

人工智能在传统发酵食品生产中的应用

司砚汀, 汤子岩, 刘欣宇, 周红权, 林煜

天津科技大学生物工程学院, 天津

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年5月23日

摘要

人工智能技术正逐步应用于传统发酵食品如酱油、醋、酒类等生产领域, 推动传统产业向高效化、智能化转型。在生产工艺优化中, 人工智能通过机器学习模型如神经网络、随机森林优化菌种筛选与鉴定、微生物数量动态调控及风味品质监测, 显著提升菌株筛选准确率和风味分析效率, 克服传统色谱法操作繁琐等局限。在发酵工艺自动化方面, 智能配料、灭菌及一键式控制系统降低了人力成本, 提高了生产稳定性和标准化水平。此外, 人工智能技术还通过能源管理优化和余热回收实现节能减排, 促进绿色生产。人工智能的深度融合为传统发酵食品产业提供了精准控制、高效生产和可持续发展的新路径。

关键词

传统发酵食品, 人工智能, 生产工艺优化, 自动化控制

The Application of Artificial Intelligence in Traditional Fermented Food Production

Yanting Si, Ziyang Tang, Xinyu Liu, Hongquan Zhou, Yu Lin

College of Bioengineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 15th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

Artificial intelligence technology is gradually being applied to the production of traditional fermented foods such as soy sauce, vinegar, and alcohol, promoting the transformation of traditional industries towards high efficiency and intelligence. In the optimization of production processes, artificial intelligence significantly improves the accuracy of strain screening and flavor analysis efficiency through machine learning models such as neural networks, random forest optimization for

strain screening and identification, dynamic regulation of microbial quantity, and monitoring of flavor quality, overcoming the limitations of traditional chromatographic methods such as cumbersome operation. In terms of fermentation process automation, intelligent batching, sterilization, and one click control systems have reduced labor costs, improved production stability, and standardization levels. In addition, artificial intelligence technology also achieves energy conservation and emission reduction through energy management optimization and waste heat recovery, promoting green production. The deep integration of artificial intelligence provides a new path for precise control, efficient production, and sustainable development in the traditional fermented food industry.

Keywords

Traditional Fermented Food, Artificial Intelligence, Production Process Optimization, Automated Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当下, 人工智能发展变化日新月异、突飞猛进, 推动经济发展快速转型, 已经融入我们生活的方方面面并为我们的生活带来了许多便利。我国传统的发酵产业如酱油、醋、奶酪、酒等食品的发展也因人工智能的融合变得更加便利。传统发酵过程的数据采集主要依赖人工采样和实验室离线检测, 其状态评估往往基于操作人员的经验判断。这种方式存在明显的监测延迟和数据分析不连续等问题, 难以实现发酵过程的实时监测与精准调控, 无法满足现代化智能发酵对过程优化控制的实时性要求[1], 所以仍在菌种筛选、工艺控制和产品标准化等方面长期面临挑战。尽管微流控技术提升了实验室规模的高通量筛选效率, 但其工业放大效果仍不理想, 且传统菌种鉴定方法存在耗时长、准确性不足等问题[2]。在过程控制方面, 微生物数量动态调控和风味物质检测仍依赖经验或复杂仪器如色谱联用技术, 难以满足工业化生产对实时性和精准性的需求[3]。人工智能技术为上述问题提供了创新解决方案: 机器学习模型如神经网络、随机森林可显著提升菌种鉴定准确率, 并通过多参数监测实现发酵过程的动态优化[3]; 自动化系统则通过智能配料、灭菌和一键式控制降低人为误差, 同时能源回收技术助力节能减排[4]。本文系统综述人工智能在发酵工艺优化、自动化生产和能源管理中的应用, 为行业智能化转型提供理论参考和技术路径。

2. 生产工艺优化

人工智能可以对传统发酵行业的生产工艺进行优化。可以通过监测温度、湿度、pH 值等参数, 对发酵过程实时控制。也可以用于菌种及菌株的精准筛选与鉴定, 实现对微生物数量的科学控制, 并且在传统发酵食品的风味品质控制方面也发挥着关键作用, 助力提升传统发酵行业的生产水平与产品质量。

2.1. 菌种及菌株筛选与鉴定

菌株的筛选与鉴定是酸奶制作过程中至关重要的步骤。通过合适的筛选方法, 可以找到优质的菌株, 确保发酵的效果。同时, 通过鉴定菌株的种属和亲缘关系, 可以确保所使用的菌株的纯度和品质。

尽管近年来微流控技术在解决高通量、自动化培养方面取得了一定进展, 并且在高通量筛选方面发

挥了重要作用。然而，实验室环境与大规模工业生产环境还存在较大的差异性，把实验室反应器同比例放大后效果并非完全达到预期。因此开发高通量、自动化的能够准确反映工业生产环境的微型平行反应器是未来人工智能领域的发展方向[2]。

菌株的鉴定分为菌群结构水平的鉴定和种属水平的鉴定。人们最常用的方法是基于 16SrRNA 的基因扩增子的高通量测序技术。但该方法存在时间长、准确性较差、后期处理麻烦等问题。而机器算法的引用突破了以上难题：在菌群结构鉴定方面，如 Miriam 等用神经网络模型与 Adam 优化器结合分类奶酪，准确率达到 92.8%；在种属水平鉴定方面，Eiseul 等用神经网络识别必需食品发酵细菌，准确率超过了 97%，Manon 等用卷积神经网络来鉴定布鲁塞尔双歧杆菌，其准确率达到了 96.6%，还有科学家利用微生物生产的金纳米材料的特征结合随机森林模型实现多水平精准分类。可见，人工智能的引入大大提高了鉴别菌群、种属的准确性与效率[3]。

2.2. 微生物数量控制

微生物的数量是发酵过程中的关键参数，如果微生物数量过少，会导致发酵速度缓慢，在工业生产中效率低下，反之若微生物数量过多，大量的微生物竞争有限的营养物质，导致产生过多的代谢废物，影响自身生长，进而影响产品的质量与口感。因此在微生物数量控制方面也需要人工智能加以调控。Bayer 等[5]应用基于二维荧光(2D-fluorescence)的软传感器技术于大肠杆菌培养发酵中。该技术能够实时估计发酵过程中生物量的数值，通过整合二维荧光信息和其他过程相关数据，建立起有效的估算模型，实现对大肠杆菌发酵过程中生物量的动态监测，为发酵过程的优化控制提供了关键的实时生物量数据支持，有助于提升发酵效率与质量。

神经网络模型、随机森林模型可以简化微生物数量动态监测的操作，通过已知数据的变化情况推算出复杂体系中微生物的数量变化规律，便于人们及时根据微生物数量的变化做出应对措施，如图 1、图 2。XU 等[6]利用随机森林模型，用于改善大肠杆菌补料分批发酵中质粒 DNA 的生产，通过该模型对发酵过程进行控制，大量提升了质粒 DNA 的产量。

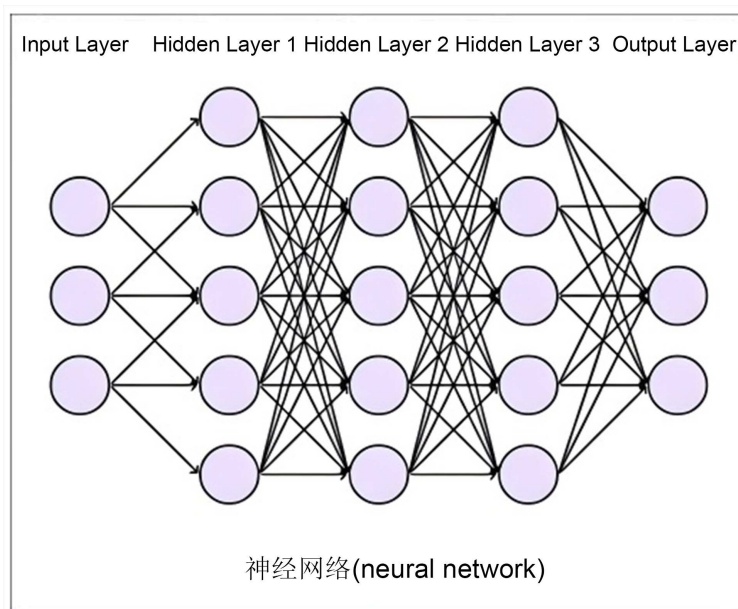


Figure 1. Neural network model

图 1. 神经网络模型

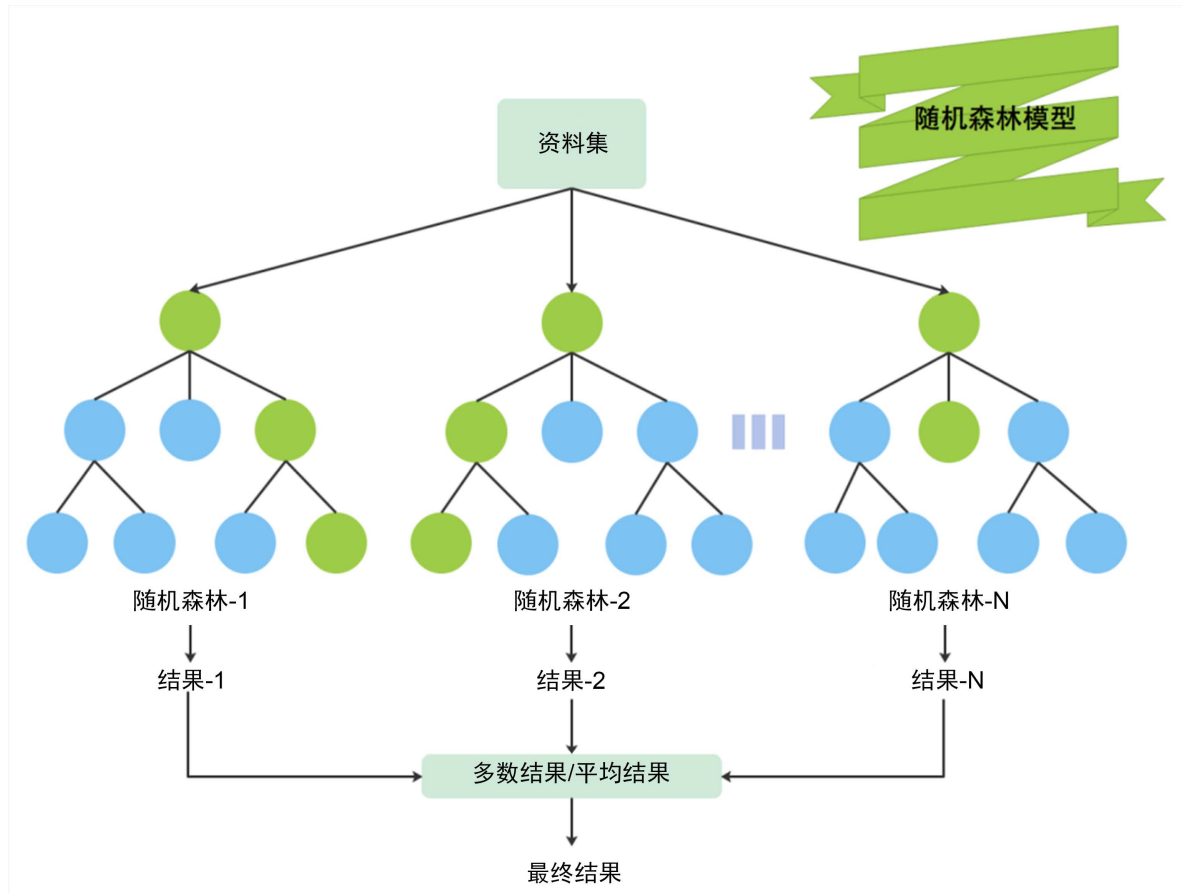


Figure 2. Random forest model
图 2. 随机森林模型

2.3. 传统发酵食品风味品质控制

发酵食品的风味物质分非挥发性和挥发性这两类，我们常用的食品风味物质监测方法为色谱法，但是色谱法的定性能力有限，尽管色谱联用技术能补其短板，但是色谱连用技术操作繁琐且成本高，然而神经网络模型、随机森林模型相比于色谱法在发酵食品风味品质检测上更具优势。

若该产品为非挥发性物质，可通过不同神经网络模型进行产品口感分析和原料品质的预测，例如，Claudia 等将颜色和泡沫作为参数建立了反向传播神经网络模型，实现了对啤酒苦味的无过拟合预测。若该产品为挥发性物质，例如白酒[7]，可以用支持向量机和傅立叶变换结合偏最小二乘法构建浓香型基酒质量等级的判断模型用于评估浓香型基酒的质量[8]。或者用红外光谱的 LDA [9]和 BPANN 模型用于识别不同等级白酒基酒，如图 3。还可以用神经网络技术建立基酒酒龄识别模型，实现了对基酒的精准分类鉴别[10][11]。

随着电子鼻技术的发展，其在发酵的过程控制中的应用更加广泛，可对发酵过程中乳制品的成熟度的预测，挥发性香气成分的实时检测[12]。武斌研究组[13]则运用电子鼻技术对不同品种食醋进行检测，结合因子分析和线性判别分析等方法，成功建立了食醋品质的快速鉴别模型。管彬彬团队[14]采用可视化嗅觉技术，系统测定了 56 种发酵床种子的乙醇脱氢酶活性、不挥发性酸及总酸含量，并通过误差反向传播神经网络对检测数据进行分析。研究证实，该技术组合能够实现醋酸发酵过程的实时监测和动态预测。



Figure 3. BFH-960 Fourier transform infrared spectrometer GBPI
图 3. BFH-960-傅立叶变换红外光谱仪 GBPI

3. 发酵工艺自动化

发酵工艺自动化应用是发酵行业技术发展重要方向，传统发酵生产需要大量的人力物力，且产品质量无法做到统一标准。而随着人工智能的发展，自动化技术迅速推广，并广泛应用于食品发酵等诸多领域[1]。

3.1. 发酵基础补料

传统大发酵配料阶段需大量人力用于搬运原料，而引进自动化配料装置的引进，实现了原料转运和配置的自动化，减少了人工劳动强度、提高了效率，并且该自动化配料装置对于不同物料有不同转运方式，仅靠自动化系统与扫码设备就可实现物料的追踪与数据的收集。LI 等[15]通过在线电容测量来优化聚羟基链烷酸酯(PHA)的发酵，利用在线电容测量技术对聚羟基链烷酸酯发酵过程进行监测，优化发酵补料过程，将 PHAs 产量提升 22% 以上，达到 166 g/L 水平。Beiroti 等[16]用 μ -stat 在毕赤酵母生产乙肝表面抗原(HBsAg)的补料分批发酵中控制甲醇补料，通过 μ -stat 控制策略来调节甲醇的补加速度，以维持发酵过程中合适的菌体生长速率，进而优化了发酵结果。

3.2. 发酵自动消毒及智能倒罐技术

智能连续灭菌装置[17]及清洗设备不仅降低了人员劳动强度，而且其自动化升温控制的稳定性比手动要高，并且可以大大减少人为失误。并且余热回收方式可以节约蒸汽，达到能源的重复利用[18]。在葡萄酒酿造方面，刘成龙[19]通过在线监测与自动控制技术，对 8 种不同倒罐工艺酿制的干红葡萄酒进行了全程理化指标追踪和成品酒质评估，开发了智能决策系统。该系统能实时监测发酵电位变化，并自动匹配最佳倒罐时机的特征曲线，实现精准倒罐操作。实际应用表明，该系统的决策准确率高达 97.38%~98.04%，不仅继承了传统自动倒罐系统的优势，更通过智能决策功能显著降低了人工干预需求，提升了葡萄酒酿造的自动化水平。

3.3. 发酵过程智能温度控制

与传统车间手动操作不同，新员工不需要长时间复杂培训，自动化车间可一键操作多种工艺，员工只需要在操作站点击按钮即可进行补料等一系列操作，使操作更加准确、便利。陈晓春[20]提出了一种基于神经网络的自适应比例-积分-微分控制器(PID)啤酒温度控制方法。将啤酒发酵温度控制系统采用

PLC 作为核心控制器，结合人机触摸屏实现智能化管理。系统通过温度传感器实时采集发酵罐温度数据，PLC 将检测值与设定目标值进行比对，并运用智能算法控制冷却水泵变频器，动态调节冷却水流量以实现精准控温，如图 4。人机界面不仅支持参数设置，还能实时显示温度曲线，实现了发酵过程的自动化控制和可视化监控。该系统有效提高了温度控制的精度和稳定性，降低了人工干预需求。



Figure 4. Fully automatic stainless steel fermentation tank
图 4. 全自动不锈钢发酵罐

4. 能源管理和节能减排

人工智能技术的发展能帮助传统发酵业进行能源管理与节能减排。发酵环节中设备多、能耗高等问题通过优化其动力和能量系统可改造为节能设备；全封闭式连消可减少蒸汽用量并降低排气噪声；高温泛汽、冷凝水和冷却水可回收循环利用，有效降低人员成本、避免能源浪费、减少了环境的污染。

5. 结论

人工智能技术为传统发酵食品产业提供了智能化转型的新路径。在工艺优化方面，机器学习模型显著提升了菌种筛选准确率和风味分析效率，解决了传统方法实时性不足的问题。自动化控制系统实现了智能配料、灭菌和精准温控，提高了生产稳定性和标准化水平。能源管理优化技术则助力企业实现绿色生产。未来，随着深度学习、物联网等技术的发展，人工智能将在发酵过程模拟、智能预测调控等方面发挥更大作用。行业需加强跨学科合作，推动技术深度融合，并建立标准化数据平台以支撑智能化升级。人工智能的深度应用将为传统发酵食品产业的高质量发展开辟更广阔前景。

参考文献

- [1] 夏建业, 龙东娇, 陈敏, 等. 智能生物制造之发酵过程优化: 在线检测、人工智能与数字孪生技术[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1179-1196.

- [2] 夏建业, 刘晶, 庄英萍. 人工智能时代发酵优化与放大技术的机遇与挑战[J]. 生物工程学报, 2022, 38(11): 4180-4199.
- [3] 王宁晓璇, 李欣, 黄玉立, 等. 机器学习在传统发酵食品微生物结构及品质控制中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 360-367.
- [4] 肖龙. 信息化技术在发酵自动化系统中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(2): 164-167.
- [5] Bayer, B., von Stosch, M., Melcher, M., Duerkop, M. and Striedner, G. (2019) Soft Sensor Based on 2D-Fluorescence and Process Data Enabling Real-Time Estimation of Biomass in *Escherichia coli* Cultivations. *Engineering in Life Sciences*, **20**, 26-35. <https://doi.org/10.1002/elsc.201900076>
- [6] Xu, Z., Zhu, X., Mohsin, A., Guo, J., Zhuang, Y., Chu, J., et al. (2024) A Machine Learning-Based Approach for Improving Plasmid DNA Production in *Escherichia coli* Fed-Batch Fermentations. *Biotechnology Journal*, **19**, e2400140. <https://doi.org/10.1002/biot.202400140>
- [7] 孙仪航, 钟典余. 数据驱动的人工智能方法在白酒行业中的应用研究进展[J]. 酿酒, 2024, 51(5): 43-45.
- [8] 韩云翠. 浓香型基酒香气模型构建与自动化摘酒研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [9] 张超. 连续灭菌系统的设计讨论[J]. 化工与医药工程, 2019, 40(4): 22-25.
- [10] 辛新. 基于分子光谱技术的浓香型白酒基酒品质检测研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [11] 陈飞. 基于微量组分的白酒基酒分类鉴别与模式识别研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [12] 代良超, 乌日娜, 陶冬冰, 等. 智能仿生在食品发酵中的应用及研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 14-21.
- [13] 管彬彬, 赵杰文, 金鸿娟, 等. 基于嗅觉可视技术的醋醅理化指标分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 223-227, 244.
- [14] 武斌, 王大智, 嵇港, 等. 基于正交线性判别分析和电子鼻技术的食醋分类[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 263-268.
- [15] Li, L., Wang, Z., Chen, X., Chu, J., Zhuang, Y. and Zhang, S. (2014) Optimization of Polyhydroxyalkanoates Fermentations with On-Line Capacitance Measurement. *Bioresource Technology*, **156**, 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.042>
- [16] Beiroti, A., Hosseini, S.N., Aghasadeghi, M.R. and Norouzian, D. (2019) Comparative Study of μ -Stat Methanol Feeding Control in Fed-Batch Fermentation of *Pichia pastoris* Producing HBsAg: An Open-Loop Control versus Recurrent Artificial Neural Network-Based Feedback Control. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **94**, 3924-3931. <https://doi.org/10.1002/jctb.6192>
- [17] 张超. 连续灭菌系统的设计讨论[J]. 化工与医药工程, 2019, 40(4): 22-25.
- [18] 陈宝华. 浅谈发酵工程培养基的灭菌[J]. 山东化工, 2013, 42(3): 53-54, 56.
- [19] 刘成龙. 基于氧化还原电位的葡萄酒发酵过程智能倒罐系统设计[D]: [硕士学位论文]. 咸宁: 西北农林科技大学, 2023.
- [20] 陈晓春. 啤酒发酵系统温度智能控制[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 219-222.