

食品发酵剂研究进展与发展趋势浅析

张程程¹, 翟齐啸¹, 孙志宏², 顾青³, 陈卫^{1*}

(¹ 江南大学食品学院 江苏无锡 214122

² 内蒙古农业大学食品科学与工程学院 呼和浩特 010018

³ 浙江工商大学食品与生物工程学院 杭州 310018)

摘要 食品发酵剂能够通过多种代谢途径影响发酵食品的感官特性、营养价值和益生功能,是发酵食品生产制造的核心。优良性能食品发酵剂的挖掘与制造,对发酵食品产业的高质量发展具有重要意义。本文通过综合文献调研和数据可视化分析,系统梳理当前国内外食品发酵剂研究进展及产业现状,总结食品发酵剂产业面临的挑战并展望未来发展趋势,旨在为我国优良性能食品发酵剂的研发及产业发展提供思路和借鉴。

关键词 食品发酵剂; 优良性能; 研究现状; 发展趋势

文章编号 1009-7848(2024)05-0089-14 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.05.007

随着经济的发展以及居民收入的提高,我国居民的食品消费观念和消费结构发生了显著改变,从追求基本的饱腹向追求高质量的营养转变。发酵食品具有种类多样、风味独特、营养丰富等优良品质^[1],能更好地满足人民群众日益多元化的食物消费需求。发酵食品主要包括发酵乳类食品(如酸奶、奶酪等),发酵肉类食品(如火腿、香肠等),发酵果蔬类食品(如泡菜、酸菜等),发酵谷物类食品(如酒精饮料、食醋等),发酵豆类食品(如酱油、腐乳等)。食品发酵剂是至少含有一种微生物,菌体浓度高,加入原料中可加速和控制发酵食品生产的微生物制剂,菌种主要来自乳酸菌、酵母菌、霉菌等,具有发酵产酸,提供风味物质,蛋白水解,产生生理活性物质等功能,是发酵食品制造的关键,被誉为发酵食品的“芯片”,其历史悠久,可追溯到远古时期。据《尚书·说命篇》记载:“若作酒醴,尔堆曲蘖”,表明早在商周时期人们便使用酒曲酿酒^[2]。北魏时期贾思勰所著《齐民要术》中详细记录了 24 种酿醋方法,其中“粟米、曲作醋法”“秫米神醋法”“大麦醋法”等 10 余种酿造方法需用黄衣(主要是米曲霉)。随着现代食品工业的发展,发酵剂的使用在提升发酵食品品质和制造效率方面

发挥着重要作用,是实现发酵食品工业生产标准化、规模化的关键。优良发酵剂不仅应具有发酵剂的基础活性,还应具备改善食品风味、质地等品质及营养的多元化功能。近年来,优良发酵剂的研究持续得到学术界及产业界的广泛关注,如 2020 年 8 月《Nature Food》的一项研究:基于宏基因组和代谢组数据荟萃分析了奶酪中风味物质与微生物间的关联^[3]。2023 年 12 月《Nature Communication》的一项研究探究了嗜热链球菌与乳酸乳球菌相互作用对奶酪发酵及其风味形成的影响机制^[4]。2020 年某著名企业在中国市场推出 4 款新型乳制品发酵剂,不仅活菌数高、发酵速度快,而且能够提供多元的口味选择。微生物资源是国家基础科学研究和工业化生产应用的重要资源,是国家经济与社会发展的重要战略资源,收集、保护和合理开发利用微生物菌种资源的意义重大,其为优良发酵剂菌种筛选提供了丰富的菌种。

近年来针对食品发酵剂的科研论文成果众多,然而,目前鲜有从科学计量分析的角度来探讨整个食品发酵剂领域的研究进展。本综述通过梳理中国知网(CNKI)和 Web of Science(WoS)核心数据库中食品发酵剂相关文献,结合科学计量分析的方法,系统梳理该领域的研究热点,研究内容演变以及国内外研究机构间的合作网络,旨在揭示食品发酵剂领域最新的研究动态、研究热点和发展趋势;同时总结当前食品发酵剂产业所面

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(32021005)

第一作者: 张程程,男,博士,助理研究员

通信作者: 陈卫 E-mail: chenwei66@jiangnan.edu.cn

面临的挑战,并展望未来的发展趋势,以期为相关研究人员的科研创新工作提供思路和借鉴,助力其科研创新与实践应用的深化。

1 食品发酵剂研究内容及发展现状

1.1 食品发酵剂相关文献发文状况分析

中文文献以中国知网(CNKI)为数据来源,以“食品发酵剂”或“食品发酵菌种”为主题词进行全字段检索,时间限定为2000年1月1日至2024年2月1日,文献类型为学术期刊和硕士、博士学位论文。英文数据来自Web of Science (WoS)核心合集数据库,选择“Food starter culture”“Food

fermentation agent”“Food fermentation starter”“Food leavening agent”“Food fermentation starters”或“Food fermenting agent”为主题词进行搜索,文献类型限定为论文或综述论文,文献发表时间范围限定为2000年1月1日至2024年2月1日。通过检索CNKI数据库和WoS核心合集数据库,得到符合要求的中文文章1 292篇,英文文献4 292篇。2000—2024年食品发酵剂研究领域的历年发文量如图1和图2所示,整体呈现逐年增加的趋势,相关中文文献发文量在2020,2021年和2022年达到高峰,相关英文文献年发文量在2019年以后迅速上升。

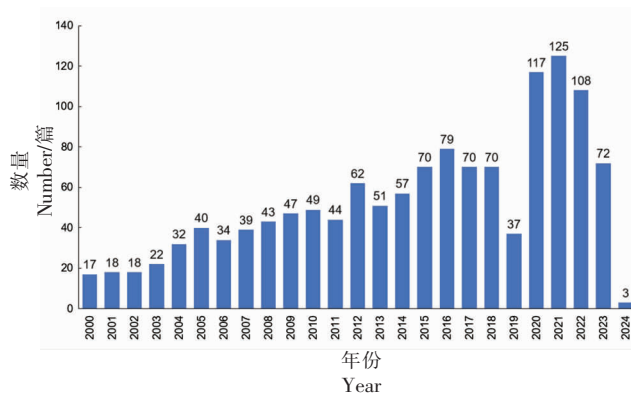


图1 CNKI数据库中“食品发酵剂”相关中文文献年发文量

Fig.1 The annual number of Chinese literature publications related to ‘food starter culture’ in CNKI database

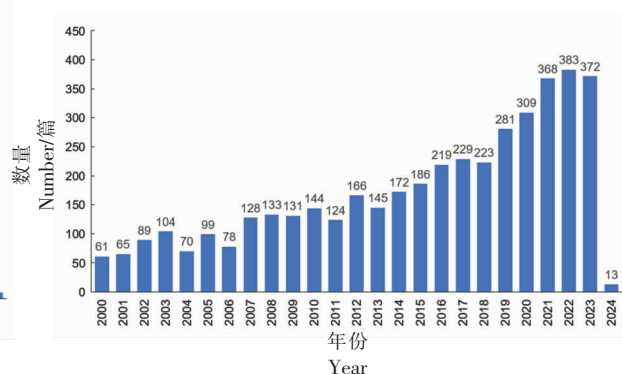


图2 Web of Science数据库中“食品发酵剂”相关英文文献年发文量

Fig.2 The annual number of English literature publications related to ‘food starter culture’ in Web of Science database

1.2 发文机构及其合作关系分析

研究机构的参与情况可以直接反映食品发酵剂领域的科研力量分布、资源储备及合作网络。将CNKI数据库检索到的中文期刊文献导入Citespace软件进行机构发文分布分析,结果如图3所示。CNKI数据库中食品发酵剂相关文献发文机构合作图谱共有512个节点,197条连线,网络密度为0.0015。其中,内蒙古农业大学食品学院以38篇的发文量名列首位;其次是黑龙江八一农垦大学食品学院,发文量达20篇;其它发文量较多的机构包括湖南农业大学食品科学技术学院(18篇)、西南大学食品科学学院(17篇)、四川农业大学食品学院(16篇)、云南农业大学食品科学技术学院(15篇)、中国农业大学食品科学与营养工程

学院(15篇)、东北农业大学食品学院(14篇)、河南科技学院食品学院(11篇)、南京农业大学食品科技学院(11篇)及上海海洋大学食品学院(11篇)。食品发酵剂相关文献共现图谱整体呈现出“小集中,大分散”的趋势。

对WoS数据库中4 292篇食品发酵剂相关英文文章进行发文机构共现分析,如图4所示,合作图谱共有544个节点,684条连线,网络密度0.0046。其中,发文量最多的机构是西班牙国家研究委员会(CSIC),发表文章102篇;其次是江南大学和法国国家农业食品与环境研究院(INRAE),分别发表文章76篇和70篇。从合作关系来看,以江南大学为核心,形成了涵盖国内外多所知名高校的大型合作网络,所合作的院校包括上海交通

大学、北京工商大学、内蒙古农业大学、合肥工业大学、肯塔基大学、新加坡国立大学、河北农业大学、江苏大学、云南农业大学等。此外,从英文文献的发布国家来看,中国学者占很大比例,且发文数

量远高于中文期刊,这说明在食品发酵剂方面,中国的科研人员更倾向于通过高质量的英文论文进行学术交流和成果展示。

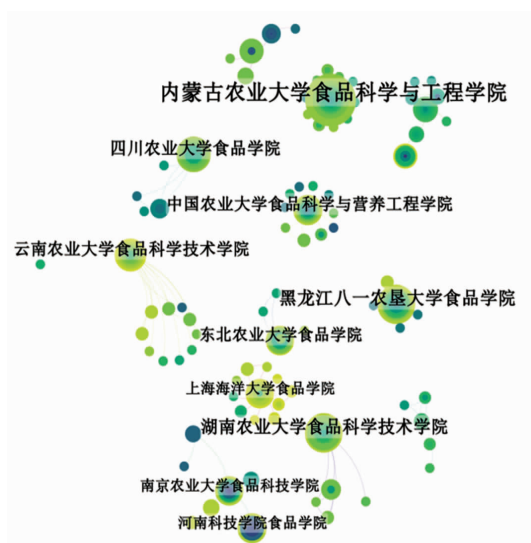


图 3 CNKI 数据库“食品发酵剂”发文机构分布情况

Fig.3 The distribution of issuing institutions of ‘food starter culture’ in CNKI database

1.3 关键词聚类分析

使用 Citespace 软件对检索到的 1 292 篇中文文献进行关键词聚类分析,结果如图 5 所示,关键词聚类图谱共有 509 个网络节点,1 340 条边,聚类平均轮廓值(s 值)为 0.7895,表明该图谱可靠性较高。进一步分析发现,排名前 5 的聚类分别是“#0 发酵”“#1 发酵剂”“#2 乳酸菌”“#3 风味”和“#4 酸奶”,强调了食品发酵剂领域的研究主要以乳酸菌发酵剂发酵酸奶为核心,并在此基础上重点关注风味特性。

在 WoS 核心合集数据库中,对包含“食品发酵剂”(“Food starter culture”“Food fermentation agent”“Food fermentation starter”“Food leavening agent”“Food fermentation starters”或“Food fermenting agent”)关键词的 4 292 篇英文文献进行聚类分析,结果如图 6 和表 1 所示。关键词聚类网络图谱中共有 737 个节点,8 310 条边,聚类平均轮廓值(s 值)为 0.697,表明该聚类图谱具有较高

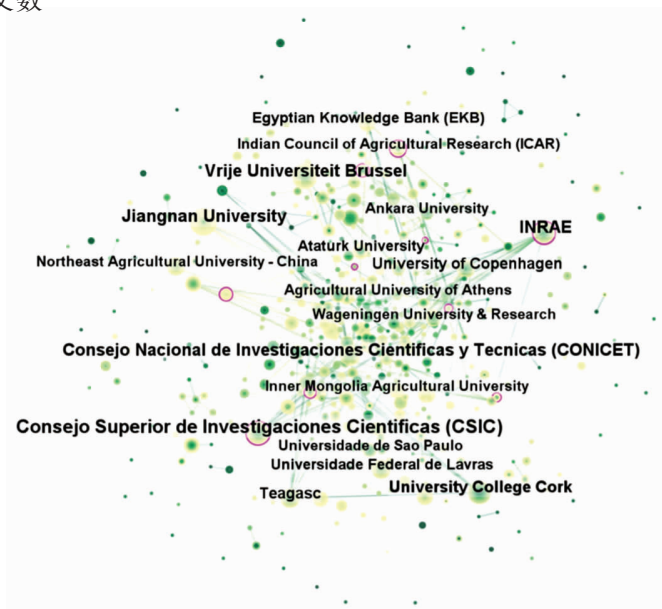


图 4 Web of Science 数据库中“食品发酵剂”发文机构分布情况

Fig.4 The distribution of issuing institutions of ‘food starter culture’ in Web of Science database

信服力。进一步分析发现食品发酵剂相关英文文献聚类图谱中排名前 6 的聚类依次为“#0 *Lactobacillus acidophilus*”“#1 biogenic amines”“#2 acetic acid bacteria”“#3 *Listeria monocytogenes*”“#4 lactic acid bacteria”和“#5 antioxidant activity”,说明发酵剂研究领域在重点关注菌种筛选的同时,还特别重视发酵食品的安全(如控制生物胺等)与功能(如提高抗氧化活性等)需求。

1.4 食品发酵剂突显词分析

突显词分析是一种通过对文献或语料库中关键词的频次统计和趋势分析,来揭示特定主题或领域在一定时间范围内的关注度和研究重点的方法^[5]。通过对 CNKI 数据库中“食品发酵剂”为主题词的相关文章(包括学术期刊、硕士及博士学位论文)进行突显词分析(图 7),发现国内在 2001—2008 年期间食品发酵剂领域对“乳酸发酵”的研究热度较高,为后续发酵乳生产提供了重要的技术支持;食品发酵剂的“应用”在 2005—2014 年成

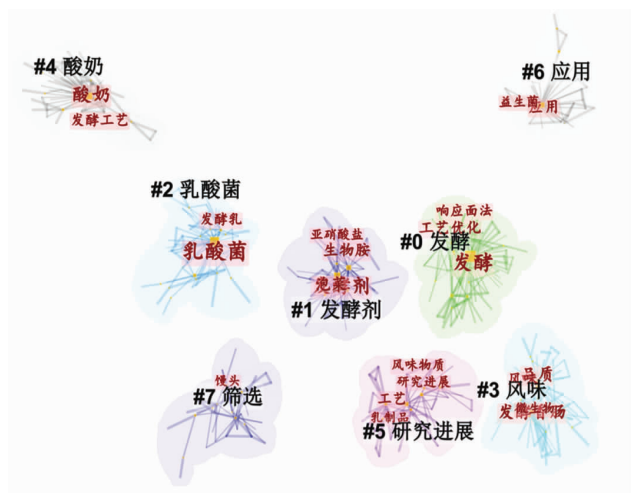


图 5 CNKI 数据库中“食品发酵剂”
相关中文文献关键词聚类图谱

Fig.5 The clustering of keywords in Chinese literatures
related to ‘food starter culture’ in CNKI database

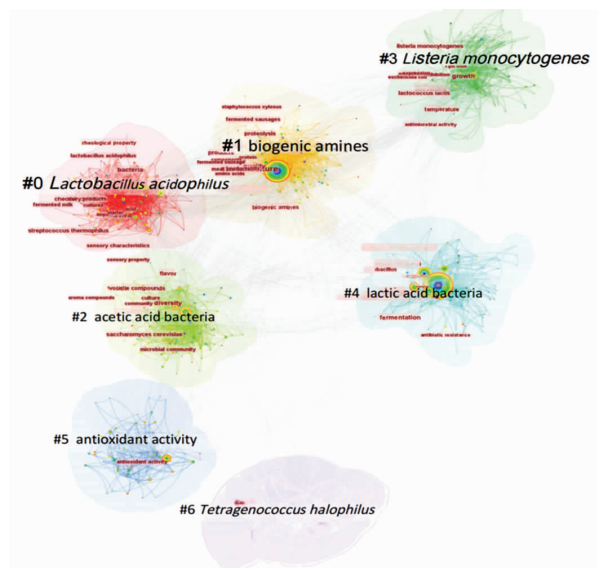


图 6 Web of Science 数据库中“食品发酵剂”
相关英文文献关键词聚类图谱

Fig.6 The keywords clustering of English literatures
related to ‘food starter culture’ in Web of Science database

表 1 WoS 数据库中“食品发酵剂”相关英文文献关键词聚类 Top 8

Table 1 The top 8 keywords clusters in English literatures on the homology of food and medicine in the WoS database

类聚序号	轮廓值	形成年	本聚类高频词
#0	0.699	2008	starter culture, structural properties, greek yoghurt, total solids, stress adaptation, lactic acid bacteria, amino acid content, probiotic interactions, microstructure, volatile compound
#1	0.649	2007	starter culture, consumer acceptance, sorghum beer, fermentation profile, physico-chemical analyses, biogenic amines, wild boar meat, bacterial starter cultures, fat oxidation, sensory preference
#2	0.594	2013	lactic acid bacteria, acetic acid bacteria, cocoa fermentation, fermentation, microbial communities, starter culture, microbial compositions, rice noodle, food innovation, rRNA gene
#3	0.643	2005	lactic acid bacteria, starter culture, microstructure, exposure assessment, brine, <i>Listeria monocytogenes</i> , foodborne pathogens, unpasteurized milk, cheese safety, milk contamination
#4	0.675	2008	lactic acid bacteria, fermented sausages, petrovac sausage, fermentation control, edible mushrooms, starter culture, genetic diversity, <i>Staphylococcus carnosus</i> , multi-locus sequence, population structure
#5	0.686	2015	lactic acid bacteria, sensory analysis, table olives, risk assessment, amino acid content, antioxidant activity, lactic acid fermentation, red cabbage sprouts, air classification, organic acids
#6	0.801	2012	starter culture, biogenic amines, enological potential, type II sourdough, heavy metals, <i>Tetragenococcus halophilus</i> , metabolic response, salt stress, enological potential
#7	1.000	2024	chemical toxin, Chinese fried dough stick, dough rheology, food texture, fried stick, frying, polycyclic aromatic hydrocarbon

为行业的研究热点,原因可能是 2005 年 7 月国家药品监督管理局发布《益生菌类保健食品申报与审评规定(试行)》引起学术界和产业界对益生菌产品应用的高度关注;“酵母菌”和“馒头”相关研究在 2012—2018 年关注度较高;“工艺优化”“风味”“发酵乳”“响应面法”“品质分析”“理化性质”“感官评价”和“质构”等方面的研究自 2018 年以

来一直是食品发酵剂领域的研究热点。然而,尽管“混菌发酵”的研究热度在 2020 年爆发,却在 2021 年后失去了热度。混菌发酵在提升发酵食品稳定性和食品品质方面扮演着关键角色,因此,基于复合发酵剂的混菌发酵技术的开发和研究应当继续被学术界关注与重视。

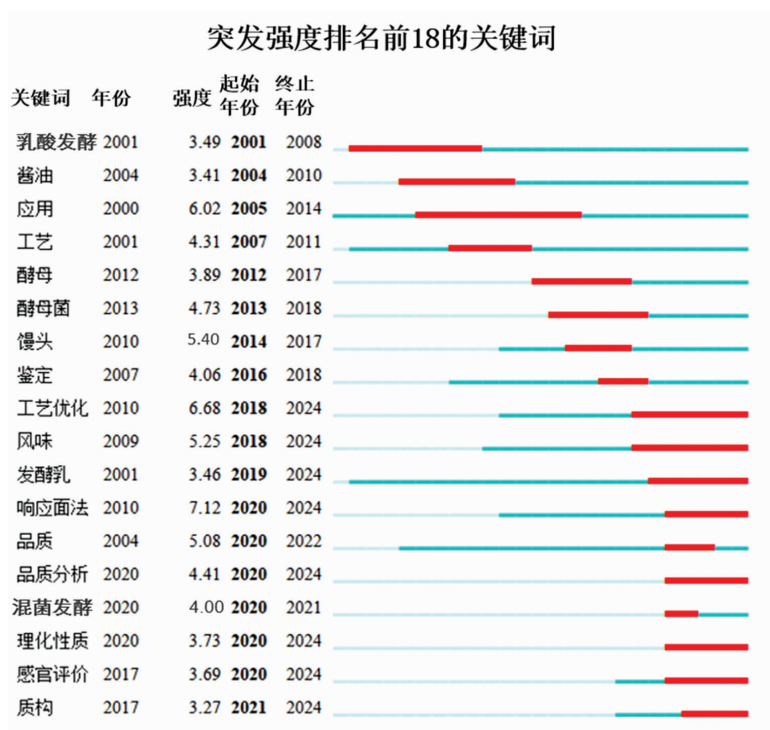


图 7 CNKI 数据库中“食品发酵剂”相关文献突显词分析

Fig.7 The analysis of salient words related to ‘food starter culture’ in CNKI database

基于 WoS 数据库的 4 292 篇英文文献进行突显词分析,食品发酵剂领域排名前 20 的突显词及其突发强度和持续时间如图 8 所示。突发强度排名前 20 的突显词依次为“cheddar cheese”(切达干酪)、“antioxidant activity”(抗氧化活性)、“dry sausage”(干香肠)、“meat products”(肉类产品)、“inhibition”(抑制)、“manufacture”(制造)、“histamine”(组胺)、“gradient gel electrophoresis”(梯度凝胶电泳)、“PCR(聚合酶链式反应)”、“microbial community”(微生物群落)、“impact”(影响)、“starch”(淀粉)、“sensory property”(感官品质)、“microflora”(微生物区系)、“dry sausages”(干香肠)、“*Bifidobacterium*”(双歧杆菌属)、“microbiota”(微生物群)

、“profile”(谱系)、“high-throughput sequencing”(高通量测序)、“*Lactiplantibacillus plantarum*”(植物乳植杆菌)。近几年研究突显度较高的关键词有“抗氧化活性”(antioxidant activity, 突显度 14.3, 2021—2024 年)、“微生物群落”(microbial community, 突显度 8.5, 2022—2024 年)、“感官品质”(sensory property, 突显度 8.08, 2021—2024 年)以及“植物乳植杆菌”(Lactiplantibacillus plantarum, 突显度 7.46, 2021—2024 年)。这些关键词突出体现了行业对食品发酵过程中抗氧化能力、微生物群落结构、食品的感官品质及特定菌种研究的重视,指向了食品科学和食品工业实践中的重要发展趋势。

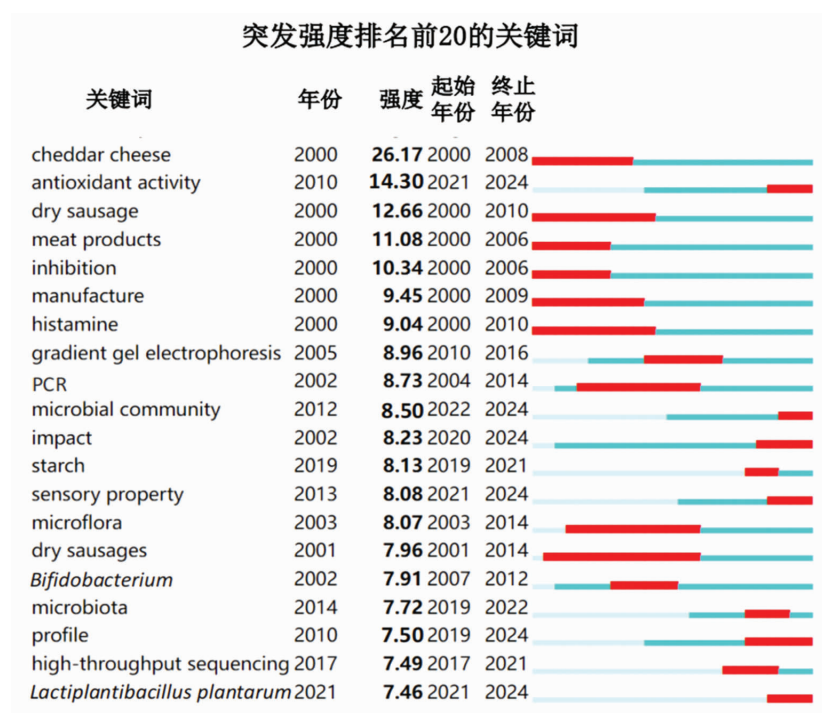


图 8 Web of Science 数据库中“食品发酵剂”相关文献突显词分析

Fig.8 The analysis of salient words related to 'food starter culture' in Web of Science database

1.5 食品发酵剂研究领域的发展历程

CNKI 数据库发文关键词聚类图时序变化如图 9 所示,“发酵”及“发酵剂”相关文献聚类演化过程较丰富,对各聚类有较大的影响,其中与“#0 发酵”聚类关联的文献共有 81 篇,相关研究内容主要涉及工艺优化、响应面法、品质分析、优化、响应面等。袁亚等^[6]探究了不同的菌种、添加量及添加比例对泡菜制作发酵时间和亚硝酸盐含量的影响,通过单因素实验和响应面优化分析确定了最佳菌种组合(植物乳杆菌和干酪乳杆菌)及最佳添加比(2:1),该条件下泡菜的发酵时间及亚硝酸盐含量显著降低。与“#1 发酵剂”聚类关联的文献共有 60 篇,研究内容涉及生物胺、亚硝酸盐、亚硝酸胺、发酵食品等。一项检测 60 余株菌株(来自乳杆菌、链球菌和双歧杆菌等 6 个属)生成生物胺(组胺和酪胺)能力和水平的研究发现,菌种组胺和酪胺的产量分别为 4.32~32.15 mg/L 和 9.22~114.02 mg/L,为发酵剂安全性评估提供了必要数据^[7]。

与“#2 乳酸菌”聚类关联的文献共有 60 篇,研究内容涉及发酵性能、乳酸菌、发酵乳、工艺优化等。石阳阳等^[8]探究 6 种乳酸菌(瑞士乳杆菌、

乳酸乳球菌、干酪乳杆菌、肠膜明串珠菌、嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌)与植物乳杆菌 CCFM8661 协同发酵对发酵乳品质的影响,发现干酪乳杆菌 FQHYN79L1 显著提高了发酵乳抗氧化活性及感官品质,同时促进了植物乳杆菌在发酵乳中的生长,表明协同发酵对改善发酵乳品质及提高益生菌株活菌数具有重要作用。基于关键词聚类时序图分析食品发酵剂相关英文文献不同聚类的发展历程和关联性,结果如图 10 所示,4 292 篇英文文献中,“#0 *Lactobacillus acidophilus*”作为关键词聚类演化过程最为丰富,并对各聚类产生较大影响,有 153 篇文献与“#0 *Lactobacillus acidophilus*”聚类关联,研究内容主要涉及发酵剂、结构特性、氨基酸含量、微观结构、挥发性化合物等。Martin-Diana 等^[9]采用含有嗜热链球菌 ST-20Y、嗜酸乳杆菌 LA-5 和双歧杆菌 BB-12 的益生菌发酵剂(ABT-2)对牛奶进行发酵,添加 3%的乳清浓缩蛋白(WPC)后,可使嗜热链球菌和双歧杆菌的活菌数分别增加 0.3 个和 0.7 个对数单位,提高了发酵乳的表观黏度和凝胶硬度,同时提高了香气、质地、整体接受度等感官评分。与“#1 biogenic

amines”相关联的聚类文献有 137 篇,研究内容主要有生物胺、发酵剂、消费者接受度、理化分析、脂肪氧化、感官偏好等。Shukla 等^[10]通过研究不同质量比[1:1:1,2:1:3,2:2:1]的枯草芽孢杆菌 TKSP24、米曲霉复体和葡枝根霉组成复合发酵剂对大豆发酵酱品质的影响,发现三者质量比例为 2:1:3 时游离氨基酸含量最高,且黄曲霉毒素、组胺等食品安全危害因子含量较低,该研究为开发具有提高发酵食品营养和安全品质的复合发酵剂提供了思路

和借鉴。与“#2 acetic acid bacteria”相关联的聚类文献共有 134 篇,涉及的研究内容主要有乳酸菌、可可发酵、发酵、微生物群落、微生物组成、米粉等。如 Gullo 等^[11]系统综述了传统香醋制造过程中醋酸菌生态、代谢及营养等特性相关研究进展,揭示了发酵过程中发酵基质、微生物群落、氧气等因素对香醋风味的影响,为传统香醋醋酸菌发酵剂的开发提供了依据和参考。

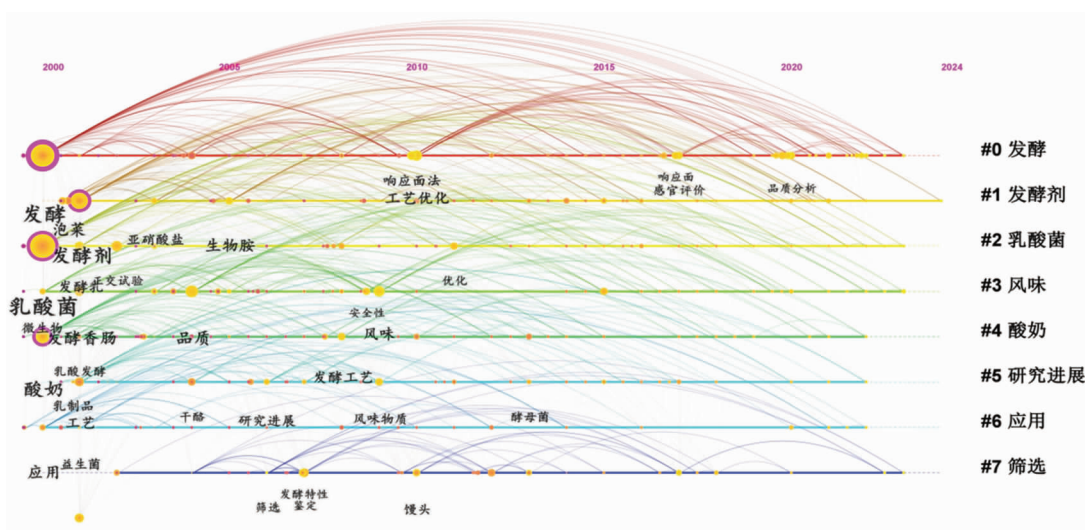


图 9 CNKI 数据库中“食品发酵剂”相关文献关键词聚类时序图

Fig.9 The clustering sequence diagram of keywords related to ‘food starter culture’ in CNKI database

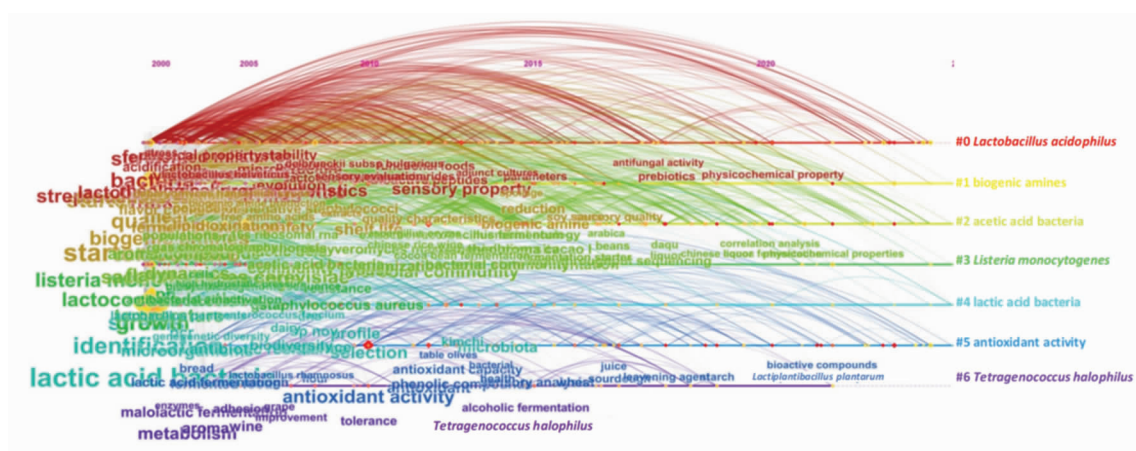


图 10 Web of Science 数据库中“食品发酵剂”相关文献关键词聚类时序图

Fig.10 The clustering sequence diagram of keywords related to ‘food starter culture’ in Web of Science database

2 食品发酵剂领域存在的问题

2.1 优良发酵特性菌株筛选技术落后,高性能和益生特性发酵剂菌株匮乏

优良发酵剂在具备改善发酵食品感官、质地、

营养等品质的生产特性的同时,还具备改善肠道微生态环境,调节免疫等益生功能,并且具有高活力、高稳定性等特点^[12-14]。近年来我国高校、企业和科研院所等机构已在收集保藏发酵菌,建立自有

的菌种库。如内蒙古农业大学建立了全球最大的原创性乳酸菌种质资源库,保藏了包括33个属、141个种和亚种的47 573株乳酸菌。江南大学长期致力于益生菌的菌种资源挖掘、功能解析和产业化应用,采样地遍布中国29省131县区,共收集健康人体粪便、发酵食品等样本8 000余份,分离菌种25 000余株,对其中8 000余株菌株进行了全基因组测序,极大推动了中国益生菌产业的高质量发展。然而,我国发酵剂开发尚处于起步阶段,缺少具有自主知识产权的优良发酵剂菌株,发酵剂种类、质量等总体与欧美发达国家存在较大差距。如丹麦乳业巨头研制的一款酸奶发酵剂可生产6种不同黏度和风味强度的发酵乳制品,满足不同风味要求的消费者嗜好;产品除具备传统发酵剂生产性能外,还具备使发酵乳制品中保持高双歧杆菌活菌数特性,同时具有抑制腐败菌,改善胃肠功能失调的功效^[15]。优良发酵剂的创制首先要自然发酵食品中筛选获得大量具有优良生理特性的菌株^[16]。虽然我国微生物菌种资源丰富,但是菌种资源缺乏有效的收集、保护,加之筛选方法和加工技术落后,导致具有自主知识产权的知名发酵剂匮乏,亟待发掘“本土化”优良生产、益生特性的发酵剂菌株。

2.2 发酵剂菌种有益代谢产物制备技术亟待提升

发酵剂菌种有益代谢产物(如维生素、 γ -氨基丁酸、短链脂肪酸等)是其发挥益生功效重要效应分子^[17-20]。近年来,欧美、日本等发达国家纷纷布局发酵剂菌种有益代谢物的挖掘及其产业化。如美国某公司开发出首款针对体重管理的后生元制剂-灭活BPL1(双歧杆菌乳亚种CECT8145)制剂^[21];日本某公司开发出通过激活浆细胞样树突状细胞(pDC),调节宿主免疫的副干酪乳杆菌MCC1849后生元制剂^[22-23];日本某公司基于食淀粉乳杆菌CP1563代谢产物开发了具有减少体脂,降低胆固醇的功效产品^[24]。我国科研工作者认识到发酵剂菌种有益代谢产物的重要作用,利用功能物质分离鉴定及功效评价等技术对益生菌种有益代谢产物开展了相关研究,然而,发酵剂菌种产生的代谢产物种类、活性、功效等具有显著的菌种/株差异,面临有益代谢产物分离纯化、结构表征困难等技术难题,距离大规模产业化仍有一段

距离。

2.3 高活性、高稳定性生态复合发酵剂亟需开发

高活性是指发酵过程中能够迅速利用底物进行生长和代谢,提高产物的生成速率和产量。高稳定性是指在储存运输、发酵过程中能够保持稳定的生物活性和功能。这种发酵剂在发酵过程中能够快速、高效地转化原料,并在不利的环境条件下具有较强的抗逆性,从而能够提高发酵产品的产量和质量。针对发酵剂菌种的协同共生机制,已有国内外科研机构尝试采用基因组和代谢组等多组学技术进行研究,目前尚处于初级阶段,相关机制仍未明晰。近年来,国内科研团队在发酵剂菌种代谢调控、精准筛选和发酵剂制备等关键技术方面进行了大量的研究工作,开发出一些具有自主知识产权的发酵剂菌株,打破了国外技术与产品的市场垄断,增强了企业核心竞争力,然而仍存在缺少高活性、高稳定性优良发酵剂菌株的问题。

2.4 多元化特色食品发酵剂制造技术亟需研制

通过发酵剂菌种选择和加工技术优化实现发酵食品品质的个性化设计,进一步通过对发酵过程精准调控实现特色发酵食品高效制造是发酵食品未来发展趋势。国际乳业巨头已经布局高端特色发酵乳产业,可根据个人营养需求定制个性化特色功能发酵乳。我国发酵食品制造工业尚未从根本上摆脱传统加工经验的束缚,与发达国家先进的制造技术存在较大差距,存在发酵剂种类与益生功效单一,核心技术相对落后以及产品同质化严重的问题,难以满足人们日益多元化的食物消费需求。多层面探索发酵食品与健康关联,寻找能够促进人体健康的发酵食品源活性物质,通过分子生物学与多组学等技术阐明其功效机制,进一步阐明产有益代谢产物菌株的生物学特征,同时探索基于发酵剂菌种及其代谢物精准调控的多元发酵食品制造技术,为建立种类多样、风味独特、营养丰富的特色发酵食品开发提供策略。

3 食品发酵剂未来发展趋势

3.1 优良生产、益生特性发酵剂菌种的生物学表征

食品发酵是通过所需微生物生长及酶作用转化食品成分生产食品或饮料的过程,发酵体系中

的菌群结构组成、产生的代谢物等因素共同决定了最终产品的质地、风味、营养和安全性等特性^[25]。因此,对发酵剂菌种的生物学特性(如生理特性、代谢特性、抗逆性等)进行表征,可更好地筛选优良菌种用于发酵生产,有助于发酵工艺的优化及功能性产品的开发。1)生理特性分析:包括菌种的生长速率、适宜温度、pH值范围、氧气需求量等,了解菌种的生理特性有助于确定其在不同条件下的生长和代谢能力。2)代谢特性探究:研究菌种的代谢途径、代谢产物、酶系统等,通过代谢途径和代谢产物的分析,可以确定菌种的主要代谢途径和其对底物的利用能力及产生的有益代谢产物(如有机酸、维生素等)。3)耐胁迫特性分析:研究菌种对不利环境因素的适应能力,如高温、低温、酸碱度、盐浓度等,了解菌种的耐胁迫特性有助于确定其在实际应用中的稳定性。4)益生特性评估:如果菌种被认为具有益生特性,如对人体健康有益的活性代谢产物的产生,对肠道菌群的调节能力等。

食品微生物种类和数量繁多,不同菌种/株间生理表型差异大,这为筛选具有优异特性的菌株带来了极大的挑战。传统筛选方法虽然能够识别出具备优良生产和益生特性的发酵剂菌株,但是往往工作量巨大且效率低下,亟需建立高通量靶向筛选方法。近年来,《Cell》等顶级期刊及其子刊研究成果显示,发酵剂菌株的生理特性、益生功效与其特定的功能基因(簇)密切相关^[18,26],这提示可从遗传背景角度预测并锁定具有优良生产、益生特性的发酵剂菌株。因此,深入解析不同潜在发酵剂菌株的遗传背景、生理表型和功能特性差异规律,明确特征基因组与微生物优良生产、发酵特性的关联机制,可为优良发酵剂菌株的高效筛选提供靶标和方向。如利用UHPLC-QE-MS等技术手段分析不同菌种/株代谢食品基质(如糖类、蛋白质、脂肪等)产风味物质(如醛类、酮类、酯类等)、营养物质(如氨基酸、核苷酸、短链肽等)的能力差异,结合多组学联用技术和生物信息学方法,解析与菌种/株特定代谢物产生相关的潜在功能基因(簇)、代谢途径与调控机制;进一步利用CRISPR、同源重组等基因编辑技术进行验证,进而锁定与菌株生产特性相关关键基因(簇)。通过体外模型、

动物模型和临床试验评估不同发酵剂菌株特定功效差异,结合比较基因组学方法锁定影响益生功效的潜在功能基因(簇),进一步使用基因敲除方法和无菌鼠模型进行验证,确定影响菌株功效的功能基因(簇),进而为具有特定益生功效的菌株高效选育提供分子靶标。

3.2 发酵剂菌种有益代谢产物的功能解析及分子调控

食品发酵过程中产生的大量有益代谢产物(如 γ -氨基丁酸、维生素等)有利于增强发酵食品的营养价值^[1,27]。不同种类或结构的代谢产物益生功效可能表现出显著差异,其产生具有菌株特异性。因此,解析发酵剂菌种特征代谢产物及其功能,探究有益代谢产物、菌体和底物的调控机制及分子调控规律,可为高产有益代谢产物菌种挖掘提供理论基础。

基于发酵菌种基因组大数据,使用Anti-SMASH、BiG-SLiCE等生物信息学软件,结合MIBiG数据库预测有益代谢产物的生物合成基因簇(BGC)及其生物活性^[19]。采用离子交换、凝胶/亲和层析等集成技术,对特征代谢产物进行分离纯化和结构表征,进一步通过体外肠道模拟、动物实验为一体的功能评价模型,阐明发酵剂菌种有益代谢产物发挥功效的量效关系。

此外,通过在基因组及代谢产物层面探究发酵剂菌种发酵过程中菌体、有益代谢产物和底物之间的动态关系,能够明确与有益代谢产物合成及调控相关的功能基因和代谢通路;通过构建菌体生长、产物生成和底物消耗动力学模型,探究pH值、营养基质和辅酶等因子对菌种合成代谢物的调控规律,从而实现有益代谢产物的定向调控。

以获取高产GABA菌种为例,根据基因组数据,通过比较基因组学方法确定菌种GABA合成相关的*gad*操纵子,包括GABA生物合成的关键基因*gadA*和*gadB*,以及负责GABA在细胞膜上转运功能的基因*gadC*;通过基因组分析确定短乳杆菌是乳酸菌中唯一携带完整*gad*操纵子的菌种。体外试验发现短乳杆菌NCL912的GABA产量为(205.8±8.0)g/L^[28],而不具备该操纵子的植物乳杆菌KCTC3103的GABA产量仅为0.67g/L^[29]。此外,探究了不同浓度(0,10,20,30,40,50,100

$\mu\text{mol/L}$ 的磷酸吡哆醛(PLP)对短乳杆菌 RK03 生产 GABA 的影响,发现培养基中 PLP 浓度为 $10 \mu\text{mol/L}$ 和 $20 \mu\text{mol/L}$ 时 GABA 的产量最高^[30]。

3.3 复合发酵剂菌种群体共生和协同增效的物质基础解析

复合发酵剂菌种群体共生和协同作用可促进菌种生长、优化代谢产物生成,从而提高整体发酵效率和改善食品品质,还可通过维持微生物群落的稳定性增强产品稳定性^[31-32]。

复合发酵剂菌种群体共生和协同增效的物质基础涉及多方面的生物化学和微生物学机制,主要包括以下内容:1)代谢途径互补:不同菌种可能具有不同的代谢途径和酶系统,这些途径在底物转化和代谢产物生成中相互补充,从而增加了总体代谢能力。2)代谢产物互用:某些菌种分解底物产生的代谢产物可能是其它菌种生长所需的底物,这种共生关系促进了底物的完全利用,减少了代谢产物的积累。3)酶的协同作用:不同菌种分泌的酶可能具有互补功能,共同作用于底物的降解或转化,从而加速反应速率。4)共生物质互换:不同菌种之间可能通过分泌物质或者细胞间连接结构进行物质交换,如营养物质、信号分子等,这种共生交换促进了菌种之间的相互协调和生长调控。5)环境因子调节:共生关系可能使菌种对环境因子的适应能力增强,如某些菌种能产生抗氧化物质或者表面活性剂,帮助其它菌种更好地适应环境压力。

复合发酵剂菌种群体共生和协同增效主要取决于微生物间正向的相互作用,如交叉喂养、群体感应等。1)交叉喂养。交叉喂养是指菌种/株利用其它菌种/株分泌的代谢产物(包括碳源、氮源、氨基酸、维生素等生长因子)促进自身生长的代谢互养关系^[33]。保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌复合发酵剂在牛奶发酵过程中的协同共生是典型的交叉喂养模式^[34],嗜热链球菌的蛋白酶(*prtS*)酪蛋白降解能力较弱,不能直接从牛奶体系中获得生长所需的足够氨基酸,保加利亚乳杆菌表现出较强的蛋白水解能力,可为嗜热链球菌提供生长所需的氨基酸(如组氨酸、蛋氨酸和脯氨酸)、小分子肽等,而大多数保加利亚乳杆菌缺乏丙酮酸-甲酸裂解酶以及叶酸合成相关酶,因此无法合成叶酸、甲

酸和吡啶等菌种生长所需的物质。嗜热链球菌具有较高的丙酮酸-甲酸裂解酶活性以及完整的叶酸合成途径,可为保加利亚乳杆菌提供这些必需物质^[34]。2)群体感应。群体感应是一种由自诱导物介导的菌种/株群体交流现象。某些微生物产生信号分子并释放到环境中,当其浓度达到一定阈值时,将触发细胞响应信号分子,进而特异性激活下游基因表达。这种相互作用方式影响着微生物群落之间的关系^[35]。这种信号分子在不同菌种中具有差异,如*N*-酰基-高丝氨酸内酯(AHL)存在于革兰氏阴性菌中^[36],自诱导肽(乳酸链球菌肽、植物乳杆菌素等)和呋喃糖基硼酸盐存在于革兰氏阳性菌中^[37],酵母中检测到的信号分子主要是一些芳香醇,如法尼醇、色胺醇和酪醇等物质^[35]。这些信号分子介导的群体感应通过促进细胞自溶,提高菌株环境胁迫耐受性等作用,在发酵剂之间的相互作用中发挥着重要作用,如 AI-2 被证明可通过提高嗜热链球菌的耐酸性和代谢速率增强与保加利亚乳杆菌的相互作用^[38]。

由于每种菌株都具有独特的代谢潜力,产生代谢物的种类、数量、时间等具有差异,因此复合发酵剂菌株间相互作用的存在和强度取决于菌株的特定组合^[34]。未来研究使用人工智能技术构建多菌株协同发酵代谢共生网络,结合转录组学、代谢组学等手段解析不同种菌株协同发酵过程中基因表达调控、特征代谢物、信号分子等物质变化规律,基于群体感应、交叉喂养等相互作用探究复合食品发酵剂群体共生和协同增效物质基础,为优良复合发酵剂的研创提供理论基础。

3.4 特色发酵食品的品质形成机制和定向调控

特色发酵食品的品质形成过程是微生物通过代谢食品基质中蛋白质、脂质和碳水化合物等生成独特风味及营养物质的过程,微生物种类及其代谢产物的多样性是影响该过程的核心因素^[3-4,39]。为了实现特色发酵食品品质的定向调控,首先需要明确在自然接种条件下特色发酵食品的品质形成机制,即发酵微生物如何形成独特的微生物群落并进行精准代谢^[4]。其次,由于发酵食品中原有的微生物群落具有复杂性高,稳定性差和功能冗余等缺陷,容易造成发酵产品品质的波动^[3,40],通过特征微生物菌种的选择与重组构建复合发酵剂

进行发酵,对提高发酵食品品质的定向调控至关重要。

发酵食品的品质形成机制和定向调控涉及多个方面的因素,包括原料选择、发酵菌种、发酵条件、生产工艺等。1)菌种选择:发酵食品的菌种是影响品质的关键因素之一,选择合适的发酵菌种可以通过其代谢产物、酶系统等特性来调控食品的风味、口感、营养成分等;菌种的种类和比例会影响到发酵过程中的代谢产物及其相互作用,从而影响到最终产品的品质。2)发酵条件:控制发酵条件是调控发酵食品品质的关键,包括温度、湿度、pH值、氧气含量等因素都会影响菌种的生长和代谢活性,进而影响产品的质地、口感、营养成分等。3)原料种类:不同的原料具有不同的成分和特性,对发酵食品的品质也会产生重要影响,选择优质的原料,并根据不同的发酵工艺要求进行加工和处理,可以改善产品的口感、颜色、香味等。4)辅助发酵剂:有些特色发酵食品需要添加辅助发酵剂,如酵母、乳酸菌、曲霉等,来促进发酵过程和调控产品品质;合理选择发酵剂的种类和比例,可以增强产品的特色风味和营养成分。5)发酵过程控制:对发酵过程进行严密控制是确保产品品质的关键,包括发酵时间、发酵温度、搅拌速度等参数的调控,都会影响到产品的发酵程度和最终品质。6)微生物群落动态调控:发酵食品的微生物群落动态变化对产品品质有重要影响,通过合理设计发酵工艺,可以控制不同阶段的微生物群落组成,从而实现产品品质的定向调控。

在基于食品发酵剂实现特色发酵食品品质的定向调控方面,首要任务是在多组学联合分析的框架下,深入探索特色发酵食品的微生物群落结构及其功能,以及这些群落的演替规律。借助对酶系、菌系和物系之间相互作用的深入解析,揭示核心功能微生物群与食品品质之间的关联。在此基础上,探究影响复合发酵剂介导的食品发酵的环境因素(如湿度、pH值、氧气和温度等)和生物因素(如初始微生物丰度、延滞期和微生物间相互作用等),并通过模拟发酵和数学建模分析重组复合发酵剂菌种的最佳组成比例和最适环境因素。Wang等^[41]使用16S rRNA测序技术、非靶代谢组学技术结合相关性分析等统计学方法鉴别出白酒

发酵过程中产特定风味化合物的核心微生物群,并通过复合发酵剂菌群在白酒发酵中重现该风味化合物,实现了对发酵食品风味的定向调控。这一成果不仅展现了定向调控发酵食品品质的潜力,也为食品科学领域带来了新的研究思路和技术路径。

综合分析国内外最新研究发现,乳酸菌发酵剂是食品发酵领域研究的核心。筛选具有优良生产、益生特性发酵剂菌种,开发多菌株协同作用的复合发酵剂是食品发酵工业的发展趋势。在发酵剂制造技术方面,我国与发达国家尚存在一定差距,存在发酵剂种类与益生功效单一,核心技术相对落后以及产品同质化严重等问题,亟需加大投入,开发具有自主知识产权的乳酸菌发酵剂,为我国发酵食品行业的高质量发展提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] MUKHERJEE A, BRESELGE S, DIMIDI E, et al. Fermented foods and gastrointestinal health: Underlying mechanisms[J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2023, 21(4): 248-266.
- [2] 周恒刚. “若作酒醴,尔惟曲蘖”试解[J]. *酿酒科技*, 1999, 95(5): 22-23.
ZHOU H G. Discussion on ‘Making liquor and drink only by koji and rice malt’[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 1999, 95(5): 22-23.
- [3] WALSH A M, MACORI G, KILCAWLEY K N, et al. Meta-analysis of cheese microbiomes highlights contributions to multiple aspects of quality[J]. *Nature Food*, 2020, 1(8): 500-510.
- [4] MELKONIAN C, ZORRILLA F, KJÆRBØLLING I, et al. Microbial interactions shape cheese flavour formation[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 8348.
- [5] HUANG L, ZHOU M, LV J, et al. Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119908.
- [6] 袁亚, 池金颖, 黄丹丹, 等. 人工接种乳酸菌对泡菜感官品质和亚硝酸盐含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(7): 119-122.
YUAN Y, CHI J Y, HUANG D D, et al. Effect of lactic acid bacteria inoculated on sensory qual-

- ity and nitrite concentration of pickles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(7): 119–122.
- [7] 田丰伟, 孟甜, 丁俊荣, 等. 蔬菜发酵剂乳酸菌产生生物胺的检测与评价[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 241–245.
- TIAN F W, MENG T, DING J R, et al. Detection and evaluation of biological amine produced by lactic acid bacteria for vegetable fermentation[J]. Food Science, 2010, 31(24): 241–245.
- [8] 石阳阳, 江远智, 李瑞, 等. 协同发酵生产植物乳杆菌发酵乳及其特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(11): 8–13.
- SHI Y Y, JIANG Y Z, LI R, et al. *Lactobacillus plantarum* fermented milk manufactured by co-fermentation and its properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(11): 8–13.
- [9] MARTÍN-DIANA A B, JANER C, PELÁEZ C, et al. Development of a fermented goat's milk containing probiotic bacteria[J]. International Dairy Journal, 2003, 13(10): 827–833.
- [10] SHUKLA S, BAHUGUNA A, PARK H K, et al. Effect of *Rhizopus nigricans* (*Rhizopus stolonifera*)-based novel starter culture on quality and safety attributes of doenjang, a traditional Korean soybean fermented food product[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1081.
- [11] GULLO M, GIUDICI P. Acetic acid bacteria in traditional balsamic vinegar: Phenotypic traits relevant for starter cultures selection[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 125(1): 46–53.
- [12] HOLZAPFEL W H. Appropriate starter culture technologies for small-scale fermentation in developing countries[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 75(3): 197–212.
- [13] PASOLLI E, DE FILIPPIS F, MAURIELLO I E, et al. Large-scale genome-wide analysis links lactic acid bacteria from food with the gut microbiome[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2610.
- [14] DANIEL N, NACHBAR R T, TRAN T T T, et al. Gut microbiota and fermentation-derived branched chain hydroxy acids mediate health benefits of yogurt consumption in obese mice[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1343.
- [15] 关加怀. 酸奶发酵剂研究进展[J]. 食品工业科技, 1991, 12(2): 35–36.
- GUAN J H. The current status in yoghurt fermentation agent research[J]. Science and Technology of Food Industry, 1991, 12(2): 35–36.
- [16] HOLZAPFEL W. Use of starter cultures in fermentation on a household scale[J]. Food Control, 1997, 8(5/6): 241–258.
- [17] PLATTEN M, NOLLEN E A, RÖHRIG U F, et al. Tryptophan metabolism as a common therapeutic target in cancer, neurodegeneration and beyond[J]. Nature Reviews Drug discovery, 2019, 18(5): 379–401.
- [18] ZHANG C C, YU L L, MA C C, et al. A key genetic factor governing arabinan utilization in the gut microbiome alleviates constipation[J]. Cell Host & Microbe, 2023, 31(12): 1989–2006.
- [19] DU R B, XIONG W, XU L, et al. Metagenomics reveals the habitat specificity of biosynthetic potential of secondary metabolites in global food fermentations[J]. Microbiome, 2023, 11(1): 115.
- [20] DIZMAN N, MEZA L, BERGEROT P, et al. Nivolumab plus ipilimumab with or without live bacterial supplementation in metastatic renal cell carcinoma: A randomized phase 1 trial [J]. Nature Medicine, 2022, 28(4): 704–712.
- [21] PEDRET A, VALLS R M, CALDERÓN-PÉREZ L, et al. Effects of daily consumption of the probiotic *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* CECT 8145 on anthropometric adiposity biomarkers in abdominally obese subjects: A randomized controlled trial[J]. International Journal of Obesity, 2019, 43(9): 1863–1868.
- [22] MARUYAMA M, ABE R, SHIMONO T, et al. The effects of non-viable *Lactobacillus* on immune function in the elderly: A randomised, double-blind, placebo-controlled study[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2016, 67(1): 67–73.
- [23] ARAI S, IWABUCHI N, TAKAHASHI S, et al. Orally administered heat-killed *Lactobacillus paracasei* MCC1849 enhances antigen-specific IgA secretion and induces follicular helper T cells in mice[J]. PLoS One, 2018, 13(6): e0199018.
- [24] NAKAMURA F, ISHIDA Y, AIHARA K, et al. Effect of fragmented *Lactobacillus amylovorus* CP1563 on lipid metabolism in overweight and mildly obese individuals: A randomized controlled trial[J]. Microbial Ecology in Health and Disease,

- 2016, 27(1): 30312.
- [25] MARCO M L, SANDERS M E, GÄNZLE M, et al. The international scientific association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods[J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2021, 18(3): 196–208.
- [26] VATANEN T, ANG Q Y, SIEGWALD L, et al. A distinct clade of *Bifidobacterium longum* in the gut of Bangladeshi children thrives during weaning [J]. *Cell*, 2022, 185(23): 4280–4297.
- [27] ESTRUCH R, LAMUELA-RAVENTÓS R M. Cardiovascular benefits of fermented foods and beverages: Still up for debate[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2023, 20(12): 789–790.
- [28] WANG Q, LIU X H, FU J H, et al. Substrate sustained release-based high efficacy biosynthesis of GABA by *Lactobacillus brevis* NCL912[J]. *Microbial Cell Factories*, 2018, 17(1): 1–8.
- [29] BINH T T, JU W T, JUNG W J, et al. Optimization of gamma-aminobutyric acid production in a newly isolated *Lactobacillus brevis* [J]. *Biotechnol Lett*, 2014, 36(1): 93–98.
- [30] WU C H, HSUEH Y H, KUO J M, et al. Characterization of a potential probiotic *Lactobacillus brevis* RK03 and efficient production of γ -aminobutyric acid in batch fermentation[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(1): 143.
- [31] PÉREZ-DÍAZ I M, HAYES J, MEDINA E, et al. Reassessment of the succession of lactic acid bacteria in commercial cucumber fermentations and physiological and genomic features associated with their dominance[J]. *Food Microbiology*, 2017, 63: 217–227.
- [32] WANG Y Y, ZHANG C H, LIU F S, et al. Ecological succession and functional characteristics of lactic acid bacteria in traditional fermented foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(22): 5841–5855.
- [33] MATAIGNE V, VANNIER N, VANDENKOORN-HUYSE P, et al. Microbial systems ecology to understand cross-feeding in microbiomes[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 780469.
- [34] SIEUWERTS S. Microbial interactions in the yoghurt consortium: Current status and product implications [J]. *SOJ Microbiology & Infectious Diseases*, 2016, 4(2): 1–5.
- [35] JOHANSEN P, JESPERSEN L. Impact of quorum sensing on the quality of fermented foods[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2017, 13: 16–25.
- [36] COQUANT G, GRILL J P, SEKSIK P. Impact of *N*-acyl-homoserine lactones, quorum sensing molecules, on gut immunity [J]. *Frontiers in Immunology*, 2020, 11: 1827.
- [37] PRAZDNOVA E V, GOROVTSOV A V, VASILCHENKO N G, et al. Quorum-sensing inhibition by Gram-positive bacteria[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(2): 350.
- [38] MENG F Q, ZHAO M W, LU Z X. The LuxS/AI-2 system regulates the probiotic activities of lactic acid bacteria[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 127: 272–279.
- [39] SOMERVILLE V, BERTHOUD H, SCHMIDT R S, et al. Functional strain redundancy and persistent phage infection in Swiss hard cheese starter cultures [J]. *The ISME Journal*, 2022, 16(2): 388–399.
- [40] JIN G Y, ZHU Y, XU Y. Mystery behind Chinese liquor fermentation[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 63: 18–28.
- [41] WANG S L, WU Q, NIE Y, et al. Construction of synthetic microbiota for reproducible flavor compound metabolism in Chinese light-aroma-type liquor produced by solid-state fermentation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(10): e03090–18.

An Overview and Analysis of Current Status and Trends in Food Fermentation Agents

Zhang Chengcheng¹, Zhai Qixiao¹, Sun Zhihong², Gu Qing³, Chen Wei^{1*}

¹*School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

²*School of Food Science and Technology, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018*

³*College of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018*

Abstract Food starters can affect the sensory properties, nutritional value, and healthy beneficial functions of fermented

foods through a variety of metabolic pathways. They are the core of fermented food production and manufacturing. The excavation and manufacturing of food starters with excellent performance are important to the high-quality development of the fermented food industry. The status of the food starter research and industry is systematically reviewed through comprehensive literature research and data visualization analysis. This study summarized and looked forward to the challenges faced by the food starter industry and future development trends, aiming to provide ideas and references for the research and development and industrial development of high-performance food starters in China.

Keywords food starter cultures; excellent performance; research status; future trends