

基于 Web of Science 的用于碳捕集的碳酸酐酶研究分析

胡耀峰¹, 程从雨¹, 李为^{*1,2}, 余龙江^{*1,2}

1 华中科技大学 生命科学与技术学院 生物技术系 资源生物学与生物技术研究所, 湖北 武汉 430074

2 分子生物物理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

胡耀峰, 程从雨, 李为, 余龙江. 基于 Web of Science 的用于碳捕集的碳酸酐酶研究分析[J]. 微生物学通报, 2025, 52(7): 3285-3301.

HU Yaofeng, CHENG Congyu, LI Wei, YU Longjiang. Analysis of carbonic anhydrase used for carbon capture based on Web of Science[J]. Microbiology China, 2025, 52(7): 3285-3301.

摘要:【背景】目前碳酸酐酶(carbonic anhydrase, CA)被应用于医药、天然活性物筛选、生物检测和碳捕集等众多领域, 虽然已发表了大量相关科研论文和著作, 但尚缺乏对 CA 领域全面、系统的文献计量分析。【目的】深入挖掘和分析可应用于碳捕集的 CA 的研究动态、研究热点和发展趋势, 为从事相关工作的研究者提供研究方向及数据参考。【方法】选用 Web of Science (WOS)核心合集数据库作为数据源, 利用 VOSviewer 作为文献计量工具, 通过关键词分析、发文数量分析、国家分布、作者合作共现及机构合作共现等方式对 CA 领域热点和趋势进行分析。【结果】最终共筛选出 795 篇有效文献。国家之间合作综合排名第一的是美国。我国在该领域起步较晚, 但近些年呈现出迅猛发展势头, 目前已经领先于其他国家。在 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域中, 研究热点集中在 CA 的表达、功能、CA 的抑制剂和 CO₂ 的捕集方面, 随着时间的推移, 通过分子对接筛选疾病靶点以及对 CA 的改造用于固碳已成为新的研究热点。【结论】CA 用于碳捕集这一领域具有广阔的前景, 本文以可视化的方式诠释了用于碳捕集的 CA 领域研究发展热点和趋势, 为用于碳捕集的 CA 研究及其应用提供了重要参考。

关键词: 碳酸酐酶; 碳捕集; VOSviewer; 可视化分析; 文献计量学

资助项目: 国家自然科学基金(42141008, 42377203); 国家重点研发计划(2022YFC2106000)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42141008, 42377203) and the National Key Research and Development Program of China (2022YFC2106000).

*Corresponding authors. E-mail: LI Wei, hulwei_009@163.com; YU Longjiang, yulongjiang@hust.edu.cn

Received: 2024-11-25; Accepted: 2025-03-08; Published online: 2025-04-09

Analysis of carbonic anhydrase used for carbon capture based on Web of Science

HU Yaofeng¹, CHENG Congyu¹, LI Wei^{*1,2}, YU Longjiang^{*1,2}

1 Institute of Resource Biology and Biotechnology, Department of Biotechnology, College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

2 Key Laboratory of Molecular Biophysics, Ministry of Education, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract: [Background] At present, carbonic anhydrase (CA) is applied in many fields such as medicine, natural active substance screening, biological detection, and carbon capture. Although a large number of related scientific papers and works have been published, there is still a lack of comprehensive and systematic bibliometric analysis of the research progress in CA. [Objective] To deeply explore and analyze the research trends, research hotspots, and development trends of CA that can be applied in carbon capture and provide research directions and data references for researchers engaged in related work. [Methods] The core collection of Web of Science (WOS) was selected as the data source. VOSviewer was used to analyze the keywords, number of publications, country distribution, author co-occurrence, and institution co-occurrence, thereby revealing the research hotspots and trends of CA. [Results] A total of 795 valid publications were ultimately selected. The United States ranked first in comprehensive cooperation among countries. China started relatively late in this field, but has shown rapid development in recent years and is currently ahead of other countries. From 2004 to 2023, the research hotspots of CA for carbon capture focused on the expression, function, and inhibitors of CA and CO₂ capture. Over time, screening disease targets through molecular docking and modifying CA for carbon sequestration have become new research hotspots. [Conclusion] The application of CA in carbon capture has broad prospects. This article visually explains the research and development hotspots and trends of CA that can be used for carbon capture, providing a theoretical basis for the research and application of CA for carbon capture.

Keywords: carbonic anhydrase; carbon capture; VOSviewer; visual analysis; bibliometrics

碳酸酐酶(carbonic anhydrase, CA, EC 4.2.1.1)是一种含锌的金属酶,它能够高效催化CO₂水合的可逆反应($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$)^[1]。CA广泛存在于动植物及微生物中,并且在很多生理过程中起重要作用,如CO₂转移、光合作用、保持体内酸碱平衡、离子运输和参与生物合成过程等^[2]。迄今为止,已发现的CA有 α 、 β 、 γ 、 δ 、 θ 和 η 等6个不同家族^[3]。 α -CAs常见于哺乳动物、原生动物、藻类、植物、细菌、真菌、古菌的胞浆中,所有动物来源的CA都出自 α -CAs,是现今研究最透彻的家族^[4]; β -CAs

首先发现在高等植物的叶绿体中,随后又在细菌、真菌、藻类、古菌中找到^[5]; γ -CAs则主要存在于一些细菌和古菌中; δ -CAs与 β -CAs非常类似,但是其在反应机理上却更接近于 α -CAs; δ -CAs与 θ -CAs主要存在于海洋的硅藻中^[6]; η -CAs是近年来才发现的类型,主要存在于疟原虫中^[7]。目前,CA被应用于医药、天然活性物筛选、生物检测和碳捕集等众多领域。在碳捕集领域中,相较于传统的固碳手段,CA因其固碳效率高、环境友好和能耗较小等优势而被广泛应用。为了探究CA研究领域的热点和趋

势,有必要对目前已有文献进行计量统计分析。

文献计量学是借助文献的各种特征,采用数学与统计学方法来描述、评价和预测科学技术的现状与发展趋势的学科^[8]。它可以帮助我们了解某个学科领域在不同时间、地区和语言环境下的发展趋势及其影响力的大小^[9]。目前,应用于碳捕集的 CA 领域尚未见文献计量学的进展报道。因此,我们利用文献计量学分析方法对近 20 年来应用于碳捕集的 CA 领域进行动态分析,旨在深入挖掘和分析可应用于碳捕集的 CA 的研究动态、研究热点和发展趋势,为从事相关工作的研究者提供研究方向及数据参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究的数据检索来源于 Web of Science (WOS)核心合集数据库。根据研究需求,采用检索式: Topic="carbonic anhydrase" AND ("CO₂ fixation" OR "CO₂ sequestration" OR "carbon capture")进行文献检索,检索时间跨度为 2004–2023 年,数据检索时间为 2024 年 10 月 30 日。为确保文献与研究主题的高度相关性,仅保留研究论文和综述论文,剔除新闻、会议记录、书籍章节等通常缺乏系统生成关键词的文献类型。经过筛选最终获得 795 篇文献用于后续分析。

1.2 研究方法

本研究基于系统性文献计量学方法,采用以下步骤对 795 篇文献进行知识图谱构建与趋势分析:首先从数据库导出原始文献数据(TXT 格式)进行标准化预处理,包括关键词词形归一化(消除大小写/字符差异)及同义词整合。完成预处理后,将筛选并整理后的文献导入 VOSviewer 软件进行文献计量分析^[10]。VOSviewer 通过构建和绘制科学图谱对各个知识领域进行可视化分析,并生成共现网络和时间图谱。利用该工具对不同国家和地区、作者及关键词进行聚类

分析,通过分析聚类结果和节点大小,识别当前研究的热点领域及其随时间的变化趋势。最后运用 Excel 进行国家和人名的格式校正,并采用 GraphPad Prism 9.0 对文献产出、不同国家和地区发文趋势进行可视化分析。

2 结果与分析

2.1 文献的产出与趋势分析

发文量可一定程度上反映某一学术领域或方向的发展速度和发展程度^[11]。基于 WOS 的核心合集数据库检索到 2004–2023 年近 20 年来关于用于碳捕集的 CA 领域的文献共计 795 篇。由图 1 可看出,CA 领域的发文数量随着时间的推移总体呈现出一个平稳的上升趋势。在 WOS 核心合集数据库中,全球范围内关于用于碳捕集的 CA 领域的研究自 2004–2010 年进入了一个相对平稳的发展阶段,该阶段的年均发文量为 13 篇,占总发文量的 1.63%。另外,2011 年的发文量增加迅速,是 2010 年发文量的 1.9 倍。紧接着,用于碳捕集的 CA 领域在 2013–2017 年又进入了上升阶段,该阶段的年均发文量为 52 篇,占总发文量的 6.54%。2018–2023 年的年均发文量依旧在递增,不过每年的年均发文量略有起伏。从整体发展趋势来看,近年来用于碳捕

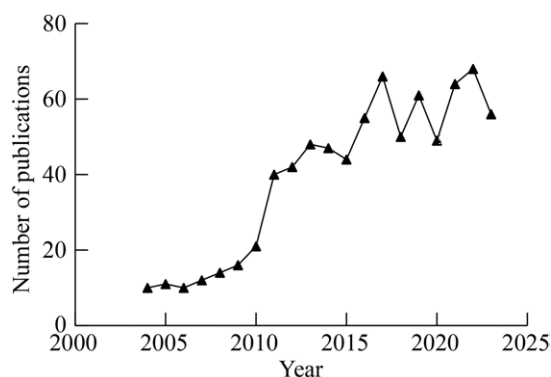


图 1 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域世界发文量

Figure 1 World publications in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023.

集的 CA 领域得到广泛关注,一直保持着整体上升趋势,可见在该领域内的研究还未达到饱和,根据 2020–2023 年的发展情况来看,预测未来几年将会保持一个低速且稳定的发展状态。

2.2 国家和地区

在特定研究领域的发文数量一定程度上可反映一个国家在该领域的学术影响力和科研实力,发文量随时间的变化可反映一个国家对该领域的关注程度。根据 WOS 核心合集数据库中检索出的用于碳捕集的 CA 领域发文量前 15 位的国家和地区(图 2)可以看出,美国的发文量最多且明显高于其他国家,为 180 篇,占总发文量的 22.64%; 发文量排第 2 位的是中国,在 2004–2023 年间,中国共发表了 167 篇文章,占总发文量的 21.01%,这表明我国研究者对该方向较高的关注程度。排名之后依次是印度、韩国、澳大利亚、英国、加拿大、德国、意大利、日本、法国、荷兰、西班牙、比利时和瑞典,这些国家的发文量平均值为 41 篇,占总发文量的 5.16%。发文量前三的国家占全部国家

与地区总发文量的一半以上,表明其在该领域的研究与其他国家相比占据主导地位。

图 3 统计并绘制出了总发文量居于前 5 位国家的年度发文量变化趋势。由图 3 可以看出,在 2004–2023 年间,美国在 CA 领域发文量呈现的趋势为:先上升后下降再逐渐趋于平稳。在 2004–2016 年间,美国在 CA 领域的发文量相对于其他国家一直处于明显的领先地位,直到 2017 年美国年均发文量(11 篇)才首次被中国(13 篇)反超。中国在 2010 年之后发文量一直处于持续上升趋势,特别是从 2013 年开始中国的发文量开始迅速增长,2013–2017 年中国年均发文量增长了 550%。中国在用于碳捕集的 CA 领域的发展起步相对较晚,但与全球研究的趋势保持一致,并且中国在该领域持续保持活跃状态,并在近几年表现得更加活跃。印度、韩国以及澳大利亚在用于碳捕集的 CA 领域的发文量呈现为先缓慢上升,之后趋于平缓,最后再渐渐下降的趋势。这也表明这些国家对于此领域的研究活跃程度在慢慢降低。

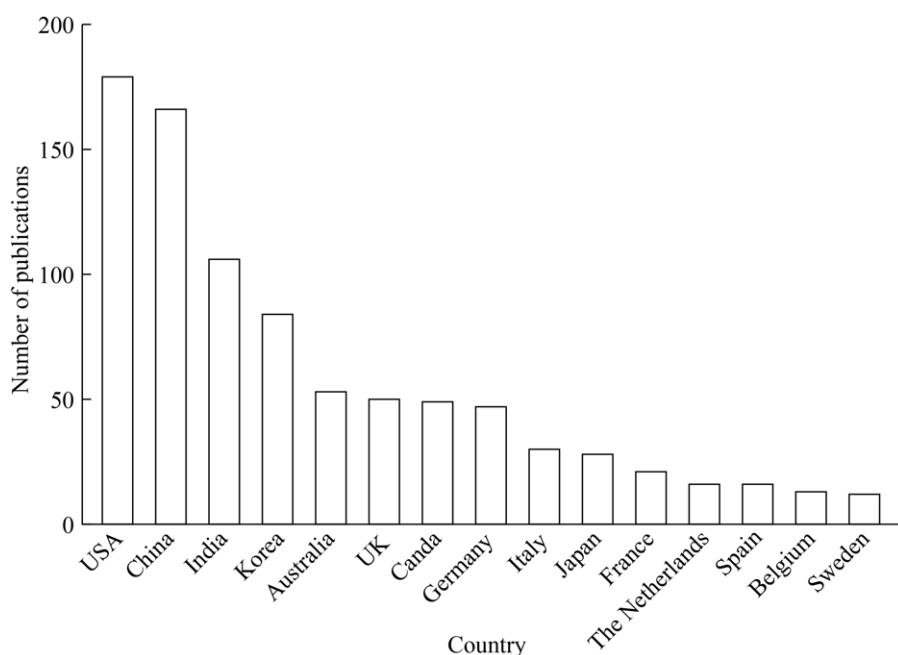


图 2 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量前 15 位的国家

Figure 2 Top 15 countries with the highest number of publications in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023.

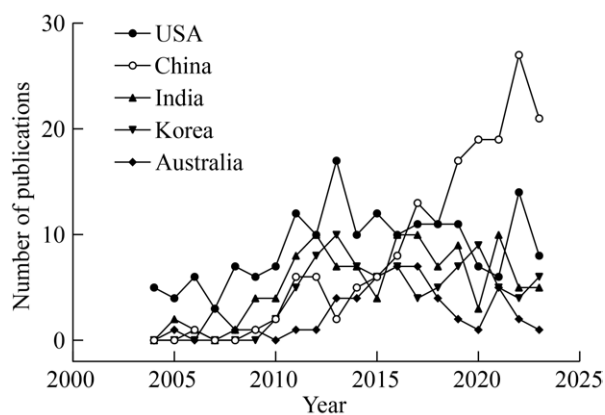


图 3 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量前 5 位的国家

Figure 3 Top 5 countries with the highest number of publications in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023.

利用 VOSviewer 对用于碳捕集的 CA 领域重要发文国家之间的相互合作关系图谱进行了绘制(图 4)。通过设定合适的阈值, 选取前 32 个国家进行 VOSviewer 可视化。图 4 中国标识的大小代表了该国家的总发文量, 国家之间的连线代表国家之间在该方向存在着合作, 连线的粗细程度表明了合作的程度。可以看出, 不同国家之间呈现出复杂深入的合作关系, 体现了该方向研究国际化的特点。美国标识为深蓝色, 说明美国在该方向起步很早, 中国标识为淡红色, 表明我国在该领域发展起步相对较晚。

2.3 研究机构分析

2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域发文量全球排名前 10 的研究机构见表 1。这 10 个

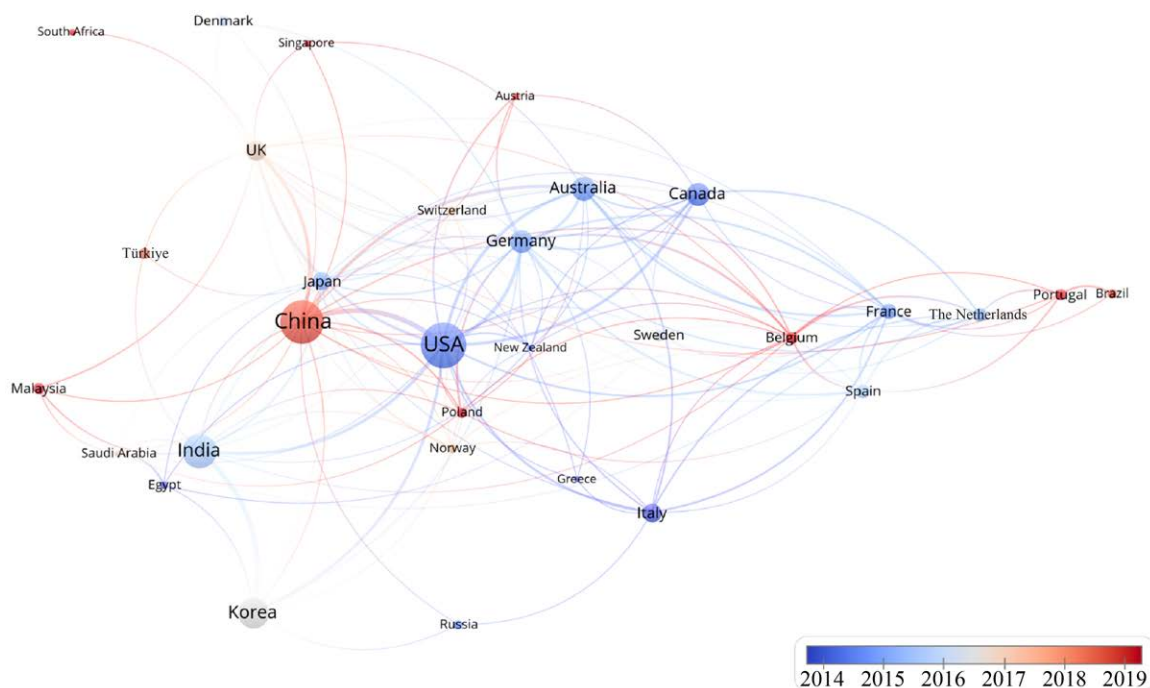


图 4 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域国家和地区合作关系图谱 节点表示国家和地区; 节点大小表示出现的频次; 参数阈值设置为 4, 即至少出现 4 次, 此图显示 32 个节点; 不同颜色代表期刊平均发表年份。

Figure 4 National and regional cooperation relationships in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023. Node represents the country/region and node size represents the frequency of occurrence; The parameter threshold is set to four, which means that the country/region has appeared at least four times; This figure shows 32 nodes; Different colors represent the average publication year of the journal.

表 1 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量排名前 10 的研究机构

Table 1 Top 10 research institutions in the field of carbonic anhydrase (CA) that can be used for carbon capture in terms of publication from 2004 to 2023

排名 Rank	研究机构 Institution	发文量(篇) Publication volume (article)	占比 Percentage (%)	总被引频次 Total citation	篇均被引频次 Average citation
1	美国能源部 United States Department of Energy	39	4.91	1 935	49.62
2	韩国高丽大学 Korea University	34	4.28	853	25.09
3	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	34	4.28	776	22.82
4	美国加利福尼亚大学 University of California, USA	31	3.90	213	68.16
5	澳大利亚国立大学 Australian National University	21	2.64	2 170	103.33
6	美国佛罗里达州立大学 Florida State University, USA	21	2.64	617	29.38
7	韩国能源研究院 Korea Institute of Energy Research	19	2.39	781	41.11
8	意大利国家研究委员会 Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy	19	2.39	776	40.84
9	印度科学工业研究理事会 Council of Scientific & Industrial Research, India	19	2.39	767	40.37
10	法国科学院 Centre National de la Recherche Scientifique, France	17	2.14	772	45.41

研究机构发文量共计 254 篇，占全球发文的 31.95%。其中美国能源部的发文数量位居榜首，总发文量 39 篇，占全部检索的 4.91%，总被引频次 1 935 次，篇均被引频次达到了 49.62 次，显示出该机构在用于碳捕集的 CA 领域有着相当高的学术活跃度；其次为韩国高丽大学，发文量占比为 4.28%，总被引频次 853 次；中国科学院以总发文量 34 篇位居第 3，篇均被引频次为 22.82 次。位居第 5 位的澳大利亚国立大学具有最高的篇均被引频次(103.33)，显示澳大利亚国立大学在该领域具有较高的权威。前 10 名的研究机构分别来自 7 个国家，其中来自美国的科研机构一共有 3 个，占比为 30%。

表 2 为 WOS 核心合集数据库中 2004–2023 年中国在用于碳捕集的 CA 领域发文量排名前 10 名的研究机构。我国排名前 10 的研究机构总发文量占全国总发文量的 65.87%。排名第 1 的研究

机构为中国科学院，该机构的发文量为 34 篇，占中国机构总发文量的 20.36%，总被引频次为 776；中国科学院大学以 12 篇的总发文量位居第 2；位居第 3 和第 4 的厦门大学和南京农业大学分别占总发文量的 6.59%和 5.99%。发文量位居第 10 的天津科技大学的篇均被引频次最高(37.67)。国内排名前 10 位机构的平均篇均被引频次为 24.33，远小于世界排名前 10 位机构的平均篇均被引频次(46.61)，这表明在该领域的论文质量方面，我国与世界前列国家还有一定的差距。

2.4 资助机构分析

通过分析机构资助情况可以反映出国家和国际对特定研究领域的重视程度，以及研究项目的影响力。2004–2023 年全球用于碳捕集的 CA 领域基金项目资助情况见表 3，在国际机构资助项目中，中国国家自然科学基金委员会以 120 篇发文量位居首位，占总量的 15.09%。这表明中

表 2 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量排名前 10 位的中国研究机构
Table 2 China’s top 10 research institutions in terms of publications in the field of carbonic anhydrase (CA) that can be used for carbon capture from 2004 to 2023

排名 Rank	研究机构 Institution	发文量(篇) Publication volume (article)	占比 Percentage (%)	总被引频次 Total citation	篇均被引 频次 Average citation
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	34	20.36	776	22.82
2	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences	12	7.19	330	27.50
3	厦门大学 Xiamen University	11	6.59	328	29.82
4	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	10	5.99	217	21.70
5	华中科技大学 Huazhong University of Science and Technology	9	5.39	268	29.78
6	东南大学 Southeast University	8	4.79	246	30.75
7	天津大学 Tianjin University	8	4.79	149	18.63
8	中国地质调查局 China Geological Survey	6	3.59	74	12.33
9	中国地质科学院岩溶地质研究所 Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	6	3.59	74	12.33
10	天津科技大学 Tianjin University of Science and Technology	6	3.59	226	37.67

表 3 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量排名前 10 位的资助机构
Table 3 Top 10 funding agencies in the research field of carbonic anhydrase (CA) that can be used for carbon capture from 2004 to 2023

排名 Rank	资助机构 Funding agency	发文量(篇) Publication volume (article)
1	中国国家自然科学基金委员会 National Natural Science Foundation of China	120
2	美国能源部 United States Department of Energy	53
3	美国国家科学基金委员会 National Science Foundation, United States	49
4	加拿大自然科学与工程研究委员会 Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	29
5	欧洲联盟 European Union	28
6	韩国国家研究基金委员会 National Research Foundation of Korea	25
7	印度生物技术部 Department of Biotechnology, India	23
8	美国国立卫生研究院 National Institutes of Health, United States	22
9	西班牙政府 Spanish Government	22
10	美国卫生部人类服务部 Department of Health & Human Services, United States	22

国对用于碳捕集的 CA 领域研究的重视程度和投入较高。美国能源部以 53 篇发文量位居第 2，说明美国在能源相关研究领域的支持较大。美国国家科学基金委员会以 49 篇发文量位居第 3，反映了美国在基础科学研究方面的持续投入。

其他国家和地区的机构也提供了不同程度的资助，但相对较少。

如表 4 所示，在国内资助机构中，国家自然科学基金委员会也以总发文量 71.86% 的占比位居首位，这突显了该研究领域的重要性。国

表 4 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量排名前 10 位的中国资助机构

Table 4 China's top 10 funding agencies in the research field of carbonic anhydrase (CA) that can be used for carbon capture from 2004 to 2023

排名 Rank	资助机构/基金项目 Funding agency/Grant project	发文量(篇) Publication volume (article)
1	国家自然科学基金委员会 National Natural Science Foundation of China	120
2	国家重点研发计划 National Key Research and Development Program of China	13
3	中国博士后科学基金委员会 China Postdoctoral Science Foundation Committee	10
4	中央高校基本科研业务费 Fundamental Research Funds for the Central Universities	9
5	国家留学基金委员会 China Scholarship Council	6
6	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	6
7	国家重点基础研究发展计划 National Program on Key Basic Research Project	6
8	科学技术部 Ministry of Science and Technology	5
9	北京市自然科学基金委员会 Beijing Natural Science Foundation Committee	4
10	江苏省自然科学基金委员会 Jiangsu Provincial Natural Science Foundation Committee	4

国家重点研发计划以 13 篇发文量位居第 2, 占总发文量的 7.78%。中国博士后科学基金委员会以 10 篇发文量位居第 3, 占总发文量的 5.99%。通过对国内资助机构的分析, 可以进一步看出中国对于用于碳捕集的 CA 研究领域的投入和重视程度非常高, 尤其是国家自然科学基金委员会在推动该领域研究和发展中起关键作用。科研人员应持续关注国内外研究资助动态, 积极申请相关研究资助, 以获得更多的研究支持。

2.5 文献作者分析

发文量排名前 10 的学者如表 5 所示, 这 10 位作者分别来自 5 个国家, 其中来自韩国的学者最多。来自澳大利亚国立大学的学者 Badger MR 发表文章的篇均被引频次最高(130.69), 远大于 10 位作者的平均篇均被引频次(60.28)。来自韩国能源研究院的 SOON Kwan J 发文量第一, 为 19 篇, 占总发文量的 2.39%, 文章的总被引频次为 781, 其被引率最高的研究通过使用 Tris base 作为吸收剂, 成功将 CO₂ 矿化为 3 种不同多形体的碳酸钙(方解石、文石和球霏石), 而 CA 酶的加入促进了矿化过程的初始速率; 这项工作作为 CO₂ 的捕获和矿化提供了新的策略, 有

助于开发更有效的碳捕获和利用技术, 以应对全球气候变化和环境问题^[12]。在该领域, 国内研究也取得了显著进展。发文量位居第 10 的学者的研究揭示, 在不存在 CA 抑制剂的条件下, Ca²⁺的沉淀速率显著高于存在 CA 抑制剂的情况, 暗示细菌分泌的 CA 可能在促进方解石沉淀过程中发挥了重要作用^[13]。此外, Li 等^[14-15]还进一步研究了初始钙离子浓度和不同 CA 酶浓度对方解石沉淀及晶体形态的影响, 发现在一定范围内, 较低的 Ca²⁺/CA 酶浓度有利于球霏石的形成, 而较高的 Ca²⁺/CA 酶浓度则更有利于方解石的生成。这些研究不仅丰富了 CA 在碳捕集领域的应用理论, 还为实际应用提供了重要的参考依据。

利用 VOSviewer 对用于碳捕集的 CA 领域作者之间的相互合作关系进行分析并进行可视化呈现(图 5)。通过设定合适的阈值后, 排除掉与其他学者合作较少的学者后, 选取前 21 个发文量最多的作者进行可视化分析。来自韩国高丽大学的学者 KIM Jungbae 与其中 13 个学者有合作, 是其中参与合作人数最多的学者。同样来自韩国高丽大学的学者 SEUNG Pil P 是图中最大的聚类, 这表明他与该领域的其他学者有

表 5 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量前 10 名作者
Table 5 Top 10 authors in the field of carbonic anhydrase (CA) that can be used for carbon capture from 2004 to 2023

排名	作者	所属机构	发文量(篇)	占比	总被引频次	篇均被引频次
Rank	Author	Institution	Publication volume (article)	Percentage (%)	Total citation	Average citation
1	Soon Kwan J	韩国能源研究院 Korea Institute of Energy Research	19	2.39	781	41.11
2	Kerfeld Cheryl A	美国劳伦斯伯克利实验室 Lawrence Berkeley National Laboratory	17	2.14	1 315	77.35
3	Capasso Clemente	意大利国家研究理事会 Consiglio Nazionale delle Ricerche	16	2.01	583	36.44
4	Supuran Claudiu	意大利佛罗伦萨大学 University of Florence	16	2.01	1 463	91.44
5	I Son N	中国台湾成功大学 Taiwan Cheng Kung University, China	15	1.89	416	27.73
6	Seung Pil P	韩国高丽大学 Korea University	15	1.89	401	26.73
7	Price Dean G	澳大利亚国立大学 Australian National University	14	1.76	1 757	125.50
8	Jo Byung	韩国国立庆尚大学 Gyeongsang National University	14	1.76	312	22.29
9	Badger Mr	澳大利亚国立大学 Australian National University	13	1.64	1 699	130.69
10	Li Wei	中国华中科技大学 Huazhong University of Science and Technology, China	12	1.51	282	23.50

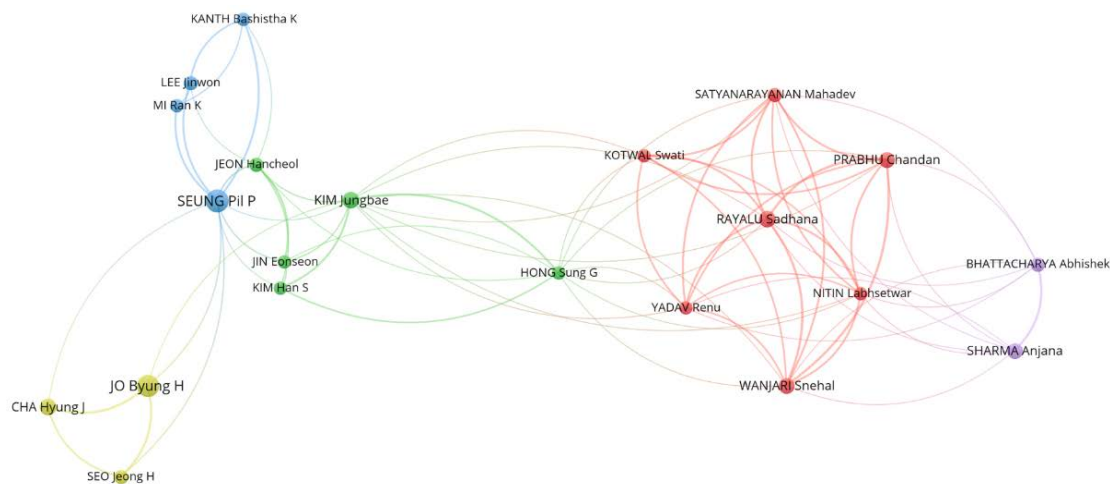


图 5 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域作者合作关系图谱 节点表示作者；节点大小表示作者出现的频次；作者参数阈值设置为 10，即作者至少出现 10 次，此图显示 21 个节点；不同颜色代表不同聚类。
Figure 5 Author collaboration in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023. Node represents the author; Node size represents the frequency of the author’s appearance; The author parameter threshold is set to 10, meaning that the author appears at least 10 times, this figure shows 21 nodes; Different colors represent different clusters.

着紧密的联系, 其引用频次最高的研究论文开发了一种封装在生物二氧化硅基质中的基于 CA 的生物催化剂, 用于环境中的 CO_2 固定, 该生物催化剂不仅显著加速了 CaCO_3 的沉淀速率, 而且表现出优异的热稳定性和良好的可重复使用性, 因此, 这种通过生物仿生绿色途径高效合成的二氧化硅-CA 纳米复合材料可以成功用作固定温室气体 CO_2 的强效生物催化剂^[16]。

2.6 来源期刊分析

全世界范围内 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域发文量位居前 10 名的期刊见表 6。这 10 种期刊总发文 149 篇, 占全部检索结果的 18.74%, 通过计算得出其平均影响因子为 6.5。其中, 来自瑞士的期刊 *Chemical Engineering Journal* 以 20 篇的总发文量位列第 1, 同时该期刊也有着最高的影响因子(13.3)。篇均被引频次最高的期刊是总发文量位居第 9 的 *PLoS One*, 其篇均被引频次为 55.10, 影响因子为 2.9。此外, 从表 6 可以看出, 收录用于碳捕集的 CA 领域研究的期刊多集中于工程学和化学领域。除去 2 本已停刊的期刊, 荷兰和英国期刊分别占前 8 名期刊总数的 50%和 25%, 说明这 2 个国家

在该领域发展较为先进, 对此方面研究较为深入。由表 6 还可以看出, 发文量排名前 10 名的期刊中未出现中国的期刊, 说明中国的期刊在该领域的影响力相对来说较低, 整体研究水平尚需进一步提升。

2.7 高引用论文分析

衡量论文重要性的指标之一是“被引频次”。通过统计文献的被引频次来了解科研人员对所研究领域的关注程度, 并且还可以凸显出科学论文在科学研究过程中的地位^[17]。由表 7 可以得出, 由意大利佛罗伦萨大学的学者 Supuran 等发表的题为“Carbonic anhydrases as targets for medicinal chemistry”的文章是被引频次最高的论文, 该论文详细研究了 CA 的催化和抑制机制, 以开发更特异性和有效的治疗药物; 该论文于 2007 年发表于 *Bioorganic & Medicinal Chemistry* 期刊上, 被引用次数是 484 次^[18]。CA 领域前 10 篇高被引论文分别发表于 10 种不同期刊中, “Protein-based organelles in bacteria: carboxysomes and related microcompartments”发表于其中影响因子最高的期刊 *Nature Reviews Microbiology* (IF=69.2), 该论文讨论了蓝藻细胞

表 6 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域发文量前 10 的期刊

Table 6 Top 10 journals in the field of carbonic anhydrase (CA) for carbon capture from 2004 to 2023

排名 Rank	发文章刊 Journal	发文量(篇) Publication volume (article)	占比 Percentage (%)	总被引频次 Total citation	篇均被 引频次 Average citation	影响因子 (2023) Impact factor (2023)
1	<i>Chemical Engineering Journal</i>	20	2.52	511	25.55	13.3
2	<i>Journal of CO₂ Utilization</i>	19	2.39	459	24.16	7.2
3	<i>Bioresource Technology</i>	18	2.26	643	35.72	9.7
4	<i>Energy Procedia</i>	18	2.26	262	14.56	/
5	<i>International Journal of Greenhouse Gas Control</i>	16	2.01	515	32.19	4.3
6	<i>Process Biochemistry</i>	15	1.89	480	32.00	3.7
7	<i>Photosynthesis Research</i>	12	1.51	560	46.67	2.9
8	<i>Separation And Purification Technology</i>	12	1.51	297	24.75	8.1
9	<i>PLoS One</i>	10	1.26	551	55.10	2.9
10	<i>Energy & Fuels</i>	9	1.13	242	38.33	/

“/”表示已在 2023 年之前停刊。

Publications marked “/” ceased publication prior to 2023.

表 7 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域前 10 篇高被引论文

Table 7 Top 10 highly cited papers in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023

排名 Rank	题名 Title	第一作者 First author	第一作者机构 Institution	发表期刊 Journal	总被引频次 Total citation
1	Carbonic anhydrases as targets for medicinal chemistry ^[18]	SUPURAN Claudiu	意大利佛罗伦萨大学 University of Florence	<i>Bioorganic & Medicinal Chemistry</i>	484
2	Carbon concentrating mechanisms in eukaryotic marine phytoplankton ^[19]	REINFELDER JR	美国罗格斯大学新伯朗士威分校 Rutgers State University New Brunswick	<i>Annual Review of Marine Science</i>	404
3	Metal organic frameworks mimicking natural enzymes: a structural and functional analogy ^[20]	NATH I	印度科学教育与研究学院 Indian Institute of Science Education & Research	<i>Chemical Society Reviews</i>	363
4	Protein-based organelles in bacteria: carboxysomes and related microcompartments ^[21]	YEATES TO	美国加利福尼亚大学洛杉矶分校 University of California, Los Angeles	<i>Nature Reviews Microbiology</i>	349
5	A model for carbohydrate metabolism in the diatom <i>Phaeodactylum tricornutum</i> deduced from comparative whole genome analysis ^[22]	KROTH PG	德国康斯坦兹大学 University of Konstanz	<i>PLoS One</i>	347
6	Efficiency of the CO ₂ -concentrating mechanism of diatoms ^[23]	HOPKINSO BM	美国佐治亚大学 University of Georgia	<i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i>	312
7	Feedback interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean ^[24]	SUNDA WG	美国北卡罗来纳大学 University of North Carolina	<i>Frontiers in Microbiology</i>	276
8	Functions, compositions, and evolution of the two types of carboxysomes: polyhedral microcompartments that facilitate CO ₂ fixation in cyanobacteria and some proteobacteria ^[25]	RAE BD	澳大利亚国立大学 Australian National University	<i>Microbiology and Molecular Biology Reviews</i>	271
9	Native architecture of the <i>Chlamydomonas</i> chloroplast revealed by <i>in situ</i> cryo-electron tomography ^[26]	ENGEL BD	瑞士巴塞尔大学 University of Basel	<i>eLife</i>	240
10	Investigating the application of enzyme carbonic anhydrase for CO ₂ sequestration purposes ^[27]	MIRJAFARI P	加拿大不列颠哥伦比亚大学 University of British Columbia	<i>Industrial & Engineering Chemistry Research</i>	237

中含有的核酮糖-1,5-双磷酸羧化酶/加氧酶和 CA 的多角体结构，即为羧基体的运作原理^[22]。高引论文中排名第 15 的论文“Structure, function

and applications of carbonic anhydrase isozymes”叙述了 CA 抑制剂对于治疗癫痫、肥胖、青光眼等都有大量的应用，并且还提到了在 CO₂ 捕获

过程中使用 CA 来缓解全球气温上升是未来的趋势^[28]。

2.8 研究方向

如表 8 所示, 研究方向排名前 3 位的分别为工程学、化学和生物技术应用微生物学, 分别占总研究方向的 28.18%、25.66%和 16.35%。前 3 个研究方向的出现频次占总的研究方向出现频次的 70.19%, 涵盖了绝大多数研究方向。

2.9 研究热点分析

2.9.1 研究热点聚类分析

通过使用可视化分析软件 VOSviewer 对 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域的相关文献进行关键词分析。通过设定阈值, 选取前 31 个重要关键词绘制关键词共现网络。由图 6 可知, 关键词网络可划分为 4 个不同聚类, 这说明 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域研究可分为 4 个主要的主题。除去连接所有聚类的关键词碳酸酐酶(carbonic anhydrase)外, 第 1 个聚类中最大的节点是二氧化物(dioxide), 然后依次是捕集(capture)、固定(immobilization)和吸收(absorption)等关键词, 由这前 5 个主要关键词可以推断出, 该聚类的主要研究方向是 CA 用于碳捕集、碳固定这一大主题的研究, 其中 Bhatia 等^[29]讨论了碳酸酐酶在 CO₂ 捕集中的进

展、各种碳捕集方法的优点和局限性; 此外, 还简要概述了如何利用 CO₂ 并创造收入, 期望开发一种既可以减轻 CO₂ 对环境的影响, 还可以在创造收入的同时解决能源问题的工艺。

第 2 个聚类中大的节点是光合作用(photosynthesis), 其次分别是表达(expression)、核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(rubisco)等关键词, 由此可见, 第 2 个聚类主要聚焦于植物中 CA 的研究。Yan 等^[30]设计了野外原位中宇宙水箱微藻培养实验系统, 研究了自然条件下岩溶区水生微藻及其胞外 CA 作用下的固碳能力, 结果表明, 胞外 CA 活性高的微藻群落表现出较强的固碳能力, 影响岩溶水生生态系统微藻固碳的主要环境因素为水体 CA 活性、光照、温度、总磷和总氮。该研究揭示了水生微藻和 CA 在自然岩溶水生条件下对碳汇的实际贡献, 为科学认识全球岩溶生态系统的碳汇潜力提供了新证据。

第 3 个聚类中, 出现频次前 5 位的关键词分别为: CO₂ 封存(CO₂ sequestration)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、纯化(purification)、生物矿化(biomineralization)和碳酸钙(calcium-carbonate), 结合关键词可以判断, 该聚类主要集中在利用生物矿化来封存 CO₂ 的研究上, 在全球气温上升、极端天气频发的背景下, 未来的研究中探索新

表 8 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域研究方向

Table 8 Research directions in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023

排名 Rank	研究方向 Research field	出现频次 Frequency	占比 Percentage (%)
1	工程学 Engineering	224	28.18
2	化学 Chemistry	204	25.66
3	生物技术应用微生物学 Biotechnology Applied Microbiology	130	16.35
4	生物化学分子生物学 Biochemistry Molecular Biology	128	16.10
5	科学技术类的其他方向 Science Technology Other Topics	108	13.59
6	能源燃料 Energy Fuels	89	11.12
7	植物科学 Plant Sciences	81	10.19
8	环境科学生态学 Environmental Sciences Ecology	69	8.68
9	材料科学 Materials Science	60	7.55
10	微生物学 Microbiology	47	5.91

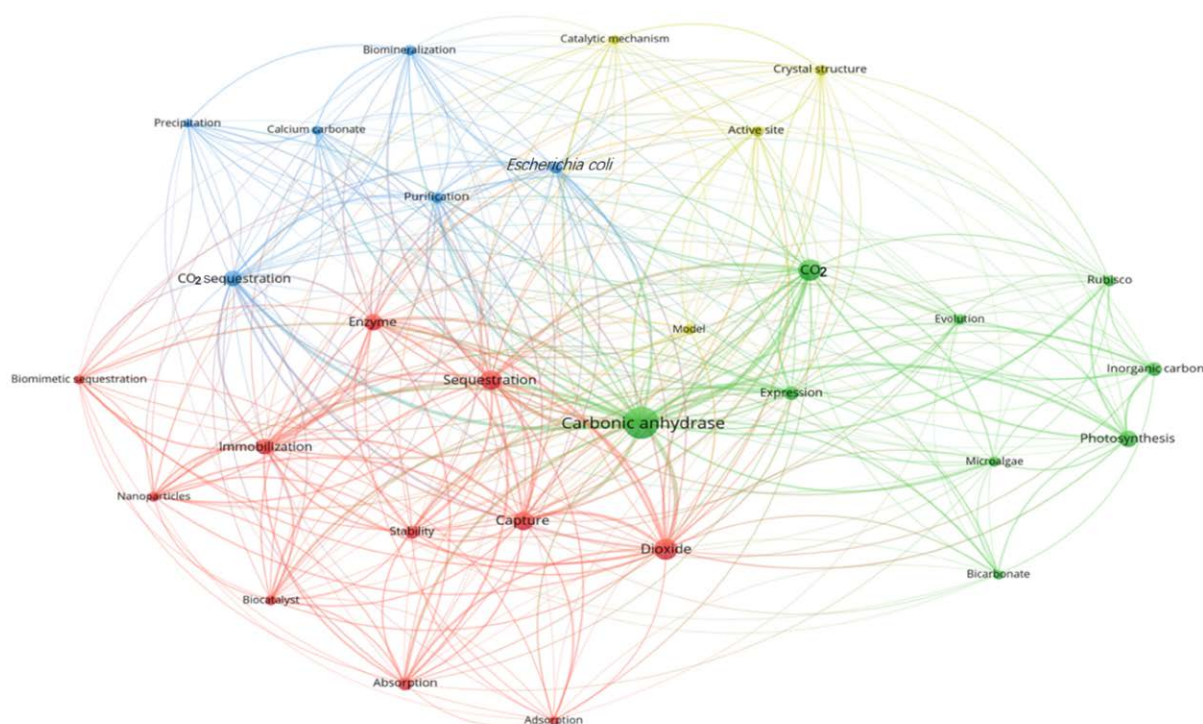


图 6 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域文献关键词共现图谱 节点表示关键词；节点大小表示关键词出现的频次；关键词参数阈值设置为 20，即关键词至少出现 20 次，此图显示 30 个节点；不同颜色代表不同聚类。

Figure 6 Keywords relationships in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023. Node represents keywords; Node size represents the frequency of keywords occurrences; The keywords parameter threshold is set to 20, which means that the keywords appears at least 20 times, this figure shows 30 nodes; Different colors represent different clusters.

型的碳捕集技术尤为重要。相较于传统的 CO_2 固定方法，使用 CA 捕集 CO_2 ，酶催化反应条件温和、高效、污染少，是一种环境友好的绿色工艺，而且其催化产物是碳酸盐，可作为其他工业生产的原料，也可通过矿化作用生成 CaCO_3 ，实现 CO_2 的地质学最终固定。Hazarika 等^[31]详细综述了 CA 的各种固定方法及其优点和局限性，并对迄今为止发现的不同类别的 CA 进行了结构概述，并使用多序列比对研究了它们的进化关系。Baidya 等^[32]将来自蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*) GLRT202 的 CA 与来自丁香假单胞菌(*Pseudomonas syringae*)的冰核蛋白进行融合表达，使 CA 锚定在大肠杆菌的表面，增强了 CA 的稳定性和特异性，并将构建的这种

CA 全细胞催化剂用于诱导方解石沉淀以用于 CO_2 的捕集。Qian 等^[33]通过向水泥基材料中添加能分泌 CA 的微生物来增强和改善水泥的表面结构，CA 能有效促进 CO_2 与水泥基材料孔隙溶液中 Ca^{2+} 的反应从而加速碳酸钙的形成，在矿化产物填充表层孔隙、降低孔隙度的同时也压实了材料的表层。最后一个聚类主要围绕用于碳捕集的 CA 的晶体结构、活性位点和催化机制展开研究。

2.9.2 研究热点时间演变分析

利用可视化分析软件 VOSviewer 对 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域文献的 10 个高频关键词进行分析，绘制出该研究方向的研究热点时间演变图谱(图 7)。如图 7 所示，出现

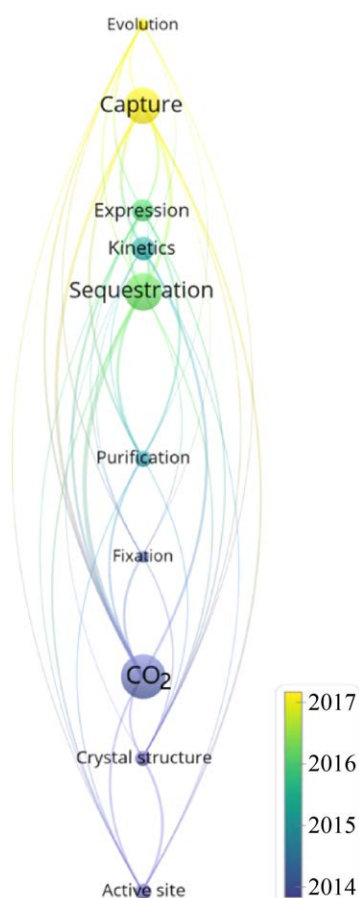


图 7 2004–2023 年用于碳捕集的碳酸酐酶领域研究热点时间演变图 节点表示关键词;节点大小表示关键词出现的频次;不同颜色代表关键词出现的平均年份。

Figure 7 Time evolution diagram of research hotspots in the carbonic anhydrase (CA) field that can be used for carbon capture from 2004 to 2023. Node represents keywords; Node size represents the frequency of keywords occurrences; Different colors represent the average year in which keywords appear.

的平均时间最早的关键词是“active site”，其中被引频次最高的论文是“Carbonic anhydrases as targets for medicinal chemistry”，该论文主要讲述 CA 在临床上对于青光眼、抗肥胖及抗惊厥的作用^[18]。来自意大利佛罗伦萨大学的学者 Supuran 于 2007 年将该论文发表在 *Bioorganic & Medicinal Chemistry* (IF=3.3) 上，被引频次为

484 次。

随着时间推移，碳捕集领域的研究重点发生转移，研究者的关注逐渐转向碳封存或碳汇技术，例如，Wang 等^[34]研究了土壤微生物和 CA 对岩溶作用强度的影响，结果表明产 CA 的细菌及 CA 在促进岩溶作用中发挥了重要作用，为理解土壤微生物和 CA 在岩溶生态系统碳汇中的作用提供了科学认识。近年来，研究者们开始专注于设计改造 CA 以开发性能更优的酶，并利用分子对接技术寻找 CA 抑制剂，这些抑制剂有望用于治疗包括青光眼和高山病在内的多种疾病。在“capture”聚类中，Liu 等^[35]将 CA 寡聚颗粒(nanosized CA oligomeric particles, nCAOPs)组装成微米级 CA 超颗粒(micrometer-sized CA supraparticles, mCASP), mCASP 可以作为无载体固定化 CA，循环利用 15 次后仍保留超过 90% 的原酶活性，而且，mCASP 可以再溶解并形成 nCAOPs，其具有优异的催化性能， k_{cat}/K_m 值提高了 74%，这为持续捕获 CO_2 以实现碳中和目标提供了可行性。在“evolution”聚类中，Alvizo 等^[36]利用定向进化法，经过反复的文库设计、文库建立和高通量筛选，将 CA 的热稳定性和耐碱性提高了 4×10^6 倍，在中试规模中将 CO_2 吸收率提高了 25 倍，这也为未来的研究和应用奠定了坚实基础。随着技术的不断进步和创新，CA 在未来固碳领域的潜力和重要性将不断显现，为应对全球气候变化提供新的解决方案。

3 结论

近年来，随着温室效应问题日益严重，世界范围内对 CA 固碳的作用日益关注。基于 Web of Science 核心合集数据库，针对 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域文献进行计量学分析，并利用 VOSviewer 进行可视化分析，结论如下：

(1) 在全世界范围内，2004–2023 年 CA 领域的发文量呈逐年上升趋势。国家之间合作综合排名第一的是美国。我国在该领域起步较晚，

但近些年呈现出迅猛发展势头,目前已经领先于其他国家。

(2) 从研究机构看,发文量排名前 10 位的机构中,中国科学院位居世界第 3,但篇均被引频次较低,说明中国的研究机构对于碳捕集的 CA 领域虽然已经开始重视,但依旧与世界前列水平存在差距,预测在未来几年,中国在该领域的研究会更加先进。

(3) 工程学、化学、生物技术应用微生物学位居 2004–2023 年用于碳捕集的 CA 领域研究方向总出现频次的前 3 名,是主要的研究方向。

(4) 从高频关键词看,在 2004–2023 年 CA 领域中,研究热点集中在 CA 的表达、CA 抑制剂和 CO₂ 的固定/捕集方面。随着时间的推移,碳捕集领域的研究重点发生转移,研究者们的关注逐渐转向碳封存或碳汇技术。近些年,对 CA 的改造用于固碳已成为新的研究热点之一。

4 展望

能源活动是经济发展的重要支撑,发展不可能完全避免 CO₂ 的排放,因此,固碳技术的研究与应用愈发关键和重要。CA 在固碳领域有望发挥重要作用,其应用价值主要集中在水生微藻固碳、岩溶碳汇及工业固碳这 3 个关键领域。它们分别代表了自然生态系统、地质过程和人类工业活动中的固碳潜力,涵盖了从生物地球化学循环到工业减排的多个层面,对于实现全球碳减排目标具有重要意义。水生微藻 CA 在固碳领域展现出巨大潜力。一方面,微藻通过光合作用吸收 CO₂,而 CA 作为 CO₂ 浓缩机制中的关键酶,能够高效催化 CO₂ 与碳酸氢根离子的相互转化,显著提升微藻对 CO₂ 的固定效率。未来可进一步探索不同微藻种类中 CA 的多样性及其在固碳过程中的具体作用机制,开发基于海洋微藻 CA 的高效固碳系统,为海洋生态系统碳汇能力的提升提供理论支持与技术手段。另一方面,CA 在岩溶碳循环中发挥着重要作用。岩溶作用通过风化和沉积过程影响

大气 CO₂ 浓度,而 CA 及产 CA 微生物能够加速碳酸盐岩的溶蚀与沉积,促进 CO₂ 的固定与释放。深入研究 CA 在不同岩溶生态环境中的活性、稳定性及其对岩溶碳汇的实际贡献,有助于开发基于 CA 的岩溶碳汇增强技术,为实现碳中和目标提供新的思路与途径。此外,在工业固碳领域,基于酶促反应的 CO₂ 捕集技术逐渐受到关注。CA 作为一种高效的生物催化剂,可显著提高 CO₂ 的吸收效率,降低传统碳捕集工艺中的能源损耗。然而,游离 CA 酶在工业应用中存在稳定性和重复利用性不足的问题。因此,未来需致力于开发高活性、高稳定性的工程化 CA 酶,构筑高性能且廉价的仿酶催化剂,同时优化 CA 酶的固定化载体材料和工艺,以提高其在工业固碳中的应用价值。

总之,CA 在碳捕集和转化领域展现出巨大的应用潜力,随着技术的不断进步和创新,CA 有望在全球碳减排中发挥更加重要的作用。本研究仅局限 Web of Science 主题检索范围,未来研究中可考虑克服这一不足,获取更广泛的数据,从而对 CA 领域研究现状与趋势形成更准确的整体性认知。

作者贡献声明

胡耀峰:调研、数据整理和分析、撰写初稿;程从雨:数据统计;李为:获取基金,指导调研、数据整理和分析,写作审查和修改;余龙江:获取基金,指导调研,写作审查和修改。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] CAGLAYAN C, TASLIMI P, TÜRK C, KANDEMİR FM, DEMİR Y, GULCIN İ. Purification and characterization of the carbonic anhydrase enzyme from horse mackerel (*Trachurus trachurus*) muscle and the impact of some metal ions and pesticides on enzyme activity[J]. Comparative Biochemistry and

- Physiology Toxicology & Pharmacology, 2019, 226: 108605.
- [2] ALISSA SA, ALGHULIKAH HA, ALOTHMAN ZA, OSMAN SM, del PRETE S, CAPASSO C, NOCENTINI A, SUPURAN CT. Inhibition survey with phenolic compounds against the δ - and η -class carbonic anhydrases from the marine diatom *Thalassiosira weissflogii* and protozoan *Plasmodium falciparum*[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2020, 35(1): 377-382.
 - [3] IRANINASAB S, SHARIFIAN S, HOMAEI A, HOMAEI MB, SHARMA T, NADDA AK, KENNEDY JF, BILAL M, IQBAL HMN. Emerging trends in environmental and industrial applications of marine carbonic anhydrase: a review[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2022, 45(3): 431-451.
 - [4] GOZES I, LITTAUER UZ, GEIGER B, FUCHS S. Immunochemical determination of tubulin[J]. FEBS Letters, 1977, 73(1): 109-114.
 - [5] SMITH KS, COSPER NJ, STALHANDSKE C, SCOTT RA, FERRY JG. Structural and kinetic characterization of an archaeal beta-class carbonic anhydrase[J]. Journal of Bacteriology, 2000, 182(23): 6605-6613.
 - [6] KIKUTANI S, NAKAJIMA K, NAGASATO C, TSUJI Y, MIYATAKE A, MATSUDA Y. Thylakoid luminal θ -carbonic anhydrase critical for growth and photosynthesis in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(35): 9828-9833.
 - [7] JENSEN EL, CLEMENT R, KOSTA A, MABERLY SC, GONTERO B. A new widespread subclass of carbonic anhydrase in marine phytoplankton[J]. The ISME Journal, 2019, 13(8): 2094-2106.
 - [8] 王乃亮, 黄慧, 陈思瑾, 姜泳波, 孙旭伟. 基于 Cite Space 分析的生态安全评价研究[J]. 环境生态学, 2023, 5(3): 8-16.
WANG NL, HUANG H, CHEN SJ, JIANG YB, SUN XW. Study of ecological security assessment based on Cite Space analysis[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(3): 8-16 (in Chinese).
 - [9] 李豫悦, 李天凯, 陈林. 中国高寒草甸研究进展: 基于文献计量分析[J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7771-7781.
LI YY, LI TK, CHEN L. Research progress on alpine meadows in China: based on bibliometric analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7771-7778 (in Chinese).
 - [10] 周泽, 张春平, 曹铨, 俞旸, 魏孔涛, 董全民. 基于 VOSviewer 和 CiteSpace 的 2014—2023 年土壤碳库研究可视化分析[J]. 草地学报, 2025, 33(1): 136-146.
ZHOU Z, ZHANG CP, CAO Q, YU Y, WEI KT, DONG QM. Visual analysis of soil carbon pool research from 2014 to 2023 based on VOSviewer and CiteSpace[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 136-146 (in Chinese).
 - [11] 郑梅迎, 林伟, 徐茜, 彭玉龙, 刘明宏, 龚鹏飞, 刘跃东, 孔凡玉, 张继光. 基于 CNKI 数据库的土壤酸化文献计量分析[J]. 土壤, 2020, 52(4): 811-818.
ZHENG MY, LIN W, XU Q, PENG YL, LIU MH, GONG PF, LIU YD, KONG FY, ZHANG JG. Bibliometric analysis of soil acidification research based on CNKI database[J]. Soils, 2020, 52(4): 811-818 (in Chinese).
 - [12] CHU DH, VINOBA M, BHAGIYALAKSHMI M, BAEK IH II, NAM SC, YOON Y, KIM SH, JEONG SK. CO₂ mineralization into different polymorphs of CaCO₃ using an aqueous-CO₂ system[J]. RSC Advances, 2013, 3(44): 21722-21729.
 - [13] LI W, LIU LP, ZHOU PP, CAO L, YU LJ, JIANG SY. Calcite precipitation induced by bacteria and bacterially produced carbonic anhydrase[J]. Current Science, 2011, 100(4): 502-508.
 - [14] LI W, CHEN WS, ZHOU PP, ZHU SL, YU LJ. Influence of initial calcium ion concentration on the precipitation and crystal morphology of calcium carbonate induced by bacterial carbonic anhydrase[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 218: 65-72.
 - [15] LI W, CHEN WS, ZHOU PP, YU LJ. Influence of enzyme concentration on bio-sequestration of CO₂ in carbonate form using bacterial carbonic anhydrase[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 232: 149-156.
 - [16] JO BH, SEO JH, YANG YJ, BAEK K, CHOI YS, PACK SP, OH SH, CHA HJ. Bioinspired silica nanocomposite with autoencapsulated carbonic anhydrase as a robust biocatalyst for CO₂ sequestration[J]. ACS Catalysis, 2014, 4(12): 4332-4340.
 - [17] 任睿, 高雯芳, 李敏, 潘丽娜. 基于 VOSviewer 和 CiteSpace 的昆虫肠道微生物领域可视化分析[J]. 微生物学通报, 2023, 50(11): 5219-5234.
REN R, GAO WF, LI M, PAN LN. Visual analysis of research on insect gut microbiota based on VOSviewer and CiteSpace[J]. Microbiology China, 2023, 50(11): 5219-5234 (in Chinese).
 - [18] SUPURAN CT, SCOZZAFAVA A. Carbonic anhydrases as targets for medicinal chemistry[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2007, 15(13): 4336-4350.
 - [19] REINFELDER JR. Carbon concentrating mechanisms in eukaryotic marine phytoplankton[J]. Annual Review of Marine Science, 2011, 3: 291-315.
 - [20] NATH I, CHAKRABORTY J, VERPOORT F. Metal organic frameworks mimicking natural enzymes: a structural and functional analogy[J]. Chemical Society Reviews, 2016, 45(15): 4127-4170.
 - [21] YEATES TO, KERFELD CA, HEINHORST S, CANNON GC, SHIVELY JM. Protein-based organelles in bacteria: carboxysomes and related microcompartments[J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, 6(9): 681-691.
 - [22] KROTH PG, CHIOVITTI A, GRUBER A, MARTIN-JEZEQUEL V, MOCK T, PARKER MS, STANLEY MS, KAPLAN A, CARON L, WEBER T, MAHESWARI U, ARMBRUST EV, BOWLER C. A model for carbohydrate metabolism in the diatom *Phaeodactylum tricornutum* deduced from comparative whole genome analysis[J]. PLoS One, 2008, 3(1): e1426.
 - [23] HOPKINSON BM, DUPONT CL, ALLEN AE, MOREL FMM. Efficiency of the CO₂-concentrating mechanism of diatoms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(10): 3830-3837.
 - [24] SUNDA WG. Feedback interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean[J]. Frontiers in Microbiology, 2012, 3: 204.
 - [25] RAE BD, LONG BM, BADGER MR, PRICE GD. Functions, compositions, and evolution of the two types

- of carboxysomes: polyhedral microcompartments that facilitate CO₂ fixation in cyanobacteria and some proteobacteria[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2013, 77(3): 357-379.
- [26] ENGEL BD, SCHAFER M, KUHN CUELLAR L, VILLA E, PLITZKO JM, BAUMEISTER W. Native architecture of the *Chlamydomonas* chloroplast revealed by *in situ* cryo-electron tomography[J]. *eLife*, 2015, 4: e04889.
- [27] MIRJAFARI P, ASGHARI K, MAHINPEY N. Investigating the Application of Enzyme Carbonic Anhydrase for CO₂ Sequestration Purposes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(3): 921-926.
- [28] IMTAIYAZ HASSAN M, SHAJEE B, WAHEED A, AHMAD F, SLY WS. Structure, function and applications of carbonic anhydrase isozymes[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2013, 21(6): 1570-1582.
- [29] BHATIA SK, BHATIA RK, JEON JM, KUMAR G, YANG YH. Carbon dioxide capture and bioenergy production using biological system: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 110: 143-158.
- [30] YAN Z, SHEN TM, LI W, CHENG WL, WANG XY, ZHU M, YU QW, XIAO YT, YU LJ. Contribution of microalgae to carbon sequestration in a natural Karst wetland aquatic ecosystem: an *in situ* mesocosm study[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 768: 144387.
- [31] HAZARIKA A, YADAV M. Biomineralization of carbon dioxide by carbonic anhydrase[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2023, 51: 102755.
- [32] BAIDYA P, ZHANG M, XIAO YT, ZHANG H, YU LJ, LI W. Genetically engineered whole-cell biocatalyst for efficient CO₂ capture by cell surface display of carbonic anhydrase from *Bacillus cereus* GLRT202 on *Escherichia coli*[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2024, 211: 109446.
- [33] QIAN CX, ZHANG X, CHEN YQ, XUE B. Microbial mineralization at the surface layer of cement-based materials and its effect on efflorescence performance[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 52: 104480.
- [34] WANG CW, LI W, SHEN TM, CHENG WL, YAN Z, YU LJ. Influence of soil bacteria and carbonic anhydrase on karstification intensity and regulatory factors in a typical Karst area[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 17-24.
- [35] LIU GZ, YUAN H, LI XB, LI K, MAO L, ZHANG GY. Tailoring the properties of self-assembled carbonic anhydrase supraparticles for CO₂ capture[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(37): 12374-12385.
- [36] ALVIZO O, NGUYEN LJ, SAVILE CK, BRESSON JA, LAKHAPATRI SL, SOLIS EOP, FOX RJ, BROERING JM, BENOIT MR, ZIMMERMAN SA, NOVICK SJ, LIANG J, LALONDE JJ. Directed evolution of an ultrastable carbonic anhydrase for highly efficient carbon capture from flue gas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(46): 16436-16441.