

马克斯克鲁维酵母的微生物学特性 及其在发酵食品中的应用

季 鑫¹ 张宇航¹ 黄卫宁² 和 珊¹ 汤晓娟¹

(1. 临沂大学生命科学学院, 山东 临沂 276000; 2. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214000)

摘要: 马克斯克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*)是一种 GRAS 级别的真菌微生物, 以其生产常规及特殊酶的能力以及作为特定酶表达载体的功能而著称。在食品工业领域, *K. marxianus* 作为发酵剂, 不仅能有效控制发酵过程, 还能显著提升发酵食品品质。文章系统分析了 *K. marxianus* 的微生物学特性, 对其在果蔬、乳制品、谷物、肉制品及酒类等发酵产品中的应用进行了综述, 并对其在未来食品工业中的潜在应用进行了展望。

关键词: 马克斯克鲁维酵母; 发酵食品; 非传统酵母; 应用研究

Microbiological characteristics of *Kluyveromyces marxianus* and its application in fermented foods

JI Xin¹ ZHANG Yuhang¹ HUANG Weining² HE Shan¹ TANG Xiaojuan¹

(1. School of Life Sciences, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China; 2. The State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: *Kluyveromyces marxianus* is a GRAS-classified fungal microorganism, renowned for its capacity to generate both conventional and specialized enzymes, as well as its function as a vector for the expression of specific enzymes. In the food industry, *K. marxianus* serves as a fermentation agent capable of effectively controlling the fermentation process and significantly enhancing the quality of fermented foods. This article systematically analyzes the microbiological characteristics of *K. marxianus*, reviews its application in the fermentation of products such as fruits and vegetables, dairy, grains, meat products, and alcoholic beverages, and explores its potential application in the future food industry.

Keywords: *Kluyveromyces marxianus*; fermented food; non-conventional yeasts; application research

在食品工业领域, 酵母菌占据着极为重要的地位。其中, 酿酒酵母作为传统酵母的典型代表, 被广泛应用于发酵面制品与酒类等产品的生产过程中。随着消费者对于食品风味、营养以及功能性需求的日益增长, 非传统酵母在发酵食品中的应用愈发广泛。相较于酿酒酵母, 非传统酵母展现出代谢多样性以及环境适应性强等显著优势。

马克斯克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*)最初是从葡萄中分离出来, 为食品安全级微生物, 得到欧盟 QSP 和美国 GRAS 认证, 2013 年被中国国家卫生计生委批准为新食品原料^[1]。作为一种非传统酵母, *K. marxianus* 具有卓越的代谢能力、高生长速率、高耐热性(45~55 °C)以及广泛的糖同化能力^[2], 具备显著的工业应用价值。此外, *K. marxianus* 广泛存在于酸奶、果蔬、酒

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:32402145); 山东省自然科学基金项目(编号:ZR2023QC083)

通信作者: 汤晓娟(1988—), 女, 临沂大学副教授, 博士。E-mail: tangxiaojuan@lyu.edu.cn

和珊(1988—), 女, 临沂大学助理研究员, 硕士。E-mail: liuyuxinghe@qq.com

收稿日期: 2025-01-20 **改回日期:** 2025-07-30

引用格式: 季鑫, 张宇航, 黄卫宁, 等. 马克斯克鲁维酵母的微生物学特性及其在发酵食品中的应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 184-191.

Citation: JI Xin, ZHANG Yuhang, HUANG Weining, et al. Microbiological characteristics of *Kluyveromyces marxianus* and its application in fermented foods[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 184-191.

类、谷类、肉制品等环境中,可利用多种碳源(葡萄糖、果糖、乳糖、菊粉等)通过代谢途径使发酵过程产生二氧化碳、有机酸、酯类、醇类、酮类等化合物,从而改善食品的风味、质地、营养价值和保藏性^[3]。

不同的 *K. marxianus* 菌株特性各不相同,在各类发酵食品中所发挥的作用也存在差异。因此,选育合适的菌株并合理加以应用,对于有效提升发酵产品品质至关重要。文章拟对马克斯克鲁维酵母的生物学特性以及其在发酵果蔬、乳制品、谷物制品、肉制品和酒类等发酵食品中的应用进行全面综述,旨在为进一步提升和改善马克斯克鲁维酵母在发酵食品中的应用研究提供依据。

1 马克斯克鲁维酵母的微生物学特性

马克斯克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*)在真菌分类学中隶属于子囊菌门酵母菌亚门酵母纲酵母目酵母科克鲁维属,是一类同宗配合的半子囊菌酵母^[4]。在酵母演化谱系中,其与酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)存在一定亲缘关系,但二者在代谢途径与生长特性等方面呈现出显著差异(表1)。在代谢特性上,*K. marxianus*为Crabtree 阴性酵母,这一特征使其区别于酿酒酵母。在有氧环境下,即便培养基中存在过量葡萄糖,马克斯克鲁维酵母也不会启动酒精发酵过程,而是优先通过有氧呼吸途径高效利用葡萄糖,将其彻底氧化为二氧化碳和水,以产生更多能量用于细胞生长和代谢活动。在呼吸代谢类型上,*K. marxianus* 属于兼性厌氧型微生物,虽然在无氧条件下具备一定发酵能力,但无法在严格厌氧环境中长期生存。适量氧气的供给对其代谢调控至关重要^[5]。在生长特性方面,*K. marxianus* 展现出突出的快速生长和耐高温能力。部分菌株能够在45℃以上的高温环境中维持生长,其细胞膜的脂质组成、蛋白质热稳定性以及细胞内一系列应激响应机制协同作用,保障细胞在高温下的正常生理功能^[6]。这种耐高温特性在工业生产中具有重要意义,在发酵过程中可有效抑制嗜温性杂菌生长,减少染菌风险,同时显著降低冷却成本,提升生产效率与经济效益。在底物利用与酶学特性上,*K. marxianus* 呈现出极高的代谢多样性。它能够利用乳糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、纤维二糖、菊粉等多种碳源,尤其在乳糖代谢方面表现卓越。此外,*K. marxianus* 具备强大的特殊酶生产能力,能够合成菊粉酶、脂肪酶、半乳糖苷酶、葡萄糖苷酶、羧肽酶、氨肽酶、乳糖酶等水解酶^[7]。这些酶在生物催化过程中发挥关键作用,如菊粉酶可用于菊粉类物质转化,将菊粉高效水解为果糖等产物。综上,*K. marxianus* 凭借其广泛的底物利用能力、出色的耐高温特性以及高效的代谢灵活性等微生物学特性,在生物、食品以及医药等多个领域展现出巨大的应用潜力。在食品工业中,其独特的代谢特性与酶学功能可用于改善食品品质、开发

表1 马克斯克鲁维酵母与酿酒酵母主要的生理特性比较

Table 1 Comparison of principal physiological characteristics between *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae*

特性	酿酒酵母	马克斯克鲁维酵母
能量代谢	Crabtree-阳性	Crabtree-阴性
葡萄糖抑制敏感性	高	低
乙醇耐受性	高	低
高温耐受性	低(<40℃)	高(>40℃)
乳糖利用	不可利用	可利用
底物谱	窄(偏好葡萄糖)	广(包括菊粉、木糖等)

新型发酵食品。

2 马克斯克鲁维酵母在发酵食品中的应用

中国传统发酵食品历史悠久、种类丰富,凭借天然、营养及功能性特质,已成为日常生活与食品行业的重要组成部分。微生物作为食品生物转化的“天然催化剂”,通过代谢活动赋予食品独特的色泽、风味、口感、质地及营养,显著提升产品品质。目前,*K. marxianus* 已被广泛应用于乳制品、果蔬、谷物、肉类及酒类等发酵食品领域,具有显著的工业及食品加工价值。文章对 *K. marxianus* 在发酵食品中的研究及应用进行系统梳理(图1),有助于深入了解其应用现状、挖掘潜在价值,为后续研究及产业发展提供参考。

2.1 在发酵乳制品中的应用

乳制品是食品中最具代表性的领域之一,富含蛋白质、维生素、碳水化合物、矿物质等成分,是人体摄取营养的良好来源。发酵乳制品作为其中的一类,其代表性产品包括干酪、酸奶、开菲尔乳、马奶酒等。发酵乳制品中的微生物对于乳制品的营养、安全、风味、香气、质地等起着至关重要的作用。其中,微生物对乳制品风味品质的影响最大,乳制品的风味物质很大程度上决定了乳制品的品质。

马克斯克鲁维酵母广泛存在于开菲尔、奶酪、酸奶等传统发酵乳制品中^[8]。由于 *K. marxianus* 可分泌 β -半乳糖苷酶、蛋白酶和脂肪酶,因此乳中的乳糖、蛋白质和脂肪等营养成分可被分解转化^[9],使乳制品更易于消化,同时乳制品的风味品质也得以提升。因此,在部分传统发酵乳制品中,*K. marxianus* 是决定乳制品风味与营养及功能品质的关键菌株。Perpetuini 等^[10]通过将 *K. marxianus* FM09 与乳酸乳球菌用于奶酪发酵,揭示了 *K. marxianus* 通过消耗乳酸,提升奶酪 pH 值、增强蛋白水解作用改变奶酪理化特性,协同代谢促进酯类、有机酸和高醇等风味物质的生成,优化奶酪的香气轮廓,为风味调控提供了机制依据。Huang 等^[11]研究了 *K. marxianus* 与乳酸菌共发

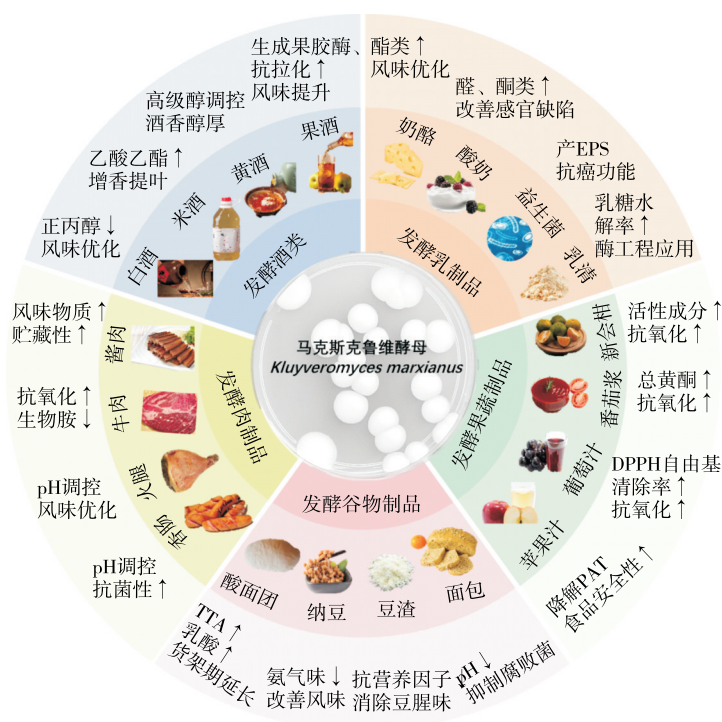


图1 马克斯克鲁维酵母在各类发酵食品中的应用研究

Figure 1 Application of *Kluyveromyces marxianus* in various fermented food products

酵对山羊奶的物理化学和感官特性的影响,建立了乳酸菌和酵母的多启动发酵系统。结果发现,山羊奶的黏度、稳定性、口感和风味都有所改善,特别是形成了更多的香气化合物掩盖了山羊奶的膻味。此外,*K. marxianus*在乳糖水解与益生功能研究方面也取得一定进展。Nag等^[12]评估了从牦牛乳中分离的*K. marxianus* PCH397作为潜在益生菌的特性。该菌从高原地区的牦牛奶中被分离培养,具有 β -半乳糖苷酶活性,这种酶能够水解乳糖,适合乳糖不耐受者。通过对其益生菌、抗脂肪、抗糖尿病、抗氧化以及抗癌特性进行评估发现,*K. marxianus* PCH397作为一种潜在的益生菌,对肥胖、2型糖尿病、结直肠癌(CRC)有特定的治疗潜力。Rahbar Saadat等^[13]在发酵乳制品中发现一株能够产胞外多糖(Exopolysaccharides, EPS)的马克斯克鲁维酵母,该EPS能诱导肠癌细胞凋亡,具有潜在的抗癌效果,为乳制品中益生菌酵母的应用提供了新的视角,特别是在开发针对结直肠癌的新疗法方面。乳清作为乳制品的主要残留物,其高效发酵和酶解研究为乳清资源的综合利用提供了重要途径。Oda等^[14]研究了*K. marxianus* NBRC 1963菌株在乳清渗透液中的乙醇发酵能力,采用连续发酵和分批发酵模式,利用乳清渗透液作为碳源,该菌株在45℃高温下仍能高效产乙醇,最高质量浓度达40 g/L。此外,该菌株对乳糖的利用率显著优于其他菌株,在高温条件下的生长速率和产乙醇能力均优于*S. cerevisiae*。Szczodrak等^[15]研究了*K.*

*marxianus*生产的 β -半乳糖苷酶在乳清乳糖水解中的应用,该 β -半乳糖苷酶在连续反应中乳糖水解率达90%以上,水解后乳清渗透液可用于生产低乳糖乳制品,展示了乳清发酵的高效性,为乳清资源的酶解利用提供了新思路。

2.2 在发酵果蔬制品中的应用

水果和蔬菜富含人体所需的维生素、膳食纤维、有机酸、矿物质和重要化合物,尤其是果蔬中的天然活性化合物对人体抗炎、抗菌、抗氧化和抗癌有着至关重要的作用^[16]。当前市场上已有的发酵果蔬产品包括果蔬汁、泡菜、腌菜、酵素、果醋等。发酵果蔬的益生菌主要为乳酸菌和酵母菌^[17]。益生菌应用在果蔬的发酵过程中,微生物进行代谢活动产生有机酸、氨基酸、多酚类化合物、维生素、生物活性物质以及抗氧化物质等,这些物质能赋予发酵果蔬独特的风味,有助于提高果蔬的抗氧化活性,改善矿物质的利用率和消化率^[18]。

*K. marxianus*作为具有独特代谢特性的非传统酵母菌,通过代谢强化、菌群协同及解毒功能提升酵素、果浆、果汁等产品的品质。*K. marxianus*代谢产生的酶能分解果蔬基质,释放并转化生物活性物质,增强产品抗氧化性能;混菌发酵借助菌株功能效果的差异,代谢互补,不但能提升发酵效率,还使得发酵产物的风味品质优于单菌发酵;菌体表层结构可特异性吸附并降解霉菌毒素,保障食品安全。说明*K. marxianus*对果蔬发酵产品的营养、抗

氧化、风味及安全性均有优化作用。周映君等^[19]以新会柑果浆为原料,比较了不同酵母菌与植物乳杆菌复合发酵对新会柑酵素品质的影响。结果表明,*K. marxianus*发酵体系中粗多糖和 γ -氨基丁酸含量有所提升,羟自由基清除率及总还原力均优于其他酵母发酵,表明该体系发酵条件下显著提升了生物活性物质及抗氧化能力。丁敏等^[20]利用2株不同来源的*K. marxianus*混合发酵番茄浆,结果表明,*K. marxianus*混菌发酵能够显著提升番茄浆、番茄红素和总黄酮的含量,提升番茄浆品质及抗氧化能力。董双佳等^[21]利用植物乳杆菌 Zhang-LL 及 *K. marxianus* M3 协同发酵葡萄汁酵素,相较于单菌发酵,共发酵显著提高了葡萄汁酵素中益生菌活菌数和 DPPH 自由基清除率。当接种比例为 1:1、34 °C 发酵 18 h 时,活菌总数为 7.42×10^8 CFU/mL,比植物乳杆菌和 *K. marxianus* 单菌发酵分别提高了 28.9% 和 62.36%,DPPH 自由基清除率达 85.25%,比单菌发酵分别提高了 31.83% 和 53.81%,有效提升了产品的抗氧化效果。此外,*K. marxianus* 在发酵果蔬的风味改善与安全性调控方面亦具有独特优势。燕国梁等^[22]从宁夏产区自然发酵的葡萄酒中分离出一株适用于发酵樱桃番茄汁的 *K. marxianus* KM-20,将其与植物乳杆菌 HY-1 应用于樱桃番茄汁中进行混合发酵,与对照菌株植物乳杆菌 HY-1 单菌发酵相比,混菌发酵在活菌数、产酸能力、产多酚量和还原糖消耗量上均有所提高,改善了单一乳酸菌发酵香气不足、生青味重的问题,提升了樱桃番茄发酵果汁的营养价值和感官品质。Ning 等^[23]从开菲尔谷物中分离得到 *K. marxianus* YG-4,并分析其对苹果汁中霉菌毒素棒曲霉素(PAT)的解毒作用。结果表明,*K. marxianus* YG-4 能有效吸附和降解苹果汁中的 PAT,解毒能力达到 81.70%,显著提高了苹果汁的品质,同时为果蔬汁及其他食品中 PAT 污染的消除提供了一种新的生物技术方法。

2.3 在发酵谷物制品中的应用

谷物主要是由淀粉、蛋白质、膳食纤维和维生素等组成,作为人体主要能量来源,为人类提供必需的营养物质^[24]。作为全球第一大粮食作物,谷物种类繁多,在全球农业生产中占据主导地位,是维持人类健康和生存的基础。发酵谷物制品是指利用谷类为原料经微生物发酵而制成的食品,如馒头、杂粮面包、纳豆、米醋等。微生物发酵通过生物转化显著提升谷物制品的营养与风味,发酵使得谷物制品的营养成分更易吸收,发酵谷物的风味形成与微生物群落代谢密切相关,其中酵母菌通过代谢活动降解大分子化合物、释放功能性物质并合成大量香气成分,有助于提高消化率,优化谷物口感,赋予产品独特的功能特性和风味特性。

K. marxianus 应用于麦麸、面包、豆渣等发酵谷物中,能分泌菊粉酶、蛋白酶、 β -半乳糖苷酶、果胶酶、纤维素酶

等酶类^[25-26],有效分解谷物中的果聚糖、蛋白质、乳糖、果胶、纤维素等物质,提升谷物的加工性能。此外,在代谢过程中产生各种酸类、醇类和酯类等风味化合物,影响产品的质构和香气,有效提升发酵产物的风味和品质。鉴于此,*K. marxianus* 成为谷物发酵中常用的菌种之一。*K. marxianus* 分泌的 β -葡萄糖苷酶是一种重要的纤维素酶,能将纤维素降解为葡萄糖,用于食品加工或工业燃料。杨文丹^[27]利用具有 β -葡萄糖苷酶生产能力的 *K. marxianus* 发酵麦麸制备了一种高膳食纤维面包。Plessas 等^[28]利用 *K. marxianus* IFO 288 与另外 3 株乳杆菌属作为混合发酵剂应用到酸面团面包中。结果表明,混合发酵提高了面包总可滴定酸度(TTA)和乳酸浓度,有助于抑制霉菌的生长,延长面包的货架期。邹奇波等^[29]将食蜜魏斯氏菌 T5 和 *K. marxianus* ATCC36534 应用于全麦面包中探究混菌发酵对全麦面包品质的改善。结果表明,面包的菌落数、纤维素酶活性、胞外多糖(EPS)产量均有显著提升,且面包的比容、弹性与风味有所改善,赋予面包更浓郁的酒香与果香,有效优化了全麦面包的质构与风味特性。Wang 等^[30]通过 *K. marxianus* 发酵豆渣改良不溶性膳食纤维(IDF),发现 *K. marxianus* 分泌的 β -葡萄糖苷酶可水解纤维素 β -1,4-糖苷键,显著提升 IDF 纯度,豆渣 IDF 的功能特性得到改良,豆渣的质量提高,这为食品行业提供了低成本、环保的膳食纤维改良性策略。Hu 等^[31]利用 *K. marxianus* 发酵豆渣,发酵后豆渣的粗脂肪、可溶性膳食纤维和多糖含量提升,此外,发酵有效降低了豆渣的豆腥味,提高了大豆残渣的加工特性。混菌发酵突破了单一菌种的功能局限,可以很好地改善产品品质。聂萌滋等^[32]利用 *K. marxianus* 与纳豆芽孢杆菌混合发酵以改善纳豆发酵风味,提升口感,并通过响应面法优化确定菌种比例为 1:1、发酵温度为 36 °C,发酵时间为 96 h,此时纳豆激酶活性最高、氨气味有效降低,口感风味最好。

2.4 在发酵肉制品中的应用

肉制品作为人类饮食的组成部分,富含优质蛋白质、脂肪、矿物质和维生素等多种营养素^[33],为机体生长发育提供重要营养来源。在中国,发酵肉制品历史悠久,凭借其独特风味、紧密肉质、易消化、营养价值高、较长保质期以及种类丰富,深受消费者喜爱。目前市场上常见发酵肉制品有香肠、火腿、腊肉、酸肉等,通过有益微生物发酵以提升其风味和保质期^[34]。特定益生菌通过代谢可合成维生素、促进蛋白质分解为更易吸收的小分子肽,产生抗菌肽等活性物质,从而提升肉制品的营养价值和功能特性。益生菌的选择要基于在肉制品中的生存力、加工耐受性(如耐酸、耐亚硝酸盐、耐胆盐、耐抗生素等)以及遗传稳定性。

K. marxianus 在香肠、火腿、牛肉和酱肉等产品中通过酶促代谢与菌群协同作用,可显著提升产品的安全性、

营养及风味特性。*K. marxianus* 代谢产生的蛋白酶和脂肪酶可促进肉制品中蛋白质、脂质分解,生成游离氨基酸和脂肪酸,增加产品的营养价值;代谢产生的有机酸、酯类和醛类等风味化合物,可改善肉制品的色泽、弹性等品质,提升产品的风味和质构。与此同时,*K. marxianus* 与乳酸菌、酿酒酵母的共生代谢模式备受关注,通过微生物互作调节体系酸碱平衡、降低水分活度,提升发酵肉制品的抗菌性能。范鑫洋等^[35]利用 *K. marxianus* B3 和植物乳杆菌 Z43 复配发酵香肠,发现混菌发酵提高了样品 pH 值,降低了 TVB-N 值,显著提升了发酵香肠的抗菌性能,有效改善了低盐发酵香肠的品质。王菲等^[36]利用 *K. marxianus* 和副干酪乳杆菌 LP 发酵藏猪火腿。结果表明,混菌发酵显著降低了火腿的 pH 值和水分活度,改善了火腿的色泽、亮度和弹性,有效提升了藏猪火腿的品质和风味,为发酵肉制品的生产开辟了新的技术路径。鄢嫣等^[37]利用 2 株乳杆菌和 1 株 *K. marxianus* 发酵牛肉,与未发酵和自然发酵牛肉相比,牛肉的 pH 值、水分活度、TBA 值(脂质氧化)和羰基值(蛋白质氧化)有所降低,发酵牛肉的品质、风味和安全性得到改善。Ji 等^[38]研究了 *K. marxianus* 和酿酒酵母在酱肉中的理化、微生物和风味变化,结果发现,与未发酵组相比,KM 组酱肉中的可溶性蛋白(SP)、游离氨基酸(FAA)分别增加了 32.4% 和 29.84%,水分含量、水分活度、pH 值逐渐降低,酯类、烯烃、醇类和酯类含量显著增加,总体上提高了酱肉贮藏的品质和风味。

2.5 在酒类中的应用

随着酿酒技术的进步,酒的种类日益丰富,常见的酒有啤酒、葡萄酒、米酒、果酒、黄酒、白酒等。风味品质是决定酒精饮料价值的关键因素,而酵母菌在酒精饮料发酵过程中发挥着重要作用,其代谢活动直接影响风味物质的形成。酿酒酵母作为传统酿酒的优势菌株,凭借高糖转化为乙醇的能力被广泛应用^[39]。但酿酒酵母在风味多样性方面存在局限,如产香能力不足,香气不够浓郁^[40]。近年来,越来越多的研究者采用非酿酒酵母属酵母进行酒的酿造,为酒类香气改良提供了新思路。

K. marxianus 作为一种非酿酒酵母,被广泛应用于白酒、果酒、米酒和黄酒等酒类酿造中。袁海珊等^[40]研究表明,*K. marxianus* 不仅能通过高效酶活性定向调控风味物质的生物合成,还能协同酿酒酵母形成互补代谢网络,优化发酵体系中的乙醇产率与风味平衡。酯类是构成酒体香气的主要成分之一,与酿酒酵母相比,*K. marxianus* 在发酵过程中会产生更多的酯类等芳香化合物,已知 *K. marxianus* 在发酵过程中产生的乙酸乙酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯等酯类物质均高于酿酒酵母^[41],利用 *K. marxianus* 提高酒中乙酸乙酯的含量已成为新兴的酿酒工艺优化方向。孙神英^[42]对 *K. marxianus* HY32 和市售的酿酒酵母

TRADY 进行混合发酵以提高白酒的品质,当两种菌株的混合比例为 5:1 时,产生的乙酸乙酯高达 (121.00 ± 5.90) mg/L,与对照组“白云边”小曲曲粉相比提高了近 2 倍,HY32 和 TRADY 的协同发酵不仅提高了乙酸乙酯含量,还增加了其他风味化合物含量,如己酸乙酯和乳酸乙酯等。朱丽萍等^[43]将从酒醅中筛选的 *K. marxianus* Y245 应用到白酒生产中,该 Y245 表现出低产正丙醇的特点,且乙酸乙酯含量较高,显著提升了白酒的风味品质。Zhang 等^[44]研究了 *K. marxianus* Fim-1 和 *S. cerevisiae* 发酵的苹果酒的挥发性物质特性,结果表明,高级醇、脂肪酸和酯的含量明显提升,尤其在 *K. marxianus* 的苹果酒中乙酸乙酯含量达到 (756.5 ± 28.1) μ g/L,由其发酵的苹果酒往往散发出更为香甜的气息。*K. marxianus* 在果酒发酵中,能够分泌果胶酶,使果香和花香成分显著增加,改善酒的品质。Sieiro 等^[45]利用 *K. marxianus* 发酵葡萄汁,与使用商业果胶酶相比,葡萄酒中芳香族化合物增加、种类更加丰富多样,证实了 *K. marxianus* 果胶酶对葡萄酒风味的影响。*K. marxianus* 在酿酒时有单菌发酵和混菌发酵两种形式,刘梦等^[46]研究了 *K. marxianus* 与酿酒酵母协同发酵黄酒。结果表明,混合发酵提升了乙醇含量,风味化合物浓度增加,产生了丰富的香气物质,改善了黄酒的口感和风味。王金驰等^[47]运用 *K. marxianus* 与酿酒酵母混合发酵米酒。结果表明,混合发酵能够提升米酒的风味和口感,解决了米酒微生物单一,产香不足的难题。何明迎^[48]将 *K. marxianus* 应用于奶啤发酵并优化其工艺,优化后的奶啤中风味物质及其相对含量显著提高,特别是乙酸酯类和醇类的相对含量增加,使香气更丰富,风味品质显著提升。Nolasco-Cancino 等^[49]利用 *K. marxianus* 发酵龙舌兰汁,发酵过程中乙醇浓度、产量以及效率均优于酿酒酵母,该菌株被认为是手工酿造龙舌兰酒的理想选择。综上,无论是单菌还是混菌发酵,*K. marxianus* 会改变酒精饮料中芳香成分的种类和含量,在不同类型酒中都具有一定发酵潜力。

3 结论与展望

随着时代的进步,消费者对于食品的追求不仅局限于风味和口感,也越来越重视食品的营养价值和品质。马克斯克鲁维酵母作为重要的食品级非传统酵母菌,因其独特的发酵机制,在提升发酵食品品质中有着重要的积极作用,特别在乳制品、果蔬制品、谷物制品、肉制品及酒类中,利用多种碳源通过多种代谢途径产生的酸类、醇类、酯类、酮类等化合物能改善食品的风味、质地、营养价值、贮藏性以及增强食品的抗氧化能力。同时,马克斯克鲁维酵母作为“天然的酶工厂”生产的 β -半乳糖苷酶、菊粉酶、蛋白酶等水解酶类可用于改善食物的营养组分,如 β -半乳糖苷酶助乳糖不耐受者消化乳制品,菊粉酶分解菊

粉促肠道健康,蛋白酶助蛋白质吸收,这使其在食品工业,尤其是在功能性食品开发和营养提升方面潜力巨大。不同菌株的马克斯克鲁维酵母生理特性可能会有所差异,选择合适的菌株和发酵条件,可以优化食品发酵过程。事实证明,相较于单菌发酵,混菌发酵能利用不同菌株的相互作用和优势,提高发酵效率。因此,马克斯克鲁维酵母与其他酵母菌、乳酸菌混合发酵已成为提升发酵食品品质的常用手段。

然而,有关马克斯克鲁维酵母在食品工业中的产香机制研究较少,基因调控机制不明确,生产效率和产量不足,在乙醇、抑制物耐受性方面还有待提升。因此,未来的研究方向应聚焦于解决葡萄糖效应问题,实现多种碳源的共利用,加强基因工程改造,以及提高对抑制物的耐受性,从而充分发挥马克斯克鲁维酵母在食品发酵领域的潜力^[50]。当前,马克斯克鲁维酵母的应用主要集中在食品和生物技术领域,在食品发酵中主要用于生产酶、发酵剂和改善食品风味,后续应充分利用其特性,深入研发一系列创新产品。马克斯克鲁维酵母的应用范围有望拓展到更多不同的领域,如生产香精香料和其他发酵类产品,开发其在产香方面的商业价值,对其代谢芳香化合物的机制进行深入探索,确保在实际应用中发挥最大发酵效能。

参考文献

- [1] 莫文娟,郭超,吕红. 马克斯克鲁维酵母的遗传与生理特征[J]. 中国科学:生命科学, 2016, 46(4): 413-419.
- [2] MO W J, GUO C, LV H. Review of *Kluyveromyces marxianus* genetic and physiological features[J]. Scientia Sinica (Vita), 2016, 46(4): 413-419.
- [3] BAPTISTA M, DOMINGUES L. *Kluyveromyces marxianus* as a microbial cell factory for lignocellulosic biomass valorisation[J]. Biotechnology Advances, 2022, 60: 108027.
- [4] FONSECA G G, HEINZLE E, WITTMANN C, et al. The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 79(3): 339-354.
- [5] LANE M M, MORRISSEY J P. *Kluyveromyces marxianus*: a yeast emerging from its sister's shadow[J]. Fungal Biology Reviews, 2010, 24(1/2): 17-26.
- [6] HA-TRAN D M, NGUYEN T T M, HUANG C C. *Kluyveromyces marxianus*: current state of omics studies, strain improvement strategy and potential industrial implementation[J]. Fermentation, 2020, 6(4): 124.
- [7] LI P S, TAN X W, FU X F, et al. Metabolomic analysis reveals *Kluyveromyces marxianus*'s stress responses during high-temperature ethanol fermentation[J]. Process Biochemistry, 2021, 102: 386-392.
- [8] 杨鑫,黄佳豪,杨娟,等. 马克斯克鲁维酵母的菌种特性及生产应用现状[J]. 食品科技, 2024, 49(11): 10-17.
- [9] YANG X, HUANG J H, YANG J, et al. Strain property and production application status of *Kluyveromyces marxianus*[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(11): 10-17.
- [10] KARIM A, GERLIANI N, AİDER M. *Kluyveromyces marxianus*: an emerging yeast cell factory for applications in food and biotechnology[J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 333: 108818.
- [11] 罗珍兰. 酵母菌在发酵乳制品中的有益作用[J]. 中国乳品工业, 1996, 24(2): 31-33.
- [12] LUO Z L. Beneficial effects of yeasts in fermented dairy products[J]. China Dairy Industry, 1996, 24(2): 31-33.
- [13] PERPETUINI G, ROSSETTI A P, RAPAGNETTA A, et al. Unlocking the potential of *Kluyveromyces marxianus* in the definition of aroma composition of cheeses[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1464953.
- [14] HUANG Z H, HUANG L, XING G L, et al. Effect of co-fermentation with *Lactic acid bacteria* and *K. marxianus* on physicochemical and sensory properties of goat milk[J]. Foods, 2020, 9(3): 299.
- [15] NAG D, GOEL A, PADWAD Y, et al. In vitro characterisation revealed himalayan dairy *Kluyveromyces marxianus* PCH₃97 as potential probiotic with therapeutic properties[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2023, 15(3): 761-773.
- [16] RAHBAR SAADAT Y, YARI KHOSROUSHAHI A, MOVASSAGHPUR A A, et al. Modulatory role of exopolysaccharides of *Kluyveromyces marxianus* and *Pichia kudriavzevii* as probiotic yeasts from dairy products in human colon cancer cells[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103675.
- [17] ODA Y, NAKAMURA K. Production of ethanol from the mixture of beet molasses and cheese whey by a 2-deoxyglucose-resistant mutant of *Kluyveromyces marxianus* [J]. FEMS Yeast Research, 2009, 9(5): 742-748.
- [18] SZCZODRAK J. Hydrolysis of lactose in whey permeate by immobilized β -galactosidase from *Kluyveromyces fragilis*[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2000, 10(6): 631-637.
- [19] WU Y Y, LIU Y N, JIA Y Q, et al. Effects of thermal processing on natural antioxidants in fruits and vegetables[J]. Food Research International, 2024, 192: 114797.
- [20] 朱丹实,吴逗逗,沈雨思,等. 多菌种混合发酵果蔬汁的研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 343-352.
- [21] ZHU D S, WU D D, SHEN Y S, et al. Research progress on mixed fermentation of multiple strains for fruits and vegetables juice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 343-352.
- [22] 全琦,刘伟,左梦楠,等. 乳酸菌发酵果蔬汁的风味研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 315-323.
- [23] QUAN Q, LIU W, ZUO M N, et al. Advances in the flavor of fruit and vegetable juices fermented by lactic acid bacteria[J].

- Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 315-323.
- [19] 周映君, 谢纯良, 陈柏忠, 等. 不同酵母菌与植物乳杆菌复合发酵对新会柑酵素品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 118-125.
- ZHOU Y J, XIE C L, CHEN B Z, et al. Effect of different yeast and *Lactobacillus plantarum* combined fermentation on the quality of Xinhui citrus ferment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 118-125.
- [20] 丁敏, 李阔, 张悦, 等. 马克斯克鲁维酵母发酵番茄浆工艺条件优化及抗氧化能力分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(8): 179-185.
- DING M, LI K, ZHANG Y, et al. Optimization of process conditions and analysis of antioxidant capacity of tomato pulp fermentation by *Kluyveromyces marxianus*[J]. China Brewing, 2023, 42(8): 179-185.
- [21] 董双佳, 刘慧, 金君华, 等. 植物乳杆菌 Zhang-LL 与马克斯克鲁维酵母菌 M3 共发酵葡萄汁酵素的工艺优化[J]. 北京农学院学报, 2024, 39(1): 77-83.
- DONG S J, LIU H, JIN J H, et al. Optimization of grape juice co-fermentation with *Lactobacillus plantarum* Zhang-LL and *Kluyveromyces marxianus* M3[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2024, 39(1): 77-83.
- [22] 燕国梁, 段长青, 姜敏捷. 马克斯克鲁维酵母菌 KM-20 及其在樱桃番茄发酵果汁中的应用: CN117448183A[P]. 2024-01-26.
- YAN G L, DUAN C Q, JIANG M J. K. *marxianus* KM-20 and its application in cherry tomato fermented juice: CN117448183 A[P]. 2024-01-26.
- [23] NING M G, GUO P, QI J R, et al. Detoxification of mycotoxin patulin by the yeast *Kluyveromyces marxianus* YG-4 in apple juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(22): 12 798-12 809.
- [24] PĂUCEAN A, MURESAN V, MARIA-MAN S, et al. Metabolomics as a tool to elucidate the sensory, nutritional and safety quality of wheat bread-a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(16): 8 945.
- [25] 高教琪, 韩锡铜, 孔亮, 等. 马克斯克鲁维酵母在工业生物技术中的应用[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(2): 109-117.
- GAO J Q, HAN X T, KONG L, et al. Application progress of *Kluyveromyces marxianus* in the industrial biotechnology[J]. China Biotechnology, 2014, 34(2): 109-117.
- [26] 杨文丹, 张宾乐, 庄靓, 等. 发酵麦麸对面包面团生化特征及烘焙学特性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 6-11.
- YANG W D, ZHANG B L, ZHUANG L, et al. Effect of fermented wheat bran on biochemical and baking properties of dough and bread[J]. Food & Machinery, 2018, 34(3): 6-11.
- [27] 杨文丹. 马克斯克鲁维酵母发酵麦麸面包烘焙与营养特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 16-50.
- YANG W D. Studies on baking and nutritional properties of *Kluyveromyces marxianus* fermented wheat bran bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 16-50.
- [28] PLESSAS S, FISHER A, KOURETA K, et al. Application of *Kluyveromyces marxianus*, *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* and *L. helveticus* for sourdough bread making[J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 985-990.
- [29] 邹奇波, 程新, 陈诚, 等. 混菌发酵面团对全麦面包风味与烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 32-39.
- ZOU Q B, CHENG X, CHEN C, et al. Effects on flavor and baking characteristics of whole wheat bread by fermented sourdough with the mixed culture[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 32-39.
- [30] WANG X J, ZHANG Y Y, LI Y B, et al. Insoluble dietary fibre from okara (soybean residue) modified by yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110252.
- [31] HU Y, PIAO C H, CHEN Y, et al. Soybean residue (okara) fermentation with the yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. Food Bioscience, 2019, 31: 100439.
- [32] 聂萌滋, 王尚, 朴春红, 等. 马克斯克鲁维酵母对纳豆发酵风味的影响和发酵工艺研究[J]. 大豆科学, 2021, 40(6): 835-843.
- NIE M Z, WANG S, PIAO C H, et al. Effect of *Kluyveromyces marxianus* on natto flavor and the fermentation process[J]. Soybean Science, 2021, 40(6): 835-843.
- [33] BOHRER B M. Review: nutrient density and nutritional value of meat products and non-meat foods high in protein[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 65: 103-112.
- [34] 张国华, 何国庆. 传统发酵食品中乳酸菌多样性及其功能特性[J]. 中国食品学报, 2013, 13(9): 174-181.
- ZHANG G H, HE G Q. Diversity of lactic acid bacteria in traditional fermented foods and its functional properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(9): 174-181.
- [35] 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.
- FAN X Y, ZHANG X M, KANG J, et al. Effect of different proportions of *Kluyveromyces* on quality characteristic of low-salt fermented sausages[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 227-233.
- [36] 王菲, 落桑央吉, 黄晶晶, 等. 副干酪乳杆菌和马克斯克鲁维酵母接种发酵对藏猪火腿品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 249-258.
- WANG F, LUOSANG Y J, HUANG J J, et al. Effect of *Lactobacillus paracasei* and *Kluyveromyces marxianus* on quality of Tibetan pig ham[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(12): 249-258.
- [37] 鄢嫣, 杨明柳, 周迎芹, 等. 不同发酵剂对发酵牛肉品质、风味特性和安全性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(4): 170-185.

- YAN Y, YANG M L, ZHOU Y Q, et al. Effects of different starter cultures on the quality, flavor characteristics and safety of fermented beef[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(4): 170-185.
- [38] JI L L, WANG S, ZHOU Y N, et al. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* on the physicochemical, microbial, and flavor changes of sauce meat during storage[J]. Foods, 2024, 13(3): 396.
- [39] MONNIN L, NIDELET T, NOBLE J, et al. Insights into intraspecific diversity of central carbon metabolites in *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation[J]. Food Microbiology, 2024, 121: 104513.
- [40] 袁海珊, 刘功良, 白卫东, 等. 产酯酵母在发酵食品中的应用研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(1): 15-20.
- YUAN H S, LIU G L, BAI W D, et al. Research progress on the application of ester-producing yeast in fermented food[J]. China Brewing, 2023, 42(1): 15-20.
- [41] 兰青, 张志勇, 余垚, 等. 马克斯克鲁维酵母发酵苹果酒的化学成分与抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 80-89.
- LAN Q, ZHANG Z Y, YU Y, et al. Chemical composition and antioxidant activities of apple cider fermented with non-Saccharomyces yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 80-89.
- [42] 孙神英. 不同酵母菌对白酒风味成分的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2014: 27-34.
- SUN S Y. Effects of different yeasts on liquor flavor components[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2014: 27-34.
- [43] 朱丽萍, 李群, 张帆, 等. 马克斯克鲁维酵母筛选及其在白酒酿造中降低正丙醇的研究[J]. 酿酒, 2024, 51(2): 75-80.
- ZHU L P, LI Q, ZHANG F, et al. Screening of *Kluyveromyces marxianus* and its application in the light-aroma-type Baijiu production[J]. Liquor Making, 2024, 51(2): 75-80.
- [44] ZHANG Z Y, LAN Q, YU Y, et al. Comparative metabolome and transcriptome analyses of the properties of *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces yeasts* in apple cider fermentation[J]. Food Chemistry Molecular Sciences, 2022, 4: 100095.
- [45] SIEIRO C, VILLA T G, DA SILVA A F, et al. Albariño wine aroma enhancement through the use of a recombinant polygalacturonase from *Kluyveromyces marxianus*[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 179-185.
- [46] 刘梦, 缪礼鸿, 刘蒲临, 等. 马克斯克鲁维酵母与酿酒酵母混合发酵对液态法黄酒风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 160-167.
- LIU M, MIAO L H, LIU P L, et al. Effect of mixed liquid fermentation of *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* on the flavor of Huangjiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(9): 160-167.
- [47] 王金驰, 薛涵予, 朱国兴, 等. 马克斯克鲁维酵母与酿酒酵母协同发酵米酒的特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(14): 43-51.
- WANG J C, XUE H Y, ZHU G X, et al. Characteristics of fermented rice wine with mixed strains of *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(14): 43-51.
- [48] 何明迎. 奶啤菌种的优选、冻干菌粉的制备及奶啤发酵工艺的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 5-77.
- HE M Y. Study on the optimization of milk beer strains, the preparation of freeze-dried bacterial powder and the fermentation process of milk beer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 5-77.
- [49] NOLASCO-CANCINO H, SANTIAGO-URBINA J A, WACHER C, et al. Predominant yeasts during artisanal mezcal fermentation and their capacity to ferment maguey juice[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 2900.
- [50] 王冬梅, 洪洞. 在耐热的马克斯克鲁维酵母中构建微生物细胞工厂[J]. 生物学杂志, 2020, 37(1): 1-10.
- WANG D M, HONG J. Constructing microbial cell factory with thermo-tolerant yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. Journal of Biology, 2020, 37(1): 1-10.