

生物工程在食品领域的研究与应用进展

罗正山^{1,2,3}, 徐铮^{1,2}, 李莎^{1,2}, 王瑞^{1,2}, 续晓琪^{1,2}, 徐虹^{*1,2}

(1. 南京工业大学 食品与轻工学院, 江苏 南京 211816; 2. 南京工业大学 材料化学工程国家重点实验室, 江苏 南京 211816; 3. 南京轩凯生物科技股份有限公司, 江苏 南京 211816)

摘要: 随着人民生活水平的改善,对食品品质的要求不断提升,食品产业必须引入先进技术和理念才能应对新时代的市场需求。生物工程作为食品产业的核心技术之一,对食品原料加工、食品添加剂开发、食品防腐技术革新等产生重大影响。随着“健康中国 2030”计划的实施,生物工程将在食品领域中扮演更加重要的角色,作者针对近年来食品生物工程领域的研究进展进行综述,为相关产业升级提供借鉴。

关键词: 生物工程;食品工业;健康中国 2030;产业升级

中图分类号:Q 819;TS 2 文章编号:1673-1689(2020)09-0001-05 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.09.001

Research and Application of Bioengineering in Food Field

LUO Zhengshan^{1,2,3}, XU Zheng^{1,2}, LI Sha^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, XU Xiaoqi^{1,2}, XU Hong^{*1,2}

(1. College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Nanjing Shineking Biotech Co., Ltd, Nanjing 211816, China)

Abstract: With the development of people's living standard, requirement for food quality has improved continuously. New technologies and concepts should be introduced to food industry, so as to fulfill the modern commercial markets. Bioengineering is the key technology of food industry, showing great effects on food raw material processing, development of food additives, and technical innovation of food antisepsis. With the implementation of the 'Healthy China 2030' plan, bioengineering will play a more important role in future. This paper summarized recent research advances in food bioengineering, which might shed light on relevant industrial upgrading in this field.

Keywords: bioengineering, food industry, healthy China 2030, industrial upgrading

食品工业是“为耕者谋利、为食者造福”的传统民生产业,在实施制造强国战略和推进健康中国建设行动中具有重要地位^[1]。食品生物工程是食品工业的重要组成部分,既包括了现代生物技术在食品原辅料制备、食品加工中的应用,也囊括了食品发

酵和酿造等传统生物转化过程^[2]。生物反应工程、合成生物学、蛋白质工程、细胞工程等诸多前沿生物技术的发展,也对现代食品生物工程的快速发展起到了极大的推动作用^[3-4]。由于生物工程在食品领域的重要性和巨大产业价值,中国、美国、欧盟和日本

收稿日期:2020-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(21878152,21776133);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)3049);中国博士后科学基金资助项目(2020M671466);江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z115);江苏省高等学校自然科学研究项目(20KJB530016);江苏省自然科学基金项目(BK20171010);江苏省先进生物制造协同创新中心项目(XTB1804)。

* 通信作者:徐虹(1964—),女,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品功能因子的绿色生物制造研究。E-mail:xuh@njtech.edu.cn

等国家和地区皆将食品生物工程的发展提升到战略高度,相继投入巨额研究经费用于食品生物技术的研究与开发^[9]。据统计,全球有近 300 家公司涉足食品生物技术相关的研究和开发,其中包括美国杜邦、丹麦诺维信、美国孟山都、德国巴斯夫、荷兰帝斯曼、日本味之素、美国联合利华等行业巨擘。近年来,欧美还涌现了以 Codexis 为代表的一大批创新型技术公司。

当前,全球正处于产业、经济、社会加速变革的时期,食品领域也伴随着新一轮科技与产业革命。目前,食品生物工程在提升食品工业科技水平,稳定食品供给,满足人民群众日益增长和不断升级的消费需求等方面具有重要的作用,对推动食品工业转型升级、膳食消费结构改善、满足小康社会城乡居民更高层次的食品需求等方面呈现出巨大的潜力。作者主要综述了食品生物工程在食品领域的应用与发展,并分析了当前食品生物工程领域发展的现状问题与战略发展态势,展望食品生物工程领域的未来发展趋势,以期食品生物工程领域的发展提供借鉴。

1 生物工程在食品领域中的应用

1.1 营养化学品合成

营养化学品是指具有调节人体生理功能,适宜特定人群食用,不以治疗疾病为目标的一类功能性食品^[6-7]。营养化学品的功效与应用广泛,包括调节免疫、调节血脂、延缓衰老、抗氧化、调节血糖和改善睡眠等^[8-9]。传统的营养化学品,包括氨基酸、核苷酸和维生素等^[10];新型高效的营养化学品包括植物天然提取物(黄酮、萜类、多酚类、低聚糖等)和动物来源的分离物(功能糖、甾体、多不饱和脂肪酸等)^[11]。目前营养化学品的生产方法包括动植物提取或化学合成法,在生产中往往存在传统提取法原料来源不足、化学法生产污染严重、动植物组织提取产品存在过敏原等制约产业发展的瓶颈问题。随着生物技术的发展,越来越多的功能性营养化学品的生物合成途径得到阐明。利用合成生物学技术可以在微生物、微藻等细胞中重构营养化学品分子的代谢途径,实现营养化学品的绿色生物制造与精准调控,从而在工业规模实现其高效合成制备。

1.2 酿造食品升级

我国是世界主要的传统酿造食品发源地,发酵

调味品、酒类、发酵乳等产品的产值占食品工业总产值的近 30%,对人民日常生活和饮食习惯有着举足轻重的地位。酿酒、酱油、食醋、酸汤、泡菜等传统酿造食品大多采用多菌种共同发酵,固态、半固态和液态发酵,发酵周期较长,在复杂的微生物群落作用下发生复杂的生化作用,微生物代谢产物与产品品质具有最直接的联系。目前国际上已经将基因组学、转录组学、蛋白质组学、代谢组学等现代生物技术手段运用到传统酿造食品发酵过程如微生物群落组成及其功能分析等方面^[12-14]。例如,我国已经利用高通量测序技术和传统培养技术解析了多种香型白酒在酿造过程中微生物的群落结构,全面了解白酒发酵过程中微生物的动态变化,发现不同酿造工艺和环境对微生物群落结构有明显影响,及对白酒香型贡献的主要功能微生物,也发现乳酸菌对白酒酿造过程微生物群落结构的稳定和白酒风味的形成有重要作用^[13]。此外,日韩、欧美等国家对泡菜、奶酪等传统发酵食品酿造机理都进行了深入研究^[15-16]。哈佛大学对奶酪微生物群落组成与风味物质形成的关系进行了系统分析,发现湿度、盐度等是不同地区奶酪微生物群落差异的主要因素,通过分析这些因素与微生物组成及风味物质形成之间的关系,挑选菌株进行微生物群落的重构,建立了不依赖于地理环境、群落组成及演变可被复制的奶酪发酵方式,不仅证明了微生物群落组成是赋予传统发酵食品独特风味的本质,而且表明环境因素对微生物群落的演替起到了重要的驱动作用,该研究对实现传统酿造食品的现代化可控生产提供了理论基础^[17]。目前流行于全球的发酵食品如酸奶、啤酒、葡萄酒、酱油等产品都是经过现代化改造后生产加工而成,完全摆脱了传统的手工作坊式生产。

1.3 功能性脂类开发

随着社会进步和科技的发展,人们的生活方式和膳食结构发生了巨大的变化,对各类功能性食品成分的商业需求越来越迫切。功能性脂类物质具有特殊生理功能,广泛用于特殊医学食品、功能性食品、保健食品等领域,是维持人体正常生理活动提供必需的基础物质^[18-19]。在近代营养学和生理学发展的基础上,特别是脂质组学的快速发展,让人们越来越认识到功能性脂类物质在维持人体健康中的不可替代作用。与传统的大宗食用油脂不同,功能性脂类物质一般具有特殊的分子结构和理化性

质^[20];在加工制造过程中,需要更加安全、精准的加工和制造技术。

近年来,随着营养学研究和脂质组学研究的快速进步,功能性脂类物质的发掘、生理功能评估、精准制造技术等领域均进入快速发展时期^[21-22]。大量与生物体生理特征、生理状况相关的脂类物质被证实,脂类物质的生理功能评价技术体系也在逐步探索中得以建立。在此基础上亟须构建完善的功能性脂类物质的营养功能和安全性评价技术体系,研究和解析功能性脂类物质的构效关系,进行功能性脂类物质的广泛挖掘,利用微生物反应器定向合成功能脂质,进行功能性脂类物质的绿色加工和精准制造技术的研发,开展功能性脂类物质产品的研发与产业化示范以及功能脂质合成副产物的高值化利用和产业化示范。

1.4 食品加工用酶开发

食品酶制剂的制备、催化与转化是食品绿色制造的重要组成^[23-24]。基于高效食品酶制剂的绿色食品生产工艺可以显著降低能耗、物耗和水耗,缓解产业的环境保护压力^[25]。国际上主要大型酶制剂企业通过几十年的持续资金投入和系统研究,已基于传统诱变和基因工程手段,建立了若干标准化的高生产强度和高产酶水平的微生物表达体系,如丹麦诺维信公司使用的米曲霉、黑曲霉、镰孢霉等。食品酶工程集合了微生物学、分子生物学、蛋白质工程等多学科的前沿科技,是食品生物技术领域研究的热点^[26]。目前,该领域的研究前沿主要体现在:1)新型食品酶制剂的定向、高通量挖掘技术;2)以应用为导向的精准酶分子改造技术;3)安全、高效的微生物酶表达系统构建;4)基于合成生物学的细胞工厂及酶分子机器构建;5)多酶自组装偶联反应体系地构建。这些研究的投入将极大地促进食品酶制剂行业的健康发展。

1.5 食品添加剂绿色生物制造

食品添加剂是指食品加工与防腐工艺所必需的一类物质,目的是改善食品的色、香、味、形等诸多品质、改善口感、延长销售货架期。它既可以来自化学合成,也可以为天然来源^[27]。食品添加剂生物制造主要是针对色(色素)、香(香料香精)、味(甜味、酸味等)、形、防腐(纳他霉素、乳酸链球菌素、聚赖氨酸、溶菌酶等)开展研究,其中色素、甜味剂、香精香料、防腐剂可以是生物来源制造,采用合成生物

学手段,利用微生物合成或酶法转化,可实现其高效、绿色生物合成^[28-30]。目前,生物工程在食品添加剂的生物制造方面的应用主要在以下几个方面:1)挖掘新天然食品添加剂和评价其功效;2)代谢工程改造菌株合成现有天然食品添加剂;3)天然食品添加剂的合成生物学研究;4)酶的定向进化与天然食品添加剂的高效生物转化;5)生物质资源的高效利用、部分取代、甚至完全替代与天然食品添加剂的价廉质优生产。随着合成生物学技术的快速发展,食品添加剂的生物制造研究正在向生物合成途径的系统优化和改造方向发展,最终将走向食品添加剂的全人工设计高效合成,真正实现食品添加剂的绿色、高效、大规模生物合成。

2 我国食品生物工程领域发展面临的挑战和机遇

今后一个时期,食品生物工程领域发展挑战和机遇并存。从国际上看,世界经济复苏乏力,食品跨国集团加快全球布局,不断提升核心竞争能力,对我国食品产业发展带来一定影响和挑战。另一方面,随着“一带一路”倡议的深入推进,以及各种国际贸易协定的签订,对外投资环境不断改善,有利于我国食品企业加快实施“走出去”战略。从国内来看,中国经济进入新常态,一方面增长预期放缓,人力、土地、环境资源保护等综合成本不断上升,食品工业保持高速发展难度加大。另一方面,食品消费需求呈刚性增长态势,随着消费结构升级,消费者对食品的营养与健康要求更高,品牌意识不断增强,食品工业发展模式将从量的扩张向质的提升转变。

当前我国食品生物工程领域面临的现状问题主要有:1)食品生物工程的基础研究和科技普及相对滞后。食品营养与健康的相关基础研究仍然有待加强,有针对性的特医食品、功能因子或食疗产品仍然相对缺乏;科技普及工作相对滞后,大健康领域市场鱼龙混杂,阻碍行业正向发展;2)企业数目较多,规模普遍偏小。部分产品集中度和进入门槛低,同质化相对严重,自动化智能化程度较低,龙头企业的引领和示范作用较弱,无法形成规模效益,少有清洁生产 and 循环经济示范;3)微生物资源亟须整理挖掘。微生物资源是酿造食品的核心,也是食品生物技术重要载体。我国传统酿造食品中蕴藏着

应用潜力无限的特色微生物资源,亟须对我国传统酿造食品微生物资源进行系统化整理和保藏,建立自有知识产权的微生物信息数据库;4)政策法规还不健全,很多发酵食品,如泡菜、豆豉等发酵食品,由于发酵食品的菌种未安全认定,基因工程食品没有相应的国际标准,难以规模化生产和扩大国际市场。

伴随着“健康中国 2030”规划地实施,应用现代生物技术开发的营养和功能食品未来需求将进一步扩大。营养化学品、健康糖、健康油脂、发酵食品等健康食品(成分)的生物制造将受到进一步重视。2018年,全球营养食品配料市场规模超过2300亿美元。国际市场上营养食品配料种类越来越多,应用范围越来越广。预计到2023年,全球营养食品配料市场将达到3360亿美元,年复合增长率为7.8%。此外,根据国际经合组织(OECD)预估,未来包括食品加工用酶在内的生物技术的发展,可以降低食品加工相关过程10%~80%的能耗和水资源消耗,20%~90%的污染物排放^[1]。因此,发展食品工业领域中的绿色生物制造技术,对于促进我国食品工业循环经济发展水平,提升科技创新水平具有重要的战略意义。随着现代生物技术的发展,利用生物工程手段保障食品供给将成为未来食品工业领域的研究热点和发展方向。我国可食用的生物资源十分丰富,利用现代生物技术开发新资源食品未来将进一步发展。此外,合成生物学、基因编辑、细胞工程等先进生物技术的发展,使得基因编辑作物、人造蛋白、微生物淀粉、微生物油脂等新兴食品技术的应用成为现实。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,工业和信息化部. 关于促进食品工业健康发展的指导意见[J]. 轻工标准与质量, 2017, 1: 8-11.
- [2] BAYRAM M, GOKIRMAKLI C. Horizon scanning: how will metabolomics applications transform food science, bioengineering, and medical innovation in the current era of foodomics? [J]. *Omics*, 2018, 22(3): 177-183.
- [3] TYAGI A, KUMAR A, APARNA S V, et al. Synthetic biology: applications in the food sector [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(11): 1777-1789.
- [4] KIDO Y, KUWAHADA M, IWAMOTOH, et al. Engineering method of protein composition with reduced protein metabolism requirement, and manufacturing method of protein-containing food and drink composition based on the engineering method: Japan, JP 2019030269 A[P]. 202-05-01.
- [5] 彭华, 王爱梅. 美国、欧盟、日本食品安全监管体系的特点及对中国的启示[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(8): 44-48.
- [6] 贺燕丽. 中国保健(功能)食品的现状与发展[J]. 中国经贸导刊, 2010, (15): 24-26.

3 展望

目前我国高品质健康食品的供应与市场需求仍不相匹配,难以较好适应消费变化。伴随着“健康中国 2030”规划地实施,应用现代生物技术开发的营养和功能食品未来需求将进一步扩大。营养化学品、健康糖、健康油脂、发酵食品等健康食品(成分)的生物制造将受到进一步重视。食品生物工程领域的战略发展主要呈现以下几种趋势:1)以提升产品品质和降低生产成本为核心,开发环境友好的绿色生物制造途径和生产技术、食品废弃物生物治理技术,降低生产成本和能量消耗,提高效率,达到增产增收,并实现节能环保;2)具有免疫调节、延缓衰老、抗疲劳、调节血脂、调整肠胃等健康功能的新资源食品及功能食品的需求增加,相关生物制造技术快速发展;3)智能生物制造技术及装备的兴起,以实现天然食品组分和生物基可降解包装材料的生物制造、合成途径的高效装配,以及食品组分规模化生物制造的智能化控制;4)集成高效提取分离、生物转化等技术,生产营养化学品、天然色素、风味成分等食品成分,实现有限资源的综合、深层次、高效利用;5)通过微生物群落调控,自动化酿造装备,发酵控制关键技术,实现传统发酵食品的现代化酿造,提高产品品质,保障产品质量安全。

综上所述,食品生物工程领域的未来发展将围绕食品营养和健康,提升食品工业科技水平,稳定食品供给,以满足人民群众日益增长和不断升级的消费需求为目标,以供给侧结构性改革为主线,以创新驱动为引领,着力提高供给质量和效率,推动食品工业转型升级、膳食消费结构改善,满足小康社会城乡居民更高层次的食品需求。

- [7] ROBERFROID M B. Concepts and strategy of functional food science: the European perspective[J]. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 2000, 71(6 Suppl): 1660S-1664S.
- [8] 陈坚. 功能性营养化学品的研究现状及发展趋势[J]. **中国食品学报**, 2013, 13(1): 5-10.
- [9] LALOR F, MADDEN C, MCKENZIE K, et al. Health claims on foodstuffs: a focus group study of consumer attitudes[J]. **Journal of Functional Foods**, 2011, 3(1): 56-59.
- [10] GRANATO D, BRANCO G F, CRUZ A G, et al. Probiotic dairy products as functional foods[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2010, 9(5): 455-470.
- [11] LANDSTRÖM E, HURSTI U K, MAGNUSSON M. "Functional foods compensate for an unhealthy lifestyle". some swedish consumers' impressions and perceived need of functional foods[J]. **Appetite**, 2009, 53(1): 34-43.
- [12] 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): 14.
- [13] LU X, WU Q, ZHANG Y, et al. Genomic and transcriptomic analyses of the Chinese Maotai-flavored liquor yeast MT1 revealed its unique multi-carbon co-utilization[J]. **Bmc Genomics**, 2015, 16(1): 1-14.
- [14] WU Q, XU Y. Transcriptome profiling of heat-resistant strain *Bacillus licheniformis* CGMCC3962 producing maotai flavor[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2012, 60(8): 2033-2038.
- [15] HUANG T T, WU Z Y, ZHANG W X. Effects of garlic addition on bacterial communities and the conversions of nitrate and nitrite in a simulated pickle fermentation system[J]. **Food Control**, 2020, 113: 107215.
- [16] LI W, JIN Q, WU Q, et al. Effect of a hybrid process, high hydrostatic pressure treatment combined with mixed-strain fermentation, on the quality of the dietary fibre in pickled vegetables[J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2020, 55(6): 2650-2659.
- [17] WOLFE B E, BUTTON J E, SANTARELLI M, et al. Cheese rind communities provide tractable systems for *in situ* and *in vitro* studies of microbial diversity[J]. **Cell**, 2014, 158(2): 422-433.
- [18] CAS M D, RODA G, LI F, et al. Functional lipids in autoimmune inflammatory diseases[J]. **International Journal of Molecular Sciences**, 2020, 21(9): 3074.
- [19] KATIYAR R, ARORA A. Health promoting functional lipids from microalgae pool: a review[J]. **Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts**, 2020, 46: 101800.
- [20] BHADURI S, ZHANG H M, ERRAMILLI S, et al. Structural and functional contributions of lipids to the stability and activity of the photosynthetic cytochrome *b₆f* lipoprotein complex[J]. **Journal of Biological Chemistry**, 2019, 294(47): 17758-17767.
- [21] SCHNEIDER C. Lipidomics: approaches and applications in nutrition research[J]. **Molecular Nutrition and Food Research**, 2013, 57(8): 1305.
- [22] HYÖTYLÄINEN T, BONDIA-PONS I, OREŠIČ M. Lipidomics in nutrition and food research[J]. **Molecular Nutrition and Food Research**, 2013, 57(8): 1306-1318.
- [23] DECKERS M, DEFORCE D, FRAITURE M A, et al. Genetically modified micro-organisms for industrial food enzyme production: an overview[J]. **Foods**, 2020, 9(3): 326.
- [24] YUSHKOVA E D, NAZAROVA E A, MATYUHINAA V, et al. Application of immobilized enzymes in food industry[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2019, 67(42): 11553-11567.
- [25] YI Z, GEARY T, SIMPSON B K. Genetically modified food enzymes: a review[J]. **Current Opinion in Food Science**, 2019, 25: 14-18.
- [26] ZHANG Y, HE S D, SIMPSON B K. Enzymes in food bioprocessing - novel food enzymes, applications, and related techniques [J]. **Current Opinion in Food Science**, 2018, 19: 30-35.
- [27] CHAZELAS E, DESCHASAUX M, SROUR B, et al. Food additives: distribution and co-occurrence in 126,000 food products of the French market[J]. **Scientific Reports**, 2020, 10(1): 3980.
- [28] FRAATZ M A, RUEHL M, ZORN H. Food and Feed Enzymes[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 229-256.
- [29] FUJIWARA Y. Method for producing food additive by soybean enzyme decomposition product; Japan, JP 2019062839 A [P]. 2020-05-01.
- [30] PORTA R, PANDEY A, ROSELL C M. Enzymes as additives or processing AIDS in food biotechnology[J]. **Enzyme Research**, 2011, 2010: 436859-436859.
- [31] SALING P. Assessing industrial biotechnology products with LCA and eco-efficiency[J]. **Sustainability and Life Cycle Assessment in Industrial Biotechnology**, 2019, 173: 325-357.