

燕麦挂面品质与干燥系统中耦合因子的关系研究

田媛, 刘振蓉, 胡新中, 赵武奇*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院 西安 710119)

摘要 建立干燥系统中耦合因子与燕麦挂面品质指标之间的多元线性回归模型, 以实现干燥耦合因子预测燕麦挂面的品质指标。以燕麦挂面的品质指标为因变量, 以各耦合因子(温度和、空气绝对水势和、空气绝对水势积、积温)为自变量, 通过多元线性回归, 建立燕麦挂面各品质指标预测模型并进行评价和验证。结果表明: 建立的最佳煮制时间、蒸煮损失、烹调吸水率、延展性、硬度、咀嚼性、黏着性、抗弯曲强度、折断距离、酸度和脂肪酸值的回归模型均显著($P < 0.01$), 模型对品质指标预测的决定系数 R^2 分别为 0.8075, 0.9981, 0.8485, 0.8354, 0.8118, 0.8194, 0.8030, 0.8416, 0.8838, 0.8100 和 0.8888。干燥耦合因子可用于对燕麦挂面品质指标的预测, 本研究为燕麦挂面干燥过程中品质的控制提供理论参考。

关键词 燕麦挂面; 干燥; 耦合因子; 预测模型

文章编号 1009-7848(2023)11-0182-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.11.018

2019 年, 我国挂面年总产量达 800 多万 t, 国内 24 家挂面龙头企业的总销售额高达 178.7 亿元^[1], 挂面已成为人们的主食之一。随着人民生活水平的提高以及对食物营养品质的追求, 挂面也由原料单一的产品发展成各类具有营养保健功能的复合型营养挂面^[2]。研究表明, 在小麦加工成小麦粉的过程中会流失大量膳食纤维、矿物质及 B 族维生素^[3]。燕麦富含可溶性膳食纤维、蛋白质、矿物质和不饱和脂肪酸等营养成分^[4], 燕麦 β -葡聚糖作为一种可溶性膳食纤维具有降低血液胆固醇水平^[5-6], 抑制餐后血糖升高^[7-8]等功效。因此, 将燕麦粉添加到面粉中制作的燕麦挂面具有较高的营养价值, 成为肥胖、糖尿病、代谢综合征等人群调脂降糖的主食新选择^[9], 越来越受到大众的欢迎。

干燥是挂面生产的关键工序^[10], 干燥的温度、相对湿度、风速等决定着挂面的产量、品质和能耗^[11]。Zhang 等^[12]研究了不同温度(40, 60 °C 和 80 °C)和相对湿度(65%, 75% 和 85%)对挂面品质的影响, 结果发现干燥温度是影响挂面品质和蛋白

质结构的主要因素。惠滢等^[13]研究表明相对湿度对挂面产品色泽、密度、抗弯曲等特性均有显著或极显著的影响。高飞等^[14]研究发现干燥风速对挂面的扭断力、拉伸、色泽、咀嚼性等多项品质具有显著影响, 4.0 m/s 的恒定风速下挂面内、外水分迁移速率趋于平衡, 该条件下干燥的挂面具有较好的品质。挂面干燥是水分在挂面内部和外部迁移的复杂过程, 水分迁移的动力在于水势差^[15]。影响内、外水势的因素是多方面的, 内、外水势的变化是各因素作用的综合结果^[16]。因此, 不仅要考虑单个因素对干燥过程及干燥品质的影响, 还应研究多因素的交互耦合的影响。吴文福等^[17]研究了变温变湿干燥过程中玉米籽粒的不饱和脂肪酸与干燥系统的耦合关系, 结果发现不饱和脂肪酸与粮食绝对水势和的相关性最大, 可以用来分析和预测玉米的不饱和脂肪酸含量。陈俊轶^[18]研究了基于耦合因子的谷物变温变湿干燥品质特性的控制方法, 结果表明, 干燥耦合因子对谷物的品质影响显著, 其中谷物绝对水势积是谷物干燥控制过程中的理想耦合因子。

本文将温度、相对湿度、时间等独立简单的因子相互结合形成复杂的耦合因子, 研究干燥系统中耦合因子与燕麦挂面品质指标之间的关系, 建立模型, 以实现运用干燥耦合因子对燕麦挂面品质指标的预测, 为燕麦挂面干燥过程中品质的控制提供理论参考。

收稿日期: 2022-11-07

基金项目: 陕西省国际合作基地项目(2019GHJD-15); 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-07); 陕西省谷物食品科学与营养创新团队项目(2020TD-049)

第一作者: 田媛, 女, 硕士生

通信作者: 赵武奇 E-mail: zqw65@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦粉,河北金沙河面业有限公司;燕麦粉,武川县禾川绿色食品责任有限公司;食盐,中盐西安盐业公司;水,华润怡宝饮料有限公司;氢氧化钠,成都市科龙化工试剂厂;七水硫酸钴,成都市科龙化工试剂厂;酚酞,天津市天力化学试剂有限公司;三氯甲烷,天津市天力化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

JA2003N 电子分析天平,上海精密科学仪器有限公司;EM336 和面机,凯伍德有限公司;JMTD 168/140 压面机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;BPS-250CL 恒温恒湿干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 燕麦挂面干燥 使用恒温恒湿干燥箱对燕麦鲜面条进行干燥,鲜燕麦面条的制作参见刘丽宅等^[9]的方法,干燥操作采用三段变温变湿干燥工艺,具体参见王杰等^[20]的方法。预试验结果表明,影响燕麦挂面品质的三段变温变湿干燥工艺的主要因素为一段相对湿度、二段温度和二段相对湿度,本文中燕麦挂面的干燥试验方案如表 1 所示。

1.3.2 指标测定 参照 LS/T 3212-2014《挂面》方法测定最佳煮制时间、蒸煮损失和烹调吸水率;参照武亮等^[11]的方法进行质构特性测定,每组样品做 5 次平行试验;参照王杰等^[20]的方法进行抗弯曲特性测定,探头型号:A/SFR;测定速度:1 mm/s;参照 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》中的方法进行酸度和脂肪酸值的测定;用外接电能表测定燕麦挂面干燥过程中所消耗的电能,kW·h。

1.3.3 干燥系统中耦合因子的计算 干燥系统中耦合因子(温度和、积温、绝对水势积、绝对水势和)等耦合因子的计算公式分别见公式(1)~(5)。

$$SGT = \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$P_a = \sum_{i=1}^n P_{ai} \quad (3)$$

$$CP_a = \left(\sum_{i=1}^n P_{ai} \right) \cdot t_i \quad (4)$$

$$CT = \left(\sum_{i=1}^n T_i \right) \cdot t_i \quad (5)$$

式中,SGT——温度和,℃;T_i——第 i 段的温度,℃;P——绝对水势,kJ/kg;P_a——空气绝对水势和,kJ/kg;P_{ai}——第 i 段的空气绝对水势,kJ/kg;CP_a——空气绝对水势积,kJ/(kg·h);C_T——积温,℃·h;t_i——第 i 段的干燥时间,h;P_i——第 i 段的绝对水势,kJ/kg。

第 i 段的绝对水势计算方法见公式 (6) 和 (7)。

$$AH_i(\text{g/m}^3) = \ln(100 \times \exp \left(\frac{87.72 \times \lg(\text{RH}_a) + 0.9845 \times (1737.1 - \frac{474242}{273 + t_a}) - 270.57}{87.72} \right) \times 133.3) / 18 \quad (6)$$

$$P_i = RT_i \ln(\text{EAH}_i) \quad (7)$$

式中,EAH_i——温度 T_i 条件下的平衡绝对湿度,g/m³;RH_a——空气相对湿度,%;t_a——空气温度,℃;R——常数,0.46。

1.3.4 燕麦挂面品质指标与干燥系统中耦合因子的相关性分析 以燕麦挂面的干燥试验数据为基础,分别计算燕麦挂面的各品质指标与干燥系统中耦合因子间的相关关系。

1.3.5 燕麦挂面品质指标模型的建立 以表 1 中 1~17 的干燥试验的品质指标为因变量,以各耦合因子(温度和、空气绝对水势和、空气绝对水势积、积温)为自变量,分别对各品质指标进行多元线性回归,建立各品质指标的预测模型。以 18~25 试验的结果作为验证集,用于检验模型的效果。

1.4 数据分析

采用 Origin 8.5 进行绘图及模型拟合分析,SPSS 22.0 进行多元线性回归分析和统计分析,显著性水平取 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同的干燥过程对燕麦挂面品质的影响

不同干燥试验的结果见表 1,可以看出,不同的干燥工艺对燕麦挂面品质影响的变异系数大小次序为酸度、黏着性、最佳煮制时间、脂肪酸值、延展性、蒸煮损失、抗弯曲强度、硬度、咀嚼性、折断

表1 燕麦挂面干燥试验设计与结果

Table 1 Design and results of oat noodle drying experiments

编号	一段			二段			三段			最佳煮制时间/s	蒸煮损失/%	烹调吸水率/%	延展性/g·s ⁻¹	咀嚼性/g·s	黏着性/g·s	抗弯曲强度/g	折断面高/mm	酸度/mL· ⁻¹ (10g)	脂肪值/mL·(100g) ⁻¹	温度/°C	积温/°C·h	空气绝对水势和/kJ·kg ⁻¹	空气绝对水势积/kJ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	
	温度(A)/°C	相对湿度(B)/%	温度(C)/°C	相对湿度(D)/%	温度(E)/°C	相对湿度(F)/%	相对湿度																	
1	35	80	50	75	25	60	295.00	8.63	180.91	0.31	49.93	19.26	1.17	10.52	30.67	3.45	31.64	110.00	338.80	4 535.28	13 968.68			
2	25	90	40	65	25	60	280.00	8.20	183.97	0.32	49.08	19.47	1.10	10.74	30.98	3.11	29.77	90.00	299.70	4 276.67	14 241.32			
3	35	80	50	65	25	50	305.00	9.27	178.60	0.29	51.47	19.03	1.26	10.06	30.10	3.52	31.92	110.00	210.10	4 515.12	8 623.89			
4	35	90	40	75	25	50	255.00	7.75	187.82	0.33	47.31	20.11	0.92	11.46	31.88	3.21	29.83	100.00	391.00	4 403.39	17 217.27			
5	35	90	50	65	35	60	310.00	8.98	176.74	0.30	52.03	18.85	1.30	10.52	30.07	3.76	32.11	120.00	279.60	4 661.11	10 860.40			
6	35	90	40	75	35	50	275.00	7.89	188.42	0.33	46.62	20.08	0.93	11.32	31.56	3.22	30.13	110.00	412.50	4 530.85	16 990.69			
7	25	80	40	75	35	60	275.00	7.38	187.88	0.34	46.71	20.13	0.92	11.36	31.67	2.97	27.96	110.00	338.80	4 535.28	13 968.68			
8	25	80	50	75	35	50	295.00	8.72	181.10	0.31	49.86	19.31	1.17	10.61	30.71	3.57	33.51	110.00	331.10	4 523.45	13 615.58			
9	25	80	50	70	35	50	313.00	8.31	185.11	0.31	48.06	19.30	1.10	10.84	31.10	3.23	28.41	100.00	367.00	4 406.44	16 171.63			
10	25	80	50	70	35	50	314.50	8.33	184.96	0.31	48.09	19.25	1.11	10.82	31.06	3.26	28.50	110.00	276.10	4 518.98	11 342.64			
11	25	80	50	70	35	50	317.00	8.27	185.18	0.31	47.97	19.38	1.09	10.90	31.18	3.17	28.17	110.00	276.10	4 518.98	11 342.64			
12	25	80	40	60	35	50	306.00	8.11	185.69	0.32	47.64	19.64	1.03	11.14	31.47	2.94	27.42	110.00	276.10	4 518.98	11 342.64			
13	25	80	40	80	35	50	303.50	8.02	186.01	0.33	47.48	19.80	1.00	11.27	31.64	2.85	26.93	100.00	234.00	4 381.17	10 251.95			
14	25	80	50	70	35	50	312.50	8.35	184.81	0.31	48.13	19.21	1.11	10.79	31.03	3.29	28.60	100.00	434.00	4 399.23	19 092.65			
15	25	90	60	70	35	50	330.50	8.63	183.76	0.29	48.67	18.73	1.20	10.38	30.52	3.70	30.02	110.00	276.10	4 518.98	11 342.64			
16	25	80	60	80	35	50	328.00	8.55	183.98	0.30	48.53	18.87	1.18	10.49	30.66	3.60	29.57	120.00	220.80	4 654.15	8 563.64			
17	25	70	50	80	35	50	307.50	8.24	185.21	0.32	47.89	19.43	1.08	10.96	31.23	3.12	27.97	120.00	320.40	4 656.03	12 431.60			
18	25	80	50	70	35	50	320.00	8.41	184.67	0.30	48.24	19.15	1.13	10.71	30.92	3.38	28.85	110.00	330.00	4 519.65	13 558.95			
19	25	70	60	70	35	50	334.50	8.77	182.73	0.28	48.97	18.48	1.25	10.18	30.25	3.52	30.14	110.00	276.10	4 518.98	11 342.64			
20	25	90	40	70	35	50	290.00	7.85	185.36	0.34	47.12	20.11	0.95	11.51	31.95	2.54	26.11	120.00	180.00	4 639.13	6 958.70			
21	25	70	40	70	35	50	296.50	7.94	186.77	0.34	47.30	19.97	0.98	11.38	31.76	2.67	26.21	100.00	367.00	4 397.89	16 140.24			
22	25	90	50	80	35	50	310.00	8.19	185.33	0.32	47.81	19.51	1.05	11.02	31.32	3.07	28.25	100.00	300.00	4 382.87	13 148.61			
23	25	70	50	60	35	50	324.00	8.49	183.57	0.30	48.40	18.98	1.16	10.58	30.77	3.51	29.31	110.00	403.70	4 534.67	16 642.22			
24	25	80	60	60	35	50	335.00	8.89	182.86	0.27	49.21	18.27	1.29	10.01	30.03	4.10	31.23	110.00	165.00	4 501.02	6 751.53			
25	25	90	50	60	35	50	317.00	8.17	185.17	0.32	47.91	19.48	1.06	10.96	31.32	3.12	28.03	120.00	160.80	4 636.82	6 213.34			
										变异系数														
										0.06	0.05	0.01	0.06	0.03	0.03	0.10	0.04	0.02	0.11	0.06	0.07	0.25	0.02	0.28

距离、烹调吸水率,影响显著的品质指标有酸度、黏着性、最佳煮制时间、脂肪酸值、延展性和蒸煮损失。不同的干燥过程中的耦合因子的变异系数的大小次序为空气绝对水势积、积温、温度和、空气绝对水势和,变化显著的有空气绝对水势积、积温、温度和。

2.2 燕麦挂面的品质指标与耦合因子的相关性分析

燕麦挂面干燥系统中耦合因子与燕麦挂面的品质相关性分析结果见图 1。由图 1 可知,燕麦挂面的最佳煮制时间、蒸煮损失、烹调吸水率、硬度、延展性、咀嚼性、黏着性、抗弯曲强度、折断距离、酸度、脂肪酸值与干燥系统中耦合因子均呈极显著相关关系,各耦合因子均对燕麦挂面品质指标表现出较高的相关性,因此,利用耦合因子来分析并预测燕麦挂面品质指标具有一定可行性。

2.3 燕麦挂面品质指标与耦合因子间多元线性回归模型的建立

利用 SPSS 22.0 软件进行多元线性回归,分别得到燕麦挂面的最佳煮制时间(Y_1)、蒸煮损失(Y_2)、烹调吸水率(Y_3)、延展性(Y_4)、硬度(Y_5)、咀嚼性(Y_6)、黏着性(Y_7)、抗弯曲强度(Y_8)、折断距离(Y_9)、酸度(Y_{10})和脂肪酸值(Y_{11})与温度和(X_1)、绝对水势和(X_2)、绝对水势积(X_3)和积温(X_4)的多元线性回归方程:

$$Y_1 = 744.634 + 4.362X_1 - 0.200X_2 + 0.004X_3 - 0.193X_4 \quad (8)$$

$$Y_2 = 32.793 + 0.175X_1 - 0.01X_2 - 0.008X_4 \quad (9)$$

$$Y_3 = 152.334 - 0.451X_1 + 0.018X_2 - 0.001X_3 + 0.064X_4 \quad (10)$$

$$Y_4 = 3.650 + 0.014X_1 - 0.001004X_2 - 0.001X_4 \quad (11)$$

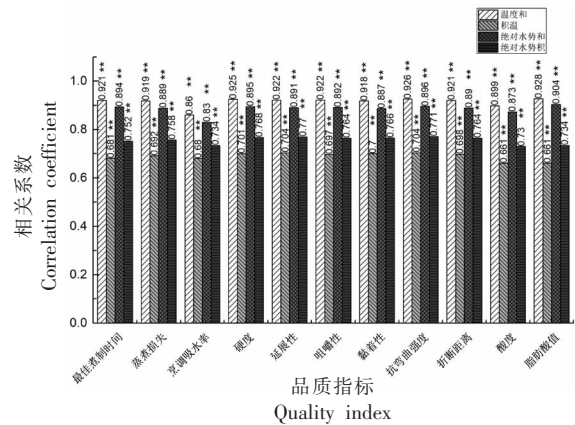
$$Y_5 = 92.972 + 0.329X_1 - 0.018X_2 - 0.016X_4 \quad (12)$$

$$Y_6 = -31.691 - 0.290X_1 + 0.016X_2 + 0.03X_4 \quad (13)$$

$$Y_7 = 9.734 + 0.049X_1 - 0.00297X_2 + 0.000066X_3 - 0.0042X_4 \quad (14)$$

$$Y_8 = -29.386 - 0.202X_1 + 0.013X_2 + 0.012X_4 \quad (15)$$

$$Y_9 = -28.239 - 0.326X_1 + 0.02X_2 + 0.015X_4 \quad (16)$$



注:“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著。

图 1 燕麦挂面干燥系统的多元耦合关系图

Fig.1 Multivariate coupling relationship diagram of oat noodles drying system

$$Y_{10} = 27.391 + 0.160X_1 - 0.009X_2 - 0.002X_4 \quad (17)$$

$$Y_{11} = 75.558 + 0.221X_1 - 0.0151X_2 + 0.0001X_3 - 0.005X_4 \quad (18)$$

表 2 为方差分析结果,采用决定系数 R^2 和 P 值对模型进行评价。由表可知,燕麦挂面各品质指标的回归模型均显著 ($P < 0.01$),最佳煮制时间、蒸煮损失、烹调吸水率、延展性、硬度、咀嚼性、黏着性、抗弯曲强度、折断距离、酸度和脂肪酸值的决定系数 R^2 分别为 0.911, 0.937, 0.873, 0.944, 0.949, 0.943, 0.941, 0.952, 0.943, 0.870 和 0.914,说明建立的回归模型可靠,预测精度较高,可用于燕麦挂面分段变温变湿干燥品质的分析和预测。

2.4 燕麦挂面品质指标预测模型的验证

图 2 为建立的模型对各品质指标的预测结果,由图 2 可知,最佳煮制时间、蒸煮损失、烹调吸水率、延展性、硬度、咀嚼性、黏着性、抗弯曲强度、折断距离、酸度和脂肪酸值的预测决定系数 R^2 分别为 0.8075, 0.9981, 0.8485, 0.8354, 0.8118, 0.8194, 0.8030, 0.8416, 0.8838, 0.8100 和 0.8888,建立的模型能用于燕麦挂面品质指标的预测。

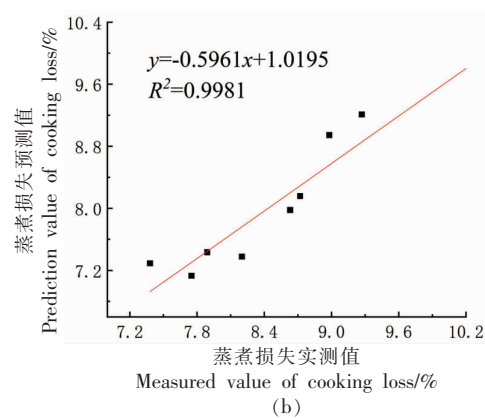
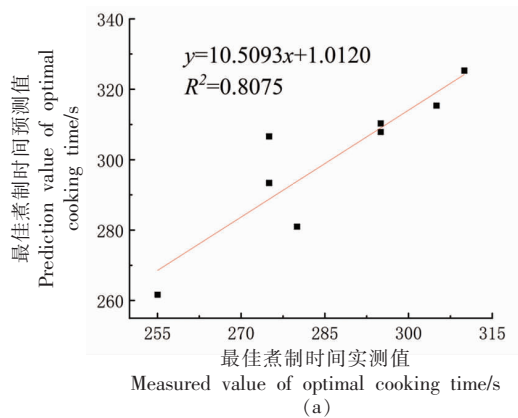
3 结论

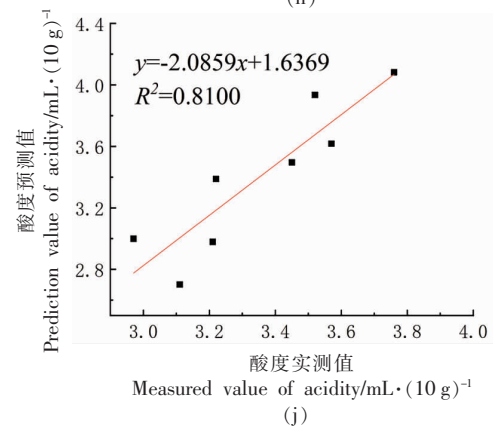
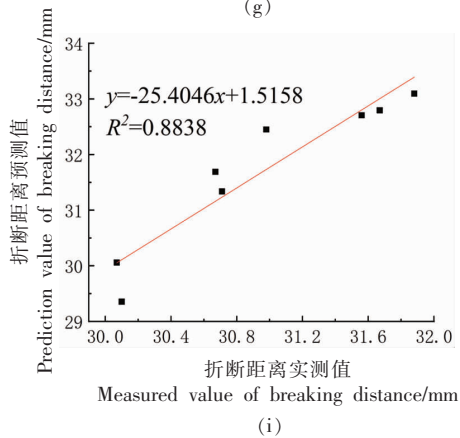
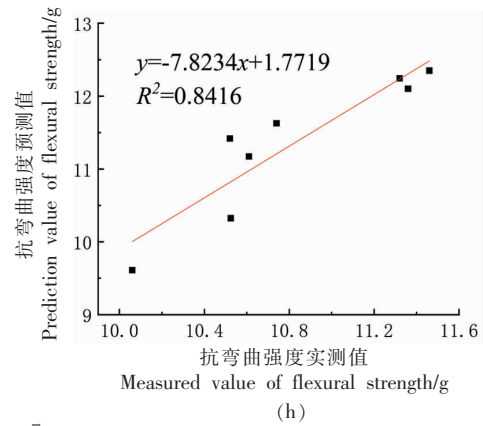
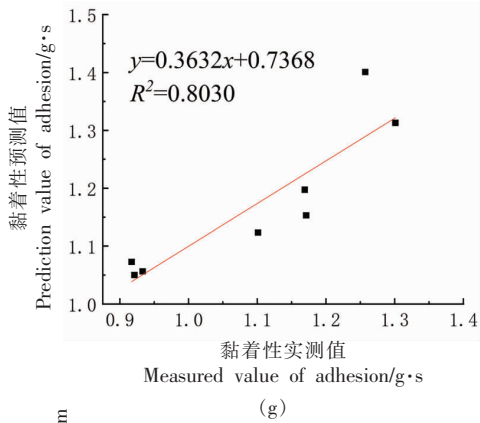
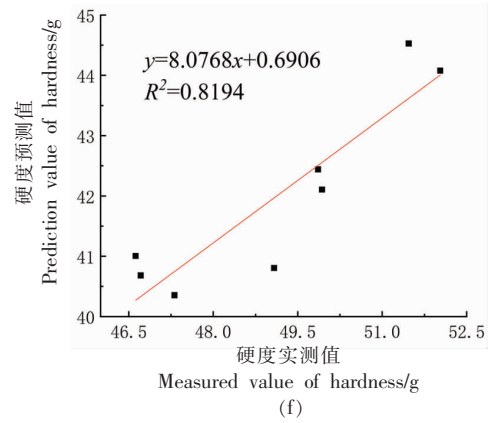
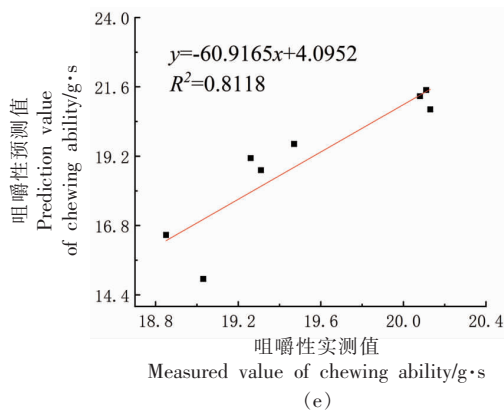
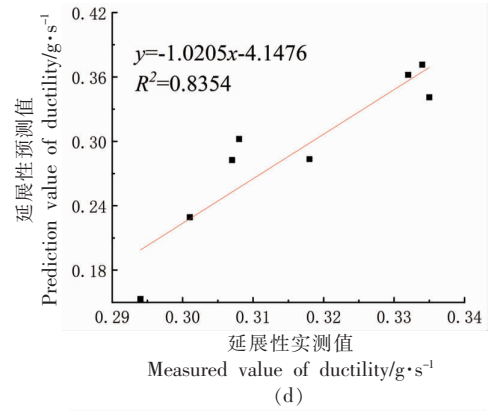
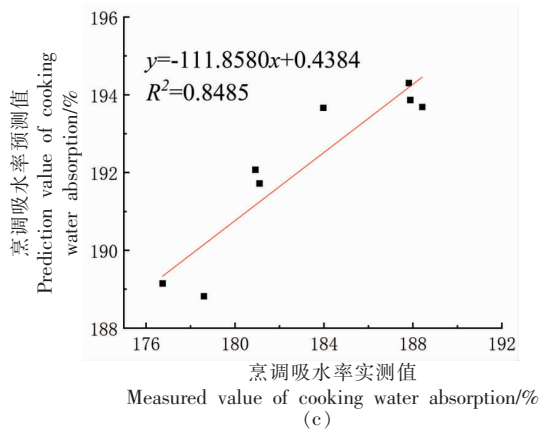
燕麦挂面各品质指标与干燥系统中的耦合因子均呈极显著相关,运用多元线性回归的方法建立燕麦挂面品质指标与干燥耦合因子的数学模

表2 方差分析结果

Table 2 Analysis of variance

指标	差异源	平方和	df	均方	F	Sig.	决定系数 R^2
最佳煮制时间	回归	2 332.545	4	1 166.272	67.466	0.000	0.911
	残差	242.014	12	17.287			
	总计	2 574.559	16				
蒸煮损失	回归	1.164	4	0.582	83.196	0.000	0.937
	残差	0.098	12	0.007			
	总计	1.262	16				
烹调吸水率	回归	15.235	4	7.617	31.463	0.000	0.873
	残差	3.389	12	0.242			
	总计	18.642	16				
延展性	回归	0.005	4	0.002	92.839	0.000	0.944
	残差	0.000	12	0.000			
	总计	0.005	16				
硬度	回归	4.661	4	2.331	101.182	0.000	0.949
	残差	0.322	12	0.023			
	总计	4.984	16				
咀嚼性	回归	3.649	4	1.825	90.366	0.000	0.943
	残差	0.283	12	0.020			
	总计	3.932	16				
黏着性	回归	0.129	4	0.064	88.325	0.000	0.941
	残差	0.010	12	0.001			
	总计	0.139	16				
抗弯曲强度	回归	2.458	4	1.229	106.477	0.000	0.952
	残差	0.162	12	0.012			
	总计	2.619	16				
折断距离	回归	3.938	4	1.969	91.882	0.000	0.943
	残差	0.300	12	0.021			
	总计	4.238	16				
酸度	回归	2.059	4	1.029	45.685	0.000	0.870
	残差	0.315	12	0.023			
	总计	2.374	16				
脂肪酸值	回归	26.913	4	13.456	69.600	0.000	0.914
	残差	2.707	12	0.193			
	总计	29.619	16				





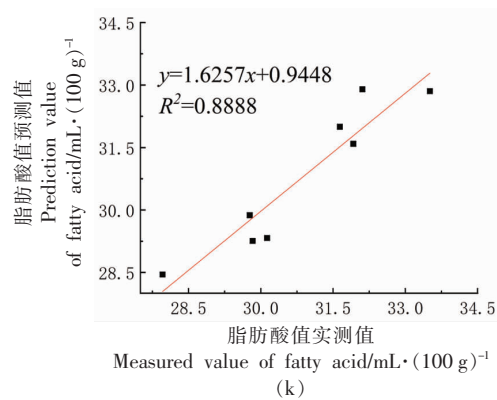


图2 燕麦挂面品质指标的预测值和实测值的相关性

Fig.2 Correlation between predicted value and measured value of quality indicators of oat noodles

型,可以较好地预测燕麦挂面的最佳煮制时间、蒸煮损失、烹调吸水率、延展性、硬度、咀嚼性、黏着性、抗弯曲强度、折断距离、酸度和脂肪酸值等指标,且均具有较好的验证结果,预测决定系数分别为 0.8075,0.9981,0.8485,0.8354,0.8118,0.8194,0.8030,0.8416,0.8838,0.8100 和 0.8888,模型预测效果好,运用干燥耦合因子可以对燕麦挂面的品质指标进行预测。

参 考 文 献

- [1] LIU R, SOLAH A V, WEI Y M, et al. Sensory evaluation of Chinese white salted noodles and steamed bread made with Australian and Chinese wheat flour[J]. Cereal Chemistry, 2019, 96(1): 66-75.
- [2] 高凤, 郭晓娜, 朱科学. 面粉特性对燕麦挂面品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(3): 46-54.
GAO F, GUO X N, ZHU K X. Effects of wheat flour characteristics on quality of oat noodles [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(3): 46-54.
- [3] 姚斌, 张绪坤, 温祥东, 等. 国内外农产品变温干燥研究进展[J]. 食品科技, 2015, 40(7): 94-98.
YAO B, ZHANG X K, WEN X D, et al. Developments of variable temperature drying technology for agricultural products at home and abroad[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(7): 94-98.
- [4] 王喜庆, 郭天时, 郭丽, 等. 杂粮面条的研究进展与展望[J]. 武汉轻工大学学报, 2021, 40(6): 20-26.
- WANG X Q, GUO T S, GUO L, et al. Research progress and prospect on cereals noodles[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2021, 40(6): 20-26.
- [5] SALLA H, LOTTA N, NATALIA R S, et al. Effect of oat β -glucan of different molecular weights on fecal bile acids, urine metabolites and pressure in the digestive tract-A human cross over trial [J]. Food Chemistry, 2020, 342(4): 128219.
- [6] TOSH S M. Review of human studies investigating the post-prandial blood-glucose lowering ability of oat and barley food products[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2013, 67(4): 310.
- [7] ZREMB A M M S, GOW F I, DRUMMNOD S, et al. Effects of oat β -glucan consumption at breakfast on ad libitum eating, appetite, glycemia, insulinemia and GLP-1 concentrations in healthy subjects[J]. Appetite, 2018, 128(1): 197-204.
- [8] 田思萌, 孔祥菊. 燕麦 β -葡聚糖的分子结构特点及其生物学功能研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(12): 180-183.
TIAN S M, KONG X J. Research progress on molecular structure and biological functions of oat β -glucan[J]. China Condiment, 2021, 46(12): 180-183.
- [9] 任长忠, 闫金婷, 董锐, 等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 438-446.
REN C Z, YAN J T, DONG R, et al. Research progress on oat nutrients, functional properties and related products[J]. Science and Technology of Food

- Industry, 2022, 43(12): 438-446.
- [10] 于晓磊, 王振华, 张影全, 等. 加工工艺对挂面干燥及产品特性的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(10): 144-154.
- YU X L, WANG Z H, ZHANG Y Q, et al. Effects of processing technology on the drying characteristics and quality properties of Chinese dried noodles[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(10): 144-154.
- [11] 武亮, 刘锐, 张波, 等. 干燥条件对挂面干燥脱水过程的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 191-197, 295.
- WU L, LIU R, ZHANG B, et al. Impact of the conditions of the drying medium on the dehydration of fine-dried noodle[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(9): 191-197, 295.
- [12] ZHANG Y Q, HUI Y, WANG Y, et al. Effects of drying temperature and relative humidity on quality properties of Chinese dried noodles[J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020: 1-9.
- [13] 惠滢, 张影全, 张波, 等. 高温、高湿干燥工艺对挂面产品特性的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(10): 117-125.
- HUI Y, ZHANG Y Q, ZHANG B, et al. Effects of high temperature and relative humidity drying technology on the product properties of Chinese dried noodles[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(10): 117-125.
- [14] 高飞, 陈洁, 王春, 等. 干燥风速对挂面品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(6): 17-20.
- GAO F, CHEN J, WANG C, et al. Influence of wind speed on the quality of noodle drying progress[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 30(6): 17-20.
- [15] 王振华, 张波, 张影全, 等. 面条干燥过程的湿热传递机理研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 310-314.
- WANG Z H, ZHANG B, ZHANG Y Q, et al. Review of moisture and heat transfer mechanism during drying progress of noodles[J]. Transactiona of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 310-314.
- [16] 巩艳菲, 代美瑶, 李芳, 等. 面制品干燥过程中水分迁移机制及影响因素分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 195-202.
- GONG Y F, DAI M Y, LI F, et al. A review on moisture migration mechanism and influencing factors in wheat flour products' drying process[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 195-202.
- [17] 吴文福, 陈俊轶, 成荣敏, 等. 玉米籽粒变温变湿干燥后不饱和脂肪酸与干燥系统的耦合关系[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 328-333.
- WU W F, CHEN J Y, CHENG R M, et al. Coupling relationship between content of unsaturated fatty acid and drying system of corn grain after variable temperature and humidity drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 328-333.
- [18] 陈俊轶. 基于耦合因子的变温变湿干燥谷物品质特性及窗口控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- CHEN J Y. Research on quality characteristics and windows-control method of variable temperature and humidity grain drying process by coupling factors[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [19] 刘丽宅, 谢晶, 卢曼曼, 等. 改良剂对燕麦面条品质影响的研究[J]. 粮食加工, 2016, 41(4): 39-43.
- LIU L Z, XIE J, LU M M, et al. Amendments on quality of oat noodle[J]. Grain Processing, 2016, 41(4): 39-43.
- [20] 王杰, 张影全, 刘锐, 等. 挂面干燥工艺研究及其关键参数分析[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 88-93.
- WANG J, ZHANG Y Q, LIU R, et al. The drying process and its key parameters of Chinese dried noodle[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(10): 88-93.

Research on the Relationship between Oat Noodles Quality and the Coupling Factor in Drying Systems

Tian Yuan, Liu Zhenrong, Hu Xinzhong, Zhao Wuqi*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract A multivariate linear regression model between the coupling factor and the quality index of oat noodles in the drying system was established, and the drying coupling factor predicted the quality index of oat noodles. Taking the quality index of oat noodles as the dependent variables, and the coupling factors (temperature, air absolute water potential, air absolute water potential and accumulated temperature) as the independent variables, through multiple linear regression, the prediction model of each quality index of oat noodles was established, evaluated and verified. The results showed that the established quality index regression models of optimal cooking time, cooking loss, cooking water absorption, ductility, hardness, chewability, adhesion, flexural strength, breaking distance, acidity and fatty acid value, were significant ($P < 0.01$), and the model's coefficients R^2 for quality index prediction were 0.8075, 0.9981, 0.8485, 0.8354, 0.8118, 0.8194, 0.8030, 0.8416, 0.8838, 0.8100 and 0.8888, respectively. The drying coupling factor can be used to predict the quality index of oat noodles, and the study provided a theoretical basis for the quality control of oat noodles in the drying process.

Keywords oat noodles; drying; coupling factor; predictive model