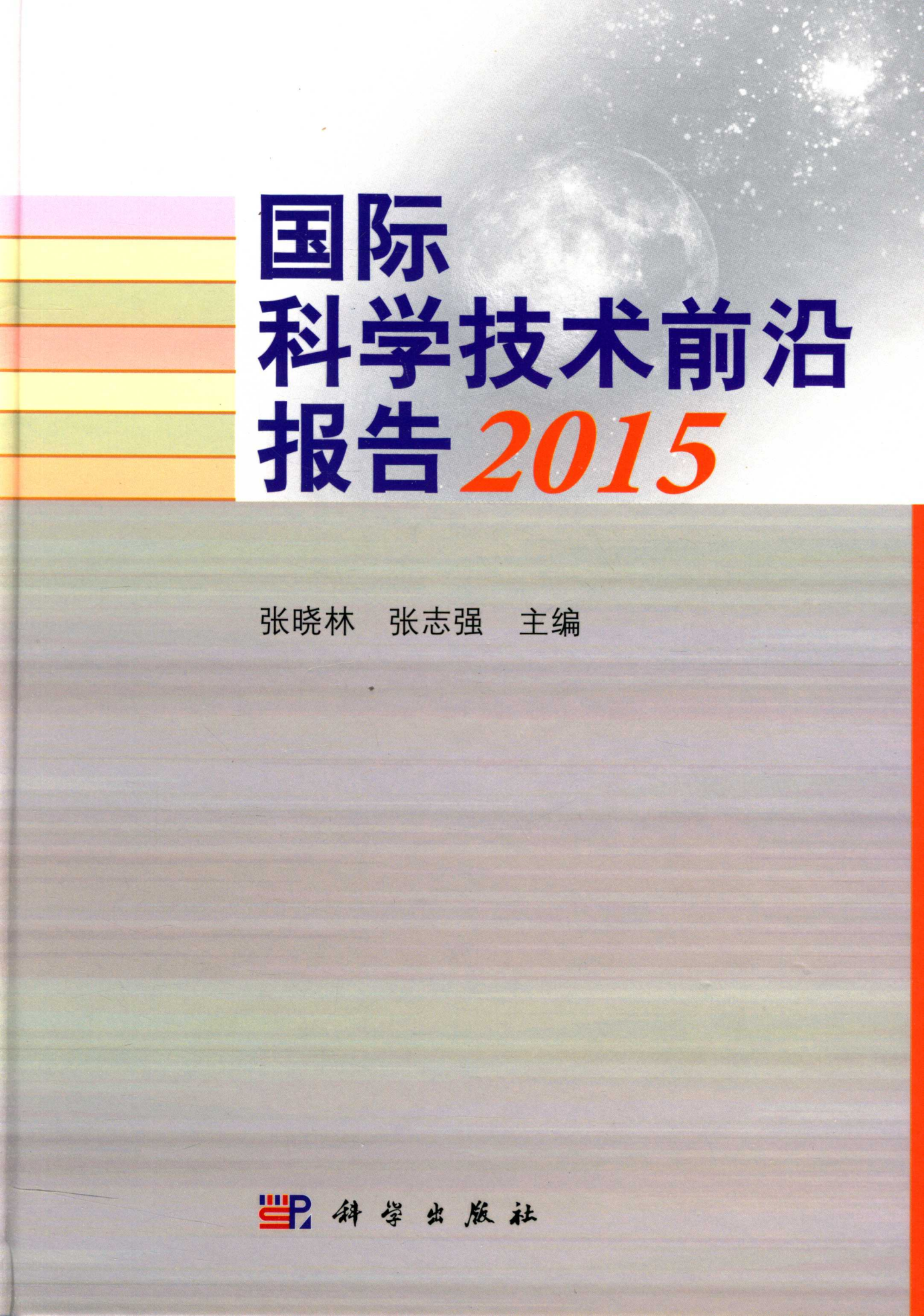


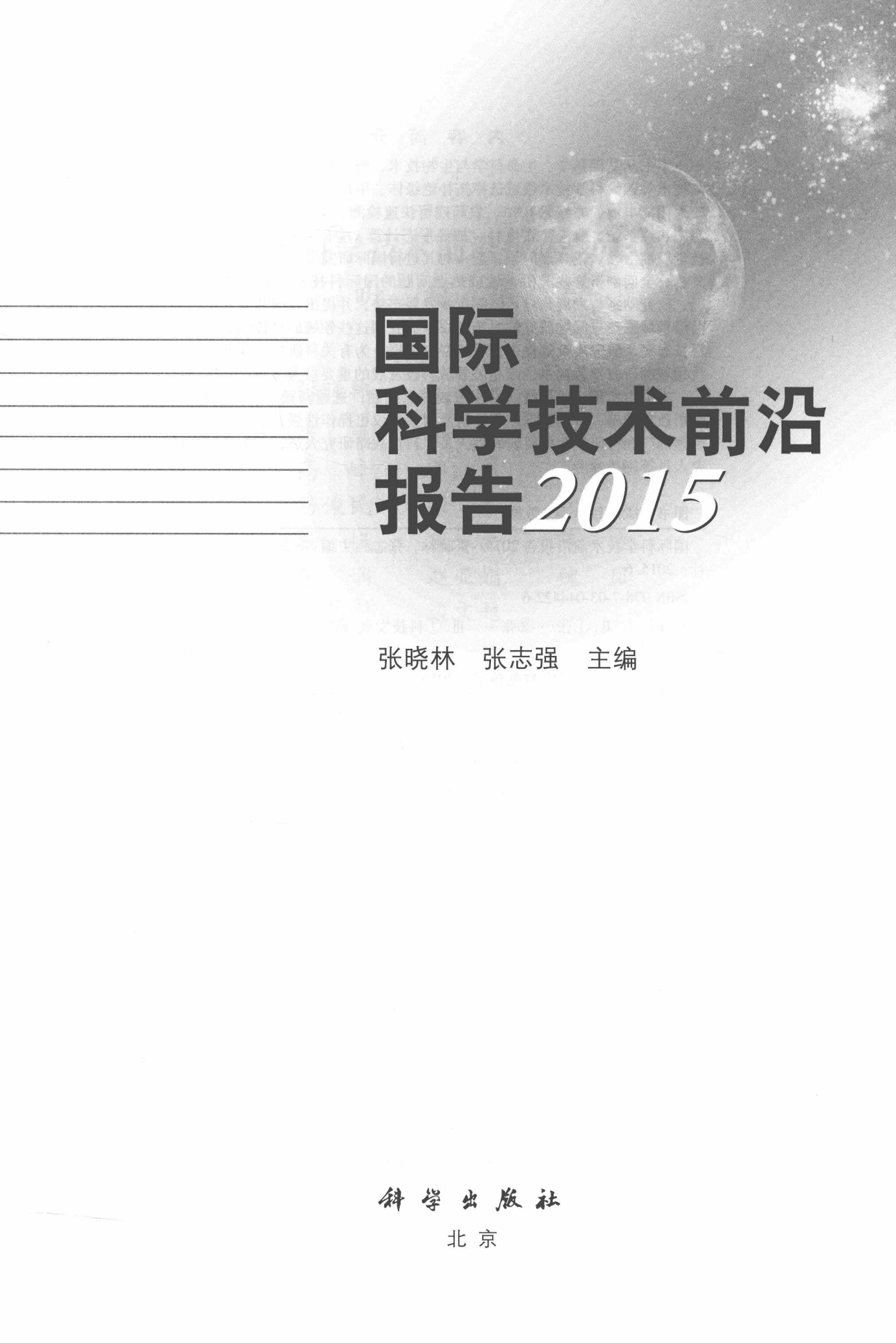


国际 科学技术前沿 报告 *2015*

张晓林 张志强 主编



科学出版社



国际 科学技术前沿 报告*2015*

张晓林 张志强 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从基础科学、生命科学与生物技术、资源环境科学与技术、战略高技术等四大科学技术领域选择拓扑绝缘体、甲烷催化转化制乙烯、钙钛矿太阳能电池、非编码 RNA、农药残留快速检测、生物基材料、城市化、海底热液系统、海洋防腐涂料、神经形态计算、空间生命科学等 11 个科技创新前沿领域或热点问题,逐一对其进行国际研究发展态势的全面系统分析,全面剖析这些前沿领域或热点问题的国际科技发展的整体进展状况、研究动态与发展趋势、国际竞争发展态势,并提出我国开展这些相关前沿领域或热点问题研究的对策建议,为我国这些领域的科技创新发展的科技布局、研究决策等提供重要的咨询依据,为有关科研机构开展这些科技领域的研究部署提供国际相关领域科技发展的重要参考背景。

本书中所阐述的科技前沿领域或热点问题,选题新颖,具有前瞻性,分析数据准确,资料数据翔实,研发对策建议可操作性强,适合政府科技管理部门和科研机构的科研管理人员、科技战略研究人员,相关领域的研究人员等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

国际科学技术前沿报告 2015/ 张晓林, 张志强主编. —北京: 科学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-03-044422-6

I. 国… II. ①张… ②张… III. ①科技发展-研究报告-世界-2015
IV. ①N11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 103039 号

责任编辑: 刘巧巧

责任印制: 肖兴 / 封面设计: 黄华斌

电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 25 1/2 插页: 10

字数: 600 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《国际科学技术前沿报告 2015》 研 究 组

组 长	张晓林	张志强	
成 员	张 薇	冷伏海	刘 清
	高 峰	邓 勇	曲建升
	房俊民	张 军	徐 萍
	杨 帆	熊永兰	陈 方
	张 娴	赵亚娟	魏 凤
	梁慧刚	边文越	

前 言

中国科学院文献情报系统作为服务于基础科学、资源环境科学与技术、生命科学与生物技术、战略高技术和重大产业与技术创新、边缘交叉前沿科学发展，以及科技发展战略与政策的国家级科技信息与决策咨询知识服务骨干机构系统，以服务科技决策一线、科技研究一线、区域与产业发展一线为己任，在全面建设支撑科技创新的系统信息知识资源体系的同时，全面建立起了全方位、多层次、专业化、集成化、协同化的支持科技战略研究、科技发展规划和科技发展决策的战略情报研究与咨询服务体系，系统监测国际科技领域发展态势，分析判断科技领域前沿热点方向与突破，调研关注国际重大科技布局 and 研发计划，全面分析国际科技战略与科技政策动态，全面评价国际科技领域与国别科技发展竞争力，建立起了系统的国际科技发展态势监测分析与战略研究的决策知识咨询服务机制。

中国科学院文献情报系统在其理事会领导下，根据中国科学院科技研发创新的战略布局，发挥其系统性、整体化优势，按照“统筹规划、系统布局、协同服务、整体集成”的原则，构建“分工负责、长期积累、深度分析、支撑决策”的战略情报研究服务体系，面向国家和中国科学院科技创新的宏观科技战略决策、面向中国科学院科技创新领域和前沿方向的科技创新发展决策，开展深层次专业化战略情报研究与咨询服务：院文献情报中心（北京）负责基础科学与交叉重大前沿领域、空间光电与大科学装置、现代农业科技等科技创新领域的战略情报研究；兰州文献情报中心负责地球科学与资源环境科学、海洋科技等科技创新领域的战略情报研究；成都文献情报中心负责信息科技、生物科技等科技创新领域的战略情报研究；武汉文献情报中心负责先进能源科技、先进制造与先进材料科技等科技创新领域的战略情报研究；上海生命科学信息中心负责生命科学及人口健康与医药科技等科技创新领域的战略情报研究。基于上述统筹规划，形成了覆盖主要科技创新领域的10个学科领域科技战略情报研究团队体系。服务体系建设、决策需求导向、科技前沿聚焦、专业战略分析、政策咨询研究的发展机制和措施，促进了这些学科领域科技战略情报研究与决策咨询专业化知识服务中心的快速成长和发展。

从2006年起，我们部署这些学科领域科技战略情报研究团队，围绕各自分工关注的科技创新领域的科技发展态势，结合中国科学院和我国科技创新的决策需求，每年选择相应科技创新领域的前沿科技问题或热点科技方向，开展国际科技发展态势的系统战略分析研究，汇编形成年度“国际科学技术前沿报告”，呈交中国科学院有关部门、研究所和国家相关科技管理部门，以供科技发展的相关决策参考。从2010年开始，完成的研究报告《国际科学技术前沿报告2010》《国际科学技术前沿报告2011》《国际科学技术前沿报告2012》《国际科学技术前沿报告2013》《国际科学技术前沿报告2014》等公开出版，供更广泛的科研人员和科技管理人员参考。“国际科学技术前沿报告”的逻辑框架特色鲜明，不同于现有的其他相关的类似科技前沿发展报告，其中收录的专题领域科技发展态势分析

报告,从相应领域的科技战略与规划、前沿热点与进展、发展态势与趋势、发展启示与建议等方面予以系统分析,定性定量结合、战略政策结合、启示建议结合。各年度的“国际科学技术前沿报告”汇集在一起,就形成了各相关科技领域前沿问题与方向发展的百科全书,对相关科技领域的发展战略研究、科技前沿分析、科技发展决策等具有重要参考咨询价值。

2015年,我们继续部署这些学科领域战略情报研究团队,选择相应科技创新领域的前沿学科、热点问题或重点技术领域,开展国际发展态势分析研究,完成这些研究领域的分析研究报告11份。院文献情报中心完成《拓扑绝缘体国际发展态势分析》《甲烷催化转化制乙烯国际发展态势分析》《农药残留快速检测技术国际发展态势分析》和《空间生命科学研究国际发展态势分析》;兰州文献情报中心完成《城市化研究国际发展态势分析》和《海底热液系统研究国际发展态势分析》;成都文献情报中心完成《生物基材料科技国际发展态势分析》和《神经形态计算研究国际发展态势分析》;武汉文献情报中心完成《钙钛矿太阳能电池国际发展态势分析》和《海洋防腐涂料国际发展态势分析》;上海生命科学信息中心完成《非编码RNA国际发展态势分析》。本书将这11份前沿学科、热点问题或技术领域的国际发展态势分析报告汇编为《国际科学技术前沿报告2015》正式出版,以供科技创新决策部门和科研管理部门、相关领域的科研人员和科技战略研究人员参考。

面对国家深入实施创新驱动发展战略、深化科技体制机制改革、加快建设中国特色新型智库、全面推进发展科技咨询服务业发展的新形势,以及大数据信息环境和知识服务环境持续快速调整变化的新挑战,围绕有效支撑和服务国家和中国科学院的科技战略研究、科技发展规划和科技战略决策的新需求,适应数字信息环境和数据密集型科研新范式的新趋势,中国科学院文献情报系统的科技战略研究咨询工作,将进一步面向前沿、面向需求、面向决策,着力推动建设科技战略情报研究的新型决策知识服务发展模式,着力推动开展专业型、计算型、战略型、政策型和方法型的战略情报分析和科技战略决策咨询研究,实时持续监测和系统分析国际最新科技进展、重要国家和国际组织关注的重要科技问题,系统开展科技热点和前沿进展、科技发展战略与规划、科技政策与科技评价等方面的研究和分析,及时把握科技发展新趋势、新方向和新变革,及时揭示国际科技政策、科技管理发展的新动态与新举措,为重大咨询研究、学科战略研究、科技领域战略研究、科技政策研究等提供战略情报分析和知识计算服务,在中国科学院科技战略咨询研究院的建设和发展中发挥不可替代的作用。

中国科学院文献情报系统的战略情报研究服务工作,一直得到中国科学院领导和院有关部门的指导和支持,得到院属有关研究所科技战略专家的指导和帮助,以及科技部、国家自然科学基金委员会等部门领导和专家的大力支持和指导,得到相关科技领域的专家学者的指导和参与,在此特别表示感谢!衷心希望我们的工作能够继续得到中国科学院和国家有关部门领导和战略研究专家的大力指导、支持和帮助。

国际科学技术前沿报告研究组

2015年5月20日

目 录

1 拓扑绝缘体国际发展态势分析	1
1.1 引言	1
1.2 世界各国拓扑绝缘体研究现状	2
1.3 拓扑绝缘体研究论文计量分析	8
1.4 拓扑绝缘体专利分析	15
1.5 研究总结与建议	17
2 甲烷催化转化制乙烯国际发展态势分析	21
2.1 引言	22
2.2 甲烷氧化偶联制乙烯国际发展态势分析	26
2.3 甲烷无氧催化转化制乙烯研究进展	42
2.4 总结和建议	42
3 钙钛矿太阳能电池国际发展态势分析	47
3.1 引言	48
3.2 主要国家/地区竞争力分析	50
3.3 关键前沿技术与发展趋势	55
3.4 研发创新能力定量分析	60
3.5 我国研究现状及发展展望	68
4 非编码 RNA 国际发展态势分析	76
4.1 引言	77
4.2 国际重要政策规划与资助	78
4.3 非编码 RNA 相关科学计量分析	95
4.4 建议	108
5 农药残留快速检测技术国际发展态势分析	112
5.1 引言	113
5.2 农药残留快速检测技术体系分类	115
5.3 农药残留快速检测技术研究论文分析	119
5.4 农药残留快速检测技术专利分析	132
5.5 我国农药残留快速检测技术的研发布局	139

5.6	我国农药残留快速检测技术行业的战略分析	143
5.7	结论与建议	145
6	生物基材料科技国际发展态势分析	154
6.1	引言	155
6.2	国际生物基材料科技规划	155
6.3	国际生物基材料研究与应用现状	162
6.4	国际生物基材料产业发展态势	183
6.5	总结与建议	192
7	城市化研究国际发展态势分析	198
7.1	引言	199
7.2	城市化领域研究发展态势	200
7.3	城市化研究文献计量分析	217
7.4	城市化研究的前沿热点	225
7.5	对我国新型城镇化研究的启示	235
8	海底热液系统研究国际发展态势分析	242
8.1	引言	243
8.2	国际主要研究计划和行动	245
8.3	国际海底热液研究文献计量分析	254
8.4	海底热液研究内容及现状	267
8.5	海底热液主要研究热点	271
8.6	国际海底热液研究发展态势	276
8.7	国际海底热液研究对我国的启示	278
9	海洋防腐涂料国际发展态势分析	283
9.1	引言	284
9.2	国内外海洋开发及海工装备战略与计划	285
9.3	海工装备及涂料市场现状	288
9.4	海洋防腐涂料研究进展	290
9.5	海洋防腐涂料相关专利计量分析	297
9.6	结语与启示	304
10	神经形态计算研究国际发展态势分析	308
10.1	引言	309
10.2	重要机构与研发计划	312
10.3	技术研发态势分析	324
10.4	总结与建议	341



11 空间生命科学研究前沿发展态势分析 349

11.1 引言 349

11.2 主要国家和国际组织空间生命科学发展战略和计划 350

11.3 空间生命科学领域研究与产出发展态势 367

11.4 空间生命科学未来任务部署与展望 382

11.5 启示与建议 390

彩图

1 拓扑绝缘体国际发展态势分析

黄龙光 刘小平 冷伏海

(中国科学院文献情报中心)

摘 要 拓扑绝缘体是最近几年发现的一种全新的量子物态,是目前凝聚态物理学最活跃的研究前沿之一。拓扑绝缘体研究不仅对探索 and 发现新的量子现象具有重要意义,而且具有巨大的应用前景和市场潜力,因此各国政府制订了一系列针对拓扑绝缘体的研发计划。美国通过国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 和美国能源部 (United States Department of Energy, DOE) 等机构进行了部署,已形成“自由探索—器件开发—能源应用”的研究体系,中国通过国家自然科学基金委员会 (简称基金委)、科技部和中国科学院等机构对拓扑绝缘体开展了深入研究,日本、德国和欧盟也都设立了重大研究计划对拓扑绝缘体进行重点研究。

本报告对拓扑绝缘体研究论文和专利进行了定量分析,发现世界各国对拓扑绝缘体研究保持了很高的热度。美国和中国是研究论文发表最多的国家,是在拓扑绝缘体研究领域的科研活动最活跃的两个国家。中国科学院和斯坦福大学是拓扑绝缘体论文发表最多的机构。拓扑绝缘体相关技术的专利申请在 2010 年后才出现,其专利受理主要集中在中国国家知识产权局和美国专利商标局。专利申请量最多的 3 个专利权人都是中国的机构,这反映出中国科学家对拓扑绝缘体专利的重视。目前,拓扑绝缘体专利申请的主要技术方向包括半导体器件、非金属元素的二元化合物、纳米结构的制造或处理、晶体生长、霍尔效应器件、激光器等。

基于这些特点,本报告建议,中国应从国家层面对拓扑绝缘体研究进行战略布局,打造从基础研究到应用的全方位研究体系;集中资源和力量,力争取得重大原创性突破;积极开发关键技术,建立核心专利保护网,力争在未来的电子产业应用中处于领先地位。

关键词 拓扑绝缘体 量子自旋霍尔效应 量子反常霍尔效应 自旋-轨道耦合
文献计量

1.1 引言

拓扑绝缘体是最近几年发现的一种全新的量子物态,是目前凝聚态物理学最活跃的研究

前沿之一。简单而言,拓扑绝缘体是一种内部绝缘、表面导电的材料。拓扑绝缘体的这种特性,即其表面金属态是由材料的体电子态的拓扑性质决定的,与表面的具体结构无关,因此该表面金属态的存在非常稳定,基本不受材料中杂质和材料所处外在条件的影响。拓扑绝缘体研究对探索和发现新的量子现象具有重要意义,如量子反常霍尔效应、拓扑超导态、马约拉纳(Majorana)费米子和磁单极等。此外,拓扑绝缘体在未来电子技术中有很好的应用前景,如低损耗输运、高速晶体管、抗干扰自旋电子学器件,甚至是拓扑量子计算机等。

拓扑绝缘体的发现可追溯到2005年,美国宾夕法尼亚大学的Kane和Mele在理论上设想量子自旋霍尔态,并指出在石墨烯中有可能观察到量子自旋霍尔效应(Kane and Mele, 2005)。量子自旋霍尔效应系统实际上就是一种二维拓扑绝缘体,它的发现大大促进了拓扑绝缘体研究的开展。2006年,斯坦福大学的Bernevig、Hughes和张守晟提出了理论预测,二维拓扑绝缘体能在HgTe/CdTe量子阱中实现(Bernevig et al., 2006)。2007年,德国的Möllenkamp研究组与张守晟研究组通过实验证实了这一理论预测(König et al., 2007)。

2007年,宾夕法尼亚大学的Fu、Kane和Mele将量子自旋霍尔效应的概念从二维推广到三维情况,在理论上预言了一种新的拓扑绝缘态,称为强拓扑绝缘体(Fu et al., 2007),并预测了合金 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 是一种三维拓扑绝缘体。2008年,普林斯顿大学Hasan研究组实验验证了这种三维拓扑绝缘体 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ (Hsieh et al., 2009)。2009年,中国科学院物理研究所的方忠、戴希与张守晟等合作,通过计算预测了一类新的拓扑绝缘体: Bi_2Se_3 、 Bi_2Te_3 及 Sb_2Te_3 (Zhang et al., 2009)。几乎同时,普林斯顿大学的Xia等(2009)实验验证了这一类拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 。此外,在三元化合物如 GeBi_2Te_4 、 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ 、 $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 、 TlBiSe_2 等体系中也发现了强的自旋轨道耦合效应和拓扑表面态,它们也属于拓扑绝缘体家族。2010年,中国科学院物理研究所方忠、戴希等理论预言了磁性拓扑绝缘体薄膜中的量子反常霍尔效应(Yu et al., 2010)。2013年,中国科学院物理研究所何珂等与清华大学物理系薛其坤等合作,在拓扑绝缘体磁性薄膜中观测到了“量子反常霍尔效应”(Chang et al., 2013)。这项工作被*Science*杂志誉为“凝聚态物理界一项里程碑式的工作”,被杨振宁教授称为“第一次从中国实验室里发表的诺贝尔奖级的物理学论文”。最近几年来,拓扑绝缘体的领域又不断被扩展,发现了众多的拓扑量子态,包括拓扑晶体绝缘体、拓扑半金属、拓扑超导等。

至今,全球掀起的拓扑绝缘体研究热潮仍在持续。Kane和张守晟等由于在拓扑绝缘体方面的杰出贡献,获得了2010年欧洲物理学会的“凝聚态物理奖”,2012年美国物理学会的“奥利弗巴克利凝聚态物理奖”(凝聚态物理领域的最高奖)和联合国教育、科学及文化组织(简称联合国教科文组织)国际理论物理学中心的“狄拉克奖”(国际理论物理学领域最高奖),2013年的“尤里基础物理学前沿奖”。2014年,拓扑绝缘体成为“诺贝尔物理学奖”的热门候选。

1.2 世界各国拓扑绝缘体研究现状

由于拓扑绝缘体具有潜力巨大的应用前景,所以欧盟、美国、日本、德国和中国等多个国家和组织制订了一系列针对拓扑绝缘体的研发计划,投入大量资金资助拓扑绝缘体研究。美国通过NSF、DARPA和DOE等机构形成了“自由探索—器件开发—能源应用”的

研究体系，多方位地促进了拓扑绝缘体的研究。欧盟、日本、德国和中国在大力支持自由探索研究的同时，设立了一些重大研究计划，以对拓扑绝缘体进行重点研究。

1.2.1 美国

美国投入巨资支持拓扑绝缘体的研究，主要资助机构为 NSF、DARPA 和 DOE。

1.2.1.1 NSF

NSF 对拓扑绝缘体相关项目的资助较早地出现在 2006 年，截至 2014 年年底，NSF 对拓扑绝缘体相关项目的总资助金额为 8100 多万美元。

2006 年获 NSF 资助的项目是宾夕法尼亚大学 Kane 的“石墨烯理论和自旋霍尔效应”项目，资助金额为 24 万美元。2008 年，NSF 对普林斯顿复合材料中心进行了大力资助，资助金额为 2010 万美元，资助期限为 2008 ~ 2015 年。NSF 资助普林斯顿复合材料中心研究跨学科材料研究中的重要问题，石墨烯、铋锑合金等“狄拉克材料”是其主要研究方向之一，以直接验证拓扑绝缘体。随后，NSF 对拓扑绝缘体相关项目的资助持续增加，从 2011 年起，资助的项目数大幅增长（图 1-1），每年的资助金额也都超过了 1000 万美元。

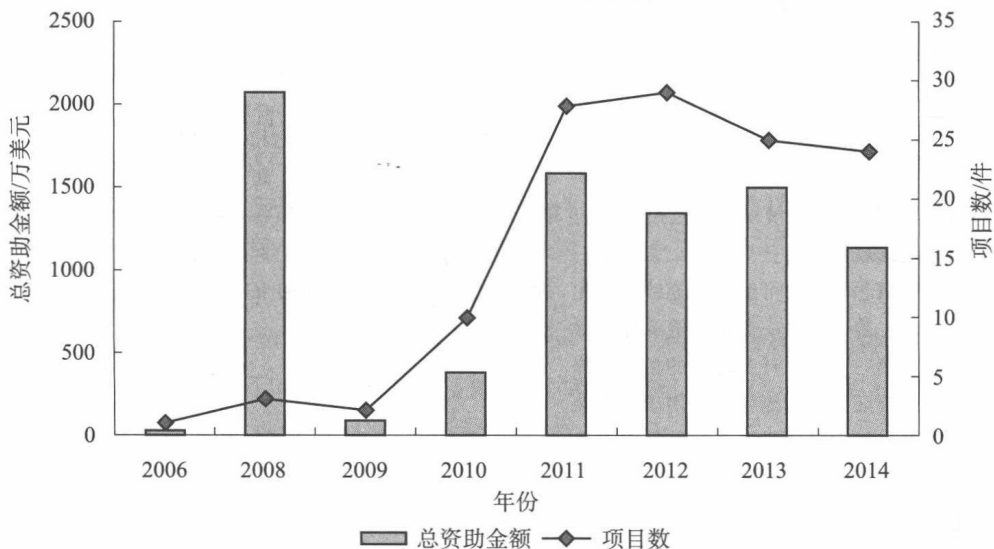


图 1-1 NSF 对拓扑绝缘体的资助情况

1.2.1.2 DARPA

2010 年 10 月，DARPA 设立了介观动力学结构（Meso）计划，旨在通过利用量子的集体行为，实现新一代的传感、通信和计算。Meso 计划将在晶体管、宽带探测器和高效热导体等一系列器件和技术上使其超越传统的功能，大多数器件的大小是在介于微米和纳米之间的介观尺度，且在室温下操作。Meso 计划开发最近发现的拓扑绝缘物态并在 4 个方面加以使用：介观尺度固有的强非线性和波动、量子集体行为、场和激发（声学、电学和光学的）之间的高效信息转导，以及相干反馈控制。Meso 计划还利用在非常小的机械系统、非线性动力学和



噪声管理等方面的最新进展，以变革相关振荡器的性能。由于振荡器是现代电子工业的基本组件，它们在频率上产生的任何不确定性将限制较大系统的性能，如雷达、通信、传感器和地理定位设备等。Meso 计划的目标新器件为军事和商业领域提供了新的机遇。

Meso 计划设立时，预计资助金额为 5500 万美元，事实上，该计划获得的资助大大超过了这一预算。2010 财年，Meso 计划获得了 888.9 万美元的资助，2011 财年为 2080.9 万美元，2012 财年为 2582.2 万美元，2013 财年为 1313.9 万美元，2014 财年的预算为 1300 万美元。Meso 计划实施了 5 年，已取得了一系列的成果，表 1-1 列出了 Meso 计划历年相关的目标和取得的成果。可以看出，DARPA 已经从拓扑绝缘体的物理学研究走向了基于拓扑绝缘体的场效应晶体管的研制，乃至基于拓扑绝缘体的热电器件的原型制造。

表 1-1 Meso 计划历年的目标和取得的成果

财年	已取得的成果	下一年的计划	再下一年的计划
2012	2011 财年：Meso 计划对拓扑绝缘体的物理学进行了研究，用该技术生产的传输电力和信息的互连线比现有最好的技术低几个数量级的功率和损耗；重现了第一个可以通过外加电压来控制其磁化方向的磁体，该磁体与拓扑表面态一起将可以产生超低功率的晶体管，有助于超越摩尔定律；制造了第一个基于拓扑绝缘体的场效应晶体管	2012 财年计划：优化拓扑绝缘体材料的性能；改善材料的表面传导，同时减少其块体传导；开发和测试拓扑绝缘体、绝缘体晶体管和互连线的第一个原型	2013 财年计划：大规模优化和集成材料以实现磁性门控、超低功率、超高转换速度的拓扑元件的超低损耗、可编程的互连线
2013	2012 财年：进一步理解了拓扑绝缘体的性质；减少了 100 多倍块体杂质，将表面对块体的载流率提高了 10 倍多；通过用磁场打开了拓扑绝缘表面态的一个间隙，在实现一个新晶体管概念和新的可编程互连线上走出了关键一步；验证了第一个拓扑绝缘体场效应晶体管和第一个由磁开关控制的拓扑绝缘体晶体管；验证了拓扑绝缘体可用于热电装置，该装置将可能提供比现有最好技术水平高 10 ~ 1000 倍的更有效的电子冷却	2013 财年计划：大规模优化和集成材料以实现磁性门控、超低功率、超高转换速度的拓扑绝缘体晶体管以及用于电子元件的超低损耗、可编程的互连线	2014 财年计划：验证磁性门控、超低功率（0.1 伏）、超高转换速度（1 纳秒）的拓扑绝缘体晶体管；验证用于电子元件的超低损耗（比 10 微米铜的损耗低 4 倍以上）、可编程的互连线，该互连线的电阻将与其长度无关，可减少长距离耗散；验证比现有最好技术水平高 10 ~ 1000 倍的热互连线
2014	2013 财年：制造出首个门可调（gate-tunable）拓扑绝缘体表面态热电器件的初始原型	2014 财年计划：验证超低损耗、基于拓扑绝缘体的互连线的可编程性，并验证整个互补金属氧化物半导体（CMOS）的集成；验证超低功率、超高转换速度的磁性拓扑绝缘体晶体管，并优化每个操作的能量以获得优于在 CMOS 中实现 1000 倍的性能	

1.2.1.3 DOE

2012 财年，DOE 对基础能源科学部分项目进行了调整，设立了“凝聚态物理与材料

物理研究”项目来推进对凝聚态物质和介观尺度材料的了解，从而促进对能源技术基础设施的发展。该年，DOE 投入了 1.24 亿美元对多种材料进行了研究，拓扑绝缘体和石墨烯等新材料是三大方向之一。2013 财年，DOE 继续聚焦拓扑绝缘体和石墨烯等新材料的理论和实验研究以及其他四个方面的材料的研究，资助金额为 1.49 亿美元。2014 财年，DOE 聚焦的是展现拓扑表面态新现象的材料的研究，以及新理论工具和材料发现的验证软件的开发。连同其他 3 个方面材料的研究，资助金额为 1.25 亿美元。

1.2.2 欧盟

近年来，欧盟加大了对拓扑绝缘体的资助力度，特别是 2010 年之后，主要通过第七框架计划（FP7）进行。2010~2014 年，FP7 对拓扑绝缘体相关项目的总资助金额为 3100 多万欧元。下面是资助力度较大的几个项目。

（1）探索三维拓扑绝缘体的物理学：资助金额为 242 万欧元，旨在找出能解决拓扑绝缘体表面态的输运特性和磁性的方法。首先，通过分子束外延，生长出高质量的 HgTe 、 Bi_2Se_3 和 Bi_2Te_3 薄膜，然后用光谱学方法分析相关的表面态，随后将侧重于制造和表征纳米结构以阐明拓扑表面的输运特性和磁性。除了采用常见的表征表面态的狄拉克带结构的方法，还将重点预测系统对测试电荷的磁性类单极子响应。此外，还将表面态与超导薄膜和磁性薄膜接触，以验证马拉约纳费米子的行为。

（2）狄拉克材料：资助金额为 170 万欧元，旨在应用狄拉克材料电子光谱中节点的敏感性来控制狄拉克点/狄拉克线的修饰。狄拉克材料，如最近发现的石墨烯和拓扑绝缘体，由于其电子的相对狄拉克分散使得功能材料和器件应用有了新的功能，显示了其巨大的科学重要性和技术前景。该项目将深化对狄拉克材料的理论研究，引导对材料和定制的几何结构的设计，从而实现狄拉克载流子的能量可调。

（3）拓扑绝缘体的计算探索：资助金额为 164.4 万欧元，旨在通过计算机模拟来探索拓扑绝缘体的特性。整体目标是通过研究拓扑绝缘体的材料科学、化学和器件相关方面，提供理论支持，以建立拓扑绝缘体的基础物理特性及其未来技术应用之间的联系，主要包括 3 个研究方向：①通过拓扑非平凡电子结构，了解拓扑绝缘体的结构性能与合理设计；②模拟真实的造型逼真的第二代拓扑绝缘体（铋硫化合物 Bi_2Se_3 、 Bi_2Te_3 及相关材料）；③研究拓扑绝缘体的磁性和输运特性以及其与器件应用相关的界面。

（4）拓扑约瑟夫森器件：资助金额为 199.9 万欧元，旨在实现一个可探测和控制非阿贝尔任意子的平台。该项目希望能人工创建约瑟夫森旋涡并控制和混合多个马拉约纳态，从而证明它们的非阿贝尔任意子特征。因此，该项目先通过邻近效应在拓扑绝缘体中引入超导性，随后开发出具有更高表面迁移性的拓扑绝缘体材料。

1.2.3 日本

日本学术振兴会对拓扑绝缘体相关项目的资助较早地出现在 2007 年（图 1-2），截至 2014 年年底，日本学术振兴会对拓扑绝缘体相关项目的总资助金额为 33.5 亿日元。



2009 ~ 2010 年，总资助金额大幅增加，资助的项目数持续增长中。2010 ~ 2011 年，总资助金额明显下降，但资助的项目数继续增加。

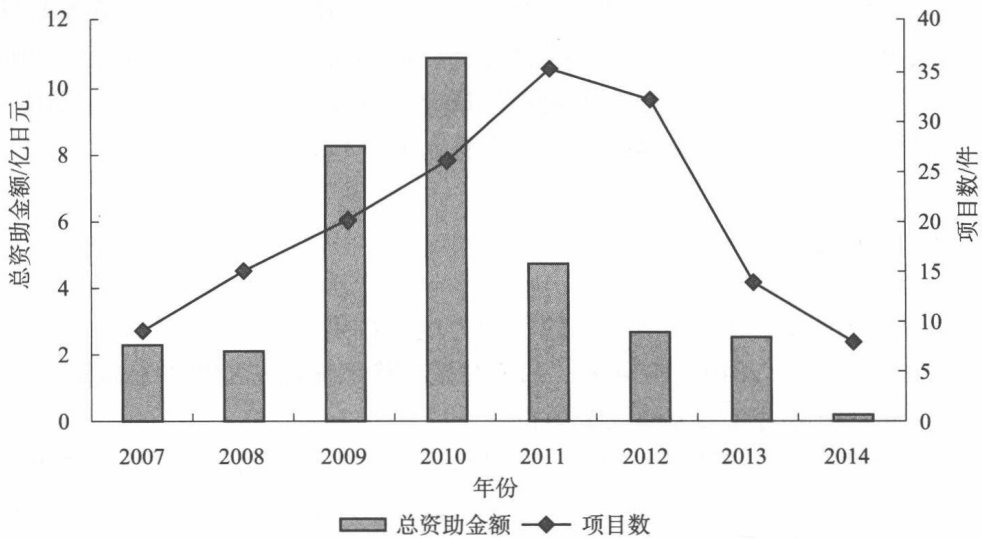


图 1-2 日本学术振兴会对拓扑绝缘体的资助情况

2009 年，日本学术振兴会投入 1000 亿日元设立了“世界一流科学技术创新研究资助计划”（FIRST），旨在推动日本的前沿研究。“强相关量子科学”是该计划资助的 30 个项目之一，资助金额为 30.99 亿日元，拓扑绝缘体表面态的电子结构以及拓扑绝缘体的界面、表面和边界态的理论研究是其研究重点之一。

1.2.4 德国

2009 ~ 2011 年，德国德意志研究联合会（DFG）在“电子结构的多体效应和半导体表面吸附物的超导性”“拓扑电子学”“新型低维半导体中的自旋电子学”等项目中支持了一些与拓扑绝缘体相关的研究。2013 年，DFG 设立了为期 6 年的优先领域项目“拓扑绝缘体：材料—基础特性—器件”，从 3 个方面来实现拓扑绝缘体的重大突破：①改进现有的拓扑绝缘体材料；②基础特性和器件结构；③新的拓扑绝缘体材料和新概念。目前，该项目设立了 36 个子项目，其子项目名称见表 1-2。根据 DFG 的 2013 年年报，优先领域项目的平均资助金额为 1800 多万欧元。

表 1-2 DFG 优先领域项目的 36 个子项目名称

HgMnTe 量子阱的量子自旋霍尔和量子反常霍尔效应	三维拓扑绝缘体运输的表面态和块体态特点	拓扑 Heusler 材料薄膜	拓扑绝缘体螺旋边界态的可控电荷和自旋电流
HgTe 拓扑绝缘体纳米线	三维拓扑绝缘体薄膜中电流诱导的自旋极化	拓扑表面态的定向太赫兹自旋电流研究	单晶 Bi ₂ Te ₃ 和 Bi ₂ Se ₃ 纳米线作为拓扑绝缘体材料：合成和性质
HgTe 线的自旋轨道相互作用	双层拓扑绝缘体的激子凝聚	拓扑保护电子对缺陷的自旋散射	铋基拓扑绝缘体的自旋和电荷输运

续表

二维拓扑绝缘体中的通 用螺旋液体：运输特性 与应用	协调项目	拓扑绝缘体中的超快载 体动力学	基于铋、铅和铊的三元硫属化合物 的新拓扑绝缘体
二维拓扑绝缘体材料 I- nAs/GaSb/AlSb 和器件	优化拓扑绝缘体和超导体之 间的界面：以助于马约拉纳 费米子的局部探测	拓扑绝缘体光探针理论	基于新型弱三维拓扑绝缘体 $\text{Bi}_{14}\text{Rh}_3\text{I}_9$ 的拓扑绝缘体的设计、合成、 优化和特性
二维拓扑绝缘体的磁性 输运和介观干涉现象	低温原子层沉积/外延的费 米能级调谐	拓扑绝缘体表面吸附物 的几何结构和电子结构 的关联	蜂窝过渡金属氧化物的拓扑相
二维和三维拓扑绝缘体 中太赫兹/微波辐射引 起的高频非线性传输	库伦阻塞拓扑绝缘体纳米线 中马约拉纳费米子的输运 特征	拓扑绝缘体的电子、磁 性和输运特性：从头计 算描述	新拓扑绝缘体的自旋分辨和角分辨 紫外线电子能谱
三维拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 纳米结构中的量子相干	纳米结构拓扑绝缘体一维边 界态的电子特性和输运特性 的第一性原理研究	拓扑绝缘体的非平衡和 局部光电动力学	磁掺杂拓扑绝缘体：表面态、维度 和缺陷影响
三维拓扑绝缘体的分子 束外延	表面掺杂和体掺杂拓扑绝缘 体的准粒子干涉	拓扑绝缘体的量子传输	磁掺杂拓扑绝缘体的自旋分辨扫描 隧道谱 STS、角分辨光电子能谱 ARPES 和 X 射线磁性圆二色 XMCD

1.2.5 中国

我国对拓扑绝缘体的研究也非常重视。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》和《国家“十二五”科学和技术发展规划》都把拓扑绝缘体研究列为量子调控研究的重点之一。近年来，国家重点基础研究发展计划（973 计划）的量子调控研究重大科学研究计划支持了一系列与拓扑绝缘体相关的项目，如“新型量子功能体系的物性表征及其材料探索”“以 Dirac 系统为代表的低维量子体系的新奇量子现象研究”“功能关联电子材料及其低能激发与拓扑量子性质的调控研究”“新型低维体系量子输运和拓扑态的研究”等，“量子有序现象及其外场调控”资助金额都在 1000 万元以上。

从 2011 年开始，基金委在物理 I 领域增设研究方向“拓扑绝缘体材料制备及物性研究”；从 2012 年开始，拓扑绝缘体的研究列入了“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划。2011~2014 年，基金委已资助了 140 多个拓扑绝缘体相关项目，总资助金额为 2.0 亿元。从图 1-3 可以看出，每年的资助金额都在 2000 万元以上，其中，2014 年的资助金额为 1.3 亿元，这是因为 2014 年资助了一个国家重大科研仪器研制项目“低维量子物质非平衡态物理性质原位综合实验研究平台的研制”，资助金额为 9800 万元。

《中国科学院“十二五”发展规划纲要》将拓扑绝缘体列为要力争取得的重大原始性突破之一。2014 年 4 月，中国科学院战略性先导科技专项（B 类）“拓扑与超导新物态调控”启动，主要设立三个研究方向，其中之一是拓扑有序态与新奇量子现象研究，旨在培

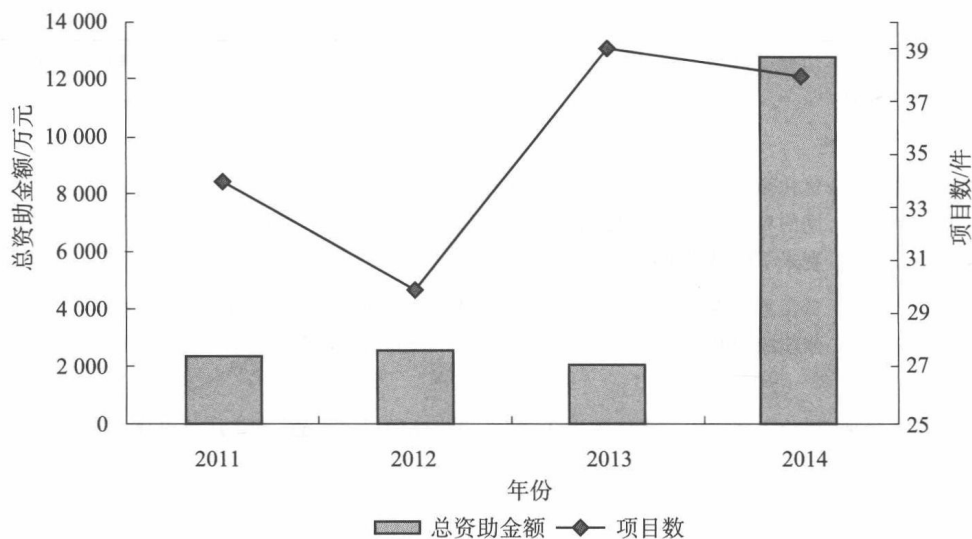


图 1-3 基金委对拓扑绝缘体的资助情况

养出一批国际领军科学家，形成国际化研究中心，引领国际拓扑领域发展方向，实现重大突破，占领国际制高点。

1.3 拓扑绝缘体研究论文计量分析

美国科学引文索引（Science Citation Index，SCI）的学术论文作为重要科研成果的载体，为分析学术领域研究动态提供了一条有效途径。通过 SCI 论文计量分析，可以反映该研究领域的研发态势。本报告以汤森路透集团的 Web of Science（WoS）数据库作为分析数据源，通过建立检索策略，并利用分析工具汤森数据分析器（Thomson Data Analyzer，TDA）分析了 1980 ~ 2014 年拓扑绝缘体领域的 SCI 论文，数据采集时间为 2014 年 12 月。根据数据的实际情况，该领域从 2005 年开始才有数据，因此，实际分析的是 2005 ~ 2014 年拓扑绝缘体领域的 SCI 论文情况。

1.3.1 论文数量的年度变化趋势

在拓扑绝缘体研究中，2005 ~ 2014 年 SCI 论文的年度变化如图 1-4 所示，可以看出，2005 ~ 2008 年的拓扑绝缘体研究处于起步阶段，论文数量很少；2009 ~ 2011 年，拓扑绝缘体研究处于一个发展阶段，发文量整体呈快速增长趋势；2012 年至今，论文数量暴增，是一个快速增长阶段，2014 年论文数量最多。结合拓扑绝缘体的发展历史来看，从二维拓扑绝缘体理论预测和实验验证，到三维拓扑绝缘体的理论预测和实验验证，乃至基于拓扑绝缘体预言的一系列新奇物理现象，都使得拓扑绝缘体的研究热度持续上涨。此外，2010 ~ 2014 年各国出台的拓扑绝缘体相关计划对该研究的开展也起到了一定的促进作用。