

Research Progress on the Impact of Co-fermentation of *Kazachstania humilis* and *Fructilactobacillus sanfranciscensis* on Quality of Dough and Steamed Breads

Ao Fu Zicheng Wang Yujiao Du Jiarui Wang Xin Wang

College of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030031, China

Abstract

Kazachstania humilis and *Fructilactobacillus sanfranciscensis* are core microorganisms in sourdough fermentation. This study reveals the synergistic mechanism of *K. humilis* and *F. sanfranciscensis* co-fermentation: *K. humilis* enhances fermentation efficiency through gas production and acid tolerance, while *F. sanfranciscensis* improves dough rheology and flavor via acidification and exopolysaccharide synthesis. Their metabolic synergy strengthens gluten structure, increasing steamed bread volume, softness, and shelf life while reducing anti-nutrients, allergenicity, and glycemic index. These findings support the development of healthier fermented staple foods.

Keywords

Sourdough; steamed bread; *Kazachstania humilis*; *Fructilactobacillus sanfranciscensis*; Co-fermentation

矮小哈萨克斯坦酵母菌与旧金山果实乳杆菌共发酵对面团及馒头品质影响的研究进展

付敖 王子成 杜玉娇 王佳瑞 汪鑫

山西大学生命科学学院, 中国·山西太原 030031

摘要

矮小哈萨克斯坦酵母菌 (*Kazachstania humilis*) 与旧金山果实乳杆菌 (*Fructilactobacillus sanfranciscensis*) 是酸面团发酵的核心微生物。本研究首次揭示了 *K. humilis* 和 *F. sanfranciscensis* 共发酵的协同机制: *K. humilis* 通过产气、耐酸等特性提升发酵效率, *F. sanfranciscensis* 则通过酸化、胞外多糖合成等改善面团品质和风味。二者协同作用可增强面筋结构, 提高馒头品质, 降低致敏性并延长货架期, 为健康主食开发提供理论支撑。

关键词

酸面团; 馒头; 矮小哈萨克斯坦酵母菌; 旧金山果实乳杆菌; 共发酵

1 引言

酸面团是以谷物粉和水经微生物发酵的传统发酵剂, 中国东汉已用, 古埃及可追溯至公元前 3000 年^[1], 现因其风味、营养及延长保质期而在工业化与手工面食中广泛应用^[2]。单一酵母仅产 CO₂ 和乙醇, 风味单调; 引入乳酸菌后, 其胞外多糖、有机酸和挥发物丰富香气、改善流变与面筋结构。矮小哈萨克斯坦酵母菌 (*Kazachstania humilis*) 是从发酵面团中分离出的第二大酵母菌株, 有优良的耐酸性, 旧金山果实乳杆菌 (*Fructilactobacillus sanfranciscensis*) 是酸面团中的优势乳酸菌, 通过其代谢产物改善面制品的感官特性、质地、货架期、风味及营养健康属性。二者共发酵能有效改善

面制品品质^[3]。

本研究旨在总结 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵的协同机制, 评价该共发酵体系对酸面团流变学特性、中国传统主食馒头感官品质与营养价值的提升效果, 为发酵面食的工业化生产提供理论依据。

2 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 的代谢特性

2.1 *K. humilis* 的代谢特性

K. humilis 是面团中仅次于酿酒酵母的次优势酵母菌, 是一种麦芽糖阴性酵母, 属于子囊菌芽殖酵母, 无芽孢和鞭毛, 细胞形态通常为卵圆形或椭圆形, 直径约为 2~5 μm^[4-5]。菌落呈圆形或不规则形状, 表面光滑, 颜色通常为乳白色 (例如 *K. humilis* CBS 5658T, 见图 1)。*K. humilis* 能够快速利用葡萄糖、半乳糖等单糖及蔗糖、海藻糖等二糖产气, 但其麦芽糖阴性特性限制了其对面团中麦芽糖的利用^[6]。*K.*

【作者简介】付敖 (2005–), 女, 中国山西人, 本科, 从事微生物资源利用研究。

humilis 能够通过 Ehrlich 途径从支链氨基酸产生高级醇，并通过酯化反应生成酯类，同时还会产生少量的有机酸，这些物质对面制品的风味有重要贡献^[7-8]。此外，其能够产生多种维生素，降解面团中的抗营养物质，并增加可溶性膳食纤维和抗氧化物质的含量^[9]。

2.2 *F. sanfranciscensis* 的代谢特性

F. sanfranciscensis 为革兰氏阳性菌，细胞呈短杆状或中长杆状，微弯曲，两端钝圆，尺寸约为 (0.6~0.8) × (2~4) μm。其菌落形态光滑、圆形且半透明（例如 *F. sanfranciscensis* Ls-1001，见图1）。作为酸面团的核心乳酸菌，*F. sanfranciscensis* 高度适应酸面团环境。其酸化能力是其在酸性环境中生存的关键：通过高效代谢六碳糖（生成乳酸、乙酸、乙醇及 CO₂）和五碳糖（生成乳酸与乙酸），显著降低面团 pH 至 3.8~4.5，赋予产品独特酸味的同时，抑制腐败菌生长。该菌作为专性异型发酵乳酸菌，优先通过磷酸酮醇酶途径分解麦芽糖，既为自身供能，又释放葡萄糖供酵母利用，形成高效的碳源互补机制。例如，*F. sanfranciscensis* TMW 1.1150 在有/无酵母共存时均表现出对麦芽糖的高效利用，且其代谢不受电子受体限制^[10]。

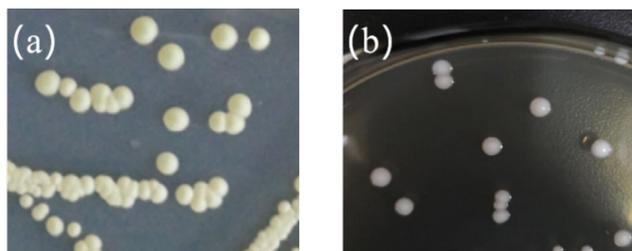


图1 *K. humilis* CBS 5658T (a) 和 *F. sanfranciscensis* Ls-1001 (b) 菌落图^{[6],[11]}

3 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵对面团及馒头品质影响

K. humilis 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵可显著提升面团发酵效率，优化面筋网络结构。同时，该组合应用于馒头中能改善感官、质构与风味，增强营养并延长货架期（图2）。

3.1 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵对面团的影响

K. humilis 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵显著提升面团的产气性能与发酵效率。*K. humilis* 在中低水分面团中展现出比酿酒酵母更高的产气速率及更早的产气峰值时间，但其麦芽糖阴性特性限制了其对底物的利用。而 *F. sanfranciscensis* 通过麦芽糖磷酸化酶分解麦芽糖为葡萄糖-1-磷酸，两者共发酵通过代谢互补实现协同作用：*K. humilis* 利用葡萄糖，*F. sanfranciscensis* 则以麦芽糖为主要碳源，避免了底物竞争^[12]。Rogalski 等^[13] 通过动态发酵实验证实，两菌共发酵时 CO₂ 释放量较单一酵母发酵提升 18%，发酵动力学曲线更稳定。

F. sanfranciscensis 代谢产生的有机酸使面团 pH 降至 3.8~4.0，这一酸性环境具有双重作用：一方面激活小麦蛋白酶促进面筋水解，另一方面通过谷胱甘肽还原酶调控二硫键动态重组，优化面筋网络交联结构，从而同步提升了面团的延展性和弹性。同时，*K. humilis* 通过快速释放 CO₂ 形成均匀气孔结构以改善面团拉伸性能，同时其分泌的 1,3-β-葡聚糖苷酶可降解阿拉伯木聚糖，增加可溶性膳食纤维含量，提升面团持水性和黏弹性^[2]。

3.2 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵对馒头的影响

两菌共发酵显著提升馒头的比容、松软度、硬度和咀嚼性等感官与质构特性。两菌共发酵产生 CO₂、有机酸形成均匀气孔，*F. sanfranciscensis* 产生的胞外多糖可延缓淀粉老化，降低馒头储存过程中的硬度增加速率^[11]，通过产生果聚糖增大馒头体积并降解麦谷蛋白，而 *K. humilis* 则通过优化孔隙结构提升蓬松度，二者协同作用显著改善了馒头的咀嚼性^[14]。

共发酵赋予馒头独特的风味物质。*F. sanfranciscensis* 代谢糖类产生的酸化效应会生成乙酸乙酯、醇类、醛类和酸类，同时其蛋白酶活性促进面筋蛋白分解为小分子肽和游离氨基酸，进一步通过美拉德反应生成风味前体物质^[12]。同时，*K. humilis* 代谢也会产生挥发性酯类，在与乳酸菌共发酵时，可以促进 *K. humilis* 产生吡嗪类和呋喃类物质^[13]，会赋予馒头特有的酸香、烤香和果香。此外，两菌的协同作用可释放结合态酚类化合物，增强抗氧化活性并提升风味层次^[8]。

共发酵有助于增强馒头的营养与功能特性。*F. sanfranciscensis* 的蛋白酶系统可部分水解麸质蛋白，减少致敏性肽段，可用于开发无麸质发酵馒头。郭晶斐等^[14] 利用 *F. sanfranciscensis* Gm4 发酵降低麸质蛋白的致敏性。两菌共发酵产生的短链脂肪酸、氨基酸、酚类化合物和肽会降低馒头的血糖指数，也可以调节肠道菌群发挥益生功能^[1]。

此外，两菌共发酵可激活并分泌植酸酶，显著降解酸面团中的植酸，提升膳食纤维与矿物质的生物利用率^[1]。

馒头储存易老化变硬并滋生微生物，缩短保质期；两菌共发酵产生的有机酸与 *F. sanfranciscensis* 产生的细菌素协同抑菌，延长货架期。

4 结论与展望

本文系统分析了酸面团常见的发酵菌 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 的生物学特征以及共发酵对面团及馒头的综合品质的影响。二者协同发酵不仅改善了馒头的比容、抗老化性和柔软度，还通过降解植酸、降低麸质致敏性及血糖指数提升了营养价值。此外，共发酵产生的有机酸与细菌素有效抑制腐败菌，显著延长了货架期，为传统发酵面食的功能化改进提供了新思路。

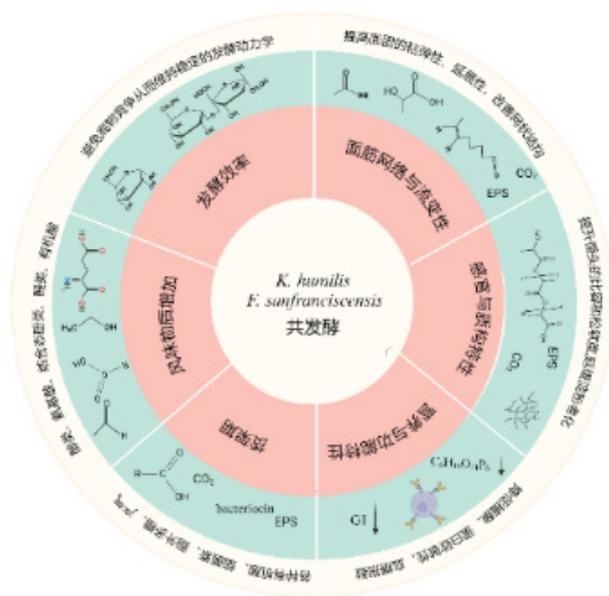


图 2 *K. humilis* 与 *F. sanfranciscensis* 共发酵对发酵面食的影响

参考文献

[1] 张国华, 贺霞霞, 路婷, 等. 旧金山果实乳杆菌生物学特性及其对发酵面食影响的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(01): 431-438.

[2] YANG H, LIN J, HAN X, et al. Functional Characterization of Different *Fructilactobacillus sanfranciscensis* Strains Isolated from Chinese Traditional Sourdoughs [J]. 2024, 13(17): 2670.

[3] DE VUYST L, COMASIO A, KERREBROECK S V J C R I F S, et al. Sourdough production: fermentation strategies, microbial ecology, and use of non-flour ingredients [J]. 2023, 63(15): 2447-2479.

[4] MIELECKI D, DETMAN A, ALEKSANDRZAK-PIEKARCZYK T, et al. Unlocking the genome of the non-sourdough *Kazachstania*

humilis MAW1: insights into inhibitory factors and phenotypic properties [J]. 2024, 23(1): 111.

[5] 王晴晴. 传统发酵剂中酵母菌在全麦馒头面团发酵中的适应性研究 [D], 2023.

[6] WITTWER A E, SICARD D, HOWELL K S J T I M. *Kazachstania humilis* [J]. 2022, 30(10): 1012-1013.

[7] PARK S-H, KIM S, HAHN J-S J A M, et al. Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for the production of isobutanol and 3-methyl-1-butanol [J]. 2014, 98: 9139-9147.

[8] 苏珊, 王玉婷, 吴洁, 等. 酸面团中的优势微生物及其相互作用研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(07): 316-323.

[9] NUOBARIENE L, HANSEN Å S, ARNEBORG N J L-F S, et al. Isolation and identification of phytase-active yeasts from sourdoughs [J]. 2012, 48(2): 190-196.

[10] ROGALSKI E, EHRMANN M A, VOGEL R F. Strain-specific interaction of *Fructilactobacillus sanfranciscensis* with yeasts in the sourdough fermentation [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(6): 1437-1447.

[11] 张国华, 张纬珍, 梁武龙, 等. 一株高产胞外多糖乳酸菌的鉴定及其特性研究 [J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 229-238.

[12] MARTORANA A, GIUFFRÈ A M, CAPOCASALE M, et al. Sourdoughs as a source of lactic acid bacteria and yeasts with technological characteristics useful for improved bakery products [J]. European Food Research and Technology, 2018, 244(10): 1873-1885.

[13] ROGALSKI E, EHRMANN M A, VOGEL R F J E F R, et al. Strain-specific interaction of *Fructilactobacillus sanfranciscensis* with yeasts in the sourdough fermentation [J]. 2021, 247(6): 1437-1447.

[14] 郭晶斐, 贺霞霞, 涂建, 等. 酸面团中优势乳酸菌和酵母菌对麦谷蛋白结构的影响 [J]. 中国酿造, 2022, 41(04): 142-146.