

张忠杰研究员主持“粮食储运国家工程研究中心绿色储粮科技新视野”特约专栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.05.001

李进泉, 尹君, 金毅, 等. 积温驱动的稻谷热风干燥工艺优化与营养品质模型研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 1-10.

LI J Q, YIN J, JIN Y, et al. Study on optimization of hot air drying process and nutrient quality model of rice driven by accumulated temperature[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 1-10.

积温驱动的稻谷热风干燥工艺优化 与营养品质模型研究

李进泉^{1,2}, 尹君^{2,3}, 金毅^{2,3}✉, 弋晓康¹✉, 张忠杰^{2,3}

(1. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆维吾尔自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室, 南疆特色农林产物利用与装备兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院粮食储运研究所, 北京 100037;

3. 粮食储运国家工程研究中心, 北京 100037)

摘要: 本研究开展了水稻薄层热风干燥实验, 采用正交实验方法研究稻谷在不同热风温度、热风湿度、初始含水率、热风风速、缓苏比条件下的热风干燥特性, 比较9种干燥积温-营养指标(蛋白质、脂肪、淀粉)数学模型在稻谷热风干燥中的适用性。结果表明: 利用 Central-Composite 设计了实验方案, 通过回归模型优化参数组合为热风温度 $T=38.5$ °C、热风湿度 $RH=48.086\%$ 、初始含水率 $MC=19.82\%$ 、热风风速 $V=0.70$ m/s、缓苏比 $TR=1.45$ 验证实验结果与优化结果的相对误差为 3.65%, 积温-营养品质模型的相对误差为 5.92%。通过数学模型拟合发现, 积温-蛋白质含量采用仿修正 Page II 模型拟合效果最佳; 积温-脂肪含量拟合效果最佳为仿 Thompson 方程; 直链淀粉含量拟合效果最佳为仿 Midilli 方程; 积温-支链淀粉含量拟合效果最佳为仿 Weibull II 方程, 模型都极其显著。优化后的干燥工艺保持了营养品质, 提高了干燥效率, 为深入探究稻谷品质变化机理提供新途径, 为后续智能控制系统的开发奠定基础。

关键词: 积温; 营养品质; 工艺优化; 干燥模型

中图分类号: TS203 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)05-0001-10

网络首发时间: 2024-09-01 16:56:49

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240830.0921.002>

Study on Optimization of Hot Air Drying Process and Nutrient Quality Model of Rice Driven by Accumulated Temperature

LI Jin-quan^{1,2}, YIN Jun^{2,3}, JIN Yi^{2,3}✉, YI Xiao-kang¹✉, ZHANG Zhong-jie^{2,3}

(1. Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Production and Construction Corps (XPCC) Key Laboratory of Utilization and Equipment of Special Agricultural and Forestry Products in Southern Xinjiang, College of

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (JY2303)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. JY2303)

作者简介: 李进泉, 男, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为粮食干燥品质调控及干燥机智能控制, E-mail: 2100547558@qq.com

通信作者: 金毅, 男, 1989 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为粮食干燥品质调控及干燥机智能控制, E-mail: jy@ags.ac.cn

弋晓康, 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 研究方向为林果干燥技术与装备, E-mail: yxk@taru.edu.cn. 专栏背景及作者简介详见 PC7-9

Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 3. National Engineering Research Centre of Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China)

Abstract: The study undertook a thin-layer hot air-drying experiment on rice, and an orthogonal testing approach was used to explore the drying characteristics under diverse conditions of hot air temperature, humidity, initial moisture content, airflow velocity, and tempering ratio. It compared the applicability of nine different accumulated temperature-nutritional index (protein, fat, starch) mathematical models in the hot air drying process of rice. The results showed that the experimental scheme was designed using Central-Composite design, and the parameter combination was optimized through a regression model to hot air temperature hot air temperature (T) at 38.5 °C, humidity (RH) at 48.086%, initial moisture content (MC) at 19.82%, airflow velocity (V) at 0.70 m/s, and tempering ratio (TR) at 1.45. The relative error between the experimental results and the optimized results was 3.65%, and the relative error of the accumulated temperature-nutritional quality model was 5.92%. Through mathematical model fitting, it was found that the accumulated temperature-protein content was best fitted by the modified Page II model, while the accumulated temperature-fat content was best fitted by the Thompson equation. The accumulated temperature-amylose content was best fitted by the Midilli equation, and the accumulated temperature-amylopectin content was best fitted by the Weibull II equation. All models were highly significant. The optimized drying process maintained nutritional quality and improved drying efficiency. This study could provide a new approach for in-depth exploration of the mechanism of rice quality changes and lay a foundation for the subsequent development of intelligent control systems.

Key words: accumulated temperature; nutritional quality; process optimization; drying model

干燥是复杂的水分迁移和传热传质过程，具有水分扩散速度慢、蒸发滞后时间长、干燥参数之间存在强耦合和非线性效应的特点。干燥过程不仅受到物料的物理结构和化学性质的影响，还与干燥条件和干燥工艺密切相关^[1]。数学建模能够有效探索系统参数之间的复杂关系，通过数学模型的映射关系，可预测干燥过程中的水分迁移、干燥时间、能量消耗等参数，优化干燥工艺。此外，数学模型还可用于计算和分析数据集中各参数或趋势之间的关联^[2]。随着干燥进程的推进，物料的外观、营养成分和化学成分都时刻发生细微的变化。各指标复杂的变化过程，与温度、湿度和时间等参数呈现出函数关系^[3]。因此，如果能够准确地建立稻谷干燥工艺参数和品质指标的关系，就可更好地预测和控制稻谷品质^[4-5]。已有的研究表明，Page 模型^[6]对干燥领域产生了深远影响，Lewis 模型^[7]以其指数形式描述了水分运动，广泛应用于干燥过程中。由于不同的模型对各指标呈现不同的拟合精度，不同的物理化学指标，其拟合效果呈现差异性，某些指标 Midilli 模

型^[8]比 Page 模型^[6]呈现更好的数据拟合效果。Prakash B^[9]提出了两个单参数方程，有效描述了美国中南部稻谷薄层干燥的特性，但仅考虑了热风温度和相对湿度两个影响因素。Chen 等^[5]通过变温湿度热风干燥正交实验，采用遗传算法优化了干燥过程的综合目标模型。Alves Pereira 等^[10]运用经验和扩散模型描述了水稻干燥水分迁移过程，仅考虑有效操作时间对糙米的连续和间歇干燥进行了比较评价。研究表明，一维扩散模型能够准确描述水稻的干燥过程，并发现在相同温度条件下，间歇干燥的有效质量扩散率高于连续干燥^[9]。这些模型在一定程度上解释了颗粒干燥过程，但其精度仍有待提高。已有研究引入农学中的积温理论描述稻谷干燥过程，发现可以帮助完善粮食干燥机控制机制^[11]。本课题组之前的研究显示，在特定干燥条件下，达到安全水平所需的积温具有相对稳定性，基于有效积温理论建立了数学模型，利用该模型控制干燥机运行有利于提高稻谷干燥品质和效率^[12-17]。

本实验采用正交实验方法对稻谷进行热风干

干燥工艺优化, 在干燥过程中, 蛋白质可能发生变性, 脂肪可能氧化, 而淀粉的结构可能改变。监控这些关键营养指标的变化趋势, 不仅能够揭示干燥工艺参数(如温度、风速、相对湿度及干燥时间)与稻谷品质指标间的复杂相互作用, 还能为精准调控干燥过程、保持乃至提升稻谷品质开辟新路径。研究稻谷在不同工艺参数下的热风干燥特性, 通过构建多变量回归模型, 定量解析各工艺参数与稻谷品质指标之间的函数关系, 从而精确导向至最优干燥工艺参数的确定。同时, 为了更全面、深入地描述稻谷干燥动力学特性及营养品质动态演变, 本研究还对比分析了九种常见的干燥数学模型, 优选拟合度最高、解释力最强的模型, 以期对稻谷干燥过程的数学模拟与预测提供强有力工具。本研究将回归分析与选定的数学模型相结合, 从不同维度剖析积温与稻谷品质指标的内在联系, 旨在构建一个综合性的品质预测与控制框架。此框架不仅能为稻谷干燥工艺的智能化设计与优化提供理论支撑, 而且对于实现干燥过程的保质增效、成本控制以及在实际农业生产中的推广应用具有重要指导意义。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

样品来源: 优质品种南粳 5055, 2023 年 10 月采购自张家港市。

样品制备: 通过 105 °C 烘箱法确定水稻初始收获含水率为 30% (w.b.), 初始爆腰率为 1%, 忽略自然晾晒对爆腰的影响。采用烘箱法对水分分析仪的精度进行校正。在实验开始前达到实验所需稻谷含水率。采用水分分析仪实时测量晾晒水分, 以确保达到实验所需的水分。实验前人工去除破裂、发芽、颗粒较小的稻谷籽粒, 获取色泽均匀、颗粒饱满的稻谷种子作为实验材料。然后样品密封在聚乙烯袋中, 并存放在环境温度为 (4±1) °C 的冷库中。

1.2 仪器与amp;设备

本次实验采用干燥实验装置为自主研发^[18-19], 该装置可以监测控制干燥过程中干燥介质的温度、相对湿度、流速, 准确控制物料的干燥参数,

模拟粮食干燥机中干燥微环境。控制精度为: 热空气温度±0.5 °C, 热空气相对湿度±1%, 热空气速度±0.1 m/s。其余仪器设备详见表 1。

表 1 仪器与amp;设备

Table 1 Other instruments and equipment

仪器设备名称	生产企业
JK-LB1700 型多参数可控原位精确干燥实验台	长春吉大科学仪器设备有限公司
AL204-IC 型万分之一天平	梅特勒-托利多仪器有限公司
BLH-3250 磨谷机	浙江伯利恒仪器设备有限公司
小型精米机	浙江伯利恒仪器设备有限公司
CM-5 美能达分光测色仪	柯尼卡美能达公司
Perten RVA4500 快速粘度仪	波通瑞华科学仪器有限公司
DGG-9250GD 型电热恒温鼓风干燥箱	上海森信实验仪器有限公司
控制型试管研磨机	IKA 艾卡仪器设备有限公司
OS-200 轨道式振荡器	杭州奥盛仪器有限公司
TG16K 离心机	长沙东旺实验仪器有限公司
HS153 水分分析仪	瑞士梅特勒-托利多集团

1.3 实验方法

在实验启动前, 先在实验装置的中央控制系统中精确设定了干燥温度、风速和相对湿度等关键操作参数, 以确保实验条件的一致性和准确性。实验装置接收预设参数后进行 20 min 的预热程序, 确保达到并保持所设定的稳定操作状态。稻谷样品从低温存储环境(冷库)中取出, 在室内恒温条件下静置以适应室温。在实验阶段, 每次精确称量 1 000 g 稻谷样品, 并将其放置于干燥设备的物料腔内进行干燥处理。在整个干燥过程中, 每隔 15 min 称重一次稻谷样品, 以实时监测其水分流失情况。干燥完成后, 按照预设的缓苏比将样品转移到具有相同设置温度的烘箱中进行缓苏处理, 缓苏时间严格依据预设的缓苏比进行计算。为了模拟真实的缓苏环境, 使用了专用的缓苏盒, 确保在缓苏过程中外部环境对样品的影响最小化。

所有稻谷干燥实验持续至样品达到预定的含水率阈值 14% (w.b.)。干燥完毕后的稻谷样品, 在常温条件下放置稳定 48 h 后, 对其进行一系列品质指标的测定, 包括爆腰增率、整精米率、抗性淀粉含量以及发芽率等关键参数。此后, 样品被储存于 4 °C 冷藏环境中, 以便后续进行稻谷脂

肪酸值、蛋白质含量、脂肪含量等深层次营养品质的检测。为了确保实验数据的可靠性与统计有效性，每一组实验条件下的所有品质测试均重复执行三次平行实验。

1.3.1 含水率及计算

1.3.1.1 含水率 (MC) 参照 GB/T 14489.1—2008《油料 水分及挥发物含量测定》测定稻谷的含水率，样品湿基含水率公式如下：

$$MC = \frac{m_t - m_d}{m_t} \quad \text{式 (1)}$$

式中，MC 代表样品的湿基含水率 (%)， m_t 是湿样质量 (g)， m_d 是干样质量 (g)。

1.3.1.2 干基含水率 (M_d) 在后计算中会用到干基含水率，其计算公式如下：

$$M_d = \frac{M_t}{100 - M_t} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.3.1.3 水分比 (MR) 水分比表示一定条件下稻谷的剩余含水率，计算公式如下：

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{式 (3)}$$

其中，MR 为 t 时刻稻谷的水分比； M_0 为稻谷初始含水率 (干基)，%； M_e 为特定干燥环境下的平衡含水率，%。

1.3.2 积温模型推导

干燥积温的定义：借鉴于农学中的植物生长积温概念而提出。根据前期的研究结果^[12, 20-22]，稻谷薄层干燥有效积温公式如下：

$$AT_n = \sum_{i=1}^n (T - T_{ei}) \times t_i \quad \text{式 (4)}$$

其中， AT_n 为稻谷薄层干燥积温， $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ ；T 为粮食籽粒温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_i 为稻谷称重周期，h (本研究称重周期为 0.25 h)； T_{ei} 为第 i 个称重周期稻谷的解吸平衡温度， $^{\circ}\text{C}$ ，其公式如下所示：

$$T_e = -\frac{C_1}{\ln(RH)} \exp(-C_3 \times M_i) - C_2 \quad \text{式 (5)}$$

其中，RH 为薄层干燥热风相对湿度，小数； M_i 为第 i 个称重周期稻谷的起始含水率，% (干基)； C_1 、 C_2 、 C_3 为常数，其值与作物品种有关，其中稻谷解吸过程对应的 $C_1=529.276$ ， $C_2=52.725$ ， $C_3=0.177$ 。

1.3.3 实验指标测定

蛋白质含量 (Protein content, PC) 参照 GB/T 24897—2010 粮油检验《稻谷粗蛋白质含量测定》执行。脂肪含量 (Fat content, FC) 参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》执行。直链淀粉含量 (Amylose content, AC) 参照 GB/T 15683—2008《大米直链淀粉含量的测定》执行。支链淀粉含量 (Amylopectin content, APC) 参照 DB32/T 2265—2012《鲜食玉米中直链淀粉和支链淀粉含量的测定》执行。

1.4 实验设计方案

本研究采用中心复合设计 (Central composite design, CCD) 实验，总计设计了 59 组实验单元，其中包括 32 个因子设计点、10 个轴向点以及 17 个中心点，以期对所研究变量之间的交互效应进行深度剖析。选定的五个关键工艺参数及其相应变化范围分别为：干燥温度 (T, 35~55 $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度 (RH, 30%~50%)、初始水分含量 (MC, 20%~28%)、风速 (V, 0.36~0.84 m/s) 以及缓苏比 (TR, 1~4)。各个变量的具体水平设置及结果详细列于表 2~3 所示。

表 2 实验因素水平

Table 2 Levels of response surface test factors

因素	符号	编码与非编码值				
		$-\alpha=2.378$	-1	0	1	$\alpha=2.378$
干燥温度/ $^{\circ}\text{C}$	T	35	40.8	45	49.2	55
相对湿度/%	RH	30	35.8	40	44.2	50
初始含水率/%	MC	20	22.3	24	25.7	28
风速/(m/s)	V	0.36	0.5	0.6	0.7	0.84
缓苏比	TR	1	1.9	2.5	3.1	4

注：缓苏比是单次缓苏时间与干燥时间的比值。

Note: The tempering ratio is the ratio of single tempering time to drying time.

1.5 数据处理

各指标重复测定 3 次，取平均值，采用 SPSS18.0 进行统计分析，运用 Design-Expert V8.0.6.1 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 正交实验结果

通过实验研究了各因素对响应的影响及交互作用，表 3 列出了具体每组实验的因素水平以及对应响应结果。方差分析结果见表 5，各模型应

具有显著性($P < 0.05$), 失拟项应不显著($P > 0.05$)。表 4 得到了各响应的多项式二次回归模型, 并计算了相应的 R^2 和 CV 值作为检验模型精确性的标

准。 R^2 为相关系数, CV 为变异系数, 是标准偏差/平均值的百分比, 其值越小, 表明数据可靠性越高, CV 值一般至少 $< 12\%$ ^[23-24]。

表 3 响应面实验方案及结果

Table 3 Response surface experiment scheme and results

序号	T/°C	RH/%	MC/%	V/(m/s)	TR	Dtt/min	AT/(°C·h)	PC/%	FC/%	AC/(mg/g)	APC/(mg/g)
1	40.8	35.8	22.3	0.50	1.9	7.38	301.17	8.35	2.46	15.22	72.99
2	49.2	35.8	22.3	0.50	1.9	5.28	259.86	8.31	2.21	11.82	54.85
3	40.8	44.2	22.3	0.50	1.9	9.54	389.10	8.45	2.30	11.64	82.69
4	49.2	44.2	22.3	0.50	1.9	8.22	404.34	8.38	2.49	7.52	74.56
5	40.8	35.8	25.7	0.50	1.9	9.52	388.21	8.41	2.95	19.33	99.50
6	49.2	35.8	25.7	0.50	1.9	6.61	325.13	8.46	2.63	16.01	101.16
7	40.8	44.2	25.7	0.50	1.9	12.39	505.44	8.43	2.52	13.66	105.37
8	49.2	44.2	25.7	0.50	1.9	9.65	474.86	8.50	2.36	9.44	112.11
9	40.8	35.8	22.3	0.70	1.9	5.96	243.17	8.75	2.71	9.07	77.97
10	49.2	35.8	22.3	0.70	1.9	4.49	220.99	8.65	2.31	11.79	61.58
11	40.8	44.2	22.3	0.70	1.9	7.42	302.87	8.81	2.55	11.79	86.52
12	49.2	44.2	22.3	0.70	1.9	7.29	358.67	8.71	2.53	6.77	68.35
13	40.8	35.8	25.7	0.70	1.9	9.51	388.14	8.56	2.75	17.73	102.91
14	49.2	35.8	25.7	0.70	1.9	5.92	291.18	8.49	2.34	18.26	104.01
15	40.8	44.2	25.7	0.70	1.9	12.38	504.97	8.66	2.32	18.04	109.50
16	49.2	44.2	25.7	0.70	1.9	8.19	403.11	8.49	2.27	15.93	118.61
17	40.8	35.8	22.3	0.50	3.1	9.33	380.73	8.57	2.04	8.23	115.73
18	49.2	35.8	22.3	0.50	3.1	6.19	304.38	8.60	2.22	10.23	90.03
19	40.8	44.2	22.3	0.50	3.1	12.36	504.36	8.54	2.27	12.76	96.40
20	49.2	44.2	22.3	0.50	3.1	7.37	362.36	8.57	2.58	7.22	81.83
21	40.8	35.8	25.7	0.50	3.1	12.44	507.55	8.67	2.32	9.30	106.67
22	49.2	35.8	25.7	0.50	3.1	8.37	411.64	8.74	2.27	12.99	115.83
23	40.8	44.2	25.7	0.50	3.1	15.40	628.32	8.61	2.02	7.18	81.57
24	49.2	44.2	25.7	0.50	3.1	10.47	514.96	8.70	2.34	8.28	106.09
25	40.8	35.8	22.3	0.70	3.1	8.26	337.01	8.70	2.06	6.37	109.14
26	49.2	35.8	22.3	0.70	3.1	5.16	254.04	8.63	2.02	9.53	88.53
27	40.8	44.2	22.3	0.70	3.1	9.31	379.78	8.68	2.23	13.88	94.09
28	49.2	44.2	22.3	0.70	3.1	7.23	355.55	8.56	2.78	10.36	70.79
29	40.8	35.8	25.7	0.70	3.1	11.31	461.31	8.69	2.10	11.68	126.08
30	49.2	35.8	25.7	0.70	3.1	7.21	354.57	8.71	2.03	18.23	121.65
31	40.8	44.2	25.7	0.70	3.1	12.30	501.84	8.66	1.98	14.74	91.49
32	49.2	44.2	25.7	0.70	3.1	8.43	414.59	8.64	2.16	16.37	98.61
33	35.0	40.0	24.0	0.60	2.5	13.20	462.06	8.62	2.60	15.20	105.67
34	55.0	40.0	24.0	0.60	2.5	5.44	299.11	8.61	2.61	13.52	96.61
35	45.0	30.0	24.0	0.60	2.5	5.49	246.83	8.64	2.53	18.49	124.38
36	45.0	50.0	24.0	0.60	2.5	13.16	592.13	8.61	2.58	14.15	107.90
37	45.0	40.0	20.0	0.60	2.5	5.32	239.25	8.46	2.02	9.93	83.71
38	45.0	40.0	28.0	0.60	2.5	9.87	444.30	8.48	1.97	17.87	132.58
39	45.0	40.0	24.0	0.36	2.5	9.70	436.58	8.68	2.47	3.78	64.82
40	45.0	40.0	24.0	0.84	2.5	7.19	323.63	8.86	2.40	9.22	69.61
41	45.0	40.0	24.0	0.60	1.0	6.61	297.60	8.48	2.39	10.09	59.90
42	45.0	40.0	24.0	0.60	4.0	9.00	405.00	8.63	1.72	10.47	94.88

续表 3

序号	T/°C	RH/%	MC/%	V/(m/s)	TR	Dtt/min	AT/(°C·h)	PC/%	FC/%	AC/(mg/g)	APC/(mg/g)
43	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.13	365.63	8.80	2.17	12.58	97.10
44	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.03	361.43	8.77	2.00	8.88	86.62
45	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.05	362.10	8.73	2.13	8.78	97.73
46	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.08	363.60	8.66	2.38	10.54	93.49
47	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.88	399.53	8.72	2.19	9.00	87.59
48	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	7.92	356.18	8.73	2.06	10.82	92.52
49	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.15	366.90	8.80	2.17	12.59	96.50
50	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	7.99	359.40	8.75	2.08	8.90	87.62
51	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	7.24	325.80	8.72	2.14	8.79	96.63
52	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.08	363.60	8.67	2.27	10.51	93.99
53	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.88	399.45	8.73	2.17	9.15	88.79
54	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.17	367.73	8.73	2.11	10.78	92.72
55	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	7.24	325.80	8.74	2.08	8.90	87.82
56	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.04	361.88	8.72	2.14	8.98	96.33
57	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.83	397.28	8.68	2.27	10.51	92.39
58	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	8.08	363.53	8.72	2.17	9.10	88.58
59	45.0	40.0	24.0	0.60	2.5	7.97	358.43	8.73	2.11	10.71	92.92

注：热风湿度 T、热风湿度 RH、初始含水率 MC、热风风速 V、缓苏比 TR，总干时间 Dtt、有效积温 AT；其中未干燥的稻谷蛋白质含量 PC=7.58 g/100 g、脂肪含量 FC=1.9 g/100 g、直链淀粉 AC=6.62 mg/g、支链淀粉 APC=118.7 mg/g。

Note: Hot air humidity T, hot air humidity RH, initial moisture content MC, hot air wind speed V, tempering ratio TR, total drying time Dtt, effective accumulated temperature AT; Which is undried rice protein content PC=7.58 g/100 g, fat content FC=1.9 g/100 g, amylose AC=6.62 mg/g, amylopectin APC=118.7 mg/g.

2.2 回归模型拟合与方差分析

分别建立总干时间、有效积温、蛋白质、脂

肪、直链淀粉、支链淀粉的二次多项回归模型，剔除不显著因素后得到的回归方程如表 4 所示。

表 4 二次多项式回归模型
Table 4 Quadratic polynomial regression model

响应	多项式回归模型方程	R ²	CV
Dtt	$Y_1 = -22.9048 - 0.0481367A - 0.876145B + 3.05861C - 6.0108D + 7.64116E - 0.0527909A^2 - 0.147053A^2E + 0.0145935A^2 + 0.0146102B^2$	0.9398	7.06
AT	$Y_2 = -1532.43 + 21.2508A - 39.7059B + 138.353C - 819.682D + 299.058E - 1.65332A^2C - 5.50444A^2E + 0.272099A^2 + 0.661016B^2 - 0.706456C^2 + 460.622D^2 - 1.4306E^2$	0.9190	7.07
PC	$Y_3 = -13.531 + 0.166811A + 0.132395B + 0.942584C + 11.2665D + 0.720474E - 0.0662478A^2D - 0.0100738B^2E - 0.2468C^2D + 0.029186C^2E - 0.807224D^2E - 0.00143806A^2 - 0.00133621B^2 - 0.0180165C^2 + 0.202091D^2 - 0.0901186E^2$	0.8956	0.5380
FC	$Y_4 = 3.17251 + 0.19669A + 0.68291B - 0.303304C + 0.0720186D + 0.069834E + 0.0943789A^2B - 0.0434371A^2C + 0.145768A^2E - 0.158044B^2C + 0.152018B^2E - 0.0878355C^2D + 0.0767758A^2 - 0.10754B^2 - 0.0445448C^2 + 0.0529495D^2 - 0.0366893E^2$	0.8974	3.96
AC	$Y_5 = 452.644 - 5.27827A - 2.88352B - 13.8538C - 273.98D - 21.8944E - 0.0597475A^2B + 0.076842A^2C + 1.3194A^2D + 0.34728A^2E - 0.0857762B^2C + 2.28081B^2D + 0.355633B^2E + 7.33367C^2D - 0.692551C^2E + 10.5348D^2E + 0.0454208A^2 + 0.0650667B^2 + 0.255692C^2 - 57.6209D^2 + 0.200655E^2$	0.9028	11.80
APC	$Y_6 = 1577.79 - 33.8576A - 17.1216B - 74.1794C + 276.713D + 285.354E + 0.100393A^2B + 0.875235A^2C - 2.92102B^2E + 10.4172C^2D - 5.27609C^2E + 0.0913693A^2 + 0.241326B^2 + 1.0089C^2 - 430.515D^2 - 6.51001E^2$	0.9506	4.57

注：其中 A 代表干燥温度、B 代表热风湿度、C 代表初始含水率、D 代表风速、E 代表缓苏比，公式中的项为非编码（实际）值。

Note: Where A stands for drying temperature, B stands for hot air humidity, C stands for initial moisture content, D stands for wind speed, E stands for tempering ratio, and the terms in the formula are non-coded (actual) values.

表 5 回归模型的方差分析结果

Table 5 Results of variance analysis of regression model

指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	
Dtt	模型	277.86	9	30.87	84.95	< 0.000 1	显著
	残差	17.81	49	0.363 4			
	失拟项	14.50	33	0.439 5	2.13	0.055 1	不显著
	误差	3.30	16	0.206 5			
AT	模型	3.753E+05	12	31 273.03	43.49	< 0.000 1	显著
	残差	33 074.27	46	719.01			
	失拟项	26 382.28	30	879.41	2.10	0.059 6	不显著
	误差	6 691.98	16	418.25			
PC	模型	0.794 8	15	0.053 0	24.58	< 0.000 1	显著
	残差	0.092 7	43	0.002 2			
	失拟项	0.070 9	27	0.002 6	1.93	0.287 9	不显著
	误差	0.021 8	16	0.001 4			
FC	模型	3.02	16	0.188 5	22.95	< 0.000 1	显著
	残差	0.345 0	42	0.008 2			
	失拟项	0.216 0	26	0.008 3	1.03	0.877 3	不显著
	误差	0.129 0	16	0.008 1			
AC	模型	659.89	20	32.99	17.64	< 0.000 1	显著
	残差	71.09	38	1.87			
	失拟项	44.89	22	2.04	1.25	0.330 1	不显著
	误差	26.20	16	1.64			
APC	模型	15 217.98	15	1 014.53	55.19	< 0.000 1	显著
	残差	790.48	43	18.38			
	失拟项	557.73	27	20.66	1.42	0.234 1	不显著
	误差	232.74	16	14.55			

2.3 工艺参数优化

高直链淀粉与低支链淀粉的大米含有较高的抗性淀粉, 维持肠道微生物群、低血糖指数、降低胆固醇水平, 并且结构较紧实、减少了细菌和霉菌滋生的机会, 因此在储存过程中不易变质, 稳定性更高, 从而提高了大米的品质并延长了储藏期^[19-23]。因此限定总干燥时间、积温和支链淀粉含量最小, 限定蛋白质含量、脂肪含量、直链淀粉含量最大, 为得到最优干燥参数组合, 利用 Design-Expert 软件对模型进行优化, 得到实验范围内最优工艺参数组合为热风温度 38.5 °C、热风湿度 48.00%、初始含水率 19.82%、热风风速 0.7 m/s、缓苏比 1.45, 此时总干时间 7.48 h、有效积温 287.31 °C·h、蛋白质含量 8.59 g/100 g、脂肪含量 3.00 g/100 g、直链淀粉 18.27 mg/g、支链淀粉 95.82 mg/g。

2.4 积温-营养指标模型选择

依据参考文献选择同类型样品运用较多的 9 种干燥基础数学模型^[18,24-26], 利用 MATLAB 对实

验数据进行模型拟合处理, 并输出各个模型对应的可决系数 R^2 、 χ^2 和 RMSE, 通过对比此 3 项评价指标, 便可得出最优拟合方案。

以积温-蛋白质含量模型为例, 由表 7 可知, 拟合效果最好的是仿修正 Page II 模型, 模型极其显著; 简化仿修正 Page II 模型拟合效果最差, R^2 范围仅为 0.515~0.678。所以最终选用仿修正 Page II 方程作为多参数耦合稻谷干燥积温模型。其余“积温-营养指标模型”优选方法同积温-蛋白质含量模型。其中, 积温-脂肪含量拟合效果最佳为仿 Thompson 方程; 积温-直链淀粉含量拟合效果最佳为仿 Midilli 方程; 积温-支链淀粉含量拟合效果最佳为仿 Weibull II 方程, 模型都极其显著, 结果见表 8。

2.5 验证实验

2.5.1 最优参数验证实验

通过优化参数进行验证实验, 为消除随机误差, 进行 3 次平行实验, 实验结果如表 9 所示。分析可知, 实验值与软件优化参数值的平均误差

表 6 水分比和干燥积温计算结果

Table 6 Calculation results of moisture ratio and drying accumulated temperature

干燥时间/h	湿基含水率/%	干基含水率/%	当前干燥积/(°C·h)	总干燥积温/(°C·h)	PC/%	FC/%	AC/(mg/g)	APC/(mg/g)
0	21.00	26.58	0.000 0	0.000 0	7.58	1.900	6.622	118.72
0.25	20.80	26.27	9.055 5	9.055 5	7.59	2.141	6.684	118.54
0.5	20.45	25.71	19.100 5	28.156 0	7.60	1.918	6.738	117.01
0.75	20.09	25.14	18.843 3	46.999 3	7.61	1.919	6.822	115.93
1	19.48	24.20	36.697 6	83.697 0	7.62	1.925	7.006	113.36
1.25	18.92	23.34	35.639 1	119.336 1	7.63	1.925	7.040	111.81
1.5	18.39	22.54	34.502 2	153.838 3	7.64	1.935	7.202	111.76
1.75	17.90	21.80	33.289 3	187.127 6	7.65	1.939	7.362	110.24
2	17.42	21.09	31.969 0	219.096 7	7.69	1.939	7.478	106.34
2.25	17.00	20.49	30.698 4	249.795 1	7.71	1.932	7.539	104.66
2.5	16.64	19.96	29.474 9	279.270 0	7.74	1.947	7.657	101.53
2.75	16.24	19.39	27.999 2	307.269 2	7.79	1.956	7.742	101.41
3	15.95	18.97	26.839 4	334.108 6	7.81	1.960	7.916	97.30
3.25	15.65	18.55	25.552 9	359.661 5	7.85	1.967	8.045	96.84
3.5	15.33	18.11	24.115 1	383.776 6	7.93	1.969	8.293	96.57
3.75	15.05	17.72	22.741 7	406.518 3	7.98	1.975	8.371	96.52
4	14.80	17.37	21.422 0	427.940 3	7.99	1.982	8.430	94.34
4.25	14.54	17.02	20.005 5	447.945 8	7.10	1.988	8.593	92.34
4.5	14.34	16.75	18.863 9	466.809 7	8.19	1.988	9.087	89.21
4.75	14.16	16.49	17.743 4	484.553 1	8.27	1.998	9.241	89.03
5	13.95	16.22	16.439 5	500.992 6	8.28	1.995	9.396	88.85
5.25	13.77	15.97	15.259 0	516.251 5	8.29	1.995	9.416	87.61
5.5	13.61	15.75	14.128 6	530.380 1	8.26	2.000	9.450	87.04
5.75	13.40	15.48	12.673 9	543.054 1	8.29	2.013	9.664	86.46
6	13.28	15.32	11.779 5	554.833 6	8.35	2.015	9.733	86.42
6.25	13.21	15.23	11.258 8	566.092 4	8.39	2.019	9.758	85.39
6.5	13.14	15.13	10.680 1	576.772 5	8.42	2.023	9.833	84.08
6.75	13.00	14.94	10.216 0	586.988 5	8.46	2.024	9.930	83.71

表 7 常用的数学模型及评价指标对比

Table 7 Several commonly used mathematical models

模型	R ² 波动范围	χ ² 波动范围 (10 ⁻⁴)	RMSE 波动范围 (10 ⁻⁴)
线性方程 $N = aAT + b$	0.825~0.876	0.572 043 2~19.537 01	2.145~52.166
多项式 $N = aAT^2 - bAT + c$	0.811~0.863	4.275 339~6.408 121	0.049~2.70
仿 Page II 方程 $N = \exp(-kAT^n)$	0.856~0.879	1.061 333~14.115 93	0.297~16.017
简化仿修正 Page II 方程 $N = a \exp(-AT^n)$	0.515~0.678	1.034 447~12.900 39	3.357~6.710
仿 Weibull 方程 $N = a \ln PC + b(\ln PC)^2$	0.797~0.839	5.888 49~8.796 60	0.297~16.017
仿 Weibull II 方程 $NI = a \ln PC + \exp\left[-\left(\frac{AT}{a}\right)^b\right]$	0.885~0.929	1.061 333~14.115 93	0.228~12.472
仿 Midilli 方程 $N = a \exp(-kAT^n) + bAT$	0.857~0.889	0.030 182 3~1.515 054	0.014~1.697
仿 Thompson 方程 $t = a \ln N + b(\ln N)^2 + cN$	0.822~0.859	0.028 037 2~1.408 121	0.297~16.017
仿修正 Page II 方程 $N = a \exp(-kAT^n)$	0.863~0.951	0.028 037 2~1.408 121	0.014~1.60

注: N 表示营养指标输出, AT 表示积温, R² 表示可决系数, χ² 表示卡方检验值, RMSE 表示标准误差。

Note: N stands for nutrient output, AT stands for accumulated temperature, R² stands for determination coefficient, X² stands for Chi-square test value, and RMSE stands for standard error.

为 3.65%, 表明实验结果与优化结果基本一致, 稻谷干燥品质影响因素选择合理。

2.5.2 模型验证实验

为对得到的数学模型进行验证, 随机 3 个积

温值进行验证实验。根据仿修正 Page II 方程模型方程得到预测值, 计算实验值与预测值之间的相对误差。结果表 10 所示, 实验值与模型值的相对平均误差为 5.92%, 实验值与预测值具有

表 8 营养指标优选模型评价

Table 8 Evaluation of nutrient index optimization model

营养指标 (N)	优选模型	优选 R^2 范围	优选 χ^2 范围 (10^{-4})	优选 RMSE 范围 (10^{-4})
蛋白质 (AT-PC)	仿修正 Page II 方程	0.863~0.951	0.028 037 2~1.408 121	0.014~1.60
脂肪 (AT-FC)	仿 Thompson 方程	0.889~0.953	0.054 231 8~1.872 559	0.028~2.051
直链淀粉 (AT-AC)	仿 Midilli 方程	0.902~0.979	0.031 712 3~1.105 358	0.024~1.697
支链淀粉 (AT-APC)	仿 Weibull II 方程	0.873~0.941	0.061 843~2.012 453	0.147~3.017

表 9 优化参数实验验证结果

Table 9 Test results of optimization parameters

	T/°C	RH/%	MC/%	V/(m/s)	TR	Dtt/min	AT/(°C·h)	PC/%	FC/%	AC/(mg/g)	APC/(mg/g)	总误差
最优参数预测值						7.48	287.31	8.59	3.00	18.27	95.82	
最优参数验证	38.5	48	19.82	0.7	1.45	7.20	286.92	7.92	2.40	17.49	90.66	
实验组 1						7.64	278.65	8.38	2.93	17.05	97.40	
实验组 2						7.10	274.75	8.83	2.94	17.80	93.70	
实验组 3						2.24	2.51	2.48	8.19	4.50	1.98	3.65
平均误差/%												

表 10 模型验证结果

Table 10 Results of model verification

	Dtt/min	AT/(°C·h)	PC/%	FC/%	AC/(mg/g)	APC/(mg/g)	总误差
模型预测值	9.59	446.40	8.42	3.71	15.14	100.12	
实验组 1	9.57	453.49	8.57	3.59	15.45	100.70	
误差/%	0.23	1.69	1.78	3.30	2.00	0.60	
模型预测值	8.51	365.02	8.49	2.95	16.97	98.84	
实验组 2	8.22	348.14	8.14	2.81	17.99	93.92	
误差/%	3.47	4.62	4.17	4.60	5.99	4.98	
模型预测值	7.75	321.92	8.53	2.91	17.22	97.04	
实验组 3	7.60	308.92	7.99	2.75	16.36	87.85	
误差/%	2.04	4.04	6.36	5.59	5.03	9.47	
平均误差/%	4.79	3.25	6.89	7.35	6.57	6.68	5.92

可接受的一致性。因此,该模型有效地预测了响应。

3 结论

本研究构建了基于积温的水稻干燥模型,通过模型优化确定的最佳干燥参数显著提升了干燥过程的效率和稻谷品质保持能力。通过对比分析 9 个数学模型,选出了对各类营养指标拟合度最高的模型,其中仿修正 Page II 模型、仿 Thompson 方程、仿 Midilli 方程和仿 Weibull II 方程分别对积温-蛋白质、积温-脂肪、直链淀粉和支链淀粉的含量变化表现出了最佳拟合效果。模型验证结果显示,预测值与实验值的相对平均误差仅为 5.92%,证明所提出的模型能够有效预测稻谷干燥过程中的营养品质变化。研究结果为实现稻谷干

燥工艺的智能化设计与优化提供了科学依据,有助于实际生产中实现干燥过程的保质增效,对农业生产的实践应用具有重要的指导价值。

参考文献:

- [1] LAMIDI R O, JIANG L, PATHARE P B, et al. Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review[J]. Applied Energy, 2019, 233: 367-385.
- [2] TANAKA F, TANAKA F, TANAKA A, et al. Mathematical modelling of thin-layer drying according to particle size distribution in crushed feed rice[J]. Biosystems Engineering, 2015, 136: 87-91.
- [3] JIN Y, WONG K W, YANG D, et al. A neural network model used in continuous grain dryer control system[J]. Drying Technology, 2022, 40(9): 1901-1922.
- [4] BAIDHE E, CLEMENTSON C L. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality [J]. Computers and Electronics in Agriculture,

- 2024, 222: 109094.
- [5] CHEN J, WU W, CHENG R, et al. Optimization of hot air drying process of corn using genetic algorithm and response surface methodology[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 753-764.
- [6] PAGE G E. Factors Influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[M]. Purdue University, 1949.
- [7] LEWIS W K. The rate of drying of solid materials[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1921, 13(5): 427-432.
- [8] MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying [J]. *Drying Technology*, 2002, 20(7): 1503-1513.
- [9] PRAKASH B, SIEBENMORGEN T J. Single-parameter thin-layer drying equations for long-grain rice[J]. *Transactions of the ASABE*, 2018, 61(2): 733-742.
- [10] ALVES P J C, DA S W P, GOMES J P, et al. Continuous and intermittent drying of rough rice: effects on process effective time and effective mass diffusivity[J]. *Agriculture*, 2020, 10(7): 282.
- [11] WU Y, WU W, HAN F, et al. Intelligent monitoring and control of grain continuous drying process based on multi-parameter corn accumulated temperature model; proceedings of the 2017 international conference on smart grid and electrical automation (ICSGEA), F, 2017 [C]. IEEE.
- [12] 金毅, 谢辉煌, 尹君, 等. 基于 LSTM-MPC 的粮食干燥机智能控制方法研究[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(5): 25-34.
JIN Y, XIE H H, YIN J, et al. Research on control method of grain drying intelligence based on LSTM-MPC[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2023, 31(5): 25-34.
- [13] JIN Y, WONG K W, WU Z, et al. Relationship between accumulated temperature and quality of paddy[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 19-33.
- [14] JIN Y, YIN J, XIE H, et al. Reconstruction of rice drying model and analysis of tempering characteristics based on drying accumulated temperature[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23): 11113.
- [15] LI J, YI X, JIN Y. Study of the targeted regulation of rice drying characteristics and quality[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(9): 3587.
- [16] 谢辉煌, 金毅, 张忠杰, 等. 基于 LSTM 网络的粮食干燥机水分预测与优化[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(11): 196-204.
XIE H H, JIN Y, ZHANG Z J, et al. Moisture prediction and optimization of grain dryers based on LSTM network[J]. *Journal of Cereals and Oils*, 2023, 38(11): 196-204.
- [17] 吴文福, 金毅, 张亚秋, 等. 一种立式湿热控速薄层干燥实验台及干燥方法: CN105767163B [P/OL].
WU W F, JIN Y, ZHANG Y Q, et al. A vertical wet heat controlled speed thin layer drying test bed and drying method: CN105767163B [P/OL].
- [18] 金毅. 基于等效积温的谷物干燥过程建模与智能控制[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
JIN Y. Modeling and intelligent control of grain drying process based on equivalent accumulated temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [19] CHEN J, WU W, CHENG R, et al. Optimization of hot air drying process of corn using genetic algorithm and response surface methodology[J]. *Int J Food Prop*, 2020, 23(1): 753-764.
- [20] NANVAKENARI S, MOVAGHARNEJAD K, LATIFI A. Multi-objective optimization of hybrid microwave-fluidized bed drying conditions of rice using response surface methodology [J]. *J Stored Prod Res*, 2022, 97: 101956.
- [21] WEI C, QIN F, ZHOU W, et al. Comparison of the crystalline properties and structural changes of starches from high-amylose transgenic rice and its wild type during heating[J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(3): 645-652.
- [22] CHUNG H J, LIU Q, LEE L, et al. Relationship between the structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of rice starches with different amylose contents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 968-975.
- [23] 邹佳池. 粳稻热风-微波耦合最优干燥工艺与过程品质变化规律的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
ZOU J C. Study on optimal drying process and process quality change of japonica rice with hot-air and microwave coupling [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.
- [24] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 131-140.
WANG L X, LAN H, ZHENG Q Y, et al. Gas jet impact drying characteristics and drying model of red jujube[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 131-140.
- [25] 尹晓峰, 杨明金, 李光林, 等. 稻谷薄层热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J]. *食品科学*, 2017, 38(8): 198-205.
YIN X F, YANG M J, LI G L, et al. Process optimization and mathematical model fitting of thin layer hot air drying of rice[J]. *Food Science*, 2017, 38(8): 198-205.
- [26] 尹晓峰, 杨玲. 稻谷薄层红外干燥特性及数学模型[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(2): 11-19.
YIN X F, YANG L. Infrared drying characteristics and mathematical model of thin layer of rice[J]. *Journal of Cereals and Oils of China*, 2024, 39(2): 11-19. 完