

恒稳磁场辅助冷藏保鲜对蓝莓品质的影响

Effects of static magnetic field-assisted preservation on the quality of blueberry

周宇益¹ 杨 哪² 孟 嫚³ 魏 建⁴ 徐学明²

ZHOU Yuyi¹ YANG Na² MENG Man³ WEI Jian⁴ XU Xueming²

(1. 英都斯特[无锡]感应科技有限公司, 江苏 无锡 214035; 2. 江南大学食品学院,

江苏 无锡 214122; 3. 利诚检测认证集团股份有限公司, 广东 中山 528436;

4. TCL 家用电器[合肥]有限公司, 安徽 合肥 231299)

(1. INDUC Scientific Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214035, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. Licheng Detection & Certification Group Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528436, China; 4. TCL Home Appliances [Hefei] Co., Ltd., Hefei, Anhui 231299, China)

摘要:目的:探究一种改善蓝莓冷藏保鲜品质的方法。方法:以蓝莓为试材,于4℃,0,3,6,10 mT恒稳磁场环境下贮藏7 d,分析贮藏过程中蓝莓果实的表观形态、失重率、腐烂率、花青素含量、总酚含量、细胞膜透性、超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量的变化。结果:随磁场强度增加,蓝莓冷藏期间理化特性显著改善。其中,与对照相比,10 mT恒稳磁场环境下的蓝莓果实到贮藏末期大部分仍呈现饱满状态,蓝莓失重率和腐烂率分别下降55.63%和62.14%,花青素及酚类物质损失减小;同时,蓝莓细胞组织中超氧化物歧化酶活性得到增强,减少了膜透性。结论:恒稳磁场辅助冷藏使蓝莓品质显著提升。

关键词:恒稳磁场;冷藏保鲜;蓝莓;品质;活性成分

Abstract: Objective: This study aimed to explore a new method to improve the blueberry quality during the preservation.

Methods: Blueberries were stored at 4℃ for 7 days in 0, 3, 6 and 10 mT static magnetic fields respectively. Meanwhile, the apparent morphology, weight loss rate, decay rate, content of anthocyanidin and total phenol cell membrane permeability, superoxide dismutase activity and content of malondialdehyde of

blueberries were analyzed. **Results:** The physicochemical properties of blueberries improved significantly with the increase of magnetic-field strength. Compared with the control, most of the blueberries treated by 10 mT static magnetic field remained plump during the storage. The weight loss and decay rate of blueberries decreased by 55.63% and 62.14%, respectively. In addition, the loss of anthocyanin and phenolic substances was reduced. **Conclusion:** The quality of blueberry was significantly improved by static magnetic field-assisted preservation.

Keywords: static magnetic field; preservation; blueberry; quality; active ingredient

蓝莓(*Vaccinium uliginosum*)富含花青素、类黄酮、酚酸、维生素和抗氧化物酶,具有预防心血管疾病、癌症、组织炎症、促进视红素合成和抗衰老等功效^[1]。然而,蓝莓在采后加工和贮藏过程中极易受到真菌感染和机械损伤,导致货架期缩短。磁场冷藏保鲜是近年来发展出来的一种食品贮藏新方法。由于果蔬中的水分子和有机物及生物大分子等均具有抗磁性,在外部磁场作用下会发生磁化和取向,从而影响果蔬水分蒸发;同时,果蔬中蛋白质合成、离子跨膜运输及生物遗传特性在磁场环境下发生改变,微生物生理代谢活性受到抑制。因此,静磁场环境可适于果蔬贮藏。Tang等^[2]利用磁场辅助樱桃冷冻,10 mT静磁场下樱桃冰晶面积减少67%,失重率仅为4.79%,冷冻效果显著提升。利用静磁场及交变磁场进行樱桃番茄的低温保藏,磁场环境下,樱桃番茄冷却时间缩短16.7%,失重率下降,表皮色泽变化减少^[3]。

目前,果蔬的贮藏保鲜主要以控温为主,通过低温减

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(编号:CX[22]2041);国家自然科学基金面上项目(编号:32172353);江苏省优秀青年基金项目(编号:BK20211582);企业委托项目(编号:210038);无锡市科技发展资金项目(编号:G20223003)

作者简介:周宇益,女,英都斯特(无锡)感应科技有限公司工程师,硕士。

通信作者:杨哪(1982—),男,江南大学副研究员,博士。

E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2022-11-02 **改回日期:**2023-08-16

缓果蔬的呼吸作用和水分的蒸发,磁场辅助冷藏保鲜应用于果蔬中的研究较少。研究以蓝莓为试材,在恒稳磁场环境下冷藏保鲜蓝莓,研究不同强度恒稳磁场下,蓝莓贮藏过程中品质变化,探究恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓品质的影响,为果蔬高品质冷藏保鲜提供新的参考手段。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

秘鲁蓝莓:品种为 Ventura,七八成熟,市售;

三氯乙酸、硫代巴比妥酸、丙酮、甲酸、氯化钾、醋酸钠、磷酸盐缓冲液、冰乙酸、乙醇、没食子酸、福林酚等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

总超氧化物歧化酶测试盒:南京建成生物工程研究所有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

磁场辅助冷冻冷藏箱(恒稳磁场强度 0~10 mT):MFF10 型,英都斯特(无锡)感应科技有限公司;

电子分析天平:AL204 型,瑞士 Mettler Toledo 仪器有限公司;

离心机:TGL-16B 型,上海安亭科学仪器厂;

磁力搅拌器:C-MAG 型,德国 IKA 公司;

紫外分光光度计:V-1800 型,上海美谱达仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:HWS-24 型,上海一恒科学仪器有限公司;

电导率仪:DDS-307 型,上海仪电科学股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理与贮藏 分别称取 4 份形状、大小均匀,表皮无损伤的 100 g 果实,洗净擦干后,分别置于 0(对照组)、3,6,10 mT 强度的恒稳磁场下的冷藏箱中于 4 ℃冷藏 7 d,RH 为 90%。冷藏期间,定期取样,测定相关指标。

1.2.2 失重率测定 按式(1)计算蓝莓贮藏期间的失重率。

$$Y_m = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y_m ——样品的失重率,%;

m_0 ——样品的初始质量,g;

m_t ——贮藏第 t 天的样品质量,g。

1.2.3 腐烂率测定 按式(2)计算蓝莓贮藏期间的腐烂率。

$$Y_n = \frac{n_0 - n_t}{n_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Y_n ——样品的腐烂率,%;

n_0 ——初始果实数量,个;

n_t ——贮藏第 t 天的果实腐烂数量(当果实腐烂面积超过 25%即视为腐烂),个。

1.2.4 花青素含量测定 采用 pH 示差法^[4]。以 $V_{\text{丙酮}}$: $V_{\text{水}}$: $V_{\text{甲酸}}=80:20:0.2$ 为提取液,取 5 g 蓝莓果实,加入 10 mL 提取液研磨成浆,混匀后 4 ℃,5 000 r/min 离心 20 min。上清液经 0.45 μm 有机系滤膜过滤后,取 1 mL 加入 pH 1.0 的 0.25 mol/L 氯化钾缓冲溶液或 pH 4.5 的 0.4 mol/L 醋酸钠缓冲溶液 4 mL,混合均匀后,测定样品在 520,700 nm 处的吸光度值。蓝莓贮藏期间的花青素含量计算公式如式(3)和式(4)所示。

$$A = (A_{520 \text{ nm}, \text{pH } 1.0} - A_{700 \text{ nm}, \text{pH } 1.0}) - (A_{520 \text{ nm}, \text{pH } 4.5} - A_{700 \text{ nm}, \text{pH } 4.5}), \quad (3)$$

$$Y_b = \frac{A}{\epsilon L} \times 10^3, \quad (4)$$

式中:

A ——吸光度值;

$A_{520 \text{ nm}, \text{pH } 1.0}$ ——样品在 pH 1.0 时,520 nm 处的吸光度值;

$A_{700 \text{ nm}, \text{pH } 1.0}$ ——样品在 pH 1.0 时,700 nm 处的吸光度值;

$A_{520 \text{ nm}, \text{pH } 4.5}$ ——样品在 pH 4.5 时,520 nm 处的吸光度值;

$A_{700 \text{ nm}, \text{pH } 4.5}$ ——样品在 pH 4.5 时,700 nm 处的吸光度值;

Y_b ——样品中花青素含量,mg/g;

ϵ ——矢车菊花素-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数,26 900;

L ——比色皿光路长度,1 cm;

M ——矢车菊花素-3-葡萄糖苷的摩尔质量,449.2 g/mol;

b ——稀释倍数;

V ——最终体积,mL。

1.2.5 总酚含量测定 取 5 g 样品研磨成浆,加入 20 mL 60%的乙醇于 40 ℃水浴超声提取 30 min,5 000 r/min 离心 20 min。上清液经 0.45 μm 有机系滤膜过滤。参照李晓英等^[5]的方法,以没食子酸为标准品测定总酚含量。

1.2.6 细胞膜透性测定 采用电导率法^[6]。将蓝莓样品切成大小均匀薄片,取 2 g 置于试管中,加入 20 mL 去离子水,在真空干燥器中抽气浸泡 20 min,弃去浸泡液,加入 20 mL 去离子水后,振荡 30 min,测定电导率 L_1 。将烧杯置于 100 ℃下煮沸 15 min,降至室温后,测定电导率 L_t ,重复测定 3 次。蓝莓贮藏期间的细胞膜相对电导率计算公式如式(5)所示。

$$L_n = \frac{L_1}{L_t} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

L_n ——样品的相对电导率, %;

L_1 ——样品的初始电导率, mS/cm;

L_t ——贮藏第 t 天的样品电导率, mS/cm。

1.2.7 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定 取 1 g 蓝莓样品,加入 4 mL pH 7.8 的磷酸盐缓冲溶液研磨成浆,在 4 ℃、5 000 r/min 下离心 20 min。取上清液 0.05 mL 加入 SOD 试剂盒中试剂 1 号 1.0 mL 混合均匀,加入 2 号(0.1 mL)、3 号(0.1 mL)和 4 号(0.1 mL),充分混合均匀后,于 37 ℃ 下孵育 40 min 后,加入 2 mL 显色剂,室温下静置 10 min,测定混合液在 550 nm 下的吸光度值。1 g 样品在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 所需酶量为一个酶活性单位(U),每个样品重复测定 3 次。

1.2.8 丙二醛(MDA)含量 参照 Shi 等^[7]的方法并改进,修改如下:在 4 ℃、5 000 r/min 下离心 20 min,取上清液 2 mL,加入 2 mL 6.7 g/L 硫代巴比妥酸溶液,混合均匀后降至室温,5 000 r/min 离心 20 min,重复测定 3 次。

1.3 数据分析

采用 Origin 8.5 制图,SPSS 22.0 软件分析数据。

2 结果与分析

2.1 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓表现形态的影响

蓝莓贮藏 3 d 后,对照组蓝莓果皮表面出现褶皱,5 d 后果皮褶皱愈加明显,果实出现瘫软,7 d 后果实失水加剧,果实干瘪瘫软。10 mT 恒稳磁场环境冷藏 7 d 后仅有 3% 的果皮表面出现褶皱,大部分蓝莓果实仍呈现饱满状态。这与单亮亮等^[8]利用弱直流磁场处理蔬菜结果相似,3.6 mT 磁场作用下,西葫芦、黄瓜和胡萝卜汁液流失减少,形态保持显著优于对照组。

2.2 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓失重率的影响

从图 1 可以看出,冷藏 7 d 时,对照组中蓝莓失重率达到 6.04%,而随恒稳磁场强度增加,蓝莓失重率显著下降,3,6,10 mT 恒稳磁场环境下的蓝莓失重率分别较对照组下降了 27.98%,38.74%,55.63%。此外,在鲜切芒果^[9]和香蕉^[10]中也有类似的报道。这可能与磁场环境下,果实中自由离子和溶质分子受到洛伦兹力的作用,扩

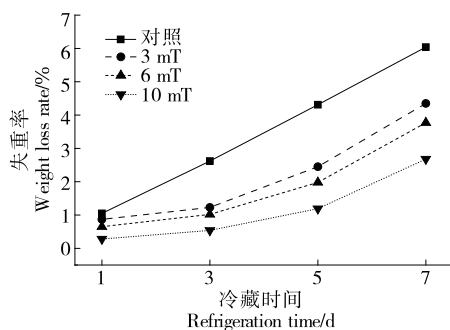


图 1 恒稳磁场环境对蓝莓冷藏过程中失重率的影响

Figure 1 Effects of static magnetic field on the weight loss rate of blueberries during preservation

散和迁移速率减缓,细胞膜极性磷脂双分子层排列更加紧密有序,水分子跨膜扩散通量降低有关^[11-12],表明恒稳磁场环境可有效降低蓝莓失重率。

2.3 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓腐烂率的影响

从图 2 可以发现,冷藏 7 d 时,对照组中蓝莓的腐烂率达到 5.23%。而随恒稳磁场强度增加,蓝莓腐烂率显著下降,10 mT 恒稳磁场环境下蓝莓的腐烂率仅为 1.98%,蓝莓腐烂率降低 62.14%。草莓中也有类似报道^[13]。同时,黄色镰刀菌在静磁场环境下菌丝生长和分生孢子萌发受到抑制,真菌毒性降低^[14]。表明恒稳磁场环境可有效抑制蓝莓中的病原菌和腐败菌增殖,延缓蓝莓腐烂。

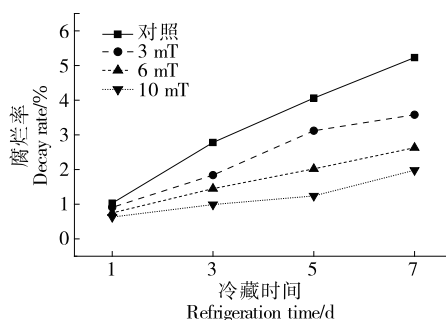


图 2 恒稳磁场环境对蓝莓冷藏过程中腐烂率的影响

Figure 2 Effects of static magnetic field on decay rate of blueberry during preservation

2.4 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓花青素含量的影响

从图 3 可以发现,随贮藏时间延长,蓝莓中花青素含量逐渐下降。贮藏 3 d,与对照组相比,10 mT 恒稳磁场环境下,蓝莓中花青素含量提高了 7.25%。贮藏第 7 天,蓝莓中保留的花青素含量为对照组的 1.12 倍。在豌豆和红酒中,磁场辅助贮藏可有效改善叶绿素、原色素含量变化^[15-16]。恒稳磁场环境下,蓝莓中抗氧化酶活性增强,氧化减少,活性成分降解减缓,有效提高了蓝莓冷藏保鲜品质。

2.5 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓总酚含量的影响

从图 4 可以发现,蓝莓冷藏过程中总酚含量呈先增加后减少的趋势,恒稳磁场环境下,随磁场强度增加,总

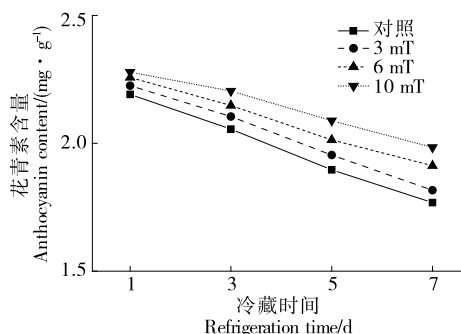


图 3 磁场环境对蓝莓冷藏过程中花青素含量的影响

Figure 3 Effects of static magnetic field on the anthocyanin content in blueberries during preservation

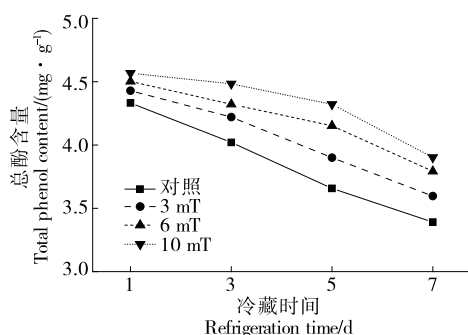


图 4 恒稳磁场环境对蓝莓冷藏过程中总酚含量的影响
Figure 4 Effects of static magnetic field on total phenol content of blueberries during preservation

酚含量变化减小。冷藏 7 d 时, 10 mT 恒稳磁场环境下蓝莓总酚含量为对照组的 1.15 倍, 恒稳磁场环境可有效抑制蓝莓中多酚物质的降解。磁场冷藏保鲜环境下, 黄瓜和葡萄中氧化酶活性下降, 抗氧化酶活性增强^[17-18]。恒稳磁场环境下, 蓝莓中多酚氧化酶活性受到抑制, 促进过氧化氢酶和超氧化物歧化酶等抗氧化酶合成, 有效减少蓝莓中酚类物质的降解, 消除蓝莓细胞中产生的过氧化氢和超氧自由基, 有效减少细胞氧化损伤, 实现蓝莓高品质冷藏保鲜。

2.6 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓细胞膜透性的影响

从图 5 可以发现, 蓝莓贮藏期间相对电导率逐渐增加。与对照组相比, 冷藏 7 d 时, 3, 6, 10 mT 恒稳磁场环境下, 相对电导率分别下降 7.72%, 13.91%, 19.87%。且与已有报道^[19]相似, 在黄瓜贮藏中交变磁场对电导率具有抑制作用。恒稳磁场环境下, 蓝莓细胞膜有序性和紧密性提高, 细胞内电解质泄露减少, 果实抗逆性增强。

2.7 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓 SOD 活性的影响

从图 6 可以发现, 与对照组相比, 恒稳磁场环境下, SOD 活性显著增加。冷藏 7 d 时, 3 mT 恒稳磁场环境下, SOD 活性提高 5.78%, 而 10 mT 下, SOD 活性增加 11.33%。在脉冲电场处理大蒜、洋葱和生姜研究中, SOD 和 POD 活性增强, 提高了果蔬防御自由基氧化损伤的能

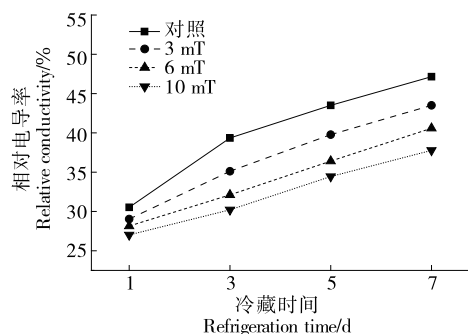


图 5 恒稳磁场环境对蓝莓冷藏过程中相对电导率的影响
Figure 5 Effects of static magnetic field on the relative conductivity of blueberries during preservation

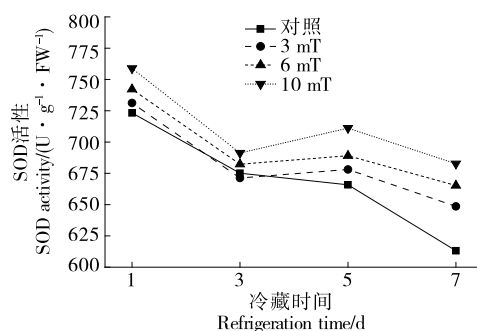


图 6 恒稳磁场环境对蓝莓冷藏过程中 SOD 活性的影响
Figure 6 Effects of static magnetic field on SOD activity of blueberries during preservation

力, 有效抑制酶促褐变^[20]。恒稳磁场影响蛋白质的电磁特性和氨基酸偶极矩, 改变蛋白质的基因表达和生物分子合成^[21-22]。恒稳磁场环境下, 蓝莓组织液中产生微电流, 影响 SOD 金属活性基团, 酶活性增加, 蓝莓的抗氧化能力增强, 清除氧自由基, 减少蓝莓的氧化损伤, 提高蓝莓贮藏品质。

2.8 恒稳磁场冷藏保鲜对蓝莓 MDA 含量的影响

从图 7 可以发现, 蓝莓冷藏过程中, MDA 呈上升趋势, 冷藏前 3 d, 对照组与恒稳磁场环境下蓝莓 MDA 差异较小。冷藏 7 d 时, 3, 6, 10 mT 恒稳磁场环境下, 蓝莓 MDA 含量较对照组分别下降 4.96%, 10.74%, 19.01%, 蓝莓中脂质过氧化物含量显著降低。已有研究^[23]表明, 磁场处理葡萄, 可有效抑制膜脂过氧化。在磁场作用下, 化学反应中的塞曼分裂大于分子的超精细组态相互作用能, 减少自由基形成^[24]。恒稳磁场环境下, 蓝莓果实中自由基减少, 有效抑制 MDA 合成, 减少脂质氧化, 延长蓝莓贮藏时间。

3 结论

10 mT 恒稳磁场环境下, 恒稳磁场冷藏 7 d 后, 蓝莓果实大部分仍呈现饱满状态。蓝莓失重率和腐烂率分别降低了 55.63% 和 62.14%, 细胞组织液相对电导率下降了 19.87%, 细胞膜透性减弱, 蓝莓果实抗逆性增强。同

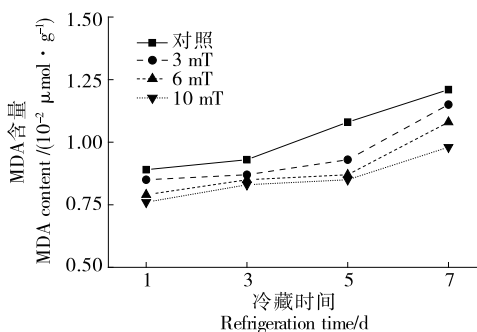


图 7 恒稳磁场环境对蓝莓冷藏过程中 MDA 含量的影响
Figure 7 Effects of static magnetic field on the content of MDA of blueberries during preservation

时,恒稳磁场冷藏后,蓝莓中超氧化物歧化酶活性增强,丙二醛含量显著下降,脂质氧化减少,花青素及酚类物质氧化损伤减小,蓝莓营养物质及活性成分损失减小。通过研究恒稳磁场下蓝莓冷藏过程中的理化性质变化,为蓝莓的高品质冷藏保鲜提供了一种新的手段,但蓝莓等果蔬贮藏过程中氨基酸及多糖等营养物质的变化以及对微生物的影响仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] 霍若冰,李洋,徐瞳晖,等.鱼腥草提取液-壳聚糖抗菌复合膜对低温贮藏蓝莓的保鲜作用[J].现代食品科技,2022,38(8): 153-162.
HUO R B, LI Y, XU T H, et al. The fresh-keeping effect of antibacterial houttuynia cordata extract-chitosan composite film on blueberries stored at a low temperature[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 153-162.
- [2] TANG J Y, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 278: 109949.
- [3] ZHAO Y, ZHANG L, ZHAO S S, et al. Comparison study of static and alternating magnetic field treatments on the quality preservation effect of cherry tomato at low temperature[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(9): e13453.
- [4] 王凤娟,孙飞龙,叶文文,等.pH示差法测定红菊苣中花青素条件的优化[J].包装与食品机械,2018,36(5): 61-64.
WANG F J, SUN F L, YE W W, et al. Optimization of analytical conditions for determining content of anthocyanin in *Cichorium intybus* var. *foliosum* hegi by pH differential method[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(5): 61-64.
- [5] 李晓英,薛梅,樊汶樵.蓝莓花、茎、叶酚类物质含量及抗氧化活性比较[J].食品科学,2017,38(3): 142-147.
LI X Y, XUE M, FAN W Q. Comparison of antioxidant activity and phenolic contents of blueberry flowers, stems and leaves[J]. Food Science, 2017, 38(3): 142-147.
- [6] 袁芳,邱诗铭,李丽.不同保鲜剂复合处理对鲜切芒果活性氧代谢、细胞膜透性和褐变的影响[J].食品科学,2020,41(3): 218-223.
YUAN F, QIU S M, LI L. Effect of Composite preservatives on active oxygen metabolism, cell membrane permeability and browning of fresh-cut mango[J]. Food Science, 2020, 41(3): 218-223.
- [7] SHI S Y, WANG W, LIU L Q, et al. Effect of chitosan/nano-silica coating on the physicochemical characteristics of longan fruit under ambient temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(1): 125-131.
- [8] 单亮亮,刘斌,王鹏飞.弱直流磁场下蔬菜冻结过程的变化特性[J].食品科技,2018,43(5): 49-53.
SHAN L L, LIU B, WANG P F. Variations of vegetable freeze process under weak direct current magnetic field[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(5): 49-53.
- [9] 赵松松,韩馨仪,刘斌,等.交变磁场抑制香蕉冷害的作用机理分析[J].江苏农业学报,2021,37(3): 739-745.
- ZHAO S S, HAN X Y, LIU B, et al. Mechanism analysis on the action of alternating magnetic field in inhibiting chilling injury of bananas[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(3): 739-745.
- [10] ZHAN L J, LI Y, HU J Q, et al. Browning inhibition and quality preservation of fresh-cut romaine lettuce exposed to high intensity light[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 14: 70-76.
- [11] WANG Z, HAO F T, DING C, et al. Effects of static magnetic field on cell biomechanical property and membrane ultrastructure[J]. Bioelectromagnetics, 2014, 35(4): 251-261.
- [12] CORTELLINO G, GOBBI S, BIANCHI G, et al. Modified atmosphere packaging for shelf life extension of fresh-cut apples[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 320-330.
- [13] 李太宝,谭明辉,王达,等.电磁场辅助冷藏对草莓品质的影响[J].制冷技术,2021,41(2): 61-64, 70.
LI T B, TAN M H, WANG D, et al. Effect of electromagnetic field assisted cold storage on strawberry quality[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(2): 61-64, 70.
- [14] MARIA C A, AUGUSTO A, BARBARA C, et al. Morphological and biochemical modifications induced by a static magnetic field on *Fusarium culmorum*[J]. Biochimie, 2003, 85(10): 963-970.
- [15] 贾一鸣,邸倩倩,刘斌,等.磁场对豌豆贮藏品质的影响[J].冷藏技术,2018,41(3): 25-28.
JIA Y M, DI Q Q, LIU B, et al. Effects of magnetic field on pea storage quality[J]. Cold Storage Technic, 2018, 41(3): 25-28.
- [16] 苏慧娜,黄卫东,战吉成,等.磁场对新鲜干红葡萄酒原花色素的影响研究[J].食品工业科技,2009,30(11): 112-115.
SU H N, HUANG W D, ZHAN J C, et al. Effect of magnetic field on the contents of proanthocyanidins in young red wines[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(11): 112-115.
- [17] ZHAO S S, ZHAO Y, ZHANG L, et al. Effect of combined static magnetic field and cold water shock treatment on the physicochemical properties of cucumbers[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 217: 24-33.
- [18] 高梦祥,张长峰,樊宏彬.交变磁场对葡萄保鲜效果的影响研究[J].食品科学,2007,28(11): 587-590.
GAO M X, ZHANG C F, FAN H B. Preservation study on fresh grapes by alternating magnetic field[J]. Food Science, 2007, 28(11): 587-590.
- [19] 罗娜.果蔬采后热激及交变磁场联合处理的理论与实验研究[D].天津:天津大学,2018: 46.
LUO N. Preservation mechanism and experimental research on combined hot water and alternating magnetic field treatment for postharvest fruits and vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018: 46.
- [20] 李婷婷.高压脉冲电场对大蒜、洋葱和生姜抗氧化物质的影响[D].吉林:吉林农业大学,2008: 61.
LI T T. Effect of high voltage pulsed electric field on antioxidant substances in garlic, onion and ginger[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2008: 61.

(下转第172页)

- [22] STINTZING F C, HERBACH K M, MOSSHAMMER M R, et al. Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 53(2): 442-451.
- [23] ALVAREZ-PZRRILLA E, DE LA ROSA L A, AMAROWICZ R, et al. Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeno and Serrano peppers[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(1): 163-173.
- [24] SOUZA V R D, PEREIRA P A P, SILVA T L T D, et al. Determination of the bioactive compounds, antioxidant activity and chemical composition of Brazilian blackberry, red raspberry, strawberry, blueberry and sweet cherry fruits[J]. *Food Chemistry*, 2014, 156: 362-368.
- [25] 李锦锦, 莫然, 唐善虎, 等. 不同解冻方式对猪肝理化特性及氧化稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 302-309.
- LI J J, MO R, TANG S H, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and oxidation stability of porcine liver[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 302-309.
- [26] 冯钰敏, 梁诗惠, 邓华荣, 等. 不同解冻方式对鸭腿肉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 336-345.
- FENG Y M, LIANG S H, DENG H R, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of the duck leg meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 336-345.
- [27] 王晋, 高学慧, 陈云云, 等. 解冻方式对船载超低温鲑鱼肌肉保水性及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(9): 159-164, 197.
- WANG J, GAO X H, CHEN Y Y, et al. Effect of thawing methods on water retention and quality of ship-borne ultra-low-temperature squid muscle[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 159-164, 197.
- [28] 靳青青, 马兆立, 李温静, 等. 解冻方法及解冻时间对冻结猪肉品质的影响[J]. *肉类工业*, 2013(11): 7-11.
- JIN Q Q, MA Z L, LI W J, et al. Effects of defrosting methods and time on quality of frozen pork[J]. *Meat Industry*, 2013(11): 7-11.
- [29] 张艳妮, 刘婷, 张雯雯, 等. 不同解冻方式对鸡胸肉物理品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(22): 57-63.
- ZHANG Y N, LIU T, ZHANG W W, et al. Effects of different thawing methods on the physical quality of chicken breast[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(22): 57-63.
- [30] XIA X F, KONG B H, LIU J, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 280-286.
- (上接第 130 页)
- [19] 张连文, 杨传民, 孟宪文. 水晶梨运输包装件振动冲击性能实验研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(11): 34-38, 45.
- ZHANG L W, YANG C M, MENG X W. Experimental study on the vibration and impact performance of crystal pear transport packaging parts [J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(11): 34-38, 45.
- [20] 王璐璐, 刘美华, 张连文, 等. 果品物流运输包装件堆码振动传递性能的试验研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(19): 5-10.
- WANG L L, LIU M H, ZHANG L W, et al. Experimental study on the vibration transmission performance of fruit logistics and transport packaging parts stacking [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(19): 5-10.
- [21] 康维民, 肖念新, 蔡金星, 等. 模拟 3 自由度振动条件下水果运输振动加速度传递率及损伤研究[J]. *农业工程学报*, 2003(6): 219-222.
- KANG W M, XIAO N X, CAI J S, et al. Study on acceleration transfer rate and damage of fruit transport vibration under simulated 3-degree-of-freedom vibration conditions[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2003(6): 219-222.
- [22] 张连文, 杨传民, 孟宪文, 等. 圣女果运输包装件振动冲击性能试验研究[J]. *振动工程学报*, 2011, 24(1): 73-77.
- ZHANG L W, YANG C M, MENG X W, et al. Experimental study on the vibration and impact performance of the transport packaging of sainfoin[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(1): 73-77.
- [23] 朱元国, 范金华, 张军, 等. 高等工程数学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 288-296.
- ZHU Y G, FAN J H, ZHANG J, et al. *Mathematics of higher engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2019: 288-296.
- (上接第 165 页)
- [21] LUCIELEN O D S, TATIANE A G, BEATRIZ T, et al. Glutathione production using magnetic fields generated by magnets [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2012, 55(6): 921-926.
- [22] LARAMEE C B, FRISCH P, MCLEOD K, et al. Elevation of heat shock gene expression from static magnetic field exposure in vitro [J]. *Bioelectromagnetics*, 2014, 35(6): 406-413.
- [23] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 交变磁场抑制葡萄冻害机理分析及试验研究[J]. *河北农业大学学报*, 2021, 44(2): 97-103.
- HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. Analysis and experimental study on the inhibition mechanism of grape freezing injury by alternating magnetic field [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2021, 44(2): 97-103.
- [24] WELLER A, NOLTING F, STAERK H. A quantitative interpretation of the magnetic field effect on hyperfine-coupling-induced triplet formation from radical ion pairs [J]. *Chemical Physics Letters*, 1983, 96(1): 24-27.