

加酶挤压高粱米辅料对麦汁及啤酒品质的影响

张 信¹,任志秋²,闫闯硕¹,孙 颖¹,王雨凡¹,李宏军^{1*}

(1.山东理工大学 农业工程与食品科学学院,山东 淄博 255100;2.黑龙江交通职业技术学院 粮食工程系,黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要:为探究加酶挤压高粱米辅料对麦汁和啤酒品质的影响,以未挤压的高粱米辅料制备的麦汁和啤酒为对照组,利用高效液相色谱、氨基酸分析仪和气相色谱-质谱联用分析麦汁中可发酵糖、含氮化合物、游离氨基酸以及啤酒中挥发性风味物质的组成及含量。结果表明,加酶挤压高粱米辅料麦汁中可发酵糖和游离氨基酸含量分别为13.46 g/100 mL和1.24 g/L,与对照组麦汁相比,分别提升了16.44%和6.92%,总氮和低分子质量含氮化合物含量分别提升7.08%和9.40%。加酶挤压高粱米辅料制备的啤酒的泡持性、双乙酰含量和酒精度等基本指标均符合GB/T 4928—2008《啤酒》国标要求且优于对照组;啤酒中挥发性风味物质由对照组的21种增加至24种,特别是检出了2-甲基丁醇、丁酸乙酯、醋酸香茅酯和9-癸烯酸乙酯四种风味物质,啤酒的果味和玫瑰香气突出,风味协调、口感更佳;感官评分从对照组的75分增至83分。加酶挤压高粱米作为辅料能提升麦汁中可发酵糖和游离氨基酸含量,所酿啤酒理化指标更优、风味物质更丰富、感官评分更高,整体品质更优。

关键词:高粱米;加酶挤压;麦汁;啤酒;品质

中图分类号:TS262.5

文章编号:0254-5071(2025)12-0189-06

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.12.027

引文格式:张信,任志秋,闫闯硕,等.加酶挤压高粱米辅料对麦汁及啤酒品质的影响[J].中国酿造,2025,44(12):189-194.

Effect of enzymatic extrusion sorghum grain adjuvant on quality of wort and beer

ZHANG Xin¹, REN Zhiqiu², YAN Chuangshuo¹, SUN Ying¹, WANG Yufan¹, LI Hongjun^{1*}

(1.College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255100, China;

2.Department of Grain Engineering, Heilongjiang Jiaotong Polytechnic, Haerbin 150000, China)

Abstract:To explore the effect of enzymatic extrusion sorghum grain adjuvant on the quality of wort and beer, using the wort and beer prepared using sorghum grain adjuvant without extrusion as the control group, the composition and content of fermentable sugars, nitrogen-containing compounds, free amino acids in wort, and the volatile flavor substances in beer were analyzed by HPLC, amino acid analyzer, and GC-MS. The results showed that the contents of fermentable sugars and free amino acids in the wort of enzymatic extrusion sorghum grain adjuvant were 13.46 g/100 ml and 1.24 g/L, compared with the control group, which increased by 16.44% and 6.92%, respectively, and the total nitrogen and nitrogen-containing compounds with low molecular mass contents increased by 7.08% and 9.40%, respectively. The basic indicators such as foam holding capacity, diacetyl content, and alcohol content of beer made from enzymatic extrusion sorghum grain adjuvant met the requirements of GB/T 4928—2008 "beer", and better than those of the control group. The contents of volatile flavor substances in the beer increased from 21 in the control group to 24 in the experimental group. In particular, the four flavor substances were detected in the beer, including 2-methylbutanol, ethyl butyrate, citronellyl acetate, and ethyl 9-decenoate, which gave the beer a prominent fruity and rose aroma. The beer exhibited a coordinated flavor and taste, and therefore increasing the sensory score from 75 (control group) to 83. In conclusion, enzymatic extrusion sorghum grain as an adjuvant could increase the contents of fermentable sugars and free amino acids in wort, and further improved the physicochemical characteristics, flavor substances contents, sensory scores, and the overall quality was superior to the control group.

Key words:sorghum grain; enzymatic extrusion; wort; beer; quality

在竞争日益激烈的全球啤酒市场中,酿酒行业面临生产成本高和啤酒品种少等挑战^[1]。在糖化过程中添加谷物辅料替代价格相对昂贵的大麦芽是一种有效策略^[2]。高粱是世界五大种植作物之一,种植范围广、适应性强、价格便宜^[3]。高粱脱壳后即為高粱米,高粱米含有丰富的淀粉、蛋白质、脂肪和膳食纤维等,具有较高的营养价值,以其作为辅料酿造的啤酒营养价值高、品质良好,但存在糊化温

度高、糖化效率低的问题^[4]。加酶挤压技术是将挤压机作为酶催化的生物反应器,在挤压过程引入外源酶制剂,加强对底物的作用^[5]。原料在挤压机内受到压力和剪切力的作用,淀粉和蛋白质发生糊化和适度变性,暴露了更多酶结合位点^[6]。同时,剪切力和压力等作用会诱导酶激活,促进酶对底物的降解,增加挤出物中的可溶性物质含量,有利于后续的糖化和发酵^[7]。

收稿日期:2025-04-07

修回日期:2025-08-25

基金项目:山东省重点研发计划项目(2023TZXD004)

作者简介:张 信(2001-),男,硕士研究生,研究方向为农产品加工。

*通讯作者:李宏军(1968-),男,教授,博士,研究方向为农产品高值化加工。

王玉露^[9]采用低温挤压膨化高粱米辅料酿造啤酒,确定低温挤压膨化高粱辅料的最佳糖化工艺参数,分析了麦汁中的可发酵性糖组成及啤酒中的可挥发性风味组分。CORTES-CEBALLOS E等^[9]在高粱挤出物中添加硬脂酰乳酸钠,可以提高高粱淀粉的糖化效率及麦汁中可发酵糖含量,利于后续的啤酒发酵。MA C等^[10]研究发现采用挤压高粱米做辅料可增加啤酒中风味物质种类并提升啤酒风味品质。目前研究主要聚焦于挤压技术在高粱辅料啤酒中的应用,但添加耐高温 α -淀粉酶挤压高粱米辅料酿造啤酒方面还未见报道。

本研究利用添加耐高温 α -淀粉酶挤压处理高粱米作辅料酿造啤酒,探究加酶挤压高粱米辅料对麦汁中可发酵糖、含氮化合物及游离氨基氮含量及对啤酒外观、泡沫特性、香气和口感等指标的影响,以期为挤压高粱啤酒的工业化生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

白高粱米(水分含量12.81%,淀粉含量78.56%,蛋白质含量9.33%,脂肪含量2.50%);淄博潘庄粮油市场;大麦芽:山东康源生物科技有限公司;啤酒花:济南福克达生物技术责任有限公司;啤酒酵母:德国DAB下面酵母;耐高温 α -淀粉酶(酶活力40 000 U/g):上海麦克林生化科技有限公司。

1.1.2 化学试剂

乙腈(色谱纯):北京迪科马科技有限公司;H型氨基酸混合标准液(色谱纯):日本富士胶片和光有限公司;硫酸、盐酸(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

YJP 200单螺杆挤压机:由山东理工大学农产品精深加工中心自制,配备自动控制系统,螺杆外径为77 mm,螺杆长径比为16.4:1,螺杆转速0~300 r/min,配有3个直径为10 mm的模孔;100 L啤酒酿造设备:山东中德发酵技术有限公司;JMF-1A对辊盘式磨粉机:山东东岸机械科技有限公司;FD-8真空冷冻干燥机:北京博医康试验仪器有限公司;Multiskan SkyHigh酶标仪:上海赛默飞世尔科技有限公司;DL-5-B离心机、TGL-16C离心机:上海安亭科学仪器厂;600E高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)仪、Waters 2414 示差检测器:美国Waters公司;LA 8080自动氨基酸分析仪:日本日立公司;二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷(DVB/CAR/PDMS)萃取头(50/30 μ m):美国Sigma-Aldrich公司;HP-INNOWAX色谱柱(60 m $\times$ 0.25 μ m $\times$ 0.25 mm),8890-5977B气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS):美国Agilent Technologies公司。

1.3 方法

1.3.1 挤压处理

以粉碎并通过80目筛后的高粱米为原料,通过单螺杆挤压机进行挤压处理。根据预实验研究结果,将挤压条件设置为:物料水分含量27%、耐高温 α -淀粉酶添加量0.06%、套筒温度90 $^{\circ}$ C、螺杆转速160 r/min。挤出物冷却至室温后粉碎备用。

1.3.2 加酶挤压处理/未挤压处理高粱米辅料麦汁啤酒制备工艺流程及操作要点

(1)加酶挤压处理高粱米辅料麦汁啤酒

大麦+水+加酶挤压的高粱米辅料 $\rightarrow$ 糖化 $\rightarrow$ 过滤 $\rightarrow$ 煮沸 $\rightarrow$ 回旋沉降 $\rightarrow$ 发酵 $\rightarrow$ 啤酒成品

操作要点:麦汁和啤酒的制备参照QIMM等^[11]的方法。麦汁的制备于啤酒酿造设备(100 L)上进行。加酶挤压高粱米辅料麦汁的制备采用单醪浸出糖化法。首先将粉碎后加酶挤压高粱米(9 kg)和大麦芽(21 kg)混合并分散到装有130 L预热水(50 $^{\circ}$ C,添加乳酸至pH值5.3)的煮沸锅中保持1 h,然后以1 $^{\circ}$ C/min的速度升至63 $^{\circ}$ C,保温1 h,再升至70 $^{\circ}$ C保温30 min,整个过程中持续搅拌。最后加热至78 $^{\circ}$ C,将煮沸锅中麦汁倒入过滤槽中沉降30 min并过滤后,将滤液倒入煮沸锅中煮沸,在麦汁煮沸后的10 min、40 min和80 min,分别加入11 g、31 g和28 g啤酒花,再煮沸10 min,完成煮沸过程^[12]。将完成煮沸过程的麦汁倒入回旋沉降槽中沉降30 min,转移至发酵罐中,稳定平衡至9 $^{\circ}$ C,接入1%酵母,酵母添加后麦汁中细胞浓度为 $(1.5\sim 1.8)\times 10^7$ 个/mL。主发酵7 d左右。待原麦汁浓度降至3.8~4.2 $^{\circ}$ P封罐,5 h左右降温至4 $^{\circ}$ C,维持1 d降温至2~3 $^{\circ}$ C,完成啤酒酿造过程。最终得到加酶挤压高粱米辅料啤酒(enzymatic extrusion sorghum grain adjuvant beer, ESA)。

(2)未挤压处理高粱米辅料麦汁啤酒

大麦+水+加酶未挤压的高粱米辅料 $\rightarrow$ 预糊化/糖化 $\rightarrow$ 过滤 $\rightarrow$ 煮沸 $\rightarrow$ 回旋沉降 $\rightarrow$ 发酵 $\rightarrow$ 成品酒

操作要点:未挤压处理高粱米(对照组)做辅料麦汁的制备采用双醪浸出糖化法。首先,将粉碎后高粱米(9 kg)和耐高温 α -淀粉酶(5.4 g)混合并分散到装有50 L预热水(50 $^{\circ}$ C,添加乳酸至pH值5.3)的容器中,升温至90 $^{\circ}$ C保持20 min,继续升温至100 $^{\circ}$ C,再保持10 min,并在整个过程中持续搅拌。与此同时,大麦芽(21 kg)与80 L预热水(50 $^{\circ}$ C, pH值5.3)于煮沸锅中混合,保温并搅拌1 h。然后将预糊化的高粱米醪倒入煮沸锅中,醪液混合物加热至63 $^{\circ}$ C,间歇搅拌1 h。后续过程与上述单醪浸糖化法一致,得到未挤压高粱米辅料啤酒(non-extrusion sorghum grain adjuvant beer, NSA)。

1.3.3 麦汁可发酵糖含量测定

麦汁可发酵糖的测定方法参照VRIESEKOP F等^[13]的方法。将麦汁经0.45 μ m水系无菌微孔滤膜过滤后,通过

高效液相色谱仪,使用碳水化合物柱(4.6 mm×250 mm, 4 μm)测定麦汁中可发酵糖含量。HPLC系统配备2515泵、717Plus自动进样器和2414示差检测器。柱温45℃,检测器温度35℃。流动相选择乙腈-水溶液(78:22, V/V),流速0.9 mL/min。

1.3.4 麦汁可溶性含氮化合物含量测定

采用Lundin分级沉淀法对麦汁中的含氮化合物进行分子质量分级测定^[14]。

1.3.5 游离氨基酸组成分析

使用自动氨基酸分析仪测定麦汁的游离氨基酸组成(色氨酸除外)。测量方法按照YANG H等^[15]的描述进行适当修改。麦汁中加入0.02 mol/L HCl 稀释10倍并用0.22 μm 无菌尼龙微孔膜过滤后,测定麦芽汁中游离氨基酸的含量。使用H型氨基酸混合液作为标准溶液。

1.3.6 啤酒基本质量指标测定

参照GB/T 4928—2008《啤酒分析方法》中的方法分析挤压处理高粱米辅料麦汁啤酒和未挤压高粱米辅料麦汁啤酒的基本质量指标,包括色度、双乙酰含量、原麦汁浓度、实际发酵度、酒精度、总酸及pH值。

1.3.7 啤酒挥发性风味成分测定

啤酒中挥发性风味成分通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术,参照HE Y等^[16]的方法进行测定。

将10 mL啤酒样品放入装有3 g氯化钠的20 mL顶空样品瓶中,用隔膜盖密封样品瓶,于磁力搅拌器搅拌10 min后,小瓶放入60℃的水浴中15 min,后插入已老化处理的DVB/CAR/PDMS(50/30 μm)萃取头于60℃条件萃取1 h。萃取结束后,将萃取头取出并插入气相色谱进样口于250℃解吸5 min后进行测定。

GC条件:HP-5MS毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)以氮气(N₂)为载气,流速为1 mL/min,进样口温度为250℃。升温程序从45℃开始,保持2 min,以5℃/min的速率升至220℃并保持1 h。

MS条件:电子电离源(electron ionization, EI);电子能量70 eV;离子源温度250℃;四级杆温度150℃,质荷比扫描范围30~500 m/z。

定性定量方法:将获得的质谱数据与美国国家标准技术研究所谱库进行对照匹配(匹配度>80%)进行定性。通过计算各分离峰的相对峰面积计算各成分的相对含量。

1.3.8 感官评价

从外观、泡沫、香气和口感4个方面对挤压处理高粱米辅料麦汁啤酒和未挤压高粱米辅料麦汁啤酒进行感官评价,评审小组由10名男性和10名女性组成,所有小组成员均经过培训,根据GB 4927—2008《啤酒》中的感官评价标准进行感官评价,详细评分标准见表1。

表1 高粱米辅料啤酒感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standards of sorghum grain adjuvant beer

项目	评分标准	评分/分
外观 (20分)	酒液清亮透明有光泽,无悬浮物	16~20
	酒液略清亮透明有光泽,无悬浮物	11~15
	酒液略浊颜色暗淡,存在悬浮物	≤10
泡沫 (15分)	泡沫洁白细腻厚实,挂壁持久	12~15
	泡沫较洁白细腻,挂壁较持久	9~11
	泡沫松散不洁白,挂壁时间较短或不起泡沫	≤8
香气 (25分)	具有明显的酒花香、麦芽香气、高粱香气,各香协调	21~25
	酒花香、麦芽香气、高粱香气不明显	16~20
	存在异味(酸味、腐败味),无独特香气	≤15
口感 (40分)	酒体爽口协调,杀口力舒适、甜苦适中,口感细腻 略显愉悦,有再饮欲	36~40
	酒体协调,较爽口、有一定杀口力,较苦或较甜	31~35
	酒体粗糙淡薄、略有杂味,过苦或过甜	21~30
	杂味明显,无杀口感,口味杂乱	≤20

1.3.9 数据处理

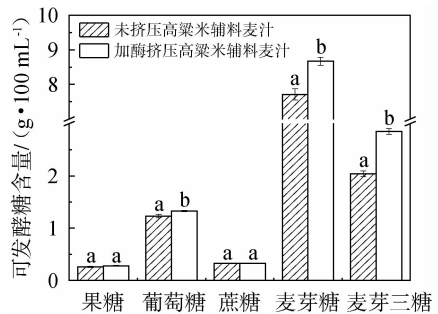
理化指标的测定均重复3次,结果以“平均数±标准差”表示,采用t检验($P<0.05$)和方差分析进行统计分析,并通过SPSS 26.0进行Duncan检验,使用Origin 2023绘图。

2 结果与分析

2.1 两种麦汁品质对比分析

2.1.1 两种麦汁中可发酵糖含量分析

糖化过程中,麦芽内源性淀粉酶将淀粉水解为一系列可发酵糖(葡萄糖、麦芽糖和麦芽三糖)及一些低分子质量的糊精^[17]。可发酵糖为后续酵母生长提供碳源,其含量可以反映糖化效率的高低^[11]。两种麦汁中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖和麦芽三糖5种可发酵糖含量测定结果见图1。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 两种麦汁中可发酵糖的含量

Fig. 1 Fermentable sugar contents in two types of wort

由图1可知,加酶挤压高粱辅料麦汁中葡萄糖、麦芽糖和麦芽三糖的含量分别为1.33 g/100 mL、8.67 g/100 mL和2.85 g/100 mL,均显著高于对照组的葡萄糖、麦芽糖和麦芽三糖含量(1.23 g/100 mL、7.71 g/100 mL和2.04 g/100 mL)($P<$

0.05)。这与赵淑娜^[8]关于加酶挤压大麦粉在大麦啤酒酿造中的应用的研究中取得了类似的结果,都是由于加酶挤压处理时,辅料淀粉在高温、高压及高剪切力作用下发生完全糊化和部分降解,暴露出更多的酶结合位点,酶与底物的接触面积增大,有利于糖化过程中淀粉酶的水解。结果表明,加酶挤压处理能有效提高高粱米辅料麦汁中可发酵糖的含量,为后续啤酒发酵奠定良好基础。

2.1.2 两种麦汁中含氮化合物含量分析

麦汁中含氮化合物的分子质量分布是评估蛋白质水解程度及预测啤酒品质的重要指标^[9]。两种麦汁中含氮化合物含量测定结果见图2。由图2可知,加酶挤压高粱米辅料麦汁中的高分子质量含氮化合物(368 mg/L)、中分子质量含氮化合物(274 mg/L)及低分子质量含氮化合物(1 152 mg/L)的含量均显著高于添加未挤压高粱米辅料麦汁($P<0.05$) (高分子质量含氮化合物358 mg/L;中分子质量含氮化合物264 mg/L;低分子质量含氮化合物1 053 mg/L),且总氮含量提升7.08%,低分子质量含氮化合物提升9.40%。QI MM等^[1]在挤压木薯辅料啤酒酿造中的应用研究也得出了挤压处理辅料能够提升麦汁中总氮与低分子质量氮含量的结论。这是由于加酶挤压处理使高粱米蛋白质发生适度变性,酶解效率提升;同时,加酶挤压高粱米辅料采用单醪糖化,高粱米蛋白质经过完整的蛋白质休止阶段,蛋白质被分解成小分子物质并转移到麦汁中^[1]。加酶挤压能有效促进原料蛋白质的降解与转化,提高麦汁中不同分子质量含氮化合物的含量,有利于后续啤酒品质的改善。

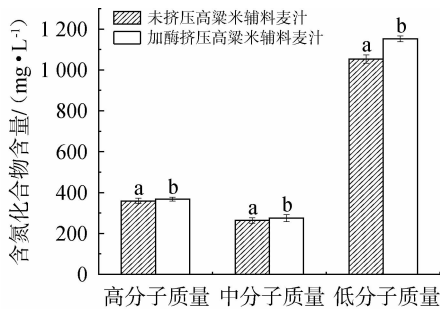


图2 两种麦汁中不同分子质量含氮化合物的含量
Fig. 2 Contents of nitrogen-containing compounds with different molecular mass in two types of wort

2.1.3 两种麦汁中游离氨基酸含量的分析

游离氨基酸是啤酒酵母可同化氮的主要来源,对发酵过程中酵母代谢和啤酒品质均有重要影响^[20]。根据啤酒酵母的同化模式可以将游离氨基酸分为四组:A组(Asp、Thr、Ser、Glu、Lys和Arg)、B组(His、Val、Met、Ile和Leu)、C组(Tyr、Phe、Trp、Gly和Ala)以及D组(Pro),酵母对不同氨基酸的吸收和同化表现出显著的差异,酵母在发酵过程中主要利用A组和B组氨基酸^[20]。两种麦汁中游离氨基酸含量测定结果见图3。由图3可知,加酶挤压高粱米辅料麦

汁和未挤压处理高粱米辅料麦汁的总游离氨基酸分别为1 241.23 mg/L和1 160.87 mg/L。与对照组相比,加酶挤压高粱米辅料麦汁中A、B、C三组氨基酸含量均得到提升。这是由于加酶挤压促进了蛋白质的降解和小分子肽的产生,提高了高粱米辅料中蛋白质的转化率。加酶挤压高粱米辅料麦汁中A组和B组氨基酸占比63.65%,高于对照组麦汁的61.30%,表明加酶挤压高粱米辅料麦汁的游离氨基酸组成更合理,更有利于后续发酵过程中酵母的利用。

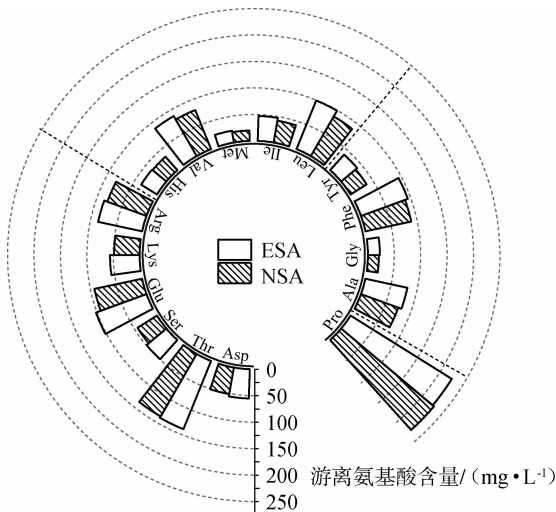


图3 两种麦汁中游离氨基酸含量
Fig. 3 Contents of free amino acid in two types of wort

2.2 两种啤酒品质对比分析

2.2.1 两种啤酒基本理化指标分析

两种啤酒的基本理化指标测定结果见表2。由表2可知,加酶挤压高粱米辅料啤酒(ESA)的色度为9.44 EBC,双乙酰含量为0.05 mg/L,酒精度为5.24%vol,实际发酵度为70.47%,总酸含量为1.39 mL/100 mL,pH为4.39,泡持性为249 s,理化指标均符合GB/T 4928—2008《啤酒》要求,且整体优于未挤压高粱米辅料啤酒(NSA)。

表2 两种啤酒理化指标对比
Table 2 Comparison of physicochemical indicators of two types of beer

项目	啤酒种类	
	NSA	ESA
色度(EBC)	10.51±0.32a	9.44±0.31b
双乙酰/(mg·L ⁻¹)	0.06±0.011a	0.05±0.008a
酒精度/%vol	4.93±0.15a	5.24±0.13b
实际发酵度/%	68.17±0.81a	70.47±0.89b
总酸/(mL·100 mL ⁻¹)	1.36±0.03a	1.39±0.02a
pH值	4.48±0.02a	4.39±0.01b
泡持性/s	201±29a	249±32b

2.2.2 两种啤酒挥发性风味成分分析

酵母在发酵过程中利用麦汁中的可发酵糖等产生的

多种次级代谢产物,主要包括高级醇、酸、酯和其他物质,在啤酒质量方面起着关键的作用^[21]。两种啤酒挥发性风味化合物测定结果见表3。由表3可知,ESA和NSA分别检测出24和21种挥发性风味化合物。

表3 两种啤酒中挥发性风味化合物含量对比
Table 3 Comparison of volatile flavor compounds contents between two types of beer

挥发性风味化合物		相对含量/%	
		NSA	ESA
醇类			
1	异戊醇	4.30	4.23
2	2-戊醇	3.96	3.50
3	苯乙醇	11.26	12.55
4	2-甲基丁醇	/	0.66
酸类			
1	正己酸	0.55	0.72
2	辛酸	21.48	20.24
3	正癸酸	7.05	6.10
酯类			
1	乙酸异戊酯	7.04	7.02
2	乙酸-2-甲基丁酯	0.77	0.52
3	正乙酸乙酯	2.44	2.70
4	乙酸己酯	6.48	2.55
5	丁酸乙酯	/	1.14
6	辛酸乙酯	10.24	11.74
7	乙酸辛酯	0.12	0.20
8	乙酸苯乙酯	14.36	12.72
9	丙位葵内酯	0.14	/
10	反式-4-癸烯酸乙酯	0.52	0.78
11	癸酸乙酯	7.20	7.53
12	辛酸异戊酯	0.13	0.17
13	月桂酸乙酯	0.74	1.02
14	棕榈酸乙酯	0.17	0.40
15	醋酸香茅酯	/	0.86
16	9-癸烯酸乙酯	/	0.78
酚类			
1	4-乙烯基愈创木酚	0.35	0.42
2	3,5-二叔丁基苯酚	0.66	1.90

注:“-”表示未检出。

适量的高级醇可赋予酒体特殊香气^[23],ESA中高级醇的相对含量为21.94%,明显高于NSA的19.52%。其中,2-甲基丁醇仅在ESA中检出,可以赋予啤酒果味;苯乙醇是高粱米辅料啤酒中含量最高的高级醇,ESA中苯乙醇含量为12.55%,高于NSA的11.26%,赋予ESA明显的玫瑰香气。这是由于加酶挤压高粱米辅料提高了麦汁中的葡萄糖含量,有利于发酵过程中苯乙醇的产生^[24]。

酯类是啤酒中挥发性较强的风味化合物,是啤酒的重

要香气成分。ESA和NSA中分别检测出15种和13种酯类风味物质,相对含量分别为50.13%和50.35%。在ESA检测出丁酸乙酯、醋酸香茅酯和9-癸烯酸乙酯等3种新的挥发性酯类物质,分别赋予啤酒果味、玫瑰和脂肪的香气^[25]。醇酯比通常用来评价啤酒是否产生“上头”现象,饮用醇酯比>4的啤酒容易出现头晕、头痛的现象^[24]。ESA和NSA的醇酯比分别为0.43和0.39,均较低,饮用后无“上头”现象。

啤酒中主要包括己酸、辛酸及癸酸等酸类物质,合适的酸类物质含量能增加啤酒风味的层次感,过量会产生腐烂水果和脂肪等异味^[26]。两种啤酒中挥发性酸类物质差异不大且均在适宜范围内。ESA中检测出的4-乙烯基愈创木酚和3,5-二叔丁基苯酚的相对含量为0.42%和1.90%,高于NSA的0.35%和0.66%,这两种物质分别赋予啤酒略带甜味的发酵香气和酚类香气,表明加酶挤压高粱米辅料更有利于酚类物质的产生。

结果表明,与未处理辅料相比,加酶挤压工艺拓宽了挥发性化合物的种类范围,提高了其含量,优化了啤酒的整体风味特征。

2.2.3 两种啤酒的感官评价

从外观、泡沫特性、香气和口感等四个方面对ESA和NSA进行感官评分,结果见图4。麦汁中总氮和中小分子氮含量对啤酒的泡沫特性有重要影响^[8]。ESA的酒体更加清亮透明,评分处于16~20分,而NSA酒液澄清度和光泽度较低,评分处于11~15分。ESA泡沫更加洁白细腻、挂壁持久,达到12~15分的优质水平;NSA泡沫较松散,挂壁时间较短,评分处于9~11分。这是由于ESA采用单醪糖化工艺,高粱米辅料中的蛋白被充分降解并转入麦汁和啤酒中,进而使得ESA中的总氮含量和中小分子质量含氮化合物含量高于NSA。加酶挤压辅料啤酒中风味物质种类多,醇类物质占比高,使ESA酒香更为突出且各种风味协调、整体口感更佳。ESA的香气和口感评分分别为21和34分,显著高于NSA的19和31分($P<0.05$)。ESA在外观、泡沫、香气和口感上的评分均显著高于NSA($P<0.05$),总评分从75分提升至83分,提升了10.67%,表明加酶挤压处理可有效改善高粱米辅料啤酒的感官品质。

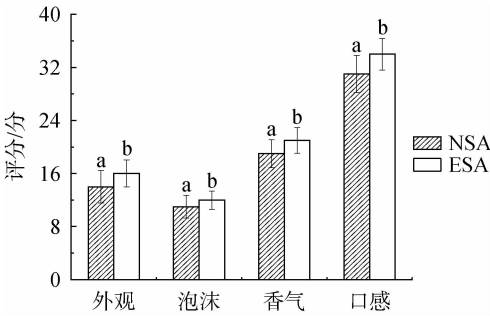


图4 两种啤酒的感官评价结果

Fig. 4 Sensory evaluation results of two types of beer

3 结论

该研究探究了添加耐高温 α -淀粉酶挤压高粱米辅料对麦汁和啤酒品质的影响。结果表明,酶结合挤压机内高温、高压和高剪切作用,破坏了高粱米淀粉结构,使其充分糊化并部分降解,麦汁中可发酵糖含量为13.46 g/100 mL,明显高于对照组麦汁的11.56 g/100 mL。加酶挤压处理可使高粱米中的蛋白质适度变性,提高蛋白质酶解效率。同时加酶挤压高粱米辅料采用单醪糖化工艺,辅料蛋白经过蛋白质休止阶段,蛋白质充分酶解,麦汁中的总氮含量和游离氨基酸含量比对照组分别提高7.08%和6.92%。啤酒酿造实验结果表明,加酶挤压高粱米辅料能有效提升啤酒品质,在色度、酒精度、实际发酵度、泡持性等理化指标上较对照组表现更优。加酶挤压高粱米辅料啤酒中醇类化合物相对含量较未挤压高粱米辅料啤酒提高12.40%,并检测出2-甲基丁醇、丁酸乙酯、醋酸香茅酯和9-癸烯酸乙酯4种新的风味物质,啤酒的果味和玫瑰香气突出。加酶挤压高粱米辅料啤酒的口感协调,泡沫细腻持久,香气丰富,感官评分更高,整体品质优于对照组。

参考文献:

- [1] 黄琳,葛秀琪,张元夫,等. 精酿啤酒专用麦芽的研究进展[J]. 中国酿造, 2020, 39(2): 7-12.
- [2] ZDANIEWICZ M, PATER A, HRABIA O, et al. Triticale malt: An innovative raw material for beer production[J]. *J Cereal Sci*, 2020, 96: 103095.
- [3] OGBONNA A. Current developments in malting and brewing trials with sorghum in Nigeria: A review[J]. *J I Brewing*, 2011, 117(3): 394-400.
- [4] 石晓峰. 挤压添加中温 α -淀粉酶高粱作啤酒辅料的试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- [5] 徐恩波. 加酶挤压大米品质调控机理及其黄酒应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- [6] WU W, JIAO A, XU E, et al. Effects of extrusion technology combined with enzymatic hydrolysis on the structural and physicochemical properties of porous corn starch[J]. *Food Bioproc Technol*, 2020, 13: 442-451.
- [7] ZHAO S, JIAO A, YANG Y, et al. Modification of physicochemical properties and degradation of barley flour upon enzymatic extrusion[J]. *Food Biosci*, 2022, 45: 101243.
- [8] 王玉露. 低温挤压膨化高粱辅料酿造啤酒的试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
- [9] CORTES-CEBALLOS E, PEREZ-CARRILLO E, SERNA-SALDIVAR S O. Addition of sodium stearoyl lactylate to corn and sorghum starch extrudates enhances the performance of pregelatinized beer adjuncts[J]. *Cereal Chem*, 2015, 92(1): 88-92.
- [10] MA C, HE Y, CAO Y, et al. Analysis of flavour compounds in beer with extruded sorghum as an adjunct using headspace solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *J I Brewing*, 2016, 122(2): 251-260.
- [11] QI M M, JIANG L J, SONG J L, et al. Enhancing cassava beer quality: Extrusion-induced modification of cassava starch structure boosts fermentable sugar content in wort[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 278: 134895.
- [12] 姜丽君. 大米生物大分子挤压改性机理及在啤酒酿造中的应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
- [13] VRIESEKOOPE F, RATHBAND A, MACKINLAY J, et al. The evolution of dextrins during the mashing and fermentation of all-malt whisky production[J]. *J I Brewing*, 2010, 116(3): 230-238.
- [14] ZHANG T, ZHANG H, YANG Z, et al. Black rice addition prompted the beer quality by the extrusion as pretreatment[J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(11): 3664-3674.
- [15] YANG H, ZONG X, XU Y, et al. Efficient fermentation of very high-gravity worts by brewer's yeast with wheat gluten hydrolysates and their ultrafiltration fractions supplementations[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 106: 151-157.
- [16] HE Y, CAO Y, CHEN S, et al. Analysis of flavour compounds in beer with extruded corn starch as an adjunct[J]. *J I Brewing*, 2018, 124(1): 9-15.
- [17] DE SCHEPPER C, MICHIELS P, BUVE C, et al. Starch hydrolysis during mashing: A study of the activity and thermal inactivation kinetics of barley malt α -amylase and β -amylase[J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 255: 117494.
- [18] 赵淑娜. 加酶挤压对大麦粉理化性质的影响及其在大麦啤酒酿造中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [19] XIE L, JIN Y, DU J, et al. Water-soluble protein molecular weight distribution and effects on wheat malt quality during malting[J]. *J I Brewing*, 2014, 120(4): 399-403.
- [20] LEI H, FENG L, PENG F, et al. Amino acid supplementations enhance the stress resistance and fermentation performance of lager yeast during high gravity fermentation[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2019, 187: 540-555.
- [21] LEI H, ZHENG L, WANG C, et al. Effects of worts treated with proteases on the assimilation of free amino acids and fermentation performance of lager yeast[J]. *Int J Food Microbiol*, 2013, 161(2): 76-83.
- [22] HE Y, DONG J, YIN H, et al. Wort composition and its impact on the flavour-active higher alcohol and ester formation of beer-a review[J]. *J I Brewing*, 2014, 120(3): 157-63.
- [23] OLANIRAN A O, HIRALAL L, MOKOENA M P, et al. Flavour-active volatile compounds in beer: production, regulation and control[J]. *J I Brewing*, 2017, 123(1): 13-23.
- [24] 刘倩, 贾建华, 白艳龙, 等. 啤酒风味物质及分析技术研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(8): 20-27.
- [25] ZONG X, WU J, CHEN Z, et al. Impact of Qingke (hulless barley) application on antioxidant capacity and flavor compounds of beer[J]. *J Cereal Sci*, 2023, 109: 103624.
- [26] GOMEZ-ALONSO S, HERMOSÍN-GUTIÉRREZ I, GARCÍA-ROMERO E. Simultaneous HPLC analysis of biogenic amines, amino acids, and ammonium ion as aminoenone derivatives in wine and beer samples[J]. *J Agr Food Chem*, 2007, 55(3): 608-613.