



董吉林,朱莹莹,申瑞玲. 全谷物膳食纤维对小麦面团及其主要组分的影响研究进展[J]. 轻工学报,2021, 36(5):1-8.

DONG J L, ZHU Y Y, SHEN R L. Research progress in the effects of whole grain dietary fiber on wheat dough and main components [J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(5):1-8. DOI:10.12187/2021.05.001

中图分类号:TS213.2 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)05-0001-08

全谷物膳食纤维对小麦面团及其主要组分的影响研究进展

Research progress in the effects of whole grain dietary fiber on wheat dough and its main components

董吉林,朱莹莹,申瑞玲

DONG Jilin, ZHU Yingying, SHEN Ruiling

郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001

College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

关键词:

全谷物;膳食纤维;
小麦面团;食品品质

Key words:

whole grain; dietary
fiber; wheat dough;
food quality

摘要:在简述全谷物营养及其消费趋势的基础上,重点针对添加不同全谷物和全谷物膳食纤维对小麦面团及其主要组分的影响进行了综述。指出:全谷物和全谷物膳食纤维组分(如 β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖和抗性淀粉)因添加量不同,会影响小麦面团特性、食品质构及感官品质,这些影响主要是由膳食纤维组分与谷朊蛋白和小麦淀粉的相互作用引起的结构性质的变化。未来应针对不同全谷物膳食纤维及其重要组分的分子组成、含量等进行深入研究,探讨其对小麦面团作用的内在机制,以进一步推动营养型高品质全谷物产业的发展。

收稿日期:2021-04-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2020YFD1001400);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(202102110292)

作者简介:董吉林(1968—),男,山西省灵石县人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为谷物营养与加工。

通信作者:申瑞玲(1967—),女,山西省灵石县人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为谷物营养与加工。

Abstract: On the basis of summarizing the nutrition and consumption trend of whole grain, the effects of different components of whole grain and cereal dietary fiber on wheat dough and main components were reviewed. This study indicated that different types of whole grains and cereal dietary fiber components (such as β -glucan, arabinoxylan and resistant starch) could affect the characteristics of dough, texture and sensory quality of food with different supplemental levels. These effects were mainly caused by the structural changes of dietary fiber components through the interaction with wheat gluten protein and wheat starch. In the future, the molecular composition, content and other structural characteristics of dietary fibers and important components of different whole grains should be further studied to explore the internal mechanism of their effects on wheat dough to further promote the development of nutrition-oriented high-quality whole grain industry.

0 引言

谷物是我国传统主食食材,流行病学研究显示^[1],近年来,我国慢性代谢疾病罹患人群比例上升与谷物精制化紧密相关。与精制谷物相比,全谷物保留了更多麸皮和胚芽,富含膳食纤维、微量元素和多酚类物质。研究表明^[2],食用全谷物对平衡膳食、改善Ⅱ型糖尿病和心血管疾病、预防结直肠癌具有极大作用。许多国家积极呼吁和提倡人体应该增加全谷物的摄入^[3]。调查显示^[4-6],膳食纤维的摄入量是决定人体健康效益的关键因素,但我国居民膳食纤维及全谷物摄入比例总体较低,成人每天膳食纤维平均摄入量仅 10.8 g,约 95%的成人膳食纤维摄入量低于建议值(25.0~35.0 g)。近年来,我国居民的营养膳食消费理念逐渐增强,全谷物类食品消费量持续攀升,与全谷物相关的理论和应用研究也日渐增多,高粱、小米、藜麦等无麸质产品已成为全谷物加工消费的热点^[7]。由于全谷物口感较差,故多将其与精制小麦、大米等复配加工,既增加产品的膳食纤维和微量元素含量、降低热量,同时又改善产品口感、提升消费量。富含膳食纤维的全谷物产品,已逐渐成为谷物加工业中的高端、时尚产品代表。

常见的全谷物原料包括全麦、燕麦、糙米、大麦、黑麦、高粱、荞麦、小米等。不同全谷物具有不同的膳食纤维,但主要包括非淀粉多糖(β -葡聚糖(BG)、阿拉伯木聚糖(AX))、抗性

淀粉(RS)、低聚糖、多糖-多酚复合物等^[4],例如,燕麦和大麦含有较多的BG;黑麦和全麦籽粒含有较多的AX;全麦和高粱中RS含量则明显不同^[8]。现代食品加工业对全谷物的利用和理论研究尚有不足,尤其是在与小麦粉复配时,小麦淀粉和谷朊蛋白会与全谷物膳食纤维等成分发生不同的作用,这直接影响食品的结构、质地和稳定性。例如,在挤压谷物中,淀粉会形成连续的非晶相,而膳食纤维和蛋白质均会对淀粉结构造成影响^[9]。因此,深入研究不同全谷物膳食纤维与小麦淀粉和谷朊蛋白间的作用机理,改善全谷物食品感官品质和质构特性,以及深入了解其加工过程中的营养成分变化均具有重要意义,这也是全谷物食品加工业的一大挑战。

本文在简述全谷物营养及其膳食纤维消费需求的基础上,综述添加不同全谷物和全谷物膳食纤维对小麦面团及其食品品质的影响,并进一步阐述这些膳食纤维在加入小麦粉后,对小麦主要组分(谷朊蛋白和小麦淀粉)结构和性质产生的影响,以期对未来加工富含全谷物及全谷物膳食纤维的食品提供参考和新思路。

1 全谷物对小麦面团及其食品品质的影响

近年来,我国在全谷物理论研究和产业化应用方面均有较快发展,研究主要集中在对全谷物的化学组成、营养、产品质构特性等方面,其中,关于全谷物部分替代主食的研究是热点。

1.1 全谷物与谷朊蛋白和小麦淀粉的相互影响

燕麦、青稞、高粱等全谷物中一般缺乏面筋蛋白,因此,将这些全谷物添加到小麦粉中可影响混合体系淀粉和蛋白质的结构及性质。张慧娟等^[10]研究发现,将一定量的青稞粉加入小麦粉中,随着青稞粉添加量(10%~40%)的增加,面团湿面筋含量下降,吸水率提高了3.6%~7.0%,谷朊蛋白弱化速度先减小后增大,淀粉糊化速度和蒸煮稳定性降低。而王军等^[11]研究发现,高粱超微全粉的添加也会降低小麦-高粱混合粉中淀粉和蛋白质的含量,当高粱超微全粉的添加量为5%~10%时,混合粉中淀粉含量降低不明显;当添加量为15%~20%时,混合粉中淀粉含量显著降低;当添加量为10%及以上时,蛋白质含量显著降低。另外,添加谷朊蛋白可增加荞麦-小麦混合面团中二硫键的含量,进而通过化学作用力(离子键、氢键和疏水作用力)变化影响谷朊蛋白的构象,还可影响荞麦-小麦混合面团的微观结构及粉质拉伸特性^[12];谷朊蛋白还可使燕麦-小麦混合面团的氢键强度逐渐减弱,使荞麦-小麦混合面团的氢键强度逐渐增强,从而改变混合面团的流变学特性及所制馒头的品质^[12-13]。

1.2 全谷物对小麦面团特性的影响

将不同种类的全谷物掺入主粮中,兼顾营养的同时可改善产品的口感。与小麦粉相比,全谷物的添加可影响小麦面团粉质特性和拉伸特性。李真^[14]研究发现,用一定量的大麦全粉代替部分小麦粉后,面团的吸水率随大麦全粉添加量(10%~60%)的升高而增加,而面团形成时间、稳定时间分别从4.13 min和9.58 min降至1.02 min和2.65 min。王杰琼^[13]研究发现,用一定量的苦荞全粉和燕麦全粉代替部分小麦粉后,混合粉的吸水率显著增加,且随着全粉代替率的增加,面团的最高拉伸阻力、延伸

度、最大拉伸比例和能值均显著降低,而面团的储能模量(G')和损耗模量(G'')均逐渐增大,与李娜等^[15]的研究结果基本一致。王军等^[11]研究发现,用一定量的高粱超微全粉代替部分小麦粉后,混合粉吸水率增加,当高粱超微全粉添加量达到10%及以上时,面团形成时间、稳定时间、粉质指数、拉伸曲线面积、拉伸阻力和延伸度均显著降低。与单一添加不同,不同谷物复配后对面团特性的影响不一:将燕麦粉、苦荞粉、高粱粉分别与小米粉复配成35%的混合粉添加到小麦粉中,与单一添加35%小米粉的混合面团相比,复配粉混合面团的综合粉质特性得到显著改善^[16]。

1.3 全谷物对面制品品质的影响

添加全谷物后,可改善面条、馒头、饼干等面制品的功能特性,但也增加了其粗糙的口感,降低了食用品质。例如,当小米粉添加量高于30%时,挂面蒸煮损失率升高,干物质吸水率下降^[6]。燕麦全粉的添加会使馒头比容下降,弹性降低,硬度增大,这些品质的变化与馒头膳食纤维含量的高低密切相关^[13,17]。青稞全粉和藜麦全粉的添加也会使馒头的感官评分及整体质构呈下降趋势^[10]。当大麦全粉添加量大于20%时,面包的内部气孔壁出现断裂,比容降低,硬度增加,弹性减小,感官品质下降,面包蓬松的海绵状纹理结构消失^[14]。全麦粉在饼干中的添加量超过16%时,感官评分逐渐降低,饼干硬度增加,口感逐渐变差^[18]。杜艳等^[19]通过人体试验,检测和评价了青稞全粉含量 $\geq 51\%$ 挂面的血糖生成指数后发现,青稞挂面的血糖生成指数为53.63,属低血糖生成指数食物,可以有效控制血糖平衡。

综上所述,全谷物的营养价值虽高,但基于高比例和纯全谷物食品在加工特性和加工品质方面的劣势,还需考虑在加工过程中加入部分小麦淀粉、谷朊蛋白等以改良面制品品质。在后

续研究中,一方面应加强研究全谷物膳食纤维的结构性质;另一方面还应加强研究这些膳食纤维与小麦面团间的相互作用。

2 全谷物膳食纤维对小麦面团及其食品品质的影响

全谷物膳食纤维具有持水性、凝胶性、脂肪模拟特性、增稠作用等,能够有效改善谷物产品的质地、感官品质及货架期。添加全谷物膳食纤维可以影响小麦面团的结构、质地等,并进一步影响产品的消化性和营养物质利用率。

2.1 BG

BG 是谷物水溶性膳食纤维的主要成分,添加 BG 可以影响小麦面团的流变性、水合作用及食品品质。潘利华等^[20]研究发现,适量添加燕麦 β -葡聚糖(OG)能改善小麦面团的流变学特性,当添加一定量(0.5%~5.0%)的 OG 于低筋、中筋和高筋面粉及馒头专用粉中时,随着 OG 添加量的增加,4 种面粉面团的吸水率、形成时间和稳定时间均增加;而当 OG 添加量为 0.5%~1.0%时,低筋面粉的拉伸特性接近馒头专用粉;OG 的添加能使中筋面粉的糊化温度稍有升高,亦能降低馒头专用粉的糊化温度及 4 种面粉的最终黏度、衰减值和回生值。也有研究表明^[21],BG 的添加对小麦面团有劣化作用:当大麦 β -葡聚糖(BBG)的添加量 \geq 0.5%时,小麦面团的抗延伸阻力增加,形成时间、稳定时间、弱化度(值)及延伸性均显著降低;当 BBG 的添加量 \geq 1.5%时,小麦面包的比容明显减小、硬度增大、弹性降低。A. Rieder 等^[22]研究发现,高相对分子质量的 BG 能增加面团水相黏度,稳定气孔,但 S. Gill 等^[23]研究发现,高相对分子质量的 BG 会对小麦面团造成不利影响,使面团的抗延展性更高,膨胀性更低。高相对分子质量的 BG 遇水会产生高黏性凝胶,一方面可附着在面筋网络结构表面,影响其结构;

另一方面可与谷朊蛋白争夺水分,影响面团的吸水性和延展性。高相对分子质量 BG 的高持水性可限制挤压过程中的水分分布,降低产品膨胀性,增加其硬度和色泽^[24]。L. Wang 等^[25]评价了 OG 对小麦面团的水合作用,发现稀溶液中的水分会竞争 OG 与谷朊蛋白,恶化谷朊蛋白网络结构,降低小麦面团稳定性。A. Skendi 等^[26]研究了两种不同相对分子质量(1.00×10^5 和 2.03×10^5)的 BG 对两种小麦面团流变学、黏弹性和面包品质的影响,结果表明,BG 能增加小麦面团的黏弹性、抗变形性和流动性,将相对分子质量较低的 BG 添加到低筋小麦粉中,可使低筋小麦粉产生与高筋小麦粉类似的作用。K. L. Tsatsaragkou 等^[27]研究发现,添加量为 1%的 BG 能增加小麦面包的体积和多孔性,使面包松软。因此,BG 的相对分子质量、在不同筋力小麦面团中的添加量与小麦面团相互作用的规律性尚无定论,还需进一步深入研究。

2.2 AX

全麦、黑麦、小米等全谷物膳食纤维中的 AX 含量较高,在小麦面粉中添加一定量的 AX 可以影响小麦面团的微观结构,改善面团的黏弹性和稳定性,且在一定的离子强度下,水溶性阿拉伯木聚糖(WEAX)可增加小麦面团的 G' 和 G'' ,显著提高面筋蛋白的黏弹性和凝胶强度^[28-29]。不溶性阿拉伯木聚糖(WUAX)通过酚酸(如阿魏酸等)的活性双键与小麦蛋白结合成更大分子的网络结构,从而改良面团的特性^[30]。杨莎^[31]将不同相对分子质量的碱性阿拉伯木聚糖(AEAX)分别添加到谷朊蛋白和淀粉体系进行研究,发现 AEAX-谷朊蛋白体系的持水力、 G' 、 G'' 和蛋白变性温度均显著升高;然而,C. Döring 等^[32]研究发现,高含量的 AX 在面团形成过程中可影响蛋白网络结构的形成,从而对面团特性产生不利影响。另外,不同类型的 AX 与小麦面筋蛋白之间的相互作用,还需要从相对分

子质量、结构敏感参数等方面进行深入研究^[33]。

2.3 RS

RS 既具有膳食纤维的生理功能,又具有较膳食纤维更细腻的口感,可作为膳食纤维功能食品的原料,受到业界的广泛关注. M. M. Seremesic 等^[34]研究发现,添加量为 15% 的 RS3 和 RS4 能够影响小麦面团的流变性,增加面包的体积和弹性. M. Cervini 等^[35]将质量分数为 0%、15%、30% 和 45% 的高粱抗性淀粉添加到小麦粉中,所制成饼干的总膳食纤维含量增加 ($P>0.05$),硬度也增加,且在不严重影响产品品质的情况下,添加 RS 有助于制备具有缓慢消化特性的饼干. M. Maziarz 等^[36]将玉米 RS 分别加入松饼和面包中发现,玉米 RS 可显著增加松饼的感官品质,并使面包的密度更大、色泽更美观. 吴津蓉等^[37]研究发现,在蛋糕粉中添加质量分数为 2%~3% 的 RS,可明显减小蛋糕在贮藏过程中的硬度,且保鲜效果良好. 而蒋启巍^[38]研究发现,在 RS 质量分数为 20% 的挂面中添加质量分数为 6% 的谷朊蛋白粉,挂面的抗弯能力和质构最好,可见,RS 可与谷朊蛋白相互作用进而影响产品品质.

综上所述,膳食纤维作为全谷物食品的重要营养成分,是食品加工行业关注的热点. 但不同全谷物膳食纤维的分子组成、含量、溶解性等具有很大差异,因此,从目前精准加工和精准营养的角度出发,有必要对不同全谷物膳食纤维的结构特性进行深入研究,进一步解析其对小麦面团及其食品品质影响的内在过程,这也将有利于未来全谷物食品加工的创新.

3 全谷物膳食纤维对小麦主要组分的影响

3.1 对小麦谷朊蛋白结构性质的影响

近年来,消费者越来越青睐富含膳食纤维的产品,而膳食纤维往往通过影响小麦谷朊蛋白的

结构性质而影响产品的加工性能和食用品质,因此,膳食纤维与谷朊蛋白的相互作用是面制品加工过程中影响产品品质的一个关键因素.

添加膳食纤维可以诱导谷朊蛋白结构的改变,使焙烤产品的品质下降. 不同来源全谷物膳食纤维的化学组成不同,其与谷朊蛋白的相互作用方式也不同. 添加不同全谷物膳食纤维可使谷朊蛋白具有更致密的网络结构,降低小麦面团的拉伸特性;还可导致混合体系的结合水重新分配,进一步影响谷朊蛋白的次级结构^[39]. M. J. Correa 等^[40]利用拉曼光谱研究了 7 种全谷物膳食纤维(添加量为 3%、6% 和 9%)与谷朊蛋白的相互作用,发现不同膳食纤维的添加均减少了谷朊蛋白的 α -螺旋结构,增加了其反平行 β -转角,导致面筋蛋白的聚集或折叠,但不同膳食纤维对面筋蛋白二硫键、氨基酸组成等的影响不同. 李渊^[21]研究发现,添加一定量的 BG 可使谷朊蛋白结构更不稳定, β -转角占比由 34.75% 降至 32.79%, β -折叠、无规卷曲占比及自由巯基含量均增加,十二烷基硫酸钠可提取出更多麦醇溶蛋白聚合物;添加一定量的蛋白酶可使全谷物 BG 溶液黏度下降,这也表明蛋白质与膳食纤维以离子键、氢键作用或二者形成了更大的复合物. C. C. Wang 等^[41]研究发现,分别添加一定量的小麦麸阿魏酸和膳食纤维,谷朊蛋白总巯基含量、二硫键含量、变性温度 (T_p) 和热焓 (ΔH) 均明显下降,谷朊蛋白网络结构变得混乱;而当二者一起添加时,膳食纤维与阿魏酸的交互作用阻止了二硫键含量的下降,防止了面筋形成过程中的氧化交联,即二者的增效作用改善了谷朊蛋白的结构^[42]. 但不同结构类型全谷物膳食纤维对谷朊蛋白结构性质影响的规律还需深入研究.

3.2 对小麦淀粉结构性质的影响

全谷物膳食纤维与小麦淀粉之间的相互作用可以影响淀粉的加工特性、产品质构等. 可

溶性膳食纤维(SDF)能够溶解在小麦面团的水相中,包裹淀粉颗粒,减少淀粉的吸水性,提高面团的稳定性^[27]. D. B. Yamina 等^[43]研究发现,将不同质量分数的全谷物膳食纤维溶液与小麦淀粉混合,淀粉的糊化温度和峰值时间均随膳食纤维的添加而下降,膳食纤维的高持水性使面团的黏度增加. S. G. Hardeep 等^[44]研究发现,将大麦麸皮代替小麦麸皮添加到薄饼面团中,淀粉的凝沉指数下降了 26.44%,总 BG 含量与淀粉的凝沉指数呈负相关,表明总 BG 含量与淀粉回生密切相关. C. Wang 等^[41]研究发现,将小麦淀粉与 BG 进行复配,BG 分子通过与氢键结合附着在小麦淀粉颗粒表面,促进淀粉颗粒的吸水膨胀,更多可溶性淀粉渗透到连续相中,可促进直链淀粉重新有序化排列和短期回生;BG 增加了直链淀粉的重均相对分子质量,但对支链淀粉的重均相对分子质量没有明显影响. 杨莎^[31]研究发现,低相对分子质量的 AEAX 可抑制淀粉糊化过程中的膨胀吸水和回生过程中直链淀粉的渗出,同时参与并增强淀粉凝胶网络结构的形成. 姬翔^[45]研究发现,回添麸皮粉后的面粉中,总淀粉含量最低,芯粉含量最高,且芯粉中直链淀粉含量高于回添麸皮粉后的面粉.

4 结论与展望

本文对全谷物和全谷物膳食纤维对小麦面团及其食品品质的影响,以及全谷物膳食纤维对小麦主要组分(小麦淀粉和谷朊蛋白)结构和性质产生的影响进行了综述,指出:全谷物的添加可影响混合体系淀粉和蛋白质的结构及性质,增加面制品的功能性;全谷物膳食纤维的添加可影响小麦面团的结构、质地等,并进一步影响产品的消化性和营养物质利用率;全谷物膳食纤维与谷朊蛋白的相互作用是面制品加工过程中影响产品品质的一个关键因素,而全谷物

膳食纤维与小麦淀粉的相互作用可影响淀粉的加工特性、产品质构等. 从目前的研究结果报道来看,全谷物及全谷物膳食纤维对小麦面团及其食品品质的影响,以及不同全谷物膳食纤维与小麦粉主要组分之间的相互作用已有一些研究,对其关键参数和性质的了解也取得了一定进展,但已有的理论不够系统,研究深度不足,还无法满足全谷物食品加工工业化、标准化和新产品开发的要求. “十四五”期间,我国发布的“健康谷物白皮书”和“全谷物及全谷物食品判定及标识通则”团体标准,旨在持续引导消费者优化谷物摄入结构,提升全谷物消费水平,助力实现《“健康中国 2030”发展规划》目标. 因此,未来一方面需加强对不同全谷物及其膳食纤维的深入研究,了解其对小麦面团作用的内在机理,开发口感优良的全谷物新产品;另一方面,通过了解加工过程中营养组分的变化,进一步明晰全谷物食品的健康功效,促进我国全谷物产业的健康发展.

参考文献:

- [1] 张欣然. 代谢综合症与长期大量摄入精制谷物、油炸食品和红肉有关[J]. 中国食品学报, 2008,8(1):143.
- [2] 龚凌霄,曹文燕,王静,等. 全谷物调节代谢性疾病机制研究的新视角:肠道微生物[J]. 食品工业科技,2017,38(2):364.
- [3] GONG L X,CAO W Y,CHI H L,et al. Whole cereal grains and potential health effects: involvement of the gut microbiota [J]. Food Research International,2018,103:84.
- [4] BARRETT E M,PROBST Y C,BECK E J. Creation of a database for the estimation of cereal fibre content in foods[J]. Journal of Food Composition & Analysis,2018,66:1.
- [5] HUANG T,XU M,LEE A,et al. Consumption of whole grains and cereal fiber and total and

- cause-specific mortality: prospective analysis of 367, 442 individuals [J]. *BMC Med*, 2015, 13(1):59.
- [6] YU D M, HE Y N, GUO Q Y, et al. Trends of energy and nutrients intake among Chinese population in 2002–2012 [J]. *Hyg Res*, 2016, 45:527.
- [7] ALVAREZ J L, ARENDT E K, GALLAGHER E. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2010, 21:106.
- [8] 沈舒民. 高粱淀粉结构与功能特性研究及相关性分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [9] ROBIN F, THEODULOZ C, SRICHUWONG S. Properties of extruded whole grain cereals and pseudocereals flours [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2015, 50:2152.
- [10] 张慧娟, 黄莲燕, 王静, 等. 青稞添加量对面团热机械学性质及馒头品质的影响 [J]. *中国食品学报*, 2016, 16(4):104.
- [11] 王军, 程晶晶, 王周利, 等. 高粱超微全粉对面团流变学特性及馒头品质的影响 [J]. *现代食品科技*, 2017, 33(9):202.
- [12] 王杰琼, 钱海峰, 王立, 等. 谷朊粉对高含量荞麦面团的影响及其作用机理 [J]. *现代食品科技*, 2016, 32(8):140.
- [13] 王杰琼. 燕麦和荞麦全粉对面团特性及馒头品质影响的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [14] 李真. 大麦粉对面团特性与面包焙烤品质的影响及其改良剂研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [15] 李娜, 陈前, 李海峰, 等. 燕麦粉对小麦面团特性及饼干品质的影响 [J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(1):134.
- [16] 申瑞玲, 杨媚, 杜文娟, 等. 几种杂粮粉面团流变学特性的研究 [J]. *食品工业科技*, 2017, 38(10):108.
- [17] 刘胜男, 赵紫悦, 杜浩楠, 等. 藜麦粉对面团粉质特性与馒头品质的影响 [J]. *轻工学报*, 2018, 33(6):63.
- [18] 张晓华, 张晓雯, 郑晶晶, 等. 燕麦奇亚籽膳食纤维饼干的研制 [J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(4):133.
- [19] 杜艳, 陈正行, 郝静, 等. 高含量青稞全粉挂面升糖反应能力评价 [J]. *食品科技*, 2020, 45(11):143.
- [20] 潘利华, 徐婷婷, 罗水忠, 等. 适量燕麦 β -葡聚糖改善面团流变学特性 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18):304.
- [21] 李渊. 大麦 β -葡聚糖对小麦面团性质影响的机理研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [22] RIEDER A, HOLTEKJ LEN A K, SAHLSTR M S, et al. Effect of barley and oat flour types and sourdoughs on dough rheology and bread quality of composite wheat bread [J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 55(1):44.
- [23] GILL S, VASANTHAN T, OORAIKUL B, et al. Wheat bread quality as influenced by the substitution of waxy and regular barley flours in their native and extruded forms [J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36(2):219.
- [24] ERIVE M O, HE F L, WANG T, et al. Development of β -glucan enriched wheat bread using soluble oat fiber [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 95(1):103051.
- [25] WANG L, YE F Y, LI S, et al. Wheat flour enriched with oat β -glucan: a study of hydration, rheological and fermentation properties of dough [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 75(2):143.
- [26] SKENDI A, BILIADERIS C G, PAPAGEORGIOUS M, et al. Effects of two barley β -glucan isolates on wheat flour dough and bread properties [J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3):1159.
- [27] TSATSARAGKOU K L, PROTONOTARIOU S, MANDALA I. Structural role of fibre addition to

- increase knowledge of non-gluten bread [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 67:58.
- [28] XIAO F, ZHANG X, NIU M, et al. Gluten development and water distribution in bread dough influenced by bran components and glucose oxidase [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 137:110427.
- [29] 马福敏, 郭乃菲, 徐美玲, 等. 小麦粉中水溶性阿拉伯木聚糖对面筋蛋白黏弹性的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(10):1.
- [30] 钱海峰, 王杰琼, 王立, 等. 高膳食纤维面制主食的研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(19):385.
- [31] 杨莎. 碱性阿拉伯木聚糖对小麦面团及其组分特性的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [32] DÖRING C, NUBER C, STUKENBORG F, et al. Impact of arabinoxylan addition on protein microstructure formation in wheat and rye dough [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 154:10.
- [33] LI Q, LIU R, WU T, et al. Interactions between soluble dietary fibers and wheat gluten in dough studied by confocal laser scanning microscopy [J]. *Food Research International*, 2017, 95:19.
- [34] SEREMESIC M M, DOKIC L, NIKOLIC I, et al. Rheological and textural properties of short (cookie) dough made with two types of resistant starch [J]. *Journal of Texture Studies*, 2013, 44(2):115.
- [35] CERVINI M, FRUSTACE A, GARRIDO G D, et al. Nutritional, physical and sensory characteristics of gluten-free biscuits incorporated with a novel resistant starch ingredient [J]. *Heliyon*, 2021, 7(3):e06562.
- [36] MAZIARZ M, SHERRARD M, JUMA S, et al. Sensory characteristics of high-amylose maize-resistant starch in three food products [J]. *Food Science & Nutrition*, 2013, 1(2):117.
- [37] 吴津蓉, 党建磊. 压热-酶法提高小麦中抗性淀粉及其在蛋糕中应用研究 [J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(2):38.
- [38] 蒋启巍. 抗性淀粉挂面加工技术研究及其降血糖功能评价 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [39] ZHOU Y, DHITAL S, ZHAO C Y, et al. Dietary fiber-gluten protein interaction in wheat flour dough: analysis, consequences and proposed mechanisms [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111:106203.
- [40] CORREA M J, ANON M C, PEREZ G T, et al. Effect of modified celluloses on dough rheology and microstructure [J]. *Food Research International*, 2010, 43(3):780.
- [41] WANG C C, YANG Z, GUO X N, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the quality of steamed bread and gluten aggregation properties [J]. *Food Chemistry*, 2021, 364:13044.
- [42] HUANG L Y, ZHANG X S, ZHANG H J, et al. Interactions between dietary fiber and ferulic acid changed the aggregation of gluten in a whole wheat model system [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 91:55.
- [43] YAMINA D B, INGE L, CHIARA R, et al. The impact of wheat (*Triticum aestivum* L.) bran on wheat starch gelatinization: a differential scanning calorimetry study [J]. *Carbohydrate polymers*, 2020, 241:116262.
- [44] HARDEEP S G, BHARATI S, MANALI K. Influence of replacing wheat bran with barley bran on dough rheology, digestibility and retrogradation behavior of chapatti [J]. *Food Chemistry*, 2018, 240:1154.
- [45] 姬翔. 全麦粉对面粉及面条品质的影响 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.