3D 生物打印生物墨水研发现状：基于文献计量学的系统分析

李 谊[1]，陈海燕[2]，胡浩磊[1]，蔡一宁[1]，邢培梅[1]，张亚戈[1]，岳 玮[1]，王奕文[1]

[1]联勤保障部队第九八八医院耳鼻喉颌面外科 河南郑州
[2]湖南师范大学生命科学学院动物多肽药物创制国家联合地方工程实验室 湖南长沙

【摘要】目的 随着高科技的发展，对 3D 生物打印生物墨水（bioink）的研究越来越多，但好多研究者都陷入了盲区，不知道当前的研发方向和研究热点，故笔者通过对 3D 生物打印生物墨水研发现状的文献计量学的系统分析，来指导或帮助科研者走正确的科研之路。**方法** 基于 Web of Science 核心合集数据库，检索查阅 2015-2025 年间 3D 生物打印生物墨水研究领域相关文献。运用 VOSviewer、CiteSpace 等工具对 232 篇文献进行可视化分析。**结果** 研究呈现指数增长趋势，年均增长率达 32.36%；形成"材料-工艺-应用"三大研究集群；纳米复合生物墨水和血管化构建成为前沿热点。**结论** 3D 生物打印生物墨水是世界范围内一个重要的研究领域和研究热点，本研究结果对正在进行 3D 生物打印生物墨水的探究者必将起到一定的指导和参考作用。

【关键词】3D 生物打印；生物墨水；文献计量学；组织工程

【基金项目】河南省自然科学基金面上项目（242300420125）：构建 MiR-920/BMSCs 仿生支架用于修复兔鼻中隔软骨缺损机制研究

【收稿日期】2026 年 8 月 21 日 **【出刊日期】**2026 年 9 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ijmd.20260066

Current research status of 3D bioprinting bioinks: A systematic analysis based on bibliometrics

Yi Li[1], Haiyan Chen[2], Haolei Hu[1], Yining Cai[1], Peimei Xing[1], Yage Zhang[1], Wei Yue[1], Yiwen Wang[1]

[1]Department of Otolaryngology and Maxillofacial Surgery, 988th Hospital of the Joint Logistics Support Force, Zhengzhou, Henan
[2]National Joint Local Engineering Laboratory for Animal Peptide Drug Innovation, College of Life Sciences, Hunan Normal University, Changsha, Hunan

【Abstract】Objective With the development of high technology, there is an increasing amount of research on 3D bioprinting bioinks. However, many researchers have fallen into blind spots and are unaware of current research directions and hotspots. Therefore, the author conducts a systematic analysis of the bibliometric research status of 3D bioprinting bioinks to guide or assist researchers in taking the right path in scientific research. **Methods** Based on the Web of Science core collection database, search and consult relevant literature in the field of 3D bioprinting bioink research from 2015 to 2025. Visual analysis of 232 literature using tools such as VOSviewer and CiteSpace. **Results** The research shows an exponential growth trend, with an average annual growth rate of 32.36%; Forming three major research clusters of “materials, processes, and applications”; Nanocomposite bioink and vascularization construction have become cutting-edge hotspots. **Conclusion** 3D bioprinting bioink is an important research field and hotspot worldwide, The results of this study will provide guidance and reference for researchers who are currently exploring 3D bioprinting bioinks.

【Keywords】3D bioprinting; Bioink; Bibliometrics; tissue engineering

作者简介：李谊，科主任，主任医师，博士；陈海燕，副教授，博士后；胡浩磊，主治医师，硕士研究生；蔡一宁，医师，硕士研究生；邢培梅，主治医师，硕士研究生；张亚戈，主治医师，硕士研究生；岳玮，教学办主任，副主任医师，硕士研究生；王奕文，硕士研究生。

3D 生物打印技术作为组织工程领域的革命性突破,核心挑战在于生物墨水的开发[1]。理想的生物墨水需同时满足可打印性、生物相容性和功能性要求[2]。近年来，随着材料科学[3-14]、细胞生物学[15-16]和制造技术[17-25]的交叉融合，生物墨水研究呈现出多元化发展趋势[26]。本研究通过文献计量学方法，系统梳理该领域知识结构、研究热点和演进路径，为未来研究提供参考。

文献计量学是研究文献的一门定量学科，它采用文献统计和视觉分析技术。文献计量学的历史已有一百多年，二十世纪初，曾有学者采用文学统计分析的方法，对 1600 年-1800 年发表的比较解剖学文献进行了统计学分析[27]。二十世纪 60 年代，普里查德首次使用了“文献计量学”(bibliometrics)一词[28]。目前，文献计量学主要用于某一特定领域已发表文献的数量、质量、分布和发展趋势的描述，从而识别出比较活跃的研究领域，以预测未来的研究方向。特别是随着 VOSviewer、CiteSpace、RStudio 等文献分析和可视化软件的发展，文献计量学显著促进了文献计量学在医学、工程学、生物学、教育等领域研究中的广泛应用。

目前关于 3D 生物打印生物墨水的研究文章比较多，但检验研究者之间的关系或总结该领域全球研究趋势和热点的文章并不多见。本研究的目的是利用 VOS-viewer、RStudio、和 CiteSpace、对 3D 生物打印生物墨水的研究文献进行系统的可视化分析。本研究对 3D 生物打印生物墨水研究文献的特点及演变进行了全面系统分析。它描述了关键词数量、关键词共现数量、国际合作数量、机构数量、期刊数量、作者数量及国家分布等变化趋势。这些发现将为今后 3D 生物打印生物墨水的研究提供必要参考和指导。

1 材料与方法

1.1 材料与搜索策略

检索 Web of Science (WoS) Core Collection（2015-2025），Web of Science (WoS) Core Collection 数据库是一个强大的多学科数据库，它支持医学、工程学、生物学和人文学科等的全球学术研究[29,30]。本研究文献检索始于 2015 年 1 月，无语言限制。搜索公式包括以下检索式：TS=(("3D bioprinting" OR "bioprinting") AND ("bioink*" OR "biomaterial ink*" OR "bioprintable material*") AND ("hydrogel*" OR "GelMA" OR "collagen" OR "alginate" OR "dECM" OR "hyaluronic acid") AND ("printability" OR "rheolog* propert*" OR "mechanical strength" OR "cell viability") AND ("tissue engineering" OR "organ-on-a-chip" OR "cartilage regeneration" OR "vascularization") AND ("review" OR "progress" OR "challenge*" OR "trend*"))。检索记录均以纯文本文件格式导出，记录内容包括整条记录和引用参考文献。随后，所有文件被添加到一个 zip 文件中，并导入到文献计量工具中进行进一步分析。初筛排除综述（n=38）、会议摘要（n=24）、社论（n=11）及非英文文献（n=6）；复筛由两名独立研究者阅读标题与摘要，排除与生物墨水打印性能无关的肿瘤模型研究（n=19），分歧通过第三方协商解决，最终纳入原创研究论文 232 篇。

1.2 分析工具

采用 CiteSpace 6.2.R4 软件，利用其定量分析和可视化技术，深入探究 3D 生物打印生物墨水复杂的空间结构和发展趋势，该软件可以无缝处理复杂数据库的文献数据，将这些庞大的信息群转换为直观、视觉上引人注目的图形和图表；VOSviewer 1.6.18 构建关键词共现网络；是一个用于统计计算和图形的软件环境。RStudio 为文献计量学和科学计量学提供了定量研究工具，可对国家和地区、核心来源、作者、关键词、机构等进行系统分析。分析文献共被引网络和突现词，并进行统计分析和可视化。bibliometrix 包是综合地图分析的 R 工具。Microsoft Excel 主要用于构建表格和显示文献计量随时间变化的发展趋势。

2 研究结果

2.1 概述

本研究共纳入参考文献 232 篇。时间跨度：2015 年-2025 年。有关 3D 生物打印生物墨水的研究文献近年来越来越多，论文发表数量呈逐年增长趋势，年增长率达 32.36%。作者共有 1297 位，单一作者 2 位。文档写作表现出明显的国际合作模式，国际合作者达 31.90%，每篇文档的合著作者数平均为 6.27 位。文档被引用次数为 14665 次，每个文档的平均引用次数为 63.21 次。文档平均年龄：2.98 岁。论文来源于《生物制造》及《国际生物打印杂志》的最多，分别为 20 篇和 18 篇。第三位则为《先进医疗材料》，论文数量为 9 篇。

2.2 隶属科研机构关系

既往发表论文隶属各大单位，其中“中国科学院”发表论文最多（21 篇）；“University of Nebraska System”排名第二，发表论文 14 篇；“National University of Singapore”和“StanfordUniversity”排名第三，各发表论文 13 篇；而中国上海交通大学、上海大学、清华大学数量也不少，各发表了 12 篇，这些大学已形成核心研究集群[31]。从图 2B 可看出，中国科学院发表论文最多（21 篇）；随着时间的延长，呈强势发展势头，而中国上海交通大学、上海大学、清华大学数量也不示弱，这说明中国的科技振兴指日可待。

2.3 通讯作者所在国家

国家在某一领域的学术成就水平可以通过该国家通讯作者在该领域发表的论文数量来反映。在本研究中，基于通讯作者所在国家的信息，图 1 给出了排名前 20 国家的论文发表数量（共 210 篇）。中国排名(包括中国科学院、中国上海交通大学、上海大学、清华大学等)第一（MCP:15;SCP:45），占总发文量的 28.57%；其次是美国（MCP：10;SCP：26；17.14%）；两个第三，分别是是印度（MCP:4;SCP:11；7.14%）和韩国（MCP:3;SCP:12；7.14%）。同样，中国拥有最大的单一国家出版物(SCP)和多国出版物(MCP)。“SCP”表示作者属于同一国家，“MCP”表示作者属于不同的国家。通讯作者所在的国家中，中国位居榜首，且相互合作的论文数量最多，其次是美国。这说明中国的科技发展及科技合作意识比较浓厚[32]。

2.4 各国论文时间分布图及各国合作地图

从图 2A 可看出，美国和中国每年发表论文的曲线图都呈上升趋势，而 2022 年是个交汇点[2022 年后中国发文量超越美国，可能与当年科技部‘生物制造与组织工程’重点专项（2022YFB380xxxx）资助力度显著提升有关，该专项累计投入经费约 2.3 亿元。]，然后中国发表论文的数量迅速超过美国，呈迅速攀升的态势，其次，韩国、伊朗、印度也都呈逐步上升趋势；从图 2B 可看出，美国和中国论文合作的密度曲线最高，其它国家也进行了相关合作，这说明合作是未来科技发展的方向。

2.5 关键词

2.5.1 关键词共现网络

从图 3（A、B）可知，墨水材料体系包括胶原、透明质酸、可光交联甲基丙烯酸魔芋葡甘露聚糖（KGMMA）、甲基丙烯酸酯改性壳聚糖 （ChMA）等 [33-34]。打印工艺优化体系包括挤出式、数字光处理（DLP）3D 生物打印等[35-36]。组织特异性应用包括仿生半月板、肝脏、骨、软骨、皮肤等[37-39]。性能表征方法包括流变学、力学测试等[40]。生物活性调控包括生长因子负载、细胞响应(指负载细胞在打印后 24h 内的存活率≥85%)等[41]。

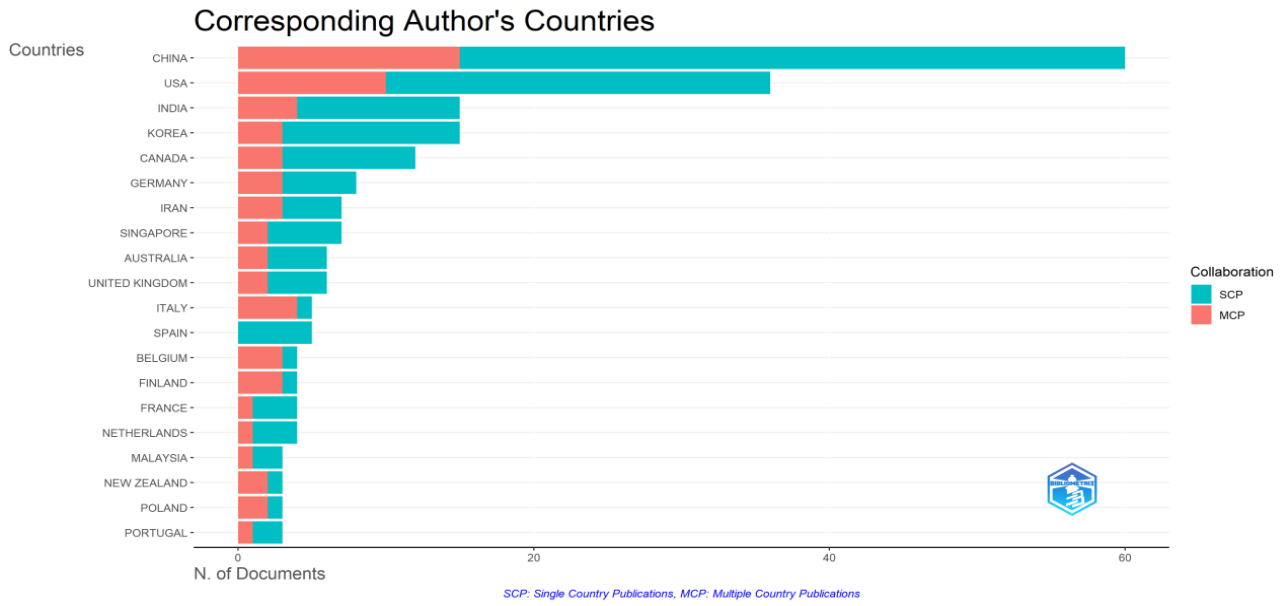


图 1　通讯作者所在国家文献计量学分析：单国家出版物（SCP）和多国家出版物（MCP）排名前 20 的国家

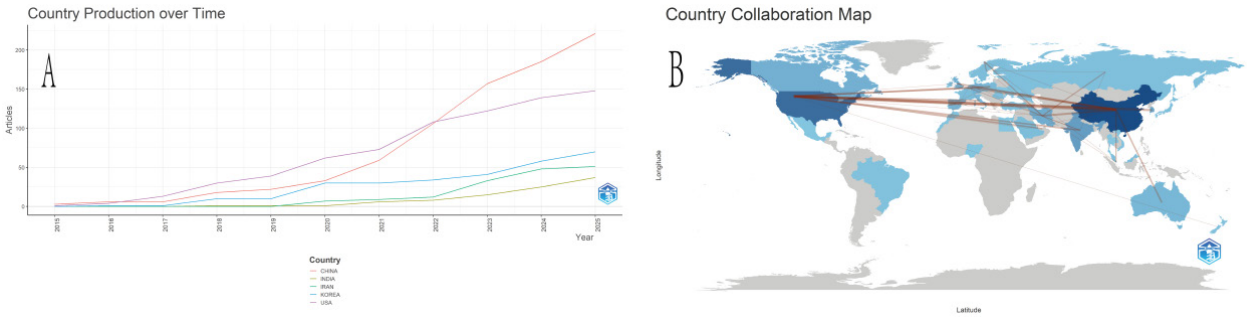


图 2　A：各国论文随时间分布图；B：各国论文被引用情况

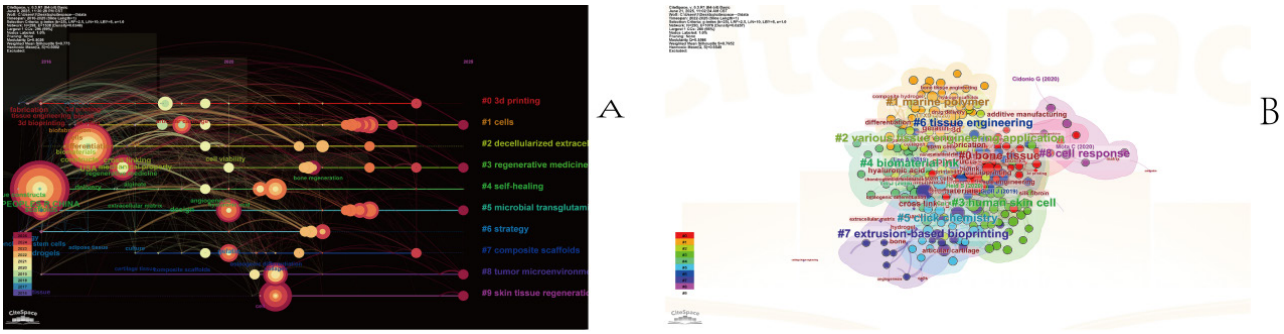


图 3　（A、B）关键词网络关系

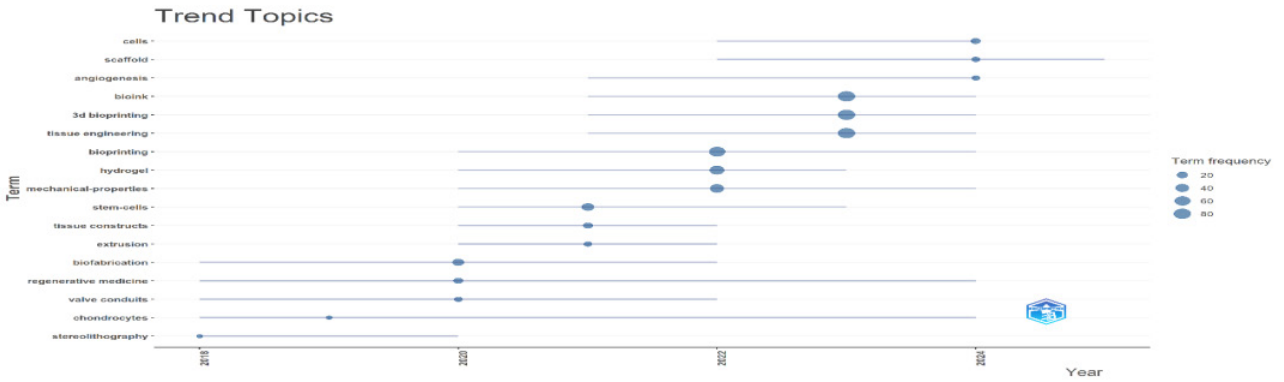


图 4　关键词随时间变化发展趋势

2.5.2 发展趋势

从图 4 也可看出，关键词从最初的水凝胶、生物制造、再生医学等逐渐过渡到机械性能、生物打印等，到目前为止发展到细胞[42,43]、3D 生物打印支架[44]、血管等类器官[45]的研究。研究历程可分为三个阶段：2015-2018：基础材料探索期，聚焦水凝胶[46-49]、海藻酸盐[50]、明胶[51]等天然高分子；2019-2022：复合墨水发展期，出现纳米纤维素[52]、导电聚合物[53,54]等新型复合材料；2023-2025：功能化创新期，关注血管网络构建[55,56]、免疫调节[57,58]、导电增能[59]等生物功能。

3 讨论

通过文献计量分析，可熟知大量文献资料所蕴含的内部信息、挖掘出其潜在的运行规律。可通过对文献资料所蕴含的国家、机构、作者、论文、关键词、期刊、被引等方面所做的系统分析，确切了解文献资料(比如 3D 生物打印生物墨水)目前的研究热点和研究趋势。本研究发现：2015 年至 2025 年全球共发表 3D 生物打印生物墨水相关论文 232 篇，并且发现每年发表论文数量都呈明显上升趋势。尤其是 2022 - 2025 年。这说明，近年来对 3D 生物打印生物墨水的研究越来越受到广大学者的重视和关注。

在本研究中，基于通讯作者所在国家的信息，

排名前 20 国家的论文发表数量共 210 篇，中国排名第一（MCP:15;SCP:45），发表论文共 60 篇，占总发文量的 28.57%；其次是美国（MCP：10;SCP：26；17.14%），发表论文 36 篇；两个第三，分别是是印度（MCP:4;SCP:11；7.14%）和韩国（MCP:3;SCP:12；7.14%），各发表了 15 篇。同样，中国拥有最大的单一国家出版物(SCP)和多国合作出版物(MCP)。通讯作者所在的国家中，中国位居榜首，且相互合作的论文数量最多，其次是美国。这说明中国的科技发展及科技合作意识比较浓厚。在文献被引用方面：美国的论文被引用次数最多，为 3188 次；中国第二，为 2803 次。加拿大排名第三，被引用 1377 次。这表明，美国在论文引用方面仍然位居全球高位，其研究水平一直走在世界前列。另外，国际合作是科学研究的重要途径，合作的程度可以反映研究领域的渗透能力，也可以反映该研究领域的研究深度和质量；随着科技的振兴，中国相互合作的论文数量越来越多，位居第一，其次是美国，这说明中国的科技发展及科技合作意识越来越浓厚。从合作的国家来看，中国与美国和澳大利亚的合作比较紧密。这表明，近年来，中国在加强国际合作方面取得了较好成绩。文献关键词探究是科学研究必不可少的步骤，她提示着一篇文献的核心内容；通过对相关关键词的文献计量分析，能准确揭示 3D 生物打印生物墨水研究的“热点”和发展趋势。本研究提示：“bioink”、“3d bioprinting”、“tissue engineering”、“scaffolds”、“hydrogels”、“bioprinting”等关键词出现较多，这说明，上述关键词是 2015 - 2025 年 3D 生物打印生物墨水研究的热点话题。我们还对关键词共现网络进行了总结。关键词“cell viability”、“innervation”、“additive manufacturing”和“bioink”的总链接强度最高。这表明，上述四个关键词是 2015 - 2025 年 3D 生物打印生物墨水研究的发展趋势。

在期刊影响力方面，研究显示，论文来源于《生物制造》及《国际生物打印杂志》的最多，分别为 20 篇和 18 篇。第三位则为《先进医疗材料》，论文数量为 9 篇。论文的核心期刊来源主要来自《生物制造》、《国际期刊》、《先进医疗材料》、《ACS 生物材料科学》、《生物医用材料》、《聚合物》、《今天的应用材料》、《生物活性材料》、《生物工程前言》等杂志。

在机构影响力方面，发表论文隶属各大单位，其中“中国科学院”发表论文最多，为 21 篇；“University of Nebraska System”排名第二，发表论文 14 篇；“National University of Singapore”和“Stanford University”排名第三，各发表论文 13 篇；而“中国上海交通大学”、“上海大学”、“清华大学”数量也不少，各发表了 12 篇，这些大学已形成核心研究集群。这些大学分别来自中国、美国、新加坡等。中国科学院发表论文随着时间的延伸，呈强势发展势头，而中国上海交通大学、上海大学、清华大学数量也不示弱。这说明中国的科技发展日新月异、中国的科技振兴指日可待。

该研究领域已经构建了由诸多节点组成的高密度网络，这些节点聚集在 3 个集群中，证实了网络中每个集群围绕特定研究内容的高度集中性、统一性和互联性。墨水材料体系包括胶原、透明质酸、可光交联甲基丙烯酸魔芋葡甘露聚糖 （KGMMA）、甲基丙烯酸酯改性壳聚糖 （ChMA）等。打印工艺优化体系包括挤出式、数字光处理 （DLP）3D 生物打印等。组织特异性应用包括仿生半月板、肝脏、骨、软骨、皮肤等。性能表征方法包括流变学、力学测试等。生物活性调控包括生长因子负载、细胞响应等。关键词网络从最初的水凝胶、生物制造、再生医学等逐渐过渡到机械性能、生物打印等，再发展到 3D 生物打印支架、血管等类器官的研究。研究历程可分为三个阶段：2015-2018：基础材料探索期，聚焦水凝胶、海藻酸盐、明胶等天然高分子[19-20]；2019-2022：复合墨水发展期，出现纳米纤维素、导电聚合物等新型复合材料[21-22]；2023-2025：类器官及功能化创新期，关注血管网络构建、类器官培育、免疫调节、导电增能等生物组织器官的建立及功能的提升[23-25]。展望未来，研究重点应放在对类器官及功能化创新的探索分析上，加强跨学科协作（医学、工程科、生物医学等），构建更加全面、科学的研究体系，积极探索新兴领域，引领研究方向的创新发展。

本课题综合研究的结果能指导对 3D 生物打印生物墨水的未来探索。第一，提出在 3D 生物打印生物墨水研究领域应充分利用新兴 ChatGPT 技术、DeepSeek 技术，应充分发挥人工智能的潜力。各种人工智能驱动工具可以为生物墨水的研发提供大量的客观数据、现实方案，筛选各组份配比等，从而快速推进 3D 生物打印生物墨水的研发进程，为打印

各类类器官做好物质准备。第二，提出"材料-工艺-应用"三大研究集群，这三方面只有有机结合了，才能顺利实现生物墨水的功能，才能打造出对人类有用的创伤移植替代物及各类药物筛选模型等。本文深入探讨了生物墨水的材料体系[60-61]、性能评价标准[62]及临床应用挑战[56]，提出了多尺度仿生设计[59]、动态响应性墨水[62-64]等未来发展方向。第三，在全球一体化背景下，3D 生物打印生物墨水的研发越来越走向世界，院校合作、区域合作、国际合作亦成大势所趋。这种多向合作模式将会促进 3D 生物打印生物墨水的快速研发进程，共同促进科技发展，以迎接技术瓶颈的挑战。最后，本研究强调在 3D 生物打印生物墨水的研发中，一定要把握好当前 3D 生物打印生物墨水研究的热点问题，那就是通过对相关关键词的文献计量分析，本研究提示：“bioink”、“3d bioprinting”、“tissue engineering”、“scaffolds”、“hydrogels”、“bioprinting”等关键词是 2015 - 2025 年 3D 生物打印生物墨水研究的热点话题；另外要把握好发展趋势，本研究提示：“cell viability”、“innervation”、“additive manufacturing”和“bioink”等关键词是 2015 - 2025 年 3D 生物打印生物墨水研究的发展趋势。

本研究通过文献计量学分析提供了比一般综述文献更具体、更详细的研究方法，它呈现了过去 10 年来有关 3D 生物打印生物墨水的研究热点和未来发展趋势。但，文献计量学也存在一些自身的局限性。第一，有些文献可能会被忽略，因为文献是从 WoSCC 数据库中检索出来的，然而，WoSCC 数据库有些文献可能未被收录，故全面性尚有不足。第二，本课题搜索策略只包括主要目标关键词和主题，因此检索到的文献可能包含潜在的假阴性、假阳性，以致于搜索查询结果很难达到 100%的准确性。第三，本研究使用了 RStudio、CiteSpace 和 VOSviewer 软件，搜索算法存有偏差，技术需要进一步提高。尽管存有这些局限，但本研究仍然为该领域的当前研究和未来研究趋势提供了有价值的参考。

4 结论

对 2015-2025 年全球 3D 生物打印生物墨水研究进展及趋势进行文献计量和可视化分析，表明 3D 生物打印生物墨水目前是世界范围内一个重要的研究领域和研究热点。文献计量学分析涉及诸多作者、研究关键词、机构、国家/地区等和相关文献之间的关系探究。本研究对全球 3D 生物打印生物墨水有关研究文献的特点和演变进行了综合分析。也将为预测未来 3D 生物打印生物墨水研究方向提供重要参考。本研究结果对正在进行 3D 生物打印生物墨水的探究者将大有脾益。未来的研究方向可能包括多尺度仿生墨水、动态响应性材料、AI 驱动的智能制造系统等技术的融合，这将引发一场新的科技革命，将形成 3D 生物打印生物墨水等研究领域一个有前景的热点课题。

参考文献

[1] Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs[J]. Nat Biotechnol. 2014;32(8):773-785.

[2] Jürgen Groll, Jason A. Burdick，Dong-Woo Cho，et al. A definition of bioinks and their distinction from biomaterial inks[J]. Biofabrication. 2018;11(1):013001.

[3] Aylin Kara Özenler, Thomas Distler, Ashwini Rahul Akkineni, et al. 3D bioprinting of mouse pre-osteoblasts and human MSCs using bioinks consisting of gelatin and decellularized bone particles[J]. Biofabrication, 2024, 16(2): 025027.

[4] Xiaoyu Wang, Yue Zhang, Anning Song, et al. A Printable Hydrogel Loaded with Medicinal Plant Extract for Promoting Wound Healing[J]. Adv. Healthc. Mater. 2024, 13(8):e2303017.

[5] Kyu Young Choi, Olatunji Ajiteru, Heesun Hong, et al. A digital light processing 3D-printed artificial skin model and full-thickness wound models using silk fibroin bioink [J]. Acta Biomater. 2023 Jul 1:164:159-174.

[6] Rehovsky, C., Bajwa, D. S., Mallik, S., et al. Natural polymer hydrogel based 3D printed bioreactor testing platform for cancer cell culture [J]. Mater. Today Commun. 39, 108925 (2024).

[7] Kaustubh Naik, Priyanka Singh, Monika Yadav, et al. 3D printable, injectable amyloid-based composite hydrogel of bovine serum albumin and aloe vera for rapid diabetic wound healing[J]. J. Mat. Chem. B. 2023, 11(34):8142-8158.

[8] Vurat, M. T., Ergun, C., Elcin, A. E., et al. 3D Bioprinting of Tissue Models with Customized Bioinks. in Bioinspired Biomaterials: Advances in Tissue Engineering and

Regenerative Medicine (eds. Chun, H. J., Reis, R. L., Motta, A. & Khang, G.) vol. 1249 67–84 (Springer-Verlag Singapore Pte Ltd, Singapore, 2020).

[9] Eleftherios G Andriotis, Georgios K Eleftheriadis, Christina Karavasili, et al. Development of Bio-Active Patches Based on Pectin for the Treatment of Ulcers and Wounds Using 3D-Bioprinting Technology [J]. Pharmaceutics, 2020, 12(1):56.

[10] Govindharaj, M. 3D-bioprinted tri-layered cellulose/ collagen- based drug-eluting fillers for the treatment of deep tunneling wounds[J]. Bio-Des. Manuf. 2024, 7, 938–954.

[11] Haoran Cui, Junjie Cai, Hanjiao He, et al. Tailored chitosan/glycerol micropatterned composite dressings by 3D printing for improved wound healing [J]. Int. J. Biol. Macromol. 2024, 255:127952.

[12] Yue Wang, Yixiong Duan, Bai Yang, et al. Nanocomposite Hydrogel Bioinks for 3D Bioprinting of Tumor Models. Biomacromolecules, 2024 Aug 12;25(8):5288-5299.

[13] Rency Geevarghese, Lakshmi T Somasekharan, Anugya Bhatt, et al. Development and evaluation of a multicomponent bioink consisting of alginate, gelatin, diethylaminoethyl cellulose and collagen peptide for 3D bioprinting of tissue construct for drug screening application[J]. Int. J. Biol. Macromol. 2022, 207:278-288.

[14] Lazaridou, M. 3D-printed hydrogels based on amphiphilic chitosan derivative loaded with levofloxacin for wound healing applications[J]. Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomat. 2025, 74:67–84.

[15] Patricia González-Callejo, Clara García-Astrain, Ada Herrero-Ruiz, et al. 3D Bioprinted Tumor-Stroma Models of Triple-Negative Breast Cancer Stem Cells for Preclinical Targeted Therapy Evaluation[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2024, 16(21):27151-27163.

[16] Letizia Ferroni, Chiara Gardin, Ugo D'Amora, et al. Exosomes of mesenchymal stem cells delivered from methacrylated hyaluronic acid patch improve the regenerative properties of endothelial and dermal cells. Biomater. Adv. 2022, 139:213000.

[17] Cheng, S. 3D bioprinted tumor-vessel-bone co-culture scaffold for breast cancer bone metastasis modeling and drug testing[J]. Chem. Eng. J. 2023, 476:146685.

[18] You Chen, Langtao Xu, Weilin Li, et al. 3D bioprinted tumor model with extracellular matrix enhanced bioinks for nanoparticle evaluation. Biofabrication, 2022, 14(2).

[19] Reshma Murali, Rathina Vel Balasubramanian, Harikrishnan V S, et al. Unravelling the wound healing efficiency of 3D bioprinted alginate-gelatin-diethylaminoethyl cellulose-fibrinogen based skin construct in a rat's full thickness wound model[J]. Int. J. Biol. Macromol. 2025 May;305(Pt 1):140816.

[20] Claire Benwood, Josie Chrenek, Rebecca L Kirsch, et al. Natural Biomaterials and Their Use as Bioinks for Printing Tissues[J]. Bioengineering-Basel, 2021, 8(2):27.

[21] Langtao Xu, You Chen, Peng Zhang, et al. 3D printed heterogeneous hybrid hydrogel scaffolds for sequential tumor photothermal-chemotherapy and wound healing[J]. Biomater. Sci. 2022 Sep 27;10(19):5648-5661.

[22] Kun Zhang, Yanen Wang, Qinghua Wei, et al. Design and Fabrication of Sodium Alginate/Carboxymethyl Cellulose Sodium Blend Hydrogel for Artificial Skin[J]. Gels, 2021, 7(3):115.

[23] Maggiotto, F. 3D bioprinting of a perfusable skin-on-chip model suitable for drug testing and wound healing studies[J]. Mater. Today Bio, 2025, 33:101974.

[24] Alexya Azhakesan, Johann Kern, Ankit Mishra, et al. 3D Bioprinted Head and Neck Squamous Cell Carcinoma (HNSCC) Model Using Tunicate Derived Nanocellulose (NC) Bioink. Adv. Healthc. Mater. 2025, 14(7):e2403114.

[25] Xiaoyuan Wang, Xiaoning Yang, Zixian Liu, et al. 3D bioprinting of in vitro porous hepatoma models: establishment, evaluation, and anticancer drug testing. Bio-Des. Manuf. 2024, 185:173-189.

[26] Chimene D, Kimberly K. Lennox，Ranjith K. Nanjundan，et al. Advanced bioinks for 3D printing: A materials science perspective[J]. Ann Biomed Eng. 2020;48(7):1900-1915.

[27] F. J. Cole, N. B. Eales, The history of comparative anatomy. Part I: a statistical analysis of the literature[J]. Sci. Prog. 11(1917):578–596.

[28] A. Pitchard, Statistical bibliography or bibliometrics[J]. Doc. 24(1969):348–349.

[29] J. Zhang, C. Ji, X. Zhai, S. Ren, H. Tong, Global trends and hotspots in research on acupuncture for stroke:a bibliometric and visualization analysis[J]. Eur. J. Med. Res. 28(2023):359,

[30] J. Zhang, C. Ji, X. Zhai, H. Tong, J. Hu, Frontiers and hotspots evolution in anti-inflammatory studies for coronary heart disease:a bibliometric analysis of 1990-2022[J]. Frontiers in cardiovascular medicine 10(2023)：1038738, https://doi. org/10. 3389/fcvm. 2023. 1038738.

[31] Gungor-Ozkerim PS. Bioinks for 3D bioprinting: Current advances and future prospects[J]. Biomater Sci, 2021, 9(7): 2303-2315.

[32] Stavarache C, Ghebaur A, Serafim A, et al. Fabrication of k-Carrageenan/Alginate/Carboxymethyl Cellulose basedScaffolds via 3D Printing for Potential Biomedical Applications[J]. Polymers (Basel). 2024, 16(11):1592.

[33] Qin Zainen, Pang Yunfen, Lu Chun, et al. Photo-crosslinkable methacrylated konjac glucomannan (KGMMA) hydrogels as a promising bioink for 3D bioprinting[J]. Biomaterials Science, 2022, 10(22): 6549-6557.

[34] Osi Amarachi Rosemary, Zhang Hua, Chen Jing, et al. Three-Dimensional-Printable Thermo/Photo-Cross-Linked Methacrylated Chitosan-Gelatin Hydrogel Composites for Tissue Engineering[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(19):22902-22913.

[35] Yang Jin, Li Zhihui, Li Shikai, et al. Tunable metacrylated silk fibroin-based hybrid bioinks for the bioprinting of tissue engineering scaffolds[J]. Biomaterials Science, 2023, 11(5): 1895-1909.

[36] Zheng Zizhuo, Eglin David, Alini Mauro, et al. Visible Light-Induced 3D Bioprinting Technologies and Corresponding Bioink Materials for Tissue Engineering: A Review[J]. Engineering, 2021, 7(7): 966-978.

[37] Zhou Jian, Tian Zhuang, Tian Qinyu, et al. 3D bioprinting of a biomimetic meniscal scaffold for application in tissue engineering[J]. BIOACTIVE MATERIAL, 2021, 6(6): 1711-1726.

[38] Brumberg Valentin A., Bikmulina Polina Yu, Pozdnyakov Artem A., et al. Scaling liver bioprinting: A guide for usage of the hepatic extracellular matrix as a bioink[J]. International Journal of Bioprinting, 2025, 11(1):57-83.

[39] Yongxia Li, Xueyong Ren, Lin Zhu, et al. Biomass 3D Printing: Principles, Materials, Post-Processing and Applications[J]. Polymers (Basel), 2023, 15(12):2692. doi: 10. 3390/polym15122692.

[40] Lapomarda Anna, De Acutis Aurora, Chiesa Irene, et al. ectin-GPTMS-Based Biomaterial: toward a Sustainable Bioprinting of 3D scaffolds for Tissue Engineering Application[J]. Biomacromolecules, 2020, 21(2):319-327.

[41] Steele Eliza Marie, Carr Zacheus L, Dosmar Emily, et al. Bioprinting of Hydrogel-Based Drug Delivery Systems for Nerve Tissue[J]. Regeneration, 2024, 4(1):58-73.

[42] Dequan Zhang, Qiang Fu, Huijuan Fu, et al. 3D-bioprinted human lipoaspirate-derived cell- laden skin constructs for healing of full-thickness skin defects[J]. Int. J. Bioprinting, 2023, 9(4):718.

[43] Meng Li, Lei Sun, Zixian Liu, et al. 3D bioprinting of heterogeneous tissue-engineered skin containing human dermal fibroblasts and keratinocytes[J]. Biomater. Sci. 2023, 11(7):2461-2477.

[44] Evita Ning, Gareth Turnbull, Jon Clarke, et al. 3D bioprinting of mature bacterial biofilms for antimicrobial resistance drug testing[J]. Biofabrication, 2019, 11(4):045018.

[45] Mrunal N Damle, Leena Chaudhari, Kishor Tardalkar, et al. A biologically functional bioink based on extracellular matrix derived collagen for 3D printing of skin[J]. Int. J. Biol. Macromol. 2024, 258(Pt 1):128851.

[46] Jianguo Chen, Tianyu Huang, Ruiquan Liu, et al. Congenital microtia patients: the genetically engineered exosomes released from porous gelatin methacryloyl hydrogel for downstream small RNA profiling, functional modulation of microtia chondrocytes and tissue-engineered ear cartilag e regeneration. J Nanobiotechnol. 2022, 20(1):164.

[47] Qi Li, Huilei Yu, Fengyuan Zhao, et al. 3D Printing of Microenvironment-Specific Bioinspired and Exosome-Reinforced Hydrogel Scaffolds for Efficient Cartilage and Subchondral Bone Regeneration. Adv Sci (Weinh). 2023, 10(26):e2303650.

[48] Hongyuan Xing, Zengjie Zhang, Qijiang Mao, et al. Injectable exosome-functionalized extracellular matrix hydrogel for metabolism balance and pyroptosis regulation in intervertebral disc degeneration. J Nanobiotechnol. 2021, 19(1):264.

[49] Fei Gao, Ziyang Xu, Qingfei Liang, et al. Osteochondral Regeneration with 3D-Printed Biodegradable High-Strength Supramolecular Polymer Reinforced-Gelatin Hydrogel Scaffolds. Adv Sci (Weinh). 2019, 6(15):1900867.

[50] Monika Hospodiuk, Madhuri Dey, Soshniki Soshnik, et al. The bioink: A comprehensive review on bioprintable materials[J]. Biotechnol Adv, 2017, 35(2): 217-239.

[51] Ying Guoliang, Jiang Nan, Yu Cunjiang, et al. Three-dimensional bioprinting of gelatin methacryloyl (GelMA) [J]. Bio-Design and Manufacturing, 2018, 1(4):215-224.

[52] Theus Andrea S, Ning Liqun), Jin Linqi, et al. Nanomaterials for bioprinting: functionalization of tissue-specific bioinks[J]. 3D Bioprintin, 2021, 65(3): 429-439.

[53] Xinxiang Chai, Yanzhen Lou, Lei Nie, et al. A three-dimensional printable conductive composite dressing for accelerating wound healing under electrical stimulation. Colloid Surf. B-Biointerfaces, 2025, 245:114264.

[54] Zhu Wei, Harris Brent T, Zhang Lijie Grace. Gelatin Methacrylamide Hydrogel with Graphene Nanoplatelets for Neural Cell-laden 3D Bioprinting[C]. 2016 38th Annual International Conference Of The IEEE Engineering In Medicine And Biology Society (EMBC), IEEE Service Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854，Institute of Electrical and Electronics Engineers，2016, 4185-4188.

[55] Sahar Baniameri, Hossein Aminianfar, Niusha Gharehdaghi, et al. 3Tissue Engineering 3D-Printed Scaffold Using Allograft/Alginate/Gelatin Hydrogels Coated With Platelet-Rich Fibrin or Adipose Stromal Vascular Fraction Induces Osteogenesis In Vitro[J]. J Cell Physiol, 2025, 240(1):e31497.

[56] Ibrahim T. Ozbolat, Monika Hospodiuk, Madhuri Dey, et al. High-resolution bioprinting of vascular networks[J]. Biofabrication, 2023, 15(4):042001.

[57] Sayan Deb Dutta, Jeong Man An, Jin Hexiu, et al. 3D bioprinting of engineered exosomes secreted from M2-polarized macrophages through immunomodulatory biomaterial promotes in vivo wound healing and angiogenesis. Bioact. Mater. 2024, 45:345-362.

[58] Chai Ruth Jinfen, Wong Wan Ling, Beh Cyrus Weijie, et al. Developing a bioink for single-step deposition and maturation of human epidermis [J]. International Journal of Bioprinting, 2023, 9(4):755-765.

[59] Dixit Mansi, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko, et al. Carbon-Based Nanoarchitectonics in Advancing Cardiac Tissue Bioprinting:A Review[J]. Acs Applied Nano Materials, 2024, 7(21): 24638-24652.

[60] Qin Zainen, Pang Yunfen, Lu Chun, et al. Photo-crosslinkable methacrylated konjac glucomannan (KGMMA) hydrogels as a promising bioink for 3D bioprinting[J]. Biomaterials Science, 2022, 10(22): 6549-6557.

[61] Lin Lan, Jiang Songli, Yang Jun, et al. Application of 3D-bioprinted nanocellulose and cellulose derivative-based bio-inks in bone and cartilage tissue engineering[J]. International Journal of Bioprinting, 2023, 9(1): 212-229.

[62] Feng Li, Shuyi Xie. Self-healing bioink with shear-thinning properties[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2024, 12(15): 3678–3690.

[63] Wen H, Li J, Payne GF, et al. Hierarchical patterning via dynamic sacrificial printing of stimuli-responsive hydrogels[J]. Biofabrication. 2020, 12(3):035007.

[64] Liu S, Liao X, de Haan LT, et al. Light-deformable dynamic surface fabricated by ink-jet printing [J]. Soft Matter. 2021, 17(3):748-757.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心（OAJRC）所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS