

我国稀土材料领域研发态势分析与 发展建议*

陆颖^{1,3} 史继强¹ 刘宇¹ 陶诚² 张志强^{*,1,3} 陈云伟^{1,3}

(1. 中国科学院成都文献情报中心科学计量与科技评价研究中心, 成都 610041; 2. 中国科学院发展规划局, 北京 100864; 3. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系, 北京 100190)

摘要:稀土材料(也称为稀土新材料)是将稀土元素融合进其它材料以提高原有材料性能或获得新功能的材料统称,包括稀土永磁材料、稀土发光材料等,是高科技领域广泛使用的战略性材料,也是我国高度重视发展的新兴战略材料之一。为了揭示我国稀土材料研发的全球竞争力,研判我国稀土材料研发的国际地位,本文利用文献计量与专家咨询等方法,从论文产出、合作关系、研究布局、研究亮点等方面出发,选取该领域的国内顶级研究单元与国际领先科研单元进行文献计量学对比,挖掘我国在学科布局、论文质量、科技合作等方面的优势与不足。分析发现,我国稀土论文发表与引用已经处于世界前列,但在学科布局、科技合作等方面仍然存在一些问题,阻碍着我国稀土研究快速发展。针对这些不足,论文从学科布局、战略协同、国际合作、产业转化、团队培养、技术攻关等方面提出发展建议。

关键词:稀土材料(稀土新材料);文献计量;竞争力;发展态势;政策建议

中图分类号:G350 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2019.02.005

Study on Development Situation of Rare Earth Materials Research and Suggestions in China*

LU Ying^{1,3} SHI Jiqiang¹ LIU Yu¹ TAO Cheng²
ZHANG Zhiqiang^{*,1,3} CHEN Yunwei^{1,3}

(1. Scientometrics & Evaluation Research Center (SERC), Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Bureau of Development Planning, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China; 3. Department of Library Information and Archives Management, School of Economics and Management, UCAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Rare Earth Materials (Rare Earth New Materials) is a kind of material that puts rare earth elements into other materials to improve the properties of existing materials or obtain new functions, including rare earth permanent magnet materials, rare earth luminescent materials and so on. Rare earth materials are strategic materials widely used in high-tech fields, and is one of the emerging strategic materials in China, which is key to "Made in China 2025" plan. This paper reveals the global competitiveness of Chinese rare earth materials research and development, and judges the international sta-

* 中科院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2019-31)资助

** 通讯作者, E-mail: zhangzq@clas.ac.cn

tus of Chinese rare earth materials research and development, and proposes suggestions for the problems. Using bibliometrics, literature research, expert consultation and other methods, the article analyzes the global competitiveness of Chinese rare earth materials research. At the same time, the domestic top research units and the international leading research units are selected for bibliometric comparison, and the advantages and disadvantages of Chinese discipline layout, paper quality and scientific and technological cooperation are found. According to problems of the rare earth materials in China, the suggestions has been given from aspects such as discipline layout, strategic coordination, international cooperation, achievements transfer transformation, team training, and technical research.

Key words: rare earth materials (rare earth new materials); bibliometrics; global competitiveness; rare earth materials development; policy suggestion

稀土元素是元素周期表中 15 种镧系元素和钪(Sc)、钇(Y)两种元素的总称。稀土材料(也称为稀土新材料)是将稀土元素融合进其它材料中,提升其原有性能或者使其具有某种新功能的一类新型材料的统称,是当今很多高精尖产业必不可少的材料,素有“工业维生素”美称,是极其重要的战略资源,在高科技电子产品、航天航空、国防军工等国家战略领域都有极高价值,是国家科技竞争的重要战略领域^[1-3]。

近些年来,稀土材料已成为世界各大经济体争夺的科技高地。2007年,日本文部科学省、经产省提出“元素战略计划”、“稀有金属替代材料计划”等,在稀土资源储备、技术进步、资源获取、替代材料寻求等方面持续采取措施;2008年,稀土材料被美国能源部列为“关键材料战略”;2010年,欧盟宣布实施稀土战略储备计划^[4];2016年,我国工信部发布《稀土行业发展规划(2016—2020年)》,提出以创新驱动为导向,加强稀土战略资源保护,提升智能制造水平,扩大稀土高端应用,提高行业发展质量和效益,充分发挥稀土战略价值和支撑作用。我国稀土资源较为丰富,总体储量占全球比重一半以上,某些种类在全球同类稀土总量中所占的比重甚至高达 80%^[5-7]。但是,我国稀土材料生产、利用、回收等方面仍处于粗放发展阶段,稀土材料研究仍然存在着不足与不平衡,集聚效应不明显,研究的影响力与前瞻性

还不足。因此,迫切需要了解稀土材料研究领域我国领先团队与国际重要团队的发展现状,以便更好地为我国稀土材料学科布局、团队建设等提供决策依据。

目前已有研究者尝试利用文献计量学来揭示国家、学科团队之间的竞争力,如张晓琴等^[8]通过对期刊影响力和论文研究方向分布的分析,梳理我国渔业科技竞争力;戚佳妮等^[9]以发文量、被引频次为基础,研究我国主要省域的植物保护学科竞争力情况以及学科布局。部分研究者也利用王冠指数、f指数等相关指数进行对比研究^[10,11],如杜文龙等^[12]利用g指数对我国6所应用型航空类院校的基金申请、论文被引频次进行对比分析。同时,科研人员也将ESI数据引入学科领域竞争力分析中,如徐扬等^[13]以计量学理论为基础研究了进入ESI前1%的电力科学工程学科论文数量、论文被引次数、高被引论文数、高被引论文占有率及热点论文情况,以分析国内6所电力工程学科大学竞争力。然而,当前研究者对学科领域团队的计量学竞争力研究仍然孤立地研究机构的论文数量、被引频次等,未融合学科领域政策环境、科研前沿等维度,决策建议的全面性仍不足。

基于此,本文选择四个稀土材料高水平科研单元进行比较研究,将文献计量学与政策分析、学科布局结合,多角度提出我国稀土材料研究领域

的问题与建议。

1 数据与方法

本文选择 Web of Science 数据库中的 SCIE 数据库作为数据源。检索时间限定为 2000—2016 年。数据采集时间为 2017 年 7 月,共计检索到数据 31912 条。采取人工辅助计算机的方式进行数据清洗后,得到有效数据 22971 条。在此基础上,检索科研单元中全部科学家的论文,汇总成为各科研单元论文集合。

检索策略: $TS = (((Rare * Earth) or (Rare Earth) or (rare * earth material *) or (Rare * Earth Element *)) AND (La or Ce or Pr or Nd or Pm or Sm or Eu or Gd or Tb or Dy or Ho or Er or Tm or Yb or Lu)) AND PY = (2000-2016)$ 。

比较分析对象遴选方案:从发文量居前 10 位的机构中,选择组织模式相近,且研究成果突出的国际顶尖科研单元开展比较分析。所谓科研单元,是由几个或多个课题组构成的研究单元,通常是指在科研院所、高校或研发型企业等内部建立的研究中心、重点实验室、系室等。本文选定的分析对象包括在中国处于领先地位的中国科学院长春应用化学研究所稀土资源利用国家重点实验室(以下简称“长春应用化学研究所”)以及稀土材料军事应用方面较强的美国爱荷华州立大学埃姆斯实验室(以下简称“埃姆斯实验室”)、化学合成领域研究较深入的俄罗斯莫斯科国立罗蒙诺索夫大学化学系(以下简称“莫斯科大学化学系”)、德国明斯特大学无机化学与分析化学研究所(以下简称“明斯特大学化学所”)。

数据清洗和统计分析工具: DDA (Derwent Data Analyzer) 软件。

2 稀土材料整体研发趋势

世界主要的科技发达国家和发展中大国均重视争夺稀土材料技术研发的制高点,聚焦稀土材料科技与产业发展,稀土材料科技创新成为各国重点支持领域。自 2008 年来,美国、欧盟、日本陆续发布关键原材料战略评估报告^[14-16],遴选本国或本地区战略新兴产业发展所需的关键原材料,稀土材料成为各国共同关注的关键原材料。

2006 年,日本政府发布《国家能源资源战略新规划》,将稀有金属储备种类扩展至 10 种,2010 年发布的科学技术白皮书提到,要开发稀土高效回收系统、稀土替代材料,并通过设立环境废物管理研究基金,优先资助稀土回收提炼研究。2012 年日本经济省进一步推动“脱稀土”事业的发展,为稀土材料项目提供 50 亿日元补贴计划,重点鼓励和支持降低镨、钕磁材料的使用及提高稀土回收利用等各类技术开发项目的实施。

2010 年,美国能源部制定部署稀土供应的战略计划,分三个层面:一是多样化稀土的供应链;二是致力于替代产品的开发,鼓励美国的稀土消费企业研发使用战略性较低的资源;三是提高稀土资源的利用效率以及回收再利用水平以减少对进口的过度依赖。

2010 年,欧盟宣布实施稀土战略储备计划。根据欧盟委员会 2008 年 11 月出台的“原材料整合战略”,欧盟将在全球市场上寻求建立更好、更不容易遭受破坏的原材料获取渠道,加大欧洲内部原材料勘探、开采力度,同时提高原材料利用效率、缩短循环利用周期,以减少以稀土材料为代表的原材料需求量。2013 年,欧盟委员会联合研究中心发布《欧盟能源行业低碳经济中的关键金属》报告,对低碳能源技术制造中的原材料供应

问题开展调查,发现有八种稀有金属处于短缺高风险状态。2014年,欧盟宣布成立原材料创新与技术研究院(原材料-EIT),旨在整合全欧洲稀土材料等领域的研发创新资源,提高创新能力,促进经济增长和提高全球竞争力。

我国在2016年发布了《稀土行业发展规划(2016—2020年)》^[17],基于我国稀土行业现状、所面临形势和对未来发展趋势的判断,明确了将构建合理开发、有序生产、高效利用、科技创新、协同发展的稀土行业新格局,重点发展稀土高端功能材料及器件,着力拓展稀土功能材料的中高端应用,加快稀土产业转型升级,提高行业发展质量

和效益,发挥好稀土材料在改造传统产业、发展新兴产业及国防科技工业中的战略价值和支撑作用。

2.1 全球 SCI 论文产出增长呈平稳发展态势

2000年以来,全球每年稀土材料领域论文呈平稳发展趋势,年均增长率5%左右,2008年后年发文量基本稳定在1400~1600篇之间(图1)。造成这一结果的部分原因是,2008年全球金融危机爆发后,随着全球经济环境趋弱,稀土产业发展受到影响,稀土产业与资源交易处于下降趋势,以美国科学基金会(NSF)等为代表的基金资助出现了增长缓慢趋势(图2),项目资助数量和资金额

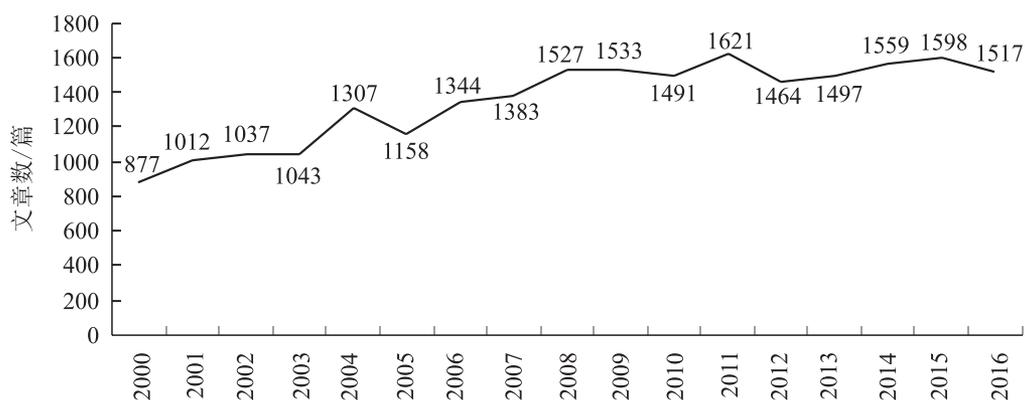


图1 稀土材料领域 SCI 发文趋势(2000—2016)

Fig. 1 Number trend of SCI papers in rare earth materials research (2000-2016)

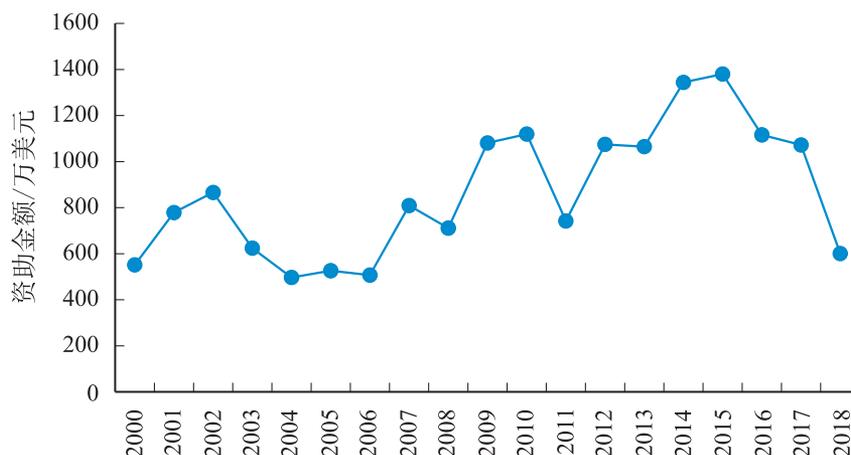


图2 NSF在稀土材料领域的经费资助情况(2000—2018)

Fig. 2 NSF Funding in the field of rare earth materials (2000-2018)

都处于一个相对稳定的状态。

2.2 稀土领域各国 SCI 论文产出比较分析

2000—2006年,稀土材料领域的 SCI 论文主要来自中国、美国、德国、日本、法国等国家,其中我国的数量优势明显(4769篇,占比28%),位居全球第一位,是美国(位居第二)发文量的近2倍(图3)。

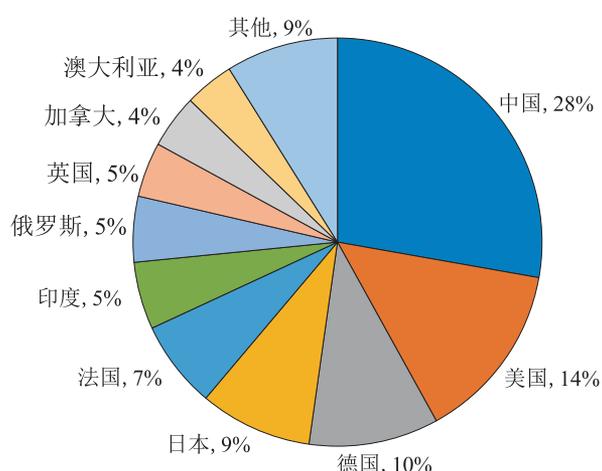


图3 稀土材料领域 SCI 论文国家/地区分布 (2000—2016)

Fig. 3 SCI paper country/region distribution in the field of rare earth materials (2000-2016)

对中美两国论文的研究主题词进行分析(表1)可以发现,晶体结构、冷发光、磁特性、光学特性、光激发光等是两国共同关注的高频主题词;不同之处在于,美国对于中子衍射、电子结构、光谱学、超导等主题的研究投入了更多的关注,而中国对于纳米粒子、显微结构、荧光性、机械性能等主题的关注度更高。由此可见,两国研究既有相互交叉的领域,又有各自的关注重点。

2.3 稀土领域 SCI 论文机构产出比较分析

在2000—2016年稀土材料领域 SCI 发文最多的前15个机构中,中国科学院、法国国家科学研究中心、俄罗斯科学院、美国能源部排名前四,其中中国科学院虽然是唯一一家中国机构,却以

表1 中美两国稀土材料领域 SCI 论文研究主题分布(2000—2016)

Tab. 1 The distribution of research topics in SCI papers in the field of rare earth materials in China and USA(2000-2016)

序号	中国		美国	
	主题词	发文量	主题词	发文量
1	冷发光	403	晶体结构	235
2	纳米粒子	369	磁特性	166
3	晶体结构	344	转换	118
4	能量转移	295	冷发光	91
5	强度	286	中子衍射	86
6	磁特性	260	光谱学	85
7	发射	260	合金	82
8	纳米晶体	246	电子结构	81
9	复合体	244	光学特性	79
10	光学特性	243	光激发光	79
11	光激发光	236	薄膜	76
12	显微结构	229	金属互化物	74
13	合金	226	氧化物	71
14	荧光性	202	化学	68
15	机械性能	181	超导	64

2018篇的总发文量处于显著的领先地位(图4)。而在SCI发文数量最多的25个研究单元中,来自中国的研究单元占据11席,其中长春应用化学研究所以334篇论文位居全球第二(表2)。

3 我国科研单元与国际领先科研单元比较分析

本节选取2000—2016年SCI发文量最多的四个科研单元,长春应用化学研究所与埃姆斯实验室、莫斯科大学化学系、明斯特大学化学所,主要从高被引论文、论文影响力,科研合作关系、研究方向等方面揭示各单元的竞争优势。

3.1 各科研单元科研影响力分析

四个科研单元2000年以来SCI论文被引频次的分布数据显示,在各被引频次区间,长春应用化学研究所都具有比较明显的优势,在绝大部分区间甚至超过其它3个科研单元的3倍以上

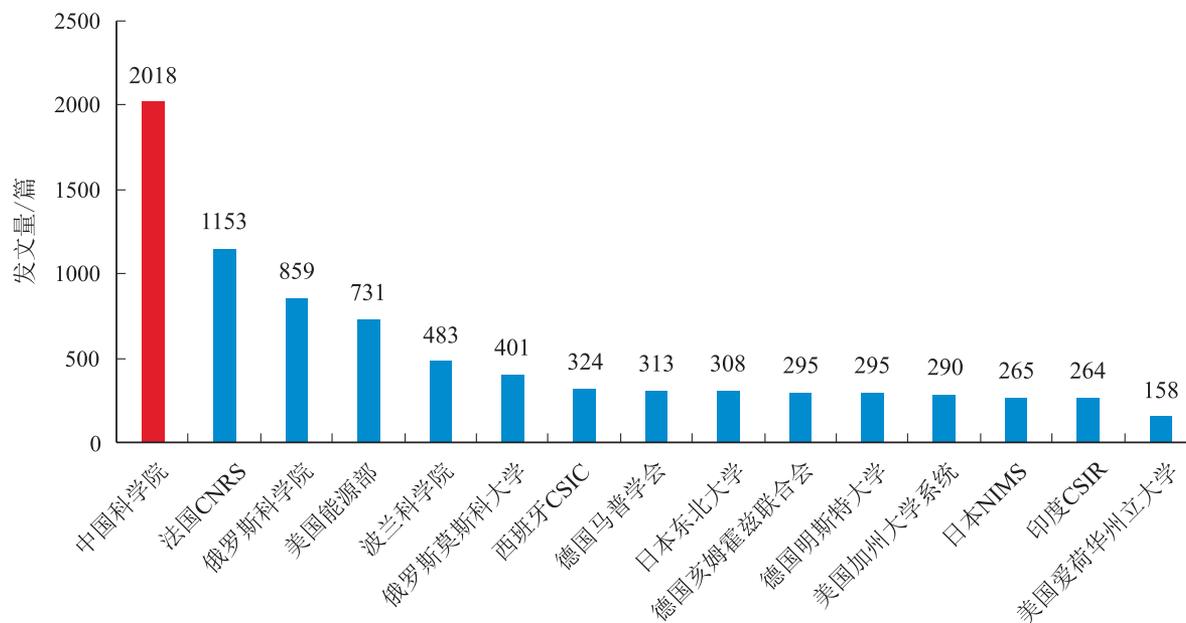


图4 稀土材料领域SCI发文量TOP15机构(2000—2016)

Fig.4 TOP 15 Institute SCI paper in the field of rare earth materials (2000-2016)

表2 稀土新材料领域(2000—2016年)基于SCI发文量的重要研究团队(前25位)

Tab.2 Important research group in the field of rare earth materials based on SCI paper (Top 25) (2000-2016)

序号	研究单元	篇数
1	俄罗斯莫斯科国立罗蒙诺索夫大学化学系	390
2	中科院长春应用化学所稀土资源利用国家重点实验室	334
3	德国明斯特大学无机化学与分析化学研究所	286
4	美国爱荷华州立大学埃姆斯实验室	178
5	中国科学院物理研究所先进材料与结构分析研究部	173
6	法国国家科学研究中心	156
7	山东大学化学与化工学院	137
8	波兰科学院低温结构研究所	136
9	中国科学院福建物构所光电材料化学与物理重点实验室	128
10	哈尔滨工业大学材料科学与工程学院	113
11	北京大学稀土材料化学与应用国家重点实验室	110
12	波兰雅盖隆大学斯莫卢霍夫斯基物理研究所	106
13	同济大学化学学院	106
14	中南大学化学与化工学院	104
15	西班牙国家研究委员会光学研究所	103
16	兰州大学材料学院	102
17	北京科技大学材料科学与工程学院	97
18	中国科学院上海硅酸盐研究所高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室	91
19	德国马克斯普朗克学会	90
20	日本东北大学	86

(图5);SCI论文篇均被引频次和H指数都远高于其它3个科研单元(表3)。同时,在四个科研

单元中,2000年以后只有长春应用化学研究所(4篇)和埃姆斯实验室(1篇)两家机构拥有高被引

论文。这说明长春应用化学研究所在稀土材料研究领域的论文质量在世界范围内处于较高水平,具有较高学术影响力,在行业内的优势比较突出,优于其它3个科研单元。

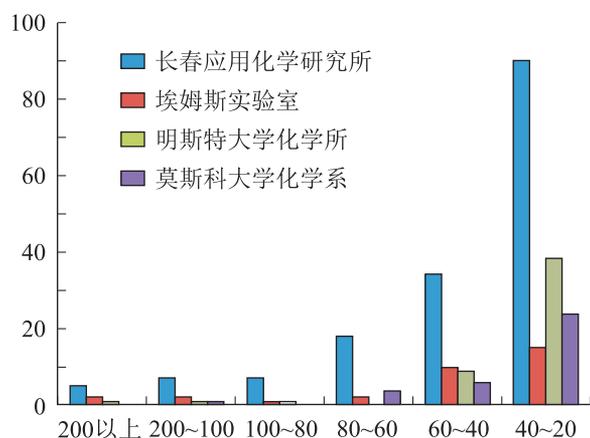


图5 四个对比科研单元SCI论文被引频次分布(2000—2016)

Fig. 5 SCI papers cited frequency distribution of four comparative scientific research units (2000-2016)

表3 四个对比科研单元篇均被引次数与H指数对比(2000—2016)

Tab. 3 Comparison of the times cited and the H index in the four comparative scientific research units (2000-2016)

机构	篇均被引频次	H指数
长春应用化学研究所	23.64	51
埃姆斯实验室	14.78	30
明斯特大学化学所	12.21	29
莫斯科大学化学系	7.24	22

王冠指数(式1)是由莱顿大学科学技术研究中心(CWTS)提出,用于测算机构在某一学科领域内相对于世界平均科研水平的相对影响力指标,是定量判定研究机构全球影响力的主要指标。

$$CPP/FCSm =$$

$$\frac{\text{该机构该领域论文被引次数/该机构该领域论文数}}{\text{全球该领域论文被引次数/全球该领域论文数}}$$

(1)

通过对四个科研单元王冠指数进行对比分析发现,长春应用化学研究所王冠指数最高(1.77),和莫斯科大学化学系(1.33)、埃姆斯实验室(1.11)、明斯特大学化学所(0.92)相比,具有较大优势(图6)。这说明其论文的整体实力高于世界平均水平,也高于其它三个对比科研单元。

3.2 各科研单元合作网络分析

分析四个科研单元的合作网络(图6)可知,在2000—2016年间,莫斯科大学化学系的对外合作最多(240家合作机构),其后依次是埃姆斯实验室(118)、长春应用化学研究所(105)和明斯特大学化学所(91)(表4)。其中莫斯科大学化学系的国外合作最多,主要来自法国、印度、波兰等国。其他三家科研单元的国外合作论文数量相对少一些,长春应用化学研究所主要合作对象是吉林大学、长春大学、浙江大学以及中国科学院其它研究所等国内机构;明斯特大学化学所、埃姆斯实验室对外合作也较少,特别是埃姆斯实验室,这可能是由于该实验室是由美国能源部(DOE)下属(委托爱荷华州立大学管理)的国家科学实验室,具有较强的保密性质。

3.3 各科研单元资金来源分布趋同

一方面,四个科研单元的资金资助都主要来自于其本国,由于稀土研究本身的封闭性和涉密性导致了对外合作的受限,甚至盟国之间的相互资助也较少。

另一方面,四个科研单元受基金资助的文章数量差异较大,长春应用化学研究所的最多(309),其次是莫斯科大学化学系(142)、明斯特大学化学所(133),埃姆斯实验室(38)最少,主要原因可能是由于埃姆斯实验室的资助主要来自政府或军方,相关研究成果受到保密限制。但资助10篇以上的资助机构数量相差不大,莫斯科大



图 6 四个科研单元的合作关系网络

Fig.6 Partnership network of four comparative scientific research units

表4 四个科研单元的主要合作国家分布(前5)

Tab.4 Cooperative country of four comparative scientific research units (Top 5)

合作机构	国家	合作篇数
莫斯科大学化学系 (390篇)	法国	66
	印度	45
	波兰	41
	德国	40
	意大利	29
长春应用化学研究所 (334篇)	俄罗斯	8
	日本	6
	美国	5
	德国	4
	葡萄牙	4
明斯特大学化学所 (286篇)	法国	44
	乌克兰	24
	波兰	13
	印度	12
	巴西	8
埃姆斯实验室 (178篇)	德国	15
	意大利	14
	法国	13
	印度	10
	中国	7

学化学系资助机构4个,长春应用化学所和明斯特大学化学所的资助机构3个,埃姆斯实验室2个。

3.4 各科研单元研究重点各不相同

对四个科研单元的关键词、主题词等进行梳理,通过技术分类与筛选,发现四个科研单元各自有不同的侧重点(表6)。需要注意的是,和其它三个科研单元相比,长春应用化学研究所在磁性研究方面的论文产出相对较少。

4 稀土材料近期的亮点工作与进展

4.1 稀土材料在通信领域的研究逐渐深入

2015年,澳大利亚国立大学的研究人员利用稀土元素铈在量子存储研究方面取得重大突破,实现了长达6个小时的量子存储时间,比以往水平延长了100倍,预示着固态量子硬盘和全球范

表5 四个对比科研单元的主要资助机构统计(资助10篇以上)

Tab.5 Major funding funds for four comparative research units(more than 10 papers each)

科研单元	资助机构	篇数
长春应用化学研究所	国家自然科学基金委(National Natural Science Foundation of China)	124
	国家基础研究计划(National Basic Research Program of China)	72
	中国科学技术部(Ministry of Science and Technology of China)	25
莫斯科大学化学系	俄罗斯基础研究基金会(Russian Foundation for Basic Research)	113
	印度俄罗斯基础研究基金会(Indo Russian Fund for Basic Research)	32
	印俄基础研究基金会(Indo-Russian Fund for Basic Research)	14
	国际衍射数据中心(ICDD)	14
明斯特大学化学所	德国科学基金会(Deutsche Forschungsgemeinschaft)	103
	化学工业基金会(Fonds Der Chemischen Industrie)	19
	北莱茵威斯特法伦州分子与材料研究学院(NRW Forschungsschule Molecules and Materials)	10
埃姆斯实验室	美国能源部(US Department of Energy)	25
	爱荷华州立大学(Iowa State University)	13

表6 四个对比科研单元主要研究领域统计

Tab.6 The main research areas of the four comparative research units

研究方向	长春应用化学研究所	明斯特大学化学所	埃姆斯实验室	莫斯科大学化学系
能量传递	√			√
光学性能	√			√
纳米研究	√			√
薄膜	√			
结晶体结构		√		
磁性研究		√	√	√
金属间化合物		√		
合金研究	√		√	
电阻研究			√	

围的量子通信可能成为现实^[18]。相关成果发表于*Nature*杂志上。

2016年,索尔福德大学和萨里大学的研究人员将稀土注入硅来制作高性能的LED光探测器,用于产生和检测使用硅通讯波长的光^[19]。该研究中,光可以通过电子在硅和稀土之间的“跳跃”直接产生,极大地简化了数据传输方式。

2017年,中科院宁波材料研究所通过引入低熔点Nd-Fe合金粉末,制备出高性能高丰度稀土基永磁体^[20],将极大促进稀土材料在电子通信、交通运输、军事装备等领域的应用。

2018年,中国科学技术大学郭光灿院士在量子存储领域取得新进展,研制出多自由度并行复用的固态量子存储器,在国际上首次实现跨越三个自由度的复用量子存储,并展示了时间和频率自由度的任意光子脉冲操作功能。

4.2 稀土材料促进生物医学领域获得长足进步

2015年,中科院上海光学精密机械研究所围绕现场快速检测系统核心技术,在国际上首次创建了基于稀土纳米上转发光的免疫层析技术平台,实现了纳米材料、生物检测、生物传感三个关键领域的融合^[21],并凭此获得了2015年度国家技术发明奖二等奖。同年,中科院福建物质结构研究所开发出一种具有中空核壳结构的多功能稀土纳米荧光生物探针,能特异性识别癌细胞,有望成为一种集多模成像和肿瘤靶向治疗于一体的新型多功能纳米诊疗材料^[22]。

2016年,新加坡南洋理工大学、新加坡科技研究局以及厦门大学的研究人员联合创建了一种光声/荧光多模态导向的诊疗策略以响应复杂的肿瘤组织微环境,并成功地将功能化稀土上转换纳米粒子特异性地富集在活体动物的肿瘤部位以达到精准的靶向诊疗^[23]。该研究成果发表在*Nature Communications*杂志上。同年,中科院福建物质结构研究所的科研人员采取将三价铈

离子Eu³⁺分别掺杂到内外壳层的设计策略,发展了一种基于Eu³⁺双模(上转换/下转移)发光的核-壳-壳结构纳米荧光探针,并成功地将应用于AFP的上转换和溶解增强下转移发光双模体外检测,对原发性肝癌的诊疗具有重要意义^[24]。该研究成果发表在英国皇家化学会*Chemical Science*杂志上。

2017年,东京大学的科研人员研发了一种基于OTN近红外稀土掺杂的新型纳米荧光粉材料^[25],该材料与温度具有良好线性相关性,因而有望应用于深层组织的测温。该研究成果发表在*Journal of Materials Chemistry*杂志上。同年,新加坡科技与设计大学、新加坡国立大学、台湾国立卫生研究所、常州大学的科研人员联合研发了一种利用二氧化硅包覆的稀土掺杂纳米粒子来强化近红外光声成像的技术^[26]。此技术可以提高深层组织成像的分辨率与信噪比。同年,湖北大学、华中科技大学、中科院深圳先进研究院的科研人员共同发现了CuS稀土聚合物在核磁共振成像引导的化学-光热疗法中的重要作用,展现了稀土材料在综合医疗手段中的发展潜力^[27]。

2018年,中科院信息功能材料国家重点实验室与德国于利希研究中心合作,将极低场磁共振成像(ULF-MRI)图像中±500Hz带宽内的工频噪声干扰抑制85%以上,解决了无屏蔽或简易屏蔽ULF-MRI成像的固有工频噪声干扰问题,向实现低成本可移动式MRI系统迈出了坚实的一步。

5 启示与建议

5.1 保持优势领域研究动力,不断优化研究布局

通过分析稀土材料领域4个科研单元的高水平论文与被引频次发现,长春应用化学研究所在稀土研究领域具有比较强的学科优势,尤其是在

能源材料、合金材料等方面,但与国际对标科研单元相比,长春应用化学研究所在磁性能研究方面比较弱,而德国明斯特大学、埃姆斯实验室等在该领域有较多的研究成果。这一方面说明磁性能研究方向是稀土材料研究的重要方向。

建议我国稀土材料研究机构在保持自身研究领域优势的同时,进一步优化学科布局,通过补短板,优化学科方向来进一步夯实优势,形成更为合理的研究布局,促进国家在相关领域的发展。

5.2 面向国家战略需求,加强稀土材料领域基础研究

我国稀土材料研究论文产出位居世界前列,但基础研究影响力不足,原创成果少,在 *Nature*、*Science* 等国际一流期刊上发表论文的数量与西方国家相比存在较大差距,2000年以来只有2篇,而美国达到14篇。

建议加强稀土高频、磁传感、激光晶体、闪烁晶体等新一代稀土复合材料基础研究,以促进电子、航空、国防等战略领域发展。同时,集中稀土材料科研资源(资金、人才、政策等),建立新型稀土材料研究中心(比如中国科学院卓越中心),联合国内优势单位,加强合作,设置大计划、大项目来进行支持,创新协同机制建设。

5.3 在保证国家安全的前提下,有针对性地开展国际合作交流

我国稀土材料领域学术研究的国际合作相对较弱,国内合作研究也较少,且大多集中在本地相关科研机构之间,比如长春应用化学研究所。这样使得本来就比较封闭的合作网络更加封闭,不利于国内稀土材料领域的研究合作。

建议梳理各单位的稀土材料研究优势,整合资源,促进研究机构强强联合和协同创新、交叉

研究,共同攻关重大科学问题与技术问题,弥补我国在稀土研究领域的短板。

5.4 加强稀土材料研究成果转化与技术应用

我国在稀土材料研究领域已拥有较多成果,多年来论文产出一直处于世界前列,但是也应该看到,我国稀土材料研究成果主要集中在国立科研机构中,科技成果转化效率较低,在稀土产业发展与转型方面仍然存在不足,主要有应用技术较少、成果转化数量不多、民用技术推广不足等。

建议进一步完善稀土材料研究成果转移转化机制,结合稀土材料研究与应用,特别是国防军事应用的特点,组建军民融合的科技成果转移转化平台。

5.5 加大培养稀土材料研究领域世界级研究团队

当前我国还缺乏稀土材料领域世界级的重大原创性研究成果和顶尖科学家研究团队。在稀土领域SCI论文中,2000—2016年发文量前10的作者中,中国只有1名(同济大学闫冰教授,83篇),发文最多的是明斯特大学化学所的 Poettgen (147篇),其次是波兰雅盖隆大学的 Szytula (127篇)和 Penc (83篇)。就SCI论文发表而言,我国具有代表性的科研人员仍然较少。

建议加大力度培养稀土材料研究领域世界级人才与团队,特别是在稀土材料研究国际合作不多的情况下,要加强本土人才及团队的培养,设立专门的人才项目、资助措施、管理机制等,选准队伍、稳定支持、减少考核,促进我国稀土材料领域世界一流人才和团队的培养。

5.6 加强力量攻关核心技术,培养战略优势

我国最为突出的优势是稀土储量大,且稀土品种齐全、分布合理。但是由于技术掌握不足、资源利用效率低下,使其价值没有得到应有的体

现,优势没有完全展现。

建议集中力量攻关稀土生产技术,加强对稀土资源的综合利用、再生回收等技术的研究,提高稀土资源利用效率,降低能源和原材料消耗,加大高精尖技术研发,以支撑芯片、航天等战略领域技术发展,形成“大国重器”。总而言之,有必要将稀土材料先进技术培育成为我国未来的一个“长板”领域,成为国家的核心关键技术。

致谢:本文写作过程中得到了中国科学院长春应用化学研究所王鑫岩研究员的指导、审阅和修改,特致谢忱。

参考文献

- [1]程玲,罗伟昂,戴李宗. 战略性资源——稀土的应用与发展[J]. 厦门科技,2013(3):23-28.
CHENG Ling, LUO Weiang, DAI Lizong. Strategic Resources-Application and Development of Rare Earths [J]. Xiamen Science Technology, 2013 (3):23-28.
- [2]孟弘,李振兴. 关于我国稀土产业发展的战略性思考[J]. 科技管理研究,2011,31(16):29-31.
MENG Hong, LI Zhenxing. Strategic Thinking on the Development of China's Rare Earth Industry [J]. Science and Technology Management Research, 2011, 31(16):29-31.
- [3]莫志宏. 从国防军事战略高度看稀土资源合理开发利用[J]. 化学工程与装备,2013(4):146-148.
MO Zhihong. Rational Development and Utilization of Rare Earth Resources from the Perspective of National Defense Military Strategy [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2013 (4):146-148.
- [4]王昶,阳香莲,宋慧玲,等. 基于中西方稀土战略调整演化路径的中国稀土政策研究[J]. 矿产保护与利用,2018(1):1-11.
WANG Chang, YANG Xianglian, SONG Huiling, et al. A Chinese Rare Earth Policy Study Based on the Evolutionary Path of Strategic Adjustment of Rare Earths in China and the West [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018 (1):1-11.
- [5]谢瑾岚. 合理有效开发利用稀土资源的战略对策[J]. 中国国情国力,2011(3):7-9.
XIE Jinglan. Strategic Countermeasures for Rational and Effective Development and Utilization of Rare Earth Resources [J]. China National Conditions and Strength, 2011 (3):7-9.
- [6]马诚慧. 浅谈稀土资源开发利用的现状与未来[J]. 商情,2014(20):286-286.
MA Chenghui. Talking about the Present Situation and Future of Rare Earth Resources Development and Utilization [J]. Shangqing, 2014 (20):286-286.
- [7]曹毅,关铤. 中国南方离子型稀土现状浅析[J]. 中国矿业,2016,25(11):60-62.
CAO Yi, GUAN Xi. Analysis of Situation of The Southern Ionic Type Rare-Earth Ore in China [J]. China Mining Magazine, 2016, 25(11):60-62.
- [8]张晓琴,吴均,陈欣然,等. 基于论文发表信息分析中国渔业科技竞争力——以中国水产科学研究院为例[J]. 中国农学通报,2007,23(5):494-499.
ZHANG Xiaoqin, WU Jun, CHEN Xinran, et al. Analysis on Fishery Scientific and Technological Competitive Advantage Based on Published Academic Articles——Using Chinese Academy of Fishery Sciences as the Example [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5):494-499.
- [9]戚佳妮,成丽娜. 基于中文期刊发表论文情况的视角探讨辽宁植物保护学科竞争力[J]. 园艺与

- 种苗,2017(10):24-27.
- QI Jiani, CHENG Lina. Discussion on Core Competence of Plant Protection Discipline Based on Metadata of CNKI [J]. Horticulture & Seed, 2017(10):24-27.
- [10] 陈仕吉, 史丽文. 基于 ESI 的学术影响力指标测度方法与实证 [J]. 图书情报工作, 2013, 57(2):97-102.
- CHEN Shiji, SHI Liwen. Theoretical and Empirical Study on Measure Method of Academic Influence Indicator Based on ESI [J]. Library and Information Service, 2013, 57(2):97-102.
- [11] 叶鹰. 对数 f 指数及其评价学意义 [J]. 情报科学, 2009, 27(7):965-968.
- YE Ying. Logarithmic f-Index and Its Meanings in Research Assessment [J]. Information Science, 2009, 27(7):965-968.
- [12] 杜文龙, 樊秋妮, 谢珍, 等. 基于学术论文评价的航空类院校科研竞争力比较分析——以 6 所应用型航空类院校为例 [J]. 河北科技图苑, 2018, 31(3):83-87.
- DU Wenlong, FAN Qiuni, XIE Zhen et al. A Comparative Analysis on Scientific Research Competitiveness of Aviation Universities Based on Academic Thesis——Taking Six Applied Aeronautical Universities as Examples [J]. Hebei Library Journal of Science and Technology, 2018, 31(3):83-87.
- [13] 徐扬, 张力晖. 基于 ESI 数据的电力工程学科科研竞争力分析——以华北电力大学为例 [J]. 统计与管理, 2018(1):99-101.
- XU Yang, ZHANG Lihui. Analysis of Scientific Research Competitiveness of Electric Power Engineering Based on ESI Data—Taking North China Electric Power University as an example [J]. Statistics and Management, 2018(1):99-101.
- [14] National Research Council (US). Committee on Critical Mineral Impacts on the US Economy, Minerals, Critical Minerals, and the US Economy [M]. Washington: National Academies Press, 2008.
- [15] European Commission. Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials: Critical Raw Materials for the EU 2014 [EB/OL]. (2015-04-29) [2017-12-11]. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw_materials/files/docs/crm_reporton_critical_raw_materials_en.pdf.
- [16] 日本の産業は、戦略的な資源の確保します [EB/OL]. (2012-06-27) [2017-12-11]. http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/028/pdf/28sankou1-2.pdf.
- Japanese Industry. Securing Strategic Resources [EB/OL]. (2012-06-27) [2017-12-11]. http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/028/pdf/28sankou1-2.pdf.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发稀土行业发展规划(2016-2020年)的通知 [EB/OL]. (2016-10-18) [2017-12-11]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757017/c5287765/content.html>.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Industry and Information Technology on Printing and Distributing the Rare Earth Industry Development Plan (2016-2020) [EB/OL]. (2016-10-18) [2017-12-11]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757017/c5287765/content.html>.
- [18] 新华网. 留澳中国学者研究量子存储获重大突破 [EB/OL]. (2015-01-09) [2017-12-11]. <http://www.xinhuanet.com>

- tp://www.xinhuanet.com/tech/2015-01/09/c_1113944681.htm.
- Xinhua Net. Chinese Scholars Studying in Australia have Made Major Breakthroughs in Quantum Storage [EB/OL]. (2015-01-09) [2017-12-11]. http://www.xinhuanet.com/tech/2015-01/09/c_1113944681.htm.
- [19] 中国稀土行业协会. 稀土硅芯片时代显信号数据传输方式将大跃进[EB/OL]. (2016-03-07) [2017-12-11]. <http://www.ac-rei.org.cn/portal.php?mod=view&aid=4707>.
- China Rare Earth Industry Association. Rare Earth Silicon Chip Era Display Signal Data Transmission Method will Leap Forward [EB/OL]. (2016-03-07) [2017-12-11]. <http://www.ac-rei.org.cn/portal.php?mod=view&aid=4707>.
- [20] 中国科学院宁波工业技术研究院. 宁波材料所制备出高性能高丰度稀土基永磁体[EB/OL]. (2017-03-27) [2017-12-11]. http://www.nimte.ac.cn/news/progress/201703/t20170327_4764151.html.
- Ningbo Industrial Technology Institute, CAS. Preparation of High Performance and High Abundance Rare Earth Based Permanent Magnets from Ningbo Materials Institute [EB/OL]. (2017-03-27) [2017-12-11]. http://www.nimte.ac.cn/news/progress/201703/t20170327_4764151.html.
- [21] 中国科学院上海光学精密机械研究所. 上海光机所主要参与完成的“基于稀土纳米上转换发光技术的即时检验系统创建及多领域应用”项目荣获2015年度国家技术发明奖二等奖[EB/OL]. (2016-02-05) [2017-12-11]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/ttxw/201602/t20160205_4531479.html.
- Shanghai Institute of Optic and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, The Project of "Real-Time Inspection System Creation and Multi-Field Application Based on Rare Earth Nano-Upturning Illuminating Technology" Won the Second Prize of 2015 National Technology Invention Award [EB/OL]. (2016-02-05) [2017-12-11]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/ttxw/201602/t20160205_4531479.html.
- [22] LU S, TU D, HU P, et al. Multifunctional Nanobioprobes Based on Rattle-Structured Upconverting Luminescent Nanoparticles [J]. *Angewandte Chemie*, 2015, 54(27): 7915-7919.
- [23] AI X, HO C J H, AW J, et al. In vivo Covalent Cross-Linking of Photon-Converted Rare-Earth Nanostructures for Tumour Localization and Theranostics [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10432.
- [24] LUO W, FU C, LI R, et al. Er³⁺-Doped Anatase TiO₂ Nanocrystals: Crystal-Field Levels, Excited-State Dynamics, Upconversion, and Defect Luminescence [J]. *Small*, 2011, 7(21): 3046.
- [25] MASAO Kamimura, TAIKI Matsumoto, SATORU Suyari. Ratiometric Near-Infrared Fluorescence Nanothermometry in the OTN-NIR (NIR II/III) Biological Window Based on Rare-Earth Doped β-NaYF₄ Nanoparticles [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2017, 5(10): 1917.
- [26] SHENG Y, LIAO L D, BANDLA A, et al. Enhanced Near-Infrared Photoacoustic Imaging of Silica-Coated Rare-Earth Doped Nanoparticles [J]. *Materials Science & Engineering C*, 2017, 70(Pt 1): 340-346.
- [27] HAN L, HAO Y N, WEI X, et al. Hollow Copper Sulfide Nanosphere-Doxorubicin/Graphene Oxide Core-Shell Nanocomposite for Photothermo-Chemotherapy [J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2017, 3(12): 3230-3235.