DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.16.002

不同焙烤程度对麦芽糖化性能和挥发性化合物的影响

杨圆圆,陈涛,魏超昆*
(宁夏大学 食品科学与工程学院,宁夏 银川 750000)

摘　要:为探究焙烤前后麦芽糖化性能和挥发性化合物的变化规律,该文对不同焙烤程度麦芽的糖化力等指标进行测定,同时采用气相色谱-离子迁移谱(headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry,HS-GC-IMS)测定170、190 ℃和210 ℃焙烤的麦芽挥发性化合物。结果表明,随着焙烤温度升高,麦芽的糖化力从67.14 U/g下降至15.60 U/g。α-淀粉酶和β-淀粉酶活力分别从2.99 U/g和3.46 U/g下降至0.90 U/g和0.69 U/g。挥发性化合物测定结果表明,共鉴定出55种挥发性化合物,包括11种醇类、13种酯类、6种酸类、9种酮类、7种醛类、4种吡嗪、1种酚类、2种呋喃、1种吡咯类和1种其他化合物,通过变量投影重要性(variable importance in projection,VIP)值>1和阈值大小筛选显著差异代谢物,最终筛选出32种关键挥发性化合物,包括2,3-丁二醇、壬醛、苯乙醛、2-壬酮等。当焙烤温度为190 ℃时,麦芽的挥发性化合物种类最多、含量最高。

关键词:麦芽;焙烤程度;糖化;挥发性化合物

Effects of Different Roasting Degrees on Saccharification Properties and Volatile Compounds of Malt

YANG Yuanyuan,CHEN Tao,WEI Chaokun*
(College of Food Science and Engineering,Ningxia University,Yinchuan 750000,Ningxia,China)

Abstract:To investigate the patterns of malt saccharification performance and volatile compounds before and after kilning,this study measured indicators such as the saccharification power of malt at different kilning levels. Concurrently,headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry(HS-GC-IMS) was employed to determine the volatile compounds in malt kilned at 170,190,and 210 ℃. Results indicated that malt saccharification power decreased from 67.14 U/g to 15.60 U/g with increasing roasting temperature. α-amylase and β-amylase activities declined from 2.99 U/g and 3.46 U/g to 0.90 U/g and 0.69 U/g,respectively. Volatile compound analysis identified 55 compounds:11 alcohols,13 esters,6 acids,9 ketones,7 aldehydes,4 pyrazines,1 phenol,2 furans,1 pyrrole,and 1 other compound. Metabolites showing significant differences were screened using variable importance in projection (VIP) values>1 and threshold size,ultimately identifying 32 key volatile compounds including 2,3-butanediol,nonanal,phenylacetaldehyde,and 2-nonanone. At a roasting temperature of 190 ℃,malt exhibited the greatest diversity and highest content of volatile compounds.

Key words:malt;roasting degree;saccharification;volatile compounds

引文格式:
杨圆圆,陈涛,魏超昆. 不同焙烤程度对麦芽糖化性能和挥发性化合物的影响[J]. 食品研究与开发,2026,47(16):9-15,24.
YANG Yuanyuan,CHEN Tao,WEI Chaokun. Effects of Different Roasting Degrees on Saccharification Properties and Volatile Compounds of Malt[J]. Food Research and Development,2026,47(16):9-15,24.

基金项目:国家自然科学基金项目(32401996);中国博士后科学基金(2024M761983)
作者简介:杨圆圆(2001—),女(回),硕士研究生,研究方向:食品加工与安全。
*通信作者:魏超昆(1990—),男,副教授,博士,研究方向:食品风味化学。

焙烤麦芽是在专用烘烤设备中，通过精准控制温度与时间进行高温热处理制得的一类“特种麦芽”，其独特的色泽、滋味与香气，本质上源于美拉德反应、焦糖化反应以及热降解等一系列复杂的化学变化。研究表明，焙烤不仅能够显著促进挥发性香气物质的生成（如呋喃类、吡嗪类和含硫化合物）[1]，还能影响麦芽中功能性成分的组成与活性。例如，在适宜焙烤条件下，花青素含量及其抗氧化活性显著提高，而多酚类物质、丙烯酰胺及羟甲基糠醛等组分含量保持相对稳定[2]，表明焙烤可选择性调控麦芽的化学特性。该机制为后续工艺优化及产品开发提供理论支撑。经焙烤处理后，亚麻籽所制取的油脂表现出更强的氧化稳定性[3]。

Castro 等[4]研究特种麦芽对麦芽汁和啤酒特性的影响，结果表明，添加焙烤麦芽与焦糖麦芽制备的麦芽汁，其可发酵糖及游离氨基氮含量均低于普通麦芽和焙烧麦芽；由其酿制的啤酒酒精度与双乙酰含量均为最低，且总酚含量显著高于其他啤酒样品。王琳琳等[5]以藜麦和藜麦芽为原料，研究烘烤后两种茶叶的香气物质，结果表明焙烤对其风味有一定影响，为藜麦茶和藜麦芽茶的开发与创新提供理论依据。陈臣等[6]探究烘烤前后不同品种巴旦木风味特征和挥发性成分的变化规律发现，烘烤后巴旦木坚果味、烤面包和奶香等风味增强，青香和木香等减弱。Rögner 等[7]使用液体麦芽提取物改善烘焙食品的酶活性、颜色和风味。结果表明，浅色和深色液体麦芽提取物的香气显示出强烈的麦芽香气，以及明显的蜂蜜味、焦糖味、汤香料味、烤味和烟熏味。韩中平等[8]对焙烤麦芽制麦工艺进行研究，发现温度是影响烘焙干麦芽品质的一个重要因素，在不同温度下烘焙产生的各种化合物会产生不同的风味，可为制备品质稳定、色度和风味良好的优质焙烤麦芽提供理论基础。刘常波[9]通过单因素试验优化了结晶麦芽的焙焦工艺，得到浅色结晶麦芽焙焦工艺的最佳条件为焙焦温度 110 ℃、焙焦时间 35 min。Wu 等[10]使用烘烤方法改善大麦麦芽中蛋白质-多酚复合物的结构和抗氧化活性，结果发现在大麦麦芽的烘烤过程中，蛋白质和多酚相互作用并相互影响，最终改变大麦麦芽的营养成分和功能特性。

为探究焙烤过程中麦芽糖化性能与风味物质的演变规律，本文对不同焙烤程度麦芽的糖化力、α-淀粉酶活力及 β-淀粉酶活力等关键理化指标进行分析，并采用气相色谱-离子迁移谱（headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry，HS-GC-IMS）技术对不同焙烤温度下麦芽的挥发性化合物进行测定，旨在阐明焙烤温度对麦芽糖化性能与风味特征的影响，以期为特种麦芽的工艺优化与风味调控提供数据支持与理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦芽：山东潍坊蓝乔精酿啤酒原料有限公司；茚三酮：上海联迈生物工程有限公司；氢氧化钠、氯化钠、硫酸钾：天津市大茂化学试剂厂；福林酚：湖北魏氏化学试剂股份有限公司；碳酸氢钾：上海广诺化学科技有限公司。所用试剂均为分析纯。

DE-100g 多功能粉碎机：浙江红景天工贸有限公司；SM2-523H 型电烤炉：新泰机械有限公司；FA20024 型电子分析天平：上海仪电科学仪器股份有限公司；GG-17 密度瓶：南京腾辉实验科技有限公司；Flavour-Spec®气相色谱-离子迁移谱仪：德国 G.A.S 公司；LE438 型 pH 计：梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备

选取不同焙烤程度麦芽（130、150、170、190、210、230 ℃）和普通麦芽（对照组）去除杂质、碎粒和碳化粒后进行粉碎，并测定相关指标，采用 GC-IMS 对 170、190 ℃和 210 ℃焙烤麦芽的挥发性化合物进行分析。

1.2.2 麦芽理化指标的测定

参照 GB/T 7416.2—2025《啤酒原料质量要求 第 2 部分：啤酒麦芽》，利用茚三酮比色法、密度瓶法等对焙烤麦芽的 α-氨基氮含量、浸出率、糖化力、糖化时间进行测定[11]；利用 pH 计对 pH 值进行测定；参照 GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》测定还原糖含量[12]；参考 SB/T 10317—1999《蛋白酶活力测定法》中福林酚试剂法对蛋白酶活力进行测定[13]；参照 Disharoon 等[14]方法对 α-淀粉酶、β-淀粉酶活力进行测定，总酶活为两者之和；采用考马斯亮蓝法[15]对蛋白质含量进行测定。

1.2.3 HS-GC-IMS 测定

参考文献[16]方法测定挥发性化合物并稍作修改。称取 2 g 样品置于 20 mL 顶空固相微萃取瓶中，并加入 1.5 g NaCl，每个样品 3 个平行，进行 GC-IMS 分析。注射器温度 80 ℃；反应时间 15 min；进样体积 500 μL。GC 条件：毛细管色谱柱（15 m×0.53 mm，1.0 μm）；柱温 60 ℃；程序流量：初始流量 2 mL/min，保持 2 min；以阶梯式升至 30 mL/min，保持 8 min；继续升至 100 mL/min，保持 10 min；最终升至 150 mL/min，保持 5 min；氮气流量 150 mL/min；流速 150 mL/min。将分析物洗脱并在 IMS 电离室中电离，产生的离子被驱动到漂移管（长 9.8 cm），该漂移管在恒定温度（45 ℃）和电压（5 kV）下工作，挥发性化合物的相对含量以峰面积的平均值表示。

1.3 数据处理

结果表示为平均值±标准差，采用 Excel 进行统计分析，采用 SPSS 24.0 分析结果并进行单因素方差分析

和 Tukey 检验。指纹图谱使用 Gallery Plot 插件进行处理。使用 Smica14.1 软件进行主成分分析(principal component analysis,PCA)、偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis,PLS-DA)和变量重要性投影(variable importance in projection,VIP)图分析。

2 结果与分析

2.1 不同焙烤程度麦芽糖化性能分析

分别选取 130、150、170、190、210、230 ℃焙烤的麦芽,测定其各项理化指标,并与对照组相比,结果如表1所示。

表1 不同焙烤程度麦芽理化指标

Table 1 Physicochemical indexes of malt with different roasting degrees

温度/℃	pH 值	糖化力/(U/g)	糖化时间/min	浸出率/%	还原糖含量/(g/L)	α-氨基氮含量/(mg/L)	蛋白质含量/%
130	5.27±0.16^{c}	67.14±1.21^{b}	13.0±0.4^{e}	60.66±0.05^{a}	33.44±0.74^{d}	89.20±0.71^{b}	17.72±0.09^{c}
150	5.74±0.29^{b}	48.86±1.53^{c}	18.0±0.5^{d}	52.03±0.06^{b}	48.66±0.29^{d}	64.41±0.93^{c}	17.21±0.11^{c}
170	6.18±0.12^{a}	38.19±1.00^{d}	24.0±0.2^{c}	37.55±0.03^{c}	54.54±0.36^{c}	63.41±1.07^{c}	16.51±0.32^{d}
190	5.70±0.22^{b}	37.36±1.16^{d}	28.0±0.6^{c}	31.78±0.06^{cd}	56.25±0.26^{c}	48.03±0.94^{d}	21.00±0.15^{a}
210	5.28±0.18^{b}	32.02±1.00^{e}	36.0±0.2^{b}	28.79±0.02^{de}	63.06±0.51^{b}	38.45±0.83^{d}	17.99±0.14^{bc}
230	4.47±0.26^{c}	15.60±0.58^{f}	41.0±0.3^{a}	21.81±0.03^{e}	102.71±0.88^{a}	9.37±1.04^{e}	18.22±0.07^{b}
对照组	4.70±0.20^{c}	70.19±1.23^{a}	10.0±0.1^{d}	66.41±0.01^{a}	28.02±0.62^{d}	96.03±1.03^{a}	12.71±0.18^{e}

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

由表1可知,麦芽经焙烤后发生美拉德反应导致其颜色和风味发生了变化,与对照组相比,随焙烤温度升高,焙烤后麦芽的α-氨基氮含量、糖化力和浸出率均呈现下降趋势,焙烤温度为230 ℃时,α-氨基氮含量降至9.37 mg/L,变化较大。麦芽糖化力主要反映麦芽中β-淀粉酶活性[17],β-淀粉酶不耐高温,因此随焙烤温度升高,糖化力明显降低。此外,还原糖含量呈现上升的趋势,pH值在焙烤后并未发生较大的变化。

2.2 不同焙烤程度麦芽相关酶活力的变化

不同焙烤程度麦芽酶活力变化见表2。

表2 不同焙烤程度麦芽酶活力变化

Table 2 Changes in maltase activity at different roasting levels degrees

U/g

温度/℃	总酶活	α-淀粉酶活力	β-淀粉酶活力	蛋白酶活力
130	6.46±0.12^{a}	2.99±0.03^{b}	3.46±0.16^{a}	329.87±0.55^{b}
150	5.47±0.08^{ab}	2.67±0.02^{b}	2.80±0.08^{b}	304.83±0.33^{b}
170	4.26±0.09^{b}	2.13±0.04^{b}	2.13±0.05^{b}	293.22±0.36^{bc}
190	3.48±0.03^{c}	1.64±0.04^{c}	1.84±0.05^{c}	239.13±0.28^{c}
210	2.21±0.03^{c}	1.07±0.02^{c}	1.13±0.04^{c}	201.85±0.59^{c}
230	1.59±0.10^{d}	0.90±0.02^{d}	0.69±0.10^{d}	134.89±0.43^{d}
对照组	7.49±0.03^{a}	3.44±0.05^{a}	4.05±0.05^{a}	513.10±0.66^{a}

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

由表2可知,随着焙烤温度的升高,麦芽的总酶活、α-淀粉酶和β-淀粉酶活力都有所下降。温度越高,酶活力损失越多。温度升高到230 ℃时,酶活力降到最低,α-淀粉酶和β-淀粉酶活力分别为0.90 U/g和0.69 U/g,几乎已经没有活性。温度从130 ℃上升到230 ℃,蛋白酶活力下降最快,在焙烤过程中蛋白酶活力被严重破坏,焙烤结束后酶活力仅为对照组的26%,这主要因为焙烤起始温度高于蛋白酶最适酶活温度且蛋白酶对温度比较敏感[17]。

2.3 不同焙烤程度麦芽挥发性化合物分析

焙烤麦芽挥发性化合物变化见表3。

表3 焙烤麦芽挥发性化合物变化

Table 3 Changes in volatile compounds of roasted malt

序号	中文名	分子式	分子量/Da	保留指数	挥发性化合物含量/%			香气描述
					170 ℃	190 ℃	210 ℃	
1	苯甲醇	C_7H_8O	108.1	1 076.4	291.02±17.36^{b}	467.23±19.15^{a}	291.65±21.84^{b}	杏仁味
2	2-辛醇	$C_8H_{18}O$	130.2	1 050.4	116.79±18.76^{c}	173.25±10.26^{b}	376.38±20.56^{a}	
3	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	154.3	1 095.6	1 630.68±94.29^{a}	1 075.17±85.83^{c}	1 231.87±88.40^{b}	玫瑰味
4	3-呋喃甲醇	$C_5H_6O_2$	98.1	966.7	193.76±20.52^{a}	105.89±24.38^{c}	131.54±6.57^{b}	
5	1-戊醇	$C_5H_{12}O$	88.1	758.7	7 882.80±180.80^{a}	7 340.98±170.28^{b}	5 962.40±75.47^{c}	面包味、果香味
6	2-甲基丙醇	$C_4H_{10}O$	74.1	594.2	5 763.01±281.03^{b}	7 252.01±178.14^{a}	5 402.74±238.29^{c}	酒精味
7	1,3-丁二醇	$C_4H_{10}O_2$	90.1	827.6	208.82±32.56^{a}	125.85±11.94^{c}	152.66±21.57^{b}	
8	2,3-丁二醇	$C_4H_{10}O_2$	90.1	814.7	132.21±3.86^{b}	206.03±14.99^{a}	112.92±13.71^{b}	
9	(*Z*)-3-己醇	$C_6H_{12}O$	100.2	824.2	335.22±42.99^{a}	342.82±17.22^{a}	174.17±19.61^{b}	
10	麦芽醇	$C_6H_6O_3$	126.1	1 097	148.07±9.43^{b}	140.06±11.07^{b}	157.81±16.76^{a}	焦糖味
11	(*E*)-3-己烯-1-醇	$C_6H_{12}O$	100.2	874.1	132.36±27.01^{a}	107.41±6.79^{b}	129.47±2.88^{a}	
12	丁酸丁酯	$C_8H_{16}O_2$	144.2	1 016.8	13 261.40±175.80^{a}	10 475.64±142.12^{b}	7 743.19±243.50^{c}	苹果味

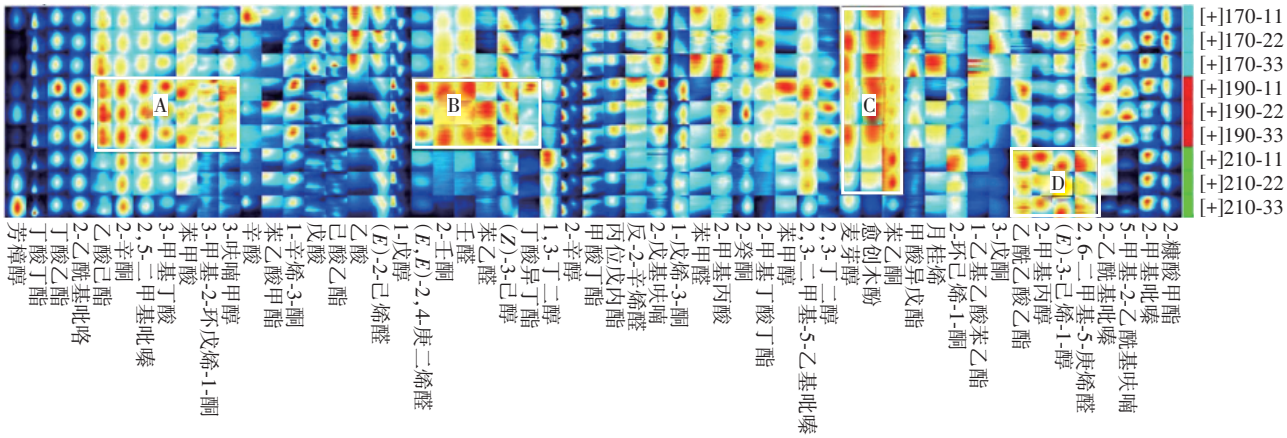
续表 3　焙烤麦芽挥发性化合物变化

Continue table 3　Changes in volatile compounds of roasted malt

序号	中文名	分子式	分子量/Da	保留指数	挥发性化合物含量/%			香气描述
					170 ℃	190 ℃	210 ℃	
13	丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	116.2	996.6	1 374.02±139.67[a]	1 310.67±87.71[b]	1 135.81±107.52[c]	果香味
14	乙酸己酯	$C_8H_{16}O_2$	144.2	1 003.1	762.04±20.19[b]	910.49±85.25[a]	531.92±151.78[c]	果香味
15	1-乙基乙酸苯乙酯	$C_{10}H_{12}O_2$	164.2	1 184	63.25±8.25[c]	102.37±15.36[b]	155.34±12.59[a]	
16	苯乙酸甲酯	$C_9H_{10}O_2$	150.2	1 137.7	174.39±26.20[ab]	150.32±14.17[b]	200.11±15.98[a]	蜂蜜味
17	丙位戊内酯	$C_5H_8O_2$	100.1	940.6	632.22±106.87[b]	737.92±189.75[a]	457.10±69.94[c]	
18	己酸乙酯	$C_7H_{14}O_2$	130.2	879.9	2 969.87±76.03[b]	3 117.48±130.76[a]	2 408.13±120.67[c]	菠萝味
19	2-糠酸甲酯	$C_6H_6O_3$	126.1	984.8	372.52±23.52[a]	326.28±46.69[b]	208.09±65.74[c]	蘑菇味
20	丁酸异丁酯	$C_8H_{16}O_2$	144.2	940.8	299.82±4.96[a]	282.41±4.00[b]	190.91±1.00[c]	苹果味
21	甲酸丁酯	$C_5H_{10}O_2$	102.1	693.3	1 190.59±40.00[a]	1 116.38±32.67[ab]	901.06±59.50[b]	果香味
22	甲酸异戊酯	$C_6H_{12}O_2$	116.2	813.7	1 190.59±40.00[a]	1 116.38±32.67[b]	887.73±38.50[c]	果香味
23	2-甲基丁酸丁酯	$C_9H_{18}O_2$	158.2	1 036.8	197.70±21.17[a]	181.90±7.68[a]	71.44±14.27[b]	果香味
24	2,6-二甲基-5-庚烯醛	$C_9H_{16}O$	140.2	1 072.6	125.39±20.16[c]	356.74±20.50[b]	419.67±26.31[a]	
25	反-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	126.2	996.7	153.56±22.78[a]	83.61±30.46[c]	106.85±9.41[b]	脂肪味
26	苯乙醛	C_8H_8O	120.2	1 008.4	576.82±20.36[c]	826.38±34.28[b]	940.36±31.08[a]	果香味
27	苯甲醛	C_7H_6O	106.1	984	94.21±27.35[b]	120.59±9.30[ab]	130.96±13.17[a]	果香味
28	(*E*)-2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	98.1	903.7	2 373.07±22.46[a]	1 203.53±57.80[b]	1 106.98±230.92[c]	清香味
29	壬醛	$C_9H_{18}O$	142.2	1 031.6	113.97±9.63[a]	92.21±11.60[b]	54.42±3.97[ab]	油脂味
30	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	$C_7H_{10}O$	110.2	1 038.8	103.39±9.43[b]	229.10±16.22[a]	97.07±12.09[b]	芳香味
31	苯甲酸	$C_7H_6O_2$	122.1	1 121.2	247.75±28.87[b]	322.65±24.95[a]	265.77±14.50[b]	刺激性气味
32	辛酸	$C_8H_{16}O_2$	144.2	1 116	1 554.82±88.25[a]	496.87±116.68[c]	671.55±192.82[b]	
33	戊酸	$C_5H_{10}O_2$	102.1	897.4	2 373.07±22.46[a]	1 203.53±57.80[b]	1 106.98±230.92[b]	
34	3-甲基丁酸	$C_5H_{10}O_2$	102.13	930.8	64.57±4.90[a]	54.36±5.16[b]	42.98±4.40[c]	
35	乙酸	$C_2H_4O_2$	60.1	655.2	556.32±11.35[c]	685.32±20.16[b]	712.46±20.17[a]	刺激性气味
36	乙酰乙酸乙酯	$C_{10}H_6O_3$	130.14	817.7	352.69±10.42[a]	209.59±4.75[b]	182.50±14.69[bc]	
37	2-甲基丙酸	$C_4H_8O_2$	88.1	843.5	558.68±35.14[c]	728.64±22.49[a]	609.18±5.19[b]	
38	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	C_6H_8O	96.1	992.3	172.38±10.28[c]	228.39±2 139[b]	378.69±25.31[a]	樟脑味
39	1-戊烯-3-酮	C_5H_8O	84.1	694.3	148.07±9.03[b]	140.06±11.07[b]	154.47±11.19[a]	
40	2-癸酮	$C_{10}H_{20}O$	156.3	1 149.8	396.70±55.53[b]	373.12±33.88[b]	590.82±30.21[a]	柠檬味
41	苯乙酮	C_8H_8O	120.2	1 050.8	148.77±15.00[b]	191.03±5.00[b]	207.94±4.00[a]	山楂味
42	2-环己烯-1-酮	C_6H_8O	96.1	912.4	71.66±8.72[b]	73.69±5.60[b]	93.84±8.79[a]	
43	3-戊酮	$C_5H_{10}O$	86.1	722.6	44.67±7.87[a]	20.53±3.66[b]	24.97±2.90[b]	
44	2-壬酮	$C_9H_{18}O$	142.2	1 092.2	40.60±10.38[a]	38.10±1.40[c]	19.51±8.11[b]	果香味
45	2-辛酮	$C_8H_{16}O$	128.2	1 044	99.20±15.98[c]	142.24±14.08[b]	190.09±60.07[a]	奶酪味
46	1-辛烯-3-酮	$C_8H_{14}O$	126.2	964.1	529.23±25.30[c]	811.08±159.38[a]	648.73±58.68[b]	蘑菇味
47	愈创木酚	$C_7H_8O_2$	124.1	1 100.4	312.03±55.17[a]	318.48±92.29[a]	276.60±101.10[b]	
48	2,5-二甲基吡嗪	$C_6H_8N_2$	94.1	877.4	163.95±14.67[c]	338.96±20.17[b]	410.38±19.63[a]	花生味
49	2-乙酰基吡嗪	$C_6H_6N_2O$	122.1	1 032.1	226.68±18.61[a]	220.82±25.83[a]	163.55±15.28[b]	
50	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪	$C_8H_{12}N_2$	136.2	1 071.7	82.40±6.17[c]	111.61±3.23[b]	121.30±13.32[a]	
51	2-甲基吡嗪	$C_5H_6N_2$	94.1	858.4	6 738.36±285.36[a]	5 406.29±28.95[b]	4 330.39±66.67[c]	烧烤味、坚果味
52	2-戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	138.2	998.3	557.20±90.58[a]	477.24±32.93[b]	545.12±41.30[a]	果香味、青草味
53	5-甲基-2-乙酰基呋喃	$C_7H_8O_2$	124.1	1 077.1	131.63±8.41[c]	218.92±13.97[a]	203.66±31.81[b]	焦糖味
54	2-乙酰基-1-甲基吡咯	C_6H_7NO	109.1	1 076.9	664.59±25.00[c]	1 213.19±96.82[a]	986.80±182.93[b]	甘草味
55	月桂烯	$C_{10}H_{16}$	136.2	953.8	31.86±1.54[b]	34.81±7.57[a]	31.01±0.45[b]	脂香味

由表 2 可知，3 个样品中总共鉴定出 55 种化合物，包括 11 种醇类、9 种酮类、13 种酯类、7 种醛类、6 种酸类、1 种酚类、4 种吡嗪、2 种呋喃、1 种吡咯类和 1 种其他化合物。

不同焙烤程度麦芽挥发性化合物的指纹图谱见图 1。



A、B、C、D 为含量较多的挥发性化合物区域。

图 1　不同焙烤程度麦芽挥发性化合物的指纹图谱

Fig.1　Fingerprinting of volatile compounds in malts with different degrees of roasting

从图 1 可以看出，焙烤温度对于麦芽的风味有较大影响，不同的焙烤温度下挥发性化合物含量不同。图 1 可分 A、B、C、D 4 个区域，A 区域主要包括 2-辛酮、3-呋喃甲醇、苯甲酸、乙酸己酯等物质，B 区域主要包括 2-壬酮、2,5-二甲基吡嗪和(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛等，C 区域包括愈创木酚、麦芽醇和苯乙酮等，D 区域主要包括 2-甲基吡嗪、(*E*)-3-己烯-1-醇和乙酰乙酸乙酯等。

在焙烤过程中，美拉德反应、脂质氧化以及高温条件下的糖热降解是形成麦芽风味的关键途径。脂质氧化能产生丰富的醇酮类与吡嗪类化合物，包括较高浓度的 1-戊烯-3-酮、2-丁醇、2,3-二甲基-5-乙基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪等。其中，高浓度且嗅感阈值低的吡嗪类化合物尤其显著，为焙烤麦芽带来强烈的坚果与烘烤特征香气[18]，本文结果与 Shi 等[19]的研究结果一致。醇类阈值较高，对挥发性组分构成的直接影响较弱，但其能够协同作用于整体气味；酯类则赋予麦芽果香、花香和蜂蜜等气味。短链脂肪酸（如戊酸和辛酸）的形成主要来源于脂质和氨基酸的降解过程[20]，其香气在较低浓度时较为浓郁，浓度过高则会呈现刺激性气味。此外，随焙烤温度升高，麦芽中醇类和酯类含量呈现先增后减的趋势：温度升至 190 ℃时化合物含量达到峰值，例如苯甲醇含量为(467.23±19.15)%，而温度升至 210 ℃时，其含量开始下降，同时麦芽出现焦糊气味。

醛类化合物是麦芽、咖啡及茶叶中的关键气味物质。麦芽在焙烤过程中，同样生成了多种醛类化合物，如(*E*)-2-己烯醛、苯甲醛和苯乙醛等。其中，苯乙醛呈现类似蜂蜜的香气，其形成主要源于苯丙氨酸经不饱和脂肪氧化降解生成相应的 Strecker 醛的过程[21]。这些醛类物质在关于咖啡叶茶的研究中已有报道[22]。此外，酮类化合物多为醇类氧化或酯类分解的产物，带有花香与果香特征；因其气味阈值普遍较低，对食品风味的改善作用较为显著。

麦芽在不同焙烤条件下产生不同挥发性化合物，其香气程度的不同是由美拉德反应和焦糖化反应的浓度和阈值不同导致的[23]。研究表明，热处理食品的风味形成多与美拉德反应相关[24]，该反应通过高温下羰基化合物与氨基化合物的相互作用，不仅生成棕黑色物质，也形成独特风味特征，是产生黑麦芽的关键途径。经焙烤鉴定出的挥发性化合物主要包括吡嗪类、呋喃类及吡咯类，均属美拉德反应的典型产物。其中，吡嗪类作为一组含氮挥发性杂环化合物，对烘烤、焙烤及坚果类风味贡献显著[25]，是美拉德反应中的重要合成产物。例如，190 ℃焙烤时，2,5-二甲基吡嗪和 2-乙酰基吡嗪的含量分别达 338.96% 和 220.82%；高含量的吡嗪类常被认为是赋予烘烤风味和坚果香气的重要来源。呋喃类主要由焦糖化反应和碳水化合物降解形成[26]，并广泛存在于热加工坚果与油脂的风味物质中，其本质是糖类高温反应的产物[27]。2-戊基呋喃和 5-甲基-2-乙酰基呋喃含量分别为 477.24% 和 218.92%。2-乙酰基吡咯是唯一鉴定出的吡咯类物质，该化合物也出现在汤龙等[28]关于豆粕/鸡肉酶解物美拉德反应体系的研究中。

2.4　主成分分析

主成分分析是一种通用的统计方法，用于将个案分析数据表简化为其基本特征[29]，为明确不同焙烤程度下麦芽挥发性化合物的变化，在 GC-IMS 的基础上，采用 PCA，研究不同焙烤程度麦芽样本挥发性化合物的差异性，结果见图 2。

由图 2 可知，不同焙烤程度的麦芽具有明显差异性，PC1 和 PC2 分别占总方差的 35.0% 和 32.9%，其累计贡献率达到了 67.9%，说明其可以很好地代表原始数据。每个温度的平行样本相对较近，但 3 个温度的麦芽样本距离较远，由此可以说明，不同焙烤程度对麦芽的香气成分影响较大，可以较好区分。

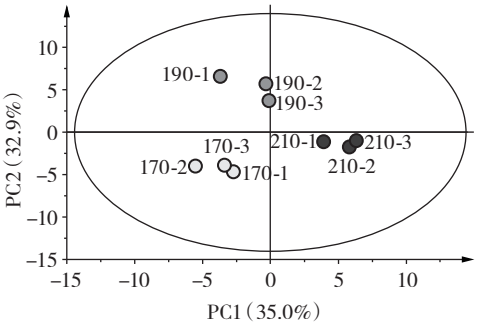


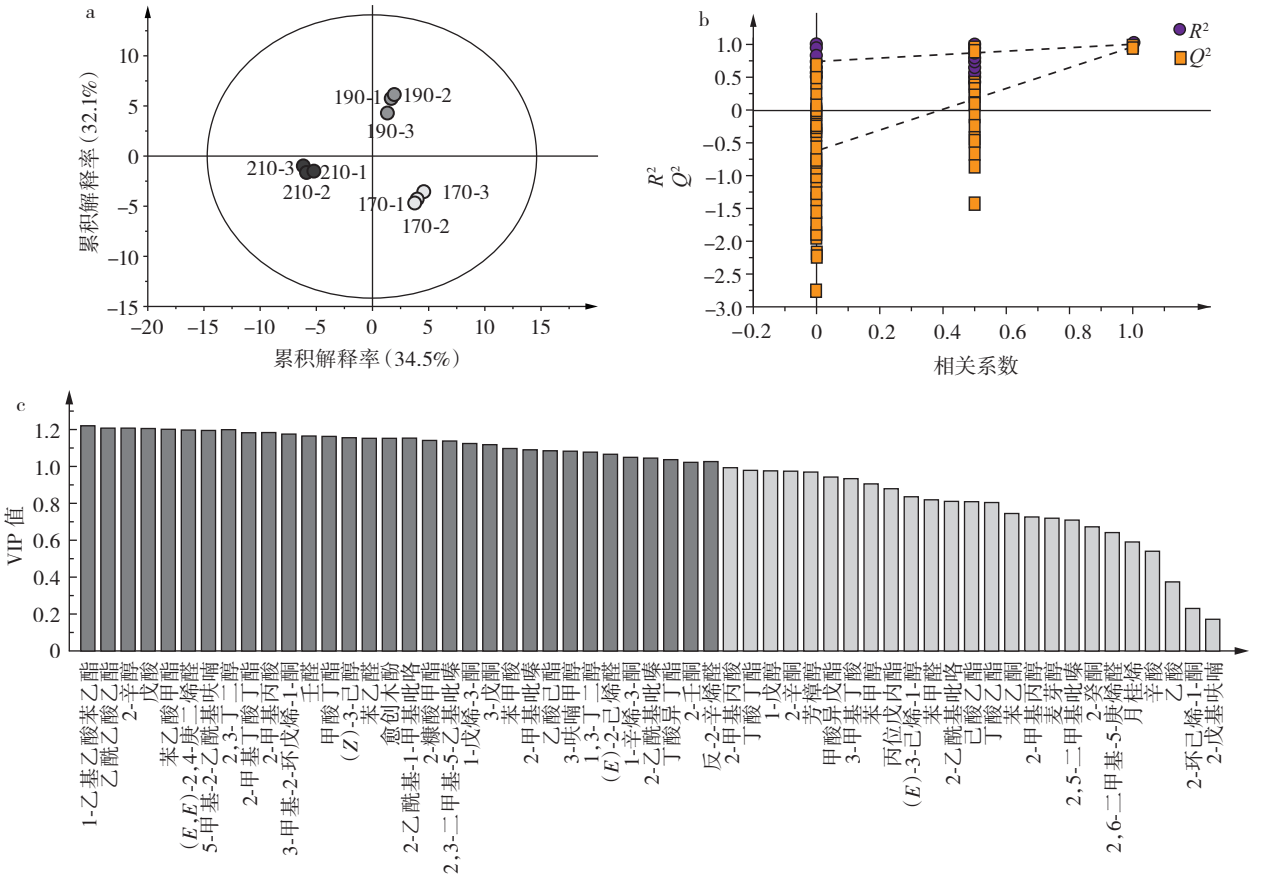
图 2　不同焙烤程度麦芽挥发性成分的 PCA 图

Fig.2　PCA diagram of volatile components of malt with different baking degrees

2.5　基于 PLS-DA 确定关键挥发性化合物

PLS-DA 是一种监督降维方法，广泛应用于食品方面的研究[30]，为明确烘烤前后麦芽挥发性化合物的变化，在 GC-IMS 的基础上，对其进行 PLS-DA 分析，结果见图 3。

由图 3a 可知，PLS-DA 结果与 PCA 分析一致，通过 PLS-DA 分析发现不同焙烤程度的麦芽分别位于正半轴和负半轴，说明 PLS-DA 较好区分了不同焙烤程度的麦芽。如图 3b 显示，该模型累计统计量 R^2_X=0.809、模型解释率参数 R^2_Y=0.989、预测能力参数 Q^2=0.953。其 R^2 和 Q^2 值表明模型拟合可接受。



a. 载荷图；b. 置换检验图；c.VIP 排序图。

图 3　GC-IMS 检测不同焙烤程度麦芽挥发性成分的 PLS-DA 载荷图、置换检验图及 VIP 排序图

Fig.3　PLS-DA loading plots，replacement test plots and VIP ranking plots for volatile components of malt with different roasting degrees by GC-IMS

如图 3c 所示，VIP>1 的化合物包括 2，3-丁二醇、壬醛、苯乙醛、乙酸己酯、戊酸、苯乙酸甲酯、2-壬酮和 3-呋喃甲醇等 32 种关键挥发性化合物，被认为对分类有贡献，因此，可用于鉴别分析。

3　结论

本文探究焙烤温度（130~230 ℃）对麦芽糖化性能与挥发性风味成分的影响。研究结果显示，随着焙烤温度的升高，麦芽的 α-氨基氮含量持续下降，在 230 ℃时降至最低值（9.37 mg/L）；糖化力与浸出率也呈现明显下降趋势，而还原糖含量则有所增加；pH 值在整个焙烤温度范围内保持相对稳定。酶活力分析表明，总酶活及 α-淀粉酶、β-淀粉酶活力均随温度升高而明显下降，其中 230 ℃处理下的酶活损失最为显著，说明高温焙烤对麦芽中淀粉酶的活力具有明显的抑制作用。在挥发性化合物方面，通过 HS-GC-IMS 技术在 170、

190 ℃及 210 ℃焙烤麦芽中共鉴定出 55 种挥发性化合物，涵盖醇类、酯类、酮类、酸类、醛类、吡嗪类、酚类、呋喃类及吡咯类等多种化合物类别。PCA 有效区分了不同焙烤温度处理的样品，表明温度对挥发性化合物组成具有显著调控作用；进一步通过 PLS-DA 结合 VIP>1 筛选出 32 种关键差异风味物质，包括 2，3-丁二醇、壬醛、苯乙醛及 2-壬酮等。综合理化与风味分析结果发现，190 ℃焙烤条件下的麦芽挥发性化合物种类及含量方面均表现较优，能够在保持良好理化指标的同时形成更为丰富协调的风味特征。本研究为通过焙烤工艺调控麦芽的酿造性能与风味品质提供了依据，对特种麦芽的生产与啤酒风味的定向调控具有参考价值。

参考文献：

[1] GU Z X, JIN Z, SCHWARZ P, et al. Unraveling the role of germination days on the aroma variations of roasted barley malts *via* gas chromatography-mass spectrometry based untargeted and targeted flavoromics[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136563.

[2] SÁEZ-ESCUDERO L, BLANCH G P, MORALES F J, et al. Health-related compounds and Maillard reaction products in dry and steam roasted purple carrots (*Daucus carota* L.)[J]. Food Chemistry, 2025, 483: 144296.

[3] CHEN J Z, DU Y, ZHANG Y K, et al. Screening of Maillard reaction substrates from roasted flaxseed and comparative analysis of the antioxidant potential of their products[J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102661.

[4] CASTRO L F, AFFONSO A D, LEHMAN R M. Impact of specialty malts on wort and beer characteristics[J]. Fermentation, 2021, 7(3): 137.

[5] 王琳琳, 张佰清, 王萍, 等 . HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析藜麦茶及藜麦芽茶的香气成分[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 167-173.
WANG Linlin, ZHANG Baiqing, WANG Ping, et al. Analysis of the aroma components of quinoa tea and quinoa sprouts tea by using combination of HS-SPME-GC-MS and ROAV[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 167-173.

[6] 陈臣, 周洁, 周琦, 等 . 烘烤前后巴旦木感官评价和挥发性化合物变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 293-301.
CHEN Chen, ZHOU Jie, ZHOU Qi, et al. Sensory evaluation and volatile compounds changes of almonds before and after baking[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 293-301.

[7] RÖGNER N S, STEINHAUS M. Geruchsaktive Verbindungen in Malzextrakten für die Backindustrie – Identifizierung, Quellen und Einfluss auf das Brotaroma[J]. Lebensmittelchemie, 2025, 79(S2): S2-116-S2-117.

[8] 韩中平, 韩永红 . 基于挥发性风味物质的啤酒焙烤麦芽制麦工艺研究[J]. 中外酒业, 2023(5): 26-39.
HAN Zhongping, HAN Yonghong. Study on malting technology of beer baking malt based on volatile flavor substances[J]. Global Alcinfo, 2023(5): 26-39.

[9] 刘常波 . 结晶麦芽焙焦工艺研究[J]. 现代食品, 2021, 27(2): 127-129.
LIU Changbo. Study on the roasting process of crystalline malt[J]. Modern Food, 2021, 27(2): 127-129.

[10] WU G Z, LIN H T, CHEN Y S. Improvement of the structure and antioxidant activity of protein-polyphenol complexes in barley malts using roasting methods[J]. Antioxidants, 2025, 14(5): 538.

[11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会 . 啤酒原料质量要求 第 2 部分: 啤酒麦芽: GB/T 7416.2—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Quality requirements of brewing material: Part 2 Brewing malt: GB/T 7416.2—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

[12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 食品中还原糖的测定: GB 5009.7—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of reducing sugar in food: GB 5009.7—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[13] 国家国内贸易局 . 蛋白酶活力测定法: SB/T 10317—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
State Bureau of Internal Trade. Measurement of proteinase activity: SB/T 10317—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.

[14] DISHAROON A, BOYLES R, JORDAN K, et al. Exploring diverse sorghum (*Sorghum bicolor*(L.) Moench) accessions for malt amylase activity[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2021, 127(1): 5-12.

[15] NIU C T, HAN Y P, WANG J J, et al. Malt derived proteins: Effect of protein Z on beer foam stability[J]. Food Bioscience, 2018, 25: 21-27.

[16] 廖国钊, 时小东, 王嘉, 等 . 基于 GC-IMS 和 GC-MS 比较不同桑叶茶的香气成分[J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 262-272.
LIAO Guozhao, SHI Xiaodong, WANG Jia, et al. Comparison of aroma components of different mulberry leaf teas based on GC-MS and GC-IMS[J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(1): 262-272.

[17] 赵旭乐, 管斌, 孔青, 等 . 麦芽制备中蛋白质组分与蛋白酶活性的相关性[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(10): 1445-1449.
ZHAO Xule, GUAN Bin, KONG Qing, et al. Relationship between protein components and protease activity during malting process[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(10): 1445-1449.

[18] ZHANG K Y, GAO L L, ZHANG C, et al. Analysis of volatile flavor compounds of corn under different treatments by GC-MS and GC-IMS[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 725208.

[19] SHI Y, WANG L L, FANG Y, et al. A comprehensive analysis of aroma compounds and microstructure changes in brown rice during roasting process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 613-621.

[20] BAI X, ZHANG M L, ZHANG Y Y, et al. Effects of pretreatment on the volatile composition, amino acid, and fatty acid content of oat bran[J]. Foods, 2022, 11(19): 3070.

[21] CHEN T, WEI C K, LI T, et al. Effects of reducing sugars on the structural and flavor properties of the Maillard reaction products of *Lycium barbarum* seed meal[J]. Foods, 2023, 12(23): 4346.

[22] STEGER M C, RIGLING M, BLUMENTHAL P, et al. Coffee leaf tea from El Salvador: On-site production considering influences of processing on chemical composition[J]. Foods, 2022, 11(17): 2553.

[23] SACCHETTI G, IOANNONE F, DE GREGORIO M, et al. Non enzymatic browning during cocoa roasting as affected by processing time and temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169: 44-52.

[24] XIE Q S, XU B C, XU Y, et al. Effects of different thermal treatment temperatures on volatile flavour compounds of water-boiled salted duck after packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112625.

（下转第24页）

neurological damage in preterm infants[J]. BioMed Research International, 2021, 2021(1): 2628824.

[14] TROTT O, OLSON A J. AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading[J]. Journal of Computational Chemistry, 2010, 31(2): 455-461.

[15] STICHT C, DE LA TORRE C, PARVEEN A, et al. miRWalk: An online resource for prediction of microRNA binding sites[J]. PLoS One, 2018, 13(10): e0206239.

[16] WANG Y J, CHE M X, XIN J G, et al. The role of IL-1β and TNF-α in intervertebral disc degeneration[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2020, 131: 110660.

[17] TURNER M D, NEDJAI B, HURST T, et al. Cytokines and chemokines: At the crossroads of cell signalling and inflammatory disease [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research, 2014, 1843(11): 2563-2582.

[18] HUANG W J, HICKSON L J, EIRIN A, et al. Cellular senescence: The good, the bad and the unknown[J]. Nature Reviews Nephrology, 2022, 18(10): 611-627.

[19] COPPÉ J P, DESPREZ P Y, KRTOLICA A, et al. The senescence-associated secretory phenotype: The dark side of tumor suppression [J]. Annual Review of Pathology: Mechanisms of Disease, 2010, 5: 99-118.

[20] SALMINEN A, KAARNIRANTA K, KAUPPINEN A. Photoaging: UV radiation-induced inflammation and immunosuppression accelerate the aging process in the skin[J]. Inflammation Research, 2022, 71(7): 817-831.

[21] NGOH E N, WEISSER S B, LO Y, et al. Activity of SHIP, which prevents expression of interleukin 1β, is reduced in patients with Crohn′s disease[J]. Gastroenterology, 2016, 150(2): 465-476.

[22] GENG Q S, XU J H, CAO X X, et al. PPARG-mediated autophagy activation alleviates inflammation in rheumatoid arthritis[J]. Journal of Autoimmunity, 2024, 146: 103214.

[23] WANG L M, WALTENBERGER B, PFERSCHY-WENZIG E M, et al. Natural product agonists of peroxisome proliferator-activated receptor gamma (PPARγ): A review[J]. Biochemical Pharmacology, 2014, 92(1): 73-89.

[24] WANG D, SHI L Y, XIN W, et al. Activation of PPARγ inhibits proinflammatory cytokines production by upregulation of miR-124 *in vitro* and *in vivo*[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2017, 486(3): 726-731.

[25] MITCHELL S, VARGAS J, HOFFMANN A. Signaling *via* the NFκB system[J]. WIREs Systems Biology and Medicine, 2016, 8 (3): 227-241.

[26] ROUSSEAUX C, LEFEBVRE B, DUBUQUOY L, et al. Intestinal antiinflammatory effect of 5-aminosalicylic acid is dependent on peroxisome proliferator-activated receptor-gamma[J]. The Journal of Experimental Medicine, 2005, 201(8): 1205-1215.

[27] SHI D, HAN T S, CHU X, et al. An isocaloric moderately high-fat diet extends lifespan in male rats and *Drosophila*[J]. Cell Metabolism, 2021, 33(3): 581-597.

[28] EILAM Y, KHATTIB H, PINTEL N, et al. Microalgae—Sustainable source for alternative proteins and functional ingredients promoting gut and liver health[J]. Global Challenges, 2023, 7(5): 2200177.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2025-06-17

(上接第15页)

[25] YU H, ZHANG R Y, YANG F W, et al. Control strategies of pyrazines generation from Maillard reaction[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 795-807.

[26] LEE J, ROUX S, LE ROUX E, et al. Unravelling caramelization and Maillard reactions in glucose and glucose+leucine model cakes: Formation and degradation kinetics of precursors, α-dicarbonyl intermediates and furanic compounds during baking[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131917.

[27] DUN Q, YAO L, DENG Z Y, et al. Effects of hot and cold-pressed processes on volatile compounds of peanut oil and corresponding analysis of characteristic flavor components[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 112: 107648.

[28] 汤龙, 宋焕禄, 王丽金. 不同分子质量大豆蛋白和鸡肉酶解物的美拉德反应产物风味特征分析[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(3): 148-162.
TANG Long, SONG Huanlu, WANG Lijin. Flavor characterizations of Maillard reaction products of enzymatical hydrolysates of soybean and chicken with different molecular weights[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(3): 148-162.

[29] GREENACRE M, GROENEN P J F, HASTIE T, et al. Principal component analysis[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2022, 2: 100.

[30] MÉSZÁROS M, SEDLÁK J, BÍLEK T, et al. Evaluating LDA and PLS-DA algorithms for food authentication: A chemometric perspective[J]. Algorithms, 2025, 18(12): 733.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2025-12-12