

# 常压空气冷等离子处理 对陈小麦生理生化及面团糊化特性的影响

徐咏宁<sup>1,2</sup>, 王若兰<sup>1</sup>, 李兴军<sup>2,\*</sup>, 刘俊明<sup>3</sup>, 闫恩峰<sup>3</sup>

(1.河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001;

2.国家粮食和物资储备局科学研究院, 昌平中试基地, 北京 102209;

3.山东鲁粮集团有限公司, 山东济南 250012)

**摘要:**采用 30 W 的常压空气冷等离子(APCP)处理陈小麦, 处理时间分别是 0、14、18、22 及 26 min, 分析了小麦生理生化及面团糊化特性指标的变化。结果表明, 14~26 min 冷等离子处理显著( $P < 0.05$ )降低小麦籽粒水滴接触角、发芽率及陈化指数, 而籽粒破碎率和吸水率显著( $P < 0.05$ )增加。可溶蛋白及巯基的含量随等离子处理时间趋向于增加。深入分析面团糊化特性, 与 0 min 处理比较, 等离子处理时间加长, 面团醒发时间趋于增加, 稳定时间趋于减少; 最大稠度、混合结束时扭矩、最小扭矩、最终扭矩均趋于减少, 而糊化峰值扭矩和加热结束时扭矩趋于不变; C1 峰值幅度明显减少, 蛋白质网络弱化趋于减少, 淀粉酶活性增大, 淀粉回生程度趋于降低, 对应蛋白质网络弱化速率和糊化速率增大、蒸煮稳定速率趋于减少, 破损淀粉则明显减少。APCP 可能通过增大过氧化物酶和淀粉酶活性而提高陈小麦面团蛋白强度和面团稳定性。

**关键词:**常压空气冷等离子, 水滴接触角, 陈小麦, 糊化特性

## Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma on the Physiological Biochemistry of Stale Wheat and Its Dough Pasting Properties

XU Yong-ning<sup>1,2</sup>, WANG Ruo-lan<sup>1</sup>, LI Xing-jun<sup>2,\*</sup>, LIU Jun-ming<sup>3</sup>, YAN En-feng<sup>3</sup>

(1.College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2.Changping Pilot, Academy of the National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102209, China;

3.Shandong Luliang Group, Jinan 250012, China)

**Abstract:** The stale wheat was treated 0, 14, 18, 22, and 26 min with 30 W atmospheric pressure cold plasma (APCP), respectively. After 14~26 min APCP treatment, the water drop contact angle of a wheat kernel significantly ( $P < 0.05$ ) reduced, and its germination rate and stale index significantly ( $P < 0.05$ ) decreased while its kernel broken percent and water-absorption rate were significantly increased. The contents of soluble protein and sulfuryl group increased with treatment time. Further analyzed the pasting properties of whole wheat flour showed, compared with the sample treated with 0 min, with the increasing in APCP treatment time, dough development time tended to increase while the dough stability time tended to decrease. The maximum consistency torque (C1), a torque at end of mixing (Cs), the minimum torque (C2), and final torque (C5) all tended to decrease, but the pasting peak torque (C3) and the torque (C4) at end of heating tended to unchanged. The amplitude of C1 torque peak significantly reduced. The weakness of protein network (C1-Cs) tended to decrease, the amylase activity (C3/C4) and the extent of starch retrogradation tended to decrease. These changes were related to a slight increase in heating rate ( $\alpha$ ) and pasting rate ( $\beta$ ), with a decreasing tendency in enzymatic rate ( $\gamma$ ). Cold plasma treatment significantly decreased damaged starch in the whole wheat flour. The study suggested that the atmospheric pressure cold plasma could modify the strength of protein network and the pasting properties of whole flour in stale wheat possibly by increasing peroxidase and amylase activities in a wheat kernel.

**Key words:** atmospheric pressure cold plasma (APCP); water drop contact angle; stale wheat; pasting property

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)16-0037-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.007

**引文格式:** 徐咏宁, 王若兰, 李兴军, 等. 常压空气冷等离子处理对陈小麦生理生化及面团糊化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 37-42.

收稿日期: 2019-10-08

作者简介: 徐咏宁(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: xuyongning123@163.com。

\* 通讯作者: 李兴军(1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食生理生化与工程, E-mail: lixj3714@126.com。

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ012-4)。

等离子是 TonksLewi 和 Langmuir Irving 首次在 1928 年用于定义物质的第四状态,包含电子、离子、自由基、激发态的原子或分子、大量非离子化的中性分子等活性种类<sup>[1]</sup>。低温或冷等离子体的温度小于 50 ℃,所包含的等离子体种类的温度不一样,局部热是不平衡的。冷等离子体不影响与之接触的热敏感材料;冷等离子体围绕物料流动,没有阴影效果<sup>[2]</sup>。基于这些特点,冷等离子体(CP)技术作为食品行业的非热加工技术,在最近十年,对其应用研究有大量报道。这个技术的新颖性在于它的非热本性、成本低、设计多样化及环境友好。CP 技术可用于失活蔬菜、豆类及谷物上的寄生曲霉和青霉菌<sup>[3-4]</sup>,提高谷物种子发芽率<sup>[5]</sup>,修饰谷物和薯类的淀粉<sup>[6]</sup>,失活苹果褐变相关的酶<sup>[7]</sup>,减少米饭的蒸煮时间<sup>[8]</sup>。但是,冷等离子体对谷物粮食生理生化及淀粉糊化特性研究报道有限。基于粮食平衡水分理论的低温(<23 ℃)低湿(RH < 70%)物理法储粮技术,目标是抑制储粮昆虫和霉菌生长,保持籽粒活性,延缓品质劣变,改善加工性能<sup>[9]</sup>。温室效应引起的持续高温(>30 ℃)导致我国南方地区常规储藏的粮食在储藏周期中品质劣变加快,本文分析了常压空气冷等离子体(APCP)对陈小麦的生理生化变化及品质的影响,以期对这个技术在粮食行业应用的可行性和安全性提供基础数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

小麦样品 我国东南沿海地区一个粮库储存 3 年零五个月的红小麦(2015 年 9 月入仓,2019 年 2 月初出仓);快氯 FCF 染色试剂 Sigma 公司;酚酞 天津光复精细化工研究所;考马斯亮兰 G-250 Scientific Research Special 公司;二盐酸邻联茴香胺、愈创木粉 Macklin 公司;H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(优级纯)、牛血清蛋白 国药集团化学试剂有限公司;Tris、盐酸、醋酸、磷酸、硼酸、L-亮氨酸、抗坏血酸、水合茚三酮、氢氧化钾、氢氧化钠、乙酸钠、硫代硫酸钠、正己烷、95%乙醇和无水乙醇、异丙醇、重铬酸钾 北京化学试剂公司;碘化钾 西陇化工股份有限公司。

PZ2-I 手持压电冷等离子体发生器 德国 Piezo brush 公司;DHG9070A 烘箱 杭州蓝天化验仪器厂;3-30K 高速冷冻离心机 Sigma 公司;紫外可见分光光度计 上海奥析科学仪器有限公司;电子天平(万分之一)、Mettler Toledo 326 电导率测定仪 梅特勒多利多;JMWT12 大米外观品质检测仪 北京东方孚德技术发展中心;HD-U805-1 水滴角度测定仪 海达国际仪器有限公司;Mixolab 混合试验测定仪、SDmatic 损伤淀粉测定仪 特雷首邦(北京)贸易有限公司;FW 135 型中草药粉碎机 天津泰斯特仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 小麦样品 1400 g 用于常压空气冷等离子体处理,分为 5 个处理,处理时间分别是 0(对照)、14、18、22 及 26 min,每个处理包含 280 g 小麦。陈小麦籽粒 280 g 分四次以薄层铺在长宽 21.5 cm × 14 cm 米白色的

美耐皿树脂(Melami-neware)盘中,右手垂直握着 PZ2-I 压电冷等离子体发生器(工作电压 220 V,功率 30 W),在距离麦粒约 5 mm 的高度处沿着样品盘长度方向从左上角开始向右移动,样品处理宽度约 10 mm,直到样品盘右下角。每盘样品处理一遍后,将样品盘转动 180 度,再处理一遍。每盘样品处理的总时间分别是 0、14、18、22 及 26 min。

#### 1.2.2 测定方法

1.2.2.1 籽粒长度、宽度及长宽比测定 采用 JMWT12 大米外观品质测定仪。自定义模式扫描小麦全粒长平均值,全粒宽平均值,计算长宽比。每次扫描小麦 400 粒左右。

1.2.2.2 麦粒水滴接触角测定 采用水滴角度测定仪<sup>[10]</sup>。2.5 μL 去离子水加麦粒表面,采用固着液滴法测定。一滴去离子水在麦粒表面沉积后立即分析,小水滴形状的动态变化采用 CCD 照相机每 10 s 记录一次。

1.2.2.3 籽粒破碎率测定 按照任强等<sup>[11]</sup>方法。称取 5 g 小麦籽粒,置于 50 mL 塑料离心管,加入 0.1% FCF 溶液 10 mL,在摇床上振荡 20 min,用去离子水冲洗至水无色,再用 10 mmol/L NaOH 洗脱液 20 mL 洗脱 30 min,对洗脱液测定吸光度 D<sub>610</sub>。挑选完整籽粒,用刀片切成两半,与完整粒混合 0、10%、20%、40%、60%、80% 的比例,作籽粒破碎率标准曲线。采用 D<sub>610</sub>(y)与破碎率(x)之间的线性方程计算麦粒破碎率。

1.2.2.4 含水率测定 按照 105 ℃恒重法(GB 5497-1985)<sup>[12]</sup>测定。

1.2.2.5 籽粒发芽率测定 按照 GB/T 5520-2011<sup>[13]</sup>方法。在 20 ℃条件萌发,在第 3 和 5 d 分别统计发芽势和发芽率。

1.2.2.6 电导率测定 挑选 50 粒大小相似,无破损、饱满的籽粒,称重装入 50 mL 离心管,加入 25 mL 去离子水,混匀后在室温下放置 24 h,期间摇动几次。测定上清液电导率,分别进行直接测定和摇匀后测定。

1.2.2.7 籽粒吸水率测定 称取 1 g 小麦籽粒置于 50 mL 离心管,加入 15 mL 去离子水,浸泡 24 h 后用滤纸吸干后称重,计算吸水率。

1.2.2.8 游离氨基酸含量测定 采用茚三酮染色法<sup>[14]</sup>。称取 1 g 小麦粉加入 15 mL 正己烷,充分涡旋后,常温下振荡脱脂 3 h。在 4 ℃下 6000 r/min 离心 10 min,于通风橱中吸走并挥发正己烷。然后倒出脱脂样品到研钵,加入 5 mL 娃哈哈纯净水充分研磨,并加入 10 mL 娃哈哈纯净水洗涤转入离心管,在 4 ℃下 6000 r/min 离心 10 min,取上清液并量体积,上清液即为游离氨基酸提取液。取 0.5 mL 上清液,依次加入 0.5 mL 娃哈哈纯净水、1.17 mol/L pH5.4 醋酸缓冲液 0.5 mL、3% 茚三酮溶液 0.5 mL 及 0.1% 抗坏血酸溶液 0.05 mL。在 85 ℃水浴反应 12 min,冷却后加入 95%乙醇 5 mL,剧烈涡旋试管后定容至 10 mL,测定 D<sub>570</sub>。以亮氨酸作标准曲线(D<sub>570</sub> = 0.9939C + 0.0037, R<sup>2</sup> = 0.9998)。

1.2.2.9 可溶性蛋白含量测定 采用考马斯 G-250 染色法<sup>[15]</sup>。称取 1 g 小麦粉到研钵,加入 50 mmol/L pH7.2 Tris-HCl 缓冲液 5 mL 进行研磨,转移到 50 mL 离心管,并用 10 mL 缓冲液洗涤研钵。在 4 ℃ 下 4000 r/min 离心 10 min,移取上清液量体积,上清液即为可溶性蛋白提取液。取 0.1 mL 加入 4 mL 考马斯亮蓝 G-250 反应液,混匀,静置 2 min,测定  $D_{595}$ 。以牛血清蛋白做标准曲线 ( $D_{595} = 0.8169C + 0.078$ ,  $R^2 = 0.999$ )。

1.2.2.10 巯基含量测定 采用田益玲等<sup>[16]</sup>方法。称取 2 g 米粉,加入 50% 乙醇 15 mL 后超声波振荡 10 min 并混匀,在 3000 r/min 下离心 20 min,取 4 mL 上清液于具塞试管,加入 2 mL 重铬酸钾-醋酸溶液,用去离子水定容至 10 mL,90 ℃ 水浴 10 min,在 571 nm 处测吸光度。

1.2.2.11 游离脂肪酸值测定 按照 GB/T 5510-2011 方法<sup>[17]</sup>。

1.2.2.12 陈化度指数测定 按照文献<sup>[18]</sup>的方法。称取 2 g 小麦籽粒,加入 1% 愈创木酚 4.6 mL,1% 邻联茴香胺 3.4 mL,1% 过氧化氢 100  $\mu$ L,在 26 ℃ 水浴中保持 12 min,用移液枪吸取酶液在 385 nm 处测吸光度,吸光度  $D_{385}$  反映了籽粒过氧化物酶(POD)活性大小。小麦籽粒陈化度指数用  $1/D_{385}$  表示。

1.2.2.13 面团 Mixolab 糊化特性测定 参考 GB/T 37511-2019<sup>[19]</sup>方法。小麦样品粉碎采用 FW 135 型中草药粉碎机,试验方案选择 Choppinwheat<sup>+</sup>,采用恒量加水法。水分基数 14% 湿基,目标扭矩设定为  $(1.1 \pm 0.05)$  Nm,转速 80 r/min,面粉团重量 75 g,和面初始温度 30 ℃,水箱温度 30 ℃,水合作用 60%,第一阶段 30 ℃ 恒温 8 min;第二阶段从 30 ℃ 升温到 90 ℃ 共 15 min,90 ℃ 保持 7 min;第三阶段 90 ℃ 降温至 50 ℃ 共 10 min,保持 50 ℃,5 min。

1.2.2.14 破损淀粉含量测定 采用 SDmatic 损伤淀

粉测定仪。先称量 3.0 g 硼酸和 3.0 g 碘化钾放入反应杯中,加入 120 mL 蒸馏水,滴加 1 滴 0.1 mol/L 硫代硫酸钠。再准确称量全麦粉样品  $1.000 \pm 0.005$  g 于小匙两刻度线中间,点击测试按钮,输入样品质量,进行测试。

### 1.3 数据处理

采用随机区组试验设计,数据以平均值  $\pm$  标准差表示。LSD 检验中同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 常压空气冷等离子对小麦籽粒物理指标的影响

从表 1 看出,随着常压空气冷等离子处理时间加长,小麦籽粒的长度和宽度均有变化,但长宽比率几乎保持不变。与对照样品比较,冷等离子处理的小麦籽粒水滴接触角显著 ( $P < 0.05$ ) 减少,而籽粒破碎率则显著 ( $P < 0.05$ ) 增加。

### 2.2 常压空气冷等离子对小麦籽粒生理生化指标的影响

从表 2 看出,随着常压空气冷等离子处理时间加长,籽粒含水率呈减少趋势,与籽粒沿着径向(宽度)和纵向(长度)呈现减少趋势相对应。与对照比较,22 和 26 min 冷等离子处理显著 ( $P < 0.05$ ) 减少小麦籽粒发芽势,14、18、22、26 冷等离子处理显著 ( $P < 0.05$ ) 减少小麦籽粒发芽率,而不摇匀状态和摇匀状态的电导率也出现明显变化。

从表 3 看出,与对照比较,常压空气冷等离子处理时间在 14~22 min 的小麦籽粒吸水率显著 ( $P < 0.05$ ) 增加,且可溶性蛋白和巯基含量均呈现增加趋势,可溶性蛋白和巯基含量最大可以分别增加 24.8% 和 5.7%,游离氨基酸含量则保持不变。

### 2.3 常压空气冷等离子对小麦新鲜度指标的影响

从表 4 看出,与对照比较,常压空气冷等离子处

表 1 常压空气冷等离子对小麦籽粒长宽比及水滴接触角的影响

Table 1 Effect of APCP on the length/width ratio and water drop contact angle of the wheat kernels

处理时间 (min)	长度 (mm)	宽度 (mm)	长宽比	水滴接触角 ( $\theta^\circ$ )	破碎率 (%)
0 (CK)	$6.19 \pm 0.02^b$	$2.84 \pm 0.01^a$	$2.18 \pm 0.01^b$	$123.99 \pm 4.48^a$	$0.48 \pm 0.18^c$
14	$6.62 \pm 0.08^a$	$2.73 \pm 0.02^b$	$2.43 \pm 0.02^a$	$78.40 \pm 7.07^c$	$4.41 \pm 0.55^b$
18	$5.99 \pm 0.17^c$	$2.68 \pm 0.03^b$	$2.24 \pm 0.05^b$	$81.33 \pm 7.37^{bc}$	$2.86 \pm 1.19^b$
22	$6.01 \pm 0.09^c$	$2.88 \pm 0.18^a$	$2.09 \pm 0.10^b$	$86.47 \pm 18.56^{bc}$	$8.82 \pm 5.37^{ab}$
26	$6.27 \pm 0.06^b$	$2.73 \pm 0.17^{ab}$	$2.30 \pm 0.11^{ab}$	$87.81 \pm 1.98^b$	$6.11 \pm 0.99^a$

注:同一列不同小写字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ );表 2~表 7 同。

表 2 常压空气冷等离子对小麦籽粒发芽率和电导率的影响

Table 2 Effect of APCP on the germination rate and conductivity of wheat kernels

处理时间 (min)	含水率 (%)	发芽势 (%)	发芽率 (%)	电导率(不摇匀) ( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )	电导率(摇匀) ( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ )
0 (CK)	$11.31 \pm 0.12^a$	$18.67 \pm 5.03^a$	$20.00 \pm 4.00^a$	$68.2 \pm 11.5^a$	$220.5 \pm 14.8^{ab}$
14	$11.15 \pm 0.00^b$	$10.67 \pm 4.16^{ab}$	$13.33 \pm 2.31^b$	$50.0 \pm 3.1^b$	$211.9 \pm 13.0^{ab}$
18	$11.15 \pm 0.11^{ab}$	$11.33 \pm 3.06^{ab}$	$12.67 \pm 3.06^b$	$51.6 \pm 5.6^{ab}$	$222.1 \pm 16.7^{ab}$
22	$11.05 \pm 0.07^c$	$8.00 \pm 2.00^b$	$9.33 \pm 3.06^b$	$51.2 \pm 2.8^b$	$243.0 \pm 19.9^a$
26	$10.99 \pm 0.01^c$	$10.00 \pm 3.46^b$	$13.33 \pm 2.31^b$	$61.9 \pm 7.6^a$	$201.9 \pm 14.0^b$

表3 常压空气冷等离子对小麦籽粒吸水率和可溶蛋白的影响

Table 3 Effect of APCP on the water absorption rate and soluble protein content of wheat kernels

处理时间 (min)	吸水率 (%)	游离氨基酸 (mg 氨基氮/DW)	可溶蛋白含量 (mg/g)	巯基含量 (mg/g)
0	64.94 ± 1.21 <sup>c</sup>	53.95 ± 2.68 <sup>a</sup>	12.86 ± 1.80 <sup>b</sup>	9.35 ± 0.64 <sup>a</sup>
14	71.74 ± 1.66 <sup>a</sup>	53.79 ± 2.68 <sup>a</sup>	14.95 ± 1.73 <sup>ab</sup>	9.48 ± 0.48 <sup>a</sup>
18	69.31 ± 1.17 <sup>ab</sup>	52.99 ± 0.98 <sup>a</sup>	14.84 ± 1.66 <sup>ab</sup>	9.63 ± 0.57 <sup>a</sup>
22	68.08 ± 1.30 <sup>b</sup>	53.02 ± 2.36 <sup>a</sup>	15.44 ± 1.76 <sup>ab</sup>	9.88 ± 0.24 <sup>a</sup>
26	67.90 ± 0.77 <sup>b</sup>	52.03 ± 2.22 <sup>a</sup>	16.05 ± 0.58 <sup>a</sup>	9.87 ± 0.56 <sup>a</sup>

理小麦籽粒 18、22 及 26 min, 脂肪酸值和陈化指数均显著 ( $P < 0.05$ ) 降低。以籽粒 POD 酶活性的倒数表示的陈化指数越小, 小麦籽粒变得越新鲜, 说明冷等离子有改善小麦新鲜度的作用。

表4 常压空气冷等离子对小麦脂肪酸值及陈化指数的影响

Table 4 Effect of APCP on the FFA contents and staling index of wheat kernels

处理时间 (min)	脂肪酸值 (mg/100 g KOH)	陈化指数 (1/D <sub>385</sub> )
0	26.14 ± 2.64 <sup>b</sup>	6.07 ± 1.13 <sup>a</sup>
14	30.30 ± 1.26 <sup>a</sup>	2.91 ± 0.89 <sup>b</sup>
18	15.57 ± 0.73 <sup>d</sup>	3.82 ± 0.77 <sup>b</sup>
22	13.86 ± 1.25 <sup>d</sup>	3.37 ± 0.66 <sup>b</sup>
26	18.07 ± 0.73 <sup>c</sup>	4.09 ± 0.45 <sup>b</sup>

## 2.4 常压空气冷等离子对小麦面团糊化特性的影响

图 1 和表 5~表 7 给出了全麦粉面团穿过两个混合刀片、遭受混合与温度变化双重应力下的连续力矩, 反映了面团组分(淀粉、蛋白及水)的行为。面团醒发时间 DDT 是在 30 °C 达到最大扭矩 C1 需要的时间, 面团稳定时间 DST 也叫倒塌时间, 面团保持在扭矩 1.1 Nm (±11%) 的时间; C1 峰值幅度 (C1 处曲线

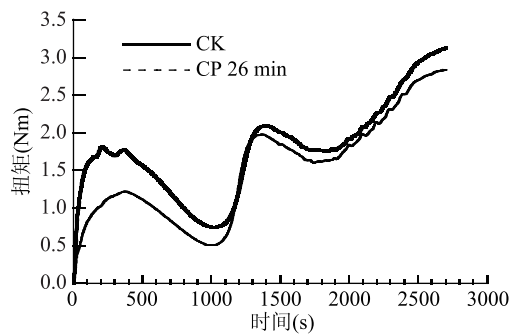


图1 常压空气冷等离子处理小麦籽粒 26 min 的全麦粉 Mixolab 曲线

Fig.1 Mixolab curves in whole flour of wheat kernels treated 26 min by APCP

的宽度), 表示面团的弹性; Cs (Nm) 是混合结束 (8 min) 时的扭矩; C2 (Nm) 测量由于机械剪切应力和温度增加 (30~60 °C) 引起的面团稠度减少后的蛋白质强度, 它表明了蛋白质的质量。C3 (Nm) 测量淀粉糊化, 淀粉颗粒吸水, 当温度从 60 °C 持续增加到 90 °C, 淀粉糊粘度增加; C4 (Nm) 测量在恒定温度 90 °C 下与淀粉酶相关的热凝胶的稳定性; C5 (Nm) 测定冷却阶段 (90~50 °C) 淀粉的回生。α(-Nm/min)

表5 常压空气冷等离子对面团醒发时间及糊化峰值的影响

Table 5 Effect of APCP on the dough development time and pasting peak in whole wheat flour

处理时间 (min)	醒发时间 DDT (min)	稳定时间 DST (min)	C1 (Nm)	Cs (Nm)	C2 (Nm)	C3 (Nm)
0	4.477 ± 0.846 <sup>d</sup>	6.430 ± 0.415 <sup>a</sup>	1.830 ± 0.105 <sup>a</sup>	1.594 ± 0.183 <sup>a</sup>	0.747 ± 0.117 <sup>a</sup>	2.107 ± 0.065 <sup>a</sup>
14	5.707 ± 0.150 <sup>c</sup>	5.643 ± 0.145 <sup>b</sup>	1.550 ± 0.060 <sup>b</sup>	1.344 ± 0.045 <sup>b</sup>	0.620 ± 0.030 <sup>b</sup>	2.130 ± 0.010 <sup>a</sup>
18	5.830 ± 0.087 <sup>bc</sup>	6.450 ± 0.434 <sup>a</sup>	1.667 ± 0.064 <sup>ab</sup>	1.471 ± 0.055 <sup>a</sup>	0.703 ± 0.035 <sup>a</sup>	2.127 ± 0.012 <sup>a</sup>
22	6.023 ± 0.136 <sup>b</sup>	5.907 ± 0.127 <sup>ab</sup>	1.473 ± 0.055 <sup>b</sup>	1.321 ± 0.038 <sup>b</sup>	0.607 ± 0.025 <sup>b</sup>	2.143 ± 0.031 <sup>a</sup>
26	6.537 ± 0.738 <sup>a</sup>	5.267 ± 0.165 <sup>c</sup>	1.243 ± 0.281 <sup>b</sup>	1.134 ± 0.206 <sup>b</sup>	0.510 ± 0.132 <sup>b</sup>	1.993 ± 0.246 <sup>a</sup>

注: C1: 最大稠度; Cs: 混合结束时扭矩; C2: 最小扭矩; C3: 峰值扭矩。

表6 常压空气冷等离子对面团蛋白弱化和回生程度的影响

Table 6 Effect of APCP on the weakness of dough protein network and starch retrogradation in whole wheat flour

处理时间 (min)	C4 (Nm)	C5 (Nm)	C1 峰值幅度 (Nm)	C1-Cs (Nm)	C3/C4	C5-C4 (Nm)
0	1.740 ± 0.066 <sup>a</sup>	3.137 ± 0.179 <sup>a</sup>	0.140 ± 0.070 <sup>a</sup>	0.236 ± 0.077 <sup>a</sup>	1.211 ± 0.011 <sup>b</sup>	1.397 ± 0.119 <sup>a</sup>
14	1.743 ± 0.031 <sup>a</sup>	3.057 ± 0.040 <sup>a</sup>	0.063 ± 0.006 <sup>b</sup>	0.206 ± 0.017 <sup>a</sup>	1.222 ± 0.016 <sup>ab</sup>	1.313 ± 0.015 <sup>a</sup>
18	1.763 ± 0.038 <sup>a</sup>	3.143 ± 0.042 <sup>a</sup>	0.053 ± 0.006 <sup>b</sup>	0.195 ± 0.021 <sup>ab</sup>	1.206 ± 0.024 <sup>b</sup>	1.380 ± 0.026 <sup>a</sup>
22	1.707 ± 0.047 <sup>a</sup>	3.100 ± 0.079 <sup>a</sup>	0.053 ± 0.006 <sup>b</sup>	0.152 ± 0.018 <sup>c</sup>	1.256 ± 0.021 <sup>a</sup>	1.393 ± 0.032 <sup>a</sup>
26	1.590 ± 0.280 <sup>a</sup>	2.840 ± 0.509 <sup>a</sup>	0.047 ± 0.006 <sup>c</sup>	0.109 ± 0.078 <sup>bc</sup>	1.262 ± 0.075 <sup>ab</sup>	1.250 ± 0.229 <sup>a</sup>

注: C4, 加热结束扭矩; C5, 最终扭矩; C1-Cs, 蛋白网络弱化程度; C3/C4, 淀粉酶活性; C5-C4, 淀粉回生程度。

表7 常压空气冷等离子对面团糊化速率和全麦粉中破损淀粉含量的影响

Table 7 Effect of APCP on the dough pasting rate and damaged starch content in whole wheat flour

处理时间 (min)	$\alpha$ (-Nm/min)	$\beta$ (Nm/min)	$\gamma$ (-Nm/min)	破损淀粉 (AI%)
0	0.099 ± 0.017 <sup>a</sup>	0.512 ± 0.025 <sup>b</sup>	0.058 ± 0.012 <sup>b</sup>	91.34 ± 0.33 <sup>a</sup>
14	0.075 ± 0.012 <sup>a</sup>	0.622 ± 0.035 <sup>a</sup>	0.093 ± 0.008 <sup>a</sup>	87.78 ± 1.07 <sup>c</sup>
18	0.098 ± 0.033 <sup>a</sup>	0.556 ± 0.029 <sup>b</sup>	0.067 ± 0.015 <sup>b</sup>	89.56 ± 0.10 <sup>b</sup>
22	0.094 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.643 ± 0.074 <sup>ab</sup>	0.093 ± 0.037 <sup>ab</sup>	85.05 ± 0.66 <sup>d</sup>
26	0.077 ± 0.017 <sup>a</sup>	0.647 ± 0.038 <sup>a</sup>	0.069 ± 0.017 <sup>ab</sup>	83.58 ± 0.56 <sup>c</sup>

注: $\alpha$ ,加热速率; $\beta$ ,糊化速率; $\gamma$ ,酶解速率。

是 30 ℃ 末期与 C2 之间的曲线斜率,指示蛋白网络弱化的速率,也称为加热速率; $\beta$  (Nm/min) 是 C2 与 C3 之间的曲线斜率,指示糊化速率; $\gamma$  (-Nm/min) 是 C3 与 C4 之间的曲线斜率,指示蒸煮稳定速率,也称为酶解速率。

从表 5~表 7 看出,与对照比较,随着等离子处理时间加长,面团醒发时间趋于增加,而稳定时间趋于减少;最大稠度(C1)、混合结束时扭矩(Cs)、最小扭矩(C2)、最终扭矩(C5)均趋于减少,而糊化峰值扭矩(C3)和加热结束时扭矩(C4)趋于保持不变。与对照组相比,C1 峰值幅度显著降低意味着面筋弹性降低;冷等离子处理 26 min 显著( $P < 0.05$ )降低全麦粉的 C1 和 Cs 值。

与对照比较,随着等离子处理时间加长,蛋白质网络弱化度(C1-Cs)趋于降低,淀粉酶活性(C3/C4)趋于增大,淀粉回生程度(C5-C4)趋于降低。这些变化与蛋白网络弱化的速率( $\alpha$ )和糊化速率( $\beta$ )趋于增大、蒸煮稳定速率( $\gamma$ )趋于减少相关。与对照样品比较,常压空气冷等离子处理提高小麦蛋白质强度、改善淀粉糊化并降低淀粉回生老化。进一步分析破损淀粉含量,随着常压空气冷等离子时间加长,破损淀粉含量显著( $P < 0.05$ )减少,表明冷等离子处理提高了淀粉颗粒的晶体度。

### 3 讨论

储粮含水率、温度及储藏时间是影响其品质劣变的主要因素<sup>[20]</sup>。在上世纪 80 年代报道的我国河南省苏式平房仓储藏的小麦,在第 4 年发芽率是 60%<sup>[21]</sup>。本研究中,红小麦来源于东南沿海地区一高大平房仓,由于受夏季高温气候的影响发芽率在 3~4 年常规条件储藏结束时降低到 20%。为了抑制储粮品质劣变速率,当前重要工作是大力推广低温储藏工艺,同时研发储粮品质改善的绿色物理技术。本研究中,常压空气冷等离子处理提高小麦新鲜度和 POD 酶活性( $D_{385}$ ),以及趋于提高面团糊化过程中的淀粉酶活性(C3/C4),说明冷等离子处理改善了常规条件储藏 3.4 年的小麦籽粒酶活性。

许多物理方法如微波、灭菌蒸汽、烘焙、红外加热及臭氧处理用于试验改良和稳定小麦面粉的功能特性<sup>[22-24]</sup>。工业臭氧生产工艺中通常包含在富氧气体中利用电晕放电。介电阻挡放电是产生臭氧最有效的方法之一<sup>[25]</sup>,它包括在两个电势差巨大的电极之间放置一个介电材料抑制形成电弧,从介电阻挡系统放电产生的等离子含有级联反应的系列电子、活性离子、中性物质、发射的光子。在空气压强产生

的等离子定义为冷等离子,在于净气体温度接近周围环境的温度<sup>[26]</sup>。冷等离子是高能量物质,对材料表面纳米尺度的蚀刻效果可以通过水滴接触角大小来评价,冷等离子处理功率和时间增大,水滴接触角变小而材料表面的亲水性增大<sup>[27]</sup>。本研究采用常压空气冷等离子在室温下处理小麦籽粒样品,发现与对照组相比,处理后小麦籽粒水滴接触角显著( $P < 0.05$ )减少,籽粒破碎率则显著( $P < 0.05$ )增加,说明冷等离子对籽粒表面具有蚀刻作用。常压空气冷等离子处理后,以 POD 活性的倒数表示小麦的陈化指数降低;籽粒吸水率趋于增加。全麦粉在水合作用过程中,蛋白网络弱化降低,淀粉酶活性(C3/C4)和糊化速率( $\beta$ )均趋于增大,说明全麦粉面团中蛋白质强度和面团稳定性增强了。进一步分析表明破损淀粉降低了,说明全麦粉中淀粉颗粒的晶体度提高了。这一致于研究结果,空气压非热等离子(APNTP)可以影响固体淀粉颗粒的结晶度<sup>[28]</sup>并提高面团强度<sup>[29]</sup>。

本试验中,等离子通过电离空气形成温度小于 50 ℃ 的冷等离子体,导致小麦籽粒含水率随着处理时间延长而趋于减少。小麦发芽势和发芽率均降低说明籽粒胚部受到冷等离子负影响。小麦籽粒脂肪酸值受等离子处理降低,Bahrami 等<sup>[29]</sup>认为是易氧化的亚麻酸的降解引起的。本试验还显示,与常压空气冷等离子处理 0 min 时间比较,小麦籽粒吸水率显著( $P < 0.05$ )增加,而可溶性蛋白和巯基含量增加不显著,游离氨基酸含量保持不变。通常认为冷等离子作用食品的化学反应中以臭氧的氧化作用为主<sup>[6]</sup>,本研究中,小麦籽粒脂肪酸值减少、巯基含量呈现增加的趋势表明常压空气冷等离子引发的反应中包含蛋白质的还原反应。冷等离子处理小麦籽粒是功率及处理时间依赖的,可以根据小麦的末端用途优化冷等离子处理的参数,评价小麦籽粒应答冷等离子生理生化及品质指标的变化。

### 4 结论

常压空气冷等离子处理陈小麦 14~26 min,籽粒水滴接触角显著( $P < 0.05$ )减少,发芽率和陈化指数均显著( $P < 0.05$ )降低,而籽粒破碎率和吸水率则显著增加,可溶蛋白及巯基的含量随处理时间趋向于增加。进一步分析全麦粉的面团糊化特性,与对照比较,随着等离子处理时间加长,面团醒发时间趋于增加,而稳定时间趋于减少;显示面筋弹性的 C1 峰值幅度显著( $P < 0.05$ )减少。蛋白质网络弱化(C1-Cs)趋于减少,淀粉酶活性(C3/C4)增大,淀粉

回生程度(C5-C4)趋于降低。这些变化与蛋白网络弱化的速率( $\alpha$ )和糊化速率( $\beta$ )趋于增大、蒸煮稳定速率( $\gamma$ )趋于降低相关。全麦粉破损淀粉则显著减少。常压空气冷等离子可能通过增大过氧化物酶(POD)和淀粉酶活性而提高陈小麦面团蛋白质强度和面团稳定性。值得深入分析小麦醇溶性蛋白、脂肪酸种类与冷等离子体之间的化学反应途径。

### 参考文献

- [1] Luo Q Z, Angelo N, Merlino R L. Shock formation in a negative in plasma [J]. Department of Physics and Astronomy Retrieved, 1998, 5(8): 2868.
- [2] Pankaj S K, Wan Z F, Keener K M. Effects of cold plasma on food quality: A review [J]. Food, 2018, 7(4): 2-21.
- [3] Selcuk M, Oksuz L, Basaran P. Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. by cold plasma treatment [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 5104-5109.
- [4] Devi Y, Thirumdas R, Sarangapani C, et al. Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts [J]. Food Control, 2017, 77: 187-191.
- [5] 方向前, 边少锋, 徐克章, 等. 等离子体处理玉米种子对生物性状及产量影响的研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(4): 60-61.
- [6] Thirumdas R, Kadam D, Annapure U S. Cold plasma: An alternative technology for the starch modification [J]. Food Biophysics, 2017, 12(1): 129-139.
- [7] Tappi S, Berardinelli A, Ragni L, et al. Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 21: 114-122.
- [8] Thirumdas R, Deshmukh R R, Annapure U S. Effect of low temperature plasma processing on physicochemical properties and cooking quality of basmati rice [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 37: 53-60.
- [9] 李兴军. 谷物粮堆通风的理论依据与目标[J]. 粮食加工, 2017, 42(1): 28-38.
- [10] Chen Z T, Wang R L, Li X J, et al. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of cold plasma treated milled rice [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 55: 35-47.
- [11] 任强, 姜平, 张来林, 等. 采用 FCF 染色法测定粮食破碎率[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 50-53.
- [12] GB/T 5497-1985 粮食、油料检验水分测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- [13] GB/T 5520-2011 粮油检验籽粒发芽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [14] 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.

- [15] Sippel T O. Protein staining by coomassie brilliant blue G-250: Unique color rendering in iron-toned prints [J]. Electrophoresis, 1986, 7: 482-483.
- [16] 田益玲, 贾英氏, 李慧静, 等. 紫外分光光度法测定面粉中的巯基含量[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(4): 125-127.
- [17] GB/T 5510-2011 粮油检验粮食、油料脂肪酸值测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] Chen T F, Chen C L. Analysing the freshness of intact rice grains by colour determination of peroxidase activity [J]. Journal of Science and Food Agriculture, 2003, 83: 1214-1218.
- [19] GB/T 37511-2019 粮油检验小麦粉面团流变学特性测试混合试验仪法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [20] Navarro S, Noyes R. The mechanics and physics of modern grain aeration management [M]. New York: CRC Press, 2002: 2-29.
- [21] 张聚元. 小麦品质劣变指标的选择与评定[J]. 粮食储藏, 1987, 16(5): 1-15.
- [22] Srivastava A, Sudha M L, Baskaran V, et al. Studies on heat stabilized wheat germ and its influence on rheological characteristics of dough [J]. European Food Research and Technology, 2007, 224(3): 365-372.
- [23] Misra N N, Kaur S, Tiwari B K, et al. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour [J]. Food Hydrocolloid, 2015, 44: 115-121.
- [24] Sandhu H P, Manthey F A, Simsek S. Ozone gas affects physical and chemical properties of wheat starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1261-1268.
- [25] Alonao J M, Garcia J, Calleja A J, et al. Analysis, design, and experimentation of a high-voltage power supply for ozone generation based on current-fed parallel-resonant push-pull inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1364-1372.
- [26] Misra N N, Keener K M, Bourke P, et al. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 118(2): 177-182.
- [27] Morent R, De Geyter N, Desmet T, et al. Plasma surface modification of biodegradable polymers: A review [J]. Plasma Processes and Polymers, 2011, 8: 171-190.
- [28] Zhang B, Xiong S, Li X, et al. Effect of oxygen glow plasma on supramolecular and molecular structures of starch and related mechanism [J]. Food Hydrocolloid, 2014, 37: 69-76.
- [29] 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.

(上接第 36 页)

- tuna myofibrillar protein in linear and nonlinear viscoelastic regions [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121(1): 58-63.
- [27] Benjakul S, Visessanguan W, Ishizaki S, et al. Differences in gelation characteristics of natural actomyosin from two species of bigeye snapper, *Priacanthus tayenus* and *Priacanthus macracanthus* [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(9): 1311-1318.

- [28] Mleko S, Foegeding E A. pH induced aggregation and weak gel formation of whey protein polymers [J]. Journal of Food Science, 2000, 65(1): 139-143.
- [29] 董秋颖, 杨玉玲, 许婷. 从质构学角度研究肌原纤维蛋白凝胶形成的作用力 [J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(5): 45-49.
- [30] 励建荣, 余永名, 仪淑敏, 等. 鱼糜制品热凝胶形成机理研究进展 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 380-385.