

基于文献计量的滨海湿地碳收支研究进展分析

廖丽蓉^{1,2}, 武明月^{1,2}, 戴子熠^{1,2}, 梁嘉慧^{1,2}, 左平^{1,2,3}

(1.南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2.南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 3.自然资源部滨海盐沼湿地生态与资源重点实验室, 江苏 南京 210001)

摘要: 中国在第七十五届联合国大会上承诺, 争取在 2060 年实现碳中和。蓝碳潜力巨大, 能助力实现碳中和。滨海湿地碳汇占全球海洋碳汇的 50%, 是蓝碳的重要组成部分, 因此, 碳中和目标下的滨海湿地碳收支研究尤其值得关注。本文基于文献计量方法, 在 Web of Science 核心合集数据库获取 1979—2020 年滨海湿地碳收支领域的相关文献, 结合 VOSviewer 可视化软件定量分析了该领域研究进展。结果表明: (1) 1979—2020 年滨海湿地碳收支领域发文数量与被引频次均呈上升趋势, 尤以 2011 年后增加最多; (2) 涉及的学科主要有环境科学、海洋淡水生物学、生态学等, 主要发文期刊有《Estuarine Coastal and Shelf Science》《Marine Ecology Progress Series》《Science of the Total Environment》等; (3) 开展研究的国家以亚洲、南北美洲和欧洲国家居多, 其中美国发文量居世界首位; (4) 研究热点包括温室气体排放、气候变化与碳库、碳循环过程等。随着我国生态文明建设加快, 海洋碳汇已被纳入国家战略, 其中气候变化和碳中和背景下滨海湿地蓝碳的增汇机制将是未来研究的热点。本文基于 1979—2020 年的文献分析, 建议加强滨海湿地蓝碳的通量及影响因素、蓝碳估算以及应对气候变化的固碳增汇技术方面的研究与探索。

关键词: 文献计量; 气候变化; 碳中和; 蓝碳; 滨海湿地; 碳收支

中图分类号: X142; Q14 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2022)01-0032-08

Research analysis of carbon budgets in coastal wetlands based on bibliometrics

LIAO Li-rong^{1,2}, WU Ming-yue^{1,2}, DAI Zi-yi^{1,2}, LIANG Jia-hui^{1,2}, ZUO Ping^{1,2,3}

(1.School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2.Key Laboratory for Coast and Island Development of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3.Key Laboratory of Coastal Salt Marsh Ecosystems and Resources, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210001)

Abstract: China promised to achieve carbon neutralization by 2060 at the 75th UN General Assembly. Blue carbon has great potential which can implement carbon neutralization. Blue carbon of coastal wetlands accounts for 50% of the global marine carbon sink, which is an important part of blue carbon. Carbon budget in coastal wetlands under carbon neutralization target is attracting more attention in many fields. This paper used bibliometric analysis based on relevant papers focusing on carbon budget of coastal wetlands during 1979—2020 from Web of Science core database. The paper analyzed the research progress in this field quantitatively by VOSviewer visualization software. Results showed that: ① The numbers of published papers and citations in the field of carbon budget of coastal wetlands kept rising during 1979—2020, especially with a fast growth since 2011; ② The main research fields were environmental science, marine freshwater biology and

收稿日期: 2021-01-21, 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506506, 2017YFF0206905)

作者简介: 廖丽蓉(1999—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向为滨海湿地生态学与生物地球化学, E-mail: liaolirong0016@163.com

通讯作者: 左平, 副教授, E-mail: zuoping@nju.edu.cn

ecology, and major journals included Estuarine Coastal and Shelf Science, Marine Ecology Progress Series and Science of the Total Environment; ③ The publications were mainly contributed by countries from Asia, America and Europe, and the United States ranked first in the world; ④ Hot topics covered greenhouse gas emissions, climate change and carbon pools, carbon cycle processes and so on. As China's ecological civilization accelerates, marine carbon sinks have been incorporated into national strategies, in which the mechanism of blue carbon sequestration in coastal wetlands with climate change will attract more attention. Based on paper analysis during 1979—2020, it suggested that we should strengthen the study on blue carbon flux and influencing factors, coastal wetlands blue carbon estimation, the related carbon sequestration and sequestration technology to deal with climate change in the future.

Key words: bibliometrics; climate change; carbon neutralization; blue carbon; coastal wetlands; carbon budget

滨海湿地介于陆地与近海之间,主要是指海陆交互作用下被水体浸淹的沿海低地、潮间带滩涂以及低潮时水深不超过 6 m 的浅海水域^[1-3]。蓝碳又称海洋碳汇,是利用海洋活动及海洋生物吸收大气中的 CO₂,并将其固定在海洋中的过程、活动和机制^[4]。滨海湿地是海岸带蓝碳的主要分布地,储存着红树林、滨海盐沼、海草床等生境捕获的生物碳和沉积物碳。滨海湿地具有高效的固碳能力^[5],是蓝碳的研究重点与热点,在减缓全球变暖中发挥着重要作用。蓝碳作为一种负排放技术,可以为碳中和愿景下能源系统零排放增加灵活性^[6]。

文献计量法是一种基于统计学的文献处理方法,可以同时大量文献进行分析,具有客观、易于比较等特点^[7]。国内许多学者用文献计量法总结了各自领域的研究进展,较为直观地统计了出版物的数量、作者的相关信息等,进而对研究热点进行了追踪。例如,陆双龙等借助 CiteSpace 软件,用文献计量方法梳理了我国入海河口营养盐的研究热点与发展态势^[8];刘爱原等收集了 1981—2015 年与全球滨海湿地研究有关的论文,重点剖析了中国滨海湿地研究的发展趋势、研究热点和影响力等^[9];田亚平等以中国知网期刊论文和学位论文为数据源,说明了 1989—2011 年中国生态脆弱性的研究趋势与分阶段发展特征^[10];张玉新等运用文献计量的方法阐述了近 50 年国际海岸线变化的科学问题和研究趋势^[11];陆红飞等基于文献计量法认识了 2000—2019 年黄河流域灌溉和排水文章的发文规律^[12]。

学者们亦从不同角度对滨海湿地碳收支的研究进展做了总结。曹磊等从观测方法、碳循

环过程与特点、碳库组成与影响因素、气态碳的输入与输出、潮汐对碳收支的影响等方面分析了中国滨海盐沼湿地的碳收支研究^[13];唐剑武等总结了海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态修复中的应用^[14];张莉等归纳了红树林湿地植被碳储量、土壤碳储量、碳汇的研究方法^[15];Moraes 从区域海洋管理的角度总结了蓝碳监测的关键方法、治理系统、政策手段以及保护和恢复的投资途径^[16];Vanderklift 从概念、分布、相关政策、碳交易市场介绍了印度洋周边国家的蓝碳^[17]。这些研究大多从定性的角度分析了滨海湿地碳收支的研究内容及研究方法。目前,运用文献计量法定量分析湿地碳收支的研究较少。

本文基于上述研究,从文献计量的角度梳理总结了滨海湿地碳收支的文献,分析了发文量与被引频次、主要学科与期刊、研究机构、主要研究国家与国际合作和研究热点,以期为滨海湿地碳循环与碳收支研究提供参考。本研究亦可从文献热点追踪的角度,为碳中和愿景提供决策支持。

1 材料与数据

1.1 数据来源

本文搜集的文献来自 Web of Science 核心合集数据库。在高级检索中,基于主题检索 TS = (coastal wetland* or mangrove* or salt marsh* or seagrass*) AND TS = (blue carbon* or greenhouse gas* or carbon budget* or carbon source* or carbon sink* or emission*),检索 1979—2020 年发表的英文文献(检索时间为 2021 年 4 月 20 日),共获得

3752 篇, 将其全记录导出, 作为本文的研究数据。

1.2 数据处理

以搜集的文献为基础, 利用 Origin2018 软件绘制文章发文量与被引频次的图表。根据 Web of Science 自带的分类体系, 统计主要发文期刊、学科、主要研究机构、开展研究的国家。将保存的全记录文本文件导入 VOSviewer 软件中, 对国家间的合作频次、主要关键词进行共现分析。在此基础上, 综述滨海湿地碳收支领域的研究热点与研究趋势。

2 文献计量分析

2.1 发文量与被引频次分析

1979—2020 年, 滨海湿地碳收支研究领域的年发文数量和年被引频次均呈上升趋势。其中, 2011 年为发文量与被引频次的转折点, 2011 年之前发文量与被引频次增加平缓, 2011 年之后快速增长。这与国际社会重视蓝碳、发展海洋经济有一定相关性^[18-20]。

根据发文量与被引频次的时间变化特点, 将滨海湿地碳收支的研究划分为四个阶段(图 1)。1979—1990 年是萌芽阶段, 发文数量少于 10 篇, 年均发文 1 篇, 被引频次为 2~30 次, 年均被引 12 次, 发文量与被引频次增加不明显。1991—2000 年是孕育阶段, 发文量由 17 篇增加到 39 篇, 年均发文 32 篇, 被引频次由 28 次增加到 788 次, 年均被引 338 次, 发文量与被引频次开始增加, 增加速度较慢。2001—2011 年是初步发展阶段, 发文量由 39 篇增加到 113 篇, 年均发文 83 篇, 被引频次由 851 次增加到 4361 次, 年均被

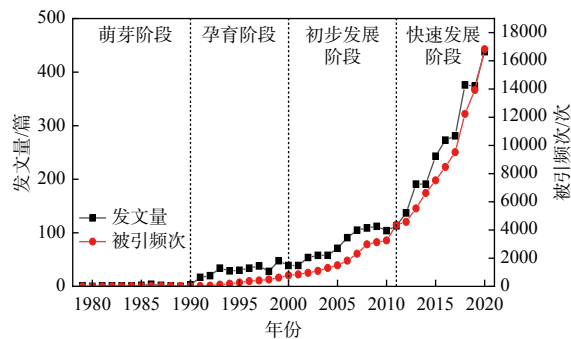


图 1 1979—2020 年发文量与被引频次
Fig. 1 The numbers of published papers and citations during 1979—2020

引 2147 次, 滨海湿地碳收支研究开始初步发展, 发文量与被引频次增加速度较快。2012—2020 年是快速发展阶段, 此阶段发文量与被引频次呈爆发式增长, 发文量由 137 篇增加到 438 篇, 年均发文 278 篇, 被引频次由 4575 次增加到 16826 次, 年均被引 9472 次。

2.2 学科领域与发文期刊分析

据 Web of Science 的学科分类统计, 滨海湿地碳收支研究涉及的领域有 67 个。发文量排名前十的学科依次为环境科学、海洋淡水生物学、生态学、海洋学、与其他学科有关的地球科学、气象大气科学、水资源学、湖沼学、综合科学、植物学。其中, 环境科学、海洋淡水生物学、生态学占绝对优势, 分别发文 1461 篇、1079 篇、789 篇, 占发文总数的 38.94%、28.76%、21.03%。出版滨海湿地碳收支研究的期刊共 643 个。发文量大于 50 篇的期刊有 10 个(表 1), 占总发文量的 26.81%。《Estuarine Coastal and Shelf Science》《Marine Ecology Progress Series》《Science of the Total Environment》的发文量最高, 分别为 209 篇、174 篇、105 篇, 占发文量排名前十期刊发文总量的 48.51%。《Estuarine Coastal and Shelf Science》于 1981 年在英国创刊, 是一个国际性的多学科研究河口海岸与陆架区域的专业期刊, 发表蓝碳研究内容较多;《Marine Ecology Progress Series》于 1979 年在德国发行, 是一个国际领先的全方面研究海洋生态学的综合期刊;《Science of the

表 1 发文量排名前十的期刊信息统计
Tab.1 Journal statistics on top ten papers published

序号	期刊	发文量/篇	占比/(%)	近3年影响因子
1	Estuarine Coastal and Shelf Science	209	5.57	2.33
2	Marine Ecology Progress Series	174	4.64	2.33
3	Science of the Total Environment	105	2.80	6.55
4	Estuaries and Coasts	96	2.56	2.32
5	Limnology and Oceanography	95	2.53	3.78
6	Marine Pollution Bulletin	87	2.32	4.05
7	Wetlands	65	1.73	1.78
8	Journal of Geophysical Research-Biogeosciences	64	1.71	3.41
9	Biogeochemistry	57	1.52	4.16
10	PLoS One	54	1.44	2.74

Total Environment》期刊近年来在 Web of Science 中的影响因子在 6 以上,是一个国际性的多学科期刊。

2.3 发文国家、主要发文机构与国际合作分析

在滨海湿地碳收支领域发表文章的国家有 117 个。发文数量较高的国家主要集中在亚洲、南北美洲、欧洲、大洋洲。其中,美国发文 1373 篇,居世界首位;中国发文 579 篇,居第二位。根据发文量占比分布,可将全球国家分为五个梯队:① $\geq 10\%$ 的国家有美国(36.59%)、中国(15.43%)、澳大利亚(14.15%);② 居于 [5%, 10%) 的国家有西班牙(6.90%)、印度(6.77%)、德国(5.33%);③ 位于 [3%, 5%) 的国家有巴西(4.80%)、日本(4.69%)、法国(4.50%)、英国(4.03%)、加拿大(3.68%);④ 位于 [1%, 3%) 的国家有新西兰(2.80%) 等 16 个国家;⑤ $< 1\%$ 的国家最多,共 90 个。

滨海湿地碳收支研究领域的发文机构共有 2662 个,发文量排名前十的依次为佛罗里达州立大学系统、中国科学院、美国内政部、西班牙高等科学理事会、法国国家科学研究中心、美国地质调查局、加州大学系统、南十字星大学、路易斯安娜州立大学、北卡罗来纳大学。10 所机构中,美国有 6 所,中国、西班牙、法国、澳大利亚各有 1 所。

图 2 所示为国家间合作频次的可视化图谱,图中圆圈代表国家,圆圈的大小与发文量的多少

有关,圆圈间连线反映了国家间合作的强度。从图 2 可以看出,滨海湿地碳收支领域的国际合作大都集中在主要发文国家之间。美国基于强劲的科研实力,与 71 个国家建立了合作关系,国际合作频次 832 次,居世界首位。其次是英国与澳大利亚,分别与 53 个、52 个国家合作发文。中国有 40 个合作发文的国家,合作发文国家数居世界第九位,国际合作频次共 317 次。尽管中国的发文量居世界第二位,但合作国家数和合作频次与美国等发达国家还有较大差距,表明中国在滨海湿地碳收支领域的国际合作仍有待加强。

2.4 研究热点分析

关键词是对文章主旨的高度概括,分析高频关键词有助于了解滨海湿地碳收支领域的研究热点和研究方向。VOSviewer 对关键词的共现结果显示(图 3),1979—2020 年,滨海湿地碳收支领域的高频关键词依次为:价值、湿地、有机物、土壤、排放、年、通量、贡献、二氧化碳、季节、碳源等。对出现频率大于 50 的关键词(共 417 个)进行聚类分析,设置每类至少包括 25 个关键词。根据聚类结果,将滨海湿地碳收支领域的研究主题分为三个方向:① 温室气体排放研究(绿色部分),主要关键词有气体排放、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、测量、季节、土壤温度、大气通量等,涉及 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 三种温室气体排放通量^[21-24]、排放的时间变化特征及影响因素^[25-26],排放时间变化分析包括年变化^[27]、季节变化^[28-30]、昼夜变化^[31],影响因素分析主要集中于土壤理化性质;② 气候变化与碳库(蓝色部分),主要关键词有红树林、损失、气候变化、碳储量、海平面上升、管理战略等,该主题涉及气候变化背景下植被碳库、土壤碳库的变化^[32-33],关注滨海湿地碳储量对缓解气候变暖、海平面上升等问题所起的作用;③ 碳循环过程(红色部分),主要关键词为有机物、碳价值、食物网、消费者、氮源、颗粒有机碳等,涉及有机物分解、碳固定、食物网中的碳转移^[34]、海洋颗粒有机碳与无机碳的捕获^[35-36]等。这三大主题的关系不是相互独立的,而是存在密切的关联。滨海湿地生态系统碳循环过程包括碳输入、碳输出、碳固定。其中温室气体通量涉及碳的输入与输出,碳库涉及碳固定等。

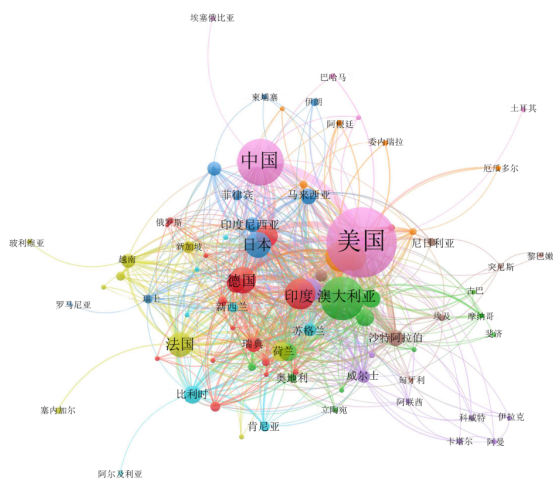


图 2 相关国家合作频次的可视化分析

Fig. 2 Visualization of national cooperative network

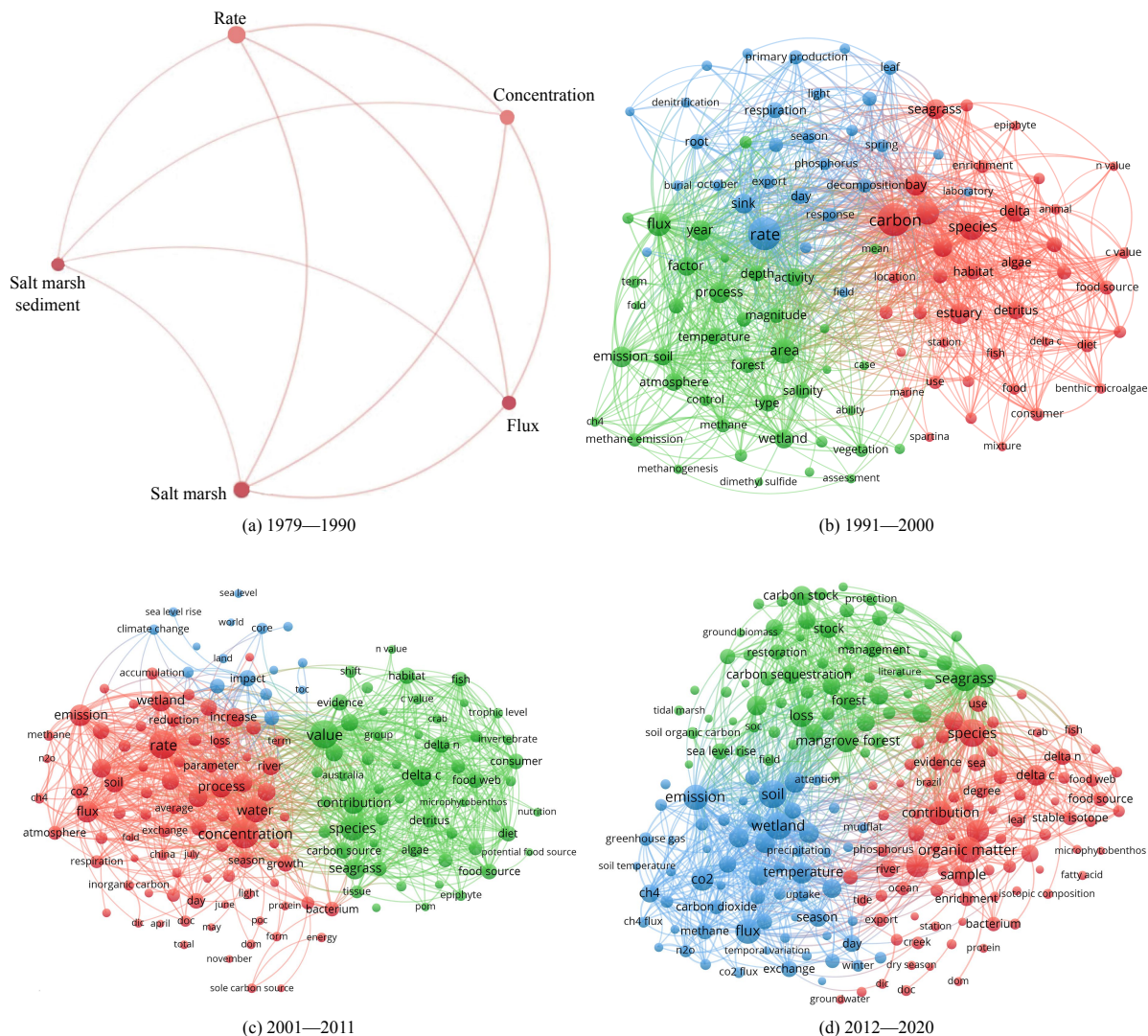


图 4 1979—2020 年各研究阶段主要关键词及共现关系

Fig. 4 Keywords and their co-occurrence in different development stages during 1979—2020

冰川消融加剧、海平面上升、极端气候事件频发,威胁着人类生存与未来社会可持续发展。滨海地区人口众多,产业发达,经济发展与环境保护之间的矛盾十分突出。减排和增汇是应对气候持续变暖的两条有效途径,其中增汇能在保证现有经济发展状态的同时实现碳中和的目标。增加滨海湿地碳汇是应对全球变暖,促进经济发展的重要保障之一。从 20 世纪起,碳封存、碳储量、碳固定等有关碳汇的关键词开始出现,且出现频次不断增加。2009 年,联合国环境规划署等国际组织发布的《蓝碳:健康海洋对碳的固定作用——快速反应评估》指出,海洋碳汇是当前人类应对全球变化所做努力中需要弥补的最大

缺口。海洋碳库是世界上最大的碳库,其容量相当于陆地碳库的 20 倍^[40],海洋碳汇对缓解气候变化有至关重要的作用^[41-42]。红树林、滨海盐沼、海草床具有较高的生产力和较低的物质分解速率,固碳潜力巨大,增加滨海湿地的碳汇能有效减缓气候变化,因此,有关其碳汇过程的研究逐渐成为重点和热点。

(2) 聚焦不同类型滨海湿地生态系统的碳排放通量及影响因素。滨海湿地是海洋碳汇的重要组成部分,其面积不到海洋面积的 0.2%,却占海洋有机碳埋藏总量的 50%,是重要的海岸带碳库。同时,滨海湿地也是碳源,系统中各类生物的呼吸作用会向大气排放碳。滨海湿地碳排放

通量研究扩展到不同类型的滨海湿地,如红树林、滨海盐沼、海草床。有关海草床的研究出现较早,但一直处于停滞状态,21世纪之后又重新受到重视。从频次统计来看,2001—2011年海草床一词的出现频次为48次,2012—2020年出现频次达427次。从各阶段关键词来看,CO₂、CH₄、N₂O三种温室气体的研究不断增多,影响温室气体排放的驱动因素逐渐成为研究焦点。其中,土壤理化性质与潮汐作用是影响碳排放通量的主要因素。

(3) 强调人类活动对滨海湿地碳库的影响。随着海岸带围垦、资源过度利用、环境污染等因素影响的加剧,海岸带蓝碳生态系统正急剧退化^[43-45]。据关键词统计,自2001年以来,“湿地丧失”在2001—2011年、2012—2020年出现频次分别为85次、321次,出现频次显著增加。相关数据也说明了这一变化:全球1/3海草床已丧失,2000年以来每年消失速度超过7%^[46],全球25%的盐沼不复存在^[47]。人类活动对滨海湿地的影响越来越大,如何评估人类活动造成的影响、有效减少滩涂围垦、恢复滨海湿地的碳汇功能成为重要议题,对编制蓝碳清单、实现可持续发展具有重要的意义。2011年,第一届国际蓝碳政策工作组会议制定了多项政策,以保护滨海湿地,减缓生态系统退化。2013年,《近海海洋的碳循环变化》一文指出,人类对近海活动的压力将对未来滨海碳汇格局产生重要影响。同年,中国科学院院士焦念志发起并组建了“全国海洋碳汇联盟”,建设“产学研政用”创新机制,联合全国优势力量探求海洋碳汇过程机制、研发减排增汇对策。随着世界范围内开展的蓝碳活动增多,人类活动下滨海湿地的蓝碳变化越来越受关注。

围绕滨海湿地碳收支领域的研究热点和趋势,结合我国温室气体的减排目标,未来滨海湿地碳收支研究重点应包括:①滨海湿地碳通量及影响因素,即关注不同类型湿地的碳通量,综合分析自然环境与人类活动对滨海湿地碳收支的影响;②滨海湿地蓝碳估算,加强实地观测与模型模拟等手段的综合运用,建立海岸带蓝碳估算体系,编制蓝碳收支清单;③应对气候变化的

滨海湿地固碳增汇和碳中和技术。滨海湿地碳汇作为蓝碳的重要组成部分,其碳埋藏速率要远高于陆地森林。未来需加强红树林、盐沼、海草床等滨海湿地生态系统的固碳增汇技术研究,通过基于自然的解决方案增加滨海湿地的碳汇功能,构建生物量高、繁殖速度快、固碳能力强的高碳汇群落。

3 结论

本文利用VOSviewer软件定量分析了1979—2020年滨海湿地碳收支领域的英文文献,结论如下:①1979年以来,滨海湿地碳收支研究不断发展,发文量与被引频次都呈增加趋势;②主要学科领域涉及环境科学、海洋淡水生物学、生态学等,发文量较高的三个期刊是《Estuarine Coastal and Shelf Science》《Marine Ecology Progress Series》《Science of the Total Environment》;③发表相关论文较多的国家和机构多在亚洲、南北美洲和欧洲,其中美国发文量居世界首位;④温室气体排放、气候变化与碳库、碳循环等是未来相当长时间里的研究热点。

参考文献:

- [1] 曹磊,宋金明,李学刚,等.滨海盐沼湿地有机碳的沉积与埋藏研究进展[J].应用生态学报,2013,24(7):2040-2048.
- [2] 牟晓杰,刘兴土,阎百兴,等.中国滨海湿地分类系统[J].湿地科学,2015,13(1):19-26.
- [3] 许鑫王豪,赵一飞,邹欣庆,等.中国滨海湿地CH₄通量研究进展[J].自然资源学报,2015,30(9):1594-1605.
- [4] NELLEMAN C, CORCORAN E, DUARTE C M, et al. Blue carbon: a rapid response assessment[R]. GRID-Arendal: United Nations Environment Programme, 2009.
- [5] 周晨昊,毛覃愉,徐晓,等.中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析[J].中国科学:生命科学,2016,46(4):475-486.
- [6] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系[J].中国环境管理,2020,12(6):58-64.
- [7] 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(6):64-66.
- [8] 陆双龙,张建兵,蔡芸霜,等.基于文献计量学的我国入海河口营养盐研究状况分析[J].海洋环境科学,2021,40(2):309-316.

- [9] 刘爱原, 康 斌, 郭玉清. 中国滨海湿地研究态势: 基于文献计量分析视角[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [10] 田亚平, 常 昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1515-1525.
- [11] 张玉新, 侯西勇. 国际海岸线变化研究进展综述——基于文献计量学方法[J]. *应用海洋学报*, 2020, 39(2): 289-301.
- [12] 陆红飞, 齐学斌, 乔冬梅, 等. 基于文献计量的黄河流域农田灌排研究现状[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10): 25-34.
- [13] 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5141-5152.
- [14] 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.
- [15] 张 莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1153-1159.
- [16] MORAES O. Blue carbon in area-based coastal and marine management schemes - a review[J]. *Journal of the Indian Ocean Region*, 2019, 15(2): 193-212.
- [17] VANDERKLIFT M A, GORMAN D, STEVEN A D L. Blue carbon in the Indian Ocean: a review and research agenda[J]. *Journal of the Indian Ocean Region*, 2019, 15(2): 129-138.
- [18] 张 瑶, 赵美训, 崔 球, 等. 近海生态系统碳汇过程、调控机制及增汇模式[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(4): 438-449.
- [19] ZHAO R, HYNES S, HE G S. Defining and quantifying China's ocean economy[J]. *Marine Policy*, 2014, 43: 164-173.
- [20] LUBCHENCO J, HAUGAN P M, PANGESTU M E. Five priorities for a sustainable ocean economy[J]. *Nature*, 2020, 588(7836): 30-32.
- [21] SARATHY P P, BHARATHIDASAN V, GNANAMOORTHY P, et al. Influence of physico-chemical parameters and pCO₂ concentration on mangroves-associated polychaetes at Pichavaram, southeast coast of India[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(12): 1550.
- [22] MINICK K J, MITRA B, NOORMETS A, et al. Saltwater reduces potential CO₂ and CH₄ production in peat soils from a coastal freshwater forested wetland[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(23): 4671-4686.
- [23] 康文星, 赵仲辉, 田大伦, 等. 广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气二氧化碳交换[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2605-2610.
- [24] 高 春, 胡杰龙, 颜 葵, 等. 海南东寨港红树林土壤二氧化碳和甲烷排放通量研究[J]. *湿地科学*, 2017, 15(3): 351-357.
- [25] 全 川, 柳铮铮, 曾从盛, 等. 模拟SO₄²⁻沉降对河口潮汐湿地甲烷排放通量的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(3): 302-308.
- [26] BARTLETT K B, CRILL P M, SEBACHER D I, et al. Methane flux from the central Amazonian Floodplain[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1988, 93(D2): 1571-1582.
- [27] MARTÍNEZ-EIXARCH M, ALCARAZ C, VIÑAS M, et al. Neglecting the fallow season can significantly underestimate annual methane emissions in Mediterranean rice fields[J]. *PLoS One*, 2018, 13(5): e0198081.
- [28] CICERONE R J, SHETTER J D, DELWICHE C C. Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C15): 11022-11024.
- [29] DAI S P, JU W M, ZHANG Y G, et al. Variations and drivers of methane fluxes from a rice-wheat rotation agroecosystem in eastern China at seasonal and diurnal scales[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 973-990.
- [30] 许鑫王豪, 邹欣庆, 吴丹丹, 等. 盐城滨海湿地春季温室气体通量及影响因素[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(1): 5-11.
- [31] 叶 勇, 卢昌义, 林 鹏, 等. 河口红树林湿地CH₄通量的日变化研究[J]. *海洋学报*, 2000, 22(3): 103-109.
- [32] 彭聪姣, 钱家炜, 郭旭东, 等. 深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2059-2065.
- [33] 陈 卉. 中国两种亚热带红树林生态系统的碳固定、掉落物分解及其同化过程[D]. 厦门: 厦门大学, 2013: 1-139.
- [34] ZHANG X D, CUI L J, NIE M, et al. Macrophytes and crabs affect nitrogen transformations in salt marshes of the Yangtze River Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 225: 106242.
- [35] ARRIOLA J M, WANG X C, CABLE J E. Effects of sediment delivery changes on carbon burial within the modern and abandoned delta lobes of the Yellow River, China[J]. *Estuaries and Coasts*, 2019, 42(6): 1491-1508.
- [36] MUKHERJEE R, MUDULI P R, BARIK S K, et al. Sources and transformations of organic matter in sediments of Asia's largest brackish water lagoon (Chilika, India) and nearby mangrove ecosystem[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(11): 332.
- [37] LEE S Y. Carbon dynamics of Deep Bay, eastern Pearl River estuary, China. II: trophic relationship based on carbon- and nitrogen-stable isotopes[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 205: 1-10.