

辉光放电冷等离子体处理对小麦加工品质的改善作用

刘 婷, 李 淼*, 齐先科, 王若兰*

(河南工业大学粮食和物资储备学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为改善小麦加工品质, 以新收获小麦为研究对象, 对其进行辉光放电冷等离子体处理, 研究处理后小麦面粉理化特性、面团流变学特性的变化, 进一步分析蛋白质分子质量分布及二级结构。结果表明, 两种气源(氧气/氩气)冷等离子体处理后小麦的面筋指数均显著增加($P < 0.05$); 面团的形成时间、稳定时间有所提高; 揉混特性参数中8 min中线曲线面积(midline integral at 8 min, MTxI)、8 min中线曲线带宽(midline width at 8 min, MTxW)显著增加($P < 0.05$), 弱化斜率(weakening slope, WS)显著降低($P < 0.05$); 储藏蛋白组分中大分子聚合物蛋白(F1)相对含量有所增加, 大分子聚合物蛋白与小分子聚合物蛋白相对含量比值(F1/F2)显著升高($P < 0.05$); 蛋白二级结构 β -折叠、 β -转角向更为有序的蛋白结构分子间 β -折叠转变。综上, 辉光放电冷等离子体处理改变了小麦籽粒中储藏蛋白的分子质量分布及二级结构, 明显增强了面团弹性、耐揉性并提高了面团抗拉伸特性, 一定程度改善了小麦加工品质。

关键词: 辉光放电冷等离子体; 小麦; 加工品质; 面粉理化特性; 面团流变学特性; 蛋白结构

Effect of Glow Discharge Cold Plasma Treatment on Improvement of Wheat Processing Quality

LIU Ting, LI Miao*, QI Xianke, WANG Ruolan*

(School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the processing quality of wheat, newly harvested wheat was treated with glow discharge cold plasma. The changes in the physicochemical properties of wheat flour and the rheological properties of wheat flour dough after the treatment were studied, and the molecular mass distribution and secondary structure of wheat flour proteins were furthermore analyzed. The results showed that the gluten index of wheat was significantly increased after cold plasma treatment with oxygen or argon as the gas source. Dough development time and stability time were improved, and the mixographic parameters midline integral at 8 min (MTxI) and midline width at 8 min (MTxW) were significantly increased ($P < 0.05$), while weakening slope (WS) was significantly decreased ($P < 0.05$). The content of macromolecular polymeric storage protein fraction F1 was increased, and the ratio between macromolecular polymeric storage protein fraction F1 and small-molecule polymeric storage protein fraction F2 was significantly increased ($P < 0.05$). The protein secondary structure was transformed from β -sheet and β -turn to more ordered intermolecular β -sheet. In conclusion, glow discharge cold plasma treatment changed the molecular mass distribution and secondary structure of wheat storage proteins, significantly enhanced the elasticity and mixing tolerance of dough, and improved the tensile resistance of dough, thereby enhancing the processing quality of wheat to some extent.

Keywords: glow discharge cold plasma; wheat; processing quality; flour physicochemical properties; dough rheological properties; protein structure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220920-193

中图分类号: TS211.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)15-0087-08

收稿日期: 2022-09-20

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21A550002); 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2019BS013)

第一作者简介: 刘婷(1997—)(ORCID: 0000-0003-4893-1368), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食储藏技术。

E-mail: lt2641448343@163.com

*通信作者简介: 李淼(1987—)(ORCID: 0000-0002-5603-5267), 女, 讲师, 博士, 研究方向为粮食储藏理论与技术。

E-mail: limiaohust@163.com

王若兰(1960—)(ORCID: 0000-0003-2090-7470), 女, 教授, 硕士, 研究方向为粮食储藏理论与技术、粮食储藏品质控制。E-mail: wangruol@163.com

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220920-193. <http://www.spkx.net.cn>

LIU Ting, LI Miao, QI Xianke, et al. Effect of glow discharge cold plasma treatment on improvement of wheat processing quality[J]. Food Science, 2023, 44(15): 87-94. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220920-193. <http://www.spkx.net.cn>

小麦作为三大重要谷物之一, 种植面积广泛, 对于世界粮食安全具有重要的保障作用^[1]。农业农村部报告数据显示, 我国2021年小麦产量约1.37亿 t, 占国内粮食总产量的20% (<http://zdscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/search.jsp>)。小麦籽粒几乎全部可食用且营养丰富, 富含淀粉、蛋白质、脂肪、矿物质、多种维生素等。其中, 面筋蛋白约占小麦籽粒总蛋白的75%~85%, 使得小麦粉遇水揉混可形成与其他谷物制粉相比独有的面筋网络结构^[2]。面筋蛋白主要由单体形式的醇溶蛋白和聚合体形式的麦谷蛋白构成, 赋予面团一定的黏弹性、持水性、延展性、抗拉伸性等; 面筋蛋白的数量和质量直接决定了小麦的加工品质, 对面制品的品质起主导作用^[3-4]。我国大部分小麦因受品种、环境条件和栽培措施等影响而存在面筋强度低、面粉加工品质不高等实际问题^[5]。目前, 改善小麦加工品质的方法主要有传统育种、配粉、添加改良剂等, 但均存在一定的局限性, 如培育出一个优质小麦品种所需育种周期较长, 配粉操作过程中易出现交叉污染、物料残留等现象, 改良剂添加量的相关法律法规体系仍不够完善等^[6-8]。

现用于改善食品加工品质的相关技术主要包括热处理、挤压膨化、超声波等, 但均有其不足之处, 即传统热处理会引起食品中营养成分的流失^[9]; 挤压膨化技术则会显著降低大麦中总酚和类黄酮含量^[10]; 超声波技术会引起食品产生不愉快的气味以及抗氧化物质的降解^[11]。冷等离子体作为一种新型非热加工技术, 具有操作简单、利用率高、耗时短、无污染等优点, 并且能够最大程度维持产品原有的颜色、质地和营养成分, 在食品领域表现出极大的应用潜能^[12-13]。已有研究证明, 冷等离子体具有较强的杀菌能力, 可显著降低小麦、果蔬、鸡蛋、牛奶、肉类等在加工、贮藏过程中产生的细菌、真菌、病毒等有害微生物, 从而延长食品的贮藏周期^[14-15]; Sohan等^[16]发现以氩气和氧气作为混合气源的低频辉光放电等离子体通过影响种子表面润湿性和幼苗根、茎中抗氧化酶的活性而促进了小麦种子发芽及幼苗生长。孟宁等^[17]研究发现低温等离子体处理通过增加糙米的加热吸水率、体积膨胀率及固形物损失率, 有效提升了糙米的蒸煮性能; 管学梅^[18]发现低温等离子体处理后糙米的蒸煮时间短于过热蒸汽处理样品, 显著短于未处理组样品, 且低温等离子体处理所引起的糙米体积膨胀率

和加热吸水率的增幅高于过热蒸汽处理样品; Liu Shuyang等^[19]研究表明低温冷等离子体处理能够提高燕麦粉的持水性、溶胀力和溶解度, 降低其峰值黏度、最终黏度、回生值, 并且一定程度抑制燕麦粉变质。综上所述, 冷等离子体技术相关研究主要体现在食品杀菌、农产品保鲜、促进种子萌发和改善谷物蒸煮品质等方面, 但其在改善谷物加工品质方面, 特别是直接作用于小麦籽粒以研究其对小麦加工品质的影响鲜有报道。

本实验采用辉光放电冷等离子体对小麦籽粒进行处理, 探究冷等离子体处理对小麦加工品质相关参数及籽粒中储藏蛋白分子质量分布、二级结构的影响, 旨在为冷等离子体技术在食品加工领域的合理利用提供一定的数据支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新收获小麦‘农大3432’, 于2021年6月购于河北德丰种业有限公司, 其基本信息如表1所示。

表1 ‘农大3432’小麦基本信息
Table 1 Basic information of wheat cultivar ‘Nongda 3432’

品种	粗蛋白 质量分数/%	水分 质量分数/%	硬度指数/%	收获地
‘农大3432’	11.47	11.60	68.32	河北省沧州市

十二烷基硫酸钠 (sodium dodecyl sulfate, SDS)、乳酸 (分析纯) 上海国药集团化学试剂有限公司; 无水乙醇、氢氧化钠、氯化钠、盐酸 (分析纯) 天津天力化学试剂有限公司; 甘油 (分析纯) 上海联硕生物科技有限公司; 二硫苏糖醇 (分析纯)、Bradford蛋白浓度测定试剂盒 (PC0010) 北京索莱宝科技有限公司; 磷酸氢二钠、二水合磷酸二氢钠 (分析纯) 天津科密欧化学试剂有限公司; β -巯基乙醇 (分析纯)、溴化钾 (光谱纯)、乙腈 (色谱纯)、三氟乙酸 (色谱纯) 上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

LRMM8040-3-D实验磨粉机 无锡锡粮机械制造有限公司; BLH-1780润麦器 浙江伯利恒仪器设备有限公司; LFS-30粉筛 沈阳仪丰诚实验设备有限公司; Multiskan FC酶标仪 美国Thermo Fisher科技有限

公司; H3-18KR离心机 湖南可成仪器设备有限公司; Kjeltac 8400凯氏定氮仪 丹麦Foss公司; 860704电子型拉伸仪、8101152电子型粉质仪 德国Brabender公司; 10 g Mixograph电子式揉混仪 美国National Manufacturing公司; JJJM54S面筋洗涤仪、JHGM面筋烘干仪、JLZM面筋指数测定仪 上海嘉定粮油仪器有限公司; Tensor II傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)仪 德国Bruker光谱仪器公司; Biosep-SEC-s4000空间排阻柱 美国Phenomenex公司; Waters E2695高效液相色谱仪 美国Waters公司; HD-2N辉光放电冷等离子体设备 江苏常州中科常泰等离子体科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 冷等离子体处理及小麦粉的制备

参照NY/T 1094.1—2006《小麦实验制粉 第1部分: 设备、样品制备和润麦》进行润麦^[20]。按下式计算出4 500 g小麦样品所需加水量为180 mL, 随后二者于润麦器中混合, 室温放置18 h, 期间数次搅拌。

$$\text{加水量/mL} = \frac{\text{小麦籽粒质量/g} \times (15 - \text{小麦籽粒原始水分质量分数/\%})}{100 - 15}$$

采用HD-2N型辉光放电冷等离子体设备处理上述样品, 具体处理条件为: 频率13.56 MHz; 电压220 V; 功率50 W; 工作气压30 Pa; 体积功率密度18.939 kW/m³; 处理时间10 s; 气源: 氧气(O₂)、氩气(Ar)。以未处理的小麦粉为对照(Control)。

参照虞泓等^[21]的方法制备小麦粉, 于室温下静置2周, 于4℃保存备用。

1.3.2 面粉相关基础参数的测定

参照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[22], 采用直接干燥法测定水分质量分数; 参照GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[23]测定蛋白质质量分数; 参照GB/T 21304—2007《小麦硬度测定 硬度指数法》^[24]测定硬度指数; 参照虞泓等^[21]的方法测定出粉率; 参照GB/T 15685—2011《粮油检验 小麦沉淀指数测定 SDS法》^[25]测定沉淀指数; 参照AACC 38-12.01方法^[26]测定湿面筋含量和面筋指数。

麦谷蛋白、醇溶蛋白含量: 根据李淼^[27]的方法制备蛋白标准品稀释液和麦谷蛋白、醇溶蛋白样品, 按照蛋白浓度测定试剂盒说明书操作进行测定。

1.3.3 流变学特性参数的测定

参照AACC 54-21.02^[28]的方法测定粉质特性参数; 参照AACC 54-10.01^[29]的方法测定拉伸特性参数; 参照AACC 54-40A^[30]的方法测定揉混特性参数。

1.3.4 尺寸排阻高效液相色谱分析

面粉蛋白的提取: 称取10 mg面粉置于2 mL离心管中, 加入1 mL 0.5 g、100 mL SDS-磷酸钠盐缓冲溶液

(pH 6.9), 超声15 s后, 12 000×g离心5 min, 上清液经0.45 μm滤膜过滤后, 于4℃保存备用。

流动相的配制: 500 mL蒸馏水经0.45 μm滤膜过滤, 装入1 L蓝口瓶, 然后于通风橱中依次加入500 mL乙腈及500 μL三氟乙酸, 混匀低温超声40 min, 备用。

尺寸排阻高效液相色谱(size-exclusion high performance liquid chromatography, SE-HPLC)检测条件: 进样量20 μL; 检测波长214 nm; 柱温40℃; 洗脱速率, 0.5 mL/min。

1.3.5 FTIR分析

参照Li Nan等^[31]的方法, 将面粉与干燥后的KBr粉末(质量比1:100)混合, 在研钵中充分研磨, 压成透明薄片, 采用FTIR在400~4 000 cm⁻¹范围内扫描64次, 用Omic 32和Peakfit 4.12软件对酰胺I带(1 600~1 700 cm⁻¹)进行分峰、求峰面积及曲线拟合等分析。

1.4 数据处理与分析

各实验均重复4次, 采用Microsoft Excel 2018和SPSS Statistics 25.0软件对数据进行单因素方差分析(P<0.05), 实验结果表示为平均值±标准差; 采用Origin 2018软件作图。

2 结果与分析

2.1 冷等离子体处理小麦的面粉品质相关参数

由表2可知, 所有样品的出粉率为64.25%~66.66%。小麦籽粒蛋白组成及各组分含量在决定面粉品质特性方面发挥着重要作用, 麦谷蛋白和醇溶蛋白的含量及其比例对小麦加工品质的贡献巨大^[32]。经两种气源冷等离子体处理的小麦中麦谷蛋白含量均有所提高, 分别为(7.19±0.08) μg/mg (O₂)和(6.75±0.15) μg/mg (Ar), 较Control组((6.73±0.13) μg/mg)分别增加了6.84%和0.30%。Control组与冷等离子体处理小麦样品在出粉率、麦谷蛋白含量、醇溶蛋白含量、麦谷蛋白/醇溶蛋白、沉淀指数方面均无显著差异(P>0.05)。由此可知, 两种气源冷等离子体处理对‘农大3432’小麦的籽粒蛋白组成及组分含量、沉淀指数无显著影响。

表2 冷等离子体处理对小麦面粉品质相关参数的影响

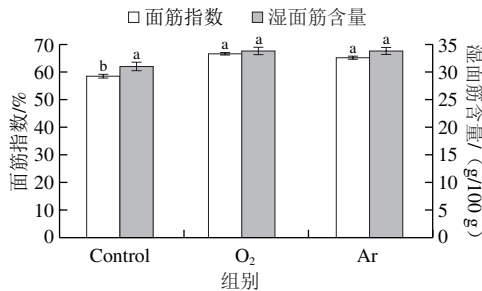
Table 2 Effect of cold plasma treatment on wheat flour quality parameters

指标	Control组	O ₂ 组	Ar组
出粉率/%	64.25	66.53	66.66
麦谷蛋白含量/(μg/mg)	6.73±0.13	7.19±0.08	6.75±0.15
醇溶蛋白含量/(μg/mg)	10.80±0.07	10.76±0.09	10.89±0.05
麦谷蛋白/醇溶蛋白	0.61	0.67	0.62
沉淀指数/mL	37.97±0.15	39.80±0.98	39.43±0.45

2.2 冷等离子体处理对小麦面筋指标的影响

面筋是面团黏弹特性的宏观表现, 即面团经水冲洗后,

去除可溶性蛋白、淀粉及其他非可溶性颗粒物所剩余的胶体,是面制品制作的重要物质基础。面筋由面筋蛋白(醇溶蛋白、麦谷蛋白)组成,其含量和质量决定了小麦终用途品质^[27]。由图1可知,氧气、氩气冷等离子体处理小麦的面筋指数较Control组分别显著提高了13.84%和11.36% ($P < 0.05$)。氧气、氩气两种气源冷等离子体处理小麦的湿面筋含量分别为33.84、33.79 g/100 g,高于Control组(31.01 g/100 g),但差异不显著 ($P > 0.05$)。由此可知,两种气源冷等离子体处理均具有提高面筋数量和质量的积极作用。



同一指标小写字母不同表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。图2、3、4B同。

图1 冷等离子体处理对小麦面筋指数和湿面筋含量的影响

Fig. 1 Effect of cold plasma treatment on the gluten index and wet gluten content of wheat

2.3 冷等离子体处理对小麦面团粉质特性的影响

粉质特性参数可反映面团形成和发展过程中的特性变化,包括吸水率、形成时间、稳定时间和弱化度。吸水率是指将面粉揉制成面团所需的最适加水量^[33];形成时间和稳定时间用于评估面团形成、发育过程中和剪切作用下面筋网络的稳定性,可反映面团的耐揉性及面筋强度^[4];弱化度是指面团过度搅揉后面筋强度变弱的程度,弱化度越大,面团越不宜用于烘焙面包。

由图2可知,与Control组相比,冷等离子体处理小麦的面团吸水率、形成时间和稳定时间均有所增加,弱化度有所下降,但变化不显著 ($P > 0.05$)。其中,面粉吸水率的提高可归因于冷等离子体处理后小麦中损伤淀粉含量增加,使面粉更易吸收水分^[34-36]。氧气、氩气两种气源冷等离子体处理小麦的面团形成时间较Control组分别延长了8.16%、4.61%,稳定时间较Control组分别增加了11.36%、7.89%,且氧气气源的处理效果好于氩气气源。

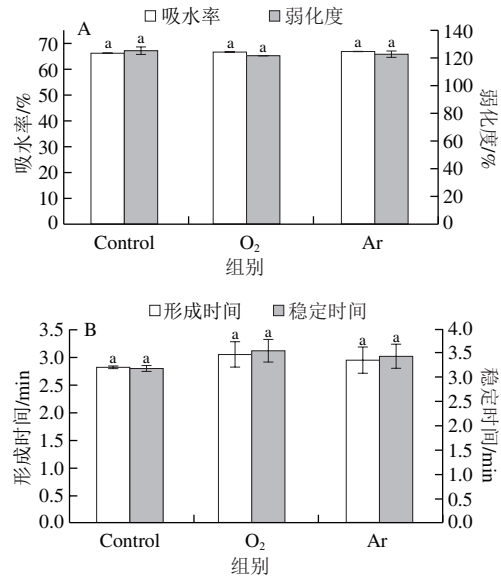
表3 冷等离子体处理对小麦面团拉伸特性的影响

Table 3 Effect of cold plasma treatment on the extensograph properties of wheat dough

组别	45 min				90 min				135 min			
	拉伸曲线面积/cm ²	拉伸阻力/BU	延伸度/mm	最大拉伸阻力/BU	拉伸曲线面积/cm ²	拉伸阻力/BU	延伸度/mm	最大拉伸阻力/BU	拉伸曲线面积/cm ²	拉伸阻力/BU	延伸度/mm	最大拉伸阻力/BU
Control	31.00±1.41 ^a	159.00±4.97 ^b	122.00±2.95 ^a	166.50±6.21 ^a	34.00±2.26 ^a	190.00±6.36 ^a	115.50±3.12 ^b	194.00±7.07 ^{ab}	35.50±1.13 ^a	201.00±6.25 ^a	113.00±4.24 ^b	205.00±6.82 ^a
O ₂	29.50±2.12 ^a	172.50±4.67 ^a	108.50±3.53 ^b	173.50±8.38 ^a	32.00±1.14 ^a	198.50±7.77 ^a	110.00±2.12 ^b	202.00±5.65 ^a	35.00±2.42 ^a	212.00±5.32 ^a	104.00±5.81 ^b	212.00±4.94 ^a
Ar	28.50±2.83 ^a	147.00±7.49 ^b	126.00±4.65 ^a	152.00±7.06 ^a	33.00±2.35 ^a	177.50±5.58 ^b	122.00±3.54 ^a	182.50±8.83 ^b	33.50±2.84 ^a	182.00±5.02 ^b	120.00±2.38 ^a	186.50±7.93 ^b

注: 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

推测一方面,冷等离子体形成过程中产生的能量一定程度影响了蛋白质水合作用而延长了面团形成时间^[4];另一方面,冷等离子体放电产生的活性物质促使巯基向二硫键转化,强化面筋蛋白间的交互作用,延长了面团的稳定时间^[36]。



A.吸水率、弱化度; B.形成时间、稳定时间。

图2 冷等离子体处理对小麦面团粉质特性的影响

Fig. 2 Effect of cold plasma treatment on the farinograph properties of wheat dough

2.4 冷等离子体处理对小麦面团拉伸特性的影响

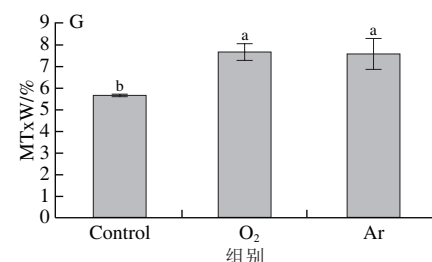
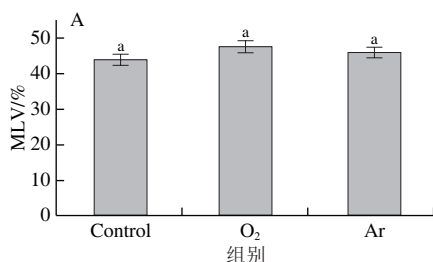
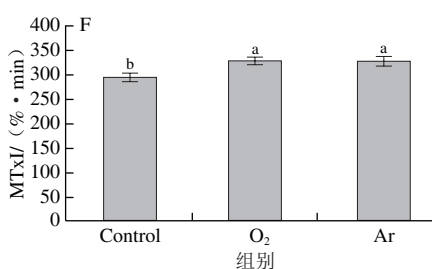
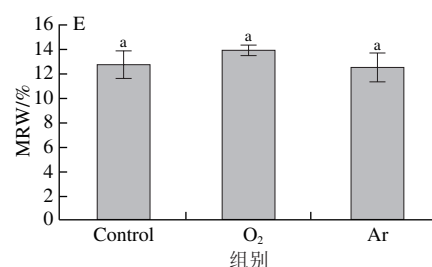
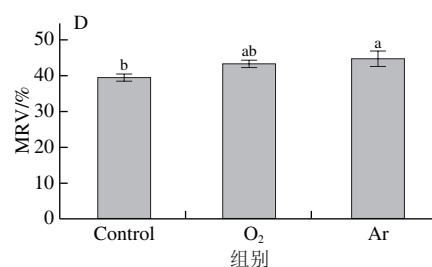
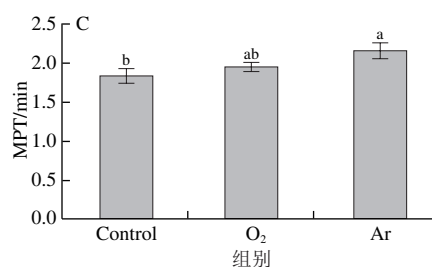
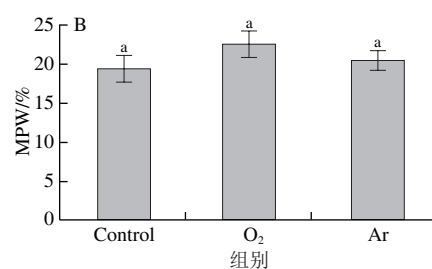
拉伸特性参数可评价面团的抗拉伸阻力、延伸性能和面粉品质,主要包括拉伸曲线面积、延伸度、拉伸阻力和最大拉伸阻力。拉伸曲线面积是指面团从开始拉伸到断裂所需的能量,具体反映面团强度;延伸度反映面团的横向延展性;拉伸阻力及最大拉伸阻力表示面团抵抗变形所表现的阻力,反映发酵过程中面团的持气能力,数值越大表明面团持气性越好,反之亦然^[37]。由表3可知,对于所有样品,随着发酵时间的延长,拉伸曲线面积、拉伸阻力、最大拉伸阻力变大,延伸度降低;与Control组相比,在同一发酵时间,氧气冷等离子体处理小麦的面团拉伸曲线面积、延伸度有所降低,拉伸阻力和最大拉伸阻力略有上升,除45 min时延伸度外,其余指标均无显著差异 ($P > 0.05$);在发酵45、90、135 min时,

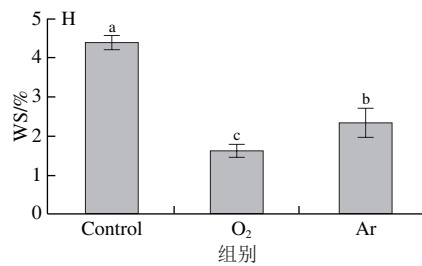
氩气冷等离子体处理小麦面团的拉伸阻力和最大拉伸阻力较Control组分别降低了7.54%、6.32%、9.45%和8.98%、5.67%、8.78% ($P < 0.05$)；以上可能是等离子体注入的不同气源介质产生的能量显著不同所致，即在相同放电电压条件下氩气等离子体产生的电流明显强于氧气等离子体，前者产生的活性粒子能量较高，高能粒子轰击小麦籽粒后，引起小麦蛋白内部分子间化学键断裂，致使蛋白质发生部分解聚，从而一定程度降低了面团拉伸阻力^[38]。

2.5 冷等离子体处理对小麦面团揉混特性的影响

揉混是通过测定面团搅拌过程中的流变学特性评价小麦品质及其适用性的一种重要手段。本研究采集并分析8个主要的揉混曲线参数以直观反映面团揉混特性，即与面团弹性呈正相关的中线左侧高度 (midline left value, MLV)、中线右侧高度 (midline right value, MRV)；与面团抗拉伸特性呈正相关的中线峰值带宽 (midline peak width, MPW)、中线右侧带宽 (midline right width, MRW)；与面筋强度呈正相关的中线峰值时间 (midline peak time, MPT)、8 min中线曲线面积 (midline integral at 8 min, MTxI)；与面团耐揉性呈正相关的8 min中线曲线带宽 (midline width at 8 min, MTxW)；以及与面团耐揉性呈负相关的弱化斜率 (weakening slope, WS)。

如图3所示，与Control组相比，两种冷等离子体处理小麦样品的MPT高达1.95 (O₂)、2.16 min (Ar)，MTxI较Control组分别显著增加了11.34% (O₂)、11.14% (Ar) ($P < 0.05$)；面团揉混曲线中高度相关参数 (MLV、MRV) 均有增加，且氩气冷等离子体处理小麦样品的MRV显著增加 ($P < 0.05$)；揉混曲线宽度相关参数 (MPW、MRW、MTxW) 都有所增加，且氧气、氩气冷等离子体处理小麦样品的MTxW分别显著增加了35.67%、33.96% ($P < 0.05$)；与Control组相比，氧气、氩气冷等离子体处理小麦样品的WS分别显著降低了62.87%、46.47% ($P < 0.05$)。上述结果表明，冷等离子体处理显著提高了面团弹性、耐揉性并改善了面团抗拉伸特性，即该物理技术在改善面团揉混特性方面发挥积极正向的作用，这与Misra等^[39]的研究结果相似。





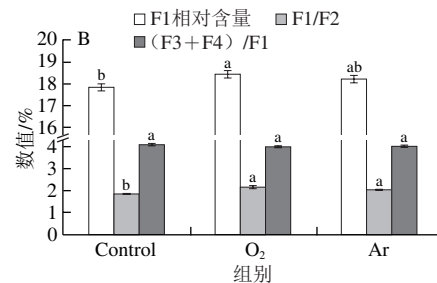
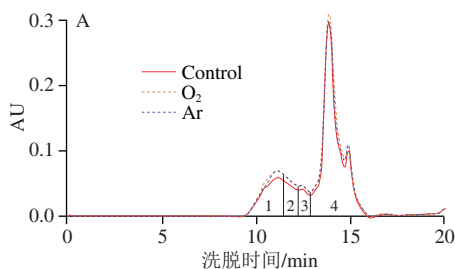
A. MLV; B. MPW; C. MPT; D. MRV;
E. MRW; F. MTxI; G. MTxW; H. WS。

图3 冷等离子体处理对小麦面团揉混特性的影响

Fig. 3 Effect of cold plasma treatment on the mixographic properties of wheat dough

2.6 冷等离子体处理对小麦蛋白分子质量分布的影响

如图4A所示, 各组小麦面粉蛋白SE-HPLC图谱共分为4个区域(F1、F2、F3、F4), 与李淼^[27]、王若兰^[33]、Bangur^[40]和Tosi^[41]等研究中涉及的小麦储藏蛋白SE-HPLC图谱相似。F1和F2分别对应于大分子聚合体蛋白和小分子聚合体蛋白, 两者富含高分子质量麦谷蛋白亚基和B型低分子质量麦谷蛋白亚基(low molecular weight glutenin subunits, LMW-GSs), F3为富含C型、D型LMW-GSs的大分子单体和寡聚体蛋白, F4为 α -醇溶蛋白、 γ -醇溶蛋白和非面筋蛋白^[39]。F1相对含量(以总蛋白计, 下同)、F1与F2相对含量比值(F1/F2)与面筋强度呈正相关,(F3+F4)/F1则与之呈负相关。由图4B可知, 与Control组相比, 经两种气源冷等离子体处理, 小麦样品F1/F2值分别显著提高了15.62% (O₂)、8.90% (Ar) ($P < 0.05$), 且氧气冷等离子体处理小麦样品的F1相对含量显著提高了3.43% ($P < 0.05$); 经两种气源冷等离子体处理后小麦样品的(F3+F4)/F1值略有降低, 但无显著差异 ($P > 0.05$)。由此可知, 冷等离子体处理可促进面筋蛋白组分交联聚合成大分子聚合体, 利于改善面团特性, 与上述面团流变学特性的结果一致。



A.小麦样品中储藏蛋白SE-HPLC色谱曲线拟合图; B.小麦储藏蛋白相对含量变化。

图4 冷等离子体处理对小麦蛋白分子质量分布的影响

Fig. 4 Effect of cold plasma treatment on the molecular mass distribution of wheat proteins

2.7 冷等离子体处理对小麦蛋白二级结构的影响

蛋白质二级结构是指多肽链中主链原子沿一定的轴旋转或折叠, 通过羰基和酰胺基之间氢键形成的特定构象, 包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角。蛋白二级构象与面团流变学特性密切相关^[42], 本研究选择FTIR光谱中酰胺I带(1600~1700 cm⁻¹)进行分析, 反映冷等离子体处理对小麦蛋白二级结构的影响。其中1610~1625 cm⁻¹区域内的谱峰为分子间 β -折叠结构、1627~1635 cm⁻¹为反向平行 β -折叠、1650~1660 cm⁻¹为 α -螺旋、1668~1680 cm⁻¹为 β -转角、1680~1687 cm⁻¹为 β -折叠^[43-44]。

如图5和表4所示, 所有样品中 α -螺旋和 β -折叠相对含量较高, 这与Seabourn等^[45]的结果一致; 两种气源冷等离子体处理小麦样品的分子间 β -折叠结构相对含量分别较Control组显著增加了8.93% (O₂)和10.32% (Ar) ($P < 0.05$); 而 β -折叠、 β -转角相对含量稍有下降, 反向平行 β -折叠含量则略有增加 ($P > 0.05$)。相关研究表明, 蛋白二级结构中分子间 β -折叠和反向平行 β -折叠含量与面团的稳定性呈正相关^[43]; 谷蛋白聚合体含量越多, 分子间 β -折叠结构相对含量也越高, 表明蛋白交联作用越强^[46]; 面团中面筋蛋白二级结构之间的转变, 如 β -转角向更为有序的分子间 β -折叠结构转变, 有利于谷蛋白大分子聚合体的形成^[47]。由此可知, 本研究中冷等离子体处理一定程度促使 β -折叠、 β -转角向分子间 β -折叠结构转变, 致使大分子聚合体含量增加, 提高了面团的稳定性。

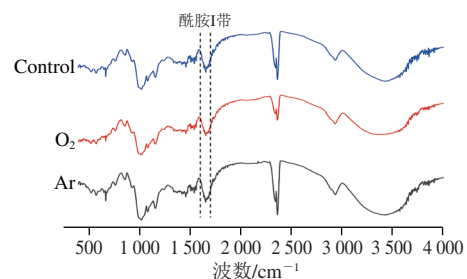


图5 未处理及冷等离子体处理小麦样品的FTIR图

Fig. 5 FTIR spectra of untreated and cold plasma treated wheat samples

表4 冷等离子体处理对小麦蛋白二级结构相对含量的影响
Table 4 Effect of cold plasma treatment on secondary structures of wheat proteins

组别	分子间 β -折叠	反向平行 β -折叠	α -螺旋	β -转角	β -折叠
Control	15.11±0.15 ^b	21.23±0.71 ^a	29.64±0.32 ^a	20.67±0.11 ^a	13.35±0.10 ^a
O ₂	16.46±0.27 ^a	21.54±0.15 ^a	29.71±0.12 ^a	19.61±0.64 ^a	12.68±0.36 ^a
Ar	16.67±0.04 ^a	21.29±0.01 ^a	29.16±0.05 ^a	20.32±0.10 ^a	12.56±0.46 ^a

3 结论

本实验研究了辉光放电冷等离子体对小麦面粉理化特性、流变学特性、蛋白组分及二级结构的影响。经氧气/氩气辉光放电冷等离子体处理后小麦的面筋指数、MTxI、MTxW显著增加,湿面筋含量略有增加,面团的形成时间、稳定时间、拉伸阻力以及延展性有所提高,说明两种气源冷等离子体有助于改善小麦的面团弹性及耐揉性等,且氧气冷等离子体处理效果优于氩气冷等离子体。进一步分析发现,经两种气源冷等离子体处理后,小麦储藏蛋白SE-HPLC图谱中F1相对含量和F1/F2较Control组增加,即蛋白质大分子聚合体含量增加;冷等离子体处理后小麦蛋白二级结构发生改变,更为有序分子间 β -折叠结构增加。综上可知,冷等离子体处理能一定程度改善小麦的面粉理化特性及面团流变学特性,对小麦加工品质具有积极影响。但冷等离子体对小麦加工品质的改善作用有限,这可能与完整小麦籽粒、籽粒大小或籽粒与辉光放电极板之间的距离有关,是否存在相关性值得进一步研究。

参考文献:

- 姜佳慧,金蕊,陈刘明,等.小麦谷蛋白大聚合体研究进展[J].中国种业,2022(8):17-21. DOI:10.19462/j.cnki.1671-895x.2022.08.012.
- 王雅琼. Avenin-like b蛋白特定Cys残基影响小麦面团弹性的作用与机制研究[D].武汉:华中科技大学,2020:13-21.
- GOESAERT H, BRIJS K, VERAVERBEKE W S, et al. Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2005, 16(13): 12-30. DOI:10.1016/j.tifs.2004.02.011.
- 张洪新. 多频超声改性面筋蛋白对其面条品质的影响和机制研究[D].重庆:西南大学,2020:8-9.
- MA M M, LI Y C, XUE C, et al. Current situation and key parameters for improving wheat quality in China[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 638525. DOI:10.3389/fpls.2021.638525.
- 刘远晓,李萌萌,卞科,等.弱筋小麦粉品质改善技术研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(1):124-131. DOI:10.16433/j.1673-2383.2021.01.018.
- 张洁,张惠琴,彭洒洒,等.浅谈改良剂在面粉中的应用[J].现代面粉工业,2020,34(6):18-21. DOI:10.3969/j.issn.1674-5280.2020.06.005.
- 朱海言,尹焰杰,王华.浅谈小麦制粉工艺流程与配粉工艺流程的设置[J].现代面粉工业,2022,36(4):1-5. DOI:10.3969/j.issn.1674-5280.2022.04.001.
- 刘曼,南敬昌,丛密芳,等.射频加热技术在农产品和食品加工中的应用[J].食品与发酵工业,2023,49(8):289-296. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032410.
- SHARMA P, GUJRAL H S, SINGH B, et al. Antioxidant activity of barley as affected by extrusion cooking[J]. Food Chemistry, 2012, 131(4): 1406-1413. DOI:10.1006/j.foodchem.2011.10.009.
- 刘远方,李萌萌,刘远晓,等.功率超声波及其在食品工业中的降解应用研究进展[J].食品与发酵工业,2018,44(10):283-289. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.016491.
- THIRUMDAS R, KADAM D, ANNAPURE U S. Cold plasma: an alternative technology for the starch modification[J]. Food Biophysics, 2017, 12(1): 129-139. DOI:10.1007/s11483-017-9468-5.
- MIR S A, SHAH M A, MIR M M. Understanding the role of plasma technology in food industry[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 734-750. DOI:10.1007/s11947-016-1699-9.
- THIRUMDAS R, SARANGAPANI C, ANNAPURE U S. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing[J]. Food Biophysics, 2015, 10(1): 1-11. DOI:10.1007/s11483-014-9382-z.
- THOMAS-POPO E, MENDONÇA A, MISRA N N, et al. Inactivation of Shiga-toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* and natural microflora on tempered wheat grains by atmospheric cold plasma[J]. Food Control, 2019, 104: 231-239. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.04.025.
- SOHAN M S R, HASAN M, HOSSAIN M F, et al. Improvement of seed germination rate, agronomic traits, enzymatic activity and nutritional composition of bread wheat (*Triticum aestivum*) using low-frequency glow discharge plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2021, 41(3): 923-944. DOI:10.1007/s11090-021-10158-7.
- 孟宁,刘明,孙莹,等.低温等离子体对糙米蒸煮品质和物化特征的影响[J].食品工业科技,2020,41(2):9-15. DOI:10.13386/J.ISSN1002-0306.2020.02.002.
- 咎学梅.不同加工方式对全谷物糙米食用品质的调控研究[D].厦门:集美大学,2021:56-58.
- LIU Shuyang, HE Ting, RAFIQUE H, et al. Effect of low-temperature plasma treatment on the microbial inactivation and physicochemical properties of oat grain[J]. Cereal Chemistry, 2022, 99(6): 1373-1382. DOI:10.1002/cche.10599.
- 农业部.小麦实验制粉 第1部分:设备、样品制备和润麦:NY/T 1094.1—2006[S].北京:中国标准出版社,2006:1-5.
- 虞泓,吴文杰. LRMM 8040-3-D新型实验磨粉机的实际应用[J].粮食与食品工业,2005,12(4):31-34. DOI:10.3969/j.issn.1672-5026.2005.04.012.
- 国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:1-2.
- 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:1-3.
- 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.小麦硬度测定 硬度指数法:GB/T 21304—2007[S].北京:中国标准出版社,2007:1-4.
- 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.粮油检验 小麦沉淀指数测定 SDS法:GB/T 15685—2011[S].北京:中国标准出版社,2011:1-4.
- American Association of Cereal Chemists (AACC). Approved methods of the AACC, 11th Ed. Method 38-12.01: wet gluten and gluten index[S]. St. Paul, USA: AACC, 1999: 1-4.
- 李森.增加了Cys残基的小麦1Ax1亚基人工突变体的品质功能研究[D].武汉:华中科技大学,2017:59-61.

- [28] American Association of Cereal Chemists (AACC). Approved methods of the AACC, 11th Ed. Method 54-21.02: rheological behavior of flour by farinograph: constant flour weight procedure[S]. St. Paul, USA: AACC, 2011: 1-8.
- [29] American Association of Cereal Chemists (AACC). Approved methods of the AACC, 11th Ed. Method 54-10.01: extensigraph method, general[S]. St. Paul, MN, USA: AACC, 1999: 1-2.
- [30] American Association of Cereal Chemists (AACC). Approved methods of the AACC, 11th Ed. Method 54-40A: mixograph method[S]. St. Paul, USA: AACC, 1999: 1-6.
- [31] LI Nan, YU Jiaojiao, JIN Nan, et al. Modification of the physicochemical and structural characteristics of zein suspension by dielectric barrier discharge cold plasma treatment[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(8): 2452-2460. DOI:10.1111/1750-3841.15350.
- [32] HU X, ZHAO M M, SUN W Z, et al. Effects of microfluidization treatment and transglutaminase cross-linking on physicochemical, functional, and conformational properties of peanut protein isolate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(16): 8886-8894. DOI:10.1021/jf201781z.
- [33] 王若兰, 何鑫, 王向阳, 等. 冷等离子体处理对小麦粉理化性质改善效果研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2021.06.001.
- [34] PEREIRA A P A, CLERICI M T P S, SCHMIELE M, et al. Blackberries (*Rubus* sp.) and whole grain wheat flour in cookies: evaluation of phenolic compounds and technological properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1445-1453. DOI:10.1007/s13197-019-03628-6.
- [35] 王晓曦. 小麦淀粉损伤对小麦粉品质及其加工特性的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 31-33.
- [36] LI X J, WEN Y Q, ZHANG J, et al. Effects of non-thermal plasma treating wheat kernel on the physicochemical properties of wheat flour and the quality of fresh wet noodles[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(3): 1544-1553. DOI:10.1111/ijfs.15514.
- [37] 赵军轻. 电子束处理对小麦储藏性能及加工品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 29-30.
- [38] 孟祎然. 放电等离子体对小麦种子萌发的生理生化影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 29-30.
- [39] MISRA N N, KAUR S, TIWARI B K, et al. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 115-121. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.08.019.
- [40] BANGUR R, BATEY I L, MCKENZIE E, et al. Dependence of extensograph parameters on wheat protein composition measured by SE-HPLC[J]. Journal of Cereal Science, 1997, 25(3): 237-241. DOI:10.1006/jcrs.1996.0098.
- [41] TOSI P, MASCI S, GIOVANGROSSI A, et al. Modification of the low molecular weight (LMW) glutenin composition of transgenic durum wheat: effects on glutenin polymer size and gluten functionality[J]. Molecular Breeding, 2005, 16(2): 113-126. DOI:10.1007/s11032-005-5912-1.
- [42] NAWROCKA A, KREKORA M, NIEWIADOMSKI Z, et al. FTIR studies of gluten matrix dehydration after fibre polysaccharide addition[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 198-206. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.110.
- [43] GAO X, LIU T H, YU J, et al. Influence of high-molecular-weight glutenin subunit composition at *Glu-B1* locus on secondary and micro structures of gluten in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 1184-1190. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.11.085.
- [44] KŁOSOK K, WELC R, FORNAL E, et al. Effects of physical and chemical factors on the structure of gluten, gliadins and glutenins as studied with spectroscopic methods[J]. Molecules, 2021, 26(2): 508. DOI:10.3390/molecules26020508.
- [45] SEABOURN B W, CHUNG O K, SEIB P A, et al. Determination of secondary structural changes in gluten proteins during mixing using fourier transform horizontal attenuated total reflectance spectroscopy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(11): 4236-4243. DOI:10.1021/jf703569b.
- [46] POPINEAU Y, BONENFANT S, CORNEC M, et al. A study by infrared spectroscopy of the conformations of gluten proteins differing in their gliadin and glutenin compositions[J]. Journal of Cereal Science, 1994, 20(1): 15-22. DOI:10.1006/jcrs.1994.1040.
- [47] WANG Y Q, LI M, GUAN Y B, et al. Effects of an additional cysteine residue of avenin-like b protein by site-directed mutagenesis on dough properties in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(31): 8559-8572. DOI:10.1021/acs.jafc.9b02814.