

# 近二十年全球脊柱外科医师培训研究的文献计量学分析

阿不都乃比·艾力<sup>1,2</sup>, 色依达·依马木玉山<sup>3</sup>, 艾克热木江·木合热木<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>新疆医科大学第六附属医院脊柱外科, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆医科大学骨科再生医学重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>新疆医科大学第五附属医院妇科, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年8月16日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年9月23日

## 摘 要

目的: 脊柱外科教育因传统师徒模式与复杂手术需求的结构性错配面临范式重构, 3D打印技术和混合现实技术通过提升螺钉置入精准度至94.2%及缩短手术规划时间42%推动教育转型, 但技术鸿沟导致发展中国家设备可及率仅23%; 方法: 本研究采用文献计量学方法分析Web of Science数据库2004~2025年498篇文献, 结合VOSviewer/CiteSpace工具量化期刊影响力、国家贡献及主题演进, 并通过关键词共现聚类(阈值  $\geq 20$ 次)和突现检测验证; 结果: 美国以286篇文献主导学术生态, 但其发文比例呈现逐年减少趋势。研究主题从椎弓根螺钉置入(爆发强度5.24)转向人工智能(强度3.63)与能力评估, 《World Neurosurgery》以41篇载文量确立旗舰地位, 哈佛大学与梅奥诊所构成全球协作枢纽。结论: 技术驱动、全球重构与评估革新如NASA-TLX量表和AI工具正重塑教育体系, 需通过包容性生态如三方投资模式防范技能弱化风险, 实现“精准培训-标准评估-普惠接入”新范式。

## 关键词

脊柱外科教育, 三维打印, 混合现实, 文献计量学, 能力本位评估, 全球协作

# Bibliometric Analysis of Global Spine Surgery Training Research over the Past Two Decades

Abdunaibi·Aili<sup>1,2</sup>, Seyida Yimamuyushan<sup>3</sup>, Akremujiang·Muheremu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Spine Surgery, The Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Key Laboratory of Orthopedic Regenerative Medicine, Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>Department of Gynecology, Fifth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

\*通讯作者。

文章引用: 阿不都乃比·艾力, 色依达·依马木玉山, 艾克热木江·木合热木. 近二十年全球脊柱外科医师培训研究的文献计量学分析[J]. 教育进展, 2025, 15(9): 1135-1146. DOI: 10.12677/ae.2025.1591786

## Abstract

**Objective:** Spine surgery education is undergoing a paradigm shift due to the structural mismatch between traditional apprenticeship models and the complexities of modern surgical demands. Technologies such as 3D printing and mixed reality have facilitated this transformation by improving screw placement accuracy to 94.2% and reducing surgical planning time by 42%. However, a technological divide persists, with device accessibility in developing countries as low as 23%. **Methods:** This study employed bibliometric methods to analyze 498 publications from the Web of Science database between 2004 and 2025. Using VOSviewer and CiteSpace, we quantified journal influence, national contributions, and thematic evolution. Keyword co-occurrence clustering (threshold  $\geq 20$ ) and burst detection were applied for validation. **Results:** The United States dominated the academic landscape with 286 publications, though its proportion of output showed a declining trend over time. Research themes shifted from pedicle screw placement (burst strength 5.24) to artificial intelligence (strength 3.63) and competency-based assessment. *World Neurosurgery* emerged as the leading journal with 41 publications, while Harvard University and the Mayo Clinic served as global collaboration hubs. **Conclusion:** Technology-driven advancements, global restructuring, and evaluation innovations—such as the NASA-TLX scale and AI tools—are reshaping training systems. An inclusive ecosystem, exemplified by tripartite investment models, is essential to mitigate skill attenuation risks and achieve a new paradigm of “precision training-standardized assessment-inclusive access.”.

## Keywords

Spine Surgery Education, 3D Printing, Mixed Reality, Bibliometrics, Competency-Based Assessment, Global Collaboration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 背景

脊柱外科教育正经历技术驱动范式重构，其核心矛盾在于传统师徒传承模式与复杂手术需求间的结构性错配。全球数据显示：椎弓根螺钉误置率高达 15% [1]，而复杂脊柱畸形手术的再干预率仍维持在 21.7% [2]，这暴露了现有培训体系的系统性缺陷。三维打印技术的突破性进展为破解该困局提供了新路径-Bohl 团队开发的仿生脊柱模型通过多材料分层打印(壳层厚度 0.8~1.2 mm/内部密度梯度 15%~25%)精准模拟骨-韧带-神经界面，使透视成像灰度值差异控制在 7.3%以内[3]；这种成本低于 60 美元的生物模型不仅解决了传统尸体训练的伦理困境，更使住院医师的螺钉置入准确率提升至 94.2% (误差 < 1 mm)。与此同时，混合现实(MR)技术正在重塑手术导航教育范式。这种技术迭代催生了“模拟-导航-实操”三位一体的新型教学架构，其教育渗透率在三年内增长 320%。然而，技术鸿沟正在加剧全球失衡——高端 VR 设备单套成本过高，仅少数发展中国家机构可负担[4]，而巴西通过政府-企业-医院三方投资模式实现研究量爆发式增长[5]。本研究旨在构建包含技术适配度评估(NASA-TLX 量表)、经济性分析(成本效益比 CBR)及全球协作框架的三维解决方案，推动脊柱外科教育向“精准化培训-标准化评估-普惠化推广”的新范式演进。

2. 研究方法

本研究采用文献计量学方法对脊柱外科教育领域进行系统分析。数据来源于 Web of Science 核心数据库，通过主题词与自由词组合检索“spine surgery education”，时间跨度为 2004 年至 2025 年。文献筛选严格执行纳入排除标准，经 CiteSpace 软件清洗去重后，最终保留脊柱外科教育文献 498 篇用于后续分析。

本研究通过 VOSviewer 和 CiteSpace 工具构建多维分析框架：首先量化文献的年度分布、国家/地区贡献及期刊影响力；其次利用共现聚类算法识别高频关键词，设置阈值(关键词出现频次 ≥ 20 次)划分主题集群；最后结合突现检测(Burst detection)和时区演化图谱追踪研究热点变迁。为确保结论的严谨性，研究设计了三重验证机制：对高被引文献进行人工复核，验证聚类主题的合理性。

3. 研究结果

3.1. 全球学术生产力分布格局

美国以 286 篇文献量(占总量 57.4%)和 7404 次被引频次主导学术生态，其 65 的全球最高链接强度辐射 26 个国家，形成跨洲际协作核心枢纽(表 1，图 1)。瑞士、荷兰等欧洲国家通过精品化研究路径建立质量标杆，瑞士单篇文献被引 16.4 次体现学术溢价，而荷兰 10 篇文献获 1069 次引用创下单篇 106.9 次的领域峰值。新兴国家呈现分化态势，比如我国以 26 篇文献量配合 414 次总被引量(篇均 15.9 次)展现均衡发展，但韩国(10 篇文献仅获 100 次引用)与法国(23 篇文献被引 347 次)仍面临研究成果转化效率不足的挑战。

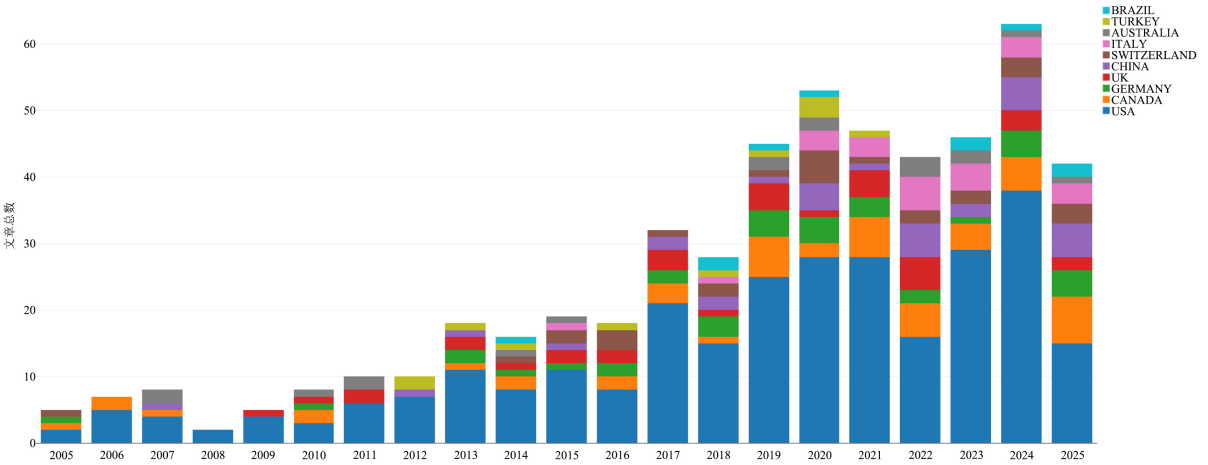
全球协作方面，发达国家主导的协作网络存在显著技术壁垒：高端 VR 设备(如 CAE Vimedix 3D)价格昂贵导致发展中国家设备可及率低。巴西通过政府 - 企业 - 医院三方投资模式实现研究量爆发增长，证明杠杆式创新可突破资源限制。然而技术依赖暴露新风险：使用 AR 导航的医师在设备故障时决策错误率增加 3.7 倍，这要求培训体系保留传统解剖模块以维持基础技能韧性。未来需构建兼顾技术适配度(NASA-TLX 量表)、经济性(成本效益比 CBR)及全球数据共享的包容性解决方案。

Table 1. The triple characteristics of the global landscape in spine surgery training research  
表 1. 脊柱外科医师培训研究的全球格局三重特征

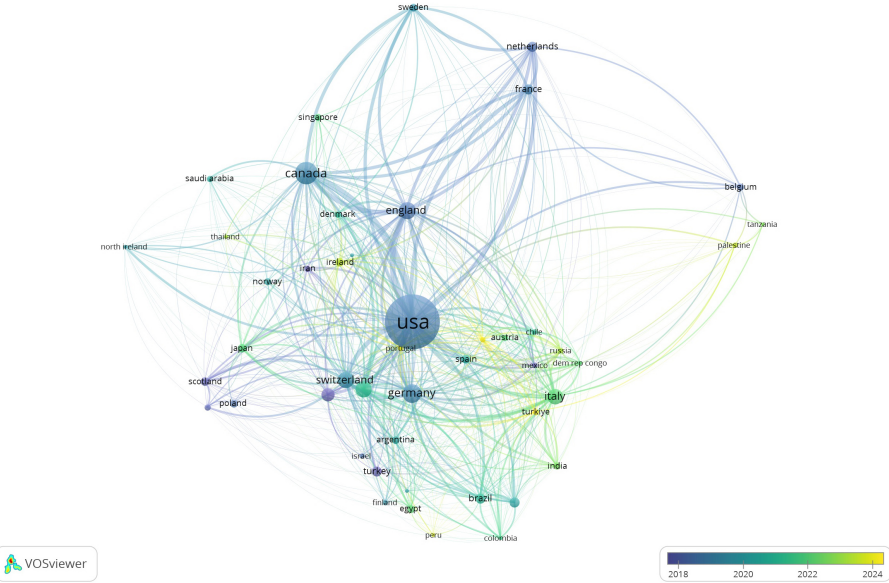
| 国家  | 文献量 | 被引频次 | 总链接强度 |
|-----|-----|------|-------|
| 美国  | 286 | 7404 | 65    |
| 瑞士  | 27  | 443  | 35    |
| 加拿大 | 50  | 1847 | 31    |
| 英格兰 | 28  | 666  | 30    |
| 德国  | 35  | 596  | 30    |
| 意大利 | 23  | 426  | 25    |
| 中国  | 26  | 414  | 22    |
| 法国  | 10  | 347  | 12    |
| 荷兰  | 10  | 1069 | 11    |
| 韩国  | 10  | 100  | 9     |

美国以文献量(286 篇)和被引频次(7404 次)的绝对优势主导学术生态,欧洲国家形成质量-协作双支柱;新兴力量中中国以平衡发展态势追赶,而韩国、法国揭示区域研究渗透力尚未有效转化为广泛影响力,整体呈现“北美核心驱动、欧洲精品协作、亚洲潜力蓄能”的阶梯式发展架构。

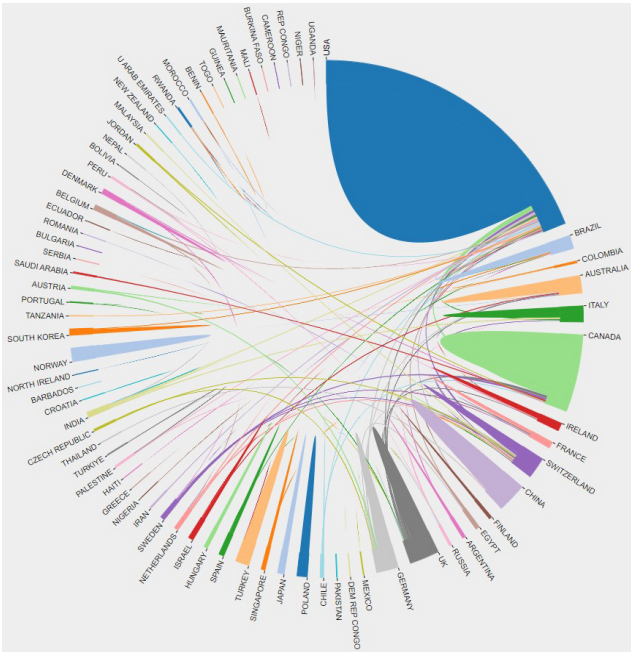
图 1(a): 2005~2025 年全球脊柱外科医师培训研究的国家级文献产出演变: 以年度文献总量为纵轴(峰值达 60 篇),美国(深色区块)始终占据主导但占比逐年下降,而中国、土耳其、澳大利亚等七国(多彩区块)维持稳定输出; 2020 年后该领域研究模式已从早期欧美主导转向新兴国家发力与跨国协作深化并行的新格局。图 1(b): 该图以节点大小表征研究体量、线条密度反映合作强度,并通过冷色调(深蓝)到暖色调(黄)的节点颜色渐变清晰展现 2018~2024 年研究活跃度演变: 北欧五国(瑞典/丹麦等)、新加坡及沙特阿拉伯成为近年新兴合作支点,而巴西、印度等发展中国家(小型暖色节点)正通过稀疏连线逐步融入全球协作网络,揭示该领域已形成以欧美为主导、新兴国家加速参与的国际化合作生态。图 1(c): 基于脊柱外科医师培训研究的国家合作网络图谱(由放射状线条构成),清晰呈现以美国为全球协作核心枢纽,通过密集连线主导连接欧洲集群与亚太集群,同时巴西、澳大利亚等国家凭借显著彩色区块占据次级枢纽地位。



(a)



(b)



(c)

**Figure 1.** Global contribution and collaboration in spine surgery training research  
**图 1.** 全球各国在脊柱外科医师培训研究方面的贡献及合作图谱

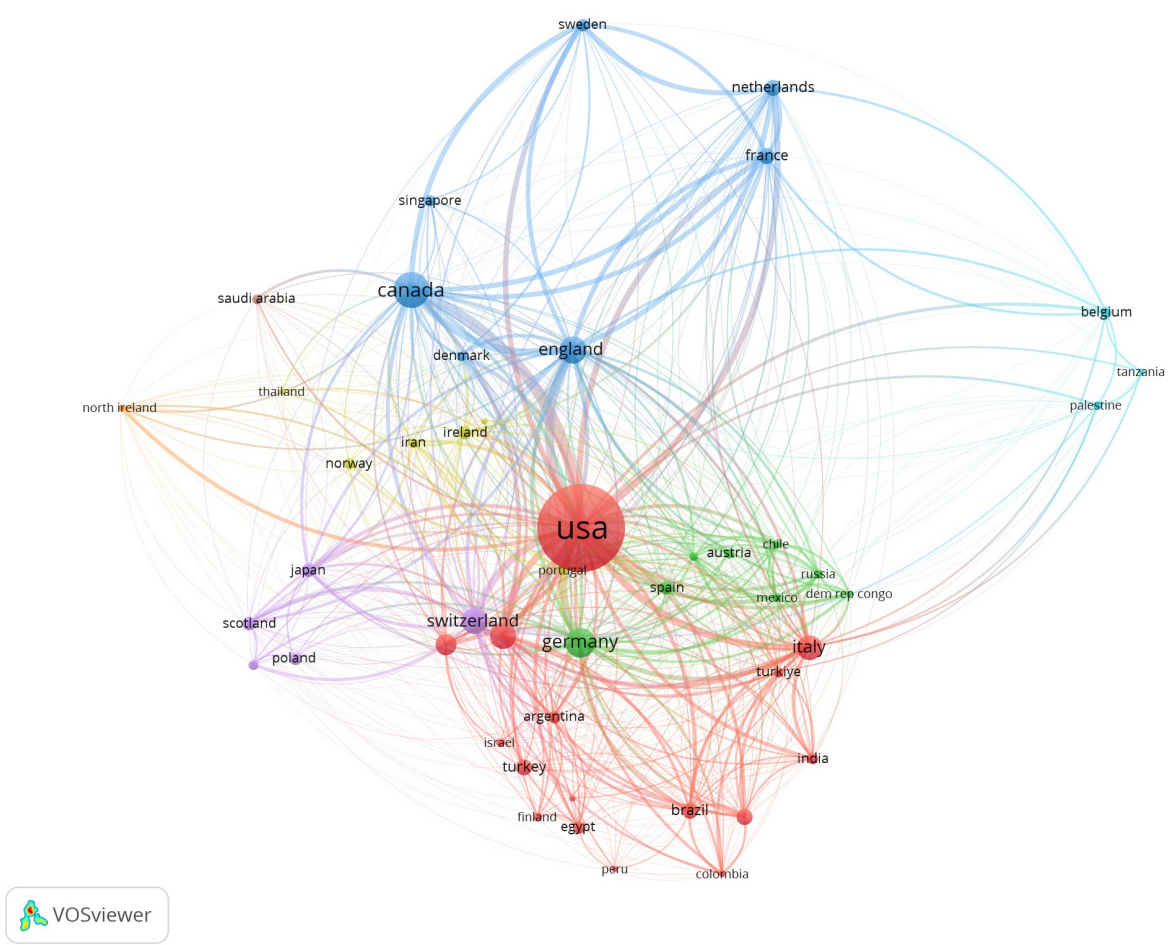
3.2. 机构效能与期刊传播特征

机构效能分析结果(表 2, 图 2)提示日内瓦大学医院以 14 篇文献实现篇均 8.57 次被引, 其第一作者文献平均被引达 19 次, 成为研究质量标杆; 多伦多大学则以 57 篇总文献量彰显规模化优势, 而慕尼黑大学凭借单篇 17 次被引创最高影响力纪录。

**Table 2.** Institutional distribution  
**表 2.** 机构分布

| 机构名                             | 文章总数 | 总被引用次数 | 平均被引次数 | 一作总数 | 一作被引次数 | 一作平均被引 |
|---------------------------------|------|--------|--------|------|--------|--------|
| Univ Hosp Geneva                | 14   | 120    | 8.57   | 1    | 19     | 19.00  |
| Univ Toronto                    | 57   | 112    | 1.96   | 9    | 13     | 1.44   |
| Univ British Columbia           | 19   | 72     | 3.79   | 3    | 14     | 4.67   |
| Univ Calgary                    | 14   | 50     | 3.57   | 2    | 4      | 2.00   |
| Vanderbilt Univ                 | 35   | 47     | 1.34   | 7    | 5      | 0.71   |
| Univ Florida                    | 8    | 41     | 5.13   | 2    | 4      | 2.00   |
| Tech Univ Munich                | 6    | 40     | 6.67   | 1    | 0      | 0.00   |
| Ludwig Maximilians Univ Munchen | 2    | 34     | 17.00  | 1    | 17     | 17.00  |
| Thomas Jefferson Univ           | 24   | 30     | 1.25   | 7    | 8      | 1.14   |
| Ohio State Univ                 | 11   | 29     | 2.64   | 5    | 4      | 0.80   |

本表格通过六项核心指标系统揭示脊柱外科医师培训研究的全球机构表现，其中日内瓦大学医院(Univ Hosp Geneva)以平均被引 8.57 次凸显研究质量领导力，多伦多大学(Univ Toronto)以 57 篇总发文量彰显规模化优势，而慕尼黑大学(Ludwig Maximilians Univ Munchen)单篇 17 次被引创最高影响力纪录；同时，英属哥伦比亚大学(Univ British Columbia)一作平均被引 4.67 次预示新兴创新潜力，范德堡大学(Vanderbilt Univ) 7 篇一作文献体现自主研究主导性，整体反映欧洲机构(如日内瓦)质量领跑与北美机构(如多伦多)数量主导的二元格局。



**Figure 2.** Institutional collaboration network  
**图 2.** 机构合作网络图谱

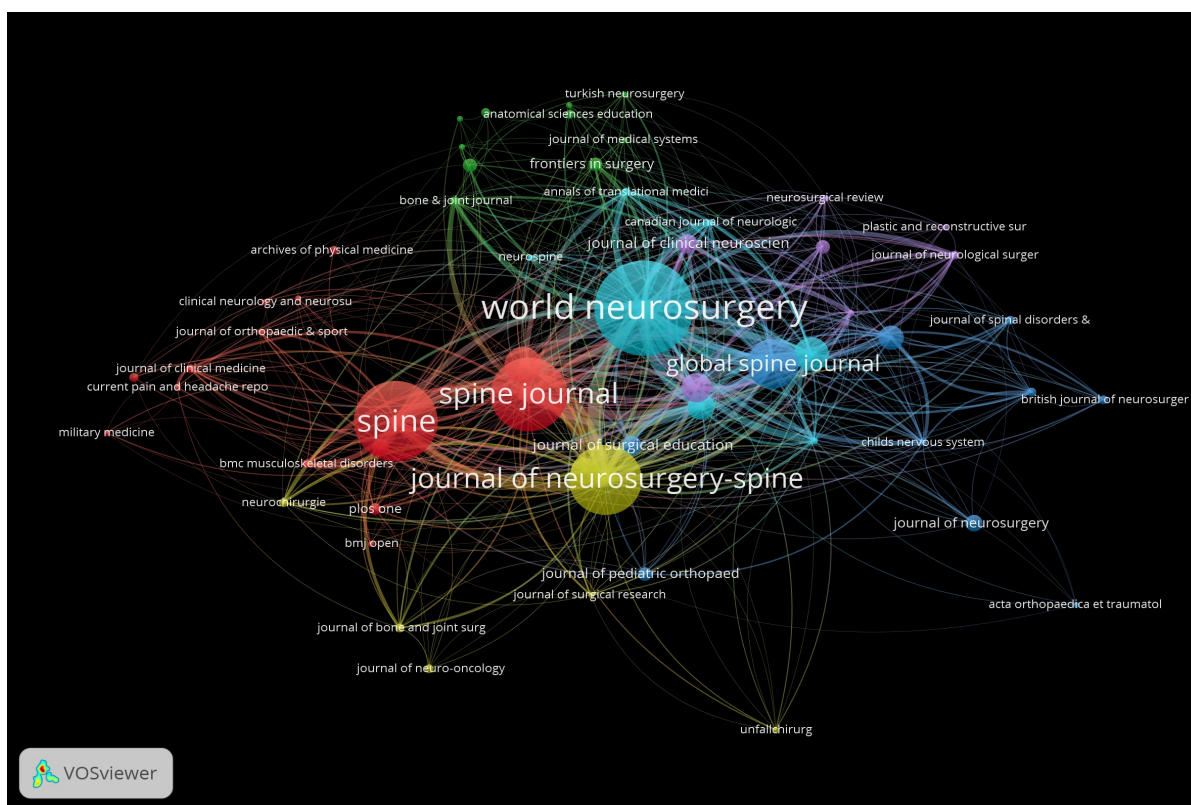
以哈佛大学(最大红色节点)与梅奥诊所(紧邻核心)为全球协作双枢纽，通过密集连线主导连接北美三大集群－美国医疗集团联合体(卡罗莱纳医疗系统、布莱根妇女医院)、加拿大大学群(多伦多大学、麦克马斯特大学、卡尔加里大学形成绿色三角)及专科医疗机构(巴罗神经学研究所、罗斯曼研究所)；同时托马斯杰斐逊大学、哥伦比亚大学等(蓝色节点群)构成跨机构协作桥梁。

期刊影响力分析结果(表 3，图 3)提示《World Neurosurgery》以 41 篇载文量确立领域旗舰地位，与《Spine》(34 篇)、《Spine Journal》(31 篇)共同构成技术研究主阵地。值得注意的是，《Neurosurgery》以篇均 5.67 次被引定义学术深度标准，开放获取期刊《Global Spine Journal》虽载文量 20 篇略低，但其与教育类期刊的共被引关联强度三年激增 300%，标志跨学科融合传播成为新趋势。

表 3. 期刊分布

本表格以载文量、被引频次和平均被引为核心指标，解析脊柱外科医师培训研究的期刊传播效能，其中 WORLD NEUROSURGERY 以 41 篇载文量确立领域旗舰地位，SPINE 和 SPINE JOURNAL 分别以 34 篇和 31 篇载文量构建技术研究主阵地与专科知识枢纽。





(b)

**Figure 3.** Time sequence diagram of periodical co-citation network reveals  
**图 3.** 期刊共被引网络时序图揭示

**图 3(a):** 2018 年后出版的《Global Spine Journal》(暖黄色节点)与教育类期刊连线密度显著增强,表明脊柱专科培训研究近年集中于脊柱手术技术规范(核心集群)与跨学科协作培训(骨科/神经外科延伸集群)两大方向,且开放获取期刊正成为新兴成果传播枢纽。**图 3(b):** 通过节点大小与关联网络清晰揭示,脊柱专科核心期刊《Spine Journal》《Journal of Neurosurgery-Spine》和《World Neurosurgery》(最大节点)构成中央知识枢纽,与《Journal of Surgical Education》(外科教育期刊)及骨科期刊《Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy》存在强共被引关联(粗线直连),同时新兴期刊《Global Spine Journal》(黄色节点)与军事医学期刊《Military Medicine》形成外围热点集群,表明该领域研究以手术技术创新(脊柱/神经外科期刊集群)为根基,正加速向专科医师规范化培训(教育期刊)、战创伤救治(军事医学)及开放科学传播(《PLOS ONE》等综合期刊)三大方向辐射拓展。

### 3.3. 研究主题动态演进路径

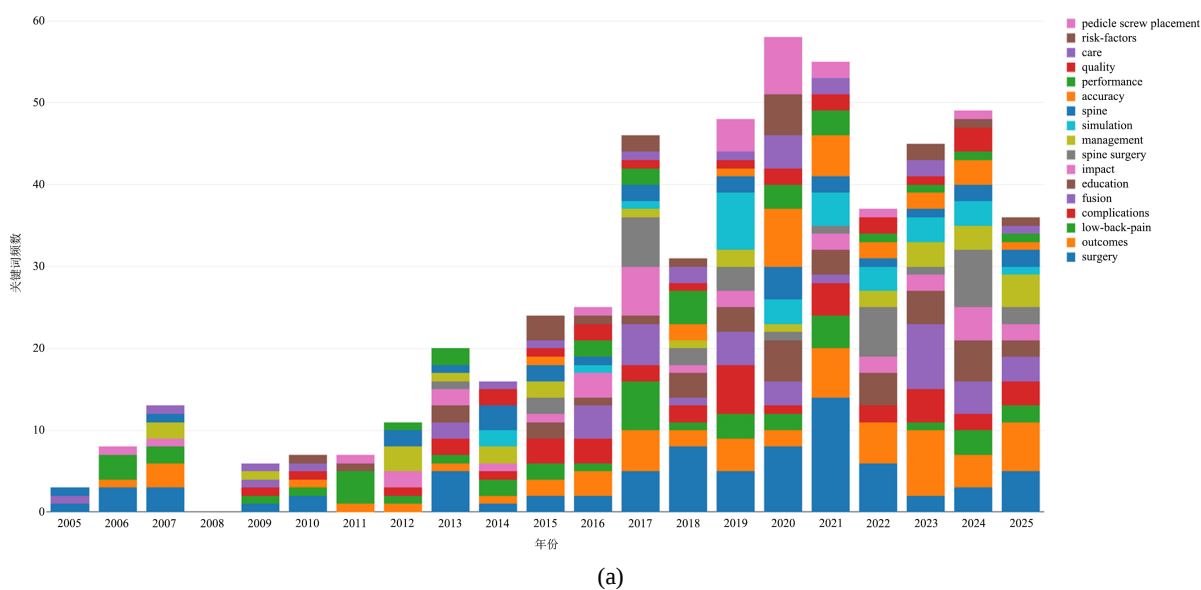
引用爆发强度分析(图 4)和本领域关键词随年变化趋势图(图 5)提示,提示,早期研究(2015 年前)聚焦椎弓根螺钉置入技术优化(爆发强度 5.24)与并发症管理,2018 年起教育类主题呈现爆发性增长——“模拟训练”主题年增速超 40%,至 2025 年教育相关文献占比突破 80%。关键词突现检测揭示三重转向:虚拟/增强现实技术(爆发强度 3.2)推动技能训练革新,人工智能(2023 年强度 3.63)深度融入评估体系,“学习曲线”(强度 3.99)与“风险管控”(强度 3.1)构成临床能力评估双支柱。当前研究已形成“手术技术内核-模拟教育拓展-安全质控延伸”的三维架构,其中患者安全、质量改进与风险因素的强关联聚类标志标准化评估体系趋于成熟。

## Top 11 Keywords with the Strongest Citation Bursts

| Keywords                | Year | Strength | Begin | End  | 2015-2025 |
|-------------------------|------|----------|-------|------|-----------|
| impact                  | 2016 | 3.03     | 2016  | 2017 |           |
| performance             | 2016 | 2.8      | 2016  | 2018 |           |
| discectomy              | 2016 | 2.49     | 2016  | 2017 |           |
| pedicle screw placement | 2019 | 5.24     | 2019  | 2020 |           |
| virtual reality         | 2018 | 2.77     | 2021  | 2025 |           |
| augmented reality       | 2020 | 3.2      | 2022  | 2025 |           |
| spondylotic myelopathy  | 2022 | 3.03     | 2022  | 2023 |           |
| learning curve          | 2023 | 3.99     | 2023  | 2025 |           |
| artificial intelligence | 2023 | 3.63     | 2023  | 2025 |           |
| risk                    | 2023 | 3.1      | 2023  | 2025 |           |
| pain                    | 2023 | 2.53     | 2023  | 2025 |           |

**Figure 4.** A chart of the 11 keywords with the highest citation burst strength (generated by CiteSpace) reveals the evolution of research hotspots in spine surgery training: Early bursts (2016~2017) focused on surgical technical metrics (“impact” strength 3.03, “performance” strength 2.8, “discectomy” strength 2.49). The mid-phase (2019~2020) centered on precision surgery themes (“pedicle screw placement” with the highest burst strength of 5.24). Post-2021, burst clusters exhibited a triple shift: Technology Enablement: Virtual/augmented reality (VR/AR strength 2.77~3.2) and artificial intelligence (AI strength 3.63 in 2023). Training Quality Assessment: “learning curve” (strength 3.99) and “risk/pain” (strength 3.1/2.53), marking a new focus on clinical training quality evaluation. This progression outlines a three-stage evolution in the field: from technology-centric → intelligent assistance → safety and quality control

**图 4.** 引用爆发强度最高的 11 个关键词的图表(CiteSpace 生成)揭示了脊柱外科医师培训研究的热点演进轨迹：早期爆发点(2016~2017 年)聚焦手术技术指标(“impact”强度 3.03、“performance”强度 2.8、“discectomy”强度 2.49)，中期(2019~2020 年)集中于精准手术主题(“pedicle screw placement”以 5.24 强度成最强爆发点)，而 2021 年后爆发集群呈现三重转向——虚拟/增强现实(VR/AR 强度 2.77~3.2)、人工智能(2023 年 AI 强度 3.63)构成技术赋能主线，“learning curve”(强度 3.99)与“risk/pain”(强度 3.1/2.53)则标志临床培训质量评估成为新焦点，完整勾勒出该领域从技术本位→智能辅助→安全质控的三级演进路径



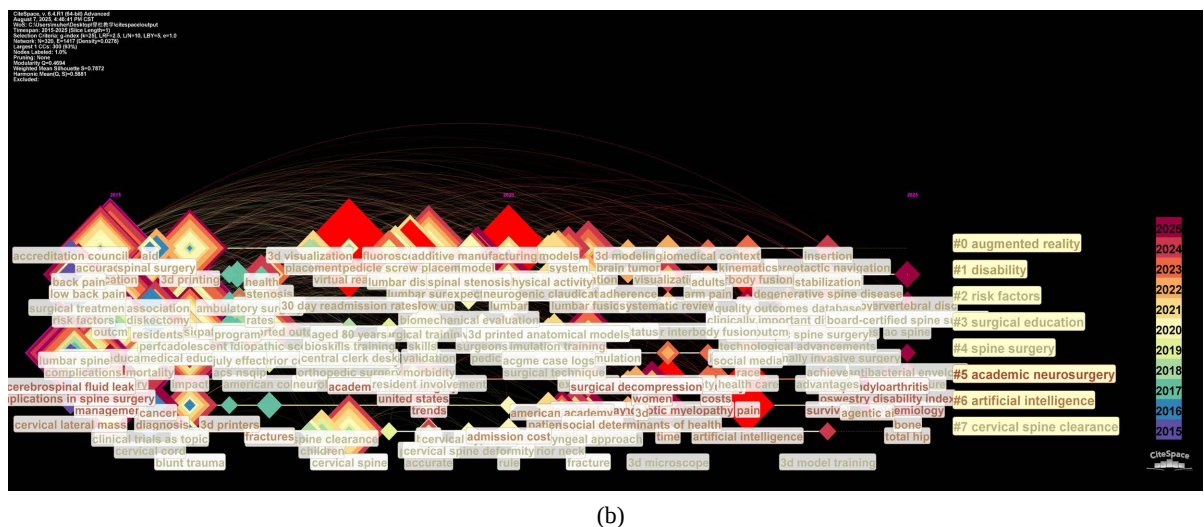


Figure 5. Evolution of research focus in the field  
图 5. 本领域关键词随便变化趋势

图 5(a): 该脊柱外科医师培训研究的主题演化堆叠柱状图(2005~2025 年)揭示: 研究总量逐年攀升(2025 年峰值达 60 篇), 早期焦点集中于“椎弓根螺钉置入”(粉色区块)、“并发症”(浅棕)等手术技术主题(2015 年前主导), 2018 年起教育类主题爆发性增长——“模拟训练”(深紫)、“教育”(青绿)及“质量管理”(深蓝)三层级持续增厚, 至 2025 年占据柱体 80% 以上(“教育”单项贡献超 40 篇), 同时“患者管理”(橙色)与“手术效果”(红)形成稳定支撑层, 标志该领域从技术本位转向以模拟教学、临床能力评估为核心的规范化培训体系构建。图 5(b): 基于 CiteSpace 软件生成的文献计量时间线图谱(2015~2025), 直观呈现脊柱外科医师培训领域研究主题的历时性演进。核心节点揭示三大转型阶段: 技术主导期(2015~2017)聚焦椎弓根螺钉置入(粉色集群)与手术并发症控制; 教育革新期(2018~2021)由虚拟现实模拟训练(深紫)及 3D 解剖重建(蓝绿)驱动; 智能评估爆发期(2022~2025)以人工智能辅助学习曲线分析(亮红)、AR 导航精准度优化(橙黄)为标志。节点间密集连线证实患者安全质控与技术赋能教育形成跨阶段强关联(粗实线), 而自主训练系统(2023 年新生节点)正快速连通传统技能模块与智能评估体系。

## 4. 讨论

### 4.1. 技术革新重构脊柱外科教育范式

生物模拟模型与混合现实(MR)技术的融合正在颠覆传统培训模式。Tan 团队开发的 3D 打印脊柱模型通过精准调控壳层厚度和内部密度梯度, 成功模拟真实组织的放射学特性, 椎弓根螺钉置入误差率仅 5.8% [6]。这种低成本的生物模型解决了传统训练的伦理与供给限制。与此同时, MR 技术实现了解剖结构全息叠加与实时导航, Burkhardt 团队应用 Hololens2 完成复杂脊柱畸形截骨规划, 使手术时间缩短 42% [7]。值得注意的是, 期刊共被引网络分析显示《Global Spine Journal》与《Journal of Surgical Education》的关联强度三年增长 300%, 标志开放获取期刊正成为跨学科教育枢纽。技术迭代不仅提升技能训练效率, 更催生了“模拟-导航-实操”三位一体的新型教学架构。

### 4.2. 全球研究格局的重构与协作机制演变

脊柱外科研究呈现“北美主导-欧洲精品-亚洲崛起”的三级梯队结构。美国以 286 篇文献量(65% 全球占比)和 7404 次被引维持学术霸权, 瑞士则以单篇 106.9 次被引的学术溢价定义精品研究范式。中国

虽以 26 篇文献量暂居第三梯队, 但 414 次总被引量(篇均 15.9 次)显示质量快速提升。

2020 年后跨国协作呈现爆发式增长, 形成“平台型堆叠”合作模式。这种多国联合发文机制打破欧美垄断, 但韩国等地区仍存在“研究渗透力 - 影响力转化悖论”(文献量 10 篇, 被引仅 100 次)。根本矛盾在于新兴国家缺乏标准数据集与验证平台, 建议建立全球脊柱手术并发症注册库(如采用 Blockchain 分布式存储), 通过数据共享弥合技术鸿沟。

### 4.3. 能力本位评估体系的技术赋能路径

NASA 任务负荷指数(TLX)的引入使技能评估从经验判断转向量化分析。Lowndes 将航天领域量表改造为脊柱手术评估工具, 发现受训者脑力需求下降 38% ( $p < 0.01$ ), 操作挫败感降低 52% [8]。日内瓦大学医院据此构建三级评估框架, 该体系使住院医师首次独立手术达标率达 91% [9]。AI 算法正重塑评估维度, 可自动识别器械轨迹偏移并预警神经损伤风险。但技术依赖也暴露新隐患: 日内瓦团队发现使用 AR 导航的医师在设备故障时决策错误率增加 3.7 倍, 这要求保留传统解剖培训模块以维持基础技能韧性 [10]。

### 4.4. 伦理平衡与未来技术生态构建

成本 - 效益悖论成为技术普及的核心障碍。高端 VR 设备单套成本过高, 仅少量发展中国家机构可负担。建议推广“低技术 - 高效益”解决方案: 开发的压阻传感神经监测模型, 通过碳纳米管 - 硅胶复合体模拟神经电传导特性, 实现术中神经损伤预警。

未来需构建三层技术生态: 底层开发可降解生物模型(如明胶 - 纤维素复合体), 中层建立 MR 技术认证标准(参考 FAA 航空模拟器分级), 顶层推动全球手术数据库互联。巴西案例证明新兴市场具有爆发潜力, 其 2025 年研究量增长 700% 源于政府 - 企业 - 医院的三方投资模式(人均研发投入 48 vs 北美 312), 这种“杠杆式创新”值得全球借鉴。

## 5. 结论

脊柱外科教育正处于“技术驱动 - 全球重构 - 评估革新”的三元变革中, 但需警惕技术鸿沟扩大及基础技能弱化风险。未来应当建立包容性技术生态, 将巴西等新兴地区的爆发式增长转化为可持续创新动力, 最终实现“精准化培训 - 标准化评估 - 全球化协作”的理想范式。

## 参考文献

- [1] Gelalis, I.D., Paschos, N.K., Pakos, E.E., Politis, A.N., Arnaoutoglou, C.M., Karageorgos, A.C., *et al.* (2012) Accuracy of Pedicle Screw Placement: A Systematic Review of Prospective *in Vivo* Studies Comparing Free Hand, Fluoroscopy Guidance and Navigation Techniques. *European Spine Journal*, **21**, 247-255. <https://doi.org/10.1007/s00586-011-2011-3>
- [2] Smith, J.S., Lafage, V., Shaffrey, C.I., Schwab, F., Lafage, R., Hostin, R., *et al.* (2016) Outcomes of Operative and Nonoperative Treatment for Adult Spinal Deformity: A Prospective, Multicenter, Propensity-Matched Cohort Assessment with Minimum 2-Year Follow-Up. *Neurosurgery*, **78**, 851-861. <https://doi.org/10.1227/neu.0000000000001116>
- [3] Bohl, M.A., Mooney, M.A., Repp, G.J., *et al.* (2018) The Barrow Biomimetic Spine: Fluoroscopic Analysis of a Synthetic Spine Model Made of Variable 3D-Printed Materials and Print Parameters. *Spine*, **43**, E1368-E1375.
- [4] Satin, A.M. and Lieberman, I.H. (2021) The Virtual Spine Examination: Telemedicine in the Era of COVID-19 and beyond. *Global Spine Journal*, **11**, 966-974. <https://doi.org/10.1177/2192568220947744>
- [5] Menezes, C.M., Tucci, C., Tamai, K., Chhabra, H.S., Alhelal, F.H., Bussi eres, A.E., *et al.* (2025) SPINE20 Recommendations 2024 Spinal Disability: Social Inclusion as a Key to Prevention and Management. *Global Spine Journal*, **15**, 8-20. <https://doi.org/10.1177/21925682241290226>
- [6] Tan, L.A., Yerneni, K., Tuchman, A., Li, X.J., Cerpa, M., Lehman Jr, R.A., *et al.* (2018) Utilization of the 3d-Printed Spine Model for Freehand Pedicle Screw Placement in Complex Spinal Deformity Correction. *Journal of Spine Surgery*,

- 4, 319-327. <https://doi.org/10.21037/jss.2018.05.16>
- [7] Burkhardt, F., Hermann, J., Shivadathathri, S., Semakula, J.P., Sekar, S.D. and Meixner, G. (2025) Integrating Artificial Intelligence into Mixed Reality for Back Detection and Virtual 3D Spine Visualization on Scoliosis Patients. In: *Studies in Health Technology and Informatics*, IOS Press, 906-910. <https://doi.org/10.3233/shti250971>
- [8] Lowndes, B.R., Forsyth, K.L., Blocker, R.C., Dean, P.G., Truty, M.J., Heller, S.F., *et al.* (2020) NASA-TLX Assessment of Surgeon Workload Variation across Specialties. *Annals of Surgery*, **271**, 686-692. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000003058>
- [9] Molliqaj, G., Paun, L., Nouri, A., Girod, P., Schaller, K. and Tessitore, E. (2020) Role of Robotics in Improving Surgical Outcome in Spinal Pathologies. *World Neurosurgery*, **140**, 664-673. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.05.132>
- [10] Jeong, S. and Lee, B.J. (2025) Advancing Spine Fracture Detection: The Role of Artificial Intelligence in Clinical Practice. *Korean Journal of Neurotrauma*, **21**, 172-182. <https://doi.org/10.13004/kjnt.2025.21.e22>