

王小洁, 蒿宝珍, 谢艺可, 等. ^{60}Co - γ 辐照对小麦加工品质及终产品质构特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 74–82. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090092

WANG Xiaojie, HAO Baozhen, XIE Yike, et al. Effects of ^{60}Co -Gamma Irradiation on Wheat Processing Quality and Final Product Texture Properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 74–82. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090092

· 研究与探讨 ·

^{60}Co - γ 辐照对小麦加工品质及终产品质构特性的影响

王小洁*, 蒿宝珍, 谢艺可, 马静丽, 常 夏

(新乡学院生命科学与基础医学学院, 河南新乡 453003)

摘 要: 为了明确 ^{60}Co - γ 辐照对小麦品质的影响, 用不同剂量 (0、35、50、75、90、120、150、200、300、400 Gy) 的 ^{60}Co - γ 辐照处理小麦种子, 以其 M_1 代为研究对象, 对其小麦粉的面筋含量、面团流变学特性、馒头质构和感官评定等品质指标进行分析。结果表明, 在面粉品质方面, 辐照处理使面筋含量向高、低两个方向发展; 在面团流变学特性方面, 辐照处理得到 4 种不同类型的面团特性, 400 Gy 辐照处理下, 能量、50 mm 阻力、50 mm 拉伸比、最大阻力、最大拉伸比等均达到最大值 (醒面 90 min 除外), 75 Gy 辐照处理的拉伸比例适中; 在馒头质构方面, 辐照处理降低了馒头的硬度和咀嚼性, 对黏聚性和回复性影响不显著 ($P>0.05$); 在感官评分方面, 75 Gy 辐照处理下馒头品质最好, 其次是 90、50、200 Gy, 其他辐照处理对感官评分较对照影响不显著 ($P>0.05$)。经 Pearson 相关分析可知, 硬度与稳定时间、粉质指数呈显著负相关 ($P<0.05$), 馒头风味与湿面筋含量和弱化度呈显著负相关 ($P<0.05$), 与面筋指数、稳定时间呈显著正相关 ($P<0.05$)。因此, 诱变育种目标应根据材料的敏感性和辐照剂量综合确定。

关键词: ^{60}Co - γ 辐照, 小麦粉, 面筋含量, 流变学特性, 馒头品质

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)11-0074-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090092

本文网刊:



Effects of ^{60}Co -Gamma Irradiation on Wheat Processing Quality and Final Product Texture Properties

WANG Xiaojie*, HAO Baozhen, XIE Yike, MA Jingli, CHANG Xia

(School of Life Science and Basic Medicine, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: To clarify the effects of ^{60}Co -gamma irradiation on the quality of wheat, dry seeds of wheat was irradiated by ^{60}Co -gamma irradiation of different doses (0, 35, 50, 75, 90, 120, 150, 200, 300, 400 Gy), the quality of M_1 generation on gluten content of wheat flour, dough rheological properties, steamed bread texture and sensory evaluation were analyzed. The results showed that irradiation treatment made the gluten content develop in the direction of high and low; In the dough rheological properties, 4 different types of dough characteristics were obtained by irradiation treatment, the energy, 50 mm extension resistance, 50 mm extension ratio, maximum extension resistance, maximum extension ratio of 400 Gy irradiation treatment were showed the biggest (except for fermentation time 90 min), 75 Gy irradiation treatment were moderated in extension ratio; In the texture of steamed bread, the hardness and chewiness of irradiation treatment were reduced, the cohesion and recovery were not significant ($P>0.05$); In the sensory score, 75 Gy irradiation treatment showed the best quality, followed by 90, 50, 200 Gy, other irradiation treatment had no obvious influence on sensory score compared with the control ($P>0.05$). Pearson correlation analysis showed that the hardness was negatively correlated with stable time and farinograph property ($P<0.05$), steamed bread flavor was negatively correlated with wet gluten content and softening degree

收稿日期: 2021-09-08

基金项目: 河南省自然科学基金 (202300410013); 河南省面上自然科学基金 (212300410380); 河南省科技攻关项目 (202102110168, 212102310333); 博士科研启动项目 (1366020173)。

作者简介/通信作者*: 王小洁 (1983-), 女, 博士, 讲师, 主要从事辐射生物效应、小麦生理生态及食品加工方面的研究, E-mail: wxj07-04@163.com。

($P<0.05$), and positively correlated with gluten index and stable time ($P<0.05$). Thus, the objectives of mutation breeding were determined according to sensitivity of materials and doses.

Key words: ^{60}Co -gamma irradiation; wheat flour; gluten content; rheological properties; quality of steamed bread

小麦是世界上广泛种植的粮食作物,也是我国主要的粮食作物,其生产对保障粮食安全和稳定国家经济发展具有重要意义。随着人们生活水平的提高和消费结构的不断改善,消费者对以面粉为原料制作的各种方便食品的质量要求越来越高,因此,小麦品质的提高显得尤为重要,经过多年的遗传改良,小麦品质性状研究取得了一些重要的进展,主要探索了小麦主要品质性状的遗传规律;随着基因组学的发展,中国小麦品质性状的研究进入到分子遗传研究快速发展阶段,通过分子标记对品质性状遗传规律的解析和 QTL 定位分析,筛选并克隆了重要品质性状的调控基因和基因编辑定向改良,加快了小麦品质改良的育种效率。近几年选育的小麦品质相较以前已有大幅提升,但是仍旧不能完全满足消费需求,中国优质强筋、弱筋、高蛋白含量的小麦新品种较少,小麦品质改良仍处于中低水平^[1]。

种质资源创新在小麦育种和改善小麦品质中发挥关键性的作用。目前,优质小麦育种方法有品种间杂交、系统选择和诱变育种等,其中前两种都属于常规方法,选育周期较长且操作较为繁琐,而辐射诱变是进行种质资源创新的高效育种手段,它能够打破基因连锁,提高重组率,短期内获得新的优良品种或特异优良种质材料,具有重要的实践意义^[2]。目前,辐射诱变在医疗、军事、工业、农业方面均有应用。

研究表明,利用辐射诱变手段已成功的改变生物性状,广泛应用于植物改良,育种前景广阔^[3]。与其他化学诱变剂如甲基磺酸乙酯(EMS)、N-甲基-N-亚硝基脲(MNU)相比, ^{60}Co - γ 属于无毒操作,不会对诱变后的变异体产生毒副作用,是一种便利的物理诱变因子^[4],已经在柚子^[5]、苹果^[6]、蚕豆^[7]、辣椒^[8]、小苍兰^[9]、月季^[10]、菊花^[11]及秋葵^[12]等的改良中取得了较大的进展。查阅相关文献发现,目前对小麦辐射诱变的研究多集中在农艺性状^[13]、突变体^[14-15]、新品种选育^[16-17]、遗传变异与选择方法^[18]上,对于小麦品质有关的研究较少,李萌萌等^[19]开展了 ^{60}Co - γ 射线对赤霉病小麦及健康小麦籽粒的品质研究,发现高剂量 ^{60}Co - γ 辐照对小麦籽粒的品质指标影响显著,表现为面筋指数下降、面筋强度降低、吸水率升高、稳定时间缩短、形成的面团耐搅拌力变差等。王亭亭等^[20]研究了 ^{60}Co - γ 辐照处理对小麦 M_3 代品质性状的影响,发现 200 Gy 的 ^{60}Co - γ 辐照处理可以诱导 M_3 代小麦蛋白质亚基发生变异, M_3 代群体籽粒的蛋白质含量、湿面筋含量、LOX 活性均值高于亲本,硬度、沉降值、GMP 含量和 PPO 活性均值低于亲本,但是对小麦的加工品质及食用品质还未研究。因此,本试验从这方面入手,在前人的研究基础上,采用不同剂

量 ^{60}Co - γ 辐照处理为诱变手段,以小麦干种子为试验材料,对其 M_1 代小麦面粉的面筋含量、面团流变学特性及馒头质构进行研究,探讨 ^{60}Co - γ 射线辐照对面粉理化特性、加工品质和食用品质的影响,明确 ^{60}Co - γ 辐射对小麦品质性状的诱变效果,以合理有效地利用有关变异资源,为小麦品质改良和辐射育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦品种百农 4199 河南科技学院;安琪高活性干酵母 安琪酵母股份有限公司;纯净水 新乡市娃哈哈饮品有限公司。

BSA124S 型电子天平 北京赛多利斯科学仪器有限公司;HX204 型快速水分测定仪 梅特勒-托利多仪器有限公司;JFZD 型粉质仪、JMLD 150 型拉伸仪 北京东孚久恒仪器技术有限公司;2200 型面筋测定仪 浙江托普云科技股份有限公司;SP 18S 醒发箱 江苏三麦食品机械有限公司;TA.XTC 质构仪 上海圣保实业发展有限公司;SL-38T 型切片机 江苏三麦食品机械有限公司;DHG-9023A 型烘箱 上海精宏实验设备有限公司;CD1 型磨粉机 法国肖邦技术公司。

1.2 实验方法

1.2.1 ^{60}Co - γ 辐照处理 ^{60}Co - γ 辐照在河南省科学院同位素研究所进行。挑选颗粒饱满、形状完整的同一批小麦植株收获的种子,在室温低湿的辐照室内,对种子进行不同剂量的 ^{60}Co - γ 辐照,辐照速率为 6.25 Gy/min,辐照剂量分别为 35、50、75、90、120、150、200、300、400 Gy,未辐照种子作为对照组,标记为 0 Gy。

1.2.2 试验样品准备 将对照和辐照处理过的小麦种子播种在郑州大学试验田中(河南省新乡市刘景屯村农田),地处中纬度,属暖温带大陆性季风型气候,年平均气温 14 $^{\circ}\text{C}$;7 月最热,平均 27.3 $^{\circ}\text{C}$;1 月最冷,平均 0.2 $^{\circ}\text{C}$;年均湿度 68%。土壤呈黄棕色,质地粘壤土,用单因素随机区组设计,正常的田间管理,于成熟期即叶片枯黄,籽粒变硬,呈品种本色,收割小麦,脱粒晾晒后,参照 NY/T 1094.1-2006 小麦实验制粉方法,润麦 24 h 后,用专用实验磨粉机制粉。制备好的面粉,过 80 目筛,装入密封口袋,在常温下熟化备用。

1.2.3 面筋相关指标的测定 小麦粉中湿面筋含量的测定按照 GB/T5506-2008 进行,面筋指数的测定按照 LS/T6102-1995 进行。称取 10 g 待测样品,精确至 0.01 g,用可调移液器向待测样品中加入 4.8 mL 氯化钠溶液(2%),接着将样品装入面筋仪的洗涤器

中,点击开始按钮,自动程序为先在圆形洗涤器内搅拌面团 20 s,之后揉洗 5 min 自动停止,用金属镊子将湿面筋从洗涤器中取出,放入 (6000 ± 5) r/min 离心机内离心 1 min 后,取出筛盒,用不锈钢刮匙小心刮净通过筛孔下的面筋,在天平上称重,精确至 0.01 g (设为 a 克),再将未通过筛孔的面筋用镊子取出,放入天平上与通过筛孔的面筋一起称量,得到总面筋量(设为 b 克),之后将总面筋放入 150 ℃ 烘干炉内烘 4 min,烘干后称重(设为 c 克),精确至 0.01 g。各计算公式如下:

$$\text{湿面筋含量}(W, \%) = b \times 10 \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{干面筋含量}(D, \%) = c \times 10 \quad \text{式 (2)}$$

$$\text{面筋指数}(I, \%) = [(b - a) / b] \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{面筋持水性}(H, \%) = W - D \quad \text{式 (4)}$$

式中: a 表示被甩出面筋质量, g; b 表示湿面筋质量, g; c 表示干面筋质量, g。

1.2.4 面粉粉质的测定 参照 GB/T 14614-2019《小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法》进行操作,提前打开水浴循环设备上的开关做升温准备,打开粉质仪软件,输入相应的试验条件;称取定量的面粉加入揉面钵中,搅拌 1 min,使面粉均匀分布;在 25 s 内加入预期的水量,在面团开始形成时,用刮面刀刮去池壁上的面团至内部,之后加上盖板;粉质曲线应在 (500 ± 20) FU 内,曲线完成后,保存数据。

1.2.5 面团拉伸特性的测定 参照 GB/T 14615-2019《小麦粉面团流变学特性测试拉伸仪法》进行操作,利用粉质仪测定面粉吸水率的数据,加入相应的盐水制作面团,面团准备好以后,称取 (150 ± 0.1) g 面团,进行搓圆(旋转约二十周),搓圆后加入成型器内将面团成型为圆柱状,之后放入面团架上夹住,面团架表面需要稍稍涂油,将面团放入面团醒发室中,醒发 45 min 后,取出样品放在测定位置上,打开软件,开始测试,测定后,从测定位置上取下面团,重新搓圆和成型,再次放入醒发室内醒发 45 min 后,再次测定,重复以上操作,45 min 后进行第三次测定,完成整个测试。

1.2.6 馒头的制作 不同剂量辐照处理下的面粉,采用一次发酵法,和面 15 min,然后将面团在温度 34 ℃、相对湿度 85% 的恒温恒湿培养箱中发酵 90 min,发酵后的面团分割成 50 g/个的馒头坯,将馒头坯搓圆后置于蒸锅中蒸制 30 min,取出冷却即为成品。

1.2.7 馒头质构特性的测定 将冷却的馒头用切片机切成厚度均匀为 20 mm 的薄片,用直径为 50 mm 的圆柱形探头来测定馒头的质地。测定馒头质构时的参数设置如下:测量前后速度均为 1.00 mm/s,测试速度为 1.00 mm/s,压缩程度 15%,2 次压缩间隔时间 5 s,感应力为 5 g。测定不同剂量辐照下馒头

的硬度、弹性、黏聚性、胶着性、回复性和咀嚼性。

1.2.8 馒头感官评价 将馒头切成数块进行感官评价,品尝小组由食品专业 10 名(男生 5 名、女生 5 名)大三学生组成,经过专业培训,参照 GB/T 35991-2018《粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价》内容,略有改动(表 1),按照改进后的新标准进行逐项品尝打分,并计算总评分。

表 1 馒头感官品质评分标准
Table 1 Criterion for sensory evaluation of steamed bread

评价指标	评价标准	评分
色泽(20分)	颜色均匀,有光泽度	15~20
	颜色较均匀,稍暗	10~14
	色泽不均匀,颜色暗淡	5~9
外形(20分)	表面光滑	15~20
	表面光滑度稍差	10~14
	有凹陷、褶皱、气泡或烫斑	5~9
风味口感(30分)	香味浓郁,口感较好	25~30
	香味较浓郁,口感稍差	20~24
	没有香味,口感粗糙	15~19
内部组织(30分)	气孔细腻均匀	25~30
	气孔基本细腻均匀,有个别气泡	20~24
	气孔均匀但结构稍粗糙	15~19
	气孔不均匀结构很粗糙	5~14

1.3 数据处理

所有数据应用 Excel 2010 软件进行处理,使用 SPSS 20 分析软件进行单因素方差分析和相关性分析,方差分析中,显著性分析采用 Duncan 检验,不同的小写字母表示差异达显著水平 $P < 0.05$ 。相关分析中,*表示差异达显著水平 $P < 0.05$,**表示差异达极显著水平 $P < 0.01$,用 Graphpad prism 8 进行统计绘图,试验结果以 3 次重复试验所得数据为准。

2 结果与分析

2.1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照对面筋相关特性的影响

面筋蛋白影响面团的加工品质,由表 2 可知,对于湿面筋含量来说,辐照剂量 200 Gy 及以下处理显著降低了湿面筋含量($P < 0.05$, 35 Gy 除外,可能是其辐照剂量较小,促使诱变材料呈现单个位点正突变),而 300、400 Gy 增加了湿面筋含量。对于干面筋含量来说,300 Gy 处理下干面筋含量显著高于对照($P < 0.05$),而 50、90、120 Gy 处理下的干面筋含量显著低于对照($P < 0.05$);对于面筋指数来说,辐照剂量为 150 Gy 及以下处理,随着剂量的增加,面筋指数呈增加的趋势,均显著高于对照($P < 0.05$),辐照剂量为 200 Gy 及以上的处理降低了面筋指数;对于面筋持水性来说,300、400 Gy 处理下的面筋持水性显著高于对照($P < 0.05$)。

小麦粉品质主要取决于面筋的数量和质量,湿面筋含量与面筋指数分别反映了面筋的数量和质量,因此,从这两方面来看,200 Gy 及以下的辐照处理(35 Gy 除外)不同程度地降低了面筋含量,高于

表 2 ⁶⁰Co-γ 辐照对小麦粉面筋相关指标的影响
Table 2 Effect of ⁶⁰Co-gamma irradiation on gluten-related indicators of wheat flour

处理剂量(Gy)	湿面筋含量(%)	干面筋含量(%)	面筋指数(%)	面筋持水性(%)
0	29.22±0.56 ^c	10.37±0.32 ^b	86.57±0.49 ^d	18.86±0.26 ^{cd}
35	29.54±0.42 ^c	10.16±0.69 ^{bc}	91.37±0.27 ^c	19.38±0.98 ^c
50	27.34±0.38 ^{de}	9.57±0.06 ^{cd}	93.03±0.13 ^{ab}	17.77±0.33 ^{ef}
75	26.57±0.23 ^{ef}	10.41±0.44 ^b	92.04±0.52 ^{bc}	16.15±0.66 ^g
90	26.24±0.34 ^{fg}	9.20±0.22 ^d	94.26±0.41 ^a	17.04±0.13 ^{fg}
120	25.60±0.55 ^g	9.16±0.03 ^d	94.35±0.26 ^a	16.43±0.54 ^g
150	28.09±0.38 ^d	9.96±0.29 ^{bc}	93.26±0.27 ^{ab}	18.13±0.66 ^{de}
200	26.01±0.55 ^{fg}	9.87±0.20 ^{bcd}	83.15±0.81 ^e	16.14±0.62 ^g
300	38.11±0.69 ^a	12.48±0.49 ^a	64.73±0.78 ^g	25.62±0.61 ^a
400	31.42±0.53 ^b	10.02±0.59 ^{bc}	70.96±0.52 ^f	21.40±0.63 ^b

注: 同列不同小写字母表示数据差异显著($P<0.05$); 表3、表5同。

200 Gy 的辐照处理显著提高了面筋含量($P<0.05$), 不同的辐照处理使小麦的面筋含量发生变异, 向高、低两个方向发展, 这与前人的研究结果一致^[21], 这可能是因为辐照处理导致与小麦籽粒的蛋白质含量相关的基因发生了变异。面筋指数是指经离心后留存在离心筛网上的湿面筋质量占面筋总质量的百分比, 因此, 面筋筋力越强, 面筋指数越大。较低剂量的辐照处理起到正效应作用, 提高了面筋指数, 改善了面筋的质量, 而较高的剂量却大幅度降低了面筋指数, 可能是由于辐照剂量过高, 对麦谷蛋白和残基蛋白多肽链破坏严重, 造成面粉遇水后网络结构强度变低, 面筋指数降低, 这与前人研究结果相似^[18]。总的来说, 与对照相比, 35 Gy 辐照处理对面筋含量影响不显著($P>0.05$), 面筋指数显著提升($P<0.05$); 300、400 Gy 辐照处理提高了面筋含量、面筋持水力, 但是却降低了面筋指数; 其它处理降低了湿面筋含量, 但是提高了面筋指数(200 Gy 除外)。说明辐照处理可以使面筋相关指标产生很多变异, 可为育种领域提供许多新的种质资源。

2.2 ⁶⁰Co-γ 辐照对面团流变学特性的影响

2.2.1 对面粉粉质特性的影响 粉质特性是面团形成的综合评价, 有助于判断面团操作性能, 对产品品质也具有重要意义。由表 3 可得, 300、400 Gy 处理下吸水率显著高于对照($P<0.05$), 这不仅与该处理下

的面筋含量高有关, 还有可能与小麦破碎淀粉有关, 高剂量辐照处理对小麦淀粉和蛋白质影响较大, 使两者的结合变得松散, 部分淀粉分子发生断裂, 并且大淀粉颗粒和蛋白质基质脱离, 从而形成更多的破损淀粉, 进而使样品吸水率升高^[22]; 50、150、200 Gy 处理下, 形成时间显著增加($P<0.05$); 辐照剂量 150 Gy 及以下处理, 稳定时间延长, 说明其处理下小麦粉筋力很强, 对剪切力降解有较强的抵抗能力, 该结果与前面的面筋指数测定结果表现相一致, 其原因是此时的小麦麦谷蛋白的二硫键处在十分恰当的位置上, 结合比较牢固, 不易打开, 而 200 Gy 及以上处理则显著降低($P<0.05$), 可能是因为高剂量辐照改变了蛋白质内部结构, 二硫键被打开, 蛋白质结构疏松, 面团筋力变弱, 稳定时间下降, 这与前人的研究结果一致, 面团稳定性随着辐照剂量的增加而降低^[23]; 对于弱化度来说, 300、400 Gy 处理下较高, 其余处理较对照降低; 辐照剂量 200 Gy 及以下处理, 粉质指数不同程度的升高, 而 300、400 Gy 处理下降明显。总的来说, 较高剂量 300、400 Gy 处理下, 面团的形成时间短、稳定时间短、粉质指数降低, 弱化度增加, 预测加工性能比较差; 50、90、150 Gy 处理下形成时间长、稳定时间长; 35、75、120 Gy 处理下形成时间短、稳定时间长; 200 Gy 处理下形成时间长、稳定时间短。说明不同处理间差异较大, 变异类型丰富, 可供选择的范围较大。

表 3 ⁶⁰Co-γ 辐照对小麦粉粉质特性的影响
Table 3 Effect of ⁶⁰Co-gamma irradiation on farinograph properties of wheat flour

处理剂量(Gy)	吸水率(%)	形成时间(min)	稳定时间(min)	弱化度(FU)	粉质指数
0	55.27±0.06 ^c	3.07±0.29 ^c	3.87±0.06 ^d	75.33±3.51 ^c	54.67±3.51 ^c
35	55.33±1.05 ^c	2.10±0.26 ^{de}	4.86±0.06 ^c	37.33±4.51 ^c	179.00±8.89 ^c
50	55.56±1.05 ^c	4.10 ±0.10 ^b	8.43±0.25 ^a	7.00±0.10 ^g	243.33±16.74 ^a
75	56.10±0.10 ^c	1.67±0.06 ^e	7.57±0.06 ^b	25.67±0.58 ^f	181.67±10.02 ^c
90	56.10±0.10 ^c	3.17±0.31 ^c	4.77±0.31 ^c	33.00±3.00 ^e	173.33±4.51 ^c
120	55.77±1.05 ^c	1.67±0.06 ^e	4.50±0.06 ^c	22.67±3.21 ^f	224.00±19.52 ^b
150	55.07±0.06 ^c	3.80±0.26 ^b	4.87±0.06 ^c	20.67±3.79 ^f	214.33±8.02 ^b
200	55.87±0.06 ^c	6.03±0.06 ^a	2.33±0.06 ^c	48.67±0.58 ^d	154.00±11.00 ^d
300	58.37±0.15 ^b	2.23±0.25 ^d	1.20±0.00 ^f	220.00±1.00 ^a	13.33±1.53 ^g
400	60.83±0.06 ^a	2.57±0.06 ^d	1.40±0.45 ^f	178.33±3.51 ^b	32.00±1.00 ^f

2.2.2 对面团拉伸特性的影响 在面团分别醒发 45、90、135 min 后,各辐照处理下(400 Gy 除外)的面团拉伸各相关特性的变化趋势为醒发 90 min 时,各指标大幅度增加,而 135 min 后,各相关指标降低或小幅增加,这可能是由于发酵时间过长,面筋网络衰败导致的结果(表 4)。

拉伸能量反映了面团筋力,与谷物的烘焙品质呈正相关^[24]。由表 4 可知,经过不同剂量辐照处理的小麦面粉,在相同的醒发时间条件下,50、90、400 Gy 辐照处理下,能量高于对照,且均高于 50 cm²,其他处理能量变化没有规律,可能是经辐照处理后,面粉的蛋白含量、蛋白组分比例、淀粉含量、直链淀粉和支链淀粉的比例及其它成分的变化,加水成面团后,就会构成不同的蛋白淀粉骨架,从而导致不同的拉伸能量。研究表明,拉伸能量高于 50 cm² 时,拉伸面积越大,烘焙质量越好^[25];延伸度是指面团由拉开到断裂的距离,它表示面团的延展性和收缩性,延伸度越大,面团延展性越好^[26]。在相同醒发时间下,与对照相比,90 Gy 辐照处理下延展性均高于对照,其他辐照处理延展性变化没有规律;对于 50 mm 阻力和最大阻力来说,在相同醒发时间下,50、400 Gy

处理下面团的阻力均高于对照;对于拉伸比来说,在相同醒发时间下,拉伸比变化规律与阻力变化规律一致。拉伸阻力代表了面团的韧性和筋力;延展性代表了面团的延展能力和可塑性^[27]。拉伸比是对面团拉伸阻力和延展性的质量综合评价^[28],拉伸比大的面团,具备较好的醒发持气性^[29],但也不是越大越好,拉伸比一般在数值 5 左右波动较好,若拉伸比过大,延展性变小,面团发酵缓慢,面制品结构紧实且不易制作^[30]。

总的来说,400 Gy 辐照处理下,能量、50 mm 阻力和 50 mm 拉伸比、最大阻力和最大拉伸比均达到最大值(醒面 90 min 除外)。75 Gy 处理下各拉伸指标相对来说较适中,预测烘焙品质较佳。

2.3 ⁶⁰Co- γ 辐照对馒头质构的影响

质构特性是面制品品质的重要参数,它们能够很好地反映出面团的质地及结合程度^[31-33]。硬度和咀嚼性是评价馒头品质的重要指标,通常硬度和咀嚼性越小,面团越柔软^[34]。从表 5 可知,0 Gy 处理下的硬度和咀嚼性均较高,而辐照处理下相对较低,说明辐照处理在一定程度上降低了馒头的硬度,改善了馒头的品质。可能是因为辐照处理可以破坏蛋白质的

表 4 ⁶⁰Co- γ 辐照对面团拉伸特性的影响

Table 4 Effect of ⁶⁰Co-gamma irradiation on extensograph properties of dough

处理剂量(Gy)	醒发时间(min)	能量(cm ²)	延伸度(mm)	阻力50(EU)	阻力max(EU)	拉伸比50	拉伸比max
0	45	60.00±2.00 ^{de}	95.67±1.53 ^b	462.00±9.00 ^d	577.67±10.50 ^c	4.83±0.24 ^d	6.04±0.21 ^d
	90	70.32±0.58 ^c	87.00±2.00 ^{de}	658.00±10.00 ^b	677.00±21.07 ^b	7.57±0.63 ^a	7.79±0.36 ^b
	135	52.67±1.53 ^{cd}	94.32±2.52 ^a	426.33±0.58 ^d	553.69±8.39 ^c	4.52±0.13 ^{ef}	5.87±0.09 ^f
35	45	58.31±0.58 ^c	76.67±0.58 ^c	299.00±0.00 ^e	469.67±11.15 ^d	3.90±0.03 ^e	6.13±0.18 ^d
	90	66.33±1.53 ^d	81.66±1.53 ^f	341.66±4.83 ^f	546.32±29.09 ^d	4.19±0.35 ^d	6.69±0.45 ^d
	135	68.00±1.00 ^b	77.67±0.58 ^d	347.67±2.10 ^e	584.33±9.50 ^d	4.48±0.54 ^{ef}	7.52±0.13 ^{cd}
50	45	61.67±1.53 ^{cd}	97.67±2.31 ^b	498.31±8.50 ^c	707.68±4.16 ^b	5.10±0.07 ^c	7.25±0.13 ^c
	90	77.67±0.00 ^a	95.66±1.53 ^b	710.00±9.00 ^a	729.67±13.65 ^a	7.42±0.03 ^a	7.63±0.04 ^{bc}
	135	68.00±0.00 ^b	86.00±3.00 ^{bc}	651.32±9.87 ^b	700.33±0.58 ^b	7.58±0.36 ^{ab}	8.15±0.29 ^b
75	45	42.00±2.00 ^h	78.67±1.52 ^{de}	283.68±13.80 ^e	390.00±10.82 ^f	3.60±0.11 ^f	4.96±0.08 ^f
	90	48.66±0.58 ^f	80.68±1.54 ^f	365.00±3.00 ^f	477.67±10.50 ^c	4.52±0.32 ^{cd}	5.92±0.03 ^e
	135	50.33±0.58 ^d	85.67±0.58 ^{bc}	355.00±1.61 ^e	487.00±2.00 ^f	4.15±0.40 ^f	5.68±0.02 ^f
90	45	62.68±1.53 ^c	112.33±1.53 ^a	427.67±10.50 ^c	433.67±20.50 ^c	3.81±0.14 ^c	3.86±0.22 ^e
	90	74.00±2.00 ^b	108.00±2.00 ^a	523.00±9.17 ^c	554.33±29.50 ^d	4.84±0.14 ^c	5.14±0.37 ^f
	135	67.67±1.53 ^b	96.00±1.00 ^a	543.67±5.73 ^c	567.68±18.50 ^{de}	5.66±0.33 ^d	5.91±0.23 ^f
120	45	47.67±1.53 ^g	82.33±2.52 ^d	394.00±15.00 ^f	452.00±18.68 ^{de}	4.78±0.04 ^d	5.49±0.20 ^e
	90	58.00±0.00 ^c	81.00±3.00 ^f	505.33±9.50 ^{cd}	585.67±7.51 ^d	6.24±0.20 ^b	7.24±0.23 ^c
	135	53.32±3.06 ^{cd}	81.67±4.04 ^{cd}	420.33±18.50 ^d	576.33±0.58 ^{de}	5.16±0.48 ^{de}	7.07±0.36 ^{de}
150	45	67.67±0.58 ^b	82.32±2.52 ^d	645.67±21.13 ^b	712.34±11.50 ^b	7.84±0.02 ^b	8.66±0.24 ^a
	90	68.00±1.00 ^{cd}	85.00±2.00 ^{ef}	647.68±0.58 ^b	718.00±18.33 ^a	7.62±0.17 ^a	8.45±0.17 ^a
	135	66.00±1.00 ^b	84.33±1.53 ^{bcd}	585.67±17.50 ^c	673.00±2.00 ^c	6.95±0.33 ^{bc}	7.98±0.17 ^{bc}
200	45	52.33±0.58 ^f	75.67±1.53 ^e	278.32±19.43 ^g	585.67±7.51 ^c	3.68±0.33 ^{ef}	7.74±0.11 ^b
	90	58.67±0.58 ^c	81.68±4.51 ^f	486.33±11.24 ^d	624.00±22.11 ^c	5.96±0.19 ^b	7.65±0.31 ^{bc}
	135	54.00±3.00 ^c	83.67±8.50 ^{bcd}	541.33±6.66 ^c	557.67±23.46 ^c	6.52±0.76 ^c	6.72±0.79 ^c
300	45	44.00±1.00 ^h	96.32±4.51 ^b	305.66±9.07 ^g	400.00±2.00 ^f	3.17±0.06 ^g	4.16±0.20 ^g
	90	56.32±4.51 ^e	93.67±2.52 ^{bc}	443.67±21.46 ^c	551.67±31.82 ^d	4.74±0.29 ^c	5.89±0.39 ^c
	135	53.67±2.52 ^c	84.00±4.36 ^{bcd}	454.00±39.51 ^d	558.33±22.74 ^c	5.43±0.74 ^d	6.65±0.14 ^e
400	45	75.33±1.53 ^a	90.00±2.00 ^c	728.67±15.28 ^a	782.32±4.51 ^a	8.10±0.03 ^a	8.69±0.14 ^a
	90	73.67±0.58 ^b	90.33±0.58 ^{cd}	658.32±13.50 ^b	709.31±18.45 ^{ab}	7.29±0.11 ^a	7.85±0.20 ^b
	135	78.00±1.00 ^a	89.66±0.58 ^{ab}	736.33±8.50 ^a	805.67±10.02 ^a	8.21±0.15 ^a	8.98±0.07 ^a

注:不同小写字母表示同列同一时间不同辐照处理下差异显著(P<0.05)。

表 5 ⁶⁰Co-γ 辐照对馒头质构特性的影响

Table 5 Effect of ⁶⁰Co-gamma irradiation on texture properties of steamed bread

处理剂量(Gy)	硬度(gf)	弹性	咀嚼性(gf)	胶着性(gf)	黏聚性	回复性
0	1420.00±11.14 ^a	0.78±0.06 ^{ab}	1235.16±39.03 ^a	1122.09±52.90 ^{ab}	1.04±0.00 ^a	0.11±0.01 ^a
35	803.33±4.16 ^d	0.62±0.03 ^{cd}	579.33±20.64 ^c	940.78±33.22 ^c	1.05±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a
50	1000.00±19.08 ^{bcd}	0.68±0.07 ^{cd}	696.85±20.54 ^c	1042.43±21.61 ^{abc}	1.04±0.01 ^a	0.11±0.01 ^a
75	932.67±32.15 ^{cd}	0.67±0.07 ^{cd}	609.64±33.75 ^c	977.02±31.10 ^{bc}	1.05±0.00 ^a	0.11±0.01 ^a
90	1101.33±38.48 ^{bc}	0.60±0.02 ^d	690.27±35.86 ^c	1158.76±43.35 ^{ab}	1.05±0.00 ^a	0.11±0.01 ^a
120	1047.33±43.00 ^{bc}	0.67±0.09 ^{cd}	745.38±16.59 ^c	1096.82±27.52 ^{ab}	1.05±0.00 ^a	0.12±0.00 ^a
150	1151.33±46.56 ^b	0.89±0.02 ^a	1128.83±15.99 ^{ab}	1212.35±23.14 ^a	1.05±0.00 ^a	0.13±0.00 ^a
200	1022.00±58.61 ^{bc}	0.75±0.05 ^{bc}	806.76±39.32 ^{bc}	1068.42±10.80 ^{ab}	1.04±0.01 ^a	0.11±0.01 ^a
300	1058.00±52.85 ^{bc}	0.75±0.02 ^{bc}	835.37±8.81 ^{bc}	1109.99±32.51 ^{ab}	1.05±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a
400	1000.67±45.09 ^{bcd}	0.66±0.04 ^{cd}	711.01±21.70 ^c	1048.81±21.25 ^{abc}	1.05±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a

化学键,使分子链断裂,从而引起蛋白质性质的变化。对于弹性来说,150 Gy 辐照处理下弹性最好,可能是因为该辐照处理下使蛋白质组分发生了改变,醇溶蛋白和麦谷蛋白的含量和比例有所改变,进而影响馒头的弹性^[18];胶着性是把半固态食品咀嚼成能够吞咽的状态所需要的能量,35 Gy 辐照处理下低于对照,可能是由于硬度降低,吞咽所需能量减少的原因,其他辐照处理则与对照之间差异未达显著水平($P>0.05$);黏聚性用来模拟食品内部的粘合力,各处理之间差异不显著($P>0.05$);馒头的回复性主要是指馒头受力之后,恢复状态的变化,主要指网络结构的变化程度,因为 150 Gy 辐照处理下弹性最好,所以馒头受力之后,回复性也较好,但各处理间差异未达显著水平($P>0.05$)。

2.4 ⁶⁰Co-γ 辐照对馒头感官品质的影响

不同剂量的⁶⁰Co-γ 辐照对馒头感官评分影响如图 1 所示,随着剂量的增加,馒头的感官评分呈先增加后减小的变化趋势,这说明低剂量的辐照处理有效地改善馒头的感官评分,这主要是因为适宜的辐照处理有利于面筋蛋白网络结构的维持,能够改变馒头的内瓤结构,从而使馒头具有良好的质构特性。75 Gy 辐照处理下的馒头整体弹性较好,色泽、结构、外观和口感都较符合要求,感官评分最高。可能是⁶⁰Co-γ 射线诱导蛋白质亚基发生变异,通过辐照处理激活了某些沉默的编码高分子量麦谷蛋白亚基的区域,导致新亚基条带的出现^[18],其中高分子量谷蛋白亚基对小麦的烘烤品质起主要作用^[35-36]。本试验表明适宜剂量的⁶⁰Co-γ 辐照可以改变小麦的加工品质,这与前人研究的结果一致^[19-20]。90 Gy 辐照处理下感官评分次之,50 Gy 辐照处理下感官评分也较好,辐照剂量高于 90 Gy 时馒头内部气孔大小不均匀,导致馒头出锅以后表面出现褶皱,馒头的外观明显变差(如图 1c 所示),影响馒头的外观评分,还有可能是因为高剂量辐照处理对面粉大分子物质有不同程度降解或断裂作用,造成破碎淀粉较多,小麦粉吸水增多,这与前面的面筋相关指标测定的结果一致,较多的膨胀淀粉有可能形成空间障碍而限制面筋的充分扩展,从而影响馒头的品质。

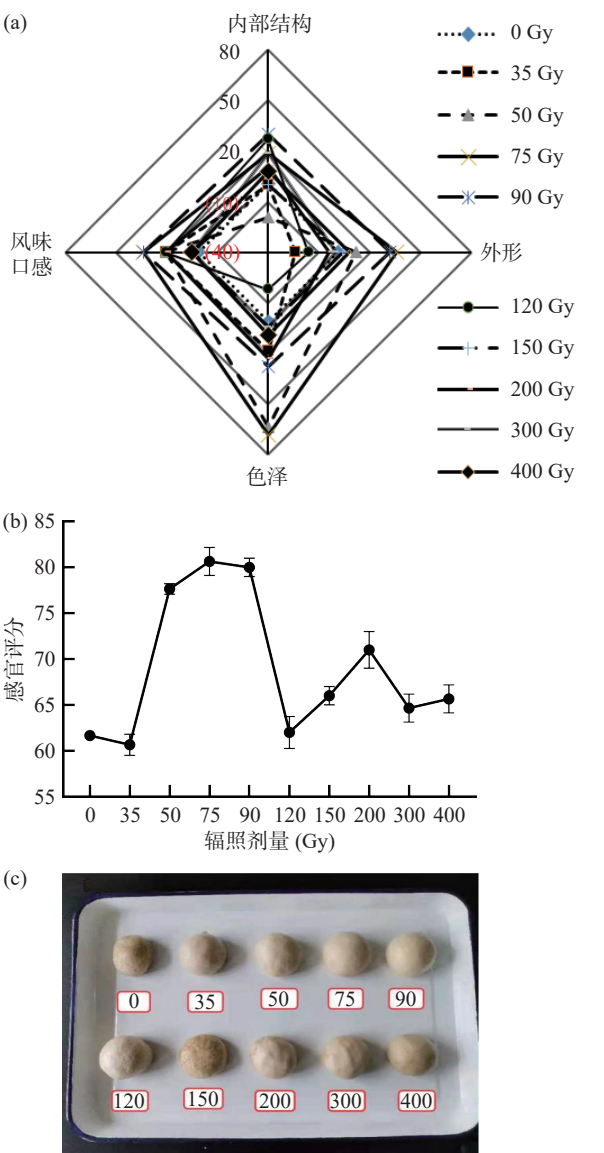


图 1 ⁶⁰Co-γ 辐照对馒头的感官品质评价(a)、评分结果(b)、馒头外观(c)的影响

Fig.1 Effect of ⁶⁰Co-gamma irradiation on sensory quality evaluation (a), scoring results (b), and steamed bread appearance (c)

2.5 ⁶⁰Co-γ 辐照处理的面粉理化指标与馒头质构相关性分析

从表 6 可以看出,硬度与稳定时间、粉质指数呈

表 6 面粉理化指标与馒头质构相关性分析

Table 6 Correlation coefficients between physico-chemical properties of wheat flour and texture properties of steamed bread

指标	硬度	弹性	咀嚼性	胶着性	黏聚性	回复性
湿面筋含量	0.120	0.125	0.175	-0.071	-0.016	-0.149
面筋指数	-0.230	-0.117	-0.231	0.111	0.309	0.426*
吸水率	0.013	-0.378*	-0.190	-0.121	0.040	-0.400*
形成时间	0.128	0.211	0.204	0.156	-0.371*	-0.005
稳定时间	-0.401*	-0.284	-0.415*	-0.139	0.224	0.039
弱化度	0.288	0.066	0.230	-0.033	-0.190	-0.361*
粉质指数	-0.441*	-0.172	-0.367*	-0.016	0.351	0.399*
拉伸能量	-0.229	-0.333	-0.218	-0.144	0.227	0.07
延伸度	0.427*	-0.038	0.166	0.280	-0.259	-0.198
最大阻力	-0.022	-0.092	0.018	-0.026	-0.035	0.048
最大拉伸比	-0.222	-0.062	-0.058	-0.150	0.100	0.142

注: *表示在置信度为0.05时, 相关性是显著的; **表示在置信度为0.01时, 相关性是极显著的; 表7同。

显著负相关($P<0.05$), 这些指标的值越大, 馒头硬度就越小, 吃起来不费力, 口感较好, 与延伸度呈显著正相关($P<0.05$), 与其他项不相关; 弹性与吸水率呈显著负相关($P<0.05$); 咀嚼性与稳定时间和粉质指数呈显著负相关($P<0.05$), 这两个指标越大, 馒头硬度越小, 其咀嚼性就随之变小; 其它多项指标均与馒头胶着性相关不显著; 黏聚性与形成时间呈显著负相关($P<0.05$); 回复性与面筋指数及粉质指数呈显著正相关($P<0.05$), 与吸水率和弱化度呈显著负相关($P<0.05$)。

2.6 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照处理的面粉理化指标与馒头感官品质相关性分析

从表 7 可以看出, 色泽与稳定时间呈极显著正相关($P<0.05$), 与其它指标相关度不大; 馒头外形与稳定时间和延伸度呈极显著正相关($P<0.05$), 与最大拉伸比呈显著负相关($P<0.05$); 馒头风味口感与湿面筋含量和弱化度呈显著负相关($P<0.05$), 与面筋指数、稳定时间呈显著正相关($P<0.05$), 与粉质指数呈极显著正相关($P<0.01$); 馒头的内部结构与稳定时间呈显著正相关($P<0.05$), 与其他多项指标不相关。试验的感官评价结果为 75 Gy>90 Gy>50 Gy>200 Gy>400 Gy、150 Gy>300 Gy>0 Gy、120 Gy>35 Gy, 与质

构测定的结果(硬度、弹性、咀嚼性、胶着性)有一些的偏差, 可能是评价员之间的实际操作与理论知识认知存在差异; 也可能是仪器不能完全模拟人施加在食品上的力、唾液的分泌、口腔及牙齿的动态运动等原因造成的。

3 结论

本研究发现, 在面筋相关指标中, 辐照处理使面筋含量向高、低两个方向发展; 对于粉质特性的影响, 可以获得 4 种不同类型的面团特性, 变异类型丰富。对于拉伸特性的影响, 能量、延展性、阻力及拉伸比变化无规律, 变化与辐射剂量间也没有必然联系, 呈不定向变化。对馒头品质来说, 馒头质构方面, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照降低了馒头的硬度和咀嚼性, 对黏聚性和回复性影响不大。感官评价方面, 75 Gy 辐照处理下的馒头整体效果较好, 色泽、结构、外观和口感都符合要求, 感官评分最高, 90、50、200 Gy 次之, 其他处理与对照相比差异不显著。本研究结果可为小麦新品种选育提供种质资源, 为小麦的品质改良提供理论依据。

综上所述, 为获得优异的品种, 还需将育种目标与常规育种紧密联系, 可通过杂交来获得复合优良性状的小麦品种, 再对其优良性状进行稳定性培育。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照应用于遗传改良是作物育种方法的一大创新, 可在短时间内获得丰富的新的种质资源, 提高了育种效率, 如何快速而有效地筛选出符合育种目标的变异类型, 探明辐照致多个位点突变的分子机理及将优良性状的稳定性遗传是接下来的研究重点。

参考文献

- [1] 马斯霜, 白海波, 惠建, 等. 小麦主要品质性状研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24): 1-5. [MA Sishuang, BAI Haibo, HUI Jian, et al. Advances in research on main quality traits of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(24): 1-5.]
- [2] 杨震, 彭选明, 彭伟正. 作物诱变育种研究进展[J]. 激光生物学报, 2016, 25(4): 302-308. [YANG Zhen, PENG Xuanming, PENG Weizheng. Advances in crop mutagenesis breeding[J]. Chinese Journal of Laser Biology, 2016, 25(4): 302-308.]

表 7 面粉理化指标与馒头感官品质的相关性分析

Table 7 Correlation coefficients between physico-chemical properties of wheat flour and sensory quality of steamed bread

指标	色泽	外形	风味口感	内部组织
湿面筋含量	-0.132	-0.164	-0.385*	-0.284
面筋指数	0.050	0.125	0.413*	0.230
吸水率	0.147	0.145	-0.042	-0.261
形成时间	0.139	-0.030	-0.085	0.207
稳定时间	0.720**	0.468**	0.436*	0.377*
弱化度	-0.199	-0.076	-0.422*	-0.290
粉质指数	0.219	-0.021	0.473**	0.194
拉伸能量	0.110	0.041	0.074	-0.147
延伸度	0.077	0.611**	-0.037	0.333
最大阻力	0.028	-0.071	-0.204	-0.133
最大拉伸比	-0.031	-0.382*	-0.174	-0.297

- [3] 黄桂丹. ^{60}Co - γ 射线辐射育种研究进展[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(2): 107–110. [HUANG Guidan. Research progress for ^{60}Co - γ ray radiation breeding[J]. Forestry and Environmental Science, 2016, 32(2): 107–110.]
- [4] MBA C. Induced mutations unleash the potentials of plant genetic resources for food and agriculture[J]. Agronomy, 2013, 3: 200–231.
- [5] WANG Shuming, LAN Hong, JIA Huihui, et al. Induction of parthenogenetic haploid plants using gamma irradiated pollens in ‘Hirado Buntan’ pummelo (*Citrus grandis* L. Osbeck)[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 207: 233–239.
- [6] ATAY A N, ATAY E, LAURI P E, et al. Phenotyping gamma-ray-induced mutant population of ‘Amasya’ apple for architectural traits, precocity, floral phenology and fruit characteristics[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 233: 195–203.
- [7] SHAHNAWAZ K, SAMIULLAH K. Genetic improvement of two cultivars of *Vicia faba* L. using gamma irradiation and ethyl methanesulphonate mutagenesis[J]. Legume Research, 2016, 40(2): 338–344.
- [8] JO Y D, SANG H K, HWANG J E, et al. Construction of mutation populations by gamma-ray and carbon beam irradiation in chili pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2016, 57(6): 606–614.
- [9] 刘玲, 王丹, 黎熠睿, 等. ^{60}Co - γ 射线对小苍兰的生物学效应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 186–192. [LIU Ling, WANG Dan, LI Yirui, et al. Biological effects of ^{60}Co - γ rays on freesia freesia[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 43(1): 186–192.]
- [10] 齐文全, 江振威, 王亚琴, 等. ^{60}Co - γ 射线对 9 种庭院月季扦插苗的辐射效应研究[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 681–690. [QI Wenquan, JIANG Zhenwei, WANG Yaqin, et al. Radiation effects of ^{60}Co - γ rays on nine kinds of Chinese rose cuttings[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2020, 34(4): 681–690.]
- [11] MOHIT K S, MADHU B, SIMRAT S. Induction of novel inflorescence traits in Chrysanthemum through ^{60}Co gamma irradiation[J]. International Journal of Radiation Biology, 2020, 96(10): 1–8.
- [12] AMIR K, HUSSAIN S, SHUAIB M, et al. Effect of gamma irradiation on OKRA (*Abelmoschus esculentus* L.)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 368–373.
- [13] FLORES S A, PANDO L R G, COTA F I P, et al. Technical note: Gamma irradiation induces changes of phenotypic and agronomic traits in wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*)[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, 167: 109490.
- [14] ALMOATAZ B A E M, IBRAHIM H F. Elicitation of salt stress-tolerant mutants in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) by using gamma radiation[J]. Bulletin of the National Research Centre, 2020, 44(1): 458–466.
- [15] ALGWAIZ H I. Cytological effect of gamma radiation on selected mutants of wheat (*Triticum aestivum* L.) in M_3 generation[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2019, 22(12): 607–613.
- [16] 赵林姝, 刘录祥. 农作物辐射诱变育种研究进展[J]. 激光生物学报, 2017, 26(6): 484. [ZHAO Linshu, LIU Luxiang. Research progress in crop radiation induced mutation breeding[J]. Chinese Journal of Laser Biology, 2017, 26(6): 484.]
- [17] AHMED S, AKHTAR N, ALI S, et al. Impact of gamma radiations on wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties (Batoor and Janbaz)[J]. Pure and Applied Biology, 2017, 6(1): 218–225.
- [18] 王婷婷, 王敏, 张从宇. 郑麦 9023 诱变 M_2 代产量与品质性状变异分析[J]. 种子, 2015, 34(5): 67–71. [WANG Tingting, WANG Min, ZHANG Congyu. Variation analysis of yield and quality characters of M_2 radiated by ^{60}Co - γ with Zhengmai 9023[J]. Seed, 2015, 34(5): 67–71.]
- [19] 李萌萌, 卞科, 关二旗. ^{60}Co - γ 射线辐照对小麦品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2015, 4(2): 4–9. [LI Mengmeng, BIAN Ke, GUAN Erqi. Effects of ^{60}Co - γ ray irradiation on wheat quality[J]. Grain and Feed Industry, 2015, 4(2): 4–9.]
- [20] 王婷婷, 王敏, 张从宇. ^{60}Co - γ 射线诱变小麦 M_3 代品质性状的遗传变异分析[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(6): 675–681. [WANG Tingting, WANG Min, ZHANG Congyu. Genetic variation analysis of quality traits in wheat M_3 generation induced by ^{60}Co - γ ray[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(6): 675–681.]
- [21] 张从宇, 王敏, 李文阳, 等. ^{60}Co - γ 射线对皖麦 50 M_2 代农艺及品质性状的诱变效应[J]. 种子, 2014, 33(12): 80–83. [ZHANG Congyu, WANG Min, LI Wenyang, et al. Effects of ^{60}Co - γ ray on agronomic and quality traits in Anhui Wheat 50 M_2 generation[J]. Seed, 2014, 33(12): 80–83.]
- [22] 王若兰, 杨延远. 射线辐照对粮食微观结构及其萌发特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(10): 95–99. [WANG Ruolan, YANG Yanyuan. Effects of irradiation on grain microstructure and germination characteristics[J]. Journal of Chinese Cereals and Oils, 2010, 25(10): 95–99.]
- [23] AZZEH F S, AMR A S. Effect of gamma irradiation on physical characteristics of Jordanian durum wheat and quality of semolina and lasagna products[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2009, 78(9): 818–822.
- [24] 王丹, 郑惠华, 纪阳, 等. 木耳粉对面团流变学特性及面条品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 43–50. [WANG Dan, ZHENG Huihua, JI Yang, et al. Effects of auricularia powder on dough rheological properties and noodle quality characteristics[J]. Food Science, 2019, 40(20): 43–50.]
- [25] 范文静, 于基成, 王思予, 等. 菊粉添加量对面团流变学特性和面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 282–285. [FAN Wenjing, YU Jicheng, WANG Siyu, et al. Effects of inulin addition on dough rheological properties and bread quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(21): 282–285.]
- [26] 豆康宁, 石晓, 王昭才, 等. 甘草粉对面粉品质的影响研究[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 156–159. [DOU Kangning, SHI Xiao, WANG Zhaoai, et al. Effect of licorice powder on flour quality[J]. Food Industry, 2015, 36(7): 156–159.]
- [27] 张艳艳, 李银丽, 吴萌萌, 等. 超声波对醒面过程中面团流变学特性、水分分布及蛋白二级结构的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 72–77. [ZHANG Yanyan, LI Yinli, WU Mengmeng, et al. Effects of ultrasonic-assisted resting on dough rheological properties, water distribution and protein secondary structure[J]. Food Science, 2018, 39(21): 72–77.]

- [28] 姚慧慧, 王燕, 吴卫国, 等. 酸改性麦麸粉对面粉粉质特性及面团质构特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 67-72. [YAO Huihui, WANG Yan, WU Weiguo, et al. Effect of acid-modified wheat bran powder on farinographic properties and texture properties of wheat flour dough[J]. Food Science, 2019, 40(2): 67-72.]
- [29] 张华, 张艳艳, 赵学伟, 等. 竹笋膳食纤维对面粉粉质特征及面团质构特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 82-86. [ZHANG Hua, ZHANG Yanyan, ZHAO Xuewei, et al. Effect of bamboo shoot dietary fiber on farinograph properties and texture properties of wheat flour dough[J]. Food Science, 2017, 38(8): 82-86.]
- [30] 王伟, 薛文通, 张惠. 面团流变学特性与面包烘焙品质[J]. 食品科技, 2009, 34(7): 122-125. [WANG Wei, XUE Wentong, ZHANG Hui. Rheological properties of dough and bread baking quality[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(7): 122-125.]
- [31] ZHAO Dan, ZHOU Yun, LIU Hangda, et al. Effects of dough mixing time before adding konjac glucomannan on the quality of noodles[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(12): 1-10.
- [32] WILLIAMS J K, HONG M. Probing membrane protein structure using water polarization transfer solid-state NMR[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2014, 247: 118-127.
- [33] JIANG Y L, ZHAO Y M, ZHU Y F, et al. Effect of dietary fiber rich fractions on texture, thermal, water distribution, and gluten properties of frozen dough during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124902.
- [34] 侯飞娜, 木泰华, 孙红男, 等. 不同品种马铃薯对马铃薯-小麦复合馒头品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 132-139. [HOU Feina, MU Taihua, SUN Hongnan, et al. Effects of different varieties of potato on quality characteristics of potato-wheat compound steamed bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 132-139.]
- [35] 杨随庄, 尚勋武, 叶春雷. 小麦高分子量谷蛋白亚基基因分子育种研究进展[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 358. [YANG Suizhuang, SHANG Xunwu, YE Chunlei. Advance on improvement of wheat high-molecular-weight glutenin subunits via molecular breeding[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(2): 358.]
- [36] LIU S W. Genetic variation of high molecular weight glutenin subunits associated with processing quality improvements in wheat[J]. Plant Physiology Journal, 2011, 47(6): 531.