

舒在习, 陈一帆, 张威, 等. 储藏条件与优质籼稻品质变化关系的研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 393–400. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010155

SHU Zaixi, CHEN Yifan, ZHANG Wei, et al. Study on the Relationship between Storage Conditions and Quality Changes of High-quality Indica Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 393–400. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010155

· 贮运保鲜 ·

储藏条件与优质籼稻品质变化关系的研究

舒在习, 陈一帆, 张威, 王平坪, 戴煌

(武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023)

摘要:为探究储藏条件与优质籼稻品质变化的关系, 将优质籼稻“丰优 22”样品在 4 种储藏温度 (15、20、25 和 30 ℃)、3 种水分含量 (13.5%、14.5% 和 15.5%) 和 2 种气体成分 (氮气、空气) 条件下模拟储藏 360 d, 定期测定其黄粒米含量、发芽率、电导率、 α -淀粉酶活性、脂肪酸值、胶稠度、直链淀粉含量、米汤固形物、碘蓝值和米饭硬度、米饭黏度、米饭平衡度、米饭弹性、外观评分、口感评分、综合评分等指标。结果表明, 储藏温度越高、水分含量越大, 品质变化越明显; 在储藏温度、水分含量相同的情况下, 氮气储藏具有延缓品质变化的作用。采用主成分分析法对 16 个指标进行分析, 通过降维得到 5 个累积贡献率达到 81.055% 的主成分因子, 对各主成分中正特征值较大的指标进行筛选, 获得发芽率、电导率、碘蓝值和直链淀粉含量等具有代表性的品质特征指标。将 4 个特征指标与储藏温度、水分含量、气体成分进行相关性分析, 发现储藏温度对优质籼稻特征指标影响最大, 水分含量影响次之, 气体成分影响最小。

关键词: 优质籼稻储藏, 优质籼稻品质, 储藏温度, 水分含量, 气体成分

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)19-0393-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010155



本文网刊:

Study on the Relationship between Storage Conditions and Quality Changes of High-quality Indica Rice

SHU Zaixi, CHEN Yifan, ZHANG Wei, WANG Pingping, DAI Huang

(College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: In order to explore the relationship between storage conditions and the quality changes of high-quality indica rice, the high-quality indica rice “Fengyou 22” samples were stored at 4 storage temperatures (15, 20, 25 and 30 ℃) and 3 moisture contents (13.5%, 14.5% and 15.5%) and 2 gas composition (modified atmosphere with nitrogen, non-modified atmosphere) simulated storage for 360 d, and the yellow rice content, germination rate, electrical conductivity, α -amylase activity, fatty acid value, gel consistency, straight chain starch content, rice soup solids, iodine blue value and rice hardness, rice viscosity, rice balance, rice elasticity, appearance score, taste score, comprehensive score and other indicators were regularly determined. The results showed that the higher the storage temperature and the higher the moisture content, the more obvious the quality changed; under the same condition of storage temperature and moisture content, nitrogen storage had the effect of delaying the quality change. The principal component analysis method was used to analyze the 16 indicators, and 5 principal component factors with a cumulative contribution rate of 81.055% were obtained through dimensionality reduction. Representative quality indicators were chosen from the indicators with larger positive eigenvalues in each principal component, which were germination rate, electrical conductivity, iodine blue value and amylose content. The correlation analysis of the four characteristic indexes with storage temperature, moisture content and gas composition showed that storage temperature had the greatest influence on the characteristic indexes of high-quality indica rice, followed by moisture content then gas composition.

Key words: high-quality indica rice storage; high-quality indica rice quality; storage temperature; moisture content; gas composition

收稿日期: 2022-01-18

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0401604); 国家粮食和物资储备局委托研究项目 (CCS2020301)。

作者简介: 舒在习 (1965-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与储藏工程, E-mail: shuzaixi@163.com。

稻谷是我国最主要的粮食作物,大米全年消费量约 1.4 亿吨^[1],在我国粮食安全中占有极其重要的地位。稻谷在储藏过程中仍在进行新陈代谢活动^[2],导致其数量和质量下降。研究表明,储藏条件的优化可以有效延缓稻谷品质的劣变速度^[3]。在储藏条件中,温度、水分含量、气体成分是重要的环境因子^[4],在不同程度上影响稻谷的品质变化。Ahmad 等^[5]研究发现在低温下储藏的稻米品质明显好于高温下的稻米。稻谷含水量是影响其储藏稳定性的关键因素,也直接影响到稻谷储藏期间的品质^[6]。Sun 等^[7]的研究表明采用高浓度 CO₂ 气调储藏稻谷可以减缓稻谷储藏期间的品质劣变速度。

稻谷在储藏期间的品质主要是指理化品质和蒸煮食用品质,而表征稻谷理化品质与蒸煮食用品质的指标众多,且指标之间有交互和重叠的现象。Zhao 等^[8]的研究表明,短链支链淀粉含量较高的大米食用品质好,Xu 等^[9]认为,总体呈低蛋白质含量、低直链淀粉含量状态的稻谷食用品质好。脂肪酸含量变化作为衡量稻谷品质变化的敏感性理化指标,也反映了其食用品质的劣变程度^[10]。米汤固形物和碘蓝值的下降对米饭的光泽、口感和味道有影响,表明稻米食用品质出现劣变,很大程度上体现了淀粉结构的变化^[11-12]。米饭食味计与感官评价趋势一致,说明米饭食味计测得的米饭质构等指标能客观体现稻米食味品质^[13]。众多品质指标纷繁复杂,可以采用主成分分析法进行数据处理,包括降维和可视化^[14],获得具有代表性的品质评价指标。

储藏条件中的温度、水分含量、气体成分对优质籼稻的品质变化无疑具有重大影响,但这 3 个因子对品质的影响程度是有差别的。目前的研究大多集中于其中 1 个因子或 2 个因子对不同稻谷品种或不同品质指标的影响,并未研究储藏条件对品质特征指标影响的主次关系。因此探明影响优质籼稻品质变化的主次因子,对于有针对性地开发稻谷保质储藏技术,有效减缓储藏期间品质下降具有重要指导意义。

本文依据不同储藏温度、水分含量和气体成分交叉设计出 21 种储藏模式,定期检测每种储藏模式下优质籼稻的 16 项品质指标,通过主成分分析法对所测指标进行降维处理,获得具有代表性的品质特征指标,并将代表性特征指标和 3 种储藏环境因子进行相关性分析,以期探明储藏条件对优质籼稻品质的影响,明确影响优质籼稻品质变化的主次环境因子,为研发优质籼稻保质储藏技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

优质籼稻“丰优 22”产地湖北省沙洋县;普通包装袋(材料 PE,规格 220 mm×330 mm×0.14 mm)、气调包装袋(材料 PA,规格 220 mm×330 mm×0.2 mm)

武汉市九益包装制品有限公司;氮气 纯度 99.9%,武汉市明辉气体科技有限公司;无水乙醇、95%乙

醇、氢氧化钾、氢氧化钠、冰乙酸 分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;碘 分析纯,湖北大学化工厂;碘化钾 分析纯,武汉市江北化学试剂有限责任公司。

AL204 电子分析天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;JSFM-1 粮食水分测试磨 成都施特威科技发展有限公司;THU358 砻谷机、TM05C 碾米机 佐竹机械(苏州)有限公司;JXFM 锤式旋风磨 上海嘉定粮油仪器有限公司;GZX-9070MBE 数显鼓风干燥箱、HHS 电热恒温水浴锅 上海博讯实业有限公司医疗设备厂;SATAKE 米饭食味鉴定团、SATAKE 米饭硬度黏度计 佐竹机械(苏州)有限公司;DZQ45L/2 真空充气包装机 上海人民包装股份有限公司人民仪表厂;KBF115 恒温恒湿培养箱 德国 BINDER;JZDZ-I 脂肪酸值振荡器 国家粮食局成都粮食储藏科学研究所;T6 分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;DDS-11A 型电导率仪 上海雷磁仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 将水分含量 13.5%、14.5%、15.5% 的优质籼稻样品按表 1 的要求分组处理、编号,非气调储藏样品采用普通包装袋包装,每袋 1 kg;氮气气调储藏样品采用气调包装袋包装,每袋 1 kg,用真空充气包装机充入 99.9% 氮气并热合袋口,置于相应温湿度的培养箱内模拟储藏,培养箱温度波动范围±0.1 ℃。在模拟储藏期间每隔 7 d 检查 1 次样品,若发现害虫及时筛理清除;每隔 60 d 测定 1 次样品水分含量,并与原始水分相比较,采用调质或摊晾措施控制水分含量波动范围不超过 0.2%。

表 1 样品分组处理与编号

Table 1 Experimental sample group processing and numbering

水分含量 (%)	储藏温度(℃)						
	15		20		25		30
	非气调	气调	非气调	气调	非气调	气调	非气调
13.5	1	2	3	4	5	6	7
14.5	8	9	10	11	12	13	14
15.5	15	16	17	18	19	20	21

1.2.2 检测指标与方法 新收获的优质籼稻样品分组处理前,测定其黄粒米含量、发芽率、电导率、 α -淀粉酶活性、脂肪酸值、胶稠度、直链淀粉含量、米汤固形物、碘蓝值和米饭硬度、米饭黏度、米饭平衡度、米饭弹性、外观评分、口感评分、综合评分等指标,分组储藏 360 d 后,再测定各组样品的上述指标。

1.2.2.1 黄粒米含量 参考 GB/T 5496-1985《粮食、油料检验 黄粒米及裂纹粒检验法》^[15]。

1.2.2.2 发芽率 参考 GB/T 5520-2011《粮油检验 发芽试验》^[16]。

1.2.2.3 电导率 随机选取 80 粒无损伤稻谷并称重,先用自来水冲洗 3 次,再用纯净水冲洗 3 次,用滤纸吸干水分,放入装有 200 mL 纯净水的加盖锥形

瓶中, 在 25 ℃ 下浸泡 24 h, 期间摇匀 2~3 次, 使用电导率仪测定浸泡液电导率。

1.2.2.4 α -淀粉酶活性 参考 GB/T 5521-2008《粮油检验 谷物及其制品中 α -淀粉酶活性的测定 比色法》^[17]。

1.2.2.5 脂肪酸值 参考 GB/T 20569-2006《稻谷储存品质判定规则》中的附录 A 测定脂肪酸值^[18]。

1.2.2.6 胶稠度 参考 GB/T 22294-2008《粮油检验 大米胶稠度的测定》^[19]。

1.2.2.7 直链淀粉含量 参考 GB/T 15683-2008《大米 直链淀粉含量的测定》^[20]。

1.2.2.8 米汤固形物和碘蓝值 参照王肇慈^[21] 稻米蒸煮特性试验方法测定, 具体操作步骤如下:

称取相当于 7.0 g 干重一级大米的试样置于铜丝笼中, 在流水中洗 5 遍以淘去米糠, 再用蒸馏水洗 1 遍, 置于 200 mL 高型烧杯中, 加 50 ℃ 蒸馏水洗至 120 mL, 在沸水锅中煮 20 min(100 ℃ 开始计时), 取出铜丝笼置烧杯上至不再有米汤滴下, 将烧杯中米汤冷却至室温。

米汤固形物: 将米汤稀释至 100 mL, 离心后取 10 mL 于已知质量的小烧杯中, 烘干, 称重。米汤固形物以每克干大米的米汤中含有干物质的毫克数来表示。

碘蓝值: 取测定米汤固形物的离心液 1.0 mL 于约 50 mL 蒸馏水中, 加入 0.5 mol/L HCl 溶液 5 mL 及 0.2 g/100 mL 碘试剂 1 mL, 定容 100 mL, 在分光光度计上于波长 600 nm 处, 用 10 mm 比色皿测定

吸光度。米汤碘蓝值用吸光度表示。

1.2.2.9 米饭食味品质指标 米饭硬度、米饭黏度、米饭平衡度、米饭弹性、外观评分、口感评分、综合评分使用佐竹机械有限公司配套仪器和规定的米饭制作、测定方法测定。

1.3 数据处理

实验数据使用 Excel 统计, 采用 SPSS 19.0 软件进行标准化处理、主成分分析、pearson 相关性分析。相关性分析显著水平 $P<0.05$ 、 $P<0.01$, 主成分分析采用特征值>1 提取主成分。

2 结果与分析

2.1 优质籼稻品质指标间相关性分析

由表 2 可知, 1~21 组黄粒米含量均未超过 1.0%, 符合国家标准《稻谷》的规定, 且不同组别之间差异不大, 说明该指标变化不灵敏。所有实验组电导率、脂肪酸值、胶稠度、直链淀粉含量均较初始值上升, 发芽率、 α -淀粉酶活性、米汤固形物、碘蓝值均较初始值下降, 其中脂肪酸值、发芽率、米汤固形物、碘蓝值变化规律明显。通过不同组别间的实验结果对比分析发现, 随着储藏温度的升高和水分含量的增大, 脂肪酸值的上升率增加, 1 组(15 ℃、13.5%)、10 组(20 ℃、14.5%)、12 组(25 ℃、14.5%)、21 组(30 ℃、15.5%)上升率分别为 18%、52%、59%、127%。第 21 组脂肪酸值上升至 39.5 mg KOH/100 g, 超过籼稻“宜存”范围, 说明在温度 30 ℃、水分含量 15.5% 条件下优质籼稻储藏期不宜超过 1 年。发芽率的下降率呈

表 2 不同条件下优质籼稻“丰优 22”储藏前后理化品质的变化

Table 2 Changes of physical and chemical quality of high-quality indica rice "Fengyou 22" before and after storage under different conditions

组别	黄粒米含量 (%)	发芽率 (%)	电导率 ($\mu\text{S}/(\text{cm}\cdot\text{g})$)	α -淀粉酶活性 (U(单位))	脂肪酸值 (mg KOH/100 g)	胶稠度 (mm)	直链淀粉含量 (g/100 g)	米汤固形物 (mg/g)	碘蓝值 ($D_{600\text{nm}}$)
0	0.2±0.0	97±2	5.70±0.00	1.17±0.06	17.4±1.0	90±3	12.9±0.6	63.0±0.4	0.507±0.007
1	0.4±0.1	86±5	11.02±0.08	0.36±0.01	20.6±0.7	131±4	15.6±0.4	60.7±0.7	0.342±0.006
2	0.2±0.0	87±4	10.32±0.08	0.14±0.01	19.4±0.8	141±1	14.9±0.6	60.2±1.1	0.324±0.006
3	0.4±0.0	88±3	9.39±0.08	0.21±0.01	21.3±0.9	136±3	16.6±0.3	51.6±0.4	0.220±0.011
4	0.2±0.0	86±6	11.25±0.06	0.30±0.01	23.2±0.9	128±2	16.4±0.4	39.9±0.8	0.222±0.010
5	0.4±0.1	80±5	11.00±0.10	0.42±0.01	21.8±0.7	126±0	14.4±0.6	51.4±0.6	0.296±0.004
6	0.2±0.1	71±6	10.26±0.04	0.28±0.01	28.5±0.6	129±1	17.0±0.4	40.2±0.8	0.216±0.006
7	0.4±0.1	46±8	11.05±0.06	0.28±0.01	28.4±0.8	128±4	15.3±0.5	43.3±0.8	0.276±0.007
8	0.5±0.1	81±4	10.13±0.08	0.30±0.01	21.7±0.8	143±1	15.2±0.6	53.8±1.0	0.286±0.006
9	0.3±0.1	85±6	11.27±0.08	0.10±0.00	24.7±0.9	131±4	16.0±0.4	57.1±1.1	0.288±0.010
10	0.4±0.1	75±5	9.68±0.03	0.28±0.01	26.5±0.7	128±2	15.8±0.4	48.3±0.8	0.339±0.004
11	0.5±0.1	68±5	11.57±0.08	0.27±0.01	21.9±0.8	125±1	14.7±0.1	44.7±0.8	0.339±0.009
12	0.4±0.1	64±6	10.42±0.09	0.22±0.00	27.7±0.3	128±3	14.5±0.6	51.8±0.8	0.394±0.011
13	0.4±0.1	9±4	12.48±0.10	0.31±0.01	25.1±0.9	135±1	15.2±0.6	40.3±1.1	0.319±0.006
14	0.4±0.1	23±6	10.35±0.06	0.32±0.00	29.3±0.3	126±1	16.3±0.4	51.9±0.8	0.258±0.010
15	0.3±0.1	87±4	10.61±0.11	0.34±0.01	24.1±1.1	112±1	15.9±0.6	47.1±0.4	0.343±0.009
16	0.5±0.1	88±4	10.42±0.10	0.25±0.01	29.5±0.7	127±2	17.6±0.6	54.0±1.1	0.341±0.011
17	0.7±0.1	66±5	9.50±0.11	0.34±0.01	27.4±0.1	125±1	15.8±0.6	56.1±0.7	0.443±0.004
18	0.5±0.0	65±6	10.45±0.06	0.21±0.01	22.1±0.7	124±3	15.3±0.5	47.6±1.0	0.312±0.008
19	0.5±0.1	72±6	9.64±0.04	0.12±0.01	25.0±1.1	129±3	14.4±0.5	41.5±0.6	0.436±0.008
20	0.4±0.1	25±6	14.96±0.08	0.07±0.00	27.5±0.6	128±1	17.9±0.6	41.2±0.8	0.451±0.011
21	0.7±0.1	0±0	10.15±0.05	0.29±0.01	39.5±1.1	125±4	15.9±0.5	41.0±0.8	0.304±0.007

注: 0组为新收获的优质籼稻; 1~21组为不同条件下储藏360 d的优质籼稻; 表1、表3同。

现类似的规律性,1组、10组、12组、21组下降率分别为11%、23%、34%、100%。第21组发芽率降至0%,稻谷籽粒全部失活。同时发现,在储藏温度、水分含量相同的情况下,氮气储藏组品质变化率小于空气储藏组,说明氮气储藏具有延缓品质变化的作用。

米饭平衡度(米饭黏度/米饭硬度)能综合反映米饭黏度和米饭硬度的变化情况,与米饭的质构密切相关。由表3可知,随着储藏温度的升高和水分含量的增大,米饭平衡度的下降率增加,1组(15℃、13.5%)、10组(20℃、14.5%)、12组(25℃、14.5%)、21组(30℃、15.5%)下降率分别为39%、59%、61%、72%。在360 d储藏期内,米饭外观评分、口感评分和综合评分均较初始值下降,随着储藏温度的升高和水分含量的增大,3项评分值的下降率均增加,1组、10组、12组、21组外观评分的下降率分别为16%、21%、30%、38%,口感评分的下降率分别为23%、30%、36%、42%,综合评分的下降率分别为9%、14%、18%、23%。与理化品质类似,氮气储藏也有延缓食味品质变化的作用。

对21组不同储藏条件下的优质籼稻样品储藏360 d后所检测的16个指标进行相关性分析,结果如表4所示。黄粒米含量与脂肪酸值、碘蓝值呈显著正相关($P<0.05$);发芽率与脂肪酸值、米饭黏度、米饭平衡度、外观评分、口感评分、综合评分呈极显著相关($P<0.01$),与米汤固形物、米饭硬度、米饭弹性呈显著相关($P<0.05$);电导率仅与米饭黏度呈显著负相关($P<0.05$);脂肪酸值与米饭平衡度、米饭弹性、综合评分呈显著负相关($P<0.05$),与外观评分、口感评分呈极显著负相关($P<0.01$);米汤固形物与米

饭硬度、米饭黏度、米饭平衡度呈极显著相关($P<0.01$),与外观评分、口感评分、综合评分呈显著相关($P<0.05$);米饭硬度与米饭平衡度呈极显著负相关($P<0.01$),与米饭黏度、外观评分、口感评分、综合评分呈显著负相关($P<0.05$);米饭黏度与米饭平衡度呈极显著正相关($P<0.01$),与外观评分、口感评分、综合评分呈显著正相关($P<0.05$);米饭平衡度与外观评分、口感评分、综合评分呈极显著正相关($P<0.01$);米饭弹性与外观评分、口感评分呈显著相关($P<0.05$),与综合评分呈极显著相关($P<0.01$);外观评分与口感评分、综合评分呈极显著正相关($P<0.01$);口感评分与综合评分呈极显著正相关($P<0.01$)。

由此可见,各指标之间的信息相互重叠,互相影响,关系很复杂,给统计分析带来较大的困难,有必要采用主成分分析法将较多的指标简化为少数几个代表性指标。

2.2 优质籼稻品质指标主成分分析

对所测得的16个指标进行主成分分析,筛选出少数能充分反映多个指标所提供信息的关键性指标。由表5得知,排名前3的成分方差贡献率分别为40.594%、15.097%和10.935%,比重较大,排名前5的主成分累积贡献率达到81.055% $>80\%$,且特征值均大于1,表明将16个指标综合为5个主成分可以反映优质籼稻品质情况的大部分信息。

从表6可知,对第一个主成分贡献较大的是发芽率、脂肪酸值、米汤固形物、米饭硬度、米饭黏度、米饭平衡度、外观评分、口感评分、综合评分,其中,发芽率的载荷量最大,大部分指标随着稻谷新鲜度

表3 不同条件下优质籼稻“丰优22”储藏前后米饭食味品质的变化

Table 3 Changes in the eating quality of high-quality indica rice "Fengyou 22" before and after storage under different conditions

组别	米饭硬度(分)	米饭黏度(分)	米饭平衡度(分)	米饭弹性(分)	外观评分(分)	口感评分(分)	综合评分(分)
0	2.865±0.006	0.518±0.011	0.181±0.004	0.892±0.008	8.1±0.0	8.1±0.1	81.0±0.9
1	1.697±0.010	0.186±0.008	0.110±0.004	0.882±0.010	6.8±0.1	6.2±0.1	73.7±0.8
2	1.858±0.008	0.214±0.006	0.115±0.004	0.883±0.006	6.4±0.1	5.8±0.1	70.3±0.8
3	2.693±0.008	0.162±0.009	0.060±0.003	0.882±0.010	6.7±0.0	6.0±0.3	73.8±1.1
4	2.377±0.010	0.166±0.008	0.070±0.003	0.888±0.008	6.2±0.1	5.9±0.1	70.2±1.0
5	1.997±0.009	0.162±0.008	0.081±0.004	0.865±0.007	6.0±0.1	5.6±0.1	69.5±0.5
6	2.598±0.011	0.157±0.007	0.061±0.002	0.858±0.009	5.8±0.1	5.4±0.2	68.0±0.4
7	2.304±0.004	0.136±0.011	0.059±0.006	0.862±0.006	5.5±0.1	5.2±0.1	65.1±1.0
8	1.573±0.010	0.172±0.009	0.109±0.007	0.880±0.011	6.7±0.1	6.2±0.0	72.6±0.8
9	1.828±0.008	0.163±0.011	0.089±0.006	0.893±0.008	7.3±0.1	6.6±0.2	77.3±0.9
10	1.620±0.011	0.120±0.007	0.075±0.005	0.882±0.008	6.4±0.1	5.7±0.1	69.8±0.9
11	2.080±0.013	0.108±0.010	0.052±0.006	0.885±0.006	6.0±0.0	5.5±0.2	68.6±0.7
12	2.122±0.010	0.148±0.008	0.070±0.004	0.880±0.011	5.7±0.1	5.2±0.1	66.2±1.1
13	2.494±0.006	0.108±0.010	0.043±0.004	0.842±0.008	5.6±0.1	5.2±0.1	59.5±0.7
14	2.368±0.011	0.140±0.011	0.060±0.005	0.858±0.008	5.1±0.1	4.9±0.0	60.7±0.9
15	1.836±0.008	0.175±0.008	0.095±0.004	0.876±0.007	6.7±0.1	6.1±0.1	74.4±0.7
16	1.977±0.008	0.148±0.006	0.075±0.003	0.852±0.011	6.4±0.0	5.7±0.1	70.4±1.0
17	1.848±0.011	0.172±0.007	0.093±0.004	0.868±0.008	6.3±0.1	5.8±0.1	69.7±1.4
18	2.142±0.009	0.125±0.004	0.059±0.002	0.882±0.010	6.0±0.1	5.3±0.1	68.7±0.9
19	2.615±0.007	0.133±0.009	0.051±0.004	0.865±0.005	6.5±0.1	6.0±0.3	71.1±1.1
20	2.645±0.006	0.098±0.010	0.037±0.004	0.887±0.008	6.1±0.1	5.6±0.1	70.1±1.2
21	2.590±0.009	0.133±0.003	0.051±0.001	0.866±0.006	5.0±0.1	4.7±0.2	62.2±1.1

表 4 优质籼稻“丰优 22”品质指标间相关系数矩阵
Table 4 Correlation coefficient matrix between “Fengyou 22” quality indicators

	黄粒米 含量	发芽 率	电导 率	α -淀粉 酶活性	脂肪 酸值	胶稠 度	直链淀粉 粉含量	米汤 固形物	碘蓝 值	米饭 硬度	米饭 黏度	米饭 平衡度	米饭 弹性	外观 评分	口感 评分	综合 评分
黄粒米含量	1															
发芽率	-0.379	1														
电导率	-0.202	-0.398	1													
α -淀粉酶活	0.159	-0.001	-0.273	1												
脂肪酸值	0.443*	-0.663**	-0.024	0.031	1											
胶稠度	-0.158	0.093	-0.038	-0.272	-0.336	1										
直链淀粉含量	-0.130	-0.092	0.298	-0.193	0.337	-0.115	1									
米汤固形物	0.010	0.506*	-0.330	0.050	-0.395	0.299	-0.133	1								
碘蓝值	0.454*	-0.122	0.237	-0.294	0.081	-0.214	-0.144	0.081	1							
米饭硬度	-0.010	-0.536*	0.245	-0.282	0.385	-0.049	0.280	-0.702**	-0.144	1						
米饭黏度	-0.333	0.624**	-0.461*	0.187	-0.379	0.254	-0.117	0.670**	-0.236	-0.458*	1					
米饭平衡度	-0.188	0.647**	-0.376	0.241	-0.451*	0.240	-0.206	0.800**	-0.033	-0.824**	0.869**	1				
米饭弹性	-0.220	0.450*	0.103	-0.387	-0.435*	0.078	-0.035	0.277	0.057	-0.323	0.214	0.317	1			
外观评分	-0.243	0.788**	-0.104	-0.270	-0.625**	0.202	0.050	0.503*	0.119	-0.513*	0.454*	0.579**	0.539*	1		
口感评分	-0.289	0.769**	-0.074	-0.209	-0.625**	0.219	0.033	0.458*	0.071	-0.482*	0.502*	0.613**	0.519*	0.977**	1	
综合评分	-0.241	0.825**	-0.117	-0.267	-0.543*	0.051	0.111	0.449*	0.073	-0.448*	0.483*	0.555**	0.654**	0.939**	0.921**	1

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关; **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; 表9同。

表 5 主成分特征值及贡献率
Table 5 Principal component eigenvalues and contribution rate

成分	初始特征值			提取主成分的特征值		
	合计	方差的 贡献率(%)	累积 贡献率(%)	合计	方差的 贡献率(%)	累积 贡献率(%)
1	6.495	40.594	40.594	6.495	40.594	40.594
2	2.416	15.097	55.691	2.416	15.097	55.691
3	1.750	10.935	66.626	1.750	10.935	66.626
4	1.251	7.818	74.444	1.251	7.818	74.444
5	1.058	6.611	81.055	1.058	6.611	81.055
6	0.893	5.584	86.639			
7	0.643	4.017	90.655			
8	0.535	3.345	94.000			
9	0.314	1.963	95.963			
10	0.289	1.808	97.772			
11	0.171	1.069	98.841			
12	0.091	0.566	99.407			
13	0.066	0.412	99.819			
14	0.017	0.106	99.925			
15	0.011	0.069	99.994			
16	0.001	0.006	100.000			

的降低而降低^[22], 因此定义为“新鲜度因子”, 结合表 7 可知, 其回归方程为:

$$F_1 = -0.131X_1 + 0.347X_2 - 0.115X_3 - 0.022X_4 - 0.280X_5 + 0.110X_6 - 0.058X_7 + 0.285X_8 - 0.014X_9 - 0.275X_{10} + 0.292X_{11} + 0.333X_{12} + 0.224X_{13} + 0.346X_{14} + 0.345X_{15} + 0.337X_{16}$$

第二个主成分中电导率的正载荷量最大, 电导率体现稻谷细胞膜的完整度、通透性^[23]。因此将其定义为“完整因子”, 其回归方程为:

$$F_2 = -0.204X_1 + 0.008X_2 + 0.414X_3 - 0.493X_4 - 0.099X_5 + 0.032X_6 + 0.277X_7 - 0.213X_8 + 0.126X_9 + 0.240X_{10} - 0.242X_{11} - 0.259X_{12} + 0.289X_{13} + 0.210X_{14} + 0.182X_{15} + 0.228X_{16}$$

表 6 成分矩阵
Table 6 Component matrix

指标	成分				
	1	2	3	4	5
黄粒米含量(X_1)	-0.333	-0.317	0.720	-0.005	0.239
发芽率(X_2)	0.883	0.012	-0.105	0.194	-0.138
电导率(X_3)	-0.293	0.644	0.040	-0.125	-0.209
α -淀粉酶活(X_4)	-0.057	-0.766	-0.126	0.281	-0.356
脂肪酸值(X_5)	-0.714	-0.154	0.173	0.345	0.419
胶稠度(X_6)	0.280	0.050	-0.322	-0.716	0.449
直链淀粉含量(X_7)	-0.148	0.430	-0.207	0.599	0.493
米汤固形物(X_8)	0.726	-0.331	0.184	-0.131	0.322
碘蓝值(X_9)	-0.036	0.195	0.875	-0.129	-0.008
米饭硬度(X_{10})	-0.701	0.372	-0.323	-0.011	0.117
米饭黏度(X_{11})	0.744	-0.376	-0.260	0.061	0.212
米饭平衡度(X_{12})	0.849	-0.402	0.033	0.005	0.108
米饭弹性(X_{13})	0.570	0.449	0.134	-0.042	-0.129
外观评分(X_{14})	0.882	0.327	0.132	0.104	0.034
口感评分(X_{15})	0.879	0.283	0.067	0.092	0.001
综合评分(X_{16})	0.858	0.354	0.123	0.263	0.009

第三个主成分中碘蓝值的正载荷量最大, 碘蓝值与稻米胚乳淀粉结构的变化相关^[24], 因此将其定义为“结构因子”, 其回归方程为:

$$F_3 = 0.544X_1 - 0.079X_2 + 0.030X_3 - 0.095X_4 + 0.131X_5 - 0.243X_6 - 0.156X_7 + 0.139X_8 + 0.662X_9 - 0.244X_{10} - 0.196X_{11} + 0.025X_{12} + 0.101X_{13} + 0.100X_{14} + 0.050X_{15} + 0.093X_{16}$$

第四个主成分中直链淀粉含量的正载荷量最大, 指标体现稻谷直链淀粉含量的变化, 因此将其定义为“成分因子”, 其回归方程为:

$$F_4=-0.004X_1+0.174X_2-0.112X_3+0.251X_4+0.309X_5-0.640X_6+0.536X_7-0.117X_8-0.115X_9-0.010X_{10}+0.055X_{11}+0.004X_{12}-0.038X_{13}+0.093X_{14}+0.082X_{15}+0.235X_{16}$$

表 7 主成分的特征向量

Table 7 Eigenvectors of principal components

指标	成分				
	1	2	3	4	5
黄粒米含量(X_1)	-0.131	-0.204	0.544	-0.004	0.232
发芽率(X_2)	0.347	0.008	-0.079	0.174	-0.134
电导率(X_3)	-0.115	0.414	0.030	-0.112	-0.204
α -淀粉酶活(X_4)	-0.022	-0.493	-0.095	0.251	-0.346
脂肪值(X_5)	-0.280	-0.099	0.131	0.309	0.407
胶稠度(X_6)	0.110	0.032	-0.243	-0.640	0.436
直链淀粉含量(X_7)	-0.058	0.277	-0.156	0.536	0.480
米汤固形物(X_8)	0.285	-0.213	0.139	-0.117	0.313
碘蓝值(X_9)	-0.014	0.126	0.662	-0.115	-0.008
米饭硬度(X_{10})	-0.275	0.240	-0.244	-0.010	0.114
米饭黏度(X_{11})	0.292	-0.242	-0.196	0.055	0.206
米饭平衡度(X_{12})	0.333	-0.259	0.025	0.004	0.105
米饭弹性(X_{13})	0.224	0.289	0.101	-0.038	-0.125
外观评分(X_{14})	0.346	0.210	0.100	0.093	0.033
口感评分(X_{15})	0.345	0.182	0.050	0.082	0.001
综合评分(X_{16})	0.337	0.228	0.093	0.235	0.009

第五个主成分中直链淀粉含量的正载荷量仍然最大,胶稠度的正载荷量次之,胶稠度反映的是米胶在冷却后的延展性及米饭的延展性^[25],因此将其定义为“延展因子”,其回归方程为:

$$F_5=0.232X_1-0.134X_2-0.204X_3-0.346X_4+0.407X_5+0.436X_6+0.480X_7+0.313X_8-0.008X_9+0.11X_{10}+0.206X_{11}+0.105X_{12}-0.125X_{13}+0.033X_{14}+0.001X_{15}+0.009X_{16}$$

综合主成分得分 F 与 5 个主成分(F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5)的回归方程如下:

$$F=0.501F_1+0.186F_2+0.135F_3+0.096F_4+0.082F_5$$

综上所述,综合主成分得分 F 与指标 X 之间的回归方程如下:

$$F=-0.001X_1+0.170X_2-0.004X_3-0.120X_4-0.078X_5+0.002X_6+0.092X_7+0.136X_8+0.094X_9-0.118X_{10}+0.097X_{11}+0.131X_{12}+0.166X_{13}+0.238X_{14}+0.221X_{15}+0.247X_{16}$$

从表 8 不同储藏条件下的 21 组样品各主成分得分、综合得分和排名结果可以看出,排名前三的是第 9、第 1 和第 2 组,储藏温度、水分含量和是否气调分别是 20 ℃、14.5% 和氮气气调,15 ℃、13.5% 和非气调,20 ℃、13.5% 和氮气气调。排名后三的是第 21、第 13 和第 14 组,储藏温度、水分含量和是否气调分别是 30 ℃、15.5% 和非气调,30 ℃、14.5% 和氮气气调,30 ℃、14.5% 和非气调。综合得分排名与实际情况较一致,储藏温度越高品质劣变越快^[26-28],气调储藏可以减缓品质劣变程度^[29-30],说明主成分分析法在分析所测 16 个指标时保留了绝大部分信息,较为真实地反映了品质变化的实际状况。

综合上文的成分矩阵表 and 对应解析内容以及综合得分情况,选择发芽率、电导率、碘蓝值和直链淀粉含量作为优质籼稻“丰优 22”的品质特征指标。

表 8 主成分得分及综合得分排名

Table 8 Principal component score and comprehensive score ranking

组别	成分得分及排名						综合得分排名
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5	综合得分	
1	3.679	-0.867	0.451	0.034	-0.123	1.735	2
2	3.746	-0.375	-1.099	-2.192	0.934	1.523	3
3	1.590	1.078	-1.732	0.111	1.106	0.864	6
4	0.671	1.098	-2.344	0.907	-1.006	0.230	10
5	0.704	-1.755	-0.301	-0.138	-1.672	-0.164	12
6	-1.450	0.115	-2.832	1.228	0.378	-0.938	17
7	-2.257	-0.596	-0.733	-0.260	-0.372	-1.395	18
8	3.235	-1.061	-0.020	-1.311	0.728	1.353	4
9	3.747	2.084	0.118	0.187	0.790	2.363	1
10	0.702	-0.225	0.770	0.411	-0.368	0.423	8
11	-0.777	0.642	0.981	-0.613	-1.871	-0.349	15
12	-0.680	-0.610	0.919	-1.036	-0.277	-0.453	16
13	-4.057	-0.178	-0.823	-1.839	-0.602	-2.402	20
14	-3.161	-1.704	-1.084	0.120	0.591	-1.987	19
15	2.055	-0.234	0.466	2.547	-1.664	1.158	5
16	0.165	-0.321	0.512	1.682	1.671	0.391	9
17	0.870	-1.970	2.634	0.708	0.865	0.563	7
18	-0.595	0.285	0.577	-0.251	-0.857	-0.261	14
19	-0.374	1.199	1.460	-0.889	-0.179	0.133	11
20	-2.660	4.941	1.293	0.014	0.497	-0.196	13
21	-5.155	-1.546	0.787	0.580	1.432	-2.591	21

2.3 品质特征指标与储藏条件的相关性分析

将 4 个品质特征指标与 3 种储藏条件进行 Pearson 相关性分析,气调方式赋值 O₂ 浓度 0%,非气调方式赋值 O₂ 浓度 21%,结果如表 9 所示。

表 9 品质特征指标与储藏条件的相关系数
Table 9 Correlation coefficient of quality characteristic index and storage condition

储藏条件	品质特征指标			
	发芽率	电导率	碘蓝值	直链淀粉含量
储藏温度	-0.754**	0.378	-0.101	0.096
水分含量	-0.307	0.071	0.644**	0.158
气体成分	-0.016	-0.499*	0.117	-0.329

由表 9 可知,储藏温度与发芽率呈极显著负相关($P<0.01$);水分含量与碘蓝值呈极显著正相关($P<0.01$);气体成分与电导率呈显著负相关($P<0.05$)。储藏温度对优质籼稻品质影响最大,水分含量影响次之,气体成分影响最小。

3 结论

将不同水分含量的优质籼稻,在不同温度和不同气体成分条件下储藏 360 d,测定储藏前后样品的理化、生理生化和食味品质指标的变化,对所测指标进行相关性分析和主成分分析,并求得主要特征指标与储藏条件之间的相关系数。研究发现,不同指标之间的信息相互重叠、互相影响、关系复杂;降维得到的 4 个具有代表性的品质特征指标是发芽率、电导率、碘蓝值和直链淀粉含量,这 4 个主要指标可以反映优质籼稻品质情况的大部分信息;储藏条件中温度对优质籼稻品质影响最大,水分含量影响次之,气体成分影响最小。本研究对储藏条件与优质籼稻品质变化关系进行探索,其结果为开发优质籼稻保质储藏技术提供理论依据,建议在储藏生产实践中,首先考虑控温储藏技术,其次是控水储藏技术,再次是气调储藏技术;在经济条件允许的情况下,逐步实现控温、控水和气调相结合的综合储藏技术。

参考文献

[1] WANG H, ZHU S M, RAMASWAMY H S, et al. Effect of high pressure processing on rancidity of brown rice during storage [J]. *LWT*, 2018, 93: 405–411.

[2] WANG C Y, FENG Y C, FU T X, et al. Effect of storage on metabolites of brown rice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(12): 4364–4377.

[3] WANG H W, WANG Y, WANG R, et al. Impact of long-term storage on multi-scale structures and physicochemical properties of starch isolated from rice grains[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107255.

[4] 王若兰. 粮油储藏学: 第 2 版 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016: 111–113. [WANG R L. Grain and oil storage science: 2nd Edition[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2016: 111–113.]

[5] AHMAD U, ALFARO L, YEBOAH A M, et al. Influence of

milling intensity and storage temperature on the quality of Catahoula rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 75: 386–392.

[6] 李佳, 曹毅, 赵旭, 等. 2 种储粮水分梗稻储藏周期内品质变化及效益分析[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(3): 110–115. [LI J, CAO Y, ZHAO X, et al. Quality change and benefit analysis of two kinds of stored-grain moisture japonica rice during storage period [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(3): 110–115.]

[7] SUN S G, LI B P, YANG T, et al. Preservation mechanism of high concentration carbon dioxide controlled atmosphere for paddy rice storage based on quality analyses and molecular modeling tools[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 85: 279–285.

[8] ZHAO C, XIE J, LI L, et al. Comparative transcriptomic analysis in paddy rice under storage and identification of differentially regulated genes in response to high temperature and humidity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(37): 8145–8153.

[9] XU Y J, YING Y N, OUYANG S H, et al. Factors affecting sensory quality of cooked japonica rice[J]. *Rice Science*, 2018, 25(6): 330–339.

[10] 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 W Y, SHI T Y, YANG D, et al. Study on quality changes of "Yongyou 9" high-quality rice during storage under different temperatures[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(12): 66–69, 72.]

[11] 李少寅, 舒在习. 米汤碘蓝值测定条件的探讨[J]. *粮食与饲料工业*, 2014(4): 5–7, 13. [LI S Y, SHU Z X. Discussion on the determination conditions of the iodine blue value of rice soup[J]. *Cereal and Feed Industries*, 2014(4): 5–7, 13.]

[12] 倪姗姗, 吴莉莉, 许卫国, 等. 优质稻谷在不同储藏条件下米汤固形物含量的变化规律研究[J]. *粮食科技与经济*, 2015, 40(1): 29–30, 63. [NI S S, WU L L, XU W G, et al. Study on the variationlaw of rice soup solid content of high-quality rice under different storage conditions[J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2015, 40(1): 29–30, 63.]

[13] 陆建忠, 张亚静, 沈超群. 米饭食味计与人工评鉴稻米食味品质比较试验[J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(16): 57–59. [LU J Z, ZHANG Y J, SHEN C Q. Comparison of rice taste meter and manual evaluation of rice taste quality[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, 26(16): 57–59.]

[14] YI S Y, LAI Z H, HE Z Y, et al. Joint sparse principal component analysis[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 61: 524–536.

[15] 商业部粮食储运局. GB/T 5496-1985 粮食、油料检验 黄粒米及裂纹粒检验法 [S]. 北京: 国家标准局, 1985. [Grain Storage and Transportation Bureau, Ministry of Commerce. GB/T 5496-1985 Inspection of grain and oils-Methods for determination yellow-coloured rice and cracked kernels[S]. Beijing: National Bureau of Standards, 1985.]

[16] 国家粮食局. GB/T 5520-2011 粮油检验 发芽试验 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2011. [National Grain Administration. GB/T 5520-2011 Inspection of grain and oils-Germination test of seeds[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2011.]

- [17] 国家粮食局. GB/T 5521-2008 粮油检验 谷物及其制品中 α -淀粉酶活性的测定 比色法[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008. [National Grain Administration. GB/T 5521-2008 Inspection of grain and oils-Determination of alpha-amylase activity in cereal and cereal products-Colorimetric method[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2008.]
- [18] 国家粮食局标准质量中心. GB/T 20569-2006 稻谷储存品质判定规则[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006. [Standard Quality Center of National Grain Administration. GB/T 20569-2006 Guidelines for evaluation of paddy storage character[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2006.]
- [19] 国家粮食局. GB/T 22294-2008 粮油检验 大米胶稠度的测定[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008. [National Grain Administration. GB/T 22294-2008 Inspection of grain and oils-Determination of rice adhesive strength[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2008.]
- [20] 国家粮食局. GB/T 15683-2008 大米 直链淀粉含量的测定[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008. [National Grain Administration. GB/T 15683-2008 Rice-Determination of amylose content[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2008.]
- [21] 王肇慈. 粮油食品品质分析: 第2版[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 326-328. [WANG Z C. Grain, oil and food quality analysis: 2nd Edition[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2000: 326-328.]
- [22] 周显青, 祝方清, 张玉荣, 等. 不同储藏年限稻谷的储藏特性、生理生化指标及其糊化特性分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(12): 108-114, 124. [ZHOU X Q, ZHU F Q, ZHANG Y R, et al. Analysis of storage characteristics, physiological and biochemical indexes and gelatinization characteristics of paddy with different storage years[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2020, 35(12): 108-114, 124.]
- [23] 黄象鹏, 李宛婷, 周海芳, 等. 稻谷实仓储藏品质变化规律研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 101-107. [HUANG X P, LI W T, ZHOU H F, et al. Study on the quality change law of rice grain storage[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2021, 36(6): 101-107.]
- [24] 周显青, 张少昌, 梁彦伟. 不同储藏条件下蒸谷米蒸煮特性的变化研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 77-84. [ZHOU X Q, ZHANG S C, LIANG Y W. Variation of cooking characteristics of parboiled rice under different storage conditions[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 77-84.]
- [25] 周延智, 谢茹. 不同储藏温度对优质稻胶稠度变化的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(10): 52-54. [ZHOU Y Z, XIE R. Effects of different storage temperatures on the consistency of high-quality rice glue[J]. Food Industry, 2015, 36(10): 52-54.]
- [26] SHI J Y, ZHANG T, GENG S F, et al. Effect of accumulated temperature on flavour and microbial diversity of japonica rice during storage[J]. Journal of Stored Products Research, 2021, 92: 101779.
- [27] ZHAO Q Y, GUO H, HOU D Z, et al. Influence of temperature on storage characteristics of different rice varieties[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(4): 935-945.
- [28] WANG T, SHE N N, WANG M N, et al. Changes in physicochemical properties and qualities of red brown rice at different storage temperatures[J]. Foods, 2021, 10(11): 2658.
- [29] KLAYKRUYAT S, MAHAYOTHEE B, KHUWITJARU P, et al. Influence of packaging materials, oxygen and storage temperature on quality of germinated parboiled rice[J]. LWT, 2020, 121: 108926.
- [30] 吕晨泽, 章程, 李燕, 等. 浙江省优质晚稻谷最佳储藏方式和耐储性研究[J]. 粮食储藏, 2021, 50(2): 30-37. [LÜ C Z, ZHANG C, LI Y, et al. Research on the optimal storage method and storage tolerance of high-quality late rice in Zhejiang Province[J]. Grain Storage, 2021, 50(2): 30-37.]