

引用格式: 刘娜, 张波, 马廷灿. 二硫化钼国际研究态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2025, 47(S1): 28 - 41.

二硫化钼国际研究态势分析*

刘娜^{1,2} 张波³ 马廷灿^{*,1,2}

(1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071; 2. 中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100190; 3. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101)

摘要:近年来, 二硫化钼(MoS_2)因其类石墨烯结构和独特的物理/化学性质而广受关注, 在光电器件、传感器、催化剂和润滑等领域具有巨大的应用价值。为全面了解二硫化钼研究领域最新国际进展和发展态势, 本文基于 SCI 论文, 借助 DDA 和 Excel 等工具, 从年代分布、国家分布、研究机构分布、研究主题等方面对二硫化钼领域相关文献进行计量分析和主题挖掘。结果表明, 全球范围内二硫化钼领域科研产出规模不断扩大, 发文量呈稳定上升态势; 美国是二硫化钼研究领域的佼佼者, 新加坡发展势头迅猛, 中国具有显著的产出规模优势; 主要研发机构有中国科学院、美国斯坦福大学和美国加州大学伯克利分校、新加坡南洋理工大学和新加坡国立大学等; 研究热点包括二维材料、电化学、光催化剂、生物传感器和摩擦与振动等。最后, 本文提出了加强高质量研究产出、增强国际合作、及时掌握研究前沿热点等方面的建议。

关键词: 二硫化钼; MoS_2 ; 研究态势; 文献计量分析

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2024.08.101

CSTR: 32308.14.1006-6055.2024.08.101

Analysis of the International Research Trend of Molybdenum Disulfide*

LIU Na^{1,2} ZHANG Bo³ MA Tingcan^{*,1,2}

(1. National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Department of Information Resources Management, School of Economics and Management,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Qingdao Institute of
Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

Abstract: Recently, molybdenum disulfide (MoS_2) has garnered widespread attention due to its graphene-like structure as well as unique physical and chemical properties, positioning it as a promising material in various fields such as optoelectronics, sensing, catalysis, and lubrication. In order to have a comprehensive understanding of the latest international progress and development trend of molybdenum disulfide, this paper is based on the SCI papers in Web of Science, together with DDA, Excel and subject mining, to conduct bibliometric analysis of literature related to molybdenum disulfide. The analysis dimensions encompass the temporal evolution, geographical distribution, institutional contributions and research hotspots within MoS_2 research. The results indicate that the annual number of publications in the field of molybdenum

* 中国科学院文献情报能力建设专项“研究所科技创新学科情报服务”(E3291106)

** E-mail: matc@whlib.ac.cn; Tel: 027-2719980

disulfide worldwide has been steadily increasing. The United States leads in the field of molybdenum disulfide, while Singapore is rapidly emerging, and China has a significant advantage in terms of research output scale. Major contributing institutions include the Chinese Academy of Sciences (CAS), Stanford University in the United States, the University of California, Berkeley, and the Singapore Nanyang Technological University in Singapore and the National University of Singapore. Research hotspots primarily encompass 2D materials, electrochemistry, photocatalysts, biosensors and friction and vibration. Finally, this paper puts forward the recommendations to focus on the production of high-quality research, strengthen the international cooperation, and stay abreast of emerging research frontiers.

Keywords: Molybdenum Disulfide; MoS₂; Trend Analysis; Bibliometric Analysis

自从 2004 年 Novoselov 等首次成功剥离获得石墨烯以来^[1], 二维材料的研究迅速升温, 尤其是过渡金属层状二元化物(MX₂), 其中二硫化钼(Molybdenum Disulfide, MoS₂)因其独特的物理和化学性质在材料科学领域引起了广泛关注^[2,3]。二硫化钼具有类似石墨烯的二维层状结构——钼原子层被夹在两层硫原子层之间, 层与层间的厚度约为 0.65 nm, 赋予其低摩擦系数和优异的催化性能, 使其在润滑剂和催化剂的应用中占据了重要地位^[4,5], 甚至被誉为“高级固体润滑油王”。随着对二硫化钼电子结构、光学性质、机械性能的深入理解, 二硫化钼的多功能性逐渐被发掘, 推动了二硫化钼在能源、环境、医疗等领域的应用研究, 为解决全球能源危机和环境问题提供新的解决方案。二硫化钼不仅因其固有的物理化学特性在材料科学中占有一席之地, 更因其在半导体和光电子领域的潜在应用前景成为科研人员探索的热点。如, 在半导体材料领域, 二硫化钼的层状结构和对光的相应特性, 为解决石墨烯材料带隙设计问题提供了新的视角, 使其成为下一代光电子器件的理想材料^[6,7]。

纳米科技的不断进步推动了二硫化钼制备方法的创新, 如化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)、机械剥离、液相剥离等, 为二硫化钼的大规模应用奠定了基础^[8-10]。随着对其结构和性能的进一步研究, 二硫化钼有望在未来的高科技领域发挥更加重要的作用, 为人类社会的

发展贡献力量。为了能够更宏观地了解二硫化钼领域的研究进展, 本文采用定量和定性分析相结合的方法, 借助德温特数据分析软件 (Derwent Data Analyzer, DDA)、Excel 等工具, 从论文年度申请趋势、主要发文国家、主要研究机构和研究主题等方面, 对二硫化钼领域进行分析, 以期为我国未来在该领域的发展和布局提供参考。

1 二硫化钼研究概况

1.1 制备方法

不同的制备方法会得到性能不同的材料, 选择恰当的制备方法十分必要。目前, 二硫化钼的制备方法主要是微机械剥离法、液相剥离法、化学气相沉淀法、水热法及溶剂热法等。

1) **微机械剥离法**。同石墨烯一样, 单层的二硫化钼也可采用微机械剥离法制备, 利用 Scotch 胶带的粘性, 反复剥离形成层状纳米二硫化钼。这种方法操作简单, 剥离速度快, 适合于单个器件的制备和一些基础的研究, 缺点在于剥离的厚度、形状和大小难以控制, 不能重复性、大规模生产。

2) **液相剥离法**。液相剥离法是将二硫化钼粉末放入与之相匹配的溶剂或者插层剂中, 然后利用超声波降解克服层间弱的范德华力。该方法成本低、操作简单, 适合大规模生产, 缺点是需要进行, 且材料的晶体结构会受到残余溶剂或者离子的影响。

3) **化学气相沉积法**。化学气相沉积法是将

热分解产生的钼、硫原子沉积在基体,再将其生长为薄膜。该方法可用来制备高品质、大面积且薄厚均匀的二硫化钼纳米材料。

4) **水热法及溶剂热法**。水热法及溶剂热法是指在高压釜中采用水溶液或有机溶剂作为溶剂,对其进行加热,在高温高压的环境中进行化学反应,从而形成二硫化钼。此种方法操作简单、能耗小、反应条件易控制,得到的二硫化钼纳米片纯度较高,可通过工艺调整来控制二硫化钼纳米片的形貌,但存在反应时间较长、合成的二硫化钼纳米片层数难以控制等缺点^[11]。

1.2 应用

二硫化钼凭借其独特的晶体结构和优异的光电性能、催化性能及降解能力,在工业领域得到了广泛的应用,成为材料领域的研究热点之一。

作为**润滑剂**,二硫化钼的层间作用力弱,易发生滑移而起到润滑作用,具有优异的减磨抗磨性能,可作为固体润滑剂,广泛应用于轴承、齿轮、石油化工、防腐工程以及航空航天等方面^[12]。

在**催化剂领域**,二硫化钼因其独特的二维层状结构、巨大的比表面积以及较高的表面活性等特性而在半导体催化领域成为研究热点。二硫化钼对可见光具有很强的吸收能力,在光催化方面有较大的应用潜力;同时含有活性边缘位点的二维层状二硫化钼在催化电解水制氢方面有望替代昂贵的铂基催化剂。

在**光电器件上的应用上**,二硫化钼独特的光电性能,特别是优异的光学吸收和半导体带隙,使其成为了发展高性能纳米电子器件和光电器件最有潜力的材料之一。目前,主要应用于太阳能电池、锂离子电池、场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)、超级电容器和电化学生物传感器等领域。

2 二硫化钼研究的文献计量分析

2.1 数据来源与方法

本文所用数据来源于 Web of Science 核心合集的 SCIE 数据库。检索策略为 TS = (" Molybdenum Disulfid* " OR MoS₂) AND DT = (Article OR Review), 不限制时间范围。检索日期为 2024 年 1 月 29 日,共计得到二硫化钼相关文章 48763 篇。鉴于 2024 年的数据收录不完整,故剔除。利用 Python、DDA 和 Excel 对其余的 48285 篇论文数据进行清洗处理和可视化分析。

2.2 年代分布分析

早在 20 世纪 30 年代,美国、日本和德国等国的科学家就已经开始探索二硫化钼的层状结构,之后越来越多的国家和科研人员相继在该领域投入研发(图 1),科研论文产出总体呈现逐年上升趋势。整体来看,二硫化钼研究领域的发表论文数量变化大致可以分为三个阶段。

第一阶段(1936—1990 年),二硫化钼领域处于初探阶段,因其独特的层状结构,层间原子结合力较弱、易于滑动,具有良好的润滑作用而广泛应用于润滑行业。这一阶段发文数量较低,论文增长速度较慢。自 20 世纪 60 年代起,以 Frindt 为代表的科研人员发展了机械解理技术以及液相解理技术,并得到了很可能是单层的二硫化钼^[13-15]。之后科研人员陆续发现了二硫化钼对加氢脱硫反应具有催化活性^[16],于是逐渐在催化领域展开了相关研究^[17]。

第二阶段(1991—2010 年),通过对二硫化钼结构和性质的进一步剖析,其在催化剂领域得到了进一步发展。1993 年, Schumacher 等^[18]通过原子力显微镜得到液相解理的单层二硫化钼形貌图。2007 年, Jaramillo 等^[19]对沉积所得不同粒度

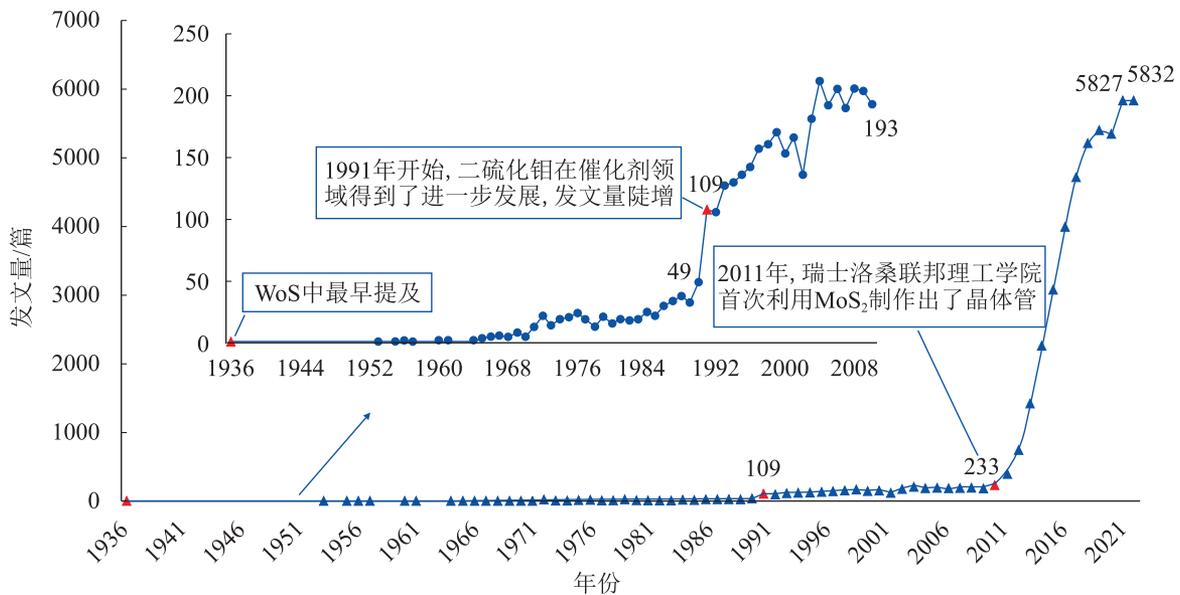


图 1 二硫化钼领域年度发表论文趋势

Fig. 1 The trend of annual papers published in the molybdenum disulfide field

的二硫化钼粒子进行电催化析氢实验,发现其催化特性与边长呈正比例关系,这在一定程度上为二硫化钼在电催化析氢中的应用提供了成功的可能性。

第三阶段(2011—2023 年),二硫化钼因其二维形式为解决石墨烯带隙问题提供了新思路而受到广泛关注,相关发文量迅速增长。单层的二硫化钼被发现具有 1.8 eV 的直接带隙^[20],2011 年,瑞士洛桑联邦理工学院首次成功制备高质量的单层二硫化钼场效应管^[21],开关比达到 10^8 ,不足的是迁移率偏低,只有大概 $100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。随后麻省理工学院的研究人员迅速跟进^[22],打开了通往一个全新的电子材料和器件领域的大门。2021—2023 年的发文占比达 35.2%,表明近年来全球范围内科研人员对二硫化钼的研发增长迅速。

2.3 主要发文国家分析

2.3.1 主要国家分布及论文影响力

全球共有 100 多个国家在二硫化钼研究领域发表了相关文章,表 1 展示了二硫化钼方向学科规范化引文影响力(Category Normalized Citation

Impact, CNCI) 累计值排名前 20 的国家。从 CNCI 累计值来看,中美高居前二,远超其他国家,之后是韩国、新加坡、印度。具体来看,中国的论文总量(25736 篇)和 CNCI 累计值(48462.1)都高居第一;其中,中国论文总量是第 2 名美国的 3 倍,是第 3 名韩国的 7 倍,产出规模优势明显;从世界份额来看,中美发文量分别占整个领域发文量的 53.3% 和 16.5%,其他国家均未超过 10%。从署名情况来看,中国一作/通讯作者论文比例(94.7%)高于美国(74.8%),紧跟其后的是伊朗(91.3%)、印度(90.6%)、韩国(86.5%),其余国家均未超过 80%。从国际合作情况来看,美国、日本、英国、德国等发达国家的国际合作比例均超过 50%;而中国、印度、韩国的比例均在 50% 以下;其中,中国国际合作比例较低(25.4%)。

论文的被引次数是衡量其学术影响力的基本指标,国家的总被引次数可以在一定程度上反映其学术影响力的整体水平。从论文被引用情况来看,中国总被引次数位居第一,远超其他国家,之后依次是美国、新加坡、韩国和英国,与 CNCI

表1 二硫化钼领域 CNCI 累计值 TOP20 国家分布

Tab.1 TOP 20 countries in the molybdenum disulfide field in terms of CNCI

	CNCI		全球总计 ¹⁾		本国占比		被引		H 指数	ESI 高被引论文	
	累计值	均值	发文量	占比	一作/通讯	国际合作	总次数	比率		总量	比率
中国	48462.1	1.9	25736	53.3%	94.7%	25.4%	1106885	92.5%	356	1049	4.1%
美国	23102.5	2.9	7954	16.5%	74.8%	56.8%	749581	96.1%	375	585	7.4%
韩国	7103.2	1.9	3737	7.7%	86.5%	40.3%	186125	93.9%	164	108	2.9%
新加坡	5607.9	3.4	1660	3.4%	71.7%	76.8%	188068	97.0%	205	174	10.5%
印度	5487.8	1.4	3929	8.1%	90.6%	31.2%	102428	90.4%	125	55	1.4%
日本	4083.7	1.8	2299	4.8%	63.3%	54.8%	110384	91.3%	148	87	3.8%
英国	4043.9	2.4	1668	3.5%	57.2%	77.0%	116833	94.7%	145	81	4.9%
德国	3655.1	1.8	1993	4.1%	63.8%	70.7%	98803	93.8%	135	68	3.4%
澳大利亚	3008.0	2.5	1205	2.5%	61.4%	81.8%	90394	95.9%	138	87	7.2%
沙特	2601.0	2.8	928	1.9%	42.9%	87.6%	58816	91.5%	113	61	6.6%
法国	2275.3	1.7	1359	2.8%	66.4%	63.6%	61959	94.4%	117	37	2.7%
瑞士	1805.3	3.7	494	1.0%	61.3%	65.2%	77654	94.3%	101	35	7.1%
意大利	1496.6	1.9	798	1.7%	64.9%	70.9%	41001	92.4%	84	20	2.5%
西班牙	1302.4	1.7	755	1.6%	62.8%	76.2%	35091	92.8%	91	31	4.1%
加拿大	1203.4	1.6	753	1.6%	69.6%	59.8%	30257	95.4%	86	15	2.0%
丹麦	1103.5	3.0	367	0.8%	72.5%	60.8%	38357	97.0%	85	13	3.5%
荷兰	1035.5	2.5	408	0.8%	62.0%	67.6%	29879	93.4%	84	21	5.1%
爱尔兰	1009.7	3.2	315	0.7%	60.6%	76.5%	42744	94.6%	73	19	6.0%
瑞典	986.9	2.5	395	0.8%	55.2%	83.0%	25991	95.9%	71	21	5.3%
伊朗	984.6	1.1	874	1.8%	91.3%	30.4%	15871	89.2%	59	8	0.9%

1) 由于采用全作者统计口径,各国家论文数量有交集,因此各国家论文数量之和可能大于全球总计。

累计值 TOP5 国家大体相同。其中,中国总被引次数是美国的 1.5 倍。由于总被引次数和 CNCI 累计值易受论文数量的影响,而论文被引率和 CNCI 均值可以从一定程度上消除论文数量的影响,从而揭示国家论文产出的相对影响力。瑞士、新加坡、爱尔兰等位于 CNCI 均值排名前列,新加坡、丹麦和美国位于该领域论文被引率的前三,而中国的 CNCI 均值和被引率排名均未进入前十的行列。H 指数是评估论文数量与学术影响力的综合指标,可以进一步揭示各国家的学术影响力。美国 H 指数位列第一,中国、新加坡紧随其后。从高被引论文数量来看,中国、美国和新加坡居于前 3 位;从高被引论文比例来看,新加坡(10.5%)、美国(7.4%)和澳大利亚(7.2%)居前 3 位,中国排第 11 位,仅 4.1%。

总体上,我国在该领域的研究成果较多,具有研究规模优势,但总体仍缺乏一些引领性、突破性的研究论文;美国的论文总量不足中国的三分之一,但其在各项指标上均居于前列,可见其在该领域雄厚的研究实力;新加坡的论文总数不足中国的十分之一,但其总被引次数、H 指数和 ESI 高被引论文数仅次于中美两国,且 CNCI 均值、论文被引率和高被引论文比例分别位居第 2、1、1 位,研究实力不容小觑。

2.3.2 主要国家产出年度变化趋势

图 2 展示了二硫化钼领域 CNCI 累计值 TOP20 国家的产出年度变化趋势。1936—2000 年,中国仅有 112 篇相关研究论文,与美国差距较大(480 多篇),美国、日本、法国、德国和英国在该领域处于领先地位;2001 年开始,中国、美国、日本、法

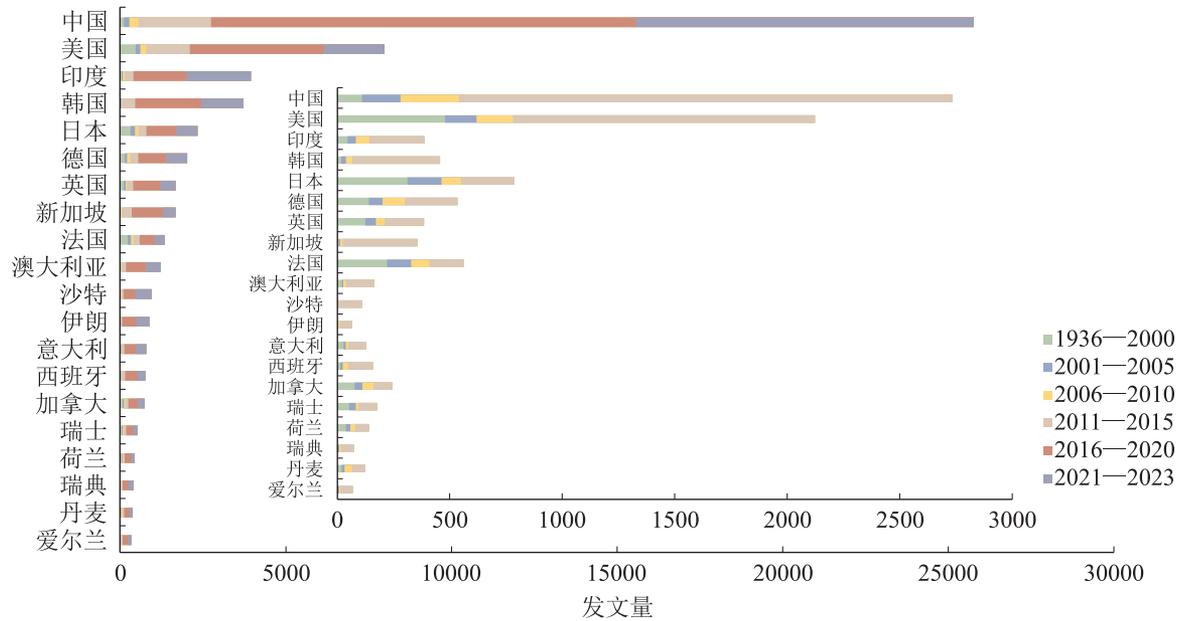


图2 二硫化钼领域 CNCI 累计值 TOP20 国家产出年度变化趋势

Fig. 2 Annual publication trends of TOP20 countries in the molybdenum disulfide field in terms of CNCI

国和德国居于前5位,中国也在此期间首次超过美国;2011年后中国一直稳步增长,且保持着较高的增长率,同一时期发文量一直在美国之上,同时累计总发文量超过美国,成为该领域发文量最多的国家;2016—2020年,各国发文量增速明显,中国发文量大幅增长,远超美国;2021—2023年,中国的发文量远超同期美国的发文量,较2016—2020年的产出规模优势更为突出,累计总发文量已达美国的三倍之多,遥遥领先于世界各国。

从产出规模来看,中国的产出规模优势在不断扩大,2011—2015年间的年发文量略多于美国,2016—2020年间发展为同时期美国的3.2倍,2021—2023年间已是同时期美国的5.7倍。从世界份额比例来看,中国的增长幅度最大,从2011—2015年间的43.5%增长到2021—2023年间的59.7%,增长了16.2%,美国的论文数量下降幅度较大,同一时期下降了16.1%,其他国家

世界份额较为平稳。从论文数量排名情况来看,沙特、印度和意大利进步幅度相对较大。

2.4 主要研究机构分析

2.4.1 主要研究机构分布及论文影响力

二硫化钼领域 CNCI 累计值排名前20位的机构(表2)以高等院校为主。就 CNCI 累计值而言,中国科学院排第1位,远超其他机构,之后是新加坡南洋理工大学、中国科学技术大学和新加坡国立大学等。从发文量和全球占比来看,中国科学院以3780篇论文排在首位,全球占比7.8%,中国科学技术大学、北京理工大学、清华大学和韩国成均馆大学分别处于第2~5位。前20的机构中,有一半来自中国,美国、新加坡分别有5个、2个,韩国、瑞士和日本各有一个机构,我国在该领域的产出规模优势可见一斑。从署名情况和国际合作情况来看,湖南大学的一作/通讯作者比例最高(75.2%),但国际合作比例排名较低;新加坡南洋理工大学一作/通讯作者比例排第4名,同时国际合作比例排第2名;美国麻省理

表 2 二硫化钼领域 CNCI 累计值 TOP20 研究机构分布

Tab. 2 TOP20 institutions in the molybdenum disulfide field in terms of CNCI

	所属国家	CNCI		全球总计		本国占比		被引		H 指数	ESI 高被引论文数
		累计值	均值	发文量	占比	一作/通讯	国际合作	总次数	比率		
中国科学院	中国	8601.1	2.3	3780	7.8%	2395	28.7%	217935	94.1%	205	216
南洋理工大学	新加坡	3223.9	4.1	785	1.6%	533	80.1%	117316	98.5%	170	119
中国科学技术大学	中国	2674.6	2.6	1027	2.1%	508	27.7%	75672	94.4%	137	80
新加坡国立大学	中国	2143.0	3.0	704	1.5%	464	71.7%	68041	96.3%	123	54
清华大学	中国	2067.9	2.3	916	1.9%	631	28.9%	49256	94.4%	108	64
北京理工大学	中国	2012.2	2.0	999	2.1%	220	28.1%	44270	92.3%	102	50
北京大学	中国	2000.9	2.7	742	1.5%	500	33.6%	51126	94.6%	121	65
斯坦福大学	美国	1872.3	5.9	320	0.7%	182	63.4%	64291	96.9%	109	59
成均馆大学	韩国	1758.1	2.2	805	1.7%	481	38.4%	49641	94.8%	96	21
南京大学	中国	1709.0	2.7	628	1.3%	419	27.1%	38248	94.1%	101	49
加州大学伯克利分校	美国	1646.0	5.0	330	0.7%	214	67.0%	60015	98.5%	110	50
湖南大学	中国	1632.9	2.9	572	1.2%	430	28.1%	33952	94.4%	92	54
哥伦比亚大学	美国	1519.2	7.3	207	0.4%	112	70.5%	53174	98.1%	76	34
洛桑联邦理工学院	瑞士	1386.2	6.0	231	0.5%	114	66.7%	66715	97.4%	78	30
橡树岭国家实验室	美国	1352.6	5.2	261	0.5%	85	60.5%	47040	97.3%	93	38
深圳大学	中国	1346.1	2.2	610	1.3%	440	43.1%	30472	95.7%	86	37
武汉大学	中国	1334.4	1.8	733	1.5%	254	26.3%	28501	92.5%	84	25
香港大学	中国	1300.7	3.6	357	0.7%	102	47.1%	40413	94.4%	85	40
麻省理工学院	美国	1300.6	4.3	306	0.6%	157	74.5%	51280	97.7%	96	32
国立材料研究所	日本	1249.0	2.5	504	1.0%	67	80.8%	30482	92.3%	89	30

工学院一作/通讯作者比例排第 13 名,国际合作比例排名第 3;日本国立材料研究所一作/通讯作者比例排最末尾,但国际合作比例排第 1 位。此外,我国入选的十个机构国际合作比例均未超过 50%,最高为香港大学(47.1%)。

就总被引次数而言,排在前 5 位的依次是中国科学院、新加坡南洋理工大学、中国科学技术大学、新加坡国立大学和瑞士洛桑联邦理工学院;就 CNCI 均值来看,排在前 5 位的依次是美国哥伦比亚大学、瑞士洛桑联邦理工学院、美国斯坦福大学、美国橡树岭国家实验室和美国加州大学伯克利分校,我国入选机构中香港大学排名最靠前,为第 8 位,而中国科学院仅排在第 15 位;从被引率而言,美国加州大学伯克利分校、新加坡南洋理工大学、美国哥伦比亚大学、美国麻省理工学院和瑞士洛桑联邦理工学院居于前 5 位,我

国机构中深圳大学排名最靠前(第 9 位);从 H 指数来看,排在前 5 位的是中国科学院、新加坡南洋理工大学、中国科学技术大学、新加坡国立大学和北京大学;就 ESI 高被引论文数来看,中国科学院居于榜首,是第 2 位新加坡南洋理工大学的 1.8 倍。

总体而言,中国科学院论文总量最多,总被引次数、CNCI 累计值、H 指数和 ESI 高被引论文数量都是最高的,具有明显的产出规模优势和一定的学术影响力;美国入选的 5 所机构虽然论文总量不多,但在 CNCI 均值和论文被引率方面表现突出,其中斯坦福大学和加州大学伯克利分校在 H 指数和 ESI 高被引论文数量的排名上也居于前列,整体研究水平处于世界领先;新加坡南洋理工大学除 CNCI 均值处于第 7 位外,各项指标都处于第 2 位,此外新加坡国立大学也表现优

异,各项指标都处于前十,可见新加坡在该领域发展迅猛。

2.4.2 主要机构产出年度变化趋势

从图3可看出,2011年前,各机构的论文产出都较少;之后,各机构才逐渐重视该领域的相关研究。2001年开始,中国科学院在二硫化钼方向发文量一直领先于其他机构,并在2016—2020年期间远超其他机构。尽管美国论文总量居世界第2位,但入选的5所机构发文量均处于末尾。发文总量不及中国十分之一的新加坡,有两所机构入选 CNCI 累计值前 20,分别是新加坡南洋理工大学(第2)和新加坡国立大学(第4),观其年度产出趋势可知,这两所高校的研究成果也是2011年前后开始在国际学术界得到广泛认可和显著体现。

2.5 研究主题分析

2.5.1 引文主题分析

Citation Topics 是科睿唯安根据已发表论文的相互引用强度而形成的独立于单篇文献的主

题和内容,代表着文献被积极引用领域的主题分类体系。该分类体系分为宏观、中观和微观三个层面,其中宏观主题(Macro topics)和中观主题(Meso topics)是 ISI 根据内容进行标注的,微观主题(Micro topics)根据最重要的关键词标注得到。本研究所用的近五万篇论文分布在 10 个宏观主题、193 个中观主题和 636 个微观主题上。从图4可看出 TOP15 的中观主题分别为二维材料、电化学、光催化剂、催化剂等。可见,二硫化钼领域中很大一部分研究都围绕二维材料展开,其次是催化和摩擦润滑方面,这与二硫化钼独特的层状结构以及良好的光电性能、催化性能相一致。

结合表3各项评价指标进一步分析微观主题分布发现,以二硫化钼为微观主题的研究主要围绕其结构和性质展开;结合图5中各主题的年度变化趋势可知,氧化还原反应、超级电容器、光催化是二硫化钼方向所关注的重点内容。加氢脱硫这一微观主题总体发文量较多,但 CNCI 均值和近三年论文占比较低,高被引论文数较少,可见

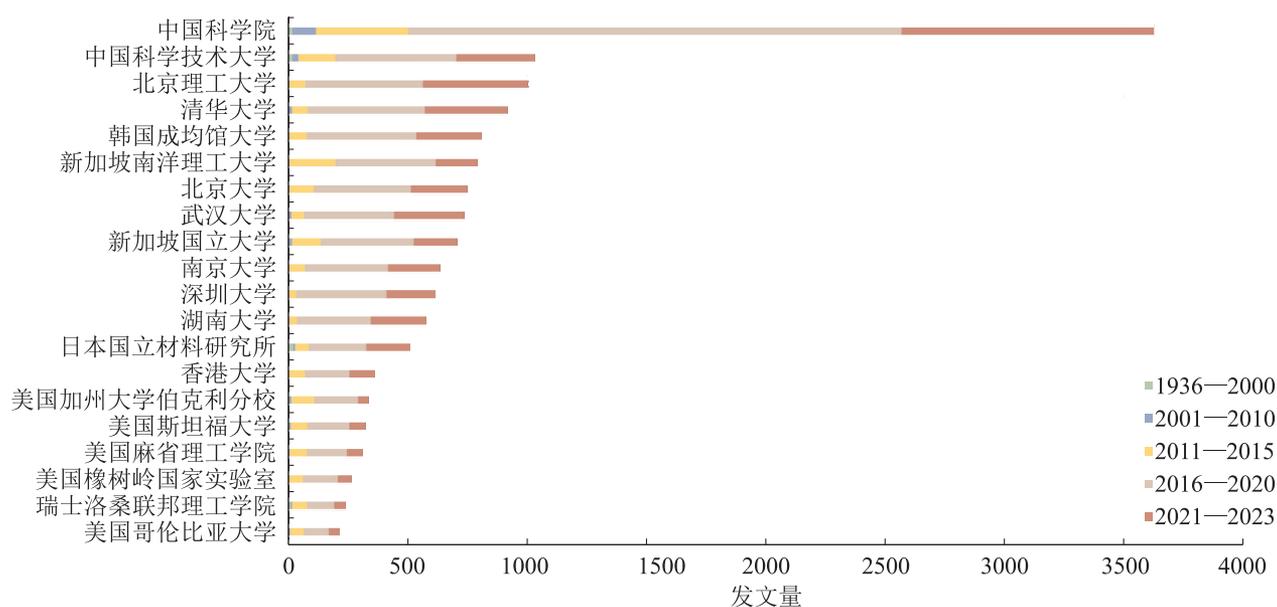


图3 二硫化钼领域 CNCI 累计值 TOP20 机构产出年度变化趋势

Fig. 3 Annual publication trends of TOP20 institutions in the molybdenum disulfide field in terms of CNCI

这一主题仍缺少一些具有广泛影响力的进展。此外,石墨烯、磨损、光纤激光器和适体 4 个研究主题的论文数在 500 篇以上,总被引次数均超过 2 万次,说明这些微观主题也是近年来的研究热点。值得注意的是电阻式开关、锂硫电池、葡萄糖氧化酶、微波吸收和磁性纳米粒子这 5 个微观主题的总被引次数均在 1 万次以上,CNCI 均值都大于 2,且有 10 篇以上的高被引论文,表明其研究群体不多,但引起了广泛关注,可视为该领域

的研究前沿。尤其是微波吸收这一主题,其高被引论文数仅次于光催化等 4 个主题,近三年论文占比为 58.4%,CNCI 均值最高(3.3)。

2.5.2 主要国家引文主题分析

选取 CNCI 累计值前 10 的国家作为研究对象,利用中观主题和发文量计算共现矩阵,从而对比不同国家的研究侧重点。图 6 可以看出,中国在二维材料、电化学、光催化剂等方面均开展了大量研究;美国在二维材料、电化学、催化剂、光

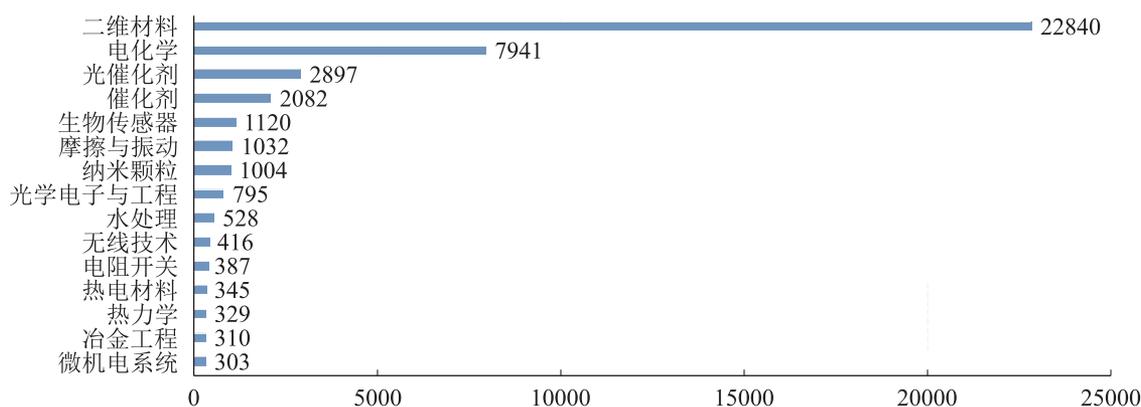


图 4 二硫化钼领域 TOP15 中观主题分布

Fig. 4 TOP15 meso topics in the molybdenum disulfide field

表 3 二硫化钼领域 TOP15 微观主题分布

Tab. 3 TOP15 micro topics in the molybdenum disulfide field

微观主题	发文量	总被引次数	CNCI 均值	论文被引率	ESI 高被引论文数	近三年占比
二硫化钼	21649	1152942	1.8	93.3%	748	31.5%
氧化还原反应	4046	317665	2.8	95.9%	316	35.9%
超级电容器	3234	186877	2.2	95.1%	153	35.7%
光催化	2359	122823	2.3	96.1%	118	35.6%
加氢脱硫	1694	53177	1.0	95.5%	1	13.8%
石墨烯	988	46455	1.5	95.4%	35	21.5%
磨损	949	22113	1.1	94.0%	5	24.6%
光纤激光器	744	30680	2.1	96.1%	33	17.1%
适体	681	22912	1.9	94.0%	12	41.3%
电阻式开关	387	13766	2.4	87.3%	16	62.8%
锂硫电池	376	14796	2.4	92.8%	22	56.1%
葡萄糖氧化酶	363	12853	2.0	95.6%	16	38.8%
表面增强拉曼光谱	341	11589	1.8	95.6%	8	33.1%
磁性纳米粒子	309	20900	2.5	93.9%	25	41.1%
微波吸收	308	12882	3.3	93.2%	37	58.4%

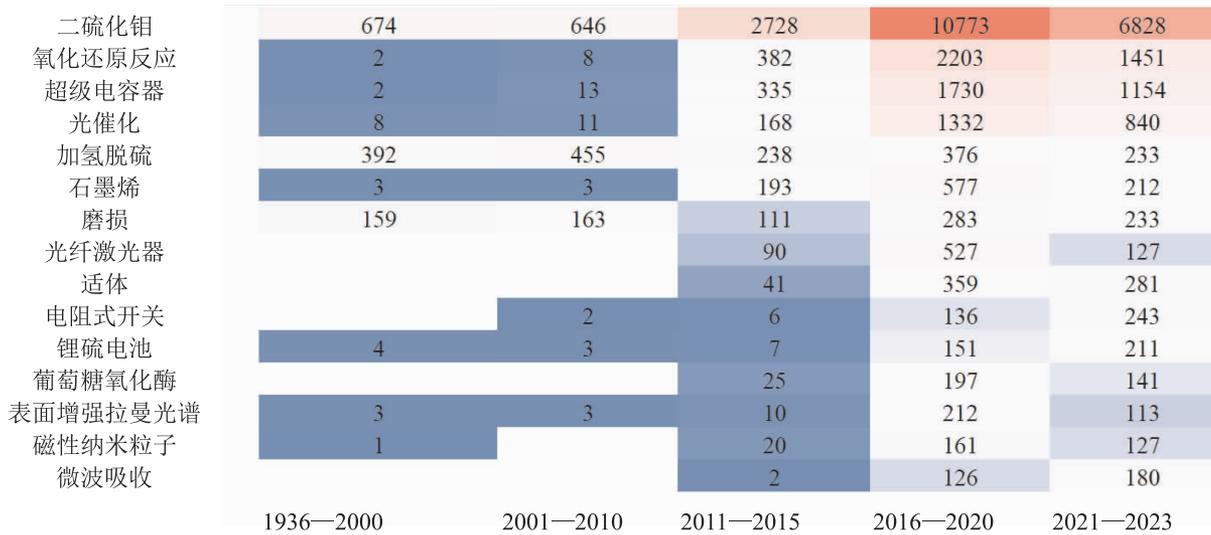


图 5 二硫化钼领域 TOP15 微观主题年度变化趋势

Fig. 5 Annual publication trends of TOP15 micro topics in the molybdenum disulfide field

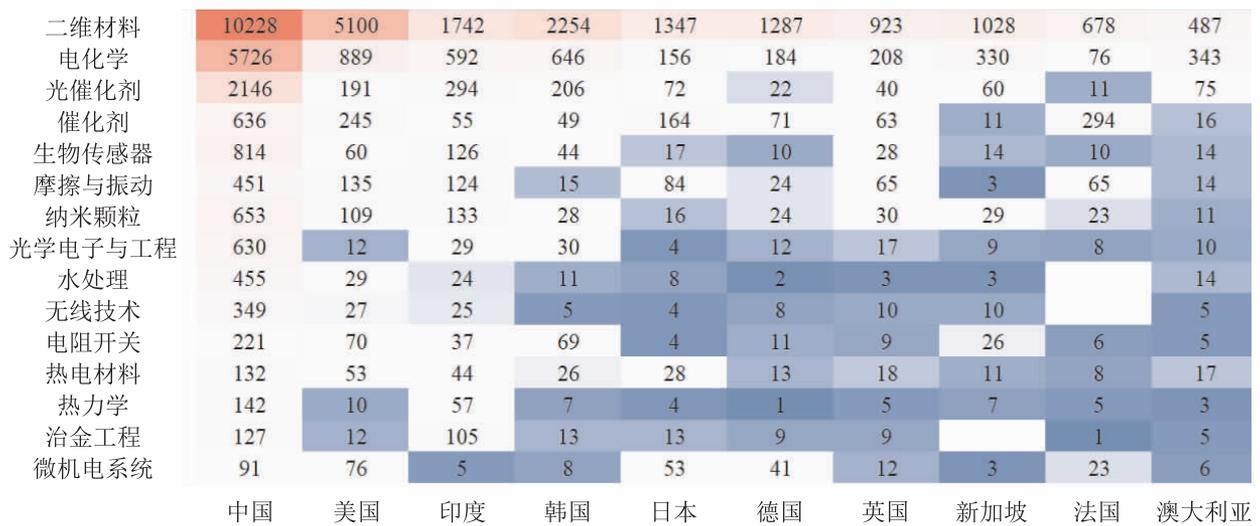


图 6 二硫化钼领域 CNCI 累计值 TOP10 国家中观主题分布

Fig. 6 Meso topics of TOP10 countries in the molybdenum disulfide field in terms of CNCI

催化和摩擦与振动方面的研究占比较多;印度比较关注二维材料、电化学、光催化剂、生物传感器、纳米颗粒和冶金工程的研究;韩国在二维材料、电化学、光催化剂方面着力研究;日本主要围绕二维材料、电化学和催化剂进行研究;德国、英国、新加坡和澳大利亚侧重于二维材料和电化学领域;法国以二维材料和催化剂研究为主。

综合考虑各国发文量、研究质量及其科研机

构表现,表 4 选取中国、美国和新加坡为研究对象,进一步分析每个国家 TOP15 的微观主题分布情况,以洞察其研究重点。

整体上,中国的主要研究主题分布较为集中,美国和新加坡的主要研究主题分布呈现一定程度的断崖现象,美国和新加坡都从排在第 2 位的氧化还原反应开始分布趋于均匀。3 个国家的研究主要围绕二硫化钼的光电性能和催化性能展

表4 中国、美国和新加坡的TOP15 微观主题分布

Tab.4 TOP15 micro topics of China,USA and Singapore in the molybdenum disulfide field

中国				美国				新加坡			
主题	发文量	近三年占比	CNCI均值	主题	发文量	近三年占比	CNCI均值	主题	发文量	近三年占比	CNCI均值
二硫化钼	9151	35.2%	1.6	二硫化钼	4801	20.8%	3.0	二硫化钼	983	22.1%	3.2
氧化还原反应	2838	37.1%	2.6	氧化还原反应	492	14.6%	5.6	氧化还原反应	175	14.9%	5.5
超级电容器	2317	35.2%	2.1	超级电容器	295	18.0%	4.4	超级电容器	135	13.3%	3.7
光催化	1765	34.3%	2.4	石墨烯	265	17.7%	2.1	光催化	52	21.2%	4.2
光纤激光器	597	17.4%	2.2	加氢脱硫	193	4.1%	1.3	石墨烯	43	18.6%	3.0
适体	543	39.2%	2.0	光催化	128	17.2%	3.5	电阻式开关	26	42.3%	3.1
加氢脱硫	459	29.6%	0.7	磨损	124	5.6%	1.4	锂硫电池	14	35.7%	4.0
石墨烯	406	23.6%	1.2	电阻式开关	70	51.4%	4.0	表面增强拉曼光谱	13	15.4%	4.0
磨损	393	34.4%	1.2	三代测序	57	42.1%	2.2	磁性纳米粒子	12	25.0%	2.5
锂硫电池	282	61.0%	2.3	锂硫电池	57	31.6%	2.7	拓扑绝缘体	10	40.0%	1.5
微波吸收	275	59.6%	3.5	表面增强拉曼光谱	53	24.5%	1.5	超材料	9	44.4%	2.5
磁性纳米粒子	263	37.6%	2.7	拓扑绝缘体	51	35.3%	1.6	适体	8	0.0%	4.9
电絮凝	235	85.5%	2.5	原子力显微镜	40	25.0%	1.6	光纤激光器	8	12.5%	11.5
电阻式开关	213	66.7%	2.7	适体	39	38.5%	2.0	钙钛矿太阳能电池	7	14.3%	1.8
葡萄糖氧化酶	193	28.0%	2.1	热电性能	34	20.6%	1.4	有机太阳能电池	6	0.0%	1.0

开, TOP5 微观主题重合率较高, 可见这正是二硫化钼方向的主要研究热点。

结合近三年(2021—2023年)发文情况和CNCI均值进一步深入分析可以看出, 中国近三年发文占比较高的主题有电阻式开关、葡萄糖氧化酶、锂硫电池和微波吸收, CNCI均值较高的有微波吸收(3.5)、磁性纳米粒子(2.7)、电阻式开关(2.7)和氧化还原反应(2.5); 美国近三年着力研究的主题为电阻式开关、三代测序、适体和拓扑绝缘体, 在氧化还原反应(5.6)、超级电容器(4.4)、电阻式开关(4.0)和光催化(3.5)方面表现突出; 新加坡近三年来开始在超材料、电阻式开关、拓扑绝缘体和锂硫电池方面钻研, 在光纤激光器(11.5)、氧化还原反应(5.5)、适体(4.9)、光催化(4.2)、锂硫电池(4.0)和表面增强拉曼光谱(4.0)方面表现优异。3个国家近三年来都很注重电阻式开关, 中新两国都较关注锂硫电池, 美新两国都在开展拓扑绝缘体相关研究。此外, 中国也在积极开展拓扑绝缘体研究, 且论文数量

领先于美新两国(105篇), CNCI均值与美新差距较小(1.4)。

2.5.3 核心论文分析

表5给出了二硫化钼领域被引次数处于前十的高被引论文。研究内容主要集中在二硫化钼的光电性能和催化性能方面, 比如利用二硫化钼制作晶体管、光电子中的电活性材料等。文献类型以研究论文为主, 仅有两篇为综述型论文。

其中, 麻省理工学院的Wang QH等所撰写的综述“Electronics and Optoelectronics of Two-dimensional Transition Metal Dichalcogenides”被引次数最高, 达到12608次, 系统综述了包括二硫化钼在内的过渡金属硫族化合物的历史发展、制备方法、光电性能, 以及电子学和光电子学的发展前景; 2011年由瑞士联邦理工学院的Andras Kis团队发表于*Nature Nanotechnology*的“Single-layer MoS₂ Transistors”一文中, 首次利用二硫化钼单层薄片制作出首批晶体管, 打开了通向光电器件领域的大门; 丹麦科技大学的Jaramillo等于2007年

表 5 二硫化钼领域 TOP10 高被引论文

Tab. 5 TOP10 highly cited papers in the molybdenum disulfide field

题名	发表年份	发表期刊	被引次数	第一作者机构	中观主题
Electronics and Optoelectronics of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides	2012	<i>Nature Nanotechnology</i>	12608	美国麻省理工学院	二维材料
Single-Layer MoS ₂ Transistors	2011	<i>Nature Nanotechnology</i>	11989	瑞士洛桑联邦理工学院	二维材料
Atomically Thin MoS ₂ : A New Direct-Gap Semiconductor	2010	<i>Physical Review Letters</i>	10053	美国哥伦比亚大学	二维材料
Van Der Waals Heterostructures	2013	<i>Nature</i>	7704	英国曼彻斯特大学	二维材料
The Chemistry of Two-Dimensional Layered Transition Metal Dichalcogenide Nanosheets	2013	<i>Nature Chemistry</i>	7556	美国罗格斯大学	二维材料
Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS ₂	2010	<i>Nano Letters</i>	7361	美国加州大学伯克利分校	二维材料
Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti ₃ AlC ₂	2011	<i>Advanced Materials</i>	7126	美国德雷塞尔大学	电化学
Two-Dimensional Nanosheets Produced by Liquid Exfoliation of Layered Materials	2011	<i>Science</i>	5810	爱尔兰都柏林三一大学	二维材料
Phosphorene: An Unexplored 2D Semiconductor with a High Hole Mobility	2014	<i>Acs Nano</i>	5102	美国普渡大学	二维材料
Identification of Active Edge Sites for Electrochemical H ₂ Evolution from MoS ₂ Nanocatalysts	2007	<i>Science</i>	4843	丹麦科技大学	电化学

发表的“*Identification of Active Edge Sites for Electrochemical H₂ Evolution from MoS₂ Nanocatalysts*”一文对沉积所得不同粒度的二硫化钼粒子进行了电催化析氢实验,在一定程度上为二硫化钼在电催化析氢中的应用提供了成功的可能性。

3 结论与启示

3.1 结论

本文基于 SCI 论文数据,利用科学计量学方法刻画了国际二硫化钼领域的发展特征,得出以下主要结论。

1) 美国在二硫化钼研究方面处于全球领先地位,新加坡正快速发展,而中国则以其大规模产出在该领域占据优势。美国的发文量不足中国的三分之一,但影响力很高,无论是 CNCI 均值、H 指数还是高被引论文比例,均居于前列。新加坡在论文影响力方面表现也较为出色,虽然发文量不及美

国,但 CNCI 均值、论文被引率和高被引论文比例均排名第 1,总被引次数和 H 指数仅次于中美两国。中国的发文量远超其他国家,高被引论文数量也居于首位,说明中国具有相当的产出规模优势,部分研究论文具有较高的国际水准,但从整体影响力来看,中国的高被引论文比例不高,国际合作程度较低,还需进一步提升研究实力和国际合作水平。

2) 二硫化钼主要研发机构以高等院校为主。中国科学院表现突出,不仅发文量排第 1 位,高被引论文数量、H 指数和 CNCI 累计值也都居于全球首位;美国斯坦福大学和美国加州大学伯克利分校在 H 指数和 ESI 高被引论文数量的排名上居于前列,整体研究水平处于世界领先;新加坡南洋理工大学除 CNCI 均值处于第 7 位外,各项指标都处于第 2 位,此外新加坡国立大学也表现优异,各项指标都处于前十。

3) 二硫化钼研究热点包括二维材料、电化学、光催化剂、生物传感器和摩擦与振动等,涉及化学、

物理、材料科学等多个领域,是典型的跨学科和交叉研究领域。氧化还原反应、超级电容器和光催化是二硫化钼领域当前的重点研究内容,分别对应二硫化钼优异的催化性能和光电性能。此外,电阻式开关、锂硫电池、葡萄糖氧化酶、微波吸收和磁性纳米颗粒这5个微观主题目前研究规模不大,但引起了广泛关注,可视为该领域的研究前沿。从中、美、新的研究内容来看,虽均有侧重点,但近三年来都很重视电阻式开关相关研究。

3.2 启示

总体来看,二硫化钼研究领域的科研产出呈现出持续增长态势,且研究热度不断上升;我国二硫化钼领域基础研究力量雄厚,具备一定的规模优势;高被引论文比例值得关注,与新加坡、美国等国家存在差距;学术影响力有待提升,仍缺乏原创性、颠覆性研究成果。基于上述分析,对我国二硫化钼研究领域的未来发展提出以下建议。

1) 加强高质量研究产出。虽然我国在发文量上有显著优势,但在影响力方面仍与美国和新加坡存在差距。故应重视研究成果的质量和创新性,鼓励科研人员开展高质量研究,发表高水平论文,并在国际会议上展示相应成果,同时可优化资助机制,大力支持具有高创新性和潜在影响力的研究项目,以提高国际学术影响力。

2) 加强国际合作与交流。鉴于我国的国际合作比例较低,应积极拓展与国际先进科研机构的合作渠道。可通过建立联合实验室、参与国际会议等方式,引进国际先进经验,促进知识和技术的交流合作,提高我国在二硫化钼研究领域的国际合作程度。

3) 关注研究前沿和热点。及时掌握二硫化钼领域研究热点及未来发展趋势,合理配置研究资源,特别是在电阻式开关、微波吸收和锂硫电池等新兴方向加大研究力度,抢占科技制高点,确保我

国走在国际前列。

参考文献

- [1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [2] GUPTA D, CHAUHAN V, KUMAR R. A comprehensive review on synthesis and applications of molybdenum disulfide (MoS_2) material: past and recent developments [J]. *Inorganic chemistry communications*, 2020, 121: 108200.
- [3] SAMADI M, SARIKHANI N, ZIRAK M, et al. Group 6 transition metal dichalcogenide nanomaterials: synthesis, applications and future perspectives[J]. *Nanoscale horizons*, 2018, 3(2): 90-204.
- [4] GAO K, WANG Y, ZHANG B, et al. Effect of vacuum atomic oxygen irradiation on the tribological properties of fullerene-like carbon and MoS_2 films[J]. *Tribology international*, 2022, 170: 107499.
- [5] MONDAL A, VOMIERO A. 2D Transition metal dichalcogenides-based electrocatalysts for hydrogen evolution reaction [J]. *Advanced functional materials*, 2022, 32(52): 2208994.
- [6] NOH S H, LEE H B, LEE K S, et al. Sub-second joule-heated RuO_2 -decorated nitrogen- and sulfur-doped graphene fibers for flexible fiber-type supercapacitors [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2022, 14(26): 29867-29877.
- [7] 李晶, 王宇晴, 刘东新, 等. 二硫化钼性能及应用研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(5): 471-478.

- [8] AN S J, PARK D Y, LEE C, et al. Facile preparation of molybdenum disulfide quantum dots using a femtosecond laser [J]. Applied surface science, 2020, 511:145507.
- [9] CHEN J, SHAO D, FAN S. Destabilization and consolidation: conceptualizing, measuring, and validating the dual characteristics of technology [J]. Research policy, 2021, 50(1):104115.
- [10] COLOMA A, DEL POZO M, MARTÍNEZ-MORO R, et al. MoS₂ quantum dots for on-line fluorescence determination of the food additive allura red [J]. Food chemistry, 2021, 345:128628.
- [11] 周莎, 安耿, 崔玉青, 等. 类石墨烯二硫化钼的合成及应用研究进展 [J]. 中国钼业, 2020, 44(5):1-6.
- [12] 蒋丽娟, 常恬, 李延超, 等. 二硫化钼制备及应用研究进展 [J]. 中国钼业, 2019, 43(6):1-6.
- [13] FRINDT R F. Optical absorption of a few unit-cell layers of MoS₂ [J]. Physical review, 1965, 140(2A):A536-A539.
- [14] FRINDT R F. Superconductivity in ultrathin NbSe₂ layers [J]. Physical review letters, 1972, 28(5):299-301.
- [15] JOENSEN P, FRINDT R F, MORRISON S R. Single-layer MoS₂ [J]. Materials research bulletin, 1986, 21(4):457-461.
- [16] CHIANELLI R R, SIADATI M H, DE LA ROSA M P, et al. Catalytic properties of single layers of transition metal sulfide catalytic materials [J]. Catalysis reviews, 2006, 48(1):1-41.
- [17] LI Y, WANG H, XIE L, et al. MoS₂ nanoparticles grown on graphene: an advanced catalyst for the hydrogen evolution reaction [J]. Journal of the american chemical society, 2011, 133(19):7296-7299.
- [18] SCHUMACHER A, SCANDELLA L, KRUSE N, et al. Single-layer MoS₂ on mica: studies by means of scanning force microscopy [J]. Surface science, 1993, 289(1):L595-L598.
- [19] JARAMILLO T F, JØRGENSEN K P, BONDE J, et al. Identification of active edge sites for electrochemical H₂ evolution from MoS₂ nanocatalysts [J]. Science, 2007, 317(5834):100-102.
- [20] MAK K F, LEE C, HONE J, et al. Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor [J]. Physical review letters, 2010, 105(13):136805.
- [21] RADISAVLJEVIC B, RADENOVIC A, BRIVIO J, et al. Single-layer MoS₂ transistors [J]. Nature nanotechnology, 2011, 6(3):147-150.
- [22] WANG H, YU L, LEE Y H, et al. Integrated circuits based on bilayer MoS₂ transistors [J]. Nano letters, 2012, 12(9):4674-4680.

作者贡献说明

刘娜:数据检索、统计、分析,论文撰写与修改;

张波:论文修改;

马廷灿:选题与构思,审阅修改。