薄 宇,周 洪,贾紫牧,等.全球大气污染物和温室气体融合排放清单研究趋势分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):676-688.
Bo Y, Zhou H, Jia Z M, et al. Analysis of global research trends in integrated emission inventories of atmospheric pollutants and greenhouse gases [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):676-688.

全球大气污染物和温室气体融合排放清单研究趋势分析

薄 宇[1],周 洪[2],贾紫牧[3],唐 倩[4],徐晨曦[5,6],贺克斌[7],陶 诚[2*] (1.中国科学院大气物理研究所, 全球变化东亚区域研究中心,北京 100029；2.中国科学院武汉文献情报中心,湖北 武汉 430071；3.中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029；4.生态环境部环境规划院大气环境规划研究所,北京 100041；5.天府永兴实验室,四川 成都 610213；6.兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000；7.清华大学环境学院,北京 100084)

摘要：气候变化与大气污染是当今全球面临的两大关键环境挑战,构建高精度排放清单是应对这些挑战的科学基础.基于 Web of Science 数据库,综合运用科学知识图谱和文本挖掘技术,系统解析了全球排放清单研究领域的主题分布、机构格局及合作网络特征.研究发现,该领域发文量在过去数 10a 间呈现显著增长态势,并表现出约 10a 周期的跃升特征.研究主题涵盖交通运输排放、颗粒物污染、气候变化减缓等 26 个主题,涉及行业部门、排放物种、模型方法以及特定过程和影响分析.中国、美国、法国、德国等国的研究机构在领域发展中发挥引领作用,形成了差异化、多元化的研究格局,并构建了具有显著地理集聚效应的国际合作网络.分析揭示,研究主题间存在紧密关联,其中颗粒物污染、空气质量模型、挥发性有机化合物等主题在促进不同排放清单间的知识融合方面已显现出重要作用.未来研究的重点应聚焦于:构建统一的排放清单分类体系、优化排放清单校验方法、推动排放数据公开透明化、以及深化跨国协作与信息共享机制,以期协同推进大气污染物和温室气体排放清单的科学基础与应用效能.

关键词：排放清单；融合；大气污染物；温室气体；科学知识图谱
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-0676-13

Analysis of global research trends in integrated emission inventories of atmospheric pollutants and greenhouse gases. BO Yu[1], ZHOU Hong[2], JIA Zi-mu[3], TANG Qian[4], XU Chen-xi[5,6], HE Ke-bin[7], TAO Cheng[2*] (1.Temperate East Asia Research Center on Global Change, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China；2.National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China；3.State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China；4.Institute of Atmospheric Environment, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100041, China；5.Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, China；6.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China；7.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：676~688

Abstract：Climate change and atmospheric pollution represent two critical environmental challenges facing the world today, and the development of high-accuracy emission inventories serves as the scientific foundation for addressing these challenges. Based on the Web of Science database, this study employs a comprehensive approach integrating scientometric mapping and text mining techniques to systematically analyze the thematic distribution, institutional landscape, and collaborative network characteristics within the global emission inventory research domain. The findings reveal a significant growth trend in publication output over the past decades, with a notable leap cycle of approximately ten years. The research themes encompass 26key topics, including transportation emissions, particulate matter pollution, and climate change mitigation, and span across industrial sectors, emission species, and modeling methodologies, as well as specific processes and impact analyses. Research institutions from China, the United States, France, Germany, and other countries have played leading roles in advancing the field, forming a differentiated and diversified research landscape while establishing international collaboration networks with distinct geographical clustering effects. The analysis demonstrates strong interconnections among research themes, with topics such as particulate matter pollution, air quality modeling, and volatile organic compounds showing significant potential in facilitating knowledge integration across different emission inventories. Future research efforts should prioritize (1) establishing a unified classification system for emission inventories, (2) optimizing emission inventory validation methods, (3) promoting transparency and open access to emission data, and (4) strengthening multinational collaboration and information-sharing mechanisms. These measures are essential for synergistically

收稿日期：2025-05-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42442108)
* 责任作者, 副研究员, taoch@mail.whlib.ac.cn

advancing the scientific foundation and practical application of both air pollutant and greenhouse gas emission inventories.
Key words：emission inventory；integration；atmospheric pollutants；greenhouse gases；scientific knowledge map

气候变化与大气污染是当今全球面临的两大重要环境挑战[1-2].自工业革命以来,二氧化碳(CO_2)浓度持续上升,2024 年比工业化前水平高出 50%以上,全球平均地表温度比 1850~1900 年水平高出了 1.55℃.与此同时,大气污染问题愈发严重,2024 年全球空气状况报告指出,空气污染已成为全球第二大早逝风险因素,仅次于高血压,并且 99%的世界人口暴露于有害的 $PM_{2.5}$ 水平中[3].为应对这些问题,各国和国际机构积极推进减污与降碳目标,通过立法和排放标准控制温室气体与污染物的排放[4-6].

大气污染物或温室气体排放清单通常指各种排放源在一定时间跨度和空间区域内向大气排放的污染物或温室气体量的集合[7-8].大气污染物排放清单编制是大气污染控制的基础,为污染排放特征识别、监测数据解析、空气质量预测和污染防治措施制定提供信息支持[9-10].温室气体排放清单编制对评估监测排放趋势、制订减排政策和推动低碳经济发展至关重要[11].

大气污染物和温室气体之间存在复杂的相互作用关系,排放源具有高度重叠性[12-13],然而目前研究工作多将其视为独立领域,缺乏协同研究的融合性[14-16].这种分割限制了对大气污染与气候变化之间复杂关系的深入理解,还导致了数据采集、处理和分析的冗余.将两者纳入同一管理框架中进行协同控制,可以有效提高环境治理的综合效能[17].例如,英国国家大气排放清单涵盖了污染物和温室气体的排放数据,由相关机构按统一体系编制和维护,并集成到一个信息平台[18].德国也采取了类似的做法[19].我国在这方面也积极推进,2024 年 1 月生态环境部发布了《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》[20],明确了融合排放清单的编制程序及技术方法,并强调全过程的质量控制.

为深入分析大气污染物和温室气体排放清单的研究现状与协同融合趋势,本文采用科学知识图谱和文本挖掘的方法,从融合的视角对全球相关研究进行分析.通过利用 Web of Science 的论文数据,重点聚焦研究主题的交叉网络,揭示重点物种清单之间的融合特征,并探讨融合清单发展的趋势,识别当前的热点和前沿问题.基于这些分析,提出应对协同发展过程中所面临挑战的相应建议,为我国大气污染物和温室气体协同控制提供支撑.

1　数据来源和方法

大气污染物和二氧化碳排放清单是评估和管理环境排放的重要工具[21-22].通过详实的活动数据和科学估算方法,这些清单能够量化特定区域内温室气体(如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4))和主要污染物(如氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、挥发性有机化合物(VOCs)、颗粒物(PM))的排放量,不仅揭示排放特征,还为空气质量预测、数据监测和污染防治提供关键依据[23-24].目前,全球多个机构,如联合国气候变化框架公约(UNFCCC)、欧洲环境署(EEA)和美国环境保护署(EPA),定期发布相关清单,我国也在积极推进排放清单的编制(表 1)[25-28].其中,UNFCCC 和欧盟排放交易系统(ETS)要求成员国报告详细的排放数据,这推动了数据标准化和协同管理[29-30].清华大学开发的多尺度排放清单模型(MEIC)则致力于构建高分辨率的人为源排放清单,并通过云计算平台共享数据,为科学研究提供支持[31].

大气污染物与温室气体排放清单融合不仅是简单的数据整合,更要求建立统一的排放源分类、分级体系及一致的计算方法、技术规范和质量控制措施,以确保清单的准确性和可靠性.本文基于 Web of Science 数据库作为数据来源,围绕排放清单构建检索式:TS=(“emission inventor*” OR “emissions inventor*”),检索时间为 2025 年 1 月 1 日,得到包含 7926 篇论文(article)的数据集.采用 R 语言对数据进行清洗与预处理后,使用 BERTopic 主题模型[32]对论文摘要进行主题识别与挖掘,构建全球排放清单研究论文的主题图,并分析主要主题的发展趋势及其关注程度.接着,进一步分析主要机构及其研究布局和合作网络,利用主题语义相似度矩阵和 Gephi 软件构建多主题交叉网络,探讨主要研究主题间的相互联系,揭示当前全球排放清单研究的融合特征.

表 1 全球部分大气污染物和温室气体排放清单

Table 1 List of emission inventories for selected air pollutants and greenhouse gases worldwide

序号	清单名称	发布机构	主要内容	发布周期
1	大气化合物排放量和辅助数据汇编(ECCAD)	全球排放清单活动(GEIA)	全球和区域尺度的空气污染物和温室气体排放清单,包括 CO_2、CH_4、N_2O 以及各种气溶胶和臭氧前体.	定期更新
2	全球大气研究排放数据库(EDGAR)	欧盟委员会联合研究中心(JRC)	全球人为温室气体和空气污染物排放量,包括 CO_2、CH_4、N_2O 以及各行业的其他气体.	定期更新
3	美国国家排放清单(NEI)	美国环境保护署(EPA)	美国工业、交通、农业等排放源的空气排放综合清单,涵盖温室气体,以及 SO_2、NO_x、VOCs、CO、颗粒物等.	每 3a 更新一次
4	国家温室气体清单报告(NIR)和通用报告格式表(CRF)	联合国气候变化框架公约(UNFCCC)	联合国气候变化框架公约缔约方提交的国家温室气体清单,包括 CO_2、CH_4、N_2O、HFCs、PFCs 和 SF6 排放数据.	每年更新
5	二氧化碳信息分析中心(CDIAC)数据档案库	美国橡树岭国家实验室(ORNL)	全球、国家和地区的化石燃料二氧化碳排放数据、土地利用变化数据以及其他碳循环数据.	2017 年 9 月结束运营
6	欧洲污染物释放和转移登记册(E-PRTR)	欧洲环境署(EEA)	欧洲工业设施的污染物排放数据,包括空气、水和土地中的排放,以及废物的转移情况.	每年更新
7	燃料燃烧产生的二氧化碳排放量	国际能源署(IEA)	按国家和地区分列的燃料燃烧二氧化碳排放综合数据,包括行业细分.	每年更新
8	全球碳预算	全球碳项目(GCP)	全球年度碳预算,包括化石燃料排放、土地利用变化排放和碳汇数据,并从 2013 年开始评估全球甲烷和氧化亚氮预算	每年更新
9	欧洲监测和评估计划(EMEP)	联合国欧洲经济委员会(UNECE)	欧洲跨境空气污染数据,包括 SO_2、NO_x、VOC、NH_3 和颗粒物(PM)的排放.	每年更新
10	全球火灾排放数据库(GFED)	美国 NASA 戈达德太空飞行中心、加州大学欧文分校等	基于卫星观测的火灾排放数据,包括 CO_2、CH_4、CO 和其他污染物.	定期更新
11	IIASA GAINS 模型	国际应用系统分析研究所(IIASA)	综合评估模型,提供各部门和各地区的空气污染物和温室气体排放数据,以及未来排放情景.	定期更新
12	TNO-MACC III 欧洲排放清单	荷兰应用科学研究组织(TNO)	欧洲高分辨率排放清单,包括各行业 CO_2、NO_x、SO_2、VOC 和可吸入颗粒物的数据.	定期更新
13	全球贸易分析项目(GTAP)排放数据库	美国普渡大学	涵盖 141 个国家和地区,包含温室气体和空气污染物排放的数据,并与经济数据关联,可分析与贸易有关的排放.	定期更新
14	中国多尺度排放清单模型(MEIC)	中国清华大学	中国碳排放清单以及高分辨率大气污染物集成清单,涵盖 CO_2、SO_2、NO_x、CO、NMVOC、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$等.	定期更新

2 全球排放清单研究的主题分布

过去几十年来,随着全球经济的增长和能源需求的激增,大气污染物和二氧化碳排放量问题日益严峻,这促使全球对排放问题的研究得到了前所未有的关注[33-34].技术的进步,例如卫星观测技术在 CH_4、CO_2、NO_2 等排放清单效验中的应用[35-36],为排放清单校验提供了新工具.在经济扩张、技术创新和政策演变的共同推动下,研究论文数量不断攀升且呈现每 10a 显著跃升的趋势,如图 1 所示.其驱动机制可归结为以下三方面:(1)政策资金驱动的科研投入扩张.各国政府持续提升气候变化与大气污染治理的政策优先级,研究资金的规模性投入,如“地平线欧洲计划(Horizon Europe)”2021~2027 年预算总额达 955 亿欧元,重点支持气候变化等战略领域,直接催化了科研产出的增长.(2)领域研究力量的系统性增强.环境科学和气候变化研究领域学科建设与专业人才培养体系的完善,促使全球研究群体规模扩大,形成规模化的知识生产能力.(3)清单编制技术的代际革新:从“自下而上”核算到天地一体监测(如哨兵等卫星反演数据应用),方法论进步与多源数据融合显著提升了研究可行性.

1990 年之前,这一领域的研究活动相对有限,论文数量增长缓慢.从 1993~2010 年,随着全球对气候变化意识的提升,特别是 1997 年《京都议定书》签署以来,相关研究迅速增长,论文数量从 1993 年 24 篇激增至 2010 年 193 篇.这一阶段的增长主要得益于各国政府对环境问题的重视,纷纷投入大量研究资金,同时越来越多的研究人员投身于该领域.此外,排放清单的编制技术和方法不断进步,新的数据来源和技术手段(如卫星观测)也为研究提供了更有力的支持.2011~2021 年,研究进一步深化,论文数量在 2021 年达到 608 篇的高峰,不仅数量激增,研究的质量和深度也显著提升,覆盖了更广泛的科学、技术和

政策议题.

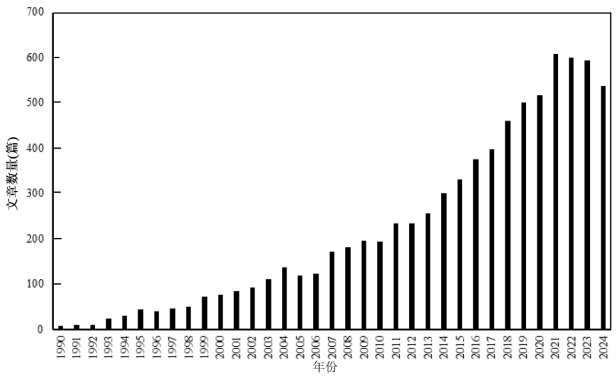


图 1　全球排放清单研究论文的发表趋势

Fig.1　Trends in the publication of research papers in the field of global emission inventories

然而,2021 年后全球排放清单研究数量呈现增速趋缓态势,年均增长率由 2010~2020 年 10.4%降至 1.1%,其结构性动因可解构为三重约束的叠加效应.一是科研资金的战略再配置,因经济形势削减研究经费,如 2021 年“地平线欧洲计划”预算削减至 850 亿欧元,结合政策调整,将资源转向其他环境问题或人工智能等新兴技术领域,削弱了该领域的资金支持;二是学科前沿的结构性转移,研究力量更多投向气候适应路径设计、极端天气归因分析及新兴污染物等领域,导致排放清单研究论文数量增长放缓;三是全球突发事件的持续损耗,新冠疫情影响了研究机构和高校的正常运作,实验室关闭、项目暂停、交流受限频发,同时疫情促使部分资金紧急调配至公共卫生领域,进一步削弱了该领域的研究投入,且迟滞效应明显,在疫情后期仍在持续,恢复和调整需要时间.

从空间分布来看, 1990 年代~2000 年代以欧美主导,发文量占同期全球发文量的 95%以上;2010 年代后中国研究机构呈现跃迁式发展,从 2010 年的论文全球占比 21%持续增长至 2023 年近 52%,再到 2024 年近 60%,中国发文快速增长,欧美保持稳定,导致近年来中国该领域占比持续上涨,成为重塑领域贡献的关键变量.地域贡献度差异本质映射各国科研投入周期:不同发展阶段的环境治理需求强度、国家科研投资规模及技术储备深度,共同决定了区域研究产出的历史轨迹.

通过梳理全球排放清单领域论文的研究主题,揭示该领域的主题分布和热点趋势.采用 BERTopic 主题模型对论文摘要文本进行主题挖掘,模型设置最小集群规模为 50 和最小样本数为 25,提炼出 26 个独特的主题.通过 KeyBERT 和 MMR 算法提取的主题关键词,结合大语言模型和专家综合评估,确定主题标签,构建全球排放清单研究论文的主题图,如图 2 所示.其中,每个点代表一篇论文,其 UMAP 确定的坐标反映了论文之间的主题相似性.点距离越近,表明对应的论文在主题上具有较高的相关性,而较远距离则意味着较低的相似性.点的颜色根据 HBSCAN 聚类结果标示不同主题.

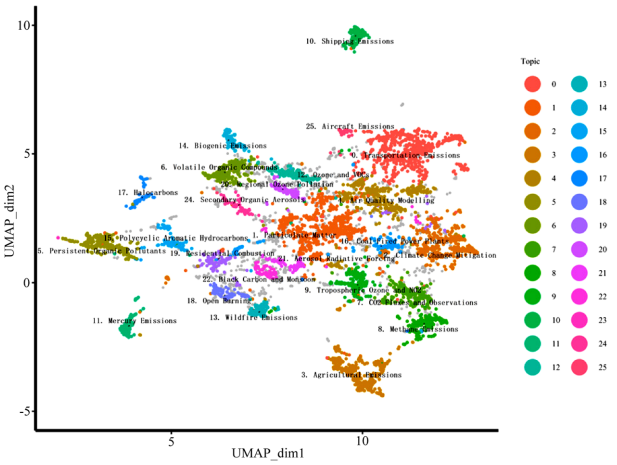


图 2　全球排放清单研究论文的主题

Fig.2　Topic map of research papers on global emission inventories

全球排放清单研究涵盖广泛的主题,可归纳为:(1)工业与环境污染物,包括颗粒物污染、汞排放、燃煤发电厂等.(2)大气化学与臭氧层,涉及 POPs、VOCs、对流层臭氧和二氧化氮等.(3)气候变化与碳排,包括交通运输排放、气候变化缓解、航空排放、甲烷排放等.(4)农业与自然源排放,涵盖农业排放、野火排放、露天焚烧等.从演变特征看,早期研究聚焦于基础排放清单编制及主要污染物排放特征分析,而近年来研究方向逐渐向多污染物协同效应、模型优化以及政策影响评估等领域拓展和深化.

从行业来看,研究关注特定来源的排放问题,覆盖了工业、交通、农业、生活等多个领域[37-41],包括交通运输排放(主题 0)、农业排放(主题 3)、航运排放(主题 10)、野火排放(主题 13)、生物排放(主题 14)、燃煤发电厂(主题 16)、露天焚烧(主题 18)、民用排放(主题 19)、航空排放(主题 25)等.从物种划分来看,

研究包括 CO_2 通量和观测(主题 7)、甲烷排放(主题 8)等温室气体主题,也包括颗粒物污染(主题 1)、持久性有机污染物(POPs)(主题 5)、VOCs(主题 6)、对流层臭氧和二氧化氮(主题 9)、汞排放(主题 11)、多环芳香烃(主题 15)、卤化碳(主题 17)、黑碳(主题 22)、全氟化合物(主题 23)等大气污染物主题,其中 POPs(主题 5)等为新污染物.研究还涉及模型和方法,如空气质量模型(主题 4)、CO_2 通量和观测(主题 7)等,以及特定过程和影响,如气候变化缓解(主题 2)、臭氧与 VOCs 的敏感性(主题 12)、区域性臭氧污染(主题 20)、气溶胶光学性质(主题 21)、次生有机气溶胶(主题 24)等.

在排放清单研究中,各主题既独立呈现行业特有问题,又在跨领域的治理与政策制定中展现出共性和融合趋势.交通运输排放(主题 0)备受关注,涉及对车辆尾气中的氮氧化物等污染物和 CO_2 排放的研究;航运排放(主题 10)和航空排放(主题 25)排放清单则聚焦船舶与飞机的特定污染物.工业领域研究多样,如颗粒物污染(主题 1)研究集中在可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($PM_{2.5}$)等颗粒物的来源与健康环境影响;燃煤发电厂(主题 16)的研究则涵盖了煤炭燃烧过程中的二氧化硫等污染物排放.气候变化缓解(主题 2)是一个多维度的研究领域,既关注 CO_2 等温室气体的排放,也涉及能源消耗、城市排放等综合监测;甲烷排放(主题 8)其排放源的研究特别关注油气开采和农业活动.农业排放(主题 3)不限于氨气和牲畜排放,还涉及这些活动对环境的广泛影响.野火排放(主题 13)的研究揭示了自然灾害对空气质量的深远影响,尤其是在全球变暖和极端气候事件日益频繁的背景下.野火不仅在短时间内释放大量颗粒物和气体污染物,还对生态系统和人类健康构成严重威胁.民用排放(主题 19)的研究关注日常生活中的燃烧活动,如木材和炉灶燃烧.

研究领域虽各自聚焦特定污染物,但在环境污染控制和气候变化治理中却相互交织、互为补充,促进了多维度综合治理策略的形成.POPs(主题 5)和 VOCs(主题 6),这些化学物质因其在环境中的长期存在和潜在的健康风险而备受关注.POPs,如多氯联苯(PCBs)和二噁英(PCDD/Fs),因其生物累积性和远距离传输特性,对生态系统和人类健康构成了长期威胁;VOCs 来自工业、燃烧及溶剂使用等多种来源,不仅直接参与大气化学反应,还在臭氧及次生有机气溶胶(主题 24)的生成中发挥关键作用.进一步,臭氧与 VOCs 的敏感性(主题 12)研究揭示了臭氧在大气中的形成机制,以及 VOCs 在光化学过程中的重要作用,这些研究对于理解和预测区域性臭氧污染(主题 20)至关重要.特定化学物质的排放,如氯氟烃(CFCs)和卤化碳(主题 17),以及全氟化合物(主题 23),例如多氟烷基和多氟烷氧基化合物(PFAS),因其环境持久性和生物累积性而引起全球关注,这些物质不仅对臭氧层有破坏作用,还可能通过食物链累积,最终对人类健康造成影响.汞排放(主题 11)的研究则关注这种重金属的环境行为及其对生态系统和人类健康的潜在风险,汞的全球循环和生物放大作用,特别是在食物链中的累积,使得它成为全球性的环境问题.

还有一些主题不容忽视,通过相互融合的视角,构建了一个多层次、跨领域的环境污染物理解框架.空气质量模型(主题 4)通过数学工具在大尺度范围内对空气质量进行仿真模拟,再现污染物在大气中的输送、反应和清除等过程,不仅提高了污染物浓度预测的准确性,还为识别和改进排放清单中的不确定性因素提供了支持.CO_2 通量和观测(主题 7)研究提供了对大气中温室气体浓度变化的深入理解,这对于全球气候变化研究至关重要.气溶胶光学性质(主题 21)的研究则聚焦于这些微小颗粒如何影响大气的光学特性,包括散射和吸收太阳辐射以及地球的长波辐射,这些过程直接关联到气候强迫和能见度问题,对理解气候变化和制定空气质量标准具有重要意义.黑碳(主题 22)作为重要的大气污染物,其研究揭示了这些颗粒物在气候变化和空气质量中的作用.

从国家来看,不同国家和地区的研究主题存在差异.美国和欧洲更关注大气化学过程、气溶胶辐射强迫和温室气体的全球循环.中国在交通运输排放、颗粒物污染和气候变化缓解等领域研究较多.美国、中国、法国、德国等国家的研究机构在该领域发挥了引领作用,但不同国家的引领作用存在差异.美国在早期的排放清单编制和大气化学过程研究方面具有领先优势,特别是在卫星观测技术和模型开发方面.中国近年来在交通运输排放、颗粒物污染和气候变化缓解等领域取得了显著进展,研究数量和质

量均居世界前列.法国、德国在大气化学、气溶胶辐射强迫和欧洲区域排放清单编制方面具有较强的研究实力.针对 26 个主题,不同国家的引领作用并不完全一致.例如,美国在对流层臭氧和 NO_2 研究方面表现突出,而中国在交通运输排放和颗粒物污染研究方面更为领先,这与中国的实际环境问题和政策需求密切相关.发展中国家,如印度和巴西,关注农业排放、野火排放等自然源排放领域.

自 2010 年以来,多数主题领域的论文发表量呈现出显著的增长趋势,如图 3 所示.特别是在交通运输排放(主题 0)、气候变化缓解(主题 2)、VOCs(主题 6)、CO_2 通量和观测(主题 7)以及甲烷排放(主题 8)等领域,研究活动的激增揭示了这些议题在环境科学和政策制定中的紧迫性和重要性.然而,一些主题,如汞排放(主题 11)、臭氧与 VOCs 敏感性(主题 12)以及生物排放(主题 14)的论文增长趋势有所减缓,甚至出现了下降,这可能指示了研究资金的转移、政策焦点的变迁或是科学问题的部分解决.此外,一些主题如气溶胶光学性质(主题 21)和全氟化合物(主题 23)的论文发表在近年的某一特定时间段内出现了急剧增长,随后增长势头减弱,这可能与特定的科学发现、政策变动或社会关注点的转移有关.

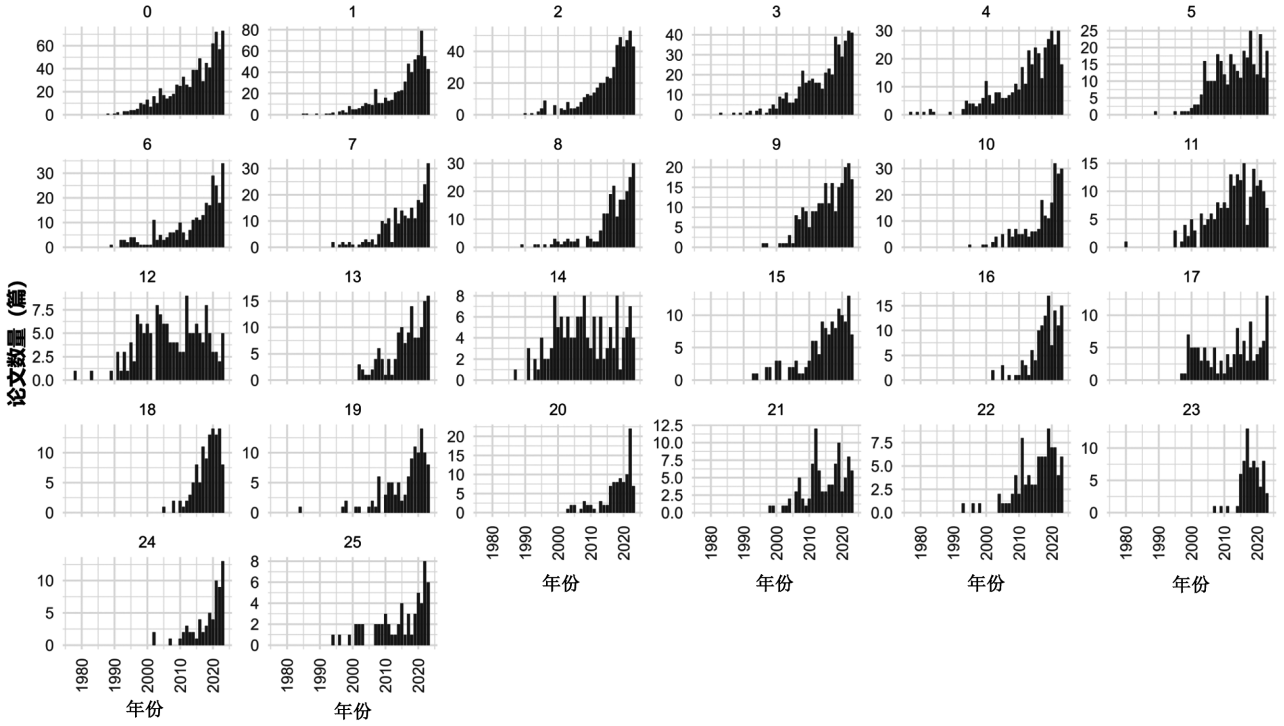


图 3　全球排放清单研究论文的主题趋势(1990 年~2023 年)

Fig.3　Topic trends of research papers on global emission inventories (1990 to 2023)

全球排放清单研究历经数 10a 发展,已形成多维度、跨学科的研究体系.卫星观测技术与人工智能模型的应用显著提升了排放数据的获取与分析能力,研究主题从传统工业排放拓展至航运、野火等新兴源解析,并深度聚焦温室气体与新污染物(如 POPs、PFAS)的环境行为.研究显示,交通排放、甲烷监测及 CO_2 通量等主题呈现持续增长,而汞排放等部分领域研究增速趋缓,反映出科研焦点随政策需求与技术突破的动态调整.值得注意的是,环境统计数据与模型模拟数据间的差异仍是制约清单准确性的关键瓶颈,且新污染物的快速涌现对清单动态更新提出更高要求.总体而言,融合多数据源与多方法构建系统化、动态更新的排放清单,是应对当前环境挑战的重要战略路径.

3　全球排放清单研究的机构布局

排放清单研究领域发文数量前 20 机构主要为高校和科研机构,主要来自中国、美国、法国、德国等国家,如图 4 所示.中国的研究机构在这一领域表现较为突出,清华大学以 451 篇的发文量,位居全球首位,紧随其后的是北京大学,以 391 篇的发文量位列全球第二.此外,南京大学、中国科学院大学、南京信息工

程大学、中国气象局、中国科学院大气物理研究所等机构也在该领域发表了大量高质量的学术论文.美国在排放清单研究领域同样成果丰硕,如美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、科罗拉多大学波尔德分校、哈佛大学、美国国家航空航天局(NASA)、美国环境保护署(EPA)、美国能源部(DOE)等机构均在各自的研究领域内做出了显著的贡献.欧洲的研究机构也不容忽视,法国国家科学研究中心(CNRS)、德国亥姆霍兹联合会、以及马克斯·普朗克学会等,在排放清单研究领域开展了大量的研究工作.

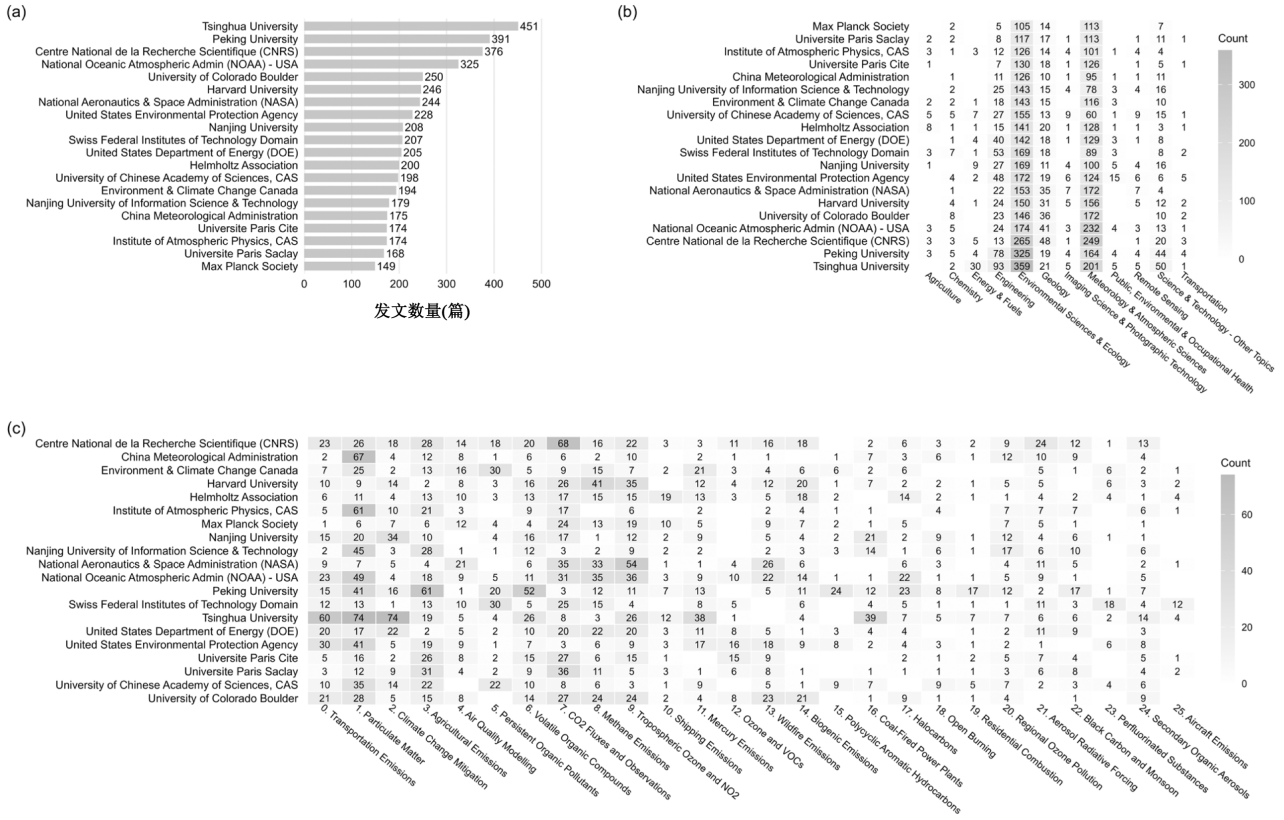


图 4 全球排放清单研究机构的布局方向

Fig.4 Layout directions of research institutions on global emission inventories

主要机构研究均聚焦于环境科学与生态学、气象与大气科学等关键领域,是理解和应对大气污染及气候变化的知识学科.例如,清华大学在环境科学与生态学、气象大气科学及工程领域分别发表 359 篇、201 篇和 93 篇论文,其中能源与燃料领域有 30 篇,凸显其跨学科优势.北京大学在环境科学与生态学及气象大气科学分别发表 325 篇和 164 篇论文,工程领域 76 篇.法国国家科学研究中心则在环境科学、气象大气科学及地质学领域分别贡献 265 篇、249 篇和 48 篇论文,展现了在地球科学整体布局上的实力.美国国家海洋和大气管理局在环境科学与生态学和气象大气科学领域分别发表 174 篇和 232 篇论文.

从研究主题来看,主要机构具有不同的专业特长和研究重点,引领作用并不完全一致.中国在交通运输排放、颗粒物污染和气候变化缓解等领域取得了显著进展,研究数量均居世界前列.例如,清华大学在交通运输排放(60 篇)、颗粒物(74 篇)、减缓气候变化(74 篇)等城市环境问题和空气质量领域开展较多研究,并在燃煤发电厂相关研究(39 篇)上也展现了其在能源与环境交叉领域的深入探索.北京大学则在农业排放(61 篇)和 VOCs(52 篇)研究中突显了其在环境化学领域的专注,同时在颗粒物研究(41 篇)上也开展较多研究. 南京大学在气候变化缓解(34 篇)方面的研究显示了其在可持续发展领域的研究兴趣.美国机构在多个主题表现出色,例如美国国家海洋和大气管理局在 CO_2 通量与观测(31 篇)和甲烷排放(35 篇)方面开展较多研究,体现了其对全球碳循环和温室气体研究的关注.科罗拉多大学波尔德分校在交通运输排放(21 篇)和甲烷排放(24 篇)方面

的研究显示了其在大气科学和环境政策领域的专业能力.哈佛大学在甲烷排放(41 篇)和对流层臭氧及 NO_2(35 篇)方面的研究突出,体现了其在大气科学领域的广泛兴趣.NASA 在对流层臭氧及 NO_2(54 篇)和野火排放(26 篇)方面的研究显示了其在利用空间技术进行环境监测方面的优势.美国环境保护署在交通运输排放(30 篇)和臭氧与 VOCs(16 篇)方面的研究,显示了其在环境保护和空气质量管理方面的专长.美国能源部则在气候变化缓解(22 篇)和 CO_2 通量与观测(20 篇)方面的研究,显示了其在能源效率和可再生能源领域的研究兴趣.此外,法国国家科学研究中心在多个领域展现了其研究实力,特别是 CO_2 通量与观测(68 篇)及气溶胶辐射强迫(24 篇)方面的研究较多.

值得注意的是,尽管这些机构在多个主题上展开了广泛而深入的探索,但至今还没有任何一个机构能够全面覆盖所有研究主题.各研究机构根据自身的专业特长和研究兴趣,选择了不同的研究重点,形成了多样化的研究格局.例如,一些机构在交通排放、气候变化缓解等领域取得了丰硕成果,而其他机构则可能在农业排放、工业污染或特定化学物质的环境影响等方面展现了深入的研究.这种专业化的研究布局,虽然彰显了各自的学术优势,同时也暴露了跨学科整合的必要性.排放清单研究的综合性要求融合不同学科的知识和技能,以构建更为全面和系统的认识框架.不同机构在研究主题上的互补性,为跨领域合作提供了天然的契机,也指向了促进协同发展和国际合作的巨大潜力[42].

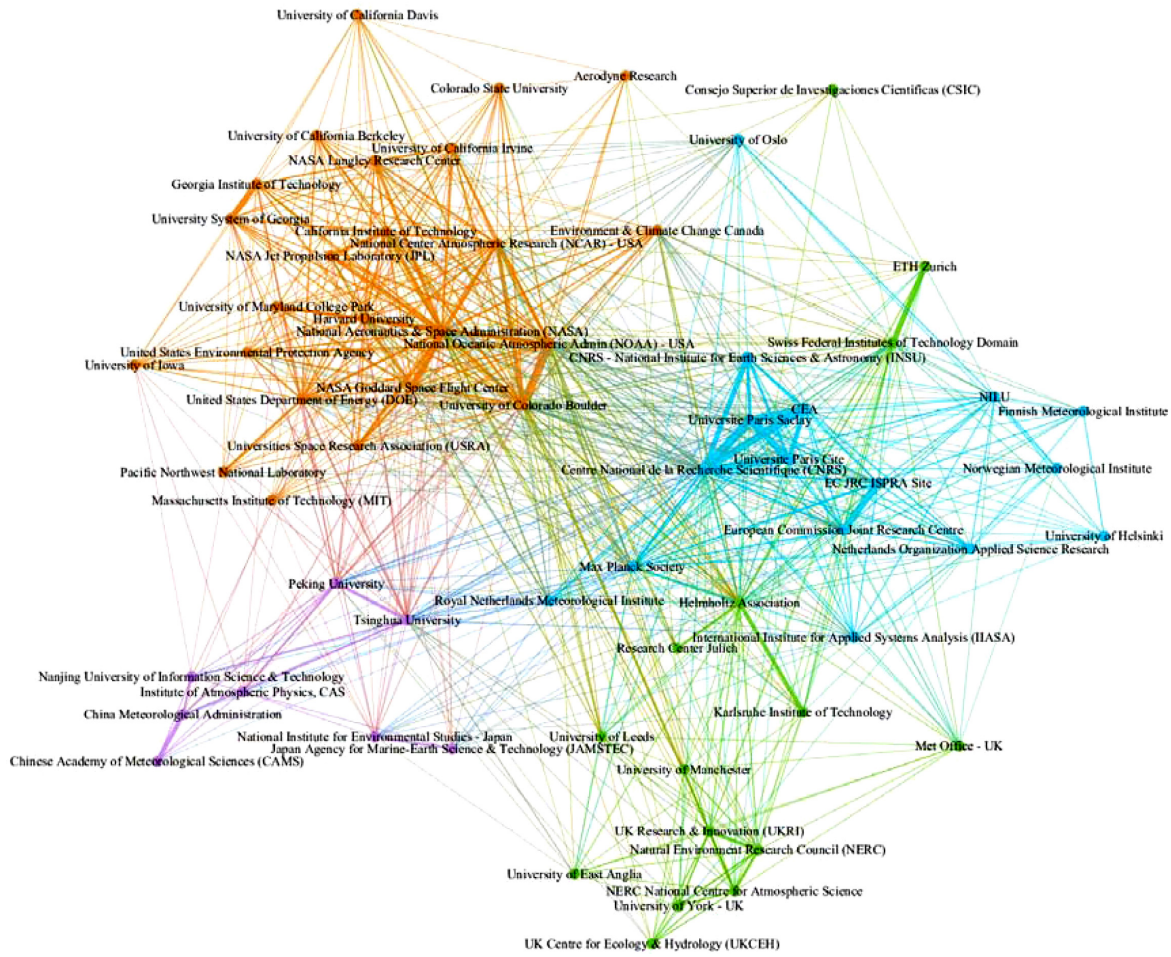


图 5　全球排放清单研究机构的合作网络

Fig.5　Collaboration network of research institutions on global emission inventories

进一步,全球性的合作网络对于排放清单的融合至关重要,它促进了数据共享、技术交流和最佳实践的传播.通过分析论文中机构的共现关系,遴选合作次数大于等于 5 次的合作关系,构建出一个全

球性、多机构的合作网络,如图 5 所示.这一网络反映了合作的广泛性,还体现了合作的地理接近性特征,即机构倾向于与地理位置相近的机构开展合作.这种倾向性可能是由于地理邻近带来的沟通便利、资源共享以及成本降低等优势,从而在一定程度上影响了合作模式和网络结构的形成.

具体来看,合作网络大致可以分为 4 个社区:首先是北美合作网络(橘色),以美国国家海洋和大气管理局、哈佛大学、美国国家航空航天局、美国环境保护署和美国能源部等美国机构为核心,还包括加拿大环境与气候变化部等加拿大机构.其次是东亚合作网络(紫色),主要由中国的清华大学、北京大学、南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所和中国气象局等机构,以及日本的日本海洋地球科学与技术机构、日本国立环境研究所等组成.第三是欧洲合作网络(蓝色),包括法国国家科学研究中心、巴黎萨克雷大学、马克斯·普朗克学会、欧洲委员会联合研究中心等机构.最后是英国合作网络(绿色),以英国研究与创新署、英国生态与水文中心等机构为中心.这些社区的形成不仅反映了各国和地区在环境科学和气候变化研究领域的合作紧密度,也揭示了全球合作网络中的关键节点和中心机构.这种地理上的集聚效应有助于加强区域内的信息交流和资源共享,同时也促进了跨国界的问题解决和技术创新.此外,还应加强全球性的合作网络,促进各机构能够更有效地整合资源和优势领域,共同应对全球环境挑战,推动可持续发展的科学进步.

4 全球排放清单研究的融合特征

大气污染物和温室气体排放之间的关联性和交互影响使得其融合研究显得尤为重要.大气污染源排放清单方法主要关注污染物的排放量估算,而二氧化碳排放清单则侧重于能源、工业、交通等部门的活动.由于二氧化碳与能源消耗和碳循环密切相关,单一排放清单难以准确估算其排放量.此外,环境统计数据的准确性和可靠性受到数据缺失和标准不一的影响,导致不同地区和国家间的排放比较困难.目前,已有学者开展排放清单的融合研究[43-45],但仍需加强跨学科的综合研究,系统考虑不同排放清单研究之间的融合特征,以促进排放清单的融合与优化.

为探讨全球排放清单研究中各主题的关联和融合特征,构建了基于文本语义相似度的主题交叉网络.选取相似度大于 0.76 的边构建 1-模网络,并采用力导向算法 Fruchterman-Reingold 进行可视化,如图 6 所示.网络中,每个节点代表一个研究主题,边的权重即为主题间的相似度,节点颜色反映中心度与关联关系,借此通过社区识别揭示主题之间的融合路径,明确当前的主要融合领域.主要社区内部存在主题融合,大致包括:(1)工业与环境污染物(紫色),涉及颗粒物污染(主题 1)、汞排放(主题 11)、多环芳香烃(主题 15)、燃煤发电厂(主题 16)、气溶胶光学性质(主题 21)、黑碳(主题 22),涵盖从工业排放到大气化学过程的广泛领域;(2)大气化学与臭氧层(浅绿),涉及 POPs(主题 5)、VOCs(主题 6)、对流层臭氧和二氧化氮(主题 9)、臭氧与 VOCs 的敏感性(主题 12)、生物排放(主题 14)、卤化碳(主题 17),聚焦于大气化学过程,特别是臭氧层的保护和大气氧化能力;(3)气候变化与碳排(橘色),涉及交通运输排放(主题 0)、气候变化缓解(主题 2)、空气质量模型(主题 4)、航空排放(主题 25);(4)农业与自然源排放(深绿色),涉及农业排放(主题 3)、CO_2 通量和观测(主题 7)、甲烷排放(主题 8)、野火排放(主题 13)、露天焚烧(主题 18),关注农业活动和自然过程对大气污染物和温室气体排放的贡献.

基于全球排放清单研究主题的交叉网络分析,通过接近中心度(Closeness Centrality)、中介中心度(Betweenness Centrality)和特征向量中心度(Eigenvector Centrality)的计算,评估各研究主题在知识融合中的影响力.接近中心度反映了主题与其他主题的邻近程度,高值表明该主题有利于信息快速传播;中介中心度揭示主题在最短路径中的桥梁作用,高值说明该主题在不同清单之间起着重要中介作用;特征向量中心度则综合考量节点及其连接节点的重要性,高值代表该主题与其他核心主题紧密关联,整体影响力较强.

利用 Ucinet 工具计算结果如图 7 所示,颗粒物污染(主题 1)在三个中心度指标中均表现突出,与其他研究主题密切关联,并推动颗粒物与二氧化碳排放清单的协同研究.当前,许多国家和地区正在开展颗粒物与二氧化碳排放清单的协同研究[46],主要集中

在能源和生产、农业生产和废物处理等来源方面[47-48],并关注颗粒物与 VOCs 等大气污染物的协同影响.空气质量模型(主题 4)的中心度得分较高,与多个研究主题密切相关,以其科学模拟大气输送与反应过程的能力[49-50],有效支撑了多学科融合.同时,VOCs(主题 6)、臭氧与 VOCs 的敏感性(主题 12)等 VOCs 相关主题也有较高的得分,已有研究表明两者的协同研究对于解释 VOCs 排放清单的复杂性和与 CO_2 排放的相互作用具有重要意义[51].交通运输排放(主题 0)、农业排放(主题 3)虽然相关论文数量较多,但中心度指标得分并不高,与其他研究主题的融合还需进一步加强.相对而言,航运排放(主题 10)和全氟化合物(主题 23)的中心度得分较低,与其他主题的衔接不足.

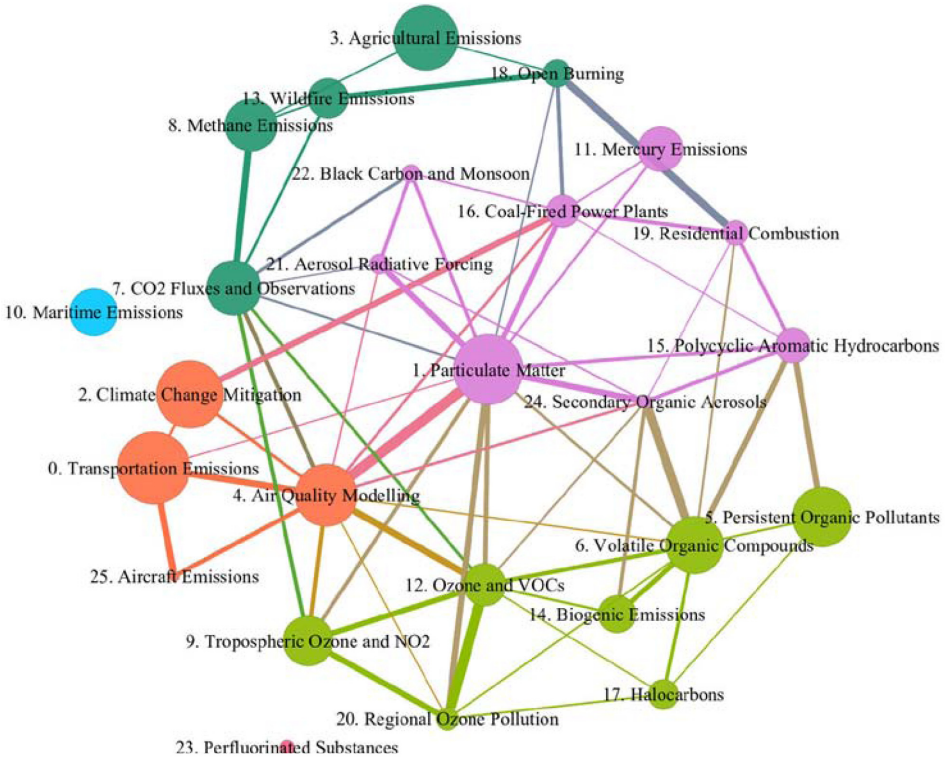


图 6　全球排放清单研究主题的交叉网络

Fig.6　Intersection network of research topics on global emission inventories

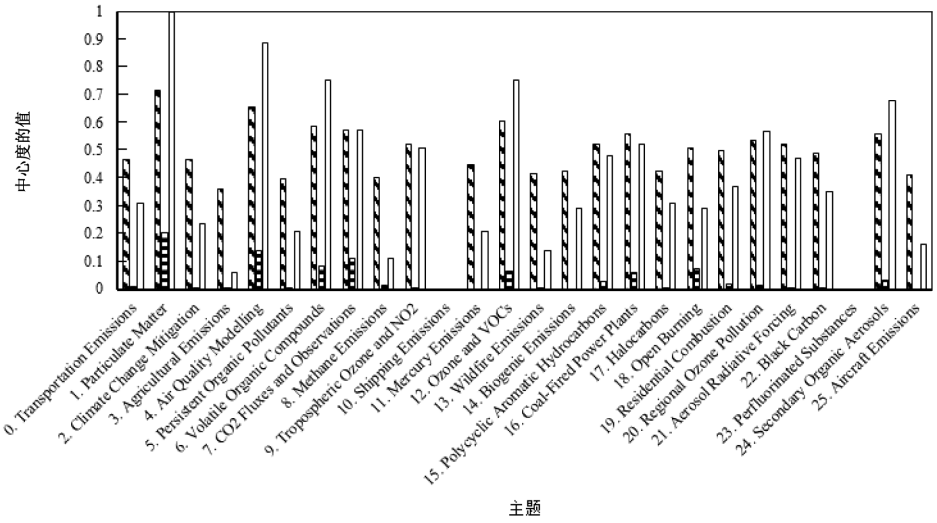


图 7　全球排放清单研究主题的中心度分析

Fig.7　Centrality analysis of research topics on global emission inventories

整体来看,这些中心度指标为构建排放清单的跨学科融合提供了重要依据,揭示了当前研究网络中存在的协同优势与不足.未来研究应进一步加强不同来源间的协同效应和综合分析,特别是提升交通运输排放、农业排放、航运排放和全氟化合物等主题的跨学科融合水平,以推动排放清单研究的全面性和系统性发展.

5 结论和建议

大气污染物与温室气体排放清单融合有助于更精准地识别和管理排放源,为实现环境保护和气候变化目标提供强有力的技术支持和政策依据.本文通过科学知识图谱和文本挖掘方法,对全球排放清单研究开展分析,针对 7926 篇文献,通过行业、物种、模型方法以及特定过程和影响,将该领域划分了 26 个主题,揭示了研究主题分布、机构布局和融合发展趋势.各主题既独立呈现行业特有问题,又在跨领域的治理与政策制定中展现出共性和融合趋势;各研究机构根据自身的专业特长和研究兴趣,选择了不同的研究重点,形成了多样化的研究格局;开展排放清单的融合研究,需加强跨学科的综合研究,系统考虑不同排放清单研究之间的融合特征,以促进排放清单的融合与优化.建议如下:

5.1 建立统一的排放清单分类体系.构建一个统一的分类方法体系对排放清单的整合至关重要,这将有助于将大气污染物和温室气体排放数据进行有效整合,实现数据共享与协同研究.此体系应基于全球公认的排放类别、排放因子、数据收集及报告标准、质量控制与验证机制,确保不同地区和国家在编制排放清单时采用一致的方法和参数.这将提升数据质量和一致性,减少重复工作,从而为深入理解大气污染物与二氧化碳排放之间的相互影响提供全面基础,识别主要污染源和关键领域,并采取针对性减排措施.

5.2 优化排放清单校核方法.在排放清单的制定和校核过程中,环境统计数据与模型模拟数据均发挥着重要作用.但由于环境统计数据和模型模拟数据的差异,它们之间存在一定的不确定性.亟需构建融合多源数据的智能校验体系,一方面通过优化卫星遥感、地面监测与模型算法的协同校验机制,减少数据不确定性;另一方面建立新污染物排放清单的快速响应框架,利用机器学习实时追踪其来源与迁移规律,有助于推动排放数据透明化,增强排放数据审核和验证科学基础,提高排放数据的准确性和完整性,为精准治污提供科学支撑.

5.3 加强国际合作与信息共享.鉴于大气污染和气候变化是全球性问题,各国之间的合作与信息共享至关重要.建议通过共享各国的排放数据,促进数据的跨国比对与校核,识别数据不一致性与误差,并寻求解决方案.国际合作还应推动技术和方法的交流,共同研发更先进的排放估算工具.此外,建议国际组织和合作平台协调各国在排放清单编制与发布方面的努力,建立统一的数据格式和交换机制,以促进全球排放数据的互认和共享.同时,国际合作可为发展中国家提供技术支持和培训,帮助其建立健全的排放清单体系,提高数据质量和准确性.

参考文献:

[1] Hong C, Zhang Q, Zhang Y, et al. Impacts of climate change on future air quality and human health in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019,116(35): 17193-17200.

[2] Xu Z, Chen S X, Wu X. Meteorological change and impacts on air pollution: results from north china [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020,125(16):e2020JD032423.

[3] Health Effects Institute. State of global air report 2024 [EB/OL]. Boston, MA: Health Effects Institute. https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024.2024-06-19.2024-11-01.

[4] Feng T, Shi Y, Wang X, et al. Synergies of air pollution control policies: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 377:124655.

[5] 赵曼仪,王 科.减污降碳协同效应综合评估的研究综述与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(2):58-69.
Zhao M Y, Wang K. Comprehensive evaluations of the synergistic effects of carbon emission reduction and air pollution control: a literature review [J]. China population, resources and environment, 2024,34(2):58-69.

[6] 郑逸璇,宋晓晖,周 佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究 [J]. 中国环境管理, 2021,13(5):45-51.
Zheng Y X, Song X H, Zhou J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: pathway and policy [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021,13(5):45-51.

[7] 王书肖,邱雄辉,张 强,等.我国人为源大气污染物排放清单编制技术进展及展望 [J]. 环境保护, 2017,45(21):21-26.
Wang S X, Qiu X H, Zhang Q, et al. Progress and prospects of emission inventory compilation technology for anthropogenic air pollutants in China [J]. Environmental Protection, 2017,45(21):21-26.

[8] 胡 诚,张俊清,刘慧丽,等.城市尺度温室气体排放反演研究进展及

发展趋势 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):7036−7045.
Hu C, Zhang J Q, Liu H L, et al. Review of the greenhouse gas emission inversion approaches at city scale and future development trends [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):7036−7045.

[9] 周卫青,李　朋,吴华成,等.基于电力数据优化大气污染物排放清单 [J]. 中国环境科学, 2023,43(7):3350−3359.
Zhou W Q, Li P, Wu H C, et al. Research on optimizing air pollutant emission inventory based on electricity consumption data [J]. China Environmental Science, 2023,43(7):3350−3359.

[10] 孙世达,王　博,孙露娜,等.江苏省高时空分辨率机动车排放清单构建及特征 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4490−4502.
Sun S D, Wang B, Sun L N, et al. Development and characteristics of vehicle emission inventory with high spatiotemporal resolution in Jiangsu Province [J]. China Environmental Science, 2023,43(9): 4490−4502.

[11] 孙世达,张改革,孙露娜,等.河北省 2013~2020 年大气污染治理进程中的减污降碳协同效益 [J]. 环境科学, 2023,44(10):5431−5442.
Sun S D, Zhang G G, Sun L N, et al. Synergistic benefits of pollution and carbon reduction from air pollution control in Hebei province from 2013 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023,44(10):5431−5442.

[12] 郭亚丽,贾俊松,何　珊.温室气体与空气污染物协同减排健康效应研究热点及趋势分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):4101−4116.
Guo Y L, Jia J S, He S. Research hotspots and trends of the health effects of synergistic emission reduction of greenhouse gases and air pollutants [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):4101−4116.

[13] Singh P, Yadav D. Link between air pollution and global climate change [C]//Global climate change. Elsevier, 2021:79−108.

[14] 刘卫先,李　诚.中国温室气体与大气污染物控制协同规划及其保障规划及其保障 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(12):1−10.
Liu W X, Li C. Collaborative planning and guarantee of greenhouse gas and air pollutant control in China [J]. China population, resources and environment, 2022,32(12):1−10.DOI: 10.12062/cpre.20221062.

[15] 黄浩瑜,高艳珊,王　强.我国人为源大气污染物排放清单研究进展 [J]. 能源环境保护, 2023,37(3):204−216.
Huang H Y, Gao Y S, Wang Q. Research progress on emission inventory of anthropogenic air pollutants in China [J]. Energy Environmental Protection, 2023,37(3):204−216.

[16] 罗　雯,陈　佳,张　齐,等.基于多源数据融合的浙江省温室气体与大气污染物排放协同研究 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(2):283−290.
Luo W, Chen J, Zhang Q, et al. Research on the synergies in reducing air pollutant and greenhouse gases in Zhejiang Province based on multi−source data fusion [J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(2):283−290.

[17] 易　兰,赵万里,杨　历.大气污染与气候变化协同治理机制创新 [J]. 科研管理, 2020,41(10):134−144.
Yi L, Zhao W L, Yang L. Innovation of collaborative governance mechanism on air pollution and climate change control [J]. Science Research Management, 2020,41(10):134−144.

[18] 刘兆香,唐艳冬,赵敬敏,等.大气污染物和温室气体“两单融合”发展分析与建议——助力减污降碳协同增效 [J]. 环境保护科学, 2024, 50(2):49−53.
Liu Z X, Tang Y D, Zhao J M, et al. Analysis and suggestions of the synergy management and development of air quality pollutant emission inventory and greenhouse gas emission inventory—Helping synergize the reduction of pollution and carbon emissions [J]. Environmental Protection Science, 2024,50(2):49−53.

[19] Schmieder L, Scheer D, Iurato C. Streams analysis for better air quality: The German lead city program assessed by the policy package approach and the multiple streams framework [J]. Energies, 2021, 14(3):596.

[20] 生态环境部办公厅.关于印发《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》的通知 [EB/OL]. 北京:生态环境部办公厅. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240130_1065242.html. 2024−01−30.2025−04−20.
General Office of Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Technical guidelines for the compilation of integrated emission inventory of air pollutants and greenhouse gases (Trial)[EB/OL]. Beijing: General Office of Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240130_1065242.html. 2024−01−30.2025−04−20.

[21] 张　强.中国区域细颗粒物排放及模拟研究 [D]. 北京:清华大学, 2005.
Zhang Q. Research on regional fine particulate matter emission and simulation in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.

[22] Teoh R, Engberg Z, Shapiro M, et al. The high−resolution Global Aviation emissions Inventory based on ADS−B (GAIA) for 2019–2021 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(1):725−744.

[23] 王　堃,高佳佳,田贺忠,等.基于 POI 兴趣点的排放清单空间分配方法 [J]. 中国环境科学, 2017,37(6):2377−2382.
Wang K, Gao J J, Tian H Z, et al. Spatial allocation method of emission inventory based on POI point of interest [J]. China Environmental Science, 2017,37(6):2377−2382.

[24] 周子航,邓　也,谭钦文,等.四川省人为源大气污染物排放清单及特征 [J]. 环境科学, 2018,39(12):5344−5358.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutants from Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2018,39(12):5344−5358.

[25] Darras S, Granier C, Liousse C, et al. The ECCAD database, version 2: emissions of atmospheric compounds & compilation of ancillary data [J]. IGAC Newsletter, 2018,hal−02144878f.

[26] Huang K, Eckelman M J. Estimating future industrial emissions of hazardous air pollutants in the United States using the National Energy Modeling System (NEMS) [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,169:105465.

[27] Deng Z, Ciais P, Tzompa−Sosa Z A, et al. Comparing national greenhouse gas budgets reported in UNFCCC inventories against atmospheric inversions [J]. Earth System Science Data, 2022,14(4): 1639−1675.

[28] Ge Y, Heal M R, Stevenson D S, et al. Evaluation of global EMEP MSC−W (rv4. 34)−WRF (v3. 9.1. 1) model surface concentrations and wet deposition of reactive N and S with measurements [J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2021,2021:1−35.

[29] Kuyper J, Schroeder H, Linne B O. The Evolution of the UNFCCC [J].

Annual Review of Environment and Resources, 2018,43(1):343−368.

[30] Uddin N, Holtedahl P. Emission trading schemes–avenues for unified accounting practices [J]. Journal of cleaner production, 2013,52:46−52.

[31] Ruochong X U, Tong D, Xiao Q, et al. MEIC−global−CO_2: A new global CO_2 emission inventory with highly−resolved source category and sub−country information [J]. Science China Earth Sciences, 2024, 67(2):450−465.

[32] Abdelrazek A, Eid Y, Gawish E, et al. Topic modeling algorithms and applications: A survey [J]. Information Systems, 2023,112:102131.

[33] Osobajo O A, Otitoju A, Otitoju M A, et al. The impact of energy consumption and economic growth on carbon dioxide emissions [J]. Sustainability, 2020,12.DOI:10.3390/su12197965.

[34] Bo Z, Dan T, Meng L, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018,18(19):14095−14111.

[35] 张羽中,毛慧琴,陈翠红,等.卫星观测在甲烷排放清单校核中的应用 [J]. 遥感学报, 2024,28(8):1940−1954.
Zhang Y Z, Mao H Q, Chen C H, et al. Application of satellite observations to verify methane emission inventories [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024,28(8):1940−1954.

[36] Guo W, Shi Y, Liu Y, et al. CO_2 emissions retrieval from coal−fired power plants based on OCO−2/3 satellite observations and a Gaussian plume model [J]. Journal of Cleaner Production, 2023.DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136525.

[37] Liu X, Yang L, Du J, et al. Carbon and air pollutant emissions forecast of China's cement industry from 2021 to 2035 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024,204:107498.

[38] Teoh R, Engberg Z, Shapiro M, et al. The high−resolution Global Aviation emissions Inventory based on ADS−B (GAIA) for 2019~2021 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(1):725−744.

[39] McDuffie E E, Smith S J, O'Rourke P, et al. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector−and fuel−specific sources (1970~2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS) [J]. Earth System Science Data Discussions, 2020,2020:1−49.

[40] Maasakkers J D, Varon D J, Elfarsdottir A, et al. Using satellites to uncover large methane emissions from landfills [J]. Science Advances, 2022,8(31):eabn9683.

[41] Hmiel B, Petrenko V V, Dyonisius M N, et al. Preindustrial $^{14}CH_4$ indicates greater anthropogenic fossil CH_4 emissions [J]. Nature, 2020,578(7795):409−412.

[42] Xian B, Xu Y, Chen W, et al. Co−benefits of policies to reduce air pollution and carbon emissions in China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024,104:107301.

[43] 王震山,绳梦雅,肖 薇,等.基于多源碳卫星融合产品的中国地区 XCO_2 与人为 CO_2 排放时空变化 [J]. 中国环境科学, 2023,43(3):1053−1063.
Wang Z S, Sheng M Y, Xiao W, et al. Spatiotemporal changes of $XCO_2$and anthropogenic CO_2emission in China based on multi−source carbon satellite fusion product. China Environmental Science, 2023, 43(3):1053−1063.

[44] Larkin N K, Raffuse S M, Huang S M, et al. The comprehensive fire information reconciled emissions (CFIRE) inventory: Wildland fire emissions developed for the 2011 and 2014 US National Emissions Inventory [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2020,70(11):1165−1185.

[45] Li M, Zeng W, Yang Z, et al. Multiple sources emission inventory closely integrated with atmospheric environment management: A case study of Guangdong, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023, 14(8):101825.

[46] Liu Z, Ciais P, Deng Z, et al. Near−real−time monitoring of global CO_2 emissions reveals the effects of the COVID−19 pandemic [J]. Nature communications, 2020,11(1):5172.

[47] Chen D, Jin X, Fu X, et al. Impact of inter−annual variation in meteorology from 2010 to 2019 on the inter−city transport of $PM_{2.5}$ in the Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. Sustainability, 2022,14(10):6210.

[48] Ma X, Jia H, Sha T, et al. Spatial and seasonal characteristics of particulate matter and gaseous pollution in China: Implications for control policy [J]. Environmental Pollution, 2019,248:421−428.

[49] Georgiou G K, Christoudias T, Proestos Y, et al. Evaluation of WRF/Chem model (v3. 9.1. 1) real−time air quality forecasts over the Eastern Mediterranean [J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2022,2022:1−23.

[50] Kuenen J, Dellaert S, Visschedijk A, et al. CAMS−REG−v4: a state−of−the−art high−resolution European emission inventory for air quality modeling [J]. Earth System Science Data, 2022,14(2):491−515.

[51] NOAA OAR's Climate Program Office. Understanding volatile organic compound emissions from wildfires in the western us with modeling comparisons [EB/OL]. Silver Spring: NOAA OAR's Climate Program Office. https://cpo.noaa.gov/News/ArtMID/7875/ArticleID/2896/Understanding−Volatile−Organic−Compound−Emissions−from−Wildfires−in−the−Western. 2023−06−16. 2024−11−01.

作者简介：薄 宇(1982−),女,黑龙江鸡西人,高级工程师,博士,主要研究方向为大气污染与温室气体协同控制.发表论文 30 余篇.boyu@mail.iap.ac.cn.