

·论著·

脑机接口技术运用于脊髓损伤康复领域的可视化分析

王彬¹, 吴炼铎¹, 刘小平¹, 周娅², 王大明³, 胡东霞¹

作者单位

1. 南昌大学第二附属医院康复医学科

南昌 330000

2. 昆明医科大学康复学院

昆明 650000

3. 浙江大学医学院附属第一医院

杭州 310000

基金项目

江西省工信厅优势创新团队项目

(No. G/Y2738);

江西省中医药管

理局科技计划项

目(No. 2021Z01

8, No. 2023B082

4); 江西省卫生

健康委员会科技

计划项目(No. 2

0171BBG70016)

收稿日期

2023-08-21

通讯作者

胡东霞

hudongxia5489

@sina.com

摘要 目的:对脑机接口技术(BCI)运用于脊髓损伤(SCI)康复领域相关文献的研究现状、热点和发展趋势进行可视化分析。**方法**:检索从建库至2023年7月30日Web of Science核心合集数据库中BCI技术运用于SCI领域的相关文献,采用CiteSpace 6.1.R6和Microsoft Excel 2023软件对数据进行可视化分析。**结果**:最终文献计量分析纳入400篇文献,其中期刊类论文310篇,综述类90篇。过去二十年该领域文献的年发文量呈现快速增长趋势。发文量最多的国家、作者和机构分别是美国、Collinger Jennifer L、Graz University Technology,共被引次数最高的期刊是J Neural Eng。以“functional electrical stimulation”、“movement”、“motor imagery”等频次较高的关键词为代表形成15个主要聚类 and 前16个爆发力最强的突显词,其中“restoration”、“interface”、“walking”、“gait”等从2018年开始持续至今,未来可能是研究趋势。**结论**:BCI技术运用于SCI康复领域研究热度持续增加,目前疗效上主要集中于对SCI导致四肢瘫患者上肢运动 and 手抓握功能的恢复;中枢机制上是诱导SCI后神经可塑性。未来的研究趋势和热点是探究BCI技术在改善SCI患者下肢步行或步态功能的康复效果及其疗效机制。

关键词 脑机接口;脊髓损伤;康复;可视化分析**中图分类号** R741;R744 **文献标识码** A **DOI** 10.16780/j.cnki.sjssgncj.20230557**本文引用格式**:王彬, 吴炼铎, 刘小平, 周娅, 王大明, 胡东霞. 脑机接口技术运用于脊髓损伤康复领域的可视化分析[J]. 神经损伤与功能重建, 2024, 19(7): 402-407.

Brain-Computer Interface Technology in Spinal Cord Injury Rehabilitation: A Bibliometric and Visualization Analysis WANG Bin¹, WU Lianhua¹, LIU Xiaoping¹, ZHOU Ya², WANG Daming³, HU Dongxia¹. 1. Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330000, China; 2. College of Rehabilitation, Kunming Medical University, Kunming 650000, China; 3. Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310000, China

Abstract Objective: To conduct a visualization analysis of the research status, hotspots, and development trends of brain-computer interface (BCI) technology in the rehabilitation of spinal cord injury (SCI) patients. **Methods:** Relevant literature about BCI technology applications in SCI was retrieved from the Web of Science Core Collection database from its inception to July 30, 2023. The data were subjected to bibliometric analysis using CiteSpace 6.1.R6 and Microsoft Excel 2023 software. **Results:** A total of 400 articles were included in the bibliometric analysis, including 310 journal articles and 90 reviews. The annual publication of literature in this field has shown an increasing trend over the past two decades. The most productive country, author and institution is the United States, Collinger Jennifer L, and Graz University Technology, respectively. The journal with the highest citation is J Neural Eng. High-frequency keywords such as "functional electrical stimulation", "movement" and "motor imagery" were identified, leading to 15 major clusters and 16 prominent burst terms. Notably, terms like "restoration", "interface", "walking", and "gait" have been continuously prominent since 2018, indicating potential future research trends. **Conclusion:** The application of BCI technology in SCI rehabilitation continues to increase in research popularity. The current efficacy mainly focuses on the recovery of upper limb movement and hand grip function in quadriplegia patients caused by SCI, with the central mechanism focusing on inducing neuroplasticity after SCI. Future research trends and hotspots are likely to explore the rehabilitation efficacy and underlying mechanisms of BCI technology in improving the walking or gait function of lower limbs in patients with SCI.

Keywords brain-computer interface; spinal cord injury; rehabilitation; visualization analysis

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)可由高强度损伤引起,如交通事故、坠落伤和暴力,也可由感染、肿瘤、脊柱退行性疾病等原因引起,导致损伤平面以下功能暂时或永久性改变^[1,2]。该病发病率、费用、致残率均较

高^[3]。严重SCI会给患者及其家人带来重大的身体、心理和经济负担。而促进SCI患者功能的恢复以最大限度地提高患者独立性,一直是SCI康复研究的焦点^[4]。近年来,越来越多新兴智能康复技术运用于此领域,神经

科学和工程技术结合的快速发展并不断创新,为SCI患者康复提供了更先进、便捷的手段,如脑机接口(brain-computer interface, BCI)等^[5]。BCI是一种绕过脊髓中继站,直接通过脑电使患者能够在不受周围神经和肌肉影响的情况下与外周环境进行交互,达到控制肢体运动的目的^[6]。该技术不仅可使SCI等神经功能受损患者重新获得肢体的控制能力,还能建立主动闭环刺激反馈,实现运动功能重建^[7]。当前BCI技术用于SCI康复领域已逐渐走向临床,但目前仍然缺乏对该领域文献的科学计量分析。

CiteSpace是基于寻路网络算法和共引分析理论,以呈现科学文献中包含潜在知识、规则和分布的一款多元、分时、动态的引文可视化分析软件^[8]。它帮助研究人员探索某一研究领域的知识基础、研究热点和前沿^[9]。前期有研究表明CiteSpace已经成为文献计量学领域比较有影响力的分析软件^[10,11]。

为了全面了解BCI技术用于SCI康复研究的现状和热点,并探讨未来发展趋势,本研究采用CiteSpace软件对Web of Science数据库中BCI技术用于SCI康复相关文献进行可视化分析,希望文献计量研究结果可以帮助研究人员快速了解,以便为今后该领域的深入研究提供基础。

1 资料和方法

1.1 文献检索

针对Web of Science核心合集数据库进行主题词检索。文献类型: Article 和 Review。检索语言: English。检索时间为建库至2023年7月30日。检索式: ("brain-machine interface") OR ("brain-machine interfaces") OR ("brain-computer interface") OR ("brain-computer interfaces") OR ("brain-computer interaction") OR ("brain interface") OR ("brain-computer interface therapy") OR ("brain computer interface") AND ("spinal cord injury") OR ("spinal cord injuries") OR ("spinal cord injured") OR ("spinal injury ") OR ("spinal cord injure") OR ("cervical spinal cord injury") OR ("spinal injuries ") OR ("spinal shock") OR ("spine trauma")。

1.2 方法

将在Web of Science核心合集数据库检索到的文献以纯文本.txt格式导出,并以“download_XXX”命名。下载的文件被重命名为download_1.txt和download_2.txt。运行CiteSpace、导入文本文件、删除

重复项等^[12],筛选出400个有效文献。进行项目(Project)创建,参数设置。时间段为2000年1月至2023年7月30日,时间节点设置为1年;节点类型包括:作者、国家/地区、机构、共被引文献和期刊、参考文献以及关键词。这些节点产生了作者合作网络、世界各国/地区合作网络、机构合作网络、共被引文献和期刊以及关键词共现、聚类 and 突现知识图谱。选择标准定义如下: top N = 50;网络裁剪过程如下: 寻经路径(pathfinder), 时间切片网络剪切(pruning sliced networks), 整体网络剪切(pruning the merged network),得到清晰突出的网络图^[13,14]。

2 结果

2.1 发文量

2000~2023年,BCI技术运用于SCI康复领域发文量呈上升趋势,从建库至2000年末检索到BCI技术运用于SCI的相关文献,而从2011年开始每年发文量不低于10篇,在2021年发文量高达46篇。经检索和去重,最终共纳入400篇相关文献,其中期刊类论文310篇,综述类90篇。该领域的年发文量呈现快速增长趋势,见图1。

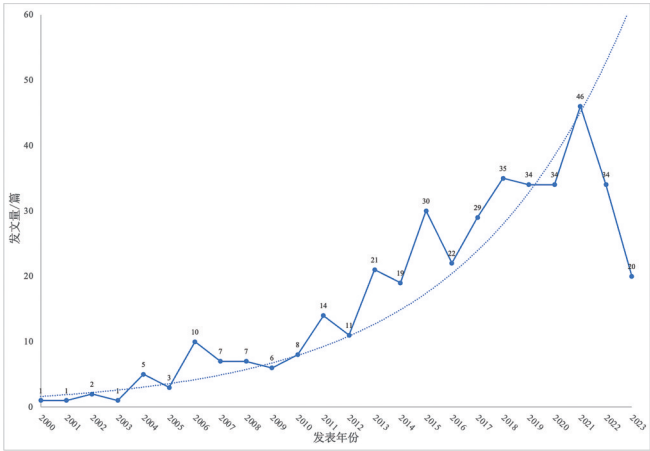


图1 BCI技术运用于SCI康复领域年发文量趋势

2.2 作者

选择“Author”为节点运行CiteSpace,作者共现见图2,节点数N = 534,连线数E = 1 056。共有534名作者,其中发文量≥5篇的作者有12名,发文量前5位的作者依次为Collinger Jennifer L(14篇)、Mueller-putz Gernot R(11篇)、Marquez-chin Cesar(8篇)、Boninger Michael L(8篇)、Vuckovic Aleksandra(7篇),最为突出的研究者Collinger Jennifer L来自美国宾夕法尼亚州匹兹堡大学物理医学与康复系,其主要的研究方向为运用神经康复技术以促进上肢瘫痪患者肢体功能的恢复^[15,16]。

“Cited Author”为节点运行 CiteSpace,节点数 N = 473,连线数 E = 2 942。发现排名前 5 位的共被引作者依次为 Pfurtscheller G (154 次)、Hochberg Leigh R (151 次)、Wolpaw Jonathan R (147 次)、Collinger Jennifer L (120 次)、Birbaumer N (87 次)。

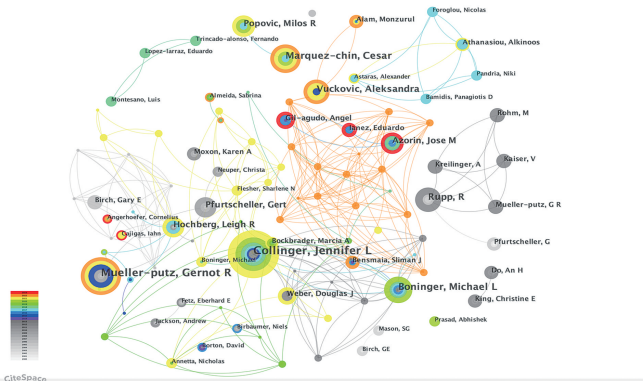


图2 作者共现图

2.3 机构

节点选择“Institution”分析,得到节点数 N = 265,连线数 E=417的图谱,见图3。经分析,近二十年以国外机构发文量居多,绝大多数发文机构主要集中于美国,说明美国在该领域处于领先地位,但中心性均不高。而国内相关机构在发文量和中心性方面排名靠后,因此需要加大国内相关机构平台对该领域的投入,加强与高发文量机构的合作和交流,促进该领域的临床实践和推广,并提升我国在该领域的影响力。

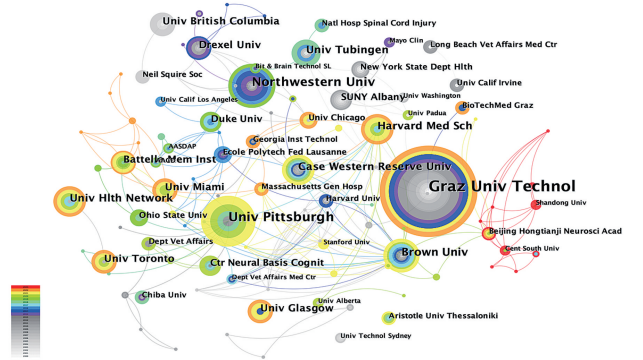


图3 机构共现图

2.4 国家/地区

选择“Country”节点运行 CiteSpace,得到节点数 N=45,连线数 E=194 的图谱,见图4。美国(172篇)、德国(53篇)、澳大利亚(41篇)、中国(38篇)和加拿大(37篇)发文量排名前 5。中心性排名前 5 依次为英国(0.34)、德国(0.30)、美国(0.27)、意大利(0.23)和中国(0.17)。美国在发文量和中心性方面均排名靠前,表明其在该领域中较高的影响力,并在其中发挥重要作用。

近二十年,我国的发文量和中心性虽然排名靠前,但仍需加大与其他该领域领先国家/地区的合作。



图4 国家/地区共现图

2.5 共被引

2.5.1 共被引文献 选择“Reference”节点运行 CiteSpace,被引频次和中心性排名前 5 位的文献分别见表4和表5。其中,Hochberg Leigh R 及其研究团队^[24,25]在该领域表文献的被引频次和中心性均排名靠前。

2.5.2 共被引期刊 选择“Cited Journal”节点进行分析,得到高被引频次排名前 5 的期刊,见表6。说明以上期刊在 BCI 技术运用于 SCI 康复领域具有较高的影响力,也有为该领域研究提供重要信息,未来该领域的最新研究热点和发展成果很大可能会继续在以上期刊报道。

2.6 关键词

2.6.1 关键词共现 关键词反映文献主题内容的浓缩和提炼,比较能代表文章的主题思想^[17]。研究者通常使用频次较高的关键词来反映研究领域的热点问题^[18]。以“Keyword”为节点进行分析,选择“Pathfinder”、“Pruning sliced networks”和“Pruning the merged network”裁剪方式,去除与检索策略相关的主题词,形成由 122 个节点、425 条连线组成的关键词共现图谱,见图5。

2.6.2 关键词聚类分析 在关键词共现基础上,通过 CiteSpace 对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)算法对关键词进行聚类分析,共形成 15 个聚类标签,见图6。每个色块代表了 1 个聚类,色块范围内的节点均属于该聚类。ModalityQ=0.7159,聚类结构较为显著且聚类效果较好;Mean Silhouette=0.884,表明聚类间同质性较好。

2.6.3 关键词突现分析 在关键词聚类基础上进行突现分析能发现突增的研究热点,观察到该研究热点持续的年份,在一定程度上能探测某一科学领域的发展

表4 共被引文献频次排名前5的文献

排名	文章标题	年份	频次	第一作者
1	Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: a proof-of-concept demonstration	2017	53	Ajiboye AB
2	Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia	2016	51	Bouton CE
3	Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm	2012	51	Hochberg LR
4	High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia	2013	49	Collinger JL
5	Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients	2016	37	Donati ARC

表5 共被引文献中心性排名前5的文献

排名	文章标题	年份	中心性	第一作者
1	Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia	2006	0.66	Hochberg LR
2	Restoration of grasp following paralysis through brain-controlled stimulation of muscles	2012	0.44	Ethier C
3	Toward the restoration of hand use to a paralyzed monkey: brain-controlled functional electrical stimulation of forearm muscles	2009	0.31	Pohlmeier EA
4	Instant neural control of a movement signal	2002	0.28	Serruya MD
5	Direct control of paralysed muscles by cortical neurons	2008	0.27	Moritz CT

表6 BCI技术运用SCI康复领域的主要共被引期刊(前5位)

排名	期刊	国家/地区	频次	中心性
1	J Neural Eng	英国	280	0.03
2	IEEE T Neur Sys Reh	美国	270	0.01
3	Nature	英国	235	0.04
4	IEEE T Bio-Med Eng	美国	226	0.01
5	Clin Neurophysiol	英国	207	0.01

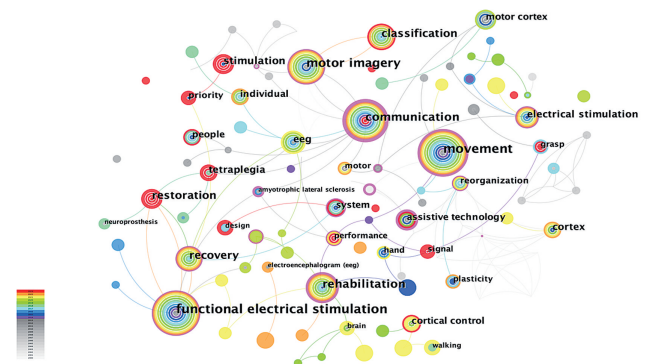


图5 关键词共现分析图

趋势^[19]。对关键词进行突显分析,共得到16个突显词,见图7。“restoration”、“interface”、“walking”、“gait”等从2018年开始持续至今,未来可能仍是研究趋势。

3 讨论

一个领域相关论文数量的年度变化清晰地展示了该领域学术产出的发展现状和研究趋势^[20]。本研究通过Web of science核心数据库对BCI治疗SCI的相关文献进行可视化分析,发现该技术最早与该领域相关的

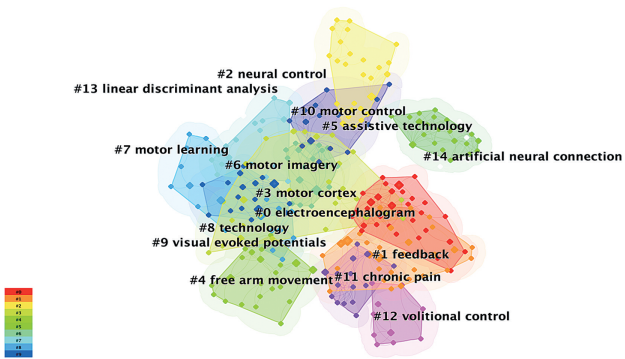


图6 关键词聚类分析图

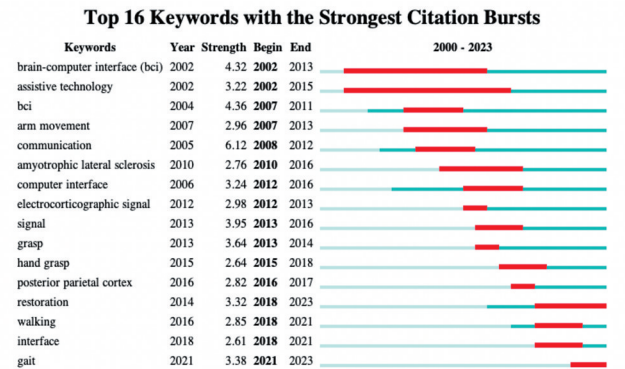


图7 关键词突显分析图

研究可以追溯到上世纪90年代。早在20世纪70年代,BCI技术开始真正成形。2005年,有研究报道美国Cyberkinetics公司开发的实验性BCI可用于治疗四肢瘫痪患者,并在其身上展示了通过意念移动电脑光标以完成阅读、开灯和换电视频道等任务^[21]。此外,BCI运用于SCI康复领域近二十年的发文量也呈快速增长趋

势,说明该领域的研究热度持续增加。鉴于BCI技术运用于SCI患者的疗效和机制等问题仍在不断的探究中,预测未来该领域的发文量将持续高速增加。

在发文作者中,Collinger Jennifer L影响力较高,其科研团队在该领域成果显著,并为SCI患者康复做出重要贡献。此外,其近几年致力于为四肢瘫患者开发皮质内BCI技术。2021年,该作者^[23]选用开发的双向BCI微刺激因SCI导致四肢截患者皮质以创建人工触觉反馈,可极大地提高四肢瘫患者用大脑控制机器人肢体操纵物体的能力。我国专家近十年在该领域不断探索和开拓,目前也到达了该领域研究的最前沿。Zheng等^[23]在纳入7例SCI患者的研究中,发现给予患者带有下肢机器人BCI系统的短期训练,能安全且有效地提高患者下肢关键肌肌力。但在发文量排名靠前的作者中中国学者尚缺乏,说明我国在该领域的研究投入和影响力尚不足。因此,在该领域的研究我国仍需加强。

从国家/地区和机构分布来看,欧美等发达国家在BCI治疗SCI领域贡献的论文数量最多,中国位居第四。从机构层面,发文机构主要集中在美国,但各机构间在该领域的合作交流却相对较低。总体来看,美国在这一领域占据主导地位,其在发文量、引用次数和发文机构等方面排名均靠前。这一成功可能得益于其神经科学和人工智能研究的有利条件,包括拥有先进设备、充足资金和大量专业研究人员等。而我国在该领域的科研实力还有待进一步提升,需要加强与上述具有高影响力的国家和相应机构的交流合作。

本研究通过对关键词进行共现、聚类及突现分析,可以揭示新兴趋势并为未来研究提供方向^[24]。通过对BCI技术用于SCI康复领域的关键词图谱分析,发现该领域近十几年来的研究内容主要集中于对肢体运动功能恢复的疗效和疗效机制。从疗效方面,该领域的研究热点主要集中于对SCI患者的上肢运动和手抓握功能的康复^[25]。Hochberg等^[26]给予2例慢性四肢瘫患者使用基于BCI的机械臂来控制 and 执行3D拉伸和抓握动作,他们的研究结果显示患者无需训练即可在较大的空间内控制手臂,甚至其中一人可使用机械臂喝咖啡。Benabid等^[27]通过对四肢瘫患者使用硬膜外无线BCI控制的外骨骼系统,让患者能通过控制皮质程序以执行上肢不同的拉伸和手的触摸活动。BCI与功能性电刺激(functional electrical stimulation,FES)相结合可通过FES激活瘫痪的肌肉,将电刺激信息直接传输到周围神经和肌肉组织以引起收缩,达到完成身体运

动的目的^[28]。Ajiboye等^[29]的一项临床研究表明,BCI结合FES可成功控制单关节和多关节手臂的协调运动,实现点对点目标捕获,并恢复SCI后四肢瘫患者的上肢关节伸展和手抓握能力。从疗效机制方面,该领域的研究热点主要集中于BCI通过刺激大脑皮质(肢体感觉运动区),可以诱导SCI后神经可塑性,刺激损伤和残存轴突再生,增强剩余神经网络功能连接并促进新自发神经回路的形成和兴奋性,从而改善或恢复因SCI导致的肢体运动功能障碍^[30]。为增强SCI后运动功能的恢复,目前越来越多的研究是通过选用联合治疗的策略以恢复患者运动功能和部分感觉功能,如与视觉触觉反馈、运动训练以及FES等手段的结合^[31]。

此外,在关键词聚类和突现图中亦出现BCI与下肢步行或步态应用紧密相关的关键词,查阅相关研究发现,其研究内容主要集中于改善SCI后导致下肢运动功能障碍,进而改善患者的步行功能^[32,33]。Lorach等^[34]发现通过对慢性四肢瘫患者植入脑-脊髓接口(brain-spine interface,BSI)能使患者自然站立、行走、爬楼梯,甚至越过复杂的地形,实现了对腿部活动的自然控制。即使将BSI关闭,患者也恢复了拄拐行走的能力。这为因SCI而导致瘫痪的患者恢复站立和步行功能提供可靠依据。未来BCI技术运用于SCI后下肢运动功能恢复的临床应用,可能会成为该领域研究的另一个热点。目前,BCI用于SCI康复领域发展迅速,但促进瘫痪肢体运动功能的恢复有待深入研究。虽然我国在该领域起步晚,与发达国家尚有一定差距,但近十年也取得一定进展,未来需加大资金的投入和科技技术的研发,加大与欧美等发达国家或地区间交流合作,进一步加强智能化BCI康复平台建设和临床的投入使用。

本研究存在一定的缺陷。首先,本研究采用CiteSpace作为分析工具,由于软件本身的原因,一些细微数据可能会有偏差,网络知识图谱的解释标准可能存在不完全统一,这也会对数据分析结果产生一定影响。其次,仅对Web of Science数据库的文献进行分析,部分发表于其他数据库的文献未能被统计分析,也可能导致分析结果偏倚。

本研究运用CiteSpace软件首次对BCI用于SCI康复领域的相关文献进行文献计量分析,提出了该领域的新见解。美国在该领域的研究做出了较多贡献,其中个人贡献数量较多的是Collinger Jennifer L教授,该领域研究最多的机构是Graz University Technolog。此外,目前该领域的研究热点是集中于讨论对SCI导致四肢

瘫患者上肢运动和手抓握功能的恢复以及SCI后神经可塑性的影响。未来的研究趋势是进一步探讨BCI对SCI患者下肢步行或步态功能的恢复及其可能的疗效机制,为该领域未来的发展方向提供了一定参考。

参考文献

- [1] Müller-Jensen L, Ploner CJ, Kroneberg D, et al. Clinical Presentation and Causes of Non-traumatic Spinal Cord Injury: An Observational Study in Emergency Patients[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 1-12.
- [2] Hu X, Xu W, Ren Y, et al. Spinal cord injury: molecular mechanisms and therapeutic interventions[J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2023, 8: 245.
- [3] Spinal Cord Injury (SCI) 2016. Facts and Figures at a Glance[J]. *J Spinal Cord Med*, 2016, 39: 493-494.
- [4] Cajigas I, Vedantam A. Brain-Computer Interface, Neuromodulation, and Neurorehabilitation Strategies for Spinal Cord Injury[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2021, 32: 407-417.
- [5] Cervera MA, Soekadar SR, Ushiba J, et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis[J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2018, 5: 651-663.
- [6] Ganzer PD, Colachis SC, Schwemmer MA, et al. Restoring the Sense of Touch Using a Sensorimotor Demultiplexing Neural Interface[J]. *Cell*, 2020, 181: 763-773.
- [7] Huo C C, Zheng Y, Lu W W, et al. Prospects for intelligent rehabilitation techniques to treat motor dysfunction[J]. *Neural Regen Res*, 2021, 16(2): 264-269.
- [8] Synnestevedt M B, Chen C, Holmes J H. CiteSpace II: visualization and knowledge discovery in bibliographic databases[J]. *AMIA Annu Symp Proc*, 2005, 2005: 724-728.
- [9] Nakagawa S, Samarasinghe G, Haddaway NR, et al. Research Weaving: Visualizing the Future of Research Synthesis[J]. *Trends Ecol Evol*, 2019, 34: 224-238.
- [10] 唐芷晴, 刘天昊, 韩凯月, 等. 近5年经颅磁刺激治疗脑卒中的可视化分析[J]. *中国康复理论与实践*, 2023, 29: 294-301.
- [11] 刘明月, 樊亚蕾, 张蒙, 等. 近10年脑机接口技术用于脑卒中康复领域的可视化分析[J]. *中国康复理论与实践*, 2023, 29: 223-230.
- [12] Xu AH, Sun YX. Research hotspots and effectiveness of repetitive transcranial magnetic stimulation in stroke rehabilitation[J]. *Neural Regen Res*, 2020, 15: 2089-2097.
- [13] Chen C. Searching for intellectual turning points: progressive knowledge domain visualization[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2004, 101 Suppl 1: 5303-5310.
- [14] 沈鹏, 余帅江, 卓秀建, 等. 基于CiteSpace的国内昏迷促醒研究计量学分析[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36: 251-255.
- [15] Jorge A, Royston DA, Tyler-Kabara EC, et al. Classification of Individual Finger Movements Using Intracortical Recordings in Human Motor Cortex[J]. *Neurosurgery*, 2020, 87: 630-638.
- [16] Dekleva BM, Weiss JM, Boninger ML, et al. Generalizable cursor click decoding using grasp-related neural transients[J]. *J Neural Eng*, 2021, 18: 1-29.
- [17] Xu X, Li Y, Shi S, et al. The Application of Angiotensin Receptor Neprilysin Inhibitor in Cardiovascular Diseases: A Bibliometric Review From 2000 to 2022[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 1-14.
- [18] Zhou K, Zhou Y, Zeng Y, et al. Research Hotspots and Global Trends of Transcranial Direct Current Stimulation in Stroke: A Bibliometric Analysis [J]. *Neuropsychiatr Dis Treat*, 2023, 19: 601-613.
- [19] Xu F, Zeng J, Liu X, et al. Exercise-Induced Muscle Damage and Protein Intake: A Bibliometric and Visual Analysis[J]. *Nutrients*, 2022, 14: 1-20.
- [20] Zhang Q, Xiao Y, Liu Y, et al. Visualizing the intellectual structure and evolution of carbon neutrality research: a bibliometric analysis[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023, 30: 75838-75862.
- [21] Brower V. When mind meets machine[J]. *EMBO Rep*, 2005, 6: 108-110.
- [22] Flesher SN, Downey JE, Weiss JM, et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control [J]. *Science*, 2021, 372: 831-836.
- [23] Cui Z, Li Y, Huang S, et al. BCI system with lower-limb robot improves rehabilitation in spinal cord injury patients through short-term training: a pilot study[J]. *Cogn Neurodyn*, 2022, 16: 1283-1301.
- [24] Li L, Sun Y. Research hotspots and trends of the tele-rehabilitation for stroke survivors based on CiteSpace: A review[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2023, 102: 1-11.
- [25] Jovanovic LI, Kapadia N, Zivanovic V, et al. Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study[J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 2021, 7: 1-11.
- [26] Hochberg LR, Bacher D, Jarosiewicz B, et al. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm [J]. *Nature*, 2012, 485: 372-375.
- [27] Benabid AL, Costecalde T, Eliseyev A, et al. An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18: 1112-1122.
- [28] Bouton CE. Merging brain-computer interface and functional electrical stimulation technologies for movement restoration[J]. *Handb Clin Neurol*, 2020, 168: 303-309.
- [29] Ajiboye AB, Willett FR, Young DR, et al. Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: a proof-of-concept demonstration[J]. *Lancet*, 2017, 389: 1821-1830.
- [30] Yang B, Zhang F, Cheng F, et al. Strategies and prospects of effective neural circuits reconstruction after spinal cord injury[J]. *Cell Death Dis*, 2020, 11: 439.
- [31] Shokur S, Donati ARC, Campos DSF, et al. Training with brain-machine interfaces, visuo-tactile feedback and assisted locomotion improves sensorimotor, visceral, and psychological signs in chronic paraplegic patients[J]. *PLoS One*, 2018, 13: 1-33.
- [32] Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, et al. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury[J]. *Nature*, 2018, 563: 65-71.
- [33] Kathe C, Skinnider MA, Hutson TH, et al. The neurons that restore walking after paralysis[J]. *Nature*, 2022, 611: 540-547.
- [34] Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface[J]. *Nature*, 2023, 618: 126-133.

(本文编辑:王晶)