张朝阳, 温纪平, 申玉翔, 等. 等离子体活化水对发芽小麦面包品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 176−183. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090028

ZHANG Chaoyang, WEN Jiping, SHEN Yuxiang, et al. Effect of Plasma Activated Water on Bread Quality of Germinated Wheat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 176−183. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090028

· 研究与探讨 ·

等离子体活化水对发芽小麦面包品质的影响

张朝阳[1], 温纪平[1,2,*], 申玉翔[1], 敖天芳[1]

（1.河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001;
2.小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 河南郑州 450001）

摘　要: 发芽会赋予小麦更高的营养价值与功能特性，但理化性质也因此发生改变，不利于加工操作。本研究探讨了不同制作时间的等离子体活化水（Plasma-activated water，PAW）对发芽小麦面团的发酵特性、流变学特性、淀粉酶活性及发芽小麦面包品质的影响。结果表明，与纯净水制作面团相比，制作时间为 30 min 的 PAW 制作的发芽小麦面团，气体保留率提高了 3.5%；流变学特性中的 G'、G"均恢复至接近未发芽时的水平；减少了面团制作过程中还原糖的产量；对面包外观改善明显，其中：面包比容增加 0.24 mL/g，感官评分增加 11.71；面包的硬度和咀嚼性有所降低；将发芽小麦面包的老化率从 122.02 gf/d 降低至 105.79 gf/d。综上，PAW 能有效改善面包的品质，为 PAW 作为和面用水、发芽小麦的合理利用提供理论基础。

关键词: 发芽小麦, 等离子体活化水, 和面用水, 面团, 面包

中图分类号: TS210.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0176−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090028　　本文网刊:

Effect of Plasma Activated Water on Bread Quality of Germinated Wheat

ZHANG Chaoyang[1], WEN Jiping[1,2,*], SHEN Yuxiang[1], AO Tianfang[1]

（1.College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2.National Engineering Research Center for Wheat & Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China）

Abstract: Germination endows wheat with enhanced nutritional value and functional properties, but its physicochemical properties also change as a result, which is not conducive to processing operations. This study investigated the effects of plasma-activated water (PAW) prepared under different treatment durations on the fermentation properties, rheological properties, and amylase activity of germinated wheat dough, as well as the quality of germinated wheat bread. The results showed that compared with kneading dough with deionized water, the gas retention capacity of the germinated wheat dough made by PAW with a production time of 30 minutes increased by 3.5%; The rheological properties of G' and G" both returned to levels close to those before germination; The output of reducing sugar was reduced during the dough-making process; The appearance of the bread was significantly improved, with the specific volume of the bread increasing by 0.24 mL/g and the sensory score increasing by 11.71; The hardness and chewiness of the bread was reduced; The staling rate of germinated wheat bread was reduced from 122.02 gf/d to 105.79 gf/d. In conclusion, PAW can effectively improve the quality of bread, providing a theoretical basis for the rational utilization of PAW as water for kneading dough and for germinating wheat.

Key words: germinated wheat; plasma activated water; dough-making water; dough; bread

收稿日期: 2025−09−05

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目（2021YFD2100900）。

作者简介: 张朝阳（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 谷物科学与工程技术, E-mail: z_beiguang@163.com。

*** 通信作者:** 温纪平（1968−）, 男, 硕士, 教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: wjp1380@163.com。

小麦是世界上最重要的粮食作物之一，每年在收获季节因天气潮湿或储存不当，会有大量的发芽小麦产生。发芽会表现出更高的功能特性和营养特性，如：降血压、维护心血管健康、预防糖尿病等[1]。这些功能特性的增强被归因于发芽过程中的酚类物质增多、γ-氨基丁酸含量增加、可溶性膳食纤维增加[2]等。但是发芽给小麦带来的品质改变，会损害面粉的加工品质最终影响产品的质量，发芽使小麦中酶活性的升高，导致淀粉、蛋白质和脂肪降解[3]，反映在面粉质量方面是粉质特性和糊化特性的劣变、面筋网络结构松散、脂肪酸值增加等[4]，这些性质的改变使发芽小麦粉在用于制作馒头时发黏[5]；制作面条时易断条，蒸煮损失大；制作面包时体积小，气孔大且外壳颜色深[6]。这些面粉品质的改变极大限制了发芽小麦的应用，众多学者也对发芽小麦进行了针对性研究，有学者从发芽小麦中被激活的酶着手，采用微波辐照、湿热处理等办法钝化这些酶，但会造成其他成分的损失或改变[7]。而有学者尝试分离出质地较好的小麦或小麦粉，如：气流分级[8]、剥皮制粉和密度分离[9]等。但这些方法操作繁琐，成本较高，分离后的剩余部分更加难以利用。也有学者将发芽小麦粉视为一种很好的酶源，适量添加于其他面粉中，能够改善面包的感官特性[10]、改善馒头的内部组织[11]，这种方法在于发挥发芽小麦的优势，也是最常用的应用发芽小麦的方法，但其添加量往往要控制在 15% 以内，对发芽小麦的利用率不高。

近年来，一种新兴的非热处理技术——冷等离子体，因其具有降菌保鲜、改善食品原料加工品质、延长食品货架期和绿色安全等优点[12]，受到广泛关注。冷等离子体通过在给定电压下电离空气或介质产生，该过程会产生活性氧、自由基和带电离子等活性物质[13]，近年来已被应用于食品保鲜、谷物降菌、水果灭酶等多个方面。将等离子体通入水中可以制成等离子体活化水，等离子体活化水也具有等离子体的多种特性，用于处理冰鲜鸡时，能有效延长其货架期至 8 d[14]；用于小麦润麦时，16% 的润麦水分对小麦中菌落总数、大肠菌群、霉菌和酵母菌、耐热芽孢总数均有显著（$P<0.05$）削减；在用于和面时，对生湿面条的感官评价有显著（$P<0.05$）改善以及对保质期有最高 41.7% 的延长[15]。目前，已有学者对等离子体活化水的食用安全性进行了探究，用等离子体活化水及其制作的面包喂养小鼠，在将测试物质引入小鼠日粮的 90 d 内，对照组和实验组的体重变化无明显差异，宏观形态参数以及胃、肝脏、肾脏和股骨作为潜在靶器官的组织学研究结果表明，这些器官没有营养不良退行性变化，为等离子体活化水和用它制成的小麦面包的食品安全性提供了理论依据[16]。目前，还未有等离子体活化水用作发芽小麦制品品质改善的研究。本文将等离子体活化水用作和面用水，分析其对发芽小麦面团发酵流变特性、动态流变特性及还原糖含量的影响，探究其对发芽小麦面包品质的影响，为 PAW 作为和面用水、发芽小麦的合理利用提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

郑麦 9188　南秋乐种业股份有限公司；DNS 试剂　飞净生物科技有限公司；酵母　安琪酵母股份有限公司；食盐　中盐河南盐业物流配送有限公司；白砂糖　开封市祥符区粒之源食品有限公司；脱脂奶粉　杜尔伯特伊利乳业有限责任公司；黄油　新加坡商永紐股份有限公司；PAW　实验室自制；所用试剂均为分析纯　天津市科密欧化学试剂有限公司。

DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱　上海精宏实验设备有限公司；HWS-500 型恒温恒湿培养箱　宁波东南仪器有限公司；F3 发酵流变仪　德国哈克公司；MARS60 型哈克流变仪　Thermo Fisher Scientific 公司；JHMZ-200 型针式和面机　北京东孚久恒仪器技术有限公司；SEC-Y2 型远红外线食品烘焙炉　广州三麦机械设备有限公司；TX-XT Plus 型质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司；MLU-202 型布勒磨　布勒机械制造有限公司；等离子体活化水生成装置　厂家定制，郑州邦达电气有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　发芽小麦粉制备　将清理除杂后的小麦室温浸泡 6 h，控干水分，放入铺有双层纱布的透气框内，铺平，表面覆盖双层纱布，放入恒温恒湿培养箱中，设定温度 28 ℃，湿度 90%，发芽 24 h，发芽结束后放入鼓风干燥箱中，40 ℃ 干燥至水分 14% 以下，制得发芽小麦。

将发芽小麦在室温下润麦 16 h，调至水分 16%。采用实验磨粉机磨粉，收集各路系统粉，混匀，过 90 目筛，制得发芽小麦粉。

1.2.2　PAW 及面团的制备　使用等离子体生成装置，以蒸馏水进行等离子体活化，将等离子体源头浸入液面 3 mm 处，设置功率 800 W，分别电解活化 10、20、30 和 40 min，制得 PAW，密封备用。

以蒸馏水和面，制得未发芽小麦面团和发芽小麦面团，分别记为 A、B，以处理时间为 10、20、30 和 40 min 的 PAW 和面，制得的发芽小麦面团，分别记为 C、D、E、F。

1.2.3　小麦粉理化特性的测定　灰分：GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》；粉白度：GB/T 22427.6-2008《淀粉白度测定》；粗蛋白：GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》；湿面筋：GB/T 5506.2-2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第二部分：仪器法测定湿面筋》；面筋指数：LS/T 6102-1995《小麦粉湿面筋质量测定法面筋指数法》；降落数值：GB/T 10361-2008《小麦、黑麦及其面粉，

杜伦麦及其粗粒粉 降落数值的测定 Hagberg-Perten 法》; 粗脂肪: GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》。

1.2.4 小麦粉发酵流变特性的测定 采用 F3 发酵流变仪进行测定。称取 200 g 小麦粉于针式和面机中, 按照吸水率的 90% 加水, 加 1% 的高活性酵母, 和面 2 min, 称取和好的面团 300 g 放入 F3 发酵仪中测定, 温度设定 35 ℃, 压力 2 kg, 时间 3 h。

1.2.5 小麦粉流变学特性的测定 称取 50 g 面粉于针式和面机中, 按照吸水率的 90% 加水, 和面 2 min, 用保鲜膜包裹, 25 ℃ 静置 20 min。静置后面团中心取样, 平铺于流变仪载物台, 选用 PP35 圆形探头。进行应力扫描, 确定线性粘弹性区域, 选择合适应力, 扫描范围 0.0001%~10%, 温度 25 ℃, 频率 1 Hz。设置间隙 1 mm, 温度恒定 25 ℃, 应力 0.1%, 扫描频率 0.1~10 Hz, 进行频率扫描, 结果以角频率表示(角频率=2π×频率)。

1.2.6 小麦粉酶活性的检验 称取 50 g 面粉于针式和面机中, 按照吸水率的 90% 加水, 和面 2 min, 然后称取 1.6 g 面团, 于 50 mL 离心管中, 50 ℃ 保温 20 min 后加入 1 mol/L 的盐酸 2 mL 进行酶促灭处理(同时取以蒸馏水和面制作的面团 A 和 B 作为对照组, 记为 A'和 B', 对照组取样后先加入 1 mol/L 的盐酸 2 mL 进行酶促灭处理, 再 50 ℃ 保温 20 min), 保温结束后加入 20 mL 蒸馏水, 磁力搅拌 10 min 使面团充分溶解, 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液于 50 mL 容量瓶中加水定容, 取 1 mL 上清液, 加 1 mL 蒸馏水、1.5 mL DNS 试剂, 混匀后沸水浴 5 min, 冷却至室温, 加水定容至 25 mL, 混匀, 静置 10 min 后在 540 nm 测定吸光度, 通过标准曲线计算样品中还原糖含量。还原糖标准曲线方程: y=0.4891x+0.0071, R^2=0.9953。

1.2.7 面包的制作、比容和烘焙损失率的测定 面包制作和比容的测定参照 GB/T 14611-2008《粮油检验 小麦粉面包烘焙品质试验 直接发酵法》。和面按照吸水率的 90% 加水, 将和好的面团均分成 170 g 两份, 制成面包胚, 发酵完成后在烤箱中上火 185 ℃, 下火 190 ℃ 焙烤 20 min。烘焙损失率按照公式计算:

$$L(\%) = \left(1 - \frac{m_2}{m_1}\right) \times 100$$

式中: L—烘焙损失率, %; m_1—面团质量, g; m_2—烘焙冷却后面包质量, g。

1.2.8 面包的外观、面包芯纹理及感官评分 将面包固定于同一位置, 固定相机的拍摄距离对面包进行拍摄, 然后将面包切成 10 mm 厚的片。面包感官评分参照 GB/T 14611-2008《粮油检验 小麦粉面包烘焙品质试验 直接发酵法》中的标准评分。

1.2.9 面包质构的测定 使用 1.2.8 中切的面包片, 测定面包芯的质构特性。质构仪参数设定: P/36R 探头, TPA 模式, 触发模式为 Auto, 触发力 5 g, 应变 50%, 测前、测中、测后速度均为 1 mm/s, 两次压缩时间间隔 5 s。

1.2.10 面包储藏过程中老化率的测定 参考展小彬[17] 的方法, 将制作好的面包装入自封袋中, 4 ℃ 冰箱存放 7 d, 依照 1.2.9 的方法测定面包硬度。面包老化率计算公式如下:

$$H = \frac{H_T - H_0}{T}$$

式中: H—老化率, gf/d; H_T—储藏 T d 后面包的硬度, gf; H_0—新鲜面包的硬度, gf; T—储藏时间, d。

1.3 数据处理

所有数据进行 3 次平行测定, 以平均值±标准差表示结果, 使用 Origin 2022 统计数据与绘图, SPSS 20 软件对数据进行统计学意义分析(显著水平为 P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 小麦粉及发芽小麦粉的基本理化指标

由表 1 可知, 小麦在发芽后灰分含量为 0.45%, 显著(P<0.05)低于未发芽, 可能与浸泡过程中矿物质的流失有关[18]。发芽小麦面粉白度增加至 79.98, 张佳灵[19] 指出小麦粉中含有 β-胡萝卜素, 为浅黄色, 对小麦面粉、面团色泽都有影响, 而发芽时酶活的增强会氧化破坏类胡萝卜素的共轭双键, 使面粉白度有所增加。小麦发芽会分解营养物质提供营养, 这一过程会造成小麦中粗蛋白和脂肪含量的减少[20]。发芽后湿面筋含量没有明显变化, 造成这一现象的原因可能是发芽过程中碳水化合物等其他营养物质同样被消耗, 但小麦粉面筋指数下降了 21.38%, 这可以用麦谷蛋白在发芽过程中的变化解释, 麦谷蛋白对蛋白酶的敏感性高于麦醇溶蛋白, 在发芽过程中更容易被降解, 改变麦谷蛋白和麦醇溶蛋白的比例, 因此面筋蛋白依旧遭到破坏, 小麦粉面筋指数降低[21−22]。降落数值能侧面反映小麦中 α-淀粉酶的活性, 与之呈负相关[23], 降落数值急剧下降至 167 s, 表明小麦中 α-淀粉酶活性急剧升高。

表 1 小麦粉及发芽小麦粉的基本理化指标

Table 1 Basic physical and chemical indexes of wheat flour and germinated wheat flour

样品	灰分(%)	粉白度	粗蛋白(%)	湿面筋(%)	面筋指数(%)	降落数值(s)	脂肪(%)
WF	0.55±0.03^a	76.35±0.07^b	11.56±0.11^a	32.10±0.14^a	86.30±3.90^a	458.50±10.6^a	0.86±0.11^a
GF	0.45±0.02^b	79.98±0.01^a	11.39±0.02^b	32.20±0.57^a	64.92±1.58^b	167.00±7.0^b	0.72±0.01^b

注: WF表示未发芽小麦粉, GF表示发芽小麦粉; 不同小写字母表示不同样品存在显著性差异(P<0.05); 表2~表5同。

2.2　发酵流变

发酵流变能反映面团的发酵能力以及产气、持气能力，直观地反映出面团质量的好坏。表 2 为不同和面用水的发芽小麦面团发酵流变的结果。相比未发芽小麦面团，发芽小麦面团 B 的膨胀高度（Hm）和产气体积（Vt）分别增加了 24.4% 和 15.4%，这与酵母在发酵过程中产气直接相关，发芽小麦中淀粉酶活性升高，分解淀粉产生了更多还原糖，尤其是麦芽糖、和葡萄糖[24]，这些还原糖更容易被酵母利用，导致酵母产气量升高。这并不是完全有益的，对于面包来说，过高的产气量会破坏发芽小麦面团的较弱面筋网络结构[25]，使面包胚发酵体积过大，还未进入烤箱时就出现涨裂，在面包烘焙后胀裂现象更为明显，表现为过量产气现象。表 2 中可以看出，小麦发芽后，其发酵稳定性（(Hm-H)/Hm(%)）急剧降低，使用处理时间为 10 和 20 min 的 PAW 作为和面用水对发芽小麦面团的发酵稳定性有一定的改善作用。被破坏的面筋网络结构，也削弱了面团的持气能力，从面团的持气能力看，发芽对小麦面团的气体保留体积（Vr）有一定影响，面团的气体保留率（R）减少了 7.9%。使用 PAW 作为和面用水会略微降低发芽小麦面团的膨胀高度，是由于 PAW 具有高氧化还原电位（Oxidation-Reduction Potential，ORP）以及较低的 pH[26]，两者协同对淀粉酶以及酵母有一定抑制作用，从而控制了面团的产气，但依旧比未发芽小麦面团 A 高出 14.2%~23.4%，且仅在样品 F 处出现明显降低，尽管 PAW 降低了发芽小麦面团的产气体积，但样品 C、D、E 的产气体积依旧高于样品 A 的 6% 以上，而 PAW 因为降低了发芽小麦的总产气量，也因此导致发芽小麦面团的气体保留率显著（P<0.05）提升。

2.3　动态流变

如图 1 所示，发芽会导致面团的储能模量（G'）和损耗模量（G"）明显降低，表明面团的类弹性固体性质变差，抵抗变形的能力减弱，变得更加稀软且粘黏，这是因为发芽小麦中高活性的蛋白酶破坏了面筋蛋白，损伤了面团的面筋网络结构，使面团的稳定性变差[27]。样品 C~F 的 G'和 G"依次升高至接近正常小麦面团的水平，表明 PAW 有助于发芽小麦面团结构稳定性的恢复。发芽使面团的损耗因子 tanδ（G"/G'）变大，表明面团的黏性增强，在生产加工中更易出现粘连现象，不利于生产加工操作，样品 C~F 的 tanδ 随着 PAW 处理时间的增加而减小，面团粘性有所下降，以 PAW 作为和面用水有益于增加面团的固体样品行为。

2.4　淀粉酶活性的检验

如图 2 所示，未发芽小麦面团的对照组 A'和发芽小麦面团的对照组 B'的还原糖含量无明显差别，表明未发芽小麦面粉和发芽小麦面粉在制成面团之前，其还原糖含量接近，在加水制作面团的过程中，淀粉酶遇水活化，开始分解淀粉产生糖类物质，因此未发芽小麦面团 A 和发芽小麦面团 B 的还原糖含量都有显著（P<0.05）增高，分别增加 63.37% 和 232.96%，相比于未发芽小麦面团 A，发芽小麦面团 B 的还原糖含量的增加量多出 169.59%，这也表明发芽小麦粉具有更高的淀粉酶活性，因此在制作面团的过程中能更多地水解淀粉产生还原糖。相比于蒸馏水，以 PAW 作为和面用水的发芽小麦面团测得的还原糖含量有

表 2　PAW 对发芽小麦发酵流变特性的影响

Table 2　Effect of PAW on the rheological properties of germinated wheat during fermentation

样品	Hm(mm)	H(mm)	(Hm-H)/Hm(%)	Vt(mL)	Vr(min)	R(%)
A	50.8±1.8^{c}	49.4±0.1^{c}	1.7±1.8^{c}	1713.0±16.8^{d}	1242.5±12.0^{b}	72.5±0.0^{a}
B	63.2±1.3^{a}	49.2±0.2^{c}	20.5±3.8^{ab}	1976.5±16.3^{a}	1276.0±4.2^{a}	64.6±0.8^{c}
C	62.7±0.4^{a}	53.1±0.1^{a}	16.1±0.9^{b}	1819.5±19.1^{c}	1246.0±4.2^{b}	68.5±0.5^{b}
D	61.4±0.6^{a}	50.5±0.1^{b}	18.3±0.2^{ab}	1849.5±13.4^{bc}	1243.5±4.9^{b}	67.3±0.2^{b}
E	61.0±1.2^{a}	49.2±0.4^{c}	19.4±2.2^{ab}	1869.5±7.8^{b}	1272.5±6.4^{a}	68.1±0.6^{b}
F	58.0±0.6^{b}	43.9±0.6^{d}	23.4±1.3^{a}	1727.5±33.2^{d}	1234.0±12.7^{b}	71.5±0.6^{a}

注：A、B分别表示未发芽小麦粉和发芽小麦粉用蒸馏水制得的面团，C、D、E、F分别表示使用处理10、20、30、40 min的PAW制得的发芽小麦面团；图1~图3，表3~表5同。

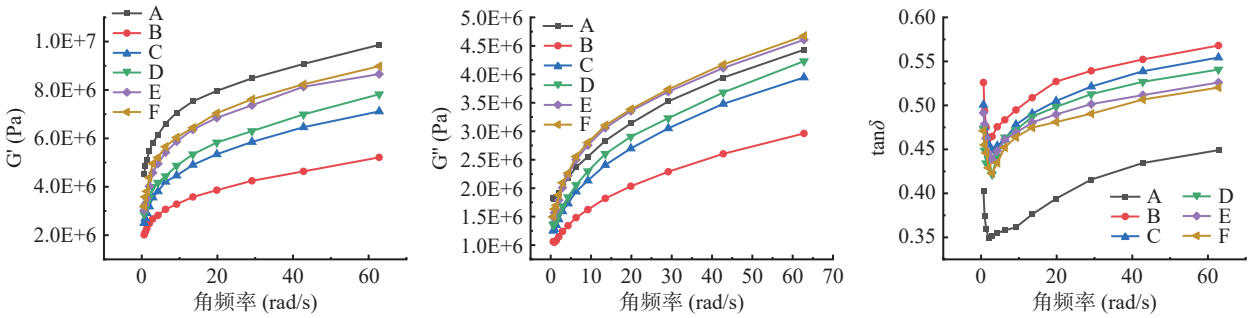


图 1　面团的 G'、G"和 tanδ 随角频率的变化

Fig.1　Variation of G', G" and tanδ of dough with angular frequency

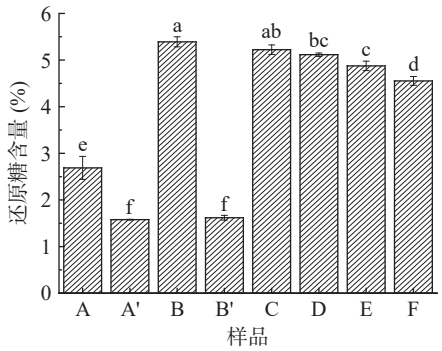


图 2 面团制作过程中还原糖含量的变化

Fig.2 Changes of reducing sugar content during dough making

注: A'和 B'表示小麦粉和发芽小麦粉制成面团后立即进行酶促灭活处理的组, 分别为 A、B 的对照组。

明显降低, 产生这一现象的原因可能是 PAW 增加了小麦淀粉的相对结晶度、短程有序性和糊化焓值, 减少了淀粉酶的作用位点[28], 另一方面, PAW 对食品中的内源酶有灭活效果[12], 因此减少了面团制作过程中还原糖的产量。

2.5 面包的外观及内部纹理

如图 3 所示, 未发芽小麦面包表面光洁, 无破皮、涨裂现象, 整体外观良好, 而发芽小麦面包体积有所增大, 在正面和侧面都出现了涨裂现象, 以 PAW 作为和面用水的面包其侧面涨裂现象消失, 正面的裂口也逐渐减小。从面包的切片来看, 未发芽小麦面包的面包芯气孔细密均匀, 大气孔很少, 呈现海绵状, 发芽小麦面包的面包芯气孔不均匀, 有较多大的气孔, 相较于 B 组, 以 PAW 作为和面用水的面包其面包芯气孔变得较为均匀, 大气孔数量明显减少。



图 3 面包的外观及内部纹理结构

Fig.3 Appearance and internal texture structure of bread

2.6 面包的比容、烘焙损失率和感官评分

由表 3 可知, 发芽对面包的烘焙损失率无明显影响, PAW 对发芽小麦的烘焙损失率也无明显影响。面包比容是反映面包质量的一个重要指标, 发芽会导致面包的比容明显增加, 这一结果与面团发酵流变中的气体保留率变化相矛盾, 可能是因为用于发酵流变的面团仅添加了酵母, 而用于制作面包的面团添加的还有盐和脱脂奶粉等成分, 这些成分中, 盐的添加(尤其是 1.5% 的添加量)有助于面筋网络中氢键和二硫键的形成, 促进热变性小麦面筋蛋白形成更具凝聚力的网络结构, 增强面筋网络的稳定性[29], 而脱脂奶粉本身含有大量蛋白质, 能增加面团的吸水, 增强面筋的韧性, 对面筋网络有一定的增强作用; 尽管发芽损伤了面团的面筋网络结构, 面团的气体保留率有所降低, 但在一定程度内, 发芽小麦面团增加的产气量[30], 使气体保留量也增加, 依旧足以支撑面包的体积, 因此, 三者协同作用造成了面包比容的增加。但发芽小麦面包的孔隙结构会变得不均匀, 甚至产生大气孔, 这是由于过量的产气以及损伤后的面筋网络无法有效限制气体的扩散和聚集, 在面团中形成气室, 烘烤时进一步膨胀形成的。在使用 PAW 作为和面用水之后, 面包的比容最高可达到 4.14 mL/g, 这是 PAW 促进了蛋白质中游离巯基形成二硫键[31−32], 提高了蛋白质分子交联度, 使面筋网络结构变得均匀, 进而能够更好地保留气体; 同时, PAW 对小麦中内源酶的抑制作用, 也能减少面包制作过程中蛋白酶对面筋蛋白的影响。最后, 相较于 B 组面包, C~F 组面包的感官评分显著(P<0.05)增加, 其中面包比容的增加和纹理结构的改善贡献了大部分感官评分, 这些贡献使 D~F 组发芽小麦面包的感官评分恢复至接近 A 组的未发芽小麦面包的水平。

表 3 PAW 对面包比容和烘焙损失率的影响

Table 3 Effect of PAW on specific volume and baking loss of bread

样品	烘焙损失(%)	比容(mL/g)	感官评分
A	10.13±0.75^{a}	3.78±0.04^{c}	65.13±1.94^{a}
B	9.47±0.90^{a}	3.90±0.08^{bc}	55.00±0.82^{c}
C	10.49±0.19^{a}	3.91±0.06^{bc}	60.09±1.29^{b}
D	9.91±0.66^{a}	4.02±0.16^{ab}	63.75±1.06^{a}
E	10.11±0.40^{a}	4.14±0.05^{a}	66.71±0.53^{a}
F	10.94±0.25^{a}	4.08±0.01^{ab}	64.96±2.42^{a}

2.7 面包的质构

质构可以全面地反映面包的品质, 可以理解为承受外部压力的能力, 其中硬度、胶黏性和咀嚼性与面包品质呈负相关, 弹性、内聚性和回复性与面包品质呈正相关[33], 这些性质的改变可以用面筋蛋白和淀粉的改变解释, 面筋蛋白可以形成连续的网状骨架, 淀粉颗粒作为面团的主要成分, 是网状骨架的填充基质, 两者共支撑成面包的结构[34]。在未发芽小麦中, 淀粉颗粒以完整形式存在, 吸水鼓胀, 烘烤后形成凝胶网络支撑面包结构, 冷却后缓慢老化, 保持面包的结构稳定, 发芽后部分淀粉颗粒被水解为小分子的糖, 淀粉的完整性被破坏, 不能形成稳定的凝胶网络; 另一方面, 未发芽小麦中的面筋蛋白在面团中可以形成完整的面筋网络结构, 淀粉颗粒均匀分散其中, 包裹酵母发酵时产生的二氧化碳, 形成均匀的孔隙, 烘

表 4　PAW 对面包质构的影响

Table 4　Effect of PAW on bread texture

样品	硬度(gf)	弹性(mm)	内聚性	胶黏性	咀嚼性(gf)	回复性(mm)
A	451.93±42.58^{a}	0.98±0.01^{a}	0.81±0.01^{a}	360.73±37.54^{a}	352.83±30.91^{a}	0.47±0.01^{a}
B	243.02±8.61^{b}	0.95±0.01^{b}	0.77±0.01^{c}	169.36±12.19^{b}	176.56±5.35^{b}	0.33±0.01^{c}
C	235.97±22.37^{b}	0.94±0.01^{b}	0.79±0.01^{b}	153.31±8.42^{b}	178.76±16.66^{b}	0.31±0.02^{bc}
D	238.54±38.29^{b}	0.93±0.00^{c}	0.76±0.02^{c}	170.16±3.30^{b}	167.86±26.03^{bc}	0.32±0.01^{bc}
E	193.88±14.90^{c}	0.92±0.01^{c}	0.77±0.02^{bc}	156.62±6.30^{b}	141.34±12.34^{d}	0.33±0.02^{bc}
F	208.35±9.46^{bc}	0.94±0.02^{bc}	0.77±0.01^{bc}	171.23±6.43^{b}	151.08±6.00^{cd}	0.35±0.02^{b}

烤后面筋网络固化成为面包的结构支撑，而发芽小麦中部分面筋蛋白被破坏，难以交联形成面筋网络。发芽小麦淀粉与面筋蛋白的共同改变，使面包承受外部压力的能力减弱，因此，相较于样品 A，样品 B 质构特性整体减小(表 4)。当以 PAW 作为和面用水时，相较于样品 B，发芽小麦面包的硬度(243.02 gf)和咀嚼性(176.56 gf)在此基础上进一步降低，Nieves 等[35] 指出 PAW 较低的 pH 和增加的氧化还原电位，能够促进淀粉颗粒表面的氧化和降解，并且影响淀粉的长程和短程结构，因此面包的硬度和咀嚼性下降。处理时间为 40 min 的 PAW使发芽小麦面包的回复性有一定程度提高，则是 PAW 中的活性成分促进了蛋白质交联[36]，面筋网络变得稳定，增强了承受外部压力后回复的能力。

2.8　面包储藏过程中的老化率

贮藏期间面包硬度的改变可以很好地反映面包的老化程度，面包的老化与贮藏过程中水分的迁移和淀粉的重结晶有关[37]。由表 5 可知，发芽使面包第 7 d 的老化率降低到 122.02 gf/d，降低了 15.9%，而 PAW 使面包第 7 d 的老化率在此基础上进一步降低，随着处理时间的延长，面包的老化率最低降至 93.42 gf/d。发芽导致面包老化率的降低可能是因为淀粉酶能促进淀粉水解为较短的链和小分子的糖类[38]，这些物质含有更多的羟基基团，能够与水形成氢键，从而吸附和保持水分[39]，同时也抑制淀粉的重结晶；PAW 将老化率进一步降低的原因可能是其提供的酸性环境能干扰淀粉的重结晶[40]，从而够抑制淀粉的老化，保持面包屑的柔软。

表 5　PAW 对面包储藏过程中老化率的影响

Table 5　Effect of PAW on the aging rate of bread during storage

样品	0 d-硬度(gf)	7 d-硬度(gf)	面包老化率(gf/d)
A	451.93±42.58^{a}	1467.71±94.01^{a}	145.11
B	243.02±8.61^{b}	1097.16±75.57^{b}	122.02
C	235.97±22.37^{b}	963.05±34.21^{c}	103.87
D	238.54±38.29^{b}	977.84±85.43^{c}	105.61
E	193.88±14.90^{c}	934.41±32.48^{cd}	105.79
F	208.35±9.46^{bc}	861.29±45.37^{d}	93.42

3　结论

小麦发芽 24 h，其面粉的基本理化指标、面团的发酵流变以及面团流变学特性均产生了不同程度的劣变，制成的面包品质也有所下降。本研究以不同处理时间的 PAW 作为和面用水，改善了发芽小麦面团的发酵稳定性，处理 40 min 的 PAW 可将面团的气体保留率提高至 71.5%，与未发芽小麦面团达到同一水平；面团的弹性模量和粘性模量恢复至正常水平附近，相比于蒸馏水和面，以 PAW 作为和面用水的 tanδ 有所下降，能一定程度上降低面团黏性，其中，处理时间为 40 min 的 PAW 对面团黏性的改善效果最好；面团中还原糖的增量有所降低，表明 PAW 对淀粉酶有一定抑制作用。以处理 30 min 的 PAW 制成的面包比容(4.14 mL/g)最大，感官评分(66.71)最高；PAW 使面包硬度和咀嚼性降低，回复性升高，降低了面包的老化率。该结果可为 PAW 代替传统和面用水提供依据，为发芽小麦的改善措施提供新的选择。最后，本文并未对 PAW 在面团中的作用机理进行探究，PAW 对面团的多尺度影响也值得进一步探究。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 武伟超, 桑若杰, 刘磊, 等. 发芽、发酵对谷物营养和功能活性成分的影响及其应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 411−418. [WU W C, SANG R J, LIU L, et al. Effect of germination and fermentation on nutritional and functional active components of cereals and its application research progress[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(7): 411−418.]

[2] 张玉荣, 陈杨, 曹宇飞, 等. 发芽小麦的品质变化及改善方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(17): 395−402. [ZHANG Y R, CHEN Y, CAO Y F, et al. Research progress on quality changes and improvement methods of germinated wheat[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(17): 395−402.]

[3] 齐笑笑, 郭嘉, 温纪平. 发芽小麦的研究利用进展[J]. 食品工业, 2022, 43(5): 241−245. [QI X X, GUO J, WEN J P. Research and utilization progress of germinated wheat[J]. The Food Industry, 2022, 43(5): 241−245.]

[4] 张朝阳, 温纪平, 刘非凡, 等. 发芽小麦的品质特性与食用安全特性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(7): 30−38. [ZHANG C Y, WEN J P, LIU F F, et al. Research progress on quality and edible safety characteristics of germinated wheat[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(7): 30−38.]

［5］ 梁王壮, 唐雅楠, 刘佳荟, 等. 小麦发芽对面粉质量与加工产品品质的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(7): 1267−1280. ［LIANG W Z, TANG Y N, LIU J H, et al. Effects of wheat germination on flour quality and processed product quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(7): 1267−1280.］
［6］ 王钰惠, 轩毫毫, 郑学玲, 等. 发芽对小麦品质特性及馒头和面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(15): 293−302. ［WANG Y H, XUAN H H, ZHENG X L, et al. Effects of germination on wheat quality characteristics, steamed bread and bread quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(15): 293−302.］
［7］ 王肖宁, 刘远晓, 王建立, 等. 臭氧处理对发芽小麦粉及面条品质的影响[J]. 食品科技, 2025, 50(4): 208−215. ［WANG X N, LIU Y X, WANG J L, et al. Effects of ozone treatment on the quality of germinated wheat flour and noodles[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(4): 208−215.］
［8］ 齐笑笑, 郭嘉, 温纪平, 等. 气流分级对发芽小麦粉品质的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 162−167. ［QI X X, GUO J, WEN J P, et al. Effect of airflow classification on the quality of germinated wheat flour[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(3): 162−167.］
［9］ OLAERTS H, BONDT D Y, COURTIN M C. Density separation as a strategy to reduce the enzyme load of preharvest sprouted wheat and enhance its bread making quality[J]. Food Chemistry, 2018, 241: 434−442.
［10］ MARES D, MRVA K. Late-maturity *α*-amylase: Low falling number in wheat in the absence of preharvest sprouting[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 47(1): 6−17.
［11］ 徐颖. 发芽小麦粉对馒头品质的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019. ［XU Y. Effect of germinated wheat flour on the quality of steamed bread[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.］
［12］ 刘非凡, 温纪平, 展小彬, 等. 冷等离子体处理在食品中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(12): 181−188. ［LIU F F, WEN J P, ZHAN X B, et al. Research progress on the application of cold plasma treatment in food[J]. Food Research and Development, 2024, 45(12): 181−188.］
［13］ BOURKE P, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production[J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(6): 615−626.
［14］ 李欣怡, 靳爽爽, 王明月, 等. 等离子体活化水协同有机酸对冰鲜鸡抑菌效果及贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 412−419. ［LI X Y, JIN S S, WANG M Y, et al. Effects of plasma activated water combined with organic acids on the antibacterial effect and storage quality of chilled chicken[J]. Food Industry Science and Technology, 2026, 47(12): 412−419.］
［15］ 刘非凡. 润麦用水对小麦表面微生物及其制品品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2025. ［LIU F F. Effect of water on the quality of wheat surface microorganisms and their products[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025.］
［16］ MYKOLENKO S, PIVOVAROV O, YEFIMOV V, et al. Food safety of plasma-chemically activated water and bread made with its use[J]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 6(11): 74−83.
［17］ 展小彬. 过热蒸汽处理对麦胚品质的影响及麦胚在面包中应用的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. ［ZHAN X B. The effect of superheated steam treatment on the quality of wheat germ and the application of wheat germ in bread[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.］
［18］ 牛康康. 超声波辅助二氧化氯对发芽小麦微生物及品质特性影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. ［NIU K K. Effect of ultrasound-assisted chlorine dioxide on microorganisms and quality characteristics of germinated wheat[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.］
［19］ 张佳灵. 芽萌动对小麦粉品质影响的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015. ［ZHANG J L. Study on the effect of germination on the quality of wheat flour[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2015.］
［20］ KAUE H, GILL S B. Changes in physicochemical, nutritional characteristics and ATR-FTIR molecular interactions of cereal grains during germination[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 58(6): 1−12.
［21］ 李明鹏, 高琨, 魏敏, 等. 小麦萌芽程度对全麦挂面食用品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 172−178. ［LI M P, GAO K, WEI M, et al. Effect of wheat germination on the edible quality of whole wheat noodles[J]. Food Science, 2024, 45(14): 172−178.］
［22］ 赵艳丽. 发芽小麦粉的利用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013. ［ZHAO Y L. Study on the utilization of germinated wheat flour[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.］
［23］ 翟静静, 张德鹏, 马清香, 等. 干燥温度对高水分小麦加工和应用品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 52−61. ［ZHAI J J, ZHANG D P, MA Q X, et al. Effect of drying temperature on processing and application quality of high moisture wheat[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(7): 52−61.］
［24］ MARTI A, CARDONE G, NICOLODI A, et al. Sprouted wheat as an alternative to conventional flour improvers in bread-making[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 230−236.
［25］ VERHEYEN C, ALBRECHT A, ELGETI D, et al. Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality[J]. Food Research International, 2015, 76(3): 860−866.
［26］ CHOI J E, PARK W H, KIM B S, et al. Sequential application of plasma-activated water and mild heating improves microbiological quality of ready-to-use shredded salted Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L)[J]. Food Control, 2018, 98: 501−509.
［27］ 杜世超. 收获期降雨对春小麦穗发芽和产量品质的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021. ［DU S C. Effects of rainfall during harvest on pre-harvest sprouting, yield and quality of spring wheat[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.］
［28］ 彭百祥. 等离子体活化水韧化处理对淀粉多尺度结构和性能的影响研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022. ［PENG B X. Study on the effect of plasma activated water toughening treatment on the multi-scale structure and properties of starch[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.］
［29］ LIANG Y, CAO Z, JIE Y, et al. Effect of NaCl on heat-denatured wheat gluten in freeze-thaw cycles: Physicochemical properties and molecular structure[J]. LWT, 2024, 207: 116669.
［30］ MARTI A, CARDONE G, PAGANI A M, et al. Flour from sprouted wheat as a new ingredient in bread-making[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 237−243.

［31］闵照永. 等离子体活化水及微波协同处理对鲜湿面片特性的影响[J]. 食品科技，2024, 49(6)：180−186. ［MIN Z Y. Effect of plasma activated water and microwave synergistic treatment on the characteristics of fresh wet noodles[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(6)：180−186.］
［32］SEGAT A, MISRA N, CULLEN P, et al. Atmospheric pressure cold plasma（ACP）treatment of whey protein isolate model solution[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 29：247−254.
［33］CHENG J, ZHENG L, ZHAO J, et al. Study on the effect of microwaved brewer's spent grains on the quality and flavor characteristics of bread[J]. Foods（Basel, Switzerland）, 2024, 13(3)：461.
［34］HU X H, LI C, YAN H, et al. An extensive review：How starch and gluten impact dough machinability and resultant bread qualities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 63(13)：11−12.
［35］NIEVES S I, SOLER A, SILVA F C P. Effect of plasma-activated water on the supramolecular structure and techno-functional properties of starch：A review[J]. Food Chemistry, 2024, 456：139997.
［36］陈昊. 生湿面条的保鲜研究[D]. 无锡：江南大学, 2023. ［CHEN H. Study on preservation of raw wet noodles[D]. Wuxi：Jiangnan University, 2023.］
［37］BIANCHI A, VENTURI F, PALERMO C, et al. Primary and secondary shelf-life of bread as a function of formulation and MAP conditions：Focus on physical-chemical and sensory markers[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 41：101241.
［38］CHANG Y, CHEN H, JIAO Y. Improvement in textural, structural and digestive characteristics of maize gruel using malt amylase obtained by germination and ultrasonic extraction[J]. LWT, 2025, 220(15)：117576.
［39］祁雪儿, 姚慧, 齐贺, 等. 多羟基糖类物质对冷冻虾仁中水的重结晶的改善作用[J]. 现代食品科技，2020, 36(1)：91−97,135. ［QI X E, YAO H, QI H, et al. Improvement of recrystallization of water in frozen shrimp by polyhydroxy sugars[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(1)：91−97,135.］
［40］田耀旗. 淀粉回生及其控制研究[D]. 无锡：江南大学, 2011. ［TIAN Y Q. Study on starch retrogradation and its control[D]. Wuxi：Jiangnan University, 2011.］