

鲜切加工莴笋适宜性品种筛选与货架品质对比分析

罗静红^{1,2}, 唐月明^{1,2}, 梁根云³, 罗芳耀^{1,2}, 李春³, 杨艺雯^{1,2}, 高佳^{1,2*}

(1. 四川省农业科学院农产品加工研究所(四川省农业科学院食物与营养健康研究所), 四川成都 610066)

(2. 四川成都中农大现代农业产业研究院, 四川新津 611430)

(3. 四川省农业科学院园艺研究所, 四川成都 610066)

摘要: 为筛选出适宜的莴笋鲜切加工品种, 该试验对 10 个莴笋品种开展了莴笋鲜切加工品质研究, 重点测试了 15 °C 贮藏条件下 3 d 货架期内产品外观和内在品质变化, 测定其色差 L^* 、 a^* 、 b^* 值、茎肉硬度、破碎力、失重率、电导率、PPO、POD、PAL、总体感官、褐变情况等 12 项指标。通过对测定指标数据的基础分析、相关性分析和因子评价, 确定了鲜切莴笋加工适宜性品种筛选的核心评价指标为总体感官、色差 a^* 值、茎肉硬度和 PPO; 通过层次分析确定了上述各核心评价指标的权重分别为 61.67%、21.18%、11.71% 和 5.45%; 采用灰色关联分析对 10 个莴笋品种贮藏期内鲜切加工品质进行了排序, 评价其鲜切加工适宜性, 筛选出较适宜鲜切加工的莴笋优选品种为 135# (组合 2019135)、109# (川绿香 2 号) 和 63# (新翠竹), 其中 135# 表现最优。以上结果可为鲜切莴笋加工过程中原料的选择提供科学依据, 同时为莴笋鲜切加工专用品种的选育提供指导。

关键词: 鲜切莴笋; 加工适宜性; 层次分析法; 灰色关联分析

文章编号: 1673-9078(2025)02-262-271

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0056

Creening of Suitable Varieties for Fresh-cut Processed Lettuce and Comparative Analysis of Shelf Quality

LUO Jinghong^{1,2}, TANG Yueming^{1,2}, LIANG Genyun³, LUO Fangyao^{1,2}, LI Chun³, YANG Yiwen^{1,2}, GAO Jia^{1,2*}

(1. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Institute of Food and Nutrition Health, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

(2. China Agricultural University-Sichuan Advanced Agricultural & Industrial Institute, Xinjin 611430, China)

(3. Institute of Horticulture, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: In order to select suitable lettuce varieties for fresh-cut products, the processing quality of 10 varieties of fresh-cut lettuce was examined in this research, focusing on the changes in the appearance and internal quality of the products during the 3-day shelf-life under the 15 °C storage conditions. 12 indicators were measured, including the color difference (L^* , a^* , b^* values), stem hardness, crushing force, weight loss rate, electrical conductivity, PPO, POD, PAL, overall sensory quality and browning degree. Based on the basic analysis, correlation analysis and factor evaluation of the measured index data, it was determined

引文格式:

罗静红, 唐月明, 梁根云, 等. 鲜切加工莴笋适宜性品种筛选与货架品质对比分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 262-271.

LUO Jinghong, TANG Yueming, LIANG Genyun, et al. Creening of suitable varieties for fresh-cut processed lettuce and comparative analysis of shelf quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 262-271.

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 四川省农作物育种攻关项目(2021YFYZ0022); 国家现代农业产业技术体系四川省大宗蔬菜创新团队(SCCXTD-2024-5); 四川产研院省级支持项目

作者简介: 罗静红(1993-), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与加工, E-mail: 937251130@qq.com。

通讯作者: 高佳(1983-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与加工, E-mail: jiagao129@163.com

that the core evaluation indicators for the screening of suitable fresh-cut lettuce varieties for processing were determined to be the overall sensory quality, color difference (a^* value), stem hardness and PPO. Through the analytic hierarchy process, the weights of the above core evaluation indicators were 61.67%, 21.18%, 11.71% and 5.45%, respectively. Gray correlation analysis was used to rank the fresh-cut processing quality of the 10 lettuce varieties during the storage and evaluate their suitability for fresh-cut processing. 135# (Combination 2019135), 109# (Chuan Lvxiang 2), and 63# (Xin Cuizhu) were selected to be the preferred lettuce varieties suitable for fresh-cut processing, among which 135# had the best performance. The above results can provide a scientific basis for the selection of raw materials in the processing process of fresh-cut lettuce, and provide guidance for the breeding of specific lettuce varieties for fresh-cut processing.

Key words: fresh-cut lettuce; processing suitability; hierarchical analysis; gray correlation analysis

莴笋 (*Lactuca sativa* var. *Angusta-ta*) 又称青笋、莴苣笋, 富含丰富的蛋白质、纤维素以及钙、磷等矿物质, 是一种营养丰富且具有较强抗氧化、抗肿瘤、增强免疫力等保健功能的蔬菜^[1-3]。莴笋是莴苣的一个变种, 最早在中国是以食用嫩叶为主, 经过长期栽培, 才逐步演化出茎用类型莴笋。鲜切莴笋是将莴笋嫩茎去皮(切分)、包装后销售的一种即用型预制蔬菜加工产品, 由于其具有安全、方便、快捷等优点而深受消费者喜爱。鲜切莴笋由于经过了削皮、切分等加工处理, 切口表面细胞破损, 导致胞内营养物质外渗, 极易产生酶促褐变现象, 影响了产品的外观商品性^[4-6], 大大缩短了货架期, 成为产业痛点问题。因此, 现有研究大量集中在开发鲜切莴笋的抗褐变保鲜技术领域, 常用方法包括抗褐变保鲜剂浸泡处理^[7-9]、包装隔氧或限氧技术^[10-12]、热激^[13-15]和辐照^[16]等酶钝化技术等。上述多种方法均是从外源处理角度抑制褐变现象的产生, 而对莴笋品种自身的抗褐变性能却关注较少。同时, 市场上对于加工专用型莴笋品种的关注度也不足, 而品种特性对于鲜切加工产品的商品性、耐贮运特性以及加工特性都具有重要影响^[17,18], 针对加工要求对品种进行评价, 选择适宜的品种材料进行加工非常必要。因此, 本研究选取了四川地区生产中主流的 10 个莴笋品种为研究对象, 采用相关性分析、层次分析和灰色关联度分析等分析方法, 重点分析贮藏货架期内各莴笋品种鲜切加工产品的色泽、质地、内含物等品质变化, 以期筛选出抗褐变且适宜鲜切加工的莴笋优选品种, 也为今后莴笋品种选育改良提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试的 10 个莴笋品种材料均由四川省农业科

学院园艺研究所莴笋育种栽培团队提供(表 1), 所有材料统一种植于四川省成都市新都区科研试验基地, 栽培管理水平一致, 原料于前一年 12 月底分 2 批次采收后当天 2 h 内送达实验室, 加工处理前于 (4 ± 0.5) °C 冷库中存放备用。

表 1 供试莴笋品种信息表

Table 1 Information table of lettuce varieties for testing

品种编号	品种名称	品种来源	肉质茎颜色
9#	红尖笋 1 号	四川省农业科学院园艺研究所	茎皮浅绿色带紫, 茎肉翠绿
11#	东方红	四川广汉龙盛种业有限公司	茎皮浅绿色带紫, 茎肉翠绿
21#	红尖笋 2 号	四川省农业科学院园艺研究所	茎皮绿色带紫, 茎肉翠绿
22#	红尖笋 3 号	四川省农业科学院园艺研究所	茎皮绿色带紫, 茎肉翠绿
63#	新翠竹	四川广汉龙盛种业有限公司	茎皮浅绿色, 茎肉翠绿
77#	川绿香 1 号	四川省农业科学院园艺研究所	茎皮浅绿色, 茎肉翠绿
89#	黑牛皮	彭州地方品种	茎皮浅绿泛白, 茎肉浅绿泛黄
92#	竹筒青	彭州地方品种	茎皮浅绿色, 茎肉浅绿泛黄
109#	川绿香 2 号	四川省农业科学院园艺研究所	茎皮浅绿色, 茎肉翠绿
135#	组合 2019135	四川省农业科学院园艺研究所	茎皮绿色带紫, 茎肉翠绿

1.2 仪器与设备

TA.XT Plus 质构仪, 英国 SMS 公司; DDSJ-30BA 电导率仪, 上海仪电科学仪器股份有限公司; DHG-9075A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司; 5810R 冷冻离心机, Eppendorf 中国有限公司; CR-400 色差仪, 日本 Konica Minolta 公司; JA31002 电子天平, 上海精天电子仪

器有限公司; XM-300UVF 超声波清洗机, 小美超声仪器有限公司; Synergy HTX 酶标仪, 美国 BioTek 仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将新鲜莴笋每个品种取 10 根, 去除茎皮和叶片, 横切为厚度 5 mm 的圆片, 清水浸泡清洗 2 min, 离心脱除表面水分, 每盒 (200±2) g 称重装入带盖食品塑料包装盒中, 置于 (15±0.5) °C 恒温冷库中模拟货架贮藏。每盒为 1 个样本, 每品种每次测试时取 3 盒, 测试时间为第 0 (加工当天)、1、2、3 天。

1.3.2 指标测定

(1) 失重率: 称量每盒样本的质量, 然后计算贮藏期间样品质量与加工初始值质量的比值。

(2) 相对电导率 (Relative Electrical Conductivity, REC): 参考曹建康等^[19]的方法, 随机选取 6 片莴笋, 装入盛有 40 mL 去离子水的小烧杯中, 25 °C 保温 2 h 后, 测定其电导率 C_1 , 然后加热煮沸 10 min 并冷却至 25 °C, 测定其电导率 C_2 。每品种重复测定 3 盒, 每盒随机测试 6 片。相对电导率计算公式如下所示:

$$Le = \frac{C_1}{C_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Le —相对电导率, %;

C_1 —莴笋片煮沸前的电导率, %;

C_2 —莴笋片煮沸后的电导率, %。

(3) 感官评定: 每组样品混合后, 由 7 名经过训练的科研人员组成感官评定小组, 对莴笋片进行评分, 评分标准参考文献^[13,20,21]并略作修改。总体感官评分标准为: 9, 极好; 7, 好; 5, 较好 (商品临界点); 3, 较差; 1, 完全劣变。褐变情况评分标准为: 1, 无褐变; 2, 褐变面积小于 5%, 或者部分变色轻微; 3, 褐变面积 5%~25% 或者整体变色较浅; 4, 褐变面积 25%~50% 或部分颜色红褐色; 5, 褐变面积超过 50%, 部分颜色深红褐色。

(4) 色差: 采用色差仪测定莴笋片切口面色差 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 测试温度 (15±2) °C。每品种重复测定 3 盒, 每盒随机测试 10 片。

(5) 硬度和破碎力: 采用质构仪 P/2 探头穿刺测定莴笋片肉质硬度和破碎力, 测试速度 1 mm/s, 位移 5 mm, 定义探头穿刺位移 (2~4) mm 的平均

力为茎肉硬度, 探头穿透莴笋片表面的最大力为破碎力。

(6) 多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Aminolyase, PAL): 采用曹建康等^[19]的方法, 并略有改动, 分别在 420、470、290 nm 下测定吸光度值的变化情况 (每 10 s 记录一次, 共记录 3 min), 以每克鲜样每分钟吸光度变化值增加 0.01 为 1 个活性单位, 单位为 U。每品种重复测定 3 盒。

1.3.3 数据处理

对所有测定数据进行了统计分析, 通过相关性分析并结合实际生产确定了核心评价指标; 采用层次分析法参照 Satty 1~9 标度构造两两比较的判断矩阵, 确定评价指标的相对权重^[22-24]; 采用灰色关联度分析法计算加权关联系数并排序, 通过比较与理想品种关联系数的大小对品种的加工适应性进行评价^[22,24,25]。测试数据结果用 (平均值 ± 标准偏差, $n=3$) 表示, 数据采用 Excel 软件进行指标标准化, 采用 SPSS 软件进行差异显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 莴笋基础指标数据

表 2 为 10 个莴笋品种经鲜切加工后在 15 °C 货架条件下贮藏 1~3 d 的各测定指标数据汇总。所有鲜切莴笋样品随着货架期的延长失重率均呈逐渐升高趋势, 但在 3 d 的货架期内所有样品失重率均低于 2.5%, 变化较小; 至第 3 天时, 11#、21# 和 63# 这 3 个品种失重率相对更低。测试样品的相对电导率表明, 鲜切加工后的莴笋片 REC 值呈现出先降低后缓慢升高的趋势, 但所有样品在 15 °C 下存放至第 3 天时 REC 值均小于 2.5%, 并未表现出明显的腐败和汁液外渗现象; 供试样品中 89# 品种 REC 值在第 3 天相对更高。对所有样品进行总体感官和褐变情况的感官评定打分, 默认所有样品第 0 天总体感官值均为 9 分满分, 褐变情况均为 1 (未褐变), 从结果可见, 随着货架期的延长所有样品总体感官呈现不同程度的降低趋势, 部分品种伴随着褐变现象的产生, 其中 89# 和 92# 样品在第 1 天时总体感官值就低于 5 分 (商品临界值), 并伴随着切面明显的褐变; 而 9#、11# 和 135# 样品总体感官值显著

较高,表面并未出现明显的褐变。至第2天时,所有样品总体感官值均小于5分,表面褐变的面积扩大;至第3天时,所有样品伴随着褐变的产生,品质劣变现象加剧,其中9#、11#和135#样品褐变程度相对较轻。从样品表面色差值来看,所有品种鲜切莴笋整体表现为 L^* 值先升高后降低, a^* 值逐渐升高, b^* 值逐渐降低趋势。至第3天时,9#和11#样品的 L^* 值相对较高,而21#、22#、63#和135#样品相对较低。所有样品由于初始肉质颜色存在差异, a^* 和 b^* 值在整个货架期间均存在差异,但从照片上来看,从第2天开始所有样品从圆片边缘向内扩散均出现了不同程度的变色,至第3天时89#和92#品种变色更明显,且出现了较多的红褐色斑点(图1)。对样品的质地进行测试,所有品种中9#品种肉质质地相对较高,77#、92#和135#品种相对较低;随着货架期的延长,各品种质地出现了不规律变化,部分品种肉质硬度小幅升高(9#、21#、22#、77#、92#和135#),部分品种降低(11#、63#、89#和109#)。

测试肉质PPO、POD和PAL酶活性表明,随着货架期延长,各品种PPO和POD活性显著升高,而PAL活性呈现第1天显著升高,之后降低的趋势。各品种初始时PPO、POD和PAL活性也存在较大差异,其中89#和92#样品的初始PPO活性比其它品种高出10倍以上,9#品种POD和PAL活性显著高于其他品种。在整个货架期内,第2~3天时各品种PPO活性快速上升,第3天时增幅达到79.00~483.15 U,其中89#增幅最大,135#增幅最小。相比于PPO值的变化,POD值在货架期内增幅相对较小在6.45~9.46 U之间,其中11#和22#增幅相对较大,9#、63#和92#增幅较小。而PAL值在各品种中的较大变化主要出现在第1天,增幅达到115.63~518.13 U,其中89#样品增加值最多,135#

样品含量几乎不变;随着货架期延长,至第3天时各品种PAL活性逐渐降低,9#、63#、109#和135#这4个品种PAL值甚至低于初始第0天时,出现了负增长。

2.2 应用相关性筛选主评价因子

本试验共测定了12项指标(表2),对12项测定指标进行相关性分析(表3),并通过相关性分析来筛选主评价因子。结果可见,色差 L^* 、 a^* 、 b^* 值之间呈显著或极显著相关,信息重叠较多,其中 a^* 值最能代表鲜切莴笋翠绿色泽保持度,且与绝大多数指标均呈显著或极显著相关性。茎肉硬度与破碎力呈极显著正相关,茎肉硬度更能代表鲜切莴笋硬度质地特征,后续保留茎肉硬度做进一步分析。

总体感官和大多数指标呈显著或极显著相关性,和色差 L^* 、 a^* 值呈显著或极显著负相关,和 b^* 值呈极显著正相关,表明果肉颜色亮度的变化对于感官评价打分影响较大,色泽越新鲜翠绿总体评分越高。总体感官还与失重率、褐变情况和PPO酶活呈极显著负相关,表明失重率越高,鲜切莴笋片酶促褐变和氧化损伤越严重,感官评分则越低。POD、PAL酶活和色差 L^* 值呈极显著正相关,说明外观色泽能潜在反映酶促褐变造成颜色变化现象。色差 L^* 、 a^* 值和失重率呈显著或极显著负相关,表明失水过多不利于莴笋片翠绿色泽的保持。PPO酶活和电导率呈显著正相关,表明莴笋片氧化褐变和腐损有互相促进的作用。

上述测定指标中各测定指标均表现出了较强的相关性,尤其是色差3项与其他指标之间有显著相关性,代表彼此之间存在一定的信息重叠。为简化后续分析评价,保留了总体感官、色差 a^* 值、茎肉硬度和PPO这4项指标作为后续分析的核心评价指标。



图1 贮藏期间各品种鲜切莴笋照片

Fig.1 Photographs of fresh-cut lettuce of each variety during storage

表 2 供试莴笋样品基础指标数据
Table 2 Basic index data of lettuce samples for testing

贮藏 时间 /d	品种 编号	失重率/%	电导率/%	总体感官	褐变情况	L^*	a^*	b^*	茎肉硬度/g	破碎力/g	PPO/U	POD/U	PAL/U	
0	9	—	1.60 ± 0.05 ^{bc}	9 ± 0	1 ± 0	48.99 ± 4.35 ^a	-11.58 ± 0.97 ^c	22.45 ± 3.09 ^{abc}	583.66 ± 91.72 ^a	773.65 ± 86.47 ^a	0.13 ± 0.11 ^c	40.92 ± 3.11 ^a	533.79 ± 35.75 ^a	
	11	—	1.94 ± 0.36 ^{ab}	9 ± 0	1 ± 0	47.09 ± 4.22 ^{ab}	-11.99 ± 1.18 ^{cd}	22.26 ± 2.82 ^{abc}	521.76 ± 59.60 ^{abcd}	732.22 ± 81.26 ^{abc}	0.09 ± 0 ^c	35.22 ± 1.43 ^{ab}	327.70 ± 55.76 ^{bc}	
	21	—	1.23 ± 0.28 ^{de}	9 ± 0	1 ± 0	39.96 ± 4.62 ^{ef}	-12.21 ± 2.12 ^{cd}	20.66 ± 3.81 ^c	509.59 ± 48.54 ^{bcd}	703.95 ± 77.55 ^{abcd}	0.46 ± 0.33 ^c	28.94 ± 0.34 ^{bcd}	151.81 ± 20.85 ^d	
	22	—	1.21 ± 0.06 ^{de}	9 ± 0	1 ± 0	42.49 ± 4.72 ^{de}	-12.82 ± 1.98 ^{def}	22.34 ± 4.05 ^{abc}	532.10 ± 62.35 ^{abc}	713.89 ± 68.80 ^{abc}	0.13 ± 0.05 ^c	28.93 ± 4.29 ^{bcd}	196.46 ± 3.13 ^d	
	63	—	1.56 ± 0.08 ^{cd}	9 ± 0	1 ± 0	42.41 ± 3.46 ^{de}	-13.74 ± 1.39 ^f	24.59 ± 3.55 ^a	547.25 ± 86.47 ^{ab}	749.95 ± 71.54 ^{ab}	0.10 ± 0 ^c	28.87 ± 0.90 ^{bcd}	214.60 ± 0.77 ^d	
	77	—	1.82 ± 0.14 ^{abc}	9 ± 0	1 ± 0	39.27 ± 3.49 ^f	-12.41 ± 1.36 ^{abc}	21.77 ± 3.56 ^{bc}	457.77 ± 49.26 ^d	612.75 ± 87.55 ^c	0.76 ± 0.77 ^c	28.13 ± 1.84 ^{cd}	175.72 ± 28.20 ^d	
	89	—	2.07 ± 0.11 ^a	9 ± 0	1 ± 0	45.91 ± 3.68 ^{bc}	-6.25 ± 1.05 ^a	14.08 ± 3.50 ^e	510.36 ± 50.19 ^{bcd}	669.90 ± 89.53 ^{cde}	20.61 ± 3.67 ^a	29.20 ± 0.41 ^{bcd}	306.78 ± 23.32 ^c	
	92	—	1.91 ± 0.13 ^{abc}	9 ± 0	1 ± 0	43.98 ± 4.90 ^{cd}	-8.73 ± 1.33 ^b	17.58 ± 3.50 ^d	476.81 ± 93.30 ^{cd}	632.57 ± 80.59 ^{de}	10.74 ± 1.72 ^b	32.91 ± 6.59 ^{bc}	311.06 ± 5.29 ^e	
	109	—	1.83 ± 0.10 ^{abc}	9 ± 0	1 ± 0	40.42 ± 4.29 ^{ef}	-12.23 ± 1.72 ^{cd}	21.41 ± 4.46 ^{bc}	532.16 ± 77.60 ^{abc}	687.87 ± 108.32 ^{bcd}	0.44 ± 0 ^c	25.32 ± 0.32 ^d	361.91 ± 42.57 ^{bc}	
	135	—	1.16 ± 0.11 ^e	9 ± 0	1 ± 0	38.30 ± 2.84 ^f	-13.37 ± 1.63 ^{ef}	23.25 ± 3.34 ^{ab}	472.73 ± 65.92 ^{cd}	687.54 ± 62.11 ^{bcd}	0.10 ± 0.04 ^c	27.89 ± 1.11 ^{cd}	394.86 ± 50.27 ^b	
	1	9	0.53 ± 0.12 ^b	0.68 ± 0.05 ^{abcd}	7.08 ± 0.79 ^{ab}	1.58 ± 0.42 ^{bc}	53.60 ± 4.17 ^a	-8.78 ± 1.43 ^{de}	18.50 ± 2.30 ^{ab}	582.09 ± 88.60 ^a	825.25 ± 75.00 ^a	2.73 ± 0.21 ^e	36.53 ± 1.54 ^b	649.42 ± 79.55 ^b
		11	0.62 ± 0.13 ^{ab}	0.55 ± 0.05 ^{abcd}	6.75 ± 0.94 ^{abc}	1.63 ± 0.31 ^{efg}	51.52 ± 4.35 ^{ab}	-9.72 ± 1.59 ^e	19.27 ± 2.26 ^a	488.29 ± 66.90 ^{cd}	766.12 ± 112.38 ^a	0.74 ± 0.17 ^e	40.53 ± 0.71 ^a	514.24 ± 17.72 ^{bc}
		21	0.46 ± 0.05 ^b	0.55 ± 0.18 ^{abcd}	6.38 ± 1.46 ^{bc}	1.75 ± 0.50 ^{defg}	47.80 ± 4.93 ^c	-8.25 ± 1.78 ^{cd}	16.77 ± 2.57 ^{abc}	524.69 ± 57.90 ^{abcd}	774.53 ± 87.21 ^a	1.31 ± 0.27 ^e	33.63 ± 0.77 ^{bc}	602.18 ± 44.83 ^b
22		0.57 ± 0.06 ^{ab}	0.43 ± 0.04 ^d	5.88 ± 1.51 ^c	2.13 ± 0.53 ^{de}	47.24 ± 3.57 ^c	-7.15 ± 1.69 ^b	15.83 ± 2.72 ^{ef}	569.11 ± 53.28 ^{ab}	760.63 ± 59.84 ^{ab}	1.34 ± 0.16 ^e	33.21 ± 3.30 ^c	608.57 ± 42.23 ^b	
63		0.63 ± 0.05 ^{ab}	0.53 ± 0.08 ^{bcd}	5.88 ± 1.05 ^c	2.33 ± 0.33 ^c	48.12 ± 3.26 ^c	-7.48 ± 0.93 ^{bc}	16.91 ± 2.28 ^{bcd}	579.69 ± 81.18 ^a	773.09 ± 77.29 ^a	2.97 ± 0.28 ^d	27.94 ± 0.52 ^d	564.39 ± 61.12 ^b	
77		0.65 ± 0.55 ^{ab}	0.79 ± 0.15 ^{ab}	5.79 ± 1.21 ^{cd}	2.17 ± 0.49 ^{cd}	47.25 ± 3.22 ^c	-8.33 ± 1.33 ^{cd}	16.24 ± 2.22 ^{de}	477.04 ± 69.60 ^d	630.70 ± 86.39 ^c	2.37 ± 1.29 ^e	23.84 ± 1.95 ^e	660.97 ± 64.02 ^b	
89		0.73 ± 0.09 ^a	0.84 ± 0.30 ^a	4.63 ± 1.15 ^{de}	3.08 ± 0.60 ^b	51.41 ± 3.04 ^{ab}	-1.60 ± 1.40 ^a	14.31 ± 2.16 ^f	497.83 ± 63.46 ^{cd}	676.79 ± 89.91 ^{bc}	117.09 ± 8.11 ^a	29.31 ± 1.31 ^d	824.90 ± 111.51 ^a	
92		0.74 ± 0.60 ^a	0.78 ± 0.18 ^{abc}	3.63 ± 1.17 ^e	3.83 ± 0.75 ^a	52.72 ± 3.88 ^a	-1.65 ± 1.71 ^a	16.00 ± 2.09 ^e	510.61 ± 70.92 ^{bcd}	647.78 ± 88.79 ^c	82.10 ± 13.12 ^b	36.04 ± 0.68 ^{bc}	538.12 ± 100.91 ^{bc}	
109		0.57 ± 0.07 ^{ab}	0.70 ± 0.06 ^{bcd}	6.21 ± 1.21 ^{bc}	2.00 ± 0.48 ^{def}	49.09 ± 3.38 ^{bc}	-7.88 ± 1.50 ^{bcd}	18.32 ± 2.28 ^{abc}	493.21 ± 83.50 ^{cd}	647.78 ± 120.03 ^c	36.31 ± 5.79 ^d	29.18 ± 1.03 ^d	566.28 ± 62.56 ^b	
135		0.54 ± 0.09 ^{ab}	0.49 ± 0.07 ^{cd}	7.71 ± 0.45 ^a	1.42 ± 0.19 ^f	47.63 ± 3.51 ^c	-8.82 ± 1.03 ^{de}	17.70 ± 3.19 ^{abcd}	546.36 ± 79.38 ^{abc}	741.32 ± 95.05 ^{ab}	49.51 ± 6.29 ^c	35.01 ± 0.84 ^{bc}	392.84 ± 28.42 ^c	

续表 2

贮藏 时间 /d	品种 编号	失重率/%	电导率/%	总体感官	褐变情况	L*	a*	b*	茎肉硬度/g	破碎力/g	PPO/U	POD/U	PAL/U	
2	9	0.98 ± 0.25 ^a	1.45 ± 0.39 ^a	4.67 ± 0.65 ^a	3.17 ± 0.33 ^{ef}	52.79 ± 4.71 ^a	-5.75 ± 2.30 ^{de}	18.15 ± 2.75 ^{ab}	637.12 ± 92.92 ^a	894.39 ± 75.86 ^c	123.83 ± 5.57 ^b	38.46 ± 2.03 ^{ab}	577.02 ± 53.75 ^{ab}	
	11	1.01 ± 0.17 ^a	0.95 ± 0.06 ^{ab}	4.83 ± 0.75 ^a	3.00 ± 0.30 ^f	52.01 ± 4.44 ^{ab}	-6.92 ± 2.78 ^e	19.40 ± 3.22 ^a	518.39 ± 93.76 ^{bc}	791.81 ± 114.03 ^b	97.87 ± 5.50 ^c	39.60 ± 0.73 ^a	605.37 ± 119.95 ^c	
	21	0.56 ± 0.03 ^c	1.31 ± 0.27 ^{ab}	2.88 ± 0.93 ^{bcd}	3.96 ± 0.40 ^{cd}	48.39 ± 3.27 ^{cde}	-4.44 ± 1.79 ^{cd}	17.92 ± 3.23 ^{ab}	519.56 ± 38.29 ^{bc}	750.66 ± 63.50 ^b	90.10 ± 5.91 ^{cd}	34.42 ± 2.46 ^{cd}	233.75 ± 10.93 ^e	
	22	0.73 ± 0.07 ^{abc}	1.24 ± 0.41 ^{ab}	3.21 ± 0.89 ^{bc}	3.71 ± 0.33 ^d	47.49 ± 3.12 ^{def}	-3.01 ± 1.45 ^b	15.36 ± 2.45 ^{cd}	578.71 ± 60.56 ^{ab}	757.12 ± 48.98 ^b	83.03 ± 8.75 ^{de}	34.43 ± 0.40 ^{cd}	312.09 ± 42.31 ^{de}	
	63	0.77 ± 0.08 ^{abc}	0.91 ± 0.05 ^{ab}	2.46 ± 1.03 ^{cd}	4.25 ± 0.50 ^{abc}	47.20 ± 3.95 ^{def}	-2.84 ± 1.87 ^b	16.66 ± 1.78 ^{bc}	587.11 ± 66.99 ^a	749.93 ± 74.38 ^b	75.75 ± 3.02 ^e	28.51 ± 0.10 ^f	368.91 ± 56.24 ^{cd}	
	77	0.83 ± 0.69 ^{abc}	1.18 ± 0.09 ^{ab}	2.67 ± 1.07 ^{cd}	4.00 ± 0.48 ^{bcd}	45.92 ± 2.61 ^f	-3.60 ± 2.00 ^{bc}	15.33 ± 1.73 ^{cd}	481.08 ± 52.40 ^c	627.50 ± 76.04 ^d	85.40 ± 5.05 ^{cde}	24.54 ± 0.54 ^g	277.67 ± 12.90 ^{de}	
	89	0.93 ± 0.19 ^{ab}	1.11 ± 0.11 ^{ab}	2.33 ± 0.86 ^{cd}	4.42 ± 0.42 ^{ab}	50.11 ± 2.06 ^{bc}	0.55 ± 1.67 ^a	13.91 ± 1.98 ^d	495.81 ± 69.20 ^c	715.10 ± 95.29 ^{bc}	150.89 ± 7.38 ^a	33.92 ± 1.49 ^{cd}	371.15 ± 65.82 ^{cd}	
	92	0.79 ± 0.23 ^{abc}	1.21 ± 0.11 ^{ab}	2.25 ± 0.87 ^d	4.50 ± 0.37 ^a	49.89 ± 3.14 ^{bc}	1.07 ± 2.05 ^a	15.30 ± 2.18 ^{cd}	490.48 ± 62.00 ^c	651.96 ± 71.67 ^{cd}	135.73 ± 8.56 ^b	36.56 ± 0.92 ^{bc}	479.18 ± 86.16 ^{ab}	
	109	0.64 ± 0.05 ^{bc}	0.83 ± 0.07 ^b	3.71 ± 0.45 ^b	3.58 ± 0.47 ^{de}	48.72 ± 2.89 ^{cd}	-3.48 ± 2.27 ^{bc}	17.19 ± 1.98 ^b	517.97 ± 84.14 ^{bc}	722.68 ± 103.05 ^{bc}	12.61 ± 2.82 ^g	30.53 ± 1.84 ^{ef}	452.57 ± 15.94 ^{bc}	
	135	0.76 ± 0.15 ^{abc}	1.23 ± 0.46 ^{ab}	4.83 ± 1.17 ^a	2.83 ± 0.49 ^f	46.25 ± 3.29 ^{ef}	-6.76 ± 2.20 ^c	16.74 ± 2.48 ^{bc}	574.54 ± 54.11 ^{ab}	767.85 ± 92.13 ^b	52.29 ± 9.53 ^f	33.46 ± 0.74 ^{de}	445.05 ± 76.29 ^{bc}	
	3	9	1.59 ± 0.41 ^{ab}	1.81 ± 0.28 ^{abc}	3.71 ± 0.69 ^a	3.58 ± 0.42 ^c	53.07 ± 4.32 ^a	-3.14 ± 3.17 ^{de}	18.43 ± 2.84 ^a	641.17 ± 94.29 ^a	931.98 ± 92.41 ^a	200.34 ± 3.61 ^b	47.51 ± 0.54 ^a	353.11 ± 2.19 ^{ab}
		11	1.44 ± 0.14 ^b	1.77 ± 0.17 ^{abc}	3.58 ± 0.56 ^a	3.71 ± 0.54 ^{bc}	50.94 ± 3.57 ^a	-4.61 ± 3.12 ^{ef}	18.77 ± 2.36 ^a	513.88 ± 78.26 ^c	785.07 ± 69.22 ^b	195.21 ± 4.07 ^b	44.34 ± 0.56 ^a	425.59 ± 74.48 ^a
		21	1.38 ± 0.21 ^b	1.70 ± 0.03 ^{abc}	1.38 ± 0.61 ^{cd}	4.88 ± 0.31 ^a	45.36 ± 3.66 ^{def}	-1.19 ± 1.78 ^{bc}	18.26 ± 2.48 ^a	555.64 ± 77.42 ^{bc}	741.13 ± 76.70 ^{bc}	138.42 ± 5.22 ^c	36.46 ± 2.78 ^{bc}	314.27 ± 40.51 ^{ab}
22		1.55 ± 0.18 ^{ab}	1.40 ± 0.27 ^{bcd}	1.25 ± 0.45 ^d	4.71 ± 0.50 ^a	43.70 ± 2.22 ^f	0.19 ± 1.27 ^{ab}	17.35 ± 1.75 ^{ab}	589.44 ± 65.84 ^{ab}	741.53 ± 68.97 ^{bc}	158.06 ± 7.47 ^d	38.38 ± 2.86 ^b	376.13 ± 70.42 ^a	
63		1.37 ± 0.13 ^b	1.26 ± 0.21 ^{cd}	1.38 ± 0.48 ^{cd}	4.67 ± 0.44 ^a	45.26 ± 3.63 ^{ef}	-2.42 ± 2.40 ^{cd}	17.45 ± 1.39 ^{ab}	534.18 ± 75.07 ^{bcd}	719.08 ± 60.12 ^{bcd}	107.30 ± 3.94 ^f	35.31 ± 0.58 ^{bc}	207.01 ± 41.52 ^{bc}	
77		2.26 ± 0.97 ^a	1.44 ± 0.33 ^{abcd}	1.88 ± 0.77 ^c	4.50 ± 0.64 ^a	45.92 ± 3.07 ^{cde}	-2.23 ± 2.31 ^{cd}	18.13 ± 1.94 ^a	473.07 ± 74.85 ^d	661.50 ± 80.53 ^{cd}	152.61 ± 7.06 ^d	36.05 ± 0.84 ^{bc}	398.46 ± 87.44 ^a	
3	89	1.52 ± 0.11 ^{ab}	2.07 ± 0.38 ^a	1.00 ± 0.00 ^d	4.92 ± 0.19 ^a	47.82 ± 2.45 ^{bc}	1.06 ± 1.87 ^a	14.51 ± 2.06 ^c	484.33 ± 66.93 ^d	667.14 ± 110.92 ^{cd}	503.76 ± 0.98 ^a	38.09 ± 5.21 ^b	381.16 ± 82.44 ^a	
	92	1.88 ± 0.34 ^{ab}	1.50 ± 0.17 ^{abcd}	1.08 ± 0.19 ^d	4.88 ± 0.23 ^a	48.40 ± 2.61 ^b	0.39 ± 1.99 ^a	17.97 ± 2.89 ^{ab}	505.44 ± 80.35 ^{cd}	656.11 ± 99.61 ^d	177.76 ± 7.50 ^c	39.70 ± 0.94 ^b	314.81 ± 41.78 ^{ab}	
	109	1.61 ± 0.50 ^{ab}	1.05 ± 0.12 ^d	2.88 ± 0.61 ^b	4.04 ± 0.26 ^b	47.50 ± 3.54 ^{bcd}	-2.69 ± 2.35 ^{cd}	18.51 ± 1.96 ^a	496.78 ± 68.8 ^{cd}	669.80 ± 116.68 ^{cd}	132.79 ± 5.08 ^e	33.37 ± 0.24 ^c	197.05 ± 42.68 ^c	
	135	1.56 ± 0.33 ^{ab}	1.97 ± 0.69 ^{ab}	3.63 ± 0.77 ^a	3.63 ± 0.48 ^{bc}	45.55 ± 3.54 ^{def}	-5.28 ± 2.08 ^f	16.56 ± 1.75 ^b	520.55 ± 74.30 ^{bcd}	733.24 ± 86.10 ^{bcd}	79.09 ± 2.41 ^g	36.22 ± 0.79 ^{bc}	360.16 ± 120.30 ^c	

注: 同列数据后不同小写字母表示测试指标在同一测试天内的差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 各测试指标相关性分析
Table 3 Correlation analysis of each test indicator

	失重率	电导率	总体感官	褐变情况	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	茎肉硬度	破碎力	PPO	POD	PAL
失重率	1.00											
电导率	0.08	1.00										
总体感官	-0.86**	0.02	1.00									
褐变情况	0.85**	0.05	-0.99**	1.00								
<i>L</i> *	0.37*	-0.32*	-0.39*	0.36*	1.00							
<i>a</i> *	0.77**	0.02	-0.93**	0.94**	0.46**	1.00						
<i>b</i> *	-0.41**	0.20	0.60**	-0.57**	-0.46**	-0.76**	1.00					
茎肉硬度	0.08	-0.05	-0.07	0.06	0.30	0.03	0.04	1.00				
破碎力	0.12	-0.08	-0.02	0.00	0.45**	-0.07	0.13	0.84**	1.00			
PPO	0.71**	0.35*	-0.72**	0.73**	0.29	0.73**	-0.41**	0.02	0.02	1		
POD	0.53**	0.21	-0.37*	0.37*	0.57**	0.36*	-0.04	0.36*	0.57**	0.49**	1.00	
PAL	0.03	-0.53**	-0.01	-0.04	0.61**	0.08	-0.32*	0.14	0.21	-0.07	0.09	1

注: **表示 *P* 在 0.01 水平上相关, 极显著相关; * 表示 *P* 在 0.05 水平上相关, 显著相关。

2.3 应用层次分析法确定评价因子权重

在 Satty1~9 标度下, 通过对各核心评价指标对莴笋鲜切加工影响的重要程度打分, 构建了两两比较的判断矩阵表 (表 4)。通过和积分法计算出判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{max}=3.499$ 12。为了检验判断矩阵的一致性, 做了一致性检验, 当判断矩阵为 4 阶矩阵 ($n=4$) 时, 平均随机一致性指标 $RI=0.89$, 一致性指标 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$, 一致性比率 $CR=CI/RI=-0.187$ 59, 由于 $CR<0.1$, 则判定该判断矩阵一致性检验通过。计算得到各个指标的权重如表 5 所示, 色差 *a** 值权重最高, 为 61.67%; 总体感官和茎肉硬度值次之, 分别为 21.18% 和 11.71%; 而 PPO 值权重相对较低, 仅为 5.45%。

2.4 应用灰色关联分析进行样品鲜切加工适宜性排序

灰色关联度分析是一种多因素综合统计分析方法, 通过分析多个因素 (子系统) 之间的关系大小, 并计算各个样品与理想样品之间的关联系数来评价样品的优劣, 关联系数越大表明其与理想品种的相似程度越高, 适宜性越好^[22]。对鲜切莴笋产品加工和货架贮藏而言, 4 项核心评价指标中总体感官值、色差 *a** 值和茎肉硬度越大越好, PPO 值越低越好。因此, 参考各指标的测定值, 拟定了理想品种的参考值, 即总体感官值为 9, *a** 值为 -14, 茎肉硬度为 650 g, PPO 值为 0.2%。参照张学杰^[25]方法对数据进行无量纲处理 (分辨系数 $\rho=0.5$), 并将各

指标的关联系数赋予层次分析法确定的相应权重 (表 5), 得到不同鲜切莴笋样品对于理想品种的加权关联系数和大小排序 (表 6)。

从表 6 中可见, 整个 3 天的贮藏期内, 10 份莴笋鲜切加工样品在货架第 0 天时排序最优, 随着贮藏时间的延长, 各样品的品质产生了差异性变化, 92# 和 89# 品种在整个贮藏期间始终排名靠后。贮藏第 1 天时排名前 3 的莴笋样品分别为 11#、21# 和 22#; 贮藏第 2 天时排名前 3 的莴笋样品分别为 109#、135# 和 63#; 贮藏第 3 天时排名前 3 分别为 135#、63# 和 109#。上述结果表明, 92# 和 89# 最不宜作为鲜切加工的莴笋材料, 135#、109# 和 63# 可作为较适宜于鲜切加工的莴笋优选材料, 贮藏后期仍表现出较优的综合品质。

表 4 判断矩阵及一致性检验

Table 4 Judgment matrix and consistency test

	总体感官	<i>a</i> *	茎肉硬度	PPO	特征向量
总体感官	1	1/7	3	5	0.211 8
<i>a</i> *	7	1	5	7	0.616 7
茎肉硬度	1/3	1/5	1	3	0.117 1
PPO	1/5	1/7	1/3	1	0.054 5

表 5 主评价指标权重

Table 5 Main evaluation indicator weights

指标	总体感官	<i>a</i> *	茎肉硬度	PPO
权重/%	21.18%	61.67%	11.71%	5.45%

表 6 各样品的关联系数和加权关联系数

Table 6 Correlation coefficients and weighted correlation coefficients for each sample

储存时间/d	品种编号	总体感官	a^*	茎肉硬度	PPO	加权关联度	组内关联序	综合关联序
0	9	1	0.999 8	0.999 9	0.999 6	0.999 8	2	2
	11	1	0.999 8	0.999 8	0.999 4	0.999 8	5	5
	21	1	0.999 9	0.999 8	0.998 6	0.999 5	7	7
	22	1	0.999 9	0.999 8	0.999 6	0.999 8	1	1
	63	1	1	0.999 8	0.999 4	0.999 8	3	3
	77	1	0.999 9	0.999 7	0.996 9	0.999 1	8	8
	89	1	0.999 4	0.999 8	0.923 0	0.980 5	10	17
	92	1	0.999 6	0.999 7	0.945 6	0.986 2	9	15
	109	1	0.999 9	0.999 8	0.998 7	0.999 6	6	6
	135	1	0.999 9	0.999 7	0.999 4	0.999 8	4	4
1	9	0.999 8	0.999 6	0.999 9	0.986 4	0.996 4	5	13
	11	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.997 1	0.999 0	1	9
	21	0.999 7	0.999 6	0.999 8	0.994 0	0.998 2	2	10
	22	0.999 6	0.999 5	0.999 9	0.993 8	0.998 2	3	11
	63	0.999 6	0.999 5	0.999 9	0.985 1	0.996 0	6	14
	77	0.999 6	0.999 6	0.999 7	0.988 3	0.996 8	4	12
	89	0.999 5	0.999	0.999 7	0.658 9	0.914 3	10	29
	92	0.999 3	0.999	0.999 8	0.774 7	0.943 2	9	23
	109	0.999 7	0.999 5	0.999 7	0.907 9	0.976 7	7	18
	135	0.999 8	0.999 6	0.999 8	0.881 3	0.970 1	8	19
2	9	0.999 5	0.999 4	0.999 9	0.597 2	0.899 0	8	30
	11	0.999 5	0.999 4	0.999 8	0.652 4	0.912 8	7	27
	21	0.999 3	0.999 3	0.999 8	0.670 9	0.917 3	6	26
	22	0.999 3	0.999 1	0.999 9	0.688 7	0.921 8	4	24
	63	0.999 2	0.999 1	0.999 9	0.708 1	0.926 6	3	21
	77	0.999 2	0.999 2	0.999 7	0.682 7	0.920 2	5	25
	89	0.999 2	0.998 9	0.999 7	0.524 8	0.880 6	10	34
	92	0.999 2	0.998 8	0.999 7	0.574 9	0.893 2	9	32
	109	0.999 4	0.999 2	0.999 8	0.936 6	0.983 7	1	16
	135	0.999 5	0.999 4	0.999 9	0.861 4	0.965 1	2	20
3	9	0.999 4	0.999 2	0.999 9	0.478 0	0.869 1	9	39
	11	0.999 3	0.999 3	0.999 8	0.484 5	0.870 7	8	38
	21	0.999 1	0.999 9	0.999 8	0.558 2	0.889 0	4	33
	22	0.999 1	0.998 9	0.999 9	0.537 3	0.883 8	6	36
	63	0.999 1	0.999 1	0.999 8	0.631 2	0.907 3	2	28
	77	0.999 1	0.999 1	0.999 7	0.546 0	0.886 0	5	35
	89	0.999	0.998 8	0.999 7	0.333 3	0.832 7	10	40
	92	0.999	0.998 9	0.999 8	0.507 9	0.876 4	7	37
	109	0.999 3	0.999 1	0.999 7	0.580 2	0.894 6	3	31
	135	0.999 3	0.999 3	0.999 8	0.788 2	0.946 7	1	22

3 讨论

通过分析 10 个品种莴笋鲜切加工后贮藏期间外观和内在品质指标发现,随着贮藏时间的延长,10 个品种鲜切莴笋色泽逐渐变成黄褐色,组织电导率升高,细胞膜逐渐被破坏,PPO、POD、PAL 活性逐渐增加,均出现褐变现象,但水分含量变化甚微,硬度在品种间变化趋势不一致。不同品种鲜切莴笋贮藏期间所表现的外观品质和生理指标变化存在一定差异。测定内含物发现 PPO、POD、PAL 活性存在不同程度增加,这是由于酶促褐变反应的进行,这种反应会导致莴笋片的颜色变化以及味道和营养价值的损失^[26,27]。杨霞等^[28]的研究表明鲜切莴笋在不同温度贮藏条件下 PPO 活性逐渐升高,莴笋外观上出现了不同程度的褐变。Teng 等^[29]的研究也表明 14 个种质的莴笋切割后 PAL 和 POD 增加迅速,但 12 份种质的 PPO 波动仅略有增加,可能与试验材料和切割方式有关。本研究中不同品种表现出不同的酶活初始活性和增长速度,89# 和 92# 的 PPO 活性贮藏期间始终处于较高水平,在贮藏至第 1 天已失去商品性,莴笋片表面颜色逐渐变成橙黄色,其感官评价分数也偏低,这可能与不同品种遗传因素和酶的特性有关;而 135# 和 109# PPO 活性相对较低,增幅相对较小,感官评分优于其他品种,在整个贮藏期内均具有较好的品质。通过相关性分析发现,外观指标和内在品质指标有密切内在关联,其中总体感官和大多数指标呈显著或极显著相关性,说明总体感官可以作为评判鲜切莴笋贮藏效果的直观标准。此外,色差 a^* 值与电导率、酶活等其他多项指标存在显著或极显著相关性,该色差值代表了鲜切莴笋翠绿色泽,可以将 a^* 值作为评判鲜切莴笋贮藏外观效果的一种方式。

4 结论

为了确定鲜切莴笋加工适宜性的核心评价指标,对测定指标进行了统计分析、相关性分析和因子评价,确定了总体感官、色差 a^* 值、茎肉硬度和 PPO 这 4 个核心评价指标;为进一步了解各主评价指标对加工品质的影响程度,通过层次分析确定各主评价指标的权重分别为 61.67%、21.18%、11.71% 和 5.45%;为综合比较贮藏品质变化,应用灰色关联分析对 10 个莴笋品种鲜切工后常温贮藏 3 d 过程

中的贮藏品质指标进行排序,结果显示,135#(组合 2019135)、109#(川绿香 2 号)和 63#(新翠竹)的表现较好,经鲜切加工后 15 °C 下贮藏 3 d 内可以保持良好的外观商品性,这一结果为鲜切莴笋的加工和贮藏提供了有益的参考。

参考文献

- [1] ZDRAVKOVI J M, AAMOVI-DJOKOVI G S, MLADENOVI J D, et al. Antioxidant capacity and contents of phenols, ascorbic acid, β -carotene and lycopene in lettuce [J]. Hemijska Industrija, 2014, 68: 193-198.
- [2] LLORACH R, MARTINEZ S A, TOMAS F A, et al. Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole [J]. Food Chemistry, 2008, 108(3): 1028-1038.
- [3] KIM M J, MOON Y, TOU J C, et al. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2016, 49: 19-34.
- [4] 高晗,司俊娜,高愿军,等.鲜切莴苣保鲜技术研究[J].中国农学通报,2008,24(2):115-120.
- [5] 宋晓雪,胡文忠,毕阳,等.纳他霉素对鲜切莴苣表面微生物增殖与生理生化变化的影响[J].食品工业科技,2014, 35(8):336-339,348.
- [6] ZHANG L, WANG Z Q, ZENG S X, et al. Browning mechanism in stems of fresh-cut lettuce [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134575.
- [7] 刘云芬,廖玲燕,段振华,等.不同处理对鲜切莴苣褐变及贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2020,20(4):15-20.
- [8] FAN K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A combination treatment of ultrasound and ϵ -polylysine to improve microorganisms and storage quality of fresh-cut lettuce [J]. LWT- Food Science and Technology, 2019, 113: 108315.
- [9] LEE H J, LUO J, CHOI J Y, et al. Effect of thyme extract on quality characteristics of fresh-cut lettuce during storage [J]. Korean Journal of Food Preservation, 2018, 25(3): 304-310.
- [10] 王羽,云雪艳,李见森,等.PA/PE复合膜对鲜切莴笋保鲜效果的影响[J].食品科学,2015,36(24):343-347.
- [11] LIU H, ZHAO H, YE L, et al. Effects of the combination of phytic acid and vacuum packaging on storage quality of fresh-cut lettuce [J]. Food Science and Technology Research, 2022, 28(1): 45-52.
- [12] TAE-YOUNG HWANG. Quality changes of fresh-cut lettuce with different oxygen permeability of films during storage [J]. Food Science/Microbiology, 2018, 61(1): 25-31.
- [13] 李泽珍,狄建兵,贺雅蓉.微波处理时间对鲜切莴笋贮藏品质的影响[J].山西农业科学,2016,44(6):833-835,847.
- [14] KIM J G, NIMITKEATKAI H, CHOI J W, et al. Calcinated

- calcium and mild heat treatment on storage quality and microbial populations of fresh-cut iceberg lettuce [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2011, 52(4): 408-412.
- [15] ABEELE C V, RAES K, SAMPERS I. Effect of mild heat treatment on browning-related parameters in fresh-cut Iceberg lettuce [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(7): e12906.
- [16] HAN C, ZHAN W, CHEN Q, et al. UV-C irradiation inhibits surface discoloration and delays quality degradation of fresh-cut stem lettuce [J]. LWT, 2021, 147: 111533.
- [17] 王梅,董楠,周罗娜,等.品种和加工工艺对马铃薯泥质构特性的影响[J].食品科技,2018,43(7):164-168.
- [18] 李春红,孙树侠,乞求艳.原料品种对玉米加工特性影响的研究[J].中国粮油学报,2005,20(3):35-38
- [19] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [20] 李泽珍,狄建兵,郝利平.热激处理对鲜切莴笋色泽和质地的影响[J].核农学报,2017,31(10):1955-1962.
- [21] 高佳,朱永清,罗芳耀,等.华南型黄瓜鲜切加工适宜性的对比分析[J].现代食品科技,2018,34(12):45-52.
- [22] 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.
- [23] 李慧,毛胜利,胡鸿,等.不同甜椒品种鲜切加工适宜性评价[J].食品科学,2012,33(15):136-139.
- [24] 王丽,张学杰,李慧,等.不同甜瓜品种鲜切加工特性评价[J].食品科学,2012,33(7):55-58.
- [25] 张学杰.不同胡萝卜品种制汁加工特性的灰色关联度分析评价[J].食品科学,2007,28(7):54-56.
- [26] AIA B, AMA B, WHA B, et al. Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing [J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 117: 170-182.
- [27] SUI X, MENG Z, DONG T, et al. Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2023, 81: 102921.
- [28] 杨霞,舒晓斌,吴广辉,等.贮藏温度对鲜切莴笋品质的影响[J].食品与机械,2011(5):156-158,189.
- [29] TENG Z L, YAGUANG B, ELLEN R, et al. Identification of romaine lettuce (*Lactuca sativa* var. *longifolia*) Cultivars with reduced browning discoloration for fresh-cut processing [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 156: 110931.