

基于 GC-IMS 结合电子舌表征不同干燥方式白洋葱品质及挥发性风味

弓志青¹, 李瑞泼¹, 史君彦¹, 姜绍东², 刘洪耀², 王延圣¹, 王文亮^{1*}

(1. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 农业部新食品资源加工重点实验室, 山东济南 250100)

(2. 山东百佳食品有限公司, 山东冠县 252500)

摘要: 为探究不同干燥方式对洋葱品质及风味的影响, 采用 4 种干燥方式, 即热泵 55 °C-热风 60 °C、热泵 60 °C-热风 60 °C、热泵 60 °C-冻干, 比较其干燥特性、理化品质及挥发性风味成分。结果表明: 热泵 60 °C-热风 60 °C 组合工艺较单一热泵干燥时长缩短 25%; 冻干洋葱色泽最优, 总酚、总黄酮保留率最高, 热泵 60 °C-热风 60 °C 样品综合品质次之; 干燥后洋葱鲜味、咸味、酸味显著上升, 涩味降低, 热泵 60 °C-热风 60 °C 组风味更为柔和; 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 共检出 10 类 128 种挥发性物质, 脱水洋葱风味物质总量为鲜样的 2~3 倍, 其中真空冷冻干燥样品含量达 $97.45 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 含硫化合物占比最高, 其余三组样品则以醇、醛、酮类物质为主, 二丙烯基二硫醚等二硫醚类物质是洋葱核心风味组分; 主成分分析 (PCA) 显示鲜样、冻干样与其余干燥样品风味差异显著, 两种热泵-热风组合工艺样品风味特征相近。综合效率、品质与风味, HPD 60 °C-HAD 60 °C 联合干燥具备较好的工业化应用潜力。本研究结合 GC-IMS 联合电子舌、气味活度值与 PCA 可有效区分不同干燥洋葱的风味差异, 为脱水洋葱品质评价与风味调控提供理论基础。

关键词: 白洋葱; 干燥; 品质; 电子舌; 气相色谱-离子迁移谱

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0913

Characterization of Quality and Volatile Flavor of White Onions with Different Drying Processes Using GC-IMS Combined with Electronic Tongue

GONG Zhiqing¹, LI Ruipo¹, SHI Junyan¹, JIANG Shaodong², LIU Hongyao², WANG Yansheng¹,
WANG Wenliang^{1*}

(1. Shandong Academy of Agricultural Sciences Institute of Agricultural Products Processing and Nutrition, Key Laboratory of Novel Food Resources Processing, Ministry of Agriculture, Jinan 250100, China)

(2. Shandong Baijia Food Co. Ltd., Guanxian 252500, China)

Abstract: Four drying methods were used to dehydrate white onions to explore the effects of different drying processes on their quality and flavor, including heat pump 55 °C-hot air 60 °C (HPD 55 °C-HAD 60 °C), heat pump 60 °C-hot air 60 °C (HPD 60 °C-HAD 60 °C), heat pump 60 °C (HPD), and vacuum freeze drying (FD). The drying characteristics, physicochemical traits and volatile aroma components were systematically investigated. It was demonstrated that drying time was reduced by 25% for HPD60 °C-HAD60 °C in comparison with HPD. FD onions presented the optimal color as well as the maximum retention of total phenols and total flavonoids, while HPD 60 °C-HAD 60 °C samples ranked next to FD in comprehensive quality. Drying remarkably increased umami, saltiness and sourness and decreased astringency of the samples according to electronic tongue analysis; Onions processed by HPD 60 °C-HAD 60 °C presented a milder overall flavor. 128 volatile flavor compounds were identified via gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), classified into 10 categories. The content of volatile substances in dehydrated onions was approximately 2~3 times that in fresh onions. Among them, FD-dried onions had the highest

收稿日期: 2026-06-17; 修回日期: 2026-07-27; 接受日期: 2026-07-28

基金项目: 山东省重点研发计划 (2024TZXD018)

作者简介: 弓志青 (1976-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 147372843@qq.com

通讯作者: 王文亮 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: cywwl@163.com

content ($97.45 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) and the highest level of sulfur-containing compounds, whereas the other three dehydrated onion samples were rich in alcohols, aldehydes, and ketones. Diallyl disulfide, (Z)-1-propenyl propyl disulfide, and isopropyl disulfide were the major flavor-contributing compounds of onions via odor activity value (OAV) analysis. Principal component analysis (PCA) demonstrated significant flavor differences between fresh onions and FD-dried onions, as well as between FD-dried onions and the other three dried onion samples. While the similar flavor profiles were observed between HPD 60°C -HAD 60°C and HPD 55°C -HAD 60°C onions. Considering comprehensive efficiency, product quality and flavor characteristics, the combined drying process of HPD at 60°C coupled with HAD at 60°C exhibits promising potential for industrialized application. Combined with electronic tongue, OAV and PCA analyses, GC-IMS was proven to effectively distinguish flavor differences across the samples subjected to four drying processes. These findings provide a theoretical basis for quality evaluation and flavor regulation of dehydrated onions.

Key words: white onion; drying process; quality; electronic tongue; GC-IMS

洋葱 (*Allium Cepa* L.) 隶属百合科葱属, 为二年生草本作物, 是中国规模化主栽蔬菜之一, 富含类黄酮、有机硫等活性功能组分, 具有抗氧化、抗炎、抑菌等多种生理保健作用^[2]。中国是全球最大的脱水洋葱生产国, 产量占比达 22%, 产品广泛应用于调味品、肉制品、速冻食品等领域。洋葱主要有红皮洋葱、黄皮洋葱和白皮洋葱, 其中红皮和黄皮洋葱以鲜食和烹饪为主, 而甘肃、新疆等长日照区域出产的白皮洋葱干物质含量高, 是脱水干制的优质原料。

目前洋葱干燥以分段式热风干燥为主, 该工艺操作简单、成本低, 但存在干燥时间长、褐变严重等问题^[4]。热泵干燥 (Heat Pump Drying, HPD) 高效节能, 但后期脱水效率低, 难以去除物料结合水^[5]。联合干燥可整合多种干燥方式优势, 缩短时间、提升速率、降低能耗, 热泵-热风联合干燥已在红薯叶粉、马铃薯燕麦复合面条等农产品加工中得到应用, 产品品质优于单一干燥^[6,7]。干燥过程中发生的酶促反应、非酶褐变、美拉德反应、氧化降解等反应都有可能引起洋葱品质及风味物质的变化^[8]。

风味是评价洋葱脱水制品的核心品质指标。含硫化合物由蒜氨酸酶催化 S-烷基 (烯基) -L-半胱氨酸亚砷水解生成, 是洋葱的特征风味物质, 其含量受产地、品种、干燥方式等因素影响^[9-11]。电子舌可快速客观评价味觉特征; 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 具有高灵敏度、操作便捷等优势, 已被广泛应用于果蔬挥发性风味物质的定性定量分析^[12]。洋葱表皮蜡质层致密, 水分迁移阻力大, 干燥效率受限。现有研究多关注单一干燥对洋葱品质及风味的影响^[13-15], 但针对白洋葱热泵-热风联合干燥的系统品质与风味对比研究较少。Maftoonazad 等^[16]探究了微波-热风联合隧道干燥工艺 (MW-HA), 发现相较于纯热风干燥, 微波-热风联合干燥可缩短 90% 以上干燥时长, 能源利用效率提升 3.0~16.0 倍。Rupnar 等^[17]设计并试制一套太阳能-沼气复合干燥装置加工脱水洋葱, 与纯太阳能干燥进行对比, 发现沼气辅助供热能够稳定干燥环境温度, 避免干燥流程中断; 复合模式干燥时长显著缩短, 物料受热均匀, 加工产能提升。本研究在前期工作基础上, 采用热泵-热风联合干燥、热泵及冻干处理洋葱, 测定其理化品质、味觉及挥发性风味成分, 筛选高效、优质的洋葱干制工艺, 为脱水洋葱工业化生产与风味调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

原料: 白洋葱, 产地新疆; 正构酮, 阿拉丁公司; 其余试剂为国药集团化学试剂有限公司。

GZX-924MBE 电热鼓风干燥箱, 上海博迅实业有限公司; L3.5AB 热泵干燥机, 正旭新能源设备科技有限公司; SCIENTZ-10N 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; UV-6100 紫外可见分光光度计, 上海元析仪器有限公司; NR60CP 精密色差仪, 广东三恩时科技有限公司; INSENT SA402B 电子舌味觉分析系统, 日本 INSENT 公司; 气相色谱-离子迁移谱 (Flavour Spec®), 德国 G.A.S. 公司; CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置, CTC Analytics AG 公司 (瑞士, Zwingen); MXT-WAX 毛细管色谱柱 (30 m×0.53 mm, 1.0 μm), 美国 Restek 公司。

1.2 方法

1.2.1 原料预处理

将白洋葱去葱蒂、葱梢,剥去表皮并削去破损部分,洗净沥干,切成2 cm×3 cm大小的薄片,取厚薄均匀一致的洋葱为原料。为提高洋葱干燥效率,在前期实验基础上采用热泵-热风联合干燥提高洋葱干燥效率,并与60℃热泵及冻干洋葱进行对比。

HPD 55℃-HAD 60℃: 55℃热泵干燥150 min+60℃热风干燥240 min; HPD 60℃-HAD 60℃: 60℃热泵干燥300 min+60℃热风干燥60 min; HPD: 60℃热泵干燥480 min; FD: 在-25℃预冻6 h,然后放入冻干设备中在真空度300 Pa、-45℃下冻干60 h;直至含水量低于8%。新鲜洋葱用液氮研磨仪粉碎,装入食品级聚乙烯塑料袋储存袋中,在-18℃下保存使用;脱水后的洋葱经粉碎过80目筛后,在4℃下密闭保存。

1.2.2 干基含水率与干燥速率

洋葱干燥过程中干基含水率(M_d)按(1)公式计算:

$$M_d = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (1)$$

式中:

W_t ——为t时刻的洋葱质量, g;

W_d ——为洋葱片干物质含量, g。

干燥速率(DR , $g \cdot g^{-1} \cdot \min^{-1}$)按(2)公式计算:

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (2)$$

式中:

M_t ——为t时刻的含水率, % (质量分数);

M_{t+dt} ——为t+dt时刻的含水率, % (质量分数)。

1.2.3 色泽

使用色差计测定鲜洋葱与脱水洋葱的色泽,记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值,每个样品重复测定3次取平均值。

1.2.4 营养成分测定

总酚含量测定采用福林酚比色法^[18],标准曲线为 $y=0.080 \ 2x-0.032$ ($R^2=0.992$);总黄酮含量测定采用 $NaNO_2-Al(NO_3)_3-NaOH$ 比色法^[19],标准曲线为 $y=12.763x+0.000 \ 9$ ($R^2=0.999$)。

1.2.5 味觉分析

各称取样品4.00 g,加入100 mL水,在60℃水浴下浸提20 min,4 000 $r \cdot \min^{-1}$ 离心20 min,取上清液70 mL用味觉分析仪进行分析。采用6种传感器电极,并且提前将电极进行活化,每个样品设置3次平行,按照设定程序进行检测。

1.2.6 GC-IMS 分析

样品处理:分别称取1.00 g样品于20 mL顶空瓶中,加盖密封后置于80℃孵育20 min。

GC条件:毛细管色谱柱MXT-WAX (30 m×0.53 mm, 1.0 μm);色谱柱温度60℃;载气:高纯氮气;程序升温:2.0 $mL \ min^{-1}$ 保持2 min,在8 min内线性增至10.0 $mL \ min^{-1}$,在10 min内线性增至100.0 $mL \ min^{-1}$,保持40 min;色谱运行时间60 min;进样口温度为80℃。

IMS条件:电离源为氦源(3H);迁移管长度53 mm;电场强度500 $V \ cm^{-1}$;迁移管温度45℃;漂移气为高纯氮气(纯度≥99.999%);流量为75.0 $mL \ min^{-1}$;正离子模式。

1.2.7 气味活度值评价方法

采用气味活度值(OAV)评价各化合物对样品总体风味的贡献^[20],计算公式为:

$$OAV = \frac{C_i}{T_i} \quad (3)$$

式中:

C_i ——为化合物i的含量, $\mu g \cdot g^{-1}$;

T_i ——为化合物i的香气感觉阈值, $\mu g \cdot g^{-1}$ 。

1.3 数据分析

采用 SPSS23.0 分析数据显著性,采用 Origin 2021 作图,采用联川生物云平台绘制热图,以 $P<0.05$ 表示在统计学上存在显著差异;借助 VOCal 软件内置的 NIST 2020 气相色谱保留指数库与离子迁移谱迁移时间数据库完成挥发性组分检索匹配,进行物质定性,结合 Reporter、Gallery Plot、Dynamic PCA 插件,对比各组样品挥发性物质的三维图谱、二维图谱、特征指纹图谱及主成分分析图。

2 结果与讨论

2.1 不同干燥方式对洋葱理化品质的影响

2.1.1 干基含水率和干燥速率

不同干燥方式洋葱干燥特性如图 1 所示,冻干干燥时间较长,而且采用自动升华干燥和解析干燥程序,因此本研究只分析 HPD 60℃-HAD 60℃、HPD 55℃-HAD 60℃、HPD 三种脱水洋葱的干燥特性。如图 1A 所示,不同干燥方式洋葱所需干燥时间不同,HPD 60℃-HAD 60℃、HPD 55℃-HAD 60℃和 HPD 总干燥时间分别为 360、390 和 480 min,其中 HPD 60℃-HAD 60℃比 HPD 55℃-HAD 60℃和 HPD 干燥时间分别缩短了 7.69%和 25%,由于热泵干燥是基于逆卡诺循环回收空气中余热循环完成物料脱水,但干燥后期物料内部结合水脱除难度较大,因此单一热泵干燥在干燥末期的干燥速率显著降低。从图 1B 中也可以看出,HPD 整个干燥过程干燥速率较慢,而 HPD 55℃-HAD 60℃在 90 min 内干燥速率低于 HPD 60℃-HAD 60℃,在 90~270 min 内干燥速率高于 HPD 60℃-HAD 60℃,说明前期较高的热风干燥温度有利于自由水的排出。HPD 60℃-HAD 60℃较 HPD 干燥时间缩短 25%,干燥效率显著提升。

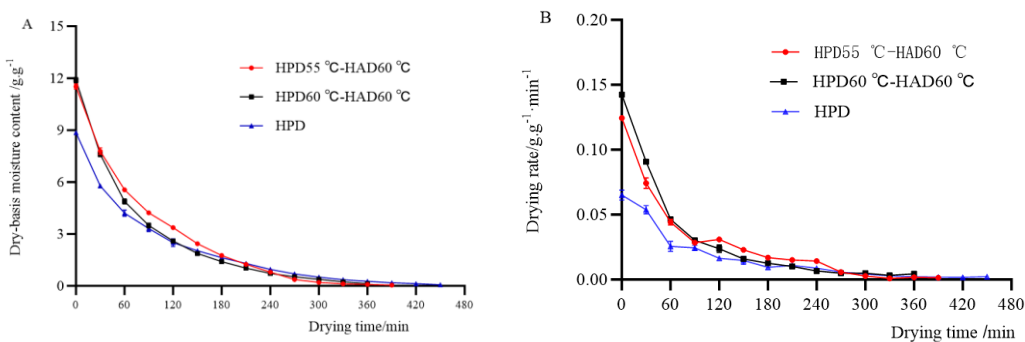


图 1 不同干燥方式洋葱的干燥特性曲线

Fig.1 Drying characteristic curves of onion under different drying methods

注: A 干基含水率; B 干燥速率。

2.1.2 色差

与鲜洋葱相比,4 种不同干燥方式洋葱的 L^* 、 a^* 和 b^* 值具有显著差异 ($P<0.05$),其中 FD 洋葱的 L^* 和 a^* 显著高于鲜洋葱,表明冻干增加了洋葱的亮度和红值(见表 1);HPD 60℃-HAD 60℃的 L^* 、 a^* 和 b^* 显著高于鲜洋葱;HPD 和 HPD 55℃-HAD 60℃洋葱的 L^* 显著低于鲜洋葱,而 b^* 显著高于鲜样,可能是因为干燥时间较长,洋葱表面与氧气接触时间长,发生氧化褐变,导致洋葱表面色泽偏黄,亮度降低。如图 2 所示,冻干洋葱色泽最白,与 L^* 值最高有关,这是因为冻干是在低温和真空环境下干燥,不发生酶促褐变及非酶促褐变^[21],而其他三种干燥方式由于干燥时间长且干燥温度较高,均发生不同程度的褐变,而 HPD 60℃-HAD 60℃洋葱充分利用了热泵和热风干燥的优点,干燥时间较短,而且褐变程度也较轻。

表 1 干燥方式对洋葱色泽的影响

Table 1 Color difference analysis of onion under different drying methods

Drying methods	L^*	a^*	b^*
鲜洋葱	67.07±2.28 ^c	-1.29±0.21 ^c	11.57±1.53 ^c
HPD 55℃-HAD 60℃	64.07±2.28 ^d	4.73±0.84 ^a	19.10±1.37 ^a

HPD 60 °C-HAD 60 °C	77.43 ±1.65 ^b	2.70 ±1.85 ^b	12.09 ±1.12 ^b
HPD	63.85 ±2.20 ^d	4.36 ±0.79 ^a	18.24 ±1.67 ^a
FD	89.43 ±2.34 ^a	-0.73 ±0.13 ^c	9.10 ±1.26 ^d

注：不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。

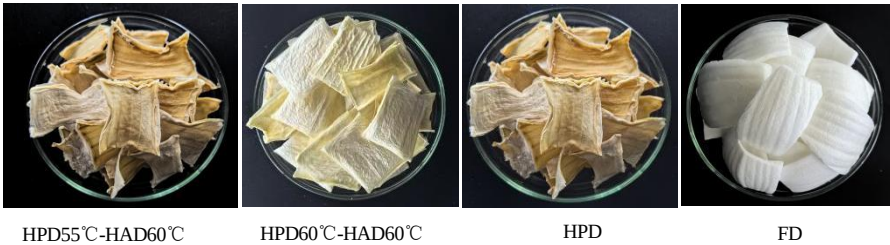


图 2 不同干燥方式洋葱样品图

Fig.2 Photo of onion under different drying methods

2.1.3 营养成分

洋葱中黄酮类、黄酮醇类及花色素类等多酚类物质极为丰富，图 3 为不同干燥方式对洋葱总酚及总黄酮含量的影响。与鲜洋葱中总酚及总黄酮含量相比，除 FD 外，其他三种干燥方式对其含量都有显著影响（*P*<0.05），其中 FD 中总酚和黄酮含量分别为 5.12、0.234 7 mg g⁻¹ DW，保留率最高为 98.8%，这是因为冻干在低温和真空条件下进行，降低了各种酶的活性，有效减缓了氧化反应速率，可以最大限度保留洋葱中的营养及活性成分；其余三种干燥方式总酚和黄酮含量依次为 HPD 60 °C-HAD 60 °C>HPD>HPD 55 °C-HAD 60 °C 洋葱。洋葱热风干燥过程中，多酚降解速率随干燥温度升高而加快，但高温可显著缩短干燥时间，从而减少多酚的总降解量^[13]。洋葱的品种和部位对其总酚和黄酮的含量影响较大，其中紫皮洋葱>黄皮洋葱>白皮洋葱，外皮>内皮，洋葱中的黄酮以槲皮素为主^[22]。

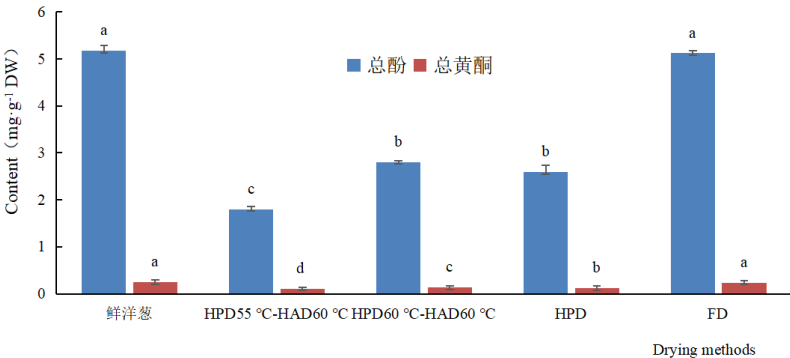


图 3 不同干燥方式对洋葱总酚及黄酮含量的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on total phenols and flavonoids in onions

注：不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。

2.2 不同干燥方式对洋葱电子舌味觉的影响

电子舌对鲜洋葱、4 种干燥方式洋葱的味觉响应值见图 4，5 组样品的味觉响应轮廓大致相似，但响应值存在一定差异，且具有明显的咸味、鲜味；与鲜洋葱相比，脱水洋葱的鲜味、咸味及酸味显著提升，而涩味减少；HPD 55 °C-HAD 60 °C 的涩味和酸味较重，HPD 的咸味较重，鲜洋葱与几种干燥方式下洋葱的丰富度和回味-A 区别不大；HPD 60 °C-HAD 60 °C 联合干燥制得的脱水洋葱整体风味较柔和。丰富度本质是鲜味的回味，反映鲜味在口腔中的留存时长；回味-A 代表涩味回味，表征涩味残留持久度。干燥过程大量水分脱除，单位质量干样中有机酸、游离鲜味氨基酸、可溶性矿物盐离子大幅富集，因此脱水洋葱的鲜味、咸味、酸味响应值均显著高于鲜洋葱；此外，除 HPD 外，其余三种干燥方式下高温促进酚类氧化、美拉德反应，导致脱水洋葱的辛辣刺激味道减轻而香味增加；HPD 干燥的洋葱由于在真空低温下干燥，含硫刺激风味及香味同时保留。

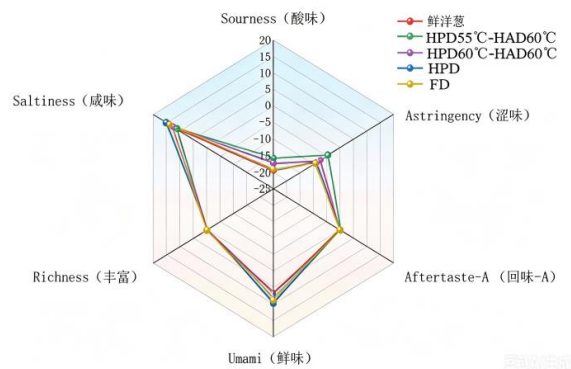
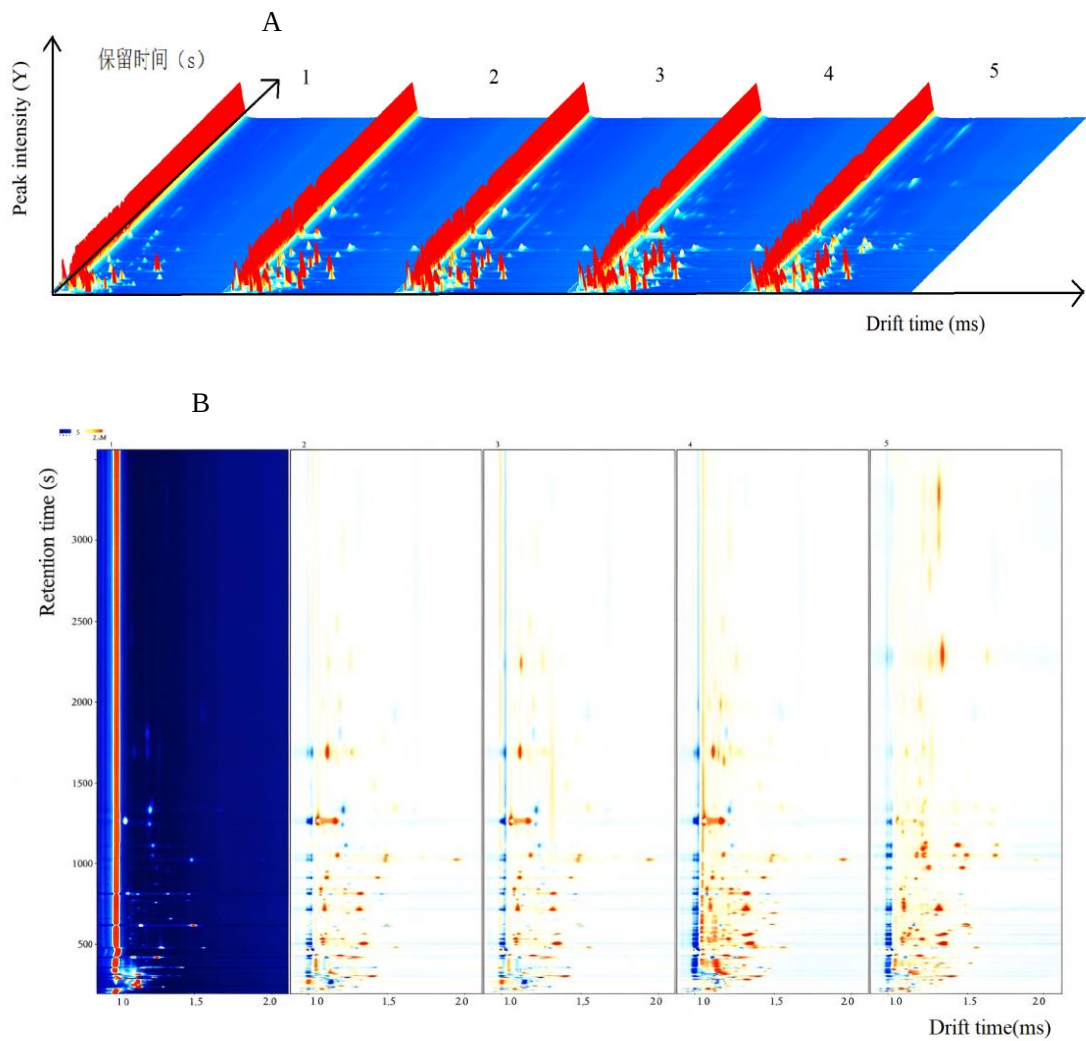


图 4 洋葱电子舌分析雷达图

Fig.4 Radar image of onion electronic tongue analysis

2.3 不同干制方式处理的洋葱挥发性风味成分比较

图 5 为鲜洋葱、HPD 55℃-HAD 60℃、HPD 60℃-HAD 60℃、HPD、FD 洋葱的三维（A）、二维（B）及指纹图谱（C）。



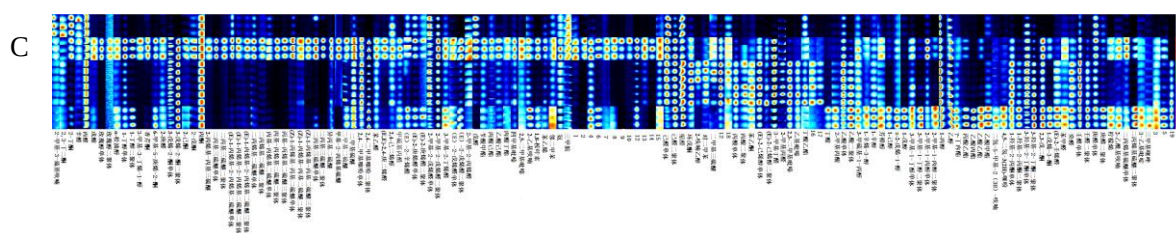


图5 五种洋葱样品中 GC-IMS 分析

Fig.5 GC-IMS analysis of five kinds of onion sample

注：(A) 三维谱图 1.鲜洋葱；2.HPD 55 °C-HAD 60 °C；3.HPD 60 °C-HAD 60 °C；4.HPD；5.FD。(B) 二维谱图；(C) 指纹图谱。

图 5A、B、C 为鲜洋葱与 4 种干洋葱挥发性风味物质的 GC-IMS 三维及二维谱图、指纹图谱，可看出洋葱脱水前后挥发性风味物质浓度有明显变化，洋葱各类风味物质的保留时间主要集中分布于 0~1 500 s 之间，此区间外的风味物质检出量极少。反应离子峰迁移时间为 1.0 ms，峰图两侧各信号点对应一种挥发性风味组分；信号点颜色越深、峰面积越大，代表对应物质浓度越高，反之则浓度更低。部分化合物可呈现两处及以上信号点，分别对应其不同聚合形态（二聚体、三聚体）。

图 6 为鲜洋葱与 4 种干洋葱的挥发性风味物质成分，共鉴定出 10 类 128 种物质，其中醇类 24 种、酮类 19 种、醛类 28 种、硫醚类 23 种、酯类 10 种、酸类 7 种、噻吩类 2 种、吡嗪类 4 种、呋喃类 2 种及其它物质 9 种，这些香气成分共同构成洋葱的特征性风味。

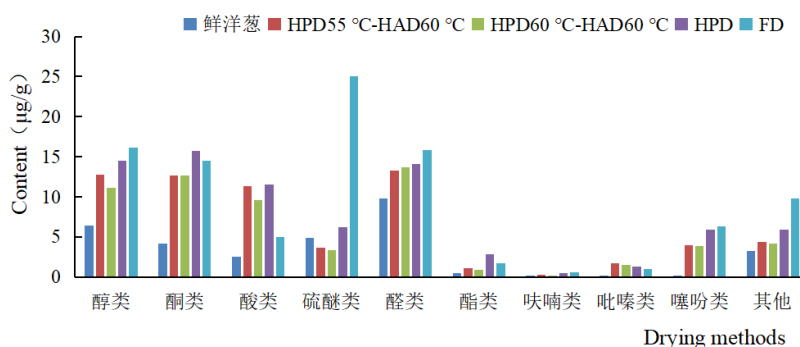


图6 五种样品中挥发性风味物质含量

Fig.6 Content of volatile flavor compounds in five samples

由图 6 可知，鲜洋葱含量为 $32.15 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、FD 为 $97.45 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、HPD 60 °C-HAD 60 °C 为 $62.65 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、HPD 55 °C-HAD 60 °C 为 $66.54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、HPD 为 $79.57 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，干燥后挥发性物质含量约为鲜洋葱的 2 到 3 倍，除含硫类物质在两种联合干燥后降低外，其余物质在干燥后含量都增加。鲜洋葱中，醛类物质含量最高为 $9.83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，其次为醇类 ($6.44 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、硫醚类 ($4.89 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、酮类 ($4.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 及酸类 ($2.49 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)；冻干洋葱挥发性物质中，含硫类物质最高，其次为醇类、醛类、酮类、酸类；其余三种干洋葱中，醇类、醛类、酮类、酸类、含硫类物质含量较高。

醛类物质具有果香及脂香，在新鲜及干制洋葱中共鉴定出 28 种，分别占总含量的 30.57%、16.51%、22.4%、20.38%、17.93%，它是由脂肪酸通过脂氧合酶和过氧化氢裂解酶衍生而来^[23]，对洋葱风味起重要作用。2-甲基-2-戊烯醛及其二聚体是洋葱催泪因子（硫代丙醛-S-氧化物）的主要代谢产物^[24]，在鲜洋葱中的含量为 $2.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，冻干洋葱中含量高达 $4.34 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Choi 等^[25]采用气质联用研究对流干燥洋葱粉（50、70、90 °C）中挥发性风味物质含量，发现醛类物质是干洋葱中的主要挥发性物质，且 2-甲基-2-戊烯醛及其二聚体在醛类物质中含量最高，该结论与本研究相符。2-甲基-2-戊烯醛由 1-丙烯亚磺酸依次转化而成硫代丙醛-S-氧化物，随后转化为 2-甲基-2-戊烯醛^[24]。丙醛具有水果香味，是构成生洋葱香气的最重要的化合物之一，也是切碎洋葱后首先形成的挥发物之一，丙醛在鲜洋葱中的含量较高为 $2.40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，其余几种干洋葱中的含量分别为 2.14、2.22、2.16 和 $2.07 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，说明

在干燥中发生了降解。3-甲基丁醛在鲜洋葱中含量为 $0.09 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，其它干燥洋葱中的含量分别为 1.51、1.40、1.54 和 $1.11 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，它是在干燥过程中形成的，是异亮氨酸在干燥过程中降解的产物^[26,27]。

含硫类化合物具有洋葱、大蒜的辛辣及硫化物风味，在新鲜及干制洋葱中共鉴定出 23 种，包括硫醚、硫醇、硫代磷酸酯、杂环硫化物等，鲜洋葱中占总量的 15.2%，冻干洋葱占 25.7%，含量最高，而其它方式干燥后含量降低，HPD 60°C -HAD 60°C 为 5.38%，HPD 55°C -HAD 60°C 为 5.42%，HPD 洋葱为 9.35%，说明含硫物质性质不稳定，在高温下易降解。鲜洋葱中含量最高的为(E)-1-丙烯基-2-丙烯基二硫醚 ($1.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、二丙烯二硫醚、丙基-丙烯基二硫醚，FD 洋葱中为二丙基三硫醚 ($4.36 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、(E)-1-丙烯基-2-丙烯基二硫醚、丙基-丙烯基二硫醚、二丙基二硫醚。Gao 等^[11]利用 SPME-GCMS 对冻干、热风干燥和鲜洋葱的挥发性物质进行分析，发现冻干和热风干燥洋葱中硫化物的总含量分别为 4.96% 和 39.79%，占总含量的 24.59% 至 48.89%。Cecchi 等^[28]利用 HS-SPME-GC-MS 和 HS-SPME-GC×GC-TOF 对 40°C 热风干燥洋葱的风味进行分析，鉴定出 53 种挥发性化合物，二硫化物含量最高（占总挥发物含量的 60% 以上），其次是三硫化物、二丙基二硫化物和二丙基三硫。这一研究结果与本研究不同，可能是与干燥方式及检测仪器的灵敏度有关。

醇类化合物普遍具有花果香味^[29]，在新鲜及干制洋葱中共鉴定出 24 种醇类物质，分别占总含量的 20.03%、16.86%、18.19%、19.72%、18.43%，含量较高的为乙醇、1-丙醇、(E)-2-己烯醇及其二聚体。

2.4 不同干制方式洋葱关键性风味化合物分析

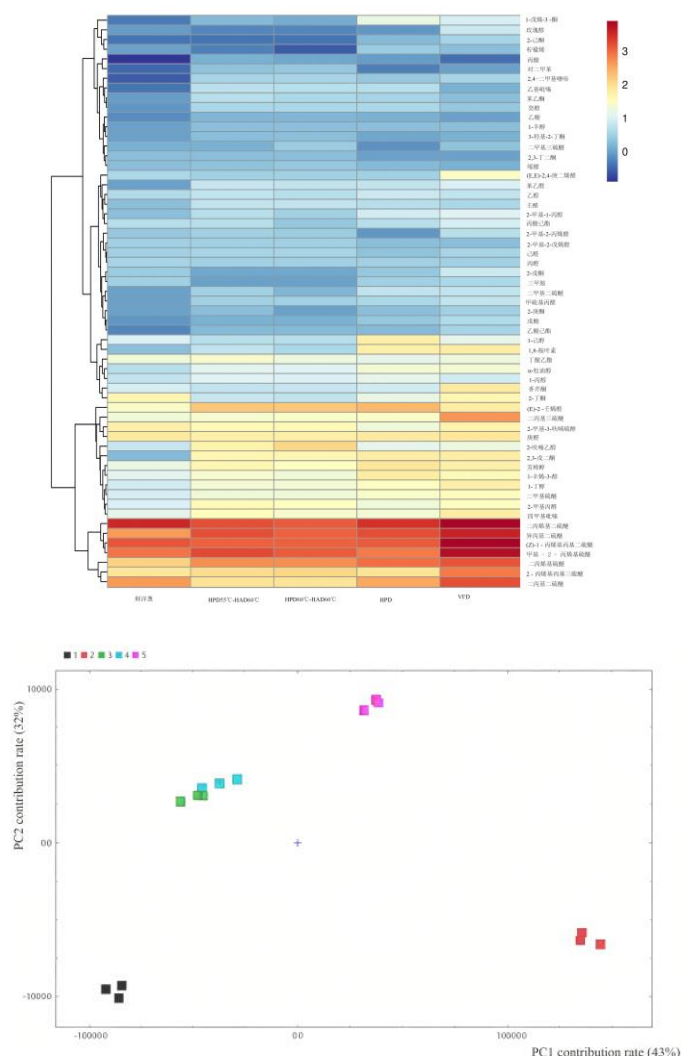


图 7 五种样品的关键性香气成分 OAV 分析及挥发性成分 PCA 图

Fig.7 OAV analysis of key aroma compounds PCA results of volatile components in five kinds of sample

采用 OAV 鉴定关键风味化合物：当 $\text{OAV} \leq 0.1$ 时，该组分对整体风味无明显作用； $0.1 < \text{OAV} < 1$ 时，物质仅起

到风味修饰效果; $OAV \geq 1$ 时, 组分可直接影响样品整体风味, 为关键风味化合物。在有效区间内, 气味活度值越高, 对应物质对整体风味的贡献度越强。本研究参考《化合物嗅觉阈值汇编(第二版)》得到气味阈值, 确定其相应的 OAV 。5 种洋葱中共检出 59 种 $OAV \geq 1$ 的挥发性成分(见图 7), 其中鲜洋葱 44 种, FD 57 种, HPD 60 °C-HAD 60 °C 56 种, HPD 55 °C-HAD 60 °C 56 种, HPD 54 种, 有 43 种化合物为 5 个样品所共有, 包括 11 种醇类、5 种酮类、9 种硫醚、12 种醛类及其它, OAV 值最高的有二丙烯基二硫醚、(Z)-1-丙烯基丙基二硫醚、异丙基二硫醚、二丙烯基硫醚、甲基-2-丙烯基硫醚、二丙烯基硫醚等, 构成洋葱主要的挥发性物质。同时发现, 新鲜洋葱中一些非关键性风味化合物 ($OAV < 1$), 包括酮类物质如苯乙酮、3-羟基-2-丁酮、1-戊烯-3-酮, 酸类物质戊酸、丙酸、乙酸, 2,4-二甲基噻吩等, 经干燥后变成关键性风味化合物 ($OAV \geq 1$), 说明干燥对洋葱风味有很好的强化作用。噻吩类物质是二丙基二硫醚等化合物的前体物质, 由硫代亚磺酸盐降解产生, 具有尖刺的气息和洋葱浓郁的特征气味^[30]。二烷基噻吩据报道为二(1-烯基)硫化物和烷基 1-丙烯基二硫化物衍生的热解产物^[31]。

为进一步区分 5 种洋葱样品, 对所有检出的挥发性风味物质进行 PCA 分析, 发现两个主成分因子的累计方差贡献率为 75%, 第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为 43%和 32%(图 7)。鲜洋葱与 FD、FD 与其它三种干燥洋葱风味具有显著差异, 而 HPD 60 °C-HAD 60 °C和 HPD 55 °C-HAD 60 °C的风味较接近。这一结果也与洋葱加工方式密切相关, 说明干燥方式对洋葱风味影响较大^[32]。

3 结论

通过对白洋葱进行 HPD 55 °C-HAD 60 °C、HPD 60 °C-HAD 60 °C、HPD、FD 干燥, 发现 HPD 60 °C-HAD 60 °C 较 HPD 干燥时间缩短 25%, 耗时最短、效率最高; FD 最优, 色泽洁白、总酚/总黄酮保留率最高; HPD 60 °C-HAD 60 °C 综合品质次之, 褐变轻、营养保留较好; 干燥后鲜味、咸味、酸味提升, 涩味降低; HPD 60 °C-HAD 60 °C 风味最柔和; GC-IMS 鉴定 10 类 128 种物质, 干燥后总挥发性物质为鲜样 2~3 倍, 其中 FD 含量达 $97.45 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 含硫化合物占比最高, 其余以醇、醛、酮为主; 5 种洋葱中共检出 59 种关键性风味化合物, OAV 值最高的为二丙烯基二硫醚、(Z)-1-丙烯基丙基二硫醚、异丙基二硫醚、二丙烯基硫醚、甲基-2-丙烯基硫醚、二丙烯基硫醚; PCA 可有效区分不同干燥样品, HPD 60 °C-HAD 60 °C与 HPD 55 °C-HAD 60 °C风味接近。综合效率、品质与风味, HPD 60 °C-HAD 60 °C联合干燥具备较好的工业化应用潜力。

参考文献

- [1] GUPTA AJ, KALDATE S, VOLAGUTHALA S, et al. Onion nutritional and nutraceutical composition and therapeutic potential of its phytochemicals assessed through preclinical and clinical studies [J]. Journal of Functional Foods. 2025, 129: 106889.
- [2] MAJID I, MAJID D, MAKROO HA, et al. Enhancing the bioavailability and gut health benefits of quercetin from sprouted onions: A comprehensive review in the context of food-derived bioactives [J]. Food Chemistry Advances, 2024, 4: 100725
- [3] ESPINO N, GALIETTA G, VODANOVICH A, et al. Onion skin (*Allium cepa* L.) of three landrace varieties produced in Uruguay: minerals and fatty acids composition, phytochemical compounds, in vitro antioxidant and anti-inflammatory properties [J]. Food Bioscience, 2025, 71: 107112.
- [4] ONWUDE DI, HASHIM N, CHEN G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 57: 132-145.
- [5] XU NT, WU WD, WANG ZL, et al. Study of two-stage variable temperature heat pump drying process of chili peppers [J]. Food and Bioproducts Processing, 2026, 157: 334-346
- [6] 张迎敏,任广跃,段续,等.红薯叶粉热泵-热风联合干燥工艺优化[J].食品与发酵工业,2021,47(1):198-205.
- [7] 屈展平,任广跃,张迎敏,等.马铃薯燕麦复合面条热泵-热风联合干燥质热传递规律分析[J].食品科学,2020,41(5):57-65.
- [8] JEEVARATHINAM G, DEEPA J, NISHA R, et al. Drying of onion and onion slices: comparative methods and their impact on kinetics, quality, nutritional properties, modelling, drying efficiency, and energy consumption: a review [J]. Heat Transfer, 2026, 55: 1718-1757
- [9] COZZOLINO R, MALORNI L, MARTIGNETTI A, et al. Comparative analysis of volatile profiles and phenolic compounds of Four Southern Italian onion (*Allium cepa* L.) Landraces [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 101: 103990
- [10] SHARAF EI-DIN MG, FAHMY HA, RAGAB NA, et al. Comprehensive metabolome classification of four onion (*Allium cepa*) cultivars via GC-MS and UPLC-MS: insights into chemical diversity and remote antimicrobial activity against foodborne pathogens [J]. Food

- Research International, 2025, 221: 117367
- [11] GAO Y, WU SM, SUN YQ, et al. Effect of freeze dried, hot air dried and fresh onions on the composition of volatile sulfocompounds in onion oils [J]. *Drying Technology*, 2019, 37(11): 1427-1440.
- [12] DU QP, REYIM A, WANG W, et al. Flavor fingerprinting and aroma-active compound evolution in prune preserves: comparative analysis of drying technologies by GC-MS and GC-IMS [J]. *Food Chemistry*, 2026, 515: 149229.
- [13] SRINIVAS G, RADHIKA GB, PRAVEEN B. Experimental study on the effect of microwave heating power on the drying behavior of onion slices [J]. *MethodsX*, 2025, 15: 103479
- [14] SARKAR A, HOSSAIN MW, ALAM M, et al. Drying conditions and varietal impacts on physicochemical, antioxidant and functional properties of onion powder [J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 12: 100578.
- [15] FALSAFI SR, GOORUEE R, GAZOR HR. Comparative assessment of drying kinetics and physicochemical properties of vegetables under different solar drying methods [J]. *Food Chemistry: X*, 2026, 35: 103726
- [16] MAFTOONAZAD N, DEGHANI MR, RAMASWAMY H S. Hybrid Microwave-hot air tunnel drying of onion slices: drying kinetics, energy efficiency, product rehydration, color, and flavor characteristics [J]. *Drying Technology* 2022, 40(5): 966-986
- [17] RUPNAR A K, JAIN S, PANWAR N L, et al. Design and development of solar-biogas hybrid dryer for onion drying [J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2020, 10(7): 65-73
- [18] HUYNH KD, PHAM VT, TRAN VK, et al. Polyphenol, flavonoid content and antioxidant activity of the garlic (*Allium sativum* L.) extract obtained by two different extraction processes [J]. *Materials Science Forum*, 2022, 1048: 493-501.
- [19] 赵柏棚,崔茗淇,张泉,等.149 份山楂种质资源果实总酚、黄酮、花青苷含量差异分析[J].*果树学报*,2025,42(3):486-497.
- [20] SWIEGERS JH, BARTOWSKY EJ, Henschke PA, et al. Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour [J]. *Australian Journal of Grape & Wine Research*, 2010, 11(2): 139-173.
- [21] DONG-JIN L, JUNG-AH H, SEUNG-TAIK L. Enhancement of antioxidant activity of onion powders by browning during drying process [J]. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 2016, 48(1): 15-19.
- [22] 王存堂,李建立,张译心,等.黄、紫洋葱外层干皮和内层果肉总酚、总黄酮含量及抗氧化活性研究[J].*江苏农业科学*,2018,46(8):180-182.
- [23] RODRIGO D, JOLIE R, LOEY VA, et al. Thermal and high pressure stability of tomato lipoxygenase and hydroperoxide lyase [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(2): 423-429.
- [24] NIELSEN GS, LARSEN LM, POLL L. Formation of aroma compounds during long-term frozen storage of unblanched leek (*Allium ampeloprasum* Var. *Bulga*) as affected by packaging atmosphere and slice thickness [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(5): 1234-1240.
- [25] CHOI S M, LEE D J, KIM J Y. Volatile composition and sensory characteristics of onion powders prepared by convective drying [J]. *Food Chemistry*, 2017, 231: 386-392.
- [26] TOLDRÁ F, ARISTOY M C, FLORES M. Contribution of muscle aminopeptidases to flavor development in dry-cured ham [J]. *Food Research International*, 2000, 33(3): 181-185.
- [27] KRAUJALYTE V, PELVAN E, ALASALVAR C. Volatile compounds and sensory characteristics of various instant teas produced from black tea [J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 864-872.
- [28] CECCHI L, IERI F, VIGNOLINI P, et al. Characterization of volatile and flavonoid composition of different cuts of dried onion (*Allium cepa* L.) by HS-SPME-GC-MS, HS-SPME-GC×GC-TOF and HPLC-DAD [J]. *Molecules*, 2020, 25(2): 408.
- [29] YUN J, CUI C J, ZHANG SH, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130033.
- [30] PATTERSON J, OWEN C M, FRANK D, et al. Flavour sensory qualities and consumer perceptions-A comparison of sensory and brain activity responses to flavour components in different populations [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2004, 39(5): 481-490.
- [31] BOELEN H, BRANDSMA L. Formation of dialkylthiophenes by thermolysis of di (1-alkenyl) disulfides and alkyl 1-propenyl disulfides [J]. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 1972, 91(2): 141-145.
- [32] 谭宇涛,陆宁.真空冷冻干燥和热风干燥对洋葱挥发性成分的影响[J].*包装与食品机械*,2010,28(4):20-25.