

龚川, 李盛乐, 武晓芳. 3S 技术在地震研究领域应用的研究进展[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 187–192. [GONG Chuan, LI Shengle, WU Xiaofang. Application of 3S Technology in Seismic Research[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 187–192. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.033.]

## 3S 技术在地震研究领域应用的研究进展\*

龚 川<sup>1</sup>, 李盛乐<sup>1</sup>, 武晓芳<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉, 430071; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘 要:** 随着 3S(RS、GIS、GPS)技术的快速发展, 其在地震领域上的应用已引起国内外研究机构和学者的广泛关注。以 Web of Science 核心数据集为文献源, 检索 2000–2019 年 3S 技术应用于地震领域的文献, 利用 Citespace 可视化分析软件进行文献分析, 通过探究研究主题及研究热点的演变趋势, 总结分析了当前研究前沿。研究结果表明, 3S 技术应用于地震领域涉及到了多个交叉学科及方向, 体现出地震领域的研究具有广泛性和综合性的特点; 通过聚类分析, 发现可划分为 8 个知识群组, 形成了以“地震案例”与“板块运动”为主的两条演化路径; 关键词分析表明“合成孔径雷达应用”、“模型反演”, “滑动分布研究”成为近几年的研究热点, 并趋向于多样化的趋势发展。

**关键词:** 可视化分析; 研究热点; 研究进展; 地震研究领域; 3S 技术

**中图分类号:** X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0187–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.033

随着 3S 技术的快速发展, 该项技术已在国土、农业、水利、交通、地震等多个学科得到了广泛的应用。在地震研究领域, 传统的地面地震监测方法受监测点和监测范围的限制, 而 3S 技术具有观测范围大、成本低、数据获取效率高等显著优点, 能够在一定程度上弥补传统地震研究领域观测方法的局限。近年来 3S 技术在地震研究领域的应用上越发广泛, 在地震预报、震害应急信息获取及灾后重建等方向均有涉及。

本文从 Web of Science 核心数据集中收集 2000–2019 年 3S 技术应用于地震领域的相关文献, 利用 Citespace 可视化分析工具绘制科学和技术领域发展的知识图谱, 通过对文献样本进行图谱分析, 来梳理该研究领域的现状和热点, 为后续的相关科学研究提供参考。

### 1 数据统计与整理

为保证文献分析数据的可靠性和准确性, 避免检索到过多不相关的其他文献, 采用高级检索功能, 以 GIS、GPS、RS 及 earthquake 等为主要文献主题检索字段, 以 infrared、InSar 等作为辅助检索字段, 文献类型选择为 Article、Proceedings Paper、Review, 经筛选后共计收集到有效文献数量为 2 255 篇(检索日期为 2020 年 7 月 2 日)。

对检索到的文献样本进行年度发文数量、文献出版刊物来源统计、研究方向分析以及研究机构分析, 如图 1 和表 1、表 2 所示。

由图 1 和表 1、表 2 可见, 在 2000–2012 年 3S 技术在地震领域应用的文献发表数量稳步增长, 该时段内科学技术快速发展, 如 InSar、热红外等越来越多的 3S 技术应用于地震研究, 为地震领域的研究提供了新的方法和思路, 得到了研究学者的广泛重视。在 2013–2019 年, 3S 技术在地震领域应用的文献发文数量进入稳定阶段, 该时期的研究主要是对已有的研究方法和思路进行完善, 发文篇数虽略有起伏但均保持在较高的数量上, 仍是众多专家学者研究的重点。从文献研究方向分析来看, 地球物理化学研究(36.59%)占据首位, 其次是地质学研究、遥感技术研究、工程学研究、气象学大气科学研究以及成像科学与摄影技术研究等, 表明了 3S 技术在地震领域的研究涉及到了多个学科的研究领域, 体现其应用广泛性、学科综合性和交叉性等特点。从发表期刊来看, 主要的期刊来源皆是以地震研究、构造运动等为主要研究方向, 利用 3S 技术进行地震案例和构造运动的研究仍是相关权威文献的主要研究方向。在发文机构中, 遥感技术应用于地震领域的研究主要集中于高校和科研院所, 中国地震局、中国科学院、武汉大学、加州理工学院和美国地质调查局位居机构发文数量前五, 占总机构发文数量的 29.18%。

\* 收稿日期: 2020–09–03 修回日期: 2020–11–15

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1939204); 中国地震局地震科技星火计划(XH17022)

第一作者简介: 龚川(1997–), 男, 苗族, 重庆黔江人, 硕士研究生, 主要从事地震数据处理相关研究。E-mail: gec0866@163.com

通讯作者: 武晓芳(1982–), 女, 汉族, 山西寿阳人, 副编审, 主要从事期刊编辑研究。E-mail: 78184416@qq.com

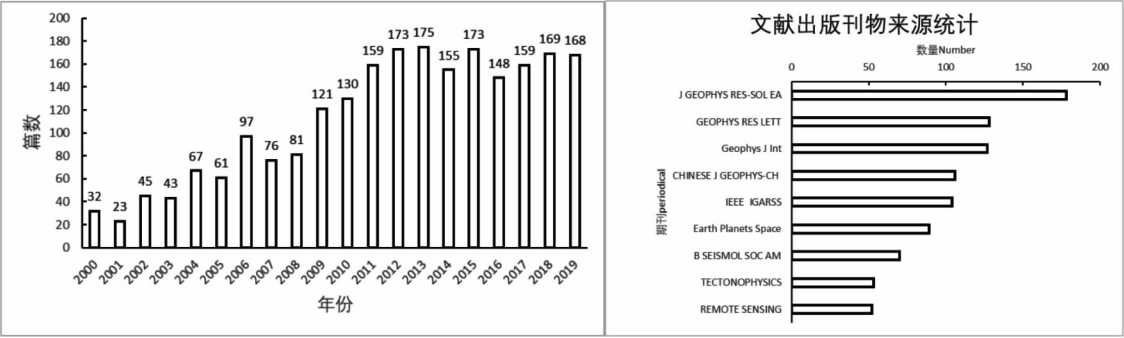


图1 2000 – 2019 年文献发表数量与期刊统计图

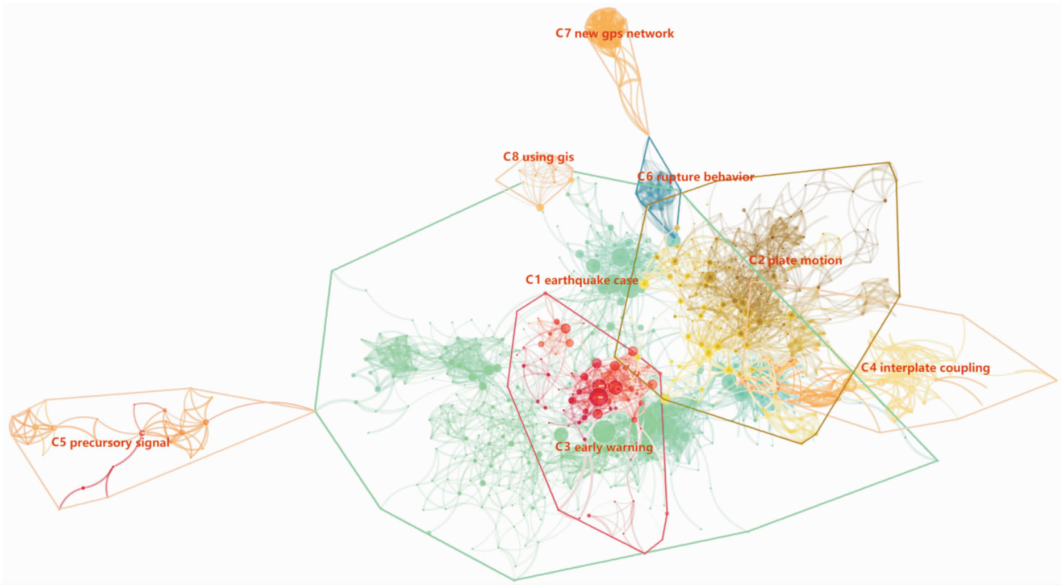


图2 3S 技术在地震研究领域应用知识群组图谱

表 1 样本文献主要研究方向	
学科类别	文献比例/%
地球物理化学	36.59
地质学	34.99
遥感技术	18.36
工程学	16.98
气象学大气科学	7.72
成像科学与摄影技术	6.65

表 2 3S 技术应用于地震领域发文前 10 的研究机构			
序号	机构	国家或地区	篇数
1	中国地震局	中国	254
2	中国科学院	中国	164
3	武汉大学	中国	88
4	加州理工学院	美国	84
5	美国地质调查局	美国	68
6	加州大学伯克利分校	美国	67
7	国家地理研究所	意大利	57
8	东京大学	日本	48
9	台湾中央研究院	中国台湾	45
10	京都大学	日本	44

向之间的关联，本文利用 Citespace 可视化分析工具，对文献样本数据进行共被引可视化分析，得到 14 个研究聚类，通过对文献数据聚类群组的筛选和整理，将相似聚类进行了合并，以不同的颜色和区域范围划分了 8 个主要的知识群组，绘制了知识群组视图，如图 2 和图 3 所示。两视图体现了各个知识群组间的结构特征，突出关键节点及重要连接，体现不同群组之间的交互关系。

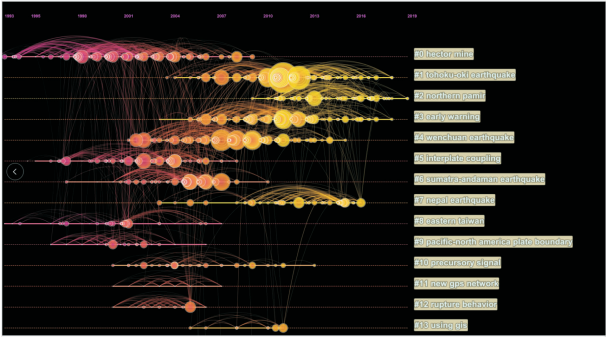


图3 3S 技术在地震研究领域聚类时间线图

2 知识群组演化分析

为更好地研究 3S 技术在地震领域应用的发展趋势，揭示研究前沿演变转折及明确各个研究方

C1 earthquake case(地震案例)知识群组，包含了#0 hector mine(1999 年美国赫克托雷地震)、#1 tohoku-oki earthquake(2011 年日本东北大地震)、#4 wenchuan earthquake(2008 年中国汶川大地震)、

#6 sumatra-andaman(2004 年苏门答腊大地震)等多个地震案例研究聚类,该群组是样本是文献中统计得到的最大群组,文献总量大,中心度高,与其他群组的节点连接较强。该群组的主要研究内容是利用全球定位系统和遥感技术对具体的地震案例进行分析,核心研究方向是利用 GPS 测量数据研究同震变形和震后变形的综合影响,讨论了同震模型与地震后滑移模型的关系<sup>[7-9]</sup>、结合现场调查数据与卫星影像数据构建地震破裂几何模型,分析地震断裂带的特征与走向<sup>[10]</sup>、利用连续 GPS 记录数据与区域地震网络反演地下断层滑动分布和演化模型<sup>[11]</sup>。

C2 plate motion(板块运动)知识群组,主要包含了#2 northern pamir、#8 eastern Taiwan、#9 pacific – north America plate boundary 三个聚类。研究范围主要包含具体地震案例的同震变形场,地壳运动、断裂带等,该知识群组的文献研究为 3S 技术在地震领域应用奠定了基础,提出了许多应用于地震研究领域的思路和方法,如雷达干涉测量法测量地震造成的地表形变在 1990 年代初迅速发展起来<sup>[12]</sup>,结合全球定位系统(GPS)和合成孔径雷达(InSar)收集震后数据来研究高瞬态速度的地震机制<sup>[13]</sup>,利用全球定位系统(GPS)对观测地点长期地壳运动测量数据进行研究和解释<sup>[14]</sup>等,为后续的科学研究提供了重要的研究视角。其中 C4 interplate coupling(板块耦合)、C6 rupture behavior(破裂运动)与 C7 new gps network(GPS 网络)是 C2 知识群组的延伸,对板块耦合和地震破裂运动进行了更加深入的研究,这三类延伸群组文献的研究内容和思路也与 C2 知识群组相似。

C3 early warning(地震预警)知识群组,首次的引用时间为 2005 – 2007 年,图谱分析显示,“地震预警”知识群组与 C1“地震案例”群组有很高的重合度,呈现出共被引网络的重叠,表明地震预警的研究与地震案例的研究有着较强的关联。该群组的研究集中在利用高速率 GPS 进行地震实时监测研究,通过密集的监测网络进行实时监测,为地震预警和地震快速反应提供了条件<sup>[15]</sup>。另外实时地壳形变监测对于快速了解实际地震尺度也引起了学者们的重视,例如从 RTK – GPS 时间序列中检测和估计地震断层引起的静态地面位移算法,该算法通过监测 GPS 时间序列的短期平均与长期平均的差值来识别永久位移<sup>[16]</sup>。

C5 precursory signal(地震前兆)知识群组,该群组的首次引用时间为 2000 – 2002 年,位于图谱的边缘位置,仅与#1 地震案例群组有一定的联系。该群组的研究主要集中在两个方面,一是利用全球定位系统观测震前电离层电子含量的变化,通过对大量地震案例的电离层变化统计,分析表明大地震前 GPS 电子含量有明显下降<sup>[17]</sup>;二是通过热红外遥感观测震前热红外异常现象,利用卫星的热图像,表明热异常的存在与地壳的大线性结构和断层系统有关<sup>[18]</sup>。

C8 using gis(GIS 应用)知识群组,首次的引用时间为 2005 年,该群组内包含的文献较少,其主

要研究内容是利用卫星图像和地理信息系统分析地震引起的滑坡等灾害事件,进行相应的研究和评估。

通过对上述聚类的分析,3S 技术在地震领域上的应用共被引网络一定程度上展现了 3S 技术在地震领域的发展过程,及研究方向的演化趋势,为更加直观地展现各个聚类之间的交互联系,结合聚类时间线图(图 3)的时间演化关系,绘制了各个知识群组之间的演进关系(图 4)。

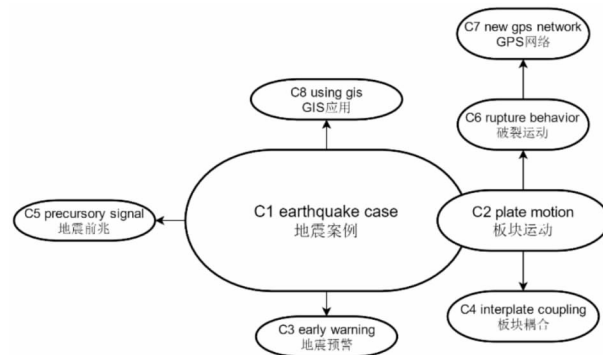


图 4 3S 技术在地震领域应用的知识群组演进关系图

结合共被引网络简图分析,3S 技术在地震领域应用上的聚类数量并不多,其研究的方向较为集中,可围绕 C1 earthquake case(地震案例)与 C2 plate motion(板块运动)两个主要知识群组划分成两个研究演化路径:一条是围绕具体的地震案例进行研究,延伸出了利用各类 GPS 数据进行地震预警研究、借助各类卫星观测手段研究地震前兆异常、以地理信息系统或卫星遥感手段来分析地震引起的滑坡等灾害事件。第二条是研究发震地区主要构造板块的运动,反演运动学模型,描述地壳的相对运动,研究主要断层上的应变累积性质、板块耦合及破裂运动过程。

### 3 研究热点分析

利用 Citespace 可视化分析工具中的 Keyword 分析功能,对检索到的文献数据进行关键词分析,高频关键词可以在一定程度上反映地震遥感领域研究学者的研究热点,通过对关键词的分析可以对该领域的研究方向有一个总体的了解。以每五年为一个研究阶段,表 3 筛选了 3S 技术在地震应用研究领域各个阶段的高频关键词,展示了各个阶段的主要研究方向、手段及热点地区。

遥感技术在地震领域上的应用是一个逐渐演变、不断完善的过程,根据检索文件数据的关键词发展统计和发文的时间分析,发现地震遥感领域研究方向的不断延伸,利用 Citespace 可视化工具对检索文献数据进行突现词分析,突现词分析是通过考察词频,将某段时间内其中频次增加率高的关键词探测出来,以出现强度为标准筛选了近 20 年来 Top10 突现词,得到了 3S 技术在地震领域应用上的突现词汇(表 4)。

表 3 关键词共现网络主要信息表

年份	关键词及引用频次			
2000 – 2004	deformation( 47)	GPS( 32)	canifornia( 20)	landers earthquake( 19)
	deformation( 125)	GPS( 77)	Sumatra Andaman( 46)	fault( 45)
2005 – 2009	InSar( 43)	canifornia( 35)	slip( 32)	seismicity( 25)
	GIS( 24)	model( 23)		
2010 – 2014	deformation( 132)	GPS( 109)	Wenchuan earthquake( 70)	model( 69)
	slip( 60)	GIS( 56)	fault( 55)	remote sensing( 48)
	upture( 44)	InSar( 41)	displacement( 35)	invention( 30)
2015 – 2019	deformation( 180)	GPS( 177)	InSar( 126)	model( 118)
	slip( 94)	fault( 79)	invention( 64)	rupture( 64)
	surface deformation( 59)	displacement( 51)	GIS( 50)	slip distribution( 47)

表 4 3S 技术在地震领域的应用主要突现词

关键词	强度	起始年	终止年	时间( 2000 – 2019)
radar interferometry( 雷达干涉测量)	7. 517 5	2000	2003	
crustal deformation( 地壳形变)	9. 122 6	2000	2005	
landers earthquake( 兰德斯地震)	12. 608 1	2000	2007	
half space( 半空间)	8. 960 1	2002	2010	
wenchuan earthquake( 汶川地震)	13. 630 2	2008	2012	
earthquake ground motion( 地震动)	5. 144 4	2012	2015	
tohoku earthquake( 东日本大地震)	5. 269 8	2012	2015	
pacific coast( 太平洋岸)	11. 684 0	2012	2016	
lushan earthquake( 芦山地震)	5. 865 4	2014	2017	
stress change( 应力变化)	4. 876 3	2017	2019	
viscoelastic relaxation( 粘弹性松弛)	5. 652 1	2017	2019	

2000 – 2004 年这一阶段的发文数量较少, 许多 3S 技术的应用仍在起步阶段, 如雷达干涉测量技术( InSar) 在地震领域上的应用逐渐发展起来, 不少学者结合卫星雷达和 GPS 数据来对具体地震的滑动分布, 对 InSar 和 GPS 数据进行反演, 来研究断层几何形状及滑移分布<sup>[19-20]</sup>。综合考虑 GPS 数据、地震地质数据与不确定因素, 用构造块体方法解释大地测量数据对于板块边界带是可行的, 强调了在解释 GPS 速度场时考虑地质和地震信息的重要性<sup>[21]</sup>, “InSar 技术的应用”与“地壳形变研究”成为该阶段的研究热点。另外, 地震前兆研究也仍是许多学者关注的重点, 通过全球定位系统的地面接收器数据来研究震前电离层异常现象<sup>[22]</sup>, 为研究地震电离层异常提供了一种新的方法和思路。

2005 – 2009 年内 3S 技术在地震领域应用的发文数量快速增加, 研究的方向也更加广泛, 该阶段的研究内容主要与两次大地震有关: 2004 年 12 月 26 日苏门答腊大地震与 2008 年 5 月 12 日汶川大地震。该阶段的地震研究领域的重点是通过 GPS 测量数据来研究大震的同震和震后形变, 对地震的断裂面及断层的延伸特征进行研究<sup>[8,23]</sup>, 或是利用震前 GPS 观测结果, 对地震的特征及成因机制进行研究<sup>[24]</sup>。该阶段除了不断完善 GPS 在地震应用上的研究, 还出现了一些新的应用于地震的技术手段, 如利用卫星图像和地理信息系统技术分析震后滑坡的空间数据库, 提出了应用多准则评价法确定事件控制参数在地震诱发灾害中的作用<sup>[25]</sup>。

2010 – 2014 年, 此阶段发文数量趋近于稳定, 高被引文献的研究热点主要集中在“震后滑坡”和“模型反演”, 并取得了较大的进展。在震后滑坡的研究中, 通过利用地震后拍摄的航空照片和遥感图像, 对地震引发的多处滑坡进行解译, 探讨滑坡的发生与地质地貌条件及地震参数之间的关系, 研究了地震诱发的主要滑坡影响因子对滑坡发生的影响顺序<sup>[26-27]</sup>。在模型反演的研究中, 主要通过远震数据来联合反演地震滑移时空分布关系<sup>[28]</sup>, 以及通过矫正输入数据的系统偏差来提高各项参数化设置的可靠性<sup>[29]</sup>, 使联合反演的研究取得了较大的进展。

2015 – 2019 年, 在近几年来 3S 技术在地震领域应用上的研究中, “InSar”“模型反演”“滑动分布”为主要的研究重点, 其中 “InSar”研究内容和应用范围非常的广泛: 结合 GPS 观测数据对断层几何形状和断层滑动反演进行优化, 解释震后断层破裂的范围、持续时间、滑动速度<sup>[30-31]</sup>; 利用多个卫星 InSar 数据, 按照相应的权重正确结合不同的数据集, 进行了同震模型反演分析<sup>[32]</sup>; 利用 InSar 和雷达图像的方位角偏移, 建立了三维位移模型, 以记录地震引起的地表变形<sup>[33]</sup>。此外, GIS 在地震领域上的应用也更加成熟, 在滑坡发生与成因之间的研究中应用更加广泛<sup>[34]</sup>。另外值得注意的是, 应力变化( stress change) 与震后粘弹性松弛( viscoelastic relaxation) 等方面的研究在近几年的发表文献中增加率较快, 也值得研究学者们重点关注。



## 4 结论与建议

本文利用 Citespace 软件, 对近二十年 Web of Science 核心数据集中 3S 技术应用于地震领域的 2255 篇文献进行可视化分析, 研究了当前 3S 技术在地震领域的应用发展趋势及各个时段的研究热点, 得出了以下结论:

(1) 3S 技术在地震领域应用的相关文献年发表量近年来呈稳定趋势, 其中中国地震局、中国科学院、武汉大学、加州理工学院和美国地质调查局位居等相关科研机构为该领域发文较高的机构。遥感技术在地震领域上的应用涉及到地球物理学、地质学、遥感技术、工程学、气象学、成像科学等众多领域, 体现了交叉性和综合性的特点。

(2) 通过绘制 3S 技术在地震领域应用的文献共被引网络图谱, 辨析出共被引网络集聚的 8 个知识群组, 得出了 2 条知识群组的演化路径: 第一条是通过分析具体的地震案例, 对地震预警、地震前兆异常、诱发灾害事件等进行研究; 第二条是围绕发震地区主要构造板块运动, 反演地震运动模型, 研究地壳的相对运动、板块耦合及破裂运动过程等。

(3) 进行关键词和突现词分析, 得到了各个时段的研究重点和研究热点。近几年的研究热点主要集中在“InSar”“模型反演”“滑动分布”等研究上, 研究多利用 GPS、InSar 等多种遥感数据和地震数据进行联合反演, 最大程度上利用已有数据进行研究, 提高研究结果的可信度。除此之外, “应力变化”与“震后粘弹性松弛”在近两年研究的增长率较快, 也需引起重视和关注。

本文以文献分析计量的方式, 对遥感技术在地震领域应用上的发展趋势及研究热点进行了一个大致的回溯和总结, 从上述近二十年的研究进展来看, RS、GPS、GIS 各项技术在地震领域上的应用已非常成熟, 在地震研究的各个方法均有涉及。现阶段利用 GPS 与 InSar 技术进行地震机制、滑动分布等研究取得了很大的进展, 但其余各项技术之间的综合使用仍然较少, 利用多源遥感数据, 融合 GPS 和 GIS 技术, 精细化提取和处理数据, 最大程度发挥 3S 技术的优势, 或许是未来的研究重点。

虽然在文献样本的遴选中存在着一一定的主观性, 可能会使得文献可视化分析存在一定的误差, 尽管如此, 此次研究分析还是尽可能地检索、筛选出相关文献, 能从一定程度上反映相关研究的历史进程。随着 3S 技术的不断发展, 其在地震领域上的应用也将越发广泛, 作为一个多学科交叉的研究领域, 需尽可能地发挥各个学科或技术的优势, 时刻关注各个学科的发展动态, 期为地震领域的研究提供新的研究思路。

## 参考文献:

[1] 马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 等. 基于 CiteSpace 的陆地生态系统碳水耦合研究现状及趋势[J]. 生态学报, 2005(15): 1-10.

[2] 张晋辉, 龙海云. 国际地震预警研究现状与研究热点的可视化分析[J]. 中国地震, 2017, 33(1): 172-179.

[3] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.

[4] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望[J]. 现代情报, 2013, 33(4): 99-103.

[5] 付泽钰, 翟国方. 基于多源数据的厦门市地震灾害风险评估[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 441-448, 601.

[6] 杜浩国, 陈亮, 林旭川, 等. 云南红河县城区房屋地震灾害三维仿真模拟方法[J]. 地震研究, 2019, 42(2): 218-229.

[7] GAHALAUT V K, NAGARAJAN B, CATHERINE J K, et al. Constraints on 2004 Sumatra-Andaman earthquake rupture from GPS measurements in Andaman-Nicobar Islands[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 242(3/4): 365-374.

[8] CHLIEH M, AVOUAC J P, HJORLEIFSD OTTIR V, et al. Co-seismic slip and afterslip of the great Mw 9. 15 Sumatra-Andaman earthquake of 2004[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(1): 152-173.

[9] OZAWA S, NISHIMURA T, SUTO H, et al. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake[J]. Nature, 2011, 475: 373-376.

[10] XU X W, WEN X Z, YU G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7. 9 Wenchuan earthquake, China[J]. Geology, 2009, 37(6): 515-518.

[11] MARK S, SARAH E M, ANTHONY S, et al. The 2011 Magnitude 9. 0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries[J]. Science, 2011, 332: 1421-1425.

[12] MASSONNET D, FEIGL K L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface[J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441-500.

[13] POLLITZ F F, PELTZER G, PELTZER G, et al. Mobility of continental mantle: Evidence from postseismic geodetic observations following the 1992 Landers earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B4): 8035-8054.

[14] MCCLUSKY S, BALASSANIAN S, BARKA A, et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2000, 105(B3): 5695-5719.

[15] BOCK Yehuda, MELGAR D, CROWELL B W. Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6): 2904-2925.

[16] OHTA Y, KOBAYASHI T, TSUSHIMA H. Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9. 0) [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2012, 117: B02311.

[17] LIU J Y, CHEN Y I, CHEN C H, et al. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7. 9 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2009, 114: A04320.

[18] TRONIN A A, HAYAKAWA M, MOLCHANOV O A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 33(4/5): 519-534.

[19] JONSSON S, ZEBKER H, SEGALL P, et al. Fault slip distribution of the 1999 Mw 7. 1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(4): 1377-1389.

[20] MARK S, YURI F, LUIS R. Coseismic deformation from the 1999 Mw 7. 1 Hector Mine, California, earthquake as inferred from InSAR and GPS observations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(4): 1390-1402.

[21] WALLACE L M, JOHN B. Subduction zone coupling and tectonic block rotations in the North Island, New Zealand[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B12): B12406.

[22] LIU J Y, CHUO Y J, SHAN S J, et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements[J]. Annales Geophysicae, 2004, 22(5): 1585-1593.

[23] VIGNY C, SIMONS W J F, ABU S, et al. Insight into the 2004

- Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia[J]. *Nature*, 2005, 436: 201–206.
- [24] ZHANG P Z, XU X W, WEN X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 2008, 51(4): 1066–1073.
- [25] KAMP U, GROWLEY B J, KHATTAK G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 631–624.
- [26] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 883–895.
- [27] XU C, XU X W, YAO X, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 441–461.
- [28] DELOUIS B, NOCQUET J M, VALLEE M. Slip distribution of the February 27, 2010 Mw8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L17305.
- [29] SHAO G, JI C. What the exercise of the SPICE source inversion validation BlindTest 1 did not tell you[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(1): 569–590.
- [30] GALETZKA J, MELGAR D, GENRICH J F, et al. Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal[J]. *Science*, 2015, 349(6252): 1091–1095.
- [31] HUANG M H, FIELDING E J, LIANG C R, et al. Coseismic deformation and triggered landslides of the 2016 Mw 6.2 Amatrice earthquake in Italy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(3): 1266–1274.
- [32] CHELONI D K, DENOVELLIS V T, ALBANO M, et al. Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6778–6787.
- [33] YEN J Y, LU C H, DORSEY R J, et al. Insights into seismogenic deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake sequence from InSAR, GPS, and modeling[J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(1): 78–87.
- [34] DOU J, YUNNUS A P, TIEN B D, et al. Evaluating GIS-based multiple statistical models and data mining for earthquake and rain-fall-induced landslide susceptibility using the LiDAR DEM[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 638.
- [35] SIMONS M, FIALKO Y, RIVERA L. Coseismic deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake as inferred from InSAR and GPS observations[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1390–1402.
- [36] HAYES G P, WALD D J, JOHNSON R L. Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2012, 117: B01302.
- [37] LOHMAN R B, SIMONS M, SAVAGE B. Location and mechanism of the Little Skull Mountain earthquake as constrained by satellite radar interferometry and seismic waveform modeling[J]. *John Wiley & Sons, Ltd*, 2002, 107(B6): 2118.
- [38] HEKI K. Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench[J]. *Nature*, 1997, 20: 595–598.
- [39] HARP E L, JIBSON R W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(1): 319–332.
- [40] HAYES G P. The finite, kinematic rupture properties of great-sized earthquakes since 1990[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 468: 94–100.
- [41] AVALLONE A, MARZARIO M, CIRELLA A. Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L’Aquila (central Italy) event[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2011, 116: B02305.
- [42] JI C, LARSON K M, TAN Y, et al. Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-Hz GPS, strong motion, and teleseismic data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(17): L17608.
- [43] MIYAZAKI S, LARSON K M, CHOI K H, et al. Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(21): L21603.
- [44] CALIS E, MINSTER J B. GPS Detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1045–1048.
- [45] SUN T, WANG K L, IINUMA T, et al. Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake[J]. *Nature*, 2014, 514: 84–87.

## Application of 3S Technology in Seismic Research

GONG Chuan<sup>1</sup>, LI Shengle<sup>1</sup> and WU Xiaofang<sup>2</sup>

(1. *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China;*

2. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)*

**Abstract:** With the rapid development of 3S(RS, GIS, GPS) technology, more and more scientists and research institutions in worldwide focused on the topic of its application in the field of earthquake. Based on the papers in database of Web of Science Core Collection we use data from articles about “Seismic application of 3S technology” during 2000 to 2019. we synthesize information visualization methods, bibliometric methods and data mining algorithms and visualizes the development process and structural relationship of research data using the information visualization analysis software, Citespace. The results indicated that the application of 3S technology in the field of earthquake involves many interdisciplinary subjects and directions, reflected that the research are comprehensive and extensive. Through cluster analysis, there are eight knowledge groups and formed two main evolution paths around “earthquake case” and “plate movement”. In recent years, The development of the research has a tendency of diversification and focused on “InSar”, “model inversion” and “sliding distribution”.

**Key words:** citespace; visualized analysis; research hotspots; earthquake; 3s technology