

# 纳米粉碎对 3 种食用菌风味特征 及减盐增鲜效果的影响

Effect of flavor characteristics and salt reduction and flavor enhancement  
of three edible fungi by Nano-pulverization

班鑫荣<sup>1,2,3,4</sup> 杨 焱<sup>2,3,4</sup> 李 文<sup>2,3,4</sup> 吴 迪<sup>2,3,4</sup>

BAN Xinrong<sup>1,2,3,4</sup> YANG Yan<sup>2,3,4</sup> LI Wen<sup>2,3,4</sup> WU Di<sup>2,3,4</sup>

张 忠<sup>2,3,4</sup> 陈万超<sup>2,3,4</sup> 李景军<sup>1</sup>

ZHANG Zhong<sup>2,3,4</sup> CHEN Wanchao<sup>2,3,4</sup> LI Jingjun<sup>1</sup>

(1. 安徽科技学院, 安徽 滁州 239000; 2. 上海市农业科学院食用菌研究所, 上海 201403; 3. 农业  
农村部南方食用菌资源利用重点实验室, 上海 201403; 4. 国家食用菌工程技术研究中心, 上海 201403)

(1. Anhui University of Science And Technology, Chuzhou, Anhui 239000, China; 2. Institute  
of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 3. Key  
Laboratory of Edible Fungi Resources and Utilization [South], Ministry of Agriculture, Shanghai  
201403, China; 4. National Engineering Research Center of Edible Fungi, Shanghai 201403, China)

**摘要:**目的: 优化食用菌的加工工艺, 评估其作为风味剂在食品工业中的应用潜力。方法: 使用离子色谱仪和高效液相色谱仪对样品的非挥发性滋味成分含量进行测定, 并通过等鲜浓度值来评估样品的鲜味; 运用 GC-MS、电子鼻和电子舌来检测样本中的挥发性香气成分, 观察纳米粉碎前后的微观结构, 并进行增鲜减盐试验。结果: 纳米粉碎后, 大球盖菇和双孢蘑菇的鲜味氨基酸、呈味核苷酸和有机酸含量显著增加, 挥发性化合物的种类和数量显著增加, 而纳米粉碎对草菇的风味成分影响较小; 电子舌结果表明, 经纳米粉碎的样品在鲜味和咸味方面均有明显提升, 加入 0.5% 纳米粉碎双孢蘑菇后能够增加 0.28% 的盐浓度, 同时其鲜味值提高了 145%。结论: 纳米粉碎技术能够提高食品的口感, 在食品制造业中可以将纳米粉碎后的食用菌粉作为替代盐和风味增强剂的有效选择。

**关键词:** 大球盖菇; 双孢蘑菇; 草菇; 纳米粉碎技术; 风味; 增鲜减盐

**基金项目:** 国家重点研发计划(编号: 2023YFF1103401)

**作者简介:** 班鑫荣, 女, 安徽科技学院在读硕士研究生。

**通信作者:** 陈万超(1987—), 男, 上海市农业科学助理研究员, 博士。E-mail: chenwanchao@saas.sh.cn

李景军(1970—), 男, 安徽科技学院研究员, 博士。

E-mail: 2003jjli@163.com

**收稿日期:** 2023-09-09 **改回日期:** 2023-12-11

**Abstract: Objective:** This study aimed to optimize the processing technology of edible fungi and evaluate its application potential as flavoring agents in the food industry. **Methods:** The content of non-volatile flavor components of the samples was determined by ion chromatography and high-performance liquid chromatography, and the umami of the samples was evaluated by equal umami concentration. The volatile aroma components in the samples were detected by GC-MS, electronic nose and electronic tongue. The microstructure before and after Nano-pulverization was observed, and the experiment of increasing freshness and reducing salt was carried out. **Results:** After Nano-pulverization, the contents of umami amino acids, flavor nucleotides and organic acids in *Stropharia rugosoannulata* and *A. bisporus* increased significantly, and the types and quantities of volatile compounds increased significantly, while Nano-pulverization had little effect on the flavor components of *Volvariella volvacea*. The results of the electronic tongue showed that the pulverized samples were significantly improved in both umami and saltiness, the addition of 0.5% Nano-pulverization *A. bisporus* could increase the salt concentration by 0.28%, and the umami value was increased by 145%. **Conclusion:** Nano-pulverization technology can improve the taste of food. Nano-pulverized edible fungus powder can be used as an effective alternative to salt and flavor enhancers in the food manufacturing industry.

**Keywords:** *Stropharia rugosoannulata*; *Agaricus bisporus*;

*Volvariella volvacea*; Nano-pulverization technology; flavor; flavor enhancement and salt reduction

大球盖菇、双孢蘑菇和草菇作为食用菌的代表性品种,因其独特的风味品质而备受人们喜爱。食用菌所具有的特殊风味,是其成为烹饪和美食领域重要组成部分的关键原因之一<sup>[1]</sup>。然而,传统的食用菌干燥、烹调以及粉碎方法会对食用菌的风味产生影响<sup>[2]</sup>。侯会等<sup>[3]</sup>发现食用菌在热风干燥的高温、富氧环境中,其有机酸易氧化为脂肪酸和氧代有机酸,或在热干燥中发生脱羧反应,导致含量降低;刘玉莽<sup>[4]</sup>发现经高压蒸煮处理后的双孢菇香气物质最少,可能是高压蒸煮破坏了风味物质结构;刘丽娜等<sup>[5]</sup>发现常规粉碎会使产品颗粒粗糙、分布不均匀,限制风味物质释放,影响最终产品口感和风味。纳米菌粉的制备可采用高能球磨法,通过罐体的冷循环系统,在常温和低温条件下,罐体快速进行多维摆动式运动,此时球磨介质会产生强烈的冲击力,使材料颗粒不断碰撞和摩擦,进而细化和混合颗粒,实现纳米级颗粒的制备<sup>[6]</sup>。

在食品生产中,采用纳米技术可以优化食品的物理化学性质,改善其营养和风味<sup>[7-8]</sup>,为推动传统食品科学和食品工业的发展提供有效途径<sup>[9]</sup>。而目前有关纳米粉碎对食用菌风味品质的影响研究尚未见报道。研究拟评估纳米粉碎对大球盖菇、双孢蘑菇和草菇风味品质的影响,探索纳米粉碎在提高非挥发性和挥发性滋味成分含量方面的潜在优势,并分析纳米粉碎对食用菌增鲜减盐效果的影响,以期为进一步优化食用菌的加工工艺和改善风味品质提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

大球盖菇、双孢蘑菇:上海联中食用菌专业合作社;

草菇:江苏江南生物科技有限公司;

AccQ-Tag 氨基酸测定衍生试剂盒、氨基酸混标溶液:美国 Waters 公司;

5'-胞苷酸、葡萄糖、赤藓糖醇等标品:美国 Sigma 公司;

酒石酸等有机酸标准品:上海安谱实验科技股份有限公司;

甲醇、乙腈:色谱级,美国 DIKMA 公司;

邻二氯苯:色谱级,国药集团化学试剂有限公司;

氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

高能纳米冲击磨:CJM-SY-B01 型,秦皇岛市太极环纳米制品有限公司;

摇摆式高速万能粉碎机:QE-400 型,浙江屹立工贸

有限公司;

离心机:Allegra25RCentrifuge 型,美国 Beckman 公司;

阴离子色谱仪:Dionex ICS2500 型,美国 DIONEX 公司;

高效液相色谱仪:Waters600 型,含 2996 型二极管阵列检测器,美国 Waters 公司;

固相微萃取装置:美国 Supelco 公司;

GC-MS 联用仪:7890A-5975C 型,美国 Agilent 公司;

电子舌味觉分析系统:SA402B 型,日本 Insent 公司;

电子鼻系统:PEN3 型,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;

扫描电子显微镜:TM4000PLUS 型,日本株式会社日立高新技术那珂事业所。

### 1.2 试验方法

1.2.1 纳米食用菌粉的制备 采用高速万能粉碎机将干制的大球盖菇、双孢蘑菇、草菇进行预粉碎,过 60 目筛,得到粗粉原样,含水量均在 5% 以下。将粗粉与磨球按照特定的体积比装入高能纳米冲击磨罐内,密封罐盖并紧固螺钉。罐体被安装于机器的套壳内,用螺母固定后,启动设备<sup>[10]</sup>。粉碎过程持续 6 h,取出样品,用标准筛分离物料,真空包装<sup>[11]</sup>。

1.2.2 扫描电镜分析 参照牛潇潇等<sup>[12]</sup>的方法略修改。取适量样品平铺于导电胶上,用洗耳球将多余的样品轻轻吹扫,采用离子溅射法对样品进行镀金,喷金时间 60 s,将样品置于扫描电子显微镜下观察其微观结构。像素 1 080,工作距离 12.2 mm,加速电压 5 kV,束流强度为标准束流,探头模式为背散射。选取 500~3 000 倍进行观察。

1.2.3 溶解度测定 参照许佳林等<sup>[13]</sup>的方法。称取 0.2 g 食用菌粉末于 15 mL 离心管中,加入 10 mL 蒸馏水,涡旋混匀,沸水浴 30 min,冷却,4 000 r/min 离心 20 min,将上清液倒入事先干燥至恒重的干燥皿中,105 ℃干燥至恒重,并按式(1)计算溶解度。

$$S = \frac{A}{M} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——溶解度,%;

A——上清液重量,g;

M——称样量,g。

#### 1.2.4 非挥发性风味成分

(1) 游离氨基酸含量测定:参照陈荣荣等<sup>[14]</sup>的方法。色谱条件:AccQ·Tag 氨基酸分析色谱柱(3.9 mm×150 mm×4 μm),流速 1.0 mL/min,柱温 37 ℃,紫外检测波长 248 nm,进样量 10 μL,流动相 A 为乙腈,流动相 B

为超纯水,流动相C为醋酸盐—磷酸盐缓冲液。

(2) 5'-核苷酸含量测定:取500 mg样品,加入25 mL超纯水,煮沸并保持10 min,冷却,10 000×g离心15 min,取上清液过0.22 μm MCE微孔滤膜,检测。色谱条件:UltimateAQ-C<sub>18</sub>色谱柱(250 mm×4.6 mm×5 μm);流动相为10 mmol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>缓冲盐(pH 4.68);流速1.0 mL/min;柱温30℃;进样量10 μL;紫外检测波长249 nm。

(3) 等效鲜味浓度值(EUC)测定:根据陈万超等<sup>[15]</sup>的方法。

(4) 有机酸含量测定:参照李巧珍等<sup>[16]</sup>的方法。色谱条件:GreenODS-AQC<sub>18</sub>色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相为10 mmol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>缓冲盐(pH 2.8),等度洗脱模式,流速1.0 mL/min,紫外检测波长210 nm,柱温30℃,进样量10 μL。

(5) 可溶性单糖、糖醇含量测定:参照陈万超等<sup>[17]</sup>的方法。色谱条件:CarboPac PA-20色谱柱(4 mm×250 mm),进样量25 μL,流速0.4 mL/min,柱温30℃,流动相为0.48 mol/L NaOH。

1.2.5 挥发性风味成分分析 参照陈万超等<sup>[18]</sup>的方法。

1.2.6 电子鼻分析 参照谷镇<sup>[19]</sup>的方法。

1.2.7 电子舌分析

(1) 3种食用菌纳米粉碎前后的电子舌分析:准确称取1 000 mg样品粉末,加入30 mL蒸馏水,沸水浴30 min,冷却,10 000×g离心15 min,提取上清液,并用蒸馏水稀释5倍,以制备待测液,取40 mL倒入电子舌专用杯中测定。五味如酸味、苦味、涩味、鲜味、咸味以及甜味的数据通过仪器自带的数据处理软件获得。每个样品重复4次。

(2) 增鲜减盐试验:参照严方等<sup>[20]</sup>的方法略修改。测定质量分数为0.01%,0.05%,0.10%,0.30%,0.50%,0.70%,0.80%,0.90%,1.00%盐溶液的电子舌,以质量分数为横坐标,咸味值为纵坐标建立标准曲线( $y = 5.2564 \ln x + 33.218$ ,  $R^2 = 0.9999$ )。以0.5%盐溶液为对照,且样品溶液中盐质量分数保持在0.5%水平,分别加入0.5%的食用菌粉样品进行复配混匀,并直接倒入电子舌专用杯中进行测定。

纳米菌粉与NaCl溶液的复配参照Yu等<sup>[21]</sup>的方法略修改,保持盐溶液和纳米粉碎菌粉复配液终浓度相同,以0.5%的NaCl溶液作为对照,梯度降低盐的质量分数为0.4%,0.3%,0.2%,0.1%,并分别添加0.1%,0.2%,0.3%,0.4%的纳米粉碎菌粉,混匀后进行电子舌测定。

### 1.3 统计学分析

利用IBM SPSS Statistics 26和Origin 2019b 32Bit软件对数据进行显著性差异分析并绘图。数据以平均

数±标准偏差表示,小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 3种食用菌纳米粉碎前后的微观结构表征

由图1可知,3种食用菌的微观形态各有差异,大球盖菇的形态类似木炭,经纳米粉碎后颗粒变得细小且密集,更加碎片化;双孢蘑菇为多层片状结构,表面不平整,而纳米粉碎双孢蘑菇像细小的土壤颗粒,成团居多;草菇的形态与双孢蘑菇的类似,但纳米粉碎后草菇的颗粒比双孢蘑菇的更小,且成球居多。初始食用菌颗粒具有不规则的形状,经纳米粉碎后,颗粒形状更加均匀,更接近球形。这是因为粉碎过程中颗粒受到力的作用逐渐被破碎和研磨,形状变得更加均匀,孔隙结构更为紧密。总的来说,相比于常规粉碎,纳米粉碎能较好均质化3种食用菌粉末。

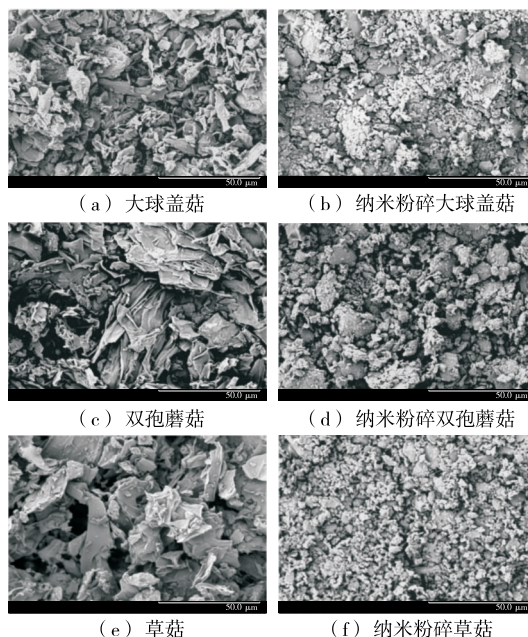


图1 纳米粉碎对3种食用菌微观结构的影响

Figure 1 Effect of Nano-pulverization on microstructure of three edible fungi (×1 000)

### 2.2 3种食用菌纳米粉碎前后的溶解度

由图2可知,相比于常规粉碎,纳米粉碎后大球盖菇、双孢蘑菇和草菇的溶解度均显著提高,这可能是纳米粉碎技术将颗粒变得更细小均匀,增加了颗粒表面积,使颗粒表面和内部的亲水基团与水接触,因此溶解度增大;也有可能是因为纳米粉碎过程中,由于强烈的压力、剪切和摩擦力作用,食用菌中的部分不溶性物质可能发生连接键的破裂或部分熔化现象,从而转化为可溶性物质,增加了溶解性<sup>[22]</sup>。说明纳米粉碎技术对提高食用菌的溶解度具有积极作用。

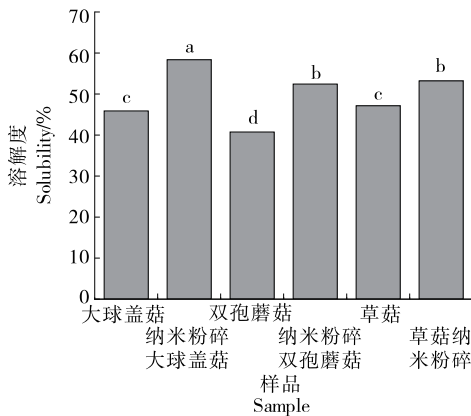


图 2 3 种食用菌纳米粉碎前后的溶解度

Figure 2 Solubility of three edible fungi before and after Nano-pulverization

2.3 3 种食用菌纳米粉碎前后的非挥发性风味成分

2.3.1 游离氨基酸和核苷酸含量 食用菌样品中的游离氨基酸和核苷酸在营养和风味方面具有重要作用。甜味与丙氨酸、甘氨酸、脯氨酸、丝氨酸和苏氨酸含量有关；谷氨酸和天冬氨酸含量与鲜味有关，风味 5'-核苷酸(5'-IMP、5'-GMP 和 5'-XMP)也有助于食用菌的鲜味，而苯丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和蛋氨酸含量与苦味有关<sup>[23]</sup>。

由表 1 可知，纳米粉碎后，除草菇外，其他两类样品中的游离氨基酸和核苷酸总量均显著增加( $P < 0.05$ )。常规粉碎的大球盖菇中甜味氨基酸含量最高；经纳米粉碎后，甜味氨基酸含量显著增加，其中含量最高的鲜味氨基酸谷氨酸(Glu)增加得最多，占鲜味成分的 78%<sup>[24]</sup>。这可能是由于谷氨酰胺酶的水解作用。表明纳米粉碎可以有效改善大球盖菇鲜味。

表 1 纳米粉碎对 3 种食用菌中游离氨基酸和核苷酸的影响

Table 1 Effects of Nano-pulverization on free amino acids and nucleotides of three edible fungi mg/g

| 氨基酸      | 大球盖菇                    | 纳米粉碎大球盖菇                | 双孢蘑菇                     | 纳米粉碎双孢蘑菇                | 草菇                      | 纳米粉碎草菇                   |
|----------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 天冬氨酸     | 1.70±0.17 <sup>d</sup>  | 2.17±0.21 <sup>c</sup>  | 4.21±0.04 <sup>b</sup>   | 4.65±0.03 <sup>a</sup>  | 0.91±0.02 <sup>e</sup>  | 1.02±0.02 <sup>e</sup>   |
| 丝氨酸      | 2.61±0.08 <sup>e</sup>  | 2.96±0.04 <sup>d</sup>  | 6.74±0.09 <sup>a</sup>   | 6.89±0.04 <sup>a</sup>  | 3.72±0.00 <sup>c</sup>  | 4.04±0.03 <sup>b</sup>   |
| 谷氨酸      | 6.60±0.23 <sup>f</sup>  | 7.85±0.10 <sup>e</sup>  | 14.90±0.18 <sup>b</sup>  | 16.60±0.06 <sup>a</sup> | 9.91±0.02 <sup>d</sup>  | 10.39±0.07 <sup>c</sup>  |
| 甘氨酸      | 0.33±0.07 <sup>c</sup>  | 0.38±0.07 <sup>c</sup>  | 1.09±0.01 <sup>a</sup>   | 1.11±0.11 <sup>a</sup>  | 0.82±0.02 <sup>b</sup>  | 0.83±0.01 <sup>b</sup>   |
| 组氨酸      | 3.54±0.16 <sup>d</sup>  | 4.06±0.12 <sup>d</sup>  | 13.01±0.51 <sup>b</sup>  | 17.43±0.10 <sup>b</sup> | 11.80±0.02 <sup>c</sup> | 12.27±0.07 <sup>bc</sup> |
| 精氨酸      | 0.13±0.05 <sup>d</sup>  | 0.97±0.03 <sup>b</sup>  | 0.62±0.02 <sup>c</sup>   | 0.68±0.00 <sup>c</sup>  | 1.00±0.00 <sup>ab</sup> | 1.08±0.01 <sup>a</sup>   |
| 苏氨酸      | 1.76±0.08 <sup>d</sup>  | 2.08±0.05 <sup>cd</sup> | 3.61±0.02 <sup>a</sup>   | 3.86±0.45 <sup>a</sup>  | 2.60±0.01 <sup>bc</sup> | 2.78±0.01 <sup>b</sup>   |
| 丙氨酸      | 3.16±0.12 <sup>c</sup>  | 3.66±0.07 <sup>c</sup>  | 11.79±0.07 <sup>a</sup>  | 12.04±0.95 <sup>a</sup> | 5.44±0.02 <sup>b</sup>  | 5.75±0.03 <sup>b</sup>   |
| 脯氨酸      | 0.57±0.05 <sup>cd</sup> | 0.72±0.02 <sup>c</sup>  | 2.36±0.17 <sup>b</sup>   | 2.72±0.02 <sup>a</sup>  | 0.46±0.01 <sup>d</sup>  | 0.51±0.01 <sup>cd</sup>  |
| 酪氨酸      | 1.11±0.05 <sup>bc</sup> | 1.23±0.01 <sup>ab</sup> | 0.82±0.07 <sup>d</sup>   | 1.06±0.01 <sup>c</sup>  | 1.25±0.01 <sup>a</sup>  | 1.27±0.00 <sup>a</sup>   |
| 缬氨酸      | 1.18±0.04 <sup>c</sup>  | 1.35±0.02 <sup>c</sup>  | 2.59±0.18 <sup>a</sup>   | 2.74±0.02 <sup>a</sup>  | 1.76±0.01 <sup>b</sup>  | 1.95±0.01 <sup>b</sup>   |
| 蛋氨酸      | 0.14±0.01 <sup>d</sup>  | 0.16±0.00 <sup>bc</sup> | 0.23±0.02 <sup>ab</sup>  | 0.25±0.02 <sup>a</sup>  | 0.09±0.02 <sup>d</sup>  | 0.17±0.04 <sup>bc</sup>  |
| 赖氨酸      | 0.82±0.04 <sup>b</sup>  | 1.04±0.02 <sup>b</sup>  | 0.73±0.22 <sup>b</sup>   | 1.06±0.01 <sup>b</sup>  | 1.49±0.03 <sup>a</sup>  | 1.81±0.01 <sup>a</sup>   |
| 异亮氨酸     | 0.34±0.01 <sup>b</sup>  | 0.42±0.01 <sup>b</sup>  | 1.28±0.01 <sup>ab</sup>  | 1.91±0.78 <sup>a</sup>  | 1.01±0.03 <sup>ab</sup> | 1.20±0.01 <sup>ab</sup>  |
| 亮氨酸      | 0.93±0.03 <sup>d</sup>  | 1.01±0.01 <sup>d</sup>  | 2.29±0.06 <sup>b</sup>   | 2.61±0.02 <sup>a</sup>  | 1.96±0.08 <sup>c</sup>  | 2.46±0.02 <sup>a</sup>   |
| 苯丙氨酸     | 1.02±0.02 <sup>d</sup>  | 1.09±0.00 <sup>c</sup>  | 0.90±0.03 <sup>e</sup>   | 0.92±0.02 <sup>e</sup>  | 1.16±0.00 <sup>b</sup>  | 1.31±0.00 <sup>a</sup>   |
| 5'-胞苷酸   | 5.54±0.08 <sup>e</sup>  | 6.41±0.15 <sup>cd</sup> | 6.09±0.01 <sup>ded</sup> | 6.62±0.26 <sup>c</sup>  | 21.79±0.07 <sup>a</sup> | 20.11±0.01 <sup>ab</sup> |
| 5'-尿苷酸   | 0.19±0.00 <sup>e</sup>  | 0.36±0.03 <sup>d</sup>  | 1.13±0.00 <sup>b</sup>   | 1.45±0.09 <sup>a</sup>  | 0.75±0.02 <sup>c</sup>  | 0.99±0.04 <sup>b</sup>   |
| 5'-鸟苷酸   | 0.06±0.01 <sup>e</sup>  | 0.16±0.00 <sup>e</sup>  | 0.40±0.03 <sup>d</sup>   | 0.82±0.06 <sup>b</sup>  | 0.62±0.06 <sup>c</sup>  | 1.05±0.08 <sup>a</sup>   |
| 5'-肌苷酸   | 0.10±0.01 <sup>e</sup>  | 0.23±0.00 <sup>bc</sup> | 0.22±0.02 <sup>bc</sup>  | 1.42±0.16 <sup>a</sup>  | 0.43±0.03 <sup>b</sup>  | 0.16±0.02 <sup>e</sup>   |
| 5'-黄苷酸   | 0.10±0.00 <sup>d</sup>  | 0.10±0.00 <sup>d</sup>  | 1.14±0.12 <sup>ab</sup>  | 1.03±0.06 <sup>b</sup>  | 1.41±0.10 <sup>a</sup>  | 0.53±0.10 <sup>c</sup>   |
| 5'-腺苷酸   | 0.13±0.00 <sup>e</sup>  | 0.30±0.03 <sup>d</sup>  | 0.61±0.00 <sup>c</sup>   | 1.62±0.02 <sup>a</sup>  | 0.33±0.01 <sup>d</sup>  | 0.94±0.00 <sup>b</sup>   |
| 呈味核苷酸    | 0.39±0.02 <sup>c</sup>  | 0.79±0.04 <sup>c</sup>  | 2.36±0.07 <sup>b</sup>   | 4.89±0.30 <sup>a</sup>  | 2.79±0.05 <sup>b</sup>  | 2.68±0.00 <sup>b</sup>   |
| 5'-核苷酸总量 | 6.12±0.10 <sup>f</sup>  | 7.56±0.08 <sup>e</sup>  | 9.59±0.08 <sup>d</sup>   | 12.95±0.12 <sup>c</sup> | 25.33±0.04 <sup>a</sup> | 23.79±0.03 <sup>ab</sup> |
| 鲜味氨基酸    | 8.30±0.40 <sup>e</sup>  | 10.02±0.31 <sup>d</sup> | 19.11±0.23 <sup>b</sup>  | 21.24±0.09 <sup>a</sup> | 10.93±0.03 <sup>c</sup> | 11.30±0.09 <sup>c</sup>  |
| 甜味氨基酸    | 8.44±0.39 <sup>c</sup>  | 9.80±0.24 <sup>c</sup>  | 25.59±0.18 <sup>a</sup>  | 26.63±1.45 <sup>a</sup> | 13.03±0.05 <sup>b</sup> | 13.91±0.07 <sup>b</sup>  |
| 苦味氨基酸    | 7.27±0.33 <sup>f</sup>  | 9.06±0.20 <sup>e</sup>  | 21.54±0.42 <sup>b</sup>  | 25.91±0.01 <sup>a</sup> | 18.79±0.07 <sup>d</sup> | 20.45±0.16 <sup>c</sup>  |
| 无味氨基酸    | 1.93±0.09 <sup>bc</sup> | 2.26±0.04 <sup>b</sup>  | 1.54±0.29 <sup>c</sup>   | 2.12±0.02 <sup>b</sup>  | 2.74±0.02 <sup>a</sup>  | 3.09±0.02 <sup>a</sup>   |
| 游离氨基酸总量  | 25.93±1.21 <sup>e</sup> | 31.14±0.79 <sup>d</sup> | 67.16±0.60 <sup>b</sup>  | 76.53±2.13 <sup>a</sup> | 45.37±0.01 <sup>c</sup> | 48.86±0.33 <sup>c</sup>  |

对于草菇来说,纳米粉碎显著提高了苦味氨基酸含量( $P<0.05$ ),不利于草菇的风味。纳米粉碎双孢蘑菇中游离氨基酸总量最高,为76.53 mg/g,且相比于常规粉碎方法,其呈味核苷酸含量显著提高,可能是由于纳米粉碎改变了双孢蘑菇的细胞壁结构,增加了其可溶性,导致游离氨基酸和核苷酸的释放。

纳米粉碎草菇的呈味核苷酸含量无明显变化,而纳米粉碎双孢蘑菇和纳米粉碎大球盖菇中的呈味核苷酸含量显著增加( $P<0.05$ ),可能是由于纳米粉体可以使呈味核苷酸更易于释放出来,增加了样品的呈味强度。

2.3.2 等效鲜味浓度(EUC) 等效鲜味浓度常用于评价氨基酸和5'-核苷酸协同作用下蘑菇鲜味,EUC值 $>1\ 000\text{ g MSG/g}$ 为较高水平, $100\sim1\ 000\text{ g MSG/g}$ 为高水平, $10\sim100\text{ g MSG/g}$ 为中水平, $<10\text{ g MSG/g}$ 为低水平<sup>[25-26]</sup>。由图3可知,纳米粉碎双孢蘑菇的EUC值达到了785.77 g MSG/100 g,鲜味质量较高,其鲜味氨基酸和风味核苷酸含量也非常丰富。经纳米粉碎后大球盖菇和双孢蘑菇的EUC值显著提升( $P<0.05$ ),但草菇的增加效果不显著,其中大球盖菇的EUC值提高了159.86%,双孢蘑菇的提高了142.28%,说明纳米粉碎对其鲜味的提升作出了极大贡献,有助于提高食用菌样品的风味和营养价值。

2.3.3 有机酸含量 由表2可知,纳米粉碎后,大球盖菇

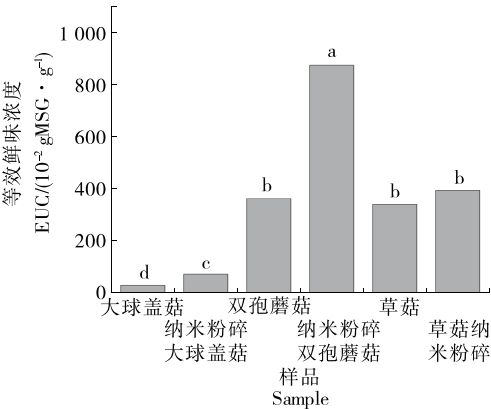


图3 3种食用菌纳米粉碎前后的EUC值

Figure 3 The EUC values of three edible fungi before and after Nano-pulverization

和草菇的呈味有机酸含量和总量均显著提高,可能是因为纳米粉碎破坏了食用菌的细胞结构,增加了有机酸的可溶性和释放程度<sup>[27]</sup>。纳米粉碎双孢蘑菇中的有机酸含量略微增加,但无明显差异,可能是因为不同的食用菌在细胞结构和化学组成方面存在差异,从而对纳米粉碎的响应程度也不同。

综合来看,纳米粉碎对食用菌中有有机酸含量影响显著,但具体效果取决于菇种和化合物类型,纳米粉碎有助于释放和提取食用菌中的有机酸化合物。

表2 纳米粉碎对3种食用菌有机酸的影响<sup>†</sup>

Table 2 Effects of Nano-pulverization on organic acids of three edible fungi mg/g

| 有机酸   | 大球盖菇                     | 纳米粉碎大球盖菇                 | 双孢蘑菇                     | 纳米粉碎双孢蘑菇                 | 草菇                       | 纳米粉碎草菇                   |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 酒石酸   | 7.81±0.08 <sup>c</sup>   | 8.69±0.53 <sup>c</sup>   | 33.43±0.84 <sup>b</sup>  | 35.31±0.15 <sup>a</sup>  | 8.13±0.21 <sup>c</sup>   | 9.07±0.05 <sup>c</sup>   |
| 苹果酸   | 50.81±0.36 <sup>f</sup>  | 56.71±0.70 <sup>e</sup>  | 106.12±0.88 <sup>d</sup> | 111.18±0.44 <sup>c</sup> | 128.97±0.75 <sup>b</sup> | 160.56±0.98 <sup>a</sup> |
| 抗坏血酸  | 2.09±0.17 <sup>a</sup>   | 2.28±0.25 <sup>a</sup>   | 1.45±0.03 <sup>b</sup>   | 1.48±0.02 <sup>b</sup>   | 2.31±0.06 <sup>a</sup>   | 2.37±0.01 <sup>a</sup>   |
| 乙酸    | 40.34±0.48 <sup>b</sup>  | 49.02±0.07 <sup>a</sup>  | 92.81±0.95 <sup>a</sup>  | 93.14±0.49 <sup>a</sup>  | 46.77±0.00 <sup>b</sup>  | 49.10±0.59 <sup>a</sup>  |
| 富马酸   | 1.20±0.00 <sup>d</sup>   | 1.39±0.08 <sup>c</sup>   | 1.94±0.04 <sup>b</sup>   | 1.95±0.00 <sup>b</sup>   | 3.64±0.00 <sup>a</sup>   | 3.63±0.03 <sup>a</sup>   |
| 柠檬酸   | 23.58±0.95 <sup>d</sup>  | 26.57±0.48 <sup>c</sup>  | 29.43±0.94 <sup>b</sup>  | 33.02±0.49 <sup>a</sup>  | 28.27±0.50 <sup>bc</sup> | 28.30±0.87 <sup>bc</sup> |
| 琥珀酸   | 51.42±0.93 <sup>e</sup>  | 59.28±0.78 <sup>f</sup>  | 147.82±0.83 <sup>b</sup> | 151.53±0.69 <sup>a</sup> | 65.11±0.15 <sup>d</sup>  | 79.83±0.97 <sup>c</sup>  |
| 呈味有机酸 | 125.81±2.24 <sup>e</sup> | 142.56±1.95 <sup>d</sup> | 286.96±2.21 <sup>a</sup> | 292.14±2.07 <sup>a</sup> | 222.35±0.11 <sup>c</sup> | 268.69±0.85 <sup>b</sup> |
| 总计    | 177.27±2.80 <sup>e</sup> | 203.94±2.74 <sup>d</sup> | 416.59±4.06 <sup>a</sup> | 424.01±1.75 <sup>a</sup> | 283.20±0.18 <sup>c</sup> | 332.85±0.18 <sup>b</sup> |

<sup>†</sup> 呈味有机酸包括苹果酸、琥珀酸、柠檬酸。

2.3.4 可溶性糖含量 可溶性糖是产生甜味和影响蘑菇味道的主要物质<sup>[28]</sup>。由表3可知,纳米粉碎后,大球盖菇、双孢蘑菇、草菇的糖醇含量显著下降,可能是因为纳米粉碎过程中的高压或剧烈搅拌等作用力导致糖醇分解或损失;大球盖菇中含量最高的单糖为葡萄糖,纳米粉碎大球盖菇的葡萄糖含量显著增加( $P<0.05$ ),双孢蘑菇和草菇中也有类似现象,可能是由于食用菌的结构在纳米粉碎的高压过程中被破坏,导致细胞破裂和破碎,细胞壁和膜的完整性被破坏,胞壁多糖降解,从而增加了葡萄

糖含量<sup>[29]</sup>;粉碎过程中积累的较高内部温度和增强的酶促反应也可能导致可溶性糖醇含量下降;此外,纳米粉碎可以促进蛋白质中游离氨基酸的产生以及食用菌中氨基酸和糖之间的美拉德反应,从而使食用菌中糖醇含量减少<sup>[30]</sup>。

2.4 电子鼻分析

W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S传感器分别对芳香物质、氮氧化合物、氨类及芳香物质、氢化合物、烯烃及芳香物质、烃类、含硫化合

表 3 纳米粉碎对 3 种食用菌可溶性糖含量的影响

Table 3 Effects of Nano-pulverization on soluble sugar of three edible fungi mg/g

| 种类 | 可溶性糖  | 大球盖菇                    | 纳米粉碎大球盖菇                | 双孢蘑菇                    | 纳米粉碎双孢蘑菇                | 草菇                      | 纳米粉碎草菇                  |
|----|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 单糖 | 葡萄糖胺  | 0.26±0.03 <sup>b</sup>  | 0.09±0.03 <sup>c</sup>  | 0.03±0.00 <sup>c</sup>  | 0.02±0.01 <sup>c</sup>  | 0.22±0.05 <sup>b</sup>  | 0.74±0.02 <sup>a</sup>  |
|    | 半乳糖   | 0.12±0.02 <sup>a</sup>  | 0.20±0.00 <sup>a</sup>  | 0.12±0.00 <sup>a</sup>  | 0.20±0.01 <sup>a</sup>  | 0.24±0.10 <sup>a</sup>  | 0.17±0.03 <sup>a</sup>  |
|    | 葡萄糖   | 21.58±0.27 <sup>b</sup> | 33.83±0.01 <sup>a</sup> | 8.20±0.24 <sup>f</sup>  | 9.16±0.24 <sup>e</sup>  | 14.15±0.02 <sup>d</sup> | 19.70±0.11 <sup>c</sup> |
|    | 木糖    | 1.27±0.18 <sup>ab</sup> | 1.02±0.00 <sup>bc</sup> | 0.55±0.01 <sup>d</sup>  | 1.48±0.07 <sup>a</sup>  | 0.91±0.05 <sup>c</sup>  | 0.45±0.04 <sup>d</sup>  |
|    | 甘露糖   | 0.26±0.01 <sup>cd</sup> | 0.23±0.00 <sup>cd</sup> | 0.17±0.00 <sup>d</sup>  | 0.46±0.05 <sup>b</sup>  | 0.76±0.08 <sup>a</sup>  | 0.40±0.11 <sup>bc</sup> |
|    | 果糖    | 1.26±0.07 <sup>bc</sup> | 1.06±0.01 <sup>c</sup>  | 0.53±0.01 <sup>d</sup>  | 0.64±0.08 <sup>d</sup>  | 2.28±0.10 <sup>a</sup>  | 1.43±0.16 <sup>b</sup>  |
|    | 半乳糖醛酸 | 0.31±0.13 <sup>c</sup>  | 0.96±0.01 <sup>a</sup>  | 0.37±0.06 <sup>c</sup>  | 0.61±0.01 <sup>b</sup>  | 0.40±0.01 <sup>bc</sup> | 0.35±0.01 <sup>c</sup>  |
|    | 葡萄糖醛酸 | 0.85±0.02 <sup>c</sup>  | 0.97±0.02 <sup>c</sup>  | 1.14±0.05 <sup>c</sup>  | 2.54±0.27 <sup>a</sup>  | 1.07±0.10 <sup>c</sup>  | 1.95±0.08 <sup>b</sup>  |
|    | 总计    | 25.91±0.53 <sup>b</sup> | 38.37±0.05 <sup>a</sup> | 11.12±0.15 <sup>e</sup> | 15.13±0.23 <sup>d</sup> | 20.03±0.23 <sup>c</sup> | 25.19±0.15 <sup>b</sup> |
| 糖醇 | 赤藓糖醇  | 1.24±0.10 <sup>a</sup>  | 0.27±0.03 <sup>cd</sup> | 0.44±0.04 <sup>b</sup>  | 0.30±0.01 <sup>bc</sup> | 0.19±0.00 <sup>cd</sup> | 0.14±0.00 <sup>d</sup>  |
|    | 阿拉伯糖醇 | 1.68±0.04 <sup>a</sup>  | 0.37±0.05 <sup>b</sup>  | 0.34±0.01 <sup>b</sup>  | 0.44±0.14 <sup>b</sup>  | 0.24±0.01 <sup>b</sup>  | 0.22±0.00 <sup>b</sup>  |
|    | 海藻糖醇  | 47.86±0.17 <sup>a</sup> | 43.17±0.61 <sup>b</sup> | 0.38±0.02 <sup>e</sup>  | 0.53±0.04 <sup>e</sup>  | 16.39±0.48 <sup>c</sup> | 13.89±0.78 <sup>d</sup> |
|    | 甘露醇   | 12.74±0.34 <sup>c</sup> | 8.47±0.07 <sup>d</sup>  | 55.22±0.19 <sup>a</sup> | 40.00±0.49 <sup>b</sup> | 0.48±0.00 <sup>e</sup>  | 0.38±0.02 <sup>e</sup>  |
|    | 总计    | 63.51±0.64 <sup>a</sup> | 52.27±0.75 <sup>b</sup> | 56.39±0.26 <sup>c</sup> | 41.27±0.67 <sup>d</sup> | 17.29±0.50 <sup>e</sup> | 14.63±0.80 <sup>f</sup> |

物、醇类醛酮类、芳香化合物及有机硫化物、烷烃等化学物质响应信号较强<sup>[31]</sup>。由图 4(a)可知,纳米粉碎后,WIC 传感器响应值增大,说明芳香物质响应信号增强,即芳香物质含量增加。W5S 传感器表现出对氮氧化合物极高的敏感性,其中大球盖菇和草菇在纳米粉碎后的响应值较大,说明纳米粉碎技术可能导致菇中氮氧化合物浓度增加。由图 4(b)可知,PC1 的贡献率为 52.4%,PC2 的为 28.3%,累计贡献率为 80.7%,说明这两个主成分可以代表样品的大部分信息。除大球盖菇外,其余样品均分布在不同的区域,说明纳米粉碎前后的双孢蘑菇和草菇可以被区分开<sup>[32]</sup>,纳米粉碎后双孢蘑菇主要在 W1S 传感器上差异显著,相较于常规粉碎,其响应值大幅增加,表明纳米粉碎可能导致双孢蘑菇中烃类含量增加;而纳米粉碎后草菇主要在 W1S 传感器上响应比较强烈,表明纳米粉碎可能促进了草菇含硫化合物的释放。综上,纳米粉

碎过程可能会释放更多的挥发性化合物,或使原有的化合物更容易被传感器检测到,从而改变传感器的响应值。

2.5 挥发性风味成分分析

由图 5 可知,3 种食用菌中共检出 87 种挥发性化合物,包括烷烃类 6 种、醛类 18 种、酯类 19 种、酮类 12 种、酸类 9 种以及其他类 6 种,各食用菌的挥发性组分存在显著差异。

由图 6 可知,大球盖菇、双孢蘑菇和草菇中分别检出 43,30,34 种挥发性化合物。经纳米粉碎后,各食用菌中挥发性化合物的种类和含量均有不同程度的增加,其中纳米粉碎大球盖菇增加了 12 种,且显著高于大球盖菇,可能是因为纳米粉碎破坏了食用菌粉的结构,更细小的颗粒和增加的表面积可以促进化合物从样品中挥发出来,增加其在气相色谱中的信号强度,从而使其含量增加<sup>[33]</sup>。

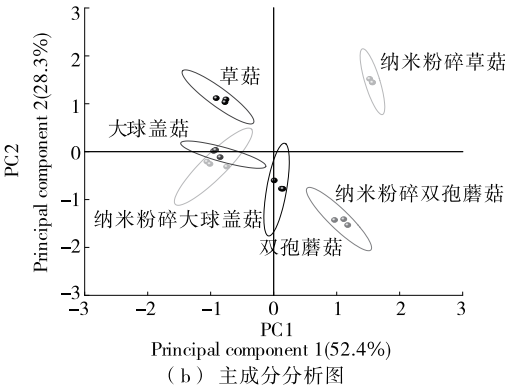
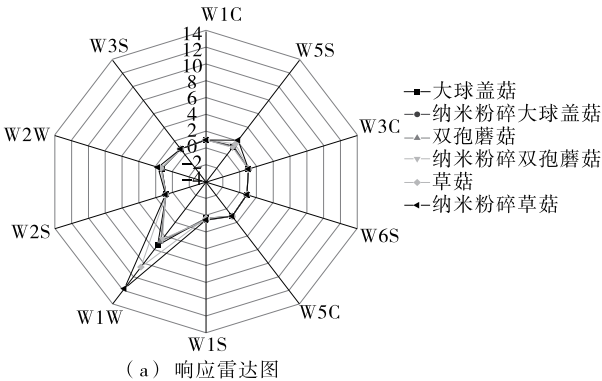


图 4 纳米粉碎对 3 种食用菌电子鼻的影响

Figure 4 Effects of Nano-pulverization on electronic nose of three edible fungi

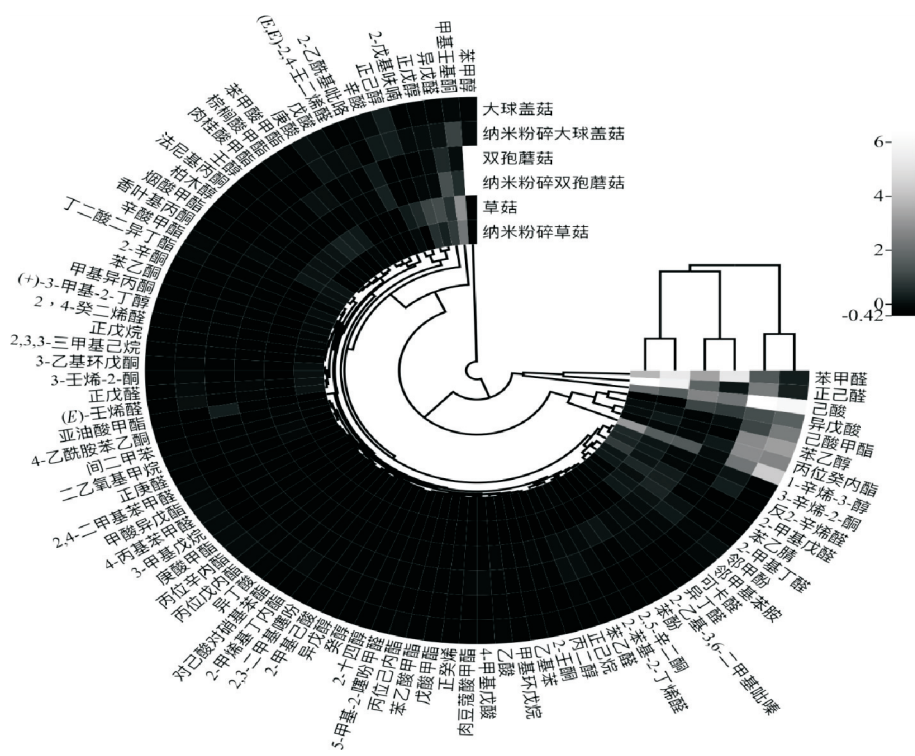


图5 纳米粉碎前后3种食用菌挥发性化合物含量的聚类热图

Figure 5 Cluster thermogram analysis of volatile compounds in three edible fungi before and after Nano-pulverization

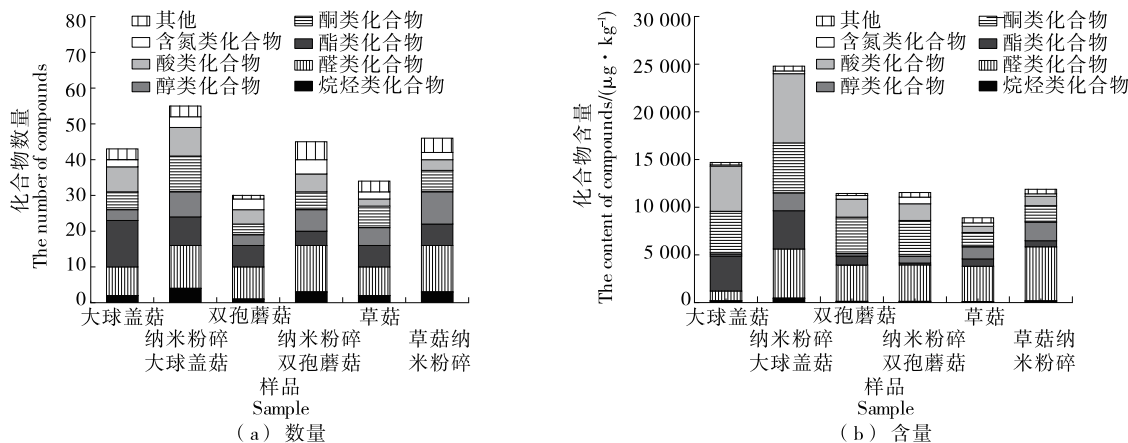


图6 样品中8组挥发性化合物的丰度

Figure 6 Abundance of 8 groups of volatile compounds in the sample

纳米粉碎后,双孢蘑菇中的烷烃类、醛类、酮类、醇类和酸类化合物含量略有上升,酯类和含氮类化合物含量变化较为稳定;而草菇中的烷烃类、醛类、酮类、醇类和酸类化合物含量相对稳定,酯类和含氮类化合物含量有所下降,可能是因为草菇在粉碎过程中引起了一些化合物的分解或挥发<sup>[34]</sup>。

综上,纳米粉碎对大球盖菇、双孢蘑菇和草菇的挥发性风味成分产生了不同程度的影响,可能与菌种的细胞结构、化合物的性质以及纳米粉碎过程中的温度、压力和力度等因素有关。此外,蘑菇的风味成分也会因种植、收

获和加工条件的不同而存在较大差异。

## 2.6 电子舌分析

由图7(a)可知,纳米粉碎后,大球盖菇、双孢蘑菇和草菇的甜味、鲜味和苦味得分差异较大,6个样品中纳米粉碎双孢蘑菇的鲜味值最高,与EUC值变化一致;纳米粉碎后,大球盖菇的鲜味得到了显著提升,鲜味值增加了10倍。此外,纳米粉碎后,大球盖菇和双孢蘑菇表现出更为强烈的增鲜作用,因此在一定程度上可以减少食物中味精的添加量。草菇和纳米粉碎草菇的鲜味值差异不明显,但纳米粉碎草菇的甜味值最高,是草菇的2倍多,可

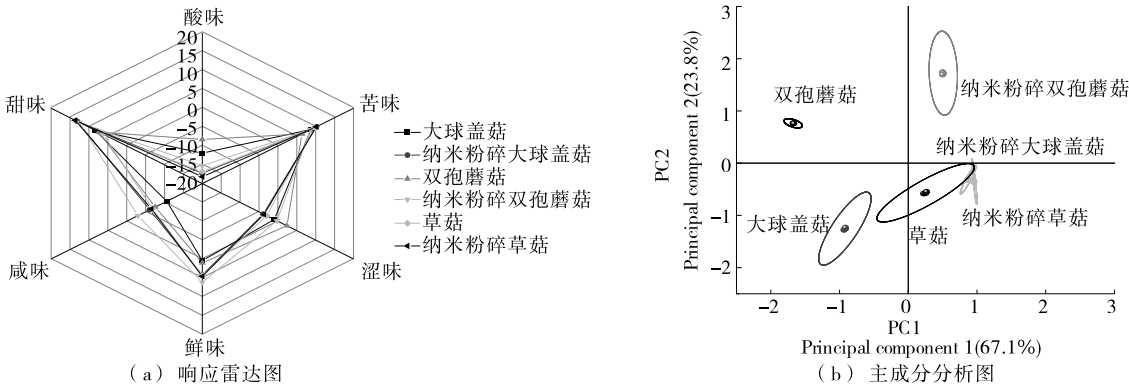


图 7 纳米粉碎对 3 种食用菌电子舌的影响

Figure 7 Effects of Nano-pulverization on electronic tongue of three edible fungi

能是由于纳米粉碎增加了食用菌粉颗粒中甜味物质的释放。综上,纳米粉碎使 3 种食用菌在整体口味和鲜味方面得到了提升,与非挥发性风味成分的结果一致。

由图 7(b)可知,PC1 的贡献率为 67.1%,PC2 的贡献率为 23.8%,累计贡献率为 90.9%,表明这两个主成分能够代表样品的绝大部分信息<sup>[35]</sup>。纳米粉碎前后的双孢蘑菇和大球盖菇分布在不同的区域,无重叠,说明这两种菌菇在纳米粉碎后风味发生了改变,可以被区分开,而纳米粉碎前后的草菇与纳米粉碎大球盖菇间有所重叠,不能有效区分。

2.7 增鲜减盐试验

由表 4 可知,相对于 0.5%盐溶液对照组,加入 0.5%经纳米粉碎的样品后,溶液的鲜味和咸味响应值均显著升高,表明纳米粉碎样品具有增咸和增鲜的效果。其中纳米粉碎双孢蘑菇的增味效果略高于其他两种样品。0.5%的纳米粉碎双孢蘑菇、大球盖菇和草菇分别能增加 0.28%,0.25%,0.25%的盐浓度。此外,在盐溶液中添加纳米样品的鲜味值高于样品溶液自身,与 0.5%的盐溶液对照组相比,加入 0.5%纳米粉碎双孢蘑菇后鲜味值提高了 145%,加入 0.5%纳米粉碎大球盖菇和纳米粉碎草菇的鲜味值为常规粉碎组的 2.4 倍,说明样品与盐溶液之间可能存在协同增效作用。

由图 8 可知,随着纳米粉碎样品添加量的增加,NaCl 溶液浓度随之降低,其增咸效果减弱,可能归因于食用菌浓度太高,其酸、苦味掩盖或抑制了复合溶液的咸味。在不影响溶液整体口味的情况下,0.2%纳米粉碎样品和 0.3%盐溶液复配可以达到对照组的效果,相较于对照组,纳米粉碎后的 3 种食用菌均可替代 40%以上的 NaCl,其中双孢蘑菇的效果更显著。在相同条件下加入适量的纳米粉碎样品,能够在不减少咸味的情况下降低食盐的摄入量,从而实现科学的减盐目标,并保持咸味不减,同时还能提供额外的鲜味效果<sup>[36]</sup>。此外,纳米粉碎后的菌粉作为风味剂应用至食品工业中,具有较强的溶解性,能有效减少食物中风味增强剂的使用量。

3 结论

利用高能纳米冲击磨将大球盖菇、双孢蘑菇、草菇进行纳米粉碎,与常规粉碎相比,纳米粉碎技术通过破坏细胞壁结构和增加比表面积,可能改变了食用菌样品中的化学物质释放和可溶性,使得食用菌粉中非挥发性成分(游离氨基酸、核苷酸、有机酸)和挥发性成分含量显著增加,对食用菌的味道、风味和口感产生较大的影响。此外,纳米粉碎后的食用菌粉还具有增鲜减盐的效果,可以作为风味剂应用至复合调味品中。综上,纳米粉碎有

表 4 纳米粉碎后样品的增味效果

Table 4 Taste enhancement of Nano-samples measured by electronic tongue

| 样品                     | 鲜味值   | 咸味值   | 折算的盐浓度/% |
|------------------------|-------|-------|----------|
| 0.5%盐溶液(对照)            | 4.30  | 5.36  | 0.50     |
| 0.5%盐水溶液+0.5%纳米粉碎大球盖菇粉 | 10.44 | 7.52  | 0.75     |
| 0.5%盐水溶液+0.5%纳米粉碎双孢蘑菇粉 | 10.57 | 7.70  | 0.78     |
| 0.5%盐水溶液+0.5%纳米粉碎草菇粉   | 10.43 | 7.53  | 0.75     |
| 0.5%纳米粉碎大球盖菇粉          | 8.07  | -7.03 | —        |
| 0.5%纳米粉碎双孢蘑菇粉          | 8.45  | -3.65 | —        |
| 0.5%纳米粉碎草菇粉            | 8.24  | -7.23 | —        |

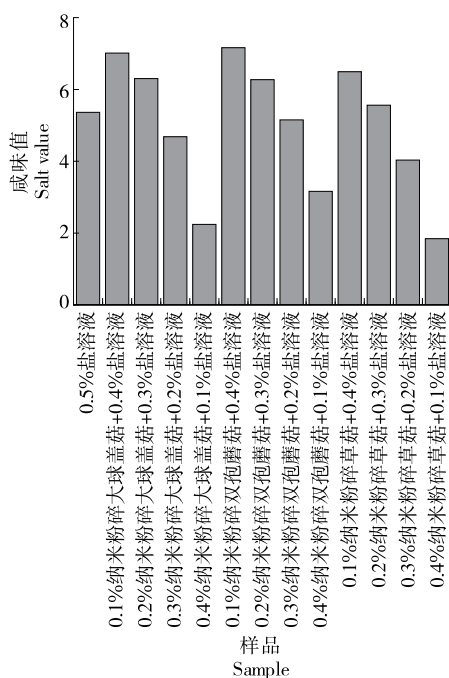


图8 纳米粉碎后样品的减盐效果

Figure 8 Salt reduction of Nano-samples measured by electronic tongue

利于食用菌粉的风味成分释放,提高食用菌粉的利用率。然而,纳米粉碎技术对食用菌样品的综合影响需进行进一步的评估,包括营养成分、稳定性和应用等方面。此外,应在食品加工和消费者层面进行进一步研究,以确定纳米粉碎技术在食用菌产品开发中的潜在应用和食品安全性。

### 参考文献

- [1] 于梓芑, 李宇阳, 弓志青, 等. 食用菌呈味物质及其检测技术、应用的研究进展[J/OL]. 食品工业科技. (2023-06-27) [2023-08-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020269>.  
YU Z P, LI N Y, GONG Z Q, et al. Research progress on edible fungus flavor substances and their detection technology and application[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2023-06-27) [2023-08-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020269>.
- [2] 冯涛, 水梦竹, 李雪, 等. 食用菌风味物质的研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 97-104.  
FENG T, SHUI M Z, LI X, et al. Progress on flavor substances of edible fungi[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 97-104.
- [3] 侯会, 陈鑫, 方东路, 等. 干燥方式对食用菌风味物质影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4 877-4 883.  
HOU H, CHEN X, FANG D L, et al. Research progress on influence of drying methods on flavor compounds of edible fungus[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(15): 4 877-4 883.
- [4] 刘玉莽. 不同的加工方式对双孢菇食用品质的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021: 20-34.
- LIU Y Q. Effect of different processing methods on the edible quality of *Agaricus bisporus* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021: 20-34.
- [5] 刘丽娜, 路凤银, 李顺峰, 等. 两种超微粉碎方法对香菇柄粉体性质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(6): 58-62.  
LIU L N, LU F Y, LI S F, et al. Effects of two ultrafine grinding methods on powder property of mushroom stem[J]. Storage and Process, 2020, 20(6): 58-62.
- [6] 陆必志. 纳米片状铝粉的制备及其发展动态[J]. 粉末冶金工业, 2004(2): 39-43.  
LU B Z. Manufacturing process and development trend of flaky aluminum nanopowder [J]. Powder Metallurgy Industry, 2004 (2): 39-43.
- [7] 钱雪丽, 陶宁萍, 王锡昌, 等. 食品中纳米颗粒的制备、表征及其应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 313-317, 324.  
QIAN X L, TAO N P, WANG X C, et al. Research progress on the preparation, characterization and application of Nanoparticles in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(16): 313-317, 324.
- [8] PATHAKOTI K, MANUBOLU M, HWANG H. Nanostructures: Current uses and future applications in food science[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2017, 25(2): 245-253.
- [9] HE X J, HUEYMIN H. Nano technology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24(4): 671-681.
- [10] 王晨. 五味子皮渣超微粉碎及其复合低糖果酱工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2016(21): 98-102, 103.  
WANG C. Schisandra chinensis skin slag superfine grinding and its composite low sugar jam processing technology research [J]. Food Research and Development, 2016(21): 98-102, 103.
- [11] 郭常升, 文连奎. 响应面法优化人参超微粉碎工艺参数[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(20): 126-131.  
GUO C S, WEN L K. Response surface method for optimizing the process parameters of panax ginseng [J]. Food Research and Development, 2016, 37(20): 126-131.
- [12] 牛潇潇, 王杰, 王宁, 等. 超微粉碎对马铃薯渣理化性质和微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 84-91.  
NIU X X, WANG J, WANG N, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and microstructure of potato residues[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 84-91.
- [13] 许佳林, 温靖, 任国谱, 等. 基于不同粉碎程度的紫色马铃薯生全粉理化及粉体特性[J/OL]. 食品与发酵工业. (2023-10-23) [2023-10-26]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036795>.  
XU J L, WEN J, REN G P, et al. Effect of different degrees of grinding on physicochemical properties and microstructure of purple potato[J/OL]. Food and Fermentation Industries. (2023-10-

- 23) [2023-10-26]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036795>.
- [14] 陈荣荣, 李文, 吴迪, 等. 大球盖菇生长发育过程中营养、质构和滋味特征的动态变化[J]. 食用菌学报, 2022, 29(4): 42-54.
- CHEN R R, LI W, WU D, et al. Nutrients, texture and taste characteristics of *Stropharia rugosoannulata* during growth and development[J]. Acta Edulis Fungi, 2022, 29(4): 42-54.
- [15] 陈万超, 杨焱, 冯杰, 等. 不同产地商业品种香菇的滋味成分分析及评价[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 152-157.
- CHEN W C, YANG Y, FENG J, et al. Analysis and evaluation of taste components in dried *Lentinula edodes* collected from different areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8): 152-157.
- [16] 李巧珍, 李晓贝, 吴迪, 等. 工厂化栽培的不同杏鲍菇菌株非挥发性风味成分分析及风味评价[J]. 上海农业学报, 2019, 35(1): 38-42.
- LI Q Z, LI X B, WU D, et al. Non-volatile flavor composition analysis and flavor evaluation of different factory cultivated *Pleurotus mushroom* strains[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, 35(1): 38-42.
- [17] 陈万超, 李文, 吴迪, 等. 11 个主栽品种香菇可溶性糖和有机酸测定及滋味品质评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 273-279.
- CHEN W C, LI W, WU D, et al. Determination of soluble sugar and organic acid components and evaluation of taste quality of 11 main varieties cultivars of *Lentinula edodes* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 273-279.
- [18] 陈万超, 杨焱, 李文, 等. 香菇挥发性成分 SPME-GC-MS 分析及特征指纹图谱的建立[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(10): 1 074-1 080.
- CHEN W C, YANG Y, LI W, et al. Analysis of volatile components in *Lentinula edodes* by SPME-GC-MS and establishment of fingerprint [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(10): 1 074-1 080.
- [19] 谷镇. 食用菌呈味物质分析及制备工艺研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012: 34-39.
- GU Z. Analysis and preparation process of edible fungi [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012: 34-39.
- [20] 严方, 于静洋, 崔和平, 等. 减盐增鲜的豌豆肽美拉德反应产物制备及其风味分析[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(3): 37-45.
- YAN F, YU J Y, CUI H P, et al. Preparation and flavor analysis of Maillard reaction products with salt reducing and umami-enhancing effect derived from pea protein hydrolysates[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(3): 37-45.
- [21] YU B, WU W, WANG B, et al. Maillard-reacted peptides from glucosamine-induced glycation exhibit a pronounced salt taste-enhancing effect[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131776.
- [22] 刘东杰, 刘伟帆, 梁贵强, 等. 广佛手超微粉的制备及其理化性质分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 160-167.
- LIU D J, LIU Y F, LIANG G Q, et al. Preparation of Citri medica 'Fingered' ultra-fine powder and comparison of its physical-chemical properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 160-167.
- [23] HU S, FENG X, HUANG W, et al. Effects of drying methods on non-volatile taste components of *Stropharia rugosoannulata* mushrooms[J]. LWT, 2020, 127(3): 109428.
- [24] 段静怡, 李自燕, 李建, 等. 基于游离氨基酸的组分及特征比较四种食用菌与四种果蔬的营养与风味特征[J]. 菌物学报, 2020, 39(6): 1 077-1 089.
- DUAN J Y, LI Z Y, LI J, et al. Comparing of nutrition and flavor characteristics between four edible fungi and four fruits and vegetables based on the components and characteristics of free amino acids[J]. Mycosystema, 2020, 39(6): 1 077-1 089.
- [25] WANG J P, JIANG S Y, MIAO S, et al. Effects of drying on the quality characteristics and release of umami substances of *Flammulina velutipes*[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102338.
- [26] 李润, 杨焱, 刘晓风, 等. 食用菌风味影响因素及其评价研究进展[J]. 食用菌学报, 2020, 27(4): 202-214.
- LI R, YANG Y, LIU X F, et al. Progress in influencing factors and evaluation of edible fungi [J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(4): 202-214.
- [27] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 等. 美拉德反应改善香菇酶解液的风味[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 71-78.
- LIU P J, CUI W J, WANG W L, et al. Flavor improvement of enzymatic hydrolysate of *Lentinus edodes* stalk by Maillard reaction[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 71-78.
- [28] 余昌霞. 香菇失香突变菌株的营养成分和呈味物质分析[J]. 上海农业学报, 2019(6): 17-23.
- YU C X. Analysis of nutritional components and flavor substances in a mutant *Lentinula edodes* strains with no aroma [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019(6): 17-23.
- [29] 王缓, 王乐姣, 岳陈, 等. 超微粉碎预处理对碱提和水提麦麸多糖理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 19-27.
- WANG H, WANG L J, YUE C, et al. Effects of ultrafine grinding pretreatment on physicochemical properties of alkali- and water-extracted wheat bran polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 19-27.
- [30] 刘鑫烨, 李蕴澍, 马琦, 等. 不同干燥方式对杏鲍菇滋味成分的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2020(16): 8-13.
- LIU X Y, LI Y S, MA Q, et al. Effect of different drying methods on the non-volatile flavor components in *Pleurotus eryngii* [J]. Food Research and Development, 2020(16): 8-13.
- [31] ZHANG H, WANG J, TIAN X, et al. Optimization of sensor array and detection of stored duration of wheat by electronic nose[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4): 403-408.

(下转第 39 页)

- 2022, 424: 127428.
- [9] BU N, LIU X, SONG S. Synthesis of NaY zeolite from coal gangue and its characterization for lead removal from aqueous solution[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31: 2 699-2 710.
- [10] 周绿山, 赖川, 王芬, 等. 多孔碳酸钙的制备及应用研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(1): 159-167.
- ZHOU L S, LAI C, WANG F, et al. Research progress in the preparation and application of porous calcium carbonate [J]. *Progress in Chemical Industry*, 2018, 37(1): 159-167.
- [11] ZHOU Y C, HE Y J, XIAO X C. A novel and efficient strategy mediated with calcium carbonate-rich sources to remove ammonium sulfate from rare earth wastewater by heterotrophic *Chlorella* species[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 125994.
- [12] 郭亚宁, 季军荣, 焦妍惠, 等. 机械活化重质碳酸钙制备复合碳酸钙及其对溶液中的  $\text{Cu}^{2+}$  离子吸附性能[J]. *化工进展*, 2023, 42(11): 5 861-5 870.
- GUO Y N, JI J R, JIAO Y H, et al. Preparation of composite calcium carbonate by mechanical activation of heavy calcium carbonate and its adsorption performance for  $\text{Cu}^{2+}$  ions in solution [J]. *Chemical Progress*, 2023, 42(11): 5 861-5 870.
- [13] ZHANG X, LU L, QIN Y Z, et al. Removal of aqueous Cr(VI) by a magnetic biochar derived from *Melia azedarach* wood [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 256: 1-10.
- [14] SARTORI D S, APARECIDA J, FIGUEIREDO C F, et al. Criegee mechanism as a safe pathway of color reduction in sugarcane juice by ozonation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 225: 181-187.
- [15] GAO C, YU R, HUANG J. Organic-inorganic hybridized zeolite by polycardanol for ammonia-nitrogen adsorption[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2021(42): 319-327.
- [16] LIU F J, LI W, ZHOU Y S. Preparation and characterization of magnetic sodium alginate-modified zeolite for the efficient removal of methylene blue [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 629: 127403.
- [17] ZHU L, LU X, TONG S, et al. Modification of zeolite by metal and adsorption desulfurization of organic sulfide in natural gas [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 69: 102941.
- [18] WANG R F, DENG L G, LI K. Fabrication and characterization of sugarcane bagasse-calcium carbonate composite for the efficient removal of crystal violet dye from wastewater [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(17): 27 484-27 492.
- [19] 柳富杰, 吴海铃, 盘艳梅, 等. 壳聚糖改性蒙脱石对蔗糖溶液中酚酸的吸附性能研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 17-24.
- LIU F J, WU H L, PAN Y M, et al. Study on the adsorption performance of chitosan modified montmorillonite for phenolic acids in sucrose solution[J]. *Food Industry Technology*, 2021, 42(21): 17-24.
- [20] ZHOU X L, LIU W Z, ZHANG J, et al. Biogenic calcium carbonate with hierarchical organic inorganic composite structure enhancing the removal of Pb(II) from wastewater [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(41): 35 785-35 793.
- [21] 杜旭东, 唐城元, 杨小丽, 等. 生物源碳酸钙对污水中 Pb(II) 和甲基橙吸附行为的研究[J]. *无机材料学报*, 2020, 35(3): 315-323.
- DU X D, TANG C Y, YANG X L, et al. Study on the adsorption behavior of biogenic calcium carbonate for Pb(II) and methyl orange in wastewater[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, 35(3): 315-323.
- [22] LIU D M, CHEN D, ZHONG J P, et al. Facile preparation of chitosan modified magnetic kaolin by one-pot coprecipitation method for efficient removal of methyl orange[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 245: 116572.
- [23] 李安玉, 李双莉, 余碧戈, 等. 镁浸渍生物炭吸附氨氮和磷: 制备优化和吸附机理[J]. *化工学报*, 2020, 71(4): 1 683-1 695.
- LI A Y, LI S L, YU B G, et al. Magnesium impregnated biochar for adsorption of ammonia nitrogen and phosphorus: Preparation optimization and adsorption mechanism[J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2020, 71(4): 1 683-1 695.
- [24] ZHU J Q, LI J Y, LI Y Y, et al. Adsorption of phosphate and photodegradation of cationic dyes with BiOI in phosphate-cationic dye binary system [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 223: 15549.
- (上接第 32 页)
- [32] 张祺玲, 徐远芳, 周毅吉, 等. 基于电子鼻(舌)分析  $\gamma$  射线和电子束辐照工艺对酱板鸭风味的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2023, 41(6): 32-41.
- ZHANG Q L, XU Y F, ZHOU Y J, et al. Effects of  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and electron beam irradiation on the flavor of spicy salted duck based on the electronic nose (tongue)[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2023, 41(6): 32-41.
- [33] 范如意, 李丽华, 李金婵, 等. 粉碎技术在食品工业中的应用[J]. *现代食品*, 2018(15): 54-57.
- FAN R Y, LI L H, LI J C, et al. Application of pulverization technology in food industry[J]. *Modern Food*, 2018(15): 54-57.
- [34] 刘曦. 食品风味物质在水凝胶中的控释研究进展[J]. *中国调味品*, 2019(3): 175-179.
- LIU X. Research progress of controlled release of food flavor substances in hydrogels[J]. *Chinese Condiment*, 2019(3): 175-179.
- [35] 韩慧, 王志强, 李彩虹, 等. 基于电子舌的掺假羊奶快速定量预测模型[J]. *食品与机械*, 2018, 34(12): 53-56.
- HAN H, WANG Z Q, LI C H, et al. Rapid quantitative prediction model of adulterated goat milk based on electronic tongue[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(12): 53-56.
- [36] 于海燕, 刘新广, 李永, 等. 调味品减盐增鲜的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 375-382.
- YU H Y, LIU X G, LI Y, et al. Research progress of condiment reducing salt and increasing umami[J]. *Food Science*, 2023, 44(5): 375-382.