥发性化合物的影响研究[J]. 食品与发酵工业，2022，48(11)：156-161.
LIU Y Y，CAI W C，ZHANG Q，et al. Changes of phenolic acids and volatile compounds in sea buckthorn juice fermented by lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(11)：156-161.(in Chinese)

[48] KWAW E，MA Y，TCHABO W，et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile，color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. Food Chemistry，2018，250：148-154.

（责任编辑：李春丽）