

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

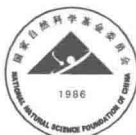
能源化学

国家自然科学基金委员会
中国科学院



科学出版社

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

能源化学

国家自然科学基金委员会
中国科学院

科学出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

能源化学 / 国家自然科学基金委员会, 中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2018.1

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-054485-8

I. ①能… II. ①国… ②中… III. ①能源—应用化学 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第227228号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 朱萍萍 孙静惠 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张欣秀 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

联系电话: 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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年1月第一次印刷 印张: 20 1/2

字数: 355 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国学科发展战略

联合领导小组

组 长：陈宜瑜 张 涛
副 组 长：秦大河 姚建年
成 员：王恩哥 朱道本 傅伯杰 李树深 杨 卫
武维华 曹效业 李 婷 苏荣辉 高瑞平
王常锐 韩 宇 郑永和 孟庆国 陈拥军
杜生明 柴育成 黎 明 秦玉文 李一军
董尔丹

联合工作组

组 长：李 婷 郑永和
成 员：龚 旭 孟庆峰 吴善超 李铭禄 董 超
孙 粒 苏荣辉 王振宇 钱莹洁 薛 淮
冯 霞 赵剑峰

中国学科发展战略·能源化学

项 目 组

项目负责人：田中群 包信和

项目组成员（以姓氏笔画为序）：

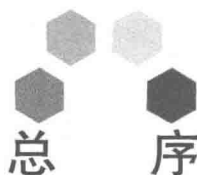
万立骏 王 野 庄 林 刘会洲 刘昌俊
刘海超 齐 飞 张华民 陈 军 郑南峰
赵东元 程 俊 谢 毅

青年工作组成员（以姓氏笔画为序）：

王 华 方晓亮 李先锋 张 凡 张庆红
郑永红 郭玉国 程方益 傅 强 詹东平
熊宇杰 潘 洋

项目组秘书（以姓氏笔画为序）：

刘 波 连 伟 赵凌潇 姜秀美



白春礼 杨卫

17 世纪的科学革命使科学从普适的自然哲学走向分科深入，如今已发展成为一幅由众多彼此独立又相互关联的学科汇就的壮丽画卷。在人类不断深化对自然认识的过程中，学科不仅仅是现代社会中科学知识的组成单元，同时也逐渐成为人类认知活动的组织分工，决定了知识生产的社会形态特征，推动和促进了科学技术和各种学术形态的蓬勃发展。从历史上看，学科的发展体现了知识生产及其传播、传承的过程，学科之间的相互交叉、融合与分化成为科学发展的重要特征。只有了解各学科演变的基本规律，完善学科布局，促进学科协调发展，才能推进科学的整体发展，形成促进前沿科学突破的科研布局和创新环境。

我国引入近代科学后几经曲折，及至上世纪初开始逐步同西方科学接轨，建立了以学科教育与学科科研互为支撑的学科体系。新中国建立后，逐步形成完整的学科体系，为国家科学技术进步和经济社会发展提供了大量优秀人才，部分学科已进入世界前列，有的学科取得了令世界瞩目的突出成就。当前，我国正处在从科学大国向科学强国转变的关键时期，经济发展新常态下要求科学技术为国家经济增长提供更强劲的动力，创新成为引领我国经济发展的新引擎。与此同时，改革开放 30 多年来，特别是 21 世纪以来，我国迅猛发展的科学事业蓄积了巨大的内能，不仅重大创新成果源源不断产生，而且一些学科正在孕育新的生长点，有可能引领世界学科发展的新方向。因此，开展学科发展战略研究是提高我国自主创新能力、实现我国科学由“跟跑者”向“并行者”和“领跑者”转变的

一项基础工程,对于更好把握世界科技创新发展趋势,发挥科技创新在全面创新中的引领作用,具有重要的现实意义。

学科发展战略研究的核心是结合科学技术和经济社会的发展需求,在分析科学前沿发展趋势的基础上,寻找新的学科生长点和方向。在这个过程中,战略科学家的前瞻引领作用十分重要。科学史上这样的例子比比皆是。在1900年8月巴黎国际数学家代表大会上,德国数学家戴维·希尔伯特发表了题为“数学问题”的著名讲演,他根据过去特别是19世纪数学研究的成果和发展趋势,提出了23个最重要的数学问题,即“希尔伯特问题”。这些“问题”后来成为许多数学家力图攻克的难关,对现代数学的研究和发展产生了深刻的影响。1959年12月,美国物理学家、诺贝尔奖得主理查德·费曼在加利福尼亚理工学院举行的美国物理学会年会上发表了题为“物质底层大有空间——一张进入物理新领域的请柬”的经典讲话,对后来出现的纳米技术作出了天才的预见。

学科生长点并不完全等同于科学前沿,其产生和形成不仅取决于科学前沿的成果,还决定于社会生产和科学发展的需要。1841年,佩利戈特用钾还原四氯化铀,成功地获得了金属铀,可在很长一段时间并未能发展成为学科生长点。直到1939年,哈恩和斯特拉斯曼发现了铀的核裂变现象后,人们认识到它有可能成为巨大的能源,这才形成了以铀为主要对象的核燃料科学的学科生长点。而基本粒子物理学作为一门理论性很强的学科,它的新生长点之所以能不断形成,不仅在于它有揭示物质的深层结构秘密的作用,而且在于其成果有助于认识宇宙的起源和演化。上述事实说明,科学在从理论到应用又从应用到理论的转化过程中,会有新的学科生长点不断地产生和形成。

不同学科交叉集成,特别是理论与实验科学相结合,往往也是新的学科生长点的重要来源。新的实验方法和实验手段的发明,大科学装置的建立,如离子加速器、中子反应堆、核磁共振仪等技术方法,都促进了相对独立的新学科的形成。自20世纪80年代以来,具有费曼1959年所预见的性能、微观表征和操纵技术的

仪器——扫描隧道显微镜和原子力显微镜终于相继问世，为纳米结构的测量和操纵提供了“眼睛”和“手指”，使得人类能更进一步认识纳米世界，极大地推动了纳米技术的发展。

作为国家科学思想库，中国科学院（以下简称中科院）学部的基本职责和优势是为国家科学选择和优化布局重大科学技术发展方向提供科学依据、发挥学术引领作用，国家自然科学基金委员会（以下简称基金委）则承担着协调学科发展、夯实学科基础、促进学科交叉、加强学科建设的重大责任。继基金委和中科院于2012年成功地联合发布“未来10年中国学科发展战略研究”报告之后，双方签署了共同开展学科发展战略研究的长期合作协议，通过联合开展学科发展战略研究的长效机制，共建共享国家科学思想库的研究咨询能力，切实担当起服务国家科学领域决策咨询的核心作用。

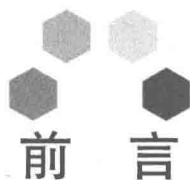
基金委和中科院共同组织的学科发展战略研究既分析相关学科领域的发展趋势与应用前景，又提出与学科发展相关的人才队伍布局、环境条件建设、资助机制创新等方面的政策建议，还针对某一类学科发展所面临的共性政策问题，开展专题学科战略与政策研究。自2012年开始，平均每年部署10项左右学科发展战略研究项目，其中既有传统学科中的新增长点或交叉学科，如物理学中的软凝聚态物理、化学中的能源化学、生物学中生命组学等，也有面向具有重大应用背景的新兴战略研究领域，如再生医学、冰冻圈科学、高功率、高光束质量半导体激光发展战略研究等，还有以具体学科为例开展的关于依托重大科学设施与平台发展的学科政策研究。

学科发展战略研究工作沿袭了由中科院院士牵头的方式，并凝聚相关领域专家学者共同开展研究。他们秉承“知行合一”的理念，将深刻的洞察力和严谨的工作作风结合起来，潜心研究，求真唯实，“知之真切笃实处即是行，行之明觉精察处即是知”。他们精益求精，“止于至善”，“皆当至于至善之地而不迁”，力求尽善尽美，以获取最大的集体智慧。他们在中国基础研究从与发达国家“总量并行”到“贡献并行”再到“源头并行”的升级发展过程中，

脚踏实地，拾级而上，纵观全局，极目迥望。他们站在巨人肩上，立于科学前沿，为中国乃至世界的学科发展指出可能的生长点和新方向。

各学科发展战略研究组从学科的科学意义与战略价值、发展规律和研究特点、发展现状与发展态势、未来5~10年学科发展的关键科学问题、发展思路、发展目标和重要研究方向、学科发展的有效资助机制与政策建议等方面进行分析阐述。既强调学科生长点的科学意义，也考虑其重要的社会价值；既着眼于学科生长点的前沿性，也兼顾其可能利用的资源 and 条件；既立足于国内的现状，又注重基础研究的国际化趋势；既肯定已取得的成绩，又不回避发展中面临的困难和问题。主要研究成果以“国家自然科学基金委员会—中国科学院学科发展战略”丛书的形式，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。

基金委和中科院在学科发展战略研究方面的合作是一项长期的任务。在报告付梓之际，我们衷心地感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家，还要感谢在咨询、审读和支撑方面做出贡献的同志，也要感谢科学出版社在编辑出版工作中付出的辛勤劳动，更要感谢基金委和中科院学科发展战略研究联合工作组各位成员的辛勤工作。我们诚挚希望更多的院士、专家能够加入到学科发展战略研究的行列中来，搭建我国科技规划和科技政策咨询平台，为推动促进我国学科均衡、协调、可持续发展发挥更大的积极作用。



前言

能源化学是能源科学和化学科学这两门主干学科与材料学、工程学、物理学、生物学、环境学、经济学、管理学等多个学科交叉融合，进而形成的在能源学科下的一门二级学科，它主要利用化学的理论和方法来研究能量获取、储存、转换及传输过程的规律和探索能源新技术的实现途径。不论是在常规能源的综合利用还是新能源的研究开发中，能源化学均担当重任，为人类社会的可持续发展发挥巨大作用。

“未来 10 年中国学科发展战略”丛书的总序中指出，学科作为知识体系结构分类和分化的重要标志，既在知识创造中发挥着基础性作用，也在知识传承中发挥着主体性作用。加强学科建设是一项提升自主创新能力、建设创新型国家的带有根本性的基础工程。在我国学科目录中，能源和能源化学学科仅收录于工程与技术科学门类，自然科学门类中尚未包含。国际基本科学指标数据库 (Essential Science Indicators, ESI) 学科目录中，至今也未包含能源和能源化学学科门类。这表明国内外能源化学学科的发展均处于起步阶段，我国与世界其他国家基本处在同一起跑线上。开展能源化学学科发展战略研究，抢占能源化学学科发展的战略制高点，构建国际能源化学研究和人才教育培养的高端平台，是新时期能源科学乃至整个科学的重大使命，将为解决能源问题、推动能源产业战略转型提供有效策略、技术支撑和人才保证，为国家制定能源发展战略发挥“科学智库”作用。

厦门大学和中国科学院大连化学物理研究所“高等学校创新能力提升计划”(2011 计划)能源材料化学协同创新中心作为依托，

联合发起并主持了国家自然科学基金委员会-中国科学院学科发展战略研究合作项目“能源化学学科发展战略研究”，旨在梳理能源化学学科发展的历史脉络，探讨能源化学及相关学科发展的一般规律，研究分析学科发展总体态势，并从历史和现实的角度剖析战略性新兴产业与学科发展的关系，为可能发生的能源领域新科技革命提前做好学科准备，并对我国未来能源化学学科的持续、协调、健康发展提出有针对性的政策建议。

参与本项目内容编写的有厦门大学田中群、郑南峰、王野、张庆红、程俊、杨勇、赵金保、赵英汝、方晓亮、张鹏，中国科学院大连化学物理研究所包信和、张华民、邵志刚、傅强、章福祥、李先锋、张洪章，中国科学院化学研究所万立骏、郭玉国，复旦大学赵东元、张凡、余爱水、夏永姚、王永刚，中国科学技术大学谢毅、熊宇杰、潘洋，中国科学院青岛生物能源与过程研究所刘会洲、陈骁、郑永红，北京大学刘海超，天津大学刘昌俊、王华、范志刚、芮宁、孙楷航，南开大学陈军、程方益、何良年，武汉大学庄林，上海交通大学齐飞，中国科学院上海应用物理研究所王建强，中国科学院上海硅酸盐研究所王绍荣，合肥工业大学潘云翔。厦门大学连伟、刘波，中国科学院大连化学物理研究所姜秀美、赵凌潇，以及相关课题组的部分老师、研究生也参与了本项目的有关工作。

由于编者的水平和时间有限，书中不妥之处敬请广大读者批评指正。

田中群 包信和

2017年7月



摘 要

能源化学是在世界能源需求日益突出的背景下正处于初步发展阶段的新兴交叉学科。作为能源学科中最主要的二级学科之一，能源化学是在融合物理化学、材料化学和化学工程等学科知识的基础上提升形成，兼具理学、工学相融合大格局的鲜明特色，是指导能源高效利用和新能源开发的关键学科之一。能源科学很可能跟随材料科学和环境科学形成并且壮大的足迹，成为被学术界、工业界和社会所广泛认可的新兴一级学科，进而被 ESI 收录。能源化学则有望最早搭建起全面系统的知识框架体系，成为能源科学的二级学科分支中的前行者和领航员。本书对能源化学学科的内涵及分类、战略地位、规律及特点等进行了梳理和分析，在明确学科发展目标与学科任务的基础上，提出了对我国能源化学学科发展的初步建议。

一、定义、内涵与战略地位

能源科学技术的每一次重大突破都显著推动了生产力的发展和人类文明的进步。提高能源利用效率和实现能源结构多元化是解决能源问题的关键，这些都离不开化学的理论与方法，以及以化学为核心的多学科交叉和基于化学基础的新型能源材料及能源支撑材料的设计合成和应用。特别是在能源的开发和利用方面，无论是化石能源的高效清洁利用，还是太阳能等可再生能源的高效化学转化，都涉及重要的化学基元反应问题，都无可避免地依赖于能源化学的基础研究。正是在亟须化学的理论和解决方法解决能源问题的背景之下，能源化学学科应运而生。

能源化学是能源科学和化学科学这两门主干学科与材料学、工程学、物理学、生物学、环境学、经济学、管理学等多个学科交叉融合,进而形成在能源学科下属的一门二级学科。能源化学主要利用化学的理论和方法来研究能量获取、储存、转换及传输过程的规律和探索能源新技术的实现途径。不论是在常规能源的综合利用还是新能源的研究开发中,能源化学均担当重任,为人类社会的可持续发展发挥巨大作用。催化化学、电化学、材料化学、光化学、燃烧化学、理论化学、环境化学和化学工程等学科及其分支学科为能源化学提供了学科基础。在划定能源化学下属学科时,本书并不主张将上述化学分支学科与能源学科进行简单组合而划分为诸如能源催化化学、能源电化学等次级学科,这些发展了数十年甚至上百年的成熟的化学分支学科必须在协同解决能源问题的过程中相互融合,因此应依照不同的能源资源利用过程以及对能源体系和过程的支撑作用,将能源化学划分为碳基能源化学、电能能源化学、太阳能能源化学、热能能源化学及能源物理化学、能源材料化学以及能源化学系统工程等多个三级学科。

我国是世界能源消费第一大国,在应对世界能源形势变化的同时,也面临着能源资源短缺、消费总量大、化石能源比例高、能源安全形势严峻和环境污染严重等问题。实施“十三五”规划,建设现代能源体系,深入推进能源革命,一定程度上依赖于能源领域的科技创新,而科技创新离不开多学科的交叉研究。能源化学作为能源科学、化学和其他相关学科交叉融合形成的新学科,不论是在常规能源的综合利用还是在新能源的研究开发中都扮演着重要的角色。能源化学学科的持续、协调、健康发展将对国家能源安全、国民经济和人民生活产生重要的积极影响。

二、学科规律、特点和发展趋势

能源化学学科在能源与化学学科的相互作用过程中沉积了深厚的融合基础,在当今能源危机日益临近、环境污染日趋严重的时代背景下应运而生,属于新兴学科,其产生和发展有如下规律:

(1) 能源化学以强烈的社会需求为导向建立并发展。

(2) 能源资源高效利用是能源化学发展的主要推动力, 能源化学是若干能源资源利用过程的先导和源泉, 两者紧密相连、相互促进。

(3) 能源化学领域颠覆性(变革性)技术推动能源生产、利用方式发生重大变革。

作为新兴的交叉学科, 能源化学有着如下学科特点:

(1) 能源化学学科在教学和科研方面必然要有全新的知识结构体系, 具有理学、工学相融合大格局的鲜明特色, 需要协同物理化学、材料化学和化学工程等学科知识。

(2) 能源问题的解决依赖于能源体系(系统和器件)的高效构建, 绝大多数能源化学体系都包含若干复杂的能源化学过程, 而能源化学过程的实现又依赖于能源材料功用的发挥, 特别需要从能量、时间、空间三个角度去考虑各类材料衔接的界面问题。

(3) 能源化学领域的多数前沿研究正在向系统集成的发展方向发展, 实现系统集成的关键在于能源化学各领域之间以及能源化学和其他学科之间的协同增效, 需借助集成和过程革新, 寻求将多种能源综合互补、高效利用的有效途径与方法。

(4) 能源化学的科学研究、学科发展、人才培养特别需要强调大局观和统筹观, 必须以系统论的方法, 以可持续发展的理念, 以全局、历史、开放和关联的视角分析和研究能源和能源化学问题。

根据学科发展的现状与态势, 预测在未来的10~20年内, 我国能源化学的学科发展趋势如下:

(1) 能源化学学科的新概念、新方法、新理论将不断涌现, 支撑世界能源科技继续向绿色低碳、高效、智能、多元化方向发展, 引领能源生产和消费革命不断深化。

(2) 前沿性探索研究和能源新技术开发的结合将更加紧密; 能源化学越来越重视并参与能源科技全产业链的创新; 与能源相关领域的渗透与综合使能源化学有机会在更大的框架和系统中得以发展。

(3) 能源化学将形成完善和统一的学科框架与知识体系, 理工

科一体化的新模式将在探索和发展中逐步形成,并得到学生、学校乃至整个社会的认可,同时推动我国在高等教育体系内推广能源化学本科专业,建立从本科生到研究生一体化的能源化学创新人才培养体系和教育模式。

三、学科发展目标与任务

能源化学学科以“满足国家能源战略需求,引领国际能源化学学科”为发展目标。主导推进 ESI 将能源科学列入所收录的一级学科,并将能源化学列为主要的二级学科之一。立足我国能源化学科技现状,从国家能源战略需求和学科发展需要出发,争取在 5~10 年内建设比较完善的能源化学学科体系和人才培养体系,持续为国家培育能源化学创新和创业人才;建立一支高水平的研究队伍,汇聚培养能源化学领军人才,成为国际能源化学研究和教学的学术高地;突破能源化学领域若干基础科学问题和关键技术,抢占国际能源化学科学研究和核心技术开发的战略制高点;建成一批先进的能源化学的科研平台及大科学装置,为解决制约我国经济发展的能源重大关键问题奠定科学基础,并为相关的能源高新技术和产业的发展提供科学支撑。

针对学科发展目标,能源化学具体的学科任务如下:

(1) 构建能源化学的新学科框架与知识体系。

(2) 加快建立从本科生到研究生一体化的教育模式与培养体系。

(3) 持续在能源化学领域开展原创性、引领性的科学研究与技术创新。

四、平台建设和人才培养

进入 21 世纪以来,美国、欧洲等世界发达国家和地区有条不紊地规划着不同层次的能源研究平台,以期从源头上推动创新能源技术的发展。我国也进行了大胆的能源体制机制探索,先后设立了国家能源局、国家能源委员会,批准建设了一批国家能源研发(实

验)中心,为构建国家能源创新体系奠定了坚实基础。近年来,中国科学院和不少高校也相继建立了若干能源研究所或研究中心。一些跨学科、跨单位协作大平台的建设也逐步得到了重视,如大连洁净能源国家实验室(筹)、中国科学院广州能源研究所、中国科学院青岛生物能源与过程研究所、中国科学院北京纳米能源与系统研究所等。2014年,由厦门大学、复旦大学、中国科学技术大学、中国科学院大连化学物理研究所共同培育建设的“能源材料化学协同创新中心”获教育部“高等学校创新能力提升计划”(2011计划)认定,旨在以“能源领域满足国家重大战略需求”和“化学基础学科领域冲击世界一流”为导向,以化学为基础、材料为载体、能源为目标,充分协同多单位优势资源,为国家能源新兴战略产业的健康快速发展提供引领性和关键性基础支撑。

国际上,能源化学人才的培养多采用以高校教学为基础,通过科研实践进一步提高人才整体创新能力的模式。为拉近基础教学与能源化学科学研究之间的距离,近年来许多世界著名大学都开设学科交叉性强的能源相关课程。总体来说,目前国际上还未将能源化学相关教育提升到学科高度,存在学科系统性不强等不足,尚未建立从基础教学到科研实践(从本科生培养到研究生培养)一体的人才培养体系。

近年来,国内各高校也相继开设了一些能源化学相关课程。然而,除了工科类的能源及能源化工专业,尚未设立理科类交叉领域的能源化学专业。一方面,仅凭借与工科方向的专业融合已远远不能满足能源科学深度发展的需要,必须与更多的基础科学相互融合。另一方面,基于传统学科分类的人才培养模式(化学、物理、材料的本科教育与能源方向的研究生培养相互割裂)已难以适应新形势下能源领域对创新人才的需求。因此,当务之急是以国家重大需求为导向,结合能源、化学、材料等相关学科的发展趋势,积极推动能源化学学科进入学位授予和人才培养学科目录,推动在条件成熟的高等院校增设能源化学本科专业,建立从本科生到研究生一体化的教育模式与培养体系。按照能源化学特定的培养目标,切实推行“宽方向、厚基础”的培育模式,完善教学内容和课程体系,

并建立与之适应的管理制度和评估方式,系统培养能源化学专业人才。我国能源化学学科将力争在世界范围内抢占人才培养、学科建设和科学研究等方面的战略制高点,为实现能源化学领域新一轮跨越式发展提供坚实的科技支撑和丰富的人才资源。

五、重点发展的研究领域

(一) 碳基能源化学领域

碳基能源化学研究如何将化石燃料、生物质等碳资源清洁、高效地转化为载能分子和化学品。发展碳资源优化利用的新方法、新技术与新材料,特别是注重发展非石油化石资源的高效绿色利用技术,是推动我国能源进步的关键点之一。重点发展的研究方向包括:甲烷活化与转化、生物质转化、合成气催化转化、二氧化碳化学利用等。

(二) 电能能源化学领域

电能与化学能之间的相互转化通过各式各样的化学储能器件即电池来完成。针对不同应用需求,开发高性能、高安全性、长寿命、低成本的化学储能器件是电能能源化学领域的发展目标。重点发展的研究方向包括:动力与储能型锂离子电池、燃料电池、液流电池、锂硫电池、锂-空气电池、全固态电池、可穿戴柔性电池与微电子系统储能器件等。

(三) 太阳能能源化学领域

发展高效且成本低廉的转化与利用技术是太阳能大规模开发利用的最大挑战,不仅亟需新材料的发展与革新,而且还需要深入理解太阳能利用中复杂的能量转化/转移界面过程以发展新的高效利用技术。重点发展的研究方向包括:太阳能电池、太阳能燃料、太阳能热化学等。