

基于 CiteSpace 的海洋热浪研究可视化分析

陈俏君^{1,2}, 李德磊^{3,4}, 冯建龙^{1,2}

(1. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 海洋资源化学与食品技术教育部重点实验室, 天津 300457; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 在全球变暖的背景下, 海洋热浪发生频率、强度、持续时间及空间范围均呈现出显著增长趋势, 对海洋生物多样性和生态系统造成极为严重的破坏, 引起了世界各国的广泛关注。CiteSpace 是一款具有多元、分时、动态等优势特点的引文分析工具, 可用于分析学科或知识领域的研究发展进程和结构关系。以海洋热浪为主题, 基于 Web of Sciences Core Collection 数据库, 利用 CiteSpace 对检索到的 514 篇相关文献(2012—2021 年)进行可视化分析, 全面揭示了海洋热浪研究领域的发展趋势、研究热点及前沿。研究发现, 海洋热浪研究的发文量逐年增加, 从 2012 年至今总体呈现平稳—缓慢上升—迅速增长三个阶段特征。美国和澳大利亚两国在海洋热浪研究中占主导地位。中国虽起步较晚, 但在该领域中影响力不断增强。发文作者集中度较高, 且发文量排名靠前的作者合作关系紧密, 对该研究领域的发展起到了引领作用。海洋热浪研究所属学科主要集中于环境科学与生态学、海洋及淡水生物学、海洋学等。基于关键词共现、突变分析及文献共被引方法, 发现当前研究的前沿热点方向主要包括海洋热浪特征、变率及物理机制, 海洋热浪对海洋生态系统及生物多样性的影响, 气候变化下海洋热浪的响应、适应与减缓。此研究是对该领域文献综述的一个新颖尝试, 为深入研究海洋热浪提供了一定的科学参考和借鉴。

关键词: 海洋热浪; CiteSpace; 合作特征; 前沿热点; 综述

中图分类号: P731.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)2-0109-16

DOI: 10.11759/hyxx20220213001

海洋热浪(Marine Heatwave, MHW)是一定海域内发生的较长时间(几天至几个月)海水异常偏高的现象。Hobday 等^[1]将其定义为在某一海域内发生的日海表温度(Sea Surface Temperature, SST)连续 5 天及以上超出当地季节阈值(即气候基准期内同期日海表温度的 90%分位数)的一种极端海洋灾害现象。海洋热浪持续时间可达数百天, 空间范围可覆盖数千千米^[2], 深度影响可达数百米^[3-5]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告以来, 海洋热浪变化规律、成因及其影响研究成为气候变化研究的前沿热点领域之一^[6], 同时海洋热浪也是 IPCC《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》及第六次评估报告的重点评估内容之一^[7-8]。

在全球气候持续变暖的背景下, 海洋热浪发生频率、强度、持续时间及空间范围均呈现出显著增长趋势, 近 30 年来海洋热浪次数增加超过 50%^[9]。当前全球已有多处地方发生了多起大规模影响巨大

的海洋热浪事件, 如 2003 年地中海海洋热浪^[10-12], 2011 年澳大利亚西海岸极端海洋热浪^[13-15], 2012 年西北大西洋海洋热浪^[16], 2013—2016 年东北太平洋海洋热浪^[17-19], 2016—2019 年中国近海区域海洋热浪^[20-22]以及 2015—2016 和 2019—2020 年热带印度洋海洋热浪^[23]等。这些极端异常高温事件会引起大范围的珊瑚白化和死亡^[24]以及海草和海带的消亡^[15], 导致某些有害藻类的爆发性增长, 引发赤潮等生态灾害^[25], 对海洋生物多样性和生态系统造成极为严重的破坏。其还会影响鱼类产卵, 造成渔业和水产养殖业的巨大损失^[3, 18]。Li 等^[26]发现 1982 年至今中国

收稿日期: 2022-02-13, 修回日期: 2022-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(42176198, 42176203)

[Foundation: National Nature Science Foundation of China, Nos. 42176198, 42176203]

作者简介: 陈俏君(1999—), 女, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要从事海洋热浪研究, E-mail: chenqiao2022@163.com; 冯建龙(1988—), 男, 山东济宁人, 通信作者, 副研究员, 主要从事近海流体力学研究, E-mail: fj1181988@tust.edu.cn

近海海洋热浪事件逐渐增多, 1982—2016 年间海洋热浪频率增加趋势是全球平均的 2.5 倍。2016 年 8 月, 我国渤海、黄海和东海区域发生了破纪录的海洋热浪事件^[27], 导致渤海近岸养殖海参大量死亡, 损失近 70 亿^[28]。2017、2018 年该区连续出现海洋热浪事件, 造成重大经济损失^[29]。此外, 海洋热浪还会通过大气遥相关影响陆地区域的天气系统, 造成区域性的高温、干旱或极端降水等事件^[30-31], 进而影响陆地上的生态系统、人类健康和经济发展^[32]。近些年, 许多科研人员和研究机构针对极端海洋热浪事件、海洋热浪形成机制、海洋热浪对生态系统及生物多样性的影响、海洋热浪与全球变暖等方面对该领域进行了研究^[33], 并发表了大量高质量、高影响力的研究成果和科研论文。因此, 对海洋热浪领域做综述研究, 深入挖掘其研究热点、前沿及发展趋势具有重要的现实意义。

与传统的文献综述研究方法^[34]相比, CiteSpace 作为具有多元、分时、动态等优势特点的引文分析工具, 以可视化知识图谱的方式呈现某一学科或知识领域的研究发展进程和结构关系^[35]。该软件是由 Drexel University 计算机与情报学的陈超美教授基于 Java 应用程序开发的一款引文可视化分析软件, 其通过挖掘引文空间的知识聚类及分布(关键词、文献共被引), 提供知识单元之间的合作和共现网络分析(国家/地区、机构、作者)^[36], 为研究者全面了解该领域的发展历史、研究热点及前沿等提供了有效途径。现已被广泛的应用在热浪^[37]、极地^[38]、热带气旋^[39]及气候变化^[40-41]等研究领域, 如李睿倩等^[42]基于 Web of Sciences(WoS)数据库并利用 CiteSpace 可视化软件分析海洋空间规划应用生态系统服务研究, 全面揭示了近 20 年该交叉领域的国际研究进展及演变趋势; 王利等^[38]借助 CiteSpace 对国内(CNKI 数据库)、国际(WoS 数据库)北极科研领域的研究进行综述分析。但目前还没有学者使用 CiteSpace 引文可视化分析软件分析海洋热浪研究领域的发展历程与演变特征。

本文基于 CiteSpace 对 WoS 数据库所检索得到的海洋热浪相关文献进行数据可视化分析, 分别从发文数量的变化特征、海洋热浪研究合作特征、前沿热点分析共三个方面, 较为全面地探究了该领域的发展趋势以及研究热点与前沿, 为海洋热浪研究提供一定的科学参考和借鉴。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文数据来源于 Web of Sciences Core Collection (WoS)数据库, 该平台是全球最大、覆盖学科最多的综合性学术资源平台, 广泛收录了多个研究领域共 11,000 多种世界权威且高影响力的学术期刊, 因此可以确切保证数据来源的质量。以“marine heat wave*” OR “marine heatwave*”为主题词进行文献数据精确检索, 文献类型选取为“Article” OR “Review”, 时间跨度为 2012 年 1 月—2021 年 12 月, 共检索得到 514 篇海洋热浪相关文献。

1.2 研究方法

本文基于 CiteSpace 5.8.R3(64-bit)对所检索的海洋热浪相关文献进行数据可视化分析, 根据检索文献的时间跨度选择对应的分析时间范围 2012 年 1 月—2021 年 12 月, 时间切片层设置为 1 年; 在 Term Source 中选取项目所有提取位置, 包括“Title”(标题), “Abstract”(摘要), “Author Keywords”(DE, 作者关键词)以及“Keywords Plus”(ID, WoS 增补关键词), 分别选择“Country”(国家), “Institution”(研究机构)和“Author”(作者)3 个节点类型以此分析海洋热浪研究领域合作网络特征, 选择“Category”(类别), “Keyword”(关键词)和“Reference”(参考文献)3 个节点分析其共现网络特征, 探究海洋热浪的研究热点、前沿及发展趋势; 选取阈值 Top N 为 50, Top N%为 10.0%, 裁剪方式为 Pathfinder(寻径网络算法)^[36]。

2 结果与讨论

2.1 发文数量的变化特征

发文数量的时间变化可以反映海洋热浪研究的动态变化特征以及该领域的重要程度和学术热度^[37]。基于 WoS 核心合集所检索(2012 年 1 月—2021 年 12 月)的 514 篇文献, 通过 CiteSpace 数据去重处理后, 得到关于海洋热浪研究领域的文献发表数量年际变化图(图 1)。海洋热浪研究的发文量呈逐年增加趋势, 且呈现出三阶段特征: 2012—2015 年为平稳阶段, 该时间段内的海洋热浪发文量较少, 相关研究仍处于探索时期, 平均为 3.75 篇/年; 2016—2018 年为缓慢上升阶段, 该阶段的发文数量相比前一阶段有了较为明显的增加, 平均为 23.33 篇/年, 说明近年来海洋热浪日趋成为学术研究热点, 特别在 2016 年 Hobday

等^[1]针对海洋热浪阈值的确定提出了系统性定义,为日后该研究领域的迅速发展起到了重要作用;2019—2021 年为迅速增长阶段,该阶段的发文数量增长迅速,平均为 143 篇/年,其中 2019 年为海洋热浪研究发文量的转折节点,海洋热浪有关文献在该年的发文量呈爆发性增长现象,达 93 篇,考虑与

IPCC 对此的高度关注有关^[6]。由发文数量的总体时间变化可见,海洋热浪已成为目前国际海洋研究中的一个热点方向,其变化特征可能与全球气候变化背景下的大范围极端海洋热浪事件增多^[43]以及科研人员或研究机构开拓该领域新的研究内容、方法等有关。

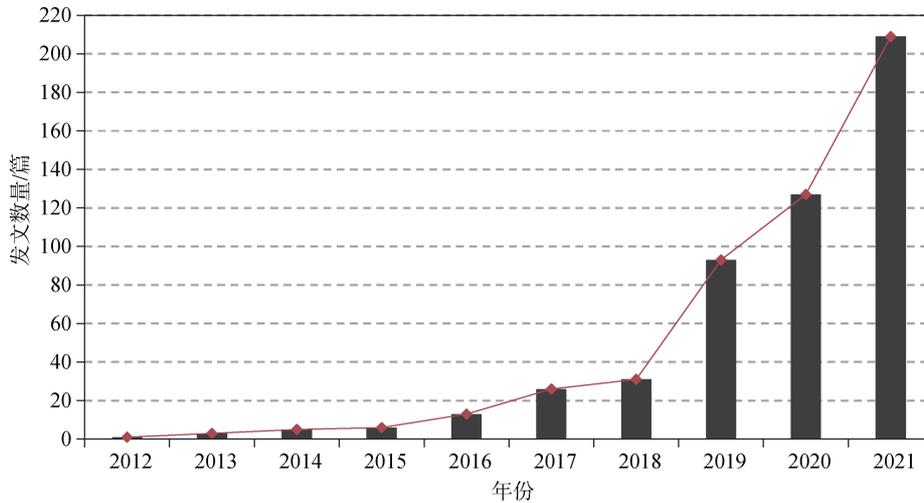


图 1 2012—2021 年海洋热浪研究年发文数量变化图

Fig. 1 Number of published papers on marine heatwaves from 2012 to 2021

2.2 海洋热浪研究合作特征

合作网络图谱分析可以反映出某个研究领域国家、研究机构或科研人员之间的合作关系,为评价其学术影响力提供了一个新的视角,有利于我们发现并重点关注相关的国家、机构或学者^[44]。本文基于 CiteSpace 5.8.R3 依次选取“Country”(国家)、“Institution”(研究机构)和“Author”(作者)3 个节点类型,从宏观的国家/地区合作、中观的研究机构合作,以及微观的发文作者对海洋热浪研究进行三个层次的特征分析。

在 CiteSpace 合作网络图谱中,节点大小代表国家/地区、研究机构或文献作者发表论文的数量,节点越大说明发文量越高;节点以年轮圈的形式呈现,圈内用不同颜色表示文献出现的年份,年轮圈层越厚说明对应年份的发文数量越多,其中出现红色内圈反映海洋热浪领域发文量具有较高的爆发性(Burst);节点间的连线反映合作关系,连线的粗细表示关系的强弱;CiteSpace 中利用中心中介性指标(Centrality)测度节点在网络中重要性,衡量文献、机构以及国家等在海洋热浪研究领域的重要程度,并用紫色外圈进行标注,圈层越厚说明该节点在海洋热浪研究领域占有重要性越高。

2.2.1 国家/地区合作特征

利用 CiteSpace 对海洋热浪研究的发文国家/地区进行可视化分析得到合作网络图谱(图 2),图谱中共有 62 个节点,92 个链接,网络密度 D(Density)为 0.0487,表明各个国家或地区之间在该领域存在较为密切的合作交流关系。其中美国和澳大利亚两国在海洋热浪研究领域占据主导地位,发文数量都超过 190 篇(表 1),两国的总发文量占有所有国家/地区发文数量的 43.26%,但与其他国家的连线较少,表明其与其他国家合作关系不太密切。综合中心中介性(简称中心性,下同)的角度来看,虽然英国(发文量为 40)、中国(发文量为 33)、德国(发文量为 26)、法国(发文量为 23)、葡萄牙(发文量为 20)以及意大利(发文量为 17)发文量并不多,但其中心性均达到 0.34 以上,其中意大利、德国和法国的中心性甚至超过 0.60,表明这些国家发表的研究文献质量较高,影响力较大,在海洋热浪合作网络中具有重要作用;一些地中海沿岸国家(意大利、土耳其、突尼斯、克罗地亚、以色列、希腊)虽节点较小,但彼此之间连线密集,构成了一个较为紧密的合作群体,这些合作关系密切的国家有望通过优势互补、取长补短,使得针对地中海海洋热浪的研究得到快速发展。中国

在海洋热浪研究领域的探索兴起于 2017 年, 虽然开始时间较晚, 但其发文数量现居于全球第 5 位, 且中心性处于较高水平为 0.55, 说明近几年来我国对该研究领域的发展起到了重要的推动作用, 日后可考虑在加强国际合作交流的基础之上, 开展原始创新研究, 逐渐

实现从跟跑到并跑到领跑的历史性跨越。从爆发性的角度可以发现, 澳大利亚是唯一具有较高爆发性的国家, 其数值为 12.04, 同时其发文量仅次于美国且最早开始发表相关文献, 表明其在海洋热浪研究领域占有极为重要的发言权。

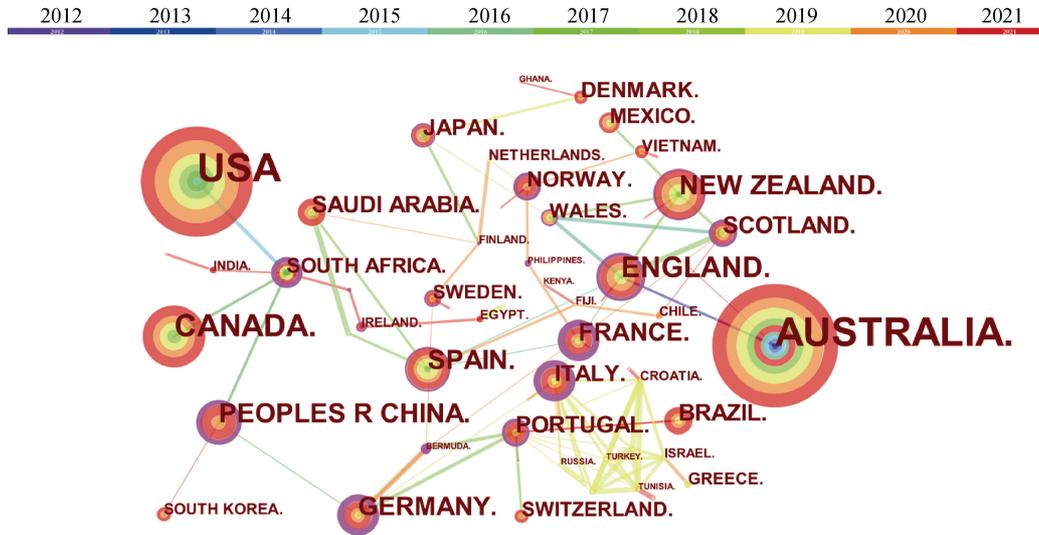


图 2 海洋热浪研究的国家/地区合作网络图谱

Fig. 2 National/regional cooperation network of marine heatwave research

表 1 海洋热浪研究发文数量排名前 10 的国家/地区
Tab. 1 Top 10 countries/regions in marine heatwave research ranked based on research frequency

国家	发文数量/篇	中心中介性	首发年份
USA(美国)	207	0.00	2015
Australia(澳大利亚)	194	0.06	2012
Canada(加拿大)	55	0.00	2017
England(英国)	40	0.34	2013
China(中国)	33	0.55	2017
Spain(西班牙)	31	0.19	2016
New Zealand(新西兰)	31	0.13	2016
Germany(德国)	26	0.61	2017
France(法国)	23	0.61	2016
Portugal(葡萄牙)	20	0.35	2016

2.2.2 研究机构合作特征

基于 CiteSpace 对海洋热浪研究领域的发文机构以 Timezone View 呈现形式进行可视化分析, 得到其时间序列合作图谱(图 3), 图谱中共有节点数 244 个, 419 个链接, 网络密度 D 为 0.014 1, 表明机构间合作不够紧密, 学术交流有待加强。由表 2 可直观看出, 发文数量排名前 10 的机构中绝大部分属于美国和澳

大利亚两国, 其中 NOAA(美国)在海洋热浪研究机构中发文量最大, 为 83 篇, 其次分别为 The University of Western Australia (UWA)、University of Tasmania (UTAS)、CSIRO Oceans and Atmosphere 和 Australian Institute of Marine Science (AIMS)均属于澳大利亚, 再一次印证了该国家在海洋热浪研究领域中具有极为领先和重要的地位, 考虑可能是与澳大利亚频繁遭遇大范围的极端海洋热浪灾害事件有关; NOAA 和 AIMS 具有较高的中心性, 其中 AIMS 在合作网络中的中心性达到 0.65, 说明这些研究机构在海洋热浪领域合作中起到关键作用, 具备较大的国际影响力。而与外国相比中国科研机构的发文数量偏少, 代表性的研究机构为中国科学院(排名 19), 中国海洋大学(排名 30)以及青岛海洋科学与技术试点国家实验室(排名 46), 且首发时间均为近两年, 表明我国在该领域现处于新兴阶段。

结合时间序列图谱(图 3)分析, UWA 对海洋热浪领域的研究最早(2012 年), 且发文数量现居于全球第二, 在 2019 年所发表文献的数量出现突增, 其爆发性高达 6.05, 说明该研究机构近些年来极大推进了海洋热浪的研究进展, 但其合作线路较为单一; 随后从

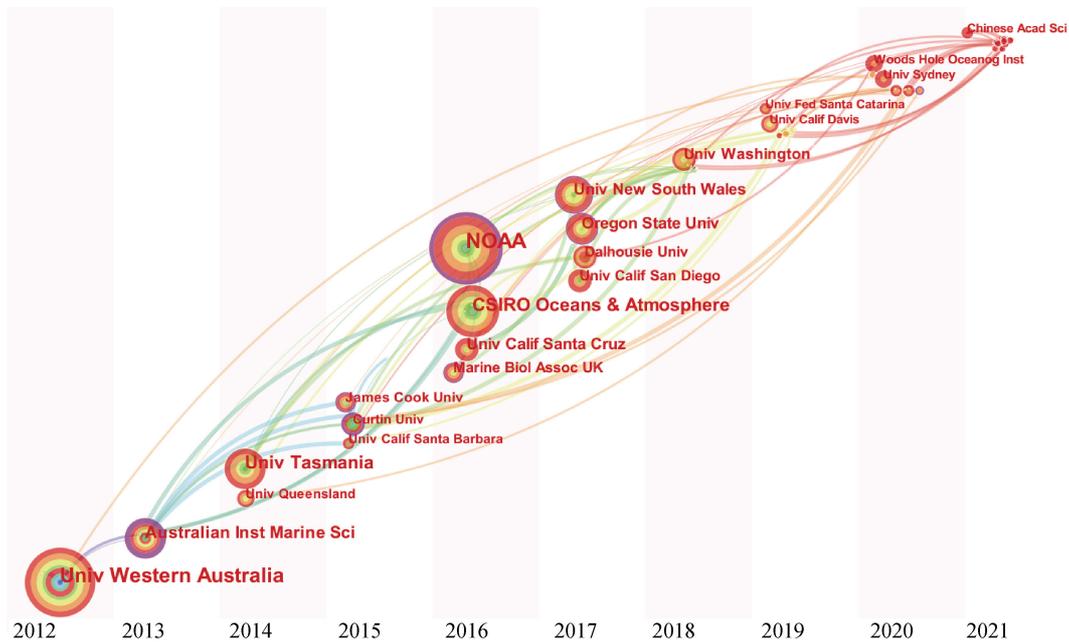


图 3 海洋热浪研究机构的时间序列图谱

Fig. 3 Time-series mapping of institutions involved in marine heatwave research

表 2 海洋热浪研究发文数量排名前 10 的机构以及国内排名前 5 的机构

Tab. 2 Top 10 institutions in the world and top 5 institutions in China ranked by the number of publications on MHW

序号	机构	发文数量/篇	中心中介性	首发年份
1	NOAA(美国)	83	0.56	2016
2	The University of Western Australia(澳大利亚)	70	0.03	2012
3	University of Tasmania(澳大利亚)	46	0.10	2014
4	CSIRO Oceans and Atmosphere(澳大利亚)	45	0.00	2016
5	Australian Institute of Marine Science(澳大利亚)	32	0.65	2013
6	University of New South Wales(澳大利亚)	25	0.15	2017
7	University of California-Santa Cruz(美国)	25	0.01	2016
8	Oregon State University(美国)	25	0.17	2017
9	University of Washington(美国)	23	0.00	2018
10	Dalhousie University(加拿大)	20	0.04	2017
19	Chinese Academy of Sciences(中国)	12	0.01	2021
30	Ocean University of China(中国)	8	0.03	2020
46	Qingdao Natl Lab Marine Sci & Technol(中国)	6	0.04	2020
79	The University of Hong Kong(中国)	3	0.00	2020
90	University of Chinese Academy of Sciences(中国)	3	0.01	2021

2013—2015 年出现了不少伴随较高中心性的发文机构, 如 AIMS(中心性为 0.65)、Curtin University(中心性为 0.31)以及 James Cook University(中心性为 0.12)等; 2016 年为一关键时间节点, 在 NOAA 和 CSIRO Oceans and Atmosphere 对海洋热浪进行系统的定义基础上, 针对海洋热浪事件特征、物理机制、对生态系统生物多样性的影响、海洋热浪与全球变暖的关

系研究迅速的发展起来。

2.2.3 文献作者分析

通过 CiteSpace 对海洋热浪研究领域的文献作者进行统计分析可得, 共有 267 位作者发表了 514 篇与海洋热浪相关的科研论文。按照发表文献数量排名统计, 海洋热浪研究领域文献作者情况如表 3 所示, 发文数量达到 15 篇及以上的作者只有 6 位, 其发文

数总和占有所有作者总发文次数的 16.33%，表明该领域内作者集中度较高，核心作者对于海洋热浪的相

关研究起到了先导作用，并在此基础上不断开拓其研究内容。

表 3 海洋热浪研究发文数量排名前 10 的作者

Tab. 3 Top 10 prolific authors involved in marine heatwave research

作者	国家	机构	发文数量/篇	中心中介性	首发年份
Thomas Wernberg	Australia	The University of Western Australia	25	0.04	2013
Ming Feng	Australia	CSIRO Oceans and Atmosphere	23	0.06	2013
Eric C. J. Oliver	Canada	Dalhousie University	19	0.03	2017
Dan A. Smale	UK	Marine Biological Association of the United Kingdom	17	0.01	2013
Alistair J. Hobday	Australia	CSIRO Oceans and Atmosphere	15	0.06	2016
Neil J. Holbrook	Australia	University of Tasmania	15	0.03	2018
Jessica A. Benthuyesen	Australia	Australian Institute of Marine Science	12	0.04	2018
Steven J. Bograd	USA	NOAA Southwest Fisheries Science Center	12	0.01	2019
Alex Sen Gupta	Australia	The University of New South Wales	10	0.03	2016
Elliott L. Hazen	USA	NOAA Southwest Fisheries Science Center	10	0.00	2019

由表 3 可看出，来自 UWA 的 Thomas Wernberg 是发文量最多的作者，共有 25 篇，主要研究方向为海洋热浪对海洋生物多样性及其生态系统的影响^[14-15, 45]，其中以第一作者身份于 2016 年发表在 *Science* 中的 Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem^[15] 该篇文章被引频数达到 571 次(检索时间: 2022 年 1 月 7 日，下同)，说明其研究成果在海洋热浪领域颇具影响力；来自 CSIRO Oceans and Atmosphere 的华人科学家冯明共发表了 23 篇研究成果，发文数量居于全球第二，其主要从事西澳大利亚的海洋环流、印度洋-太平洋海区气候变化和极端海洋热浪事件研究，近些年来极大推动我国在印太海域海洋热浪研究的进展^[46]。从发文作者合作群组特征来看，发文量排名前 5 的作者(Thomas Wernberg, Ming Feng, Eric C. J. Oliver, Dan A. Smale, Alistair J. Hobday)彼此之间的合作关系较为紧密，且共同发表的学术论文具有较高引用量，如 2016 年发表在 *Progress In Oceanography* 中的 A hierarchical approach to defining marine heatwaves^[1](被引 386 次)该篇文章首次将海洋热浪的定义进行标准化，为日后该领域的研究分析奠定了坚实基础。2018 年发表在 *Nature Communications* 中的 Longer and more frequent marine heatwaves over the past century^[43](被引 456 次)该篇文章进一步对全球海洋热浪发生频率、强度及持续时间等进行量化分析，结果表明全球平均海洋热浪发生频次和持续时间分别增加了 34% 和 17%，致使海洋热浪天数增加了 54%。2019 年同样发表在 *Nature Communications* 中的 A global assessment of marine heatwaves

and their drivers^[47](被引 111 次)该篇文章评估了全球范围内的海洋热浪及其驱动机制，为未来海洋热浪过程分析与预测提供了一个全球基线。由此可见，核心作者对海洋热浪研究领域的发展及海洋生态系统的维护做出了突出贡献。

2.3 海洋热浪研究前沿热点分析

共现网络图谱分析通过挖掘引文空间的知识分布及聚类，反映了某个研究领域内的学科结构(学科共现分析)、研究基础(文献共被引聚类)、研究热点、前沿及演变趋势(高频关键词共现及突变的时间演化趋势分析)^[48]，全面揭示该领域的发展状况。本文利用 CiteSpace 分别选取“Category”(类别)，“Keyword”(关键词)和“Reference”(参考文献)3 个节点，探讨海洋热浪研究领域的学科类别、研究热点、前沿及其演变历程。

基于 CiteSpace 生成的共现网络中的表征特点与合作网络图谱基本一致，节点为年轮圈状，其厚度与对应年份的关键词出现频次成正比。不同的是在网络聚类分析中，CiteSpace 提供了聚类模块性指数(Q 值)和聚类轮廓性指数(S 值)两个评价指标，两者共同作为评判图谱聚类效果的一个重要依据。一般地，Q 值的取值区间为[0, 1]，当 Q>0.3 时即认为得到的网络聚类结构显著；当 S 值在 0.5 以上，可认为聚类结果是合理的，达到 0.7 时则认为聚类结果具有高信度^[36, 44]。

2.3.1 学科共现特征

学科类别的共现分析可以揭示某一研究领域学

科知识的结构、关系及其演变趋势。根据 WoS 的学科分类, 借助 CiteSpace 对所检索的文献数据分析可得, 2012—2021 年发表的与海洋热浪相关的科研论文共覆盖 50 个学科。由表 4 可见, 海洋热浪研究的学科分布主要集中于环境科学与生态学、海洋及淡水生物学、地质学及气象与大气科学等相关学科。其中, 环境科学与生态学发文数量最多, 高达 226 篇, 占学科文献总量的 19.42%。发文数量前十的学科中, 有 6 个

学科与生态环境有关, 包括环境科学、海洋及淡水生物学、生态学、环境科学与生态学、渔业、生物多样性保护, 且前三者的中心性较强, 均达到了 0.69 以上, 尤其是环境科学的中心性数值甚至高达 1.02, 表明了生态环境占据海洋热浪研究领域的绝对主导地位。此外, 海洋热浪的气象与大气科学研究也占有较为重要的地位, 虽然发文数量并不多, 但其具有较高中心性为 0.97, 反映了海洋热浪与气候变化的密切关系。

表 4 2012—2021 年海洋热浪研究学科共现特征分析

Tab. 4 Co-occurrence characteristics of marine heatwave research disciplines from 2012 to 2021

学科	发文数量/篇	中心中介性	首发年份
环境科学与生态学(Environmental Sciences & Ecology)	226	0.23	2013
海洋及淡水生物学(Marine & Freshwater Biology)	170	0.70	2013
环境科学(Environmental Sciences)	154	1.02	2015
海洋学(Oceanography)	96	0.08	2012
生态学(Ecology)	96	0.69	2013
其他分类(Science & Technology: Other Topics)	75	0.00	2014
地质学(Geology)	47	0.38	2013
气象与大气科学(Meteorology & Atmospheric Sciences)	43	0.97	2012
生物多样性保护(Biodiversity & Conservation)	33	0.00	2015
渔业(Fisheries)	26	0.23	2016

结合图 4 的学科逐年发文数量的变化图可见, 发文量排列前 10 的学科文章数量的总体变化均呈现出明显的增长趋势, 尤其是在 2018 年之后, 且海洋热浪相关各学科发文量与该研究领域的年发文量(图

1)变化趋势相一致。其中, 环境科学与生态学增长幅度较为突出, 平均每年增加 9 篇; 海洋及淡水生物学、环境科学的增长率次之, 约为 7 篇/年。其余 7 个学科增长率大致相似。

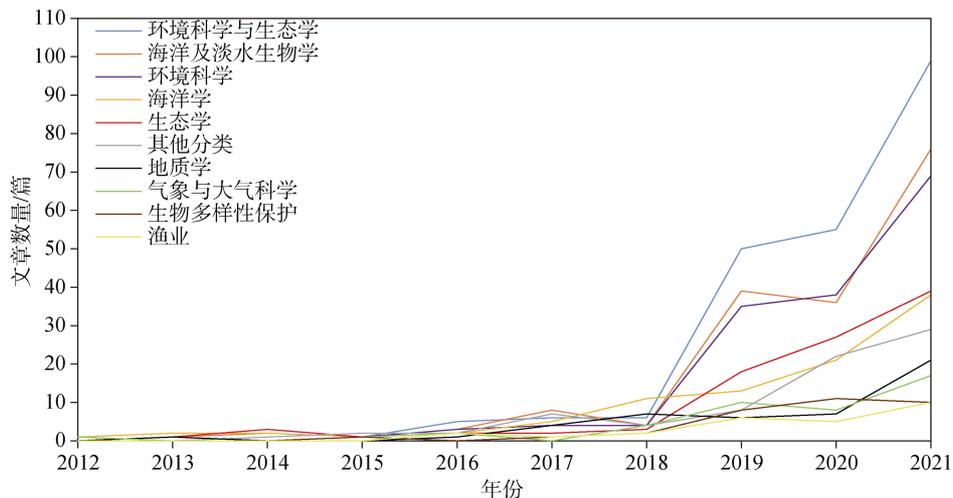


图 4 2012—2021 年海洋热浪研究排名前 10 的学科分类年际变化图

Fig. 4 Interannual variation in the top 10 disciplines of marine heatwave research from 2012 to 2021

2.3.2 关键词分析

研究热点是指在一定时期内出现频次较高、稳

定集中的研究领域或主题, 而研究前沿是近些年兴起的具有先导性、前瞻性和探索性的研究领域或主

题,两者存在一定交叉^[49]。关键词作为科研论文内容的高度总结,能够反映论文的核心观点,因此对某一研究领域的相关文献进行关键词分析,有助于探究该领域的研究热点,同时结合突发性检测(Burstness),进一步挖掘其研究前沿及演化趋势,并预测该领域的未来发展方向。

基于 CiteSpace 提取海洋热浪相关文献的关键词,经过相同关键词合并、无关关键词排除后,共得到 338 个关键词,而只出现过一次或两次的关键词分别为 76 个和 89 个,共占出现关键词总量的 48.82%。

出现 20 次及以上的关键词有 27 个,仅占关键词总量的 7.99%,表明海洋热浪的研究内容虽涉及范围广泛,但研究重点较为集中,只出现过一次的部分关键词,从侧面说明了其研究存在不可持续性或者与海洋热浪研究热点的关联性不大^[50]。

文中通过 CiteSpace 的关键词共现分析,得到 2012—2021 年海洋热浪研究词频排名前 20 的关键词统计表(表 5)和关键词共现时区特征图谱(图 5)。结合图表综合分析可得,国际上海洋热浪研究领域的主要内容大致可分为以下三大类别:

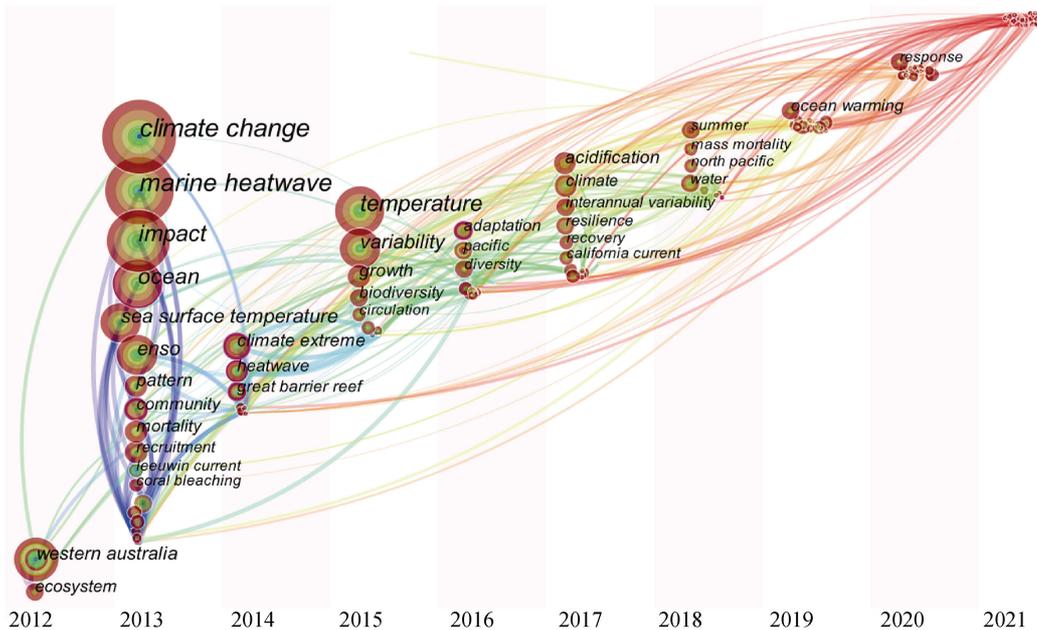


图 5 海洋热浪研究关键词共现时区特征图谱

Fig. 5 Time-zone view of marine heatwave research keywords

(1) 海洋热浪特征、变率及物理机制

该研究类别所涵括的主要关键词有 sea surface temperature(海表温度)、temperature(温度)、variability(变率)、interannual variability(年际变率)、ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)、pattern(型态)、Leeuwin Current(利文暖流)、circulation(环流)、California Current(加利福尼亚海流)等,集中出现于 2013、2015 及 2017 年。其中,temperature 出现频次最高,为 108 次,sea surface temperature 次之,为 62 次,ENSO 名列第三为 60 次。表明该方向的海洋热浪研究主要关注海洋热浪(尤其是海表海洋热浪)的时空分布特征、多尺度时间变化以及与大尺度气候模态、主要环流系统的关系。

(2) 海洋热浪的生物生态影响

这一研究类别包括的主要关键词为 ecosystem(生

态系统)、impact(影响)、community(群落)、mortality(死亡率)、coral bleaching(珊瑚白化)、growth(生长)、biodiversity(生物多样性)、diversity(多样性)、acidification(酸化)、mass mortality(大量死亡)等。由表 5 可以看出,该类别所包含的大多数关键词具有较高的频次及中心性,其中 impact 出现频次最高,达到 113 次,成为海洋热浪的研究热点。community 具有较高中心性,达到 0.22, biodiversity 次之,为 0.10,说明均为海洋热浪研究的关键节点,即探讨其对海洋生物群落及多样性的影响成为一个热门主题。结合图 5 的时区图谱可见,海洋热浪研究于 2012 年以 ecosystem 为起点,随后对于生物生态的影响研究几乎贯穿于整个研究阶段(2012—2021 年),表明海洋热浪对生物生态产生的影响之大、范围之广、程度之深。

表 5 海洋热浪研究词频排名前 20 的关键词及其中心中介性

Tab. 5 Top 20 keywords in marine heatwave research ranked by frequency and centrality

关键词	频次	中心中介性	关键词	频次	中心中介性
climate change(气候变化)	215	0.02	growth(生长)	37	0.06
marine heatwave(海洋热浪)	193	0.01	pattern(型态)	35	0.09
impact(影响)	113	0.03	climate extreme(极端气候)	35	0.24
temperature(温度)	108	0.01	community(群落)	30	0.22
ocean(海洋)	96	0.17	ecosystem(生态系统)	30	0.05
sea surface temperature(海表温度)	62	0.09	heatwave(热浪)	29	0.12
ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)	60	0.06	mortality(死亡率)	29	0.08
variability(变量)	59	0.02	climate(气候)	26	0.00
Western Australia(西澳大利亚)	44	0.02	biodiversity(生物多样性)	25	0.10
acidification(酸化)	37	0.06	ocean warming(海洋变暖)	24	0.02

(3) 气候变化下海洋热浪的响应及适应与减缓

根据关键词共现时区特征图谱可发现, 该研究类别包含的关键词多集中于近几年, 其中具有代表性的关键词有 climate change(气候变化)、climate extreme(极端气候)、adaptation(适应性)、resilience(恢复力)、ocean warming(海洋变暖)、response(响应)等, 主要研究热点为全球气候变暖的背景趋势下海洋热浪的响应以及不同海洋生物或水产养殖、渔业等对异常高海温的适应性和恢复力。相关研究是对原有海洋热浪的发生机制进行更加深入地探索, 全面了解极端气候事件及其海洋生态环境的影响, 有助于未来实现海洋热浪的精确预报, 制定相应防灾减灾措施。

此外, Western Australia (西澳大利亚)、Great Barrier Reef(澳大利亚大堡礁)、Pacific(太平洋)、North Pacific(北太平洋)作为出现频次较高的地名关键词, 表明这些地区频繁遭受海洋热浪灾害的严重影响, 如在 2011 年西澳大利亚沿岸发生极端海洋热浪事件 (“Ningaloo Niño” 事件), 使当地海藻/海草和珊瑚的生态环境发生改变, 从大型褐藻占主导变成海草, 造成大量珊瑚白化以及热带鱼广泛繁殖^[3, 15, 51]; 2016—2017 年海洋热浪致使澳大利亚大堡礁发生大面积的白化现象, 波及 90% 以上的珊瑚, 并且对其造成的影响可能具有不可恢复性^[4, 52]; 2014—2016 年北太平洋海温持续升高, 致使美国西海岸有害藻华暴发, 其产生的毒素制约渔场正常营业, 大量海洋哺乳动物搁浅^[17, 19, 30]。

近 2 年来出现了些新颖关键词如 cumulative impact(累积影响)、species richness(物种丰富度)、tolerance(耐受性)、climate regime shift(气候跃变)等,

可见研究海洋热浪的累积影响以及对生态环境和生物多样性影响已成为该学科领域的重要发展前沿。

突变词是指在相对较短时间内关键词出现频次突然增加或频次增长率突然提高的词汇, 可以反映相关研究在一定时期内的突增及延续状况, 适合表征研究前沿和演化趋势^[53]。利用 CiteSpace 中突发性检测功能, 得到 2012—2021 年海洋热浪研究领域排名前 10 的突变词统计表(表 6), 其中研究时间列中用加粗横圆柱标注突变词的持续时间。由表 6 可见, 自 2012 年开始, Western Australia 和 Leeuwin Current、Pacific 和 climate variability(气候变率)、current system(环流系统)是早期研究热点, 表明早期学者们对于海洋热浪领域研究多集中于某一海洋热浪事件及其形成机制。其中, Leeuwin Current 突变强度最高, 达到 7.87, Western Australia 次之, 其强度值为 7.28, 且呈现出持久的爆发趋势, 再一次印证海洋热浪对该地区造成的破坏力极强, 影响范围极大。ocean(海洋)、summer(夏季)、habitat(生境)、growth(生长)、harmful algal bloom(有害藻华)成为近些年研究前沿, 说明海洋热浪领域在其物理机制研究基础上, 引入了海洋热浪影响研究, 如极端异常高海温造成海洋物种发生远离热生境的位移, 致使海洋生物重新分布, 破坏了生态系统及生物多样性, 预测未来极端海洋热浪事件及其对海洋生态环境、海洋生物多样性的影响将成为该领域的一个重要研究方向。

2.3.3 文献共被引分析

文献共被引是指两篇(或多篇)文献同时被后来一篇或多篇论文所引证, 则这两篇(或多篇)文献构成了共被引关系^[36]。通过对此进行分析, 可以展示出

表 7 海洋热浪研究聚类大小排列前 10 的聚类信息表
Tab. 7 Top 10 clusters for marine heatwave research

聚类号	聚类名	主要研究内容	关键文献
#0	kelp(巨藻)	温度异常; 海藻森林; 敏感物种; 生物群落变化; 沿海生态系统	[54-56, 66]
#1	sea surface temperature(海表温度)	高纬度海洋热浪; 趋势变化; 平均变暖; 耦合区域气候系统模式	[25, 67-68]
#2	coral bleaching(珊瑚白化)	全球变暖; 珊瑚礁生态系统; 珊瑚白化; 珊瑚礁扰动机制的转变	[60, 69]
#3	seagrass(海草)	蓝碳; 海草生态系统; 海草碳储量损失; 沿海生物群落转变	[55, 59]
#4	California Current(加利福尼亚海流)	东北太平洋海洋热浪; 有害藻华; 对食物网、栖息地的影响	[61-62]
#5	coral(珊瑚)	温室效应; 珊瑚白化程度; ENSO	[57-58, 70]
#6	Leeuwin Current(利文暖流)	极端气候; 全球模式; 澳大利亚大堡礁	[1, 43]
#7	Ningaloo Nino	厄尔尼诺年代际增长; 夏季; 西澳大利亚; 恢复力	[46, 71-72]
#8	heat budget(热收支)	物理机制; 异常冬季风; 北太平洋; 生产力; 营养物质输送	[73-74]
#9	Echinodermata(棘皮动物门)	海洋栖息地; 无脊椎动物种群; 生态系统模型; 渔业管理	[63, 75]

由图 6 的聚类图谱显示, 图中节点大小与文献被引频次成正比, 不同聚类结果用颜色块填充, 其中聚类模块性指数 Modularity Q 为 0.897, 表明海洋热浪研究网络的聚类结构显著; 聚类轮廓性指数 Mean Silhouette S 为 0.964 3, 表明该聚类网络同质性较高, 聚类结果具有高信度。结合表 7 可以得出, 海洋热浪研究领域的前沿发展主要可分为以下两大类:

(1)海洋热浪对海洋生态系统及生物多样性的影响(#0、#2、#3、#5、#9)

该研究方向主要包括#0 kelp(巨藻)、#2 coral bleaching(珊瑚白化)、#3 seagrass(海草)、#5 coral(珊瑚)、#9 Echinodermata(棘皮动物门)共 5 个小聚类。由于聚类编号越小所包含的关键词节点越多, 因此依据该研究方向所含有聚类号大小和聚类个数多少, 可判断研究海洋热浪对海洋生态系统及生物多样性的影响已成为当前该领域的重要研究方向及热点。海洋热浪的发生往往伴随着海洋物种分布的大规模变化^[54-56]、物候变化^[13, 57-58]、生态系统结构的变化^[59-60]以及极端事件下的大量死亡^[61-62]等, 给海洋生物多样性、海洋经济、渔业资源等造成严重影响。例如, Mills 等^[16]研究发现, 2012 年发生于西北大西洋的海洋热浪事件改变了当地的长鳍鲑鱼和美洲龙虾的分布及种群结构, 导致捕鱼方式发生了变化, 渔业经济受到严重影响。Jones 等^[62]研究 2013—2015 年东北太平洋发生海洋热浪期间, 海鸟死亡的原因机制发现, 越发频繁和强烈的海洋变暖事件可能会对食物网、栖息地等产生影响, 从而对海洋捕食者造成种群影响, 特别是海鸟。Babcock 等^[63]综合统计了 2011—2017 年澳大利亚一系列极端气候灾害信息, 结果发现该地区大陆海岸线 45%以上的重要海

洋栖息地形成生物——珊瑚、海带、海草和红树林遭到大量死亡。

(2)海洋热浪特征、变化及其物理机制(#1、#4、#6、#7、#8)

该研究方向所包括的聚类标签有#1 sea surface temperature(海面温度)、#4 California Current(加利福尼亚海流)、#6 Leeuwin Current(利文暖流)、#7 Ningaloo Nino、#8 heat budget(热收支)。在全球持续变暖的背景趋势下, 海表温度异常偏高, 海洋气候极端事件频发所导致的海洋热浪呈现出发生频次更频繁、持续时间更久、袭击范围更广、强度更大的趋势^[43]。因此, 研究海洋热浪形成的物理机制, 对于更好地开发有效的预报系统, 降低其危害具有非常重要的现实意义。例如, Feng 等^[13]对 2011 年西澳大利亚沿岸极端海洋热浪事件进行成因分析, 可得该事件主要是由南太平洋夏季向极地流动的利文暖流的非季节性涌流所驱动; Scannell 等^[64]研究表明, 北大西洋在大西洋多年代际振荡(Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO)正位相期间较为容易发生大面积的海洋热浪, 而东北太平洋则在太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)和 ENSO 正位相时才会较大可能发生大面积海洋热浪; Qin^[65]以 2006 年 11 月的热带太平洋海洋热浪事件为例, 探究其形成机制, 结果表明由于厄尔尼诺的影响, 热带太平洋东部海温异常升高, 进而形成了深对流, 导致热带太平洋西部高空气流辐合下沉, 抑制对流和云的发展, 海温逐渐升高, 生成海洋热浪。

总体而言, 极端气候变化、海洋生态系统及生物多样性、物理机制和海洋热浪热点事件的研究成为海洋热浪领域的研究主体。同时, 不同研究方向之间

构成一定程度的交叉结构,如#0 kelp、#1 sea surface temperature、#3 seagrass 与#8 heat budget 两两之间相互交叉,组成了一个大聚类集群,说明海表温度异常增加导致极端海洋热浪发生,破坏了海带森林、海草草甸等海洋生态系统结构稳定;#2 coral bleaching 与#9 Echinodermata 部分交叉,说明这两个聚类模块之间构成较为紧密的联系,即珊瑚礁作为棘皮动物理想的栖息地和繁殖场所,一旦珊瑚礁出现大面积白化,进而对棘皮动物的生存和繁殖造成严重影响;而针对#4 California Current、#6 Leeuwin Current 聚类的研究较为独立。

3 结论与展望

近年来,随着全球气候持续变暖,海洋热浪灾害愈发严重,相关研究已成为全球海洋科学研究热点。本文基于 WoS 核心数据库,利用 CiteSpace 对所检索到的 2012—2021 年共 514 篇海洋热浪相关文献进行可视化分析,揭示了发文数量的变化特征,并在此基础上,分别从国家/地区、研究机构、文献作者 3 个方面分析海洋热浪研究领域合作网络特征;从学科共现、关键词、文献共被引 3 个方面分析其共现网络特征,全面综述该研究领域的发展趋势、研究热点及前沿。主要得到以下结论:

(1)从发文数量上看,海洋热浪研究的发文量呈逐年增加趋势,总体呈现出平稳-缓慢上升-迅速增长 3 阶段特征。

(2)从合作网络来看,其特征分析可划分为 3 个层次:①宏观的国家/地区,总体上合作关系较为密切,具有主要发文国家合作线路较为单一,一些小国家(地中海沿海国家)合作紧密的特点。其中,美国和澳大利亚两国在该领域中占主导地位,特别是澳大利亚作为唯一具有高爆发性的国家,拥有极为重要的发言权,而中国相关研究虽起步较晚,但近年发文量迅速增加且中心性较高,在该领域的影响力将不断增强;②中观的研究机构,各机构间的合作较为独立,发文量排名前 10 的机构中绝大部分属于美、澳两国,且均在该领域合作中起到关键作用,具备较大的国际影响力;③微观的发文作者,发文数量达到 15 篇及以上的作者发文数总和占总发文次数的 16.33%,表明作者集中度较高,且发文量排名前 5 的作者合作关系较为紧密,共同发表的论文具有较高引用量,对于海洋热浪的相关研究起到了先导作用。

(3)从共现网络来看,其特征分析可划分为 2 个方面:①海洋热浪研究领域覆盖的学科较为集中,发文量排列前 10 的学科中 6 个学科与生态环境有关,表明生态环境占据该领域的绝对主导地位;②该领域的研究热点和前沿内容主要分为三大类别:一是海洋热浪特征、变率及物理机制,为早期研究的突变热点;二是海洋热浪的生物生态影响,为该领域的关键节点,其影响研究贯穿于整个阶段(2012—2021 年);三是气候变化下海洋热浪的响应及适应与减缓,主要探索全球变暖与海洋热浪、海洋热浪对气候变化的响应及不同海洋生物种类或水产养殖、渔业等对异常高海温的适应性和恢复力等,这也正是近年的研究主流方向。

本文基于 CiteSpace 较为系统且全面地揭示了海洋热浪研究领域的发展趋势、研究热点及前沿,是对该领域文献综述的一个新颖尝试,为未来更有针对性的开展海洋热浪前沿热点和难点问题提供了科学参考。

参考文献:

- [1] HOBDAV A J, ALEXANDER L V, PERKINS S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. *Progress in Oceanography*, 2016, 141: 227-238.
- [2] OLIVER E C J, BENTHUYSEN J A, DARMARAKI S, et al. Marine heatwaves[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2021, 13(1): 313-342.
- [3] CAPUTI N, KANGAS M, DENHAM A, et al. Management adaptation of invertebrate fisheries to an extreme marine heat wave event at a global warming hot spot[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(11): 3583-3593.
- [4] BENTHUYSEN J A, OLIVER E C J, FENG M, et al. Extreme marine warming across tropical Australia during Austral summer 2015-2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(2): 1301-1326.
- [5] HU S, LI S, ZHANG Y, et al. Observed strong subsurface marine heatwaves in the tropical western Pacific Ocean[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(10): 104024.
- [6] COLLINS M, SUTHERLAND M, BOUWER L, et al. IPCC SROCC—Extremes, abrupt changes and managing risks[M]//IPCC. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019, 589-656.
- [7] CHEN Y, MOUFOUMA-OKIA W, MASSON-DELMOTTÉ V, et al. Recent progress and emerging topics on weather and climate extremes since the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018,

- 43(1): 35-59.
- [8] PÖRTNER H, ROBERTS D, MASSON-DELMOTTE V, et al. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2019.
- [9] FRÖLICHER T L, FISCHER E M, GRUBER N. Marine heatwaves under global warming[J]. *Nature*, 2018, 560(7718): 360-364.
- [10] OLITA A, SORGENTE R, RIBOTTI A, et al. Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea surface layer: a numerical simulation[J]. *Ocean Science Discussions (OSD)*, 2006, 3(3): 85-125.
- [11] SPARNOCCHIA S, SCHIANO M E, PICCO P, et al. The anomalous warming of summer 2003 in the surface layer of the Central Ligurian Sea (Western Mediterranean)[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(2): 443-452.
- [12] OLITA A, SORGENTE R, NATALE S, et al. Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response[J]. *Ocean Science*, 2007, 3(2): 273-289.
- [13] FENG M, MCPHADEN M J, XIE S P, et al. La Nina forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1277.
- [14] WERNBERG T, SMALE D A, TUYA F, et al. An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 78-82.
- [15] WERNBERG T, BENNETT S, BABCOCK R C, et al. Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem[J]. *Science*, 2016, 353(6295): 169-172.
- [16] MILLS K E, PERSHING A J, BROWN C J, et al. Fisheries management in a changing climate lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic[J]. *Oceanography*, 2013, 26(2): 191-195.
- [17] BOND N A, CRONIN M F, FREELAND H, et al. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(9): 3414-3420.
- [18] CAVOLE L C M, DEMKO A M, DINER R E, et al. Biological impacts of the 2013-2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific[J]. *Oceanography*, 2016, 29(2): 273-285.
- [19] GENTEMANN C L, FEWINGS M R, GARCIA-REYES M. Satellite sea surface temperatures along the West Coast of the United States during the 2014-2016 Northeast Pacific marine heat wave[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 312-319.
- [20] GAO G, MARIN M, FENG M, et al. Drivers of marine heatwaves in the East China Sea and the South Yellow Sea in three consecutive summers during 2016-2018[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(8): e2020JC016518.
- [21] 王爱梅, 王慧, 范文静, 等. 2019 年中国近海海洋热浪特征研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 35-44.
WANG Aimei, WANG Hui, FAN Wenjing. Study on characteristics of marine heatwave in the China offshore in 2019[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 35-44.
- [22] 张文静, 郑兆勇, 张婷, 等. 1960-2017 年北部湾珊瑚礁区海洋热浪增强原因分析[J]. *海洋学报*, 2020, 42(5): 41-48.
ZHANG Wenjing, ZHENG Zhaoyong, ZHANG Ting. Strengthened marine heatwaves over the Beibu Gulf coral reef regions from 1960 to 2017[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(5): 41-48.
- [23] ZHANG Y, DU Y, FENG M, et al. Long-lasting marine heatwaves instigated by ocean planetary waves in the tropical Indian Ocean during 2015-2016 and 2019-2020[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(21): e2021GL095350, doi: 10.1029/2021GL095350.
- [24] FRÖLICHER T L, LAUFKÖTTER C. Emerging risks from marine heat waves[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 650.
- [25] WALSH J E, THOMAN R L, BHATT U S, et al. The high latitude marine heat wave of 2016 and its impacts on Alaska[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(1): S39-S43.
- [26] LI Y, REN G, WANG Q, et al. More extreme marine heatwaves in the China Seas during the global warming hiatus[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 104010.
- [27] TAN H, CAI R. What caused the record-breaking warming in East China Seas during August 2016?[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2018, 19(10): e853, doi: 10.1002/asl.853.
- [28] 方正飞. 热浪频发 海洋“高烧”引关注[N]. *中国海洋报*, 2019.
FANG Zhengfei. Heat waves frequently hit the ocean “high fever” concerns[N]. *China Ocean News*, 2019.
- [29] 蔡榕硕, 谭红建, 郭海峡. 中国沿海地区对全球变化的响应及风险研究[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 514-527.
CAI Rongshuo, TAN Hongjian, GUO Haixia. Responses and compound risks of the coastal China areas to global change[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(4): 514-527.
- [30] DI LORENZO E, MANTUA N. Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1042-1047.
- [31] GARREAUD R D. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38: e1296-e1302.
- [32] 余荣, 翟盘茂. 海洋和冰冻圈变化有关的极端事件、

- 突变及其影响与风险[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 194-202.
- YU Rong, ZHAI Panmao. Ocean and cryosphere change related extreme events, abrupt change and its impact and risk [J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 194-202.
- [33] 郑秋红, 王卫丹, 张定媛. 基于文献计量的气候变化领域研究前沿分析[J]. 气象科技进展, 2021, 11(4): 173-177.
- ZHENG Qiuhong, WANG Weidan, ZHANG Dingyuan. Frontier analysis of climate change research based on bibliometrics[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(4): 173-177.
- [34] 皇甫全, 游景如, 涂丽娜, 等. 系统性文献综述法: 案例、步骤与价值[J]. 电化教育研究, 2017, 38(11): 11-18, 25.
- HUANG Fuquan, YOU Jingru, TU Lina, et al. Systematic review methodology: cases, procedures, and values[J]. E-education Research, 2017, 38(11): 11-18, 25.
- [35] CHEN C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.
- [36] 李杰, 陈超美. CiteSpace 科技文本挖掘及可视化(第二版)[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017.
- LI Jie, CHEN Chaomei. CiteSpace: Text mining and visualization in scientific literature(second edition)[M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2017.
- [37] 张俊华, 黄波, 刘晓倩, 等. 基于 CiteSpace 的热浪研究知识图谱分析[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 383-389.
- ZHANG Junhua, HUANG Bo, LIU Xiaoqian, et al. Knowledge structure analysis of heat wave based on CiteSpace[J]. Climate Change Research, 2020, 16(3): 383-389.
- [38] 王利, 杨林生, 黄季夏, 等. 基于 CiteSpace 的北极研究综述[J]. 极地研究, 2019, 31(3): 346-363.
- WANG Li, YANG Linsheng, HUANG Jixia, et al. A review on the Arctic research using Citespace[J]. 极地研究, 2019, 31(3): 346-363.
- [39] 蒋浩, 李军利, 甘瑞杰, 等. 基于知识图谱的热带气旋研究热点与趋势分析[J]. 巢湖学院学报, 2019, 21(3): 64-77.
- JIAN Hao, LI Junli, GAN Ruijie, et al. Research hotspots and trends analysis of tropical cyclones based on knowledge mapping[J]. Journal of Chaohu University, 2019, 21(3): 64-77.
- [40] FANG Y, YIN J, WU B. Climate change and tourism: a scientometric analysis using CiteSpace[J]. Journal of Sustainable Tourism, 2018, 26(1): 108-126.
- [41] HUANG L, CHEN K, ZHOU M. Climate change and carbon sink: a bibliometric analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8): 8740-8758.
- [42] 李睿倩, 吕明珠, 李永富, 等. 基于文献计量的海洋空间规划应用生态系统服务研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 410-421.
- LI Ruiqian, LV Mingzhu, LI Yongfu, et al. Research progress of application ecosystem services in marine spatial planning based on bibliometrics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 410-421.
- [43] OLIVER E C J, DONAT M G, BURROWS M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1324.
- [44] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [45] WERNBERG T, COLEMAN M A, BENNETT S, et al. Genetic diversity and kelp forest vulnerability to climatic stress[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1851.
- [46] FENG M, ZHANG Y, HENDON H H, et al. Niño 4 west (Niño-4W) sea surface temperature variability[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(9): e2021JC017591, doi: 10.1029/2021JC017591.
- [47] HOLBROOK N J, SCANNELL H A, SEN GUPTA A, et al. A global assessment of marine heatwaves and their drivers[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2624.
- [48] 梁秀娟. 科学知识图谱研究综述[J]. 图书馆杂志, 2009, 28(6): 58-62.
- LIANG Xiujian. Review of mapping knowledge domains[J]. Library Journal, 2009, 28(6): 58-62.
- [49] 胡泽文, 孙建军, 武夷山. 国内知识图谱应用研究综述[J]. 图书情报工作, 2013, 57(3): 131-137, 84.
- HU Zewen, SUN Jianjun, WU Yishan. Research review on application of knowledge mapping in China[J]. Library And Information Service, 2013, 57(3): 131-137, 84.
- [50] GARFIELD E. The history and meaning of the journal impact factor[J]. Jama-Journal of the American Medical Association, 2006, 295(1): 90-93.
- [51] PEARCE A F, FENG M. The rise and fall of the “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/2011[J]. Journal of Marine Systems, 2013, 111: 139-156.
- [52] HUGHES T P, KERRY J T, ALVAREZ-NORIEGA M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. Nature, 2017, 543(7645): 373-377.
- [53] CHUANG K Y, HUANG Y L, HO Y S. A bibliometric

- and citation analysis of stroke-related research in Taiwan[J]. *Scientometrics*, 2007, 72(2): 201-212.
- [54] ARAFEH-DALMAU N, MONTAÑO-MOCTEZUMA G, MARTÍNEZ J A, et al. Extreme marine heatwaves alter kelp forest community near its equatorward distribution limit[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 499.
- [55] SANFORD E, SONES J L, GARCÍA-REYES M, et al. Widespread shifts in the coastal biota of northern California during the 2014-2016 marine heatwaves[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4216.
- [56] THOMSEN M S, MONDARDINI L, ALESTRA T, et al. Local extinction of bull kelp (*Durvillaea* spp.) due to a marine heatwave[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 84.
- [57] CAI W, WANG G, SANTOSO A, et al. Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(2): 132-137.
- [58] ZHANG N, FENG M, HENDON H H, et al. Opposite polarities of ENSO drive distinct patterns of coral bleaching potentials in the southeast Indian Ocean[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2443.
- [59] ARIAS-ORTIZ A, SERRANO O, MASQUÉ P, et al. A marine heatwave drives massive losses from the world's largest seagrass carbon stocks[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(4): 338-344.
- [60] HUGHES T P, ANDERSON K D, CONNOLLY S R, et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene[J]. *Science*, 2018, 359(6371): 80-83.
- [61] MCCABE R M, HICKEY B M, KUDELA R M, et al. An unprecedented coastwide toxic algal bloom linked to anomalous ocean conditions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(19): 10366-10376.
- [62] JONES T, PARRISH J K, PETERSON W T, et al. Massive mortality of a planktivorous seabird in response to a marine heatwave[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(7): 3193-3202.
- [63] BABCOCK R C, BUSTAMANTE R H, FULTON E A, et al. Severe continental-scale impacts of climate change are happening now: extreme climate events impact marine habitat forming communities along 45% of Australia's coast[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 411.
- [64] SCANNELL H A, PERSHING A J, ALEXANDER M A, et al. Frequency of marine heatwaves in the North Atlantic and North Pacific since 1950[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(5): 2069-2076.
- [65] QIN H, KAWAMURA H. Air-sea interaction throughout the troposphere over a very high sea surface temperature phenomenon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(1): L01704.
- [66] KRUMHANSL K A, OKAMOTO D K, RASSWEILER A, et al. Global patterns of kelp forest change over the past half-century[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(48): 13785-13790.
- [67] DARMARAKI S, SOMOT S, SEVAULT F, et al. Future evolution of marine heatwaves in the Mediterranean Sea[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3/4): 1371-1392.
- [68] OLIVER E C J. Mean warming not variability drives marine heatwave trends[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3/4): 1653-1659.
- [69] HUGHES T P, KERRY J T, BAIRD A H, et al. Global warming transforms coral reef assemblages[J]. *Nature*, 2018, 556(7702): 492-496.
- [70] ABDO D A, BELLCHAMBERS L M, EVANS S N. Turning up the heat: increasing temperature and coral bleaching at the high latitude coral reefs of the houtman abrolhos islands[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(8): e43878.
- [71] DEPCZYNSKI M, GILMOUR J P, RIDGWAY T, et al. Bleaching, coral mortality and subsequent survivorship on a West Australian fringing reef[J]. *Coral Reefs*, 2013, 32(1): 233-238.
- [72] KATAOKA T, TOZUKA T, BEHERA S, et al. On the Ningaloo Niño/Niña[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(5/6): 1463-1482.
- [73] WHITNEY F A. Anomalous winter winds decrease 2014 transition zone productivity in the NE Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(2): 428-431.
- [74] AMAYA D J, MILLER A J, XIE S P, et al. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1903.
- [75] CAPUTI N, KANGAS M, CHANDRAPAVAN A, et al. Factors affecting the recovery of invertebrate stocks from the 2011 Western Australian extreme marine heatwave[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 484.

Review of marine heatwave research based on CiteSpace

CHEN Qiao-jun^{1, 2}, LI De-lei^{3, 4}, FENG Jian-long^{1, 2}

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Marine Resource Chemistry and Food Technology (TUST) of Chinese Ministry of Education, Tianjin 300457, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Feb. 13, 2022

Key words: marine heatwaves; CiteSpace; cooperation characteristics; frontiers and hotspots; review

Abstract: Under global warming, the frequency, intensity, duration, and spatial range of marine heatwaves (MHWs) have shown a significant increasing trend. MHWs cause severe damage to marine biodiversity and ecosystems, which has attracted widespread attention worldwide. CiteSpace is a diverse, time-sharping, and dynamic analysis tool for visualizing citations with the development of scientometrics. It can be used to analyze the underlying knowledge in scientific literature. Based on the Web of Sciences Core Collection database, 514 related papers from 2012 to 2021 on MHWs have been retrieved and visually analyzed using CiteSpace. The development trend, research hotspots, and frontiers of the MHW research field have been comprehensively summarized in this study. The results show that the number of published MHW research papers increases annually, experiencing three stages: steady, slow rise, and rapid growth. The United States and Australia dominate the MHW research field. Although China started relatively late, its influence is increasing annually. With high concentration and close cooperation, the prolific authors from this research field play a major role in its development. The disciplines of MHW research mainly include environmental sciences and ecology, marine and freshwater biology, and oceanography. Based on keyword co-occurrence, burstness analysis, and document co-citation methods, the popular topics of current research are found to mainly include the characteristics, variability, and physical mechanism of MHWs, the impact of MHWs on marine ecosystems and biodiversity, and the response, adaptation, and mitigation of MHWs under climate change. This research is a novel attempt to review the literature in this field and provides a promising direction for further study on MHWs.

(本文编辑: 康亦兼)