

## 偏高水分粳稻谷储藏期间粮堆空气特性与品质指标的变化

陶利思, 秦文, 魏征, 段义三, 马建勇, 张洪清, 李兴军

### Changes in Intergranular Air Properties of Grain Bulk and Quality Parameters in Japonica Paddy with Slightly High Moisture during Storage

TAO Lisi, QIN Wen, WEI Zheng, DUAN Yisan, MA Jianyong, ZHANG Hongqing, and LI Xingjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060097>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 粳稻谷低温仓储期间粮堆特性及加工品质的变化

Changes in Grain Bulk Properties of Japonica Paddy in a Warehouse and Processing Quality during Lower Temperature Storage  
食品工业科技. 2021, 42(9): 289–298

#### 流化床干燥工艺对稻谷糊化特性的影响

Influence of fluidized bed drying technology on the pasting properties of paddy rice  
食品工业科技. 2017(03): 249–254

#### 温度对高水分稻谷储藏品质的影响及其预测模型研究

Effect of Temperature on Storage Quality of High-Moisture Paddy and Its Prediction Model  
食品工业科技. 2020, 41(19): 304–308,326

#### 稻谷低温低湿干燥特性与水分迁移分析

Analysis of drying characteristics and moisture migration for paddy rice under low temperatures and low relative humidities  
食品工业科技. 2017(05): 114–119

#### 常压空气冷等离子处理对陈小麦生理生化及面团糊化特性的影响

Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma on the Physiological Biochemistry of Stale Wheat and Its Dough Pasting Properties  
食品工业科技. 2020, 41(16): 37–42

#### 稻谷储藏过程霉菌挥发性物质和品质分析

Analysis of Mould Volatile Substances and Quality during Rice Storage  
食品工业科技. 2020, 41(8): 90–95



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶利思, 秦文, 魏征, 等. 偏高水分粳稻谷储藏期间粮堆空气特性与品质指标的变化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 328–337. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060097

TAO Lisi, QIN Wen, WEI Zheng, et al. Changes in Intergranular Air Properties of Grain Bulk and Quality Parameters in Japonica Paddy with Slightly High Moisture during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 328–337. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060097

· 贮运保鲜 ·

# 偏高水分粳稻谷储藏期间粮堆空气特性与品质指标的变化

陶利思<sup>1,2</sup>, 秦文<sup>1</sup>, 魏征<sup>2</sup>, 段义三<sup>3</sup>, 马建勇<sup>3</sup>, 张洪清<sup>2</sup>, 李兴军<sup>2,\*</sup>

(1. 四川农业大学食品学院, 四川雅安 625014;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院昌平基地, 北京 102209;

3. 鲁粮集团山东军粮储备库有限公司, 山东德州 251100)

**摘要:** 为了寻找偏高水分稻谷低温短期储藏期间的评价指标, 本研究基于平衡水分方程和牛顿拉弗逊迭代方法分析了高大平房仓粳稻谷储藏期间粮堆各层空气相对湿度 (RH) 和湿球温度的变化, 并分析它们的积累值与大米热特性、热机械特性、脂肪酸成分及外观品质指标的关系。结果表明, 冬季入仓的含水率 15.3% 的粳稻谷在 163 d 储藏期间, 当粮堆平均温度由 8.3 °C 增加到 22.9 °C, 一、二、三、四层的 RH 由 75.1% 分别增加了 3.6%、3.0%、2.9%、2.9%, 湿球温度由 6.2 °C 分别增加了 15.21、13.57、13.47、13.29 °C, 显示粮堆没有虫、霉菌危害。由 DSC 测定的米粉淀粉糊化温度保持不变。混合试验仪分析表明, 随着稻谷储存时间由 45 d 增加到 213 d, 米粉团发育和稳定时间、回生扭矩逐渐增加, 而酶解速率降低。GC-MS 分析表明稻谷在 213 d 储存期间, 重要种类脂肪酸成分所占比例不变。外因指标中粮堆最高积温、最高温度对应的湿球积温; 内因指标淀粉糊化峰值温度、面积及高度, 米粉团发育与稳定时间、淀粉糊化峰值扭矩、回生扭矩及酶解速率, 脂肪酸成分 C<sub>14:1</sub>、C<sub>14:0</sub>、C<sub>20:5n3</sub>、C<sub>20:3n6</sub>、C<sub>20:2</sub>、C<sub>20:1</sub>、C<sub>24:1</sub>、C<sub>24:0</sub>, 以及大米外观品质指标整精米率、小碎米率、籽粒尺寸均可作为偏高水分粳稻谷低温储藏的评价指标。

**关键词:** 偏高水分, 粳稻谷, 粮堆空气特性, 整精米率, 淀粉糊化, 面团糊化速率

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)02-0328-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060097

本文网刊: 

## Changes in Intergranular Air Properties of Grain Bulk and Quality Parameters in Japonica Paddy with Slightly High Moisture during Storage

TAO Lisi<sup>1,2</sup>, QIN Wen<sup>1</sup>, WEI Zheng<sup>2</sup>, DUAN Yisan<sup>3</sup>, MA Jianyong<sup>3</sup>, ZHANG Hongqing<sup>2</sup>, LI Xingjun<sup>2,\*</sup>

(1. Food College, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. Changping pilot, Academy of the National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102209, China;

3. Shandong Grain Reserve Depot for Army Provision, Luliang Jituan Co., Ltd., Dezhou 251100, China)

**Abstract:** In order to evaluate the quality parameters for short-term stored paddy with slightly high moisture, this study determined the changes in intergranular air relative humidity (RH) and wetbulb temperature of grain bulk with an equilibrium moisture model and Newton-Raphson method, and analyzed the effect of their accumulation amount during storage on thermal and thermo-mechanical properties, and lipid components, and appearance quality indexes in milled rice. The japonica paddy with 15.3% MC was put into warehouse in winter and stored for 163 days, when the average dry temperature in bulk increased from 8.3 to 22.9°C, the average RH in bulk layer 1, 2, 3, and 4 respectively increased 3.6%,

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 中央公益级院所科研基本业务费 (JY2007); 2013 年粮食行业公益性专项结余经费 (JY2102)。

作者简介: 陶利思 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, Email: lisitao.cd@foxmail.com。

\* 通信作者: 李兴军 (1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品科学与工程, Email: lxj@ags.ac.cn。

3.0%, 2.9%, and 2.9% from 75.1%, and wetbulb temperature respectively increased 15.21, 13.57, 13.47 and 13.29 °C from 6.2 °C, showing no damage from stored insects and fungi. The gelatinization peak temperature of rice flour measured by DSC remained unchanged. A Mixolab analysis showed, during paddy storage from 45 to 213 d, dough development time and stability time, and starch setback torque gradually increased, but enzymatic speed decreased. GC-MS analysis showed the percent of the main fatty acid species kept unchanged during 213 d paddy storage. External indexes like accumulation of grain bulk maximum temperature, and accumulation of wetbulb temperature corresponding to bulk maximum temperature, and internal indexes such as the temperature, area and height of rice flour gelatinization peak measured by DSC, and dough development time and stability time, gelatinization peak torque and enzymatic speed in rice flour measured by a Mixolab, and fatty acid components ( $C_{14:1}$ ,  $C_{14:0}$ ,  $C_{20:5n3}$ ,  $C_{20:3n6}$ ,  $C_{20:2}$ ,  $C_{20:1}$ ,  $C_{24:1}$ ,  $C_{24:0}$ ), as well as rice appearance quality indexes like head rice percentage, small broken kernel rate, and kernel size could be used as the evaluation indexes for the low temperature storage of a japonica paddy with slightly high moisture.

**Key words:** slightly high moisture; japonica paddy; air properties of grain bulk; head rice percentage; starch gelatinization; gelatinization speed

2003~2016 年期间是我国现代化粮仓建设的重要时期, 其中高大平房仓占据新建仓总容积的 85%, 仓储管理技术日益成熟, 粮食仓储品质和效益越来越受到重视。近年来我国全面推广控温储粮技术, 措施包括冬季机械通风降低基础粮温、春季粮面减小热交换、空调制冷或排积热通风及时散热、利用冷心环流通风降低表层粮温<sup>[1~2]</sup>。采用 12~13 °C 的粮堆温度储藏, 偏高水分的粮食可以较长时间储藏, 在温带的欧洲和英国气候下, 将含水率 17% 的谷物粮堆温度冷却到 12 °C<sup>[3~4]</sup>。评价稻谷加工效率的指标是整精米率和白度<sup>[5]</sup>, 而稻谷含水率是这两个指标的重要影响因素, 在竖向研磨车间进行的研磨试验表明稻谷最佳含水率是 15%<sup>[6]</sup>。仓储企业为了提高出仓稻谷加工的大米整精米率和白度, 不再采用调质通风技术, 而是采用提高入仓稻谷的含水率 1.0%~1.5%, 通过控温储粮技术保持稻谷粮堆安全过夏<sup>[7~9]</sup>。Kaliyan 等<sup>[10]</sup>在恒温箱试验表明, 15% 含水率的稻谷在 20 °C 储存 72 d 未发现可见霉菌孢子。Park 等<sup>[11]</sup>研究了初始水分 15.5% 的韩国大米在 4、20、30、40 °C 实验室储藏期间理化特性的变化。Li 等<sup>[12]</sup>比较了 4、15、25、35 °C 恒温下三种正常含水率的粳稻储存 18 个月, 其大米热特性和热机械特性的变化。然而稻谷实仓储藏期间, 粮堆籽粒间隙的空气特性、加工的大米的外观品质, 以及淀粉糊化的特性缺乏深入的研究。为此, 本研究对冬季入仓的晚籼稻 200 多天的低温储藏期间的粮堆相对湿度、湿球温度及粮食品质的敏感指标、淀粉糊化参数进行研究, 以期为我国稻谷优粮优储提供评价指标。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

氢氧化钠、氢氧化钾 天津市光复科技发展有限公司; 溴百里香酚兰 天津市福晨化学试剂厂; 快氯 FCF 染色试剂、37 脂肪酸甲酯混标( $C_4$ ~ $C_{24}$  不饱和组分)、 $C_7$ ~ $C_{30}$  饱和烷烃、顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯、顺-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯 Sigma 公司。

KFR-140W/S-590T2 型空调 美的集团; T35-

11N056 型轴流风机(1.1 kW) 乐清市天永防爆电气有限公司; LDS-1G 谷物水分测定仪 台州市粮仪厂; SC-E 万深大米外观品质检测分析仪 杭州万深检测科技有限公司; JMW12 大米外观品质检测仪、东孚久恒-Satake 大米食味测定仪 北京东方孚德技术发展中心; LTJM 5588 精米机、JLGJ4.5 型试验砻谷机 台州市粮仪厂; DHG9070A 烘箱 杭州蓝天化验仪器厂; 3-30K 高速冷冻离心机 Sigma 公司; 紫外可见分光光度计 上海奥析科学仪器有限公司; 电子天平(万分之一) 梅特勒多利多; 7890 气相色谱 美国 Agilent 公司; M7-300EI 质谱仪 北京普析通用仪器有限责任公司; 色谱柱 HP-5ms Ultra Inert (30 m×250 μm×0.25 μm) 安捷伦公司; XW-80A 微型涡旋混仪 上海泸西分析仪器有限公司。

### 1.2 仓房条件及管理

山东省军粮储备库位于山东省齐河市, 属于暖温带半湿润季风气候区。14 号试验仓, 地上笼一机三道, 通路比  $K=1.4$ , 入库完成时间为 2020 年 1 月 16 日, 东北粳稻 2200.4 t, 含水率为 15.5%。仓房长 39.7 m, 宽 20.7 m, 装粮高度 4.7 m, 杂质 0.9%, 出糙率 82.4%。2019 年 1 月 7 日至 22 日采用两台 1.1 kW 的轴流风机进行吸出式均温通风。在过夏期间采用空调控制粮面温度(仓温), 仓房南北墙各装有 2 台空调, 空调位于粮面上 1.8 m 处, 如果仓空间温度超过 23 °C 就沿着对角线开启空调。由于新冠病毒疫情和市场的应急供应需要, 该仓稻谷从 2020 年 2 月 1 日开始小批量出仓加工, 直到 7 月底结束。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 粮堆温度 在单仓粮面上分布 50 根测温电缆, 每根纵深 4 层分布, 分别是粮面下 0.1 m(一层)、1.5 m(二层)、3 m(三层)、4.5 m(四层), 整仓共计 200 个点的粮堆温度数据。粮情检测系统检测粮堆各点的温度, 从 2 月 11 日起每 2~4 d 巡检一次, 直到 5 月 30 日移走测温电缆。

1.3.2 粮堆水分 在粮面布置 11 个扦样点, 每点再纵深 3 个扦样点, 分别位于粮面下 0.3 m(一层)、2.4 m

(二层)、4.5 m(三层), 每次扦样 33 份样品, 每份样品 500 g。扦样日期是 2020 年 1 月 30 日、3 月 30 日、5 月 28 日及 7 月 17 日, 分别是入仓后第 45、105、163、213 d。水分采用 LDS-1G 谷物水分测定仪测定, 并采用国标 GB 5497-1985 烘箱法进行校正。

1.3.3 粮粒间隙空气的特性参数及积累值测定 粮粒间隙空气的相对湿度及湿球温度测定按照文献 [13] 方法。粮粒间隙空气相对湿度计算式为:

$$RH(\%) = 100 \exp \left[ -\frac{a}{T+b} \exp(-c \cdot M) \right] \quad \text{式 (1)}$$

式中: RH 为粮粒间隙空气的相对湿度, %; M 为粮食水分, %; T 为粮食温度, °C; a、b、c 是粳稻 MCPE 方程的系数<sup>[14]</sup>。

在粮堆(干球)温度(T)下, 粒粒间隙空气的水分比率(w)是饱和蒸汽压( $P_s$ )和湿球温度( $T_w$ )的函数, 满足:

$$f(T_w) = w - w_w(T_w) + [4.042 \times 10^{-4} + 5.816 \times 10^{-7} w_w(T_w)](T - T_w) \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $T_w$  粒粒间隙空气的湿球温度, °C;  $w_w$  是在  $T_w$  下饱和水汽压的水分比率, kg/kg。采用牛顿拉弗逊迭代方法编程解出  $T_w$ 。

粮堆各层最高积温、最低积温、平均积温是粮堆各层每日的最高温、最低温、平均温分别减去 17 °C 的积累值。粮堆各层最高温、最低温、平均温对应的 RH 积累量是指粮堆各层每日的最高温、最低温、平均温对应的 RH 分别减去 70% 的积累值。粮堆各层最高温、最低温、平均温对应的湿球积温是指粮堆各层每日的最高温、最低温、平均温对应的湿球温度分别减去 13.94 °C 的积累值。

1.3.4 出米率、大米外观品质及食味值测定 约 150 g 稻谷在精米机研磨 30 秒, 按照公式计算出米率。

$$\alpha = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $\alpha$  为出米率, %;  $m_0$  为稻谷质量, g;  $m_1$  为大米质量, g。

大米外观品质测定分别采用 JMWT12 和 SC-E 大米外观品质测定扫描仪测定。米粒图像处理按照 GB/T 1354 精米标准。采用自定义模式扫描大米全粒长、全粒宽, 计算长宽比。每次扫描大米 500 粒左右, 重复 3 次。JMWT12 测定仪提供整精米率、小碎米率、不完善粒率、黄粒米率、垩白度、垩白粒率, 而 SC-E 测定仪能够提供籽粒的长、宽、长宽比、千粒重、精度及裂纹率。

大米食味值测定采用东孚久恒-Satake 大米食味测定仪, 每次测定约 300 g 样品。食味值测量范围 50~100, 测量精度是重复性误差  $\leq 2$ , 食味值  $\geq 80$  表示米饭好吃。

1.3.5 稻谷新鲜指数和大米破碎指数 新鲜度指数参考 Takashi 等<sup>[15]</sup> 的方法, 有改动。准确测量 1 g 米

粉样品于研钵中, 用移液枪加入 5 mL 溴百里酚蓝溶液研磨 2~3 min, 将样品液移入 50 mL 圆底离心管中, 再吸取 5 mL 溴百里酚蓝溶液洗涤研钵后一并移入离心管, 8000 r/min 下离心 10 min。随后移液枪吸取 4 mL 上清液于比色皿中, 在 615 和 690 nm 处测定吸光度。 $D_{615}-D_{690}$  表示米粒新鲜度指数, 差值越大, 米粒越新鲜。

米粒破碎指数采用快氯 FCF 染色方法<sup>[16]</sup>。在 610 和 690 nm 处的吸光度之差( $D_{610}-D_{690}$ )表示米粒破碎指数, 差值越大, 米粒破碎率严重。

1.3.6 米粉糊的糊化温度 米粉(过 80 目筛)的热特性采用差异量热扫描仪测定<sup>[17]</sup>。在铝坩埚称取 3.0~3.2 mg 样品, 按照质量比 2:1 加入蒸馏水, 密封后 4 °C 过夜。DSC 温度扫描从 20 到 110 °C, 加热速率是 10 °C/min。每个样品重复三次。

1.3.7 米粉团的 mixolab 参数 参考 GB/T 37511-2019 方法<sup>[18]</sup>。大米样品粉碎采用 FW135 型中草药粉碎机, 试验方案选择 Choppinwheat+, 采用恒量加水法。水分基数 14% 湿基, 目标扭矩设定为 (1.1±0.05) Nm, 转速 80 r/min, 面粉团重量 75 g, 和面初始温度 30 °C, 水箱温度 30 °C, 水合作用 60%, 第一阶段 30 °C 恒温 8 min; 第二阶段从 30 °C 升温到 90 °C 共 15 min, 90 °C 保持 7 min; 第三阶段 90 °C 降温至 50 °C 共 10 min, 在 50 °C 保持 5 min。C1—Cs 表示蛋白质网络弱化(Nm), C3 表示淀粉糊化的峰值扭矩(Nm); C3/C4 表示淀粉酶活性; C3—C4 表示淀粉溃败程度(Nm); C5—C4 表示淀粉回生程度(Nm)。 $\alpha$  表示蛋白网络弱化的速率(-Nm/min),  $\beta$  表示糊化速率(Nm/min),  $\gamma$  表示蒸煮酶解速率(-Nm/min)。

1.3.8 米饭感官品质 米饭感官品质考国标 GB/T 15682-2008《粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》, 包括了气温、滋味、色泽及饭粒的外观结构, 由粮库米厂 6 位有经验的专家进行评价。

### 1.3.9 脂肪酸成分轮廓分析

1.3.9.1 样品提取 参考王希越等<sup>[19]</sup> 的方法, 有改动。准确称取 300 mg 过 80 目筛的样品, 置于 10 mL 离心管中, 加入 1 mL 正己烷, 再加入 0.25 mL 2 mol/L 的 KOH-甲醇溶液, 涡旋 30 s。在 300 W、30 °C 下超声水浴提取 40 min, 再加入 0.25 mL 2 mol/L 的 HCl 溶液, 涡旋 1 min, 7600 g 离心 10 min, 取上清液进行 GC-MS 分析。每个样品独立重复三次。

1.3.9.2 GC-MS 测定 色谱条件: 安捷伦 HP-5MS UI (30 m×0.25 mm×0.25 μm) 色谱柱; 柱温箱起始温度 130 °C, 保持 3 min; 以 5 °C/min 的速率升到 180 °C, 保持 8 min; 再以 5 °C/min 的速率升至 240 °C, 保持 12 min。载气: 氮气, 流速 1.0 mL/min, 分流比 10:1; 进样口温度 260 °C, MSD 传输线温度 280 °C; 溶剂延迟 1.6 min。

质谱条件: 电子轰击源, 全扫描模式; 离子源温度 230 °C, 四级杆温度 150 °C; 扫描范围 m/z 45~400。

1.3.9.3 定性及定量分析 使用安捷伦 MassHunter Qualitative Analysis V10.0 软件, 结合离线 NIST08s 和在线 NIST Chemistry Web Book, SRD 69 (<https://webbook.nist.gov/chemistry/#>) 数据库(得分  $\geq 80\%$ )、同条件下正构烷烃(C7~C30)保留指数计算值和参考文献进行定性分析。使用 37 种脂肪酸甲酯各梯度混合标准品制作标准曲线, 外标法定量, 结果以  $\mu\text{g/g}$  表示。线性范围 0.5~400  $\mu\text{g/mL}$ , 基于样品浓度确定( $R^2 \geq 0.99$ )。

#### 1.4 数据处理

采用随机区组试验设计, 数据以平均值  $\pm$  标准差表示。LSD 检验中同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著( $P < 0.05$ )。使用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 26.0 进行数据处理。使用 ANOVA 进行差异显著性分析(Duncan's 分析,  $P=0.05$ ), SIMCA 14.1 进行主成分分析(PCA)和层次聚类分析(HCA)。对于储存时间和粮堆层数两组变量采用通用线性模型方差分析。对成对数据的相关分析, 采用 Excel 软件中散点图—线性趋势线—决定系数方法获得相关系数。观察各种因素对大米品质指标的影响, 回归—线性方法用于获得多元线性回归方程, 凡是能够进入方程的自变量表示具有显著性影响, 正、负号分别表示正影响和负影响。

### 2 结果与分析

#### 2.1 气温气温、仓温仓湿的变化

从入仓后 38 到 164 d, 大气温度以波浪式由 2.5 °C 升高到 31 °C, 然后回落到 23 °C; 仓空间温度由 2.7 °C 逐渐升高到 23 °C, 并保持在 23 °C。在此期间大气相对湿度变化范围是 19%~73%, 而仓空间相对湿度由 66% 逐渐减少到 58%(图 1)。说明仓空间空气温度随着气温的增加而增加, 当 5 月 20 日(入仓后 155 d)空调开启后仓空间温度保持在 23 °C; 仓空间相对湿度变化幅度小, 主要由于它受稻谷粮堆的含水率控制, 也表明仓空间空气中没有储藏真菌孢子生长。

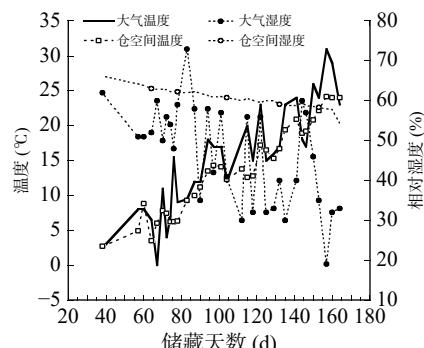


图 1 大气温湿度和 14#仓空间温湿度的变化

Fig.1 Changes in temperature and relative humidity in atmosphere and 14# warehouse headspace

#### 2.2 粮堆各层温度的变化

粮堆各层的平均温度在入仓后 38 到 164 d 期间显示波浪式增加, 且各层的平均温度几乎一样(图 2A)。粮堆各层的最高温度减去对应的最低温度, 即较差温度。在入仓后 90 d 之前, 较差温度分成两组, 一层的较差温度明显不同于二、三、四层的。90 d 之后, 一层的较差温度波动的平均值是(3.0  $\pm$  1.4) °C; 在较差温度波浪式上升中, 四层低于二层和三层(图 2B)。在入仓后 57 到 164 d 期间, 粮堆一、二、三四层的较差温度平均值分别是(3.2  $\pm$  1.2)、(7.7  $\pm$  2.0)、(7.6  $\pm$  2.4) 及(6.3  $\pm$  2.0) °C。

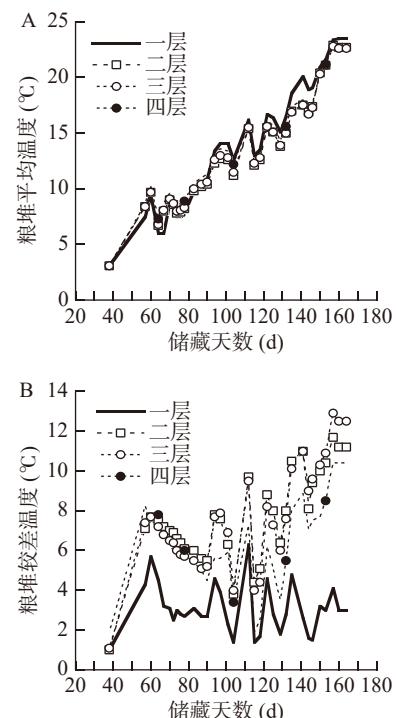


图 2 稻谷储存期间粮堆层平均温度和较差温度的变化

Fig.2 Changes in the average temperature and the difference between maximum and minimum temperature in each bulk layer during paddy storage

#### 2.3 粮堆各层含水率和 RH 的变化

如表 1 所示, 在入仓后 45、105、163 d 抽样中, 粮堆含水率范围分别是 14.8%~15.4%、14.9%~15.6%、14.4%~15.7%, 平均含水率分别是 15.1%、15.2% 和 15.1%。粮堆各层的平均含水率(表 1)和各层的最高温、最低温及平均温, 用于计算粮堆各层的 RH 及湿球温度。

在入仓后 57 至 164 d 期间, 粮堆相对湿度总体上是上升的(图 3)。平均温度对应的 RH 由 57 d 的 75.1% 对一层、二层、三层、四层分别增加了 3.6%、3.0%、2.9%、2.9%; 粮堆最高温、最低温、平均温对应的 RH 分别由 57 d 的 76.3%、73.8%、75.0% 增加了 2.2%、1.6%、3.2%。在入仓后 57 至 164 d 期间粮堆一层的 RH 增加幅度是 0.4%~3.2%, 高于粮堆二、三、四层, 说明粮堆内的水分是由底部第四层向

表 1 稻谷储藏期间粮堆扦样位点含水率的变化  
Table 1 Changes in moisture content of sampling sites in paddy bulk during storage

| 储藏天数/层数 | 粮堆含水率(%) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 平均         |
|---------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
|         | A1       | A2   | A3   | A4   | A5   | A6   | A7   | A8   | A9   | A10  | A11  |            |
| 45 d    |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 15.14±0.14 |
| 一层      | 15.2     | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 14.9 | 15.3 | 15.0 | 15.2 | 15.0 | 15.2 | 15.14      |
| 二层      | 15.3     | 15.0 | 15.1 | 15.4 | 15.0 | 15.3 | 15.0 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 15.16      |
| 三层      | 15.0     | 14.9 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 14.8 | 15.3 | 15.2 | 15.2 | 15.1 | 15.11      |
| 105 d   |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 15.19±0.18 |
| 一层      | 14.9     | 15.2 | 15.1 | 15.6 | 15.4 | 15.0 | 15.1 | 15.3 | 15.3 | 15.2 | 15.3 | 15.22      |
| 二层      | 15.0     | 15.0 | 15.0 | 15.5 | 15.4 | 14.9 | 15.1 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.19      |
| 三层      | 15.1     | 15.3 | 15.1 | 15.4 | 15.3 | 14.9 | 15.0 | 15.2 | 15.3 | 15.1 | 15.2 | 15.17      |
| 163 d   |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 15.07±0.36 |
| 一层      | 14.6     | 14.7 | 15.0 | 15.4 | 15.7 | 15.1 | 15.6 | 15.3 | 15.2 | 15.2 | 15.4 | 15.20      |
| 二层      | 14.8     | 14.4 | 15.1 | 15.7 | 15.5 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 14.7 | 15.0 | 15.3 | 15.09      |
| 三层      | 14.9     | 14.9 | 14.5 | 15.6 | 15.0 | 14.6 | 14.5 | 15.2 | 14.6 | 14.9 | 15.3 | 14.91      |

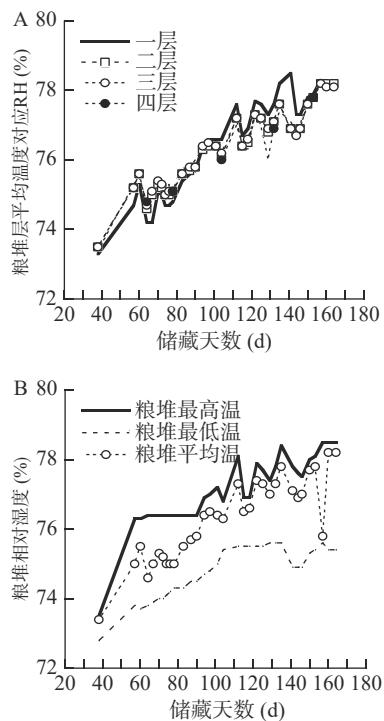


图 3 粮堆各层相对湿度的变化

Fig.3 Changes in relative humidity in bulk layers

粮面迁移。

#### 2.4 粮堆湿球温度的变化

从图 4 看出, 在入仓后 57 至 164 d 期间, 粮堆湿球温度总体是上升的, 平均温度对应的湿球温度对一层、二层、三层、四层分别增加了 15.21、13.57、13.47、13.29 °C; 粮堆最高温、最低温、平均温对应的湿球温度分别增加了 11.23、7.05、13.86 °C。在入仓后 57 至 164 d 期间粮堆一层的湿球温度增加幅度是 1.1~11.5 °C, 高于粮堆二、三、四层, 说明粮堆一层湿球温度的准确调控对抑制储粮害虫发育的重要性。

#### 2.5 粮堆品质指标的评价

初始含水率 15.3% 的稻谷在入仓后 38~164 d

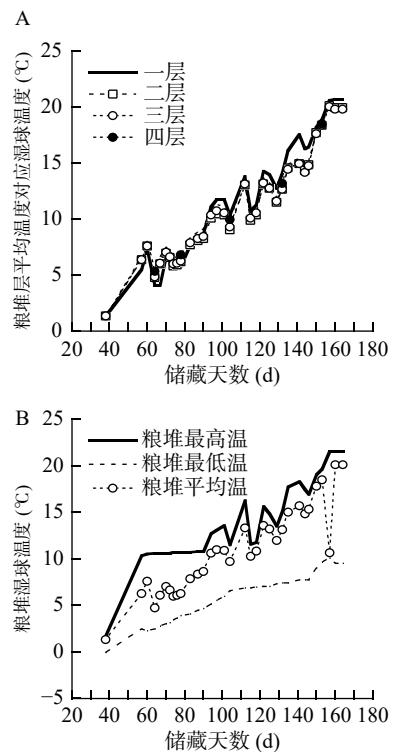


图 4 粮堆湿球温度的变化

Fig.4 Changes in wetbulb temperature in bulk layers

实仓储期间, 平均粮堆温度是 13.3 °C, 其中自 155 d 起当仓空间温超过 23 °C 就开启空调。针对四次扦样分析的 17 个指标, 采用通用线性模型方差分析, 从表 2~表 3 看出, 大米破碎指数、JMW12 和 SE 扫描仪测定的大米外观品质指标在粮堆三层之间没有差异, 而储存 105 与 163 d 之间存在显著差异的指标是稻谷含水率、大米破碎指数、整精米率、不完善粒、垩白粒率、垩白度、籽粒长度及长宽比、千粒重、精度、裂纹率。进一步以整精米率为因变量, 与其他指标进行相关分析结果如表 4, 相关系数大于 0.8 以上的指标有碎米率、小碎米率、籽粒长度和宽度。整精米率与小碎米率、黄粒米率、不完善粒率、裂纹粒率之间呈现负相关, 而与籽粒尺寸、精度、垩

表 2 稻谷储藏期间出米率及理化指标的变化

Table 2 Changes in milled rice yield and rice physico-chemical parameters during paddy storage

| 影响因素    | 稻谷含水率(%) | 出米率(%)                   | 新鲜度指数(0.1)              | 破碎指数(0.1)               | 吸水率(%)                  |
|---------|----------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 储存天数(d) | 45       | 15.14±0.06 <sup>ab</sup> | 70.46±0.13 <sup>b</sup> | 2.72±0.09 <sup>c</sup>  | 13.97±0.35 <sup>a</sup> |
|         | 105      | 15.19±0.06 <sup>a</sup>  | 70.26±0.13 <sup>b</sup> | 3.10±0.09 <sup>ab</sup> | 13.80±0.35 <sup>a</sup> |
|         | 163      | 15.07±0.06 <sup>b</sup>  | 70.43±0.13 <sup>b</sup> | 3.25±0.09 <sup>a</sup>  | 10.72±0.35 <sup>c</sup> |
|         | 213      | 14.52±0.06 <sup>c</sup>  | 71.31±0.13 <sup>a</sup> | 2.98±0.09 <sup>b</sup>  | 11.56±0.35 <sup>b</sup> |
| 粮堆部位    | 一层       | 14.89±0.05 <sup>b</sup>  | 70.83±0.11 <sup>a</sup> | 2.98±0.08 <sup>ab</sup> | 12.49±0.30 <sup>a</sup> |
|         | 二层       | 15.08±0.05 <sup>a</sup>  | 70.56±0.11 <sup>b</sup> | 2.93±0.08 <sup>b</sup>  | 12.38±0.30 <sup>a</sup> |
|         | 三层       | 14.97±0.05 <sup>b</sup>  | 70.46±0.11 <sup>b</sup> | 3.12±0.08 <sup>a</sup>  | 12.68±0.30 <sup>a</sup> |

注: 每个指标四次扦样共计132个数据; 对储存天数或粮堆部位, 同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著( $P<0.05$ ); 表3、表5~表8同。

表 3 稻谷储存期间大米外观品质指标变化

Table 3 Changes in milled rice appearance quality parameters during paddy storage

| 影响因素    | 整精米率(%) | 小碎米率(%)                 | 不完善粒率(%)               | 黄粒米率(%)                 | 垩白粒率(%)                 | 垩白度(%)                  |
|---------|---------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 储存天数(d) | 45      | 86.15±1.53 <sup>a</sup> | 0.28±0.03 <sup>a</sup> | 0.94±0.20 <sup>b</sup>  | 0.35±0.03 <sup>a</sup>  | 16.96±0.93 <sup>a</sup> |
|         | 105     | 85.92±1.53 <sup>a</sup> | 0.31±0.02 <sup>a</sup> | 0.55±0.20 <sup>c</sup>  | 0.27±0.03 <sup>b</sup>  | 18.64±0.93 <sup>a</sup> |
|         | 163     | 81.40±1.53 <sup>b</sup> | 0.27±0.03 <sup>a</sup> | 1.25±0.20 <sup>b</sup>  | 0.26±0.03 <sup>b</sup>  | 10.40±0.93 <sup>b</sup> |
|         | 213     | 79.28±1.53 <sup>b</sup> | 0.30±0.03 <sup>a</sup> | 1.80±0.20 <sup>a</sup>  | 0.22±0.03 <sup>b</sup>  | 8.83±0.93 <sup>b</sup>  |
| 粮堆部位    | 一层      | 83.32±1.33 <sup>a</sup> | 0.29±0.03 <sup>a</sup> | 0.94±0.18 <sup>b</sup>  | 0.26±0.02 <sup>a</sup>  | 13.51±0.80 <sup>a</sup> |
|         | 二层      | 83.21±1.33 <sup>a</sup> | 0.29±0.03 <sup>a</sup> | 1.13±0.18 <sup>ab</sup> | 0.29±0.02 <sup>a</sup>  | 13.63±0.80 <sup>a</sup> |
|         | 三层      | 83.03±1.33 <sup>a</sup> | 0.29±0.03 <sup>a</sup> | 1.33±0.18 <sup>a</sup>  | 0.28±0.02 <sup>a</sup>  | 13.98±0.80 <sup>a</sup> |
| 储存天数(d) | 籽粒长(mm) | 籽粒宽(mm)                 | 长宽比                    | 千粒重(g)                  | 精度(0.1)                 | 裂纹率(%)                  |
|         | 45      | 4.17±0.04 <sup>bc</sup> | 2.63±0.01 <sup>a</sup> | 1.59±0.01 <sup>b</sup>  | 30.61±0.73 <sup>a</sup> | 8.82±0.01 <sup>a</sup>  |
|         | 105     | 4.16±0.04 <sup>c</sup>  | 2.62±0.01 <sup>a</sup> | 1.59±0.01 <sup>b</sup>  | 26.76±0.73 <sup>b</sup> | 8.79±0.01 <sup>b</sup>  |
|         | 163     | 4.29±0.04 <sup>a</sup>  | 2.63±0.01 <sup>a</sup> | 1.63±0.01 <sup>a</sup>  | 22.58±0.73 <sup>c</sup> | 8.71±0.01 <sup>d</sup>  |
|         | 213     | 4.23±0.04 <sup>ab</sup> | 2.63±0.01 <sup>a</sup> | 1.60±0.01 <sup>b</sup>  | 22.19±0.73 <sup>c</sup> | 8.74±0.01 <sup>c</sup>  |
|         | 一层      | 4.31±0.03 <sup>a</sup>  | 2.63±0.01 <sup>a</sup> | 1.60±0.01 <sup>a</sup>  | 24.95±0.63 <sup>a</sup> | 8.77±0.01 <sup>a</sup>  |
|         | 二层      | 4.22±0.03 <sup>a</sup>  | 2.63±0.01 <sup>a</sup> | 1.60±0.01 <sup>a</sup>  | 25.74±0.63 <sup>a</sup> | 8.77±0.01 <sup>a</sup>  |
| 粮堆部位    | 三层      | 4.21±0.03 <sup>a</sup>  | 2.62±0.01 <sup>a</sup> | 1.60±0.01 <sup>a</sup>  | 25.92±0.63 <sup>a</sup> | 8.76±0.01 <sup>a</sup>  |

表 4 整精米率与大米其他品质指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis between head rice percentage and other quality parameters in milled rice

| 大米品质指标 | 相关系数     | 大米品质指标 | 相关系数    |
|--------|----------|--------|---------|
| 碎米率    | -0.9972* | 裂纹率    | -0.2605 |
| 长度     | 0.8329*  | 含水率    | 0.2149  |
| 宽度     | 0.8188*  | 垩白度    | 0.1561  |
| 小碎米率   | -0.7659* | 破碎指数   | 0.1483  |
| 黄粒米率   | -0.3995  | 千粒重    | 0.1299  |
| 精度     | 0.3173   | 吸水率    | -0.1269 |
| 不完善粒率  | -0.3023  | 出米率    | 0.1009  |
| 垩白粒率   | 0.2959   | 新鲜度    | 0.0800  |

注: \*表示相关系数达到差异显著( $P<0.05$ )。

白粒率、含水率及垩白度之间呈现正相关。由于这些指标的相关分析考虑了稻谷低温储藏的天数和粮堆部位, 因此本研究选择整精米率、小碎米粒、米粒长度作为初始含水率 15.3% 的稻谷在高大平房仓存储期间外观品质评价的指标。

## 2.6 淀粉糊化特性与米饭品质

从表 5 看出, 四次扦样之间大米食味值没有显著差异。米粉的糊化起始、峰值、终止温度在四次扦样之间是相似的, 而 163 与 213 d 之间的差异是糊化峰的面积、高度及宽度。糊化峰的面积表示糊化的

焓值, 213 d 较低的糊化焓值相关于淀粉粒的破碎率增加。

从表 6 看出, 随着稻谷储存时间由 45 d 增加到 213 d, 米粉团发育时间(DDT)、稳定时间(DST)及淀粉回生(C5—C4)扭矩逐渐增加, 蛋白弱化(C1—Cs)、糊化峰值扭矩(C3)、淀粉酶活性(C3/C4)、淀粉溃败扭矩(C3—C4)、加热速率( $\alpha$ )、糊化速率( $\beta$ )保持不变, 而酶解速率( $\gamma$ )降低。说明此仓稻谷低温储藏期间大米的热特性和热机械特性被很好地保持。

表 7 比较了稻谷低温储存期间米粉品尝得分, 稻谷储存 213 d 加工的米饭与储存 105 d 加工的米饭在气味、滋味、色泽和饭粒外观结构方面没有差异。说明在暖温带半湿润季风气候区, 冬季入仓高大平房仓的偏高含水率的梗稻谷, 在夏季辅以空调控制粮面准低温技术, 利用粮堆自身的特性(热不良导体和空隙率 0.4)能够保持籽粒间隙的空气处于低温低湿条件, 因此, 加工的米饭品尝得分仍然满足 GB/T 1354-2018 规定的一级粳米(90 分)。

## 2.7 大米脂肪酸成分轮廓分析

稻谷在第 45 到 105 d 实仓储期间, 大米不饱和脂肪酸和总脂肪酸的含量显著增加( $P<0.05$ ), 之后

表 5 稻谷储存期间大米食味值及热特性的变化

Table 5 Changes in taste value and thermal properties of milled rice during paddy storage

| 存储天数(d) | 大米食味值                   | 米粉糊化峰                   |                         |                         |                         |                        |                          |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
|         |                         | 峰面积(J/g)                | 峰值温度(℃)                 | 起始温度(℃)                 | 终止温度(℃)                 | 宽度(℃)                  | 高度(0.01 mW/mg)           |
| 45      | 80.67±0.58 <sup>a</sup> | 3.95±0.94 <sup>ab</sup> | 67.83±0.15 <sup>a</sup> | 63.03±0.68 <sup>a</sup> | 71.43±0.64 <sup>a</sup> | 6.93±0.81 <sup>b</sup> | 10.77±1.33 <sup>ab</sup> |
| 105     | 82.00±1.00 <sup>a</sup> | 3.57±1.52 <sup>ab</sup> | 67.93±0.31 <sup>a</sup> | 63.50±0.78 <sup>a</sup> | 71.33±0.74 <sup>a</sup> | 6.40±1.01 <sup>b</sup> | 10.54±2.89 <sup>ab</sup> |
| 163     | 81.67±0.58 <sup>a</sup> | 4.34±0.28 <sup>a</sup>  | 67.67±0.25 <sup>a</sup> | 63.17±0.42 <sup>a</sup> | 71.50±0.20 <sup>a</sup> | 7.20±0.17 <sup>b</sup> | 11.73±0.44 <sup>a</sup>  |
| 213     | 81.32±0.58 <sup>a</sup> | 3.56±0.19 <sup>b</sup>  | 67.93±0.31 <sup>a</sup> | 62.63±0.71 <sup>a</sup> | 71.53±0.90 <sup>a</sup> | 8.03±0.25 <sup>a</sup> | 8.73±0.32 <sup>b</sup>   |

表 6 稻谷储存期间大米热机械特性的变化

Table 6 Changes in thermomechanical properties of milled rice during paddy storage

| 存储天数(d) | DDT(min)                | DST(min)                | C1—Cs(0.1 Nm)          | C3(0.1 Nm)               | C3/C4                  |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
|         |                         |                         | $\alpha$ (-0.1 Nm/min) | $\beta$ (0.1 Nm/min)     | $\gamma$ (-0.1 Nm/min) |
| 45      | 3.02±2.87 <sup>b</sup>  | 4.87±2.99 <sup>b</sup>  | 3.55±3.26 <sup>a</sup> | 24.21±3.24 <sup>ab</sup> | 1.30±0.12 <sup>a</sup> |
| 105     | 7.02±1.83 <sup>ab</sup> | 8.23±0.12 <sup>a</sup>  | 0.10±0.02 <sup>b</sup> | 26.75±0.14 <sup>b</sup>  | 1.40±0.03 <sup>a</sup> |
| 163     | 8.25±0.41 <sup>a</sup>  | 8.43±0.15 <sup>a</sup>  | 0.06±0.05 <sup>b</sup> | 27.00±0.08 <sup>a</sup>  | 1.36±0.02 <sup>a</sup> |
| 213     | 3.92±4.15 <sup>ab</sup> | 6.1±2.20 <sup>ab</sup>  | 1.75±1.54 <sup>a</sup> | 26.60±0.24 <sup>b</sup>  | 1.34±0.07 <sup>a</sup> |
|         | C3-C4(0.1 Nm)           | C5-C4(Nm)               |                        |                          |                        |
| 45      | 5.65±2.09 <sup>a</sup>  | 0.96±0.11 <sup>b</sup>  | 0.87±0.10 <sup>a</sup> | 4.93±0.75 <sup>b</sup>   | 0.88±0.24 <sup>a</sup> |
| 105     | 7.59±0.43 <sup>a</sup>  | 1.06±0.03 <sup>ab</sup> | 0.95±0.04 <sup>a</sup> | 5.75±0.52 <sup>ab</sup>  | 0.97±0.06 <sup>b</sup> |
| 163     | 7.16±0.34 <sup>a</sup>  | 1.05±0.02 <sup>b</sup>  | 1.04±0.11 <sup>a</sup> | 6.40±0.29 <sup>a</sup>   | 0.99±0.03 <sup>b</sup> |
| 213     | 6.76±1.04 <sup>a</sup>  | 1.11±0.03 <sup>a</sup>  | 0.97±0.06 <sup>a</sup> | 5.59±0.63 <sup>ab</sup>  | 0.79±0.17 <sup>b</sup> |

表 7 稻谷储存期间米饭品尝品质评价的变化

Table 7 Changes in the eating quality evaluation of milled rice during paddy storage

| 储存天数(d) | 气味                    | 滋味                    | 色泽                    | 饭粒外观结构               | 总分                    |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 105     | 32.2±2.0 <sup>a</sup> | 32.6±1.7 <sup>a</sup> | 22.2±1.5 <sup>a</sup> | 4.8±0.4 <sup>a</sup> | 91.4±2.7 <sup>a</sup> |
| 163     | 32.6±1.5 <sup>a</sup> | 33.0±1.2 <sup>a</sup> | 22.8±1.3 <sup>a</sup> | 4.6±0.5 <sup>a</sup> | 93.4±2.6 <sup>a</sup> |
| 213     | 30.6±2.4 <sup>a</sup> | 31.8±1.1 <sup>a</sup> | 22.2±0.4 <sup>a</sup> | 4.8±0.4 <sup>a</sup> | 89.4±2.7 <sup>a</sup> |

则显著减少( $P<0.05$ ),在第 163 与 213 d 之间不饱和脂肪酸和总脂肪酸的含量差异不显著(图 5)。四次扦样之间,不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比值保持在 0.32~0.33,而单/多不饱和脂肪酸比值在前三次扦样保持在 1.41~1.43,在最后一次扦样是 1.32,说明稻谷 213 d 储藏期间大米多不饱和脂肪酸含量未减少。在鉴定的 35 种脂肪酸中,含量大于 5  $\mu\text{g/g}$  的 18 种脂肪酸成分在表 8 给出,比较 105 与 213 d 的样品,显著减少的脂肪酸成分有  $\text{C}_{14:1}$ 、 $\text{C}_{14:0}$ 、 $\text{C}_{16:0}$ 、 $\text{C}_{18:2n6c}$ 、 $\text{C}_{18:3n3}$ 、 $\text{C}_{18:1n9c}$ 、 $\text{C}_{18:2n6t}$ 、 $\text{C}_{18:1n9t}$ 、 $\text{C}_{18:0}$ 、 $\text{C}_{20:1}$ 、 $\text{C}_{20:0}$  及  $\text{C}_{22:0}$ ,但是这 12 种脂肪酸所占的比例仅降

低了 0.02%。再比较 45 与 213 d 的样品,14 种脂肪酸保持不变,而显著减少的 4 种脂肪酸是  $\text{C}_{14:0}$ 、 $\text{C}_{20:2}$ 、 $\text{C}_{20:0}$ 、 $\text{C}_{22:0}$ ,这四种脂肪酸所占的比例由 2.3% 减少到 1.7%。因此整仓稻谷四次扦样期间重要的脂肪酸种类所占比例保持不变。

## 2.8 稻谷品质指标与粮堆空气特性参数积累值及内在因素的相关分析

多元一次回归分析表明,稻谷低温储存期间出米率、整精米率、大米食味值及米饭品尝得分受到粮堆最高积温、最高温度对应的湿球积温、平均温度对应的湿球积温显著影响(表 9)。影响大米食味值和米饭品尝得分的指标中,理化与外观品质指标有籽粒长及宽、小碎米率、黄粒米率、精度、含水率、破碎指数、新鲜度。热特性参数有米粉糊化峰的峰值温度、峰面积、高度及宽度。热机械特性参数有面团的发育和稳定时间、蛋白弱化、糊化峰值扭矩、淀粉酶活性、淀粉回生扭矩、加热速率、糊化速率及酶解速率。脂肪酸成分中有  $\text{C}_{14:1}$ 、 $\text{C}_{14:0}$ 、 $\text{C}_{20:5n3}$ 、 $\text{C}_{20:3n6}$ 、 $\text{C}_{20:2}$ 、 $\text{C}_{20:1}$ 、 $\text{C}_{24:1}$ 、 $\text{C}_{24:0}$ (表 10)。

## 3 讨论

在粮堆生态系统中,粮食含水率、籽粒间隙空气温度及相对湿度之间呈现指数或对数函数<sup>[20]</sup>。当粮堆温度低于 17 ℃,储粮昆虫不生长发育<sup>[21]</sup>。在

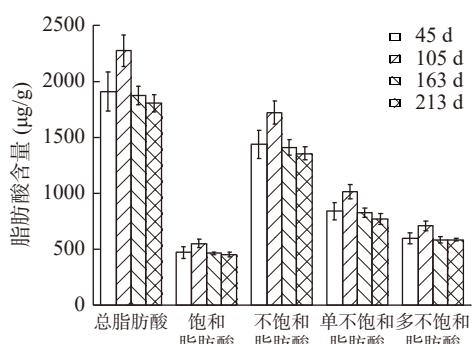


图 5 稻谷储藏期间大米脂肪酸成分的变化  
Fig.5 Changes in fatty acid components in milled rice during paddy storage

表 8 稻谷储藏期间大米脂肪酸成分的变化

Table 8 Changes in the main fatty acid components in milled rice during paddy storage (μg/g)

| 储藏天数(d) | C <sub>14:1</sub>         | C <sub>14:0</sub>         | C <sub>16:0</sub>          | C <sub>18:2n6c</sub>      | C <sub>18:3n3</sub>      | C <sub>18:1n9c</sub>      |
|---------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 45      | 4.35±0.49 <sup>b</sup>    | 19.26±2.65 <sup>a</sup>   | 331.52±37.61 <sup>ab</sup> | 397.25±34.89 <sup>b</sup> | 41.85±5.66 <sup>ab</sup> | 148.92±13.25 <sup>b</sup> |
| 105     | 5.39±0.26 <sup>a</sup>    | 18.78±2.03 <sup>a</sup>   | 392.49±27.47 <sup>a</sup>  | 467.55±31.75 <sup>a</sup> | 50.37±4.95 <sup>a</sup>  | 178.52±12.68 <sup>a</sup> |
| 163     | 4.37±0.17 <sup>b</sup>    | 18.09±0.97 <sup>a</sup>   | 323.57±10.02 <sup>b</sup>  | 393.86±19.77 <sup>b</sup> | 39.28±1.62 <sup>b</sup>  | 146.22±8.70 <sup>b</sup>  |
| 213     | 4.54±0.43 <sup>b</sup>    | 13.82±0.77 <sup>b</sup>   | 316.61±14.46 <sup>b</sup>  | 390.76±16.09 <sup>b</sup> | 39.54±0.82 <sup>b</sup>  | 137.10±8.63 <sup>b</sup>  |
|         | C <sub>18:2n6t</sub>      | C <sub>18:1n9t</sub>      | C <sub>18:0</sub>          | C <sub>20:4n6</sub>       | C <sub>20:5n3</sub>      | C <sub>20:3n6</sub>       |
| 45      | 122.65±11.21 <sup>b</sup> | 657.86±63.47 <sup>b</sup> | 67.32±5.59 <sup>b</sup>    | 6.21±1.09 <sup>a</sup>    | 8.56±1.82 <sup>a</sup>   | 5.99±1.39 <sup>a</sup>    |
| 105     | 157.29±15.92 <sup>a</sup> | 803.07±49.41 <sup>a</sup> | 88.83±5.77 <sup>a</sup>    | 9.61±4.19 <sup>a</sup>    | 9.01±2.70 <sup>a</sup>   | 6.59±2.50 <sup>a</sup>    |
| 163     | 124.23±8.54 <sup>b</sup>  | 647.29±35.89 <sup>b</sup> | 69.54±2.02 <sup>b</sup>    | 4.97±2.21 <sup>a</sup>    | 7.61±3.05 <sup>a</sup>   | 4.80±0.78 <sup>a</sup>    |
| 213     | 122.06±5.39 <sup>b</sup>  | 611.67±37.42 <sup>b</sup> | 73.11±3.65 <sup>b</sup>    | 6.71±0.62 <sup>a</sup>    | 11.28±2.02 <sup>a</sup>  | 5.98±1.76 <sup>a</sup>    |
|         | C <sub>20:2</sub>         | C <sub>20:1</sub>         | C <sub>20:0</sub>          | C <sub>22:0</sub>         | C <sub>24:1</sub>        | C <sub>24:0</sub>         |
| 45      | 6.01±2.11 <sup>a</sup>    | 8.28±0.34 <sup>b</sup>    | 10.41±1.07 <sup>ab</sup>   | 7.65±0.83 <sup>a</sup>    | 7.38±0.04 <sup>a</sup>   | 16.32±1.76 <sup>a</sup>   |
| 105     | 3.67±0.46 <sup>ab</sup>   | 9.05±0.44 <sup>a</sup>    | 11.75±0.57 <sup>a</sup>    | 7.65±0.46 <sup>a</sup>    | 7.35±0.03 <sup>a</sup>   | 16.27±1.53 <sup>a</sup>   |
| 163     | 2.14±0.14 <sup>c</sup>    | 8.29±0.36 <sup>ab</sup>   | 10.26±0.65 <sup>b</sup>    | 7.67±0.51 <sup>a</sup>    | 7.40±0.01 <sup>a</sup>   | 16.41±1.22 <sup>a</sup>   |
| 213     | 2.32±1.33 <sup>bc</sup>   | 7.83±0.18 <sup>b</sup>    | 7.81±0.21 <sup>c</sup>     | 5.34±0.56 <sup>b</sup>    | 7.38±0.03 <sup>a</sup>   | 15.91±1.83 <sup>a</sup>   |

表 9 粮堆内空气特性参数积累量对稻谷品质指标的影响

Table 9 Effect of accumulation amount of air property parameters in grain bulk on quality parameters of paddy

| 品质指标 | 线性方程   |
|------|--|
| 出米率  | $y=70.431-0.159X_1-0.016X_2-0.014X_3+0.163X_4+0.022X_5+0.004X_6$ |
| 整精米率 | $y=85.911-0.371X_1-0.002X_2-0.072X_3+0.452X_4+0.041X_5-0.109X_6$ |
| 食味值  | $y=80.524+0.037X_1+0.003X_2+0.004X_3-0.032X_4-0.001X_5-0.022X_6$ |
| 品尝得分 | $y=93.242-0.069X_1-0.012X_2+0.003X_3+0.059X_4+0.004X_5+0.047X_6$ |

注:  $X_1$ ~ $X_6$ 依次是最高积温、最低积温、最低温对应RH积累量、最高温对应湿球积温、最低温对应湿球积温、平均温对应湿球积温。

表 10 粮粒内外因指标对大米品质指标的影响

Table 10 Effect of external and internal factors in grain kernels on quality parameters of milled rice

| 指标      | 品质指标 | 线性方程  |
|---------|------|---|
| 理化与外观品质 | 品尝得分 | $y=94.686-0.005X_1-0.372X_2-1.547X_3-0.829X_4-0.747X_5-9.682X_6-0.034X_7+0.006X_8+0.000X_9+0.296X_{10}+0.015X_{11}-0.100X_{12}-0.039X_{13}+0.012X_{14}-0.048X_{15}+2.151X_{16}$   |
|         | 食味值  | $y=85.603-0.014X_1+2.632X_2-10.402X_3-1.862X_4+1.611X_5+17.443X_6-0.112X_7+0.003X_8+0.039X_9+1.317X_{10}+0.090X_{11}-1.117X_{12}+0.028X_{13}-0.189X_{14}-0.066X_{15}+0.473X_{16}$ |
| 热特性     | 品尝得分 | $y=19.556-4.082X_1+0.934X_2-0.146X_3+0.123X_4+0.170X_5+227.554X_6$  |
|         | 食味值  | $y=61.831+3.084X_1+0.304X_2-0.156X_3+0.308X_4-1.675X_5-125.484X_6$  |
| 热机械特性   | 品尝得分 | $y=99.302+0.793X_1+0.489X_2+14.458X_3+26.239X_4-14.859X_5-54.837X_6+86.496X_7-16.358X_8-82.306X_9$  |
|         | 食味值  | $y=82.932-0.136X_1+0.335X_2-1.991X_3-10.372X_4-3.497X_5+21.016X_6+3.047X_7+1.676X_8+63.974X_9$  |
| 脂肪酸成分   | 品尝得分 | $y=89.838+0.834X_1+0.013X_2-0.057X_3+0.002X_4-0.032X_5-0.031X_6-0.141X_7+0.323X_8-0.128X_9-0.549X_{10}+0.573X_{11}+0.626X_{12}$   |
|         | 食味值  | $y=76.045+0.421X_1-0.297X_2-0.021X_3+0.013X_4+0.028X_5-0.011X_6-0.078X_7+0.294X_8-0.191X_9-0.276X_{10}+0.246X_{11}+0.531X_{12}$   |

注: 对理化指标和外观品质指标,  $X_1$ ~ $X_{16}$ 依次是整精米率、籽粒长及宽、小碎米率、黄粒米率、精度、不完善粒率、垩白粒率、裂纹率、含水率、垩白度、破碎指数、千粒重、吸水率、出米率、新鲜度。对热特性, 6个自变量依次是糊化的峰面积、峰值温度、起始温度、终止温度、峰宽度、峰高度。对热机械特性, 9个自变量依次是面团发育时间、稳定时间、C1-Cs、C3/C4、C5-C4、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。对脂肪酸成分, 12个自变量依次是C<sub>14:1</sub>、C<sub>14:0</sub>、C<sub>18:2n6t</sub>、C<sub>18:1n9c</sub>、C<sub>18:0</sub>、C<sub>20:4n6</sub>、C<sub>20:5n3</sub>、C<sub>20:3n6</sub>、C<sub>20:2</sub>、C<sub>20:1</sub>、C<sub>24:1</sub>、C<sub>24:0</sub>。

25 °C, 粮堆相对湿度 75% 对应的稻谷含水率 15%, 是稻谷的临界安全水分, 根据拇指法则再降低一个水分点, 即含水率 14% 是稻谷的安全水分<sup>[22]</sup>。在水分活度 0.75 时, 稻谷粮堆可以生长的微生物有灰绿曲霉、局限曲霉及亮白曲霉, 生长的最佳温度对灰绿曲霉、局限曲霉是 30~35 °C, 而对亮白曲霉则是 45~50 °C<sup>[21~22]</sup>。因此, 为了提高稻谷研磨加工的品质指标(整精米率和白度), 仓储企业在粮堆温度与粮堆含水率之间寻找平衡点, 低温储粮技术可以适当提高粮堆含水率。于是本研究探索初始含水率 15.3% 稻谷低温储藏 213 d 期间的粮堆空气特性参数与大米重

要理化指标及品质指标的关联性。

稻谷储藏温度、含水率及储存时间如何影响加工时的整精米率<sup>[23~26]</sup>, 国内外缺乏实仓研究数据。考虑储藏时间和粮堆部位, 本研究发现, 含水率 15.3% 梗稻谷储存 105 与 163 d 之间显著差异的指标是含水率、大米千粒重、籽粒长及宽、整精米率、垩白粒率、垩白度、精度、裂纹率、破碎指数、新鲜度指数和吸水率, 而与整精米率相关系数大于 0.8 以上的指标有碎米率、小碎米率、籽粒长度和宽度。因此以入仓时的稻谷加工的整精米率、小碎米率、籽粒长度和宽度为参照, 可以评价稻谷储藏期间的品质变化情况。

当前评价稻谷储藏期间品质劣变的方法有化学法<sup>[15]</sup>、生化和酶方法<sup>[27-28]</sup>、淀粉糊化方法<sup>[29]</sup>及米饭质地测定<sup>[30]</sup>。本研究发现梗稻谷在 163 与 213 d 之间 DCS 测定的淀粉糊化峰的面积和高度减少。米粉团混合试验仪测定的参数分析表明, 随着稻谷储存时间由 45 增加到 163 d, 米粉团发育时间、稳定时间及回生扭矩逐渐增加, 而酶解速率( $\gamma$ )降低。这些米粉糊和米粉团淀粉糊化的参数变化可能是影响蒸煮米饭质地的原因之一。深入比较 105 与 213 d 储藏的稻谷样品, 18 种脂肪酸所占的百分比例保持不变。

本文研究粮堆各层籽粒间隙空气的特性参数, 并分析其积累值与稻谷品质的关系。稻谷低温储存期间出米率、整精米率、大米食味值及米饭品尝得分均受到粮堆最高积温、最高温度对应的湿球积温、平均温度对应的湿球积温显著地影响。

## 4 结论

冬季入仓的含水率 15.3% 的梗稻谷在 213 d 储藏中, 在夏季辅以空调控制粮面准低温, 储藏期间稻谷加工的大米糊化温度、蛋白弱化和糊化峰值扭矩、重要种类的脂肪酸所占比例均保持不变。稻谷加工的大米整精米率、小碎米率、籽粒长度和宽度可以作为储藏过程评价的外观品质指标。稻谷低温储存期间出米率、整精米率、大米食味值及米饭品尝得分均受到粮堆最高积温、最高温度对应的湿球积温、平均温度对应的湿球积温显著影响。在显著影响大米食味值和米饭品尝得分指标中, 理化与外观品质指标有籽粒长及宽、小碎米率、黄粒米率、精度、含水率、破碎指数、新鲜度; 热特性参数有米粉糊糊化的峰值温度、面积及高度; 热机械特性参数有面团的蛋白弱化、糊化峰值扭矩、淀粉酶活性、淀粉回生扭矩、加热速率、糊化速率及酶解速率; 脂肪酸成分中有 C<sub>14:1</sub>、C<sub>14:0</sub>、C<sub>20:5n3</sub>、C<sub>20:3n6</sub>、C<sub>20:2</sub>、C<sub>20:1</sub>、C<sub>24:1</sub>、C<sub>24:0</sub>。

## 参考文献

- [1] 顾小洲. 利用空调制冷实现低温储粮确保高水分稻谷储藏安全的实践[J]. 粮油仓储科技通讯, 2011, 27(4): 31-32. [GU X Z. A practice for ensuring safe storage of high moisture paddy with air-condition refrigeration to make low-temperature storage[J]. Liangyou Cangchu Keji Tongxun, 2011, 27(4): 31-32.]
- [2] 丁声俊. 粮业奋进粮人奋斗[J]. 粮食问题研究, 2019, 36(1): 5-10. [DING S J. Grain industry to forge ahead and gain workers to struggle[J]. Grain Issues Research, 2019, 36(1): 5-10.]
- [3] MAIER D E, NAVARRO S. Chilling of grain by refrigerated air. The mechanics and physics of modern grain aeration management(Navarro S, Noyes R. )[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002: 491-555.
- [4] ATUNGULU G G, KOLB R E, KARCHER J, et al. Postharvest technology: Rice storage and cooling conservation. Rice chemistry and technology(fourth edition)[M]. Woodhead Publishing and AACC International Press, 2019: 517-555.
- [5] YAN T Y, HONG J H, CHUNG J H. An improved method for production of white rice with embryo in a vertical mill[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92: 317-323.
- [6] YADAV B K, JINDAL V K. Changes in head rice yield and whiteness during milling of rough rice[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 86: 113-121.
- [7] 李兴军, 吴晓明, 殷树德. 平衡水分方程精准指导稻谷调质通风试验的原理[J]. 粮食加工, 2017, 42(6): 25-29. [LI X J, WU X M, YIN S D. A principle for accurate guiding paddy remoisturizing aeration test with equilibrium moisture equation [J]. Grain Processing, 2017, 42(6): 25-29.]
- [8] 段义三, 丁进, 闫恩峰, 等. 自然空气条件下梗稻谷智能化调质通风试验[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(11): 55-58. [DUAN Y S, DING J, YAN E F, et al. A smart remoisturizing aeration in japonica paddy using natural air[J]. Grain Science, Technology and Economy, 2018, 43(11): 55-58.]
- [9] 陈丽, 颜世强, 王孟亚. 空调控温确保稻谷安全度夏的实践[J]. 粮油仓储科技通讯, 2014, 30(6): 32-34. [CHEN L, YAN S Q, WANG M Y. A practice for ensuring paddy spending the summer with air condition controlling temperature[J]. Liangyou Cangchu Keji Tongxun, 2014, 30(6): 32-34.]
- [10] KALIYAN N, ALAGUSUNDARAM K, GAYATHRI P. Effect of temperature and moisture content on shelf life of paddy [C]// ASABE Paper No. 066193, 2006.
- [11] 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.
- [12] LI X J, JIANG P. Effect of storage temperature on biochemical and mixolab pasting properties of Chinese japonica paddy[J]. Journal of Food Research, 2015, 4(2): 57-67.
- [13] 郑颂, 赵恢发, 范存瞻, 等. 东南地区晚籼稻降温通风期间粮堆含湿量和露点温度的变化研究[J]. 粮食加工, 2020, 45(5): 36-43. [ZHENG S, ZHAO H F, FAN C Z, et al. A study on the humidity ratio and dewpoint temperature of late maturate indica paddy during temperature-decrease aeration in southeast China[J]. Grain Processing, 2020, 45(5): 36-43.]
- [14] LI X J, WU Z D, WU X M, et al. Lowering paddy temperature with mechanical aeration guided by CAE Model and aeration window[C]. In: Arthur FH, et al, eds. Proceedings of the 11th International Working Conference on Stored Product Protection, 2014, 294-309.
- [15] TAKASHI M, KOJI K, TATSUHIKO O. Method of measuring freshness of cereals and beans and apparatus therefor: European Patent, EP1612542[P]. 2006-4-1.
- [16] 李兴军, 陈治天, 邵汉良, 等. 一种大米籽粒破碎情况的检测方法: 中国, 109085132A[P]. 2018-12-25. [LI X J, CHEN Z T, SHAO H L, et al. A detection method for kernel broken percent of milled rice: China, 109085132A[P]. 2018-12-25.]
- [17] 姜平, 李兴军. 干燥过程中玉米籽粒水分扩散系数及热特性研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 53-59. [JIANG P, LI X J. A study on moisture diffusion coefficient and thermal properties of shelled corn during drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(15): 53-59.]

- [ 18 ] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GBT37511-2019. 粮油检验小麦粉面团流变学特性测试混合试验仪法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. [ State Administration of Market Supervision and Administration, Standardization Administration of China. GBT37511-2019. Grain and oils test, a method for determination of rheological properties of wheat flour dough with a Mixolab analysis [S]. Beijing: China Standard Press, 2019. ]
- [ 19 ] 王希越, 明明, 连丽丽, 等. 基于气相色谱-质谱的拟靶向代谢组学方法分析大米中脂肪酸 [J]. 色谱, 2020, 38 ( 2 ) : 250-254. ]
- [ WANG X Y, MING M, LIAN L L, et al. Analysis of fatty acids in rice by pseudotargeted metabolomics method based on gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2020, 38 ( 2 ) : 250-254. ]
- [ 20 ] 李兴军, 姜平. 稻谷及其加工产品平衡水分研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2014, 22(6): 100-105. [ LI X J, JIANG P. Advance in equilibrium moisture content of paddy and its products[J]. Grain and Oil Food Science and Technology, 2014, 22(6): 100-105. ]
- [ 21 ] NAVARRO S, NOYES R, ARMITAGE D, et al. Objectives of aeration. The mechanics and physics of modern grain aeration management( Navarro S, and Noyes R)[M]. New York: CRC Press, 2002: 1-34.
- [ 22 ] CHRISTENSEN C M. Storage of cereal grains and their products [M]. American Association of Cereal Chemists, 1982: 145-240.
- [ 23 ] REHAL J, KAUR G J, SINGH A K. Influence of milling parameters on head rice recovery: A review [J]. [International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences](#), 2017, 6(10): 1278-1295.
- [ 24 ] WISET L, LAOPREASERT P, BOROMPICHACHAICHTKUL C, et al. Effects of in-bin aeration storage on physical properties and quality of glutinous rice cultivar RD 6[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(6): 635-640.
- [ 25 ] KANLAYAKRIT W, MAWEANG M. Postharvest of paddy and milled rice affected physicochemical properties using different storage conditions[J]. International Food Research Journal, 2013, 20(3): 1359-1366.
- [ 26 ] DA SILVA WSV, VNIER N L, ZIEGLER V, et al. Effects of using eolic exhausters as a complement to conventional aeration on the quality of rice stored in metal silos[J]. [Journal of Stored Products Research](#), 2014, 59: 76-81.
- [ 27 ] CHEN T F, CHEN C L. Analysing the freshness of intact rice grains by colouretermination of peroxidase activity[J]. [J Sci Food Agric](#), 2003, 83: 1214-1218.
- [ 28 ] SRIKAEK K, PANYA U. Efficiencies of chemical techniques for rice grain freshness analysis[J]. [Rice Science](#), 2013, 20(4): 292-297.
- [ 29 ] ZHOU Z K, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Effect of storage temperature on rice thermal properties[J]. [Food Research International](#), 2010, 43(3): 709-715.
- [ 30 ] KEAWPENG I, VENKATACHALAM K. Effect of aging on changes in rice physical qualities[J]. International Food Research Journal, 2015, 22(6): 2180-2187.