·临床研究论著·

# 基于文献计量分析导航技术在脊柱外科领域的研究热点与趋势

木热提·卡哈尔[1] 阿巴拜科日·奥斯曼[1] 麦麦提江·阿卜拉[1] 孙悦[1] 周奕良[1] 瓦热斯江·尼牙孜[2] 张建军[1]

**【摘要】 目的** 基于文献计量分析导航技术在脊柱外科领域的研究热点及趋势。**方法** 从Web of Science核心数据库中检索2010年1月1日至2025年9月20日关于导航在脊柱外科领域的相关文献。使用CiteSpace和Bibliometrix在线平台、Scimago Graphica、VOSviewer软件进行计量学分析，并绘制可视化科学知识图谱。**结果** 通过检索共得到706篇英文文献，年度发文量与参考文献引用量均在较高水平。*Global Spine Journal*（49篇）和*Journal of Clinical Medicine*（36篇）是发文量最多的期刊。美国（325篇）、中国（160篇）、德国（97篇）是发文量最多的国家。发文量最多的作者是Elmi-Terander A（15篇）。纽约特种外科医院是发文量（29篇）最多的机构。除检索词外，精准性、定位、植入、计算机断层成像、融合、腰椎是该领域高频关键词。**结论** 脊柱外科导航技术研究热度呈上升趋势，全球关注度较高。现有研究以提升手术精准性、开展微创术式、辅助复杂脊柱手术为核心热点，可有效改善手术安全性与疗效。依托人工智能、机器人、增强现实等技术，该领域将向智能、精准、微创方向迭代发展，但其临床普及仍面临挑战，国际合作是推动该领域创新发展的重要途径。

**【关键词】** 导航技术；脊柱外科；文献计量学；可视化分析；研究趋势

**Research hotspots and trends in spinal surgery based on bibliometric analysis navigation technology.**

*Mureti Kahaer[1], Ababaikeri Aosiman[1], Maimaitijiang Abola[1], Sun Yue[1], Zhou Yiliang[1], Waresijiang Niyazi[2], Zhang Jianjun[1]. [1]The First Department of Orthopaedics, Uyghur Medical Hospital of Xinjiang Uygur Autonomous Region (The Second People's Hospital of Xinjiang Uygur Autonomous Region), Urumqi 830049, China; [2]The Second Department of Spine, Xinjiang Uygur Autonomous Region People's Hospital, Urumqi 830049, China*

*Corresponding author: Zhang Jianjun, E-mail: 30032958@qq.com*

**【Abstract】 Objective** To identify the research hotspots and emerging trends in navigation technology within the field of spinal surgery using bibliometric analysis. **Methods** Relevant literature on navigation in spinal surgery published between January 1, 2010 and September 20, 2025, was retrieved from the Web of Science Core Collection. Bibliometric analyses were performed using CiteSpace, the Bibliometrix online platform, Scimago Graphica, and VOSviewer, and visualized scientific knowledge maps were generated. **Results** A total of 706 English-language articles were retrieved. Both the annual publication volume and citation frequency remained consistently high throughout the study period. *Global Spine Journal* (n=49) and *Journal of Clinical Medicine* (n=36) were the most productive journals. The United States (n=325), China (n=160), and Germany (n=97) ranked as the top three contributing countries. The most prolific author was Elmi-Terander A (n=15). The Hospital for Special Surgery in New York contributed the largest number of publications (n=29). Excluding the search terms, the high-frequency keywords in this field included precision, localization, implantation, computed tomography, fusion, and lumbar spine. **Conclusion** Research on navigation technology in spinal surgery has shown a clear upward trend and has attracted considerable global attention. Current research hotspots focus primarily on improving surgical precision, facilitating minimally invasive procedures, and assisting complex spinal surgeries, all of which contribute to enhanced surgical safety and clinical outcomes. With the intelligence of emerging technologies such as artificial intelligence, robotics, and augmented reality, this field is expected to evolve toward greater intelligence, precision, and minimal invasiveness. However, widespread clinical adoption remains challenging, and international collaboration will be essential for driving further innovation in this area.

**【Key words】** Navigation technology; Spine surgery; Bibliometrics; Visual analysis; Research trends

DOI：10.3969/j.issn.1674-8573.2026.05.005

作者单位：1. 新疆维吾尔自治区维吾尔医医院（新疆维吾尔自治区第二人民医院）骨一科，乌鲁木齐 830049；2. 新疆维吾尔自治区人民医院脊柱二科，乌鲁木齐 830049

通信作者：张建军，E-mail：30032958@qq.com

脊柱外科是骨科的重要学科之一，手术的精确性和安全性直接关系到患者的神经功能与术后康复[1]。传统手术方式中的术中定位、置入椎弓根螺钉等关键环节主要依赖术者的经验和术中透视，存在高辐射暴露、定位精度差等缺点[2]。随着数字化导航技术的不断发展，其优势在脊柱外科领域中也越来越突出，该技术通过将医学影像、空间定位和计算机处理相结合，提供实时的、三维的术中引导，显著提高了手术的精准度，并有效降低了手术相关风险[3]。近年来，增强现实（AR）、机器人辅助等新兴技术与导航系统的完美融合，推动了脊柱外科向智能化、微创化方向的发展[4-5]。虽然关于数字化导航在脊柱外科领域应用的文献数量日益增长，但该领域的研究现状、研究热点与发展趋势仍缺乏系统的整理。文献计量学作为一种定量分析学术文献的方法，能够通过可视化的方式，清晰地展示某一领域的研究分布、合作网络、研究热点与趋势[6]。因此，本研究旨在利用CiteSpace、Bibliometrix等文献计量学工具，对2010年至2025年间Web of Science核心数据库中关于脊柱外科导航技术的相关文献进行系统性分析。与既往研究相比，本研究在时间跨度、多工具整合以及各项评价指标体系方面具有独特性。通过绘制科学的知识图谱，客观地呈现该领域的研究现状，识别研究热点及未来发展趋势，为相关专业的学者提供有价值的参考。

## 资料与方法

一、数据收集与处理

本研究选取Web of Science核心数据库作为数据来源，检索时间范围从2010年1月1日至2025年9月20日，限定文献类型为论著及综述，语种选择英文。利用高级检索功能，检索式采用逻辑运算符AND/OR，以“Navigation” OR "Navigation system" OR “Navigation, Surgery” AND “Spine” OR “Spine, Surgery”作为检索条件。纳入标准：选择以导航在脊柱外科领域中的应用为主题的文献。文献排除标准：①研究主题与“导航”无关或与“脊柱外科”无关；②会议、病例报告、专业指南等；③重复发表的文献；④内容相似的学位论文或期刊论文。检索出的相关文献由3名研究成员详细筛选并按照排除标准剔除，对候选文献进行统一审查并达成一致意见。检索流程遵循PRISMA指南（图1），经过筛选共得到706篇相关英文文献，其中研究类论文592篇，综述114篇。涉及182种期刊，3 953名作者，701个机构，150个国家和地区。

二、研究方法

将检索到的706篇文献的纯文本数据导入Excel、CiteSpace软件（版本号：6.4.R2）、Bibliometrix在线平台、VOSviewer（版本号：1.6.20）、Scimago Graphica在线软件进行深度挖掘。软件参数设置：CiteSpace时间切片为2年，阈值g-index=15，聚类算法为LLR，权重指标为关键词频次；VOSviewer聚类分辨率为1.0，最小聚类规模为5。制作国家合作网络图、机构合作网络图、作者合作网络图、关键词共现图、关键词聚类图、关键词突现图等多方面的可视化分析图。

## 结　果

一、年度发文量

文献数量的时序变化可以反映科学研究的活跃程度，在一定程度上揭示了科学发展的特点与规律[7]。图2展示了2010年1月至2025年9月，年度发表文献数量整体呈现上升趋势，其中，2024年的发文量最高（92篇）。这一趋势表明，数字化导航在脊柱外科领域的重要性和潜在研究价值长期受到学者的广泛关注。

二、期刊分布及合作网络

发表在核心期刊的文献能够代表所含专业学科发展水平，为本学科学者提供宝贵的参考资源[8]。本研究对Web of Science核心数据库中的相关文献进行统计并对发文量排名前5的期刊进行排序（表1），*Global Spine Journal*的发文量位居首位，共发表了49篇文献，其次是*Journal of Clinical Medicine*（发文量为36篇），两本期刊的JCR分区均为Q1区。图3展示了各刊论文发表的时间变化，从图中可以看

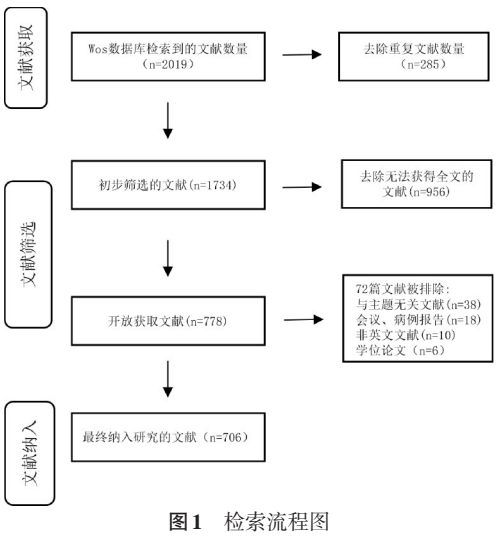


**图1**　检索流程图

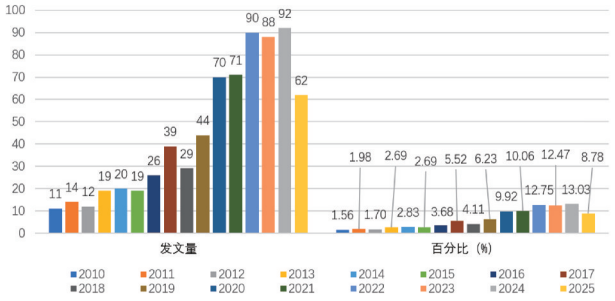


**图2**　年度发文量时序变化

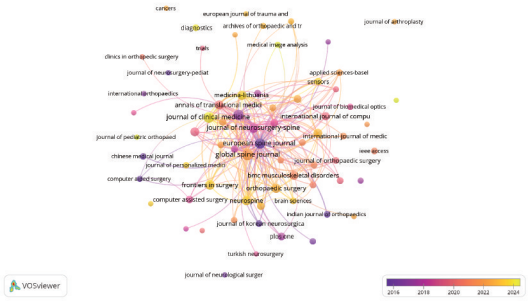

**图3**　期刊发文量的时间叠加图

出，虽然 *European Spine Journal* 是被引用最多的期刊，但主要发表的论文集中在2016年左右，而发表在 *Global Spine Journal* 和 *Journal of Clinical Medicine* 这两本期刊上的论文以近几年居多。

三、国家/地区与合作网络

国家与国家、地区与地区的科研合作有助于提升学科在全球科研中的影响力[9]。表2展示了发文量排在前五的国家/地区：其中排在前三的国家是美国（235篇，33.29%）、中国（160篇，22.66%）、德国（97篇，13.74%）；图4展示了排在前10的国家或地区发文量随时间变化情况，美国、中国、德国、日本和韩国这五个国家从2010年至2025年发文量呈逐渐上升趋势。图5 a展示了国家/地区合作网络的知识

**表1**　发文量排名前5的期刊

| 期刊 | 发文量 | 引用频次 | 影响因子 | 分区 |
|---|---|---|---|---|
| Global Spine Journal | 49 | 725 | 3.0 | Q1 |
| Journal of Clinical Medicine | 36 | 292 | 2.9 | Q1 |
| European Spine Journal | 34 | 1 953 | 2.7 | Q2 |
| Neurosurgical Focus | 33 | 1 286 | 3.0 | Q1 |
| Journal of Neurosurgery: Spine | 24 | 612 | 3.1 | Q1 |

**表2**　国家/地区的发文量与引用量

| 国家/地区 | 发文量 | 占比(%) | 引用频次 | 平均被引次数 |
|---|---|---|---|---|
| 美国 | 235 | 33.29 | 4 640 | 22.90 |
| 中国 | 160 | 22.66 | 1 972 | 12.20 |
| 德国 | 97 | 13.74 | 1 069 | 15.70 |
| 日本 | 49 | 6.94 | 540 | 12.00 |
| 瑞士 | 40 | 5.67 | 584 | 24.30 |

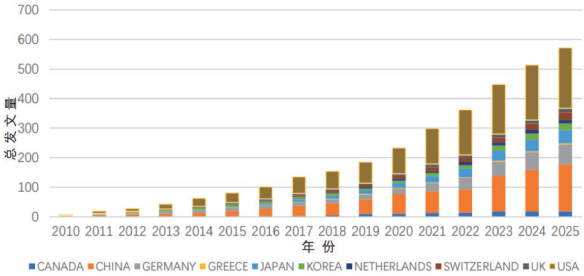


**图4**　国家/地区年度发文量

图谱，其中美国在该领域中的发表论文数量最多，并与中国的联系最为密切；此外，美国与加拿大、澳大利亚、法国、巴西等其他国家的合作关系也较密切。图5 b展示了国家/地区之间的合作关系和平均发表时间，通过结合图3及图5 b发现美国在该领域的研究中作出了重要贡献，而中国、德国也在近几年发表了大量研究成果。

四、作者及合作网络

在学术领域，高产作者通常是推动学科发展的重要力量[10]。图6 a展示了被引用次数超过100次作者的被引用共线网络图，图6 b展示了作者的贡献随时间的变化情况，早期研究中田伟、Johnson JP、田乃峰、Siewerdsen JH等贡献较为突出，而在近年来的研究中 Elmi-Terander A、Edström E、Burström G、Nachabe R等的贡献也较大。通过表3可以了解发文量排前5的作者分别是Elmi-Terander A（15篇）、Edström E（15篇）、Farshad M（13篇）、Burström G（11篇）、Furnstahl P（11篇）；由表4可以看出被引用次数排前5的作者分别为Elmi-Terander A（698次）、Ed-

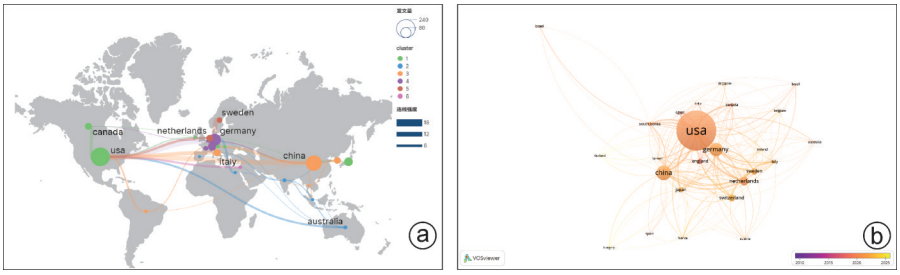


**图5**　国家/地区合作网络知识图谱(a)及时间叠加图(b)

**表3**　发文量排前5的作者

| 序号 | 作者 | 发文量 |
|---|---|---|
| 1 | Elmi-Terander A | 15 |
| 2 | Edström E | 15 |
| 3 | Farshad M | 13 |
| 4 | Burström G | 11 |
| 5 | Furnstahl P | 11 |

**表4**　被引次数排前5的作者

| 序号 | 作者 | 被引次数 |
|---|---|---|
| 1 | Elmi-Terander A | 698 |
| 2 | Edström E | 655 |
| 3 | Nachabe R | 590 |
| 4 | Burström G | 503 |
| 5 | Gerdhem P | 477 |

**表5**　机构发文量与引用频次

| 序号 | 机构 | 发文量 | 被引次数 |
|---|---|---|---|
| 1 | 纽约特种外科医院 | 29 | 378 |
| 2 | 约翰霍普金斯大学 | 21 | 633 |
| 3 | 苏黎世大学 | 19 | 533 |
| 4 | 卡洛林斯卡大学医院 | 15 | 664 |
| 5 | 飞利浦医疗系统 | 14 | 664 |

ström E（655次）、Nachabe R（590次）、Burström G（503次）、Gerdhem P（447次）。

五、机构及合作网络

机构合作图谱分析可以揭示各机构之间的合作关系，为研究者的学术交流提供重要参考[11]。本研究使用VOSviewer及Scimago Graphica软件绘制研究机构合作网络分析图谱及时间叠加图（图7）。图7 a展示了发文量不少于5篇的科研机构。通过表5可以看出，发文量排在前五的科研机构分别是纽约特种外科医院（29篇）、约翰·霍普金斯大学（21篇）、苏黎世大学（19篇）、卡洛林斯卡大学医院（15篇）、飞利浦医疗系统（14篇）。图7 b代表各机构的文献发表时间，可以看出北京大学、北京积水潭医院、美国加州戴维斯大学、达斯西奈医学中心等机构在该领域发文时间较早，说明在美国和中国数字化导航应用于脊柱外科的研究相对较早，近几年南京医科大学、首都医科大学、西安交通大学、上海交通大学等中国的研究机构发文量也有显著提升。总体来看，中国与国外机构的合作越来越频繁，这说明该领域的学者们加强交流与互动，共同推动研究的创新与发展。

六、高被引文献分析

高被引文献在学术界被视为具有较高的研究价值和参考意义[12]。在近15年数字化导航应用于脊柱外科领域中被引用次数排前10的文献中（表6），5篇文献探讨了数字化导航技术辅助机器人在椎弓根螺钉植入中的安全性及优越性；3篇文献探讨了增强现实手术导航（ARSN）技术在脊柱外科手术中的应用效果；2篇文献通过比较多种不同的椎弓根螺钉植入技术说明了导航在脊柱外科手术中的安全性及精确性。

七、关键词共现分析

关键词是文章的核心主题，便于了解文献的主

**图6**　作者合作网络图谱（a）及时间叠加图（b）

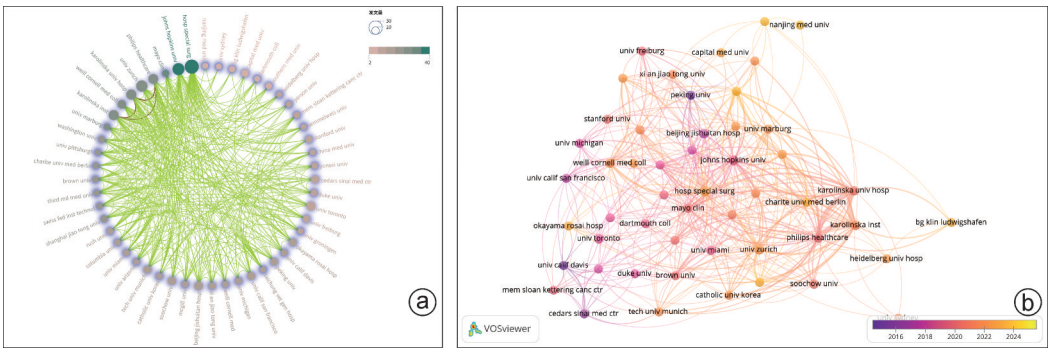

**图7**　机构合作网络知识图谱（a）及时间叠加图（b）

**表6** 排名前10的高被引文献

| 序号 | 第一作者 | 期刊 | 年份 | 被引次数 | 主要内容 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Elmi-Terander A[13] | Spine (Phila Pa 1976) | 2019 | 46 | ARSN结合术中3D成像进行椎弓根螺钉置入的临床研究。 |
| 2 | Overley SC[14] | Neurosurgery | 2017 | 35 | 综述了脊柱手术中导航和机器人技术的现状、应用及其潜在优势。 |
| 3 | Han X[15] | J Neurosurg Spine | 2019 | 33 | 通过对234例患者进行随机对照试验比较TiRobot机器人结合3D导航与传统透视辅助置钉在胸腰椎手术中的安全性与准确性。 |
| 4 | Molina CA[16] | J Neurosurg Spine | 2019 | 33 | 探讨了AR技术与徒手、数字化导航和机器人辅助数字化导航方法置钉的比较,描述了各种方法的优缺点。 |
| 5 | Hyun SJ[17] | Spine (Phila Pa 1976) | 2017 | 29 | 通过一项前瞻性研究比较数字化导航辅助机器人在微创脊柱手术(MIS)与透视辅助下的开放手术在腰椎融合术中的影响,总结了数字化导航的优势。 |
| 6 | Liebmann F[18] | Int J Comput Assist Radiol Surg | 2019 | 28 | 介绍了一种基于微软HoloLens的脊柱融合手术中椎弓根螺钉导航方法,通过表面数字化和AR技术,实现了精确的手术导航。 |
| 7 | Li HM[19] | Spine (Phila Pa 1976) | 2020 | 27 | 通过9项涉及696例患者的随机对照试验比较了导航辅助机器人与传统徒手技术在植入椎弓根螺钉中的安全性及优越性。 |
| 8 | Gibby JT[20] | Int J Comput Assist Radiol Surg | 2019 | 26 | 介绍了使用头戴式增强现实(HMD-AR)技术结合计算机导航进行脊柱椎弓根螺钉植入腰椎模型的试验,展示了其在脊柱手术中的潜力。 |
| 9 | Gelalis ID[21] | Eur Spine J | 2012 | 25 | 评估了不同椎弓根螺钉置入技术(徒手技术、透视引导、基于CT的导航、基于透视的导航),发现导航技术在椎弓根螺钉置入中的准确性高于徒手技术和透视引导。 |
| 10 | Perdomo-Pantoja A[22] | World Neurosurg | 2019 | 25 | 比较了四种不同置钉技术在脊柱融合手术中的效果,并且总结出导航技术的安全性及准确性。 |

要内容[23]。使用CiteSpace软件统计出导航在脊柱外科领域应用的20个关键词并构建共线网络。表7展示了出现频次排前10的关键词,图8 a展示了关键词共线网络,由表7和图8 a可以看出:除了检索词外,精确性(accuracy)是导航在脊柱外科应用的主要优势;定位(placement)、植入(insertion)等关键词也频繁出现,体现出导航技术对于提升手术关键环节精准度的重要作用。相关影像技术,如计算机断层成像(computed tomography)和图像引导(image guidance),构成了导航系统实现精准定位的基础。从手术部位来看,腰椎(lumbar spine)和颈椎(cervical spine)是导航技术应用的重点部位。在术式方面,导航不仅应用于传统融合(fusion)手术,也显著提高了微创(minimally invasive)手术的开展。关键词“徒手(free hand)”的出现,则通过与导航技术形成对比,进一步凸显了导航技术在提升手术精确性方面的价值。高频关键词共同验证了导航技术在脊柱外科中有助于提升手术精准度、安全性与微创化水平。

关键词聚类分析可以深入挖掘研究热点和关键问题,时间轴图可以了解聚类的时间演化特点[24]。图8 b展示了通过分析识别出以下几个主要聚类标签:#0 微创手术(minimally invasive surgery),该聚类主要关注导航技术如何优化脊柱微创手术,核心研究方向包括通道与内镜手术的辅助、经皮螺钉植入以及手术效果评估;#1 增强现实(augmented reality),此聚类代表了手术导航与可视化技术的前沿融合,其研究主题集中在AR系统开发、集成以及空间配准、精度验证;#2 术中成像(intraoperative imaging),该聚类聚焦于导航系统赖以实现的影像学基础,特别是术中实时三维成像,主要研究方向为研究“O”型臂、“C”型臂、CT等移动式三维成像设备在导航中的图像质量、配准效率及其对手术流程的影响;#3 椎弓根螺钉(pedicle screw),重点研究螺钉植入环节的导航辅助与精准放置;#4 颈椎椎弓根螺钉(cervical pedicle screw),专门针对颈椎椎弓根径路狭小、毗邻重要神经血管结构的高风险区域,研究重点在于评估导航技术在颈椎,尤其是上颈椎($C_1$、$C_2$)置钉中的可行性与安全性,解决该区域传统方法难度大、风险高的临床难题;#5 人工智能(artificial intelligence),体现智能算法在导航规划与执行中的新

**表7** 高频关键词

| 序号 | 关键词 | 出现频次 |
|---|---|---|
| 1 | 精确性(accuracy) | 273 |
| 2 | 定位(placement) | 133 |
| 3 | 植入(insertion) | 105 |
| 4 | 计算机断层成像(computed tomography) | 78 |
| 5 | 融合(fusion) | 68 |
| 6 | 腰椎(lumbar spine) | 63 |
| 7 | 图像引导(image guidance) | 40 |
| 8 | 徒手(free hand) | 39 |
| 9 | 颈椎(cervical spine) | 36 |
| 10 | 微创(minimally invasive) | 32 |

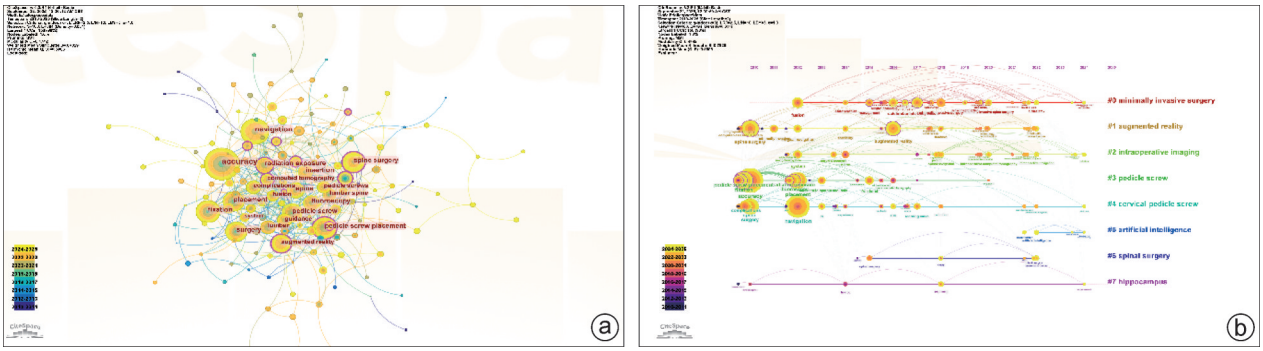


**图8**　高频关键词共线网络(a)及聚类时间轴图(b)

兴作用,该聚类主要研究方向为智能规划与预测、自动识别与分割,尤其是肿瘤疾病的区域分割等;#6 脊柱外科(spinal surgery),作为整体研究背景贯穿多个聚类;#7 海马体(hippocampus),虽为非常规关联关键词,却能反映神经导航或相关交叉研究方向。聚类分析的模块度(Q)为0.472 4,平均轮廓值(S)为0.782 9,关键词聚类结构显著且聚类结果同质性尚可。

通过分析关键词在时间维度上的分布,能够全面追踪关键词的发展动态,了解其随时间的演变轨迹[25]。根据关键词突现分析结果(图9),我们可以看出早期(2010年左右)的研究集中于影像引导技术与关键手术环节,如“图像引导”(image guidance)、“计算机断层扫描”(computed tomography)、“植入”(insertion)等,体现了该阶段对导航精准定位能力的初步探索。2014至2017年间,关注点扩增至术中设备与实操经验,如“O型臂”(O-arm)和“经验”(experience),同时“徒手”(free hand)作为对比技术也引起较强关注,反映出该时期临床验证与技术比较成为重点。近年来(2020年后),研究热点进一步向智能化、精准化方向发展,“虚拟现实”(virtual reality)、“机器人技术”(robotics)、“术中导航”(intraoperative navigation)等关键词开始突现并持续至今,表明导航技术正与数字化技术进一步融合,并向智能手术系统转化。总体来看,导航在脊柱外科领域的研究重点已从早期的定位精度验证,逐渐向多元化影像、智能规划及机器人辅助等前沿方向转变,这预示着未来脊柱外科手术会更加智能化、微创化。

**Top 20 Keywords with the Strongest Citation Bursts**

| Keywords | Year | Strength | Begin | End | 2010 - 2025 |
|---|---|---|---|---|---|
| thoracic spine | 2010 | 5.71 | 2010 | 2015 | |
| image guidance | 2010 | 4.06 | 2010 | 2019 | |
| insertion | 2010 | 3 | 2010 | 2013 | |
| computed tomography | 2010 | 2.94 | 2010 | 2013 | |
| image-guided surgery | 2010 | 2.82 | 2010 | 2017 | |
| axis | 2012 | 2.99 | 2012 | 2015 | |
| in vivo | 2014 | 5.84 | 2014 | 2019 | |
| o arm | 2014 | 4.98 | 2014 | 2017 | |
| experience | 2014 | 3.52 | 2014 | 2017 | |
| free hand | 2015 | 3.17 | 2015 | 2017 | |
| cervical spine | 2010 | 3.11 | 2014 | 2017 | |
| surgical technique | 2016 | 4.26 | 2016 | 2021 | |
| thoracolumbar spine | 2016 | 2.99 | 2016 | 2019 | |
| rates | 2018 | 3 | 2018 | 2021 | |
| intraoperative imaging | 2020 | 3.36 | 2020 | 2021 | |
| diskectomy | 2022 | 4.03 | 2022 | 2025 | |
| virtual reality | 2022 | 3.49 | 2022 | 2023 | |
| classification | 2022 | 3.3 | 2022 | 2025 | |
| intraoperative navigation | 2022 | 2.92 | 2022 | 2025 | |
| robotics | 2024 | 3.38 | 2024 | 2025 | |

**图9**　关键词突现分析图

## 讨　论

一、现状总结

在过去的15年中,关于导航在脊柱外科领域应用研究的文献数量呈持续增长趋势。通过对期刊分布的分析发现发文量最多的期刊普遍属于高质量期刊,这反映出脊柱导航技术已经取得了一定的研究成果。在基础研究领域,主要涉及外科学、神经外科学和矫形学等方向。美国国立卫生研究院(NIH)在相关研究中的资助排名首位,这表明脊柱导航技术研究在美国受到了较高的关注。目前,从事此类研究的学者主要集中在中国和美国等地,然而中国学者的文献平均引用量相对较低,这表明中国学者的研究影响力有待提升。国家合作结构差异可能源于科研资源分布、政策支持及国际合作网络的成熟度。在作者和机构的合作网络中,已形成了一定的合作群体,但中外学者之间的交流仍然不够紧密。

二、研究热点及未来研究趋势

通过关键词词频分析发现,国内外在脊柱导航技术研究领域中的热点话题和未来发展趋势大体一致。根据分析结果,脊柱导航技术的研究焦点主要集中在精确性方面。同时,研究热点问题涉及脊柱微创技术和脊柱肿瘤的治疗。

(一)数字化导航在脊柱外科手术中应用的精确性

相较于传统透视引导下进行脊柱外科手术,数字化导航在椎弓根螺钉植入的精确性和效率方面展现出更为显著的优势[26]。很多研究已经证实了计算机辅助下的导航技术在提升手术安全性方面的效果[27]。Amiot等[28]通过研究发现,使用导航技术植

入的椎弓根螺钉准确率(94.6%)远高于传统透视下徒手置钉(84.7%)。俞兴等[29]对2 062个胸椎和腰椎椎弓根螺钉的植入效果进行研究发现,使用导航植入的椎弓根螺钉中,只有4.6%的螺钉在植入椎弓根过程中穿破内壁2 mm,而徒手置钉过程中穿破椎弓根壁的发生率高达16.0%,并且导航置钉所用的平均时间和总手术时间均比透视下徒手置钉少。Lange等[30]通过一项荟萃分析发现导航与非导航椎弓根螺钉植入在神经损伤风险上的差异无统计学意义。Morello等[31]发现使用导航植入的椎弓根螺钉可以精准地填充椎弓根内部,增加稳定性且降低椎弓根螺钉出现松动的可能性。

(二)数字化导航在脊柱微创手术中的应用

数字化导航技术的应用极大地推动了脊柱微创手术的发展[32]。与传统的透视引导下经皮脊柱微创手术技术相比,计算机辅助导航可以减少外科医生与患者90%以上的辐射暴露风险[33]。同时,术中3D成像技术的应用为导航的准确性操作提供实时反馈[34-35]。Virk等[36]研究发现在复杂的上颈椎手术中,导航技术的优势更为显著。Vaishnav等[37]将导航系统用于微创经椎间孔腰椎椎间融合术(MIS-TLIF),发现与传统透视组相比,导航组的手术时间明显缩短($P$<0.001),出血量显著减少($P$=0.007)。因此,这些研究成果进一步验证了导航技术在脊柱微创手术中的优势。

(三)数字化导航在脊柱肿瘤手术中的应用

Ivanov等[38]通过回顾分析2010~2020年间在谢菲尔德教学医院应用数字化导航完成脊柱肿瘤手术的病例,证实了导航不仅可以精准植入螺钉并且可以精确地划定肿瘤边缘,还可以更好地保留重要的解剖组织。Chitta等[39]报道了利用"O"型臂X线机辅助3D数字化导航对1名22岁$C_{4-5}$关节突骨样骨瘤的患者进行骨瘤整体切除手术,术中病灶被完全切除并且术后未出现神经损伤表现,在术后2年的随访过程中未发现肿瘤复发或颈椎不稳。Sakhrekar等[40]报道了导航立体定位在脊柱肿瘤椎体切除术中的应用价值,并且详细描述了计算机辅助导航技术的新用途,这项研究提出了一种使用实时导航切除边界清楚的胸椎肿瘤的安全及有效的方法。Ando等[41]对18例原发性脊柱肿瘤患者进行导航辅助下肿瘤切除术,未出现术中神经系统并发症,螺钉位置准确并且在长期随访中未发现局部复发,该研究为导航系统在原发性脊柱肿瘤切除术中的安全性及有效性提供了证据。

(四)导航技术在未来脊柱外科中的发展方向

随着数字化导航技术的不断发展,创新已成为提升手术安全性和效率的关键因素[42]。如何改进可视化成像、如何优化导航操作工具以及如何研发更加轻巧的术中跟踪器成为未来导航技术发展的新挑战[43]。此外,医生对于导航操作的熟练程度也可能成为其被广泛应用的一个关键因素,随着熟练程度的不断提升,基于导航技术的应用也将会不断增加[44]。目前,AR技术已经在国外应用于临床,不仅有实时导航的功能,而且可以将图像直接显示在患者身上,随着这项技术的不断发展,其普及率将显著提升[45]。数字化导航辅助下的机器人手术是另一个发展方向,但其应用成本可能会比单纯导航系统高,目前未能广泛应用于临床[46]。在本研究中发现的某些现象,例如中国学者发文量高但引用量低、中外机构合作网络不密切等,除了某些科研质量的因素外,也可以从"技术接受"角度得到一些解释,高频关键词"精确性""安全性"等在大量学术层面反复验证了其临床使用的效果并佐证了"有用性";但"易用性"是当前导航技术应用普及的关键挑战,本研究发现的AR、人工智能、骨科机器人等研究点,最终目的仍是为了更好地解决"易用性"这个短板。

综上所述,导航技术在脊柱外科手术中的应用越来越广泛,特别是在复杂病例的治疗中表现出了独特的优势。未来的研究方向应关注导航技术的优化、效果评估及成本估算等方面,以促进其在临床上的普及应用。

## 参 考 文 献


[1] Zawar A, Chhabra HS, Mundra A, et al. Robotics and navigation in spine surgery: A narrative review[J]. J Orthop, 2023, 44: 36-46.

[2] Weng R, Lin DX, Song YK, et al. Bibliometric and visualized analysis of research relating to minimally invasive spine surgery reported over the period 2000-2022[J]. Digit Health, 2023, 9: 20552076231173562.

[3] Lonjon N, Chan-Seng E, Costalat V, et al. Robot-assisted spine surgery: Feasibility study through a prospective case-matched analysis[J]. Eur Spine J, 2016, 25(3): 947-955.

[4] Li C, Geng M, Li S, et al. Knowledge mapping of surgical smoke from 2003 to 2022: a bibliometric analysis[J]. Surg Endosc, 2024, 38(3): 1465-1483.

[5] Chen B, Shin S, Wu M, et al. Visualizing the knowledge domain in health education: A scientometric analysis based on citespace[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(11): 6440.

[6] Arruda H, Silva ER, Lessa M, et al. Vosviewer and bibliometrix[J]. J Med Libr Assoc, 2022, 110(3): 392-395.

[7] Oyewola DO, Dada EG. Exploring machine learning: A scientometrics approach using bibliometrix and vosviewer[J]. SN Appl Sci, 2022, 4(5): 143.

[8] Polizzi A, Boato M, Serra S, et al. Applications of artificial intelligence in orthodontics: A bibliometric and visual analysis[J]. Clin

Oral Investig, 2025, 29(1): 65.
[9] Chen C, Dubin R, Kim MC. Emerging trends and new developments in regenerative medicine: a scientometric update (2000 - 2014)[J]. Expert Opin Biol Ther, 2014, 14(9): 1295-1317.
[10] Wu T, Duan Y, Zhang T, et al. Research trends in the application of artificial intelligence in oncology: A bibliometric and network visualization study[J]. Front Biosci (Landmark Ed), 2022, 27(9): 254.
[11] Chen K, Zhai X, Wang S, et al. Emerging trends and research foci of deep learning in spine: Bibliometric and visualization study[J]. Neurosurg Rev, 2023, 46(1): 81.
[12] Lin GX, Chen CM, Rui G, et al. Research relating to three-dimensional (3D) printing in spine surgery: A bibliometric analysis[J]. Eur Spine J, 2023, 32(2): 395-407.
[13] Elmi-Terander A, Burström G, Nachabe R, et al. Pedicle screw placement using augmented reality surgical navigation with intraoperative 3d imaging: A first in-human prospective cohort study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2019, 44(7): 517-525.
[14] Overley SC, Cho SK, Mehta AI, et al. Navigation and robotics in spinal surgery: Where are we now?[J]. Neurosurgery, 2017, 80(3S): S86-S99.
[15] Han X, Tian W, Liu Y, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: A prospective randomized controlled trial[J]. J Neurosurg Spine, 2019, 30(5): 615-622.
[16] Molina CA, Theodore N, Ahmed AK, et al. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: A cadaveric proof-of-concept study[J]. J Neurosurg Spine, 2019, 31(1): 139-146.
[17] Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, et al. Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic-guided spinal instrumented fusions: A randomized controlled trial[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2017, 42(6): 353-358.
[18] Liebmann F, Roner S, von Atzigen M, et al. Pedicle screw navigation using surface digitization on the microsoft hololens[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2019, 14(7): 1157-1165.
[19] Li HM, Zhang RJ, Shen CL. Accuracy of pedicle screw placement and clinical outcomes of robot-assisted technique versus conventional freehand technique in spine surgery from nine randomized controlled trials: A meta-analysis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2020, 45(2): E111-E119.
[20] Gibby JT, Swenson SA, Cvetko S, et al. Head-mounted display augmented reality to guide pedicle screw placement utilizing computed tomography[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2019, 14(3): 525-535.
[21] Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, et al. Accuracy of pedicle screw placement: A systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques[J]. Eur Spine J, 2012, 21(2): 247-255.
[22] Perdomo-Pantoja A, Ishida W, Zygourakis C, et al. Accuracy of current techniques for placement of pedicle screws in the spine: A comprehensive systematic review and meta-analysis of 51,161 screws[J]. World Neurosurg, 2019, 126: 664-678.e3.
[23] Guo X, Wang D, Li J, Zhang H. Global research status and trends in orthopaedic surgical robotics: a bibliometric and visualisation analysis study[J]. J Robot Surg, 2023, 17(4): 1743-1756.
[24] Li G, He M, Chen H, et al. Lumbar spondylolysis: A bibliometric analysis and visualization research from 2000 to 2023[J]. Medicine (Baltimore), 2025, 104(35): e43273.
[25] Sang D, Guo J, Meng H, et al. Global trends and hotspots of minimally invasive surgery in lumbar spinal stenosis: A bibliometric analysis[J]. J Pain Res, 2024, 17: 117-132.
[26] Tu TH, Kuo YH, Chang CC, et al. Comparison of intraoperative cone-beam CT versus preoperative fan-beam CT for navigated spine surgery: A prospective randomized study[J]. J Neurosurg Spine, 2024, 40(2): 240-247.
[27] Kim JH, Jitpakdee K, Kotheeranurak V, et al. Is navigation beneficial for transforaminal endoscopic lumbar foraminotomy? a preliminary comparison study with fluoroscopic guidance[J]. Eur Spine J, 2023, 32(8): 2808-2818.
[28] Amiot LP, Lang K, Putzier M, et al. Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2000, 25(5): 606-614.
[29] 俞兴, 徐林, 毕连涌, 等. 术中三维导航引导的腰椎弓根螺钉植入效果分析[J]. 中华医学杂志, 2008, 88(27): 1905-1908.
[30] Lange N, Meyer B, Meyer HS. Navigation for surgical treatment of disorders of the cervical spine - a systematic review[J]. J Orthop Surg (Hong Kong), 2021, 29(1_suppl): 23094990211012865.
[31] Morello A, Colonna S, Carbone F, et al. Cervical pedicle screws: Multicenter comparison of freehand, patient-specific 3d-printed templates, loop-x navigation and oarm/ct navigation accuracy and safety[J]. Global Spine J, 2026, 16(2): 935-944.
[32] Hiyama A, Sakai D, Katoh H, et al. Assessing procedural accuracy in lateral spine surgery: A retrospective analysis of percutaneous pedicle screw placement with intraoperative CT navigation[J]. J Clin Med, 2023, 12(21): 6914.
[33] Yokota K, Kawano O, Sakai H, et al. Intraoperative radiation exposure from o-arm-based 3d navigation in spine surgery[J]. Spine Surg Relat Res, 2023, 7(6): 496-503.
[34] Richter PH, Gebhard F. [Application of navigation in the fractured spine][J]. Oper Orthop Traumatol, 2023, 35(1): 29-36.
[35] Palmer R, Ton A, Robertson D, et al. Top 25 most cited articles on intraoperative computer tomography-guided navigation in spine surgery[J]. World Neurosurg, 2024, 184: 322-330.e1.
[36] Virk S, Qureshi S. Navigation in minimally invasive spine surgery[J]. J Spine Surg, 2019, 5(Suppl 1): S25-S30.
[37] Vaishnav AS, Merrill RK, Sandhu H, et al. A review of techniques, time demand, radiation exposure, and outcomes of skin-anchored intraoperative 3D navigation in minimally invasive lumbar spinal surgery[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2020, 45(8): E465-E476.
[38] Ivanov M, Radatz M. Role of navigation in the surgery of spine tumours[J]. Acta Neurochir Suppl, 2023, 135: 173-178.
[39] Chitta S, Russo TL, Albert AJ, et al. En bloc resection of cervical spine osteoid osteoma with o-arm-assisted 3d navigation: A case report[J]. JBJS Case Connect, 2022, 12(3).
[40] Sakhrekar RT, Peshattiwar VB, Rathi P, et al. Minimally invasive approach for excision of dorsolumbar spine osteoid osteomas using 3d imaging and stealth navigation: A report of two cases[J]. Malays Orthop J, 2022, 16(2): 127-130.
[41] Ando K, Kobayashi K, Machino M, et al. Computed tomography-based navigation system-assisted surgery for primary spine tumor[J]. J Clin Neurosci, 2019, 63: 22-26.
[42] Driver J, Groff MW. Editorial. Navigation in spine surgery: an innovation here to stay[J]. J Neurosurg Spine, 2021, 36(3): 347-349.
[43] Kelley BV, Hsiue PP, Upfill-Brown AM, et al. Utilization trends and outcomes of computer-assisted navigation in spine fusion in the united states[J]. Spine J, 2021, 21(8): 1246-1255.
[44] Yamout T, Orosz LD, Good CR, et al. Technological advances in spine surgery: Navigation, robotics, and augmented reality[J]. Orthop Clin North Am, 2023, 54(2): 237-246.
[45] Otomo N, Funao H, Yamanouchi K, et al. Computed tomography-based navigation system in current spine surgery: A narrative review[J]. Medicina (Kaunas), 2022, 58(2): 241.
[46] Prabhu MC, Jacob KC, Patel MR, et al. Is intraoperative navigation in minimally invasive spine surgery cost-effective?[J]. Mini-invasive Surg, 2022, 6: 31.

（收稿日期：2025-10-03）
（本文编辑：陈姗姗）

**引用格式**

木热提·卡哈尔, 阿巴拜科日·奥斯曼, 麦麦提江·阿卜拉, 等. 基于文献计量分析导航技术在脊柱外科领域的研究热点与趋势[J]. 骨科, 2026, 17(5): 433-440. DOI:10.3969/j.issn.1674-8573.2026.05.005.