

自然冷资源低温储藏仓设计与稻谷储藏试验

施灿璨 周福君 夏吉庆 贾富国

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为解决稻谷在高温干燥和储藏过程中品质损失问题,设计了自然冷资源低温储藏仓,利用冬季环境下形成的自然冰为高含水率稻谷制冷,以减少高温干燥稻谷工序并减少储藏期间稻谷的品质劣变。试验检测自然冷资源低温储藏仓内稻谷的储藏品质与加工品的变化,并与传统常温仓做对比,结果表明:所设计的自然冷资源低温储藏仓供冷均匀、能耗低、无污染,其制冷系统的能效比为3.54;初始含水率为16.5%的高含水率稻谷在自然冷资源低温储藏仓中能安全储藏5个月,平均含水率呈缓慢下降趋势,最终达到 $(15.1 \pm 0.5)\%$;自然冷资源低温储藏仓中稻谷粮温稳定,平均粮温为 9.8°C ;储藏期结束后,稻谷脂肪酸质量比为 $18.3\text{ mg}/(100\text{ g})$,发芽率为86.75%,霉菌总数为 $5.1 \times 10^4\text{ CFU/g}$,自然冷资源低温储藏仓中稻谷的出糙率和整精米率比常温储藏的稻谷分别提高了5.41个百分点和9.57个百分点,裂纹率比常温仓的稻谷降低了13.88个百分点,自然冷资源低温储藏仓中稻谷的储藏品质和加工品质显著优于常温仓中稻谷。

关键词: 自然冷资源; 低温储藏; 稻谷; 储藏品质

中图分类号: S379.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0375-08

Design of Cool Storage Warehouse with Natural Cold Resource and Paddy Storage Experiment

SHI Cancan ZHOU Fujun XIA Jiqing JIA Fuguo

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve paddy quality loss during drying process and storage, a natural cold resource (NCR) warehouse, which used the nature environment ice for providing cold energy to store high moisture paddy and reduce deterioration of paddy during storage period was designed. The NCR warehouse was composed by refrigeration system, paddy storehouse, ice storehouse, equipment room and control system. The paddy storehouse was a closed chamber with size of $3.8\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2.8\text{ m}$, the ice storage room was 0.5 m below ground with size of $4\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$. When the warehouse temperature was higher than the set temperature, the temperature sensor sent the signal to RMA411 remote input capture module, then the data output adopted the distal RM4024 analog output module, achieving real time communication between the host computer and output mold, through the RS485 serial series sent out command to start water pumps. The cold water which exchanged the cold energy from ice as coolant flowed from top to bottom in the finned tube heat exchanger by use of a water pump. The heat exchanged between hot air and heat exchanger under the action of the fan, and then the cool air was blown into warehouse to keep the paddy storage temperature at 10°C . The ice which collected in the winter provided cold energy for NCR warehouse. The paddy with inertial moisture content of 16.5% was packed on the weight of 10 kg by woven bag. The paddy bags were stacked 5 layers and 12 bags per layer which stored in the NCR warehouse from May to September and another part of paddy was stored in an ordinary temperature warehouse stored in the same way as a control group. The physiological characters and processing characters of the paddy were evaluated at the end of every month. The result showed that moisture contents of paddy in the NCR warehouse was decreased less than the ordinary warehouse. The fatty acid value of paddy in the NCR warehouse was $18.3\text{ mg}/(100\text{ g})$. The germination rate of paddy in

收稿日期: 2017-07-30 修回日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575098)

作者简介: 施灿璨(1986—),女,博士生,主要从事农产品加工与储藏研究,E-mail: www.shicancan@163.com

通信作者: 周福君(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程及农产品加工与储藏研究,E-mail: fjzhou@163.com

the NCR was 86.75% , and the total of molds was 5.1×10^4 CFU/g. Cracked rate of paddy in the NCR warehouse and ordinary warehouse was increased by 2.77 percentage points and 16.65 percentage points, respectively. The storage character of paddy in NCR warehouse was superior to ordinary warehouse paddy. The result indicated that NCR warehouse showed a better performance on storing high moisture paddy in high temperature season.

Key words: natural cold resource; low temperature storage; paddy; storage character

引言

我国是稻谷生产和食用大国,稻谷的年产量达2亿t以上,居世界首位^[1]。稻谷在入仓前需要高温干燥,使其含水率降至安全含水率(14%)以下,以减少储藏期间品质劣变^[2-3]。然而,稻谷为热敏性谷物,高温干燥工序会造成稻米香味物质损失和爆腰率增加,降低稻谷食用品质和加工品质^[4-8]。大量研究结果表明,稻谷含水率在15.5%~16.5%时碾磨品质最佳且食味品质较好^[9-12]。基于上述原因,可通过自然晾晒通风方式干燥稻谷使其含水率下降至16.5%,以减少热风干燥工序对稻谷加工品质的影响。然而,根据前人和本研究的前期试验结果可知,稻谷含水率在16.5%时储藏稳定性差,储藏温度需要达到10℃才能抑制霉菌和储粮害虫的生理活动和生长繁殖,实现稻谷安全储藏^[13-14]。

我国现行的粮仓降温方法主要包括:自然通风降温、机械通风降温、利用谷物冷却机制冷降温等。其中,自然通风降温 and 机械通风降温受环境温度影响较大,降温速度慢,降温效果较差^[15]。谷物冷却机购置费用高,运行能耗大^[16-18]。为减少粮仓降温的能源消耗,国内外学者开始研究利用新型能源为粮仓降温。YANG等^[19]利用地下热源泵为平房仓制冷,实现大豆在年平均温度13.9℃的条件下低温储藏,然而地下热源泵的制冷温度较高,不能达到低温储藏高水分稻谷对温度的要求。修方珑等^[20]利用热管技术对小麦进行降温并有效抑制仓储害虫生长,然而此种技术只能在环境气温较低的季节为粮仓降温。基于上述分析,研发低能耗、持续制冷的稻谷低温储藏方法是当前需要解决的问题。

黑龙江省是优质稻谷的产地,属于温带大陆性季风气候,年平均温度在2.45~5.72℃之间^[21],受环境温度影响,5—9月份的粮食温度高,其余月份粮温较低,因此控制稻谷高温月份的粮温即可实现全年低温储粮。我国东北地区冬季冰雪储量丰富,将自然环境中冰雪等自然冷资源应用于稻谷低温储藏,减少制冷剂的使用量,是稻谷绿色储藏的新方法^[22-23]。目前,自然冷资源主要应用在果蔬保鲜方面^[24-26],自然冷资源应用于稻谷储藏领域的研究鲜

见报道。

为此本试验利用自然冰为冷源,设计适用于稻谷储藏的自然冷资源低温储藏仓,设置储藏仓的储藏温度为10℃,研究含水率16.5%稻谷的储藏品质和加工品质变化情况,并与常温储藏仓中稻谷品质作对比,为自然冷资源低温储藏仓储藏大量高含水率稻谷提供理论依据。

1 自然冷资源低温储藏仓设计

试验用自然冷资源低温储藏仓由储藏室、储冰室、设备室、制冷系统和控制系统组成,结构如图1所示。

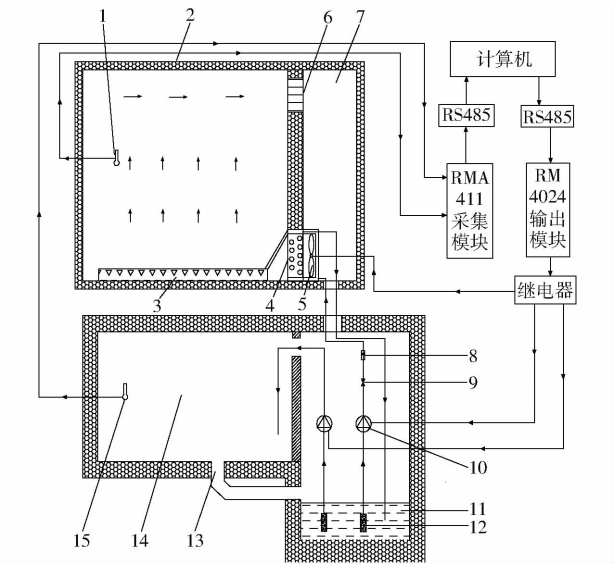


图1 自然冷资源稻谷储藏仓结构示意图

Fig.1 Sketch map of experimental equipment of NCR warehouse

- 1、15. 传感器 2. 储藏室 3. 风道 4. 换热器 5. 轴流风机
6. 通风口 7. 设备室 8. 流量计 9. 阀门 10. 水泵 11. 冷水池
12. 过滤器 13. 出水口 14. 储冰室

储藏室尺寸为3.8 m×2.8 m×3 m。墙体部分采用0.5 mm厚不锈钢板,中间层为厚度100 mm的阻燃性聚氨酯夹芯隔热板,导热系数为0.265 W/(m²·K),小于GB/T 29890—2013《粮油储藏技术规范》中第三储粮生态区域墙体传热系数要求。

储冰室建造于距地面0.5 m的地下,尺寸为4 m×3 m×2.5 m。墙体为240 mm的砖混结构,墙

内壁铺设厚度为 200 mm 聚氨酯保温板和防水层, 储冰室通过出水管道与冷水池联通, 冷水利用自身重力流入冷水池中。冷水池为不锈钢箱体结构, 外层铺设 200 mm 聚氨酯保温板, 冷水池的尺寸为 1 m×1.2 m×0.8 m。

制冷系统由翅片管式换热器、轴流风机、水泵、过滤器、流量计以及其他辅助设备组成^[27]。其中翅片管式换热器的换热管为蛇形紫铜管, 铜管直径 10 mm, 厚度为 0.7 mm。管间距为 25 mm, 换热翅片为厚度 0.22 mm 的铝制翅片, 翅片间距为 2.3 mm。翅片管式换热器与风机通过不锈钢槽体固定, 空气由风机推送入换热器进行冷量交换。

通风系统由设备室中风机、风道以及通风口组成。风机与换热器位于储藏室与设备室之间的墙壁下部, 风道与风机通过矩形变径管相连, 风道为地上笼式矩形结构, 开孔率为 25%, 截面积为 0.01 m²。冷空气通过风道孔垂直射入稻谷通风垛, 与粮堆内部空气和稻谷进行冷量交换, 换热后的空气沿墙壁方向通过上部通风口进入设备室, 与换热器进行热量交换, 完成空气制冷循环。

控制系统利用温湿度传感器 (JWSL-3 型, 湿度测量范围: 0~100%, 温度测量范围: 0~50℃, 灵敏度分别为 3% 和 0.5℃) 进行数据采集并传输给 RMA411 数据采集模块, 通过 RS232/485 串口将信号汇总并输入 PC 机, 利用 LabVIEW 软件对温度信息参数范围进行判断, 当储藏温度高于设定储藏温度时, 通过输出 RM4024 模块将启动信号以电压形式传递给继电器开启制冷系统, 进行制冷操作。当仓温降低至设定温度阈值时, 输出 RM4024 模块将关闭信号以电压形式传递给继电器关闭制冷系统, 完成制冷操作。

2 自然冷资源低温储藏仓的设计计算

自然冷资源低温储藏仓位于东北农业大学工程学院, 地理位置 45°44'N, 126°43'E。将含水率为 16.5% 的稻谷以包装粮形式储藏, 堆码成井字形通风垛形式, 通过计算储藏温度为 10℃ 的自然冷资源低温储藏仓的冷负荷、制冷用冰量、送风量等参数, 为该仓的设计建造提供技术参数并匹配相应的设备。

2.1 自然冷资源低温储藏仓冷负荷计算

自然冷资源低温储藏仓的冷负荷主要包括: 围护结构传热、通风换气、粮食冷却、粮食呼吸热、电动机运转热流量以及操作热。由于稻谷储藏入库时间为 5 月初, 此时稻谷粮温低于设定试验储藏温度 10℃, 并且在 10℃ 时稻谷的呼吸作用微弱, 因此, 计

算自然冷资源低温储藏仓的冷负荷时忽略稻谷冷却和粮食呼吸热。

围护结构传热量 Q_1 的计算公式为

$$Q_1 = KAa(T_w - T_0) = 268.40 \text{ W} \quad (1)$$

式中 K ——围护结构传热系数, 0.265 W/(m²·K)
 A ——围护结构的计算传热面积, 50.24 m²
 a ——围护结构两侧温差修正系数, 取 1.6
 T_w ——围护结构外侧温度, 取最热月份 (7 月) 的平均气温, 295.75 K
 T_0 ——储藏仓的仓储温度, 283.15 K

为减少因换气造成的冷量损失, 储藏过程中严格控制通风换气次数, 换气频率为每周 1 次, 换气热 Q_2 计算公式为

$$Q_2 = \frac{(h_w - h_0)n_1 V \rho}{3.6 \times 24} = 2.03 \text{ W} \quad (2)$$

式中 h_w ——温度 22.6℃、相对湿度 70% 时空气的比焓, 51.4 kJ/kg
 h_0 ——温度为 10℃、相对湿度 55% 时空气的比焓, 20.6 kJ/kg
 n_1 ——储藏仓每日换气次数, 每周换气 1 次, 1/7
 V ——储藏仓的容积, 31.92 m³
 ρ ——10℃ 条件下储藏仓空气密度, 1.25 kg/m³

风机运行时电动机产生的冷负荷 Q_3 计算公式为

$$Q_3 = 1\,000 P \xi \delta = 61.88 \text{ W} \quad (3)$$

式中 P ——风机电动机功率, 0.25 kW
 ξ ——电动机效率, 0.75
 δ ——电动机运转时间系数, 取 0.33

操作热量 Q_4 是工作人员进行仓库管理操作时产生的热量, 包括开门热量 Q_{4a} 和操作人员热量 Q_{4b} , 开门热量 Q_{4a} 计算公式为

$$Q_{4a} = \frac{V n_1 n_2 (h_w - h_0) M \rho}{3.6 \times 24} = 2.03 \text{ W} \quad (4)$$

式中 n_2 ——储藏仓门幢数, 1
 M ——无空气幕效率修正系数, 取 1
操作人员热量 Q_{4b} 的计算公式

$$Q_{4b} = \beta m Q_r = 5.83 \text{ W} \quad (5)$$

式中 β ——每日操作时间系数, 1/48
 m ——操作人员数, 1 人
 Q_r ——单个操作人员产生的热量, 280 W/人
自然冷资源低温储藏仓 7 月份平均单日冷负荷 Q_d 的计算公式为

$$Q_d = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 340.17 \text{ W} \quad (6)$$

2.2 储冰量计算

自然冷资源低温储藏仓的储冰量根据储藏期内

储藏仓的总冷负荷计算得出,单日冷负荷根据5—9月份的平均气温计算,平均分别为:12.2、18.5、22.6、21.3、13.6℃,根据公式(1)~(6)计算出不同月份中的储藏仓的每日冷负荷。试验期间稻谷自然冷资源低温储藏仓的总冷负荷 Q_t 为

$$Q_t = \sum_{i=5}^9 n_i Q_i = 35\,718.69\text{ W}$$

(7)

式中 n ——每月的天数,d

自然冷资源低温储藏仓的储冰量 W 计算公式为

$$W = \frac{Q_t}{Q_L \eta_{XL} \eta_{HR}} = 13\,391.78\text{ kg}$$

(8)

式中 Q_L ——1 kg 冰的可利用热焓量,包括冰水相变时吸收的热量以及水温上升至4℃时吸收的热量,351.7 kJ/kg

η_{XL} ——储冰蓄冷效率,78%

η_{HR} ——换热器冷量利用效率,84%

试验根据计算的储冰量值,于2016年1月底进行室外取冰,密封存放于储冰室中,于5月初开启储冰室开始储藏稻谷试验。

2.3 风机风量和风压计算

自然冷资源低温储藏仓采用风机送风,冷空气通过风道送入粮堆,为粮堆以及储藏仓提供制冷风量。因此,需要确定风机的风量和风压。

2.3.1 风机风量计算

为保证风机在试验期间能够提供足够的制冷风量,以哈尔滨地区7月份历史最高温度36℃为环境温度,根据公式(1)~(6)计算自然冷资源低温储藏仓的日最大冷负荷 $Q_{\max}$,并计算出相应的风机风量,风机风量 φ 计算公式为

$$\varphi = S_1 \frac{Q_{\max}}{\rho c_p \Delta T} = 80.38\text{ m}^3/\text{h}$$

(9)

式中 $Q_{\max}$ ——自然冷资源仓的最大冷负荷,628.67 W

S_1 ——风量系数,取1.16

c_p ——空气比热容,1.005 kJ/(kg·K)

ΔT ——仓内与仓外的温度差,26 K

2.3.2 风机风压计算

送风系统的送风阻力由风道阻力、筛孔阻力以及粮层阻力组成,由于稻谷堆码成通风垛形式,粮袋间有相对较大间隙,通风效果好。因此,计算时忽略通风垛的粮堆阻力。

风道阻力包括风道直长管的延程摩擦阻力和异型管段的局部阻力。风道的摩擦阻力 H_f 计算公式为

$$H_f = \Delta H_f L = 55.00\text{ Pa}$$

(10)

式中 ΔH_f ——管内单位摩擦力,25 Pa/m

L ——通风管长,2.2 m

异型管段局部阻力 H_p 的计算公式为

$$H_p = \zeta_1 \frac{\rho v_1^2}{2} = 1.10\text{ Pa}$$

(11)

式中 ζ_1 ——局部阻力系数,取0.11

v_1 ——通风管内风速,4 m/s

风道总阻力 H_c 的计算公式为

$$H_c = H_f + H_p = 56.10\text{ Pa}$$

(12)

筛孔阻力 H_s 的计算公式为

$$H_s = \zeta_2 \frac{\rho v_2^2}{2} = 0.22\text{ Pa}$$

(13)

式中 ζ_2 ——空气分配器阻力系数,取9.75

v_2 ——筛孔风速,0.19 m/s

送风系统的风道总阻力 H_t 为

$$H_t = H_c + H_s = 56.32\text{ Pa}$$

(14)

实际工作中的风机风压 H_i 计算公式为

$$H_i = S_2 H_t = 67.58\text{ Pa}$$

(15)

式中 S_2 ——风压系数,取1.2

根据上述计算结果,为自然冷资源稻谷储藏仓配备相应设备,试验选择有效换热面积为2 m²翅片管式换热器1台,其余设备参数见表1。

表1 自然冷资源低温储藏仓的结构参数和工作参数

Tab.1 Structure parameters and working parameters of NCR warehouse

参数	数值
储藏室尺寸/(m×m×m)	3.8×2.8×3
储冰室尺寸/(m×m×m)	4×3×2.5
额定电压/V	380
额定输出功率/kW	1.05
轴流风机型号	SFG2.5-2
单相漩涡式自吸水泵型号	JLm60-400
变频器型号	HT6000
智能三相电表型号	KZD-S

2.4 自然冷资源低温储藏仓性能分析

系统能效比是用来评价制冷系统能耗的指标,表示为制冷系统的制冷量 Q_k 与总输入功率 P_i 的比值。其中,自然冷资源低温储藏仓的制冷系统制冷量等于翅片管式换热器的换热量,其计算公式为

$$Q_k = L_w \rho_w c_w (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) = 3\,721.78\text{ W}$$

(16)

式中 L_w ——冷水循环流量,0.8 m³/h

ρ_w ——水密度,取1 000 kg/m³

c_w ——水定压比热容,4.187 kJ/(kg·K)

T_{out} ——换热器出水口水温,281.15 K

T_{in} ——换热器入水口水温,277.15 K

系统能效比计算公式为

$$E = \frac{Q_k}{P_f + 2P_p} = 3.54$$

(17)

式中 P_f ——风机功率,250 W
 P_p ——水泵功率,400 W,制冷系统中使用 2 个水泵,分别为换热器供水和为系统提供冰水换热用冷水

通常,普通型号的谷物冷却机能效比在1.8~2.83之间,与谷物冷却机相比自然冷资源低温储藏仓的制冷系统能耗比低,能源利用率高,能更有效地为稻谷制冷。

3 材料与方法

3.1 试验材料

五优稻 4 号(五常粮原谷物有限公司)。

3.2 仪器与设备

SY88-TH 型实验荃谷机,韩国双龙公司;SY88+TR100 型实验连续碾米机,韩国双龙公司;BGZ-76 型电热鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司;LRH-250 型生化培养箱,上海一恒科技有限公司;FZ102 微型植物试样粉碎机,天津泰斯特仪器有限公司。

3.3 试验方法

3.3.1 稻谷储藏试验设计

稻谷储藏试验于自然冷资源低温储藏仓中进行,储藏温度设定为 10℃。将未经热风干燥的稻谷在储藏前晾晒调质至含水率 16.5%,以包装粮形式分装于编织袋中(10 kg/袋),将一部分袋装稻谷储藏于自然冷资源低温储藏仓中,并摆放成通风垛形式,每层堆码 12 袋稻谷,共堆码 5 层,横向粮袋间的距离为 10 cm,粮垛与粮库墙壁间距离大于 0.5 m,具体结构见图 2。分别于仓体的墙壁中心处和仓顶中心处布置 1 个温湿度传感器,以测定仓温和仓湿;于粮堆上层、中层和下层各布置 1 个温度传感器,测定粮温。按照相同堆垛方法将另一部分稻谷储藏于常温仓中作为对照组,比较在自然冷资源低温储藏仓和常温仓中含水率为 16.5% 稻谷的储藏品质以及加工品质变化情况。储藏试验从 2016 年 5 月 1 日开始至 2016 年 9 月 30 日结束,稻谷的仓储试验周期 153 d。

3.3.2 稻谷指标测定

稻谷含水率按照 GB 549—85 方法测定。
稻谷的储藏品质测定:脂肪酸质量比按照 GB/T 15684—1995 方法测定,稻谷发芽率按照 GB/T 5520—2011 方法测定,霉菌菌落总数按照 GB 4789.15—2010 方法测定。

稻谷加工品质测定:出糙率按照 GB/T5495—2008 方法测定,整精米率按照 GB/T21719—2008 方



图 2 自然冷资源低温储藏仓稻谷储藏试验现场图
Fig.2 Physical picture of paddy storage with NCR warehouse

法测定,裂纹率按照 GB 5496—85 方法测定。

3.4 数据处理

Excel 软件处理数据,利用 SPSS 20.0 软件对稻谷品质进行 LSD 方差分析,Origin 9.0 软件作图。

4 结果与分析

4.1 自然冷资源低温储藏仓温度变化

图 3 为试验周期内室外气温以及自然冷资源低温储藏仓和常温仓中仓温、粮温的变化情况。如图 3 所示,自然冷资源低温储藏仓在整个试验周期内仓温变化范围为 7.3~11℃,平均仓温(9.8±1.1)℃,粮温变化范围为 5.5~11.9℃,平均粮温(9.8±0.7)℃。其中,自然冷资源低温储藏仓在初始阶段的仓温和粮温低于 10℃,这是由于 5 月份夜间温度较低,试验采用自然冰制冷与自然通风相结合的方法共同为自然冷资源低温储藏仓降温。试验期间,常温仓的仓温和粮温受室外气温影响较大,总体呈先增大后减小的趋势。常温仓仓温变化范围为 6.4~27.5℃,平均温度(18.3±4.8)℃,粮温变化范围为 6.6~24.5℃,平均粮温(16.9±4.2)℃。稻谷储藏试验期间内,自然冷资源低温储藏仓的仓温比常温仓低 8.5℃,粮温比常温仓低 7.1℃。由温度数据可知,自然冷资源低温储藏仓的仓温和粮温比常温仓低,并且仓温和粮温保持恒定。

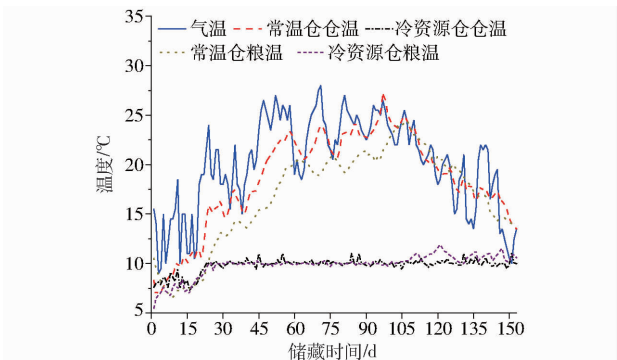


图 3 储藏期间温度变化曲线
Fig.3 Temperature variation curves during storage periods

4.2 储藏仓的环境相对湿度和稻谷含水率变化

图 4 为储藏仓环境相对湿度和稻谷含水率的变化情况。试验期间,自然冷资源低温储藏仓的环境相对湿度变化范围为 53% ~ 60%,常温仓的环境相对湿度变化范围为 46% ~ 53%。储藏期结束后,自然冷资源低温储藏仓中稻谷含水率下降至 $(15.1 \pm 0.5)\%$,常温仓中稻谷含水率降至 $(14.7 \pm 0.7)\%$ 。根据稻谷吸附与解吸 CAE 方程^[28]可知,稻谷平衡含水率与环境相对湿度成正比,与环境温度成反比。当自然冷资源低温储藏仓的环境相对湿度为 53% ~ 60%、仓温为 10℃ 时稻谷的平衡含水率小于 15.1%;当常温仓的环境相对湿度在 46% ~ 53% 之间、粮温在 6.4 ~ 24.5℃ 之间时稻谷的平衡含水率小于 14.7%,因此,在储藏期间两种仓中的稻谷均处于解吸状态,表现为稻谷的含水率降低。并且,自然冷资源仓稻谷的含水率下降速度小于常温仓,其稻谷的最终含水率比常温仓中稻谷含水率高 0.4 个百分点,通过比较两个储藏仓稻谷含水率标准差可知,自然冷资源仓中稻谷的含水率差异度较小,均匀度好。

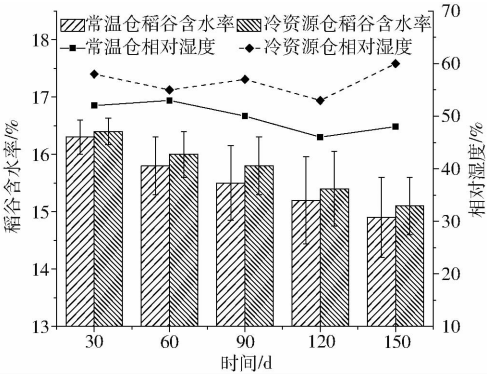


图 4 粮仓的环境相对湿度和稻谷含水率变化趋势
Fig. 4 Variation trends of relative humidity and paddy moisture content in warehouse

4.3 稻谷储藏品质分析

稻谷脂肪酸含量、发芽率和霉菌总数的变化情况见表 2。在储藏试验结束后,自然冷资源低温储藏仓中稻谷脂肪酸质量比 18.32 mg/(100 g),与初始脂肪酸质量比相比增加了 63.4%,常温仓中稻谷脂肪酸质量比为 42.5 mg/(100 g),与初始脂肪酸质量比相比增加了 279.5%。自然冷资源低温储藏仓中稻谷发芽率从 94.00% 下降至 86.75%,常温仓稻谷发芽率从 94.00% 降低至 79.25%,自然冷资源储藏仓中稻谷的发芽率比常温仓高 7.5 个百分点,两者差异极显著 ($P < 0.01$)。自然冷资源储藏仓中稻谷的霉菌总数从 1.5×10^3 CFU/g 增加至 5.1×10^4 CFU/g,常温仓内稻谷的霉菌总数从 1.5×10^3 CFU/g 增加至 1.3×10^5 CFU/g,表现为储藏后期常温仓中稻谷出现霉变

气味,局部有霉变粒产生。由试验结果可知,自然冷资源低温储藏仓中稻谷的储藏品质显著高于常温仓稻谷,自然冷资源低温储藏仓的低温环境有效抑制了稻谷的储藏品质劣变和微生物的生长繁殖。

表 2 稻谷脂肪酸含量、发芽率和霉菌总数变化
Tab. 2 Changes of moisture content, fat acid value and molds count

储藏条件	脂肪酸质量比/ (mg·(100 g) ⁻¹)	发芽率/ %	霉菌总数/ (CFU·g ⁻¹)
初始值	11.2 ± 0.75 ^a	94.00 ± 1.2 ^a	1 500 ± 600 ^a
冷资源仓	18.3 ± 2.10 ^a	86.75 ± 1.5 ^b	51 000 ± 5 500 ^b
常温仓	42.5 ± 3.31 ^b	79.25 ± 3.1 ^c	130 000 ± 13 000 ^c

注:同一列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$),下同。

4.4 稻谷加工品质分析

表 3 为储藏期结束后稻谷加工品质的变化情况,储藏试验结束后,自然冷资源低温储藏仓中稻谷的出糙率、整精米率、裂纹率与初始值无显著性差异,常温仓中稻谷的加工品质与初始值相比有显著差异 ($P < 0.05$)。自然冷资源低温储藏仓中稻谷的出糙率和整精米率比常温仓稻谷相比分别高 5.41 个百分点和 9.57 个百分点,裂纹率比常温仓低 13.88 个百分点,从试验结果可知,自然冷资源低温储藏仓的低温环境更有利于保持稻谷的加工品质。

表 3 自然冷资源低温储藏仓与常温仓的稻谷加工品质对比

Tab. 3 Paddy processing quality of NCR warehouse and ordinary warehouse				%
储藏条件	出糙率	整精米率	裂纹率	黄粒米率
初始值	78.70 ± 2.05 ^a	63.81 ± 1.04 ^a	19.57 ± 1.53 ^b	—
冷资源仓	76.68 ± 1.95 ^a	60.77 ± 1.35 ^a	22.34 ± 1.11 ^b	—
常温仓	71.27 ± 1.53 ^b	51.20 ± 1.20 ^b	36.22 ± 1.53 ^a	0.72

通过稻谷储藏试验结果可知,自然冷资源低温储藏仓能为稻谷提供有效的低温储藏环境,并减少稻谷的储藏品质和加工品质损失。试验期结束后进入 10 月,此时东北地区气温普遍降低,夜间温度可达 10℃ 以下,经自然冷资源低温储藏仓储藏后的稻谷最终含水率为 15.1%,已达到东北地区秋冬季节稻谷安全储藏含水率,可以将稻谷转入常温仓继续安全储藏。

5 经济性分析

5.1 自然冷资源低温储藏仓建设成本

自然冷资源低温储藏仓的建设成本包括:土建工程成本和设备购置成本,其中土建工程成本为

10 980 元,翅片管式换热器、风机等设备购置成本为 5 900 元,自然冷资源低温储藏仓总建设成本为 16 880 元。

5.2 稻谷耗电量

自然冷资源低温储藏库的耗电量如图 5 所示,其耗电量与环境温度显著正相关($P < 0.01$),试验期内 7 月耗电量最大,耗电量为 132 kW·h。总耗电量为 517 kW·h,月平均耗电量为 103.4 kW·h。按照一般工业用电电价 0.866 5 元/(kW·h) 计算,自然冷资源稻谷储藏仓用于稻谷储藏的总电费为 448 元。

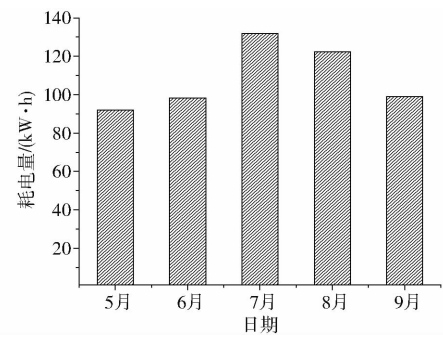


图 5 自然冷资源储藏仓耗电量

Fig.5 Power consumption of NCR warehouse

因此,自然冷资源低温储藏仓的建设和运行费用为 17 328 元。然而,利用自然冷资源低温储藏稻谷可减少稻谷干燥费用 80 元/t。并且,按照现行的稻谷常规储藏方式,稻谷经过干燥和仓储通风后出库时含水率通常下降至 12% 以下,储藏期间干耗较大。通过试验结果可知,利用自然冷资源低温储藏仓储藏稻谷减少 3% 的稻谷干耗,按照粳稻收购价格 3 000 元/t 计算,利用自然冷资源储藏仓储藏稻谷每吨至少降低 90 元的干耗损失。因此,与常规粮

仓相比,利用自然冷资源低温储藏仓储藏稻谷每吨可增加 170 元的收入。

通过对比可知,自然冷资源低温储藏仓可在减少干燥成本的同时保证稻谷的储藏品质和加工品质,并降低稻谷储藏期间干耗,但建设和运行成本较高,因此,建议此种稻谷低温储藏方法应充分利用地域优势,储藏食味品质优良、稻米单价高的优质稻谷(如五常稻花香、响水大米等),以平衡自然冷资源低温储藏仓的建设和储藏成本。

6 结论

(1)设计并建造了自然冷资源低温储藏仓,采用冬季自然冰为冷源并结合稻谷通风堆码方法,实现了稻谷在高温季节的低温储藏。自然冷资源低温储藏仓的平均仓温为 $(9.8 \pm 1.1)^\circ\text{C}$,稻谷平均粮温为 $(9.8 \pm 0.7)^\circ\text{C}$,制冷系统的能效比为 3.54,与常规机械制冷相比自然冷资源低温储藏仓具有供冷均匀、能耗低、无污染等特点。

(2)初始含水率 16.5% 的稻谷在自然冷资源低温储藏仓中储藏 5 个月,稻谷平均含水率呈缓慢下降趋势,最终达到 $(15.1 \pm 0.5)\%$,减少了热风干燥工序。

(3)储藏期结束后,自然冷资源低温储藏仓中稻谷的脂肪酸质量比为 18.3 mg/(100 g),发芽率 86.75%,霉菌总数 5.1×10^4 CFU/g。与常温储藏的稻谷相比,自然冷资源低温储藏仓中稻谷的出糙率和整精米率分别高了 5.41 个百分点和 9.57 个百分点,裂纹率低了 13.88 个百分点,无黄粒米检出,自然冷资源低温储藏仓很好地保持了稻谷的储藏品质和加工品质。

参 考 文 献

1 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 国家统计局出版社, 2014 - 2016.

2 王玉凤, 夏吉庆, 孙培灵. 糙米低温储藏技术的发展及应用前景[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(4): 136 - 140.
WANG Yufeng, XIA Jiqing, SUN Peiling. Advances and application prospect of storage technique of brown rice in low temperature [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 40(4): 136 - 140. (in Chinese)

3 GENKAWA T, UCHINO T, INOUE A, et al. Development of a low-moisture-content storage system for brown rice: storability at decreased moisture contents[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(4): 515 - 522.

4 徐凤英, 陈震, 李长友, 等. 稻谷热风、微波干燥品质与玻璃化转变研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 187 - 192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150228&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.028.

XU Fengying, CHEN Zhen, LI Changyou, et al. Effect of drying methods on quality and glass transition temperature of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 187 - 192. (in Chinese)

5 夏吉庆, 郑先哲. 稻谷热变性温度的试验[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 76 - 78.
XIA Jiqing, ZHENG Xianzhe. The experiment research on paddy thermal denatuiation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 76 - 78. (in Chinese)

6 刘立意, 郝世杨, 张萌, 等. 基于 CFD - DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27 - 32, 158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150805&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.005.

LIU Liyi, HAO Shiyang, ZHANG Meng, et al. Numerical simulation and experiment on paddy ventilation resistance based on CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 27 - 32, 158. (in Chinese)

- 7 张慧明,郑先哲,宋翔宇. 不同收获期稻谷及时干燥与延时干燥后品质对比研究[J]. 东北农业大学学报,2012,43(8):30-33.
ZHANG Huiming, ZHENG Xianzhe, SONG Xiangyu. Study of rice quality compared immediately drying with deferred drying in different harvest time[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012,43(8):30-33. (in Chinese)
- 8 陈银基,蒋伟鑫,曹俊,等. 温湿度动态变化过程中不同含水量稻谷的储运特性[J]. 中国农业科学,2016,49(1):163-175.
CHEN Yinji, JIANG Weixin, CAO Jun, et al. Storage and transportation characteristic of different moisture paddy rice dealt with dynamic temperature and humidity[J]. Scientia Agricultura Sinica,2016,49(1):163-175. (in Chinese)
- 9 夏吉庆,邢靓,施灿璨,等. 自然冷资源储藏环境下稻谷质构特性及蒸煮品质的试验研究[J]. 沈阳农业大学学报,2016,47(1):114-118.
XIA Jiqing, XING Liang, SHI Cancan, et al. Cooking quality variation and textural properties of rice under nature cold resource storage state[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2016,47(1):114-118. (in Chinese)
- 10 BASAVAIAH D, DEVENDAR B, ARAVINDU K, et al. Changes in culinary, viscoamylographic and sensory characteristics during rice storage at different temperatures[J]. Journal of Stored Products Research, 2013, 53(2):37-42.
- 11 TIAGO A K, AURI B, LEILA P da S, et al. Changes in culinary, viscoamylographic and sensory characteristics during rice storage at different temperatures [J]. Journal of Stored Products Research, 2013,53(2):37-42.
- 12 贾富国,兰海鹏,左彦军,等. 糙米二次加湿调质工艺优化与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(5):95-98,151.
JIA Fuguo, LAN Haipeng, ZUO Yanjun, et al. Optimization of technology for twice moisture conditioning treatment for brown rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):95-98,151. (in Chinese)
- 13 周建新,张瑞,王璐,等. 储藏温度对稻谷微生物和脂肪酸值的影响研究[J]. 中国粮油学报,2011,26(1):92-95.
ZHOU Jianxin, ZHANG Rui, WANG Lu, et al. Temperature influence on microorganism flora and fatty acid value of stored paddy under high humidity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2011,26(1):92-95. (in Chinese)
- 14 COPATTI C E, MARCON R K, MACHADO M B. Evaluation of damage by *Sitophilus zeamais*, *Orizaephilus surinamensis* and *Laemophloeus minutus* in stored rice grain[J]. Revista Brasileira De Engenharia Agricola E Ambiental,2013,17(8):855-860.
- 15 庞文录. 高水分稻谷低温储藏技术的研究[J]. 粮食加工, 2007, 32(1):78-80,85.
PANG Wenlu. The research of storage high water rice by low temperature[J]. Grain Processing,2007, 32(1):78-80,85. (in Chinese)
- 16 XIAO Fengning, HE Li, TAE Hwan Kang, et al. Storage characteristics of low temperature grain warehouse using ambient cold air in winter[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2012, 37(3):184-191.
- 17 王子彪,朱立,王培. 谷物冷却机与低温贮粮技术实验研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(3):465-468.
WANG Zibiao, ZHU Li, WANG Pei. Develop the mobile grain chilling unit for the low temperature grain storing technology[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition,2007,23(3):465-468. (in Chinese)
- 18 周全申,卞科,乔永钦. 谷物冷却机处理量计算与评估[J]. 农业机械学报,2006,37(10):83-85.
ZHOU Quanshen, BIAN Ke, QIAO Yongqin. Estimation and judgment of handle capacity of grain refrigerator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(10):83-85. (in Chinese)
- 19 YANG Weiqiao, LI Xiong, LIU Xia, et al. Improvement of soybean quality by ground source heat pump (GSHP) cooling system [J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 64:113-119.
- 20 修方珑,张岩,王世清,等. 基于热管技术的储粮仓温度特征及其抑虫效果[J]. 农业工程学报,2013, 29 (14):256-261.
XIU Fanglong, ZHANG Yan, WANG Shiqing, et al. Temperature characteristic and inhibition effect on insect pest in grain storehouse based on heat pipe technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(14):256-261. (in Chinese)
- 21 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519-531.
HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(2):519-531. (in Chinese)
- 22 杨光,祁影霞,刘汉尚. 季节性冰雪蓄冷空调系统的实验研究 [J]. 制冷与空调,2010,24(2):6-9.
YANG Guang, QI Yingxia, LIU Hanshang. Experimental study on seasonal snow and ice storage air conditioning system[J]. Refrigeration and Air Conditioning,2010,24(2):6-9. (in Chinese)
- 23 李高锋,马忠龙,肖晟昊,等. 季节性冰蓄冷技术在空调系统中的应用研究[J]. 湖南生态科学学报, 2015,2(1):32-35.
LI Gaofeng, MA Zhonglong, XIAO Shenghao, et al. Research on seasonal ice cold energy storage technology in air conditioning [J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2015,2(1):32-35. (in Chinese)
- 24 LI Lite, CHENG Yongqiang, XUE Wentong. A study on the technology keeping fruits and vegetables fresh by utilizing natural cooling resource[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,1995,11(3):88-94.
- 25 陈曦,周福君. 利用自然冷资源对油豆角保鲜的试验研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(9):159-161.
CHEN Xi, ZHOU Fujun. Experiment study of natural cool resources (NCR) freshness technology on bean [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2010, 32(9):159-161. (in Chinese)
- 26 宫元娟,张建鹏,张研,等. 基于自然冷源保鲜库贮藏的寒富苹果保鲜条件优化[J]. 沈阳农业大学学报,2016,47(1):64-70.
GONG Yuanjuan, ZHANG Jianpeng, ZHANG Yan, et al. Optimize the fresh-keeping condition of hanfu apple based on nature source of cold storage[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2016,47(1):64-70. (in Chinese)
- 27 周福君,张飞,邹春阳. 降温加湿型热交换装置:中国,20101053962.8[P]. 2011-04-13.
- 28 吴子丹,李兴军. 利用 CAE 方程调控我国稻谷仓库通风[J]. 中国粮油学报,2011,26(2):73-78.
WU Zidan, LI Xingjun. The use of CAE model for controlling aeration in a Chinese rough rice sepot[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2011,26(2):73-78. (in Chinese)