

全球海洋酸化研究态势与最新进展分析^{*}

於维樱 张灿影 冯志纲^① 郭琳

(中国科学院海洋研究所 文献信息中心, 青岛 266071)

摘要 海洋是一个巨大的碳库, 通过吸收大气中的二氧化碳减缓了全球变暖的局势。海洋同时也是蕴含丰富资源的宝库, 过量二氧化碳的吸收, 造成海水 pH 发生变化, 海洋酸化对这个资源宝库的影响不容忽视。本文通过文献计量与统计分析的方法, 从宏观角度研究了海洋酸化研究的整体发展现状和主要研究主题的分布, 分析了未来的发展趋势, 并结合现有问题给出了讨论及建议, 以期为未来的海洋酸化研究提供一定的参考借鉴。研究结果表明, 海洋酸化研究经历了探索、成型、快速增长与稳步增长 4 个时期。澳大利亚、美国、加拿大和英国是主要研究国家; 美国国家海洋与大气管理局、美国伍兹霍尔海洋研究所、美国加州大学、澳大利亚昆士兰大学和詹姆斯库克大学是主要研究机构。海洋酸化过程与成因、敏感性生物与生命过程影响、生态系统影响与生态效应、珊瑚礁与藻类典型研究等内容则是该领域的主要研究主题。未来的海洋酸化研究应该拓展广度和深度, 提升方法和技术, 并注意制定综合研究计划, 慎重定性 with 量化研究结果, 考虑多方面差异耦合因子并加强基础研究与国际合作。

关键词 海洋酸化; 文献计量; 研究态势; 最新进展

中图分类号 N99 **doi:** 10.12036/hyxxjk20160721005

海洋是地球的重要组成部分, 约占地球表面积的 71%, 包含有地球上 97% 的总水量, 是一个蕴藏着巨大能量和资源的宝库, 在促进地球生物化学循环、维持生物多样性和提供丰富生物资源等方面扮演着重要角色。海洋也是一个巨大的碳库, 在全球碳循环中起着极其重要的作用, 通过大量吸收大气中的二氧化碳, 减缓了大气中二氧化碳浓度的上升趋势, 从而对缓解全球变暖起到了重要作用。

海水应为弱碱性, 海洋表层水的 pH 约为

8.2。全球海洋通量研究(joint global ocean flux study)证明了大气中二氧化碳向海洋中的扩散现象及海洋酸化现象的发生(Buesseler, 2001)。工业革命以来, 人类活动和现代化化石燃料的大量使用导致大气中二氧化碳的总量不断增加, 这些人为排放的二氧化碳有 30%~40% 被海洋吸收(Sabine et al., 2004)。当空气中过量的二氧化碳进入海洋中时, 海水的酸度就会增大, 海洋自身碳酸盐的化学平衡也会被打破, 从而使海水的 pH 降低, 最终导致海水酸

^{*} 於维樱, 女, 助理馆员, E-mail: yuweiyang@qdio.ac.cn

^① 通讯作者: 冯志纲, 男, 图书馆员, 主要从事情报服务与信息检索, E-mail: zgfgeng@qdio.ac.cn

收稿日期: 2016-07-21, 收修改稿日期: 2016-07-29

度增加。这种由于海洋吸收了大气中过量二氧化碳引起的海水酸度增加的过程, 被称为海洋酸化。Caldeira 和 Wickett(2003)首次在著名科学杂志 *Nature* 上阐述了这种现象, 并将其命名为“海洋酸化”。目前, 全球海洋正处于 5500 万年以来海洋酸化速度最快的时期, 截止到 2012 年, 过量的二氧化碳排放已将海水表层 pH 降低了 0.1, 预计 2100 年前表层海水 pH 将下降 0.3~0.4(降至 7.8 左右), 即海水酸度将比 1800 年增加 1~1.5 倍(Orr et al., 2005)。

自从 2003 年海洋酸化在国际上首次作为科学问题被提出以来, 就成为当今国际海洋科学研究前沿领域的重要内容, 引起了广泛关注。随着海水 pH 的变化, 海洋生态系统也发生了巨大改变, 严重影响了海洋中的生物, 尤其是甲壳类、无脊椎生物的生存(赵信国和刘广绪, 2015)。海洋吸收二氧化碳导致海洋酸化, 改变了海水的化学特性, 使得海洋生物赖以生存的海洋化学环境发生了变化, 从而影响到海洋生物的生理、生长、繁殖和代谢过程, 破坏海洋生物多样性和生态系统平衡(贺仕昌等, 2014)。由此可见, 海洋酸化是一个全球性的、人类历史上前所未遇的挑战。海洋酸化对全球海洋生态系统的影响十分严重。

1 资料与方法

为了深入分析海洋酸化的研究发展状况, 以汤森路透集团的科学引文索引扩展版(science citation index expanded, SCIE)数据库为基础, 采用“ocean acidification”为主题进行检索, 并限定文献类型为“article、review、book chapter、proceeding papers”, 检索得到海洋酸化研究的相关文献 3562 篇, 检索日期截止到 2016 年 6 月 13 日。检索得到的文献绝大多数与海洋酸化关系紧密, 涵盖了该领域研究的主要文献群体, 符合宏观研究的数据

需求。

Thomson Data Analyzer(TDA)是汤森路透公司推出的一个具有强大分析功能的文本挖掘软件, 可以对文本数据进行多角度的数据挖掘和可视化的全景分析(郑斐和郭彦宏, 2013)。Ucinet 是加州大学欧文(Irvine)分校编写的可视化分析软件, 其中的 NetDraw 插件可针对二维数据进行大型网络分析(王运锋等, 2008)。PathFinder 是复杂网络分析及可视化的重要优化算法, 可以通过简化网络的方式达到凸显重要关联的效果(汤天波等, 2015)。VOSviewer 是一款科学知识图谱绘制工具, 可对作者、机构、关键词等字段进行合作共现与聚类分析(高凯, 2015)。HistCite 是汤森路透公司推出了一个引文分析软件, 可以根据多个引文指标筛选出重要的核心文献(李运景等, 2006)。而 Excel 则是我们最常用的数据统计与绘图工具, 可对研究数据进行图表分析。因此, 通过以上网络可视化软件进行计量分析与图表绘制, 我们可以从文献产出的宏观统计视角看到海洋酸化研究的国际发展现状、热点研究主题与未来发展趋势。

2 结果

2.1 整体态势与主要研究力量分析

2.1.1 整体发文态势

从整体发文情况来看, 2005 年以前, 海洋酸化的发文量不太稳定, 50 余篇文献中多数与当前海洋酸化研究关联性不是很大。2005 年以后, 海洋酸化研究开始呈现出稳定增长态势, 2007~2008 年这两年的增长率尤为突出(图 1)。

2.1.2 主要发文国家

表 1 显示了发表海洋酸化相关论文的主要国家。美国、澳大利亚和英国是发文最多的国家, 其发文量、总被引频次与篇均被引频次均排在前 3 位。此外, 葡萄牙、西班牙和中

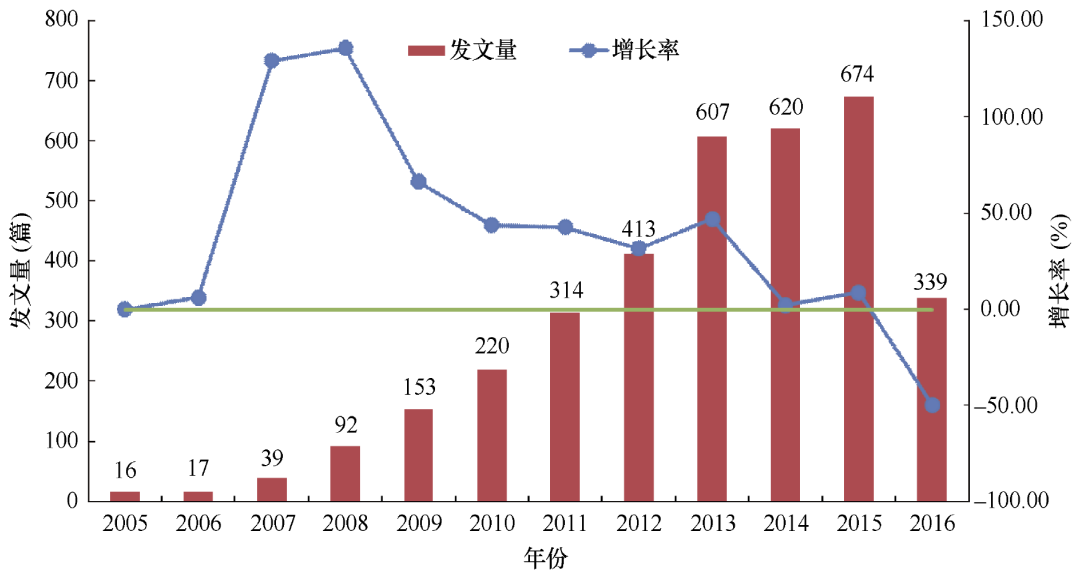


表 1 主要国家海洋酸化研究影响力分析(前 15 位)
Tab.1 The major countries on ocean acidification research(Top15)

国家	发文量 (篇)	总被引频次 (次/篇)	篇均被引频次 (次/篇)	近 3 年发文 占比(%)	被引论文 比例(%)	被引频次≥引频 的论文比例(%)	被引频次≥引频 次的论文比例(%)
美国	1426	42739	29.97	46.56	87.24	12.41	5.40
澳大利亚	665	19477	29.29	46.02	89.32	13.53	5.26
英国	643	19460	30.26	42.92	89.11	13.84	4.04
德国	513	14490	28.25	45.81	88.89	13.65	5.46
法国	269	8344	31.02	44.24	87.73	13.38	5.20
加拿大	258	11279	43.72	47.29	87.60	12.79	6.20
中国	215	3010	14.00	59.53	77.67	7.44	1.40
西班牙	179	2624	14.66	63.69	79.89	4.47	3.35
瑞典	171	4412	25.80	43.86	91.81	12.28	5.26
意大利	169	4472	26.46	53.25	82.84	13.61	5.92
挪威	160	3833	23.96	42.50	91.25	9.38	5.00
日本	158	4415	27.94	39.24	85.44	8.86	3.16
荷兰	133	3171	23.84	43.61	89.47	9.02	3.01
新西兰	113	2353	20.82	41.59	92.04	11.50	4.42
葡萄牙	75	758	10.11	68.00	78.67	5.33	0.00

注: 粗体下划线标注的是每个指标的前 3 位数据

国的最新发文较多; 新西兰、瑞典和挪威的被引比例较高; 英国、德国和澳大利亚的高被引论文较多; 加拿大、意大利和法国在高质量论文产出方面表现突出。结合各项指标的排名进行权重分析可以看出, 澳大利亚、美国、加拿

大、德国和英国是海洋酸化研究综合实力较强的国家。图 2 展示了前 50 个主要国家(或地区)的合作网络图谱。从图 2 中可以看出, 美国处于合作中心位置, 其次是英国、德国和澳大利亚, 法国、挪威和丹麦则处于第三梯队。

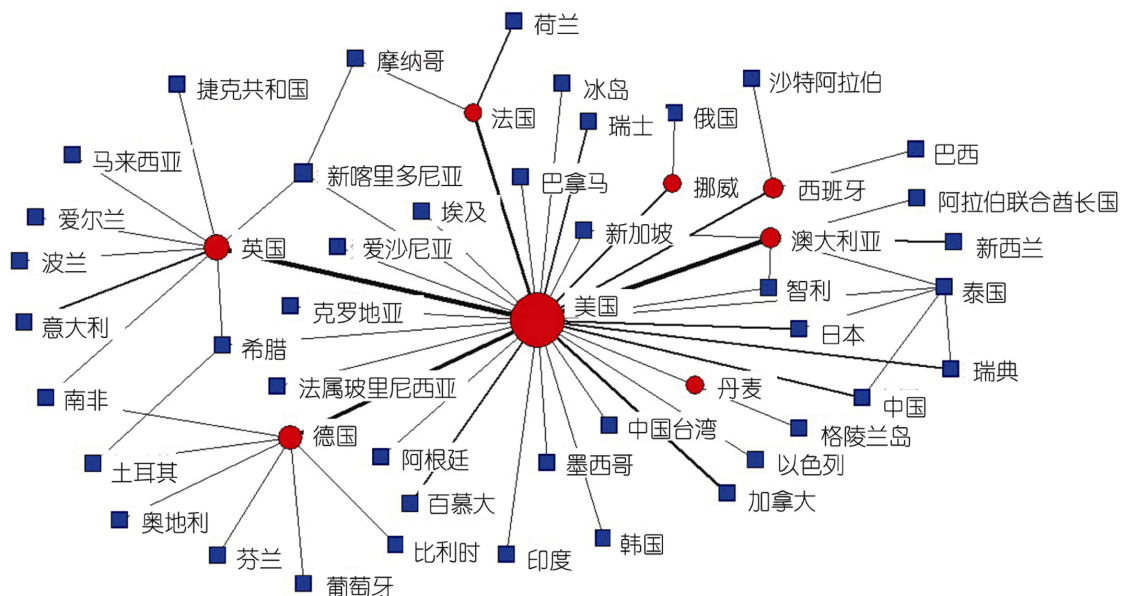


图 2 国际海洋酸化研究主要国家(或地区)合作网络图(前 50 位)

Fig. 2 The cooperation network of main countries or regions on global ocean acidification research(Top50)

2.1.3 主要发文机构

从表 2 中发表海洋酸化相关论文的主要机构来看,美国加州大学在发文与引用体量上表现突出,美国国家海洋与大气管理局的发文量、总被引频次、篇均被引频次与近 3 年发文占比等多个指标居于前 3 位,美国伍兹霍尔海洋研究所和法国巴黎第六大学则在被引情况与高质量论文方面表现良好。此外,法国国家科学研究院虽然发文体量不大,但其科研产出认可程度较高。总体来看,美国国家海洋与大气管理局、美国伍兹霍尔海洋研究所、美国加州大学、澳大利亚昆士兰大学及詹姆斯库克大学 5 所机构在该领域的综合科研实力较强。在机构合作方面,美国加州大学处于合作网络的中心,其次是澳大利亚昆士兰大学和德国赫姆霍兹基尔海洋研究中心(图 3)。此外,美国国家海洋与大气管理局的合作性也非常突出,新西兰奥塔格大学及澳大利亚的 5 所机构(昆士兰大学、联邦科学与工业研究组织、塔斯马尼亚大学、悉尼大学和南十字星大学)是该领域的国际合作桥梁机构。由

此可见,澳大利亚机构在海洋酸化合作研究方面非常活跃。

此外,从发文的资金支持方面来看,美国国家科学基金(652 篇)、澳大利亚研究委员会(295 篇)、美国国家海洋与大气管理局(215 篇)、英国自然环境研究委员会(211 篇)和欧洲共同体(170 篇)是资助比例最大的组织,这与上文指出的主要国家和机构吻合度非常高,可见研究经费支持力度与文献产出有着较大的关联性。

2.2 主要研究热点与趋势分析

从研究领域来看,环境科学与生态学(1310 篇)、海洋与淡水生物学(1073 篇)、海洋学(687 篇)和地质学(567 篇)是海洋酸化研究的主要领域。在发文期刊方面,*PLoS One* (229 篇)*Biogeosciences*(214 篇)*Marine Ecology Progress Series*(144 篇)*Global Change Biology* (114 篇)与 *Marine Biology*(113 篇)是发文最多的刊物。而发文量居于前 30 位的期刊中,海洋生物学类的刊物占了绝大多数,此外还有海洋生态、珊瑚礁、气候变化、海洋湖沼、海

注: 粗体下划线标注的是每个指标的前 3 位数据

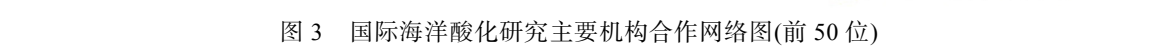


Fig. 3 The cooperation network of major institutions on global ocean acidification research(Top50)

洋污染及海洋化学领域的少量刊物。除了宏观地分析发文领域和期刊外,通过统计分析高频关键词与年代变化、关键词共现和聚类,以及重要核心文献,还能进一步得出国际海洋酸化研究的主要研究热点与最新研究方向。

2.2.1 高频关键词与年代变化分析

采用 TDA 对作者关键词进行提取、清洗和词频统计,可以了解该领域研究的主要内容和热点。统计发现,“海洋酸化”“气候变化”“二氧化碳”“钙化”“pH”“珊瑚”“珊瑚礁”“光合作用”及“生态系统”等词汇是排名靠前的高频关键词。通过对高频关键词进行分组统计发现,海洋酸化研究的作者关键词主要有如下几类:①与海洋酸化过程与成因相关的词汇包括“二氧化碳”“气候变化”“全球变暖”“pH”“文石”“温度”“碳酸钙”“碳循环”“方解石”“盐度”“碱度”“酸碱平衡”“溶解无机碳”;②受海洋酸化影响的生物词汇包括“珊瑚”“浮游植物”“珊瑚藻”“珊瑚虫”“海草”“海藻”“棘皮动物”“有孔虫”“牡蛎”“硅藻”“海胆”“贻贝”“无脊椎动物”与“软体动物”等;③酸化对海洋生物生命过程造成影响的词汇包括“高碳酸血症”“缺氧”“氧化应激”“幼虫”“代谢”“生物矿化”“珊瑚白化”“生产力”“生理反应”“死亡”“捕食”“受精”“发育”“入侵物种”及“毒性”等;④与海洋酸化研究地域相关的词汇包括“地中海”“南极洲”“北极”“南部海洋”“大堡礁”“波罗的海”“北冰洋”“近海”及“沿岸海洋”等。除此以外,还有一些海洋酸化对海洋生态造成影响的词汇,以及古海洋学与地质学研究方面的词汇,如“水体富营养化”“生物多样性”“栖息地”“碳同位素”“沉积物”“演化”等。

采用年代作为参数进行划片分析,可以进一步了解海洋酸化领域的关键词变化情况。图4(见文后彩图)是排名前30位的关键词的年代分布图,从中可以明显看到,“海洋酸化”

一词从2010年开始显著增长,“气候变化”与“二氧化碳”也出现明显增长趋势,其他热门词汇则发展平稳。这说明,海洋酸化研究与全球变暖、气候变化和二氧化碳等酸化成因及诱导因素关联紧密,相关研究还没有出现大规模拓展和延伸,符合新兴领域的发展特征。

2.2.2 关键词共现与聚类分析

通过前50个高频关键词的共现关系与中心性,可以分析海洋酸化研究的热点内容。从图5中可以看到,“海洋酸化”是网络的中心词汇,“气候变化”“珊瑚”与“文石”是网络的关键性结构词汇。此外,连线较粗的重要关键词还有“二氧化碳”“全球变暖”“海洋变暖”“钙化”“珊瑚礁”“温度”“光合作用”及“幼虫”等。

通过 VOSviewer 软件对海洋酸化研究文献中的标题与摘要关键词进行提取和聚类分析,可以了解该领域研究的主要主题。从图6(见文后彩图)中可以看出,海洋酸化研究主要分为5个大类:①红色聚类团,主要研究海洋酸化的成因、过程与反应机制,探索海洋酸化与海洋环流、海水交换、海洋碳氮循环的关系,针对个别地区进行原位试验与海水酸碱度监测,根据试验数据与观测变化结果构建系统模型等内容,聚类词汇包括“海水”“二氧化碳”“大气二氧化碳”“酸化”“pH”“人类排放”“溶解性无机碳”“固氮”“分解”“气体交换”“沿岸海水”“原位”“年际变化”“系统模型”与“生物化学”等;②绿色聚类团,主要研究海洋酸化对海洋钙化生物受精过程、幼虫生长、酸化响应及病理变化的影响,聚类词汇包括“酸碱平衡”“海水酸化”“海洋生物”“海洋鱼类”“钙化生物”“海胆”“贻贝”“桡足类”“棘皮动物”“耐热性”“氧化应激”“血碳酸过多症”“受精”“幼虫生长”与“适应性”等;③蓝色聚类团,主要研究海洋酸化对珊瑚和珊瑚礁带来的影响,监测各地珊瑚白化情况,探讨海洋酸化带来的生态环境挑

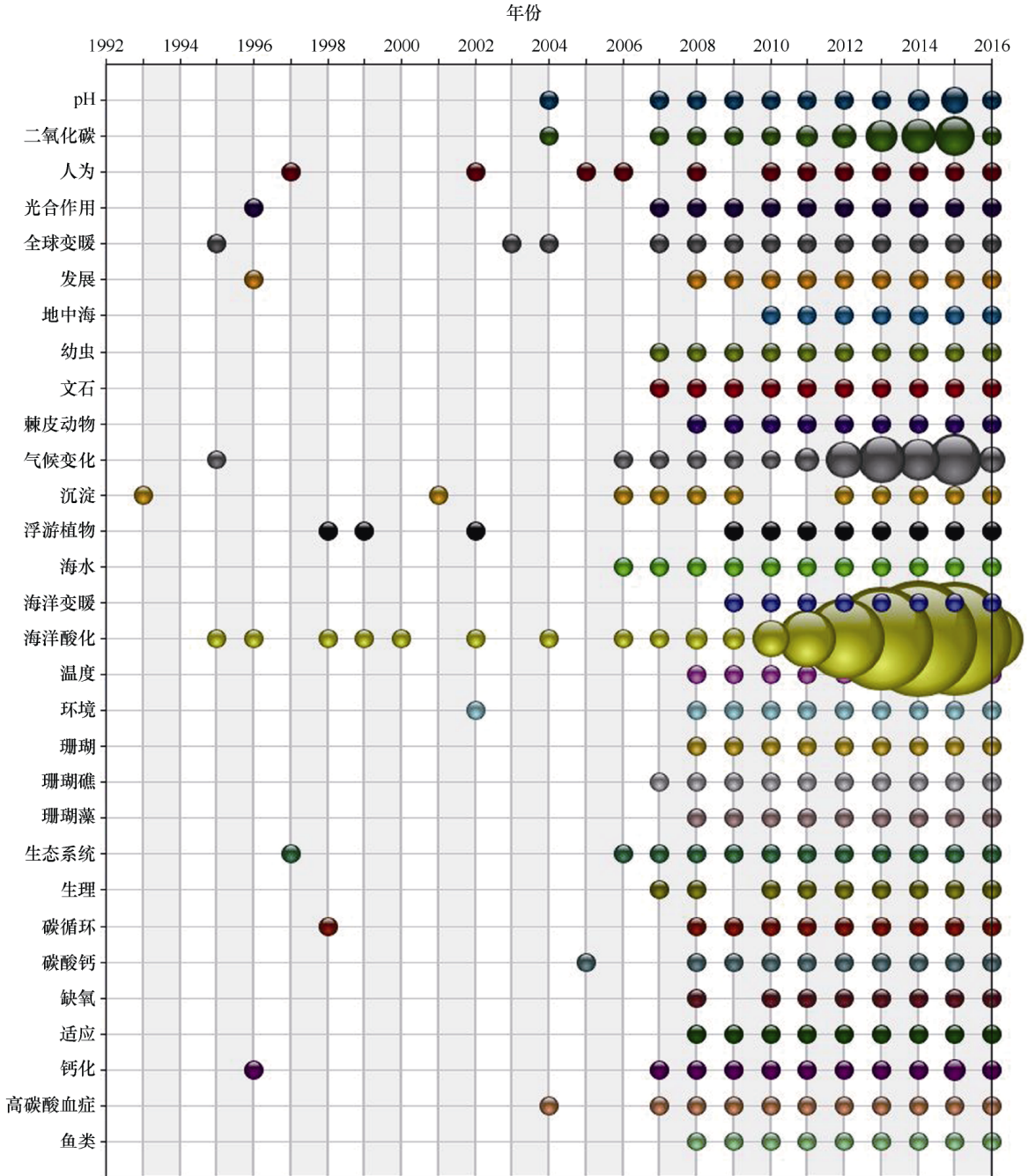


图 4 国际海洋酸化研究高频关键词年代变化(前 30 位)

Fig. 4 The annual change of high-frequency key-words on global ocean acidification research

战, 聚类词汇包括“海洋酸化”“气候变化”“钙化”“生物多样性”“珊瑚礁”“大堡礁”“造礁石珊瑚”“生态”“恢复”“白化”与“栖

息地”等; ④黄色聚类团, 主要从海洋地质学与矿物学角度研究过去的气候变化与海洋酸化历史事件, 聚类词汇包括“碳酸钙”“钙化”

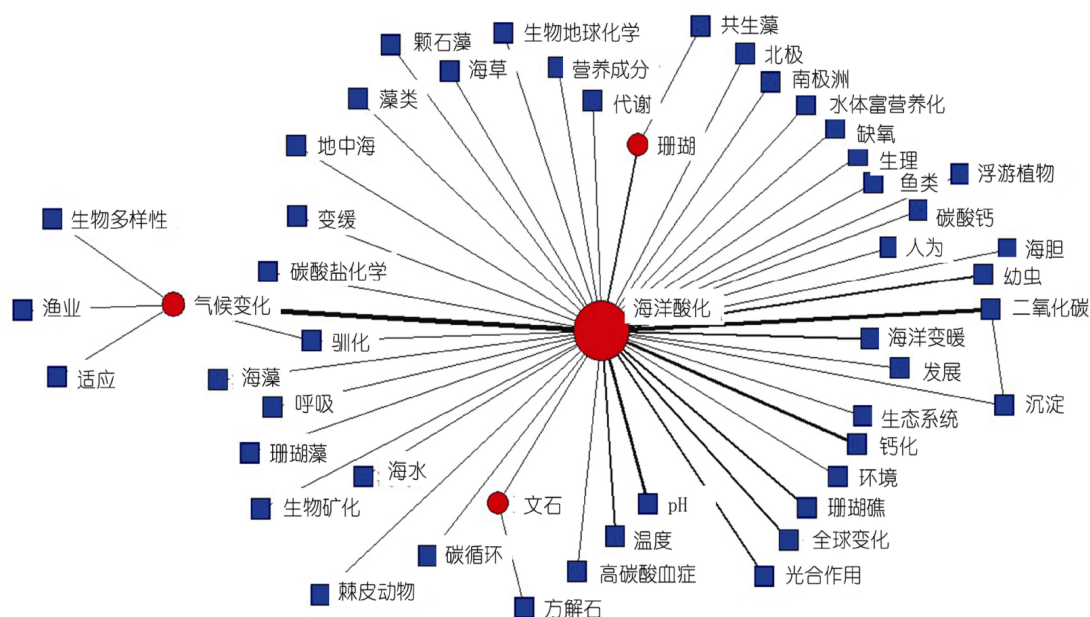


Fig. 5 The co-occurrence chart of high-frequency key words on global ocean acidification research(Top50)

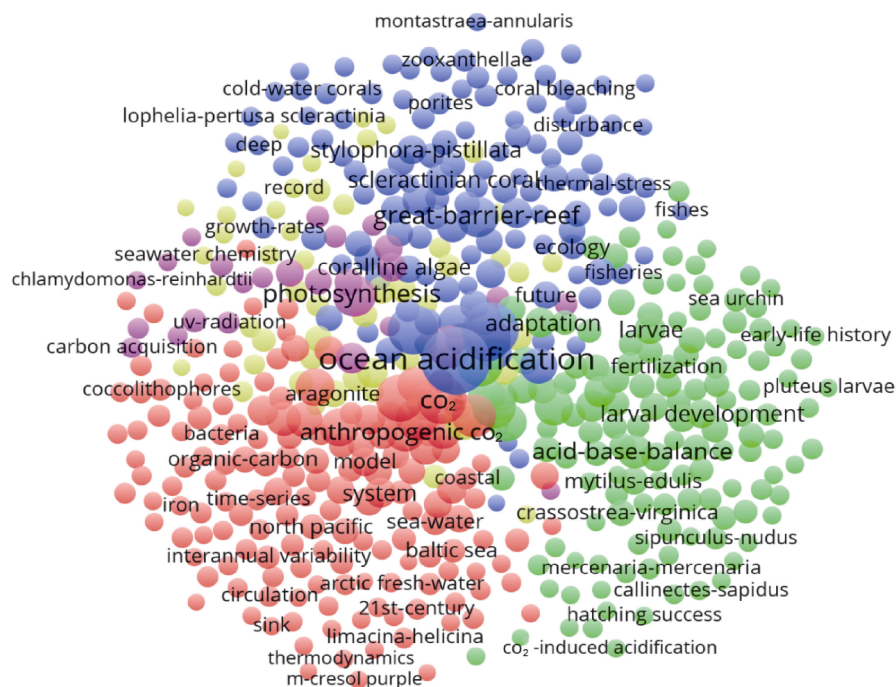


Fig. 6 The clustering map of keywords on global ocean acidification research in the titles and abstracts

“分解”“霏石”“沉积”“浮游有孔虫”“灭绝”
“进化”“始新世热量峰值”“矿物学”与“聚

合物”等;⑤紫色聚类团,主要研究海洋酸化给海洋藻类带来的变化和影响,聚类词汇包

括“硅藻”“珊瑚藻”“微藻”“衣藻”“上升二氧化碳”“浓缩机制”“紫外线辐射”“光合作用”“叶绿素荧光性”“常量分析”“增长”“碳获取”与“生理反应”等。

2.2.3 重要核心文献分析

传统意义上的核心文献指的是在 SCI 数据库里引用率高的文献,但这些文献有时候跟我们的研究方向不完全贴合。通过 HistCite 对检索到的数据进行统计分析,可以得到一系列指标,其中 LCS 指的是某篇文献在本次研究文献集合内的被引情况。因此, LCS 高的文献往往才是我们应该重视的领域核心文献。另外, HistCite 软件还给出了其他多种参考指标,它们都能从某个角度表明文献的重要性(李运景等, 2006)。

结合 HistCite 软件的 10 个指标(表 3),笔者筛选出了各类指标排名靠前的 50 篇或 100 篇文献,去重后获得重要文献集合 283 篇,通过分析这些文献的主要研究内容,可以帮助我们进一步了解领域的研究热点。统计发现,海洋酸化的研究热点主要分为 8 类:①海洋酸化与珊瑚礁生态系统,包括珊瑚白化与恢复、珊瑚礁栖息地与礁栖生物、珊瑚虫与珊瑚共生物种、珊瑚礁生物群落等;②海洋酸化与敏感性动物,包括钙化动物、无脊椎动物、浮游动

物与经济型动物,主要针对原生动物、软体动物与甲壳动物,如贝类、有孔虫、海参、蟹类与虾类等;③海洋酸化与地球生物化学循环,关注二氧化碳与碳酸钙浓度变化、溶解有机碳动态与碳循环、海洋碳酸盐平衡、海洋生物碳吸收、海洋养分循环、海洋微量元素、海底火山喷口等方面,特别是海洋固碳问题,包括物理固碳的碳储存与泄漏问题、生物固碳的光合固碳与钙化固碳两种途径研究;④海洋酸化与海洋生态系统,包括海洋生物多样性与群落结构变化、生态系统热耐受与低氧应激、海洋食物链变化与营养供给、海洋栖息地变化与底栖群落、生态系统不同层次的生物演变、海洋物种管理与生态系统保护等;⑤海洋酸化与海洋藻类,主要针对硅藻、红藻(珊瑚藻)、绿藻和褐藻等种类,研究藻类钙化、光合作用、生长变化、丰度变化、富营养化与有害藻华等;⑥海洋酸化与差异性因素的耦合效应,包括全球变暖、海冰融化、二氧化碳浓度升高、物理海洋变化、紫外线辐射、色素沉着、环境污染及渔业捕捞等;⑦海洋酸化与古海洋地质学研究,包括古新世-始新世最高热度研究、海洋酸化地址记录、底栖有孔虫、海水沉积试验、碳酸盐台地演变、碳酸盐矿物及海洋生物矿化反应等;⑧海洋酸化数值模拟与动

表 3 HistCite 软件的主要参考指标
Tab.3 The main reference index of HistCite

指标缩写	指标释义	重要性表征
GCS	总引用次数: 被整个 WOS 数据库中文献引用的次数	重要文献, 相关度不一定高
GCS/ <i>t</i>	年平均总被引次数	生命力强, 被持续关注
LCS	本地引用次数: 在当前数据集中被引用的次数	重要文献, 相关度高, 开创性文章
LCS/ <i>t</i>	年平均本地被引次数	生命力强, 被持续关注
LCS _x	去掉自引的本地引用次数	同行认可度高的文章
LCS _b	发文头 3 年被引次数	当期热门文章
LCS _e	发文近 3 年被引次数	近期受关注文章
LCS _e / <i>b</i>	<i>e</i> 和 <i>b</i> 的比值	比值越大表示最近受关注, 之前较少
LCR	本地参考文献数: 参考文献在当前数据集中的数量	综述文章, 近期关注新动向
CR	总参考文献数: 在整个 WOS 数据库中引用的文献	综述性文章

态监测, 包括海洋酸化数值测量、pH 变化动态与时间序列、酸化季节性变化与长期规律、海洋酸化的程度分析与进展预测、海洋钙化速率监测、海洋酸化建模与场景实验等。

对于海洋酸化与具体海洋生物的影响研究, 主要内容包括以下几个方面: ①海洋酸化对海洋生物生殖与早期生命阶段的影响, 如受精、产卵、孵化、繁殖、早期发育与幼虫生长等; ②海洋酸化对动物生活能力与行为塑造的影响, 如嗅觉、听觉、捕食、迁徙与归巢等; ③海洋酸化对生物进化与适应性的影响, 如生化适应、耐热性、耐酸性、氧气消耗与二氧化碳吸收能力等; ④海洋酸化对海洋生物的功能性影响, 如呼吸作用、食物消化、能量代谢与其他机能变化等; ⑤海洋酸化与生物毒理学研究, 如生物死亡率、物种选择、生物灭绝、病理反应, 以及酸雨症、血碳酸过多症与缺氧等毒性反应; ⑥海洋酸化与动物基因组学研究, 包括蛋白质基因组学、基因表达、遗传效应、免疫反应、形态变化及细胞分析等。

除此以外, 海洋酸化对浮游植物生长的促进, 海洋微量金属的形态、溶解性、吸附性、毒性与氧化反应, 海草生长与酸化抑制, 海洋捕捞、海洋旅游与渔业经济, 海洋工程、化学风化与海洋酸化应对措施, 以及海洋酸化对深海、大陆架和陆地生态系统的影响等也是该领域研究所涉及的内容。

3 总结与讨论

3.1 研究发展态势分析

结合上述分析, 从整理发展脉络来看, 海洋酸化研究领域具有较长的研究历史, 早在 20 世纪 80 年代就开展了相关的研究, 但直到近 15 年期间这一领域才逐渐发展成为热点, 受关注程度逐年上升。2005 年以前是海洋酸化研究的探索期, 2005 年以后该领域逐渐成型, 2007~2008 年是研究的快速增长期, 而近 5 年则处于稳步增长期。随着海洋酸化问题的

逐渐凸显, 未来若干年该领域将仍然保持较高的被关注热度。

在研究力量分布方面, 澳大利亚、美国、加拿大、德国和英国是海洋酸化研究的主要国家, 美国处于研究合作的中心位置, 英国、德国和澳大利亚也有较强的合作成效。中国在近 3 年的发文较多, 未来有望在该领域有更好的表现。美国国家海洋与大气管理局、美国伍兹霍尔海洋研究所、美国加州大学、澳大利亚昆士兰大学和詹姆斯库克大学 5 所机构是海洋酸化研究的中坚力量。美国加州大学是主要合作机构, 其次是澳大利亚昆士兰大学、德国赫姆霍兹基尔海洋研究中心和美国国家海洋与大气管理局。澳大利亚机构在国际合作方面起到了桥梁作用, 鉴于该国特有的沿海特色与珊瑚礁区域, 澳大利亚在海洋酸化研究方面的表现非常活跃。此外, 与主要研究力量相吻合的是美国、澳大利亚、英国和欧洲为该领域提供了较大的资金支持。

在研究主题分布方面, 首先从高频关键词角度分析, “海洋酸化”“气候变化”“二氧化碳”“钙化”“pH”“珊瑚”“光合作用”及“生态系统”等词汇是排名靠前的高频关键词。在全部作者关键词中, 热门词汇主要集中在海洋酸化过程与成因、海洋酸化敏感性生物、海洋生物生命过程影响、海洋酸化生态效应及关键地域等方面。从年代变化角度来看, “全球变暖”“气候变化”与“二氧化碳”等词汇出现的频率有明显增长趋势, 说明海洋酸化诱因是研究不可避免的内容, 也是该领域的基础研究内容, 同时还有着长期的伴随性影响。此外, “珊瑚”“文石”“钙化”“温度”“光合作用”与“幼虫”等都是网络关系较突出的词汇, 它们代表了该领域研究的主流。

其次, 从关键词聚类角度分析, 海洋酸化研究有四个明显的研究方向, 一是从源头出发, 研究海洋酸化的成因、过程与反应机制, 海洋酸化与海洋物理化学变化的关系, 海洋酸化的参数变化与建模分析; 二是从易受影

响的敏感生物入手,研究海洋酸化对钙化生物早期生命过程、进化适应与病变反应的影响;三是选择代表性物种先行研究,如珊瑚礁与藻类;四是追溯历史,通过地质矿物研究推演过去的气候变化与酸化事件。

最后,从核心文献角度分析,海洋酸化的研究主题主要围绕珊瑚礁生态系统、敏感性脆弱生物、海洋地球化学循环、生态系统变化、藻类生态系统、耦合作用因素、古海洋酸化历史、模拟监测试验 8 个方面。其中,针对海洋酸化的生物学研究较多,细分主题主要包括繁殖发育、行为能力、生物功能、病变死亡与基因组学等 6 个方面。总而言之,海洋酸化的生物学研究分为微观、中观和宏观 3 个层次,其中微观层次主要研究具体某个生物的变化,包括生理、行为、病理与基因研究等;中观层次则聚焦于某些物种种群的影响,如群落结构、物种丰度、种群演化等;宏观层次则是针对某个生态系统进行研究,如珊瑚礁生态系统、藻类生态系统、沿岸生态系统等。

3.2 讨论与未来发展建议

以往的海洋酸化研究综述都是针对某一个主题进行研究内容的整合分析,如海洋酸化的生态学研究、海洋酸化的生物学研究、海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响等。本文采用的文献计量分析方法主要是从文献产出的角度进行研究,通过统计分析发表文献的标题、年代、国家、机构、关键词与引用情况等字段信息,从宏观的角度总结该领域的研究进展,可以帮助研究人员以更大的视野掌握该领域的发展动向,同时也可以了解同行研究情况并寻找潜在合作伙伴。此外,此类研究既可以揭示该领域研究的热点趋势,也可以提示该领域未来的发展走向和未触及的研究空缺。但是,文献计量方法也有自己的局限性,那就是不能很好地反映细小的主题研究进展,无法从微观角度进行深入的研究内容分析。此外,文献计量采用的分析数据只能包含大部分的

相关文献而不能囊括所有,虽满足宏观分析的需求却容易遗漏一些领域开创性文献和部分重要的领域外延文献。

总结现有成果,当前的海洋酸化研究还存在观测评估时间较短、研究广度深度不够、实验技术方法局限等问题。因此,建议未来的海洋酸化研究可以注意以下几点:①制定综合系统的研究计划,开展长时间、连续性的监测评估和胁迫试验;②尽可能量化研究结果,并注意甄别结果的可信度,如国际地圈生物圈计划(international geosphere-biosphere program, IGBP)曾发布的置信报告;③要考虑到各类差异性因素(特别是区域性差异),以及协同因子、潜在因素间的相互影响;④不要过于放大研究结果和定性酸化影响,一些未来可变性因素无法模拟和预测;⑤在巩固加强基础性研究工作时,开展更多的酸化预防、抑制与应对研究;⑥不能忽视海洋酸化的溯源研究与成因机理研究。此外,海洋酸化研究还应该加强国际合作,制定覆盖整个海域的全球性研究计划,在发挥各自优势的同时避免重复性工作。同时,跨学科合作也应该引起重视,在研究全球变暖等的其他主题领域时,把海洋酸化考虑在内。

目前,海洋酸化是国际海洋研究的热门领域,除上述提及的研究主题外,该领域还呈现出如下发展趋势:①研究对象由直接受影响的敏感生物逐渐扩展到大型哺乳动物等顶层捕食者;②研究方法从简单的实验室研究提升为更接近实际的原位围隔试验和更先进的技术设备;③研究内容从早期发育繁殖与幼虫生长转向更多的生命过程、生理反应、功能行为及基因表达;④评估范围从单个个体上升到群体系统水平与多层级响应研究;⑤研究区域从沿海代表性区域延伸到更广泛的大洋甚至深海;⑥研究参数从单一的 pH 变化发展为多因子联合试验与协同效应分析。

继全球变暖和环境污染后,海洋酸化将逐渐成为严重影响和威胁人类社会发展的第

三大环境问题。面对全球变暖和海洋酸化日趋严重的形势,世界各国要积极行动起来,广泛开展海洋酸化研究,为保护海洋的健康、缓解气候变化和人为影响作出应有的贡献。

参 考 文 献

- 高凯. 2015. 文献计量分析软件 VOSviewer 的应用研究. 科技情报开发与经济, 25(12): 95-98
- 贺仕昌, 张远辉, 陈立奇, 等. 2014. 海洋酸化研究进展. 海洋科学, 38(6): 85-93
- 李运景, 侯汉清, 裴新涌. 2006. 引文编年可视化软件 HistCite 介绍与评价. 图书情报工作, 50(12): 135-138
- 汤天波. 2015. Pathfinder 算法优化研究. 计算机应用与软件, 32(11): 277-280
- 王运锋, 夏德宏, 颜尧妹. 2008. 社会网络分析与可视化工具 NetDraw 的应用案例分析. 现代教育技术, 18(4): 85-89
- 赵信国, 刘广绪. 2015. 海洋酸化对海洋无脊椎动物的影响研究进展. 生态学报, 35(7): 2388-2398
- 郑斐, 郭彦宏. 2013. TDA 分析工具的发展与应用. 山西科技, 28(4): 103-104
- Buesseler K O. 2001. Ocean biogeochemistry and the global carbon cycle: an introduction to the U.S. joint global ocean flux study. Oceanography, 14(4): 5
- Caldeira K, Wickett M E. 2003. Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. Nature, 425(6956): 365
- Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437(7059): 681-686
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. Science, 305(5682): 367-371

Bibliometric Analysis on Research Trends and Latest Developments of Global Ocean Acidification

YU Wei-Ying, ZHANG Can-Ying, FENG Zhi-Gang*, GUO Lin
(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)
*Corresponding author, E-mail: zgfbeng@qdio.ac.cn

Abstract The ocean is a huge carbon sink that slows down the global warming by absorbing atmospheric carbon dioxide. The ocean also contains a wealth of resources, but the excessive absorption of carbon dioxide leads to the ocean acidification, which is a serious problem and cannot be ignored. By applying bibliometric methods and statistical analysis from a macro perspective, we studied the history and trend of research on ocean acidification, distribution of major research topics, and put forward several research proposals to solve existing problems and to provide references for the future research. The results show that the ocean acidification research experienced four development periods from initiation to full growth. Australia, United States, Canada and the UK are the main research countries. The US National Oceanic and Atmospheric Administration, Woods Hole Oceanographic Institution, University of California, University of Queensland and James Cook University are the major research institutions. The process and cause of ocean acidification, sensitivity organism and life processes influence, the ecosystem impacts and ecological effects, case studies on coral reefs and algae are the main research topics of this field. Future research on ocean acidification shall expand the breadth and depth of research, improve research methods and techniques, enhance comprehensive research programs, re-analyze qualitative and quantitative outcomes, consider multiple differentiated coupling factors, and strengthen the basic research and international cooperation.

Key words ocean acidification; bibliometrics analysis; research trends; latest developments