

小麦啤酒浑浊度影响因素、分析检测技术及控制措施研究进展

吴昱权¹, 殷艳婷¹, 杜 鹃², 王 松², 王贵新², 范洪臣^{1,*}

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028;

2. 百威哈尔滨啤酒有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

摘 要: 小麦啤酒浑浊是影响啤酒外观、感官品质及稳定性的重要因素, 也是小麦啤酒研究与生产关注的核心质量指标之一。小麦啤酒蛋白质与多酚可通过氢键、疏水相互作用等形成不溶性复合物, 是小麦啤酒浑浊的主要来源; 酵母在发酵及贮藏过程中进行的不同代谢也可能进一步影响啤酒浑浊的稳定性。本文围绕小麦啤酒浑浊问题, 综述小麦啤酒浑浊度的影响因素、检测分析及控制措施, 并对未来的研究方向进行展望, 旨在为探究小麦啤酒浑浊形成的分子机制和形成规律提供参考, 为小麦啤酒品质提升和工艺优化提供科学依据。

关键词: 小麦啤酒; 浑浊度; 影响因素; 分析检测技术; 控制措施

Research Progress on Influence Factors, Analysis Detection Technology and Control Measure for Wheat Beer Haze

WU Yuquan¹, YIN Yanting¹, DU Juan², WANG Song², WANG Guixin², FAN Hongchen^{1,*}

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. Budweiser Harbin Brewery Co. Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: Wheat beer haze is a key factor affecting beer appearance, sensory quality, and stability, and it is also regarded as one of the core quality attributes in wheat beer research and production. In wheat beer, proteins and polyphenols can form insoluble complexes through hydrogen bonding, hydrophobic interactions, and other intermolecular forces, which are considered the main sources of haze formation. In addition, different metabolic activities of yeast during the fermentation and storage may further influence the stability of beer haze. This article focuses on wheat beer haze and systematically reviews the influencing factors of haze, analytical and detection techniques, as well as control measures. Future research directions are also discussed. The aim is to provide a reference for elucidating the molecular mechanisms and formation patterns of wheat beer haze, and to offer a scientific basis for quality improvement and process optimization.

Keywords: wheat beer; haze; influence factor; analysis detection technology; control measure

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.002

中图分类号: TS262.5

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 05-0007-09

引文格式:

吴昱权, 殷艳婷, 杜鹃, 等. 小麦啤酒浑浊度影响因素、分析检测技术及控制措施研究进展[J]. 中国酿造, 2026, 45(5): 7-15. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.002. <http://www.chinabrewing.net.cn>

WU Yuquan, YIN Yanting, DU Juan, et al. Research progress on influence factors, analysis detection technology and control measure for wheat beer haze[J]. China Brewing, 2026, 45(5): 7-15. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.002. <http://www.chinabrewing.net.cn>

小麦啤酒是小麦芽(占总原料40%以上)、大麦芽及酒花, 经酵母发酵酿制成的具有小麦芽酿制特有香气

的啤酒。目前世界各国对小麦啤酒的定义和标准各不相同, 从严格意义上讲, 添加少量小麦芽, 即小麦芽只是

收稿日期: 2025-09-26

基金项目: 黑龙江省教育厅重点研发项目(YQJH2023241)

第一作者简介: 吴昱权(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为啤酒发酵。E-mail: wuyuquan823@qq.com

*通信作者简介: 范洪臣(1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品发酵。E-mail: fanhongchen@hrbcu.edu.cn

作为一种辅料使用而酿制的啤酒不能称为小麦啤酒。与传统的啤酒类型相比,小麦啤酒以其丰富的口感、细腻的泡沫和微妙的水果香气赢得了许多消费者的喜爱^[1]。由于多不经过滤工序去除酵母,小麦啤酒成品较为浑浊并呈现一种白色乳浊状态,故也被称为白啤酒^[2]。浑浊的控制对啤酒质量起到至关重要的作用,相对大麦啤酒,小麦啤酒中的浑浊机理研究少。因此,对小麦啤酒浑浊度影响因素的研究具有重要意义。

啤酒浑浊本质上是胶体体系稳定性失衡的外在表现,其形成与蛋白质、多酚、多糖等多种组分的相互作用密切相关^[3]。在小麦啤酒中,由于小麦原料蛋白质含量高、非淀粉多糖(non-starch polysaccharides, NSP)组成复杂,且酵母残留程度相对较高,其浑浊形成机理较传统大麦啤酒更为复杂^[4]。已有研究表明,富含脯氨酸的浑浊活性蛋白与浑浊活性多酚,通过氢键、疏水作用及静电作用形成的大分子复合物,是导致非生物性浑浊的核心物质基础^[5];同时,酵母的生理状态、代谢特性及自溶行为亦可通过释放胞内物质或调节胶体平衡,进一步影响浑浊的形成与稳定性^[6-7]。

从生产实践角度看,原料组成、糖化与煮沸工艺、发酵条件、酵母管理方式以及后处理工艺等因素,均会通过改变蛋白质、多酚和多糖的含量及相互作用方式,对小麦啤酒浑浊度产生显著影响^[8-10]。在当前精酿化与多样化发展趋势下,小麦啤酒原料配方和工艺路径更加多元,浑浊调控难度进一步增加。如何在保持小麦啤酒典型风味与外观特征的前提下,实现浑浊状态的可控与稳定,已成为啤酒工业与科研领域共同关注的重要问题。

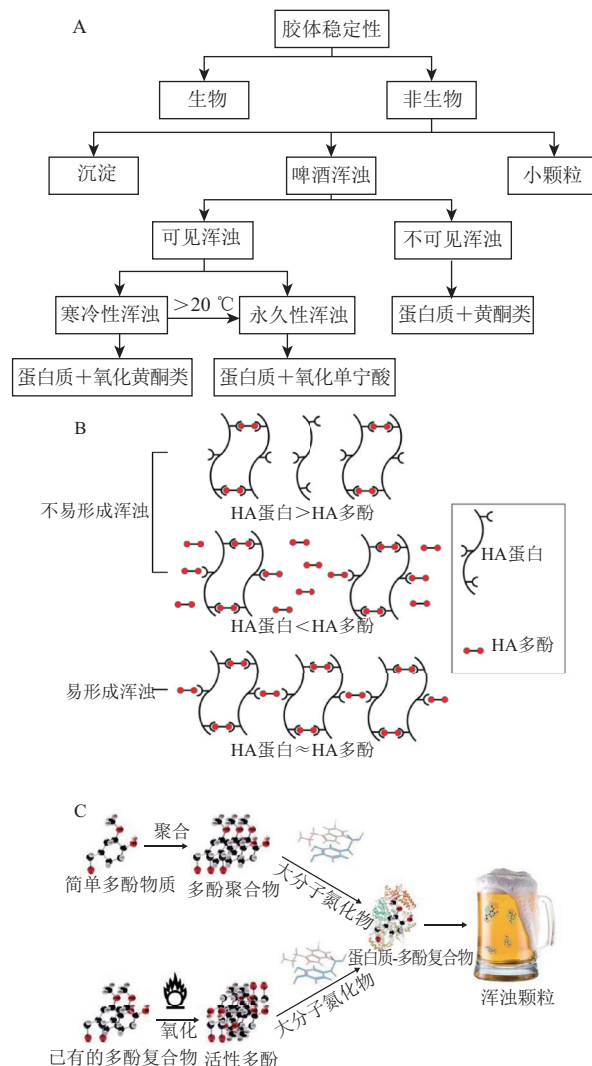
随着啤酒酿造科学的发展,浑浊研究已由传统的经验判断逐步转向基于光学、物理化学及分子生物学手段的定量解析^[11]。多角度浊度测定、动态光散射(dynamic light scattering, DLS)、颗粒计数、色谱-质谱联用及多组学技术的引入,为系统阐明小麦啤酒浑浊的形成机制与动态演变过程提供了新的研究工具,但相关研究成果仍较为分散,尚缺乏针对小麦啤酒浑浊的系统性总结。

本文围绕小麦啤酒浑浊问题,综述小麦啤酒浑浊的影响因素、检测技术及控制措施,并对未来的研究方向进行展望,旨在加深对小麦啤酒浑浊形成规律的认识,为其品质提升及工艺优化提供理论依据和技术参考。

1 小麦啤酒浑浊的概述

浑浊是指由不溶性物质引起溶液透明度降低、呈现云雾状或悬浮颗粒的现象^[12]。啤酒作为一种胶体溶液,其浑浊与胶体稳定性密切相关,是衡量啤酒品质的一项重要且复杂的指标^[13]。研究表明,啤酒浑浊可分为生物性和非生物性两类(图1A),生物性浑浊多由微生物污染引起,非生物性浑浊主要由大分子物质结合形成^[14-15]。

欧洲啤酒酿造协会标准进一步表明,非生物性浑浊分为在低温出现,加热可逆的寒冷性浑浊和持续存在的永久性浑浊^[3,16]。在大量有关啤酒浑浊研究中,研究者们都围绕着生物性浑浊和非生物性浑浊中的可被肉眼看见的浑浊(即可见浑浊)进行研究。可见浑浊是影响啤酒保质期的关键因素之一,其形成涉及多种机制,其中蛋白质与多酚的相互作用被认为是导致非生物性浑浊的核心机制。在可见浑浊中,有一类浑浊是本身可能不直接导致液体浑浊,但会在一些特定环境条件下与其他成分结合或发生反应,最终使液体从澄清状态变为浑浊状态,即为活性浑浊(haze-active, HA)。在HA中,HA蛋白与HA多酚在适当比例下通过疏水作用与氢键形成复合物,并进一步交联为网状结构,导致浊度上升最为常见。酵母的健康状态、代谢特性及菌株差异也显著影响浑浊的形成,胞内物质的释放、脯氨酸利用能力及代谢产物的间接作用等都会对其产生影响。理解啤酒浑浊的形成机理与调控因素,对提高啤酒稳定性和品质具有重要意义。



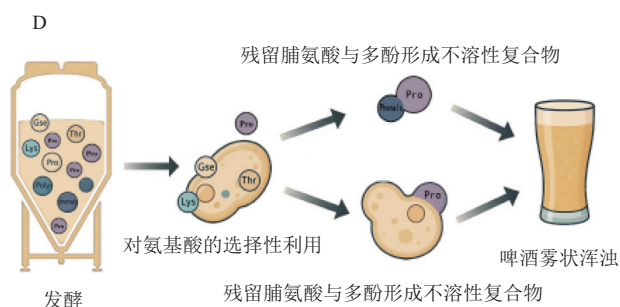


图1 小麦啤酒浑浊的类型(A)、形成机理(B)、合成路径(C)及脯氨酸的影响(D)

Fig. 1 Types of haze (A), formation mechanism (B), synthetic pathway (C), and effects of proline (D) in wheat beer

1.1 浑浊产生的机理

浑浊物质主要是HA蛋白与HA多酚在比例适当的条件下形成的蛋白质-多酚复合物^[17](图1B)。HA蛋白是一类易与多酚结合并导致啤酒、果汁和葡萄酒等饮料产生浑浊沉淀的蛋白质,其结构特征通常包含较高比例的脯氨酸残基;而HA多酚则指与蛋白结合形成浑浊复合物的多酚,其结构特征为邻二酚羟基或没食子酰基。关于浑浊形成机制,目前存在2种假说:一是多酚自身聚合形成复合体,二是多酚先经氧化转化为活性形式,再与含氮大分子结合生成蛋白质-多酚复合物(图1C)。Siebert等^[18-19]研究发现,HA蛋白与HA多酚的结合机理是在蛋白质和羟基中通过疏水作用和氢键相结合。在疏水作用中,脯氨酸中吡咯烷环的环状结构破坏蛋白质的 α -螺旋或 β -折叠,使蛋白质构象更松散,暴露疏水区域,提供疏水环境,与多酚中的芳香环通过疏水作用结合。而脯氨酸中的亚氨基可作为氢键受体,与多酚的羟基形成氢键,如儿茶素及原花青素中B环的邻二酚羟基和A环的间位羟基,使HA蛋白与HA多酚通过氢键结合。在疏水作用和氢键结合的过程中形成的微小复合物,该阶段是初步的结合,为可逆阶段,下一阶段中,一个多酚分子可同时结合多个蛋白质分子,形成三维网络,随着结合形成的复合物增大,光散射增强,出现可见浑浊,最终导致啤酒浑浊度升高,影响啤酒的销售与消费者的饮用体验。Jongberg等^[20]研究发现,浑浊的形成强烈依赖于HA蛋白与HA多酚的比例。当其中一方过量时,仅生成低聚物,不足以引起显著浑浊;只有当二者比例适当时,才能形成具有网状结构的大尺寸胶体复合物,导致最大光散射与可见浑浊。Benucci等^[21]研究表明,当HA多酚质量浓度降低的情况下,浑浊不会产生,研究通过应用漆酶和单宁酶作为酚类降解酶,发现在糊化后使用单宁酶进行处理可以完全去除HA多酚,有效防止冷浑浊产生。

啤酒中的HA蛋白主要来源于麦芽和酵母,而HA多酚则来自麦芽和啤酒花,研究表明,最常见的浑浊成分是富含脯氨酸的蛋白质与大麦芽芽及酒花中多酚形成的

加合物,富含HA蛋白的麦芽主要为富含脯氨酸的大麦醇溶蛋白和小麦麦胶蛋白,HA多酚主要为儿茶素和表儿茶素构成的二聚体或三聚体(原花青素)及单宁酸^[6]。麦汁中谷氨酸、缬氨酸、亮氨酸等氨基酸是酵母代谢生成啤酒滋味和风味化合物的主要前提物,但酵母菌对氨基酸有选择性利用,必需氨基酸中的脯氨酸难以被啤酒酿造的酵母菌利用,残留的脯氨酸易与酵母菌和多酚结合,形成不溶性复合物,导致啤酒浑浊。若将脯氨酸利用程度提高,则可以大幅度降低啤酒的浑浊现象(图1D)^[22]。

综上,现有研究普遍认为,小麦啤酒浑浊的形成主要源于HA蛋白与HA多酚之间的相互作用,其具体表现形式受原料和酿造工艺的共同影响^[3,23]。

1.2 小麦啤酒浑浊的影响因素

1.2.1 原料对小麦啤酒浑浊的影响

原料是小麦啤酒浑浊形成的基础物质来源,麦芽和啤酒花带来大量HA蛋白和HA多酚,它们在生产过程中直接决定啤酒浑浊的潜在风险。小麦啤酒浑浊的原因还与小麦本身有关。相比于传统的大麦啤酒,小麦啤酒使用了较高比例的小麦麦芽。小麦中含有大量的蛋白质、淀粉、NSP(阿拉伯木聚糖(araboxylan, AX)和 β -葡聚糖构成,还有少量阿拉伯半乳糖、甘露糖聚合物(mannitol polymer, MP)及其他复杂多糖),这些物质在小麦啤酒制作过程中会导致浑浊。研究发现,小麦啤酒中NSP与黏度和浑浊呈显著正相关,并且NSP中高分子质量的AX和其他复杂多糖会增加小麦啤酒中的浑浊,并影响生产过程中的过滤速率^[24-26]。经过Q-琼脂糖凝胶FF离子交换柱层析分级纯化得多糖组分NSP-1和NSP-2,其中NSP-2能显著提高啤酒浑浊和泡沫稳定性,而AX、阿拉伯半乳糖和MP的多组分结构更易形成浑浊胶体。Wang Yin等^[3]研究指出,在麦汁制作过程中,淀粉糖化不完全,使长链糊精和淀粉大量残留于麦汁中,会直接导致浑浊形成。

原料中的蛋白质在制麦和麦汁制造过程中降解,最终影响小麦啤酒的浑浊稳定性。小麦在制麦过程时,高分子质量贮藏蛋白(麦谷蛋白、醇溶蛋白等)被蛋白酶部分降解,生成低分子质量的肽和氨基酸,同时释放出更多专一和非专一酶。Liu Junhan等^[27]研究表明,随着蛋白降解度Kolbach指数的升高,高数均分子质量谷蛋白和醇溶蛋白大量水解,而部分球蛋白和白蛋白增加,这类可溶蛋白更易进入麦汁并参与后续浑浊的形成。在麦汁制造过程时,若蛋白休止的温度和时间过高,总蛋白含量下降,但典型的HA蛋白(富含脯氨酸的谷蛋白和醇溶蛋白等)比例可能升高,导致啤酒中出现浑浊现象^[3]。

1.2.2 酵母对小麦啤酒浑浊的影响

健康的酵母细胞能有效隔离细胞内物质,而当酵母细胞因不良环境胁迫导致衰老或死亡时,细胞膜的完

整性会受到破坏,从而释放出蛋白质、核酸和脂质等胞内组分,该类组分中含有的疏水性氨基酸残基可与多酚快速结合,形成粒径为 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的浑浊颗粒,直接诱发啤酒浑浊。小麦啤酒浑浊的原因之一是酵母残留物。酵母在啤酒发酵的过程中,将麦芽中的淀粉转化为糖,并产生二氧化碳和乙醇。而酵母在发酵完成后,会在酒液中残留,形成一种白色的悬浮物质,这就是啤酒中常见的酵母沉淀。这些酵母残留物会使小麦啤酒呈现出一种浑浊的外观。甘露糖蛋白作为酵母细胞壁的主要成分之一,对啤酒浑浊具有双向调控作用,Nguela等^[28]研究发现,甘露糖蛋白的磷酸化和支链结构对多酚的吸附具有关键作用,且甘露糖蛋白表面富含羟基和疏水区域,较易与多酚作用结合,形成游离于啤酒中的大分子复合物,增加浑浊度。Olšovská等^[29]通过工业案例验证,酵母细胞状态劣化或酵母分离技术调控失衡时,酵母细胞破裂释放的胞内物质是导致啤酒浑浊的重要因素。因此,酵母细胞完整性与酵母的自溶行为通过释放胞内物质,是影响小麦啤酒浑浊形成的重要生物学机制之一^[7,30]。

1.2.3 生产工艺对啤酒浑浊的影响

生产工艺也是调节啤酒浑浊的关键因素之一,通过优化工艺参数可显著降低浑浊发生的概率。糖化工艺直接影响蛋白质的降解效率,糖化温度过高或蛋白酶活性不足,麦芽中的高分子蛋白质无法被降解为小分子肽或氨基酸,残留的高分子蛋白质则易与其他物质形成浑浊;糖化pH值若调控不当,也会抑制蛋白酶的活性,进一步降低蛋白质降解的效率^[31]。发酵工艺同样关键,当发酵温度过低,会抑制酵母对脯氨酸的利用,导致富含脯氨酸的蛋白质残留。在传统的啤酒酿造过程中,酒液会经过一系列的过滤步骤,以去除悬浮物质。而小麦啤酒则采用了较为温和的过滤方式,不会完全去除酒液中的悬浮物质,从而保留了小麦啤酒独特的浑浊口感。过滤澄清阶段中离心转速、过滤介质孔径或硅藻土添加量不足,均会影响啤酒中的浑浊颗粒无法被有效去除,增加成品啤酒的浊度。

综上,小麦啤酒浑浊状态并非由单一因素所决定,而是原料组成、酵母状态及发酵条件共同作用的结果,其中蛋白质和多酚含量通常被认为是决定浑浊水平和稳定性的关键因素^[3,5,32]。

2 小麦啤酒浑浊的检测与分析方法

啤酒的浑浊不仅是评估啤酒视觉感官质量的核心指标,更是关联产品非生物稳定性和风味特性的关键表征,啤酒浑浊的检测是根据光散射原理定量表征啤酒中悬浮颗粒的含量、粒径分布及分散状态。随着啤酒酿造科学与检测技术的发展,蛋白质-多酚相互作用、酵母代谢物的影响、颗粒物的粒径分布等因素,已被明确为调

控啤酒浑浊形成的关键^[33]。依托现代检测技术对蛋白质-多酚相互作用、酵母代谢通路以及其他环境胁迫因素的多维度深入分析,能够为系统阐明啤酒浑浊的分子机制与动态形成过程提供关键技术支撑。

2.1 浑浊度检测技术

2.1.1 传统方法

比色法基于视觉比色原理,通过肉眼观察啤酒样品的浑浊状态,或与预设的标准浊度色板进行梯度比对,实现对浑浊度的半定量评估,在20世纪50年代被应用于啤酒浊度的检测^[34-35]。该方法优点在于操作简便、无需复杂仪器辅助,可快速完成样品初筛,适用于资源有限场景下的浑浊度初步判断。但缺点在于受检测原理制约,结果主观性误差突出,易受环境光照强度、标准色板长期使用后的褪色程度及操作者视觉敏感度、色觉分辨能力等主观因素干扰,且仅能实现浑浊度的定性或半定量描述,无法提供精确数值化结果,测量精度远低于仪器分析方法。因此,仅适用于浑浊度的粗略评估,难以满足科研或工业高精度检测需求^[36]。

分光光度计法以朗伯-比尔定律与米氏散射理论为核心,通过测量啤酒样品对入射光的透过率或散射光强度实现对浑浊度的定量分析。这种方法较比色法具有更高的定量能力,目前已广泛应用于啤酒工业生产线的在线或离线质量监控环节,可实现批量样品的高效检测。该检测方法已纳入GB/T 4928—2008《啤酒分析方法》中,使用福尔马肼标准浊度溶液对浊度计进行校正,即可直接测定啤酒样品的浊度。Rice等^[37]研究表明,通过浊度仪采用 13° 散射角和 90° 散射角测定啤酒浊度,可间接反映浑浊颗粒粒径分布对整体浑浊度的贡献度,结合光子相关光谱法发现,即使直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒占比较低,仍会导致浊度仪读数显著偏高,证实了微小颗粒对浊度的强贡献效应。然而,单一使用该方法对颗粒性质的区分能力较弱,难以区分不同粒径的悬浮颗粒或深入分析浑浊成分^[38]。王宏镭等^[39]利用啤酒浊度仪测量 90° 、 25° 2个角度下的浑浊度,结果表明在 90° 散射角所检测的浊度信号主要来源于直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的小分子颗粒;而 25° 散射角信号则主要对应直径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的大分子颗粒,该发现为基于散射角度实现浑浊颗粒的初步粒径区分提供了关键实验支撑。

2.1.2 现代技术

基于布朗运动的DLS技术,通过分析悬浮颗粒因热运动产生的散射光强度信号波动,可实现对啤酒中纳米和亚微米悬浮颗粒的粒径分布,并动态追踪其变化过程。Ullmann等^[40]探讨了DLS技术在测量纳米和亚微米悬浮液颗粒粒径分布中的应用,并系统研究微滤工艺对检测精度的调控效益,结果表明微滤处理能够去除较大颗粒,大幅提高DLS技术检测的精确性,这一结果为

DLS技术在啤酒复杂基质中的精准应用提供了关键工艺参考。DLS技术灵敏度高,可分析直径在纳米至微米范围内的颗粒,能够捕捉到传统方法所不能观察到的细小颗粒变化,使其在解析啤酒浑浊成分的形成路径、悬浮稳定性演化规律等研究中具有不可替代的作用^[41]。

颗粒计数仪以显微成像技术结合数字处理技术为核心,可高精度统计啤酒中颗粒数量、粒径大小和形态特征^[42]。Brunnhofner等^[43]介绍了一种基于全息技术的颗粒计数仪,该仪器能够同时检测多个微米级颗粒,并基于自定义的霍夫变换算法实现了精确的颗粒计数。该技术在多成分复杂体系的啤酒中展现出显著优势,目前啤酒发展更偏向于精酿啤酒,不同于传统啤酒的简单成分,精酿啤酒呈现更为复杂的多元体系,颗粒计数仪可通过解析颗粒物理特性与浑浊度的关联性,为精酿小麦啤酒浑浊度调控及品质标准化提供直接数据支撑。

光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)通过非接触式三维成像,可高分辨率呈现啤酒样品中悬浮颗粒的空间分布特征及其运动行为^[44]。与传统二维检测技术相比,OCT技术的核心价值在于提供“可视化微观视角”,其生成的三维图像可直观展示颗粒的聚集状态、沉降速率及与基质的相互作用过程,为深入探究颗粒物理特性、悬浮稳定性及浑浊形成的微观机制提供直接研究手段。该技术显著降低了浑浊机制分析的间接性与不确定性,为啤酒浑浊调控策略的制定提供更精准的理论依据。

激光后向散射通过特定波长激光束照射样品,快速分析颗粒的粒径分布,适用于高浓度或多分散性悬浮液的浑浊分析,快速、准确的特点使其在工业生产中具有广泛的应用潜力^[45]。通过结合静态光散射与DLS技术,可以同时获得颗粒的尺寸信息和动态行为,构建完整的颗粒特性图谱。二者数据互补可从分子层面解释颗粒聚集机制,为理解浑浊的形成机制提供重要线索^[46]。

2.2 浑浊产生机理分析技术

2.2.1 蛋白质与多酚相互作用

蛋白质与多酚的相互作用是啤酒浑浊形成的核心机制,其检测可通过结合多维度技术手段以揭示分子层面的作用规律。

高效液相色谱-质谱通过色谱分离与质谱鉴定的协同作用,可实现蛋白质-多酚复合物的分子质量测定和结构解析。Callemien等^[47]利用高效液相色谱-电喷雾电离-串联质谱技术分析了啤酒贮藏过程中的类黄酮化合物与多酚的降解与聚合过程,发现多酚氧化产物与蛋白质巯基和氨基的共价结合是冷浑浊形成的关键步骤。该技术具有的高灵敏度和结构表征能力,使其成为解析复合物组成及动态变化的核心工具^[48]。

傅里叶变换红外光谱通过分析蛋白质与多酚的特征吸收峰变化揭示二者的相互作用模式^[49]。圆二色光谱技术通过检测蛋白质二级结构的椭圆率变化,可定量评估多酚与蛋白质结合后引发的蛋白构象改变^[50]。DLS用于测量复合物粒径及其在不同环境条件下的行为变化,为研究复合物形成动力学提供数据支持^[41]。

2.2.2 酵母引起浑浊分析技术

酵母引起啤酒的浑浊情况一般可以区分为正常浑浊(自溶)和异常浑浊(污染),在酵母密度过大时,会导致酵母出现自溶等不良情况,一般可以通过总酵母数和死亡率对小麦啤酒进行检测,从而确认啤酒的浑浊与酵母的相关情况。Stilman等^[51]提出了一种生物仿生电化学传感器检测方法,该方法能在15 min内之间检测出啤酒中的酵母数和疏水蛋白。Condina等^[52]提出了将惯性微流控分离与基质辅助激光解吸-电离飞行时间质谱法进行结合的检测方法,能将啤酒中酵母与细菌进行快速分离和鉴定,对于区分酵母引起的浑浊情况具有较大帮助。

目前,不同检测方法在小麦啤酒浑浊研究中各具优势。传统理化指标检测适用于生产监控,而多组学、多方向检测技术更有助于解析浑浊形成的分子机制。不同方法的结合应用,有助于全面认识小麦啤酒浑浊特性^[53-54]。

3 控制小麦啤酒浑浊的措施

小麦啤酒的浑浊是影响其外观品质、感官体验及非生物稳定性的关键因素。为有效控制浑浊的形成,当前研究与工业实践中已建立多维度调控体系,涵盖酿造过程中选择原料及糖化工艺的优化、酵母代谢调控及管理、与发酵工艺优化、去除浑浊物质及使用加工助剂等技术措施,且上述策略均在浑浊度调控中展现出显著效能,小麦啤酒浑浊度具体调控措施及其效果见表1。

表1 小麦啤酒浑浊度不同控制措施优缺点、适用范围和效果
Table 1 Advantages, disadvantages, applicable scope and effects of different control measures for haze degree in wheat beer

控制措施	优点	缺点	适用范围	效果	参考文献
酿造工艺优化	源头控制减少蛋白质和多糖溶解	复杂调控工艺	所有生产规模	高效,有助于长期稳定控制浑浊	[16]
酵母代谢调控及管理	控制代谢副产物	精确控制影响发酵效率	发酵过程中	中等效果,需提高成本精细控制发酵工艺	[13]
过滤技术	去除大颗粒悬浮物	过滤成本高且影响风味	后期处理与成熟阶段	高效、快速	[55]
后酵(冷藏)	低成本,操作简单	较长时间	啤酒成熟与储存阶段	见效较慢	[16]
絮凝剂使用	加速沉淀物形成,缩短澄清时间	使用过量影响啤酒风味和口感	后期处理阶段	高效、快速	[21]

3.1 酿造工艺的优化

在小麦啤酒的酿造生产过程中, 优化酿造工艺是实现有效调控浑浊的基础, 不同酿造工艺参数对小麦啤酒浑浊度的影响见表2。

表2 不同酿造工艺参数对小麦啤酒浑浊度的影响
Table 2 Effects of different brewing process parameters on the haze degree of wheat beer

酿造工艺	工艺操作	浑浊度变化	参考文献
麦芽配比	增加小麦麦芽比例	小麦麦芽有较多蛋白质和多糖, 易与多酚结合, 形成浑浊物, 浑浊度升高	[56]
糖化温度	高糖化温度	高温糖化可以促进蛋白质溶解, 有利于减少浑浊物形成, 浑浊度降低	[57]
糖化时间	延长糖化时间	延长糖化时间有助于更彻底地溶解蛋白质, 减少浑浊物形成, 浑浊度降低	[7]
麦汁煮沸时间	短时间煮沸	短时间煮沸可能导致更多的蛋白质未被去除, 增加浑浊物, 浑浊度升高	[58]
酵母种类与健康状态	高活性酵母	通过总酵母数与死亡率监测健康的酵母, 有效减少自溶产生的副产物, 避免浑浊物形成, 浑浊度降低	[13]
发酵温度	高温发酵	高温发酵可以促进酵母的代谢, 减少浑浊物的生成, 浑浊度降低	[59]

3.2 酵母代谢调控及管理

研究表明, 调控酵母菌的脯氨酸利用能力可降低啤酒浊度, 相关机制研究主要集中于脯氨酸特异性蛋白酶的应用。Lopez等^[22]研究发现, 添加脯氨酸特异性蛋白酶可显著抑制啤酒冷混浊, 通过不同蛋白酶对富含脯氨酸的小麦醇溶蛋白进行预消化验证, 证实该类酶具有优异的抗浑浊效果。中试研究进一步证实, 在啤酒发酵阶段添加低浓度该酸性酶, 即可有效阻止瓶装啤酒中寒冷性浑浊的形成, 其作用机制为降解含脯氨酸的不溶性蛋白, 避免其与多酚发生结合反应。Zhao Fuhua等^[60]通过研究酶的固定化技术, 以氨基官能化无孔二氧化硅纳米颗粒为载体固定脯氨酸特异性内切蛋白酶, 该酶可特异性裂解脯氨酸羧基侧的肽键或酯键, 在抑制浑浊形成的同时延长啤酒保质期。Liu Minglu等^[61]则聚焦于黑曲霉脯氨酰内肽酶 (*Aspergillus niger* prolyl endopeptidase, AN-PEP) 的应用, 该酶可优先切割内部脯氨酸残基羧基末端的肽键。在*cbh1*启动子及分泌信号肽的调控下实现AN-PEP基因在里氏木霉 (*Trichoderma reesei*) 中重组表达, 获得重组酶rAN-PEP。啤酒酿造过程中经rAN-PEP处理后, 蛋白质含量可降至酶联免疫吸附测定检测下限 (<10 mg/kg) 以下, 显著降低啤酒浊度并提升其非生物稳定性。

除脯氨酸代谢外, 酵母代谢产生的挥发性和非挥发性化合物也对啤酒浑浊性存在调控作用。挥发性化合物多通过间接途径影响浑浊性, Roberts等^[62]通过动态监测醇类挥发性化合物结果发现, 乙酸乙酯和异戊醇等为酵母代谢主要产物, 不同菌株合成这类物质的能力存在

显著差异, 该类化合物虽然不能直接诱导浑浊, 但是可能通过改变啤酒中胶体的平衡或啤酒的氧化状态间接影响啤酒的稳定性; 硫化物作为部分酵母在发酵过程中会产生挥发性化合物, 主要产物为二氧化硫和硫化氢。二氧化硫具有抗氧化性, 可以延缓啤酒中多酚的氧化, 进而降低浑浊度, 而硫化氢若过量合成可能会与金属离子结合形成沉淀^[63]。非挥发性代谢产物则以直接作用为主, 如有机酸与小分子肽可通过调节啤酒pH值及电解质平衡, 促进蛋白质与多酚的相互作用, 最终影响啤酒浑浊稳定性^[64]。

因此, 在实际生产过程中, 需要定期进行扩培并复壮酵母, 保持酵母的健康状态, 维持酵母的活性, 保证酵母的代谢正常, 避免酵母过度衰老或应激损伤, 产生不利于啤酒产品的代谢副产物, 进而减少浑浊物质的生成。

3.3 过滤技术

啤酒过滤一般在啤酒成熟后的后处理阶段, 目标是去除酵母与悬浮颗粒, 使浑浊趋于稳定, 并提高啤酒货架期的胶体稳定性^[65]。目前工业中常用的过滤技术为硅藻土过滤, 该技术主要控制酵母与大颗粒悬浮物, 能将浊度快速降至2 EBC以下, 且处理量大, 但存在粉尘危害、含砷风险, 以及会对风味有一定影响^[55]。

3.4 发酵工艺优化

控制发酵温度是控制酵母代谢进而减少啤酒浑浊的一个重要手段, 合理的发酵工艺对于控制啤酒浑浊至关重要。Cimini等^[55]研究指出, 延长低温后酵的时间, 可以显著加快酵母和啤酒中大颗粒的自然沉降, 降低成品啤酒的浊度。同时在发酵期加入酸性脯氨酸特异性内切酶, 能够定向水解脯氨酸富集蛋白, 显著抑制寒冷性浑浊的形成, 且对泡持性的影响较小。

3.5 絮凝剂使用

在小麦啤后处理阶段添加絮凝剂, 可快速促使悬浮颗粒成絮团、缩短自然澄清时间, 但过量会带走过多蛋白与多酚并残留异味, 进而影响风味和口感。常见的絮凝剂一般有壳聚糖和胶原类澄清剂。Lee等^[66]研究指出, 壳聚糖具有强吸附多酚的能力, 可显著降低啤酒总多酚和抗氧化组分, 但剂量过高会削弱酒体口感与抗氧化稳定性。Sterczyńska等^[67]研究指出, 胶原类澄清剂会结合蛋白, 过量可能去除泡沫蛋白和口感相关高分子, 导致酒体变薄。

总体而言, 现有调控策略在改善小麦啤酒浑浊状态方面均具有一定效果, 但其适用性和调控目标存在差异。在实际生产中, 应结合产品风格需求和工厂实际工艺条件, 合理选择或组合不同控制措施^[55,68]。

4 存在的问题

小麦啤酒浑浊现象的本质是蛋白质、多糖、多酚、酵母代谢产物等多组分协同作用的复杂过程。尽管已有研究揭示了蛋白质与多糖、多酚之间的相互作用对浑浊的影响,但对于这些成分在生产发酵全周期的阶段特异性作用机理,及其如何通过分子间作用力形成不溶性聚集体的动态演化路径,仍缺乏详细的解释,因此对于浑浊形成机制的研究仍然是当前的一个重要难题;虽然部分现代检测技术及新兴技术在实验室环境下取得了一定成果,但将实验室成果向工业应用转化的可行性与经济性仍面临挑战。小麦啤酒作为一个产品,是一个不易分离的整体,不能将浑浊单独进行讨论而忽略啤酒原有的风味或口感,如何在保证澄清型小麦啤酒中澄清效果和浑浊型小麦啤酒中稳定微小浑浊效果的前提下平衡生产成本,实现技术的规模化适配,仍是亟待解决的产业问题。

5 未来研究方向与展望

未来的研究需要进一步深入探讨浑浊形成的微观机制,依托多组学联用技术,蛋白质组学、代谢组学以及转录组学等现代生物技术手段,系统解析啤酒体系中蛋白质、多酚及酵母代谢产物的动态互作网络,通过定量蛋白质组学分析关键蛋白的表达与修饰,揭示其与多酚的结合特性;结合代谢组学追踪酵母代谢物对胶体的调控,最终构建完整机制模型。随着现代检测技术的发展,未来研究可以通过更细致、更高效和更精确的方法追踪浑浊物质的生成过程,从而为生产工艺优化和控制浑浊提供更加精确的科学依据。而将生物学与物理学进行跨学科融合创新,推动生物酿造学与材料学的结合,通过纳米级滤膜和纳米材料高效地去除微小的浑浊颗粒,同时避免风味物质的流失。针对小麦啤酒浑浊问题,未来需突破单一环节调控的局限,通过多学科的协作构建一个全链条协同调控体系,形成一个从源头到最终产品的系统化管理方案,更有效地控制浑浊的生成并提高啤酒的整体质量。

参考文献:

- [1] BYEON Y S, LIM S T, KIM H J, et al. Quality characteristics of wheat malts with different country of origin and their effect on beer brewing[J]. *J Food Qual*, 2021, 2021(1): 1-12.
- [2] WANG Y P, LIU L, WANG X S, et al. *GAT1* gene, the GATA transcription activator, regulates the production of higher alcohol during wheat beer fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Bioengineering*, 2021, 8(5): 61.
- [3] WANG Y, YE L. Haze in beer: Its formation and alleviating strategies, from a protein-polyphenol complex angle[J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3114.
- [4] BAIANO A, FIORE A, la GATTA B, et al. Single and interactive effects of unmalted cereals, hops, and yeasts on quality of white-inspired craft beers[J]. *Beverages*, 2023, 9(1): 9.
- [5] KRSTANOVIĆ V, HABSCHIED K, LUKINAC J, et al. The influence of partial substitution of malt with unmalted wheat in grist on quality parameters of Lager beer[J]. *Beverages*, 2020, 6(1): 7.
- [6] YDING E D, CAILLE O, GOSSELIN Y, et al. Yeast RNA-protein interactions generate beer haze[J]. *J Agric Food Chem*, 2025, 73(30): 18953-18959.
- [7] HUISMANN M, GORMLEY F, DZAIT D, et al. Unfilterable beer haze part II: identifying suspect cell wall proteins[J]. *J Am Soc Brew Chem*, 2022, 80(1): 26-34.
- [8] JIANG K, JIN Y. Effects of fortified wheat bran arabinoxylan on the quality of wheat malt beer[J]. *Foods*, 2025, 14(6): 1036.
- [9] SCHUBERT C, MAXMINER J, AITKENS M, et al. Filtration challenges in non-alcoholic and low-alcohol beer production with a focus on different yeast strains[J]. *Appl Sci*, 2025, 15(12): 6797.
- [10] LI M, WANG C, LI B, et al. Effects of wheat malt and mashing process on non-starch polysaccharides in wheat beer[J]. *Qual Assur Saf Crop Food*, 2025, 17(3): 293-307.
- [11] MAZIARZ K, STERCZYŃSKA M, STACHNIK M, et al. Analysis of haze susceptibility in beers with unmalted barley addition under varying storage conditions[J]. *J Res Appl Agric Eng*, 2023, 68(2): 1-9.
- [12] KITCHENER B G B, WAINWRIGHT J, PARSONS A J. A review of the principles of turbidity measurement[J]. *Prog Phys Geogr*, 2017, 41(5): 620-642.
- [13] LACY K, MORMANDO R, SMITH J R, et al. Identification of the yeast mannoprotein gene *HZY1* as a key genetic determinant for yeast-derived haze in beer[J]. *J Am Soc Brew Chem*, 2024, 82(4): 370-379.
- [14] OLŠOVSKÁ J, KYSELOVÁ L, KUBIZNIAKOVÁ P, et al. Non-microbiological turbidity of beer: Part 1: semireview[J]. *Ferment Ind*, 2021, 67(4): 484-497.
- [15] KAHLE E M, ZARNKOW M, JACOB F. Beer turbidity part 1: a review of factors and solutions[J]. *J Am Soc Brew Chem*, 2021, 79(2): 99-114.
- [16] BAMFORTH C W. 125th anniversary review: The non-biological instability of beer[J]. *J Inst Brew*, 2011, 117(4): 488-497.
- [17] WANG L, ZHAO S, LIAO T, et al. Polysaccharide selection and mechanism for prevention of protein-polyphenol haze formation in beverages[J]. *J Food Sci*, 2020, 85(11): 3776-3785.
- [18] SIEBERT K J, CARRASCO A, LYNN P Y. Formation of protein-polyphenol haze in beverages[J]. *J Agric Food Chem*, 1996, 44(8): 1997-2005.
- [19] SIEBERT K J, TROUKHANOVA N V, LYNN P Y. Nature of polyphenol-protein interactions[J]. *J Agric Food Chem*, 1996, 44(1): 80-85.
- [20] JONGBERG S, ANDERSEN M L, LUND M N. Covalent protein-polyphenol bonding as initial steps of haze formation in beer[J]. *J Am Soc Brew Chem*, 2020, 78(2): 153-164.
- [21] BENUCCI I, MAZZOCCHI C, LOMBARDELLI C, et al. Phenolic-degrading enzymes: effect on haze active phenols and chill haze in India Pale Ale beer[J]. *Foods*, 2022, 12(1): 77.
- [22] LOPEZ M, EDENS L. Effective prevention of chill-haze in beer using an acid proline-specific endoprotease from *Aspergillus niger*[J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(20): 7944-7949.
- [23] OZDAL T, CAPANOGLU E, ALTAY F. A review on protein-phenolic interactions and associated changes[J]. *Food Res Int*, 2013, 51(2): 954-970.
- [24] LI M, DU J, ZHENG Y. Non-starch polysaccharides in wheat beers and barley malt beers: a comparative study[J]. *Foods*, 2020, 9(2): 131.

- [25] SONG Z, LI M, DU J, et al. Effects of non-starch polysaccharides from pure wheat malt beer on beer quality, *in vitro* antioxidant, prebiotics, hypoglycemic and hypolipidemic properties[J]. Food Biosci, 2022, 47(6): 101780.
- [26] 李苗苗. 小麦啤酒中非淀粉多糖分布与结构特性[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [27] LIU J H, CHU B, YANG X, et al. Relationship between the index of protein modification (Kolbach index) and degradation of macromolecules in wheat malt[J]. J Food Sci, 2021, 86(6): 2300-2311.
- [28] NGUELA J M, TEUF O, BICCA S A, et al. Impact of mannoprotein N-glycosyl phosphorylation and branching on the sorption of wine polyphenols by yeasts and yeast cell walls[J]. Food Chem, 2023, 403(3): 134326.
- [29] OLŠOVSKÁ J, KUBIZNIAKOVÁ P, SLABÝ M, et al. Non-microbiological turbidity of beer: Part 2: a case study[J]. Ferment Ind, 2021, 67(6): 523-528.
- [30] CHEN Y, YANG Y, CAI W, et al. Research progress of anti-environmental factor stress mechanism and anti-stress tolerance way of *Saccharomyces cerevisiae* during the brewing process[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2023, 63(33): 12308-12323.
- [31] SANMAN L E, VAN DER LINDEN W A, VERDOES M, et al. Bifunctional probes of cathepsin protease activity and pH reveal alterations in endolysosomal pH during bacterial infection[J]. Cell Chem Biol, 2016, 23(7): 793-804.
- [32] KRÓLAK K, KOBUS K, KORDIALIK-BOGACKA E. Effects on beer colloidal stability of full-scale brewing with adjuncts, enzymes, and finings[J]. Eur Food Res Technol, 2023, 249(1): 47-53.
- [33] YIN T W, LI M, DEVKOTA L, et al. Mashing performance as a function of malt particle size in beer production[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2023, 63(21): 5372-5387.
- [34] THORNE R S W, Nannestad I. Some considerations on the physical significance of turbidity estimates[J]. Ferment Ind, 1959, 65(2): 175-188.
- [35] THORNE R S W. Application of formazin standards to nephelometric estimation of beer turbidity[J]. J Inst Brew, 1961, 67(2): 191-199.
- [36] 袁国亿, 王春晓, 何宇淋, 等. 酶标仪比色法检测浊米酒中高级醇含量[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 221-227.
- [37] RICE C J, PAWLOWSKY K, SMART C. Evaluating haze formation in flavoured lager beers using a range of forcing methods[J]. J Inst Brew, 2017, 123(3): 388-395.
- [38] SHI Z, CHOW C W K, FABRIS R, et al. Applications of online UV-Vis spectrophotometer for drinking water quality monitoring and process control: a review[J]. Sensors, 2022, 22(8): 2987.
- [39] 王宏镭, 刘旭. 啤酒浊度的测定方法研究[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 288-291.
- [40] ULLMANN C, BABICK F, STINTZ M. Microfiltration of submicron-sized and nano-sized suspensions for particle size determination by dynamic light scattering[J]. Nanomaterials, 2019, 9(6): 829.
- [41] BABICK F. Characterization of nanoparticles[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 137-172.
- [42] OLŠOVSKÁ J, KYSELOVÁ L, KUBIZNIAKOVÁ P, et al. Non-microbiological turbidity of beer: Part 1: semireview[J]. Ferment Ind, 2021, 67(4): 484-497.
- [43] BRUNNHOFER G, BERGMANN A, KLUG A, et al. Design and validation of a holographic particle counter[J]. Sensors, 2019, 19(22): 4899.
- [44] HOPE J, GOODWIN M, VANHOLSBECK F. Inverse spectroscopic optical coherence tomography (IS-OCT) for characterization of particle size and concentration[J]. OSA Continuum, 2021, 4(8): 2260-2274.
- [45] CRESTANI C E, BERNARDO A, COSTA C B B, et al. An artificial neural network model applied to convert sucrose chord length distributions into particle size distributions[J]. Powder Technol, 2021, 384(5): 186-194.
- [46] 郑萃, 刘芷君, 梁德海. 光散射技术在高分子表征研究中的应用[J]. 高分子学报, 2023, 53(1): 90-106.
- [47] CALLEMIEN D, GUYOT S, COLLIN S. Use of thiolysis hyphenated to RP-HPLC-ESI-MS/MS for the analysis of flavanoids in fresh lager beers[J]. Food Chem, 2008, 110(4): 1012-1018.
- [48] SHI Z, PANG W, CHEN M, et al. Polyaniline-modified magnetic halloysite nanotube-based magnetic micro-solid-phase extraction for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in beer samples by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Anal Methods, 2021, 14: 761-772.
- [49] WU G, FAN G, ZHOU J, et al. Structure and main polyphenols in the haze of blackberry wine[J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 149(9): 111821.
- [50] DI GASPERO M, RUZZA P, HUSSAIN R, et al. The secondary structure of a major wine protein is modified upon interaction with polyphenols[J]. Molecules, 2020, 25(7): 1646.
- [51] STILMAN W, WACKERS G, SICHANI S B, et al. A table-top sensor for the detection of hydrophobins and yeasts in brewery applications[J]. Sens Actuators B Chem, 2022, 373: 132690.
- [52] CONDINA M R, DILMETZ B A, BAZAZ S R, et al. Rapid separation and identification of beer spoilage bacteria by inertial microfluidics and MALDI-TOF mass spectrometry[J]. Lab Chip, 2019, 19(11): 1961-1970.
- [53] STEINER E, BECKER T, GASTL M. Turbidity and haze formation in beer: insights and overview[J]. J Inst Brew, 2010, 116(4): 360-368.
- [54] DE F R, SANTARELLI V, GRILLI S, et al. An integrative multi-omics approach aimed to gain insight on the effect of composition, style, yeast, and wheat species on wheat craft beer flavour[J]. Food Chem, 2024, 441(5): 138387.
- [55] CIMINI A, MORESI M. Innovative rough beer conditioning process free from diatomaceous earth and polyvinylpyrrolidone[J]. Foods, 2020, 9(9): 1228.
- [56] LI X, YANG J, XIE L, et al. The effect of barley to wheat ratio in malt blends on protein composition and physicochemical characteristics of wort and beer[J]. J Food Sci, 2023, 88(1): 193-203.
- [57] KISHIMOTO T, HISATSUNE Y, YAMADA O. The Effect of mash-in temperature on the characteristics and flavor stability of pilsner-type beer[J]. J Am Soc Brew Chem, 2024, 82(1): 32-38.
- [58] PINTO M B C, SCHMIDT F L, RAPPSILBER J, et al. Addition of hop (*Humulus lupulus* L.) bitter acids yields modification of malt protein aggregate profiles during wort boiling[J]. J Agric Food Chem, 2023, 71(14): 5700-5711.
- [59] FOSTER B, TYRAWA C, OZSAHIN E, et al. Kveik brewing yeasts demonstrate wide flexibility in beer fermentation temperature tolerance and exhibit enhanced trehalose accumulation[J]. Front Microbiol, 2022, 13(3): 747546.
- [60] ZHAO F H, HOU T Q, WANG J X, et al. Immobilization of proline-specific endoprotease on nonporous silica nanoparticles functionalized with amino group[J]. Bioprocess Biosyst Eng, 2017, 40(1): 1-7.

- [61] LIU ML, HU M, ZHOU H, et al. High-level production of *Aspergillus niger* prolyl endopeptidase from agricultural residue and its application in beer brewing[J]. Microb Cell Fact, 2023, 22(1): 93.
- [62] ROBERTS R, KHOMENKO I, EYRES G T, et al. Online monitoring of higher alcohols and esters throughout beer fermentation by commercial *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces pastorianus* yeast[J]. J Mass Spectrom, 2023, 58(10): e4959.
- [63] OKA K, HAYASHI T, MATSUMOTO N, et al. Decrease in hydrogen sulfide content during the final stage of beer fermentation due to involvement of yeast and not carbon dioxide gas purging[J]. J Biosci Bioeng, 2008, 106(3): 253-257.
- [64] 孔维宝, 蔡国林, 赵海锋. 啤酒中蛋白质和氨基酸含量与其它数据的关系[J]. 啤酒科技, 2006(3): 44-48.
- [65] CADAR O, VAGNER I, MIU I, et al. Preparation, characterization, and performance of natural zeolites as alternative materials for beer filtration[J]. Materials, 2023, 16(5): 1914.
- [66] LEE W H, KIM J O. Optimization of turbidity removal and floc formation for ballasted flocculation using magnetite-based agents by response surface methodology[J]. Chemosphere, 2024, 363(9): 142932.
- [67] STERCZYŃSKA M, ZDANIEWICZ M, STACHNIK M. A pilot study of clarifying (fining) agents and their effects on beer physicochemical parameters[J]. Appl Sci, 2025, 15(17): 9330.
- [68] FEILNER R, JACOB F F. Improving resistance to aging and increasing haze stability in Southern German wheat beer through process optimization[J]. Brew Sci, 2015, 68(5/6): 58-66.