

戊糖片球菌发酵猕猴桃对面包香气与烘焙特性的影响

Aroma and baking characteristics of kiwifruit and its bread
fermented by *Pediococcus pentosaceus*

黄 璟¹ 梁丽婷¹ OMEDI Jacob Ojobi¹ 陈 诚¹ 郭睿琚²

HUANG Jing¹ LIANG Li-ting¹ OMEDI Jacob Ojobi¹ CHEN Cheng¹ GUO Rui-jun²

黄卫宁³ 曾永青³ 李 宁⁴ 高铁成⁴ 周立源⁵

HUANG Wei-ning¹ ZENG Yong-qing³ LI Ning⁴ GAO Tie-cheng⁴ ZHOU Li-yuan⁵

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 深圳市金谷园实业

发展有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 广州市食品工业研究所, 广东 广州 510663;

4. 广州焙乐道食品有限公司, 广东 广州 511400; 5. 山东稻香村食品工业有限公司, 山东 菏泽 274000)

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi,

Jiangsu 214122, China; 2. Shenzhen Jingyuan Industry Development Co., Ltd., Shenzhen,

Guangdong 518000, China; 3. Guangzhou Food Industry Research Institute, Guangzhou,

Guangdong 510641, China; 4. Guangzhou Puratos Food Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400,

China; 5. Shandong Daoxiangcun Food Industry Co., Ltd., Heze, Shandong 274000, China)

摘要:目的: 开发猕猴桃风味面包。方法: 分析猕猴桃发酵过程中的 β -葡萄糖苷酶酶活、有机酸和风味化合物变化, 测定面团理化性质、面包膳食纤维和总氨基酸含量变化、烘焙及风味特性。结果: 经 15.5 h 发酵, β -葡萄糖苷酶酶活达 55.13 U/L, 乳酸和乙酸含量均显著增加 ($P < 0.05$)。经 GC-TOF/MS 共检出 110 种风味物质, 发酵后, 酸类、酯类、醇类和萜烯类物质含量增加, 醛类和酮类物质含量减少。猕猴桃中检出 α -当归内酯、乙酸糠酯和泛酸内酯。与未发酵组相比, 发酵猕猴桃面包的 α -淀粉酶和蛋白酶酶活分别提高了 14.86%, 18.63%, 硬度降低了 11.58%, 可溶性膳食纤维、总氨基酸含量和比容分别增加了 12.54%, 41.02%, 18.59%。此外, 滋味值(除苦味与涩味外)增加, 风味物质种类和含量分别增加了 45.10% 和 27.78%, 其整体可接受度更高。结论: 利用戊糖片球菌 J8 发酵猕猴桃能改善面包风味和烘焙特性。

关键词: β -葡萄糖苷酶; 猕猴桃; 风味; 烘焙特性; 电子舌; 氨基酸

Abstract: **Objective:** This study aimed to explore the effect of *Pediococcus pentosaceus* J8 fermented kiwifruit on bread baking and flavor profile characteristics of wheat bread. **Methods:** The changes in β -glucosidase enzyme activity, organic acids and flavor compounds during kiwifruit fermentation were analyzed. The physical and chemical properties of wheat dough incorporated with fermented kiwifruit were determined. Moreover, the changes in total dietary fiber and total amino acid content, bread quality and flavor characteristics of the resulted bread were also determined. **Results:** After 15.5 hours of fermentation, the β -glucosidase activity reached 55.13 U/L, and the content of lactic acid and acetic acid significantly increased. A total of 110 flavor compounds were detected by GC-TOF/MS in kiwifruit. After fermentation, the content of acids, esters, alcohols and terpenes increased, while the content of aldehydes and ketones decreased. For the first time, α -angelica lactone, furfuryl acetate and panto-lactone were found in kiwifruit. In dough, compared with the un-fermented group, the α -amylase and protease activities increased by 14.86% and 18.63%, respectively after incorporation of fermented kiwifruit. In bread, compared with the unfermented group, the hardness (11.58%) decreased, while the soluble diet-

基金项目:“十三五”国家重大专项(编号:2016YFD0400500); 国家自然科学基金(编号:31071595, 31571877); 比利时国际合作项目(编号:BE110021000)

作者简介:黄璟, 女, 江南大学在读博士研究生。

通信作者:黄卫宁(1963—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: wnhuang@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2021-11-03

ary fiber, total amino acids and specific volume increased by 12.54%, 41.02% and 18.59%, respectively. In addition, bread incorporated with fermented kiwifruit tasted better, had an increased content (27.78%) and type (45.10%) of flavor compounds and a higher overall acceptability than bread incorporated with unfermented kiwifruit. **Conclusion:** Fermenting kiwifruit with *Pediococcus pentosaceus* can improve the flavor and baking characteristics of bread.

Keywords: β -glucosidase; kiwifruit; flavor; baking properties; electronic tongue; amino acid

猕猴桃富含碳水化合物、膳食纤维、氨基酸、有机酸等,营养丰富,极具开发潜力。将猕猴桃及其副产物添加到面包体系中不仅可以增强面包营养和种类^[1-2],还可以使面包中的多酚和膳食纤维等成分得到强化^[3-4]。

Zhao 等^[5]将猕猴桃接种酿酒酵母以提升产品的风味物质,但其并未充分发挥猕猴桃本身风味,这是因为猕猴桃大多数风味物质(醇类、酯类和萜烯类)以不挥发的糖苷形式存在,而这些风味物质多数阈值较低,对风味贡献较大。 β -葡萄糖苷酶作为水解糖苷类香气前体的关键酶类,常被作为风味酶用于果汁和果酒的增香。彭帅等^[6]发现利用产 β -葡萄糖苷酶菌株可以提升葡萄酒风味。但产 β -葡萄糖苷酶的微生物大多为曲霉^[7]、芽孢杆菌^[8]和木霉^[9]等,因此难以直接用于水果发酵。钱超等^[10-11]从酒曲等中国传统发酵资源中分离出高产 β -葡萄糖苷酶的乳酸菌,并将其作为发酵剂制作含葡萄汁的酸面团,面包中风味物质含量和种类得到了有效提升。但是其在猕猴桃及新型绿色健康烘焙食品中的研究尚未见报道。

文章拟以课题组前期分离自酒鬼酒曲的戊糖片球菌 J8^[10-13]为研究对象,研究乳酸菌发酵对猕猴桃理化特性及风味的影响,并将发酵猕猴桃引入到面包体系中,分析面包面团理化性质,评估其对猕猴桃面包烘焙和风味特性的影响,以期工业化开发风味独特、烘焙品质优良的水果面包提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猕猴桃:海沃德品种,产自陕西周至;

高筋粉:河北参花面粉有限公司;

酵母:乐斯福(明光)有限公司;

MRS 肉汤培养基:杭州百思生物技术有限公司;

戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus* KID7) J8:产 β -葡萄糖苷酶,筛选自酒鬼酒曲;

对硝基苯基- β -D-吡喃葡萄糖苷、庚酸甲酯、三氯乙酸:分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

苹果酸、柠檬酸、乳酸、奎宁酸和乙酸:分析纯,上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

切片机:SM-302 型,新麦机械(无锡)有限公司;

pH 计:FE20 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

恒温恒湿培养箱:SPX-150C 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

三重四极杆气质联用仪:TSQ Quantum XLS 型,美国赛默飞世尔科技公司;

电子舌:SA402B 型,美国 Isenso 公司;

质构仪:CT3 型,美国 Brookfield 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发酵猕猴桃的制备 将戊糖片球菌 J8 于 37 °C 的 MRS 液体培养基中培养 24 h,8 000 ×g 离心 15 min,收集细胞,在灭菌生理盐水溶液中洗涤两次(质量分数 0.85%),用作发酵剂发酵猕猴桃(K-J8),初始接种量为 10⁸ CFU/mL。使用搅拌机将猕猴桃(可溶性固形物含量 17.33 °Brix)搅拌成果泥,称取 100 g 于 121 °C 灭菌 10 min,室温冷却 10 min。将发酵剂接种至灭菌猕猴桃(WK),27.5 °C、180 r/min 下培养 15.5 h。

1.3.2 发酵过程中 pH、TTA 和菌落数测定 参照邹奇波等^[14]的方法。

1.3.3 发酵过程中 β -葡萄糖苷酶酶活测定 参照钱超等^[10]的方法。

1.3.4 发酵过程中有机酸含量测定 取 5 g 样品于 20 mL KH₂PO₄溶液(0.01 mol/L)中,均质 5 min,4 °C、5 000 ×g 离心 10 min,上清液过 0.22 μ m 膜,将 20 μ L 样品通过 HPLC 测定有机酸含量(乳酸、乙酸、苹果酸、柠檬酸和奎宁酸)。色谱条件: C₁₈ 色谱柱(250 mm × 4.6 mm),流动相为 10 mmol/L KH₂PO₄, pH 2.6,柱温 30 °C,流速 1.0 mL/min,波长 215 nm。

1.3.5 发酵过程中风味化合物含量测定 称取 5.0 mL 样品于 20 mL 样品瓶。将样品瓶插入 SPME 萃取头(50/30 μ m CAR/PDMS/DVB),50 °C 萃取 30 min。250 °C 热解吸 3 min,进行 GC-TOF/MS 分析。色谱条件:DB-5MS 毛细管色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μ m),载气为 N₂,流速 1 mL/min。升温程序:40 °C 保持 2 min,以 10 °C/min 升至 250 °C,恒温 6 min。进样、界面和离子源温度分别为 250,250,200 °C。电子撞击能量 70 eV。

1.3.6 猕猴桃面包的制作 小麦面包(XB)、未发酵猕猴桃面包(WKB)和发酵猕猴桃面包 KB-J8 配方见表 1。制作流程:将原料(除黄油外)倒入搅拌缸,慢搅 3 min,快搅 1 min;加入黄油后慢搅 3 min,快搅 2 min。搅拌后滚圆并松弛 5 min,分割成 90 g,松弛 10 min,整形,置于模具,醒发 90 min(38 °C,85%),放入烤箱(上火 170 °C,下火 210 °C)烘烤 21 min。

1.3.7 面团的 α -淀粉酶和蛋白酶酶活测定

(1) α -淀粉酶:参照 Wang 等^[15]的方法。

(2) 蛋白酶:参照 Thiele 等^[16]的方法。

表 1 面包配方

Table 1 The recipes of bread								g
样品	小麦粉	未发酵猕猴桃	发酵猕猴桃	水	盐	糖	黄油	干酵母
XB	300	0	0	180	1.5	18	12	4.5
WKB	300	90	0	100	1.5	18	12	4.5
KB-J8	300	0	90	102	1.5	18	12	4.5

1.3.8 面包烘焙特性测定

- (1) 比容和硬度:参照吴玉新等^[17]的方法。
- (2) 膳食纤维含量:参照曹伟超等^[18]的方法。
- (3) 色泽:参照 Sharma 等^[19]的方法。

1.3.9 面包游离氨基酸含量测定 参照刘若诗等^[20]的方法。

1.3.10 电子舌分析 参照武盟等^[21]的方法。

1.3.11 面包风味化合物含量测定 参照张薇等^[22]的方法。

1.3.12 面包感官评定 采用 9 分嗜好法^[22]。由 20 位经过培训的人员(男女各一半)对面包外观、色泽、组织结构、口感、风味以及整体可接受度进行评分。

1.4 数据处理

采用 Excel 2015、Origin 9.5 以及 SPSS 26.0 软件进行数据分析,显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 猕猴桃发酵过程中 pH、TTA 和菌落数变化

由表 2 可知,猕猴桃发酵 15.5 h 后,K-J8 菌落数达 10^8 CFU/mL,表明戊糖片球菌 J8 在猕猴桃基质中适应性良好。与其他乳酸菌发酵体系相比,其菌落数比发酵火龙果体系高 1~2 个数量级^[23]。猕猴桃 pH 值显著降低,TTA 值显著增加($P<0.05$),表明戊糖片球菌 J8 发酵猕猴桃过程中产生了有机酸,如乳酸和乙酸等,而这些化合物能够促进风味物质形成^[24]。

表 2 猕猴桃发酵前后的菌落数、pH 和 TTA[†]

Table 2 The cell counts, pH and TTA of kiwifruit before and after fermentation

样品	菌落数/ $\lg(\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1})$	pH	TTA/ mL
WK	—	3.52 ± 0.06^b	24.33 ± 0.18^a
K-J8	8.14 ± 0.04	3.29 ± 0.10^a	28.43 ± 0.07^b

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 发酵猕猴桃的有机酸含量变化[†]

Table 3 Changes in the content of organic acid

样品	柠檬酸	奎宁酸	苹果酸	乳酸	乙酸
WK	9.98 ± 0.12^b	8.44 ± 0.31^b	1.98 ± 0.06^b	0.04 ± 0.00^a	—
K-J8	8.82 ± 0.09^a	6.73 ± 0.12^a	0.85 ± 0.00^a	4.74 ± 0.02^b	0.35 ± 0.02

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 猕猴桃发酵过程中 β -葡萄糖苷酶酶活变化

由图 1 可知,发酵初期, β -葡萄糖苷酶酶活逐渐增加,6 h 后酶活最高,达 61.14 U/L,9 h 后小幅下降,随后趋于平缓直至发酵完成,其最终酶活为 55.13 U/L,这与菌株的生长特性、对水果基质适应能力以及水果基质中代谢物相关^[25]。较高的 β -葡萄糖苷酶酶活有利于释放猕猴桃糖苷风味前体物质。

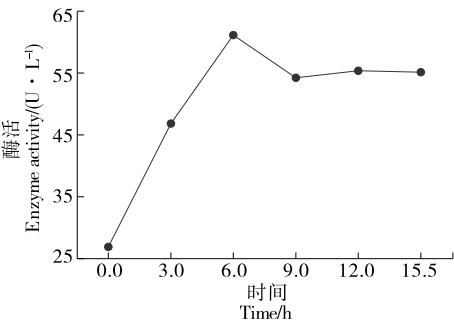


图 1 猕猴桃发酵过程中 β -葡萄糖苷酶酶活变化

Figure 1 Changes in β -glucosidase activities during kiwifruit fermentation

2.3 猕猴桃发酵过程中有机酸含量变化

由表 3 可知,发酵后奎宁酸、柠檬酸和苹果酸含量均显著降低($P<0.05$),分别降低了 11.62%,20.26%,57.07%($P<0.05$),其中苹果酸含量降幅最大。乳酸菌通过苹果乳酸发酵产生乳酸,也可以代谢柠檬酸产生乳酸、丙酮酸和乙酸。因此发酵后乳酸和乙酸含量显著增加($P<0.05$),与 Wei 等^[26]的结果相吻合。乳酸是乳酸菌的主要关键代谢产物,能赋予发酵食品愉悦感受^[27];乙酸是乙酸乙酯的前体,本身带有愉悦醋香味^[28]。

2.4 发酵猕猴桃的风味化合物变化

由表 4 和表 5 可知,2 种样品中共检出 110 种风味物质,与 WK 相比,K-J8 的种类和含量分别增加了 39.39%,94.90%。乳酸菌发酵后,酸类、酯类、醇类和萜烯类化合

表 4 发酵猕猴桃风味化合物含量的影响
Table 4 Effects of fermentation on the volatile flavor of kiwifruit

种类	化合物	峰面积($\times 10^7$)		种类	化合物	峰面积($\times 10^7$)	
		WK	K-J8			WK	K-J8
醇类	乙醇	220.88	2 643.82	醛类	壬醛	188.34	43.02
	2-甲基-1-丙醇	—	328.19		(<i>E</i>)-2-辛烯醛	125.42	5.23
	1-丁醇	12.25	35.86		甲硫基丙醛	78.20	—
	1-戊烯-3-醇	33.87	28.99		糠醛	3 965.21	188.81
	3-甲基-1-丁醇	—	3 810.88		(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	82.88	10.79
	桉叶油醇	196.88	—		癸醛	—	21.49
	1-戊醇	294.59	1 201.37		苯甲醛	242.47	54.66
	4-戊烯-1-醇	—	19.04		5-甲基-2-呋喃甲醛	148.00	10.15
	(<i>E</i>)-2-戊烯-1-醇	—	14.24		2-羟基-苯甲醛	8.80	9.93
	1-己醇	86.04	1 770.03		苯乙醛	134.83	—
	(<i>E</i>)-3-己烯-1-醇	—	28.55	酯类	乙酸乙酯	9.49	13 904.10
	3-己烯-1-醇	7.61	25.32		丙酸乙酯	—	140.64
	(<i>E</i>)-2-己烯-1-醇	—	149.84		乙酸正丙酯	—	21.34
	1-辛基-3-醇	28.83	48.92		乙酸异丁酯	—	152.85
	(<i>R</i>)-1-氨基-2-丙醇	—	119.29		乙酸丁酯	71.95	77.47
	1-庚醇	—	363.99		乙酸异戊酯	—	1 677.03
	2-乙基-1-己醇	7.54	6.95		乙酸戊酯	—	277.23
	芳樟醇	47.17	59.92		乙酸己酯	—	58.81
	1-辛醇	23.16	74.99		α -当归内酯	—	13.35
	3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇	—	26.68		乙酸糠酯	—	420.46
醛类	2,3-丁二醇	—	61.27		苯甲酸甲酯	49.29	45.99
	萜品四醇	38.78	—		γ -丁内酯	—	8.43
	2-呋喃甲醇	75.36	847.85		乙酸-2-苯乙基酯	—	74.09
	α -松油醇	58.10	76.90		泛酸内酯	—	4.25
	香叶醇	3.23	2.72		2-糠酸甲酯	—	2.70
	2-甲基-3-戊烯-1-醇	—	27.62		2-丁酮	91.59	—
	苯甲醇	9.44	7.48		3-戊烯-2-酮	68.09	—
	苯乙醇	10.63	29.15		1-(乙酰氧基)-2-丙酮	—	451.34
	$\alpha,\alpha,4$ -三甲基-苯甲醇	2.52	6.47		1-戊烯-3-酮	735.55	20.89
	2-甲基-丙醛	128.10	22.26		2,3-戊二酮	52.47	—
	2-甲基-丁醛	214.72	—		2-甲基-1-戊烯-3-酮	23.96	12.04
	戊醛	4 002.41	251.42		3-辛酮	—	42.55
	(<i>E</i>)-2-丁烯醛	487.76	—		二氢-2-甲基-3(2 <i>H</i>)-呋喃酮	7.56	10.76
	己醛	762.02	68.91		2,3-己二酮	125.82	—
	(<i>E</i>)-2-戊烯醛	—	2.71		3-羟基-2-丁酮	—	123.58
	(<i>Z</i>)-3-己烯醛	—	41.24		羟基丙酮	—	30.96
	庚醛	61.60	31.00		1-辛烯-3-酮	197.55	—
	3-甲基-2-丁烯醛	8.24	9.37		4-甲基-3-戊烯-2-酮	—	22.42
	2-己烯醛	—	45.62		6-甲基-5-庚-2-酮	162.48	97.56
	(<i>E</i>)-2-己烯醛	1 564.14	—		4-甲基-4-戊烯-2-酮	—	38.90
酮类	辛醛	125.86	6.94		左旋樟脑	—	8.54
	(<i>E</i>)-2-庚烯醛	500.32	25.49				

续表 4

种类	化合物	峰面积($\times 10^7$)		种类	化合物	峰面积($\times 10^7$)	
		WK	K-J8			WK	K-J8
酮类	3-甲基-6,1-甲基乙基-2-环己烯-1-酮	14.88	10.18	其他	2-甲基-呋喃	40.13	—
	4-环戊烯-1,3-二酮	17.73	26.42		2-乙基-呋喃	61.74	25.91
	香芹酮	3.55	3.90		2-戊基呋喃	15.83	10.55
	2,5-己二酮	6.16	—		2,5-二乙基四氢-呋喃	—	5.28
	2,3-辛二酮	—	17.19		樟脑	4.30	—
	2(5 <i>H</i>)-呋喃酮	19.39	9.67		2-丙基-呋喃	—	4.80
	马茅烯酮	34.81	17.28		四氢-2,5-二甲基-呋喃	—	38.00
	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	9.38	4.50		5-甲基-2-呋喃甲醇	—	15.04
酸类	乙酸	—	136.49	其他	3-苯基-呋喃	0.80	—
	己酸	—	37.68		顺式-亚麻酸	—	48.67
	α -蒎烯	—	65.18		1-甲基-4,1-甲基乙烯基-苯	—	42.58
萜烯类	2-萜烯	13.13	—	其他	2,5-呋喃甲醛	20.96	—
	<i>D</i> -柠檬烯	21.34	11.97		5-羟甲基糠醛	13.64	9.36
	γ -松油烯	24.37	9.02				

表 5 猕猴桃不同挥发性风味化合物统计

Table 5 Statistics of different volatile flavor compounds in kiwifruit

化合物 类别	WK		K-J8	
	种类	峰面积($\times 10^7$)	种类	峰面积($\times 10^7$)
醇类	18	1 156.88	27	11 816.33
醛类	19	12 829.32	18	849.04
酸类	0	0.00	2	174.17
酮类	16	1 570.97	18	948.68
酯类	3	130.73	15	16 922.29
萜烯类	3	58.84	3	86.17
其他	7	157.40	9	200.19
合计	66	15 904.14	92	30 996.87

物含量增加,尤其是醇类和酯类,醛类和酮类化合物含量降低。WK 和 K-J8 中共有化合物 48 种,主要以醇类、醛类和酮类居多,包括乙醇、己醛和乙酸乙酯等。戊糖片球菌发酵后增添了 44 种风味物质,以醇类和酯类为主,这与菌株发酵产生的特殊风味物质和 β -葡萄糖苷酶水解糖苷产生的不同风味物质前体有关。

醇类是乳酸菌发酵过程中重要的挥发性香气^[29],12 种醇类在乳酸菌发酵后含量增加,如芳樟醇(铃兰香)和 α -松油醇(百合、紫丁香),这些化合物以糖苷形式结合在猕猴桃中^[30],阈值较低,对产品风味具有积极影响。酯类提供水果宜人的花果香,其阈值一般较低。发酵猕猴桃中增加的酯类多为乙酸酯(乙酸甲酯和乙酸乙酯等),是因为猕猴桃中氨基酸或碳水化合物降解产生的高级醇与乙酰辅酶 A 反应^[31],从而增加乙酸酯含量。萜烯类化

合物是水果的典型香气特征,常以糖苷键结合的形式出现在猕猴桃中^[32]。K-J8 中新的萜烯类化合物为 α -蒎烯(雪松、松木)。

WK 中主要风味化合物为戊醛(绿色、麦芽)、糠醛(杏仁、焦香)、(*E*)-2-己烯醛(绿色、青草)和己醛(青草),较高的糠醛含量可能源于维生素 C 在无氧和热的作用下形成糠醛^[33]。而 K-J8 中主要为乙酸乙酯(甜香、菠萝味)、3-甲基-1-丁醇(香蕉、花香)、乙醇(果香、花香)、1-己醇(花果香)、乙酸异戊酯(苹果、香蕉)、2-甲基-丁醛(麦芽)和 1-戊醇(水果香),这些化合物均呈花香和果香,赋予猕猴桃丰富且浓郁的风味。戊糖片球菌发酵后,猕猴桃中有 3 种新风味化合物,分别为 α -当归内酯(甜草药香)、乙酸糠酯和泛酸内酯(棉花糖、烤面包)。乙酸糠酯被广泛用作食品和面包房中的调味剂,可通过糠醇与乙酸的原位酯化形成^[34]。综上,戊糖片球菌 J8 发酵增加了猕猴桃的风味物质含量及种类,改善了猕猴桃的风味。

2.5 发酵猕猴桃面包面团 α -淀粉酶和蛋白酶活力变化

由图 2 可知,WB 的 α -淀粉酶活和 α -氨基态氮含量最低,而 KB-J8 的 α -淀粉酶活力和 α -氨基态氮含量较 WKB 分别提高了 14.86%,18.63%,表明猕猴桃的添加和乳酸菌发酵均可提高 α -淀粉酶和蛋白酶活力。其原因在于猕猴桃富含的有机酸和乳酸菌发酵产生的大量乳酸、乙酸等有机酸激活了小麦粉中内源性 α -淀粉酶和蛋白酶活力,同时乳酸菌自身也会分泌 α -淀粉酶和蛋白酶^[35]。

2.6 发酵猕猴桃面包的烘焙特性

由表 6 可知,与 WKB 相比,采用戊糖片球菌 J8 发酵的 KB-J8 的 SDF 含量提高了 12.54%,这与其较高的 β -葡萄糖苷酶酶活有关。 β -葡萄糖苷酶是重要的纤维素水解

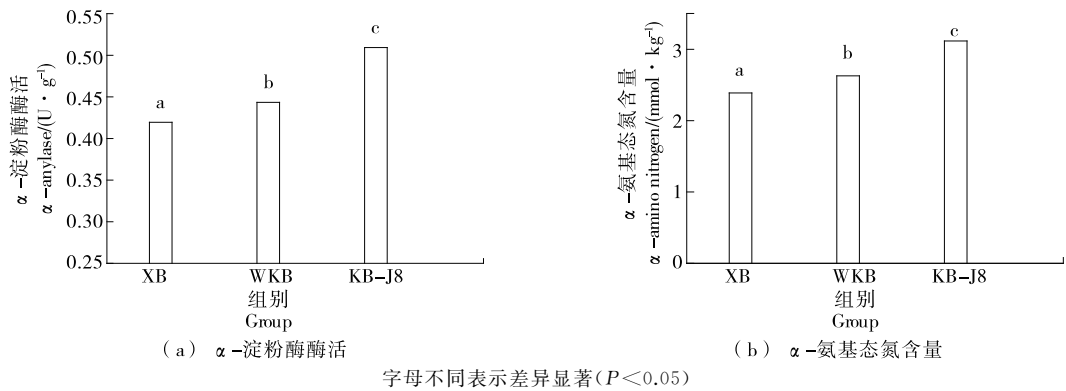


图 2 猕猴桃面团的 α -淀粉酶酶活与 α -氨基态氮含量变化

Figure 2 The α -amylase activity and α -amino nitrogen content of different kiwifruit dough

酶,可促进纤维降解生成小分子可溶性多糖^[36],供乳酸菌和酵母菌利用。WKB 面包比容最小,主要是因为纤维素会削弱或破坏面团筋网络结构,从而导致持气能力降低。与 WKB 相比,KB-J8 面包比容提高了 18.59%,硬度下降了 11.58%。添加猕猴桃后,面包皮 L^* 值从 72.10 降至 65.02, a^* 、 b^* 值显著增加($P < 0.05$), ΔE 均大于 6,即猕猴桃的添加导致面包亮度减少,红黄度增加,表皮颜色变化显著,添加发酵猕猴桃后面包色泽进一步加深,与

KB-J8 中较高的 α -淀粉酶和蛋白酶酶活相符。淀粉和面筋蛋白的水解使美拉德反应底物含量增加,从而导致褐变,面包色泽变化更加明显。

2.7 发酵猕猴桃面包游离氨基酸含量

由图 3 可知,相对于 XB, WKB 总游离氨基酸含量 (57.00 mg/100 g) 为 XB 的 1.10 倍,是因为猕猴桃本身含有多种氨基酸。经乳酸菌发酵后,KB-J8 中总游离氨基酸含量达 80.38 mg/100 g,与 WKB 相比提高了 41.02%,与

表 6 不同面包烘焙特性评估[†]

Table 6 Evaluation of the baking characteristics of different breads

样品	SDF/(g · kg ⁻¹)	TDF/(g · kg ⁻¹)	比容(mL/g)	硬度/g	L^*	a^*	b^*	ΔE
XB	7.02±1.23 ^a	18.51±1.11 ^a	6.15±0.01 ^b	281.00±4.10 ^a	72.10±1.66 ^b	6.92±1.18 ^a	35.22±1.55 ^a	—
WKB	12.12±1.50 ^b	35.62±1.41 ^c	5.11±0.05 ^a	354.00±5.30 ^c	66.98±0.47 ^a	9.51±0.11 ^b	38.13±0.16 ^b	6.43
KB-J8	13.64±0.81 ^c	31.59±1.82 ^b	6.06±0.10 ^b	313.00±12.00 ^b	65.02±1.10 ^a	9.79±0.49 ^b	38.64±0.45 ^b	8.37

[†] SDF 为可溶性膳食纤维;TDF 为总膳食纤维;字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

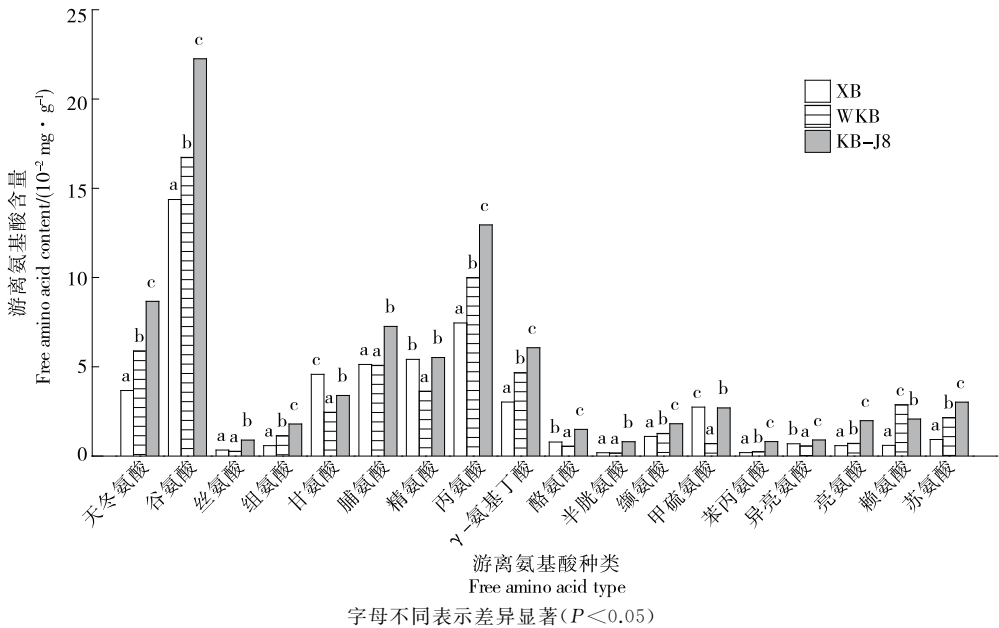


图 3 发酵猕猴桃面包游离氨基酸含量

Figure 3 Free amino acid content of fermented kiwifruit bread

蛋白酶活性测定结果相符。支链氨基酸(缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸)、芳香族氨基酸(酪氨酸、苯丙氨酸)和含硫氨基酸(甲硫氨酸和半胱氨酸)是形成风味化合物的主要氨基酸^[37]。KB-J8 面包中缬氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、酪氨酸、半胱氨酸含量均比 XB 和 WKB 高,这 5 种物质总量较 WKB 提升了 2.32 倍。通过 Ehrlich 途径可将缬氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸转化为 2-甲基-1-丙醇、3-甲基-1-丁醇和苯乙醇,而这 3 种物质都是面包中重要的风味物质。

2.8 发酵猕猴桃面包滋味分析

由图 4(a)可知,WKB 和 KB-J8 的整体滋味指标显著高于小麦面包,与猕猴桃较高的有机酸(苹果酸和柠檬酸等)、糖类(葡萄糖、果糖)和呈味氨基酸含量有关。与 WKB 相比,KB-J8 的酸味、甜味、鲜味、鲜味增加,涩味和苦味降低。WKB 与 KB-J8 的甜味、酸味、滋味差异源于乳酸菌发酵代谢产酸、淀粉降解和较高含量的呈味氨基

酸。KB-J8 中较高含量的丙氨酸、丝氨酸和苏氨酸可增加甜味,较高的谷氨酸和天冬氨酸含量可赋予鲜味同时还可抑制苦味。KB-J8 的苦味和涩味值均低于 WKB,与其较低的奎宁酸含量相关,奎宁酸阈值较低,对苦味和涩味贡献较大。

由图 4(b)可知,主成分总方差贡献率达 95.96%,能反映样品大部分信息。XB、WKB 和 KB-J8 的整体滋味特性在主坐标轴具有良好的区分度,WKB 与苦涩味相关,而 KB-J8 与甜酸鲜咸味相关,说明发酵和未发酵猕猴桃的添加对面包整体滋味特性的提升具有显著性差异($P<0.05$)。

2.9 发酵猕猴桃面包挥发性风味化合物含量变化

由图 5(a)和表 7 可知,3 组面包共检出 102 种风味物质,包括 39 种醇类、10 种酸类和 22 种酯类等。XB 的种类和含量最低,KB-J8 的种类和含量较 WKB 分别增加了 45.10%和 27.78%。

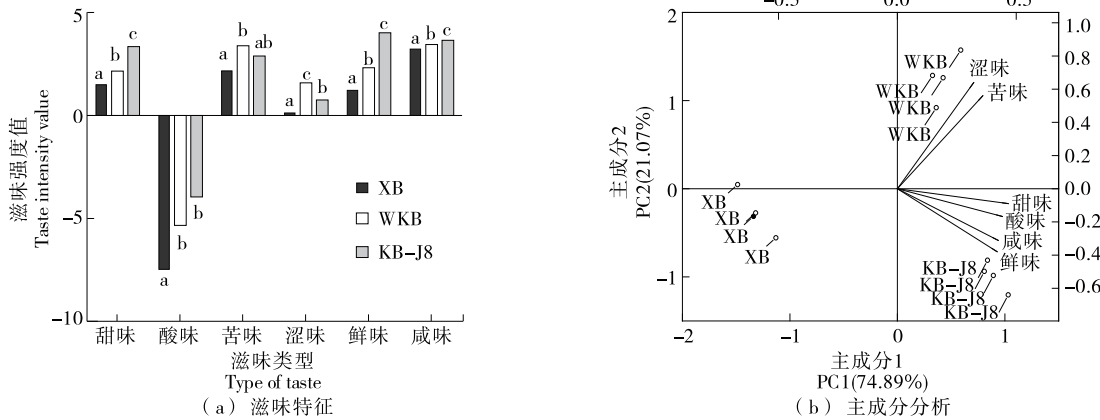


图 4 发酵猕猴桃面包的滋味特征及主成分分析

Figure 4 Taste characteristic and PCA plots of fermented kiwifruit bread bread

表 7 面包风味化合物含量[†]

Table 7 The content of bread flavor compound

种类	化合物	气味特性	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
			XB	WKB	KB-J8
醇类	乙醇	果香,花香	257.00 $\pm$ 7.34 ^b	229.50 $\pm$ 7.74 ^a	302.70 $\pm$ 2.92 ^d
	2,3-二甲基-1-戊醇	—	—	0.43 $\pm$ 0.02	—
	2-乙基环丁醇	—	—	—	0.92 $\pm$ 0.02
	2-甲基-1-丙醇	苹果,麦芽	3.27 $\pm$ 0.01 ^a	3.97 $\pm$ 0.07 ^a	16.21 $\pm$ 0.13 ^c
	3-甲基-1-丁醇	香蕉,花香	68.39 $\pm$ 0.12 ^a	90.26 $\pm$ 1.29 ^b	126.70 $\pm$ 0.98 ^d
	1-戊醇	果香	—	0.73 $\pm$ 0.03 ^a	2.16 $\pm$ 0.02 ^c
	5-甲基-2-庚醇	—	0.47 $\pm$ 0.08 ^a	—	1.58 $\pm$ 0.04 ^b
	1-己醇	花果香	8.28 $\pm$ 0.12 ^a	18.76 $\pm$ 0.15 ^c	16.50 $\pm$ 0.13 ^b
	内消旋 3,4-己二醇	—	1.07 $\pm$ 0.03	—	—
	2-癸醇	—	—	—	0.91 $\pm$ 0.05
酯类	DL-2,3-丁二醇	醇香	0.80 $\pm$ 0.03 ^b	1.53 $\pm$ 0.08 ^c	3.57 $\pm$ 0.05 ^e
	DL-薄荷醇	—	—	38.81 $\pm$ 1.74 ^d	26.50 $\pm$ 0.92 ^a
	香茅醇	玫瑰香	0.03 $\pm$ 0.02	—	—

续表 7

种类	化合物	气味特性	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
			XB	WKB	KB-J8
醇类	Z-2-十二烯醇	—	—	—	1.87 ± 0.02
	薄荷醇	薄荷	7.88 ± 0.19^a	9.59 ± 0.32^b	—
	2-呋喃甲醇	焙烤香	—	—	2.63 ± 0.08
	Z-4-十二烯醇	—	5.41 ± 0.08^b	6.05 ± 0.01^c	3.63 ± 0.04^a
	1,9-壬二醇	—	—	—	6.20 ± 0.17
	松油醇	百合,丁香	5.34 ± 0.05^b	5.19 ± 0.05^b	4.04 ± 0.06^a
	4-叔丁基环庚醇	—	2.40 ± 0.05	—	—
	2,6-辛二烯-4,5-二醇	—	4.27 ± 0.05	—	—
	(Z)-2,6-二甲基-2,7-辛二烯-1,6-二醇	—	—	—	0.21 ± 0.01
	苯甲醇	花香	9.55 ± 0.12^c	9.11 ± 0.18^c	7.90 ± 0.06^b
	苯乙醇	玫瑰,苹果	192.30 ± 1.05^d	150.60 ± 4.05^c	135.70 ± 0.18^b
	4-甲基-2,3-戊二醇	—	—	—	2.17 ± 0.03
	6-(3-甲基-3-环己烯基)-2-甲基-2,6-庚二烯醇	—	0.80 ± 0.01	—	—
	2-甲基-6-亚甲基-辛-1,7-二烯-3-醇	—	—	—	1.11 ± 0.01
	1-(3,7-二甲基-1-辛烯基)-环丙醇	—	—	—	0.22 ± 0.03
	3,6-二甲基-3-庚醇	—	—	—	9.48 ± 0.15
	2,2,4-三甲基-3-戊醇	果香	—	3.91 ± 0.08	—
	3-甲基-2-丁醇	—	0.60 ± 0.03^a	1.59 ± 0.08^b	3.69 ± 0.05^d
	乙酸	醋酸味	41.53 ± 2.34^a	50.27 ± 1.74^b	80.97 ± 2.12^c
酸类	2-甲基富马酸	—	—	0.43 ± 0.02	—
	2-甲基庚酸	—	10.75 ± 0.21	—	—
	异丁酸	脂肪	18.69 ± 0.12^c	8.61 ± 3.79^a	20.71 ± 0.98^d
	4-甲基戊酸	—	6.74 ± 0.20^b	10.14 ± 0.03^c	1.58 ± 0.02^a
	2-巯基丙酸	—	—	2.44 ± 0.08	—
	己酸	汗味,脂肪	3.87 ± 0.12^a	18.08 ± 0.55^b	18.54 ± 0.13^b
	辛酸	奶酪味	5.21 ± 0.03^a	8.19 ± 0.08^c	—
	壬酸	椰子,脂肪	1.47 ± 1.14^a	2.50 ± 1.07^a	10.53 ± 0.03^c
	己醛	青草味	3.34 ± 0.02^a	4.13 ± 0.02^b	3.10 ± 0.12^a
	(E)-2-庚醛	果香	—	—	10.41 ± 0.03
醛类	壬醛	柑橘,花香	17.97 ± 0.01^a	20.10 ± 0.07^b	26.38 ± 0.13^d
	(E)-2-辛烯醛	坚果,焙烤	—	—	3.63 ± 0.08
	糠醛	杏仁,焦香	—	18.34 ± 0.03^c	2.40 ± 0.02^a
	月桂醛	柑橘	—	—	2.16 ± 0.04
	苯甲醛	杏仁,焦香	12.16 ± 0.12^a	17.00 ± 0.55^b	22.17 ± 0.13^c
	(E)-2-壬烯醛	木香,烟熏	—	6.31 ± 0.08^a	10.12 ± 0.05^c
	2-壬烯醛	黄瓜香味	—	—	7.84 ± 0.15
	苯乙醛	蜂蜜,甜香	2.54 ± 0.04^a	4.13 ± 0.11^b	—
	(E,E)-2,4-癸二烯醛	黄瓜,油炸	—	1.88 ± 0.08^b	0.74 ± 0.02^a
	2,3-己甲醛	—	—	—	1.81 ± 0.03
	甲酸戊酯	果香	—	—	1.53 ± 0.11
	乙醇酸戊酯	—	2.22 ± 0.02^c	1.10 ± 0.02^a	—
	辛酸乙酯	菠萝,香蕉	13.99 ± 0.01^a	12.59 ± 0.17^a	29.02 ± 0.13^c
	辛酸甲酯	橘子	—	17.05 ± 1.12	—
	4-甲基-戊酸甲酯	—	—	—	0.59 ± 0.05
酯类	壬酸乙酯	葡萄	—	—	1.93 ± 0.04
	癸酸乙酯	椰子香	—	—	21.06 ± 0.13

续表 7

种类	化合物	气味特性	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
			XB	WKB	KB-J8
酯类	2-甲基巴豆酸甲酯	—	—	—	2.22±0.08
	乙酸乙酯	甜香,菠萝	2.01±0.05 ^a	3.91±0.01 ^b	6.03±0.18 ^c
	丁酰乳酸丁酯	烤面包香	—	5.93±0.08 ^c	6.49±0.11 ^c
	δ -癸内酯	椰子,桃子	—	—	0.43±0.04
	壬基内酯	桃子	—	—	2.87±0.06
	十六酸乙酯	奶油香	1.25±0.05 ^c	0.67±0.05 ^a	0.92±0.01 ^b
	对叔丁基苯乙酸甲酯	—	—	—	1.52±0.08
	己酸甲硫醇酯	果香	—	1.40±0.09 ^a	2.75±0.07 ^b
	邻苯二甲酸-4-庚基异丁酯	—	1.28±0.06	—	—
	1,2-苯二甲酸单丁酯	—	—	—	0.88±0.01
	邻苯二甲酸二丁酯	—	—	—	3.86±0.11
	草酸酰胺乙酯	—	—	—	1.87±0.08
	二氢-3,5-二甲基-2(3 <i>H</i>)-呋喃酮	奶油,酸奶	0.53±0.04	—	—
酮类	3-羟基-2-丁酮	薄荷香	—	16.26±0.02 ^a	22.23±0.42 ^b
	异薄荷酮	薄荷香	0.40±0.02 ^a	0.31±0.01 ^a	4.21±0.02 ^b
	<i>L</i> -薄荷酮	—	0.08±0.01 ^a	1.22±0.07 ^b	0.70±0.03 ^b
	2-羟基-5-乙基-5-甲基环戊-2-烯-1-酮	香油,焦糖	—	4.83±0.02	—
	2-羟基-2-环戊烯-1-酮	乙醚	—	—	2.93±0.02
	2-羟基-3,5-二甲基环戊-2-烯-1-酮	桃子,椰子	—	1.71±0.05 ^a	2.98±0.03 ^c
	二氢-5-戊基-2(3 <i>H</i>)-呋喃酮	—	4.27±0.03 ^c	2.93±0.08 ^a	—
	5-乙基二氢-3-甲基-2(3 <i>H</i>)-呋喃酮	—	—	—	1.81±0.08
	3,6-庚二酮	—	0.47±0.01	—	—
	十一烷	—	—	5.62±0.14	—
烃类	3,5-二甲基-辛烷	—	—	—	0.54±0.04
	十烷	—	—	3.54±0.07	—
	2-环丙基丁烷	—	—	—	1.35±0.08
	庚烷	—	—	—	0.68±0.02
	1-十六烷	—	1.66±0.05	—	—
	十六烷	—	—	—	8.19±0.12
	柠檬烯	花香	—	1.59±0.01	—
	1,4-戊二烯	—	0.60±0.02	—	—
	3,7-二甲基-1-辛烯	—	—	—	11.23±0.06
	2-甲基-3-己烯	—	—	1.71±0.07 ^a	3.16±0.09 ^b
	(<i>Z</i>)-5-甲基-2-己烯	—	—	—	3.16±0.07
	2,4-癸二烯	油炸,脂肪	2.20±0.09 ^b	—	0.64±0.01 ^a
	(<i>E</i>)-2-戊烯	苹果,草莓	—	0.73±0.03	—
	2,4-辛二炔	—	0.80±0.04	—	—
	2-戊基呋喃	花果,坚果	3.74±0.02 ^d	2.44±0.12 ^c	0.44±0.02 ^a
	5-甲基-3-庚炔	—	—	—	1.58±0.02
	2-甲基丙酸酐	—	—	—	5.79±0.13
	1-十三炔	—	—	—	4.21±0.18
	2,4-双(1,1-二甲基乙基)苯酚	—	3.67±0.08	—	—
	吲哚	橙子,茉莉	6.61±0.12 ^a	11.12±0.25 ^b	15.91±0.13 ^c

† 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

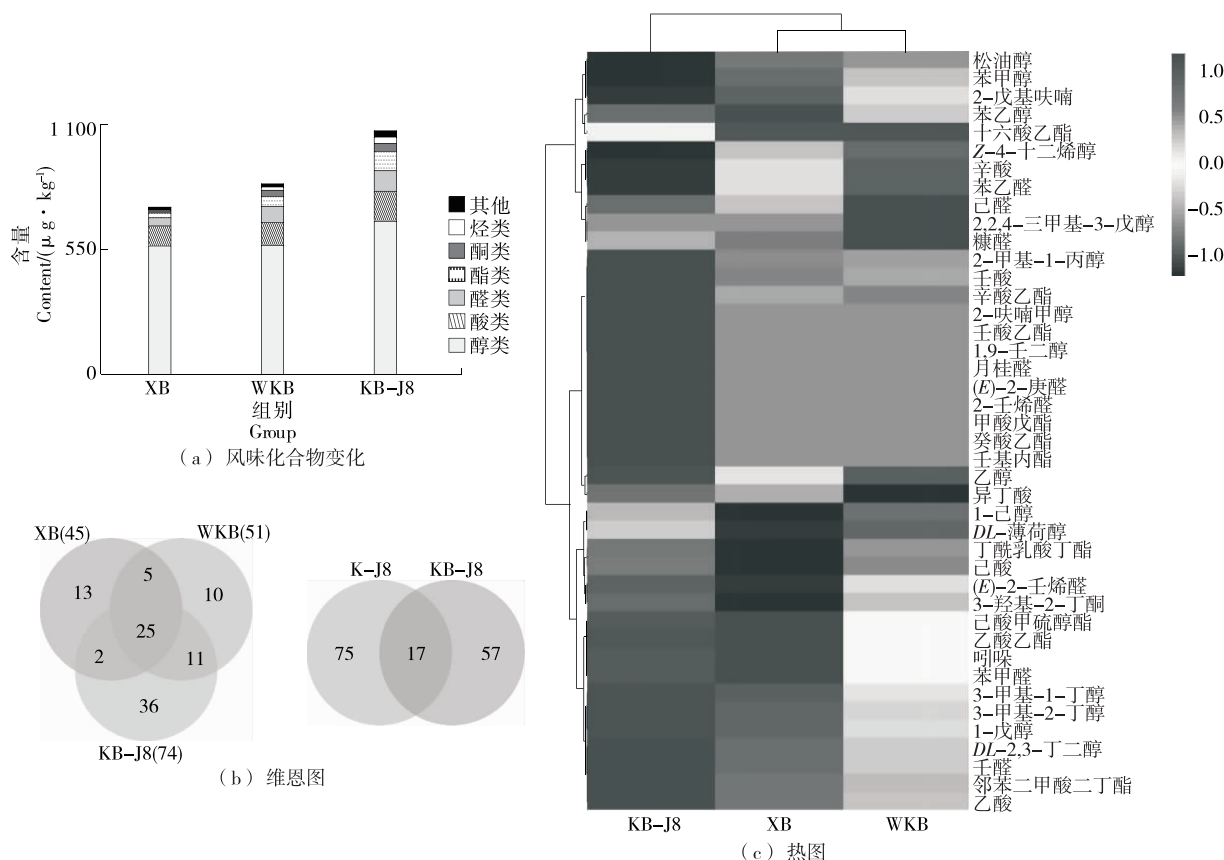


图 5 面包的风味化合物变化、维恩图和热图

Figure 5 Changes in content of different bread flavor compound Venn diagrams and Heatmap

由图 5(b)可知,3 组面包中均检出 25 种共有风味化合物,包括乙醇(果香、花香)、1-己醇(花果香)和辛酸乙酯(菠萝、香蕉)等,主要以醇类为主。K-J8 和 KB-J8 中均检出 17 种共有化合物,包括 3-甲基-1-丁醇(香蕉、花香)、2-甲基-1-丙醇(苹果、麦芽)和乙酸乙酯(甜香,菠萝)等,以醇类居多。将其中 43 种面包主要风味物质的含量标准化后进行聚类热图分析,由图 5(c)可知,不同挥发性风味物质含量在不同面包中差异显著($P < 0.05$)。

醇类化合物是面包风味的重要组成部分。发酵后,KB-J8 中乙醇、2-甲基-1-丙醇、3-甲基-1-丁醇和 3-甲基-2-丁醇含量均显著提升,与发酵猕猴桃风味检测结果相符。且 KB-J8 中缬氨酸和亮氨酸含量最高,这两种氨基酸可通过 Ehrlich 途径分别转化形成 2-甲基-1-丙醇和 3-甲基-1-丁醇。KB-J8 中产生了一些在 WKB 和 XB 中未检出的新不饱和醛类物质,如 2-壬烯醛(黄瓜)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(黄瓜)和月桂醛(柑橘)等。这些不饱和烯醛类物质阈值比饱和醛类更低,可赋予面包更加丰富、浓郁的风味^[38]。酯类化合物大多呈果香和花香,KB-J8 中酯类种类和含量最高,WKB 次之。KB-J8 中还检测到内酯类化合物:壬基内酯(桃子)和 δ -癸内酯(椰子、桃子),内酯可通过微生物作用、深度的脂类氧化或加热形成。

2.10 发酵猕猴桃面包感官评价

由图 6 可知,KB-J8 的整体可接受度评分最高,而 WKB 的外观评分最低,这与其低比容和高硬度有关。WKB 中较高的总膳食纤维含量破坏了面团筋网络结构,苦涩味突出,因而组织结构和口感评分较低。发酵后,WKB 的比容与硬度得到改善,KB-J8 的外观饱满、质地松软,外观和口感评分均优于 WKB。KB-J8 中因富含更多香气物质而获得较高风味评分(7.7),其较高的游离氨基酸含量易于发生美拉德反应,产生令消费者喜爱的焦黄色泽,因此在色泽方面评分最高,与面包风味化合物

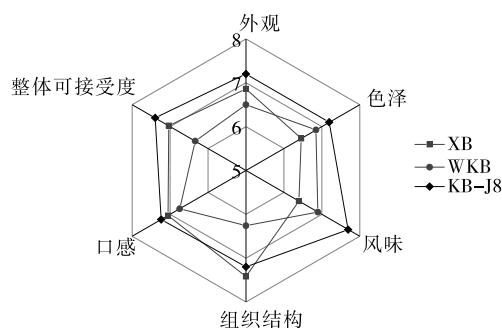


Figure 6 Bread sensory evaluation

和颜色分析结果相符合。

3 结论

利用酒鬼酒曲中筛选的戊糖片球菌 J8 发酵猕猴桃并制成面包。结果表明,经戊糖片球菌 J8 发酵猕猴桃后,奎宁酸、柠檬酸和苹果酸含量均降低,乳酸和乙酸含量均显著增加 ($P < 0.05$);风味物质种类和含量均提高,以醇类、醛类和酯类化合物为主。猕猴桃中发现了 3 种新的风味化合物: α -当归内酯、乙酸糠酯和泛酸内酯。与未发酵猕猴桃面包相比,发酵猕猴桃面包 KB-J8 面团的 α -淀粉酶和蛋白酶活力分别提高了 14.86% 和 18.63%,其面包的可溶性膳食纤维含量和总氨基酸分别增加了 12.54% 和 41.02%。烘焙特性方面,KB-J8 的比容提高了 18.59%,硬度下降了 11.58%。风味特性方面,乳酸菌发酵后面包风味物质种类和含量增加,甜味、酸味、鲜味和咸味均优于 WKB,风味特性整体得到改善,同时感官评价指标得分均优于 WKB。说明该株戊糖片球菌 J8 发酵猕猴桃在增加可溶性膳食纤维含量,提升氨基酸含量,改善面包风味和烘焙特性等方面具有良好的应用潜力。后续可将该株产 β -葡萄糖苷酶戊糖片球菌与马克斯克鲁维酵母混菌发酵进一步改善发酵猕猴桃体系,实现混菌发酵的协同作用,改善发酵猕猴桃面包的烘焙品质与香气特征。

参考文献

- [1] 于航, 李祎婷, 谢云飞, 等. 猕猴桃淀粉功能性评价及其在面包中的应用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(18): 162-166.
YU Hang, LI Yi-ting, XIE Yun-fei, et al. Functional evaluation of kiwi starch and its application on bread[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(18): 162-166.
- [2] ANUSOOYA S, SUN D X, GEOFFREY I N, et al. Physicochemical properties of bread dough and finished bread with added pectin fiber and phenolic antioxidants[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(3): 97-107.
- [3] SUN WATERHOUSE D, SIVAM A S, COONEY J, et al. Effects of added fruit polyphenols and pectin on the properties of finished breads revealed by HPLC/LC-MS and size-exclusion HPLC [J]. Food Research International, 2011, 44(9): 3 047-3 056.
- [4] SUN WATERHOUSE D, CHEN J, CHUAH C, et al. Kiwifruit-based polyphenols and related antioxidants for functional foods: Kiwifruit extract-enhanced gluten-free bread[J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 2009, 60(7): 251-264.
- [5] ZHAO Ning, ZHANG Yu-zhu, LIU Dan, et al. Free and bound volatile compounds in 'Hayward' and 'Hort16A' kiwifruit and their wines[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(5): 875-890.
- [6] 彭帅, 樊明涛, 张庭静, 等. 熊果苷诱导植物乳杆菌 β -D-葡萄糖苷酶对葡萄酒香气的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 170-175.
PENG Shuai, FAN Ming-tao, ZHANG Ting-jing, et al. Influence of β -D-glycosidase enzymes induced by arbutin on aroma of grape wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(19): 170-175.
- [7] NARASIMHA G, SRIDEVI A, RAMANJANEYULU G, et al. Purification and characterization of β -glucosidase from aspergillus niger[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 19(1/2/3/4): 652-661.
- [8] DONG Wei-liang, XUE Meng-lei, ZHANG Yue, et al. Characterization of a beta-glucosidase from Paenibacillus species and its application for succinic acid production from sugarcane bagasse hydrolysate[J]. Bioresource Technology Biomass Bioenergy Biowastes Conversion Technologies Biotransformations Production Technologies, 2017, 241(3): 9-16.
- [9] GONZALEZ BLASCO G, SANZ APARICIO J, GONZALEZ B, et al. Directed evolution of β -glucosidase a from paenibacillus polymyxa to thermal resistance[J]. Journal of Biological Chemistry, 2000, 275(18): 13 708-13 712.
- [10] 钱超, 杨文丹, 张宾乐, 等. 高产 β -葡萄糖苷酶的乳酸菌在葡萄汁酸面团面包中的应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 14-20.
QIAN Chao, YANG Wen-dan, ZHANG Bin-le, et al. Application of high producing β -glucosidase lactic acid bacteria in raisin sourdough bread[J]. Food & Machinery, 2017, 33(5): 14-20.
- [11] 钱超. 酒曲产 β -葡萄糖苷酶的乳酸菌在葡萄酸面团面包中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 33-34.
QIAN Chao. β -glucosidase producing lactic acid bacteria from Qu starter and its application in raisin sourdough bread [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 33-34.
- [12] 程新, 黄璟, JACOB Ojobi-omedi, 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 Xin, HUANG Jing, JACOB Ojobi-omedi, 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.
- [13] 程新. 湿热-多菌发酵对白芸豆面包营养及风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 53-54.
CHENG Xin. Effect of heat moisture treatment and multi-bacterial fermentation on nutrition and flavor characteristics of white kidney bean bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 53-54.
- [14] 邹奇波, 程新, 陈诚, 等. 混菌发酵酸面团对全麦面包风味与烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 38-45.
ZOU Qi-bo, CHENG Xin, CHEN Cheng, et al. Effects on flavor and baking characteristics of whole wheat bread by fermented sourdough with the mixed culture[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 38-45.
- [15] WANG Yu-chuan, HU Hui-fang, MA Jun-wei, et al. A novel high maltose-forming α -amylase from Rhizomucor miehei and its application in the food industry[J]. Food Chemistry, 2020, 305(1): 125447.1-125447.9.
- [16] THIELE C, GRASSL S, GÄNZLE M. Gluten hydrolysis and depolymerization during sourdough fermentation [J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(5): 1 307-1 314.

- [17] 吴玉新, 张可欣, 蒋慧, 等. 不同发酵时间甜酒酿面团的超微结构与面包香气特征研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(2): 29-36.
- WU Yu-xin, ZHANG Ke-xin, JIANG Hui, et al. Research on Ultra-structure of dough and aroma characteristics of bread containing glutinous rice fermented at different fermentation time[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(2): 29-36.
- [18] 曹伟超, 张宾乐, OJOBI O J, 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, 2021, 42(6): 111-117.
- CAO Wei-chao, ZHANG Bin-le, OJOBI O J, et al. The nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2021, 42(6): 111-117.
- [19] GOSWAMI D, GUPTA R K, SHARMA M, et al. Barnyard millet based muffins: Physical, textural and sensory properties[J]. LWT Food Science & Technology, 2015, 64(1): 374-380.
- [20] 刘若诗. 乳酸菌酸面团发酵剂的制备及其发酵烘焙特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010: 10-11.
- LIU Ruo-shi. Studies on preparation of lactic acid bacteria sourdough starter and their fermentation and baking characteristics[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 10-11.
- [21] 武盟, 曹伟超, 程新, 等. 高产 α -半乳糖苷酶乳酸菌发酵对鹰嘴豆酸面团生化特性及其面包烘焙品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 146-153.
- WU Meng, CAO Wei-chao, CHENG Xin, et al. Effect of fermentation with high-yield α -galactosidase-producing lactic acid bacteria on biochemical properties and breadmaking characteristics of chickpea sourdough[J]. Food Science, 2021, 42(10): 146-153.
- [22] 张薇, 程晓燕, 黄卫宁, 等. 含天然酵母粉发酵面包的营养与老化特性及风味化合物特征[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 33-38.
- ZHANG Wei, CHENG Xiao-yan, HUANG Wei-ning, et al. Nutritional properties, staling characteristics and volatile flavor compounds of natural yeast sourdough bread[J]. Food Science, 2014, 35(23): 33-38.
- [23] OMEDI J O, HUANG W, ZHENG J. Effect of sourdough lactic acid bacteria fermentation on phenolic acid release and antifungal activity in pitaya fruit substrate[J]. LWT, 2019, 111(3): 9-17.
- [24] HASSAN Y I, BULLERMAN L B. Antifungal activity of *Lactobacillus paracasei* ssp. *tolerans* isolated from a sourdough bread culture[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 121(1): 112-115.
- [25] GRIMALDI A, BARTOWSKY E J, JIRANEK V. Screening of *Lactobacillus* spp. and *Pediococcus* spp. for glycosidase activities that are important in oenology [J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 99(5): 1 061-1 069.
- [26] WEI Ming, WANG Shao-yang, GU Pan, et al. Comparison of physicochemical indexes, amino acids, phenolic compounds and volatile compounds in bog bilberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* under different pH conditions[J]. Journal of Food Science & Technology, 2018, 55(6): 2 240-2 250.
- [27] NGUYEN B T, BUJNA E, FEKETE N, et al. Probiotic beverage from pineapple juice fermented with *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains[J]. Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 54.
- [28] PENG Wang-ying, MENG Diao-qing, YUE Tian-li, et al. Effect of the apple cultivar on cloudy apple juice fermented by a mixture of *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, and *Lactobacillus fermentum*[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127922.
- [29] CHENG He-fa. Volatile flavor compounds in yogurt: A review[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2010, 50(10): 938-950.
- [30] GARCIA C V, QUEK S Y, STEVENSON R J, et al. Characterization of the bound volatile extract from baby kiwi (*Actinidia arguta*) [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(15): 8 358-8 365.
- [31] LALEL H J D, SINGH Z, TAN S C. Glycosidically-bound aroma volatile compounds in the skin and pulp of 'Kensington Pride' mango fruit at different stages of maturity[J]. Postharvest Biology & Technology, 2003, 29(2): 205-218.
- [32] ZHANG Shu-juan, MIKAEL P, LIU Jing, et al. Influence of Pre-Fermentation treatments on wine volatile and sensory profile of the new disease tolerant cultivar solaris[J]. Molecules, 2015, 20(12): 21 609-21 625.
- [33] 张鑫. 猕猴桃果酒发酵过程中色泽变化影响因素及护色研究[D]. 自贡: 四川轻化工大学, 2019: 15-16.
- ZHANG Xin. Research on influencing factors of kiwifruit wine color during fermentation and color protection [D]. Zigong: Sichuan University of Light Chemical Technology, 2019: 15-16.
- [34] HASHIM L H, HALILU A, SUDARSANAM P, et al. Bifunctional rice husk-derived SiO_2 -Cu-Al-Mg nanohybrid catalyst for one-pot conversion of biomass-derived furfural to furfuryl acetate[J]. Fuel, 2020, 275: 117953.
- [35] GAENZLE M G, VERMEULEN N, VOGEL R F. Carbohydrate, peptide and lipid metabolism of lactic acid bacteria in sourdough[J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 128-138.
- [36] SU Ri-na, NI Kui-kui, WANG Tian-wei, et al. Effects of ferulic acid esterase-producing *Lactobacillus fermentum* and cellulase additives on the fermentation quality and microbial community of alfalfa silage[J]. PEERJ, 2019, 7: 7 712.
- [37] 杨浣漪. 传统酸面团中酿酒酵母和旧金山乳杆菌的种内多样性及其互作研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 108-109.
- YANG Huan-yi. Intraspecific diversity of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus* San Francisco isolates from Chinese and traditional sourdough and their interaction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 108-109.
- [38] 程晓燕. 酸面团乳酸菌优势菌群及发酵馒头品质与风味特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 40-41.
- CHENG Xiao-yan. Research of dominant LAB in sourdough and its fermentation on the quality and flavor characteristics of steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 40-41.