

CiteSpace 分析 CO₂ 合成碳酸酯的高效催化剂研究进展

耿 赛¹, 刘雨菲², 殷佳璐^{1*}, 王卉卉¹, 刘仕伟¹

¹ 青岛科技大学化工学院 山东青岛

² 青岛科技大学高分子科学与工程学院 山东青岛

【摘要】以 Web of Science 核心合集数据库中近十年（2014 年-2024 年）间所发表的有关二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂的研究进展的共计 357 篇文献为分析对象，使用 CiteSpace 进行可视化分析。从发文量，发文国家、机构、作者及其之间的的联系分析该研究领域的外部特征。利用关键词的聚类、时间线谱图和突显分析方法，分析该领域的研究现状、热点并预测该领域未来的研究趋势。

【关键词】CO₂；碳酸酯；高效催化剂；CiteSpace；可视化分析

【收稿日期】2025 年 4 月 6 日 **【出刊日期】**2025 年 5 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250005

Research progress on efficient catalysts for analyzing CO₂ synthesis of carbonate using CiteSpace

Sai Geng¹, Yufei Liu², Jialuo Yin^{1*}, Huihui Wang¹, Shiwei Liu¹

¹School of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong

²School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong

【Abstract】A total of 357 articles on the research progress of efficient catalysts for carbon dioxide synthesis of carbonates published in the Web of Science core collection database during the past decade (2014-2024) were analyzed using CiteSpace for visualization analysis. Analyze the external characteristics of this research field from the perspectives of publication volume, publication country, institution, author, and their relationships. Analyze the current research status, hotspots, and predict future research trends in this field using keyword clustering, time-line spectrogram, and highlight analysis methods.

【Keywords】CO₂;Carbonate; Efficient catalyst; CiteSpace; Visualization analysis

1 引言

工业革命以来，化石能源的大量消耗造成大气中的 CO₂ 等温室气体含量不断升高，导致了全球变暖、极端天气、人类的生存环境不断恶化。以 CO₂ 为原料，通过开发高效的催化技术，可以将 CO₂ 转化为包括环状碳酸酯，碳酸二甲酯在内的具有高附加值的碳酸酯产品，充分发挥 CO₂ 的利用价值。然而，由于 CO₂ 的动力学惰性和热力学稳定性，以 CO₂ 为原料生产有机化学品在全球仅有少量过程实现了工业化。因此，开发 CO₂ 催化转化新技术，制备一种高效的催化剂，以实现温和条件下 CO₂ 的高值化利用具有重要的研究价值和十分广阔的应用前景^[1]。

有关二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂的研究是当前的研究热点，相关研究文献数量呈上升趋势，但总

体发文量仍然较少，特别是有关的综述类文献更少。基于此，文章基于 CiteSpace 文献可视化软件，利用 WOS 文献库总结分析近十年来二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂的研究，旨在分析该领域的研究现状、研究热点，并预测该领域的未来发展方向，从而推进我国相关研究的发展。

2 数据来源和研究分析方法

2.1 数据来源

本文数据基于 Web of Science 核心合集数据库，设置检索时间为出版日期的 2014 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日，检索式为((((TS=(CO₂) AND TS=(carbonate) AND TS=(catalyst))))))，共检索得到 357 篇相关文献。以记录内容为“全记录与引用的参考文献”的纯文本文件格式导出分析。

*通讯作者：殷佳璐

2.2 研究分析方法

将数据导入 CiteSpace 后, 利用“Remove Duplicates”方法对文献进行去重, 可得 357 篇独立来源于 WOS 的文献, 据统计其中独立的实体 (Unique Entities) 如表 1 所示。之后利用所得数据, 通过 Word 内置功能绘制年发文量的柱状图 (表 1 统计的独立实体的及数量)。作者的发文量、作者合作关系等分析是将同一篇论文

中的所有作者列入分析的。所属的国家、地区和机构按照论文标注的所有位置进行统计。使用 CiteSpace 6.2.R3 (64-bit) Advanced 版本进行可视化分析。通过 “Country”、“Institution”、“Keyword”、“Author”、“Keyword”、“Cited Author”以及“Cited Journal”等节点类型, 进行国家、机构、关键词、作者、作者共被引、期刊共被引的可视化分析。

表 1 统计的独立实体的及数量

类别	数量
Articles 文章	357
Journals 期刊	113
Authors 作者	1485
Institutions 机构	676
Countries/Regions 国家/地区	64

3 结果和讨论

3.1 发文量

统计 2014~2024 年 Web of Science 核心合集数据库中二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面研究的年发文量 (图 1), 结果显示年论文发文量总体呈现波动

上升的趋势, 表明该领域的研究热度正不断升高, 尤其是 2020 年后, 随着 “双碳” 政策的提出, 发表的相关文章数量迅速增多, 在 2022 年达到了 53 篇。但总体相关发文量仍然较少。

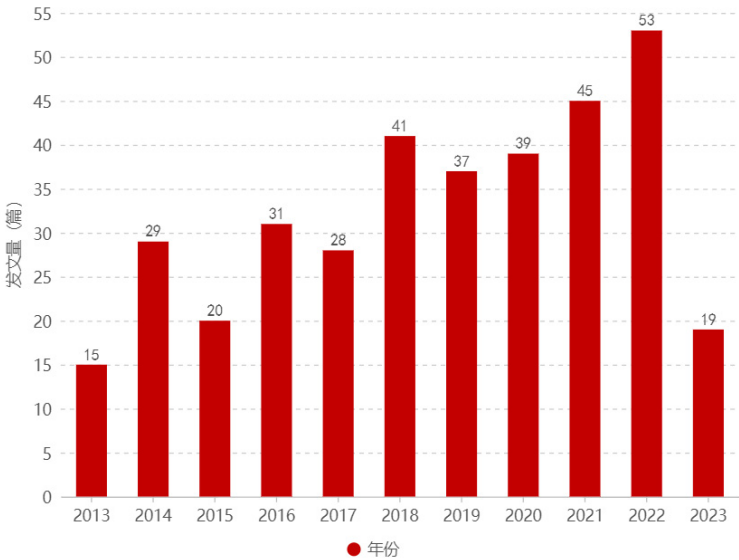


图 1 2014-2024 年二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂相关研究文献年发文章

3.2 机构与国家的发文情况

通过 CiteSpace 软件对发文作者的所属机构进行分析, 发现在 2014-2024 年间发文作者分布在 229 个机构中。发文数量排名前 10 的机构如表 2 所示, 其中中国科学院总发文量最多。据统计排名前 10 的机

构均来自东亚, 其中 8 所来自中国。由研究机构合作关系图 (图 2) 可得到 N=229, E=151, 网络密度结果极小, 表明各机构之间关于开发二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面研究合作较少, 基本处于独立研究状况。

表2 发文量前10机构

排名	机构	数量	占比/%
1	Chinese Academy of Sciences	31	8.68
2	Pusan National University	13	3.64
3	University of Chinese Academy of Sciences	11	3.08
4	Dalian University of Technology	7	1.96
5	Nanchang Hangkong University	6	1.68
6	Tohoku University	6	1.68
7	Henan University	6	1.68
8	Sun Yat sen University	6	1.68
9	Southeast University	6	1.68
10	Tsinghua University	5	1.40

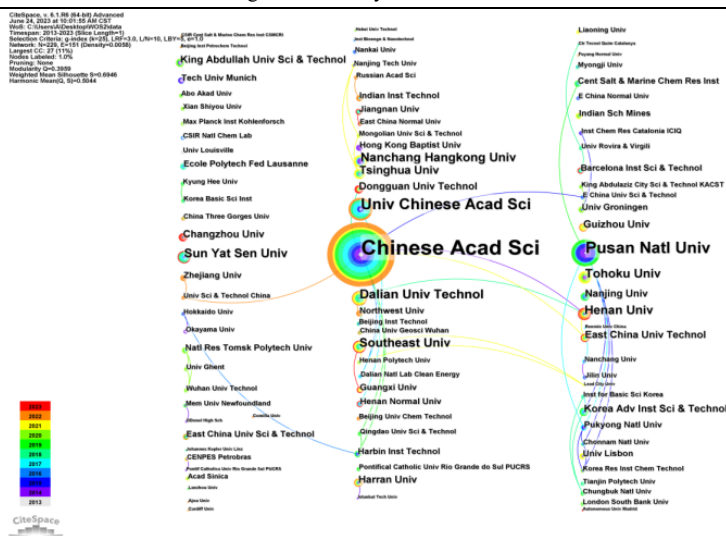


图2 研究机构合作关系图

经 CiteSpace 统计可得, 相关发文所属的国家或地区共计有 47 个, 发文量排名前 10 的国家或地区如表 3 所示。中国在开发二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面研究发文量最多, 占比近 48.18%, 这可能是由于我国的“双碳政策”的实施以及从事相关方向的

科研人员众多。在作者合作关系图(图3)中可得 $N=47$, $E=87$, 且中心度相对于研究机构合作关系的中心度大很多, 表明国家或地区之间对于开发二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面的研究联系相比机构之间更加密切。

表3 发文量前10的国家/地区

排名	国家	数量	占比/%
1	PEOPLES R CHINA	172	48.18
2	SOUTH KOREA 韩国	37	10.36
3	INDIA 印度	32	8.96
4	USA 美国	18	5.04
5	SPAIN 西班牙	16	4.48
6	RUSSIA 俄罗斯	16	4.48
7	JAPAN 日本	15	4.20
8	GERMANY 德国	11	3.08
9	SAUDI ARABIA 沙特阿拉伯	10	2.80
10	BRAZIL 巴西	9	2.52

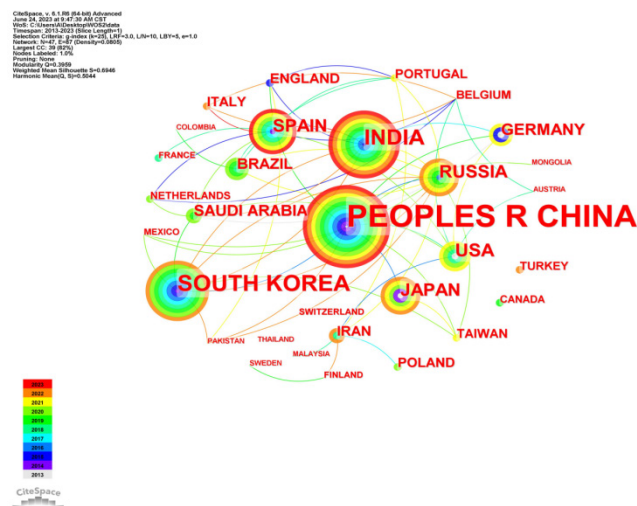


图3 国家/地区合作关系图

3.3 研究领域作者的分析

通过对该领域发文作者统计分析,可以得到对该领域有较大的贡献者和作者之间的联系情况。数据显示,2014-2024年该领域的发文作者形成321个节点和399条连线的合作网络,密度Density为0.0078。图4中节点的大小与发文量成正比,节点间的连线代表作者之间的合作情况,线段粗细与合作程度呈正相关关系。这表明近10年来,共有321位作者在该研究领域发表论文,但发表论文的研究作者较为分散,并没有形成密集的合作群体。

本文对发文量大于5篇的作者进行深入分析,Kathalikkattil_Amal Cherian, Park,Dae Won, Tharun,Jose 等的研究时间集中在2014-2015年间,他们主要从事生物金属有机骨架的研究,制备了多种多相介孔分子筛催化剂,并利用了从头算量子力学计算(DFT技术)对反应机理进行了分析^[2-4]Tomishige, Keiichi, Nakagawa, Yoshinao, Tamura, Masazumi 等的研究时间集中在2019年后,他们主要从事的是钪基催化剂的研究^[5-7],Aytar_Emine 主要从事钴酰亚胺配合物的研究,研究时间比较分散,从2014年至2022年间不时有文章产出。



图4 作者合作关系图

3.4 关键词聚类分析

L.Egghe 提出了 G 指数^[8],作为 H 指数的改进,说明作者热门文章的表现等。g 指数对引频非常敏感^[8]。在关键词的聚类分析和时间线图谱分析中,采用

将 Selection Criteria 中的 g-index 由默认值 25 改为 15 的方法照顾到了低被引文章,同时控制了高被引文章的作用。同时,将 Top N 修改为 38,以控制节点的个数。

通过对关键词的研究,可以得到文章的强调的核心内容与突出内容。CiteSpace 是通过算法将关系紧密的关键词进行聚类,给每个关键词一个值,同一聚类中值最大的为该类别的代表,并给它进行标签。如图 5 所示关键词的聚类是利用 CiteSpace 在 pathfinder 剪切算法中简化关键词网络并凸显出其重要的结构特征绘制而成的。由图知 $Q=0.6679>0.3$ 的聚类结构是显著的,

$S=0.8890>0.7$ 的聚类是高效率令人信服的^[4], 分析可得, 关键词可分为 11 类, 分别为: 离子液体、复合物、二氧化碳固定、碳酸二甲酯、共聚合、甲醇、CO₂ 气化、二氧化铈、选择性聚合、活性位点、环加成、形成机理。从中可以了解到研究的主要方向是合成碳酸二甲酯, 环状碳酸酯以及聚合物, 在开发高效催化剂方面采用多为离子液体、铈基催化剂是比较多的。

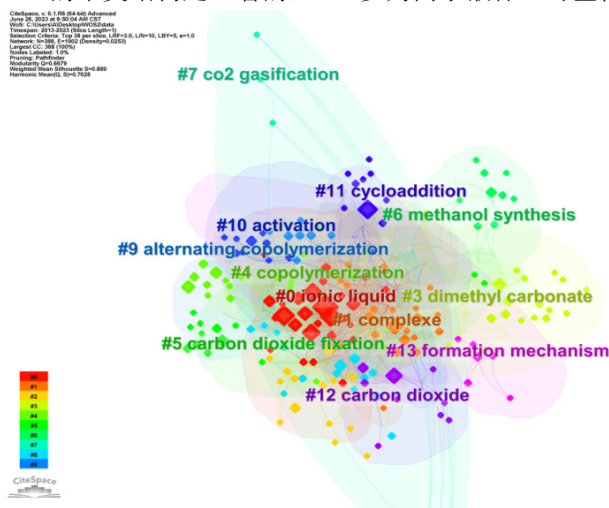


图 5 关键词聚类分析图

3.5 关键词时间线图谱

通过对时间线图谱的研究可以分析开发二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面的研究的研究脉络并预测该领域未来的发展方向,并且通过多维度地呈现聚类 and 关键词信息,将同一年份的研究热点按照时间的顺序进行排列并集合在指定区域,这可以帮助研究者了解重要关键词演进的时间脉络。在图谱中,圆表示关键词节点,圆越大说明对应的主题出现的频次越高。节点的年轮颜色表示对应关键词出现的时间,年轮厚度表明对应年份出现的频次^[9]。由图 6 得到相关的离子液体、复合物、共聚合、碳酸二甲酯、二氧化碳固定、甲醇合成、 CeO_2 、活性位点等十个关键词近十年来一直有人研究。

无论是与甲醇合成碳酸二甲酯,与环氧化合物共聚生成环状碳酸酯以及聚合形成聚碳酸酯的反应近十年来均有报道,尤其是合成共聚物,是近年来研究的热点。Li, T 等报告了一种由四苯基卟啉氯化铝、助催化剂双(三苯基膦)氯化亚铵组成的双组分催化剂可以引发环氧丙烷(PO)的聚合,生成具有微量聚醚链段的聚乳酸(PLA)链^[10]。Maeda, C 等则制备了一种双官能铝卟啉催化氧杂环丁烷与 CO₂ 转化为碳酸三甲烯(TMC)和聚碳酸三甲烯^[11]。

对催化剂的研究是研究的重点，早期的研究重点主要是均相催化剂，Zou,B 等合成了一种含 Cu 的配位聚合物 BIT-C，并发现 BIT-C 在常压下对 CO_2 和各种环氧化物转化为环状碳酸酯具有突出的催化活性，Meng XL 等设计并合成了一种羧酸基离子液体，并通过控制羧基的链长，发现该离子液体在 PC 中表现出依赖于温度的溶解-沉淀转变。其发现的这种可逆相变现象为提升均相催化剂的活性和回收提供了一种有效的方式^[12]。2021 年后非均相催化剂逐渐成为主流，尤其是金属有机框架(mof)结构被多次报道，Liu, S 等报道合成了一种咪唑阳离子官能团改性的三官能离子金属有机框架，在没有任何助催化剂和溶剂的情况下，实现了对二氧化碳环氧化物环加成为环碳酸酯的催化^[13]。Wang,WL 等报道了一种基于镁卟啉和磷盐的集成多孔有机聚合物 (POP) 的单组分多功能催化剂，经实验验证，这种催化剂可以多次简单地回收并重复使用^[14]。在非均相催化剂研究过程中，铈、锆、铜、锌、铝、钛等金属均有被报告使用，铈基催化剂的应用相对更加广泛。Xu,SY 等采用溶胶凝胶法制备了不同 Ce/Zr 摩尔比的双金属催化剂，并将其用于 CO_2 和甲醇直接合成碳酸二甲酯，其特征结果表明，在 CeO_2 中掺杂 Zr 可

以形成 Ce-O-Zr 固溶体, 从而增强 ZrO₂ 与 CeO₂ 之间的相互作用^[15]。此外, 还有许多学者对反应的机理进

行了探究, Kathalikkattil_Amal Cherian 利用了从头算量子力学计算 (DFT 技术) 对反应机理进行了分析。

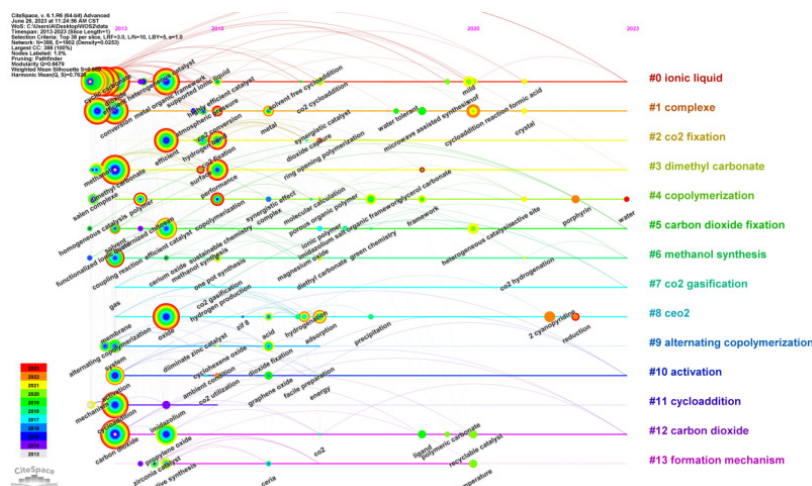


图 6 关键词时间线谱图

Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2013 - 2023
styrene carbonate	2013	3.15	2013	2015	
propylene carbonate	2013	2.66	2013	2014	
styrene oxide	2013	2.6	2013	2014	
supercritical condition	2013	2.29	2013	2014	
efficient synthesis	2013	2.14	2013	2014	
n heterocyclic carbene	2013	2	2013	2016	
homogeneous catalysis	2013	1.93	2013	2014	
salen complexe	2013	1.81	2013	2014	
propylene oxide	2014	2.74	2014	2016	
efficient heterogeneous catalyst	2014	2.17	2014	2015	
carboxylation	2014	1.78	2014	2016	
dmc	2017	1.94	2017	2018	
organic framework	2018	2.4	2018	2021	
metal-organic framework	2015	1.81	2018	2019	
metal organic framework	2014	1.79	2018	2019	
framework	2019	2.38	2019	2021	
heterogeneous catalysis	2020	6.23	2020	2021	
adsorption	2017	3.67	2020	2023	
mild	2020	3.45	2020	2021	
mof	2020	3.25	2020	2021	
efficient catalyst	2014	2.58	2020	2023	
selective synthesis	2014	1.95	2020	2021	
co2 cycloaddition	2017	1.86	2020	2021	
diethyl carbonate	2017	1.77	2020	2021	
cycloaddition reaction	2020	5.79	2021	2023	

图 7 关键词突显分析图

3.6 关键词突显分析

通过关键词的突显分析, 可以得到在统计时间内某个特定时间段内某个词的运用频次, 反映该特定时间内的研究前沿和随时间发展的历史演变情况。如图 7 Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts, 分析引用最强的前 25 个关键词可知, 早期的研究热点是碳酸苯乙烯(styrene carbonate)、碳酸丙烯酯(propylene carbonate)、超临界条件(supercritical condition)、salen 配合物(salen complexe)等, 而环加成反应(cycloaddition reaction)、温和环境(mild)、选择性合成(selective synthesis)、mof 材料等是最近几年的研究热点。

例如, Wang WZ 等合成了一系列稀土金属配合物, 催化反应试验表明, 制备的配合物在没有任何助溶剂的温和条件下可以显著提高催化活性^[16]。Denardin, FG 等使用溶胶-凝胶法制备氧化锆固体, 并使用初湿浸渍法负载 Na、Mg 或 PO₄-3, 经过反应实验发现, 随着 PO₄-3 负载量的增加, 目标产物碳酸二乙酯的产率和选择性增加, 而副产物乙醛的产率降低^[17]。Honda, M 等则合成了一种 CeO₂ 与 2-氰基吡啶的羧化/水合级联催化剂, 以优异的产率(>99%)从 CO₂ 和 1,2-丙二醇直接合成碳酸亚丙酯, 且该催化剂还可以用合成一系列环状碳酸酯, 并获得不错的产率^[18]。

4 结论

本研究分析样本来源于 Web of Science 的核心合集数据库, 以 2014—2024 年间所发表的有关开发二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂研究进展的 357 篇文献作为分析对象, 通过 citespace 的科学图谱功能, 将大量的数字和语言信息进行可视化, 形象、直观、明了地展示了二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面的研究进展。

结果显示年论文发文量总体呈现波动上升的趋势。在 2022 年发文量达到最大值, 但总体相关发文量较少, 预计未来年发文量仍会呈现上升趋势。发表论文的研究作者较为分散, 并没有形成密集的合作群体, 而国家或地区之间对于开发二氧化碳合成碳酸酯的高效催化剂方面的研究联系更加密切。发文量第一的机构为中国科学院, 发文量第一的国家为中国, 表明在双碳战略推动下, 我国在该领域的贡献程度相对较大。再次, 合成直链碳酸酯的论文占比较大, 但有关合成环状碳酸酯以及聚合物的研究正在不断升高, 预计未来会成为研究的主流。未来的研究热点可能为: 通过制备有机配体与金属离子(簇)配位而成的金属有机框架(mof), 在温和条件下, 定向合成高收率、高选择性的环状碳酸酯。

参考文献

- [1] 刘福胜,程鑫,何亮等.功能化离子液体催化 CO₂ 转化合成高附加值化学品综述[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2023,44(01):12-26.DOI:10.16351/j.1672-6987.2023.01.002.
- [2] Ravi, S,Kang, DH,Roshan, R,Tharun, J,Kathalikkattil, AC,Park, DW.Organic sulphonate salts tethered to mesoporous silicas as catalysts for CO₂ fixation into cyclic carbonates[J].CATALYSIS SCIENCE & TECHNOLOGY, 5(3),1580-1587
- [3] Kathalikkattil, AC,Babu, R,Roshan, RK,Lee, H,Kim, H,Tharun, J,Suresh, E,Park, DW,An lcy-topology amino acid MOF as eco-friendly catalyst for cyclic carbonate synthesis from CO₂: Structure-DFT corroborated study[J]. JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A,3(45), 22636-22647.
- [4] Ravi, S,Roshan, R,Tharun, J,Kathalikkattil, AC,Park, DW. Sulfonic acid functionalized mesoporous SBA-15 as catalyst for styrene carbonate synthesis from CO₂ and styrene oxide at moderate reaction conditions[J]. JOURNAL OF CO₂ UTILIZATION. 10.88-94.
- [5] Tomishige, K,Gu, Y,Nakagawa, Y,Tamura, M,Reaction of CO₂ With Alcohols to Linear-, Cyclic-, and Poly-Carbonates Using CeO₂-Based Catalysts[J]FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH,8.
- [6] Tomishige, K,Tamura, M,Nakagawa, Y.CO₂ Conversion with Alcohols and Amines into Carbonates, Ureas, and Carbamates over CeO₂ Catalyst in the Presence and Absence of 2-Cyanopyridine[J].CHEMICAL RECORD.19(7).1354-1379.
- [7] Tamura, M,Hiwatashi, D,Gu, Y,Nakayama, A,Nakagawa, Y,Tomishige, K.Organic compound modification of CeO₂ and 2-cyanopyridine hybrid catalyst in carbonate synthesis from CO₂ and alcohols[J].JOURNAL OF CO₂ UTILIZATION.54.
- [8] Egghe, L. Theory and practise of the g-index[J]. Scientometrics 69, 131–152 (2006).
- [9] 宁宇新,沈彬.ESG 研究热点与前沿趋势——基于 CiteSpace 的可视化分析[J/OL].科学与管理:1-12[2023-06-13].

- [10] Li, T. Liu, ZJ.Chen, Y.Sun, N.Shu, HZ.Wu, LL.Zhang, CC.Xie, D.Preparation of CO₂-based poly(carbonate-co-lactide) with different porphyrin aluminum (III) catalysts[J].JOURNAL OF POLYMER SCIENCE.2023
- [11] Maeda, C. Inoue, H. Ichiki, A.Okihara, T.Ema, T.Synthesis of Trimethylene Carbonates and Polycarbonates from Oxetanes and CO₂ Using Bifunctional Aluminum Porphyrin Catalysts[J].ACS CATALYSIS.12(20).13042-13049.
- [12] Meng, XL. He, HY. Nie, Y.Zhang, XP. Zhang, SJ.Wang, JJ.Temperature-Controlled Reaction-Separation for Conversion of CO₂ to Carbonates with Functional Ionic Liquids Catalyst[J].ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING. 5(4).3081-3086
- [13] Liu, S. Gao, ML. Zhang, Y. Liu, L. Han, ZB. Trifunctional Metal-Organic Framework Catalyst for CO₂ Conversion into Cyclic Carbonates[J].INORGANIC CHEMISTRY. 60(9).6152-6156
- [14] Wang, WL.Wang, YQ.Li, CY. Yan, L. Jiang, M.Ding, YJ. State-of-the-Art Multifunctional Heterogeneous POP Catalyst for Cooperative Transformation of CO₂ to Cyclic Carbonate. ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING[J].5(6),4523-4528.
- [15] Xu, SY.Cao, YX.Liu, ZM.Dimethyl carbonate synthesis from CO₂ and methanol over CeO₂-ZrO₂ catalyst[J]. CATALYSIS COMMUNICATIONS.162
- [16] Wang, WZ,Fan, W,Jia, XG,Li, LL,Rare earth-porphyrin complex catalysts for transforming CO₂ into cyclic carbonate under mild conditions[J],JOURNAL OF THE CHINESE CHEMICAL SOCIETY.67(8).1380-1386.
- [17] Denardin, FG. Valenca, GP.Synthesis of diethyl carbonate from ethanol and CO₂ over ZrO₂ catalysts[J]. B RAZILIAN JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING.38(1).77-87.
- [18] Honda, M. Tamura, M. Nakao, K. Suzuki, K. Nakagawa, Y. Tomishige, K.Direct Cyclic Carbonate Synthesis from CO₂ and Diol over Carboxylation/Hydration Cascade Catalyst of CeO₂ with 2-Cyanopyridine[J]. ACS CATALYSIS. 4(6).1893-1896
- 版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**OPEN ACCESS**