

不同小麦替代玉米比例下混合物料制粒成型特性与预测模型研究

杨洁^{1,2} 李星¹ 钱广宇¹ 李军国^{1,2} 秦玉昌³ 邵爽¹ 李俊¹ 邬本成⁴

(1. 中国农业科学院饲料研究所, 北京 100081;

2. 农业农村部动物产品质量安全饲料源性因子农村评估实验室, 北京 100081;

3. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193;

4. 安佑生物科技集团股份有限公司预混料事业部, 苏州 215437)

摘要: 为研究小麦替代玉米比例对混合物料理化特性、饲料制粒成型特性的影响规律,通过响应面法建立了颗粒饲料制粒成型特性的预测模型。试验采用 Box - Behnken 试验设计,以调质温度(70、80、90℃)、调质时间(45、135、225 s)和替代比例(0、50%、100%)为自变量,以颗粒饲料成型率、吨料电耗、颗粒耐久性指数为因变量,共进行 17 组制粒加工试验,测定混合物料的理化特性指标、饲料制粒成型特性指标,并对自变量参数进行优化。试验结果表明:随着小麦替代玉米比例的增加,混合物料的松装密度、振实密度、水溶性、蛋白质分散指数和糊化时间显著增加($P < 0.05$);休止角、吸水性指数、峰值黏度、保持黏度和最终黏度显著下降($P < 0.05$);颗粒饲料成型率升高,吨料电耗降低,颗粒耐久性指数先升高后降低。随着调质温度升高,颗粒饲料成型率先升高后降低;当替代比例在 0 和 50% 时,吨料电耗降低;当替代比例在 100% 时,吨料电耗先降低后升高,颗粒耐久性指数升高。随着调质时间的延长,吨料电耗升高,成型率和颗粒耐久性指数变化相对较小。方差分析结果显示,影响颗粒饲料制粒成型特性因素的主次顺序依次为替代比例、调质温度、调质时间,并根据响应面建立不同替代比例下颗粒饲料制粒成型特性的预测模型,模型预测结果可靠。由此可见,使用小麦替代玉米可显著提高颗粒饲料质量,并降低生产能耗。

关键词: 小麦替代玉米; 精准加工; 制粒特性; 颗粒质量; 响应面法

中图分类号: S816.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0569-08

OSID:



Influence of Different Proportions of Wheat Replacing Corn on Pelleting Characteristics of Mash Feed and Establishment of Prediction Model

YANG Jie^{1,2} LI Xing¹ QIAN Guangyu¹ LI Junguo^{1,2} QIN Yuchang³ SHAO Shuang¹ LI Jun¹ WU Bencheng⁴

(1. Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2. Laboratory of Feed-derived Factor Risk Assessment for Animal Product Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China

3. Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

4. Premix Business Unit, Anyou Biotechnology Group Co., Ltd., Suzhou 215437, China)

Abstract: The Box - Behnken experimental design was used in the experiment, and a total of 17 groups of pelleting experiments were carried out. The results showed that with the increase of replacement ratio of wheat, the bulk density, tap density, water solubility index, protein dispersibility index, pasting time of the mash feed were increased significantly ($P < 0.05$), the angle of repose, water absorption index, peak-viscosity, through-viscosity and final viscosity were decreased significantly ($P < 0.05$), and the pelleting rate was increased, power consumption per ton was decreased and the pellet durability index was increased first and then decreased. With the increase of conditioning temperature, the pelleting rate was firstly increased and then decreased. When the replacement ratio were 0 and 50%, the power

收稿日期: 2024-09-24 修回日期: 2024-10-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1300300)和中国农业科学院创新工程项目(1610382024010、CAAS-IFR-ZDRW202303、CAAS-ASTIP-2024-FRI-06)

作者简介: 杨洁(1983—),女,研究员,主要从事饲料原料加工特性、饲料加工工艺和产品质量评价研究,E-mail: yangjie02@caas.cn

通信作者: 李军国(1964—),男,研究员,主要从事饲料加工工艺、饲料生产质量评价研究,E-mail: lijunguo@caas.cn

consumption per ton was decreased, and when the replacement ratio was 100%, the power consumption per ton was firstly decreased and then increased and the pellet durability index was increased. With the extension of conditioning time, the power consumption per ton was increased, and the changes of pelleting rate and pellet durability index were relatively small. The results of variance analysis showed that the primary and secondary order of factors affecting the pelleting characteristics of pellet feed was replacement ratio, conditioning temperature, and conditioning time. It can be seen that the use of wheat replacing of corn can significantly improve the quality of pellet feed and reduce the power consumption per ton.

Key words: wheat replacing corn; precision processing; pelleting characteristics; pellet quality; response surface method

0 引言

近年来,我国畜牧养殖业发展迅速,饲料需求量不断上涨。据统计,2023 年全国饲料消耗总量已突破 $4.8 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$,其中玉米作为主要能量类饲料,同年饲用消费量高达 $1.88 \times 10^8 \text{ t}$,占据玉米总消费量的 68%,远超食用消费占比。然而,国内玉米供不应求,2023 年玉米总进口量 $2.714 \times 10^7 \text{ t}$,同比增长 31.6%,对外依赖程度过高^[2]。目前,玉米消费总量居高不下,且价格不稳定,严重制约了我国畜牧业发展,因此农业农村部制定了各种措施,增加能量类饲料原料种类,减少畜牧养殖业对玉米的依赖^[3]。但是,多元化日粮配方的理化特性及加工性能差异较大,使得饲料加工难度增大,产品质量参差不齐,不能满足现代化、规模化养殖对颗粒饲料质量的要求,所以急需加工性能良好的饲料原料来提高多元化配方的制粒效率和颗粒质量。

与玉米相比,小麦营养价值丰富,富含淀粉、蛋白质及氨基酸,少量脂肪、有效磷及多种矿物质元素和维生素 B 族^[4]。小麦中的谷胚蛋白,在饲料加工过程中可以产生较好粘结力,对提高颗粒质量有明显的积极作用。小麦在猪中的消化能、净能分别为玉米的 98.4% 和 96.2%^[5],在饲粮中使用小麦部分替代玉米对动物的生长性能无显著的负面影响,与木聚糖酶配合使用还可提高其生长性能^[6-10]。但是,在饲料加工过程中,饲料原料的种类、配方组合、工艺参数和设备配置等都会影响饲料的制粒成型特性。其中,饲料原料的影响程度最大,不同种类的饲料原料营养组成和理化特性不同,其加工特性也有所不同,将直接影响颗粒饲料的制粒成型性能^[11-12]。

目前,关于小麦替代玉米的研究主要集中在对动物生长性能的影响方面,而关于小麦对颗粒饲料制粒成型特性的影响研究较少。因此,本文旨在研究小麦替代玉米不同比例对混合粉料制粒成型特性的影响,并构建不同替代比例下颗粒饲料制粒成型

特性的预测模型,以期小麦在饲料精准加工中的应用提供理论指导和参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

玉米采购于天津正大饲料有限公司,豆粕采购于青岛渤海科技有限公司,小麦采购于南口面粉厂。试验设备包括:BT-1000 型粉体综合特性测试仪(丹东百特仪器有限公司)、ZM100 型快速黏度分析仪(波通瑞华科学仪器有限公司)、9FQ-50B 型锤片式粉碎机(北京通燕机械制造有限公司)、SJHS0.2 型混合机(江苏思贝德机械有限公司)、SZLH200*40 型环模制粒机(江苏正昌制粒机科技有限公司)、NHP100 型颗粒耐久性测试仪(英国 TEKPRO Holmen 公司)、TA-XY2i 型质构仪(英国 Stable Micro 公司)等。

1.2 试验设计

设置三因素三水平的 Box-Behnken 试验,即调质温度 70、80、90℃,调质时间 45、135、225 s,替代比例 0、50%、100%。将玉米、小麦、豆粕粉碎混合,并进行制粒加工试验,试验条件为筛片孔径 2.0 mm,模孔直径 3 mm,长径比 10:1。试验配方见表 1,具体试验因素编码见表 2。

表 1 配方组成(质量分数)

Tab.1 Composition of basal diet %			
项目	替代比例		
	0	50	100
玉米	58.54	29.27	0
小麦	0	29.27	58.54
豆粕	39.03	39.03	39.03
石粉	0.97	0.97	0.97
豆油	1.46	1.46	1.46

1.3 检测指标与方法

1.3.1 理化特性指标

(1)松装密度、振实密度:使用 BT-1000 型粉体综合特性测试仪测定物料的松装密度和振实密

表 2 试验因素编码
Tab.2 Factors and coding

编码	因素		
	调质温度/℃	调质时间/s	替代比例/%
-1	70	45	0
0	80	135	50
1	90	225	100

度。每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。计算公式为

$$A = (M - m) / 100 \tag{1}$$

$$T = (M - m) / 100 \tag{2}$$

式中 A——松装密度,g/L
T——振实密度,g/L
M——总质量,g
m——容器质量,g

(2)休止角、摩擦角:使用 BT-1000 型粉体综合特性测试仪测定物料休止角和摩擦角。

(3)吸水性指数、水溶性指数及溶胀度:吸水性和水溶性参考文献[13]的方法进行测定。计算公式为

$$I_A = (M_2 - M_1) / M_1 \tag{3}$$

$$I_s = M_3 / M_1 \times 100\% \tag{4}$$

$$D = M_2 / [M_1 / (1 - I_s)] \tag{5}$$

式中 I_A ——吸水性指数,g/g
 I_s ——水溶性指数,%
D——溶胀度,g/g
 M_1 ——样品干物质质量,g
 M_2 ——沉淀物质量,g
 M_3 ——上清液残余干物质质量,g

(4)蛋白质分散指数:参考文献[14]提供的方法,并进行改进。

(5)糊化特性:采用快速黏度分析仪进行测定,选用程序 standard 1,在结果中提取峰值黏度、保持黏度、最终黏度、糊化温度和糊化时间等数值。

1.3.2 制粒成型特性指标

(1)成型率:采用文献[15]提供的测定方法进行测定。

(2)吨料电耗:记录生产过程中颗粒饲料每分钟的产量,记为 S(kg),记录制粒机的电流,记为 I(A),计算制粒吨料电耗,公式为

$$E_c = 1.732IU \frac{1\,000}{60S} \cos\theta \tag{6}$$

式中 E_c ——吨料电耗,kW·h/t
U——电压,取 0.38 kV
 $\cos\theta$ ——功率因数,取 0.85

(3)颗粒耐久性:将待测样品用 60 目筛清理去除细粉,称取 100 g 放入颗粒耐久性测试仪的仓内,盖好仪器盖,选择仪器运转时间 60 s,停止后称量留在筛网上颗粒饲料质量,计算颗粒耐久性,计算公式为

$$P_{DI} = M' / 100 \times 100\% \tag{7}$$

式中 P_{DI} ——颗粒耐久性指数,%
 M' ——筛后颗粒质量,g

(4)硬度:利用 TA-XY2i 型质构仪进行测定,颗粒断裂前的峰值即为硬度,重复测试 20 次取平均值。

(5)淀粉糊化度:采用文献[16]提供的方法进行测定。

1.4 统计分析

采用 SPSS 26.0 对数据进行方差分析,结果以“平均值±标准差”的形式表示, $P < 0.05$ 为差异显著;采用 Design-Expert 12.0 设计试验并对试验数据进行拟合;采用 Matlab 2021b 进行绘图制作。

2 结果与分析

2.1 小麦替代玉米比例对混合物料理化特性的影响

混合物料的物理特性、水合特性和糊化特性见表 3。由表 3 可知,随着小麦替代玉米比例升高,混合物料的休止角显著降低($P < 0.05$),松装密度和振实密度显著升高($P < 0.05$);吸水性显著降低($P < 0.05$),水溶性和蛋白质分散指数显著升高($P < 0.05$);峰值黏度、保持黏度和最终黏度均显著升高($P < 0.05$),糊化时间显著延长($P < 0.05$),说明随着小麦替代玉米比例升高,混合物料的流动性、容重和水溶性蛋白质含量增加,而吸水性和糊化性能下降。

2.2 响应面中心组合试验结果

根据 Box-Behnken 试验设计方法,共设计 17 组加工试验,每组试验改变调质温度(70、80、90℃)、调质时间(45、135、225 s)、替代比例(0、50%、100%)3 个因素,参数设定值及对应的颗粒饲料制粒成型特性指标结果见表 4。表中 A、B、C 分别表示调质温度、调质时间、替代比例的编码值。

2.3 多元回归模型方差分析

采用 Design-Expert 12.0 统计分析软件拟合出颗粒耐久性、成型率、吨料电耗的回归模型方程,对模型方程进行方差分析,结果见表 5。由表 5 可知,颗粒耐久性指数、成型率和吨料电耗的模型显著水平 P 值均小于 0.01,说明模拟成立且准确度高;所有模型的决定系数 R^2 均大于 0.9,校正决定系数 R^2 均大于 0.9,说明调质温度、调质时间及替代比例

表 3 不同小麦替代玉米比例的混合物理化特性

Tab.3 Effects of different proportions of wheat replacing corn on physicochemical properties of mash feed				
项目	参数	替代比例/%		
		0	50	100
物理特性	休止角/(°)	(41.33 ± 1.53) ^a	(40.00 ± 1.00) ^{ab}	(38.85 ± 0.26) ^b
	摩擦角/(°)	50.33 ± 3.69	47.00 ± 3.77	46.5 ± 2.29
	松装密度/(g·L ⁻¹)	(542.57 ± 0.65) ^c	(548.40 ± 3.00) ^b	(555.83 ± 0.29) ^a
	振实密度/(g·L ⁻¹)	(729.70 ± 3.56) ^c	(747.80 ± 2.55) ^b	(762.50 ± 2.17) ^a
水合特性	吸水性指数/(g·g ⁻¹)	(2.77 ± 0.01) ^a	(2.75 ± 0.02) ^{ab}	(2.69 ± 0.05) ^b
	水溶性指数/%	(8.67 ± 0.01) ^c	(9.19 ± 0.06) ^b	(10.51 ± 0.12) ^a
	溶胀度/(g·g ⁻¹)	3.32 ± 0.02	3.32 ± 0.02	3.30 ± 0.05
	蛋白质分散指数/%	(7.72 ± 0.14) ^c	(8.64 ± 0.09) ^b	(9.08 ± 0.19) ^a
糊化特性	峰值黏度/cP	(1 109.00 ± 15.56) ^a	(816.50 ± 0.71) ^b	(858.00 ± 28.28) ^b
	保持黏度/cP	(1 044.50 ± 19.09) ^a	(719.00 ± 8.49) ^b	(738.50 ± 19.09) ^b
	最终黏度/cP	(2 996.50 ± 3.54) ^a	(2 206.50 ± 27.58) ^b	(2 115.50 ± 30.41) ^c
	糊化温度/℃	70.15 ± 23.05	90.85 ± 0.57	91.20
	糊化时间/min	(5.17 ± 0.05) ^b	(6.94 ± 0.09) ^a	7.00 ^a

注:同行数据不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

表 4 Box – Behnken 试验设计及结果

Tab.4 Box – Behnken trial design and results								
编号	A	B	C	吨料电耗/(kW·h·t ⁻¹)	成型率/%	颗粒耐久性指数/%	硬度/N	淀粉糊化度/%
1	-1	-1	0	8.73 ± 0.02	99.75 ± 0.04	93.27 ± 0.05	54.32 ± 0.27	23.55 ± 0.11
2	1	-1	0	8.03 ± 0.05	99.13 ± 0.05	93.63 ± 0.09	65.05 ± 0.49	27.77 ± 0.22
3	-1	1	0	8.97 ± 0.01	99.62 ± 0.05	93.20 ± 0.10	57.60 ± 0.47	24.62 ± 0.09
4	1	1	0	8.23 ± 0.03	99.27 ± 0.05	94.12 ± 0.09	59.80 ± 0.49	28.93 ± 0.07
5	-1	0	-1	9.60 ± 0.07	99.44 ± 0.05	88.84 ± 0.14	58.74 ± 0.65	24.99 ± 0.07
6	1	0	-1	8.55 ± 0.05	99.08 ± 0.06	90.01 ± 0.24	71.23 ± 0.63	27.98 ± 0.06
7	-1	0	1	8.66 ± 0.04	99.65 ± 0.06	92.23 ± 0.12	66.31 ± 0.63	23.48 ± 0.06
8	1	0	1	8.60 ± 0.04	98.95 ± 0.06	93.15 ± 0.09	73.09 ± 0.97	26.75 ± 0.07
9	0	-1	-1	8.19 ± 0.04	99.56 ± 0.06	89.09 ± 1.06	58.34 ± 1.05	26.54 ± 0.05
10	0	1	-1	9.28 ± 0.13	99.60 ± 0.06	89.44 ± 0.03	60.01 ± 1.05	26.96 ± 0.08
11	0	-1	1	8.19 ± 0.09	99.56 ± 0.09	93.57 ± 0.01	68.70 ± 1.05	24.96 ± 0.09
12	0	1	1	7.93 ± 0.06	99.51 ± 0.09	93.14 ± 0.10	61.54 ± 0.99	27.36 ± 0.07
13	0	0	0	8.20 ± 0.03	99.57 ± 0.09	94.27 ± 0.06	68.88 ± 0.91	26.23 ± 0.09
14	0	0	0	8.26 ± 0.12	99.56 ± 0.08	94.31 ± 0.04	69.93 ± 0.91	25.94 ± 0.12
15	0	0	0	7.95 ± 0.04	99.53 ± 0.08	94.59 ± 0.06	68.15 ± 0.92	26.04 ± 0.11
16	0	0	0	8.11 ± 0.07	99.56 ± 0.08	94.80 ± 0.06	68.65 ± 1.81	26.65 ± 0.13
17	0	0	0	8.21 ± 0.04	99.60 ± 0.08	93.83 ± 0.28	69.74 ± 1.81	26.09 ± 0.66

表 5 颗粒质量回归模型方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression model equation of pellet quality				
响应面方程	P	回归系数		精密度
		R ²	R ² _{Adj}	
$Y_{PR} = 99.56 - 0.2537A - 0.0012C + 0.0675AB - 0.0850AC - 0.0225BC - 0.1995A^2 + 0.078B^2 - 0.0845C^2$	0.000 1	0.990 9	0.979 3	33.500 7
$Y_{PC} = 8.15 - 0.318A + 0.1596B - 0.2791C - 0.0109AB + 0.2494AC - 0.3392BC + 0.4005A^2 - 0.0577B^2 + 0.3046C^2$	0.000 2	0.966 1	0.922 4	17.423 8
$Y_{PDI} = 94.36 + 0.4175A + 0.0425B + 1.83C + 0.1400AB - 0.0625AC - 0.1950BC - 0.5288A^2 - 0.2763B^2 - 2.77C^2$	0.000 1	0.984 7	0.965 1	19.486 5

注:Y_{PDI}、Y_{PC}、Y_{PR}分别表示颗粒耐久性指数、吨料电耗、成型率;R²_{Adj}为校正决定系数。

3个自变量参数与颗粒质量之间的回归关系显著,且误差较小;信噪比均大于4,表明该试验的结果具有意义且可靠,所选模型与硬颗粒质量响应值有较高的拟合性。

模型方程回归系数的显著性检验分析见表6。由表6可以看出,调质温度对成型率、吨料电耗影响极显著($P < 0.01$),对颗粒耐久性指数影响显著($P < 0.05$);调质时间对吨料电耗影响显著($P < 0.05$);替代比例对颗粒耐久性指数、吨料电耗影响

表6 回归方程系数及显著性分析

Tab.6 Significance analysis of regression coefficients

来源	回归系数		
	成型率	吨料电耗	颗粒耐久性指数
常数项	99.56	8.15	94.36
A	-0.253 7 **	-0.318 0 **	0.421 3 *
B	0	0.159 6 *	0.042 5
C	-0.001 2	-0.279 1 **	1.84 **
AB	0.067 5 **	-0.010 9	0.14
AC	-0.085 0 **	0.249 4 **	0.062 5
BC	-0.022 5	-0.339 2 **	0.195 0
A ²	-0.199 5 **	0.400 5 **	-0.528 8 *
B ²	0.078 0 **	-0.057 7	-0.276 3
C ²	-0.084 5 **	0.304 6 **	-2.77 **

注: *表示差异显著($P < 0.05$); **表示差异极显著($P < 0.01$)。

极显著($P < 0.01$);调质温度和调质时间的交互性对成型率影响极显著($P < 0.01$);调质温度和替代比例的交互性对成型率、吨料电耗影响极显著($P < 0.01$),对硬度影响显著;调质时间和替代比例对吨料电耗影响极显著($P < 0.01$);调质温度的平方项对成型率、吨料电耗影响极显著($P < 0.01$),对颗粒耐久性指数影响显著($P < 0.05$);调质时间的平方项对成型率的影响极显著($P < 0.01$);替代比例的平方项对颗粒耐久性指数、成型率、吨料电耗的影响极显著($P < 0.01$)。综上所述,各因素影响颗粒饲料制粒成型特性的主次顺序依次为替代比例、调质温度、调质时间。

2.4 响应面分析

根据回归方程利用 Design-Expert 12.0 软件进行响应面分析,利用 Matlab 2021b 软件绘出响应面分析图,结果见图1。由图1可以得出,随着替代比例的升高,颗粒饲料成型率升高,吨料电耗降低,颗粒耐久性指数先升高后降低。随着调质温度升高,成型率表现出先升高后降低;当替代比例为0和50%时,吨料电耗降低,当替代比例为100%时,吨料电耗表现出先降低后升高,颗粒耐久性指数升高。随着调质时间的延长,吨料电耗升高,成型率和颗粒耐久性指数变化相对较小。

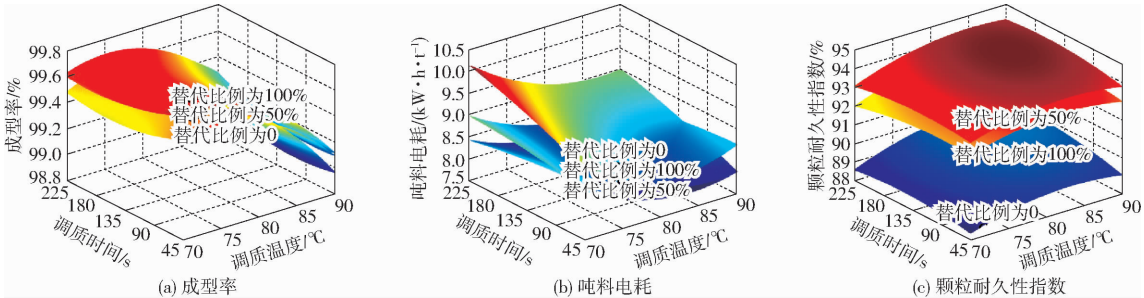


图1 小麦替代玉米比例及加工工艺参数对混合粉料制粒成型特性影响的响应曲面

Fig.1 Effects of different proportions of wheat replacing corn and processing parameters on pelleting characteristics of mash feed

2.5 加工工艺参数优化分析

利用 Design-Expert 12.0 软件对本试验进行优化,寻找适宜的工艺参数范围。设定自变量调质温度为70~90℃,调质时间为45~225 s,替代比例为0~100%。设定了因变量成型率目标值为最大值,范围为95%~100%,重要程度为重要;吨料电耗目标值为最小值,范围为0~8.5 kW·h/t,重要程度为较重要;颗粒耐久性指数目标值为最大值,变化范围为89%~95%,重要程度为极重要。

不同替代比例下调质温度、调质时间优化区间结果见图2,黄色区域为适宜加工区间。由图2可以看出随着小麦替代玉米的比例增加,适宜加

工操作区间呈先扩大再缩小的趋势,说明在一定范围内,小麦替代玉米后可使物料的加工难度降低,而超过一定比例后,对调质温度、调质时间的可操作范围减小,物料加工难度增加。

2.6 不同替代比例下加工工艺参数及颗粒饲料制粒成型特性预测

不同替代比例下混合物料的加工工艺参数、颗粒饲料质量及生产能耗的预测结果见表7。通过优化结果可以看出,颗粒耐久性指数在替代比例70%达到最大,制粒吨料电耗在替代比例50%达到最小,成型率在替代比例50%时达到最高,调质温度和时间先降低后升高。

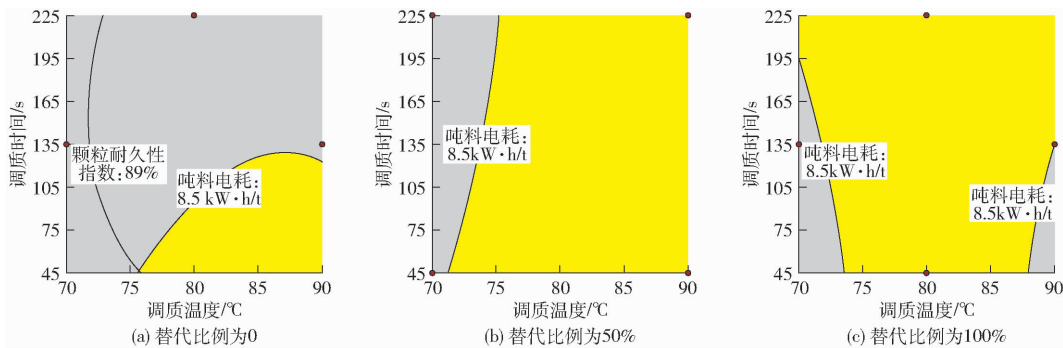


图 2 不同小麦替代玉米比例混合粉料加工区间优化结果

Fig. 2 Optimization results of processing parameters for different proportions of wheat replacing corn mash feed

表 7 工艺参数优化结果

Tab. 7 Results of process parameter optimization							
序号	替代比例/%	调质温度/℃	调质时间/s	成型率/%	吨料电耗/(kW·h·t ⁻¹)	颗粒耐久性指数/%	可信度
1	0	85	134	99.34	8.54	89.85	0.286
2	10	84	86	99.39	8.17	91.00	0.451
3	20	84	55	99.46	7.95	91.96	0.560
4	30	83	59	99.49	7.93	92.93	0.634
5	40	83	66	99.50	7.94	93.71	0.682
6	50	82	60	99.53	7.93	94.12	0.713
7	60	81	51	99.57	7.94	94.41	0.726
8	70	82	91	99.50	8.03	94.65	0.722
9	80	82	193	99.49	8.02	94.38	0.709
10	90	82	220	99.50	7.95	93.78	0.685
11	100	82	221	99.47	7.95	93.10	0.642

3 讨论

3.1 小麦替代玉米比例对混合物料制粒成型特性的影响

物料的物理特性、水合特性、糊化特性对颗粒饲料的制粒成型特性有重要的影响作用^[17-18]。流动特性可反映物料是否容易通过环模模孔并挤压成型,在一定范围内,流动性较好的物料更容易通过模孔,制粒能耗较小^[19]。容重反映物料单位体积内的质量,容重大的物料内部结构更加紧实,更容易被压制成颗粒饲料,同时产量更高,吨料电耗更低。水合特性反映物料在调质过程中吸收饱和蒸汽的能力,以及物料本身的水溶性蛋白质含量,在调质过程中,吸水性强的物料能更充分地 与湿热饱和蒸汽结合,吸收大量热量,物理化学变化更剧烈,调质效果更好,从而使制出颗粒饲料质量更佳。糊化特性反映的是物料中的淀粉是否容易发生糊化以及充分糊化后所产生黏度的大小,淀粉在调质过程中发生糊化并产生黏度,增加了物料间的粘结力,从而提高了颗粒饲料质量,但黏度过大时会导致物料难以通过模孔,造成制粒能耗增加。本试验结果表明,随着小麦

替代玉米比例增加,颗粒饲料成型率表现出上升趋势,吨料电耗表现出下降趋势,颗粒耐久性指数表现出先上升后下降,综合制粒成型特性表现出先上升后下降的趋势,但均优于替代比例为 0 组颗粒饲料,这可能是添加小麦替代玉米后混合物料的流动性、容重、水溶性蛋白质含量均增大,物料整体结构更加紧实,物料间摩擦力更小,所以容易通过模孔制粒成型,使吨料电耗降低,同时水溶性蛋白质含量升高,尤其是小麦中特有的谷朊粉蛋白,调质过程中更易发生变性,产生黏度,提高了颗粒饲料成型率和耐久性。当替代比例继续升高时,混合粉料的吸水性较小,糊化性能相对较差,影响了调质效果及调质后物料的黏度,使颗粒耐久性下降,吨料电耗上升,从而使适宜加工区间缩小。

3.2 调质温度对混合物料制粒成型特性的影响

调质处理是颗粒饲料生产过程中极其重要的环节,在这个过程中,物料在调质器里与饱和湿热蒸汽充分接触,吸收水分和热量,从而发生淀粉糊化、蛋白质变性等一系列物理、化学变化,使物料产生黏度,提高了颗粒饲料质量和营养消化利用率^[20]。影响调质效果的主要因素包括调质温度、调质时间以及物料初始含水率。调质温度是影响调质效果的因素之一,调质器内热量主要来源于蒸汽量,通入调质器内的蒸汽量越大,则调质温度越高^[21-22]。调质温度升高,物料吸收更多的水分和热量,淀粉糊化、蛋白质变性程度更剧烈,调质后物料产生的黏度更大,调质效果更好,所以在一定范围内升高调质温度,可以改善颗粒饲料质量^[23]。当调质温度过高时,调质后物料的含水率过高,黏度过大,物料中出现糊状物,进入制粒机后不易通过模孔挤压成型,所以导致吨料电耗升高,甚至出现堵机现象。文献[24]研究表明,提高调质温度对小麦型日粮的颗粒饲料质量存在积极影响作用。文献[25]研究表明,随着调质温度的升高,颗粒饲料的硬度和耐久性均升高。文献[26]研究表明,随着调质温度的升高

(70、75、80、85℃)，颗粒饲料的含粉率为先下降后上升趋势，80℃含粉率最低。本试验结果与以上研究结果基本一致，随着调质温度升高，颗粒饲料耐久性提高，而颗粒饲料成型率表现出先升高后降低；当替代比例在 0、50% 时，吨料电耗降低，当替代比例在 100% 时，吨料电耗表现出先降低后升高，颗粒耐久性升高。吨料电耗先降低后升高可能是因为当小麦替代玉米比例为 100% 时，混合物料的吸水能力大幅下降，在高温调质下不能充分吸收蒸汽，使物料中的含水率过高，所以吨料电耗会有所升高。

3.3 调质时间对混合物料制粒成型特性的影响

调质时间是影响调质效果的又一重要因素，时间长短主要取决于调质器类型、配置以及螺杆转速。调质时间越长，物料与饱和蒸汽的接触时间越多，物料吸收的热量越充足，有助于蛋白质与水分子间形成氢键，从而使饲料淀粉糊化、蛋白质变性程度加剧，增加了物料间的粘结力，提高颗粒饲料耐久性指数、成型率^[27]。文献[28]研究结果表明，调质时间为 30 s 的生产能耗低于 60 s，调质时间对颗粒饲料质量的影响不显著，同时当调质温度为 88℃ 时，调质时间的影响效应消失。文献[29]研究结果表明，与调质时间为 2 min 相比，4 min 组颗粒饲料耐久性指数、硬度均显著下降，电耗显著上升，整体颗粒饲料制粒成型性能下降。文献[30]试验结果表明，延长调质时间(0 ~ 120 s)显著提高了颗粒饲料耐久性指数及硬度，而颗粒成型率及蛋白质溶解度无显著影响。文献[31]研究结果表明调质时间对颗粒饲

料耐久性指数、吨料电耗等指标影响程度低于粉碎粒径、调质温度、喂料速度以及模孔直径比。而本试验结果表明，随着调质时间延长，吨料电耗明显上升，而对颗粒饲料成型率及耐久性指数的影响不明显，吨料电耗上升可能是因为物料在较长时间的调质下熟化程度较高，产生黏度较大，所以制粒时能耗相对较高，而对颗粒饲料质量的影响程度相对较小可能是因为调质温度的影响作用下，调质时间的作用效应较小，所以表现出的影响程度较小。

4 结论

(1) 响应面法分析得出，随着替代比例的升高，颗粒饲料成型率升高，吨料电耗降低，颗粒耐久性指数先升高后降低。随着调质温度升高，成型率表现出先升高后降低；当替代比例在 0 和 50% 时，吨料电耗降低，当替代比例在 100% 时，吨料电耗表现出先降低后升高，颗粒耐久性指数升高。随着调质时间的延长，吨料电耗升高，成型率和颗粒耐久性指数变化相对较小。

(2) 通过响应面法建立了混合物料制粒成型特性评指标的二次回归模型，得出影响颗粒饲料制粒成型特性因素的主次顺序依次为替代比例、调质温度、调质时间，并对不同替代比例下混合物料的加工工艺参数及制粒成型特性进行预测，预测结果可靠。

(3) 研究发现，小麦制粒成型特性优于玉米，使用适量小麦替代玉米，可提高颗粒饲料质量，降低生产能耗，增大加工区间。

参 考 文 献

[1] 林国发. 2024 年饲料产量分析及展望[J]. 广东饲料, 2024, 33(4): 27-28.
LIN Guofa. Analysis and outlook of feed production in 2024[J]. Guangdong Feed, 2024, 33(4): 27-28. (in Chinese)

[2] 王辽卫. 2023 年饲料原料市场回顾与展望[J]. 猪业科学, 2024, 41(2): 38-41.

[3] 中华人民共和国农业农村部. 猪鸡饲料玉米豆粕减量替代技术方案[R/OL]. (2021-03-15)[2021-04-21]. http://www.moa.gov.cn/gk/nszd_1/2021/202104/t20210421_6366304.htm.

[4] 王建. 小麦替代玉米对蛋鸡生产以及鸡蛋品质的影响[J]. 中国动物保健, 2024, 26(5): 104-105.

[5] 付永利, 兰东晨, 唐佩娟, 等. 小麦替代玉米在猪日粮中的应用[J]. 天津农林科技, 2022(5): 36-38.

[6] NGUYEN X H, NGUYEN H T, MORGAN N K. Dietary soluble non-starch polysaccharide level and xylanase supplementation influence performance, egg quality and nutrient utilization in laying hens fed wheat-based diets[J]. Animal Nutrition, 2021, 7(2): 512-520.

[7] MIRZAEI S, ZAGHARI M, AMINZADEH S, et al. Effects of wheat inclusion and xylanase supplementation of the diet on productive performance, nutrient retention, and endogenous intestinal enzyme activity of laying hens[J]. Poultry Science, 2012, 91(2): 413-425.

[8] HAN T H, HONG J S, FANG L H, et al. Effects of wheat supplementation levels on growth performance, blood profiles, nutrient digestibility, and pork quality in growing-finishing pigs[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2017, 30(8): 1150-1159.

[9] WANG J, ZHU H, LI H, et al. Metabolic and microbial mechanisms related to the effects of dietary wheat levels on intramuscular fat content in finishing pigs[J]. Meat Science, 2024, 216: 109574.

[10] LEI X J, LEE K Y, KIM I H. Performance, egg quality, nutrient digestibility, and excreta microbiota shedding in laying hens fed corn-soybean-meal-wheat-based diets supplemented with xylanase[J]. Poultry Science, 2018, 97(6): 2071-2077.

[11] 李星, 廖莹, 杨洁, 等. 高粱替代玉米不同比例及调质温度对颗粒饲料质量影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(10):

166 – 173.

LI Xing, LIAO Ying, YANG Jie, et al. Effects of different proportions of sorghum instead of corn and conditioning temperature on pellet feed quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(10) : 166 – 173. (in Chinese)

[12] TRUELOCK C N, TOKACH M D, STARK C R, et al. Pelleting and starch characteristics of diets containing different corn varieties[J]. Translational Animal Science, 2020, 4(4) : txaa189.

[13] ANDERSON R. Water absorption and solubility and amylograph characteristics of roll-cooked small grain products[J]. Cereal Chemistry, 1982, 59(4) : 265 – 269.

[14] AOCS Official Method Ba. Sampling and analysis of oilseed by-products, protein dispersibility index, 11 – 65 [S]. AOCS Official Methods, 1997a.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 环模制粒机通用技术规范:GB/T 20192—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006

[16] 中华人民共和国农业农村部. 饲料中淀粉糊化度的测定:NY/T 4125—2022[S]. 北京:中国农业出版社, 2022.

[17] 吴雨珊, 杨洁, 李军国, 等. 蛋白原料及其混合粉料理化性质对颗粒饲料加工质量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7) : 301 – 308.

WU Yushan, YANG Jie, LI Junguo, et al. Effects of physicochemical properties of protein raw materials and their mash feed on the processing quality of pellet feed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7) : 301 – 308. (in Chinese)

[18] 许传祥, 杨洁, 李军国, 等. 膨化饲料中常用淀粉源理化性质比较研究[J]. 动物营养学报, 2021, 33(10) : 5874 – 5886.

XU Chuanxiang, YANG Jie, LI Junguo, et al. Comparison research on physicochemical properties of starch sources in extruded feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(10) : 5874 – 5886. (in Chinese)

[19] LI Q, RUDOLPH V, WEIGL B, et al. Interparticle van der Waals force in powder flowability and compactibility[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2004, 280(1) : 77 – 93.

[20] ABDOLLAHI M R, RAVINDRAN V, SVIHUS B. Pelleting of broiler diets: an overview with emphasis on pellet quality and nutritional value[J]. Animal Feed Science and Technology, 2013, 179(1) : 1 – 23.

[21] ABDOLLAHI M R, RAVINDRAN V, WESTER T J, et al. Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet [J]. Animal Feed Science and Technology, 2011, 168(1) : 88 – 99.

[22] CUTLIP S E, HOTT J M, BUCHANAN N P, et al. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2008, 17(2) : 249 – 261.

[23] NADERINEJAD S, ZAEFARIAN F, ABDOLLAHI M R, et al. Influence of feed form and particle size on performance, nutrient utilisation, and gastrointestinal tract development and morphometry in broiler starters fed maize-based diets [J]. Animal Feed Science and Technology, 2016, 215: 92 – 104.

[24] ABDOLLAHI M R, RAVINDRAN V, WESTER T J, et al. Influence of conditioning temperature on the performance, nutrient utilisation and digestive tract development of broilers fed on maize- and wheat-based diets[J]. British Poultry Science, 2010, 51(5) : 648 – 657.

[25] 马世峰, 李军国, 于纪宾, 等. 不同工艺参数组合对肉鸡颗粒饲料加工质量、生长性能和养分表观消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(4) : 1148 – 1158.

MA Shifeng, LI Junguo, YU Jibin, et al. Effects of different process parameters combination on pellet feed quality, growth performance and nutrient apparent digestibility of broilers[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(4) : 1148 – 1158. (in Chinese)

[26] 梁玉朋, 刘泳, 张文杰, 等. 高温制粒对猪颗粒饲料质量及饲喂效果的影响[J]. 饲料工业, 2023, 44(17) : 42 – 46.

LIANG Yupeng, LIU Yong, ZHANG Wenjie, et al. Effects of high temperature granulation on growth performance and nutrient digestibility of finishing pigs[J]. Feed Industry, 2023, 44(17) : 42 – 46. (in Chinese)

[27] HUANG X, CHRISTENSEN C, YU P. Effects of conditioning temperature and time during the pelleting process on feed molecular structure, pellet durability index, and metabolic features of co-products from bio-oil processing in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(7) : 4869 – 4881.

[28] BOLTZ T P, WARD N E, AYRES V E, et al. The effect of varying steam conditioning temperature and time on pellet manufacture variables, true amino acid digestibility, and feed enzyme recovery[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2020, 29(2) : 328 – 338.

[29] ATTAR A, KERMANSHAHI H, GOLIAN A, et al. Conditioning time and sodium bentonite affect pellet quality, growth performance, nutrient retention and intestinal morphology of growing broiler chickens [J]. British Poultry Science, 2019, 60(6) : 777 – 783.

[30] MASSUQUETTO A, DURAU J F, SCHRAMM V G, et al. Influence of feed form and conditioning time on pellet quality, performance and ileal nutrient digestibility in broilers[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2018, 27(1) : 51 – 58.

[31] FAHRENHOLZ A C. Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability[D]. Manhattan: Kansas State University, 2012.