

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.01.023

吴强, 朱豆豆, 熊宏, 等. 平房仓准低温储藏稻谷温度场的演变规律[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(1): 216-222.

WU Q, ZHU D D, XIONG H, et al. Evolution pattern of paddy temperature field in quasi-low temperature storage in flat stores[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(1): 216-222.

平房仓准低温储藏稻谷温度场的演变规律

吴强^{1,2}, 朱豆豆¹, 熊宏³, 段海静¹, 金立兵¹✉

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南工大设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001;

3. 成都市龙泉驿区粮油实业有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 通过实验研究与数值模拟相结合的方法, 研究了平房仓准低温储藏稻谷温度场的时空分布。通过对平房仓准低温储藏稻谷进行了为期 14 个月粮温实验, 得到了稻谷温度场的演变规律; 同时构建了准低温储藏稻谷温度场的数值模型, 对其进行模拟, 并与实验结果对比验证了数值模型的有效性; 最后, 利用本文模型对 26 个月内的稻谷温度场进行预测。研究表明: 在为期 14 个月平房仓准低温储藏的实验过程中, 稻谷的整体平均温度低于 17 °C, 最高值是 15.57 °C、最低值是 11.32 °C; 依据模型对平房仓准低温储藏 26 个月进行模拟, 在整个模拟过程中稻谷整体平均温度呈上升趋势, 平均粮温仍处于 17 °C 以下; 月平均最高粮温均出现在每年的九月份, 第一年和第二年分别为 14.85 °C、15.34 °C, 表层粮温最高值同样出现在九月份分别为 15.3 °C、15.8 °C。本文探究的稻谷温度场演变规律, 可为稻谷平房仓准低温储藏提供应用支持。

关键词: 平房仓; 准低温储藏; 现场实验; 数值模拟; 粮食温度

中图分类号: TS210; S379 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2025)01-0216-07

网络首发时间: 2024-12-27 13:02:23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20241225.1700.016>

收稿日期: 2024-06-20; **修回日期:** 2024-07-06; **录用日期:** 2024-07-08

基金项目: 河南省级科技研发计划联合基金(应用攻关类)项目“双层浅圆仓粮食进出仓的动力性能及结构优化设计”(232103810080); 河南省重点研发与推广专项“高水位地区地下生态粮仓浮力问题及抗浮关键技术研究”(232102110266); 河南省科技攻关项目“基于压电智能传感器电压响应和时域统计矩的混凝土结构健康监测研究”(232102320014)

Supported by: The Henan Provincial Science and Technology R&D Programme Joint Fund (Application Research Category) Project “Dynamic Performance and Structural Optimization of Grain Entry and Exit in Double-storey Squat Silos” (No. 232103810080); Research on Buoyancy Problem and Anti-Floating Key Technology of Underground Ecological Grain Silo in High Water Level Area “Key R&D and Promotion Special Project of Henan Province” (No. 232102110266); Henan Provincial Science and Technology Tackling Project “Research on Concrete Structure Health Monitoring Based on Voltage Response of Piezoelectric Intelligent Sensor and Statistical Moments in Time Domain” (No. 232102320014)

第一作者: 吴强, 男, 1970 年出生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为粮食仓储基本理论与结构设计, E-mail: wqyjwh@163.com

通信作者: 金立兵, 男, 1976 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为混凝土结构与新型仓储结构基本理论和长期性能, E-mail: jinlb@haut.edu.cn

Evolution Pattern of Paddy Temperature Field in Quasi-low Temperature Storage in Flat Stores

WU Qiang^{1,2}, ZHU Dou-dou¹, XIONG Hong³, DUAN Hai-jing¹, JIN Li-bing¹✉

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Henan University of Technology Design and Research Academy Co., Ltd., Zhengzhou,

Henan 450001, China; 3. Chengdu Longquanyi District Grain and Oil Industry Co., Ltd.,
Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: This study investigated the spatiotemporal evolution of the temperature field of paddy in quasi-low-temperature storage in flat stores using experimental research and numerical simulation. The evolution pattern of the paddy temperature field was derived from a 14-month grain temperature experiment in quasi-low-temperature storage. A numerical model of the temperature field in quasi-low-temperature storage was developed and validated against experimental results. Finally, the temperature profile of paddy over 26 months was predicted by the proposed numerical model. The conclusion can be expressed as follows: During the 14-month experimental period, the overall average temperature of paddy remained below 17 °C, with a maximum of 15.57 °C and a minimum of 11.32 °C. The 26-month quasi-low temperature storage period in the storehouse was simulated by using the above model. The simulation results showed that the overall average temperature of paddy gradually increased but remained below 17 °C. The monthly average maximum grain temperature occurred in September each year, with values of 14.85 °C and 15.34 °C in the first and second years, respectively. Similarly, the highest surface grain temperatures, 15.3 °C and 15.8 °C, were also recorded in September. The evolutionary rule of the paddy temperature field, as elucidated in this paper, offers theoretical support for the quasi-low temperature storage of paddy in storehouses.

Key words: flat stores; quasi-low temperature storage; field experiment; numerical simulation; grain temperature

粮堆温度是影响粮食储藏安全的重要因素。储粮期间如果粮温控制不当易形成局部高温,会造成粮食品质劣变、害虫繁殖,从而影响粮食安全,因此分析仓内粮堆温度场具有重要意义。

关于粮堆温度场研究包括实验和数值模拟。在实验方面,通过对不同粮食品种、不同仓型的仓内粮堆温度场的实验研究,结果分析得出温度场的时空分布规律及仓内粮堆表层的温度波动大于粮堆内部的温度波动^[1-2];在实仓内粮堆温度场的分析方法主要有自然储藏下外界气温对仓内的影响和实验仓人工加热的方式改变边界气温,来研究粮堆内的温度梯度,探究粮堆内部的热传递规律^[3]。在数值模拟方面,学者采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)建模的方法,模拟散装粮食在储藏过程中粮堆内部的热

量传递,分析瞬态冷却与稳态状况下的传热传质变化规律^[4]; Iguaz 等^[5]、戚禹康等^[6]、王远成等^[7]建立了自然储藏粮堆温度场的数学模型,从不同仓型、粮堆与粮堆颗粒的不同尺度及不同粮食品种等不同方面探究仓内粮堆温度场的时变规律并进行了验证;在数值模拟与实验研究相结合方面,学者利用不同仓型的实验仓,分析实验过程中粮堆温度场变化规律,通过有限元软件可以看出粮食在储藏过程中温度变化具有分层现象^[8];在平房仓的实验和数值模拟过程中,研究发现仓壁附近的粮堆温度变化明显,易形成热聚集^[9]。

截至目前,国内外学者通过实验与数值模拟的研究方法对粮仓内粮堆温度场进行了分析研究。平房仓是我国的主导仓型,占80%左右,其具有装粮量大、建造成本低、建造时间短等优点。

但常规储藏方式粮堆温度变化幅度较大，准低温储藏可通过适当方式控制粮堆温度，可保证粮食品质^[10]。目前针对平房仓准低温储藏条件下的粮堆温度场研究内容较少。本文则主要是采用现场实验和数值分析相结合的方法，分析平房仓内稻谷准低温储藏 14 个月静态储藏时的温度演变规律，并对稻谷准低温储藏 26 个月的粮堆温度场进行预测，可对准低温储粮技术的推广提供支持。

1 实验研究

1.1 工程概况

本文所研究的平房仓位于四川某地区粮食储备库，采用现浇钢筋混凝土拱板屋盖及砖混结构。分析静态储粮过程中准低温储藏的稻谷温度场演变规律。准低温储藏的平房仓的长宽是 24 m，屋檐高度 8 m，仓壁厚度 0.8 m，粮食高度 6 m。2019 年 10 月 22 日，2 000 t 稻谷入库结束。

准低温储藏时需要消耗的制冷量，其中围护结构占 30%~35%。故针对围护结构进行保温隔热改造：墙体采用 30 mm CPC 双面水泥基硬泡聚氨酯复合板 $[K=0.024 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 对墙体外立面进行改造；仓顶采用 30 mm 聚氨酯发泡层及 EPS 颗粒浆料 $[K=0.024 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 对仓顶下弦板面层进行改造，仓顶下弦板仓内隔热层采用 CPC 双面水泥基硬泡聚氨酯复合板 $[K=0.024 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ，厚度为 50 mm；平房仓均为聚氨酯保温密闭门窗 $[K=0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ，对穿墙的管道进行双层加厚改造。改造后的传热系数如表 1 所示。

表 1 围护结构传热系数

Table 1 Heat transfer coefficient of enclosure structure

结构部位	墙体	仓顶	门窗
传热系数/ $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	0.46	0.29	0.9

1.2 测点布置

平房仓内的测温电缆一共 42 根，通过粮食的高度把测温点分成 4 层，测温点的垂直布置图如图 1 所示；测温点的水平布置图如图 2 所示；实验期间每日定时测温（保留两位小数）。

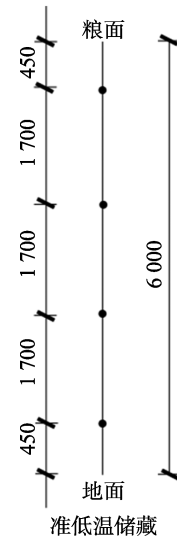


图 1 测温点垂直布置图

Fig.1 Vertical arrangement of temperature measurement points

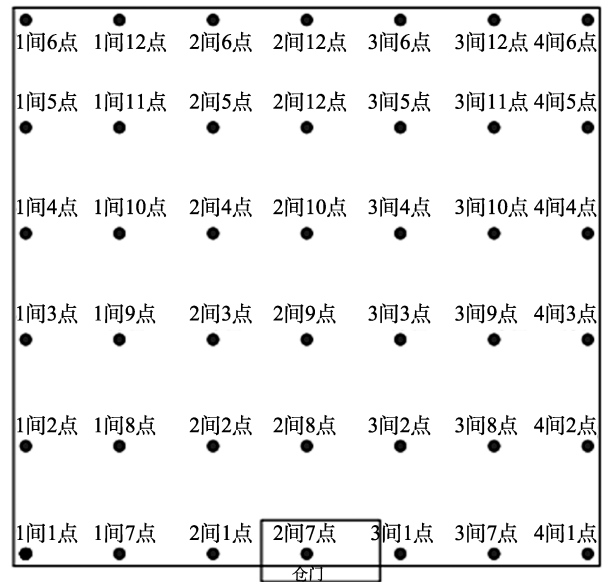


图 2 测温点水平布置图

Fig.2 Horizontal arrangement of temperature measurement points

1.3 实验结果分析

平房仓的准低温储藏实验的时间为 2019 年 11 月 1 日—2020 年 12 月 31 日（共计 14 个月），对实验数据进行整理分析，得到准低温储藏库储藏期间的温度演变规律。

1.3.1 温度场变化规律

通过实验结果进行分析研究，得出准低温储藏库的三温（气温、仓温、粮温）的演变规律图，如图 3 所示。2019 年 10 月将粮食装入仓内测得粮食的温度，平均温度是 21.35 °C，最高是 22.87 °C，

采用浅层地能整仓降温设备对仓内进行降温，降温时间为 65 h。降温结束后粮堆的平均温度是 13.78 °C，比降温前降低了 7.57 °C。

利用浅层地能对仓内降温后，在 11 月平均粮温有短暂回升，温度是 15.62 °C。由图 3 可知，在 14 个月的静态储藏过程中，准低温储藏库中的稻谷在温度高的季节平均粮温依旧在 17 °C 以下。11 月份至次年 2 月份，外界环境温度下降，仓内粮温随之降低；2 月份至 9 月份，外界环境温度上升，粮温随之上升，但粮温依旧保持在 17 °C 以下。2020 年 10 月-12 月，外界环境温度下降，仓温小幅下降，12 月平均粮温有 12.47 °C。在实验期间月平均粮温最大值出现在 2019 年 11 月为 15.57 °C，最小值出现在 2020 年 2 月为 11.32 °C，变化幅度为 4.25 °C，粮堆温度全年维持在 17 °C 以下。准低温储藏可以降低外界环境对仓内粮堆温度的影响。

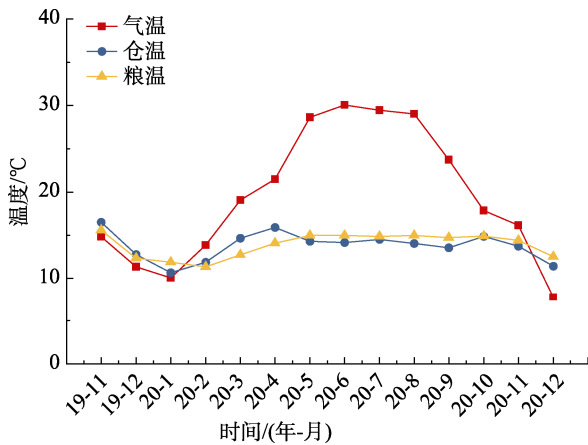


图 3 准低温储藏平均温度的变化趋势
Fig.3 Variation trend of average temperature in quasi-low temperature storage

1.3.2 局部温度变化规律

对准低温储藏表层平均粮温、整体粮堆局部最高和最低粮温的数据进行分析，绘制点线图如图 4~5 所示。由图 4 可知，整体粮堆的局部温度夏季最高是 22.81 °C，冬季最低是 3.3 °C。图 4 中所显示的整体局部粮堆的最高粮温和最低粮温与外界环境气温的变化趋势一致，由此可知静态储藏过程中外界环境气温影响仓内环境进而影响粮堆温度。在温度高的季节局部粮温低于 25 °C。由图 5 可知，表层平均粮温与仓温变化趋势一致，

由此可知表层平均粮温主要受仓温的影响。实验期间表层粮温最高温度为 16.67 °C、最低温度为 10.08 °C，表层粮温每月均处于 17 °C 以下。说明平房仓准低温储藏可降低环境温度对仓内温度的影响。

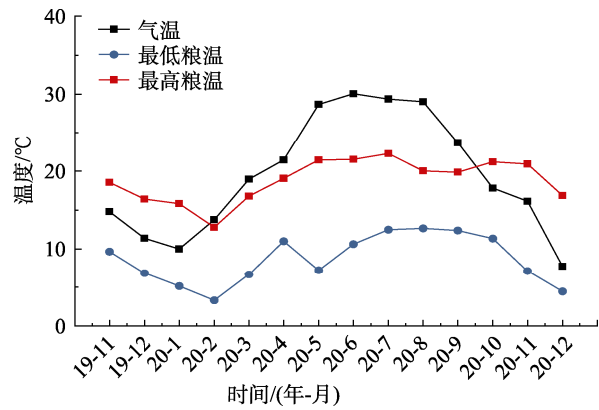


图 4 最高、最低温度变化趋势
Fig.4 Variation trend of maximum and minimum temperatures

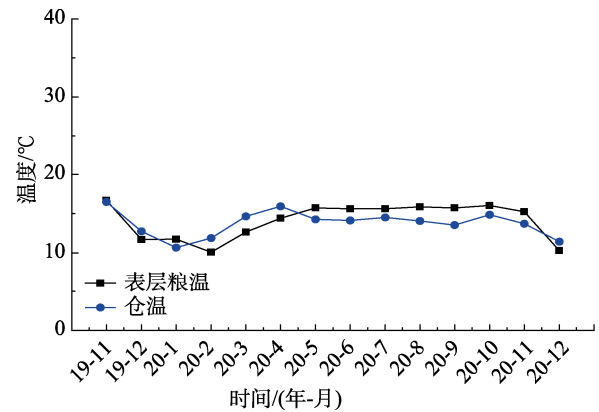


图 5 表层粮温变化趋势
Fig.5 Trend of surface grain temperature changes

2 数值模型

2.1 理论基础

将粮堆内部的传热过程简化为非稳态的传热过程，由以下方程表述^[11]：

连续性方程：

$$\varphi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho_f u_n) = 0 \quad \text{式 (1)}$$

动量守恒方程：

$$\rho_f \left[\varphi^{-1} \frac{\partial u_n}{\partial t} + \varphi^{-2} (u_n \cdot \Delta) u_n \right] = -\Delta p - \frac{\mu}{\kappa} u_n + F \quad \text{式 (2)}$$

能量守恒方程：

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f u_n \cdot \Delta T = \Delta \cdot (\kappa \Delta T) + q \quad \text{式 (3)}$$

式中： ρ 为密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； u_n 为速度， m/s ； ϕ 为孔隙率； μ 为动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； F 为流体在多孔介质中所受的合力， N ； c 为比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； κ 为导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； m 为粮堆； f 为流体； q 为热量， J 。

静态储藏过程中，仓内粮食温度会因为外界气温的变化而变化，从而导致空气流动。空气在粮堆内流动需克服粮食的阻力，故在模型中增加一个动力源项来表示空气流动时的阻力。

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{\rho_a}{2} |v_n| v_j \quad \text{式 (4)}$$

式中： α 是渗透系数； C_2 是内部阻力因子； v 是速度， m/s ； v_n 是平均速度， m/s ； i, j 代表网格方向。

α 、 C_2 表示为：

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad \text{式 (5)}$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\phi)}{D_p} \frac{1}{\phi^3} \quad \text{式 (6)}$$

式中： D_p 为粮食颗粒平均直径， mm ； ϕ 为粮堆孔隙率。

2.2 边界条件

实验时间为 2019 年 11 月—2020 年 12 月，则数值模拟的时间也为此段时间。边界条件按照如下设置：粮堆初始温度为 $15.62\text{ }^\circ\text{C}$ ；仓壁、仓顶、门窗均设置为无滑移条件，边界温度为当月平均温度，见图 3；稻谷、空气相关参数见表 2。

表 2 稻谷与空气物性参数

Table 2 Physical parameters of paddy and air

物性参数	稻谷	空气
密度/ (kg/m^3)	600	1.225
导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.11	0.024 2
比热容/ $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	1 600	1 066.43
渗透率/ m^2	7.27×10^{-9}	—
孔隙率	0.6	—
迂曲度	1.53	—
动力粘度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	—	1.79×10^{-5}

2.3 物理模型

构建数值模型，其物理模型根据平房仓相关

参数跨度 24 m，檐高 8 m，装粮高度 6 m。将构建的物理模型利用有限元软件进行网格划分，如图 6 所示。

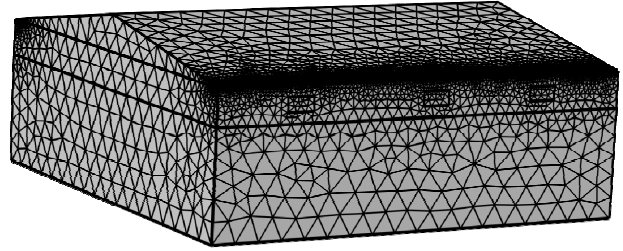


图 6 几何模型及网格划分

Fig.6 Geometric model and meshing

2.4 模型验证

按照仓内实际电缆的布置进行取点，将模拟值与实测值进行对比分析，如图 7 所示。由于仓内粮堆上部空气极易受环境温度影响，而仓内气温易对粮堆表层造成影响，为提高模型的可信度分别选取粮堆整体平均温度及粮堆表层平均温度的实测值和模拟值进行对比分析。由图 7 可知仓内整体粮温模拟值与实测值变化趋势一致，表层粮温的实测值与模拟值对比可以看出两者变化趋势一致；但是略有偏差，主要是由于模拟时未考虑热辐射及稻谷的自呼吸作用。外界环境温度降低，模拟值与实测值有稍微下降，模拟值与实测值在实验期间保持在 $17\text{ }^\circ\text{C}$ 以下，在 14 个月的储藏过程中月平均温度最高值与最低值仅差 $1.13\text{ }^\circ\text{C}$ ，准低温储藏可为粮食创造一个良好的储粮环境，保证粮食品质。

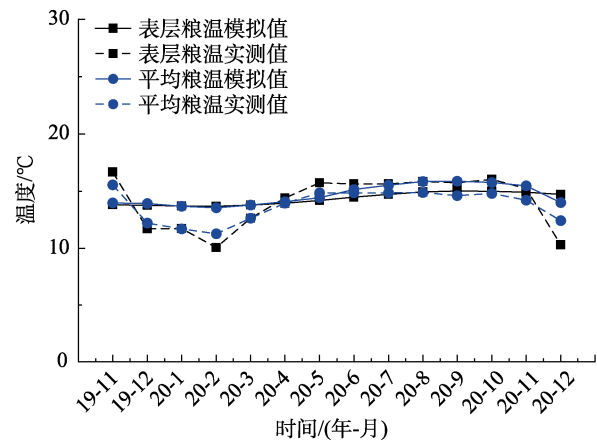


图 7 模拟值与实测值对比

Fig.7 Comparison of simulated and measured values

3 稻谷温度场的数值分析

为探究稻谷长期储藏状况下仓内粮堆温度场的演变规律,依据已验证的数值模型模拟储藏 26 个月仓内粮堆的温度场变化情况,整理模拟结果如图 8 所示。由图 8 可知,仓内的平均粮温为缓慢上升趋势,但都处于 17 °C 以下,说明准低温储藏可以为稻谷提供一个良好的储粮环境,可用于更好的保证粮食品质。

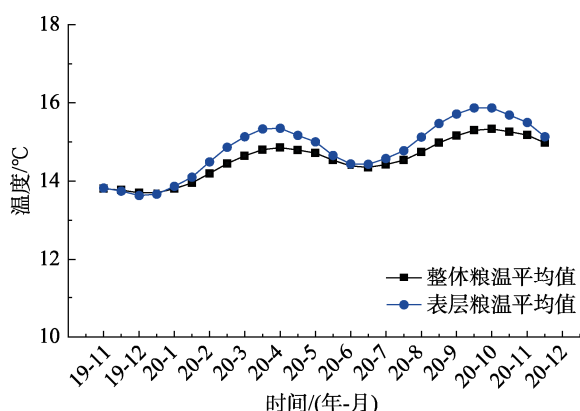


图 8 稻谷储藏 26 个月温度变化

Fig.8 Temperature variation of paddy stored for 26 months

表层粮温平均值是模拟结果的平均值,模拟结果的表层粮堆温度平均值的提取点与实验过程中测温电缆第一层测点分布位置一致。对比可知该位置的粮堆温度易受环境温度影响变化范围较大,这主要是由于空气是易导热体,环境温度通过仓壁将热量传导至仓内,空气再影响装粮表层粮堆温度,则该区域温度变化范围较大,温度范围有 13.63~15.88 °C。而整体粮堆温度平均值则变化较小仅为 13.7~15.3 °C,这是由于稻谷为“热惰体”,热量在粮堆的内部传导比较缓慢,从而使粮食的整体温度变化范围较小。

在 26 个月的储藏期间粮堆整体平均温度呈上升趋势,但上升幅度很小。在储藏过程中月最高平均粮温均出现在 9 月份,第一年和第二年粮温分别为 14.86 °C、15.34 °C,第二年仅比第一年高 0.48 °C,而环境温度年最高温度出现在 6 月份,这是由于仓内粮食的温度变化具有滞后性。

综上所述,准低温储藏有利于稻谷的长期储藏,在 26 个月的储藏过程中温度变化趋势较小,虽然略有上升但仍然处于安全储粮温度范围内;

在储粮过程中要着重关注表层区域的温度变化情况,防止温度过高出现粮食劣变。

4 结论

在静态储藏过程中,外界环境气温影响仓温,从而影响粮堆温度。在准低温储藏条件下,粮堆温度随外界环境的变化而变化,实验期间粮堆平均温度低于 17 °C。

在实验期间月平均粮温最高值是 15.57 °C,最低值是 11.32 °C;整体粮堆的局部温度最高值是 22.81 °C,最低值是 3.3 °C;表层粮温最高值是 16.67 °C,最低值是 10.08 °C;通过分析在储藏的过程中应该重点监测出现粮温最高值的位置,防止粮食劣变。


根据准低温储藏实验的参数设定、边界条件对粮堆温度场进行数值模拟,发现模拟结果和实测结果吻合度高,验证了模型的有效性,可以用来模拟准低温储藏库内的粮堆温度场变化。

表层粮堆温度变化范围较大,温度范围有 13.63~15.88 °C;整体粮堆温度平均值则变化较小仅为 13.7~15.3 °C,因为稻谷为“热惰体”,热量在粮堆的内部传导比较缓慢。

准低温储藏方式在 26 个月的长期储藏过程中,随着储藏周期延长,粮温整体平均值呈上升趋势,但仍然处于 17 °C 以下。

参考文献:

- [1] 赵旭,郝立群,柏禄乾,等. 过夏期间平房仓进口大豆粮堆温度时空变化研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(8): 62-66.
ZHAO X, HAO L Q, BAI L Q, et al. Study on the spacetime variety of temperature of imported soybean grain pile in warehouse during summer[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(8): 62-66.
- [2] 张祥祥,张昊,王振清,等. 内衬塑料地下粮食筒仓粮堆温度场研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 8-14.
ZHANG X X, ZHANG H, WANG Z Q, et al. Study on temperature field of grain piles in underground grain silos lined with plastic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(16): 8-14.
- [3] 田琳,张海洋,谢维治,等. 广东地区浅圆仓玉米粮堆温度分布规律研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 7-13.
TIAN L, ZHANG H Y, XIE W Z, et al. Study on temperature distribution of corn grain mass in squat silo in Guangdong[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023,

- 38(2): 7-13.
- [4] CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. CFD simulation of effects of operating parameters and product on heat transfer and moisture loss in the stack of bagged potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 947-960.
- [5] IGUAZ A, ARROQUI C, ESNOZ A, et al. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 429-439.
- [6] 戚禹康, 王远成, 鲁子枫, 等. 稻谷自然储藏多尺度热湿耦合传递研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 109-113.
QI Y K, WANG Y C, LU Z F, et al. Multi - scale coupled heat and moisture transfer in natural grain storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(6): 109-113.
- [7] 王远成, 潘钰, 尉尧方, 等. 仓储粮堆内部自然对流和热湿传递的数学分析及验证[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 120-125+130.
WANG Y C, PAN Y, YU Y F, et al. Mathematical analysis and validation for natural convective heat and moisture transfer in grain bulk during sealed storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 120-125+130.
- [8] JIN L B, LI C, DUAN H J, et al. On-site test and numerical analysis on temperature field of an underground grain silo under static storage[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(4): e14306.
- [9] 葛蒙蒙, 陈桂香, 刘文磊, 等. 基于 COMSOL 的静态仓储稻谷粮堆温度场模拟研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 101-105.
GE M M, CHEN G X, LIU W L, et al. Simulation of temperature field of static storage paddy grain pile based on COMSOL[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 101-105.
- [10] 李卓珍, 渠琛玲, 王红亮, 等. 优质稻谷准低温储藏与常温储藏品质变化的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(11): 104-110.
LI Z Z, QU C L, WANG H L, et al. Comparative study on the quality changes of the high quality paddy during quasi-low temperature storage and conventional temperature storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(11): 104-110.
- [11] 陈雁, 孙德胜. 变温带地下仓埋深对长期储粮过程粮堆温度影响的模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(5): 78-83.
CHEN Y, SUN D S. Simulation study on effects of buried depth on grain bulk temperature during long term storage in upper crust[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(5): 78-83. 

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