杨惜媛, 穆歆迪, 苏婷婷, 等. 留胚米储藏品质变化、评价模型及其与挥发性化合物的相关性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 375−386. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010158
YANG Xiyuan, MU Xindi, SU Tingting, et al. Storage Quality Variation, Evaluation Model, and Correlation with Volatile Compounds of Embryo Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 375−386. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010158

·贮运保鲜·

留胚米储藏品质变化、评价模型及其与挥发性化合物的相关性

杨惜媛[1], 穆歆迪[1], 苏婷婷[1], 马丽雪[1], 于巧如[1], 王立东[1,2], 翟爱华[1,2], 王柏峻[4], 姚　笛[1,2,3,*], 王长远[1,2,*], 张丽媛[1,2,3]

（1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;
2.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319;
3.黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319;
4.黑龙江省北大荒米业集团有限公司, 黑龙江哈尔滨 150036）

摘　要: 为科学评价留胚米储藏期间的品质变化情况，将两种材料真空包装的留胚米于 25 ℃ 和 4 ℃ 储藏 300 d，分析其脂肪酸值、食味、质构等指标的变化规律。基于主成分分析和熵权法构建品质评价模型，同时，利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术测定挥发性化合物，进一步探讨指标间的相关性。结果表明：随储藏时间的延长，脂肪酸值、硬度和咀嚼性显著升高（P<0.05），弹性和食味值显著下降（P<0.05），脂肪酶和丙二醛呈先升后降趋势；基于 7 个核心指标建立留胚米的品质评价模型为：Y=0.0803×咀嚼性+0.1170×弹性+0.1221×香气+0.1182×食味值综合评分+0.2215×丙二醛+0.2234×脂肪酶活+0.1175×脂肪酸值。根据模型获得的综合得分对不同储藏时期的留胚米进行品质分级，储藏 0 d 为Ⅰ级，储藏 60 d 为Ⅱ级，储藏 120 d 为Ⅲ级，储藏 180 d 后为Ⅳ级。共检测出 53 种挥发性化合物，其中醛类、酮类、酸类等化合物在储藏 300 d 时大量出现。2,2,6-三甲基辛烷与脂肪酸值、脂肪酶、丙二醛、硬度、咀嚼性、b^*和ΔE 呈显著负相关（P<0.05），与食味值和品质评价综合得分呈显著正相关（P<0.05），其次是 2-正丙基呋喃和 3-甲基十一烷。研究结果可为留胚米的品质评价和储藏方式的选择提供理论依据。

关键词: 留胚米, 储藏品质, 评价模型, 挥发性化合物
中图分类号: TS213.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0375−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010158
本文网刊:

Storage Quality Variation, Evaluation Model, and Correlation with Volatile Compounds of Embryo Rice

YANG Xiyuan[1], MU Xindi[1], SU Tingting[1], MA Lixue[1], YU Qiaoru[1], WANG Lidong[1,2], ZHAI Aihua[1,2], WANG Baijun[4], YAO Di[1,2,3,*], WANG Changyuan[1,2,*], ZHANG Liyuan[1,2,3]

（1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2.National Coarse Cereals Engineering Research Center of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
3.Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China;
4.Heilongjiang Beidahuang Rice Industry Group Co., Ltd., Harbin 150036, China）

收稿日期: 2025−01−17
基金项目: 国家重点研发计划（2021YFD2100902）。
作者简介: 杨惜媛（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 13555517359@163.com。
*** 通信作者:** 姚笛（1980−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: yd13845991700@163.com。
王长远（1976−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: byndwcy@163.com。

Abstract: In order to evaluate the quality changes of embryo rice during storage, the embryo rice with vacuum packaging of two kinds of materials was stored at 25 and 4 ℃ for 300 d and the changes in the fatty acid value, taste, texture, and other indexes were analyzed. A quality evaluation model was constructed based on principal component analysis and entropy weight method. The volatile compounds were determined using headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) to further explore the correlation between the indexes. The results showed that with prolonged storage time, fatty acid value, hardness, and chewiness increased significantly (P<0.05), springiness and taste value decreased significantly (P<0.05), and lipase and malondialdehyde (MDA) first increased and then decreased. A quality evaluation model of embryo rice was established based on seven core indexes: Y=0.0803×chewability+0.1170×springiness+0.1221×flavor+0.1182×taste value comprehensive score+0.2215×malondialdehyde+0.2234×lipase activity+0.1175×fatty acid value. According to the comprehensive scores obtained by the model, the quality of the embryo rice at different storage periods was classified as grade I after 0 d of storage, grade II after 60 d of storage, grade III after 120 d of storage, and grade IV after 180 d of storage. A total of 53 volatile compounds were detected, among which aldehydes, ketones, acids, and other compounds appeared in large quantities after 300 d of storage. There was a significant negative correlation between 2,2,6-trimethyloctane and fatty acid value, lipase, malondialdehyde, hardness, chewability, b^*, or ΔE (P<0.05) and a significant positive correlation between the taste value and quality evaluation comprehensive score (P<0.05), followed by 2-n-propyl furan and 3-methylundecane. These results provide a theoretical basis for quality evaluation and storage method selection of embryo rice.

Key words: embryo rice; storage quality; evaluation model; volatile compound

留胚米又称胚芽米，是留胚率在 80% 以上的大米制品[1]。相较于精米，留胚米含有丰富的脂肪、蛋白质、维生素 B1 以及大量的不饱和脂肪酸和必需氨基酸，在保持良好食用品质的同时，能够保留更多的营养成分[2−4]。留胚米经过碾磨加工，使胚芽失去糠粉层的保护，且米胚中脂肪含量较高，加上自身的呼吸作用可引发一系列化学反应，使得留胚米在储藏过程中的品质下降速度加快[5]。

为了解留胚米储藏过程中的品质变化，研究多聚焦于不同储藏方式对留胚米品质变化的分析，包括低温储藏[6]、气调储藏[7]、化学储藏[8]、微波处理[9−10]等。严松等[11]验证了调控储藏温度在保持留胚米品质方面优于调整气调方式。留胚米的储藏条件多采用常温或冷藏，而包装方式也在一定程度上影响留胚米的储藏品质。万志华等[12]发现真空包装留胚米的储藏稳定性较好[13]。目前，真空包装多选用塑料复合薄膜。聚丙烯、聚酰胺、聚乙烯（PP/PA/PE）作为市场上常见的三层复合包装材料，凭借其良好的阻隔性和机械性能广泛应用于食品保鲜领域[14]。在此基础上，定向聚丙烯和流延性聚丙烯（Opp/Cpp）作为一种韧性较好的复合包装材料，通过优化材料结构进一步提升了抗穿刺性和耐低温性能，成为高要求包装场景的重要选择[15]。包装材料的迭代升级，可为满足留胚米多样化、高品质的保鲜需求持续赋能。

分析不同储藏温度和包装材料影响留胚米的品质变化规律，有助于评价留胚米的品质劣变程度。然而，影响留胚米储藏品质的相关指标较多，这对留胚米的品质评价带来一定挑战。基于数理统计方法挖掘品质指标间的关联并建立品质评价模型是一种有效的解决途径，该方法已在板栗[16]、樱桃[17]等果蔬的品质评价中得到广泛应用。张书龙[18]基于集成学习对储藏小麦品质评价模型进行了深入研究，这为储藏粮食的品质评价开辟了一个新路径。然而，目前缺乏留胚米的品质评价体系，基于主成分分析和熵权法的留胚米品质评价模型未见相关报道。

香气是影响留胚米储藏品质的核心要素，其动态变化与挥发性化合物（VOCs）的种类及含量密切相关。分析留胚米储藏前后挥发性化合物的变化对于其品质评价至关重要[19]。顶空固相微萃取-气相色谱-质谱（HS-SPME-GC-MS）联用技术具有灵敏度高、抗干扰能力强、能够准确分析挥发性物质的优点[20,21]。Choi 等[22]对黑米储藏期间的挥发性化合物进行分析，发现储藏时间和储藏温度对黑米挥发性化合物的产生具有显著影响。Li 等[23]对不同稳定化米糠的分析发现随着储藏时间的延长，产生苦味的相关挥发性化合物增加。而目前针对留胚米储藏期间的品质指标与挥发性化合物的相关性研究鲜有报道。

综上，尽管现有研究已初步揭示了储藏条件对留胚米品质变化的影响，但仍存在品质评价体系单一，挥发性化合物与品质指标关联未明等问题。因此，本研究选用两种材料真空包装的留胚米分别于 25 ℃ 和 4 ℃ 下进行储藏试验，探讨其影响储藏品质指标的变化规律，基于主成分分析和熵权法建立留胚米品质评价模型，并对不同储藏时期留胚米的品质得分进行计算和分级。进一步对影响香气品质的挥发性化合物进行分析，深入探究留胚米的品质相关指标及综合评价得分与挥发性化合物之间的相关性，研究结果可为留胚米的品质评价及储运保鲜提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

留胚米（龙粳 91） 留胚率 90%，于 2023 年 11 月新鲜碾磨，北大荒米业集团公司提供；包装材料 PP/PA/PE、Opp/Cpp 青岛惯步天下塑业公司；

乙醇、氢氧化钾、酚酞等　均为分析纯，辽宁泉瑞试剂有限公司；丙二醛（MDA）试剂盒　苏州格锐思生物科技有限公司。

HWS-80 恒温恒湿培养箱　上海森信实验仪器有限公司；UV1800 紫外可见光分光光度计　上海瀚艺仪器有限公司；TMS-PRO 质构仪　美国 Food Technology Corporation 公司；米饭食味计　日本佐竹化学机械工业株式会社；CS-580 分光测色仪　杭州彩谱科技有限公司；DB-WAX 气相色谱柱（15 m×0.53 mm×0.25 μm）　安捷伦科技有限公司；50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相萃取头　美国苏伯尔科公司；TRACE1300 气相色谱仪、ISQ 系列单四极杆质谱仪　赛默飞世尔科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　留胚米处理及储藏条件　将留胚米以每袋 100 g 的规格，分别采用聚丙烯、聚酰胺、聚乙烯（PP/PA/PE）和定向聚丙烯、流延性聚丙烯（Opp/Cpp）两种复合包装材料进行真空包装处理，真空度为 60 Pa。包装后样品分别置于温度 25 ℃ 和 4 ℃，湿度 50%±5% 培养箱中储藏，每隔 60 d 测定各品质指标，总储藏周期为 300 d。

1.2.2　包装材料的参数测定　参照 GB/T 1038.1-2022《塑料制品薄膜和薄片 气体透过性试验方法》[24] 和 GB/T 16928-1997《包装材料试验方法 透湿率》[25] 测定两种包装材料的氮气透气量、透光率和透湿率。

1.2.3　脂肪酸值、脂肪酶活、丙二醛测定　脂肪酸值参照 GB/T 20569-2006《稻谷储存品质判定规则》进行测定。脂肪酶活参照 GB/T 5523-2008《粮油检验 粮食、油料的脂肪酶活动度的测定》进行测定；丙二醛（MDA）含量参照试剂盒说明书进行测定。

1.2.4　质构特性分析　取 50 g 米样，米水比例 1∶2，蒸煮 30 min，保温 30 min。取出米饭放置平皿中在质构仪上进行测定。参数设定：TPA 模式，圆盘探头，测试前速度为 30 mm/min，测试速度和测试后速度为 60 mm/min，起始力为 0.1 N，形变量为 30%。

1.2.5　食味值测定　称取米样 30 g，清洗后以米水比 1∶1.35 浸泡 30 min，随后蒸煮 30 min，并保温 10 min。保温结束后，将米饭轻轻搅拌至松散，放入冷却箱 20 min 后取出，静置 100 min。取 8.0 g 米饭样品放入压片机中正反两面各压 10 s，将压好的米饼放入米饭食味计中，测定米饭食味值。

1.2.6　色差测定　采用 CS-580 型分光色差仪测定，开机预热 15 s 后进行白板、黑板的校正；校正结束后即可进行色差的测定。在色差测定中，L^*值从 0 到 100 由黑变白，a^*值正负代表偏红偏绿，b^*值代表黄色和蓝色，ΔE代表总色差。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \qquad 式（1）$$

1.2.7　品质评价模型的建立　以 72 组留胚米样品的 16 个指标数据构建 72×16 矩阵，利用 SPSS 27.0 对数据进行标准化处理后进行主成分分析，计算特征值和主成分方差贡献率，获得评价矩阵。进一步对正、反、适度指标进行标准化处理[26]，然后利用熵权法计算权重。计算公式如下：

正向指标：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \qquad 式（2）$$

负向指标：

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \qquad 式（3）$$

适度指标：

$$y_{ij} = 1 - \frac{\left|x_{ij} - x_0\right|}{\max\left|x_{ij} - x_0\right|} \qquad 式（4）$$

其中，x_{ij} 为第 i 个评价对象下的第 j 个评价指标所对应的初始数据（i=1, 2, …, m; j=1, 2, …, n）；$\min(x_j)$、$\max(x_j)$为第 j 个评价指标的最小值和最大值；y_{ij} 为 x_{ij} 经过标准化处理后得到的数据；x_0 为确定的指标，一般为该指标的理想值。

通过式（5）计算评价指标的比重，式（6）计算熵值，式（7）、（8）分别计算变异程度和权重[27]。

计算比重：

$$P_{ij} = \frac{y_{ij} + 0.0001}{\sum_{i=1}^{m}(y_{ij} + 0.0001)} \qquad 式（5）$$

计算熵值：

$$e_j = -\frac{1}{\ln_n}\sum_{i=1}^{n} p_{ij}\ln(p_{ij}) \qquad 式（6）$$

计算变异程度：

$$g_j = 1 - e_j \qquad 式（7）$$

计算权重：

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^{m} g_j} \qquad 式（8）$$

式中，P_{ij} 为第 i 个评价对象下的第 j 个评价指标所对应的比重；e_j、g_j、w_j 分别为第 j 个评价指标的熵值、变异程度和权重。

根据各指标权重建立留胚米的品质评价模型，根据模型获得的综合得分判断留胚米的品质，并对不同储藏时期留胚米的品质进行分级评价。

1.2.8　挥发性化合物的测定　参考 Choi 等[22] 的方法，并略作修改。精确称取 2 g 参照方法 1.2.4 蒸熟的留胚米样品，密封于 20 mL 顶空萃取瓶中，在 40 ℃ 下平衡 5 min，于 60 ℃ 下进行 HS-SPME 采样，富集时间 40 min。

GC 条件：DB-Wax 毛细管柱。升温程序：进样口温度 260 ℃，柱温初始温度为 40 ℃，保持 5 min，后以 5 ℃/min 的速度升温至最终温度 230 ℃，载气为氦气（纯度>99.999%），流速为 1.0 mL/min，采用不分流模式。

MS 条件: 接口温度 260 ℃, 离子源温度 200 ℃, 电子能量 70 eV, 溶剂延迟时间 3 min, 电离模式为 EI, 全扫描模式, 质量范围 m/z 35.0~600.0。

定性分析: GC-MS 图谱经过质谱解卷积处理后, 与 NIST 数据库对照, 选择匹配度大于 75 的化合物进行分析; 在相同色谱条件下, 计算目标物的保留指数, 并与 NIST 数据库 RI 比对, 以对目标物进行鉴定。

定量分析: 根据各挥发性化合物的峰面积归一法计算各化合物的相对含量。

1.3 数据处理

利用 SPSS 27.0 进行单因素 ANOVA 方差显著性分析(P<0.05); 通过 SIMCA 14.1 进行 PCA、OPLS-DA 和 VIP 分析; 使用 Origin 2024、Chiplot 绘制折线图, 并进行相关性分析。每组实验重复三次, 结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 两种包装材料性能参数的对比分析

由表 1 可知, PP/PA/PE 的透气量和透光率显著高于 Opp/Cpp(P<0.05), 透湿率无显著差异, 说明 Opp/Cpp 包装内部与环境中的气体交换量较少, 可能对留胚米的呼吸作用影响较小; 较低的透光率可抑制光氧化反应, 减缓脂质氧化速率。然而, 包装材料的阻隔性能还与测试环境及复合材料所用粘合剂等因素有关。两种材料性能参数的比较可为留胚米品质变化分析提供参考, 而具体效果还需通过实际实验进行评价。

表 1 两种包装材料参数

Table 1 Parameters of two kinds of packaging materials

包装材料	透气量 (cm^3/m^2·24 h·0.1 MPa)	透光率(%)	透湿率 (g/m^2·24 h)
PP/PA/PE	4.72±0.16^a	30.70±1.05^a	0.06±0.01^a
Opp/Cpp	3.55±0.34^b	16.73±1.62^b	0.08±0.01^a

注: 同一列不同小写字母代表两组之间差异显著(P<0.05)。

2.2 留胚米储藏期间脂质氧化参数的变化

脂肪酸是脂肪的水解产物, 是反映留胚米品质好坏的重要指标[28]。由图 1A 可知, 随储藏时间的延长, 脂肪酸值逐渐升高。25 ℃ 下的脂肪酸值上升速度较 4 ℃ 快。在 25 ℃ 下, PP/PA/PE 和 Opp/Cpp 组的脂肪酸值由 6.23 mg/100 g KOH 分别上升到 77.61、60.66 mg/100 g KOH; 4 ℃ 下, PP/PA/PE 和 Opp/Cpp 组分别上升到 47.07、42.41 mg/100 g KOH。参照 GB/T 20569-2006《稻谷储存品质判定规则》, 以样品脂肪酸值(35 mg/100 g KOH)为界限, 超过该界限即认定其陈化变质[29]。相比于徐鹏程等[30] 的研究, 两种包装的留胚米保质期均得到延长。在 25 ℃ 下, PP/PA/PE 在 180 d 时达 52.96 mg/100 g KOH, 超出界限, 因此认定保质期为 120 d。同理, Opp/Cpp 25 ℃ 组的保质期为 180 d。4 ℃ 下 PP/PA/PE 和 Opp/Cpp 组保质期分别为 180、240 d。由此可见, Opp/Cpp 包装能够延缓脂肪酸值上升的速度, 而脂肪酸值的升高与留胚米的脂肪酶活力密切相关。

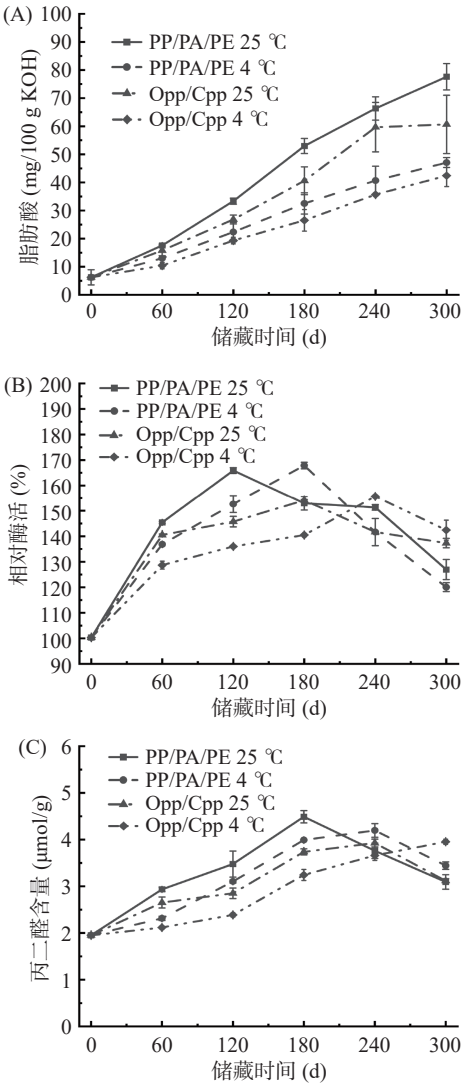


图 1 留胚米储藏期间脂肪酸值、脂肪酶活、丙二醛含量的变化

Fig.1 Changes of fatty acids, lipase and malondialdehyde during storage

注: (A)脂肪酸值; (B)脂肪酶相对酶活; (C)丙二醛含量。

由图 1B 可知, 储藏期间的脂肪酶活均先升高后降低, 主要原因是储藏初期内源酶的激活和微生物产生的外源酶增加。后期降低与脂肪被消耗有关, 这与王春莲等[31] 研究结果一致。25 ℃ 下, PP/PA/PE 包装组在 120 d 达到最大值 165.88%, Opp/Cpp 组在 180 d 达到最大值 155.14%。4 ℃ 下, PP/PA/PE 组在 180 d 时达到最大值, 而 Opp/Cpp 在 240 d 达到最大值。另外, Opp/Cpp 组较 PP/PA/PE 的变化幅度小的原因可能是 Opp/Cpp 材料具有良好的阻隔性, 可影响水分含量, 而脂肪酶催化反应需要水的参与。

MDA 是储粮过氧化脂类物质的降解产物, MDA 含量变化可反映留胚米的储藏程度[32]。由图 1C 可知, MDA 的变化趋势与脂肪酶活基本一致。PP/PA/PE 组在 25 ℃ 下储藏到 180 d 达最大值 4.49 μmol/g,

4 ℃ 下储藏到 240 d 达最大值。Opp/Cpp 组在 25 ℃ 下储藏到 240 d 达到最大值 3.93 μmol/g，在 4 ℃ 下随储藏时间延长呈上升趋势。MDA 含量升高主要由于脂肪酸发生过氧化反应并降解产生，而 MDA 后续降低则是因为其具有挥发性，可以气体形式释放[31]。

2.3　留胚米储藏期间质构特性的变化

评价留胚米的质构特性需依靠质构仪来模仿人的咀嚼，其中硬度、弹性和咀嚼性是质构特性的重要指标[33−34]。由表 2、表 3 可知，随储藏时间的延长，硬度和咀嚼性显著升高（P<0.05），弹性显著降低（P<0.05）。PP/PA/PE 组在两个温度下储藏 300 d 后硬度分别增加了 84.67% 和 84.32%，Opp/Cpp 组则增加了 84.18% 和 81.29%。硬度的增加可能与淀粉分子的结晶程度不断增加有关，并且脂质氧化产生的脂肪酸与直链淀粉结合也会导致硬度的增加[35]。PP/PA/PE 组在两个温度下储藏 300 d 后弹性分别下降了 47.76% 和 41.11%，Opp/Cpp 组为 51.89% 和 39.68%。米饭弹性的变化情况与王若兰等[36] 研究结果相似，这与水分含量的降低有关。PP/PA/PE 组在两个温度下储藏 300 d 后咀嚼性分别增加了 74.23% 和 82.83%，Opp/Cpp 组为 63.86% 和 66.23%。咀嚼性代表咀嚼吞咽一个具有弹性的样品所需要的能量[37]，弹性越大，咀嚼性越低，因此其变化趋势与弹性变化相反。综合来看，硬度和弹性在 25 ℃ 下变化速度较 4 ℃ 更快，两个包装材料中，PP/PA/PE 组随储藏时间延长，质构参数变化更大。

2.4　留胚米储藏期间食味值的变化

食味值是判断留胚米储藏品质的重要指标[38]。由图 2 可知，储藏 0 d 留胚米的光泽、口感、完整性、香气和味道分别为 7.64、7.65、7.97、7.62、7.98，食味值综合评分为 79.75。随储藏时间的延长，各组食味指标均有所降低，其中 Opp/Cpp 25 ℃ 组的综合评分下降最快，300 d 时为 48.24，下降最慢的是 Opp/Cpp 4 ℃ 组，300 d 为 55.41。图 2A 和图 2B 的变化趋势较平缓，说明随储藏时间的延长，色泽和口感变化较小。由图 2C~图 2E 可知，留胚米的完整性、香气和味道评分随储藏时间的延长下降明显。图 2F 为食味值综合评分，可见储藏 240 d 后的评分小于 60 分，尤其在 25 ℃ 储藏组，较高温度导致留胚米的水分损失较大，在蒸煮时难以吸水膨胀，使其弹性降低，硬度增加，因此口感粗糙，缺乏光泽，食味品质降低，这与毕文雅等[39] 的研究结果一致。

2.5　留胚米储藏期间色差的变化

图 3 反映了留胚米储藏过程中 L^*值、a^*值、b^*值

表 2　留胚米在 PP/PA/PE 包装下质构特性的变化

Table 2　Changes of textural properties of embryo rice in PP/PA/PE packaging

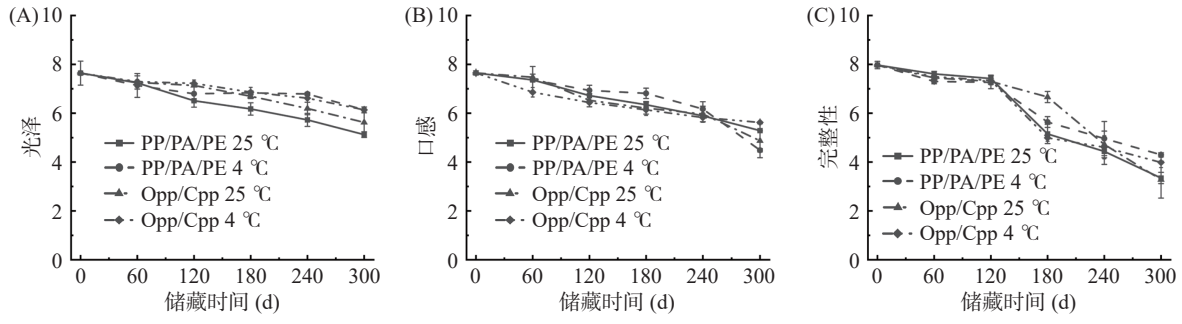
温度(℃)	指标	0 d	60 d	120 d	180 d	240 d	300 d
25	硬度(N)	7.16±0.01^{Ae}	18.80±1.01^{Ad}	24.48±1.45^{Ac}	29.57±0.63^{Bc}	38.04±0.91^{Ab}	46.67±11.41^{Aa}
	弹性(mm)	5.57±0.17^{Aa}	4.44±0.32^{Aa}	3.74±0.12^{Ab}	3.66±0.16^{Ab}	3.17±0.16d^{Ac}	2.91±0.07^{Ad}
	咀嚼性(mJ)	34.25±1.30^{Ae}	37.28±2.39^{Ad}	51.48±2.20^{Acd}	62.22±1.34^{Abc}	73.89±4.23^{Ab}	132.85±22.72^{Aa}
4	硬度(N)	7.16±0.01^{Ae}	16.69±1.11^{Ad}	22.15±0.76^{Ac}	27.06±1.22^{Abc}	34.71±5.41^{Ab}	45.67±9.65^{Aa}
	弹性(mm)	5.57±0.17^{Ae}	5.02±0.17^{Bd}	4.50±0.20^{Bd}	3.91±0.07^{Ac}	3.74±0.12^{Bb}	3.28±0.04^{Ba}
	咀嚼性(mJ)	34.25±1.30^{Ad}	43.18±1.91^{Bc}	53.57±5.11^{Ac}	88.51±0.45^{Bb}	97.23±4.74^{Bb}	199.52±28.96^{Ba}

注：同一行不同大写字母代表相同时间不同温度差异显著（P<0.05），不同小写字母代表同一温度下不同时间差异显著（P<0.05），表3同。

表 3　留胚米在 Opp/Cpp 包装下质构特性的变化

Table 3　Changes of textural properties of embryo rice in Opp/Cpp packaging

温度(℃)	指标	0 d	60 d	120 d	180 d	240 d	300 d
25	硬度(N)	7.16±0.01^{Ae}	16.04±0.10^{Ad}	21.00±0.85^{Acd}	24.99±1.47^{Abc}	28.08±8.25^{Ab}	45.27±0.40^{Ba}
	弹性(mm)	5.57±0.17^{Aa}	4.71±0.11^{Bb}	4.11±0.18^{Bb}	3.84±0.05^{Ac}	3.74±0.09^{Ad}	2.68±0.06^{Ae}
	咀嚼性(mJ)	34.25±1.30^{Ae}	43.62±1.15^{Ad}	50.12±3.45^{Ac}	54.69±2.94^{Ac}	66.30±3.35^{Ab}	94.76±3.30^{Aa}
4	硬度(N)	7.16±0.01^{Af}	15.37±0.31^{Be}	20.34±0.39^{Ad}	23.32±0.64^{Ac}	26.42±0.73^{Ab}	38.27±2.31^{Aa}
	弹性(mm)	5.57±0.17^{Aa}	5.14±0.05^{Ab}	4.93±0.06^{Ac}	4.71±0.11^{Bcd}	3.82±0.05^{Ae}	3.36±0.24^{Bf}
	咀嚼性(mJ)	34.25±1.30^{Ae}	34.29±0.10^{Be}	51.35±3.42^{Ad}	58.7±1.73^{Ac}	69.63±2.68^{Bb}	101.43±2.63^{Ba}



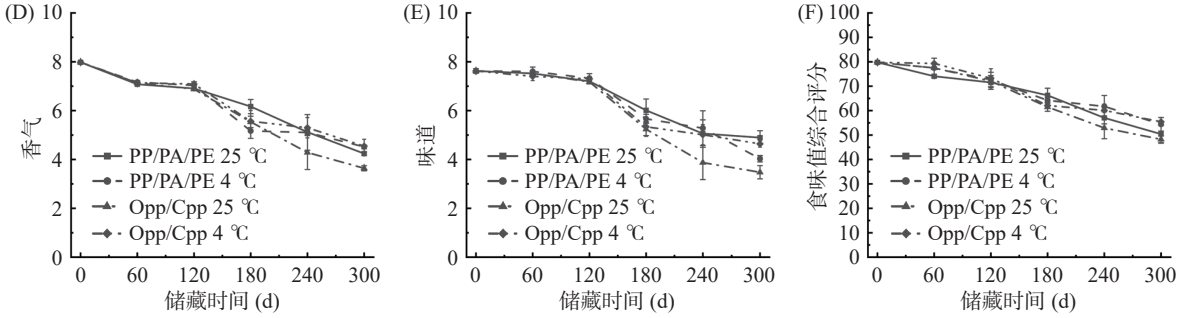


图 2　留胚米储藏期间食味值的变化

Fig.2　Changes of food taste value of embryo rice during storage

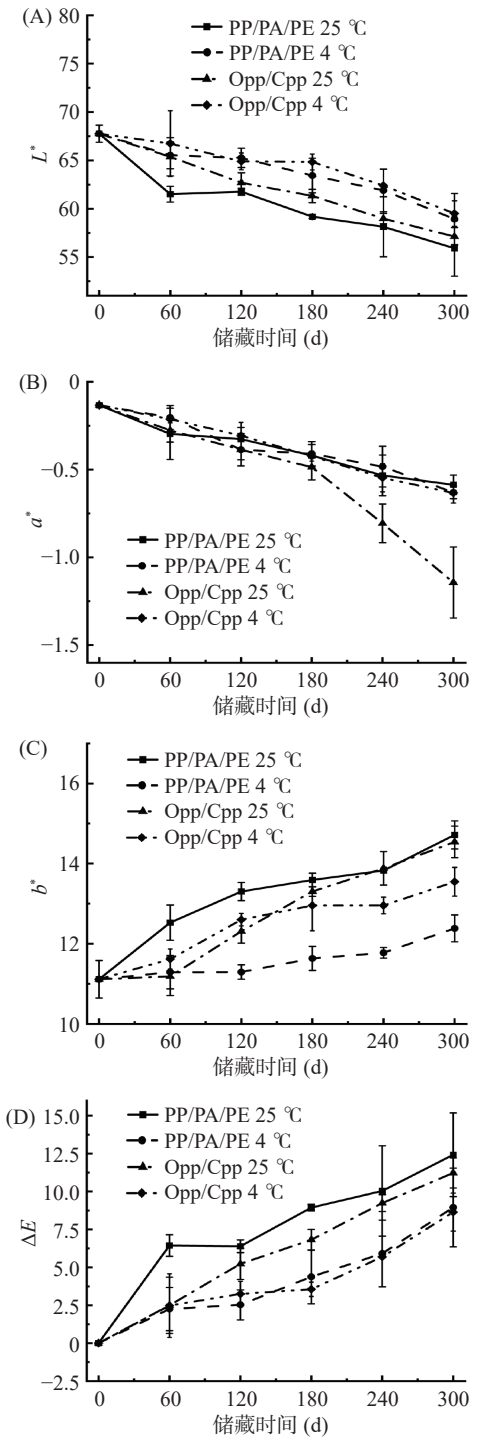


图 3　留胚米储藏期间颜色的变化

Fig.3　Changes of color of embryo rice during storage

和总色差 ΔE 的变化情况。L^*值从 0(黑色)到 100(白色)代表亮度,值越大越亮。a^*值红色为正值,绿色为负值。b^*值黄色为正,蓝色为负。随着储藏时间的延长,所有样品的 L^*值均逐渐降低,PP/PA/PE 组下降最快,25 ℃ 组的 L^*值下降速度快于 4 ℃,色泽明显变暗,这与顾佳缘等[40] 研究结果一致。随储藏时间的延长,a^*值在储藏过程中均呈下降趋势,而 b^*值呈上升趋势。Opp/Cpp 4 ℃ 组的 a^*值下降最快,PP/PA/PE 25 ℃ 组的 b^*值增加最快。这可能与脂质氧化聚合及类胡萝卜素降解并生成黄色聚合物有关,产生黄化现象,这与姚亚静等[41] 的发现一致。ΔE 值可评价样品的色差变化程度[42]。随储藏时间的延长,25 ℃ 下,PP/PA/PE 组的 ΔE 值由 6.44 升高到 12.42,Opp/Cpp 组由 2.50 升高到 12.22。综上,随储藏时间的延长,不同处理组的留胚米颜色均产生显著变化。从包装材料上看,Opp/Cpp 组的色差变化趋势较 PP/PA/PE 组小。

2.6　留胚米储藏品质评价模型的建立

如前所述,多个因素都能够在一定程度上反映留胚米的储藏品质,但过多的评价指标会增加模型计算的复杂性并降低评价过程的效率。因此,通过主成分分析筛选能够有效反映留胚米储藏品质信息的因子。相关矩阵的主成分分析表明:第一主成分的特征值为 12.578,占总方差的 78.612%,第二主成分的特征值为 6.534,占总方差的 1.045%,累计方差贡献率大于 79%,为可接受范围,基本涵盖了原始指标的主要信息。两个主成分的载荷矩阵如表 4 所示,载荷值代表各指标与主成分之间的相关系数,其绝对值越大代表该指标对主成分的贡献越大。第一主成分中香气、弹性、食味值综合评分、脂肪酸值和第二主成分中丙二醛、脂肪酶活、咀嚼性具有较高的载荷值绝对值。因此,选择这 7 项指标作为留胚米的主要评价指标。

进一步根据筛选的核心指标,构建了评价矩阵,具体见表 5。表 5 展示了 7 个评价指标在储藏过程中的变化情况,为品质评价模型的构建及品质分级提供了数据支撑。

为科学量化评价指标对留胚米储藏品质的影响程度,采用熵权法对指标进行客观赋权。指标的权重由变异程度决定,变异程度越大,熵值越小,权重越

表 4　主成分的载荷矩阵

Table 4　Load matrix of two principal components

指标	主成分1	主成分2
脂肪酸值	−0.945	0.057
硬度	−0.926	−0.088
ΔE	−0.924	0.144
b^*	−0.842	0.136
丙二醛	−0.835	0.355
咀嚼性	−0.74	−0.365
脂肪酶活	−0.58	0.709
a^*	0.864	0.143
光泽	0.909	−0.022
味道	0.91	0.259
L^*	0.911	−0.144
口感	0.918	0.118
完整性	0.929	0.211
香气	0.953	0.142
弹性	0.957	−0.146
食味值综合评分	0.96	0.156

表 5　评价矩阵

Table 5　Evaluation matrix

储藏时间(d)	咀嚼性（mJ）	弹性（mm）	香气	食味值综合评分	丙二醛（μmoL/g）	脂肪酶活（%）	脂肪酸值（mg/100 g）
0	34.25	5.57	7.98	79.75	1.95	100.31	6.23
60	39.59	4.83	7.13	77.07	2.50	137.87	14.20
120	51.63	4.32	6.98	72.37	2.95	150.08	25.46
180	66.03	4.03	5.61	63.50	3.86	153.85	38.14
240	76.76	3.62	4.95	57.94	3.89	147.58	50.08
300	132.14	3.06	4.24	52.10	3.65	138.44	56.94

高。由表 6 可知，丙二醛和脂肪酶活的权重最高，对应的变异程度明显高于其他指标，反映其作为脂肪氧化的核心指标，对留胚米的品质变化影响最为显著。咀嚼性权重最低，主要原因是其改变为渐进过程，变异程度小，故权重较低。食味值综合评分和香气权重中等，表现为感官品质的逐渐恶化，变异程度适中，符合其对综合品质的直接影响。通过熵权法对各评价指标贡献程度的客观量化，符合数据驱动的建模逻辑。因此，利用核心评价指标的权重系数建立留胚米的储藏品质评价模型：Y=0.0803×咀嚼性+0.1170×弹性+0.1221×香气+0.1182×食味值综合评分+0.2215×丙二醛+0.2234×脂肪酶活+0.1175×脂肪酸值。其中，Y 为品质综合得分。

表 6　评价指标的权重分析和计算结果

Table 6　Weight analysis and calculation results of evaluation index

指标	熵值	变异程度	权重
咀嚼性	0.8866	0.1134	0.0803
弹性	0.8348	0.1652	0.1170
香气	0.8276	0.1724	0.1221
食味值综合评分	0.8331	0.1669	0.1182
丙二醛	0.6872	0.3128	0.2215
脂肪酶活	0.6846	0.3154	0.2234
脂肪酸值	0.8340	0.1660	0.1175

2.7　留胚米储藏品质的分级

通过加权计算获得各储藏时间点的指标贡献值及品质综合得分，结果如表 7 所示。综合得分从储藏 0 d 的 0.8825 降至 300 d 的 0.1191，呈线性递减趋势，直观反映了留胚米随储藏时间延长，品质持续劣变。

表 7　不同储藏时期留胚米的综合评价得分

Table 7　Comprehensive evaluation scores of embryo rice in different storage period

项目	0 d	60 d	120 d	180 d	240 d	300 d
咀嚼性	0.0803	0.0759	0.0660	0.0542	0.0454	0.0000
弹性	0.1170	0.0824	0.0588	0.0454	0.0261	0.0000
香气	0.1221	0.0943	0.0894	0.0448	0.0234	0.0000
食味综合评分	0.1182	0.1067	0.0866	0.0487	0.0249	0.0000
丙二醛	0.2215	0.1583	0.1067	0.0025	0.0000	0.0268
脂肪酶活	0.2234	0.0667	0.0158	0.0000	0.0262	0.0643
脂肪酸值	0.0000	0.0326	0.0786	0.1047	0.0559	0.0279
综合得分	0.8825	0.6169	0.5020	0.3003	0.2020	0.1191

基于品质综合得分，参考林蝉蝉等[43]的方法和 GB/T 20569-2006《稻谷储存品质判定规则》制定品质分级标准，对留胚米储藏实际情况进行等级划分和语义解释，如表 8 所示。储藏 0 d 为Ⅰ级，留胚米品质良好，色泽鲜亮，气味优良，宜存；储藏 60 d 内为Ⅱ级，留胚米品质较好，色泽、气味正常，较为宜存；储藏 120 d 为Ⅲ级，留胚米品质较差，色泽偏暗，气味略差，轻度不宜存；储藏 180 d 之后为Ⅳ级，留胚米严重劣变，表面发黄，有异味，重度不宜存。该分级体系通过量化得分与品质等级的对应关系，为留胚米储藏过程中的品质监控和货架期管理提供了一定的参考。

表 8　留胚米储藏品质分级

Table 8　Storage quality classification of embryo rice

得分	等级
Y≥0.88	Ⅰ
0.61≤Y<0.88	Ⅱ
0.3≤Y<0.61	Ⅲ
Y<0.3	Ⅳ

2.8　留胚米储藏前后挥发性化合物分析

留胚米储藏前后的气味发生了显著变化，这与挥发性化合物的产生及其含量变化有关[44]。挥发性化合物的相对含量如图 4 所示，与储藏 0 d 相比，储藏 300 d 时的留胚米碳氢类化合物相对含量减少，醛类、酸类化合物增加。在相同储藏温度下，PP/PA/PE 组中其他化合物增加。其他化合物（二氧化碳、一氧化二氮等）主要为异味物质，相同包装材料下，25 ℃储藏条件下产生的异味物质更多，说明储藏温度高易产生异味。

检测到的 53 种挥发性化合物见表 9，分别为醇类（5 种）、酚类（3 种）、醛类（6 种）、酸类（2 种）、酮类

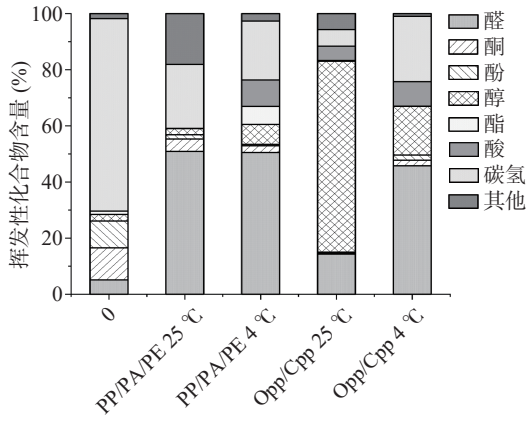


图 4 留胚米储藏前后挥发性化合物含量变化

Fig.4 Changes of volatile compounds in embryo rice before and after storage

(8 种)、酯类(3 种)、碳氢(烷烃 10 种、烯烃 1 种、芳香烃 9 种)和其他(6 种)。碳氢化合物种类最多,储藏 300 d 时的相对含量较 0 d 少,由于多数碳氢化合物的阈值较高[45],其对留胚米风味的影响相对较小。据报道,醇类、醛类、酮类和酯类化合物的形成与脂质代谢密不可分[46]。醇类和醛类物质主要来源于脂质氧化过程,由亚油酸、油酸等脂肪酸在氧化过程中的氢过氧化物经 β-断裂反应产生,赋予稻米甜味或果香等芳香味[47]。根据《化合物嗅觉阈值汇编》[48] 查找到甲硫醇(0.1~1 μg/m^3)、庚醛(0.1~1 μg/m^3)、正己醛(1~10 μg/m^3)、壬醛(1~10 μg/m^3)和正辛醛(3.6~79 ng/m^3)等出现在储藏 300 d 的化合物阈值较低,所以这类物质对留胚米整体风味贡献较大。酮是不饱和脂肪酸氧化降解的产物[49],苯乙酮在储藏 300 d 出现。乙酸甲酯、乙酸丙酯在 300 d 出现,表明脂肪酸氧化产生的醇发生了酯化反应,可导致留胚米香味发生改变。酸是通过脂质水解产生的,留胚米在储藏后期容易酸败,导致酸类化合物出现[50]。综上,包装材料和储藏温度都会影响留胚米储藏期间挥发性化合物的产生。相同温度下,大多数挥发性化合物在 PP/PA/PE 包装组相对含量较高。相同包装材料下,挥发性化合物在 25 ℃ 下相对含量更高。储藏末期挥发性化合物的产生伴随着留胚米的品质劣变。

表 9 留胚米储藏前后挥发性化合物的相对含量

Table 9 Relative contents of volatile compounds in embryo rice before and after storage

序号	分类	化合物	CAS号	RI	RT (min)	相对含量(%)				
						0 d	PP/PA/PE 25 ℃	PP/PA/PE 4 ℃	Opp/CPP 25 ℃	Opp/Cpp 4 ℃
1	醇类	2-乙基-1-丁醇	97-95-0	1310	6.09	2.37	−	0.47	−	−
2		1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1450	21.62	−	−	4.28	1.50	11.92
3		苯甲醇	100-51-6	1267	31.19	−	1.08	1.34	0.77	3.29
4		甲硫醇	74-93-1	−	3.74	−	0.10	0.08	0.02	0.12
5		二甲基硅烷二醇	1066-42-8	1153	26.09	−	0.99	0.91	65.70	2.03
6	酚类	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	7786-61-0	1409	37.19	9.55	1.06	−	0.18	1.10
7		苯酚	108-95-2	1324	33.67	−	0.47	0.46	0.19	0.68
8		愈创木酚	90-05-1	1494	40.58	−	−	0.05	−	0.05
9	醛类	苯甲醛	100-52-7	1520	23.43	−	8.06	7.93	3.37	14.16
10		3-乙基苯甲醛	7525-62-4	1424	20.91	5.11	0.34	0.33	−	−
11		庚醛	111-71-7	1184	14.26	−	1.91	2.23	0.57	1.54
12		正己醛	66-25-1	844	11.52	−	31.40	27.04	4.19	19.94
13		壬醛	124-19-6	1021	19.81	−	7.31	11.04	5.59	8.53
14		正辛醛	124-13-0	961	16.92	−	1.88	1.95	0.61	1.62
15	酸类	迭氮酸	7782-79-8	1213	3.35	−	−	9.37	5.12	8.72
16		甲氧基乙酸酐	19500-95-9	973	19.62	−	−	0.03	−	0.07
17	酮类	1-(1-环己烯-1-基)-1-丙酮	1655-03-4	1620	25.07	0.59	−	0.83	0.29	−
18		2-庚酮	110-43-0	1182	14.33	0.54	4.38	−	−	−
19		7-甲基-5-辛烯-4-酮	32064-78-1	923	15.09	1.07	0.04	−	−	−
20		丙酮	67-64-1	819	4.89	0.63	−	1.44	−	1.19
21		二苯甲酮	119-61-9	984	18.04	1.03	−	0.11	−	−
22		1-(2-甲基-2-环戊烯-1-基)-乙酮	1767-84-6	870	12.68	1.09	−	−	0.02	0.45
23		苯乙酮	98-86-2	921	14.99	−	−	0.02	0.02	0.12
24		2-(甲酰氧基)-1-苯基乙酮	55153-12-3	−	27.26	6.48	−	−	−	0.21
25	酯类	丙烯酸正戊酯	2998-23-4	1165	21.62	1.18	−	0.04	−	−
26		乙酸丙酯	109-60-4	1085	22.90	−	−	0.03	−	0.07
27		乙酸甲酯	79-20-9	828	10.29	−	0.07	0.07	0.02	−
28	碳氢	反式-2-丁烯基-环丙烷	76588-98-2	−	26.4	12.29	−	−	−	0.39
29		癸烷	124-18-5	1000	9.14	−	1.05	−	0.31	−
30		十二烷	112-40-3	1200	13.98	−	2.19	−	0.49	1.94

续表 9

序号	分类	化合物	CAS号	RI	RT（min）	相对含量(%)				
						0 d	PP/PA/PE 25 ℃	PP/PA/PE 4 ℃	Opp/CPP 25 ℃	Opp/Cpp 4 ℃
31	碳氢	2, 2, 5-三甲基己烷	3522-94-9	1068	22.07	0.97	0.36	–	0.02	–
32		2,4-二甲基己烷	589-43-5	–	4.71	1.73	–	–	0.97	–
33		3,3-二甲基己烷	563-16-6	941	15.98	0.18	–	1.14	–	–
34		正辛烷	111-65-9	800	4.69	–	0.93	0.98	–	–
35		2,2,6-三甲基辛烷	62016-28-8	–	21.53	4.85	0.20	–	–	–
36		2,3,6-三甲基辛烷	62016-33-5	–	20.86	0.92	–	–	–	0.68
37		3,4,5,6-四甲基辛烷	62185-21-1		28.25	1.29	–	–	0.10	0.47
38		苯乙烯	100-42-5	1261	15.93	0.62	1.59	1.89	0.36	2.55
39		间羟基苯甲醛	100-83-4	–	50.48	0.95	–	–	–	0.08
40		异丙基苯	98-82-8	–	18.83	0.20	–	–	–	1.76
41		1-乙基-4-乙烯基苯	3454-07-7	–	24.90	4.17	–	–	–	0.38
42		乙基苯	100-41-4	869	12.61	–	0.94	1.21	0.27	0.76
43		2-正戊基呋喃	3777-69-3	1231	15.06	8.50	11.74	11.84	2.27	8.83
44		2-正丙基呋喃	4229-91-8	1026	22.70	0.77	0.63	–	0.15	–
45		萘	91-20-3	1201	28.28	31.15	1.06	0.90	0.30	3.37
46		邻二甲苯	95-47-6	1186	12.97	–	1.49	2.09	0.47	1.41
47		对二甲苯	106-42-3	1138	12.81	–	0.64	0.93	0.21	0.64
48	其他	氩	7440-37-1	897	13.88	–	1.68	1.44	0.13	–
49		二氧化碳	124-38-9	734	7.42	–	14.50	1.00	–	–
50		一氧化二氮	10024-97-2	729	7.26	–	0.24	0.23	5.46	–
51		2-正戊基噻吩	4861-58-9	–	25.18	0.81	–	–	0.09	–
52		硫脲	62-56-6	744	7.77	–	0.76	–	–	0.97
53		3-甲基十一烷	1002-43-3	13.28	884	0.96	0.90	–	–	–

2.9　留胚米品质指标与挥发性化合物的相关性分析

通过 OPLS-DA 筛选 VIP>1 的化合物，为留胚米储藏期的主要挥发性化合物。其中，有 24 种挥发性化合物的 VIP>1 且 P<0.05，在图 5A 中以红色标记呈现。图 5B 为 24 种主要挥发性化合物与基础指标和品质综合得分的相关性分析。2,2,6-三甲基辛烷与脂肪酸值、脂肪酶、丙二醛、硬度、咀嚼性、b^*和 ΔE 呈显著负相关(P<0.05)，与食味品质呈显著正相关(P<0.05)。除丙酮、2-正丙基呋喃和 3-甲基十一烷等化合物外，大多数化合物与食味值呈负相关。2-正丙基呋喃和 3-甲基十一烷易与氧化物发生反应导致相对含量显著降低。与此同时，留胚米中的脂肪在脂肪酶等作用下水解氧化产生脂肪酸，致其风味变差、产生酸臭味，且破坏米粒结构与营养，导致留胚米品质下降[51]。迭氮酸和甲氧基乙酸酐这类酸类化合物与脂肪酸、脂肪酶呈正相关，其具有较强的氧化性和腐蚀性，且有刺激性气味，进一步说明这些酸类化合物的增加会导致留胚米在储藏末期产生异味[52]。大多数碳氢化合物与脂肪酸、脂肪酶、丙二醛呈正相关，与食味值、L^*等呈负相关，例如十二烷具有汽油味，癸烷一般表现石蜡味，两者都可能是脂肪氧化分解或相关代谢的产物[53]。当脂肪分解加剧、脂肪酸增多时，癸烷生成量也增加，呈现显著正相关(P<0.05)。与此同时，脂肪氧化越剧烈，丙二醛和十二烷的生成量同步增多，同样呈现显著正相关(P<0.05)。酯类的增加会影响咀嚼性的增加，异味气体增加会导致留胚米 L^*变暗，a^*下降[54]。

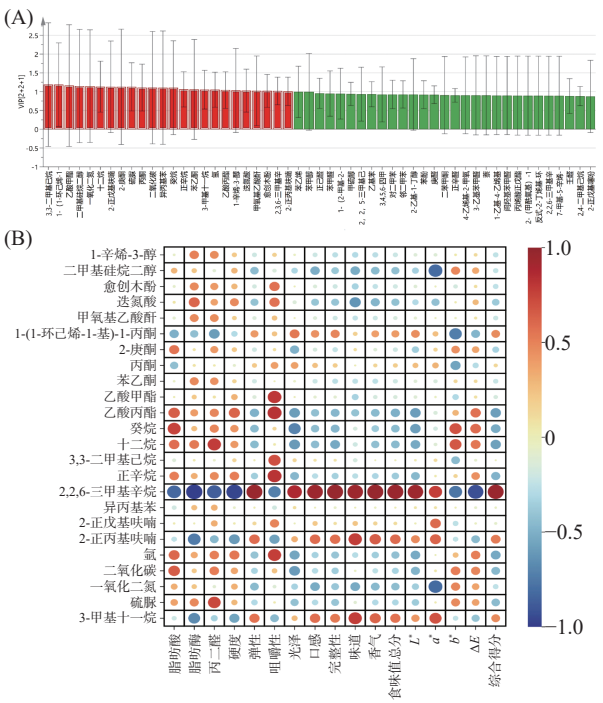


图 5　主要挥发性化合物与基础指标和综合得分的相关性分析

Fig.5　Correlation analysis of main volatile compounds with basic indexes and comprehensive scores

注：(A)VIP 图；(B)相关性分析。

此外，虽然各理化指标与挥发性化合物的相关性分析已初步阐明，但品质评价模型作为多维度信息的集成体，其获得的综合得分与挥发性化合物的关联分析更能够全面体现挥发性化合物对于留胚米品质的影响。因此，根据模型计算留胚米的综合评分，分析其与挥发性化合物之间的相关性。图 5B 所示，挥发性化合物与品质综合得分有很强相关性，大多数呈负相关，例如乙酸丙酯、癸烷、十二烷。但 2,2,6-三甲基辛烷与品质综合得分呈显著正相关(P<0.05)，2-正丙基呋喃和 3-甲基十一烷呈正相关。图 5B 中，2,2,6-三甲基辛烷与脂肪酸值负相关，而脂肪酸值的增加，会加速留胚米品质劣变，导致品质综合得分下降。

综上，留胚米在储藏期间，挥发性化合物的产生与品质变化相伴而生，与此同时，品质评价模型的综合得分亦呈现出类似的变化趋势。在相关性分析中，2,2,6-三甲基辛烷为贡献最大的挥发性化合物，与理化指标和品质评价综合评分显著相关(P<0.05)，其次是 2-正丙基呋喃和 3-甲基十一烷。

3 结论

本研究分析了留胚米在 PP/PA/PE 和 Opp/Cpp 两种材料下储藏于 25 ℃ 和 4 ℃ 的品质变化规律，随储藏时间的延长，脂肪酸值不断上升，脂肪酶活和丙二醛先上升后下降，弹性不断降低，硬度和咀嚼性增加，食味值综合评分不断下降，这些指标的变化对留胚米的储藏品质影响显著。基于上述指标首次运用主成分分析和熵权法建立留胚米的储藏品质评价模型：Y=0.0803×咀嚼性+0.1170×弹性+0.1221×香气+0.1182×食味值综合评分+0.2215×丙二醛+0.2234×脂肪酶活+0.1175×脂肪酸值，这种方法有效融合了多指标信息，科学、全面地量化留胚米的储藏品质，为品质客观评价提供了创新思路。根据不同储藏时期留胚米的综合得分获得分级结果，储藏 0 d 为Ⅰ级，储藏 60 d 内为Ⅱ级，储藏 120 d 为Ⅲ级，储藏 180 d 后为Ⅳ级。该分级体系对留胚米储藏过程中的品质监控与货架期管理具有重要实践指导意义。

留胚米储藏 300 d 共测定出 53 种挥发性化合物，储藏 300 d 后的碳氢类化合物减少，醛类、酸类物质增加。挥发性化合物与基础指标和综合评价品质得分有很强的相关性，尤其是 2,2,6-三甲基辛烷呈显著相关(P<0.05)，其次是 2-正丙基呋喃和 3-甲基十一烷。研究后续可结合不同机器学习方法对留胚米的综合品质评价模型进行系统研究，进一步优化评价模型的科学性与合理性，从而为留胚米的品质评价及储运保鲜构建更完善的理论依据，切实推动留胚米储藏保鲜技术的发展与应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 朱永义. 留胚米的营养、生产及食用方法[J]. 粮食与饲料工业, 2011(5): 31−32. [ZHU Yongyi. Nutrition, production and eating methods of rice with remained germ[J]. Cereal & Feed Industry, 2011(5): 31−32.]

[2] CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 259−271.

[3] 马文领, 景军, 耿文叶. 胚芽大米的营养特性及营养支持作用[J]. 中国食物与营养, 2018, 24(1): 55−58. [MA Wenling, JING Jun, GENG Wenye. Nutritional characteristics and nutritional support of germ rice[J]. Food and Nutrition in China, 2018, 24(1): 55−58.]

[4] 谢骏琦, 李莉, 时优, 等. 纳米抗菌包装对胚芽米储藏过程中陈化的抑制作用[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3797−3807. [XIE Junqi, LI Li, SHI You, et al. The inhibition effect of nano-antibacterial packages on the aging of milled rice with embryo during storage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(19): 3797−3807.]

[5] 张秀琼, 吴殿星, 袁名安, 等. 稻米脂类的功能特性及其生物调控[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1105−1115. [ZHANG Xiuqiong, WU Dianxing, YUAN Ming'an, et al. Functional characteristics of lipids in rice and its' biological regulation[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(6): 1105−1115.]

[6] 谢丹, 葛志刚. 温度及包装材料对留胚米储藏品质的影响研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(7): 72−73. [XIE Dan, GE Zhigang. Study on the influence of temperature and packaging materials on the storage quality of embryonic rice[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2018, 43(7): 72−73.]

[7] 张朝富, 李志方, 杨会宾. 留胚米的保鲜包装技术[J]. 粮食与饲料工业, 2017(6): 1−3. [ZHANG Chaofu, LI Zhifang, YANG Huibin. Packaging preservation technology of embryo rice[J]. Cereal & Feed Industry, 2017(6): 1−3.]

[8] REDDY K R N, REDDY C S, MURALIDHARAN K. Potential of botanicals and biocontrol agents on growth and aflatoxin production by *Aspergillus flavus* infecting rice grains[J]. Food Control, 2009, 20(2): 173−178.

[9] ZHAO Siming, QIU Chengguang, XIONG Shanbai, et al. A thermal lethal model of rice weevils subjected to microwave irradiation[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 430−434.

[10] ZHAO Siming, XIONG Shanbai, QIU Chengguang, et al. Effect of microwaves on rice quality[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 496−502.

[11] 严松, 孟庆虹, 高扬, 等. 储藏调控方法对留胚米品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 119−123. [YAN Song, MENG Qinghong, GAO Yang, et al. Effect of storage control method on quality of germ-left rice during storage[J]. Food and Machinery, 2016, 32(8): 119−123.]

[12] 万志华, 张永林, 宋少云, 等. 包装方式对留胚米品质的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(17): 33−37. [WAN Zhihua, ZHANG Yonglin, SONG Shaoyun, et al. Effects of packaging ways on the quality of embryo rice[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(17): 33−37.]

[13] 王汝华, 高雪燕, 严娜, 等. 留胚米的研究进展[J]. 农产品加工(下), 2017(5): 65−67. [WANG Ruhua, GAO Xueyan, YAN Na, et al. Research progress on embryo-retaining milled rice[J]. Farm Products Processing, 2017(5): 65−67.]

[14] 郑海英, 朱燕丽, 钟秋夏, 等. 包装材料对紫米贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 234−243. [ZHENG Haiying,

ZHU Yanli, ZHONG Qiuxia, et al. Effect of packaging materials on the storage quality of purple rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 234−243.]
[15] 武晓娟, 闫星羽, 范家兴. 不同材料包装对绿豆芽保鲜作用的研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 19−29. [WU Xiaojuan, YAN Xingyu, FAN Jiaxing. Research on preservative effects of different materials packaging on mung bean sprouts[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 19−29.]
[16] 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. [YU Yanqi, YANG Mingyuan, LÜ Chunmao, et al. Comprehensive evaluation of chestnut quality based on principal component and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 280−291.]
[17] 张若妍, 郑惠元, 邓云, 等. 甜樱桃贮藏期内品质综合评价模型的建立[J/OL]. 保鲜与加工, 2025: 1−15. (2025-01-03). https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20250102.1512.002.html. [ZHANG Ruoyan, ZHENG Huiyuan, DENG Yun, et al. Establishment of comprehensive evaluation model of sweet cherry quality during storage[J/OL]. Storage and Process, 2025: 1−15. (2025-01-03). https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20250102.1512.002.html.]
[18] 张书龙. 基于集成学习的储藏小麦品质评价模型研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [ZHANG Shulong. Research on quality evaluation model of stored wheat based on ensemble learning[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]
[19] HONG Y, SHAO Z H, CAO L, et al. Study on lipid oxidation and changes of volatile substances of germ rice during storage [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1−11[2024-12-04]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037519.
[20] 梁彩婷, 荣骅, 徐璐, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析宁州群体种和混合种制成的宁红茶挥发性成分差异[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 271−281. [LIANG Caiting, RONG Hua, XU Lu, et al. Differences in the volatile components of ninghong black tea produced by the ningzhou tea population and the blending varieties based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 271−281.]
[21] 杨植溢, 练学燕, 金磊, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 解析川红工夫红茶关键香气成分及形成机理[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 47−55. [YANG Zhiyi, LIAN Xueyan, JIN Lei, et al. Analysis of key aroma components and formation mechanism of Chuanhong congou black tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 47−55.]
[22] CHOI S, SEO H S, LEE K R, et al. Effect of milling and long-term storage on volatiles of black rice (*Oryza sativa* L.) determined by headspace solid-phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 572−582.
[23] LI Yan, GAO Chen, WANG Yu, et al. Analysis of the aroma volatile compounds in different stabilized rice bran during storage [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134753.
[24] 国家市场监督管理总局. GB/T 1038.1-2022 塑料制品薄膜和薄片气体透过性实验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [State Administration for Market Regulation. GB/T 1038.1-2022 Test method for gas permeability of plastic films and sheets[S]. Beijing: China Standards Press, 2023.]
[25] 国家市场监督管理总局. GB/T 16928-1997 包装材料实验方法 透湿率[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998. [State Administration for Market Regulation. GB/T 16928-1997 Packaging materials test methods moisture permeability[S]. Beijing: China Standards Press, 1997.]
[26] JIAN Ying, ZHAO Lin, ZHAO Na, et al. Increasing prevalence of hypervirulent ST5 methicillin susceptible *Staphylococcus aureus* subtype poses a serious clinical threat[J]. Emerging Microbes & Infections, 2021, 10(1): 109−122.
[27] 王艺静, 黎虹, 曾结, 等. 基于熵权法的结直肠癌患者经济毒性评价及影响因素分析[J]. 实用预防医学, 2025, 32(4): 425−430. [WANG Yijing, LI Hong, ZENG Jie, et al. Evaluation on financial toxicity and analysis of its influencing factors in patients with colorectal cancer based on entropy weight method[J]. Practical Preventive Medicine, 2025, 32(4): 425−430.]
[28] 邵子晗, 龚勋, 宋玉, 等. 不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 231−239. [SHAO Zihan, GONG Xun, SONG Yu, et al. Effects of different treatments on storage stability and flavor characteristics of wheat germ[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 231−239.]
[29] 李紫藤, 闫程程, 王芳, 等. 不同软糙米储藏过程中的品质变化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(19): 21−29. [LI Ziteng, YAN Chengcheng, WANG Fang, et al. Quality changes of different soft brown rice during storage[J]. Food Research and Development, 2024, 45(19): 21−29.]
[30] 徐鹏程, 徐睿, 戴智华, 等. 不同包装方式对留胚米理化及食味品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 1−7. [XU Pengcheng, XU Rui, DAI Zhihua, et al. Effects of packaging methods on physicochemical properties and eating qualities of rice with remained germ[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 1−7.]
[31] 王春莲, 王则金, 林震山, 等. 大米储藏过程品质变化研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014(5): 5−9,14. [WANG Chunlian, WANG Zejin, LIN Zhenshan, et al. Quality changes of rice during storage[J]. Cereal & Feed Industry, 2014(5): 5−9,14.]
[32] 沈灵智, 盛宇华, 鲁清峰, 等. 苦荞功能性及食品开发研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(19): 192−199. [SHEN Lingzhi, SHENG Yuhua, LU Qingfeng, et al. Progress in functional research and food development of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*)[J]. Food Research and Development, 2021, 42(19): 192−199.]
[33] CHEN Xu, ZHANG Xiuxiu, WANG Biyu, et al. Investigation of water migration and its impacts on eating qualities of black rice during cooking process[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89: 102810.
[34] 殷泽, 韦智, 王世鑫, 等. 不同蒸煮方式对大米蒸煮后品质的影响研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2024, 36(6): 58−64. [YIN Ze, WEI Zhi, WANG Shixin, et al. Influence of different cooking methods on rice quality after cooking[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2024, 36(6): 58−64.]
[35] 李容容. 纳米复合包装储藏胚芽米保鲜机理的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2019: 17. [LI Rongrong. Study on the mechanism of preservation of germinated rice in nanocomposite packaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2019: 17.]
[36] 王若兰, 白栋强. 脂肪氧化酶缺失稻谷新品种储藏品质研究[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(4): 115−121. [WANG Ruolan, BAI Dongqiang. Study on the storage performance of new rice varieties lacking lipoxygenase[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2005, 20(4): 115−121.]

［37］ ZHANG L W, WANG Y Y, HUANG L, et al. The effect of three drying methods on the quality of parboiled rice[J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 1−15[2024-12-05]. https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001021.
［38］ 邵雅芳, 余静, 郑欣, 等. 不同贮藏环境和时间对大米质量影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 1−9. ［SHAO Yafang, YU Jing, ZHENG Xin, et al. Effects of different storage environment and time on rice quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 1−9.］
［39］ 毕文雅, 石天玉, 杨东, 等. 不同温度下“甬优 9 号”优质稻储藏过程中品质变化研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(12): 66−69,72. ［BI Wenya, SHI Tianyu, YANG Dong, et al. Study on quality change of high quality rice“Yongyou 9”during storage at different temperatures[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(12): 66−69,72.］
［40］ 顾佳缘, 王琰, 杨恒, 等. 不同水分含量糙米动态储藏过程中叶黄素含量及色度值变化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 1−6. ［GU Jiayuan, WANG Yan, YANG Heng, et al. Changes of lutein content and chromatic value in brown rice with different water content during dynamic storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11): 1−6.］
［41］ 姚亚静, 芦熹坤, 李建颖, 等. 糙米储藏中品质特性变化及调控研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 204−209. ［YAO Yajing, LU Xikun, LI Jianying, et al. Changes in quality and physicochemical characteristics of brown rice during storage[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 204−209.］
［42］ QIN K Y, GE S, CHEN J N, et al. Changes in cuticle composition of different varieties pepper and its effect on storage quality [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−15[2024-12-05]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070343.
［43］ 林蝉蝉, 何舟阳, 单文龙, 等. 基于主成分与聚类分析综合评价杨凌地区红色鲜食葡萄果实品质[J]. 果树学报, 2020, 37(4): 520−532. ［LIN Chanchan, HE Zhouyang, SHAN Wenlong, et al. Comprehensive evaluation of fruit quality of 12 red table grape cultivars cultivated in Yangling area based on principal component and cluster analyses[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(4): 520−532.］
［44］ 毕文雅, 石天玉, 张来林. 甬优 15 在储藏期间挥发性成分的变化[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 137−143. ［BI Wenya, SHI Tianyu, ZHANG Lailin. Changes of volatile components of yongyou 15 during storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 137−143.］
［45］ MI Yongjie, WANG Zhenhua, GUAN Lina, et al. Analysis of volatile compounds in rice porridge of different Japonica rice varieties in Northeast China[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 113: 103749.
［46］ SUN Xiangxiang, YU Yumei, SALEH A S M, et al. Characterization of aroma profiles of Chinese four most famous traditional red-cooked chickens using GC–MS, GC-IMS, and E-nose[J]. Food Research International, 2023, 173: 113335.
［47］ 严琛, 张云斌, 许启杰, 等. 基于 GC-IMS 分析粮仓位置效应对稻谷挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 375−382. ［YAN Chen, ZHANG Yunbin, XU Qijie, et al. Effect of storage positions on the volatile flavor compounds(VFCs)of paddy rice through gas chromatography-ion mobility spectroscopy(GC-IMS)analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 375−382.］
［48］ 里奥·范海默特, 王凯, 冒德寿, 等. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018. ［LEO Van HAEMERT, WANG Kai, MAO Deshou, et al. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Beijing: Science Press, 2018.］
［49］ 王子妍, 窦博鑫, 贾健辉, 等. GC-IMS 结合 PCA 法分析不同焙炒程度留胚米挥发性化合物指纹差异[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 212−218. ［WANG Ziyan, DOU Boxin, JIA Jianhui, et al. Differential fingerprint analysis of volatile compounds in rice with remained germ roasted to different degrees by gas chromatography-ion mobility spectrometry and principal component analysis[J]. Food Science, 2023, 44(8): 212−218.］
［50］ HU Xianqiao, LU Lin, GUO Zhenling, et al. Volatile compounds, affecting factors and evaluation methods for rice aroma: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 136−146.
［51］ 洪莹, 邵子晗, 曹磊, 等. 留胚米贮藏过程中脂质氧化及挥发性物质变化的研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 248−255. ［HONG Ying, SHAO Zihan, CAO Lei, et al. Lipid oxidation and changes of volatile substances of germ rice during storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 248−255.］
［52］ ZHANG Liting, PAN Zhaoyang, LU Zhanhua, et al. Analysis of volatile compounds' changes in rice grain at different ripening stages *via* HS-SPME-GC–MS[J]. Foods, 2024, 13(23): 3776.
［53］ 贾温倩, 张威, 舒在习. 不同储藏条件对稻米蒸煮特性及挥发性成分的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(12): 183−192. ［JIA Wenqian, ZHANG Wei, SHU Zaixi. Effects of different storage conditions on rice cooking characteristics and volatile components[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(12): 183−192.］
［54］ ZHANG Kangyi, GAO Lingling, ZHANG Can, et al. Analysis of volatile flavor compounds of corn under different treatments by GC-MS and GC-IMS[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 725208.