

基于文献计量的遥感学科发展趋势分析

黄铭瑞^{1,2,3}, 简洪登^{1,2}, 徐琛^{1,2,3}, 郝俊生^{1,2}, 闫珺⁴, 刘良云^{1,2},
范湘涛^{1,2}, 郭华东^{1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院空天信息创新研究院 学会与期刊部, 北京 100190

摘要: 遥感已成为支撑国家资源能源调查、粮食安全监测、生态环境保护、自然灾害评估、国防安全等的重要信息源。利用文献计量学方法定量分析遥感相关文献所承载知识的时空分布、数量关系和变化规律, 梳理并提取遥感学科发展趋势及研究热点的时空演化特征, 可为遥感学科的建设与发展提供重要科学支撑。对1962年—2021年间发表并被SCI数据库收录的遥感相关文章进行文献计量研究, 对比分析了国内外典型遥感卫星的文献发表及应用情况, 系统剖析了1962年—2021年美国、欧洲、中国遥感研究热点及其变化过程, 总结了美国、欧洲、中国学者在合成孔径雷达(SAR)、高光谱(Hyperspectral)及激光雷达(LiDAR)3大遥感前沿技术的研究特点。结果表明:(1) 遥感学科SCI文章数自1998年起呈现快速增长、加速增长的趋势。1962年—2012年全球累积发表遥感相关SCI文章69666篇, 2013年—2021年全球累积发文100131篇。2014年, 中国(第一作者)年度发表遥感相关SCI文章2048篇, 首次超过美国(第一作者)年度1454篇跃居全球第一, 此后一直领先。2021年, 中国(第一作者)年度发表遥感相关SCI文章8063篇, 占全球该年度遥感相关SCI文章19121篇的42.17%; (2) 在遥感技术方面, 卫星遥感平台从单一卫星向专业小卫星、卫星星座方向发展; 卫星传感器从全色、单波段起步, 逐步向SAR、高光谱、LiDAR等前沿技术快速发展; (3) 在遥感数据应用方面, Landsat、MODIS、Sentinel等国外数据自出现以来就一直被全球用户广泛使用, 尤其是中国学者的遥感应用研究高度依赖这些国外卫星数据, 近年来国产卫星的应用呈快速发展趋势; (4) 当前中外遥感科学研究热点差异显著: 美国遥感学者依托Landsat、MODIS、激光雷达等先进卫星和载荷技术, 遥感已广泛深入各应用领域; 欧洲遥感学者十分重视Sentinel系列卫星的科学研究和应用; 中国遥感研究在所有领域和卫星应用方面都表现了突出的数量优势, 且中国遥感学者更关注SAR、高光谱、LiDAR以及深度学习、神经网络、特征提取等前沿技术与算法研究。

关键词: 遥感, 文献计量, 学科发展趋势, 研究热点, 卫星数据, 应用领域

中图分类号: TP3/P2

引用格式: 黄铭瑞, 简洪登, 徐琛, 郝俊生, 闫珺, 刘良云, 范湘涛, 郭华东. 2023. 基于文献计量的遥感学科发展趋势分析. 遥感学报, 27(11): 2449–2466

Huang M R, Jian H D, Xu C, Hao J S, Yan J, Liu L Y, Fan X T and Guo H D. 2023. Bibliometrics spatial-temporal evolution analysis of the development of remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 27 (11) : 2449–2466 [DOI: 10.11834/jrs.20232659]

1 引言

遥感是一种不用直接接触物体表面就可识别、观察和测量物体的科学技术。“遥感”一词于20世纪50年代由美国海军研究办公室的Evelyn Pruitt女

士提出, 1962年在美国密歇根大学举办的环境遥感国际研讨会上首次正式使用该名词, 发展至今已走过60年。遥感由最初的航空摄影测量起步, 从研究光谱、成像技术等少数领域入手, 通过与空间科学、地球科学、电子科学、计算机科学以

收稿日期: 2022-12-03; 预印本: 2023-03-13

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(编号: XDA19080101); 可持续发展大数据国际研究中心主任青年基金(编号: CBAS2022DF015)

第一作者简介: 黄铭瑞, 研究方向为数字地球与文献计量学。E-mail: huangmr@radi.ac.cn

通信作者简介: 郭华东, 研究方向为遥感科学与应用。E-mail: hdguo@radi.ac.cn

及其他学科的广泛交叉渗透与融合,形成了光学遥感、红外遥感、微波遥感、高光谱遥感、激光雷达(LiDAR)等主要遥感技术(郭华东, 2001, 2021; 张兵, 2017; 郭华东和张露, 2019; Kahraman和Bacher, 2021),广泛应用于环境、生态、农业、林业、水文、地质、气象、海洋、交通、城市发展、自然灾害监测、可持续发展等诸多领域(刘良云等, 2022)。对遥感学科发展趋势的了解,单独用一种学科的研究视角很难客观的观察、探究和评价,利用文献计量方法定量分析遥感相关文献所承载知识的时空分布、数量关系和变化规律,梳理并提取遥感学科发展趋势及研究热点的时空演化特征,可为中国遥感学科的建设与发展提供重要的科学支撑。

科技文献是记录知识的载体,承载着科学研究的产出和成果,是科研人员交流前沿研究进展的重要工具。文献计量通过研究文献的增长规律、期刊分布规律、关键词出现频次规律、引文分析等,透视出学科发展的特征和重要性,以及知识在不同学科之间的相互渗透和交叉(Chen等, 2010)。使用信息可视化方法,可以呈现知识增长和传播的时空轨迹,揭示学科发展的特点和趋势(Chen和Song, 2019; 邱均平, 2019)。在遥感领域,利用文献计量分析学科发展的文献较多,但多集中于针对某个具体的专题领域,如全球土地利用与土地覆盖(LULC)(郑荣宝等, 2017)、全球气候变化(Li等, 2011)、生态学(马志波等, 2017)、土地退化(许宁等, 2008)、全球变化(赵纪东等, 2010)、草地生物量(杨东等, 2021)、叶面积指数(LAI)(Yan等, 2021),或是针对特定技术如数字高程模型(DEM)(Peng等, 2015)、时间序列分类(Ebrahim等, 2020)、无人机遥感应用(Wang等, 2021)、开放地理空间信息联盟(OGC)标准(Huang等, 2022)等,还有针对特定区域如对中国遥感(Zeng等, 2015)、青藏高原(Liu等, 2021)、太湖(Zhang等, 2016)等地区开展研究的文献计量分析等。少量遥感学科发展态势的文献计量研究论文研究时间较久远(冯筠和郑军卫, 2005; Zhang等, 2017),以及(张熠天等, 2015)通过文献计量比较分析了中外遥感卫星科学发展状况。这些基于遥感主题、时间或地域范围的文献计量分析,未体现遥感学科综合时空发展的趋势演化及迅猛发展的态势。

遥感是支撑国家资源能源调查、粮食安全监测、生态环境保护、自然灾害评估、国防安全等的重要学科。2022年,国务院学位委员会正式将遥感科学与技术列入国家一级交叉学科,反映了国家对遥感学科发展的迫切需求和高度重视。在此背景下,本文以Science Citation Index Expanded(SCI-E, 1900—至今,以下简称“SCI”)收录文献为研究对象,构建1962年—2021年间的遥感领域SCI文献数据库,通过文献计量方法,调研和分析遥感学科发展与应用状况,梳理遥感学科发展优势和问题。论文主要包括:分析全球遥感领域不同时空的研究热点及演化;对比分析美国、欧洲和中国遥感研究热点的分布异同;选择典型遥感卫星与传感器,对比分析美欧中典型在轨卫星及载荷的应用情况;选择合成孔径雷达(SAR)、高光谱(Hyperspectral)、激光雷达(LiDAR)3门遥感前沿技术,对比分析全球遥感前沿应用态势以及中美欧学者对3大技术的研究偏好与应用特点。

2 研究方法 with 数据源

本文在Web of Science(WoS)核心合集集中的SCI数据库中检索1962年—2021年的遥感领域SCI文章,对期间遥感领域论文增长趋势及主要发文国家(按第一作者国别)进行分析,重点对2016年—2021年遥感领域SCI文章进行发文数量(按第一作者国别)、研究主题、应用领域进行识别与提取,对不同国家学者的研究偏好进行对比分析。

在SCI数据库中,以remote sensing为检索词,分别进行主题检索(topic search)、领域检索(WoS Category)以及在WoS期刊引证报告JCR(Journal Citation Reports)收录的期刊名称含有remote sensing的期刊论文。检索到1962年—2021年遥感领域SCI文章171302篇,其中2016年—2021年有79568篇。本文使用DDA(Derwent Data Analyzer)和Excel进行文献字段数据的整理和清洗,使用VOSviewer进行数据可视化呈现。本文使用作者关键词(Author's Keywords)、组合关键词(Combined Keywords)、研究领域(WoS Category)、第一作者国家(Countries "1st")等字段。文中涉及国家的数据都取自第一作者国家字段。对关键词进行清洗的过程是通过人工判读将不同拼写方式的词合并。

本文从研究热点的角度分析遥感学科发展，研究热点是指在一段时间、一个特定空间区域内或利用特定技术、特定数据开展研究时形成的内容相近或相似的研究主题聚类。研究主题在不同时间阶段会呈现出新兴、热点、前沿等态势 (Wang, 2018)。其中，研究热点和前沿是当前研究领域特别受关注的主题，一方面，部分具有潜力的关键研究或新兴领域可能会产生突破性创新或颠覆性创新，从而发展成研究前沿；另一方面，当前的研究前沿可能在将来会受到很多学者的关注而成为下一个研究热点。研究热点具有规模大、快速增长、易识别等特征 (陈稳和陈伟, 2022)，能直观地反映一定时间范围内的遥感学科发展趋势。因此，本文重点从不同时间阶段和空间范围遥感研究的热点识别和提取入手进行遥感学科发展趋势研究。

使用相同关键词的不同文章具有相似或相近的研究主题。本文通过对作者关键词进行共现分析，识别并提取出一定时空条件下、使用相同技术或数据的研究者们的共同研究热点。在对文章按卫星或技术进行分类时，为弥补每篇文章的作者关键词受 5—8 个数量限制而带来的漏检情况，本文使用自然语言处理方法，对文章的标题、作者关键词、扩展关键词 (Keywords Plus) 以及摘要等字段进行实词提取，得到组合关键词数据集，

用来对文章进行研究主题分类，例如，当组合关键词中出现 Landsat 时，该文章归入 Landsat 类。为保证研究热点分析的准确性，仍使用作者关键词字段进行热点识别与提取。在研究热点可视化过程中，本文将共词规模控制在 300 个左右，因此，不同的分析会出现不同的共现强度阈值。在研究热点图中，少数节点由于位置重叠或关键词太长造成节点名不显示或字体很虚的情况，根据需要，我们严格对照软件中节点的位置，手工补充了一些空节点的关键词。

在 2016 年—2021 年的 79568 篇论文中，提取作者关键词 124847 个，进行人工清洗后得到 101189 个，用于分析研究热点；在标题、摘要、扩展关键词中提取出组合关键词 1645568 个，对明显无实际含义的词进行停词处理并经过人工清洗后，得到组合关键词 1342195 个，用于文章分类。

3 文献计量结果与对比分析

3.1 全球遥感领域SCI文章概况

根据第一作者所属国家发文数量，选取在 1962 年—2021 年发表遥感领域 SCI 论文数量超过 2000 篇的 14 个国家，进行全时段发文数量分析，如图 1 所示。由于 1962 年—1971 年的文章没有国家字段信息，所以图 1 显示 1972 年—2021 年的发文数据。

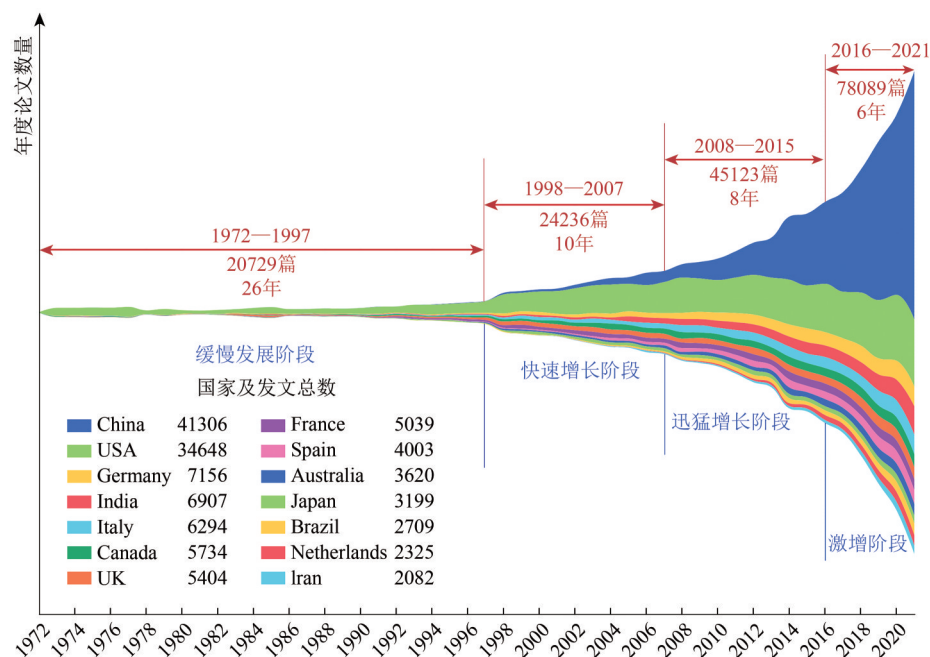


图 1 遥感领域发表相关SCI超过2000篇的14个国家(第一作者)在1972年—2021年的发文情况
Fig. 1 Remote sensing publication trends from 14 countries (1st authors) with more than 2000 SCI publications from 1972 to 2021

3.1.1 发文数量增长情况及主要发文国家

总体上看, 遥感学科的发展呈现出萌芽与稳步发展(1972年—1997年)、快速增长(1998年—2007年)、迅猛增长(2008年—2015年)和激增(2016年—2021年)等阶段, 尤其是自1998年起全球遥感领域发文数量上呈现快速增长、加速增长的趋势, 如图1所示。1962年—2012年, 全球累积发表遥感相关SCI文章69666篇, 2013年—2021年全球累积发文100131篇。中国(第一作者)发表的遥感相关SCI文章自1998年起首次超过50篇之后数量增长迅猛, 2014年, 中国(第一作者)年度发表遥感相关SCI文章2048篇, 首次超过美国(第一作者)年度1454篇跃居全球第一, 此后一直领先, 成为全球遥感领域年度发表SCI论

文数量最多的国家。2021年, 中国(第一作者)年度发表遥感相关SCI文章8063篇, 占全球该年度遥感相关SCI文章19121篇的42.17%。其他发文较多的国家主要有德国、印度、意大利等。

3.1.2 全球研究热点演化

全球范围内, 分别对上述4个发文数量变化阶段的研究热点进行识别和提取, 尝试分析遥感研究热点的演化及发展趋势。

(1) 1972年—1997年。1972年—1997年, 发文数量的特点是平缓发展, 处于萌芽与稳步发展阶段。这期间共提取作者关键词3141个, 选取共现多于3次的251个词进行聚类, 得到16个簇, 如图2(a)所示。

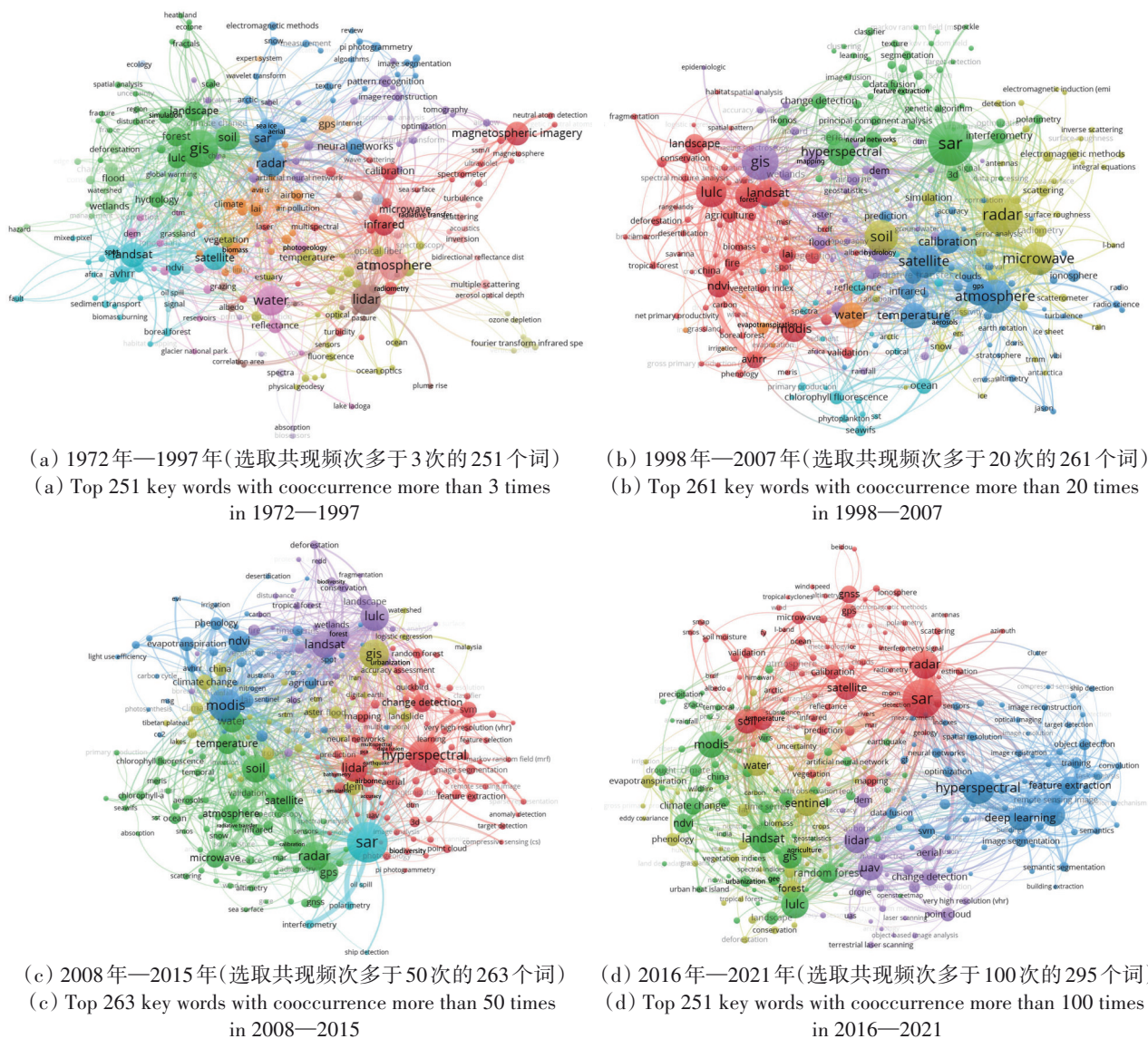


图2 1972年—2021年遥感发展不同阶段的研究热点

Fig. 2 Research hotspots of the global remote sensing from 1972 to 2021

在此期间, 遥感技术主要集中于SAR、红外(infrared)、微波(microwave)、LiDAR、航空(aerial)、航空摄影地质学(photogeology)等研究, 重点关注光谱学(spectroscopy)、光纤(optical fiber)、辐射传输(radiative transfer)、辐射特性测量(radiometry)、多重散射(multiple scattering)、定标(calibration)、反射率(reflectance)、磁层成像(magnetospheric imagery)、图像分割(image segmentation)、混合像元(mixed pixel)、仿真(simulation)、分形(fractals)等; 遥感应用方面主要使用Landsat、SPOT等卫星数据, 开展与陆地景观、土壤、植被、LAI、归一化植被指数(NDVI)、大气、水、水文、气象、气溶胶、气候变化、雪、海洋、北极等相关的应用研究。可以发现, 在遥感萌芽与稳步发展阶段, 多光谱遥感、雷达遥感和LiDAR是该阶段的前沿技术, 与之相关的机理研究和应用研究是当时的主要研究热点, LAI和NDVI等长时序、质量稳定的遥感数据产品开始出现, 把森林和植被遥感带入了之后的繁荣阶段。

(2) 1998年—2007年。1998年—2007年, 遥感学科进入快速增长阶段, 这期间的文章共提取作者关键词21233个, 选取共现多于20次的261个词进行聚类, 得到7个簇, 如图2(b)所示。

此期间, 全球遥感主要开展星载SAR、高光谱、LiDAR、红外、微波和机载(airborne)遥感等研究, 重点关注DEM、变化检测(change detection)、神经网络(neural network)、特征提取(feature extraction)、数据融合(data fusion)、辐射传输(radiation transfer)、电磁法(electromagnetic methods)、干涉(interferometry)、散射(scattering)、定标等研究主题, 主要使用Landsat、SPOT、IKONOS卫星及MODIS数据开展与土壤、大气、气溶胶、温度、水体、海洋环境、LULC、森林、湿地、冰川等相关的应用。可以发现, 在快速增长阶段, 遥感研究从多光谱技术与应用逐渐向雷达遥感和高光谱遥感方向发展, 雷达遥感的研究数量快速增长, 高光谱遥感开始出现, MODIS和更多的遥感卫星涌现, Landsat以及LAI、NDVI等遥感数据产品仍然是研究热点。

(3) 2008年—2015年。2008年—2015年, 遥感进入迅猛增长阶段, 这期间的文章共提取作者关键词51382个, 选取共现多于50次的263个词进

行聚类, 得到7个簇, 如图2(c)所示。

在此期间, 全球遥感主要开展SAR、高光谱、LiDAR等遥感前沿技术, 重点关注微波、校准(validation)、DEM、无人机(UAV)、3D、精度(accuracy)、变化检测、目标识别(target detection)、支持向量机(SVM)、稀疏表征(sparse representation)、马尔可夫随机场(markov random field(mrf))、特征提取、数据融合、点云(point cloud)、蒸散发(evapotranspiration)、碳循环(carbon cycle)、双向反射分布函数(BRDF)等研究主题, 主要使用Landsat、MODIS卫星数据开展与大气、水、叶绿素荧光、湖泊、土壤、LULC、农业、森林、草地、生物多样性、火灾、灾害、滑坡、城镇化等相关应用。可以发现, 在迅猛增长阶段, 高光谱遥感快速发展, 成为突出的研究热点, 雷达遥感、LiDAR仍是非常突出的前沿研究, 新的传感器增多, 关于中国的研究成为显著的研究热点, 遥感的应用领域更加丰富, Landsat和MODIS代表的光学遥感及应用是研究热点, NDVI和LAI成为较大的研究热点, 森林和植被的研究显著增多(陈良富等, 2016)。

(4) 2016年—2021年。2016年—2021年, 遥感进入激增阶段, 中国学者已成为全球遥感领域重要的推动者和不可忽视的参与者, 中国的研究极大影响着全球研究热点的发展和演化。这期间的文章共提取作者关键词101139个, 选取共现次数超过100次的290个词, 聚类分析后得到6个簇, 如图2(d)所示。

在此期间, 全球遥感研究热点更加聚集, 主要集中于SAR、高光谱、LiDAR等前沿技术, 重点关注微波、干涉、蒸散发、NDVI、LAI、DEM、人工神经网络(artificial neural network)、深度学习(deep learning)、目标探测(object/target detection)、特征提取、语义分割(semantic segmentation)、降维(dimensionality reduction)、注意机制(attention mechanism)、3D等研究主题, 主要使用Landsat、Sentinel、ALOS、WorldView等卫星数据以及MODIS数据, 开展关于大气、温度、土壤、气候变化、洪水、滑坡、火灾、物候学、生态系统等相关的应用研究。可以发现, 在激增阶段, 遥感研究的前沿研究已明显聚焦于多光谱遥感、雷达遥感、高光谱遥感、LiDAR等, 以Landsat和MODIS数据为主的光学遥感(绿色节点)、雷达遥

感（红色节点）、高光谱（蓝色节点）、LiDAR（紫色节点）已清晰地成为遥感领域的研究热点；与高光谱相关的算法成为较大的前沿技术，Sentinel卫星是突出研究热点；遥感应应用领域研究比较突出的是LULC、森林、水资源、土壤、大气、气候变化、NDVI、LAI、中国等；此阶段的突出标志是深度学习的兴起和谷歌地球引擎GEE（Google Earth Engine）的应用开始出现，在数据密集型科学研究范式、基于云平台的遥感服务方面为遥感研究赋予了大数据的时代特征。

3.1.3 全球遥感应应用领域

遥感技术与数据的应用领域非常广泛，选取1962年—2021年全球发文数量超过1000篇的11个应用领域按逆时针排序，依次分别是环境、气象与大气、土壤、植物、海洋及淡水生物、生物多样性与保护、林业、农业、土壤、生态、水资源，如图3所示。

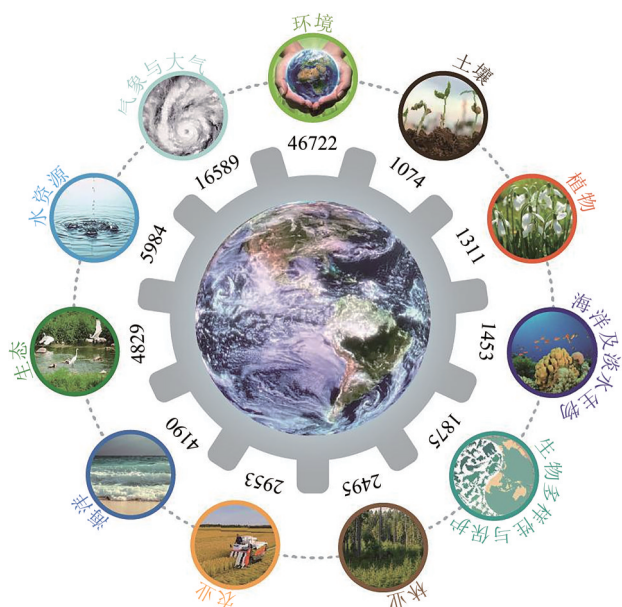


图3 1962年—2021年全球发文数量超过1000篇的遥感应应用领域

Fig. 3 1962—2021 the most global popular remote sensing applications published more than 1000 papers

3.2 近年(2016年—2021年)美欧中研究热点对比分析

3.2.1 美国近年研究热点

美国是遥感的发源地，也是当今世界空间科技实力最强的国家。美国遥感卫星获取的数据如

Landsat和MODIS等数据提供了有关地球表面及人类活动如何影响地球环境的宝贵信息来源，被全球广泛使用（Townshend, 2001；García-Mora等, 2012；Wulder等, 2019；Yan等, 2021）。简单来说，美国的遥感发展经历了“技术论证，遥感试验，政府主导的遥感力量大力发展，鼓励私营企业广泛参与遥感与数据应用”等阶段。美国从法律和政策保障入手，经历了“铺设信息高速公路，构建基础设施，全面数据共享，数据广泛应用”等阶段（黄铭瑞等, 2019）。在美国学者（第一作者）发表的文章中，清洗后共提取到18075个关键词，选择共现次数多于20次的240个词，聚类分析后得到7个簇，如图4（a）所示。

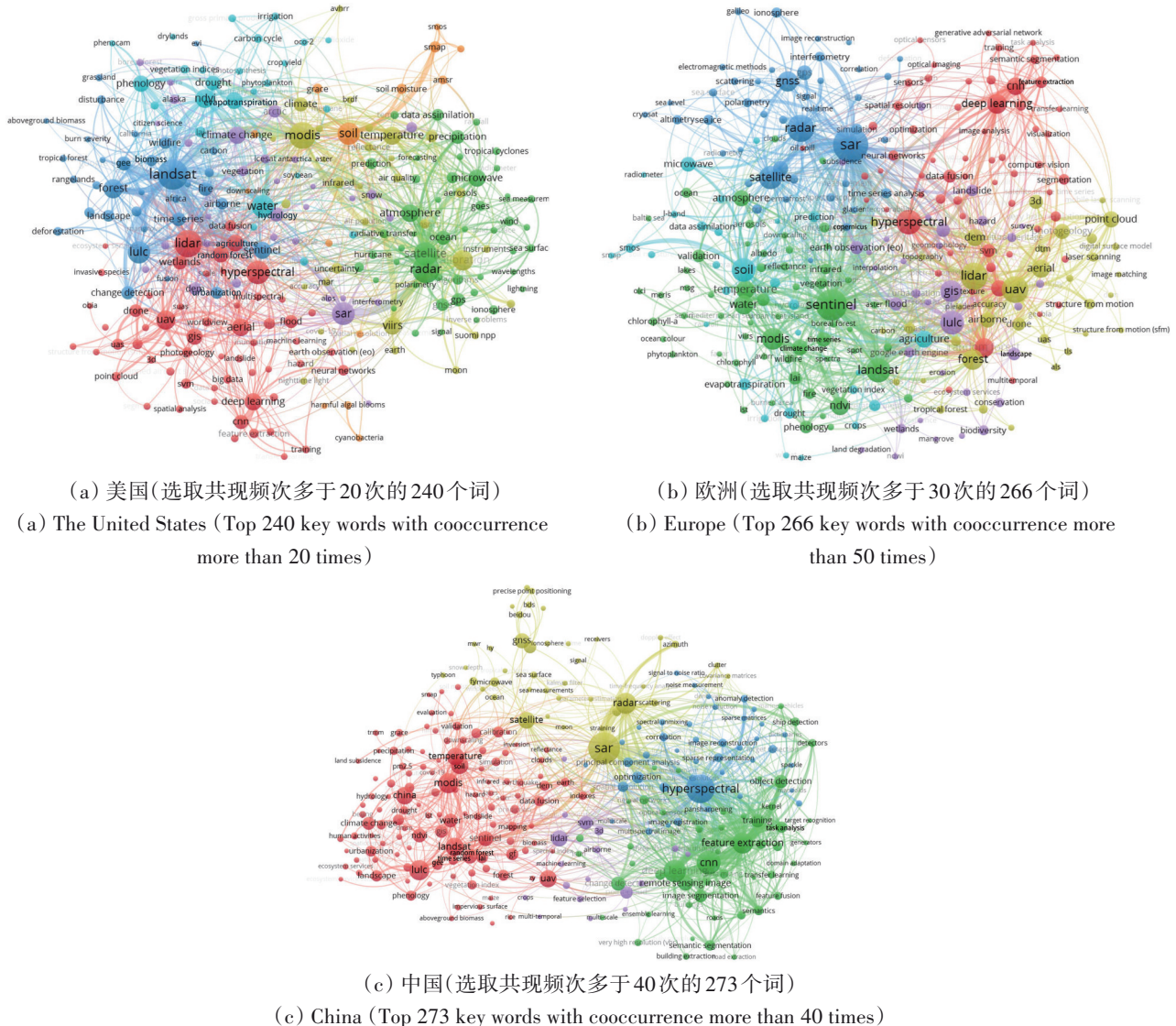
在2016年—2021年间，美国的遥感研究主要集中在SAR、高光谱、LiDAR、深度学习等研究热点，重点关注特征提取、图像分割、SVM、DEM、无人机（UAV和drone）、航空、仿真、不确定性、微波、红外、MODIS、定标、NDVI、LAI等研究前沿，使用Landsat、Sentinel、ALOS、ICESat等卫星数据以及MODIS数据，开展关于农业、气候变化、湿地、土壤、大气、温度、海洋、森林、植被、水资源、物候学、干旱、叶绿素、草地、空气污染等相关应用研究。可以发现，美国遥感研究的特点为：（1）以Landsat和MODIS卫星为代表的的光学遥感是最显著的节点，被广泛应用于植被、水资源、土地利用和土地覆盖等诸多领域；（2）SAR和微波遥感也是显著研究簇，雷达遥感广泛应用于大气、海洋、飓风、冰雪等领域；（3）LiDAR和高光谱遥感与无人机、深度学习、大数据等结合紧密；（4）GEE云平台是当前研究热点。

3.2.2 欧洲近年研究热点

欧洲遥感卫星任务主要由欧洲空间局推动，部分欧洲国家也拥有独立的对地观测能力。欧洲的主要对地观测计划有欧洲气象卫星Meteosat计划、欧洲遥感卫星计划ERS-1/2、环境卫星ENVISAT、用于观测陆地和海洋冰盖厚度变化的冷星CryoSat、欧洲哥白尼计划（Copernicus）的Sentinel系列卫星；国家级计划主要有法国地球资源观测实验卫星SPOT、德国重力场恢复与气候实验卫星GRACE等。这些欧洲的系列卫星或星座在不同领域建成了全球覆盖能力，经过数据全球共

享和商业化运作，欧洲遥感卫星数据在全球被广泛使用（Phiri 等，2020）。在欧洲学者（第一作者）发表的论文中，清洗后共提取到作者关键词

34013个,选择共现次数多于30次的492个词,聚类得到5个簇,如图4(b)所示。



在2016年—2021年间,欧洲的遥感研究主要集中在SAR、高光谱、LiDAR、深度学习等前沿技术,重点关注定标、3D、特征提取、语义分割、微波、DEM、无人机(UAV、UAS和drone)、航空、点云、摄影测量、SVM、随机森林(random forest)等研究主题,主要使用Sentinel、Landsat、MODIS以及ALOS等卫星数据,开展关于大气、水文、洪水、土壤、气候变化、植被、森林、生物质、火灾、物候学等相关的应用研究。可以发现,欧洲遥感研究的特点为:(1) Sentinel系列卫星应

用研究是显著节点，欧洲学者发表的 Sentinel 卫星相关的文章数量已超过 Landsat 卫星的发文数；(2) Sentinel 系列卫星与 Landsat、MODIS 等卫星或传感器的对比以及这些卫星在水资源、NDVI、火灾等的应用领域形成了研究热点；(3) 欧洲学者重视雷达遥感的研究，SAR 成为显著的研究热点；(4) 高光谱与 LiDAR 是研究热点，与之相关的无人机和深度学习等算法成为其子节点。

3.2.3 中国近年研究热点

中国的遥感始于20世纪70年代中后期。自

1988年发射第一颗风云气象卫星以来,中国遥感在过去30多年得到了飞速发展,逐渐发展了系列国产卫星,包括气象卫星(FY)、海洋卫星(HY)、资源卫星(ZY)、环境减灾卫星星座(HJ)、高分辨率对地观测系统(GF)等对地观测卫星体系。在中国学者(第一作者)发表的论文中,清洗后共提取到作者关键词46448个,选择共现次数多于40次的273词,聚类得到5个簇,如图4(c)所示。在2016年—2021年间,中国的遥感研究主要集中在SAR、高光谱、LiDAR、深度学习等研究热点,重点关注定标、校准、目标探测、图像重建(image reconstruction)、特征提取、卷积神经网络(CNN)、SVM、点云、随机森林等研究主题,使用Landsat、Sentinel、MODIS以及GF、FY等卫星数据,开展温度、水资源、大气、湖泊、气候、滑坡、森林、植被、LULC、陆地景观、城镇化、人类活动、城市热岛等研究。

从这些研究热点可以发现,中国学者集中在遥感成像前沿技术和先进信息分析方法研究,具体在SAR、高光谱、LiDAR以及大量与高光谱相关的深度学习、神经网络、特征提取等技术与方法方面。在遥感应用方面,中国学者主要利用

Landsat、Sentinel、MODIS等卫星数据开展与LULC、温度、水等研究。与欧美国家相比,中国遥感研究表现为如下特点:(1)相比欧美遥感研究热点深入众多学科和应用领域,中国遥感研究更偏重先进的前沿技术方法如SAR、高光谱、机器学习等,科学和应用研究相对偏弱;(2)深度学习的兴起极大推动了遥感应用,特别是欧美国家深度学习广泛应用于各个领域,而中国学者更聚集于技术方法的融合,特别是高光谱与深度学习的融合;(3)中国在SAR、高光谱、LiDAR前沿技术方面发表的SCI文章显著领先于其他国家;(4)中国学者遥感应用研究高度依赖于Landsat、Sentinel、MODIS等国外卫星数据,国产卫星的研究应用还需大力加强。

3.3 中外典型卫星及传感器应用对比分析

为了探索全球典型遥感卫星的应用情况,本文根据空间分辨率和用途,选择典型中高/低分辨率卫星和传感器、典型对地观测科学卫星,提取并分析了2016年—2021年的研究热点、应用领域及主要发文国家(按第一作者统计),分析流程如图5所示。

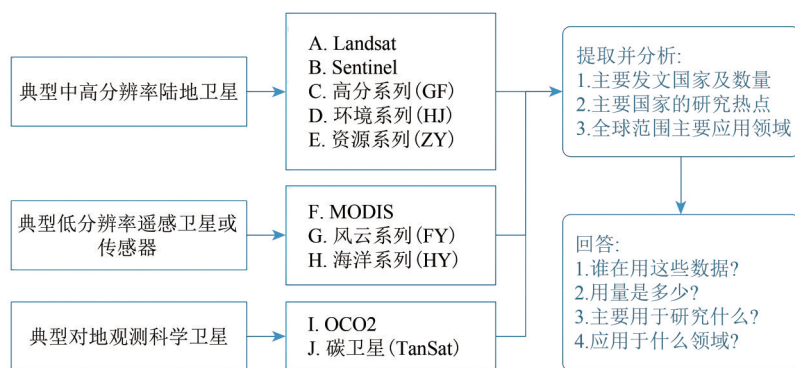


图5 美国、欧洲、中国主要卫星和传感器遥感应用对比分析流程

Fig. 5 Comparative analysis of remote sensing applications of major satellites and sensors in the United States, Europe and China

3.3.1 典型中高分辨率陆地卫星遥感对比分析

(1) Landsat数据应用情况。全球使用Landsat卫星数据的研究热点主要集中在LULC、水资源、森林、植被、温度、气候变化、陆地景观、城镇化等方面,广泛应用于环境科学、地球科学、制图、林业、生态、生物多样性、水资源、土壤、气象与大气、农业等259个领域。使用Landsat卫星数据的学者主要来自中、美、印等,详见表1,其中中

国学者(第一作者)论文最多,为2767篇。

(2) Sentinel数据应用情况。Sentinel卫星密切相关的研究热点主要集中在SAR、高光谱、LiDAR、CNN、随机森林算法、时间序列分析等方面,应用于水资源、森林、LULC、洪水、植被指数、LAI、蒸散发、大气、陆地沉降、船只探测等研究,广泛应用于环境科学、地球科学、制图、农业、生态、林业、植物科学、土壤科学、气象与大气科学、天文学等173个领域。使用Sentinel

卫星数据的学者主要来自中、美、意等，详见表2，其中中国学者（第一作者）论文最多，为1152篇。

表1 2016年—2021年全球发表Landsat卫星相关SCI文章最多的前10个国家/地区

Table 1 The most productive 10 countries of SCI papers on Landsat from 2016 to 2021

/篇								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	241	287	418	538	589	694	2767
2	USA	199	190	245	235	283	259	1411
3	India	44	51	70	89	114	143	511
4	Brazil	35	38	38	44	71	66	292
5	Canada	35	47	44	53	48	42	269
6	Iran	31	26	32	40	57	82	268
7	Germany	41	41	49	42	50	44	267
8	Italy	35	33	37	37	44	40	226
9	Australia	28	24	40	39	37	42	210
10	Spain	17	26	32	37	40	34	186

表2 2016年—2021年全球发表Sentinel卫星相关SCI文章最多的前10个国家/地区

Table 2 The most productive 10 countries of SCI papers on Sentinel from 2016 to 2021

/篇								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	13	49	84	187	319	500	1152
2	USA	17	28	47	71	132	137	432
3	Italy	20	27	43	84	95	125	394
4	Germany	24	20	58	63	97	99	361
5	France	17	21	31	52	62	75	258
6	Spain	13	11	29	47	72	80	252
7	India	0	4	9	27	55	89	184
8	UK	5	8	24	39	40	44	160
9	Canada	4	3	17	30	36	32	122
10	Iran	0	0	4	17	35	52	108

（3）GF数据应用情况。GF卫星密切相关的研究热点主要集中在SAR、深度学习、卫星、定标、高光谱、时间序列、遥感影像、特征提取、SVM等方面，应用于环境科学、地球科学、制图、林业、生态、湖沼生物学、气象与大气科学、土壤科学等91个领域。使用GF卫星数据的学者主要来自中国，详见表3，其中中国学者（第一作者）论文最多，为886篇。

（4）HJ数据应用情况。HJ卫星密切相关的研究热点主要集中在高光谱、SAR等方面，应用于

环境科学、地球科学、制图、农业、生态等52个领域。使用HJ卫星数据的学者主要来自中国，详见表4，其中中国学者（第一作者）论文最多，为188篇。

表3 2016年—2021年全球发表GF卫星相关SCI文章最多的前12个国家/地区

Table 3 The most productive 12 countries of SCI papers on GF from 2016 to 2021

/篇								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	36	77	124	155	227	267	886
2	France	0	2	0	3	0	0	5
3	Iran	0	0	0	0	4	0	4
4	South Korea	0	1	1	2	0	0	4
5	Spain	0	0	0	2	0	2	4
6	USA	0	0	1	1	0	2	4
7	Italy	0	0	0	0	1	2	3
8	Australia	0	0	0	0	2	0	2
9	Canada	0	2	0	0	0	0	2
10	India	0	0	0	1	1	0	2
11	Japan	0	0	0	0	1	1	2
12	UK	0	0	1	1	0	0	2

表4 2016年—2021年全球发表HJ卫星相关SCI文章的国家/地区

Table 4 Countries of SCI papers on HJ from 2016 to 2021

/篇								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	42	40	30	30	31	15	188
2	Australia	0	0	0	1	0	0	1
3	Italy	0	1	0	0	0	0	1
4	New Zealand	0	0	1	0	0	0	1
5	Pakistan	0	1	0	0	0	0	1
6	Portugal	0	0	1	0	0	0	1
7	Thailand	0	0	1	0	0	0	1
8	Turkey	0	1	0	0	0	0	1

（5）ZY数据应用情况。ZY卫星密切相关的研究热点主要集中在卫星、定标、校正、高分辨率、深度学习、CNN、SVM、高光谱、图像匹配、SAR、DEM、RFM、DSM、有理函数模型等方面，应用于环境科学、地球科学、制图、水科学、林业等31个领域。使用ZY卫星数据的学者主要来自中国，详见表5，其中中国学者（第一作者）论文最多，为197篇。

不同系列卫星的发射时间、卫星数量会对发文数量产生较大影响，表6提供了上述典型中高分

分辨率陆地卫星的发射时间、卫星数量及主要应用领域。

表 5 2016 年—2021 年全球发表 ZY 卫星相关 SCI 文章的国家/地区

Table 5 Countries of SCI papers on ZY satellite from 2016 to 2021								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计/篇
1	China	24	39	27	26	35	46	197
2	Australia	0	0	1	0	0	0	1
3	Austria	0	0	0	0	0	1	1
4	Italy	1	0	0	0	0	0	1
5	Nepal	0	0	0	0	1	0	1
6	Netherlands	0	0	0	0	0	1	1

表 6 2016 年—2021 年典型中高分辨率陆地卫星及数据应用情况
Table 6 Typical medium/high-resolution land satellites and the data applications from 2016 to 2021

系列卫星	首颗发射时间	卫星数量	应用领域数量	应用最多的前 5 个领域
Landsat	1972 年 7 月 23 日	9	259	环境科学、地球科学、制图、林业、生态学
Sentinel	2014 年 4 月 3 日	12	173	环境科学、地球科学、制图、农业、生态学
高分 (GF)	2013 年 4 月 26 日	14	91	环境科学、地球科学、制图、林业、生态学
环境 (HJ)	2008 年 9 月 6 日	8	52	环境科学、地球科学、遥感、农业、生态学
资源 (ZY)	1999 年 10 月 14	12	31	环境科学、地球科学、制图、水科学、林业

表 7 2016 年—2021 年全球发表 MODIS 相关 SCI 文章最多的前 10 个国家/地区

Table 7 The most productive ten countries of SCI papers on MODIS from 2016 to 2021								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计/篇
1	China	351	412	468	590	603	662	3086
2	USA	257	221	240	244	226	228	1416
3	Germany	74	58	63	48	46	49	338
4	India	40	49	44	46	59	67	305
5	Italy	42	34	31	43	49	25	224
6	Brazil	21	17	31	45	44	46	204
7	Canada	38	33	39	34	25	21	190
8	Spain	21	18	31	33	44	31	178
9	Iran	15	29	16	22	49	44	175
10	France	33	32	25	25	27	25	167

(2) FY 数据应用情况。FY 卫星密切相关的研究热点主要集中在温度、卫星、定标、中国、微波、土壤、云探测、高光谱、数据同化等方面，应用领域包括环境科学、地球科学、制图、农业、生态、林业、植物科学、土壤科学、气象与大气科学、天文学等。使用 FY 卫星数据的学者主要来

3.3.2 典型中低分辨率遥感卫星/传感器对比分析

选择美国 Terra/Aqua MODIS 传感器和中国风云卫星 (FY)、海洋 (HY) 系列卫星进行对比分析。

(1) MODIS 数据应用情况。MODIS 是全球应用最广泛的卫星遥感数据 (Zhao 等, 2022)。MODIS 密切相关的研究热点主要集中在 SAR、LiDAR、定标等，广泛应用于环境科学、地球科学、气象与大气科学、遥感、农林气象、农业工程、生态、渔业、天文学等 224 个领域。使用 MODIS 数据的学者主要来自中、美、德等，详见表 7，其中中国学者 (第一作者) 论文最多，为 3086 篇。

自中国，详见表 8，其中中国学者 (第一作者) 论文最多，为 299 篇。

表 8 2016 年—2021 年全球发表 FY 卫星相关 SCI 文章最多的前 12 个国家/地区

Table 8 The most productive 12 countries of SCI papers on FY satellite from 2016 to 2021								
序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计/篇
1	China	18	32	30	60	66	93	299
2	USA	3	3	0	0	2	2	10
3	UK	0	1	1	1	0	5	8
4	South Korea	0	1	1	1	1	2	6
5	Spain	0	1	1	0	1	0	3
6	Australia	0	1	0	1	0	0	2
7	Canada	0	0	0	2	0	0	2
8	Cyprus	0	0	0	0	0	2	2
9	Germany	0	0	1	0	0	1	2
10	India	0	0	1	1	0	0	2
11	Italy	0	0	2	0	0	0	2
12	Japan	0	0	1	0	1	0	2

(3) HY 数据应用情况。HY 卫星密切的研究热点主要集中在卫星、定标、雷达、微波、校准、

后向散射等方面，应用于环境科学、农业、生态、林业、植物科学、土壤科学、气象与大气科学、天文学等14个领域。使用HY卫星数据的学者主要来自中国，详见表9，其中中国学者（第一作者）论文最多，为81篇。

3.3.3 典型对地观测科学卫星对比分析

本研究对OCO2和碳卫星（TanSat）进行了应用对比分析，了解其研究热点及主要应用领域。

（1）OCO2数据应用情况。OCO2卫星密切相关的研究热点主要集中在太阳诱导的叶绿素荧光（SIF）、CO2、CO2柱浓度混合比（XCO2）、干旱、作物产量、大气、气溶胶等，应用于环境科学、气象与大气科学、能源与燃料、生物多样性保护

生态学等31个领域。使用OCO2卫星数据的学者主要来自美国和中国，详见表11，其中美国学者（第一作者）论文最多，为61篇。

表9 2016年—2021年全球发表HY卫星相关SCI文章的国家/地区

Table 9 Countries of SCI papers on HY from 2016 to 2021 /篇

序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	6	7	10	12	16	30	81
2	Greece	0	0	2	0	0	0	2
3	Australia	0	0	0	1	0	0	1
4	Czech Republic	0	0	0	0	1	0	1
5	Italy	1	0	0	0	0	0	1
6	UK	0	0	0	0	0	1	1

表10 2016年—2021年典型中低分辨率遥感卫星/传感器及其数据应用情况

Table 10 Typical medium/low-resolution land satellites and the data applications from 2016 to 2021

系列卫星/传感器	首颗发射时间	卫星数量	应用领域数量	应用最多的前5个领域
Terra/Aqua MODIS	1999年12月18日	2	224	环境科学、地球科学、气象与大气科学、遥感、农林气象
风云(FY)	1988年9月7日	19	9	环境科学、地球科学、制图、农业、生态学
海洋(HY)	2002年5月15日	7	14	环境科学、农业、生态学、林业、植物科学

表11 2016年—2021年全球发表OCO2卫星相关SCI文章最多的前12个国家/地区

Table 11 The most productive 12 countries of SCI papers on OCO2 from 2016 to 2021 /篇

序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	USA	5	6	9	13	14	14	61
2	China	0	2	7	5	15	17	46
3	Germany	0	2	1	0	4	2	9
4	UK	0	2	1	0	2	2	7
5	South Korea	0	0	0	2	0	4	6
6	Australia	0	2	2	1	0	0	5
7	Japan	0	1	1	1	0	2	5
8	India	0	2	0	0	1	1	4
9	France	0	1	1	0	0	1	3
10	Canada	0	0	0	1	0	1	2
11	Finland	0	0	0	2	0	0	2
12	Italy	1	0	0	0	1	0	2

（2）TanSat数据应用情况。TanSat卫星密切相关的研究热点主要集中在高光谱、遥感、大气、气溶胶、CO2、太阳诱导的叶绿素荧光（SIF）、定标等，应用于环境科学、地球科学、制图、气象与大气科学、光学与光谱学等12个领域。使用

TanSat卫星数据的学者主要来自中国，详见表12，其中中国学者（第一作者）论文最多，为22篇。

表12 2016年—2021年全球发表TanSat卫星相关SCI文章的国家/地区

Table 12 Countries of SCI papers on TanSat from 2016 to 2021 /篇

序号	国家	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	3	3	3	6	7	22
2	France	0	0	1	0	0	1
3	UK	0	0	0	0	1	1

典型对地观测科学卫星的发射时间、卫星数量及主要应用领域见表13。

综上所述，经过多年发展，中国逐步形成了以气象、海洋、资源、环境灾害、高分、可持续发展等体系完整的对地观测卫星体系（郭华东，2014；CBAS，2021）。2014年，中国年度发表遥感SCI文章数量首次跃居全球第一，此后一直领先，从卫星发射数量和论文发表数量两个维度，中国毋庸置疑地成为了航天遥感大国。表14汇总了中国和国外学者使用不同卫星数据发表的SCI论文汇总。从文献计量角度看，2016年—2021年，全球主要遥感卫星和传感器的发文数量中国均排

名第一，但从国产卫星遥感应用情况来看，从使用中国遥感卫星数据发表论文的情况来看，中国学者使用外国卫星数据发表的SCI文章远高于使用国产卫星发表的SCI文章，外国学者使用国产卫星数据发表文章的非常少。从这些卫星数据的使用

情况发现，虽然中国学者的发文数量多，但显然中国学者在开展研究过程中严重依赖外国卫星数据。如果从使用国产卫星数据发表SCI文章数量的角度看，国产卫星的国际影响力还相对薄弱。

表 13 2016 年—2021 年典型对地观测科学卫星及其数据应用情况

Table 13 Typical Earth observation science satellites and their data applications from 2016 to 2021

系列卫星	首颗发射时间	卫星数量	应用领域数量	应用最多的前 5 个领域
OCO2	2014-07-02	1	31	太阳诱导的叶绿素荧光(SIF)、CO2、CO2柱浓度混合比(XCO2)、干旱、作物产量
碳卫星(TanSat)	2016-12-22	1	12	环境科学、地球科学、制图、气象与大气科学、光学与光谱学

表 14 2016 年—2021 年中外学者(第一作者)使用不同卫星数据发表SCI论文情况对比

Table 14 Comparison of SCI papers between Chinese and foreign authors using different satellite data counted by the 1st author country from 2016 to 2021

	使用国外卫星发表	使用国产卫星发表
	SCI 论文数量	SCI 论文数量
全球	18004	1,743
中国学者	5839	1,633
外国学者	12165	110
其中,美国学者	2682	16
其中,欧洲学者	4482	51

3.4 遥感前沿技术应用对比分析

根据本文第 2 节对遥感学科研究热点与前沿的内涵、定义及其相互转化的分析，通过第 3.1.2 节对不同时间阶段全球遥感研究热点的提取与演化分析（图 2），以及第 3.2 节对 2016 年—2021 年美国、欧洲和中国遥感研究热点的对比分析（图 4），可以清晰的发现“SAR、高光谱和LiDAR”在不同时空范围中始终具有“热点、关注度高”的特征。这些研究热点分析表明“SAR、高光谱和LiDAR”是遥感研究前沿，这与遥感领域学者们的共识“SAR、高光谱和LiDAR是当前遥感的三大前沿技术”（郭华东，2001，2021；张兵，2017；Kahraman和Bacher，2021）相符合。本节对三大前沿技术进行 2016 年—2021 年全球范围文献计量分析，并对中美学者（第一作者）的研究特点与应用偏好进行对比分析。

3.4.1 合成孔径雷达研究与应用情况

全球 SAR 研究热点主要集中在 DEM、变化检

测、CNN、深度学习、特征提取、卫星、定标等方面，广泛应用于森林、洪水、LULC、土壤、水、北极、灾害、滑坡、沉降、船舶探测等研究。开展 SAR 研究的学者主要来自中、美、意等，详见表 15，其中中国学者（第一作者）论文最多，为 3535 篇，远远领先其他国家。

表 15 2016 年—2021 年全球开展 SAR 研究发表SCI文章最多的前 10 个国家(第一作者)年度发文情况

Table 15 The most productive 10 countries of SCI papers on SAR counted by the 1st author from 2016 to 2021

序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	419	446	508	632	637	893	3535
2	USA	83	88	95	89	101	116	572
3	Italy	80	72	78	101	85	112	528
4	Germany	72	64	117	71	72	75	471
5	India	21	45	40	46	75	94	321
6	Canada	25	45	69	61	52	38	290
7	France	32	28	36	54	36	47	233
8	Iran	18	23	29	38	46	35	189
9	UK	19	19	36	40	41	33	188
10	Japan	11	20	36	36	33	29	165

在研究主题方面，提取共现超过 100 次的 20 个关键词进行中美学者对比发现，中国学者使用 SAR 开展研究的发文数量普遍比美国学者多，主要包括变化检测、土壤、DEM、特征提取、森林、洪水等。美国学者使用 SAR 技术在湿地研究方面发表的文章比中国学者多，如图 6 所示。图中每行左侧的数据表示在 2016 年—2021 年全球发表 SAR 文章中与该热点关键词相关文章的总数，蓝色和红色分别代表中美两国，颜色条的长短表示发文数量的多少。

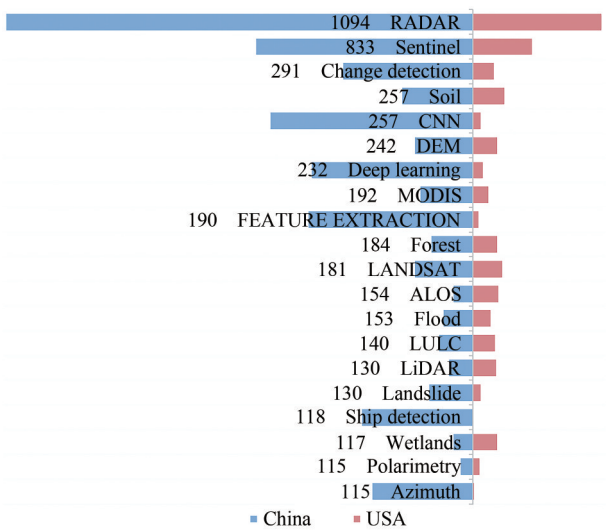


图6 2016年—2021年中美学者(第一作者)开展SAR研究时共现频次最高的前20个关键词对比

Fig. 6 Top 20 key words from SAR related SCI papers published by 1st authors of China and the United States from 2016 to 2021

3.4.2 高光谱研究与应用情况

全球高光谱研究热点主要集中在特征提取、深度学习、CNN、SVM、主成份分析、无人机、LiDAR等,应用研究主要包括变化检测、目标识别、土壤、森林、生物质、LAI、植被指数等。开展高光谱研究的学者主要来自中、美、意等,详见表16,其中中国学者(第一作者)论文最多,为3192篇,远远领先其他国家。

表16 2016年—2021年全球开展高光谱研究发表SCI文章最多的前10个国家(第一作者)年度发文情况

Table 16 The most productive 10 countries of SCI papers on Hyperspectral counted by the 1st author from 2016 to 2021

序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	329	386	432	597	654	794	3192
2	USA	117	100	109	121	123	140	710
3	India	28	40	33	60	69	91	321
4	Germany	36	46	38	52	54	49	275
5	Spain	31	25	32	49	28	28	193
6	Iran	26	36	24	22	24	20	152
7	France	24	18	23	28	27	28	148
8	Italy	22	21	17	22	29	25	136
9	Canada	14	18	28	12	23	30	125
10	Australia	16	12	20	26	21	26	121

在研究内容方面,中国学者在高光谱领域的发文数量远比美国学者多,主要开展特征提取、CNN、深度学习、SVM、无人机、LiDAR、降维等

技术,主要应用于土壤、异常检测等。美国学者开展高光谱研究时,在成像光谱技术方面的文章数量较中国学者多。中国学者开展高光谱研究时,针对方法和技术的研究论文多,针对科学应用的论文相对较少,如图7所示。

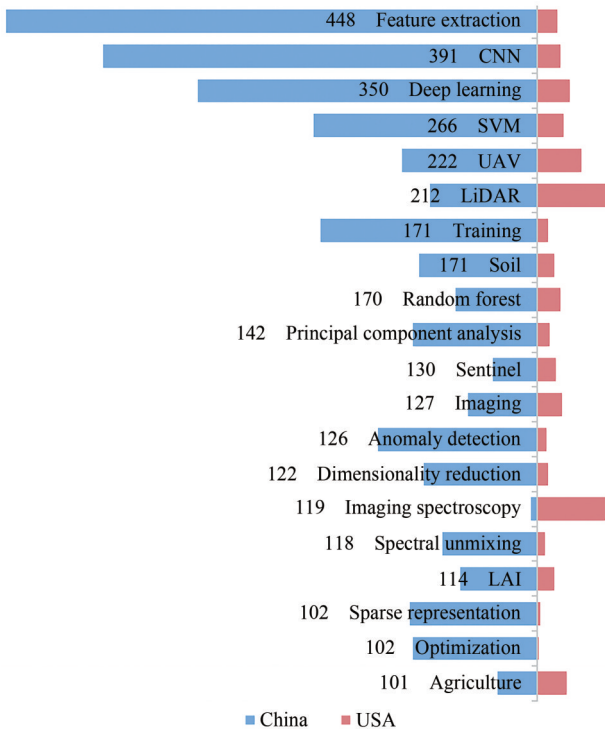


图7 2016年—2021年中美学者(第一作者)开展高光谱研究时共现频次最高的前20个关键词对比

Fig. 7 Top 20 key words from Hyperspectral related SCI papers published by 1st authors of China and the United States from 2016 to 2021

3.4.3 激光雷达研究与应用情况

全球LiDAR研究热点主要集中在点云、无人机、机载、SAR、高光谱、航空、语义分割、运动结构重建、断层摄影、偏振测量、3D、大数据、极化等,广泛应用于森林、生物质、树高、物候学、冠层高度模型、地上生物质、冰冻圈、LULC、水资源、亚马逊、滑坡、滑坡检测、气溶胶、气溶胶光学厚度、风能、北极环境、地震等研究。开展LiDAR研究的学者主要来自中、美、德等,详见表17,其中中国学者(第一作者)论文最多,为1513篇,略领先于美国的1191篇。

在研究内容方面,中美两国学者使用LiDAR开展研究的发文数量相当,中国的研究在点云、无人机、高光谱、雷达、随机森林、深度学习、CNN、特征提取等方面明显较美国学者多;美国

学者在遥感、森林、航空、DEM、生物质等领域的研究较中国学者多，如图8所示。

表 17 开展LiDAR研究发表SCI文章最多的前10个国家
(第一作者)年度发文情况

Table 17 The most productive 10 countries of SCI papers
on LiDAR counted by the 1st author

序号	国家	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
1	China	133	158	225	279	304	414	1513
2	USA	174	150	205	224	209	229	1191
3	Germany	34	52	61	66	53	70	336
4	Canada	36	44	52	43	55	60	290
5	Spain	24	20	35	56	62	49	246
6	Italy	32	28	27	37	48	46	218
7	Australia	29	16	28	36	40	46	195
8	UK	27	34	35	41	31	27	195
9	France	31	29	28	30	33	42	193
10	Finland	27	33	16	29	33	17	155

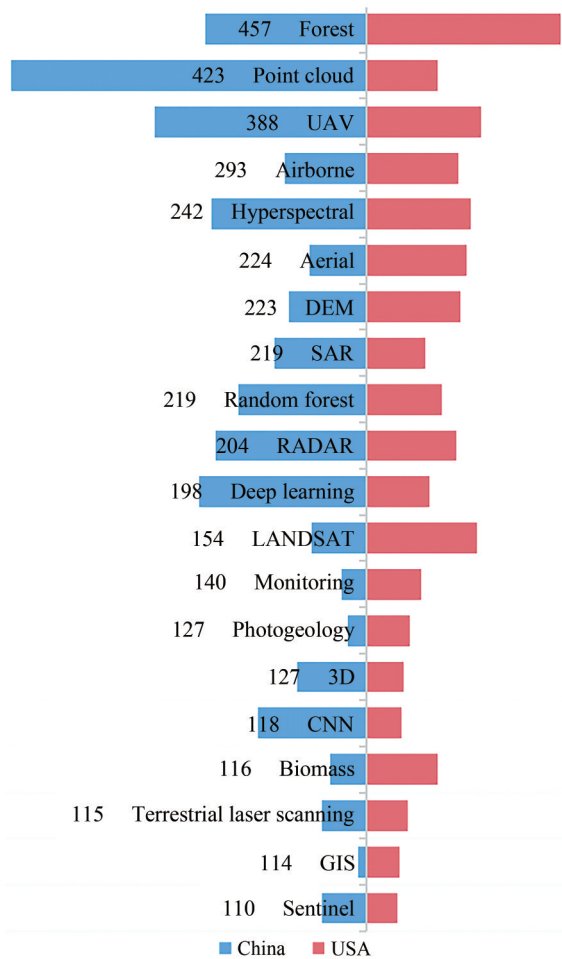


图8 2016年—2021年中美学者(第一作者)开展LiDAR研究时共现频次最高的前20个关键词
Fig. 8 Top 20 key words from LiDAR related SCI papers published by 1st authors of China and the United States from 2016 to 2021

4 讨论

遥感学科SCI文章的增长态势，不仅反映了遥感自诞生以来的发展速率，还揭示了不同阶段、不同国家研究热点演化的特征。随着人类对认识地球需求的不断提升和科学技术的发展，月基对地观测平台正在研究中。月球作为新型对地观测平台，将是把地球作为一个整体进行研究的新技术方向（郭华东，2016）。进入大数据时代，新的遥感数据使用模式出现，用户从原来的下载数据、再加工、使用的模式转变到使用遥感云服务平台提供的遥感数据和云计算功能，无需下载数据和安装分析软件，可以直接选择和使用遥感数据进行分析（Xu等，2022；Gorelick等，2017）。

本文以SCI为数据源，选取全球认可的高水平学术论文进行遥感学科发展趋势文献计量分析。由于受数据库收录限制，有数量庞大的优质期刊未被SCI检索，同时，受SCI数据库语言限制，绝大多数文章以英文为主，非英语国家以母语发表的遥感文章，如中国遥感早期的文章几乎全部以中文为主，再如其他以法、德、意、俄等欧洲国家发表的母语文章，大多未被SCI收录。这些局限会在分析欧洲和中国的研究热点时产生一定影响。

另外，受数据筛选和处理方法所限，对关键词的清洗步骤主要是合并不同拼写方式的同义词（如将synthetic aperture radar与SAR合并）和识别一词多义（如FY、ZY等代表中国的系列卫星同时也有其他含义），这会在清洗个别关键词时产生一定的主观性。同时，本文只筛选了高频词，未考虑大量低频的、不同时间阶段出现的突现词，这些短期出现的新兴领域未纳入本次分析。在数据可视化设置共现强度的阈值时，有些较小的研究热点会因关键词的共现强度和词频阈值选择受到影响。

其次，受篇幅所限，本文未开展引文分析和期刊分析，WoS数据库提供及时更新的被引参考文献检索平台和期刊引证报告（JCR）分析平台，可对文章的引用及期刊情况进行在线检索和分析。

最后，本文通过文献计量分析，从前沿技术和应用热点两方面分析总结了遥感学科的时空发展趋势，未从学科角度进行深度挖掘和综述。这些局限可以在今后的工作中继续研究和探讨。

5 结 论

本文通过文献计量方法回顾遥感学科60年的发展趋势,将不同时间阶段的研究热点进行提取,发现了遥感前沿技术的发展演化特征;提取了近期美国、欧洲、中国的遥感研究热点,发现了遥感在不同空间下的研究特点;对10种典型遥感卫星/传感器进行了应用对比分析;对三大遥感前沿技术(SAR、高光谱和LiDAR)进行了全球研究热点分析。本文对全面了解遥感学科在不同时空环境下的发展趋势演化以及遥感数据的应用情况具有一定的参考价值,主要结论总结如下:

(1) 在文献数量方面,在全球范围内,1962年—1997年属于萌芽与稳定发展阶段,该阶段以多光谱遥感技术与应用为主。1998年—2007年为快速增长阶段,研究特点从多光谱技术与应用逐渐向雷达遥感、高光谱遥感迁移。2008年—2015年为迅猛增长阶段,土地利用和土地覆盖以及多学科应用成为显著的研究热点。中国(第一作者)自2014年起首次年度发表SCI文章2048篇超过美国(第一作者)1454篇跃居全球第一,此后一直领先,成为全球遥感领域年度发表SCI论文数量最多的国家。2021年,中国(第一作者)年度发表遥感相关SCI文章8063篇,占全球该年度遥感相关SCI文章19121篇的42.17%。

(2) 在美国、欧洲、中国研究热点对比方面,2016年以来,美国的遥感研究在Landsat、Sentinel、Terra/Aqua MODIS等卫星遥感数据及红外、LiDAR、高光谱、SAR等前沿技术推动下,在科学和应用驱动下,遥感深入到丰富的应用领域之中。欧洲遥感研究重视对SAR、LiDAR的研究,特别是Sentinel系列卫星极大推动了欧洲和全球研究和应用。中国遥感研究在技术和应用方面的都体现出显著的数量优势。在遥感技术方面,中国的研究热点集中在SAR、高光谱、LiDAR以及大量关于深度学习、神经网络、特征提取等技术与算法方面。在遥感应用方面,中国学者主要使用Landsat、MODIS、Sentinel等卫星数据开展与土地利用和土地覆盖、温度、水资源等方面的应用研究。

(3) 在遥感卫星数据应用方面,Landsat、Terra/Aqua MODIS、Sentinel数据自出现以来就一直被全球用户广泛使用,尤其是中国学者的应用研究高度依赖这些国外卫星数据。国产卫星数据

的应用支撑还比较薄弱,少有国外用户使用中国卫星数据发表SCI论文。国产卫星服务全球研究、提高国际影响力的路程才刚起步。

参考文献(References)

- CBAS. 2021. SDGSAT[EB/OL]. [2023-02-06]. <http://www.cbac.ac.cn/en/resources/sdgsat/> (CBAS 官网. 2021. 可持续发展科学卫星[EB/OL]. [2023-02-06]. <http://www.cbac.ac.cn/en/resources/sdgsat/>)
- Chen C M, Ibekwe-SanJuan F and Hou J H. 2010. The structure and dynamics of cocitation clusters: a multiple-perspective cocitation analysis. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61(7): 1386-1409 [DOI: 10.1002/asi.21309]
- Chen C M and Song M. 2019. Visualizing a field of research: a methodology of systematic scientometric reviews. *PLoS One*, 14(10): e0223994 [DOI: 10.1371/journal.pone.0223994]
- Chen L F, Yan J, Fan W J, Xin X Z, Zhao T J, Chen F, Wu C Y and Fan M. 2016. Twentieth anniversary of the *Journal of Remote Sensing*. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 794-806 (陈良富, 闫珺, 范闻捷, 辛晓洲, 赵天杰, 陈方, 吴朝阳, 范萌. 2016. 《遥感学报》20年: 从热点到前沿. *遥感学报*, 20(5): 794-806) [DOI: 10.11834/jrs.20166230]
- Chen W and Chen W. 2022. The identification and evolution of research frontiers from comparison of science and technology. *Journal of Intelligence*, 41(1): 67-73, 163 (陈稳, 陈伟. 2022. 科学与技术对比视角下的前沿主题识别与演化分析. *情报杂志*, 41(1): 67-73, 163) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1965.2022.01.011]
- Ebrahim S A, Poshtan J, Jamali S M and Ebrahim N A. 2020. Quantitative and qualitative analysis of time-series classification using deep learning. *IEEE Access*, 8: 90202-90215 [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993538]
- Feng Y and Zheng J W. 2005. An analysis of status and trends of the international remote sensing science on bibliometrics. *Remote Sensing Technology And Application*, 20(5): 526-530 (冯筠, 郑军卫. 2005. 基于文献计量学的国际遥感学科发展态势分析. *遥感技术与应用*, 20(5): 526-530) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2005.05.014]
- García-Mora T J, Mas J F and Hinkley E A. 2012. Land cover mapping applications with MODIS: a literature review. *International Journal of Digital Earth*, 5(1): 63-87 [DOI: 10.1080/17538947.2011.565080]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D and Moore R. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Guo H D. 2001. *Earth Observation Technology and Sustainable Development*. Beijing: Science Press (郭华东. 2001. *对地观测技术与可持续发展*. 北京: 科学出版社)

- Guo H D. 2014. Scientific Satellites for Global Change Research. Beijing: Science Press (郭华东. 2014. 全球变化科学卫星. 北京: 科学出版社)
- Guo H D. 2016. Earth system observation from space: from scientific satellite to Moon-based platform. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 716-723 (郭华东. 2016. 地球系统空间观测: 从科学卫星到月基平台. *遥感学报*, 20(5): 716-723) [DOI: 10.11834/jrs.20166266]
- Guo H D. 2021. Listen to Academician Guo Huadong talk on Remote sensing Episode 3(6): What are the three frontier technologies of remote sensing. [2022-12-30]. <https://www.douyin.com/video/6921658998689139975> (郭华东. 2021. 听郭华东院士讲遥感第3集(6)遥感三大前沿技术都有啥? <https://www.douyin.com/video/6921658998689139975>) [2022-12-30]
- Guo H D and Zhang L. 2019. 60 years of radar remote sensing: four-stage development. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1023-1035 (郭华东, 张露. 2019. 雷达遥感六十年: 四个阶段的发展. *遥感学报*, 23(6): 1023-1035) [DOI: 10.11834/jrs.20199398]
- Huang M R, Fan X T, Jian H D, Zhang H Y, Guo L Y and Di L P. 2022. Bibliometric analysis of OGC specifications between 1994 and 2020 based on web of science (WoS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(4): 251 [DOI: 10.3390/ijgi11040251]
- Huang M R, Li G Q, Li J and Fan X T. 2019. International comparative study on management mode of national science data center. *Journal of Agricultural Big Data*, 1(4): 14-29 (黄铭瑞, 李国庆, 李静, 范湘涛. 2019. 国家科学数据中心管理模式的国际对比研究. *农业大数据学报*, 1(4): 14-29) [DOI: 10.19788/j.issn.2096-6369.190402]
- Kahraman S and Bacher R. 2021. A comprehensive review of hyperspectral data fusion with lidar and SAR data. *Annual Reviews in Control*, 51: 236-253 [DOI: 10.1016/j.arcontrol.2021.03.003]
- Li J F, Wang M H and Ho Y S. 2011. Trends in research on global climate change: a science citation index expanded-based analysis. *Global and Planetary Change*, 77(1/2): 13-20 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.02.005]
- Liu L Y, Chen L F, Liu Y, Yang D X, Zhang X Y, Lu N M, Ju W M, Jiang F, Yin Z S, Liu G H, Tian L F, Hu D H, Mao H Q, Liu S H, Zhang J H, Lei L P, Fan M, Zhang Y C, Zhou X and Wu Y R. 2022. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(2): 243-267 (刘良云, 陈良富, 刘毅, 杨东旭, 张兴赢, 卢乃锰, 居为民, 江飞, 尹增山, 刘国华, 田龙飞, 胡登辉, 毛慧琴, 刘思含, 张建辉, 雷莉萍, 范萌, 张雨琮, 周翔, 吴一戎. 2022. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战. *遥感学报*, 26(2): 243-267) [DOI: 10.11834/jrs.20221806]
- Liu W H, Zheng J W, Wang Z R, Li R and Wu T H. 2021. A bibliometric review of ecological research on the Qinghai-Tibet Plateau, 1990-2019. *Ecological Informatics*, 64: 101337 [DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101337]
- Ma Z B, Xiao W F, Huang Q L and Zhuang C Y. 2017. A review of point pattern analysis in ecology and its application in China. *Acta Ecologica Sinica*, 37(19): 6624-6632 (马志波, 肖文发, 黄清麟, 庄崇洋. 2017. 生态学中的点格局研究概况及其在国内的应用. *生态学报*, 37(19): 6624-6632) [DOI: 10.5846/stxb201607081399]
- Peng Y L, Lin A W, Wang K, Liu F L, Zeng F and Yang L. 2015. Global trends in DEM-related research from 1994 to 2013: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 105(1): 347-366 [DOI: 10.1007/s11192-015-1666-7]
- Phiri D, Simwanda M, Salekin S, Nyirenda V R, Murayama Y and Ranagalage M. 2020. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*, 12(14): 2291 [DOI: 10.3390/rs12142291]
- Qiu J P. 2019. *Bibliometrics*. 2nd ed. Beijing: Science Press (邱均平. 2019. *文献计量学*. 2版. 北京: 科学出版社)
- Townshend J. 2001. Landsat imagery in geography//Smelser N J and Baltes P B, eds. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Oxford: Pergamon: 8265-8270 [DOI: 10.1016/B0-08-043076-7/02527-4]
- Wang J R, Wang S Q, Zou D X, Chen H M, Zhong R, Li H L, Zhou W and Yan K. 2021. Social network and bibliometric analysis of unmanned aerial vehicle remote sensing applications from 2010 to 2021. *Remote Sensing*, 13(15): 2912 [DOI: 10.3390/rs13152912]
- Wang Q. 2018. A bibliometric model for identifying emerging research topics. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 69(2): 290-304 [DOI: 10.1002/asi.23930]
- Wulder M A, Loveland T R, Roy D P, Crawford C J, Masek J G, Woodcock C E, Allen R G, Anderson M C, Belward A S, Cohen W B, Dwyer J, Erb A, Gao F, Griffiths P, Helder D, Hermosilla T, Hipple J D, Hostert P, Hughes M J, Huntington J, Johnson D M, Kennedy R, Kilic A, Li Z, Lymburner L, McCorkel J, Pahlevan N, Scambos T A, Schaaf C, Schott J R, Sheng Y W, Storey J, Vermote E, Vogelmann J, White J C, Wynne R H and Zhu Z. 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225: 127-147 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.015]
- Xu C, Du X P, Fan X T, Giuliani G, Hu Z Y, Wang W, Liu J, Wang T, Yan Z Z, Zhu J J, Jiang T Y and Guo H D. 2022. Cloud-based storage and computing for remote sensing big data: a technical review. *International Journal of Digital Earth*, 15(1): 1417-1445 [DOI: 10.1080/17538947.2022.2115567]
- Xu N, Guo X D, Hong Y T, Zhang C and Dong H. 2008. Study on land degradation assessment indicators based on literature analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 28(3): 425-430 (许宁, 郭旭东, 洪友堂, 张聪, 董华. 2008. 基于文献分析的土地退化评价指标研究. *地理科学*, 28(3): 425-430) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2008.03.022]
- Yan K, Zou D X, Yan G J, Fang H L, Weiss M, Rautiainen M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2021. A bibliometric visualization review of the MODIS LAI/FPAR products from 1995 to

2020. *Journal of Remote Sensing*, 2021: 7410921 [DOI: 10.34133/2021/7410921]
- Yang D, Yang X C, Jin Y X and Xu B. 2021. Evaluating the research status quo around remote sensing-mediated monitoring of grassland biomass based on bibliometrology. *Pratacultural Science*, 38(9): 1782-1792 (杨东, 杨秀春, 金云翔, 徐斌. 2021. 基于文献计量的草地生物量遥感监测研究进展. *草业科学*, 38(9): 1782-1792) [DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0167]
- Zeng Y, Zhang J X and Niu R C. 2015. Research status and development trend of remote sensing in China using bibliometric analysis//*The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Kona: [s.n.]: 203-208 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W4-203-2015]
- Zhang B. 2017. Current status and future prospects of remote sensing. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(7): 774-784 (张兵. 2017. 当代遥感科技发展的现状与未来展望. *中国科学院院刊*, 32(7): 774-784) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.07.012]
- Zhang H Y, Huang M R, Qing X L, Li G Q and Tian C Z. 2017. Bibliometric analysis of global remote sensing research during 2010-2015. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 332 [DOI: 10.3390/ijgi6110332]
- Zhang Y L, Yao X L and Qin B Q. 2016. A critical review of the development, current hotspots, and future directions of Lake Taihu research from the bibliometrics perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13): 12811-12821 [DOI: 10.1007/s11356-016-6856-1]
- Zhang Y T, Wang Y and Song X L. 2015. Comparison between the science developments of remote sensing satellite based on bibliometrics. *Proceedings of the 10th China Soft Science Annual Conference*. Beijing: China Soft Science Research Society. 2015: 269-279. (张熠天, 王宇, 宋小龙. 2015. 基于文献计量的中外遥感卫星科学发展比较分析. 第十届中国软科学学术年会论文集. 北京: 中国软科学研究会. 2015: 269-279)
- Zhao J D, An P J and Zhang Z Q. 2010. Bibliometrical analysis for space observations of global change research. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(5): 753-760 (赵纪东, 安培浚, 张志强. 2010. 全球变化空间观测研究的文献计量分析. *遥感技术与应用*, 25(5): 753-760)
- Zhao Q, Yu L, Du Z R, Peng D L, Hao P Y, Zhang Y G and Gong P. 2022. An overview of the applications of earth observation satellite data: impacts and future trends. *Remote Sensing*, 14(8): 1863 [DOI: 10.3390/rs14081863]
- Zheng R B, Lu R K, Tang X L, Li S, Zhang Y Q and Huang T. 2017. Researches progress and hotspots analysis of global LUCC research during 1998 to 2016. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 38(5): 591-601 (郑荣宝, 卢润开, 唐晓莲, 李爽, 张雅琪, 黄婷. 2017. 1998-2016年全球LUCC研究进展与热点分析. *华侨大学学报(自然科学版)*, 38(5): 591-601) [DOI: 10.11830/issn.1000-5013.201706068]

Bibliometrics spatial-temporal evolution analysis of the development of remote sensing

HUANG Mingrui^{1,2,3}, JIAN Hongdeng^{1,2}, XU Chen^{1,2,3}, HAO Junsheng^{1,2}, YAN Jun⁴, LIU Liangyun^{1,2}, FAN Xiangtao^{1,2}, GUO Huadong^{1,2}

1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Department of Academic Societies & Journals, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Remote Sensing (RS) has become an essential information source for national resource and energy surveys, food security monitoring, ecological environmental protection, natural disaster assessment, and national defense security. Bibliometric is a helpful method to analyze the development dynamics, hotspots, and evolution in the RS discipline. It is a powerful approach to sort out and visualize the progress of RS development.

This study conducts a bibliometric analysis of RS-related Science Citation Index (SCI) papers published from 1962 to 2021. The research hotspots and changes of RS in the United States, Europe, and China from 1962 to 2021 are systematically determined. The application of typical RS satellites globally and in China are compared and analyzed. The research characteristics of US, European, and Chinese scholars in the three frontier technologies (i.e., Synthetic Aperture Radar, Hyperspectral, and LiDAR) are summarized.

Results show that (1) the number of SCI papers and authors in RS has shown a trend of rapid growth and accelerated growth since 1998, from 69,666 published in 2012 to 169,797 in 2021. China has surpassed the US in its annual publication to become the first since

2014, and it has been far ahead since then. It published 8,063 RS SCI papers by 2021, which accounted for 42.17% of the 19,121 global publications. (2) In terms of RS technology, RS started from multispectral imaging, and it developed rapidly to the frontier technologies of synthetic aperture radar, hyperspectral, LiDAR, unmanned aerial vehicle (UAV), high-resolution image, and deep learning. Furthermore, RS gradually played an increasingly important role in many application fields. (3) In terms of RS data application, Landsat, MODIS, Sentinel, and other foreign data have been widely used by global users. Chinese scholars highly rely on these foreign satellite data to conduct RS research. By contrast, the application of domestic satellites is relatively rare, and the international influence of domestic satellites is very weak, which is very mismatched with China's status of RS. (4) Significant differences are observed in the hotspots of RS research between China and other countries. By relying on advanced satellite and payload technologies (e.g., Landsat and MODIS), the US developed science- and demand-driven RS research, which has been widely used in various application fields. European RS scholars attached great importance to the research and application of Sentinel satellites, which have surpassed Landsat in the number of SCI papers they published. Chinese RS has shown outstanding quantitative advantages in all research fields and applications. Meanwhile, Chinese RS scholars pay more attention to synthetic aperture radar, hyperspectral, LiDAR, deep learning, neural networks, feature extraction, and other cutting-edge technologies and algorithms.

Key words: remote sensing, bibliometrics, discipline development trends, research hotspot, satellite data, application fields

Supported by Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA19080101); Director Fund of the International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals (No. CBAS2022DF015)