

【循证研究与数据挖掘】

基于 CiteSpace 和 VOSviewer 知识图谱的凝胶贴膏制剂研究动态与发展趋势

梅佳华¹, 王立胜^{1#}, 张胜豪¹, 王勇森¹, 王思敏¹, 莫 恭¹, 唐佳佳¹, 马云淑^{1,2*}

1. 云南中医药大学, 云南 昆明 650500

2. 云南省高校外用给药系统与制剂技术研究重点实验室, 云南省傣医药与彝医药重点实验室, 云南省药食同源饮片工程中心, 云南 昆明 650500

摘要: 目的 基于文献计量学方法, 对 1995—2025 年凝胶贴膏领域的研究现状与发展趋势进行可视化分析, 为该领域未来的探索及创新发展提供参考。方法 检索中国学术期刊全文数据库 (CNKI)、万方 (Wanfang)、维普 (VIP) 及 Web of Science (WOS) 核心数据库的凝胶贴膏相关中、英文文献, 经 NoteExpress 去重和人工筛选后, 采用 CiteSpace、VOSviewer 及 Excel 工具, 从年度与国家发文量、机构与作者合作网络、关键词共现与聚类、关键词突现等维度, 对纳入的文献开展系统性可视化计量分析, 对比中、英文研究的特征与差异。结果 共纳入文献 3 689 篇, 其中中文 1 605 篇, 英文 2 084 篇。分析显示, 年度发文量呈波动性增长, 2015 年后英文文献增速与总量均显著超越中文, 2024 年英文文献发文峰值 192 篇。国家层面, 美国以 528 篇居英文发文量首位, 中国 404 篇位列第 2, 全球形成北美、亚洲、欧洲 3 大研究重心; 国际合作中, 中、美为核心节点, 合作网络密集。机构方面, 中文发文量最高的机构是北京中医药大学 (25 篇), 国内研究机构呈“区域化小团体”特征, 企业参与度低; 英文发文量最高的机构是诺华公司 (77 篇), 国际机构形成以跨国药企为核心、产学研深度融合的全球化协作网络。作者方面, 中文发文量最高的作者为中国中医科学院刘淑芝 (24 篇), 核心团队包括刘淑芝团队 (聚焦基质优化、促透技术)、吴雪茹团队 (聚焦工艺优化与质量标准)、马云淑团队 (聚焦民族药凝胶贴膏开发), 国内作者合作呈分散化特征, 形成多个独立研究团队; 英文发文量最高的作者为 Fang Liang (58 篇), 国际作者合作网络高度互联, 核心团队研究偏向前沿药物递送机制与疾病靶向治疗。研究热点上, 中文文献聚焦剂型基础研究与工艺优化, 高频关键词为巴布剂、基质、制备工艺等, 研究演进历经剂型引进、技术深化、标准建立、理念统一与前沿探索 4 阶段; 英文文献聚焦临床应用与前沿递送机制, 高频关键词为透皮贴剂、双盲、疗效等, 研究从替代治疗拓展至神经系统疾病、智能递送、组织修复等领域, 历经激素治疗、神经疾病治疗、制剂技术革新、生物医学工程融合 4 阶段。结论 凝胶贴膏领域正快速发展, 中、英文研究在研究重点、合作模式等方面差异显著。未来该领域需融合透皮吸收机制与智能递送技术, 推进中药复方凝胶贴膏现代化标准化, 拓展其在慢性病管理、组织修复的应用, 攻克黏附力等技术瓶颈。

关键词: 凝胶贴膏; 文献计量学; 研究现状; 发展趋势; CiteSpace; VOSviewer; 可视化分析; 透皮机制; 慢性病管理; 组织修复

中图分类号: R283.6; G350 文献标志码: A 文章编号: 1674 - 6376(2026)04 - 1331 - 18

DOI:10.7501/j.issn.1674-6376.2026.04.022

Research dynamics and development trends of gel patch formulations based on CiteSpace and VOSviewer knowledge graphs

MEI Jiahua¹, WANG Lisheng¹, ZHANG Shenghao¹, WANG Yongsen¹, WANG Simin¹, MO Gong¹, TANG Jiajia¹, MA Yunshu^{1,2}

1. Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China

2. Engineering Research Center for Medicine and Food Homologous Beverage of Yunnan Province, Yunnan Key Laboratory of Dai

收稿日期: 2025-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (82174065); 云南省科技厅社会发展专项-重点研发计划项目 (202303AC100025)

作者简介: 梅佳华, 男, 博士, 主要从事中药新制剂及新产品开发研究。E-mail: Highwaydo@163.com

#共同第一作者: 王立胜, 男, 本科, 主要从事中药学研究。E-mail: 3092162342@qq.com

*通信作者: 马云淑, 女, 博士, 教授, 主要从事中药新制剂及新产品开发研究。E-mail: yunshuma2@126.com

and Yi medicines, The Key Laboratory of External Drug Delivery System and Preparation Technology in University of Yunnan Province, Kunming 650500, China

Abstract: Objective Based on the bibliometric method, a visual analysis was conducted on the research status and development trends of gel patches from 1995 to 2025 to provide a reference for future exploration and innovation in this field. **Methods** Relevant Chinese and English literature on gel patches from the CNKI, Wanfang, VIP, and Web of Science (WOS) core databases were retrieved. After removing duplicates using NoteExpress and conducting manual screening, CiteSpace, VOSviewer, and Excel tools were used to conduct a systematic visual quantitative analysis of the included literature, comparing the characteristics and differences between Chinese and English studies. **Results** A total of 3 689 articles were included, including 1 605 Chinese articles and 2 084 English articles. The analysis showed that the annual publication volume fluctuated and increased, with the growth rate and total volume of English literature significantly exceeding that of Chinese literature after 2015. In 2024, the number of English literature reached a peak of 192 articles. At the national level, the United States had 528 articles as the leading English publication volume, China had 404 articles ranking second. Three major research centers formed in North America, Asia, and Europe. In international cooperation, China and the United States were the core nodes, and the cooperation network was dense. In terms of institutions, Beijing University of Chinese Medicine had the highest number of Chinese publications (25 articles), and domestic research institutions showed a “regionalized small group” feature, with low participation from enterprises. The institution with the highest number of English publications was Novartis (77 articles), and international institutions formed a global collaborative network centered on multinational pharmaceutical companies, with deep integration of industry, academia, and research. In terms of authors, the Chinese author with the highest number of publications was Liu Shuzhi from the Chinese Academy of Traditional Chinese Medicine (24 articles), with core teams including the Liu Shuzhi team (focusing on matrix optimization and permeation technology), Wu Xueru team (focusing on process optimization and quality standards), and Ma Yunshu team (focusing on the development of ethnic medicine gel patches). Domestic authors' cooperation was characterized by dispersion, forming multiple independent research teams. The English author with the highest number of publications was Fang Liang (58 articles), with a highly interconnected core team research network focusing on the frontiers of drug delivery mechanisms and disease-targeted treatment. In terms of research hotspots, Chinese literature focused on basic research and process optimization of formulations, with frequent keywords such as ointment, matrix, and preparation process. The research evolution went through four stages: introduction of formulations, deepening of technology, establishment of standards, unified concepts, and frontier exploration. English literature focused on clinical applications and frontier delivery mechanisms, with frequent keywords such as transdermal patches, double-blind, and efficacy. The research expanded from alternative treatment to neurological diseases, intelligent delivery, and tissue repair, going through four stages: hormone therapy, neurological disease treatment, formulation technology innovation, and integration of biomedical engineering. **Conclusion** The gel patch field is developing rapidly, and there are significant differences in research focus and cooperation models between Chinese and English studies. In the future, this field needs to integrate transdermal absorption mechanisms and intelligent delivery technologies, promote the modernization and standardization of traditional Chinese medicine compound gel patches, expand their application in chronic disease management and tissue repair, and overcome technical bottlenecks such as adhesion force.

Key words: gel patch; bibliometrics; research status; development trend; CiteSpace; VOSviewer; visual analysis; transdermal mechanism; chronic disease management; tissue repair

经皮给药系统作为继口服给药、iv 给药之后的第 3 大给药途径,可有效规避肝脏首关效应,减少胃肠道刺激,显著提升患者用药依从性,为慢性病的长期防治提供了理想的给药解决方案^[1]。凝胶贴膏是以亲水性高分子材料为基质制备而成的外用贴膏剂,凭借载药量大、透气性优良、患者顺应性佳等突出优势,近年来在中药新剂型开发领域备受关注^[2]。尤其值得关注的是,其特性与中药复方多组分、多靶点的作用特点高度契合,在关节炎、软组织损伤及各类疼痛性疾病的治疗中展现出独特

优势^[3]。近年来,随着新型药用辅料的不断涌现及制剂工艺的持续创新,凝胶贴膏的研究重心逐步拓展,从传统的基质配方筛选、制备工艺优化,逐步延伸至药效物质基础、体内外相关性、智能递送系统等深度研究领域^[4-5]。然而,中药凝胶贴膏的产业化推进与临床广泛应用仍面临诸多瓶颈,如中药复杂成分与基质的相容性欠佳、黏附力与释药性能难以平衡、质量标准缺乏统一规范等,这些问题亟待系统梳理与针对性解决^[6]。

文献计量学作为一种定量分析文献的有效方

法, 可通过知识图谱直观呈现特定领域的国家分布、合作模式、研究热点及发展动态, 为领域研究提供清晰的可视化参考^[7-9]。目前, 已有研究对经皮给药领域开展过文献计量分析^[10-11], 但尚未有研究专门聚焦于融合传统中药理论与现代制剂技术的凝胶贴膏领域, 尤其缺乏对中、英文文献的对比分析, 难以揭示不同科研语境下该领域的研究侧重点与演进路径。基于此, 本研究采用文献计量学方法, 系统检索并分析 1995—2025 年间凝胶贴膏领域的中、英文相关文献; 进一步借助 CiteSpace、VOSviewer 等可视化工具, 清晰描绘该领域的研究现状、现存挑战, 并展望未来发展方向, 以期为推动中药凝胶贴膏的现代化发展与国际化进程提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 文献获取

中文文献来源于中国学术期刊全文数据库 (CNKI)、万方 (Wanfang)、维普 (VIP) 数据库, 为全面覆盖凝胶贴膏剂型在中国的研究历程与术语演变, 采用高级检索, 选择学术期刊并且以“巴布剂”或“凝胶膏剂”或“凝胶贴膏”为主题进行检索, 该检索策略基于对该剂型发展脉络的梳理: “巴布剂”是从日本“巴布 (cataplasm)”引入中国初期的直接音译名, 是早期文献 (1990—2000 年) 中的常用术语; “凝胶膏剂”是随后出现的过渡性规范术语, 在 2000—2010 年的文献中广泛使用; “凝胶贴膏”则是近年来在《中国药典》等相关标准推动下逐渐确立的当前规范化术语。3 者采用“或”的关系合并检索, 能够系统囊括该剂型在不同历史阶段的所有核心研究文献。检索时间范围设定为 1995 年 1 月 1 日—2025 年 9 月 30 日, 经人工筛选剔除无关文献后, 导入 NoteExpress 进行查重处理, 最终得到中文文献原始数据集。

英文文献来源于 Web of Science (WOS) 核心合集数据库, 采用高级检索, 选择学术期刊并以“gel patch” OR “hydrogel patch” OR “transdermal patch” OR “cataplasm”主题进行检索, 时间范围在 1995 年 1 月 1 日—2025 年 9 月 30 日。同时, 考虑到“transdermal patch”一词在英文文献中为广义的经皮给药贴剂总称, 为防止遗漏相关研究, 也将其纳入初步检索。随后对标题和摘要进行人工筛选, 无关文献予以剔除。该双重筛选流程精准界定了纳入范围, 有效避免了因概念交叉导致的重复或误纳, 最终得到英文文献原始数据集。

1.2 文献纳入与排除

将有关凝胶贴膏的研究文献纳入, 排除毕业论文、会议论文、报纸报道和重复文献, 利用 NoteExpress 软件去掉重复文献和作者、关键词、期刊等信息不全的文献。

1.3 数据处理

运用 CiteSpace 6.3.R1、VOSviewer 1.6.20 及 Excel 软件, 对本研究数据开展了系统性的可视化分析。首先通过 Excel 完成中、英文文献年度发文量, 英文文献国家发表数据的整理与可视化处理, 清晰呈现该领域研究的时序发展趋势与地域分布特征。在文献计量分析层面, 依托 CiteSpace 软件设置时间跨度为 1995—2025 年、时间切片为 1 年, 以精准捕捉研究趋势的逐年演变规律; 节点类型选取国家、作者与关键词, 同时采用 TopN=50 的阈值进行节点筛选 (该设定旨在平衡网络密度与核心信息保留的关系, 既避免节点过多造成网络结构杂乱, 也防止节点过少导致重要结构信息丢失), 并基于上述参数分别对中、英文文献展开多维度分析: 通过绘制中、英文文献年度发文量趋势图, 揭示该领域研究产出的动态变化特征; 通过构建机构合作网络, 明晰中、英文文献发文机构的协作模式; 同时开展关键词聚类分析与突现检测, 生成中、英文文献对应的关键词聚类图谱和突现图谱, 以此有效识别领域内的研究热点与前沿发展方向。此外, 借助 VOSviewer 软件进一步深化合作网络与研究热点的可视化呈现效果: 通过构建英文文献国家合作网络并统计各国发文数据, 直观展现该领域的国际合作整体格局及各国研究贡献程度; 通过绘制中、英文文献作者合作网络, 清晰揭示核心作者群体构成及合作关联特征; 通过建立中、英文文献关键词共现网络, 深入呈现各研究热点间的关联强度与领域整体知识结构。

2 结果与分析

2.1 发文趋势分析

经系统筛选, 本研究最终纳入凝胶贴膏相关文献共计 3 689 篇, 其中中文文献 1 605 篇, 占比 43.57%; 英文文献 2 084 篇, 占比 56.43%。该领域年度发文趋势如图 1 所示, 整体呈波动上升态势, 具体可划分为 3 个发展阶段: 1995—2006 年为研究起步阶段, 期间总发文量偏少, 整体增长态势缓慢; 2006 年后研究增速显著提升, 累计发文量持续攀升, 反映出该领域的学术研究活动日趋活跃; 1996 年起, 英文文献年度发文量首次超越中文文献,

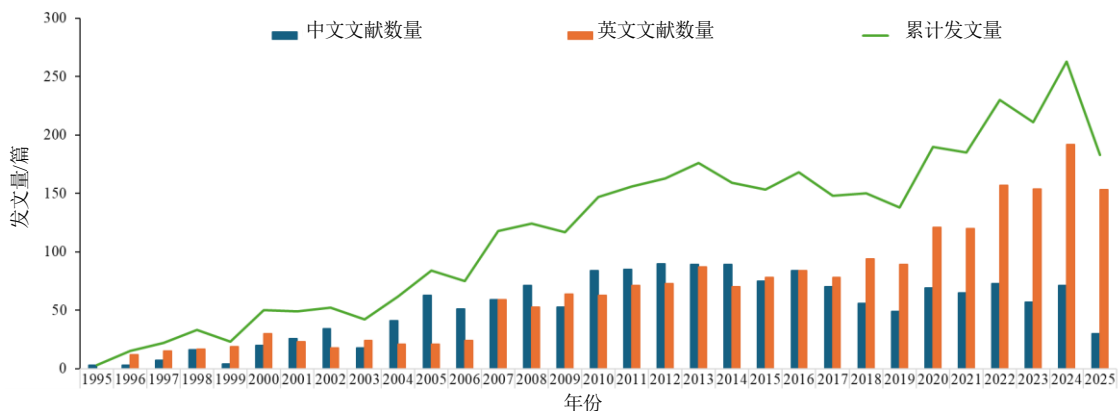


图 1 中、英文文献发文趋势

Fig. 1 Trends in publication of Chinese and English literature

2015—2025 年英文文献的增长趋势尤为显著，并于 2024 年达到发文峰值（192 篇）。这一发文特征表明，凝胶贴膏领域的研究成果愈发倾向于在国际期刊发表，体现出该领域研究具备较高的国际化发展程度。本研究的文献纳入时间截至 2025 年 9 月 30 日，故 2025 年英文文献的发文章数据仍存在后续增长空间。

2.2 国家发文与合作分析

凝胶贴膏研究在 1995—2025 年间已成为全球性热点科学领域，英文文献累计发文章达 2 084 篇，涉及全球 71 个国家，覆盖 6 大洲，呈现出广泛的国际关注度。国家发表数据显示，美国以 528 篇的发表量位居首位，显示出其在该领域长期的科研积累（图 2）。中国以 404 篇的发文章量位列第 2，展现出显著的科研成长性与系统性的投入成效。中国在

该领域的快速崛起，可归因于以下因素：一是国家层面在生物材料与药物递送系统领域的持续战略布局与科研经费投入；二是中国在中药经皮给药理论与现代制剂技术融合方面的独特研究基础，推动了凝胶贴膏在材料、工艺与评价方法等方面的特色创新；三是国内高校、科研院所与企业协同创新的机制逐步成熟，促进了科研成果的高效转化与国际化发表。从全球地域分布来看，凝胶贴膏研究已形成以美国为核心的北美地区、以中国、印度、日本和韩国为代表的亚洲地区，以及包括德国、英国、意大利、法国和西班牙在内的欧洲地区 3 大研究重心，呈现出“三足鼎立”的整体格局，反映出该领域在全球范围内的多极化发展与区域协同态势。

从国际合作网络（图 3）可以看出，节点间的

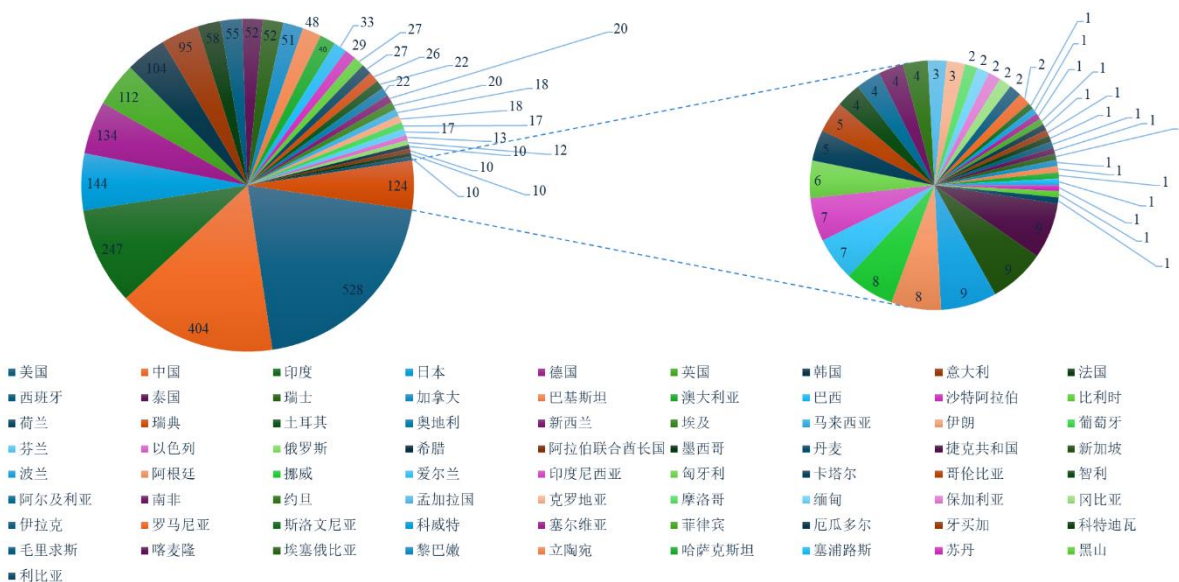


图 2 英文文献国家发文章量分布

Fig. 2 Distribution of English-language publications by country

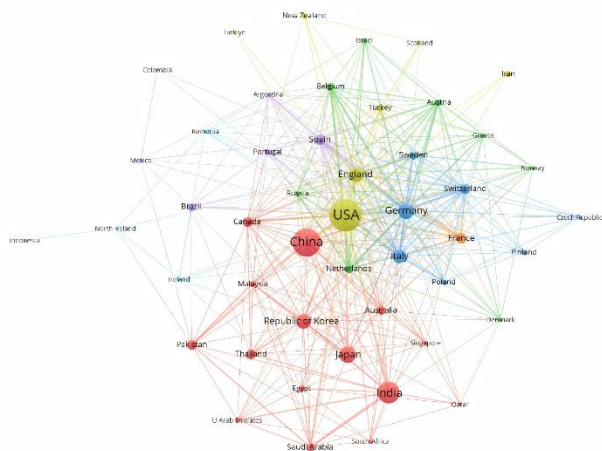


图 3 英文文献国家合作网络

Fig. 3 National cooperation network of English literature 连接广泛且密集，反映出凝胶贴膏研究领域具有高度国际化特征。英文文献发文量前 10 的国家见表 1。美国作为网络中的核心节点之一，与包括中国、印度、德国、英国等在内的多个国家建立密切的合作关系。这种广泛的合作格局得益于美国在生物材料、药物递送等基础研究方面的深厚积累。与此同时，中国也逐步成为国际合作网络中的关键参与者，其合作活跃度不断提升。这一方面源于中国在中药经皮给药理论和现代制剂技术融合方面的特色优势，另一方面也受益于国家层面鼓励国际科技合作与高水平成果输出的政策支持。中、美两国作为该领域科研产出的重要力量，其广泛国际合作不仅促进了知识、技术与资源的跨境流动，也有力推动了全球凝胶贴膏研究的协同创新与标准化进程，为应对共性技术挑战和加速临床转化提供了重要平台。

表 1 英文文献发文量前 10 位的国家

Table 1 Top 10 countries in terms of number of English academic papers published

序号	发文量	国家
1	528	美国
2	404	中国
3	247	印度
4	144	日本
5	134	德国
6	112	英国
7	104	韩国
8	95	意大利
9	58	法国
10	55	西班牙

2.3 研究机构分析

对中文文献发文机构进行可视化分析，中、英文文献发文量前 10 的机构见表 2。其中，中文文献发文量中北京中医药大学排名第 1 (25 篇)，其次是广州中医药大学 (23 篇)，排名第 3 的是甘肃省中医院 (15 篇)。英文文献发文量排名前 3 的依次是诺华公司 (77 篇)、沈阳药科大学 (59 篇)、优时比制药公司 (33 篇)。中文文献合作网络的分析 (图 4-A) 显示，国内凝胶贴膏领域的研究机构呈现出显著的“区域化小团体”特征。在特定地理范围内，由少数核心机构作为区域枢纽，带动周边单位形成协作集群。例如，湖南中医药大学、广州中医药大学和甘肃省中医院等机构，不仅是该领域的高产单位，也在各自区域合作网络中发挥着关键的作用。这些核心枢纽通过与区域内高校、医院等机构合作，有效促进了相关技术从基础研究向临床应用的转化。然而，各区域核心枢纽之间缺乏有效的合作，导致研究力量分散，难以形成协同攻关的整体格局。从机构类型分布来看，高校与医院构成了国内凝胶贴膏研究的主力，而企业参与度明显不足。合作网络中绝大多数节点为中医药院校及其附属医院，企业节点稀少且多处于边缘位置。

英文文献机构合作网络 (图 4-B) 呈现出高度互联与全球整合的特征，节点密集且连接紧密，形成了高度一体化的协作体系。值得关注的是，以 Novartis USA 为代表的跨国制药企业在网络中占据核心地位，与包括中国科学院、沈阳药科大学等在内的多家学术机构建立了广泛的合作关系。这种深度参与的格局显示出企业在国际凝胶贴膏研发中的重要作用，形成了产学研紧密协同的创新生态。中英文文献企业参与度的差异反映了我国在构建开放型产业协同创新体系方面仍需加强。

2.4 发文作者与合作分析

本研究借助 CiteSpace 软件对中、英文文献的作者合作网络开展可视化分析，清晰呈现出凝胶贴膏研究领域两种截然不同的学术合作生态格局。在中文文献方面，共识别出 287 位作者，形成 306 条合作连线。从合作网络图谱 (图 5-A) 可直观发现，该领域研究力量未形成高度整合的整体，呈现出典型的分散化特征，衍生出数个以高产学者为核心的相对独立研究团队。这些团队内部协作紧密，但团队间的学术合作相对匮乏。表 3 的数据进一步印证了这一特征，发文量位居前列的学者，如中国

表 2 中、英文文献发文量前 10 位的机构

Table 2 Top 10 institutions by publication volume in Chinese and English literatures

序号	中文文献			英文文献		
	发文量/篇	始发年份	机构	发文量/篇	始发年份	机构
1	25	2011	北京中医药大学	77	2007	Novartis USA
2	23	1998	广州中医药大学	59	2009	Shenyang Pharmaceutical University
3	15	2009	甘肃省中医院	30	2010	UCB Pharma SA
4	14	2007	中国中医科学院中药研究所	28	2002	University of California System
5	13	2005	南京中医药大学	26	1999	Harvard University
6	13	2012	湖南中医药大学	26	2012	University of Chinese Academy of sciences
7	12	2007	山东中医药大学	23	2003	Harvard University Medical Affiliates
8	11	2010	青岛市海慈医疗集团	21	1999	University of London
9	11	2003	上海中医药大学附属曙光医院	17	2009	Egyptian Knowledge Bank
10	9	2013	四川省骨科医院	16	2007	Saint Louis University

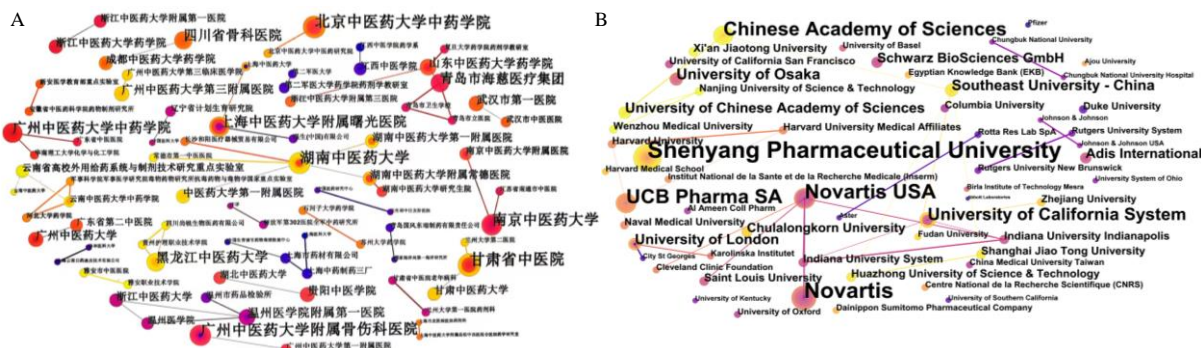


图 4 中文 (A) 和英文 (B) 文献发表机构合作网络分析

Fig. 4 Analysis of collaboration networks among institutions in Chinese (A) and English (B) scholarly literature

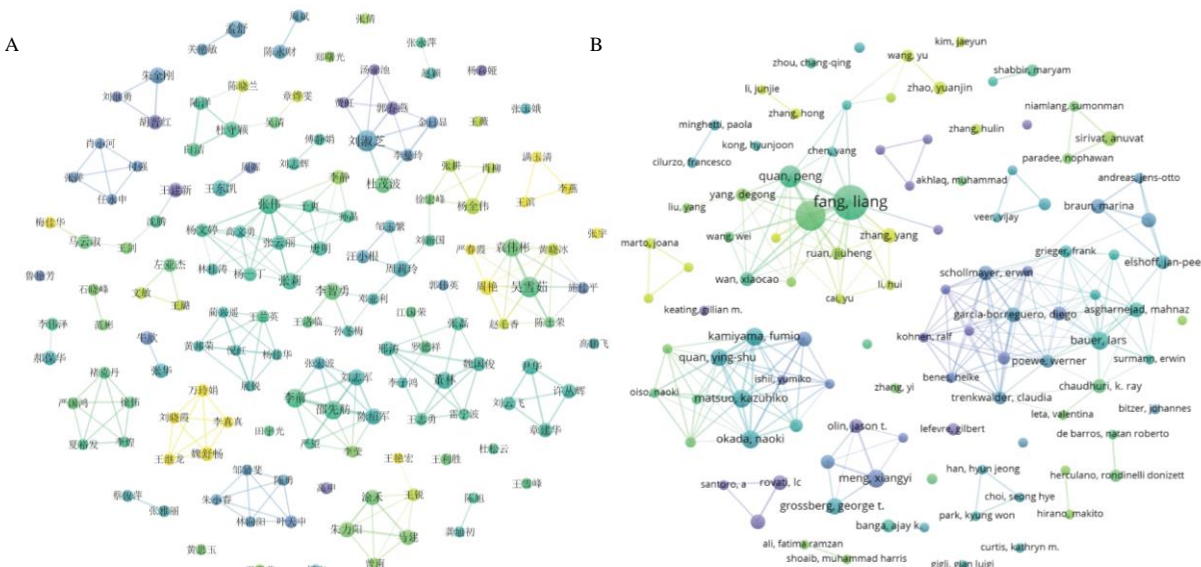


图 5 中文 (A) 和英文 (B) 文献作者合作网络

Fig. 5 Author collaboration networks between Chinese (A) and English (B) literature

表 3 中文和英文文献发文量前 10 位的作者

Table 3 Top 10 authors by publication volume in Chinese and English literature

序号	中文文献		英文文献	
	发文量/篇	作者	发文量/篇	作者
1	24	刘淑芝	58	Fang Liang
2	22	吴雪茹	42	Liu Chao
3	20	张伟	23	Quan Peng
4	18	邵先舫	16	Matsuo Kazuhiko
5	17	李前	16	Bauer Lars
6	16	袁伟杉	15	Kamiyama Fumio
7	15	萤林	15	Okada Naoki
8	15	张莉	15	Meng Xiangyi
9	14	杜茂波	14	Quan Yingshu
10	14	李智勇	13	Grissberg George t.

中医科学院刘淑芝（24 篇）、广州中医药大学吴雪茹（22 篇）及张伟（20 篇）等，均为各自合作团队的核心枢纽。深入剖析各核心团队的研究方向，可清晰把握中文研究的侧重点：刘淑芝团队聚焦于凝胶贴膏的基质优化、制备工艺革新及促透技术开发^[12-14]，该团队运用面心设计-效应面法等现代优化技术，在优化膏体黏附性、内聚性与药物释放性能方面取得系列研究成果，为中药凝胶贴膏的产业化制备奠定了坚实基础。与之不同，吴雪茹团队更注重工艺优化与质量标准的衔接研究，其研究范畴涵盖温通膏微乳凝胶的成型工艺研究，以及筋骨疗伤贴膏的薄层鉴别与稳定性考察^[15-17]，形成了从“工艺研究”到“质量评价”的完整研究链条。值得关注的是，云南中医药大学马云淑团队以民族药“香果健消片”为研发源头完成二次开发，成功研制出复方蜘蛛香凝胶贴膏，构建起从复方蜘蛛香的提取纯化、凝胶贴膏的成型工艺研发、质量标准建立，到药效学评价与作用机制研究的完整证据链，为民族药转化为符合现代制剂标准的外用透皮制剂提供了可借鉴的技术路径^[18-24]。

与中文文献的合作特征形成鲜明对比的是，英文文献的作者合作网络展现出高度互联与全球整合的特点。尽管作者数量（240 位）与合作连线数量（225 条）与中文文献相近，但其合作网络结构更为交织紧密、高度融合。发文量领先的学者，如 Fang Liang（58 篇）、Liu Chao（42 篇）和 Quan Peng（23 篇）等，并非孤立的研究核心，而是深度嵌入于广泛且复杂的国际合作网络体系中。这些高产研究团队的研究方向也更具前沿性与学科交叉性：

Fang Liang 团队深耕药物递送机制的基础研究，早在 2018 年便探究了利用离子对策略精准调控贴剂中药物的经皮递送速率，研究涉及分子间相互作用和压敏胶迁移性等微观作用机制^[25-26]；Liu Chao 团队则凸显出更强的疾病导向与技术创新融合特征，致力于探索贴剂在疾病治疗中的创新应用，例如开发出由血红素负载的青蒿酸二聚体脂质体与海藻酸盐构成的原位水凝胶系统，应用于局部癌症治疗，充分体现了先进剂型技术与精准医疗理念的有机结合^[27-29]。

综上，中、英文文献在作者合作模式上存在显著差异：中文研究形成了以核心学者为引领、聚焦于剂型基础研究、工艺优化与中药/民族药开发的本土化合作团队，研究体系结构清晰但合作形态略显分散；而英文研究则构建起高度国际化、网络化的合作体系，研究方向更偏向于前沿药物递送机制、创新剂型设计及特定疾病的靶向治疗应用，各研究团队间联结紧密，协同创新的特征尤为显著。

2.5 关键词分析

2.5.1 关键词共现分析

通过对中、英文文献开展关键词共现分析（图 6），并结合高频关键词统计结果（表 4），可明晰凝胶贴膏领域中、英文研究的核心侧重点与发展脉络。中文研究的热点高度聚焦于制剂工艺优化与质量控制领域，“巴布剂”（363 次）、“基质”（118 次）、“制备工艺”（115 次）、“正交实验”（108 次）、“凝胶膏剂”（83 次）等关键词出现频次位居前列，构成中文研究的核心关键词集群。从关键词共现网络图谱（图 6-A）可见，上述核心关键词形成了以“巴布剂”为中心，向基质研究、

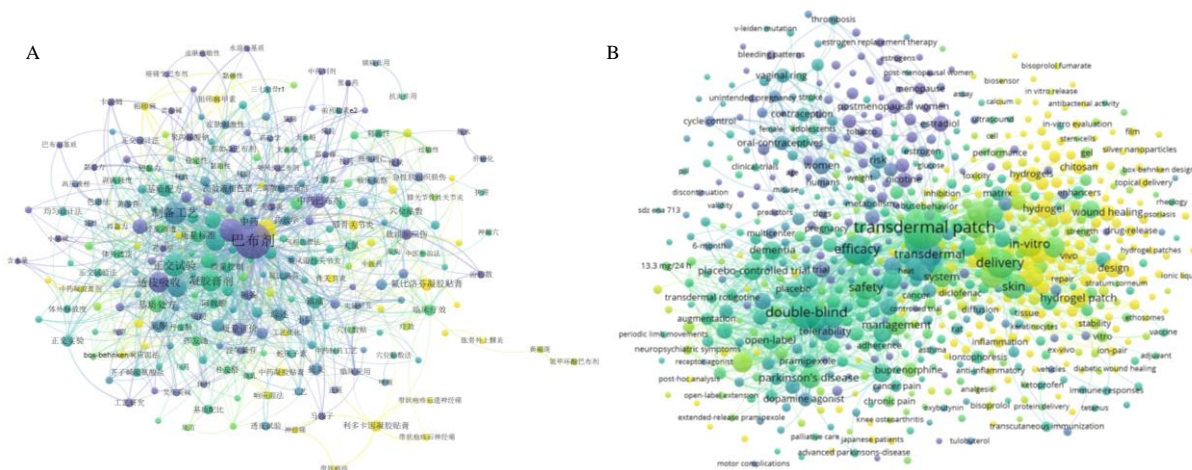


图 6 中文 (A) 和英文 (B) 文献关键词共现网络

Fig. 6 Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature

表 4 中、英文文献中出现频次前 15 位的关键词
Table 4 Top 15 high-frequency keywords across Chinese and English literature

序号	中文关键词	频次	英文关键词	频次
1	巴布剂	363	transdermal patch	524
2	基质	118	double-blind	248
3	制备工艺	115	efficacy	204
4	正交实验	108	pharmacokinetics	195
5	透皮吸收	87	delivery	195
6	凝胶膏剂	83	in-vitro	159
7	高效液相色谱法	81	skin	149
8	凝胶贴膏	74	transdermal	136
9	正交设计	67	safety	131
10	中药	48	patch	123
11	含量测定	45	drug-delivery	111
12	基质处分	45	release	108
13	提取工艺	42	permeation	96
14	均匀设计	39	formulation	94
15	中药巴布剂	38	system	91

工艺优化、质量评价、药效验证等方向辐射的紧密网络结构。这一分布特征表明，中文研究核心围绕剂型本身的开发与标准化展开，研究人员致力于通过正交实验、均匀设计等方法优化制备工艺，并构建包含含量测定、高效液相色谱法在内的系统化质量评价体系，体现出鲜明的基础研究与技术优化导向。

相较之下，英文研究的格局呈现出显著的差异化特征。“transdermal patch”（透皮贴剂，524 次）、“double-blind”（双盲，248 次）、“efficacy”（疗效，204 次）、“pharmacokinetics”（药动学，195 次）、“safety”（安全性，131 次）等关键词占据主导地位。

其关键词共现网络图谱（图 6-B）结构更为复杂多元，研究重点明显偏向临床应用与疾病靶向治疗，网络围绕利斯的明（rivastigmine）、芬太尼（fentanyl）、罗替高汀（rotigotine）等特定药物，以及帕金森病（Parkinson’s disease）、阿尔茨海默病（Alzheimer’s disease）等特定疾病形成多个研究集群，清晰展现出从基础研究向临床价值转化的研究路径。尤为值得关注的是，英文研究在新型递送系统与前沿功能材料领域展现出显著优势，“nanoparticles”（纳米粒）、“hydrogel”（水凝胶）、“microneedles”（微针）等高频关键词的出现，体现出英文研究对纳米技术、智能材料等前沿领域的积极探索，此类新兴方向与传统透皮给药研究深度融合，共同推动了凝胶贴膏技术的创新发展。

中、英文文献在研究重点上的显著差异，本质上反映出 2 者所处研究阶段与核心发展方向的不同：中文研究聚焦于剂型的基础优化与标准化体系建设，是该领域发展的重要基础支撑；英文研究则更注重临床价值的实现与前沿技术的创新探索，代表着该领域的前沿发展方向。2 者的研究差异不仅为后续跨区域、跨视角的融合研究提供了互补性思路，也为凝胶贴膏领域的未来发展指明了多元化的创新路径。

2.5.2 关键词聚类分析 通过对中、英文文献的关键词开展系统性聚类分析，深入解析凝胶贴膏领域的研究核心、知识结构与发展脉络，并以此为基础对该领域未来发展趋势进行科学预判。中文文献的关键词聚类图谱（图 7-A）显示，该领域已形成 13

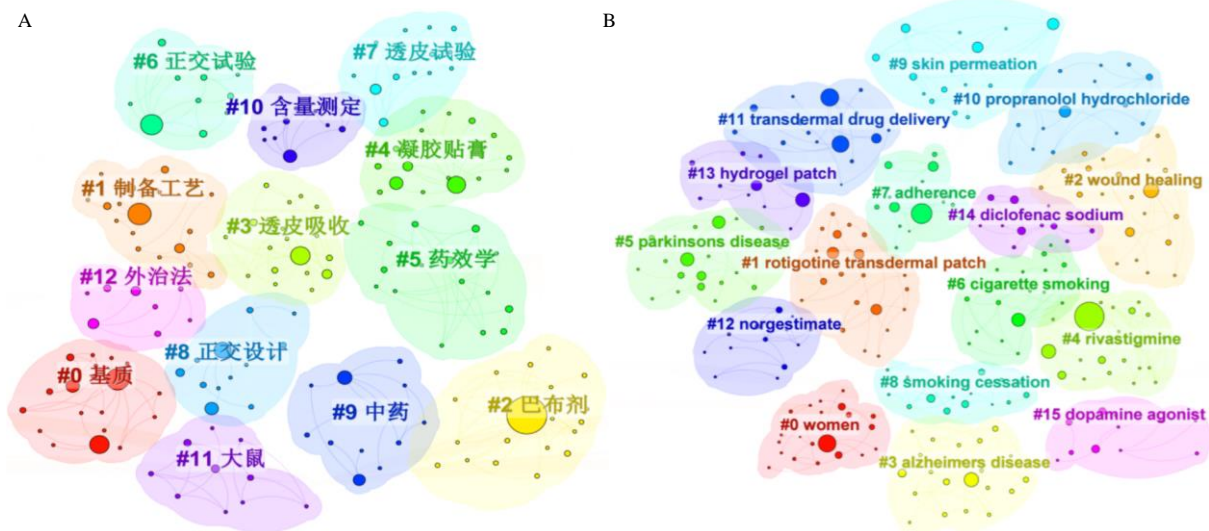


图 7 中文 (A) 英文 (B) 文献关键词聚类图

Fig. 7 Cluster map of keywords in Chinese (A) and English (B) literature

个内聚力较强的研究聚类。如表 5 所示，所有聚类的轮廓值均 ≥ 0.9 ，表明各研究方向均已构建起稳定、成熟的研究体系。结合聚类内涵与研究逻辑，可将这些聚类归纳为 4 个核心研究层次：（1）基础研究层，以聚类#0 基质、正交设计相关聚类为核心，聚焦于贴膏剂材料学基础研究与处方优化，是整个领域研究开展的理论与技术起点；（2）工艺开发层，以聚类#1 制备工艺、聚类#6 正交实验为代表，为研究规模最大的核心领域，核心致力于凝胶贴膏制备方法的探索、改进与系统优化；（3）质量控制层，依托制备工艺、正交实验等相关聚类的研究成果，构建起科学规范的质量标准体系，为凝胶贴膏产品的产业化转化提供关键质量保障；（4）应用验证层，涵盖聚类#2 巴布剂、聚类#4 凝胶贴膏、聚类#5 药效学、聚类#9 中药、聚类#11 大鼠等方向，将前期基础研究与工艺开发成果延伸至具体的药效验证与实际应用层面，体现出该领域研究以实际应用为导向的最终价值取向。

值得关注的是，所有聚类的主要活跃研究年份均集中于 2000—2010 年，这表明国内凝胶贴膏研究在该时期已步入成熟发展阶段。而 2010 年后的研究创新幅度有限，研究模式多为更换有效成分后，沿用正交实验等传统方法优化基质配方，尚未出现突破性的技术革新与研究方向的创新性拓展。

英文文献的关键词聚类图谱（图 7-B）呈现出更为复杂且多元的研究格局，共形成 16 个高轮廓

值（基本 >0.9 ）的稳定研究聚类。与中文文献的研究特征相比，英文研究凸显出鲜明的疾病导向与技术驱动双重发展特征。如表 6 所示，疾病相关研究以神经系统疾病为核心方向，聚类#1（rotigotine transdermal patch）、#4（alzheimers disease）、#5（parkinsons disease）相互关联形成了完整的研究体系，充分彰显出凝胶贴膏在神经退行性疾病临床治疗中的重要应用价值。此外，聚类#0（women）则聚焦于女性健康领域的特色化研究，研究范畴涵盖更年期健康管理、避孕等多个应用方向，成为该领域的重要研究分支。技术创新层面，英文研究展现出强劲的前沿探索势头，相关聚类围绕新型药物递送系统研发与透皮吸收机制研究展开深度探索。其中聚类#2（wound healing）、#10（propranolol hydrochloride）、#13（hydrogel patch）聚焦于新型药物递送系统的开发，研究涉及水凝胶贴剂、纳米粒等先进制剂技术的研发与实际应用；聚类#9（skin permeation）则持续深耕透皮吸收增强机制的基础研究，为促进技术的创新发展提供了重要理论支撑。从研究时间维度来看，英文文献各聚类的核心活跃年份从 2001 年（#0 women）持续延续至 2021 年（#10 propranolol hydrochloride），呈现出研究热点动态演进、持续更新的显著特征。这种研究方向的不断迭代与拓展，反映出英文研究能够敏锐捕捉新材料研发成果与新兴临床需求，及时调整研究重心，始终保持该领域的研究创新活力。

表 5 中文文献关键词聚类分析

Table 5 Cluster analysis of keywords in Chinese literature

聚类名称	节点数	轮廓值	主要关键词
#0 基质	20	1.000	基质、均匀设计、凝胶膏剂、投药、皮肤、巴布剂、癌痛巴布剂、天麻钩藤凝胶贴、亲水型透皮贴剂
#1 制备工艺	20	1.000	制备工艺、体外释放、临床研究、星点设计、质控标准、透皮实验、去氢紫堇碱、基质制备、结肠慢传输型便秘
#2 巴布剂	19	1.000	巴布剂、凝胶膏剂、血竭素、吴茱萸、凝胶贴膏、黄氏愈伤贴、产业化、发展前景、降血压
#3 透皮吸收	18	1.000	透皮吸收、氮酮、丙二醇、芦丁、止痛巴布剂、桉叶油、止痛凝胶膏剂、丁香油、癍舒巴布剂
#4 凝胶贴膏	17	0.917	凝胶贴膏、巴布剂、祖师麻、提取工艺、促渗剂、川乌、石墨烯热敷贴、剥离度、高乌甲素
#5 药效学	16	0.958	药效学、治伤散、临床疗效、疼痛、持黏力、活血止痛凝胶膏剂、膜残留、带状疱疹后神经痛、保留率
#6 正交实验	14	0.958	正交试验、基质配比、工艺研究、薄层色谱、提取、交联成型工艺、黏合剂、体外透皮吸收、筋骨疗伤贴膏
#7 透皮实验	13	0.976	透皮试验、马钱子、薄层色谱扫描法、羌活醇、复方紫荆消伤膏、醇质体、丁桂凝胶膏剂、腰肾膏巴布剂、动物模型
#8 正交设计	12	0.859	正交设计、基质处方、工艺、经皮给药、分子对接、异欧前胡素、消定膏巴布剂、五虎巴布剂、跌打万花巴布剂
#9 中药	12	0.911	中药、研究进展、新剂型、展望、药剂学、外用乳胶剂、骨折、研究现状、巴布剂、正交设计
#10 含量测定	12	0.920	含量测定、大黄素、大黄酚、大黄酸、芦荟大黄素、即型凝胶、祛风巴布剂、贴膏剂、透皮吸收试验
#11 大鼠	10	0.995	大鼠、关节炎、穴位贴敷、细胞凋亡、雷公藤、治疗、佐剂性、核转录因子- κ B、类风湿性关节炎
#12 外治法	9	0.943	外治法、质量评价、综述、氟比洛芬、骨关节炎、药理研究、美洛昔康贴疗法、脾肾阳虚

2.5.3 关键词突现分析 关键词突现分析可有效挖掘研究领域在不同时期的学术焦点与发展脉络，通过对中、英文文献关键词突现图谱（图 8）的系统解析，本研究清晰梳理出凝胶贴膏领域中、英文研究的差异化演进路径与核心发展特征。其中中文文献的研究演进呈现出 4 阶段特征，完整映射出该领域从技术引进到自主探索的发展历程。（1）剂型引进与基础框架构建期（1997—2001 年）：作为研究萌芽阶段，关键词“基质”（1997 年）与“质量评价”（1997 年）同步突现，分别指向凝胶贴膏研发的两大核心维度——“基质”聚焦制剂的材料基础与成型机制，“质量评价”着眼于产品的标准化建设与性能综合评估。二者的同时出现表明，国内该领域研究在起步阶段便立足构建从制备到评价的完整技术框架，为后续研究筑牢了基础。（2）技术深

化与临床转化探索期（2002—2008 年）：此阶段研究核心围绕“透皮”核心技术展开深化探索，关键词“透皮速率”（2005 年）、“含量测定”（2005 年）、“大鼠”（2006 年）与“临床疗效”（2007 年）依次突现，勾勒出一条清晰的研究演进路径：从体外透皮速率的测定研究，到含量测定方法的建立与完善，再通过大鼠等动物模型开展体内药效验证，最终延伸至临床疗效评价。这一过程标志着国内凝胶贴膏研究正式从单纯的剂型开发向规范化药物产品研发迈进。（3）标准建立与技术体系完善期（2009—2015 年）：关键词“质量标准”（2011 年）的突现，预示着研究重点从单一技术探索转向系统化技术体系构建。研究者开始着力建立统一的质量控制标准、规范标准化制备工艺，推动凝胶贴膏研究从实验室基础探索向产业化生产转化，为产品的

表 6 英文文献关键词聚类分析

Table 6 Cluster analysis of keywords in English literature

聚类名称	节点数	轮廓值	聚类包含关键词
#0 women	22	0.945	women、efficacy、vaginal ring、menopause、oral contraceptives、idiopathicrls、prescription adherence
#1 rotigotine transdermal patch	22	0.943	rotigotine transdermal patch、dopamine agonists、alzheimer's disease、parkinson's disease、transdermal patch、animal models、tem、levodopa treated
#2 wound healing	22	0.981	wound healing、drug delivery、rivastigmine、hydrogel、parkinson's disease、suture resistance、sensitive vesicles
#3 alzheimers disease	21	0.968	alzheimer's disease、capsules、clinical pharmacokinetics、rivastigmine、estradiol、correlation、economic trends、reprod
#4 alzheimers disease	21	1.000	alzheimer's disease、rivastigmine、transdermal patch、cholinesterase inhibitors、donepezil、behavioral side effects、analysis
#5 parkinsons disease	19	0.930	parkinson's disease、postmenopausal women、quality of life、rotigotine、alzheimer's disease、amantadine、extracts、 <i>in vitro</i>
#6 cigarette smoking	17	0.952	cigarette smoking、nicotine、sustained release bupropion、smoking、major depression、reaction time、phase i、caffeine
#7 adherence	16	0.886	adherence、transdermal patches、double blind、dysphagia、child、healthy japanese、alzheimer-type dementia
#8 smoking cessation	16	0.782	smoking cessation、transdermal patch、nicotine patch、sumatriptan、acute、inner-city patients、nicotine dependence
#9 skin permeation	15	0.939	skin permeation、chemical enhancer、rivastigmine、bisoprolol、calorimetry、tds、transepidermal water loss、tolt
#10 propranolol hydrochloride	15	0.974	propranolol hydrochloride、solid lipid nanoparticles、 <i>ex vivo</i> permeation、 <i>ex vivo</i> permeation studies、ccd、analgesic activity、ustukhuddu
#11 transdermal drug delivery	15	1.000	transdermal drug delivery、 <i>in vitro</i> 、rivastigmine、parkinson's disease、transdermal drug delivery system、nerodilol、multivesicular vesicle
#12 norgestimate	14	0.932	norgestimate、vaginal ring、risk、intrauterine system、hormonal contraception、acceptability、perimenopausal women
#13 hydrogel patch	12	0.911	hydrogel patch、transcutaneous immunization、myocardial infarction、vaccine、transcutaneous vaccination、magnetic stimulation、poke-and-patch
#14 diclofenac sodium	12	0.918	diclofenac sodium、 <i>vivo</i> 、alzheimer's disease、palladium、isobornyl methacrylate、palladium、isobornyl methacrylate g
#15 dopamine agonist	11	1.000	dopamine agonist、adverse effects、therapeutic use、rotigotine、cholinesterase inhibitors administration & dosage、levodopa/carbidopa、clinical practice

规范化量产与临床广泛应用提供了坚实的技术支撑。(4) 理念统一与前沿探索期(2016 年至今):“凝胶贴膏”(2016 年)这一统一术语的突现,标志着该领域在概念表述上实现标准化与规范化,彰显出学术共识的形成与研究共同体的成熟。而 2022 年最新突现的关键词“炎症因子”,则表明国内研究已从宏观的剂型特性研究逐步深入至分子作用机制

层面,开启了机制导向的前沿探索新阶段。

英文文献中凝胶贴膏的研究展现出截然不同的发展轨迹,其 4 个阶段的演进过程,体现了该剂型从简单替代治疗载体到复杂生物学工程应用制剂的升级之路。(1) 激素治疗与行为干预探索期(1996—2005 年):本阶段突现关键词包括“estradiol”(雌二醇,1996 年)、“smoking cessation”

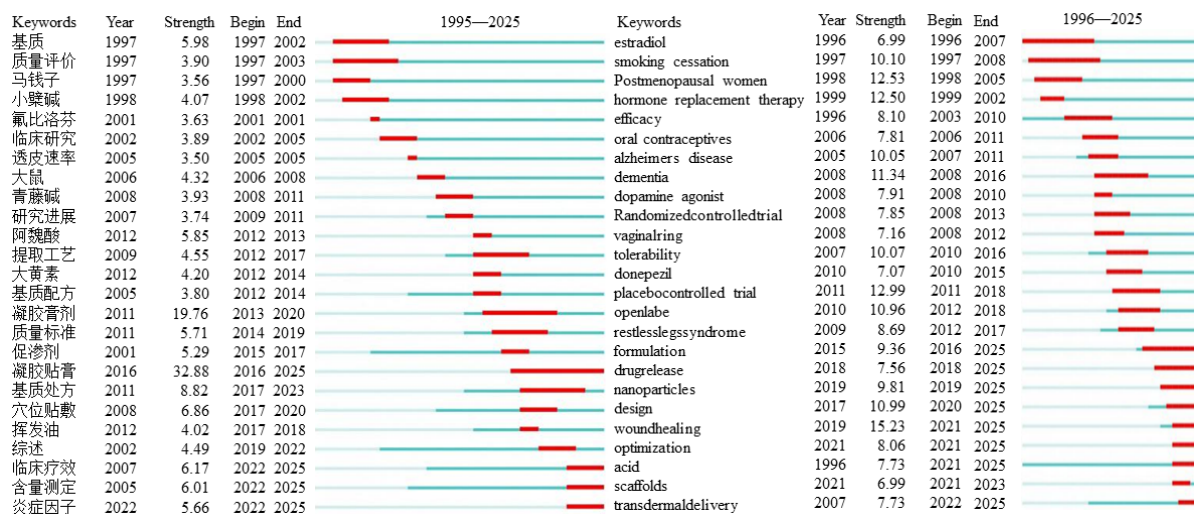


图 8 中、英文文献关键词突现图谱

Fig. 8 Atlas of keyword emergence in Chinese and English academic literatures

(戒烟, 1997 年)、“postmenopausal women”(绝经后妇女, 1998 年)与“hormone replacement therapy”(激素替代疗法, 1999 年), 清晰揭示出凝胶贴膏在发展初期主要应用于小分子化学药物的递送, 聚焦激素替代疗法与尼古丁替代疗法领域, 也由此确立了该剂型在慢性病长期治疗中的独特优势。(2) 神经系统疾病治疗拓展期 (2006—2015 年): 关键词“alzheimer’s disease”(阿尔茨海默病, 2007 年)、“dementia”(痴呆, 2008 年)、“dopamine agonist”(多巴胺激动剂, 2008 年)与“restless legs syndrome”(不宁腿综合征, 2012 年)相继突现, 表明英文研究的应用重心从简单的替代治疗转向复杂的神经系统疾病治疗领域, 充分凸显出凝胶贴膏在中枢神经系统药物递送上的独特应用价值。(3) 制剂技术革新与精准控制期 (2016—2020 年): 研究焦点向制剂技术本身的创新与深化研究回归, 关键词“formulation”(制剂, 2016 年)、“drug release”(药物释放, 2018 年)、“nanoparticles”(纳米粒, 2019 年)的依次突现, 标志着该阶段研究核心围绕药物释放行为的精准控制展开, 通过新型制剂技术与功能材料的研发应用实现这一目标, 其中纳米技术的引入更是为凝胶贴膏的性能提升与应用拓展开辟了全新路径。(4) 生物医学工程融合期 (2021 年至今): “scaffolds”(支架)与“nanoparticles”(纳米粒)的持续突现, 代表着先进基础功能材料在该领域的规模化应用; 而“wound healing”(伤口愈合)的突现则具有标志性的转型意义——这意味着凝

胶贴膏已从单纯的“药物递送载体”, 升级为兼具主动治疗功能的“活性制剂”。该阶段研究深度融合材料科学、组织工程、药物递送等多个前沿学科领域, 预示着凝胶贴膏正朝着多功能化、智能化的方向快速发展。

通过中、英文研究演进路径的对比分析可见, 国内凝胶贴膏研究遵循从技术引进、方法建立到体系完善的传统研发路径, 始终注重技术发展的系统性与规范性; 而英文研究则呈现出从简单临床应用到复杂疾病治疗, 再到多学科技术融合的阶梯式上升路径, 更强调应用探索的创新性与前沿性。二者的发展路径与研究经验形成良好互补, 为全球凝胶贴膏领域的创新发展提供了双重思路, 共同推动该领域的持续进步。

3 讨论

3.1 研究领域现状

凝胶贴膏作为一种新型经皮给药制剂, 因其独特的药物释放特性和良好的患者顺应性, 在全球范围内受到广泛关注。文献计量分析显示, 该领域研究呈现持续快速增长态势, 中国和美国在发文量、研究质量与国际影响力方面均处于领先地位, 共同构成领域的研究核心。中文研究侧重将凝胶贴膏与中医药理论相结合, 聚焦于基质筛选、制备工艺优化和质量标准建立等基础研究; 而英文研究则更注重临床应用导向, 围绕特定疾病的治疗效果、药理学及安全性评价展开深入探索。在科研合作模式上, 中文研究以高校为主体, 企业参与度低, 产学

研协同不足, 导致获批产品以化学仿制药为主, 中药凝胶贴膏市场化程度有限; 相比之下, 国际研究形成了高校、企业深度合作的创新网络, 跨国协作广泛, 展现出更加开放的研发生态, 有效促进了技术共享与产业创新。

3.2 研究热点与趋势

3.2.1 透皮机制与智能递送系统的深度融合 英文文献的关键词分析显示, “nanoparticles” “microneedles” “hydrogel patch” 等已成为高频前沿关键词; 同时, 关键词突现分析进一步揭示 “nanoparticles” (2019 年) 作为近期强突现词出现。清晰地表明, 国际研究热点已从传统制剂工艺转向兼具精准与响应特性的智能递送系统。因此, 未来研究的核心任务在于推动透皮吸收基础机制研究与智能化递送技术的深度融合, 其实现路径主要包括以下 3 个方向: (1) 功能性纳米粒的协同促渗与靶向^[30-32]: 利用经透明质酸等生物相容性材料修饰的纳米粒作为载体, 不仅能增强难溶性药物的皮肤渗透性, 还可借助其主动靶向能力, 将药物精准递送至病灶部位。例如, 李诗曼^[33]等开发的透明质酸修饰的中空二氧化锰纳米粒, 在增强人参皂苷 Rg₃ 抗三阴性乳腺癌的透皮效率与靶向疗效方面取得了显著成果。(2) 微针技术对大分子药物的高效递送^[34-35]: 可溶性微针阵列能机械性地绕过皮肤最外层的角质屏障, 为蛋白质、多肽等大分子药物开辟了高效透皮通道。徐婷^[36]等研制的可溶性透明质酸微针, 成功实现了迷迭香酸的经皮递送, 并展现出协同光热抗菌的增强疗效, 便是该技术的典型代表。(3) 环境响应型系统的智能化药物控释^[37-39]: 开发能感知并响应病灶微环境的智能水凝胶贴膏, 可实现抗菌与药物释放的协同联动。张蔓^[40]研究的 pH 响应性凝胶微针, 能够根据环境 pH 值快速释放蛋白类药物, 为开发此类自适应递送系统提供了重要借鉴。

3.2.2 中药复方凝胶贴膏的现代化与标准化研究 尽管中药凝胶贴膏在 “巴布剂” 传统剂型基础上已积累一定研究基础, 但中文文献的关键词聚类分析表明, 研究长期聚焦于 “基质” “制备工艺” “正交实验” 与 “质量标准” 等基础领域。关键词突现图谱进一步显示, “质量标准” 在 2011 年左右出现强突现。这反映中药凝胶贴膏的研究已从工艺探索进入标准化建设的关键阶段, 因此, 推动其现代化与标准化已成为当前首要任务。例如, 盘龙药业 “盘

龙七凝胶贴膏” 在近期获批临床, 这标志着中药复方凝胶贴膏在规范化开发与临床转化方面迈出重要一步, 也为同类制剂的研究提供了示范。所以未来应系统开展以下研究方向: 一是加强中药复杂提取物与新型亲水性基质的相容性研究, 结合现代分析技术如 HPLC-MS、体内微透析等, 构建以 “质量标志物” 为核心的质量评价体系, 并探索其体内外相关性, 为产品一致性评价提供依据^[41-43]。二是应推广使用星点设计-响应面法等系统性优化策略, 科学制定基质处方, 提升工艺稳定性与重现性, 如刘建清等^[44-46]通过该方法成功优化双柏凝胶贴膏处方, 为标准化研究提供了方法学借鉴。三是深入开展中药凝胶贴膏的药效物质基础与药理学研究, 阐明其整体作用机制, 如对双柏凝胶贴膏^[47]、盐酸小檗碱微乳凝胶贴^[48]、七厘散凝胶贴膏^[49]和森登-4 贴膏的研究^[50], 为民族药复方贴膏的现代化开发提供了范例。综上所述, 通过推动研究从 “经验筛选” 向 “系统设计” 转变, 并积极对接如《经皮给药制剂体外经皮渗透试验技术规范专家共识》等行业技术标准, 将有力加速中药凝胶贴膏从实验室研究向高质量产品转化的进程。

3.2.3 面向慢性病与组织修复的功能化贴膏开发 英文关键词突现分析清晰显示, “wound healing”、“Alzheimer’s disease”、“Parkinson’s disease” 等词在近年呈现强突现。这表明凝胶贴膏的研究前沿正从单纯的药物递送, 转向慢性病管理与组织修复等关键临床领域。针对此趋势, 未来功能化贴膏的开发应致力于实现从 “被动载药” 到 “主动治疗” 的转变。主要发展路径可归纳为以下 3 个方向: 首先, 是开发集成抗菌、抗炎与促愈合能力的多功能贴剂^[51-54]。通过构建复合型水凝胶体系, 将多种治疗功能整合于一体, 例如李璐宽^[55]开发的透明质酸基防护性水凝胶敷料, 便展现了其在创面修复与组织工程中的巨大应用潜力。其次, 针对神经退行性疾病的治疗需求, 重点在于设计适用于长期给药的长效透皮递药系统。此类系统能够维持中枢神经系统药物的稳定血药浓度, 从而改善帕金森病、阿尔茨海默病等患者的用药依从性与生活质量^[56]。最后, 利用生物材料技术构建负载生长因子的仿生支架贴膏^[57-59], 以精准调控慢性创面的微环境。例如, 杨迪^[60]研制的基于壳聚糖季铵盐的抗菌水凝胶, 不仅具有良好的生物相容性, 更显著促进了伤口愈合的过程, 为此类高端敷料的开发提供了技术范例。总之, 通过

深度融合材料科学、药剂学与临床医学，面向特定生理环境开发的智能功能贴膏，将是该领域未来发展的核心方向。

3.2.4 新型材料与仿生黏附技术的应用 针对当前凝胶贴膏普遍存在的黏附力不足、揭除残留及湿态环境下附着力衰减等关键技术瓶颈，未来研究亟需引入新型功能材料与仿生黏附策略，以全面提升其贴敷性能、安全性与患者顺应性。(1) 开发仿生黏附材料^[61-63]。受自然界生物（如贻贝、壁虎）的启发，设计与制备能够在潮湿皮肤表面实现强韧、持久黏附的生物高分子材料。例如，熊雄^[64]基于贻贝黏性蛋白结构，仿生开发了含多巴胺基团的组织黏合剂，为构建长效湿态黏附型凝胶贴膏提供了创新思路。(2) 构建智能响应型黏附系统。利用离子液体凝胶、动态共价键等先进材料化学手段，实现对黏附强度的精准、可控调节^[65-66]。王文祥^[67]设计的基于动态化学键的离子液体黏附材料，成功实现了黏附性能的按需调控，展现了良好的应用前景。(3) 探索外场刺激响应的智能贴膏。通过引入光敏基团（如香豆素），使凝胶材料具备光控的黏附与药物释放特性^[68-70]。王文楷^[71]所制备的含香豆素光敏基团的智能凝胶材料，为实现此类可逆、精准的远程控制提供参考。

4 结论

凝胶贴膏作为具有广阔前景的经皮给药系统，已在全球范围内形成以中、美为核心的研究格局。中、英文文献在研究重点、合作模式与发展阶段上呈现显著差异：中文研究侧重剂型基础与工艺优化，英文研究则更注重临床转化与前沿技术创新。未来，该领域应致力于深化透皮吸收机制与智能递送系统的融合，推动凝胶贴膏向“诊疗一体化”方向发展；加强中药复方贴膏的现代化与标准化研究，构建科学的质量评价体系；同时，拓展其在慢性病管理与组织修复中的应用，开发功能化与仿生黏附型新产品。通过跨学科协作与技术融合，凝胶贴膏有望在个性化医疗与精准给药领域发挥更大作用。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 谭有珍, 郑芳昊, 刘东文, 等. 凝胶材料及其在经皮给药系统中的应用与研究进展 [J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(8): 1151-1158.

Tan Y Z, Zheng F H, Liu D W, et al. Gel materials and their application and research progress in transdermal drug delivery system [J]. *Chin J Mod Appl Pharm*, 2024, 41(8): 1151-1158.

[2] 曹亮亮, 包贝华, 赵颖, 等. 中药凝胶贴膏临床应用研究进展及上市产品概况分析 [J]. *中成药*, 2024, 46(11): 3721-3725.

Cao L L, Bao B H, Zhao Y, et al. Research progress of clinical application of traditional Chinese medicine gel plaster and general analysis of listed products [J]. *Chin Tradit Pat Med*, 2024, 46(11): 3721-3725.

[3] 郑芳昊, 赵婷婷, 范华娜, 等. 新型活血贴膏与原散剂治疗慢性软组织损伤的药效学比较研究 [J]. *中国现代应用药学*, 2024, 41(4): 496-503.

Zheng F H, Zhao T T, Fan H N, et al. Pharmacodynamic comparative of the novel Huoxue plaster and the original powder in treating chronic soft tissue injury [J]. *Chin J Mod Appl Pharm*, 2024, 41(4): 496-503.

[4] 肖永成, 王小斌, 谢德明. 透明质酸微针经皮递送胰岛素智能给药系统用于糖尿病治疗 [J]. *生物工程学报*, 2022, 38(9): 3433-3442.

Xiao Y C, Wang X B, Xie D M. Application of hyaluronic acid microneedles in insulin intelligent delivery system for the treatment of diabetes [J]. *Chin J Biotechnol*, 2022, 38(9): 3433-3442.

[5] 党蕊, 管辉达, 王长虹. 三伏贴凝胶膏剂制备工艺与体外透皮特性研究 [J]. *中草药*, 2025, 56(13): 4608-4620.

Dang R, Guan H D, Wang C H. Preparation process and in vitro transdermal properties of Sanfutie hydrogel patch [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2025, 56(13): 4608-4620.

[6] 杨楠, 刘子修, 张力, 等. 三色散凝胶贴膏剂的基质处方优化及其对 KOA 大鼠滑膜炎的干预效应观察 [J]. *南京中医药大学学报*, 2022, 38(1): 32-39.

Yang N, Liu Z X, Zhang L, et al. Optimization of the matrix formulation of sanse powder gel paste and its intervention effect on synovitis in KOA rats [J]. *J Nanjing Univ Tradit Chin Med*, 2022, 38(1): 32-39.

[7] 商素菲, 王进, 陈仁寿. 基于文献计量学探讨黄连的研究进展及前沿趋势 [J]. *药物评价研究*, 2025, 48(10): 2970-2988.

Shang S F, Wang J, Chen R S. Exploring research progress and cutting-edge trends of Coptidis Rhizoma based on bibliometrics [J]. *Drug Eval Res*, 2025, 48(10): 2970-2988.

[8] 钟文婷, 王溪, 吴孟华, 等. 基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的炭类中药研究热点及趋势的可视化分析 [J]. *中草药*, 2025, 56(18): 6710-6720.

Zhong W T, Wang X, Wu M H, et al. Visual analysis of

- research hotspots and trends of carbonized traditional Chinese medicines based on CiteSpace and VOSviewer [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2025, 56(18): 6710-6720.
- [9] 王悦宸, 侯亚威, 王振国. 基于文献计量学的丹参研究现状与热点分析 [J]. *中草药*, 2025, 56(4): 1318-1337.
Wang Y C, Hou Y W, Wang Z G. Research status and hotspot analysis of *Salviae Miltiorrhizae Radix et Rhizoma* based on bibliometric [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2025, 56(4): 1318-1337.
- [10] 张宇, 包旭宏, 王峰, 等. 中药凝胶贴膏的历史渊源与制备工艺研究进展 [J]. *中华中医药杂志*, 2023, 38(6): 2769-2774.
Zhang Y, Bao X H, Wang F, et al. Research progress of historical origin and preparation technology of traditional Chinese medicine gel plaster [J]. *China J Tradit Chin Med Pharm*, 2023, 38(6): 2769-2774.
- [11] 张宇, 王峰, 姜昱, 等. 基于 CiteSpace 知识图谱分析凝胶贴膏制剂的研究动态与发展趋势 [J]. *中草药*, 2022, 53(17): 5459-5468.
Zhang Y, Wang F, Jiang K, et al. Analysis on research trends and development tendency of gel plaster preparation based on CiteSpace knowledge graph [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2022, 53(17): 5459-5468.
- [12] 杜茂波, 刘淑芝. 经方制剂研究 [J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(12): 2454-2459.
Du M B, Liu S Z. Study on classic preparations [J]. *China J Chin Mater Med*, 2018, 43(12): 2454-2459.
- [13] 刘淑芝, 李军红, 金日显, 等. 面心设计: 效应面法优化巴布剂基质的研究 [J]. *中国中药杂志*, 2009, 34(24): 3211-3213.
Liu S Z, Li J H, Jin R X, et al. Optimization of cataplasm matrix with face-centered design-response surface method [J]. *China J Chin Mater Med*, 2009, 34(24): 3211-3213.
- [14] 于娟, 杜茂波, 刘淑芝, 等. 活血止痛凝胶体外释放和经皮渗透性研究 [J]. *中国中药杂志*, 2014, 39(24): 4778-4781.
Yu J, Du M B, Liu S Z, et al. Study on *in vitro* release and percutaneous absorption of Huoxue Zhitong gel [J]. *China J Chin Mater Med*, 2014, 39(24): 4778-4781.
- [15] 黄晓冰, 吴涵, 钟碧莲, 等. 温通膏微乳凝胶成型工艺优化研究 [J]. *中药材*, 2020, 43(8): 1967-1970.
Huang X B, Wu H, Zhong B L, et al. Study on optimization of microemulsion gel forming process of Wentong paste [J]. *J Chin Med Mater*, 2020, 43(8): 1967-1970.
- [16] 赵毛香, 吴雪茹, 周艳, 等. 温性经筋通贴膏醇提和制剂工艺优化研究 [J]. *中华中医药学刊*, 2022, 40(1): 209-211.
Zhao M X, Wu X R, Zhou Y, et al. Study on optimization of alcohol extraction technology and preparation formula of wenxing jingjintong cataplasm(温性经筋通贴膏) [J]. *Chin Arch Tradit Chin Med*, 2022, 40(1): 209-211.
- [17] 赵毛香, 吴雪茹, 周艳, 等. 筋骨伤疗贴膏的薄层鉴别研究及稳定性考察 [J]. *中国中医药现代远程教育*, 2022, 20(3): 147-149.
Zhao M X, Wu X R, Zhou Y, et al. Research and stability investigation on thin layer identification of jingu Liaoshang cataplasm [J]. *Chin Med Mod Distance Educ China*, 2022, 20(3): 147-149.
- [18] 梅佳华, 崔利利, 郝佳旭, 等. 基于质量源于设计理念的复方蜘蛛香醇提工艺研究 [J]. *中国医院药学杂志*, 2022, 42(8): 774-780.
Mei J H, Cui L L, Hao J X, et al. Study on alcohol extraction technology of Compound Zhizhuxiang based on quality by design [J]. *Chin J Hosp Pharm*, 2022, 42(8): 774-780.
- [19] 梅佳华, 王涛, 查丽春, 等. D-最优混料设计制备复方蜘蛛香凝胶贴膏及初步药效学考察 [J]. *中草药*, 2022, 53(11): 3329-3337.
Mei J H, Wang T, Zha L C, et al. Pharmaceutical research of Compound Zhizhuxiang Gel Plaster by D-optimal mixture design [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2022, 53(11): 3329-3337.
- [20] 梅佳华, 郝佳旭, 程欣, 等. 基于 HPLC 指纹图谱结合化学计量学及多成分定量测定的香果健消片质量评价 [J]. *中草药*, 2025, 56(2): 458-466.
Mei J H, Hao J X, Cheng X, et al. Quality evaluation of Xiangguo Jianxiao Tablets based on HPLC fingerprint combined with chemometrics and multi-component content determination [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2025, 56(2): 458-466.
- [21] 梅佳华, 赵济, 薛蕊, 等. 复方蜘蛛香凝胶贴膏质量控制方法研究及多元成分含量测定 [J]. *中国医院药学杂志*, 2025, 45(2): 161-166.
Mei J H, Zhao J, Xue R, et al. Research on the quality control method and determination of multiple component contents in Compound Zhizhuxiang Gel Plaster [J]. *Chin J Hosp Pharm*, 2025, 45(2): 161-166.
- [22] 梅佳华, 姜婕, 杨蕊萍, 等. 基于超高效液相-高分辨质谱和网络药理学的复方蜘蛛香凝胶贴膏治疗功能性消化不良的药效物质基础及作用机制研究 [J]. *中国医院药学杂志*, 2025, 45(21): 2426-2433.
Mei J H, Jiang J, Yang R P, et al. Pharmacodynamic material basis and mechanism of action of the compound Zhizhuxiang gel plaster in treating functional dyspepsia based on UHPLC-HRMS combined with network pharmacology [J]. *Chin J Hosp Pharm*, 2025, 45(21): 2426-2433.
- [23] 梅佳华, 查学志, 孙杏倩, 等. 基于肠道菌群和代谢组

- 学探讨复方蜘蛛香凝胶贴膏治疗消化不良的作用机制 [J/OL]. 中药药理与临床, 1-16 [2026-03-17]. <https://doi.org/10.13412/j.cnki.zyyl.20250625.001>.
- Mei J H, Zha X Z, Sun X Q, et al. Exploring the mechanism of action of the Compound Zhizhuxiang Gel Plaster in treating dyspepsia based on gut microbiota and metabolomics [J/OL]. *Pharmacol Clin Chin Mater Med*, 1-16 [2026-03-17]. <https://doi.org/10.13412/j.cnki.zyyl.20250625.001>.
- [24] 梅佳华, 郝佳旭, 姜婕, 等. 基于血清代谢组学探讨复方蜘蛛香凝胶贴膏治疗腹泻型肠易激综合征的作用机制 [J]. 时珍国医国药, 2025, 36(22): 4213-4220.
- Mei J H, Hao J X, Jiang J, et al. Investigating the mechanism of compound Zhizhuxiang Gel Plaster (蜘蛛香凝胶贴膏) in treating diarrhoeal irritable bowel syndrome using serum metabolomics [J]. *Lishizhen Med Mater Med Res*, 2025, 36(22): 4213-4220.
- [25] Ruan J H, Wan X C, Quan P, et al. Investigation of effect of isopropyl palmitate on drug release from transdermal patch and molecular dynamics study [J]. *AAPS PharmSciTech*, 2019, 20(5): 174.
- [26] Li Q Y, Wan X C, Liu C, et al. Investigating the role of ion-pair strategy in regulating nicotine release from patch: Mechanistic insights based on intermolecular interaction and mobility of pressure sensitive adhesive [J]. *Eur J Pharm Sci*, 2018, 119: 102-111.
- [27] Li X Y, Wang X L, Zhao M L, et al. The chemical and pharmacological research progress on a kind of Chinese herbal medicine, fructus malvae [J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5678.
- [28] Liu C, Yu H, Li X, et al. Anti-hepatocellular carcinoma efficacy of Fuzheng Xiaozheng prescription and its interventional mechanism studies [J]. *J Ethnopharmacol*, 2022, 285: 114913.
- [29] Wang Y, Zha W H, Wang J, et al. Local delivery of artesunate dimer liposomes incorporated injectable hydrogel for H₂O₂ and pH-independent chemodynamic therapy [J]. *Int J Pharm*, 2023, 636: 122822.
- [30] 任红萌, 董茹悦, 张法新, 等. 透明质酸脂质体的制备、表征及体外经皮吸收研究 [J]. 安徽化工, 2024, 50(5): 34-39.
- Ren H M, Dong R Y, Zhang F X, et al. Preparation, characterization and in vitro transdermal absorption of hyaluronic acid liposomes [J]. *Anhui Chem Ind*, 2024, 50(5): 34-39.
- [31] Martin B A, Dalmolin L F, Lemos C N, et al. Electrostimulable polymeric films with hyaluronic acid and lipid nanoparticles for simultaneous topical delivery of macromolecules and lipophilic drugs [J]. *Drug Deliv Transl Res*, 2024, 14(9): 2499-2519.
- [32] 戴烁. 负载 Diacerein/Kartogenin 的透明质酸纳米粒子治疗骨关节炎 [D]. 吉林: 吉林大学, 2025.
- Dai S. Hyaluronic acid nanoparticles loaded with Diacerein / Kartogenin for the treatment of osteoarthritis [D]. Jilin: Jilin University, 2025.
- [33] 李诗曼, 张慧中, 徐晓涵, 等. 透明质酸修饰的负载人参皂苷 Rg3 中空二氧化锰纳米粒的抗三阴性乳腺癌评价 [J]. 药学学报, 2026, 61(1): 292-300.
- Li S M, Zhang H Z, Xu X H, et al. Evaluation of hyaluronic acid-modified ginsenoside Rg3-loaded hollow mesoporous MnO₂ nanoparticles against triple-negative breast cancer [J]. *Acta Pharm Sin*, 2026, 61(1): 292-300.
- [34] Ghazi R F, Al-Mayahy M H. Levothyroxine sodium loaded dissolving microneedle arrays for transdermal delivery [J]. *ADMET DMPK*, 2022, 10(3): 213-230.
- [35] 赵笑. 透明质酸微针介导药物经皮传递的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Zhao X. Construction of hyaluronic acid microneedles for transdermal drug delivery [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [36] 徐婷, 葛黎明, 徐志朗, 等. 可溶性透明质酸微针经皮递送迷迭香酸协同光热抗菌的研究 [J]. 高分子学报, 2025, 56(10): 1746-1756.
- Xu T, Ge L M, Xu Z L, et al. Dissolving hyaluronic acid-based microneedles with antibacterial activity achieved by photothermal antibacterial effect in coordination with transdermal delivery of rosmarinic acid [J]. *Acta Polym Sin*, 2025, 56(10): 1746-1756.
- [37] 郭兴, 朱荣秀. “最佳多面手”颁奖典礼——透明质酸家族的荣耀时刻 [J/OL]. 大学化学, 1-7 [2026-03-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1815.O6.20250926.0852.002>.
- Guo X, Zhu R X. “Best All-Rounder” award: Celebrating hyaluronic acid’s multifaceted applications [J/OL]. *Univ. Chem*, 1-7 [2026-03-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1815.O6.20250926.0852.002>.
- [38] Gong Z H, Chen L J, Zhou X L, et al. MXene-based photothermal-responsive injectable hydrogel microsphere modulates physicochemical microenvironment to alleviate osteoarthritis [J]. *Smart Med*, 2025, 4(2): e70006.
- [39] 郭江利, 侯永可, 王天赐, 等. 光热响应水凝胶敷贴特性优势及在创面修复中的应用进展 [J]. 黏接, 2025, 52(11): 70-73.
- Guo J L, Hou Y K, Wang T C, et al. Advantages of photothermal-responsive hydrogel dressing properties and Its application progress in wound repair [J]. *Adhesion*, 2025, 52(11): 70-73.
- [40] 张蔓. pH 响应性凝胶微针快速透皮递送蛋白 [D]. 天津: 天津理工大学, 2023.

- Zhang M. pH responsive hydrogel microneedle for rapid transdermal delivery of proteins [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [41] 祝紫涵, 马迅, 尹利辉, 等. 微透析技术及其在经皮给药制剂的研究应用进展 [J]. 中国新药杂志, 2024, 33(21): 2246-2253.
- Zhu Z H, Ma X, Yin L H, et al. Microdialysis and its applications in transdermal drug delivery formulations [J]. Chin J New Drugs, 2024, 33(21): 2246-2253.
- [42] 何金英, 张永萍. 微透析技术在药物成分体内分析研究的应用进展 [J]. 贵州中医药大学学报, 2022, 44(6): 45-51.
- He J Y, Zhang Y P. Application progress of microdialysis technology in vivo analysis of pharmaceutical ingredients [J]. J Guizhou Univ Tradit Chin Med, 2022, 44(6): 45-51.
- [43] 方栋, 王林艳, 姚东. HPLC 法同时测定消瘀凝胶贴膏中 7 种成分的含量 [J]. 中成药, 2024, 46(11): 3568-3571.
- Fang D, Wang L Y, Yao D. Simultaneous content determination of seven constituents in Xiaoyu Gel Plaster by HPLC [J]. Chin Tradit Pat Med, 2024, 46(11): 3568-3571.
- [44] 王奕博, 邓玉莹, 杜媛媛, 等. 均匀设计结合星点设计-响应面法优化胃瘫凝胶贴膏处方 [J]. 中南药学, 2020, 18(4): 577-581.
- Wang Y B, Deng Y Y, Du Y Y, et al. Optimization of Weitan cataplasma by uniform design combined with central composite design response surface methodology [J]. Cent South Pharm, 2020, 18(4): 577-581.
- [45] 张永萍, 徐剑, 谢伟杰. 星点设计-效应面法优化咪喹莫辛亲水凝胶贴剂基质处方及成型工艺 [J]. 医药导报, 2018, 37(5): 593-599.
- Zhang Y P, Xu J, Xie W J. Optimization of the matrix formulation of new indomethacin hydrophilic gel patches based on central composite design-response surface methodology and its molding process inspection [J]. Her Med, 2018, 37(5): 593-599.
- [46] 钱珊珊, 李舒寒, 杨满琴, 等. Plackett-Burman 联用 Box-Behnken 响应面法优选伤痛凝胶贴膏基质处方的研究 [J]. 牡丹江医科大学学报, 2025, 46(1): 118-122, 162.
- Qian S S, Li S H, Yang M Q, et al. Optimizing the prescription of Shangtong gel plaste by Plackett-Burman design combined with Box-Behnken response surface methodology [J]. J Mudanjiang Med Univ, 2025, 46(1): 118-122, 162.
- [47] 刘建清, 林水森, 谢志新, 等. 基于星点设计-响应面法优化双柏凝胶贴膏剂基质处方 [J]. 安徽医药, 2024, 28(9): 1737-1740, 后插 1.
- Liu J Q, Lin S S, Xie Z X, et al. Optimization of a Shuangbai gel ointment matrix formulation based on star point design-response surface methodology [J]. Anhui Med Pharm J, 2024, 28(9): 1737-1740, 后插 1.
- [48] 顾雪梅, 汪洁, 吕志阳, 等. 盐酸小檗碱微乳凝胶贴的制备及药动学与药效学研究 [J]. 中国药学杂志, 2025, 60(5): 497-506.
- Gu X M, Wang J, Lü Z Y, et al. Preparation, pharmacokinetics and pharmacodynamics of berberine hydrochloride microemulsion gel patch [J]. Chin Pharm J, 2025, 60(5): 497-506.
- [49] 杨晓霞, 程雨舒, 李静, 等. 七厘散凝胶贴膏改善大鼠急性软组织损伤的药效学研究 [J]. 时珍国医国药, 2025, 36(18): 3450-3454.
- Yang X X, Cheng Y S, Li J, et al. Pharmacodynamic study on Qilisan Ningjiao Plaster (七厘散凝胶贴膏) in ameliorating acute soft tissue injuries in rats [J]. Lishizhen Med Mater Med Res, 2025, 36(18): 3450-3454.
- [50] 牛昂格乐玛. 森登-4 贴膏剂的制备工艺及药理作用研究 [D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2025.
- Niu Angeluo Ma. Study on the preparation process and pharmacological effects of Sendeng-4 Plaster [D]. Tongliao: Inner Mongolia University for Nationalities, 2025.
- [51] 刘源. 壳聚糖季铵盐的制备及其在促进伤口愈合中的应用 [D]. 广州: 暨南大学, 2015.
- Liu Y. Preparation of quaternized chitosan and its application in woundhealing [D]. Guangzhou: Jinan University, 2015.
- [52] Fan L, Wang L, Wang X J, et al. Multifunctional silk and gelatin composed microneedle patches for enhanced wound healing [J]. Smart Med, 2025, 4(1): e137.
- [53] Krishnamoorthy E, Radha G, Subramanian B. Multifunctional layered HPMC/PCL-59S bioactive glass patches for improved *in vivo* wound healing with potent anti-inflammatory and angiogenic effects [J]. ACS Appl Bio Mater, 2025, 8(6): 5044-5066.
- [54] Khamrai M, Banerjee S L, Paul S, et al. AgNPs ornamented modified bacterial cellulose based self-healable L-B-L assembly via a schiff base reaction: A potential wound healing patch [J]. ACS Appl Bio Mater, 2021, 4(1): 428-440.
- [55] 李璐宽. 透明质酸基防护性水凝胶敷料的构建及其在创面修复中的应用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- Li L K. Construction of hyaluronic acid-based protective hydrogel dressings and its application in wound repair repair [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2025.

- [56] Braeckman R, Oh C. A study of once-a-week donepezil transdermal system's bioequivalence to oral donepezil in healthy volunteers: A plain language summary [J]. *Neurodegener Dis Manag*, 2023, 13(6): 303-313.
- [57] 李拉香格, 罗明念, 赵哲萌, 等. 功能化水凝胶应用于皮肤创面修复的研究进展 [J]. *海军军医大学学报*, 2025, 46(10): 1350-1354.
Li L, Luo M N, Zhao Z M, et al. Functionalized hydrogels for skin wound healing: Research advances [J]. *Acad J Nav Med Univ*, 2025, 46(10): 1350-1354.
- [58] 夏玉萍, 张斌斌, 黄勇, 等. 碱性成纤维细胞生长因子联合中性氧化电位水敷料对 II 度烧伤创面修复的影响研究 [J]. *中国美容医学*, 2025, 34(9): 56-59.
Xia Y P, Zhang B B, Huang Y, et al. Effect of basic fibroblast growth factor combined with neutral electrolyzed oxidizing water dressing on second-degree burn wound healing [J]. *Chin J Aesthetic Med*, 2025, 34(9): 56-59.
- [59] 李穗鸥, 李明翰, 祝兆波, 等. 新型水凝胶对糖尿病大鼠慢性感染性皮肤创面修复的疗效 [J]. *中华医院感染学杂志*, 2025, 35(19): 2896-2900.
Li S O, Li M H, Zhu Z B, et al. Efficacy of new hydrogel for repair of chronic infectious skin wounds in diabetic rats [J]. *Chin J Nosocomiology*, 2025, 35(19): 2896-2900.
- [60] 杨迪. 基于壳聚糖季铵盐的抗菌水凝胶的制备及性能研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
Yang D. Preparation and performance of antibacterial hydrogels based on chitosan quaternary ammonium salts [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023.
- [61] 丁淑雯, 朱佳玉, 赵洁晨, 等. 仿生湿黏附水凝胶在口腔敷料中的应用研究进展 [J]. *口腔医学*, 2025, 45(9): 701-706.
Ding S W, Zhu J Y, Zhao J C, et al. Research progress of biomimetic wet-adhesive hydrogel in oral dressings [J]. *Stomatology*, 2025, 45(9): 701-706.
- [62] 才煜. 仿生高黏附水凝胶在经皮给药系统中的应用基础研究 [D]. 延吉: 延边大学, 2024.
Cai Y. Basic research on the application of biomimetic high-adhesion hydrogels in transdermal drug delivery systems [D]. Yanji: Yanbian University, 2024.
- [63] 周飞飞. 光响应型组织黏附性水凝胶用于软组织修复再生的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Zhou F F. The photo-responsive and tissue adhesive hydrogel for soft tissues repair and regeneration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [64] 熊雄. 基于贻贝黏性蛋白结构仿生的含多巴组织黏合剂研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Xiong X. Study on dopamine-containing tissue adhesives inspired by mussel foot proteins [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [65] 程艳雯. 黏性可控离子液体凝胶的制备及应用 [D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
Cheng Y W. Preparation and application of viscouscontrollable ionic liquid gels [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2025.
- [66] Kuddushi M, Ray D, Aswal V, et al. Poly (vinyl alcohol) and functionalized ionic liquid-based smart hydrogels for doxorubicin release [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2020, 3(8): 4883-4894.
- [67] 王文祥. 基于动态化学键的离子液体黏附材料的设计与性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
Wang W X. Design and performance study of ionic liquid adhesive materials based on dynamic chemical bond [D]. Changsha: Hunan University, 2023.
- [68] 傅嘉伟, 袁誉铭, 袁子怡, 等. 原位凝胶构建与调试药物的研究进展 [J]. *华西药学杂志*, 2025, 40(3): 325-330.
Fu J W, Yuan Y M, Yuan Z Y, et al. Research progress on in situ gel construction and drug debugging [J]. *West China J Pharm Sci*, 2025, 40(3): 325-330.
- [69] 徐青雨, 张保健, 李红日, 等. 智能响应型水凝胶在关节软骨损伤修复中的应用与进展 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2025, 39(2): 250-256.
Xu Q Y, Zhang B J, Li H R, et al. Application and progress of intelligent responsive hydrogels in articular cartilage injury repair [J]. *Chin J Reparative Reconstr Surg*, 2025, 39(2): 250-256.
- [70] 曹英. 光驱动聚 (N-异丙基丙烯酰胺-丙烯酰胺) 纳米复合智能水凝胶的制备、特性与应用研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
Cao Y. preparation, properties and applications of light-driven poly (N-isopropylacrylamide-acrylamide) nanocomposite smart hydrogels [D]. Qingdao: Qingdao University, 2022.
- [71] 王文楷. 含香豆素光敏基团凝胶的设计与应用 [D]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
Wang W K. Design and application of gel containing coumarin photosensitive group [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2023.

[责任编辑 孙英杰]