

AI+中药活性多糖研究的文献计量学分析

叶梓¹, 徐晴¹, 江丽洁¹, 崔琦¹, 刘巨钊^{1*}, 秦路平^{1,2*}

1. 浙江中医药大学药学院, 浙江 杭州 311402

2. 浙江中医药大学 全省中药大品种培育与创制重点实验室, 浙江 杭州 311402

摘要: 目的 对 2011—2025 年新兴热门领域 AI+中药活性多糖的发展趋势和研究热点进行知识图谱分析, 为该领域的进一步发展提供实用性参考。方法 全面检索 Web of Science (WOS) 中的相关英文文献, 使用 VOSviewer 和 CiteSpace 2 种重要文献计量学工具进行可视化分析, 包括发文趋势、国家和期刊分布、作者与机构合作网络分析, 关键词共现、聚类、时间线和突现分析以及高被引文献分析。结果 最终得到 AI+中药活性多糖研究领域高质量文献 116 篇, 发文趋势呈现新兴学科演进特征, 中国和美国是发文量最多的国家, *International Journal of Biological Macromolecules* 是发表论文最多的期刊, 中国科学院为核心机构。研究热点涵盖智能算法驱动的中药活性多糖提取、分离、鉴定及活性预测, 多糖基生物材料的智能化开发, 以及精准医疗与癌症疾病预防调控等方向。结论 AI+中药活性多糖当前研究热点具有极大研究前景, 研究领域展现高速发展态势, 有可能成为未来重要的研究方向。

关键词: 人工智能; 机器学习; 深度学习; 中药活性多糖; 文献计量学

中图分类号: G350; R285 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)17-6301-16

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.17.019

Bibliometric analysis of artificial intelligence in research of active polysaccharides from traditional Chinese medicine

YE Zi¹, XU Qing¹, JIANG Lijie¹, CUI Qi¹, LIU Juzhao¹, QIN Luping^{1,2}

1. School of Pharmaceutical Sciences, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 311402, China

2. Zhejiang Key Laboratory of Chinese Medicine Modernization, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 311402, China

Abstract: Objective To analyze the knowledge mapping of the development trend and research hotspots in the emerging hot field of AI + active polysaccharides in traditional Chinese medicine from 2011 to 2025, so as to provide a practical reference for the further development of this field. **Methods** A comprehensive search of relevant English literature in Web of Science (WOS) was conducted, and 2 important bibliometric tools, VOSviewer and CiteSpace, were used to perform visual analysis, including the trend of publications, distribution of countries and journals, network analysis of authors' and institutions' cooperation, keyword co-occurrence, clustering, timeline and emergence analyses as well as the analysis of highly cited literature. **Results** Finally, a total of 116 high-quality literatures were obtained in the research field of AI + active polysaccharides in traditional Chinese medicine, and the trend of publication showed the characteristics of emerging disciplinary evolution, with China and the United States being the countries with the largest number of publications, *International Journal of Biological Macromolecules* being the journal with the largest number of publications, and Chinese Academy of Sciences being the core institution. The research hotspots cover intelligent algorithm-driven polysaccharide extraction, isolation, characterization and activity prediction, intelligent development of polysaccharide-based biomaterials, and precision medicine and cancer prevention and regulation. **Conclusion** The current research hotspots of AI + active polysaccharides in traditional Chinese medicine have great research prospects, and the research field shows a rapid development trend, which may become an important research direction in the future.

Key words: artificial intelligence; machine learning; deep learning; active polysaccharides in traditional Chinese medicine; bibliometric

收稿日期: 2025-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2202213); 国家自然科学基金资助项目 (82374098)

作者简介: 叶梓, 本科, 研究方向为中药学。E-mail: 1745814992@qq.com

*通信作者: 秦路平, 博士生导师, 教授, 从事中药品质评价和资源开发利用研究。E-mail: lpqin@zcmu.edu.cn

刘巨钊, 博士, 副研究员, 从事中药学研究。E-mail: JZLiu@zcmu.edu.cn

人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的迅猛发展正在重构生物医学研究的底层逻辑。作为 AI 的核心引擎,机器学习 (machine learning, ML) 与深度学习 (deep learning, DL) 凭借其强大的数据处理与模式识别能力,在疾病诊断、药物研发等领域展现出革命性潜力。以药物研发为例, AI 通过分子对接模拟与高通量虚拟筛选,将传统研发周期缩短 50% 以上,显著加速了成簇规律间隔短回文重复序列 (clustered regularly interspaced short palindromic repeats, CRISPR) 疗法等前沿技术的临床转化^[1]。同时, AI 驱动的多模态数据整合系统如 AI 辅助诊断系统,为慢性病精准干预提供了新范式,其数据洞察力已突破传统医学研究的效率边界,推动医疗模式向预测性、个性化方向演进^[2]。

在天然药物研究领域,中药活性多糖因其结构复杂性与功能多样性成为现代药学研究的热点。然而,传统研究方法存在诸多局限,如中药活性多糖结构解析流程耗时且成本高昂;基于体外实验的活性筛选效率低下;生产工艺优化依赖经验试错,难以建立标准化体系等^[3]。这些瓶颈严重制约了中药活性多糖的深度开发与产业升级。而 AI 技术的引入为破解上述难题提供了创新路径,如 DL 模型可通过构效关系数据库预测多糖三维结构,辅助实验设计降本增效^[4];人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 能优化气凝胶加工的实验设计,为气凝胶处理污染物的工业应用打下基础^[5];强化学习算法可动态优化提取参数,提升产物纯度与产率等^[6]。

尽管 AI 与中药活性多糖的交叉研究已取得初步进展,但该领域仍存在发展脉络模糊、研究焦点分散、协作网络薄弱等问题。文献计量学方法通过量化分析学术产出中的关键词共现、作者及机构合作网络等,能客观揭示学科交叉的动态轨迹与技术融合的关键节点^[7]。本研究旨在运用文献计量学方法,系统梳理 AI 技术在生物医学与中药活性多糖研究领域的交叉融合机制,并深入剖析此技术融合的内在逻辑与外部驱动因素,期望为学术界与产业界提供兼具理论深度与实践价值的战略参考,推动中医药现代化与 AI 技术创新的双向赋能。

1 材料与方法

1.1 数据检索

以 Web of Science (WOS) 核心合集数据库为检索源,对 AI+中药活性多糖主题进行检索,检索

时间跨度为 2011 年 1 月 1 日—2025 年 4 月 30 日。

具体检索式如下: ① TS=(machine learning) AND TS=(polysaccharide); ② TS=(deep learning) AND TS=(polysaccharide); ③ TS=(artificial intelligence) AND TS=(polysaccharide)。

中药活性多糖泛指来源于药用植物 (如黄芪)、传统药用真菌 (如灵芝) 及药食同源生物等来源的活性多糖。由于多糖范围广泛,而目前中药活性多糖尚无明确统一的术语,因此在检索中以“polysaccharide” (多糖) 作为核心检索词,对检索结果的进一步人工筛选和整理,以确保文献来源的完整性和相关性。

1.2 数据筛选

初步检索共获得 186 篇文献,经手动去重后,剔除不符合纳入标准的文献,最终纳入 116 篇高质量英文文献。在中文文献方面,经初步检索发现相关文献数量较少 (仅 17 篇),且研究内容相对单一,缺乏与 AI 技术深度融合的研究成果^[8]。相比之下,英文文献的数量则明显更多,且涵盖了从基础研究到应用研究的多个层面。这一现象的出现,可能源于国际学术界对该领域的更高关注度,以及研究人员为与国际同行交流分享而更倾向于在英文期刊发表研究成果的趋势,在国家分布分析中也有所体现。此外, AI 技术作为国际前沿的科学技术,其在中药活性多糖研究中的应用仍处于快速发展阶段,国内部分研究成果可能尚未及时在中文期刊上发表。因此本研究专注于英文文献的分析,以提供更广泛的国际视野和更具代表性的研究趋势。未来的研究中可以更进一步地结合中文数据库进行更为全面的分析。

纳入标准: 检索主题、篇名、摘要、关键词等与研究主题相关的文献。

排除标准: (1) 与主题不相关的文献,如动物多糖、细菌脂多糖等与中药活性多糖无关的研究; (2) 重复文献; (3) 会议摘要、报纸文章、专利等文献,非实验性或理论性研究 (如新闻、评论) 等。

1.3 数据可视化

首先以文本格式将从 WOS 中检索到的文献导出,确保导出的文本文件中包含文献的全部必要信息,包括标题、作者、期刊名称、年份、关键词、引用次数等。并统一转换为 download_*.txt 格式,存储于 data 文件夹中,以供后续的数据分析。随后利用 VOSviewer 1.6.18、CiteSpace 6.2.R4、

Pajek 5.16、Scimago Graphica 1.0.35 软件对国家、期刊、作者、机构、关键词和高被引文献进行文献计量学分析。

2 结果

2.1 发文趋势

发文趋势分析能够清晰地展现 AI+中药活性多糖研究领域在特定时期内的发展动态。基于 WOS 核心数据库检索结果, AI 与中药活性多糖的交叉研究最早出现于 2011 年, 因此本研究分析了 2011 年 1 月 1 日—2025 年 4 月 30 日收录的 116 篇相关文献的发文趋势。结果显示, 该领域呈现出典型的新兴学科演进特征, 2011—2018 年为该领域的萌芽期, 学术产出相对较低, 这一阶段研究者们对 AI+中药活性多糖进行了初步探索; 2019 年该领域进入快速发展期, 此后每年的出版物持续大幅上升, 2024 年达到峰值, 并有持续上升的趋势, 凸显了该领域的研究热度与研究价值。为量化这一发展趋势, 本研究采用 Gauss 模型进行非线性拟合, 得到方程 (图 1), 其中 x 代表年份, y 代表年度发文量。尽管模型拟合度尚存提升空间, 但其预测曲线仍能表明年度出版物的数量呈持续上升趋势^[9], 这一结果表明, AI+中药活性多糖的研究已经引起了学术界的极大兴趣, 预示着这一新兴领域在未来几年内将迎来重大进展。

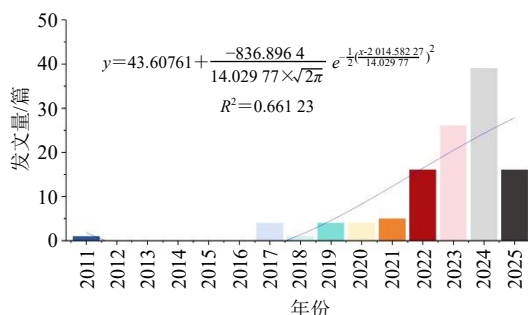


图 1 2011—2025 年 AI+中药活性多糖相关研究的年发文量统计

Fig. 1 Annual publication statistics of studies related to AI + active polysaccharides in traditional Chinese medicine from 2011 to 2025

2.2 国家/地区分布

国家分布特征分析能够有效揭示领域内研究力量的地域分布、合作网络特征及学术影响力格局。国家/地区分布分析涉及 34 个国家/地区, 构建国家合作聚类图如图 2-a 所示, 图中节点直径与年度发文量呈正相关, 色彩聚类表征研究主题相似

性。结合表 1 分析发现, 论文发表大部分集中在亚洲、欧洲和北美国家。中国发表的论文数量最多, 为 63 篇, 其次是美国, 为 20 篇。这既体现了我国在传统药物现代化研究中的战略布局, 也反映出科研投入资源强度与出版物数量在学术话语权上的重要作用。图 2-b 进一步展示了国际合作的频率, 图中节点直径反映年度发文量, 边权重反映国家间合作强度。分析发现中国与美国、澳大利亚、加拿大之间的连线最粗, 形成了一个跨太平洋合作轴心。此外, 结合图 1 发现, 相同聚类的国家之间的连线更频繁, 说明具有相似研究取向的国家更易形成稳定的学术共同体, 这有利于国际研究者开展交流与合作, 推动理论创新。国家/地区突现分析进一步量化了学术影响力的时空动态演变, AI+中药活性多糖领域的国家发文突现见图 2-c, 红色加粗表示国家突现程度。突现强度最强的国家是美国, 为 2.62, 这展现了该领域核心研究国家的突现强度。值得注意的是, 国家引用突现前 14 的国家中, 大部分为发达国家, 这说明欧洲和美洲的发达国家是该领域较大的贡献者, 但发展中国家也正越来越多地将资源投入到这一领域, 如中国、巴基斯坦等国家, 显示出全球范围内研究力量的多元化趋势。这些结果表明, 该领域的研究正在往全球性合作发展, 但更需要各国研究者积极相互合作、建立全球伙伴关系以扩大领域影响范围。

2.3 期刊分布

期刊分布特征分析能够揭示特定领域的核心知识传播平台、研究热点分布及学术影响力格局, 为研究人员选择投稿期刊、了解领域研究动态以及评估研究成果的影响力提供重要参考。整理发现共有 91 个期刊发表过该领域文章, 期刊发文密度可视化见图 3-a, 颜色越红表示发文密度越高, 即期刊在该领域的影响力越大; 节点越大则表示发文量越多。发文量排名前 10 位的期刊见表 2, 发文量排名第 1 的期刊为 *International Journal of Biological Macromolecules*, 为 10 篇; 其次是 *Food Chemistry* 为 4 篇, 表明这 2 个期刊在该领域比其他期刊更活跃, 是目前研究成果的重要发布平台。期刊引文密度可视化见图 3-b, 反映了领域内期刊的引用影响。结合表 2 分析发现, *Heliyon* 期刊被引量位居第 1, 为 132 次; 其次为 *Advanced Functional Materials* 期刊, 为 71 次, 表明对领域知识的传播和推动作用显著。期刊共被引聚类分析见图 3-c, 揭示了期刊在共引网络中的影响力及相互合作关系。被该领域文献

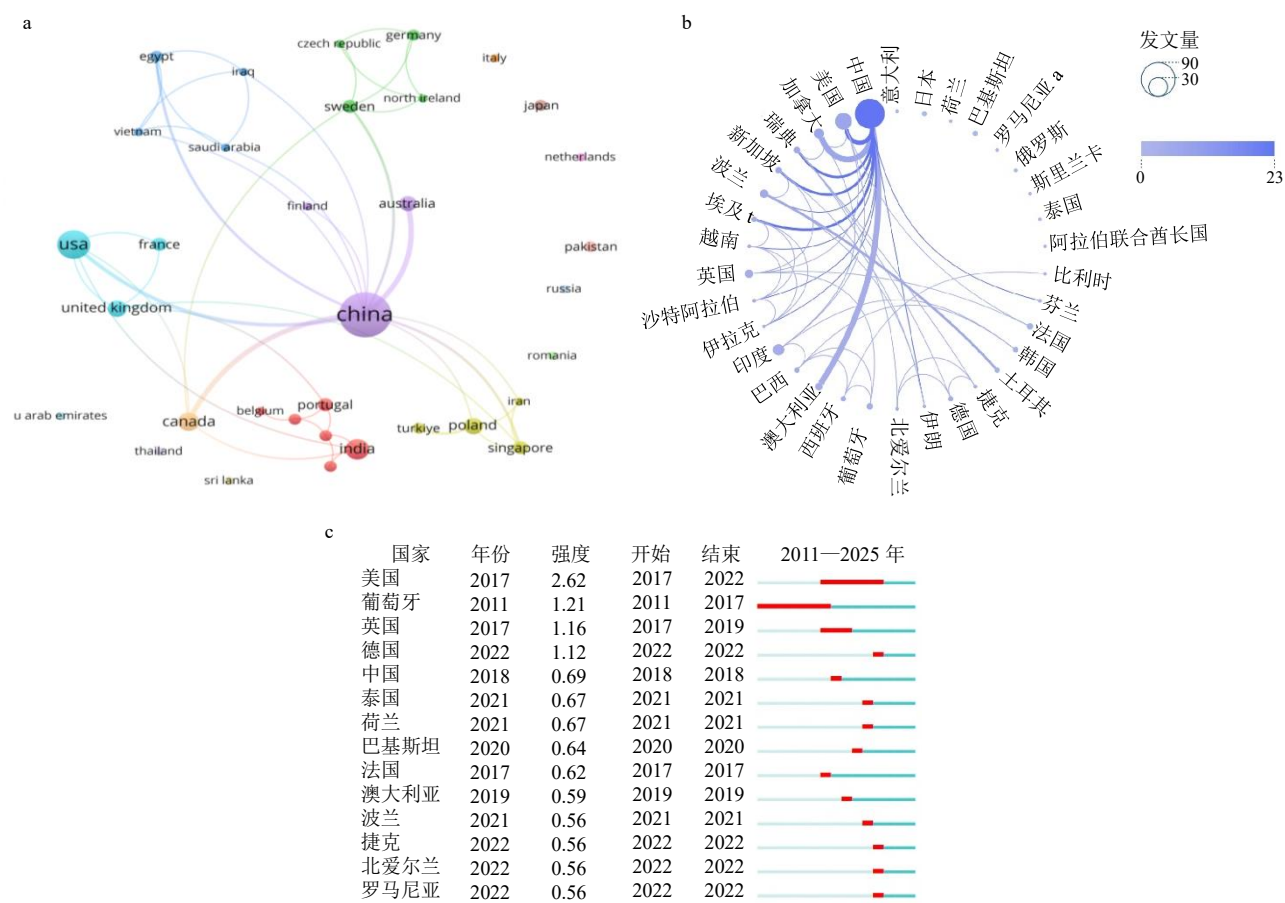


图 2 国家合作聚类图 (a)、国家合作和弦图 (b) 和国家发文突现图 (c)

Fig. 2 Clustering map of national cooperation (a), chord diagram of national cooperation (b), emergence diagram of national publications (c)

表 1 WOS 中发文量前 10 的国家

Table 1 Top 10 countries with volume of publications in WOS

序号	发文量/篇	被引量	年份	中心度	总连线强度	国家
1	62	517	2018	0.72	22	中国
2	20	282	2017	0.30	7	美国
3	9	103	2022	0.24	4	印度
4	7	22	2022	0.21	7	加拿大
5	5	38	2021	0.08	5	波兰
6	4	71	2019	0.00	4	澳大利亚
7	4	21	2017	0.10	3	英国
8	3	26	2017	0.00	2	法国
9	3	9	2011	0.05	3	葡萄牙
10	3	8	2023	0.08	5	新加坡

共同引用的文献期刊共 2 507 个, 选取其中最为核心的 216 个期刊进行聚类, 分为 5 个聚类簇, 其中 *International Journal of Biological Macromolecules*、*Food Chemistry*、*Carbohydrate Polymers*、*Bioresource Technology*、*Nature Communications* 是各组的核心期刊, 具有广泛的共引关系, 表明这些期刊为该领域

共被引的高质量期刊, 形成了一个相对稳定的核心引文网络, 对推动该领域的研究发展起到了重要的引领作用。同时, 这些期刊均为各自领域的知名期刊, 涵盖了从基础研究到应用研究的多个层面, 说明该研究领域具有较高的跨学科性, 涉及多个相关学科的重要研究成果, 反映了 AI+ 中药活性多糖研

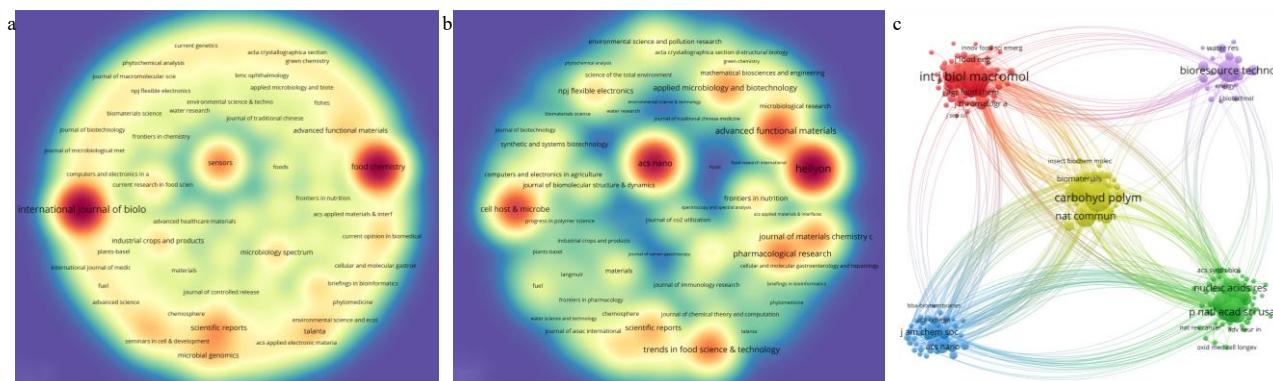


图 3 期刊发文密度可视化 (a)、期刊引文密度可视化 (b) 和共被引聚类 (c)

Fig. 3 Density visualization of journal publications (a), density visualization of journal citation (b), and clustering of journal co-citation (c)

表 2 WOS 中发文量前 10 的期刊

Table 2 Top 10 journals with volume of publications in WOS

序号	发文量/篇	被引量	总连线强度	期刊
1	10	37	44	<i>International Journal of Biological Macromolecules</i>
2	4	3	10	<i>Food Chemistry</i>
3	3	35	7	<i>Scientific Reports</i>
4	3	22	26	<i>Carbohydrate Polymers</i>
5	2	132	6	<i>Heliyon</i>
6	2	71	5	<i>Advanced Functional Materials</i>
7	2	28	13	<i>Sensors</i>
8	2	21	11	<i>Microbiology Spectrum</i>
9	2	8	6	<i>Journal of AOAC International</i>
10	2	8	1	<i>Microbial Genomics</i>

究的广泛性和综合性。以上分析结果共同说明了 AI+中药活性多糖领域的发展态势良好,引用的期刊质量较高,且自身被引用情况也在不断发展和扩大,形成了一个积极的学术交流和知识传播生态。

2.4 作者与机构合作网络

作者和机构合作网络分析不仅能够揭示某一研究领域内核心作者群体和研究机构的分布情况,还能反映研究者之间的合作关系以及机构间的学术交流模式,从而为促进知识共享、推动研究创新提供重要依据。

2.4.1 作者合作 对该领域 767 位作者进行作者合作可视化分析。如表 3 所示,发文量前 10 的作者中,Zhang Min (江南大学)、Depciuch Joanna (美国原子能物理研究所)和 Wang Yuanzhong (云南省农业科学院)发表的文章数并列最多,均为 3 篇;其中,Zhang Min 的被引量居于榜首,说明其研究有着更为重要的学术价值和影响力。绘制作者合作网络(图 4-a),可以清晰地发现该领域目前未形成较大的核心研究群体,发文量较高的作者携其团队形成了一定规模的小聚类,但聚类间合作关系不突出。这说明大部分学者尚未形成规模化的合作集

表 3 WOS 中发文量前 10 的作者

Table 3 Top 10 authors with volume of publications in WOS

序号	发文量/篇	被引量	年份	总连线强度	作者
1	3	71	2019	9	Zhang Min
2	3	5	2023	22	Depciuch Joanna
3	3	3	2024	13	Wang Yuanzhong
4	2	56	2019	8	Wang Jing
5	2	32	2023	19	Li Na
6	2	15	2023	7	Adhikari Benu
7	2	13	2023	16	Liu Qinghua
8	2	13	2023	16	Ma Zhangwen
9	2	13	2023	16	Tang Jiawei
10	2	13	2023	16	Wang Liang

群,该领域的作者合作网络仍处于相对分散的状态,需要加强研究者之间的交流与合作,特别是在跨区域、跨机构的合作方面,以促进知识的共享与创新,推动领域研究向更高水平发展。作者共被引网络图见图 4-b,图中节点(圆圈)的大小表征了作者被共引的频率,节点的连线则表征了共引关系。所有被该领域文献共同引用的作者共 6 944 个,选择作者共被引排名前 135 的数据,形成了 10 个聚类,表明该领域已分化出多个相对独立的研究方

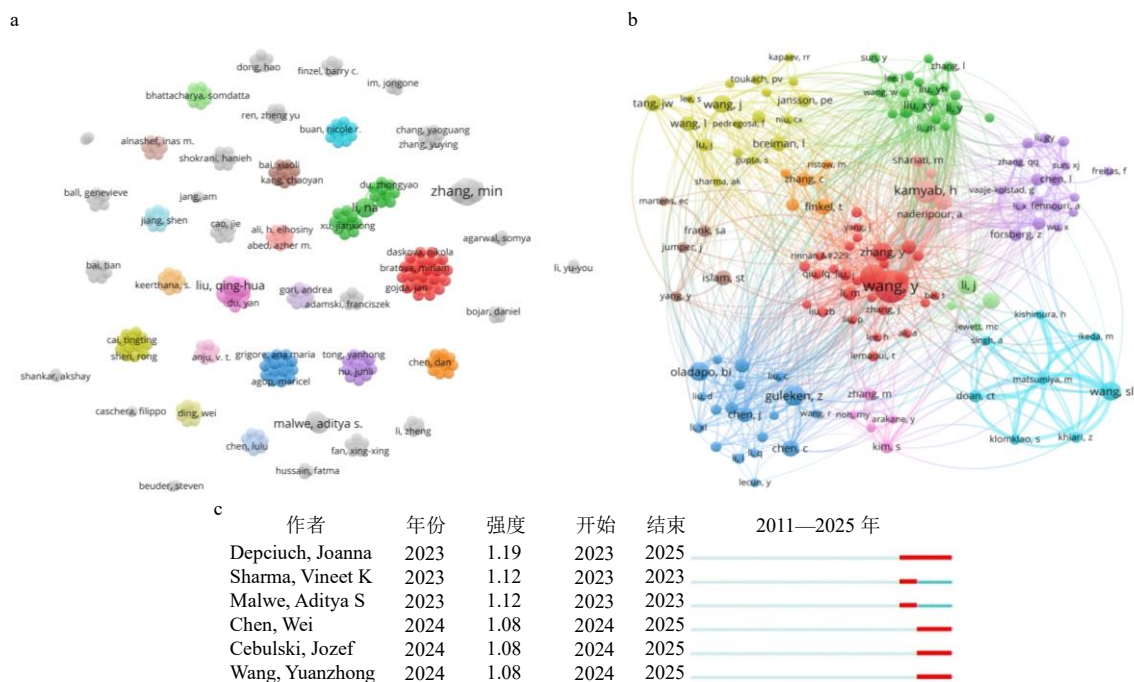


图 4 作者合作可视化 (a)、作者共被引可视化 (b) 和作者发文突现 (c)

Fig. 4 Collaboration visualization of authors(a), co-citation visualization of author (b), and emergence of authors' publications (c)

向。作者发文突现图见图 4-c，列出了发文突现前 6 的作者，所有高突现作者的活跃期均始于 2023—2024 年，说明在近 2 年，该领域的研究出现了新的热点和趋势，相关研究受到了广泛关注，但较低的突现强度（1.08~1.19）显示当前的研究热点尚未形成具有压倒性优势的核心主题，说明该领域仍处于快速发展和探索阶段。

2.4.2 机构合作 本研究覆盖了 AI+中药活性多糖研究领域的 279 个机构，发文量排名前 10 的机构见表 4。浙江大学以 5 篇居发文量首位，但总被引量仅 38 次；中国科学院以 4 篇发文量及总被引

57 次展现更高质量产出。此外，排名第 3 的江南大学被引量达 71 次，具有较大学术影响力。值得注意的是，巴基斯坦的旁遮普大学和费萨拉巴德农业大学的 2 个机构虽仅发表 1 篇该领域文章，但总被引达 129 次，是引用次数最高的机构，其计算模型预测衰老相关生物标志物及衰老机制研究被影响因子为 9.1 的 *Journal of Controlled Release* 引用^[10]，表明其研究成果得到学术界的广泛认可。分别使用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件绘制的机构合作共现网络如图 5-a、b 所示，18 个机构形成 5 个合作集群，而其他机构之间没有合作关系，因此未纳入分

表 4 WOS 中发文量前 10 的机构

Table 4 Top 10 institutions with volume of publications in WOS

序号	发文量/篇	被引量	年份	总连线强度	机构
1	5	38	2022	8	浙江大学
2	4	57	2020	9	中国科学院
3	3	71	2019	5	江南大学
4	3	36	2018	10	澳门科技大学
5	3	8	2023	6	新加坡国立大学
6	3	5	2024	17	热舒夫大学
7	3	3	2024	5	云南省农业科学院
8	2	40	2025	6	中国科学院大学
9	2	31	2023	5	首都医科大学
10	2	16	2019	3	伦敦大学学院

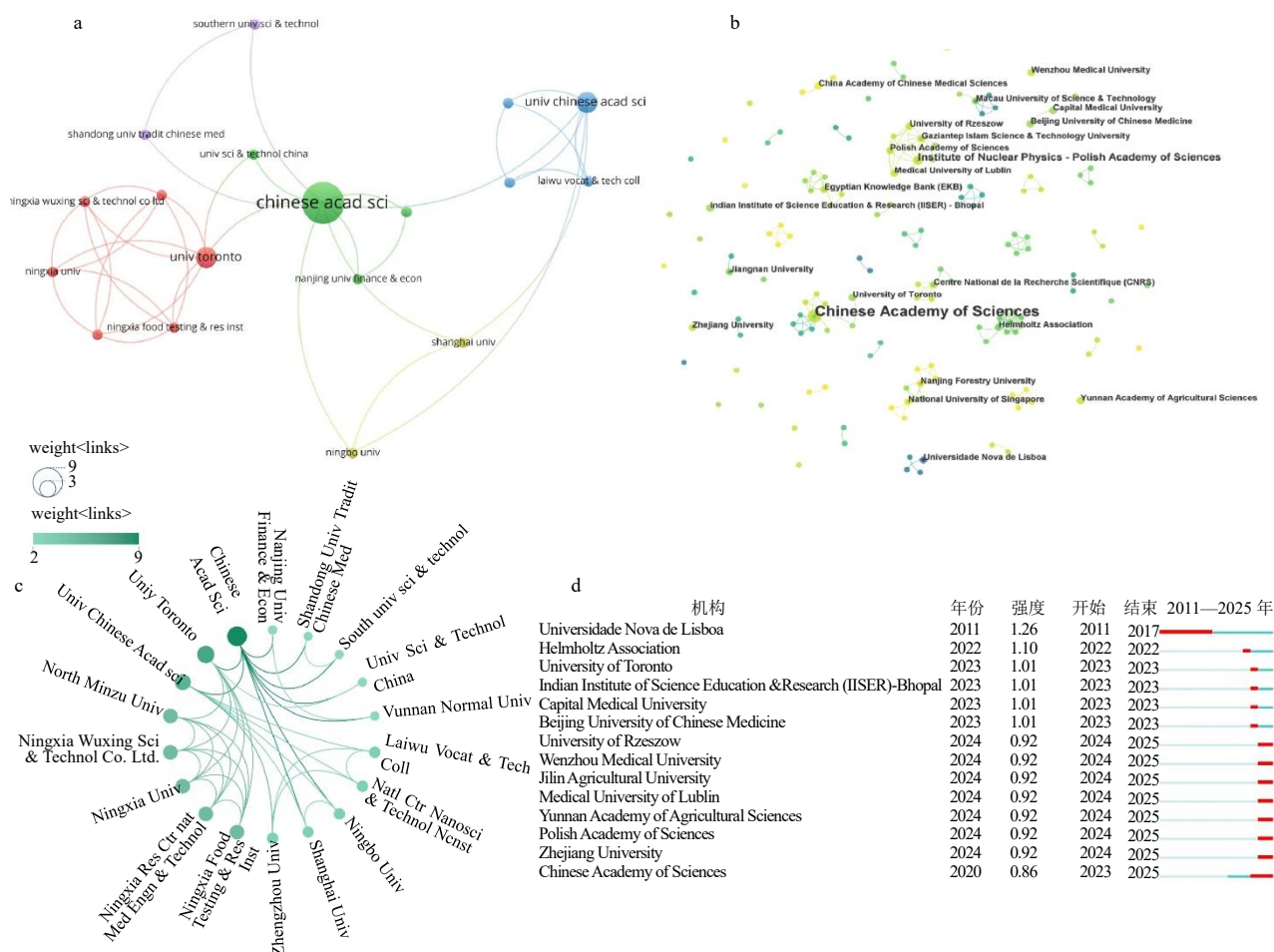


图 5 VOSviewer 机构合作共现图 (a)、CiteSpace 机构合作共现图 (b)、机构合作强度和弦图 (c) 和机构发文突现图 (d)
Fig. 5 VOSviewer institutional collaboration co-occurrence plot (a), CiteSpace institutional collaboration co-occurrence plot (b), institutional collaboration intensity chordal plot (c), and institutional origination emergence plot (d)

析, 这意味着大多数机构目前主要以院校内合作研究为主, 跨院校的合作相对较少, 这在一定程度上限制了研究资源的共享和优势互补, 不利于该领域的快速发展和整体水平的提升。合作网络中以中国科学院为中心, 形成该领域的主要合作关系, 建立了一个具有较大合作潜力的核心群体。此外, 合作机构中大部分为国内机构, 这说明目前机构合作主要集中在国家内部, 国际合作的广度和深度尚有待进一步拓展。为更进一步突出机构间的合作强度, 构建了机构合作强度和弦图 (图 5-c), 图中圆圈越大代表机构合作强度越大, 圆圈和连线颜色越深代表相互间合作越密切。中国科学院的合作强度最高, 表明其在科研合作方面具有显著优势, 这对推动学术交流与资源共享具有重要意义。而加拿大的多伦多大学位居第 2, 也显示出国际合作在促进知识传播中的重要价值。在发文突现方面 (图 5-d),

里斯本新大学虽突现时间最长, 但其研究热点和方向的转变可能导致突现的中断。发文突现第 2 长的是中国科学院, 其在近 2 年展现了较突出的爆发, 可能会成为未来该领域的研究主要机构。其余机构虽然也在近 2 年展现出爆发式突现增长, 预示着其在该领域的研究热度持续上升。

2.5 关键词

关键词的共现性、聚类、时间线和突现分析对于了解 AI+中药活性多糖领域的研究热点, 理清该领域不同主题之间的关系, 及预测最新研究方向具有重要作用。

2.5.1 关键词共现分析 利用 VOSviewer 和 CiteSpace 工具对 WOS 数据库中 AI+中药活性多糖的相关文献所覆盖的 996 个关键词进行共现网络和密度分析, 如图 6-a、b 所示, 排名前 10 的高频关键词见表 5。作为检索公式中包含的关键词, “machine

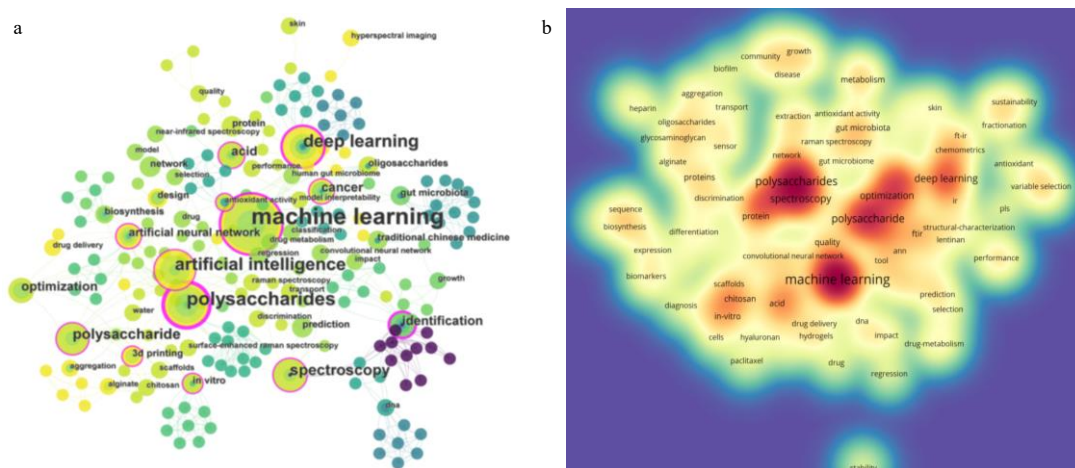


图 6 关键词共现网络 (a) 和关键词发文密度图 (b)

Fig. 6 Co-occurrence network (a) and publications density map (b) of keywords

表 5 WOS 中排名前 10 的高频关键词

Table 5 Top 10 high frequency keywords in WOS

序号	发文量/篇	年份	中心度	总连线强度	关键词
1	30	2019	0.36	290	machine learning
2	17	2020	0.49	202	polysaccharides
3	16	2023	0.12	164	polysaccharide
4	12	2017	0.35	111	deep learning
5	11	2023	0.12	126	artificial intelligence
6	11	2011	0.19	125	spectroscopy
7	8	2011	0.26	102	identification
8	8	2023	0.08	90	optimization
9	7	2022	0.15	84	cancer
10	5	2019	0.12	53	acid

learning”(机器学习)、“polysaccharide(s)”(多糖)、“deep learning”(深度学习)和“artificial intelligence”(人工智能)是排名前 5 的关键词,印证了该领域以智能算法为技术驱动的研究特征。Lu 等^[11]通过 ANN 构建了覆盆子多糖构效关系预测模型; Abdalla 等^[12]创新性地将光谱数据与 ML 结合,开发出可优化结肠靶向制剂多糖包衣的新型预测工具,成功简化药物递送系统的开发流程。此外,“spectroscopy”(光谱学)和“identification”(鉴定)作为高频关键词的出现,揭示了该领域目前研究热点之一为采用光谱技术与 ML 相结合的方法实现中药活性多糖成分的无损高效准确鉴定^[13]; “optimization”(优化)凸显了该领域对中药活性多糖提取工艺优化的深入研究,研究人员致力于通过智能算法优化多糖提取流程,提高提取效率与纯度^[14]。“cancer”(癌症)是另一大研究热点,壳聚糖和透明质酸等天然多糖因其优异的

生物相容性,已成为聚合物药物递送系统的理想载体材料,在肿瘤靶向治疗领域展现出重要应用价值^[15]。此外,“acid”(酸)这一关键词的出现,表明酸性多糖的结构表征以及其在抗氧化等生物活性方面的作用机制是当前研究的重点之一^[16],这些研究为中药活性多糖的药用开发提供更为坚实的理论支撑与实践指导。

2.5.2 关键词聚类分析 利用 VOSviewer 和 CiteSpace 对关键词进行聚类分析,如图 7-a、b 所示。基于 VOSviewer 的关键词聚类网络图谱共分为 10 个颜色集群,包括 116 个核心关键词。高频关键词如“machine learning”(机器学习)、“polysaccharides”(多糖)等在连接本聚类与该领域的其他聚类方面发挥着重要作用。

红色聚类簇(多糖水凝胶的应用)共有 19 个关键词,包括“acid”(酸)、“hyaluronic-acid”(透明质酸)、“hydrogels”(水凝胶)、“scaffolds”(支架)、“starch”(淀粉)、“3D printing”(3D 打印)、“in vitro”(体外)、“medicine”(药物)、“drug delivery”(药物递送)、“nanoparticles”(纳米颗粒)、“design”(设计)等,显示了在生物材料与药物递送领域的多元研究,涵盖了从材料合成、结构设计到药物递送的多方面内容。多糖制备水凝胶后,利用 3D 打印技术制备脚手架和水凝胶支架的相关研究备受关注^[17]。在药物递送系统中,中药活性多糖水凝胶的应用也十分广泛。Yan 等^[18]从蛇瓜根/黄芪中提取活性多糖,并与羧甲基壳聚糖交联形成水凝胶,通过扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱(fourier transform

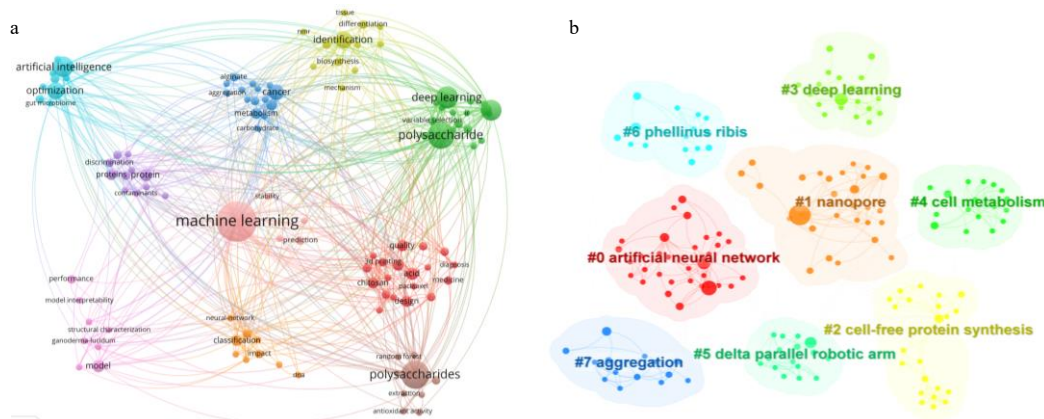


图 7 基于 VOSviewer (a) 和 CiteSpace (b) 的关键词聚类可视化网络

Fig. 7 Clustering visualization networks of keywords based on VOSviewer (a) and CiteSpace (b)

infrared spectroscopy, FTIR) 分析等进行表征。随后使用 3D 打印机将复合水凝胶打印成贴片。结果表明, 水凝胶贴剂的牛血清白蛋白累积释放率高达 89%, 展现出适合药物输送系统应用的硬度和细胞相容性, 在该领域具有极好的应用潜力。

绿色聚类簇(光谱分析与 DL 融合)共有 18 个关键词, 以“spectroscopy”(光谱学)、“deep learning”(深度学习)、“polysaccharide”(多糖)为中心, 包含“ANN”(人工神经网络)、“FTIR”(傅里叶变换红外光谱)、“infrared spectroscopy”(红外光谱)、“antioxidant”(抗氧化剂)、“raman”(拉曼)、“metabolomics”(代谢组学)、“variable selection”(变量选择)、“hyperspectral imaging”(高光谱成像)等, 强调了光谱技术与 DL 在中药活性多糖分析领域中的紧密结合, 为多糖的结构表征以及代谢组学分析等提供了新的思路和方法。Wang 等^[19]采用傅里叶变换衰减全反射红外光谱(attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR)与多变量分析相结合的方法, 完成了药用黄精物种的分类和活性多糖的预测, 还评估了预处理方法和变量选择对偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)和内核偏最小二乘(Kernel-PLSR)模型预测滇黄精多糖的影响。Li 等^[20]使用氢核磁共振(hydrogen nuclear magnetic resonance, ¹H-NMR)技术研究了黄精多糖提取物在小鼠体内的代谢组学研究, 得到的差异代谢物为 3-羟基丁酸、D-核糖、磷酸腺苷、肌醇、6-磷酸果糖、组氨酸、天冬氨酸和顺式乌氨酸。

深蓝色聚类簇(肿瘤微环境调控)共有 15 个关

键词, 以“cancer”(癌症)为中心, 包括“alginate”(藻酸盐)、“carbohydrate”(碳水化合物)、“gut microbiota”(肠道微生物群)、“health”(健康)、“mechanisms”(机制)、“metabolism”(代谢)、“simulation”(模拟)等, 揭示中药活性多糖在肠道菌群调控、预防和治疗癌症的关键作用。近年研究发现, 肠道微生物群是结肠癌和胃癌等癌症的潜在生物标志物和治疗靶点^[21-22]。

黄色聚类簇(生物分子合成代谢与基因研究)包括 12 个关键词, 其中心为“identification”(鉴定), 还有“biomarkers”(生物标志物)、“biosynthesis”(生物合成)、“differentiation”(分化)、“expression”(表达)、“gene”(基因)、“in vivo”(体内)等, 聚焦于中药活性多糖的生物合成、代谢和降解的途径及其作用机制^[23], 应用代谢组学技术揭示了多糖合成关键酶的表达调控规律和转录调控^[24]。

紫色聚类簇(生物分子与材料)包括“proteins”(蛋白质)、“sensor”(传感器)、“transport”(运输)、“glycosaminoglycan”(糖胺聚糖)、“heparin”(肝素)、“nanopore”(纳米孔)、“oligosaccharides”(低聚糖)等 11 个关键词, 表明了生物分子与各类材料之间的相互作用研究热点, 为开发新型生物材料和生物传感器等提供了理论基础。Bayat 等^[25]通过蛋白质纳米孔对糖胺聚糖寡糖和多糖进行全面的结构分配, 证明了野生型气溶素纳米孔可以检测和表征具有各种硫酸盐模式、糖醛酸残基的骨架键和差向异构体的糖胺聚糖寡糖, 解决了破译寡糖和多糖结构的需求。

淡蓝色聚类簇(多糖分离纯化和生物活性研究)以“artificial Intelligence”(人工智能)为中心, 包括

“fractionation”(分级)、“neural-networks”(神经网络)、“optimization”(优化)、“sustainability”(可持续性)、“temperature”(温度)等 10 个关键词,显示了当前部分研究重点集中于利用神经网络和 AI 技术对中药活性多糖的提取分离进行分级优化。Chen 等^[6]采用超声辅助酶提取从肉桂树皮中获得多糖,并采用响应面法(response surface methodology, RSM)和遗传算法反向传播 ANN 模型确定最佳提取条件,实现肉桂粗多糖产量显著提高至 28.35%。进一步分离和纯化提取的肉桂粗多糖,得到 5 种纯化的酸性多糖。生物活性方面,肉桂粗多糖对脂多糖刺激的 RAW264.7 细胞中一氧化氮产生差异抑制,这为开发新型天然来源的抗炎药物提供了可能的候选成分。从提取分离到生物活性评估的各个环节,AI+中药活性多糖的研究都展现出巨大的应用潜力,同时也有助于实现整个研究和生产过程的可持续发展。

橙色聚类簇(药物代谢与基因研究)包括“classification”(分类)、“DNA”(脱氧核糖核酸)、“drug-metabolism”(药物代谢)、“impact”(影响)、“selection”(选择)等 9 个关键词,显示了中药活性多糖领域在药物代谢与基因方面的核心研究。Geng 等^[26]通过转录组和蛋白质组学技术,深入探究了丹参多糖(*Salvia miltiorrhiza* polysaccharides, SMPs)对肝损伤的缓解作用及机制。SMPs 可能通过调控药物代谢相关基因的表达,显著改善模型肉鸡的生长性能、炎症因子水平等。通过对基因表达数据的分析,研究人员发现 SMPs 可能通过调节细胞色素 P450 途径、氧化物酶体增殖物激活受体(peroxisome proliferator activated receptor, PPAR)等关键代谢通路中基因的表达,纠正基因表达异常,减轻肝损伤。这些发现为理解 SMPs 在药物代谢与基因调控层面

的作用提供了重要依据。

棕色聚类簇(多糖提取技术)包括“polysaccharides”(多糖)、“products”(产品)、“random forest”(随机森林)、“water”(水)、“antioxidant activity”(抗氧化活性)、“extraction”(提取)、“microwave-assisted extraction”(微波辅助提取)、“network”(网络)等 9 个关键词,强调了中药活性多糖从提取技术到对其抗氧化活性等特性的评估,以及利用随机森林等方法构建网络,推动多糖产品的多元化和高效化^[27-28]。

玫红色聚类簇(多糖生物模型与性能研究)包括“model”(模型)、“model interpretability”(模型可解释性)、“*Gnoderma lucidum*”(灵芝)、“lentinan”(香菇多糖)、“near-infrared spectroscopy”(近红外光谱)、“performance”(性能)、“structural characterization”(结构表征)等 8 个关键词。通过建立模型并关注其可解释性,结合近红外光谱等技术对灵芝、香菇多糖等进行结构表征和性能分析,为开发新型生物材料和功能产品提供理论支持^[29-30]。

粉色聚类簇(药物预测应用)以“machine learning”(机器学习)为中心,包括“drug”(药物)、“prediction”(预测)、“regression”(回归)、“stability”(稳定性)共 5 个关键词,显示出 ML 技术在药物研究领域的应用方向,主要侧重于利用 ML 对药物的特性进行预测,评估药物的稳定性,从而加速药物研发进程^[31]。该聚类图谱较全面地呈现了 AI 与中药活性多糖研究的深度交叉,催生出多糖生物材料、中药活性多糖提取分离纯化、合成代谢等多个方向,标志着该领域数据驱动的重要作用。

2.5.3 聚类时间线分析 基于关键词聚类分析,构建关键词聚类时间线图,如图 8-a、b 所示。

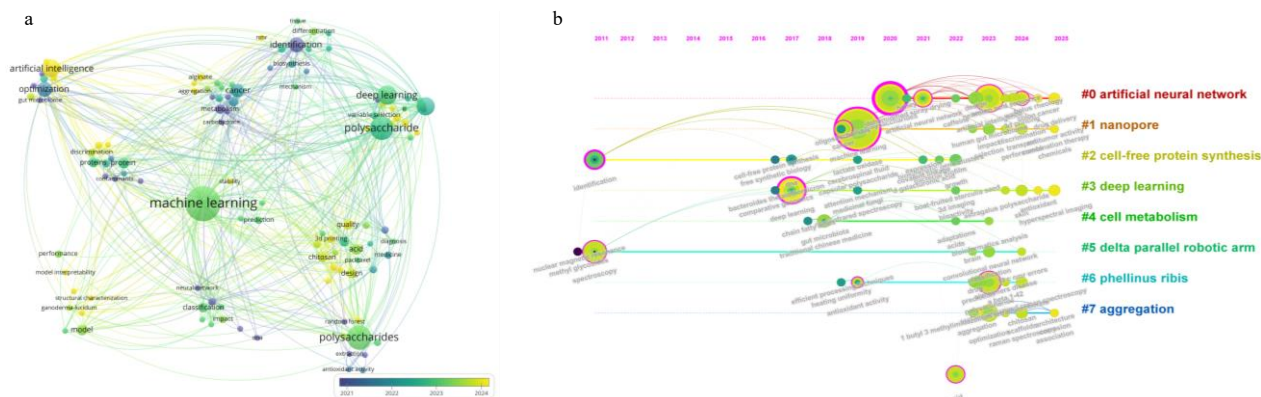


图 8 基于 VOSviewer (a) 和 CiteSpace (b) 的关键词聚类时间线图

Fig. 8 Clustering timeline plots of keywords based on VOSviewer (a) and CiteSpace (b)

延续 VOSviewer 关键词聚类网络的分析, 在图 8-a 中, 聚类关键词平均出现时间越早, 颜色越深。分析发现, 大部分关键词聚类在 2019—2020 年开始有了较大发展, 而在 2021—2022 年, 研究热度较高的关键词聚类集中在肿瘤微环境调控和生物分子合成代谢与基因研究, 同时中药活性多糖分离纯化和生物活性研究也取得了一定进展, 表明在这一时期, 中药活性多糖研究的重点开始向疾病机制探索和生物分子的基础研究倾斜。同时, 分离纯化技术的改进和生物活性的评价也为中药活性多糖的进一步开发利用奠定了物质基础和数据支持。随着研究的不断深入。在 2022—2023 年, 合成代谢与基因研究进一步深化, 光谱分析与 DL 融合作为新兴方法开始崭露头角, 多糖水凝胶的生物材料应用也逐渐受到关注, 说明中药活性多糖研究在这一阶段开始向多学科交叉融合的方向发展, 借助先进的分析技术和制造工艺, 拓展其应用领域和功能。在 2024 年前后, 新兴的多糖生物模型与性能研究、生物分子与材料的关注度显著提升, 药物代谢与基因研究的整体架构进一步完善, 标志着研究继续向智能化、可持续化方向转变, 并可能演变为新的研究方向。呈现出从基础研究到应用研究、从单一学科到多学科交叉融合的趋势, 为未来的研究方向提供了有益的参考。进入 2023—2024 年, 药物代谢与基因研究、中药活性多糖提取技术和药物预测应用这 3 个方面的研究迅速增多, 并形成了较大的聚类群, 表明中药活性多糖研究的重心逐渐向应用转化和技术创新方向过渡。一方面, 通过研究药物代谢与基因调控机制, 可以更好地理解和优化中药活性多糖的安全性; 另一方面, 中药活性多糖提取技术的改进有助于提高产量和质量, 降低生产成本, 为其大规模应用提供可能。总体来看, 这些变化反映了 AI+中药活性多糖研究领域正朝着更加深入、多元和应用导向的方向发展, 不断探索新的研究方法和应用途径, 以满足生物医药、材料科学等领域日益增长的需求。

2.5.4 关键词突现分析 图 9 列出了前 11 个突现关键词, 这 11 个关键词均出现于 2019 年以后, 印证了 2019 年作为该领域快速发展的开始。在这些关键词中, “machine learning”(机器学习) 以高达 3.47 的突现强度遥遥领先, 且从 2023 年到 2025 年, 其热度持续攀升且仍在延续, 反映出 ML 技术在“AI+中药活性多糖”领域不断拓展应用场景和



图 9 关键词突现分析

Fig. 9 Emergence analysis of keywords

深化应用程度。“artificial intelligence”(人工智能) 紧随其后, 突现强度为 1.76, 自 2023 年起至 2025 年关注度持续上升。AI 的广泛应用带动了一系列相关技术如自然语言处理、计算机视觉等的协同发展, 成为该领域数字化转型和科技创新的关键力量, 并且随着技术的演进和人们对智能化需求的提升, 其热度还将进一步延续。“polysaccharide”(多糖) 同样在 2023 年开始突现, 直至 2025 年, 突现强度为 1.7。在中药活性多糖相关研究中, 多糖作为关键成分在药物研发、新型生物材料等方面的应用研究不断取得新进展, 推动该领域的交叉融合发展。这些关键词的突现情况勾勒出了“AI+中药活性多糖”领域在不同时间节点上关注焦点的演变轨迹, 展现了技术热点从基础研究逐渐向应用开发过渡, 以及多学科交叉融合的发展态势, 为研究人员把握未来研究方向和重点提供了有力的参考依据, 同时也反映出科研资源分配、社会需求导向以及技术进步相互作用下学术研究的动态变化过程。

2.6 高被引文献分析

高被引文献分析是文献计量学中的重要方法, 能够揭示研究领域的核心主题、热点方向及其影响力。在共被引文献网络中, 每个聚类表示一个重要的研究主题或方向, 其节点密度和连线强度直接反映研究主题的影响力和关联性。如图 10-a 所示, 共被引次数最多的文献是 Jumper 等^[32]2021 年发表在 *Nature* 杂志上的论文“Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold”, 研究团队结合多序列比对和 DL 技术, 利用物理和生物学知识设计算法, 开发了 AlphaFold 模型。该模型能够在没有已知相似结构的情况下, 以原子级精度准确预测蛋白质的三维结构, 将蛋白质结构预测提升到了新的高度, 解决了困扰科学界 50 多年的蛋白质折叠

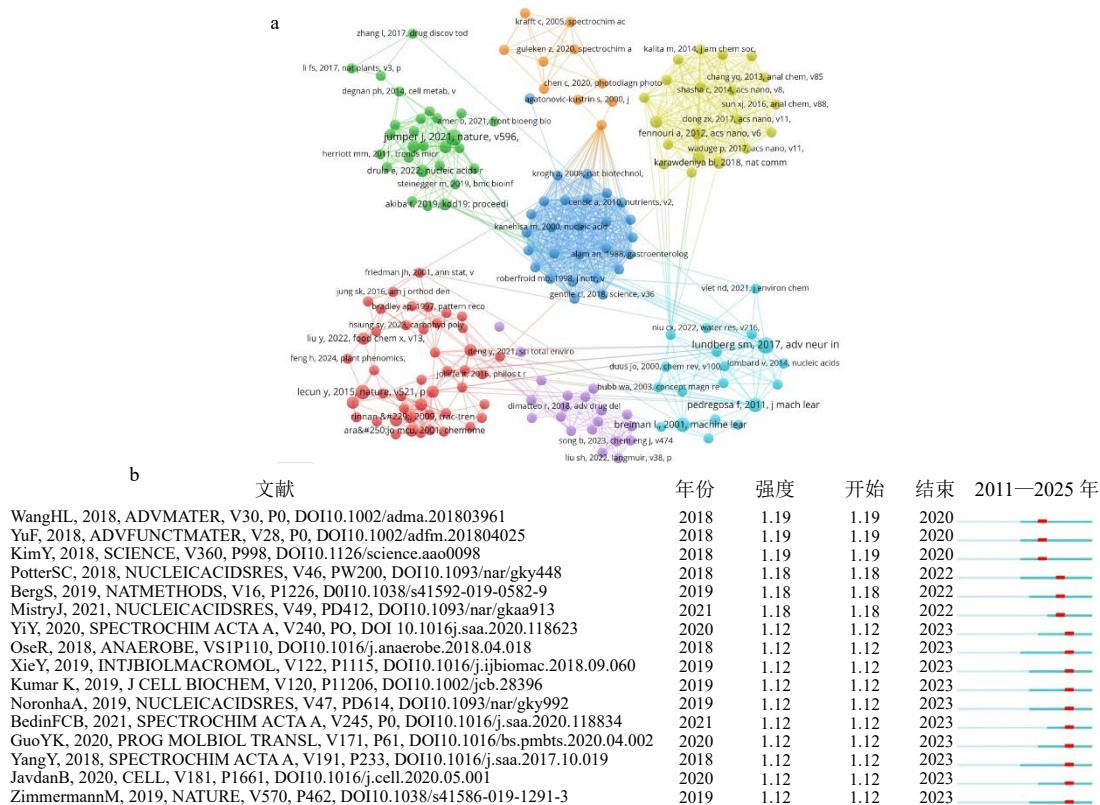


图 10 共被引参考文献可视化网络 (a) 和文献引用突现图 (b)

Fig. 10 Visualization network of co-cited references (a) and emergence map of literature citation (b)

问题。该文献在本领域的共被引网络中的频次为 5 次，这一数据充分显示了该文献在 AI 与中药活性多糖交叉研究领域中发挥的引领性与奠基性作用，为后续相关研究提供了极具价值的理论基础和研究思路，推动了该领域在利用 AI 技术解决复杂生物学问题方面的深入探索与发展。表 6 为 WOS 中该领域排名前 10 的高被引文献，其中有 3 篇综述和 7 篇研究性论文，这说明该领域的研究形成了较为系统的理论框架，同时仍保持着活跃创新性研究状态^[10,33-41]。其中，2020 年 Hussain 等在 *Heliyon* 上发表的“Aging-oxidative stress, antioxidants and computational modeling”是引用最多的文献 ($n=129$)，该文献指出线粒体活性氧通过氧化损伤和促进存活双向调控衰老进程，并强调计算模型（如深度神经网络）在识别衰老生物标志物中的价值，为靶向抗氧化策略和衰老干预提供了重要理论依据。其次是 Yang 等在 2020 年 *Advanced Functional Materials* 上发表的论文“Ultraflexible, degradable organic synaptic transistors based on natural polysaccharides for neuromorphic applications”，该研究首次使用自支撑的天然葡聚糖

膜作为栅极电介质，制作超柔韧和可降解的有机突触晶体管。所得装置的厚度仅为 309 nm，可以在各种曲面上保持稳定的突触行为。且该装置可在水中迅速降解，无任何有毒副产物，有效减少环境污染，为未来基于中性天然生物材料的突触晶体管提供了有意义的指导。排名前 20 的文献引用突现图如图 10-b 所示。近年来，文献的引用突现持续时间普遍较短且突现强度不高，这表明该领域的研究热点更替较快，创新性成果的影响力尚未达到长期稳定的阶段，反映了研究方向的快速演进。

3 讨论

3.1 研究热点与趋势

本研究通过文献计量学分析揭示了 AI+中药活性多糖领域的 3 大核心研究热点。

3.1.1 智能算法驱动的中药活性多糖多环节优化
当前的研究热点之一是 AI 技术在中药活性多糖多环节的应用，ML 与 DL 算法在中药活性多糖提取工艺优化、分离、鉴定、活性预测及构效关系建模等环节中均展现出显著优势，能够提升研究效率与精准度。计算模型在中药活性多糖合成代谢途径解析中的应用也为定向调控多糖生物合成

表 6 WOS 被引量排名前 10 的文献
Table 6 Top 10 cited literature in WOS

序号	被引量	年份	文献	作者	出处	影响因子 (IF) 及分区
1	129	2020	Aging-oxidative stress, antioxidants and computational modeling ^[10]	Hussain F, et al.	<i>Heliyon</i>	IF=3.4, 中科院 4 区
2	66	2020	Ultraflexible, degradable organic synaptic transistors based on natural polysaccharides for neuromorphic applications ^[33]	Yang Y H, et al.	<i>Advanced Functional Materials</i>	IF=18.5, 中科院 1 区 TOP
3	58	2019	Single molecule identification and quantification of glycosaminoglycans using solid-state nanopores ^[34]	Im J O, et al.	<i>Angewandte Chemie International Edition</i>	IF=16.1, 中科院 1 区 TOP
4	57	2019	Recent development in efficient processing technology for edible algae: A review ^[35]	Wang J, et al.	<i>Trends in Food Science and Technology</i>	IF=15.1, 中科院 1 区 TOP
5	56	2020	Artificial intelligence and network pharmacology based investigation of pharmacological mechanism and substance basis of Xiaokewan in treating diabetes ^[36]	Zhu C Y, et al.	<i>Pharmacological Research</i>	IF=9.1, 中科院 2 区
6	49	2022	Fungal secondary metabolites in food and pharmaceuticals in the era of multi-omics ^[37]	Shankar A, et al.	<i>Applied Microbiology and Biotechnology</i>	IF=3.9, 中科院 3 区
7	47	2021	Deep-learning resources for studying glycan-mediated host-microbe interactions ^[38]	Bojar D, et al.	<i>Cell Host and Microbe</i>	IF=20.6, 中科院 1 区 TOP
8	43	2021	Synthetic heparan sulfate standards and machine learning facilitate the development of solid-state nanopore analysis ^[39]	Xia K, et al.	<i>Proceedings of National Academy of Sciences</i>	IF=9.4, 中科院 1 区 TOP
9	40	2020	Bio-polysaccharide electrolyte gated photoelectric synergic coupled oxide neuromorphic transistor with pavlovian activities ^[40]	Guo Y B, et al.	<i>Journal of Materials Chemistry C</i>	IF=5.7, 中科院 3 区
10	33	2023	All-natural phyllosilicate-polysaccharide triboelectric sensor for machine learning-assisted human motion prediction ^[41]	Liu Y H, et al.	<i>NPJ Flexible Electronics</i>	IF=12.3, 中科院 1 区 TOP

提供了新思路^[42]。未来 AI 技术在中药活性多糖领域的应用场景将更丰富，推动基础研究向实际应用快速转化，为中药现代化及生物医药产业发展提供支撑。

3.1.2 多糖基生物材料的智能化开发 中药活性多糖基生物材料具有广泛的应用前景和重要价值，其在生物医药领域展现出巨大的潜力。其应用涵盖了从材料合成、结构设计到药物递送的多方面内容。壳聚糖等天然多糖因其良好的生物相容性和可修饰性，成为智能药物递送系统的理想载体^[43]。研究显示，利用花生蛋白-多糖半互穿网络并结合 3D 打印技术构建的复合水凝胶具有热可逆性，并可响应 pH 值的变化，可回收、可食用，为开发个性化食品的植物性食用油墨提供参考^[44]。随着生物材料科学与 AI 技术的不断融合，多糖基生物材料的智能化开发将为生物医药领域带来更多的创新和突破，有望在疾病治疗和组织修复等方面发挥更大的作用。

3.1.3 精准医疗与癌症疾病预防调控 中药活性多糖在癌症治疗、肠道菌群调控及免疫调节中的作用备受关注。随着研究的深入，肠道菌群与癌症之

间的复杂关系被不断揭示，其在癌症的发生、发展以及治疗效果等方面的重要地位愈发凸显。黄芪多糖通过调节肠道菌群改善癌症微环境，进而影响癌症的发生和发展^[45]。此外，中药活性多糖如海藻多糖还能够调节免疫系统，增强机体的免疫监视和免疫防御功能，有助于治疗癌症、传染病、炎症等^[46]。这些研究进展为多糖在精准医疗中的应用提供了新的思路和技术支持，有望在癌症的早期诊断、个性化治疗和预后评估等方面发挥重要作用。

3.2 局限性

3.2.1 语言与地域偏倚 本研究仅纳入英文文献，而中文文献虽数量较少，但可能包含区域性技术创新，未来需囊括多语言数据库以全面评估领域进展。

3.2.2 技术应用深度不足 当前 AI 模型多聚焦于多糖预测与技术优化，但在多糖作用机制解析（如免疫调节通路）中的应用仍较浅层^[47]，需结合图神经网络等高级算法深化机制研究。

3.2.3 国际合作薄弱 中国虽在发文量上领先，但国际合作率较低，而欧美国家通过跨国合作

形成了紧密的研究网络，未来需加强跨区域资源共享。

4 结论与展望

本研究通过文献计量学揭示了 AI+中药活性多糖领域的 3 大特征。(1) 技术驱动性：智能算法成为中药活性多糖研究转型的核心动力，数据建模和光谱分析在工艺优化和成分解析中发挥了重要作用。(2) 学科交叉性：领域融合了药学、材料学、计算科学等多学科，催生了智能生物材料、精准医疗等新兴方向。(3) 地域集中性：中国在传统药物现代化研发发挥了重要作用，但需通过国际合作提升学术影响力。

未来研究可从以下方向突破。(1) 技术创新：开发专用于中药活性多糖结构解析的 AI 算法，以解决传统光谱技术的局限性；整合多组学数据构建“多糖-靶点-疾病”网络，推动个性化治疗策略设计。(2) 应用拓展：探索中药活性多糖在环境治理和慢性病管理中的跨界应用；推动仿生递送系统的临床转化，结合监管科学建立评价标准。(3) 协同发展：加强“产学研医”联动，建立活性多糖资源数据库与开源算法平台，促进数据共享；依托“一带一路”等国际合作框架，深化与欧美国家在技术标准共建、临床试验合作等方面的交流。本研究为 AI+中药活性多糖的跨学科发展提供了全局视角，未来需持续追踪技术演进与政策动态，以推动这一领域的可持续发展。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Dai L J, Yu P F, Fan H J, *et al.* Identification and validation of new DNA-PKcs inhibitors through high-throughput virtual screening and experimental verification [J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(14): 7982.
- [2] Wang X Y, Wang Y. Analysis of trust factors for AI-assisted diagnosis in intelligent Healthcare: Personalized management strategies in chronic disease management [J]. *Expert Syst Appl*, 2024, 255(Pt A): 124499.
- [3] Li L F, Zhang Q W, Han Q B. Recent advances in qualitative and quantitative analysis of polysaccharides in natural medicines: A critical review [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2022, 220: 115016.
- [4] Zhang W J, Zhang X J, Bai Q X, *et al.* Structure-effect relationship studies of polysaccharides based on receptor-active centres: An alternative view [J]. *Food Funct*, 2023, 14(11): 4981-5000.
- [5] Malashin I, Martysyuk D, Tynchenko V, *et al.* Machine learning-based process optimization in biopolymer manufacturing: A review [J]. *Polymers*, 2024, 16(23): 3368.
- [6] Chen Q C, Zhang W Q, Wang Y L, *et al.* Genetic algorithm-back propagation neural network model- and response surface methodology-based optimization of polysaccharide extraction from *Cinnamomum cassia* presl, isolation, purification and bioactivities [J]. *Foods*, 2025, 14(4): 686.
- [7] 施江南, 温乐乐, 江丽洁, 等. 基于文献计量学的覆盆子研究热点与趋势分析 [J]. *中草药*, 2025, 56(2): 598-616.
- [8] Lunny C, Neelakant T, Chen A, *et al.* Bibliometric study of ‘overviews of systematic reviews’ of health interventions: Evaluation of prevalence, citation and journal impact factor [J]. *Res Synth Methods*, 2022, 13(1): 109-120.
- [9] Agyemang E F. A Gaussian process regression and wavelet transform time series approaches to modeling influenza A [J]. *Comput Biol Med*, 2025, 184: 109367.
- [10] Warraich U E A, Hussain F, Kayani H U R. Aging-Oxidative stress, antioxidants and computational modeling [J]. *Heliyon*, 2020, 6(5): e04107.
- [11] Lu J, Yang Y J, Hong E K, *et al.* Analyzing the structure-activity relationship of raspberry polysaccharides using interpretable artificial neural network model [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 264(Pt 1): 130354.
- [12] Abdalla Y, McCoubrey L E, Ferraro F, *et al.* Machine learning of Raman spectra predicts drug release from polysaccharide coatings for targeted colonic delivery [J]. *J Control Release*, 2024, 374: 103-111.
- [13] 谷传凯, 褚璇, 刘洪利, 等. 基于高光谱技术的金线莲多糖与黄酮含量的无损检测 [J]. *食品工业科技*, 2025, 46(7): 227-234.
- [14] Hu W W, Ye X Q, Chantapakul T, *et al.* Manosonication extraction of RG-I pectic polysaccharides from *Citrus* waste: Optimization and kinetics analysis [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 235: 115982.
- [15] Jiang M P, Wu R P, Liu D Q, *et al.* Utilizing Ni (II) complex for metal drug-gel particles in cervical cancer treatment and designing novel drugs through machine learning methods [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 5421.
- [16] Yang Y M, Qiu Z C, Li L Y, *et al.* Structural characterization and antioxidant activities of one neutral polysaccharide and three acid polysaccharides from *Ziziphus jujuba* cv. Hamidazao: A comparison [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 261: 117879.

- [17] Huang J H, Huang Z W, Xiong J Y, *et al.* 3D bioprinted scaffolds of polysaccharide hydrogels in osteochondral and cartilage tissue engineering [J]. *Des Monomers Polym*, 2023, 26(1): 258-272.
- [18] Yan J X, Wang Y, Zhang X, *et al.* Snakegourd root/*Astragalus* polysaccharide hydrogel preparation and application in 3D printing [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 121: 309-316.
- [19] Wang Y, Li Z M, Li W Y, *et al.* Rapid identification of medicinal *Polygonatum* species and predictive of polysaccharides using ATR-FTIR spectroscopy combined with multivariate analysis [J]. *Phytochem Anal*, 2025, 36(3): 677-692.
- [20] Li T T, Xu S, Bi J L, *et al.* Metabolomics study of polysaccharide extracts from *Polygonatum sibiricum* in mice based on ¹H NMR technology [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(12): 4627-4635.
- [21] Chen M H, Lin W, Li N, *et al.* Therapeutic approaches to colorectal cancer via strategies based on modulation of gut microbiota [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 945533.
- [22] Liu S L, Dai J J, Lan X, *et al.* Intestinal bacteria are potential biomarkers and therapeutic targets for gastric cancer [J]. *Microb Pathog*, 2021, 151: 104747.
- [23] Chen L S, Xu S W, Liu Y J, *et al.* Identification of key gene networks controlling polysaccharide accumulation in different tissues of *Polygonatum cyrtoneura* Hua by integrating metabolic phenotypes and gene expression profiles [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 1012231.
- [24] Li Z W, Sang R X, Feng G L, *et al.* Microbiological and metabolic pathways analysing the mechanisms of alfalfa polysaccharide and sulfated alfalfa polysaccharide in alleviating obesity [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 263: 130334.
- [25] Bayat P, Rambaud C, Priem B, *et al.* Comprehensive structural assignment of glycosaminoglycan oligo- and polysaccharides by protein nanopore [J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5113.
- [26] Geng Y M, Lu C Y, Jin G Z, *et al.* Study on the mechanism of *Salvia miltiorrhiza* polysaccharides in relieving liver injury of broilers induced by florfenicol [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2022, 29(3): 3372-3385.
- [27] Rahman S S A, Pasupathi S, Venkatachalam P, *et al.* Modeling, optimization, and characterization of polysaccharides from *Strychnos potatorum* using microwave-assisted extraction [J]. *Biomass Convers Biorefin*, 2025, 15(2): 2111-2129.
- [28] Qiu J J, Shi M L, Li S Q, *et al.* Artificial neural network model- and response surface methodology-based optimization of *Atractylodes Macrocephalae Rhizoma* polysaccharide extraction, kinetic modelling and structural characterization [J]. *Ultrason Sonochem*, 2023, 95: 106408.
- [29] Ni H F, Fu W L, Wei J, *et al.* Non-destructive detection of polysaccharides and moisture in *Ganoderma lucidum* using near-infrared spectroscopy and machine learning algorithm [J]. *LWT*, 2023, 184: 115001.
- [30] Dong X, Gao X K, Wang R, *et al.* Evaluation of polysaccharide content in shiitake culinary-medicinal mushroom, *Lentinula edodes* (Agaricomycetes), via near-infrared spectroscopy integrated with deep learning [J]. *Int J Med Mushrooms*, 2023, 25(1): 13-28.
- [31] Alomari A K, Almansour K. Chemometric and computational modeling of polysaccharide coated drugs for colonic drug delivery [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 14694.
- [32] Jumper J, Evans R, Pritzel A, *et al.* Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold [J]. *Nature*, 2021, 596(7873): 583-589.
- [33] Yang Y H, Zhao X L, Zhang C, *et al.* Ultraflexible, degradable organic synaptic transistors based on natural polysaccharides for neuromorphic applications [J]. *Adv Funct Materials*, 2020, 30(51): 2006271.
- [34] Im J, Lindsay S, Wang X, *et al.* Single molecule identification and quantification of glycosaminoglycans using solid-state nanopores [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(6): 6308-6318.
- [35] Wang J, Zhang M, Fang Z X. Recent development in efficient processing technology for edible algae: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 88: 251-259.
- [36] Zhu C Y, Cai T T, Jin Y, *et al.* Artificial intelligence and network pharmacology based investigation of pharmacological mechanism and substance basis of Xiaokewan in treating diabetes [J]. *Pharmacol Res*, 2020, 159: 104935.
- [37] Shankar A, Sharma K K. Fungal secondary metabolites in food and pharmaceuticals in the era of multi-omics [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2022, 106(9/10): 3465-3488.
- [38] Bojar D, Powers R K, Camacho D M, *et al.* Deep-learning resources for studying glycan-mediated host-microbe interactions [J]. *Cell Host Microbe*, 2021, 29(1): 132-144.
- [39] Xia K, Hagan J T, Fu L, *et al.* Synthetic heparan sulfate standards and machine learning facilitate the development of solid-state nanopore analysis [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118(11): e2022806118.
- [40] Guo Y B, Zhu L Q, Long T Y, *et al.* Bio-polysaccharide electrolyte gated photoelectric synergic coupled oxide neuromorphic transistor with Pavlovian activities [J]. *J*

- Mater Chem C*, 2020, 8(8): 2780-2789.
- [41] Liu Y H, Shen Y W, Ding W, *et al.* All-natural phyllosilicate-polysaccharide triboelectric sensor for machine learning-assisted human motion prediction [J]. *NPJ Flex Electron*, 2023, 7: 21.
- [42] Huang Z Y, Wang L J, Wang J J, *et al.* Hispaglabridin B, a constituent of liquorice identified by a bioinformatics and machine learning approach, relieves protein-energy wasting by inhibiting forkhead box O1 [J]. *Br J Pharmacol*, 2019, 176(2): 267-281.
- [43] Gorain B, Pandey M, Leng N H, *et al.* Advanced drug delivery systems containing herbal components for wound healing [J]. *Int J Pharm*, 2022, 617: 121617.
- [44] Lin Q Z, Hu Y, Qiu C, *et al.* Peanut protein-polysaccharide hydrogels based on semi-interpenetrating networks used for 3D/4D printing [J]. *Food Hydrocoll*, 2023, 137: 108332.
- [45] Chen T, Xie L M, Shen M Y, *et al.* Recent advances in *Astragalus* polysaccharides: Structural characterization, bioactivities and gut microbiota modulation effects [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2024, 153: 104707.
- [46] Hwang J, Yadav D, Lee P C, *et al.* Immunomodulatory effects of polysaccharides from marine algae for treating cancer, infectious disease, and inflammation [J]. *Phytother Res*, 2022, 36(2): 761-777.
- [47] Govindarajan S, Ayesha N. Biological activities of plant polysaccharides, mechanism of action and biomedical applications [J]. *Res J Biotech*, 2021, 16(7): 255-272.

[责任编辑 潘明佳]