DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.018
田琳, 祁智慧, 张翔, 等. 成品大米不同低温条件下储藏期评价研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 138-147.
TIAN L, QI Z H, ZHANG X, et al. Study on evaluation of different low-temperature storage period of milled rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 138-147.

成品大米不同低温条件下储藏期评价研究

田　琳[1,2]，祁智慧[1,2]，张　翔[3]，赵馨宁[3]，谢文军[4]，唐　芳[1,2]✉

（1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所，北京 100037；
2. 粮食储运国家工程研究中心，北京 100037；
3. 北京农学院 食品科学与工程学院，北京 100096；
4. 北京古船米业有限公司 北京 100096）

摘　要：通过两种成品大米在 16、18 和 20 ℃三个准低温条件下，储藏 6~12 个月期间理化、外观、食味和糊化特性等品质指标的检测，结果显示：大米的脂肪酸值、黄粒米含量和回生值均随储藏温度升高和储藏时间延长而逐渐升高，食味值逐渐下降，尤其是在 20 ℃条件下变化显著。多项品质指标之间存在显著的相关性，通过主成分分析法降维处理后，分别在优质籼稻和优质粳稻中提取 4 和 3 个主成分，主成分综合得分随着储藏温度的升高和储藏时间的延长逐渐下降。聚类分析结果显示，偏低水分籼米 16 ℃储藏期 8~12 个月的品质与 18 ℃的储藏期 6~8 个月和 20 ℃储藏期 6 个月的品质相当，保持 18 ℃储藏 10~12 个月的品质在 20 ℃的储藏期约为 8 个月；偏高水分粳米保持 16 ℃储藏 10~12 个月的品质，在 18 和 20 ℃的储藏期约为 6 个月。为成品大米低温储藏实践中，温度条件的精细化控制提供参考。

关键词：成品大米；低温储藏；综合品质；主成分分析；聚类分析
中图分类号：TS210.1; S-3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1007-7561(2023)06-0138-10
网络首发时间：2023-11-03 17:48:31
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20231103.1522.010

Study on Evaluation of Different Low-Temperature Storage Period of Milled Rice

TIAN Lin[1,2], QI Zhi-hui[1,2], ZHANG Xiang[3], ZHAO Xin-ning[3], XIE Wen-jun[4], TANG Fang[1,2]✉
(1. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
2. National Engineering Research Center for Grain Storage and Transportation, Beijing 100037, China;
3. College of Food Science and Engineering, Beijing University of Agriculture, Beijing 100096, China;
4. Beijing Guchuan rice Co., Ltd., Beijing 100096, China)

Abstract: Through the detection of quality indicators such as physicochemical, appearance, taste and

收稿日期：2023-05-22
基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（ZX2203）
Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. ZX2203)
作者简介：田琳，女，1988 年出生，硕士，助理研究员，研究方向为储粮霉菌综合防控。E-mail: tl@ags.ac.cn
通讯作者：唐芳，女，1978 年出生，硕士，副研究员，研究方向为储粮霉菌综合防控。E-mail: tf@ags.ac.cn

gelatinization of two kinds of milled rice under three quasi-low temperature conditions of 16, 18 and 20 ℃ during storage for 6 to 12 months, the results showed that the fatty acid value, content of yellow-colored kernel and setback of rice starch all increased gradually with the increase of storage temperature and storage time, but the taste value decreased gradually, especially at 20 ℃. There were significant correlations among multiple quality indicators. After dimensionality reduction treatment by principal component analysis, 4 and 3 principal components were extracted from indica rice and japonica rice, respectively. The comprehensive scores of the principal components decreased gradually with the increase of storage temperature and time. The results of cluster analysis showed that the quality of low-moisture indica rice stored at 16 ℃ for 8 to 12 months was equivalent to that at 18 ℃ for 6 to 8 months and at 20 ℃ for 6 months. And keeping the quality of 10 to 12 months at 18 ℃, the storage period at 20 ℃ was about 8 months. The quality of high-moisture japonica rice stored at 16 ℃ for 10 to 12 months was equivalent to that at 18 and 20 ℃ for 6 months. It provides a theoretical basis for the fine control of temperature conditions in the practice of low-temperature storage of milled rice.

Key words: milled rice; low-temperature storage; comprehensive quality; principal component analysis; cluster analysis

温度是影响粮食品质的重要因素之一，高温引起粮食品质劣变[1]，且容易滋生害虫、发生霉变，在粮食质量和数量上造成损失[2]。目前，我国的稻谷原粮储藏过程中多通过自然通风、机械通风、内环流、人工制冷等多种控温措施，保持稻谷在储藏期间处在相对低温的环境下[3-4]。成品大米在失去稻壳和糠层的保护后，耐储性降低，通常需要更低温度进行储藏。目前对大米储藏的研究多集中在模拟环境下温度对大米理化性质、食味品质、微观结构和挥发物[5-8]等的影响，温度设置范围在 4 至 70 ℃之间，温度跨度大，与成品大米储藏实践中的温度设置差距较大，在大米实仓精细化控温储存应用方面缺乏实践指导性。在成品大米的储藏实践中，温度设置越低，能耗越大，成本就会越高，如何在经济、环保的前提下保持大米的品质有待进一步研究。

本文通过两种成品大米在 16、18 和 20 ℃三个准低温条件下，储藏 6~12 个月期间理化、外观、食味和糊化四个方面 20 项品质指标的检测，利用主成分分析和聚类分析将不同低温条件下、不同储藏期的大米品质进行分类，以期为成品大米的精细化控温储藏提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用两个品种的成品大米，分别是购自湖北省钟祥市盛达米业有限公司的优质籼米和盘锦阳光米业有限公司的优质粳米。籼米（简称 X）初始水分 13.3%，粳米（简称 J）初始水分 15.6%。

1.2 仪器与设备

JSWL 大米食味计、JMWT12 大米外观品质测定仪：北京东方孚德技术发展有限公司；L3002-IC 电子分析天平：梅特勒–托利多仪器（上海）有限公司；DHG-9246A 型电热恒温鼓风干燥箱：上海精宏实验设备有限公司；JSFM-1 粮食水分测试粉碎磨：成都粮食储存科学研究院；TS60 分光测色仪：深圳市三恩时科技有限公司；RVA-TecMaster 快速粘度分析仪：瑞典 Perten。

1.3 实验方法

1.3.1 成品大米的低温储藏

成品大米分装在 PP 材质的密封箱（图 1）中，密封箱分别放置在设置温度为 16，18 和 20 ℃的三个恒温室。实验期间记录的恒温室温度分别为（16.1±0.3）、（18.3±0.2）和（20.1±0.0）℃。

密封箱尺寸如图 1 所示，每箱装样量约为五分之四，每个品种大米在同一恒温室中放置三箱，总样品量约 40 kg，取样时每箱混匀后单独取样，组成三个平行样。样品命名为品种_储藏温度_储藏时间，如 J_T16_M6 为粳米在 16 ℃下储藏 6 个月。

1.3.2 大米品质检测

成品大米在低温条件储藏 6~12 个月期间，

图 1　实验用密封箱

Fig.1　The storage box used in the experiment

每两个月取样一次对以下品质指标进行检测。检测指标及方法如下：

理化指标：采用 TS60 分光测色仪进行检测 *L**值、*a**值和 *b**值。参照 GB/T 5009.3—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》和 GB/T 20569—2006《稻谷储存品质判定规则》附录 A 检测大米的水分和脂肪酸值。

外观品质：采用大米外观品质测定仪检测不完善粒率、黄粒米含量、垩白粒率、垩白度、整精米率。

食味品质：采用 JSWL 大米食味计检测食味值、蛋白质含量和直链淀粉含量。

糊化特性：样品磨碎后过 40 目筛制成大米粉，采用 RVA-TecMaster 快速粘度分析仪进行糊化分析，测试程序参照 GB/T 24852—2010《大米及米粉糊化特性测定 快速粘度仪法》。

1.4　数据处理

实验数据采用 EXCEL 2016 软件初步整理，使用 SPSS 19.0 软件进行数据的统计分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析。

2　结果与分析

2.1　低温储藏期间主要品质指标变化

脂肪酸值是评价粮食储藏品质的关键指标之一，大米虽然仅含有 1%~5%的脂类物质，但在储藏过程中极易发生氧化和水解，产生游离脂肪酸[9]，脂肪酸值的变化也会对大米的风味物质产生一定影响[10]。实验大米在储藏期间脂肪酸值变化情况见表 1。

表 1　两种成品大米储藏期间脂肪酸值变化情况

Table 1　Changes of fatty acid values of two milled rice during storage

品种	温度/℃	时间/月			
		6	8	10	12
籼米	16	$9.43±0.60^{Aa}$	$11.47±0.93^{Ba}$	$10.33±0.84^{ABa}$	$9.80±1.31^{ABa}$
	18	$9.87±0.76^{Aa}$	$12.80±1.47^{Bab}$	$16.33±0.95^{Cb}$	$16.30±0.46^{Cb}$
	20	$12.40±0.50^{Ab}$	$14.73±0.55^{Bb}$	$18.50±0.85^{Cc}$	$19.10±0.44^{Cc}$
粳米	16	$8.70±0.17^{Aa}$	$10.73±0.70^{Ba}$	$12.93±0.74^{Ca}$	$12.30±1.18^{Ca}$
	18	$12.53±0.78^{Ab}$	$14.33±0.31^{Bb}$	$14.83±0.95^{Bb}$	$18.07±0.90^{Cb}$
	20	$14.93±1.02^{Ac}$	$16.27±0.38^{Ac}$	$15.97±0.42^{Ab}$	$19.30±1.64^{Bb}$

注：大写字母为同行数据经 Duncan’s 法检验在 0.05 水平上的显著性差异，小写字母为同一品种成品大米同列数据经 Duncan’s 法检验在 0.05 水平上的显著性差异。

Note: The uppercase letters are the significant difference at the 0.05 level of the Duncan's method for the data in the same line, and the lowercase letters are the results of the data in the same column.

由表 1 可见，两种成品大米在储藏期间脂肪酸值都呈增大趋势，同一储藏时间温度越高脂肪酸值越大。籼米在 16 ℃下储藏 12 个月脂肪酸值没有显著性升高，而在 18 和 20 ℃下储藏 8 个月脂肪酸值开始有显著升高。脂类物质在氧化过程中需要水分参与，粳米因初始水分较高，导致脂质氧化速率加快[11]，即使在 16 ℃的低温条件下储藏，在 6~8 个月之间脂肪酸值也呈显著性升高。

黄粒米含量是对大米外观品质影响较大的指标[12]，黄粒米含量与正常米粒相比，胚乳色泽呈黄色，严重影响大米的外观，根据国家标准 GB/T 1354—2018《大米》的规定，黄粒米含量不能超过 1.0%。实验大米在储藏期间黄粒米含量变化情况见表 2。

表 2　两种成品大米储藏期间黄粒米含量的变化情况

Table 2　Changes of yellow-colored kernel’s rate of two milled rices during storage

品种	温度/℃	时间/月			
		6	8	10	12
籼米	16	$0.27±0.06^{a}$	0.30±0.26	0.40±0.26	$0.27±0.21^{a}$
	18	$0.30±0.00^{a}$	0.37±0.12	0.43±0.23	$0.47±0.15^{a}$
	20	$0.53±0.12^{Ab}$	$0.67±0.15^{AB}$	$0.63±0.06^{AB}$	$0.80±0.10^{Bb}$
粳米	16	0.03±0.06	0.03±0.06	0.03±0.06	$0.10±0.10^{a}$
	18	0.10±0.10	0.07±0.06	0.23±0.06	$0.23±0.15^{ab}$
	20	$0.13±0.15^{AB}$	$0.07±0.06^{A}$	$0.27±0.29^{AB}$	$0.43±0.12^{Bb}$

注：大写字母为同行数据经 Duncan's 法检验在 0.05 水平上的显著性差异，小写字母为同一品种成品大米同列数据经 Duncan's 法检验在 0.05 水平上的显著性差异。

Note: The uppercase letters are the significant difference at the 0.05 level of the Duncan's method for the data in the same line, and the lowercase letters are the results of the data in the same column.

由表 2 可见，两种成品大米在 16 和 18 ℃下储藏 6~12 个月期间，黄粒米含量虽有所升高，但变化不显著，而在 20 ℃下储存 10~12 个月显著升高，虽然总体黄粒米含量仍在国标允许范围内，但可能会影响消费者对成品大米的直观印象。

食味值是一项具有综合性评价的食味品质指标，JSWL 大米食味计利用智能模糊理论，将大米食味的构成要素包括粘性、硬度、味道、香气等进行综合评价并与近红外光谱数据进行结合，直接对未经蒸煮的大米样品食味值进行检测。实验大米在储藏期间食味值变化情况见表 3。

表 3　两种成品大米储藏期间食味值变化情况

Table 3　Changes of taste value of two milled rices during storage

品种	温度/℃	时间/月			
		6	8	10	12
籼米	16	87.67±1.53^{B}	87.00±1.00^{ABb}	86.67±0.58^{AB}	85.33±0.58^{A}
	18	86.33±0.58^{B}	85.67±0.58^{ABab}	86.33±0.58^{B}	84.67±1.15^{A}
	20	85.67±0.58^{AB}	85.33±0.58^{Aa}	86.67±0.58^{B}	84.67±0.58^{A}
粳米	16	82.67±0.58	82.33±1.53	82.33±0.58^{b}	83.00±0.00^{b}
	18	81.67±1.53^{B}	81.00±0.00^{AB}	79.33±0.58^{Aba}	80.00±1.00^{Aa}
	20	81.33±1.15^{B}	80.67±0.58^{AB}	79.33±0.58^{Aa}	79.67±0.58^{Aa}

注：大写字母为同行数据经 Duncan's 法检验在 0.05 水平上的显著性差异，小写字母为同一品种成品大米同列数据经 Duncan's 法检验在 0.05 水平上的显著性差异。

Note: The uppercase letters are the significant difference at the 0.05 level of the Duncan's method for the data in the same line, and the lowercase letters are the results of the data in the same column.

由表 3 可见，两种成品大米在三个低温条件下随着储藏时间的延长，食味值均呈下降的趋势，表明长时间储藏对大米食味有不利影响。同一储藏时间不同低温条件下，籼米的食味值基本没有显著性变化，而粳米在 18 和 20 ℃储藏 10～12 个月的食味值显著低于 16 ℃。

淀粉是大米的主要营养物质，约占大米质量的 70%，大米食用品质的优劣取决于淀粉的糊化特性[13]。其中淀粉的回生值代表淀粉冷糊的老化趋势，回生值越大表示越易老化，食用品质越差[14]。实验大米储藏期间大米淀粉的回生值变化情况见表 4。

由表 4 可见，两种成品大米随着储藏温度升高和储藏时间延长，回生值呈增大的趋势。20 ℃下，籼米在储藏 12 个月、粳米在储藏 10 个月后都与储藏 6～8 个月表现出了显著性差异，而其他两个低温条件下储藏 6～12 个月期间淀粉的回生值变化不显著，表明大米在 20 ℃温度下长时间储藏，淀粉更易老化，口感会逐渐变硬，食用品质逐渐变差。

2.2　品质指标间相关性分析

大量研究表明在大米的理化性质、外观品质、食味品质和蒸煮品质等指标之间存在相关性[15-16]。对本文研究的两种成品大米的各项品质指标进行相关性分析，结果见表 5 和表 6。

由表 5、表 6 可见，在实验检测的多项品质指标之间存在显著的线性相关关系，不仅表现在理化、外观、食味和糊化四个分组的内部指标之间，在四个分组之间部分指标也存在不同程度的相关性，尤其在理化与外观，食味与糊化之间。

表 4　两种成品大米储藏期间淀粉回生值的变化情况

Table 4　Changes of setback of two milled rices during storage

品种	温度/℃	时间/月			
		6	8	10	12
籼米	16	1 537.00±52.37^{Aa}	1 682.33±9.71^{AB}	1 726.00±138.92^{B}	1 606.00±83.86^{AB}
	18	1 701.33±65.26^{b}	1 593.67±127.34	1 687.00±7.55	1 736.67±41.05
	20	1 595.33±37.90^{Aa}	1 625.67±56.36^{A}	1 698.00±7.21^{AB}	1 805.33±153.01^{B}
粳米	16	1 324.00±61.44	1 352.67±20.40^{b}	1 305.33±5.69^{a}	1 315.33±9.87^{a}
	18	1 298.00±13.89	1 303.33±19.55^{a}	1 315.67±19.30^{a}	1 328.33±36.12^{ab}
	20	1 319.00±20.95^{A}	1 303.33±4.73^{Aa}	1 350.33±6.66^{Bb}	1 365.33±5.51^{Bb}

注：大写字母为同行数据经 Duncan’s 法检验在 0.05 水平上的显著性差异，小写字母为同一品种成品大米同列数据经 Duncan’s 法检验在 0.05 水平上的显著性差异。

Note: The uppercase letters are the significant difference at the 0.05 level of the Duncan's method for the data in the same line, and the lowercase letters are the results of the data in the same column.

表 5　籼米品质指标间 Pearson 相关性

Table 5　Pearson correlation table between quality indexes of indica rice

Pearson 相关系数	*L**值	*a**值	*b**值	水分	脂肪酸值	不完善粒率	黄粒米含量	垩白粒率	垩白度	整精米率	食味值	蛋白质含量	直链淀粉	峰值黏度	最低黏度	衰减值	最终黏度	回生值	糊化时间	糊化温度
*L**值	1																			
*a**值	0.601*	1																		
*b**值	–0.908**	–0.600*	1																	
水分	–0.386	–0.457	0.381	1																
脂肪酸值	–0.893**	–0.735**	0.793**	0.543	1															
不完善粒率	–0.837**	–0.501	0.714**	0.537	0.827**	1														
黄粒米含量	–0.839**	–0.591*	0.932**	0.512	0.833**	0.699*	1													
垩白粒率	–0.542	–0.493	0.702*	0.145	0.544	0.362	0.596*	1												
垩白度	–0.850**	–0.529	0.634*	0.520	0.912**	0.808**	0.674*	0.234	1											
整精米率	0.740**	0.405	–0.693*	–0.462	–0.660*	–0.777**	–0.569	–0.507	–0.612*	1										
食味值	0.481	0.331	–0.485	–0.031	–0.471	–0.594*	–0.529	–0.339	–0.333	0.136	1									
蛋白质含量	0.111	–0.063	0.070	–0.628*	–0.166	–0.331	–0.025	0.550	–0.452	0.216	–0.251	1								
直链淀粉	–0.211	0.079	–0.042	0.246	0.180	0.134	0.129	–0.491	0.423	0.175	–0.076	–0.520	1							
峰值黏度	–0.629*	–0.559	0.418	0.358	0.817**	0.627*	0.506	0.195	0.861**	–0.251	–0.505	–0.263	0.376	1						
最低黏度	0.315	0.236	–0.440	0.041	–0.229	–0.231	–0.445	–0.474	–0.054	0.285	0.550	–0.479	0.178	–0.049	1					
崩解值	–0.670*	–0.568	0.589*	0.244	0.757**	0.616*	0.658*	0.441	0.682*	–0.367	–0.722**	0.100	0.173	0.784**	–0.659*	1				
最终黏度	–0.135	0.051	–0.069	0.313	0.156	0.249	–0.060	–0.371	0.384	–0.001	0.209	–0.695*	0.417	0.296	0.824**	–0.289	1			
回生值	–0.656*	–0.225	0.463	0.494	0.577*	0.743**	0.486	–0.020	0.745**	–0.382	–0.365	–0.582*	0.496	0.584*	0.116	0.368	0.658*	1		
糊化时间	0.826**	0.612*	–0.723**	–0.173	–0.745**	–0.701*	–0.724**	–0.423	–0.676*	0.449	0.712**	–0.128	–0.250	–0.622*	0.602*	–0.843**	0.140	–0.554	1	
糊化温度	–0.856**	–0.301	0.782**	0.195	0.658*	0.811**	0.708**	0.437	0.604*	–0.716**	–0.545	–0.011	0.176	0.316	–0.335	0.447	0.069	0.566	–0.719**	1

注：*. 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。**. 在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

Note: Significant correlations at the 0.05 level (two-sided) are indicated by “*”. Significant correlations at the 0.01 level (two-sided) are indicated by “**”.

表 6　粳米品质指标间 Pearson 相关性

Table 6　Pearson correlation table between quality indexes of japonica rice

Pearson 相关系数	*L**值	*a**值	*b**值	水分	脂肪酸值	不完善粒率	黄粒米含量	垩白粒率	垩白度	整精米率	食味值	蛋白质含量	直链淀粉	峰值黏度	最低黏度	衰减值	最终黏度	回生值	糊化时间	糊化温度
*L**值	1																			
*a**值	0.697*	1																		
*b**值	–0.566	–0.948**	1																	
水分	–0.327	0.017	–0.114	1																
脂肪酸值	–0.728**	–0.898**	0.905**	–0.101	1															
不完善粒率	–0.928**	–0.676*	0.486	0.211	0.621*	1														
黄粒米含量	–0.742**	–0.920**	0.861**	0.120	0.791**	0.760**	1													
垩白粒率	–0.564	–0.831**	0.801**	–0.207	0.796**	0.552	0.658*	1												
垩白度	–0.491	–0.883**	0.934**	–0.181	0.902**	0.442	0.739**	0.812**	1											
整精米率	0.605*	0.708*	–0.680*	0.309	–0.800**	–0.600*	–0.544	–0.724**	–0.764**	1										
食味值	0.574	0.933**	–0.920**	–0.066	–0.813**	–0.507	–0.789**	–0.843**	–0.881**	0.599*	1									
蛋白质含量	–0.556	–0.851**	0.853**	–0.023	0.760**	0.473	0.662*	0.878**	0.820**	–0.664*	–0.953**	1								
直链淀粉	0.314	0.717**	–0.762**	0.369	–0.635*	–0.232	–0.477	–0.729**	–0.699*	0.583*	0.799**	–0.868**	1							
峰值黏度	–0.679*	–0.889**	0.853**	0.107	0.871**	0.602*	0.776**	0.903**	0.825**	–0.613*	–0.903**	0.852**	–0.610*	1						
最低黏度	–0.207	0.242	–0.338	0.460	–0.110	0.220	–0.142	0.005	–0.240	0.084	0.262	–0.243	0.623*	0.089	1					
崩解值	–0.491	–0.924**	0.930**	–0.157	0.823**	0.422	0.760**	0.791**	0.855**	–0.598*	–.941**	0.884**	–0.890**	0.821**	–0.491	1				
最终黏度	–0.264	0.113	–0.223	0.488	–0.035	0.304	0.014	0.074	–0.140	0.039	0.163	–0.181	0.597*	0.164	0.974**	–0.406	1			
回生值	–0.316	–0.465	0.375	0.279	0.281	0.433	0.617*	0.296	0.342	–0.162	–0.329	0.180	0.108	0.350	0.234	0.190	0.450	1		
糊化时间	–0.281	–0.054	0.214	–0.280	0.451	0.076	–0.033	0.245	0.308	–0.430	–0.056	0.165	–0.186	0.218	0.127	0.089	0.016	–0.429	1	
糊化温度	–0.615*	–0.748**	0.780**	–0.197	0.896**	0.461	0.519	0.850**	0.832**	–0.818**	–0.762**	0.815**	–0.741**	0.812**	–0.082	0.760**	–0.072	0.014	0.601*	1

注：*. 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。**. 在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

Note: Significant correlations at the 0.05 level (two-sided) are indicated by “*”. Significant correlations at the 0.01 level (two-sided) are indicated by “**”.

2.3 大米品质的主成分分析

由表 5 和表 6 的相关性分析结果可见，实验检测的指标在大米品质的反映上有所重叠，因此，对各项指标检测数值进行标准化处理后进行主成分分析，采用降维方法，将实验检测的品质指标简化为少数综合性指标，主成分分析结果见表 7。

由表 7 可见，主成分分析得到的大部分品质指标的公因子方差都达到 80%以上，说明提取的主成分对各个指标的方差解释度较高，主成分提取效果较好。按照特征值大于 1 的原则，在籼米和粳米中分别提取了 4 个和 3 个主成分，累计贡献率均达到 85%以上，表明提取的主成分能代表原始指标中绝大部分的信息。

表 7 主成分分析结果

Table 7 Result table of principal component analysis

指标	籼米					粳米			
	公因子方差	因子载荷				公因子方差	因子载荷		
		主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4		主成分 1	主成分 2	主成分 3
L	0.941	0.954	0.016	0.098	–0.142	0.754	0.707	0.485	0.138
a	0.787	0.672	–0.144	0.115	0.549	0.987	0.969	0.062	–0.209
b	0.891	–0.874	0.223	–0.256	0.113	0.936	–0.954	0.098	0.130
水分	0.666	–0.507	–0.431	–0.330	–0.338	0.539	0.089	–0.672	0.280
脂肪酸值	0.959	–0.949	–0.074	–0.065	–0.223	0.923	–0.941	–0.059	–0.185
不完善粒率	0.883	–0.901	–0.173	–0.107	0.171	0.694	–0.644	–0.528	–0.011
黄粒米含量	0.804	–0.880	0.136	–0.105	0.001	0.884	–0.841	–0.261	0.329
垩白粒率	0.830	–0.537	0.612	–0.388	–0.127	0.827	–0.898	–0.053	–0.129
垩白度	0.919	–0.873	–0.378	0.054	–0.106	0.862	–0.924	0.087	–0.027
整精米率	0.839	0.702	–0.030	0.558	–0.184	0.740	0.786	–0.018	0.348
食味值	0.745	0.616	–0.319	–0.488	–0.161	0.930	0.941	–0.035	–0.210
蛋白质含量	0.836	0.140	0.898	0.099	0.018	0.848	–0.913	0.111	0.048
直链淀粉	0.736	–0.201	–0.612	0.552	0.131	0.919	0.785	–0.548	–0.048
峰值黏度	0.892	–0.734	–0.267	0.370	–0.381	0.891	–0.916	–0.225	–0.033
最低黏度	0.783	0.397	–0.749	–0.232	–0.100	0.918	0.208	–0.851	–0.389
衰减值	0.939	–0.799	0.265	0.423	–0.225	0.970	–0.923	0.274	0.208
最终黏度	0.838	–0.082	–0.902	–0.113	0.065	0.915	0.115	–0.920	–0.236
回生值	0.866	–0.671	–0.586	0.110	0.247	0.721	–0.325	–0.590	0.516
糊化时间	0.913	0.864	–0.213	–0.333	–0.099	0.864	–0.259	0.130	–0.883
糊化温度	0.948	–0.792	0.062	–0.110	0.552	0.956	–0.876	0.094	–0.424
特征值		10.018	4.021	1.758	1.218		11.666	3.446	1.966
贡献率/%		50.089	20.104	8.788	6.088		58.328	17.231	9.828
累积贡献率/%		50.089	70.194	78.982	85.070		58.328	75.559	85.387

2.4 大米品质的综合评价

以不同储藏条件下检测的品质数据的标准值为基础，通过主成分载荷矩阵形成新的评价指标，分别构建两种成品大米在不同低温储藏环境下的综合评价模型。

利用公式（1）和表 7 中的因子载荷矩阵获得主成分载荷矩阵。

$$U_{ij}=A_{ij}/\sqrt{\lambda j} \quad (1)$$

（U_{ij} 为第 i 项指标在第 j 主成分上的载荷，A_{ij} 为第 i 项指标在第 j 主成分上的因子载荷，λ_j 为第 j 主成分的特征值。i 取值为 1~20，j 在籼米中取值为 1~4、j 在粳米中取值为 1~3。）

利用公式（2）计算各主成分得分。

$$Y_j=U_{11}\times X_1+U_{21}\times X_2+\cdots\cdots+U_{ij}\times X_i \quad (2)$$

（Y_j 为第 j 主成分得分，X_i 为第 i 项指标的标准值）

利用公式（3）计算综合得分。

$$Y=\sum Y_j\times \lambda_j \quad (3)$$

两种成品大米各主成分得分及综合得分表结果见表 8。

由表 8 可见，两种实验大米的综合得分随着储藏温度的升高和储藏时间的延长逐渐下降。16 ℃的温度条件综合得分变化最小，储藏 12 个月后籼米和粳米的综合得分分别下降了 38.95%和 51.04%。在 18 和 20 ℃条件下，储藏 6 个月时两种成品米的综合得分已经明显低于 16 ℃，储藏 12 个月后，在原有的基础上下降幅度分别达到 2 倍和 4 倍以上，表明低温储藏条件在大米的品质保持方面有明显的效果。

表 8　两种成品大米各主成分得分及综合得分表

Table 8　The principal component scores and comprehensive score tables of the two milled rice

得分	Y1	Y2	Y3	Y4	Y	得分	Y1	Y2	Y3	Y
X_T16_M6	4.537	0.084	–0.033	0.051	2.290	J_T16_M6	17.725	–0.058	2.280	10.553
X_T18_M6	2.180	–1.277	0.251	–0.350	0.836	J_T18_M6	5.603	6.105	1.682	4.486
X_T20_M6	1.025	2.232	0.899	–1.021	0.979	J_T20_M6	3.313	2.967	0.576	2.500
X_T16_M8	2.872	–1.606	–1.027	0.637	1.064	J_T16_M8	13.790	–3.430	1.190	7.569
X_T18_M8	0.203	4.150	0.571	–0.298	0.968	J_T18_M8	–2.319	2.763	–2.210	–1.094
X_T20_M8	–0.999	1.778	–0.916	–0.315	–0.243	J_T20_M8	–6.301	4.335	–3.090	–3.232
X_T16_M10	1.831	–2.214	–0.060	1.142	0.536	J_T16_M10	10.301	–4.867	–2.494	4.925
X_T18_M10	–1.196	–2.497	0.760	–1.626	–1.133	J_T18_M10	–8.313	–0.525	1.239	–4.818
X_T20_M10	–3.805	–0.339	–3.203	–0.987	–2.316	J_T20_M10	–13.218	0.031	2.467	–7.462
X_T16_M12	2.187	1.140	–0.233	1.547	1.398	J_T16_M12	9.546	–1.262	–1.870	5.167
X_T18_M12	–2.026	–1.447	2.160	–0.726	–1.160	J_T18_M12	–12.803	–1.930	–0.559	–7.855
X_T20_M12	–6.810	–0.005	0.832	1.946	–3.220	J_T20_M12	–17.324	–4.129	0.790	–10.739

2.5　聚类分析

利用两种成品大米的综合得分进行聚类分析，聚类方法为组间联接，区间选择平方 Euclidean 距离，籼米和粳米品质的聚类结果分别见图 2。

由图 2A 可见，当聚类间距为 5 时，籼米的品质被分成 4 类，其中 X_T16_M6 单独为 1 类；

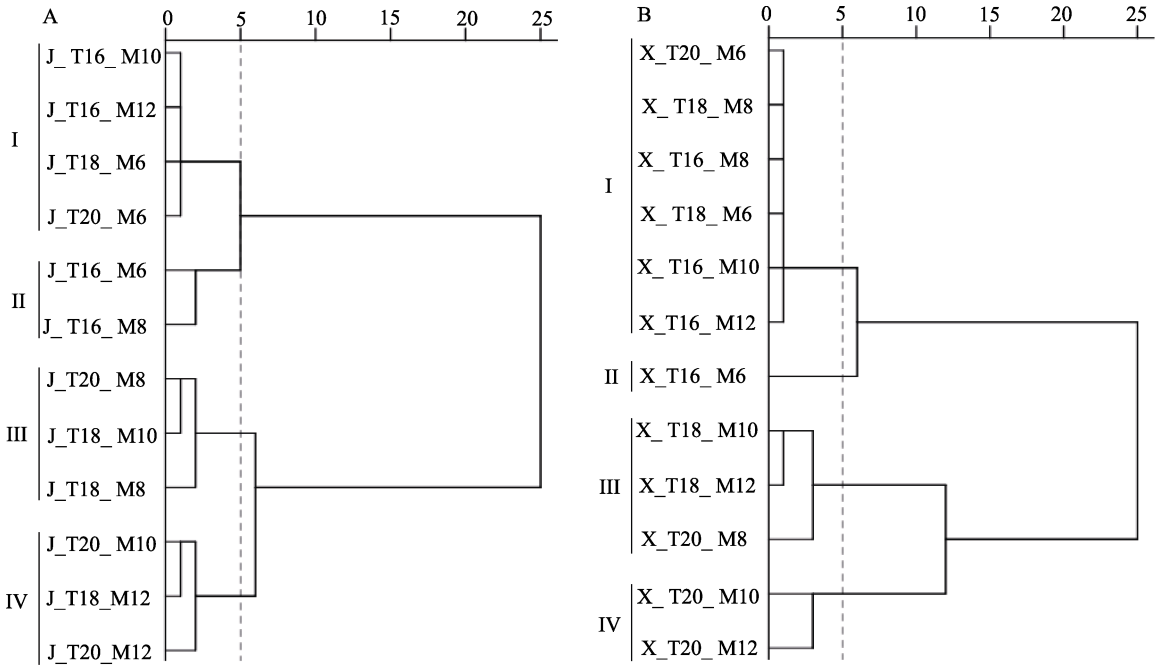

图 2　大米综合品质的聚类树状图（A：籼米，B 粳米）

Fig.2　Cluster dendrogram of rice comprehensive quality (A, Indica rice.B, Japonica rice.)

第 2 类为 X_T16_M8、X_T16_M10、X_T16_M12、X_T18_M6、X_T18_M8 和 X_T20_M6，表明实验籼米在 16 ℃储藏 8~12 个月、18 ℃储藏 6~8 个月和 20 ℃储藏 6 个月，对大米品质的保持效果相当；第 3 类为 X_T18_M10、X_T18_M12 和 X_T20_M8，表明 18 ℃下储藏 10 ~ 12 个月实验籼米品质没有明显变化，而在 20 ℃下保持同等品质只能存放 8 个月；第 4 类为 X_T20_M10 和 X_T20_M12，表明 20 ℃下储藏 10 ~ 12 个月期间实验籼米的品质变化不大。

由图 2B 可见，当聚类间距为 5 时，粳米的品质同样被分成 4 类，第 1 类为 J_T16_M6 和 J_T16_M8；第 2 类为 J_T16_M10、J_T16_M12、J_T18_M6 和 J_T20_M6 表明实验粳米在 16 ℃储藏 10~12 个月对实验粳米品质的保持效果与 18 和 20 ℃储藏 6 个月基本一致；第 3 类为 J_T18_M8、J_T18_M10 和 J_T20_M8，表明 18 ℃下储藏 8~10 个月实验粳米品质没有明显变化，而在 20 ℃下保持同等品质只能存放 8 个月；第 4 类为 J_T18_M12、J_T20_M10 和 J_T20_M12，表明 18 ℃下储藏 12 个月和 20 ℃储藏 10~12 个月对实验粳米品质的保持效果一致。

实验籼米和粳米在聚类上的差异除了受大米品种的影响外，与大米的水分密切相关，籼米的初始水分相对较低（13.3%），而粳米的初始水分偏高（15.6%），水分通常作为谷物安全储藏的判别标准，研究表明高水分使稻谷原粮的储藏稳定性下降，同样对大米的储藏品质和货架期也有不利影响[17-18]。因此，偏高水分的粳米在 18 和 20 ℃下品质变化较快，若要保持 16 ℃下同等品质，18 和 20 ℃的保质期会比低水分的籼米更短。

3 结论

两种实验大米储藏期间的脂肪酸值、黄粒米含量和大米淀粉的回生值均随温度升高和时间延长而逐渐升高，食味值逐渐下降，大米品质发生不同程度的劣变。温度越高、储藏时间越长，大米品质的综合得分越低，品质劣变越明显。偏低水分籼米 16 ℃储藏期 8~12 个月的品质与 18 ℃的储藏期 6~8 个月和 20 ℃储藏期 6 个月的品质相当，保持 18 ℃储藏 10~12 个月的品质在 20 ℃的储藏期约为 8 个月；偏高水分粳米保持 16 ℃储藏 10~12 个月的品质，在 18 和 20 ℃的储藏期约为 6 个月，可用于指导成品大米低温储藏实践中，温度条件的精细化控制。

参考文献：

[1] ZIEGLER V, FERREIRA C D, HOFFMANN J F, et al. Effects of moisture and temperature during grain storage on the functional properties and isoflavone profile of soy protein concentrate[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 37-44.

[2] KUYU C G, TOLA Y B, MOHAMMED A, et al. Evaluation of different grain storage technologies against storage insect pests over an extended storage time[J]. Journal of Stored Products Research, 2022, 96: 101945.

[3] 郑志华, 王玮, 许辉, 等. 云贵高原地区稻谷低温储藏技术研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2019, 35(3): 23-25.
ZHENG Z H, WANG W, XU H, et al. Research on low-temperature storage technology of rice in Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Grain and Oil Storage Science and Technology Communication, 2019, 35(3): 23-25.

[4] 施灿璨, 周福君, 夏吉庆, 等. 自然冷资源低温储藏仓设计与稻谷储藏试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 375-382.
SHI C C, ZHOU F J, XIA J Q, et al. Design of cool storage warehouse with natural cold resource and paddy storage experiment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 375-382.

[5] PARK C E, KIM Y S, PARK K J, et al. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures[J]. Journal of stored products research, 2012, 48: 25-29.

[6] 赵卿宇, 王占占, 陈博睿, 等. 大米储藏期间风味品质的变化研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 203-215.
ZHAO Q Y, WANG Z Z, CHEN B R, et al. Studies on the changes of flavor quality during rice storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 203-215.

[7] 周显青, 张玉荣, 李里特. 不同模拟储藏条件下粳米胚乳显微结构变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 329-334.
ZHOU X Q, ZHANG Y R, LI L T. Microscopic structure changes of Japonica milled rice endosperm under typical simulating storage conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 329-334.

[8] ZHAO Q, XUE Y, SHEN Q. Changes in the major aroma-active compounds and taste components of Jasmine rice during storage[J]. Food Research International, 2020, 133: 109160.

[9] BRYANT R J, MCCLUNG A M. Volatile profiles of aromatic and non-aromatic rice cultivars using SPME/GC–MS[J]. Food chemistry, 2011, 124(2): 501-513.

[10] HU X, LU L, GUO Z, et al. Volatile compounds, affecting factors and evaluation methods for rice aroma: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 136-146.

[11] 陈通, 李海瑜, 张定宇, 等. 基于风味特征的大米储藏过程脂肪酸值的预测研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4810-4815.
CHEN T, LI H Y, ZHANG D Y, et al. Prediction of fatty acid values during rice storage based on flavor characteristics[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(15): 4810-4815.

[12] 刘宏超, 李俊, 王步军. 不同水分含量巴西大豆储存期间的品质变化[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 38-41.
LI H C, LI J, WANG B J. Quality change of Brazil soybean with different moisture contents during storage[J]. China oils and fats, 2021, 46(1): 38-41.

[13] LIU Y, SHAD Z M, STRAPPE P, et al. A review on rice yellowing: physicochemical properties, affecting factors, and mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131265.

[14] ZHU L, WU G, CHENG L, et al. Effect of soaking and cooking on structure formation of cooked rice through thermal properties, dynamic viscoelasticity, and enzyme activity[J]. Food chemistry, 2019, 289: 616-624.

[15] 舒在习, 戴煌. 优质籼稻储藏期间稻米 RVA 特性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 112-119.
SHU Z X, DAI H. RVA characteristics of high quality indica rice during storage period[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 112−119.

[16] KE-XIN Q, LIN-LIN L, TIAN-YI L, et al. Correlation between physicochemical properties and eating qualities of rice[J]. Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), 2014, 21(3): 60-67.

[17] 李贞. 大米理化性质与食味品质的相关性[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(1): 89-92.
LI Z. Correlation between physicochemical characteristics and palatability qualities of rice[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(1): 89-92.

[18] 王若兰, 宋永令, 付鹏程. 中国稻谷储藏技术及装备的现状及发展趋势[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 66-70.
WANG R L, SONG Y L, FU P C. Present situation and development trend of rice storage technology and equipment in China[J]. China rice, 2021, 27(4): 66-70.

[19] 陈冰洁, 乔勇进, 王晓, 等. 不同水分含量大米贮藏品质及货架期研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(12): 104-108+113.
CHEN B J, QIAO Y J, WANG X, et al. Study on the storage quality and shelf life of rice with different moisture content[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(12): 104-108+113. 完

备注：本文的彩色图表可从本刊官网（http//lyspkj.ijournal.cn）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。