

引用格式: 陈小龙, 狄乾斌, 侯智文, 等. 海洋碳汇研究进展及展望[J]. 资源科学, 2023, 45(8): 1619–1633. [Chen X L, Di Q B, Hou Z W, et al. Research progress and prospect of marine carbon sink[J]. Resources Science, 2023, 45(8): 1619–1633.] DOI: 10.18402/resci.2023.08.10

海洋碳汇研究进展及展望

陈小龙¹, 狄乾斌^{1,2}, 侯智文², 梁晨露¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029)

摘要: 海洋拥有巨大的碳汇潜力。在全球气候变化的背景下, 海洋碳汇是新时期生态文明建设、实现碳中和的有效途径, 已受到学术界广泛关注。海洋碳汇作为一种高效的长期碳汇, 其碳汇机理、效应、技术、核算与交易市场构建, 正成为当前各学科领域亟待探索的新课题。本文在辨析海洋碳汇研究缘起与概念内涵的基础上, 从碳汇和碳源层面出发, 结合中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)核心数据库中海洋碳汇相关研究文献, 利用文献计量工具, 定量对比分析国内外海洋碳汇研究论文的发文量、期刊、作者和机构等主要特征; 通过关键词聚类、突现和共现知识图谱探讨研究热点、阶段性前沿领域和主题演变趋势。结果表明: 国内外海洋碳汇研究发文量随时间变化整体均呈波动增长趋势; 刘纪化和Christian J Sanders是该领域发文量最多、影响力较大的作者; 国外在该领域开展广泛合作, 国内研究也已形成小规模学术研究团队; 研究机构主要为高校和科研院所, 聚集在沿海地区; 研究方向逐渐多元化, 热点明确。对海洋碳汇重点研究方向进行了展望: 应以多学科交叉研究为引领, 推动陆海统筹的统一碳汇市场研究; 以滨海湿地、海水养殖环境碳汇为支撑, 实现海洋碳汇新突破; 以综合性生态补偿机制为导向, 构建海洋碳汇保护管理体系; 以海洋碳汇相关理论与技术创新研究为基础, 探索海洋碳汇应用模式; 以海洋碳汇合作研究为重点, 探讨海上丝绸之路沿线国家蓝碳合作机制。本文旨在梳理国内外海洋碳汇研究现状, 推动该领域研究向更深层次科学合理地发展, 为后续学者开展相关研究提供参考与借鉴。

关键词: “双碳”; 海洋碳汇; 关键词分析; 研究展望; CiteSpace; 知识图谱

DOI: 10.18402/resci.2023.08.10

1 引言

工业革命后, CO₂等温室气体排放导致全球气候变化加剧, 造成的生态和社会问题威胁着人类生存与可持续发展, 促使碳汇问题逐渐成为学界研究关注的热点话题^[1]。碳汇(carbon sink)又称生态系统碳汇, 指吸收空气中CO₂, 减少温室气体在大气中含量的过程, 陆地碳汇和海洋碳汇是地球生态系统最主要的天然碳汇^[2], 其中广阔的海洋孕育着巨大的碳汇能力, 是地球最大的活跃碳库^[3]。2009年《蓝碳: 健康海洋固碳作用的评估报告》从碳固定、气候、作用、现状、意义和发展路径等方面进行了深入

浅出的论述, 明确海洋在气候变化和碳循环中的作用^[4], 引起国内外学者的广泛关注, 积极开展保护海洋碳汇及海岸带蓝碳生态系统研究中^[5]。为应对气候变化的严峻形势, 中国政府不断规划设计低碳发展路径和战略, 多个重要场合反复重申、强调^[6], 2015年《巴黎协定》后中国政府积极响应并承诺“力争CO₂排放于2030年前达到峰值”^[7]; 2020年第75届联合国大会上提出“争取2060年前实现碳中和”的宏伟目标。面向新时期的碳达峰碳中和目标, 仅靠减排难以完成, 提升生态碳汇能力更为重要^[8]。准确把握海洋碳汇领域的学术动态与研究进展, 厘

收稿日期: 2022-10-02 修订日期: 2023-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42076222)。

作者简介: 陈小龙, 男, 河南永城人, 博士研究生, 主要研究方向为海洋经济地理学、区域发展与规划。E-mail: chenxl0313@163.com

通讯作者: 狄乾斌, 男, 山东滕州人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为海洋经济地理学、区域发展与规划。E-mail: dqbwmm@163.com

清当前研究热点和前沿,能够促进海洋碳汇研究的未来发展,更好地为中国海岸带生态系统保护和修复提供科学基础。

碳汇研究是全球气候变化研究的重要课题,学者们在碳汇研究方面积累了丰富的研究成果。当前研究主要围绕针对不同资源类型,如森林生态系统、农田生态系统、湿地生态系统等的碳汇核算^[9]。如钱晓雍^[10]测算了上海农田生态系统主要碳源汇,分析了碳源汇的时空格局及影响因素;黄利等^[11]基于文献计量分析方法,通过CNKI核心期刊、CSSCI和CSCD数据库的研究机构、作者、期刊等信息,利用CiteSpace关键词聚类共现图谱等方法,对国内碳汇研究的概况及碳汇研究热点、趋势进行了分析;Huang等^[12]对1991—2018年间发表的与气候变化和碳汇相关文章进行科学计量分析,揭示了该领域研究的基本特征、主要力量、知识基础、主题演化和热点。也有学者围绕旅游业碳汇进行研究,发现其中旅游交通与旅游住宿的碳要素消耗占比最大,可通过完善碳汇交易机制、碳源管理、旅游过程管理等措施增加碳汇潜力^[13]。森林碳汇和草原碳汇也受到较多关注。如张哲等^[14]分别以WOS、CNKI数据库为资料来源,对有关森林碳汇研究领域的国内外重要学术机构、学术文献及人物、研究热点等进行了统计分析;高玉娟等^[15]采用WOS核心合集数据库中2010—2019年收录的有关草原碳汇研究的相关文献,基于CiteSpace软件进行了可视化分析。

海洋是地球系统中最大的碳库,海洋碳库是大气的50倍,陆地生态系统的20倍,全球大洋每年从大气吸收CO₂约20亿t,占全球每年CO₂排放量的1/3左右,是大气CO₂巨大的汇^[3]。长期以来,关于海洋碳汇的概念、理论框架及研究方法存在一定的阶段性特征,完整的研究体系有待进一步完善。IPCC国际权威组织评估报告中提出的蓝碳概念被广泛采纳^[16],但理解片面且缺乏通用内涵。在不同学科交叉融合发展背景下,“蓝碳”内涵逐渐深化。众多学者对其研究范围、主题进行了辨析^[17],集中在海岸带碳汇的科学概念、研究方法、现状分析^[18]、碳汇渔业发展机制、蓝碳潜力及其进展^[19-21]等理论层面,在文献选择、热点方向判断等方面研究视角单一;对该领域整体研究现状的总结和系统化研究不足。仅有聂鑫等^[22]和陈松丛等^[23]从单一视角定量分析国

内外总体进展,相关重点、理论和制度解析有待深入,对海洋碳汇研究的发展提出了适应新形势的要求。

随着经济不断发展与人类活动影响增加,生态环境保护面临巨大的挑战,气候变化问题已经引起广泛关注。海洋碳汇是解决中国碳排放问题的重要路径之一,中国海洋碳汇建设的潜力较大,在以海洋生态改善为基础的海洋碳汇对中国碳达峰与碳中和具有重要意义。国内外学者也针对海洋碳汇开展了一系列重要工作,取得了一定的成果。当前,中国海洋碳汇研究仍处于起步探索阶段,海洋碳汇概念、评估方法、前沿观点和趋向等方面有待深入探讨。本文拟在总结整理并对比分析国内外文献基础上,重点厘清海洋碳汇概念及发展脉络,基于CNKI和WOS核心数据库,探讨适应性研究科学范式,提出未来海洋碳汇研究方向,以期深化对海洋碳汇研究理论的理解,推动该领域研究向更深层次科学合理的发展,为后续学者进一步开展相关研究提供参考和借鉴,引导更多资源进入海洋碳汇建设领域,助力实现增强中国碳实力的目标。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文数据来源于CNKI和WOS核心数据库。国内海洋碳汇研究数据,文献检索主题设置“海洋碳汇”或“海-气界面CO₂通量”或“蓝碳”;文献来源类别限定为“核心期刊”“CSSCI”和“CSCD”;文献类型限定为“中文期刊”。国际海洋碳汇研究数据,文献检索主题设置为“Ocean carbon sink”OR“Carbon dioxide flux at the air-sea interface”OR“Blue-carbon”;语种设置为“English”;文献类型为“Article”。关于海洋碳汇相关研究最早出现在2001年^[24],因此,文献时间跨度设置为2001—2021年。由图1可以看出,国内研究起步晚,2010年后CNKI文献才开始大量涌现;WOS发文量在2001—2010年缓慢增长,2010年后增长迅速。总体上,国内和国际海洋碳汇发文量均呈波动增长趋势,发文量越来越多,表明受关注程度越来越高。

2.2 分析方法与工具

借鉴相关文献综述分析方法的基础上,构建“定性探析+定量分析”文献分析体系(图2)。运用CiteSpace软件对相关文献进行信息数据挖掘,绘制

2023年8月

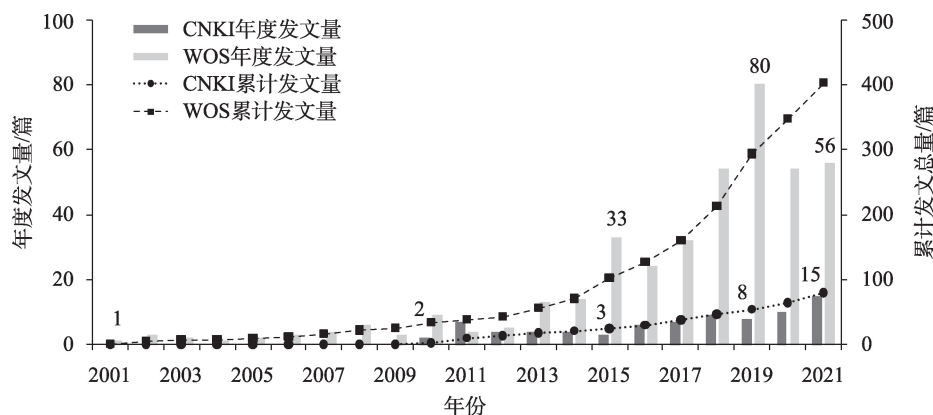


图1 国内和国际海洋碳汇研究发文量年度变化图

Figure 1 Annual change of Chinese and international marine carbon sink research publications

作者、期刊、机构和国家(地区)合作网络图谱,并从知识图谱中分析国内外海洋碳汇的研究特征;对海洋碳汇关键词分析,绘制关键词的聚类知识图谱、突现表、共现时区图,识别海洋碳汇研究前沿热点;在此基础上进行数理和文本分析,总结探讨和预测海洋碳汇的最新进展、演进过程和未来趋势^[25]。CiteSpace软件近几年在海洋学科领域如海洋经济、海洋生态经济、海洋资源、海洋生态补偿^[26-29]等方面研究也被广泛使用。

3 主要研究进展

3.1 海洋碳汇研究的缘起与概念

3.1.1 海洋碳汇研究的缘起

1992年联合国气候变化框架公约对“碳汇”与“碳源”作出明确的定义,将温室气体“汇”定义为从大气中去除温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制;将温室气体中的“源”定义为向大气中释放产生温室气体CO₂和甲烷等气溶胶或前体的过程、活动或机制^[30]。全球碳排与碳汇是以大气圈为依据,以大气中输出或向大气中输入的碳为参考,主要碳源有矿物燃料燃烧导致的CO₂排放、土地利用方式改变所引起的CO₂排放量增加、生物呼吸作用以CO₂的形式释放到大气中^[31]。与其他碳汇相比,海洋碳汇具有固碳量大、效率高、储存时间长等特点。森林、草原等陆地生态系统碳汇储存周期最长只有几十年,而海洋碳汇可长达数百年甚至上千年,碳汇效果显著。因此,海洋碳汇可有效减缓温室气体排放,助力实现碳中和目标,已成为全球气候治理的前沿领域。发展海洋碳汇是中国参与全球气候治理、积极应对气候变化的重要抓手,可进一步丰富国家应对气候变化自主贡献的内容。

在海洋碳源汇理论方面,中国科学院海洋研究所宋金明^[32]剖析了海洋碳源汇的内涵,并将其分为“表观碳源汇”与“实际碳源汇”,很好地解释了造成海洋碳源汇不确定性的原因,为后来海洋碳汇理论的形成奠定了思想基础。随着海洋碳汇研究不断深化^[33],2013年中国多个涉海科研院校、部委和企业共同组成政产学研用全国海洋碳汇联盟;2014年

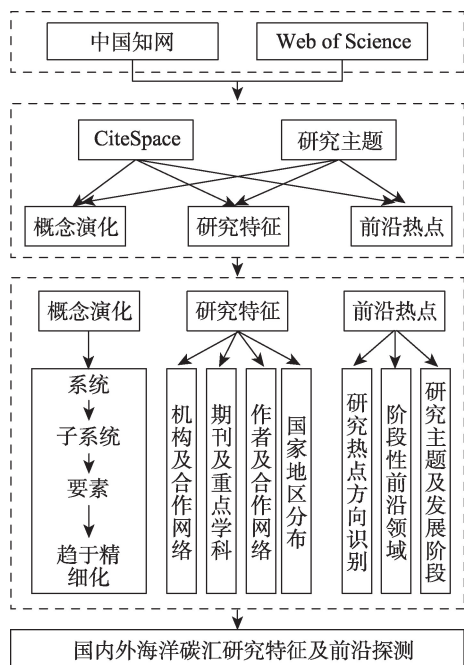


图2 融合“定性探析”+“定量分析”的文献分析方法
研究框架图

Figure 2 Framework of the bibliometric analysis

COCA推出“中国蓝碳计划”;2015年“海洋碳汇”被纳入《生态文明体制改革总体方案》;2019年中国提出“海洋负排放国际大科学计划(ONCE)”,以便在国家和地区建立海洋环境的负排放生态示范工程^[16];2020年海洋生态经济国际论坛发布《实施海洋负排放,践行碳中和战略倡议书》;同年12月召开“海洋负排放支撑碳中和”专题研讨会;中国相关涉海大学在有关部门支持下成立海洋负排放研究中心、碳中和创新研究中心等机构,有望为全球实现碳中和提供中国方案^[34]。

自工业革命以来,人类活动引起的大气CO₂浓度增加正在加剧全球气候变化,全球碳循环和碳汇研究广受关注^[30]。在海洋中,利用海洋活动及海洋生物吸收大气中的二氧化碳,并将其固定、储存在海洋的过程、活动和机制则被称为“海洋碳汇”^[4]。海洋可以通过物理、化学和生物学机制完成储碳^[35],通过海洋物理固碳、深海封储固碳、海洋生物固碳、海滨湿地固碳等方式实现海洋碳汇过程^[36]。海洋浮游植物从大气中吸收CO₂,但被固定下的有机碳经过一系列过程后又返回到大气中,虽然只有很小部分的有机碳能够长期储存在深海和海底沉积物中,但这种长期储碳对全球气候变化发挥重要作用,是海洋碳循环的重要过程。作为占海洋生物量主体的微型生物通过自身的生命活动,将容易利用的活性溶解有机碳或半活性溶解有机碳转化成难以利用的惰性溶解有机碳,进而完成储碳的过程^[37]。海洋生态系统中的各类生物作用较为明显,拥有海洋固碳功能的生物类群或生态系统,主要为浮游生物、贝藻类、红树林和珊瑚礁生态系统等^[30]。由此可知,海洋固碳和储碳过程已成为该研究领域迫切探讨的研究课题,海洋固碳机制研究已成为气候谈判、CO₂减排压力等方面的研究热点。

通过文献分析可知,国内外关于海洋碳汇的研究多从海洋科学、环境科学、生态学、经济学等多视角分析^[38],广泛应用于滨海湿地碳汇、海岸带碳汇、大型海藻类碳汇和微型生物碳泵等方面^[39]。其中,滨海湿地是陆地和海洋生态系统间的过渡生态系统,受气候变化和人类活动的双重威胁,碳汇能力有下降趋势^[34];同时由于滩涂围垦、资源浪费、水源污染等原因,海岸带生态系统面临退化威胁,全球67%的红树林、35%的滨海盐沼和29%的海草床遭

到破坏,不仅失去碳汇功能,还可能从碳“汇”变成碳“源”,表明海洋碳汇研究面临巨大挑战^[40]。

3.1.2 海洋碳汇的概念

生态系统碳汇主要通过两种方式实现:①陆地碳汇,由陆地植树造林增加的碳汇,将CO₂固定在陆地生态系统中被称为“绿碳”;②海洋碳汇又称“蓝碳”,将CO₂封存在海岸带或海洋生态系统中,由海洋水体、海岸带、河口、滨海湿地内生物固碳和储碳增加的碳汇^[41]。21世纪以来,人类活动和气候变化对海洋生态系统的双重压力不断加大,国际社会日益认识到海洋碳汇在应对气候变化和维持生态系统服务功能中的价值和潜力。2009年联合国环境规划署、联合国粮农组织和联合国教科文组织政府间海洋学委员会联合发布《蓝碳:健康海洋固碳作用的评估报告》^[4],明确海洋在全球气候变化和碳循环过程中至关重要的作用,从此“蓝碳”概念被广泛采纳,多项国际计划和国家计划相继出台。

海洋碳汇的概念可从以下几个方面去理解:①从海洋固碳原理看,海洋碳汇主要通过物理溶解碳泵、生物碳泵、微生物碳泵和海洋碳酸盐泵等方式来固碳^[42]。②从地理位置看,“蓝碳”包括深海、浅海、海岸带、海岛等生态系统中可保持的碳。③从生物载体看,“蓝碳”包括红树林、海草与海藻等捕获的CO₂及其形成沉积物,或通过养殖贝藻、部分鱼类等吸收水体中CO₂的渔业碳汇,均是以海洋、海岸生物固存的方式来清除大气中的CO₂^[43]。④从最初的定义看,“蓝碳”与“海洋碳汇”概念是一致的,既包含海岸带碳汇,也包括开阔海区碳汇。从生态系统可持续发展的视角,红树林、海草床等碳汇确实具有重要生态价值^[44,45];但从气候变化视角,红树林、海草床等碳汇远无法达到对气候变化产生量级影响效果,而真正对气候变化发挥调节作用是海洋水体碳汇,即微型生物为主介导的有机碳汇与无机碳汇。因此,“蓝碳”概念不应片面,甚至被曲解为红树林、海草床等“看得见、摸得着”的碳汇资源专属名词;涉及红树林、海草床等碳汇时,应采用“海岸带蓝碳”,以保障学术严谨性和科学术语应用准确性^[46,47]。由此看出海洋碳汇研究正逐渐系统化、精细化。

3.2 海洋碳汇研究主要特征

3.2.1 发文作者及合作关系

利用软件对国内外作者进行共现分析获得知

2023年8月

识图谱(图3)。国内发文作者知识图谱中,节点和连线分别是264和649个,网络密度是0.0187,说明当前研究学者相对较少,学者之间形成较为固定的团队,国内作者合作共现频次少,合作强度较弱。从发文量及共现频次看,排名前3的作者依次是刘纪化(7篇)、焦念志(5篇)、唐剑武(4篇)、张永雨(4篇),其余作者发文均在4篇以下。从合作网络看,对于海洋碳汇研究已形成小规模学术研究团队,仍处于相对独立的阶段,团队之间存在较弱的合作关系。合作突出的3组研究团队有刘纪化、焦念志、唐剑武、张永雨、张继红、王法明团队;齐占会、陈胜军、李纯厚、王珺、黄洪辉、孙鹏和刘永团队;陈丕茂、秦传新、冯雪、黎小国、林会洁和马欢团队。其中,由刘纪化等组成的团队,根据其合作者所在单位的不同,内部也有一定的研究方向差异,如刘纪化团队主要研究海洋碳汇与海洋负排放^[48,49];焦念志团队主要研究海洋生态系统碳汇与气候变化^[50-52];唐剑武团队主要研究海岸带蓝碳^[38,53]。此外,齐占会团队在海水养殖贝藻类碳汇^[54]方面、陈丕茂团队在海洋牧场生物碳储量^[55,56]方面研究成果较多。促成团队间合作的主要原因在于研究课题一致或项目合作,但团队与团队间的合作交流不足,尤其是不同学科间团队合作更是匮乏。按此趋势将不利于海洋碳汇研究的完善与发展,应重视学者之间的跨区域、跨学科之间的交流与合作。国际发文量排名前3的作者为 Christian J Sanders (8篇)、Oscar Serrano (7篇)、Carlos M Duarte (7篇),发表时间较为集中,多分布在2016—2018年阶段。这可能是由于2016年《巴黎协定》通过,全球气候治理进入了新

的时代,主权国家政府开始出面推动蓝碳发展。从合作网络看,Christian J Sanders、Carlos M Duarte 和 Oscar Serrano 等形成了联系紧密合作网络。

3.2.2 发文期刊

根据条件检索出国内外海洋碳汇研究各期刊的载文数(表1)。国内载文数量最多的期刊是《中国科学院院刊》,达到9篇;其次为《中国科学·地球科学》,为6篇;而《中国科学·生命科学》《中国人口·资源与环境》两期刊并列第三名,均为4篇。表中的期刊汇聚了国内地球科学、生命科学、资源科学等领域的相对较为综合的期刊,以其广泛的研究范围更多更早地涉及海洋碳汇研究。国际期刊载文数量远高于国内期刊,载文量最多的是 *Sustainability*, 为52篇; *Marine Policy* 和 *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 分别以载文量18和16篇位居第二和第三名。与国内的载文热门期刊相比,表中的国际期刊显示出研究领域更为多样、研究范围更为聚焦的特点,这与国外海洋碳汇研究经历了更长的时间、延伸出了更多的方向吻合。

3.2.3 发文机构

国内海洋碳汇研究发文机构合作网络图谱中(图4),节点数为140,连接数为247,网络密度为0.0254,说明国内研究机构之间联系总体呈现相对集中,学科交叉的趋势,逐渐形成良性互动的学术氛围,进一步促进国内海洋碳汇研究。从高产机构和发文量看,山东大学海洋研究院出现的频次最高,达到8篇,在海洋碳汇研究具有相对优势;其次是中国海洋大学经济学院与管理学院。从区域分布看,海洋碳汇研究机构多分布在沿海地区,如位



图3 国内与国际海洋碳汇研究发文作者及合作知识图谱

Figure 3 Authors and cooperation knowledge map of marine carbon sink research in China and internationally

表1 国内与国际海洋碳汇研究载文期刊(前12名)

Table 1 Journals of marine carbon sink research in China and internationally (top12)

序号	期刊来源	篇数	序号	期刊来源	篇数
1	中国科学院院刊	9	1	Sustainability	52
2	中国科学·地球科学	6	2	Marine Policy	18
3	中国科学·生命科学	4	3	Journal of Geophysical Research-Biogeosciences	16
4	中国人口·资源与环境	4	4	Estuarine, Coastal and Shelf Science	15
5	资源科学	3	5	Remote Sensing of Environment	12
6	地球科学进展	3	6	Journal of Geophysical Research-Oceans	11
7	生态学报	3	7	Global Biogeochemical Cycles	10
8	南方水产科学	2	8	Nature Climate Change	9
9	应用海洋学学报	2	9	Environmental Research Letters	8
10	应用生态学报	2	10	Marine and Petroleum Geology	8
11	中国海洋大学学报	2	11	Remote Sensing	8
12	海洋通报	2	12	Atmospheric Environment	6

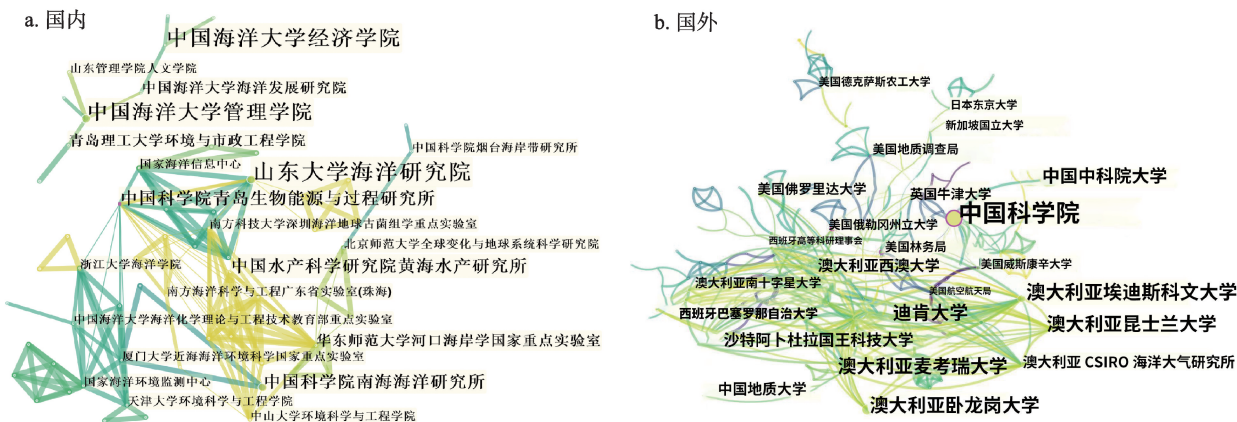


图4 国内外海洋碳汇研究发文机构及合作知识图谱

Figure 4 Institutions and cooperation knowledge map of marine carbon sink research in China and internationally

于黄海的中国水产科学研究所黄海水产研究所,位于渤海的国家海洋环境监测中心,位于东海的华东师范大学河口海岸学国家重点研究室和浙江大学海洋学院,位于南海的中国科学院南海海洋研究所和南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),和位于山东沿海的高校和研究所,均为海洋碳汇研究的主要力量。从机构合作关系看,山东大学海洋研究院、中国科学院青岛生物能源与过程研究所、中国科学院南海海洋研究所和中国水产科学研究所黄海水产研究所有直接的节点连接,青岛理工大学、山东管理学院和中国海洋大学的管理学院、经济学院和海洋发展研究院之间也有合作关系,这些表明合作研究多是在地理位置相近的机构之间发生。

国际海洋碳汇研究发文机构合作网络图谱中,

节点数为237,连接线为261,网络密度为0.0093,说明各机构间的合作联系较弱。研究期间发文数量在8篇以上的机构共12家,占总发文量的32.75%,说明国际研究机构间成果差异较大,中国科学院(Chinese Academy of Sciences)出现的频次最高,达到20次。从机构合作关系看,各研究机构间相对分散,未形成较强的学术合作网络。

3.2.4 发文国家(地区)分布

利用Citespace软件对海洋碳汇研究的国家(地区)进行分析,可把握各国海洋碳汇研究现状和重视程度(图5)。从发文数量看,美国、中国是该领域研究最多的两个国家,分别发文133、70篇,美国作为开发利用最早、开发程度最高的国家(地区)在海洋碳汇研究方面占据主导地位;中国也占有重要的

系统的研究正在向更加多元化、内涵深入化的方向发展,使蓝碳生态系统概念得到了扩展,由单纯的红树林、海草床、盐沼等向海岸带、渔业碳汇、养殖业碳汇进行相关延伸。这一方面表明蓝碳研究所涵盖的地域和行业向纵深发展,另一方面体现出人类对于减少碳排放的态度由被动向主动转变,由单纯利用海洋生物增加碳吸收向积极利用人工养殖等手段实现碳减排的转化。最后,从海洋碳汇综合举措来看,主要有聚类#4“负排放”和聚类#5“碳储量”和聚类#2“碳循环”。中国研究主要集中在“如何突破蓝碳保护的制度困境”问题上,尤其是针对蓝碳的特殊属性,而“准物权”的提出有利于从“公权”角度明确与蓝碳相关的主体定位及权利结构,为构建更加科学的碳汇交易提供可靠的制度基础。

国际海洋碳汇研究热点涉及 blue carbon、phytoplankton、ecosystem services、climate change policy、fluorescence spectroscopy、moisture、PM2.5、carbon、cyclostratigraphy、carbon assimilation、stable carbon isotopes 等 11 个方面的聚类。聚类#0“blue carbon”是出现最多的热点词,包含红树林、盐沼和沿海湿地,反映在海岸带湿地海洋碳汇生态系统中,动植物、微生物起到呼吸、光合及分解等作用,充分发挥碳汇能力,尤其是红树林、盐沼和海草床,具备高生产高固碳能力,是海岸带蓝碳的主要贡献者,其在

抑制碳排放、缓解全球气候变化提供最有效、最迅速的工具,是研究热点方向。而聚类#1“phytoplankton”包含 chlorophyll、scattering、green 和 ocean,反映当前海洋碳汇研究主要集中于浮游生物碳汇以及海洋植被碳汇对海洋碳循环的作用。聚类#4 涉及 restoration、climate mitigation、climate change policy 和 payments for ecosystem services,海洋生态系统服务系统具有巨大的碳汇能力,开展海洋碳汇研究,对于建立和完善海洋生态系统服务清单技术具有重要理论意义。

综上,国内与国际海洋碳汇研究主要从多个视角进行解读,海洋碳汇在缓解气候变化、生物多样性保护、海洋资源高效利用方面扮演重要角色,但对海洋生态系统固碳能力的研究深度不够,对全球海草固碳的评估仍存在诸多限制,海洋碳汇研究将会受到越来越多的重视,为深入认识海洋碳汇功能价值及碳汇使用价值提供参考。

3.3.2 阶段性前沿研究领域分析

由表 2 可知,国内关键词突现主要集中在 2010 年以后,主要向低碳、渔业碳汇、生态系统、海岸带、养殖碳汇、碳储量、气候变化、海洋牧场和负排放等主题转换。从持续周期看,海洋低碳发展的研究是最早前沿领域;出现时间相对较晚是海洋牧场建设和海洋负排放,近些年研究热点注重海洋碳汇的新

表 2 国内与国际海洋碳汇研究关键词突现表

Table 2 Keyword emergence table of marine carbon sink research in China and internationally

关键词	强度	突现时间	2010—2021 年	关键词	强度	突现时间	2001—2021 年
低碳	0.76	2010—2011		variability	2.64	2004—2009	
藻类	1.07	2012—2013		dynamics	4.74	2006—2013	
贝类	1.15	2012—2013		sea	1.38	2006—2007	
渔业碳汇	3.22	2013—2017		bioma	2.65	2008—2013	
生态系统	4.15	2014—2015		phytoplankton	2.19	2010—2015	
碳循环	1.77	2014—2016		mangrove	4.15	2013—2021	
海草床	0.77	2014—2016		ecosystems	5.15	2013—2021	
海岸带	3.38	2015—2016		emission	1.23	2014—2015	
养殖碳汇	0.54	2015—2016		climate	4.95	2014—2017	
碳汇潜力	1.02	2016—2017		wetland	1.56	2014—2015	
碳储量	3.02	2016—2017		carbon stock	2.85	2017—2019	
生产力	0.77	2016—2018		seagrass	4.93	2018—2021	
气候变化	2.77	2017—2019		wetland	5.87	2019—2021	
海洋牧场	1.55	2017—2019		cooperation	2.65	2019—2020	
负排放	0.97	2020—2021		marine ranching	3.53	2020—2021	

兴实践建设;周期最长的是“渔业碳汇”,周期在2013—2017年,接着是碳循环、海草床、生产力、气候变化、海洋牧场持续周期较长,均为3年,其余突现词持续时间较短,大约在1~2年,说明研究内容比较多元化,国内研究关注度比较高。从关键词突现强度看,排名前5位的突现关键词主要是:生态系统、海岸带、渔业碳汇、碳储量、气候变化这些方面的研究是目前海洋碳汇数据的重要来源,影响力度比较大。从时间序列看,2013年之前的突现关键词为低碳、贝藻类等;2014—2017年生态系统、碳循环、海草床、海岸带等;2018年之后为气候变化、海洋牧场、负排放等。整体看海洋碳汇研究的突现强度和突现时间节点表明该研究与时政结合紧密,助力碳中和碳达峰。

国际关键词突现表可以看出, dynamics、mangrove、ecosystems、climate、wetland 是阶段周期性长且突现强度较大的几个关键词, 分别代表了不同时间段的前沿研究热点, 说明学者们在该相关研究领域热度较高。mangrove 和 ecosystems 突现持续周期最长, 在 2013—2021 年持续 9 年, 是该研究领域的焦点问题; 其次是 dynamics、bioma、phytoplankton、variability 研究周期较长均在 5 年以上, 反映国际对

海洋碳汇研究领域热度较长的主题方向。突现关键词出现相对较晚的有 cooperation、marine ranching,说明近些年海洋碳汇研究热点注重国际合作和海洋牧场建设。从时间序列看,2002—2007年突现关键词主要为 variability、dynamics、sea 等;2008—2015年主要为 phytoplankton、mangrove、ecosystems、emission 等;2016—2021年主要为 carbon stock、seagrass、wetland、cooperation 等。从关键词突现强度和时间节点看,海洋碳汇研究紧跟时代主题,多与国际和国家的政策结合开展相关研究。

3.3.3 主题演变与发展阶段分析

借助关键词共现时间分布与发展历程,结合关键词聚类图谱和关键词突现强度图谱的分析,把握随时间变换海洋碳汇研究的演进趋势。对国内2010—2021年(图7)和国际2001—2021年(图8)海洋碳汇研究文献进行关键词共现分析。

根据图7的结果,将国内海洋碳汇研究发展大致划分为3大阶段:第一阶段为2001—2009年,是海洋碳汇研究的萌芽阶段,发文在3篇以下,相关学者关注不足。第二阶段为2010—2017年,是海洋碳汇发展阶段,随着国外研究前沿而不断深入,出现较多的有海洋碳汇、碳循环、碳汇渔业、海水养殖、

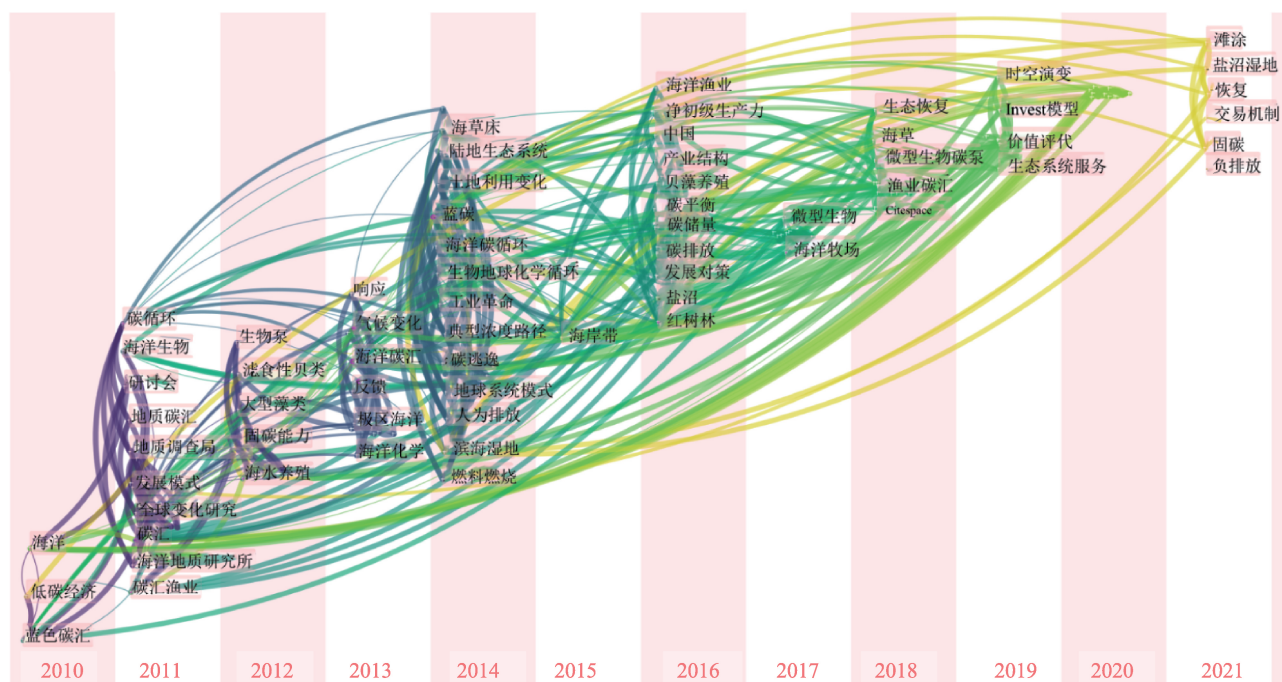


图7 国内海洋碳汇研究关键词共现时区图

Figure 7 Keyword time zone knowledge map of marine carbon sink research in China

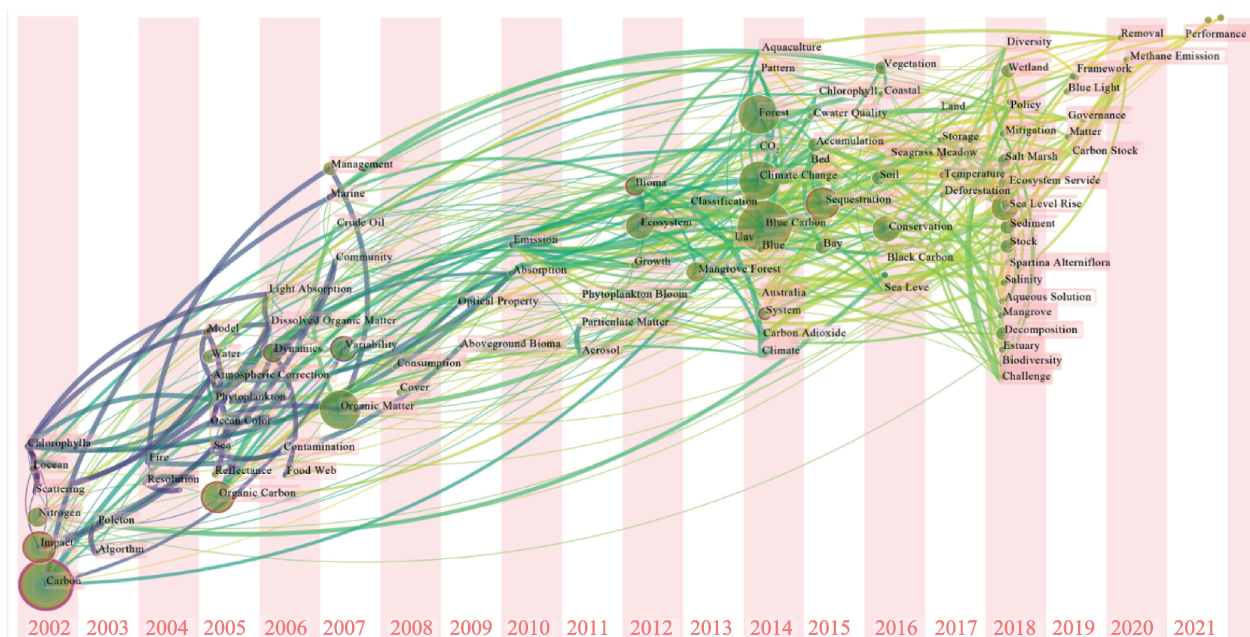


图8 国际海洋碳汇研究关键词共现时区图

Figure 8 Keyword time zone knowledge map of marine carbon sink research internationally

气候变化、海岸带、碳储量、气候变化等关键词,成为这一时期的主要热点主题;海洋碳汇研究队伍不断壮大,各学者之间积极合作。第三阶段为2018—2021年,是研究的深化发展阶段,这一阶段研究内容日渐丰富,发文量也较多,集中了“生态恢复”“海洋生态系统”“盐沼湿地”“海洋负排放”和“碳中和”等关键词。这一阶段,中国政府逐渐认识到海洋碳汇在应对气候变化方面的重要性,采取多样措施和发布多份重要文件对海洋碳汇作出了部署,中国学者也对国际海洋碳汇研究作出突出贡献。

国际海洋碳汇研究从2001年至今,开展了大量工作。根据图8将其划分为3个阶段:第一阶段为2001—2010年,是初步发展阶段,早期联合国虽然对海洋作为碳汇进行了研究,但产出了成果较少,海洋碳汇没有较为深入的突破;在该时期学者首次提出了“蓝碳”的概念和内涵,并重点关注海草床、红树林、滨海沼泽三大海岸带蓝碳生态系统;随后成立“海洋气候联盟”,在蓝碳议题出现之际迅速扩大了蓝碳的舆论影响,但由于其成员组成庞杂、组织方式松散,无实际经费,难以开展实质工作^[57]。第二阶段为2011—2017年,是快速发展阶段,organic matter、mangrove forest、blue carbon、coastal wetlands、carbon sequestration、climate change、ecosys-

tem等关键词在这一阶段大量出现,这些研究成果成为研究的重要主题;《海洋及沿海地区可持续发展蓝图》《湿地指南》等对海洋碳汇有更系统更深入研究。第三阶段为2018—2021年,是波动发展阶段,出现 policy、coastal wetland、Australia、carbon storage、methylene bulue等关键词,海洋碳汇减缓气候变化的研究内容备受关注,IPCC研究报告也指出海洋碳汇在气候变化的影响、减缓气候变暖等方面重要的作用,对其发展具有里程碑意义。

4 研究展望

气候变化作为全球性危机,需要全世界共同努力应对,《巴黎协定》的签署为各国开展合作、承担责任提供了基础保障。中国高度重视气候变化问题,适时提出“双碳”目标,推动国家低碳发展。通过海洋生态系统光合作用吸收及固定碳实现海洋增汇,已掀起营造和保护蓝碳生态系统、大力发展蓝碳的热潮。随着国际及国内形势的变化、结合相关研究领域现状,海洋碳汇研究方法和研究视角有待丰富,研究领域和研究深度仍需加强。未来的海洋碳汇研究应该重点关注以下几个方面:

(1)陆海统筹的多学科交叉研究。中国作为陆海兼备的世界大国,碳汇潜力巨大,发展海洋碳汇必须对陆地和海洋进行统筹考虑,更好地实现海洋

2023年8月

储碳效率的最大化,取得最优增汇效果。只有对海洋碳汇生态系统进行多学科的交叉研究,方能找到解决陆海统筹问题的最佳路径和方案。当前,国际上尚未建立统一的与海洋碳汇相关的技术方法和标准规范,中国学术界应把握这一机遇,深入开展交叉学科研究,充分利用当代高新技术工具,建立海洋碳汇方法与技术体系的规范与标准,促进碳达峰碳中和目标实现。国际社会将海洋碳汇与其他碳固定生态系统纳入统一的减排和缓解气候协议中,成立统一的碳汇管理机构,利于碳汇市场的规范统一;国内生态环境部与自然资源部改革,也体现统筹规划特征。海洋碳汇研究应与时俱进,以陆海统筹研究契合统一碳汇市场的时代需求,建立陆海统筹的国家统一碳汇市场,实现海洋碳汇应有的生态与经济价值,为更好地防治污染寻求新思路。

(2)滨海湿地的蓝色碳汇功能研究。滨海湿地具备很强的蓝色碳汇价值和生态系统服务功能,当前在世界范围内的滨海湿地面积有望进一步增加,但由于中国近些年一系列的经济开发活动,导致湿地面积急剧下降,威胁到固碳能力和碳汇潜力的增长,如何减少对湿地生态系统功能的破坏成为当前解决环境问题的题中之义。因此,未来应加强对滨海湿地蓝碳的研究:运用现代化信息手段对滨海湿地固碳功能进行定量测算并提高预测功能;针对典型滨海湿地系统,如盐沼湿地、红树林湿地和海草床生态系统,开展野外观测研究以深入了解滨海湿地生态系统的结构与功能;通过相关制度、法律法规的制定,建立滨海生态系统服务示范区,为研究保护滨海湿地和增加海洋碳汇提供因地制宜的对策。

(3)海水近海养殖环境碳汇研究。近海养殖业的发展能够将碳汇渔业和海上粮仓建设合为一体,而中国作为世界第一海水养殖大国,对近海养殖蓝碳的开发在未来将拥有巨大的潜力。首先,以生物碳泵和微型生物碳泵储碳原理为理论依据,实施海水养殖负排放工程,基于环境承载力进行多种海洋生物的标准化混养,形成多层次立体化生态养殖格局,实施清洁能源驱动的人工上升流生态增汇工程;其次,推进以海藻养殖为主体的生态牧场建设,加快海草床生态系统修复,拓展蓝碳富集区和海洋生物栖息地;最后,通过深入研究探讨近海养殖环境中碳汇关键过程与机制,优化海水养殖增汇典型

发展模式,为制定科学合理的蓝碳开发策略、促进近海养殖业可持续发展提供重要途径。

(4)综合性生态补偿机制的海洋碳汇保护研究。生态补偿是一个系统工程,关于生态补偿研究已有较为成熟的理论,但由于生态补偿机制尚未形成体系,标准制定缺乏科学定量分析,涉及范围尚未明确,碳汇生态补偿研究还需不断加强。海洋碳汇保护资金投入机制仍需进一步完善,健全生态保护补偿机制,使生态系统服务付费更科学、标准。相关研究应关注生态补偿机制在蓝碳上的应用,重点加强蓝碳储量估算、价值评估等标准体系构建,加强海洋碳汇补偿主客体界定、补偿标准、激励约束机制、检测评估、绩效考核等方面研究。利用碳汇加深市场化、科学化、多元化及标准化的生态补偿模式探索。

(5)海洋碳汇相关理论与技术创新研究。近年来,海洋碳汇在理论指导和实证研究等层面已经取得瞩目的成就,但相关研究基础理论体系比较薄弱,对海洋碳汇及保护的原理、测度方法尚未形成统一认识和理论体系,海洋碳汇的形成过程与调控机制、现状评估规划及增汇技术研发等方面都需要进一步完善。在自然和人为活动的多重压力下,海洋碳汇正快速减少和消失,气候变化和人类活动导致的全球化问题,对海洋生态系统及碳汇带来一系列问题。因此,完善海洋生态系统变化和蓝碳的形成过程与调控机制理论、研发重大生态保护及修复工程碳汇功能价值评估技术,对缓解气候变化的战略制定至关重要。

(6)海上丝绸之路沿线国家蓝碳合作机制研究。在建设海洋强国的战略布局下,进一步提出发展“一带一路”战略蓝图,对海洋碳汇研究也提出了新的发展要求。中国作为海洋大国,政府正积极探索海洋碳汇有效机制,拓展海洋经济发展空间,在建设“21世纪海上丝绸之路”的新形势下,以海洋碳汇合作机制构建为重点,引领海上丝绸之路沿线国家共同关注气候变化问题,取得积极反响。在此背景下,重点把握如何探索有效保护和增加蓝碳的机制、途径和方法等问题,关注海上丝绸之路沿线国家蓝碳合作的动力机制、实现机制、保障机制研究。

5 结语

本文通过梳理近年来国内外海洋碳汇研究现

状及阶段性前沿热点,展望了面向陆海统筹、滨海湿地、海水养殖、生态补偿、合作机制的新时期海洋碳汇研究的需求。研究发现:①海洋碳汇发文量呈波动增长趋势。刘纪化、焦念志、Christian J Sanders、Oscar Serrano 等是国内外研究的主要作者;国内研究团队表现出“大分散、小聚合”特征,国际研究团队在该领域开展了广泛合作;主要发文机构有山东大学海洋研究院、麦考瑞大学等;美国、中国是该领域研究最多的国家。②国内研究热点涉及“海水养殖”“滨海湿地”等6个方面聚类,研究方向多元化,热点明确;国际研究热点包含:phytoplankton、ecosystem等,主要涵盖海洋生态、科学、经济等方面;预测碳汇渔业、气候变化、海岸带、碳储量是以后主要研究主题方向。

通过以上的分析,可以看出:①与国外研究对比,中国对海洋碳汇的监测与核算研究尚不充分,数据基础比较薄弱,对其碳汇过程研究定量分析、系统研究和宏观评估缺乏。基于此,应开展更细致的调查研究,积极推动海洋碳汇理论、评估方法、增汇技术的创新,探索适合中国国情的海洋增汇方法。②对比国外海洋碳汇研究背景调查分析,发现全球海洋生态系统处于极其脆弱的状态,气候变暖、海洋酸化等问题破坏滨海湿地生态结构,导致海洋生物资源枯竭,海洋生态系统失衡,严重影响其固碳储碳能力。在制定海洋负排放的方案中海洋碳汇研究机理复杂多样,海洋碳汇转化研究不足,海洋生态系统碳汇影响仍需进一步深入研究。③通过对国内外海洋碳汇研究现状发现,海洋碳汇开发相关的规章制度、行业规范相对不足,需要加快顶层设计,进一步完善海洋碳汇管理政策的制定和实施。

参考文献(References):

- [1] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 179–187. [Jiao N Z. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(2): 179–187.]
- [2] 陶波, 葛全胜, 李克让, 等. 陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(5): 564–575. [Tao B, Ge Q S, Li K R, et al. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem[J]. Geographical Research, 2001, 20(5): 564–575.]
- [3] 陈尚, 张朝晖, 马艳, 等. 我国海洋生态系统服务功能及其价值评估研究计划[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1127–1133. [Chen S, Zhang Z H, Ma Y, et al. Program for service evaluation of marine ecosystems in China waters[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(11): 1127–1133.]
- [4] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. Blue Carbon: A Rapid Response Assessment[C]. United Nations Environment Programme: GRID-Arendal, 2009.
- [5] de Vries T, Holzer M, Primeau F. Recent increase in oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning[J]. Nature, 2017, 542(7640): 215–218.
- [6] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1155–1167. [Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double Carbon” targets[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1155–1167.]
- [7] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1–15. [Hu A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1–15.]
- [8] Legendre L, Rivkin R B, Weinbauer M G, et al. The microbial carbon pump concept: Potential biogeochemical significance in the globally changing ocean[J]. Progress in Oceanography, 2015, 134: 432–450.
- [9] 吕铭志, 盛连喜, 张立. 中国典型湿地生态系统碳汇功能比较[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 114–120. [Lv M Z, Sheng L X, Zhang L. A review on carbon fluxes for typical wetlands in different climates of China[J]. Wetland Science, 2013, 11(1): 114–120.]
- [10] 钱晓雍. 上海农田生态系统碳源汇时空格局及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1460–1467. [Qian X Y. Spatial-temporal variation and impact factor of carbon source and sink of farmland ecosystem in Shanghai, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1460–1467.]
- [11] 黄利, 于焕生, 何丹, 等. 国内碳汇研究进展与前沿动态追踪: 基于CNKI期刊文献的可视化分析[J]. 林业经济, 2020, 42(4): 46–55. [Huang L, Yu H S, He D, et al. Domestic carbon sink research status and research frontier tracking: Visualization analysis based on CNKI literatures[J]. Forestry Economics, 2020, 42(4): 46–55.]
- [12] Huang L, Chen K, Zhou M. Climate change and carbon sink: A bibliometric analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 8740–8758.
- [13] 宋一兵. 旅游业碳汇潜力研究初探[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(2): 135–140. [Song Y B. The study on potential for carbon source and sink in tourism industry[J]. Areal research and development, 2012, 31(2): 135–140.]
- [14] 张哲, 沈月琴, 龙飞, 等. 森林碳汇研究的知识图谱分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(4): 567–577. [Zhang Z, Shen Y Q, Long F, et al. Knowledge mapping of research on forest carbon sinks[J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2013, 30

2023年8月

- (4): 567–577.]
- [15] 高玉娟, 石娇, 李新. 基于 CiteSpace 的草原碳汇研究的知识图谱分析[J]. 草业学报, 2020, 29(8): 195–203. [Gao Y J, Shi J, Li X. Knowledge mapping analysis of grassland carbon sink research based on CiteSpace[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(8): 195–203.]
- [16] 刘纪化, 郑强. 从海洋碳汇前沿理论到海洋负排放中国方案[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(4): 644–652. [Liu J H, Zheng Q. From the ocean carbon sink frontier theory to the Chinese scheme of negative ocean emissions[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(4): 644–652.]
- [17] McLeod E, Chmura G L, Bouillon S, et al. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(10): 552–560.
- [18] 赵逊, 李梦言, 朱晖. 基于 PEST 模型的国外海岸带碳汇开发分析[J]. 自然资源情报, 2023, (6): 35–41. [Zhao X, Li M Y, Zhu H, et al. Analysis of foreign coastal zone carbon sink development based on the PEST model[J]. Natural Resources Information, 2023, (6): 35–41]
- [19] 杨林, 郝新亚, 沈春蕾, 等. 碳中和目标下中国海洋渔业碳汇能力与潜力评估[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 716–729. [Yang L, Hao X Y, Shen C L, et al. Assessment of carbon sink capacity and potential of marine fisheries in China under the carbon neutrality target[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 716–729.]
- [20] 徐敬俊, 覃恬恬, 韩立民. 海洋“碳汇渔业”研究述评[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 161–172. [Xu J J, Qin T T, Han L M. A review of research on marine carbon sink fisheries[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 161–172.]
- [21] 狄乾斌, 陈小龙, 苏子晓, 等. “双碳”目标下中国海洋渔业碳排放效率区域差异及碳减排潜力研究[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(1): 29–37. [Di Q B, Chen X L, Su Z X, et al. Research on regional disparities in carbon emission efficiency and carbon emission reduction potential of China's marine fisheries under the “Dual-Carbon” target[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(1): 29–37.]
- [22] 聂鑫, 陈茜, 李福泉, 等. 国内外海洋蓝碳热点与前沿趋势研究: 基于 CiteSpace5.1 的可视化分析[J]. 生态经济, 2018, 34(8): 38–42. [Nie X, Chen X, Li F Q. A study on emerging trends and research hotspots of blue carbon: A visualization based on CiteSpace5.1[J]. Ecological Economy, 2018, 34(8): 38–42.]
- [23] 陈松丛, 任珩. 蓝碳研究进展[R/OL]. (2017) [2023-01-28]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=fe7bb342ccfe60cbbb7c94c0f133b6a2>. [Chen S C, Ren H. Advances in Blue Carbon Research[R/OL]. (2017) [2023-01-28]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=fe7bb342ccfe60cbbb7c94c0f133b6a2>.]
- [24] Gradskov D A, Kazarinov I A, Ignatov V V. Bioelectrochemical oxidation of glucose with bacteria *Escherichia coli*[J]. Russian Journal of Electrochemistry, 2001, 37: 1216–1219.
- [25] 李杰, 陈超美. CiteSpace 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016. [Li J, Chen C M. CiteSpace Science and Technology Text Mining and Visualization[M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016.]
- [26] 韩增林, 李彬, 张坤领, 等. 基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 643–652. [Han Z L, Li B, Zhang K L, et al. Knowledge structure of China's marine economy research: An analysis based on CiteSpace map[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(5): 643–652.]
- [27] 柯丽娜, 阴曙升, 刘万波. 基于 CiteSpace 中国海洋生态经济的文献计量分析[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5602–5610. [Ke L N, Yin S S, Liu W B. Bibliometric analysis of China's marine ecological economy based on CiteSpace[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5602–5610.]
- [28] 彭飞, 富宁宁, 胡伟, 等. 国内外海洋资源研究知识图谱解析及启示[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2047–2061. [Peng F, Fu N N, Hu W, et al. Analysis and enlightenment of knowledge map of marine resources research at home and abroad[J]. Resources Science, 2021, 42(11): 2047–2061.]
- [29] 许瑞恒, 姜旭朝. 国外海洋生态补偿研究进展(1960–2018)[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2020, (1): 84–93. [Xu R H, Jiang X Z. Knowledge graph of foreign marine ecological compensation research: Analysis based on web of science[J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2020, (1): 84–93.]
- [30] 李纯厚, 齐占会, 黄洪辉, 等. 海洋碳汇研究进展及南海碳汇渔业发展方向探讨[J]. 南方水产, 2010, 6(6): 81–86. [Li C H, Qi Z H, Huang H H, et al. Review on marine carbon and development of carbon sink fisheries in South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2010, 6(6): 81–86.]
- [31] 夏四友, 杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 679–696. [Xia S Y, Yang Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration based on the plan for Major Function-oriented Zones[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 679–696.]
- [32] 宋金明. 海洋碳的源与汇[J]. 海洋环境科学, 2003, (2): 75–80. [Song J M. Carbon sources and sinks in oceans[J]. Marine Environmental Science, 2003, (2): 75–80.]
- [33] 胡敦欣. 海洋在全球气候变化中的作用: 概况、展望与建议[J]. 科学中国人, 2005, (11): 21–23. [Hu D X. The role of oceans in global climate change—overview, prospects and suggestions[J]. Scientific Chinese, 2005, (11): 21–23.]
- [34] 周宏春. 发挥海洋碳汇在碳中和目标实现中的巨大作用[J]. 中华环境, 2022, (8): 26–29. [Zhou H C. Give full play to the great role of marine carbon sink in carbon neutrality and goal realization[J]. China Environment, 2022, (8): 26–29.]
- [35] 张洁. 碳汇渔业的运行机理及区域治理效应分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. [Zhang J. Operational Mechanism and Regional Governance Effect Analysis of Carbon Sink Fishery[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.]
- [36] Chisholm S W. Stirring times in the Southern Ocean[J]. Nature, 2000, 407(6805): 685–686.

- [37] 焦念志, 张传伦, 谢树成, 等. 古今结合论碳汇、见微知著识海洋[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1294–1297. [Jiao N Z, Zhang C L, Xie S C, et al. To decipher the ocean carbon sink through inter-disciplinarity and the integration of the past and present[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1294–1297.]
- [38] 唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 等. 海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(6): 661–670. [Tang J W, Ye S F, Chen X C, et al. Coastal blue carbon: Concept, study method, and the application to ecological restoration[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48(6): 661–670.]
- [39] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, (3): 241–251. [Wang F M, Tang J W, Ye S Y, et al. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2021, (3): 241–251.]
- [40] 李森, 蔡厚才, 陈万东, 等. 海岸带生态恢复区不同林龄红树林对CH₄和CO₂排放通量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2414–2422. [Li S, Cai H C, Chen W D, et al. Analysis on CH₄ and CO₂ fluxes of mangroves with different ages in the coastal ecological restoration zone[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2414–2422.]
- [41] 向爱, 揣小伟, 李家胜. 中国沿海省份蓝碳现状与能力评估[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1138–1154. [Xiang A, Chuai X W, Li J S. Assessment of the status and capacity of blue carbon in China's coastal provinces[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1138–1154.]
- [42] 曹云梦, 吴婧. “双碳”目标下我国海洋碳汇交易的发展机制研究[J]. 中国环境管理, 2022, 14(4): 44–51. [Cao Y M, Wu J. Research on the development mechanism of China's ocean carbon sink trading under the “Dual-carbon” goal[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14(4): 44–51.]
- [43] Chen X L, Di Q B, Hou Z W, et al. Measurement of carbon emissions from marine fisheries and system dynamics simulation analysis: China's northern marine economic zone case[J]. Marine Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105279.
- [44] Howard J L, Creed J C, Aguiar M V P, et al. CO₂ released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass “Blue Carbon” storage[J]. Limnology and Oceanography, 2018, 63(1): 160–172.
- [45] 章海波, 骆永明, 刘兴华, 等. 海岸带蓝碳研究及其展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11): 1641–1648. [Zhang H B, Luo Y M, Liu X H, et al. Research and prospect of coastal blue carbon[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2015, 45(11): 1641–1648.]
- [46] 隋玉正, 陈小璇, 李淑娟, 等. 海岸带蓝碳时空演变及其服务价值评估: 以胶州湾为例[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 2119–2130. [Sui Y Z, Chen X X, Li S J, et al. Spatiotemporal change of coastal blue carbon and its service value evaluation: A case study of Jiaozhou Bay[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 2119–2130.]
- [47] 焦念志, 骆庭伟, 张瑶, 等. 海洋微生物碳泵: 从微生物生态过程到碳循环机制效应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 387–401. [Jiao N Z, Luo T W, Zhang Y, et al. Microbial carbon pump in the ocean: From microbial ecological process to carbon cycle mechanism [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2011, 50(2): 387–401.]
- [48] 张传伦, 孙军, 刘纪化. 海洋微生物碳泵理论的发展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 1933–1944. [Zhang C L, Sun J, Liu J H, et al. Advances in microbial carbon pump and prospects for its future research[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(12): 1933–1944.]
- [49] 刘纪化, 张飞, 焦念志. 陆海统筹研发碳汇[J]. 科学通报, 2015, 60(35): 3399–3405. [Liu J H, Zhang F, Jiao N Z. Deciphering the mechanisms of carbon sink through a holistic view of interactions between land and ocean[J]. China Science Bulletin, 2015, 60(35): 3399–3405.]
- [50] 焦念志, 张传伦, 李超, 等. 海洋微生物碳泵储碳机制及气候效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(1): 1–18. [Jiao N Z, Zhang C L, Li C, et al. Carbon storage mechanism and climate effect of marine microbiological carbon pump[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2013, 43(1): 1–18.]
- [51] 焦念志, 刘纪化, 石拓, 等. 实施海洋负排放践行碳中和战略[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(4): 632–643. [Jiao N Z, Liu J H, Shi T, et al. Implementing negative ocean emissions and practicing carbon neutrality strategy[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(4): 632–643.]
- [52] 焦念志, 严威. 如何通过海洋负排放实现碳中和?[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3922–3923. [Jiao N Z, Yan W. How to achieve carbon neutrality through negative marine emissions?[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3922–3923.]
- [53] 陈雪初, 高如峰, 黄晓琛, 等. 欧美国家盐沼湿地生态恢复的基本观点、技术手段与工程实践进展[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(3): 467–472. [Chen X C, Gao R F, Huang X C, et al. Basic views and technological methods of salt marsh restoration and its progresses in implementation[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(3): 467–472.]
- [54] 齐占会, 王珺, 黄洪辉, 等. 广东省海水养殖贝藻类碳汇潜力评估[J]. 南方水产科学, 2012, 8(1): 30–35. [Qi Z H, Wang J, Huang H H, et al. Potential assessment of carbon sink capacity by marine bivalves and seaweeds in Guangdong Province[J]. South China Fisheries Science, 2012, 8(1): 30–35.]
- [55] 马欢, 秦传新, 陈丕茂, 等. 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值评估[J]. 南方水产科学, 2019, 15(1): 10–19. [Ma H, Qin C X, Chen P M, et al. Valuation of ecosystem service of marine ranching in Zhelin Bay[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(1): 10–19.]
- [56] 江睿, 吴云超, 陈丕茂. 珠江口淇澳岛红树林湿地沉积物碳、氮分布研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(1): 1–9. [Jiang R, Wu Y C, Chen P M. Study on the distribution of sediment carbon and nitrogen in mangrove wetland in Qi'ao Island, Pearl River Estuary [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(1): 1–9.]
- [57] 赵鹏, 胡学东. 国际蓝碳合作发展与中国的选择[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 613–619. [Zhao P, Hu X D. International blue carbon cooperation development and China's choice[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 613–619.]

Research progress and prospect of marine carbon sink

CHEN Xiaolong¹, DI Qianbin^{1,2}, HOU Zhiwen², LIANG Chenlu¹

(1. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Marine Economies and Sustainable

Development Research Center, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The ocean has great potential as a carbon sink. Under the background of global climate change, marine carbon sink is an effective way to build ecological civilization and achieve carbon neutrality in the new era, and has received extensive attention from academia. As an efficient long-term carbon sink, the carbon sink mechanism, carbon sink effect, carbon sink technology, carbon sink accounting, and carbon sink trading market construction of the marine systems are becoming new topics that need to be explored in various disciplines. Based on the analysis of the origin of research and conceptual connotation of marine carbon sink and by examining carbon sinks and carbon sources, this study combined the relevant research literature of marine carbon sink in the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and the Web of Science (WOS) core databases, and used bibliometric tools to quantitatively compare and analyze the main characteristics, such as the number of publications, journals, authors, and institutions, of marine carbon sink research in China and internationally. Through keyword clustering and emergence and co-occurrence knowledge maps, the research hotspots, frontier fields at different stages, and evolution trends of themes were explored. The results show that the number of publications on marine carbon sink research in China and internationally has shown a fluctuating growth trend. Liu Jihua and Christian J. Sanders are the most influential authors in this field. Foreign countries have carried out extensive cooperation in this field, and Chinese researchers have also formed small-scale academic research teams. Research institutions are mainly universities and research institutes, focusing on coastal areas; the research directions are gradually diversified and the hotspots are clear. The key research directions of marine carbon sinks are examined, and the key contents that need to be paid attention to in future research are discussed: multidisciplinary studies should guide the research to promote the unified carbon sink market research of land and seas; studies should be based on the carbon sinks of coastal wetland and mariculture environment to realize new breakthroughs of marine carbon sink research; to build a marine carbon sink protection management system with a comprehensive ecological compensation mechanism as the guide; to explore marine carbon sink application models based on research on theories and technological innovations related to marine carbon sinks; and to explore blue carbon cooperation mechanisms in countries along the Maritime Silk Road with a focus on marine carbon sink cooperation research. This study examined the status of research of marine carbon sinks in China and internationally to promote the further scientific development of research in this field.

Key words: dual- carbon targets; marine carbon sink; keyword analysis; research prospect; CiteSpace; knowledge map