DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250930008
引用格式: 冯媛, 陈尚兵, 王平东, 等. 低温等离子体处理对小麦粉品质特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 79–85.
FENG Y, CHEN SB, WANG PD, *et al*. Influence of low-temperature plasma treatment on the quality characteristics of *Triticum aestivum* L. flour [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 79–85. (in Chinese with English abstract).

低温等离子体处理对小麦粉品质特性的影响

冯 媛[1], 陈尚兵[2], 王平东[2], 袁华山[2], 李光磊[1], 邢常瑞[1], 袁 建[1*]

(1. 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/江苏省粮油品质控制及深加工技术重点实验室, 南京 210023; 2. 中储粮江苏质检中心有限公司, 南京 211151)

摘 要: 目的 探究低温等离子体处理对小麦粉品质特性的影响。**方法** 本研究采用不同时间和功率的气流式低温等离子体处理小麦粉, 系统分析了其品质指标的变化规律。**结果** 在低于 200 W 功率处理时, 损伤淀粉含量和蛋白质受影响较小, 而游离氨基酸总量对低温等离子体处理高度敏感, 在 20 min、200 W 的处理条件下, 降幅达 90.1%, 同时脂肪酸含量下降 28.6%、面筋指数下降 16.4%。但在 10 min、120 W 的处理条件下, 面筋指数可提升至 97.37%, 表明适度的等离子体处理能改善面筋网络。此外, 所有处理组的回生值均显著增加(P<0.05, 增幅 17.7%~49.7%), 淀粉酶活性均显著降低(P<0.05)。**结论** 低温等离子体处理对小麦粉品质的影响具有指标特异性, 该研究为调控小麦粉加工适应性及该技术的精准应用提供了依据。

关键词: 低温等离子体; 小麦粉; 面团特性; 品质特性

Influence of low-temperature plasma treatment on the quality characteristics of *Triticum aestivum* L. flour

FENG Yuan[1], CHEN Shang-Bing[2], WANG Ping-Dong[2], YUAN Hua-Shan[2], LI Guang-Lei[1], XING Chang-Rui[1], YUAN Jian[1*]

(1. *School of Food Science and Engineering*, *Nanjing University of Finance and Economics*/*Jiangsu Collaborative Innovation Center of Modern Grain Circulation and Safety*/*Jiangsu Key Laboratory of Grain and Oil Quality Control and Deep Processing Technology*, *Nanjing* 210023, *China*; 2. *Sinograin Jiangsu Quality Inspection Center Co*., *Ltd*., *Nanjing* 211151, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigated the effects of low-temperature plasma treatment on the quality characteristics of *Triticum aestivum* L. flour. **Methods** In this study, wheat flour was treated with atmospheric pressure low-temperature plasma at different times and power levels. The variation patterns of its quality indicators were systematically analyzed. **Results** When the treatment power was below 200 W, the starch damage content and protein content were minimally affected, whereas the total free amino acids were highly sensitive to the low-temperature plasma treatment, decreasing by 90.1% under the conditions of 200 W for 20 minutes. Simultaneously, the fatty acid content dropped by 28.6%, and the gluten index decreased by 16.4%. However, under

收稿日期: 2025-09-30
基金项目: 中储粮集团公司 2024 年科技研发项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)
第一作者: 冯媛(2001—), 女, 硕士, 主要研究方向为粮食质量与品质控制。E-mail: fyuan0202@163.com
***通信作者:** 袁建(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为粮食质量与品质控制。E-mail: yjian_nj@163.com

the conditions of 120 W for 10 minutes, the gluten index increased to 97.4%, indicating that moderate plasma treatment could improve the gluten network structure. In addition, the setback values of all treatment groups increased significantly (P<0.05, increase of 17.7%-49.7%), and the amylase activity decreased significantly (P<0.05). **Conclusion** The influence of low-temperature plasma treatment on the quality of wheat flour is indicator-specific. This study provides a basis for regulating the adaptability of wheat flour processing and the precise application of this technology.

KEY WORDS: low-temperature plasma; *Triticum aestivum* L. flour; dough characteristics; quality characteristics

0 引 言

小麦是我国主要的粮食作物和口粮品种之一。据统计, 2024 年, 我国小麦年产量已突破 1.4 亿顿, 播种面积达 2358.7 万公顷, 在粮食作物中仅次于玉米和稻谷, 其生产与加工对国民饮食结构具有重要影响[1]。但是部分小麦粉有稳定时间短、拉伸阻力低、烘焙特性差等的缺点, 严重影响其使用价值, 对其品质改善的需求日益增加[2]。

低温等离子体技术是近年来迅速发展起来的一种新型非热加工技术[3], 其是指中性气体在室温条件下, 通过微波、光脉冲、交流电和直流电等多种激发源产生的带电粒子和不带电粒子以及紫外线、γ 射线、β 射线等活性成分的混合体系[4], 具有操作简单、能量利用率高、处理周期短及环境友好等显著优势, 在食品加工领域展现出广阔应用前景[5]。已有研究证实, 低温等离子体可通过修饰食品组分的表面结构与官能团影响其品质特性。高光标等[6]发现, 低温等离子体处理使小麦粉表面物理特性发生改变, 使电导率与水分吸收比率均呈显著提升趋势。LI 等[7]研究表明, 低温等离子体处理可缩小大豆分离蛋白的粒径, 并对蛋白质表面产生蚀刻作用。ZHANG 等[8]研究发现, 利用氮气、氦气及氧气作为气源时, 辉光放电等离子体对淀粉可以产生蚀刻作用, 且氧气的蚀刻速率较高, 蚀刻效应随着放电功率及处理时间的增大而增加。以上研究结果表明, 等离子体成分均可以修饰食品组分(脂质、蛋白质、淀粉等)的表面结构和官能团, 是非热加工改善食品品质特性的重要手段。

目前, 低温等离子技术在小麦粉品质改性领域已有相关研究。张静雯等[9]采用介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)式低温等离子体处理黑青稞、黑小麦、藜麦 3 种全谷物粉, 发现处理后样品的脂肪氧化酶(lipid oxidase, LOX)活力与水分含量均显著降低(P<0.05), 且黑小麦和藜麦的吸水指数显著提升(P<0.05)。刘婷等[10]报道低温等离子体处理能显著提高小麦的面筋指数, 延长面团的形成时间与稳定时间。MISRA 等[11]利用 DBD 式低温等离子体(60~70 kV, 50 Hz)处理硬麦和软麦小麦粉, 结果表明, 随着处理功率的增加与时间的延长, 面团强度提高, 最佳混合时间延长, 蛋白质二级结构中 α-螺旋和 β-转角占比增加, β-折叠占比减少。CHAPLE 等[12]采用空气 DBD 式低温等离子体反应器(80 kV, 50 Hz)处理小麦粉 5~30 min, 发现处理后样品水合特性增强, 糊化最终黏度上升, 吸热焓和结晶度降低, 推测与等离子体诱导的淀粉解聚有关。尽管现有研究已揭示部分规律, 但低温等离子体对小麦粉品质特性及其衍生产品面团的影响仍缺乏全面研究。

本研究旨在采用低温等离子体技术, 对小麦粉进行处理, 对比不同处理条件下小麦粉的损伤淀粉含量、蛋白质含量、游离氨基酸总量、脂肪酸值、面筋质量、热机械特性的变化。系统研究等离子体处理对小麦粉及其衍生产品面团品质特性的影响, 为低温等离子体技术在小麦粉加工过程中的应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦粉(中筋, 水分含量 9.5%), 江苏海福食品有限公司。

氯化钠、氢氧化钠、无水硫酸铜、碘化钾、十二烷基硫酸钠(分析纯, 上海国药集团化学试剂有限公司); 浓硫酸(分析纯, 谷城县福兴化工有限公司); 0.1 mol/L 稀盐酸滴定标准溶液(分析纯, 上海环球标准溶液有限公司); 硫代硫酸钠(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 硼酸(分析纯, 洛阳昊华化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

CTP-2000K 定制管式双介质阻挡放电等离子体处理反应器(南京苏曼等离子体有限公司); TM3000 台式扫描电子显微镜、U-3900 紫外可见分光光度计(日本日立科学仪器有限公司); AB204-S 分析天平(精度 0.01 mg, 瑞士 Metterler Toledo 公司); Mixolab 混合试验仪、SDmatic 损伤淀粉测定仪(法国肖邦 Chopin Technologies 公司); JJJM54S 面筋洗涤仪、JLZM 面筋离心指数测定仪(上海嘉定粮油仪器有限公司); K1100F 自动凯氏定氮仪(海能仪器有限公司); DHO824 RIGOL 数字示波器(西安安泰有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 低温等离子体处理条件

设置本实验对小麦粉进行处理的时间和功率, 具体参数如表 1 所示。

表 1　低温等离子体处理条件
Table 1　Low-temperature plasma treatment conditions

气体类型	气体流量/(L/min)	处理时间/min	输入电压/V	输入电流/A	输出电压顶端值/kV	输出电流有效值/mA	脉冲频率/Hz
空气	3	0	50	1	13	31	200
		5	100	1	20	51	200
		10	150	1	27	67	200
		20	180	1	31	87	200

1.3.2　样品处理

将小麦粉样品分装到塑封袋, 抽真空后放入冷库中储存。每次使用前, 先将样品放到室温条件下平衡 2 h。使用塑料称量皿每次称取(50±5) g 小麦粉样品装入 1000 mL 广口瓶中, 盖上橡胶塞, 然后将等离子体出气管插入橡胶塞, 出气管高度位置在小麦粉样品以下, 调节气体流量, 打开等离子体电源, 设置参数, 开始处理样品, 为尽量均匀处理样品, 每隔 3 min 晃动一次瓶身。

1.3.3　小麦粉理化指标测定

(1)水分含量测定。按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法 直接干燥法进行测定。

(2)小麦粉损伤淀粉含量。按照 GB/T 31577—2015《粮油检验 小麦粉损伤淀粉测定 安倍计法》进行测定

(3)小麦粉蛋白质含量。按照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法 凯式定氮法进行测定。

(4)小麦粉游离氨基酸总量测定。参考姜平等[13]的方法。

(5)小麦粉脂肪酸值。按照 GB/T 5510—2024《粮油检验 谷物及制品脂肪酸值的测定》进行测定。

(6)小麦粉面筋含量及面筋质量。按照 GB/T 5506.2—2024《小麦和小麦粉 面筋含量》第 2 部分: 仪器法测定湿面筋和面筋指数进行测定。

(7)小麦粉热机械特性。按照 AACC 54—60.01 标准, 使用混合实验仪测定小麦粉的吸水率、形成时间和稳定时间。

1.4　数据处理

所有测定结果均进行 3 次重复实验。使用 SPSS 27.0 软件对数据进行方差分析。利用邓肯检验对实验结果进行显著性差异分析(P<0.05), 采用 Origin 2024 绘图软件进行图表的绘制。

2　结果与分析

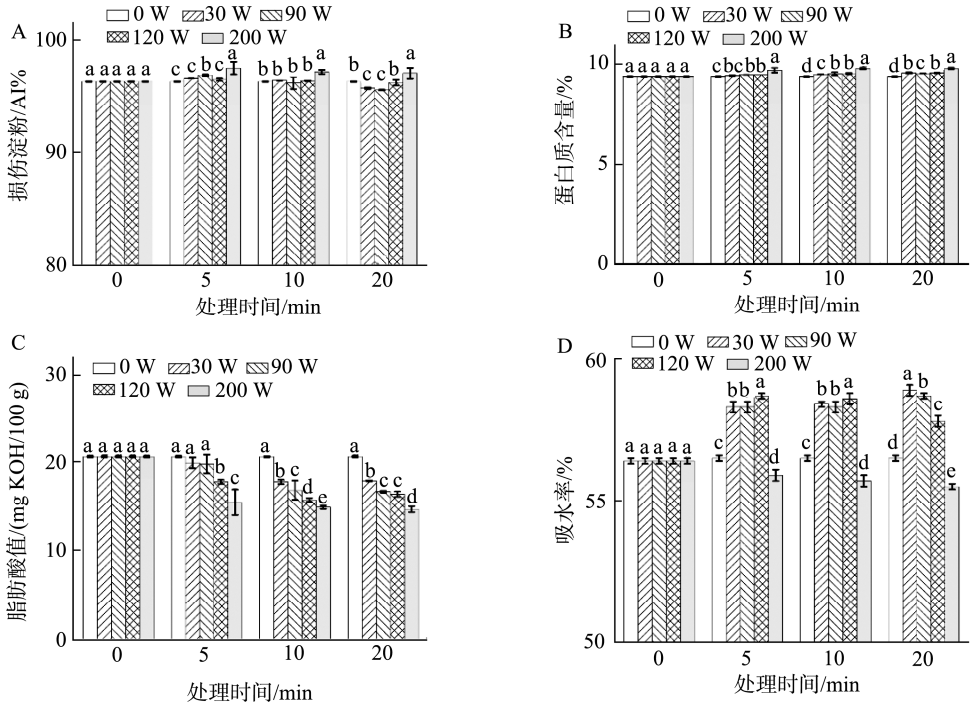
2.1　低温等离子体电源输出功率计算和效果分析

为测定调制脉冲交流高压电源作用于同轴式双介质阻挡放电的输出功率, 本研究依据图形法原理, 通过计算 Lissajous 图形的包络面积, 确定反应器输出功率[14]。原始输出波形中叠加了若干更高频率的正弦波波形, 由于单个正弦波周期会形成独立的封闭闭合曲线, 导致该脉冲周期对应的 Lissajous 图形中叠加了若干不同大小的闭合曲线, 基于放电功率正比于多组闭合曲线的总面积, 对实验所得的 Lissajous 图形进行积分运算求其面积, 最终测得输出功率分别为 30、90、120、200 W。

2.2　不同低温等离子体条件处理小麦粉特性变化分析

2.2.1　小麦粉中损伤淀粉、蛋白质、脂肪酸和吸水率变化分析

小麦粉中损伤淀粉的含量是影响其吸水性及面团揉混特性的关键指标[15]。由图 1A 可知, 在不同处理时间与处理功率的低温等离子体处理条件下, 经损伤淀粉仪测定的小麦粉碘吸收率统计结果为 95.1%~96.9%。在 200 W 功率处理时, 损伤淀粉含量升高, 而在低于 200 W 处理条件下时, 损伤淀粉含量受等离子处理的影响较小, 不影响小麦粉加工性能稳定性。小麦粉的食用品质和加工品质受蛋白质含量、面筋强度、淀粉特性、颜色、硬度等因素影响[16]。图 1B 结果显示, 不同等离子体处理条件下小麦粉蛋白质含量稳定在 9.5%~9.7%之间, 有报道表明, 低温等离子体处理会导致蛋白质二级结构发生变化, β-转角的比例显著增加[17], 并且可降低游离巯基含量[18], 说明等离子体可能通过修饰蛋白质分子构象而非改变总量影响其功能特性。由图 1C 可知, 随着处理时间的延长及处理功率的增加, 游离脂肪酸值呈显著下降趋势(P<0.05)。在处理功率 200 W 条件下, 处理 5、10、20 min 的小麦粉脂肪酸较未处理组分别下降 24.8%、27.5%和 28.6%, 这一结果与 BAHRAMI 等[3]的研究结论相符, 游离脂肪酸是高度氧化性不稳定的, 低温等离子体处理对游离脂肪酸的影响是由于小麦粉中主要脂肪酸(如亚麻酸)的减少[19]。吸水率作为反映小麦粉揉制面团时最适加水量的指标, 在等离子体处理后呈现小幅波动。图 1D 显示, 在相同处理时间条件下, 随着处理功率的增加, 吸水率均呈现先增加后下降的趋势, 在 20 min, 200 W 处理条件下, 吸水率较未处理组降低 1.6%, 而在 20 min, 30 W 处理条件下吸水率达到最高值, 较未处理组提高 4.4%。这与低压辉光等离子体处理糙米后, 其吸水率提升的研究结果具有一致性, 推测可能与等离子体处理改变了小麦粉表面物理特性有关[20]。



注: 同一处理时间, 不同处理功率小写字母不同表示样品之间有显著性差异(P<0.05), 下同。

图 1 小麦粉理化指标

Fig.1 Physicochemical properties of *Triticum aestivum* L. flour

2.2.2 低温等离子体处理对小麦粉游离氨基酸总量的影响

图 2 显示了低温等离子体处理后小麦粉游离氨基酸含量的变化。统计分析表明, 在相同处理时间条件下, 随着处理功率的升高, 小麦粉中游离氨基酸含量呈显著下降的趋势(P<0.05); 在相同处理功率条件下, 随着处理时间的延长, 游离氨基酸含量同样表现出降低的趋势。整体来看, 不同处理条件下游离氨基酸含量的降幅范围为 9.4%~90.1%。其中 20 min, 200 W 处理处理条件下游离氨基酸含量的降幅最为显著, 较未处理组降低 90.1%。这可能是由于氨基酸侧链对低温等离子体具有敏感性, 易受放电等离子体产生的活性物质的影响, 诱导其降解[21]。比如在 pH 为 3.0 且有氧气存在的条件下, 几乎所有经 γ 射线照射受损的半胱氨酸都转化成了胱氨酸[22], 同样, 半胱氨酸中的巯基也易受放电等离子体产生的活性物质影响[23], 进而导致游离氨基酸含量下降。

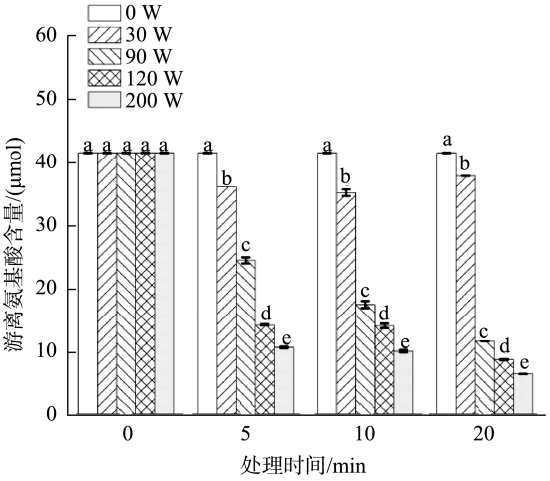


图 2 小麦粉样品中游离氨基酸含量

Fig.2 Free amino acid content in *Triticum aestivum* L. flour samples

2.2.3 小麦粉面筋含量及面筋质量变化分析

小麦粉面筋含量及面筋质量反映小麦粉的加工品质, 影响面制品的质构与口感特性[24]。不同处理时间及功率的等离子体处理对小麦面筋含量及面筋质量的影响结果如表 2 所示。由表 2 可知, 在处理功率 120 W, 处理时间 5、10、20 min 条件下, 面筋指数较未处理组分别增加 0.3%、3.5%、2.3%, 前期研究发现大气压等离子体处理可使小麦粉中游离巯基含量减少, 二硫键含量增加, 说明低温等离子体可以通过促进巯基氧化成二硫键来增加面筋网络结构的强度[25]。在 30 W 处理功率条件下, 随着处理时间的增长, 湿面筋含量呈逐渐降低趋势; 当处理功率为 200 W 时, 面筋指数呈现不同程度的降低, 其中在处理时间 20 min 条件下, 面筋指数下降 16.4%, 同时, 与对照组相比, 面筋吸水率下降 27.5%。这可能是在处理过程中, 随着处理时间的延长及功率的增大, 等离子体中的氧化性物质导致小麦粉蛋白分子间的非共价键及二硫键断裂, 使谷蛋白结构变得松散, 进而影响面筋网络的形成能力[26]。

表 2　小麦粉面筋含量及面筋质量

Table 2　Gluten content and gluten quality of *Triticum aestivum* L. flour

处理时间/min	处理功率/W	湿面筋含量/%	干面筋含量/%	面筋指数/%	面筋吸水率/%
5	0	27.10±0.08^{b}	7.50±0.26^{e}	94.10±0.54^{b}	261.33±4.70^{a}
	30	27.72±0.16^{a}	7.80±0.14^{d}	91.73±0.37^{c}	256.40±3.82^{b}
	90	27.10±0.11^{b}	8.10±0.13^{c}	94.83±0.61^{a}	234.57±3.68^{c}
	120	26.55±0.29^{c}	8.40±0.08^{b}	94.36±0.74^{ab}	216.67±2.16^{d}
	200	27.07±0.14^{b}	8.89±0.29^{a}	84.50±0.14^{d}	204.49±1.65^{e}
10	0	27.10±0.08^{a}	7.50±0.26^{c}	94.10±0.54^{d}	261.33±4.70^{a}
	30	25.37±0.29^{c}	7.89±0.06^{bc}	96.46±0.42^{b}	221.52±3.67^{c}
	90	26.75±0.17^{b}	7.98±0.16^{b}	95.52±0.55^{c}	235.00±4.77^{b}
	120	26.60±0.22^{b}	8.90±0.67^{a}	97.37±0.32^{a}	198.88±3.46^{d}
	200	26.99±0.14^{a}	9.10±0.25^{a}	79.26±0.24^{e}	196.00±2.49^{d}
20	0	27.10±0.08^{a}	7.50±0.26^{c}	94.10±0.54^{b}	261.33±4.70^{a}
	30	22.39±0.27^{d}	7.69±0.09^{c}	85.89±0.34^{d}	191.07±2.11^{d}
	90	23.37±0.03^{c}	8.19±0.12^{b}	87.23±0.21^{c}	234.15±1.47^{b}
	120	26.60±0.28^{b}	8.10±0.07^{b}	96.24±0.22^{a}	228.40±2.14^{c}
	200	27.18±0.14^{a}	9.39±0.02^{a}	78.68±0.40^{e}	189.36±1.50^{d}

注: 同一处理时间、不同处理功率小写字母不同表示样品之间有显著性差异(P<0.05), 下同。

2.2.4　小麦粉热机械特性的变化

小麦粉粉质特性是反映面团流变学特性的重要指标[27], 直接关联面制品加工过程中的操作适应性。等离子体处理对小麦粉的热机械特性的影响结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 可知, 在 5 min, 30 W 处理条件下, 形成时间较对照组显著增加(P<0.05), 由 1.37 min 延长至 7.45 min, 在 20 min 处理时长下, 形成时间较对照组增加 299.3%~321.2%。稳定时间在相同处理时间条件下, 随着处理功率的升高整体呈现显著下降的趋势, 其中 20 min, 120 W 处理组的稳定时间降幅最大, 由 9.97 min 降至 7.97 min。由于稳定时间能够反映小麦粉中二硫键的稳定程度[28]、面团的稳定性以及耐揉程度[29], 这一结果表明等离子体处理会破坏蛋白质结构, 导

表 3　面团形成时间、小麦粉糊化峰值及回生程度

Table 3　Dough development time, pasting peak of *Triticum aestivum* L. flour and retrogradation degree

处理时间/min	处理功率/W	形成时间/min	稳定时间/min	C3/nm	C3-C4/nm	C5/nm	C5-C4/nm
5	0	1.37±0.27^{c}	9.97±0.15^{a}	1.90±0.07^{c}	0.57±0.02^{a}	2.86±0.10^{c}	1.53±0.01^{c}
	30	7.45±0.32^{a}	9.78±0.20^{ab}	2.14±0.03^{a}	0.41±0.02^{b}	3.71±0.20^{a}	1.98±0.02^{a}
	90	1.37±0.26^{c}	9.55±0.23^{b}	1.97±0.03^{b}	0.07±0.00^{e}	3.55±0.06^{b}	1.95±0.08^{a}
	120	1.27±0.22^{c}	9.48±0.36^{b}	1.99±0.02^{b}	0.27±0.01^{c}	3.71±0.02^{a}	1.99±0.02^{a}
	200	7.03±0.40^{b}	9.03±0.29^{c}	1.98±0.02^{b}	0.13±0.00^{d}	3.65±0.08^{ab}	1.80±0.06^{b}
10	0	1.37±0.27^{bc}	9.97±0.15^{a}	1.90±0.07^{c}	0.57±0.02^{a}	2.86±0.10^{d}	1.53±0.01^{c}
	30	1.65±0.22^{b}	9.47±0.30^{b}	1.95±0.02^{bc}	0.42±0.02^{c}	3.59±0.13^{c}	2.06±0.11^{b}
	90	7.12±0.31^{a}	9.28±0.22^{bc}	1.99±0.02^{a}	0.45±0.01^{b}	3.83±0.08^{a}	2.29±0.13^{a}
	120	1.32±0.24^{c}	8.97±0.46^{c}	1.96±0.03^{ab}	0.46±0.02^{b}	3.75±0.04^{b}	2.25±0.10^{a}
	200	1.32±0.25^{c}	9.00±0.37^{c}	2.00±0.03^{a}	0.37±0.01^{d}	3.81±0.01^{ab}	2.18±0.02^{b}
20	0	1.37±0.27^{b}	9.97±0.15^{a}	1.90±0.07^{d}	0.57±0.02^{a}	2.86±0.10^{d}	1.53±0.01^{d}
	30	5.50±0.33^{a}	8.58±0.35^{b}	2.00±0.01^{bc}	0.39±0.02^{b}	3.47±0.02^{c}	1.86±0.03^{c}
	90	5.77±0.40^{a}	8.12±0.21^{c}	2.03±0.02^{ab}	0.09±0.02^{d}	3.94±0.09^{a}	2.00±0.12^{a}
	120	5.47±0.34^{a}	7.97±0.37^{c}	1.97±0.01^{c}	0.15±0.04^{c}	3.75±0.04^{b}	1.93±0.04^{b}
	200	5.62±0.43^{a}	8.12±0.26^{c}	2.04±0.02^{a}	0.15±0.01^{c}	3.91±0.11^{a}	2.02±0.08^{a}

注: C3. 峰值扭矩; C3-C4. 淀粉崩解值; C5. 最终扭矩; C5-C4. 淀粉回生程度。

表 4 面团淀粉酶活性及糊化速率

Table 4 Dough amylase activity and gelatinization rate

处理时间/min	处理功率/W	α/(nm/min)	β/(nm/min)	γ/(nm/min)	C3/C4/nm
5	0	0.014±0.006[a]	0.442±0.032[c]	0.002±0.002[a]	1.430±0.006[a]
	30	–0.014±0.016[b]	0.410±0.027[d]	–0.352±0.003[e]	1.241±0.018[b]
	90	–0.018±0.010[b]	0.504±0.036[ab]	–0.006±0.002[b]	1.040±0.007[e]
	120	–0.020±0.002[b]	0.534±0.018[a]	–0.010±0.001[c]	1.163±0.006[c]
	200	–0.010±0.006[b]	0.494±0.006[b]	–0.014±0.005[d]	1.071±0.011[d]
10	0	0.014±0.006[a]	0.442±0.032[a]	0.002±0.002[c]	1.433±0.006[a]
	30	–0.032±0.010[c]	0.442±0.062[a]	–0.058±0.011[d]	1.282±0.004[c]
	90	–0.052±0.003[d]	0.448±0.042[a]	0.018±0.003[b]	1.237±0.009[d]
	120	–0.054±0.021[d]	0.408±0.036[a]	0.014±0.002[b]	1.311±0.010[b]
	200	–0.020±0.001[b]	0.346±0.037[b]	0.026±0.001[a]	1.230±0.006[d]
20	0	0.014±0.006[a]	0.442±0.032[b]	0.002±0.002[b]	1.431±0.006[a]
	30	–0.040±0.001[b]	0.478±0.016[a]	–0.198±0.011[d]	1.245±0.007[b]
	90	–0.074±0.012[c]	0.436±0.042[b]	–0.108±0.002[c]	1.050±0.003[d]
	120	–0.072±0.007[c]	0.486±0.018[a]	0.016±0.008[a]	1.081±0.002[c]
	200	–0.066±0.011[c]	0.124±0.007[c]	–0.114±0.002[c]	1.081±0.002[c]

注: α. 加热速率; β. 糊化速率; γ. 酶解速率; C3/C4. 淀粉酶活性。

致二硫键断裂, 进而引发小麦粉内部结构改变, 使小麦粉内部结构更加疏松, 而在较高功率下, 稳定时间下降更显著, 此时面筋蛋白网络结构易被破坏。经低温等离子体处理的小麦粉峰值黏度 C3 均有所增加, 20 min, 120 W 处理组的小麦粉峰值黏度 C3 值达 1.97 nm, 较未处理组提升 3.7%。C4 至 C5 为降温阶段, 在此阶段淀粉分子糊化后遇冷重结晶发生凝胶化现象[30]。所有处理组回生值较对照组均显著增加, 增加范围为 17.7%~49.7%, 表明等离子体处理可增强淀粉的回生能力, 这对提升面制品的结构持水性具有积极意义。由表 4 可知, 经过等离子体处理的小麦粉加热速率显著降低(P<0.05), 其中 20 min, 90 W 处理组的加热速率较对照组降低了 628.6 %。酶解速率分析显示, 处理功率为 30 W, 处理时间为 5 min 及 10 min 条件下, 处理组的酶解速率由对照组的 0.002 nm/min 分别降至–0.352 nm/min 和–0.058 nm/min, 表明淀粉酶活性受到抑制。这一结果与 C3/C4 值的变化规律一致, 即所有处理组的 C3/C4 值较对照组显著降低(P<0.05), 且在 5 min, 10 min 处理时间下, 随着功率的增加, 淀粉酶活性逐渐减弱, 其中 5 min, 90 W 处理组的淀粉酶活性最弱, 较对照组降低了 27.3%。酶活性的减弱, 一方面是由于 α 螺旋结构的丧失及 β 折叠结构含量的减少, 另一方面是由于等离子体活性物质对氨基酸侧链进行了化学修饰[31]。

3 结 论

本研究通过多参数组合的低温等离子体处理实验, 揭示了其对小麦粉品质特性的影响。结果表明, 低温等离子体处理对不同指标的影响存在差异性: 对损伤淀粉含量及蛋白质含量的影响基本不显著, 而对游离氨基酸总量、脂肪酸含量、吸水率、面筋指数、回生值及淀粉酶活性等指标影响显著(P<0.05), 说明适度的等离子体处理可强化面筋网络与淀粉功能, 增强小麦粉的功能性, 高强度处理则会抑制蛋白质功能性与脂类稳定性。本研究系统阐明了低温等离子体处理参数对小麦粉品质特性的影响, 为非热加工技术改良小麦粉品质提供了新的数据支撑。

参考文献

[1] 杨洁. 2024 年我国粮食产量首次突破 1.4 万亿斤[N]. 中国证券报, 2025-01-21 (A02).
YANG J. In 2024, China's grain output exceeded 1.4 trillion jin for the first time [N]. China Securities Journal, 2025-01-21 (A02).

[2] 梁宝权, 王惠安. 关于面粉厂小麦品质指标的几点看法[J]. 粮油科学与工程, 2024, 38(5): 6–7.
LIANG BQ, WANG HAN. Perspectives on wheat quality indicators in flour mills [J]. Grain Oil Science and Engineering, 2024, 38(5): 6–7.

[3] BAHRAMI N, BAYLISS D, CHOPE G, *et al*. Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality [J]. Food Chemistry, 2016, 202: 247–253.

[4] 李琦, 支爱, 何学明, 等. 低温等离子体改性粮油植物蛋白结构的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 305–313.
LI Q, ZHI AI, HE XM, *et al*. Research progress of structure modification of grain and oil plant protein by cold plasma [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(11): 305–313.

[5] SAINZ-GARCÍA E, ALBA-ELÍAS F. Advances in the application of cold plasma technology in foods [J]. Foods, 2023, 12(7): 1388.

[6] 高光标, 吴建章, 李燕羽, 等. 冷等离子体在粮油行业应用研究进展

[J]. 中国油脂, 2022, 47(8): 133–140.
GAO GB, WU JZ, LI YY, *et al*. Application of cold plasma in grains and oils industry [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(8): 133–140.

[7] LI Q, SHEN F, HE X, *et al.* Modification of soy protein isolate using dielectric barrier discharge cold plasma assisted by modified atmosphere packaging [J]. Food Chemistry, 2023, 401: 134158.

[8] ZHANG B, LI R, YAN J. Study on activation and improvement of crop seeds by the application of plasma treating seeds equipment [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2018, 655: 37–42.

[9] 张静雯, 李梦晓, 刘笑笑. 低温等离子体处理对3种全谷物粉品质和脂肪氧化酶活性的影响[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(5): 55–60.
ZHANG JW, LI MX, LIU XX. Effects of low-temperature plasma treatment on the quality and lipoxygenase activity of three types of whole grain flour [J]. Cereals and Oils, 2025, 38(5): 55–60.

[10] 刘婷, 李淼, 齐先科, 等. 辉光放电冷等离子体处理对小麦加工品质的改善作用[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 87–94.
LIU T, LI M, QI XK, *et al*. Effect of glow discharge cold plasma treatment on improvement of wheat processing quality [J]. Food Science, 2023, 44(15): 87–94.

[11] MISRA NN, KAUR S, TIWARI BK, *et al.* Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 115–121.

[12] CHAPLE S, SARANGAPANI C, JONES J, *et al.* Effect of atmospheric cold plasma on the functional properties of whole wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and wheat flour [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102529.

[13] 姜平, 母冬梅, 李兴军. 粮食游离氨基酸总量测定方法研究[J]. 粮食科技与经济, 2014, 39(1): 28–31.
JIANG P, MU DM, LI XJ. Detailed method for determination of free amino acids in grains [J]. Food Science and Technology and Economy, 2014, 39(1): 28–31.

[14] 戴阳, 万良湜, 万京林, 等. 调制脉冲同轴式双介质阻挡放电输出功率计算研究[J]. 集成电路应用, 2020, 37(11): 4–7.
DAI Y, WAN LW, WAN JL, *et al*. Study on output power calculation of modulated pulse coaxial double dielectric barrier discharge [J]. Application of IC, 2020, 37(11): 4–7.

[15] WU F, LI J, YANG N, *et al.* The roles of starch structures in the pasting properties of wheat starch with different degrees of damage [J]. Starch-Starke, 2018, 70: 5–6.

[16] 何蔷薇, 张援文, 宛亮. 2018—2023 年武都系冬小麦品种的品质性状分析[J]. 现代农业科技, 2025(12): 17–18, 25.
HE QW, ZHANG YW, WAN L. Analysis of quality traits of winter wheat cultivars in the wudu series from 2018 to 2023 [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(12): 17–18, 25.

[17] HELD S, TYL CE, ANNOR GA. Effect of radio frequency cold plasma treatment on intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) flour and dough properties in comparison to hard and soft wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 1–8.

[18] SEGAT A, MISRA NN, CULLEN PJ, *et al.* Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of whey protein isolate model solution [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29: 247–254.

[19] CHAKRABORTY S, PULIVARTHI MK, RAJ AS, *et al.* Inactivation of lipase and lipoxygenase in whole wheat flour using atmospheric cold plasma and steam treatments: Kinetics, mechanism, and impact on its compositional properties [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 9.

[20] CHEN HH, CHEN YK, CHANG HC. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice [J]. Food Chemistry, 2012, 135(1): 74–79.

[21] ZHANG T, HE L, ZHANG M, *et al.* Physicochemical characterization and sensory enhancement of cold plasma treated black whole wheat flour [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 24366.

[22] KARGBO RB. Tumor-targeted bivalent protein degradation for application in cancer therapy [J]. ACS Medicinal Chemistry Letters, 2021, 12(3): 326–327.

[23] KE Z, YU Z, HUANG Q. Assessment of damage of glutathione by glow discharge plasma at the gas-solution interface through Raman spectroscopy [J]. Plasma Processes & Polymers, 2013, 10(2): 181–188.

[24] LI J, LI G, HAO J, *et al.* A comprehensive evaluation model for highland spring wheat cultivars: Assessing protein composition and dough quality [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 144: 107737.

[25] WANG Q, LI L, ZHENG X. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126267.

[26] LI X, ZHANG J, LIU X, *et al.* Effect of pulsed light treatment on the physicochemical properties of wheat flour and quality of fresh wet noodles [J]. Cereal Chemistry, 2022, 99: 4.

[27] CHANVRIER H, UTHAYAKUMARAN S, LILLFORD P. Rheological properties of wheat flour processed at low levels of hydration: Influence of starch and gluten [J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(3): 263–274.

[28] MA H, YANG Y, ZHAO J, *et al.* Relationship between the baking quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) and the protein composition and structure after shading [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138392.

[29] YANG A, CHEN H, TIAN H, *et al.* Sustainable protein-enriched biscuits: effects of mealworm protein powder on the properties of wheat flour and biscuit quality [J]. Foods, 2025, 14(17): 3063.

[30] LIANG W, ZHANG Q, DUAN H, *et al.* Understanding $CaCl_2$ induces surface gelatinization to promote cold plasma modified maize starch: Structure-effect relations [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 320: 121200.

[31] SEGAT A, MISRA NN, CULLEN PJ, *et al.* Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) on activity and structure of alkaline phosphatase [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 98: 181–188.

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)