

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240714001

高效液相色谱法测定辣椒制品中辣椒素含量及辣度差异性分析

郝蔚*

(新疆农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 乌鲁木齐 830052)

摘要: **目的** 建立高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定辣椒制品中辣椒素含量的方法, 并对市售不同辣椒制品辣度进行差异分析。**方法** 用 ODS 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm), 流动相为等比例的甲醇和水, 在流速 1.0 mL/min 的条件下进行进样, 最后在紫外波长为 280 nm 处进行检测。**结果** 辣椒素在 0.001~0.150 mg/mL 范围内与峰面积线性关系良好($r^2=0.9990$), 检出限为 0.05 μg/mL, 定量限为 0.5 μg/mL, 相对标准偏差在 1.2%~5.4%之间, 重复性良好。经优化后的方法测定辣椒制品, 发现不同辣椒制品中的辣度具有显著差异性($P<0.05$)。**结论** 该方法的准确度与灵敏性高, 且操作简单, 可用于辣椒素的测定, 可为辣椒产品的技术改良品质控制及产品开发等提供参考。

关键词: 高效液相色谱法; 辣椒; 辣椒素; 差异性

Determination of capsaicin content in pepper products by high performance liquid chromatography and analysis of difference in spiciness

HAO Wei*

(Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Ministry of Agriculture and Rural Agricultural Products Quality Inspection and Testing Center, Urumqi 830052, China)

ABSTRACT: Objective To establish a high performance liquid chromatography (HPLC) method for the determination of capsaicin content in chili products, and to analyze the difference in the spiciness of different pepper products on the market. **Methods** ODS chromatographic column (250 mm×4.6 mm, 5 μm) was used, and the mobile phase was methanol and water in equal proportion. The sample was injected at a flow rate of 1.0 mL/min, and finally detected at ultraviolet wavelength of 280 nm. **Results** Capsaicin had a good linear relationship with the peak area in the range of 0.001–0.150 mg/mL ($r^2=0.9990$). The limit of detection was 0.05 μg/mL, and the limit of quantitation was 0.5 μg/mL. The relative standard deviations were between 1.2% and 5.4%, and the repeatability was good. The optimized method was used to determine the pepper products, and it was found that the spiciness of different pepper products was significantly different ($P<0.05$). **Conclusion** The method has high accuracy and sensitivity, and is simple to operate. It can be used for the determination of capsaicin. This study provides an important reference for the technical improvement, quality control and product development of pepper products.

KEY WORDS: high performance liquid chromatography; pepper; capsaicin; difference

*通信作者: 郝蔚, 实验师, 主要研究方向为农产品质量安全与检测。E-mail: 982733172@qq.com

*Corresponding author: HAO Wei, Engineer, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Ministry of Agriculture and Rural Agricultural Products Quality Inspection and Testing Center, Urumqi 830052, China. E-mail: 982733172@qq.com

0 引言

辣椒素(capsaicin), 分子式为 $C_{18}H_{27}NO_3$, 现行的 GB/T 21266—2007《辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法》及已有的相关研究中都将辣椒素总含量作为辣椒制品的品质指标^[1-4]。在辣椒果实中可以提取分离出辣椒素, 并根据其含量判断辣椒的辛辣程度。随后, 人们发现辣椒素、二氢辣椒素、高辣椒素等大约十几种辣椒素类物质^[5]。虽然辣椒素是人们饮食中的主要成分, 但现阶段还是缺乏对辣椒制品品质的评价标准, 随着人们健康意识的增强, 对辣椒制品中天然辣椒素的含量追求也在慢慢增加。因此测定辣椒制品中辣椒素含量不仅可以筛选出品质优良的辣椒制品品牌, 还为辣椒制品的开发利用提供数据参考^[6-7]。

目前, 辣椒素含量的测定主要由分光光度法和高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)这两种方法来测定。然而, 分光光度法在样品处理过程中都较为复杂, 精确度也不好。故目前常用测定辣椒素含量的方法为 HPLC, 具有操作简单以及准确度高、分离度好等特点^[8-12]。不过, 有关辣椒制品的 HPLC 分析方法还是鲜少有人使用。

本研究建立 HPLC 检测辣椒制品中辣椒素含量的分析方法, 在此基础上对方法的不同条件进行优化, 并且分析不同辣椒制品中辣度的含量差异性, 以期评估辣椒制品中辣度研究提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料、试剂与仪器

泡椒、郫县豆瓣酱、天山辣椒酱、蒜香朝天椒、蒜蓉辣椒酱、韩式辣椒酱等样品均购于乌鲁木齐市超市。

辣椒素、二氢辣椒素标准品(纯度 $\geq 98\%$, 成都瑞芬思有限公司); 甲醇、乙腈、甲酸、四氢呋喃(色谱纯, 上海安谱实验科技股份有限公司); 实验用水为超纯水。

Agilent 1260 型高效液相色谱仪(配二极管阵列检测器, 美国安捷伦科技有限公司); Biosafer 1200DT 型超声波破碎机[赛飞(中国)有限公司]; MS 型分析天平(精度 0.001 g, 瑞士梅特勒-托利多公司); CNW® Athena ODS 柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μ m, 上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.2 样品处理

1.2.1 前处理

样品称 5 g(精确至 1 mg), 用 50 mL 甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)浸泡, 放入 60 °C 的超声仪器超声(40 kHz) 60 min, 10000 r/min 离心 5 min, 将上清液转移到浓缩样管中, 浓缩到小于 10 mL。用甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)定容至 50 mL, 最后过 0.45 μ m 滤膜过滤, 进行色谱分析。

1.2.2 方法优化处理

取 3 份辣椒制品为原料, 保持其他条件相同, 分别采用甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)、甲醇:四氢呋喃(1:9, V:V)、甲醇:四氢呋喃(9:1, V:V) 3 种不同比例提取试剂进行辣椒素的提取, 采用上述方法进行提取, 后经 HPLC 测定。

准确称取 3 份辣椒制品, 其他条件相同。分别提取 30、60、80 min, 通过上述方法确定最佳提取时间。

准确称取 3 份辣椒制品, 保持其他条件相同。在 50、60、70 °C 下超声提取 30 min, 通过上述方法确定最佳超声温度。

1.3 液相色谱仪器工作条件

色谱柱: CNW® Athena ODS 柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μ m); 流动相: A 相为甲醇溶液、B 相为水(65:35, V:V); 柱温: 30 °C; 进样体积: 10 μ L, 流动相流量: 1.0 mL/min。

1.4 溶液配制

(1) 标准溶液的制备

精确称取 0.0500 g 辣椒素标准品和 0.0500 g 二氢辣椒素标准品, 用甲醇定容到 50 mL, 配制成质量浓度为 1.00 mg/mL 的辣椒素和二氢辣椒素的混合标准储备液, 于冷藏 4 °C 条件下备用。

(2) 混合标准溶液标准曲线的绘制

分别吸取配制好的辣椒素和二氢辣椒素的混合标准溶液 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL 于容量瓶中, 用甲醇分别定容到 25 mL, 得到质量浓度分为 0、20、40、60、80、100 μ g/mL 的辣椒素和二氢辣椒素的混合标准溶液。

1.5 定量方法

取辣椒素和二氢辣椒素工作液配制成适量浓度的混合标准工作溶液, 过滤, 取滤液进样测定, 记录色谱图, 以色谱峰面积标准曲线法定量。

1.6 辣椒素物质总量计算

辣椒素物质总量的计算^[13]如式(1):

$$W = \frac{C \times V}{1000 \times m} \quad (1)$$

式中, W 表示样品分别为辣椒素和二氢辣椒素的含量(辣椒素类物质总量), g/kg; C 表示标准曲线上查到辣椒的含量, μ g/mL; V 表示定容体积, mL; m 表示样品质量, g。

辣椒素类物质总量以辣椒素与二氢辣椒素含量之和除以 0.9 计算(0.9 为辣椒素总量的折算系数)。

1.7 辣度计算及分级标准

本研究以国际通用的斯科维尔指数(scoville heat units, SHU)表示样品的辣度, 其计算如公式(2)所示, 辣度与 SHU 的换算关系为, 150 SHU=1 度。

$$\text{SHU} = W \times 0.9 \times (16.1 \times 10^3) + W \times 0.1 \times (9.3 \times 10^3) \quad (2)$$

1.8 数据处理

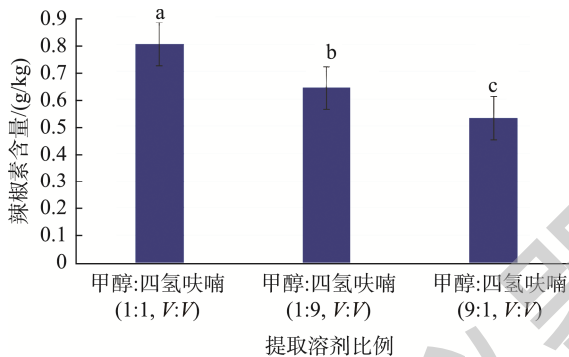
实验数据采用 Excel 2010 进行分析处理以及极差分析。

2 结果与分析

2.1 样品处理优化

2.1.1 提取溶剂比例的优化

由于甲醇与四氢呋喃都对有机物有很好的溶解能力,所以不仅能提取出目标物质还会提取出别的杂质,使其纯度不高,由于辣椒素与杂质之间的极性强弱不同,所以要用高比例甲醇或高比例四氢呋喃来查看提取效果,结果见图 1。从图 1 可知,以甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)作提取溶剂所得辣椒素含量为 0.81 g/kg[相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)=3.5%]均高于其他提比例提取出的含量,因此本研究最终选择甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)为提取溶剂^[14-15]。



注:不同小写字母表示组间具有显著性差异($P < 0.05$),下同。

图1 提取溶剂比例对辣椒素提取效果的影响

Fig.1 Effects of solvent ratio on the extraction efficiency of capsaicin

2.1.2 提取时间的优化

由图 2 可知,辣椒素的提取效果随着时间的延长先增大后减小。提取 30 min 时辣椒素的提取量不高,原因可能是辣椒素还没达到完全溶解的时间。随后辣椒素的含量持续增高,在 60 min 时的提取效果最好,原因是此时辣椒素可以完全溶解并达到最大值。但是,当时间超过 60 min 时,辣椒素的提取率下降,这可能是温度过高破坏了辣椒素的活性,导致其含量随着时间的推移而下降。因此确定 60 min 为最佳提取时间^[16-17]。

2.1.3 提取温度的优化

实验结果如图 3 所示。提取效果最好的是 60 °C,可能是适当的温度可以激活溶剂中的热运动,使溶剂更容易扩散到辣椒制品中。当超过 60 °C 时,萃取效果下降,可能是高温容易破坏目标组分成分,从而影响提取率。因此确定 60 °C 为最佳提取温度^[18-20]。

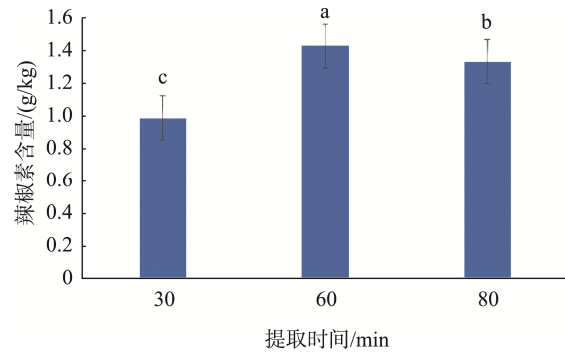


图2 提取时间对辣椒素提取效果的影响

Fig.2 Effects of extraction time on the extraction efficiency of capsaicin

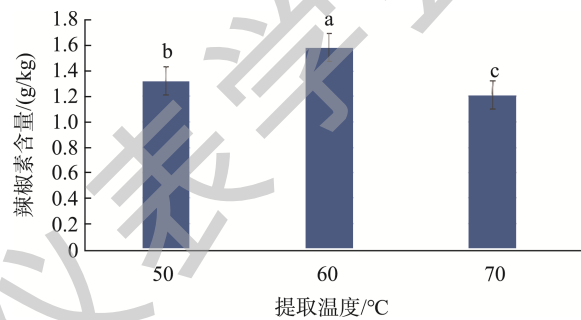


图3 提取温度对辣椒素提取效果的影响

Fig.3 Effects of ultrasonic extraction temperature on the extraction efficiency of capsaicin

2.1.4 正交实验设计

针对提取溶剂比例、提取温度、提取时间 3 个因素,研究其对辣椒素提取的影响。正交实验设计见表 1,每组 3 次平行,超声辅助温度设置:50、60、70 °C,超声提取时间设置:30、60、80 min,有机溶液比例设置:甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)、甲醇:四氢呋喃(1:9, V:V)、甲醇:四氢呋喃(9:1, V:V)。以辣椒素含量作为主要指标判断最佳单因素提取条件。 R 值越高,意味着该因素的重要性越强,辣椒素含量的变化也会相应增大。从表 2 的 R 值数据可以看出,提取时间对 R 值的影响最大,其次是提取温度,最后则是提取溶剂比例。在提取溶剂为甲醇:四氢呋喃(1:1, V:V)并且超声温度为 60 °C 提取 60 min 为最优组合^[21]。

表 1 正交实验因素水平
Table 1 Orthogonal experimental factor level

水平	提取温度/°C	提取时间/min	提取溶剂比例
1	50	30	甲醇:四氢呋喃 (1:1, V:V)
2	60	60	甲醇:四氢呋喃 (1:9, V:V)
3	70	80	甲醇:四氢呋喃 (9:1, V:V)

表 2 正交实验结果分析

Table 2 Analysis of the results of orthogonal experiment

实验编号	提取温度 /°C	提取时间 /min	提取溶剂比例(V:V)	辣椒素含量/(g/kg)
1	1	1	1	1.580
2	1	2	2	1.600
3	1	3	3	1.250
4	2	1	2	1.550
5	2	2	3	1.630
6	2	3	1	1.610
7	3	1	3	1.300
8	3	2	1	1.620
9	3	3	2	0.890
K_1	4.43	4.43	4.81	
K_2	4.79	4.85	4.04	
K_3	3.81	3.75	4.18	
R	0.98	1.10	0.77	

2.1.5 检测器的选择

在相同条件(流速、进样量、柱温、流动相梯度运行)下,分别用紫外检测器(variable wavelength detector, VWD)(检测波长 280 nm)和荧光检测器(fluorescence detector, FLD)(激发波长 229 nm, 发射波长 320 nm)分析辣椒素和二氢辣椒素混合标准溶液(2 $\mu\text{g/mL}$),见表 3。从表 3 可以看出,用 VWD 检测器比 FLD 检测器检测辣椒素类物质灵敏度更高^[22]。

2.1.6 方法学验证

(1)线性范围、检出限和定量限

检出限和定量限以及线性范围按照 1.4 的条件下进行测定,以峰面积 Y 为纵坐标,质量浓度(X , $\mu\text{g/mL}$)为横坐标进行线性回归,计算回归方程。得到辣椒素标准曲线方程为 $Y=430.5X+415.398$, $r^2=0.9990$, 二氢辣椒素标准曲线方程为 $Y=193.5X+7.835$, $r^2=0.9950$, 满足定量要求;各种辣椒碱在 0.001~0.150 mg/mL 质量浓度范围内线性关系良好,相关系数均在 0.99 以上。检出限指被分析物被检测出的最小浓度,测定得出检出限为 0.05 $\mu\text{g/mL}$, 定量限为 0.50 $\mu\text{g/mL}$, 表明该方法灵敏度良好。

(2)精密度

取同一种类样品做 9 个平行并进行 HPLC 检测,记录峰面积值,根据辣椒素标准曲线计算含量和 RSD,如表 4 所示。RSDs 在 1.2%~5.4%之间,重复性良好,说明精密度均能够满足分析要求。

配制质量浓度为 0.040 mg/mL 的辣椒碱混合标准品溶液,按照 1.3 的色谱条件,精密吸取辣椒碱混合标准溶液各 10 μL ,分别连续测定辣椒碱组分的峰面积 5 次,考察方法的精密度。如表 5 所示,RSDs 分别为 0.455%和 1.197%,表明方法的精密度良好。

表 3 2 $\mu\text{g/mL}$ 辣椒素和二氢辣椒素标准溶液的强度
Table 3 Strength of 2 $\mu\text{g/mL}$ capsaicin and dihydrocapsaicin standard solution

项目	峰高/mAU		峰面积/(mAU*s)		信噪比(S/N)	
	VWD 检测器	FLD 检测器	VWD 检测器	FLD 检测器		
辣椒素	60.5	50.2	1805.6	1685.5	7.5	185
二氢辣椒素	35.8	31.8	1658.9	1504.2	5.9	125

表 4 HPLC 的重复性实验结果($n=9$)
Table 4 Repetitive experimental results of HPLC ($n=9$)

种类	平均值/(g/kg)	RSDs/%
辣椒制品 1 号	0.780	1.2
辣椒制品 2 号	0.063	5.4
辣椒制品 3 号	0.084	4.8

表 5 精密度实验结果($n=5$)
Table 5 Test results of precision ($n=5$)

标准品	平均值	RSDs/%
辣椒碱	351.505	0.455
二氢辣椒碱	155.581	1.197

2.2 辣椒素标准溶液色谱图

精密吸取合成辣椒素标准物质(80 $\mu\text{g/mL}$)溶液适量,按 1.3 仪器条件进样测定,详见图 4。从图 4 可以看出,用本研究的色谱条件,基线更平整、谱图上无明显杂峰。目标峰的保留时间分别为 17.095 min 和 26.872 min。

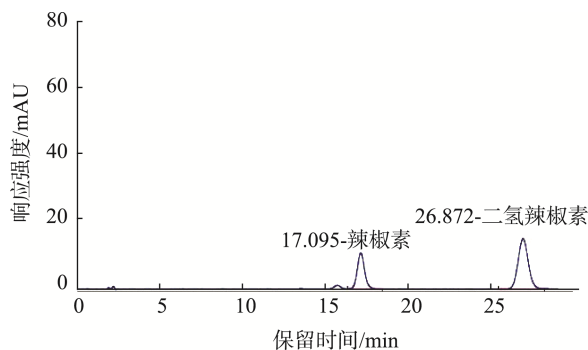


图 4 辣椒素和二氢辣椒素的 HPLC 色谱图

Fig. 4 HPLC chromatogram of capsaicin and dihydrocapsaicin

2.3 提取方法的比较

GB/T 21266—2007 方法 7.1.3 中要求烘干样品至水分含量不大于 15%再进行提取。但辣椒酱烘干的时候会较费时,且烘干之后,加入提取剂后很难分散样品,影响目标物的提取。因此,本研究采用了不烘干样品直接提取的方式。对市面上的辣椒酱进行提取效果比对,分别按本研究的样品处理方法和 GB/T 21266—2007 的样品处理方法,在相同的色谱条件下分析,实验结果见表 6。结果表明,本研究不烘干直接提取,比 GB/T 21266—2007 法烘干后再提取的提取效率更高^[22-25]。

2.4 辣椒制品中辣度的测定

采用上述建立的检测方法对 4 种辣椒制品中的辣椒素和二氢辣椒素含量进行测定(表 7)。结果表明,泡椒与郫县豆瓣样品均具有显著差异($P<0.05$),辣度在 6.26~69.80

之间。

本研究采用单因素实验对辣椒制品中辣椒素的提取工艺进行了优化。确定了提取溶剂比例、提取温度和提取时间每个因素的最佳水平,并且该方法精密性与灵敏度都能够满足分析要求,RSDs 在 1.2%~5.4%之间。用该方法检测时发现,在辣椒制品中,泡椒是由野山椒经过发酵处理后制成的,其辣度相对较高。郫县豆瓣并未展示明确的辣度标准,而其辣味的产生主要是由原料里的辣椒所决定的。不同的制造商对原料选择、比例配置、加工技术及发酵时长都会影响辣椒素的含量。除此之外,会有一些不良厂商使用次级辣椒作为基础材料,并通过添加人工合成的辣椒素来提升产品的辣度,这通常会在以辣椒为主导调料的产品的出现。由此可以看出辣椒的辣度受到多种因素的制约,因此评估辣度的过程中需要全面考量这些因素^[26-27]。

表 6 不同样品处理方法的比对结果(g/kg)
Table 6 Comparison results of different sample processing methods (g/kg)

序号	品牌	按本研究优化方法		GB/T 21266—2007 的样品处理方法	
		辣椒素	二氢辣椒素	辣椒素	二氢辣椒素
1	天山辣椒酱	0.091	0.061	0.082	0.051
2	蒜香朝天椒	0.105	0.051	0.087	0.036
3	蒜蓉辣椒酱	0.051	0.031	0.041	0.019
4	韩式辣椒酱	0.061	0.038	0.052	0.030

表 7 辣椒制品中辣椒素和二氢辣椒素的含量
Table 7 Content of capsaicin and dihydrocapsaicin in pepper products

辣椒制品	辣椒素/(g/kg)	二氢辣椒素/(g/kg)	辣椒素总含量/(g/kg)	SHU	辣度
泡椒 1	0.6897±0.0137 ^a	0.3201±0.0157 ^a	1.1220±0.0270 ^a	10291±234 ^a	68.60
泡椒 2	0.7001±0.0121 ^a	0.3501±0.0148 ^a	1.1669±0.0200 ^a	10470±275 ^a	69.80
郫县豆瓣酱 1	0.0633±0.0022 ^b	0.0235±0.0058 ^b	0.0964±0.012 ^b	939±8 ^b	6.26
郫县豆瓣酱 2	0.0889±0.0100 ^b	0.0244±0.0011 ^b	0.1259±0.0145 ^b	1311±9 ^b	8.74

注:不同字母表示同种物质不同辣椒制品具有显著性差异($P<0.05$)。

3 结论

本研究建立了一种用于测定辣椒制品中合成辣椒素成分的技术方法,对 HPLC 测定辣椒素的方法进行了优化和改进,并进行了方法学验证。实验数据证明,该方法操作简单,精密度高,适合辣椒制品中总辣椒素的检测。此外,对 4 种辣椒制品中辣椒素和二氢辣椒素含量进行检测,结果表明,泡椒与郫县豆瓣酱样品之间存在显著差异($P<0.05$),辣度范围为 6.26~69.80。接下来研究将进一步优化检测方法、扩大样品范围、深入探究辣度差异的生理机

制等,对生辣椒及其加工产品的工艺监控、工艺优化和质量标准提高具有重要意义^[28-30]。

参考文献

- [1] 孟庆林, 欧勇, 孙鑫. 中国加工型红辣椒产业发展现状[J]. 园艺与种苗, 2022, 44(7): 40.
- [2] MENG QL, OU Y, SUN X. Development status of processing red pepper industry in China [J]. Horticult Seed, 2022, 44(7): 40.
- [3] 陶兴林, 朱惠霞, 王晓巍, 等. 5 个不同产区地理标志辣椒营养成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(3): 303-310.

- TAO XL, ZHU HX, WANG XW, *et al.* Analysis of nutritional components of geographical indications pepper in 5 different producing areas [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(3): 303–310.
- [3] 阙小峰, 余雁, 方志成, 等. 天然辣椒生物碱的提取方法及其应用研究进展[J]. *食品工业*, 2021, 42(9): 231–235.
- QUE XF, YU Y, FANG ZC, *et al.* Research progress on extraction method and application of natural capsicum alkaloid [J]. *Food Ind*, 2021, 42(9): 231–235.
- [4] 邓文溢, 文江平. 辣椒的化学成分与药理作用研究进展[J]. *湖北农业*, 2021, 60(15): 5.
- DENG WY, WEN JP. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of pepper [J]. *Hubei Agric Sci*, 2021, 60(15): 5.
- [5] 戴雄泽, 张可欣, 弓志青, 等. 辣椒油树脂的纯化工艺及成分分析[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(4): 133.
- DAI XZ, ZHANG KX, GONG ZQ, *et al.* Purification process and composition analysis of pepper oleoresin [J]. *Shandong Agric Sci*, 2022, 54(4): 133.
- [6] 齐立军, 王苗, 栗永刚, 等. 不同干燥方式对鲜辣椒组分的影响研究[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(7): 158.
- QI LJ, WANG M, LI YG, *et al.* Study on the effects of different drying methods on the components of fresh peppers [J]. *China Food Addit*, 2022, 33(7): 158.
- [7] 蔡永艳, 郝会娟, 关振亚, 等. 辣风味研究及其常见辣椒品种品质分析[J]. *中国调味品*, 2021, 46(9): 193–196.
- CAI YY, HAO HJ, GUAN ZY, *et al.* Research on spicy flavor and quality analysis of common capsicum [J]. *China Cond*, 2021, 46(9): 193–196.
- [8] SHERIDAN MH. Capsaicin 8% dermal patch in peripheral neuropathic pain: A profile of its use [J]. *Drug Ther Perspect*, 2020, 36(2): 47.
- [9] 马嫔, 樊巧, 刘平, 等. “郟县豆瓣”色价和辣度的分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(6): 152.
- MA Y, FAN Q, LIU P, *et al.* Analysis of color value and spiciness of ‘Pixian bean paste’ [J]. *Food Sci*, 2014, 35(6): 152.
- [10] 王楠艺, 付文婷, 吴迪, 等. 辣椒品质研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(16): 21–27.
- WANG NY, FU WT, WU D, *et al.* Research progress on pepper quality [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2022, 50(16): 21–27.
- [11] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. *园艺学报*, 2020, 47(9): 1715–1726.
- ZOU XX, MA YQ, DAI XZ, *et al.* The spread and industrial development of pepper in China [J]. *Hortic J*, 2020, 47(9): 1715–1726.
- [12] SHARAVATHY MK, UROOJ A, PUTTARAJ S. Nutritionally important starch fractions in cereal based Indian food preparations [J]. *Food Chem*, 2001, 75(2): 241–247.
- [13] 王立浩, 张宝玺, 张正海, 等. “十三五”我国辣椒育种研究进展、产业现状及展望[J]. *中国蔬菜*, 2021(2): 21–29.
- WANG LH, ZHANG BX, ZHANG ZH, *et al.* Research progress, industrial status and prospect of pepper breeding in China during the “13th Five-Year Plan” [J]. *Chin Veget*, 2021(2): 21–29.
- [14] 霍瑞春, 王国泽, 姚慧静, 等. 19种加工辣椒辣椒素提取、纯化及其含量测定[J]. *中国调味品*, 2022, 47(4): 167–172.
- HUO RC, WANG GZ, YAO HJ, *et al.* Extraction, purification and content determination of 19 kinds of processed pepper capsaicin [J]. *Chin Cond*, 2022, 47(4): 167–172.
- [15] 李立恒, 刘明新, 胡超, 等. 超声波辅助提取鲜辣椒中辣椒素工艺优化[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(5): 626–630.
- LI LH, LIU MX, HU C, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted extraction of capsaicin from fresh red pepper [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 48(5): 626–630.
- [16] ARVAPALLY M, ASATI A, NAGENDLA NK, *et al.* Development of an analytical method for the quantitative determination of multi-class nutrients in different food matrices by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry using design of experiments [J]. *Food Chem*, 2021, 341: 128173.
- [17] HOU MY, HU WZ, XIU ZL, *et al.* Efficient enrichment of total flavonoids from *Pteris ensiformis* Burm. extracts by macroporous adsorption resins and in vitro evaluation of antioxidant and antiproliferative activities [J]. *J Chromatogr B*, 2020. DOI: 10.1016/j.jchromb.2019.121960
- [18] NWOLEM CO, AGBAJI EB, KAGBU JA, *et al.* Determination of capsaicin content and pungency level of five different peppers grown in Nigeria [J]. *NY Sci J*, 2010, 31(1): 17–21.
- [19] OGUNC M, MERVE A, GORKEM K, *et al.* Capsaicin inhibits cell proliferation by cytochrome c release in gastric cancer cells [J]. *Tumor Biol*, 2014, 35(7): 6485–6492.
- [20] CHENG Q, CHANGSHUI Y, YAOU S, *et al.* Whole-genome sequencing of cultivated and wild peppers provides insights into capsicum domestication and specialization [J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2014, 111(14): 5135–5140.
- [21] 余永昊, 谢定源, 方妍, 等. 固相萃取提取分离辣椒油中辣椒素的正交实验优化及检验[J]. *中国调味品*, 2020, 45(12): 6–12.
- YU YH, XIE DY, FANG Y, *et al.* Optimization and verification of orthogonal experiment for solid-phase extraction and separation of capsaicin from chili oil [J]. *Chin Cond*, 2020, 45(12): 6–12.
- [22] 田玉肖, 罗静红, 宋占锋, 等. 热风烘干温度对线椒和朝天椒干制品品质的对比分析[J]. *中国调味品*, 2023, 48(3): 90–94.
- TIAN YX, LUO JH, SONG ZF, *et al.* Comparative analysis of hot air drying temperature on the quality of dried chili peppers and chili peppers [J]. *Chin Cond*, 2023, 48(3): 90–94.
- [23] 张付杰, 陶欢, 易俊洁, 等. 辣椒微波热风耦合干燥模型及品质研究[J]. *包装与食品机械*, 2022, 40(6): 45–53.
- ZHANG FJ, TAO H, YI JJ, *et al.* Study on microwave-hot air coupled drying model and quality of pepper [J]. *Packag Food Mach*, 2022, 40(6): 45–53.
- [24] RAHMAN MJ, INDEN H. Effect of nutrient solution and temperature on capsaicin content and yield contributing characteristics in six sweet

- pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars [J]. Food Agric Environ, 2012, 10: 524–529.
- [25] WANG Z, WU L, FANG Q, *et al.* Effects of capsaicin on swallowing function in stroke patients with dysphagia: A randomized controlled trial [J]. J Stroke Cereb Dis, 2019, 28(6): 1744–1751.
- [26] 曹猛. 天然辣椒素食团在急性缺血性脑卒中后吞咽障碍患者中的应用效果研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2020.
- CAO M. Study on the application effect of natural capsicum vegetarian bolus in patients with dysphagia after acute ischemic stroke [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2020.
- [27] ZHANG SP, WANG D, HUANG JY, *et al.* Application of capsaicin as a potential new therapeutic drug in human cancers [J]. J Clin Pharm Therap, 2020, 45(1): 16–28.
- [28] GUO Y, BAI J, DUAN X, *et al.* Accumulation characteristics of carotenoids and adaptive fruit color variation in ornamental pepper [J]. Sci Hortic, 2021, 275: 109699–109709.
- [29] FÉLIX AG, SHANNA M, CARMEN MV, *et al.* Microsatellites to enhance characterization, conservation and breeding value of *Capsicum germplasm* [J]. Genet Resour Crop Evolut, 2020, 67(3): 1–5.
- [30] JIN L, JIN N, WANG SY, *et al.* Comparing the morphological characteristics and nutritional composition of 23 pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties [J]. Europ Food Res Technol, 2023, 249(4): 963–974.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



郝蔚, 实验师, 主要研究方向为农产品质量安全与检测。
E-mail: 982733172@qq.com