

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.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.03.025

## 交变磁场抑制香蕉冷害的作用机理分析

赵松松<sup>1</sup>, 韩馨仪<sup>1</sup>, 刘 斌<sup>1</sup>, 关文强<sup>1</sup>, 戴泉玉<sup>2</sup>, 李静红<sup>2</sup>, 张 蕊<sup>3</sup>

(1. 天津市制冷技术重点实验室/工程热物理基础和工程国际联合研究中心, 天津商业大学, 天津 300134; 2. 中国农村技术开发中心, 北京 100045; 3. 华商国际工程有限公司, 北京 100069)

**摘要:** 低温贮藏技术是一种有效且应用广泛的食品保鲜方法, 但贮藏温度降低会引发冷敏型水果细胞组织不可逆的损伤, 发生冷害并导致水果变质, 造成大量经济损失。为此, 提出一种健康安全的磁场抑制冷害的物理处理方法具有重要意义。通过 COMSOL 建立三维电磁线圈模型, 模拟的磁感应强度值 ( $I=3\text{ A}$ ,  $B=0.010\ 35\text{ T}$ ) 与实测结果吻合, 误差仅为 10.7%。联合冷藏技术和电磁生物效应, 构建一种低温电磁保鲜系统, 基于该系统开展交变磁场抑制香蕉冷害试验研究及机理分析。结果表明, 在香蕉低温(温度  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度 85%)贮藏中, 相比对照组, 交变磁场连续处理组(AMCT)与间歇处理组(AMIT)的呼吸强度、多酚氧化酶(PPO)活性和冷害程度明显降低, 其中 AMCT 处理组色差、丙二醛(MDA)含量指标优势明显, 抑制冷害效果最佳。

**关键词:** 交变磁场; 仿真; 冷害; 电磁效应; 香蕉

**中图分类号:** TS255.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2021)03-0739-07

## Mechanism analysis on the action of alternating magnetic field in inhibiting chilling injury of bananas

ZHAO Song-song<sup>1</sup>, HAN Xin-yi<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, GUAN Wen-qiang<sup>1</sup>, DAI Quan-yu<sup>2</sup>, LI Jing-hong<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>3</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology/International Center in Fundamental and Engineering Thermophysic/Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China; 3. Hua Shang International Engineering Co., Ltd., Beijing 100069, China)

**Abstract:** Cryopreservation technology is an effective and widely used method for food preservation, but the decrease of storage temperature of cold-sensitive fruits will cause irreversible damage to fruit cells and tissues, which will cause chilling injury and deterioration of fruits, and result in much economic loss. Therefore, it is of great significance to propose a healthy and safe physical treatment method for chilling injury suppression by magnetic field. A three dimensional electromagnetic coil model was established by COMSOL, and the simulated magnetic induction intensity values ( $I=3\text{ A}$ ,  $B=0.010\ 35\text{ T}$ ) were consistent with the measured results, with an error of only 10.7%. Combined with refrigeration technology and electromagnetic biological effect, an electromagnetic fresh-keeping system with low temperature was constructed, study on inhibition effect of

alternating magnetic field on chilling injury of bananas and mechanism analysis were carried out based on the system. The results showed that, during cryopreservation of bananas (the temperature was  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the relative humidity was 85%), the respiration intensity, polyphenol oxidase (PPO) activity and chilling injury degree under alternating magnetic field continuous treatment group (AMCT) and intermittent treatment group (AMIT) were obviously reduced

收稿日期: 2020-09-24

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51906178); 国家重点研发计划重点专项(2018YFD0401304); 天津市自然科学基金项目(2018JCQNJC84600)

**作者简介:** 赵松松(1988-), 男, 山东滨州人, 博士, 讲师, 主要从事制冷系统智能控制策略研究及新型食品保鲜技术。(Tel) 13820590827; (E-mail) songsongzhao@tjcu.edu.cn

compared with the control group. Compared with CK, the advantages of color difference and malonaldehyde (MDA) content of bananas under AMCT treatment were obvious, which showed the best inhibition effect on chilling injury.

**Key words:** alternating magnetic field; simulation; chilling injury; electromagnetic effect; banana

低温贮藏是保持果蔬口感和营养品质、延长采后水果和蔬菜保质期最有效的方法之一<sup>[1-2]</sup>。但一些水果在采摘及采后加工过程中容易受低温影响,造成果蔬冷害效应(Chilling injury, CI),香蕉、芒果、菠萝等冷敏型热带水果受冷害影响更为明显<sup>[3]</sup>。冷害效应会导致果蔬新陈代谢机制失调及细胞膜破损,使果蔬表皮与内部出现凹陷、水渍斑块、果肉干缩、褐变等冷害症状,甚至还会造成果蔬无法正常成熟、局部组织霉变、有异味等严重后果<sup>[4-5]</sup>。随着低温贮藏时间的延长,果蔬冷害效应逐渐出现,且当温度升高时果蔬冷害症状表现得更加明显,在一定程度上限制了低温贮藏技术在果蔬保鲜的应用<sup>[6]</sup>。

香蕉是一种具有丰富营养且对人类健康具有药用价值的水果,可在 13 ℃ 温度下贮藏 21 d 左右,但当温度低于 6 ℃ 时,香蕉就会发生冷害。冷害效应导致香蕉果皮出现延迟发育、褐变或出现黑色斑点,甚至导致果实成熟软化失败的现象,造成香蕉品质下降<sup>[7]</sup>。引发冷害的主要原因是,在冷胁迫下细胞膜脂由流体液晶相过渡到刚性凝胶固相,从而引起果实初级和次级代谢发生重大变化<sup>[8]</sup>。从生理学角度看,不适当的冷却会引起细胞膜代谢紊乱,导致活性氧(ROS)过度积累,最终导致细胞损伤<sup>[9]</sup>。细胞膜不仅具有感知功能和屏障功能,还具有支持体内生理代谢的作用。当遇到寒冷等极端环境时,植物必须调整膜成分以维持细胞器的功能。最近的研究结果表明,当温度降低时,细胞膜的液体变少。为了保持膜的正常流动性,细胞膜脂的不饱和程度增加<sup>[10-11]</sup>。此外,冷却可诱导细胞氧化,导致过量 ROS 产生,引起氧化应激<sup>[12]</sup>。因此,细胞膜的主要成分被破坏,最终导致氧化损伤,造成果蔬冷害<sup>[13]</sup>。由此,研究人员广泛尝试了多种方法以缓解冷害效应,如利用多胺类化合物<sup>[14]</sup>、水杨酸<sup>[15]</sup>与茉莉酸<sup>[16]</sup>等植物生长调节剂、褪黑素<sup>[17]</sup>及外源性孕激素<sup>[18]</sup>等生化方法以及利用热水处理<sup>[19]</sup>、超声波技术<sup>[20]</sup>及磁场加工处理<sup>[21]</sup>等物理方法。其中利用物理方法进行果蔬处理更加安全健康,更有研究表明,磁场处理不仅能维持细胞膜脂稳定,还能利用磁场线圈的微热效应减缓环境冷

胁迫,有效缓解果蔬受冷害的影响。

食品磁场加工技术利用外部磁场环境改变生物体自身电磁性质,进而对整个生命体造成生理特性上的影响。由于其物理特性及对食品品质的保鲜作用,近年来磁场加工技术在食品领域发展迅速,应用广泛。研究结果表明,低强度磁场处理有助于稳定细胞膜结构,降低膜通透性和水分损失,持续处理可以有效保持果蔬硬度,延缓果蔬色泽改变等,对生物体组织电解质、分子组成结构以及细胞膜脂、蛋白质等微观结构电磁性质造成影响,增强抑制氧化酶活性,减少氧化产物积累从而高效维持果蔬新鲜品质<sup>[22-24]</sup>。此外,磁场处理还具有抑制腐败菌繁殖、延缓果蔬后熟的功效,进一步提高果蔬的保鲜品质,同时兼具运行能耗小、实验装置易于实现等优点,应用前景广泛<sup>[25]</sup>。但以往磁场处理研究多集中在果蔬品质保鲜方向,探究磁场抑制贮藏期间果蔬冷害机理的报道较少。为此利用磁场作用抑制果蔬冷害以提高果蔬保鲜品质,并对抑制作用机理进行研究分析具有重要意义。本研究依据电磁生物学效应,选用具有明显电磁生物效应、杀菌抑菌作用显著且具有微弱电磁热效应的低频交变磁场开展试验,利用不同的处理方式,对比磁场连续处理与间歇处理对贮藏期间香蕉保鲜效果的差异性,并对磁场抑制冷害作用机理进行探究分析。

## 1 低温电磁保鲜系统

低温电磁保鲜系统由制冷系统、冷藏库、电磁处理系统及控制系统等组成(图 1)。其中电磁处理系统由赫姆霍兹线圈、稳压交流电源以及特斯拉计等设备构成。依据 Biot-Savart 定律,赫姆霍兹线圈电磁场沿  $y$  轴方向的磁性参数计算如公式 1 所示:

$$\begin{cases} B = \frac{I\varphi_0 nr^2}{2\left[r^2 + \left(y + \frac{r}{2}\right)^2\right]^{3/2}} + \frac{I\varphi_0 nr^2}{2\left[r^2 + \left(\frac{r}{2} - y\right)^2\right]^{3/2}} \\ \omega = \frac{B^2}{2\varphi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varphi_0$  是真空磁导率( $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ); $n$  是线圈匝数(600); $I$  是导线电流(A); $r$  是线圈有效半

径(m); $\omega$  是磁能密度( $\text{J/m}^3$ ); $B$  是磁感应强度(T); $\varphi$  是生物组织磁导率( $\text{H/m}$ )。

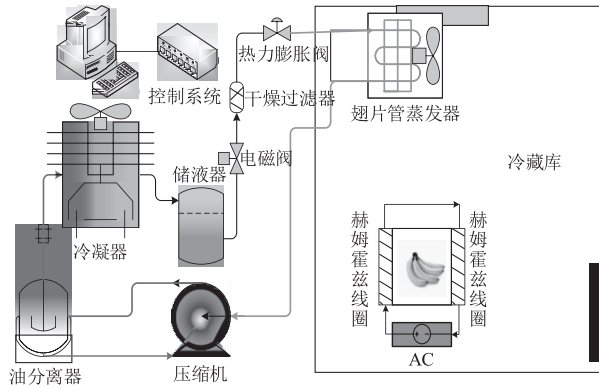


图1 低温电磁保鲜系统原理

Fig.1 Schematic diagram of low-temperature electromagnetic preservation system

为构建适宜强度的磁场设计参数,使用 COM-SOL 5.0 软件绘制三维赫姆霍兹线圈磁场发生器的物理模型(线圈内径:300 mm;线圈外径:420 mm;线圈间距:130 mm;线圈厚度:50 mm),建立网格划分后,添加磁场,计算稳态状态,模拟结果显示:当磁场发生器输入电流为 3 A 时,仿真中心区域(0,0,0)磁感应强度达 $1.035 \times 10^{-2}$  T,磁能密度为 $41.2 \text{ J/m}^3$ ,线圈磁场发生器中心位置能够产生均匀磁场,能够保证电磁生物学效应与磁感应强度参数之间量化研究结果精确。试验测试数据显示:通入 3 A 电流时,磁场中心(0,0,0)位置的磁感应强度为 $9.24 \times 10^{-3}$  T,相比模拟数据( $1.035 \times 10^{-2}$  T)吻合度较高,其误差为 10.7%。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

新鲜青蕉(品种:齐尾)在南方某果园人工采摘,香蕉成熟度为 80%,未用乙烯或乙烯利处理,冷藏运送至实验室。选择尺寸大小一致(果指长约 150 mm,直径约 40 mm)、形状均匀、无外部破损、无虫害的香蕉,随机分为 3 组,每组 6 根。3 组香蕉分别设置无处理(对照组 CK),交变磁场强度 $2.0 \times 10^{-3}$  T+频率 60 Hz 处理(交变磁场连续处理组 AMCT)和上述相同强度及频率下作用 12 h+无磁场作用 12 h 的间歇处理(交变磁场间歇处理组 AMIT)。然后将处理后的香蕉放置在冷藏温度为 $(6.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 、相

对湿度为 $85.0\% \pm 3.0\%$ 的环境下贮藏,每间隔 3 d 取样进行理化指标测量。试验数据利用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行分析。

### 2.2 测试指标

2.2.1 失质量率 用质量变化表征失质量率,使用上海精科 JA500N 电子天平(最大承质量 0.5 kg,精度值 0.001 g)称质量,每组选取 6 根香蕉称质量,并根据公式(2)计算失质量率,每组质量测量 3 次取平均值。

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta m$  是失质量率; $m_0$  是香蕉初始质量; $m_n$  是香蕉第  $n$  d 的质量。

2.2.2 呼吸强度 利用红外二氧化碳气体分析仪(型号:JFQ-3150L)根据循环气流法测量呼吸速率,每次选取 2 根香蕉放置在试验测量容器中,测试 30 min,记录测试前后密闭容器中的二氧化碳浓度,试验数据选取 3 次试验的平均值。其计算方法见公式(3):

$$U = \frac{\left( \frac{C - C_0}{1\,000\,000} \right) \times \left( \frac{V \times 1\,000}{22.4} \right) \times 44}{m \times T} \quad (3)$$

式中: $U$  是呼吸速率, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ;  $C$ 、 $C_0$  是样品和容器的气体质量分数, $\text{mg}/\text{kg}$ ;  $V$  是封闭容器体积, $\text{m}^3$ ; 22.4 是气体摩尔体积, $\text{L}/\text{mol}$ ; 44.0 是  $\text{CO}_2$  摩尔质量, $\text{g}/\text{mol}$ ;  $m$  是样本质量, $\text{kg}$ ;  $T$  是反应进行时间, $\text{h}$ 。

2.2.3 色差 选取外皮颜色相似的 6 根香蕉,每间隔 2 d 测量 1 次色差变化,利用色差计 WSC-S(稳定性:  $\Delta Y \leq 0.6$ ) 亨特( $L, a, b$ ) 表色系统根据公式(4)计算色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_{\text{int}})^2 + (a - a_{\text{int}})^2 + (b - b_{\text{int}})^2} \quad (4)$$

式中: $\Delta E$  是亮度差值; $L$  是亮度值; $a$  是红绿度值; $b$  是黄蓝度值;角标 int 表示标准色差参照值。

2.2.4 多酚氧化酶(PPO)活性测定 称取 340 mg 聚乙二醇 6000、4 g 聚乙烯吡咯烷酮,取 1 ml TritonX-100,用 0.1 mol/L pH 值为 5.5 的乙酸-乙酸钠缓冲液溶解稀释到 100 ml,获得提取缓冲液。将 5.0 ml 提取缓冲液和 1.0 g 香蕉果肉样品混合后离心处理 10 min,将 4.0 ml 乙酸-乙酸钠缓冲液和 1.0 ml 邻苯二酚溶液在试管中混合后加入 100  $\mu\text{l}$  酶提取液。测量紫外分光光度计在 420 nm 波长下溶液吸光度。测量 6 次取平均值,根据公式(5)计算 PPO 活性。



$$\begin{cases} \Delta OD_{420} = \frac{OD_{420}'' - OD_{420}'}{T'' - T'} \\ U = \frac{\Delta OD_{420} \times V}{V_x \times m} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta OD_{420}$  是吸光度变化值;  $OD_{420}''$  是反应混合溶液吸光度终止值;  $OD_{420}'$  是混合溶液吸光度初始值;  $T''$  和  $T'$  分别是反应终止时间和初始时间;  $U$  是酶活性单位;  $V$  和  $V_x$  分别是制备及参与反应的样本提取溶液体积;  $m$  是样本质量。

**2.2.5 丙二醛(MDA)含量测定** 量取 1 g 香蕉果肉与 5 ml 三氯乙酸混合,离心处理后取 2 ml 上清液加入硫代巴比妥酸溶液,混合煮沸后,利用紫外分光光度计(UV759)分别在 450 nm、532 nm 和 600 nm 波长处测定溶液吸光度。取 6 个样本的平均值作为试验数据进行分析。MDA 含量的计算见公式(6):

$$C = \frac{[6.45(OD_{532} - OD_{600}) - 0.56 \times OD_{450}] \times V_b \times V_c}{V_a \times m \times 1000} \quad (6)$$

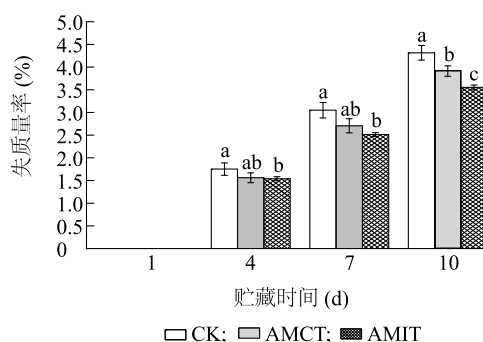
式中:  $C$  是反应测试物丙二醛浓度;  $OD_{450}$ 、 $OD_{532}$ 、 $OD_{600}$  分别是 450 nm、532 nm 和 600 nm 波长处的吸光度;  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  分别是测定时所取的提取液体积、样品提取液总体积、反应液总体积;  $m$  是样品质量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同电磁处理方式对香蕉失质量率的影响

由图 2 可知,未加磁场处理(CK)、磁场持续处理(AMCT)和磁场间歇处理(AMIT)的香蕉失质量率均随贮藏时间延长升高。与对照组相比,经磁场处理过的香蕉果实失质量率均有所降低。并且随着贮藏时间的延长,磁场处理对降低果实失质量率的影响更加明显。贮藏 7 d 时处理组间的失质量率无明显差异( $P > 0.05$ )。贮藏第 10 d 时,AMIT 组香蕉失质量率显著低于 CK 组、AMCT 组( $P < 0.05$ )。试验结果表明,香蕉在低温贮藏期间交变磁场处理能够有效维持果实含水率,抑制失质量率升高。且不同磁场处理方式效果差异明显,交变磁场间歇处理组效果优于连续处理组,原因可能是在磁场作用下组织细胞内的极性水分子发生持续细小振动,阻碍果蔬细胞水分迁移,对失质量率产生抑制作用,与此同时水分子的持续振动也会造成能量变化发生微热效应,缓解香蕉低温冷害,但长时间的热效应会促进水分迁移。在热效应方面,不同电磁处理工艺导致香蕉水分子振动时间存在

差异,其中间歇处理组振动时间减少 50%,导致热效应也降低约 50%,因此热效应导致的水分散失作用也相应降低。此外,失质量率变化也可能与细胞膜酯排列有关。细胞膜在磁场环境中,膜中的双层极性脂质有序紧密分布,这减少了细胞内水分扩散到细胞外,细胞内自由水比例降低导致细胞间隙与环境之间的扩散力降低,从而减少自由水向环境中扩散,抑制失质量率的升高<sup>[26]</sup>。



CK: 对照组, 不作磁场处理; AMCT: 交变磁场连续处理组, 交变磁场强度  $2.0 \times 10^{-3}$  T, 频率 60 Hz; AMIT: 交变磁场间歇处理组, 交变磁场强度  $2.0 \times 10^{-3}$  T, 频率 60 Hz 作用 12 h, 无磁场作用 12 h 的间歇处理。不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平 ( $P < 0.05$ )。

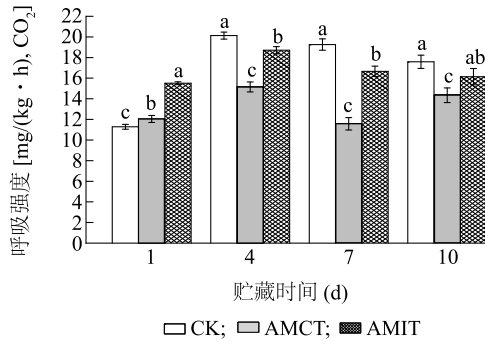
图 2 不同电磁处理方式对香蕉失质量率的影响

Fig.2 Effects of different electromagnetic treatments on weight loss of bananas

#### 3.2 不同电磁处理方式对香蕉呼吸强度的影响

呼吸强度是表征采后果蔬营养消耗速率的重要指标。未加磁场处理、交变磁场连续与交变磁场间歇处理果蔬呼吸强度的变化情况如图 3 所示。对照组与处理组呼吸强度大致呈现先升高后降低的趋势,第 4 d 时呼吸强度达到峰值。除贮藏第 10 d 外,处理组与对照组呼吸强度均表现出明显差异( $P < 0.05$ ),其中除贮藏第 1 d 外,AMCT 组呼吸强度最低,保鲜效果最好。贮藏第 7 d AMCT 组呼吸强度显著低于 CK 组和 AMIT 组( $P < 0.05$ ),说明磁场连续处理相对更能减缓呼吸作用,减少果实营养损耗,原因可能是细胞膜在磁场环境下膜中的极性磷脂双分子层排列更加整齐紧凑,且细胞膜表面水分子结构也发生了变化,形成一个稳定的水化层,降低了静电吸引力,从而降低细胞膜通透性,直接导致氧气扩散至细胞的速率降低,影响呼吸作用效率<sup>[27]</sup>。由于交变磁场的间歇处理导致交变磁场间歇处理组无法持续保持细胞膜磁化状态,随着时间延长,细胞膜的

磁化效果逐渐削弱, 导致呼吸作用增强。



CK, AMCT, AMIT 处理见图 2 注。不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平 ( $P < 0.05$ )。

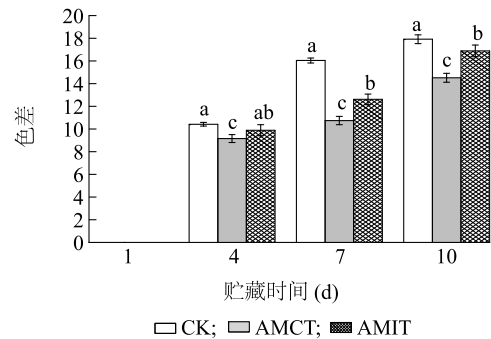
图 3 不同电磁处理方式对香蕉呼吸强度的影响

Fig.3 Effect of different electromagnetic treatments on respiration rate of bananas

### 3.3 不同电磁处理方式对香蕉色差的影响

果蔬的外观颜色是消费者是否选择购买的重要参数。由图 4 可知, 随贮藏时间延长, 各组色差逐渐增大, 其中 AMCT 组色差变化最小, CK 组色差升高速率最快, 处理组色差变化明显小于对照组。贮藏第 7 d 开始, AMIT 组和 AMCT 组色差值显著低于 CK 组 ( $P < 0.05$ )。在整个贮藏期间, AMCT 组始终保持最小的色差值, 而 CK 组色差值最高。AMCT 组维持香蕉果皮颜色效果最佳, 原因可能是果蔬颜色与内部营养物质的氧化程度密切相关, 磁场处理对生物体抗氧化系统具有积极影响。电磁作用能够促进细胞中叶绿素的合成或降低叶绿素酶活性, 抑制香蕉颜色变化<sup>[28]</sup>。在色泽保持方面, 电磁连续处理组优于间歇处理组, 原因可能在于, 间歇处理组试验过程中人工介入操作次数较多, 由此导致的温度波动及多次触碰样品更容易造成样品表皮色泽变化; 间歇处理组只有一半的时间进行磁场作用, 而贮藏期间未处于磁场环境时, 低温可能会导致部分细胞叶绿素分解, 不利于色泽维持, 所以色差变化明显。

冷害是一种影响果实外观形态和果实采后冷藏品质的生理紊乱现象。CK 组在贮藏第 4 d 开始出现冷害症状, 部分香蕉表面发生褐变, 而 AMCT 组与 AMIT 组在贮藏第 7 d 部分样本开始略微出现冷害症状, 直至第 10 d 处理组冷害症状才表现明显。结果表明, 电磁处理能不同程度抑制香蕉冷害, 其原因一方面可能是由于低频交变磁场具有微弱热效应, 从而降低环境冷胁迫, 减缓冷害效应; 另一方面,



CK, AMCT, AMIT 处理见图 2 注。不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平 ( $P < 0.05$ )。

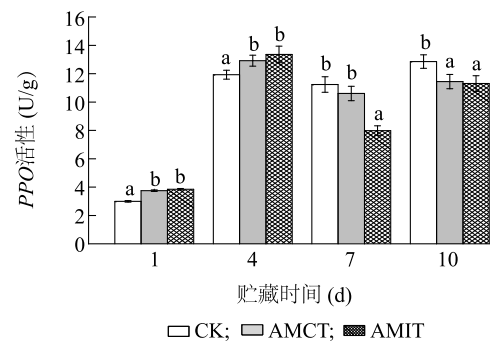
图 4 不同电磁处理方式对香蕉色差的影响

Fig.4 Effect of different electromagnetic treatments on color difference of bananas

交变磁场处理能够增强细胞中抗氧化酶活性, 提高分解有害产物的能力, 减少有害代谢产物积累, 有利于维持香蕉品质<sup>[23]</sup>。

### 3.4 不同电磁处理方式对香蕉 PPO 活性的影响

PPO 是一种氧化还原酶, 主要用于催化形成色素物质, 外观表现为淡黄至暗褐色, 由此推测果蔬发生褐变可能多与 PPO 活性有关。如图 5 所示, 各组 PPO 活性在第 4 d 时均有大幅度增强, 可能会导致色差明显变化。随后各处理的数据小幅下降, 第 10 d 时再次升高。贮藏第 7 d 时, AMIT 组 PPO 活性显著低于 CK 组和 AMCT 组 ( $P < 0.05$ ), CK 组和 AMCT 组间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。研究结果表明, 一定强度的交变磁场对 PPO 具有显著的灭活作用<sup>[29-30]</sup>, 这可能是由于含铜离子的辅基在交变磁场作用下产生构象改变, 导致 PPO 活性有所下降。



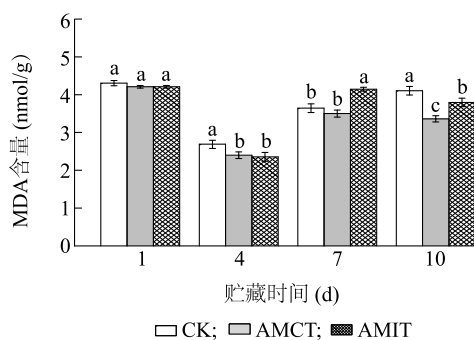
CK, AMCT, AMIT 处理见图 2 注。不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平 ( $P < 0.05$ )。

图 5 不同电磁处理方式对香蕉 PPO 活性的影响

Fig.5 Effect of different electromagnetic treatments on PPO activity of bananas

### 3.5 不同电磁处理方式对香蕉 MDA 含量的影响

MDA 含量作为表征脂质过氧化性的指标之一,可以用来反映病虫害、冷害等病害的恶化程度<sup>[31-34]</sup>。由图 6 可知,随着贮藏时间增加,各组的 MDA 含量没有出现持续增长趋势。这可能是磁场作用增强抗氧化酶活性,导致 MDA 被酶类物质分解,此外酸性环境也会导致 MDA 分解,减缓生物体内有害产物的积累。贮藏第 10 d 时,CK 组 MDA 含量最高,AMCT 组 MDA 含量最低,且各组间差异显著( $P < 0.05$ )。由此可见,2 种磁场处理方式均能有效降低 MDA 含量,减缓有害产物积累,降低香蕉氧化程度。MDA 含量还能间接表征磁场对细胞膜通透性及生物体抗氧化酶系统的影响。磁场作用对极性带电离子( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ )产生影响从而影响膜电压,当离子进行跨膜运输进入细胞时,磁场作用导致细胞液电阻变大,电导率降低<sup>[35]</sup>;也有学者指出,电磁作用重新有序排列了细胞膜极性脂质双分子层,使其结构更加密实,从而抑制电解质的外渗<sup>[36]</sup>。综上,磁场作用对于降低果蔬 MDA 含量及电导率效果明显,能够减轻果蔬细胞结构损伤,利于果蔬保鲜<sup>[37]</sup>。



CK, AMCT, AMIT 处理见图 2 注。不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平( $P < 0.05$ )。

图 6 不同电磁处理方式对香蕉 MDA 含量的影响

Fig.6 Effect of different electromagnetic treatments on MDA content of bananas

## 4 结论

本研究基于冷藏技术和电磁生物学效应构建低温电磁保鲜系统,进而开展低温电磁作用影响香蕉保鲜效果的试验研究,联合交变磁场对果蔬电磁特性的影响,探索了交变电磁连续与间歇处理对抑制低温贮藏下香蕉冷害的作用机理。

1) 基于 COMSOL 建立电磁场发生器仿真模型,

构建了果蔬电磁处理装置,试验测试结果显示,当赫姆霍兹线圈电流为 3 A 时,磁场中心处磁感应强度为  $9.24 \times 10^{-3}$  T,与仿真结果 ( $1.035 \times 10^{-2}$  T) 的吻合度较高,其误差仅为 10.7%。

2) 采用交变磁场连续处理 (AMCT) 与交变磁场间歇处理 (AMIT) 于 6 °C (冷害温度) 冷藏的香蕉,试验结果显示,AMCT 与 AMIT 均能不同程度地降低 PPO 的活性,降低呼吸强度,抑制 MDA 的积累,从而达到降低冷害的效果。其中,AMCT 的呼吸强度、色差及 MDA 含量最低,可能与其连续的微弱电磁热效应及磁场强化抗氧化系统有关;相比 AMCT, AMIT 相对较小的热效应,使其具有更低的失质量率与 PPO 活性,然而其多变的处理环境并不利于保鲜品质的提高。

### 参考文献:

- [1] PHORNVILLAY S, NUTTHACHAI P, CHALERMCHAI W, et al. Physio-biochemical responses of okra (*Abelmoschus esculentus*) to oxidative stress under low temperature storage [J]. The Horticulture Journal, 2020, 89(1): 69-77.
- [2] BLANKA T, MARTIN P, LUBOMÍR D, et al. Evaluation of qualitative changes of apple-beetroot juice during long-term storage at different temperatures [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(5): 1-8.
- [3] JHON L M, THIERRY T, BORJA C T, et al. Physicochemical and physiological changes during the ripening of banana (*Musaceae*) fruit grown in Colombia [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 56(3): 1171-1183.
- [4] DARRAS A I. The chilling injury effect in cut flowers: a brief review [J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2020, 95(1): 1-7.
- [5] 王 懿, 侯媛媛, 马钰晴, 等. 甘氨酸甜菜碱处理对桃果实冷害及 AsA-GSH 循环代谢的影响 [J]. 食品科学, 2020, 12(3): 1-11.
- [6] ZHANG J, WU Z, BAN Z, et al. Exogenous polyamines alleviate chilling injury of jujube fruit (*Zizyphus jujuba* Mill.) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): 1-10.
- [7] HUANG H, JING G, GUO L, et al. Effect of oxalic acid on ripening attributes of banana fruit during storage [J]. Postharvest Biology & Technology, 2013, 84(5): 22-27.
- [8] ZHANG M, LIU W, LI C H, et al. Postharvest hot water dipping and hot water forced convection treatments alleviate chilling injury for zucchini fruit during cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 219-227.
- [9] ZENG F, JIANG T, WANG Y, et al. Effect of UV-C treatment on modulating antioxidative system and proline metabolism of bamboo shoots subjected to chilling stress [J]. Acta Physiol Plant, 2015, 37: 1-10.

- [10] DE M D. Temperature sensing by membranes[J]. *Annu Rev Microbiol*, 2014, 68:101-116.
- [11] HOLTHUIS J, MENON A K. Lipid landscapes and pipelines in membrane homeostasis[J]. *Nature*, 2014, 510:48-57.
- [12] OLIVEIRA A N, SANTOS M N, FERREIRA A F, et al. Balance between oxidative stress and the antioxidant system is associated with the level of cold tolerance in sweet potato roots[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 172: DOI: 10.1016/j.postharvbio.2020.111359.
- [13] NEJADSADEGHI L, MAALIAMIRI R, ZEINALI H, et al. Membrane fatty acid compositions and cold-induced responses in tetraploid and hexaploid wheats[J]. *Mol Biol Rep*, 2015, 42:363-372.
- [14] SINGH V, JAWANDHA S K, GILL P P S. Effect of exogenous putrescine treatment on internal browning and colour retention of pear fruit[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 15(1):905-913.
- [15] GE W Y, ZHAO Y B, KONG X M, et al. Combining salicylic acid and trisodium phosphate alleviates chilling injury in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) through enhancing fatty-acid desaturation efficiency and water retention[J]. *Food Chemistry*, 2020, 327: DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127057.
- [16] ZHAO Y Y, SONG C C, BRUMMELL D A, et al. Jasmonic acid treatment alleviates chilling injury in peach fruit by promoting sugar and ethylene metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2020, 338: DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128005.
- [17] KONG X M, GE W Y, WEI B D, et al. Melatonin ameliorates chilling injury in green bell peppers during storage by regulating membrane lipid metabolism and antioxidant capacity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 170: DOI: 10.1016/j.postharvbio.2020.111315.
- [18] HAO J, LI X, XU G, et al. Exogenous progesterone treatment alleviates chilling injury in postharvest banana fruit associated with induction of alternative oxidase and antioxidant defense[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286:329-337.
- [19] LOAYZA F E, BRECHT J K, SIMONNE A H, et al. A brief hot-water treatment alleviates chilling injury symptoms in fresh tomatoes[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 101(1):1-11.
- [20] KHADEMI O, ASHTARI M, RAZAVI F. Effects of salicylic acid and ultrasound treatments on chilling injury control and quality preservation in banana fruit during cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249:334-339.
- [21] ZHAO S, YANG Z, ZHANG L. The effect of treatment with the combined static magnetic field and cold water shock on the physicochemical properties of cucumbers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 8(11):362-373.
- [22] BELYAVSKAYA N A. Biological effects due to weak magnetic field on plants [J]. *Advances in Space Research the Official Journal of the Committee on Space Research*, 2004, 34 (7):1566-1574.
- [23] CAKMAK T, CAKMAK Z E, DURLUPINAR R, et al. Analysis of apoplastic and symplastic antioxidant system in shallot leaves: Impacts of weak static electric and magnetic field [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(11):1066-1073.
- [24] NIU C, WU J F, LING H, WANG L J. Cold-shock resistance of activated sludge microorganisms strengthened by a static magnetic field[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, 28(3):1847-1855.
- [25] LIN L, WANG X L, HE R H, et al. Action mechanism of pulsed magnetic field against *E.coli* O157:H7 and its application in vegetable juice[J]. *Food Control*, 2019, 95:150-156.
- [26] YANG Z, 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):144-156.
- [27] ASGHAR T, JAMIL Y, IQBAL M. Laser light and magnetic field stimulation effect on biochemical, enzymes activities and chlorophyll contents in soybean seeds and seedlings during early growth stages [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B Biology*, 2016, 165: 283-290.
- [28] KRIKLAVOVÁ, TRUHLÁR M, ŠKODOVÁ P, et al. Effects of a static magnetic field on phenol degradation effectiveness and *Rhodococcus erythropolis* growth and respiration in a fed-batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 167(3): 510-513.
- [29] 马海乐,黄六容,朱春梅. 多酚氧化酶高强度脉冲磁场灭活及动力学模型 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (增刊1): 325-328.
- [30] 赵松松. 果蔬低温电磁处理的保鲜机理与试验研究 [D]. 天津:天津大学, 2017.
- [31] 姜琳琳,王 静,段晓风,等.低温对富士苹果花抗性生理指标的影响[J].*江苏农业科学*,2020,48(11):111-114.
- [32] 杨 森,肖关丽,郑亚强,等.马铃薯对马铃薯块茎蛾取食危害的生理响应[J].*南方农业学报*,2020,51(4):844-852.
- [33] 李 畅,苏家乐,刘晓青,等.旱涝交替胁迫对杜鹃花生理特性的影响[J].*江苏农业学报*,2019,35(2):412-419.
- [34] 王利芬,孔丛玉,吴思琳,等.2种菊科植物对镉胁迫的生长和生理响应[J].*江苏农业科学*,2019,47(22):164-166.
- [35] WOJCIK P K, KASZUBA Z J, ROKITA E, et al. Cell viability modulation through changes of  $Ca^{2+}$ -dependent signalling pathways [J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2016, 121 (1):45-53.
- [36] NOVITSKII Y I, NOVITSKAYA G V, SERDYUKOV Y A, et al. Influence of weak permanent magnetic field on lipid peroxidation in radish seedlings[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2015, 62(3):375-380.
- [37] ALBUQUERQUE W W C, COSTA R B, FERNANDES T E, et al. Evidences of the static magnetic field influence on cellular systems [J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2016, 121(1):16-28.

(责任编辑:陈海霞)