

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80770

基于制粉程序的小麦适度加工研究

张培杰¹ 任广跃^{1,2,3} 刘文超^{1,2,3} 范会平⁴ 张德榜⁵

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 河南省农产品加工装备工程研究中心, 河南 洛阳 471000; 3. 河南省农产品干燥装备工程技术研究中心, 河南 洛阳 471000; 4. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南 郑州 450002; 5. 郑州万谷机械股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: [目的] 探究适度加工小麦粉的生产程序, 提高制粉效益、减少原料损失, 提升面粉品质。[方法] 通过调控磨粉过程的关键点(润麦、筛理、皮磨和辊间距调节)进行制粉加工, 以小麦出粉率和面粉特性为评价指标, 综合分析小麦粉的品质, 获取小麦粉适度加工工艺。[结果] 改变辊间距—不润麦工艺的小麦出粉率最高(72.05 g/100 g), 比对照组提高了 8.96%, 与不润麦工艺相比提高了 14.24%; 且改变辊间距—不润麦比不润麦制得的面粉蛋白质含量增加了 7.97%。改变辊间距的制粉工艺, 如改变辊间距—不润麦, 改变辊间距—2 次筛理和改变辊间距—2 次皮磨制得的小麦粉总酚含量相较于相同制粉工艺但采用较小辊间距的工艺分别增大了 56.85%, 53.76%, 40.38%。调整皮磨辊间距制得的小麦淀粉短程有序结构最大。[结论] 改变辊间距—不润麦工艺为小麦粉综合品质最佳的适度加工工艺。制粉过程中适当提高辊间距是小麦适度加工的可行方式, 能够增加面粉总酚及灰分含量, 降低面粉的白度。

关键词: 制粉程序; 加工; 小麦粉; 出粉率; 微观结构

Moderate processing of wheat based on milling procedures

ZHANG Peijie¹ REN Guangyue^{1,2,3} LIU Wenchao^{1,2,3} FAN Huiping⁴ ZHANG Debang⁵

(1. College of Food and Biological Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Henan Province Engineering Research Center of Agricultural Products Processing Equipment, Luoyang, Henan 471000, China; 3. Henan Province Engineering Technology Research Center of Agricultural Product Drying Equipment, Luoyang, Henan 471000, China; 4. Institute of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China; 5. Zhengzhou Wangu Machinery Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the production procedures for moderately processed wheat flour, with the aim of improving milling efficiency, reducing raw material loss, and enhancing flour quality. [Methods] The milling process was conducted by regulating key steps (wheat conditioning, sifting, bran milling, and roll spacing adjustment). Flour quality was comprehensively evaluated based on flour yield and flour characteristics to determine the optimal moderate processing procedure. [Results] The roll spacing adjustment-non-conditioning process yielded the highest flour output (72.05 g/100 g), representing an increase of 8.96% compared to the control group and 14.24% compared to the non-conditioning process. Moreover, the protein content of flour obtained through the roll spacing adjustment-non-conditioning method increased by 7.97% compared to the non-conditioning method. Milling processes involving increased roll spacing, such as roll spacing adjustment-non-conditioning, roll spacing adjustment-second sifting, and roll spacing adjustment-second bran milling, resulted in increases in total phenolic content by 56.85%, 53.76%, and 40.38%, respectively, compared with the same processes using smaller roll spacing. The highest short-range ordered structure of wheat starch was observed under the roll spacing-adjusted bran milling process. [Conclusion] The roll spacing adjustment-non-conditioning process is the optimal moderate processing method for achieving overall superior flour quality. Appropriately increasing roll spacing during milling is a feasible strategy for moderate wheat processing.

基金项目: 河南省重大科技专项(编号: 221100110800)

通信作者: 任广跃(1971—), 男, 河南科技大学教授, 博士。E-mail: guangyueyao@163.com

收稿日期: 2024-08-05 改回日期: 2025-03-04

引用格式: 张培杰, 任广跃, 刘文超, 等. 基于制粉程序的小麦适度加工研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 105-113.

Citation: ZHANG Peijie, REN Guangyue, LIU Wenchao, et al. Moderate processing of wheat based on milling procedures[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 105-113.

which can enhance the total phenolic and ash content of flour while reducing its whiteness.

Keywords: milling procedure; processing; wheat flour; yield; microstructure

小麦籽粒中营养物质分布不均,糊粉层的营养物质含量较高^[1],一般制粉加工会将大部分糊粉层物质去除,导致小麦粉营养品质下降。过度加工会造成营养成分的流失,影响质构和糊化等理化特性^[2-3]。而研磨度过小,皮层保留度过高则会影响食品的口感,还可能引起有毒金属污染^[4-6]。适度加工是小麦制粉的理想状态,营养物质的保留率可用于评估小麦适度加工程度。

碾磨是小麦制粉的关键环节。研磨过程中产生的摩擦热和机械力会损伤原料^[7-8],研磨条件和研磨类型也会改变面粉的粒径、淀粉的结晶度、聚合度、损伤淀粉含量和蒸煮损失率^[9-10],并影响糊化和水化性能^[11-12],进而改变产品的感官和质地特性^[13-16]。改变制粉工艺是改善小麦加工控制程度低、损失大的解决办法。而关于小麦磨粉,已有研究比较了各制粉系统制得的小麦粉品质^[17],或通过创新磨粉技术^[18-19]、回添胚乳^[20]或麸皮^[21]等来提升面粉品质,但这些研究并未充分考虑小麦的加工程度和制粉效益。

选择适度加工工艺对减少原料损失、提高制粉效益、保留营养物质、提升食品的整体品质至关重要。研究拟聚焦制粉过程中的皮磨系统,通过调整润麦、皮磨程序、筛理方案和辊间距等工艺步骤,探究其对小麦出粉率、小麦粉的理化特性以及蛋白质与淀粉特性的影响,以期对小麦适度加工评价方法及标准制定提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小麦:中央粮食储存库邓州分厂;

无水乙醇:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

Folin & Ciocalteu's Phenol:生物试剂(BR),上海蓝季科技发展有限公司;

没食子酸:分析标准品,上海源叶生物有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电热鼓风干燥箱:101型,北京科伟永兴仪器有限公司;

磨粉机:PLM-T型,杭州佩克昂科技有限公司;

色差仪:X-rite Color I5型,美国X-Rite公司;

激光粒度分析仪:Bettersize 2600型,丹东百特仪器有限公司;

扫描电子显微镜:TM3030 plus型,日本日立高新技术公司;

傅里叶变换红外光谱仪:VERTEX70型,美国Bruker公司;

X射线衍射仪:D8 Advance型,美国Bruker公司。

1.3 试验方法

1.3.1 适度加工面粉的制备 实验室磨粉机的磨粉系统由2道皮磨和2道心磨组成,皮磨和心磨之间进行筛理,磨粉机具有独立系统,皮磨和心磨工序间则通过人工转移物料。磨辊的辊间距可根据试验需求使用标准塞尺进行调节。经过人工除杂的小麦籽粒分为3份,每份100 g,根据NY/T 1094.1—2006中润麦方法于自封袋中在室温下进行水分调节,目标水分为0.25 g/g干基。

小麦干燥、润麦后,经过1次皮磨系统(皮磨辊间距为0.05 mm)、1次筛理、1次心磨系统制得面粉为试验对照组(control, CL);即对应图1中的步骤1,2,3,4,5。

不润麦(non-conditioning, NC)是指小麦直接干燥至磨粉的水分含量(0.17 g/g干基),干燥后不进行润麦直接磨粉,其他制粉工艺参数与CL相同;即对应图1中的步骤1,3,4,5。

2次筛理(second sifting, SS)是指小麦在磨粉时,皮磨之后连续进行2次筛理,其他制粉工艺参数与CL相同。其中进行2次筛理意味着增大皮磨磨下物与筛网物理撞击的时间;即对应图1中的步骤1,2,3,4,4,5。

2次皮磨(second bran milling, SM)是指小麦在磨粉时,连续经过2次皮磨系统,其他制粉工艺参数与CL相同。其中2次皮磨意味着为带有麦皮的胚乳颗粒提供第二次使麦皮与胚乳分离的机会,其作用与工业磨粉系统的渣磨相同;即对应图1中的步骤1,2,3,3,4,5。

改变辊间距(roll spacing adjustment, RSA)、改变辊间距—不润麦(roll spacing adjustment-non-conditioning, RSA-NC)、改变辊间距—2次皮磨(roll spacing adjustment-second bran milling, RSA-SM)、改变辊间距—2次筛理(roll spacing adjustment-second sifting, RSA-SS)分别是指皮磨磨辊的间距为0.06 mm的制粉工艺,其他工艺参数分别与CL、NC、SM、SS相同。

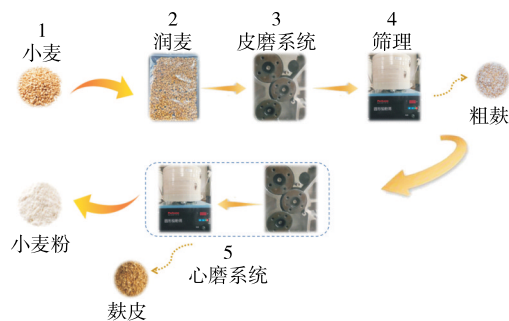


图1 小麦磨粉工艺流程图

Figure 1 Flow chart of experimental milling of wheat flour

1.3.2 小麦粉特性

(1) 小麦粉粗蛋白含量:根据 GB/T 24899—2010 测定。

(2) 面粉湿面筋含量:根据 GB/T 5506.2—2008 测定。

(3) 小麦粉灰分含量:根据 GB 5009.4—2016 测定。

(4) 总酚含量:根据 Tian 等^[22]的方法。

(5) 白度指数(WI):根据 GB/T 22427.6—2008 测定。

1.3.3 小麦粉粒径分布 使用激光粒度分析仪测量小麦粉的粒度分布。折射率为 15%~20%。记录累积分布 10% 粒径(D_{10})、平均粒径(D_{50})、累积分布 90% 粒径(D_{90})和体积平均粒径($D_{(4,3)}$)。

1.3.4 扫描电镜(SEM)分析 根据 Guadarrama-Lezama 等^[23]的方法。

1.3.5 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析 根据车瑞彬等^[24]的方法。

1.3.6 X-射线衍射(XRD)分析 根据 Asranudin 等^[25]的方法,并采用 JADE 6.5 计算相对结晶度(RC)。

1.4 数据分析

除了特殊说明外,试验一式三份进行。使用 SPSS 统计软件进行统计分析,包括单因素方差分析(ANOVA)和邓肯检验(Duncan's test),显著性差异置信度为 95%。

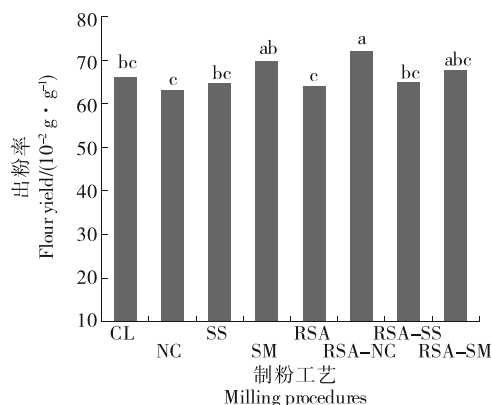
2 结果与分析

2.1 小麦出粉率分析

从图 2 可以看出,采用 2 次皮磨(SM 和 RSA-SM)的制粉工艺可以提高小麦出粉率。但 SM 和 RSA-SM 的出粉率分别与相同辊间距的 CL 和 RSA 组相比无显著性差异($P>0.05$)。RSA-NC 的小麦出粉率最高,为 72.05 g/100 g,与 CL 和 NC 组相比分别提高了 8.96% 和 14.24%。这可能是因为磨粉之前未对小麦进行水分调节,导致籽粒表面较干,胚乳与麸皮不粘连易分离,且表皮韧性较差,在磨粉时皮层容易破碎混入面粉中,从而提高小麦出粉率。而 NC 出粉率与 CL 相比无显著差异,可能是在较小辊间距下,小麦受到较大的机械力,胚乳与麸皮不易分离。这与王琳琳等^[26]的研究结果相似,当轧距过小,小麦籽粒受到的研磨强度较大,不利于皮磨研磨制粉。而且 Ji 等^[27]的研究明确指出,面粉产量的增加是由于在碾磨过程中外胚乳和糊粉层与麸皮的分离程度增加,这一发现从反面论证了较小辊间距不利于胚乳与麸皮的分离。从小麦出粉率的角度出发,RSA-NC 提高了面粉得率,减少了原料小麦的损失,更符合适度加工的要求。

2.2 小麦粉特性

2.2.1 小麦粉蛋白质和湿面筋含量 小麦胚乳中蛋白质的分布不均匀,越靠近皮层蛋白质含量越高,小麦粉中蛋白质含量的高低与皮磨系统对胚乳的剥刮程度有直接的关系^[28]。图 3 展示了不同制粉工艺小麦粉的蛋白质和湿

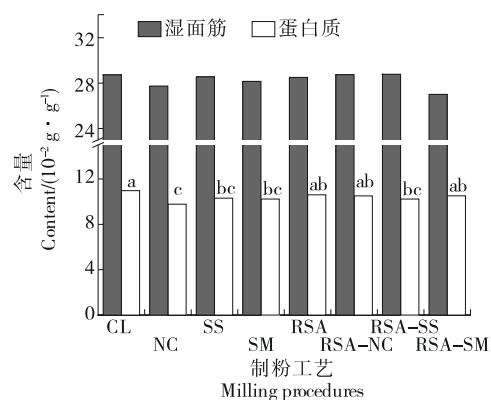


字母不同代表不同制粉工艺之间差异显著($P<0.05$)

图 2 制粉工艺对小麦出粉率的影响

Figure 2 Effect of milling procedure on wheat flour yield

面筋含量。与 NC 相比,采用 RSA-NC 制粉工艺得到的小麦粉的蛋白质含量增加了 7.97%。可能的原因是增大辊间距可以减小作用在小麦籽粒上的机械力,使得皮层粉和麸皮无法被磨辊挤压得很紧实,因此在筛分的过程中更容易将两部分分离,从而使小麦出粉率增加,蛋白质含量随出粉率的增加而升高^[29]。增大辊间距(0.06 mm)可以增大面粉中蛋白质含量较高的皮层粉的占比,进而增加小麦粉的蛋白质含量。这与 Jha 等^[30]的研究结果类似,蛋白质含量的增加归因于酶促回火对糊粉层有更好的刮擦效果。因此,RSA-NC 制得面粉因富含蛋白质而具有更高营养价值,保留了更多小麦籽粒营养物质,符合适度加工的要求。



字母不同代表不同制粉工艺之间差异显著($P<0.05$)

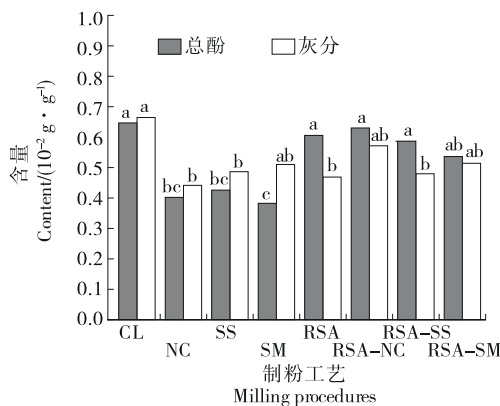
图 3 制粉工艺对小麦粉蛋白质和湿面筋含量的影响

Figure 3 Effect of milling procedure on protein content and wet gluten content of wheat flour

从图 3 可以看出,不同制粉工艺对小麦粉的湿面筋含量无显著影响($P>0.05$)。这是因为制粉工艺的改变主要涉及皮磨系统,因此其主要影响面粉中皮磨粉的含量和成分。然而,能够形成湿面筋的面筋蛋白,包括麦醇溶蛋

白和麦谷蛋白,主要存在于小麦的胚乳,并且集中在小麦心磨粉中。由于面筋蛋白与皮磨粉的关联性较小,因此对皮磨系统的改变对面粉湿面筋含量无显著影响。这与王琳琳等^[26]的研究结果一致。因此,改变皮磨制粉程序不会改变面粉湿面筋含量。

2.2.2 小麦粉总酚和灰分含量 小麦籽粒中的酚类物质以游离酚、可溶性结合物和不溶性结合物的形式存在^[31],但在小麦中分布不均匀。麦麸富含酚酸类化合物^[32],且多酚以结合态的形式存在于靠近小麦籽粒皮层的糊粉层中。精制面粉往往含有很少的麦麸,酚类物质含量较少,营养价值差。灰分含量可以反映面粉的加工精度等级,即小麦的加工程度。面粉的加工精度越高,其灰分含量越低。由图 4 可知,与 CL 相比,辊间距为 0.05 mm 时改变制粉工艺可显著减小面粉的总酚含量和灰分含量($P < 0.05$)。SM 工艺制得面粉的总酚含量最小,由于酚类化合物对温度高度敏感,因此当暴露于严重的热处理时,很容易分解^[33]。在 2 次皮磨制粉工艺下,物料与磨辊因摩擦产生更多的热量,可能会导致酚类物质的分解,从而降低小麦粉中总酚含量。增大辊间距的制粉工艺(RSA-NC/RSA-SS/RSA-SM)显著提高了小麦粉的总酚含量($P < 0.05$),与 CL 相比分别增大了 56.85%, 53.76%, 40.38%。可能的原因是增大磨辊间距,导致面粉颗粒粒度减小,其有助于提高酚酸提取率,结果表现为总酚含量的提高。Oliveira 等^[34]关于干燥和分馏对总多酚和花青素稳定性的研究表明,果皮颗粒的存在或较小的粒径有助于提高表观酚类含量,从而提高总酚含量。



字母不同代表不同制粉工艺之间差异显著($P < 0.05$)

图 4 制粉工艺对小麦粉总酚和灰分含量的影响

Figure 4 Effect of milling process on total phenolic content and ash content of wheat flour

如图 4 所示,在辊间距为 0.06 mm 时,改变小麦制粉工艺(RSA-NC/RSA-SS/RSA-SM)会导致小麦粉的灰分含量增加。与 CL 相比,NC 和 SS 在灰分含量上呈现出显著性差异($P < 0.05$)。RSA 制得的面粉灰分含量显著小于

CL,与王琳琳等^[26]的研究结果相似。且已有研究^[35]表明,小麦中的色素主要分布在皮层中,出粉率越大,其皮层的留存率越大,造成灰分含量增加。小麦出粉率的测定结果也论证了这一点。综合小麦粉的总酚含量和灰分含量,RSA-NC/RSA-SS/RSA-SM 工艺制得的面粉加工精度更低,达到了适度加工的目的。

2.2.3 小麦粉色泽 由表 1 可知,与 CL 相比,NC、SS、SM 和 RSA 工艺可以提高面粉白度,这归因于改变皮磨系统的制粉程序会导致小麦粉中影响面粉整体色泽的物质减少,如麸皮,从而增大面粉的白度值,使其具有更易被消费者接受的色泽。不同制粉工艺制得的面粉的亮度值 L^* 为 93.52~94.26。其中,NC/SS/SM 工艺获得的面粉的白度值显著高于 CL ($P < 0.05$),RSA-NC/RSA-SS/RSA-SM 工艺制得的面粉的白度值显著低于 RSA,这可能是在较大辊间距的制粉工艺下,改变制粉工艺会导致灰分含量增加,而灰分含量是影响小麦粉白度的主要因素^[36-37]。2.2.2 中灰分含量的测定结果,为上述原因提供了印证。CL 的白度值显著低于 RSA,可能的原因是在磨粉的过程中,减小辊间距会造成细碎麸皮很难与面粉分开,从而影响面粉整体色泽,造成面粉白度值较低,与王琳琳等^[26]的研究结果一致。其中 RSA-NC 的白度值显著小于 RSA,这是因为未经过水分调节的小麦的皮层水分含量低,皮层易破碎,细小麸屑混入面粉造成颜色下降^[38]。综合而言,在 0.06 mm 的辊间距下改变制粉工艺可以降低小麦粉的白度值,且改变工艺制得的面粉的灰分含量高于 RSA 工艺,符合小麦适度加工的要求。增大制粉辊间距(0.06 mm)是实现小麦适度加工的有效方式。

表 1 制粉工艺对小麦粉色泽的影响[†]

Table 1 Effect of milling process on the color of wheat flour

样品	L^*	a^*	b^*	WI
CL	93.79 ± 0.07 ^{abc}	0.57 ± 0.15 ^{ab}	9.55 ± 0.05 ^a	88.59 ± 0.01 ^c
NC	94.06 ± 0.34 ^{ab}	0.51 ± 0.09 ^{abc}	7.63 ± 0.17 ^d	90.32 ± 0.32 ^a
SS	94.17 ± 0.38 ^a	0.41 ± 0.14 ^{bc}	7.91 ± 0.19 ^c	90.16 ± 0.29 ^a
SM	93.52 ± 0.08 ^c	0.63 ± 0.06 ^a	8.16 ± 0.04 ^{bc}	89.56 ± 0.05 ^b
RSA	94.26 ± 0.08 ^a	0.39 ± 0.02 ^c	8.03 ± 0.04 ^c	90.12 ± 0.08 ^a
RSA-NC	93.63 ± 0.35 ^{bc}	0.52 ± 0.11 ^{abc}	8.05 ± 0.11 ^c	89.71 ± 0.29 ^b
RSA-SS	93.90 ± 0.37 ^{abc}	0.47 ± 0.06 ^{abc}	8.37 ± 0.21 ^b	89.63 ± 0.25 ^b
RSA-SM	93.92 ± 0.17 ^{abc}	0.48 ± 0.06 ^{abc}	8.37 ± 0.13 ^b	89.64 ± 0.18 ^b

[†] 同列字母不同代表差异显著($P < 0.05$)。

2.3 小麦粉粒径分布及扫描电镜分析

制粉过程中,因辊磨机械力作用使淀粉粒从胚乳团块上剥落下来,将小麦粉分成胚乳团块、淀粉粒及间质碎片 3 部分^[39],其大小存在差异,从而引起面粉粒度分布的不同。不同粒度大小的小麦粉的营养组分含量及其分布

也存在着一定差异^[40],这些差异会影响小麦粉的品质。例如,粒径越小,淀粉破损量越大。损伤淀粉含量决定了淀粉的流变性、糊化性和动态黏弹性^[41]。有研究^[42]表明,小麦粉粒度还能准确反映小麦胚乳颗粒的破碎程度及加工精度。在小麦制粉过程中,诸如制粉系统、机械力作用、筛理分级等均会造成小麦粉之间的粒度差异^[43]。从表2可以看出,不同制粉工艺获得面粉的 $D_{(4,3)}$ 存在显著差异($P<0.05$)。辊间距为0.05 mm时,NC/SS/SM制得小麦粉的 $D_{(4,3)}$ 和 D_{50} 比CL的低。从图4可以看出,CL出现更多的胚乳组织碎片,因此面粉的中值粒径和体积平均粒径值更大。可能的原因是面粉中存在破碎的细胞,淀粉颗粒黏附在细胞簇的基质上^[15],从而表现出较大的粒径值。与CL相比,NC和RSA-NC的粒径显著减小,可能的原因是小麦磨粉前未进行水分调节,皮层部分因水分含量低而容易磨碎,从而导致粒径减小。Hassoon等^[44]的研究也发现小麦水分含量的降低会造成大颗粒含量降低。辊间距0.05 mm时制得的小麦粉粒度明显大于辊间距为0.06 mm的,可能是因为较小辊间距下,较大的机械力作用在小麦籽粒上,磨辊将小麦挤出的过程中胚乳聚集形成具有较大粒度的碎片。Liu等^[45]的研究表明,麸皮的聚集积压会增大颗粒尺寸,这一过程与小辊间距下物理空间中的挤压作用具有相似性。因此,较小辊间距引起的积压效应同样会造成小麦粉颗粒尺寸的增大。辊间距为0.06 mm时,RSA-SS/RSA-SM小麦粉的 $D_{(4,3)}$ 显著大于RSA小麦粉的。小麦粉粒径越大,加工精度越低,说明改变筛理和皮磨工艺可以降低小麦加工精度,达到了适度加工的目的。

表2 制粉工艺对小麦粉粒径分布的影响[†]

Table 2 Effect of milling process on particle size distribution of wheat flour μm

样品	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{(4,3)}$
CL	6.83±0.06 ^a	59.36±1.29 ^a	234.43±0.76 ^a	95.04±0.33 ^a
NC	4.67±0.06 ^c	30.14±0.46 ^d	156.63±3.14 ^e	57.86±1.19 ^e
SS	5.42±0.03 ^b	36.59±0.45 ^b	173.90±3.92 ^{de}	66.45±1.39 ^{de}
SM	5.15±0.01 ^d	34.71±0.13 ^c	180.03±0.92 ^e	86.38±2.20 ^b
RSA	5.27±0.03 ^c	37.13±0.39 ^b	168.43±2.21 ^f	65.27±0.82 ^{ef}
RSA-NC	5.13±0.01 ^d	35.02±0.12 ^c	170.26±0.87 ^{ef}	63.65±0.33 ^f
RSA-SS	5.16±0.11 ^d	36.51±0.91 ^b	175.26±0.42 ^d	67.33±0.77 ^{cd}
RSA-SM	5.09±0.04 ^d	34.85±0.11 ^c	187.13±1.75 ^b	69.18±0.38 ^c

† 同列字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

在CL的电镜图像(图5)中,可以清晰地观察到较大的细胞簇或胚乳块紧密聚集的现象,这一现象从微观结构层面为面粉粒径较大的结果提供了有力证据。NC面粉中存在更多细小的淀粉颗粒, D_{50} 值最小,可能的原因是

制粉过程未经过润麦,小麦籽粒表层干燥且坚硬,在辊磨机械力的作用下更容易被粉碎,产生更多细小的颗粒,这与小麦粉粒径的测定结果一致。Kim等^[46]的研究表明,随着面粉粒径的减小,损伤淀粉含量增加。因此,辊间距0.05 mm时NC和辊间距为0.06 mm时RSA-NC可能含有更多的损伤淀粉,从而改变小麦粉特性,包括面团流变特性和糊化特性^[47]。

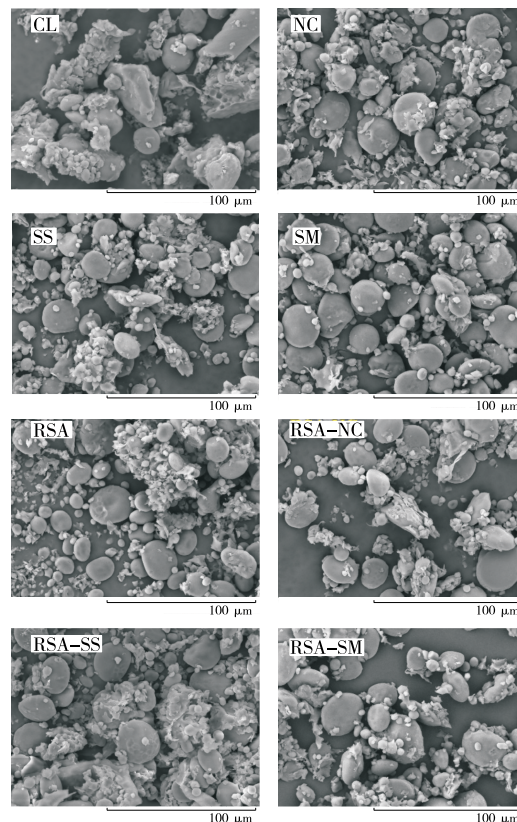


图5 不同制粉工艺制得小麦粉扫描电镜图

Figure 5 Scanning electron micrographs of wheat flour produced by different milling processes

2.4 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

图6为不同制粉工艺小麦粉的FTIR光谱图。通过观察图谱,可以发现不同制粉工艺的小麦粉傅里叶红外光谱未出现新的吸收峰,与Wang等^[48]的研究结果相似,即在射频RF膨化过程中,小麦中未出现新的吸收峰,表明在此过程中未形成新的基团。

在 $1200\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 的范围傅里叶变换红外光谱对淀粉的短程分子顺序变化敏感,因此可以用于分析淀粉的有序结构。通过分析FTIR去卷积谱图在 $1047, 1022\text{ cm}^{-1}$ 处的结果,可以获得不同制粉工艺小麦粉的短程有序结构^[14]。图7为不同制粉工艺制得的小麦粉FTIR去卷积谱图, $1047, 1022, 995\text{ cm}^{-1}$ 处有独立吸收峰,这些

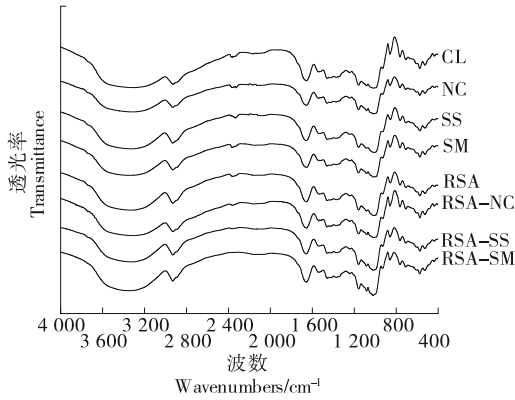


图 6 不同制粉工艺制得小麦粉的 FTIR 光谱图

Figure 6 FTIR spectra of wheat flour produced by different milling processes

峰对淀粉构象具有较高的敏感性^[15]。由于 1 047 和 1 022 cm⁻¹ 处的红外波段与淀粉中的结晶和无形量有关^[25, 49], 因此以二者的吸收峰强度比值来反映小麦粉淀粉的短程有序性。由表 3 可知, 辊间距为 0.05 mm 时, SM 的小麦粉淀粉的有序性显著降低 ($P < 0.05$)。这可能是由于小麦经过 2 道较小辊间距的皮磨阶段, 对小麦籽粒施加 2 次机械力, 辊磨机械力可破坏氢键, 打开淀粉分子的双螺旋结构^[50], 增加淀粉链的迁移率, 从而减少了有序结构的形成^[51]。采用 RSA 工艺制备的小麦粉展现出最大的短程有序结构 (0.86), 表明淀粉结晶度更高。短程有序结构的变化对产品的品质具有直接影响。通过调控面条的短程有序结构, 可以更合理地控制食品的消化、口感和风味^[52]。

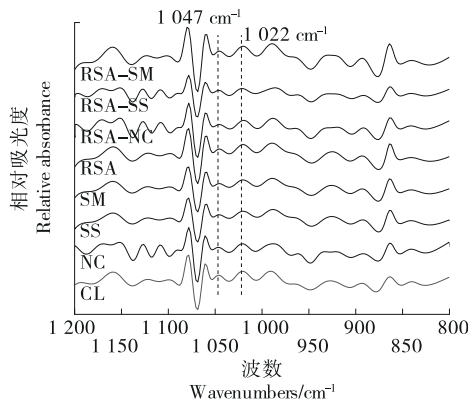


图 7 不同制粉工艺制得小麦粉 FTIR 去卷积谱图

Figure 7 FTIR deconvolution spectra of wheat flour produced by different milling processes

2.5 X 射线衍射 (XRD) 分析

图 8 展示了不同制粉工艺小麦粉的 X 射线衍射图谱, 各工艺所得小麦粉均展现出相似的特征峰, 主要集中在

表 3 制粉工艺对小麦粉淀粉的短程有序性和相对结晶度的影响[†]

Table 3 Effect of milling process on the short-range ordering and relative crystallinity of wheat flour

辊间距/mm	制粉程序	短程有序性	相对结晶度/%
0.05	CL	0.63 ± 0.05 ^{abc}	12.76 ± 0.71 ^b
	NC	0.48 ± 0.04 ^{bc}	19.30 ± 2.52 ^a
	SS	0.76 ± 0.14 ^{ab}	19.69 ± 3.88 ^a
	SM	0.43 ± 0.03 ^c	18.89 ± 4.36 ^a
0.06	RSA	0.86 ± 0.01 ^a	17.97 ± 3.39 ^{ab}
	RSA-NC	0.45 ± 0.08 ^c	18.48 ± 1.32 ^{ab}
	RSA-SS	0.58 ± 0.04 ^{abc}	21.41 ± 3.29 ^a
	RSA-SM	0.75 ± 0.13 ^{ab}	20.92 ± 1.87 ^a

[†] 同列字母不同代表差异显著 ($P < 0.05$)。

15.0°, 17.0°, 18.0° 和 23.0°, 表明典型的 A-型结晶^[53]。小麦粉在 20° (2θ) 处的较低强度的峰与天然存在的直链淀粉-脂质复合物相关^[54]。小麦粉衍射峰的位置和峰形无明显变化, 未产生新的特征峰。表明小麦粉制粉工艺对小麦粉的晶体类型影响不大^[55], 与 Zhang 等^[15] 的研究结果一致。

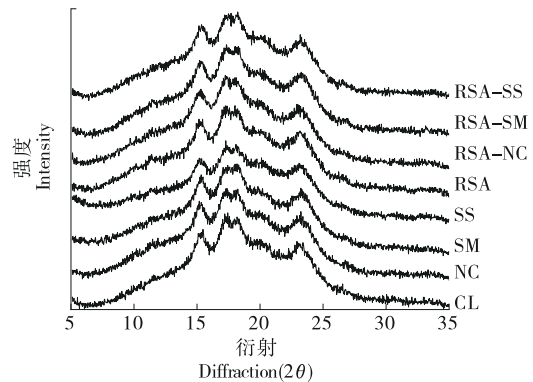


图 8 不同制粉工艺制得小麦粉的 X 射线衍射图

Figure 8 X-ray diffractograms of wheat flour produced by different milling processes

改变制粉工艺能够提高小麦粉的结晶度。即 NC、SS、SM 工艺有助于保留淀粉晶体结构。RSA 结晶度高于 CL, 可能是由于较小的辊磨间距增大了磨辊对小麦籽粒上的机械作用力, 破坏了分子内部和分子之间的部分氢键, 打开淀粉分子的双螺旋结构^[50], 进而破坏淀粉的结晶区^[14, 56], 降低淀粉的有序性。这与 Tian 等^[14] 的研究结果一致, 在机械破碎过程中, 氢键容易断裂, 进而导致淀粉结晶结构的破坏。有研究表明, 淀粉的多尺度结构和理化性质对食品的质地、加工和营养特性有重要影响^[12], 且小麦粉的结晶度会显著影响食品原料的功能特性、糊化

温度、流变和逆变行为^[57]。因此,适宜的制粉工艺可以通过改变小麦淀粉结构来改善食品的品质。

3 结论

通过调整制粉系统中的润麦、筛理、皮磨和辊间距调节等程序,研究其对小麦出粉率、面粉特性和微观结构的影响,以实现小麦的适度加工。研究结果显示,2次皮磨、改变辊间距—2次皮磨和改变辊间距—不润麦工艺在提高出粉效率方面具有显著优势。此外,与不润麦和2次皮磨相比,改变辊间距—不润麦和改变辊间距—2次皮磨制得面粉蛋白质含量较高,具有更高的营养价值,这一发现对面粉的营养强化具有重要意义。但改变制粉工艺小麦粉湿面筋含量无明显变化($P>0.05$)。另一方面,增大辊间距(改变辊间距—不润麦、改变辊间距—2次筛理、改变辊间距—2次皮磨)的制粉工艺可以显著增加小麦粉的总酚含量和灰分含量($P<0.05$),同时降低小麦粉白度值,这些变化可能与辊间距增大导致研磨程度和颗粒尺寸变化有关。关于面粉的粒径分布,采用不同制粉工艺获得的面粉,其体积平均粒径存在显著差异($P<0.05$)。然而,研究所采用的制粉工艺并未改变小麦粉的X-射线衍射图谱中的特征峰。在相同辊间距下,改变制粉工艺能有效提高小麦粉的结晶度,尤其是2次筛理制得的小麦粉展现出了最高的相对结晶度。

综上所述,小麦粉的微观结构与营养特性紧密关联于制粉程序的调控。增大皮磨系统的辊间距是有效的适度加工途径,在0.06 mm辊间距下改变辊间距—不润麦制得面粉加工精度最低且面粉品质最佳。

参考文献

- [1] LEBERT L, BUCHE F, SORIN A, et al. The wheat aleurone layer: optimisation of its benefits and application to bakery products[J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3 552.
- [2] SANDHU R S, SINGH N, KALER R S S, et al. Effect of degree of milling on physicochemical, structural, pasting and cooking properties of short and long grain Indica rice cultivars [J]. *Food Chemistry*, 2018, 260: 231-238.
- [3] 贾泽宇, 曹仁杰, 陈伟, 等. 稻谷适度加工对稻米品质的影响研究进展[J]. *粮食与食品工业*, 2024, 31(3): 6-8.
JIA Z Y, CAO R J, CHEN W, et al. Research progress on the effect of moderate rice processing on rice quality[J]. *Cereal & Food Industry*, 2024, 31(3): 6-8.
- [4] YANG L, FAN Y C, SONG S Y, et al. Frictional behavior of brown rice grain during moderate processing[J]. *Tribology International*, 2021, 162: 107123.
- [5] LIU K L, ZHENG J B, CHEN F S. Relationships between degree of milling and loss of Vitamin B, minerals, and change in amino acid composition of brown rice[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 429-436.
- [6] ZHANG H, WU F F, XU D, et al. Effects of milling methods on the properties of glutinous rice flour and sweet dumplings[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(5): 1 848-1 857.
- [7] LEE Y T, SHIM M J, GOH H K, et al. Effect of jet milling on the physicochemical properties, pasting properties, and *in vitro* starch digestibility of germinated brown rice flour[J]. *Food Chemistry*, 2019, 282: 164-168.
- [8] THANUSHREE M P, SUDHA M L, MARTIN A, et al. Enhancing the nutritional and quality profiles of buckwheat noodles: studies on the effects of methods of milling and improvers[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 160: 113286.
- [9] LEEWATCHARARONGJAROEN J, ANUNTAGOOL J. Effects of dry-milling and wet-milling on chemical, physical and gelatinization properties of rice flour[J]. *Rice Science*, 2016, 23(5): 274-281.
- [10] 董弘旭, 李萌萌, 关二旗, 等. 球磨处理时间对小麦淀粉理化特性和结构的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2): 1-7.
DONG H X, LI M M, GUAN E Q, et al. Effect of ball-milling time on physicochemical and structural properties of wheat starch[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(2): 1-7.
- [11] TIAN Y, SUN J, LI J X, et al. Effects of milling methods on rice flour properties and rice product quality: a review[J]. *Rice Science*, 2024, 31(1): 33-46.
- [12] ZHU L, ZHANG H, WU G C, et al. Effect of structure evolution of starch in rice on the textural formation of cooked rice[J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128205.
- [13] WANG G Z, YAN X Q, WANG B W, et al. Effects of milling methods on the properties of rice flour and steamed rice cakes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 167: 113848.
- [14] TIAN X L, WANG X X, MA S, et al. Effect of different milling mechanical forces on the structures and properties of wheat flour[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(4): 1 945-1 953.
- [15] ZHANG L, MENG Q F, ZHAO G H, et al. Comparison of milling methods on the properties of common buckwheat flour and the quality of Wantuan, a traditional Chinese buckwheat food[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 19: 100845.
- [16] WANG Y J, WANG X F, WU Z Z, et al. Structure and physicochemical properties of resistant starch III with different milling methods[J]. *Starch-Stärke*, 2024, 76(9/10): 2300261.
- [17] 常柳, 孙辉, 段晓亮, 等. 小麦低温制粉系统各粉路小麦粉品质特性差异性研究[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(4): 145-151.
CHANG L, SUN H, DUAN X L, et al. Study on the difference of quality characteristics of different flour flow of wheat low-temperature milling system[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2024, 32(4): 145-151.

- [18] 李林轩, 王晓芳, 李硕. 小麦混合制粉法的探索[J]. 现代面粉工业, 2023, 37(6): 1-3.
LI L X, WANG X F, LI S. Exploration of wheat mixing and flouring method[J]. Modern Flour Milling Industry, 2023, 37(6): 1-3.
- [19] 王琳琳. 预皮磨对小麦及小麦粉品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 15-49.
WANG L L. Study on the effect of prebreak on qualities of wheat and wheat flour[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 15-49.
- [20] 常道柯, 田潇凌, 林顺顺, 等. 不同制粉方式对黑小麦全麦粉及饼干品质影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 266-272.
CHANG X K, TIAN X L, LIN S S, et al. Effect of different milling method on that quality of whole black wheat flour and biscuits[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(21): 266-272.
- [21] 孟续. 预处理方式对黑小麦麸皮及其对面团品质的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 26-42.
MENG X. Study on the effect of pretreatment on triticale bran and its effect on the quality of dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 26-42.
- [22] TIAN W F, WILSON T L, CHEN G J, et al. Effects of environment, nitrogen, and sulfur on total phenolic content and phenolic acid composition of winter wheat grain[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(4): 903-911.
- [23] GUADARRAMA-LEZAMA A Y, CARRILLO-NAVAS H, VERNON-CARTER E J, et al. Rheological and thermal properties of dough and textural and microstructural features of bread obtained from nixtamalized corn/wheat flour blends [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 158-165.
- [24] 车瑞彬, 郑学玲, 李利民. 超声处理对小麦淀粉与面筋蛋白分离效果及产品性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 265-271.
CHE R B, ZHENG X L, LI L M. Effect of ultrasonication on separation of wheat starch and gluten protein and product characteristics[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 265-271.
- [25] ASRANUDIN, HOLILAH, SYARIFIN A N K, et al. The effect of heat moisture treatment on crystallinity and physicochemical-digestibility properties of purple yam flour [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106889.
- [26] 王琳琳, 王凤成, 齐兵建, 等. 预皮磨处理对小麦粉卫生和品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(16): 85-92.
WANG L L, WANG F C, QI B J, et al. Effects of prebreak on hygiene and quality of wheat flour[J]. Food Research and Development, 2023, 44(16): 85-92.
- [27] JI T, MA F Y, BAIK B K. Biochemical characteristics of soft wheat grain associated with endosperm separation from bran and flour yield[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(3): 566-572.
- [28] TOSI P, GRITSCH C S, HE J B, et al. Distribution of gluten proteins in bread wheat (*Triticum aestivum*) grain[J]. Annals of Botany, 2011, 108(1): 23-35.
- [29] 施桂林, 卞科, 关二旗. 出粉率对小麦粉理化特性及面条品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 8-13.
SHI G L, BIAN K, GUAN E Q. Effects of flour yield on wheat flour physicochemical properties and noodle quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(4): 8-13.
- [30] JHA A, BARUAH K N, TRIPATHY P P. Influence of enzymatic tempering on milling characteristics, flour quality, crystallinity and microstructure of wheat[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(4): 1 986-1 997.
- [31] VAN HUNG P, MAEDA T, MIYATAKE K, et al. Total phenolic compounds and antioxidant capacity of wheat graded flours by polishing method[J]. Food Research International, 2009, 42(1): 185-190.
- [32] CIUDAD-MULERO M, BARROS L, FERNANDES Â, et al. Potential health claims of durum and bread wheat flours as functional ingredients[J]. Nutrients, 2020, 12(2): 504.
- [33] MISHRA P, MISHRA S, MAHANTA C L. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Emblca officinalis*) juice powder[J]. Food and Bioproducts Processing, 2014, 92(3): 252-258.
- [34] OLIVEIRA G, ELIASSON L, EHRNELL M, et al. Tailoring bilberry powder functionality through processing: effects of drying and fractionation on the stability of total polyphenols and anthocyanins[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 1 017-1 026.
- [35] 张娇娇, 王香玉, 赵仁勇, 等. 基于灰分含量的累积出粉率对小麦粉及馒头品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 12-20.
ZHANG J J, WANG X Y, ZHAO R Y, et al. Effect of flour yield accumulated via ash content on quality of wheat flour and steamed bread[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(5): 12-20.
- [36] QI Y J, YANG Y Y, HASSANE HAMADOU A, et al. Tempering-preservation treatment inactivated lipase in wheat bran and retained phenolic compounds[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(4): 2 104-2 112.
- [37] RAGAEI S, SEETHARAMAN K, ABDEL-AAL E M. The impact of milling and thermal processing on phenolic compounds in cereal grains[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(7): 837-849.
- [38] 王晓芳, 李林轩, 李硕, 等. 关于小麦制粉工艺中水分调节技术的探讨[J]. 现代面粉工业, 2020, 34(6): 1-4.
WANG X F, LI L X, LI S, et al. Discussion on the technology of water conditioning during wheat flour production[J]. Modern Flour Milling Industry, 2020, 34(6): 1-4.

- [39] SILIVERU K, AMBROSE R K, VADLANI P V. Significance of composition and particle size on the shear flow properties of wheat flour[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(8): 2 300-2 306.
- [40] 田潇凌. 小麦制粉中机械力化学效应及其对品质影响机制[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 45-91.
TIAN X L. Mechanochemical effect in wheat milling and its influence mechanism on wheat flour quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 45-91.
- [41] MA S, WANG C C, LI L, et al. Effects of particle size on the quality attributes of wheat flour made by the milling process [J]. *Cereal Chemistry*, 2020, 97(2): 172-182.
- [42] PROTONOTARIOU S, DRAKOS A, EVAGELIOU V, et al. Sieving fractionation and jet mill micronization affect the functional properties of wheat flour[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 134: 24-29.
- [43] 马思雨. 不同制粉方式小麦胚乳颗粒粉破碎情况及消化性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 16-48.
MA S Y. Study on broken condition and in vitro digestibility of wheat flour particles by different milling methods[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 16-48.
- [44] HASSOON W H, DZIKI D, MIŚ A, et al. Wheat grinding process with low moisture content: a new approach for wholemeal flour production[J]. *Processes*, 2021, 9(1): 32.
- [45] LIU C, LIU L, LI L M, et al. Effects of different milling processes on whole wheat flour quality and performance in steamed bread making[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 310-318.
- [46] KIM J M, SHIN M. Effects of particle size distributions of rice flour on the quality of gluten-free rice cupcakes[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 526-532.
- [47] MA S, LI L, WANG X X, et al. Effect of mechanically damaged starch from wheat flour on the quality of frozen dough and steamed bread[J]. *Food Chemistry*, 2016, 202: 120-124.
- [48] WANG Y Q, DONG Y H, SUN Y N, et al. Process optimization of wheat flour crisp puffing by radio frequency and the accompanying property changes of starch[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(1): 460-472.
- [49] HUANG T T, ZHOU D N, JIN Z Y, et al. Effect of repeated heat-moisture treatments on digestibility, physicochemical and structural properties of sweet potato starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 54: 202-210.
- [50] MA Y S, XU D, SANG S Y, et al. Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106362.
- [51] WANG L J, WANG L B, WANG A L, et al. Superheated steam processing improved the qualities of noodles by retarding the deterioration of buckwheat grains during storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110746.
- [52] SHEN S D, CHI C D, ZHANG Y P, et al. New insights into how starch structure synergistically affects the starch digestibility, texture, and flavor quality of rice noodles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 184: 731-738.
- [53] JIRANUNTAKUL W, PUTTANLEK C, RUNGSAARDTHONG V, et al. Microstructural and physicochemical properties of heat-moisture treated waxy and normal starches[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(2): 246-258.
- [54] VICENTE A, VILLANUEVA M, CABALLERO P A, et al. Buckwheat grains treated with microwave radiation: impact on the techno-functional, thermal, structural, and rheological properties of flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108328.
- [55] YAN Y Z, XUE X H, JIN X Y, et al. Effect of annealing using plasma-activated water on the structure and properties of wheat flour[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 951588.
- [56] ZHANG K L, DAI Y Y, HOU H X, et al. Influences of grinding on structures and properties of mung bean starch and quality of acetylated starch[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 285-292.
- [57] HU H, LI S P, PAN D J, et al. The variation of rice quality and relevant starch structure during long-term storage[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1 211.