

生鲜面条水分状态与产品质量特性关系研究

冯文翰¹, 严军辉³, 张影全², 汪江华³, 张晓科¹, 魏益民^{2,3}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京海淀 100193; 3. 河北金沙河集团产业技术研究院/河北省谷物食品加工技术创新中心, 河北邢台 0541003)

摘要: 水分状态与面制品质量关系密切。为了解生鲜面条中水分状态与面条质量特性的关系, 本研究以 12 个小麦品种为原料, 测定小麦粉质量特性、生鲜面条及其煮熟后的质构、煮制特性和感官质量; 采用低场核磁共振仪测定生鲜面条和煮熟面条的水分状态, 并分析被测指标间相关性。结果表明, 生鲜面条的核磁共振参数 T_{23} 和 A_{23} 与拉伸能量、拉伸阻力和最大拉伸阻力均呈显著正相关 ($P < 0.05$), A_{21} 和 A_{22} 与吸水率、谷值黏度和回升值均呈显著正相关; 煮熟面条的 T_{23} 与蛋白质含量、峰值黏度和最终黏度均呈显著负相关。生鲜面条的 T_{23} 与质构粘性和断裂距离均呈显著正相关, A_{23} 与质构粘性和断裂力均呈显著负相关; 熟制面条的 T_{23} 与质构弹性和咀嚼性均呈显著负相关。生鲜面条的 T_{23} 与煮制吸水率均呈显著负相关, A_{23} 与感官弹性评分均呈显著负相关; 熟制面条的 T_{21} 与干物质损失率均呈显著负相关, T_{22} 与感官弹性评分均呈显著负相关, A_{23} 与干物质损失率均呈显著负相关。综上, 水分状态参数可以较好地反映小麦粉的质量特性和生鲜面条的质量特性, 本研究结果可为面条专用小麦品种的选育、鉴定和生鲜面条专用粉开发提供参考。

关键词: 小麦粉; 面条; 水分状态; 质量特性; 相关性

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)06-0764-10

Study on the Relationship between Water State and Product Quality Characteristics of Fresh Noodles

FENG Wenhan¹, YAN Junhui³, ZHANG Yingquan², WANG Jianghua³, ZHANG Xiaoke¹, WEI Yimin^{2,3}

(1. College of agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agriculture Sciences / Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 3. Cereal Industrial Technology Academy, Hebei Jinshabe Group/ Hebei Innovation Center of Cereal Food Processing Technology, Xingtai, Hebei 054100, China)

Abstract: The water state is closely related to the quality of the flour product, but the relationship between water state and the quality characteristics of noodles is unclear. Additionally, the use of water state as a research method for noodle quality characteristics has rarely been reported in wheat quality breeding. This study used 12 wheat varieties as raw materials, measured the quality characteristics of wheat flour, analyzed the texture, cooking characteristics, and sensory properties of the noodles, and used low-field nuclear magnetic resonance to measure the water state of fresh and cooked noodles. Statistical analysis showed that there were significant differences in the water state of noodles made from different wheat varieties ($P < 0.05$). The T_{23} and A_{23} of fresh noodles are significantly correlated with the tensile energy, tensile resistance, and maximum tensile resistance, while A_{21} and A_{22} are significantly correlated with the water absorption rate, trough viscosity, and setback value; the T_{23} of cooked noodles is significantly negatively correlated with the protein content, peak viscosity, and final

viscosity($P < 0.05$). The T_{23} of fresh noodles is significantly correlated with textural adhesiveness and fracture distance, while A_{23} is significantly negatively correlated with textural adhesiveness and fracture force; the T_{23} of cooked noodles is significantly negatively correlated with textural elasticity and chewiness. The T_{23} of fresh noodles is significantly negatively correlated with the boiled water absorption rate, and A_{23} is significantly negatively correlated with the sensory elasticity score; the T_{21} of cooked noodles is significantly negatively correlated with the dry matter loss rate; the T_{22} is significantly negatively correlated with the sensory elasticity score, and the A_{23} is significantly negatively correlated with the dry matter loss rate. The results showed that the water state parameters can better reflect the quality characteristics of wheat flour and the quality characteristics of the fresh noodles. This result had important reference value for the breeding and identification of wheat varieties special for noodles and the development of special flour for fresh noodles.

Keywords: Wheat flour; Fresh noodles; Water status; Quality characteristics; Correlation

水分状态与面制品的质量特性密切相关^[1-3],但有关面条水分状态参数与其质量特性及小麦粉质量特性的关系还不明确。

低场核磁共振参数弛豫时间(T_2)可以反映面制品中水分与其他物质的结合强度,其对应峰面积的比例(A_2)可反映不同结合强度水分的相对占比,二者共同表征面制品中水分状态^[4-6]。多回波序列(CPMG)是其最常用的测试方法^[7],主要反映样品-水系统中水的质子群体^[8]。面制品的 T_2 图谱存在 3 个质子峰,分别代表强结合水(T_{21})、弱结合水(T_{22})和自由水(T_{23})^[3,9-10]。衡量面条质量最可靠的依据是感官评价^[11],但感官评价受限于品评员的喜好,人为因素影响较大。以仪器参数(如质构仪、色差计等)反映面条质量则更为客观,重现性较好^[12]。此外,面条煮制特性也是衡量面条质量的重要指标,如煮制吸水率和干物质损失率等^[13]。研究发现,水分状态与面制品的质量特性关系密切,如 Engelsen 等^[14]认为,面包的质构参数与弛豫数据之间存在高度相关性;Li 等^[1]报道, T_{21} 、 T_{22} 与面条硬度呈显著负相关,与面条弹性呈显著正相关。但生鲜面条与熟制面条间水分状态参数的相关性及其与小麦粉质量的关系还未见报道。

本研究以 12 个小麦品种为材料,检测其面粉质量相关指标、生鲜面条及煮熟面条的水分状态和质量性状,并分析各种参数之间的相关性,以期为生鲜面条专用小麦品种的选育、鉴定和专用粉开发及通过水分状态参数预测面制品质量提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料与amp;设计

试验材料为 2021 年大田种植在陕西省关中

武功县贞元镇的 10 个小麦品种,包括西农 822、西农 20、小偃 22、伟隆 169、西农 979、武农 986、百农 207、西农 805、西农 511、中麦 578;优质对照为新麦 26、新麦 45。每个品种取 4 kg 籽粒,用磨粉机(BUHLER MLU-202)制粉后,用于面条加工及相关指标测定,出粉率约为 70 %。

1.2 小麦粉测定指标与amp;方法

用瑞典 Perten IM9500 型近红外(NIR)谷物品质分析仪测定蛋白质含量;用面筋仪(Perten GM220)测定湿面筋含量;用面筋指数仪(Perten GM2015)测定面筋指数;用肖邦破损淀粉仪(SDMATIC)测定破损淀粉含量;采用瑞典 Perten 降落数值仪(Perten FN1000)测定面粉的降落数值;用德国布拉本德粉质仪(FarinographR-TS816100)测定面粉的粉质参数;用德国布拉本德拉伸仪(Extensograph-E)测定面粉的拉伸参数;德国布拉本德黏度仪(Viscograph-E)测定黏度参数。

1.3 面条制备

每个样品按 14.5% 含水率取 150.00 g 面粉,以面絮含水率最终为 34 % 计算和面加水量。取 1.5 g 食盐溶解于 44.3 mL 蒸馏水用于和面,采用针式和面机[JHMZ 200,东孚久恒,主轴转速(95 ± 2) $r \cdot \text{min}^{-1}$]和面 4 min 形成面絮,调节面条机(JMTD 168/140,东孚久恒)辊间距为 2.5 mm,压延面絮两次形成面带。25 °C 醒发面带 30 min 后,分别调整面条机辊间距为 2.1 mm、1.7 mm、1.3 mm、1 mm 压延面带各一次,最终调整辊间距为 0.7 mm 左右压延,面带最终厚(1.10 ± 0.05)mm,3 mm 规格切面刀切条,得生鲜面条。

1.4 面条水分状态测定

取生鲜面条 1.00 g,使用 PTFE 薄膜包裹,

用于水分状态测定。用1 500 W电磁炉加热1 L蒸馏水至沸腾,取10.0 g生鲜面条放入水中,保持水微沸,煮制4 min;取煮熟面条1.00 g,使用PTFE薄膜包裹,用于水分状态测定。

采用0.5 T永磁体的核磁共振成像系统(NMI20-030H-I;苏州纽迈)和多回波(CPMG)序列测量横向弛豫时间(T_2)。回波时间(TE)设置为0.100 ms,采样间隔时间(TW)为500 ms;扫描频率(SF)21 MHz,采样点数(TD)为30 004,回波数(NECH)为3 000。对试验结果进行反演(反演方法:SIRT;迭代次数:100 000)得峰值(T_2)及其对应峰面积(A_2)占比。每个样品重复3次。

1.5 面条质构特性分析

采用TA.XT.Plus型质构仪从1.3所制生鲜面条中随机抽取4根,截成长度18 cm,用1 500 W电磁炉加热1 L蒸馏水至沸腾,放入面条,保持水微沸,煮制4 min后,捞出面条用凉水(4 ℃)冲洗30 s。4根煮熟面条并排放置于测定平台上,选用TPA测定模式,采用ALKB-F型号探头,测定前速度 $0.8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,测定时速度 $0.8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,测定后速度 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,压缩比70%,2次压缩停留间隔1 s,起点感应力(触发值)为5 g。检测2次,每次5个重复。

熟面条拉伸特性检测:选用熟面条拉伸测试模式(拉伸两次),采用A/SPR附件,测定前速度 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,测定中速度 $3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,测定后速度 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,感应力(触发值)为5 g,第1次拉伸距离30.00 mm,第2次拉伸距离150.00 mm。检测3次,每次3个重复。

1.6 生鲜面条的感官评价

将1.3中生鲜面条用1.4中煮制方法煮熟后,过凉水(4 ℃)30 s,由经过培训的专业感官评价小组(7人)做煮熟面条的感官评价。剔除评价偏离度最大的结果。采用表1的评分项目和标准评分。

1.7 生鲜面条煮制质量相关指标测定

称取10 g生鲜面条(记为 M_0),切出3根10 cm长度面条样品用于测定煮制膨胀率。用电磁炉将不锈钢盆(M_1)中盛放的500 mL蒸馏水加热至沸腾,放入面条保持水微沸,煮制4 min后捞出,用凉水冲洗10 s,待表面的水分沥干,称其质量(M_2),以厚度计、游标卡尺和直尺测量面条煮制前、后的厚度、宽度和长度,计算生鲜面条的体积($V_1 = \text{长}\times\text{宽}\times\text{厚}$)和熟面条的体积($V_2 = \text{长}\times\text{宽}\times\text{厚}$),所留面汤继续加热蒸发近干,在130 ℃烘箱内烘至恒重(M_3)。计算下列指标:

$$\text{煮制吸水率}(A) = \frac{M_2 - M_0}{M_0} \times 100\%$$

$$\text{干物质损失率}(L) = \frac{M_3 - M_1}{M_0 \times (1 - w)} \times 100\%$$

$$\text{煮制膨胀率}(E) = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\%$$

式中 w 为生鲜面条含水率。

1.8 数据分析

数据以平均值±标准差(SD)表示。用SPSS 27做单因素方差分析(ANOVA)和显著性检验(Duncan法);采用Origin 2021进行正态性检验和相关分析并做图(数据符合正态分布采用pearson法,不符合正态分布用Spearman法)。

表1 鲜面条感官评分项目和标准

Table 1 Sensory score items and standards of fresh noodles

项目 Item	总分 Score	评分细则 Scoring rules
色泽 Color	20	乳白色或乳黄色,颜色光亮(20~17);白色、亮度一般(16~10);色泽发灰、发暗(9~1)。Milky white/milky yellow with lustrous appearance(20-17); White with dull tone(16-10); Grayish or dark color(9-1).
外观 Appearance	10	光滑、规则(10~9);较光滑、规则(8~7);有轻微起泡(6~5);起泡严重或断条(4~1)。Smooth and regular texture(10-9); Fairly smooth with minor irregularities(8-7); Slight blistering or uneven surface(6-5); Severe blistering or broken strands(4-1).
硬度 Hardness	20	硬度适中(20~16);较硬或较软(15~10);过硬或过软(9~1)。Moderate firmness(20-16); Slightly hard or soft(15-10); Extremely hard or soft(9-1).
粘性 Stickiness	15	爽口不粘(15~13);稍粘(12~10);较粘(9~6);很粘、黏筷子(5~1)。Non-sticky and refreshing(15-13); Slightly sticky(12-10); Moderately sticky(9-6); Extremely sticky(sticks to chopsticks)(5-1).
弹性 Elasticity	25	弹性很好(25~21);弹性较好(20~16);弹性一般(15~11);弹性特差或没有弹性(10~1)。Excellent springiness(25-21); Good elasticity(20-16); Moderate elasticity(15-11); No elasticity(10-1).
光滑性 Smoothness	5	非常光滑(5);光滑(4);较光滑(3);粗糙(1~2)。Extremely smooth(5); Smooth(4); Fairly smooth(3); Coarse texture(1-2).
食味 Flavor	5	麦香浓郁(5);麦香味较浓(4);略有麦香味(3);基本无异味(2);霉味、异味(1)。Strong wheat aroma(5); Moderate wheat flavor(4); Slight wheat scent(3); No distinct odor(2); Musty or off-flavor(1).

2 结果与分析

2.1 小麦粉的质量特性

对供试小麦粉质量特性进行正态分布检验发现,蛋白质含量、湿面筋含量、降落数值、破损淀粉含量、吸水率、稳定时间、拉伸能量、拉伸阻力、延伸性、最大拉伸阻力、糊化温度、峰值黏度和最终黏度均呈正态分布;面筋指数、谷值黏度、崩解值和回升值均呈非正态分布。

对 12 个小麦品种面粉质量特性的分析结果(表 2)表明,被测参数在品种间存在极显著差异($P < 0.01$),其中稳定时间、拉伸能量、拉伸阻力、最大拉伸阻力和崩解值的变异系数均较大($> 40\%$),面筋指数、峰值黏度、谷值黏度和最终黏度的变异系数介于 40% 和 20% 之间,其余参数的变异系数均小于 20% 。

2.2 小麦面条的水分状态分析

试验小麦品种制作面条的水分状态参数的正态性检验结果表明,生鲜面条的 T_{21} 、 T_{23} 、 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 均呈正态分布, T_{22} 呈非正态分布;煮熟面条的 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 、 A_{21} 、 A_{22} 、 $A_{21} + A_{22}$ 和 A_{23} 均呈正态分布。

生鲜面条的水分状态参数的方差分析结果(表 3)表明,生鲜面条的水分弛豫时间 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 和水分状态比例 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 在品种间均存在显著差异($P < 0.05$);其中, T_{21} 和 T_{23} 、 A_{21} 和 A_{23} 的变异系数较大($> 10.00\%$)。

煮熟面条的水分状态参数的方差分析结果(表 4)表明,水分弛豫时间 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 和水分状态比例 A_{21} 、 A_{22} 、 $A_{21} + A_{22}$ 、 A_{23} 在品种间均存在显著差异($P < 0.05$)。其中, T_{21} 、 T_{22} 、 A_{21} 、 A_{22} 和 $A_{21} + A_{22}$ 的变异系数较大($> 10.00\%$), T_{21} 的变异系数高达 47.64% 。 T_{21} 峰与 T_{22} 峰出现交叠,可能由于在煮熟后含水量较高,两个不同结构域之间水分的扩散交换速率高于其固有弛豫速率,因此不能在 NMR 弛豫图谱中完全区分出两种不同结合强度的水的峰值时间和其对应比例^[15]。

2.3 小麦煮熟面条的质量特性分析

面条质量特性参数的正态性检验结果表明,质构特性参数中,硬度、粘性、弹性、咀嚼性和断裂力均呈正态分布,断裂距离呈非正态分布;感官质量和煮制特性参数中,色泽评分、硬度评分、黏性评分、弹性评分、总评分、煮制吸水率、干物质损失率和煮制膨胀率均呈正态分布。

表 2 小麦粉质量特性
Table 2 Quality characteristics of wheat flour

质量特性 Quality characteristics	参数 Parameter	平均值 Average	变化范围 Variation range	极差 Range	F 值 F value	变异系数 Coefficient of variation/%	标准差 Standard deviation
理化特性参数 Physico-chemical characteristics	蛋白质含量 Protein content/%	12.33	10.87~13.90	3.03	272.91**	7.88	0.97
	湿面筋含量 Wet gluten content/%	32.28	27.72~37.35	9.64	46.62**	9.58	3.09
	面筋指数 Gluten index/%	74.71	38.98~98.40	59.42	124.34**	28.56	21.34
	降落数值 Falling number/s	406.79	340.50~492.50	152.00	28.47**	10.74	43.70
	破损淀粉含量 Damaged starch/%	25.71	22.98~29.35	6.37	50.58**	8.13	2.09
流变特性参数 Rheological characteristics	吸水率 Water absorption/%	63.97	58.15~69.05	10.90	996.80**	5.70	3.65
	稳定时间 Dough stability/min	11.77	1.87~24.74	22.87	84.35**	60.04	7.07
	拉伸能量 Energy/cm ²	99.57	30.90~175.75	144.85	54.88**	49.52	49.30
	拉伸阻力 Resistance/BU	378.31	120.00~677.75	557.75	98.80**	46.46	175.78
	延伸性 Extensibility/mm	146.50	118.80~168.05	49.25	12.17**	8.73	12.79
	最大拉伸阻力 Maximum/BU	520.25	127.90~982.65	854.75	84.62**	53.02	275.83
黏度特性参数 Viscosity characteristics	糊化温度 Pasting temperature/°C	58.60	57.15~60.33	3.18	8.96**	1.63	0.95
	峰值黏度 Peak viscosity/BU	1 289.29	781.33~2 080.67	1 299.33	255.90**	30.51	393.33
	谷值黏度 Trough viscosity/BU	912.21	512.00~1 218.00	706.00	249.84**	31.31	285.62
	最终黏度 Final viscosity/BU	1 885.60	1 235.67~2 304.5	1 068.83	235.45**	21.09	397.73
	崩解值 Breakdown/BU	377.08	254.00~936.33	682.33	143.71**	49.70	187.40
	回升值 Setback/BU	890.86	609.67~1 046.5	436.83	123.96**	15.85	141.20

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

表 3 生鲜面条的水分状态
Table 3 Water status of fresh noodles

品种 Variety	水分弛豫时间 T_2 /ms			水分状态比例 A_2 /%		
	T_{21}	T_{22}	T_{23}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
西农 822 Xinong 822	0.16±0.02f	5.70±0.27c	182.00±29.39bc	20.63±0.67b	78.75±0.67e	0.62±0.08cde
西农 20 Xinong 20	0.18±0.02def	6.01±0.00b	202.03±25.42b	20.48±0.95b	78.94±0.98de	0.57±0.03de
小偃 22 Xiaoyan 22	0.20±0.00cde	6.01±0.00b	171.06±8.10bc	17.69±0.58d	81.48±0.59c	0.83±0.02a
伟隆 169 Weilong 169	0.26±0.02a	6.01±0.00b	190.57±8.79bc	14.18±1.19f	85.18±1.17a	0.63±0.02cd
西农 979 Xinong 979	0.18±0.01def	6.01±0.00b	193.04±38.37bc	21.56±0.20ab	77.89±0.20ef	0.55±0.02de
武农 986 Wunong 986	0.18±0.02def	6.01±0.00b	196.07±15.87b	20.79±0.16b	78.64±0.21e	0.57±0.05de
百农 207 Bainong 207	0.24±0.01ab	6.18±0.29b	180.81±14.63bc	16.82±0.68de	82.47±0.66bc	0.71±0.05b
西农 511 Xinong 511	0.18±0.02def	6.01±0.00b	180.81±14.63bc	19.35±0.45c	79.95±0.40d	0.70±0.05bc
西农 805 Xinong 805	0.21±0.02cd	5.54±0.00c	151.40±30.09c	16.21±0.21e	83.04±0.15b	0.76±0.06b
中麦 578 Zhongmai 578	0.26±0.01a	6.01±0.00b	212.15±0.00b	14.89±0.67f	84.56±0.66a	0.55±0.02e
新麦 26 Xinmai 26	0.22±0.02bc	6.88±0.32a	264.62±32.04a	20.61±0.19b	78.82±0.20e	0.57±0.03de
新麦 45 Xinmai 45	0.17±0.01ef	6.01±0.00b	206.64±9.53b	22.07±0.75a	77.37±0.73f	0.56±0.03de
平均值 AVG	0.20±0.04	6.03±0.32	194.27±27.62	18.77±2.71	80.59±2.67	0.64±0.09
极差 R	0.10	1.34	113.22	7.89	7.81	0.28
变异系数 CV/%	17.60	5.24	14.22	14.41	3.31	14.78

同列数值后不同字母表示品种间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different varieties at 0.05 level. The same in the following tables.

表 4 煮熟面条的水分状态
Table 4 Water status of boiled fresh noodles

小麦品种 Wheat variety	水分弛豫时间 T_2 /ms			水分状态比例 A_2 /%			
	T_{21}	T_{22}	T_{23}	A_{21}	A_{22}	$A_{21}+A_{22}$	A_{23}
西农 822 Xinong 822	0.29±0.05de	2.04±0.09b	46.81±2.22bc	6.35±0.63a	9.96±0.21c	16.31±0.44b	83.69±0.44e
西农 20 Xinong 20	0.33±0.00d	1.65±0.00d	44.35±2.04cde	5.73±0.84ab	10.15±0.99c	15.96±0.20b	84.04±0.20e
小偃 22 Xiaoyan 22	0.49±0.00c	1.93±0.00bc	45.53±0.00bcd	5.02±0.26bc	8.87±0.13de	13.81±0.18e	86.19±0.18b
伟隆 169 Weilong 169	0.58±0.05b	2.04±0.09b	45.53±0.00bcd	5.50±1.15ab	8.06±1.37e	13.53±0.22ef	86.47±0.22b
西农 979 Xinong 979	0.16±0.00g	1.74±0.08cd	48.09±2.22ab	3.24±0.00d	12.76±0.00a	14.60±0.25d	85.58±0.12c
武农 986 Wunong 986	—	1.65±0.13d	45.53±0.00bcd	—	—	15.16±0.18c	84.85±0.18d
百农 207 Bainong 207	—	2.40±0.11a	49.37±0.00a	—	—	13.23±0.07f	87.06±0.12a
西农 511 Xinong 511	0.20±0.00fg	1.88±0.09bc	45.53±0.00bcd	6.24±0.22a	11.54±0.34b	17.56±0.15a	82.44±0.15f
西农 805 Xinong 805	0.47±0.10c	2.28±0.18a	45.53±0.00bcd	4.31±0.30c	9.31±0.73cd	13.62±0.44ef	86.38±0.43b
中麦 578 Zhongmai 578	0.68±0.06a	1.79±0.14cd	43.17±2.04de	5.44±0.32ab	8.01±0.28e	13.45±0.08ef	86.55±0.08ab
新麦 26 Xinmai 26	0.24±0.04ef	2.04±0.09b	44.35±2.04cde	4.98±0.45bc	11.99±0.16ab	17.04±0.31a	82.96±0.31f
新麦 45 Xinmai 45	0.25±0.03ef	1.79±0.14cd	41.99±0.00e	6.16±0.74a	11.23±0.44b	17.24±0.65a	82.76±0.65f
平均值 AVG	0.37±0.17	1.94±0.24	45.48±2.00	5.30±0.97	10.19±1.66	15.12±1.63	84.91±1.67
极差 R	0.52	0.75	7.38	3.11	4.75	4.33	4.62
变异系数 CV/%	47.64	12.29	4.39	18.24	16.25	10.81	1.97

—表示样品 T_{21} 峰与 T_{22} 峰出现交叠,未分离,最终表现为 T_{22} 单一峰。

— means that the T_{21} peak and T_{22} peak overlap with each other and finally show a single peak of T_{22} .

2.3.1 煮熟面条的质构特性

煮熟面条的质构特性参数的方差分析结果(表 5)表明,质构硬度、粘性、弹性、咀嚼性、断裂力和断裂距离在品种间均存在显著差异($P < 0.05$);质构黏性、弹性、咀嚼性、断裂力和断裂距离的变异系数较大($> 10.00\%$)。

2.3.2 煮熟面条的感官质量和煮制特性

煮熟面条的感官质量和煮制特性参数的方差分析结果(表 6)表明,煮熟面条总评分、色泽评分、硬度评分、黏性评分、弹性评分、煮制吸水率、干物质损失率和煮制膨胀率在品种间均存在显著差异($P < 0.05$),其中色泽的变异系数较大($> 10.00\%$)。

2.4 水分状态与面条质量特性的相关性分析

2.4.1 水分状态与小麦粉理化特性的关系

面条水分弛豫时间(T_2)与小麦粉质量特性的相关分析结果(图 1a)表明,生鲜面条的 T_{23} 与降落数值、拉伸能量、拉伸阻力、最大拉伸阻力和面筋指数均呈显著正相关;煮熟面条的 T_{23} 与蛋白质含量、降落数值、峰值黏度和最终黏度均呈显著负相关($P < 0.05$)。

面条水分比例(A_2)与小麦粉质量特性的相关分析结果(图 1b)表明,生鲜面条的 A_{21} 与吸水率呈显著正相关,与谷值黏度和回升值呈显著负相关;而 A_{22} 与吸水率呈显著负相关,与谷值黏度和回升值呈显著正相关($P < 0.05$)。这说明生鲜

面条的 A_{21} 和 A_{22} 之间存在竞争关系,且两者受吸水率、谷值黏度和回升值影响显著。生鲜面条的 A_{23} 与拉伸能量、拉伸阻力和最大拉伸阻力均呈显著负相关。煮熟面条的 $A_{21} + A_{22}$ 与破损淀粉含量呈显著正相关,而 A_{23} 与破损淀粉含量呈显著负相关。这说明煮熟面条的结合水和自由水之间存在竞争关系,受破损淀粉含量影响显著。

2.4.2 水分状态与面条质量特性的关系

水分弛豫时间(T_2)与质构特性的相关分析结果(图 2a)表明,生鲜面条的 T_{23} 与质构粘性呈显著正相关,与断裂距离呈显著负相关;煮熟面条的 T_{23} 与质构弹性和咀嚼性呈显著负相关($P < 0.05$)。水分比例(A_2)与质构特性的相关分析结果(图 2b)表明,生鲜面条的 A_{23} 与质构粘性和断裂力呈显著负相关。

水分弛豫时间(T_2)与感官质量和煮制特性的相关分析结果(图 2c)表明,生鲜面条的 T_{23} 与煮制吸水率呈显著负相关;煮熟面条的 T_{21} 与干物质损失率呈显著负相关, T_{22} 与弹性评分呈显著负相关($P < 0.05$)。水分比例(A_2)与感官质量和煮制特性的相关分析结果(图 2d)表明,生鲜面条的 A_{23} 与弹性评分呈显著负相关;煮熟面条的 A_{22} 和 $A_{21} + A_{22}$ 与干物质损失率呈显著正相关, A_{23} 与干物质损失率呈显著负相关。

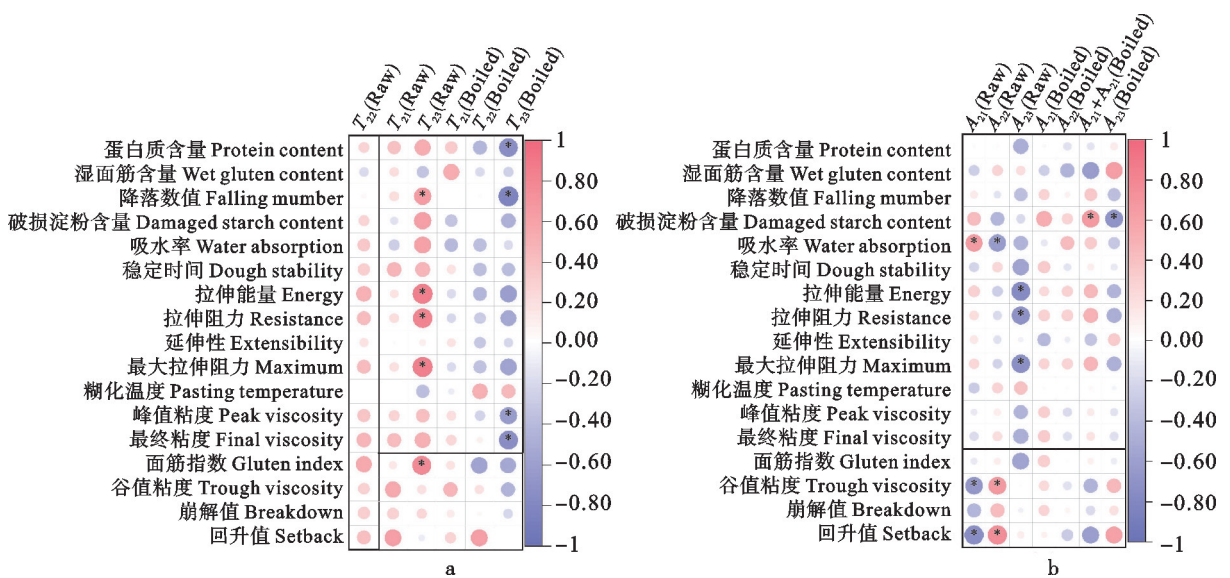
表 5 熟面条的质构特性

Table 5 Texture characteristics of boiled fresh noodles

品种 Variety	TPA 参数 TPA parameter				拉伸参数 Extensograms	
	硬度 Hardness/g	粘性 Adhesiveness/ (g · s ⁻¹)	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness	断裂力 Breaking force/g	断裂距离 Breaking length/mm
西农 822 Xinong 822	286.96 ± 1.70j	-2.97 ± 0.27d	1.05 ± 0.10cd	198.80 ± 19.35e	15.15 ± 1.04e	-72.83 ± 7.89bc
西农 20 Xinong 20	293.85 ± 2.20i	-1.91 ± 0.08a	1.37 ± 0.05b	275.18 ± 11.11c	20.33 ± 0.50a	-135.04 ± 8.42fg
小偃 22 Xiaoyan 22	299.61 ± 2.00h	-4.64 ± 0.51g	1.00 ± 0.05d	194.44 ± 9.80e	13.09 ± 0.77f	-61.91 ± 9.36ab
伟隆 169 Weilong 169	335.29 ± 11.51c	-2.63 ± 0.16cd	1.45 ± 0.03b	319.61 ± 10.25b	19.92 ± 1.08ab	-135.42 ± 7.14fg
西农 979 Xinong 979	322.28 ± 1.99ef	-3.44 ± 0.48e	1.15 ± 0.21c	241.93 ± 42.29d	17.29 ± 0.76d	-105.74 ± 20.14de
武农 986 Wunong 986	285.49 ± 2.49j	-2.28 ± 0.23bc	1.37 ± 0.14b	259.43 ± 26.48cd	17.99 ± 0.87cd	-132.14 ± 17.01fg
百农 207 Bainong 207	317.72 ± 3.29f	-3.80 ± 0.31f	1.02 ± 0.10d	215.37 ± 20.59e	18.34 ± 0.74cd	-135.22 ± 15.35fg
西农 511 Xinong 511	392.94 ± 2.92a	-4.69 ± 0.49g	1.03 ± 0.06d	258.63 ± 15.32cd	17.44 ± 1.54d	-89.69 ± 20.73cd
西农 805 Xinong 805	325.49 ± 3.42de	-4.60 ± 0.19g	1.39 ± 0.08b	271.49 ± 17.65c	13.35 ± 0.90f	-51.75 ± 9.16a
中麦 578 Zhongmai 578	368.69 ± 4.08b	-2.70 ± 0.12d	1.49 ± 0.02b	350.85 ± 10.60a	18.84 ± 0.92bc	-144.39 ± 14.93g
新麦 26 Xinmai 26	327.78 ± 2.66d	-2.30 ± 0.05bc	1.41 ± 0.02b	316.10 ± 5.94b	18.59 ± 1.00cd	-119.83 ± 11.52ef
新麦 45 Xinmai 45	312.44 ± 1.21g	-2.01 ± 0.07ab	1.66 ± 0.05a	345.70 ± 9.08a	18.51 ± 0.85cd	-130.60 ± 16.45fg
平均值 AVG	322.38 ± 32.19	-3.16 ± 1.04	1.28 ± 0.22	270.63 ± 53.66	17.40 ± 2.35	-109.55 ± 32.50
极差 R	107.44	2.78	0.66	156.41	7.24	92.63
变异系数 CV/%	9.98	-33.00	17.20	19.83	13.53	-29.67

表 6 小麦煮熟面条的质量特性
Table 6 Quality characteristics of boiled noodles made by wheat varieties

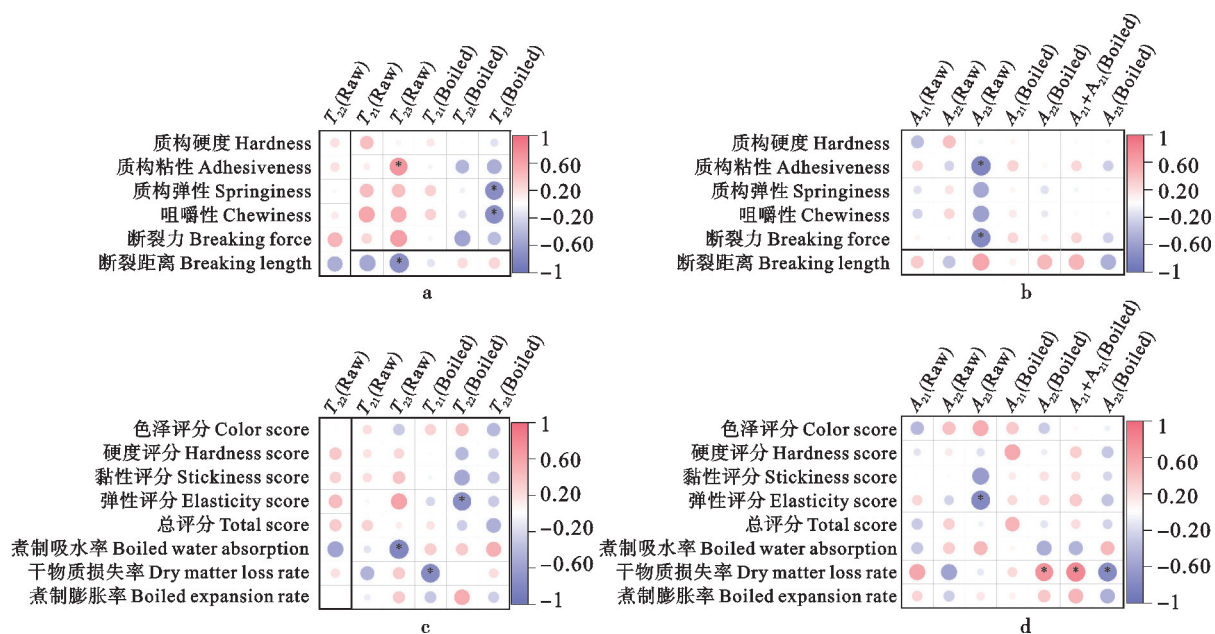
品种 Variety	感官质量 Sensory quality				总评分 Total score	煮制特性 Boiled characteristics		
	色泽评分 Color score	硬度评分 Hardness score	粘性评分 Stickiness score	弹性评分 Elasticity score		煮制吸水率 Boiled water absorption/%	干物质损失率 Dry matter loss rate/%	煮制膨胀率 Boiled expansion rate/%
西农 822 Xinong 822	13.3±2.28de	15.1±0.74def	11.8±0.45bc	19.4±0.42bcd	75.1±3.13e	95.71±1.79a	5.99±0.25b	168.52±2.54bc
西农 20 Xinong 20	14.4±1.34cd	16.4±1.08ab	12.2±0.45abc	21.2±1.48a	80.2±2.56ab	85.95±1.98bcd	5.63±0.09cd	157.77±2.08de
小偃 22 Xiaoyan 22	15.3±0.97bcd	15.3±0.84cdef	11.5±0.50c	18.8±0.84cd	76.8±1.75cde	90.98±4.99ab	5.52±0.18de	169.59±1.68de
伟隆 169 Weilong 169	14.9±0.22cd	16.2±0.84abc	12.0±1.00abc	20.5±0.50ab	79.7±1.92bc	90.42±4.61ab	5.86±0.27bc	165.41±2cde
西农 979 Xinong 979	12.0±2.55e	14.9±0.74ef	12.3±0.45abc	20.4±0.65ab	75.6±2.68de	88.53±2.23bc	5.95±0.17b	162.24±5.2bcd
武农 986 Wunong 986	12.3±2.91e	16.0±0.71abcd	12.5±0.50ab	21.4±1.19a	78.1±3.03bcd	82.40±2.84cd	5.98±0.07b	158.21±4.92bcd
百农 207 Bainong 207	15.6±0.42abc	15.3±0.45cdef	12.2±0.45abc	20.7±0.45ab	79.7±1.40bc	90.96±3.18ab	5.53±0.18de	162.54±5.95de
西农 511 Xinong 511	17.4±0.55a	16.6±0.65a	12.6±0.89ab	20.2±0.84abc	82.9±1.29a	87.28±5.9bc	6.61±0.15a	170.88±4.74a
西农 805 Xinong 805	17.0±0.00ab	14.6±0.55f	11.8±0.45bc	18.3±1.92d	77.5±1.80bcde	91.42±2.12ab	5.32±0.08e	173.58±5.76e
中麦 578 Zhongmai 578	15.1±0.42bcd	15.7±0.45abcde	12.8±0.45a	20.4±0.55ab	80.2±0.76ab	88.09±6.45bc	4.99±0.07f	161.11±4.04e
新麦 26 Xinmai 26	14.6±0.55cd	15.6±0.55bcdef	12.1±0.22abc	20.2±0.57abc	77.9±0.82bcde	79.83±1.06d	6.43±0.02a	183.75±10.86ab
新麦 45 Xinmai 45	15.2±0.67bcd	15.3±0.45cdef	12.2±0.27abc	20.4±1.52ab	78.6±2.10bc	85.64±1.52bcd	5.94±0.18b	177.93±9.23bcde
平均值 AVG	14.76±1.63	15.58±0.62	12.17±0.37	20.16±0.91	78.53±2.18	88.1±4.30	5.81±0.45	167.63±8.01
极差 R	5.40	2.00	1.30	3.10	7.80	15.88	1.60	25.98
变异系数 CV/%	11.05	3.95	3.00	4.51	2.78	4.88	7.77	4.78



* : $P < 0.05$.

图 1 小麦粉质量特性与面条水分状态的相关性

Fig. 1 Relationship between wheat flour quality characteristics and water state of noodles



a: 水分弛豫时间(T_2)与面条质构特性的关系; b: 水分比例(A_2)与面条质构特性的关系; c: 水分弛豫时间(T_2)与面条感官质量和煮制特性的关系; d: 水分比例(A_2)与面条感官质量和煮制特性的关系。* : $P < 0.05$ 。

a: Relationship between water relaxation time(T_2) and texture characteristics of noodles; b: Relationship between water ratio(A_2) and texture characteristics of noodles; c: Relationship between water relaxation time(T_2) and noodle sensory quality and cooking characteristics; d: Relationship between water ratio(A_2) and noodle sensory quality and cooking characteristics. * : $P < 0.05$.

图 2 水分状态与面条质量特性的关系

Fig. 2 Relationship between water state and noodle quality characteristics

3 讨论

3.1 小麦面条水分状态与小麦粉质量特性关系

本研究中,随着面筋指数和面团流变特性参数(拉伸能量、拉伸阻力、最大拉伸阻力)的增加,生鲜面条的自由水与其他固形物之间的相互作用显著减弱;随着小麦粉黏度(峰值黏度和最终黏度)的增加,煮熟面条的自由水与其他固形物之间的相互作用显著增强。随着吸水率的增加,生鲜面条的强结合水占比显著增加,弱结合水的占比显著降低;随着小麦粉黏度(谷值黏度和回升值)的增加,强结合水占比显著降低,弱结合水占比显著增加;随着面团流变特性参数(拉伸能量、拉伸阻力、最大拉伸阻力)的增加,生鲜面条的自由水占比显著降低;随着破损淀粉含量的增加,熟制面条的结合水占比显著增加,自由水占比显著降低。由此说明水分状态可以较好的反映面团流变特性,这与 Sun 等^[16]研究结果一致。

面制品的水分状态受面粉组分的水合作用^[3,10]和微观结构中水分迁移能力^[17]的影响。面团系统中,与淀粉相关的水含量高于面筋相关的水含量^[18],且淀粉的水结合能力更强^[3,19]。蛋

白质、碳水化合物等亲水性材料具有氢键位点,可用于与水分子形成氢键,氢键是维持面团结构完整性和限制水分迁移率的主要因素^[1,20]。这可能是小麦粉理化特性对面条水分状态产生影响的原因。在糊化过程中,淀粉颗粒膨胀裂解,直链淀粉和支链淀粉在水中完全伸展扩散,淀粉糊黏度达到谷值,随后冷却回升达到最终黏度^[21]。Hong 等^[10]试验证明,随着支链淀粉添加量的增加,冷藏生鲜面条中三种水的结合强度(T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23})降低。且面团中的淀粉可以通过与面筋竞争水合来调节面筋形成某些构象^[22]。这些研究表明小麦粉的黏度特性对面条的水分状态有较大影响,本研究结果与其一致。

3.2 小麦面条水分状态与其质量特性关系

本研究表明,随着生鲜面条的自由水结合强度的增加,质构黏度显著降低,断裂长度显著增加,煮制吸水率显著降低;随着熟制面条的强结合水结合强度的增加,干物质损失率显著降低;随着熟制面条弱结合水结合强度的增加,感官弹性评分显著降低;随着熟制面条自由水结合强度的增加,质构弹性和咀嚼性显著降低。随着生鲜面条自由水占比的增加,质构黏度显著增加,断裂力显

著降低,感官弹性评分显著降低;随着煮熟面条结合水占比的增加,干物质损失率显著增加。以上结果说明水分状态可以预测面条的质地特性,与Engelsen等^[14]研究结果一致。其也可以反映其质量特性,与Li等^[1]研究结果一致。

生鲜和煮熟面条的水分状态与面条质量特性的相关性有所不同。可能是由于煮制会改变小麦粉面筋的二级结构,促进了游离-SH转化为二硫键,并诱导了更多的蛋白质共价交联^[22-23],导致面条组分的理化特性和空间结构改变。且面团中的淀粉可以通过与面筋竞争水合来调节面筋形成某些构象^[22]。煮制过程中,蛋白质网络的凝固与淀粉颗粒的糊化存在物理竞争关系,强度高的面筋网络将包裹淀粉颗粒形成连续网络结构,低强度的面筋网络则被膨胀的淀粉颗粒破坏,形成离散团块,无法形成连续的框架结构^[24]。

3.3 水分状态对面条专用小麦品种鉴定和选育的意义

中国在小麦育种方面取得了显著的成就,但随着人们对食品质量需求的提高,面制品消费的专用化还无法满足市场消费需求^[25]。专用小麦国产供应量不足^[26]。在优质小麦品种选育方面,主要依靠分子标记辅助优异基因检测,及测定小麦品系的品质指标作为选择手段。但常规品质检测方法所需仪器设备较多,用样量较大,无法对早代品系进行选择。而低场核磁共振仪的水分状态参数与面条质量特性紧密相关,与小麦粉质量特性也有较高相关性,且用样量相对更少,检测更便捷。低场核磁共振的水分状态参数可用于优质小麦品种的选育和鉴定、面条专用粉生产、质量控制,但其具体方法还有待进一步研究。

4 结论

不同小麦品种制作的面条水分状态存在显著差异($P < 0.05$)。面条的水分状态与小麦粉理化特性参数(降落数值和面筋指数等)、团流变特性参数(拉伸能量、拉伸阻力、最大拉伸阻力等)和黏度特性参数(峰值黏度和最终黏度等)均显著相关($P < 0.05$);与面条质构特性参数(质构粘性、质构弹性、咀嚼性、断裂力、断裂距离等)显著相关、感官弹性评分和干物质损失率等面条关键质量指标显著相关。低场核磁共振仪的水分状态参数可以较好的反映面条的质量特性,对专用粉开发、小麦品种的鉴定和选育具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] LI L, WANG N, MA S, *et al.* Relationship of moisture status and quality characteristics of fresh wet noodles prepared from different grade wheat flours from flour milling streams [J]. *Journal of chemistry*, 2018, 2018: 1.
- [2] LU Z H, SEETHARAMAN K. ¹H nuclear magnetic resonance(NMR) and differential scanning calorimetry (DSC) studies of water mobility in dough systems containing barley flour [J]. *Cereal Chemistry*, 2013, 90(2): 120.
- [3] LIU L, HU X Z, ZOU L. Wheat polysaccharides and gluten effect on water migration and structure in noodle doughs: An ¹H LF-NMR study [J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 110: 103628.
- [4] FAN D M, MA S Y, WANG L Y, *et al.* ¹H NMR studies of starch-water interactions during microwave heating [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 97(2): 406.
- [5] LEYS S, BONDT Y D, BOSMANS G, *et al.* Assessing the impact of xylanase activity on the water distribution in wheat dough: A ¹H NMR study [J]. *Food Chemistry*, 2020, 325(30): 126828.
- [6] LI J, HOU G G, CHEN Z X, *et al.* Studying the effects of whole-wheat flour on the rheological properties and the quality attributes of whole-wheat saltine cracker using SRC, alveograph, rheometer, and NMR technique [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 55(1): 43.
- [7] ASSIFAOU I, CHAMPION D, CHIOTELLI E, *et al.* Characterization of water mobility in biscuit dough using a low-field ¹H NMR technique [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 64(2): 197.
- [8] LEUNG H K, MAGNUSON J A, BRUINSMA B L. Pulsed nuclear magnetic resonance study of water mobility in flour doughs [J]. *Journal of Food Science*, 1979, 44(5): 1408.
- [9] HAN C W, MA M, ZHANG H H, *et al.* Progressive study of the effect of superfine green tea, soluble tea, and tea polyphenols on the physico-chemical and structural properties of wheat gluten in noodle system [J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125676.
- [10] HONG T T, MA Y, YUAN Y R, *et al.* Understanding the influence of pullulan on the quality changes, water mobility, structural properties and thermal properties of frozen cooked noodles [J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130512.
- [11] FU B X, MALCOLMSON L. Sensory evaluation of noodles [J]. *Asian noodles: Science, technology, and processing*, 2010: 251-260.
- [12] 王灵昭, 陆启玉, 袁传光. 用质构仪评价面条质地品质的研究 [J]. 郑州工程学院学报, 2003, 24(3): 29.
WANG L Z, LU Q Y, YUAN C G. Study on the assessment for noodle texture with texture analyser [J]. *Journal of Henan University of Technology*, 2003, 24(3): 29.
- [13] 杜巍, 魏益民, 张国权. 小麦品质对面条品质影响因素的研究 [J]. 食品科技, 2001(2): 54.
DU W, WEI Y M, ZHANG G Q. Study on the effect of

- wheat character to noodle quality [J]. *Food Science and Technology*, 2001(2):54.
- [14] ENGELSEN S B, JENSEN M K, PEDERSEN H T, *et al.* NMR-baking and multivariate prediction of instrumental texture parameters in bread [J]. *Journal of Cereal Science*, 2000, 33(1):59.
- [15] TANANUWONG K, REID D S. DSC and NMR relaxation studies of starch-water interactions during gelatinization [J]. *Carbohydrate polymers*, 2004, 58(3):345.
- [16] SUN Y N, ZHANG M, CHEN H Z. LF-NMR intelligent evaluation of rheology and printability for 3D printing of cookie dough pretreated by microwave [J]. *LWT*, 2020, 132: 109752.
- [17] TANG H R, GODWARD J, HILLS B. The distribution of water in native starch granules—A multinuclear NMR study [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 43(4):375.
- [18] DOONA C J, BAIK M Y. Molecular mobility in model dough systems studied by time-domain nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45(3): 257.
- [19] FANARIA F, KELLERB J, DESOGUSA F, *et al.* Impact of water and flour components in dough investigated through low-field nuclear magnetic resonance [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2021, 87:289.
- [20] ZHAO K F, JIA Z Y, HOU L L, *et al.* Interpretation of the effects of hydroxypropyl starch and hydroxypropyl distarch phosphate on frozen raw noodles quality during frozen storage: Studies on water state and starch-gluten network properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242:124783.
- [21] 付一帆, 甘淑珍, 赵思明. 几种淀粉的糊化特性及力学稳定性 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(10):255.
- FU Y F, GAN S Z, ZHAO S M. Gelatinization characteristics and mechanical stability of various starch sources [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2008, 24(10):255.
- [22] AN D, LI H T, LI D S, *et al.* The relation between wheat starch properties and noodle springiness: From the view of microstructure quantitative analysis of gluten-based network [J]. *Food Chemistry*, 2022, 393:133396.
- [23] STATHOPOULOS C E, TSIAMI A A, SCHOFIELD J D, *et al.* Effect of heat on rheology, surface hydrophobicity and molecular weight distribution of glutes extracted from flours with different bread-making quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47(2):134.
- [24] PIERPAOLO R, PAGANI M A. Ultrastructure studies of pasta. A review [J]. *Food Structure*, 1983, 2:2.
- [25] 吴海彬, 朱志锋, 谭城, *et al.* 基于产业链视角的小麦品种品质需求调研分析 [J]. 中国种业, 2024(1):1.
- WU H B, ZHU Z F, TAN C, *et al.* Investigation and analysis of wheat variety quality demand from the perspective of wheat industry chain [J]. *China Seed Industry*, 2024(1):1.
- [26] 孟智鹏, 张靖卓. 优质专用强筋和弱筋小麦生产现状、问题和对策——基于河南等省调研分析 [J]. 农学学报, 2019, 9(3): 89.
- MENG Z P, ZHANG J Z. Current situation, problems and countermeasures of high-gluten and low-gluten wheat with premium quality for special purposes——An Investigation in Henan and other provinces [J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(3):89.