

钱玺亦,毛思湛,蒋雨洁,等.基于文献计量学的中国湿地碳循环研究进展[J].环境工程技术学报,2023,13(2):742-752.

QIAN X Y, MAO S C, JIANG Y J, et al. Research progress of wetland carbon cycle in China based on bibliometrics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 742-752.

基于文献计量学的中国湿地碳循环研究进展

钱玺亦¹, 毛思湛^{2,3}, 蒋雨洁¹, 叶成辉¹, 卢彬富¹, 单楠^{4*}, 严岩^{5*}

1.南通大学地理科学学院

2.中国科学院东北地理与农业生态研究所

3.中国科学院大学

4.生态环境部南京环境科学研究所

5.江苏省环境科学研究院

摘要 为探明中国湿地碳循环的研究现状及发展趋势,基于 Web of Science(WoS)和 CNKI 数据库中 2000—2020 年发表的中国湿地碳循环研究的相关文献信息,运用文献计量学方法对年度发文量、引用频次、作者、国家、机构、期刊、关键词等进行分析,解析了国内外该领域的研究进展并对未来发展提出了建议。结果表明:2000—2020 年共发表有关中国湿地碳循环领域文献 2 998 篇, WoS 和 CNKI 数据库分别为 1 120 和 1 878 篇, 年发文量呈现波动上升的趋势; WoS 数据库中的文献涉及全球 51 个国家, 其中中国发文量为 1 075 篇, 占总发文量的 95.98%; “湿地” “土壤有机碳” “甲烷释放” 是中介中心性较高的关键词, 是湿地碳循环研究的核心内容; *Ecological Engineering* 和《生态学报》分别是该领域外文和中文文献的主要期刊载体; 温室气体交换机制和通量、微生物对碳循环的影响、湿地土壤的碳生态化学计量特征、湿地碳循环与全球变化等是近 5 年来中国湿地碳循环研究的热点问题。计量分析结果有助于全面了解中国湿地碳循环研究现状及进展, 为国内外的湿地碳研究提供参考。

关键词 湿地; 碳循环; 文献计量; 可视化; 研究趋势

中图分类号: X142 文章编号: 1674-991X(2023)02-0742-11 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220029

Research progress of wetland carbon cycle in China based on bibliometrics

QIAN Xiyi¹, MAO Sichen^{2,3}, JIANG Yujie¹, YE Chenghui¹, LU Binfu¹, SHAN Nan^{4*}, YAN Yan^{5*}

1.School of Geographic Science, Nantong University

2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences

3.University of Chinese Academy of Sciences

4.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment

5.Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science

Abstract In order to explore the research status and development trend of the carbon cycle of wetlands in China, based on the relevant published literature in Web of Science (WoS) and CNKI databases from 2000 to 2020, the annual number of publications, citation frequency, authors, countries, institutions, journals, and keywords, etc. were analyzed in the past 20 years at home and abroad, using the bibliometrics method. Some suggestions for the future development were also put forward. The results showed that a total of 2 998 pieces of literature related to the carbon cycle of wetlands in China were published from 2000 to 2020, with the number of literature published in WoS and CNKI databases being 1 120 and 1 878, respectively. The annual number of literature published showed a trend of fluctuation and increase. The literature in WoS database covered 51 countries around the world, of which 1 075 were published in China, accounting for 95.98% of the total. Wetland, soil organic carbon and methane release were the key words with high mediating centrality, which were the core content of wetland carbon cycle research. *Ecological Engineering* and *Acta Ecologica Sinica* were the main journal carriers of foreign and Chinese literature in this field, respectively. The mechanism and flux of greenhouse gas exchange, the effect of microorganisms on carbon cycle,

收稿日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42071050); 国家级大学生创新训练项目 (202110304043Z)

作者简介: 钱玺亦 (2001—), 女, 主要从事环境科学研究, qianxiyi0104@163.com

* 责任作者: 1. 单楠 (1986—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事湿地遥感, dannan333@163.com

2. 严岩 (1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事生态学研究, jshayanyan@163.com

the ecological stoichiometry of carbon in wetland soil, and the carbon cycle and global change of wetland carbon cycle had been the hot topics in wetland carbon cycle research in China in the recent five years. The results of econometric analysis were helpful in comprehensively understanding the research status and development progress of wetland carbon cycle research in China, and providing references for wetland carbon research at home and abroad.

Key words wetland; the carbon cycle; bibliometrics; visualization; research trends

湿地是陆地和水域的过渡区,是在陆地生态系统和水生生态系统相互作用下形成的表面常年覆水的自然综合体,具有独特的水文特征^[1-2]。湿地是生物要素重要的“源”“汇”和“转化器”^[3],具有涵养水源、蓄洪防旱、调节气候、保护生物多样性等功能^[4-5]。全球湿地面积占陆地面积的 5%~8%,而碳储量达到 5 000 亿~7 500 亿 t,在整体陆地生态系统土壤碳储量中占比为 20%~30%^[6-8]。我国湿地面积约为全球湿地面积的 10%,土壤碳储存总量达 168 亿 t,约占全球湿地碳储量的 2.2%^[9],按照植被和地域差异可划分为东北湿地区、滨海湿地区、长江中下游湿地区、黄河中下游湿地区、东南华南湿地区、云贵高原湿地区、西北干旱湿地区以及青藏高原寒湿地区 8 个湿地保护类型区域^[10]。湿地生态系统对全球气候变化响应敏感^[11],由于全球变化和人类活动的干扰,湿地明显退化、面积锐减,生物地球化学循环发生相应变化,尤其湿地被开垦后,植物残体及沉积泥炭的分解速率提高,碳的释放量增加,影响了湿地生态系统的碳循环模式和机理^[12]。此外有研究表明,湿地生态系统排放至大气中的甲烷占全球甲烷排放量的 15%~22%^[13],甲烷对于温室效应的贡献率达 22%^[14-15],故湿地生态系统碳循环的改变是导致全球大气温室气体含量升高的一个重要因素^[11]。湿地碳循环的研究主要包括碳源、碳汇、碳储量、分布特征、碳的迁移转化模式和影响因素、碳释放通量和碳平衡等。湿地碳循环过程中产生的 CO₂、CH₄ 等作为温室气体的效应潜力,对全球碳循环有重要的作用,是揭示湿地功能机理的关键^[3,16]。因此,湿地碳循环研究对于深入探究湿地在全球变化中的作用至关重要。

文献计量学是一种基于统计学和数学等的定量分析方法^[17],通过分析文献的分布结构、数量关系和变化规律等特征,客观地反映某学科或领域在不同时期内的整体布局、研究热点,并预测其未来发展趋势,具有全面、客观和定量的优势,目前已广泛应用于学术水平评价、研究趋势分析等方面^[18-19]。为分析国内湿地碳循环的研究态势,笔者运用文献计量分析方法对 2000—2020 年 Web of Science(WoS)和

中国知网(CNKI)数据库中中国湿地碳循环相关文献进行较为全面的分析,借助文献的各种数量特征和可视化解析,揭示国内该研究领域的发展历程、研究趋势和热点等,以期为中国湿地碳循环的深入研究提供参考信息^[20-21]。

1 数据与方法

1.1 数据来源

外文文献数据来源于科睿唯安 (Clarivate Analytics)WoS 核心合集中的 SCI-E(Science Citation Index Expanded)数据库,中文文献数据来源于中国知网(CNKI)提供的中国学术期刊数据库。采用主题检索 2000—2020 年与中国湿地碳研究相关的文献, WoS 数据库使用的主题检索词包括“China”“wetland”“carbon”;CNKI 数据库使用的主题检索词包括“湿地”“碳”“甲烷”。为准确获得与中国湿地碳研究相关的文献,查阅 WoS 和 CNKI 数据库检索到的文献的标题、摘要和关键词,剔除不相符的文献。

1.2 分析方法

对发表年份、期刊、作者、作者所属机构、国家(地区)和关键词等文献题录信息进行筛选与提取。利用 WoS 和 CNKI 数据库的文献计量功能分析中国湿地碳循环研究领域发文量、主要作者、主要研究机构和主要期刊等指标。运用 CiteSpace 文献计量可视化软件分别挖掘分析数据库检索的文献,统计文献题录信息中各类别出现的频次,从而获得文献的分布结构、数量关系和变化规律等信息。通过 CiteSpace 可视化软件,分析文献的作者合作和机构合作,从而识别中国湿地碳循环研究领域的主要研究力量。

1.2.1 作者、机构合作图谱

将 WoS 检索的文献数据保存为文本格式,再导入 CiteSpace 中进行分析;CNKI 检索的文献数据保存为 Refworks 格式,通过 CiteSpace 将数据转换处理。在 CiteSpace 中绘制作者间、机构间的合作图谱,共现图中每个节点同心圆代表一个作者(机构),同心圆的大小反映该作者(机构)的发文量,节点同

心圆之间连线的粗细表示不同作者(机构)之间合作关系的强弱。节点同心圆越大代表发文量越多,连线越多则代表此作者(机构)与其他作者(机构)的合作越广泛,连线越粗则代表合作越紧密^[22]。中介中心性大于 0.1 的节点为网络中的关键节点,其所代表的作者或机构即为学科研究的核心作者、机构^[23]。

1.2.2 关键词共现时区视图

利用文献关键词的共现频率在 CiteSpace 中绘制关键词共现网络图的时区视图形式(Timezone),将同一年首次出现的关键词集合在相同的时区内,侧重从时间维度呈现热点关键词的演进趋势,图中节点的大小表示词频率拍,节点间的连线表示热点关键词在时间上的演进关系^[24]。共现图中一个节点代表一个关键词,节点所在的年份为关键词首次出现的年份,节点同心圆的大小代表关键词的出现频次,越大说明该关键词出现的次数越多,节点的连线代表关键词之间的联系。

2 结果与分析

2.1 年发文量与发文国家

2000—2020 年共发表有关中国湿地碳循环领域文献 2 998 篇,其中 WoS 和 CNKI 数据库分别收录相关文献 1 120 和 1 878 篇。结果显示,中国湿地碳循环领域的文献数量年际变化整体呈现出上升的趋势(图 1)。2000—2009 年发文量增长速度较为缓慢,为慢速发展期;2010—2015 年发文量增长速度较快,为加速发展期;2017 年文献数量涨幅明显,而后稳步上升。近 5 年来共有 1 652 篇相关文献发表,占总发文量的 55.10%,年均发文量 330 篇左右。WoS 数据库 2000—2008 年发文量较小,年均发文量仅 7 篇,表明国际上对中国湿地碳循环的研究处于初期发展阶段,2009 年后发文量逐渐增多,处于稳步增长阶段。CNKI 数据库 2000—2015 年发文量呈现出不断上升的趋势,2016—2020 年发文量波动较为剧烈。

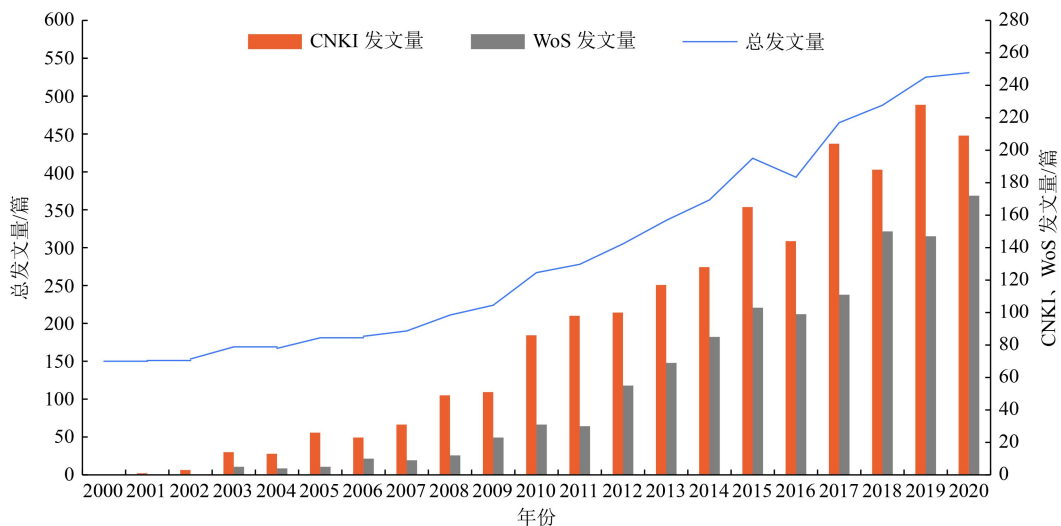


图 1 2000—2020 年中国湿地碳循环研究领域年发文量变化趋势

Fig.1 Trend chart of annual publications of wetland carbon cycle research in China from 2000 to 2020

通过 WoS 数据库检索发现,共有 51 个国家发表了有关中国湿地碳循环相关的文献,其中中国发文量为 1 075 篇,占总发文量的 95.98%(表 1),远超其他国家。其他发表文献数量超过 10 篇的国家依次为美国、加拿大、德国、澳大利亚、英国、丹麦、西班牙、荷兰和日本。仅发表 1 篇相关论文的有比利时、马来西亚、墨西哥等 13 个国家,占发文国家数的 25.49%。

2.2 作者及其合作关系

2.2.1 WoS 文献作者及其合作关系

通过对中国湿地碳循环研究领域作者发文量的统计分析发现,该领域共涉及 587 位作者。WoS 数

表 1 WoS 数据库发文量排名前 10 的国家统计

Table 1 Top 10 countries in the number of paper published in WoS database

排名	国家	发文量/篇	占比/%
1	中国	1 075	95.98
2	美国	181	16.16
3	加拿大	37	3.30
4	德国	35	3.13
5	澳大利亚	26	2.32
6	英国	25	2.23
7	丹麦	16	1.43
8	西班牙	16	1.43
9	荷兰	13	1.16
10	日本	12	1.07

数据库发文量排名前 10 的作者发文情况见表 2, 其中包括中国科学院东北地理与农业生态研究所的 Song C C 团队、北京师范大学的 Bai J H 团队、福建师范大学的 Tong C 团队等, 位于第一的团队发文量约为第 10 位的 5 倍。

表 2 WoS 数据库发文量排名前 10 的作者发文情况

Table 2 List of the top 10 most productive authors of publications in WoS database

排名	作者	发文量/篇	占比/%	排名	作者	发文量/篇	占比/%
1	Song C C	63	5.63	6	Jiang M	19	1.70
2	Bai J H	33	2.95	7	Wang G P	16	1.43
3	Tong C	29	2.59	8	An S Q	16	1.43
4	Lü X G	27	2.41	9	Zhao Q Q	14	1.25
5	Cui B S	21	1.88	10	Cheng X L	12	1.07

通过对作者之间合作关系分析, 可以看出各研究团队合作的密切程度。作者合作共现图谱(图 2)共有 587 个节点, 1 286 条连线。发文作者中, 以 Song C C 团队、Bai J H 团队、Tong C 团队、Lü X G 团队、An S Q 团队为中心建立了多个合作网络, 其中 Song C C 团队的合作作者数量最多, 且合作密切。

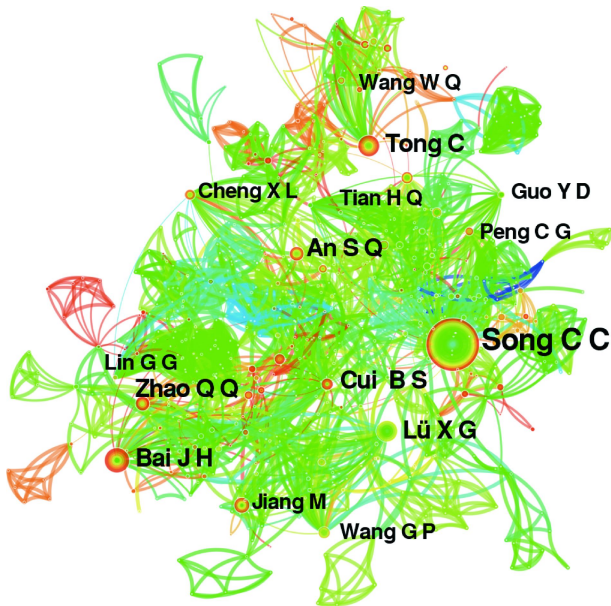


图 2 WoS 数据库作者合作共现图谱

Fig.2 Author co-occurrence map in the WoS database

2.2.2 CNKI 文献作者及其合作关系

CNKI 数据库中的 1 878 篇文献共涉及 662 位作者, 发文量最多的作者是中国科学院东北地理与农业生态研究所的宋长春团队(表 3), 发文量为 43 篇, 其发文量在 WoS 数据库中排名也是第一; 其次是福建师范大学的曾从盛团队, 其发文量达 35 篇。发文量排名前 10 的作者中有 3 人来自中国

表 3 CNKI 数据库发文量排名前 10 的作者发文情况

Table 3 List of the top 10 most productive authors of publications in CNKI database

排名	作者	发文量/篇	占比/%	序号	作者	发文量/篇	占比/%
1	宋长春	43	2.29	6	刘景双	17	0.90
2	曾从盛	35	1.86	7	吕宪国	17	0.90
3	全川	33	1.76	8	孔范龙	16	0.85
4	王维奇	24	1.28	9	郝敏	16	0.85
5	赵光影	18	0.96	10	王洋	13	0.69

科学院东北地理与农业生态研究所, 有 3 人来自福建师范大学, 有 2 人来自青岛大学。

由 CNKI 数据库作者合作共现图谱(图 3)可知, 作者合作关系共有 1 102 条。以宋长春团队为核心的作者群包括全川、王维奇、于君宝团队等; 以曾从盛团队为核心的作者群包括张文菊、张金波、杨文燕团队等; 以赵光影团队为核心的作者群包括刘景双、王洋、臧淑英团队等。

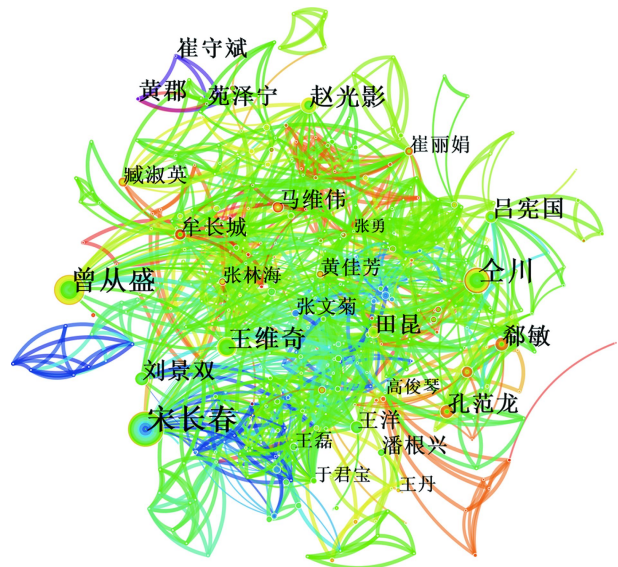


图 3 CNKI 数据库作者合作共现图谱

Fig.3 Author co-occurrence map in the CNKI database

2.3 研究机构及其合作关系

2.3.1 WoS 文献机构及其合作关系

WoS 数据库中 2000—2020 年共有 427 家研究机构发表了有关中国湿地碳循环的文献。其中, Chinese Acad Sci(中国科学院)发文量位居第一(表 4), 占总发文量的 44.55%, 其次是 Univ Chinese Acad Sci(中国科学院大学)和 Beijing Normal Univ(北京师范大学)。其他研究机构中, 338 家机构(占总机构数的 79.16%)发文量不足 3 篇, 230 家机构(占总机构数的 53.86%)仅发表了 1 篇文章。

通过对研究机构之间合作关系分析, 可以看出各研究团队合作的密切程度。机构合作共现图谱

表 4 WoS 数据库发文量排名前 10 的研究机构

Table 4 List of the top 10 most active institutions of publications in WoS database

排名	研究机构	发文量/篇	占比/%	排名	研究机构	发文量/篇	占比/%
1	Chinese Acad Sci(中国科学院)	499	44.55	6	Chinese Acad Forestry(中国林业科学研究院)	35	3.13
2	Univ Chinese Acad Sci(中国科学院大学)	131	11.70	7	Beijing Forestry Univ(北京林业大学)	35	3.13
3	Beijing Normal Univ(北京师范大学)	90	8.04	8	Fudan Univ(复旦大学)	27	2.41
4	Nanjing Univ(南京大学)	51	4.55	9	Xiamen Univ(厦门大学)	25	2.23
5	Fujian Normal Univ(福建师范大学)	46	4.11	10	Northeast Normal Univ(东北师范大学)	24	2.14

(图 4) 共有 427 个节点、1 283 条连线, 从整体上来看, 各研究机构间合作交流较多。Chinese Acad Sci 的中介中心性为 1.11, 与外界的合作关系最为密切, 其与发文量排名前 25 的机构均有合作, 是基于 WoS 数据库该领域的核心研究机构。除此之外, Beijing Normal Univ 的中介中心性(0.14)也超过了 0.1, 合作机构包括 Chinese Acad Sci、Univ Chinese Acad Sci、Nanjing Univ(南京大学)、Chinese Acad Forestry(中国林业科学研究院)等。

2.3.2 CNKI 文献机构及其合作关系

CNKI 数据库中 2000—2020 年共有 1 319 家研究机构发表了有关湿地碳循环的文献(表 5), 发文量多于 30 篇的机构从高到低依次为中国科学院东北地理与农业生态研究所(83 篇)、中国科学院大学(56 篇)、福建师范大学地理科学学院(45 篇)、中国科学院研究生院(39 篇)和福建师范大学亚热带湿地研究中心(36 篇)。

通过 CiteSpace 对研究机构之间合作关系进行分析, 获得各研究机构的合作共现图谱如图 5 所示。从图 5 看出, 图中共有 1 321 个节点、1 700 条连线, 各研究机构间联系整体上非常密切。中国科学院东北地理与农业生态研究所的发文量最高, 其中介中心性为 0.08。中国科学院大学的中介中心性最高(0.14), 超过 0.1, 是基于 CNKI 数据库湿地碳循环研究领域的核心研究机构, 其与外界的合作关系最为密切, 与发文量排名前 25 的机构均有合作。此外, 福建师范大学地理科学学院的中介中心性为

表 5 CNKI 数据库发文量排名前 10 的研究机构

Table 5 List of the top 10 most productive institutions of publications in CNKI database

排名	研究机构	发文量/篇	占比/%	排名	研究机构	发文量/篇	占比/%
1	中国科学院东北地理与农业生态研究所	83	4.41	6	福建师范大学地理研究所	26	1.38
2	中国科学院大学	56	2.98	7	哈尔滨师范大学生命科学与技术学院	21	1.12
3	福建师范大学地理科学学院	45	2.39	8	黑龙江省宝清七星河国家级自然保护区管理局	21	1.12
4	中国科学院研究生院	39	2.07	9	中国海洋大学法政学院	21	1.12
5	福建师范大学亚热带湿地研究中心	36	1.91	10	中国科学院地理科学与资源研究所	16	0.85

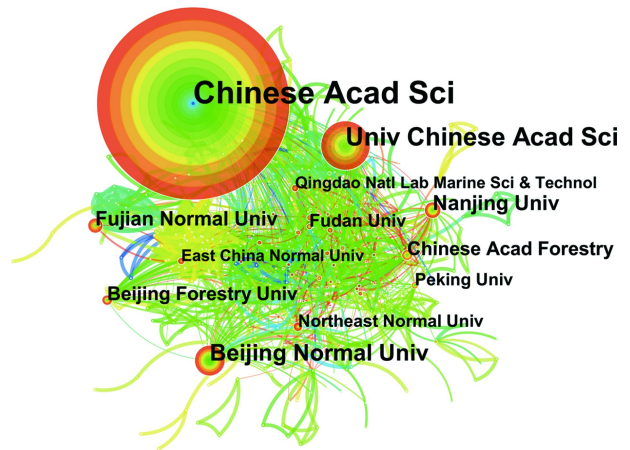


图 4 WoS 数据库发文来源机构分布及其合作关系

Fig.4 Distribution of publications source institutions in WoS database and their cooperative relationships

0.08, 是研究合作较多的一个研究机构。整体来看, 对于湿地碳循环的研究更多集中在中国科学院大学及各研究所和福建师范大学。

2.4 期刊来源分析

2.4.1 WoS 数据库文献的期刊分析

WoS 数据库文献来源共涉及 255 种期刊。载文量排名前 10 的期刊(表 6)均为 SCIE 期刊, 其中来自荷兰的期刊有 6 个, 其余 4 个分别来自中国、美国、德国和英国。期刊所属学科类别大多是 ES&E(环境科学与生态学), 还有涉及 AGR(农业)、GEO(地质学)、MFB(海洋与淡水生物学)等学科。Ecological Engineering 和 Science of the Total Environment 是发表中国湿地碳循环领域文献最多的期刊, 影响因子

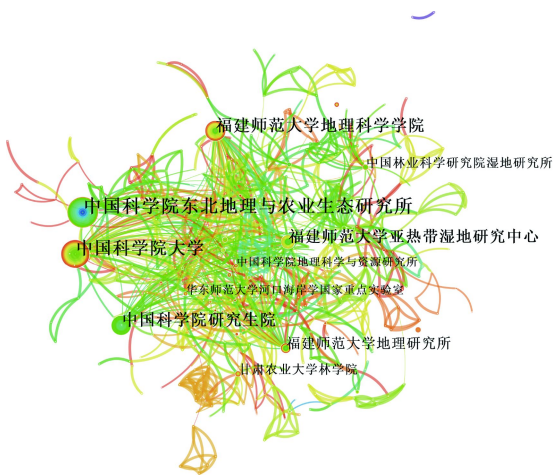


图 5 CNKI 数据库文献来源机构分布及其合作关系

Fig.5 Distribution of publications source institutions in CNKI database and their cooperative relationships

表 6 WoS 数据库收录中国湿地碳循环文献数量排名前 10 的期刊信息

Table 6 Top 10 journals with the number of wetland carbon cycle related literatures in China in WoS database

排名	期刊名称	发文量/篇	占比/%	学科类别	影响因子 (2020年)
1	<i>Ecological Engineering</i>	63	5.63	ES&E; EE	4.035
2	<i>Science of the Total Environment</i>	55	4.91	ES	7.963
3	<i>Wetlands</i>	39	3.48	ES&E	2.204
4	<i>Geoderma</i>	30	2.68	AGR	6.114
5	<i>Chinese Geographical Science</i>	29	2.59	ES&E	2.892
6	<i>PLoS One</i>	29	2.59	Sci. & Tech	3.240
7	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	28	2.50	ES&E	4.223
8	<i>Catena</i>	26	2.32	GEO; AGR; WR	5.198
9	<i>Ecological Indicators</i>	26	2.32	B&C; ES&E	4.958
10	<i>Marine Pollution Bulletin</i>	24	2.14	ES&E; MFB	5.553

注: ES&E 为环境科学与工程; EE 为环境工程; ES 为环境科学; AGR 为农业; Sci. & Tech 为科学技术; GEO 为地质学; WR 为水资源; B&C 为生物多样性保护; MFB 为海洋与淡水生物学。

分别为 4.035 和 7.963, 为该领域文献的主要载体。载文量排名前 10 期刊的影响因子最高达 7.963, 可见该领域已有众多高水平文献发表。

2.4.2 CNKI 数据库文献的期刊分析

2000—2020 年, CNKI 数据库中超过 300 个期刊都发表了与中国湿地碳循环相关的文献, 发文量排名前 10 的期刊(表 7)中 90% 为中文核心期刊。《生态学报》的发文量明显高于其他期刊, 约为发文量排名第二期刊的 2 倍, 占各期刊总发文量的 5.48%。发文量排名前 10 的期刊共刊登文献 469

表 7 CNKI 数据库收录中国湿地碳循环文献数量排名前 10 的期刊信息

Table 7 Top 10 journals with the number of China wetland carbon cycle related literatures in CNKI

排名	期刊名称	发文量/篇	占比/%	学科类别
1	生态学报	103	5.48	生物学
2	生态学杂志	57	3.03	生物学; 农业综合
3	应用生态学报	56	2.98	农业综合
4	湿地科学	56	2.98	环境科学与资源利用
5	环境科学学报	50	2.66	环境科学与资源利用
6	环境科学	46	2.45	环境科学与资源利用
7	生态环境学报	39	2.07	环境科学与资源利用
8	农业环境科学学报	22	1.17	环境科学与资源利用
9	湿地科学与管理	20	1.06	林业、工业经济
10	中国环境科学	20	1.06	环境科学与资源利用

篇, 仅占总发文量的 24.94%, 可见该领域发表期刊较为分散, 可刊领域较为广泛。

2.5 关键词分析

2.5.1 WoS 数据库文献的关键词分析

WoS 数据库关键词时区如图 6 所示。WoS 数据库文献共有 439 个关键词, 出现频次不低于 5 和 50 次的关键词分别有 185 和 29 个, 大量的关键词体现出该领域的广泛性以及研究焦点上存在着差异。carbon(193 次)、dynamics(171 次)、wetland(157 次)、nitrogen(152 次)和 soil(125 次)为出现频次前 5 的关键词。中介中间性大于 0.1 的关键词有 methane emission、dynamics(表 8)。早期以 accumulation、climate change、nitrogen、organic carbon 为主要研究热点, 近几年来 ecosystem service、wetland soil、coastal salt marsh、dissolved organic matter 更多地出现于人们的视野中。

2.5.2 CNKI 数据库文献的关键词分析

CNKI 数据库关键词时区如图 7 所示。CNKI 数据库文献共有 458 个关键词, 出现频次不低于 5 和 50 次的关键词分别为 127 和 12 个。频次较高的关键词除湿地(243 次)外, 显示以有机碳(130 次)、滨海湿地(94 次)、碳储量(81 次)、互花米草(72 次)、温室气体(65 次)为主要研究对象。中介中间性由高到低的关键词除湿地外依次为土壤有机碳、有机碳、三江平原、甲烷、温室气体等(表 9)。早期以有机碳、碳储量、温室气体、甲烷、土壤呼吸为主要研究内容, 近几年来对湿地的研究更加细化, 以滨海湿地、河口湿地居多, 重点调查植被类型, 研究土壤碳氮特征及碳源碳汇等。

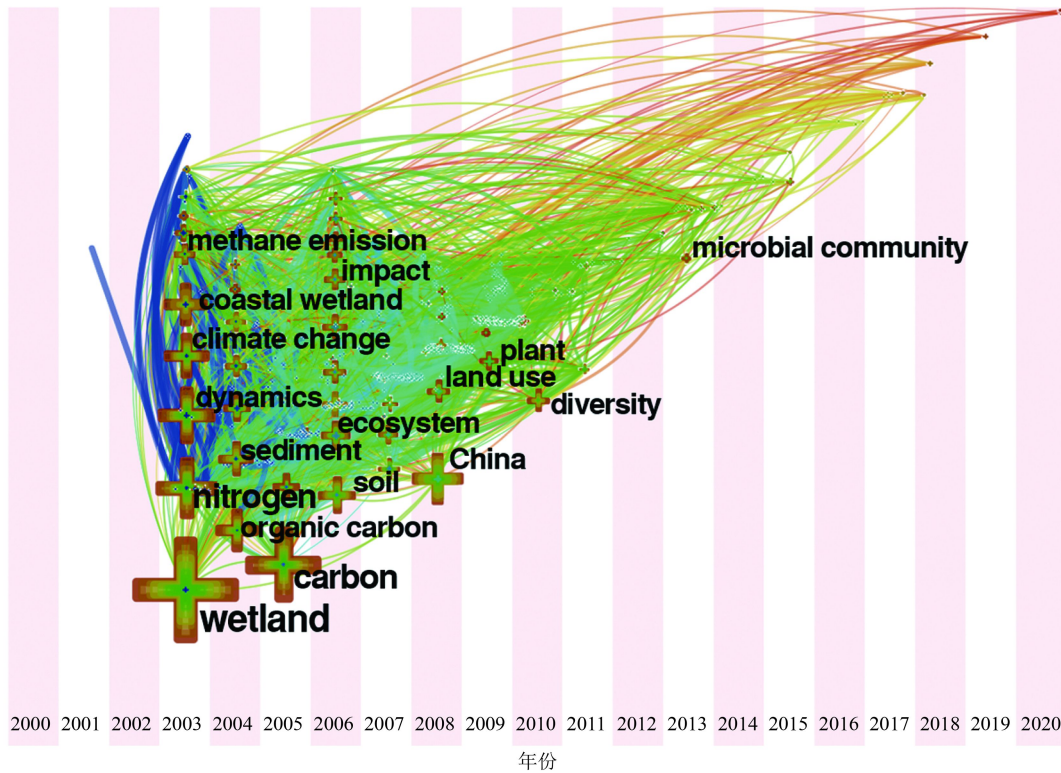


图 6 WoS 数据库关键词时区

Fig.6 Keywords timezone map of WoS database

表 8 WoS 数据库出现频次和中介中心性前 10 的关键词

Table 8 Top 10 keywords according to the frequency and mediating centrality in WoS database

排名	按出现频次排名		按中介中心性排名	
	关键词	出现频次/次	关键词	中介中心性
1	carbon	193	methane emission	0.15
2	dynamics	171	dynamics	0.10
3	wetland	157	carbon dioxide	0.08
4	nitrogen	152	denitrification	0.07
5	soil	125	decomposition	0.07
6	organic carbon	121	forest	0.07
7	China	108	carbon	0.07
8	climate change	100	atmospheric methane	0.06
9	sediment	88	CH ₄	0.06
10	water	87	fluxe	0.06

3 讨论

3.1 发文量的变化趋势

年发文量在一定程度上反映该领域知识量的变化,也可以反映学术关注程度以及发展走势^[25]。从 WoS 和 CNKI 数据库发文总量变化来看,2000—2020 年中国湿地碳循环领域相关的文献发表数量呈现出波动上升的趋势。据了解,2010 年召开了湿地科学研究进展与未来主要科学问题学术研讨会、湿

地生物多样性与气候变化暨中国生态学会湿地专业委员会年会,会议内容涵盖了湿地生物多样性、湿地生态系统恢复等,而 2010 年发文量出现大幅度增长,可见相关领域会议的召开会对发文量产生一定的影响。2017 年发文量涨幅明显而后稳步上升,很可能是受到 2016 年签订的《巴黎协定》的影响。由于受到新型冠状病毒感染疫情的影响,2020 年的发文量增长速率有所减缓。近 5 年的发文量超过 21 世纪以来发文量的 50%,说明湿地碳循环相关研究已成为近年来的研究热点,未来仍有高速发展趋势。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中将碳中和、碳达峰作为我国“十四五”污染防治攻坚战的主攻目标。由此推测,未来几十年将会有大量有关中国湿地碳循环的文献陆续发表。

3.2 作者、机构和国家的研究热点

由 WoS 数据库检索得出,来自全球 51 个国家 427 所机构的 587 位作者发表了 1 120 篇关于中国湿地碳循环的研究文献。综合 WoS 和 CNKI 文献作者分析结果,表明该领域研究中具有较强影响力的作者包括宋长春、仝川、吕宪国等,他们在发文量以及与其他学者的合作强度方面均居领先地位,形成具有代表性和突出影响力的多个研究群体。以宋长春为核心的作者群多年来围绕着中国东北地区淡

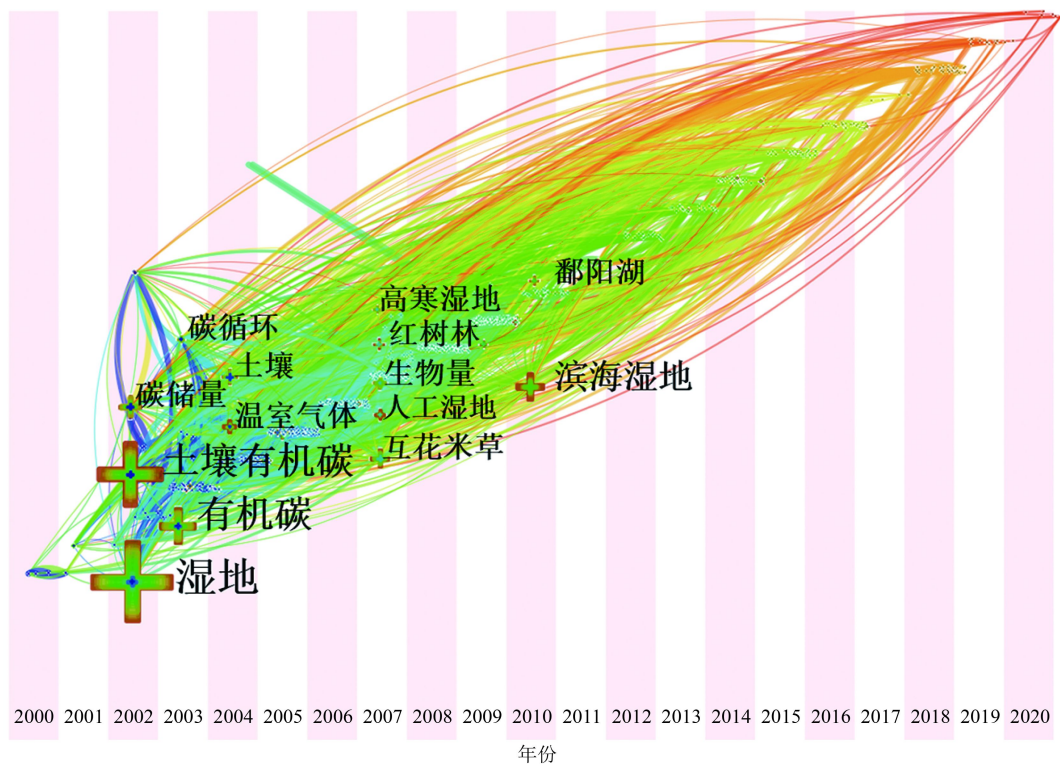


图 7 CNKI 数据库关键词时区

Fig.7 Keywords timezone map of CNKI database

表 9 CNKI 数据库中出現频次和中介中心性前 10 的关键词

Table 9 Top 10 keywords according to the frequency and mediating centrality in CNKI database

排名	按出現频次排名		按中介中心性排名	
	关键词	出現频次/次	关键词	中介中心性
1	湿地	243	湿地	0.48
2	有机碳	130	土壤有机碳	0.28
3	滨海湿地	94	有机碳	0.22
4	碳储量	81	三江平原	0.11
5	互花米草	72	甲烷	0.10
6	温室气体	65	温室气体	0.09
7	土壤	63	沼泽湿地	0.09
8	土壤呼吸	61	互花米草	0.08
9	人工湿地	56	滨海湿地	0.07
10	生物量	54	碳储量	0.07

水湿地和多年冻土泥炭地,在湿地溶解性有机碳输出、化学特征和影响因素^[26],多年冻土融化碳排放^[27-30],湿地-大气之间的甲烷交换机制^[31-34],湿地碳循环与全球变化^[35]等方向开展了丰富的研究工作并取得了大量的成果;以全川、曾从盛为核心的作者群针对河口滨海湿地土壤碳的生态化学计量特征^[36-37]、氮负荷影响湿地碳气体排放^[38]、滨海湿地互花花草入侵影响土壤碳储量^[39]以及河口沼泽区 CO₂ 通量对自

然条件(台风等)和植物种群动态的响应^[40-41]、中国沿海湿地温室气体通量^[42]等方面进行了深入的研究;以吕宪国为核心的作者群侧重于研究湿地面积和碳库^[43]、湿地土壤有机碳组成变化^[44]、沼泽湿地景观格局^[45]等,并在此基础上开展湿地生态过程^[46]、气候变化与湿地保护和恢复技术^[47]的研究。此外,发文机构可以反映出当前某研究领域最具权威的研究机构及其在领域的活跃程度^[18]。综合分析发文机构的结果发现,研究湿地碳循环的机构主要集中在中国科学院、福建师范大学、北京师范大学和南京大学,其中,中国科学院东北地理与农业生态研究所的发文量较多,结合核心作者的主要研究方向可知,中国湿地碳循环研究主要集中在东北湿地和滨海湿地。国外学者对于中国湿地碳循环也展开了较多的研究,研究方向主要集中在湿地碳固存^[48]、湿地生态系统碳储量恢复^[49]、温室气体(主要是甲烷)排放清单和模型^[40,50],这表明中国湿地退化和湿地碳循环已经引起了全球学者的关注,探索全球变化背景下中国甚至全球的湿地碳释放、固定过程和湿地修复对全球生态变化尤为重要。

3.3 发文期刊分析

分析研究成果在期刊的发文量能反映该领域的权威期刊^[51]。WoS 数据库中中国湿地碳循环领域研究成果主要发表在 *Ecological Engineering*、*Science*

of the Total Environment、Wetlands、Geoderma 等外文期刊上, CNKI 数据库中该领域研究成果多发表在《生态学报》《生态学杂志》《应用生态学报》《湿地科学》等中文核心期刊上。分析可知, 该领域研究成果较少发表在我国出版的国际化学术期刊中。建议国内学术期刊加快国际化步伐, 重视和鼓励国内外学者, 特别是有国际影响力的学者在我国主导的国际学术刊物上发表论文。此外, WoS 数据库中有关中国湿地碳循环的研究成果较少发表在 PNAS、Global Change Biology 等高影响因子的国际知名学术刊物上。顶级学术刊物对研究成果的原创性、新颖性和突破性要求更高, 因而建议学者间加强合作, 优势互补, 以全球变化水文和生态研究、碳氮生物化学循环等为切入点, 在局域、区域、全国甚至是全球尺度上围绕湿地碳汇、碳通量、气候变化和生物效应等方面开展研究。

3.4 研究热点分析

关键词是对文献的研究内容、方法、对象等的高度概括, 通过对关键词的统计分析可以发现某一学科研究的重点和热点^[52], 某个关键词在文献计量学研究的一定时期内高频出现, 表明该关键词可能是当时的热点、发展趋势或重点研究领域。综合 WoS 和 CNKI 数据库文献关键词分析结果, 出现频次最高的关键词是“湿地”“有机碳”“土壤”和“土壤呼吸”, 中介中心性较高的关键词分别为“湿地”“土壤有机碳”“甲烷释放”, 表明湿地有机碳循环过程、土壤呼吸、甲烷和 CO₂ 的释放通量是该领域研究的核心内容, 湿地碳循环研究主要集中在有机碳上。此外, “碳储量”“温室气体”“三江平原”等关键词也常出现在文献中, 表明中国湿地碳储量和温室气体释放潜力一直是国内学者们研究的重点, 并且对于中国湿地碳循环的研究大多数集中在东北的三江平原湿地。

2016—2020 年, “化学计量比”“气候变化”“CO₂ 交换”“产甲烷菌”“环境因子”“净生态系统碳交换量”“净初级生产力”等关键词出现的频率明显增加, 这反映出在全球变化的背景下, 气候变化成为湿地碳汇、碳释放通量的一个重要影响因素, 故近些年来在传统的湿地碳循环研究基础上, “气候变化”逐渐变成研究的新热点。此外, 中国湿地碳循环方面的研究更多地向微生物影响、碳生态化学计量特征、湿地生态系统的生产力等方向移动。

4 结论

(1) 2000—2020 年共发表中国湿地碳循环领域

相关文献 2 998 篇, 其中 WoS 数据库收录相关文献 1 120 篇, CNKI 数据库收录相关文献 1 878 篇, 年发文量整体呈现波动上升的趋势。

(2) 中国湿地碳循环研究领域发文量排名前 5 的作者依次是宋长春、仝川、吕宪国、曾从盛、白军红; 发文量排名前 5 的机构是中国科学院大学、中国科学院东北地理与农业生态研究所、福建师范大学、北京师范大学、南京大学。

(3) *Ecological Engineering*、*Science of the Total Environment*、*Wetlands*、*Geoderma* 是中国湿地碳循环研究成果发表的主要外文期刊, 《生态学报》《生态学杂志》《应用生态学报》《湿地科学》《环境科学学报》是研究成果发表的主要中文期刊。

(4) 近 5 年来中国湿地碳循环研究的热点问题为温室气体交换机制和通量、微生物对碳循环的影响、湿地土壤的碳生态化学计量特征、湿地碳循环与全球变化等。

(5) 基于目前湿地生态系统碳循环的研究现状, 未来该领域可在 CO₂、CH₄ 等交换通量监测方面开展研究工作, 完善各种碳通量监测和计算方法, 并采用多种方法结合使用以减小监测误差; 此外湿地生态系统中碳循环过程受多个环境变化因子的综合影响, 因此可发展完善湿地碳循环模型, 探究环境条件变化下湿地碳的动态变化及其对生态系统的影响, 并进一步探究土壤微生物多样性和生物量对湿地碳循环的影响。

参考文献

- [1] 盛春蕾, 吕宪国, 尹晓敏, 等. 基于 Web of Science 的 1899—2010 年湿地研究文献计量分析[J]. *湿地科学*, 2012, 10(1): 92-101.
SHENG C L, LÜ X G, YIN X M, et al. Bibliometrical analysis of wetland research based on Web of Science from 1899 to 2010[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1): 92-101.
- [2] 谭永滨, 黄敏婷, 程朋根, 等. 全球湖泊湿地研究的文献计量分析及可视化表达[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(2): 120-129.
TAN Y B, HUANG M T, CHENG P G, et al. A bibliometrical analysis of researches of global lake wetland and its visualized expression[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(2): 120-129.
- [3] 杨艳丽. 苏打盐碱芦苇湿地碳氮磷累积及其在退化、恢复过程中的变化特征[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
- [4] BULLOCK A, ACREMAN M. The role of wetlands in the hydrological cycle[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(3): 358-389.
- [5] 吴燕锋, 章光新. 流域湿地水文调蓄功能研究综述[J]. *水科学*

- 进展, 2021, 32(3): 458-469.
- WU Y F, ZHANG G X. A review of hydrological regulation functions of watershed wetlands[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 458-469.
- [6] MALTBY E, IMMIRZI P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils regional and global perspectives[J]. *Chemosphere*, 1993, 27(6): 999-1023.
- [7] 李璇, 栗忠飞. 滇西北纳帕海高原湿地区域退化草甸土壤有机碳含量特征[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(7): 1079-1088.
- LI X, LI Z F. Characteristics of soil organic carbon content of degraded meadows in napahai plateau wetland region in northwest Yunnan Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(7): 1079-1088.
- [8] 李富, 齐兴田, 宋春香, 等. 不同干扰强度下三江平原湿地土壤温室气体排放对冻融作用的响应[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1877-1884.
- LI F, QI X T, SONG C X, et al. Response of greenhouse gas emission to freeze-thaw with different disturbance intensity of the Sanjiang Plain wetland[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(8): 1877-1884.
- [9] XIAO D R, DENG L, KIM D G, et al. Carbon budgets of wetland ecosystems in China[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2061-2076.
- [10] 鲍达明. 全国湿地保护工程规划实施要点[J]. *湿地科学与管理*, 2007, 3(2): 18-20.
- BAO D M. Essentials of the implementation of the nationwide wetland protection program plan[J]. *Wetland Science & Management*, 2007, 3(2): 18-20.
- [11] 宋长春, 宋艳宇, 王宪伟, 等. 气候变化下湿地生态系统碳、氮循环研究进展[J]. *湿地科学*, 2018, 16(3): 424-431.
- SONG C C, SONG Y Y, WANG X W, et al. Advance in researches on carbon and nitrogen cycles in wetland ecosystems under climate change[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(3): 424-431.
- [12] KHALIL M A K. Non-CO₂ greenhouse gases in the atmosphere[J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 1999, 24: 645-661.
- [13] 刘春英, 周文斌. 我国湿地碳循环的研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1264-1270.
- LIU C Y, ZHOU W B. Progress of research on carbon cycle of wetlands in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5): 1264-1270.
- [14] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 726-733.
- CHEN H, ZHOU S, WU N, et al. Advance in studies on production, oxidation and emission flux of methane from wetlands[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2006, 12(5): 726-733.
- [15] 陈强, 潘英姿, 蒋卫国, 等. 湿地甲烷排放估算模型的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(1): 67-75.
- CHEN Q, PAN Y Z, JIANG W G, et al. Advances in the research on estimation models of wetlands methane emission[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(1): 67-75.
- [16] MITRA S, WASSMANN R, VLEK P. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock[J]. *Current Science*, 2005, 88(1): 25-35.
- [17] 高俊宽. 文献计量学方法在科学评价中的应用探讨[J]. *图书情报知识*, 2005(2): 14-17.
- GAO J K. Discussion on the application of bibliometrics in scientific evaluation[J]. *Knowledge of Library and Information Science*, 2005(2): 14-17.
- [18] 张岷, 徐建玲, 李龙威. 基于文献计量的人工湿地研究现状与发展趋势研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, 44(10): 16-21.
- ZHANG D, XU J L, LI L W. Research status and development trend of constructed wetlands based on bibliometrics[J]. *Environmental Science and Management*, 2019, 44(10): 16-21.
- [19] 张媛, 张艳杰, 朱静, 等. 基于文献计量的湿地构建前沿进展[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 107-113.
- ZHANG Y, ZHANG Y J, ZHU J, et al. A bibliometric analysis of the frontier progress in wetland construction[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 107-113.
- [20] 李贝贝, 张永慧, 苏友波. 基于CNKI数据库的土壤酶研究文献计量分析[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(8): 148-155.
- LI B B, ZHANG Y H, SU Y B. Bibliometric analysis of soil enzyme research literature based on CNKI database[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(8): 148-155.
- [21] 严陶韬, 薛建辉. 中国生物多样性研究文献计量分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7879-7892.
- YAN T T, XUE J H. Bibliometric analysis of biodiversity research literature in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7879-7892.
- [22] 赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. *中国图书馆学报*, 2010, 36(5): 60-68.
- ZHAO R Y, XU L M. The knowledge map of the evolution and research frontiers of the bibliometrics[J]. *Journal of Library Science in China*, 2010, 36(5): 60-68.
- [23] CHEN C M, IBEKWE-SANJUAN F, HOU J H. The structure and dynamics of cocitation clusters: a multiple-perspective cocitation analysis[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2010, 61(7): 1386-1409.
- [24] 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 Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [25] LIU S B, CHEN C M, DING K, et al. Literature retrieval based on citation context[J]. *Scientometrics*, 2014, 101(2): 1293-1307.
- [26] GUO Y D, SONG C C, TAN W W, et al. Hydrological processes and permafrost regulate magnitude, source and chemical characteristics of dissolved organic carbon export in a peatland catchment of northeastern China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(2): 1081-1093.
- [27] YU X Y, SONG C C, SUN L, et al. Growing season methane emissions from a permafrost peatland of northeast China: observations using open-path eddy covariance method[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 153: 135-149.
- [28] SONG C C, WANG X W, MIAO Y Q, et al. Effects of permafrost thaw on carbon emissions under aerobic and anaerobic environments in the Great Hing'an Mountains,

- China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 604-610.
- [29] SONG Y Y, SONG C C, HOU A X, et al. Temperature, soil moisture, and microbial controls on CO₂ and CH₄ emissions from a permafrost peatland[J/OL]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021. <https://doi.org/10.1002/ep.13693>.
- [30] SUN X X, WANG H J, SONG C C, et al. Response of methane and nitrous oxide emissions from peatlands to permafrost thawing in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(2): 222.
- [31] SUN L, SONG C C, LAFLEUR P M, et al. Wetland-atmosphere methane exchange in Northeast China: a comparison of permafrost peatland and freshwater wetlands[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 239-249.
- [32] SONG C C, XU X F, TIAN H, et al. Ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang Plain, Northeastern China[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 692-705.
- [33] JU H Q, SI W Y, CHUN S C, et al. Contribution of winter fluxes to the annual CH₄, CO₂ and N₂O emissions from freshwater marshes in the Sanjiang Plain[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(2): 270-275.
- [34] ZHU X Y, SONG C C, CHEN W W, et al. Effects of water regimes on methane emissions in peatland and gley marsh[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-7.
- [35] 李英臣, 宋长春. 氮磷输入对湿地生态系统碳蓄积的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(1): 224-229.
- LI Y C, SONG C C. Effects of exogenous nitrogen and phosphorus input on carbon accumulation in wetland system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 224-229.
- [36] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 134-139.
- WANG W Q, XU L L, ZENG C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 134-139.
- [37] HU M J, PEÑUELAS J, SARDANS J, et al. Stoichiometry patterns of plant organ N and P in coastal herbaceous wetlands along the East China Sea: implications for biogeochemical niche[J]. *Plant and Soil*, 2018, 431(1): 273-288.
- [38] HU M J, PEÑUELAS J, SARDANS J, et al. Effects of nitrogen loading on emission of carbon gases from estuarine tidal marshes with varying salinity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 648-657.
- [39] WANG W Q, SARDANS J, WANG C, et al. The response of stocks of C, N, and P to plant invasion in the coastal wetlands of China[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 733-743.
- [40] CHENG Y R, ZHA Y, TONG C, et al. Plant population dynamics in a degraded coastal wetland and implications for the carbon cycle[J]. *Wetlands*, 2020, 40(5): 1617-1625.
- [41] TONG C, LUO M, HUANG J F, et al. Greenhouse gas fluxes and porewater geochemistry following short-term pulses of saltwater and Fe(III) in a subtropical tidal freshwater estuarine marsh[J]. *Geoderma*, 2020, 369: 114340.
- [42] HU M J, SARDANS J, YANG X Y, et al. Patterns and environmental drivers of greenhouse gas fluxes in the coastal wetlands of China: a systematic review and synthesis[J]. *Environmental Research*, 2020, 186: 109576.
- [43] LU M Z, ZOU Y C, XUN Q L, et al. Anthropogenic disturbances caused declines in the wetland area and carbon pool in China during the last four decades[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(16): 3837-3845.
- [44] XIAO Y, HUANG Z G, LU X G. Changes of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 381-389.
- [45] 王延吉, 神祥金, 吕宪国. 1980—2015年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征[J]. *地球与环境*, 2020, 48(3): 348-357.
- WANG Y J, SHEN X J, LÜ X G. Change characteristics of landscape pattern and climate in marsh areas of Northeast China during 1980-2015[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(3): 348-357.
- [46] ZHANG Z Q, ZHONG J J, LV X G, et al. Climate, vegetation, and human influences on late-Holocene fire regimes in the Sanjiang Plain, Northeastern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 438: 1-8.
- [47] ZHENG H F, SHEN G Q, SHANG L Y, et al. Efficacy of conservation strategies for endangered oriental white storks (*Ciconia boyciana*) under climate change in Northeast China[J]. *Biological Conservation*, 2016, 204: 367-377.
- [48] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GB001917>.
- [49] MORENO-MATEOS D, POWER M E, COMÍN F A, et al. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems[J]. *PLoS Biology*, 2012, 10(1): e1001247.
- [50] SAUNOIS M, BOUSQUET P, POULTER B, et al. The global methane budget 2000-2012[J]. *Earth System Science Data*, 2016, 8(2): 697-751.
- [51] 郭兵, 杨庭, 肖成磊, 等. 基于Web of Science数据库石油污染土壤生物修复研究的文献计量分析[J]. *现代化工*, 2021, 41(2): 11-18.
- GUO B, YANG T, XIAO C L, et al. Bibliometric analysis on bioremediation research on petroleum contaminated soil based on Web of Science database[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(2): 11-18.
- [52] 顾斌杰, 赵海霞, 骆新燎, 等. 基于文献计量的减污降碳协同减排研究进展与展望[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 85-95.
- GU B J, ZHAO H X, LUO X L, et al. Research progress and prospect of collaborative reduction of pollution and carbon dioxide based on bibliometrics[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1): 85-95. ◇