

气调贮藏对腐败菌引起的鲜切黄瓜品质、滋味和挥发性物质变化的影响

郑鄩燕¹, 魏亚博^{1,2}, 王宇滨¹, 马 越¹, 梁 浩³, 张 建², 童军茂², 赵晓燕^{1,*}

(1.北京市农林科学院蔬菜研究中心, 果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 北京 100097;

2.新疆石河子大学食品学院, 新疆 石河子 832000; 3.龙大食品集团有限公司, 山东 莱阳 265231)

摘要: 本研究采用电子舌、电子鼻和气相色谱-质谱等手段, 探讨3% (体积分数, 下同) O₂+7% CO₂气调贮藏对变形假单胞菌导致的鲜切黄瓜营养品质、滋味和挥发性物质变化的影响。结果表明, 变形假单胞菌生长影响了鲜切黄瓜的营养品质, 气调贮藏抑制了鲜切黄瓜的呼吸作用, 延缓了丙二醛含量和相对电导率的增加, 维持了可溶性固形物质量分数和色泽, 保持了鲜切黄瓜硬度。电子舌分析结果表明变形假单胞菌对鲜切黄瓜鲜味和鲜味丰度影响最为明显, 气调贮藏抑制了变形假单胞菌导致的各滋味变化。不同处理鲜切黄瓜中挥发性物质存在差异。与接菌空气贮藏组相比, 气调贮藏延缓了由变形假单胞菌引起的黄瓜特征香气正己醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(Z)-6-壬烯醛相对含量的下降, 抑制了2,3-二甲基辛烷、6-甲基-3-庚酮、2-正丙基呋喃和二丙基二硫醚这些特征代谢物的产生。本实验结果可为研究微生物腐败引起的黄瓜营养与风味变化提供理论参考。

关键词: 鲜切黄瓜; 气调贮藏; 品质; 挥发性物质; 变形假单胞菌

Effect of Controlled Atmosphere Storage on Changes in Quality, Taste and Volatile Compounds of Fresh-Cut Cucumber Caused by Spoilage Bacteria

ZHENG Yanyan¹, WEI Yabo^{1,2}, WANG Yubin¹, MA Yue¹, LIANG Hao³, ZHANG Jian², TONG Junmao², ZHAO Xiaoyan^{1,*}

(1. Beijing Key Laboratory of Agricultural Products of Fruits and Vegetables Preservation and Processing, Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. The Food College, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 3. Longda Foodstuff Group Co. Ltd., Laiyang 265231, China)

Abstract: The effects of controlled atmosphere packaging with 3% O₂ and 7% CO₂ on changes in the nutritional quality, taste and volatile compounds of fresh-cut cucumber caused by *Pseudomonas plecoglossicida* were studied by electronic tongue, electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry. The results showed that the growth of *Pseudomonas plecoglossicida* decreased the nutritional quality of fresh-cut cucumbers, and controlled atmosphere storage inhibited the respiration rate, delayed the increase in malondialdehyde content and relative conductivity, and maintained the soluble solid content, color and firmness of fresh-cut cucumbers. The results of electronic tongue showed that *Pseudomonas plecoglossicida* had the most significant effect on the umami and umami richness of fresh-cut cucumbers, and controlled atmosphere storage inhibited the changes in tastes caused by *Pseudomonas plecoglossicida*. There were significant differences in volatile substances among fresh-cut cucumbers with different treatments. Compared with the control group inoculated with *Pseudomonas plecoglossicida* and packaged in air, controlled atmosphere packaging delayed the decrease in the characteristic aroma components of hexanal, (E,Z)-nona-2,6-dienal and (Z)-6-nonenal caused by *Pseudomonas plecoglossicida*, and inhibited the generation of spoilage metabolites like 2,3-dimethyloctane, 6-methyl-3-heptanone,

收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 北京市博士后基金项目 (ZZ2019-36); 北京市农林科学院协同创新中心项目 (KJCX201915);

果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室资助项目 (Z141105004414037)

第一作者简介: 郑鄩燕 (1987—) (ORCID: 0000-0003-3315-3460), 女, 博士, 研究方向为果蔬采后保鲜与加工。

E-mail: zhengyanyan@nercv.org

*通信作者简介: 赵晓燕 (1969—) (ORCID: 0000-0002-2543-9285), 女, 研究员, 博士, 研究方向为农产品加工及贮藏。

E-mail: zhaoxiaoyan@nercv.org

2-propylfuran and dipropyl disulfide. This study provides a theoretical basis for research on the nutritional and flavor changes of fresh-cut cucumbers caused by microbial spoilage.

Keywords: fresh-cut cucumbers; controlled atmosphere storage; quality; volatile compounds; *Pseudomonas plecoglossicida*

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200220-212

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2021) 05-0252-10

引文格式:

郑鄢燕, 魏亚博, 王宇滨, 等. 气调贮藏对腐败菌引起的鲜切黄瓜品质、滋味和挥发性物质变化的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 252-261. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200220-212. <http://www.spkx.net.cn>

ZHENG Yanyan, WEI Yabo, WANG Yubin, et al. Effect of controlled atmosphere storage on changes in quality, taste and volatile compounds of fresh-cut cucumber caused by spoilage bacteria[J]. Food Science, 2021, 42(5): 252-261. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200220-212. <http://www.spkx.net.cn>

鲜切果蔬营养、方便且卫生, 深受现代快节奏生活消费者青睐^[1]。但贮藏过程腐败微生物会通过代谢活动破坏果蔬组织结构, 产生具有异味的挥发性化合物, 引起果蔬腐败变质。假单胞菌 (*Pseudomonas*) 是常见的食源性腐败菌, 能以果蔬为基质快速繁殖, 变形假单胞菌 (*Pseudomonas plecoglossicida*) 是导致鲜切黄瓜腐烂的主要微生物之一^[2]。Ioannidis等^[3]指出假单胞菌属导致了2,3-丁二醇、二甲基硫醚等异味物质的产生以及鲜切卷心莴苣的腐败。气调贮藏可以维持果蔬特征香气以及抑制微生物引起的腐败物质的产生。Villalobos等^[4]报道, 气调包装有利于维持无花果乙酸乙酯、己醛、 β -石竹烯、苧烯等香气物质含量, 且对无花果品质不产生负面影响。气调包装有助于保持草莓品质^[5]、抑制甜樱桃在贮藏过程中异味物质乙酯和 γ -丁内酯的积累^[6]。

近年来, 电子舌、电子鼻以及气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 法在果蔬品质评价中得到广泛应用。依据脂环酸芽孢杆菌在不同饮料中的代谢产物不同, 李二虎等^[7]通过电子舌区分出接种脂环酸芽孢杆菌的果汁饮料。Cai Wenchao等^[8]通过电子舌从90种不同的乳酸菌发酵的枣汁中区分出了由植物乳杆菌发酵的枣汁。电子鼻在不同品种苹果的香气识别^[9]、鲜切西兰花新鲜度^[10]和芒果腐烂程度、黄桃成熟度^[11]等的检测方面已有广泛应用。Du Dongdong等^[12]采用电子鼻检测到猕猴桃氮氧化合物、烷烃和芳香类化合物含量在贮藏期间发生了显著变化, GC-MS结果表明(*E,E*)-2,4-己二烯醛、松油烯、 γ -松油烯、水杨酸甲酯和己酸异丁酯是猕猴桃的特征挥发性物质。Wang Aimei等^[13]通过GC-MS检测发现青霉菌侵染并导致腐败的洋葱与对照相比部分挥发性化合物含量增加, 包括乙醇、1-丙醇、1-丙硫醇、甲基丙基二硫等。Siegmund等^[14]采用GC-MS技术在受放线菌侵染的苹果汁中检测到了2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪等异味物质。采用电子舌、电子鼻和GC-MS分析鲜切黄瓜腐败菌导致的风味变化鲜有报道。

本实验通过电子舌、电子鼻和GC-MS技术并结合生理品质指标, 分析贮藏期间由变形假单胞菌引起的鲜切黄瓜滋味、香味物质和品质的变化, 以及3% (体积分数, 下同) $O_2+7\% CO_2$ 气调贮藏对变形假单胞菌导致的鲜切黄瓜滋味、挥发性物质和品质的影响, 旨在为了解鲜切黄瓜贮藏期间由微生物腐败引起的品质和风味变化提供依据, 并为变形假单胞菌导致的鲜切果蔬腐败变质的快速检测提供参考。

1 材料与方法

1.1 菌株、材料与试剂

实验所用菌株是本实验室从冷藏腐烂的鲜切黄瓜中分离出的主要腐败菌变形假单胞菌 (*Pseudomonas plecoglossicida*)。黄瓜 (*Cucumis sativus L.*) 为市售。挑选长度30~35 cm、质量300~350 g的健康黄瓜。

CFC选择性培养基 青岛海博生物技术有限公司; 试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

HR1364型手持搅拌机 荷兰皇家飞利浦公司; LYNX400冷冻离心机 美国Thermo公司; GXH-3051便携式CO₂红外线分析仪 上海精密仪器仪表有限公司; PAL-1数显手持式糖度计 日本Atago公司; UV-1800紫外-可见分光光度仪 日本岛津公司; CM-3700D台式分光测色仪 日本柯尼卡-美能达公司; TA.XT Plus质构仪 英国SMS公司; SA-402B味觉分析系统 (电子舌) 日本Insent公司; PEN3型电子鼻 德国AIRSENSE公司; PAL RSI 85型顶空自动进样器 瑞士思特分析仪器有限公司; 7890A-5977B型GC-MS仪 (配有电子电离源 (electronic ionization, EI) 和NIST 2.0数据处理系统) 美国Agilent公司; HP-5弹性石英纤维毛细管柱 (30 m×0.1 mm, 0.33 μ m) 美国J & W公司; 20 mL萃取瓶 北京玻璃仪器厂; 50/30 μ m DVB-CAR-PDMS固相微萃取头 美国Supelco公司。

1.3 方法

1.3.1 *P. plecoglossicida* 菌株复活和菌悬液制备

菌株活化：取100 μL冻存菌液加至100 mL LB液体培养基中，28 ℃下220 r/min过夜培养。

菌悬液制备：取100 μL活化后的菌液于100 mL LB液体培养基中，28 ℃下220 r/min培养8 h，菌悬液浓度调至10⁸ CFU/mL备用。

1.3.2 样品接种处理

黄瓜经去离子水洗净后，用200 mg/L的次氯酸钠溶液消毒2 min，再用去离子水冲洗3~4次，在无菌台上晾干后切片（厚0.9 cm），处理分3组：1) 不接种*P. plecoglossicida*的空气对照组（CK）；2) 接种*P. plecoglossicida*的气调贮藏组（*P. plecoglossicida* control atmosphere storage, PP CAS），气调条件为3% O₂+7% CO₂+90% N₂（课题组前期研究得到）；3) 接种*P. plecoglossicida*的空气对照组（*P. plecoglossicida* control group, PP CK）。接种时在鲜切黄瓜片的一面均匀涂布100 μL菌悬液，在保鲜盒中晾干15 min后，在4 ℃、相对湿度90%下贮藏12 d，定期取样检测相关指标。

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 理化指标测定

菌落总数计数：称20 g黄瓜样品，加入30 mL 0.9 g/100 mL无菌盐水匀浆，稀释到适宜浓度，从最后2个稀释梯度吸取100 μL稀释液涂布于CFC选择性培养基上，37 ℃培养48 h后进行变形假单胞菌计数。

呼吸速率测定：参考Singh等^[15]的方法，采用便携式CO₂红外线分析仪的测定，并稍作改动。仪器预热30 min后调零，将90 g黄瓜样品放入1 L密闭容器中，1 h后记录二氧化碳浓度，间隔10 min测定一次，共测定3次，取3次测定的平均值。以每千克样品每小时释放CO₂的物质的量表示，单位为mmol/(kg·h)。

硬度测定：采用质构仪测定，以5 mm直径的圆柱形探头经10 mm/s的速率刺穿至5 mm深度所需的最大力表示。

色泽测定：采用台式分光测色仪测定鲜切黄瓜L*值（亮度）、a*值（红绿度）和b*值（黄蓝度）。

可溶性固形物质量分数测定：取20 g鲜切黄瓜样品，匀浆后用4层纱布过滤，用手持式糖度计测定滤液中的可溶性固形物质量分数（soluble solids content, SSC）。

丙二醛（malondialdehyde, MDA）含量测定：采用钱磊等^[16]的方法测定，并略作改动。称取3 g样品，加6 mL 10 g/100 mL三氯乙酸溶液充分匀浆后，4 ℃、13 000×g离心20 min。取上清液1.5 mL加入2.5 mL 0.5 g/100 mL硫代巴比妥酸溶液，沸水浴15 min，冷却至室温，4 ℃、8 000×g离心10 min，在450、532 nm和600 nm波长处测定上清液的吸光度。

相对电导率测定：参考Nasef^[17]的方法测定。取1 g样品置于含50 mL去离子水的三角瓶中，封口膜封口，30 ℃、150 r/min振荡2 h，测定电导率（ κ_1 /(mS/cm)）；然后将样品煮沸10 min，冷却至室温，测定电导率（ κ_2 /(mS/cm)）。相对电导率按下式计算。

$$\text{相对电导率}/\% = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \times 100$$

1.3.3.2 电子舌测定滋味

称取鲜切黄瓜200 g，打浆、10 000×g离心20 min后经4层纱布过滤，取约40 mL滤液用于电子舌检测，电子舌味觉传感器的相关介绍见表1。电子舌检测条件：环境温度保持25 ℃。共设有5种清洗溶液，共清洗330 s，参比溶液（2.236 5 g氯化钾和0.045 g酒石酸溶于1 L去离子水）测定30 s，样品测定30 s，回味测定30 s。每个样品平行测定5次，选取后3次测定结果用于后续分析。

表1 电子舌味觉传感器性能描述

Table 1 Performance descriptions of electronic tongue sensors

| 传感器名称 | 基本味道 | 回味 |
|-------|----------------------|-------------------|
| AAE | 鲜味（氨基酸、核酸） | 鲜味丰富度（持续感知的鲜味） |
| CT0 | 咸味（无机盐食盐等） | 无 |
| CA0 | 酸味（醋酸、柠檬酸等） | 无 |
| C00 | 苦味（苦味物质，低浓度下感知为丰富性） | 苦味回味（啤酒和咖啡等食品的苦味） |
| AE1 | 涩味（涩味物质低浓度下感知为刺激性回味） | 涩味回味（茶和红酒等呈现的涩味） |
| GL1 | 甜味（糖或糖醇） | 无 |

1.3.3.3 电子鼻测定芳香物质

称取鲜切黄瓜5 g，匀浆置于50 mL顶空瓶中，25 ℃静置30 min使样品挥发性成分达到平衡状态，然后进行测定。电子鼻检测条件：25 ℃室温条件下测定，以洁净干燥的空气为载气，传感器清洗时间为100 s，自动调零5 s，待测样品准备时间8 s，测定时载气流速为400 mL/min，测定间隔时间为1 s，检测180 s。每组样品重复测定3次，选取175~177 s的数据进行主成分分析和载荷图分析。电子鼻传感器的相关描述见表2。

表2 PEN3型电子鼻传感器性能描述

Table 2 Performance descriptions of PEN3 electronic nose sensors

| 序号 | 传感器名称 | 性能描述 |
|----|-------|----------------|
| 1 | W1C | 对芳香型化合物灵敏 |
| 2 | W5S | 对氮氧化合物较为灵敏 |
| 3 | W3C | 主要对氨水灵敏 |
| 4 | W6S | 对氢气有选择性 |
| 5 | W5C | 检测烷烃、芳香型化合物 |
| 6 | W1S | 对甲烷灵敏 |
| 7 | W1W | 对硫化物、萜烯类化合物灵敏 |
| 8 | W2S | 对乙醇和部分芳香型化合物灵敏 |
| 9 | W2W | 对芳香成分灵敏 |
| 10 | W3S | 检测烷烃型化合物 |

1.3.3.4 GC-MS测定挥发性有机物

样品前处理：取3 g匀浆样品于20 mL顶空瓶内，添加3 mL饱和NaCl溶液，旋紧样品瓶。萃取头在250 °C下老化3 min后插入样品瓶，40 °C萃取40 min，在240 °C下解吸30 min。

GC条件：色谱柱为HP-5弹性石英纤维毛细管柱；升温程序：40 °C保持3 min，以4 °C/min升至150 °C，保持3 min，9 °C/min升至240 °C，保持9 min；载气(He)流速0.8 mL/min，进样量0.5 μL，不分流进样。

MS条件：电离方式为EI源，离子源温度230 °C、传输线温度220 °C、四极杆温度150 °C、电子轰击能量70 eV、质量扫描范围35~600 m/z。

使用NIST 2.0数据库对未知挥发性化合物谱图进行检索，相似度低于80视为未检出，通过正构烷烃C₇~C₃₂的保留时间计算挥发性化合物的保留指数(retention index, RI)，并采用面积归一法进行定量。

1.4 数据处理与分析

实验重复测定3次，结果表示为平均值±标准差，采用SPSS 25.0软件进行数据分析和皮尔逊相关性分析，通过单因素方差分析进行Duncan多重比较，P<0.05表示差异具有显著性；电子舌数据用SIMCA-P 11.0软件进行主成分分析；电子鼻数据使用自带的Winmuster软件进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 鲜切黄瓜的理化指标

如表3所示，贮藏期间菌落数不断增加，PP CK组菌落数显著高于PP CAS组，说明气调抑制了变形假单胞菌的生长。贮藏至8 d后，PP CK组L*值显著低于其他处理组，是由于变形假单胞菌在黄瓜表面生长增殖，使得颜色变暗，亮度下降；而PP CAS和CK组在整个贮藏期间的L*值均没有显著差异，说明气调抑制了变形假单胞菌的生长，从而抑制了变形假单胞菌导致的亮度下降。贮藏期间鲜切黄瓜a*值不断上升，说明绿度逐渐下降，PP CK组绿度变化最明显，12 d时a*值为正且显著高于其他处理组，说明绿色基本消失，可能是由于菌自身的颜色以及菌的生长加速了叶绿素的流失，从而导致绿度下降。PP CAS组和CK组在第12天时a*值没有显著差异，b*值显著低于PP CK组，说明气调处理延缓了变形假单胞菌生长以及变形假单胞菌导致的叶绿素含量下降，维持了鲜切黄瓜的绿度，延缓了黄瓜变黄。Shen Xu等^[18]研究也发现气调贮藏可以抑制微生物生长，减少微生物导致的果蔬颜色变暗。

贮藏期间PP CK组鲜切黄瓜呼吸速率显著高于CK、PP CAS组，说明变形假单胞菌的增殖引起了鲜切黄瓜

呼吸速率的增加，而气调处理抑制了变形假单胞菌所引起的呼吸速率变化。贮藏期间鲜切黄瓜中MDA含量和相对电导率逐渐增加，PP CAS组中MDA含量和相对电导率低于PP CK组而高于CK组，说明气调处理部分抑制了由变形假单胞菌生长导致的MDA产生和相对电导率增加。贮藏至8 d后，CK组硬度显著高于PP CAS和PP CK组，说明变形假单胞菌的生长破坏了鲜切黄瓜组织结构，导致硬度下降；贮藏结束时，PP CAS组硬度显著高于PP CK组，说明气调处理抑制了由变形假单胞菌生长导致的鲜切黄瓜硬度下降。鲜切黄瓜中SSC随着贮藏时间延长呈现下降趋势，PP CK组硬度在贮藏期间始终低于PP CAS和CK组，可能是由于变形假单胞菌生长繁殖消耗了鲜切黄瓜中的营养物质，加速了SSC的下降；而PP CAS和CK组硬度无显著差异，可见气调处理有效抑制了变形假单胞菌消耗利用鲜切黄瓜的营养物质。Fan Kai等^[19]指出气调包装能抑制微生物的增殖和丙二醛的产生，保持鲜切黄瓜较高的可溶性固体含量。

表3 不同处理下鲜切黄瓜的理化指标
Table 3 Physicochemical indexes of fresh-cut cucumbers under different treatments

| 指标 | 组别 | 0 d | 2 d | 4 d | 6 d | 8 d | 10 d | 12 d |
|--------------------|--------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| (lg (CFU/g)) | PP CAS | 6.61±0.07 ^b | 6.49±0.06 ^b | 6.41±0.01 ^b | 6.97±0.05 ^b | 7.82±0.07 ^b | 7.94±0.04 ^b | 8.90±0.04 ^b |
| | PP CK | 6.61±0.07 ^b | 6.74±0.03 ^b | 7.38±0.03 ^b | 8.20±0.02 ^b | 8.71±0.09 ^b | 8.75±0.03 ^b | 9.38±0.03 ^b |
| | CK | 3.11±0.09 ^b | 4.05±0.04 ^b | 4.57±0.08 ^b | 5.71±0.02 ^b | 6.94±0.03 ^b | 7.16±0.05 ^b | 8.13±0.10 ^b |
| L* | PP CAS | 76.33±0.28 ^b | 75.73±0.52 ^b | 75.59±1.25 ^b | 74.79±0.76 ^b | 74.80±0.68 ^b | 74.57±0.70 ^b | 74.01±0.70 ^b |
| | PP CK | 76.33±0.28 ^b | 74.22±0.17 ^b | 74.28±0.35 ^b | 73.81±0.35 ^b | 73.42±0.30 ^b | 71.89±0.69 ^b | 68.56±0.08 ^b |
| | CK | 76.47±0.13 ^b | 75.80±0.29 ^b | 75.61±0.25 ^b | 74.88±0.69 ^b | 74.75±0.38 ^b | 74.58±0.37 ^b | 74.30±0.19 ^b |
| a* | PP CAS | -7.82±0.02 ^b | -7.01±0.15 ^b | -6.97±0.19 ^b | -6.63±0.16 ^b | -5.71±0.12 ^b | -5.40±0.05 ^b | -5.04±0.23 ^b |
| | PP CK | -7.82±0.02 ^b | -6.41±0.03 ^b | -5.94±0.13 ^b | -3.30±0.15 ^b | -3.19±0.16 ^b | -3.11±0.20 ^b | 1.33±0.07 ^b |
| | CK | -7.65±0.05 ^b | -7.23±0.22 ^b | -7.03±0.40 ^b | -6.73±0.36 ^b | -6.22±0.23 ^b | -5.75±0.18 ^b | -5.43±0.26 ^b |
| b* | PP CAS | 33.23±0.50 ^b | 33.10±0.33 ^b | 32.24±0.38 ^b | 32.75±0.60 ^b | 34.00±0.33 ^b | 34.11±0.91 ^b | 35.89±0.94 ^b |
| | PP CK | 33.23±0.50 ^b | 35.09±0.37 ^b | 34.11±0.54 ^b | 37.97±0.27 ^b | 38.08±0.71 ^b | 38.36±0.96 ^b | 38.87±0.24 ^b |
| | CK | 32.93±0.34 ^b | 32.22±0.36 ^b | 32.31±0.26 ^b | 32.41±0.26 ^b | 33.89±0.73 ^b | 33.92±0.13 ^b | 34.05±0.16 ^b |
| 呼吸速率/(mmol/(kg·h)) | PP CAS | 85.53±6.56 ^b | 83.49±2.06 ^b | 249.10±4.59 ^b | 194.04±3.78 ^b | 169.05±2.07 ^b | 114.06±4.84 ^b | 102.72±2.21 ^b |
| | PP CK | 85.53±6.56 ^b | 94.72±2.95 ^b | 317.80±10.05 ^b | 289.88±12.94 ^b | 292.30±2.86 ^b | 169.43±1.59 ^b | 123.03±3.68 ^b |
| | CK | 79.29±0.34 ^b | 83.33±0.90 ^b | 121.68±0.70 ^b | 147.89±3.05 ^b | 120.04±0.70 ^b | 91.06±1.90 ^b | 88.38±0.34 ^b |
| MDA含量/(μmol/g) | PP CAS | 120.99±2.19 ^b | 141.16±4.02 ^b | 150.19±3.32 ^b | 154.97±5.08 ^b | 167.35±3.39 ^b | 178.14±5.46 ^b | 193.28±4.87 ^b |
| | PP CK | 120.99±2.19 ^b | 156.01±4.31 ^b | 200.92±4.82 ^b | 210.50±7.05 ^b | 227.99±7.53 ^b | 241.06±5.96 ^b | 262.64±7.38 ^b |
| | CK | 120.99±1.86 ^b | 134.70±1.03 ^b | 135.41±1.85 ^b | 135.96±1.81 ^b | 139.64±0.24 ^b | 148.32±2.47 ^b | 165.05±3.26 ^b |
| 相对电导率% | PP CAS | 48.16±0.56 ^b | 48.97±1.65 ^b | 50.05±0.27 ^b | 52.12±1.02 ^b | 54.96±3.09 ^b | 62.92±0.82 ^b | 68.85±3.39 ^b |
| | PP CK | 48.16±0.56 ^b | 51.29±1.99 ^b | 55.20±3.22 ^b | 59.00±1.85 ^b | 70.81±1.12 ^b | 73.63±1.13 ^b | 75.66±1.64 ^b |
| | CK | 36.52±2.08 ^b | 42.34±0.50 ^b | 45.45±4.39 ^b | 45.69±2.96 ^b | 49.32±1.93 ^b | 55.35±3.03 ^b | 64.64±1.19 ^b |
| 更变N | PP CAS | 28.17±1.55 ^b | 28.04±0.72 ^b | 27.54±0.74 ^b | 25.96±0.86 ^b | 25.95±0.40 ^b | 25.76±0.26 ^b | 25.62±0.32 ^b |
| | PP CK | 28.17±1.55 ^b | 28.01±0.54 ^b | 27.10±0.58 ^b | 25.94±1.23 ^b | 25.20±0.20 ^b | 24.98±0.10 ^b | 23.83±0.44 ^b |
| | CK | 28.05±0.16 ^b | 27.91±0.34 ^b | 27.64±0.03 ^b | 27.59±0.39 ^b | 27.10±0.49 ^b | 26.40±0.47 ^b | 26.11±0.43 ^b |
| SSC% | PP CAS | 3.73±0.06 ^b | 3.67±0.06 ^b | 3.63±0.06 ^b | 3.57±0.06 ^b | 3.57±0.06 ^b | 3.57±0.06 ^b | 3.33±0.15 ^b |
| | PP CK | 3.73±0.06 ^b | 3.63±0.06 ^b | 3.53±0.06 ^b | 3.43±0.12 ^b | 3.43±0.06 ^b | 3.33±0.06 ^b | 3.27±0.06 ^b |
| | CK | 3.76±0.06 ^b | 3.73±0.12 ^b | 3.67±0.08 ^b | 3.63±0.06 ^b | 3.60±0.10 ^b | 3.53±0.06 ^b | 3.33±0.06 ^b |

注：对于同一指标，同列肩标小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.2 变形假单胞菌处理和气调贮藏对鲜切黄瓜滋味的影响

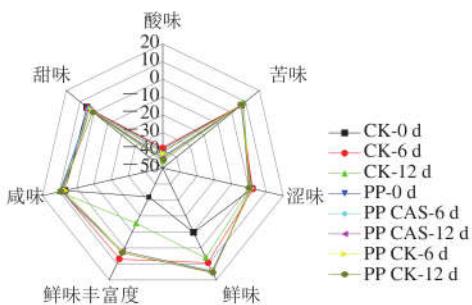


图1 不同处理下鲜切黄瓜各滋味雷达图

Fig. 1 Radar chart for taste profile of fresh-cut cucumbers under different treatments

从图1可以看出,与0 d样品相比,不同贮藏期间各组鲜切黄瓜的酸味、鲜味和鲜味丰富度这3种滋味的味觉值都有较大变化,而图中其他4个滋味的味觉值变化不明显。对各滋味味觉值进行统计并做显著性分析,得到表4。

表4 不同处理下鲜切黄瓜各滋味味觉值

Table 4 Taste values of fresh-cut cucumber under different treatments

| 组别 | 贮藏时间d | 酸味 | 苦味 | 涩味 | 鲜味 | 鲜味丰富度 | 咸味 | 甜味 |
|--------|-------|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| CK | 0 | -39.72±0.00 ^a | 7.00±0.00 ^a | 1.91±0.00 ^a | -9.77±0.00 ^a | -31.87±0.00 ^a | 6.87±0.00 ^a | 5.05±0.00 ^a |
| | 6 | -38.75±0.14 ^a | 6.61±0.03 ^a | 2.26±0.02 ^a | 9.23±0.30 ^a | 6.80±0.34 ^a | 8.82±0.03 ^a | 4.21±0.02 ^a |
| | 12 | -46.71±0.44 ^a | 8.55±0.08 ^a | 0.37±0.02 ^a | 6.29±0.58 ^a | -15.04±0.46 ^a | 10.17±0.34 ^a | 2.52±0.14 ^a |
| PP CAS | 0 | -41.29±0.00 ^a | 6.69±0.00 ^a | 1.35±0.00 ^a | 14.27±0.00 ^a | 1.85±0.00 ^a | 9.44±0.00 ^a | 3.97±0.00 ^a |
| | 6 | -44.11±0.13 ^a | 6.73±0.07 ^a | 1.03±0.03 ^a | 14.98±0.02 ^a | 2.06±0.06 ^a | 9.10±0.06 ^a | 3.55±0.05 ^a |
| | 12 | -44.51±0.20 ^a | 6.79±0.05 ^a | 1.01±0.04 ^a | 15.15±0.03 ^a | 1.91±0.08 ^a | 8.28±0.09 ^a | 2.37±0.09 ^a |
| PP CK | 0 | -41.29±0.00 ^a | 6.69±0.00 ^a | 1.35±0.00 ^a | 14.27±0.00 ^a | 1.85±0.00 ^a | 9.44±0.00 ^a | 3.97±0.00 ^a |
| | 6 | -41.76±0.09 ^a | 7.12±0.04 ^a | 1.30±0.09 ^a | 14.67±0.06 ^a | 2.19±0.14 ^a | 6.92±0.15 ^a | 2.29±0.07 ^a |
| | 12 | -45.45±0.05 ^a | 7.40±0.02 ^a | 0.08±0.01 ^a | 15.36±0.06 ^a | 2.85±0.11 ^a | 9.20±0.43 ^a | 0.48±0.02 ^a |

注: 同列肩标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由表4可知,贮藏0 d时,CK组中各滋味味觉值与PP-CK组之间有显著差异,说明变形假单胞菌引起了所有滋味味觉值的显著变化。同一贮藏时间,PP CAS与PP CK处理组酸味、苦味、涩味、咸味和甜味的味觉值之间差异显著,说明接菌后气调贮藏对于这5个滋味味觉值影响大。与刚接种变形假单胞菌(PP CAS-0 d/PP CK-0 d)的味觉值相比,贮藏至12 d时PP CAS组中的酸味、苦味、涩味、鲜味、鲜味丰富度和甜味这6个滋味的味觉值比PP CK组变化更小。综合电子舌分析结果(图1和表4),变形假单胞菌对鲜切黄瓜鲜味和鲜味丰富度影响最为显著,不同贮藏条件主要影响酸味、苦味、涩味、咸味和甜味,而气调贮藏很好地抑制了变形假单胞菌生长导致的各滋味变化。

为进一步体现各滋味味觉值之间的相关性,对各滋味味觉值进行相关性分析,结果如表5所示。酸味与苦味、咸味,苦味与涩味,鲜味与甜味之间呈极显著负相关,相关系数分别为-0.66、-0.54、-0.64和-0.61。涩味与鲜味、咸味,甜味与苦味、鲜味丰富度呈显著负相关,

相关系数分别为-0.42、-0.50、-0.42和-0.42,说明涩味味觉值增加,鲜味和咸味味觉值相应减小,而甜味味觉值增加,苦味和鲜味丰富度味觉值相应减小。酸味与涩味、甜味,涩味与甜味,鲜味与鲜味丰富度呈极显著正相关,相关系数分别为0.94、0.73、0.84和0.92,说明酸味味觉值增加,涩味与甜味味觉值相应增加;而鲜味味觉值增加,鲜味丰富度相应增加。此结果表明,由变形假单胞菌和不同贮藏条件引起的各滋味味觉值之间具有一定的相关性。

表5 不同处理下鲜切黄瓜各滋味间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis among different tastes of fresh-cut cucumbers under different treatments

| 指标 | 酸味 | 苦味 | 涩味 | 鲜味 | 鲜味丰富度 | 咸味 | 甜味 |
|-------|---------|---------|--------|---------|--------|-------|------|
| 酸味 | 1.00 | | | | | | |
| 苦味 | -0.66** | 1.00 | | | | | |
| 涩味 | 0.94** | -0.64** | 1.00 | | | | |
| 鲜味 | -0.39 | -0.17 | -0.42* | 1.00 | | | |
| 鲜味丰富度 | -0.08 | -0.39 | -0.11 | 0.92** | 1.00 | | |
| 咸味 | -0.54** | 0.39 | -0.50* | 0.39 | 0.30 | 1.00 | |
| 甜味 | 0.73** | -0.42* | 0.84** | -0.61** | -0.42* | -0.26 | 1.00 |

注: *: 显著相关($P<0.05$); **: 极显著相关($P<0.01$)。

为进一步区分不接菌、接菌处理以及不同贮藏条件下的鲜切黄瓜,对电子舌数据进行主成分分析(图2)。不同处理下鲜切黄瓜的滋味品质信息主要体现在3个主成分上,累计贡献率达94.5%。第一主成分贡献率为53.81%,包括酸味、涩味和甜味信息;第二主成分贡献率为29.48%,包括苦味和鲜味丰富度信息;第三主成分贡献率为11.21%,包括咸味信息。前2个主成分对同一贮藏期下的3个处理组具有很好的区分,但PP CAS-6 d和PP CAS-12 d之间有部分重叠。通过第三主成分可成功对PP CAS-6 d和PP CAS-12 d进行区分。

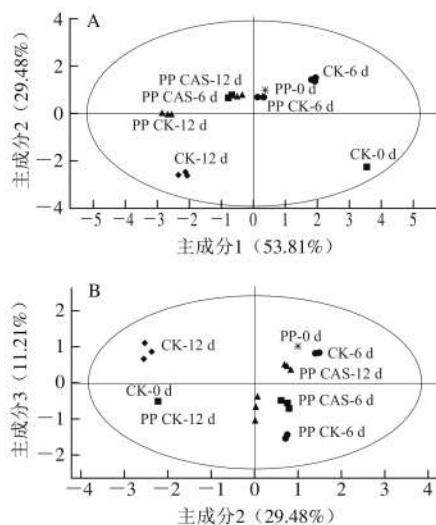


图2 鲜切黄瓜电子舌数据主成分分析图

Fig. 2 Principal component analysis plot of fresh-cut cucumber electronic tongue data

电子舌分析结果表明变形假单胞菌引起了各味觉值的显著变化,接菌后气调贮藏对鲜切黄瓜滋味的变化也有显著影响,并通过主成分分析可以区分不同处理组鲜切黄瓜。可见,电子舌可以应用腐败菌对鲜切黄瓜的滋味影响的研究。电子舌也在其他果蔬滋味变化中得到应用,Wang Huxuan等^[20]通过电子舌检测到菌株*Zygosaccharomyces rouxi*增殖和代谢引起了苹果汁甜味、酸味和涩味的显著变化,并区分了侵染不同时间段变质的苹果汁。Makino等^[21]通过电子舌研究发现,不同贮藏环境下鲜切西兰花的酸味、鲜味和咸味等滋味值具有显著差异,通过主成分分析区分了不同温度和贮藏期的鲜切西兰花。

2.3 变形假单胞菌处理和气调贮藏对挥发性物质的影响

2.3.1 电子鼻检测结果

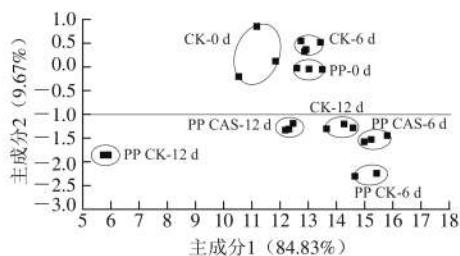


Fig. 3 Principal component analysis plot of fresh-cut cucumber electronic nose data

通过Winmuster软件对电子鼻结果进行主成分分析,结果如图3所示。第一主成分可以很好地反映不同处理下挥发性物质的区别,其贡献率达84.83%;第二主成分贡献率为9.67%,总贡献率为94.50%,各处理组之间都没有重叠,说明通过主成分分析可以很好地区分各样品。

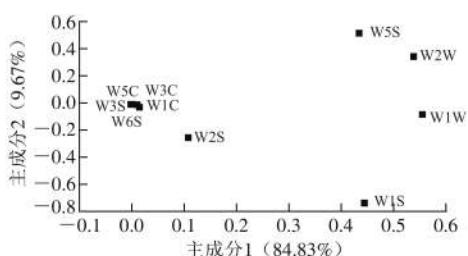


Fig. 4 Loading analysis plot of fresh-cut cucumber electronic nose data

为分析各传感器响应值与主成分的相关性,进一步进行载荷图分析。由图4可知,W5S、W2W、W1W和W1S这4个传感器响应值与第一主成分呈正相关,说明贮藏过程中氮氧化物、芳香成分、硫化物、萜烯类化合物、甲烷类挥发性物质的显著变化。Chen Huizhi等^[22]也采用电子鼻技术区分出新鲜和腐败样品,发现青椒的腐烂会引起风味的显著变化。Huang Xiaochen等^[23]研究也

表明酸土脂环酸芽孢杆菌氮氧化物、芳香成分和萜烯类发生显著变化,且电子鼻检测能区分出受酸土脂环酸芽孢杆菌侵染的苹果汁饮料。

2.3.2 GC-MS检测结果

实验鉴定出104种挥发性化合物,其中CK组53种、PP CAS组48种、PP CK组50种。3个处理组都检测出的挥发性成分有18种。

醛类化合物是检测到相对含量最高的挥发性化合物,高达38.96%~90.76% (表7)。正己醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(Z)-6-壬烯醛和2-己烯醛是黄瓜中的主要醛类化合物^[24],从表6中可以看出,正己醛和2-己烯醛在所有样品组中均有检出。正己醛是所有醛类中相对含量最高的物质,0 d接菌和不接菌黄瓜中相对含量较高,分别为46.16%和43.70%;贮藏至12 d时CK组、PP CAS组和PP CK组正己醛相对含量明显降低,分别为27.85%、18.07%和6.98%,表明刚接种变形假单胞菌对正己醛相对含量影响较小,菌增殖后引起了正己醛含量的明显变化,气调贮藏通过抑制变形假单胞菌生长从而减少正己醛含量降低。2-己烯醛相对含量在贮藏期间变化不大。正己醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(Z)-6-壬烯醛是黄瓜的特征香气成分^[25-26],(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(Z)-6-壬烯醛贮藏期间含量逐渐降低,但在CK组中都有检出,在0 d和6 d时接菌处理组中都有检出,但在贮藏至12 d时的处理组中未检出,接种变形假单胞菌后丙二醛含量和相对电导率增加、SSC和硬度下降,说明变形假单胞菌的生长破坏了黄瓜组织,导致营养物质流失和特征香气的流失。Wang Aimei等^[13]发现青霉菌的增殖引起了洋葱挥发性物质的显著变化,导致洋葱香气物质的流失。Colantuono等^[27]研究表明,贮藏至28 d时石榴汁中乳酸菌、霉菌和酵母的生长导致了挥发性化合物的显著变化以及石榴汁风味的损失。与PP CK组相比,PP CAS处理维持了正己醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(Z)-6-壬烯醛的相对含量,说明气调贮藏有助于鲜切黄瓜特征香气的保持。Villalobos等^[4]发现气调包装维持了无花果中醛类、酯类这些特征风味。Fan Kai等^[19]研究发现5% O₂和5% CO₂气调包装维持了鲜切黄瓜中可溶性固形物含量,延缓了风味的降解。Kahramanoğlu等^[5]研究还发现,气调包装维持了草莓中可溶性固形物含量,延缓了异味的产生。

2,2-二甲基戊烷、5-甲基-4-壬烯等14种C₇~C₁₂碳氢类化合物和2-羟基-2-环戊烯-1-酮、丁烯酸乙烯酯、甲酸苯酯、丁酸-1-乙烯基-1,5-二甲基-4-己烯基酯、2,7-二甲基-1-辛醇仅在PP CAS处理组中检出,可能是变形假单胞菌在低氧条件下产生的挥发性有机化合物。Klein等^[28]研究发现接种荧光假单胞菌后的鸡胸肉在低氧条件下产生了C₇~C₁₂的碳氢化合物以及3-羟基-2-丁酮和2-甲基丁酸乙酯等酮类和酯类化合物。

(E)-2-庚烯醛、丙醛二乙基乙缩醛、3,3-二甲基己醛、5-甲基-1-庚烯、1-乙基-3-甲基环戊烷、正辛烷、2,3-二甲基辛烷、8-甲基-1-烯、2,6,6-三甲基辛烷、2,5,9-三甲基癸烷、4,7-二甲基十一烷、2-甲基-3-戊酮、3,3,5-三甲基环己酮、2,2,6-三甲基环己酮、3,5-二羟基苯乙酮、2,5-二甲基-3-己酮和2,2,5-三甲基己烷-3,4-二酮、3,4-二酮、(Z)-丙酸-3-己烯酯、1,2-二甲氧基苯、二丙基二硫醚和6-丁基-2,3,4,5-四氢吡啶仅在PP CK组中检出，可能是变形假单胞菌空气条件下代谢产生的挥发性物质。María等^[29]在接种丁香假单胞菌后番茄叶片的挥发性物质中检测到葵烷和丁酸己烯酯等酯类以及含6~9个碳的酮类化合物。Parlapani等^[30]研究发现假单胞菌导致了鲷鱼的腐败并产生了2-乙基-1-己醇、丁酸异戊酯等醇类和酯类挥发性化合物。

在PP CK和PP CAS处理组中检测到了双(环己基甲基)亚硫酸盐、二丙基二硫醚、3-戊烯基戊醚以及2-正丙

基呋喃等呋喃类化合物，这些物质具有刺激性难闻气味。María等^[29]发现接种丁香假单胞菌后番茄叶片萎蔫，并产生了2-乙基呋喃等呋喃类、醚类和含硫化物。胡惠平等^[31]检测了分离自猪肉的3种假单胞菌的挥发性代谢产物，发现正十二烷、3,5-二甲基辛烷、6-甲基-5-庚烯-2-酮、3-苯基呋喃、(1E)-1-乙缩醛-1H-茚、1,5-二甲基萘、3-丙酰吡啶以及氯二溴甲烷等物质都是假单胞菌的挥发性代谢产物。本研究在接菌处理组中也检出了正十二烷以及2,3-二甲基辛烷、6-甲基-3-庚酮、2-正丙基呋喃、2,2,4,4,7,7-六甲基-1,3,3a,5,6,7a-六氢茚、(Z)-9-甲基十氢萘、6-丁基-2,3,4,5-四氢吡啶和1,4-二氯苯等挥发性代谢产物。与PP CK组相比，PP CAS组未检出2,3-二甲基辛烷、二丙基二硫醚、6-丁基-2,3,4,5-四氢吡啶和1,4-二氯苯这些挥发性代谢产物，在贮藏至6 d时抑制了6-甲基-3-庚酮、2-正丙基呋喃、2,2,4,4,7,7-六甲基-1,3,3a,5,6,7a-六氢茚的产生。

表6 不同处理下鲜切黄瓜中挥发性成分及相对含量

Table 6 Relative contents of volatile components identified in fresh-cut cucumbers under different treatments

| 种类 | 中文名称 | 英文名称 | 分子式 | 对照 | | | PP CAS | | | PP CK | | RI | CAS号 |
|--------------|----------------------|--|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|--------------|
| | | | | 0 d | 6 d | 12 d | 0 d | 6 d | 12 d | 6 d | 12 d | | |
| 醛类 | 2-己烯醛 | 2-hexenal | C ₆ H ₁₀ O | 14.46±0.74 | 13.38±0.63 | 14.23±0.63 | 10.83±0.37 | 10.87±0.26 | 13.85±0.80 | 17.62±1.09 | 17.73±1.14 | 867 | 6728-26-3 |
| | 正己醛 | hexanal | C ₆ H ₁₂ O | 43.70±0.87 | 47.57±0.22 | 27.85±0.76 | 46.16±1.06 | 40.21±0.96 | 18.07±0.30 | 25.26±0.45 | 6.98±0.97 | 792 | 66-25-1 |
| | 苯甲醛 | benzaldehyde | C ₆ H ₅ O | 3.59±0.29 | — | 1.00±0.07 | — | — | — | — | — | 1057 | 100-52-7 |
| | (E)-2-庚烯醛 | (E)-2-heptenal | C ₇ H ₁₄ O | — | — | — | — | — | — | 1.31±0.04 | — | 1054 | 18829-55-5 |
| | 丙醛二乙基乙缩醛 | propionaldehyde diethyl acetal | C ₈ H ₁₆ O ₂ | — | — | — | — | — | — | 0.38±0.03 | — | 1801 | 10160-87-9 |
| | 3-甲基己醛 | 3-methylhexanal | C ₇ H ₁₄ O | 0.62±0.04 | — | — | — | — | — | — | — | 945 | 19269-28-4 |
| | 庚醛 | heptanal | C ₇ H ₁₄ O | — | 0.86±0.03 | 1.11±0.07 | 1.06±0.09 | 1.00±0.08 | — | 1.31±0.10 | — | 946 | 111-71-7 |
| | (E)-2-辛烯醛 | (E)-2-octenal | C ₈ H ₁₆ O | — | 0.79±0.07 | — | 1.03±0.05 | — | — | — | — | 1249 | 2548-87-0 |
| | 3,3-二甲基己醛 | 3,3-dimethylhexanal | C ₉ H ₁₈ O | — | — | — | — | — | — | — | 2.84±0.15 | 1754 | 55320-57-5 |
| | (E,Z)-2,6-壬二烯醛 | (E,Z)-nona-2,6-dienal | C ₉ H ₁₆ O | 9.07±0.53 | 8.09±0.20 | 5.12±0.34 | 23.78±1.09 | 19.97±1.12 | — | 16.80±0.68 | — | 1495 | 557-48-2 |
| 酮类 | (E)-2,6-壬二醛 | (E)-2,6-nonadienal | C ₉ H ₁₆ O | — | — | — | 0.58±0.06 | 0.51±0.05 | — | 0.43±0.04 | — | 1475 | 17587-33-6 |
| | (Z)-6-壬烯醛 | (Z)-6-nonenal | C ₉ H ₁₆ O | 7.10±0.03 | 3.65±0.23 | 4.47±0.20 | 6.62±0.30 | 11.50±0.38 | — | 9.67±0.35 | — | 1383 | 2277-20-5 |
| | 壬醛 | nonanal | C ₉ H ₁₈ O | — | — | — | — | — | 1.57±0.05 | — | — | 1388 | 124-19-6 |
| | 2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛 | 2,6,6-trimethyl-1-cyclohexene-1-carboxaldehyde | C ₁₀ H ₁₈ O ₂ | — | 0.94±0.03 | — | — | — | — | — | — | 1638 | 432-25-7 |
| | 3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛 | 3,7-dimethyl-2,6-octadienal | C ₁₀ H ₂₀ O | — | — | — | — | — | 1.08±0.07 | — | 1.77±0.11 | 1686 | 5392-40-5 |
| | (S)-3,7-二甲基-6-辛烯醛 | (S)-3,7-dimethyl-6-octenal | C ₁₀ H ₂₀ O | — | — | — | — | — | 6.40±0.15 | — | 7.81±0.20 | 1496 | 5949-05-3 |
| | 癸醛 | decanal | C ₁₀ H ₂₀ O | — | — | 0.88±0.06 | — | — | — | — | — | 1609 | 112-31-2 |
| | 2-甲基十一醛 | 2-methylundecanal | C ₁₁ H ₂₂ O | — | — | 3.02±0.06 | — | — | — | — | — | 1348 | 110-41-8 |
| | 十五醛 | pentadecanal | C ₁₅ H ₃₀ O | 0.52±0.07 | — | 1.29±0.33 | 0.71±0.08 | 0.94±0.07 | 1.56±0.05 | 1.50±0.09 | 1.83±0.09 | 2593 | 2765-11-9 |
| | 丙基环丙烷 | propylcyclopropane | C ₆ H ₁₂ | — | — | — | — | — | 6.72±0.19 | 2.23±0.02 | 1.53±0.06 | 895 | 2415-72-7 |
| 碳氢化合物 | 1,1-二甲基环戊烷 | 1,1-dimethylcyclopentane | C ₆ H ₁₄ | — | — | 0.51±0.02 | 1.84±0.04 | — | — | — | — | 1053 | 1638-26-2 |
| | 2,2-二甲基戊烷 | 2,2-dimethylpentane | C ₆ H ₁₄ | — | — | — | — | 0.58±0.05 | — | — | — | 1594 | 590-35-2 |
| | 2,4-辛二烯 | 2,4-octadiene | C ₈ H ₁₆ | 1.31±0.09 | 1.51±0.07 | 1.69±0.09 | 0.89±0.08 | — | — | — | — | 1130 | 13643-08-8 |
| | 1-乙基环己烯 | 1-ethylcyclohexene | C ₇ H ₁₄ | — | — | — | — | 1.01±0.08 | — | 1.35±0.09 | — | 1133 | 1453-24-3 |
| | 5-甲基-1-庚烯 | 5-methyl-1-heptene | C ₇ H ₁₆ | — | — | — | — | — | — | — | 1.74±0.09 | 723 | 13151-04-7 |
| | 3,5-二甲基-1-己烯 | 3,5-dimethyl-1-hexene | C ₇ H ₁₆ | 0.74±0.06 | 1.76±0.03 | — | — | 0.91±0.03 | — | — | — | 1049 | 7423-69-0 |
| | (1,2-二甲基丙基)环丙烷 | cyclopropane-2-dimethylpropyl | C ₆ H ₁₆ | — | — | — | — | — | 2.09±0.08 | — | — | 1753 | 6976-27-8 |
| | 1-乙基-1-甲基环戊烷 | 1-ethyl-1-methylcyclopentane | C ₆ H ₁₆ | — | — | — | — | 0.95±0.09 | 0.77±0.05 | — | — | 1877 | 16747-50-5 |
| | 1-乙基-3-甲基环戊烷 | 1-ethyl-3-methylcyclopentane | C ₆ H ₁₆ | — | — | — | — | — | — | 1.33±0.06 | — | 1254 | 3726-47-4 |
| | 2,3-二甲基己烷 | 2,3-dimethylhexane | C ₇ H ₁₆ | — | — | — | — | — | 2.03±0.08 | — | — | 724 | 584-94-1 |
| 正辛烷 | 3,3-二甲基己烷 | 3,3-dimethylhexane | C ₇ H ₁₆ | — | 2.16±0.09 | 2.76±0.05 | — | — | — | 0.41±0.04 | — | 2182 | 563-16-6 |
| | 正辛烷 | octane | C ₈ H ₁₈ | — | — | — | — | — | — | — | 2.48±0.19 | 1596 | 111-65-9 |
| 1-乙基-1-甲基环己烷 | 1-乙基-1-甲基环己烷 | 1-ethyl-1-methylcyclohexane | C ₇ H ₁₆ | — | — | 0.86±0.04 | — | — | — | — | — | 1195 | 1000113-52-1 |

续表6

| 种类 | 中文名称 | 英文名称 | 分子式 | 对照 | | PP CAS | | PP CK | | RI | % CAS号 |
|-------|----------------------------------|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | | | | 0 d | 6 d | 12 d | 0 d | 6 d | 12 d | | |
| | 3,3-二甲基-1-反式-5-庚烯 | 3,3-dimethyl-1, <i>trans</i> -5-heptadien | C ₈ H ₁₆ | — | — | 0.63±0.06 | 0.59±0.04 | — | — | 0.91±0.03 | 2.39±0.12 |
| | 3,7-甲基-1,3,6-辛三烯 | 3,7-dimethylocta-1,3,6-triene | C ₉ H ₁₆ | 0.74±0.04 | — | — | — | — | — | — | 2 080 |
| | 1,2-二甲基-3-丙-2-环戊烷 | 1,2-dimethyl-3-propan-2-ylcyclopentane | C ₉ H ₂₀ | — | — | 0.48±0.03 | — | — | — | — | 2 565 |
| | 1-异丙基-1-甲基环己烷 | 1-isopropyl-1-methylcyclohexane | C ₉ H ₂₀ | — | — | — | — | 0.99±0.03 | — | — | 1 993 |
| | (Z)-2-癸烯 | (Z)-2-decene | C ₁₀ H ₂₀ | 0.91±0.03 | — | — | — | — | — | — | 1 183 |
| | 2,6-二甲基-3-辛烯 | 2,6-dimethyl-3-octene | C ₉ H ₂₀ | — | — | — | 1.18±0.06 | — | — | — | 1 188 |
| | 5-甲基-4-壬烯 | 5-methyl-4-nonene | C ₉ H ₂₀ | — | — | — | — | 1.35±0.09 | — | — | 1 187 |
| | 2-甲基-3-乙基-2-庚烯 | 2-methyl-3-ethyl-2-heptene | C ₉ H ₂₀ | — | — | — | — | — | 2.17±0.04 | — | 1 193 |
| | 2,3-二甲基-2-辛烯 | 2,3-dimethyl-2-octene | C ₉ H ₂₀ | — | 0.90±0.05 | — | — | — | — | 2.13±0.07 | — |
| | 2,3-二甲基辛烷 | 2,3-dimethyloctane | C ₉ H ₂₂ | — | — | — | — | — | — | 0.82±0.08 | 1 447 |
| | (Z)-9-甲基十氢萘 | (Z)-9-methyldecalin | C ₁₀ H ₂₀ | — | — | — | — | — | 0.74±0.03 | — | 1 850 |
| | 8-甲基-1-烯 | 8-methyldec-1-ene | C ₉ H ₂₂ | — | — | — | — | — | — | 4.15±0.14 | 1 347 |
| | 2,6,6-三甲基辛烷 | 2,6,6-trimethyl-octane | C ₁₀ H ₂₂ | — | — | — | — | — | — | 0.90±0.03 | 1 952 |
| | 3,9-十二烷炔 | 3,9-dodecadiyne | C ₁₂ H ₂₀ | 0.51±0.04 | — | — | — | — | — | — | 2 040 |
| | 2,3-二甲基十氢萘 | 2,3-dimethyldecalin | C ₁₀ H ₂₂ | — | 0.57±0.05 | — | — | — | — | — | 1 548 |
| | 2-乙基十氢萘 | 2-ethyldecalin | C ₁₀ H ₂₂ | — | — | 1.09±0.11 | — | — | — | — | 1 648 |
| 碳氢化合物 | 2,4,6-三甲基-1-壬烯 | 2,4,6-trimethyl-1-nonene | C ₉ H ₂₀ | — | — | — | — | — | 0.83±0.09 | — | 948 |
| | 正十二烷 | dodecane | C ₁₂ H ₂₆ | — | — | — | — | — | 2.21±0.04 | — | 1 595 |
| | 2,4-二甲基癸烷 | 2,4-dimethyldecane | C ₁₀ H ₂₆ | — | — | — | — | — | 1.19±0.09 | — | 2 183 |
| | 过氢苯基 | perhydrophenalene | C ₁₀ H ₂₂ | — | 1.72±0.04 | 3.35±0.09 | — | — | 2.98±0.04 | 1.32±0.03 | 1.57±0.05 |
| | 庚基环己烷 | heptylcyclohexane | C ₁₀ H ₂₀ | — | 0.56±0.03 | — | — | — | — | — | 1 879 |
| | 正十三烷 | tridecane | C ₁₃ H ₂₈ | — | 2.53±0.04 | 3.48±0.04 | — | 0.97±0.04 | 3.73±0.02 | 2.21±0.02 | 5.19±0.03 |
| | 2,4-二甲基十一烷 | 2,4-dimethylundecane | C ₁₁ H ₂₈ | — | — | — | — | — | 0.60±0.02 | — | 1 919 |
| | 2,5,9-三甲基癸烷 | 2,5,9-trimethyldecane | C ₁₁ H ₂₈ | — | — | — | — | — | — | 1.85±0.03 | 2 001 |
| | 4,7-二甲基十一烷 | 4,7-dimethylundecane | C ₁₁ H ₂₈ | — | — | — | — | — | — | 1.29±0.05 | 5.69±0.08 |
| | 7a-甲基-3-(2-甲基丙基)-1,2,4,5,6,7-正己烷 | 7a-methyl-3-(2-methylpropyl)-1,2,4,5,6,7-hexahydroindene | C ₁₀ H ₂₄ | — | — | 0.91±0.03 | — | — | 1.26±0.02 | — | 2 017 |
| 酮类 | 正十四烷 | tetradecane | C ₁₄ H ₃₀ | — | 1.82±0.03 | 3.32±0.04 | — | 1.07±0.05 | 4.61±0.03 | — | — |
| | β-石竹烯 | β-caryophyllene | C ₁₀ H ₂₄ | — | — | — | 0.74±0.04 | — | — | — | 2 036 |
| | α-石竹烯 | α-caryophyllene | C ₁₀ H ₂₄ | — | — | — | 1.20±0.03 | — | — | — | 2 083 |
| | 1,6-二甲基-4-异丙基-十氢萘 | 1,6-dimethyl-4-isopropyl-decalin | C ₁₀ H ₂₈ | — | — | 0.73±0.05 | — | — | — | — | 1 663 |
| | 2,2,4,4,7,7-六甲基-3,3a,5,6,7a-六氢茚 | 2,2,4,4,7,7-hexamethyl-1,3,3a,5,6,7a-hexahydroindene | C ₁₆ H ₃₀ | — | — | 0.45±0.03 | — | — | 0.85±0.04 | — | 2 037 |
| | 4-环己基丁基环己烷 | 4-cyclohexylbutylcyclohexane | C ₁₆ H ₃₀ | — | — | 0.96±0.03 | — | — | — | — | 1 878 |
| | 二环己基甲基环己烷 | dicyclohexylmethylcyclohexane | C ₁₆ H ₃₄ | — | — | — | — | 0.84±0.02 | — | — | 1 887 |
| | 2-降基-2-环戊烯-1-酮 | 2-hydroxycyclopent-2-en-1-one | C ₆ H ₁₀ O ₂ | — | — | — | — | — | 1.19±0.06 | — | 1 385 |
| | 2,5-己二酮 | 2,5-hexanedione | C ₆ H ₁₀ O ₂ | — | 0.59±0.04 | — | — | — | — | — | 1 118 |
| | 2-甲基-3-戊酮 | 2-methyl-3-pentanone | C ₅ H ₁₂ O | — | — | — | — | — | — | 0.94±0.06 | 721 |
| 酯类 | 2,4-二羟基苯乙酮 | 2,4-dihydroxyacetophenone | C ₈ H ₁₀ O ₃ | — | — | 0.76±0.03 | — | — | — | — | 1 642 |
| | 3,5-二羟基苯乙酮 | 3,5-dihydroxyacetophenone | C ₈ H ₁₀ O ₃ | — | — | — | — | — | — | 2.40±0.05 | 1 641 |
| | 3,5-辛二烯-2-酮 | 3,5-octadien-2-one | C ₈ H ₁₀ O ₂ | 0.54±0.03 | 1.39±0.11 | 0.70±0.03 | 0.57±0.03 | 1.70±0.04 | 1.02±0.02 | 2.13±0.07 | 1.67±0.04 |
| | 6-甲基-3-庚酮 | 6-methyl-3-heptanone | C ₇ H ₁₆ O | — | — | — | — | — | 1.52±0.06 | 0.78±0.03 | — |
| | 2,5-二甲基-3-己酮 | 2,5-dimethyl-3-hexanone | C ₇ H ₁₆ O | — | — | — | — | — | — | 1.10±0.04 | 1 917 |
| | 3,3,5-三甲基己酮 | 3,3,5-trimethylcyclohexanone | C ₉ H ₁₆ O | — | — | — | — | — | — | 1.48±0.04 | 1 190 |
| | 2,2,6-三甲基己酮 | 2,2,6-trimethylcyclohexanone | C ₉ H ₁₆ O | — | — | — | — | — | — | 1.14±0.04 | 1 196 |
| | 2,2,5-三甲基己烷-3,4-二酮 | 2,2,5-trimethylhexane-3,4-dione | C ₉ H ₁₆ O ₂ | — | — | — | — | — | — | 1.23±0.04 | 2 181 |
| | 6-甲基-5-乙基-3-庚烯-2-酮 | 5-ethyl-6-methyl-3-hepten-2-one | C ₉ H ₁₆ O | — | — | 0.56±0.02 | — | — | — | — | 1 482 |
| | (E)-8a-甲基-4(<i>H</i>)-八氢薁酮 | (E)-8a-methyl[perhydroazulen-4(<i>H</i>)-one | C ₁₀ H ₁₆ O | — | — | 1.38±0.02 | — | — | — | — | 1 549 |
| 酯类 | 4-乙酰基-2,3,4,5,5-五甲基环戊-2-烯酮 | 4-acetyl-2,3,4,5,5-pentamethyl-cyclopent-2-enone | C ₁₂ H ₂₀ O ₂ | 0.47±0.02 | — | — | — | 0.68±0.02 | 0.80±0.03 | 0.82±0.04 | — |
| | 丁烯酸乙烯酯 | vinyl crotonate | C ₅ H ₈ O ₂ | — | — | — | — | 0.42±0.05 | — | — | 1 490 |
| | 正己酸乙烯酯 | vinyl caproate | C ₆ H ₁₂ O ₂ | — | — | 0.49±0.03 | — | — | — | — | 1 451 |
| | 3-乙氧基-2-丁炔羧酸乙酯 | ethyl-3-ethoxybut-2-enate | C ₆ H ₁₀ O ₃ | — | — | 0.53±0.03 | — | — | — | — | 1 459 |
| | 甲酸苯酯 | phenacyl formate | C ₈ H ₁₀ O ₃ | — | — | — | — | 2.12±0.03 | — | — | 1 059 |
| | (Z)-丙酸-3-己烯酯 | (Z)-3-hexenylpropionate | C ₈ H ₁₄ O ₃ | — | — | — | — | — | 2.29±0.05 | 1 391 | 1000428-73-9 |

续表6

| 种类 | 中文名称 | 英文名称 | 分子式 | 对照 | | | PP CAS | | | PP CK | | RI | CAS号 |
|-----|-------------------------|--|--|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|--------------|
| | | | | 0 d | 6 d | 12 d | 0 d | 6 d | 12 d | 6 d | 12 d | | |
| 酯类 | 2-异丙基乙酰乙酸乙酯 | 2-isopropylacetoacetic acid ethyl ester | C ₆ H ₁₀ O ₃ | - | - | 1.70±0.03 | - | 0.51±0.02 | - | 0.89±0.02 | - | 1.532 | 1522-46-9 |
| | 苯甲酸-N-羟琥珀酰亚胺酯 | N-hydroxysuccinimidyl benzoate | C ₁₁ H ₁₀ NO ₄ | - | - | - | - | 1.41±0.02 | - | 0.96±0.02 | - | 1.063 | 23405-15-4 |
| | 3-异丙基苯基-N,N'-二甲氨基甲酸酯 | 3-isopropylphenyl-N,N'-dimethylcarbamate | C ₁₂ H ₁₇ NO ₂ | - | - | 0.82±0.02 | - | - | - | - | - | 843 | 1000331-48-4 |
| | 丁酸-1-乙烯基-1,5-二甲基-4-己烯基酯 | 1,5-dimethyl-1-vinyl-4-hexenyl butyrate | C ₁₂ H ₂₀ O ₂ | - | - | - | - | - | 0.69±0.04 | - | - | 1.374 | 78-36-4 |
| 呋喃类 | 己二酸二辛酯 | diocetyl adipate | C ₂₂ H ₄₀ O ₄ | 14.36±0.04 | 2.43±0.04 | 2.01±0.03 | - | - | - | - | - | 3150 | 123-79-5 |
| | 4-甲基-2,3-二氢呋喃 | 4-methyl-2,3-dihydrofuran | C ₆ H ₈ O | - | 0.50±0.03 | - | 0.63±0.04 | 0.55±0.03 | - | 1.02±0.03 | - | 726 | 34314-83-5 |
| | 2-正丙基呋喃 | 2-propylfuran | C ₇ H ₁₀ O | - | - | - | 0.78±0.02 | 1.40±0.08 | 3.35±0.06 | 1.85±0.06 | - | 1156 | 4229-91-8 |
| | 2-正丁基呋喃 | 2-butylfuran | C ₈ H ₁₂ O | - | - | 0.77±0.03 | - | - | 0.58±0.04 | - | 1.70±0.03 | 929 | 4466-24-4 |
| 醇类 | 2-戊基呋喃 | 2-pentylfuran | C ₉ H ₁₂ O | 0.69±0.06 | 3.83±0.09 | 4.21±0.09 | 0.81±0.02 | 0.65±0.04 | 7.33±0.06 | 1.14±0.15 | 12.40±0.03 | 1302 | 3777-69-3 |
| | 2,5-二丁基呋喃 | 2,5-dibutylfuran | C ₁₂ H ₂₀ O | - | 0.53±0.03 | 1.15±0.05 | - | - | - | - | - | 1851 | 72636-53-4 |
| | 5-甲基庚醇 | 5-methylheptanol | C ₈ H ₁₈ O | 0.67±0.05 | - | 0.78±0.01 | - | - | - | - | - | 1253 | 7212-53-5 |
| | 2,7-二甲基-1-辛醇 | 2,7-dimethyl-1-octanol | C ₁₀ H ₂₀ O | - | - | - | - | - | 2.68±0.05 | - | - | 1349 | 15250-22-3 |
| 其他 | 1,4-二氯苯 | 1,4-dichlorobenzene | C ₆ H ₄ Cl ₂ | - | 1.92±0.08 | 2.02±0.04 | - | - | - | - | 2.30±0.05 | 1155 | 106-46-7 |
| | 二丙基二硫醚 | dipropyl disulfide | C ₈ H ₁₆ S ₂ | - | - | - | - | - | - | - | 1.20±0.04 | 1397 | 629-19-6 |
| | 1,2-二甲氧基苯 | 1,2-dimethoxybenzene | C ₈ H ₁₀ O ₂ | - | - | - | - | - | - | 0.73±0.02 | - | 1483 | 91-16-7 |
| | 6-丁基-2,3,4,5-四氮吡啶 | 6-butyl-2,3,4,5-tetrahydropyridine | C ₁₀ H ₁₈ N | - | - | - | - | - | - | - | 1.23±0.03 | 1989 | 1462-94-8 |
| | 3-戊烯基戊醛 | 3-pentenyl pentyl ether | C ₁₀ H ₂₀ O | - | - | 0.60±0.03 | - | - | 0.70±0.02 | - | 2.56±0.06 | 1114 | 56052-85-8 |
| | 2-异丙基-6-叔丁基苯酚 | 2-isopropyl-6-tert-butylphenol | C ₁₃ H ₂₀ O | - | - | 0.77±0.03 | - | - | 1.12±0.03 | - | - | 2041 | 22791-95-3 |
| | 双(环己基甲基)亚硫酸盐 | bis(cyclohexylmethyl)sulfite | C ₁₄ H ₂₈ O ₃ S | - | - | 0.56±0.02 | - | - | 0.60±0.01 | 0.37±0.02 | - | 1992 | 1000309-22-7 |

注：-未检出。

表7 不同处理下鲜切黄瓜中挥发性化合物统计

Table 7 Statistics of volatile compounds identified in fresh-cut cucumbers under different treatments

| 挥发性物质类别 | CK-0 d | | CK-6 d | | CK-12 d | | PP-0 d | | PP CAS-6 d | | PP CAS-12 d | | PP CK-6 d | | PP CK-12 d | |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|------------|--------|-------------|--------|-----------|--------|------------|--------|
| | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% | 种类数 | 相对含量/% |
| 醛 | 7 | 79.07 | 7 | 75.29 | 9 | 58.97 | 8 | 90.76 | 7 | 85.01 | 6 | 42.53 | 9 | 74.27 | 6 | 38.96 |
| 碳氢化合物 | 5 | 4.21 | 9 | 13.51 | 14 | 21.22 | 6 | 6.44 | 9 | 8.10 | 18 | 34.47 | 10 | 15.03 | 11 | 27.41 |
| 酮 | 2 | 1.00 | 2 | 1.95 | 4 | 3.40 | 1 | 0.57 | 2 | 2.38 | 4 | 4.54 | 3 | 3.73 | 7 | 9.96 |
| 酯 | 1 | 14.36 | 1 | 2.52 | 5 | 5.55 | 0 | 0 | 3 | 2.34 | 2 | 2.81 | 2 | 1.85 | 1 | 2.29 |
| 呋喃 | 1 | 0.69 | 3 | 4.81 | 3 | 6.13 | 3 | 2.23 | 3 | 2.17 | 3 | 11.26 | 3 | 4.02 | 2 | 14.10 |
| 醇 | 1 | 0.67 | 0 | 0 | 1 | 0.78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2.67 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 其他 | 0 | 0 | 1 | 1.92 | 4 | 3.95 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1.72 | 2 | 1.10 | 4 | 7.28 |

3 结论

本研究将变形假单胞菌接种于鲜切黄瓜表面并贮藏于不同条件下，探讨变形假单胞菌和气调贮藏对鲜切黄瓜营养品质、滋味和挥发性物质的影响。结果表明，变形假单胞菌的生长会促进鲜切黄瓜呼吸代谢，消耗黄瓜营养物质，使黄瓜亮度和绿度降低，逐渐变黄，促使丙二醛含量和相对电导率增加，以及硬度的下降；气调贮藏可以降低假单胞菌对鲜切黄瓜品质的影响。变形假单胞菌的生长还引起了鲜切黄瓜酸味、苦味、涩味、鲜味、鲜味丰富度、咸味和甜味的显著变化，导致黄瓜特征香气的流失，并产生一些新的烷烃类、酮类、呋喃类、醚类以及含硫化合物等挥发性代谢物。气调通过抑制变形假单胞菌的生长，从而减少变形假单胞菌对各滋味的影响，维持了黄瓜的特征香气，抑制了异味物质的产生。可见，气调贮藏有助于鲜切黄瓜品质、滋味和特征香气的保持以及抑制异味物质的产生。

参考文献：

- [1] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23-38. DOI:10.1016/j.tifs.2017.03.005.
- [2] 魏亚博, 郑邵燕, 赵晓燕, 等. 气调箱贮藏对鲜切黄瓜品质的影响及对假单胞菌的抑制作用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 180-186. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022732.
- [3] IOANNIDIS A G, KERCKHOFF F M, DRIF Y R, et al. Characterization of spoilage markers in modified atmosphere packaged iceberg lettuce[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 279: 1-13. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.034.
- [4] VILLALOBOS M C, SERRADILLA M J, MARTÍN A, et al. Influence of modified atmosphere packaging (MAP) on aroma quality of figs (*Ficus carica* L.)[J]. Postharvest Biology Technology, 2018, 136: 145-151. DOI:10.1016/j.postharvbio.2017.11.001.
- [5] KAHRAMANOĞLU İ. Effects of lemongrass oil application and modified atmosphere packaging on the postharvest life and quality of strawberry fruits[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256(9): 108527. DOI:10.1016/j.scienta.2019.05.054.

- [6] COZZOLINO R, MARTINETTI A, CEFOLA M, et al. Volatile metabolites, quality and sensory parameters of “Ferrovia” sweet cherry cold stored in air or packed in high CO₂ modified atmospheres[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 659-668. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.02.022.
- [7] 李二虎, 冯佳洁, 许灿, 等. 基于电子舌技术检测商业果汁中脂环酸芽孢杆菌[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 141-145. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201422026.
- [8] CAI Wenchao, TANG Fengxian, ZHAO Xinxin, et al. Different lactic acid bacteria strains affecting the flavor profile of fermented jujube juice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(9): 14095. DOI:10.1111/jfpp.14095.
- [9] 曾辉, 刘璇, 吴昕烽, 等. 基于电子鼻技术的不同苹果品种香气的表征与识别[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 197-203. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201604036.
- [10] EZHILAN M, NESAKUMAR N, BABU K J, et al. Freshness assessment of broccoli using electronic nose[J]. Measurement, 2019, 145: 735-743. DOI:10.1016/j.measurement.2019.06.005.
- [11] 任二芳, 牛德宝, 温立香, 等. 电子鼻和电子舌在水果检测中的应用进展[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 261-264.
- [12] DU Dongdong, XU Min, WANG Jun, et al. Tracing internal quality and aroma of a red-fleshed kiwifruit during ripening by means of GC-MS and E-nose[J]. RSC Advances, 2019, 9: 21164. DOI:10.1039/c9ra03506k.
- [13] WANG Aimei, CASADEI F, JOHANSEN A. Emission of volatile organic compounds from healthy and diseased onions[J]. Acta Horticulturae, 2016, 1: 333-340. DOI:10.17660/ActaHortic.2016.1144.49.
- [14] SIEGMUND B, PÖLLINGER-ZIERLER B. Odor thresholds of microbially induced off-flavor compounds in apple juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(16): 5984-5989. DOI:10.1021/jf060602n.
- [15] SINGH S P, PAL R K. Controlled atmosphere storage of guava (*Psidium guajava* L.) fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47(3): 296-306. DOI:10.1016/j.postharvbio.2007.08.009.
- [16] 钱磊, 张业尼, 李涛, 等. 羧甲基壳聚糖与滑菇肽对杏鲍菇保鲜效果研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(18): 168-175. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021018.
- [17] NASEF I N. Short hot water as safe treatment induces chilling tolerance and antioxidant enzymes, prevents decay and maintains quality of cold-stored cucumbers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 138: 1-10. DOI:10.1016/j.postharvbio.2017.12.005.
- [18] SHEN Xu, ZHANG Min, DEVAHASTIN S, et al. Effects of pressurized argon and nitrogen treatments in combination with modified atmosphere on quality characteristics of fresh-cut potatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 149: 159-165. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.11.023.
- [19] FAN Kai, ZHANG Min, FAN Dongcui, et al. Effect of carbon dots with chitosan coating on microorganisms and storage quality of modified-atmosphere-packaged fresh-cut cucumber[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 6032-6041. DOI:10.1002/jsfa.9879.
- [20] WANG Huxuan, SUN Hongmin. Potential use of electronic tongue coupled with chemometrics analysis for early detection of the spoilage of *Zygosaccharomyces rouxi* in apple juice[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 152-158. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.03.120.
- [21] MAKINO Y, HASHIZUME M, BOERZHJIN S. Influence of cold or frozen storage on temporal changes in sulforaphane and objective taste values of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) florets[J]. Environmental Control in Biology, 2019, 57(3): 45-51. DOI:10.2525/ecb.57.45.
- [22] CHEN Huizhi, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Evaluation of the freshness of fresh-cut green bell pepper (*Capsicum annuum* var. *grossum*) using electronic nose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 77-84. DOI:10.1016/j.lwt.2017.08.052.
- [23] HUANG Xiaochen, YUAN Yahong, WANG Xiaoyuan, et al. Application of electronic nose in tandem with chemometric analysis for detection of *Alicyclobacillus acidoterrestris*-spawned spoilage in apple juice beverage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(6): 1295-1304. DOI:10.1007/s11947-015-1491-2.
- [24] 刘春香, 何启伟, 刘扬岷. 黄瓜香气成分的顶空固相微萃取气质联用分析[J]. 园艺学报, 2002, 29(6): 581-583. DOI:10.3321/j.issn:0513-353X.2002.06.021.
- [25] 王立霞, 董玉惠, 孙秀东, 等. 不同嫁接方式及不同中间砧嫁接对黄瓜果实品质及挥发性风味物质的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(6): 867-874. DOI:10.13592/j.cnki.ppj.2018.0469.
- [26] GULER Z, KARACA F, YETISIR H. Volatile compounds in the peel and flesh of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grafted onto bottle gourd (*Lagenaria siceraria*) rootstocks[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2013, 88(2): 123-128. DOI:10.1080/14620316.2013.11512945.
- [27] COLANTUONO A, VITAGLIONE P, MANZO N, et al. Evaluation of microfiltration and heat treatment on the microbiological characteristics, phenolic composition and volatile compounds profile of pomegranate juice (*Punica granatum* L.)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(9): 3324-3332. DOI:10.1002/jsfa.8836.
- [28] KLEIN D, MAURER S, HERBERT U, et al. Detection of volatile organic compounds arising from chicken breast filets under modified atmosphere packaging using TD-GC/MS[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11: 88-98. DOI:10.1007/s12161-017-0978-z.
- [29] MARÍA P L, PURIFICACIÓN L, LAURA C, et al. A non-targeted metabolomics approach unravels the VOCs associated with the tomato immune response against *Pseudomonas syringae*[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 01188. DOI:10.3389/fpls.2017.01188.
- [30] PARLAPANI F F, VERDOS G I, HAROUTOUNIAN S A, et al. The dynamics of *Pseudomonas* and volatileome during the spoilage of gutted sea bream stored at 2 °C[J]. Food Control, 2015, 55: 257-265. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.03.004.
- [31] 胡惠平, 潘迎捷, 刘源, 等. 应用气味指纹技术检测猪肉假单胞菌[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 327-332. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2009.18.076.