

# 中温联合二甲基二碳酸盐对荔枝原汁品质的影响

李镜浩<sup>1,2</sup>, 肖更生<sup>2</sup>, 徐玉娟<sup>1,3</sup>, 吴继军<sup>1</sup>, 余元善<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 邹波<sup>1\*</sup>, 徐庆<sup>4</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510631) (3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 广东茂名 525000) (4. 广东智能灌装科技有限公司, 广东佛山 528100)

**摘要:** 该研究比较了二甲基二碳酸盐 (Dimethyl Dicarbonate, DMDC)、中温及两者联合处理对荔枝原汁微生物及理化指标的影响。结果表明: 荔枝原汁经 DMDC 或中温单独处理灭菌效果较差, 联合处理组残留微生物最少, 菌落总数、乳酸菌分别为 0.41、0.36 lg CFU/mL, 酵母菌和霉菌未检出; 与新鲜荔枝汁相比, DMDC 处理对荔枝原汁品质无影响, 中温及联合处理组抗坏血酸和色泽无明显变化, 总酚 (总黄酮) 分别增加了 40.16% (7.16%)、38.01% (4.35%); 铁离子还原能力 (清除 DPPH 自由基能力) 分别提高了 15.55% (11.85%)、7.61% (3.71%), 说明中温能促进酚类物质的释放, 提高抗氧化活性。相关性分析显示, 荔枝原汁的  $\Delta E$  与 Vc 呈负相关, 抗氧化活性与总酚、总黄酮呈正相关; 聚类热图分析与感官评价表明, 联合处理能促进风味物质的释放, 且不会造成明显的蒸煮味; 联合处理组在 4 °C 贮藏 21 d 的菌落总数均小于 100 CFU/mL。综上, 中温联合 DMDC 处理对荔枝原汁微生物有较好的灭菌效果, 且对品质无不良影响, 4 °C 贮藏期可达 21 d, 该研究为高品质荔枝原汁产业化提供了科学依据。

**关键词:** 荔枝原汁; 中温处理; 二甲基二碳酸盐; 品质变化; 风味

文章编号: 1673-9078(2023)09-233-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.9.1052

## Effects of Mild Heat Combined with Dimethyl Dicarbonate on the Quality of Litchi Juice

LI Jinghao<sup>1,2</sup>, XIAO Gengsheng<sup>2</sup>, XU Yujuan<sup>1,3</sup>, WU Jijun<sup>1</sup>, YU Yuanshan<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, ZOU Bo<sup>1\*</sup>, XU Qing<sup>4</sup>

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. College of Food Science and Technology, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510631, China) (3. Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming 525000, China) (4. Guangdong Intelligent Filling Technology Limited Company, Foshan 528100, China)

**Abstract:** The effects of dimethyl dicarbonate (DMDC), mild heat and their combination on the microorganisms and physicochemical indices of litchi juice were compared. The results showed that the sterilization effect of DMDC alone or mild heat alone was poor, whilst the number of residual microorganisms in the litchi juice treated by the combination was the lowest, with the total number of colonies and lactic acid bacteria being 0.41 and 0.36 lg CFU/mL, respectively, and no yeast and mold being detected. Compared to fresh litchi juice, DMDC treatment had no effect on the quality of Litchi juice, and the changes in ascorbic acid content and color of the mild heat alone group and the combined treatment group were insignificant, causing the increases in the total phenolics (total flavonoids) by 40.16% (7.16%) and 38.01% (4.35%),

引文格式:

李镜浩,肖更生,徐玉娟,等.中温联合二甲基二碳酸盐对荔枝原汁品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(9):233-243

LI Jinghao, XIAO Gengsheng, XU Yujuan, et al. Effects of mild heat combined with dimethyl dicarbonate on the quality of litchi juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 233-243

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B0202010004); 广州市重点领域研发计划项目 (202206010123); 广东省级农业科技创新及推广项目 (2021KJ107); 茂名实验室自主科研项目 (2021ZZ002); 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室开放基金课题; 广东省农业科学院“十四五”农业优势产业学科团队 (202109TD)

作者简介: 李镜浩 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 214016387@qq.com

通讯作者: 邹波 (1986-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: skzoubo@163.com

respectively, and increases in the ferric ion reducing antioxidant power (DPPH free radical scavenging ability) by 15.55% (11.85%) and 7.61% (3.71%), respectively. These results indicated that mild heat could promote the release of phenolics and improve the antioxidant activity. Correlation analysis showed that the  $\Delta E$  of litchi juice was negatively correlated with Vc content, and the antioxidant activity was positively correlated with the contents of total phenolics and total flavonoids. Cluster heat map analysis and sensory evaluation revealed that the combined treatment could promote the release of flavor substances without causing a pronounced cooking flavor. The total number of colonies in the combined treatment group stored at 4 °C for 21 days was less than 100 CFU/mL. In conclusion, the combination of mild heat and DMDC treatment led to a good sterilization effect on the microorganisms in the litchi juice without causing adverse effects, and the shelf life of the juice was up to 21 d. This study provides a scientific basis for the industrialization of high-quality litchi juice.

**Key words:** litchi juice; mild heat; dimethyl dicarbonate; quality change; flavor

近年来,随着喜茶、奈雪的茶、蜜雪冰城等新式果茶的快速崛起,行业对高品质水果原汁等中间原料的需求迅速增加。荔枝香气浓郁,酸甜可口,但对热极为敏感。传统热杀菌处理尽管能大大延长果汁的保质期,但容易破坏产品的色、香、味、以及功能和营养成分,使其失去原有的新鲜度,甚至产生异味,严重影响产品品质<sup>[1]</sup>。因此,寻求替代传统热杀菌的加工方法对保持荔枝原汁品质具有重要意义。为避免热杀菌对荔枝原汁品质的破坏,冷冻荔枝原汁应运而生。冷冻荔枝原汁是荔枝经榨汁后直接冷冻,存在一定的微生物超标等安全问题。高静水压(High Hydrostatic Pressure, HHP)杀菌技术是一种较为成熟的非热杀菌方法,可极大程度保持荔枝原汁的品质,但设备价格昂贵,前期投资大,后期维护成本也高。

二甲基二碳酸盐(Dimethyl Dicarbonate, DMDC,又名维果灵)是我国食品添加剂使用标准中允许使用(最大限量为250 mg/L)的一种果汁饮料防腐剂<sup>[2]</sup>。它在水中极易发生分解,生成微量的甲醇和二氧化碳,不会对人体产生危害<sup>[3]</sup>;果汁温度越高,DMDC分解速度越快<sup>[4]</sup>,在常温甚至低温下,DMDC对很多污染菌具有较强的杀灭能力,其灭活机理是通过亲和基团与微生物中的关键酶相互作用,因此,这是一种很有市场潜力的非热杀菌方法<sup>[5-7]</sup>。前期研究<sup>[7]</sup>发现,DMDC对荔枝原汁中微生物具有一定的灭活效果,但也存在肠膜明串珠菌和芽孢杆菌等对DMDC具有较强耐受性的菌株。在新鲜荔枝原汁中单独使用DMDC杀菌贮藏期很短,无法满足产业化发展需求。

据此推测,将荔枝汁先进行中温预处理,再加入DMDC杀菌,可能会提高DMDC的杀菌效果,保持较好的果汁(荔枝汁)品质。因此,本文研究了中温和DMDC单独处理以及联合处理对荔枝原汁的杀菌效果,并比较了不同处理前后荔枝原汁的理化品质和风味成分,以及在4 °C贮藏期间微生物的变化,为高品质荔枝原汁加工提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

本实验所用荔枝品种,淮枝广州水果批发市场采购所得;二甲基二碳酸盐(DMDC)、没食子酸、芦丁、福林酚试剂、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH),上海源叶生物科技有限公司;PCA琼脂、孟加拉红琼脂、MRS琼脂,广东环凯微生物科技有限公司;维生素E衍生物(Trolox),梯希爱化成工业发展有限公司;亚硝酸钠、硝酸铝、偏磷酸、氢氧化钠,天津市科密欧化学试剂有限公司;磷酸氢二铵、三氯乙酸、铁氰化钾,天津市福晨化学试剂有限公司;己酸乙酯, Sigma-Aldrich公司;三氯化铁,天津市大茂化学试剂厂;正构烷烃C7-C40, LGC公司。

### 1.2 主要仪器设备

WF-A2000榨汁机,美的有限公司;SPX-250B-Z型生化培养箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;厌氧培养箱,上海跃进医疗器械有限公司;SW-CJ-2FD型无菌操作台,苏州安泰空气技术有限公司;TD6台式自动平衡离心机,长沙湘智离心机仪器有限公司;TGL16A高速冷冻离心机,德国 eppendorf公司;LC-20AT高效液相色谱,日本岛津公司;UV-1800紫外可见分光光度计,日本岛津公司;6890N/5975B型气相色谱质谱联用仪,美国安捷伦科技有限公司;57060-U固相微萃取手动进样器、50/30 μm DVB/CAR/PDMS型固相微萃取纤维头,美国 SUPELCO公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 荔枝原汁制备

新鲜荔枝(品种为淮枝),手动剥壳去核后用榨汁机榨汁,然后用300目滤布过滤得荔枝原汁,分装后置于-20 °C冰箱保存待用。

### 1.3.2 荔枝原汁杀菌条件的确定

每次取等量的 5 mL 荔枝原汁, 在不同温度 (55~65 °C)、时间 (15~300 s) 进行预处理, 测定样品褐变率<sup>[8]</sup>和静置分层率<sup>[9]</sup>, 初步筛选中温杀菌参数。

中温处理: 取 25 mL 荔枝原汁置于 50 mL 无菌玻璃瓶中, 密封, 置于 55、60、65 °C 水浴震荡 15 s 和 30 s; DMDC 处理: 向荔枝原汁中添加不同浓度的 DMDC (50、100、150、200、250 mg/kg), 迅速密封好, 混匀静置; 联合处理: 荔枝原汁置于 60 °C 水浴处理 30 s 后转移至超净工作台, 开封后添加 250 mg/L 的 DMDC, 然后密封, 混匀静置。

### 1.3.3 微生物的测定

微生物检测: DMDC 组及联合处理组在室温条件下, 超净工作台放置 4 h 取样检测, 此时 DMDC 分解较完全, 且微生物数量达到相对稳定状态。联合处理组于 4 °C 贮藏 0、14、21 d 后取样检测。菌落总数参照 GB 4789.2-2016 食品安全国家标准进行测定, 酵母菌和霉菌参照 GB 4789.15-2016 食品安全国家标准进行测定, 乳酸菌参照 GB 4789.35-2016 食品安全国家标准进行测定。

### 1.3.4 总酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[10]</sup>测定总酚含量, 总酚含量以 1 L 样品中含有的没食子酸毫克当量 (mg/L) 表示。

### 1.3.5 总黄酮含量的测定

总黄酮的测定参考王丹等<sup>[11]</sup>, 将芦丁标准品稀释到不同浓度, 如上操作测定其吸光值, 其浓度和吸光值作曲线即为黄酮含量测定的标准曲线, 结果以 (mg/L) 表示。

### 1.3.6 抗坏血酸含量的测定

采用高效液相色谱进行测定<sup>[12]</sup>。

### 1.3.7 抗氧化活性的测定

DPPH 自由基清除能力参考邹颖等<sup>[13]</sup>的方法。Ferric Reducing Antioxidant Potential (FRAP) 抗氧化能力参考董丽红等<sup>[14]</sup>方法。均以 Trolox 为标准品, 测定不同质量浓度的 Trolox 对 DPPH 自由基的清除率和铁离子还原能力, 绘制标准曲线, 样品清除 DPPH 自由基能力以 (mg/L) 表示, FRAP 以 (mmol/L) 表示。

### 1.3.8 色泽的测定

采用 UltraScan VIS 型全自动色差进行测定, 以未处理的荔枝原汁为参比样, 色差结果以  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  和  $\Delta E$  表示, 计算如式 1。

$$\Delta E = \sqrt{(a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2 + (L^* - L_0^*)^2} \quad (1)$$

式中:

$\Delta E$ ——试验样品的色泽变化程度,  $\Delta E$  值越小, 表示颜色

变化越小;

$a^*$ 、 $b^*$ 、 $L^*$ ——处理后的测定值,  $L^*$  值表示亮度,  $L^*$  值越大, 亮度越大;  $a^*$  值表示有色物质的红绿偏向, 正值越大, 偏向红色的程度越大, 负值绝对值越大, 偏向绿色的程度越大。  $b^*$  值表示有色物质的黄蓝偏向, 正值越大, 偏向黄色的程度越大, 负值绝对值越大, 偏向蓝色的程度越大;

$a_0^*$ 、 $b_0^*$ 、 $L_0^*$ ——处理前的初始值。

色度  $c$  通过 Agnelli 等<sup>[15]</sup>定义, 色度值  $c$  越高, 人类感知的颜色强度也就越高, 计算如式 2。

$$c = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

褐变指数 (BI) 通过以下公式 3 计算<sup>[16,17]</sup>:

$$BI = 581.395 \left[ \left( \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \right) - 0.31 \right] \quad (3)$$

### 1.3.9 荔枝原汁风味成分测定

准确称取 6 g 荔枝原汁于顶空萃取瓶中, 加入 2 g 氯化钠及磁力搅拌转子, 40 °C 水浴平衡 10 min, 然后采用三相固相微萃取探头顶空萃取 30 min。GC-MS 条件参考 An 等的<sup>[18]</sup>方法进行。利用 NIST 标准谱库自动检索各组分的保留时间、质谱匹配度  $\geq 90\%$ 、计算保留指数 (Retention Index, RI) 来辅助质谱检索定性。利用质谱信息与标准信息库 NIST 进行比对; 使用 C7-C40 的系列正构烷烃计算各挥发性成分的保留指数, 利用正构系列烷烃混合标样 C7-C40 并计算待测物质 LRI (Linear Retention Index), 公式 4 如下:

$$LRI = 100N + 100n(t_{Ra} - t_{RN}) / (t_{R(N+n)} - t_{RN}) \quad (4)$$

式中:

$LRI$ ——线性保留指数;

$N$ ——色谱图中位于目标物质左侧正构烷烃的碳原子数,

$n$ ——位于目标物质两侧的正构烷烃的碳分子数之差,

$t_{Ra}$ 、 $t_{RN}$  和  $t_{R(N+n)}$ ——分别是色谱图中待测物质, 待测物质左侧和右侧正构烷烃的保留时间。

采用内标 (己酸乙酯) 法进行定量分析<sup>[18]</sup>。

### 1.3.10 不同处理前后荔枝原汁的感官评价

参照 Pang 等<sup>[19]</sup>的方法, 采用 5 点强度法对三种处理前后荔枝汁整体香气特征 (总强度及各香气强度) 进行定量评价 (0=几乎无香味, 5=香味很强)。评价小组由年龄在 22~28 岁之间 4 男 6 女共 10 名成员组成。样品预处理、呈送和评价环境信息如下: 准确量取 40 mL 样品置于 125 mL 嗅闻瓶中, 用铝箔纸包裹 (避免视觉效果引入的误差) 并随机三位数字编号后呈送给感官评价室 (25±1) °C 的每个评价员, 评价员以各属性标准品的香气强度为标尺, 采取鼻前嗅闻对样品进行评价。评价重复进行三次, 两次评价中间设置休息时间 10 min。取其平均值绘制香气轮廓雷达图。

1.3.11 数据分析

Origin 8.5、R 语言软件对实验数据进行统计分析和图形绘制。

以上测定均重复 3 次，用 SPSS 23.0 和 Excel、

表 1 香气特征感官描述词

Table 1 Aroma descriptors, reference standard for flavor profile test

香气属性	定义	参比实物 <sup>a</sup>	参比强度值
水果香	与新鲜成熟水果相关联的混合香气	3-辛酮	3
甜香	与蜂蜜、焦糖和棉花糖关联的香气	乙酸异戊酯	3
花香	与玫瑰、月季等关联香气	芳樟醇	3
青瓜味	与黄瓜西瓜等相关联的清新香气	反-2-壬烯醛	3
青草香	与新鲜切割青草相关的气味	苯乙醛	3
柑橘香	与柑橘皮等相关的气味	壬醛	3
蒸煮味	与蒸煮鸡蛋或土豆相关联的不良气味	甲硫基丙醛	3

注：<sup>a</sup>样品盛装于 125 mL 嗅闻瓶中。

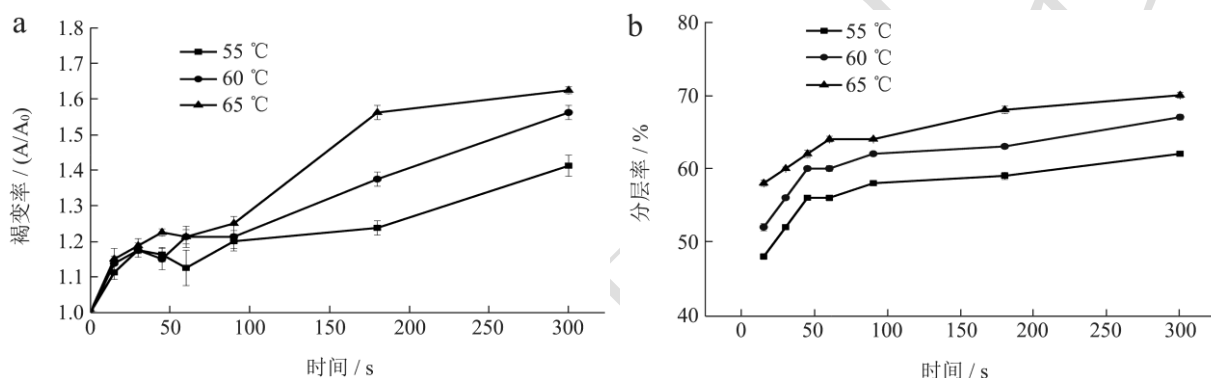


图 1 不同温度时间处理对荔枝原汁褐变率 (a) 和分层率 (b) 的影响

Fig.1 Effects of different temperature and time treatments of litchi juice (a) browning rate, (b) stratification rate

表 2 不同浓度 DMDC 处理对荔枝原汁微生物的影响 (lg CFU/mL)

Table 2 The effect of different concentrations of DMDC on the microorganisms of litchi juice (lg CFU/mL)

DMDC 浓度/(mg/kg)	菌落总数	酵母菌数	霉菌数	乳酸菌数
新鲜荔枝原汁	4.48±0.11 <sup>a</sup>	2.56±0.10 <sup>a</sup>	1.90±0.09 <sup>a</sup>	3.65±0.15 <sup>a</sup>
50	2.80±0.07 <sup>b</sup>	1.60±0.11 <sup>b</sup>	1.03±0.11 <sup>b</sup>	1.69±0.06 <sup>b</sup>
100	2.69±0.13 <sup>b</sup>	1.44±0.07 <sup>c</sup>	1.00±0.11 <sup>b</sup>	1.30±0.02 <sup>c</sup>
150	2.60±0.07 <sup>b</sup>	1.30±0.03 <sup>c</sup>	1.10±0.06 <sup>b</sup>	1.22±0.03 <sup>c</sup>
200	2.46±0.06 <sup>bc</sup>	1.18±0.03 <sup>d</sup>	N.D.	1.04±0.26 <sup>d</sup>
250	2.17±0.06 <sup>c</sup>	N.D.	N.D.	1.00±0.08 <sup>d</sup>

注：重复次数 n=3，同一列不同字母表示有显著性差异 (P<0.05)，N.D 未检测出。下表同。

表 3 不同温度和时间处理对荔枝原汁微生物的影响 (lg CFU/mL)

Table 3 Effects of different temperature and time treatments on the microorganisms of litchi juice (lg CFU/mL)

处理组	菌落总数	酵母菌数	霉菌数	乳酸菌数
新鲜荔枝原汁	4.48±0.11 <sup>a</sup>	2.56±0.10 <sup>c</sup>	1.90±0.09 <sup>b</sup>	3.65±0.15 <sup>a</sup>
55 °C+15 s	3.71±0.08 <sup>b</sup>	2.74±0.06 <sup>b</sup>	2.18±0.05 <sup>a</sup>	3.41±0.13 <sup>a</sup>
55 °C+30 s	3.60±0.05 <sup>b</sup>	2.81±0.06 <sup>a</sup>	1.40±0.07 <sup>c</sup>	3.23±0.11 <sup>b</sup>
60 °C+15 s	2.84±0.10 <sup>c</sup>	2.49±0.04 <sup>c</sup>	2.24±0.05 <sup>a</sup>	2.44±0.07 <sup>c</sup>
60 °C+30 s	2.30±0.08 <sup>d</sup>	1.90±0.05 <sup>d</sup>	1.40±0.09 <sup>c</sup>	2.16±0.06 <sup>c</sup>
65 °C+15 s	2.18±0.05 <sup>d</sup>	1.94±0.07 <sup>d</sup>	1.38±0.12 <sup>c</sup>	1.60±0.10 <sup>d</sup>
65 °C+30 s	1.91±0.06 <sup>e</sup>	1.75±0.10 <sup>e</sup>	1.20±0.04 <sup>d</sup>	1.70±0.06 <sup>d</sup>

表4 联合处理对荔枝原汁微生物的影响 (lg CFU/mL)

Table 4 The effect of combined treatment on the microorganisms of lychee juice (lg CFU/mL)

处理组	菌落总数	酵母菌数	霉菌数	乳酸菌数
新鲜荔枝原汁	4.48±0.11 <sup>a</sup>	2.56±0.10 <sup>a</sup>	1.90±0.09 <sup>a</sup>	3.65±0.15 <sup>a</sup>
55 °C+15 s/DMDC	3.10±0.13 <sup>b</sup>	1.85±0.12 <sup>b</sup>	1.78±0.05 <sup>b</sup>	2.23±0.13 <sup>b</sup>
55 °C+30 s/DMDC	2.88±0.08 <sup>c</sup>	1.74±0.13 <sup>b</sup>	1.80±0.05 <sup>b</sup>	2.11±0.08 <sup>b</sup>
60 °C+15 s/DMDC	1.55±0.05 <sup>d</sup>	1.40±0.05 <sup>c</sup>	1.08±0.08 <sup>c</sup>	0.85±0.03 <sup>c</sup>
60 °C+30 s/DMDC	0.41±0.09 <sup>e</sup>	N.D.	N.D.	0.36±0.08 <sup>d</sup>

注: 表中 DMDC 质量浓度为 250 mg/mL。

## 2 结果与讨论

### 2.1 荔枝原汁杀菌条件的确定

由图 1a 可知新鲜荔枝原汁褐变率随着温度的升高、热处理时间的延长呈逐渐增加趋势, 65 °C 时果汁褐变程度较为严重; 图 1b 中显示不同热处理温度时间下果汁果肉分层现象, 热处理的荔枝汁均会出现分层和沉淀现象, 静置分层率其值越小, 说明果汁稳定性越好。其中中温处理 1 min 内分层率出现显著上升, 1~5 min 后上升趋势较缓。为尽量减少热处理对荔枝原汁品质的影响, 综合褐变度、外观和沉淀分层情况, 挑选 15、30 s 处理进行后续实验探究。

由表 2 可知, DMDC 浓度越高, 在荔枝原汁中杀菌效果越明显, 添加量为 250 mg/kg 时, 荔枝原汁中菌落总数和乳酸菌分别下降了 2.31、2.65 lg CFU/mL, 酵母菌和霉菌未检出, 不能达到完全灭菌的效果, 可能与荔枝中芽孢杆菌属和肠膜明串珠菌属具有较强的耐受性有关<sup>[20]</sup>。

由表 3 可知, 温度越高, 处理时间越长, 荔枝原汁残留微生物越少, 其中的菌落总数、酵母菌、霉菌和乳酸菌分别下降了 2.57、0.81、0.70、1.95 lg CFU/mL, 但是在 65 °C 处理 15、30 s 时, 荔枝原汁出现了较严重的蒸煮味、褐变、果肉絮凝、分层的现象, 这跟万鹏等<sup>[21]</sup>研究高温热处理荔枝汁结果类似。

由表 4 可知, 新鲜荔枝原汁经中温联合 DMDC 处理后, 菌落总数、乳酸菌数、霉菌和酵母菌数均有显著性下降 ( $P < 0.05$ ), 其中 60 °C+30 s/DMDC 组杀菌效果最为明显, 酵母菌和霉菌未检测出, 但仍然残留微量的菌落总数和乳酸菌。可以看出联合处理后的荔枝原汁符合国标 GB 7101-2015 的要求<sup>[22]</sup>, 且杀菌效果明显好于单独处理的 DMDC 组和中温处理组。但综合新鲜荔枝原汁外观、沉淀分层情况, 确定荔枝原汁中温联合 DMDC 处理条件为 60 °C+30 s/DMDC 组来进一步探究理化和风味指标。

### 2.2 总酚、总黄酮、抗坏血酸含量的变化

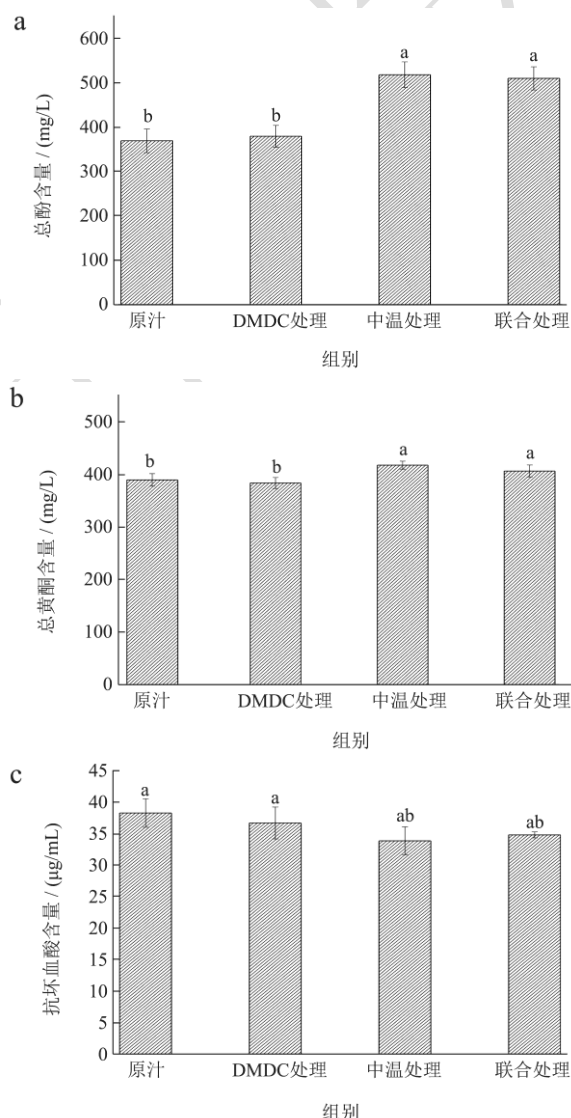


图2 不同处理对荔枝原汁 (a) 总酚、(b) 总黄酮、(c) 抗坏血酸含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the contents of lychee juice (a) total phenols, (b) total flavonoids, (c) ascorbic acid

注: 图中所标小写字母表示有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

由图 2a 可知, 未处理荔枝原汁中的总酚 (Total

Phenols) 含量为 371 mg/L, DMDC 处理对荔枝原汁总酚含量无显著影响, 而中温处理组和联合处理组分别增加了 40.16%、38.01%。有研究表明, 荔枝汁经过热处理后, 总酚含量增加, 原因可能是较高温度促进植物组织细胞破碎和共价键的断裂, 促进更多单体和二聚体酚类物质等的释放<sup>[23-26]</sup>。王丹等<sup>[11]</sup>制备了巴氏杀菌和高温灭菌荔枝汁, 与新鲜荔枝汁相比, 其总酚含量分别增加了 5.32%、62.02%, 本研究结果与之类似。

由图 2b 可知, 未处理原汁中的总黄酮 (Total Flavonoids) 含量为 391 mg/L, DMDC 处理对总黄酮含量无显著影响, 中温处理组和联合处理组则增加了 7.16%、4.35%, 总黄酮含量的变化与总酚类似。有研究表明, 俊红荔枝汁经过 121 °C 高温灭菌后立即测定其总黄酮含量, 与 0 h 的荔枝原汁和巴氏杀菌荔枝汁相比, 分别增加了 17.36%、16.86%<sup>[11]</sup>。此外, 在 90 °C 热处理后, 果汁-大豆饮料的总黄酮含量增加了 61.54%<sup>[27]</sup>, 因此, 热处理可能对酚酸和黄酮物质的释放具有促进作用。

由图 2c 可知, 未处理原汁中的抗坏血酸 (Vc) 含量为 38.40 μg/mL, 三种处理方式对荔枝原汁无显著性影响。研究表明, 抗坏血酸几乎不与 DMDC 发生反应, 但在较高温和有氧气的条件下易降解<sup>[7]</sup>。徐玉娟等<sup>[28]</sup>研究表明, 荔枝汁 (淮枝) 采用 108 °C 处理 30 s, 其维生素 C 损失达到 93% 左右。而我们采用的中温以及联合处理, 温度较低、时间短, 对新鲜荔枝原汁抗坏血酸的含量影响较小。

### 2.3 抗氧化能力的变化

本研究选用了 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 来

评价不同处理前后的荔枝原汁抗氧化活性变化。由图 3 可知, 与未处理组相比, DMDC 处理组的 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 无显著变化。Yu 等<sup>[29]</sup>研究表明, 与热处理相比, DMDC 处理的荔枝汁颜色、风味较好, 保留了总酚和抗氧化能力, 更好地保证果汁的品质, 这与本研究结果类似。中温处理组和联合处理组 FRAP 与未处理组相比显著性提高了 15.55%、11.85%, 清除 DPPH 自由基能力显著性提高了 7.61%、3.71%, 这与上述总酚、总黄酮含量趋势类似, 王丹等<sup>[11]</sup>研究表明热处理可能破坏细胞壁, 从荔枝汁中不溶性部分释放结合态多酚等抗氧化物质; 同时加热可能导致部分多酚水解为小分子的酚酸, 这些产物具有不同抗氧化能力。本研究显示, 联合处理不会降低荔枝原汁的抗氧化活性。

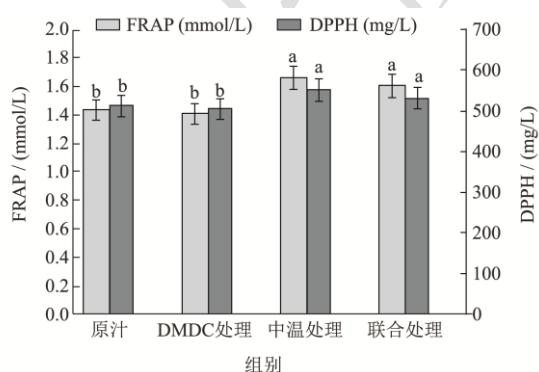


图3 不同处理对荔枝原汁清除DPPH自由基能力和FRAP铁还原能力的影响

Fig.3 Effects of different treatments on DPPH free radical scavenging ability and FRAP iron reducing ability of litchi juice

### 2.4 色泽的变化

表5 不同处理对荔枝原汁色泽的影响

Table 5 The influence of different treatments on the color difference of lychee juice

样品	L*	a*	b*	ΔE	c	BI
新鲜荔枝原汁	36.32±0.05 <sup>a</sup>	-0.14±0.06 <sup>a</sup>	-1.21±0.02 <sup>c</sup>	-	1.21±0.08 <sup>a</sup>	-3.41±0.04 <sup>c</sup>
DMDC	36.18±0.16 <sup>a</sup>	-0.30±0.09 <sup>b</sup>	-1.12±0.03 <sup>c</sup>	0.29±0.06 <sup>c</sup>	1.16±0.09 <sup>a</sup>	-3.51±0.10 <sup>c</sup>
中温处理	35.82±0.06 <sup>b</sup>	-0.23±0.04 <sup>ab</sup>	-0.66±0.10 <sup>a</sup>	0.69±0.04 <sup>a</sup>	0.70±0.05 <sup>c</sup>	-2.20±0.13 <sup>a</sup>
联合处理	35.97±0.08 <sup>b</sup>	-0.18±0.03 <sup>ab</sup>	-0.87±0.10 <sup>b</sup>	0.50±0.10 <sup>b</sup>	0.89±0.10 <sup>b</sup>	-2.64±0.06 <sup>b</sup>

表6 联合处理对荔枝原汁贮藏期微生物的影响 (lg CFU/mL)

Table 6 Effects of combined treatment on microorganisms of litchi raw juice during storage (lg CFU/mL)

贮藏时间/d	菌落总数	酵母菌数	霉菌数	乳酸菌数
新鲜荔枝原汁	4.48±0.11 <sup>a</sup>	2.56±0.10 <sup>a</sup>	1.90±0.09 <sup>a</sup>	3.65±0.15 <sup>a</sup>
0	0.41±0.09 <sup>d</sup>	N.D.	N.D.	0.36±0.08 <sup>d</sup>
14	1.56±0.09 <sup>c</sup>	N.D.	N.D.	1.12±0.12 <sup>c</sup>
21	1.95±0.08 <sup>b</sup>	N.D.	N.D.	1.90±0.06 <sup>b</sup>

从表 5 中可以看出, DMDC 处理的荔枝原汁色泽 (ΔE、c、BI) 与未处理原汁最为接近, 无显著性差

异; 中温处理组和联合处理组色 ΔE、色度值、褐变指数有显著性变化, 但对果汁整体颜色影响不大。李

汴生等<sup>[30]</sup>研究表明,当 $\Delta E \geq 2$ 时,果汁的色差变化明显可见, $\Delta E < 2$ 时,色差变化肉眼不可见。本研究中三组处理的荔枝原汁总色差均低于2,说明三种处理对荔枝原汁的颜色影响很小,而色度值和褐变指数上升原因可能是温度的升高、以及多酚氧化酶作用,但这并未影响处理后荔枝原汁肉眼可见的总体色泽。

### 2.5 联合处理后荔枝原汁贮藏期微生物变化

从表6可以看出,中温联合处理也不能达到完全灭菌的效果,其原因可能与荔枝汁中残留的耐热、耐受DMDC的菌株有关,在4℃贮藏14d后,联合处理的荔枝原汁未检测到霉菌和酵母菌,但菌落总数和乳酸菌呈现上升趋势,经革兰氏染色发现,这些乳酸菌以芽孢杆菌为主,这与我们之前的报道一致<sup>[31]</sup>。后续研究将与其他新型非热杀菌技术结合,以达到更好灭菌效果。

### 2.6 不同处理下荔枝原汁理化指标间皮尔逊

(Pearson)相关性分析

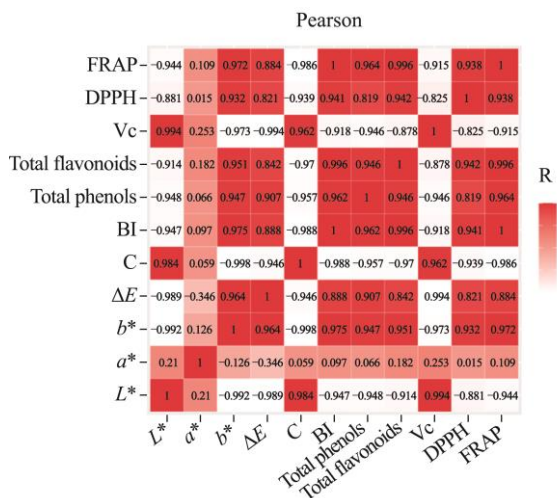


图4 不同处理对荔枝原汁理化指标间 Pearson 相关性分析

Fig.4 Pearson correlation analysis between physical and chemical indexes of litchi original juice with different treatments

不同处理的荔枝原汁各指标的 Pearson 相关性见图4,图中数据相关系数R为正值时,在0.8~1,代表极强正相关;0.6~0.8强正相关;0.2~0.4弱相关;0~0.2极弱相关或无相关,当R为负值时,则代表相反意义;不同的色块代表对应变量的不同值,以色标为参考,红色越深,即代表正相关性越高,颜色越浅,则与之相反。从图中可以看出,色差变化值 $\Delta E$ 与BI、 $b^*$ 值呈正相关性,与Vc含量呈负相关性,总酚、总黄酮与抗氧化能力都呈正相关性。因此,在分析不同处理

方式对新鲜荔枝原汁品质主要影响时,其 $\Delta E$ 值和总酚、总黄酮、FRAP和清除DPPH自由基能力的含量能作为有效评价的依据,但仍需和其他因素进行综合评价。

### 2.7 挥发性风味成分变化

由图5、表7可知,新鲜荔枝原汁经过不同处理后挥发性物质的数量有上升趋势,未处理组、DMDC组、中温处理组、联合处理组样品分别鉴定出35、40、41、46种风味成分。在所有样品中,共检出萜烯类29种,醇类11种,醛类4种,酮类3种,酯类和醚类2种,硫化物1种、其他类物质7种。新鲜荔枝原汁主要风味成分是萜烯类和醇类,这些成分物质含量占到其总挥发性成分80%;其中萜烯类含量较多的是 $\beta$ -月桂烯71.28  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、D-柠檬烯42.86  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,醇类含量较多的1-辛烯-3-醇69.81  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、香叶醇123.74  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

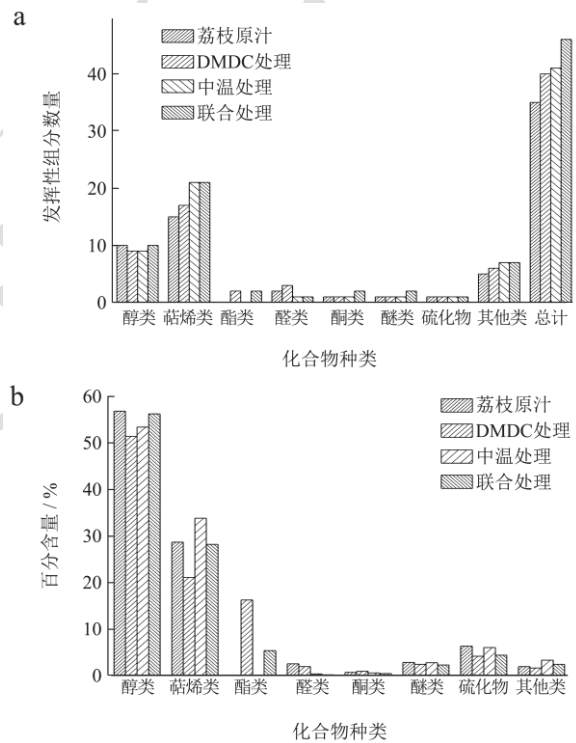


图5 不同处理荔枝原汁中挥发性化合物(a)数量、(b)相对百分含量的影响

Fig.5 Effects of different treatments of volatile compounds in litchi raw juice (a) quantity, (b) relative percentage

DMDC处理的荔枝原汁生成了微量的碳酸二甲酯,这是DMDC分解后的产物,该产物易分解、安全、绿色、无毒,对荔枝品质和风味基本无影响,与原汁相比,萜烯类( $\beta$ -月桂烯、D-柠檬烯)、醇类(1-辛烯-3-醇、苯乙醇)、硫化物(二甲硫基甲烷)等风味物质无明显变化,香叶醇的含量增加了105.01  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,由此可见,DMDC对荔枝原汁风味影响很小,且能突出其温和、香甜的气息。

表 7 不同处理对荔枝汁挥发性成分的影响 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )Table 7 The effects of different treatments on the volatile components of litchi juice ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

序号	保留指数 (RI)	鉴定方法	化合物	含量			
				原汁	DMDC	中温处理	联合处理
1	623	RI、MS	碳酸二甲酯		141.27		97.59
2	726	RI、MS	异戊二醇		15.71	30.09	43.86
3	772	RI、MS	异戊烯醇	57.29	59.35	132.62	129.44
4	855	RI、MS	(E)-2-己烯醛	13.98	10.67	6.02	
5	888	RI、MS	二甲硫基甲烷	37.85	36.67	88.94	87.93
6	917	RI、MS	甲氧基苯酚			17.12	11.64
7	924	RI、MS	梨醇酯		4.70		10.47
8	930	RI、MS	(+)- $\alpha$ -蒎烯			2.98	2.49
9	962	RI、MS	苯甲醛		4.50		
10	980	RI、MS	1-辛烯-3-醇	69.81	73.90	159.04	166.65
11	986	RI、MS	甲基庚烯酮	4.34	3.22	8.83	9.31
12	990	RI、MS	$\beta$ -月桂烯	71.28	70.40	159.53	180.80
13	1014	RI、MS	$\alpha$ -蒎品烯	2.84	3.79	4.423	7.39
14	1022	RI、MS	邻-异丙基苯	6.51			13.17
15	1022	RI、MS	间异丙基甲苯		4.37		
16	1026	RI、MS	D-柠檬烯	42.86	45.00	117.662	104.54
17	1037	RI、MS	反式- $\beta$ -罗勒烯	10.44	11.61	20.41	24.18
18	1047	RI、MS	$\alpha$ -罗勒烯	10.98		23.11	
19	1047	RI、MS	$\beta$ -顺式罗勒烯		18.66		
20	1047	RI、MS	$\beta$ -罗勒烯				27.37
21	1057	RI、MS	$\gamma$ -松油烯	3.52	5.00	15.43	13.28
22	1081	RI、MS	甲基苯乙基醚	16.64	21.39	40.84	46.04
23	1086	RI、MS	蒎品油烯				37.43
24	1098	RI、MS	芳樟醇	17.6	21.30	41.06	46.88
25	1104	RI、MS	2-异丙基环己酮		1.62		
26	1109	RI、MS	(t)-氧化玫瑰醚	1.98	2.70	8.89	10.13
27	1114	RI、MS	苯乙醇	1.55	3.29	5.03	10.76
28	1126	RI、MS	反式玫瑰醚				4.53
29	1128	RI、MS	异罗勒烯	7.97	6.93	16.35	15.13
30	1132	RI、MS	2-丙基环己酮		3.28		
31	1153	RI、MS	橙花氧化物	1.47	2.17	3.86	6.54
32	1176	RI、MS	4-蒎烯醇	10.72	10.53	17.37	15.75
33	1190	RI、MS	松油醇	23.52	27.10	51.30	59.22
34	1201	RI、MS	甲醚橙花醇	4.95	6.00	20.39	18.19
35	1224	RI、MS	香叶基甲醚	3.36	3.97	9.34	8.85
36	1228	RI、MS	(R)-香茅醇			61.77	70.79
37	1238	RI、MS	异香叶醇	13.98			6.88
38	1240	RI、MS	橙花醇	2.43			
39	1257	RI、MS	香叶醇	123.74	228.75	311.17	579.29
40	1270	RI、MS	$\alpha$ -柠檬醛	10.26	15.72	38.91	43.01
41	1345	RI、MS	$\alpha$ -萜荜茄油烯	1.21	1.74		3.78



续表 7

序号	保留指数 (RI)	鉴定方法	化合物	含量			
				原汁	DMDC	中温处理	联合处理
42	134.9	RI, MS	(-)- $\alpha$ -可巴烯			2.92	
43	136.6	RI, MS	(+)-环苜蓿烯	0.97	2.24	5.82	3.07
44	137.1	RI, MS	$\alpha$ -依兰烯			1.82	2.91
45	137.6	RI, MS	可巴烯	2.78	2.28	8.53	5.01
46	138.7	RI, MS	依兰烯		0.54		
47	142.0	RI, MS	石竹烯	1.72	2.32	6.08	5.48
48	142.9	RI, MS	$\beta$ -可巴烯		0.47	1.94	
49	143.4	RI, MS	大牻牛儿烯-D	1.29	1.86		4.25
50	143.9	RI, MS	$\gamma$ -榄香烯	0.61			0.46
51	144.7	RI, MS	顺式依兰油-3,5-二烯			0.58	
52	145.1	RI, MS	(-)- $\alpha$ -喜马偕烯		1.40	2.24	2.20
53	145.5	RI, MS	葑烯	0.83	1.10	2.45	2.44
54	147.6	RI, MS	丙位依兰油烯	2.35	2.15	7.35	8.56
55	148.0	RI, MS	$\alpha$ -紫穗槐烯			1.49	
56	149.9	RI, MS	甲位依兰油烯	3.72	5.04	11.52	9.48
57	151.3	RI, MS	丁基化羟基甲苯			17.36	24.01
58	151.5	RI, MS	$\gamma$ -杜松烯	0.66	0.96		
59	152.4	RI, MS	$\Delta$ -杜松烯	2.64	2.20	5.00	8.12

注: RI 表示通过保留指数鉴定, MS 表示质谱鉴定。

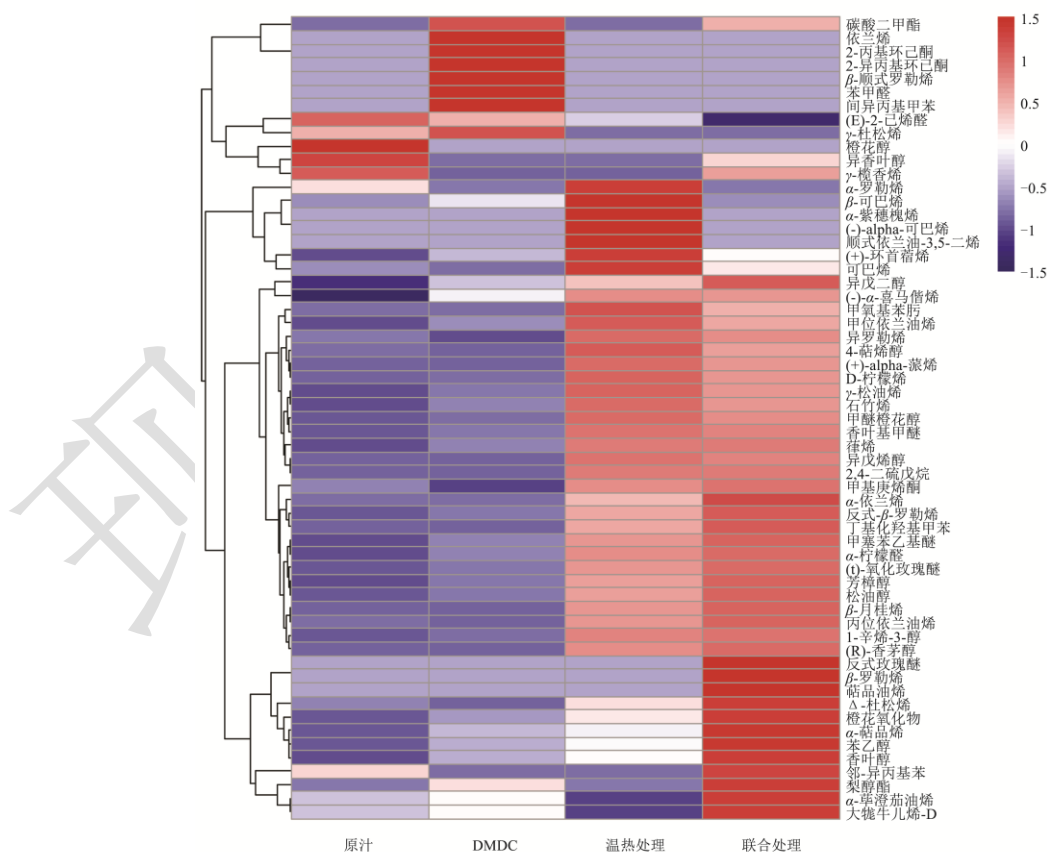


图 6 不同处理荔枝原汁中香气含量的变化

Fig.6 Changes of aroma content in litchi juice with different treatments

中温处理荔枝原汁中 D-柠檬烯、苯乙醇、香叶醇均有所上升；同时也生成了较多的二甲硫基甲烷以及其他高级醇类和萜烯类，其中二甲硫基甲烷单独存在时呈现较强硫化味，是荔枝汁热处理加工过程中产生异味的主要物质<sup>[21]</sup>，在新鲜荔枝汁中很难察觉到这种异味，可能是其含量低，其他愉悦气息的香气物质掩盖了这种异味。课题组前期研究<sup>[18]</sup>发现，荔枝汁高温长时间处理可生成含量较高的异味强烈的二甲基硫醚（DMS）、甲硫基丙醛、二甲基二硫醚（DMDS）、二甲基三硫醚（DMTS）、二甲硫基甲烷等硫醚化合物。本研究中温处理的荔枝汁仅含有二甲硫基甲烷 88.94  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，含量为高温长时间（100  $^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$ ）处理总硫化物的 4.31%，对荔枝汁风味影响较小。

联合处理的荔枝汁主要挥发性风味成分与中温处理组结果相似，表明联合处理对荔枝汁风味的影响主要来源于中温处理，DMDC 对荔枝风味影响性很小。结合热图（图 6）能直观表明不同处理对荔枝汁风味含量的影响，新鲜荔枝汁中橙花醇、异香叶醇等含量较高；DMDC 处理后碳酸二甲酯、依兰烯、苯甲醛等含量较高；中温处理后  $\alpha$ -罗勒烯、可巴烯等含量较高；联合处理中香叶醇、苯乙醇等含量较高。

综上所述，中温联合 DMDC 处理能够挥发更多风味物质，且不会造成明显的蒸煮味等不良风味。

## 2.8 不同处理后荔枝原汁的感官评价分析

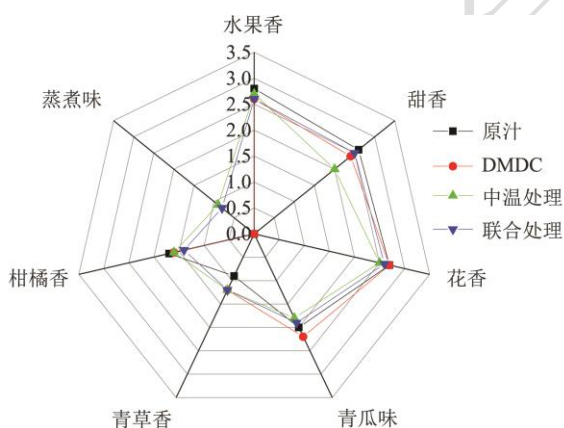


图7 不同处理对荔枝原汁香气雷达图

Fig.7 Aroma radar map of litchi juice with different treatments

由图 7 中不同处理后荔枝原汁香气特征雷达图结果可知，DMDC 处理组的香气特征与新鲜荔枝原汁最为接近，说明荔枝原汁的风味特征主要是由“果香”、“甜香”、“花香”组成，且强度较为明显；中温处理和联合处理的荔枝汁中“甜香”、“果香”、“花香”三种宜人香气属性的强度值仍然处于一个较高水平，但产生的蒸煮味，雷达图也有体现出来，这与挥发性风味成分分析的结果类似，即 60  $^{\circ}\text{C}+30\text{ s}$  处理荔枝原汁能够

挥发出更多风味物质，且不会造成非常明显的蒸煮味等不良风味。因此，综合以上分析：联合处理的荔枝汁的整体香气，“水果香”、“花香”、“甜香”香气强度结果均与新鲜荔枝原汁接近，虽然有微弱的蒸煮异味，但不影响整体的感官品质。

## 3 结论

本文比较了不同轻度杀菌方式对荔枝汁品质的影响。DMDC 是一种比较优异的非热保鲜方法，相比传统的热杀菌，成本低，对人体健康基本无影响，且中温联合 DMDC 处理相较于中温和 DMDC 单独处理，具有较好的杀菌效果，4  $^{\circ}\text{C}$  贮藏期可达 21 d，对多酚、黄酮、抗坏血酸等生物活性成分保留较好，色泽亦无明显变化；在挥发性风味成分及感官评价中，联合处理组能够挥发出更多的香叶醇和苯乙醇，且不会造成明显的蒸煮味等不良风味，后续将在保证荔枝原汁品质的情况下，可以联合其他非热杀菌技术进行探究。综上所述，中温联合 DMDC 不仅较好的保留了荔枝原有的香气成分，且无明显异味生成，这为低温短期贮藏的高品质荔枝原汁的生产提供了科学依据。

## 参考文献

- [1] Vongluangam I, Tocharovanith N, Assatarakul K. Inactivation kinetic of selected pathogens of coconut water by dimethyl dicarbonate and microbial shelf life during cold storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15229.
- [2] GB 1886.68-2015, 二甲基二碳酸盐[S].
- [3] 刘红艳.DMDC 前处理在巨峰冰葡萄酒酿造中的应用研究[D].湘潭:湘潭大学,2019.
- [4] 章亚东,蒋自伟.二碳酸二甲酯的分解动力学研究[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(5):34-37.
- [5] WU Jingyi, TIAN Yuan, WU Zufang, et al. Effects of pretreatment with dimethyl dicarbonate on the quality characteristics of fermented Huyou juice and storage stability [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15343.
- [6] Cheng R M, Churey J J, Worobo R W. Inactivation of Salmonella enterica and spoilage microorganisms in orange juice treated with dimethyl dicarbonate (DMDC) [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 285: 152-157.
- [7] 郭换丽.DMDC 联合 Nisin 对荔枝原汁的协同杀菌作用机制研究及其应用[D].南昌:江西农业大学,2015.
- [8] 朱丹,颜飞翔,朱立斌,等.沙棘酒贮藏期间非酶褐变研究[J].

- 食品工业科技,2022,43(8):336-341.
- [9] 唐雪燕,樊振江,毕韬韬,等.燕麦浓浆饮料加工工艺的研究[J].农产品加工(学刊),2014,1:37-39,43.
- [10] Emmanuel K, Yongkun M, William T, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 148-154.
- [11] 王丹,王智能,董丽红,等.灭菌和贮藏温度对荔枝汁中多酚化合物组成、含量及其抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2021,42(11):275-280.
- [12] 童兰艳,余文琴,朱玲玲,等.蔬菜和水果中维生素 C 含量测定及其稳定性[J].食品工业,2020,41(5):87-89.
- [13] 邹颖,邹波,余元善,等.酵母菌乳酸菌共发酵对荔枝汁品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(10):189-195.
- [14] 董丽红,张瑞芬,肖娟,等.荔枝果肉不同酚类成分群的分离及其抗氧化活性[J].中国农业科学,2016,49(20):4004-4015.
- [15] Tianjia Jiang. Effect of alginate coating on physicochemical and sensory qualities of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) under a high oxygen modified atmosphere [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76(1): 91-97.
- [16] Zhanli Liu, Xiangyou Wang. Changes in color, antioxidant, and free radical scavenging enzyme activity of mushrooms under high oxygen modified atmospheres [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 69(2): 1-6.
- [17] 张萃萃,李喜宏,杨莉杰,等.气调贮藏对罗汉果生理品质的影响[J].食品工业,2018,39(5):178-181.
- [18] AN Kejing, LIU Haocheng, FU Manqin, et al. Identification of the cooked off-flavor in heat-sterilized lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) juice by means of molecular sensory science [J]. Food Chemistry, 2019, 301(C): 125282.
- [19] PANG Xueli, CHENG Dong, HU Xiaosong, et al. Verification of aroma profiles of Jiashi muskmelon juice characterized by odor activity value and gas chromatography-olfactometry/detection frequency analysis: aroma reconstitution experiments and omission tests [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(42): 10426-10432.
- [20] Petrus Rodrigo R, Churey John J, Humiston Gerard A, et al. The combined effect of high pressure processing and dimethyl dicarbonate to inactivate foodborne pathogens in apple juice [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2020, 51(2): 779-785.
- [21] 万鹏,刘亮,潘思轶,等.热处理对荔枝果汁品质的影响[J].食品科学,2010,31(7):22-27.
- [22] GB 7101-2015,饮料[S].
- [23] YU Yuanshan, XU Yujuan, WU Jijun, et al. Effect of ultra-high pressure homogenisation processing on phenolic compounds, antioxidant capacity and anti-glucosidase of mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 114-120.
- [24] Alongi M, Verardo G, Gorassini A, et al. Phenolic content and potential bioactivity of apple juice as affected by thermal and ultrasound pasteurization [J]. Food & Function, 2019, 10(11): 7366-7377.
- [25] ZHANG Ruifen, ZENG Qingshuai, DENG Yuanyuan, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of litchi pulp of different cultivars cultivated in Southern China [J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1169-1176.
- [26] 邓俊琳,李晚谊,于丽娟,等.干燥温度对醇提余甘子多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2019,40(24): 57-61.
- [27] M Morales-de la Peña, L Salvia-Trujillo, M A Rojas-Graü et al. Changes on phenolic and carotenoid composition of high intensity pulsed electric field and thermally treated fruit juice-soymilk beverages during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 982-990.
- [28] 徐玉娟,温靖,肖更生,等.超高压和热处理对荔枝汁品质的影响研究[J].安徽农业科学,2014,42(31):11078-11082.
- [29] YU Yuanshan, XIAO Gengsheng, XU Yujuan, et al. Effects of dimethyl dicarbonate (DMDC) on the fermentation of litchi juice by *Lactobacillus casei* as an alternative of heat treatment [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(5): 947-956.
- [30] 李汴生,朱悦夫,张微,等.低温和中温协同超高压对鲜榨荔枝汁灭酶处理和色泽影响的研究[J].现代食品科技,2017, 33(7):151-156.
- [31] 郭换丽,余元善,吴继军,等.DMDC联合Nisin对模拟果汁中肠膜状明串珠菌细胞膜功能的影响[J].现代食品科技,2015, 31(2):19-25.