不同干燥方法对菊花品质特性、微观结构和挥发性成分的影响

宗嵇娟[1]，张雅茹[1]，朱广飞[2]，万夕雅[1]，李云香[1]，赵 聪[1]，
陈发棣[3]，王海滨[3※]，王 辉[1※]

（1. 南京农业大学食品科技学院，南京 211800；2. 农业农村部规划设计研究院，北京 100125；
3. 南京农业大学园艺学院，南京 211800）

摘 要：为探究不同干燥方式对菊花品质特性和风味特性的影响，该研究采用热风干燥（hot air drying, HD）、红外联合热风干燥（infrared combined with hot air drying, IHD）和真空干燥（vacuum drying, VD）等 3 种干燥方式于 50 ℃ 条件下对菊花进行脱水处理，系统分析其干燥特性、色泽、营养品质、微观结构及风味成分的变化。结果表明，IHD 时间最短，能有效保留产品色泽并形成疏松多孔的微观结构，且 IHD 菊花中总酚、总黄酮及其他活性成分含量最高。通过风味分析技术结合多元统计方法，可有效区分 3 种干燥方式的气味轮廓，并筛选出以萜烯类和醇类为主的关键差异标志物 20 种。其中，IHD 总挥发性成分浓度最高（421.11 mg/kg），表现为独特的烘焙香；相比之下，HD 与 VD 则分别呈现草本清香和天然花果香。综上，红外联合热风干燥在提高干燥效率、保留营养成分及丰富风味物质方面具有显著优势，可为菊花的高值化加工提供理论依据。

关键词：菊花；干燥；活性成分；挥发性化合物；GC-IMS
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202603116
中图分类号：TS255.5 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2026)-11-0428-11

宗嵇娟，张雅茹，朱广飞，等. 不同干燥方法对菊花品质特性、微观结构和挥发性成分的影响[J]. **农业工程学报**，2026，42(11)：428-438. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202603116 http://www.tcsae.org
ZONG Jijuan, ZHANG Yaru, ZHU Guangfei, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics, microstructure and volatile components of *Chrysanthemum*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(11): 428-438. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202603116 http://www.tcsae.org

0 引 言

菊花（*Chrysanthemum morifolium* Ramat.）是菊科多年生草本植物，既是深受消费者喜爱的传统观赏花卉，也是中国药食同源文化的典型代表[1]。菊花具有疏风清热、平肝明目、解毒消肿、免疫调节等多种药理功效，因此广泛用于日常茶饮、功能性食品开发及中医临床配方等场景。近年来，随着大健康产业的快速发展和消费者对天然功能食品关注度的提升，菊花资源的精深加工与高值化利用成为研究热点。新鲜采摘的菊花含水量高，呼吸代谢旺盛，极易腐烂变质[2]。目前，相关研究主要包括采后减损保鲜和活性成分的提取纯化以最大限度地保留其功能价值[3-4]，以及通过干燥加工有效减少损失并保留营养成分[2]。干燥通过减少水分含量、抑制微生物生长繁殖，能够有效延长菊花货架期[2,5]。

不同干燥方式对产品品质的影响存在较大差异，这种差异源于热量传递方式、氧分压环境和温度场分布等多因素的耦合作用。这些因素不仅影响菊花的水分脱除速率，更深刻影响其物理结构、化学组成与感官风味特征[6-7]。目前，应用于菊花的干燥方式主要包括热风干燥（hot air drying, HD）、真空干燥（vacuum drying, VD）和红外联合热风干燥（infrared combined with hot air drying, IHD）等[8]。热风干燥通过强对流方式将热量传递至物料表面，因其设备操作简单、成本低廉而成为菊花主要加工方式；真空干燥下低压环境能够降低水分沸点而促进水分汽化，但是对流传热受到抑制，因此有望通过接触式加热促进传热效果；红外联合热风干燥由辐射传热和对流传热协同作用，其高效穿透优势明显，近年来逐渐得到推广。现有研究[2,8]发现，高温干燥易使细胞组织结构收缩，而低压环境能够较好地保持花瓣多孔骨架结构。除微观组织外，工艺差异在化学组分和风味上表现更为复杂。一方面，多酚、黄酮等热敏性成分易在高温等条件下氧化降解，而美拉德反应则消耗可溶性糖并引起色泽劣变[9]。另一方面，香气组分的变化呈现双重性：吴木兰等[10]发现，高温与真空环境易使香气成分损失，但赖惠敏等[11]发现高温也促进吡嗪类、呋喃类等香气物质的生成。值得注意的是，萜烯类化合物已被证实是菊花样品中最主要的风味贡献物质[2]，但其种类与含量因干燥工艺不同而存在差异。为系统解析上述品质差异，现有研究常借助电子鼻技术区分不同干燥方式

收稿日期：2026-03-15 修订日期：2026-06-08
基金项目：国家自然科学基金项目（32302277）；江苏省自然科学基金项目（BK20242066）；中国博士后科学基金项目（2024M751436）；第 18 批博士后特别资助项目（2025T180817）
作者简介：宗嵇娟，研究方向为农产品绿色加工及精准节能调控、农产品品质机理。Email：jijuanzong@stu.njau.edu.cn
※通信作者：王海滨，博士，教授，博士生导师，研究方向为菊花及其近缘种属植物资源收集、评价和利用。Email：hb@njau.edu.cn；
王辉，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为农产品绿色加工装备开发、精准节能增效智控策略。Email：huiwang@njau.edu.cn

下的香气轮廓，尤其对氮氧化物和萜类物质的响应差异明显[12]，同时，气相色谱-质谱技术可对香气成分进行定性与定量分析，为工艺选择提供化学依据[2]。

以上研究多关注单一干燥方式下的品质分析以及不同干燥方式下菊花单维指标分析，缺乏不同干燥方式下物理结构、化学组分转变基础上风味特征的系统性研究。此外，目前风味成分的探究较多基于单种检测方式下挥发性成分的鉴定，尚未将电子鼻、气相色谱-质谱与气相色谱-离子迁移谱等多种分析手段进行关联对比。

由于 HD、IHD、VD 这 3 种干燥方式在传热传质机制、氧分压及温度分布上具有典型差异。为此，本研究旨在解析上述 3 种干燥方式下菊花的干燥动力学及数学模型，评估 3 种干燥方式对菊花色泽、营养活性成分和微观结构的影响，并结合电子鼻、气相色谱-质谱和气相色谱-离子迁移谱系统揭示其挥发性风味成分的差异，以期为菊花高品质加工提供理论依据与工艺指导。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

新鲜菊花购自重庆半亩花田农业科技有限公司的菊花基地。所有样品大小均匀、花瓣适度展开、无褐变，直径为（10 ± 2） cm。105 ℃ 下热风干燥 24 h 测得其初始水分含量（湿基）为 88.8%，并储存在 4 ℃ 的冰箱中备用。

色谱分析所用的对照品包括绿原酸、木犀草苷、异绿原酸、蒙花苷、木犀草素、芹菜素，纯度≥98%。所用溶剂甲醇、乙腈及甲酸均为色谱纯，纯度≥99.8%。邻二氯苯用于风味分析，纯度≥99.8%。用于测定可溶性糖、总酚及总类黄酮的化学试剂包括蔗糖、芦丁、没食子酸、无水乙醇、浓硫酸、蒽酮、磷酸、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、福林酚试剂及无水碳酸钠，均为分析纯。

1.2　试验设备

本研究的主要仪器和设备如下：热风干燥试验箱，课题组自制；真空干燥箱，课题组自制；远红外联合热风干燥箱，课题组自制；S-4800 扫描电子显微镜，日本日立公司；YS3060 色差仪，深圳三恩时科技有限公司；TU-1901 紫外-可见分光光度计，北京普析通用仪器有限责任公司；高效液相色谱，美国安捷伦科技有限公司；PEN3-Plus 电子鼻系统，德国 AIRSENSE 公司；TSQ8000 气相色谱-质谱联用仪，上海赛默飞世尔科技有限公司；Flavourspec 气相色谱-离子迁移谱仪，德国 G.A.S.公司；FS-SE-54 毛细管柱，美国安捷伦科技有限公司；PAL3 自动进样器，美国安捷伦科技有限公司。

1.3　干燥试验

将菊花均匀地铺在铁丝网物料盘上，采用 3 种干燥方式对菊花进行干燥。参考吴木兰等[10]方法及预试验结果，具体参数设置如下：热风干燥、真空干燥、红外联合热风干燥均设定温度为 50 ℃，其中，真空干燥中真空度设定为 95～99 kPa，以铝板为热源接触式加热。根据样品干燥过程的状态，每隔一段时间（HD、IHD 前期间隔为 1.0 h，VD 前期间隔为 1.5 h；干燥后期的间隔时长根据样品状态调整）对样品进行称量并计算其湿基含水率，直至样品的湿基含水率低于 10%，停止干燥。

1.4　干燥特性

1.4.1　水分比（moisture ratio, MR）测定

参照 ZHANG 等[13]的计算方法，菊花在干燥过程中的水分比计算如式（1）所示：

$$MR=\frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

式中 M_t 为 t 时刻的干基含水率，g/g；M_0 为初始干基含水率，g/g。

1.4.2　菊花的干燥速率测定

参照 ZHANG 等[14]的计算方法，菊花在干燥过程中的干燥速率计算如式（2）所示：

$$DR=\frac{M_1-M_2}{t_2-t_1} \quad (2)$$

式中 DR 为干燥速率，g/（g·h）；M_1 为菊花在 t_1 时刻的干基含水率，g/g；M_2 为菊花在 t_2 时刻的干基含水率，g/g。

1.4.3　干燥模型

选取 3 种常用的薄层干燥数学模型（表 1）对菊花干燥过程进行拟合。经验或者半经验模型代表不同类型的薄层干燥，能够全面比较不同数学形式对试验数据的适用性。

表 1　3 种干燥模型表达式

Table 1　Expressions of three drying models

模型 Model	数学表达式 Mathematical expression
Weibull	$MR=\exp(-(t/a)^b)$
Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$
Page	$MR=\exp(-at^b)$

注：MR 为水分比，t 为干燥时间；a、b 分别为各模型的干燥常数。

Note: MR represents moisture ratio, t represents drying time; a and b are the drying constants of each model.

采用决定系数（R^2）、卡方检验（χ^2）和均方根误差（RMSE）作为评价指标，评估菊花干燥动力学模型的拟合优度[15]。计算方程如下：

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i}-MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i}-\overline{MR_{exp,i}})^2} \quad (3)$$

$$\chi^2=\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2}{N-k} \quad (4)$$

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\frac{(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2}{N}} \quad (5)$$

式中 $MR_{exp,i}$ 为实测水分比；$MR_{pre,i}$ 为预测水分比；N 为试验数据点数量；k 为模型的参数个数。

1.5　微观结构测定

采用扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）对干燥后菊花的微观结构进行观察，取干燥花瓣的切面，将其固定在样品台上，喷金处理后在高真空条件下进行观测。设定加速电压 3.0 kV，放大倍数为 1 000 倍。

1.6　颜色测定

采用色差仪测定干燥后菊花的色泽，采集的参数包括亮度（L^*）、红度/绿度（a^*）、黄度/蓝度（b^*）。

1.7 营养活性物质测定

1.7.1 样品提取

活性成分的提取参照 XU 等[2] 的方法并进行适当调整。称取 0.1 g 经不同干燥方法处理后的菊花样品，加入 9 mL 80% 乙醇溶液，于 60 ℃ 水浴中超声提取 30 min，超声功率设定为 200 W，随后在 4 000 r/min 转速下离心 10 min。分离上清液，定容至 25 mL，备用。

1.7.2 可溶性糖测定

采用蒽酮比色法[16] 测定可溶性糖含量。制备 100 μL 提取液，并用 80% 乙醇稀释至 2 mL，与 0.5 mL 蒽酮混合，水浴加热 1 min。冷却至室温后，在 620 nm 波长下测定吸光度，用葡萄糖当量（mg/g）表示。

1.7.3 总酚与总黄酮含量测定

总酚含量的测定采用福林酚比色法[17]。500 μL 提取液、500 μL 0.01 mol/L 福林酚试剂与蒸馏水混合定容至 6.5 mL，室温避光下反应 10 min 后，加入 1 mL 碳酸钠溶液（100 g/L），室温避光孵育 60 min，760 nm 波长下测定吸光度。结果用没食子酸当量（mg/g）表示。

总黄酮含量的测定参考相关方法[18] 并适当调整。用 70% 乙醇将 1 mL 提取液稀释至 5 mL，与 0.5 mL 亚硝酸钠溶液（50 mg/mL）混合反应 5 min；加入 0.5 mL 硝酸铝溶液（100 mg/mL），摇匀静置 5 min；加入 4 mL 氢氧化钠溶液（100 mg/mL），反应 15 min 后，在 510 nm 波长下测定吸光度。结果用芦丁当量（mg/g）表示。

1.7.4 六大活性物质含量测定

通过高效液相色谱（high performance liquid chromatography, HPLC）测定样品中绿原酸、木犀草苷、异绿原酸、蒙花苷、木犀草素、芹菜素等六大活性成分[19]。以甲醇为溶剂，分别配制浓度为 40、34.8、98.8、89.6、26.8、36 μg/mL 的绿原酸、木犀草苷、异绿原酸、蒙花苷、木犀草素、芹菜素标准品，测试条件设定如下：柱温 40 ℃；流动相为 0.1% 甲酸水溶液（A）和乙腈（B），梯度洗脱，洗脱程序如表 2 所示，流速 0.3 mL/min，进样量 2 μL。通过与对照品的峰形、紫外光谱及保留时间对比确定目标峰。

表 2 高效液相色谱梯度洗脱程序

Table 2 High performance liquid chromatography gradient elution program table %

时间 Time/min	0.1% 甲酸 0.1 formic acid	Z 腈 Acetonitrile
0	88	12
1.5	88	12
3.0	75	25
8.0	70	30
12.0	64	36
15.0	0	100
18.0	88	12
20.0	88	12

1.8 风味物质分析

1.8.1 电子鼻（E-nose）检测

采用电子鼻检测 3 种不同干燥方法处理后的菊花气味。该设备配备 10 个具有不同选择性的金属氧化物半导体气体传感器。分析前，样品在顶空瓶中于室温平衡 1 h 以富集气味。参数如下：载气流速 400 mL/min，分析时间 180 s，传感器清洗时间 90 s，采样间隔 1 s，传感器调零时间 3 s。每个样品进行 3 次平行测定。

1.8.2 气相色谱-质谱（GC-MS）分析

采用气相色谱-质谱联用仪分析不同干燥方法处理后菊花样品的挥发性化合物的组成及含量[20]。称取 0.1 g 样品置于顶空瓶中密封，60 ℃ 平衡 20 min 后，提取吸附 30 min；将提取物注入 GC-MS 进样口，250 ℃ 解吸 5 min。色谱条件如下：初始温度 40 ℃，保持 5 min，以 5 ℃/min 升温至 250 ℃，保持时间 10 min；进样口温度 250 ℃；载气为高纯度氦气（纯度 99.99%），流速为 1.5 mL/min，分流比为 4∶1；离子源温度 230 ℃，传输线温度 150 ℃；EI 电离源工作电压 70 eV，扫描范围为 m/z 35～550。

挥发性化合物的定性分析基于 NIST 2017 质谱数据库检索，并结合保留指数进行鉴定。采用内标法（邻二氯苯）进行相对定量，根据式（6）进行计算：

$$C = \frac{A_v \cdot C_i}{A_i} \tag{6}$$

式中 C 为挥发性化合物的浓度，mg/kg；A_v 为挥发性化合物的峰面积；A_i 为邻二氯苯的峰面积；C_i 为邻二氯苯的浓度，17.412 mg/kg。

1.8.3 气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）分析

采用气相色谱-离子迁移谱仪对挥发性化合物进行监测和鉴定[21]，该仪器配备自动进样器。20 mL 顶空瓶中加入 0.1 g 样品，60 ℃ 孵育 20 min；随后通过 85 ℃ 加热注射器吸取 200 μL 顶空气体，以不分流模式自动进样。色谱分离采用毛细管柱，柱温 40 ℃，以高纯氮气（纯度 99.99%）为载气。样品经色谱分离后进入离子迁移谱单元，电离源为氚源（6.5 kV，正离子模式），漂移管温度 65 ℃，以高纯氮气（纯度 99.99%）为漂移气，流速 10 mL/min。将组分的保留指数和漂移时间与 GC-IMS 数据库进行比对，对挥发性化合物定性鉴定。

1.9 数据分析

所有数据在 IBM SPSS Statistics 27 软件采用单因素方差分析（ANOVA）和 Duncan 多重比较检验进行显著性差异分析（P＜0.05）。使用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

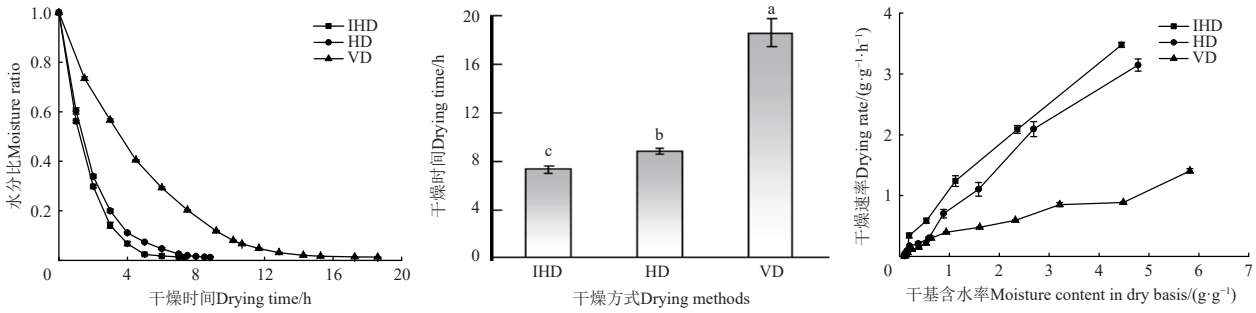
2.1 不同干燥方式下菊花干燥特性及干燥模型

水分比和干燥速率是描述干燥进程和衡量干燥效率的重要依据。3 种干燥方式（IHD、HD、VD）下菊花的水分比均随着干燥时间的延长而下降（图 1a），但下降速率存在显著差异（图 1b）。新鲜菊花从初始状态干燥至湿基含水率低于 10%，IHD、HD、VD 分别耗时 7.3、8.8 和 18.6 h。其中 VD 的干燥时间最长，是 IHD 和 HD 的 2.54 倍和 2.11 倍。

为了定量描述菊花在不同干燥方式下的水分比随时间的变化规律，选用 3 种常见的薄层干燥数学模型进行非线性回归拟合，以决定系数（R^2）、卡方（χ^2）和均方根误差（RMSE）为评价指标，结果如表 3 所示。

3 种干燥方式下 Page 模型和 Weibull 模型的拟合优度均较高，R^2 均大于 0.997，且 χ^2 和 RMSE 极低，表明这两个模型能很好地描述菊花在不同干燥过程中的水分变化规律。与 Page 和 Weibull 相比，Wang and Singh 对 HD 和 IHD 的拟合相对较差，对菊花干燥的适应性相对

较弱。根据模型参数，观察到 Page 中的干燥常数 a 值表现为 IHD>HD>VD，表明 IHD 的水分扩散速率最快，干燥效率最高；b 值在这 3 种干燥方式下均大于 1，说明干燥过程符合降速干燥特征。该现象与菊花组织结构致密、水分迁移受内部扩散控制的物理机制一致。Weibull 模型中 a 值越小，则干燥速率越快。其中，IHD 菊花在 Weibull 模型中 a 值最小，表明其干燥速率越高。Weibull 和 Page 这 2 种模型的参数趋势共同印证了 IHD 干燥速率最快、VD 最慢的规律。在天麻的干燥中观察到了类似的结论[22]。因此，Page 和 Weibull 能有效反映不同干燥方式下菊花水分比的变化规律，模型参数与干燥速率具有良好对应关系，为菊花干燥工艺优化提供理论依据。



a. 水分比　a. Moisture ratio　　b. 干燥时间　b. Drying time　　c. 干燥速率　c. Drying rate

注：IHD 表示红外联合热风干燥，HD 表示热风干燥，VD 表示真空干燥。下同。
Note: IHD represents infrared combined with hot air drying, HD represents hot air drying, and VD represents vacuum drying. The same below.

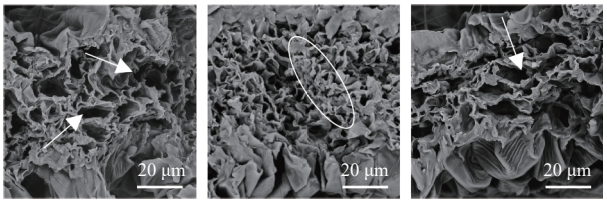
图 1　不同干燥方式下的水分比、干燥时间和干燥速率曲线
Fig.1　Moisture ratio, drying time and drying rate curves under different drying methods

表 3　3 种干燥模型的拟合结果
Table 3　Fitting results of three drying models

模型 Model	处理 Treatment	模型参数 Model parameters				
		a	b	χ^2	RMSE	R^2
Page	IHD	0.572 2	1.109 3	3.51×10^{-5}	2.46×10^{-4}	0.999 7
	HD	0.519 8	1.020 8	3.50×10^{-5}	3.50×10^{-4}	0.999 6
	VD	0.166 1	1.146 8	2.19×10^{-4}	2.85×10^{-3}	0.997 7
Wang and Singh	IHD	−0.382 2	0.034 8	3.39×10^{-3}	2.75×10^{-2}	0.965 9
	HD	−0.319 0	0.024 4	5.14×10^{-3}	5.14×10^{-2}	0.945 5
	VD	−0.141 8	0.004 9	1.56×10^{-3}	2.03×10^{-2}	0.983 4
Weibull	IHD	1.654 2	1.109 3	3.51×10^{-5}	2.46×10^{-4}	0.999 7
	HD	1.898 5	1.020 8	3.50×10^{-5}	3.50×10^{-4}	0.999 6
	VD	4.785 8	1.147 7	2.19×10^{-4}	2.85×10^{-3}	0.997 7

2.2　不同干燥方式下菊花的微观结构

SEM 能够在微观状态下直观反映干燥加工对细胞形态、孔隙结构和组织结构的影响。HD 花瓣结构排列致密，孔隙分布较均匀但孔径偏小。IHD 菊花花瓣的微观下仍能观察到明显的蜂窝状结构，塌陷程度较轻。VD 菊花花瓣的微观结构能够观察到较为明显的多孔蜂窝结构，细胞结构最为完整（图 2）。



a. IHD　　b. HD　　c. VD

注：图中白色箭头表示多孔蜂窝结构，圆圈表示坍缩区域。
Note: The white arrows in the figure indicate the porous honeycomb structure, and the circle indicates the collapsed area.

图 2　不同干燥方式下菊花的微观结构
Fig.2　Microstructure of chrysanthemum under different drying methods

2.3　不同干燥方式下菊花的色泽变化

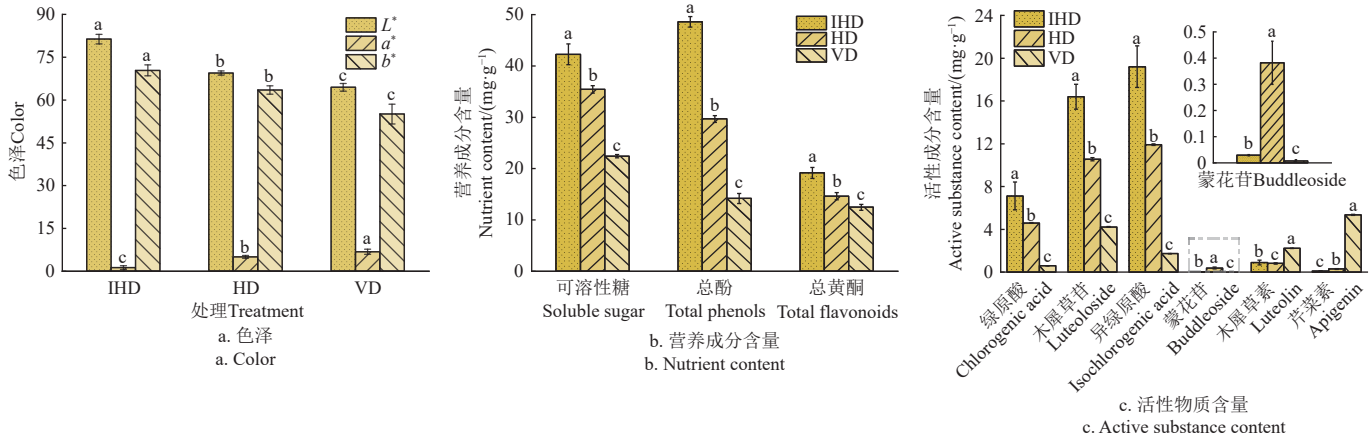
色泽是干制品视觉感官的基本指标，直接影响干制品的市场价值[23]。菊花的花瓣呈现明亮的金黄色泽，因此 3 种方式干燥后的 L^*值和 b^*值整体较高。其中，IHD 的 L^*值和 b^*值分别为（81.33±1.68）和（70.35±1.91），HD 的 L^*值和 b^*值分别为（69.46±0.73）和（63.48±1.48），而 VD 的 L^*值和 b^*值分别为（64.44±1.34）和（55.04±3.49）。IHD 和 HD 菊花的 L^*值和 b^*值显著高于 VD（$P<0.05$），且 VD 菊花观察到最高的 a^*值（6.77 ± 0.91）（图 3a）。

2.4　不同干燥方式下菊花的营养成分及六大活性成分含量

可溶性糖是评价菊花品质和风味的重要参数[24]。结果表明，干燥方式对可溶性糖含量具有显著影响。如图 3b 所示，IHD 菊花的可溶性糖含量最高，为（42.27±2.04）mg/g，比 HD 和 VD 菊花分别高 19.34% 和 88.54%。

总酚和总黄酮是一类具有抗氧化、抗炎等生理功效的植物次生代谢物[25]，在菊花中主要包括绿原酸、异绿原酸、芹菜素、木犀草苷等。总黄酮是植物体内所有具有 C6-C3-C6 基本结构的次生代谢产物的总和。总酚是带有酚羟基的化合物总称，包含多种酚类物质。在相同的温度下，VD 长时间的高温干燥处理显著降低了总酚和总黄酮的含量（图 3b），比 IHD 分别低 70.80% 和 34.97%，热降解效应显著。

绿原酸、木犀草苷、异绿原酸、芹菜素、木犀草素及蒙花苷等作为菊花 6 种特征性活性成分，对于筛选菊花干燥工艺、保障菊花干品品质具有重要意义。图 3c 表明，不同干燥方式对菊花干制品六大活性成分影响显著（$P<0.05$）。绿原酸、木犀草苷、异绿原酸三种活性成分均表现为 IHD 含量最高，HD 次之，VD 最低。其中，异绿原酸在 IHD 中的含量为 VD 的 11 倍以上。但是，芹菜素和木犀草素在 VD 处理含量最高，显著高于 IHD 和 HD。此外，蒙花苷在 HD 中含量最高，呈现不同的热稳定性特征。



注：不同字母表示同一指标在不同干燥方式下差异显著（P<0.05），下同。
Note: Different letters indicate that the same index has significant differences under different drying methods(P<0.05), the same below.

图 3 不同干燥方式下菊花的色泽和营养及活性成分含量
Fig.3 Color, nutrient and active ingredient contents of chrysanthemum under different drying methods

2.5 干燥时间与色泽、营养成分及活性物质相关性

为进一步明确干燥时间与色泽、营养及活性物质的关联，采用 Pearson 相关系数对干燥时间、色泽参数及 9 种营养活性物质进行相关性分析，结果如图 4 所示。干燥时间与可溶性糖（r=−0.96，P<0.01）、总酚（r=−0.89，P<0.01）、总黄酮（r=−0.79，P<0.05）均呈显著强负相关，表明干燥时间延长会导致这些活性物质大量降解。干燥时间与 L^*值、b^*值呈显著负相关，说明干燥时间越长，样品亮度越低、黄度也显著下降。此外，总酚与总黄酮（r=0.96，P<0.01）、绿原酸（r=0.95，P<0.01）之间呈极显著强正相关，木犀草苷与异绿原酸（r=1.00，P<0.01）之间也呈极显著强正相关，说明这些酚类物质在干燥过程中可能存在协同变化规律。

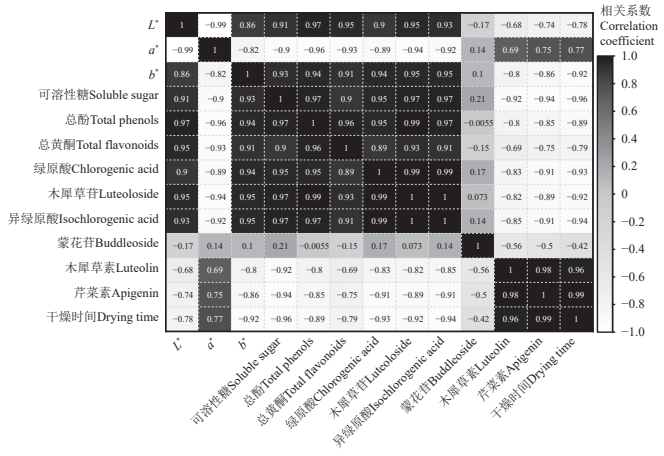


图 4 色泽、营养成分和干燥时间的相关性分析图
Fig.4 Correlation analysis chart of color, nutritional components and drying time

2.6 不同干燥条件下菊花的风味物质

2.6.1 电子鼻

香气是影响菊花感官质量和消费者接受度的决定性因素之一，其复杂的感官特性源于醇类、酯类、酮类、醛类等多种挥发性化合物的协同呈现，这些化合物的种类组成与相对丰度共同塑造了菊花的特征香气轮廓[26]。

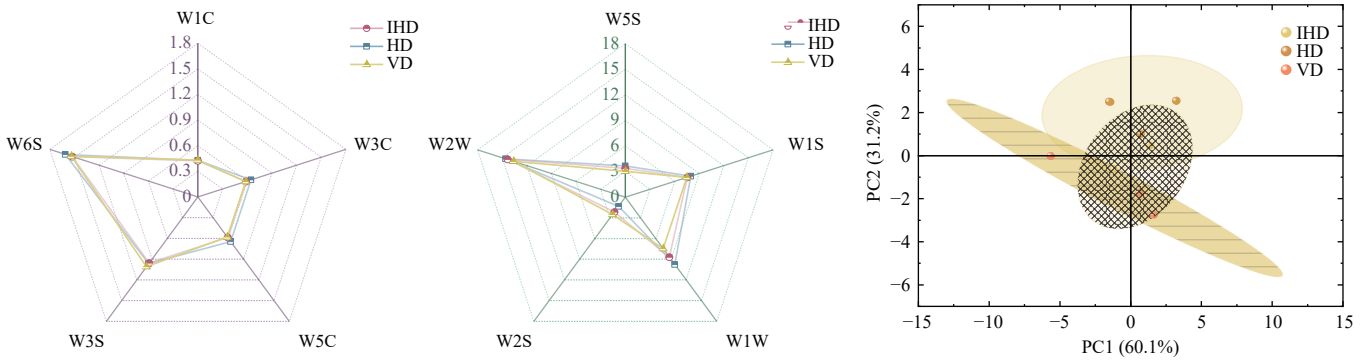
电子鼻可以获取样品的整体气味，直观对比其感官差异。不同干燥方式菊花的挥发性风味如图 5a 所示，较 HD 样品，IHD 和 VD 样品在 W2S（对醇、部分芳香族化合物敏感）响应值增强，说明红外联合热风干燥和真空干燥处理更有利于醇类及芳香族类挥发性物质的积累，这是因为 IHD 的协同加热可使物料内外均匀升温，加速细胞壁结构破坏，促进糖苷结合态醇类前体的释放与转化，生成游离态醇类和芳香族化合物。WU 等[27] 研究发现催化式红外干燥能够诱导细胞膜通透性增加、细胞壁多糖重组，这种细胞结构的破坏有助于结合态风味前体的释放。而 VD 的低氧低压环境可有效减少已生成醇类的氧化损失，尤其是对氧敏感的芳香族化合物得以更好保留。HD 和 VD 样品在 W5S（对氮氧化物敏感）、W3C（对氨类敏感）、W6S（对氢化物敏感）、W5C（对烃类、芳香型化合物敏感）、W1S（对芳烃化合物敏感）均略有降低，而 VD 样品在 W1W（对硫化物、萜烯类物质敏感）响应值降低明显，这是由于 VD 的低氧环境抑制了需氧萜烯的生成且真空条件下低沸点萜烯类及含硫化合物易随水蒸气一同被抽离干燥体系，造成物理性挥发损失。然而，有研究报道真空干燥对生姜中萜烯类物质的保留优于高温热风干燥[3]。这是因为，该研究中真空干燥的温度显著低于热风干燥，其保留优势主要归因于低温对热敏物质的保护作用。与生姜研究中不同的是，本研究 3 种干燥方式均在 50 ℃ 下进行，排除温度差异的干扰。因此，VD 样品中 W1W 响应值的降低主要因为真空环境对萜烯类生成的抑制及物理挥发损失。

对 3 种干燥方式处理的菊花样品进行主成分分析（PCA）。如图 5b 所示，第一主成分（60.1%）和第二主成分（31.2%）的累计贡献率为 91.3%，说明这两个主成分足以反映样品的主要气味信息。不同干燥方式的菊花样品在挥发性成分上呈现明显的分离趋势，表明电子鼻有效区分了不同干燥方式处理的菊花整体气味特征。

2.6.2 GC-IMS

GC-IMS 具有高灵敏度与可视化优势，直观地呈现了特征性变化区域。图 6a 是不同干燥方式菊花样品 GC-IMS 二维谱图。如图 6a 所示，3 种干燥方式下菊花样品的风味信息存在显著差异。为深入比较样品间风味化合

物的差异，以 HD 样品为参照组，对另外两种干燥方式样品进行谱图扣除，如图 6b 所示，与 HD 组相比，IHD 和 VD 组样品中均有大量挥发性风味物质的含量发生了显著变化，这一结果与 PCA 分析（图 5b）中样品组间呈现明显分离趋势相互印证，进一步证实了不同干燥方式对菊花挥发性成分组成的显著影响。



a. 不同干燥方式下菊花的风味雷达图
a. Flavor radar chart of chrysanthemum under different drying methods

b. 主成分分析
b. Principal component analysis

注：W1C 传感器主要对芳香族化合物和苯类物质敏感；W5S 传感器对氮氧化物敏感；W3C 传感器对氨气及芳香类成分敏感；W6S 传感器对氢气和氢化物敏感；W5C 传感器对烷烃类及短链烷烃芳香成分敏感；W1S 传感器对甲烷等短链烷烃敏感；W1W 传感器对硫化物和萜烯类物质敏感；W2S 传感器对醇类、醛酮类以及部分芳香族化合物敏感；W2W 传感器对芳香族化合物和有机硫化物敏感；W3S 传感器对长链烷烃敏感。
Note: The W1C sensor is primarily sensitive to aromatic compounds and benzene-like substances; the W5S sensor is sensitive to nitrogen oxides; the W3C sensor is sensitive to ammonia and aromatic components; the W6S sensor is sensitive to hydrogen and hydrides; the W5C sensor is sensitive to alkanes and short-chain alkane aromatic components; the W1S sensor is sensitive to short-chain alkanes such as methane; the W1W sensor is sensitive to sulfides and terpenes; the W2S sensor is sensitive to alcohols, aldehydes, ketones, and some aromatic compounds; the W2W sensor is sensitive to aromatic compounds and organic sulfides; the W3S sensor is sensitive to long-chain alkanes.

图 5　不同干燥方式下菊花的电子鼻分析
Fig.5　E-nose analysis of chrysanthemum under different drying methods

对所有峰进行指纹图谱对比，如图 6c 所示，其中每行代表单个样品的全部挥发性成分信号峰，每列代表同一化合物在不同样品中的信号峰。菊花样品中共鉴定出 64 种挥发性成分，包括 16 种醇类、9 种萜烯类、19 种醛类、11 种酮类、6 种酯类及 3 种其他物质。根据挥发性化合物的分布特征，可将图谱划分为 A～E 5 个特征区域，各区域内挥发性化合物的丰度在不同干燥样品间呈现明显差异。

在 B 区，HD 样品中 *α*-蒎烯、*α*-松油烯等萜烯类化合物的信号强度明显高于 IHD 和 VD 样品，赋予菊花浓郁的草本清香和松木气息。这与 STAUDT 等的研究一致[28]。在 C 区，VD 样品中的 (E)-2-戊烯醛、异佛尔酮等物质含量显著低于其他两种干燥方式。这一差异归因于此类物质主要生成于有氧条件下的热驱动反应（如脂质氧化），因此有氧热处理方式更有利于其积累。类似地，WANG 等[23] 研究发现，热风干燥和远红外干燥通过脂质氧化反应显著促进了香气的释放，而真空低氧条件则可能抑制此类反应的进行。这佐证了 VD 菊花中脂质氧化产物含量显著低于有氧热处理。D 区 IHD 样品中正戊醛、正己醛、*β*-月桂烯等物质的丰度最高。这些化合物多呈现清新的花果香与青草香。这一现象可能归因于红外与热风的协同加热效应，使物料内外升温更为均匀，从而加速脂质氧化及氨基酸的 Strecker 降解反应，促进了相关醛类和萜烯类物质的生成[29]。E 区中乙偶姻（奶油香）、2-甲酰基-5-甲基噻吩（坚果香）等物质在 VD 中呈现最高的丰度，导致 VD 呈现更多的甜香。低氧低压环境有效抑制了酯类物质的水解及过度氧化，减少了已生成挥发性物质的损失[30]。此外，A 区各组干燥样品中 5-乙基-2,3-二甲基吡嗪、丙醛、苯甲酸乙酯等挥发性化合物含量差异较小，表明这些化合物的生成与积累受干燥方式的影响相对有限[31]。

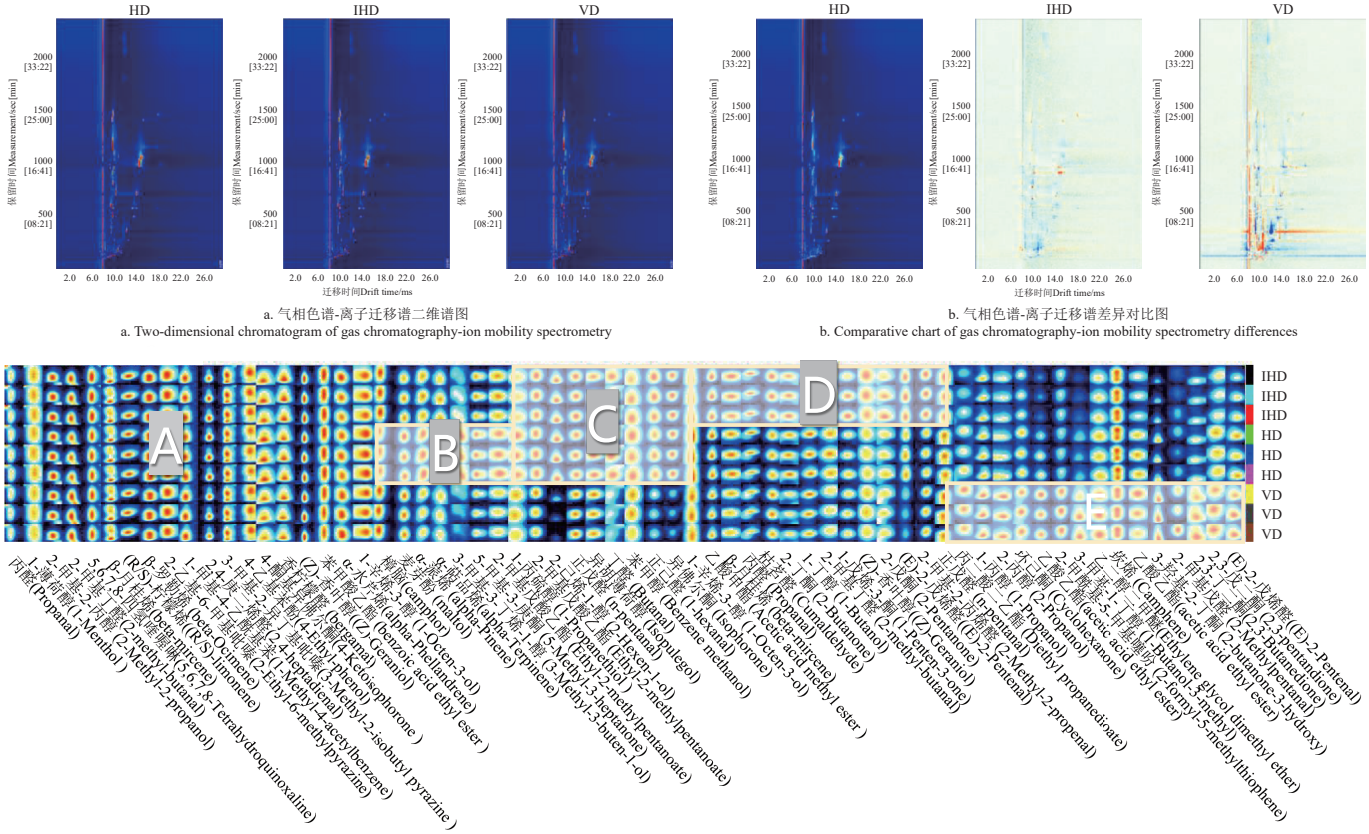
2.6.3　GC-MS

在电子鼻整体气味轮廓与 GC-IMS 指纹特征分析的基础上，GC-MS 可以对差异挥发性化合物进行精准定性与定量分析[32]。图 7a 为挥发性成分韦恩图，3 组干燥样品中共定性到 266 种挥发性化合物，87 种萜烯类，49 种醇类，41 种酮类，29 种醛类，26 种酯类以及 34 种其他类挥发性化合物。其中 HD 组检出 172 种挥发性化合物，IHD 和 VD 组样品分别检测出 183 种和 179 种挥发性化合物，其共有的挥发性成分为 105 种，构成了菊花风味的核心物质基础，表明不同干燥方式并未完全改变其主体挥发性成分谱。各组特有的化合物数量分别为 32 种（HD）、35 种（IHD）和 36 种（VD），这些特有成分是导致其风味差异的关键物质基础，与 PCA 及 GC-IMS 差异分析的结论相互印证。

由图 7b 可知，IHD 组的总挥发性化合物浓度最高，显著高于 HD 组和 VD 组（$P<0.05$），这表明 IHD 更有利于挥发性物质的总体积累。其中，萜烯类物质是 3 种干燥菊花样品中丰度最高的挥发性组分，在 HD、IHD 及 VD 样品中，其浓度分别为 89.24、121.09 及 73.90 mg/kg。

采用偏最小二乘判别分析构建分类模型，并计算各挥发性化合物的投影重要性（variable importance in projection, VIP）值，以筛选对不同干燥方式具有显著贡献的差异标志物[33]。结果如图 7c 所示，共筛选出 20 种关键差异挥发性成分（VIP＞1）。其中，3,4,4-三甲基-2-环己烯-1-酮、*α*-法呢烯、*β*-月桂烯和 *β*-岩兰烯等化合物的 VIP 值较高，是区分不同干燥方式的关键化合物，主要属于酮类和萜烯类物质，能够赋予样品花香、果香及草本香气等特征[34]，是菊花的主要香气特征。其中，*α*-法呢烯作为一种广泛存在于植物中的萜烯类化合物，在苹果等多种水果中被证实是其特征香气的关键贡献者，

其含量高低直接影响样品的整体感官品质[35]。值得注意的是，这些差异标志物中大部分为三组样品的共有成分，表明不同干燥方式对菊花风味的影响主要体现在共有成分的含量调控上，而非完全依赖特有成分的生成。



a. 气相色谱-离子迁移谱二维谱图
a. Two-dimensional chromatogram of gas chromatography-ion mobility spectrometry

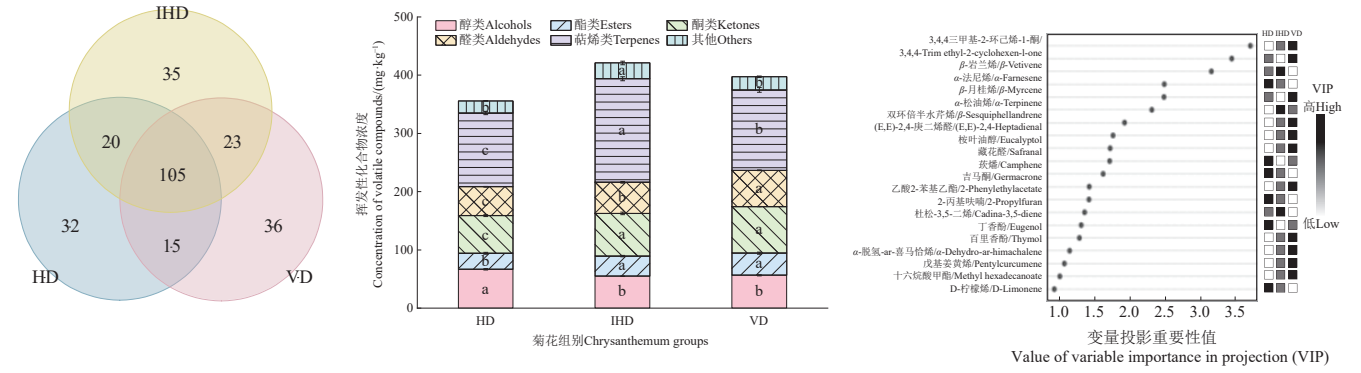
b. 气相色谱-离子迁移谱差异对比图
b. Comparative chart of gas chromatography-ion mobility spectrometry differences

c. 气相色谱-离子迁移谱指纹图谱
c. Fingerprint spectrum of gas chromatography-ion mobility spectrometry

注：图 6a 左侧竖线为归一化反应离子峰，其右边的每个点代表从样品中提取的挥发性化合物，颜色越深表示该物质浓度越高。图 6b 中白色背景代表与 HD 组无显著差异的区域，红色信号点表示该物质含量显著高于 HD 组，蓝色信号点则相反。图 6c 中，A～E 区域根据不同组挥发性化合物的变化特征划分。
Note: The vertical line on the left side of Fig. 6a represents the normalized reaction ion peak. Each point on the right side represents the volatile compounds extracted from the sample. The darker the color, the higher the concentration of the substance. In Fig. 6b, the white background represents the area with no significant difference compared to the HD group. The red signal points indicate that the content of this substance is significantly higher than that of the HD group, while the blue signal points indicate the opposite. In Fig. 6c, areas A to E are divided based on the variation characteristics of volatile compounds in each group.

图 6 不同干燥方式下菊花的气相色谱-离子迁移谱结果

Fig.6 Test results of gas chromatography-ion mobility spectrometry for Chrysanthemum under different drying methods



a. 气相色谱-质谱韦恩图
a. Venn diagram of gas chromatography-mass spectrometry

b. 挥发性化合物浓度图
b. Volatile compound concentration graph

c. 气相色谱-质谱的变量投影重要性
c. Variable importance in projection of gas chromatography-mass spectrometry

图 7 不同干燥方式下菊花气相色谱-质谱结果

Fig.7 Test results of gas chromatography-mass spectrometry for *Chrysanthemum* under different drying methods

3 讨 论

3.1 干燥方式对干燥效率及微观结构的影响机理

干燥时间的差异主要与不同干燥方式的传热机制相关。HD 以热空气作为热源，从菊花表面向内部传导，并通过对流传热促使水分蒸发。IHD 结合了热风对流和红外辐射，红外辐射能够穿透表层直接加热物料内部，二者协同作用下提高了传热传质效率[36]，因此 IHD 的干燥效率最高。此外，HD 的料盘和载物台均为网状结构，样品的顶部与底部均与热空气充分接触，鼓风装置促进水分快速迁移，因此 HD 与 IHD 的干燥时间差距较小[37]。

VD 虽然提供了负压环境导致水分沸点降低，但热传导效率较低，导致整体干燥速率下降。

微观结构的差异反映了不同干燥方式对细胞形态的破坏程度。干燥过程中 HD 花瓣的细胞结构出现了塌缩，失去了原有的多孔结构。在热风干燥蜂花粉[38] 的微观结构中也观察到了收缩。这是因为 HD 干燥过程中传热传质方向相反，易在表面形成硬层，内部蒸汽压累积导致细胞塌陷。红外辐射的内部穿透性使其能够同时加热菊花花瓣内部，而水分蒸发产生的蒸汽压有利于维持其多孔结构[2]。真空环境下水分沸点降低，有助于水分以蒸汽形式逸出[39]，且干燥速率较慢，使得内部水分迁移与表面蒸发达到平衡，细胞结构保留较为完整[40]。

3.2　色泽、营养与活性成分的保留机制

色泽与营养成分的变化与干燥过程中的酶活性及热敏性物质降解密切相关。IHD 和 HD 的快速脱水钝化了菊花的多酚氧化酶和过氧化物酶，有效抑制酶促褐变。氨基酸和还原糖在高温下相互作用产生棕色色素的反应称为美拉德反应。IHD 和 HD 在高温下的时间相对较短，减少了美拉德反应等非酶褐变发生的可能性，有助于维持样品中较高的 L^*值和较低的 a^*值[2]。尽管真空环境减少菊花与外界空气的接触，避免了氧化反应和酶促褐变，但是较长的干燥时间导致菊花长期处于加热状态，加速了热敏性类胡萝卜素等色素的降解[2]，橙黄色值显著下降，因此 VD 的 b^*值最低。

可溶性糖在干燥过程中的变化是生成和消耗的动态平衡结果。一方面，干燥过程中细胞结构被破坏，释放液泡中的游离糖[41]，增加可溶性糖含量；另一方面，糖类在干燥温度下与氨基酸参与美拉德反应被消耗[24]。50 ℃ 条件下的美拉德反应速率较慢，因此糖类的消耗与干燥时间存在显著相关性。IHD 干燥时间比 HD 缩短了 16.98%，其可溶性糖比 HD 高 19.34%，VD 的干燥时间是 IHD 的 2.54 倍，其可溶性糖含量最低。此外，可溶性糖是重要的非挥发性物质，作为菊花加工过程中风味物质的前体物质，对菊花干制品风味网络的构建具有重要作用。

酚类物质根据其结合状态可以分为游离酚和结合酚[42]，常规溶剂提取（80% 乙醇）检测的总酚含量主要包含游离酚和部分可溶性酚苷。诺丽果研究中观察到游离酚在高温干燥下大幅下降，而低温干燥（冻干）下保持了羟基完整性，减少了热分解[42]。甘草在长时间高温干燥下类黄酮含量[43] 也显著降低。此外，研究表明，红外辐射能够促进高分子酚类聚合物共价键断裂获得低分子酚类，提高保留率[2]。与 VD 相比，SEM 下观察到 HD 和 IHD 的细胞结构破坏更剧烈，促进酚类物质和黄酮类物质的释放，提高了提取效率[25]。以上双重因素作用下，IHD 样品中总黄酮和总酚含量最高。

研究表明，多酚氧化酶和过氧化物酶活性与酚酸类、黄酮类等活性物质的含量呈显著负相关，高温短时干燥可有效钝化酶活性，减少酶促降解[9]。因此，干燥时间较短的 IHD 中观察到绿原酸、木犀草苷、异绿原酸含量丰富。值得注意的是，芹菜素和木犀草素的结果与绿原酸、木犀草苷、异绿原酸的结果相反。芹菜素、木犀草素是典型的黄酮苷元，在新鲜植物中以黄酮苷的形态存在。菊花内源性 β-葡萄糖苷酶在适宜温度下（50 ℃）热稳定性较好，促进结合态黄酮苷水解为游离苷元[44]，而较长的干燥时间增加了 VD 菊花的芹菜素和木犀草素含量。尽管各活性成分在不同干燥方式下热稳定性规律不同，3 种干燥方式下六大活性成分的质量浓度总量仍然呈现 IHD＞HD＞VD 的趋势，与图 3b 中总酚和总黄酮含量规律一致。

3.3　三种风味检测技术关联对比分析

本研究联用电子鼻、GC-IMS 和 GC-MS 三种风味分析技术，从不同维度系统表征了不同干燥方式菊花的风味特征。3 种风味分析技术均表明，IHD 处理菊花的总挥发性成分最为丰富，且 3 种干燥方式可通过各自的特征谱图被有效区分。电子鼻 PCA 累计贡献率达 91.3%（图 5b），GC-IMS 差异对比图（图 6b）显示 IHD 和 VD 与 HD 组存在显著差异，GC-MS 的 PLS-DA 模型则进一步筛选出 20 种 VIP>1 的关键差异标志物（图 7c）。此外，GC-MS 和 GC-IMS 在主要挥发性化合物茨烯、β-月桂烯、α-松油烯、樟脑、2,4-庚二烯醛等的保留上具有高度一致性。

与此同时，3 种技术在检测菊花中挥发性化合物也表现出互补性。电子鼻可快速获取样品整体气味指纹，适用于样品初筛。GC-IMS 采用直接顶空进样法，对部分小分子挥发性化合物灵敏度高，检测到乙偶姻、乙酸乙酯、异丙醇等热诱导产物。值得注意的是，在 GC-IMS 分析过程中，某些挥发性单体和二聚体能够被准确检测和鉴定，这是 GC-MS 无法实现的[34]。而 GC-MS 结合顶空固相微萃取技术，通过预浓缩和选择性吸附富集挥发性物质，覆盖更广范围，实现了 266 种挥发性成分的精准定性与定量。

GC-MS（266 种）与 GC-IMS（64 种）鉴定数量的显著差异，主要归因于两者检测原理与前处理方式不同。GC-MS 采用顶空固相微萃取富集进样，通过吸附与热解吸浓缩痕量成分，并结合质荷比（m/z）进行鉴定，依托 NIST 谱库可实现宽范围定性[45]，对高沸点、半挥发性的 β-岩兰烯、双环倍半水芹烯等大分子化合物响应良好。相比之下，GC-IMS 则为直接顶空进样，基于离子迁移率分离，对小分子醛、酮、醇等高挥发性物质具有 10^{-9}（体积比）级灵敏度，但对非极性或难电离物质响应较弱，因此检出数较少。3 种技术的整合确保了全面的挥发性化合物谱分析，为阐明不同干燥方式下菊花样品的挥发性化合物变化提供了坚实基础。

4　结　论

本研究系统揭示了热风干燥（hot air drying, HD）、红外联合热风干燥（infrared combined with hot air drying, IHD）和真空干燥（vacuum drying, VD）对菊花干燥特性、理化品质及风味特征的影响规律。结果表明，干燥方式通过调控传热传质过程、氧分压及温度分布，显著影响菊花的微观结构、活性成分保留及挥发性化合物组成。主要结论如下：

1）IHD 在脱水效率、营养成分保留以及风味保留等方面优势明显；VD 虽然保留了多孔微观结构，但是营养成分损失较为严重。相关性分析显示，干燥时间与营

养活性物质显著相关，且六大活性物质呈现不同的热稳定性特征。

2）基于电子鼻、气相色谱-离子迁移谱联用（gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS）与气相色谱-质谱联用（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）等多技术联用，揭示了 3 种干燥方式下菊花风味差异的物质基础。电子鼻有效区分 3 组样品气味轮廓，主成分分析（principal component analysis, PCA）累计贡献率达 91.3%；GC-IMS 定性鉴定出 64 种挥发性成分，IHD 样品中正戊醛、β-月桂烯等花果香物质丰度最高；GC-MS 定性鉴定出 266 种挥发性化合物，以萜烯类（87 种）和醇类（49 种）为主要组分，且 IHD 组总挥发性化合物浓度最高；通过偏最小二乘判别分析筛选出 20 种关键差异标志物（变量投影重要性 VIP>1）主要为萜烯类和醇类，是区分干燥方式的关键。综合发现，干燥方式对菊花风味的影响主要体现在共有挥发性成分的含量调控，而非新物质的生成。

IHD 可作为高品质菊花干燥加工的适宜工艺，在保留营养成分与构建丰富风味方面具有综合优势，对推动菊花产业的高值化发展具有重要的理论与应用价值。本研究结果为菊花资源的精深加工提供了理论依据。但本研究仅在 50 ℃ 下进行，未考察温度与干燥方式的交互效应；未来可进一步研究红外联合真空干燥或不同温度组合对菊花品质的影响。

[参 考 文 献]

[1] SONG A, SU J, WANG H, et al. Analyses of a chromosome-scale genome assembly reveal the origin and evolution of cultivated chrysanthemum[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2021.

[2] XU H, WU M, WANG Y, et al. Effect of combined infrared and hot air drying strategies on the quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cakes: Drying behavior, aroma profiles and phenolic compounds[J]. Foods, 2022, 11(15): 2240.

[3] CHENG P, YUN X, XU C, et al. Use of poly(ε-caprolactone)-based films for equilibrium-modified atmosphere packaging to extend the postharvest shelf life of garland chrysanthemum[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 1946-1956.

[4] XUE H, GAO H, LIU Y, et al. Purification, structural identification of polysaccharides from Hangzhou Chrysanthemum and their α-glucosidase inhibition mechanisms[J]. Industrial Crops and Products, 2026, 242: 122889.

[5] 余欣珂，明建，支玲，等. 真空冷冻干燥对菊花多酚含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械，2020，36（6）：138-144.
YU Xinke, MING Jian, ZHI Ling, et al. Effects of vacuum-freeze drying on the antioxidant activity and phenolic contents of different *Chrysanthemum* flowers[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 138-144. (in Chinese with English abstract)

[6] CHEN N, FAN J, LI G, et al. Comparative analysis of the chemical constituents of chrysanthemum morifolium with different drying processes integrating LC/GC–MS−based, non-targeted metabolomics[J]. Metabolites, 2024, 14(9): 481.

[7] 刘川东，张浩平，李泽宝，等. 青花椒堆积对流干燥过程堆积层孔隙率宏细观跨尺度演变特征[J]. 农业工程学报. 2026，42（1）：372-382.
LIU Chuandong, ZHANG Haoping, LI Zebao, et al. Multi-scale evolution of porosity in *Zanthoxylum schinifolium* stack during convective drying from macro to micro-scale characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(1): 372-382. (in Chinese with English abstract)

[8] LI B, LIN J, ZHENG Z, et al. Effects of different drying methods on drying kinetics and physicochemical properties of *Chrysanthemum morifolium* Ramat[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 187-193.

[9] WANG Y, SUN J, MA D, et al. Improving the contents of the active components and bioactivities of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. : The effects of drying methods[J]. Food Bioscience, 2019, 29: 9-16.

[10] 吴木兰，张嘉慧，林启昉，等. 干燥方式对黄菊花活性成分、抗氧化特性及挥发性风味的影响[J]. 福建农业科技，2025，56（9）：21-27.
WU Mulan, ZHANG Jiahui, LIN Qifang, et al. Effects of drying methods on the active components, antioxidant properties and volatile flavor of *Chrysanthemum morifolium*[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2025, 56(9): 21-27. (in Chinese with English abstract)

[11] 赖惠敏，王世连，阮征，等. 热加工方式对火麻仁风味与品质的影响[J]. 中国食品学报，2022，22（2）：200-212.
LAI Huimin, WANG Shilian, RUAN Zheng, et al. Effects of thermal processing on the flavor and quality of hemp seed [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 200-212. (in Chinese with English abstract)

[12] 吴玉珍，王洁琼，余海涛，等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析不同干燥方式菊花脑的挥发性物质差异[J]. 食品科学，2023，44（8）：228-237.
WU Yuzhen, WANG Jieqiong, YU Haitao, et al. Analysis of volatile components in *Chrysanthemum nankingense* leaves dried by different methods by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and calculation of odor activity value[J]. Food Science, 2023, 44(8): 228-237. (in Chinese with English abstract)

[13] ZHANG J, DENG L, ZHANG W, et al. Effects of vacuum steam pulsed blanching on bioactive compounds, quality attributes, enzyme activities, and microstructural properties of daylily (*Hemerocallis lilioasphodelus* L.)[J]. Food Chemistry, 2026, 506: 148147.

[14] ZHANG J, ZHANG F, ZHANG W, et al. Effects of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on enzyme activity, drying kinetics, physicochemical properties, and volatile components of daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2026, 111: 104569.

[15] XU H H, WU M, ZHANG T, et al. Effects of different pulsed vacuum drying strategies on drying kinetics, phenolic composition, and antioxidant capacity of chrysanthemum (*Imperial chrysanthemum*)[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(4): 236-242.

[16] HAILE S, GASHAW S, KASSAHUN J, et al. Determination of total phenolic content, total flavonoid content, antioxidant activities, and soluble sugars of different varieties of banana fruit pulps grown in some woredas in bench sheko and sheka zones, southwest ethiopia[J]. Journal of Food Quality, 2025, 1:4827476.

[17] YUAN J, HAO L J, WU G, et al. Effects of drying methods on the phytochemicals contents and antioxidant properties of chrysanthemum flower heads harvested at two developmental

stages[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19: 786-795.
[18] SIDDIQUI S A, UCAK I, JAIN S, et al. Impact of drying on techno-functional and nutritional properties of food proteins and carbohydrates-A comprehensive review[J]. Drying Technology, 2024, 42(4): 592-611.
[19] ZHU S, WANG W, LIU X, et al. Qualitative and quantitative analysis of major components in Abelmoschus manihot flowers treated with different drying methods using UHPLC Q-exactive MS and HPLC-PDA[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2025, 253:116558.
[20] JIN G, ZHU Z, WU Z, et al. Characterization of volatile components of microwave dried perilla leaves using GC-MS and E-nose[J]. Food Bioscience, 2023, 56:103083.
[21] ZHAO D, XU Y, GU T, et al. Peptidomic investigation of the interplay between enzymatic tenderization and the digestibility of beef semimembranosus proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 68(4): 1136-1146.
[22] LI K, ZHANG Y, WANG Y F, et al. Effects of drying variables on the characteristic of the hot air drying for gastrodia elata: Experiments and multi-variable model[J]. Energy, 2021, 222: 119982.
[23] WANG X, SU H, GAO R, et al. A comprehensive study on the effects of drying methods on the color, structure, flavor, and nutritional properties of green peppers (*Piper nigrum* L.)[J]. Food Chemistry: X, 2025, 32: 103183.
[24] 梁珏钦，韩晓磊，范伟，等. 不同干燥方式对南荻笋品质和微观结构的影响[J]. 食品工业科技，2026，47（10）：23-32.
LIANG Jueqin, HAN Xiaolei, FAN Wei, et al. Effects of different drying methods on the quality and microstructure of *Triarrhena lutarioriparia* shoots[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 23-32. (in Chinese with English abstract)
[25] WEN A, XIE C, MAZHAR M, et al. Comparative evaluation of drying methods on kinetics, biocompounds and antioxidant activity of *Bacillus* subtilis-fermented dehulled adlay[J]. Drying Technology, 2020, 38(11): 1505-1515.
[26] 张玉，朱玲敏，徐颂文，等. 菊花的营养成分、加工制品及香气成分研究进展[J]. 食品工业，2020，41(4)：247-251.
ZHANG Yu, ZHU Lingmin, XU Songwen, et al. Advances in studies on the nutritional components, processed products and aroma components of *Chrysanthemum*[J]. The Food Industry, 2020, 41(4): 247-251. (in Chinese with English abstract)
[27] WU B, DAI J, GUO X, et al. Mechanisms of surface crust formation in carrot slices during catalytic infrared dry-blanching: Roles of moisture migration, membrane permeability, cellular morphology, and cell wall composition[J]. LWT-Food Science and Technology, 2026, 243: 119186.
[28] STAUDT M, MORIN X, CHUINE I. Contrasting direct and indirect effects of warming and drought on isoprenoid emissions from *Mediterranean* oaks[J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(7): 2121-2133.
[29] XU H, WU M, CHEN L, et al. Postharvest processing enhances flavor and quality of chrysanthemum: Insights from moisture status, aroma formation, and metabolomic profiling[J]. Postharvest Biology and Technology, 2026, 231: 113901.
[30] ZHANG J, XIONG F, KANG N, et al. Mechanisms of vacuum steam pulsed blanching on daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni): Enhancing physicochemical properties, drying efficiency, volatile compound diversity, and plant chemical constituent accumulation[J]. Food Research International, 2026, 233: 118866.
[31] NING X, SU J, ZHANG X, et al. Evaluation of volatile compounds in tea *Chrysanthemum* cultivars and elite hybrids[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 320: 112218.
[32] XU J, ZHANG Y, HU C, et al. The flavor substances changes in Fuliang green tea during storage monitoring by GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101047.
[33] LI Y, PU Y, XU F, et al. Comparative investigation of aroma characteristics of six chrysanthemum species based on sensory evaluation and multivariate statistical analysis to provide a strategy for the cultivation of sweet-scented chrysanthemums[J]. Food Chemistry, 2025, 485: 143900.
[34] YUAN C, CHEN S, WANG F, et al. Identification and functional analysis of terpene synthases revealing the sweet aroma formation in *Chrysanthemum indicum* var. *aromaticum* flowers[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 236: 121907.
[35] SHIMIZU T, HATTORI Y, OGAMI S, et al. Identification of aroma compounds responsible for apple flavor via palatability score prediction in tree-based regression models[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 192: 115737.
[36] ZHANG H, WANG B, ZENG S, et al. Drying techniques of edible flowers: Technical features, challenges and potential solutions[J]. Drying Technology, 2026, 44(4): 435-452.
[37] 段续，宋艳红，陈俊亮，等. 不同干燥方式对杜仲雄花品质特性及挥发性成分的影响[J]. 农业工程学报，2024，40（6）：101-110.
DUAN Xu, SONG Yanhong, CHEN Junliang, et al. Effects of different drying methods on the quality and volatile components of *Eucommia ulmoides* male flowers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(6): 101-110. (in Chinese with English abstract)
[38] ZHANG C, TAO J L, SUTAR P P, et al. Comparative study of hot air and vacuum drying on drying behavior, phytochemical composition, browning, and microstructural changes in bee pollen: The role of oxygen, temperature and vacuum[EB/OL]. Journal of Future Foods, (2025-6-10)[2026-01-02]. https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2025.06.001.
[39] XU M Q, HA B E, VIDYARTHI S K, et al. Innovative far-infrared radiation assisted pulsed vacuum freeze-drying of banana slices: Drying behaviors, physicochemical properties and microstructural evolution[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 100: 103925.
[40] 马佳佳，董明辉，全鑫瑶，等. 不同干燥方式对羊肚菌品质特性及复水性能的影响[J]. 农业工程学报，2024，40（20）：288-297.
MA Jiajia, DONG Minghui, QUAN Xinyao, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics and rehydration performance of *Morchella esculenta*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 288-297. (in Chinese with English abstract)
[41] 徐寒冰，郁书怀. 双果糖酐水解酶分子改造提升酶活性研究[J]. 食品与发酵工业，2023，49（5）：1-8.
XU Hanbing, YU Shuhuai. Molecular modification of difructose anhydride hydrolase to improve its enzymatic activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 1-8. (in Chinese with English abstract)
[42] LI Q, CHAI J, DENG S, et al. The comparison of the profile of phenolic compounds in noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit by different drying methods[J]. Foods, 2025, 14(8): 1398.
[43] ZHU L, LI M, YANG W, et al. Effects of different drying

methods on drying characteristics and quality of *Glycyrrhiza uralensis* (Licorice)[J]. Foods, 2023, 12(8): 1652.
[44] ZHANG W, ZUO Y, XU F, et al. Study of the mechanism of change in flavonoid composition in the processing of *Chrysanthemum morifolium* (Ramat.) Tzvel. '*Boju*'[J]. BMC Chemistry, 2019, 13(1): 128.
[45] SCHANZMANN H, GAAR S, KEIP S, et al. Comparison of the quantification performance of thermal desorption GC-IMS and GC-MS in VOC analysis[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025, 417(18): 4179-4198.

Effects of different drying methods on the quality characteristics, microstructure and volatile components of *Chrysanthemum*

ZONG Jijuan[1] , ZHANG Yaru[1] , ZHU Guangfei[2] , WAN Xiya[1] , LI Yunxiang[1] , ZHAO Cong[1] , CHEN Fadi[3] , WANG Haibin[3※] , WANG Hui[1※]

(1. *College of Food Science and Technology*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 211800, *China*;
2. *Academy of Agricultural Planning and Engineering*, *MARA*, *Beijing* 100125, *China*;
3. *College of Horticulture*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 211800, *China*)

Abstract: *Chrysanthemum morifolium* Ramat. is one of the most important medicinal and edible herbs in daily life. However, post-harvesting preservation has often been confined to the high moisture content and perishable nature of fresh chrysanthemum. Drying has been widely used to reduce microbial growth via dehydration, particularly for the long shelf life. Drying approaches also share significant impacts on the quality and flavor profiles of chrysanthemum. In this study, three drying approaches were employed to dehydrate chrysanthemum, namely hot air drying (HD), infrared combined hot air drying (IHD), and vacuum drying (VD). A systematic analysis was also conducted to explore their effects on drying behavior, color, nutritional quality, microstructure, and flavor components. Results showed that the IHD exhibited the shortest drying time (7.3 h), followed by HD (8.8 h) and VD (18.6 h). Page and Weibull models best described the drying behavior (R^2 > 0.997). Drying constant *a* in the Page model was the highest for IHD (0.5722) and the lowest for VD (0.1661), indicating the highest moisture diffusion in IHD. Furthermore, the IHD and HD yielded significantly higher L^* and b^* values than the VD (P < 0.05), indicating better color retention. Microstructural observation revealed that the VD best preserved cellular integrity with honeycomb-like structures, followed by IHD with moderate porosity, while HD shared severe structural shrinkage. Moreover, the IHD achieved the highest soluble sugar content (42.27 ± 2.04 mg/g), 19.34% and 88.54% higher than HD and VD, respectively. Shorter drying time was attributed to minimum Maillard consumption. Total contents of phenolic and flavonoid followed the descending order of IHD > HD > VD (P < 0.05). High-performance liquid chromatography (HPLC) analysis revealed that total content of six characteristic bioactive compounds (chlorogenic acid, luteoloside, isochlorogenic acid, apigenin, luteolin, and buddleoside) maintained the trend of IHD > HD > VD. Among them, chlorogenic acid, luteoloside, and isochlorogenic acid were highest in IHD, while luteolin and apigenin were highest in VD, due to prolonged β-glucosidase activation under longer drying duration. E-nose principal component analysis (PCA) showed that three drying groups were detected with 91.3% cumulative contribution (PC1 = 60.1%, and PC2 = 31.2%). Gas chromatography–ion mobility spectrometry (GC-IMS) identified 68 volatile compounds among all samples. Hierarchical clustering revealed that there were five characteristic regions of compound distributions. For instance, IHD exhibited the highest abundance of floral and fruity compounds, such as pentanal and *β*-myrcene, while VD shared the highest levels of acetoin and 2-formyl-5-methylthiophene, and HD presented high levels of terpenes, such as *α*-pinene. Additionally, 208 volatile compounds were also identified, where the HD, IHD, and VD contained 172, 183, and 179 compounds, respectively. The volatile profile was then composed of 105 common compounds. Total volatile concentration was highest in IHD (421.11 mg/kg), thus exceeding HD (355.88 mg/kg) and VD (397.24 mg/kg). Terpenes (87 compounds) and alcohols (49 compounds) dominated all samples. Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) identified 20 key differential volatile markers (VIP > 1), including terpenes and alcohols, including 3,4,4-trimethyl-2-cyclohexen-1-one, *α*-farnesene, *β*-myrcene, and *β*-vetivenene. Most VIP markers were common compounds, indicating that drying approaches modulated abundance rather than generating unique compounds. In characteristic flavor profiles, HD was featured by herbal, cooling, and woody notes (high eucalyptol and camphene); IHD exhibited roasted, spicy, and caramel-like aromas (elevated furans, esters, and phenolics) from Maillard reactions; VD delivered fruity, sweet, and floral notes (high terpenes) closest to fresh chrysanthemum. Alcohols were often correlated with floral/fruity notes, while terpenes contributed herbal/green characteristics, which were consistent with E-nose observations. In conclusion, the optimal IHD can offer superior drying efficiency, better retention of nutritional components and most bioactive compounds, and the highest total volatile concentration with desirable roasted and spicy notes. Synergistic infrared and hot air heating can accelerate drying behavior to promote compound release. These findings can also provide a scientific basis to optimize industrial chrysanthemum drying for the quality attributes of high-value products. Therefore, the infrared and vacuum drying can be promising for the constant temperature during drying.

Keywords: *Chrysanthemum*; drying; bioactive compounds; volatile compounds; GC-IMS