

## 不同气调包装对薄荷贮藏品质的影响及薄荷保鲜呼吸速率模型的建立

陆一菲, 张慧娟, 王思文, 王国强, 李涵睿, 陈湘宁

### Effects of Different Modified Atmosphere Packages on Storage Quality of Peppermint and Establishment of Respiration Rate Model of Peppermint Preservation

LU Yifei, ZHANG Huijuan, WANG Siwen, WANG Guoqiang, LI Hanrui, and CHEN Xiangning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090057>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

香槟薄荷和日本薄荷茎叶组织中挥发性组分的分析

Analysis of Volatile Components on Champagne Peppermint and Japanese Peppermint Stem and Leaf Tissues

食品工业科技. 2021, 42(17): 270-277 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100234>

不同气调包装对熟制蟹肉蟹黄贮藏品质的影响

Effect of Different Modified Atmosphere Packaging on Storage Quality of Cooked Crab Meat with Crab Roe

食品工业科技. 2021, 42(2): 264-269,278 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040034>

基于温湿度影响的香菇呼吸速率测定与模型表征

Respiration Rate Measurement and Mathematical Modelling of Shiitake on Different Storage Temperature and Relative Humidity

食品工业科技. 2019, 40(16): 223-228 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.038>

不同气调包装对菠菜冷藏保鲜效果的影响

The impact of different modified atmosphere packaging used in spinach on preservation effect in refrigerated condition

食品工业科技. 2018, 39(7): 276-279,285 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.050>

自发气调包装对辣椒贮藏品质的影响

Effect of modified atmosphere packaging on the storage quality of Capsicum annuum L.

食品工业科技. 2017(13): 271-276 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.13.050>

气调包装材料对厚皮甜瓜采后呼吸途径的影响

Effects of modified atmosphere package materials on respiratory pathway of Cucumins melo L.

食品工业科技. 2017(14): 248-253 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.048>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆一菲, 张慧娟, 王思文, 等. 不同气调包装对薄荷贮藏品质的影响及薄荷保鲜呼吸速率模型的建立 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 11-25. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090057

LU Yifei, ZHANG Huijuan, WANG Siwen, et al. Effects of Different Modified Atmosphere Packages on Storage Quality of Peppermint and Establishment of Respiration Rate Model of Peppermint Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 11-25. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090057

· 特邀主编专栏—组学分析技术在食品品质研究中的应用 (特邀主编: 徐贞贞、张良晓、洪惠) ·

# 不同气调包装对薄荷贮藏品质的影响及薄荷保鲜呼吸速率模型的建立

陆一菲<sup>1</sup>, 张慧娟<sup>1</sup>, 王思文<sup>1</sup>, 王国强<sup>2</sup>, 李涵睿<sup>3</sup>, 陈湘宁<sup>1,\*</sup>

(1.北京农学院 农业农村部农产品加工与品质控制重点实验室(部省共建), 北京 102206;

2.北京市裕农优质农产品种植公司, 北京 102206;

3.上海星河湾双语学校, 上海 201108)

**摘要:** 为了提高薄荷采后贮藏时间和预测薄荷采后的呼吸速率, 通过失重率、相对电导率、色差、感官评分、维生素 C 含量、总叶绿素含量和菌落总数指标的测定, 从包装材料为聚乙烯包装 (PE)、邻苯基苯酚复合聚乙烯包装 (OPP1.8/PE3.5、OPP1.8/PE4.5、OPP2.3/PE4.5)、高密度聚乙烯包装 (HDPE), O<sub>2</sub> 浓度为 3%~7%, CO<sub>2</sub> 浓度为 5%~15% 中筛选薄荷的气调包装条件, 并以 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和包装材料为因素开展响应面优化试验, 优化薄荷采后保鲜的最优气体比例及包装材料, 在此基础上研究薄荷挥发性化合物和表面真菌多样性。使用密闭空间系统法测量薄荷在最优包装材料内 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的比例。在此基础上, 再采用渗透系统法得到模型方程, 并对其数值模拟。运用 Matlab 软件对处于平衡点时的呼吸速率进行计算, 利用二次多项式模型对结果进行回归分析。利用高通量测序对最优、最差和对照处理组的薄荷进行测序和分析, 比较其优势菌群的占比变化。结果表明: 最优气调比例及包装材料为 3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub> 和 HDPE, 该包装方式可将薄荷的保鲜期由 7~9 d 延长至 10~12 d, 可抑制薄荷贮藏期间芳樟醇等醇类物质的增加, 减少 D-香芹酮等酮类物质的挥发, 延缓薄荷衰老, 基于以上实验结果建立薄荷二次多项式呼吸速率模型, 并能够更准确设计薄荷的气调包装条件, 较好地抑制薄荷贮藏期间子囊菌门和霉菌门等腐败菌的生长。

**关键词:** 薄荷, 气调包装, 挥发性成分, 呼吸速率模型, 贮藏保鲜

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)09-0011-15

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090057



本文网刊:

## Effects of Different Modified Atmosphere Packages on Storage Quality of Peppermint and Establishment of Respiration Rate Model of Peppermint Preservation

LU Yifei<sup>1</sup>, ZHANG Huijuan<sup>1</sup>, WANG Siwen<sup>1</sup>, WANG Guoqiang<sup>2</sup>, LI Hanrui<sup>3</sup>, CHEN Xiangning<sup>1,\*</sup>

(1.Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Quality Control (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China;

2.Beijing Yunong High-Quality Farm Products Planning Limited Company, Beijing 102206, China;

3.Shanghai Starriver Bilingual School, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** To extend the post-harvest storage duration of peppermint and predict the post-harvest respiration rate of peppermint, peppermint was subjected to modified atmosphere packaging conditions with different packaging materials (PE, OPP1.8/PE3.5, OPP1.8/4.5, OPP2.3/PE4.5, HDPE), various O<sub>2</sub> concentrations (3%~7%), and different CO<sub>2</sub> concentra-

收稿日期: 2023-09-08

基金项目: 设施蔬菜产业技术体系北京市创新团队 (BAIC01-2023)。

作者简介: 陆一菲 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: luyifei0723@163.com。

\* 通信作者: 陈湘宁 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 1509659476@qq.com。

tions (5%~15%). Parameters including weight loss rate, relative electrical conductivity, color difference, sensory evaluation, vitamin C content, total chlorophyll content, and total colony count were measured. Response surface optimization experiments were conducted with O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and packaging materials as factors to determine the optimal gas ratios and packaging materials for post-harvest preservation of peppermint. On this basis, the volatile compounds and surface fungal diversity of peppermint were studied. The proportions of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> inside the optimal packaging materials for peppermint were measured by using the closed space system. Based on this, a model equation was obtained using the permeation system method and numerically simulated. Matlab software was used to calculate the respiration rate at equilibrium, and a regression analysis was performed using a quadratic polynomial model. High-throughput sequencing was used to sequence and analyze peppermint samples from the optimal, worst, and control treatment groups, comparing changes in the proportion of dominant microbial communities. The results showed that the optimal gas composition and packaging material were 3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub> and HDPE, which extended the freshness period of peppermint from 7~9 days to 10~12 days. It could inhibit the increase of linalool and other alcohols during peppermint storage, reduce the volatilization of D-carvone and other ketones, and delay the senescence of peppermint. Based on these experiments, a more accurate quadratic respiration rate model for peppermint under controlled atmosphere packaging was established, which effectively inhibited the growth of decay-causing microorganisms such as Ascomycota and Mycetes in peppermint.

**Key words:** peppermint; modified atmosphere packaging; volatile components; respiration rate model; storage and preservation

薄荷(*Mentha haplocalyx* Briq.), 又称留兰香、银丹草, 属于唇形科薄荷属植物<sup>[1]</sup>, 是一味重要的药食同源的本草药材, 其也可用作调味剂和功能茶, 是世界三大香料之一, 广泛在印度、中国等国种植, 有“亚洲之香”的美誉<sup>[2]</sup>。但是目前对于薄荷的研究主要集中于其挥发油及化学成分上<sup>[3-6]</sup>, 薄荷的采后保鲜技术研究相对较少, 而外界温度、水蒸气、氧气、二氧化碳以及微生物的变化都会造成薄荷严重的变质和损耗, 影响其货架期。因此, 亟需对薄荷采后保鲜开展研究提升薄荷品质。

改善气调包装(Modified Atmosphere Packaging, MAP)通过在包装内保持高二氧化碳和低氧浓度的气体环境, 从而降低果蔬的呼吸速率<sup>[7]</sup>, 减少微生物腐败和水分流失, 延缓果蔬成熟, 保持果蔬品质, 延长果蔬作物的贮藏和货架期<sup>[8]</sup>。例如, 84% N<sub>2</sub>+6% O<sub>2</sub>+10% CO<sub>2</sub>的气调处理可将紫苏叶贮藏期延长到20 d左右<sup>[9]</sup>。与此同时, 气调处理对莴苣叶片的张力、破裂力和破裂能没有显著影响, 保持了莴苣叶片的新鲜度<sup>[10]</sup>。由于MAP对蔬菜的保鲜处理操作简单, 性价比高, 具有较高的应用价值<sup>[11]</sup>。但当前对于果蔬气调保鲜方面还缺少与包装材料相结合的研究, 且用于薄荷采后保鲜的包装材料较为单一, 而包装材料的性质对食品也起到关键的保护作用。比如, 透气性良好是包装材料需要具备的条件, 可在贮藏期内维持薄荷的正常呼吸, 同时包装材料的透湿性也十分重要, 还需要具有一定的拉伸强度、抗冲击强度、断裂伸长率, 从而使薄荷采后运输过程中减少营养物质的流失<sup>[12]</sup>。

利用呼吸速率模型预测果蔬采后贮藏期间的呼吸速率, 使果蔬的呼吸速率保持在较低水平同时不会发生厌氧呼吸是当下果蔬采后保鲜的研究热点<sup>[13]</sup>。气调包装呼吸速率模型在很多果蔬的保鲜中被应用, 但是由于不同的果蔬之间呼吸速率差异较大<sup>[14-15]</sup>, 在

实际应用中需要将经验模型和理论模型结合, 共同评价气调包装中果蔬呼吸速率, 利用多变量或指数函数来刻画不同气体比例对呼吸强度的影响, 在储藏过程中, 以顶空气体分析仪测量的CO<sub>2</sub>含量和O<sub>2</sub>的含量变化为基础, 通过Matlab进行拟合, 得到相应的公式参数<sup>[16]</sup>。当前关于薄荷采后MAP结合呼吸速率模型的研究较少, 而基于呼吸速率模型的MAP贮藏方式对于薄荷采后保鲜具有十分重要的意义。

本文以薄荷为研究对象, 通过测定贮藏期间薄荷失重率、叶绿素含量等指标变化, 筛选出能保持贮藏期内薄荷综合感官品质较好的包装材料, 在此基础上, 基于二次多项式模型对薄荷呼吸速率进行线性回归分析, 建立薄荷呼吸速率模型, 并对贮藏期间薄荷表面微生物菌群结构进行分析, 通过对包装袋内薄荷气体成分变化、薄膜透气性和呼吸速率模型相关数据计算及预测薄荷初始的O<sub>2</sub>吸收速率和CO<sub>2</sub>的释放速率, 为薄荷气调包装保鲜中使用的包装材料的研发提供理论依据, 提高了薄荷采后贮藏技术, 延长薄荷货架期, 同时为其他小品种蔬菜采后保鲜技术的开发提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜薄荷叶片 4 cm×2 cm, 淡绿色, 新鲜无损伤, 实验当天采自北京市大兴裕农优质农产品有限公司基地。首先对薄荷叶片进行清洗以及两次消毒, 并进行脱水处理, 甩干清洗时多余的水分。挑选叶片挺立饱满、大小均匀、感官优良的薄荷进行实验; 聚乙烯包装(PE)、邻苯基苯酚复合聚乙烯包装(OPP1.8/PE3.5、OPP1.8/PE4.5、OPP2.3/PE4.5)、高密度聚乙烯包装(HDPE) 北京华正龙泰科技有限公司; 无水乙醇、丙酮、氯化钠、2,6-二氯酚、抗坏血酸、草酸分析纯(AR), 国药集团化学试剂有限公司; DNA提取试剂盒 Mo Bio/QIAGEN; Pyrobest DNA Poly-

merase TaKaRa; Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit Invitrogen; AxyPrep DNA Gel Extraction Kit Axygen; BlasTaq™ 2×qPCR Mix 试剂盒 爱必信 上海生物科技有限公司。

AL204 电子天平 梅特勒-托利多仪器有限公司; DDS-307A 电导率测定仪 雷磁仪器有限公司; HHSY21-NI4 恒温水浴锅 北京精科华瑞仪器有限公司; KQ-500DE 超声波清洗机 昆山市超声仪器有限公司; TU-1810 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司; CM-700d 色差仪 彩谱科技有限公司; 气体混配器 丹麦丹圣(PBI/ Dansensor A/S)有限公司; CTC CombiPAL 自动顶空进样装置、GC-IMS 气相-离子迁移谱仪 德国 G.A.S.公司; 7890A-5975C 顶空分析仪 Agilent 公司; DF-101S 包材测厚仪 巩义市英裕仪器公司; FlavourSpec® 风味分析仪 北京格林德国际科技有限公司; E6090 荧光分光光度计 Invitrogen; Flx800 酶标仪 BioTek; HDL 超净工作台 北京东联哈尔仪器制造有限公司; LT-CPS50C 立式压力蒸汽灭菌器 上海博讯医疗生物仪器股份有限公司; FW100 粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司; QuantStudio 3 qPCR 仪 美国 Thermo Fisher Scientific 公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 不同包装材料的筛选及其对薄荷品质的影响

1.2.1.1 样品包装及贮藏 取新鲜薄荷叶片样品在 5 种不同的包装材料(PE、OPP1.8/PE3.5、OPP1.8/PE4.5、OPP2.3/PE4.5、HDPE)中进行装袋包装,规格均为 245 mm×245 mm。每袋装入 30 g 薄荷,置于 4 ℃ 的冰箱中贮藏,在第 0、3、6、9、12、15 和 18 d 分别测量薄荷的各项理化指标,每个指标至少 3 次平行,结果表示为平均值±标准差。

1.2.1.2 失重率的测定 将第 0 d 薄荷的重量记录初始数据,之后每天称量薄荷的质量,通过式(1)计算失重率<sup>[17]</sup>。

$$W(\%) = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: W 为失重率,%;  $W_0$  为第 0 d 鲜重, g;  $W_n$  为第 n d 鲜重, g。

1.2.1.3 相对电导率的测定 每组取 3 片薄荷叶片,每片叶片各取直径为 5 mm 的圆片 5 个,共计 15 个于锥形瓶中,轻轻冲洗后加入 50 mL 蒸馏水测定初始电导率。摇床振荡 3 h 后检测体系的电导率并记录。随后沸水浴 5 min,冷却至室温后检测电导率<sup>[18]</sup>,并按照式(2)计算相对电导率。

$$C(\%) = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: C 为相对电导率,%;  $P_0$  为初始去离子水电导率, S;  $P_1$  为轻轻振荡 3 h 后的电导率, S;  $P_2$  为振荡 3 h 后在沸水浴中加热 5 min 冷却后的电导率, S。

1.2.1.4 色差的测定 采用色差仪测定薄荷在贮藏期间的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ <sup>[19]</sup>。将色差仪放置在薄荷叶片测试头上,以仪器白板为标准空白色泽,测量出薄荷的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$ ,通过公式(3)计算得出  $\Delta E$ ,  $\Delta E$  越小表示越接近新鲜薄荷。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $L^*$  为亮度,表示黑白,0 为黑,100 为白;  $a^*$  为红绿,正值为红,负值为绿,0 为中性;  $b^*$  为黄蓝,正值为黄,负值为蓝,0 为中性。

1.2.1.5 感官评价 由 10 人组成品评组人员评价薄荷贮藏期内感官品质,观察薄荷在贮藏期间的变化,并从薄荷叶片表面的颜色、萎蔫程度、有无腐烂等几个方面对薄荷的感官进行打分评定。具体的感官评分标准见表 1。

表 1 感官评分标准<sup>[20]</sup>  
Table 1 Sensory grading scale<sup>[20]</sup>

分数	评价标准
9~10	气味清凉浓郁,商品性保持完好,薄荷叶片饱满水分充足,不存在腐烂和褐变;
7~8	商品性轻微损失,薄荷叶片轻微萎蔫,无褐变腐烂情况的发生;
5~6	开始失去商品性,薄荷叶片边缘变色,出现肉眼可见的极轻微局部的萎蔫,无腐烂情况发生;
3~4	几乎没有商品性,薄荷叶片局部发生萎蔫,叶片有大部分腐烂,无法食用;
1~2	无商品性,薄荷叶片溃烂严重,香气完全消失,不可食用。

1.2.1.6 抗坏血酸含量的测定 采用 2,6-二氯酚法测定薄荷中抗坏血酸含量。准确称量 10 g 薄荷于研钵中,加入少量 2% 的草酸研磨成匀浆,然后转入 100 mL 容量瓶中,用 2% 的草酸定容,摇匀,提取 10 min,过滤。吸取 10 mL 滤液于 100 mL 三角瓶中,用标定好的 2,6-二氯酚溶液滴定至淡红色,且 15 s 不褪色为终点,平行滴定 3 次,同时用 2% 草酸做空白滴定<sup>[21]</sup>。计算公式(4)如下:

$$V_c \text{ 含量}(\text{mg}/100 \text{ g}) = \frac{(V - V_0) \times \rho}{(V_2/V_1) \times m} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: V 为滴定样品消耗 2,6-二氯酚溶液体积, mL;  $V_0$  为滴定空白消耗 2,6-二氯酚溶液体积, mL; m 为样品质量, g;  $\rho$  为标定 1 mL 2,6 二氯酚溶液消耗多少标准维生素 C 的质量, mg/mL;  $V_1$  为提取液总体积, mL;  $V_2$  为滴定时所取体积, mL。

1.2.1.7 总叶绿素含量的测定 按照 NY/T 3082-2017 测定薄荷总叶绿素含量。在黑暗条件下使用体积分数 80% 丙酮浸提叶片叶绿素,利用分光光度计测定 663、645 nm 处吸光度,按式(5)计算叶绿素质量浓度(mg/L),再按公式(6)计算组织中叶绿素质量比,单位为  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

$$\rho(\text{叶绿素}) = 20.29 \times A_{645} + 8.05 \times A_{663} \quad \text{式 (5)}$$

$$\omega(\text{叶绿素}) = \frac{\rho(\text{叶绿素}) \times V \times N}{m \times 1000} \quad \text{式 (6)}$$

式中, A 为分光光度值, OD; V 为提取液体积, mL; N 为稀释倍数; m 为样品鲜重, g。

1.2.1.8 菌落总数的测定 按照 GB 4789.2-2016 方法测定薄荷菌落总数。取 25 g 薄荷加入 225 mL 无菌生理盐水均质 2 min, 取 1 mL 样液稀释 10 倍, 每个稀释梯度取 1 mL 样液于无菌培养皿中, 分别倒入 20 mL 平板计数琼脂培养基, 摇晃均匀, 冷却凝固后将平板在 37 °C 培养 48 h, 结果以 lg(CFU/g) 计。

### 1.2.2 响应面试验优化气体比例对薄荷品质的影响

根据前期对薄荷气调保鲜研究结果得出 O<sub>2</sub> 浓度为 3%~7%, CO<sub>2</sub> 浓度为 5%~15% 时能保持薄荷较好的感官品质<sup>[22]</sup>, 同时结合上述实验对 5 种不同包装材料的保鲜效果的筛选, 选取对叶绿素影响较大的 3 个因素: O<sub>2</sub> 浓度, CO<sub>2</sub> 浓度和包装材料, 各取 3 个水平因素分别记为水平-1、0、1, 选取的 3 种包装材料分别为: PE、OPP1.8/PE3.5、HDPE。选用叶绿素含量为响应值进行薄荷贮藏期间品质评价, 实验因素水平及编码设计如表 2 所示。运用 Design Expert 软件(V8.0.6.1)进行数据分析, 建立二次回归方程。

表 2 响应面试验因素水平设计

Table 2 Factor level design of response surface experiment

因素	水平		
	-1	0	1
O <sub>2</sub> 浓度(%)	3	5	7
CO <sub>2</sub> 浓度(%)	5	10	15
包装材料	PE	OPP1.8/PE3.5	HDPE

1.2.3 运用 GC-IMS 分析不同气调包装中薄荷挥发性成分 将薄荷样品分为 3 组, 分别为气调包装 A 组(3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub> 处理及 HDPE 包装)、气调包装 B 组(7% O<sub>2</sub>+5% CO<sub>2</sub>+86% N<sub>2</sub> 处理及 PE 包装)和对照组(不气调处理及 HDPE 包装)。其中 A 组为响应面优化试验中预测出的最佳条件, B 组为保鲜效果最差的包装条件。将三组样品进行 4 °C 保存。

参考张乐等<sup>[23]</sup>的方法, 精确称取 0.500 g 薄荷样品于 20 mL 具有聚四氟乙烯隔垫密封的顶空瓶中, 将顶空瓶 40 °C 加热孵化 10 min, 孵化转速 250 r/min; 不分流顶空进样 200 μL。进样针温度 85 °C, 进样前清洗时间 30 s, 进样后清洗时间 6 min<sup>[24]</sup>。

GC 条件: MXT-5 柱(15 m×0.53 mm, 0.53 μm); 色谱柱温度 60 °C; 载气为高纯氮气(≥99.999%)。载气流速程序为初始 2.0 mL/min, 保持 2 min, 在 2~10 min 线性增至 10.0 mL/min, 在 10~20 min 线性增至 100.0 mL/min, 在 20~40 min 线性增至 150.0 mL/min, 然后停止流动, 总运行时间为 40 min<sup>[23]</sup>。

IMS 条件: 离子源为氩(6.5 keV); 正离子模式; 漂移管长度 9.8 cm; 管内线性电压 500 V/cm; 漂移管

温度 45 °C; 漂移气流速 150 mL/min(氮气纯度 ≥99.999%)。

### 1.2.4 薄荷呼吸速率模型的建立

1.2.4.1 包装材料厚度和包装材料气体透过率的测定 采用随机抽取的方法获得需要测定的包装膜, 在包装膜上选取处于不同方位的十个点使用测厚仪(精度为 0.001 mm)测量其厚度, 对所获得数据进行平均处理即可得到包装膜的实际厚度。对于气体透过率的测定使用小袋注气法<sup>[25]</sup>。

1.2.4.2 采用顶空分析仪测定薄荷的呼吸速率 挑选新鲜无损伤的薄荷叶片, 经过两次清洗消毒, 将薄荷放入包装袋(长×宽为 245 mm×245 mm)中。本文采用密闭系统法进行研究。

密闭系统法: 将 100 g 样品放入 245 mm×245 mm 的包装袋中, 每隔 4 h 测定容器内 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的浓度, 即细胞组织生产 CO<sub>2</sub> 或消耗 O<sub>2</sub> 的数量。通过式(7)和(8)计算呼吸速率<sup>[26]</sup>。

$$R_{O_2} = \frac{(y_{O_2}^t - y_{O_2}^i) \times V}{100 \times M \times (t_f - t_i)} \quad \text{式 (7)}$$

$$R_{CO_2} = \frac{(y_{CO_2}^t - y_{CO_2}^i) \times V}{100 \times M \times (t_f - t_i)} \quad \text{式 (8)}$$

式中: y<sub>O<sub>2</sub></sub><sup>i</sup>、y<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>i</sup> 分别为 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 起始测量浓度, %; y<sub>O<sub>2</sub></sub><sup>t</sup>、y<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>t</sup> 分别为测量结束时 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 浓度, %; V 是指密封容器的自由体积(V<sub>容器</sub>-V<sub>果实</sub>), mL; M 是果实的质量, kg; t<sub>f</sub>、t<sub>i</sub> 是测量终止、起始时间, h; R<sub>O<sub>2</sub></sub>、R<sub>CO<sub>2</sub></sub> 是 O<sub>2</sub> 的消耗速率和 CO<sub>2</sub> 的生成速率, mL/(kg·h)。

1.2.4.3 基于二次多项式的呼吸速率模型的建立 采用渗透系统方法<sup>[27]</sup> 测量薄荷的呼吸速率, 取 100 g 左右的薄荷, 装入上述包装袋中, 先用包装机抽真空充入 800 mL 左右的空气并密封, 放入冷库中开始记录, 每隔 4 h 用顶空分析仪扎入密封片, 测量包装袋内的气体浓度并记录数据, 每个处理重复三次平行。并运用二次多项式方程(式(9))对实验结果进行回归分析, 拟合出最优的薄荷呼吸速率模型。

$$R = a_0 + a_1 [O_2] + a_2 [CO_2] + a_3 [O_2]^2 + a_4 [CO_2]^2 + a_5 [O_2][CO_2] \quad \text{式 (9)}$$

式中: a<sub>i</sub>(i=0, 1, ..., 5) 为实验拟合常数。

1.2.4.4 呼吸速率模型的验证 另取 100 g 左右的薄荷样品, 样品处理同 1.2.4.3, 对薄荷样品进行气体浓度测定, 将所测 [O<sub>2</sub>]、[CO<sub>2</sub>] 浓度代入所建立的呼吸模型, 得出薄荷呼吸速率的预测值  $\hat{R}$ , 并将预测值  $\hat{R}$  与实测值 R 进行比较<sup>[28]</sup>。

### 1.2.5 不同气调及包装条件下薄荷表面真菌多样性的测定

1.2.5.1 薄荷样品分组 将薄荷随机分为两组, 实验组 1: 采用 HDPE 包装及 3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub> 气调处理的薄荷样本(编号为 A0 和 A12); 实验组 2: 采用 PE 包装及 7% O<sub>2</sub>+5% CO<sub>2</sub>+86% N<sub>2</sub> 气调

处理的薄荷样本(编号为 B0 和 B12);对照组:采用 HDPE 包装及不气调处理的薄荷样本(编号为 C0 和 C12),将所有样本置于 4 ℃ 贮藏,取各组第 12 d 样品进行下一步微生物菌群分析。

1.2.5.2 薄荷样品处理 分别准确称量 10 g 薄荷样品加入 100 mL 无菌缓冲液,置于摇床 200 r/min 振荡 30 min。然后依次用 10 μm 和 0.22 μm 滤膜过滤去除杂质,过滤后的样品放入无菌离心管中置于 -80 ℃ 保存。

1.2.5.3 DNA 提取 使用 DNA 提取试剂盒从样品中提取真菌 DNA。用 2% 琼脂糖凝胶对提取获得的 DNA 样品质量进行检测,使用无菌无酶水将样品 DNA 稀释至 1 ng/μL。

1.2.5.4 PCR 扩增及测序 根据 PCR 反应体系,对真菌 ITS1 区域扩增。所有 PCR 混合液加入 15 μL Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix(New England Biolabs)、0.2 μmol/L 引物和 10 ng 基因组 DNA 模板,在 98 ℃ 下进行 1 min 的第一次变性,然后在 98 ℃(10 s)、50 ℃(30 s)和 72 ℃(30 s)下进行 30 次循环,最后在 72 ℃ 下保持 5 min。PCR 产物使用 2% 浓度的琼脂糖凝胶进行电泳检测;对检测合格的 PCR 产物进行磁珠纯化,采用酶标定量,根据 PCR 产物浓度进行等量混样,充分混匀后使用 2% 的琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物,对目的条带使用通用型 DNA 纯化回收试剂盒(TianGen)回收产物。

1.2.5.5 测序数据处理 使用 DAN Library Kit for Illumina 文库试剂盒进行文库构建,构建好的文库经过 Qubit 定量和文库检测,合格后,使用 MiSeq 进行上机测序。测得的原始数据在 Illumina 平台(北京诺禾致源科技股份有限公司)经过拼接、过滤除去干扰数据,得到有效数据,然后进行丰度、多样性指数等分析,挖掘样品间物种组成差异。

### 1.3 数据处理

所有实验至少重复 3 次,结果表示为平均值±标准差,并使用 SPSS 24.0 统计软件通过 *t* 检验进行统计分析。运用 Design Expert.V8.0.6.1 软件设计响应面试验。试验数据使用 Matlab7.1 软件进行非线性拟合得到拟合曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同包装材料的筛选及其对薄荷品质的影响

包装材料的透气性能是气调包装保鲜领域今后

研究的首要主题。表 3 为 PE、OPP1.8/PE3.5、OPP1.8/4.5、OPP2.3/PE4.5、HDPE5 种不同包装材料的技术参数,该参数为进一步筛选可延长薄荷保鲜期的包装材料和分析薄荷呼吸速率提供数据支撑。

失重率是评价叶类蔬菜饱和度、脆性和商品价值的重要指标,失重率下降越大品质越坏。图 1 表示的是贮藏期间不同包装材料对薄荷品质的影响,其中薄荷在贮藏期间失重率变化见图 1(a),整体呈现不同上升趋势,贮藏前期,OPP1.8/PE3.5 和 HDPE 组失重率较为缓慢,PE 和 OPP1.8/PE4.5 两组失水迅速。贮藏至第 12 d,OPP1.8/PE4.5 组薄荷萎蔫程度最大,失重率为 29.56%,失重率最小的为 HDPE 包装的薄荷,失重率是 19.23%,低于其他 4 种包装材料。结果表明,在 OPP1.8/PE4.5 包装条件下薄荷失水率最高,可能由于果蔬在贮藏期间进行呼吸作用和蒸腾作用导致水分含量逐渐流失,而该膜的 CO<sub>2</sub> 透过率最小,导致薄荷进行无氧呼吸,从而出现萎蔫现象<sup>[29]</sup>。

相对电导率与植物组织的细胞膜完整性与衰老程度有很大的关系,当细胞膜受损时,细胞膜的选择透过性功能被削弱,细胞内物质可自由通过,导致相对电导率增大<sup>[30]</sup>。图 1(b)所示的是贮藏期间不同包装对薄荷相对电导率的影响,随着贮藏时间的延长,5 种不同包装材料内的薄荷相对电导率都在逐渐升高。在贮藏第 9 d,OPP2.3/PE4.5 组增加了 6.8%,PE 组增加了 4.26%,OPP1.8/PE3.5 组增加了 4.35%、OPP1.8/PE4.5 组增加了 5.04%。可见,PE、OPP1.8/PE3.5 组相对电导率维持较低水平,增量较少,对于保护薄荷细胞膜完整性效果最好。

新鲜蔬菜的外部颜色是决定消费者对该产品的接受程度的最重要因素之一<sup>[31]</sup>。图 1(c)表示的是薄荷在贮藏期间的色差变化,薄荷颜色变化随着贮藏时间的增长呈现增加趋势,表明薄荷色泽逐渐变深,随着时间增加薄荷的新鲜度降低。对比 5 种不同的包装材料可看出,薄荷贮藏至第 18 d 时 OPP1.8/PE3.5 组色差为 18.76,低于 OPP1.8/PE4.5 组和 OPP2.3/PE4.5 组,主要是由于 OPP1.8/PE3.5 的氧气透过率以及水蒸气透过率较其余四种包装材料高,从而减少薄荷在包装袋中产生水气,降低薄荷腐烂速度,从而保持薄荷色泽。因此选择 OPP1.8/PE3.5 包装材料可以更好地保持薄荷原有的颜色,维持薄荷的感官品质。

感官评价可直观地反映果蔬采后的生理变化,直接影响叶菜类新鲜程度的是黄化或腐烂。其中

表 3 不同包装材料技术参数

Table 3 Technical parameters of different packaging materials

包装材料	O <sub>2</sub> 透气系数 (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·24 h·0.1 MPa)	CO <sub>2</sub> 透气系数 (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·24 h·0.1 MPa)	N <sub>2</sub> 透气系数 (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·24 h·0.1 MPa)	0.1 MPa 水蒸气透过率 (g/m <sup>2</sup> ·24 h)	厚度(mm)
PE	157.3	314	565	0.556	0.03735
HDPE	143.8	316	626	0.607	0.05557
OPP1.8/PE3.5	245.8	489	336	0.732	0.03431
OPP1.8/PE4.5	182	210.8	221	0.592	0.03709
OPP2.3/PE4.5	175	306	478	0.521	0.03689

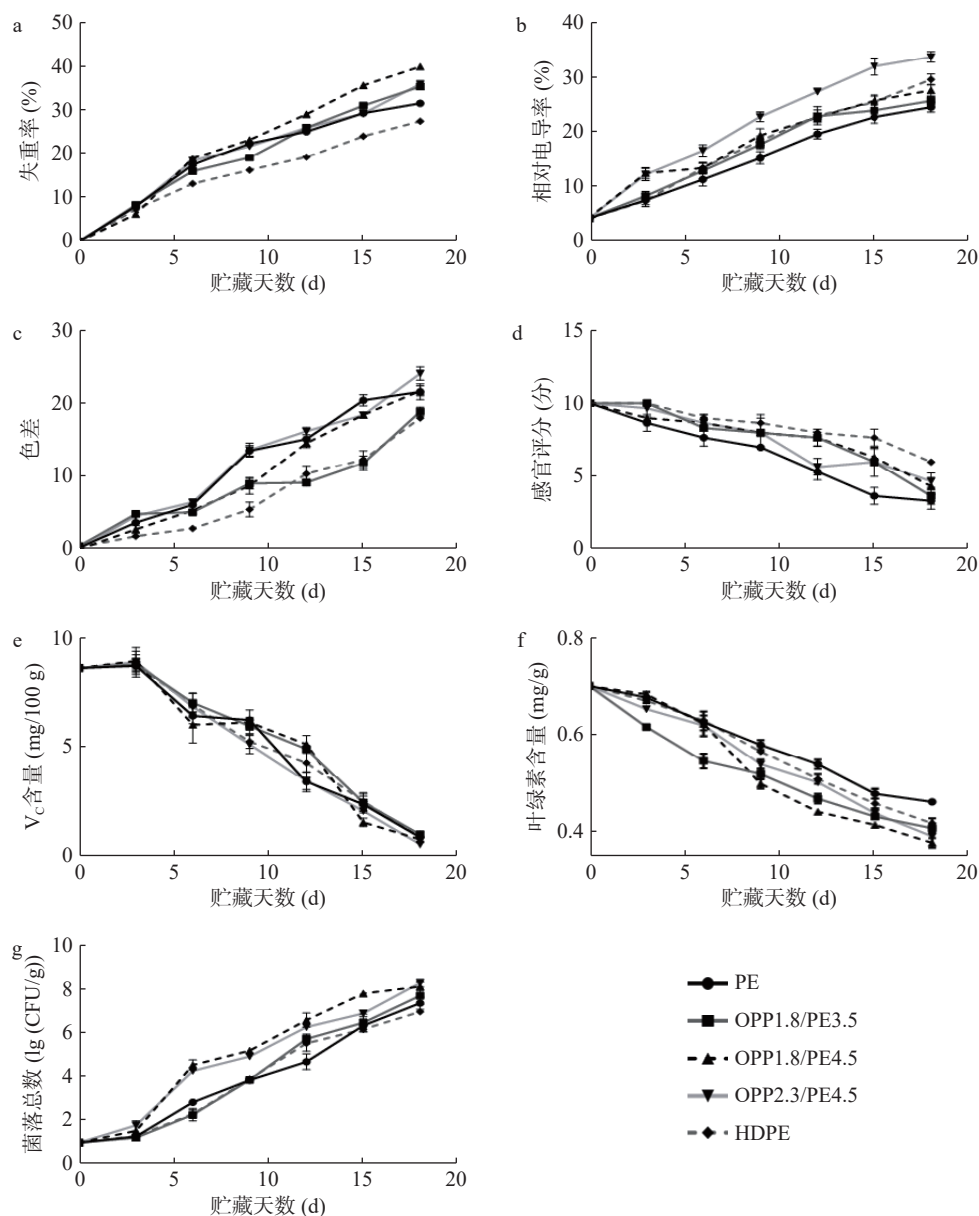


图1 贮藏期内不同包装材料对薄荷失重率(a)、相对电导率(b)、色差(c)、感官评价(d)、 $V_C$ 含量(e)、叶绿素含量(f)和菌落总数(g)的影响

Fig.1 Effects of different packaging materials on weight loss (a), relative conductivity (b), color difference (c), sensory evaluation (d),  $V_C$  content (e), chlorophyll content (f) and total number of colonies (g) of peppermint during storage

图1(d)所示的是不同包装对薄荷感官评分的影响。随着贮藏时间的增加,薄荷的感官评分都呈现下降的趋势,表明薄荷的感官品质在逐渐下降。HDPE组的薄荷新鲜程度较好,出水少,轻微褐变,贮藏第12d时还保持一定商品性,而PE组在贮藏前期评分稳定下降速度较缓慢,在贮藏至第9d时,叶片失水、变黄、开始失去挺立状态。因此,针对感官评价指标来说,5种不同包装方式中:HDPE包装的保鲜效果显著高于其他四种材料,可能是因为HDPE包装能更好地抑制腐烂菌的繁殖生长,避免其遭受微生物的侵染,减少腐烂的发生,同时能更好地减缓薄荷水分流失和生理代谢速率,保持营养价值和品质<sup>[32]</sup>。

$V_C$ 是一种非酶抗氧化物质,它是评估薄荷质量好坏的重要指标之一,对减少活性氧的积累具有一定的作用<sup>[33]</sup>。图1(e)所示的是贮藏期间不同包装对薄

荷抗坏血酸含量的影响,随着贮藏时间的延长,5组不同包装材料中的薄荷抗坏血酸含量均有所降低,其中OPP1.8/PE3.5下降幅度明显小于OPP2.3/PE4.5组,OPP1.8/PE3.5组在贮藏第9d,仍保持较高抗坏血酸含量,为6.365 mg/100 g,与第0d相比下降了30.7%,而OPP2.3/PE4.5组在第12d明显低于其他四组,这是由于抗坏血酸在贮藏过程中又很容易被空气氧化,而OPP1.8/PE3.5包装材料透氧性较高,呼吸强度较高,因此抗坏血酸含量下降也比其他四种包装材料小。

叶绿素含量通常作为绿色蔬菜是否新鲜的重要指标,与蔬菜的感官品质和营养价值联系紧密。图1(f)所示的是贮藏期间不同包装对薄荷叶绿素含量的影响,随贮藏时间增加,各组薄荷总叶绿素含量均在下降,在贮藏第12d,PE和HDPE包装的叶绿素含量

均保持较高水平,分别为 0.55 mg/g 和 0.52 mg/g,为 OPP1.8/PE3.5 组的 1.14 倍和 1.08 倍。该叶绿素变化趋势与赵洁所研究的贮藏菜心叶绿素含量变化趋势较为一致<sup>[34]</sup>。因此,对于 5 种不同包装材料内的薄荷来说,经 PE 材料包装后,薄荷中的总叶绿素含量损失较低,这是由于该包装气体透过率较高,薄荷呼吸作用产生的气体可较快散发出去,从而减缓叶绿素的分解,可以有效地阻止总叶绿素含量快速损失,更好保护薄荷叶片的色泽。

微生物的污染和增殖会导致薄荷的感官品质下降,降低其商业价值。图 1(g)所示的是贮藏期间不同包装对薄荷菌落总数的影响,贮藏期内薄荷的微生物数量均呈上升趋势,贮藏至第 12 d 时,PE 和 HDPE 包装抑制微生物效果最好,细菌平均对数仍低于 6 lg (CFU/g)。由于 PE 和 HDPE 包装氧气透过率和水蒸气透过率较高,薄荷在贮藏期间进行的呼吸作用以及蒸腾作用产生的气体可以较好地与外界气体环境进行交换,从而保持包装袋内较好的贮藏环境,降低微生物的污染和增殖,保持薄荷较好的品质特性<sup>[35]</sup>。

通过该实验研究,筛选出保鲜效果较好的 PE、OPP1.8/PE3.5、HDPE 三种包装材料,同时结合前期预实验得出的最佳气体浓度结果,即 O<sub>2</sub> 浓度为 3%~7%,CO<sub>2</sub> 浓度为 5%~15%。将这三个因素设定三个水平进行后续实验。

## 2.2 气体比例对薄荷品质的影响

### 2.2.1 叶绿素模型建立与分析

包装材料对果蔬贮藏期间感官品质的影响较大,薄荷等叶菜在贮藏期间导致其变质腐败的主要原因为包装材料的透气性能,而用透气性能较好的包装材料可减少薄荷贮藏期间呼吸作用和蒸腾作用产生的水汽<sup>[36]</sup>,例如前人将苹果与果箱间缓冲材料作为影响因素进行响应面优化试验,可较好地明确运输时苹果损伤的体积最小的最佳缓冲材料种类<sup>[37]</sup>。本研究采用相同模式进行试验设计,将包装材料种类作为影响因素,根据包装材料筛选实验结果,以及前期对薄荷气调保鲜研究结果得出的 O<sub>2</sub> 浓度为 3%~7%,CO<sub>2</sub> 浓度为 5%~15% 时能保持薄荷较好的感官品质<sup>[22]</sup>,利用 Box-Behnken 设计法,以 Design-ExpertV 8.0.6 软件设计三因素三水平的响应面试验。在绿叶蔬菜贮藏保鲜中,叶绿素含量通常作为蔬菜新鲜与否的重要指标,其分解程度对薄荷色泽及感官品质有较大影响,例如 Oliveira 等<sup>[38]</sup>将叶绿素含量作为响应值优化菠菜叶片的最佳包装温度和湿度,因此本研究选用叶绿素含量为响应值,通过设计响应面优化薄荷最佳保鲜工艺参数,设计与结果如表 4 所示。通过叶绿素含量(Y)与 O<sub>2</sub> 浓度(A)、CO<sub>2</sub> 浓度(B)、包装材料(C)之间建立回归模型,对表 4 中响应面试验结果进行多次回归拟合,得到叶绿素模型及回归系数的回归分析结果(表 5)。采用软件进行非线性回归的二次多项式拟合,得到回归方程:  $Y=0.65-0.058A-0.00525B-0.052C+0.046$

表 4 响应曲面优化薄荷气调包装条件的试验设计与结果  
Table 4 Experimental design and results of response surface optimization for modified atmosphere packaging conditions of peppermint

试验号	O <sub>2</sub> 浓度(%)	CO <sub>2</sub> 浓度(%)	包装材料	叶绿素含量(mg/g)
1	3	5	OPP1.8/PE3.5	0.636
2	7	5	OPP1.8/PE3.5	0.402
3	3	15	OPP1.8/PE3.5	0.524
4	7	15	OPP1.8/PE3.5	0.475
5	3	10	PE	0.674
6	7	10	PE	0.641
7	3	10	HDPE	0.624
8	7	10	HDPE	0.473
9	5	5	PE	0.553
10	5	15	PE	0.584
11	5	5	HDPE	0.486
12	5	15	HDPE	0.452
13	5	10	OPP1.8/PE3.5	0.668
14	5	10	OPP1.8/PE3.5	0.658
15	5	10	OPP1.8/PE3.5	0.641
16	5	10	OPP1.8/PE3.5	0.624
17	5	10	OPP1.8/PE3.5	0.658

表 5 叶绿素模型及回归系数的回归分析结果

Table 5 Regression analysis results of chlorophyll model and regression coefficient

来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.12	9	0.014	36.33	<0.0001	***
A-O <sub>2</sub> 浓度	0.027	1	0.027	72.25	<0.0001	***
B-CO <sub>2</sub> 浓度	2.21E-04	1	2.21E-04	0.58	0.4696	
C-包装材料	0.022	1	0.022	57.61	0.0001	***
AB	8.56E-03	1	8.56E-03	22.68	0.0021	**
AC	3.48E-03	1	3.48E-03	9.23	0.0189	*
BC	1.06E-03	1	1.06E-03	2.8	0.1382	
A <sup>2</sup>	3.34E-03	1	3.34E-03	8.84	0.0207	*
B <sup>2</sup>	0.053	1	0.053	140.99	<0.0001	***
C <sup>2</sup>	1.47E-03	1	1.47E-03	3.88	0.0895	
残差	2.64E-03	7	3.77E-04			
失拟项	1.43E-03	3	4.77E-04	1.58	0.3265	ns
纯误差	1.21E-03	4	3.02E-04			
总和	0.13	16				

$R^2=0.9790$   $R_{adj}^2=0.9521$

注:  $P<0.001$ 为极其显著,用\*\*\*表示;  $P<0.01$ 为极显著,用\*\*表示;  $P<0.05$ 为显著,用\*表示;  $P>0.05$ 为不显著,用ns表示。

$AB-0.03AC-0.016BC-0.028A^2-0.11B^2-0.019C^2$ 。

### 2.2.2 模型显著性检验及响应面交互作用分析

叶绿素模型及回归系数的回归分析结果如表 5 所示,模型达到极显著水平( $P<0.0001$ ),通过上述数据可以看到,该模型拟合程度较高,继续对回归方程的相应回归值进行预测,得到其模型回归系数  $R^2=0.9790$ ,调节后的  $R^2=0.9521$ ,因此可说明 95.21% 的数据均可使用此模型进行说明,且该方程可靠性较高。通过对各个因素 F 值进行分析后得到其主效应关系为:  $A>C>B$ ,即 O<sub>2</sub> 浓度>包装材料>CO<sub>2</sub> 浓度。

将模型中 A、B 和 C 三因素在方差分析的基础上固定在中间水平上,以叶绿素含量作为响应指标,得出其他两个因素交互作用模型,并根据该模型绘制

等高线图与 3D 图, 得到一个理论最大值。响应面图投影面为等高线图, 等高线弯曲程度反映了两因素之间的交互作用大小<sup>[39]</sup>。图 2 是两因素交互作用影响薄荷叶绿素含量的响应面效果图。

O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的交互作用影响薄荷中的总叶绿素含量趋势如图 2(a)所示, AB 交互曲面中, 当 CO<sub>2</sub> 增加时, 薄荷中的总叶绿素含量的变化坡度呈现出先增加后降低的趋势, 将 CO<sub>2</sub> 处于较低水平时, 随着 O<sub>2</sub> 的增加, 薄荷中的总叶绿素含量呈现出线性增加的趋势; 将 CO<sub>2</sub> 处于较高水平时, 随着 O<sub>2</sub> 的增加, 薄荷中的总叶绿素含量变化不显著; 在只考虑二者交互作用的前提下, 将 O<sub>2</sub> 水平处于 3%~5% 左右、CO<sub>2</sub> 水平处于 7%~11% 左右时, 薄荷中的叶绿素达到最大值, 曲面图与表 5 方差分析的结果一致。

O<sub>2</sub> 和包装材料的交互作用对薄荷中的总叶绿素含量的影响如图 2(b)所示, AC 交互曲面中, 当包装材料为 HDPE 和 OPP1.8/PE3.5 时, 当 O<sub>2</sub> 水平不断升高, 叶绿素的变化坡度呈现出先增加后平缓的趋势, 将包装材料处于较高水平, 薄荷中的总叶绿素含量的变化坡度随 O<sub>2</sub> 的增加呈线性增加的趋势; 将 O<sub>2</sub> 处于较低水平时, 总叶绿素含量随包装材料的增加呈先平缓后降低的趋势; 当 O<sub>2</sub> 较高时, 叶绿素随包装材料的增加呈线性增加的趋势, 因此得到氧气和包装材料之间存在十分显著的交互作用; 在仅考虑二者交互作用的条件下, 将 O<sub>2</sub> 水平处于 3%~5% 左右, 包装材料为 OPP1.8/PE3.5 或 HDPE 时, 叶绿素达到最大值, 方差分析和曲面图所呈现的趋势也十分符合。

二氧化碳和包装材料的交互作用对叶绿素的影

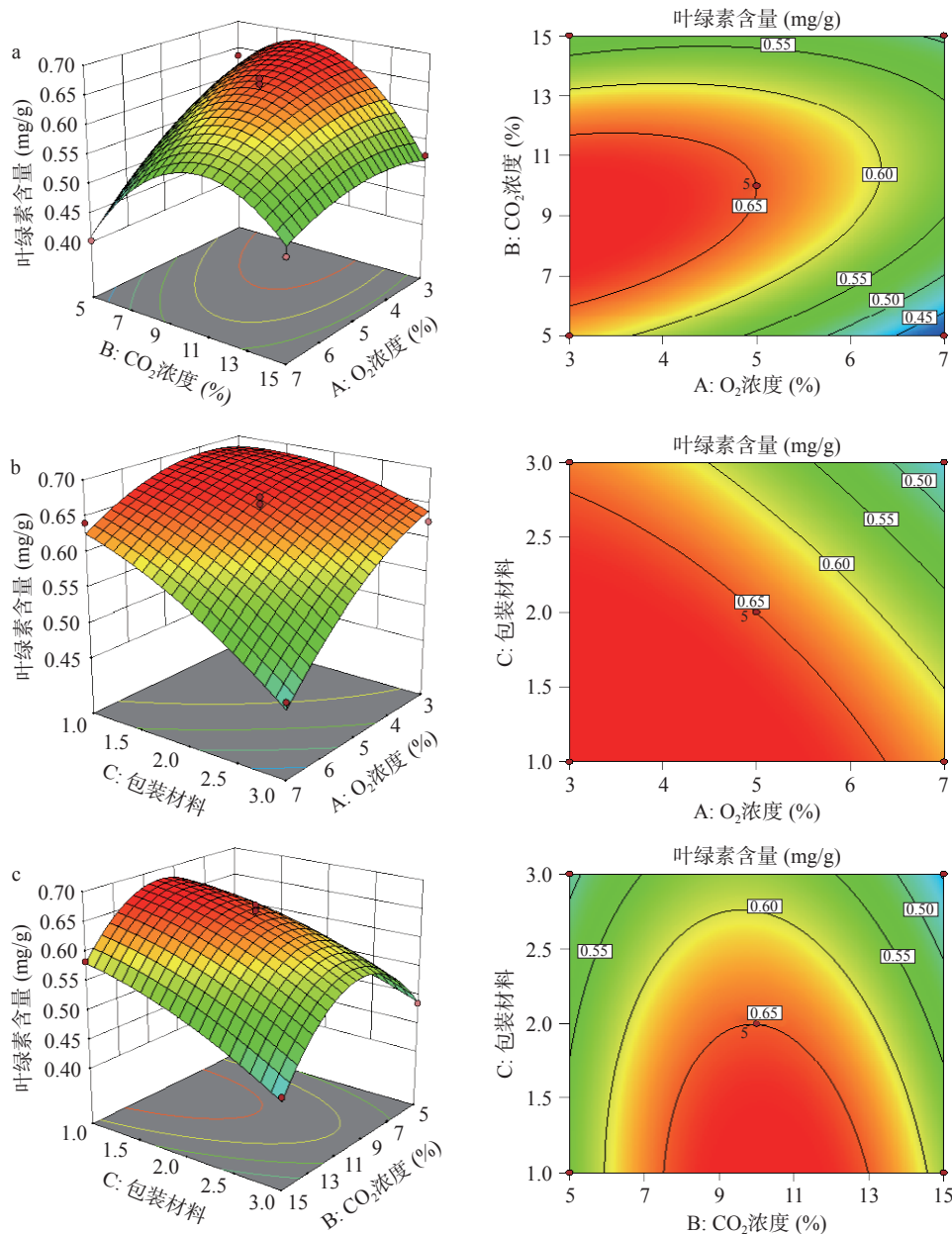


图 2 两因素交互作用薄荷叶绿素含量的影响

Fig.2 Effect of interaction of two factors on chlorophyll content of peppermint

注: 图 b、c 中包装材料 1 为 HDPE, 2 为 OPP1.8/PE3.5, 3 为 PE。

响如图 2(c)所示, BC 交互曲面中, 当包装材料增加时, 薄荷中的总叶绿素含量的变化坡度呈现出线性降低的趋势, 当 CO<sub>2</sub> 增加时, 薄荷中的总叶绿素含量呈现出先增加后降低的趋势, 在仅考虑二者交互作用的条件下, 在 CO<sub>2</sub> 为 7%~11% 左右, 包装材料为 OPP1.8/PE3.5 或 HDPE 时, 其叶绿素达到最大值, 曲面图与表 5 方差分析的结果也是相符合的。

由图 2 及表 5 可看出二次项交互作用 AB 对薄荷中的总叶绿素含量具有极显著的影响 ( $P < 0.01$ ), AC 对叶绿素的影响显著 ( $P < 0.05$ ), BC 对叶绿素的影响不显著 ( $P > 0.05$ )。即氧气和二氧化碳气体比例、氧气浓度和包装材料种类对薄荷贮藏期间叶绿素含量影响显著, 而二氧化碳浓度和包装材料对叶绿素含量则影响不显著。

**2.2.3 验证实验结果** 通过对回归方程模型的分析, 以最大程度的减少叶绿素损失为优化目标, 得到预测的最优条件为: O<sub>2</sub> 为 3.5%、CO<sub>2</sub> 为 9.4%、包装材料为 HDPE。在此最优条件下经 3 次平行实验, 得到其叶绿素含量为 0.693±0.057 mg/g, 与预测值总叶绿素含量为 0.691 mg/g 相差在 5% 范围内, 证实了实验值和预测值之间相关性很高, 实验结果较精准。

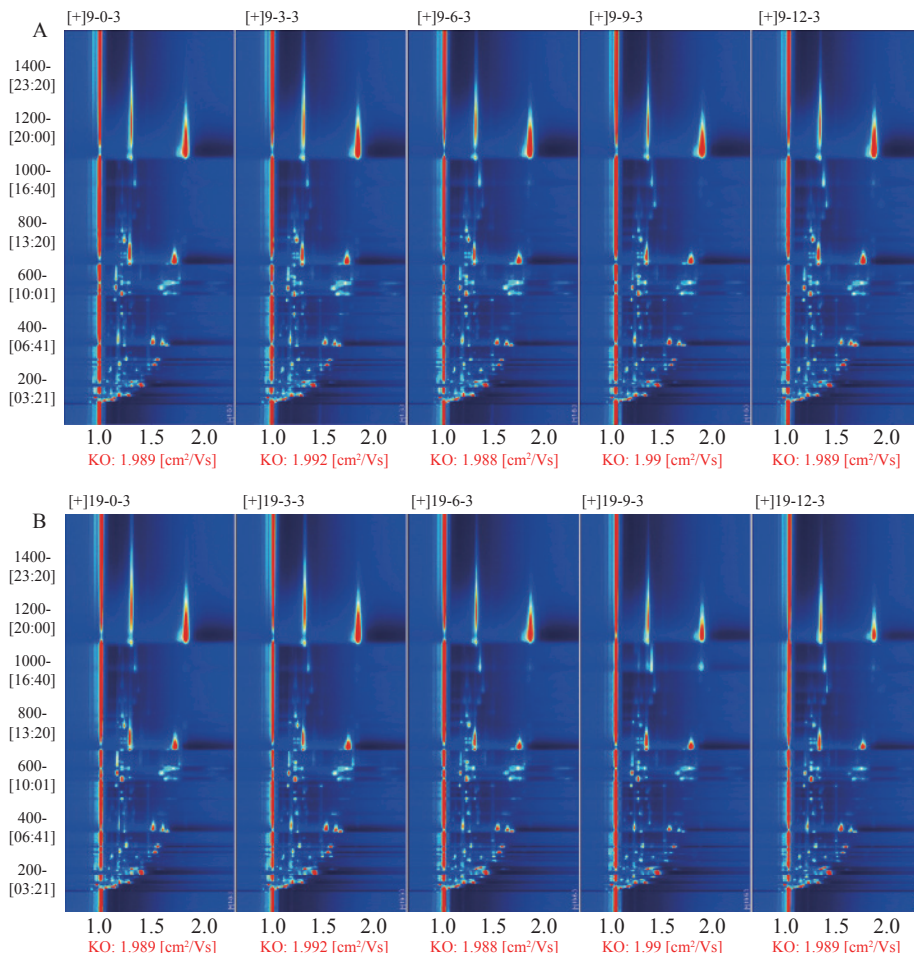
**2.3 不同气调包装中薄荷挥发性成分评价**

**2.3.1 三种不同气调包装中薄荷挥发性化合物的分析** 使用 Reporter 软件生成了不同贮藏天数薄荷中

挥发性化合物的 GC-IMS 二维俯视图, 如图 3 所示, 横坐标 1.0 处红色竖线为反应离子峰(经归一化处理), 反应离子峰右侧的每一个点代表一种挥发性化合物, 颜色表示单个化合物的信号强度<sup>[40]</sup>。红色代表高强度, 蓝色代表低强度。在贮藏期内, 图 3(A)中红色部分较其余两组明显, 说明 A 组气调包装中薄荷挥发性化合物直至第 12 d 仍保持较高水平。而在图 3(C)中贮藏至第 12 d 时白色部分较为明显, 则薄荷挥发性化合物损失较大, 图 3(B)中白色部分也明显小于图 3(C)中所示。表 6 所示的是贮藏第 12 d 时 A 组气调包装处理的薄荷主要挥发性化合物, 所以 A 组气调包装更加适合薄荷贮藏, 能够更好地保存薄荷中的挥发性化合物, 维持薄荷香气。

**2.3.2 不同气调包装中挥发性化合物指纹图谱对比**

进一步地, 为了更直观且定量地比较不同气调包装对薄荷样品中每种挥发性化合物的影响差异, 采用 GalleryPlot 软件生成不同贮藏天数薄荷中挥发性成分的指纹图谱, 如图 4 所示。薄荷叶片中主要挥发性成分为萜烯类、醇类、酮类、酯类、酸类等化合物<sup>[41]</sup>。由图 4 可知薄荷中的挥发性化合物种类丰富, 不同气调包装中薄荷的挥发性化合物在贮藏期内的变化也不同。随着贮藏时间增加萜烯类物质呈现先上升后下降的趋势。在贮藏初期 D-柠檬烯含量较多, 贮藏至第 9 d 时, 薄荷中的挥发性化合物明显降低, 但



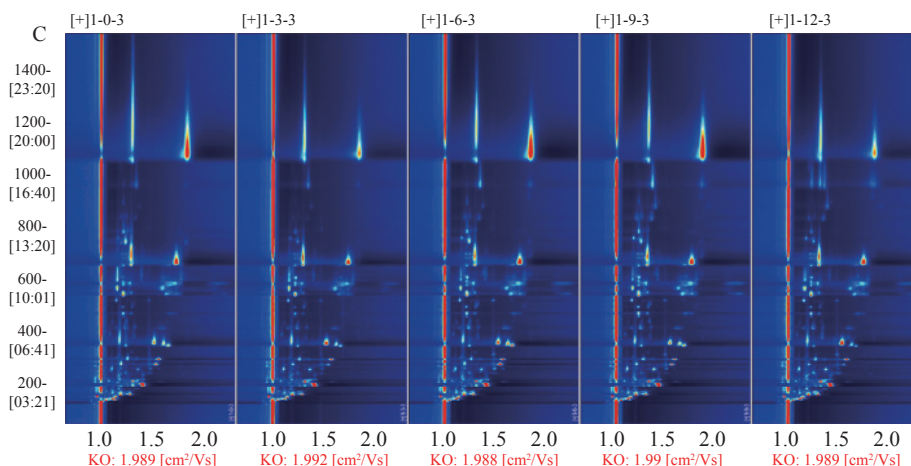


图3 气调包装A组(A)、气调包装B组(B)和对照组(C)中薄荷挥发性化合物变化三维谱图

Fig.3 Three dimensional spectra of changes of volatile compounds of peppermint in modified atmosphere packaging group A (A), modified atmosphere packaging group B (B) and control group (C)

注: A.采用 HDPE 包装及 3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub> 气调处理的薄荷样本; B.采用 PE 包装及 7% O<sub>2</sub>+5% CO<sub>2</sub>+86% N<sub>2</sub> 气调处理的薄荷样本; C.采用 HDPE 包装及不气调处理的薄荷样本。

表6 贮藏第12d时薄荷主要挥发性化合物定性结果

Table 6 Qualitative results of main volatile compounds of peppermint at the 12th day of storage

化合物	分子式	保留指数	保留时间 (s)	迁移时间 (ms)	信号峰体积(a.u)		
					对照组	A	B
香芹酮-M	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	1209.5	1084.706	1.30265	73576.29	73576.29	62846.37
香芹酮-D	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	1215.8	1105.638	1.8285	86959.57	40791.75	38212.56
氧化异佛尔酮-M	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	1170	961.437	1.34505	6733.138	4333.111	6965.068
氧化异佛尔酮-D	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	1169.5	960.113	1.82365	1522.695	3003.115	1503.144
芳樟醇氧化物-吡喃型-M	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	1080.9	732.387	1.23826	5381.059	1508.73	2555.493
芳樟醇氧化物-吡喃型-D	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	1080.6	731.774	1.81852	203.7417	81.38253	89.11821
芳樟醇	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	1099.3	774.679	1.21883	1457.527	862.0315	862.0315
桉叶油醇-M	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	1047	660.473	1.29002	22481.51	19929.143	14789.95
桉叶油醇-D	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	1045.3	657.1	1.7231	164.4184	175.8521	151.1879
柠檬烯-M	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1036.9	640.372	1.2161	1026.723	1091.97	1209.589
柠檬烯-D	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1038.4	643.222	1.65602	411.3655	458.7343	409.2599
间甲基苯甲醛-M	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	988.7	549.205	1.15868	1965.696	2016.391	1013.426
间甲基苯甲醛-D	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	990.1	552.185	1.59871	1912.211	1863.387	2345.851
水芹烯-M	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	998.8	570.07	1.21658	1928.11	1827.98	1726.77
水芹烯-D	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	997.3	567.515	1.66433	1818.19	1827.76	1625.87
苯甲醛-M	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	966	502.789	1.15096	2258.782	2155.612	1597.012
苯甲醛-D	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	965.3	501.512	1.4649	397.5129	381.1454	206.3629
alpha-蒎烯-M	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	937.4	449.986	1.21658	2154.831	1238.133	1408.354
alpha-蒎烯-D	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	937.8	450.838	1.66304	4224.393	1150.204	1707.925
2-甲基丁酸乙酯-M	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	937.8	324.334	1.24043	5723.459	6916.189	7183.018
2-甲基丁酸乙酯-D	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	846.5	323.201	1.65299	5799.68	11805.35	10598.29
2-己烯-1-醇乙酸酯-M	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	857.9	336.04	1.17782	1998.895	2296.392	2364.927
2-己烯-1-醇乙酸酯-D	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	856.6	334.471	1.51874	2729.915	3627.649	3649.018
正己醛-M	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	795.7	271.852	1.2595	1998.895	2296.392	2364.927
正己醛-D	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	792	268.451	1.56222	2729.915	3627.649	3649.013
2-甲基丁酸甲酯-M	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	773.1	251.024	1.19256	2531.172	1719.42	2092.513
2-甲基丁酸甲酯-D	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	769.4	247.655	1.53709	7538.243	1362.109	2092.543
反式-2-戊烯醛-M	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	747.6	228.805	1.10509	1459.838	1610.025	1687.7115
反式-2-戊烯醛-D	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	745.8	227.306	1.36063	1661.541	1684.874	1762.533
异丁酸乙酯-M	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	751.8	227.306	1.19418	643.053	271.8936	402.1033
异丁酸乙酯-D	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	750.2	230.97	1.5633	454.7061	119.4699	172.2989
3-甲基-2-丁烯醛-M	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	737.7	220.703	1.09192	562.5893	841.5749	936.3124
3-甲基-2-丁烯醛-D	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	735.5	218.922	1.35821	1198.153	1006.114	1111.139

续表 6

化合物	分子式	保留指数	保留时间 (s)	迁移时间 (ms)	信号峰体积(a.u)		
					对照组	A	B
1-戊烯-3-酮	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	685.8	183.267	1.07664	719.6393	680.3795	683.8765
正戊醛-M	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	693.5	187.939	1.18397	1821.982	2061.473	1283.907
正戊醛-D	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	693	187.612	1.41549	747.3124	1306.867	519.257
3-甲基丁醛-1-13C-M	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	667.6	174.845	1.16215	1638.139	1646.087	2227.366
3-甲基丁醛-1-13C-D	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	654	168.762	1.4064	247.9078	247.9078	203.5861
1-巯基丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> S	613.8	152.071	1.17273	562.5893	841.5749	936.3124
丁醛-M	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	570.5	135.936	1.11175	1726.98	1263.98	1625.98
丁醛-D	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	552.1	129.606	1.2838	1723.98	1626.98	1837.78
二甲基硫醚	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	521.8	119.815	0.96273	3434.447	3462.467	3603.979
二烯丙基二硫化物	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	1079.9	730.124	1.19889	285.3515	118.2221	168.3975
3-壬烯-2-酮	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	1138.6	873.59	1.37181	250.5182	151.2632	128.8039
月桂烯-M	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	998.3	569.085	1.28137	1270.239	1063.583	1481.235
月桂烯-D	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	998	568.626	1.70842	22481.51	19929.14	14789.95
2-戊烯醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	761.5	240.66	0.94414	365.2099	382.5846	401.3543
1-戊烯-3-醇-M	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	682.1	181.53	0.94488	1223.579	1155.54	1069.6
2-甲基-1-丁醇-M	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	728.1	213.145	1.23752	1580.114	1185.171	1319.781
2-甲基-1-丁醇-D	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	728.1	213.145	1.47472	1875.746	1725.898	1728.815
四氢噻吩	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> S	820.2	295.465	1.30119	365.2099	382.5846	401.3543
二甲基三硫醚	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	952.1	476.543	1.30219	839.955	455.9432	473.1421
2-乙酰-3-甲基吡嗪	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O	1087.7	747.851	1.16725	467.2619	666.2816	419.1969
烯丙基甲基硫醚	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> S	696.7	190.11	1.04398	106.0228	106.0228	83.20219
甲基乙基酮-M	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	582	140.029	1.05527	424.4728	1128.746	904.5024
甲基乙基酮-D	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	580.4	139.452	1.26055	1047.097	1053.025	871.7783
戊基甲醇	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	873.6	354.505	1.32501	136.8184	154.4444	211.8865

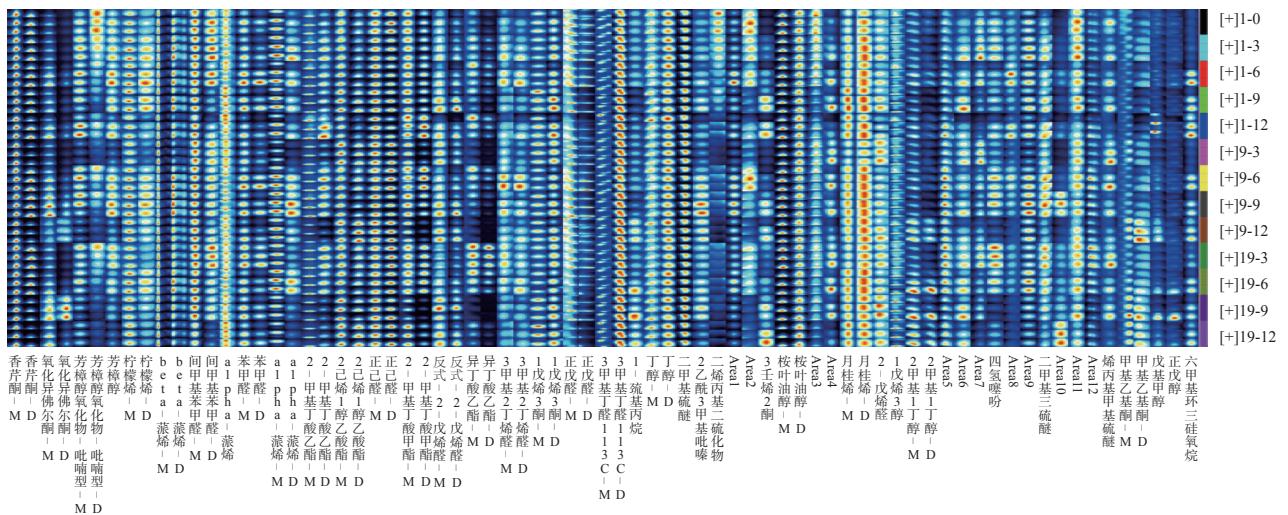


图 4 所有检测的薄荷样品中挥发性有机物的指纹图谱

Fig.4 Fingerprints of volatile organic compounds in all peppermint samples examined

注: 较亮的斑点表示挥发性化合物的浓度较高。M 和 D 分别表示化合物的单体和二聚体。部分风味物质未准确定性, 以阿拉伯数字顺序编号。右侧编号为样品分组以及贮藏天数, 其中 1 为对照组包装材料(采用 HDPE 包装及不气调处理), 9 为 A 组包装材料(采用 HDPE 包装及 3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub> 气调处理), 19 为 B 组包装材料(采用 PE 包装及 7% O<sub>2</sub>+5% CO<sub>2</sub>+86% N<sub>2</sub> 气调处理)。

是 A 组气调包装和其他两种气调包装相比仍保持较高水平。薄荷中醇类物质随着叶片成熟而产生, 随着叶片衰老而增加。芳樟醇是醇类物质中的主要成分, 到贮藏第 9 d 时, A 组气调包装中芳樟醇含量明显小于其余两组, 可见 A 组处理可有效抑制醇类物质的增加。D-香芹酮是薄荷挥发性化合物中主要成分,

到贮藏第 12 d 时, A 组气调包装中 D-香芹酮含量与其余两组相比仍处于较高水平。因此, HDPE 包装及 3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub> 处理可较好地延缓薄荷叶片的衰老, 使叶片挥发性化合物保持较高含量。

## 2.4 包装膜参数及薄荷呼吸速率模型的建立

### 2.4.1 包装膜参数 果蔬的气调包装十分关注包装

材料对 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的渗透性能,包装材料的透气性对气调包装保鲜至关重要<sup>[42]</sup>。对 HDPE 膜测得的实际厚度和相关参数如表 3 所示。从上表可以看出 N<sub>2</sub> 透过率最高,表明在薄荷保鲜的过程中,需要保证 N<sub>2</sub> 最大程度渗出包装,且薄膜的透氧性良好、厚度适中,才能保证薄荷在有氧呼吸的条件下,保持较低的呼吸速率,减少营养成分的损失,达到保鲜效果。

### 2.4.2 呼吸速率模型的建立

**2.4.2.1 薄荷呼吸速率变化的规律** 采用顶空分析仪对薄荷进行气体浓度的测定,袋内 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 含量变化如图 5 所示。在 4℃ 下,由于薄荷的呼吸作用,在贮藏期间袋内的 CO<sub>2</sub> 含量上升, O<sub>2</sub> 含量不断下降,最后在 44 h 左右不再变化。将 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 浓度代入式中,计算得出在密闭系统内薄荷的 CO<sub>2</sub> 生成速率和 O<sub>2</sub> 消耗速率<sup>[43]</sup>,如图 6。由图 6 可以看出,在贮藏开始阶段, O<sub>2</sub> 消耗速率和 CO<sub>2</sub> 的生成速率都呈现下降趋势。实验刚开始 4 h 时, CO<sub>2</sub> 生成速率为 20.8 mL/(kg·h)、O<sub>2</sub> 消耗速率为 19.69 mL/(kg·h)。到 40 h 时 CO<sub>2</sub> 生成速率下降为 9.28 mL/(kg·h),下降 55.38%、O<sub>2</sub> 消耗速率下降为 8.46 mL/(kg·h),下降 57.03%。从 44 h 之后气体生成速率和消耗速率变化都趋于平缓。薄荷的呼吸速率都是先迅速下降后变化缓慢,说明随着贮藏时间增加,薄荷的新鲜程度下降,这可能是由于本实验是在密闭系统中测定薄荷呼吸速率,在密闭容器内,随着放置时间的增加,容

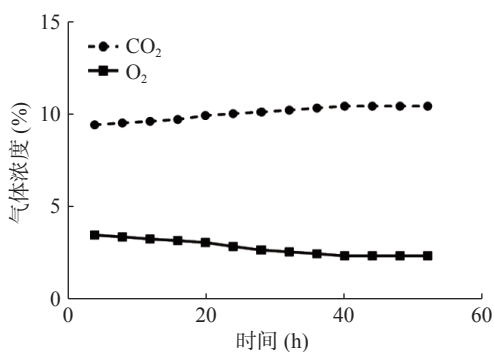


图 5 薄荷在气调包装下气体浓度的变化

Fig.5 Changes of gas concentration of peppermint in modified atmosphere packaging

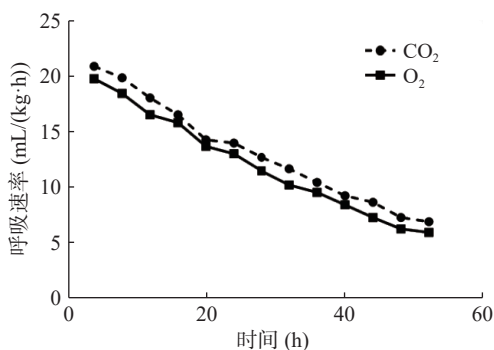


图 6 薄荷在气调包装下呼吸速率的变化

Fig.6 Changes of respiration rate of peppermint in modified atmosphere packaging

器内 O<sub>2</sub> 的含量越来越低, CO<sub>2</sub> 的含量越来越高,高 CO<sub>2</sub> 浓度抑制了薄荷的呼吸作用。

**2.4.2.2 薄荷呼吸速率模型的建立** 利用渗透系统方法<sup>[30]</sup>测量了薄荷的呼吸速率,并运用二次多项式方程方法,对试验结果进行了回归分析,并在现有的果蔬呼吸速率模型的基础上,对其进行了改进,最终拟合出了最优的薄荷呼吸速率模型。表 7 展示了薄荷二次多项式模型的参数估值。

表 7 薄荷二次多项式模型的参数估值

Table 7 Parameter estimation of peppermint quadratic polynomial model

模型类别	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>
O <sub>2</sub> 模型参数	412.0005	13.0514	-462.7276	-1.7657	21.8946	17.1509
CO <sub>2</sub> 模型参数	356.1263	-2.1587	-189.4696	-0.4543	18.5813	8.1089

将实验测量的包装袋中 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的含量的改变,并结合程序计算出的 O<sub>2</sub> 消耗率(R<sub>O<sub>2</sub></sub>)和 CO<sub>2</sub> 生成率(R<sub>CO<sub>2</sub></sub>),运用 Matlab 对其进行了非线性拟合,得出了二次多项式模型的参数估值如下:

$$R_{O_2} = 412.0005 + 13.0514 [O_2] - 462.7276 [CO_2] - 1.7657 [O_2]^2 + 21.8946 [CO_2]^2 + 17.1509 [O_2][CO_2]$$

$$R_{CO_2} = 356.1263 - 2.1587 [O_2] - 189.4696 [CO_2] - 0.4543 [O_2]^2 + 18.5813 [CO_2]^2 + 8.1089 [O_2][CO_2]$$

**2.4.3 呼吸速率模型的验证** 为对比上述模型的预测效果,重新进行薄荷样品贮藏期间气体浓度测定,分别将模型对比实验数据代入相关模型,计算呼吸速率预测值,如图 7 所示。根据气体浓度变化表达式直接计算后,得出计算模型的计算值;根据时间和气体浓度的关系式拟合后,得出多元回归模型的预测值。薄荷贮藏过程 48 h 内,多元回归模型的预测值变化趋势与实验值总体一致,相对误差为 10%~20%,结果表明实验与预测较为吻合。上述研究可为薄荷气调贮藏提供理论依据。

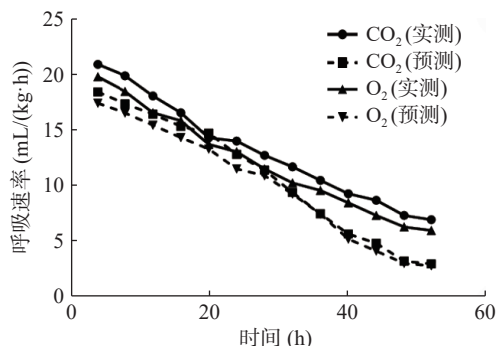


图 7 薄荷呼吸速率模型与实测值比较

Fig.7 Comparison of respiration rate model and measured value of peppermint

## 2.5 不同气调及包装条件对薄荷表面真菌多样性的影响

对贮藏 12 d 不同处理组薄荷表面微生物菌群分析如图 8 所示。子囊菌门和霉菌门是导致薄荷叶片衰老腐烂的腐败菌<sup>[44]</sup>。从图 8 可看出, A 处理组的

子囊菌门(Ascomycota)和被孢霉门(Mortierellomycota)占比明显小于其余两组,如链格孢属(*Alternaria*)和被孢霉属(*Mortierella*),与B组和CK组相比,其相对丰度明显下降。卡恩斯维希尼克氏酵母可在贮藏期内抑制薄荷叶片表面腐败菌的生长,保持薄荷较好感官品质。由图8(B)可看出,A组处理组中卡恩斯维希尼克氏酵母(*Vishniacozyma*)相对丰度高于其余两组。由此可见,HDPE包装及3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub>处理可较好地抑制叶片腐败菌生长,有利于优势菌群的增加,延缓薄荷叶片衰老,对薄荷保鲜有较好的效果。

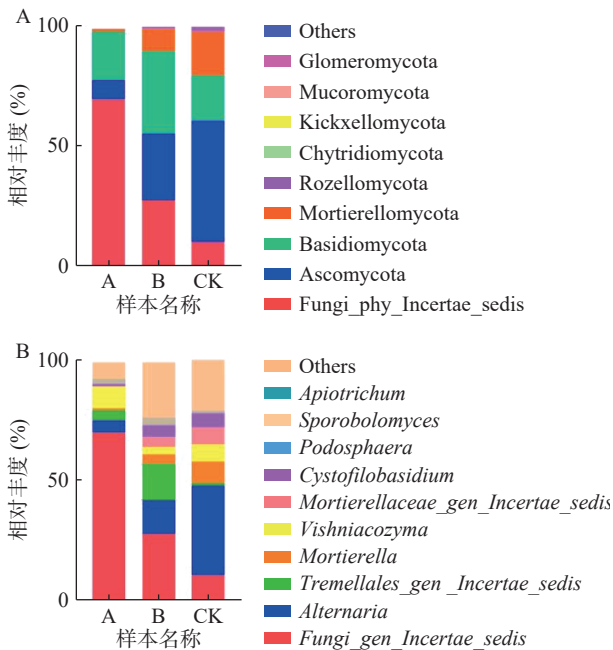


图8 贮藏12 d不同处理薄荷真菌在门(A)和属(B)水平上的物种相对丰度柱形图

Fig.8 Histogram of relative species abundance of menthol fungi at phylum (A) and genus (B) levels under different treatments after 12 days of storage

注: A.采用HDPE包装及3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>+87.1% N<sub>2</sub>气调处理的薄荷样本; B.采用PE包装及7% O<sub>2</sub>+5% CO<sub>2</sub>+86% N<sub>2</sub>气调处理的薄荷样本; CK.采用HDPE包装及不气调处理的薄荷样本。

### 3 结论

本研究通过对薄荷的感官评分、失重率、色差、相对电导率、抗坏血酸含量、总叶绿素含量和菌落总数进行测定和分析,筛选出对薄荷保鲜效果较好的PE、OPP1.8/CPP3.5和HDPE包装材料,并在已筛选出的最适包装材料中,通过响应面优化法在低气体比例范围内(3%~7% O<sub>2</sub>和5%~15% CO<sub>2</sub>),对HDPE包装的薄荷进行气调包装,以叶绿素含量为评价指标,筛选出保鲜效果最好的气体比例3.5% O<sub>2</sub>+9.4% CO<sub>2</sub>。该包装方式可显著降低叶绿素损失,将薄荷的保鲜期由7~9 d延长至10~12 d。利用GC-IMS对最佳气调组和最差气调组贮藏期内薄荷香气成分的含量及变化进行测定,该部分结果表明:薄荷内检出

主要挥发性有机物有61种,主要为萜烯类、醛类、酮类物质,且HDPE包装的薄荷样品在第12 d时挥发性物质含量仍保持在较高水平。基于以上实验建立能够更准确预测气调包装下的薄荷二次多项式呼吸速率模型,并能有效的抑制薄荷叶片表面腐败菌的生长,延缓薄荷腐败,这对于果蔬气调包装的保鲜设计有一定的指导作用,在气调包装中,可以通过合理的气体配比和最佳的包装材料来延长果蔬的保鲜期,也为薄荷气调包装提供理论依据。

© The Author(s) 2024. 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] 周荣, 钟震洪. 薄荷在我国的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2010(9): 93-95. [ZHOU Rong, ZHONG Zhenhong. Research progress of peppermint in China[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010(9): 93-95.]
- [2] CHEY W, CASH B, LACY B, et al. Peppermint oil is highly effective for the treatment of adults with IBS: Results from a self-reported survey[J]. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2022, 122(9S): A22.
- [3] 陈向阳. 薄荷酚类部位化学成分及抗炎活性研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2016. [CHEN Xiangyang. Study on the chemical constituents and anti-inflammatory activity of menthol[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2016.]
- [4] 钱俊臻, 王伯初. 橙皮苷的药理作用研究进展[J]. *天然产物研究与开发*, 2010, 22(1): 176-180. [QIAN Junzhen, WANG Bochun. Research progress on the pharmacological effects of hesperidin[J]. *Research and Development of Natural Products*, 2010, 22(1): 176-180.]
- [5] 陶兴魁, 张兴桃, 王海潮, 等. 薄荷醇对肝癌 HepG2 细胞增殖、迁移及 IL-8, CXCL-12, VEGF 表达的影响[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(21): 60-65. [TAO Xingkui, ZHANG Xingtao, WANG Haichao, et al. Effect of menthol on proliferation, migration and expressions of IL-8, CXCL-12 and VEGF in hepatoma HepG2 cells[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2019, 25(21): 60-65.]
- [6] PAN Rong, TIAN Yuzhen, GAO Ruby, et al. Central mechanisms of menthol-induced analgesia[J]. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 2012, 343(3): 661-672.
- [7] CHEN Si, CHEN Xiangning, FAN Junfeng, et al. iTRAQ proteomics reveals changes in the lettuce (*Lactuca sativa* L. Grand Rapids) proteome related to colour and senescence under modified atmosphere packaging[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2019, 99(4): 1908-1918.
- [8] CAI Jiyang, LU Wuhui, QI Xinkan, et al. Volatile composition changes of fruits in a biopolymer-coated polyethylene active packaging: Effects of modified atmosphere and packaging-shaped bacterial community[J]. *Food Research International*, 2022, 152: 110843.
- [9] 高阳, 康优, 李雪, 等. 紫苏叶复合气调保鲜技术研究[J]. *东北农业科学*, 2017, 42(3): 39-43. [GAO Yang, KANG You, LI Xue, et al. Studies on compound controlled atmosphere technology of perilla leaf storage[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2017, 42(3): 39-43.]

- [10] MAHMOUD F S, REZA A, HOSSEIN M, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the mechanical properties of lettuce during shelf life in cold storage[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2021(4): 8.
- [11] GUO Zhenlong, LIU Huijun, CHEN Xiangning, et al. Modified-atmosphere packaging maintains the quality of postharvest whole lettuce (*Lactuca sativa* L. Grand Rapid) by mediating the dynamic equilibrium of the electron transport chain and protecting mitochondrial structure and function[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 206–213.
- [12] 曾令晋, 李畅, 余晓华, 等. 淀粉/壳聚糖复合保鲜液对草莓保鲜的影响[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(20): 189–193. [ZENG Lingjin, LI Chang, YU Xiaohua, et al. Fresh-keeping effect of starch/chitosan composite fresh-keeping solution on strawberry[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(20): 189–193.]
- [13] 马霞, 李路遥, 程朝辉, 等. 冻干胡萝卜片护色工艺的优化[J]. *食品工业*, 2017, 38(3): 9–13. [MA Xia, LI Luyao, CHENG Zhaohui, et al. Optimization of color protection technology of freeze dried carrot slices[J]. *Food Industry*, 2017, 38(3): 9–13.]
- [14] DU Pengmeng, YUAN Honglun, CHEN Yayu, et al. Identification of key aromatic compounds in basil (*Ocimum* L.) using sensory evaluation, metabolomics and volatilomics analysis[J]. *Metabolites*, 2023, 13(1): 124–131.
- [15] LI M Q, YANG R W, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 32–39.
- [16] YAN Xiaoran, CHENG Meng, WANG Yirong, et al. Evaluation of film packaging containing mesoporous nanosilica and oregano essential oil for postharvest preservation of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 198: 445–455.
- [17] AGUERO M V, PONCE A G, MOREIRA M R, et al. Lettuce quality loss under conditions that favor the wilting phenomenon [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 59(2): 124–131.
- [18] FANG Yujie, WAKISAKA M. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies[J]. *Agriculture*, 2021, 11(10): 1–17.
- [19] DHINDSA R S. Enzymes of glutathione metabolism, oxidation injury, and protein synthesis in *Tortula ruralis*[J]. *Biophysical Journal*, 1978, 188: 210–213.
- [20] DEL-VALLE V, HERNÁNDEZ-MUÑOZ P, GUARDA A, et al. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life[J]. *Food Chemistry*, 2005, 91(4): 751–756.
- [21] 张岩, 卢芳芳, 张海燕, 等. 果蔬自发气调包装中呼吸速率研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7105–7111. [ZHANG Yan, LU Fangfang, ZHANG Haiyan, et al. Research progress on respiratory rate in spontaneous modified atmosphere packaging of fruits and vegetables[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(18): 7105–7111.]
- [22] 陈思, 陈湘宁, 许丽, 等. 包装材料及气调贮藏对薄荷保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(4): 136–139. [CHEN Si, CHEN Xiangning, XU Li, et al. Effect of packing materials and air conditioning storage on freshness of mint[J]. *Food and Machinery*, 2018, 34(4): 136–139.]
- [23] 张乐, 张雅, 史冠莹, 等. GC-IMS 结合化学计量学分析 8 个产区香椿挥发性成分差异[J]. *食品科学*, 2022, 43(22): 301–308. [ZHANG Le, ZHANG Ya, SHI Guanying, et al. Differences in volatile organic compounds of *Toona sinensis* from eight production regions analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics[J]. *Food Science*, 2022, 43(22): 301–308.]
- [24] 潘新春. 不同包装形式对 4 种黄桃罐头品质和香气成分的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015. [PAN Xinchun. Study on the effects of different packaging forms on the quality and aroma components of 4 kinds of canned yellow peaches[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.]
- [25] FONSECA S C, OLIVEIRA F A R, BRECHT J K. Modeling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(2): 99–119.
- [26] FISHMAN S, RODOV V, PERETZ J, et al. Model for gas exchange dynamics in modified-atmosphere packages of fruits and vegetables[J]. *Journal of Food Science*, 1995, 60(5): 1078–1083.
- [27] 张瑞宇. 食品 MAP 保鲜原理与实用分析[J]. *粮油加工与食品机械*, 2002(8): 27–30. [ZHANG Ruiyu. Principle and practical analysis of food MAP preservation[J]. *Grain and Oil Processing and Food Machinery*, 2002(8): 27–30.]
- [28] THAKUR R R, MANGARAJ S. Development of an innovative mathematical model to design an active modified atmosphere storage system for mango (cv. Amrapali) [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 45(1): e13921.1–e13921.15.
- [29] 麦馨允. 杨桃气调包装呼吸速率模型与品质变化的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2013. [MAI Xinyun. Study on respiration rate model and quality change of star fruit air-conditioned packaging[D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2013.]
- [30] MARNI H, FAHMY K, HASAN A, et al. Modelling respiration rate of chili for development of modified atmosphere packaging[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 515(1): 012032.
- [31] MPHABLELE R R, FAWOLE O A, OPARA U L. Influence of packaging system and long term storage on physiological attributes, biochemical quality, volatile composition and antioxidant properties of pomegranate fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 211: 140–151.
- [32] 张悦, 李安, 潘立刚, 等. 1-甲基环丙烯结合植酸处理对菠菜保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 231–238. [ZHANG Yue, LI An, PAN Ligang, et al. Effects of combined treatment with 1-methylcyclopropene and phytic acid on quality preservation of spinach[J]. *Food Science*, 2023, 44(1): 231–238.]
- [33] WANG Qing, DING Tian, ZUO Jinhua, et al. Amelioration of postharvest chilling injury in sweet pepper by glycine betaine[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 112: 114–120.
- [34] 赵洁, 梁水连, 刘雯雯, 等. 不同保鲜包装方式对菜心品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(7): 343–351. [ZHAO Jie, LIANG Shuilian, LIU Wenwen, et al. Effects of different packaging methods for preservation on the quality of Chinese flowering cabbages[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(7): 343–351.]
- [35] 黄方, 唐杰, 黄敏, 等. 低温结合气调包装对荔枝保鲜作用[J]. *食品工业*, 2022, 43(10): 51–55. [HUANG Fang, TANG Jie, HUANG Min, et al. Preservation effect of low temperature combined with modified atmosphere packaging of litchi[J]. *Food Industry*, 2022, 43(10): 51–55.]
- [36] 周俞含, 吴姍鸿, 骆佳, 等. 泡沫箱结合薄膜包装对小白菜保鲜效果的影响[J]. *包装工程*, 2023, 44(15): 52–59. [ZHOU Yuhang, WU Shanhong, LUO Jia, et al. Effect of foam box com-

- bined with film packaging on preservation of Chinese cabbage[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(15): 52–59. ]
- [ 37 ] 王佳, 李绍波, 陈春皓, 等. 果箱包装结构对苹果损伤特性的影响[J]. *包装与食品机械*, 2023, 41(1): 48–54. [ WANG Jia, LI Shaobo, CHEN Chunhao, et al. Effect of fruit box packing structure on damage characteristics of apple[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2023, 41(1): 48–54. ]
- [ 38 ] OLIVEIRA A, CASTRO M P, AMARO L A, et al. Optimization of temperature, relative humidity and storage time before and after packaging of baby spinach leaves using response surface methodology[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(12): 145–155.
- [ 39 ] PATEL G B, SHAH K R, SHINDHAL T, et al. Process parameter studies by central composite design of response surface methodology for lipase activity of newly obtained *Actinomyces*[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23(5): 101724.
- [ 40 ] 张欣瑶. 不同包装方式对薄荷香气成分影响的研究[J]. *现代食品*, 2018(22): 155–161. [ ZHANG Xinyao. Study on the influence of different packaging methods on the aroma components of peppermint[J]. *Process Technology*, 2018(22): 155–161. ]
- [ 41 ] HECK JR K L, VAN BELLE G, SIMBERLOFF D. Explicit calculation of the rarefaction diversity measurement and the determination of sufficient sample size[J]. *Ecology*, 1975, 56(6): 1459–1461.
- [ 42 ] 刘萌, 郭风军, 王美兰, 等. 蓝莓呼吸速率的测定及模型表征[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(14): 10–13. [ LIU Meng, GUO Fengjun, WANG Meilan, et al. Determination and characterization of respiration rate for blueberries[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(14): 10–13. ]
- [ 43 ] KEMP P F, ALLER J Y. Bacterial diversity in aquatic and other environments: What 16S rDNA libraries can tell us[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 47(2): 161–177.
- [ 44 ] 李成, 孔晓雪, 余炬波, 等. 基于高通量测序分析蟹糊微生物菌群多样性[J]. *食品科学*, 2020, 41(4): 134–139. [ LI Cheng, KONG Xiaoxue, YU Jubo, et al. Analysis of microbial community diversity of crab paste by high-throughput sequencing[J]. *Food Science*, 2020, 41(4): 134–139. ]