

## 机器学习模型在地质灾害遥感调查数据分析中的应用现状

张凯翔, 蒋道君, 吕小宁, 张 曦

### Current application of machine learning models in the analysis of remote sensing survey data for geological hazards

ZHANG Kaixiang, JIANG Daojun, LYU Xiaoning, and ZHANG Xi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202302029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123

#### 机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用

Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation

刘福臻, 王灵, 肖东升 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 98-106

#### 时序数据库技术在贵州地质灾害监测设备运行维护调度平台中的应用

Application of time series database in Guizhou Province geological disaster monitoring equipment operation maintenance scheduling platform

张家勇, 刘黔云, 邓卫卫, 龚伟, 张楠, 李程, 李潇, 胡屿 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 117-122

#### 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

#### 基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

#### 无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202302029

张凯翔, 蒋道君, 吕小宁, 等. 机器学习模型在地质灾害遥感调查数据分析中的应用现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 126-134.

ZHANG Kaixiang, JIANG Daojun, LYU Xiaoning, et al. Current application of machine learning models in the analysis of remote sensing survey data for geological hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 126-134.

# 机器学习模型在地质灾害遥感调查数据分析中的应用现状

张凯翔, 蒋道君, 吕小宁, 张 曦

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 为研究机器学习模型在地质灾害遥感调查中的应用现状, 基于中国知网(CNKI)数据库, 采用文献计量法进行可视化分析, 从发文量、研究热点、研究机构等多视角详述机器学习模型、地质灾害遥感调查技术的研究进展。利用VOSviewer软件分析机器学习模型与地质灾害遥感调查技术高频关键词及其关联度, 并通过分类统计量化分析得出研究热点、关联性和发展趋势。结果表明: 中国地质灾害遥感调查技术正由“图谱测量”向“图谱与几何测量”逐步转变, 新一代机器学习算法伴随着无人机遥感技术的进步, 已成为本领域最热门的研究方向, 推动着地质灾害体自动识别和智能提取技术发展; 未来的地质灾害遥感调查技术必然是围绕“空-天-地”协同应用与应急监测的综合技术体系。研究认为, 针对不同遥感影像数据的特点, 综合研究不同机器学习模型在各种遥感解译工作场景中的应用是未来的主要发展趋势。

**关键词:** 地质灾害; 遥感; 机器学习模型; 文献计量

中图分类号: P237; P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)04-0126-09

## Current application of machine learning models in the analysis of remote sensing survey data for geological hazards

ZHANG Kaixiang, JIANG Daojun, LYU Xiaoning, ZHANG Xi

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract:** To investigate the current landscape of the application of machine learning in remote sensing surveys of geological disasters and to support the development of intelligent remote sensing survey technologies for geological disasters, a bibliometric analysis of machine learning and geological disaster remote sensing survey technology was conducted using the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database. Visual analysis was performed from multiple perspectives, including the number of publications, research hotspots, and research institutions, to describe the research progress of machine learning and geological disaster remote sensing survey technology. VOSviewer software was utilized to scrutinize the high-frequency keywords and their associations between machine learning and geological disaster remote sensing survey technology. The results showed that remote sensing survey technology for geological disasters in China is gradually shifting from traditional “topographic measurement” towards more holistic “topographic and geometric measurement” approaches. With the advancement of unmanned aerial vehicle remote sensing technology, the new generation of intelligent learning algorithms have

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-10-18

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600402); 中国铁建股份有限公司科技重大专项(2022-A02)

第一作者: 张凯翔(1989—), 男, 湖北武汉人, 测绘科学与技术专业, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感工程地质勘察、地理地质信息系统研发相关研究。E-mail: [dr\\_setsuna@163.com](mailto:dr_setsuna@163.com)

emerged as the predominant research direction, fostering the growth of automated geological disaster recognition and intelligent extraction techniques. Nevertheless, the future of remote sensing survey technology for geological disasters is poised to evolve into a comprehensive technical system that emphasizes the synergistic “air-space-ground” application and emergency monitoring. Considering the diverse characteristics of remote sensing image data, the primary developmental trajectory will involve an extensive exploration of various machine learning algorithms across different remote sensing interpretation scenarios.

**Keywords:** geologic hazard; remote sensing; machine learning; bibliometrics

## 0 引言

在我国西南山区,震后“链式地质灾害效应”和冰川“次生地质灾害”已成为重要的地质灾害类型,以“崩滑—碎屑流—堰塞湖—溃决”和“高速远程滑坡—碎屑流”为代表的巨型链式地质灾害,不仅规模和聚集密度之大极为少见,其冲击力和破坏性远超普通地质灾害<sup>[1]</sup>。而在中国华北平原以及中东部人口密集地区,在大量重大工程建设、不合理的资源开发、人类活动以及独特的地理地质条件的共同影响下,大范围地面沉降(包括采空区沉降)、地面塌陷(包括岩溶塌陷)和地裂缝等地质灾害频发,造成城市交通基础设施出现安全隐患,长期潜在影响着城市产业的布局和发展<sup>[2]</sup>。

经过国内外专家学者的长期研究与应用,地质灾害遥感调查技术已能够为地质灾害调查、应急响应、防灾减灾等方向的应用研究和决策规划提供稳固可靠的数据资料支撑。进入 21 世纪以来,多源异构遥感影像数据呈现出爆发式的增长。随着航空航天与传感器技术的发展,除多光谱、高分辨率、高光谱光学遥感卫星影像数据外,各种 InSAR、热红外遥感卫星影像数据和以无人机 Lidar、倾斜影像数据,都开始在地震灾害遥感调查中得到应用<sup>[3]</sup>。

面对指数级增长的遥感影像数据和日益深入精细的应用需求,龚健雅院士和吴一戎院士等指出,以深度学习为主要应用的机器学习模型技术能够为遥感解译提供新的方法,将机器学习模型赋能给遥感技术,能够大幅度缩短遥感解译周期,深度挖掘遥感影像数据中的有效信息,从而快速赋能于行业应用,促进遥感技术服务模式的变革<sup>[4-8]</sup>。

因此对于地质灾害遥感调查技术的发展而言,如何面向地质灾害遥感调查的应用需求,针对不同工程地质要素,根据多源异构遥感影像数据特点,从海量遥感影像数据中合理选择数据源,设计机器学习模型,开展机器学习模型在地质灾害遥感调查中的应用研究,是地质灾害遥感调查技术步入智能化发展时代的重要课题。

## 1 地质灾害遥感调查技术的现状与发展

地质灾害遥感调查技术的综合应用主要体现在“早期识别、隐患排查、监测预警、灾害应急”4 个方面<sup>[9]</sup>。为了研究分析中国地质灾害遥感调查技术的应用现状与发展趋势,本文基于中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)数据库,采用文献计量分析法对地质灾害遥感调查技术研究领域 2003—2022 年间的文献开展可视化统计,以期为分析地质灾害遥感调查技术的应用发展趋势提供依据。

数据来源于 CNKI 数据库,其综合数据库包含中国期刊、中国博士学位论文、中国优秀硕士学位论文和中国重要会议论文等数据库。检索步骤如下:①选取 CNKI 数据库的专业检索,以“FT=‘遥感’AND FT=‘智能’AND (FT % ‘地质灾害’+‘不良地质’) NOT (SU % ‘GIS’+‘地理信息系统’+‘土地利用’+‘人民政府’+‘大数据’)”为检索语句;②文献发表时间限制为 2003—2022 年;③文献资源来源排除中国重要报纸,共检索出文献 17 779 篇。

如图 1 所示,按照发文量分布对检索出文献进行统计可以看出,在 2003—2022 年期间,地质灾害遥感调查技术的应用研究领域发表的论文数呈总体上升趋势,其中 2015 年之前发文量呈平稳缓慢增加趋势,2015 年之后发文量呈急速波动上升。由此可知:中国地质灾害遥感调查技术相关研究以 2015 年作为分水岭,2015 年后进入蓬勃发展期,获得了更广泛的关注,越来越多的学者和研究机构开始从事地质灾害遥感调查技术领域的工作。如图 2 所示,按照研究机构对检索出文献进行统计可以看出,在进行地质灾害遥感调查技术应用研究的机构中,成都理工大学、武汉大学、中国地质大学和长安大学等机构发文量排名靠前,为该技术研究和应用的优势单位;上述机构长期以来在地质灾害遥感调查技术应用研究领域做出了积极的探索和研究,培养出大量科研骨干和专业技术人才。

主题是对一篇文章的高度概括和总结,对主题的分

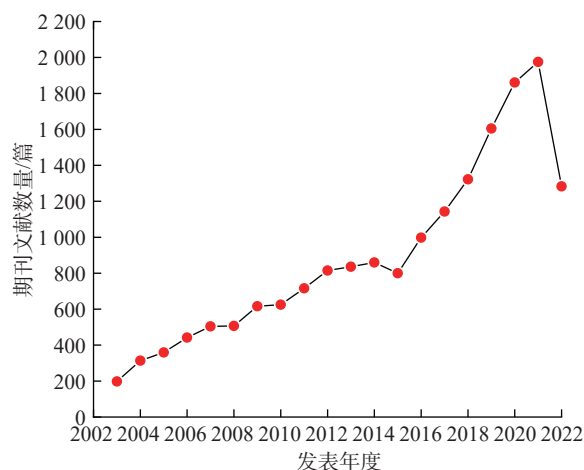


图 1 2003—2022 年地质灾害遥感调查技术应用研究领域发文量分布

Fig. 1 Distribution of published papers in the fields of geological hazard remote sensing survey technology application from 2003 to 2022

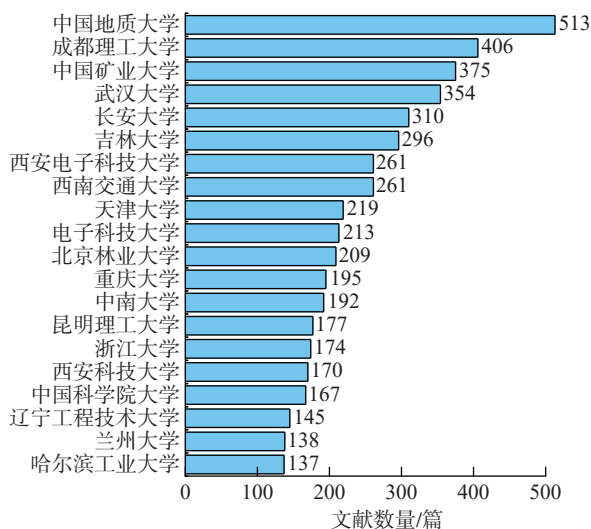


图 2 2003—2022 年地质灾害遥感调查技术应用研究领域高发文机构

Fig. 2 High-volume institutions in the field of geological hazard remote sensing survey technology application research from 2003 to 2022

析可以从总体上获知地质灾害遥感调查技术应用研究领域的研究热点和趋势变化。本文将检索出文献以“遥感技术\*地质灾害”为主题进行分类,得到 2003—2022 年间各项地质灾害遥感调查技术研究文献计量统计结果(图 3),同时对各项地质灾害遥感调查技术逐年发展趋势进行了分析(图 4)。在中国地质灾害遥感调查技术应用研究领域,关于合成孔径雷达技术(synthetic aperture radar, SAR)的发文量最高,达 668 篇;而关于无人机技术的发文量位列其次,达 602 篇。除此之外,研究较多的地质灾害遥感调查技术还有高光谱遥感(136 篇)、高分辨率遥感影像(132 篇)、激光雷达遥感(123 篇)。

综合分析图 3 和图 4 可知,无人机遥感技术、SAR

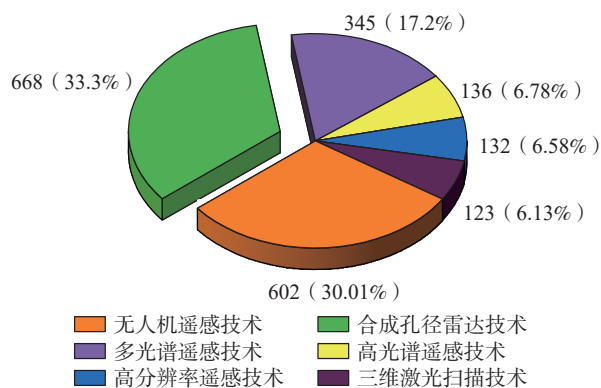


图 3 2003—2022 年主要地质灾害遥感调查技术发文量分布

Fig. 3 Distribution of research publications on major geological hazard remote sensing survey technologies from 2003 to 2022

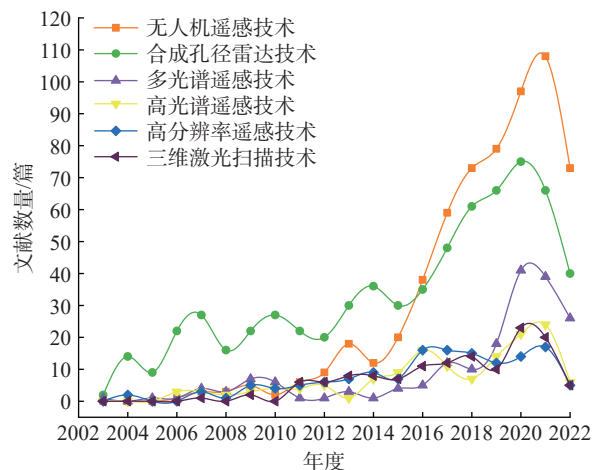


图 4 2003—2022 年主要地质灾害遥感调查技术发文量逐年发展趋势

Fig. 4 Annual development trends of research publications on major geological hazard remote sensing survey technologies from 2003 to 2022

技术和多光谱遥感技术是中国地质灾害调查技术应用研究的 3 种热门技术。其中, SAR 技术作为一种微波遥感技术一直是本领域最热门的技术, 发文量逐年呈现上升趋势。究其原因在于, 该技术长期作为唯一能稳定获得高精度、高空间分辨率及高可靠性地表变形信息的遥感技术, 同时还具有对一定时间范围内地表的微小变形具有探测能力, 能够从地表的“几何形态和形变”角度判别地质灾害体的滑移规模、活动阶段和发展趋势, 可以应用在地质灾害的早期识别中, 并有效辅助滑坡、泥石流、地面沉降等地质灾害的监测和预防工作<sup>[10-12]</sup>。

早期由于无人机飞行器相关技术的不成熟, 导致无人机遥感技术的研究热度偏低。随着近年来, 中小型无人机的迅速发展, 弥补了过去一系列限制无人机遥感技术发展的难题。例如, 2013—2016 年间, 大疆推出的精灵系列消费级无人机和经纬系列工业无人机, 既解决了

无人机小型轻量化等问题,使其可以便捷地在野外地质灾害调查中得到应用;同时还解决了搭载传感器多样性等问题,使其可以通过更换采集传感器,采集包括多光谱影像、热红外影像、高分辨率影像和三维激光点云等不同类型的遥感数据。因此,从 2013 年开始,无人机遥感技术凭借快速廉价地获取大区域多源遥感影像、重访遍历周期可控稳定、传感器组合灵活多变等优势,发文量急剧上升,成为持续性研究热点,迅速成了中国地质灾害遥感调查技术应用研究领域中最热门的研究方向<sup>[13-16]</sup>。

多光谱遥感技术涵盖了空天主要遥感影像数据类型,一直是中国地质灾害遥感调查技术应用研究领域的热门技术之一。包括 Landsat 系列卫星影像、SPOT 卫星影像、WorldView 系列卫星影像和国产 GF 系列卫星影像等提供了丰富的对地观测影像数据,支撑着研究人员从“影像和光谱变化”上对灾害形成和发育的地质背景、地表覆被变化开展研究,以揭示地质灾害的孕灾环境、承灾范围、影响因素等特征变化<sup>[17-18]</sup>。

综上所述,中国地质灾害遥感调查技术已从以往光学遥感为主的“图谱测量”走向多种遥感手段的“图谱与几何测量”的综合遥感应用。当前,中国地质灾害防治工作以多灾种和灾害链的综合监测、风险早期识别和预报预警为核心,自然资源部地质灾害防治技术指导中心殷跃平研究员、成都理工大学许强教授等国内知名地灾防治专家,提出了面向重大地质灾害的“三查”(由高精度遥感+InSAR 的“普查”、机载 Lidar+无人机航拍的“详查”、地面调查核实的“核查”共同组成)技术体系<sup>[11, 19-20]</sup>。随着 2018 年“三查”技术体系提出以来,该技术体系基于空天多载体、多传感器联合遥感观测系统的不断进步,通过地面观测数据与灾害体物理模型、“人防”与“技防”、多专业合作的有机结合、相互补充和校验,提高了地质灾害遥感调查的精准度和观测频率,强化了对灾害体在广度和精度上的监测能力,显著刺激了各种地质灾害遥感调查技术研究热度的提高。

## 2 机器学习模型在中国地质灾害遥感调查数据分析中的应用与发展

目前,全球在轨的遥感卫星数量在不断快速增加;同时伴随着无人机遥感技术的快速发展,各种无人机传感器在单次飞行作业中产生的遥感影像数据甚至已达到 TB 级别。面对海量的遥感影像和数据,采用传统人工解译的方法开展地质灾害遥感调查会耗费大量的人力和时间。因此,机器学习模型、集成学习和深度学习

等算法模型,作为新一代高效的计算机技术,在图像、影像学习和分析预测方面具有更强的处理能力,已逐渐成为实现遥感数据智能化自动识别的重要工具。

本文在前文检索出文献基础上以“机器学习模型\*遥感技术\*地质灾害”为主题进行分类,对机器学习模型在中国地质灾害遥感调查技术中的应用现状与发展趋势展开分析,得到 2003—2022 年间各种机器学习模型的文献计量统计结果(图 5),同时对各项机器学习模型逐年发展趋势进行了分析统计(图 6),在中国地质灾害遥感调查技术应用研究领域,关于深度学习的发文量最高,达 475 篇;除此之外,研究较多的机器学习模型还有神经网络算法(276 篇)、支持向量机算法(265 篇)、卷积神经网络算法(256 篇)。

综合分析图 5 和图 6 可知,机器学习在中国地质灾害遥感调查技术中的应用研究热点发展以 2017 年为分界点,经历了由以神经网络、支持向量机为代表的机器学习算法向以卷积神经网络为代表的机器学习算法的转变。同时结合图 3 和图 4 中展示的中国地质灾害遥感调查技术应用研发的热点发展趋势分析,可以得到以下结论:

(1)在 2014 年之前,SAR 技术和多光谱遥感技术是中国地质灾害遥感调查技术应用研究的主要研究方向,这一时期遥感影像数据获取难度较高,影像数据量处于 GB 级别。以神经网络、支持向量机为代表的机器学习算法被大量应用于遥感图像处理、遥感影像目标检测、遥感影像分类、遥感影像分割等应用方向,通过计算机辅助人工目视遥感解译,提高地质灾害体的识别率。

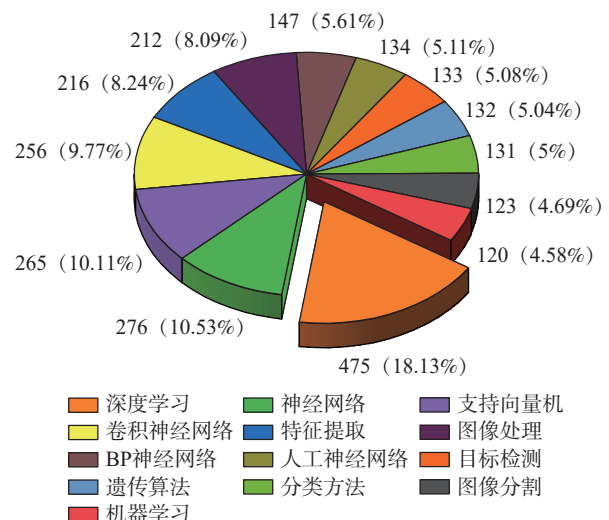


图 5 2003—2022 年主要机器学习发文量分布

Fig. 5 Distribution of research publications on major artificial intelligence algorithms from 2003 to 2022

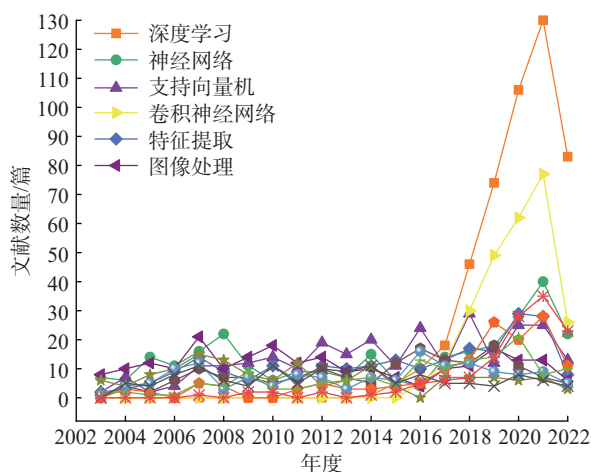


图 6 2003—2022 年主要机器学习发文量逐年发展趋势

Fig. 6 Annual development trends of research publications on major machine learning from 2003 to 2022

(2)从 2014 年开始,随着无人机遥感技术的迅速发展,单次无人机飞行作业中产生的遥感影像数据达到 TB 级别,为地质灾害遥感调查提供了丰富的影像数据,于是神经网络、支持向量机等机器学习算法在 2014—2016 年间迎来了短暂的研究热潮。

(3)由于支持向量机、神经网络等算法在处理海量影像数据上存在瓶颈,其计算效率和自动识别精度逐渐无法满足地质灾害遥感调查技术应用研究的发展需求,

因此从 2016 年开始,研究者尝试将卷积神经网络等机器学习算法应用于地质灾害遥感调查中。这些新一代算法凭借更强的图像、影像学习和分析预测能力,能够充分利用海量多源遥感影像数据作为学习样本,并以较高的正确率和解译效率开展灾害体自动识别,因此这些机器学习算法迅速成为本领域最热门的研究方向<sup>[21-23]</sup>。

(4)自 2018 年“三查”技术体系提出以来,中国地质灾害遥感调查技术转向“空-天-地”协同应用与综合应急监测方向发展,包括多光谱遥感技术、SAR 技术、无人机遥感技术在内的各种遥感技术都被应用于不同的“三查”阶段,研究者们针对不同遥感影像数据的特点,综合研究各种机器学习模型在应对不同“三查”阶段的遥感解译工作要求时的应用,导致基于机器学习模型、深度学习等不同机器学习模型的智能化自动识别研究热度均呈现出上升的趋势<sup>[24-25]</sup>。

此外,本文还利用 VOSviewer 软件对第 1、2 节使用的 4 942 篇论文文献(期刊、学位和会议论文)分别对各种机器学习模型和不同地质灾害遥感调查技术进行高频关键词关联性分析,得到高频关键词可视化分析图谱(图 7—10)。关键词是对一篇文章的高度概括和总结,对高频关键词的关联性分析可从总体上了解不同研究热点的关联度和联合研究趋势<sup>[26-27]</sup>。根据关键

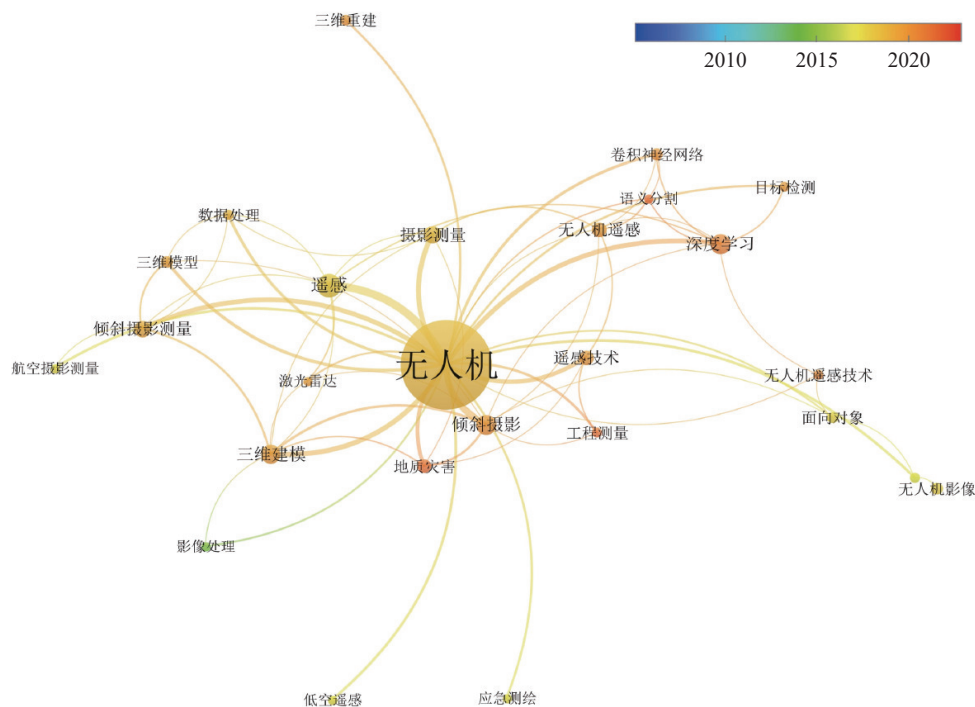


图 7 2003—2022 年无人机遥感技术与各种机器学习关键词关联度

Fig. 7 Association between unmanned aerial vehicle remote sensing technology and various artificial intelligence algorithm keywords from 2003 to 2022

**Fig. 9 Association between high-resolution remote sensing technology and various artificial intelligence algorithm keywords from 2003 to 2022**

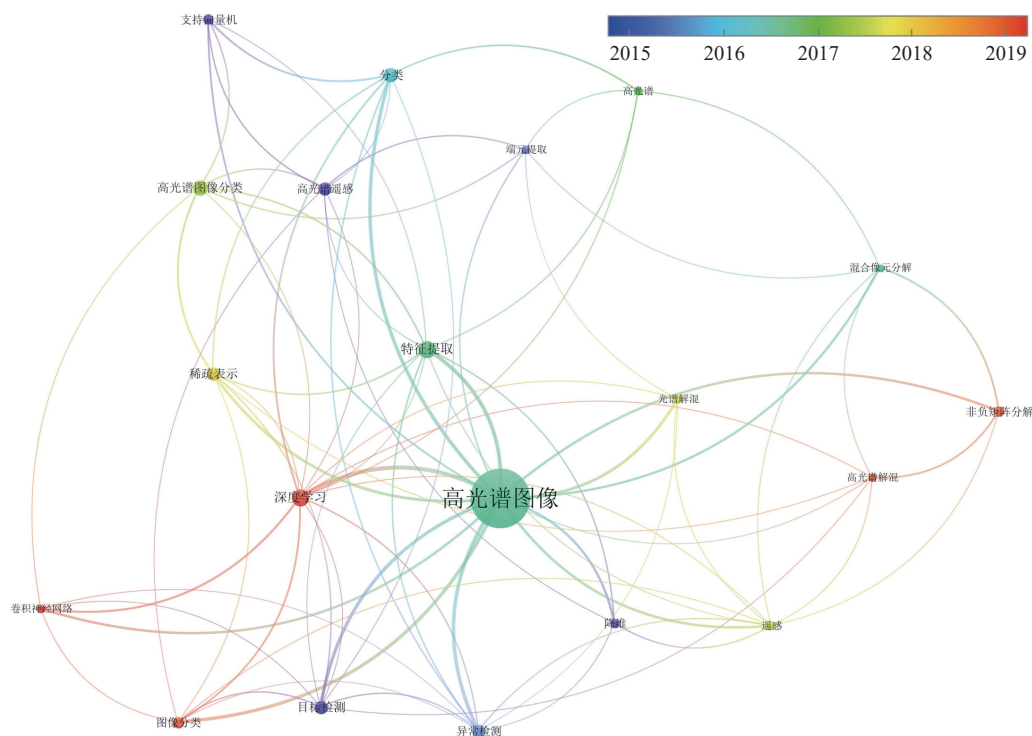


图 10 2003—2022 年高光谱遥感技术与各种机器学习关键词关联度

Fig. 10 Association between hyperspectral remote sensing technology and various artificial intelligence algorithm keywords from 2003 to 2022

词关联性, VOSviewer 自动划分出多组关联词, 以不同大小表示研究热点, 并以不同颜色表示时间年份变化, 不同粗细的连接线表示关联度紧密程度<sup>[28]</sup>。由图 7—10 可知:

①无人机遥感技术早期关联性研究热点主要集中在影像处理方面。自 2017 年开始, 无人机遥感技术的两个主要关联性研究热点方向分别是结合倾斜摄影、LiDAR 技术开展三维倾斜建模和倾斜测量研究, 以及结合卷积神经网络等机器学习算法开展的智能识别研究。机器学习算法与无人机遥感技术并无关联, 表明研究者们认为机器学习算法并不适合应用于无人机遥感技术研究<sup>[28]</sup>。

②SAR 技术和高分辨率遥感技术在 2014 年前关联性研究热点是结合支持向量机等机器学习算法开展分类、融合和目标识别研究, 并于 2018 年之后出现另一个结合卷积神经网络等机器学习算法开展智能目标识别研究的关联性研究热点。新关联性研究热点与 SAR 技术、高分辨率遥感技术直接关联度极高, 表明是未来的主要研究热点方向。

③高光谱遥感技术的主要关联性研究热点是传统的混合光谱/像元分解研究, 然后在此基础上开展特征提取研究。在 2019 年之后, 也出现了结合卷积神经网络

等机器学习算法开展图像分类的关联性研究热点, 虽然该研究热点与几乎所有传统高光谱遥感研究方向都有所关联, 但较低的关联度表明该研究热点仍处于探索阶段。

### 3 结论

(1) 无人机遥感技术、SAR 技术和多光谱遥感技术是中国地质灾害调查技术应用研究的三种热门技术, 同时也是面向重大地质灾害的“空-天-地”协同应用与综合应急监测“三查”技术体系的核心, 支撑着中国地质灾害遥感调查工作由“图谱测量”向“图谱与几何测量”逐步转变。

(2) 近 5 年来, 得益于空天多载体、多传感器联合遥感观测系统的不断进步, 遥感影像数据呈现出爆发式海量增长, 以卷积神经网络为代表的机器学习算法成了地质灾害遥感调查技术应用领域最热门的研究方向, 推动着地质灾害体自动识别和智能提取技术发展。

(3) 针对不同遥感影像数据的特点, 综合研究包括以神经网络、支持向量机为代表的机器学习算法和以卷积神经网络为代表的机器学习算法在应对不同“三查”阶段的遥感解译工作要求时的应用是未来中国地质灾害遥感调查技术应用研究领域的主要发展趋势。

## 参考文献(References):

- [1] 万佳威,褚宏亮,李滨,等.西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):51-60. [WAN Jiawei, CHU Hongliang, LI Bin, et al. Analysis on the development characteristics of high-level chain geological disasters along the Jiali fault zone in Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 51-60. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张凯翔,张占荣,于宪煜.SBAS-InSAR和PS-InSAR技术在鲁西南某线性工程沿线地面沉降成因分析中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):65-76. [ZHANG Kaixiang, ZHANG Zhanrong, YU Xianyu. Application of SBAS-InSAR and PS-InSAR technologies in analysis of landslide subsidence along a linear infrastructure in Southwestern Shandong [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 65-76. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 赖积保,康旭东,鲁续坤,等.新一代人工智能驱动的陆地观测卫星遥感应用技术综述[J].遥感学报,2022,26(8):1530-1546. [LAI Jibao, KANG Xudong, LU Xukun, et al. A review of land observation satellite remote sensing application technology with new generation artificial intelligence [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(8): 1530-1546. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄昕,李家艺.人工智能-遥感大数据时代的《遥感图像智能解译》课程教学设计与思考[J].测绘地理信息,2022,47(增刊1):219-222. [HUANG Xin, LI Jiayi. Discussion on teaching design of intelligent interpretation of remote sensing images in the era of artificial intelligence and remote sensing big data [J]. Journal of Geomatics, 2022, 47(Sup 1): 219-222. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 龚健雅,张冕,胡翔云,等.智能遥感深度学习框架与模型设计[J].测绘学报,2022,51(4):475-487. [GONG Jianya, ZHANG Mi, HU Xiangyun, et al. The design of deep learning framework and model for intelligent remote sensing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(4): 475-487. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 汉秋,王敬宇,赵理华.基于人工智能的自然资源要素遥感解译的建设应用[J].中国测绘,2021(7):66-69. [HAN Qiu, WANG Jingyu, ZHAO Lihua. Construction and application of remote sensing interpretation of natural resources elements based on artificial intelligence [J]. China Surveying and Mapping, 2021(7): 66-69. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 欧阳松.地学知识嵌入的遥感影像深度语义分割方法研究[D].武汉:武汉大学,2021. [OUYANG Song. Research on depth semantic segmentation method of remote sensing image embedded with geoscience knowledge [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 人工智能正成为遥感大数据的“解译侠”[J].电子技术与软件工程,2019(15):12. [Artificial intelligence is becoming the “interpreter” of remote sensing big data [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(15): 12. (in Chinese)]
- [9] 葛大庆.地质灾害早期识别与监测预警中的综合遥感应用[J].城市与减灾,2018(6):53-60. [GE Daqing. Application of integrated remote sensing in early identification, monitoring and early warning of geological disasters [J]. City and Disaster Reduction, 2018(6): 53-60. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许强.对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J].工程地质学报,2020,28(2):360-374. [XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360-374. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等.重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):949-956. [GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: thoughts and recommendations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949-956. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 朱建军,杨泽发,李志伟.InSAR矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J].测绘学报,2019,48(2):135-144. [ZHU Jianjun, YANG Zefa, LI Zhiwei. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 135-144. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郭庆华,胡天宇,刘瑾,等.轻小型无人机遥感及其行业应用进展[J].地理科学进展,2021,40(9):1550-1569. [GUO Qinghua, HU Tianyu, LIU Jin, et al. Advances in light weight unmanned aerial vehicle remote sensing and major industrial applications [J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1550-1569. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 许强,郭晨,董秀军.地质灾害航空遥感技术应用现状及展望[J].测绘学报,2022,51(10):2020-2033. [XU Qiang, GUO Chen, DONG Xiujun. Application status and prospect of aerial remote sensing technology for geohazards [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2020-2033. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王昆,杨鹏,吕文生,等.无人机遥感在矿业领域应用现状及发展态势[J].工程科学学报,2020,42(9):1085-1095. [WANG Kun, YANG Peng, LYU Wensheng, et al. Current status and development trend of UAV remote sensing

- applications in the mining industry [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(9): 1085–1095. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 汪美华, 赵慧, 倪天翔, 等. 近 30 年滑坡研究文献图谱可视化分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 75–85. [ WANG Meihua, ZHAO Hui, NI Tianxiang, et al. Visualization analysis of research literature map on landslides in the past 30 years [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 75–85. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 董文, 潘建平, 阳振宇, 等. 高分二号卫星数据在地质灾害调查中的应用——以重庆万州区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 106–111. [ DONG Wen, PAN Jianping, YANG Zhenyu, et al. Application of GF-2 satellite data in geological hazard survey: A case study in Wanzhou District of Chongqing City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 106–111. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 张幼莹, 余江宽, 张丹丹, 等. 国产卫星影像本底数据更新的实用方案——以地质灾害易发区遥感影像为例 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 149–157. [ ZHANG Youying, YU Jiangkuan, ZHANG Dandan, et al. Practical solution for background data update of domestic satellite images: A case study of remote sensing images of geological hazard prone areas [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017, 29(1): 149–157. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651–1659. [ XU Qiang. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1651–1659. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957–966. [ XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957–966. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 段杰斌. 基于循环神经网络的太原西山山区滑坡预测研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020. [ DUAN Jiebin. Study on landslide prediction in Xishan Mountain area of Taiyuan based on cyclic neural network [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 孙启新. 面向卷积神经网络场景解译的地质灾害遥感影像样本库建设研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019. [ SUN Qixin. Research on the construction of geological disaster remote sensing image sample database for convolutional neural network scene interpretation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 张茂省, 贾俊, 王毅, 等. 基于机器学习(machine learning)的地质灾害防控体系建设 [J]. 西北地质, 2019, 52(2): 103–116. [ ZHANG Maosheng, JIA Jun, WANG Yi, et al. Construction of geological disaster prevention and control system base on machine learning [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 103–116. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] 葛涛涛. 基于机器学习算法的日喀则地区泥石流易发性研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019. [ GE Taotao. Study on the susceptibility of debris flow in Xigaze area based on machine learning algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] 梁柱. 机器学习在浅层滑坡敏感性评价中的综合应用与研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021. [ LIANG Zhu. Comprehensive application and research of machine learning in sensitivity evaluation of shallow landslide [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] 程刚, 王振雪, 李刚强, 等. 我国滑坡监测文献计量研究的可视化分析 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 172–179. [ CHENG Gang, WANG Zhenxue, LI Gangqiang, et al. Visual analysis of bibliometric research on landslide monitoring in China [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 172–179. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 27 ] 白青林, 刘烜良, 张军华, 等. 基于 CV-XGBoost 的水下分流河道砂体厚度预测及应用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1602–1610. [ BAI Qinglin, LIU Xuanliang, ZHANG Junhua, et al. Sand body thickness prediction of underwater distributary channel based on CV-XGBoost method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1602–1610. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 28 ] 欧阳澜, 刘洪, 李光明, 等. 基于随机森林算法的找矿预测——以冈底斯成矿带西段斑岩——浅成低温热液型铜多金属矿为例 [J]. 中国地质, 2023, 50(2): 303–330. [ OUYANG Yuan, LIU Hong, LI Guangming, et al. Mineral search prediction based on Random Forest algorithm: A case study on porphyry-epithermal copper polymetallic deposits in the western Gangdise metallogenic belt [J]. Geology in China, 2023, 50(2): 303–330. (in Chinese with English abstract) ]