

贮藏时间对面包感官、理化特性 与挥发性风味物质的影响

王富¹ 黄正开¹ 李耀¹ 程万兴¹ 易宇文² 乔明峰² 李想^{1,2}

(1. 四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院,四川 成都 610100;

2. 四川旅游学院烹饪科学四川省高等学校重点实验室,四川 成都 610100)

摘要:[目的]确定面包的最佳贮藏期。[方法]分析贮藏期间(0,1,2,3,4,5,6,7 d)面包的感官、理化和挥发性风味物质的变化。[结果]贮藏期间,面包无明显霉斑,当贮藏时间>5 d时,面包开始出现轻微的酸败味。整个贮藏期间,面包的pH值、菌落总数不断增加,水分含量、水分活度、比容不断下降。在风味特性上,共检测到48种化合物,主要为醇类和酸类。通过主成分分析发现,不同贮藏期间面包之间的风味具有显著性差异,当贮藏时间>5 d时,面包的风味与初期0 d的差异显著,通过PLS-DA分析共筛选10种VIP>1的物质(如异丁酸、异丁醇-D等),这些物质对于区分面包的新鲜度具有重要贡献作用。[结论]面包在7 d的贮藏期内,其品质随着时间延长而显著劣化,尤其是在贮藏时间超过5 d后,风味和感官品质发生明显转变。

关键词:面包品质;贮藏时间;感官;GC-IMS

Effects of storage time on the sensory, physicochemical properties and volatile flavor substances of bread

WANG Fu¹ HAUNG Zhengkai¹ LI Yao¹ CHENG Wanxing¹ YI Yuwen²
QIAO Mingfeng² LI Xiang^{1,2}

(1. College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan 610100, China;

2. Culinary Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan 610100, China)

Abstract: [Objective] To determine the optimal storage period for bread. [Methods] Changes in the sensory characteristics, physicochemical properties, and volatile flavor substances of bread are analyzed during storage periods of 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 days. [Results] No noticeable mold was observed during storage, but when the storage time exceeded 5 days, a slight off-flavor began to appear. Throughout the storage period, the pH value and total microbial count of the bread increased, while moisture content, water activity, and specific volume decreased. A total of 48 compounds were detected in the flavor profile, primarily alcohols and acids. Principal component analysis (PCA) revealed significant differences in flavor between breads stored for different durations. When storage time exceeded 5 days, the flavor significantly differed from that of the fresh bread (0 days). Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) identified 10 substances with VIP values >1 (e.g., isobutyric acid and isobutanol-D), which played a key role in distinguishing the freshness of the bread. [Conclusion] Bread quality significantly deteriorated over the 7-day storage period, especially after 5 days, when both flavor and sensory quality showed a marked decline.

Keywords: bread quality; storage time; sensory; GC-IMS

基金项目:川菜人工智能重点实验室项目(编号:CR23Z24);川菜工业化四川省高等学校工程研究中心项目(编号:GCZX22-14);四川省哲学社会科学重点研究基地川菜发展研究中心项目(编号:CC23Z09);烹饪科学四川省高等学校重点实验室项目(编号:PRKX2024Z09)

通信作者:李想(1980—),男,四川旅游学院教授,硕士生导师,硕士。E-mail:shiclx@163.com

收稿日期:2025-02-22 **改回日期:**2025-09-02

引用格式:王富,黄正开,李耀,等.贮藏时间对面包感官、理化特性与挥发性风味物质的影响[J].食品与机械,2026,42(1):101-110.

Citation:WANG Fu, HAUNG Zhengkai, LI Yao, et al. Effects of storage time on the sensory, physicochemical properties and volatile flavor substances of bread[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 101-110.

面包作为一种历史悠久且广泛消费的主食,在全球范围内具有重要的饮食文化地位^[1]。其独特的口感、风味和营养价值使其成为人们日常生活中不可或缺的食品之一。面包在贮藏期间会发生一系列的物理、化学和微生物变化,导致其质地、风味、营养价值和安全性逐渐变差。廖珺等^[2]研究发现,面包的氧化值随着贮藏时间的延长不断增加,贮藏第4天,面包的氧化值达到0.27 g/100 g,超过国家标准的规定。周枫等^[3]研究发现,添加茶多酚的面包的水分含量高,酸度和硬度增加率低,有助于改善面包产品品质并延长货架期。李晶等^[4]研究发现,面包的保水性随着麦芽糖淀粉酶添加量的增加而显著提高。同时,麦芽糖淀粉酶能显著延缓面团黏度和回生值的增加,从而改善面团品质。面包在贮藏过程中容易发生品质劣化,主要表现为淀粉回生导致的口感变硬、水分迁移引起的质地变化^[5]、风味物质的挥发或降解^[6],以及微生物污染导致的腐败^[7]等问题。这些品质变化不仅影响消费者的食用体验,还造成了大量的食品浪费和经济损失。Gomes-Ruffi等^[8]研究发现,乳化剂和麦芽糖淀粉酶对面包质地有积极影响,能有效延缓面包老化。

面包的香气是消费者感知的主要特征之一。香气越诱人,面包就越容易被消费^[9]。Xi等^[10]研究发现,馒头中酯类物质和2-戊基呋喃的含量在贮藏期间会迅速下降,25℃下能较好地保持馒头松软口感,而4℃则能更好地保持其风味品质。

试验拟分析贮藏时间对面包品质的影响,通过分析面包在贮藏过程中的感官、理化性质、质构及风味物质变化,揭示贮藏时间与面包品质劣化之间的关系,为优化面包贮藏条件、延长货架期提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

金焙1号高筋面粉:厦门海嘉面粉有限公司;
安佳黄油:恒天然商贸(上海)有限公司;
久大低钠盐:四川久大制盐有限责任公司;
安琪半干酵母、安琪面包改良剂:安琪酵母股份有限公司;
蔗糖:广东中轻糖业集团;
雀巢脱脂奶粉:双城雀巢有限公司;
欧福牌蛋液:太阳食品(天津)有限公司;
马铃薯:市售;
葡萄糖:廊坊鹏彩精细化工有限公司;
琼脂:上海终峰生物科技有限公司;
牛肉膏:广州市华琪生物科技有限公司;
蛋白胨:安琪酵母股份有限公司;

琼脂粉:江苏科泰生物有限科技公司;

平板计数琼脂培养基:山东托普生物工程有限公司;

煌绿乳糖胆盐:上海瑞楚生物科技有限公司;

结晶紫中性红胆盐琼脂:深圳生物逗点生物技术有限公司。

1.1.2 仪器设备

电子天平:乐祺LQ-C30001型,昆山优科维特电子科技有限公司;

恒温醒发箱:SINMAG SM-20SP型,新麦机械(中国)有限公司;

和面机:SINMAG SM2-25型,新麦机械(中国)有限公司;

烤箱:SINMAG SM2-523H型,新麦机械(中国)有限公司;

气相色谱离子迁移谱仪:FlavourSpec®型,德国G.A.S.公司;

物性测试仪:TA.XT Plus型,英国Stable Micro Systems公司;

无菌操作台:SZYDW型,亿达净化实验室设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 面包的制作

(1) 样品面包的液种(波兰种)制作:300 g高筋粉、300 g水、3 g半干酵母(安琪)和匀后,常温发酵2 h,5℃冰箱发酵15 h。

(2) 面包制作:将回温后的波兰种和主面团原料(高筋面粉700 g、水200 g、白糖200 g、盐10 g、黄油100 g、奶粉100 g、鸡蛋40 g)混匀,搅拌至面团撕拉呈均匀薄膜状,常温发酵20 min后,分割整形为60 g圆球状,于35℃、85%湿度醒发60 min,烘烤(面火190℃,底火170℃,13 min)。利用10 cm×10 cm的PP包装袋进行封装,贮藏温度25℃,相对湿度45%,贮藏时间7 d,每隔1 d取样进行分析。

1.2.2 面包感官评价 参照文献[11]的方法并修改。选20名(10男10女)经过专业学习的食品专业人员,按表1对面包的外观形态、口感质地和气味强度进行感官评价。

1.2.3 pH值测定 参照刘敏等^[12]的方法。

1.2.4 菌落总数和大肠杆菌菌群数量测定

(1) 菌落总数:按GB 4789.2—2022执行。

(2) 大肠杆菌菌群数量:按GB 4789.3—2022执行。

1.2.5 水分含量和水分活度测定

(1) 水分含量:按GB 5009.238—2016执行。

(2) 水分活度:GB 5009.238—2016执行。

表1 面包感官评价表
Table 1 Bread sensory evaluation form

项目	评分标准	分值
外观色泽 (10分)	色泽金黄均匀,表面光滑,无霉斑异物	10~8
	色泽轻微发暗,轻微霉斑	7~5
	明显发暗和霉变	0~4
口感质地 (20分)	按压后快速回弹,且松软湿润,无异味,非常喜欢	20~16
	回弹性较慢,轻微变硬,轻微酸,可接受	10~15
	无弹性,干硬难嚼,明显酸败或霉苦味,咀嚼食用	0~9
气味强度 (20分)	麦香浓郁且无异味	20~16
	香气较淡,有轻微哈败味	10~15
	有异味和霉味	0~9

1.2.6 比容测定 参照郝素颖等^[11]的方法,按式(1)计算比容。

$$P = \frac{V}{m}, \quad (1)$$

式中:

P——面包比容, mL/g;

V——面包体积, mL;

m——面包质量, g。

1.2.7 质构测定 参照丁双鲲等^[13]的方法。探头型号为

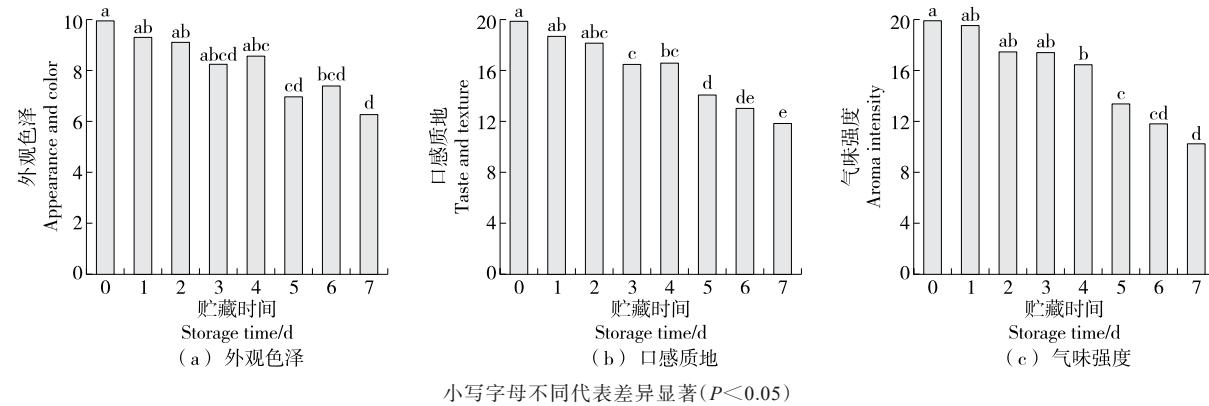


图1 不同贮藏时间下面包的感官品质

Figure 1 Changes in the sensory properties of bread at different storage time

2.2 对面包pH值和微生物菌落数量的影响

由图2可知,随着贮藏时间的延长,样品之间的菌落总数具有显著性差异($P<0.05$),面包中的菌落总数不断增加,且增长速率也不断攀升,与陈宇飞等^[15]的研究结果一致。GB 7099—2015中规定,面包中的菌落总数上限为 10^5 CFU/g,贮藏第5天,菌落总数开始 $>10^5$ CFU/g,说明面包的最佳贮藏时间为5 d。

新鲜面包的pH值通常呈酸性。其制作包括面团的

P36/R圆柱形探头;测前速度2 mm/s,测中、后速度1 mm/s;触发力0.38 N,形变量30%,选取硬度、内聚性、弹性、咀嚼性和黏附性作为检测指标。

1.2.8 风味物质分析 参照鲍雨婷等^[14]的方法并修改。

(1) GC 条件:色谱柱温度60 °C,载气为N₂(纯度>99.99%)。流速0~5 min, 5 mL/min; 15~45 min, 150 mL/min。

(2) IMS 条件:准确称取2 g样品于20 mL顶空瓶,加盖密封,孵化温度60 °C,孵化时间10 min,采用顶空固相萃取方法自动进样。

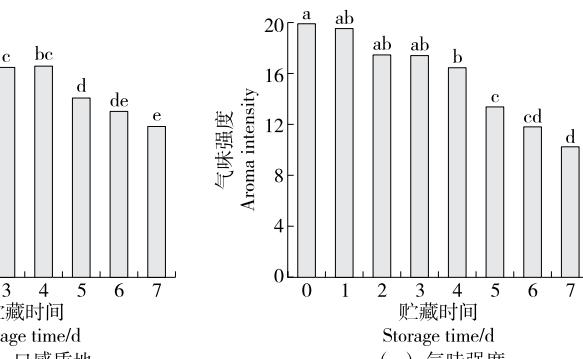
1.3 数据处理

所有样品取3个平行,利用GC-IMS仪器自带的数据库(NIST和IMS)进行定性分析,利用软件的插件Gallery进行指纹图谱分析;利用SIMCA 14.1进行PLS-DA分析处理;采用Origin 2024进行主成分分析。

2 结果与讨论

2.1 对面包感官品质的影响

由图1可知,贮藏期间,面包的外观色泽、口感质地和气味强度均下降。室温条件下(25 °C),贮藏第1~5天,面包开始老化,水分流失,表皮变得稍硬,内部弹性下降,但仍保持浓郁的烘焙香气;贮藏第6天,面包色泽变暗,香气较淡,虽无明显的霉斑,但开始出现轻微的酸味,此时面包已发生变质。



发酵过程中,酵母发酵产生二氧化碳和少量的有机酸(如乳酸和醋酸),使其pH值较低,烘焙过程中高温又会使酵母死亡,残留的有机酸使得面包呈酸性;贮藏过程中,由于面包受到霉菌或细菌的污染,微生物的代谢活动会产生碱性物质,导致pH值升高。此外,贮藏过程中面包中的有机酸被逐渐分解,酸性减弱,pH值上升。与菌落总数结果一致,pH在整个贮藏期间不断增加,当贮藏时间>5 d时,pH值变化更剧烈,说明此时面包品质发生严重变化。

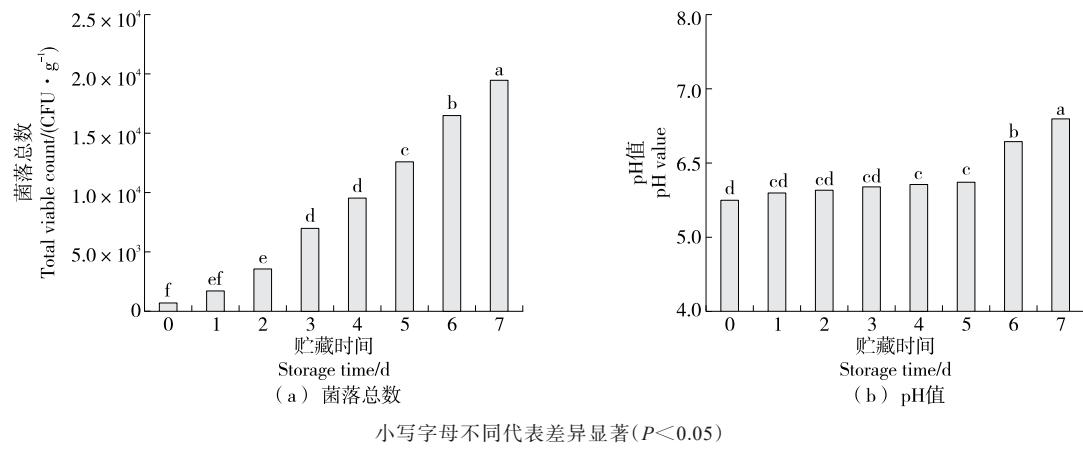


Figure 2 Changes in total microbial count and pH value of bread at different storage time

整个贮藏过程中均未检出大肠杆菌,说明试验样品未受到大肠杆菌污染。

2.3 对面包水分含量、水分活度和比容的影响

一般而言,水分活度越低,面包的保存期越长。水分含量高,则面包松软,口感更佳,但同时也会影响其保质期^[16]。由图3可知,水分活度和水分含量在整个贮藏期间不断下降,到贮藏第6,7天时,样品中的水分含量差异较小。

面包贮藏过程中水分的流失会影响其回生^[17],同时,水分的减少会使淀粉和蛋白质通过氢键连接,导致面包硬度增加,从而加速面包老化^[18]。

面包的比容主要由面团膨胀程度决定,即受酵母产气能力和面团持气能力的共同影响^[19]。随着贮藏时间的延长,面包的比容不断减小,说明贮藏一定时间后,面包品质不断下降。

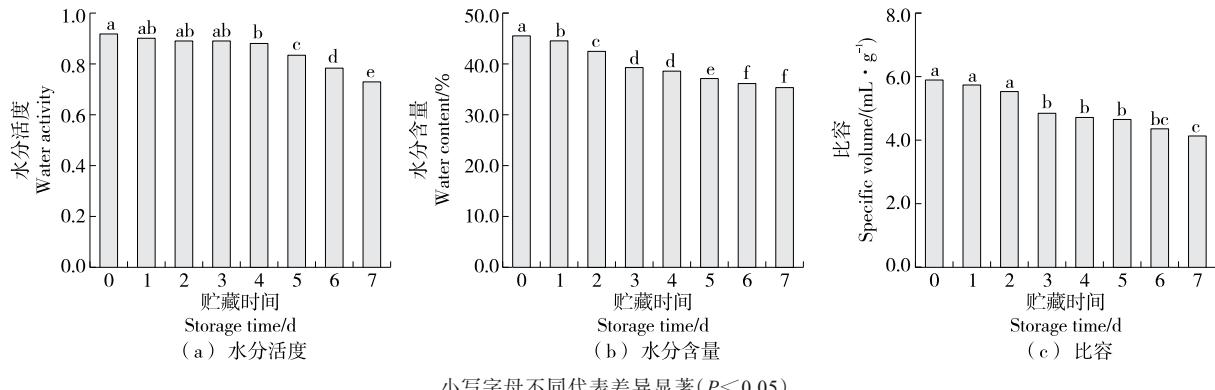


Figure 3 Effects of storage time on water activity, water content, and specific volume of bread

2.4 对面包质构的影响

由表2可知,不同贮藏时间下,面包的弹性、硬度、内聚性、咀嚼性和黏附性具有显著性差异($P<0.05$)。其中,弹性不断下降,其变化与面包内部水分迁移变化有关,由于在整个贮藏期间,面包中的水分不断散失,导致其弹性变差;硬度随着贮藏时间的延长不断增加,并伴随着咀嚼性增加。贮藏第4天和第6天,面包的弹性、硬度、内聚性、咀嚼性和黏附性均具有显著性差异($P<0.05$),说明此时样品之间质构特性差异较大。

2.5 对面包挥发性化合物的影响

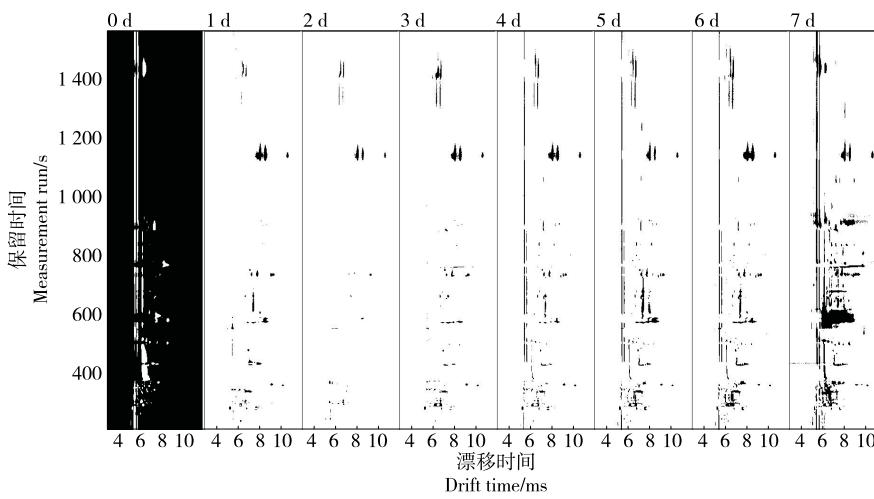
由图4可知,不同样品中存在相似的物质峰值和峰值信号分布,但每种化合物的峰值强度不同。相同的挥发性化合物可以在GC-IMS中产生不同的产物离子,如单体和二聚体,这取决于化合物的浓度和以强质子亲和力或信号为特征的分析物^[21]。与0 d新鲜面包相比,整个贮藏期间面包中的风味物质均发生变化,贮藏7 d后,样品中有大量的物质发生改变。

由图5和表3可知,整个贮藏期间共定性出48种化合物(含单体和二聚体),包括醇类18种、酯类8种、醛类

表2 贮藏时间对面包质构的影响[†]
Table 2 Influence of storage time on texture of bread

贮藏时间/d	弹性/N	硬度/N	内聚性/N	咀嚼性/(N·mm)	黏附性/(N·mm)
0	8.54±0.23 ^a	8.07±0.21 ^f	0.66±0.06 ^a	34.47±2.62 ^f	0.08±0.01 ^e
1	8.16±0.03 ^{ab}	9.00±0.86 ^{ef}	0.60±0.01 ^{ab}	38.43±3.82 ^{ef}	0.09±0.00 ^{de}
2	8.09±0.04 ^b	10.23±0.62 ^{de}	0.58±0.00 ^b	45.45±2.40 ^{de}	0.10±0.00 ^{cde}
3	7.92±0.04 ^{bc}	11.53±0.58 ^{cd}	0.54±0.00 ^{bc}	51.24±1.58 ^{cd}	0.11±0.01 ^{cd}
4	7.86±0.02 ^{bc}	12.83±0.28 ^{bc}	0.53±0.01 ^{bc}	57.53±4.06 ^{bc}	0.13±0.01 ^{cd}
5	7.56±0.27 ^{cd}	13.48±0.50 ^{bc}	0.49±0.03 ^{cd}	62.51±2.27 ^{bc}	0.15±0.00 ^c
6	7.18±0.01 ^d	15.14±0.19 ^{ab}	0.47±0.01 ^{cd}	68.56±3.56 ^{ab}	0.24±0.06 ^b
7	6.42±0.25 ^e	16.87±1.49 ^a	0.43±0.04 ^d	79.98±6.23 ^a	0.33±0.02 ^a

† 小写字母不同代表差异显著($P<0.05$)。



每个点代表一种化合物,颜色越深表示含量越高^[20]

图4 基于GC-IMS分析不同贮藏期间面包的风味差异

Figure 4 Analysis of bread flavor differences during different storage periods based on GC-IMS

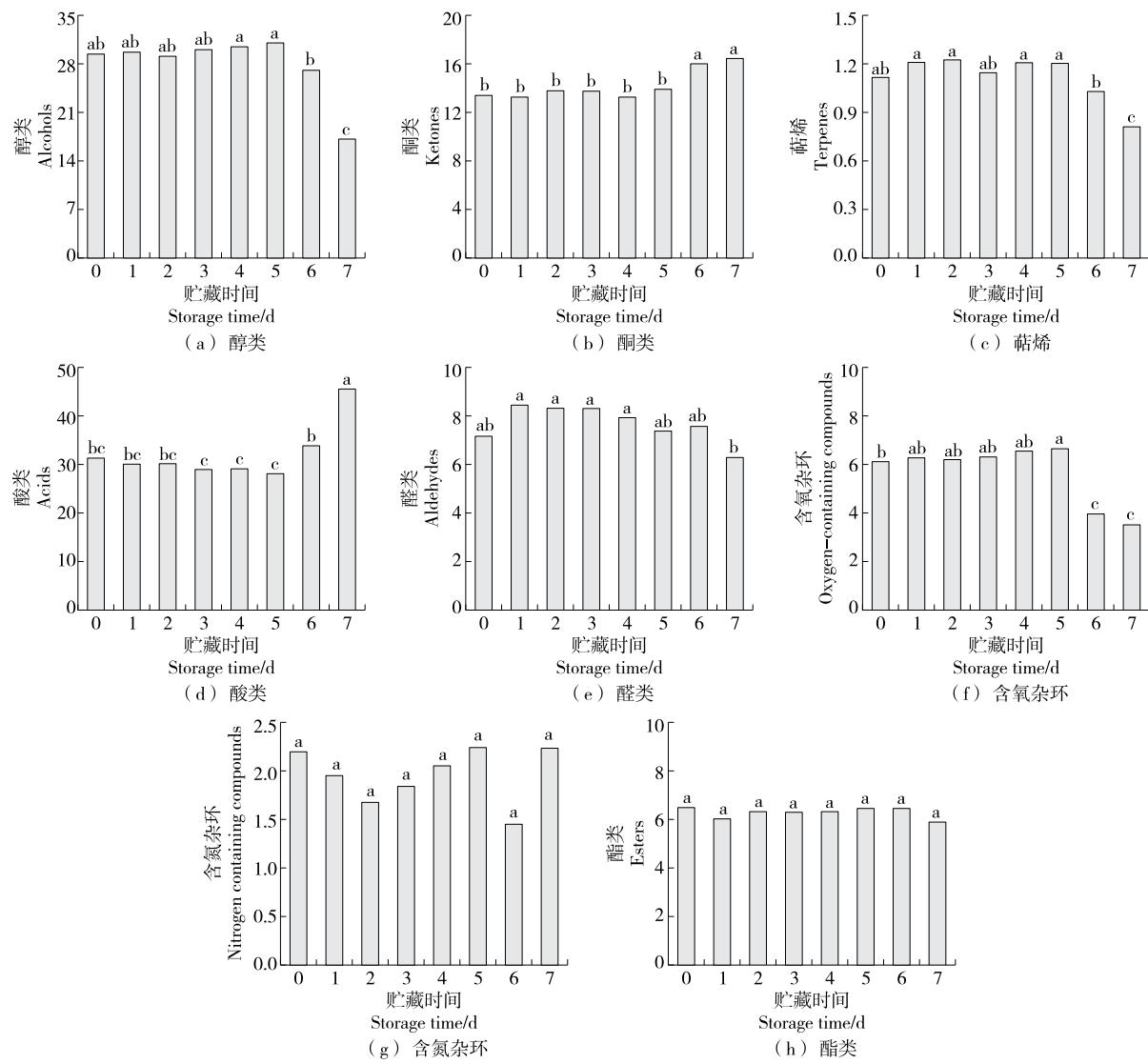
7种、酮类6种、含氧杂环6种、含氮杂环2种、萜烯2种、酸类1种和其他4种,其中以醇类和酸类为主。

醇类物质含量较高可能是因为醇类是微生物发酵的主要产物,其中,乙醇作为发酵的主产物在面包的整体风味中占比较大。乙醇还是酯类的前体物质,为面包制作过程中醇和酸酯化形成酯类风味物质提供物质基础^[22]。在面包制作(面团发酵)过程中,通过酵母代谢产生乙醇和少量高级醇,可赋予面包香气。醇类物质的相对含量在不同贮藏期间具有显著性差异($P<0.05$),并呈下降趋势,在贮藏前5 d样品之间醇类含量差异较小。面包醇类物质含量的下降,可能会导致贮藏后其醇香风味特性变差。醇类物质主要包括正己醇-D、正己醇-M、异戊醇-D、异戊醇-M、1-戊烯-3-醇、乙醇、异丙醇、正丁醇、正戊醇-D、正戊醇-M、异丁醇-D、异丁醇-M。其中异戊醇-D、异丁醇-D是面包中的主要醇类物质,异戊醇-D有苹果白兰地香

气,在整个贮藏期间,其含量从11.83%下降到10.83%;而异丁醇-D为面包提供特殊的香气,含量从12.23%下降到1.97%。贮藏期间,醇类物质的下降一方面是因为醇类物质具有一定的挥发性,另一方面可能是由于物质之间的转化,如异丁醇可通过酶催化氧化生成异丁酸。

酮类物质在面包烘焙过程中通过美拉德反应和脂质氧化形成,包括环己酮、2-庚酮-D、2-庚酮-M、仲辛酮、羟基丙酮和丙酮,其中环己酮和仲辛酮含量>1%。环己酮具有淡淡的薄清香,在贮藏期间其含量由1.17%下降到1.02%,而仲辛酮具有果香和奶酪香味,其相对含量从10.51%增加到13.35%。整体来说,整个贮藏期间,酮类物质的相对含量不断增加,可能是因为贮藏期间面包中的脂质发生氧化,此外,面包贮藏过程中的微生物如酵母或霉菌也会代谢产生酮类物质^[23]。

酸类物质在面包中的相对含量占比高,由31.23%增



小写字母不同代表差异显著($P<0.05$)

图 5 不同贮藏时间下面包中挥发性风味物质相对含量的变化

Figure 5 Changes in relative content of volatile flavor substances in bread at different storage time

加到 45.43%，当贮藏时间 >5 d 时，样品之间的酸类含量具有显著性差异($P<0.05$)。在整个贮藏期间只检出 1 种有机酸——异丁酸。异丁酸的形成主要受微生物代谢、脂质氧化、酶促反应，以及前体物质氨基酸、脂质含量的影响。

萜烯类物质的阈值通常较低，对面包的香气和风味具有显著影响。面包中检出的萜烯包括莰烯和萜烯油烯，其阈值分别为 0.18, 0.20 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。虽然两者在面包中的含量均 $<1\%$ ，但评估化合物对食品整体风味贡献作用大小的因素并不能仅依据化合物含量，还要考虑其阈值，通过化合物含量与阈值之比得出 ROAV，根据 ROAV 大小可知化合物对风味的贡献，其中 $\text{ROAV}>1$ 则具有重要的贡献作用，ROAV 值越大，贡献作用越大^[24]。通过计算莰烯和萜烯油烯的 ROAV 分别为 4.22, 1.75，说明两者对面包的风味贡献具有重要作用。

含氧杂环类物质通过美拉德反应形成，如呋喃和吡喃，此外，在贮藏期间微生物的代谢也会产生少量的含氧杂环。面包中检出的含氧杂环类物质主要包括四氢呋喃-D、四氢呋喃-M、呋喃和 2-正戊基呋喃，其相对含量均 $<1\%$ 。呋喃主要是在面包烘焙过程中形成，具有一定的焦香味，含量较高则会影响面包的口感。整体来说，贮藏期间，含氧杂环化合物含量不断减少，当贮藏时间 >5 d 时，可能是面包中的含氧杂环发生氧化，形成其他物质，导致其含量下降。

含氧杂环类物质通过美拉德反应形成，如呋喃和吡喃，此外，在贮藏期间微生物的代谢也会产生少量的含氧杂环。面包中检出的含氧杂环类物质主要包括四氢呋喃-D、四氢呋喃-M、呋喃和 2-正戊基呋喃，其相对含量均 $<1\%$ 。呋喃主要是在面包烘焙过程中形成，具有一定的焦香味，含量较高则会影响面包的口感。整体来说，贮藏期间，含氧杂环化合物含量不断减少，当贮藏时间 >5 d 时，可能是面包中的含氧杂环发生氧化，形成其他物质，导致其含量下降。

表3 不同贮藏时间下面包中挥发性化合物的相对含量

Table 3 Relative content of volatile compounds in bread at different storage time

化合物	相对含量/%							
	0 d	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d
丁酸丙酯	0.83±0.03 ^a	0.80±0.05 ^a	0.76±0.06 ^a	0.80±0.06 ^a	0.86±0.06 ^a	0.85±0.03 ^a	0.77±0.06 ^a	0.54±0.01 ^b
丁酸丁酯	0.80±0.05 ^a	0.83±0.04 ^a	0.91±0.01 ^a	0.92±0.07 ^a	0.86±0.02 ^a	0.88±0.04 ^a	0.92±0.07 ^a	0.79±0.10 ^a
乙酸乙酯-D	1.89±0.54 ^a	1.85±0.60 ^a	2.18±0.19 ^a	2.02±0.23 ^a	1.99±0.31 ^a	1.92±0.14 ^a	1.82±0.11 ^a	1.76±0.11 ^a
乙酸乙酯-M	0.35±0.01 ^b	0.37±0.04 ^b	0.39±0.04 ^b	0.37±0.01 ^b	0.35±0.03 ^b	0.33±0.01 ^b	0.54±0.01 ^a	0.51±0.00 ^a
2-丁烯酸己酯	0.50±0.05 ^{ab}	0.50±0.03 ^{ab}	0.57±0.04 ^a	0.48±0.02 ^{ab}	0.51±0.03 ^{ab}	0.54±0.03 ^a	0.46±0.01 ^{bc}	0.43±0.01 ^c
丁酸己酯	1.12±0.59 ^a	0.71±0.14 ^{ab}	0.53±0.01 ^b	0.75±0.11 ^{ab}	0.81±0.11 ^{ab}	0.93±0.12 ^{ab}	0.64±0.11 ^{ab}	0.56±0.07 ^b
乙酸叶醇酯	0.56±0.05 ^b	0.52±0.04 ^b	0.50±0.07 ^b	0.49±0.09 ^b	0.52±0.05 ^b	0.55±0.03 ^b	0.89±0.13 ^a	1.00±0.02 ^a
乙酸戊酯	0.42±0.04 ^a	0.42±0.04 ^a	0.47±0.01 ^a	0.45±0.07 ^a	0.44±0.01 ^a	0.44±0.02 ^a	0.40±0.01 ^a	0.30±0.01 ^b
环己酮	1.17±0.17 ^{ab}	1.30±0.03 ^a	1.33±0.08 ^a	1.27±0.14 ^a	1.32±0.03 ^a	1.29±0.05 ^a	1.10±0.05 ^{ab}	1.02±0.03 ^b
2-庚酮-D	0.43±0.02 ^b	0.47±0.04 ^{ab}	0.53±0.02 ^a	0.53±0.03 ^a	0.42±0.02 ^{bc}	0.45±0.02 ^b	0.36±0.00 ^{cd}	0.33±0.01 ^d
2-庚酮-M	0.43±0.07 ^b	0.49±0.03 ^{ab}	0.56±0.02 ^a	0.54±0.08 ^{ab}	0.48±0.02 ^{ab}	0.52±0.02 ^{ab}	0.54±0.04 ^{ab}	0.44±0.02 ^b
仲辛酮	10.51±0.25 ^b	10.03±0.90 ^b	10.48±0.76 ^b	10.51±0.10 ^b	10.21±0.86 ^b	10.78±0.12 ^b	12.82±0.29 ^a	13.35±0.04 ^a
羟基丙酮	0.71±0.02 ^b	0.72±0.03 ^b	0.74±0.05 ^b	0.77±0.08 ^b	0.71±0.04 ^b	0.74±0.02 ^b	1.08±0.12 ^a	1.21±0.17 ^a
丙酮	0.15±0.03 ^{ab}	0.24±0.04 ^a	0.17±0.01 ^{ab}	0.13±0.02 ^{ab}	0.13±0.04 ^{ab}	0.11±0.01 ^b	0.13±0.06 ^b	0.09±0.00 ^b
萜品油烯	0.35±0.02 ^{ab}	0.42±0.03 ^a	0.40±0.02 ^a	0.39±0.03 ^a	0.41±0.00 ^a	0.41±0.01 ^a	0.39±0.00 ^a	0.31±0.03 ^b
莰烯	0.76±0.02 ^{ab}	0.79±0.01 ^{ab}	0.83±0.01 ^a	0.76±0.12 ^{ab}	0.79±0.02 ^{ab}	0.80±0.02 ^a	0.63±0.09 ^{bc}	0.50±0.02 ^c
异丁酸	31.23±1.04 ^{bc}	30.02±0.75 ^{bc}	30.13±1.32 ^{bc}	28.90±1.66 ^c	29.08±1.21 ^c	28.03±0.11 ^c	33.74±2.68 ^b	45.43±0.37 ^a
庚醛	0.25±0.08 ^a	0.23±0.03 ^a	0.21±0.01 ^{ab}	0.22±0.02 ^{ab}	0.22±0.01 ^{ab}	0.24±0.02 ^a	0.19±0.00 ^{ab}	0.15±0.02 ^b
正丁醛-D	0.50±0.01 ^{abc}	0.63±0.09 ^{ab}	0.65±0.04 ^a	0.61±0.02 ^{ab}	0.48±0.09 ^{bc}	0.31±0.08 ^{de}	0.36±0.01 ^{cd}	0.22±0.01 ^e
正丁醛-M	4.04±0.52 ^a	4.93±0.31 ^a	4.84±0.08 ^a	4.96±0.87 ^a	4.49±0.23 ^a	4.17±0.28 ^a	5.08±0.18 ^a	4.49±0.16 ^a
(E)-2-庚烯醛	0.91±0.14 ^{ab}	1.00±0.11 ^{ab}	0.98±0.11 ^{ab}	1.01±0.07 ^{ab}	0.95±0.03 ^{ab}	1.03±0.15 ^a	0.61±0.22 ^b	0.89±0.20 ^{ab}
正己醛-D	0.29±0.04 ^a	0.30±0.03 ^a	0.25±0.00 ^{ab}	0.29±0.03 ^a	0.31±0.03 ^a	0.29±0.03 ^a	0.16±0.11 ^{bc}	0.05±0.01 ^c
正己醛-M	1.05±0.06 ^a	1.25±0.06 ^a	1.32±0.09 ^a	1.09±0.07 ^a	1.35±0.16 ^a	1.21±0.18 ^a	1.08±0.18 ^a	0.38±0.17 ^b
反式-2-己烯醛	0.14±0.01 ^a	0.11±0.01 ^{ab}	0.08±0.00 ^{bc}	0.11±0.01 ^{ab}	0.10±0.01 ^{abc}	0.11±0.04 ^{ab}	0.07±0.01 ^c	0.10±0.01 ^{abc}
乙基苯	0.26±0.04 ^c	0.31±0.03 ^c	0.33±0.03 ^{bc}	0.32±0.02 ^{bc}	0.27±0.03 ^c	0.28±0.02 ^c	0.40±0.01 ^b	0.56±0.04 ^a
丁苯	0.68±0.08 ^{bc}	0.76±0.10 ^{abc}	0.80±0.07 ^{abc}	0.81±0.04 ^{abc}	0.90±0.04 ^a	0.84±0.04 ^{ab}	0.65±0.02 ^c	0.33±0.01 ^d
1-辛烯	0.31±0.01 ^{abc}	0.30±0.01 ^{abc}	0.29±0.01 ^{bc}	0.33±0.03 ^{ab}	0.33±0.02 ^{ab}	0.35±0.04 ^a	0.26±0.00 ^c	0.22±0.00 ^d
二甲基二硫	1.66±0.04 ^{bc}	1.84±0.14 ^{ab}	1.85±0.06 ^{ab}	1.93±0.15 ^a	1.70±0.10 ^{abc}	1.75±0.04 ^{ab}	1.45±0.08 ^{cd}	1.24±0.03 ^d
四氢呋喃-D	0.20±0.05 ^a	0.19±0.02 ^a	0.14±0.01 ^{ab}	0.13±0.01 ^b	0.10±0.02 ^b	0.09±0.00 ^b	0.04±0.01 ^c	0.03±0.00 ^c
四氢呋喃-M	0.27±0.08 ^b	0.36±0.02 ^{ab}	0.36±0.03 ^{ab}	0.38±0.02 ^a	0.37±0.03 ^{ab}	0.32±0.02 ^{ab}	0.35±0.04 ^{ab}	0.33±0.01 ^{ab}
呋喃	1.19±0.07 ^{abc}	1.22±0.06 ^{abc}	1.33±0.01 ^{ab}	1.39±0.09 ^a	1.29±0.05 ^{ab}	1.27±0.02 ^{ab}	0.97±0.23 ^c	1.09±0.03 ^{bc}
1,4-二氧六环	2.17±0.11 ^a	2.36±0.04 ^a	2.36±0.26 ^a	2.28±0.19 ^a	2.47±0.13 ^a	2.59±0.11 ^a	0.39±0.35 ^b	0.05±0.00 ^b
二丁醚	1.83±0.12 ^a	1.72±0.29 ^a	1.63±0.03 ^a	1.75±0.17 ^a	1.87±0.02 ^a	1.93±0.16 ^a	1.81±0.08 ^a	1.58±0.09 ^a
2-正戊基呋喃	0.45±0.01 ^a	0.42±0.03 ^a	0.40±0.00 ^a	0.41±0.04 ^a	0.43±0.04 ^a	0.45±0.06 ^a	0.40±0.01 ^a	0.44±0.01 ^a
2,4,5-三甲基噻唑	0.84±0.35 ^a	0.50±0.10 ^{ab}	0.30±0.03 ^b	0.63±0.06 ^a	0.59±0.06 ^a	0.75±0.11 ^a	0.50±0.07 ^{ab}	0.47±0.05 ^{ab}
2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	1.36±0.11 ^{ab}	1.46±0.12 ^{ab}	1.38±0.17 ^{ab}	1.21±0.11 ^{ab}	1.46±0.05 ^{ab}	1.49±0.14 ^{ab}	0.96±0.62 ^b	1.76±0.38 ^a
正己醇-D	0.35±0.01 ^{ab}	0.37±0.02 ^{ab}	0.35±0.03 ^{ab}	0.34±0.01 ^b	0.38±0.02 ^{ab}	0.41±0.01 ^a	0.34±0.02 ^{ab}	0.33±0.05 ^b
正己醇-M	1.35±0.23 ^{ab}	1.54±0.15 ^a	1.48±0.04 ^{ab}	1.34±0.10 ^{ab}	1.54±0.11 ^a	1.54±0.05 ^a	1.36±0.04 ^{ab}	1.17±0.11 ^b
异戊醇-D	11.83±0.45 ^{ab}	11.98±0.18 ^a	11.86±0.29 ^{ab}	11.74±0.22 ^{ab}	12.11±0.54 ^a	12.48±0.07 ^a	12.17±0.64 ^a	10.83±0.27 ^b
异戊醇-M	0.89±0.06 ^a	0.91±0.05 ^a	0.98±0.01 ^a	0.98±0.12 ^a	0.91±0.02 ^a	0.93±0.04 ^a	0.95±0.09 ^a	0.80±0.00 ^b

续表 3

化合物	相对含量/%							
	0 d	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d
1-戊烯-3-醇	0.16±0.02 ^a	0.15±0.01 ^{ab}	0.15±0.01 ^a	0.16±0.01 ^a	0.17±0.02 ^a	0.16±0.00 ^a	0.15±0.01 ^{ab}	0.12±0.01 ^b
乙醇	0.68±0.02 ^{ab}	0.63±0.03 ^b	0.72±0.05 ^{ab}	0.67±0.02 ^{ab}	0.72±0.03 ^{ab}	0.77±0.02 ^a	0.42±0.12 ^c	0.27±0.02 ^d
异丙醇	0.47±0.05 ^{ab}	0.44±0.05 ^{ab}	0.49±0.01 ^a	0.53±0.06 ^a	0.54±0.04 ^a	0.52±0.01 ^a	0.35±0.07 ^{bc}	0.28±0.02 ^c
正丁醇	0.07±0.01 ^b	0.08±0.01 ^{ab}	0.08±0.01 ^{ab}	0.08±0.01 ^{ab}	0.09±0.01 ^{ab}	0.09±0.01 ^{ab}	0.08±0.00 ^{ab}	0.10±0.01 ^a
正戊醇-D	0.48±0.02 ^a	0.39±0.05 ^{ab}	0.31±0.02 ^b	0.44±0.03 ^{ab}	0.39±0.02 ^{ab}	0.49±0.13 ^a	0.34±0.00 ^{ab}	0.40±0.10 ^{ab}
正戊醇-M	0.78±0.08 ^a	0.77±0.08 ^a	0.75±0.01 ^a	0.73±0.07 ^a	0.82±0.10 ^a	0.84±0.06 ^a	0.68±0.05 ^a	0.79±0.00 ^a
异丁醇-D	12.23±0.18 ^{ab}	12.25±0.23 ^{ab}	11.68±0.24 ^{ab}	12.93±0.38 ^a	12.63±0.41 ^a	12.62±0.32 ^a	10.07±1.72 ^b	1.97±1.60 ^c
异丁醇-M	0.10±0.02 ^b	0.13±0.01 ^{ab}	0.20±0.02 ^a	0.12±0.00 ^{ab}	0.13±0.00 ^{ab}	0.12±0.04 ^{ab}	0.12±0.07 ^{ab}	0.02±0.01 ^c

2.6 主成分分析

由图 6 所示, 样品组间在 PC1 和 PC2 上具有较好的分散性, 同时组内间具有一定的聚集性。说明面包在不同贮藏期间风味特性之间具有差异性, 其中 0~5 d 样品主要聚集在第一、第四象限, 说明样品之间的整体风味特性差异较小, 即面包在贮藏 5 d 内, 挥发性化合物的变化程度较小; 而在 PC1 上, 第 6、7 天样品则分布在第三、第二象限, 与 0 d 的具有较远的距离, 说明贮藏 6、7 d 的面包风味品质与贮藏 0 d 的有较大差异, 说明此时面包可能已经发生变质, 面包的挥发性成分发生改变。

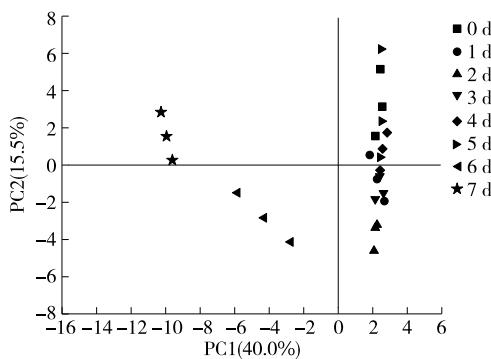


图 6 主成分分析不同贮藏时间下面包的整体风味特性差异

Figure 6 Principal component analysis of the overall flavor characteristics of bread at different storage time

2.7 偏最小二乘分析

采用 SIMCA-P 14.1 软件分析 8 个不同贮藏时间下面包中的 48 种化合物, 以筛选贮藏时间引起的面包品质差异的标志性成分。由图 7 可知, 模型拟合参数 $R^2Y=0.756$, $R^2Y=0.896$, 模型预测能力 $Q^2=0.850>0.5$, 表明所建立的模型稳定可靠。样品主要分成 3 类, 第一类是 0~5 d 的样品, 第二类是 6 d 的样品, 第三类是 7 d 的样品, 与新鲜面包(0 d)对比, 样品之间的距离代表整体的相似与

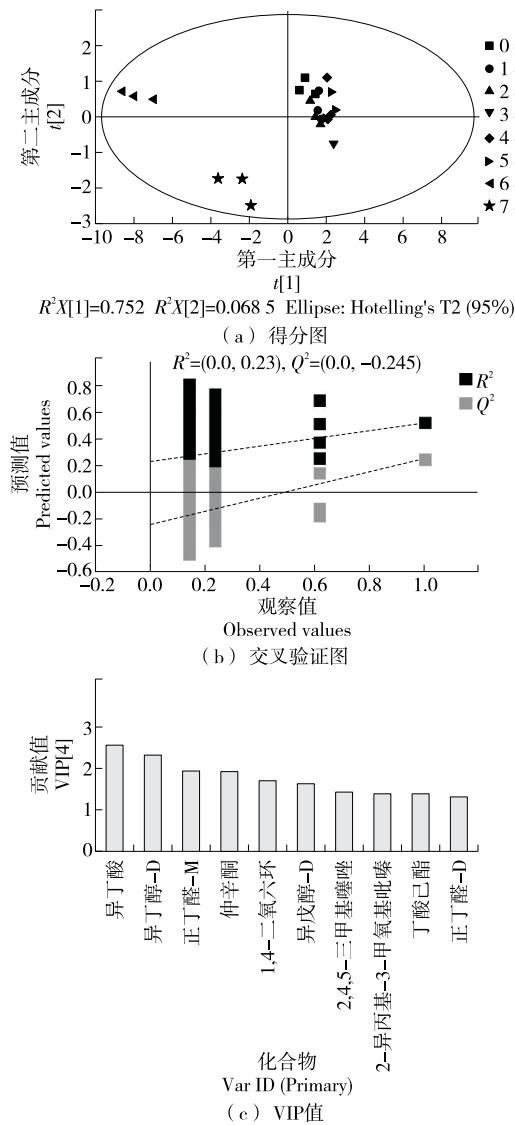


图 7 基于偏最小二乘分析不同贮藏时间下面包之间的风味差异

Figure 7 Flavor differences between bread at different storage time based on partial least squares analysis

差异,其中0~5 d的面包较相似,说明贮藏5 d内的面包风味特性较相似,继续贮藏(贮藏6,7 d),面包中的化合物会发生变化,与初期面包具有较大差异。为进一步验证模型的可靠性,将模型排列置换检验200次, R^2 、 Q^2 拟合直线与Y轴的截距分别为0.230(<0.3),-0.245(<0),说明未出现过拟合现象,模型可靠。以VIP(变量重要投影值)>1为标准,筛选了10种差异性物质,分别为异丁酸、异丁醇-D、正丁醛-M、仲辛酮、1,4-二氧六环、异戊醇-D、2,4,5-三甲基噻唑、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、丁酸己酯和正丁醛-D,其中异丁酸的VIP值最大,说明其对判断面包新鲜呈现的贡献作用最大。

3 结论

对比分析了不同贮藏时间(0,1,2,3,4,5,6,7 d)下面包的感官特性、理化特性(pH值、水分含量和水分活度)、比容、菌落总数、质构和风味特性的差异。感官上,面包在整个贮藏期间并无明显霉斑,当贮藏时间>5 d时,面包开始出现轻微的酸败味。理化特性上,不同贮藏时间下面包之间具有显著性差异($P<0.05$),其中水分含量和水分活度随着贮藏时间的延长不断减少,而pH值不断增加;面包比容在整个贮藏期间呈下降趋势,同时硬度、咀嚼性增加,弹性下降;风味特性上,共检出48种化合物,主要为醇类和酸类。通过主成分分析发现,不同贮藏期间面包之间的风味具有显著性差异,尤其是贮藏时间>5 d后,面包的风味与初期(0 d)有较大差异,而通过PLS-DA分析发现,共筛选到10种VIP>1的物质,即异丁酸、异丁醇-D、正丁醛-M、仲辛酮、1,4-二氧六环、异戊醇-D、2,4,5-三甲基噻唑、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、丁酸己酯和正丁醛-D,这些物质对于区分面包的新鲜度具有重要贡献作用。后续可结合高通量测序(如16S rRNA和ITS测序)技术,深入分析贮藏过程中面包的微生物群落结构动态变化,将特定风味化合物的产生与特定微生物菌群的演替直接关联起来。

参考文献

- [1] 张涛,孙汉巨,刘淑芸,等.黑米花青素对面包品质的影响[J].食品研究与开发,2023,44(24): 92-97.
- ZHANG T, ZHANG H J, LIU S Y, et al. Effect of anthocyanins from black rice on the quality of bread during storage[J]. Food Research and Development, 2023, 44(24): 92-97.
- [2] 廖珺,王烨军,苏有健,等.绿茶面包加工工艺优化及贮藏稳定性评价[J].食品与发酵工业,2019,45(7): 180-187.
- LIAO J, WANG Y J, SU Y J, et al. Optimized process and evaluation of storage stability of green tea flavoured bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(7): 180-187.
- [3] 周枫,李飞,张园园,等.茶多酚对面包品质及贮藏特性的影响[J].粮食与油脂,2021,34(7): 153-156.

ZHOU F, LI F, ZHANG Y Y, et al. Effects of tea polyphenols on bread quality and storage characteristics[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(7): 153-156.

- [4] 李晶,穆晓婷,鲁绯.麦芽糖淀粉酶对面包品质及面团特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(3): 74-78, 85.
- LI J, MU X T, LU F. Effect of maltogenic amylase on the quality of bread and dough characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 74-78, 85.
- [5] 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.
- [6] 崔进喜,杨玉霞,甘雨鑫,等.酸面团延长面包货架期作用机制研究进展[J].中国粮油学报,2024,39(11): 217-225.
- CUI J X, YANG Y X, GAN Y X, et al. Research progress on the mechanism of action of sourdough to extend the shelf life of bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(11): 217-225.
- [7] 田芳,李凯龙,李勇,等.一种含肉桂醛包装纸对面包腐败发霉的抑制作用[J].食品工业科技,2019,40(10): 238-241, 247.
- TIAN F, LI K L, LI Y, et al. A new cinnamaldehyde-based active paper packaging against bread spoilage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(10): 238-241, 247.
- [8] GOMES-RUFFI C R, DA CUNHA R H, ALMEIDA E L, et al. Effect of the emulsifier sodium stearoyl lactylate and of the enzyme maltogenic amylase on the quality of pan bread during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 49(1): 96-101.
- [9] BÁRCENAS M E, ROSELL C M. Effect of frozen storage time on the bread crumb and aging of par-baked bread[J]. Food Chemistry, 2006, 95(3): 438-445.
- [10] XI J Z, ZHAO Q Y, XU D, et al. Evolution of volatiles and quality of Chinese steamed bread during storage at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2022, 381: 132213.
- [11] 郝素颖,杨晓清.功能性添加物对面复合型马铃薯全粉面包品质的影响[J].食品研究与开发,2023,44(13): 106-112.
- HAO S Y, YANG X Q. Effect of functional additives on quality of potato whole flour bread[J]. Food Research and Development, 2023, 44(13): 106-112.
- [12] 刘敏,韩瑜,李金蕾,等.吡啶硫酮镧聚丙烯防霉包装薄膜制备及其在吐司面包保鲜中的应用[J].食品工业科技,2025,46(24): 269-278.
- LIU M, HAN Y, LI J L, et al. Preparation of lanthanum pyrithione/polypropylene antifungal packaging film and its application in toast bread preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(24): 269-278.
- [13] 丁双鲲,杜恺,袁增慧,等.赖氨酸对青稞面包品质及风味特征的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(7): 256-263.
- DING S K, DU K, YUAN Z H, et al. Effects of lysine on

- quality and flavor characteristics of highland barley bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 256-263.
- [14] 鲍雨婷, 孙玥, 李雪玲, 等. 滇菊粉对面团特性和面包风味及其抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 107-114.
BAO Y T, SUN Y, LI X L, et al. Effect of Chuzhou chrysanthemum powder on dough properties and flavor and antioxidant activity of bread[J]. Food Science, 2023, 44(4): 107-114.
- [15] 陈宇飞, 冷进松. 酵子面包在贮藏过程中理化及微生物指标的变化[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 309-314.
CHEN Y F, LENG J S. Changes in physicochemical and microbial properties during storage of bread made with Jiaozi, A traditional starter culture for steam bun in northern China[J]. Food Science, 2014, 35(10): 309-314.
- [16] 饶菁菁, 皮俊飞, 吴晨昕, 等. 大黄鱼鱼卵油对面包品质特性及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 95-102.
RAO J J, PI J F, WU C X, et al. Effect of large yellow croaker roe oil on the quality characteristics and volatile flavor compounds of bread [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 95-102.
- [17] RASMUSSEN P H, HANSEN A. Staling of wheat bread stored in modified atmosphere[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 34(7): 487-491.
- [18] ARP C G, CORREA M J, FERRERO C. Kinetic study of staling in breads with high-amylose resistant starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105879.
- [19] 周星明, 黄雅珏, 马蕾, 等. 不同种类鲜食玉米改善面包感官及营养品质的研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 164-173.
ZHOU X Y, HUANG Y Y, MA L, et al. Study on improving the sensory and nutritional quality of bread with different kinds of fresh corn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 164-173.
- [20] MA W J, HUANG H R, ZHENG B, et al. Effect of modified grapefruit peel dietary fiber on bread: baking quality, flavor characteristics, and starch digestive properties[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110964.
- [21] 高文涛, 雷文平, 陈利, 等. 不同方式鉴别不同产地白胡椒特征挥发性物质及抗氧化性分析[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 235-246.
GAO W T, LEI E P, CHEN L, et al. Identification of characteristic volatile substances by the combined use of different analytical methods and antioxidant properties of white peppers from different geographical origins[J]. Food Science, 2025, 46(8): 235-246.
- [22] 孙楚楠, 楚炎沛. 酸面团及其在发酵面制食品中的应用[J]. 现代面粉工业, 2020, 34(1): 25-28.
SUN C N, CHU Y P. Sour dough and its application in fermented flour food[J]. Modern Flour Milling Industry, 2020, 34(1): 25-28.
- [23] JIA C C, YU Y H, DAI H, et al. Study on the storage characteristics of steamed rice bread samples during various storage temperature[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 190: 115510.
- [24] 岳丽, 祖力皮牙·买买提, 王佳敏, 等. HS-GC-IMS 结合 ROAV 分析不同制油工艺对芜菁籽油特征香气成分的影响[J]. 中国油脂, 2025, 50(8): 50-59.
YUE L, ZU LI PI YA M M T, WANG J M, et al. Effect of oil-processing technology on the characteristic aroma components of turnip seed oil by HS-GC-IMS combined with ROAV[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(8): 50-59.