

基于文献计量分析的海洋观探测仪器技术发展态势研究

厉运周^{1,4,5}, 王超越², 郑良¹, 徐学友³, 王军成^{1,4,5}, 漆随平¹, 高杨¹

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061; 2. 山东师范大学图书馆, 山东 济南 250358; 3. 齐鲁工业大学(山东省科学院)情报研究所, 山东 济南 250014; 4. 崂山实验室, 山东 青岛 266237; 5. 国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 海洋观探测技术是海洋科学和技术的重要组成部分, 对预警海洋灾害、开发海洋资源和空间、保护海洋环境、维护海洋权益、加强国防建设非常重要, 海洋观探测仪器的研发是海洋观探测技术发展的重要基础和支撑。本文以 Web of Science 为数据统计源, 基于战略咨询智能支持系统(ISS)平台和 CiteSpace 工具, 通过文献计量和可视化分析, 从发文量、涉及学科、作者、机构、关键词等方面对 1998—2022 年海洋观探测仪器技术论文进行了统计分析, 总结了当前海洋观探测仪器技术领域研究态势和研究热点, 得出以下结论: (1)近 10 余年海洋观探测仪器技术研究呈快速增长趋势。虽然中国在该领域起步较晚, 但发展迅速, 2018 年后发文量稳居世界第一, top 10 高被引论文作者有 3 位是中国学者, 中国研究学者在该领域具有较高影响力。但是发文量 top 10 机构多为美国研究机构, top 10 高产作者中尚无中国学者, 中国在该领域科研机构和研究人员的竞争力和影响力方面还需继续提高。(2)从词云聚类分析结果看, 该领域全球研究热点集中在无人机、地磁仪、微波辐射计、海表温度和水色研究上。需要注意的是, ocean sensor 关联词多为聚类分析关键词, 表明海洋传感器是该领域的研究重点。从研究重点演变上看, 中国在该领域研究虽然起步晚, 但研究跟踪能力强, 主题演变转移较快, 有一定的热点引领作用。

关键词: 海洋观探测仪器技术; 文献计量; 可视化分析; 研究态势

中图分类号: P715; P716; G203 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2024)1-0098-13

DOI: 10.11759/hyxx20230904001

海洋是地球系统的重要组成部分, 蕴藏着丰富的生物资源、矿产资源、药物资源、空间资源、海水资源等多种资源, 深入认知海洋科学奥秘、高效开发利用海洋资源、有效保护海洋环境、有力维护海洋权益都离不开海洋科学发展和海洋科学装备的支撑^[1-2]。海洋观测探测是关心海洋、认识海洋、经略海洋的基本手段。随着科学技术的进步, 海洋观测探测仪器技术不断升级转型, 在应对气候变化、保护海洋生态、推进海洋治理等方面发挥越来越重要的作用^[3-4]。

国内外高度重视海洋科学装备的研发, 发布了一系列科技发展规划、中长期发展规划, 支持高端海洋科考船、海洋观测设备、海洋探测平台的建设。随着海洋研究领域朝着深远海、南北极拓展、知海、用海、护海对智能化、自动化、高端化的海洋科学装备提出了新的要求^[5-6]。本文采用文献计量和数学统计的方法, 对海洋观探测仪器技术的研究现状进

行了梳理, 总结了海洋观探测仪器技术领域研究热点, 提出了后续的发展建议, 以期为相关科研人员提供一定的研究思路和参考。

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-10-18

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023ZLYS01); 国家重点研发计划项目(2022YFC3104200); 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-DFZD-35, 2023-XBZD-09, 2021-XBZD-13); 齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合试点工程重大创新专项项目(2023HYZX01)

[Foundation: Key R&D Program of Shandong Province, China, No. 2023ZLYS01; National Key R&D Program of China, No. 2022YFC3104200; Consulting and Research Project of the Chinese Academy of Engineering, Nos. 2022-DFZD-35, 2023-XBZD-09, 2021-XBZD-13; Major Innovation Special Project of Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences) Science Education Industry Integration Pilot Project, No. 2023HYZX01]

作者简介: 厉运周(1984—), 山东日照人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋环境监测技术研究, E-mail: lyz@qlu.edu.cn; 郑良(1977—), 通信作者, 河南南阳人, 博士, 副研究员, 从事海洋防污防腐研究, E-mail: zhengliang@qlu.edu.cn; 徐学友(1980—), 通信作者, 山东潍坊人, 博士, 副研究员, 从事文献计量与科学评价、科技期刊传播规律研究, E-mail: xuxy@qlu.edu.cn; 王军成(1952—), 通信作者, 山东招远人, 研究员, 从事海洋环境监测工程科技研究和战略研究, E-mail: wjc@sdiol.com

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源与检索式编制

本研究论文数据源来自科学引文数据库 Web of Science 核心集合中的 SCI (Science Citation Index Expanded, 科学引文索引)、CCR (Current Chemical Reactions, 近期化学反应数据库) 和 IC (Index Chemicus, 有机化合物索引)。

根据目前业务化海洋监测及海洋科学研究的需求, 选取了常用的 7 类 55 种海洋观探测仪器作为核心检索词(表 1)。

根据表 1 所列主题词, 综合部分关键词的英文全称和缩写, 使用 Web of Science 数据库高级检索功能, 即字段标识、布尔运算符、括号和检索结果集编制创建检索式: TS=('Marine hydrological instrument' OR 'Marine Physical Instruments' OR 'Marine chemical instrument' OR 'Marine geological and geophysical instruments' OR 'Marine biological instrument' OR 'Marine meteorological instrument' OR 'Integrated Ocean Observation System' OR 'Water temperature gauge' OR 'Salinity gauge' OR 'Depth gauge' OR 'Conductivity Temperature Depth gauge' OR 'CTD' OR 'Current meter' OR 'Wave meter' OR 'Wave buoy' OR 'Water level gauge' OR 'Tide gauge' OR 'Water colorimeter' OR 'Turbidity meter' OR 'Radiometer' OR 'sound velocimeter' OR 'sound velocity profiler'

OR 'underwater acoustic transducer' OR 'pH meter' OR 'Total phosphorus and nitrogen meter' OR 'Nutrient analyzer' OR 'Radioactive meter' OR 'COD meter' OR 'BOD meter' OR 'Carbon dioxide meter' OR 'Methane sensor' OR 'Side scan sonar' OR 'Bathymeter' OR 'Stratigraphic profiler' OR 'Gravimeter' OR 'Magnetometer' OR 'Seismometer' OR 'Mud sampler' OR 'Acoustic releaser' OR 'Chlorophyll meter' OR 'Algae meter' OR 'Anemometer' OR 'Barometer' OR 'Temperature and Humidity sensor' OR 'Rain gauge' OR 'Visibility meter' OR 'Automatic weather station' OR 'Shipboard meteorological instrument' OR 'Coastal observing station' OR 'Anchored buoy' OR 'Submerged buoy' OR 'Drifting buoy' OR 'Argo buoy' OR 'Autonomous underwater vehicle' OR 'AUV' OR 'Remotely-operated vehicle' OR 'ROV' OR 'Human Occupied Vehicle' OR 'HOV' OR 'Underwater glider' OR 'Wave glider' OR 'Unmanned surface vehicle' OR 'Unmanned aerial vehicle' OR 'Seabed-based monitoring platform' OR 'Ocean satellite') and PY=(1979-2022) and SU=('OCEANOGRAPHY' or 'GEOLOGY' or 'ENGINEERING' or 'METEOROLOGY ATMOSPHERIC SCIENCES' or 'REMOTE SENSING')。文献类型为论文、会议论文和综述论文, 排除数据论文、书籍章节、收回出版物和 Publication With Expression Of Concern。其中, 1979—1997 年检索论文数量为 0, 共检索到 1998—2022 年间海洋观探测仪器技术领域发表的 89 261 篇英文论文。

表 1 海洋观探测仪器检索主题词

Tab. 1 Search keywords for ocean observation and detection instruments

序号	仪器类型	仪器名称
1	海洋水文仪器	水温计、盐度计、深度计、温深仪、温盐深仪(CTD)、海流计、测波仪、波浪浮标、水位计、验潮仪
2	海洋气象仪器	风速风向仪、气压计、温湿传感器、雨量计、能见度仪、自动气象站、船舶气象仪
3	海洋化学仪器	pH 计、总磷总氮测量仪、营养盐分析仪、放射性测量仪、COD 测量仪、BOD 测量仪、二氧化碳测量仪、甲烷传感器
4	海洋生物仪器	叶绿素仪、藻类测量仪
5	海洋地质地球物理仪器	侧扫声呐、测深仪、地层剖面仪、重力仪、磁力仪、地震仪、采泥器、声学释放器
6	海洋物理仪器	水色计、浊度计、辐射计、声速仪、声速剖面仪、水声换能器
7	海洋综合观测系统	海洋台站、锚泊浮标、潜标、漂流浮标、Argo 浮标、自主式水下航行器(AUV)、遥控无人潜器(ROV)、载人潜器(HOV)、水下滑翔机(glider)、波浪滑翔器、海洋无人船、海洋无人机、海床基、海洋卫星

1.2 数据处理与分析

以文献体系和文献计量特征为研究对象进行定量分析, 评价某个研究领域的发展现状和水平, 对

该研究领域未来发展趋势进行预测是文献计量学的主要研究内容^[7-8]。本研究以 Web of Science 核心集合数据库为数据源, 运用战略咨询智能支持系统

(ISS)平台和 Citespace 数据可视化工具对海洋观探测仪器技术相关论文进行深度分析,总结该领域主题文献的整体发文态势,分析主要发文国家和地区变化、主要发文机构和主要发文作者,借助可视化工具对高频关键词进行关键词云分析和词云聚类分析,进而追踪主题演变,从而对海洋观探测仪器领域的研究现状、热点和趋势进行总结。

2 海洋观探测仪器技术研究文献计量分析

2.1 整体发文态势分析

图 1a 给出 1998—2022 年间海洋观探测仪器技术领域全球论文发文量的历年变化。可以看出,近年来该领域全球论文发文量呈显著增长。2000 年前该领域论文年发文量为 1 500 篇以下,2006 年年发文量突破 2 000 篇,此后快速增长,2015 年年发文量突破

4 000 篇,实现文献总量翻番,历时为 9 a。2021 年海洋观探测领域论文年发文量为 8 745 篇,较 2015 年年发文量再次实现翻番,历时仅为 6 a。由此可以看出,海洋观探测领域论文翻番所需时间越来越短,说明在十多年间海洋观探测仪器技术研究受到全球相关研究人员广泛关注,得以快速发展。

为了解中国学者对该领域研究的贡献,本文以 1.1 中主题词对应的中文主题词为检索词, CNKI 数据库为数据源创建检索式,得到 1979—2022 年 36 685 篇相关中文文献,如图 1b 所示,1998 年前该领域中国学者以中文论文发表为主,1998—2010 年间有少量英文论文发表,2011 年后英文论文发文量迅速增加,2018 年后英文论文发文量超过中文论文,其后快速增长至 3 500 篇以上(2022 年),远超同期中文论文发文量。可见中国研究人员对海洋观探测领域论文发文量贡献极大。

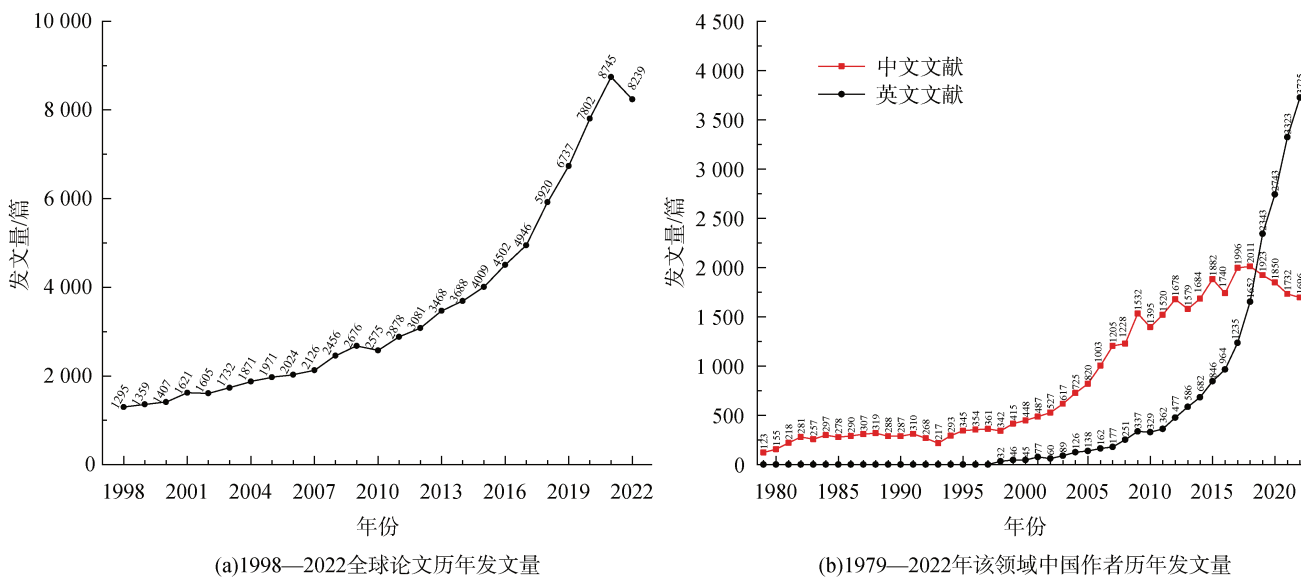


图 1 海洋观探测仪器技术领域 1998—2022 年历年论文发文量变化

Fig. 1 Changes in the number of papers published in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022

2.2 主要发文国家和地区分析

图 2 给出了 1998—2022 年海洋观探测仪器技术领域主要研究国家分布情况。从图 2 可以看出,发文量前 5 的国家分别是美国、中国、英国、法国、德国,其中美国与中国优势明显,论文总量达 20 000 篇以上,排名第 3 的英国发文量为 7 000 篇以下。

图 3 给出了海洋观探测仪器技术领域发文量 top 10 国家历年论文变化情况,从图 3 可以看出,2008 年

前,美国在该领域发文量占领先优势,之后发文量稳定领先。相比美国,中国在该领域的研究起步较晚,但发展速度迅猛,2018 年后中国在该领域发文量远超美国,保持全球领先。中国和美国外的 top 10 国家在该领域的研究成果相对稳定,年发文量 500 篇以下。但是,中国累积科研成果在排位前 5 的国家中所占比例为 30.95%,相比排名第一的美国(40.75%)还有接近 10%的差距。

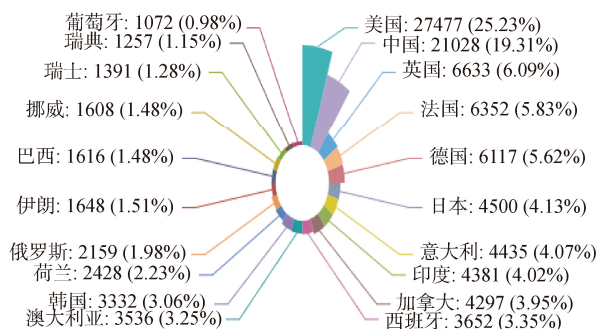


图2 海洋观探测仪器技术领域英文论文主要发文国家
Fig. 2 Main publishing countries for English papers in the field of ocean observation and detection instrument technology

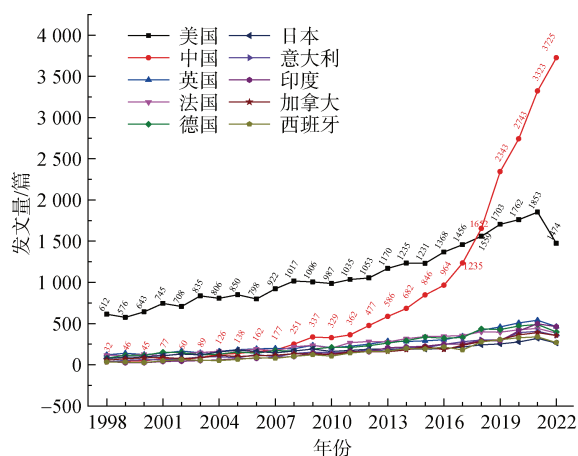


图3 1998—2022年海洋观探测仪器技术领域英文论文发文量前10国家历年发文量
Fig. 3 Number of published English papers in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022: top 10 national publications over the years

图3 Number of published English papers in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022: top 10 national publications over the years

图4给出了1998—2022年海洋观探测仪器技术领域高被引论文前10国家,由图4可知,共检索出高被引论文782篇,发文量大于100篇的国家有美国、中国、英国。对比可知,中国在高被引论文数量上还稍微落后于美国。

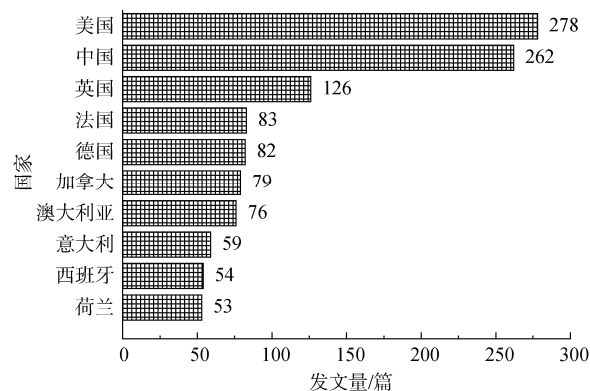


图4 1998—2022年海洋观探测仪器技术领域高被引论文前10国家
Fig. 4 Top 10 countries with highly cited papers in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022

图4 Top 10 countries with highly cited papers in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022

2.3 主要发文机构分析

图5中列出了海洋观探测仪器技术领域发文量top 10研究机构。发文量居首位的是Chinese Acad Sci(中国),是排名第2的NASA(美国)的1.4倍,显示出中国科研工作者对该领域研究的快速发展贡献极大,但发文量前10机构中,中国的研究机构有两家,俄罗斯的研究机构有一家,而隶属美国的研究机构

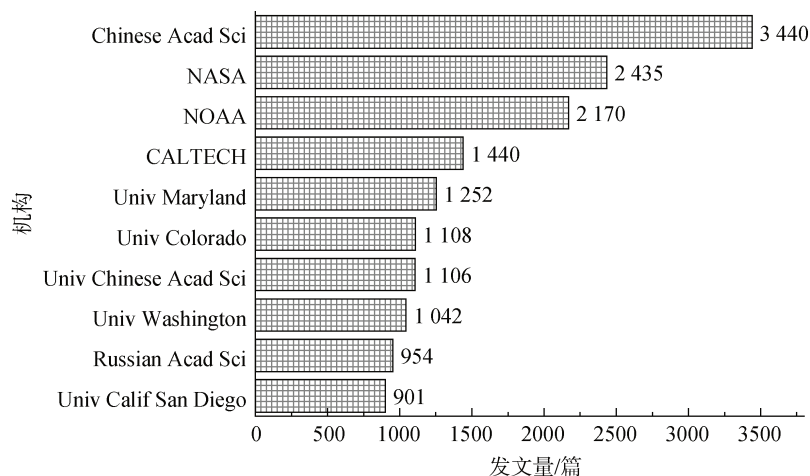


图5 海洋观探测仪器技术领域发文量前10研究机构

Fig. 5 Top 10 research institutions in the field of ocean observation and detection instrument technology

有 7 所,表明美国在该领域的国家建制化科技力量和一流科研机构占据领先优势,代表着在该领域较强的综合实力和科技实力和影响力;中国该领域的国家科研机构、高水平研究型院校在国际上不但占有一席之地,而且具有相当的影响力。

2.4 主要研究学者和高被引论文作者

核心作者发文量是衡量和判断某一研究领域发展程度的重要指标^[9-10]。表 2 中列出了 1998—2022

年海洋观探测仪器技术领域全球英文论文发文量前 10 作者。结合图 3 数据可以看出,2018 年后中国该领域科研人员的英文论文发文量已远超美国,但是发文量前 10 作者中却无所在发文单位是中国的学者,这表明在统计时间段内国外相关研究人员在该领域研究工作的持续性、定向性、稳固性、聚焦度等较好,也一定层面说明瞄准科学前沿方向,加强关键领域持续深度、精细化研究的必要性。

表 2 1998—2022 年海洋观探测仪器技术领域发文量前 10 作者

Tab. 2 Top 10 authors in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022

作者	发文量/篇	单位	研究方向
CAMPS A	165	Polytechnic University of Catalonia, Spain	Remote Sensing, Engineering, Geology, Imaging Science & Photographic Technology, Geochemistry & Geophysics
HOLBEN B	124	National Aeronautics & Space Administration NASA Goddard Space Flight Center, USA	Meteorology & Atmospheric Sciences, Environmental Sciences & Ecology, Remote Sensing, Geology, Imaging Science & Photographic Technology
KERR Y	115	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France	Remote Sensing, Imaging Science & Photographic Technology, Engineering, Geology, Environmental Sciences & Ecology
JACKSON T J	103	University College London Hospitals NHS Foundation Trust, UK	Remote Sensing, Imaging Science & Photographic Technology, Engineering, Geology, Environmental Sciences & Ecology
XIONG Xiaoxiong	94	NASA Goddard Space Flight Center, USA	Remote Sensing, Imaging Science & Photographic Technology, Optics, Engineering, Geochemistry & Geophysics
CHAPRON B	87	French Research Institute for Exploitation of the Sea (IFREMER), France	Oceanography, Engineering, Remote Sensing, Imaging Science & Photographic Technology, Geochemistry & Geophysics
Van Den BROEKE M R	86	Utrecht University, Netherlands	Geology, Physical Geography, Meteorology & Atmospheric Sciences, Environmental Sciences & Ecology, Science & Technology-Other Topics
HU Chuanmin	82	University of South Florida, USA	Environmental Sciences & Ecology, Remote Sensing Imaging Science & Photographic Technology, Marine & Freshwater Biology, Engineering
WANG Menghua	82	NOAA/NESDIS/STAR, USA	Remote Sensing, Optics, Imaging Science & Photographic Technology, Environmental Sciences & Ecology, Geology
KAMPFER N	78	University of Bern, Switzerland	Meteorology & Atmospheric Sciences, Environmental Sciences & Ecology, Remote Sensing, Engineering, Geology

文献被引频次是反映文献价值的重要依据之一,一定程度上反映了相关领域学科的研究热度,论文高被引被认定为作者在该学科领域占有较高的地位和较高的学术影响力^[11-12]。表 3 给出了海洋观探测仪器技术领域 1998—2022 年高被引论文前 10 位的作者所属单位及研究方向。可以看出这些作者主要研究方向是 Engineering、Remote Sensing、Telecommunications 及

Environmental Sciences & Ecology。高被引作者前 10 名中 3 位来自中国,分别是郑州大学 ZHANG Rui、西安电子科技大学 ZENG Yong 和上海交通大学 WU Qingqing,表明部分中国研究学者在该领域已具有较高影响力。对比表 3 与图 5 可以发现,中国高被引作者未出现在对应的高发文量研究机构中,表明高被引作者与高发文量研究机构在分布上的分散性与差异化,

相关学者或团队在海洋观探测仪器技术领域高度聚焦关键技术方向开展研究实现创新引领是可能的, 中国相关高水平研究机构充分发挥多学科、综合性优势, 集

中优势力量和创新资源开展海洋观探测仪器技术研究, 能够实现在前沿领域重大方向上引领发展, 增强国际影响力, 起到国家战略科技力量的主力军作用。

表 3 海洋观探测仪器技术领域 1998—2022 年高被引论文前 10 的作者

Tab. 3 Top 10 authors of highly cited papers in the field of ocean observation and detection instrument technology from 1998 to 2022

作者	单位	研究方向
ZHANG Rui	Zhengzhou University	Engineering, Materials Science, Chemistry, Telecommunications, Physics
CHEN Yunfei	University of Warwick	Telecommunications, Engineering, Computer Science, Transportation, Operations Research & Management Science
DORIGO W A	Technische Universität Wien	Remote Sensing, Geology, Environmental Sciences & Ecology, Imaging Science & Photographic Technology, Meteorology & Atmospheric Sciences
LUCIEER A	University of Tasmania	Remote Sensing, Imaging Science & Photographic Technology, Geology, Environmental Sciences & Ecology, Engineering
WAGNER W	Technische Universität Wien	Remote Sensing, Geology, Imaging Science & Photographic Technology, Environmental Sciences & Ecology Engineering
YUEH S	California Institute of Technology	Remote Sensing, Engineering, Geology, Imaging Science & Photographic Technology, Geochemistry & Geophysics
ZENG Yong	Xidian University	Telecommunications, Engineering, Computer Science, Transportation, Mathematics
WU Qingqing	Shanghai Jiao Tong University	Engineering, Telecommunications, Computer Science, Chemistry, Materials Science
ZHANG Rui	National University of Singapore	Engineering, Telecommunications, Computer Science, Acoustics, Transportation
COSH M H	USDA-ARS	Remote Sensing, Imaging Science & Photographic Technology, Geology, Engineering, Environmental Sciences & Ecology

2.5 主要学科分布

图 6 列出了海洋观探测仪器技术领域论文所涉 top 10 学科。其中论文中超过 10 000 篇的学科有 Geosciences and Multidisciplinary、Engineering and Electrical and

Electronics、Meteorology and Atmospheric Sciences、Oceanography 和 Environmental Sciences。可以看出, 该领域学者主要学科分布为地球科学、电气与电子工程、气象学与大气科学、海洋学、环境科学、遥感学等。

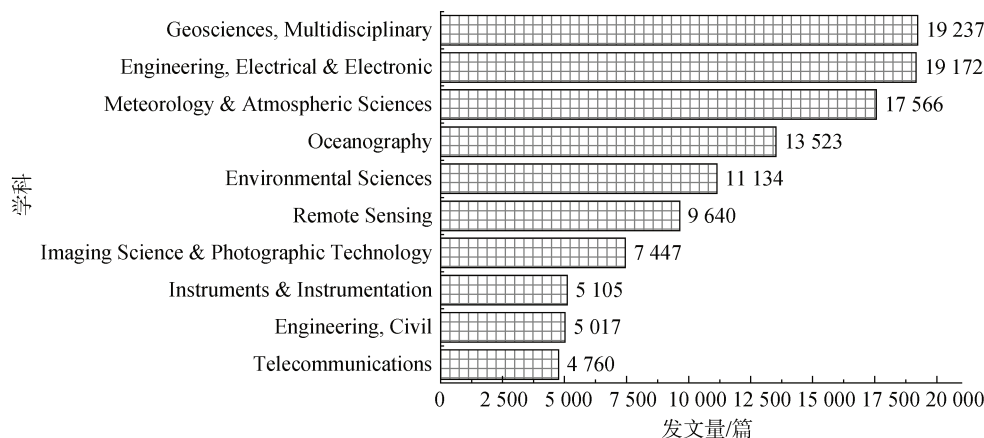


图 6 海洋观探测仪器技术领域文献涉及前 10 学科

Fig. 6 Top 10 disciplines involved in the technical field of ocean observation and detection instrument technology

2.6 研究热点

2.6.1 整体关键词云分析

图 7 给出了 1998—2022 年海洋观探测仪器技术领域文献研究热点关键词, 图中字体越大位置越居中的关键词, 关注度越高。可以看出热点关键词分别是海洋相关 unmanned aerial vehicles(无人机)、sea surface temperature(海面温度)、microwave radiometer(微波辐射计)、climate change(气候变化)、magnetometer(地磁仪)等。

按照关键词属性, 上述热点关键词可细分为海

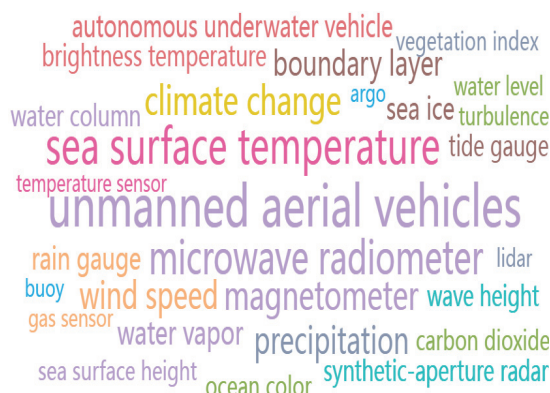
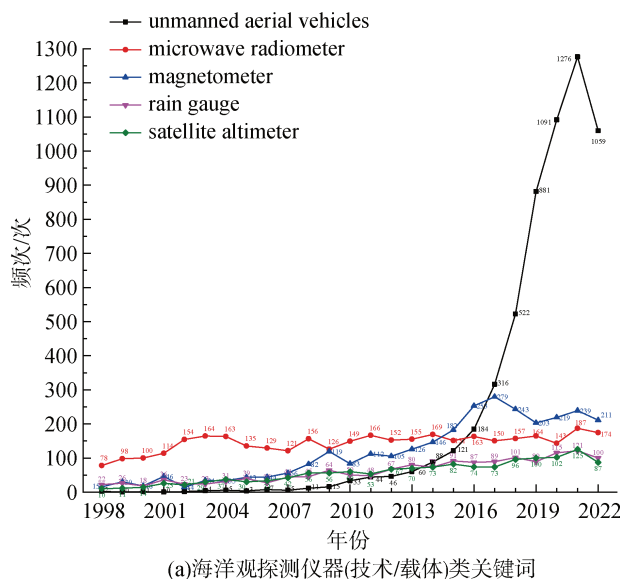


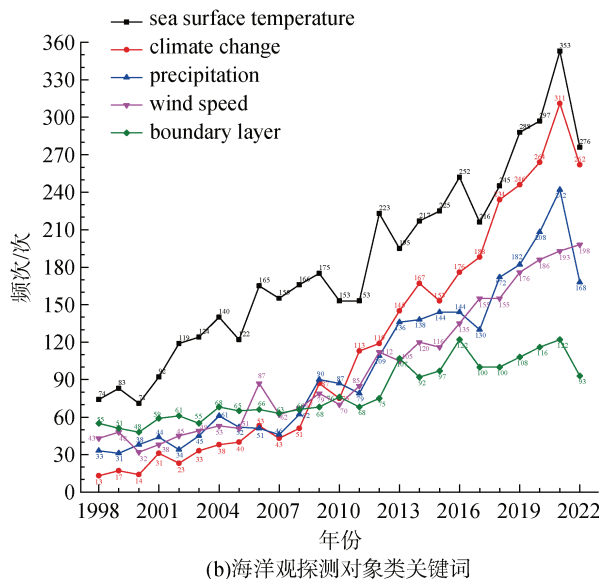
图 7 海洋观探测仪器技术领域论文热点关键词

Fig.7 Hotspot keywords in papers on ocean observation and detection instrument technology



(a)海洋观探测仪器(技术/载体)类关键词

洋观探测仪器(技术/载体)类和探测对象类。如图 8 所示, 海洋观探测仪器(技术/载体)类高频热门关键词有: 无人机累计 5 775 次、微波辐射计累计 3 618 次、地磁仪累计 2 935 次、雨量计累计 1 509 次、卫星高度计累计 1 509 次、潮位计 1 059 次、合成孔径雷达 1 024 次、激光雷达 487 次、浮标累计 315 次、温度传感器 242 次等。其中 2013 年后, 地磁仪和无人机频次显著增加, 尤其是无人机, 2017 年后成为频次最高热门关键词, 2021 年无人机出现频次达到 1 276 次, 是同年其他热点关键词的 5~10 倍。表明该领域对无人机的研究高度关注, 发展迅猛。海洋观探测对象类高频词有 sea surface temperature(海面温度)、climate change(气候变化)、wind speed(风速)、boundary layer(边界层)、sea ice(海冰)、wave height(波高)、ocean color(水色)、carbon dioxide(二氧化碳)等, 其中海表温度出现频次最高, 是相关研究持续热点, 海洋气候变化从 2011 年开始跃升到第 2 位, 并持续保持较高关注度。表明无人机、地磁仪、海表温度和海洋气候变化是目前该领域全球研究热点。研究人员应关注研究热点, 紧跟研究前沿, 结合国家重大战略和社会发展需求, 在无人机相关领域研究、搭载平台及其传感应用领域方面继续深入研究, 促进行业和研究领域的快速发展。



(b)海洋观探测对象类关键词

图 8 海洋观探测仪器技术领域热点关键词历年变化

Fig. 8 Changes in the hot keywords in the field of ocean observation and detection instrument technology over the years

2.6.2 词云聚类分析

通过论文关键词共现, 可以得到论文关键词词

云聚类团, 如图 9 所示, 一种颜色代表一个类别, 海洋观探测仪器技术领域论文 5 个明显聚类分别是无

人机、地磁仪、海表温度、微波辐射计、水色。这 5 个聚类团中, 无人机为观测平台, 地磁仪、微波辐射计为观测仪器, 海表温度、水色为观测对象变量。

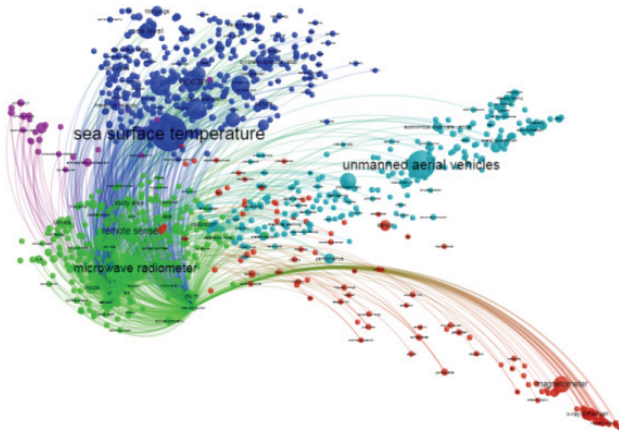


图 9 海洋观探测仪器技术领域论文关键词云聚类分析
Fig. 9 Keyword cloud clustering analysis of papers in the field of ocean observation and detection instrument technology

通过关键词聚类分析, 可以得到该聚类关键词相对应的研究热点^[13], 如表 4 所示。其中, 无人平台具备自主航行能力, 可长时间停留海面、水下及空中执行特定任务, 是目前海洋观探测领域亟需的观测平台^[5], 其研究热点集中在无人机通信、组网、导航、

应用算法以及系统设计, 主要是针对无人机系统的研究, 这是因为无人机航行、路径规划和执行任务等过程都需要系统的高度可靠及快速响应^[14], 是确保其安全航行和完成任务的关键。地磁仪在深空探测、地磁导航、生物磁探测、基础物理研究等方面有着重要应用^[15], 其研究热点是地磁仪传感器、导航定位系统、地磁仪校准技术。通过对地磁仪传感器、导航系统以及校准技术的改进, 可以提高地磁仪灵敏度, 探测更丰富的磁场信息^[16]。微波辐射计通过遥感能探测全天候、高时空分辨率、高灵敏度海表盐度和温度, 在全球海洋科学研究中有重要作用^[17], 随着海洋科学的不断发展, 对微波辐射计的分辨率、灵敏度、稳定性和精确度等指标提出了更高的要求, 其研究热点是反演算法、探测性能、辐射传输, 主要是对微波辐射计性能的研究。通过对其算法和技术的研究, 可以提升上述性能指标^[18]。海面温度是海洋系统中极其重要的参数, 在海气相互作用中起重要作用^[19], 其研究热点是海面温度变化、海洋气候变化、海冰、海面风速, 集中在海表属性研究。海洋水色观测可获取海洋水体光谱、温度等特性, 在海洋资源调查、污染监控、海温预报、赤潮、绿潮调查、水质监测、海冰监测、海岸带植被监测等诸多领域有重要作用^[20], 研究热点是叶绿素 *a*、遥感、大气校正。

表 4 海洋观探测仪器技术领域各聚类研究热点

Tab. 4 Clustering research hotspots in the field of ocean observation and detection instrument technology

聚类	关键词	研究热点
unmanned aerial vehicles	network, navigation system, algorithm, performance, design	无人机网络、导航系统、应用算法、系统设计
magnetometer	sensor, navigation, calibration	地磁仪传感器、导航定位系统、地磁仪校准技术
microwave radiometer	retrieval algorithm, performance, radiative transfer	反演算法、性能、辐射传输
sea surface temperature	variability, climate change, sea ice, wind speed	海面温度变化、海洋气候变化、海冰、海面风速
ocean color	chlorophyll-a, remote-sensing, atmospheric correction	叶绿素 <i>a</i> 、遥感、大气校正

2.7 主题演变分析

图 10 给出了海洋观探测仪器技术领域热点主题词, 从图 10 中可以看出, 该领域热点主题词主要集中在 unmanned aerial vehicle(无人机, UAV)和 remote sensing(遥感)。与无人机和遥感相关性较大领域分别是: soil moisture(土壤湿度)、modis(中等分辨率成像分光辐射计)、calibration(校准)、precipitation(预测)、microwave radiometry(微波辐射测量)、deep learn-

ing(深度学习)、sea ice(海冰)、ocean color(水色)等。

为深入了解海洋原位观探测仪器技术研究热点和重点, 提取浮标、潜标、海床基和海洋传感器为特殊主题词进行相关性分析。如图 11 所示, 浮标(buoy)关联关键词分别是 wave(波浪)、ocean(海洋)、validation(验证)、altimeter(高度计)、satellite(卫星)、measurement(测量)、scatterometer(散射计)等; 潜标(submerged buoy)相关研究集中在 computational fluid dynamics(计算流体

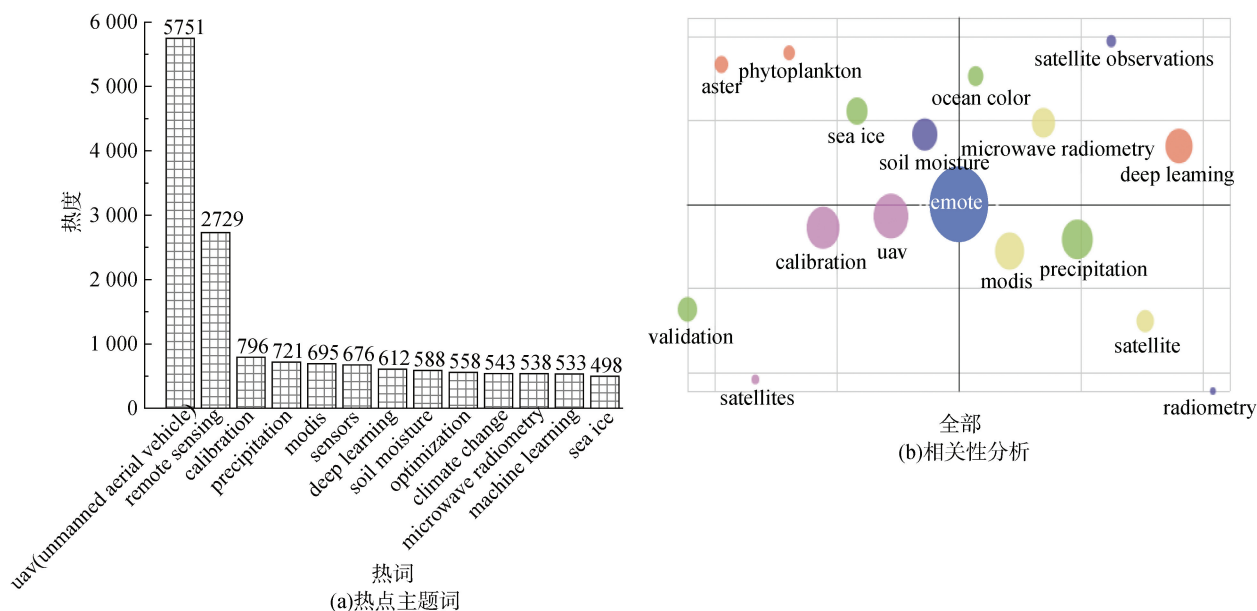


图 10 海洋观探测仪器技术领域热点主题词及相关性分析

Fig. 10 Hot topic keywords and correlation analysis in ocean observation and detection instrument technology

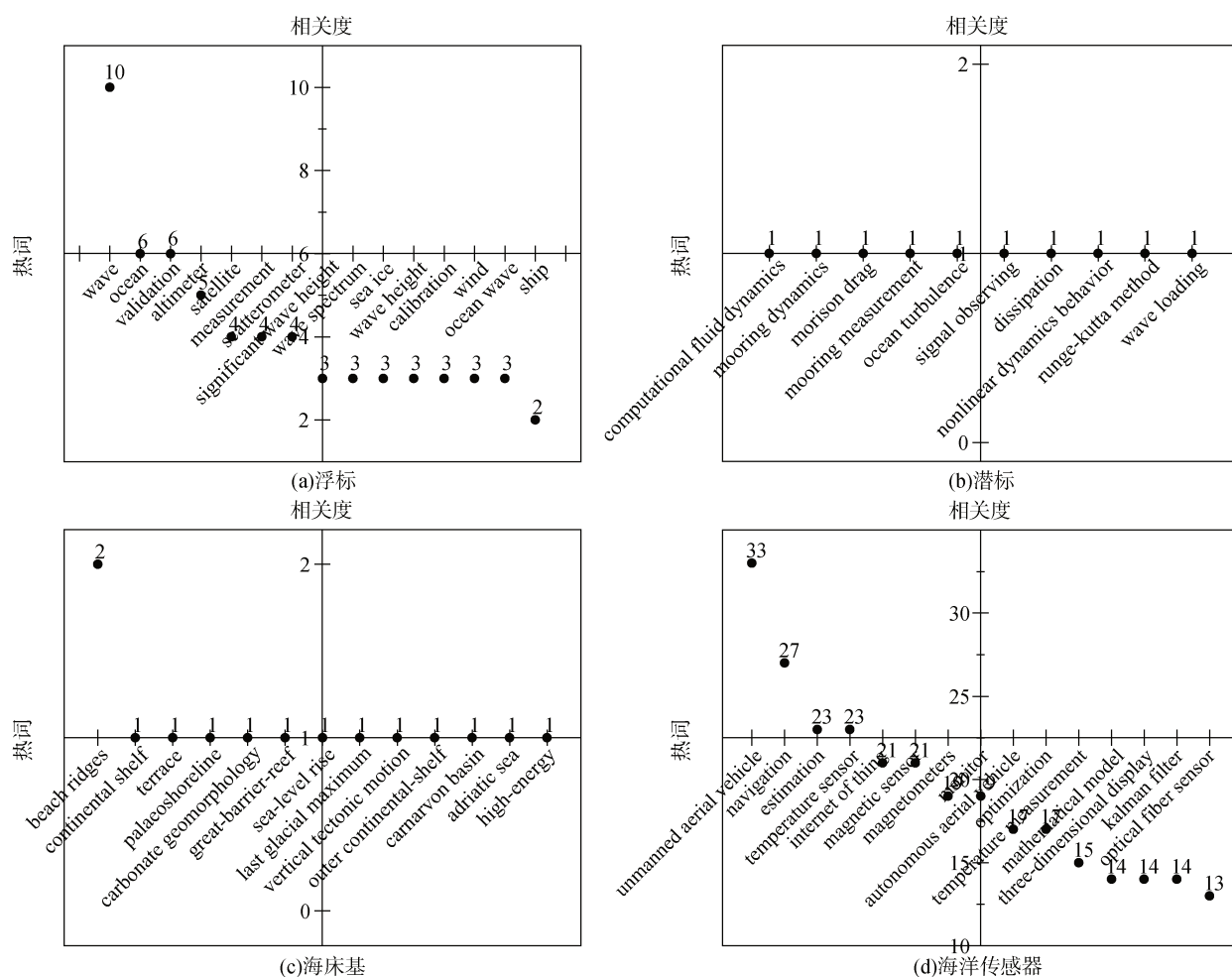


图 11 特殊主题词相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis of special theme words

动力学)、mooring dynamics(系泊动力学)、morison drag(莫里森阻力)、mooring measurement(系泊测量)等领域,论文较少,且多为理论研究,集中在动力学、算法和理论方法,应用研究相对较少;与海床基(seabed-based monitoring platform)相关关键词为 beach ridges(海滩山脊)、continental shelf(大陆架)、terrace(沿岸阶地)、palaeoshoreline(古海岸线)、carbonate geomorphology(碳酸盐岩地貌学)等;与海洋传感器(ocean sensor)相关的关键词为 unmanned aerial vehicles(无人机)、navigation、estimation(导航)、temperature sensor(温度传感器)、internet of thing(物联网)、magnetic sensor(磁传感器)、magnetometers(地磁仪)、monitor(监测仪)、autonomous underwater vehicle(自主水下航行器)、optimization(最优化)、temperature measurement(温度测量)等。其中关键词

中无人机、温度传感器、地磁仪、自主水下航行器等同样是词云聚类分析关键词,表明海洋传感器是该领域研究热点和重点。

图 12 给出了 1998—2022 年海洋观探测仪器技术领域发文量前 10 国家在该领域研究重点的演变情况。可以看出,不同国家在该领域的研究重点随时间的演变不同。1998—2003 年,美国在海洋观探测领域关注重点持续为微波辐射计,2003—2018 年,其关注重点转移到海表温度,2019—2022 年转移到无人机。1998—2012 年,该领域的中国研究者关注重点为微波辐射计,2013—2015 年关注热点转为海表温度,2016 年后中国研究人员在该领域的研究主题转移为无人机。表明中国在该领域研究起步较晚,但发展迅速,跟踪热点能力强,热点转移快,有一定的热点引领作用。

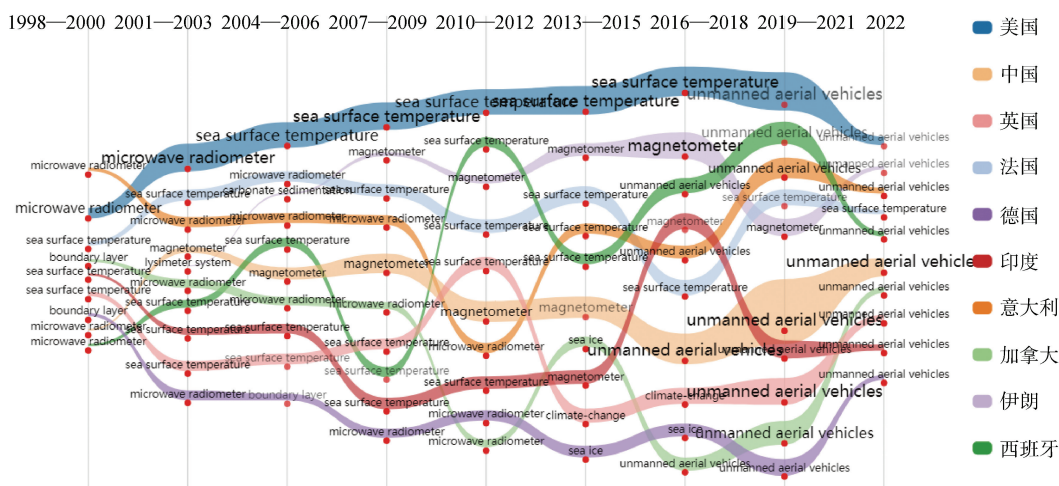


图 12 海洋观探测仪器技术领域英文论文发文量前 10 国家研究重点演变

Fig.12 Evolution of the top 10 national research priorities in the field of ocean observation and detection instrument technology based on published English papers

3 总结与展望

本文基于 Web of Science 核心集合数据库,运用文献计量和可视化分析方法,对海洋观探测仪器技术领域 1998—2022 年发表的 89 261 篇英文论文进行梳理分析,得出以下结论与展望:

从发文趋势看,近 10 余年海洋观探测仪器技术研究得到了快速的发展,特别是 2015—2022 年,该领域研究受到全球相关研究人员的广泛关注,研究呈快速增长趋势。2008 年前,美国在该领域发文量持续领先。中国在该领域的研究起步较晚,2016 年前,该领域论文发表数量较少,但发展较快,2018 年后中国科研人员发文量超过美国,居世界第一。但是,累

积科研成果上,中国与美国仍有一定差距。高被引论文作者前 10 名中有 3 位中国学者,表明中国部分研究学者在该领域具有较高影响力,但 3 位中国学者并非来自发文量前 10 机构,发文量前 10 机构多为美国研究机构。另外,前 10 高产作者中尚无所在发文单位是中国的学者,高被引论文总量我国略低于美国,表明近年来中国高度重视海洋观探测仪器的研发,该领域研究取得了较大突破与进展,但中国在该领域的科研人员和科研力量具有一定的分散性与差异化,因此有必要加强前沿方向、关键领域的持续深耕和精细化研究,以及加强体系化、建制化国家战略科技力量建设的必要性。

从学科分布上看,地球科学、电气与电子工程、气象学与大气科学、海洋学、环境科学、遥感学是海洋观探测仪器技术领域所涉及的热门学科,这表明海洋观探测仪器技术领域具有多学科交叉的前沿研究属性,其技术发展势必受到其关联学科发展的影响。随着人们关注热点和关联学科的发展,海洋观探测领域关注重点不断转移,从1998—2003年的微波辐射计到2003—2018年的海面温度,再到2019—2022年的无人机。因此,海洋观探测仪器技术领域研究学者应随时关注研究热点转换,紧随其上,保持与该领域国际前沿研究水平相当的研究速度。从中国该领域研究重点演变上看,虽然该领域研究中国的起步较晚,但中国相关研究人员研究跟踪能力很强,主题演变转移较快,有一定的热点引领作用,表明中国该领域研究人员能紧跟研究前沿,具有促进行业和研究领域快速发展的能力。

从文献关键词词云聚类看,该领域全球研究热点集中在无人机、地磁仪、海面温度、微波辐射计、水色。需要特别注意的是,水色关联词多为聚类分析关键词,表明与水色研究紧密相关的海洋传感器是该领域持续关注的研究重点,高新海洋传感器的开发将是填补该领域诸多技术空白的重要契机。从热点关键词频次变化来看,2013年后,地磁仪和无人机在检索论文中的频次显著增加,特别是无人机,2021年后,出现频次是其他热点关键词的5倍以上,远超其他热门关键词,其主要原因是无人机可在水下、水面及空中实现海洋立体观探测,因此未来海洋观探测仪器的研究热点仍将持续在无人机等运动搭载平台及其拓展应用领域。海洋观探测传感器方面,因海洋遥感技术的发展,海面温度一直是探测对象类最高频关键词,表明对海洋环境变化持续高度关注,涉及海洋环境变化的水文气象类海洋观测仪器也将是未来海洋观探测仪器技术关注的热点方向。关键词词云也表明,海洋观探测仪器技术因受海洋科学研究及海洋观探测业务化应用等需求的驱动,在解决能源、通信及可靠性等制约性核心问题的基础上,将在微型化、多功能化、智能化以及网络化等方向得到快速发展。

参考文献:

- [1] 宋宪仓,杜君峰,王树青,等.海洋科学装备研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2020,22(6):76-83.
SONG Xiancang, DU Junfeng, WANG Shuqing, et al. Research progress of marine scientific equipment and development recommendations in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 76-83.
- [2] 李保成.基于多种通信方式的海洋资料浮标数据接收系统研究及数据分析[D].青岛:中国海洋大学,2013.
LI Baocheng. Design of data buoy receiving system based on various communication technology and data analysis[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [3] 蒋成竹,张涛,吴林强,等.欧盟海洋探测和观测体系构建现状与发展趋势[J/OL].自然资源情报:1-6[2023-05-16].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1798.N.20230317.1710.012.html>.
JIANG Chengzhu, ZHANG Tao, WU Linqiang, et al. Current status and development trend of the European Union ocean exploration and observation system[J/OL]. Natural Resources Information: 1-6[2023-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1798.N.20230317.1710.012.html>.
- [4] 罗续业.发展海洋观测技术建设业务保障体系[J].海洋开发与管理,2012,29(6):29-30.
LUO Xuye. Development of ocean observation technology construction of business security system[J]. Ocean Development and Management, 2012, 29(6): 29-30.
- [5] 孙文祺,王文龙,姜兆祯,等.海洋观测无人艇发展现状与展望[J].中国造船,2022,63(5):256-271.
SUN Wenqi, WANG Wenlong, JIANG Zhaozhen, et al. Development status and outlook of unmanned surface vessels for oceanography observation[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(5): 256-271.
- [6] 方书甲.海洋环境监测是海洋发展和维权的支撑[J].舰船科学技术,2012,34(2):8.
FANG Shujia. Marine environment monitoring: essential to marine development and rights guarding[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(2): 8.
- [7] 王孝宁,何苗,何钦成,等.基于文献计量学研究方法的科技论文定量评价[J].科学学与科学技术管理,2004,25(4):15-18.
WANG Xiaoning, HE Miao, HE Qincheng, et al. Quantitative evaluation of scientific papers based on bibliometrics research methods[J]. Science of Science and Management of S & T, 2004, 25(4): 15-18.
- [8] 朱亮,孟宪学.文献计量法与内容分析法比较研究[J].图书馆工作与研究,2013,35(6):64-66.
ZHU Liang, MENG Xianxue. The comparative study on bibliometric method and content analysis method[J]. Library Work and Study, 2013, 35(6): 64-66.
- [9] 段和平,史文海,俞立,等.探讨期刊论文发表数量和核心作者群的重要意义[J].临床荟萃,2004,19(8):480-481.
DUAN Heping, SHI Wenhai, YU Li, et al. A study on the significance of the number of published papers and the core author group[J]. Clinical Focus, 2004, 19(8): 480-481.
- [10] 黄柯源,张浩军.基于CiteSpace的国内跨境教育研

- 究热点及趋势探析: 以高校中外合作办学、来华留学教育为例[J]. 西南交通大学学报(社会科学版), 2022, 23(5): 108-119.
- HUANG Keyuan, ZHANG Haojun. Citespace-based analysis of research hot spots and trends in China's cross-border education: Taking Chinese-foreign cooperation in running schools and international students education in China as an example[J]. Journal of Southwest Jiaotong University(Social Sciences), 2022, 23(5): 108-119.
- [11] 肖慎华. 农业、环境学科高被引学者研究主题的热点分析[J]. 农业图书情报学刊, 2017, 29(1): 44-48.
- XIAO Shenhua. Analysis of the hot spots in the subject of agriculture and environmental science[J]. Journal of Library and Information Sciences in Agriculture, 2017, 29(1): 44-48.
- [12] 陈江涛, 吕建秋. 基于知识图谱的我国农技推广的研究现状及热点分析[J]. 科技管理研究, 2018, 38(4): 175-180.
- CHEN Jiangtao, LV Jianqiu. Present situation and hot-spot analysis of agricultural technology extension in China based on knowledge map[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(4): 175-180.
- [13] 宋宇, 李正钧. 基于聚类分析的智慧图书馆研究热点探究[J]. 内蒙古科技与经济, 2023, 42(12): 125-127.
- SONG Yu, LI Zhengjun. Exploration and research on the research hot spot of smart library based on cluster analysis[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2023, 42(12): 125-127.
- [14] 张国庆, 李纪强, 柏林, 等. 无人机/无人船协同系统研究现状及关键技术[J]. 水上安全, 2022, 42(5): 42-48.
- ZHANG Guoqing, LI Jiqiang, BO Lin, et al. Research status and key technologies of UAV/USV cooperative system[J]. Maritime Safety, 2022, 42(5): 42-48.
- [15] 胡敏, 董海峰, 江唯鸣, 等. 高频调制矢量原子磁力仪综述[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 1-14.
- HU Min, DONG Haifeng, JIANG Weiming, et al. Review of high frequency modulation vector atomic magnetometers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 1-14.
- [16] 胡光兰, 杨勇, 李晓东. 海洋工程磁场探测传感技术研究进展[J]. 电子技术与软件工程, 2022, 11(17): 89-92.
- HU Guanglan, YANG Yong, LI Xiaodong. Research progress of magnetic field detection sensing technology in marine engineering[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022, 11(17): 89-92.
- [17] 邱钰, 丁军航, 徐腾飞, 等. 应用 Attention-LSTM 算法预测赤道太平洋浮标观测站位海表温度的方法[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(2): 207-219.
- QIU Yu, DING Junhang, XU Tengfei, et al. Application of Attention-LSTM algorithm for sea surface temperature prediction in the tropical Pacific Ocean[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(2): 207-219.
- [18] 牛原, 邱志伟, 常宇佳, 等. 基于微波遥感技术海面盐度反演方法[J]. 海洋科学, 2022, 46(1): 67-75.
- NIU Yuan, QIU Zhiwei, CHANG Yujia, et al. Inversion method of sea surface salinity based on microwave remote sensing technology[J]. Marine Sciences, 2022, 46(1): 67-75.
- [19] 宋学儒, 崔新东, 翟宇梅, 等. 面向海表盐度和温度遥感的微波辐射计研究综述[J]. 航天器工程, 2021, 30(1): 108-114.
- SONG Xueru, CUI Xindong, ZHAI Yumei, et al. Remote sensing of sea surface and temperature with microwave radiometers research review[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(1): 108-114.
- [20] 张可立, 白照广, 王丽丽. 我国海洋水色卫星发展回顾、现状及展望[J]. 卫星应用, 2018, 77(5): 24-27.
- ZHANG Keli, BAI Zhaoguang, WANG Lili. Development review, current situation and prospect of ocean color satellite in China[J]. Satellite Application, 2018, 77(5): 24-27.

Analysis of developmental trends in ocean observation and detection instrument technology based on bibliometric analysis

LI Yunzhou^{1, 4, 5}, WANG Chaoyue², ZHENG Liang¹, XU Xueyou³, WANG Juncheng^{1, 4, 5},
QI Suiping¹, GAO Yang¹

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266061, China; 2. Library, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 3. Information Research Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China; 4. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China; 5. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Received: Sep. 4, 2023

Key words: ocean observation and detection instrument technology; bibliometric; visualization analysis; research situation

Abstract: Marine observation and detection technology is an important component of marine science and technology and plays an essential role in warning against marine disasters, developing marine resources and space, protecting the marine environment, safeguarding marine rights and interests, and strengthening national defense construction. Research on marine observation and detection instruments is important for developing marine observation and detection technology. This study clarifies the current research status and hotspots of instrument technology for marine observation and detection by first retrieving the related English articles published between 1998 and 2022 from the Web of Science and then statistically analyzing them in terms of the quantity of publications, disciplines involved, authors, institutions, keywords, and other aspects using bibliometric and visual analyses. The current research status and hotspots are summarized here. First, research on instrument technology for marine observation and detection has shown a rapid growth trend in the past decade. In China, research in this technological field began relatively late but rapidly developed. After 2018, it has steadily ranked first in the world in terms of the publication quantity of articles from Chinese researchers in this field. Three of the top ten authors of highly cited papers are Chinese scholars, showing that some Chinese researchers have a considerably influence in this field. However, in terms of publication quantity, most of the top 10 institutions are American institutions, and no scholar is Chinese by nationality among the top 10 high-yield authors. Hence, the influence and competitiveness of Chinese researchers in this field must be further improved. Second, the results of the word cloud clustering analysis show that the global research hotspots in this field are focused on unmanned aerial vehicles, magnetometers, microwave radiometers, sea surface temperature, and water color. Note that the association words of the ocean sensor are mostly keywords from the clustering analysis, indicating that the ocean sensor is a key research focus in this field. From the perspective of research focus evolution, despite starting late, China plays a certain leading role in the transfer of research hotspots on instrument technology for marine observation and detection due to its strong research tracking ability and rapid transfer of theme evolution.

(本文编辑: 谭雪静)