

# 基于文献计量分析方法的海气相互作用领域研究态势分析

高宇<sup>1,2</sup>, 郝鹏<sup>1,2</sup>, 叶灿<sup>1,2</sup>, 成泽毅<sup>1,2</sup>, 李爽<sup>1,2</sup>, 宋金宝<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江大学 物理海洋与遥感研究所, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 海洋和大气是地球气候系统关键组成部分, 其相互作用对全球气候及人类生活产生深远影响。为了分析海气相互作用的研究现状与未来的发展趋势。采用文献计量分析方法, 运用 VOSviewer 和 CiteSpace 工具, 筛选了中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)和 Web of Science 核心合集数据库中关于海气相互作用的文献, 通过分析关键词共现网络图谱、时间序列图谱、突现网络图谱以及文献的发文国家和机构分布, 对 1981—2021 年中国在该领域的研究进展和未来发展趋势进行了综合评估。同时, 本研究还选取了 2001—2021 年的国际文献, 对全球范围内的研究进展和热点问题进行了分析。研究表明, 国内外在海气相互作用领域的研究均从宏观到微观角度深入探讨, 着重研究了大气和海洋的基本作用机理, 并进一步分析了影响地球气候系统的多种因素, 目前研究重点转向了极端天气系统的预测及其运行机制。从研究机构和国家分布来看, 高校与政府机构是主要的研究主体, 国内研究机构之间的合作联系较为紧密。研究关键方向和方法, 从宏观层面的基础研究转向更为深入的海气通量和大尺度过程研究。这一转变反映了国际海洋发展战略的调整, 同时为未来的研究方向提供了新的视角和思路。

**关键词:** 海气相互作用; VOSviewer; CiteSpace; 知识图谱; 研究进展

**中图分类号:** P731.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2024)4-0063-20

**DOI:** 10.11759/hyxx20220926001

海气相互作用研究在海洋大气研究领域当中有着举足轻重的地位<sup>[1-6]</sup>。早在 2003 年蒲书箴等人<sup>[7]</sup>就根据 1998—2002 年的数据, 从热带太平洋海气相互作用、与季风相关的海气相互作用、北太平洋海气相互作用、印度洋海气相互作用以及全球大洋海气相互作用几个方面进行了研究; 近年来对海气相互作用的区域性研究以及其与海洋要素之间关系的相关问题的探讨也层出不穷<sup>[8-14]</sup>, 除此之外, 台风是海气相互作用最典型的一种表现, 研究人员针对台风的强度、结构以及其演变过程采用数值模拟的方法进行分析<sup>[13, 15-17]</sup>。

海洋主要依靠与大气的相互作用来影响气候的变化, 通过热力作用来驱动大气, 而大气依靠的是风应力等动力过程来影响海流<sup>[18]</sup>。海气相互作用是长期天气和气候变化的重要因素, 也是研究和预报海洋状况的关键<sup>[19]</sup>。海洋与大气之间的热量、动量以及物质的交换影响着二者之间的各种物理特性, 而且在各个尺度上海洋和大气之间通过一定的物理过程相互作用、相互影响, 组成一个复杂的耦合系统, 它们共同起着调控全球范围内的水资源以及能量平

衡的作用, 它们之间的相互作用也是地球气候变化的重要驱动力之一<sup>[20]</sup>, 从而对人类的生活、生产活动、航运业、渔业的发展以及自然环境产生了巨大的影响。20 世纪 20 年代 Gregg<sup>[21]</sup>首次发现并提出了南方涛动(Southern Oscillation, SO)的概念; 20 世纪 60 年代, Bjerknes<sup>[22]</sup>发现了 SO 和 El Niño 是两种联系非常紧密的自然现象, 因而首次提出了厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的概念, 并说明了 ENSO 是由热带太平洋大尺度海气相互作用产生的<sup>[23]</sup>。任宏利等人<sup>[18]</sup>针对热带海气相互作用进行了分类讨论, 说明了 ENSO 与不同地区和时间尺度气候变率之间的相互作用关系。

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-02-07

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y202353066); 国家自然科学基金(41830533, 41876003)

[Foundation: Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department, No. Y202353066; National Natural Science Foundation of China, Nos. 41830533, 41876003]

作者简介: 高宇(1999—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究, E-mail: gaoyu0211@zju.edu.cn; 李爽(1982—), 通信作者, 女, 辽宁兴城人, 博士, 副教授, 主要从事海气相互作用、湍流大涡模拟以及海洋上层混合研究, E-mail: lshuang@zju.edu.cn

国外学者对于中尺度过程<sup>[24-26]</sup>以及台风等极端情况<sup>[27-28]</sup>开展了大量的研究,采用数值模拟的方法进行不同模式之间的耦合,这在研究台风等极端现象时起着重要的作用,有助于展开对气候的研究以及极端天气情况的预测;从20世纪60年代人们开始对台风的生成机制进行深入的研究,并指出海面温度(sea surface temperature, SST)是海气相互作用在动力学方面的重要因素之一<sup>[27-29]</sup>,已有研究表明SST具有显著调节气旋强度的作用<sup>[30]</sup>,但是大气强迫和洋流在改变气旋轨迹方面的影响尚不明确,一部分学者认为海气相互作用改善了气旋轨迹,进而影响气候的变化,而另一部分学者则表示气旋的轨迹不受到海气之间耦合作用的影响<sup>[31-32]</sup>;此外,有许多学者在海气相互作用方面展开了深入的研究,随着人工智能技术的发展,在极端天气现象预测方面的研究逐渐增多,旨在详细地掌握热带气旋的实时状态从而来更好地保障人类的生命财产安全<sup>[33-35]</sup>;并且在大数据时代的背景下,海气系统的观测资料日益增多,这将有助于推进对海气相互作用研究的进展。

科学计量学与信息计量学的应用与发展正在逐步崛起,科学知识图谱为分析海量文献数据提供了条件<sup>[36]</sup>,文献计量方法与可视化技术已成为了探索某一学科领域的知识结构和演变趋势的一种有效手段<sup>[37]</sup>。知识图谱的概念是在谷歌收购Metaweb公司之后在2012年提出的一种新型文献计量的方法<sup>[38]</sup>,文献计量分析方法就是通过知识图谱的形式对已经发表的相关文献进行描述与分析,有助于研究人员对某一特定领域的学术研究的发展情况以及未来的发展趋势进行准确地评估<sup>[39]</sup>。根据Noyons等人<sup>[40]</sup>的观点,科学制图和性能分析是在运用知识图谱进行特定领域文献分析的两个主要程序,现今在文献计量方法方面常用的可视化工具有VOSviewer<sup>[41]</sup>、CiteSpace<sup>[41]</sup>、HistCite<sup>[42]</sup>、DBpedia<sup>[43]</sup>、Freebase<sup>[44]</sup>、NELL<sup>[45]</sup>以及Probase<sup>[46]</sup>等,其中,CiteSpace和VOSviewer这两款工具的功能是尤为强大的。李杰在《CiteSpace:科技文本挖掘及可视化》<sup>[47]</sup>一书当中对CiteSpace文献计量软件的功能以及其强大之处做出了详细的介绍;在可视化分析界面可以直接了解到每个聚类节点的共现频次、中介中心性、不同年份的被引情况以及热点动态,从而保证对该领域内的研究热点、相关联系以及今后的发展趋势等内容的进一步分析工作的准确性<sup>[48]</sup>;VOSviewer在图谱呈现的过程中表现出色,

它可以生成任何类型的文本地图,并且可以对文献进行合作网络分析、共现分析、引证分析、文献耦合分析以及共被引分析,通过其分析输出的结果,可以直观且快速地锁定该科学领域内的重点文献;软件自身可以通过VOS图谱技术,运用关联强度的相似性测量,在图谱当中可以突出最为重要的节点标签<sup>[49]</sup>;VOSviewer具有强大的数据处理的能力,这一能力可以弥补CiteSpace在处理大量数据时的一些缺陷,因此,二者配合使用将会提高在某一特定领域研究进展以及热点问题分析的准确性,从而提升参考价值<sup>[50]</sup>。

因此,基于VOSviewer和CiteSpace这两款软件的强大功能,以及本着它们之间可以实现优势互补的原则,本文利用VOSviewer和CiteSpace这两种工具对海气相互作用领域的研究现状、热点以及未来发展趋势进行分析。

## 1 研究数据与方法

本文采用的数据分别来源于中国知网(<https://www.cnki.net/>)和Web of Science核心合集(<https://www.webofscience.com/>)。通过中国知网检索中文学术文献,进行高级检索的操作,在高级检索框内以“主题(精准)”作为检索条件,以“海气相互作用”作为检索式,并设置文献检索时间范围为1981年1月1日至2022年1月1日;通过Web of Science文献检索平台来检索外文文献,在高级检索框内设置检索条件为“主题”,以“Air Sea Interaction\*”和“Sea Air Interaction\*”作为检索式,并设置文献检索时间范围为1981年1月1日至2022年1月1日;为了保证该研究的客观性与严谨性,文献数据分别由两个人进行独立筛选,然后再由另外两个人进行数据复核,最终得到来自中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)的文献1294篇,来自Web of Science的文献34177篇,经过人工筛选以及CiteSpace软件去重操作后,最终形成进行文献计量分析的数据库,并以此来为文献的可视化分析做准备。

本文综合利用了VOSviewer和CiteSpace两种工具的不同功能来全面地对文献数据进行可视化分析,并利用Endnote X9软件<sup>[51]</sup>对数据格式进行处理以及数据的统计分析,从聚类网络视图、密度视图、关键词突现以及时间序列等可视化图谱几个方面,来呈现海气相互作用领域近40 a以来的发展情况,通过聚类网络视图来了解该领域各个方向之间的相互关

系, 以及通过密度视图、关键词共现图谱和关键词突现图谱来厘清研究热点问题, 这将有助于为后续在该领域的研究和创新指明方向。

## 2 结果与分析

分别对 CNKI 和 Web of Science 的海气相互作用的相关文献进行文献计量分析, 从国内和国际两个宏观的角度对文献进行分类处理, 分别从关键词共现网络图谱、关键词密度图谱、关键词时间序列图谱、发文机构聚类图谱以及关键词突现分析这 5 个方面展开研究与分析。

### 2.1 国内海气相互作用研究的主要特征分析

#### 2.1.1 关键词共现分析

根据 Dzikowski 等人<sup>[52]</sup>的理论, 如果某一关键

词相关的论文发表数量较多, 和其他关键词之间的关联性越高, 其研究的问题并与人类生活息息相关的情况下, 那么它的影响力也就越深远。利用 VOSviewer 对 1 294 篇 CNKI 文献的关键词进行共现分析, 而共现分析作为较为常用的文献计量以及文献分析方法, 它的主要原理就是在同一篇文章当中关键词出现的次数进行统计, 再对这些词进行聚类分析, 从而来进一步分析这些词所在学科领域的结构演变规律与趋势<sup>[53]</sup>。在分析过程当中, 将分析类型设置为共现, 分析组设置为全部关键词, 计算方法设置为全计数, 为了使关键词的主要节点尽可能地全部显现, 将关键词出现的最小频率设置为 5, 从而形成 179 个关键词节点, 这些节点之间一共形成 3 057 条复杂的关联网络线, 如图 1 所示。

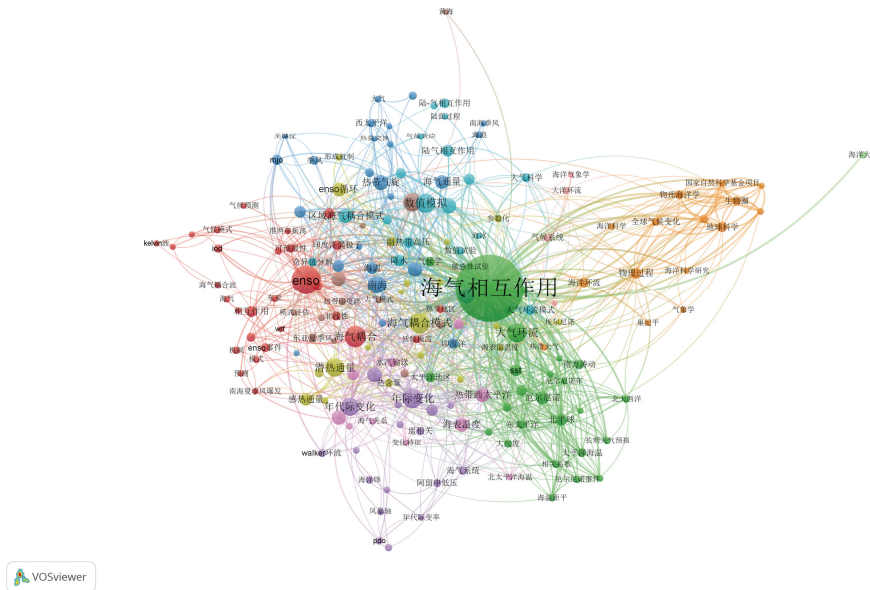


图 1 CNKI 文献关键词共现网络图谱

Fig. 1 CNKI literature keyword co-occurrence network mapping

根据 CNKI 文献关键词共现网络图分析可知: “海气相互作用” 关键词的节点最大, 关键词节点的大小代表了关键词出现的频率和文献的数量, 而网络线的粗细程度代表了各个关键词之间的关联性的强弱程度, 网络线越粗, 关键词之间的关联性越强<sup>[54]</sup>; 因此, 可以从关键词共现网络图谱当中分析可知 “海气相互作用” 相关的文献是在近 40 a 出现频率最高而且数量最多, 从网络线的粗细程度上分析, 海气相互作用的发展与 “ENSO”、“海气耦合”、“数值模拟” 以及 “大气环流” 等之间存在很强的关联性。从密度视图(图 2)的角度进行分析, 海气相互作用的研究热

度一直较高, 以及海气相互作用在大尺度上的表现结果——ENSO 也是研究热点, 此外, 从密度视图当中分析可知对海气相互作用的研究手段和方法主要是数值模式, 防灾减灾也是该领域发展的一个重要题目。

分析该领域当中的研究现状、研究热点以及未来研究的发展趋势, 可以从各个关键词的时间序列图谱(图 3)、国内 1990—2010 年的研究方向演化图(图 4) 以及发文频次统计表格(表 1)当中的关键词首次出现时间和学者们对相应的方向进行研究的时间线的长短上来开展。



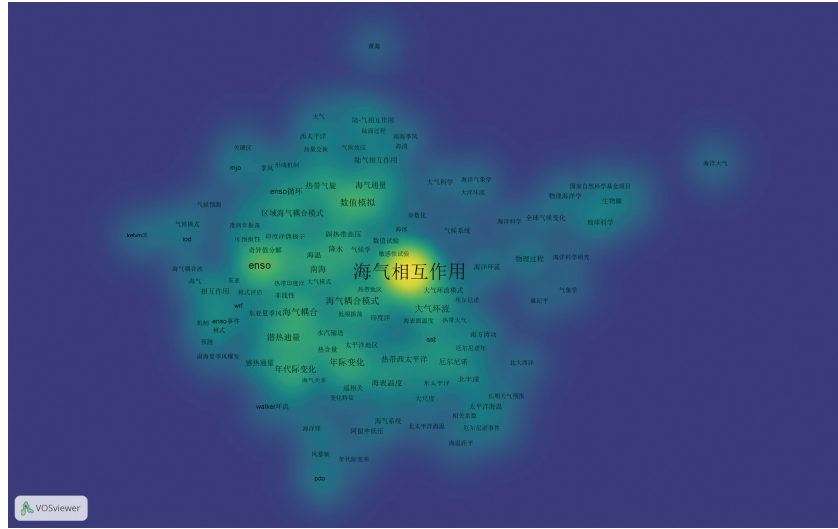


图2 CNKI 文献关键词密度视图  
Fig. 2 CNKI document keyword density view

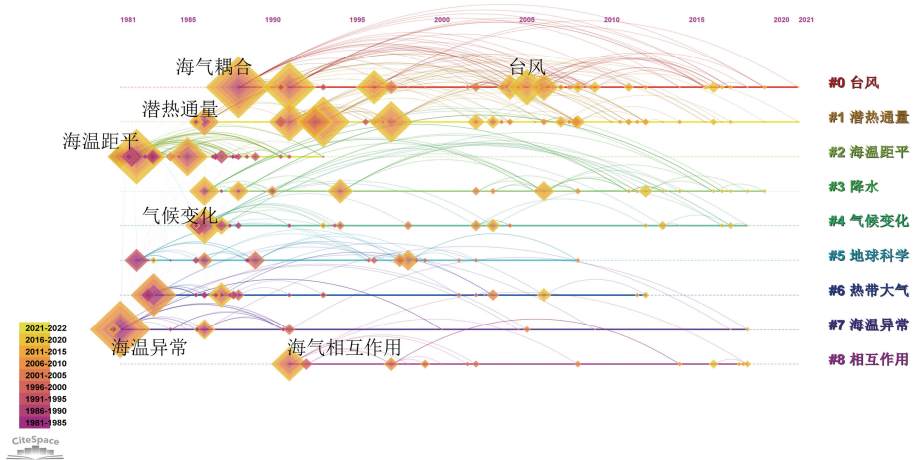


图3 国内海气相互作用研究时间序列图谱  
Fig. 3 Time-series mapping of domestic air-sea interaction studies



图4 1981—2021 年关键词演变图  
Fig. 4 Keyword evolution chart, 1981—2021



根据时间序列图以及研究方向变化图分析可知: 设置 CiteSpace 文献分析的时间间隔为 1 a, 在可视化分析过程当中一共产生了台风、潜热通量、海温距平、降水、气候变化、地球科学、热带大气、海温异常以及相互作用这 8 种聚类。同一聚类被排布在同一水平线附近, 所以聚类的共被引关系不是十分直观, 而相对于聚类内部相互作用关系的关注, 时间序列视图更加关注聚类之间的相互联系和相互影响<sup>[55]</sup>; 此外, 根据 1990 年至 2010 年的研究重心转移的情况来看, 研究重心以海气相互作用为纽带, 实现了从最初的对海洋大气物理过程的研究转变到了运用数值模式对 ENSO、热带气旋等的大尺度过程的研究, 即为从理论分析到实践应用过程的转变, 更加注重对极端气候现象的研究与探索。

从时间线上可以清晰地看出海气相互作用领域从 20 世纪 80 年代初到 90 年代末各个聚类的成果都是非常丰富的。在 1988 年“台风”聚类出现了第一篇海气耦合相关的参考文献, 在 2005 年该聚类的成果增多<sup>[56-62]</sup>。

国内海气相互作用相关研究的发文频次排名前 20 位的关键词如表 1 所示。由表中信息分析可知: 海气耦合、大气环流以及年际变化的发文频次最多, 海气耦合模式已经是海气相互作用领域研究的主流方法<sup>[63-71]</sup>。

表 1 国内海气相互作用研究发文频次前 20 位的关键词  
Tab. 1 Top 20 keywords by frequency in domestic air-sea interaction research articles

关键词	首发年份	发文频次	中介中心性
海气耦合	1988	45	0.14
大气环流	1981	39	0.28
年际变化	1982	38	0.14
数值模拟	1991	39	0.08
潜热通量	1993	36	0.04
南海	1997	35	0.10
台风	2005	35	0.09
太平洋	1983	26	0.06
热带气旋	1996	24	0.04
气候变化	1986	22	0.07
热通量	1991	21	0.11
北太平洋	1991	21	0.08
海面温度	1986	20	0.08
耦合模式	2006	20	0.07
厄尔尼诺	1985	19	0.03
感热通量	1993	18	0.00
海气通量	2001	18	0.04
北半球	1982	16	0.09
季节变化	1986	14	0.07
降水	2006	14	0.04

中介中心性作为数据分析的一个重要指标, 高中介中心性通常被认为是一个领域的关键点, 也是这段时间内的研究热点问题<sup>[72-73]</sup>, 因此根据表格当中的中介中心性值进行分析, 中介中心性的值大于 0.10 的“海气耦合”、“大气环流”、“年际变化”、“南海”以及“热通量”这几个关键词, 成为了本次网络视图当中的关键节点, 其中关键词“大气环流”的中介中心性值高达 0.28, 且已有研究表明了在海洋与大气环流异常的情况下, 地球气候系统将会受到不同程度上的影响<sup>[74-75]</sup>, 说明了大气环流在海气相互作用领域十分重要; 而海气耦合模式作为研究海气相互作用问题的一种重要工具, 区域性海气耦合模式 RegCM3-POM 在解决大气水汽输送问题上得到了很好的效果<sup>[76]</sup>, 可见大气环流和海气耦合模式在海气相互作用过程当中有着举足轻重的地位, 海洋和大气相辅相成, 共同在维持地球气候系统平衡的方面起着重要的作用。

### 2.1.2 发文机构可视化分析

发文机构出现的概率代表了其在该领域所做出的贡献以及其自身实力的强弱, 将 1 294 篇 CNKI 数据导入 CiteSpace 当中进行可视化分析所生成的网络图谱如图 5 所示。在聚类视图当中, 代表的发文机构的节点越大, 说明该机构在近 40 a 发文次数越多, 而各个节点之间连线的粗细程度代表了机构之间合作关系的密切程度, 即节点间的连线越粗, 机构间的关联越密切; 从科研高校和机构的角度分析, 最为突出的就是“中国科学院”, 尤其是对我国气候发展趋势的研究与预测方面发挥重要的作用<sup>[77-79]</sup>。实验过程中将时间切片设置为 1 a, 在网络视图当中呈现出 482 个节点, 444 条网络线, 网络密度为 0.003 8, 表明了国内的海气相互作用研究机构间的联系十分密切, 相关性较高。

经过寻径网络算法(path-finder)的计算分析, 并采用聚类模块值( $Q$  值)对模型的聚类结果进行评估, 其中,  $Q$  值作为网络模块化的评价标准, 网络模型当中的  $Q$  值越大, 则表示该网络模型得到的聚类效果越好;  $Q$  值的取值区间为[0, 3], 当  $Q > 0.3$  时, 意味着得到的网络聚类的结果是很有价值的,  $Q$  值计算的方法如式(1)所示,

$$Q = \frac{1}{2m} \sum (a_{ij} - p_{ij}) \sigma(c_i, c_j), \quad (1)$$

在上式中,  $a_{ij}$  为网络模型当中实际网络的邻接矩阵,

$p_{ij}$  为零模型中节点  $i$  和节点  $j$  之间连线边数的期望值;  $c_i$  和  $c_j$  分别代表的是节点  $i$  和节点  $j$  在网络模型

中所属的社团, 且当节点  $i$  和节点  $j$  同属于一个社团时, 此时  $\sigma$  的值为 1, 否则  $\sigma$  的值为 0。

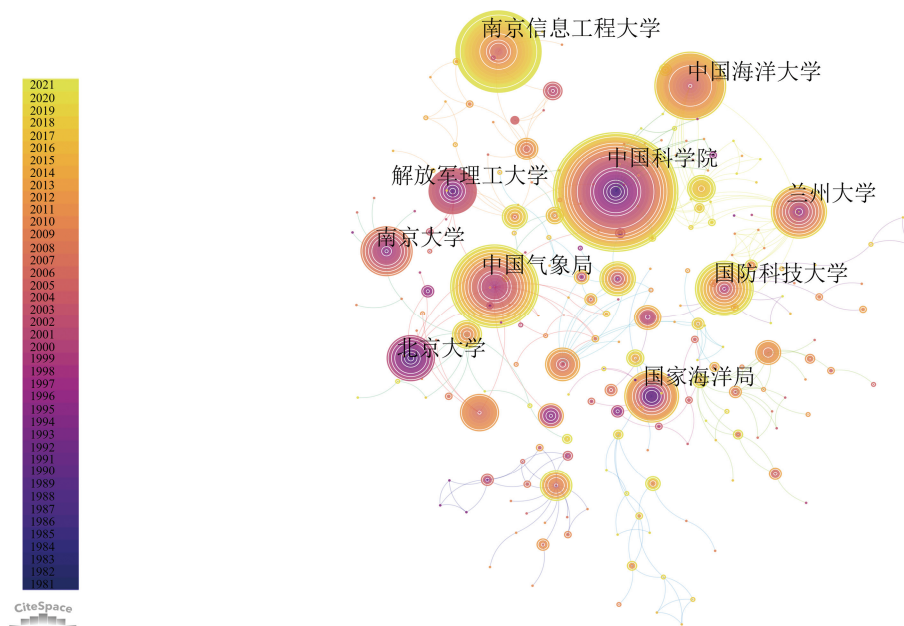


图 5 国内海气相互作用研究发文机构聚类视图

Fig. 5 Clustered view of domestic institutions conducting air-sea interaction research

聚类平均轮廓值( $S$ 值)作为另一个网络模型的评价指标, 该值具体是通过衡量网络模型同质性的指标来进行聚类结果的评价, 当  $S$  值越接近于 1 时, 表示网络的同质性越高, 当  $S$  值大于 0.5 时, 基本上可以认为聚类的结果是合理的, 当  $S$  值大于 0.7 时, 则说明聚类的结果是有高信度的。单个样本点聚类平均轮廓值( $S$ 值)的计算方法如式(2)所示,

$$S_i = \begin{cases} 1 - \frac{a(i)}{b(i)}, [a(i) < b(i)] \\ 0, [a(i) = b(i)] \\ \frac{b(i)}{a(i)} - 1, [a(i) > b(i)] \end{cases}, \quad (2)$$

上式经过整理可写成:

$$S = \frac{b(i) - a(i)}{\max[a(i), b(i)]}, \quad (3)$$

根据上式可得到  $S$  值的取值范围为  $[-1, 1]$ , 式(2)和式(3)中  $a$  为点  $i$  与所在聚类中其他点的平均距离;  $b$  为点  $i$  与最接近点  $i$  所在聚类中的各点的平均距离; 平均  $S$  值则为各个样本点轮廓值的平均数<sup>[47]</sup>。

在本文的网络模型当中, 通过寻径网络算法的分析以及对国内发文机构信息进行了进一步的数据清洗与合并操作, 最终得到聚类模块值( $Q=0.822\ 8$ ) $>0.3$ ,

表明了聚类结果十分显著, 而且得到的聚类平均轮廓值( $S=0.939\ 1$ ) $>0.7$  说明了聚类内部同质性好, 聚类的结果更加具有信服力<sup>[79]</sup>。

按照发文频次对国内海气相互作用研究的情况进行分析, 由于研究所用数据的时间跨度较大, 因此在发文机构方面的研究过程中对机构的名称进行了有效的数据清洗与合并, 整理了发文频次前 10 位的机构如表 2 所示。在 1981 年至 2022 年的时间当中, 国内海气相互作用研究主要集中在高校及国家重点研究机构当中, 其中, 中国科学院在海气相互作用领域的研究贡献度最高, 不仅发文频次在近 40 a 当中最多, 而且成为中介中心性最高的机构, 成为了最关键的、贡献最多的机构。

### 2.1.3 国内研究领域热点与演变分析

文献关键词的突现分析是研究海气相互作用领域热点话题持续时间以及其未来发展趋势的有效方法。在运用 CiteSpace 进行可视化分析的过程当中, 手动调节控制着  $\gamma$  参数, 观察可视化分析过程中突现性结果的显示情况, 使得突现结果达到最佳的效果, 其中  $\gamma$  参数取值范围为  $[0, 1]$ 。为了在最大程度上显示突现词, 在可视化分析的过程中将控制面板当中  $\gamma$  参数的值设置为 1, 最终得到的可视化结果如表 3 所示。







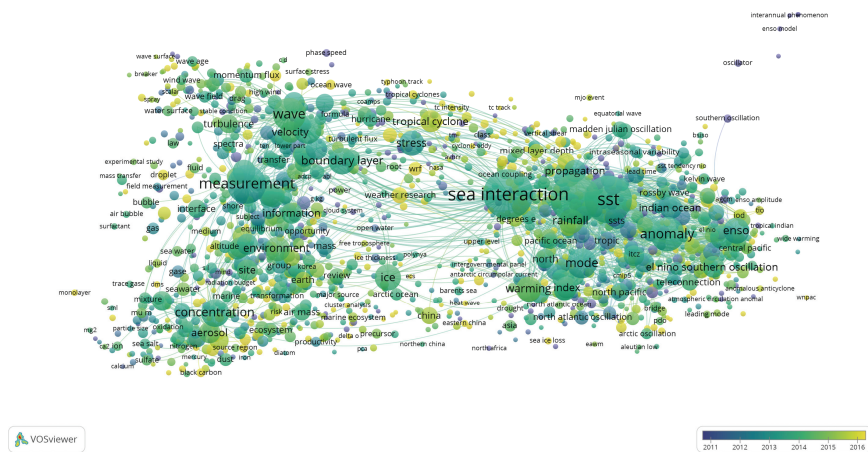


图 9 2011—2016 年关键词演变图  
Fig. 9 Keyword evolution chart, 2011—2016

根据图 6 和图 8 的图谱分析可以清晰地看出, 图 6 当中主要分为 4 大聚类, 可以总结为: 天气系统的异常(红色部分)、波浪对海洋带来的影响(绿色部分)、气候变化的研究(黄色部分)以及海洋酸化现象的研究(蓝色部分); 而在图 8 所示的图谱当中, 将关键词主要分为了 3 大聚类: 海气相互作用方面(红色部分)、波浪及湍流相关的研究方法(蓝色部分)以及对环境中各因素带来的影响方面的研究(绿色区域)。对比图 6 和图 8 的内容可发现研究重心从对异常天气系统、大尺度过程以及波浪带来的效应和环境影响方面的相关研究逐渐转变为对海气相互作用及海洋上层各影响因素的研究以及对波浪和湍流的研究方法的探讨, Weller 等人<sup>[80]</sup>通过 TOGA 海气耦合模式以及海气通量分量来对海气相互作用的影响进行研究, 以及 Tomita 等人<sup>[81]</sup>通过对高分辨率的海气通量数据以及

Argo 浮标数据进行分析, 共同揭示了海气湍流热通量与深海混合层之间的关系; 此外, 从图 9 关键词的演变可以看出在国际范围内近几年的研究当中, 研究方向的发展情况与国内目前的趋势大致相同, 根据时间图例对应可视化图谱可见“tropical cyclone”、“weather research”以及“flux”等在近几年的研究热度逐渐提高, 虽然现在研究的成果尚少, 但是随着人们对极端天气现象以及自然灾害关注度的日益提高, 自然灾害的预报以及对极端天气现象的分析和应对措施的研究已逐渐成为大多数学者所关注的问题<sup>[82-92]</sup>。

### 2.2.3 发文国家、机构可视化分析

在对发文国家、机构进行分析方面, 采用与处理 CNKI 文献相同的方法对 Web of Science 的文献基于全部作者机构进行可视化分析(图 10), 使用

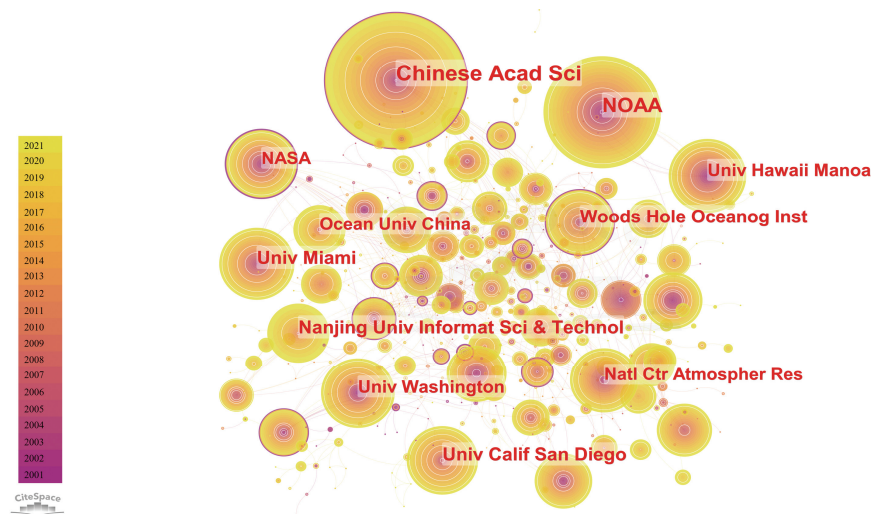


图 10 国内外海气相互作用研究发文机构聚类视图  
Fig. 10 Clustered view of domestic and foreign institutions publishing on air-sea interactions

CiteSpace, 对于 2001 年至 2021 年来自 Web of Science 的 5 162 篇文献, 选择对发文机构进行分析, 时间间隔设置为 1 a。经过寻径网络算法(path-finder)的计算分析, 一共生成了 556 个节点, 699 条网络线, 网

络密度为 0.004 5。图 11 为近 20 a 来国际上发文机构共现分析, 其中聚类模块值( $Q=0.812\ 1$ )> 0.3, 聚类平均轮廓值( $S=0.925\ 9$ )>0.7, 聚类的结果具有可信度。



图 11 发文国家(地区)可视化图谱  
Fig. 11 Visual map of sending countries (regions)

根据发文频次进行排序分析, 如表 4 所示, 国内外海气相互作用的研究主要集中在高校, 也有部分发文机构属于政府机构。发文较多的高校主要分布在中国和美国, 例如中国科学院, 它作为中国自然科学最高学术机构、科学技术最高咨询机构、自然科学与高技术综合研究发展中心, 在学术界有非常高的影响力。迈阿密大学的大气与海洋科学学院是全美国唯一一所研究亚热带应用与基础大气与海洋科学的学院, 实力也非常强劲; 伍

兹霍尔海洋研究所是世界上最大的海洋工程教育研究机构<sup>[93]</sup>; 华盛顿大学<sup>[94]</sup>在海洋科学领域当中, 处于世界领先地位; 此外, 发文较多的政府机构主要有美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)<sup>[95]</sup>以及美国国家大气研究中心<sup>[96]</sup>等, 而且各个机构也有对极端的天气系统进行预测以及保护人类生命财产安全的责任, 从而促进“人类命运共同体”的构建。

表 4 海气相互作用研究前 10 位发文机构  
Tab. 4 Top 10 publishers in air-sea interaction research

发文机构	发文频次	国家
Chinese Academy of Sciences(中国科学院)	520	中国
National Oceanic and Atmospheric Administration(美国国家海洋和大气管理局)	270	美国
Nanjing University(南京大学)	155	中国
University of Miami(迈阿密大学)	147	美国
University of California San Diego(加利福尼亚大学圣迭戈分校)	145	美国
Woods Hole Oceanographic Institution(伍兹霍尔海洋研究所)	130	美国
University of Hawaii at Manoa(夏威夷大学马诺阿分校)	122	美国
University of Washington(华盛顿大学)	118	美国
National Center for Atmospheric Research(国家大气研究中心)	111	美国
Ocean University of China(中国海洋大学)	110	中国



国际上海气相互作用研究发文国家和地区网络图谱可以非常直观地呈现出各个国家或地区海气相互作用的研究现状, 图谱如图 11 所示。

从发文数量来看, 美国在 2001 年至 2021 年这总的发文量为 2 044 篇, 占比 39.6%, 中国的发文量为 1 023 篇, 占比 19.8%。国际上发文数量的排名前十位的国家如表 5 所示, 从表格当中分析可知, 发文数量最多的前

表 5 发文数量排名前 10 位的国家

Tab. 5 Top 10 countries ranked by number of published articles

发文国家	发文数量/篇	中介中心性
美国	2 044	0.03
中国	1 023	0.03
英国	421	0.03
法国	400	0.07
德国	353	0.00
日本	337	0.20
印度	237	0.03
加拿大	222	0.07
意大利	207	0.03
澳大利亚	186	0.04

表 6 国外文献前 20 位关键词突现图

Tab. 6 Top 20 keyword emerged in foreign literature

关键词	突现强度	开始年份	结束年份
general circulation model	15.98	2001	2011
gcm	8.13	2001	2007
climate variability	5.97	2001	2003
Niño southern oscillation	8.35	2002	2007
TOGA COARE	8.15	2002	2004
North Atlantic	6.33	2002	2005
interdecadal variability	6.30	2002	2008
tropical Pacific	6.19	2002	2005
warm pool	8.06	2003	2014
annual cycle	6.26	2003	2008
United States	7.77	2004	2008
Oceanography: physical	6.63	2005	2008
interaction	6.93	2007	2013
sea interaction theory	6.30	2009	2013
tropical Indian ocean	6.80	2011	2016
southern oscillation	6.59	2011	2015
climate forecast system	6.25	2016	2018
resolution	7.18	2018	2021
atmosphere-ocean interaction	7.52	2019	2021
heat budget	6.08	2019	2021

三个国家分别是: 美国、中国和英国; 排名第一位的美国发文量占比高达 39.6%, 而中国近 20 a 来的国际发文量占比仅为 19.8%, 和美国之间还存在一定的差距。美国作为在海气相互作用研究领域投入程度最大、研究成果最多的国家, 在海洋与大气相互作用相关的领域在世界上具有举足轻重的地位<sup>[97-104]</sup>, 中国在近年来对海气相互作用领域的投入也是非常大的。

### 2.2.4 研究领域热点与演变分析

文献关键词的突现分析在研究领域热点问题以及演变趋势时往往会起到关键性的作用, 采取与分析国内研究热点及演变相同的方法, 运用 CiteSpace 进行可视化分析的过程当中, 在可视化控制面板当中将  $\gamma$  参数的值设置为 1, 选取前 20 位的关键词, 结果如表 6 所示。

根据关键词突现分析可知: 从 2001 年开始, 对“general circulation model(环流模式)”的研究持续时间最长, 直到 2011 年才开始呈现缩减, 在这段时间内, 学者们在该阶段主要聚焦在大气、海洋环流系统研究的宏观层面上, 且对其机制已得到深刻的理解, 开启了其后对大气和海洋当中较小尺度的研究<sup>[105-113]</sup>。

在 2018 至 2021 年期间,“resolution”、“atmosphere-ocean interaction”以及“heat budget”突现持续至今,充分体现出了研究理念上的革新以及研究思维的转变,与之前研究相比,近年来对海洋的生态环境以及海洋与大气之间物质与能量的交换与传递的研究逐渐增多<sup>[114-127]</sup>,上述研究结果说明了海气相互作用研究的热点主要集中在海气之间各种通量。

### 3 结论

本研究通过运用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件对 1981 至 2021 年的 CNKI 和 Web of Science 核心合集收录的海气相互作用相关文献进行分析,主要从关键词共现网络、关键词时间图谱、关键词密度图谱、发文国家、机构以及关键词突现图谱这 5 个方面进行可视化,展示了海气相互作用研究领域的核心研究问题、研究热点、研究内容的演变以及研究前沿发展趋势,反映了近几十年来的研究状况以及该领域未来的发展趋势。

(1)从关键词共现的结果来看,国内外在海气相互作用领域的研究都是从宏观到微观,在对大气与海洋的基本机制做出深入的研究与讨论之后,开始对影响地球气候系统的各个因素进行详细的分析研究;学者们考虑到全人类的整体利益,从保护海洋生态与海洋大气能量物质交换平衡的角度出发,对危害人类生命安全的极端天气系统以及被破坏的海洋生态环境做出了深刻的讨论。

(2)从发文机构及其分布来看,国内外海气相互作用的研究的机构主要是高校,也有部分政府机构。根据发文频次进行分析,国外的发文机构大多分布在美国,国内的海气相互作用研究的主体主要是涉海院校,且国内的研究机构之间的联系紧密,这将有助于将来在该领域进行深入探讨。

(3)从国内外文献关键词共现图谱来看,国内外的研究情况均开始于对海洋和大气宏观层面以及其机理的研究,进入 21 世纪之后转变为对海气相互作用的研究方法、模式以及大尺度过程的研究,主要的研究对象从机理分析过渡到对自然灾害,并在未来持续进行。

海气相互作用领域研究要从大局出发,具有全球视野。海洋作为纽带把全球各地连接在一起,要注重海洋的整体性特征。海洋自然灾害容易产生一系列的连锁效应,不论是海底火山喷发、地震还是海啸的发生,都会在全世界范围内造成极大的影响,破坏海洋和大气物质能量循环系统的稳定,更会对人

类的正常生产、生活造成严重的伤害。

综上对“海气相互作用”相关文献的研究,并根据关键词的时间序列视图以及关键词突现情况的分析可以得到该领域目前及未来研究的热点问题以及方向。

根据国内及国际范围内关键词共现的时间序列视图,从 2005 年开始,国内的多数学者开始对台风的作用机制进行研究,自 2016 年,国际范围内对“tropical cyclone”的研究成为热点话题,可以得知近年来对台风等极端气候系统的研究逐渐增多;此外,台风作为大尺度天气过程中最为典型的一个过程,虽然现在已有学者在海气相互作用对台风的结构强度、双眼墙形成以及演变过程进行了研究,但是对其机制的研究尚少<sup>[13, 15-17]</sup>,仍然需要进行更加深入的研究与讨论。因此,以台风为代表的大尺度过程的机制研究、形成过程以及演变趋势的预测将会是研究的重点内容;同时,台风的预报和防灾减灾也是现在备受关注的问题。因此,除了对大尺度天气过程的机制研究,还要对灾害性的天气过程进行预测、预防,这是现在乃至将来亟待解决的问题之一。

除此之外,国际上近年来对海气通量影响的研究层出不穷<sup>[80]</sup>,随着“蓝碳计划”<sup>[128]</sup>等的提出,对大尺度过程中海气通量的研究不仅是现在的热点问题,在国际范围内的碳达峰、碳中和背景下对海气通量(如二氧化碳通量)的研究也成为了现在及未来几十年内的热点话题。

#### 参考文献:

- [1] 郝赛,毛江玉,吴国雄.南海海气相互作用对热带气旋生成的影响——一个例诊断[J].热带气象学报,2013,29(5):759-768.  
HAO Sai, MAO Jiangyu, WU Guoxiong. Influence of air-sea interaction in the South China Sea on the formation of tropical cyclones - case diagnosis[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 29(5): 759-768.
- [2] 黄勇,黄刚,王业桂,等.中低纬海气相互作用的耦合模态变化研究[J].热带气象学报,2017,33(6):861-873.  
HUANG Yong, HUANG Gang, WANG Yegui, et al. Research on coupled mode changes in mid- and low-latitude air-sea interactions[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(6): 861-873.
- [3] 李博,周天军,林鹏飞,等.冬季北太平洋海表面热通量异常和海气相互作用的耦合模式模拟[J].气象学报,2011,69(1):52-63.  
LI Bo, ZHOU Tianjun, LIN Pengfei, et al. Coupled model simulation of sea surface heat flux anomalies

- and air-sea interaction in the North Pacific in winter[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 69(1): 52-63.
- [4] 宋斌, 智协飞, 潘梦婷, 等. 北太平洋冬季年代际尺度海气相互作用[J]. *气象科学*, 2017, 37(2): 272-277.  
SONG Bin, ZHI Xiefei, PAN Mengting, et al. Interdecadal-scale air-sea interaction in the North Pacific in winter[J]. *Meteorological Science*, 2017, 37(2): 272-277.
- [5] 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 720-740.  
WU Guoxiong, LIU Yimin, YU Jingjing, et al. Regulation of air-sea interaction by land-sea distribution and the formation of subtropical high pressure[J]. *Atmospheric Science*, 2008, 32(4): 720-740.
- [6] 郑建秋, 任保华, 李根, 等. 热带西太平洋暖池局地海气相互作用的季节依赖性[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(6): 853-860.  
ZHENG Jianqiu, REN Baohua, LI Gen, et al. Seasonal dependence of local air-sea interaction in the tropical western Pacific warm pool[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(6): 853-860.
- [7] 蒲书箴, 赵进平, 于卫东, 等. 中国的海气相互作用研究(1998-2002)[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 107-121.  
PU Shuzhen, ZHAO Jinping, YU Weidong, et al. Research on air-sea interaction in China (1998-2002) [J]. *Progress in Marine Science*, 2003, 21(1): 107-121.
- [8] 陈宏莉, 徐海明, 马静, 等. 月内尺度上与冬季北太平洋大范围海温暖异常相联系的海气相互作用特征[J]. *大气科学*, 2022, 46(2): 293-308.  
CHEN Hongli, XU Haiming, MA Jing, et al. Characteristics of air-sea interactions associated with large-scale sea warming anomalies in the North Pacific in winter on an intramonthly scale[J]. *Atmospheric Science*, 2022, 46(2): 293-308.
- [9] 何青青. 夏季西印度洋海气相互作用的特征及其可能机制[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.  
HE Qingqing. Characteristics and possible mechanisms of air-sea interaction in the western Indian Ocean in summer[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018.
- [10] 李熙晨. 热带海温通过海气相互作用影响海平面高度[C]// 中国气象学会. 第 34 届中国气象学会年会 S26 青年论坛论文集. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2017.  
LI Xichen. Tropical sea temperature affects sea level height through air-sea interaction[C]// Chinese Meteorological Society. Proceedings of the S26 Youth Forum of the 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [11] 庞姗姗, 王喜冬, 刘海龙, 等. 热带海洋盐度障碍层多尺度变异机理及其对海气相互作用的影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(2): 139-153.  
PANG Shanshan, WANG Xidong, LIU Hailong, et al. Research progress on the multi-scale variation mechanism of tropical ocean salinity barrier layer and its impact on air-sea interaction[J]. *Progress in Earth Sciences*, 2021, 36(2): 139-153.
- [12] 汪天一. 海气相互作用在西北太平洋夏季季节内振荡中的作用[D]. 南京: 南京大学, 2018.  
WANG Tianyi. The role of air-sea interaction in the summer intraseasonal oscillation of the northwest Pacific[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [13] 吴文韬. 海气相互作用对台风 Soulik(1307)强度和结构影响的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.  
WU Wentao. Numerical simulation study on the impact of air-sea interaction on the intensity and structure of Typhoon Soulik (1307) [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [14] 张炜晨. 冰期北大西洋局地海气相互作用对海温变化的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.  
ZHANG Weichen. Influence of local air-sea interaction in the North Atlantic on sea temperature changes during the glacial period[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [15] 谭晓林. 海气相互作用对台风“杜鹃”强度和边界层过程的影响研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
TAN Xiaolin. Research on the influence of air-sea interaction on the intensity and boundary layer process of Typhoon Dujuan[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [16] 杨璐. 海气相互作用对 Sinlaku 台风(2008)双眼墙形成与演变过程的影响研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
YANG Lu. Research on the impact of air-sea interaction on the formation and evolution of the double wall of Typhoon Sinlaku (2008) [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [17] 郑静, 费建芳, 蒋国荣, 等. 海气相互作用对热带气旋发生发展影响研究综述[J]. *海洋预报*, 2008, 25(1): 56-64.  
ZHENG Jing, FEI Jianfang, JIANG Guorong, et al. Review of research on the impact of air-sea interaction on the occurrence and development of tropical cyclones[J]. *Ocean Forecast*, 2008, 25(1): 56-64.
- [18] 任宏利, 郑飞, 罗京佳, 等. 中国热带海-气相互作用与 ENSO 动力学及预测研究进展[J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 351-369.  
REN Hongli, ZHENG Fei, LUO Jingjia, et al. Research progress on tropical air-sea interaction and ENSO dynamics and prediction in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 351-369.



- Sinica, 2020, 78(3): 351-369.
- [19] 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 Fei, FU Ningning, HU Wei, et al. Analysis and enlightenment of domestic and foreign marine resource research knowledge graphs[J]. Resource Science, 2020, 42(11): 2047-2061.
- [20] 孙丹译, 李爽. 基于大涡模拟耦合模式的小尺度海气相互作用研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(6): 1310-1319.  
SUN Danyi, LI Shuang. Research on small-scale air-sea interaction based on large eddy simulation coupled model[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(6): 1310-1319.
- [21] GREGG W R. The free atmosphere in India[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1924, 5(12): 169-170.
- [22] BJERKNES J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. Monthly Weather Review, 1969, 97(3): 163-172.
- [23] 张志森, 封国林, 龚志强, 等. 热带海洋与中低纬大气相互作用的信息传输特征分析[J]. 物理学报, 2014, 63(2): 456-468.  
ZHANG Zhisen, FENG Guolin, GONG Zhiqiang, et al. Analysis of information transmission characteristics of the interaction between the tropical ocean and the mid-and low-latitude atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(2): 456-468.
- [24] CABRERA M, SANTINI M, LIMA L, et al. The southwestern Atlantic Ocean mesoscale eddies: A review of their role in the air-sea interaction processes[J]. Journal of Marine Systems, 2022: 103785.
- [25] HONG J S, MOON J H, Kim T, et al. Role of salinity-induced barrier layer in air-sea interaction during the intensification of a typhoon[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 844003.
- [26] LI S, CHEN C. Air-sea interaction processes during hurricane Sandy: Coupled WRF-FVCOM model simulations[J]. Progress in Oceanography, 2022, 206: 102855.
- [27] CHARNEY J C, ELIASSEN A. On the growth of the hurricane depression[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1964, 21(1): 68-75.
- [28] ANTHES R A. The dynamics and energetics of mature tropical cyclones[J]. Reviews of Geophysics, 1974, 12(3): 495-522.
- [29] EMANUEL K, SOBEL A. Response of tropical sea surface temperature, precipitation, and tropical cyclone-related variables to changes in global and local forcing[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 447-58.
- [30] KAPLAN J, DEMARIA M. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin[J]. Weather and forecasting, 2003, 18(6): 1093-1108.
- [31] SAMSON G, MASSON S, LENGAIGNE M, et al. The NOW regional coupled model: Application to the tropical Indian Ocean climate and tropical cyclone activity[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2014, 6(3): 700-722.
- [32] SINGH V K, ROXY M. A review of ocean-atmosphere interactions during tropical cyclones in the north Indian Ocean[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103967.
- [33] GAO S. The application of remotely sensed inner-core rainfall and surface latent heat flux in typhoon intensity forecast[M]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong, 2010.
- [34] NGUYEN H V. A new tropical cyclone initialization technique and its applications to typhoon track, intensity, and heavy rainfall simulations[D]. Hawaii: University of Hawai'i at Manoa, 2011.
- [35] GOLDSTEIN A M. A methodology for modulating the intensification rates of forecast mid-latitude cyclones with implications for predictability[D]. Madison, US: The University of Wisconsin - Madison, 2018.
- [36] 宋宇, 真溱, 汤珊红. 科学图谱简介: 过去、现在和未来[J]. 情报理论与实践, 2015, 38(7): 145.  
SONG Yu, ZHEN Qin, TANG Shanhong. Introduction to scientific maps: past, present and future[J]. Intelligence Theory and Practice, 2015, 38(7): 145.
- [37] VAN ECK N, WALTMAN L J S. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
- [38] GUAN S P, JIN X L, JIA Y T, et al. Knowledge reasoning over knowledge graph: A survey[J]. Journal of Software, 2018, 29(10): 2966-2994.
- [39] REY-MARTÍ A, RIBEIRO-SORIANO D, PALACIOS-MARQUÉS D. A bibliometric analysis of social entrepreneurship[J]. Journal of Business Research, 2016, 69(5): 1651-1655.
- [40] NOYONS E C, MOED H F, LUWEL M. Combining mapping and citation analysis for evaluative bibliometric purposes: A bibliometric study[J]. Journal of the American Society for Information Science, 1999, 50(2): 115-131.
- [41] 肖明, 邱小花, 黄界, 等. 知识图谱工具比较研究[J]. 图书馆杂志, 2013, 32(3): 61-69.  
XIAO Ming, QIU Xiaohua, HUANG Jie, et al. Comparative study of knowledge graph tools[J]. Library Journal, 2013, 32(3): 61-69.
- [42] LUCIO - ARIAS D, LEYDESDORFF L. Main - path analysis and path - dependent transitions in HistCite™ - based historiograms[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2008, 59(12):

- 1948-1962.
- [43] GOH C H, BRESSAN S, MADNICK S, et al. Context interchange: New features and formalisms for the intelligent integration of information[J]. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 1999, 17(3): 270-293.
- [44] PU H, HU T, SONG T, et al. Modeling and application of a customized knowledge graph for railway alignment optimization[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 244: 122999.
- [45] LIU Q, ZHANG Q, ZHAO F, et al. Uncertain knowledge graph embedding: an effective method combining multi-relation and multi-path[J]. *Frontiers of Computer Science*, 2024, 18(3): 183311.
- [46] SUN Y, ZHU Z, ZUO Z, et al. DSAMR: Dual-stream Attention Multi-hop Reasoning for knowledge-based visual question answering[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 245: 123092.
- [47] 李杰. 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 Jie. CiteSpace: Scientific and technological text mining and visualization[M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016.
- [48] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.  
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. Methodological function of CiteSpace knowledge graph[J]. *Scientific Research*, 2015, 33(2): 242-253.
- [49] WALTMAN L, VAN ECK N J, NOYONS E C M. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks[J]. *Journal of informetrics*, 2010, 4(4): 629-635.
- [50] 胡泽文, 孙建军, 武夷山. 国内知识图谱应用研究综述[J]. *图书情报工作*, 2013, 57(3): 131-137, 184.  
HU Zewen, SUN Jianjun, WU Yishan. A review of domestic knowledge graph application research[J]. *Library and Information Service*, 2013, 57(3): 131-137, 184.
- [51] 张宏, 李航, 程利冬, 等. 运用 EndNote 批量编辑加工英文参考文献[J]. *编辑学报*, 2018, 30(4): 369-372.  
ZHANG Hong, LI Hang, CHENG Lidong, et al. Using EndNote to batch edit and process English references[J]. *Journal of Editing*, 2018, 30(4): 369-372.
- [52] DZIKOWSKI P. A bibliometric analysis of born global firms[J]. *Journal of Business Research*, 2018, 85: 281-294.
- [53] 郭文斌, 方俊明, 陈秋珠. 基于关键词共词分析的我国自闭症热点研究[J]. *西北师大学报(社会科学版)*, 2012, 49(1): 128-132.  
GUO Wenbin, FANG Junming, CHEN Qiuzhu. Research on autism hot spots in my country based on keyword co-word analysis[J]. *Journal of Northwest Normal University (Social Science Edition)*, 2012, 49(1): 128-132.
- [54] VAN ECK N J, WALTMAN L J S. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer[J]. *Scientometrics*, 2017, 111(2): 1053-1070.
- [55] 李菁菁, 李茜燕. 基于 CiteSpace 的文科综合实验教学中心可视化研究[J]. *现代信息科技*, 2023, 7(7): 124-126, 130.  
LI Jingjing, LI Qianyan. CiteSpace-based visualization study of liberal arts integrated experimental teaching center[J]. *Modern Information Technology*, 2023, 7(7): 124-126, 130.
- [56] 符传博, 丹利, 佟金鹤等. 台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2481-2491.  
FU Chuanbo, DAN Li, TONG Jinhe, et al. Analysis of the impact of Typhoon Nangka on ozone pollution in Hainan Island[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2481-2491.
- [57] 刘青, 王军, 许瀚卿, 等. 台风影响下沿海城市风雨复合灾害风险研究——以海口市为例[J]. *灾害学*, 2022, 37(4): 129-134.  
LIU Qing, WANG Jun, XU Hanqing, et al. Research on wind and rain composite disaster risks in coastal cities under the influence of typhoons—taking Haikou City as an example[J]. *Disaster Science*, 2022, 37(4): 129-134.
- [58] 孙崇智, 覃皓. 利用 TRMM 资料分析广西台风降水的分布特征[J]. *海洋预报*, 2022, 39(4): 47-58.  
SUN Chongzhi, QIN Hao. Using TRMM data to analyze the distribution characteristics of typhoon precipitation in Guangxi[J]. *Ocean Forecast*, 2022, 39(4): 47-58.
- [59] 覃皓, 郑凤琴, 伍丽泉. 台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用[J]. *应用气象学报*, 2022, 33(4): 477-488.  
QIN Hao, ZHENG Fengqin, WU Liquan. Interaction between the intensity of Typhoon Rammasun (1409) and precipitation changes[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2022, 33(4): 477-488.
- [60] 魏凯, 徐洪权, 钟茜. 台风作用下杭州湾跨海铁路大桥嘉甬通道海域风浪流特性分析[J]. *铁道标准设计*, 2023, 67(8): 97-102, 146.  
WEI Kai, XU Hongquan, ZHONG Qian. Analysis of wind and wave current characteristics in the sea area of Jiayong Channel of Hangzhou Bay Cross-sea Railway Bridge under the action of typhoon[J]. *Railway Standard Design*, 2023, 67(8): 97-102, 146.
- [61] 杨裕桂, 卢陈, 吴尧, 等. 台风“山竹”过境期间伶仃洋潮流流悬移质变化研究[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(5): 30-36.  
YANG Yugui, LU Chen, WU Yao, et al. Research on changes in suspended mass in the Lingdingyang tidal current during the passage of Typhoon Mangkhut[J].

- Sediment Research, 2022, 47(5): 30-36.
- [62] 于群, 林婧璇, 马艳子. 台风天气下电网薄弱线路辨识与停电事故模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 23-29.  
YU Qun, LIN Jingxuan, MA Yanzi. Identification of weak power grid lines and blackout accident model during typhoon weather[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2023, 35(1): 23-29.
- [63] ZOU L W. The air-sea coupling process improves the northwest Pacific summer monsoon simulated by the WRF4 model (English) [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, 13(6): 500-508.
- [64] 胡运, 宋振亚, 宋亚娟. 海气耦合模式 CESM1 中热带印度洋 SST 模拟偏差的来源分析[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(3): 350-361.  
HU Yun, SONG Zhenya, SONG Yajuan. Analysis of sources of biases in tropical Indian Ocean SST simulations in the air-sea coupled model CESM1[J]. Progress in Marine Science, 2017, 35(3): 350-361.
- [65] 江洁, 周天军, 吴波, 等. 耦合模式 FGOALS-s2 海洋同化试验模拟的西北太平洋海气相互作用特征[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 467-482.  
JIANG Jie, ZHOU Tianjun, WU Bo, et al. Characteristics of air-sea interaction in the northwest Pacific simulated by the coupled model FGOALS-s2 ocean assimilation experiment[J]. Atmospheric Science, 2019, 43(3): 467-482.
- [66] 李科, 苑福利, 刘厂. 基于海气耦合模式的均权重粒子滤波与集合卡尔曼滤波比较研究[J]. 海洋通报, 2021, 40(4): 417-424.  
LI Ke, YUAN Fuli, LIU Chang. Comparative study of equal weight particle filtering and ensemble Kalman filtering based on air-sea coupling model[J]. Marine Bulletin, 2021, 40(4): 417-424.
- [67] 刘武, 杨成荫, 李耀东, 等. 基于 MCT 耦合器的 WRF-POM 区域海气耦合模式构建及应用[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 98-107.  
LIU Wu, YANG Chengyin, LI Yaodong, et al. Construction and application of WRF-POM regional air-sea coupling model based on MCT coupler[J]. Marine Sciences, 2018, 42(5): 98-107.
- [68] 伍志元, 蒋昌波, 邓斌, 等. 基于海气耦合模式的南中国海北部风暴潮模拟[J]. 科学通报, 2018, 63(33): 3494-3504.  
WU Zhiyuan, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Storm surge simulation in the northern South China Sea based on air-sea coupling model[J]. Bulletin of Science, 2018, 63(33): 3494-3504.
- [69] 张岳军, 周静, 韩照宇, 等. 基于海气耦合模式的山西省夏季降水统计降尺度预测研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(3): 323-332.  
ZHANG Yuejun, ZHOU Jing, HAN Zhaoyu, et al. Research on statistical downscaling prediction of summer precipitation in Shanxi Province based on air-sea coupled model[J]. Climate and Environmental Research, 2016, 21(3): 323-332.
- [70] 周天军, 邹立维, 韩振宇, 等. 区域海气耦合模式 FROALS 的发展及其应用[J]. 大气科学, 2016, 40(1): 86-101.  
ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, HAN Zhenyu, et al. Development and application of regional air-sea coupling model FROALS[J]. Atmospheric Science, 2016, 40(1): 86-101.
- [71] ZHA X, LUO P, ZHU W, et al. A bibliometric analysis of the research on Sponge City: Current situation and future development direction[J]. Ecohydrology, 2021, 14(7): e2328.
- [72] GURZKI H, WOISETSCHLAGER D M. Mapping the luxury research landscape: A bibliometric citation analysis[J]. Journal of business research, 2017, 77: 147-166.
- [73] 司东, 柳艳菊, 邵颢, 等. 2015 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象, 2016, 42(4): 481-488.  
SI Dong, LIU Yanju, SHAO Xie, et al. Ocean and atmospheric circulation anomalies in 2015 and their impact on China's climate[J]. Meteorology, 2016, 42(4): 481-488.
- [74] 肖莺, 任永建, 杜良敏. 2015/2016 年海洋和大气环流异常对中国夏季降水的影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 1995-2004.  
XIAO Ying, REN Yongjian, DU Liangmin. Impact of ocean and atmospheric circulation anomalies on summer precipitation in China in 2015/2016[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 1995-2004.
- [75] 谢坤, 任雪娟, 张耀存, 等. 区域海气耦合模式对华北夏季大气水汽输送模拟结果的检验及其与单独气候模式的比较分析[J]. 气象学报, 2009, 67(6): 1002-1012.  
XIE Kun, REN Xuejuan, ZHANG Yaocun, et al. Examination of the simulation results of summer atmospheric water vapor transport in North China by the regional air-sea coupled model and its comparative analysis with individual climate models[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(6): 1002-1012.
- [76] 彭京备, 布和朝鲁, 郑飞, 等. 2019 年夏季全国气候趋势展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(6): 693-699.  
PENG Jingbei, BUHE Chaolu, ZHENG Fei, et al. National climate trend outlook in summer 2019[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(6): 693-699.
- [77] 王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果[J]. 大气科



- 学, 2008, 32(4): 806-814.
- WANG Huijun, SUN Jianqi, LANG Xianmei, et al. Some new results of research on interannual climate variability and short-term climate prediction in my country in recent years[J]. Atmospheric Science, 2008, 32(4): 806-814.
- [78] 胡力, 肖宏. 基于 CNKI 文献大数据视野下生药学学科发展及研究进展分析[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(4): 689-695.
- HU Li, XIAO Hong. Analysis of pharmacognosy discipline development and research progress based on the perspective of CNKI literature big data[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2018, 43(4): 689-695.
- [79] 邹立维, 周天军. 区域海气耦合模式研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 857-865.
- ZOU Liwei, ZHOU Tianjun. Research progress on regional air-sea coupling models[J]. Progress in Earth Sciences, 2012, 27(8): 857-865.
- [80] WELLER R A, BRADLEY F, LUKAS R. The interface or air-sea flux component of the TOGA coupled ocean-atmosphere response experiment and its impact on subsequent air-sea interaction studies[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(2): 223-257.
- [81] TOMITA H, KOUKETSU S, OKA E, et al. Locally enhanced wintertime air-sea interaction and deep oceanic mixed layer formation associated with the subarctic front in the North Pacific[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(24): L24607.
- [82] 包文轩, 宫阿都, 徐灏, 等. 基于区域灾害系统论的广东省台风灾害风险评估——以“山竹”台风为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 94-103.
- BAO Wenxuan, GONG Adu, XU Chan, et al. Typhoon disaster risk assessment in Guangdong Province based on regional disaster system theory—taking Typhoon Mangkhut as an example[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2023, 59(1): 94-103.
- [83] 陈莉婷, 郑晶, 高建清, 等. 基于 FastDTW 案例检索的台风灾害应急方案生成[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 171-176.
- CHEN Liting, ZHENG Jing, GAO Jianqing, et al. Typhoon disaster emergency plan generation based on FastDTW case retrieval[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2022, 32(4): 171-176.
- [84] 韩鹏, 郭桂祯, 孙宁, 等. 广东省台风灾害时空格局及影响因素研究[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 112-117.
- HAN Peng, GUO Guizhen, SUN Ning, et al. Research on the spatiotemporal pattern and influencing factors of typhoon disasters in Guangdong Province[J]. Disaster Science, 2022, 37(3): 112-117.
- [85] 姜露露, 马仁锋, 袁海红. 台风灾害经济损失评估研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(3): 252-263.
- JIANG Lulu, MA Renfeng, YUAN Haihong. Research progress on economic loss assessment of typhoon disasters[J]. Ecological Science, 2022, 41(3): 252-263.
- [86] 李家钰, 秦文萍, 景祥, 等. 台风灾害下考虑连锁故障的电力系统弹性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 14-22.
- LI Jiayu, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Resilience assessment of power system considering cascading failures under typhoon disaster[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2023, 35(1): 14-22.
- [87] 马丽叶, 王海锋, 卢志刚, 等. 计及相关性影响的增强台风灾害下配电网韧性灵活性资源规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 60-68.
- MA Liye, WANG Haifeng, LU Zhigang, et al. Resource planning to enhance distribution network resilience and flexibility under typhoon disasters taking into account the impact of correlation[J]. Power System Automation, 2022, 46(7): 60-68.
- [88] 席禹, 于力, 程凌森, 等. 基于改进狮群算法-模糊评判的变电站台风易损性评估[J]. 现代电力, 2023, 40(5): 827-834.
- XI Yu, YU Li, CHENG Lingsen, et al. Substation typhoon vulnerability assessment based on improved lion group algorithm-fuzzy evaluation[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(5): 827-834.
- [89] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.
- YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Chaohong, et al. V2G-based urban distribution network resilience improvement strategy under typhoon disaster[J]. Power System Automation, 2022, 46(12): 130-139.
- [90] 袁海红, 吕旖, 张时婧. 海岛养殖户台风灾害适应性行为及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 1089-1103.
- YUAN Haihong, LU Yi, ZHANG Shijing. Analysis of the adaptive behavior of island farmers to typhoon disaster and its influencing factors[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(4): 1089-1103.
- [91] 张悦. 基于 FAHP 的台风灾害影响下石化企业综合风险评估研究[J]. 华北科技学院学报, 2022, 19(2): 102-107.
- ZHANG Yue. Research on comprehensive risk assessment of petrochemical enterprises under the influence of typhoon disaster based on FAHP[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2022, 19(2): 102-107.
- [92] 周纳, 刘强. 基于模糊神经网络的广东省台风灾害损失预测[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(3): 461-466.
- ZHOU Na, LIU Qiang. Typhoon disaster loss predic-

- tion in Guangdong Province based on fuzzy neural network[J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(3): 461-466.
- [93] JONES G, MCNICHOL A, VON REDEN K, et al. The National Ocean Sciences AMS Facility at Woods Hole Oceanographic Institution[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1990, 52(3/4): 278-284.
- [94] TUYA F C, SOBOIL M L, KIDO J. An assessment of the effectiveness of marine protected areas in the San Juan Islands, Washington, USA[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(4): 1218-1226.
- [95] GUTMAN G, IGNATOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of remote sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [96] KIEHL J, HACK J, BONAN G, et al. The national center for atmospheric research community climate model: CCM3[J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(6): 1131-1149.
- [97] BELLUCCI A, ATHANASIADIS P J, SCOCCIMARRO E, et al. Air-Sea interaction over the Gulf Stream in an ensemble of HighResMIP present climate simulations[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 56(7/8): 2093-2111.
- [98] FANG J, CHEN L, YANG X Q. Roles of vertical distributions of atmospheric transient eddy dynamical forcing and diabatic heating in midlatitude unstable air-sea interaction[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 58(1/2): 351-368.
- [99] GRARE L, STATOM N M, PIZZO N, et al. Instrumented wave gliders for air-sea interaction and upper ocean research[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 664728.
- [100] KIM T, LEE S, PARK H J, et al. The impact of coupled air-sea interaction on extreme East Asian summer monsoon simulation in CMIP5 models[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(14): 6336-6349.
- [101] PASQUERO C, DESBIOLLES F, MERONI A N. Air - sea interactions in the cold wakes of tropical cyclones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(2): e2020GL091185.
- [102] SROKA S, EMANUEL K. A review of parameterizations for enthalpy and momentum fluxes from sea spray in tropical cyclones[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(10): 3053-3069.
- [103] WEI H H, SUBRAMANIAN A C, KARNAUSKAS K B, et al. Tropical Pacific air - sea interaction processes and biases in CESM2 and their relation to El Niño development[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(6): e2020JC016967.
- [104] YANG H, WU L, CHANG P, et al. Mesoscale energy balance and air-sea interaction in the Kuroshio Extension: low-frequency versus high-frequency variability[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(3): 895-910.
- [105] BADER J, LATIF M. North Atlantic oscillation response to anomalous Indian Ocean SST in a coupled GCM[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(24): 5382-5389.
- [106] HAZELEGER W. Can global warming affect tropical ocean heat transport?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): 154-164.
- [107] HOGG A M, DEWAR W K, KILLWORTH P D, et al. Decadal variability of the midlatitude climate system driven by the ocean circulation[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(7): 1149-1166.
- [108] LIU N, CHEN H. Southern meridional atmospheric circulation associated with IOD[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2006, 5(2): 99-105.
- [109] CAI W, COWAN T. Impacts of increasing anthropogenic aerosols on the atmospheric circulation trends of the Southern Hemisphere: An air-sea positive feedback[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23709-1-L23709-5.
- [110] NESTEROV E S. Influence of the Surface water temperature and heat flux in the North Atlantic on the atmospheric circulation[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, 34(1): 25-30.
- [111] KWON Y O, DESER C, CASSOU C. Coupled atmosphere-mixed layer ocean response to ocean heat flux convergence along the Kuroshio Current Extension[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(11/12): 2295-2312.
- [112] ZHAO P, YANG S, WU R, et al. Asian origin of interannual variations of summer climate over the extratropical North Atlantic Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(19): 6594-6609.
- [113] SHELL K M, FROUIN R, NAKAMOTO S, et al. Atmospheric response to solar radiation absorbed by phytoplankton[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D15): 806-814.
- [114] 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 等. 春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量[J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2565-2573.  
CAO Xingpeng, ZHANG Guiling, MA Xiao, et al. Distribution of dissolved methane and air-sea exchange flux in the East and Yellow Seas in spring[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2565-2573.
- [115] 马立杰, 崔迎春. 南海中部和北部上层海水中溶存甲烷浓度及海气交换通量[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(2): 94-101.  
MA Lijie, CUI Yingchun. Dissolved methane concentration and air-sea exchange flux in the upper seawater of the central and northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(2): 94-101.

- [116]张麋鸣, 陈立奇, 汪建君. 南大洋二甲基硫海—气交换过程研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(9): 1015-1024.  
ZHANG Miming, CHEN Liqi, WANG Jianjun. Research progress on the sea-gas exchange process of dimethyl sulfide in the Southern Ocean[J]. Progress in Earth Sciences, 2013, 28(9): 1015-1024.
- [117]马啸, 张桂玲, 曹兴朋, 等. 春季东海溶存氧化亚氮的分布和海气交换通量[J]. 海洋科学, 2014, 38(2): 21-28.  
MA Xiao, ZHANG Guiling, CAO Xingpeng, et al. Distribution of dissolved nitrous oxide and air-sea exchange flux in the East China Sea in spring[J]. Marine Sciences, 2014, 38(2): 21-28.
- [118]程天宇, 高郭平, 胡登辉, 等. 2016 年冬末长江口及邻近海域海气 CO<sub>2</sub> 交换特征分析[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(2): 264-273.  
CHENG Tianyu, GAO Guoping, HU Denghui, et al. Analysis of air-sea CO<sub>2</sub> exchange characteristics in the Yangtze River Estuary and adjacent sea areas in late winter 2016[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(2): 264-273.
- [119]孙庆杨, 林静柔, 唐丹玲, 等. 南海海气 CO<sub>2</sub> 交换对两个热带气旋“风泵”的不同响应机理分析[J]. 生态科学, 2020, 39(3): 9-16.  
SUN Qingyang, LIN Jingrou, TANG Danling, et al. Analysis of different response mechanisms of air-sea CO<sub>2</sub> exchange in the South China Sea to the “wind pump” of two tropical cyclones[J]. Ecological Science, 2020, 39(3): 9-16.
- [120]OLSEN A, OMAR A M, STUART - MENTETH A C, et al. Diurnal variations of surface ocean pCO<sub>2</sub> and sea - air CO<sub>2</sub> flux evaluated using remotely sensed data[J]. Geophysical research letters, 2004, 31(20): L20304.
- [121]FRANSSON A, CHERICI M, ANDERSON L, et al. Transformation of carbon and oxygen in the surface layer of the eastern Atlantic sector of the Southern Ocean[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(22/24): 2757-2772.
- [122]SIGNORINI S R, MCCLAIN C R. Effect of uncertainties in climatologic wind, ocean pCO<sub>2</sub>, and gas transfer algorithms on the estimate of global sea - air CO<sub>2</sub> flux[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2): GB2025.
- [123]EVANS W, MATHIS J T, CROSS J N, et al. Sea - air CO<sub>2</sub> exchange in the western Arctic coastal ocean[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2015, 29(8): 1190-1209.
- [124]IBÁNHEZ J S P, MONTES M F, LEFÈVRE N. Evidence for enhanced primary production driving significant CO<sub>2</sub> drawdown associated with the Atlantic ITCZ[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156592.
- [125]JIN R, YU T, TAO B, et al. Influence of the nocturnal effect on the estimated global CO<sub>2</sub> flux[J]. Remote Sensing, 2022, 14(13): 3192.
- [126]MANNING C, ZHENG Z, FENWICK L, et al. Inter-annual variability in methane and nitrous oxide concentrations and sea - air fluxes across the North American Arctic Ocean (2015–2019)[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2022, 36(4): e2021GB007185.
- [127]XUE F, YANG Y, ZOU S, et al. Characterization of airborne bacteria and fungi at a land-sea transition site in Southern China[J]. Science of The Total Environment, 2022, 849: 157786.
- [128]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 Peng, HU Xuedong. International blue carbon cooperative development and China's choice[J]. Marine Bulletin, 2019, 38(6): 613-619.



# Analysis of research trends in the field of air-sea interactions based on bibliometric analysis methods

GAO Yu<sup>1, 2</sup>, HAO Peng<sup>1, 2</sup>, YE Can<sup>1, 2</sup>, CHENG Zeyi<sup>1, 2</sup>, LI Shuang<sup>1, 2</sup>, SONG Jinbao<sup>1, 2</sup>

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Institute of Physical Oceanography and Remote Sensing, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

**Received:** Sep. 26, 2022

**Key words:** air-sea interaction; VOSviewer; CiteSpace; knowledge graph; research progress

**Abstract:** This research aims to elucidate the complex interactions between the ocean and atmosphere, integral components of Earth's climate system. These elements play a crucial role in shaping global climate patterns and, by extension, affect human life significantly. By employing bibliometric analysis that leverages tools such as VOSviewer and CiteSpace, the study meticulously reviews literature on air-sea interactions sourced from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and the Web of Science core collection databases. This approach allows for a comprehensive evaluation of China's research progression in this area from 1981 to 2021, alongside an exploration of future trends. The analysis encompasses keyword co-occurrence networks, time-series maps, emergent network maps, and the geographical distribution of contributing countries and institutions. This multifaceted examination not only charts China's advancements in this field but also integrates an international perspective by examining global research advancements and focal issues spanning from 2001 to 2021. One of the key findings of this study is the noticeable shift in domestic and international research focus regarding air-sea interactions. Moving from the macro to the microperspective, research has gradually evolved to emphasize the fundamental interaction mechanisms and the factors influencing Earth's climate system. Notably, there has been a recent pivot toward understanding and predicting extreme weather systems and their underlying mechanisms. Furthermore, the study underscores the predominant role played by universities and government agencies in driving the research forward, highlighting substantial collaboration among domestic institutions. It delineates the evolution in key research directions and methodologies within the air-sea interaction field. Initially, the focus was on macro-level basic research; however, there has been a transition toward more detailed studies concerning air-sea fluxes and large-scale processes. This shift mirrors adjustments in international oceanic development strategies and offers novel insights and frameworks that can guide future research trajectories.

(本文编辑: 丛培秀)