

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0674

基于主成分和聚类分析的香菇品种耐贮性评价

闻诗歌, 刘芹, 刘金玲, 贾双杰, 孔维丽

(河南省农业科学院食用菌研究所·黄淮海农业农村部食用菌种质资源评价与利用重点实验室 郑州 450000)

摘要:为科学评价与筛选耐贮香菇品种,本研究以9个香菇品种为对象,于低温条件下贮藏40 d,分别于0、5、10、20、30和40 d测定香菇子实体外观、质量、呼吸强度等11项生理生化指标,采用主成分分析对其中8项指标进行降维处理,提取反映综合贮藏性能的少数主成分。在此基础上,进一步利用系统聚类法,以主成分得分为依据,对不同香菇品种进行客观分类。结果表明,鲜香菇的耐贮性受品种自身生物学特性影响,耐贮品种通常具有子实体硬度大、呼吸强度低、失重率较低等特征。主成分分析将8项指标简化为呼吸强度、硬度和褐变指数3个相互独立的主成分(累计贡献率达82.367%),有效代表了香菇贮藏过程中的核心劣变特征。聚类分析将9个品种划分为“高耐贮”“较耐贮”“不耐贮”3个类别,其中豫香1号品种耐贮性最优。综上,本研究建立的主成分-聚类分析模型,实现了对香菇品种耐贮性的多指标综合量化评价与快速分类,筛选出高耐贮品种豫香1号,可为耐贮品种选育及贮藏实践提供理论依据与参考。

关键词:香菇;耐贮性;主成分分析;聚类分析

中图分类号:S646.1² 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2026)05-093-15

Evaluation of the storage tolerance of shiitake mushroom varieties based on principal component and cluster analysis

WEN Shige, LIU Qin, LIU Jinling, JIA Shuangjie, KONG Weili

(Institute of Edible Fungi, Henan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Germplasm Resources Evaluation and Utilization of Edible Fungi in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate and screen storable shiitake mushroom varieties, nine shiitake mushroom varieties were stored under low temperature for 40 days. Eleven physiological and biochemical indexes including appearance, quality and respiratory intensity of the fruiting body of shiitake mushroom were measured at 0, 5, 10, 20, 30 and 40 days, respectively. A few principal components reflecting the comprehensive storage performance were extracted. On this basis, the systematic clustering method was further used to objectively classify different shiitake mushroom varieties based on the principal component scores. The results showed that the storage tolerance of fresh shiitake mushroom was affected by the biological characteristics of the varieties. The tolerant variety usually had the characteristics of high firmness of fruiting body, low respiration intensity, and slow water loss rate. The eight indicators were simplified into three independent principal components (respiratory intensity, hardness and browning index) by principal component analysis (cumulative contribution rate was 82.367%), which effectively represented the core deterioration characteristics during the storage process of shiitake mushroom. The nine varieties were divided into three categories of "high storage tolerance", "relatively tolerant" and "intolerant" by cluster analysis. Yuxiang No. 1 had the highest comprehensive score and the best storage tolerance. In conclusion, the principal component cluster analysis model established in this study realized multi-index comprehensive quantitative evaluation and rapid classification of the storage tolerance of shiitake mushroom varieties, and the high storage tolerance variety Yuxiang No. 1 was selected, which could provide theoretical basis and reference for the breeding and storage practice of tolerant varieties.

Key words: Shiitake mushroom; Storage stability; Principal component analysis; Cluster analysis

收稿日期:2025-09-19;修回日期:2026-03-10

基金项目:河南省重点研发专项(231111112500);河南省现代农业产业技术体系(HARS-22-08-S);河南省农业科学院应用攻关项目(2024666018)

作者简介:闻诗歌,女,在读硕士研究生,研究方向为食用菌加工。E-mail:1571706335@qq.com

通信作者:孔维丽,女,研究员,研究方向为食用菌育种。E-mail:kongweili2005@126.com

河南作为我国香菇生产第一大省,年产量达312.36万t,占全国总产量的28%,河南香菇产业主要分布于卢氏、西峡等豫西山区,已成为当地乡村振兴的重要支柱产业^[1-2]。香菇因具有风味与营养优势,在国内食用菌消费中占据主导地位,人均年消费量达4.5kg,其中鲜品消费占比超过80%^[3]。然而,鲜香菇组织脆嫩、采后呼吸旺盛,在常温下极易出现失水皱缩、褐变、软化、开伞及腐烂等品质劣变问题,导致商品价值骤降、货架期显著缩短,造成严重的采后损失与资源浪费^[4]。因此,提升鲜香菇的贮藏保鲜能力是减少损耗、保障产业效益的关键,具有重要的经济意义。

为延长香菇货架期,目前主要依赖物理保鲜技术(如低温贮藏)与品种选育2种途径^[5]。其中,选育耐贮性强的品种,并结合适度的冷链条件,被视作一种更为经济且可持续的保鲜策略。前人研究已初步揭示了香菇采后劣变的生理机制,主要包括子实体细胞结构完整性丧失导致的持水能力下降^[6]、微生物侵染引发的营养物质分解^[7],以及较高的呼吸速率^[8]与较强的酶促反应^[9]等。但现有研究多集中于单一品种的保鲜技术或通用劣变机,针对不同香菇品种间耐贮性是否存在系统性差异以及影响香菇贮藏性的关键影响因子,尚缺乏深入比较与定量评价,这限制了香菇耐贮品种的定向选育与针对性保鲜技术的开发。

在作物性状综合评价中,主成分分析能够将多维度指标降维为核心因子,有效提取综合信息;聚类分析则可依据这些核心因子对样本进行客观分类。这2种方法已成功应用于板栗^[10]、黄桃^[11]、西瓜^[12]、花生^[13]等多种农产品的品质分级与耐贮性评价,为种质资源筛选提供了数学模型支持。然而,主成分与聚类分析相结合的综合评价模式,在食用菌尤其是香菇耐贮性研究领域仍鲜有系统报道,具有重要的研究价值。

基于此,本研究以生产中常见的9个香菇品种为试材,在低温贮藏条件下,系统测定其多项采后品质指标。旨在通过主成分分析,筛选影响香菇耐贮性的关键品质因子,并建立综合量化评价模型;利用聚类分析方法,依据耐贮性综合评价结果对不同品种进行客观分类;最终筛选出耐贮性优良的品种,以期香菇耐贮品种选育、品质调控及精准保鲜技术的制定提供理论依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试香菇品种为豫香1号(YX1)、F6、钰森3号(YS3)、德海10号(DH10)、5号(No. 5)、向阳2号(XY2)、9608、七河9号(QH9)、超越2号(CY2)。2024年11月采集自河南省西峡县农户,该地区属于北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候;平均海拔1000m,2024年年平均低温12℃,总降水量1321.6mm。试验于2024年11—12月在河南省农业科学院食用菌研究所实验室中进行。每个品种选择六成熟、大小一致、无病虫害和无机械损伤的香菇,分装于17.5cm×11cm×8cm多孔PET保鲜盒(一共12盒,每个取样时间点2盒,每盒20个,盒壁打孔以保证气体交换),置于(4±1)℃、相对湿度85%的环境下贮藏,分别于0、5、10、20、30、40d取样,测定各项生理生化指标,每处理3次重复,取平均值。

1.2 生理生化指标测定

子实体性状测定:每次每个品种取3个鲜香菇用游标卡尺测量菌盖直径、菌柄直径、菌柄长。

褐变指数:每次每个品种取3个鲜香菇采用手持色差仪(CR-20,杭州彩谱科技有限公司)测定菌盖的 L^* 、 a^* 、 b^* 值并计算褐变指数^[3]。

$$\text{褐变指数} = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \times 100。$$

失重率:采用称重法^[14]测定,每个品种取3个鲜香菇记录第0天的初始质量(M_0),每次取样时测定1次相同样品的质量(M_i),并计算失重率,失重率/% = $\frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100。$

折干率:采用烘干法^[15]对香菇子实体进行干燥,每次每个品种取6个鲜香菇使用电热鼓风恒温干燥箱(101A-2,上海市崇明实验仪器厂)于60℃干燥至恒量,记录子实体鲜质量(M_a)和干质量(M_b),并计算折干率,折干率/% = $\frac{M_b}{M_a} \times 100。$

呼吸强度:采用呼吸强度测定仪(TY-GX10,山东云唐智能科技有限公司)测定香菇子实体呼吸强度^[16]。每次每个品种随机取3个鲜香菇,称取质量后置于4.4L密封罐内,每30min记录1次罐中CO₂浓度,测定3次,并计算呼吸强度。

$$\text{呼吸强度}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}) = \frac{F \times 60 \times \varphi}{22.4} \times \frac{4.4}{W} \times 10^{-6} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: F 为气体流速($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$); φ 为 CO_2 体积分数($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); W 为样品质量(g); T 为测定温度($^{\circ}\text{C}$)。

质构特性:每次每个品种取3个鲜香菇采用质构仪(TA.XT Plus,上海瑞玢智能科技有限公司)测定香菇菌盖硬度和弹性。采用P/36 R圆柱形探头(直径为36 mm)进行测试^[17],测试条件如下:测前速率、测后速率和测试速率分别为5.0、5.0和1.0 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,触发力为6 g,目标模式为形变40%。

参考钱磊等^[18]的方法测定菌盖丙二醛(MDA)含量;参考Guo等^[19]的方法测定香菇子实体几丁质含量;采用北京索莱宝科技有限公司的试剂盒测定香菇子实体多酚氧化酶(PPO)活性(BC0195)、苯丙氨酸代谢酶(PAL)活性(BC0210)。

1.3 数据处理

采用Excel进行数据整理与初步统计;为减少指标间的重叠信息,利用降维的方法对贮藏期间9个品种香菇的失重率、折干率、褐变指数、呼吸强度、弹性、硬度、MDA含量和几丁质含量共8个指标进行评价筛选^[20]。使用DMSAS 1.7.2进行相关性分析、主成分分析和聚类分析;利用Origin Pro 2025、pheatmap和factoextra绘制主成分分析图和热图;采用GraphPad Prism 10软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 鲜香菇贮藏期间外观的变化

由表1可知,9个品种的香菇菌盖、菌柄直径和菌柄长度整体上均随贮藏时间的延长呈先增加后降低的趋势。在整个贮藏期内,YX1的菌盖直径最为稳定,且始终处于较高水平,0 d为53.84 mm,40 d为54.82 mm;而XY2菌盖直径始终较小,0 d为37.06 mm,40 d为38.51 mm。YX1菌柄直径优势明显,0 d为24.14 mm,40 d为22.96 mm,在整个贮藏期内均显著高于其他品种(9608除外);DH10的菌柄直径则始终较低,0 d为11.93 mm,40 d为13.85 mm,其菌柄细弱。在整个贮藏期内,9608的菌柄长始终最大;DH10和CY2菌柄长始终较小,生长潜力明显不足。综上所述,YX1贮藏期整体表现优良,外观形态保持能力最佳;DH10贮藏品质相对较差。

2.1.2 菌盖褐变指数的变化 由图1可知,贮藏期间9个香菇品种的菌盖褐变指数整体均呈先升后降的变化趋势。贮藏0~10 d,各品种褐变指数持续上升,至第10天均达峰值,均显著高于其他各贮藏时间,其中9608褐变指数最大(83.32),F6(80.03)次之,YX3最小(72.81),9608较YX3高14.42%。此后各品种褐变指数均逐渐下降,贮藏至40 d时,各品种褐变指数均降至较低水平,9608为57.47,高于其他品种,而YX1最小(47.52),较9608降低17.31%。从不同品种来看,整个贮藏期间9608的褐变指数整体上处于较高水平,YX1的褐变指数整体较低。综上所述,9608褐变程度较高,YX1褐变程度较轻。

2.2 鲜香菇贮藏期间生理指标的变化

2.2.1 失重率的变化 由图2可知,贮藏期间各品种不同贮藏时间失重率差异均显著,且大部分品种失重率均随贮藏时间延长呈持续上升趋势。贮藏0~20 d,各品种失重率均快速增高,20 d时QH9失重率达35.28%,明显高于其他品种,YX1最低,为18.74%。20~40 d,各品种(9608除外)失重率均缓慢上升,40 d时QH9失重率达46.58%,高于其他品种,而YX1最低,为24.36%。从不同品种间来看,贮藏期间QH9的失重率始终较高;YX1失重率整体偏低。贮藏品质较好。

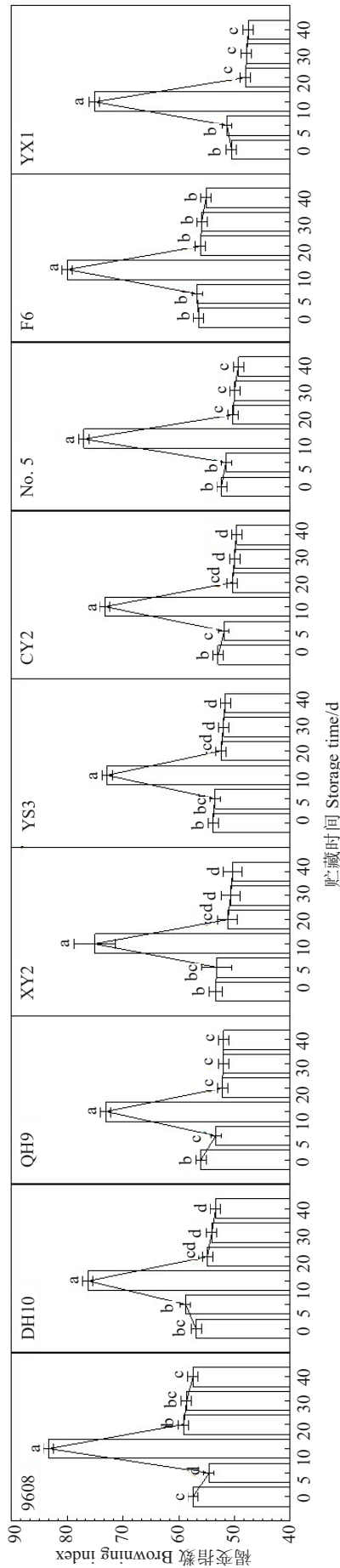
2.2.2 折干率的变化 由图3可知,贮藏期间各品种的折干率均呈波动上升趋势。贮藏40 d时,各品种折干率均显著高于其他各时间,其中YX1的折干率最高,达40.24%;9608最低,为17.63%。整个贮藏期内,YX1折干率整体均较高;9608和DH10整体均偏低。综上,YX1贮藏品质较优,9608和DH10则较差。

2.2.3 呼吸强度的变化 由图4可知,贮藏期间9个香菇品种的呼吸强度均呈先上升后下降的趋势,且均在贮藏20 d最高。贮藏0~20 d,各品种呼吸强度均呈上升趋势,贮藏20 d时9608呼吸强度最高,达176.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,明显高于其他品种;YX1呼吸强度最低,为94.66 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。贮藏20~40 d,各品种呼吸强度逐渐下降,至贮藏40 d时,9608仍最高,为164.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,高于其余品种;YX1仍最低,为88.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。除YX1外,各品种在贮藏20~40 d时呼吸强度均显著高于其他时间。在整个贮藏期间,9608呼吸强度始终处于最高水平,代谢活动最为旺盛;YX1呼吸强度始终最低,代谢水平较低,有利于延缓衰老。综上,9608呼吸代谢最活跃,

表1 不同贮藏时间9个香菇品种子实体性状比较
Table 1 Comparison of fruiting body traits of nine shitake mushroom cultivars under different storage times

贮藏时间 Storage time/d	子实体性状 Fruiting body character	No. 5	F6	YS3	DH10	9608	XY2	YX1	QH9	CY2	mm
0	菌盖直径 Cap diameter	53.07±1.79 a	41.45±2.05 cd	43.38±3.01 bc	44.45±1.58 bc	47.16±2.43 b	37.06±1.64 d	53.84±3.72 a	38.20±1.76 d	47.82±1.52 b	
	菌柄直径 Stalk diameter	16.54±1.39 c	13.22±1.17 d	12.17±2.15 d	11.93±0.52 d	20.95±3.31 b	11.08±1.20 d	24.14±2.59 a	17.67±1.24 c	16.37±1.37 c	
	菌柄长 Stalk length	32.80±3.94 c	25.28±4.13 d	27.91±1.76 d	12.74±0.54 e	43.85±2.82 a	16.24±0.16 e	38.66±4.40 b	23.68±1.49 d	17.07±2.13 e	
5	菌盖直径 Cap diameter	54.10±1.13 a	41.80±2.35 cd	43.90±2.73 bc	45.00±1.91 bc	47.74±2.45 b	37.52±1.53 d	54.49±1.12 a	38.74±2.14 d	48.42±1.93 b	
	菌柄直径 Stalk diameter	16.80±0.65 c	13.37±0.95 d	12.32±2.18 d	12.77±0.96 d	22.13±0.96 b	11.21±1.05 d	24.83±2.42 a	17.89±0.92 c	16.57±1.24 c	
	菌柄长 Stalk length	33.42±1.11 b	25.58±2.28 c	28.10±1.94 c	13.23±0.29 d	44.36±1.93 a	16.44±0.11 d	40.27±1.04 a	25.99±3.05 c	17.79±1.45 d	
10	菌盖直径 Cap diameter	55.09±1.07 a	47.38±2.66 bc	47.66±3.99 bc	51.30±3.06 ab	54.55±1.74 a	42.25±0.46 cd	54.78±3.60 a	40.04±2.09 d	52.74±2.16 ab	
	菌柄直径 Stalk diameter	17.94±1.45 c	18.04±1.29 c	16.88±1.88 c	16.70±2.29 c	22.24±2.84 ab	15.26±0.70 c	24.33±2.08 a	16.14±1.06 c	21.37±2.33 b	
	菌柄长 Stalk length	33.39±4.37 c	29.27±3.00 cd	34.43±2.45 bc	16.30±1.32 f	45.34±0.80 a	21.46±1.05 ef	39.28±6.21 b	24.26±3.33 de	17.38±9.34 f	
20	菌盖直径 Cap diameter	54.37±1.31 ab	47.31±3.55 cd	47.73±5.16 bcd	50.69±2.85 abcd	55.36±1.66 a	40.28±1.42 e	54.45±3.92 ab	46.00±3.99 de	54.12±2.85 abc	
	菌柄直径 Stalk Diameter	16.78±1.69 c	16.16±1.56 c	15.66±1.83 c	15.40±1.98 c	23.05±2.34 ab	14.09±1.69 c	24.68±1.58 a	14.95±1.04 c	21.20±2.20 b	
	菌柄长 Stalk length	33.90±3.30 bc	29.70±4.61 cd	34.53±3.18 bc	25.60±1.91 d	49.14±4.48 a	22.94±0.75 d	39.96±5.58 b	24.59±2.98 d	22.66±2.67 d	
30	菌盖直径 Cap diameter	53.70±2.88 a	46.04±2.46 b	45.94±5.03 b	50.96±3.19 ab	55.68±2.31 a	38.13±1.54 c	55.01±3.55 a	45.55±2.43 b	54.54±3.67 a	
	菌柄直径 Stalk diameter	16.37±1.77 cd	15.54±1.86 d	14.80±1.72 d	14.15±1.58 d	21.10±2.96 ab	13.11±1.85 d	23.82±2.30 a	14.24±0.74 d	19.15±2.49 bc	
	菌柄长 Stalk length	32.40±3.61 bc	29.64±3.17 cd	34.24±3.58 bc	24.28±3.00 d	47.74±4.16 a	24.05±0.91 d	38.42±4.76 b	24.39±2.56 d	22.60±1.06 d	
40	菌盖直径 Cap diameter	52.22±1.86 ab	42.02±1.61 d	43.89±4.87 cd	52.81±3.85 ab	48.56±1.86 bc	38.51±2.02 e	54.82±3.45 a	42.34±2.26 d	54.82±3.66 a	
	菌柄直径 Stalk diameter	15.78±1.59 c	15.20±1.54 c	14.45±1.64 cd	13.85±1.29 cd	20.52±2.34 b	12.66±1.37 d	22.96±1.04 a	13.48±0.47 cd	18.83±1.99 b	
	菌柄长 Stalk length	31.52±3.43 bed	29.48±3.61 cde	34.14±3.67 bc	25.36±1.91 def	45.60±2.95 a	23.13±0.79 ef	37.56±5.38 b	23.09±2.11 ef	22.03±2.11 f	

注: 同行不同小写字母表示品种间在 0.05 水平差异显著。
Note: Different small letters in the same row indicate significant difference among different cultivars at 0.05 level.



注:不同小写字母表示同一品种不同贮藏时间在 0.05 水平差异显著。下同。
 Note: Different small letters within the same variety indicate significant difference among different storage times at 0.05 level. The same below.

图 1 9 个品种香菇贮藏期间菌盖褐变指数的变化
 Fig. 1 Changes in caps browning index of 9 shiitake mushroom cultivars during storage

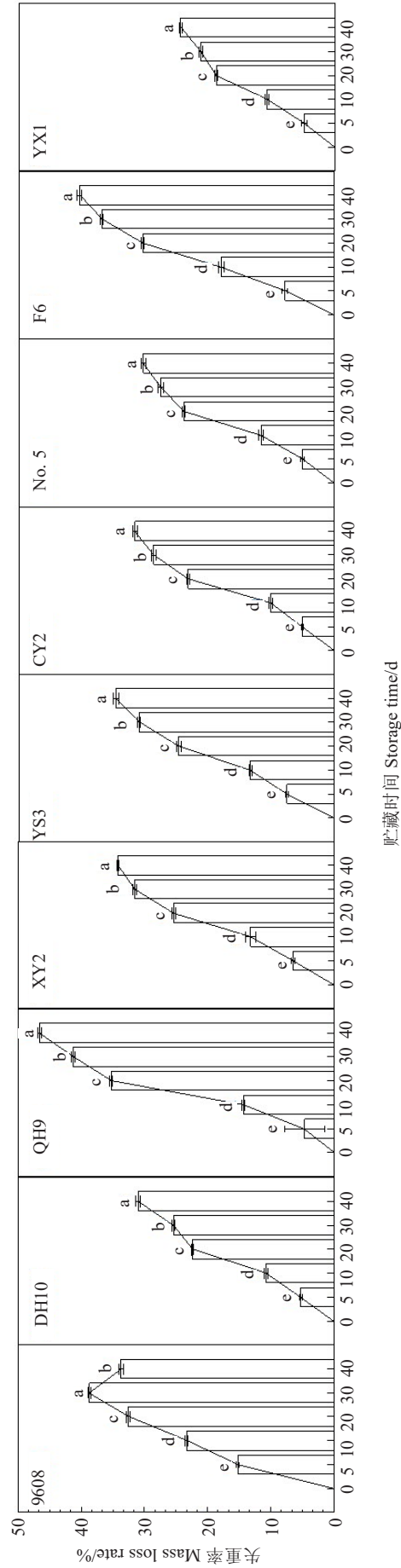


图 2 9 个品种香菇贮藏期间子实体失重率的变化
 Fig. 2 Changes in mass loss rate in fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage

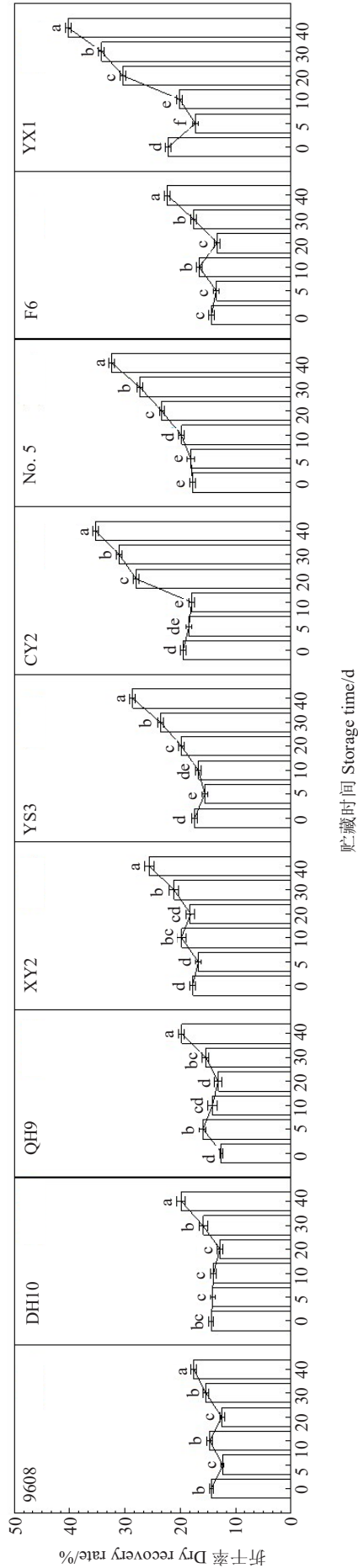


图 3 9 个品种香菇贮藏期间子实体折干率的变化
Fig. 3 Changes in dry recovery rate fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage

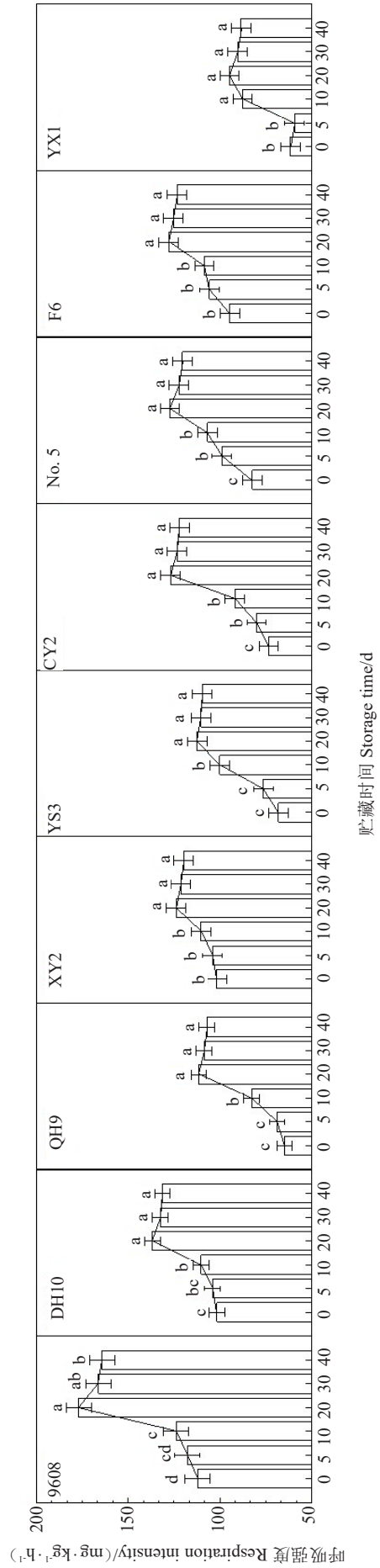


图 4 9 个品种香菇贮藏期间子实体呼吸强度的变化
Fig. 4 Changes in respiration intensity in fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage

耐贮性较差;YX1 呼吸代谢最弱,耐贮性较优。

2.2.4 菌盖质构特性的变化 由图 5-A 可知,贮藏期间 9 个香菇品种的菌盖硬度均随贮藏时间延长呈先升后降趋势,且均在贮藏 10 d 最高,此时显著高于其他贮藏时间。贮藏 0~10 d 时,各品种菌盖硬度均持续上升,10 d 时 DH10 硬度最高,达 65.33 N,高于其他品种;XY2 最低,为 49.64 N。贮藏 10~40 d 时,各品种菌盖硬度均逐渐下降,贮藏 40 d 时,YX1 菌盖硬度最高,为 55.01 N,高于其他品种;9608 最低,为 32.67 N。在整个贮藏期,YX1 和 DH10 硬度始终较高;9608 硬度整体最低。菌盖弹性为第一次压缩后样品回弹的绝对高度(mm),该值越低,表明菌盖结构越致密、质地越好。由图 5-B 可知,贮藏 0~20 d 时 9 个香菇品种菌盖弹性值均贮藏随时间延长呈上升趋势,贮藏 20 d 时均最高,均显著高于 0 d,其中 YX1 菌盖弹性值最低,为 2.28 mm;9608 菌盖弹性值最高,为 3.92 mm。贮藏 40 d 时,YX1 菌盖弹性值仍最低,为 2.10 mm,表明其菌盖结构致密,质地较好;DH10、CY2 和 9608 的菌盖弹性值较高,分别为 3.69、3.60 和 3.58 mm,表明菌盖结构松散,质地较差。在整个贮藏期,DH10、CY2 和 9608 的菌盖弹性值始终较高,YX1 的菌盖弹性值始终较低。综上,YX1 菌盖硬度和弹性均最佳,贮藏品质优良;9608 质地劣变最明显,贮藏品质较差。

2.3 鲜香菇贮藏期间生化指标的变化

2.3.1 MDA 含量的变化 由图 6 可知,贮藏期间 9 个香菇品种的 MDA 含量均呈先上升后缓慢下降的趋势。除 F6 外,均在贮藏 20 d 时最高。贮藏 0~20 d,各品种 MDA 含量持续增加,20 d 时 9608 MDA 含量(b,后同)最高,达 3.92 nmol·g⁻¹,高于其他品种;YX1 最低,为 2.28 nmol·g⁻¹。贮藏 20~40 d,各品种 MDA 含量逐渐下降,至 40 d 时,DH10 的 MDA 含量最高,为 3.70 nmol·g⁻¹;YX1 最低,为 2.10 nmol·g⁻¹。整个贮藏期间,9608 和 CY2 的 MDA 含量始终较高,膜脂过氧化程度最为严重;YX1 的 MDA 含量始终最低。综上,9608 和 CY2 膜脂过氧化程度高,耐贮性较差;YX1 膜脂过氧化程度低,耐贮性较好。

2.3.2 几丁质含量的变化 由图 7 可知,贮藏期间 9 个香菇品种的几丁质含量均随贮藏时间延长呈持续下降趋势。贮藏 0~40 d,各品种几丁质含量(w,后同)均显著降低,其中 9608 降幅最大,从 11.62 mg·kg⁻¹降至 4.12 mg·kg⁻¹,显著降低 64.5%;YX1 降幅最小,从 22.92 mg·kg⁻¹降至 15.73 mg·kg⁻¹,显著

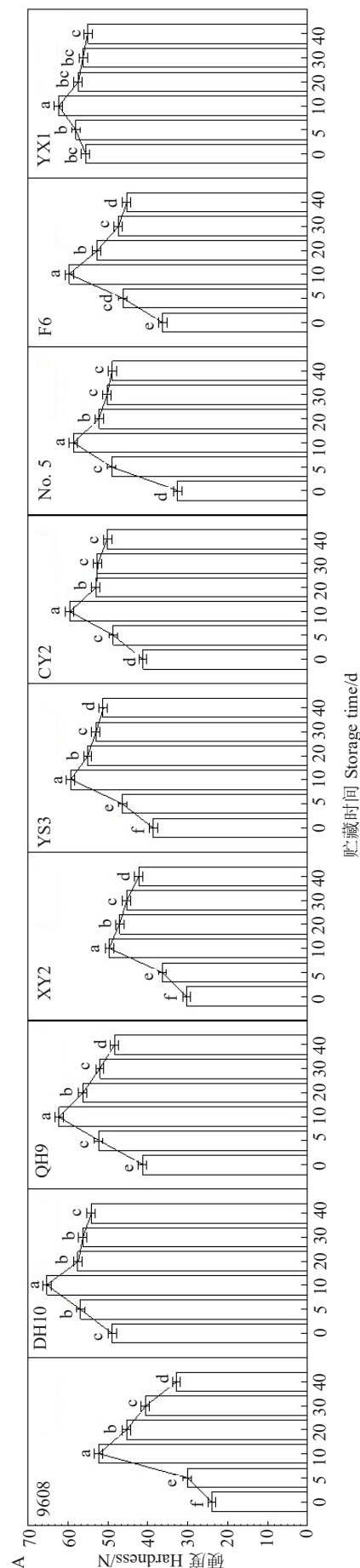


图 5 9 个品种香菇贮藏期间菌盖硬度(A)和弹性(B)的变化

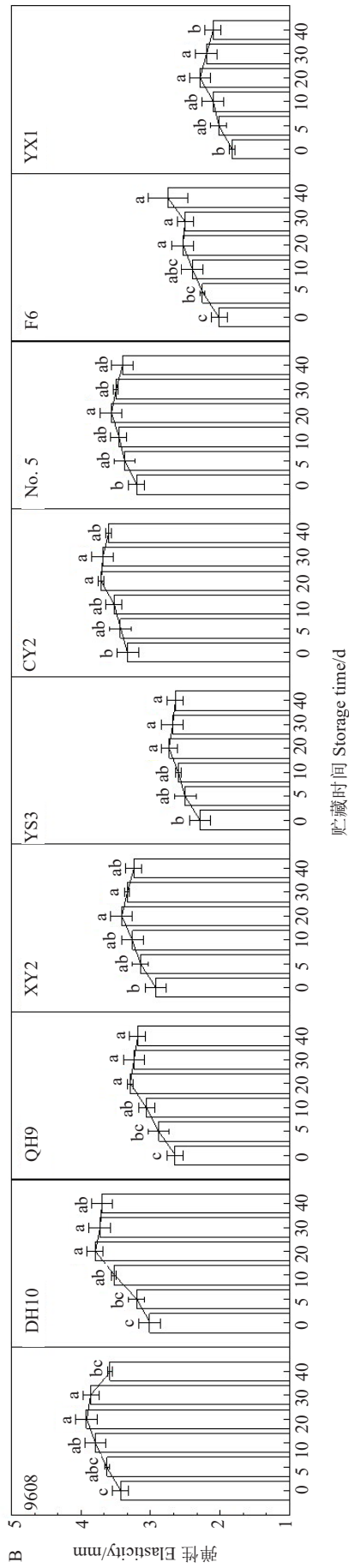


图 5 (续)
Fig. 5 (Continued)

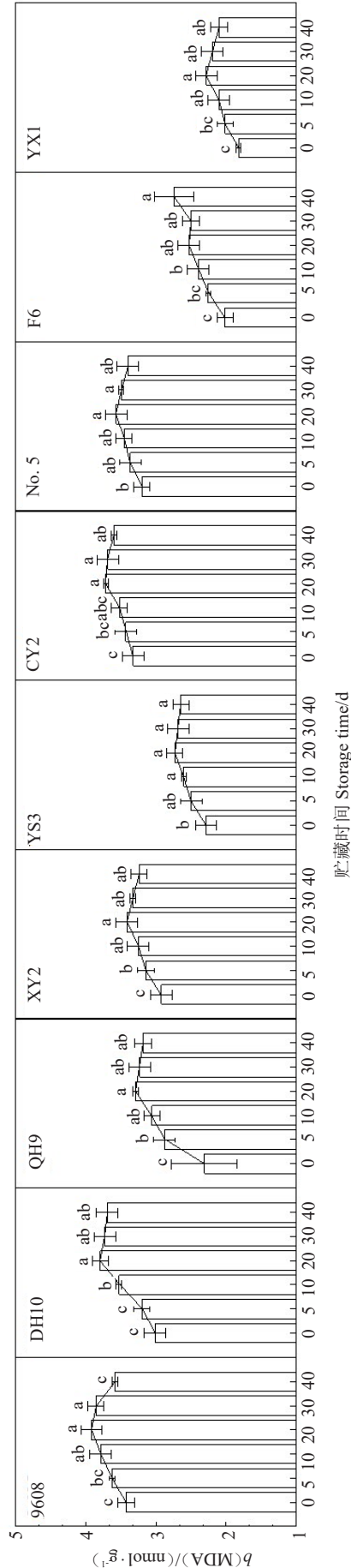


图 6 9 个品种香菇贮藏期间子实体 MDA 含量的变化
Fig. 6 Changes in MDA content during storage in fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage

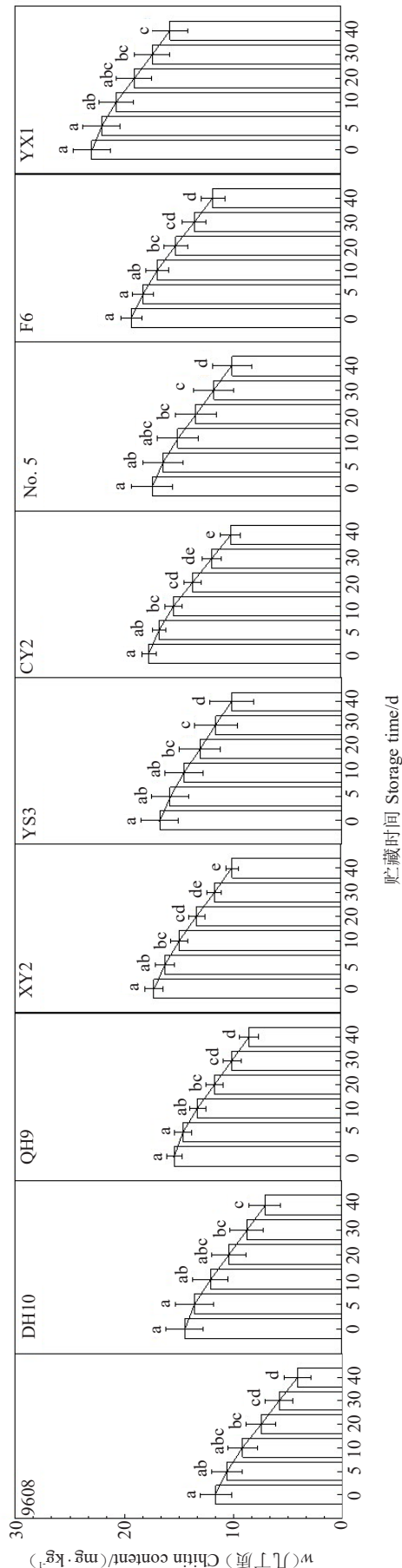


图 7 9 个品种香菇贮藏期间子实体几丁质含量的变化
Fig. 7 Change in chitin content during storage in fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage

降低 31.39%。从不同品种来看,贮藏期间 YX1 的几丁质含量始终高于其他品种;9608 的几丁质含量始终最低。综上,YX1 几丁质降解最慢,细胞壁结构维持能力最强;9608 几丁质降解最快,细胞壁完整性受损最严重,耐贮性较差。

2.3.3 PPO 活性的变化 由图 8 可知,贮藏期间 9 个香菇品种的 PPO 活性均随贮藏时间延长呈持续上升趋势。贮藏 0~20 d,各品种 PPO 活性快速上升,贮藏 20~40 d,上升速率减缓。各品种不同贮藏时间 PPO 活性差异显著。从不同品种来看,贮藏期间 9608 的 PPO 活性始终高于其他品种;YX1 的 PPO 活性始终最低。综上,9608 的 PPO 活性最高;YX1 的 PPO 活性最低,褐变潜能最小。

2.3.4 PAL 活性的变化 由图 9 可知,贮藏期间 9 个香菇品种的 PAL 活性均呈先上升后下降的趋势,但峰值出现时间品种间存在差异。各香菇品种不同贮藏时间的 PAL 活性存在显著差异。在整个贮藏期内,YX1 的 PAL 活性始终低于其他品种,贮藏 40 d 时 PAL 活性为 $23.62 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$;9608 的 PAL 活性始终高于其他品种,贮藏 40 d 时, PAL 活性为 $56.11 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.4 贮藏期间 9 个品种香菇耐贮性指标的相关性分析

9 个品种香菇在贮藏期间耐贮性指标的相关性分析热图如图 10 所示。在贮藏过程中,除 YX1 外,所有品种的贮藏时间与子实体失重率、呼吸强度均呈显著正相关,所有品种贮藏时间与子实体失重率呈显著或极显著正相关,菌盖弹性与贮藏时间、子实体失重率、呼吸强度呈显著或极显著负相关,子实体呼吸强度与失重率呈显著或极显著正相关;子实体几丁质含量与失重率呈显著或极显著正相关,与 MDA 含量呈显著或极显著正相关。除 9608 外,所有品种褐变指数与子实体失重率、折干率均呈负相关,MDA 含量与折干率呈正相关。

2.5 主成分分析

2.5.1 基于品种和贮藏时间的主成分分析 对 9 个香菇品种的耐贮性指标进行主成分分析,结果如图 11 所示。基于品种的主成分分析(图 11-A)显示,主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)的贡献率分别为 41.6%和 23.2%,累计贡献率 64.8%。贮藏期间,各品种在得分图上分布较为分散,其中 9608 和 YX1 分别位于 PC1 正负两端,与其他品种形成明显分离,表明这 2 个品种的品质特性和贮藏特性与其他品种存在较大差异。基于贮藏时间的主成分分析

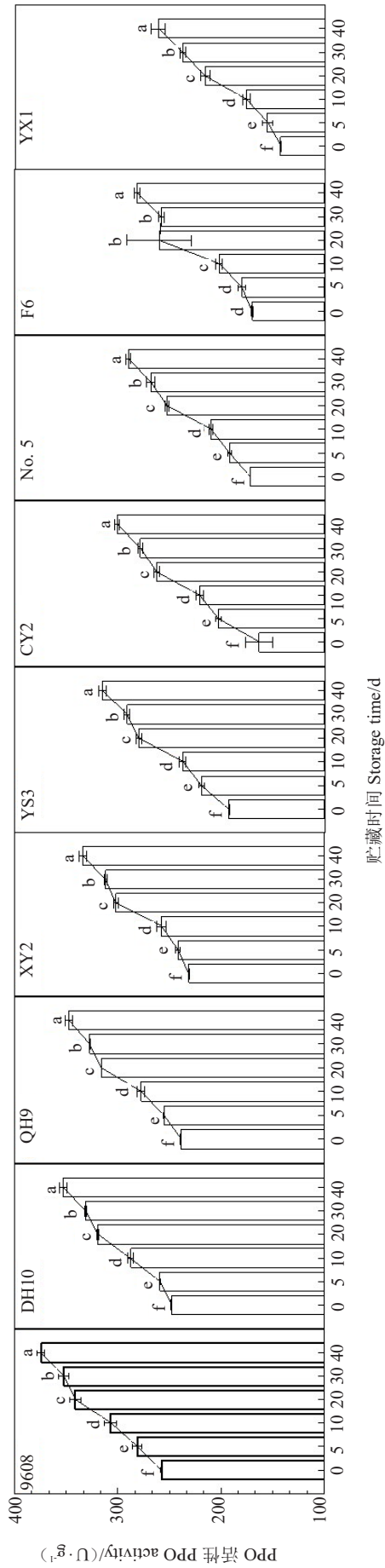


图 8 9 个品种香菇贮藏期间子实体 PPO 活性的变化
Fig. 8 Change of PPO activity in fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage

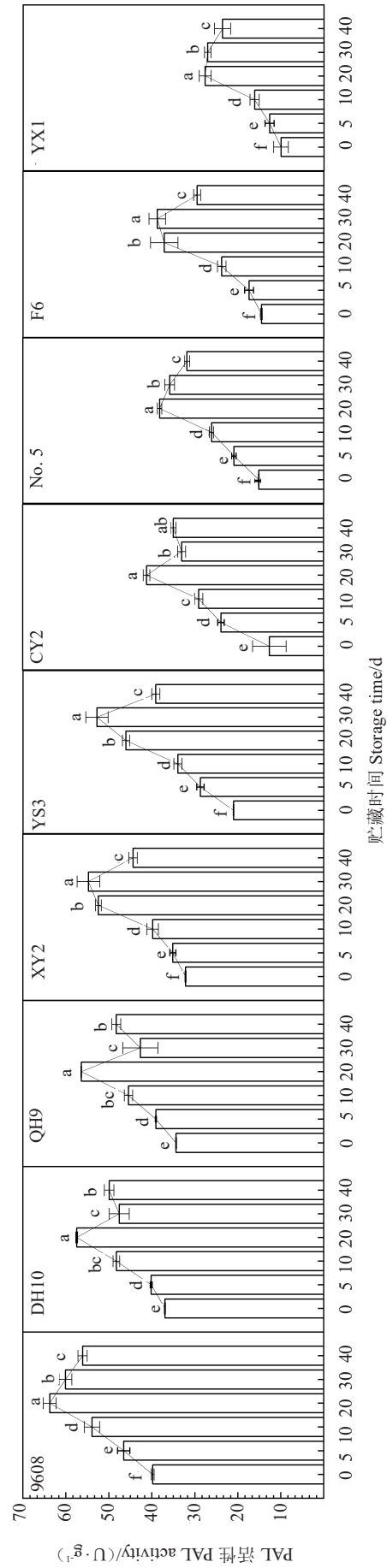
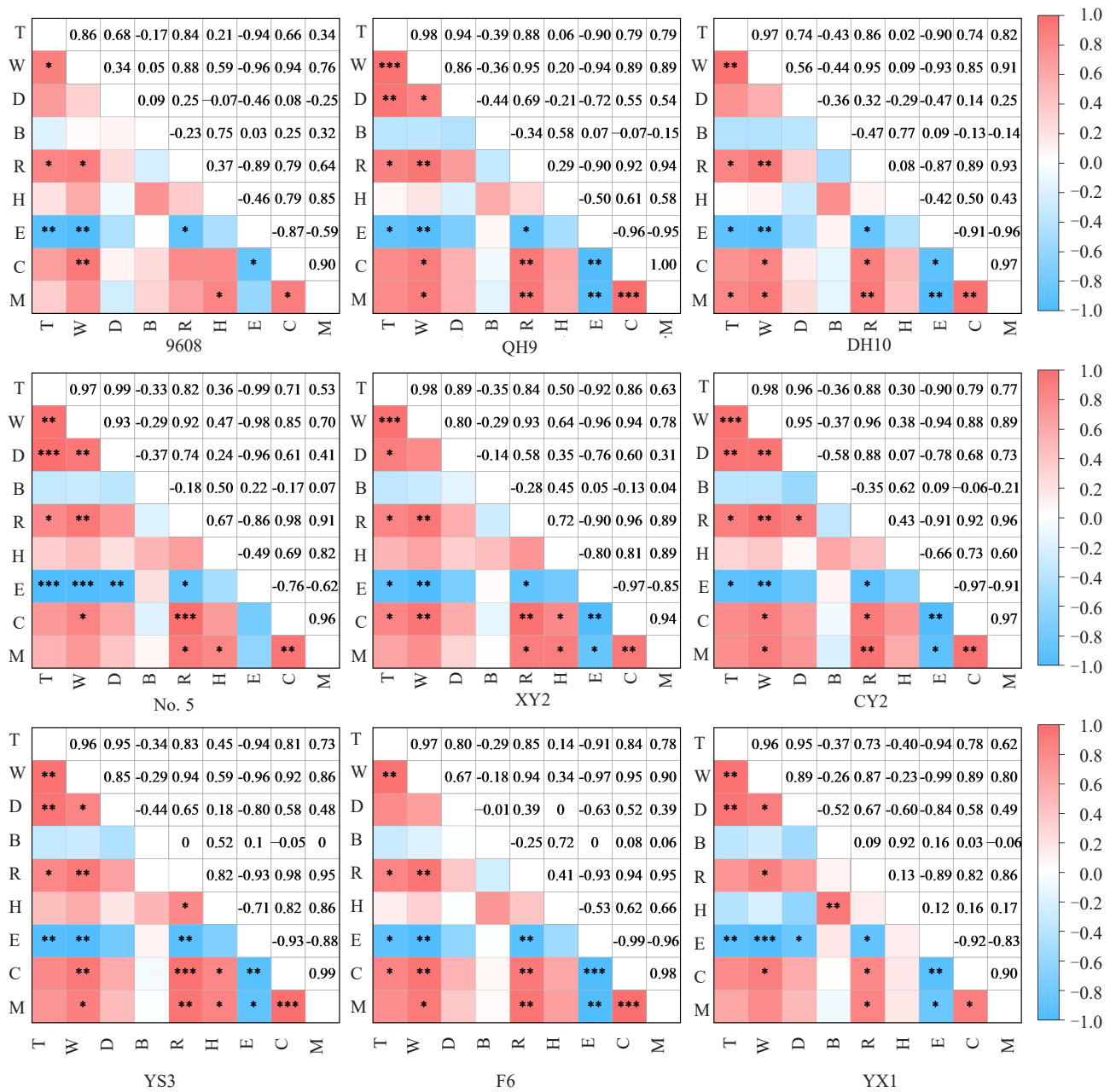


图 9 9 个品种香菇贮藏期间子实体 PAL 活性的变化
Fig. 9 Change in PAL activity in fruiting body of nine shiitake mushroom cultivars during storage



注:T为贮藏时间;W为失重率;D为折干率;B为褐变指数;R为呼吸强度;H为菌盖硬度;E为菌盖弹性;C为几丁质含量;M为MDA含量。*表示在0.05水平显著相关;**和***分别表示在0.01和0.001水平极显著相关。

Note: T is storage time; W is mass loss rate; D is the dry recovery rate; B is browning index; R is respiration intensity; H is cap hardness; E is cap elasticity; C is chitin content; M is the MDA content. * indicates significant correlation at 0.05 level; ** and *** indicates extremely significant correlations at 0.01 and 0.001 levels, respectively.

图10 贮藏期间9个品种香菇耐贮性指标的相关性热图

Fig. 10 Heat map of correlation between storage tolerance indicators of nine shiitake mushroom cultivars during storage

(图 11-B)显示,0~10 d 与 20~40 d 的样本在得分图上呈明显分离,主要沿 PC2 方向区分,而 PC1 方向区分度较小,说明贮藏后期(20~40 d)是香菇子实体生理生化指标变化的关键阶段。这一结果与上述生理特性随贮藏时间变化的规律相一致。

2.5.2 香菇耐贮性指标筛选 主成分分析可以提取出一些相互独立的指标,减少冗余变量^[21]。鉴

于部分指标间存在信息重叠,且酶活性指标(PPO、PAL)与子实体性状指标主要反映过程机制而非最终品质状态,因此本研究选取菌盖褐变指数、子实体失重率、子实体折干率、子实体呼吸强度、菌盖弹性、菌盖硬度、子实体MDA含量和几丁质含量等8项直接表征贮藏品质的核心指标进行主成分分析。根据特征值大于1的原则,共提

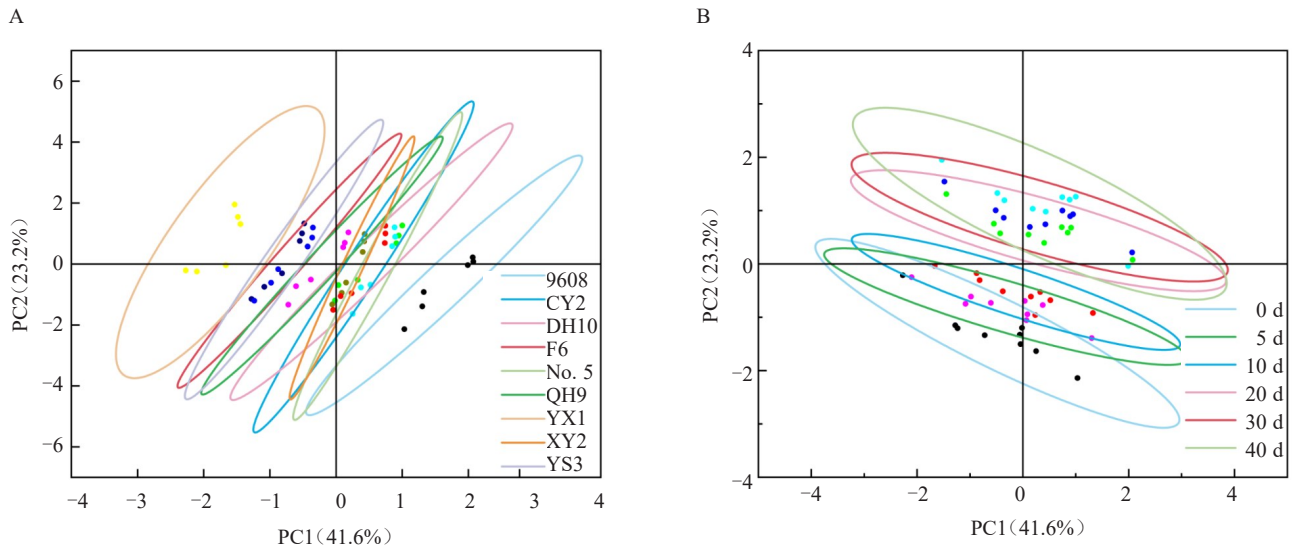


图 11 9 个品种香菇耐贮性指标基于品种(A)和贮藏时间(B)的主成分分析

Fig. 11 Principal component analysis of storability indexes of nine shiitake mushrooms cultivars; based on cultivar (A) and storage time (B)

取 3 个主成分,前 3 个主成分的累计方差贡献率达 82.367%,可以代表大部分评价指标。方差贡献率反映了各指标性状在主成分中的分散程度。方差贡献率越高,说明该主成分在样本数据分析中的作用越重要。由表 2 和表 3 可知,第 1 主成分的初始特征值为 3.329,方差贡献率为 41.616%,主要代表了子实体呼吸强度。第 2 主成分的初始特征值为 1.860,方差贡献率为 23.250%,主要代表了菌盖硬度。第 3 主成分的初始特征值为 1.400,方差贡献率为 17.501%,主要代表了菌盖褐变指数。由相关性分析的结果(图 10)可知,子实体呼吸强度与失重率呈显著或极显著正相关,与菌盖弹性呈显著或极显著负相关;子实体 MDA 含量与几丁质含量呈显著或极显著正相关;子实体失重率与几丁质含量呈显著或极显著正相关,与菌盖弹性呈极显著负相关。可以用一个指标代替其他指标。综合考虑指标的相关性、重要性,选择子实体呼吸强度、菌盖硬度、菌盖褐变指数这 3 个指标作为香菇品质的核心评价指标。

2.6 香菇耐贮性聚类分析

选取 6 个贮藏时间点(0、5、10、20、30、40 d)对 9 个品种的菌盖褐变指数、子实体失重率、子实体折干率、子实体呼吸强度、菌盖弹性、菌盖硬度、子实体 MDA 含量和几丁质含量等 8 项指标进行聚类分析。如图 12 所示,贮藏 0 d 时 9 个香菇品种聚类为 3 类,第 I 类:YX1;第 II 类:QH9、CY2、YS3;第 III 类:9608、XY2、No. 5、F6、DH10。贮藏

表 2 基于品种的主成分分析中各主成分的特征值与方差贡献率

Table 2 Eigenvalues and variance contribution rates of each principal component in the principal component analysis based on cultivar

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%
1	3.329	41.616	41.616
2	1.860	23.250	64.866
3	1.400	17.501	82.367
4	0.833	10.408	92.774
5	0.345	4.309	97.083
6	0.113	1.413	98.496

表 3 基于品种的主成分分析中主成分因子载荷矩阵
Table 3 Principal component factor loading matrix in principal component analysis based on cultivar

指标 Indicator	主成分 Principal component		
	1	2	3
子实体失重率 Mass loss rate of fruiting body	0.751	0.421	0.416
子实体折干率 Drying recovery rate of fruiting body	0.013	0.244	0.751
菌盖褐变指数 Cap browning index	0.074	0.318	-0.868
子实体呼吸强度 Respiration intensity of fruiting body	0.889	0.058	0.055
菌盖硬度 Cap hardness	-0.004	0.852	-0.140
菌盖弹性 Cap elasticity	-0.875	0.381	0.153
子实体几丁质含量 Chitin content of fruiting bodies	-0.459	0.730	0.286
子实体 MDA 含量 MDA content of fruiting body	0.862	-0.333	-0.182

5 d时9个香菇品种聚类为3类,第I类:YX1;第II类:9608;第III类:QH9、XY2、CY2、YS3、No. 5、F6、DH10。贮藏10 d时9个品种香菇聚为3类,第I类:9608、XY2;第II类:DH10、F6、No.5、YS3;第III类:YX1、CY2、QH9。贮藏后期(20~40 d)9个香菇

品种聚为3类,第I类:YX1;第II类:9608;第III类:QH9、XY2、No.5、F6、DH10、CY2、YS3。综上,9个品种按照耐贮性可分为3类,高耐贮品种:YX1;不耐贮品种:9608;较耐贮品种:DH10、XY2、QH9、CY2、No.5、F6、YS3。

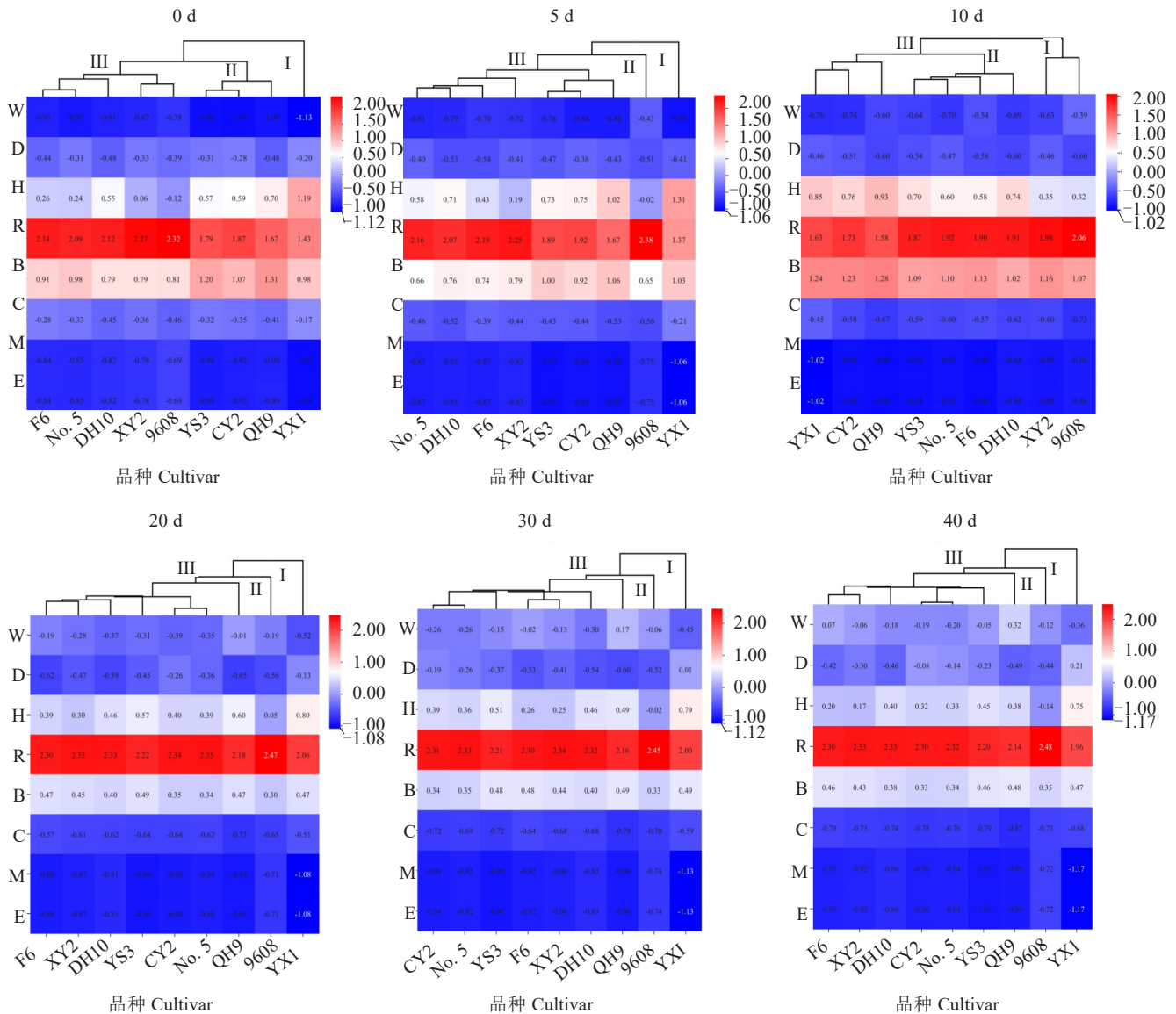


图 12 9个品种香菇不同贮藏期的聚类分析热图

Fig. 12 Heat map of cluster analysis of nine shiitake mushroom cultivars with different storage periods

3 讨论与结论

本研究系统比较了9个香菇品种在采后贮藏过程中的品质与生理变化,明确了品种间耐贮性差异及关键影响因子。菌盖直径、硬度等指标均呈先升后降的趋势,与香菇采后持续的生长发育及后续的代谢衰退有关^[22]。贮藏初期子实体仍可短暂利用体内养分生长,同时酚类物质在多酚氧化酶作用下发生酶促褐变,导致形态指标增加与色泽加深^[23];后期

则因水分与营养物质大量消耗,组织皱缩软化,最终导致香菇整体品质劣变,耐贮性显著下降^[24]。9608在贮藏期丙二醛(MDA)含量始终较高、几丁质含量始终较低,表明其细胞膜脂过氧化程度高、细胞壁结构稳定性差,这可能是其耐贮性弱的核心原因。该结果与丁树东等^[25]的细胞壁完整性维持与食用菌质地品质呈正相关的结论一致。

本研究中,所有品种子实体失重率与呼吸强度呈显著或极显著正相关,与菌盖弹性呈极显著负相

关,说明水分丧失是驱动香菇品质劣变的主要因素。这与高帅平等^[26]的研究结果相一致,其研究表明水分流失是食用菌采后品质下降的首要因素。同时也表明呼吸代谢增强可能会加剧水分流失、加速组织衰老与软化,进而影响菌盖弹性及整体贮藏品质,这与王彪等^[27]在双孢蘑菇中观察到的呼吸跃变与品质衰退同步现象相一致。PPO是催化酚类氧化致使食用菌组织褐变的主要酶类^[28]。PAL是植物体内参与苯丙烷类物质代谢和木质素合成的关键酶^[29]。耐贮品种YX1具有较低的PPO与PAL活性、MDA含量较少以及更好的持水性,说明其氧化代谢与水分流失受到抑制,这与王月等^[30]筛选到的高品质黑木耳具有低氧化酶活性特征具有相似性。

主成分分析结果显示,前3个主成分综合了子实体呼吸强度、菌盖硬度和菌盖褐变指数,累计方差贡献率达82.367%。这一结果与刘仁婵等^[31]对水晶葡萄采后贮藏品质的研究一致,该研究同样采用主成分分析发现,葡萄褐变率、呼吸强度、硬度等指标在贮藏期间变化显著。从贮藏时间看,PCA分析表明贮藏0~10 d与20~40 d的香菇在PC2维度上区分明显,说明贮藏后期(20~40 d)是香菇品质变化的关键期。这一结果与张小玲等^[32]的研究结果一致,其研究表明香菇采后24 d后水分、色泽、质构、挥发性风味物质、游离氨基酸含量以及呈味核苷酸含量均发生显著的变化。聚类分析将9个香菇品种按耐贮性分为3类:耐贮品种(YX1),不耐贮品种(9608),较耐贮品种(DH10、XY2、QH9、CY2、No.5、F6、YS3)。

综上,本研究建立的主成分-聚类分析模型,实现了对香菇品种耐贮性的多指标综合量化评价与快速分类,最终选出高耐贮品种豫香1号(YX1)。豫香1号在整个贮藏过程中,褐变程度较轻,失重率较低,折干率整体均较高,呼吸强度始终最低,且菌盖硬度和弹性均最佳,贮藏品质好;其子实体中MDA含量、PPO活性、PAL活性均较低,几丁质含量始终最高,氧化代谢水平较低;耐贮性最优。可为耐贮品种选育及贮藏实践提供理论依据与参考。

本研究也存在一定局限性:首先,试验仅在单一温湿度条件下进行,未能模拟实际冷链中可能出现的温度波动;其次,品质评价多集中于外观与生理生化指标,未涉及风味物质等指标;最后,所选品种数量虽具代表性,但未能涵盖所有主栽品种,结论的普适性有待进一步验证。

参考文献

- [1] 刘金玲,王昱峰,李臣军,等.河南香菇主产区鲜菇供应周期及影响因素分析[J].中国瓜菜,2025,38(1):95-101.
- [2] 周建方.河南省部分地区香菇市场行情[J].食用菌,2025,47(4):21.
- [3] 牛亚丽,逯腾吉,吴远.乡村振兴背景下跨境电商赋能农产品品牌竞争力提升研究:以西峡香菇为例[J].山西农经,2025,(11):87-91.
- [4] 张波,高婧,王楠楠,等.基于质构仪技术的香菇品质综合研究与评价[J].食品安全质量检测学报,2025,16(14):213-221.
- [5] 张亚茹,杨海龙.食用菌采后贮藏过程中化学成分和代谢酶活性变化研究进展[J].现代食品,2025(11):17-25.
- [6] 孙振英,刘振君,杨灵,等.香菇中特征活性成分分析方法研究进展[J].农产品质量与安全,2025(2):74-79.
- [7] 刘妮妮,王飞宇,孙鹏伟,等.物理活性包装对香菇贮藏品质、呼吸及能量代谢的影响[J].食品工业科技,2024,45(24):301-310.
- [8] LI Y J, DING S D, KITAZAWA H, et al. Storage temperature effect on quality related with cell wall metabolism of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) and its modeling [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 32: 100865.
- [9] 张瑾.基于收缩、褐变及贮藏特性的香菇脉冲强光联合控湿干燥研究[D].江苏镇江:江苏大学,2021.
- [10] 于艳奇,杨明源,吕春茂,等.基于主成分及聚类分析的板栗品质综合评价[J].食品工业科技,2025,46(2):280-291.
- [11] 周慧娟,高晓飒,叶正文,等.基于相关性和时序分析的鲜食黄桃安全贮藏期的确定及品质预测[J].食品与机械,2022,38(8):144-151.
- [12] 鲁梦情,高哲,李婷,等.西瓜贮藏期品质变化与综合评价[J].北方园艺,2025(8):35-41.
- [13] 胡廷会,吕建伟,成良强,等.花生耐贮藏性评价及鉴定指标筛选[J].花生学报,2025,54(2):190-196.
- [14] 翟梦杰,杜敏如,林晖,等.不同包装方式对农贸市场模式销售鲜香菇品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(2):235-242.
- [15] 冯泽耀,徐爱玉,周清,等.香菇品种比较试验[J].中国果菜,2025,45(3):55-60.
- [16] 黄欣莉,韩延超,陈杭君,等.1-甲基环丙烯通过调控香菇能量代谢抑制其采后褐变[J].食品科学,2022,43(13):192-198.
- [17] 赵晶,杨燕,李新荣,等.陇南市适栽香菇品种筛选试验[J].食用菌,2023,45(5):32-33.
- [18] 钱磊,曾祥,陈天泰,等.海藻酸钠与滑菇肽复合涂膜对香菇保鲜效果的影响[J].食品研究与开发,2024,45(24):42-49.
- [19] GUO Y X, CHEN X F, GONG P, et al. Effect of shiitake mushrooms polysaccharide and chitosan coating on softening and browning of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) during post-harvest storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022(218):816-827.
- [20] 刘芹,闻诗歌,刘阳,等.15种常见食用菌营养成分分析及评价[J].中国瓜菜,2024,37(11):67-74.
- [21] 王春芳,柳洪入,刘晨霞,等.基于主成分和聚类分析的不同

- 品种鲜食甜玉米营养品质评价[J]. 农产品加工, 2025(10): 54-59.
- [22] 赵哲坤, 吴林凤, 荣成博, 等. 延长鲜切香菇货架期的保鲜工艺[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3369-3382.
- [23] 丁树东, 李艳杰, 郭玉曦. 外源亚精胺处理对香菇木质化及相关酶活力的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 226-232.
- [24] 李湘利, 刘静, 魏海香, 等. 食用菌的干燥技术的研究进展[J]. 耕作与栽培, 2019, 40(6): 207-213.
- [25] 丁树东, 李艳杰. 食用菌子实体采后软化机制的研究进展[J]. 中国果菜, 2019, 39(11): 13-19.
- [26] 高帅平, 崔国梅, 李顺峰, 等. BOPP膜处理对香菇采后褐变及抗氧化性质的影响[J]. 北方园艺, 2024(14): 86-94.
- [27] 王彪, 王霆, 俞建民, 等. 双孢蘑菇采后冷链流通过程品质劣变及活性氧代谢规律[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 375-388.
- [28] LIU H Q, LI J J, LI W, et al. The mechanism of preharvest treatment of polysaccharide from *Lentinus edodes* residue on inhibiting browning of postharvest *Agaricus bisporus*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025(227): 113608.
- [29] LIU Y L, WANG Y R, DU M R, et al. Polypropylene packaging alleviates the quality deterioration of *Lentinus edodes* through antioxidant system and phenylpropane pathway[J]. 2024 (58): 103602.
- [30] 王月, 任梓铭, 王宇微, 等. 黑木耳菌株农艺性状与胞外酶相关性分析[J]. 西北园艺, 2025(11): 58-61.
- [31] 刘仁婵, 吉宁, 王瑞, 等. 基于主成分和相关性分析不同自发气调袋包装对水晶葡萄采后贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 31-40.
- [32] 张小玲, 许小路, 邓冰, 等. 香菇采后冷藏期间品质及微生物菌群的变化[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 192-201.