

# 不同磁场环境预处理对草莓采后品质的影响

郭盼杰, 王 梦, 吴夏冷, 张玉苍

(集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 基于磁场的生物学效应和食品保存的基本原理, 提出了一种利用磁场环境对采后草莓进行预处理的保鲜方法。分别设置 1, 3, 5 mT 静磁场 (static magnetic field, SMF) 和交变磁场 (alternating magnetic field, AMF) 对草莓进行 30 min 预处理, 对草莓贮藏期间的失重率、硬度、可溶性固形物质量分数、可滴定酸质量分数、相对电导率、腐烂率、呼吸速率进行测量和分析, 探究不同磁场类型及磁场强度对草莓贮藏期品质的影响。结果表明, 1 mT 磁场强度对草莓保鲜效果最好。与对照 CK 组相比, SMF-1 mT 组质量损失减少了 4.35%, 硬度高 10.97%, 可溶性固形物质量分数高 1.93%, 可滴定酸质量分数高 3.84%, 相对电导率低 1.89%, 腐烂率降低 11.49%; AMF-1 mT 组草莓质量损失减少 2.47%, 硬度高 3.30%, 可溶性固形物质量分数高 0.88%, 可滴定酸质量分数高 4.22%, 相对电导率低 4.27%, 腐烂率降低 14.58%。由此可见, 在抑制失重方面, 静磁场比交变磁场更有效; 在抑制腐烂方面, 交变磁场比静磁场效果更佳。

[关键词] 静磁场; 交变磁场; 草莓; 保鲜; 预处理

[中图分类号] TS 255.3

## Effect of Different Magnetic Field on the Physiochemical Properties of Strawberry

GUO Panjie, WANG Meng, WU Xialing, ZHANG Yucang

(College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on the biological effect of magnetic field and the basic principle of food preservation, a preservation method was developed to pretreat freshly harvested strawberries by using magnetic field environment. 1, 3, 5 mT static magnetic field (SMF) and alternating magnetic field (AMF) were set up to pretreat strawberries for 30 min, respectively, and then the relevant physiological quality including strawberry weightlessness, hardness, soluble solid content, titable acid content, relative conductivity, decay rate and respiratory rate were determined during storage. The results showed that the magnetic field strength of 1 mT had the best effect on strawberries preservation. Compared with the CK group, the mass loss of strawberries in the SMF-1 mT group decreased by 4.35%; the hardness was 10.97% higher than that of the CK group; the retention of soluble solids was 1.93% higher than that in the CK group; the retention of titable acid group was 3.84% higher than that in the CK group. Meanwhile, the relative conductivity was lower than 1.89% in the CK group; the decay rate de-

[收稿日期] 2023-05-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (21978059); 科技部重点研发计划项目 (2021YFD210020202, 2021YFD210020404); 集美大学科研启动基金项目 (ZQ2021016)

[作者简介] 郭盼杰 (1996—), 女, 硕士生, 从事果蔬保鲜研究。通信作者: 吴夏冷 (1991—), 女, 讲师, 博士, 从事食品科学方向研究; 张玉苍 (1964—), 男, 教授, 博士, 从事多糖资源高值化利用研究。E-mail: yczhang@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

creased by 11.49%; and the respiratory rate was inhibited during the storage. Compared with the CK group, the mass loss of strawberries in the AMF-1 mT group decreased by 2.47%; the hardness was 3.30% higher than that of the CK group; the retention of soluble solids was 0.88% higher than that in the CK group; and the retention of titable acids 4.22% higher than CK group; the relative conductivity lower 4.27% than CK group; decay rate reduced 14.58%; and respiratory rate was inhibited during storage. Compared with the alternating magnetic field, the static magnetic field was more effective in inhibiting the weightlessness of strawberries, while the alternating magnetic field was more effective in suppressing decay than the static magnetic field.

**Keywords:** static magnetic fields; alternating magnetic fields; strawberries; preserve; pretreatment

## 0 引言

随着经济与科学技术的快速发展,人们对健康饮食的追求越来越高。根据饮食建议,每天摄入适量水果和蔬菜可以大大降低慢性病发生的风险<sup>[1]</sup>。水果和蔬菜中的化学物质具有抗氧化和抗炎的特性,具有保护人体免受各种疾病侵害的潜力<sup>[2]</sup>。草莓有“水果皇后”的美称<sup>[3]</sup>,它富含花青素、维生素 C、酚类和其他类黄酮化合物,具有较强的抗氧化能力,又因其较好的感官特性和对人类健康的益处而受到重视<sup>[4]</sup>。但是,草莓组织娇嫩多汁且无坚硬外果皮保护,极易在采摘、运输及贮藏过程中因机械损伤而加快微生物侵染,从而导致腐烂变质。

果蔬采摘后仍会进行呼吸代谢活动,易遭受水分流失、微生物感染和机械损伤,若不采取适当的保鲜措施,果蔬的形态、品质、色泽、风味等会不断发生质变<sup>[5]</sup>。Nicolau-Lapeña 等<sup>[6]</sup>利用水辅助 UV-C 灯与过氧乙酸溶液相结合的处理方法,探究其对草莓的生理生化及微生物的影响,结果表明,该方法能使草莓的质量和营养参数保持不变,而且有助于减少草莓中人工接种的无害乳杆菌和鼠伤寒沙门氏菌。Li 等<sup>[7]</sup>研究脱落酸 (abscisic acid, ABA) 和 UV-C 辐射对草莓品质、抗氧化能力、花青素含量和相关代谢酶的影响,结果表明,ABA 处理导致果实表面呈红色,加速了果实硬度的降低,并增加了可溶性固形物质量分数,而 UV-C 辐射处理的效果却相反。高梦祥等<sup>[8]</sup>探究了交变磁场对草莓保鲜效果的影响,结果表明,在 5.3  $\mu\text{T}$  磁场强度下,草莓的腐烂率、失重率及呼吸速率有所降低,可溶性糖和维生素 C 的含量得到有效保留。

传统的物理保鲜方法通常是改变外界环境温度或调控食品储存环境气体成分来抑制微生物和酶的活性。化学保鲜在杀菌、新鲜品质保持、果蔬贮藏时间延长方面有良好作用,但化学保鲜剂的毒性和残留问题日益突出。随着消费者对安全、低加工和高营养价值食品的需求变得愈加强烈<sup>[9]</sup>,非热加工技术研究越来越受到人们的青睐。因此,寻找一种对人体更安全、更健康的保鲜方法来替代传统的物理和化学果蔬保鲜法具有十分重要的意义。近年来,磁场作为一种新型非热保鲜技术逐渐走进人们的视野。与传统加热杀菌的保鲜方法相比,磁场保鲜技术不破坏食品组织结构、营养、色泽和风味,没有毒性及残留<sup>[10]</sup>。目前已有许多关于磁场生物效应的研究,并且人们也开始从细胞和微生物水平探究磁场对食用动植物的生物学效应,希望能通过食物营养特性、功效成分、结构特征等方面的变化寻求提高食品质量的新途径。

磁场在生物学领域得到了广泛的应用,但用于采后果蔬贮藏前短期预处理的报道较少。因此,基于磁场的生物效应,本文提出了一种草莓采后预处理的保鲜方法,将采后草莓置于不同磁场类型及磁场强度下,对其贮藏生理生化指标进行检测,探讨提高保存质量和延长草莓采后保质期的可行性,评价不同磁场类型及强度处理对草莓保鲜质量的影响,对于磁场在果蔬保鲜领域的应用具有一定意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

草莓购自福建省厦门市高崎水果市场;氢氧化钠 (AR)、无水乙醇 (AR),西陇科学股份有限公

司;酚酞(试剂纯),上海生工生物工程有限公司。

## 1.2 仪器与设备

MTI-L1型磁场恒温恒湿箱,无锡英都斯特仪器设备有限公司;GR-200型电子天平,A&D有限公司;CR22N型冷冻离心机,日本日立有限公司;F900型便携式乙烯测量仪,美国Felix有限公司;UPR-II-10TN型超纯水机,四川优普有限公司;DHX260型低温培养箱,浙江赛福有限公司;FE38-Standard型电导率仪,瑞士梅特勒有限公司;UH5300型紫外分光光度计,日本日立有限公司;WYA(2WYJ)型手持阿贝折射仪,上海申光仪器仪表有限公司;GY-4型果实硬度仪,乐清市艾德堡仪器有限公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 样品预处理

将塑料盒中的草莓随机分为4组,分别为1 mT静磁场处理组(SMF-1 mT)、3 mT静磁场处理组(SMF-3 mT)、5 mT静磁场处理组(SMF-5 mT)及无磁场处理的空白对照组(CK组)。将磁场恒温恒湿培养箱设定温度为25℃、相对湿度为85%,磁场类型为静磁场,磁场强度分别为1,3,5 mT,处理30 min后取出,在设定温度为(25±0.5)℃、相对湿度为(85±2)%的环境中贮藏。

另一批交变磁场处理的草莓样品随机分为4组,分别为1 mT交变磁场处理组(AMF-1 mT)、3 mT交变磁场处理组(AMF-3 mT)、5 mT交变磁场处理组(AMF-5 mT)及无磁场处理的空白对照组(CK组)。将磁场类型设置为交变磁场,其余方法同静磁场处理组。

### 1.3.2 失重率的测定

不同磁场强度条件下处理的每组草莓各取9颗,每3颗分为一组,使用电子天平称量果实的起始质量,之后每隔48 h再称其质量,失重率的计算公式为:失重率/% = [(W<sub>0</sub> - W<sub>n</sub>)/W<sub>0</sub>] × 100,其中:W<sub>0</sub>为果实初始质量(g);W<sub>n</sub>为果实每次实测的质量(g)。

### 1.3.3 硬度的测定

参考卢亚男等<sup>[11]</sup>的方法,使用果实硬度仪测定草莓在贮藏期内的硬度,并计算其平均值。

### 1.3.4 坏果率的测定

坏果率的测定方法为贮藏即日起,每隔24 h记录腐烂果子数量,计算公式为:坏果率/% = (坏果数/果子总数) × 100。

### 1.3.5 呼吸速率的测定

参考叶建兵等<sup>[12]</sup>的方法,使用便携式乙烯测量仪测量草莓的呼吸速率。记录测定前果实的鲜重。在室温条件下测定出一定时间内CO<sub>2</sub>浓度增加量作为果实呼吸强度,以每千克果实每小时释放出CO<sub>2</sub>的量来表示,计算公式为:Q/(mg·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>) = (V × c × 44 × 1 000 × 273)/(22.4 × w × (273 + T)),其中:Q为呼吸强度(mg·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>);c为CO<sub>2</sub>体积分数(%);V为气体流速(L/h);w为被测果实鲜重(kg);T为测定时的温度(℃)。

### 1.3.6 可溶性固形物质量分数的测定

使用阿贝折射仪测定草莓的可溶性固形物质量分数,将草莓的可食用部分匀浆后过滤,用一次性胶头滴管滴加到阿贝折射仪镜面,进行读数,每个实验组重复测定9个数值。

### 1.3.7 可滴定酸质量分数的测定

可滴定酸质量分数的测定方法采用酸碱滴定法。每个处理分成3组,各取10 g果肉在研钵中研碎,转移到100 mL容量瓶中,用蒸馏水定容,静置30 min,滤纸过滤。取滤液20 mL,加入2滴质量分数为1%酚酞,用氢氧化钠溶液(0.1 mol/L)进行滴定,记录氢氧化钠用量。可滴定酸质量分数的计算公式为:可滴定酸质量分数/% = (V × c × V<sub>0</sub> × f × 100)/(V<sub>s</sub> × m),其中:V为样品提取液总体积(mL);c为NaOH滴定液浓度(mol/L);V<sub>0</sub>为消耗NaOH滴定液体积(mL);V<sub>s</sub>为滴定时所取滤液体积(mL);m为样品质量(g);f为有机酸折算系数(g/mmol)。

### 1.3.8 相对电导率的测定

参考邓红军<sup>[13]</sup>的方法并做适当修改。将草莓果肉切成 1 cm × 1 cm × 1 cm 的方块, 取 3 块果肉置于一个烧杯内, 加入 40 mL 蒸馏水, 浸泡 1 h 后用电导率仪测量溶液的电导率值 ( $R_1$ )。测定完电导率值之后, 将烧杯置于沸水浴中煮沸 30 min, 取出烧杯后冷却至室温, 第二次测定电导率值 ( $R_0$ ), 每组 3 个平行, 相对电导率的计算公式为: 相对电导率  $R/\% = (R_1/R_0) \times 100$ 。

### 1.4 统计分析

每个处理设置 3 个平行, 使用软件 Origin 2021 对数据进行处理, 显著差异性通过 SPSS 软件进行单因素方差方法分析, 各测定指标在贮藏过程中的变化用柱状图表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期失重率的影响

草莓在贮藏期间会有不同程度的失水, 影响其外观并破坏其品质, 因此, 失重率的变化是衡量草莓品质好坏的指标之一。如图 1 所示, 随着贮藏时间的延长, 草莓的失重率逐渐上升, 不同磁场强度处理下的草莓失重率略有差异。CK 组在 0 ~ 6 d 贮藏期间失重率变化最大, 末期达到了 10.71%, 其失重率在 0 ~ 2 d 贮藏期间迅速增加至 4.58%, 静磁场处理组的失重率变化均小于 CK 组。CK、SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT 组的失重率在贮藏期间内依次增大, 在第 6 天时分别达到了 10.71%、6.36%、7.49%、7.92%, CK 组样品贮藏第 6 天的失重率为 SMF-1 mT 组的 1.68 倍, SMF-1 mT 组失重率显著低于 CK 组 ( $P < 0.05$ )。交变磁场各处理组, 在 0 ~ 2 d 贮藏期间内 AMF-5 mT 组的失重率迅速增加至 4.59%, 且 AMF-5 mT 组样品在整个贮藏期内失重率最大; 在第 6 天时, CK、AMF-1 mT、AMF-3 mT、AMF-5 mT 组的失重率分别达到了 9.83%、7.36%、8.49%、10.12%, 此时 CK 组样品的失重率是 AMF-1 mT 组的 1.33 倍, 是 AMF-3 mT 组的 1.16 倍, AMF-1 mT 和 AMF-3 mT 组失重率均显著低于 CK 组 ( $P < 0.05$ )。在整个贮藏过程中, 1 mT 处理组的失重率最低。实验结果表明, 静磁场处理对失重的抑制效果优于交变磁场处理, 且效果显著 ( $P < 0.05$ ), 但二者与未经磁场处理的对照组相比均有抑制草莓失重的作用。在一定强度范围的磁场作用下, 草莓中水的物理性质发生了较大变化。对于磁场预处理的草莓, 极性水分子在从果体向周围扩散的过程中受到磁场中洛伦兹力影响, 抑制了正常扩散的速率, 进而抑制了失重率的上升<sup>[14]</sup>。

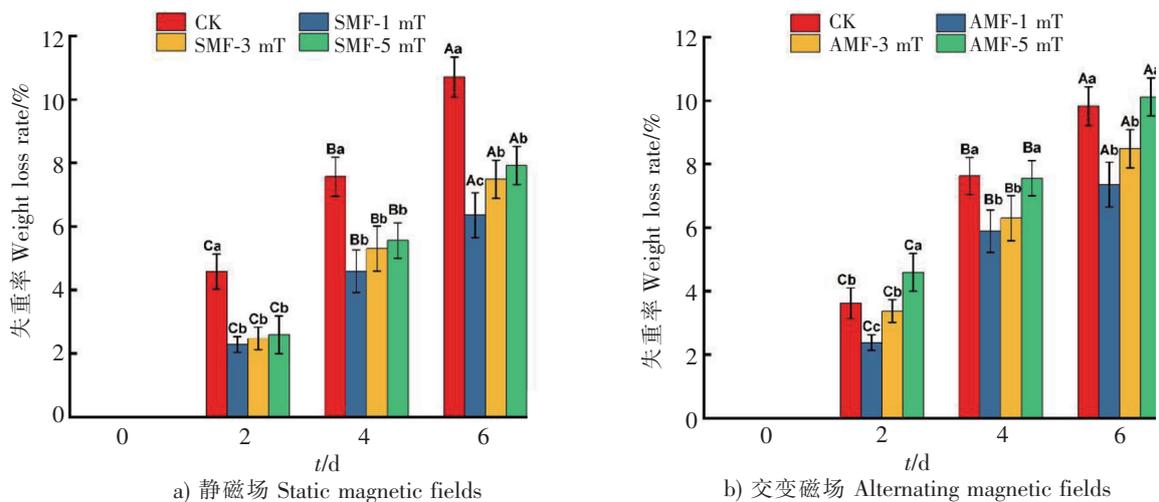


图 1 静磁场和交变磁场预处理对草莓失重率的影响  
Fig.1 Effects of static magnetic and alternating magnetic fields on weight loss rate of strawberry

### 2.2 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期硬度的影响

草莓果实的硬度在整个贮藏期间因水分损失及呼吸作用营养物质的消耗分解而呈逐渐下降的趋势

(见图2)。0 d时静磁场处理组和对照组样品的硬度大致相同, 均为 $(17.82 \pm 2.73)$  N。贮藏第6 d时CK组的硬度为 $(12.85 \pm 1.85)$  N, 而静磁场处理组草莓果肉硬度均比对照组的高, CK、SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT组的草莓硬度分别为12.85, 14.26, 13.59, 13.45 N, SMF-1 mT组草莓样品的硬度是对照组的1.11倍。CK组草莓果实硬度下降至0 d的72.11%, 但交替处理的各组草莓, AMF-1 mT组的硬度下降至0 d的76.71%, AMF-3 mT组的硬度下降至0 d的75.30%。以上结果表明, 磁场处理在延迟组织软化方面的作用大于CK组。

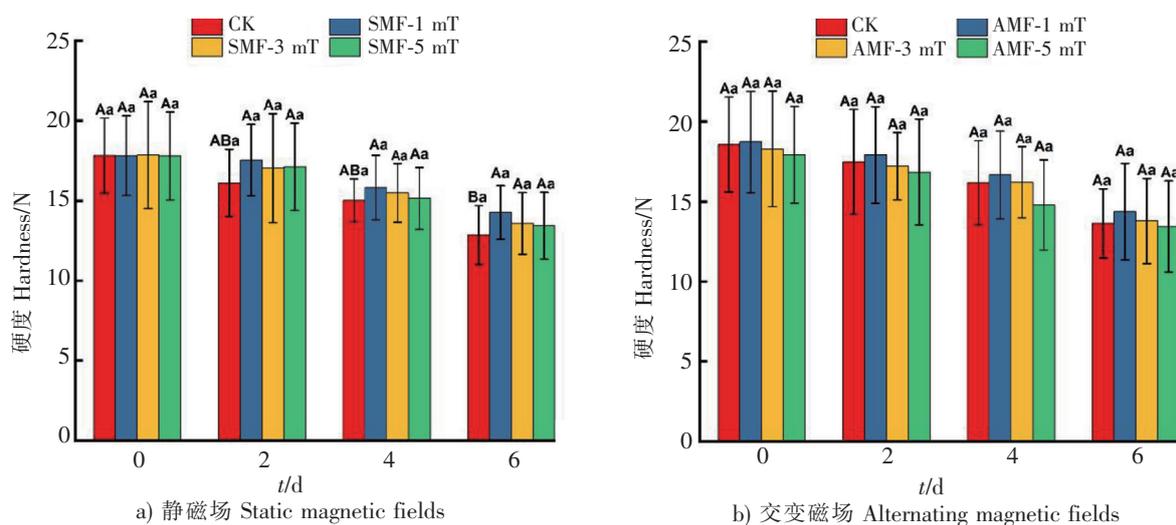


图2 静磁场和交替磁场预处理对草莓硬度的影响  
Fig.2 Effect of static magnetic and alternating magnetic fields on hardness of strawberry

硬度与细胞内结构、膨胀压力和水溶性物质有关。磁场的应用可能会改变膜蛋白的理化性质<sup>[15]</sup>, 从而提高主动转运离子的效率。此外, 果蔬中果胶纤维素的存在使果实保持坚实硬脆, 随着果实的成熟, 果胶纤维素在果胶酶的作用下分解为果胶, 从而使果蔬组织松弛绵软。Zhang等<sup>[16]</sup>发现, 交替磁场在420 mT下会降低纤维素酶与底物的亲和力, 从而抑制了纤维素酶的活性, 但220 mT的交替磁场处理却能够促进纤维素酶的活性, 由此可见, 不同磁场参数对纤维素酶活性的影响不同。由图2可知, 磁场处理组的果实硬度均大于对照组的, 推测可能是因为磁场抑制了草莓的有关酶类活性, 降低了水分及有机物的损失, 保持了组织形态。

### 2.3 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期可溶性固形物质量分数的影响

可溶性固形物是影响果实品质的重要指标, 在整个贮藏期, 其含量呈先上升后下降的趋势(见图3)。在0~2 d可溶性固形物质量分数上升期间, SMF-1 mT组的草莓在第2天时, 可溶性固形物质量分数达到最高值为8.8%, 且AMF-1 mT组的增加量高于CK组。在可溶性固形物质量分数达到最高峰时, CK、AMF-1 mT、AMF-3 mT、AMF-5 mT组的可溶性固形物质量分数分别为8.54%、8.62%、8.46%、8.38%; 在可溶性固形物质量分数下降期间, 交替磁场处理组下降量较低, 在第6天时, CK、SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT组的可溶性固形物质量分数分别为7.76%、7.91%、7.90%、7.72%, SMF-1 mT和SMF-3 mT组的草莓果实可溶性固形物质量分数均高于CK组, 此时CK、AMF-1 mT、AMF-3 mT、AMF-5 mT组的可溶性固形物质量分数分别为7.88%、7.95%、7.94%、8.07%, 交替磁场处理组的草莓样品可溶性固形物质量分数均高于CK组。

果蔬在采后贮藏前期, 果实内部的大分子物质如淀粉和纤维素等会分解, 因此这段时间内可溶性固形物的质量分数有所上升。随着贮藏时间的增加, 果实的呼吸代谢作用会进一步消耗可溶性固形物, 使其含量下降。以上结果说明, 磁场处理会影响采后草莓的代谢活动, 抑制草莓的呼吸代谢速率, 降低了草莓可溶性固形物的消耗, 从而使得磁场处理组草莓的可溶性固形物保有量更高。

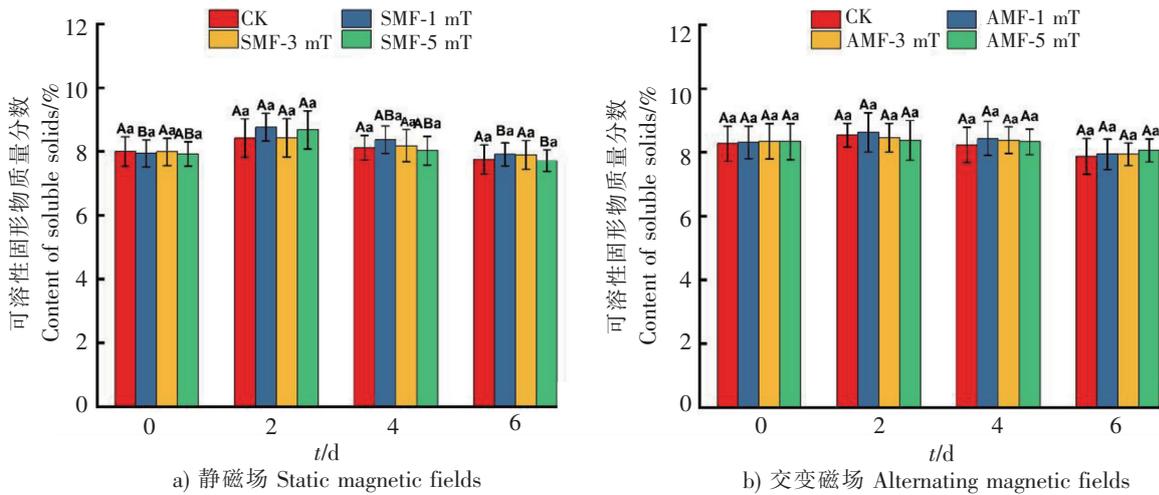


图 3 静磁场和交变磁场预处理对草莓可溶性固形物质量分数的影响

Fig.3 Effect of static magnetic and alternating magnetic fields on the content of soluble solids of strawberry

### 2.4 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期可滴定酸质量分数的影响

可滴定酸是果蔬品质的重要性状之一，也是影响果实风味品质的重要因素，其含量对果实的口味、风味、贮藏性等都有重要影响。由图 4 可见，在贮藏过程中，草莓可滴定酸在果实内转化为糖分或作为呼吸反应的底物被消耗，在第 2 天时各组草莓样品的可滴定酸质量分数与 0 d 相比均有所下降，与交变磁场处理组相比，CK 组草莓样品可滴定酸质量分数减少量最大，减少了 0.06%。草莓在贮藏前期，呼吸速率和营养物质的转换较为活跃，CK、SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT 组第 2 天的可滴定酸质量分数分别为 0.76%、0.75%、0.76%、0.75%，此时 SMF-1 mT 与 CK 组可滴定酸质量分数已呈现显著性差异 ( $P < 0.05$ )。在第 6 天，与 0 d 的各组相比，CK、SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT 组的可滴定酸质量分数分别下降了 0.09%、0.06%、0.12%、0.08%，SMF-1 mT 组可滴定酸质量分数显著高于 CK 组的；交变磁场各处理组，CK、AMF-1 mT、AMF-3 mT、AMF-5 mT 的可滴定酸质量分数分别为 0.71%、0.74%、0.73%、0.74%。在整个贮藏期间，CK 组草莓样品的可滴定酸质量分数减少量最大，1 mT 组草莓的可滴定酸质量分数的波动较小，而可滴定酸质量分数与果实的风味紧密相关，此结果说明，1 mT 磁场强度更有利于果实营养物质的保存。

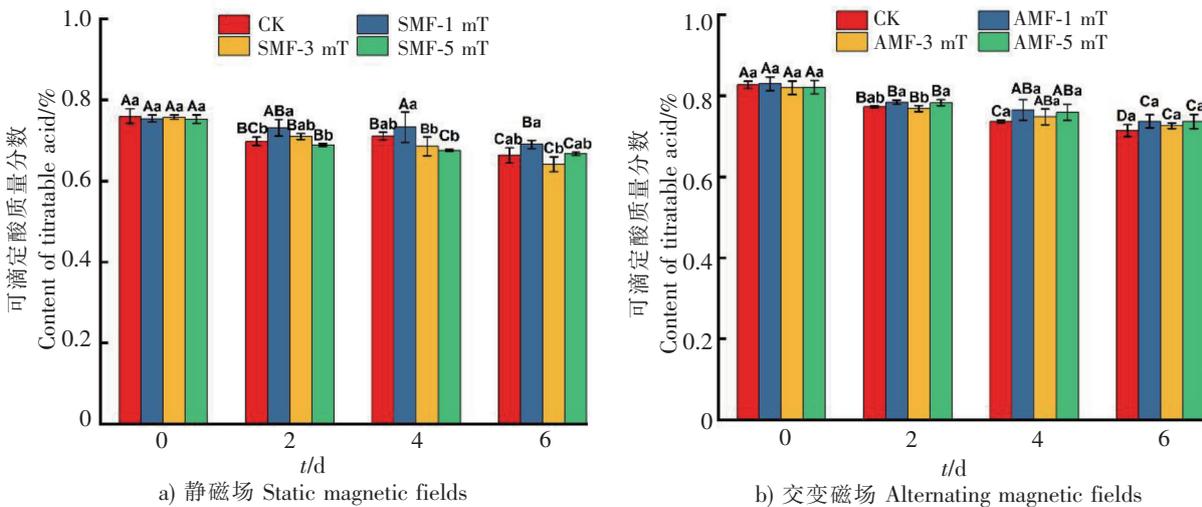


图 4 静磁场和交变磁场预处理对草莓可滴定酸质量分数的影响

Fig.4 Effect of static magnetic and alternating magnetic fields on the content of titratable acid of strawberry

## 2.5 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期相对电导率的影响

果蔬细胞膜具有选择透过性的功能, 对细胞膜内外的物质交换起着重要作用<sup>[17]</sup>。在采摘之后的贮藏过程中, 果蔬组织细胞逐渐衰老, 细胞膜功能活性下降, 膜通透性增加, 细胞内电解质外渗加快, 萃取液的电导率将会增加。图5结果表明, 在0 d时, 经过静磁场处理后的草莓果实相对电导率均比CK组的高, 而且磁场强度越大, 膜通透率越大, CK组样品相对电导率是36.60%, SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT组样品的相对电导率分别为36.80%、37.23%、38.00%。由此可知, 在刚经过高强度的交变磁场处理后, 草莓的相对电导率会有所增加, 造成这一情况的原因可能是高强度磁场作用于草莓细胞膜的带电粒子, 使得膜内物质外泄加快从而膜通透率增大。0~2 d期间CK组样品的相对电导率由36.80%迅速增加至41.43%, 而静磁场处理组样品的相对电导率增加量均小于CK组。第6天时, CK、SMF-1 mT、SMF-3 mT、SMF-5 mT组的相对电导率分别为42.77%、41.08%、42.59%、42.99%, AMF-1 mT、AMF-3 mT、AMF-5 mT组的相对电导率分别为41.69%、43.24%、42.27%, 此时AMF-1 mT组与CK组相对电导率差异性显著 ( $P < 0.05$ )。经过磁场处理后, 短时间内草莓细胞膜通透率会有所增大, 其原因可能是, 磁场作用于草莓细胞膜的带电粒子, 使得膜的物质进出功能有所改变, 影响了极性带电离子如  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  的跨膜转运<sup>[18]</sup>, 并改变了膜电压, 使内物质外泄加快, 从而膜通透率增大。

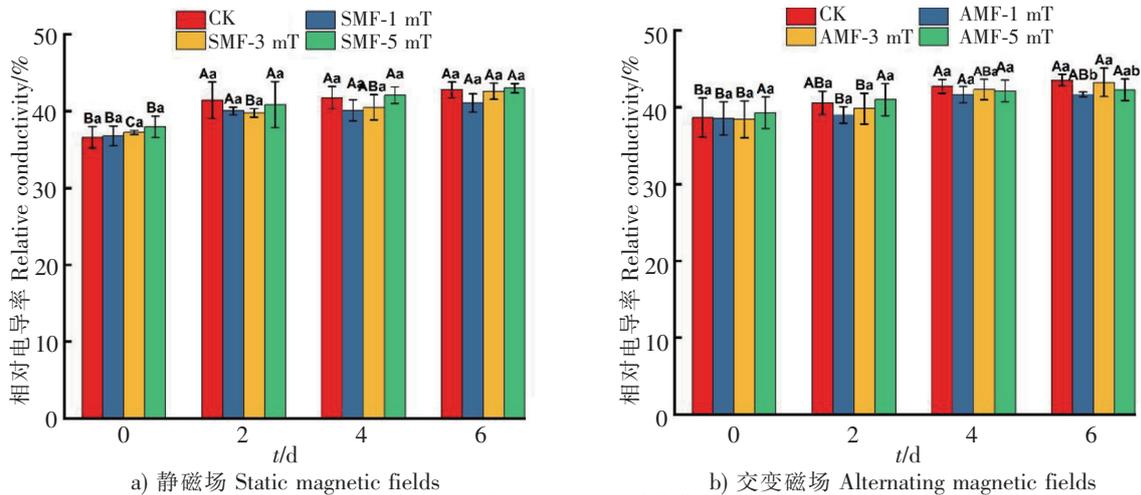


图5 静磁场和交变磁场预处理对草莓相对电导率的影响  
Fig.5 Effects of static magnetic and alternating magnetic fields on relative conductivity of strawberry

## 2.6 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期腐烂率的影响

腐烂率是评价果实质量最直观最明显的指标。草莓因为含水量较高且无坚硬外果皮保护, 所以极易受到损伤, 从而导致病菌的侵袭而腐败变质<sup>[19]</sup>。腐烂率是最重要的感官指标, 它直接反映了果实的质量和保质期。因为草莓在贮藏过程中腐烂过程迅速, 所以, 本文设置时间间隔更短的1 d来检测腐烂情况的变化。由图6可见, 最早和最严重的衰变发生在CK组。在整个贮藏过程中, 磁场处理组始终保持着比CK组更明显的优势 ( $P < 0.05$ )。在贮藏的最后一天, SMF-1 mT组的腐烂率为CK组的81.59%, AMF-1 mT组的腐烂率为CK组的73.59%。

大肠杆菌、葡萄球菌和酵母是水果和蔬菜表面的优势细菌群, 研究表明, 低密度静态或交变磁场可以抑制大肠杆菌的生长<sup>[20]</sup>。已经证实, 低密度静态磁场处理提高了大肠杆菌的脱氢酶活性和细胞内ATP含量, 从而抑制了基因的表达<sup>[21]</sup>。据观察, 旋转磁场会导致酵母细胞的减少并抑制其细胞代谢活性<sup>[22]</sup>。与CK组相比, 静磁场和交变磁场对草莓表面致病菌和腐败菌的增殖有抑制作用, 磁场暴露可导致微生物的数量减少, 抑制其细胞活性。Ostafin等<sup>[23]</sup>研究了一定强度的交变磁场对酵母生物膜形成的影响作用, 结果表明, 一定磁场强度会抑制酵母菌细胞膜的生成。由此可见, 磁场可抑制微生物的生长, 这与本研究的磁场处理降低了草莓的腐烂率情况相符。

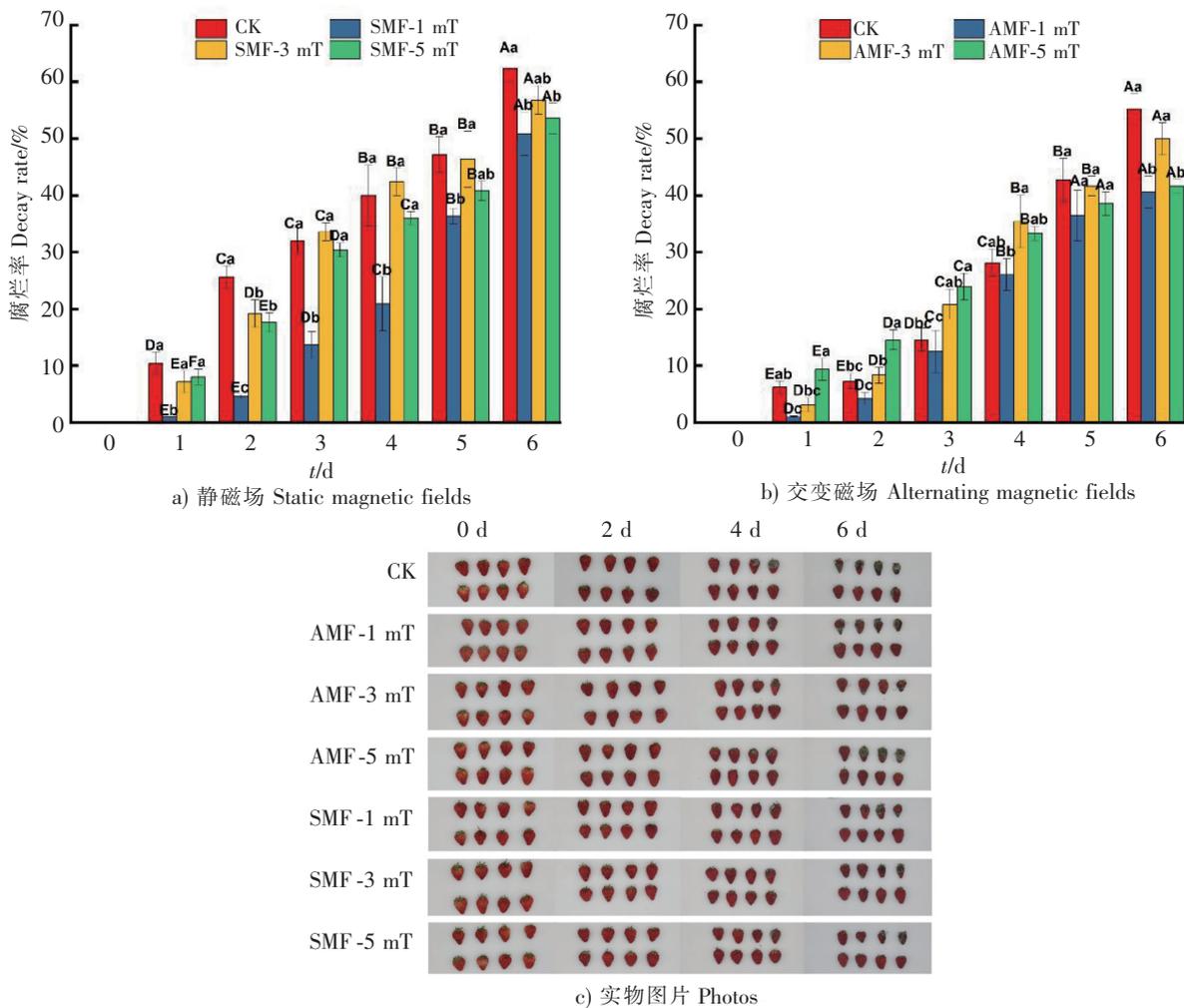


图 6 静磁场和交变磁场预处理对草莓腐烂率的影响及实物图片

Fig.6 Effect of static magnetic and alternating magnetic fields on the decay rate of strawberry and their photos

### 2.7 不同类型磁场预处理对草莓贮藏期呼吸速率的影响

由图 7 可知, 0 d 时 CK 组草莓呼吸速率大于 SMF-1 mT、SMF-3 mT 组, 而小于 SMF-5 mT 组, 说明 SMF-1 mT、SMF-3 mT 的磁场处理条件抑制了草莓的呼吸代谢, SMF-5 mT 的磁场处理促进了草莓的呼吸作用, 不同组的草莓因磁场强度的不同表现出呼吸速率差异。此时 CK 组草莓果实呼吸速率远远大于 AMF-1 mT 组的  $86.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 2 d 时, 各组草莓样品的呼吸速率与 0 d 相比略有上升, 而 CK 组的呼吸速率与 0 d 相比呈现出下降趋势; 2~4 d 各组草莓呼吸速率上升幅度较大, 其中 CK 组的上升量最大, 达到了  $87.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 4~6 d CK 组草莓的呼吸速率均大于交变磁场处理组, 其中 AMF-5 mT 组的草莓样品呼吸速率与其他组相比最小, AMF-1 mT 组在整个贮藏期内的呼吸速率均小于 CK 组。在交变处理组中, AMF-1 mT 和 AMF-5 mT 组呼吸速率在整个贮藏过程中均小于 CK 组, 说明该条件处理减缓了草莓的代谢活动。

草莓果实生物体内具有很多的带电粒子, 例如蛋白质中的氨基酸, DNA 中碱基, 磷酸酯存在的离子基团和电偶极子, 组织液中的一些无机离子等。特定磁场环境对这些带电粒子有一定的影响, 其影响效果受磁场类型、强度、方向等诸多因素影响<sup>[24]</sup>。刘剑虹等<sup>[25]</sup>以水果番茄、香蕉、苹果等为实验样品, 探究了永久磁铁产生的恒定磁场对它们在贮藏期间呼吸强度的影响, 结果表明, 磁场能有效抑制水果的呼吸速率, 此结果与本实验的一定强度下磁场预处理会使草莓呼吸速率降低的结果相符合, 其中与静磁场处理相比, 交变处理组草莓呼吸速率得到了更好抑制。

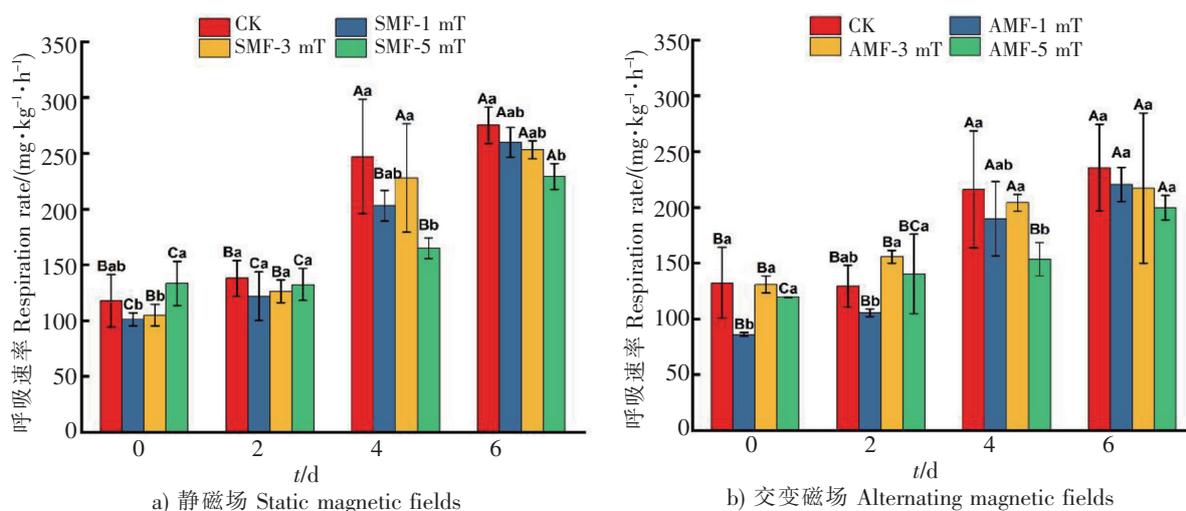


图7 静磁场和交变磁场预处理对草莓呼吸速率的影响  
Fig.7 Effects of static magnetic and alternating magnetic fields on respiration rate of strawberry

### 3 结论

本研究采用不同磁场强度的静磁场处理方法对草莓进行预处理,将磁场处理与贮藏相结合,探讨不同磁场环境、磁场强度对草莓贮藏期间的品质影响效应。实验结果表明,磁场处理会抑制草莓的呼吸代谢速率;在静磁场处理组中,1 mT 磁场强度对草莓保鲜效果最好。在抑制失重方面,静磁场比交变磁场更有效;在抑制腐烂方面,交变磁场比静磁场效果更佳。不同磁场类型在一定强度下对果蔬贮藏品质和采后生理特性有积极的影响,后续的研究可采用预处理的方法对不同种类的水果和蔬菜进行处理,从而探索最佳处理参数(磁通密度、频率、时间和温度等),为磁场在果蔬保鲜领域的应用奠定基础。

### [ 参考文献 ]

- [1] SLAVIN J L, LLOYD B. Health benefits of fruits and vegetables[J]. *Advances in Nutrition*, 2012, 3(4): 506-516. DOI: 10.3945/an. 112. 002154.
- [2] YAHIA E M, GARCÍA-SOLÍS P, CELIS M E M. Chapter 2-contribution of fruits and vegetables to human nutrition and health [C]// *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 19-45.
- [3] 聂凌涛, 黄樱樱. 草莓复合涂膜保鲜效果的研究[J]. *食品科技*, 2012, 37(8): 52-56. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2012.08.040.
- [4] ALEXANDRE E M C, BRANDAO T R S, SILVA C L M. Efficacy of non-thermal technologies and sanitizer solutions on microbial load reduction and quality retention of strawberries[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(3): 417-426. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.09.002.
- [5] JALALI A, LINKE M, GEYER M, et al. Shelf life prediction model for strawberry based on respiration and transpiration processes[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 25: 100525. DOI: 10.1016/j.foodpack.2020.100525.
- [6] NICOLAU-LAPENA I, ABADIAS M, VINAS I, et al. Water UV-C treatment alone or in combination with peracetic acid: a technology to maintain safety and quality of strawberries[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2020, 335: 108887. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108887.
- [7] LI D D, LUO Z S, MOU W S, et al. ABA and UV-C effects on quality, antioxidant capacity and anthocyanin contents of strawberry fruit (*Fragaria ananassa* Duch.) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 90: 56-62. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2013.12.006.
- [8] 高梦祥, 王春萍. 交变磁场对草莓保鲜效果的影响[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(1): 155-158. DOI: 10.3969/j.issn.

- 1005-6521. 2010. 01. 048.
- [9] HERNANDEZ-HERNANDEZ H M, MORENO-VILET L, VILLANUEVA-RODRIGUEZ S J. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: novel non-thermal processing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 58: 102233. DOI: 10. 1016/j. ifset. 2019. 102233.
- [10] BELYAVSKAYA N A. Biological effects due to weak magnetic field on plants[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(7): 1566-1574.
- [11] 卢亚男, 赵美艳, 李立. 聚乙烯抗菌膜的制备及其对草莓保鲜效果的研究[J]. *包装工程*, 2023, 44(1): 195-202. DOI: 10. 19554/j. cnki. 1001-3563. 2023. 01. 022.
- [12] 叶建兵, 陈发河, 吴光斌. 一氧化氮对莲雾果实采后生理及品质的影响[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2012, 17(3): 180-185. DOI: 10. 19715/j. jmuzr. 2012. 03. 004.
- [13] 邓红军. 短波紫外线和热处理对采后草莓损伤生理和品质的调控作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [14] ZHAO S S, YANG Z, 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. DOI: 10. 1016/j. jfoodeng. 2017. 08. 011.
- [15] DINI L, ABBRO L. Bioeffects of moderate-intensity static magnetic fields on cell cultures[J]. *Micron*, 2005, 36(3): 195-217. DOI: 10. 1016/j. micron. 2004. 12. 009.
- [16] ZHANG J, WANG S, XU B, et al. Effect of alternating magnetic field treatments on enzymatic parameters of cellulase[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(7): 1384-1388. DOI: 10. 1002/jsfa. 4711.
- [17] 詹莉, 林杨, 刘黎明, 等. 多元纳米相变蓄冷剂的制备及食用菌保鲜应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 215-223. DOI: 10. 13995/j. cnki. 11-1802/ts. 026089.
- [18] TENUZZO B, VERGALLO C, DINI L. Effect of 6 mT static magnetic field on the bcl-2, bax, p53 and hsp70 expression in freshly isolated and *in vitro* aged human lymphocytes[J]. *Tissue & Cell*, 2009, 41(3): 169-179. DOI: 10. 1016/j. tice. 2008. 09. 004.
- [19] VU K D, HOLLINGSWORTH R G, LEROUX E, et al. Development of edible bioactive coating based on modified chitosan for increasing the shelf life of strawberries[J]. *Food Research International*, 2011, 44(1): 198-203. DOI: 10. 1016/j. foodres. 2010. 10. 037.
- [20] FOJT L, KLAPETEK P, STRASAK L, et al. 50 Hz magnetic field effect on the morphology of bacteria[J]. *Micron*, 2009, 40(8): 918-922. DOI: 10. 1016/j. micron. 2009. 06. 009.
- [21] FILIPIC J, KRAIGHER B, TEPUS B, et al. Effects of low-density static magnetic fields on the growth and activities of wastewater bacteria *Escherichia coli* and *Pseudomonas putida*[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 120: 225-232. DOI: 10. 1016/j. biortech. 2012. 06. 023.
- [22] RAKOCZY R, KONOPACKI M, FIJALKOWSKI K. The influence of a ferrofluid in the presence of an external rotating magnetic field on the growth rate and cell metabolic activity of a wine yeast strain[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 109: 43-50. DOI: 10. 1016/j. bej. 2016. 01. 002.
- [23] OSTAFIN M, ANNA M, TOMASZ D, et al. The effect of alternating magnetic field on biofilm formation by *Saccharomyces cerevisiae* yeast[C]//Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE). Koscielisko: IEEE, 2017: 1-5.
- [24] MIHOUB M, EL MAY A, ALOUI A, et al. Effects of static magnetic fields on growth and membrane lipid composition of *Salmonella typhimurium* wild-type and dam mutant strains[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 157(2): 259-266. DOI: 10. 1016/j. ijfoodmicro. 2012. 05. 017.
- [25] 刘剑虹, 李景天, 李贵珍, 等. 磁场对水果保鲜的实验研究[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 1999, 19(6): 64-65.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)