

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80179

# 热分析技术鉴别辣椒粉掺假

朱晓玲<sup>1,2,3</sup> 刘杰<sup>1,2,3</sup> 陈锂<sup>1,2,3</sup> 王彬<sup>1,2,3</sup> 江丰<sup>1,2,3</sup>

(1. 湖北省食品质量监督检验研究院, 湖北 武汉 430075; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室  
(动物源性食品中重点化学危害物检测技术), 湖北 武汉 430075; 3. 湖北时珍实验室, 湖北 武汉 430075)

**摘要:** [目的] 探究热分析技术在辣椒粉掺假鉴别中的应用。[方法] 利用热分析仪对不同产地的辣椒粉样品、掺假样品(玉米、麦麸、稻壳和大米)、不同掺假物和掺假比例的模拟掺假样品以及市售样品进行热分析。样品经粉碎后, 过 60 目筛网, 在热分析仪以 10 °C/min 的升温速率, 在室温~800 °C 的温度范围, 以流量 100 mL/min 的氮气为气氛, 空铝坩埚为参比物, 进行样品分析, 并解析各样品的热特征行为。[结果] 纯辣椒粉样品的主要失重阶段温度范围为 180~579 °C, 失重率为 60.50%, 掺假样品玉米粉、麦麸粉、稻壳粉、大米粉的主要失重温度范围分别为 256~386, 252~392, 203~414, 249~349 °C, 相比纯辣椒粉样品, 掺假物表现出更集中的热分解区间, 主要失重阶段的起始和终止温度的差异可作为鉴别辣椒粉真伪的判断依据; 此外, 根据热重曲线和热导微分曲线, 不同比例的自制模拟掺假样品与纯辣椒粉样品均能被较好区分。[结论] 热分析技术可以应用于辣椒粉样品的掺假鉴别, 该方法简单、无需复杂的样品前处理。

**关键词:** 热分析技术; 辣椒粉; 掺假; 鉴别

## Identification of chili powder adulteration based on thermal analysis

ZHU Xiaoling<sup>1,2,3</sup> LIU Jie<sup>1,2,3</sup> CHEN Li<sup>1,2,3</sup> WANG Bin<sup>1,2,3</sup> JIANG Feng<sup>1,2,3</sup>

(1. Hubei Provincial Institute for Food Supervision and Test, Wuhan, Hubei 430075, China; 2. Key Laboratory of Detection Technology of Focus Chemical Hazards in Animal-derived Food, State Administration for Market Regulation, Wuhan, Hubei 430075, China; 3. Hubei Shizhen Laboratory, Wuhan, Hubei 430075, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the application of thermal analysis in the identification of chili powder adulteration. [Methods] Chili powder samples and adulterated samples (corn, wheat bran, rice husk, and rice) from different sources, different simulated adulterated samples, simulated samples with different adulteration ratios, and commercial samples are analyzed by a thermal analyzer. Samples are crushed, passed through a 60-mesh sieve, and then analyzed in the thermal analyzer at the heating rate of 10 °C/min from the room temperature to 800 °C, with a flow rate of 100 mL/min of nitrogen as the atmosphere and an empty aluminum crucible as the reference material. The thermal characteristics of each sample are analyzed. [Results] The main weight loss temperatures of the pure chili powder samples are within the range of 180~579 °C, and the weight loss rate is 60.50%. The main weight loss temperatures of the adulterated samples with corn flour, wheat bran powder, rice husk powder, and rice flour are within the ranges of 256~386, 252~392, 203~414 °C, and 249~349 °C, respectively. The adulterants show a more concentrated thermal decomposition interval, and the difference between the starting and ending temperatures of the main weight loss stage can be used as a basis for identifying the authenticity of chili powder. In addition, according to thermogravimetric curve and thermal conductivity differential curve, different proportions of simulated adulterated samples and pure chili powder samples can be well distinguished. [Conclusion] Thermal analysis can be employed to identify the adulteration of chili powder samples. The method is simple and does not require complicated sample pretreatment.

**Keywords:** thermal analysis; chili powder; adulteration; identification

基金项目: 国家市场总局科技计划项目(编号: 2023MK086); 国家重点研发项目(编号: 2023YFF1104700)

通信作者: 江丰(1985—), 男, 湖北省食品质量监督检验研究院高级工程师, 硕士。E-mail: 349136833@qq.com

收稿日期: 2025-03-04 改回日期: 2025-08-18

引用格式: 朱晓玲, 刘杰, 陈锂, 等. 热分析技术鉴别辣椒粉掺假[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 58-65.

Citation: ZHU Xiaoling, LIU Jie, CHEN Li, et al. Identification of chili powder adulteration based on thermal analysis[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 58-65.

辣椒粉是世界上重要的调味品,属于香辛料类产品,被广泛应用于食品加工行业以及日常的菜肴烹饪中。目前,辣椒加工产品主要以粉碎的形式生产辣椒粉、辣椒面、五香粉等调味粉以及辣椒酱等产品。GB/T 23183—2009《辣椒粉》规定:辣椒粉是以茄科植物辣椒属辣椒或其变种的果实经干燥、粉碎、不添加其他成分(抗结剂除外)等工序制成的非即食性粉末。由于辣椒经粉碎成粉末状后,失去了原有产品的外观形态,导致辣椒粉产品在生产加工或售卖等环节,向其中掺杂掺假不易被发现,这也给食品欺诈行为提供了巨大机会,调料(辣椒粉)的掺假已被列入欧盟调查报告列出的十大易掺假食品名单之中<sup>[1]</sup>,不法商家可能通过掺入低成本且易于获得的植物性副产品,甚至木屑粉、红砖粉等,再进行外观色泽的调整和掩盖,以此获得更高的利润。

目前,有关辣椒粉样品的监管检测主要集中于该产品的安全性指标,如苏丹红、罗丹明B等,由于辣椒粉样品掺假种属复杂未知,且粉末状的样品形态造成掺假鉴定较困难,目前中国尚无相关辣椒粉真伪鉴别的国家标准检验方法。现有的关于食品掺假鉴别的研究多集中于食用油、燕窝、人参、酒、阿胶等价值较高的产品,采用的鉴别方法主要有感官检测、显微镜检测、化学显色等,这些方法存在灵敏度低、操作复杂等局限性,难以满足准确检测需求。近年来,研究较多的食品掺假鉴别技术主要有高分辨质谱技术<sup>[2]</sup>、核磁共振技术<sup>[3-4]</sup>、同位素质谱技术<sup>[5]</sup>、电子鼻技术<sup>[6]</sup>、分子生物学技术<sup>[7-8]</sup>、适配体等快检技术<sup>[9]</sup>,以及红外<sup>[10-11]</sup>、荧光<sup>[12]</sup>、高光谱<sup>[13-14]</sup>等光谱技术等,还有采用蛋白质组或代谢组学<sup>[15]</sup>、特征标志物<sup>[16-17]</sup>、多元统计<sup>[18]</sup>、机器智能学习<sup>[19]</sup>等新技术进行识别,这些方法有的需要用到高端的仪器设备以及专业的技术人员进行操作,有的需要经过较复杂的样品前处理,检测耗时。热分析技术是一种在程序控制温度下,测量物质的温度与物理性质关系的一类技术<sup>[20]</sup>,能够反映样品组分的热稳定性与能量变化特性,该技术操作简单,不需要进行复杂的样品前处理,尤其适用于复杂基质中异质成分的鉴别,目前国内外将热分析技术应用于食品方面的研究日益增多<sup>[21-22]</sup>,在食品掺假鉴别<sup>[23-24]</sup>、产地品种分析<sup>[20,25]</sup>等方面均有相关报道。试验主要以辣椒粉掺假鉴别为切入点,采用热分析技术对辣椒粉样品与掺假样品进行区分,旨在为粉末状食品的掺假鉴别提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与材料

同步热分析仪:STD 650型,美国 Waters 公司;

操作软件:Trios 型,美国 Waters 公司;

分析天平:XPR105DR 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

铝制坩埚: $\Phi$  6.5 mm $\times$ 4 mm,上海菁仪化工材料有限公司;

粉碎机:FSJ-A05N6 型,小熊电器股份有限公司;

试验筛:8~200 目,新乡市法斯特机械有限公司;

辣椒粉样品:收集来自河南、山东、重庆等 6 个不同地区的干辣椒样品,经粉碎机粉碎均匀后,过 60 目筛网,制成纯辣椒粉样品备用;

掺假样品:收集来自河北、吉林、黑龙江等不同地区的玉米、麦麸、稻壳、大米样品,经粉碎机粉碎,过 60 目筛制成粉末状样品备用;

模拟掺假样品:将玉米粉、麦麸粉、稻壳粉、大米粉分别按照 10%、30%、50%、70% 的质量比例与制备好的纯辣椒粉样品进行混合,制备成 16 组自制模拟掺假样品;

市售样品:随机购买辣椒粉样品,具体信息见表 1。

表 1 样品来源  
Table 1 Sources of samples

编号	名称	来源	批号
1	干辣椒 1	河南郑州	20241012
2	干辣椒 2	山东潍坊	20241031
3	干辣椒 3	重庆石柱	20241102
4	干辣椒 4	四川省德阳	20241020
5	干辣椒 5	新疆喀什市	20241020
6	干辣椒 6	广西梧州	20240418
7	干玉米粒 1	合肥	/
8	干玉米粒 2	山东	/
9	干玉米粒 3	太原	/
10	麦麸 1	河北石家庄	20241123
11	麦麸 2	河南商丘	20241015
12	麦麸 3	山东枣庄	20240503
13	稻壳 1	黑龙江	/
14	稻壳 2	吉林	/
15	稻壳 3	湖北	/
16	大米 1	江西	20240301
17	大米 2	黑龙江	20240816
18	大米 3	湖北	20240908
19	市售辣椒粉 1	广西梧州	20241001
20	市售辣椒面 2	四川成都	20240718
21	市售辣椒面 3	四川成都	20240930
22	市售辣椒粉 4	/	/
23	市售辣椒粉 5	/	/
24	市售辣椒粉 6	/	/

### 1.2 试验方法及条件

同步热分析仪温度范围为室温~800 °C,升温速率为 10 °C/min,以氮气为气氛,流量为 100 mL/min,参比物为

空铝坩埚。分别取过筛后的粉末状样品 8~12 mg,置于专用铝坩埚中,按试验条件程序升温,分别对样品进行热图谱扫描,得到 TG 曲线,并对 TG 曲线求导得到微分曲线 DTG。

### 1.3 数据处理

试验数据通过 Trios 软件采集,获得样品的 TG 曲线,并进行导数分析得到 DTG 曲线,采用切线法计算曲线中台阶式转变质量损失起始点和信号变化量,由 DTG 曲线峰值确定最大失重速率温度,采用软件 Weight change 功能计算并报告选定温度区域的质量变化绝对值和质量变化百分比信息,采用软件 Residue 功能分析曲线上选定温度的失重残余百分比,将样品测试原始数据导出至 Excel 表格,并采用 Excel 2019 软件进行热分析曲线作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验条件优化

#### 2.1.1 升温速率比较 热重分析中,升温速率是影响试

验结果的关键参数之一<sup>[26]</sup>。由图 1 可知,在 5, 10, 20 °C/min 的升温速率下,采用同步热分析仪采集所得到的样品 TG 曲线形状相似,难以进行差异区分,为提高 TG 曲线分辨率,采用仪器自带软件对 TG 曲线进行导数分析,得到 DTG 微分曲线,从 DTG 微分曲线可以看出辣椒粉样品在热分析过程中存在多个失重台阶,这主要是由于辣椒粉样品基质成分复杂,不同的化合物成分在热分析谱图上显示出各自的特征。在 5, 10, 20 °C/min 的升温速率下,DTG 曲线整体轮廓相似但稍有差异,升温速率为 20 °C/min 时,在 350~450 °C 区间样品图谱的失重台阶区分不明显,较快的升温速率会影响样品内部与环境温度的热传导和热平衡,导致分解反应温度区间变宽;升温速率为 5 °C/min 时,较慢的升温速率使样品有足够的时间达到热平衡,有利于样品中化合物相邻峰或失重台阶的分离,但较慢的升温速率也会大大增加样品分析时间,导致试验时间过长。因此,采用 10 °C/min 的升温速率进行后续试验。

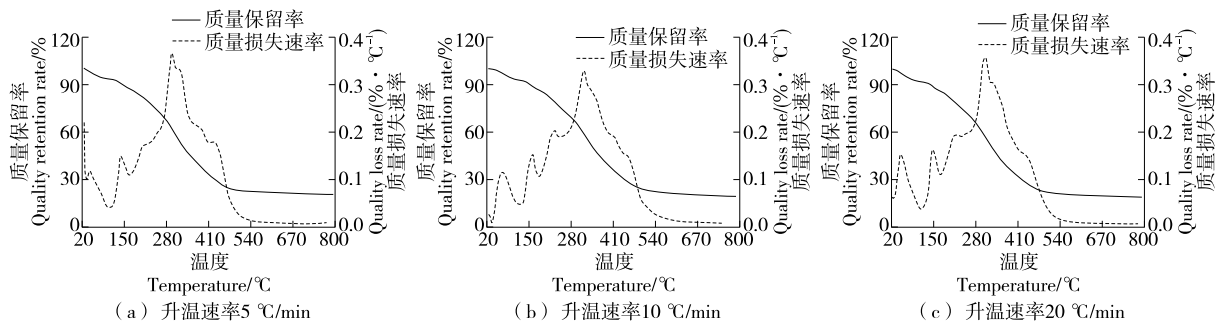


图 1 不同升温速率下辣椒粉样品的 TG-DTG 曲线

Figure 1 TG-DTG curves of chili powder samples at different heating rates

2.1.2 样品制备方式和粒径选择 在热重分析中,样品粒径会影响其内部的传热传质以及气体扩散<sup>[27]</sup>。刘鑫等<sup>[28]</sup>研究发现,无论采用去籽或带籽工艺制备辣椒粉,其所得到的样品热分析图谱均呈现 2 个放热峰,二者在第 2 个放热峰的峰面积和峰值对应温度上有所差异,但去籽辣椒粉的放热特征在带籽辣椒粉的 DSC 图谱中均有体现。鉴于当前生产企业普遍采用带籽加工方式,因此,采用带籽粉碎方式制备辣椒粉样品用于热分析。

由于热分析称样量较小,若粉碎后样品粒径不均,容易导致取样代表性不足,影响结果的稳定性。因此,干辣椒带籽粉碎后过 60 目筛,以提高样品均匀性,后续分析结果显示重复性良好。自制模拟掺假样品也统一经 60 目筛处理后再进行测定。

### 2.2 纯辣椒粉样品及典型掺假物的热分析特征

图 2 为不同产地的辣椒粉样品热图谱 TG 曲线图以及典型 DTG 热重导数微分曲线图,为了便于比较观察,将 6 条 TG 曲线 Y 轴依次增加 10% 排列在同一坐标中。由

图 2 可知,6 份不同产地的辣椒粉样品具有相似的热图谱峰形及图谱特征,类似于辣椒粉样品的热谱指纹,其中曲线波动稍有差异,可能是不同产地或品种的辣椒样品某些成分或含量存在差异造成的。为了得出辣椒粉掺假判别实际可用的具体指标,对原始数据进行处理分析,从 TG 曲线与 DTG 曲线中提取关键特征温度、最大失重速率温度、质量损失、失重残余百分比信息,并对辣椒粉样品不同失重阶段进行区分,相应的特征数据见表 2。由表 2 可知,辣椒粉样品成分复杂,其热分解包含多个分解过程,试验按照 3 个主要热分解阶段进行数据分析:第 1 阶段,辣椒粉样品 TG 曲线在 32~120 °C 有一个小台阶,失重率为 6.79%,DTG 曲线在相应的温度区间呈现一个小峰,此阶段主要为易挥发性成分和残留水分的去除<sup>[22]</sup>;第 2 阶段,温度范围为 120~180 °C,失重率为 6.13%,此阶段仍是一些易挥发成分的分解;第 3 阶段为样品失重的主要阶段,温度范围为 180~579 °C,失重率为 60.50%,此阶段样品中大部分有机质热分解,失重最快速率在 311 °C 附近。

至 800 °C 时,样品残余质量为 24.93%。

图 3~图 6 为典型掺假物玉米粉、麦麸粉、稻壳粉、大米粉样品的热图谱 TG 曲线以及典型 DTG 热重导数微分曲线。典型掺假物与辣椒粉样品表现出不同的热图谱特征,玉米粉主要失重温度范围为 256~386 °C,失重率为 59.92%;麦麸粉主要失重温度范围为 252~392 °C,失重率为 58.09%;稻壳粉主要失重温度范围为 203~414 °C,失重率为 49.14%;大米粉主要失重温度范围为 249~349 °C,失重率为 61.31%;4 种典型掺假物的主要失重阶段的起始温度均高于辣椒粉的,可能是辣椒粉中含有辣椒素、萜类物质、油脂等低热稳定性成分,这些成分在较低的温度下开始分解,而掺假物玉米粉、麦麸等主要成分中含有大量淀粉、纤维素等,这些大分子碳水化合物通常需要更高的温度(200~300 °C)才开始显著热降解;此外,4 种典型掺假物的主要失重阶段的终止温度均低于辣椒粉样品的,可能是由于辣椒粉的成分更复杂,各成分的稳定性差异大,其中含有木质素、矿物质等高稳定性化合物,需要更高的温度分解,致使辣椒粉失重阶段延长,而典型掺假物玉米粉、麦麸粉、稻壳粉、大米粉的组成成分相对简单,这些样品均表现出更集中的热分解区间。因此,主要失重阶段

的起始和终止温度的差异可作为鉴别辣椒粉真假的判断依据。

由表 2 还可以看出,经过室温~800 °C 的热分析后,辣椒粉、玉米粉、麦麸粉、稻壳粉和大米粉的残余质量分数分别为 24.93%, 16.25%, 20.81%, 32.32%, 9.82%,可能是辣椒粉中含有较多的无机矿物质(如钾、钙、镁、磷等)及高稳定有机成分(木质素等),这些成分在 800 °C 高温下仍不能完全分解;玉米粉主要成分为淀粉和少量蛋白质,无

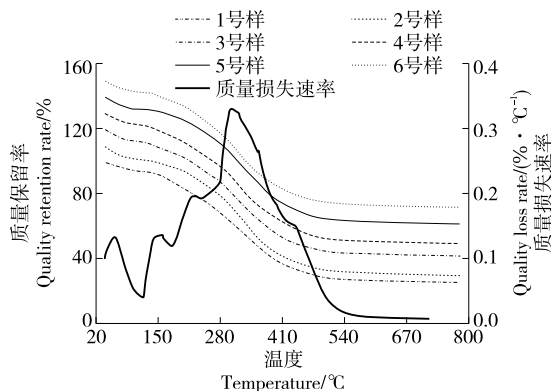


图 2 不同产地来源的辣椒粉样品热图谱

Figure 2 Heating curves of chili powder samples from different sources

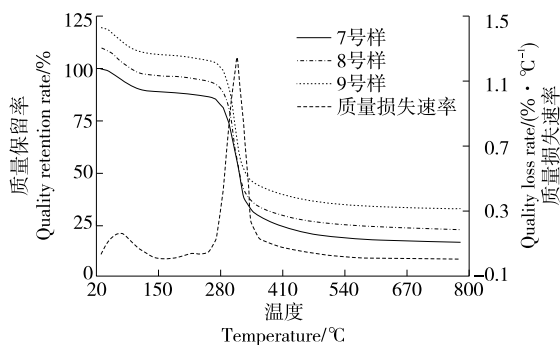


图 3 不同产地来源的玉米粉热图谱

Figure 3 Heating curves of corn flour from different sources

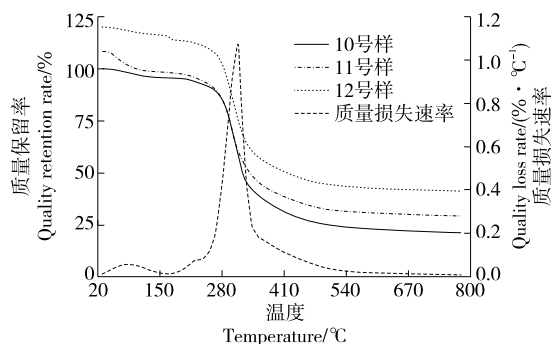


图 4 不同产地来源的麦麸粉热图谱

Figure 4 Heating curves of wheat bran powder from different sources

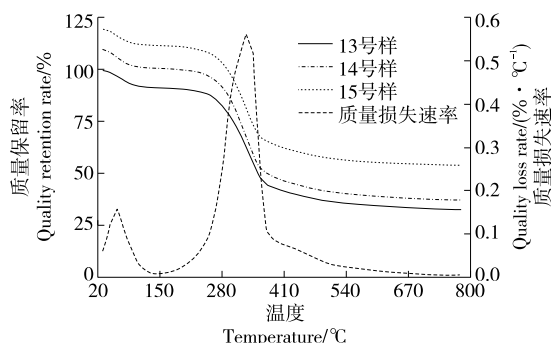


图 5 不同产地来源的稻壳粉热图谱

Figure 5 Heating curves of rice husk powder from different sources

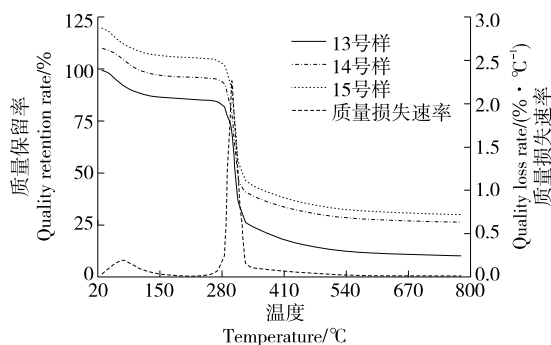


图 6 不同产地来源的大米粉热图谱

Figure 6 Heating curves of rice flour from different sources

机矿物质含量相对较低,在 800 °C 时,大部分有机成分已完全分解,残余质量较辣椒粉低;麦麸粉中含有较多的纤维素和少量矿物质,残余质量高于玉米粉,低于辣椒粉;稻壳粉中由于含有大量的硅酸盐,此类物质在高温下仍较稳定,致使稻壳粉的残余质量明显高于其他样品;大米粉主要成分为淀粉,在 800 °C 下残余质量较其他样品的低。综上,不同样品在热分析后残余质量分数也有所差异。

### 2.3 自制掺假辣椒粉样品分析

对自制的 16 组辣椒粉模拟掺假样品(玉米粉、麦麸粉、稻壳粉和大米粉掺入比例分别为 10%, 30%, 50%, 70%)进行热分解行为分析,图 7~图 10 为系列掺假样品的 TG 曲线及 DTG 曲线叠加图,4 组图中均显示,加入掺假物后,样品的主要失重阶段的温度范围发生了改变,且随着掺假物(玉米粉、麦麸粉、稻壳粉、大米粉)比例的增加,主

表 2 辣椒粉、玉米粉、麦麸粉、稻壳粉和大米粉的热分析特征数据

Table 2 Characteristic data of thermal analysis on chili powder, corn powder, wheat bran powder, rice husk powder, and rice powder

样品名称	阶段	温度范围/°C	最大失重速率温度/°C	质量损失/%	失重残余百分比/%	样品名称	阶段	温度范围/°C	最大失重速率温度/°C	质量损失/%	失重残余百分比/%
辣椒粉	第 1 阶段	32~120	56	6.79	24.93	稻壳粉	第 1 阶段	36~149	63	8.91	32.32
	第 2 阶段	120~180	153	6.13			第 2 阶段	203~414	340	49.14	
	第 3 阶段	180~579	311	60.50			第 3 阶段	414~570		6.44	
玉米粉	第 1 阶段	35~150	85	11.48	16.25	大米粉	第 1 阶段	32~175	76	14.45	9.82
	第 2 阶段	256~386	319	59.92			第 2 阶段	249~349	304	61.31	
	第 3 阶段	386~550		7.81			第 3 阶段	349~536		11.06	
麦麸粉	第 1 阶段	37~177	93	4.65	20.81						
	第 2 阶段	252~392	315	58.09							
	第 3 阶段	392~563		10.26							

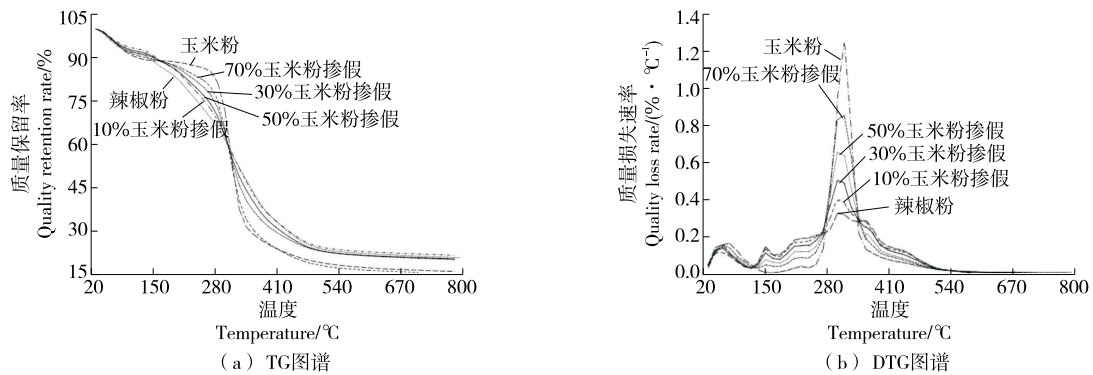


图 7 不同比例玉米粉掺假的自制掺假辣椒粉样品的 TG 及 DTG 图谱

Figure 7 TG and DTG curves of the simulated adulterated chili powder samples with different proportions of corn flour

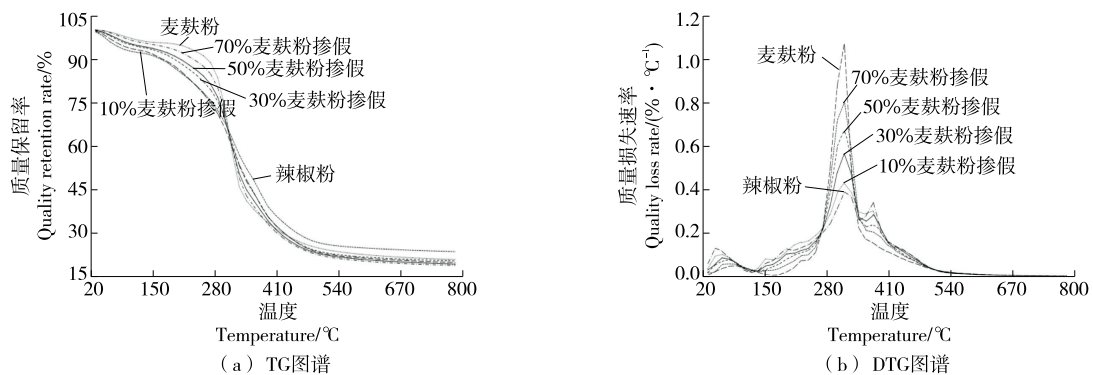


图 8 不同比例麦麸粉掺假的自制掺假辣椒粉样品的 TG 及 DTG 图谱

Figure 8 TG and DTG curves of simulated adulterated chili powder samples with different proportions of wheat bran powder

要失重阶段起始温度呈递增趋势,而终止温度逐渐降低,此外,DTG曲线中,主要失重阶段的图谱峰形随着掺假物比例的增加逐渐变得更加圆滑尖锐,从DTG曲线中可以看出,所有不同比例的自制模拟掺假样品均能与纯辣椒粉样品较好区分。因此,采用热分析进行辣椒粉样品掺假的鉴别具有可行性。从图谱中还可以看出,不同比例的麦麸粉掺假以及稻壳粉掺假的自制掺假样品,在残余质量上与纯辣椒粉的具有较大差异,该指标也可以作为

辣椒粉掺假的参考判定依据。

### 2.4 市售样品分析

基于各物质均有各自的热特征,在完全等同的分析条件下对同一样品进行分析测定,其分析行为应表现出一致的行为特征,选取6份市售辣椒粉及其制品样品进行热分析,并与纯辣椒粉样品的热分析图谱进行重叠作图,结果如图11所示。其中2份辣椒面样品的热分析图谱与纯辣椒粉样品差异较大,通过提取关键特征温度及最大

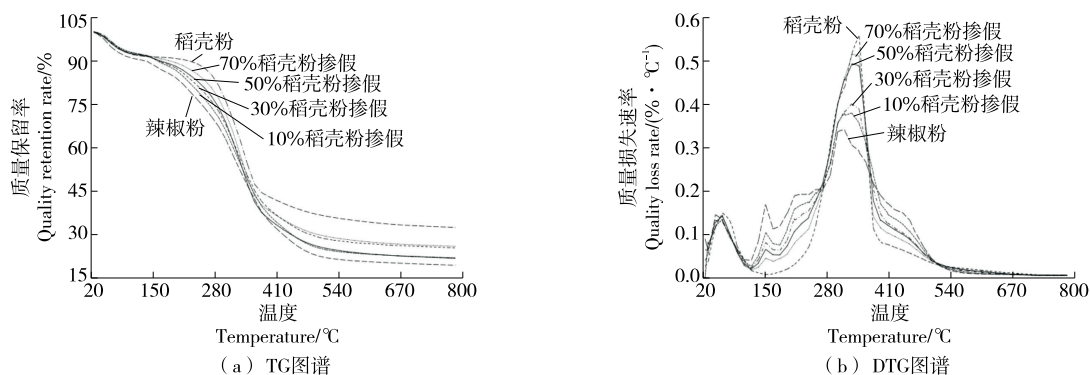


图9 不同比例稻壳粉掺假的自制掺假辣椒粉样品的TG及DTG图谱

Figure 9 TG and DTG curves of simulated adulterated chili powder samples with different proportions of rice husk powder

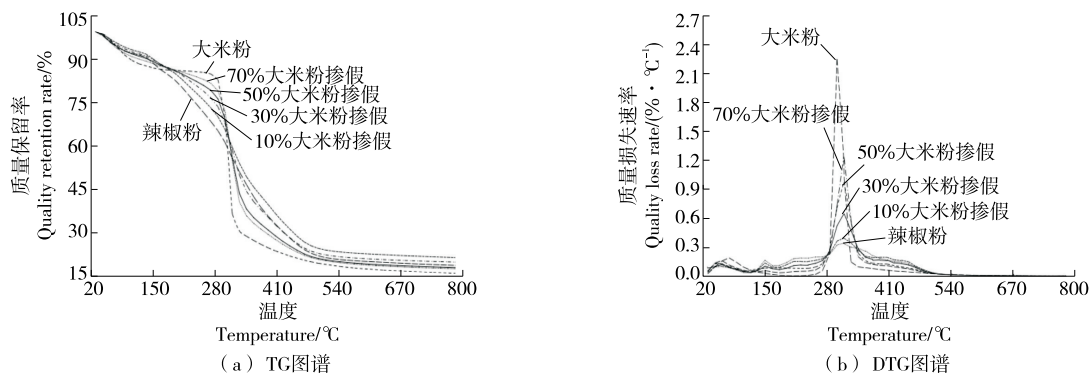


图10 不同比例大米粉掺假的自制掺假辣椒粉样品的TG及DTG图谱

Figure 10 TG and DTG curves of simulated adulterated chili powder samples with different proportions of rice flour

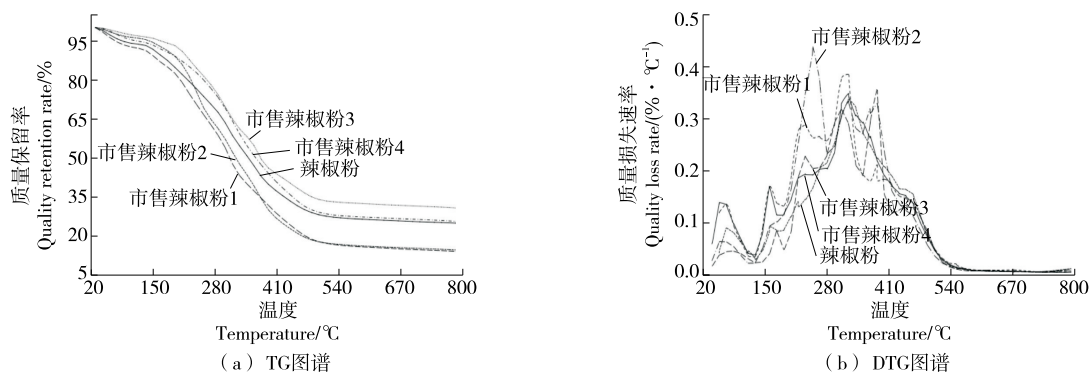


图11 市售样品的TG及DTG图谱

Figure 11 TG and DTG curves of commercially available samples

失重速率温度,发现 2 份辣椒面样品的主要失重阶段中包含 177~274 °C(最大失重速率温度 246 °C),274~337 °C(最大失重速率温度 310 °C)和 337~429 °C(最大失重速率温度 367 °C)3 个明显的失重台阶,与真实辣椒粉样品存在明显差异,可能是因为辣椒面样品本身属于复合调味料,由多种成分复合而成,不属于纯辣椒粉样品,存在差异属于正常。而另有 2 份辣椒粉样品,热图谱与纯辣椒粉仍存在差异,提取关键特征温度为 176~564 °C,最大失重速率温度分别为 217,307 °C,提示可能存在掺假,表明热分析方法可以实现对掺假辣椒粉进行质量鉴别的目的。

### 3 结论

采用热分析技术对辣椒粉样品进行了掺假鉴别。结果表明,辣椒粉样品与掺假样品在 TG 和 DTG 曲线上存在显著差异,通过比较关键特征温度与最大失重速率温度也存在差异,这种热稳定性差异可以用于区分辣椒粉样品的掺假行为,不同掺假物和不同掺假比例的模拟掺假样品与真实辣椒粉样品均被较好地地区分,表明该方法在掺假鉴别方面能开展相应的应用,同时该方法具有简便快速、无需复杂前处理的特点。由于辣椒粉掺假种属复杂未知,该方法尚不能覆盖更全的掺假物热特征信息,也无法对掺假类型进行鉴别,后期可以增加掺假种属的热分析特征研究,并结合其他技术手段研究鉴别掺假类型,以提高方法的准确性。

#### 参考文献

- [1] 食品安全网. 欧盟调查报告列出 10 大易掺假食品名单[EB/OL]. (2013-10-24) [2025-02-21]. <http://foodsafeguard.com/news/>.  
Food Safety Net. The European Union report lists the top 10 foods that are easily adulterated[EB/OL]. (2013-10-24) [2025-02-21]. <http://foodsafeguard.com/news/>.
- [2] PENG Z M, CHEN X, ZHANG J, et al. Identification of adulteration in Jiang-flavor Chinese spirits with edible alcohol based on UPLC-Q-TOF/MS combined with metabolomics[J]. *Food Analytical Methods*, 2024, 17(11): 1 511-1 522.
- [3] 刘芸, 丁涛, 吴斌, 等. 核磁共振技术结合化学计量学方法用于蜂蜜的掺假鉴别[J]. *分析测试学报*, 2016, 35(10): 1 248-1 254.  
LIU Y, DING T, WU B, et al. Identification of honey adulteration by nuclear magnetic resonance technology and chemometrics method[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2016, 35(10): 1 248-1 254.
- [4] FIGUEIREDO A L, FERNANDES C S, FERNANDES I L, et al. Determination of adulteration in evening primrose oil capsules by <sup>1</sup>H NMR analysis and chemometric techniques[J]. *Food Analytical Methods*, 2024, 17(12): 1 746-1 753.
- [5] 王绍清, 武士奎, 穆同娜, 等. 扫描电镜和稳定碳同位素质谱法鉴别马铃薯淀粉中的掺假玉米淀粉[J]. *食品科学*, 2010, 31(22): 332-335.  
WANG S Q, WU S K, MU T N, et al. Detection of adulterated maize starch in potato starch by scanning electron microscope and stable carbon isotope ratio analysis[J]. *Food Science*, 2010, 31(22): 332-335.
- [6] 管照奕珠, 方芳, 王耀耀, 等. 电子鼻技术结合化学计量学快速鉴别掺假茶籽油[J]. *食品与机械*, 2023, 39(6): 31-36, 179.  
GUAN Z Y Z, FANG F, WANG Y Y, et al. Rapid identification of adulterated camellia seed oil by e-nose combined with chemometrics[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(6): 31-36, 179.
- [7] CAO Y H, SONG X M. Meat authenticity made easy: DNA extraction-free rapid onsite detection of duck and pork ingredients in beef and lamb using dual-recombinase-aided amplification and multiplex lateral flow strips[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(40): 14 782-14 794.
- [8] 邵博宇, 徐宁, 迟凯月, 等. 基于多重 PCR 定性鉴别鹿肉掺假[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(24): 281-287.  
SHAO B Y, XU N, CHI K Y, et al. Qualitative identification of adulterated venison based on multiplex PCR[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(24): 281-287.
- [9] RAZZAGHI M, RAFATI A, GILL P. Colorimetric identification of pork myoglobin in meat samples using aptamer-conjugated magnetic nanoparticles[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2025, 19(1): 671-681.
- [10] 牟晓晴. 驴肉掺假近红外定性定量方法及成分差异分析[D]. 保定: 河北大学, 2024: 28-42.  
MU X Q. Near-infrared qualitative and quantitative of adulterated donkey meat and analysis of chemical composition [D]. Baoding: Hebei University, 2024: 28-42.
- [11] 余欣蕾, 张佳汇, 刘太昂, 等. 近红外光谱技术在调味品检测中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(9): 200-208, 218.  
YU X L, ZHANG J H, LIU T A, et al. Research progress of near infrared spectroscopy in condiments detection[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(9): 200-208, 218.
- [12] 姜海洋, 崔耀耀, 贾彦国, 等. 基于三维荧光光谱结合 2D-LDA 的食用油掺假鉴别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(11): 3 179-3 185.  
JIANG H Y, CUI Y Y, JIA Y G, et al. Identification of adulterated edible oils based on 3D fluorescence spectroscopy combined with 2D-LDA[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(11): 3 179-3 185.
- [13] HU Y, XU L J, HUANG P, et al. Non-destructive detection of Tieganyin adulteration based on fluorescence hyperspectral technique[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(3): 2 614-2 622.
- [14] 马永波, 彭玉, 徐艺萍, 等. 基于稀疏高光谱特征选择算法的牛肉糜掺假检测[J]. *食品与机械*, 2025, 41(6): 51-56.  
MA Y B, PENG Y, XU Y P, et al. Detection of beef mince adulteration based on sparse hyperspectral feature selection

- algorithm[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 51-56.
- [15] 黎星, 吴婉琴, 陈冉, 等. 超高效液相色谱—高分辨质谱组学技术鉴别咖啡掺假[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 169-176.
- LI X, WU W Q, CHEN R, et al. Identification of coffee adulteration by ultra performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry combined with omics technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 169-176.
- [16] YANG P L, BI Q R, LI Y, et al. Identification of five gelatins based on marker peptides from type I collagen by mass spectrum in multiple reaction monitoring mode[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(14): 5 851-5 860.
- [17] 李青, 许伟沂, 彭丽诗, 等. 人参和西洋参提取物中皂苷组分比例分析及其在参类产品鉴别中的应用研究[J]. 食品科技, 2024, 49(5): 225-233.
- LI Q, XU W Y, PENG L S, et al. Analysis of proportion of saponins in extracts of ginseng and American ginseng and its application on identification of ginseng products[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 225-233.
- [18] 林长虹, 吴世玉, 蓝勇波, 等. 基于 TGA-GC/MS 结合化学计量学在食醋品牌鉴别中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(15): 257-261.
- LIN C H, WU S Y, LAN Y B, et al. Application of TGA-GC/MS combined with chemometrics in the identification of vinegar brands[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(15): 257-261.
- [19] AQEEL M, SOHAIB A, IQBAL M, et al. Milk adulteration identification using hyperspectral imaging and machine learning[J]. Journal of Dairy Science, 2025, 108(2): 1 301-1 314.
- [20] 李建涛, 孙莹莹, 卢立达, 等. 差热/热重分析法鉴别杭菊、贡菊和野菊花[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2019, 40(14): 1 775-1 777.
- LI J T, SUN Y Y, LU L D, et al. Differential thermal analysis method/thermogravimetry in identification of different species of *Chrysanthemum morifolium*, *Florists Chrysanthemum* and *Dendranthemaidicum*[J]. Journal of Qiqihar Medical University, 2019, 40(14): 1 775-1 777.
- [21] 朱静平. 黑苦荞茶与黑苦荞原料的热分析研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(9): 13-16.
- ZHU J P. Study on thermal analysis for the distinguish of black buckwheat tea and raw buckwheat[J]. Food Research and Development, 2015, 36(9): 13-16.
- [22] 刘红霞, 曹义兵, 李于晓. 热分析在食用香料香精分析中的应用[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 349-354.
- LIU H X, CAO Y B, LI Y X. Application of thermal analysis technology in analysis of edible flavors[J]. Food Science, 2009, 30(17): 349-354.
- [23] 王绍清, 高峡, 兰巧峰, 等. 掺假藕粉中木薯淀粉和甘薯淀粉的鉴别—差示扫描量热法[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 325-333.
- WANG S Q, GAO X, LAN Q F, et al. Detection of cassava and sweet potato starch in adulterated lotus root starch by differential scanning calorimetry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(13): 325-333.
- [24] 林丽君, 彭奇. 辛香调味粉在热环境下的稳定性分析及掺假鉴别[J]. 中国调味品, 2017, 42(7): 90-93.
- LIN L J, PENG Q. Analysis of thermal stability and adulteration identification of spicy seasoning powder[J]. China Condiment, 2017, 42(7): 90-93.
- [25] 聂光华. 不同产地茶叶的热分析鉴别[J]. 湖北农业科学, 2004, 43(5): 77-78.
- NIE G H. Distinction for different places of origin tea by thermosanalysis[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2004, 43(5): 77-78.
- [26] 韩金廷, 孟星星, 王庚乾, 等. 基于热重—激光光谱技术的聚丙烯腈热解中氰化氢演化规律研究[J]. 燃料化学学报(中英文), 2025, 53(7): 1 112-1 122.
- HAN J T, MENG X X, WANG G Q, et al. Study on the evolution of hydrogen cyanide generated by polyacrylonitrile pyrolysis based on TG-LAS[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2025, 53(7): 1 112-1 122.
- [27] 毛晓飞, 李海山, 安城. 粒径对无烟煤燃烧特性影响的热重试验研究[J]. 电站系统工程, 2012, 28(3): 5-7.
- MAO X F, LI H S, AN C. Thermo-gravimetric study on the effect of blind coal granularity on combustion characteristic[J]. Power System Engineering, 2012, 28(3): 5-7.
- [28] 刘鑫, 孟昭宇, 曲润波. 热分析技术在辣椒粉掺假鉴别中的应用研究[J]. 现代食品, 2022, 28(18): 193-196, 206.
- LIU X, MENG Z Y, QU R B. Application of thermal analysis technology in identification of adulterated chilli powder[J]. Modern Food, 2022, 28(18): 193-196, 206.