

## 基于 Citespace 可视化分析 5 种真菌多糖研究进展

池 妍<sup>1,2</sup>, 王雅芝<sup>1,2</sup>, 王 昊<sup>1</sup>, 汲晨锋<sup>1,2\*</sup>

1. 哈尔滨商业大学药学院, 黑龙江 哈尔滨 150076

2. 抗肿瘤天然药物教育部工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150076

**摘要:** 目的 真菌是我国独特的优势资源, 多糖是真菌最主要的活性成分之一, 选取 5 种广泛应用的真菌多糖, 基于 Citespace 全面分析该研究领域的发展现状、研究热点与前沿趋势, 并浅析真菌多糖发展的薄弱环节, 为未来该领域的科学研究和产业发展提供参考。方法 利用中国知网、万方、维普以及 Web of Science 数据库, 以“香菇多糖”“灵芝多糖”“灰树花多糖”“黑木耳多糖”“虫草多糖”为关键词检索相关文献, 通过 NoteExpress 去重合并, 使用 Citespace 6.2 R4 软件对其作者、机构、关键词等进行可视化分析和内涵解读。结果 5 种真菌多糖领域的研究主要以中国学者和科研机构为主, 研究方向主要围绕提取工艺、结构表征、药理活性 3 个热点方面展开。然而目前真菌多糖仍缺乏潜在药效机制的探索创新并存在临床验证、质量评控等薄弱环节。结论 真菌多糖的研究与开发是助力大健康产业高质量发展的内容之一, 应进一步加强多学科领域交叉与合作, 攻克薄弱环节, 提升真菌多糖在医药、食品、农业等领域的重要应用价值。

**关键词:** 真菌多糖; 文献计量学; 可视化分析; Citespace; 香菇多糖; 灵芝多糖; 灰树花多糖; 黑木耳多糖; 虫草多糖

**中图分类号:** R914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5515(2024)23-8130-23

**DOI:** 10.7501/j.issn.1674-5515.2024.23.020

## Visual analysis of research progress on five kinds of fungal polysaccharides based on Citespace

CHI Yan<sup>1,2</sup>, WANG Yazhi<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, JI Chenfeng<sup>1,2</sup>

1. School of Pharmacy, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China

2. Engineering Research Center for Natural Anti-tumor Drugs, Ministry of Education, Harbin 150076, China

**Abstract: Objective** Fungi are a unique and advantageous resource in China. Polysaccharides are one of the most important active ingredients in fungi. A total of five widely used fungal polysaccharides were selected and based on Citespace, comprehensively analyzed the development status, research hotspots and frontiers of fungal polysaccharide research, and briefly analyzed the weak links in the development of fungal polysaccharides to provide reference for future scientific research and industrial development in this field. **Methods** By using Chinese databases (CNKI, Wanfang, VIP) and Web of Science (WOS), relevant literature with keywords as “lentinan”, “*Ganoderma lucidum* polysaccharide”, “*Grifola frondosa* polysaccharide”, “*Auricularia auricula* polysaccharide” and “*Cordyceps* polysaccharide” was retrieved. After deduplication and format conversion by NoteExpress, Citespace 6.2 R4 software was used for visual analysis and connotation interpretation of the authors, institutions, and keywords. **Results** The research field of fungal polysaccharides is mainly led by Chinese scholars and scientific research institutions, with research directions mainly focusing on three hotspots such as extraction technology, structural characterization, and pharmacological activity. However, there is still a lack of exploration and innovation in the potential pharmacological mechanisms, clinical verification, and quality control of fungal polysaccharides. **Conclusion** The research and development of fungal polysaccharides are one of the important contents to promote the high-quality development of the great health industry. It is necessary to further strengthen the intersection and cooperation in multidisciplinary fields, overcome weak links, and enhance the important role of fungal polysaccharides in the fields of medicine, food, and agriculture.

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 黑龙江省重点研发计划指导类项目资助 (GZ20210088); 哈尔滨市科技创新人才项目 (2022CXRC0013); 黑龙江省双一流学科协同创新成果项目 (LJGXCG2023-039); 哈尔滨商业大学产业化项目 (22CZ13)

作者简介: 池 妍 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为多糖的化学和药理研究。E-mail: m15197665871@163.com

\*通信作者: 汲晨锋 (1978—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为多糖的化学和药理研究。E-mail: smilejcf001@sina.com

**Key words:** fungal polysaccharide; bibliometrics; visual analysis; Citespace; lentinan; *Ganoderma lucidum* polysaccharide; *Grifola frondosa* polysaccharide; *Auricularia auricula* polysaccharide; *Cordyceps* polysaccharide

我国食药真菌资源丰富,可广泛应用于医药、食品等领域。真菌中含有多糖、膳食纤维、蛋白质、萜类等多种活性成分,具有很高的营养药用价值,其中多糖因其具有抗肿瘤、抗炎、抗氧化等多种药理作用,是真菌中的重要活性物质,被誉为“生物反应调控剂<sup>[1]</sup>”,近年来已成为肿瘤患者治疗的重要辅助手段之一。2022 年全球菌类多糖市场需求量约为 8 万吨,预计到 2028 年将增长至 13 万吨。中国是全球最大的菌类多糖生产国,产量占据全球总产量的约 60%。随着科学技术的进步,有关真菌多糖的相关研究日益增多,研究者通过将提取技术的传统与创新进行多元化结合,极大提升多糖提取效率,对多糖构效关系的解析愈加丰富,其复杂的生物学特性和潜在的分子作用机制逐渐被揭示,真菌多糖在基础与开发应用等多个领域的创新具有重要的科学意义。目前,被广泛认知与应用的真菌多糖相关研究文献数量逐年增长,在大健康、大食物观的背景下,真菌多糖的营养价值和保健价值更加得到重视和瞩目。不同真菌多糖从制备到应用呈现出不同程度的优势与不足,该研究领域的重点及薄弱环节也逐渐凸显,因此有关真菌多糖大量的研究成果和数据亟需系统化整理,进行客观的可视化文献计量学分析研究。

Citespace 是基于科学文献计量学的一种工具,专注于对特定知识领域在一定时期内的科学文献进行量化分析,运用社会网络分析和聚类分析等方法,挖掘其研究热点和前沿动态<sup>[2]</sup>。本研究选取 5 种真菌多糖相关文献作为研究对象,应用 Citespace 6.2.R4 软件分别对其发文作者、发文机构、关键词进行分析,并绘制可视化图谱。通过对上述文献的梳理,利用视觉特征快速直观地了解真菌多糖物质研究的知识结构及发展演化过程,浅析国内外在真菌多糖物质研究上的差异及目前存在的薄弱环节,并从共现网络图中挖掘真菌多糖的研究热点,预测其发展趋势,为广大研究者提供一定的参考依据,以期拓宽真菌多糖在医药、保健食品等领域的应用,推动食用菌健康产业发展 and 创新。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源

中文文献来源于中国知网、万方数据库、维普

网。进入高级检索窗口,检索条件:主题词分别为“香菇多糖”“灵芝多糖”“灰树花多糖”“黑木耳多糖”“虫草多糖”;时间范围:2010 年 1 月 1 日—2024 年 6 月 30 日,经检索筛选、去重处理后,得到文献 3 305 篇。

英文文献来源于 Web of Science (WOS) 核心合集数据库,检索词分别为“lentinan<sup>[3]</sup>”“*Ganoderma lucidum* polysaccharide<sup>[4]</sup>”“*Grifola frondosa* polysaccharide<sup>[5]</sup>”“*Auricularia auricula* polysaccharide<sup>[6]</sup>”“*Cordyceps* polysaccharide<sup>[7]</sup>”,英文检索词均参考英文文献而定。时间范围为 2010 年 1 月 1 日—2024 年 6 月 30 日。经检索筛选、去重处理,得到文献 1 121 篇。

### 1.2 纳入标准

中文文献:标题包含主题词,文献类型为期刊论文和学位论文。英文文献:标题包含主题词,文献类型为“article”和“review”。

### 1.3 排除标准

重复文献;会议论文、科技成果、图书等文献;主要主题与检索词无关或无法评估的文献。

### 1.4 研究流程

对 5 种真菌多糖的相关文献进行初步筛选,中文文献经 NoteExpress 去重合并,格式批量转换为 CNKI 格式,应用 Citespace 可视化软件进行分析,研究流程见图 1。Citespace 软件参数:中文、英文数据来源(data source)分别选择 CNKI、WOS。时间分区(time slicing):2010 年 1 月—2024 年 6 月。时间切片(years per slice)均为 1,节点类型选择作者(author)、机构(institution)、关键词(keyword)。分析筛选标准均为 g-index ( $k=25$ ),其余参数为系统默认值,将软件转化的数据进行可视化分析,深入探究文献作者、研究机构、关键词之间的共现性,以及关键词聚类分析、突现变化和 5 种真菌多糖的总发文趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于 Citespace 的香菇多糖分析

香菇 *Lentinus edodes* (Berk.) Sing 是一种极具营养药用价值的食用菌,有“菌中之王”的美誉。香菇多糖是一种生物活性物质,对提高机体免疫力有一定的疗效。将其有关中、英文文献进行可视化分





图 3 香菇多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献机构合作图谱

Fig. 3 Collaborative maps of institutions in Chinese (A) and English (B) literature on lentinan research

英文文献中, 发文量最高的机构是华中科技大学 (18 篇), 其次是南京农业大学 (9 篇)、西安交通大学 (6 篇)。由图 3-B 可以看出各节点连线较多, 说明英文文献中高校间合作紧密并且与其他机构有所合作。结合中英文文献机构网络图谱可以发现, 研究机构间的合作是促进学术交流、提高研究成果水平及增强国际影响力的重要途径之一。

**2.1.3 关键词共现、聚类及突现分析** 关键词可用于总结研究领域的重要成果和进展, 以便于研究者更好地了解相关领域的发展趋势。香菇多糖的关键词共现网络图谱中, 中文图谱有 509 个节点、1 269 条连线, 每个节点对应 1 个关键词, 选取  $\text{count} \geq 5$  进行标注, 如图 4-A 所示, 频次排名前 5 位的关键词

依次是香菇多糖 (889)、顺铂 (110)、化疗 (55)、免疫功能 (52)、提取 (42)。英文图谱有 312 个节点, 1 129 条连线, 选取  $\text{count} \geq 4$  进行标注, 如图 4-B 所示, 频次排名前 5 位的关键词依次是 polysaccharides (24)、antitumor activity (24)、edodes (22)、cells (20)、expression (19)。中介中心度作为衡量网络中节点重要程度的 1 个重要指标, 可以挖掘出研究的焦点和热点, 并且中心度  $\geq 0.1$  时, 表明该节点在知识网络图谱中占有重要作用。中、英文文献排名前 5 的关键词中介中心度见表 1。将图表结合可以看出, 香菇作为重要的药食资源之一, 其成分香菇多糖免疫活性强, 具有减毒增效的作用, 可作为肿瘤化疗的辅助制剂, 具有极大的临床价值。

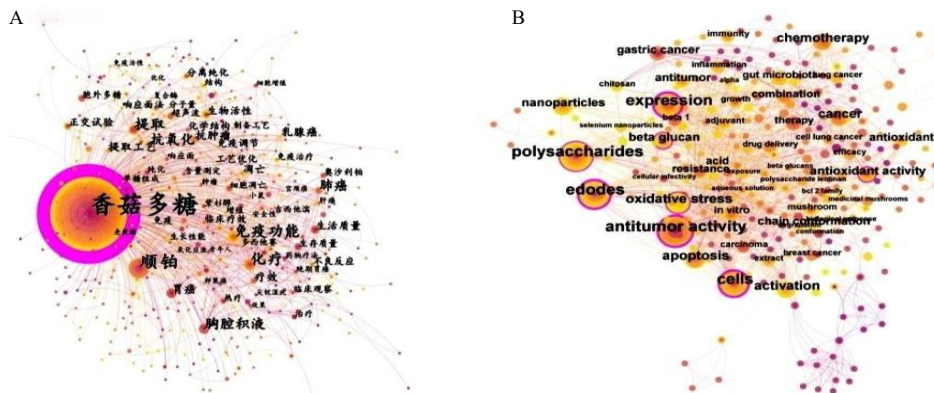


图 4 香菇多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词共线网络

Fig. 4 Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on lentinan research

采用对数似然比 (log-likelihood ratio, LLR) 算法, 对中英文文献进行聚类分析, 获得聚类图谱, 如图 5 所示。中文文献得到 11 个聚类标签: #0 香菇多糖、#1 多糖、#2 胸腔积液、#3 抗肿瘤、#4 抗氧化、#5 协同作用、#6 生长性能、#7 得率、#8 治疗、#9 尖锐湿疣、#10 膜剂。英文文献得到 6 个聚

类标签: #0 induced resistance (诱导抗性)、#1 oxidative stress (氧化应激)、#2 beta-(1→3)-D-glucan (β-葡聚糖)、#3 meta-analysis (Meta 分析)、#4 chain conformation (链构象)、#5 orai1 (orai1 抗体)。而在聚类图谱中, 聚类模块值 ( $Q$ )  $> 0.3$  表明聚类有效; 聚类轮廓性指数 ( $S$ )  $> 0.7$  表明聚类分析结果

表 1 香菇多糖相关研究中、英文文献排名前 5 的关键词

| Table 1 Top five keywords in Chinese and English literature on lentinan research |       |     |       |                    |    |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|-------|--------------------|----|-------|
| 排名                                                                               | 中文关键词 | 频数  | 中介中心性 | 英文关键词              | 频数 | 中介中心性 |
| 1                                                                                | 香菇多糖  | 889 | 1.61  | polysaccharides    | 24 | 0.18  |
| 2                                                                                | 顺铂    | 110 | 0.01  | antitumor activity | 24 | 0.27  |
| 3                                                                                | 化疗    | 55  | 0.01  | edodes             | 22 | 0.30  |
| 4                                                                                | 免疫功能  | 52  | 0.02  | cells              | 20 | 0.24  |
| 5                                                                                | 提取    | 42  | 0.01  | expression         | 19 | 0.23  |

可信<sup>[12]</sup>。中文聚类  $Q$  值为 0.525 9,  $S$  值为 0.874 9; 英文聚类  $Q$  值为 0.533 1,  $S$  值为 0.848 1, 上述数据表明关键词聚类分析结果可信并且有效。

结合图谱, 对关键词进一步梳理可知, 中文聚类#0、#1、#7 聚焦于香菇多糖提取工艺优化和结构表征, 目前研究者多采用响应面法优化香菇多糖的提取工艺, 分子排阻色谱法测定香菇多糖的纯度和相对分子质量<sup>[13-14]</sup>。中文聚类#6 聚焦于香菇多糖对家禽家畜生长性能的影响, 反映香菇多糖可改善家

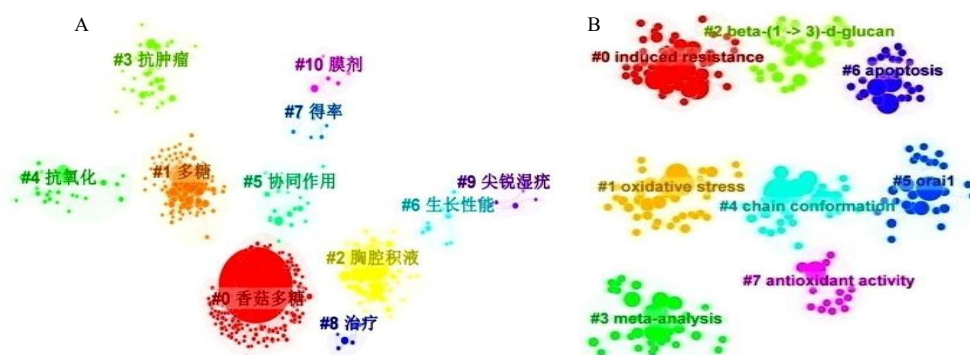


图 5 香菇多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词的聚类图谱

Fig. 5 Cluster maps of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on lentinan research

养动物的生长状况, 提高免疫力。中文聚类#2、#3、#4、#5、#8、#9、#10 聚焦于香菇多糖的药理活性研究, 研究者融合中西医学理念寻找疾病治疗的有效方法, 如香菇多糖联合顺铂治疗胸腔积液<sup>[15]</sup>、香菇多糖结合 5%咪喹莫特乳膏并辅以 CO<sub>2</sub> 激光联合治疗尖锐湿疣<sup>[16]</sup>。此外, 通过小鼠、细胞等多种实验模型进一步阐述了香菇多糖与化学药联用对多类疾病的保护作用及其分子机制。

英文文献聚焦于香菇多糖的结构表征及药理学研究, 英文聚类#2、#4 揭示了香菇多糖中的  $\beta$ -葡聚糖具有增强人体免疫力的特性, 不仅具有潜在的降血糖作用<sup>[17]</sup>, 还能有效缓解吸入脂多糖引起的外周血指标变化, 这一特性在探讨肺部感染性疾病的治疗策略时, 具有重要的参考价值<sup>[18]</sup>。而链构象作为  $\beta$ -葡聚糖结构研究的一个重要方面, 揭示了香菇多糖在溶液中的空间排列方式及其动态变化。英文聚类#0、#1、#5、#6、#7 则阐明香菇多糖可通过多种机制发挥不同作用, 如抑制氧化应激反应、调控细胞因子分泌, 干预细胞凋亡等<sup>[19-21]</sup>。

关键词突现是指在较短的时间内, 出现频率明显上升, 表示该时段内对其的关注程度有所提升,

能够展现出各阶段研究热点的变化情况, 并据此对可能的发展趋势和前沿研究进行判断<sup>[22]</sup>。对关键词进行突现分析得到突现图谱, 如图 6 所示。红色线段表示突现词的时间间隔, “strength” 表示突现词的突变强度, 数值与强度成正比。在近 10 年的发展历程中, 中文文献出现了 44 个突现词, 涵盖了香菇多糖的提取工艺、成分分析、生物活性及机制、疾病的治疗及应用。2010—2014 年深入探索香菇多糖的药物疗法, 临床上主要治疗胸腔积液和尖锐湿疣疾病。2015—2020 年主要针对香菇多糖的化学结构、肿瘤治疗 (肺癌、肝癌、卵巢癌、乳腺癌) 及临床应用, 并提示提取工艺、菌种培养、构象关系、免疫治疗将是香菇多糖未来的研究热点。英文文献共出现 37 个突现词, 近 10 年来香菇多糖的研究热点主要集中在抗肿瘤方面。2010—2018 年聚焦于探索香菇多糖的构象转变以及对细胞的生物反应 (关键词包括 conformation transition、activated protein kinases、Bcl-2 family)。2019—2024 年研究热点逐渐转移到香菇多糖生物活性及临床应用, 包括纳米粒子复合物、抗炎、抗肺癌活性及机制 (关键词包括 nanoparticles、lung cancer、inflammation)。

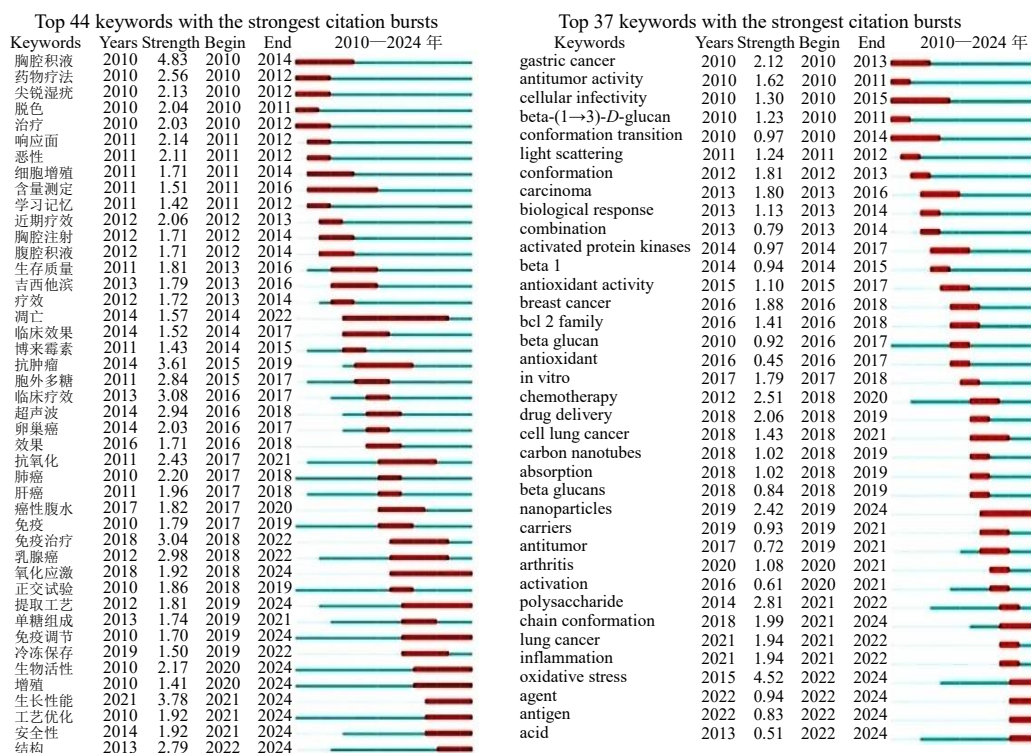


图 6 香菇多糖相关研究中、英文文献关键词突现图谱

Fig. 6 Keyword emergence maps of Chinese and English literature on lentinan research

## 2.2 基于 Citespace 的灵芝多糖分析

灵芝为多孔菌科真菌赤芝 *Ganoderma lucidum* (Leyss. ex Fr.) Karst. 或紫芝 *G. sinense* Zhao, Xu et Zhang 的干燥子实体, 具有补气安神、止咳平喘之功效。《神农本草经》记载灵芝: “养命以应天, 无毒, 多服久服不伤人, 轻身益气, 不老延年”, 故俗称“不死药”<sup>[23]</sup>。灵芝富含多糖、生物碱、氨基酸等多种化学成分, 其中灵芝多糖是其发挥免疫调节、降血糖、抗癌等作用的主要有效物质<sup>[24]</sup>。将其相关中、英文文献进行可视化分析, 中文文献共检索 4 789 篇, 纳入 2 359 篇, 去重整理后为 967 篇; 英文文献共检索 1 626 篇, 纳入 413 篇。

**2.2.1 作者分析** 通过 Citespace 软件分析, 分别得到由 486 个节点、673 条连线构成的中文文献共现网络, 选取 count ≥ 4 进行标注, 如图 7-A 所示; 以及由 442 个节点、816 条连线构成的英文文献共现网络, 选取 count ≥ 3 进行标注, 如图 7-B 所示。在图 7-A 中, 刘艳芳为发文数量排名第 1 的作者, 其次是张劲松、周帅, 3 个研究团队之间均有较强的合作关系, 是灵芝多糖研究领域的主要核心团队, 其研究主要集中在研究灵芝菌液态发酵产品的结构表征、生物活性及其市场应用。研究表明, 液态

发酵技术可以提高灵芝中多糖、三萜、甾醇类营养成分含量, 显著提高产品的抗氧化、抗病毒、免疫调节能力, 未来有待开发成高端的靶向性、功能性保健食品<sup>[25-26]</sup>。另外, 以聂少平、谢明勇为代表的研究团队采用体内外实验方法, 系统地研究了黑灵芝多糖对机体免疫功能的影响及作用机制; 乔进等<sup>[27-28]</sup>主要研究灵芝多糖联合二甲双胍对 2 型糖尿病的治疗作用及其机制。由图 7-B 可知, 英文文献发文量排名前 3 的作者分别为 Lin Zhibin、Li Weidong、Duan Xinsuo, 以 3 位研究者为代表的团队形成了合作网络, 主要开展了灵芝多糖肽对黑色素瘤小鼠免疫的影响研究<sup>[29]</sup>。

**2.2.2 机构分析** 灵芝多糖的中文文献研究机构共 376 个, 有 195 条连线; 英文文献研究机构共 265 个, 有 397 条连线, 将中英文文献的机构制成合作网络。中文文献机构合作网络选取 count ≥ 4 进行标注, 如图 8-A 所示; 英文文献机构合作网络选取 count ≥ 5 进行标注, 如图 8-B 所示。由图 8-A 可以看出, 南昌大学为发文数量最多的机构 (22 篇), 其次为南昌大学食品科学与技术国家重点实验室 (16 篇)。从科研机构的合作关系来看, 目前国内以大学为主、生物企业为辅的研究模式, 但相关部门之间的合作交流

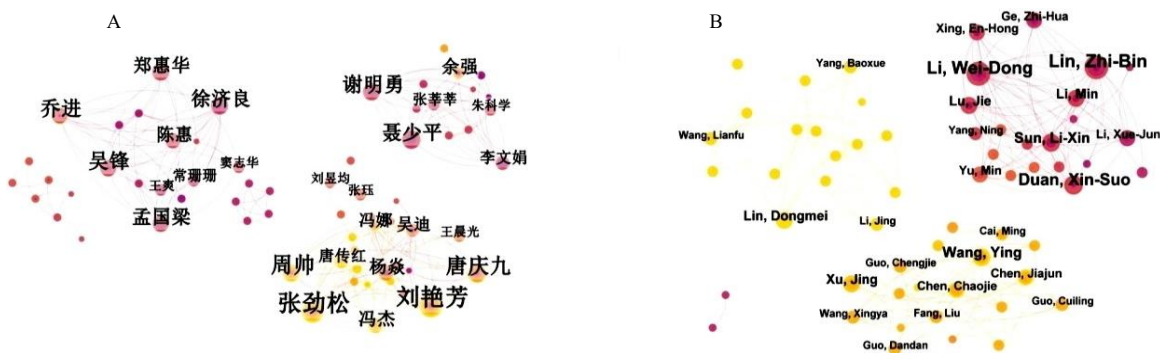


图 7 灵芝多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献作者合作图谱

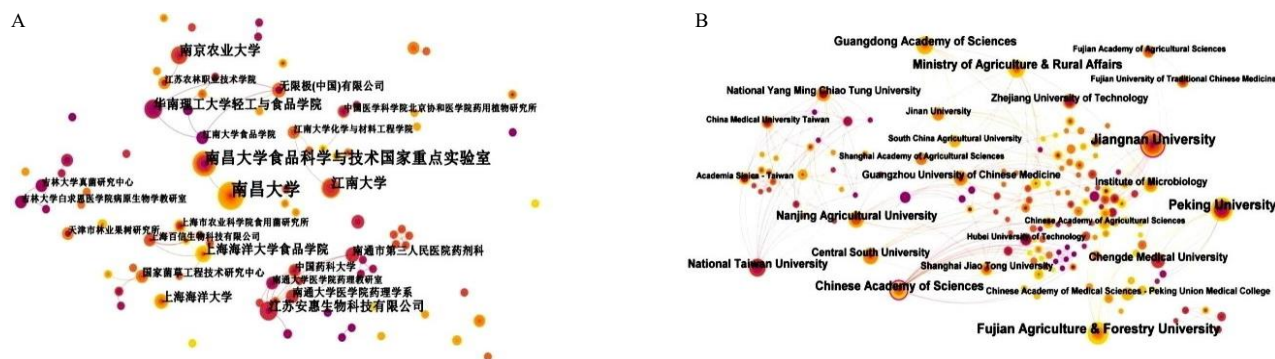
Fig. 7 Collaborative maps of authors in Chinese (A) and English (B) literature on *Ganoderma lucidum* polysaccharide research

图 8 灵芝多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献机构合作图谱

Fig. 8 Collaborative maps of institutions in Chinese (A) and English (B) literature on *Ganoderma lucidum* polysaccharide research

不多,亟待加强产学研用的合作模式,有利于灵芝多糖产业的高质量发展。从图 8-B 的网络中心性来看,形成了以北京大学与江南大学二者为主导的机构合作网络,高校覆盖面较广,北京大学发文 21 篇位居第 1,并且与国内外研究机构合作密切,影响力较强。综合上述数据可以看出,目前国内研究机构对灵芝多糖的研究和推广投入较大,重点从不同角度来探究其对人类身体健康的影响。

**2.2.3 关键词共现、聚类及突现分析** 中文关键词共现网络(图 9-A)有 452 个节点、1 260 条连线,选取 count $\geq 5$  进行标注。频数较高的关键词分别为灵芝多糖(432)、抗氧化(54)、提取(44)、分离纯化(32)、免疫调节(30)。灵芝多糖中心性最高,起到了桥梁的作用,侧面反映研究者对灵芝多糖研究视角的多样性。英文关键词共现网络(图 9-B)有 380 个节点,2 196 条连线,选取 count $\geq 5$  进行标注。频数较高的关键词分别为 *Ganoderma lucidum* polysaccharides (132)、antioxidant activity (54)、

antitumor activity (46)、mechanisms (40)、fruiting body (38)。灵芝多糖中、英文文献较高频数的关键词中心性见表 2。综合中英文文献关键词发现,近年来研究者着重于灵芝多糖的提取分离工艺和抗肿瘤、免疫等药理活性方面,以更好地满足人们的健康需求和应用。

聚类分析结果显示,中文关键词形成了 8 个聚类, $Q$  值为 0.463 7, $S$  值为 0.754 1,聚类具有可信性。如图 10-A 所示,中文关键词聚类分别是#0 灵芝多糖、#1 多糖、#2 响应面法、#3 抗氧化、#4 糖尿病、#5 分离纯化、#6 巨噬细胞、#7 药理作用。其中#0、#1、#2、#5 聚焦于灵芝多糖的提取分离、优化灵芝多糖的制备工艺<sup>[30-31]</sup>。#3、#4、#6 和#7 聚焦于灵芝多糖的生物活性,包括对巨噬细胞的免疫调节作用、抗氧化、降血糖等药理作用<sup>[32]</sup>。

英文关键词形成了 8 个聚类, $Q$  值为 0.406 9, $S$  值为 0.723 2,如图 10-B 所示,英文关键词聚类分别是#0 antioxidant activity(抗氧化)、#1 *Ganoderma*

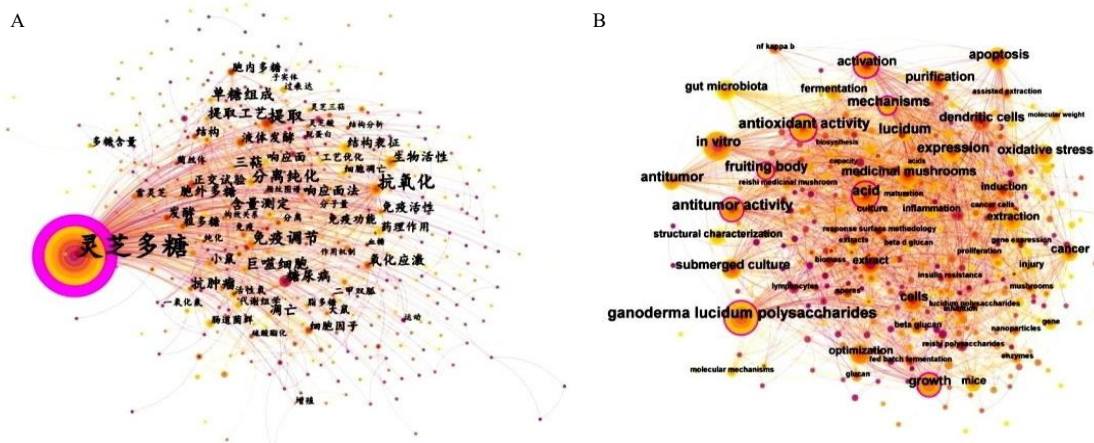


图 9 灵芝多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词共线网络

Fig. 9 Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Ganoderma lucidum* polysaccharide research

表 2 灵芝多糖相关研究中、英文文献频数较高关键词

Table 2 Keywords with high frequency in Chinese and English literature on *Ganoderma lucidum* polysaccharide research

| 排名 | 中文关键词 | 频数  | 中介中心性 | 英文关键词                                    | 频数  | 中介中心性 |
|----|-------|-----|-------|------------------------------------------|-----|-------|
| 1  | 灵芝多糖  | 432 | 1.21  | <i>Ganoderma lucidum</i> polysaccharides | 132 | 0.19  |
| 2  | 抗氧化   | 54  | 0.05  | antioxidant activity                     | 54  | 0.11  |
| 3  | 提取    | 44  | 0.03  | antitumor activity                       | 46  | 0.11  |
| 4  | 分离纯化  | 32  | 0.02  | mechanisms                               | 40  | 0.13  |
| 5  | 免疫调节  | 30  | 0.02  | fruiting body                            | 38  | 0.10  |

*lucidum* polysaccharides (灵芝多糖)、#2 IEC-6 cell line (IEC-6 细胞系)、#3 dendritic cells (树突状细胞, DCs)、#4 insulin resistance (胰岛素抵抗)、#5 inflammation (炎症)、#6 atherosclerosis (动脉粥样硬化)、#7 synergistic effect (协同效应), 8 个聚类主要集中于生物活性和作用机制的研究。#0、#5 这 2 个聚类体现出抗氧化、抗炎是灵芝多糖最常见的作用机制之一, #2 为 IEC-6 细胞系, 该细胞系是研究肠道上皮细胞生物学和相关疾病机制的重要模型, 表明目前灵芝多糖的相关药理学研究主要围绕肠道环境展开。#3 为树突状细胞, 是人体免疫系统中重要的抗原提呈细胞, 结合中文关键词聚类中的 #3 巨噬细胞, 二者都是机体重要的天然免疫细胞, 是灵芝多糖发挥免疫调节作用的重要机制。#4、#6、#7 3 个聚类进一步显示灵芝多糖可通过协同效应发挥作用, 可作为动脉粥样硬化高危患者的强效抗炎、抗氧化、免疫调节剂<sup>[33-35]</sup>, 还具有降低胰岛素

抵抗的稳态模型评估指数, 改善胰岛素抵抗发挥降血糖作用<sup>[36-37]</sup>, 这与中文关键词聚类中的 #5 糖尿病具有高度关联性。

图 11 为中英文关键词的突现图谱, 结合中文图谱发现自 2012 年起, 灵芝多糖的研究主要围绕提取工艺优化、药理活性 2 个方面进行, 这体现了目前基础性研究正逐渐向应用性研究及工程化转变的整体态势。英文图谱中突显词主要在灵芝多糖的药理作用方面, 覆盖面较广, 灵芝多糖作为生物大分子物质具有广泛应用前景。研究学者对灵芝多糖的药理研究逐渐实现由“点”到“面”的系统性发展。其中对抗炎机制研究较多, 也是大健康背景下的研究热点之一, 其机制与诸多细胞及细胞因子有关。综上, 工艺优化、结构表征、响应面、inflammation、structural characterization、fermentation 是近 3 年的研究热点词, 可为灵芝多糖的未来研究方向提供重要依据。

## 2.3 基于 Citespace 的灰树花多糖分析

灰树花 *Grifola frondosa* (Fr.) S. F. Gray 为名贵的药食兼用蕈菌, 干灰树花子实体中蛋白质、碳水化合物、维生素含量居食用菌首位<sup>[38-39]</sup>。从药用菌角度看, 灰树花含有多糖、酚酸等活性成分, 具有抗艾滋病、降血压、免疫调节等作用。现对灰树花多糖有关中、英文文献进行可视化分析, 中文文献共检索 1 387 篇, 纳入 649 篇, 去重整理后为 249 篇。英文文献共检索 334 篇, 纳入 127 篇。

**2.3.1 作者分析** 将灰树花多糖的相关文献通过可视化软件分析, 得到中、英文作者合作网络图谱, 如图 12 所示。中文文献网络图谱有 334 个节点、

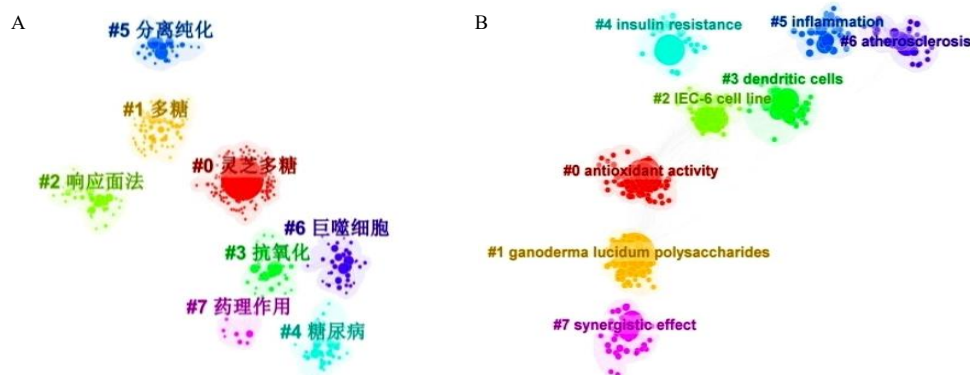


图 10 灵芝多糖类物质研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词聚类图谱

Fig. 10 Cluster maps of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Ganoderma lucidum* polysaccharide research

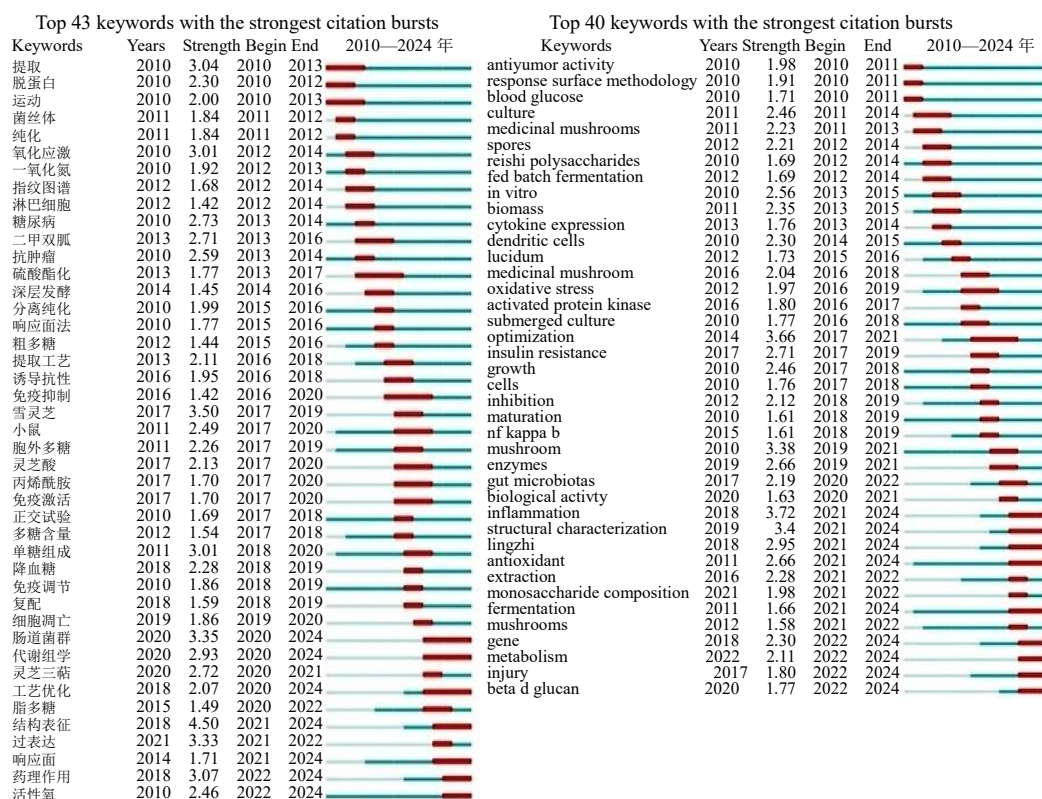


图 11 灵芝多糖多糖相关研究中英文文献关键词突现图谱

Fig. 11 Keyword emergence maps of Chinese and English literature on *Ganoderma lucidum* polysaccharide research

519 条连线；英文文献网络图谱有 347 个节点、1 017 条连线，二者均选取 count≥3 进行标注，如图 12-A 所示。中文文献发文量最多的作者是吴天祥（19 篇），其次是吕冬霞（7 篇）、刘伟民（6 篇），其中吴天祥团队的研究重心为灰树花多糖的提取工艺，包含发酵提取及其生物合成。同时，该团队还探讨了常见中药提取物对灰树花菌丝体多糖及胞外多糖发酵过程的影响。吕冬霞团队在灰树花多糖联合顺铂诱导 HeLa 细胞凋亡方面有较多研究成

果；刘伟民团队主要进行灰树花多糖液态发酵的相关研究。国内各团队的研究领域不同，涉及面较广，但团队之间暂无合作。如图 12-B 所示，英文文献的发文量最高的作者是 Li Qian（9 篇），其次为 Liu Bin（8 篇）、Zhao Ting（8 篇），英文文献中灰树花多糖研究形成了三大核心团队，团队内部合作非常紧密，共同合作研究灰树花多糖相关课题，研究领域涵盖范围较广，包括工艺优化、结构特征、生物活性等方面。除此之外，还涉及到了灰树花多糖与

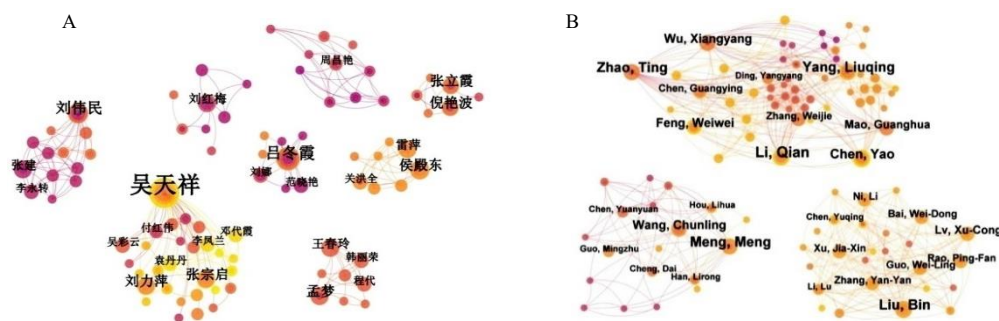


图 12 灰树花多糖类物质研究中文 (A) 和英文 (B) 文献作者合作图谱

Fig. 12 Collaborative maps of authors in Chinese (A) and English (B) literature on *Grifola frondosa* polysaccharide research

金属离子络合物的相关工作。

**2.3.2 机构分析** 灰树花多糖的中文文献研究机构共 225 个, 有 149 条连线; 英文文献研究机构共 117 个, 有 153 条连线, 将中英文文献的机构制成合作网络, 中、英文图谱均选取  $\text{count} \geq 2$  进行标注, 如图 13 所示。由图 13-A 可知, 中文文献发文量最高的机构是江苏大学 (14 篇) 与天津科技大学 (14

篇), 其次是贵州大学酿酒与食品工程学院 (13 篇)、贵州大学 (12 篇)。由图 13-B 可知, 英文文献发文量最高的机构是天津科技大学 (26 篇)、江苏大学 (24 篇)。通过对比发现, 在英文文献中, 不同院校之间的连线较多, 整体合作水平高于中文文献。因此, 各高校机构在灰树花多糖领域是主要的研究力量。

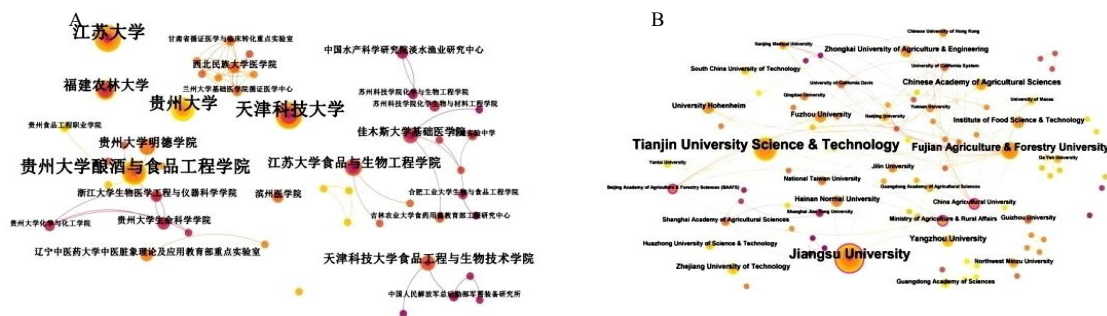


图 13 灰树花多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献机构合作图谱

Fig. 13 Collaborative maps of institutions in Chinese (A) and English (B) literature on *Grifola frondosa* polysaccharide research

**2.3.3 关键词共现、聚类及突现分析** 将灰树花多糖相关文献进行关键词共现分析, 中文文献有 292 个节点、670 条连线, 选取  $\text{count} \geq 2$  进行标注, 如图 14-A 所示, 频次较高的关键词分别是灰树花 (122)、多糖 (57)、胞外多糖 (25)、分离纯化 (21)、提取 (14)。英文文献有 264 个节点, 1382 条连线, 选取  $\text{count} \geq 5$  进行标注, 如图 14-B 所示, 频次较高的关键词分别是 *Grifola frondosa* (56)、purification (39)、antioxidant activity (37)、structural characterization (30)、immunomodulatory activity (26)。灰树花多糖的中、英文文献高频关键词中介性信息见表 3, 提示灰树花多糖的研究围绕提取纯化和药理活性展开。

对关键词进行聚类分析, 聚类图如图 15 所示。

中文关键词聚类图  $Q$  值为 0.591 9,  $S$  值为 0.892 8; 英文关键词聚类图  $Q$  值为 0.482 6,  $S$  值为 0.787 4, 二者聚类均有高度的可信性。其中, 中文聚类分别为#0 胞外多糖、#1 灰树花多糖、#2 生物活性、#3 液体发酵、#4 子实体、#5 提取、#6 肠道菌群、#7 免疫功能、#8 细胞凋亡、#9 单糖组成、#10 医药行业、#11 细胞增殖、#12 结构分析、#13 抗肿瘤药、#14 来曲唑。聚类#0、#1、#4 提示灰树花多糖的研究主要来源于胞、内外多糖; 聚类#3、#5、#9、#12 涉及到灰树花多糖的菌种培养、提取分离和结构表征, 菌种培养关键采用诱变育种策略, 显著提升了产品的产量与质量。研究者进一步探索了中药醇提物参与液态发酵的可能性, 并深入挖掘其对灰树花多糖药理活性的潜在影响。此外, 对灰树花多糖结

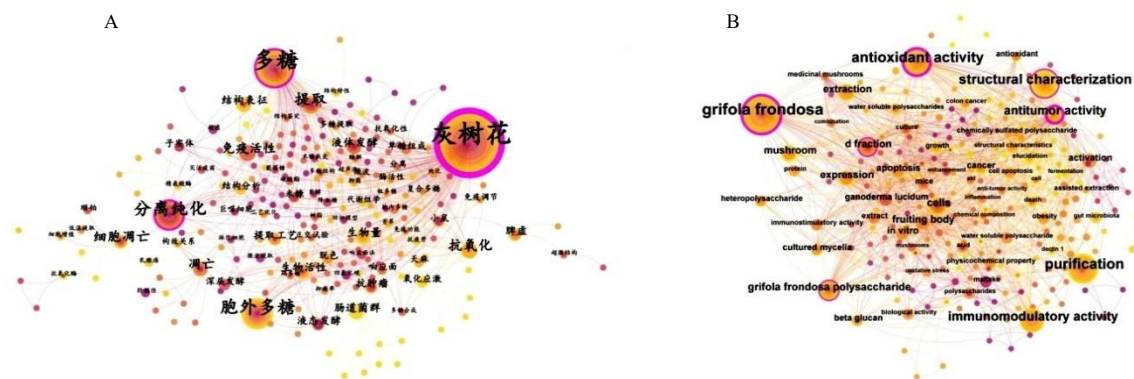


图 14 灰树花多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词共线网络

**Fig. 14** Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Grifola frondosa* polysaccharide research

表 3 灰树花多糖相关研究中英文文献高频关键词  
Table 3 Keywords with high-frequency in Chinese and English literature on *Grifola frondosa* polysaccharide research

| 排名 | 中文关键词 | 频数  | 中介中心性 | 英文关键词                       | 频数 | 中介中心性 |
|----|-------|-----|-------|-----------------------------|----|-------|
| 1  | 灰树花   | 122 | 0.89  | grifola frondosa            | 56 | 0.26  |
| 2  | 多糖    | 57  | 0.21  | purification                | 39 | 0.08  |
| 3  | 胞外多糖  | 25  | 0.03  | antioxidant activity        | 30 | 0.15  |
| 4  | 分离纯化  | 21  | 0.21  | structural characterization | 30 | 0.15  |
| 5  | 提取    | 14  | 0.05  | immunomodulatory activity   | 26 | 0.06  |

构进行详尽探究，有助于发掘其分子结构与活性的关系。聚类#2、#6、#7、#8、#11 体现出灰树花多糖的药理研究主要围绕体内外模型展开，并重点涉及免疫调节、抗肿瘤、肠道微环境等方面。聚类#10、#13 则说明灰树花多糖在医药行业中主要作为抗肿瘤药物进行开发利用。

英文聚类分别是#0 *Grifola frondosa* (灰树花)、#1 enzyme activities (酶活性)、#2 *Grifola frondosa* polysaccharide (灰树花多糖)、#3 aluminum chloride (氯化铝)、#4 endothelial cell (内皮细胞)、#5 hypolipidemic activities (降血脂活性)、#6 extracting technique (提取技术)、#7 immunostimulatory activity (免疫刺激活性)、#8 atopic dermatitis (特应性皮炎)。

9 大聚类主要聚焦于灰树花多糖的提取工艺及药理活性研究, 聚类#1、#6 聚焦灰树花多糖的提取工艺, 挖掘灰树花多糖的最佳提取条件有助于为工业生产、临床应用提供数据价值。聚类#4、#5 表明研究者对灰树花多糖调血脂活性研究较多, 有研究

得出灰树花多糖及多糖络合物可通过改变肠道菌群、调节肝脏糖代谢基因或调控糖脂代谢的相关 mRNA 表达发挥调血脂作用, 并且该物质未来可作为潜在的功能性食品用于预防或改善高血脂症<sup>[40-42]</sup>。聚类#3 提示灰树花多糖对于氯化铝诱导的小鼠遗忘学习记忆功能的改善作用已被证实, 然而, 当前针对此领域的研究仍显不足。聚类#7、#8 聚焦于灰树花多糖的免疫活性研究, 灰树花多糖能够改善小鼠特异性皮炎样皮肤损害的作用, 增强抗炎免疫功能<sup>[43]</sup>。但是, 就灰树花多糖的潜在作用而言, 当前的临床研究仍显不足, 亟需推进更为深入的研究工作。

将 2010—2024 年中英文文献关键词更替情况制成突现图,如图 16 所示。中文文献在发展过程中出现了 40 个突现词,自 2010 年起,灰树花多糖在提取工艺、结构表征、免疫调节等方面的研究经历了显著的提升和深化。灰树花多糖的结构特性及其抗氧化、抗疲劳、调节肠道菌群是目前的研究热点。英文文献在近十几年的发展中出现了 42 个突现词,主要聚焦于灰树花多糖的结构表征、提取分离及药理活性研究。关于灰树花子实体、灰树花多糖的体内免疫调节活性一直备受关注,灰树花多糖的发酵提取成为当前的主要研究方向。

## 2.4 基于 Citespace 的黑木耳多糖分析

黑木耳 *Auricularia auricula* (L. ex Hook.) Underw 是我国珍贵的药食同源胶质真菌。黑木耳具有较高的营养价值，被广泛应用于食品工业中。黑木耳多糖作为其天然活性成分，具有免疫调节、调血脂、抑菌等生物活性，有较高的临床应用价值。对黑木耳多糖有关中英文文献进行可视化分析，中

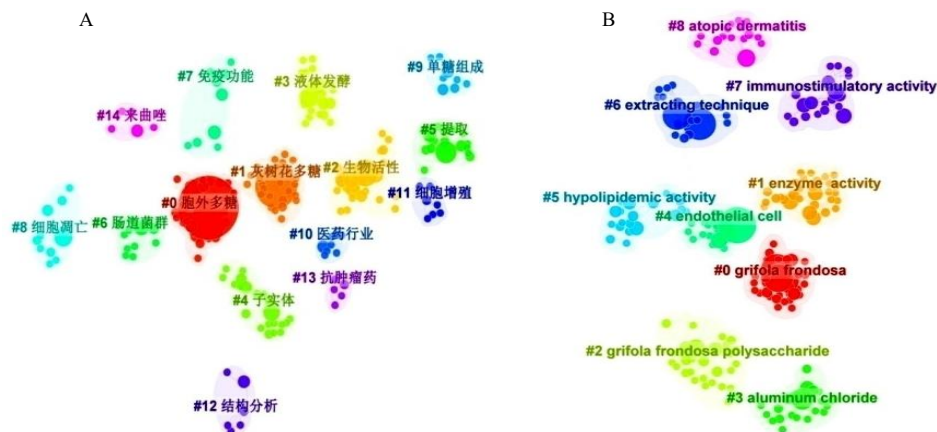


图 15 灰树花多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词聚类图谱

Fig. 15 Cluster maps of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Grifola frondosa* polysaccharide research

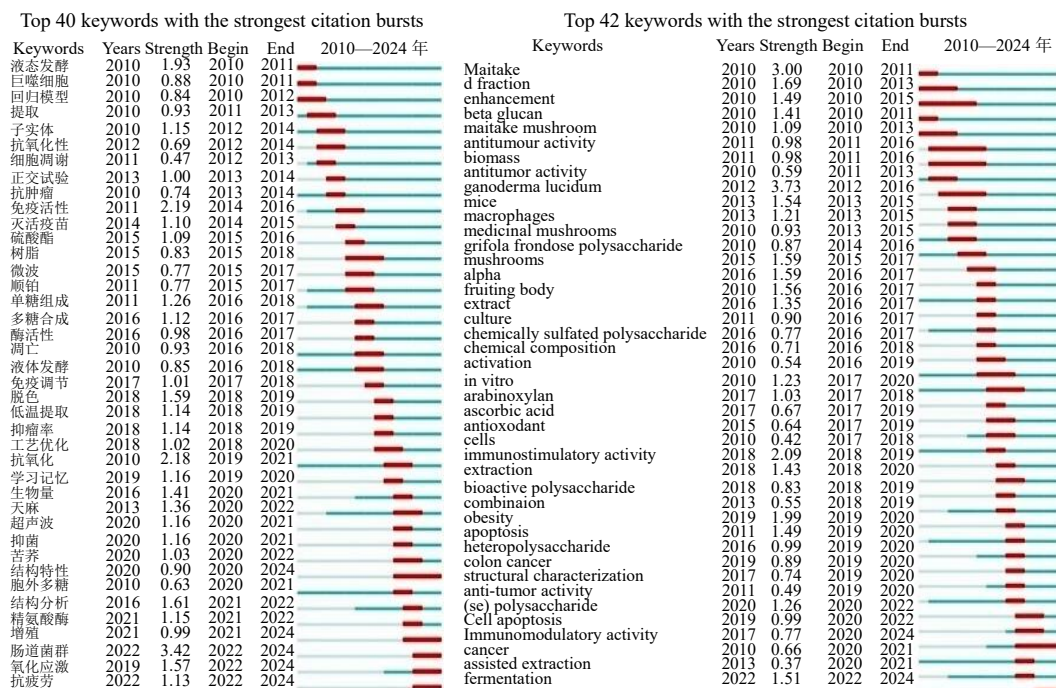


图 16 灰树花多糖多糖类物质研究中、英文文献关键词突现图谱

Fig. 16 Keyword emergence maps of Chinese literatures on *Grifola frondosa* polysaccharide research

文文献共检索 1 737 篇，纳入 865 篇，去重整理后为 333 篇。英文文献共检索 287 篇，纳入 135 篇。

**2.4.1 作者分析** 将黑木耳多糖相关研究的文献作者制成共现网络。从整体来看，在近 10 年的研究过程中，中文文献黑木耳多糖的研究形成了较多的研究团队，有 414 个节点，714 条连线，选取 count≥4 进行标注，如图 17-A 所示，发文量排名前 3 的作者是王振宇（41 篇）、尹红力（13 篇）、刘冉（12 篇），以这 3 位研究者为代表形成了较强的合作关系，且所属团队在该领域的影响较大，致力

于探究黑木耳多糖及酸性多糖的工艺优化。此外，张拥军团队主要研究黑木耳多糖的提取工艺，探究不同条件、不同方法对黑木耳多糖溶出量的影响，还包括不同品种黑木耳多糖的含量质量差异比较，姚雪萍团队主要研究黑木耳多糖提取物对肝纤维化、应激性胃溃疡、梗阻性黄疸、脓毒血症的保护作用；王会平团队主要对黑木耳多糖干预缺血性脑损伤或者心肌损伤研究较多。

英文文献作者合作图谱有 348 个节点，931 条连线，选取 count≥3 进行标注，如图 17-B 所示，发文

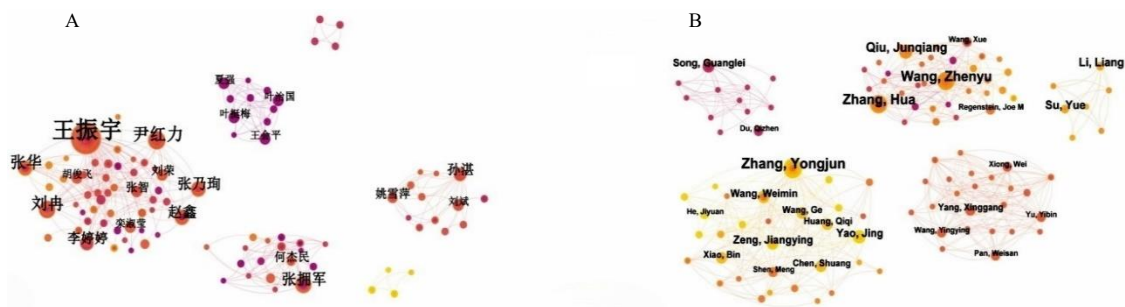


图 17 黑木耳多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献作者合作图谱

Fig. 17 Collaborative maps of authors in Chinese (A) and English (B) literature on *Auricularia auricula* polysaccharide research

数量最多作者是 Zhang Yongjun (12 篇), 其所在的团队贡献率较高。该团队合作网络较大, 成员之间合作紧密, 主要聚焦于利用秀丽隐杆线虫模型研究黑木耳多糖抗氧化活性。Song Guanglei 团队主要探究黑木耳多糖的制备与表征<sup>[44]</sup>。Li Liang 团队比较不同种类黑木耳多糖的功能特性, 包括黑木耳多糖的不同提取方法获得了良好的进展与成果<sup>[45-46]</sup>。Zhang Hua 团队在黑木耳硫酸化多糖、绿色木霉发酵法制备黑木耳多糖方面开展了创新型探索<sup>[47-48]</sup>。

**2.4.2 机构分析** 黑木耳多糖的中文文献研究机构共 305 个, 有 215 条连线; 英文文献研究机构共

136 个, 有 220 条连线, 将中英文文献的机构制成合作网络, 如图 18 所示。中、英文文献合作图谱均选择 count ≥ 3 进行标注。综合来看, 由于黑木耳的主产地在黑龙江、吉林东北地区, 是著名的东北林菌之一, 所以黑木耳多糖的研究机构以东北林业大学、哈尔滨工业大学为代表的高校为主, 同时中文文献的研究机构节点较多, 机构之间的合作关系较为密集, 合作程度较高。英文文献研究以中国计量大学、哈尔滨工业大学在该领域的贡献较多, 但缺乏密集的合作关系。整体上看, 英文文献机构合作连线较稀疏, 合作程度低。



图 18 黑木耳多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献机构合作图谱

Fig. 18 Collaborative maps of institutions in Chinese (A) and English (B) literature on *Auricularia auricula* polysaccharide research

**2.4.3 关键词共现、聚类及突现分析** 中文关键词共现网络 (图 19-A) 包括 292 个节点, 670 条连线, 节点之间连线紧密, 选取 count ≥ 3 进行标注。频数较高的关键词分别为黑木耳 (125)、多糖 (98)、抗氧化 (28)、提取工艺 (16)、调血脂 (11)。英文关键词共现网络 (图 19-B) 有 290 个节点, 1 290 条连线, 选取 count ≥ 3 进行标注。频数较高的关键词分别为 antioxidant activity (34)、in vitro (22)、

extraction (18)、oxidative stress (14)、*Auricularia auricula* polysaccharides (11)。黑木耳多糖中英文文献关键词高频信息见表 4。综合梳理中英文关键词发现, 黑木耳多糖的研究主要集中在提取工艺和抗氧化活性 2 个方面。近年来, 研究者多糖常规提取方法的基础上应用响应面法寻求更优化的提取制备工艺<sup>[49-51]</sup>。并且还系统地考察黑木耳多糖的抗氧化活性, 旨在揭示其在减轻自由基损害、延缓衰

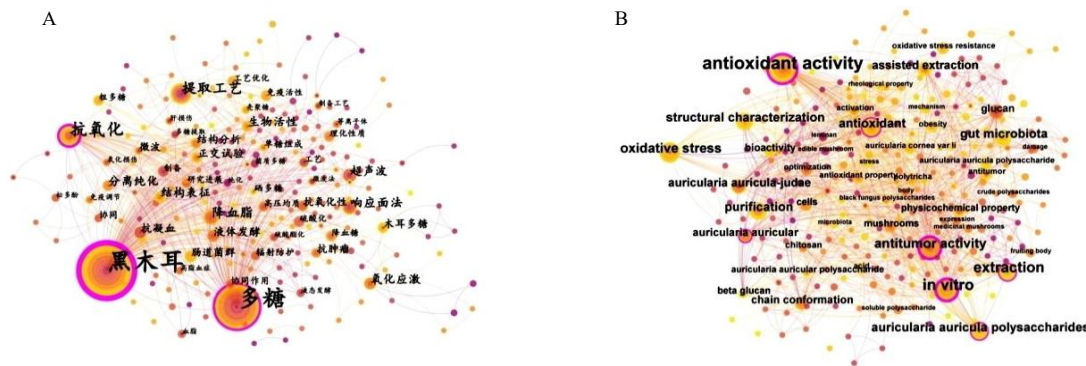


图 19 黑木耳多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词共线网络  
Fig. 19 Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Auricularia auricula* polysaccharide research

表 4 黑木耳多糖相关研究中英文文献高频关键词  
Table 4 Keywords with high-frequency in Chinese and English literature on *Auricularia auricula* polysaccharide research

| 排名 | 中文关键词 | 频数  | 中介中心性 | 英文关键词                                       | 频数 | 中介中心性 |
|----|-------|-----|-------|---------------------------------------------|----|-------|
| 1  | 黑木耳   | 125 | 0.61  | antioxidant activity                        | 34 | 0.32  |
| 2  | 多糖    | 98  | 0.38  | in vitro                                    | 22 | 0.24  |
| 3  | 抗氧化   | 28  | 0.20  | extraction                                  | 18 | 0.12  |
| 4  | 提取工艺  | 16  | 0.01  | oxidative stress                            | 14 | 0.06  |
| 5  | 降血脂   | 11  | 0.02  | <i>Auricularia auricula</i> polysaccharides | 11 | 0.11  |

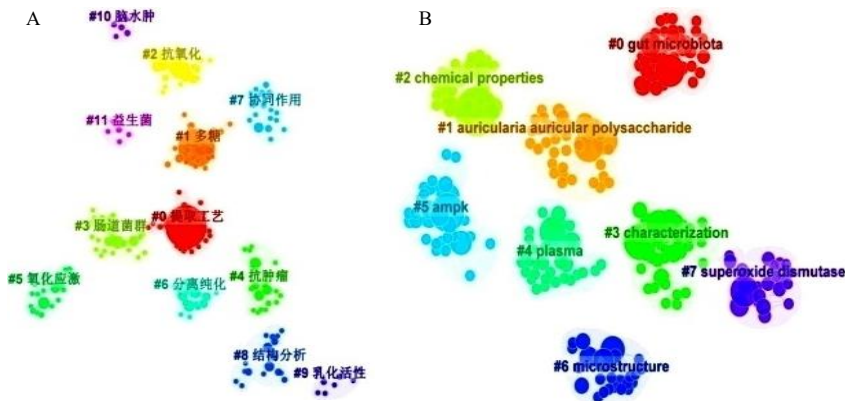


图 20 黑木耳多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词聚类图谱  
Fig. 20 Cluster maps of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Auricularia auricula* polysaccharide research

独特优势已然凸显。聚类#2、#3、#4、#5、#7、#10、#11 反映黑木耳多糖作为优质食用菌具有抗氧化、抗肿瘤等药理作用，尤其在肠道菌群调控方面亦表现出色，能促进有益菌的增殖，抑制有害菌的生长，进而维持肠道微生态平衡，对预防和治疗肠道疾病具有重要意义。此外，黑木耳多糖还显示出在脑水肿治疗中的潜力，可能通过减

老进程中的重要作用。  
对中英文关键词进行聚类分析，如图 20 所示。中文关键词  $Q$  值为 0.527 7， $S$  值为 0.839 9；英文关键词  $Q$  值为 0.609 8、 $S$  值为 0.865 4，说明该聚类结果显著且可信。中文关键词形成了 12 个聚类，分别为#0 提取工艺、#1 多糖、#2 抗氧化、#3 肠道菌群、#4 抗肿瘤、#5 氧化应激、#6 分离纯化、#7 协同作用、#8 结构分析、#9 乳化活性、#10 脑水肿、#11 益生菌。其中聚类#0、#6、#8、#9 反映出黑木耳多糖制备工艺、结构表征、制剂方面的研究，可以反映出目前黑木耳多糖在“药辅合一”领域的

轻炎症反应、改善血脑屏障功能等途径，为脑水肿的治疗提供新方案。  
英文关键词形成 8 个聚类，分别为#0 gut microbiota（肠道菌群）、#1 *auricularia auricula* polysaccharide（黑木耳多糖）、#2 chemical properties（化学性质）、#3 characterization（表征）、#4 plasma（血浆）、#5 AMPK（AMP 依赖的蛋白激酶）、#6

microstructure (微观结构)、#7 superoxide dismutase (超氧化物歧化酶, SOD)。聚类#5 提示黑木耳多糖活性研究中, SOD、AMPK 水平是影响抗氧化活性的重要因素, 是研究者关注的重要作用机制。聚类#2、#3、#6 代表黑木耳多糖的化学性质及结构特征。聚类#4 代表研究者对黑木耳多糖在抗凝血生物活性的研究较多。值得注意的是, #7 提示黑木耳多糖在肠道菌群调控方面具有良好作用, 是当前多糖研究的热点方向。总体而言, 未来对黑木耳多糖的研究应着重关注对不同生理活性的作用机制的深入探究和对不同来源黑木耳多糖的结构特征进一步解析研究。

通过对中英文关键词进行突现分析, 得到突现图, 如图 21 所示。在近 10 年的发展历程中, 中文文献关键词出现了 22 个突现词, 英文文献出现了 19 个。部分突现词持续时间不长(辐射防护、抗氧化性、提取工艺、菌制多糖、松多酚、chain conformation、antitumor activity), 然而其他突现词(调血脂、结构分析、glucan、optimization、chitosan、cells)则在近 10 年的发展中掀起了短暂的研究热潮。从 2018 年开始, 免疫活性、粗多糖、结构表征、structural characterization、bioactivity、obesity、gut microbiota 等突现词一直持续到现在, 未来也将作为黑木耳多糖研究领域的发展前沿。

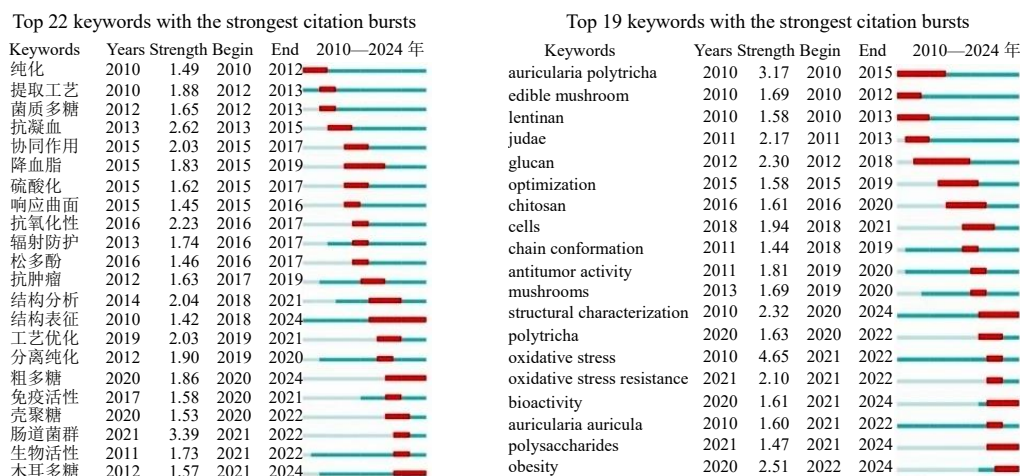


图 21 黑木耳多糖多糖类物质研究中、英文文献关键词突现图谱

Fig. 21 Keyword emergence maps of Chinese and English literature on *Auricularia auricula* polysaccharide research

## 2.5 基于 Citespace 的虫草多糖分析

冬虫夏草为麦角菌科真菌冬虫夏草菌 *Cordyceps sinensis* (Berk.) Sacc. 寄生在蝙蝠蛾科昆虫幼虫上的子座和幼虫尸体的干燥复合体, 具有补脾益肺、止血化痰的功效。冬虫夏草是我国传统的名贵中药, 因其独特的治病功效, 虫草中成药制剂在临床上广泛应用, 具有很高的国际声望。并且其所含的虫草多糖类物质具有免疫调节、抗肿瘤、降血糖等多种生物活性, 是当前抗肿瘤新药研发的热点之一。将虫草多糖有关中、英文文献进行可视化分析, 中文文献共检索 2 775 篇, 纳入 1 296 篇, 去重整理后为 510 篇; 英文文献共检索 763 篇, 纳入 231 篇。

**2.5.1 作者分析** 将虫草多糖相关研究的文献作者制成共现网络, 如图 22 所示。中文文献作者合作共现网络有 418 个节点, 475 条连线, 从共现网络(图 22-A)可以看出, 节点的合作子网络较多, 说

明虫草多糖的研究团队较多。发文量排名前 3 的作者分别是华春(10 篇)、吴雨龙(9 篇)、王仁雷(7 篇)。3 位研究者合作形成的合作团队对虫草多糖制备工艺优化以及酒精所致的急性肝损伤的保护作用研究较多。另外, 司艳红等长期关注虫草多糖对高血脂的保护作用机制, 吴小平团队围绕不同种类虫草多糖开展了系统的研究。唐庆九所属合作团队针对虫草多糖影响巨噬细胞功能进行了较为深入的探究。中文文献分析表明, 在近 10 年的发展过程中, 各研究团队相对独立, 逐渐形成了各自的研究资源和学术背景, 但整体发展不全面。

英文文献作者合作共现网络有 398 个节点, 742 条连线, 如图 22-B 所示, 分别形成了 Zhu Zhenyuan、Lin Ping、Nie Shaoping、Li Shaoping 为代表的 4 个主要研究团队。Zhu Zhenyuan 团队共发表相关论文 24 篇, 涉及虫草多糖结构表征、药理活性、金属离子络合物的特性和活性等方面, 方向覆盖面较广。

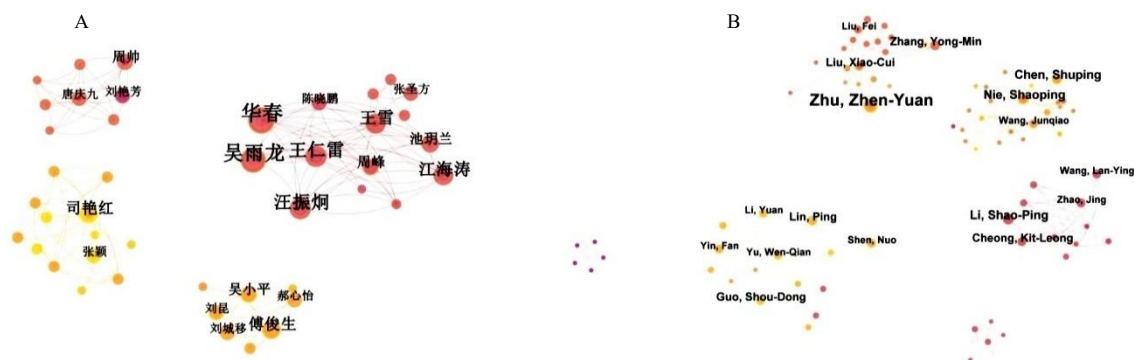


图 22 虫草多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献作者合作图谱

Fig. 22 Collaborative maps of authors in Chinese (A) and English (B) literature on *Cordyceps sinensis* polysaccharide research

Lin Ping 团队对虫草多糖抗动脉粥样硬化的活性研究投入较多, Nie Shaoping、Li Shaoping 等专注虫草多糖制备表征与抗氧化活性的深度剖析。相比较中文文献, 英文文献的研究作者研究成果更为丰富, 在其药理学范畴内取得显著进展。

**2.5.2 机构分析** 虫草多糖的中文文献研究机构共 322 个, 有 189 条连线; 英文文献研究机构共 179 个, 有 260 条连线, 将中英文文献的机构制成合作网络, 二者选择 count $\geq 4$  进行标注, 如图 23 所示。进一步综合发现, 这些中英文文献的研究机构主要集中在高校, 这些高校之间存在着紧密的合作关系, 同时少数独立的研究机构也有参与其中。中文研究机构中,

天津科技大学发表的文献数量最多, 达到 13 篇, 其次是吉林大学有 8 篇文献, 南京师范大学生命科学学院发表了 6 篇文献, 并与南京晓庄学院保持着密切的合作关系。在英文研究机构方面, 天津科技大学位居第 1, 共发表了 28 篇文献, 其次是巴黎索邦大学发表了 14 篇文献。众多研究机构加入虫草多糖研究领域, 不仅反映了虫草多糖作为一种重要的生物活性物质备受关注, 也凸显了在科研领域中对虫草多糖的深入研究的迫切需求。高校是科学研究重要阵地, 通过合作网络的构建, 各个研究机构可以充分利用彼此的优势和资源, 加强协作、共同研究, 推动虫草多糖研究的高质量发展。

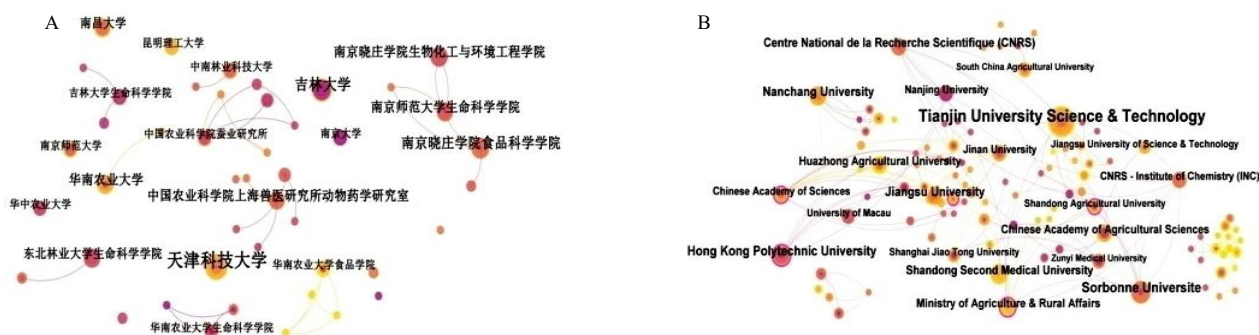


图 23 虫草多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献机构合作图谱

Fig. 23 Collaborative maps of institutions in Chinese (A) and English (B) literature on *Cordyceps sinensis* polysaccharide research

**2.5.3 关键词共现、聚类及突现分析** 将虫草多糖相关文献进行关键词共现分析, 如图 24 所示; 频次排名前 5 的关键词如表 5 所示。在中文关键词共现网络中, 有 326 个节点、913 条连线, 选择 count $\geq 3$  的关键词进行标注, 如图 24-A 所示。虫草多糖作为主题词具有很高的中介中心性, 频数排名前 5

的关键词分别是虫草多糖 (101)、抗氧化 (38)、冬虫夏草 (33)、分离纯化 (28)、虫草素 (20)。在英文关键词共现网络中, 有 344 个节点、1 885 条连线, 选择 count $\geq 4$  的关键词进行标注, 如图 24-B 所示。频数排名前 5 的关键词分别是 antioxidant activity (74)、*Cordyceps militaris* (71)、structural

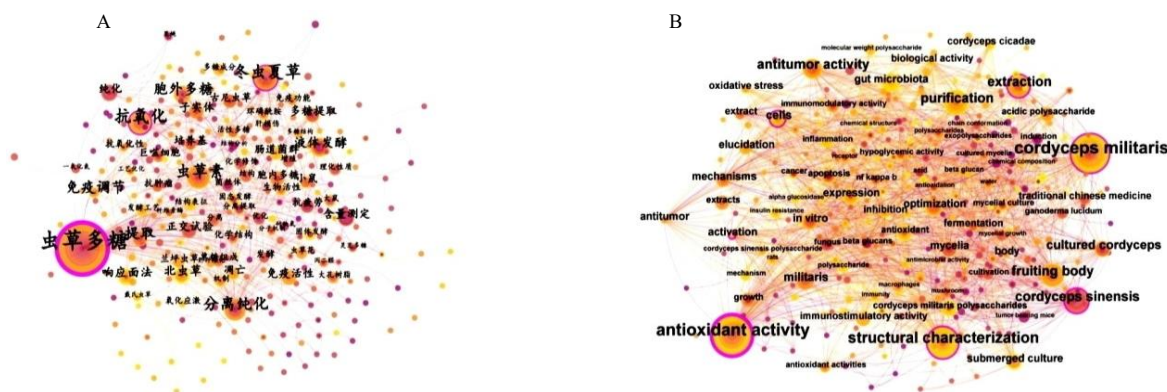


图 24 虫草多糖相关研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词共线网络

Fig. 24 Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Cordyceps sinensis* polysaccharide research

表 5 虫草多糖相关研究中英文文献排名前 5 关键词  
Table 5 Top five keywords with high-frequency in Chinese and English literature on *Cordyceps sinensis* polysaccharide research

| 排名 | 中文关键词 | 频数 | 中介中心性 | 英文关键词                       | 频数 | 中介中心性 |
|----|-------|----|-------|-----------------------------|----|-------|
| 1  | 虫草多糖  | 63 | 0.53  | antioxidant activity        | 74 | 0.27  |
| 2  | 抗氧化   | 38 | 0.11  | cordyceps militaris         | 71 | 0.16  |
| 3  | 冬虫夏草  | 33 | 0.14  | structural characterization | 47 | 0.20  |
| 4  | 分离纯化  | 28 | 0.06  | purification                | 32 | 0.16  |
| 5  | 虫草素   | 26 | 0.07  | fruiting body               | 30 | 0.10  |

characterization(47)、purification(32)、fruiting body(30)。由此可见,中英文文献对虫草多糖的研究主要涵盖了提取、结构表征和药理活性 3 个方面。

对虫草多糖关键词进行聚类分析,如图 25 所示。中文关键词形成 12 个聚类, $Q$  值为 0.454 2, $S$  值为 0.751 9,聚类分别为#0 虫草多糖、#1 提取工艺、#2 免疫调节、#3 冬虫夏草、#4 抗氧化、#5 液体发酵、#6 正交试验、#7 胞外多糖、#8 分离纯化、#9 肝纤维化、#10 金水宝胶囊。聚类#0、#3、#7 聚焦于虫草多糖的来源及多糖类型,#7 作为一个大聚类表明研究者对虫草胞外多糖研究较多,研究范围涵盖了提取工艺、分离纯化以及药理活性等多个方面。相对而言,关于胞内多糖的研究则显得较为有限,目前主要侧重于提取工艺方面,而对胞内多糖的药理活性研究则亟待深化与拓展。聚类#1、#5、#6、#8 聚焦虫草多糖的提取工艺,优化提取工艺的常用方法是响应面法,该方法能够精准调优提取过程中的各项参数设置,不仅可实现虫草多糖的高效提取,更能进一步提升提取工艺的整体效能。聚类

#2、#4、#9、#10、#11 展现了虫草多糖的作用机制,研究表明虫草多糖在肝纤维化展现了其抗纤维化的作用<sup>[52]</sup>,还可以调控甲胎蛋白的表达,进而抑制肝癌的生长与转移,临床上作为药物常用于治疗肝脏疾病,金水宝胶囊是一种富含虫草多糖的中药复方,在临床上得到了广泛应用。

英文关键词形成 9 个聚类, $Q$  值为 0.416 8, $S$  值为 0.736 7。聚类分别为#0 *Cordyceps militaris* (蛹虫草)、#1 anti-complementary activity(抗补体活性)、#2 biochemical parameters (生化参数)、#3 polysaccharide (多糖)、#4 gut microbiota (肠道菌群)、#5 traditional chinese medicine(传统中国药物)、#6 ultrahigh pressure extraction (超高压提取技术)、#7 intracellular polysaccharides (胞内多糖)、#8 acute ethanolic hepatotoxicity(急性乙醇肝毒性)。聚类#0、#5 聚焦于虫草多糖的来源及药用菌的属性;聚类#6 提示虫草多糖提取多采用超高压提取技术,超高压提取技术与传统提取技术相比,具有快速高效、绿色环保的特点,是一种新型提取加工技术;聚类#1、#4、#8 聚焦虫草多糖药理活性,调节肠道微生物群是虫草多糖的保健功效之一,多糖作为肠道菌群的主要能源和营养来源,对肠道菌群具有调节作用,从而对促进宿主机体健康发挥着重要作用。虫草多糖还具有一定的抗补体活性,并可作为潜在的抗补体候选药物<sup>[53]</sup>,对治疗多种补体过度或非正常激活引起的疾病具有重要意义。除此之外,文献表明,虫草多糖具有一定的预防酒精肝损伤作用<sup>[54]</sup>。

对关键词进行突现分析,如图 26 所示。中英文文献分别得到了 24 个和 43 个突现词,其中,中文突现词“凋亡、北虫草”自 2017 年出现,持续时间

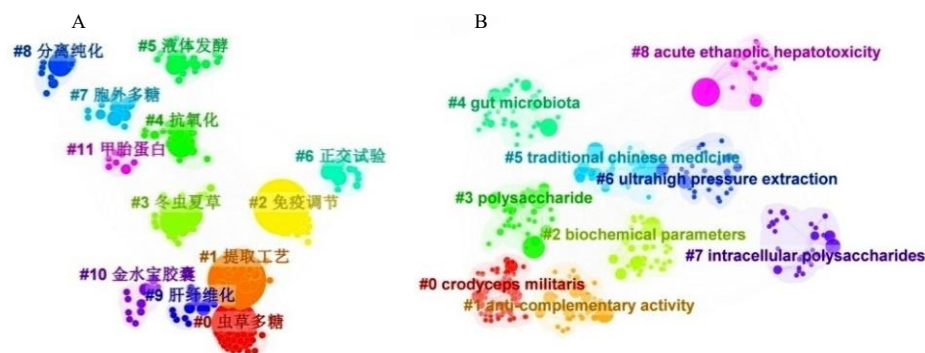


图 25 虫草多糖类物质研究中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词聚类图谱

Fig. 25 Cluster maps of keywords in Chinese (A) and English (B) literature on *Cordyceps sinensis* polysaccharide research

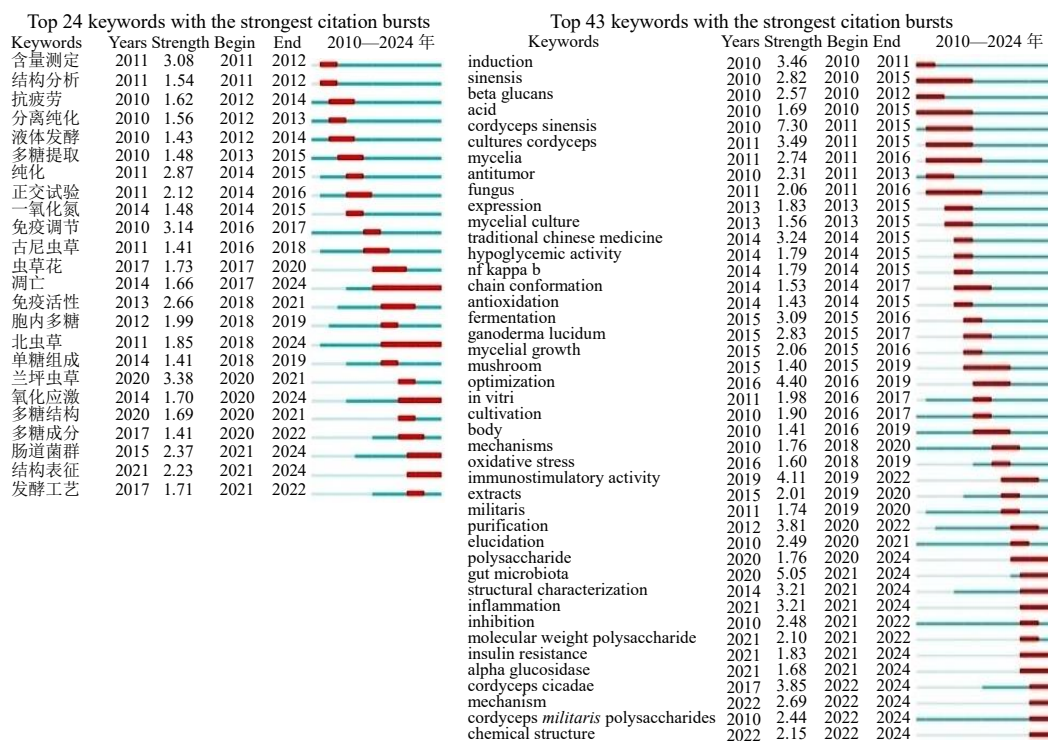


图 26 虫草多糖多糖类物质研究中英文文献关键词突现图谱

Fig. 26 Emergence maps of keywords in Chinese and English literature on *Cordyceps sinensis* polysaccharide research

最长，与“氧化应激、肠道菌群、结构表征”等突现词都是近几年虫草多糖的研究热点。而其他突现词持续时间较短，在发展进程中逐渐被取代。英文突现词表明，自 2010 年起虫草多糖的研究领域已然经历了一场从发酵培养、结构分析到更深层次的机制探索的转型。突现词展现出的系统规律性充分反映虫草多糖研究领域的成熟，结构表征与机制研究仍是虫草多糖的研究热点（突现词为 structural characterization、mechanism、gut microbiota）。

### 3 讨论

Citespace 作为一种强大的科学文献可视化网

络工具，用于分析和可视化领域内的文献关系和知识演化，能够揭示领域内知识演化和研究合作的模式。其为研究者提供了一个直观、系统和客观的分析工具，有助于加深对研究领域的理解和促进科学研究的发展。真菌多糖具有结构复杂、生理活性多样、溶解性良好、生物可降解性强等特点，因此在食品、医药、保健品等领域具有广泛的应用潜力。本研究基于文献计量学和 Citespace 方法，对 5 种真菌多糖相关文献进行了可视化分析和内涵解读，并归纳总结出了真菌多糖研究领域的发展过程与现状、研究热点与前沿，从而对真菌多糖产业未来的

发展趋势提供参考。

### 3.1 真菌多糖的文献趋势

5 种真菌多糖近 14 年的发文趋势如图 27 所示。从发文趋势来看, 2010—2019 年, 真菌多糖领域研究快速发展, 于 2020—2024 年发展趋向稳定, 并以香菇多糖的发文量最多, 灵芝多糖、黑木耳多糖近些年呈现逐渐增长趋势, 而灰树花多糖、虫草多糖 2 种多糖呈现显著下降趋势。其中, 2019 年 11 月国家卫生健康委员会、国家市场监督管理总局将灵芝等 9 种物质开展既是食品又是中药材物质的生产经营试点工作, 并于 2023 年 11 月将其正式纳入药食同源目录, 这一政策的实施快速推动了灵芝药材产业和大健康产业的升级发展, 这与该领域相关研究

论文的明显增加密切相关。虽然原国家食品药品监督管理总局 2016 年 2 月发布了《关于停止冬虫夏草用于保健食品试点工作的通知》, 但 2016—2019 年冬虫夏草的相关研究仍呈现出上升的趋势, 2020—2024 年却呈现出了显著的下降趋势, 这可能是由于 2019 年冬虫夏草并未能像灵芝一样纳入药食同源目录, 科研人员和机构对其研究投入程度减弱, 导致相关领域研究论文数量减少。另外, 2018 年 5 月生态环境部和中国科学院共同发布《中国生物多样性红色名录——大型真菌卷》和《2018 年中国生物物种名录》, 冬虫夏草被列入易危级别, 也导致该产业研究投入程度减弱, 相关领域研究论文数量减少。

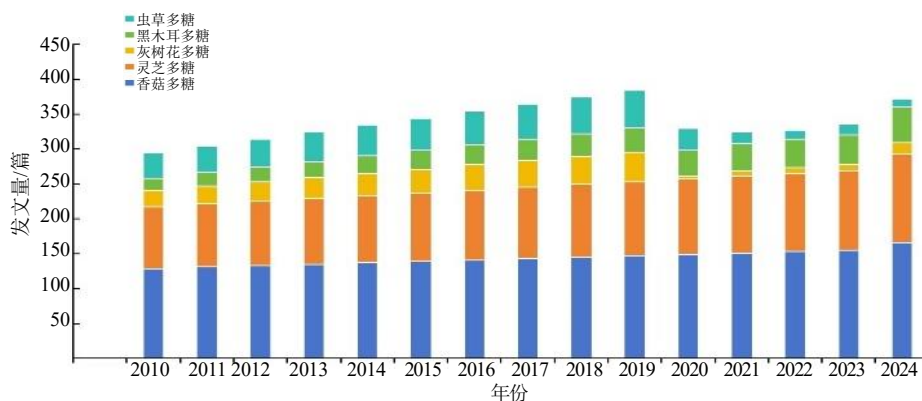


图 27 5 种真菌多糖相关文献年度发文趋势

Fig. 27 Annual publication trend of literature related to five fungal polysaccharides

### 3.2 真菌多糖的发展与应用现状

5 种真菌多糖的发展现状虽具深浅之差异, 但在多样性的展现中蕴藏共性特质, 将 5 种真菌多糖关键词绘制韦恩图, 并进行聚类分析, 如图 28 所示。分析发现, 目前真菌多糖研究的发展现状具有以下特征: (1) 制备工艺优化和纯化技术的提升。研究者不断追求制备与纯化技术的革新, 以确保真菌多糖的高提取率和纯度。针对传统提取方法, 如热水提取或酸碱提取的低效与低纯度问题, 方法上引入了超声波提取、微波辅助提取、超高压提取和酶法提取等一系列新型技术, 并通过响应面法优化提取条件, 包括溶剂的浓度、提取的时长、温度的设定以及 pH 值的精准控制等, 旨在提高多糖提取效率, 降低生产成本。在纯化技术方面, 除离子交换柱色谱、凝胶柱色谱及分级醇沉等纯化方法外, 膜分离技术正逐渐被研究者和生产者广泛应用。(2) 结构表征。多糖化学结构的系统解读, 不仅深

化了对多糖生物活性的本质理解, 也为探讨其药理作用机制奠定坚实的科学基础。尽管科研界就真菌多糖的结构表征已积累了丰富的文献资料, 然而多糖的组成及糖苷键的连接方式千变万化, 其相对分子质量过大或过小会导致多糖活性消失, 从而无法实现其预期的生物效应。基于这一认识, 研究者协同运用光谱技术 (如红外光谱、核磁共振等) 和色谱技术 (如高效液相色谱、气相色谱等), 为深入剖析真菌多糖的精细化学结构提供了重要数据支撑, 并且在多糖构象方面的研究工作也逐渐增多, 目前研究学者通过扫描电镜、原子力显微镜等多种技术手段来表征多糖链的构象。(3) 生物活性及作用机制的发掘。真菌多糖的生物活性研究主要集中于免疫调节、抗肿瘤、抗氧化及代谢性疾病的预防和治疗方面。研究者主要通过体内外实验对真菌多糖的药理作用机制进行验证, 但部分研究结果的模糊性限制了对其深层作用机制的解析。另外, 除上述传

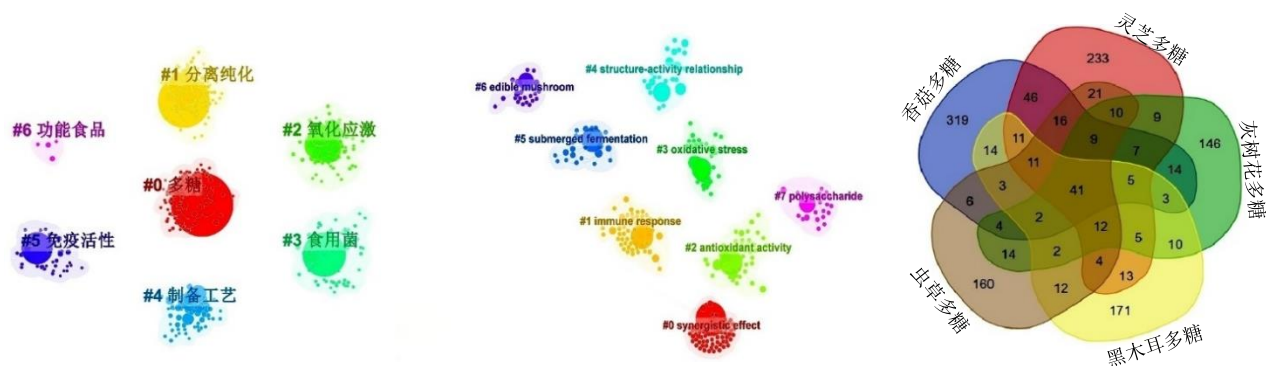


图 28 5 种真菌多糖研究发展现状共性图

Fig. 28 Common map of research and development status of five fungal polysaccharides

统生物活性外，近年多糖对肠道菌群的调节作用的研究工作也备受瞩目，揭示了其在维护肠道微生态平衡中的关键作用。(4) 真菌资源的综合利用。食用菌产业从发酵过程的产物利用，到胞内外多糖的提取，再到废物资源的高效转化，已构成一套实现环境保护与经济利益双重增长的战略体系。从食用菌生产废料中发酵提取多糖，既节省资源，又增加了经济效益。同时，废弃物中的其他生物活性物质如  $\beta$ -葡聚糖、 $\alpha$ -葡聚糖亦可通过综合利用提高其附加值。(5) 健康产品的开发。真菌多糖在医药、保健品和食品等领域具有广阔的应用潜力，目前已上市香菇多糖、灵芝多糖等几种具有药用价值的真菌多糖可作为化疗的辅助免疫制剂。在此基础上，研究者中西结合，将真菌多糖与其他有效组分进行创新复配，如真菌多糖金属离子络合物，以增强其功效，并开拓市场应用。

### 3.3 真菌多糖的发展问题与展望

在真菌多糖研发领域中，研究者和研究机构日益增加，并且以中国学者和科研机构为主，构建了一定程度的合作关系，并在研究深度和广度上展现出显著的优势。研究热点的迭代替换显示了该研究领域的持续发展和日新月异。然而通过对可视化图谱和当前多糖类物质研究现状的综合分析，可以明显看出真菌多糖仍存在若干问题有待解决，提示广大研究者未来开发真菌多糖应致力于以下 5 个方面：(1) 真菌多糖构效关系理论的创新突破。食用菌多糖的种类很多，类型分布各异，差异性的化学结构赋予其不同的功能，但目前还主要集中于葡聚糖结构类型多糖与免疫和抗肿瘤作用的构效关系理论研究，存在较大的局限性。另外，多糖链构象

对多糖活性的影响最为重要，在不同环境条件下多糖所呈现的稳定构象未必是其实现生物活性的最佳构象，亟需细致探究多糖在生物体内的构象转变规律及作用机制，以期全面阐明空间构象与生物活性之间的相互关系。(2) 全面评估其生物活性。目前关于真菌多糖多途径、多靶点协同作用的生物活性和作用机制研究仍不够充分，在口服药动力学的研究方面进展缓慢，如多糖的吸收机制、影响吸收的因素、分布规律等亟待突破。另外，人工智能为药物性质预测、药物设计、药物发现带来了飞速的发展，可为真菌多糖的高通量活性筛选和靶点预测提供助力。(3) 临床研究与开发不足。目前体外研究已揭示了众多真菌多糖的药理机制，然而大部分多糖的临床研究甚少。通过开展临床试验有助于验证真菌多糖在治疗人类疾病方面的疗效和安全性，包括对真菌多糖的药动力学、毒副作用以及与药物间交互作用等方面的研究，为其临床应用提供科学支撑，进而拓宽其在健康领域的应用与发展。同时，还需顺应大健康背景下流行病学发展趋势及重大疾病防治需求，与时俱进开展相关研究工作，借助药食同源理论的指导，对多糖的保健功能进行现代化探索与创新工作。真菌多糖具有“药辅合一”的特性，加强对真菌多糖在功能性医药材料、纳米药物以及递送系统构建中的应用研究，将为其在生物学领域的应用开辟新思路。(4) 加强对真菌多糖的生产和质量控制。真菌多糖的制备环节存在诸多挑战，如菌种筛选的精准性、培养基优化、发酵条件调控以及真菌多糖的不稳定性等，严重制约了其规模化生产与应用。真菌多糖的质量控制对确保其有效性和安全性至关重要，然而多糖结构的复杂性导

致多糖质控标准研究进展缓慢。以多糖含量为核心指标的单一检测手段难以反映多糖质量, 指纹图谱方法、糖谱法有助于建立科学的真菌多糖类产品质控体系。(5) 深入多糖生物合成领域的研究。尽管该领域正逐渐受到重视, 但其理论探索与实际应用仍存在诸多限制。亟需深入探索真菌多糖的生物合成途径与分子调控机制。通过整合基因组、转录组、蛋白组和代谢组等多组学分析技术, 全面揭示参与多糖合成的酶类、代谢途径及调控因子, 为多糖的定向合成与改造奠定理论基础。同时借助基因工程与代谢工程技术, 优化多糖合成相关基因, 实现多糖产量、结构与功能的全面提升。这将有助于开发出具备特定生理功能的新型多糖, 并进一步拓展真菌多糖在医药、食品等领域的广泛应用。

#### 4 结语

本研究基于 Citespace 软件对 5 种真菌多糖的相关文献进行可视化分析, 结合知识图谱综合发现提取工艺优化、结构表征、药理活性机制研究是真菌多糖发展的三大焦点, 获取高纯度的真菌多糖是研究的关键前提, 明晰多糖结构是研究的重要基础, 药理活性机制发掘是研究的创新热点, 创制健康产品是研究的最终目的。通过对焦点内容的深入探索将有助于更好地了解和应用真菌多糖, 在医药、食品、农业等领域发挥重要作用。多学科、多行业应跨界合作, 共同攻克产业瓶颈问题, 推动真菌多糖的应用与发展。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 杜庆. 食(药)用真菌多糖的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(5): 75-77.
- [2] Chen C M. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101(Suppl\_1): 5303-5310.
- [3] Kumar A, Paliwal R, Gulbake A. Lentinan: An unexplored novel biomaterial in drug and gene delivery applications[J]. *J Control Release*, 2023, 356: 316-336.
- [4] Guo C L, Guo D D, Fang L, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharide modulates gut microbiota and immune cell function to inhibit inflammation and tumorigenesis in colon[J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 267: 118231.
- [5] He Y L, Li X L, Hao C, et al. *Grifola frondosa* polysaccharide: A review of antitumor and other biological activity studies in China[J]. *Discov Med*, 2018, 25(138): 159-176.
- [6] Gong P, Pei S Y, Long H, et al. Potential inhibitory effect of *Auricularia auricula* polysaccharide on advanced glycation end-products (AGEs) [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 262(Pt 1): 129856.
- [7] Zheng Y, Li L, Cai T T. *Cordyceps* polysaccharide ameliorates airway inflammation in an ovalbumin-induced mouse model of asthma via TGF- $\beta$ 1/Smad signaling pathway[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2020, 276: 103412.
- [8] 乔伟, 陈文强, 彭浩, 等. 富硒香菇发酵液中硒多糖提取工艺的响应面优化[J]. 北方园艺, 2017(12): 157-162.
- [9] 乔艳明, 陈文强, 解修超, 等. 响应面法优化香菇胞外多糖提取工艺[J]. 食用菌学报, 2015, 22(3): 69-73.
- [10] 张琪琳, 杜兆松, 王凯平, 等. 香菇多糖抑制 Akt 通路和微管蛋白聚合诱导肿瘤细胞凋亡的分子机制[J]. 中国医院药学杂志, 2016, 36(23): 2046-2051.
- [11] Li H, Jiang H D, Yang B, et al. An analysis of research hotspots and modeling techniques on carbon capture and storage[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 687: 687-701.
- [12] 黄子豪, 彭斐, 刘婷, 等. 基于 CiteSpace 知识图谱及专利计量对黄精相关研究的可视化分析[J]. 中草药, 2024, 55(1): 217-231.
- [13] 张彩芳, 秦令祥, 周婧琦, 等. 基于响应面法优化双酶耦合超高压提取香菇多糖工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(9): 69-74.
- [14] 汪文琦, 陆磊, 田卫, 等. 香菇多糖分离纯化及结构表征[J]. 西北民族大学学报: 自然科学版, 2023, 44(1): 10-15.
- [15] 郭爱平, 刘飞, 叶璆菊. 香菇多糖联合顺铂治疗肺癌胸腔积液的疗效观察[J]. 中国肿瘤临床与康复, 2022, 29(3): 308-311.
- [16] 魏红岩, 侯丽. CO<sub>2</sub> 激光及 5%咪喹莫特乳膏联合香菇菌多糖片治疗尖锐湿疣[J]. 现代中西医结合杂志, 2011, 20(36): 4662-4663.
- [17] Chakraborty S, Beura M, Sharma S K, et al. Lentinan,  $\beta$ -glucan from Shiitake (*Lentinula edodes*): A review on structure, conformational transition, and gastro-intestinal interaction contributing towards its anti-diabetic potential[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 142: 104224.
- [18] Jafari M, Boskabaday M H, Rezaee S A, et al. Lentinan and  $\beta$ -glucan extract from shiitake mushroom, *Lentinula edodes*, alleviate acute LPS-induced hematological changes in mice[J]. *Iran J Basic Med Sci*, 2023, 26(7): 836-842.
- [19] You J P, Wu Q C, Li Y B, et al. Lentinan induces apoptosis of mouse hepatocellular carcinoma cells through the EGR1/PTEN/AKT signaling axis[J]. *Oncol Rep*, 2023, 50(1): 142.

- [20] Li M M, Zheng Z L, Ke J Y, *et al.* Inhibition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-induced TM3 cell apoptosis by oxidative stress by lentinan functionalized selenium nanoparticles through JAK2/STAT-3 and P53 pathways [J]. *BIOCELL*, 2023, 47(6): 1397-1405.
- [21] Meng M J, Huo R, Wang Y, *et al.* Lentinan inhibits oxidative stress and alleviates LPS-induced inflammation and apoptosis of BMECs by activating the Nrf2 signaling pathway [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 222(Pt B): 2375-2391.
- [22] 凌娜, 郭春秋, 田海燕, 等. 基于文献计量学的沙棘多糖研究现状与发展动态的可视化分析 [J]. 中草药, 2024, 55(20): 7047-7061.
- [23] 丰彬彬, 孔佳欣, 卫彩红, 等. 灵芝的药用成分及相关应用研究 [J]. 中国食品, 2023(22): 85-87.
- [24] 张文君, 宋扬, 胡扬, 等. 灵芝抗肿瘤作用及其配伍的研究进展 [J]. 中草药, 2023, 54(16): 5390-5398.
- [25] 颜梦秋, 刘艳芳, 周帅, 等. 食药菌液体发酵及功能活性成分研究现状与展望 [J]. 微生物学通报, 2023, 50(7): 3211-3231.
- [26] 颜梦秋, 刘艳芳, 唐传红, 等. 食药菌液体发酵产品在食品领域应用进展 [J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 227-233.
- [27] 乔进, 窦志华, 吴锋, 等. 灵芝多糖联合二甲双胍对 2 型糖尿病大鼠心肌结构及血流动力学的影响 [J]. 中国药理学通报, 2016, 32(7): 1012-1016.
- [28] 乔进, 窦志华, 吴锋, 等. 灵芝多糖联合二甲双胍对 2 型糖尿病大鼠心肌 AGEs 及 CTGF 的影响及其机制 [J]. 中国药理学通报, 2014, 30(4): 536-541.
- [29] Xian H C, Li J Y, Zhang Y M, *et al.* Antimetastatic effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharide peptide on B16-F10-luc-G5 melanoma mice with sleep fragmentation [J]. *Front Pharmacol*, 2021, 12: 650216.
- [30] 杜鹏瑶, 王丽红, 刘德江, 等. 响应面法优化树舌灵芝多糖提取工艺 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(34): 148-151.
- [31] 唐晓璇, 王成忠, 李双, 等. 响应面法优化灵芝多糖超声波提取工艺 [J]. 齐鲁工业大学学报, 2014, 28(3): 37-41.
- [32] 马传贵, 张志秀, 刘洋洋, 等. 灵芝多糖的生物活性及开发利用 [J]. 生物资源, 2021, 43(4): 336-340.
- [33] Sargowo D, Ubaidillah N, Handayani O, *et al.* PS 02-02 effect *Ganoderma lucidum* polysaccharide peptides as anti-hypertension, anti-lipid, anti-oxidant, anti-inflammation in high risk patients of atherosclerosis [J]. *J Hypertens*, 2016, 34(Suppl 1): e105.
- [34] Olivia H, Djanggan S, Kartika S, *et al.* Lbps 01-05 *ganoderma lucidum* polysaccharide peptides as antioxidant, anti-inflammation, anti-hypertension and anti-lipid in high-risk patients of atherosclerosis [J]. *J Hypertens*, 2016, 34: e175.
- [35] Sargowo D, Ovianti N, Susilowati E, *et al.* The role of polysaccharide peptide of *Ganoderma lucidum* as a potent antioxidant against atherosclerosis in high risk and stable angina patients [J]. *Indian Heart J*, 2018, 70(5): 608-614.
- [36] 刘世锋, 董文静, 杨兰, 等. 灵芝多糖及其菌群代谢产物对 HepG2 细胞胰岛素抵抗的改善作用及机制 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 314-321.
- [37] 陈嘉骏, 王颖, 桑婷婷, 等. 灵芝多糖在糖尿病及其并发症防治中的研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(3): 937-947.
- [38] 郑传奇, 王勋, 陈华, 等. 灰树花化学成分及质量标准研究进展 [J]. 现代食品, 2021(6): 23-27.
- [39] 庄毅. 中国药用真菌的现状与展望 [J]. 中国食用菌, 2005, 24(5): 3-5.
- [40] Guo W L, Shi F F, Li L, *et al.* Preparation of a novel *Grifola frondosa* polysaccharide-chromium (III) complex and its hypoglycemic and hypolipidemic activities in high fat diet and streptozotocin-induced diabetic mice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 131: 81-88.
- [41] Guo W L, Chen M, Pan W L, *et al.* Hypoglycemic and hypolipidemic mechanism of organic chromium derived from chelation of *Grifola frondosa* polysaccharide-chromium (III) and its modulation of intestinal microflora in high fat-diet and STZ-induced diabetic mice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 145: 1208-1218.
- [42] Guo W L, Deng J C, Pan Y Y, *et al.* Hypoglycemic and hypolipidemic activities of *Grifola frondosa* polysaccharides and their relationships with the modulation of intestinal microflora in diabetic mice induced by high-fat diet and streptozotocin [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 153: 1231-1240.
- [43] 红皮病、蕈样肉芽肿、特应性皮炎患者内皮细胞上 VCAM-1, ICAM-1, E-选择素及 P-选择素的原位表达 [J]. 国外医学: 皮肤性病学分册, 2001, 27(4): 250-251.
- [44] Song G L, Du Q Z. Isolation of a polysaccharide with anticancer activity from *Auricularia polytricha* using high-speed countercurrent chromatography with an aqueous two-phase system [J]. *J Chromatogr A*, 2010, 1217(38): 5930-5934.
- [45] Li L, Su Y, Feng Y, *et al.* A comparison study on digestion, anti-inflammatory and functional properties of polysaccharides from four *Auricularia* species [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 154: 1074-1081.
- [46] Li L, Yang X Y, Pan L, *et al.* Comparing three methods of extraction of *Auricularia auricula* polysaccharides [J].

- Curr Top Nutraceutical Res*, 2017, 17(2): 7-10.
- [47] Miao J N, Shi W, Zhang J Q, *et al.* Response surface methodology for the fermentation of polysaccharides from *Auricularia auricula* using *Trichoderma viride* and their antioxidant activities [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 155: 393-402.
- [48] Chen Z Q, Zhou X T, Zhang J, *et al.* Structure and radio-protective effects of sulfated *Auricularia auricula* polysaccharides [J]. *J Food Biochem*, 2018, 42(6): e12666.
- [49] 翟丽丽, 由大鹏. 响应面法优化黑木耳多糖酸奶工艺 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 7111-7117.
- [50] 尹红力, 佟丽丽, 王振宇, 等. 响应面法优化黑木耳酸性多糖硫酸酯化制备工艺 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42(26): 9167-9171.
- [51] 尹红力, 王振宇, 梁薇薇, 等. 响应面法优化黑木耳多糖与三价铬螯合工艺 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42(15): 4830-4833.
- [52] 崔兵兵, 李季, 刘可春, 等. 冬虫夏草多糖抑制肝纤维化作用机制的研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(15): 228-234.
- [53] Hu Z Y, Wang J M, Jin L, *et al.* Preparation, characterization and anti-complementary activity of three novel polysaccharides from *Cordyceps militaris* [J]. *Polymers*, 2022, 14(21): 4636.
- [54] Wu Y L, Zhou F, Jiang H T, *et al.* Protective effect of purified polysaccharides from *Cordyceps militaris* substrate on acute ethanolic hepatotoxicity in male mice [J]. *Nanosci Nanotechnol Lett*, 2017, 9(10): 1453-1462.

[责任编辑 潘明佳]