

小麦湿热处理后蛋白组分变化及其对面条品质的影响

蒋沛格^{1,2}, 张德榜³, 陈鹏泉⁴, 张连慧^{2,5}, 马森^{1*}, 任晨刚^{1,2,5*}

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001) (2. 中粮营养健康研究院有限公司, 营养健康与食品安全北京市重点实验室, 老年营养食品研究院北京市工程实验室, 北京 102209) (3. 郑州万谷机械股份有限公司, 河南郑州 450041) (4. 河南工业大学粮食和物资储备学院, 河南郑州 450001) (5. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023)

摘要: 为探讨小麦经过湿热处理后面条品质变化, 该研究分析了小麦初始水分含量 (14%~22%)、湿热处理温度 (45~85 ℃)、湿热处理时间 (15~90 min) 对小麦面筋蛋白组成及亚基占比和面条蒸煮特性、质构特性及感官品质的影响规律, 并利用响应面方法初步预测小麦湿热处理最佳工艺。结果表明: 高温长时的湿热处理后麦谷蛋白含量显著下降, 醇溶蛋白含量升高, 麦谷/醇溶蛋白比值下降, 高分子量麦谷蛋白亚基 (High Molecular Weight Glutenin Subunits, HMW-GS) 和低分子量麦谷蛋白亚基 (Low Molecular Weight Glutenin Subunits, LMW-GS) 含量显著降低, γ -亚基含量显著增加。较高强度的湿热处理 (水分含量为 22%、温度 >75 ℃、时间 >60 min) 会导致面条蒸煮损失率增加, 硬度、咀嚼性、弹性和感官评分下降。湿热处理最佳条件为温度 56 ℃、小麦初始水分含量 18%、时间 35 min。此条件下所制作面条的感官评分为 83.8, 蒸煮损失率为 6.02%, 综合评分为 0.93。与未经处理组相比, 面条硬度和咀嚼性稍有增加, 吸水率增加了 7.63%, 感官评分无显著差异。综合可得, 小麦经适当的湿热处理后可提升面条品质。该研究为热处理稳定或提升小麦品质提供理论基础。

关键词: 小麦; 湿热处理; 面条品质; 蛋白组成; 响应面

文章编号: 1673-9078(2026)04-158-167

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0021

Effects of Heat-moisture Treatment on Wheat Protein Composition and Noodle Quality

JIANG Peige^{1,2}, ZHANG Debang³, CHEN Pengxiao⁴, ZHANG Lianhui^{2,5}, MA Sen^{1*}, REN Chengang^{1,2,5*}

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China) (2. Cofco Nutrition and Health Research Institute Co. Ltd., Beijing Key Laboratory of Nutrition & Health and Food Safety, Beijing Engineering Laboratory of Geriatric Nutrition & Foods, Beijing 102209, China) (3. Zhengzhou Wan Gu Machinery Co. Ltd., Zhengzhou 450041, China) (4. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China) (5. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China)

Abstract: To investigate changes in noodle quality after heat-moisture treatment of wheat, the effects of wheat initial moisture content (14~22%), heat-moisture treatment temperature (45~85 ℃), and heat-moisture treatment duration (15~90 min) on wheat gluten protein composition and subunit ratio, as well as the cooking and texture characteristics and sensory quality of noodles,

引文格式:

蒋沛格, 张德榜, 陈鹏泉, 等. 小麦湿热处理后蛋白组分变化及其对面条品质的影响[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 158-167.

JIANG Peige, ZHANG Debang, CHEN Pengxiao, et al. Effects of heat-moisture treatment on wheat protein composition and noodle quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 158-167.

收稿日期: 2025-01-07; 修回日期: 2025-03-26; 接受日期: 2025-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2100901)

作者简介: 蒋沛格 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: jpeige@163.com

通讯作者: 任晨刚 (1978-), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 谷物食品开发, E-mail: rencg@cofco.com; 共同通讯作者: 马森 (1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: masen@haut.edu.cn

were evaluated. Response surface methodology was used to predict the optimal process of wheat heat-moisture treatment. The results indicated that high-temperature, long-duration heat-moisture treatment contributed to significantly reduced glutenin content, increased prolamin content, reduced glutenin-to-prolamine ratios, significantly decreased levels of high-molecular-weight glutenin subunits and low-molecular-weight glutenin subunits, and significantly increased γ -subunit levels. Heat-moisture treatment at a higher intensity (moisture content of 22%, temperature $>75\text{ }^{\circ}\text{C}$, and duration $>60\text{ min}$) led to an increase in noodle cooking loss, with lower levels of hardness, chewiness, elasticity, and sensory scores. The optimal conditions for heat-moisture treatment were found to be a temperature of $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, initial wheat moisture content of 18%, and duration of 35 min. Under these conditions, the sensory score of the noodles was 83.8, cooking loss rate was 6.02%, and overall score was 0.93. Compared with the untreated group, the hardness and chewiness of the noodles slightly increased, water absorption rate increased by 7.63%, and no significant difference in sensory scores was identified. In conclusion, appropriate heat-moisture treatment of wheat can improve the quality of noodles. This study provides a reference for using heat treatment to stabilize or improve the quality of wheat.

Key words: wheat; heat-moisture treatment; noodle quality; protein composition; response surface

小麦是我国产量仅次于稻谷和玉米的粮食作物,可用于制作馒头、面条、面包等主食^[1]。面条是中国主要面制品之一,其品质与小麦中面筋蛋白组成和结构有显著影响^[2]。面筋蛋白占小麦所有蛋白质的75%^[3],主要由麦谷蛋白和醇溶蛋白组成。麦谷蛋白赋予面团强度和弹性,醇溶蛋白赋予面团粘性和延展性。面筋蛋白的组成和结构变化对面团的加工性能和面条制品品质都有影响^[4]。

热处理在小麦加工过程中通常用于杀菌、钝酶、干燥等^[5],还可用于改善小麦和小麦粉的理化性质和制品品质。湿热处理是指在一定水分体积分数下和温度范围内处理小麦或小麦粉的一种热处理方法^[6]。湿热处理可使小麦淀粉部分糊化、面筋蛋白充分变性,提高小麦粉中的微量营养物质含量^[7]。不适当的处理条件可能会导致小麦籽粒表皮水分急剧汽化,破损淀粉含量过高,和面时间延长^[8]等,小麦品质劣变。在小麦籽粒中,蛋白质比淀粉和脂类更不耐高温,温度过高可能会造成面筋蛋白网络结构遭到破坏^[9],影响面条品质和加工。但适当的热处理条件可以改善小麦品质。Liu等^[10]研究发现 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过热蒸汽处理小麦籽粒1~3 min,面筋蛋白发生聚集,麦谷蛋白大聚体(Glutenin Macropolymer, GMP)含量增加,形成了稳定的面筋网络结构,改善了面团弹性,蛋糕品质提升。Cetiner等^[11]发现小麦经湿热处理后(水分含量19%、温度 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$),面包体积显著增大。大多数学者对湿热处理的研究集中在淀粉结构和理化性质的改变^[12,13],本研究基于蛋白质特性分析湿热处理后小麦品质特性变化,探讨引起面条品质变化的机制,对优化小麦加工工艺,提升小麦制品质量有着重要意义。

该研究旨在讨论小麦经过湿热处理后面筋蛋白组成和亚基占比及面条品质的变化,并结合响应面法优

化最佳湿热处理组合。以期为在小麦加工中通过热处理提高小麦加工应用品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

江苏硬红麦(水分11.57%),中粮面业(扬州)有限公司;二硫苏糖醇(DTT)、乙腈、三氟乙酸,上海安普实验科技股份有限公司,均为色谱纯。

1.2 仪器与设备

GZX-9140 MBE 电热鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司;880107 布拉本德小型实验磨,德国布拉班德公司;KMO20 针式和面机,英国 KENWOOD 公司;JM1D168/140 实验面条机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;SYT-030 智能挂面干燥试验台,中国包装和食品机械有限公司;TA-XT plus 质构仪,上海瑞盼智能科技有限公司;600E 高效液相色谱仪, Waters 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 小麦湿热处理条件单因素试验设计

将小麦籽粒水分人工调节至目标水分含量,用密封袋密封,在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱放置48 h使水分均匀。将水分调节后的小麦样品置于蒸煮袋中,并用封口机密封防止水分损失。用电热鼓风干燥箱加热,在湿热处理的温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间为30 min的条件下,小麦的初始水分含量分别为14%、16%、18%、20%、22%;在小麦的初始水分含量为18%,湿热处理的时间为30 min的条件下,湿热处理的温度分别取45、55、65、75、85 $^{\circ}\text{C}$;小麦初始水分含量为18%,湿热处理的温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,湿热处理的时间分别取15、30、45、

60、90 min，处理后的小麦在室温下冷却后，自然晾干至安全水分 13%，即得到湿热处理的小麦样品。以未处理组小麦为对照组。研究小麦经过湿热处理后对面条品质和面筋蛋白组成的影响。

1.3.2 小麦粉样品的制备

将经过湿热处理并晾干后的小麦润麦调制至 16% 水分，放置 24 h。利用布拉本德实验磨进行制粉，面粉混合均匀后在 4 ℃ 下储藏，备用。

1.3.3 面筋蛋白组成及亚基占比的测定

称取含 100 mg 干基蛋白质小麦粉样品，先用 5 mL 0.05 mol·L⁻¹ 磷酸盐缓冲液（pH 值为 7.6，含 0.4 mol·L⁻¹ NaCl）提取两次，弃上清液；再用 5 mL 去离子水提取 1 次，弃上清液；将沉淀物用 3 mL 60%（V/V）乙醇提取 3 次，离心（10 000 r·min⁻¹），收集上清液，即为醇溶蛋白提取物；再用 3 mL 0.05 mol·L⁻¹ Tris-HCl 缓冲液[pH 值为 7.5，含 50%（V/V）异丙醇，2.0 mol·L⁻¹ 尿素、1.0%（m/V）DTT]提取 3 次，离心，收集上清液，即为麦谷蛋白提取物。取上清液过 0.45 μm 滤膜。选用 Nucleosil 300-5 C8 色谱柱，流动相为超纯水（A 液）和乙腈（B 液），均含有 0.1%（V/V）三氟乙酸，洗脱液 B 从体积分数 24.0% 梯度升高到体积分数 56.0%，总流速为 1 mL·min⁻¹，进样量 100 μL，柱温 50 ℃，检测波长为 214 nm，采用高效液相色谱仪进行测定。参照 Wieser^[14] 等方法将各峰区分，并计算麦谷蛋白、醇溶蛋白及各亚基相对含量，各相对含量以对应的峰面积占总面积的比例表示（质量分数）。

1.3.4 挂面的制备

称取 200 g 1.3.2 中制备的小麦粉，加入 70 g 水，和面 5 min，搅拌至面絮状态，置于自封袋中，室温醒发 20 min。将面絮在 3.0 mm 的辊距下复合压延 6 次，随后依次经过 2.0、1.8、1.6、1.4、1.2、1.0 mm 的辊距连续压延，直至厚度达到 1.0 mm，用 2.0 mm 的切刀切条，放入智能挂面干燥箱进行干燥。干燥结束后，将面条切成 22 cm 的长度放入自封袋中，室温保存。

1.3.5 挂面蒸煮特性的测定

称取约 10 g 的面条样品，放入 500 mL 水中煮至最佳蒸煮时间，沥水 5 min，称质量记为 M_2 。收集面条汤于 500 mL 容量瓶中定容。量取 100 mL 混合均匀的面汤，加热浓缩至 15 mL 左右于恒重的烧杯（ M_3 ）中，在 105 ℃ 下干燥至恒重，称此时的质量为 M_4 。通过公式（1）和公式（2）计算面条吸水率和蒸煮损失率：

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1(1 - W)} \times 100\%$$

$$B = \frac{5(M_4 - M_3)}{M_1(1 - W)} \times 100\%$$

式中：
A——吸水率，%；
B——蒸煮损失率，%；
 M_1 ——煮前面条的质量，g；
 M_2 ——煮后面条的质量，g；
 M_3 ——烘前烧杯的质量，g；
 M_4 ——烘干后烧杯的质量，g；
W——煮前面条的水分质量分数，%。

1.3.6 挂面质构特性的测定

采用探头 P/36R 对面条进行 TPA 测定。TPA 测定参数：测前速度 2.0 mm·s⁻¹，测试速度 1.0 mm·s⁻¹，测后速度 2.0 mm·s⁻¹，压缩程度为 50%，触发力为 5 g，停留时间为 1 s。

1.3.7 挂面感官特性的测定

挂面感官评定按照标准 LS/T 3202-1993《面条用小麦粉》中面条品尝评分标准测定。感官评价由 6 名培训合格的小组成员进行评定。

1.3.8 响应面试验设计

在单因素试验的基础上，以小麦湿热处理温度（A）、小麦初始水分含量（B）、湿热处理时间（C）三个因素为因变量，将面条感官评分和蒸煮损失率运用熵权法得到的综合评分为响应值，运用 Design-Expert 13 软件，进行 Box-Behnken 响应面试验设计，试验因素及水平见表 1。

表 1 湿热处理条件响应面试验因素水平表
Table 1 Response surface test factor level table under heat-moisture treatment conditions

水平	因素		
	温度（A）/℃	初始水分（B）/%	时间（C）/min
-1	45	16	15
0	55	18	30
1	65	20	45

1.3.9 综合评分

参照文献^[15]对取值越大越好的指标（感官评分）以及取值越小越好的指标（蒸煮损失率）进行标准化处理。运用熵权法^[16]，将蒸煮损失率和感官评分计算权重后的综合评分 Y 作为评价面条品质的指标，对面条品质进行综合性分析，计算公式见（3）~（8）。

$$S_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}}$$

(3)

$$S_{ij} = \frac{X_{imax} - X_{ij}}{X_{imax} - X_{imin}}$$

(4)

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}$$

(5)

$$E_j = - \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}}{\ln(n)}$$

(6)

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}$$

(7)

$$Y_i = \sum_{j=1}^n W_j S_{ij}$$

(8)

式中:

S_{ij} ——归一化处理后的数据;

X_{ij} ——第 i 个方案的第 j 个指标的原始值, X_{max} 、 X_{min} 表示各指标的最大、最小值;

P_{ij} ——每个指标的特征向量, 如果 $P_{ij}=0$, 则定义 $P_{ij} \ln P_{ij}=0$;

E_j ——各指标的信息熵值;

W_j ——各指标的权重;

Y_i ——试验方案 i 的综合评分。

1.4 数据处理

所有实验重复 3 次, 取平均值, 实验结果表示为平均值 ± 标准差。采用 Excel 对数据进行处理和分析; 采用 SPSS 23.0 软件对数据进行差异性分析; 采用 Origin 2018 软件作图; 采用 Design-Expert 13 进行响应面实验分析。

2 结果与分析

2.1 不同湿热处理对小麦面筋蛋白组成的影响

面筋蛋白由麦谷蛋白和醇溶蛋白组成, 两者的含量、比例、结构变化会影响最终产品的质量^[17,18]。由图 1a、1c 可以看出, 小麦初始含量为 18% 时, 随着湿热处理温度 and 时间的增加, 麦谷蛋白含量减少, 醇溶蛋白含量增加, 说明与麦谷蛋白结合的醇溶蛋白发生了解离^[19,20]。当处理温度高于 75 °C、时间长于 60 min 时, 麦谷、醇溶蛋白含量发生显著变化, 说明较高强度的湿热处理会影响面筋蛋白组成含量变化, 从而引起面条品质变化, 面条蒸煮损失增加、硬度、咀嚼性减小。麦谷 / 醇溶蛋白比值显著下降, 较低的

麦谷 / 醇溶蛋白比值使面条缺乏弹性和咀嚼感。有研究表明, 面条的蒸煮质量、硬度、弹性和咀嚼性与麦谷蛋白含量呈正相关, 与醇溶蛋白含量呈负相关^[21]。由图 1b 可知, 不同初始水分含量的小麦在 65 °C 处理 30 min, 随着水分含量的增加, 麦谷蛋白、醇溶蛋白含量及比值无显著变化。

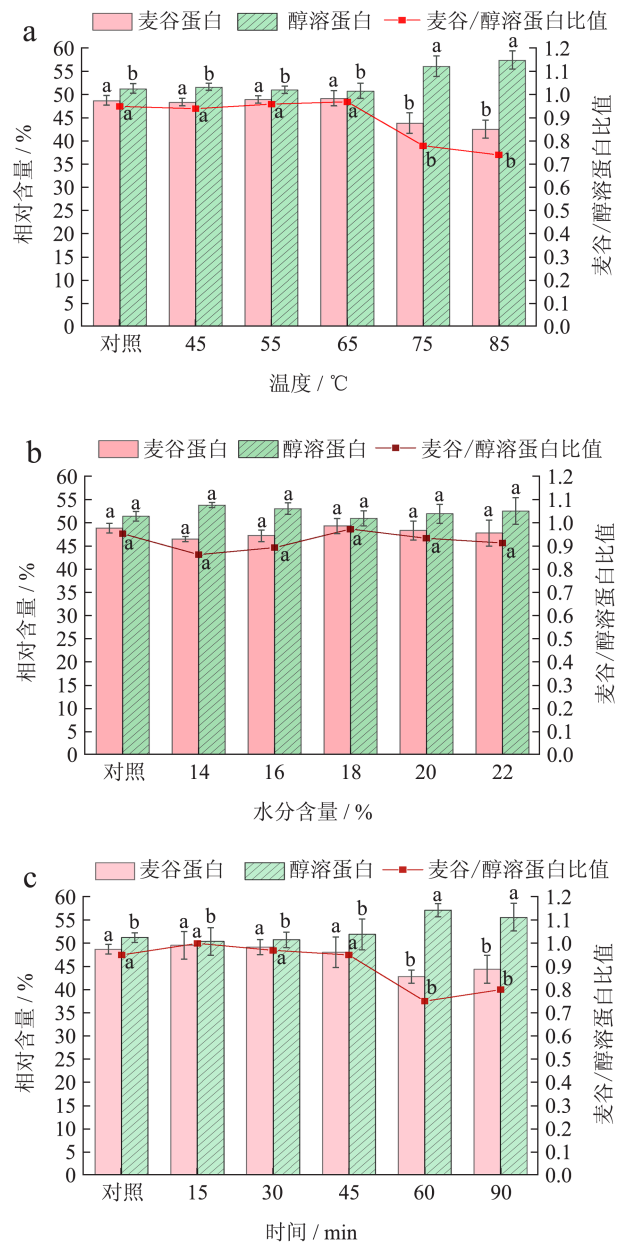


图 1 不同湿热处理条件对面筋蛋白组成的影响

Fig.1 Effect of different heat-moisture treatment conditions on gluten protein composition

注: a 表示 18% 水分时不同湿热处理温度处理 30 min; b 表示不同初始水分含量小麦 65 °C 处理 30 min; c 表示 18% 水分小麦在 65 °C 湿热处理不同时间。图中不同字母表示同一指标下样品间存在显著差异 ($P<0.05$), 下同。

2.2 不同湿热处理条件对小麦面筋蛋白亚基占比的影响

醇溶蛋白是一种由 ω -、 α -、 γ -醇溶蛋白亚基组成的单体蛋白,与面筋蛋白的黏性和延展性有关。 ω b亚基是一种与麦谷蛋白结合的醇溶蛋白,与面条的拉伸特性有关。麦谷蛋白主要由HMW-GS和LMW-GS组成,与面团弹性有关^[22]。由图2a、2c可知,小麦初始水分含量为18%时,较高温度和较长时间条件处理后,

HMW-GS和LMW-GS含量显著降低, γ -亚基含量显著增加。这与图1a和图1c中麦谷蛋白的下降和醇溶蛋白的升高一致。由图2b可知,不同初始水分含量的小麦在65℃处理30 min,随着水分含量的增加LMW-GS含量增加,但无显著变化。LMW-GS受热凝聚时提供面条的硬度,HMW-GS含量的提高可以增加面筋的强度和面团的稳定性^[23,24]。 γ -、 α -醇溶蛋白分别影响面条的硬度、剪切应力和回弹性^[25]。面筋蛋白亚基含量的变化可能是引起面条品质变化的原因之一。

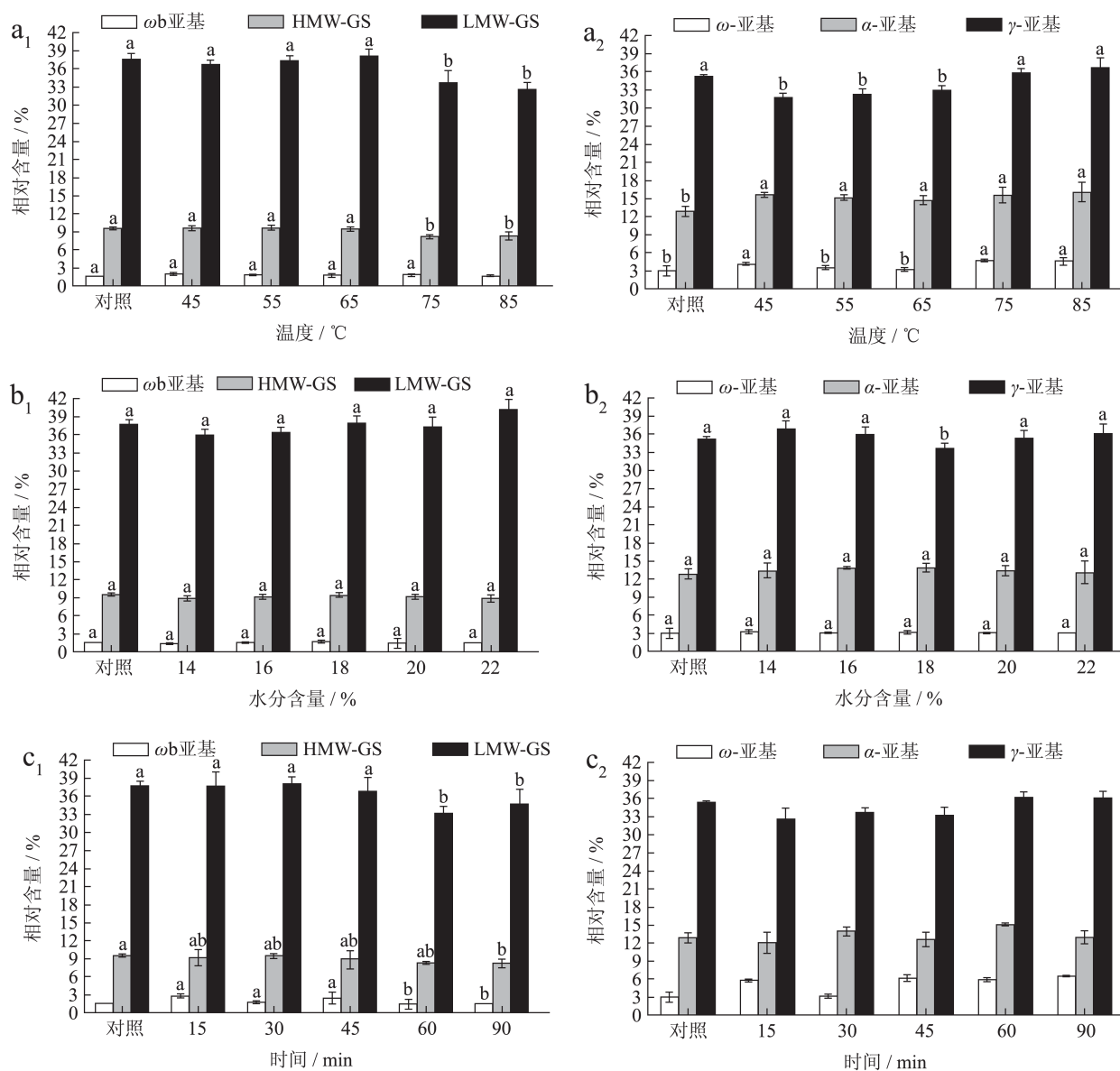


图2 不同湿热处理条件对面筋蛋白亚基占比的影响

Fig.2 Effect of different heat-moisture treatment conditions on the proportion of gluten protein subunits

注: a表示18%水分时不同湿热处理温度处理30 min; b表示不同初始水分含量小麦65℃处理30 min; c表示18%水分小麦在65℃湿热处理不同时间。

2.3 不同湿热处理条件对面条蒸煮特性的影响

蒸煮损失率和吸水率是评价面条蒸煮品质的重要指标。吸水率反映了面条的持水能力。蒸煮损失率反映了面条在蒸煮过程中固体物质的溶出程度。

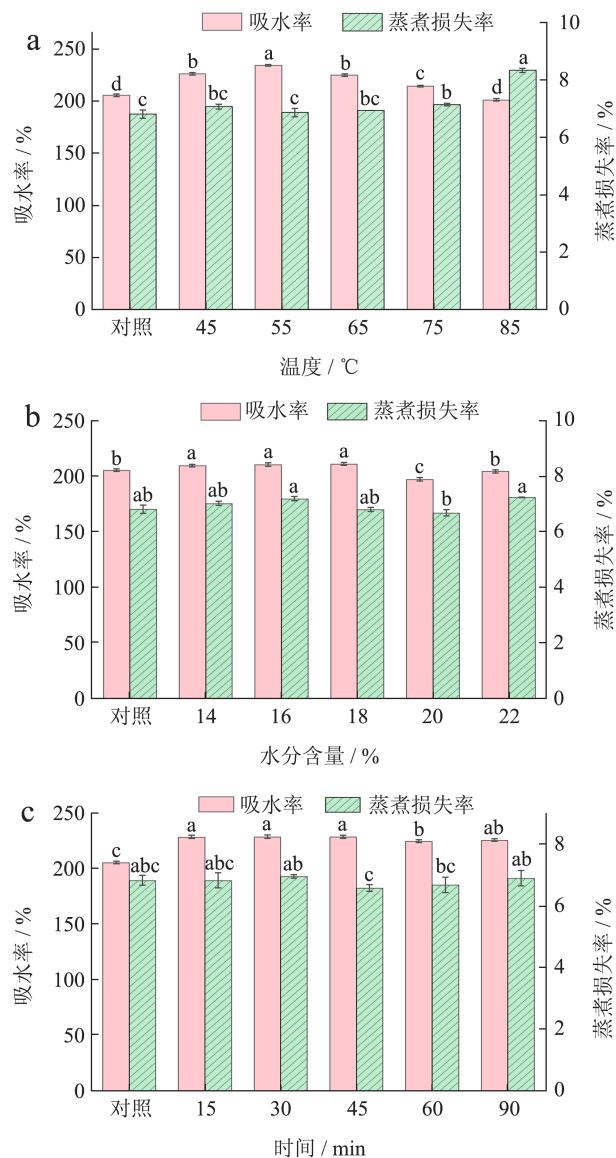


图3 不同湿热处理条件对面条蒸煮特性的影响

Fig.3 Effect of different heat-moisture treatment conditions on the cooking characteristics of noodles

注: a 表示 18% 水分时不同湿热处理温度处理 30 min; b 表示不同初始水分含量小麦 65 °C 处理 30 min; c 表示 18% 水分小麦在 65 °C 湿热处理不同时间。

由图 3a 可知, 18% 水分小麦在不同温度下处理 30 min, 随着处理温度升高, 面条吸水率呈现先升高后下降趋势, 蒸煮损失率呈先下降后增加趋势, 温度为 55 °C 时, 吸水率达到最高, 蒸煮损失率最低, 面条蒸煮品质最佳。85 °C 处理后蒸煮损失率显著增加 ($P < 0.05$), 可能是由于面筋蛋白聚集程度降低, 面

筋网络结构变得松散, 煮制时易混汤^[26]。由图 3b 可知, 在 65 °C 加热 30 min 条件下, 小麦初始水分含量 $< 18\%$ 时, 面条吸水率比对照组显著增加。各水分小麦处理的面条蒸煮损失率与对照组均无显著差异。由图 3c 可知, 18% 水分含量小麦在 65 °C 加热, 各处理时间面条吸水率均显著高于对照, 处理时间为 45 min 时, 蒸煮损失率最低, 说明适当的湿热处理时间能使面筋网络结构变得相对紧密, 面条煮制时, 淀粉颗粒较少流入面汤中, 蒸煮损失率低^[27]。

2.4 不同湿热处理条件对面条质构特性的分析

由表 2 可知, 18% 水分小麦在不同温度下处理 30 min, 随着处理温度的增加, 面条硬度和咀嚼性逐渐降低, 温度 55 °C 以上处理时, 硬度显著下降 ($P < 0.05$)。这与蛋白质含量和面筋网络结构形成情况有关^[28]。面条弹性在 85 °C 处理后显著下降, 可能与麦谷蛋白及 HMW-GS 含量的减少有关。不同初始水分含量小麦在 65 °C 处理 30 min, 随着水分含量由 18% 增加至 22% 时, 面条硬度显著增大, 与较高初始水分含量处理后时面条吸水率降低有关, 咀嚼性与硬度变化趋势一致, 14%、16% 时面条弹性相对较差。18% 水分含量小麦在 65 °C 加热, 当处理时间长于 60 min 后, 面条硬度、咀嚼性显著下降 ($P < 0.05$), 90 min 处理后面条弹性下降。从本研究结果来看, 较高强度湿热处理后, 麦谷蛋白含量降低, 麦谷 / 醇溶蛋白比值显著下降, 是使面条弹性和咀嚼性下降的原因之一。同时, 较高强度湿热处理会使蛋白质交联度下降, 面筋网络结构不牢固^[29]。

2.5 不同湿热处理条件对面条感官特性的分析

由图 4a 可知, 小麦在 18% 水分含量下经过不同温度处理 30 min 后, 面条感官评分范围在 79.8~85.9 之间, 随着湿热处理温度的升高, 面条感官评分逐渐下降, 45~65 °C 处理之间感官评分无显著变化 ($P > 0.05$), 75、85 °C 处理后, 面条适口性与韧性变差, 感官评分显著下降 ($P < 0.05$)。由图 4b 可知, 在 65 °C 处理 30 min 条件下, 小麦初始水分含量为 18% 时, 感官评分最高, 面条色泽鲜亮, 口感爽滑, 各水分含量处理之后感官评分之间无显著差异。由图 4c 可知, 18% 水分含量小麦在 65 °C 加热, 随着处理时间的延长, 面条感官评分呈先升高后下降趋势, 30 min 时感官评分最高, 时间长于 60 min 后感官评分显著下降。较高强度的湿热处理会降低小麦粉糊化峰值粘度, 影响面条感官评分。有研究表明, 小麦粉糊化峰值粘度越大, 面条感官总分越高^[30]。

表 2 不同湿热处理条件对面条质构特性的影响

Table 2 Effect of different heat-moisture treatment conditions on noodles texture						
固定条件	变量	硬度 /g	黏着性	弹性	咀嚼性	回复性
18%-30 min	45 ℃	1 543.12 ± 0.45 ^a	-64.46 ± 2.75 ^b	0.95 ± 0.00 ^a	1 208.78 ± 23.54 ^a	0.70 ± 0.00 ^a
	55 ℃	1 385.23 ± 13.24 ^c	-53.82 ± 0.41 ^a	0.94 ± 0.00 ^a	1 138.82 ± 10.32 ^{bc}	0.70 ± 0.00 ^{ab}
	65 ℃	1 442.39 ± 1.45 ^b	-73.45 ± 0.87 ^c	0.94 ± 0.00 ^a	1 165.01 ± 14.43 ^b	0.70 ± 0.00 ^{ab}
	75 ℃	1 371.46 ± 10.23 ^c	-81.81 ± 1.17 ^d	0.95 ± 0.00 ^a	1 134.01 ± 18.90 ^{bc}	0.70 ± 0.00 ^b
	85 ℃	1 355.54 ± 3.56 ^c	-65.65 ± 0.32 ^b	0.93 ± 0.01 ^b	1 110.56 ± 19.51 ^c	0.69 ± 0.01 ^c
65 ℃-30 min	14%	1 488.55 ± 4.06 ^b	-53.05 ± 8.37 ^a	0.94 ± 0.00 ^{bc}	1 180.06 ± 9.99 ^b	0.70 ± 0.01 ^{ab}
	16%	1 494.18 ± 14.87 ^b	-47.88 ± 2.45 ^a	0.93 ± 0.00 ^c	1 257.43 ± 15.68 ^a	0.71 ± 0.00 ^a
	18%	1 442.39 ± 1.45 ^b	-73.45 ± 0.87 ^b	0.94 ± 0.00 ^{ab}	1 165.01 ± 14.43 ^b	0.70 ± 0.00 ^{ab}
	20%	1 551.04 ± 7.82 ^a	-54.65 ± 2.90 ^a	0.95 ± 0.00 ^a	1 246.34 ± 18.72 ^a	0.69 ± 0.00 ^b
	22%	1 530.36 ± 16.65 ^a	-58.81 ± 3.14 ^a	0.94 ± 0.00 ^{ab}	1 228.83 ± 22.48 ^a	0.69 ± 0.00 ^{ab}
18%-65 ℃	15 min	1 493.29 ± 9.31 ^a	-62.95 ± 2.23 ^a	0.92 ± 0.00 ^b	1 235.92 ± 10.54 ^a	0.70 ± 0.00 ^a
	30 min	1 442.39 ± 1.45 ^b	-73.45 ± 0.87 ^c	0.94 ± 0.00 ^a	1 165.01 ± 14.43 ^b	0.70 ± 0.00 ^a
	45 min	1 431.12 ± 11.69 ^b	-69.32 ± 1.45 ^b	0.93 ± 0.00 ^a	1 148.16 ± 17.59 ^{bc}	0.70 ± 0.00 ^a
	60 min	1 374.67 ± 10.50 ^d	-79.49 ± 0.65 ^d	0.93 ± 0.00 ^a	1 134.75 ± 11.25 ^c	0.70 ± 0.01 ^{ab}
	90 min	1 395.96 ± 8.99 ^c	-72.13 ± 2.35 ^{bc}	0.92 ± 0.00 ^b	1 140.64 ± 12.58 ^{bc}	0.69 ± 0.00 ^b
对照		1 508.14 ± 34.23	-55.76 ± 8.24	0.94 ± 0.00	1 216.11 ± 18.89	0.70 ± 0.00

注：表中同一列上标字母不同表示差异显著（*P* < 0.05）。

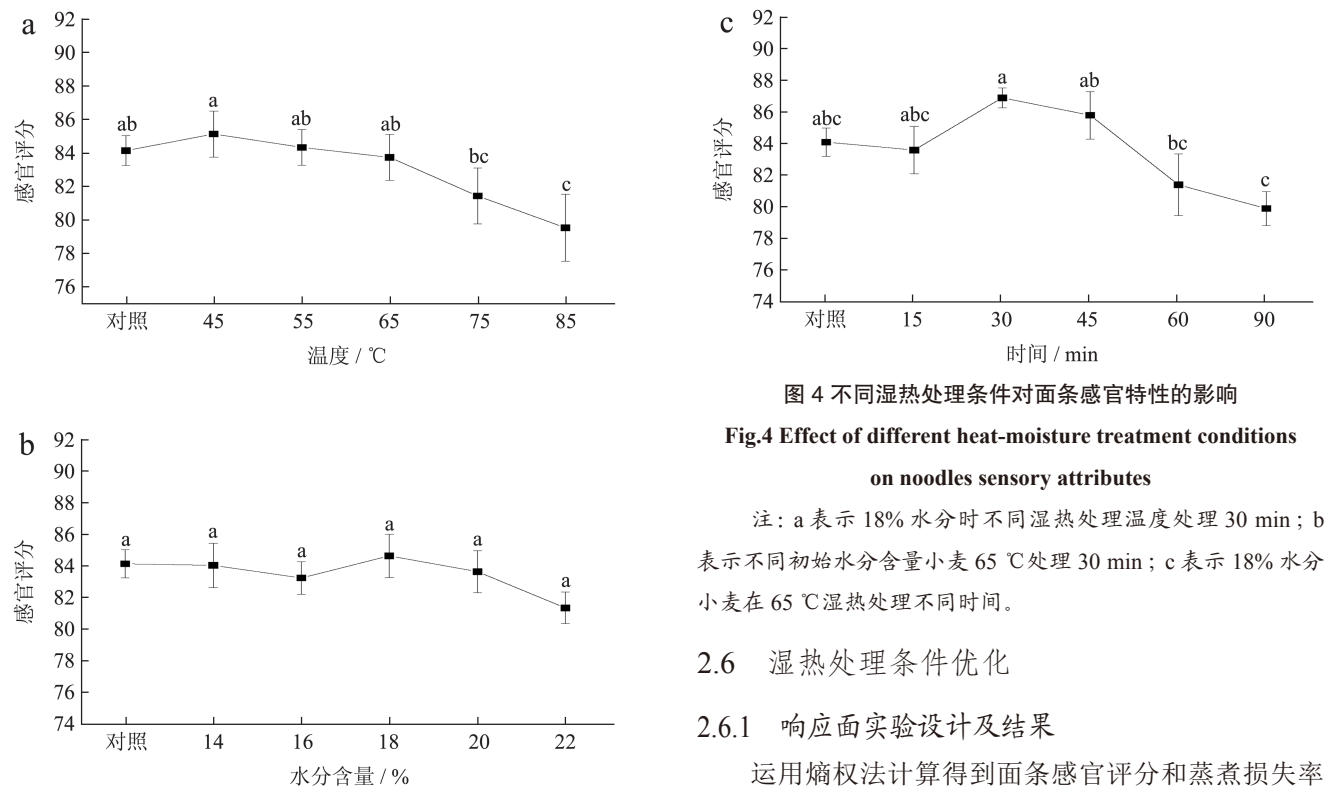


图 4 不同湿热处理条件对面条感官特性的影响

Fig.4 Effect of different heat-moisture treatment conditions on noodles sensory attributes

注：a 表示 18% 水分时不同湿热处理温度处理 30 min；b 表示不同初始水分含量小麦 65 ℃处理 30 min；c 表示 18% 水分小麦在 65 ℃湿热处理不同时间。

2.6 湿热处理条件优化

2.6.1 响应面实验设计及结果

运用熵权法计算得到面条感官评分和蒸煮损失率

的权重分别为 0.75 和 0.25，计算后综合评分（Y）、响应面试验设计及结果见表 3。

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Response surface test design and results						
试验号	A/℃	B/%	C/min	感官评分	蒸煮损失率/%	Y/综合评分
1	0	1	-1	79.50	6.65	0.142 1
2	-1	-1	0	79.00	6.65	0.064 0
3	0	0	0	83.20	5.97	0.857 4
4	1	0	1	81.30	6.20	0.514 1
5	0	-1	-1	79.20	5.98	0.230 3
6	-1	1	0	79.30	6.08	0.225 8
7	0	-1	1	80.20	6.45	0.291 8
8	0	0	0	83.50	5.98	0.902 2
9	0	0	0	83.70	5.96	0.937 5
10	0	1	1	81.70	5.97	0.623 0
11	1	1	0	81.40	6.89	0.390 6
12	-1	0	-1	78.90	5.98	0.183 5
13	1	0	-1	79.40	6.01	0.255 5
14	0	0	0	83.60	6.00	0.913 8
15	1	-1	0	80.00	6.41	0.268 6
16	-1	0	1	80.00	5.65	0.421 9
17	0	0	0	83.50	6.03	0.892 1

2.6.2 模型方程的建立与显著性分析

通过对响应面试验结果进行多元回归拟合，得到小麦经过湿热处理后面条品质综合评分 Y 与三因素的二次多元回归方程为：

$$Y=-37.268\ 9+0.367\ 4A+3.039\ 3B+0.006\ 9C-0.000\ 5AB+0.000\ 0AC+0.003\ 5BC-0.003\ 2A^2-0.085\ 7B^2-0.001\ 1C^2。$$

由表 4 可知，模型 P 值<0.000 1，说明模型极显著；失拟项 P=0.230 9>0.05，失拟项不显著（P>0.05），说明残差由随机误差引起^[31]；R²=0.994 1，校正系数 R_{Adj}²=0.986 5，说明该模型拟合度较好，能反映小麦湿热处理工艺参数对面条品质综合评分的影响。可用此模型分析和预测小麦经过湿热处理后面条品质的变化。

应由表 4 可看出，一次项 A（温度）、B（小麦初始水分含量）、C（时间）、交互项 BC、二次项 A²、B²和 C²对面条综合评分影响均极显著（P<0.01），交互项 AB 和 AC 对面条综合评分影响不显著（P>0.05）。由此结果可以得出，小麦初始水分含量、湿热处理温度和时间对面条品质的影响不是简单的线性关系，而是呈二次关系，因素之间存在交互作用，说明面条综合评分的变化比较复杂。三者不同的参数组合，对淀粉糊化和蛋白质变性的影响效果不同，影响小麦加工品质，面条品质因而发生变化。由 F 值和 P 值可知影

响因子的主效应顺序为：C>A>B，即湿热处理时间>湿热处理温度>小麦初始水分含量。

表 4 响应面试验方差分析

Table 4 ANOVA for response surface experiments						
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1.54	9	0.171 6	130.47	<0.000 1	**
A	0.035 6	1	0.035 6	27.06	0.001 3	**
B	0.034 7	1	0.034 7	26.38	0.001 3	**
C	0.135 0	1	0.135 0	102.68	<0.000 1	**
AB	0.000 4	1	0.000 4	0.3011	0.600 2	
AC	0.000 1	1	0.000 1	0.0776	0.788 7	
BC	0.044 0	1	0.044 0	33.44	0.000 7	**
A ²	0.433 0	1	0.433 0	329.28	<0.000 1	**
B ²	0.494 4	1	0.494 4	375.89	<0.000 1	**
C ²	0.234 8	1	0.234 8	178.54	<0.000 1	**
残差	0.009 2	7	0.001 3			
失拟项	0.005 7	3	0.001 9	2.20	0.230 9	
误差项	0.003 5	4	0.000 9			
总和	1.55	16				
R ²	0.994 1					
R _{Adj} ²	0.986 5					

注：** 表示极显著（P<0.01）。

2.6.3 模拟交互项的解析

曲面的陡峭程度可反映各因素之间交互作用对响应值的影响程度；等高线的疏密程度及形状可以反映各因素之间的交互作用的显著性^[32]。湿热处理温度、小麦初始水分含量、湿热处理时间三者的交互作用对面条综合评分的响应面见图 5。图 5c 曲面坡度陡峭，等高线呈椭圆形，3D 曲面朝下且存在顶点，表示湿热处理时间和水分含量对综合评分 Y 交互作用明显，与表 4 的数据有着较好的一致性。由图 5c 可知，在响应面优化实验条件范围内，随着处理时间和水分含量的升高，面条评分均呈现先增大后减小趋势，说明较长的处理时间和较高的水分含量会使综合评分下降。图 5a 等高线图为圆形，说明温度与水分含量之间的交互作用不显著。

2.6.4 验证实验

通过 Design-Expert 13 分析得到最佳工艺条件为湿热处理温度、小麦初始水分含量、湿热处理时间，在此条件下得到湿热处理后面条综合评分为 0.929，根据实际情况进行修正，得到工艺条件为：湿热处理温度 56 ℃、小麦初始水分含量 18%、湿热处理时间 35 min。此条件下得到的面条感官评分为 83.8、面条蒸煮损失率为 6.02%，综合评分为 0.93，与试验预测结果接近。

表 5 验证实验结果
Table 5 Verification results

样品	硬度/g	弹性	咀嚼性	吸水率/%	蒸煮损失率/%	感官评分
对照组	1 508.14 ± 34.23 ^a	0.94 ± 0.00 ^a	1 216.11 ± 18.89 ^a	193.94 ± 3.60 ^b	6.09 ± 0.05 ^a	84.1 ± 0.9 ^a
湿热处理组	1 520.03 ± 43.09 ^a	0.93 ± 0.00 ^a	1 224.17 ± 28.90 ^a	208.74 ± 7.22 ^a	6.02 ± 0.06 ^a	83.8 ± 1.5 ^a

注：表中同一列上标字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

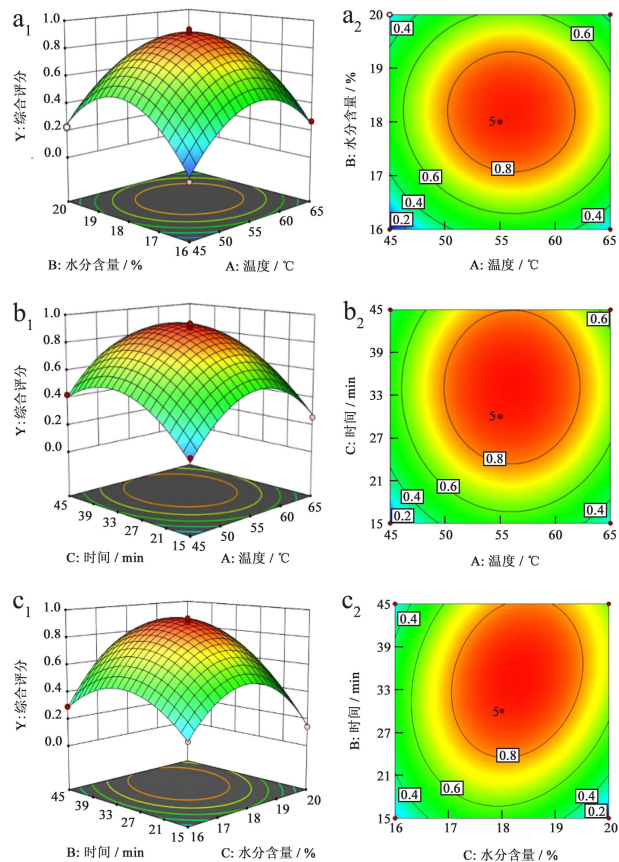


图 5 因素交互作用的响应面图和等高线图
Fig.5 Response surface plots and contour plots of factor interactions

注：a 表示湿热处理温度与小麦初始水分含量；b 表示湿热处理温度与时间；c 表示湿热处理时间与小麦初始水分含量。

采用优化后的湿热处理条件对小麦进行处理，之后磨粉制作面条，以未处理小麦为对照组，分析面条品质变化，结果见表 5。湿热处理后面条硬度、咀嚼性稍有增加，吸水率显著增加达 7.63%，蒸煮损失率降低，感官评分与对照组相当。这表明 18% 水分含量的小麦经 56℃ 处理 35 min 后，面条品质稍有提升，该条件处理不会使小麦加工品质发生劣变。

3 结论

本研究从面筋蛋白组分及亚基占比的角度分析了湿热处理参数对面条品质的影响。小麦经过高温长时（温度>75℃、时间>60 min）的湿热处理，会使麦

谷蛋白含量下降，醇溶蛋白含量升高，麦谷/醇溶蛋白比值下降，HMW-GS 和 LMW-GS 含量显著降低， γ -亚基含量显著增加，从而导致面条蒸煮品质、硬度、弹性和咀嚼性下降。小麦湿热处理因素对面条品质的影响主次顺序为：时间>温度>水分含量；小麦湿热处理的优化工艺条件为：温度 56℃、水分含量 18%、时间 35 min。在此条件下处理的小麦经磨粉制得的面条品质有所提升。小麦湿热处理除了影响蛋白组成和亚基占比外，可能还导致蛋白质二级结构变化和巯基/二硫键交换反应。后续可进一步从这些角度进行深入研究，以更加全面地阐明小麦湿热处理对小麦加工品质的影响机制。

参考文献

[1] HAKAN K. Influence of storage conditions on the quality properties of wheat varieties [J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 62: 8-15.

[2] 张惠琴,臧清露,李超,等.小麦粉主要成分对面条品质的影响研究[J].现代面粉工业,2021,35(1):16-19.

[3] PETER R S, NIGEL G, PETER S B, et al. The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 2002, 357 (1418): 133-142.

[4] 王天姣,杨玉玲,卢朝银,等.小麦籽粒蛋白质和淀粉特性与面条品质的关系[J].食品研究与开发,2023,44(7):169-174.

[5] ÖZLEM T, NECATI B T. The effect of microwave-assisted hydrothermal treatment on physicochemical and functional properties of wheat, barley, and rye flours [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 103925.

[6] YANG L P, WANG S Y, LI S N, et al. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical properties and starch digestibility of mix powder (wheat flour-black soybean flour) and corresponding cookies [J]. Gels, 2022, 8(7): 429.

[7] LIU Y X, JIA Z Y, LI M M, et al. Effect of heat-moisture treatment of wheat (*Triticum aestivum* L.) grain on micronutrient content of flour, and noodles and bread qualities [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 115: 103836.

[8] 王辉,马传喜,徐风,等.热处理对小麦和面特性的影响[J].麦类作物,1999,19(6):42-44.

[9] 马梦瑶,谢岩黎,范亭亭,等.热加工对小麦蛋白结构和消化特性的影响[J].中国粮油学报,2021,36(12):50-55.

[10] LIU Y X, LI M M, GUAN E Q, et al. Modification of soft wheat protein for improving cake quality by superheated steam treatment

- of wheat grain [J]. Foods, 2023, 12(16): 2992.
- [11] CETINER B, ACAR O, KAHRAMAN K, et al. An investigation on the effect of heat-moisture treatment on baking quality of wheat by using response surface methodology [J]. Cereal Science, 2017, 74: 103-111.
- [12] BAO J S, ZHOU X, HU Y Q, et al. Resistant starch content and physicochemical properties of non-waxy rice starches modified by pullulanase, heat-moisture treatment, and citric acid [J]. Journal of Cereal Science, 2022, 105: 103472.
- [13] ABHILASHA A, KAUR L, MONRO J, et al. Effects of hydrothermal treatment and low-temperature storage of whole wheat grains on *in vitro* starch hydrolysis and flour properties [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133516.
- [14] HERBERT W. Comparative investigations of gluten proteins from different wheat species I. Qualitative and quantitative composition of gluten protein types [J]. European Food Research and Technology, 2000, 211: 262-268.
- [15] 蔡梦迪,李玉辉,沈春霞,等.响应曲面设计结合熵权法优化石磨全麦挂面配方[J].食品与发酵工业,2024,50(5):259-266.
- [16] ZOU J Q, LI P F. Modelling of litchi shelf life based on the entropy weight method [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 25: 100509.
- [17] SHIORI K, ULRIKE B, ANETTE M, et al. Influence of temperature during grain filling on gluten viscoelastic properties and gluten protein composition [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 96(1): 122-130.
- [18] CHO S W, KANG C S, KO H S, et al. Influence of protein characteristics and the portion of gluten on end-use quality in Korean wheat cultivars [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(8): 1706-1719.
- [19] SCHOFIELD J D, BOTTOMLEY R C, TIMMS M F, et al. The effect of heat on wheat gluten and the involvement of sulfhydryl-disulfide interchange reactions [J]. Journal of Cereal Science, 1983, 1(4): 241-253.
- [20] LAGRAIN B, THEWISSEN B G, BRIJS K, et al. Mechanism of gliadin-glutenin cross-linking during hydrothermal treatment [J]. Food Chemistry, 2008, 107(2): 753-760.
- [21] NISHA C, PRIYA D, B S K. Evaluation of molecular weight distribution of unreduced wheat gluten proteins associated with noodle quality [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 53(6): 2695-2704.
- [22] 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.
- [23] 王玮,魏秀英,薛文通.小麦品质与食品品质研究现状[J].食品工业科技,2008,9:292-295.
- [24] 邓志英.小麦高分子量谷蛋白亚基表达量及其对加工品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2005.
- [25] 陆启玉.小麦面粉中主要组分对面条特性影响的研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [26] 温娅晴,屈念念,张剑,等.常温储藏中麦谷蛋白物理指标的变化及其对挂面品质的影响[J].河南农业大学学报,2022,56(4):642-651.
- [27] 何瑾璇,刘翀,郑学玲.中高温干燥对发酵挂面品质的影响[J].现代食品科技,2022,38(10):227-234.
- [28] YAO M D, LI M, DHITAL S, et al. Texture and digestion of noodles with varied gluten contents and cooking time: The view from protein matrix and inner structure [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126230.
- [29] 郭颖.不同烘干温度对挂面品质影响的研究[D].郑州:河南工业大学,2015.
- [30] 赵登登,周文化.面粉的糊化特性与鲜湿面条品质的关系[J].食品与机械,2013,29(6):26-29.
- [31] 陈远娇,杨光,杨波,等.糯米的湿热处理及其结构表征[J].包装工程,2021,42(9):124-134.
- [32] 甘增鹏,唐雪,刘惠惠,等.湿热处理对甘薯粉条食用品质及消化性能的影响[J].中国食品学报,2022,22(5):169-179.