

doi:10.3969/j.issn.2095-6002.2020.04.006

文章编号:2095-6002(2020)04-0046-08

引用格式:刘常园,方东路,汤静,等.基于电子鼻和GC-IMS分析复热对香菇汤挥发性风味物质的影响[J].食品科学技术学报,2020,38(4):46-53.



LIU Changyuan, FANG Donglu, TANG Jing, et al. Based on electronic nose and GC-IMS to study effect of reheating on volatile flavor substances of *Lentinus edodes* soups[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020,38(4):46-53.

# 基于电子鼻和 GC-IMS 分析复热对香菇汤挥发性风味物质的影响

刘常园<sup>1</sup>, 方东路<sup>1</sup>, 汤静<sup>1</sup>, 胡秋辉<sup>1,2</sup>, 赵立艳<sup>1,\*</sup>

(1. 南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;

2. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023)

**摘要:**以即食型香菇汤产品为对象,利用电子鼻和气相离子迁移色谱(GC-IMS)分析了蒸汽复热和微波复热对香菇汤风味特征的影响。电子鼻结果表明,复热后香菇汤气味特征变化显著( $P < 0.05$ )。经GC-IMS分析,复热前后香菇汤中均定性出56种单体及部分物质的二聚体,挥发性风味物质的种类虽相同,但含量差异较大。柠檬烯、辛醛及其二聚体、庚醛及其二聚体、2-环己烯-1-酮、2-糠醛及其二聚体、戊醛及其二聚体、2-甲基丙醛在微波复热香菇汤中的含量要高于蒸汽复热和未复热香菇汤。二甲基三硫、对甲酚、二甲基二硫、5-甲基-2-糠醛、1-己醇及其二聚体,在蒸汽复热香菇汤中含量要高于未复热和微波复热香菇汤。复热处理对香菇汤的挥发性风味物质影响较大,且复热后香菇汤中挥发性风味物质含量更高。

**关键词:**香菇汤;复热方式;挥发性风味物质;电子鼻;气相离子迁移色谱

中图分类号:TS202.1

文献标志码:A

香菇(*Lentinus edodes* (Berk.) Pegler)又名花菇、花蕈、香信、椎茸、厚菇等,鲜味浓郁,有“山珍之冠”“菇中之王”等美誉,深受消费者喜爱<sup>[1]</sup>。香菇中含有丰富的碳水化合物、蛋白质、游离氨基酸、维生素、脂肪酸、膳食纤维及钙、磷、铁等元素,营养价值极高<sup>[2-3]</sup>。此外,香菇中富含多糖、多酚等多种生物活性成分,具有显著的抗氧化、抗肿瘤、免疫调节等功能<sup>[4-7]</sup>。

香菇汤产品,味道鲜美、营养丰富,是香菇的主要消费方式之一。随着香菇产量的增加和人们对香菇的认知逐渐加深,香菇加工产品不断出现,丰富了市场上香菇的产品形式。即食型香菇汤产品的研发,也逐渐引起了人们的广泛关注。

人们对预制汤类的消费习惯是趁热食用,因此,对于即食型香菇汤产品来说,在食用前,会经过复热处理,而且此过程可以杀死一些贮藏过程中增殖的微生物,提高食品的安全性<sup>[8]</sup>。复热过程中,不可避免地会出现食品营养成分、物理特性、感官特性改变的情况,而且复热时间越长,对香菇汤产品品质的影响越大。吕翡燕<sup>[9]</sup>利用微波复热蟹味菇菌菇煲(1300 W,3 min),发现复热前后蛋白质无显著变化,而汤中的多糖含量增加,酚类物质和黄酮类物质经过复热处理都呈减少趋势,游离氨基酸含量明显减少,风味氨基酸的组分也呈减少趋势,减少量在50%以上。Dermiki等<sup>[10]</sup>认为,新鲜香菇的独特气味是由直链含硫化合物(如二甲基二硫、二甲基三

收稿日期:2020-06-24

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0400405-1)。

第一作者:刘常园,女,硕士研究生,研究方向为食品营养与化学。

\*通信作者:赵立艳,女,教授,博士,主要从事食品营养与化学方面的研究。

硫)和环状含硫化合物,尤其是1,2,4-三硫杂环戊烷、1,2,4,5-四硫杂环丁烷和蘑菇香精产生的。Wu等<sup>[11]</sup>研究发现,含硫化合物属于热敏物质,极易在热处理过程中受热降解。而复热处理为二次加热的过程,会对香菇汤的风味特征产生影响。因此,选择适合的复热方式对产品品质的保证具有重要意义。

本研究利用电子鼻和 GC-IMS(气相离子迁移色谱)技术分析了室温贮藏(20 ℃)的即食型香菇汤产品经微波和蒸汽复热后整体风味的变化情况,以期为香菇汤产品复热方式的选择和应用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜香菇(品种:香菇808)、胡萝卜、葱姜、食盐,南京市玄武区紫金商业街苏果超市;黄原胶、麦芽糊精(均为食品级),上海源叶生物科技有限公司;3,5-二硝基水杨酸,上海阿拉丁工业有限公司;四水合酒石酸钾钠、无水亚硫酸钠,上海马克林生物化学试剂公司。

### 1.2 仪器与设备

R2017-0349型高温蒸煮锅,山东中润机械有限

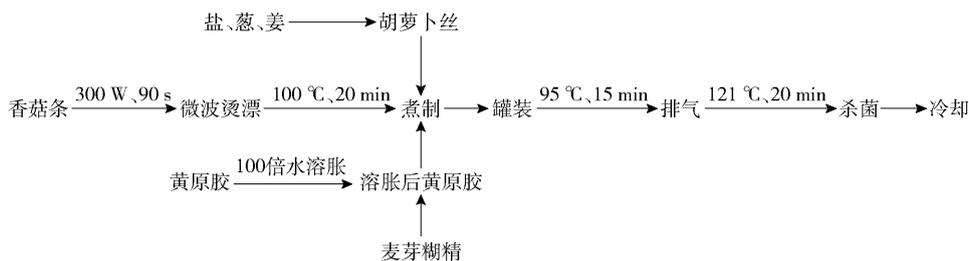


图1 香菇汤的生产工艺

Fig. 1 Production process of *L. edodes* soups

### 1.4 实验方法

#### 1.4.1 香菇汤的复热方法

将香菇汤产品放置在室温中贮藏3 d,进行复热研究<sup>[9]</sup>。为最大程度地减少预制食品的营养和感官特征等品质指标的变化,确定复热终点为香菇汤中心温度达到70 ℃<sup>[12-15]</sup>。

**微波复热:**将香菇汤开盖,整瓶放入微波炉中,微波功率设置为600 W<sup>[16]</sup>,复热到产品中心温度为70 ℃,用时114 s。

**蒸汽复热:**将香菇汤开盖,电磁炉温度设置为120 ℃,待水沸腾后,将整瓶香菇汤置于笼屉中,盖

公司;HH-6型数显电子恒温水浴锅,常州国华电器有限公司;HC238-AV型微波炉,广东美的微波炉制造有限公司;70-2型切片机,MSC International有限公司;JYL-C022E型匀浆机,九阳股份有限公司;MJ-54A型高压蒸汽灭菌锅,上海施都凯仪器设备有限公司;Fox-3000型电子鼻,法国Alpha MOS公司;H1-00053型气相色谱-离子迁移谱仪,德国GAS公司;DM-4型电子天平,上海精天电子仪器有限公司。

### 1.3 香菇汤的制备工艺

新鲜香菇清洗干净后用切片机切成香菇条,于微波炉中300 W烫漂90 s,备用;胡萝卜切丝备用;准确称取质量分数0.25%的黄原胶,加入100倍的水,搅拌20 min后,静置30 min,使黄原胶充分吸水溶胀,之后与质量分数2.7%的麦芽糊精一起加入冷水中,协同增稠香菇汤,并在水中加入质量分数0.7%的食盐。待水沸腾后,放入香菇、胡萝卜及葱、姜。香菇与水料液比为1:5(g/mL),胡萝卜丝、葱、姜的添加量分别为质量分数4%、0.5%、0.5%,100 ℃煮制20 min。罐装,85~95 ℃水浴排气15 min,趁热封罐,121 ℃高温蒸汽杀菌20 min后,快速冷却至室温。

上锅盖,复热到产品中心温度为70 ℃,用时7.5 min。

#### 1.4.2 电子鼻分析

将复热前后香菇汤进行匀浆处理,称取匀浆后样品各2 g于顶空瓶中,立即用带有聚四氟乙烯涂层的盖子进行密封,然后于室温下平衡45 min,之后用电子鼻进行检测。设定电子鼻的检测时间为180 s,延滞时间为1 080 s,洁净的空气作为载气,载气流速为150 mL/min。

#### 1.4.3 气相离子迁移色谱分析

香菇汤样品前处理:将复热前后的香菇汤进行

高速挡匀浆处理,准确称取匀浆液各 1.0 g,置于 20 mL 顶空瓶中,立即用带有聚四氟乙烯涂层的盖子进行密封,待测。

顶空孵化条件:顶空孵化温度为 50 ℃,孵化时间为 15 min,振荡加热,振荡速度为 500 r/min,顶空进样针温度为 85 ℃,进样量为 0.5 mL,采用不分流模式,进样速度为 10 mL/min,用高纯氮气推动和清洗顶空进样针,清洗时间为 15 min。

GC-IMS 条件:漂移管长度为 10 cm,管内线性电压为 400 V/cm,漂移管温度为 60 ℃,漂移气体为高纯氮气,气体流速为 150 mL/min,IMS 探测器温度为 45 ℃。

根据挥发性化合物的保留时间和迁移时间,以  $C_4 \sim C_9$  酮绘制标准曲线,软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库可对物质进行定性分析。GC-IMS 具有独立的用于数据采集的软件——LAV 软件,可用于数据可视化、对齐和自动信号测量<sup>[17]</sup>。利用仪器 LAV 软件,生成挥发性风味物质 GC-IMS 谱图。

## 1.5 数据处理

利用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件和 Microsoft Office Excel 2010 软件对实验数据进行处理,Origin 2018 对实验结果绘图,每个样品平行测定 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 复热前后香菇汤的电子鼻分析结果

电子鼻利用气体传感器阵列对特殊气体分子的敏感性,来识别样品中的气味成分,并对所检测到的气味进行判别和分析<sup>[18]</sup>,复热前后香菇汤电子鼻分析结果见表 1、图 2。由表 1 和图 2 可知,气体传感器 LY2/LG、PA/2、T70/2、P40/1、P10/2、P10/1 和 T30/1 对香菇汤产品的响应值较高,且对未复热香菇汤的响应值要显著高于对微波复热和蒸汽复热香菇汤的响应值( $P < 0.05$ );而微波复热和蒸汽复热香菇汤之间,无显著差异( $P > 0.05$ )。气体传感器 LY2/G、LY2/AA、LY2/GH、LY2/gCTL 和 LY2/gCT 对香菇汤产品的响应值较低,且对未复热香菇汤的响应值要显著低于对蒸汽复热和微波复热香菇汤的响应值( $P < 0.05$ );而微波复热和蒸汽复热香菇汤之间,无显著差异( $P > 0.05$ )。这说明复热后香菇汤的气味特征与未复热香菇汤的气味特征,存在着较大的差异,而蒸汽复热和微波复热香菇汤的气味

图谱较为相似。

表 1 复热前后香菇汤的电子鼻传感器响应值

Tab.1 Electronic nose sensor response value of *L. edodes* soups before and after reheating

传感器	未复热	微波复热	蒸汽复热
LY2/LG	0.05 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.04 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.04 ± 0.00 <sup>b</sup>
LY2/G	-0.09 ± 0.01 <sup>b</sup>	-0.05 ± 0.00 <sup>a</sup>	-0.06 ± 0.00 <sup>a</sup>
LY2/AA	-0.04 ± 0.00 <sup>b</sup>	-0.03 ± 0.00 <sup>a</sup>	-0.03 ± 0.00 <sup>a</sup>
LY2/GH	-0.04 ± 0.00 <sup>b</sup>	-0.03 ± 0.00 <sup>a</sup>	-0.03 ± 0.00 <sup>a</sup>
LY2/gCTL	-0.03 ± 0.00 <sup>b</sup>	-0.02 ± 0.00 <sup>a</sup>	-0.02 ± 0.00 <sup>a</sup>
LY2/gCT	-0.02 ± 0.00 <sup>b</sup>	-0.01 ± 0.00 <sup>a</sup>	-0.01 ± 0.00 <sup>a</sup>
T30/1	0.32 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.25 ± 0.00 <sup>b</sup>
P10/1	0.43 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.41 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.00 <sup>b</sup>
P10/2	0.32 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.31 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.31 ± 0.00 <sup>b</sup>
P40/1	0.42 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.40 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.00 <sup>b</sup>
T70/2	0.16 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.13 ± 0.00 <sup>b</sup>
PA/2	0.28 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.00 <sup>b</sup>

小写字母不同表示同行数据间差异显著。

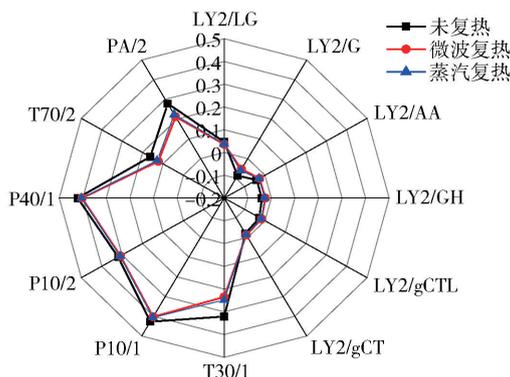


图 2 复热前后香菇汤的电子鼻雷达图谱

Fig.2 Electronic nose radar fingerprint chart of *L. edodes* soups before and after reheating

主成分分析法(PCA)是一种较为常用的数据处理方法,此分析方法能够降低数据矩阵的维度,保留原始数据集的大部分信息并解释各变量之间的相关性<sup>[19]</sup>。用电子鼻分析复热前后香菇汤的气味变化情况,并对电子鼻数据进行主成分分析,见图 3。由图 3 可以看出,PC1 的贡献率为 94.8%,PC2 的贡献率为 4.0%,累计贡献率为 98.8%,能够很好地说明电子鼻数据集的整体情况。而且,图 3 中,蒸汽复热和微波复热香菇汤两者间有部分重叠,但与未复热香菇汤分离开来,这说明蒸汽复热和微波复热香菇汤两者之间香气组成较为相似,但与未复热香菇汤

的香气特征差别较大。为进一步分析蒸汽复热、微波复热和未复热香菇汤之间香气的具体差异,利用 GC-IMS 对复热前后香菇汤的香气组分进行分析。

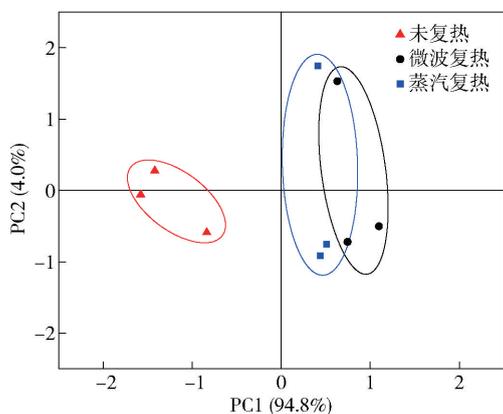


图3 复热前后香菇汤的电子鼻主成分分析

Fig. 3 Electronic nose principal component analysis of *L. edodes* soups before and after reheating

## 2.2 复热前后香菇汤的气相离子迁移色谱分析结果

GC-IMS 是一种快速、高灵敏、高选择性、无需样品前处理、高效便捷的挥发性风味成分分析新技术<sup>[20]</sup>。当 GC 检测器与 IMS 联用时,GC 保留时间和 IMS 漂移时间相结合,可以实现对所测样品中挥发性化合物的二维分离<sup>[21]</sup>。目前,GC-IMS 已被广泛地应用于医疗诊断、环境监测、食品质量和安全控制等领域中<sup>[22-25]</sup>。GC-IMS 分析方法能够作为可视化工具分析样品的挥发性风味化合物;GC-IMS 谱图能够充分反映出 GC-IMS 的检测结果,且检测结果稳定有效<sup>[26]</sup>。

表2是利用 GC-IMS 鉴定出的复热前后香菇汤中的挥发性风味物质信息。由表2可知,在复热前后香菇汤中,共分离鉴定出56种挥发性风味物质,其中包括酯类7种,醛类17种,酮类10种,醇类15种,酸类2种,含硫化合物2种,萜烯类2种,杂环类1种。

为了直观地获得不同复热方式对香菇汤的挥发性风味成分影响情况的信息,利用 GC-IMS 的 LAV 软件中的 Gallery Plot 插件,对定性出的离子峰生成指纹图谱(见图4)。图4中每个亮点均代表着一种挥发性风味化合物,点的颜色越深,说明此挥发性风味化合物的含量越高。一种化合物可能会在同一水平上产生1~2个斑点,这分别代表此物质的单体和二聚体,具体取决于化合物的性质和含量<sup>[27]</sup>。

由图4可以看出,复热方式能够改变香菇汤产

品的挥发性风味成分含量,且复热后香菇汤的风味物质含量要比未复热香菇汤的风味物质含量更高。如图4中红色矩形框 a~g 中所示,微波复热香菇汤的挥发性风味物质的点的颜色要比蒸汽复热和未复热香菇汤的深,所对应的挥发性风味物质有:柠檬烯、辛醛及其二聚体、庚醛及其二聚体、2-环己烯-1-酮、2-糠醛及其二聚体、戊醛及其二聚体、2-甲基丙醛,说明这些挥发性风味成分在微波复热香菇汤中的含量要高于蒸汽复热和未复热香菇汤。而在红色椭圆形框中的挥发性风味成分,包括二甲基三硫、对甲酚、二甲基二硫、5-甲基-2-糠醛、1-己醇及其二聚体,在蒸汽复热香菇汤中含量要高于未复热和微波复热香菇汤。

研究表明,醛酮类在微波复热香菇汤中含量较高,一般具有果香气味<sup>[28]</sup>,来源于多不饱和脂肪酸的热氧化或热降解等,其气味阈值一般较低,对香菇汤的整体风味影响较大<sup>[29-31]</sup>。由于微波可以加速脂质氧化,因此微波复热香菇汤中醛酮类化合物含量较高<sup>[32]</sup>。微波复热香菇汤中还含有较高的柠檬烯,此物质带有一种柑橘的香气,使香菇汤具有令人愉悦的气味<sup>[33]</sup>。蒸汽复热香菇汤中5-甲基-2-糠醛和含硫化合物的含量较高,含硫化合物是香菇的特征挥发性风味成分,带有一种令人愉快的香菇风味。蒸汽复热香菇汤中还含有较高含量的己醇,醇类物质通常是由不饱和脂肪酸氧化产生的,己醇具有一种香甜的松子气味,但其气味阈值较高为8 000  $\mu\text{g/L}$ <sup>[34]</sup>,对蒸汽复热香菇汤的整体香气特征贡献不突出。结合实验结果分析可知,蒸汽复热和微波复热香菇汤的香气特征存在相似之处,也有不同之处。相似之处在于都有较高含量的、对气味贡献较大的醛类物质;不同之处在于蒸汽复热香菇汤中含硫化合物的含量较高,而在微波复热香菇汤中醛酮类化合物含量较高。

## 3 结 论

利用电子鼻和 GC-IMS 分析复热方式对香菇汤气味特征的影响。结果发现:未复热香菇汤与蒸汽、微波复热香菇汤的电子鼻传感器的响应值存在显著差异( $P < 0.05$ ),而蒸汽复热与微波复热香菇汤具有相似的气味轮廓。GC-IMS 分析定性出56种挥发性风味物质以及部分物质的二聚体。复热前后,香

表2 复热前后香菇汤的挥发性风味物质定性分析

Tab.2 Qualitative analysis of volatile flavor substances of *L. edodes* soups before and after reheating

化合物类别	化合物名称	CAS号	分子式	保留指数	$t$ (保留)/s	$t$ (漂移)/ms
酯类	苯甲酸甲酯	93-58-3	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1 092.2	877.961	1.210 2
	苯甲酸甲酯二聚体	93-58-3	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1 091.0	875.253	1.617 5
	$\gamma$ -丁内酯	96-48-0	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	910.8	465.337	1.084 4
	$\gamma$ -丁内酯二聚体	96-48-0	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	904.0	452.849	1.088 9
	丁酸乙酯	105-54-4	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	791.8	300.068	1.564 5
	乙酸乙酯	141-78-6	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	606.8	158.428	1.097 1
	乙酸乙酯二聚体	141-78-6	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	612.4	160.776	1.339 2
	醛类	正壬醛	124-19-6	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	1 107.8	916.163
苯甲醛		100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	959.0	564.080	1.151 4
苯甲醛二聚体		100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	958.5	563.116	1.469 6
庚醛		111-71-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	901.1	447.768	1.332 5
庚醛二聚体		111-71-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	900.7	446.968	1.696 2
2-糠醛		98-01-1	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	828.0	341.605	1.088 0
2-糠醛二聚体		98-01-1	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	827.3	340.858	1.334 8
己醛		66-25-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	792.7	301.040	1.257 5
戊醛		110-62-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	696.4	207.014	1.187 3
戊醛二聚体		110-62-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	695.7	206.527	1.423 8
3-甲基丁醛		590-86-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	658.2	182.476	1.407 6
2-甲基丙醛		78-84-2	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	559.2	138.811	1.280 5
( <i>E</i> )-2-庚烯醛		18829-55-5	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	956.3	558.065	1.257 4
丁醛		123-72-8	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	598.5	154.955	1.291 6
5-甲基-2-糠醛		620-02-0	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	968.1	584.415	1.137 1
辛醛		124-13-0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	1 005.9	670.049	1.403 0
辛醛二聚体		124-13-0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	1 006.0	672.125	1.824 6
酮类		苯乙酮	98-86-2	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	1 061.0	801.980
	苯乙酮二聚体	98-86-2	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	1 060.7	801.065	1.573 2
	2-环己烯-1-酮	930-68-7	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	909.8	463.529	1.114 2
	2-庚酮	110-43-0	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	890.0	428.757	1.261 3
	2,3-戊二酮	600-14-6	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	691.6	203.452	1.227 7
	2-戊酮	107-87-9	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	683.2	197.622	1.128 9
	2-丁酮	78-93-3	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	590.4	151.629	1.061 0
	2-丁酮二聚体	78-93-3	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	585.6	149.679	1.248 3
	2,3-丁二酮	431-03-8	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	583.3	148.699	1.171 7
	2-丙酮	67-64-1	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	505.8	116.891	1.124 2
	2-乙基己基-1-醇	104-76-7	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	1 031.9	731.699	1.412 5
	1-己醇	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	867.8	394.404	1.326 8
2,3-丁二醇	513-85-9	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	792.1	300.431	1.360 2	
1-戊醇	71-41-0	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	759.5	265.278	1.253 5	
2-甲基-1-丁醇	137-32-6	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	733.0	238.564	1.233 0	
3-甲基-1-丁烯-1-醇	763-32-6	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	728.5	234.336	1.246 9	
3-甲基-1-丁醇	123-51-3	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	730.2	235.946	1.488 9	
2-甲基丙醇	78-83-1	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	625.8	166.591	1.173 2	
丙醇	71-23-8	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	555.2	137.186	1.110 8	
乙醇	64-17-5	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	442.2	90.782	1.047 5	
1-辛烯-3-醇	3391-86-4	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	977.5	605.867	1.155 8	
2-乙基己醇	104-76-7	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	1 031.8	733.220	1.798 5	
1-辛烯-3-醇二聚体	3391-86-4	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	983.5	619.541	1.159 1	
1-己醇二聚体	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	867.7	394.260	1.637 8	
对甲酚	106-44-5	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1 078.2	844.596	1.146 0	
酸类	己酸	142-62-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	990.8	635.075	1.305 4
	丙酸	79-09-4	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	691.8	203.646	1.263 9
含硫化合物	二甲基三硫	3658-80-8	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	968.0	584.154	1.307 0
	二甲基二硫	624-92-0	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	743.5	248.791	1.145 1
萜烯类	柠檬烯	5138-86-3	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1 040.8	753.080	1.253 2
	柠檬烯二聚体	5138-86-3	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1 030.4	728.101	1.295 6
杂环类	2-戊基呋喃	3777-69-3	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	996.0	646.973	1.255 1



- 331.
- [13] 李汴生, 李印, 黄智君, 等. 热烫叶菜在冷链储运及微波复热过程中的品质变化[J]. 现代食品科技, 2017, 33(6):261-267.
- LI B S, LI Y, HUANG Z J. Changes in quality and safety of blanched green leafy vegetables during cold-chain storage and microwave reheating [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(6):261-267.
- [14] BAKAR J, RAHIMABADI E Z, MAN Y B C. Lipid characteristics in cooked, chill-reheated fillets of Indo-Pacific king mackerel (*Scomberomorous guttatus*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10):2144-2150.
- [15] ELSHIMI N. Influence of microwave and conventional cooking and reheating on sensory and chemical characteristics of roast beef[J]. Food Chemistry, 1992, 45(1):11-14.
- [16] WANG J Y, ZHANG M, FAN K, et al. Effects of reheating methods on the product quality of Hongsu chicken dish[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 11(42):1-8.
- [17] CONTRERAS M D M, APARICIO L, ARCE L. Usefulness of GC-IMS for rapid quantitative analysis without sample treatment; focus on ethanol, one of the potential classification markers of olive oils [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 120:108897.
- [18] 康翠翠, 施文正, 方林, 等. 不同冻结方式对草鱼肉挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14):229-235.
- KANG C C, SHI W Z, FANG L, et al. Effects of different freezing methods on the volatile components of grass carp meat[J]. Food Science, 2018, 39(14):229-235.
- [19] KAYA Z, YIDIZ S, ÜNLÜTVRK S. Effect of UV-C irradiation and heat treatment on the shelf life stability of a lemon-melon juice blend: multivariate statistical approach [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29:230-239.
- [20] 王海波, 邓宝仲, 吴榕榕, 等. 基于气相离子迁移谱检测热激处理的香蕉挥发性物质 [J]. 食品科技, 2019, 44(11):339-344.
- WANG H B, DENG B Z, WU R R, et al. Detection of volatile compounds in bananas treated by heat shock using gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11):339-344.
- [21] ARROYO M N, GARCIA N M, CASTELL A, et al. Untargeted headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry analysis for detection of adulterated honey[J]. Talanta, 2019, 205:120123.
- [22] GARRIDO D R, DOBAO P M D M, ARCE L, et al. Determination of volatile compounds by GC-IMS to assign the quality of virgin olive oil[J]. Food Chemistry, 2015, 187:572-579.
- [23] RATIU I A, BOCOS B V, PATRUT A, et al. Discrimination of bacteria by rapid sensing their metabolic volatiles using an aspiration-type ion mobility spectrometer (a-IMS) and gas chromatography-mass spectrometry GC-MS [J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 982:209-217.
- [24] LIEDTKE S, SEIFERT L, AHLMANN N, et al. Coupling laser desorption with gas chromatography and ion mobility spectrometry for improved olive oil characterization [J]. Food Chemistry, 2018, 255:323-331.
- [25] CAVANNA D, ZANARDI S, DALL A C, et al. Ion mobility spectrometry coupled to gas chromatography: a rapid tool to assess eggs freshness[J]. Food Chemistry, 2019, 271:691-696.
- [26] ZENG X F, LIU J L, DONG H, et al. Variations of volatile flavour compounds in *Cordyceps militaris* chicken soup after enzymolysis pretreatment by SPME combined with GC-MS, GC × GC-TOF MS and GC-IMS [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(2):509-516.
- [27] 杜超, 戚军, 姚文生, 等. 基于 GC-IMS 分析反复炖煮过程中鸡肉风味物质的变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9):265-271.
- DU C, QI J, YAO W S, et al. Detection of volatile compounds in restewed chicken by GC-IMS [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9):265-271.
- [28] 王琼, 李聪, 高磊峰, 等. 不同类型烟熏香精对西式培根风味的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(7):220-230.
- WANG Q, LI C, GAO L F, et al. Impact of different smoke flavorings on the flavor of western bacon [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(7):220-230.
- [29] RISNER D, TOMASINO E, HUGHES P, et al. Volatile aroma composition of distillates produced from fermented sweet and acid whey [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(1):1-9.
- [30] 步婷婷, 徐大伦, 杨文鸽, 等. 虾籽酱发酵工艺条件的优化及其挥发性风味成分研究[J]. 核农学报, 2016, 30(1):110-119.
- BU T T, XU D L, YANG W G, et al. Optimization of fermentation conditions and volatile components of *Cen-*

- tropages mcmerriichi* sauce[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(1):110-119.
- [31] 解万翠, 杨锡洪, 章超桦, 等. 顶空固相微萃取气相色谱质谱法测定北极虾虾头的挥发性成分[J]. 分析化学, 2011, 39(12):1852-1857.
- XIE W C, YANG X H, ZHANG C H, et al. Determination of volatile flavor compounds of shrimp head by headspace solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2011, 39(12):1852-1857.
- [32] 许雪萍, 李静, 范亚苇, 等. 不同烹调方式对猪肉脂质氧化和挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(1):151-155.
- XU X P, LI J, FAN Y W, et al. Effects of different cooking methods on lipid oxidation and volatile flavor compounds in pork [J]. The Food Industry, 2019, 40(1):151-155.
- [33] 乔宇. 柑橘汁香气活性化合物的鉴定及其在加工和储藏中的变化[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.
- QIAO Y. Identification of aroma active compounds of citrus juices and aroma variation during processing and storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [34] 唐柯, 马玥, 徐岩, 等. 冰葡萄酒重要风味化合物嗅觉阈值的研究[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1):148-151.
- TANG K, MA Y, XU Y, et al. Study on olfactory thresholds for several flavor components in ice wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(1):148-151.

## Based on Electronic Nose and GC-IMS to Study Effect of Reheating on Volatile Flavor Substances of *Lentinus edodes* Soups

LIU Changyuan<sup>1</sup>, FANG Donglu<sup>1</sup>, TANG Jing<sup>1</sup>, HU Qihui<sup>1,2</sup>, ZHAO Liyan<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** This study took instant *Lentinus edodes* (*L. edodes*) soups as the research object to analyze the effects of steam reheating and microwave reheating methods on the flavor characteristics of *L. edodes* soups using electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results from electronic nose showed that the odor characteristics of *L. edodes* soups after reheating changed significantly ( $P < 0.05$ ). By GC-IMS analysis, 56 volatiles compounds including some dimers of flavor compounds were both identified in *L. edodes* soups before and after reheating. And the varieties of flavor compounds were same, but the contents were significantly varied. The contents of ocimene, octanal and its dimer, heptanal and its dimer, 2-cyclohexen-1-one, 2-furfural and its dimer, pentanal and its dimer and 2-methylpropanal in microwave reheating *L. edodes* soups were higher than those of steam reheated and unheated *L. edodes* soups. The contents of dimethyl trisulfide, *p*-cresol, dimethyl disulfide, 5-methyl-2-furfural, 1-hexanol and its dimer in steam reheating *L. edodes* soups were higher than those of microwave reheated and unheated *L. edodes* soups. Collectively, the reheating treatment had a greater influence on the volatile flavor substances of the *L. edodes* soups, and the contents of the volatile flavor substances in the reheated *L. edodes* soups were higher.

**Keywords:** *Lentinus edodes* soups; reheating methods; volatile flavor substances; electronic nose; gas chromatography-ion mobility spectrometry

(责任编辑:张逸群)