

不同菊花添加量下精酿啤酒的化学与感官特性变化

魏玮筠¹, 李明道², 雷红涛¹, 沈兴¹, 王际辉^{2*}, 王波^{2*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 东莞理工学院生命健康与技术学院 广东东莞 523808)

摘要: 为探究在主发酵阶段菊花不同添加量(0、5、10、15 g·L⁻¹)下精酿啤酒化学与感官特性的变化规律, 对其基础理化指标、总多酚和总黄酮含量、抗氧化活性以及感官指标进行测定, 并通过斯皮尔曼相关性分析确定菊花精酿啤酒各指标间的相关性。结果表明, 菊花添加量越高, 精酿啤酒的酒精度、pH值和色差显著提升, 同时总多酚、总黄酮含量及其抗氧化活性也显著提高($P<0.05$)。感官特性方面, 啤酒滋味随菊花添加量变化而呈现差异, 其中菊花添加量为5 g·L⁻¹时感官得分最高(76.3分)。斯皮尔曼相关性分析表明, 总多酚和总黄酮含量是影响精酿啤酒抗氧化活性和滋味的主要因素。综上, 主发酵阶段菊花添加量为5~10 g·L⁻¹时, 菊花精酿啤酒品质与感官特性较优, 并具有较好的抗氧化活性。研究可为菊花在精酿啤酒酿造中的应用价值及其功能性研究提供理论与实践参考, 并为多元化啤酒产品的开发提供新方向。

关键词: 菊花; 精酿啤酒; 多酚; 抗氧化活性; 感官特性

文章编号: 1673-9078(2026)2-222-229

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1612

Chemical and Sensory Characteristics Changes of Craft Beers with Different Chrysanthemum Additions

WEI Weijun¹, LI Mingdao², LEI Hongtao¹, SHEN Xing¹, WANG Jihui^{2*}, WANG Bo^{2*}

(1.College of Food Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2.College of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: To investigate the changing law of chemical and sensory characteristics of craft beers under different additions of chrysanthemum (0, 5, 10 and 15 g·L⁻¹) in the main fermentation stage, the basic physicochemical indices, total polyphenol and flavonoid contents, antioxidant activity and sensory indices of craft beers were measured. In addition, the correlation between the indexes determined by Spearman's correlation analysis. The results showed that with an increase in the amount of chrysanthemum addition, pH, color difference of the craft beer, alcohol content, total polyphenol content, flavonoid content, and antioxidant activity were also significantly increased ($P<0.05$). In terms of sensory characteristics, the taste of the beer varied with the amount of chrysanthemum addition, with the highest sensory score (76.3 points) obtained at 5 g·L⁻¹ of chrysanthemum. Spearman's correlation analysis showed that the total polyphenol and flavonoid contents were the primary factors influencing the antioxidant activity and flavor of the craft beer. In summary, the quality and sensory characteristics of the craft beer were superior with improved antioxidant

引文格式:

魏玮筠,李明道,雷红涛,等.不同菊花添加量下精酿啤酒的化学与感官特性变化[J].现代食品科技,2026,42(2):222-229.

WEI Weijun, LI Mingdao, LEI Hongtao, et al. Chemical and sensory characteristics changes of craft beers with different chrysanthemum additions [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 222-229.

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2025-01-03; 接受日期: 2025-01-08

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020A15110211); 广东省普通高校特色创新项目(2021KTSCX132); 东莞理工学院高层次人才(创新团队)科研启动项目(KCYCXPT2017007); 广东省创新强校创新团队项目(2021KCXTD035)

作者简介: 魏玮筠(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: weijunwei98@163.com

通讯作者: 王际辉(1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 天然活性产物与微生态制剂研发及应用, E-mail: wangjihui@dgut.edu.cn; 共同通

讯作者: 王波(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物化学, E-mail: bwang@dgut.edu.cn

activity by incorporating chrysanthemum at 5~10 g·L⁻¹ during the main fermentation stage. The study may serve as a valuable theoretical and practical reference for the application and functionality of chrysanthemum in craft beer brewing, contributing to the development of diversified beer products.

Key words: chrysanthemum; craft beer; polyphenol; antioxidant activity; sensory characteristics

精酿啤酒主要是以麦芽、水、啤酒花、酵母为原料发酵而成的酒精饮料,富含氨基酸、维生素、矿物质等营养元素,适量饮用具有促进人体消化、调节免疫、预防神经退行性疾病和心血管疾病等作用^[1,2]。近年来,全球的精酿啤酒消费市场呈现出快速增长的趋势,多元化、个性化及高端化等啤酒消费需求成为主流^[3]。相较于同质化严重的工业啤酒,精酿啤酒具有风味鲜明、口感多样、营养丰富等特点,更符合啤酒消费市场的发展趋势和消费者的需求,其中风味与功能的呈现是区别精酿啤酒品质的关键^[4]。目前,通过外源添加果蔬、香料以及草本植物等辅料以增强或改变精酿啤酒特有的风味和功能是研究热点之一。研究发现,在啤酒酿造过程中添加枣浆^[5]、石斛^[6]、姜汁^[7]等药食同源植物,不仅可以显著增加啤酒中酚类物质的含量,而且可以丰富啤酒的风味,改善啤酒的品质,赋予其潜在的功能活性。

杭白菊是中国药用四大名菊之一,其富含酚酸类、黄酮类、挥发油类等生物活性成分,具有抗氧化、抗炎以及抗高血压等功能活性,广泛应用于茶饮和功能性食品中^[8]。根据采摘时间,可分为胎菊和朵菊,其中胎菊比朵菊具有含量更高的咖啡酰奎宁酸和更强的抗氧化活性^[9]。此外,有研究发现,亳菊、杭白菊和怀菊对尿酸单钠晶体有调节作用,并鉴定出木犀草素、金合欢素-7-O-葡萄糖苷和芹菜素-7-O-葡萄糖苷是可能与减轻痛风炎症相关的关键成分^[10]。

菊花啤酒前人已有研究,主要侧重于菊花味啤酒试制^[11]。关于添加菊花对精酿啤酒理化性质、功能性与感官特性的综合评价目前未见报道。本文以杭白菊(胎菊)为辅料,研究了在主发酵阶段不同菊花添加量下(0、5、10、15 g·L⁻¹)精酿啤酒的理化性质、总多酚和总黄酮含量、抗氧化能力以及感官特性的变化,并确定菊花精酿啤酒各指标间的相关性,为菊花精酿啤酒的开发及其功能性研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

杭白菊胎菊(产地:浙江桐乡;采收时间:2023年11月;总黄酮2.52%,可溶性糖11.71%,干重),购自桐乡市海泰菊业有限公司,4℃真空密封保存。皮

尔森大麦芽、淡色小麦芽,德国维耶曼麦芽有限公司;酿酒酵母US-05,费曼迪斯酵母有限公司;西楚啤酒花、佩勒啤酒花,美国雅基玛酒花有限公司。

福林酚、过硫酸钾、奎诺二甲基丙烯酸酯((±)-6-Hydroxy-2,5,7,8-tetraMethylchroMane-2-carboxylic Acid, Trolox),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;没食子酸、芦丁,上海麦克林生化科技有限公司;2,2'-联氮-二(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic Acid) Ammonium Salt, ABTS),上海研谨生物科技有限公司;硝酸铝、亚硝酸钠,上海易恩化学技术有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH),国药集团化学试剂有限公司;其余试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

GL21M型高速冷冻离心机,湖南湘立科学仪器有限公司;Evolution 220型紫外可见光谱仪,美国赛默飞世尔科技公司;HH-2数显恒温水浴锅,上海力辰仪器科技有限公司;LRH-150CL低温培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;安东帕Alex 500酒精和浸出物分析仪,安东帕(上海)商贸有限公司;SD20 kit梅特勒台式pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;SA-402B味觉分析系统,日本Insent公司。

1.3 实验方法

1.3.1 酿造工艺

菊花精酿啤酒制作工艺参考实验室前期的酿造方法进行。大、小麦芽按质量比7:3粉碎混匀,共100 g。料水比为1:4(g:mL),加入45℃糖化用水,分步糖化。在45℃下保持15 min;升温至65℃,保持50 min;升温至72℃,保持15 min,然后升温至78℃,保持5 min,终止糖化。加入适量78℃洗槽水洗槽,纱布过滤后得到麦汁。将麦汁煮沸60 min,分两次添加啤酒花,煮沸30 min时加入0.20 g·L⁻¹苦型啤酒花,煮沸结束前15 min加入0.20 g·L⁻¹香型啤酒花。煮沸结束后,冷却,按0、5、10、15 g·L⁻¹比例加入粉碎约20目的菊花,接种活化后的酵母0.8 g·L⁻¹。在20℃进行主发酵,待糖度降至4.5°P以下时,密闭发酵7 d,于4℃冰箱贮藏。

1.3.2 菊花精酿啤酒基础理化性质的测定

样品经 4 ℃, 10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 后震荡和超声 15 min 排气, 备用。啤酒酒精度、真正浓度、真正发酵度均采用安东帕 Alex 500 酒精和浸出物分析仪测定。pH 值采用台式 pH 计测定。色泽的测定使用分光测色仪测定, 并记录亮度 (L^*)、红绿度 (a^*)、黄蓝度 (b^*), 以 0 g·L⁻¹ 菊花啤酒为对照, 根据下式计算总色差值 (ΔE):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$
 (1)

式中:

- ΔE ——总色差;
- ΔL^* ——亮度差;
- Δa^* ——红绿色差;
- Δb^* ——黄蓝色差。

1.3.3 菊花精酿啤酒总多酚、总黄酮含量的测定

(1) 采用福林酚^[12]法, 略作修改后, 以没食子酸为标准品测定啤酒的总多酚含量。取稀释 10 倍的啤酒样品 0.5 mL 加入 2.5 mL 的 0.1 mol·L⁻¹ 的福林酚试剂混合反应 5 min, 加入 2.5 mL 质量分数为 7.5% 的 Na₂CO₃ 和 5 mL 的去离子水, 混匀, 室温下避光反应 1 h 后于 765 nm 处测定吸光值。将数据结果代入标准曲线, 计算啤酒样品中的总多酚含量, 结果以每升啤酒中没食子酸当量表示 (mg GAE/L), 每组试验重复 3 次。

(2) 参照周亚丽等^[13]方法, 以芦丁为标准品, 测定啤酒样品中总黄酮的含量。吸取稀释至适宜倍数的啤酒样品 1 mL, 加入 4 mL 体积分数为 60% 的乙醇溶液和 0.5 mL 质量分数为 5% 的 NaNO₂, 涡旋混匀, 反应 6 min。加入 0.5 mL 质量分数为 10% 的 Al(NO₃)₃ 混匀反应 6 min。再加入 4 mL 质量分数为 4% 的 NaOH, 混匀, 室温下避光反应 20 min。然后于 510 nm 处测定吸光值。将数据结果代入标准曲线, 计算啤酒样品中的总黄酮含量, 结果以每升啤酒中的芦丁当量表示 (mg RE/L), 每组试验重复 3 次。

1.3.4 菊花精酿啤酒抗氧化能力的测定

(1) 根据报道的方法^[14], 测定啤酒对 DPPH 自由基的清除能力。取 2 mL 的 0.2 mmol·L⁻¹ DPPH 溶液与 2 mL 的稀释 40 倍的啤酒样品充分混匀, 室温避光反应 30 min, 测定 517 nm 处的吸光度, 结果以 Trolox 等效抗氧化能力 (mmol TE/L) 表示。

(2) 参考 Ducruet 等^[15]方法, 测定啤酒对 ABTS 阳离子自由基的清除能力。将浓度为 7 mmol·L⁻¹ 的 ABTS 与 2.45 mmol·L⁻¹ 的 K₂S₂O₄ 等体积混合, 避光 16 h, 得到 ABTS 母液。稀释 ABTS 母液, 使其 734 nm 的吸光度值为 0.7±0.02。将 0.1 mL 稀释适宜倍数的啤

酒样品与 2.9 mL 的 ABTS 稀释液混合, 室温下避光反应 6 min, 测定 734 nm 处的吸光值, 结果以 Trolox 等效抗氧化能力 (mmol TE/L) 表示。

1.3.5 菊花精酿啤酒感官特性的测定

(1) 使用 SA-402B 味觉分析系统对啤酒的酸味、苦味、涩味、鲜味和咸味进行测试。测定前, 提前 24 h 活化味觉传感器和参比电极, 待仪器自检稳定后, 将啤酒样品各 40 mL 分别倒入 2 个样品杯中, 进行样品测定。

(2) 菊花精酿啤酒的感官评定根据国标 GB/T 4927-2008 《啤酒》中的相关标准, 并基于消费者对啤酒感官体验的重视程度, 从外观、泡沫、香气和口感方面对啤酒样品的感官属性进行表征, 各指标分值分别为 15、20、25 及 40 分。通过对目标消费群体的调研, 了解其对啤酒感官的偏好和接受程度, 结合菊花精酿啤酒的特点对评分标准进行适当的调整和优化。菊花精酿啤酒的理想感官特性应为色泽明亮、无沉淀, 泡沫丰富且细腻, 香气和谐并具有典型的菊花香气, 口感纯正协调。由 10 名评价人员 (年龄 20~35 岁, 男女各 5 名) 组成感官评定小组, 经过一定的培训后, 对菊花精酿啤酒进行评价。所有样品的品评温度均在 4 ℃, 感官评分依据如表 1 所示。

表 1 菊花精酿啤酒感官评分标准
Table 1 Sensory scale of chrysanthemum craft beer

项目	评分标准	分值
外观 (15)	色泽明亮、无悬浮物或沉淀物	10~15
	色泽一般、略失光、稍有悬浮物	5~10
	暗淡失光、有明显悬浮物	<5
泡沫 (20)	泡沫丰富、细腻挂杯	15~20
	泡沫	

表 2 菊花添加量对精酿啤酒基础理化性质的影响

Table 2 The effect of chrysanthemum amount on basic physicochemical properties of craft beer								
菊花添加量/(g·L ⁻¹)	酒精度 /% (V/V)	真正浓度 /% (m/m)	真正发酵度 /% (m/m)	pH 值	L* 值	a* 值	b* 值	ΔE 值
0	6.12 ± 0.09 ^c	3.79 ± 0.04 ^d	72.39 ± 0.06 ^a	4.24 ± 0.02 ^c	98.42 ± 0.17 ^b	-0.34 ± 0.06 ^a	4.77 ± 0.09 ^b	—
5	6.25 ± 0.05 ^b	3.89 ± 0.03 ^c	72.33 ± 0.06 ^a	4.27 ± 0.00 ^c	98.97 ± 0.01 ^a	-0.71 ± 0.00 ^b	4.38 ± 0.01 ^c	0.77 ± 0.01 ^b
10	6.50 ± 0.06 ^a	4.36 ± 0.04 ^b	70.74 ± 0.03 ^b	4.38 ± 0.03 ^b	98.89 ± 0.08 ^a	-0.85 ± 0.04 ^c	4.84 ± 0.02 ^b	0.70 ± 0.08 ^b
15	6.53 ± 0.06 ^a	4.48 ± 0.04 ^a	70.25 ± 0.04 ^c	4.48 ± 0.01 ^a	98.85 ± 0.02 ^a	-1.01 ± 0.04 ^d	5.27 ± 0.06 ^a	0.94 ± 0.07 ^a

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P<0.05$ ）。

2 结果与讨论

2.1 添加菊花对精酿啤酒基础理化性质的影响

由表 2 可知，菊花添加量对啤酒的基础理化指标都具有显著影响（ $P<0.05$ ），但不影响啤酒的正常发酵。随着菊花添加量的增加，啤酒的酒精度在 6.12%~6.53%（V/V）范围内，呈先升高后平稳的趋势。菊花中含有的一些有效成分可能促进了酵母对可发酵糖的利用，使精酿啤酒的酒精度增加。有研究也表明蒲公英、茉莉花等植物作为啤酒辅料提高了啤酒的酒精度^[16,17]。各啤酒样品真正发酵度的质量分数处于 70.25%~72.39% 之间，pH 值范围为 4.24~4.48，均处于正常值范围内，并且随着菊花添加量的增加，精酿啤酒的真正浓度增加，pH 值逐渐增大，而真正发酵度降低。根据 GB/T 4928-2008《啤酒分析方法》中真正发酵度的计算公式，其结果与酒精度、麦汁发酵后浸出物的质量分数相关。菊花中含有多糖、氨基酸、萜类、黄酮和酚酸类等物质^[8]，这些物质的浸出会影响酵母的生长和代谢，并且有可能与麦汁中的组分发生相互作用。此外，有研究表明，适宜添加量的石斛可促进酵母的生长和乙醇生成，但可能由于酚类、萜醌类以及生物碱等次生代谢物的存在，在啤酒酿造过程中较高添加量的铁皮石斛会降低酵母的活性^[6]。综上所述，增加菊花添加量提高了精酿啤酒中浸出物的质量分数，酵母菌在生长代谢过程中消耗了有机酸产生了更多的酯类物质，使得最终 pH 值上升^[18]，并且适宜的菊花添加量能促进酵母的生长和对可发酵糖的利用，但在较高添加量下，可能由于酚类物质逐渐溶出降低或抑制了酵母的活性，导致酵母对菊花精酿啤酒中发酵前后浸出物的利用程度较对照啤酒低，真正发酵度降低。相比于成分单一的麦汁，添加菊花后的麦汁成分更为复杂，所以菊花引入的成分对啤酒发酵的影响机理还需进一步探讨。

啤酒色泽是评价啤酒品质质量的重要感官指标之一，并与消费者的偏好程度相关。本研究采用 Lab 颜色系统对啤酒的色泽进行差异分析，其中 L* 值表示亮

度，数值越小颜色越深，a* 值由正到负值表示颜色从红到绿的变化，b* 值由正到负值表示颜色从黄到蓝的变化。实验结果表明，随着菊花添加量的增加，L* 值变化较小，a* 值降低，b* 值升高，精酿啤酒的黄绿色度增加。当菊花添加量为 15 g·L⁻¹ 时，与不加菊花精酿啤酒色泽差异最大，总色差 ΔE 值为 0.94。有研究表明，pH 值的变化以及氧气等因素，会引起菊花茶汤颜色变绿^[19]。基于这一发现，推断在发酵的过程中添加菊花可能影响了啤酒的 pH 值以及酵母对氧气的利用程度，使菊花精酿啤酒黄绿色度增加。同时，菊花本身含有叶绿素、类胡萝卜素和花青素等天然色素^[8]，这些色素在啤酒发酵过程中可能会浸出，从而影响精酿啤酒的色泽。此外，菊花中还富含酚类化合物，多酚氧化聚合反应直接影响到啤酒的色泽变化^[20]。这种色泽变化可能会降低部分消费者对菊花精酿啤酒的接受度。

2.2 添加菊花对精酿啤酒总多酚和总黄酮含量的影响

啤酒中的多酚类物质主要来源于麦芽和啤酒花，其对啤酒的色泽、口感、风味以及非生物稳定性等特性均有重要影响^[21]。图 1a 中显示了菊花添加量对精酿啤酒中总多酚含量的影响，呈现逐渐上升趋势。当菊花添加量为 15 g·L⁻¹ 时，总

综上,在精酿啤酒中加入菊花辅料,可以使菊花含有的酚类物质或其他活性成分有效溶出,提高精酿啤酒中总多酚和总黄酮的含量,达到改善精酿啤酒品质以及提高其潜在功能活性的目的。这不仅满足了消费者对多元化啤酒的需求,而且顺应了未来食品向功能化转变的趋势。

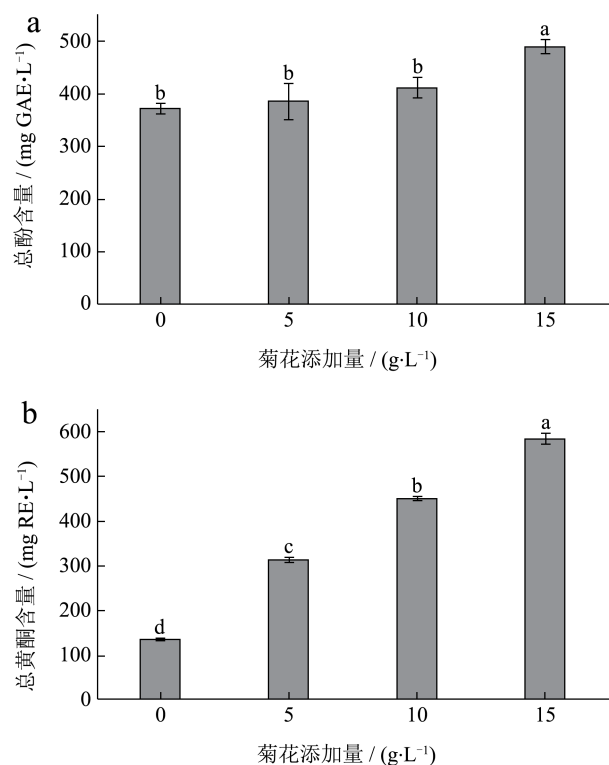


图1 菊花添加量对精酿啤酒总多酚和总黄酮含量的影响

Fig.1 Effect of chrysanthemum amount on total polyphenol and total flavonoid contents of craft beer

注:图中不同字母表示样品间具有显著差异($P < 0.05$)。下同。

2.3 添加菊花对精酿啤酒抗氧化活性的影响

啤酒的抗氧化活性对于维持其贮藏期的氧化稳定性具有重要作用^[25]。由图2可知,随菊花添加量的增加,精酿啤酒的DPPH自由基清除能力和ABTS阳离子自由基清除能力均呈现显著上升的趋势($P < 0.05$)。当菊花添加量为15 g·L⁻¹时,精酿啤酒的DPPH自由基清除能力和ABTS阳离子自由基清除能力分别达到2.04 mmol TE/L和6.51 mmol TE/L,与对照啤酒相比,分别提高了1.15 mmol TE/L和1.49 mmol TE/L。结果表明,添加菊花可显著增强精酿啤酒的抗氧化活性。菊花精酿啤酒同样显著高于Zhao等^[23]测定的34种市售啤酒的DPPH自由基清除能力(0.24~1.35 mmol TE/L)和ABTS阳离子自由基清除能力(0.55~1.95 mmol TE/L)。

Gong等^[9]研究表明,杭白菊中的咖啡酰奎宁酸类化合物与木犀草苷可能是决定其抗氧化活性的关键成分,且咖啡酰基的酰化程度以及类黄酮化合物中羟基的数量和构型对抗氧化活性具有重要影响。基于此,实验结果进一步证明了通过外源添加菊花可引入更多的多酚和黄酮类物质,并提高精酿啤酒的抗氧化活性。此外,在啤酒这样复杂的食品系统中,这些酚类化合物会与美拉德反应产物、氨基酸和酒花树脂等物质以协同或拮抗的方式相互作用,影响其抗氧化活性^[26]。

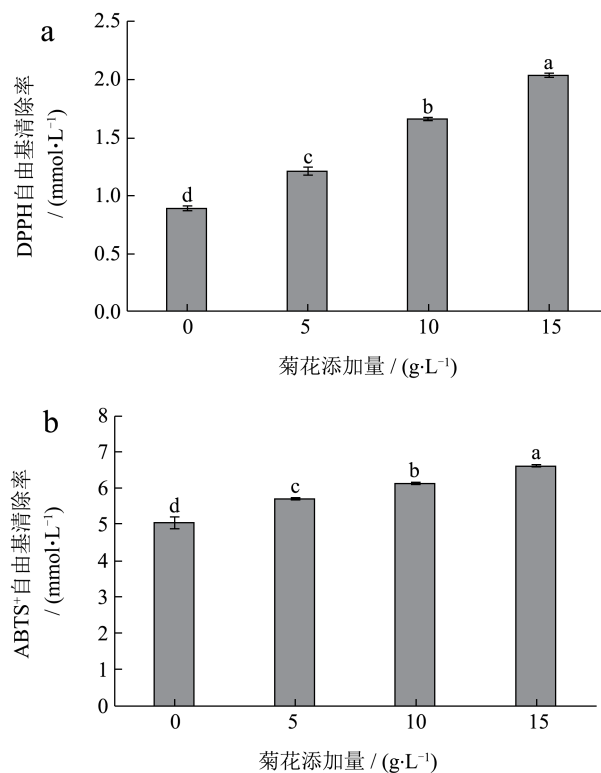


图2 菊花添加量对精酿啤酒的DPPH自由基清除能力和ABTS阳离子自由基清除能力的影响

Fig. 2 Effect of chrysanthemum amount on DPPH radical scavenging capacity and ABTS cation radical scavenging capacity of craft beer

2.4 添加菊花对精酿啤酒感官特性的影响

2.4.1 菊花精酿啤酒样品电子舌分析

电子舌是一种新型的智能味觉仿生系统,通过将电信号转化为味觉值,能有效地反应样品的味觉信息,结合化学计量学方法进一步分析样品间的滋味差异^[27]。如图3所示,电子舌传感器对各组啤酒样品的味觉响应值都存在差异。随着菊花添加量的增加,啤酒的咸味、丰富度、鲜味、涩味以及涩的回味都逐渐增大,而酸味显著降低,苦味以及苦的回味有所降低,但差异较小,其中酸味的变化与pH值变化相一致。

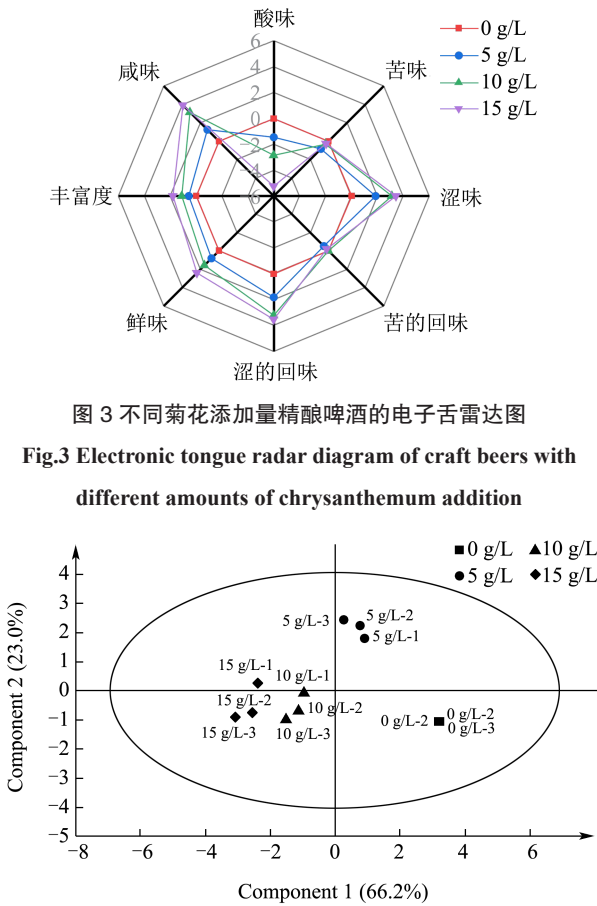


图 3 不同菊花添加量精酿啤酒的电子舌雷达图

Fig.3 Electronic tongue radar diagram of craft beers with different amounts of chrysanthemum addition

图 4 不同菊花添加量精酿啤酒的 PLS-DA 分析图

Fig.4 PLS-DA analysis diagram of craft beers with different amounts of chrysanthemum addition

为了更好地选择区分菊花精酿啤酒的特征滋味，比较菊花精酿啤酒之间的差异，本研究对电子舌数据进行 PLS-DA 模拟分析，得到拟合优度参数 (R^2X)、模拟解释能力 (R^2Y) 和预测能力 (Q^2) 分别为 0.999、0.980 和 0.896，并对模型进行 200 次置换检验，验证模拟的截距 R^2 和 Q^2 分别为 0.316 和 -0.459， $Q^2 < 0$ ，表明该模型不存在过拟合，可用于不同组啤酒的差异分析。如图 4 可知，菊花添加量为 10 g·L⁻¹ 和 15 g·L⁻¹ 的两组样品间距较其他样品组更近，且同处于第三象限，说明这两组样品组间滋味差异较小，而与不添加菊花和添加 5 g·L⁻¹ 菊花精酿啤酒样品的滋味差异较大。通过绘制变量重要性投影 (Variable Importance in Projection, VIP) 值以找到对区分不同菊花精酿啤酒有重要贡献的特征指标，VIP > 1 表明该变量对模型的贡献率较大可用于区分菊花精酿啤酒。从图 5 可知，苦的回味、苦味以及酸味可能是各组啤酒样品的特征性味觉。研究结果表明，添加一定量的菊花可以增加精酿啤酒的咸味、丰富度、鲜味、涩味以及涩的回味，而酸味显著降低，苦味以及苦的回味

有所降低，但差异较小，使得精酿啤酒的口感更醇厚，回味更绵长，但是过量添加可能会带来令人不愉快的涩味。由于电子舌技术是通过检测物质与人工质膜间相互作用引起的电势差得到不同的味觉强度，而人体的味觉感知机理复杂，还需要结合感官品评进行综合评价。

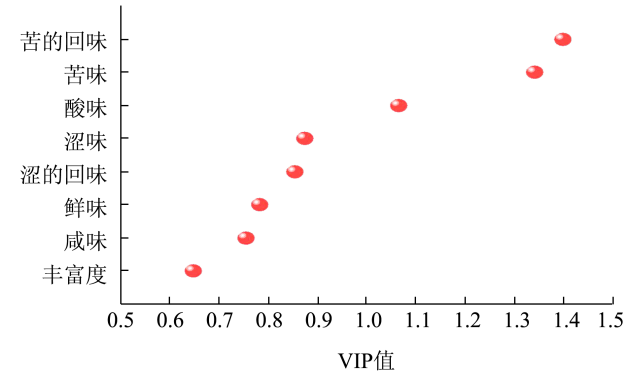


图 5 菊花精酿啤酒特征滋味 VIP 值图

Fig.5 VIP values of characteristic taste in chrysanthemum craft beer

2.4.2 菊花精酿啤酒感官品评

从外观、泡沫、香气和口感四个方面全面评估菊花精酿啤酒的感官特性。结果如图 6 所示，泡沫评价方面，各样品的差异不明显 ($P > 0.05$)；外观评价方面，添加菊花的精酿啤酒黄绿色度增加，评分有所降低；口感评价方面，添加 5 g·L⁻¹ 菊花精酿啤酒组得分最高，其口感醇厚，苦涩味协调，稍有回甘，口感层次丰富；香气评价方面，添加 15 g·L⁻¹ 菊花精酿啤酒得分最高，为 22.9 分，显著高于对照组。从感官总分来看，菊花添加量为 5 g·L⁻¹ 时得分最高，为 76.3 分；菊花添加量为 0 g·L⁻¹ 和 10 g·L⁻¹ 时与添加量为 5 g·L⁻¹ 的精酿啤酒得分差异不大，分别为 71.9 和 70.5 分；而添加 15 g·L⁻¹ 菊花的精酿啤酒得分最低，为 64.7 分。总体来看，添加菊花的精酿啤酒口感丰富，酒体醇厚，具有典型菊花香气，但黄绿色度与苦涩味随菊花用量的增加逐渐增强，当添加量超过一定限度时，其苦涩味突出，酸味减弱，收敛感增强，导致酒体协调性降低。该结果与电子舌的苦味程度测定结果有一定的差异，这可能与菊花在发酵过程中引入了多酚、黄酮及其他浸出物等滋味成分以及一些香气成分的风味互作效应有关，推测菊花精酿啤酒中的涩味物质及其他物质可能增强了对苦味的感知^[28]。综上，菊花添加量为 5~10 g·L⁻¹ 时，精酿啤酒呈现出较好的感官品质，可以一定程度上改善精酿啤酒的口感与香气，使其酒体更加醇厚，口感层次更丰富，回味悠长，并具有典型的菊花香气。

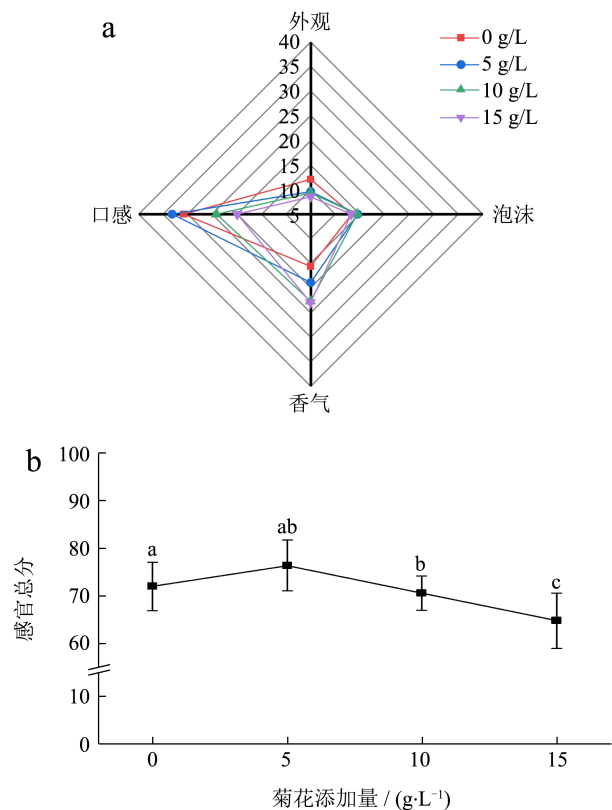


图 6 不同菊花添加量精酿啤酒样品的感官评价剖析图
和感官总分图

Fig.6 Sensory evaluation profiles and total sensory scores
of craft beer samples with different chrysanthemum additions

注：图中不同字母表示样品间具有显著差异 ($P<0.05$)。
下图同。

2.5 菊花啤酒品质特性的相关性分析

为确定菊花精酿啤酒品质指标之间的相关性，对各组啤酒样品的理化指标与滋味指标进行斯皮尔曼分析。在相关性分析中，将不同指标进行两两比较，其中蓝色表示负相关，红色表示正相关，颜色越深表示两两指标间相关性越强。如图 7 所示，总多酚含量、总黄酮含量、DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力之间呈正向强相关性 ($r>0.6$)，Gong 等^[9]研究也确定了酚类化合物与抗氧化活性具有强相关性。苦味、苦的回味与菊花添加量、总多酚和总黄酮含量没有显著相关性，这可能是由于精酿啤酒的苦味主要是来源于啤酒花。酸味与 a^* 、真正发酵度之间呈正相关关系，而与其他指标之间均为负相关关系。涩味、涩的回味、鲜味、丰富度以及咸味与除了真正发酵度和 a^* 外的指标呈正相关，并且与酒精度、总多酚含量、总黄酮含量、DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力等指标呈显著正相关 ($P<0.05$)，这可能与酵母对糖类和含氮物质的利用

情况以及产生的醇类、酯类、氨基酸等代谢副产物含量有关。田星等^[29]研究发现菊花茶汤的涩味强度与多酚类和黄酮类化合物的含量有较强正相关性，这也进一步说明了菊花精酿啤酒的涩味与多酚和黄酮类物质有关。此外，刘佳等^[30]采用电子舌对啤酒口感评价及其滋味信息与化学成分的相关性进行研究，结果表明，有机酸和阴离子是影响酸味信号响应值的主要因素，醇类、糖类及多酚类物质与咸味有关，多糖及多酚类会增强鲜味的信号响应值。由此可得出，菊花的添加不仅使精酿啤酒中总多酚、总黄酮的含量增加，啤酒的抗氧化能力增强，使其具有潜在的功能特性，而且对精酿啤酒理化品质与感官品质具有重要影响，在一定范围内添加菊花可以改善精酿啤酒的口感。

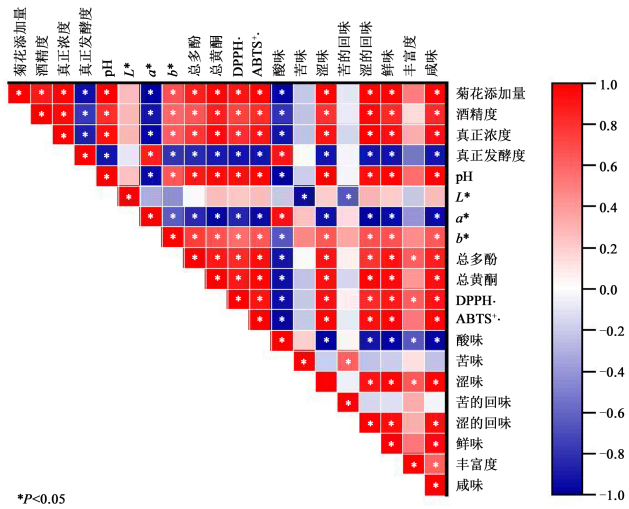


图 7 不同菊花精酿啤酒品质特性指标间的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of the quality characteristics of
different chrysanthemum craft beers

3 结论

在主发酵阶段添加菊花可以改善精酿啤酒的品质与感官特性。菊花添加量增的加会显著提高啤酒中的酒精度、pH 值、黄绿色度、总多酚和总黄酮含量以及抗氧化活性。当菊花添加量为 5 g·L⁻¹ 时，精酿啤酒的感官评分最高，为 76.3 分，且相较于不添加菊花的精酿啤酒而言，提高了精酿啤酒中总多酚、总黄酮含量以及抗氧化活性。虽然当菊花添加量超过 10 g·L⁻¹ 的时，精酿啤酒的总多酚、总黄酮含量以及抗氧化活性更高，但是苦涩味突出，口感不协调，感官评分降低，即产品可接受性降低。所以，在精酿啤酒主发酵阶段，菊花的适宜添加量为 5~10 g·L⁻¹。综上所述，在啤酒产品的可接受范围内，尽可能增加菊花的添加量，可以提高啤酒中多酚、黄酮类生物活性成分的含量，一定程度上改善精酿啤酒的品质和感官特性，并赋予其潜

在的功能特性。研究结果为菊花精酿啤酒的开发及其功能性研究提供理论和实践参考。此外,精酿啤酒的食品体系构成复杂,其整体的品质及感官特性是由多酚、黄酮及其他浸出物等物质共同作用的结果。添加菊花引入的生物活性成分对酵母生长代谢的影响及其对精酿啤酒潜在功能特性的影响,亟需深入研究。同时,结合实际生产需求,对菊花精酿啤酒的长期贮藏稳定性及消费者的接受程度进行进一步评估与研究也尤为重要。

参考文献

- [1] TIRADO-KULIEVA V A, HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ E, MINCHÁN-VELAYARCE H H, et al. A comprehensive review of the benefits of drinking craft beer: Role of phenolic content in health and possible potential of the alcoholic fraction [J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 6: 100477.
- [2] MARCOS A, SERRA-MAJEM L, PÉREZ-JIMÉNEZ F, et al. Moderate consumption of beer and its effects on cardiovascular and metabolic health: an updated review of recent scientific evidence [J]. *Nutrients*, 2021, 13(3): 879.
- [3] BAIANO A. Craft beer: an overview [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(2): 1829-1856.
- [4] 魏华阳,武亚帅,侯雅馨,等.精酿啤酒风味及功能性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(16): 193-199.
- [5] YANG N N, WU C Y, YANG H R, et al. Bioactive compounds, antioxidant activities and flavor volatiles of lager beer produced by supplementing six jujube cultivars as adjuncts [J]. *Food Bioscience*, 2022, 50: 102008.
- [6] CHEN X L, LI L Q, YANG H L, et al. Effects of the addition of *Dendrobium officinale* on beer yeast fermentation [J]. *Fermentation*, 2022, 8(11): 595.
- [7] NUTAKOR C, ESSIEDU J A, ADADI P, et al. Ginger beer: an overview of health benefits and recent developments [J]. *Fermentation*, 2020, 6(4): 102.
- [8] SHARMA N, RADHA, KUMAR M, et al. Phytochemicals, therapeutic benefits and applications of chrysanthemum flower: a review [J]. *Heliyon*, 2023, 9(10): e20232.
- [9] GONG J Y, CHU B Q, GONG L X, et al. Comparison of phenolic compounds and the antioxidant activities of fifteen *Chrysanthemum morifolium* ramat cv. 'Hangbaiju' in China [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(8): 325.
- [10] HUANG Y T, TAO M F, LI R, et al. Identification of key phenolic compounds for alleviating gouty inflammation in edible chrysanthemums based on spectrum-effect relationship analyses [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20: 100897.
- [11] 宋睿,王松廷.菊花提取液用于啤酒发酵的研究[J]. *化学研究*, 2018, 29(4): 411-414.
- [12] BERTUZZI T, MULAZZI A, RASTELLI S, et al. Targeted healthy compounds in small and large-scale brewed beers [J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125935.
- [13] 周亚丽,游新勇,崔利华,等.藜麦啤酒工艺优化及其理化品质与抗氧化活性分析[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(24): 159-165.
- [14] CHEN D Q, ZOU C, HUANG Y B, et al. Adding functional properties to beer with jasmine tea extract [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1109109.
- [15] DUCRUET J, RÉBÉNAQUE P, DISERENS S, et al. Amber ale beer enriched with goji berries-The effect on bioactive compound content and sensorial properties [J]. *Food Chemistry*, 2017, 226: 109-118.
- [16] 赵芳,杨永清,侯媛媛,等.蒲公英精酿啤酒工艺研究及其品质分析[J]. *食品科技*, 2024, 49(10): 108-117.
- [17] 王艺,于华,夏婷,等.茉莉花茶啤酒的酿造工艺优化[J]. *食品与发酵科技*, 2023, 59(5): 38-43, 51.
- [18] 范鑫洋,张香美,康晶,等.不同比例克鲁维酵母对低盐发酵香肠品质特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(2): 227-233.
- [19] 段莹,郑慕蓉,周丽,等.杭白菊汤色变化因素初步探讨分析[J]. *饮料工业*, 2013, 16(12): 33-35.
- [20] 郝秋娟,尹长远.啤酒色泽研究进展[J]. *中国酿造*, 2019, 38(11): 6-10.
- [21] 刘皓,陈烨,曾英杰,等.不同比例黑青稞麦芽汁中酵母的发酵性能及啤酒品质[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(3): 74-82.
- [22] YANG L X, LU Z D, LU J, et al. Evaluation of the antioxidant characteristics of craft beer with green tea [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(2): 625-637.
- [23] ZHAO H F, CHEN W F, LU J, et al. Phenolic profiles and antioxidant activities of commercial beers [J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1150-1158.
- [24] YU J Q, WANG J, XIA T, et al. Polyphenols and melanoidins characterization in different fractions of Chinese commercial beers [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(6): 6077-6090.
- [25] 常斌,蔡琳飞,赵海锋.酿造过程对麦汁蛋白及其氧化特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(12): 145-150, 40.
- [26] WANNENMACHER J, GASTL M, BECKER T. Phenolic substances in beer: structural diversity, reactive potential and relevance for brewing process and beer quality [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(4): 953-988.
- [27] 黄嘉丽,黄宝华,卢宇靖,等.电子舌检测技术及其在食品领域的应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2019, 44(5): 189-193, 196.
- [28] HUANG R, XU C M. An overview of the perception and mitigation of astringency associated with phenolic compounds [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(1): 1036-1074.
- [29] 田星,叶慧洁,刘石峰,等.不同品种菊花涩味成分及其与唾液的相互作用[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 42-46, 53.