

# 基于文献计量分析的多孔碳吸附研究进展

关娟娟,陈爱侠\*,卫 潇,张奕轩,胡蕊蕊,张 磊 (长安大学水利与环境学院,旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘要:** 为深入了解多孔碳在吸附领域研究的现状和前沿动态,以 Web of Science(WoS)中 Science Citation Index Expanded(SCI-E)引文数据库和 CNKI 数据库为数据源,使用 Bibliometrix、Bibliometric 平台和 VOSviewer 软件等对相关文献进行定量分析.结果表明,1997~2021 年共发表 SCI 文献 3566 篇,文章数量总体呈逐年递增的趋势,近 5a 发文量上升速度较快,中国学术期刊共发表 183 篇文献;中国的发文总量及独立发文量均位居榜首,总量达 1653 篇,但平均被引频次相对较低;领域内主要研究力量分布在中国、美国、印度等地,且具有较大学术影响力的各作者间合作频繁.2010 年至今温室气体中 CO<sub>2</sub> 排放与多孔碳吸附议题之间有着十分紧密的学术联系,CO<sub>2</sub> 捕集将是碳中和课题下的一个持续研究热点.此外,开发和应用廉价、绿色、可持续的生物质资源制备性能优异的多孔碳材料是未来碳材料领域的持续目标之一,对于吸附机理的深入研究也将成为未来发展的方向之一.

**关键词:** 文献计量; 多孔碳; 吸附; 研究现状; 发展趋势

**中图分类号:** X506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)10-4676-12

**Recent advances in porous carbon adsorption based on bibliometric analysis.** GUAN Juan-juan, CHEN Ai-xia\*, WEI Xiao, ZHANG Yi-xuan, HU Rui-rui, ZHANG Lei (Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China). *China Environmental Science*, 2022,42(10): 4676-4687

**Abstract:** To review the states and frontier of the art of porous carbon adsorption, Science Citation Index Expanded (SCI-E) citation database in Web of Science (WoS) and CNKI database were applied as the main data resources. The detailed literature analysis was conducted by Bibliometrix, Bibliometric platform and VOSviewer software. 3566SCI articles were published since 1997 to 2021, the overall trend of the number of articles was increasing. The number of publications increased rapidly in the past 5 years. 183 articles were published in Chinese academic journals. China ranking in the first place in terms of the total number of publications (1653articles) and independent publications, however, the average citation frequency was relatively lower than others. The main research forces were located in China, the United States and India, and there were frequent collaborations among authors with great academic influence. There was a strong academic link between CO<sub>2</sub> emissions and porous carbon adsorption in greenhouse gases since 2010, and CO<sub>2</sub> capture will be an ongoing research hotspot under the worldwide topic of carbon neutrality. The development and engineering application of low-cost, green and sustainable biomass resources to produce porous carbon materials will be drawn increasing attention in the future. In-depth understand of the adsorption mechanism will also be one of the future research directions.

**Key words:** bibliometric analysis; porous carbon; adsorption; current situation; growing trend

多孔碳是一种以碳为骨架的多孔结构材料,近年来在吸附领域中应用广泛<sup>[1-2]</sup>.多孔材料分为 3 类:微孔(<2nm)、介孔(2~50nm)和大孔(>50nm)<sup>[3]</sup>.微孔和介孔的存在会大大增加多孔碳材料的比表面积.大孔虽然对多孔碳材料的总比表面积贡献较小,但其为吸附剂进入大多数吸附反应发生的介孔和微孔表面提供了通道,从而提高了吸附效率<sup>[4]</sup>.

最早被 Web of Science (WoS)核心合集的 Science Citation Index Expanded (SCI-E)数据库收录的关于多孔碳吸附的文章是在 1997 年发表的. Jaroniec 等<sup>[5]</sup>的研究表明热力学方法和基于 FHH 方程的方法均适用于多孔固体分形的研究,但应用时

仍需进行适当的修正.在过去的几十年里,由于多孔碳优异的吸附性能,其在去除杂质和有毒物质方面的应用得到了极大发展.Chen 等<sup>[6]</sup>制备了富含氨基和硫醇基团的碳层包覆 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/氧化石墨烯纳米复合材料,可同时高效去除离子染料和有毒金属离子.由于分子尺寸效应,多孔碳材料的多孔性最适合捕获和存储小分子气体,尤其是微孔碳<sup>[7]</sup>.Pu 等<sup>[8]</sup>采用水热碳化和化学活化法制备的一系列高微孔率活性

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-153);长安大学研究生科研创新实践项目(300103722010)

\* 责任作者, 副教授, aixiach@chd.edu.cn

炭具有较高的 CO<sub>2</sub> 吸附能力。

文献计量学是一种集数据收集、分析、整理和显示于一体的新方法<sup>[9]</sup>。通过对现有文献的定量研究,揭示学科领域知识结构,理清学科发展脉络,找出其变化规律,进而预测未来发展趋势,该方法逐渐成为预测各学科发展趋势的重要手段。21 世纪以来,文献计量学被广泛用于许多学科或领域,如社会学、医学、环境科学等<sup>[10-11]</sup>。到目前为止,多孔碳在吸附领域的论文逐渐增多,但有关多孔碳吸附的科学计量分析研究尚未见报道。

本文基于 WoS 核心合集中的 SCI-E 数据库和 CNKI 数据库,检索了多孔碳吸附领域的相关文献。采用 Bibliometrix 程序包,Bibliometric 平台和 VOSviewer 软件对 SCI-E 数据库的年发文量、文献类型、出版语言、学科、期刊、作者、研究机构、国家、高被引文献和关键词等关键指标进行系统的文献计量学分析。采用 Citespace 软件对 CNKI 数据库的关键词进行共现分析,通过对国内外多孔碳吸附的发展过程和研究现状进行定性和定量的评价,揭示该领域的研究历史、现状和未来发展趋势,挖掘研究热点内容。此外,本文还分析了比较活跃的作者和国家及其合作现状。希望通过本文的研究能够为研究者了解世界范围内该领域的总体研究状况提供支持,并为更好地把握未来的研究方向提供思路。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

选取多孔碳吸附领域截止到 2021 年的 SCI-E 和 CNKI 数据库的文献作为研究对象。以 WoS 核心合集中 SCI-E 引文索引为数据源,利用数据库高级检索功能,提取全球主题为“porous carbon adsorption”的文章,共检索 16417 篇。为了提高文献计量学分析结果的准确性,确定检索式为 TS=(porous carbon) and AK=(adsorption),依据检索结果的相关性排除不相关文献,截止 2022 年 4 月 8 日,有效检索结果为 3566 条。另外,以主题“多孔碳吸附”和“多孔炭吸附”为检索词,采用 CNKI 数据库高级检索,匹配程度设为“精确”,共获得国内学术期刊文献 183 篇。

### 1.2 数据分析

研究路线如图 1 所示。利用多种工具对年发文量、文献类型、出版语言、学科、期刊、作者、机

构、国家、高被引文献、关键词等关键指标进行统计分析。Bibliometrix 是综合科学制图分析的 R 工具,由 R 语言编制而成。Bibliometric 平台可实现跨国合作网络的数据可视化,应用 VOSviewer 软件对 SCI-E 数据库作者间的合作关系、参考文献的共引以及关键词的共现性进行分析,以揭示文献间知识流动和转移,并反映文献间的相似性、亲密性和引证关系,探讨全球在多孔碳吸附领域研究的动态和发展趋势。CiteSpace 软件可以对 CNKI 数据库中多孔碳吸附领域的关键词进行共现研究。

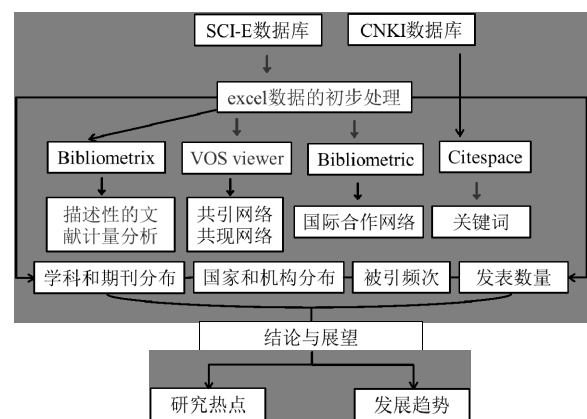


图 1 研究路线

Fig.1 Research roadmap

## 2 结果与讨论

### 2.1 数据库基本信息

表 1 数据库的基本信息(1997~2021)

Table 1 Basic information of the database (1997~2021)

类别	结果
Sources (Journals, Books, etc)	541
Documents	3566
References	106229
Keywords Plus (ID)	5742
Author's Keywords (DE)	7828
Authors	8885
Author Appearances	17761
Authors of single-authored documents	54
Authors of multi-authored documents	8831
Single-authored documents	59
Documents per Author	0.401
Authors per Document	2.49
Co-Authors per Documents	4.98
Collaboration Index	2.52

表 1 表明,检索的 1997~2021 年的 3566 篇 SCI 文献来自 541 种不同的期刊和书籍。8885 位研究人员参与发表,共有 7828 个作者关键词。值得注意的是,

单个作者发表文章仅有 59 篇,占总发文量的 1.65%,平均每篇文章共著者 4.98 人,合作指数达到 2.52。

发文量可在一定程度上反映该领域的发展走势和研究规模。由图 2 可以看出,1997~2009 年呈现微波动趋势,本文将其定义为多孔碳吸附领域的萌芽研究期。2010 年以来发文量总体呈指数上升趋势,2010~2016 年为研究初期,呈现平稳增长趋势,近 5a 上升速度明显加快,为多孔碳吸附领域的成长开发期,可见本领域的研究规模不断扩大。

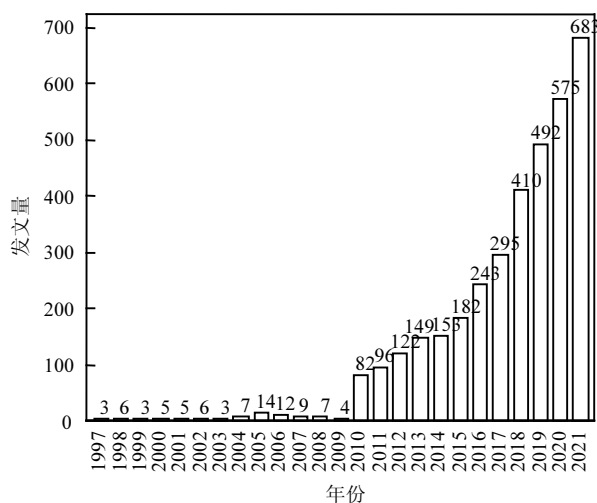


图 2 1997~2021 文献数量的年际变化

Fig.2 Interannual variation in the number of literature from 1997 to 2021

图 3(a)显示,检索结果中的文献分为研究型论文(Articles)、会议论文(Proceedings papers)、综述(Review Articles)等,其中研究性论文(3303)以 92.62%的比例占据了绝大多数,其次是会议论文(143)和综述(115),分别占 4.01%和 3.22%。图 3(b)显示,英语仍是主要语种,其中英语类文献达到 98.40%,其他种类语言文献仅占 1.60%。

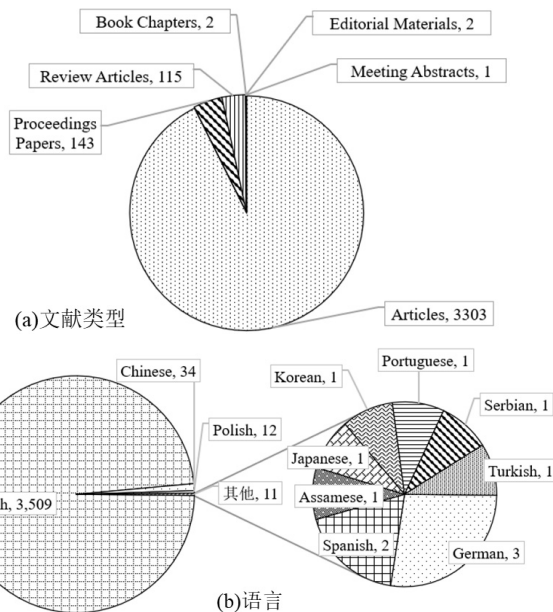


图 3 1997~2021 文献类型和语言分布情况

Fig.3 Distribution of literature types and languages from 1997 to 2021

## 2.2 学科和期刊分布

2.2.1 学科分布 Web of Science 数据库的学科分类体系是众多学科分类体系中比较精细的一种,涵盖了 250 多个学科,WoS 核心合集所收录的每一份期刊和书籍都属于至少一个学科类别,通过一篇文章的所属学科可以了解其大致研究方向。据统计,检索到的文献共涉及 84 个学科类别。表 2 显示,发文量排在首位的学科是 Engineering Chemical,其在 1997~2021 年的发文量达到 1075 篇,占总发文量的 30.15%;其次是 Chemistry Physical 学科,发文量为 848 篇,占总发文量的 23.78%;排在第 3~5 位的学科发文量较为相近,分别占总发文量的 18.65%、17.47%和 16.69%。因此,多孔碳吸附领域的研究内容呈现以化学工程学科为主,同时向多学科结构、多元化发展的趋势。

表 2 1997~2021 文献数量排名前 10 的学科

Table 2 Top 10 disciplines in terms of number of literature from 1997 to 2021

研究领域	数量	占比(%)
化学工程(Cheical Engineering)	1075	30.15
物理化学(Chemistry Physical)	848	23.78
材料科学多学科(Materials Science Multidisciplinary)	665	18.65
环境工程(Environmental Engineering)	623	17.47
环境科学(Environmental Sciences)	595	16.69
化学多学科(Chemistry Multidisciplinary)	445	12.48
纳米科技(Nanoscience Nanotechnology)	329	9.23
能量燃料(Energy Fuels)	313	8.78
应用物理(Applied Physics)	271	7.60
应用化学(Applied Chemistry)	268	7.52

**2.2.2 期刊分布** 结合期刊的学科类别,有助于研究人员根据自己的研究方向选择重点期刊进行投稿和阅读.因此,本文引入  $H$  指数和 JCR 影响因子来表征期刊水平.  $H$  指数综合了总发文量和总被引量的排名,可以更有效地表征期刊的研究质量<sup>[12]</sup>. JCR 影响因子是学术界公认的表征期刊学术水平的指标<sup>[13]</sup>.检索到的多孔碳吸附领域的文献来自 541 种期刊,按照  $H$  指数由高到低排序,选取前 10 个顶级期刊进行统计,结果见表 3. 10 本期刊的平均影响因子为 8.506,最高达 13.273,由此可见,这些期刊刊登了多孔碳吸附领域相对较多的高水平文献,在该领域有着较强的影响力.其中, *Chemical Engineering Journal* 的发文量、近 25a 和近 5a 被引次数、影响因子均位列榜首,远高于其他期刊,说明本期刊所录文章在多孔碳吸附领域内有很高的关注度.它分别聚焦于化学反应工程,环境化学工程和材料合成与加工等,全面关注具有普遍意义的原创和严谨的研究成果.从  $H$  指数上看, *Journal of Hazardous Materials* 位列第 2, *Applied Surface Science* 位居第 3.这两个期刊的发文量相对较高,它们近 25a 和近 5a 被引次数也位居前列.

领域内 25a 来总被引最高的期刊中收录的文章包含了经典或热门的研究方向,在一定程度上可以起到领域研究风向标的作用.将 1997~2021 年发表在 *Chemical Engineering Journal* 上的 227 篇文章提

取出来,通过关键词研究其共同特点.这些文章中,部分是以吸附材料本身为研究对象,含有关键词 activated carbon, porous carbon, nanoparticles;部分注重材料的吸附规律研究,含有关键词 equilibrium, kinetics, performance;另外一些文章强调对水中污染物的吸附,含有关键词 aqueous-solution, water, waste-water 等.

高水平期刊中具有较高被引量的文章一般具有引领性或创新性,研究内容和结论往往值得相关领域学者关注.“Synthesis of porous MgO-biochar nanocomposites for removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions”是 2012 年发表在 *Chemical Engineering Journal* 中被引频次最高的文章,高达 361 次,该文章开发了一种创新且简单的方法来合成多孔 MgO-生物炭纳米复合材料,对磷酸盐和硝酸盐具有优异的吸附能力<sup>[14]</sup>. “Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review”是 2020 年发表在 *Journal of Hazardous Materials* 中被引频次最高的文章,高达 430 次,该文章强调了吸附数据建模是预测吸附机理的重要方法,讨论了在不同应用中使用单/多参数等温线模型的指南<sup>[15]</sup>.吸附等温线模型可以描述吸附剂和吸附质在恒温下的相互作用机制.因此,了解各种吸附质和吸附剂的最佳拟合模型,对预测各种吸附系统的吸附机制非常重要.

表 3 1997~2021 年  $H$  指数排名前 10 的期刊  
Table 3 Top 10 journals in  $H$ -index from 1997 to 2021

期刊	$H$ 指数	NP	TC (25)	TC (5)	IF
Chemical Engineering Journal	56	227	10229	4554	13.273
Journal of Hazardous Materials	41	107	6020	2653	10.588
Applied Surface Science	35	93	3319	1595	6.707
Journal of Colloid and Interface Science	32	81	2776	1021	8.128
ACS Applied Materials & Interfaces	31	65	4269	1121	9.229
Microporous and Mesoporous Materials	30	122	2747	900	5.455
ACS Sustainable Chemistry & Engineering	27	38	1904	837	8.198
Bioresource Technology	26	31	3183	886	9.642
Journal of Cleaner Production	22	36	1490	1490	9.297
Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects	20	61	1605	504	4.539

注: NP,发表数量; TC(25) and TC(5)分别代表过去25a和5a的总被引次数; IF,影响因子.

## 2.3 领域研究力量分析

**2.3.1 作者分析** 在发文量不小于 5 篇的作者中,选取总被引量排名前 10 的作者列于表 4.可见,多孔

碳吸附领域总被引量最高的是来自武汉理工大学的 Yu Jianguo,高达 1605 次;其次是来自清华大学的 Wang Bin 和来自美国 University of Florida 的 Gao

Bin,总被引频次分别为 1052 次和 1032 次.另外,10 名作者中共有 6 名作者来自中国,其中有 4 名作者都来自清华大学,表明中国研究人员对该领域的研究十分关注.

表 4 1997~2021 引文总量排名前 10 位的作者

Table 4 Top 10 authors in total citations from 1997 to 2021

作者	发表数量	总被引频次	机构	国家
Yu Jiaguo	11	1605	武汉理工大学	中国
Wang Bin	10	1052	清华大学	中国
Gao Bin	8	1032	University of Florida	美国
Zhang Ming	5	981	Florida Institute of Technology	美国
Hameed B.H.	11	969	Universiti Sains Malaysia	马来西亚
Huang Jun	7	959	清华大学	中国
Deng Shubo	7	953	清华大学	中国
Yu Gang	7	953	清华大学	中国
Cheng Bei	6	651	武汉理工大学	中国
Asif M.	5	638	King Saud University	沙特阿拉伯

图 4(a)显示,与 Li Liqing 链接较多的作者有 Zeng Zheng, Liu Baogen, Chen Ruofei 和 Li Hailong, 与 Yan Yongsheng 链接较多的作者有 Dai Jiangdong, Li Chunxiang 和 Xie Atian,与 WangLiang 链接较多的作者有 Zhang yan, Deng Shuguang 和 Zhang Peixin.3 位学者分别形成了各自的学术集团,表明这些学者在本领域中知名度较高且与领域内其他学者合作紧密.在被引量较高的作者中,与 Yu Jiaguo 链接较多的作者有 Cheng Bei 和 Zhou Jiabin,与 Wang Bin 链接较多的作者有 Yu Gang, Deng Shubo 和 Huang Jun,这 7 位学者中有 6 位都是被引量前 10 的作者,表明高被引量的学者之间合作紧密.

在图 4(b)中,发文章最多的作者是来自 Kent State University 的 Jaroniec mietek,其发文章达 21 篇,总被引频次为 550 次,表明该作者在多孔碳吸附领域有着大量深入的研究.在发文章较多的作者中,形成了以 Jaroniec Mietek, Park Soo-jin, Saha Bidyut baran, Srinivasakannan C.和 Li Liqing 5 位学者为核心的学术集团.另外,根据平均发表年份可以看出,这 5 个学术集团在本领域活跃的先后顺序为 Jaroniec Mietek, Srinivasakannan C., Park Soo-jin, Saha Bidyut baran 和 Li Liqing.

2.3.2 机构分析 表 5 显示,被引频次最高的 3 个

机构是中国科学院、Kyushu University 和清华大学,分别达 303、244 和 208 次,说明它们在本领域发表的科研成果有着很高的国际认可度.其中,中国科学院的总被引频次和总发文章量均位居第 1,其 25a 间发表文章量高达 218 篇.Universiti Sains Malaysia 的平均被引次数最高,为每篇 6.54 次.前 10 机构中有 5 所都位于中国,体现了该领域内中国强大的科研影响力.

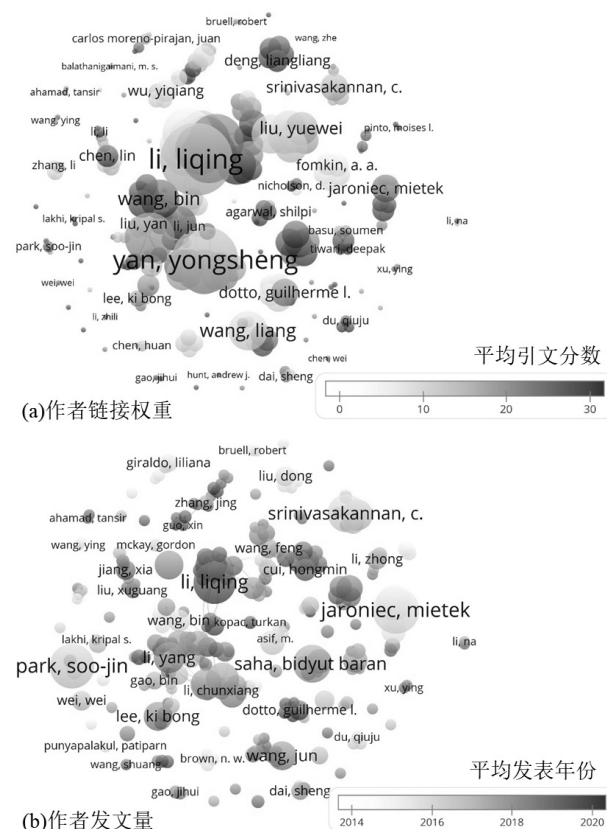


图 4 多孔碳吸附领域合作网络

Fig.4 Co-authorship network in the field of porous carbon adsorption

表 5 1997~2021 总被引次数排名前 10 位的研究机构

Table 5 Top 10 research institutions in terms of total citations from 1997 to 2021

机构	篇数	总被引频次	平均被引	国家
中国科学院	218	303	1.39	中国
Kyushu University	67	244	3.64	日本
清华大学	50	208	4.16	中国
Universiti Sains Malaysia	24	157	6.54	马来西亚
CSIC	29	152	5.24	西班牙
Curtin University	27	148	5.48	澳大利亚
江苏大学	60	146	2.43	中国
中南大学	35	142	4.06	中国
King Saud University	41	112	2.73	沙特阿拉伯
华南理工大学	43	111	2.58	中国

2.3.3 国家分析 图 5 显示,多孔碳吸附领域发文量最多的国家是中国,高达 1653 篇,遥遥领先其他国家.其次是印度和美国,分别为 183 篇和 168 篇.从发文量前 10 的国家中可以看出,除了法国以外仅由本国作者发表的论文数量都远高于多国作者合作发表的论文数量,说明国际交流性不强,还需进一步提高.

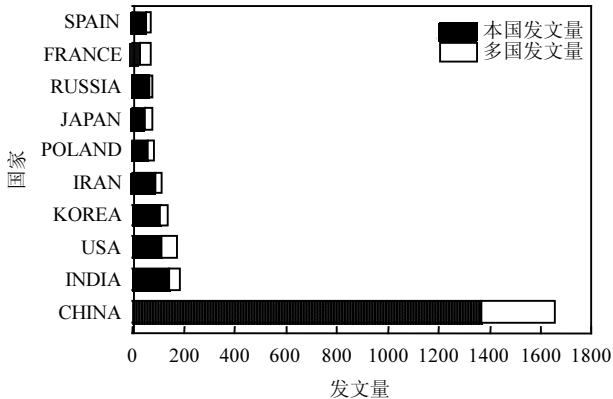


图 5 在多孔碳吸附领域的 10 大发文量国家

Fig.5 Top 10 most productive countries in porous carbon adsorption

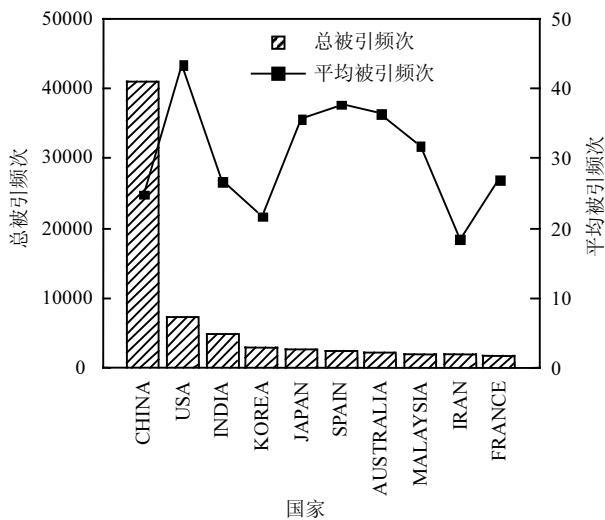


图 6 多孔碳吸附领域总被引量排名前 10 的国家

Fig.6 Top 10 countries in total citations in porous carbon adsorption

图 6 显示,从总被引频次角度分析,中国、美国、印度和韩国依然是排名前 4 的国家,其中中国的优势格外突出,其文章总被引量约是第 2 名美国的 5.63 倍.而在平均被引频次方面,美国、西班牙和澳大利亚位居前 3,分别高达 43.47,37.74,36.40 次/篇,表明这 3 个国家所产出的科研成果具有较大影响力,有较高

的阅读和引用价值.我国是该领域发文量最多的国家,因此文献被引频次相对较低,说明中国在该领域有着一定的学术影响力,但相比于国外先进水平还有一定的差距,需进行深入研究.科研成果的产生离不开全世界科学家的共同努力,在当今全球化的趋势下,国家之间合作进行科学研究的模式更是起到了推动作用,多孔碳吸附领域内参与研究的各国也普遍有对外合作情况.

图 7 表明,国际合作最为活跃的国家为法国、日本和美国,其中我国对外合作关系中,与美国的合作最为密切,其次是澳大利亚和英国.

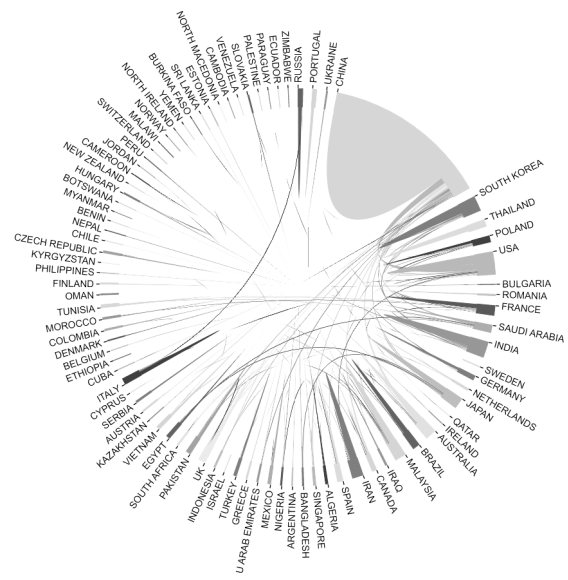


图 7 1997~2021 在多孔碳吸附领域的国际合作网络

Fig.7 International cooperation network in porous carbon adsorption from 1997 to 2021

色块大小代表该国的总发文量,线条宽度代表两国间的合作发文量

## 2.4 高被引论文和可视化共引网络

通过高被引文献可洞察某领域在一定时间内有影响力的作者和重要的研究主题.表 6 显示,排名前 2 的文章总被引频次分别为 838 和 792,远高于其他文章,其平均每年被引频次也均位居前列,说明这两篇高被引文献的影响力之大.值得注意的是,Al-Ghouti MA 在 2020 年发表的题为“Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review”的文章年均被引频次位居第 1,高达 143.33,同时也是近 5a 内多孔碳吸附领域被引频次最高的文章,说明吸附数据建模受到了科研领域的广泛关注.其中,来自印度的 Gupta VK 等 2013 年

在 Environmental Science and Pollution Research 上发表的题名为“Sorption of pollutants by porous carbon, carbon nanotubes and fullerene- An overview”的文章总被引频次位列第 1, 该篇综述了多孔碳、碳纳米管和富勒烯材料对水溶液中各种有机和无机污染物的吸附活性, 详细介绍了它们的制备、处理方法以及相关的应用和再生<sup>[16]</sup>. 总被引频次排名第 2 是来自美国 Pennsylvania State University 的 Song JX 等 2014 年在 Advanced Functional

Materials 上发表的题为“Nitrogen-Doped Mesoporous Carbon Promoted Chemical Adsorption of Sulfur and Fabrication of High-Areal-Capacity Sulfur Cathode with Exceptional Cycling Stability for Lithium-Sulfur Batteries”的文章, 该篇报道了一种新型介孔氮掺杂碳-硫纳米复合材料作为锂硫电池的正极材料, 证明氮掺杂可以通过促进氧官能团的吸附从而有效地诱导硫在高表面积碳骨架上的化学吸附<sup>[17]</sup>. 这些论文的发表对该领域的发展起到了重要的推动作用.

表 6 1997~2021 在多孔碳吸附领域被引用最多的 10 篇文献

Table 6 Top 10 most cited papers in porous carbon adsorption from 1997 to 2021

论文题目	第一作者	期刊	年份	总被引频次	年均被引
Sorption of pollutants by porous carbon, carbon nanotubes and fullerene- An overview	Gupta VK	Environmental Science and Pollution Research	2013	838	83.80
Nitrogen-doped mesoporous carbon promoted chemical adsorption of sulfur and fabrication of high-areal-capacity sulfur cathode with exceptional cycling stability for lithium-sulfur batteries	Song JX	Advanced Functional Materials	2014	792	88.00
Isoelectric point and adsorption activity of porous g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Zhu BC	Applied Surface Science	2015	520	65.00
Mussel-inspired synthesis of polydopamine-functionalized graphene hydrogel as reusable adsorbents for water purification	Gao HC	ACS Applied Materials & Interfaces	2013	520	52.00
Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review	Al-Ghouti MA	Journal of Hazardous Materials	2020	430	143.33
Preparation and characterization of a novel magnetic biochar for arsenic removal	Zhang M	Bioresource Technology	2013	416	41.60
Pore structure and its impact on CH <sub>4</sub> adsorption capacity and flow capability of bituminous and subbituminous coals from Northeast China	Cai YD	Fuel	2013	416	41.50
Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge	Chen T	Bioresource Technology	2014	397	44.00
Molecular simulation of methane adsorption in micro- and mesoporous carbons with applications to coal and gas shale systems	Mosher K	International Journal of Coal Geology	2013	370	37.00
Adsorption behavior and mechanism of perfluorinated compounds on various adsorbents-A review	Du ZW	Journal of Hazardous Materials	2014	362	40.22

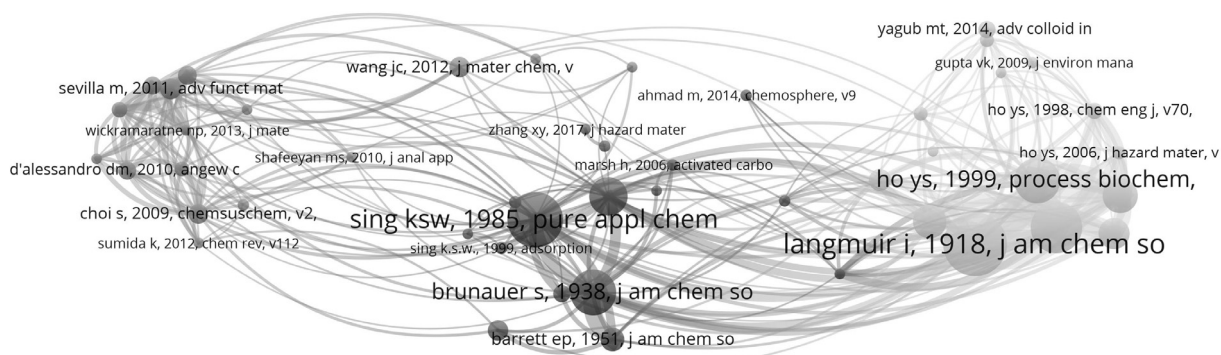


图 8 被引文献的可视化共引网络

Fig.8 Visualized co-citation network of the cited references

气泡的大小表示文章被引用的数量, 线条表示共被引用的关系, 每个气泡都标有文章的第一作者、发表年份和期刊

此外, 检索到的 3566 篇数据共涉及 106229 条参

考文献, 将参考文献的最低被引数量设置为 45, 得到

47 条较高被引文献利用 VOSviewer 软件进行共引分析.如图 8 所示,右侧集群中 Langmuir Irving 在 1918 年发表在 *Journal of the American Chemical Society* 的文章被引频次以 271 次位居第 1,是纳米技术发展史上的一件开山之作.首次提出了单分子膜的概念,长期以来一直受到吸附界的关注,自发文以来产生了深远的影响.被引频次第 2 和第 3 的参考文献为位于中部集群的“Sing KSW, 1985, *Pure and Applied Chemistry*”和位于右侧集群的“Freundlich HMF, 1906, *Journal of Physical Chemistry*”,被引频次分别为 236 和 221 次.

## 2.5 SCI-E 数据库关键词分析和发展趋势

关键词通常可反映文献的研究主题和研究成果的核心内容,通过对关键词的统计与分析可以准确把握某一研究领域的研究热点及未来研究方向,也可为今后的科学研究提供进一步的发展方向.检索到的文献共涉及 7828 个作者的关键词,用 VOSviewer 软件对文献关键词进行分析,将关键词的最低出现次数设置为 20,得到了 87 个关键词的共现关系,构建了多孔碳吸附为主题的叠加知识图谱.如图 9 所示,1997~2021 年间,除了 adsorption, porous carbon 为主要检索的关键词外,主要的热点关键词大致集中在 activated carbon, CO<sub>2</sub>adsorption, methylene blue, biochar, porous materials, kinetics 上,且这些关键词总是相伴出现,它们之间有着相当强的共现关系,说明近年来多孔碳吸附领域的研究主要集中在材料制备方法、气体捕捉、有机污染物吸附、吸附过程研究等方面.值得注意的是,2019~2020 年主要涉及的关键词是生物炭,这说明近年来研究人员在生物炭方向投入了更多的科研力量,有可能成为一个持续的研究热点.

碳纳米管、石墨烯、生物炭等是制备多孔碳材料的常用碳源.石墨烯是一种二维单层 sp<sup>2</sup> 杂化共轭碳原子<sup>[18]</sup>,氧化石墨烯是石墨烯的一种衍生物,其片层的表面和边缘存在各种亲水性氧化官能团(羟基、羧基和环氧基)<sup>[19]</sup>,在制备多孔碳材料方面具有很大的优势,被认为是一种极强的吸附材料,其吸附能力远高于传统的碳基吸附材料.近年来,生物质作为一种富含元素碳的可再生资源,资源丰富且对环境友好<sup>[20-21]</sup>,因其独特的物理化学性质和良好的吸附性能,越来越受到学者们的关注.开发和应用廉价、绿

色、可持续的碳源,特别是生物质源,生产性能优异的多孔碳材料是未来碳材料领域不断追求的目标之一.

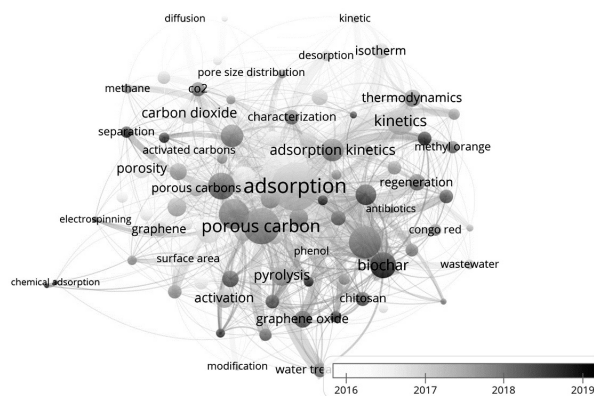


图 9 作者关键词的叠加知识图谱

Fig.9 Overlay knowledge graph of author keywords

气泡大小表示关键词出现的数量

制备多孔碳材料的方法可分为碳化法和活化法.直接碳化法,又称高温热解法,是将碳源物质在氮气、氩气等惰性气体的保护下,通过水分子蒸发、高分子降解、高温分解等一系列物理化学变化,去除碳源中非碳元素和易挥发成分,最终形成多孔碳<sup>[22]</sup>.直接碳化过程中的升温速率、碳化温度、保温时间和气体流量直接影响产物的结构和性能,工艺虽然简单,但是得到的碳材料比表面积和孔隙率都有限,极大的影响了其应用性能<sup>[23]</sup>.目前,活化法已被广泛应用于多孔碳材料的制备,活化过程的主要作用是发展孔隙结构,增加比表面积以及形成活性表面官能团,分为物理活化和化学活化两种方法<sup>[24]</sup>.物理活化通常由两步组成,先碳化后活化,碳前驱体在惰性气体保护下,在低于 800℃ 的温度下发生热解,去除挥发性物质,留下基本的碳结构.接下来,在 CO<sub>2</sub>、水蒸汽或者空气等活化剂作用下开始活化步骤,活化步骤相较于碳化步骤需要更高的温度.不同于物理活化,在化学活化过程中,碳化和活化同时进行,所需温度相比物理活化法较低,因此在化学活化过程中多孔结构发展地更均匀<sup>[25]</sup>.另外,活化过程中的保温时间、热解温度、活化剂种类及用量等条件都会直接影响产物的结构和性能<sup>[26]</sup>.

多孔碳由于其易修饰性、物理化学稳定性以及孔隙率可灵活调节性而逐渐成为 CO<sub>2</sub> 吸附研究的热



点<sup>[27-28]</sup>.为应对气候变化,中国提出了“CO<sub>2</sub> 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标.因此,CO<sub>2</sub> 捕集、利用和封存(CCUS)在未来一段时间里将持续成为科学界和工业界的研究热点,其关键是选择性地从气体混合物中捕集 CO<sub>2</sub>.

近年来越来越多的学者开始投入到污染治理等领域的研究中来,而多孔碳材料凭借其自身独特的理化性质及良好的吸附性能,越发受到环境修复领域学者的关注,尤其是水处理方面.由于多孔碳材料优异的吸附性能,使得其在污水处理方面具有很大的应用价值,用于吸附重金属离子、染料、有机污染物、内分泌污染物等<sup>[29-31]</sup>.涉及污染物的高频关键词有 methylene blue, congo red, dye, tetracycline 等.在过去的几十年中,多孔碳材料在去除杂质和有毒物质等方面的应用得到极大发展<sup>[32]</sup>.另一方面,随着环保标准日益严格,多孔碳吸附材料的使用量大大增加.环境领域碳材料的未来发展着眼于降低成本、提升吸附量、加快吸附速率以及提升再生能力.

图 9 显示,关键词 regeneration 在多孔碳吸附领域也处于很重要的地位,与其他热点关键词联系紧密.在吸附过程中吸附剂的化学组成、结构都可能发生改变,因此,再生性能也是评价吸附剂性能的重要因素之一.多孔碳吸附过程离不开研究 kinetics, isotherms 和 thermodynamics.吸附动力学数据可以利用准一级动力学模型、准二级动力学模型和粒子内扩散模型来进行分析<sup>[33]</sup>.吸附等温线一般用于描述吸附质在吸附过程如何在液体和固相之间达到平衡状态,最常用吸附等温模型是 Langmuir 和 Freundlich 方程,前者是假设吸附剂表面均匀且吸附发生在单分子层,而后者是假设吸附过程是多分子层非均匀吸附<sup>[34]</sup>.热力学参数之间的关系常用 Gibbs-Helmholtz 公式表示<sup>[35]</sup>.关键词 mechanism 大多涉及微孔填充、范德华力作用、 $\pi$ - $\pi$ EDA 作用、静电作用以及氢键作用中的一种或几种<sup>[29,36]</sup>.

关键词进行分阶段研究,可以揭示一个研究领域热点内容的演变历程.为此,按照发表时间将 1997~2021 年分为 1997~2009 年、2010~2016 年以及 2017~2021 年 3 个时段,将所选文献集的关键词按照出现频率排序,并提取前 10 名作为热点关键词进行研究.发现 adsorption 和 activated carbon 在 3 个阶段中均稳居前 2,说明活性炭一直以来都占据着多孔

碳吸附领域内研究的中心地位.同时发现 1997~2009 年作为多孔碳吸附领域研究的萌芽期,前 10 的关键词中有 3 个都与材料的理化性质有关,分别为 porosity, molecular simulation 和 pore size distribution,说明基础研究在科研领域内起着非常重要的奠基作用.对比 2010~2016 年与近 5a 的关键词可以发现,有 8 个相同的关键词仍在前 10, 2010~2016 年间的 porous materials 和 CO<sub>2</sub>capture 变为了近 5a 间的 biochar 和 biomass,表明生物质多孔碳材料越来越受到研究者们的关注.另外,在 2010~2021 阶段排名前 10 的关键词中均出现 carbon dioxide, CO<sub>2</sub>adsorption 和 CO<sub>2</sub>adsorption,说明 2010 年至今 CO<sub>2</sub> 排放与多孔碳吸附议题之间有着十分紧密的学术联系.

对近 5a 发表的文献按照关键词出现频率排序,提取前 10 名作为热点关键词进一步研究,如表 7 所示. 2017~2021 年稳居前 10 的关键词有 adsorption, activated carbon, CO<sub>2</sub>adsorption, porous carbon 和 biochar,且它们的频率基本呈现上升或轻微波动趋势.值得注意的是,2017~2018 年 biochar 排名第 10,2019~2021 年上升到了前 5,且 biomass 在 2019 年第一次出现在前 10 后居高不下,说明近 3a 生物炭方向是研究者们关注的热点. methylene blue, carbon 和 kinetics 这 3 个关键词在近 5a 中有 4a 都位居前 10,表明碳材料的动力学和对亚甲基蓝的吸附研究一直是多孔碳吸附领域的研究热点.另外,关键词 isotherm 和 regeneration 近 5a 中分别在 2017 年和 2018 年上榜前 10,说明等温线和再生研究是该阶段的主要研究内容. activation, mechanism 和 adsorption mechanism 3 个关键词只在 2020 年位居前 10,表明机理方面的研究仍然欠缺,研究者后续可以多关注材料吸附机理的研究.

## 2.6 CNKI 数据库关键词分析和研究热点

为了进一步了解国内在多孔碳吸附领域的研究现状和方向,使用 Citespace 软件对 CNKI 数据库中检索到的有关多孔碳吸附的 183 篇学术期刊文献进行关键词的分析.如图 10 所示,183 篇文献共涉及 453 个关键词.吸附、多孔碳和多孔炭作为主要检索的关键词,其出现频次分别为 118、109 和 86 次,它们的中心性分别为 0.76、0.46 和 0.41,均位列前 3.紧随其后的依次是氮掺杂、孔结构、动力学、制备和废水处理,这 5 个关键词出现频次相差不大,分别

为 32、31、29、29 和 28 次,说明多孔碳材料内部的孔隙结构、制备方法和氮掺杂改性以及将其应用于废水处理并研究吸附过程的动力学是多孔碳吸附领域的研究热点.陈爱侠等<sup>[20]</sup>采用三聚氰胺作为氮掺杂剂,一步法制备出氮掺杂海藻酸钠基多孔碳材料,其具有较高的比表面积和丰富的孔结构,用于高效去除废水中的双酚 A,动力学研究表明材料在 30min 内即可达到吸附平衡.图 10 表明,多孔碳吸附领域的关键词主要集中在吸附性能、制备过程及目标物中,其中,关键词化学活化、模板法和氮掺杂涉及多孔碳材料的制备过程.化学活化法是常用的制备方法,其关键是活化剂的选择,不同活化剂所涉及的机理是不同的<sup>[33]</sup>.模板法作为一种制备纳米材料的有效方法,可以根据合成材料的性能要求以及形貌来设计模板的材料和结构.氮掺杂是改善碳材料吸附性能的有效方法,使碳具有独特的电子特征和丰富的官能团<sup>[20]</sup>.关键词亚甲基蓝、重金属和 CO<sub>2</sub> 涉及多孔碳材料吸附的目标物,其吸附性能受孔结构、比表面积及表面化学特性等因素的综合影响.刘凤玲等<sup>[37]</sup>用分子筛模板法制备的多孔碳吸附常压低浓度的 CO<sub>2</sub>,研究发现微孔孔容及表面氮含量的增加有利于低浓度 CO<sub>2</sub> 在材料上的吸附,且含氮多孔碳的再生率最高.另外,生物质作为一种可再生

资源,成为多孔碳碳源的理想选择.生物质多孔碳因其来源广泛、制备方法简单、孔结构发达等优点,被广泛应用于重金属和有机污染物的吸附等领域,其仍然是近几年的研究热点.综合来讲,CNKI 数据库与 WoS 核心合集中 SCI-E 文献库所呈现的多孔碳吸附领域中的研究热点基本一致,开发绿色可再生的生物质碳源,对多孔碳材料进行表面改性以提高其吸附性能并研究吸附机理,从而更好地对有关污染物进行吸附去除.

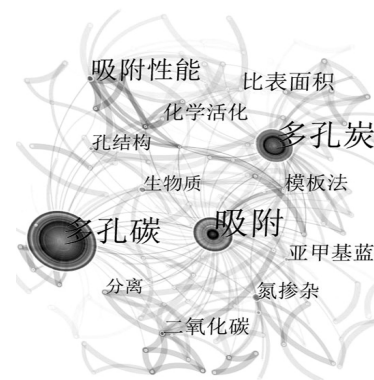


图 10 关键词的共现图谱

Fig.10 Co-occurrence mapping of keywords

节点的大小表示关键词的出现频次,线条代表它们之间的联系,节点周围线条的多少表示中心性大小

表 7 2017~2021 多孔碳吸附领域各阶段流行关键词

Table 7 Prevalent keywords of different stages in porous carbon adsorption (2017~2021)

2017		2018		2019		2020		2021	
关键词	频次	关键词	频次	关键词	频次	关键词	频次	关键词	频次
adsorption	191	adsorption	248	adsorption	282	adsorption	314	adsorption	425
activated carbon	39	CO <sub>2</sub> adsorption	34	activated carbon	46	activated carbon	60	activated carbon	65
CO <sub>2</sub> adsorption	19	activated carbon	33	CO <sub>2</sub> adsorption	34	biochar	33	porous carbon	47
carbon	14	porous carbon	20	porous carbon	32	CO <sub>2</sub> adsorption	33	CO <sub>2</sub> adsorption	35
porous carbon	11	methylene blue	17	biochar	16	porous carbon	32	biochar	34
methylene blue	10	kinetics	16	carbon	15	methylene blue	25	methylene blue	26
isotherm	9	carbon	13	adsorption kinetics	14	activation	16	biomass	24
kinetics	9	porous materials	12	biomass	12	biomass	16	kinetics	19
porous materials	8	regeneration	12	kinetics	12	adsorption mechanism	14	carbon	18
biochar	7	biochar	11	carbon dioxide	11	mechanism	13	CO <sub>2</sub>	18

### 3 结论

3.1 总体而言,研究时段内多孔碳吸附领域的热度保持持续增高的趋势.2013 年发表在 Environmental Science and Pollution Research 的文章总被引频次和年均被引频次均达到了最高,许多高引文章皆在此

年附近发表,在领域内形成了较大影响力.本领域的研究成果大多属于 Engineering Chemical、Chemistry Physical 等学科,Chemical Engineering Journal 是本领域内 H 指数最高的期刊,其发文量、近 25a 和近 5a 被引次数均位居榜首, Journal of Hazardous Materials, Applied Surface Science 近年来引用率较

高,这些期刊收录的文章值得本领域学者重点关注.另外,多孔碳吸附领域的研究内容呈现以化学工程学科为主,同时向多学科结构、多元化发展的趋势.

**3.2 领域内文章被引量最高 2 位作者**分别是武汉理工大学的 Yu Jiaguo 和清华大学的 Wang Bin,发文章量最多的作者是来自 Kent State University 的 Jaroniec Mietek,他们都是本领域内比较突出的和有很大影响力的学者.多孔碳吸附领域内总被引频次前 10 机构中有 5 所都位于中国,体现了该领域内中国强大的科研实力.从发文章量和总被引频率看,中国、美国、印度和韩国都是排名前 4 的国家,然而中国的平均被引用率并不高,中国学者还需要在现有基础上继续提高国际学术影响力.

**3.3 本领域内国家、作者间**呈现一定程度上的合作关系.国际合作最为活跃的国家为法国、日本和美国,其中中国对外合作中与美国的合作关系最为密切,其次是澳大利亚和英国.另外,学者团体合作现象较为明显,几位影响力较强的学者都有着与自己联系紧密的团队,各团队之间也会有一些联系,这些学者团队组成了领域内的主要研究力量.

**3.4 多孔碳吸附领域的研究**主要集中在材料制备方法、气体捕捉、污染物吸附、吸附过程研究等方面.2010 年至今温室气体中 CO<sub>2</sub> 排放与多孔碳吸附议题之间有着十分紧密的学术联系,而且在碳中和的议题下 CO<sub>2</sub> 的捕捉将会是多孔碳吸附领域持续的研究热点.此外,近几年越来越多的科研人员将生物质作为制备多孔碳的碳源,开发和应用廉价、绿色可持续发展的碳源,尤其是生物质源,制备出性能优异的多孔碳材料,是未来碳材料领域持续追求的目标之一,对于吸附机理的深入研究也将成为未来发展的方向之一.

#### 参考文献:

- [1] Ding J, Li X, Shan Y, et al. Super facile one-step synthesis of aromatic amine waste residue derived N-rich porous carbon for hyper efficient p-nitrophenol adsorption [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021,9(2):105106.
- [2] Guo D, Hu D, Yan Z, et al. Preparation and characteristic of high surface area lignin-based porous carbon by potassium tartrate activation [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021,326:111340.
- [3] Qi C, Xu L, Zhang M, et al. Fabrication and application of hierarchical porous carbon for the adsorption of bulky dyes [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019,290:109651.
- [4] Gu W, Huang X, Tian Y, et al. High-efficiency adsorption of tetracycline by cooperation of carbon and iron in a magnetic Fe/porous carbon hybrid with effective Fenton regeneration [J]. *Applied Surface Science*, 2021,538:147813.
- [5] Jaroniec M, Kruk M, Olivier J. Fractal analysis of composite adsorption isotherms obtained by using density functional theory data for argon in slitlike pores [J]. *Langmuir*, 1997,13(5):1031-1035.
- [6] Chen F H, Liang W W, Qin X Y, et al. Preparation and recycled simultaneous adsorption of methylene blue and Cu<sup>2+</sup> co-pollutants over carbon layer encapsulated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene oxide nanocomposites rich in amino and thiol groups [J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021,625:126913.
- [7] Chen J, Jiang L, Wang W, et al. Facile construction of highly porous carbon materials derived from porous aromatic frameworks for greenhouse gas adsorption and separation [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021,326:111385.
- [8] Pu Q Y, Zou J R, Wang J Y, et al. Systematic study of dynamic CO<sub>2</sub> adsorption on activated carbons derived from different biomass [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021,887:14.
- [9] Khatun R, Xiang H, Yang Y, et al. Bibliometric analysis of research trends on the thermochemical conversion of plastics during 1990-2020 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,317:128373.
- [10] Jiang C M, Duangthip D, Chan A K Y, et al. Global research interest regarding silver diamine fluoride in dentistry: A bibliometric analysis [J]. *Journal of Dentistry*, 2021,113:103778.
- [11] Marcal J, Bishop T, Hofman J, et al. From pollutant removal to resource recovery: A bibliometric analysis of municipal wastewater research in Europe [J]. *Chemosphere*, 2021,284:131267.
- [12] Hirsch J E. An index to quantify an individual's scientific research output that takes into account the effect of multiple coauthorship [J]. *Scientometrics*, 2010,85(3):741-754.
- [13] Pérez-Hornero P, Arias-Nicolás J P, Pulgarín A A, et al. An annual JCR impact factor calculation based on Bayesian credibility formulas [J]. *Journal of Informetrics*, 2013,7(1):1-9.
- [14] Zhang, M, Gao B, Yao Y, et al. Synthesis of porous MgO-biochar nanocomposites for removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012,210:26-32.
- [15] Al-Ghouthi M A, Da'ana D A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020,393:122383.
- [16] Gupta V K, Saleh T A. Sorption of pollutants by porous carbon, carbon nanotubes and fullerene- An overview [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013,20(5):2828-2843.
- [17] Song J X, Xu T, Gordin M L, et al. Nitrogen-Doped Mesoporous Carbon Promoted Chemical Adsorption of Sulfur and Fabrication of High-Areal-Capacity Sulfur Cathode with Exceptional Cycling Stability for Lithium-Sulfur Batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014,24(9):1243-1250.
- [18] Sui Z-Y, Cui Y, Zhu J-H, et al. Preparation of three-dimensional graphene oxide-polyethylenimine porous materials as dye and gas adsorbents [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013,5(18):9172-9179.

- [19] Hu H W, Quan H Y, Zhong B Q, et al. A reduced graphene oxide quantum dot-based adsorbent for efficiently binding with organic pollutants [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2018,1(11):6502-6513.
- [20] 陈爱侠,关娟娟,卫 潇,等.同步活化氮掺杂海藻酸钠基多孔碳制备及对双酚 A 的高效吸附 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(1):160-171.  
Chen A X, Guan J J, Wei X, et al. Efficient adsorption of BPA by sodium alginate-based porous carbon with the preparation of synchronous activation and nitrogen doping [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(1):160-171.
- [21] Sekhon S S, Park J-S. Biomass-derived N-doped porous carbon nanosheets for energy technologies [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021,425:129017.
- [22] Zhang J, Yan X, Hu X, et al. Direct carbonization of Zn/Co zeolitic imidazolate frameworks for efficient adsorption of Rhodamine B [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018,347:640-647.
- [23] Bai F, Xia Y, Chen B, et al. Preparation and carbon dioxide uptake capacity of N-doped porous carbon materials derived from direct carbonization of zeolitic imidazolate framework [J]. *Carbon*, 2014,79:213-226.
- [24] Feng D, Guo D, Zhang Y, et al. Adsorption-enrichment characterization of CO<sub>2</sub> and dynamic retention of free NH<sub>3</sub> in functionalized biochar with H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O activation for promotion of new ammonia-based carbon capture [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021,409:128193.
- [25] Lu S, Huang X, Tang M, et al. Synthesis of N-doped hierarchical porous carbon with excellent toluene adsorption properties and its activation mechanism [J]. *Environmental Pollution*, 2021,284:117113.
- [26] Jang E, Choi S W, Lee K B. Effect of carbonization temperature on the physical properties and CO<sub>2</sub> adsorption behavior of petroleum coke-derived porous carbon [J]. *Fuel*, 2019,248:85-92.
- [27] Jin C, Sun J, Chen Y, et al. Sawdust wastes-derived porous carbons for CO<sub>2</sub> adsorption. Part 1. Optimization preparation via orthogonal experiment [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021,276:119270.
- [28] Li Y, Zhang T, Wang Y, et al. Transformation of waste cornstalk into versatile porous carbon adsorbent for selective CO<sub>2</sub> capture and efficient methanol adsorption [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021,9(5):106149.
- [29] Xiao W, Jiang X, Liu X, et al. Adsorption of organic dyes from wastewater by metal-doped porous carbon materials [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,284:124773.
- [30] Chen A X, Xie Y P, Wei X, et al. One-step preparation of sodium alginate-based porous carbon for the adsorption of bisphenol A in water [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2021,66(2):1101-1109.
- [31] Wu J, Yan X, Li L, et al. High-efficiency adsorption of Cr(VI) and RhB by hierarchical porous carbon prepared from coal gangue [J]. *Chemosphere*, 2021,275:130008.
- [32] Xu L, Zhang M, Wang Y, et al. Highly effective adsorption of antibiotics from water by hierarchically porous carbon: Effect of nanoporous geometry [J]. *Environmental Pollution*, 2021,274:116591.
- [33] Chen A X, Pang J J, Wei X, et al. Fast one-step preparation of porous carbon with hierarchical oxygen-enriched structure from waste lignin for chloramphenicol removal [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28(21):27398-27410.
- [34] Zhang C, Li Y, Li Y, et al. Synthesis and Zn(II) modification of hierarchical porous carbon materials from petroleum pitch for effective adsorption of organic dyes [J]. *Chemosphere*, 2019,216:379-386.
- [35] Kumar J A, Kumar P S, Krithiga T, et al. Acenaphthene adsorption onto ultrasonic assisted fatty acid mediated porous activated carbon-characterization, isotherm and kinetic studies [J]. *Chemosphere*, 2021, 284:131249.
- [36] Yang J, Dou Y, Yang H, et al. A novel porous carbon derived from CO<sub>2</sub> for high-efficient tetracycline adsorption: Behavior and mechanism [J]. *Applied Surface Science*, 2021,538:148110.
- [37] 刘凤玲,卢 霞,刘 杰,等.不同特性的多孔炭对 CO<sub>2</sub> 的吸附研究 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(6):1404-1409.  
Liu F L, Lu X, Liu J, et al. CO<sub>2</sub> adsorption on porous carbons with different characteristics [J]. *China Environmental Science*, 2014,4(6):1404-1409.

**作者简介:** 关娟娟(1998-),女,山西长治人,长安大学硕士研究生,主要研究方向为碳材料开发和污水处理与资源化。