

酸面团的功能特性及其在豆类和碾磨副产品中应用

王伟军¹, 方鲁平², 窦志霞², 吕 玫², 蔡丽琴², 李延华^{2*}

(¹浙江农林大学暨阳学院 浙江诸暨 311800

²浙江工商大学食品与生物工程学院 浙江省微生物重点实验室 杭州 310018)

摘要 酸面团发酵影响烘焙食品的流变学特性、感官品质和货架期等,并能够有效改善烘焙食品的功能、营养及应用品质。酸面团发酵在延长烘焙食品保质期,改善风味,延缓面包老化,降低血糖指数,增加矿物质生物利用度和降低面筋含量等诸多方面发挥积极作用。同时,酸面团发酵可减少食品中盐含量以防止高血压,预防并改善肠易激综合征,促进生物活性化合物的合成/释放,特别是酚类化合物的代谢,并在提高非传统食品(豆类)和碾磨副产品(麸皮和胚芽)的开发潜力方面极具应用优势,这为酸面团系列产品的应用开发、品质提升及其功能特性研究提供新的思路。

关键词 酸面团; 发酵; 功能特性; 豆类; 碾磨副产品; 应用品质

文章编号 1009-7848(2023)08-0450-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.044

酸面团发酵是一种传统的食品生物技术,利用该技术可以生产出具有高营养价值、良好感官特性和独特功能特性的烘焙食品。最初,人们对于酸面团的研究重点是发酵工艺对食品风味、流变学和保质期的影响(如延缓老化、防止腐败)以及不同发酵工艺中微生物之间的相互作用^[1]。近年来,酸面团发酵的功能特性倍受研究者的关注^[2]。酸面团发酵可以降低面包的血糖生成指数^[3](Glycemic index, GI),例如,全麦面包和白小麦面包的 GI 值约为 71,而酸面团小麦面包的 GI 值约为 54。哈佛医学院将 $GI \leq 55$ 的食物列为低 GI 食物; GI 在 56 到 69 之间的食物为中 GI 食物; $GI \geq 70$ 的食物为高 GI 食物。因此,酸面团小麦面包是低 GI 食物。同时,酸面团发酵可以有效地将整个小麦面包的植酸含量降至原有含量的一半以上。这主要是由于发酵过程中 pH 值降低,为谷类内源性植酸酶降解植酸提供了有利条件。酸面团体系中植酸的降解可以增加谷类矿物质和游离氨基酸含量,并提高蛋白质的生物利用度^[4]。有研究者发现将乳酸菌应用于酸面团并经过较长时间(> 24 h)发酵可以降低过敏现象的发生,其原因是谷类内源性蛋白酶或酸面团中乳酸菌分泌的外源性蛋白酶降解了体系中的致敏蛋白^[5]。由于这种发酵

方法安全无害、便捷有效,已被广泛应用于大量无麸质产品中。酸面团发酵过程中的代谢产物赋予产品新的功能特性和营养品质,这将对酸面团制品的应用品质提升和功能特性挖掘具有重要的意义。

1 酸面团发酵的功能特性

1.1 降低盐含量和抗高血压作用

饮食中盐的过量摄入(10 g/d)是近年来心血管疾病和高血压频发的主要原因之一^[6],高血压是监测心血管疾病的主要可控因素之一。因此,减少钠摄入量已成为控制血压的一个重要途径。世界卫生组织和欧盟鼓励降低产品中的钠含量,将消费者的钠摄入量降低至 2 g/d。然而,氯化钠的减少会影响烘焙食品的风味和物理性质,故降低盐含量是十分具有挑战性的。虽然已有多种食盐替代品如氯化钾、香料、增味剂、氨基酸、味精等被研究出来,但是结果均不理想,这些选择都无法有效代替氯化钠。

酸面团发酵既能降低钠摄入量,又能在减少用盐的同时保持风味。由于发酵过程中会合成反式脂肪酸和氨基酸衍生物,这对降低酸面团面包的盐用量具有一定补偿作用,而这也取决于乳酸菌的种类。Voinea 等^[7]使用海盐和干酸面团组合代替食用盐以达到降低盐含量的目的,在保证达到最佳流变学特性情况下使钠含量降低 22%。Zhao

收稿日期: 2022-08-25

基金项目: 浙江省科技厅重点研发项目(2019C02091)

第一作者: 王伟军,男,博士,正高级工程师

通信作者: 李延华 E-mail: liyanhua607@163.com

等^[8]发现由产谷氨酸或者 γ -氨基丁酸(GABA)的罗伊氏乳杆菌发酵的黑麦酸面团制成的面包,可以将盐添加量从 1.5%降低至 1%,并且不影响味道和其它质量参数。Rizzello 等^[9]研究发现由酸面团制成的面包相较于普通面包吃起来更咸,较高的盐度感知是酸化、蛋白水解和谷物成分共同作用的结果。乳酸菌通过谷氨酸脱羧酶将谷氨酸转化为 GABA,这是一种对抗酸化的防御机制。GABA 是一种非蛋白质氨基酸,作为神经递质,具有降压、利尿和镇静作用。在酸面团发酵过程中,乳酸菌还可能合成血管紧张素转换酶(ACE)抑制肽和抗氧化肽^[10]。ACE 抑制肽可抑制血管紧张素 II 的收缩作用,增强缓激肽的血管扩张活性。坚持低钠饮食,不仅能有效降低血压和改善血流介导的扩张,还能减少与高血压相关的微生物失调^[11]。肠道微生物菌群的发酵/代谢产物通过调节能量消耗、肠道儿茶酚胺代谢、胃肠道和肾脏离子转运,进而影响血压,从而影响盐敏感性^[12]。这说明在制作面包时加入酸面团,既能在不影响口感和品质的前提下降低盐的添加量,又能增加功能性抗高血压化合物 GABA、ACE 抑制肽和抗氧化肽的含量,还可以保证肠道微生物区系的动态平衡起到抗高血压的效果。

1.2 预防并改善肠易激综合征

肠易激综合症 (Irritable bowel syndrome, IBS) 是一种常见的肠道疾病,会引起腹痛、腹胀、腹泻和肠道微生物群改变,是一种受多种因素影响的复杂疾病^[13]。虽然目前还没有治愈 IBS 的方法,但已证明限制可发酵低聚糖、双糖和单糖及多元醇(Fermentable oligo-, di-, and monosaccharides and polyols, FODMAPs)的摄入可以减轻大多数 IBS 患者的症状。类似肠易激综合症的症状通常是非乳糜泻谷蛋白或小麦过敏临床表现的一部分。Carlo 等^[14]认为谷类食物中的谷蛋白、脂多糖、淀粉酶/胰蛋白酶抑制剂、小麦胚芽凝集素以及 FODMAPs 都可能会引发 IBS。

IBS 患者食用谷蛋白(谷类蛋白质的主要来源)后通常会产生产生肠胃不适等不良反应。酸面团发酵可使富含谷蛋白的面筋网络水解。Calasso 等^[15]做了一项针对 IBS 患者的随机交叉对照试验,服用酸面团面包一段时间后,患者 IBS 症状有显著

改善($P<0.05$),这表明小麦酸面包对 IBS 患者是有功效性的。这些面包的流变学和感官特征与含麸质的同类产品相近,而蛋白质消化率及其它营养指标均有所提高。通过酸面团发酵得到的无麸质(谷蛋白残留 $<10\times 10^{-6}$)小麦粉是制作意大利面的主要成分^[16]。与含麸质面食和天然无麸质原料制作的面食相比,通过酸面团发酵的小麦粉制作的面食体外蛋白质消化率、必需氨基酸含量和营养指数更高。Barbara 等^[17]研究发现使用酸面团制成的牛角面包相比于普通面包酵母制成的牛角面包更容易被人接受,且能有效改善成年人餐后肠胃功能。

FODMAPs 在肠易激综合症的饮食管理中越来越受到重视。由于 FODMAPs 会引起肠腔膨胀,使得这些碳水化合物未能被结肠吸收,从而导致腹胀、疼痛和内脏过敏。然而,饮食中 FODMAPs 的大量减少会消除它们潜在的益生元功能,从而引起肠道微生物失调。因此,目前认为低 FODMAPs 饮食是最有效的治疗方法^[18],该方法不排除主要的蔬菜、水果营养素和益生元,而是侧重于食品加工过程中 FODMAPs 的降解。事实上,改变加工方法比选择低 FODMAPs 含量的谷类品种更重要。Reijo 等^[19]研究发现与常规的酵母面包相比,发酵超过 12 h 的酸面团面包中淀粉酶/胰蛋白酶抑制剂含量,尤其是 FODMAPs 含量显著降低($P<0.05$)。果聚糖是谷类食品的主要成分,含量在 1.5%到 3.7%之间。果聚糖在肠道中的积累对大多数 IBS 患者来说是危险的。一些特定的乳酸菌喜欢用果糖代替葡萄糖作为碳源。这些菌株主要是从富含果糖的环境中分离出来的(例如水果、基于果味的发酵食品、蜜蜂的胃肠道等)^[20]。Menezes 等^[21]制备出一种适合 IBS 患者的低 FODMAPs 面包,研究中通过在酸面团中加入特定的发酵剂,从而使果聚糖含量降低了 92%以上,且具有更好的营养和工艺特性。酵母菌也有降解果聚糖的能力,使用酿酒酵母转化酶制作面包可降解约 80%的果聚糖,使用分泌菊粉酶的马克斯克鲁维酵母菌株发酵制作面包可使果聚糖水平降低约 90%^[22]。通过酸面团发酵有效降低谷蛋白、淀粉酶/胰蛋白酶抑制剂和 FODMAPs 的含量,可成为一种预防并改善 IBS 的有效措施。

2 酸面团发酵对生物活性化合物的影响

发酵可以增加生物活性化合物的种类与含量,而这些化合物可以预防与代谢综合征或癌症相关的各种病理和疾病^[23]。谷类食品本身含有多种植物化合物,大致分为类黄酮(相对稀少)和非类黄酮酚类,并随着发酵过程中 pH 值的降低而增加。研究也发现这些化合物具有固有的功能特性,主要是抗氧化活性,加工条件会对其含量和生物利用度产生显著影响^[24]。

酸面团发酵能够显著提高生物活性化合物水平和抗氧化活性。乳酸菌能够合成具有体外抗氧化活性的多肽,并在酸面团中发挥抗炎和清除自由基活性,并且这些肽类物质在最终的产品中也保持了活性。研究表明,尽管在热处理过程中肽的含量有所减少,但它们在面包中的含量仍处于较高水平。Coda 等^[25]通过植物乳杆菌和乳酸乳球菌对小麦、黑麦、燕麦、荞麦、大米、苜蓿、鹰嘴豆、大豆和藜麦等面粉混合物进行酸发酵,制成了富含 GABA 的功能性面包。Raffaele 等^[26]研究发现酸面团发酵能够增加具有抗氧化性的氨基酸、有机酸和芳香族化合物含量,并在 72~96 h 达到最佳的抗氧化活性,这表明酸面团中的蛋白质在微生物

的作用下可以水解生成具有潜在生物活性的氨基酸和多肽。此外,抗氧化活性取决于抗氧化剂的类型以及发酵过程中使用的接种物和基质。Bartkiene 等^[27]将乳酸片球菌接种至大麦酸面团中,使得酚类化合物含量和自由基清除剂活性分别提高了 34.6%和 79.7%。Saa 等^[28]通过旧金山乳杆菌和短乳杆菌发酵得到的酸面团,游离黄酮含量略微增加。Abedfar 等^[29]鉴定出了一株能够产生具有抗氧化活性的胞外多糖的嗜酸乳杆菌。

在加工条件中,酸面团发酵对植物化合物的含量和生物利用度的影响最为显著。酸面团发酵可以提高可提取酚类化合物的水平。Katina 等^[30]发现在发芽黑麦酸面团发酵过程中叶酸和游离酚酸的含量分别增加了 7 倍和 10 倍。图 1 通过一些例子解释了酚类物质变化的机制,现将乳酸菌在酚类化合物代谢的生理意义解释为一种有效的解毒机制^[31]。简单来说,酚酸几乎占膳食酚的三分之一,它们或以可溶性形式存在于细胞质中,或共价结合在植物细胞壁上。通常,可提取酚类化合物的增加是抗氧化能力增强的主要原因。Dordevic 等^[32]通过对几种谷物(荞麦、大麦、小麦、黑麦)的长期发酵,可以提高酚类物质的总含量和提取率。植物

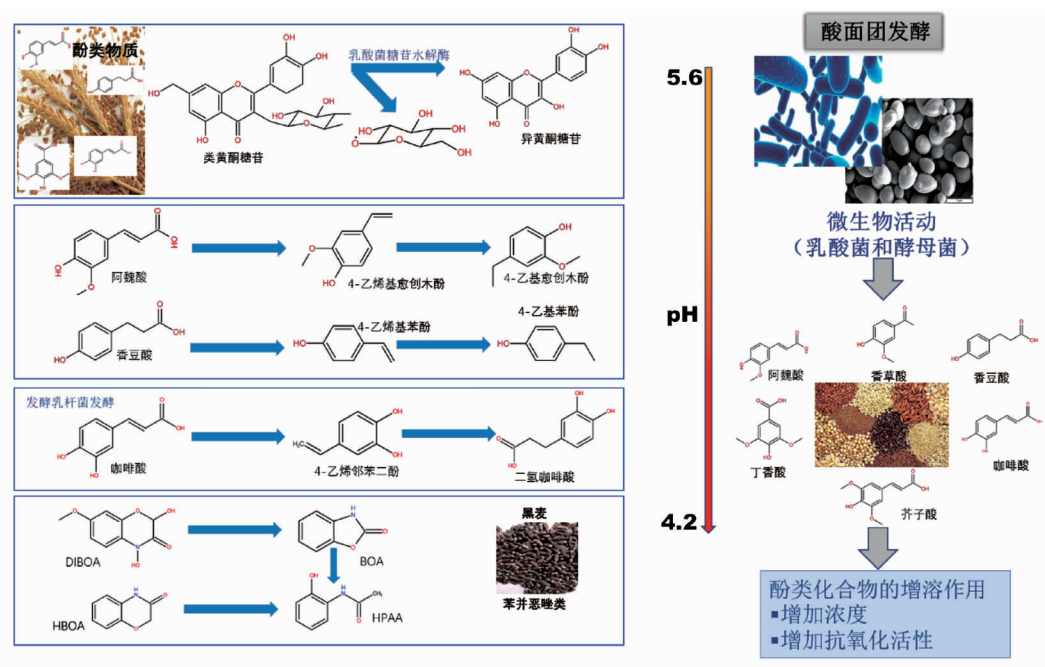


图 1 酸面团发酵过程中乳酸菌对酚类化合物代谢途径^[31]

Fig.1 Metabolic pathway of phenolic compounds by lactic acid bacteria during sour dough fermentation^[31]

乳杆菌和副干酪乳杆菌通过糖苷水解酶来释放来自相应糖苷的黄酮类化合物和异黄酮苷元,之后通过乳酸菌糖苷元代谢途径释放出阿魏酸和香豆酸,首先脱羧成 4-乙基愈创木酚和 4-乙基苯酚,然后分别还原成 4-乙基愈创木酚和 4-乙基苯酚^[33]。发酵乳杆菌将咖啡酸脱羧成 4-乙基邻苯二酚或进一步还原成二氢咖啡酸^[34]。苯并恶唑类化合物(Bx)以稳定的己糖或二己糖共轭形式存在于谷物中,其主要化合物是 2,4-二羟基-1,4-苯并恶唑-3-酮(DIBOA)和 2-羟基-1,4-苯并恶唑-3-酮(HBOA),由于 Bx 及其代谢物对人类健康有潜在的益处,该类多酚物质已引起研究者和消费者的广为关注^[35]。邻乙酰氨基酚(HPA)是黑麦酸面团面包中苯并恶唑类化合物的代谢物,可以来自 DIBOA 和 HBOA,并且酸面团微生物区系具有类似的转化能力^[36]。酸面团的抗氧化活性还依赖于其它补充生理机制,例如许多乳酸杆菌通过分泌抗氧化酶(如超氧化物歧化酶)来加强其固有的细胞抗氧化防御。乳酸杆菌可促进谷胱甘肽的合成,而谷胱甘肽是主要的非酶抗氧化剂和自由基清除剂。

3 酸面团发酵在豆类及碾磨副产品的应用

3.1 豆类在酸面团中的应用

豆科是仅次于谷物的世界上第二大受欢迎的粮食作物,能够提供蛋白质、膳食纤维(DF)、维生素、矿物质、低聚糖和酚类等营养物质,经常食用可以降低患心血管疾病、II 型糖尿病、某些癌症以及超重和肥胖的风险。虽然有许多潜在益处,但世界豆类消费量却低于推荐剂量^[37]。豆类发酵是许多国家的传统加工方式,它具有增强感官特性、提高营养价值和降低抗营养因子等诸多优点。

在日常饮食中,增加豆类食用量的最佳的选择是在配方中加入豆类面粉,并通过微生物发酵来改善产品的感官品质和功能特性。表 1 总结了不同发酵剂对豆类面粉酸面团的相关影响。研究发现虽然在面包加工配方中添加大豆面粉可以提高面包的营养价值,但对面包的流变性和风味有不利影响。马子琳等^[38]在研究中分离出一株高产丹宁酶乳酸菌,并用于发酵红豆、扁豆和蚕豆酸面团,研究发现发酵 24 h 后 3 种酸面团缩合单宁含

量显著下降($P<0.05$),其它抗营养因子含量也大幅下降,并且抗氧化活性和游离氨基酸含量也有不同程度的增加。同时,与不添加菌种面团相比,乳酸菌发酵的酸面团具有着更好的加工性能。曹伟超等^[39]使用功能性乳酸菌来发酵黑豆麦麸酸面团,发现 2 株乳酸菌均能有效改善黑豆麦麸酸面团面包的营养及感官品质,降解植酸,提高生物利用率。Limón 等^[40]利用植物乳杆菌发酵的白芸豆表现出抗高血压活性。Curiel 等^[41]在面包制作时添加 15% 的豆类面粉(鹰嘴豆、扁豆和大豆)制作酸面团,与酵母面包和仅用小麦粉制作的面包相比,豆类酸面团发酵提高了游离氨基酸、植酸酶含量和抗氧化活性,并增加了体外蛋白质的消化率。Coda 等^[42]和程新等^[43]分别采用植物乳杆菌和乳酸乳球菌发酵的蚕豆和白芸豆制作酸面团,其淀粉消化率降低,GI 值降低,同时其它营养指标增加。发酵可提高蛋白质提取率,降低淀粉酶/胰蛋白酶抑制剂活性,提高蛋白质消化率。羽扇豆是一种有价值的蛋白质来源,其必需氨基酸营养平衡良好,而其膳食纤维(占籽粒质量的 27%~31%)也高于其它大多数豆类作物。Bartkiene 等^[44]在制作酸面团面包时,添加全麦羽扇豆粉和羽扇豆粉,在不表现出感官和流变学差异的情况下提高了营养价值。无麸质产品对乳糜泻患者是安全的,在不改变质地并保证其风味以及足够的营养条件下优化配方,具有一定的挑战性。在这一背景下,由于豆类可在食品结构和质地形成方面发挥作用,并具有丰富的营养物质和生物活性化合物,可作为一种低 GI 成分而备受关注^[45]。

豆类中存在的抗营养因子是其膳食开发的主要限制因素之一。这些抗营养因子中的一些(如蛋白酶抑制剂和凝集素)是不耐热的,热处理可以消除在食用过程中的负面影响,而其它的抗营养因子(如植酸、棉子糖、单宁、皂苷)是热稳定的。通过发酵剂发酵可以降低豆类中存在的抗营养因子的活性,例如:蚕豆酸面团的发酵显著降低了胰蛋白酶抑制剂活性和缩合单宁的含量(富含蛋白质部分约为 40%)^[42,46]。Starzyńska 等^[47]研究了草豌豆酸面团,发现发酵会导致 α -半乳糖苷、单宁、植酸和胰蛋白酶抑制剂活性部分或完全消失。在发酵过程中,乳酸杆菌转化或水解棉子糖家族寡糖

(RFOs)^[48], α -半乳糖苷酶和乳酸菌发酵处理可显著降低豆类中 RFOs 的含量。因此,采用脱皮、浸泡、发芽、空气分级、挤压和热处理或酶处理等方

法虽都可以有效减少或消除豆类中的抗营养因子,但发酵仍是最有效且具有前景的措施。

表 1 不同发酵剂代谢豆类面粉酸面团的主要营养和功能优势

Table 1 Main nutritional and functional advantages of legume flour sourdough metabolized by different starters

豆类面粉	发酵剂	影响	参考文献
红豆、扁豆、蚕豆	发酵乳杆菌 D23 (<i>L. fermentum</i> D23)	缩合单宁含量显著下降 ($P < 0.05$), 游离多酚含量、小分子多肽和必需氨基酸含量增加	[38]
黑豆	乳酸片球菌 L-19 (<i>Pediococcus acidilactici</i> L-19)、戊糖片球菌 J-28 (<i>Pediococcus pentosaceus</i> J-28)	植酸降解, 可溶性膳食纤维浓度、游离氨基酸含量、体外蛋白消化率升高	[39]
白芸豆	植物乳杆菌 ATCC 14917 (<i>L. plantarum</i> ATCC 14917)	GABA 和 ACE 抑制肽的合成	[40]
鹰嘴豆、草豌豆、扁豆、豌豆	植物乳杆菌 C48 (<i>L. plantarum</i> C48)、短乳杆菌 AM7 (<i>L. Brevis</i> AM7)	植酸酶活性、游离氨基酸、GABA、可溶性膳食纤维和总酚浓度增加, 棉子糖和单宁浓度减少	[41]
蚕豆	戊糖球菌 I02 (<i>Pediococcus pentosaceus</i> I02)	蛋白质含量及消化率、游离氨基酸含量、营养指标增加, 预测血糖指数降低	[42]
白芸豆	植物乳杆菌 LPL-1 (<i>Lactobacillus plantarum</i> LPL-1)、戊糖片球菌 KID7 (<i>Pediococcus pentosaceus</i> KID7)、马克斯克鲁维酵母 ATCC36534 (<i>Kluyveromyces marxianus</i> ATCC36534)	抑制 α -淀粉酶活性, 显著降低淀粉消化率和 GI	[43]
羽扇豆	乳酸链球菌 M1807 (<i>Pediococcus acidilactici</i> M1807)	胰蛋白酶抑制剂活性降低, 蛋白质消化率增加	[44]
蚕豆	I 型酸面团、植物乳杆菌 DPPMF B24W (<i>L. Plantarum</i> DPPMF B24W)	降低浓缩丹宁浓度, 胰蛋白酶抑制剂活性	[46]
草豌豆	植物乳杆菌 DSM 20174 (<i>L. plantarum</i> DSM 20174)	降低植酸浓度和胰蛋白酶抑制剂活性	[47]

3.2 碾磨副产品在酸面团中的应用

麸皮和胚芽(胚)是碾磨的副产品,其膳食纤维含量很高,且含有多种功能性化合物。不同的加工工艺可以提高麸皮的生物价值,也可以消除一些技术缺陷,如减少烘焙食品的体积损失和消除令人不愉快的味道。碾磨工艺对于不同尺寸的麸皮颗粒而言十分重要,不同尺寸的麸皮颗粒虽对烘焙食品的生产会产生不同的影响,但将麸皮酸面团发酵与酶结合,依然是提高麸皮生物价值的最好方法^[49]。表 2 列举了不同碾磨副产品制备的酸面团对面包品质的影响。Hartikainen 等^[50]通过对小麦和黑麦麸皮进行酸面团发酵,成功地改善

了面包的体积、结构、风味和货架期,减弱麸皮的异味。Coda 等^[51]采用短乳杆菌和甜菜酿酒酵母发酵麦麸提高了面团的抗氧化活性、肽和游离氨基酸含量以及体外蛋白质消化率。孙银凤等^[52]使用旧金山乳杆菌发酵小麦和麦麸混合物制备酸面团,发现发酵可以改善面包的比容、感官品质和老化特性。

此外,小麦胚芽是小麦籽粒中营养价值最高的部分,含有 α -生育酚、维生素、矿物质和蛋白质等,具有很高的生物学价值。然而,胚芽中也含有甘油三酯、脂肪酶和脂氧合酶,这种底物和相关酶的存在导致面粉在贮藏和面包制作过程中的氧

化。酸面团发酵可以很好地解决这个问题。Rizzello 等^[53]采用乳酸菌发酵小麦胚芽酸面团,发现贮藏 40 d 后,脂肪酶活性明显下降,大部分由脂质氧化而产生的挥发性化合物消失,并且游离氨基酸

含量提高约 50%,体外蛋白消化率、总酚、植酸酶和抗氧化活性增加。将碾磨副产品通过酸面团发酵,可以大大提高产品的营养价值,并对食品加工的可持续性和废物的再利用有着深远的影响。

表 2 不同碾磨副产品制备的酸面团对面包品质的影响

Table 2 Effects of sourdough prepared from different milling by-products on the quality of bread

碾磨副产品	发酵剂	影响	参考文献
小麦、黑麦麸	酿酒酵母 (<i>S. cerevisiae</i>)、木聚糖酶、 α -淀粉酶	增加面包体积,减少硬度,具有更小的颗粒尺寸、更低的糊化黏度、更好的抗拉伸性以及更高的二氧化碳产量	[50]
麦麸	短乳杆菌 E95612 (<i>Lactobacillus brevis</i> E95612)、少孢哈萨克斯坦酵母 C81116 (<i>Kazachstania exigua</i> C81116)、木聚糖酶、 α -淀粉酶	提高抗氧化活性,体外蛋白质消化率,多肽和游离氨基酸浓度	[51]
小麦、麦麸(混合物)	旧金山乳杆菌	改善面包比容和感官品质,延缓老化	[52]
小麦胚芽	植物乳杆菌 LB1 (<i>Lactobacillus plantarum</i> LB1)、罗氏乳杆菌 LB5 (<i>Lactobacillus rossiae</i> LB5)	游离氨基酸、GABA、体外蛋白质消化率、总酚含量、植酸酶活性和抗氧化活性增加,棉子糖浓度下降	[53]

4 结语与展望

随着酸面团发酵技术焙烤出的产品所具有的优势越来越受到公众的认识和认可,酸面团的研究受到广泛关注。酸面团发酵具有多种功能特性,其对烘焙食品的流变学特性、感官品质和货架期等的影响已被大量研究所证实。一些新的功能特性逐渐被开发出来,尤其是烘焙食品中的盐分减少、IBS 饮食管理、生物活性物质的合成以及具有高营养价值的非传统风味食品的开发。在食品加工的可持续性和自然性以及减少废物的时代,酸面团发酵的潜力需要得到充分开发。对于酸面团发酵今后的工作重点应放在有针对性的工艺和选择最佳的乳酸菌和酵母菌上,而这取决于原料的功能和营养特性以及食品中所需的特性。

参 考 文 献

- [1] ALBA M G, MONTSERRAT R A, ELVIRA L T. Influence of process parameters on sourdough microbiota, physical properties and sensory profile[J]. Food Reviews International, 2021, 39(1): 1-15.
- [2] JUAN F P, PAESANI C, MANUEL G. Sourdough technology as a tool for the development of healthier grain-based products: An update[J]. Agronomy, 2020, 10(12): 1962.
- [3] PLESSAS S. Innovations in sourdough bread making[J]. Fermentation, 2021, 7(1): 29.
- [4] FEKRI A, TORBATI M, KHOSROSHAHI A Y, et al. Functional effects of phytate-degrading, probiotic lactic acid bacteria and yeast strains isolated from iranian traditional sourdough on the technological and nutritional properties of whole wheat bread[J]. Food Chemistry, 2020, 306(2): 125620.
- [5] 廖兰, 文晓艳, 陈林萍, 等. 植物乳杆菌 B02012 对酸面团小麦蛋白结构和免疫特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 22-29.
LIAO L, WEN X Y, CHEN L P, et al. Impacts of *Lactobacillus plantarum* B02012 on gluten structure and immunoreactivity in sourdough[J]. Food Science, 2019, 40(17): 22-29.
- [6] CODINĂ G G, VOINEA A, DABIJA A. Strategies for reducing sodium intake in bakery products: A review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3093.
- [7] VOINEA A, STROE S G, CODINĂ G G. The effect of sodium reduction by sea salt and dry sourdough addition on the wheat flour dough rheological prop-

- erties[J]. *Foods*, 2020, 9(5): 610.
- [8] ZHAO C J, KINNER M, WISMER W, et al. Effect of glutamate accumulation during sourdough fermentation with *Lactobacillus reuteri* on the taste of bread and sodium-reduced bread[J]. *Cereal Chemistry*, 2015, 92(2): 224–230.
- [9] RIZZELLO C G, NIONELLI L, CODA R, et al. Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread[J]. *European Food Research & Technology*, 2010, 230(4): 645–654.
- [10] CHI M S, PĂUCEAN A, MAN S M, et al. Quinoa sourdough fermented with *Lactobacillus plantarum* ATCC 8014 designed for gluten-free muffins – A powerful tool to enhance bioactive compounds[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 7140.
- [11] FANARI F, DESOGUS F, SCANO E A, et al. The effect of the relative amount of ingredients on the rheological properties of semolina doughs[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 1–14.
- [12] ANAMARIA C, LOGHIN F, MIERE D, et al. Diet in irritable bowel syndrome: What to recommend, not what to forbid to patients! [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2017, 23(21): 3771–3783.
- [13] LAURENT J, STRUYF N, AN B, et al. The potential of *Kluyveromyces marxianus* to produce low-FODMAP straight-dough and sourdough bread: A pilot-scale study[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(10): 1920–1935.
- [14] CARLO C, ARMIN A, CHRISTIAN B, et al. The overlapping area of non-celiac gluten sensitivity (NCGS) and wheat-sensitive irritable bowel syndrome (IBS): An update[J]. *Nutrients*, 2017, 9(12): 1268.
- [15] CALASSO M, FRANCAVILLA R, CRISTOFORI F, et al. New protocol for production of reduced-gluten wheat bread and pasta and clinical effect in patients with irritable bowel syndrome: A randomised, double-blind, cross-over study[J]. *Nutrients*, 2018, 10(12): 1873.
- [16] JOSÉ A C, ROSSANA C A, ANTONIO L, et al. Manufacture and characterization of pasta made with wheat flour rendered gluten-free using fungal proteases and selected sourdough lactic acid bacteria[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(1): 79–87.
- [17] BARBARA P, EMANUELE N, DA NIELA G, et al. Postprandial gastrointestinal function differs after acute administration of sourdough compared with brewer's yeast bakery products in healthy adults[J]. *Journal of Nutrition*, 2018, 148(2): 202–208.
- [18] ROEST R D, DOBBS B, CHAPMAN B, et al. The low FODMAP diet improves gastrointestinal symptoms in patients with irritable bowel syndrome: A prospective study[J]. *International Journal of Clinical Practice*, 2013, 67(9): 895–903.
- [19] REIJO L, JARI K, SANNA-MARIA H, et al. Pilot study: Comparison of sourdough wheat bread and yeast-fermented wheat bread in individuals with wheat sensitivity and irritable bowel syndrome [J]. *Nutrients*, 2017, 9(11): 1215.
- [20] ENDO A, FUTAGAWA-ENDO Y, DICKS L. Isolation and characterization of fructophilic lactic acid bacteria from fructose-rich niches[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, 32(8): 593–600.
- [21] MENEZES L A A, DE MARCO I, DOS SANTOS N N O, et al. Reducing FODMAPs and improving bread quality using type II sourdough with selected starter cultures[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2021, 72(7): 912–922.
- [22] STRUY N, LAURENT J, VERSPREET J, et al. *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* cocultures allow reduction of fermentable oligo-, di-, and monosaccharides and polyols levels in whole wheat bread[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(39): 8704–8713.
- [23] RIZZELLO, CARLO G, TAGLIAZUCCHI D, et al. Bioactive peptides from vegetable food matrices: Research trends and novel biotechnologies for synthesis and recovery[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 27: 549–569.
- [24] HASSANI A, PROCOPIO S, BECKER T. Influence of malting and lactic acid fermentation on functional bioactive components in cereal-based raw materials: A review paper[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(1): 14–22.
- [25] CODA R, RIZZELLO C G, GOBBETTI M. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of γ -aminobutyric acid (GABA)[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 137(2/3): 236–245.
- [26] RAFFAELE C, MORENA G, MARIO C, et al. The

- effect of sourdough fermentation on *Triticum dicoccum* from Garfagnana: ^1H NMR characterization and analysis of the antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305(1): 125510.
- [27] BARTKIENE E, VIZBICKIENE D, BARTKEVICIUS V, et al. Application of *Pediococcus acidilactici* LUHS29 immobilized in apple pomace matrix for high value wheat-barley sourdough bread[J]. *LWT*, 2017, 83(5): 157-164.
- [28] SAA D T, SILVESTRO R D, DINELLI G, et al. Effect of sourdough fermentation and baking process severity on dietary fibre and phenolic compounds of immature wheat flour bread[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2017, 83(9): 26-32.
- [29] ABEDFAR A, ABBASZADEH S, HOSSEININEZHAD M, et al. Physicochemical and biological characterization of the EPS produced by *L. acidophilus* isolated from rice bran sourdough[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2020, 127(7): 109373.
- [30] KATINA K, LIUKKONEN K H, KAUKOVIRTA-NORJA A, et al. Fermentation-induced changes in the nutritional value of native or germinated rye[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3): 348-355.
- [31] GOBBETTI M, DE ANGELIS M, DI CAGNO R, et al. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 302(8): 103-113.
- [32] DORDEVIC T M, SILER-MARINKOVIC S S, DIMITRIJEVIC-BRANKOVIC S I. Effect of fermentation on antioxidant properties of some cereals and pseudo cereals[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 957-963.
- [33] FILANNINO P, DI CAGNO R, GOBBETTI M, et al. Metabolic and functional paths of lactic acid bacteria in plant foods: Get out of the labyrinth[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, 49(2): 64-72.
- [34] SVENSSON L, SEKWATI-MONANG B, LUTZ D L, et al. Phenolic acids and flavonoids in nonfermented and fermented red sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2010, 58(16): 9214-9220.
- [35] DIHM K, LIND M V, SUNDEN H, et al. Quantification of benzoxazinoids and their metabolites in Nordic breads[J]. *Food Chemistry*, 2017, 235(11): 7-13.
- [36] KATI H, PEKKA K, LAPPI J, et al. The postprandial plasma rye fingerprint includes benzoxazinoid-derived phenylacetamide sulfates[J]. *Journal of Nutrition*, 2014, 144(7): 1016-1022.
- [37] MCCRORY M A, HAMAKER B R, LOVEJOY J C, et al. Pulse consumption, satiety, and weight management[J]. *Advances in Nutrition*, 2010, 1(1): 17-30.
- [38] 马子琳, 曹伟超, 张宾乐, 等. 产单宁酶乳酸菌发酵红豆、扁豆酸面团的生化特性及其对馒头体外消化的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 85-98.
- MA Z L, CAO W C, ZHANG B L, et al. Biochemical characteristics of tannase-producing LAB fermented red beans and lentils sourdough and its effects on *in vitro* digestibility of steamed bread[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(19): 85-98.
- [39] 曹伟超, 张宾乐, 黄璟, 等. 功能性乳酸菌发酵黑豆麦麸酸面团面包的营养及烘焙特性[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 142-150.
- CAO W C, ZHANG B L, HUANG J, et al. The nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 142-150.
- [40] LIMÓN R I, PEAS E, TORINO M I, et al. Fermentation enhances the content of bioactive compounds in kidney bean extracts[J]. *Food Chemistry*, 2015, 172(1): 343-352.
- [41] CUIEL J A, CODA R, CENTOMANI I, et al. Exploitation of the nutritional and functional characteristics of traditional Italian legumes: The potential of sourdough fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 196(3): 51-61.
- [42] CODA R, VARIS J, VERNI M, et al. Improvement of the protein quality of wheat bread through faba bean sourdough addition[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82(9): 296-302.
- [43] 程新, 黄璟, 张宾乐, 等. 湿热处理和混菌发酵对白芸豆面包淀粉消化率的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 59-65.
- CHENG X, HUANG J, ZHANG B L, et al. Effects of heat-moisture treatment and mixed culture fermentation on starch digestibility of white kidney bean bread[J]. *Food and Fermentation Industries*,

- 2021, 47(13): 59–65.
- [44] BARTKIENE E, JUODEIKIENE G, VIDMANTIENE D, et al. Nutritional and quality aspects of wheat sourdough bread using *L. luteus* and *L. angustifolius* flours fermented by *Pediococcus acidilactici*[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(8): 1724–1733.
- [45] MELINI F, MELINI V, LUZIATELLI F, et al. Current and forward-looking approaches to technological and nutritional improvements of gluten-free bread with legume flours: A critical review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2017, 16(5): 1101–1122.
- [46] CODA R, MELAMA L, RIZZELLO C G, et al. Effect of air classification and fermentation by *Lactobacillus plantarum* VTT E-133328 on faba bean (*Vicia faba* L.) flour nutritional properties[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 193(1): 34–42.
- [47] STARZYŃSKA J A, STODOLAK B. Effect of inoculated lactic acid fermentation on antinutritional and antiradical properties of grass pea (*Lathyrus sativus* 'Krab') flour[J]. Polish Journal of Food & Nutrition Sciences, 2011, 61(4): 245–249.
- [48] TEIXEIRA J S, MCNEILL V, GAENZLE M G. Levansucrase and sucrose phosphorylase contribute to raffinose, stachyose, and verbascose metabolism by *Lactobacilli*[J]. Food Microbiology, 2012, 31(2): 278–284.
- [49] CODA R, KATINA K, RIZZELLO C G. Bran bioprocessing for enhanced functional properties[J]. Current Opinion in Food Science, 2015, 1(2): 50–55.
- [50] HARTIKAINEN K, POUTANEN K, KATINA K. Influence of bioprocessed wheat bran on the physical and chemical properties of dough and on wheat bread texture[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(2): 115–123.
- [51] CODA R, RIZZELLO C G, CURIEL J A, et al. Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 25(10): 19–27.
- [52] 孙银凤, 徐岩, 黄卫宁, 等. 不同发酵基质的酸面团对酵母面团体系面包烘焙及老化特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 37–42.
- SUN Y F, XU Y, HUANG W N, et al. Impacts of sourdoughs made from different media on bread baking and staling properties of yeast dough system [J]. Food Science, 2015, 36(13): 37–42.
- [53] RIZZELLO C G, NIONELLI L, CODA R, et al. Effect of sourdough fermentation on stabilisation, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ[J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 1079–1089.

Functional Characteristics of Sourdough and the Application in Beans and Milling By-products

Wang Weijun¹, Fang Luping², Dou Zhixia², Lü Mei², Cai Liqin², Li Yanhua^{2*}

¹Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji 311800, Zhejiang

²School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University/Key Laboratory for Food Microbial Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018)

Abstract Sourdough fermentation affects the rheological, sensory and shelf-life attributes of baked goods, and can effectively improve the functional, nutritional and application quality of baked goods. Sourdough fermentation plays a positive role in extending the shelf life of baked goods, improving flavor, delaying bread aging, reducing glycemic index, increasing mineral bioavailability, and reducing gluten content. At the same time, sourdough fermentation could reduce salt content in foods to prevent hypertension, improve irritable bowel syndrome, and promote synthesis/release of bioactive compounds (especially phenolic compounds). Sourdough fermentation also has great application advantages in increasing the development potential of non-traditional food products (such as beans) and milling by-products (bran and germ). The above will provide new ideas for the application development, quality improvement and research of functional properties of sourdough products.

Keywords sourdough; fermentation; functional properties; legumes; milling by-products; application quality