DOI:10.12441/spyswjs.20251114001 [文章编号] 1673-1689(2026)08-0014-10

产右旋糖酐全麦酸面团的发酵特性及其对面包品质的影响

冯 倩 何美云 王东旭 张志红 刘 青 关桦楠 张 瑶*

(江苏科技大学粮食学院,江苏 镇江 212100)

摘要:【目的】明确产右旋糖酐全麦酸面团(DWWS)在改善全麦面包品质方面的效果。**【方法】**以全麦酸面团(WWS)、化学酸化全麦酸面团(CAWWS)为对照面团,比较3种全麦酸面团(DWWS、WWS、CAWWS)的发酵特性,包括pH、可滴定酸度(TTA)和胞外多糖(EPS)质量分数,并通过质构特性分析、水分质量分数测定、老化率测定及感官评价,对由3种酸面团制备的全麦面包品质差异进行系统评估。**【结果】**25 ℃下发酵24 h后,DWWS的pH下降了19.45%,TTA增长了113.86%;而WWS的pH下降了16.92%,TTA增长了63.55%。随着全麦粉质量分数的提高,由3种酸面团制备的全麦面包的品质均呈下降趋势,但DWWS有效缓解了高全麦粉添加对面包品质的不利影响。与添加WWS和CAWWS的全麦面包相比,由DWWS制备的全麦面包在烘焙当天的硬度、咀嚼性和胶着性更低,水分质量分数、内聚性和回复性更高,从而获得更高的感官评分。此外,DWWS能明显抑制全麦面包的老化,由DWWS制备的全麦面包的水分损失率和老化率均降低。**【结论】**DWWS可作为一种天然食品改良剂,为全麦面包产品的品质优化提供技术支持。

关键词:酸面团;发酵特性;右旋糖酐;全麦面包品质

Fermentation Characteristics of Dextran-producing Whole Wheat Sourdough and Its Effects on Bread Quality

FENG Qian HE Meiyun WANG Dongxu ZHANG Zhihong LIU Qing
*GUAN Hua'nan ZHANG Yao**

(School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to elucidate the effectiveness of dextran-enriched whole wheat sourdough (DWWS) in improving whole wheat bread quality. [**Method**] Whole wheat sourdough (WWS) and chemically acidified whole wheat sourdough (CAWWS) were used as controls. The fermentation characteristics of DWWS, CAWWS, and WWS were determined by measuring pH, titratable acidity (TTA), and the mass fraction of exopolysaccharide (EPS). Subsequently, the quality differences of whole wheat bread samples prepared with DWWS, CAWWS, and WWS were systematically evaluated through texture profile analysis, moisture mass fraction determination, staling rate measurement, and sensory evaluation. [**Result**] After the fermentation at 25 ℃ for 24 h, DWWS showed a pH decrease of 19.45% and a TTA increase of 113.86%, while WWS exhibited a pH decrease of 16.92% and a TTA increase of 63.55%. As the mass fraction of whole wheat flour increased, the quality of whole wheat bread samples produced with the three types of sourdough showed a declining trend. However, DWWS effectively mitigated the adverse effect of high addition of whole wheat flour on bread quality. Compared with the whole wheat bread samples prepared with WWS and CAWWS, that prepared with DWWS exhibited lower

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32502276);江苏省高校自然科学基金面上项目(25KJB550002)。
通信作者:张瑶(1992—),女,博士,讲师,主要从事粮油食品加工研究。E-mail:yaozhang@just.edu.cn
收稿日期:2025-11-14 **修回日期:**2026-01-15

hardness, chewiness, and gumminess on the day of baking, as well as higher moisture mass fraction, springiness, cohesiveness, resilience, and sensory evaluation scores. Moreover, DWWS markedly inhibited whole wheat bread staling, as evidenced by the reduced moisture loss and staling rate. [**Conclusion**] DWWS can serve as a natural food quality improver and provides technical support for the quality optimization of whole wheat bread products.
Keywords: sourdough; fermentation characteristics; dextran; whole wheat bread quality

全麦粉由整粒小麦精细加工制成，保留了胚芽和麸皮，富含维生素、膳食纤维、矿物质及抗氧化活性物质，具有较高的营养价值和潜在的健康促进作用[1-2]，因此备受关注。然而，由于小麦胚芽及麸皮的存在，全麦面包产品存在色泽深、体积小、质地粗糙及易老化等问题，导致消费者接受度较低[3]。

目前，酸面团发酵作为一种天然的谷物发酵方法，是提升谷物产品品质的有效途径[4-5]。根据发酵方式，酸面团可分为自然发酵、人为接种发酵及混合型发酵3类[6]。自然发酵酸面团多呈固态，微生物来源于环境，并通过保留上一批面团作为发酵剂实现连续发酵，具有操作简便、发酵活性高的特点。人工接种酸面团多呈半流体状态，适用于工业化生产，便于运输与贮藏，可作为酸化剂或风味增强剂，但产气能力不足，需与酵母配合使用。混合型发酵酸面团通常经干燥制成粉末，含耐干燥型乳酸菌，使用时同样需要补充酵母。在酸面团发酵过程中，乳酸菌和酵母菌利用面粉中的脂质、蛋白质和碳水化合物，经初级和次级代谢活动，生成有机酸、胞外多糖（EPS）及生物活性物质，从而改善谷物产品的感官品质和营养特性[7]。其中，EPS是在右旋糖酐蔗糖酶的催化下，由蔗糖水解与聚合反应合成的，而右旋糖酐是乳酸菌在生长代谢过程中分泌至细胞壁外的一种同质型EPS。研究表明，外源添加蔗糖可有效提高EPS产量[8]。已有大量研究证实，右旋糖酐是一种有效的“绿色型”面包品质改良剂。Bi等[9]利用产右旋糖酐酸面团显著改善了小麦面包的品质。Wang等[10]研究发现，产右旋糖酐酸面团显著增强了全麦珍珠粟面团的流变性，提高了成品面包的弹性和柔软性，同时降低了酸味和苦味。右旋糖酐对面包品质的改善机理与亲水胶体相似，主要基于提高淀粉颗粒的热稳定性，抑制直链淀粉的短期回生，通过锁住更多水分发挥增塑作用，从而减缓支链淀粉的重结晶进程[11-12]。此外，Zhang等[13]研究发现，酸性环境对右旋糖酐具有协同增效作用。因此，利用产右旋糖酐酸面团改善全麦面包品质具有可行性。

酸面团已广泛用于改善全麦面包品质。王博等[14]研究发现，经乳酸菌发酵的酸面团可显著降低全麦面包中不溶性膳食纤维质量分数，同时提高水溶性膳食纤维质量分数，从而改善全麦面包的口感，使其更易消化。酸面团的添加可明显提高全麦面包的营养价值，如增加游离酚类质量分数、增强抗氧化活性等[15]。但目前针对产右旋糖酐酸面团对全麦面包产品品质的影响研究较少。李子兴等[16]证实，添加产右旋糖酐酸面团可有效改善大麦面包的品质。有研究表明，肠膜明串珠菌（*Leuconostoc mesenteroides*）ATCC8293可产生较多右旋糖酐[9]，因此作者选取该菌株制备产右旋糖酐全麦酸面团。首先分析全麦酸面团的发酵特性，随后评价其制备的全麦面包的品质特性，并从面团特性的角度揭示其改善全麦面包品质的原因，为开发营养丰富且风味出众的全麦面包产品提供理论基础与技术指导。

1　材料与方法

1.1　材料

Leuconostoc mesenteroides ATCC8293：中国普通微生物菌种保藏管理中心；全麦粉、小麦粉：新乡市新良粮油加工有限责任公司；黄油、耐高糖型干酵母：安琪酵母股份有限公司；白砂糖：镇江市当地市场；食盐：中盐上海市盐业有限公司；麦芽提取物、麦芽糖、胰蛋白胨、葡萄糖、果糖、牛肉浸出物、酵母提取物、磷酸氢二钠、氯化铵、磷酸二氢钠、吐温-80、*L*-半胱氨酸盐酸一水合物、硫酸锰一水合物、硫酸镁、三氯乙酸、乙醇、苯酚、硫酸：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2　仪器与设备

电子天平：JY10002型，上海精密科学仪器有限公司；立式压力蒸汽灭菌器：SQ810C型，日本Yamato Scientific公司；超净台：SDC型，山东博科生物产业有限公司；台式高速冷冻离心机：

ClenLee16R 型，湖南湘立科学仪器有限公司；pH 计：PHS-25 型，上海仪电科学仪器股份有限公司；培养箱：GHP-9050N 型，上海一恒科学仪器有限公司；紫外分光光度计：T6 型，北京普析通用仪器有限责任公司；醒发箱：SM-32S 型，新麦机械（中国）股份有限公司；烤箱：SM2-523H 型，新麦机械（中国）股份有限公司；电热鼓风干燥箱：DHG-9240A 型，上海一恒科学仪器有限公司；质构仪：TA.XTC-18 型，上海保圣实业发展有限公司。

1.3 方法

1.3.1 改良 MRS（mMRS）培养基的制备

1）mMRS 液体培养基：麦芽提取物 10.0 g、麦芽糖 10.0 g、胰蛋白胨 10.0 g、葡萄糖 5.0 g、果糖 5.0 g、牛肉浸出物 5.0 g、酵母提取物 5.0 g、磷酸氢二钠 4.0 g、氯化铵 3.0 g、磷酸二氢钠 2.6 g、吐温-80 1.0 g、*L*-半胱氨酸盐酸一水合物 0.6 g、硫酸锰一水合物 0.1 g、硫酸镁 0.1 g，将上述组分溶于去离子水中并定容至 1.0 L。

2）mMRS 固体培养基：在 1.0 L 液体培养基中加入 15.0 g 琼脂。

1.3.2 新鲜菌悬液的制备

使用接种环蘸取 *Leuconostoc mesenteroides* ATCC8293，在 mMRS 固体培养基平板上划线，30 ℃恒温培养 48 h。随后，在平板上挑取单菌落，接种于 1.0 mL mMRS 液体培养基中，30 ℃恒温培养 16 h。取 0.1 mL 上述液体培养基加入 10.0 mL mMRS 液体培养基中，30 ℃恒温培养 16 h，于 5 000 r/min 离心 5 min，获得菌体，于 10.0 mL 无菌水复溶，即为新鲜菌悬液。

1.3.3 全麦酸面团的制备

称取全麦粉 100 g、菌悬液 100 g、底物蔗糖 15 g，于无菌烧杯中混合均匀，加入新鲜菌悬液，全麦酸面团的初始菌落数为 10^7 CFU/g[17]，于 25 ℃恒温发酵 24 h，即为产右旋糖酐全麦酸面团（DWWS）。不添加底物蔗糖，以相同的方法制得全麦酸面团（WWS）。将新鲜菌悬液换成 100 g 无菌去离子水，同时添加摩尔比 4∶1 的乳酸和乙酸混合液，调节 pH 至 3.8~3.9，即为化学酸化全麦酸面团（CAWWS）。

1.3.4 全麦酸面团 pH 和可滴定酸度（TTA）的测定

取 1.0 g 全麦酸面团样品，加入无菌水稀释 10 倍，获得全麦酸面团稀释液，测定 3 种全麦酸面团的 pH。取全麦酸面团稀释液，加入 3 滴质量分数 0.1% 的酚酞溶液，用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液滴定，至溶液由乳白色变为粉红色且 30 s 不褪色，记录消耗的氢氧化钠体积，即为 TTA。

1.3.5 全麦酸面团 EPS 产量的测定

取 10.0 g 发酵 24 h 的全麦酸面团，加入 20.0 mL 去离子水稀释，4 ℃振荡 1 h，于 11 000 r/min 离心 20 min。取 19.0 mL 上清液，加入 1.0 mL 质量分数为 80% 的三氯乙酸，4 ℃静置 16 h，于 12 000 r/min 离心 30 min。取 5.0 mL 上清液，加入 15.0 mL 体积分数 95% 的冷乙醇，4 ℃静置 16 h，于 12 000 r/min 离心 30 min。取沉淀，于 5.0 mL 去离子水复溶，转移至透析袋中，并置于纯水中，于层析柜中透析 48 h，每 8 h 换一次水。采用苯酚-硫酸法并按文献[18]的方法计算全麦酸面团中 EPS 产量。取 1.0 mL 待测液，加入刚配制好的质量分数 6% 的苯酚溶液，再快速加入 5.0 mL 体积分数 98% 的硫酸，振荡 5 min，室温下冷却 30 min，于 490 nm 测定吸光度。配制不同质量浓度的葡萄糖溶液，测定吸光度，绘制葡萄糖标准曲线（y=3.411x−0.017 9，R^2=0.971 9）。

1.3.6 全麦面包的制备

根据表 1 配方，制备产右旋糖酐全麦酸面团面包（DWWSB）、全麦酸面团面包（WWSB）和化学酸化全麦酸面团面包（CAWWSB），其中酸面团质量分数为 20%，全麦粉质量分数分别为 50%、60%、70%、80%、90%。预先准备全麦-小麦混合粉，称

表 1 全麦面包配方

Table 1 Recipes of whole wheat bread

组别	酸面团质量/g	全麦粉质量/g	小麦粉质量/g	黄油质量/g	食盐质量/g	酵母质量/g	白砂糖质量/g	水质量/g
质量分数 50% 全麦粉	20	40	50	4	1	1.4	7.2	50
质量分数 60% 全麦粉	20	50	40	4	1	1.4	7.2	50
质量分数 70% 全麦粉	20	60	30	4	1	1.4	7.2	50
质量分数 80% 全麦粉	20	70	20	4	1	1.4	7.2	50
质量分数 90% 全麦粉	20	80	10	4	1	1.4	7.2	50

量食盐、酵母、白砂糖、水和酸面团，加入和面机中，先低速搅拌至面团初步形成后，加入黄油，高速搅拌，直至面团形成光滑有筋膜的结构。然后，将面团分割成40 g小面团，搓圆，醒发（温度38 ℃，湿度80%）至体积分数增大到150%。最后，置于200 ℃的烤箱中焙烤20 min。烘烤完成后，冷却1 h，置于塑料自封袋中保存，以备后续分析。

1.3.7　全麦面包的全质构分析

将全麦面包切片，取厚度25 mm的中心面包片用于全麦面包的全质构分析。参数设置：TA/20 R圆柱形探头，返回距离40 mm，测试速度1 mm/s；目标模式为形变，时间间隔2 s，目标压缩率40%；测试类型为下压，触发类型为力，0.049 N触发点值。

1.3.8　全麦面包的感官评价

依据GB/T 20981—2021[19]的感官评价标准，制定评分表。感官评定小组由10名成员组成，对全麦面包的5个方面进行感官评价，见表2。

表2　感官评分表

Table 2　Sensory evaluation scoring criteria

项目	评分标准	得分/分
色泽	面包表面呈均匀的棕黄色	15~20
	面包棕黄色较适中、较均匀	8~14
	面包色泽过深或过浅、不均匀	0~7
气味	气味适中，具有典型的全麦味和发酵香味，无异味	15~20
	气味过浓，全麦味和发酵气味浓郁，无异味	8~14
	发酵后和焙烤后的面包香味不明显，有异味	0~7
口感	口感适中，发酵味和酸度适中	15~20
	整体味道偏重，口感偏酸	8~14
	味道偏淡，无典型全麦面包味道	0~7
质地	气孔均匀、有弹性，切片不掉渣	15~20
	组织较粗糙，弹性较差，掉渣不明显	8~14
	粗糙、发硬，弹性差，掉渣明显	0~7
外形	外形完整饱满，无裂纹，无气泡	15~20
	形态较为完整饱满，无明显裂纹	8~14
	有塌陷现象，有明显裂纹，有烤焦现象	0~7

1.3.9　全麦面包水分质量分数的测定

根据GB 5009.3—2016的方法测定全麦面包的水分质量分数[20]。首先称量铝盒的质量，取适量全麦面包样品置于铝盒中，放入烘箱（105 ℃，24 h）中烘干，最后放入干燥皿中恒重处理24 h，按式（1）计算全麦面包的水分质量分数。

$$w=\frac{m_1-m_2}{m_1-m_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

w——全麦面包的水分质量分数，%；

m_0——铝盒的质量，g；

m_1——干燥前样品和铝盒的质量，g；

m_2——恒重后样品和铝盒的质量，g。

1.3.10　全麦面包水分损失率的测定

依据不同贮藏时间的全麦面包水分质量分数，按式（2）计算全麦面包的水分损失率。

$$r_w=\frac{w_0-w_n}{n}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

r_w——全麦面包的水分损失率，%/d；

w_n——贮藏n天后全麦面包的水分质量分数，%；

w_0——烘焙当天全麦面包的水分质量分数，%；

n——贮藏时间，d。

1.3.11　全麦面包老化率的测定

根据不同贮藏时间的全麦面包的硬度，按式（3）计算全麦面包老化率。

$$r_s=\frac{H_n-H_0}{n} \quad (3)$$

式中：

r_s——全麦面包老化率，N/d；

H_n——贮藏n天后全麦面包的硬度，N；

H_0——烘焙当天全麦面包的硬度，N；

n——贮藏时间，d。

1.3.12　面团的全质构分析

参照李子兴等[16]的方法，测定添加产右旋糖酐全麦酸面团的面团（DWWSD）、添加全麦酸面团的面团（WWSD）和添加化学酸化全麦酸面团的面团（CAWWSD）的质构特性。将制备好的面团分成40 g的小面团，然后进行全质构分析。参数设置如下：TA/0.5S球形探头；返回距离20 mm，测试速度1 mm/s；测试类型为下压，目标模式为形变，按压时间5 s，形变率20%。

1.3.13　数据统计及分析

试验重复3次，使用SPSS 20.0中的单因素方差（ANOVA）实施差异性分析，采用沃勒-邓肯检验，用Origin 8.5绘图。

2　结果与讨论

2.1　全麦酸面团的发酵特性

2.1.1　pH和TTA

由表3可知，DWWS发酵24 h后，pH下降了

19.45%，TTA 增长了 113.86%；WWS 的 pH 下降了 16.92%，TTA 增长了 63.55%；CAWWS 的 pH 下降了 0.78%，TTA 增长了 46.73%。pH 的降幅越大、TTA 增幅越高，产酸能力越强，说明 DWWS 的产酸能力明显强于 WWS 和 CAWWS。这主要归因于 DWWS 中较多蔗糖被水解成果糖，为乳酸菌提供了可利用的碳源，从而促进其代谢并生成更多的有机酸[21]。

表 3　3 种全麦酸面团的 pH 和 TTA

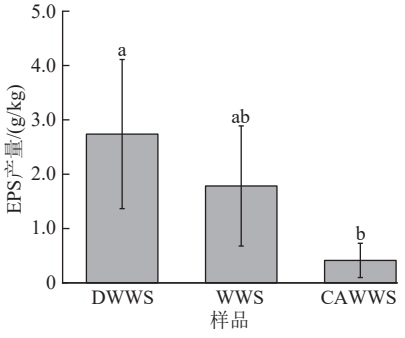
Table 3　pH and TTA of three types of whole wheat sourdough

样品	pH		TTA/mL	
	0 h	24 h	0 h	24 h
DWWS	6.58±0.04^{a}	5.30±0.81^{a}	1.01±0.05^{b}	2.16±0.58^{b}
WWS	6.56±0.03^{a}	5.45±0.67^{a}	1.07±0.06^{b}	1.75±0.31^{b}
CAWWS	3.87±0.03^{b}	3.84±0.03^{b}	2.14±0.05^{a}	3.14±0.06^{a}

注：同列不同小写字母表示样品间差异显著（P<0.05）。

2.1.2　EPS 产量

由图 1 可知，DWWS 的 EPS 产量最高，为 2.74 g/kg，与 WWS 组相比，提高了 54.04%；且显著高于 CAWWS（P<0.05），是 CAWWS 的 9.45 倍。Sandra 等[22]利用魏斯氏菌于 30 ℃下发酵小麦面团 24 h，所得 EPS 产量达 5.8 g/kg。Xu 等[23]将小麦面团发酵 24 h 后，EPS 产量达 3~4 g/kg。



不同小写字母表示样品间差异显著（P<0.05）。

图 1　3 种全麦酸面团的 EPS 产量

Fig. 1　EPS yields of the three types of whole wheat sourdough

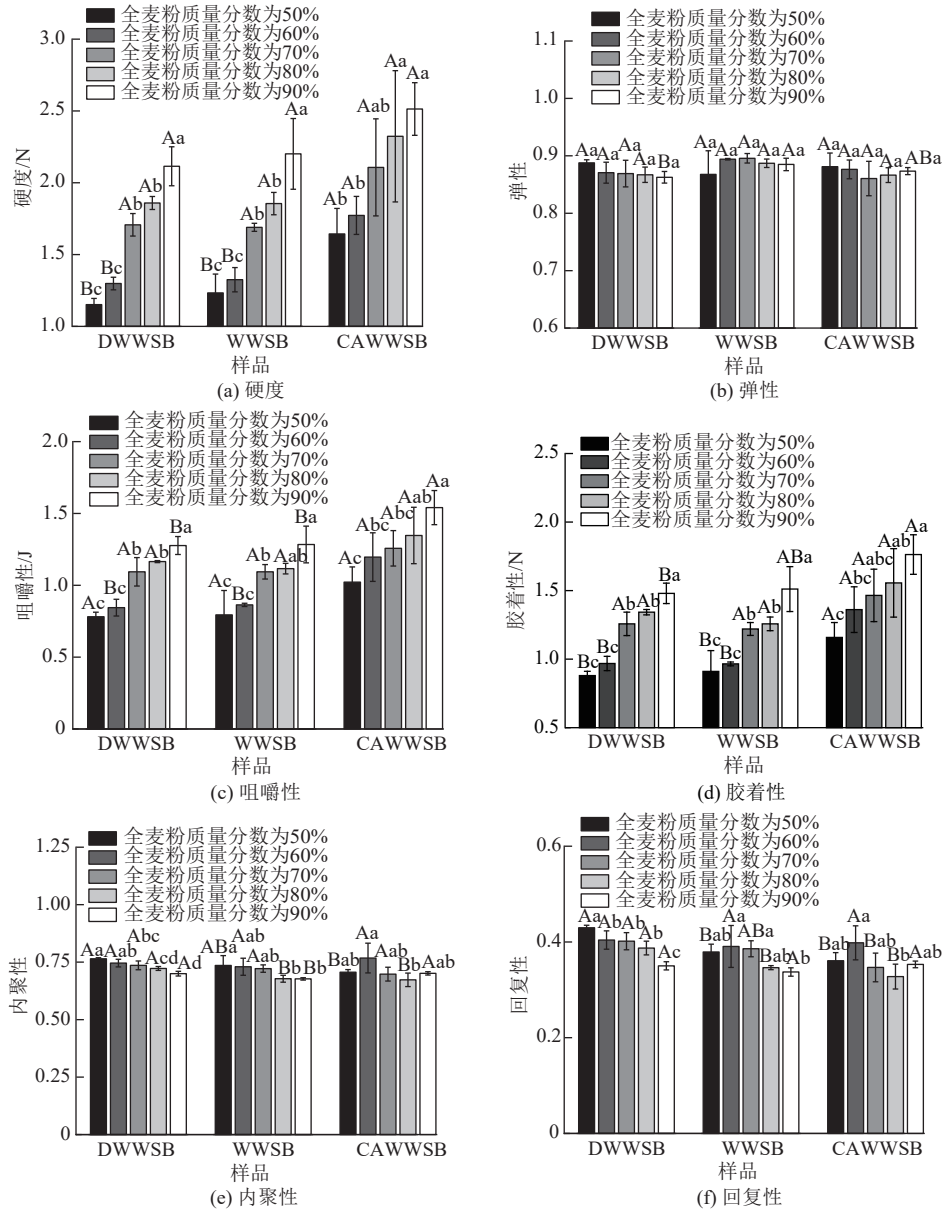
2.2　全麦面包品质

2.2.1　全质构分析结果

面包硬度与面包品质通常呈负相关[24]。如图 2（a）所示，烘焙当天，3 种全麦面包的硬度均随全麦粉质量分数的增加而提高，表明全麦粉的添加对面包柔软性会产生不利影响。Sun 等[25]研究发现，全麦粉中的麸皮会竞争水分，导致淀粉和蛋白质不完全水合，形成物理性的空间阻碍，干扰面团中面筋网络结构的形成和发展，最终导致面团品质下降。当全麦粉的质量分数为 50% 时，DWWSB、WWSB、CAWWSB 的硬度分别为（1.15±0.04）、（1.33±0.13）、（1.64±0.18）N，表明右旋糖酐明显降低了全麦面包的硬度。全麦粉质量分数相同时，CAWWSB 的硬度最高，其次是 WWSB 和 DWWSB，进一步说明右旋糖酐有助于提高全麦面包的品质。弹性与感官品质之间通常呈正相关。如图 2（b）所示，DWWSB 和 CAWWSB 的弹性均随全麦粉质量分数的增加呈降低趋势，表明全麦粉的添加对面包弹性会产生负面影响。此外，当全麦粉的质量分数为 50% 时，DWWSB 的弹性（0.894±0.000）最高，表明右旋糖酐有利于提高全麦面包的弹性。如图 2（c）所示，3 种全麦面包的咀嚼性均随全麦粉质量分数的增加而升高，全麦粉质量分数分别为 50%、60%、70%、90% 时，3 种全麦面包的咀嚼性大小均为 DWWSB<WWSB<CAWWSB。因此，全麦粉的添加导致面包的韧性和咀嚼性提高，而右旋糖酐有助于削弱全麦粉对面包口感的不利影响。全麦粉中的纤维、脂肪酶、脂肪氧化酶质量分数远高于小麦粉，使得制作出的全麦面包咀嚼感较明显[26]。

胶着性过高会降低面包轻盈、柔软的口感。如图 2（d）所示，胶着性的变化趋势与咀嚼性一致。当全麦粉质量分数为 50% 时，DWWSB 的胶着性最低，为（0.88±0.03）N。因此，右旋糖酐有利于降低全麦面包的胶着性，从而增强全麦面包松软的口感。如图 2（e）所示，3 种全麦面包的内聚性均随全麦粉质量分数的增大呈降低趋势。内聚性越低，预示着面包质地更加松散，结构越粗糙易碎。较高质量分数的全麦粉可能阻碍了面筋网络结构的形成，导致面包的内聚性降低。相同全麦粉添加量下，DWWSB 的内聚性高于 WWSB，而 CAWWSB 的内聚性整体较低。因此，DWWS 能够有效增强全麦面包的内聚性，从而提高消费者对全麦面包产品的接受度。右旋糖酐的相对分子质量较大，可能与谷蛋白分子相互作用，为面筋蛋白三维网络结构提供了支撑[27]。如图 2（f）所示，面包的回复性随着全麦粉质量分

数的增大整体呈降低趋势，当全麦粉质量分数相同时，全麦面包的回复性大小顺序总体趋势为DWWSB>WWSB>CAWWSB。因此，全麦粉质量分数越高，全麦面包的抗变形能力越差，但右旋糖酐能够有效提高全麦面包的回复性，从而提高消费者对全麦面包的接受度。



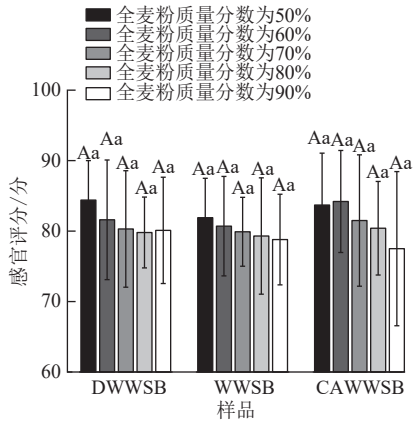
不同大写字母代表同一全麦粉质量分数下不同全麦面包差异显著（P<0.05）；
不同小写字母代表同一种全麦面包在不同全麦粉质量分数下差异显著（P<0.05）。

图2　3种全麦面包的质构特性

Fig. 2　Textural properties of the three types of whole wheat bread

2.2.2　全麦面包的感官评价分析结果

由图3可知，添加不同质量分数的全麦粉后，3种全麦面包的感官评分为77~85分，差异不显著（P≥0.05）。但从数值上看，DWWSB的评分高于WWSB，说明右旋糖酐对全麦面包的感官品质有积极影响。当全麦粉质量分数为50%时，DWWSB的感官评分最高，其次为CAWWSB、WWSB。当全麦粉质量分数为90%时，3种全麦面包的感官评分均较低且相近。这可能是由于当全麦粉质量分数较高时，3种全麦面包的口感均较差。如图4所示，对比3种全麦面包感官评价的各项指标，发现当全麦粉质量分数为50%时，



不同大写字母代表同一全麦粉质量分数下不同全麦面包差异显著（P<0.05）；不同小写字母代表同一种全麦面包在不同全麦粉质量分数下差异显著（P<0.05）。

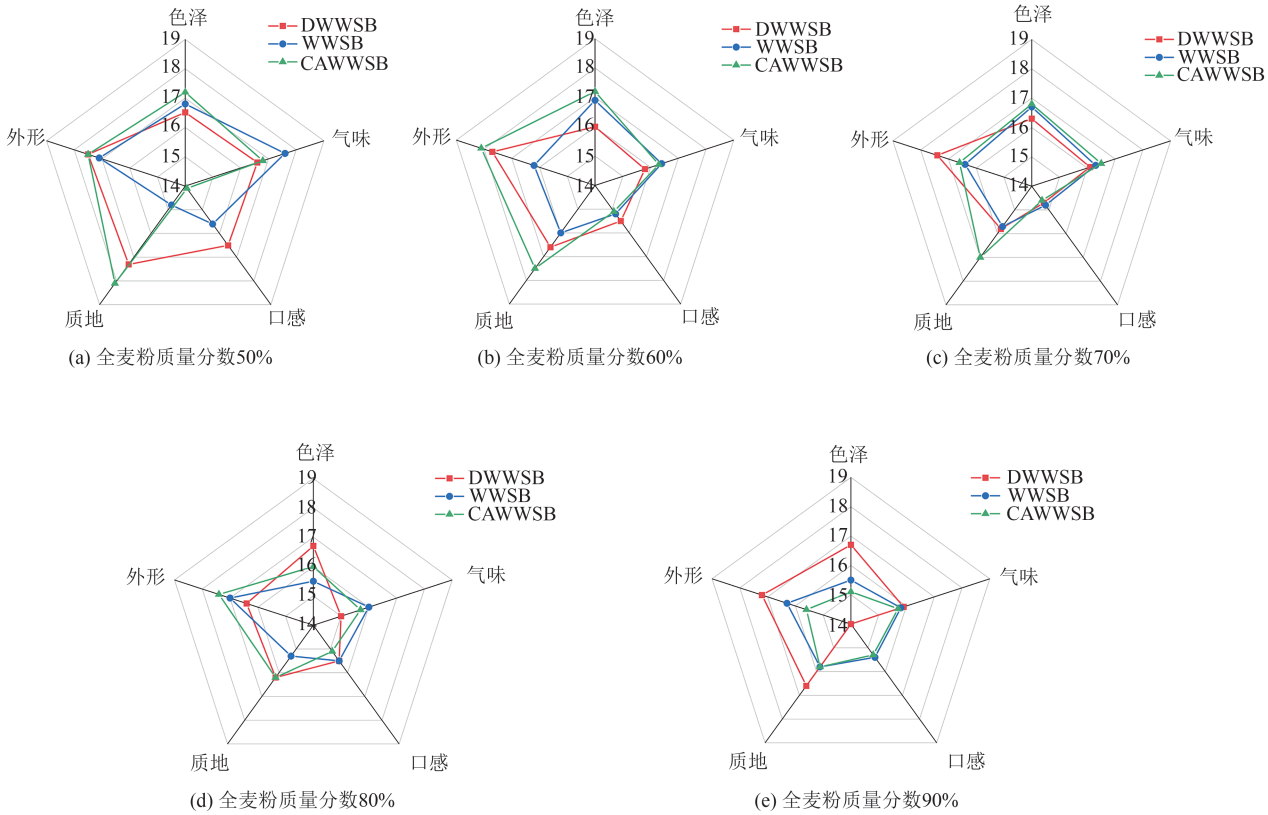
图 3　3 种全麦面包感官评分

Fig. 3　Sensory evaluation scores of the three types of whole wheat bread

DWWSB 的口感得分高于 WWSB、CAWWSB，色泽得分相差较小，气味得分则稍低于 WWSB，这可能是由于 DWWSB 中的乳酸和乙酸含量更高[28]。此外，当全麦粉质量分数为 90% 时，DWWSB 的质地、外形和色泽得分高于 WWSB、CAWWSB。上述结果表明，产右旋糖酐酸面团有利于改善全麦面包的感官品质，尤其是在全麦粉添加量达到 90% 时，其改善作用更明显。

2.2.3　水分质量分数

由表 4 可知，3 种全麦面包的水分质量分数随着全麦粉质量分数的增加总体呈下降趋势，但差异不显著。这可能是由于全麦粉中膳食纤维的含量较高，其与淀粉和面筋蛋白竞争水分，导致部分水分的结合状态发生改变，水分更易迁移和损失[29]。另一方面，全麦粉中的膳食纤维具有较强的持水能力，能够吸附并保留部分水分，从而在一定程度上抵消全麦粉质量分数增加导致的水分损失。当全麦粉质量分数为 50% 时，DWWSB 和 WWSB 的水分质量分数均最高，分别为（41.33±0.17）%、（40.33±0.31）%。在添加不同质量分数的全麦粉后，DWWSB 的水分质量分数均高于 WWSB，表明右旋糖酐有助于锁住水分，抑制全麦面包组织结构中水分的迁移，从而提高全麦面包制品的水分质量分数[30]。



(a) 全麦粉质量分数50%　(b) 全麦粉质量分数60%　(c) 全麦粉质量分数70%

(d) 全麦粉质量分数80%　(e) 全麦粉质量分数90%

图 4　3 种全麦面包感官评定结果

Fig. 4　Sensory evaluation results of the three types of whole wheat bread

表4　全麦面包的水分质量分数

Table 4　Moisture mass fraction of whole wheat bread

组别	水分质量分数/%		
	DWWSB	WWSB	CAWWSB
质量分数50%全麦粉	41.33±0.17^{Aa}	40.33±0.31^{Ba}	39.80±0.25^{Ca}
质量分数60%全麦粉	41.00±0.05^{Aa}	39.66±0.10^{Ca}	40.04±0.17^{Ba}
质量分数70%全麦粉	41.20±0.18^{Aa}	39.58±0.16^{Ba}	39.80±0.23^{Ba}
质量分数80%全麦粉	41.25±0.63^{Aa}	39.62±0.45^{Ba}	39.59±0.47^{Ba}
质量分数90%全麦粉	41.20±0.76^{Aa}	39.49±0.17^{Ba}	39.72±0.31^{Ba}

注：同行不同大写字母表示样品间差异显著（P<0.05）；同列不同小写字母表示样品间差异显著（P<0.05）。

2.2.4　水分损失率

由表5可知，3种全麦面包的水分损失率随着全麦粉质量分数的增加均呈降低趋势，但差异不显著。因此，全麦粉的添加能够减少全麦面包的水分损失。这可能是因为全麦粉中含有一定量的膳食纤维，阻碍了水分的流失[31]。全麦粉质量分数相同时，WWSB的水分损失率明显高于DWWSB和CAWWSB，表明右旋糖酐能够进一步提高全麦面包的持水力，延长全麦面包的货架期。此外，CAWWSB与DWWSB的水分损失率相当，这可能是由于乳酸菌代谢产生的植酸酶降解了植酸，从而提高了矿物质的溶解度[31]。

表5　全麦面包的水分损失率

Table 5　Moisture loss rate of whole wheat bread

组别	水分损失率/(%/d)		
	DWWSB	WWSB	CAWWSB
质量分数50%全麦粉	0.38±0.19^{ABa}	0.62±0.03^{Aa}	0.28±0.13^{Ba}
质量分数60%全麦粉	0.20±0.03^{Ba}	0.63±0.10^{Aa}	0.28±0.07^{Ba}
质量分数70%全麦粉	0.19±0.09^{Ba}	0.62±0.02^{Aa}	0.20±0.06^{Ba}
质量分数80%全麦粉	0.32±0.20^{Ba}	0.63±0.15^{Aa}	0.24±0.08^{Ba}
质量分数90%全麦粉	0.24±0.03^{Ba}	0.53±0.13^{Aa}	0.26±0.08^{Ba}

注：同行不同大写字母表示样品间差异显著（P<0.05）；同列不同小写字母表示样品间差异显著（P<0.05）。

2.2.5　老化率

由表6可知，全麦粉质量分数越高，3种全麦面包的老化率也越高，表明全麦粉的添加会导致全麦面包的货架期缩短。当全麦粉质量分数为50%时，DWWSB的老化率与WWSB相比降低了12.0%，与CAWWSB相比降低了27.5%；当全麦粉质量分数分别为60%、70%、80%、90%时，3种全麦面包的老化率均为DWWSB<WWSB<CAWWSB。结果表明，乳酸菌发酵酸面团能有效降低全麦面包的老化率。这主要是由于乳酸菌产生的有机酸为面团提供了一个酸性环境，影响了淀粉的糊化和回生过程，从而延缓了淀粉的老化过程[15]。此外，酸面团发酵过程中合成的右旋糖酐可进一步抑制全麦面包的老化。这主要是由于右旋糖酐阻碍了水分迁移，减少了支链淀粉长期回生过程中水分子的可及性，维持了面筋蛋白网络结构的稳定性[17]。

表6　全麦面包的老化率

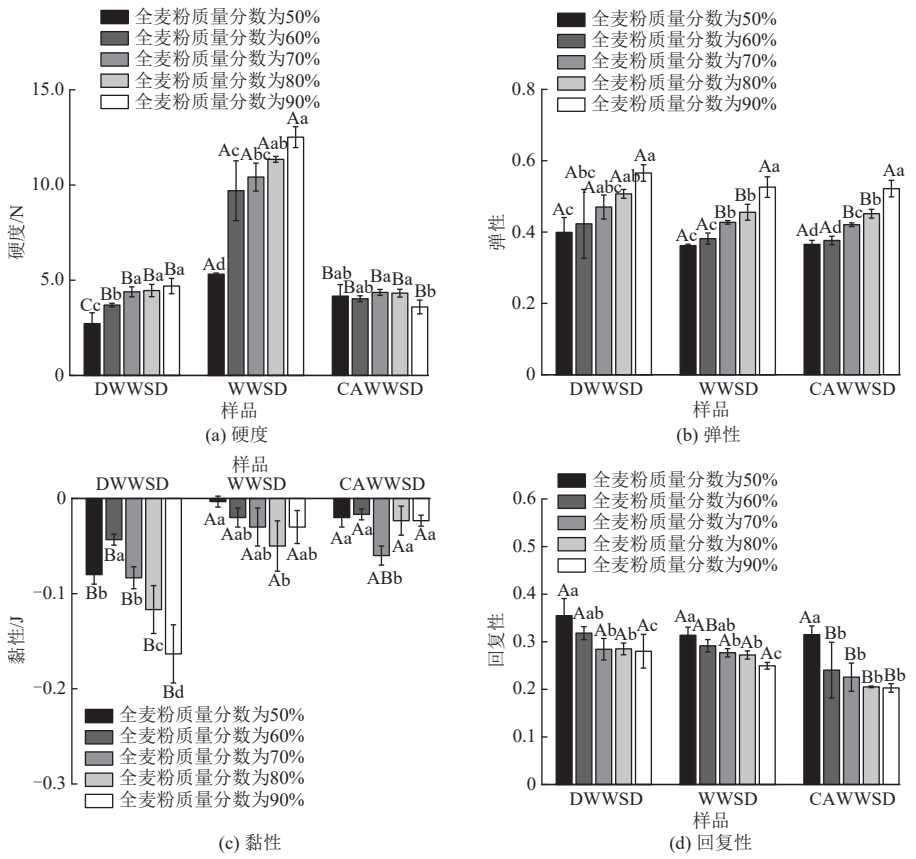
Table 6　Staling rate of whole wheat bread

组别	老化率/(N/d)		
	DWWSB	WWSB	CAWWSB
质量分数50%全麦粉	0.345±0.107^{Ab}	0.392±0.042^{Ab}	0.476±0.098^{Ac}
质量分数60%全麦粉	0.391±0.089^{Bab}	0.401±0.038^{Bb}	0.531±0.046^{Ac}
质量分数70%全麦粉	0.429±0.078^{Bab}	0.447±0.066^{Bb}	0.681±0.084^{Ab}
质量分数80%全麦粉	0.482±0.026^{Bab}	0.493±0.119^{Bab}	0.791±0.110^{Aab}
质量分数90%全麦粉	0.497±0.027^{Ca}	0.587±0.060^{Ba}	0.876±0.037^{Aa}

注：同行不同大写字母表示样品间差异显著（P<0.05）；同列不同小写字母表示样品间差异显著（P<0.05）。

2.3　全麦酸面团的质构分析

如图5(a)所示，DWWSD、WWSD的硬度均随全麦粉质量分数的增加而上升，CAWWSD的硬度变化较小；DWWSD与CAWWSD的硬度相当，但均明显低于WWSD，说明右旋糖酐、有机酸可有效降低面团的硬度，这与周一鸣等[32]的研究结果相似。如图5(b)所示，3种面团的弹性均随全麦粉质量分数的增加而明显提高，表明全麦粉的添加有助于提高面团的弹性。当全麦粉质量分数分别为50%、90%时，3种面团间的弹性无显著差异（P≥0.05），而当全麦粉质量分数分别为60%、70%、80%时，DWWSD的弹性明显高于其他2组。黏性数值由负号和数字组成，负号代表了探头的受力方向，数字表示了受力大小，数字越大，说明探头受力越大，则面团的黏性越强。如图5(c)所示，DWWSD的黏性高于WWSD及CAWWSD，说明右旋糖酐有助于提高面团的黏性。如图5(d)所示，3种全麦酸面团的回复性均随全麦粉质量分数的增加而降低。当全麦粉质量分数分别为60%、70%、80%、90%时，DWWSD的回复性与WWSD相当，且稍高于CAWWSD，表明右旋糖酐有助于提高全麦酸面团的回复性。



不同大写字母代表同一全麦粉质量分数下不同面团差异显著（P<0.05）；

不同小写字母代表同一种面团在不同全麦粉质量分数下差异显著（P<0.05）。

图 5　3 种全麦酸面团的质构特性

Fig. 5　Textural properties of the three types of whole wheat sourdough

3　结论

全麦酸面团中的右旋糖酐能明显改善全麦面包的质构特性，表现为全麦面包的硬度、咀嚼性和胶着性降低，以及水分质量分数、内聚性和回复性提高，同时有助于提升色泽、质地和外形等感官品质。4 ℃下贮藏 7 d 后，右旋糖酐降低了全麦面包的水分损失率和老化率。此外，右旋糖酐的生成改善了面团的质构品质，提高了面团的弹性、黏性和回复性，并降低了其硬度，从而改善面团的加工特性，为后续全麦面包质构品质的改善提供了基础。结果表明，*Leuconostoc mesenteroides* ATCC8293 发酵所得的产右旋糖酐全麦酸面团可有效改善全麦面包品质、延长货架期，对全谷物食品的开发和研究具有重要参考价值。然而，所制备的全麦面包产品仍存在比容较小的问题，后续研究仍需进一步优化。

参考文献

[1] 张艺，乔志刚，马硕，等. 全麦粉添加量对面包品质的影响研究[J]. 食品工程，2023(1)：41-44.

Zhang Y，Qiao Z G，Ma S，et al. Effect of whole wheat flour on bread quality[J]. Food Engineering，2023(1)：41-44.(in Chinese)

[2] 李雪杰，张剑，郑文刚，等. 小麦麸皮挤压加工对全麦粉面团及馒头的影响[J]. 食品与发酵工业，2020，46(5)：181-187.

Li X J，Zhang J，Zheng W G，et al. Effects of extrusion processing wheat bran on the dough and steamed bread of whole wheat flour[J]. Food and Fermentation Industries，2020，46(5)：181-187.(in Chinese)

[3] Tebben L，Shen Y T，Li Y H. Improvers and functional ingredients in whole wheat bread：a review of their effects on dough properties and bread quality[J]. Trends in Food Science & Technology，2018，81：10-24.

[4] Sadeghi A，Ebrahimi M，Hajinia F，et al. FoodOmics as a promising strategy to study the effects of sourdough on human health and nutrition，as well as product quality and safety；back to the future[J]. Trends in Food Science & Technology，2023，136：24-47.

[5] Chen D，Wang J S，Jia F，et al. Effects of sourdough addition on the quality and shelf life of Chinese steamed bread[J]. Grain & Oil Science and Technology，2018，1(2)：85-90.

[6] Lau S W，Chong A Q，Chin N L，et al. Sourdough

microbiome comparison and benefits[J]. Microorganisms, 2021,9(7):1355.
[7] 李玫萱. 乳酸菌发酵酸面团延缓面包老化的研究[D]. 无锡:江南大学,2024:5-7.
[8] Jamdar S N, Krishnan R, Rather S A, et al. Identification and characterisation of dextran produced by a novel high yielding *Weissella cibaria* Fiplydextran strain[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282:136658.
[9] Bi Q, Hong T T, Mei X, et al. Effect of high-molecular weight dextran-enriched sourdough fermented using *Leuconostoc mesenteroides* ATCC 8293 on bread quality and gluten[J]. Food Bioscience, 2023, 53:102777.
[10] Wang Y Q, Compaoré-Sérémé D, Sawadogo-Lingani H, et al. Influence of dextran synthesized *in situ* on the rheological, technological and nutritional properties of whole grain pearl millet bread[J]. Food Chemistry, 2019, 285:221-230.
[11] Zhang Y, Li D D, Yang N, et al. Comparison of dextran molecular weight on wheat bread quality and their performance in dough rheology and starch retrogradation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98:39-45.
[12] Wang Y Q, Maina N H, Coda R, et al. Challenges and opportunities for wheat alternative grains in breadmaking: *Ex-situ*-versus *in-situ*-produced dextran[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 113:232-244.
[13] Zhang Y, Wang D X, Zhang Z H, et al. Improvement on wheat bread quality by *in situ* produced dextran: a comprehensive review from the viewpoint of starch and gluten[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(3):e13353.
[14] 王博,张维清,李鹏,等. 不同发酵类型乳酸菌对全麦面包品质影响研究[J]. 食品与发酵工业,2023,49(17):180-186.
Wang B, Zhang W Q, Li P, et al. Effects of different fermentation types of lactic acid bacteria on the quality of whole wheat bread [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17):180-186.(in Chinese)
[15] Seis Subaşı A, Ercan R. The effects of wheat variety, sourdough treatment and sourdough level on nutritional characteristics of whole wheat bread [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 110:103637.
[16] 李子兴,杨天一,徐学明,等. 产右旋糖苷酸面团对大麦粉添加面包品质的影响研究[J]. 中国粮油学报,2023,38(1):38-46.
Li Z X, Yang T Y, Xu X M, et al. Effect of dextran-producing sourdough on quality of bread added with barley flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(1):38-46.(in Chinese)
[17] 张瑶. 右旋糖苷对面包品质的影响及机理研究[D]. 无锡:江南大学,2020:15.
[18] 欧阳博雅. 复配乳酸菌发酵苦荞酸面团及其冷冻面团抗冻性能的研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2022:16.
[19] GB/T 20981—2021 面包质量通则[S].
[20] GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].
[21] Chen X Y, Levy C, Gänzle M G. Structure-function relationships of bacterial and enzymatically produced reuterans and dextran in sourdough bread baking application [J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 239:95-102.
[22] Sandra G, Schwab C, Bello F D, et al. Comparison of the impact of dextran and reuteran on the quality of wheat sourdough bread[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(3):531-537.
[23] Xu D, Hu Y, Wu F F, et al. Comparison of the functionality of exopolysaccharides produced by sourdough lactic acid bacteria in bread and steamed bread [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(33):8907-8914.
[24] 刘恒言,陈秀金,臧鹏,等. 面包的品质变化及改良的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2024,50(17):394-404.
Liu H Y, Chen X J, Zang P, et al. Research progress on quality changes and improvement of bread [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17):394-404.(in Chinese)
[25] Sun X Y, Wu S M, Koksel F, et al. Effects of ingredient and processing conditions on the rheological properties of whole wheat flour dough during breadmaking: a review [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135:108123.
[26] Boukid F, Folloni S, Ranieri R, et al. A compendium of wheat germ: separation, stabilization and food applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78:120-133.
[27] 张娅. 产胞外多糖乳酸菌发酵藜麦酸面团对面包品质的影响及面包制作配方的优化[D]. 雅安:四川农业大学,2021:26.
[28] Bounaix M S, Gabriel V, Morel S, et al. Biodiversity of exopolysaccharides produced from sucrose by sourdough lactic acid bacteria[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(22):10889-10897.
[29] 田梦洋,田霞,王志伟,等. 乳酸菌冻干粉剂发酵全麦酸面包工艺优化及储藏特性分析[J]. 食品工业科技,2023,44(12):172-184.
Tian M Y, Tian X, Wang Z W, et al. Process optimization and storage characteristics analysis of lactic acid bacteria lyophilized powder fermented whole wheat sourdough bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12):172-184.(in Chinese)
[30] Montemurro M, Coda R, Rizzello C G. Recent advances in the use of sourdough biotechnology in pasta making [J]. Foods, 2019, 8(4):129.
[31] Gómez M, Gutkoski L C, Bravo-Núñez Á. Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6):3241-3265.
[32] 周一鸣,欧阳博雅,向茜,等. 不同乳酸菌发酵酸面团对面包品质及风味的影响[J]. 食品科学,2022,43(2):176-183.
Zhou Y M, Ouyang B Y, Xiang X, et al. Effect of sourdough fermented by different lactic acid bacteria on bread quality and flavor[J]. Food Science, 2022, 43(2):176-183.(in Chinese)