

基于熵权的 TOPSIS 和聚类分析评价方法的 发酵辣椒品种适用性研究

吴昕怡¹, 田浩¹, 牛之瑞², 桂敏³, 潘俊¹, 王瀚墨¹,
周继伟¹, 朱志妍¹, 刘秀薇^{1*}

(1. 云南省农业科学院农产品加工研究所, 昆明 650221; 2. 云南省产品质量监督检验研究院, 昆明 650223;
3. 云南省农业科学院园艺作物研究所, 昆明 650205)

摘要: **目的** 通过对不同品种辣椒品质差异的研究, 构建发酵辣椒原料加工适应性综合评价方法。**方法** 选取 46 个不同品种辣椒, 测定了农艺性状、色泽、质构特性和辣度等指标, 通过 TOPSIS 法和聚类分析对不同辣椒的品质指标进行分析, 并评判辣椒品种的加工适应性。**结果** 不同品种辣椒果实重量、色泽、硬度、辣度差异较大; 根据生产用发酵辣椒原料特性, 通过熵权 TOPSIS 法对不同品种辣椒进行评价, 综合得分显示朝天椒相似接近度最大的品种是 23 号万家红, 为 0.8200; 小米辣相似接近度最大的品种是 15 号云南小米辣 10 号, 为 0.7322; 是适宜工业化使用的发酵辣椒品种; 聚类分析将 46 种辣椒分为 4 类, 各类别间的差异与辣椒的加工适应性相关。**结论** 建立发酵辣椒原料综合评价方法, 为选择发酵用辣椒品种提供理论依据, 助力发酵辣椒加工产业发展。

关键词: 辣椒; 发酵; 熵权; TOPSIS 法; 聚类分析

Study on applicability of fermented pepper varieties based on entropy weight TOPSIS and cluster analysis

WU Xin-Yi¹, TIAN Hao¹, NIU Zhi-Rui², GUI Min³, PAN Jun¹, WANG Han-Mo¹,
ZHOU Ji-Wei¹, ZHU Zhi-Yan¹, LIU Xiu-Wei^{1*}

(1. Agro-products Processing Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650221, China;
2. Yunnan Institute of Product Quality Supervision & Inspection, Kunming 650223, China; 3. Horticulture Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

ABSTRACT: Objective To explore differences in quality amongst *Capsicum annuum* varieties and develop a comprehensive evaluation method for processing fermented *Capsicum annuum* materials. **Methods** A total of 46 different *Capsicum annuum* varieties were selected and their agronomic characters, color, texture and spiciness were measured. The quality indexes of different peppers were analyzed by TOPSIS method and cluster analysis, and the

基金项目: 云南省重大科技专项(202002AE320006-02-01、202202AE090017)、云南省农业科学院科技创新及成果转化试点专项项目(202102AE090036-13)、云南省科技计划人才平台类项目(202005AD160122)

Fund: Supported by the Major Science and Technology Special Projects in Yunnan Province (202002AE320006-02-01, 202202AE090017), the Special Pilot Project of Scientific and Technological Innovation and Achievement Transformation of Yunnan Academy of Agricultural Sciences (202102AE090036-13), and the Yunnan Science and Technology Plan-talent Platform Projects (202005AD160122)

***通信作者:** 刘秀薇, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品精深加工及加工适应性。E-mail: Liuxiuwei0305@hotmail.com

***Corresponding author:** LIU Xiu-Wei, Ph.D, Assistant Professor, Agro-products Processing Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, No.9, Xueyun Road, Wuhua District, Kunming 650221, China. E-mail: Liuxiuwei0305@hotmail.com

processing adaptability of pepper varieties was evaluated. **Results** There were significant differences in fruit weight, color, hardness and spiciness amongst *Capsicum annuum* varieties. The entropy weight TOPSIS method was used to evaluate fermented raw material of *Capsicum annuum* varieties. According to the characteristics of fermented pepper raw materials for production, the entropy weight TOPSIS method was used to evaluate different varieties of pepper. The comprehensive score showed that the largest similarity of Chaotian pepper was 23 Wanjiachong (0.8200); the greatest similarity between millet and chili was No.15 Yunnan millet and chili No.10 (0.7322). It was a kind of fermented pepper suitable for industrial use. The 46 pepper species were divided into 4 groups by cluster analysis, and the differences among the groups were related to the processing adaptability of pepper. **Conclusion** The comprehensive evaluation method of fermented pepper raw materials is established to provide a theoretical basis for the selection of fermented pepper varieties and help the development of fermented pepper processing industry.

KEY WORDS: *Capsicum annuum*; ferment; entropy weight; TOPSIS; cluster analysis

0 引言

辣椒(*Capsicum annuum* L.)富含维生素 C、矿物质等多种营养素,也是类胡萝卜素、辣椒碱等活性物质的重要来源^[1-3],是我国重要的经济作物之一^[4]。除鲜食外,辣椒也是加工方式最多的蔬菜^[5],发酵辣椒是辣椒的主要加工方式之一,常见的发酵辣椒产品包含剁辣椒^[6]、鲜辣椒^[7]和泡辣椒^[8]等。

辣椒原料的特性直接关系辣椒加工产品的品质。熵权法是客观赋权法中常用到的方法,它通过样本数据计算直接得出权重,不受人为主观因素的影响^[9]。TOPSIS 法是一种基于有限数量的评估对象与参考目标的接近程度进行排序的方法,能够直观地评估现有选择的相对优缺点^[10],被用于食品加工^[11-12]、品质综合评价^[13-14]、作物育种^[15]以及栽培方法评价^[16-17]等领域。聚类分析是依据某种或某些特性对目标群体进行分类的统计学方法^[18],在加工适应性和农产品分级中有广泛的应用,如方便米饭加工原料评价^[19]、制作花生豆腐的花生品种评价^[20]、水蜜桃进行分级^[21]等。目前在辣椒原料加工适应性方面,主要采用主成分分析与聚类分析^[22]、隶属函数分析与聚类分析^[23]、层析分析与灰色关联度分析^[24]等进行评价,基于熵权的 TOPSIS 法和聚类分析对辣椒原料发酵加工适应性的评价研究尚未见报道。

原料品质会影响发酵辣椒产品品质,原料品质的不稳定是目前发酵辣椒加工行业面临的难题^[25]。目前对于发酵辣椒原料品质及加工适应性的研究较少,邢玉晓等^[26]对朝天椒作为发酵辣椒原料进行评价,发现不同品种朝天椒适合的发酵方式不同,说明原料的品质特性对发酵辣椒产品品质有影响,但评价发酵辣椒加工适应性时仅针对了单一指标进行独立评价;叶子等^[27]比较了 9 个不同品种小米辣发酵后的品质特性,运用多元数据分析技术对发酵小米辣进行了综合评价,发现发酵会显著改变小米辣的特性,评价方法更全面,但仅针对了小米辣一个品种。

本研究采用熵值赋权的 TOPSIS 法,结合聚类分析法,对云南 46 份辣椒原料开展发酵加工适应性综合评价,以期在明确加工需求的情况下,简单、快速且科学地筛选出适宜发酵辣椒加工的专用原料品种,为指导发酵辣椒加工原料标准化提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

在云南省不同州县共收集辣椒样品 46 份,样品信息详见表 1。选取果实饱满、颜色均匀,且无机械损伤的成熟辣椒为原料开展实验。

表 1 样品采集信息表
Table 1 Sample collection information table

编号	品种	类型	地点
1 号	艳红	朝天椒	云南省广南县
2 号	椒中玉王者归来	朝天椒	云南省广南县
3 号	美人椒	朝天椒	云南省广南县
4 号	鲜椒	鲜椒	云南省广南县
5 号	本地小米辣	小米辣	云南省广南县
6 号	丘北朝天椒	朝天椒	云南省丘北县
7 号	丘北辣大果	干制用椒	云南省丘北县
8 号	丘北辣小果	干制用椒	云南省丘北县
9 号	云干椒 7 号	干制用椒	云南省丘北县
10 号	椒中玉 10 号单生	朝天椒	云南省丘北县
11 号	丘北辣提纯	干制用椒	云南省丘北县
12 号	19-55	朝天椒	云南省砚山县
13 号	19-56	朝天椒	云南省砚山县
14 号	CT117	朝天椒	云南省砚山县
15 号	云南小米辣 10 号	小米辣	云南省砚山县
16 号	19-52	朝天椒	云南省砚山县
17 号	云干椒 7 号	干制用椒	云南省砚山县
18 号	20Z-731	朝天椒	云南省砚山县

表 1(续)

编号	品种	类型	地点
19号	红满天	朝天椒	云南省砚山县
20号	高登2号	朝天椒	云南省砚山县
21号	欧周	朝天椒	云南省砚山县
22号	泰系918	朝天椒	云南省砚山县
23号	万家红	朝天椒	云南省砚山县
24号	泰红999999	朝天椒	云南省砚山县
25号	椒大圣	朝天椒	云南省砚山县
26号	完美	朝天椒	云南省砚山县
27号	哈雷螺丝椒	鲜椒	云南省砚山县
28号	丘香	干制用椒	云南省砚山县
29号	红天湖101	美人椒	云南省富源县
30号	飞艳	朝天椒	云南省富源县
31号	未知	美人椒	云南省富源县
32号	天香901	朝天椒	云南省富源县
33号	云干椒7号	干制用椒	云南省会泽县
34号	乐业羊角椒	羊角椒	云南省会泽县
35号	坤太一号	干制用椒	云南省会泽县
36号	乐业二角椒小果	干制用椒	云南省会泽县
37号	乐业二角椒大果	干制用椒	云南省会泽县
38号	羊角椒大果	羊角椒	云南省会泽县
39号	红秀404	美人椒	云南省会泽县
40号	晶翠	小米辣	云南省会泽县
41号	未知	鲜椒	云南省会泽县
42号	滇中一号	朝天椒	云南省沾益区
43号	未知	线椒	云南省沾益区
44号	十里香	美人椒	云南省沾益区
45号	朝天椒	朝天椒	云南省建水县 辣椒加工企业
46号	小米辣	小米辣	云南省建水县 辣椒加工企业

甲醇、四氢呋喃(色谱纯,德国 Merck 公司); 辣椒碱标准品、二氢辣椒碱标准品(纯度 $\geq 99\%$,成都埃法生物科技有限公司)。

1.2 仪器

CM-5 型色差仪(日本 Konica Minolta Sensing 公司); TMS-Touch 型质构仪(美国 FTC 公司); HGZF-9053 型台式电热鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械有限公司); AUY220 型分析天平(感量 0.1 mg)、Shim-pack VP-ODS C₁₈ 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μ m)(日本岛津公司); JY3002 型电子天平(感量 0.01 g, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); DL312300 型电子数显游标卡尺(得力集团有限公司); Waters 1525 型液相色谱仪(美国 Waters 公司)。

1.3 实验方法

分别对每个品种选取 10 个大小均匀的辣椒进行平行

检测,分别对农艺性状、色泽、质构特性、辣度 4 种类型共 20 项指标进行检测,每个品种选取 10 个大小均匀的辣椒,分别对农艺性状、色泽、质构特性进行平行辣度测定,每个品种重复 3 次,计算平均值,具体指标及检测方法如表 2 所示。

表 2 品质指标的检测方法

Table 2 Detection methods of quality indexes

编号	指标类型	指标	仪器及检测方法
A		单果重	用电子天平称量单果重。
B		单果长	用直尺测量单果长。
C		果肉厚度	用游标卡尺测量果实横径最大处的果肉厚度为该果实的果肉厚度。
D		果宽	用游标卡尺测得辣椒果实横径最大处的宽度为该果实的果宽。
E	农艺性状	鲜果籽重	用分析天平称量单个鲜辣椒籽重量。
F		鲜果果皮重	用分析天平称量单个鲜辣椒果皮重量。
G		干果籽重	用分析天平称量烘干后单个辣椒籽重量。
H		干果果皮重	用分析天平称量烘干后单个辣椒籽重量。
I		含水率	用直接干燥法测量果实含水率。
J		L^*	
K	色泽	a^*	用色差仪检测辣椒果皮颜色的 L^* 、 a^* 、 b^* 。
L		b^*	
M		硬度	用质构仪检测辣椒果实,采用 TPA 模式,探头: TMS-50 mm 圆盘;测试条件:测前速度 2 mm/s,测试速度 2 mm/s,测后速度 2 mm/s,触发力 0.05 N,形变指数 75%。
N		内聚性	
O	质构特性	弹性	
P		胶黏性	
Q		咀嚼性	
R		辣椒碱	
S		二氢辣椒碱	参照 GB/T 21266—2007《辣椒及辣椒制品中辣椒碱类物质测定及辣度表示》方法进行测定及辣度表示
T	辣度	斯科维尔指数(scoville heat units, SHU)	计算 SHU。

1.4 数据处理

采用 EXCEL 2003、SPSS 20.0 软件对数据进行分析。

1.4.1 数据无量纲化处理

为消除原始数据的量纲差异影响,需要对数据做标准化处理。本次检测的 20 个指标最优值以加工企业用辣椒品种为参考,均为中性指标,数据无量纲化处理的公式(1)为:

$$Z_{ij} = 1 - \frac{|x_i - x_0|}{\max\{|x_i - x_0|\}} \quad (1)$$

其中 i 代表品种编号(1, 2, 3, ..., 52), j 代表评价指标(1, 2, 3, ..., 17), Z_{ij} 代表第 i 个品种第 j 个指标无量纲化后的值, x_0

代表第 j 个指标的目标值。

1.4.2 熵权计算

计算各供试品种的指标值占全部品种指标值之和的比重 P_{ij} , 如公式(2):

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad (2)$$

计算各项指标的信息熵 e_j , 如公式(3), 其中 m 代表检测指标数量:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

计算各项指标的熵权 W_j , 如公式(4):

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (4)$$

1.4.3 TOPSIS 法

TOPSIS 法将不同度量的指标统一量化, 使其可相互比较。再通过建立理想解与负理想解, 比较各指标间的差异, 使目标值的优劣程度转化为对理想解的相对接近度, 按照接近度序列, 可对辣椒品种进行加工适应性评价。步骤如下:

构建标准化决策矩阵: 按照 1.3.1 的方法对原始数据进行无量纲化处理, 构建标准化决策矩阵 Z 。

构建加权决策矩阵: 按照 1.3.2 的方法确定各指标的权重 W_j , 并与对应的标准化决策矩阵 Z 的数据相乘, 得到加权决策矩阵 R 。

各指标的理想解和负理想解: 根据公式(5)~(6)得到理想解和负理想解序列。

$$R^+ = \text{MAX}(R_{ij}) \quad (5)$$

$$R^- = \text{MIN}(R_{ij}) \quad (6)$$

关联度的计算: 采用欧几里得范数计算各品种各性状与最佳性状的距离 D_i^+ 及与最差性状间的距离 D_i^- , 并计算相对接近度 C_i , 如公式(7)~(9)。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (R_j^+ - R_{ij})^2} \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (R_j^- - R_{ij})^2} \quad (8)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

1.4.4 聚类分析法

利用 SPSS 软件内的瓦尔德法(Ward)对 46 个辣椒样本的 20 个品质指标进行聚类分析, 结合不同辣椒品种主要加工方向, 综合进行分类, 从而评判辣椒品种的加工适应性。

2 结果与分析

2.1 不同品种辣椒的品质比较

对 46 个不同品种辣椒(1 号~46 号)的 20 个品质指标

(A~T)进行检测, 并计算平均值(详见表 3)。由表 3 可知, 不同品种辣椒的品质指标存在差异, 在农艺性状指标中, 变异系数最大的是果实重量、鲜果皮重量与干果皮重量, 表明不同品种辣椒的果实重量差异大, 最大的是 4 号(鲜椒), 最小的是 42 号(朝天椒); 在色泽相关的指标中, a^* 变异系数最大, 这可能是由于 a^* 表示红绿色度值, a^* 越大样品越趋向正红色, a^* 越小样品越趋向绿色^[28], 辣椒果实颜色多为红、绿两色, 不同品种辣椒颜色差异明显, 其中颜色最红的是 44 号(美人椒), 颜色最绿的品种是 4 号(鲜椒); 在质构特性方面, 硬度与咀嚼性的变异系数较大, 发酵辣椒的感官特色之一是鲜香爽脆^[29], 适宜的硬度与咀嚼性会影响消费者对发酵辣椒的接受程度, 发酵过程中辣椒硬度与咀嚼性会降低, 因此, 硬度、咀嚼性大的辣椒品种, 作为发酵原料的适应性更强; 辣椒碱的含量及辣度(SHU)的高低是评价辣椒品质及其制品质量的重要依据, 不同辣度辣椒适合的加工方法不同^[30], 在检测的 46 个辣椒品种中, SHU 排名前 3 的是 45 号朝天椒、15 号小米辣和 40 号小米辣, 辣椒碱类物质呈碱性, 在发酵的高酸环境中被中和, 含量会降低^[27], 辣度大的辣椒品种, 更适宜进行发酵。由结果可知, 上述选择的指标在不同品种辣椒之间差异明显, 能够依据品种特征区分出不同品种的辣椒。

2.2 TOPSIS 计算结果

目前加工企业常用的发酵辣椒原料为 45 号、46 号, 是综合考虑到生产成本、发酵辣椒产品品质和消费者接受度后确定的品种, 因此, 分别以 45、46 号两种不同的发酵用辣椒为参考品种, 按照 1.4.3 的公式计算不同品种辣椒的 C_i 值并进行排序, 具体结果如表 4 所示, 由表 4 可知, 以 45 号朝天椒为参考品种时, 得分最高的前 2 名均为朝天椒, 分别为 23 号和 6 号; 以 46 号小米辣为参考品种时, 得分最高的前 2 名分别为 15 号、5 号, 均为小米辣; 说明运用熵权 TOPSIS 法综合评价发酵用辣椒品种时, 能够区分出不同品种辣椒, 同时依据加工实际需求, 在多个不同品种辣椒中, 筛选得到多指标综合评价最优, 最接近参考品种的辣椒原料。

2.3 聚类分析结果

本研究采用瓦尔德法对 46 种辣椒品种的 20 个指标进行聚类分析, 聚类结果如图 1 所示。在欧氏平方距离为 10 时, 46 种辣椒聚为 4 类, 第一类全部为朝天椒, 包含目前辣椒加工企业常用发酵品种 45 号, 以及 TOPSIS 法评分最高的 23 号、6 号在内的 10 种朝天椒, 共同点为在朝天椒品种中, 这 10 种朝天椒果实硬度大, 咀嚼性大, 发酵辣椒加工过程中, 硬度和咀嚼性是评价泡辣椒质构的主要指标之一, 也是影响消费者接受度的关键点之一, 随着发酵过程变化, 泡辣椒硬度和咀嚼性会下降^[31-32], 因此, 硬度和咀

表3 辣椒原料品质分析
Table 3 Quality analysis of raw material

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1号	4.96	8.24	1.60	22.66	0.76	3.17	0.41	0.64	74.90	29.41
2号	2.32	33.60	1.29	10.06	0.42	1.33	0.23	0.25	74.06	31.40
3号	13.66	12.23	2.42	15.98	0.72	10.36	0.39	1.43	84.49	29.43
4号	69.12	16.54	3.16	46.37	1.08	58.38	0.32	3.98	92.67	32.63
5号	4.05	5.70	0.95	14.07	0.93	2.08	0.10	0.20	96.63	59.77
6号	4.50	8.13	1.48	10.01	0.57	2.84	0.33	0.64	73.19	26.78
7号	7.25	9.21	1.80	12.10	1.00	4.41	0.51	0.88	95.15	27.16
8号	3.36	8.52	1.30	9.34	0.61	1.78	0.31	0.51	66.54	30.11
9号	4.49	10.06	1.64	9.91	0.64	2.84	0.31	0.61	73.34	31.43
10号	3.48	5.38	1.73	10.94	0.59	2.19	0.30	0.40	76.00	32.70
11号	3.52	10.43	1.39	9.54	0.54	2.26	0.28	0.63	66.17	29.97
12号	5.21	8.25	2.13	11.09	0.87	3.34	0.46	0.51	87.22	28.10
13号	3.76	7.02	1.45	10.31	0.74	2.21	0.37	0.41	74.57	30.60
14号	4.01	8.06	1.60	9.97	0.76	2.39	0.43	0.49	72.11	27.23
15号	4.18	7.03	1.29	14.80	0.63	2.42	0.17	0.27	86.22	56.60
16号	4.92	7.42	1.60	11.80	0.84	2.93	0.43	0.49	77.04	28.66
17号	3.62	9.32	1.57	9.23	0.53	2.20	0.27	0.47	74.22	31.53
18号	6.59	9.41	2.17	12.59	0.79	4.50	0.45	0.71	79.31	31.21
19号	2.85	6.45	1.24	10.80	0.51	1.56	0.28	0.23	76.64	33.51
20号	4.91	8.21	1.67	11.34	0.75	2.67	0.38	0.47	76.74	32.64
21号	5.04	8.49	1.91	11.05	0.69	2.82	0.36	0.49	77.17	30.86
22号	5.08	8.41	2.06	10.94	0.75	2.90	0.38	0.48	77.04	32.89
23号	5.00	9.09	2.00	10.52	0.75	3.09	0.42	0.57	75.78	31.22
24号	6.32	9.76	1.88	11.84	0.80	3.88	0.42	0.66	77.93	31.52
25号	4.05	7.40	1.76	10.41	0.68	2.35	0.37	0.46	74.18	31.00
26号	4.67	8.46	1.79	10.07	0.68	2.89	0.39	0.57	75.05	30.99
27号	42.38	15.02	2.20	35.41	2.32	25.32	1.06	2.99	85.44	32.27
28号	2.72	6.97	1.44	8.97	0.44	1.67	0.21	0.36	73.46	29.57
29号	19.64	14.33	3.62	18.37	1.40	14.86	0.76	2.01	83.58	27.05
30号	5.43	8.97	1.66	11.16	0.68	3.40	0.37	0.65	76.16	23.92
31号	24.42	14.16	2.74	19.35	1.34	19.24	0.73	2.54	84.50	29.26
32号	4.65	6.95	1.69	11.71	0.66	2.87	0.35	0.58	74.81	25.97
33号	2.69	9.34	0.87	11.56	0.60	1.39	0.38	0.60	52.24	32.59
34号	9.49	13.36	2.00	14.24	1.28	5.71	0.63	2.60	57.59	33.75
35号	2.00	9.28	0.90	7.80	0.42	1.10	0.23	0.36	64.19	23.73
36号	3.17	7.38	1.46	10.01	0.52	1.96	0.30	0.42	72.84	29.23
37号	2.22	11.07	0.83	7.82	0.42	1.23	0.31	0.51	52.82	29.65
38号	14.05	16.57	1.75	15.39	1.69	9.21	0.98	1.90	74.79	29.65
39号	25.09	14.55	2.37	20.09	1.53	18.92	0.80	2.16	86.16	34.14
40号	6.40	6.46	3.21	15.35	0.82	4.41	0.17	0.40	89.07	67.18
41号	29.80	23.72	2.47	21.04	1.59	23.19	0.75	2.74	86.33	31.49
42号	1.88	4.58	0.91	8.82	0.46	0.90	0.26	0.21	66.37	34.88
43号	21.52	19.78	2.25	16.37	0.95	16.91	0.44	1.62	88.88	32.03
44号	19.44	12.93	2.36	19.13	1.34	14.23	0.71	1.84	84.32	39.93
45号	2.19	4.61	1.33	9.65	0.51	1.19	0.28	0.23	70.53	34.59
46号	3.27	4.60	1.09	15.49	0.62	1.88	0.13	0.19	87.25	34.16
平均值	9.42	10.34	1.78	13.81	0.83	6.60	0.41	0.92	77.08	32.70
标准差	12.44	5.31	0.62	6.98	0.39	9.99	0.21	0.89	9.72	8.22
变异系数/%	132.08	51.38	34.61	50.50	47.38	151.54	50.80	96.66	12.61	25.14

表 3(续)

编号	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1 号	37.29	21.86	161.98	0.25	10.35	60.87	539.07	1.45	1.02	42319
2 号	37.53	22.68	107.11	0.24	8.72	37.03	306.10	1.14	0.79	33067
3 号	32.17	18.30	47.27	0.36	16.11	18.06	266.50	0.36	0.39	12850
4 号	-7.04	18.69	19.87	0.36	20.28	8.26	169.32	0.54	0.45	16962
5 号	-5.15	34.66	65.10	0.27	12.41	24.38	299.04	1.12	0.64	30155
6 号	35.62	21.80	175.79	0.34	10.66	80.32	842.18	1.94	1.22	54141
7 号	31.96	19.21	25.17	0.55	20.26	13.91	279.72	0.27	0.19	7881
8 号	32.29	21.33	55.57	0.30	4.86	26.28	127.90	0.52	0.47	16962
9 号	34.57	19.95	48.78	0.40	10.98	20.70	204.51	0.18	0.13	5311
10 号	34.90	21.47	47.71	0.38	14.22	20.42	274.75	1.21	0.79	34267
11 号	33.19	18.04	18.58	0.70	14.46	10.79	142.45	0.22	0.15	6339
12 号	35.34	21.54	53.19	0.32	18.74	22.12	414.43	0.86	0.89	29983
13 号	35.83	23.00	62.01	0.36	15.16	22.55	298.76	0.44	0.38	14049
14 号	34.72	20.66	127.79	0.32	10.09	62.95	619.91	0.48	0.39	14906
15 号	-5.15	34.29	69.98	0.35	12.65	31.19	389.49	2.57	1.48	69390
16 号	36.61	22.63	149.84	0.23	10.47	53.50	547.01	0.71	0.72	24501
17 号	32.74	17.76	48.39	0.59	11.85	32.11	373.20	0.09	0.08	2913
18 号	35.09	22.25	212.18	0.18	9.68	52.43	503.49	0.36	0.35	12165
19 号	39.89	26.82	58.81	0.37	9.90	27.79	261.29	2.09	1.08	54313
20 号	34.61	20.05	12.18	0.56	22.30	7.07	157.41	0.68	0.54	20903
21 号	36.01	22.54	184.48	0.21	9.23	55.42	517.88	1.24	0.99	38207
22 号	35.83	21.24	40.29	0.30	17.19	15.43	267.76	1.77	1.15	50029
23 号	37.52	26.41	183.69	0.22	7.41	59.76	435.52	1.27	1.10	40606
24 号	33.91	21.03	52.37	0.30	14.19	20.11	255.11	0.39	0.35	12679
25 号	36.46	23.57	202.31	0.28	10.29	74.07	759.39	0.45	0.37	14049
26 号	35.98	24.83	168.68	0.19	7.94	47.96	382.02	0.60	0.46	18161
27 号	25.36	18.15	45.99	0.51	23.37	20.06	436.51	0.23	0.28	8738
28 号	35.81	22.41	96.01	0.24	8.86	36.11	318.87	1.42	1.04	42148
29 号	33.18	18.98	142.37	0.24	18.72	46.25	865.93	0.21	0.15	6168
30 号	33.11	19.67	47.26	0.28	13.82	16.51	228.78	1.07	0.64	29298
31 号	35.80	20.79	128.54	0.19	12.88	31.58	374.30	0.33	0.34	11479
32 号	34.11	22.09	49.42	0.27	17.04	17.95	298.19	1.09	0.76	31697
33 号	30.47	14.79	25.71	0.49	8.39	15.70	128.70	0.34	0.29	10794
34 号	35.08	18.47	103.65	0.35	12.09	49.88	668.40	0.21	0.22	7367
35 号	29.35	14.58	42.96	0.50	8.31	24.40	193.86	0.64	0.60	21245
36 号	31.12	15.84	90.52	0.30	7.46	34.12	259.23	0.88	0.89	30326
37 号	33.64	17.53	20.21	0.47	11.23	10.47	117.49	1.78	1.54	56883
38 号	33.64	17.53	156.25	0.32	12.43	65.58	853.82	0.21	0.15	6168
39 号	40.43	23.33	81.68	0.46	8.86	41.45	377.66	0.18	0.18	6168
40 号	-4.91	48.06	154.73	0.35	10.27	80.58	840.43	2.56	1.63	71789
41 号	17.57	21.79	135.47	0.26	8.99	47.70	453.48	0.54	1.05	27242
42 号	39.93	23.88	63.29	0.31	11.93	24.55	292.77	0.82	0.67	25529
43 号	36.87	19.47	152.78	0.16	13.49	38.40	518.19	0.15	0.15	5140
44 号	43.72	28.52	176.50	0.21	11.59	56.80	662.25	0.52	0.35	14906
45 号	39.06	25.73	181.99	0.27	8.75	64.49	568.26	2.23	1.54	64593
46 号	-3.78	23.27	113.01	0.36	8.88	54.89	518.31	1.39	1.26	45403
平均值	30.27	22.21	95.81	0.34	12.34	36.59	404.56	0.86	0.66	11814.72
标准差	13.14	5.62	59.10	0.12	4.19	20.31	208.64	0.67	0.44	8901.69
变异系数/%	43.41	25.30	61.68	35.74	33.96	55.51	51.57	78.11	66.19	75.34

表 4 不同品种辣椒 C_i 值排序Table 4 C_i value ranking of different *Capsicum annuum* varieties

品种	以 45 号为参考		以 46 号为参考	
	C_i	排序	C_i	排序
1 号	0.8176	4	0.6849	5
2 号	0.6932	13	0.6338	14
3 号	0.5612	39	0.5514	35
4 号	0.3676	46	0.4151	45
5 号	0.5719	36	0.6960	3
6 号	0.8180	3	0.6373	13
7 号	0.5157	43	0.5049	42
8 号	0.6370	25	0.5798	27
9 号	0.6019	30	0.5579	32
10 号	0.6789	18	0.6381	12
11 号	0.5524	40	0.4930	43
12 号	0.6425	23	0.6192	19
13 号	0.6392	24	0.5953	22
14 号	0.7109	11	0.6315	15
15 号	0.6674	19	0.7322	2
16 号	0.7545	7	0.6609	9
17 号	0.6014	31	0.5584	31
18 号	0.6818	16	0.5898	25
19 号	0.7446	8	0.6580	10
20 号	0.5659	37	0.5239	39
21 号	0.8137	5	0.6791	6
22 号	0.6821	15	0.6151	20
23 号	0.8200	2	0.6679	8
24 号	0.6121	28	0.5703	29
25 号	0.7084	12	0.5873	26
26 号	0.7159	9	0.6196	18
27 号	0.4024	45	0.4064	46
28 号	0.7702	6	0.6874	4
29 号	0.5145	44	0.4760	44
30 号	0.6429	22	0.5900	24
31 号	0.5494	41	0.5181	40
32 号	0.6635	20	0.6054	21
33 号	0.5643	38	0.5270	38
34 号	0.5970	32	0.5521	34
35 号	0.6176	27	0.5717	28
36 号	0.7123	10	0.6570	11
37 号	0.6434	21	0.5648	30
38 号	0.5749	35	0.5055	41
39 号	0.5416	44	0.5343	37
40 号	0.6056	29	0.6287	17
41 号	0.5925	33	0.5935	23
42 号	0.6921	14	0.6288	16
43 号	0.5841	34	0.5457	36
44 号	0.6217	26	0.5543	33
45 号	1.0000	1	0.6767	7
46 号	0.6800	17	1.0000	1

嚼性大的品种, 作为发酵用辣椒品种适应性更优。第二类有 2 个组合, 为全部的干制用椒与 13 种朝天椒, 包含干制辣椒专用型品种云干椒 3 号、丘北辣椒在内, 这一类辣椒的共同点为 TOPSIS 法评分中等偏低, 在品质特征方面, 果实硬度、咀嚼性相对较低, 更适宜干制, 作为发酵辣椒加工适应性低。第三类全部为小米辣, 包含目前辣椒加工企业常用发酵小米辣品种 46 号, TOPSIS 法评分最高的 15 号、5 号在内, 该类特征为 SHU 指数相对较高, 辣感强烈, 发酵辣椒在加工过程中, 辣度会下降^[33], 作为发酵用辣椒品种, 辣度低不能满足人们对感官刺激的追求^[27]。因此, 适宜的辣度是筛选发酵辣椒品种的重要指标。第四类包括 4 种组合, 包含鲜椒、美人椒、线椒、羊角椒, 共同点为 TOPSIS 法排名普遍低, 单果重量大但籽重量小、果肉厚、含水率高, 主要以鲜食为主, 作为发酵用辣椒品种适应性差。通过对 46 个辣椒品种的 20 个品质指标进行聚类分析, 结合 TOPSIS 结果分析, 可依据实际生产中适宜的原料品质特征为参考, 将辣椒品种依据加工适应性进行分类, 并且聚类结果与 TOPSIS 法评价结果基本相符, 可有效地对辣椒品种依据加工特性进行归类。

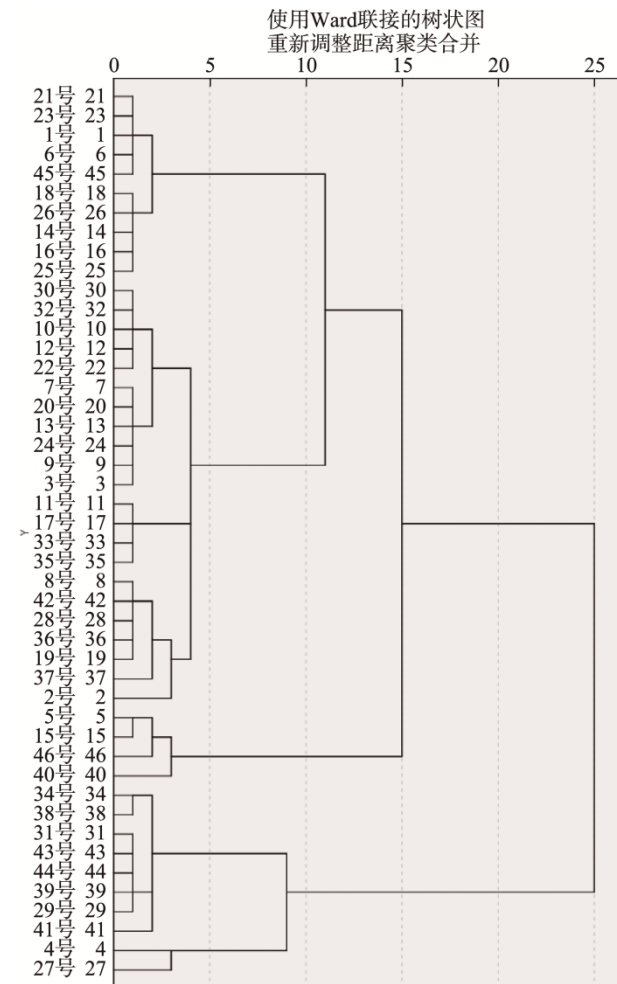


图 1 不同品种辣椒聚类分析树状图

Fig.1 Cluster analysis tree of different *Capsicum annuum* species

3 讨论与结论

本研究首次通过检测农艺性状、色泽、质构特性、辣度等指标并进行聚类分析, 依据加工特性与品种差异, 综合评价了 46 个品种辣椒作为发酵用原料的适用性。农艺性状中分析结果表明, 鲜椒、线椒等多以鲜食为主的辣椒^[34], 特征在于单果重量大, 果肉厚, 籽含量少, 含水率高, 作为发酵辣椒原料适用性低; 色泽对发酵辣椒的商品价值有严重影响^[35], 色差测定结果表明, 不同品种辣椒之间, 代表红绿色度的 a^* 差异大, 考虑到发酵过程中辣椒色泽会出现显著变化, 选择适宜色差值的辣椒作为发酵原料非常重要; 质构特性中硬度和咀嚼性代表口感, 是决定消费者对发酵辣椒喜好度的关键属性之一^[32], 质构特性分析结果表明, 硬度和咀嚼性可以划分出不同品种辣椒作为发酵原料的适用性, 硬度大、咀嚼性大的辣椒品种更适宜作为发酵原料; 高辣度能满足消费者对发酵辣椒辛辣口感的追求, 辣度分析结果表明, 适宜作为发酵原料的辣椒品种, 辣度相对更高。根据检测结果, 选择的 20 个检测指标可以全面体现出不同品种辣椒之间的品质差异, 且依据品质差异, 可以基本划分出辣椒原料的加工适宜性。

为了建立综合评价发酵辣椒原料加工适应性的方法, 筛选适宜作为发酵原料的辣椒品种, 本研究以目前辣椒加工企业发酵常用朝天椒、小米辣为参考, 使用熵权法对检测的 20 个指标进行客观赋权, 结合 TOPSIS 法对 46 个辣椒品种进行综合评价, 结果表明得分最高的朝天椒是 23 号万家红, 小米辣是 15 号云南小米辣 10 号, 2 种辣椒具有共同特征, 果实大小适中, 硬度、咀嚼性大, 辣度高, 可以同时满足消费者对辣味刺激性与口感的追求, 适宜作为发酵辣椒原料, 后期可考虑作为工业化生产发酵辣椒的替代品种。通过该方法的建立, 能够依据加工的实际需求, 准确筛选得到最接近生产需求的辣椒品种, 助力发酵辣椒原料标准化。

参考文献

- VILLA-RIVERA MG, OCHOA-ALEJO N. Chili pepper carotenoids: Nutraceutical properties and mechanisms of action [J]. *Molecules*, 2020, 25(23): 5573.
- VALKOVÁ V, ĎURANOVÁ H, IVANIŠOVÁ E, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of fruit extracts from different fresh chili peppers [J]. *Acta Sci Pol Technol Aliment*, 2021, 20(4): 465–472.
- FABELA-MORON MF, CUEVAS-BERNARDINO JC, AYORA-TALAVERA T, et al. Trends in capsaicinoids extraction from habanero chili pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.): Recent advanced techniques [J]. *Food Rev Int*, 2020, 36(2): 105–134.
- 黄春蓉, 李万琪, 黄蓓蓓. 对比干鲜辣椒酱的品质分析及其产业效益研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(10): 127–130.
HUANG CR, LI WQ, HUANG BB. Study on comparison of quality analysis and industrial benefits of dry and fresh chili sauces [J]. *China Cond*, 2022, 47(10): 127–130.
- 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. Spread and industry development of pepper in China [J]. *Acta Horticult Sin*, 2020, 47(9): 1715–1726.
- 宋新燕, 肖茜, 王蓉蓉, 等. 自然发酵剁辣椒中优良酵母菌的筛选及鉴定[J]. *中国酿造*, 2022, 41(6): 69–73.
SONG XY, XIAO Q, WANG RR, et al. Screening and identification of excellent yeasts in naturally fermented chopped chili [J]. *China Brew*, 2022, 41(6): 69–73.
- CAI W, TANG F, WANG Y, et al. Bacterial diversity and flavor profile of zha-chili, a traditional fermented food in China [J]. *Food Res Int*, 2021, 141(1): 110112.
- 赵楠, 葛黎红, 郭壮, 等. 泡辣椒发酵过程中质构劣化规律及其影响因素研究[J]. *中国酿造*, 2020, 39(1): 119–123.
ZHAO N, GE LH, GUO Z, et al. Texture change of pickled pepper during fermentation and its influence factors [J]. *China Brew*, 2020, 39(1): 119–123.
- ZOU JQ, LI PF. Modelling of litchi shelf life based on the entropy weight method [J]. *Food Packag Shelf Life*, 2020, 25: 100509.
- QU G, ZHANG Z, QU W, et al. Green supplier selection based on green practices evaluated using fuzzy approaches of TOPSIS and ELECTRE with a case study in a chinese internet company [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(9): 3268.
- MOVAHHED MK, MOHEBBI M, KOOCHEKI A, et al. Application of TOPSIS to evaluate the effects of different conditions of sonication on eggless cake properties, structure, and mass transfer [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(5): 1479–1488.
- 张厅, 陈思奇, 丁筑红, 等. TOPSIS 法综合评价不同助剂对刺梨汁喷雾干燥粉品质的影响[J]. *包装与食品机械*, 2021, 39(5): 1–7.
ZHANG T, CHENG SQ, DING ZH, et al. TOPSIS comprehensive evaluation of the effect of different drying agents on the quality of *Rosa roxburghii* trutt juice spray drying powder [J]. *Packag Food Mach*, 2021, 39(5): 1–7.
- 梁秋萍, 严学迎. 基于熵权 TOPSIS 法的不同品种甜樱桃营养品质综合评价[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(16): 59–64.
LIANG QP, YAN XY. Comprehensive evaluation of nutritional quality of different sweet cherries based on entropyweight TOPSIS approach [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(16): 59–64.
- 王玉霞, 武晓玉, 夏鹏飞, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型对经不同方法干燥的苦水玫瑰品质的综合评价[J]. *中成药*, 2021, 43(5): 1241–1248.
WANG YX, WU XY, XIA PF, et al. Entropy-based TOPSIS model for comprehensive evaluation of quality of differently dried *Rosa sertata*×*Rosa rugosa* [J]. *Tradit Pat Med*, 2021, 43(5): 1241–1248.
- 潘守慧, 王开义, 王志彬, 等. 基于改进灰色关联度和 TOPSIS 的作物育种材料评价方法[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(3): 145–154.
PAN SH, WANG KY, WANG ZB, et al. Evaluation method for crop breeding material based on improvement of gray correlation degree and TOPSIS [J]. *J Agric Sci Technol*, 2018, 20(3): 145–154.
- 李若帆, 马娟娟, 孙西欢, 等. 不同水肥管理模式下糯玉米水氮利用及熵权 TOPSIS 综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 111–120.
LI RF, MA JJ, SUN XH, et al. Comprehensive evaluation of water and nitrogen utilization of waxy corn based on entropy weight TOPSIS model

- under different water and fertilizer treatments [J]. *Agric Sci Arid Areas*, 2020, 38(4): 111–120.
- [17] 赵思腾, 师尚礼, 李小龙, 等. 基于熵权-TOPSIS 模型筛选陇中旱作区适宜玉米轮作的土壤可持续系统[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 997–1005. ZHAO ST, SHI SL, LI XL, *et al.* Application of TOPSIS based on entropy weight to screen soil sustainable systems suitable for corn rotation in the arid region of central Gansu [J]. *Acta Agrest Sin*, 2019, 27(4): 997–1005.
- [18] 李青常, 林北森, 刘利平, 等. 不同采收期雪茄烟叶化学成分聚类分析及在分级中的应用[J]. *烟草科技*, 2022, 55(6): 35–41. LI QC, LIN BS, LIU LP, *et al.* Cluster analysis of chemical components in cigar tobacco harvested at different time and its application in leaf grading [J]. *Tobacca Sci Technol*, 2022, 55(6): 35–41.
- [19] 王莉, 张新霞, 杨晓娜, 等. 方便米饭原料适应性的因子、聚类分析研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(3): 109–115. WANG L, ZHANG XX, YANG XN, *et al.* Factor analysis and cluster analysis of adaptability of raw material for instant rice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(3): 109–115.
- [20] CHEN BY, LI QZ, HU H, *et al.* An optimized industry processing technology of peanut tofu and the novel prediction model for suitable peanut varieties [J]. *J Integr Agric*, 2020, 9: 2340–2351.
- [21] 朱麟, 程勤海, 林旭东, 等. 基于因子-聚类分析的水蜜桃分级方法研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(23): 40–45. ZHU L, CHENG QH, LIN XD, *et al.* Grading method of juicy peaches based on factor-cluster analysis [J]. *Packag Eng*, 2019, 40(23): 40–45.
- [22] 郭超男, 年国芳, 徐建宗, 等. 25 种新疆主栽辣椒品种品质分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(12): 4051–4058. GUO CN, NIAN GF, XU JZ, *et al.* Quality analysis of 25 kinds of main pepper varieties planted in Xinjiang [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(12): 4051–4058.
- [23] 高佳, 田玉肖, 罗芳耀, 等. 16 个优良朝天椒组合干制品品质分析与评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(4): 1386–1392. GAO J, TIAN YX, LUO FY, *et al.* Analysis and evaluation of drying quality of 16 excellent pod pepper materials [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(4): 1386–1392.
- [24] 沈月, 高美须, 杨丽, 等. 中国主栽青辣椒品种鲜切加工适宜性评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 359–368. SHEN Y, GAO MX, YANG L, *et al.* Suitability analysis of fresh-cut vegetable processing for twenty main green capsicum cultivars in China [J]. *Trans CSAE*, 2016, 32(S2): 359–368.
- [25] XU X, WU B, ZHAO W, *et al.* Correlation between autochthonous microbial communities and key odorants during the fermentation of red pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Food Micro*, 2020, 91: 103510.
- [26] 邢玉晓, 刘方菁, 丁涌波, 等. 石柱主栽朝天红辣椒腌制加工适宜性研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(12): 113–121. XING YX, LIU FJ, DING YB, *et al.* Research of pepper pickled processing suitability of the main variety of *Capsicum annuum* var. conoides in Shizhu County [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(12): 113–121.
- [27] 叶子, 高智勋, 李美奇, 等. 不同品种发酵小米辣品质特性比较与综合分析[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 87–95. YE Z, SHANG ZX, LI MQ, *et al.* Comparison and comprehensive analysis of quality characteristics of fermented Xiaomi-la in different cultivars [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(10): 87–95.
- [28] 杨兆甜, 李方巍, 王震昊, 等. 食品颜色评价及在食品工业中的应用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 417–423. YANG ZT, LI FW, WANG ZH, *et al.* Food color evaluation and application in food industry [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(24): 417–423.
- [29] 谢靓, 蒋立文. 不同食盐含量对发酵辣椒质构的变化研究[J]. *中国酿造*, 2014, 33(11): 59–62. XIE L, JIANG LW. Effect of different salt content on change of fermented chili texture [J]. *China Brew*, 2014, 33(11): 59–62.
- [30] 霍瑞春, 王国泽, 姚慧静, 等. 19 种加工辣椒辣素辣椒素提取、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 capsaicins from 19 kinds of processed pepper [J]. *China Cond*, 2022, 47(4): 167–172.
- [31] YE Z, SHANG ZX, LI MQ, *et al.* Effect of ripening and variety on the physicochemical quality and flavor of fermented chinese chili pepper (Paojiao) [J]. *Food Chem*, 2021, 368: 130797.
- [32] YE Z, SHANG ZX, LI MQ, *et al.* Evaluation of the physicochemical and aromatic qualities of pickled Chinese pepper (Paojiao) and their influence on consumer acceptability by using targeted and untargeted multivariate approaches [J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109535.
- [33] YE Z, SHANG ZX, LI MQ, *et al.* Dynamic analysis of flavor properties and microbial communities in Chinese pickled chili pepper (*Capsicum frutescens* L.): A typical industrial-scale natural fermentation process [J]. *Food Res Int*, 2022, 153: 110952.
- [34] 任宏程, 李学林, 桂敏, 等. 云南特色辣椒产业发展现状及对策建议[J]. *中国蔬菜*, 2022, (8): 7–12. REN HC, LI XL, GUI M, *et al.* Current situation and countermeasures of yunnan characteristic pepper industry [J]. *China Veget*, 2022, (8): 7–12.
- [35] 张甫生, 吴金松, 闵倩倩, 等. 保脆处理对泡红辣椒脆度与色泽影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(10): 254–258, 262. ZHANG FS, WU JS, MIN QQ, *et al.* Effect of brittleness-keeping treatment on brittleness and color of pickled red pepper [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(10): 254–258, 262.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



吴昕怡, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品精深加工及加工适应性。
Email: ssslwxy@163.com



刘秀薇, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品精深加工及加工适应性。
E-mail: Liuxiwei0305@hotmail.com