

学术引领系列



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家科学思想库

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 中国学科发展战略

## 合成化学

中国科学院

 科学出版社

学术引领系列



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家科学思想库

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 中国学科发展战略

## 合成化学

中国科学院



科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

---

合成化学/中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2016. 1  
(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-046095-0

I. ①合… II. ①中… III. ①合成化学-学科发展-发展战略-中国  
IV. ①06-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 252647 号

---

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 邹 聪 高 微/ 责任校对: 张怡君 李 影

责任印制: 张 倩/ 封面设计: 黄华斌 陈 敬

编辑部电话: 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

\*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 48 3/4

字数: 980 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 中国学科发展战略

## 指 导 组

组 长：白春礼

副组长：李静海 秦大河

成 员：詹文龙 朱道本 陈 颢

陈宜瑜 李 未 顾秉林

## 工 作 组

组 长：李 婷

副组长：王敬泽 刘春杰

成 员：钱莹洁 马新勇 申倚敏

薛 淮 张家元 林宏侠

冯 霞 赵剑峰

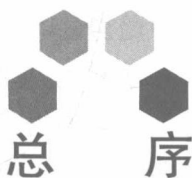
# 中国学科发展战略·合成化学

## 研 究 组

组 长：周其林 冯守华

成 员：(以姓氏汉语拼音为序)

陈 彬	陈忠宁	邓 理	邓 亮
丁奎岭	冯小明	龚流柱	郭庆祥
韩布兴	何良年	胡文平	黄 正
霍启升	康岳桐	李晓芳	李亚栋
李悦生	李治军	刘 刚	刘海超
刘 凯	刘 磊	刘 强	刘 文
刘晓辉	孟庆元	倪 燕	渠 瑾
施 展	宋 桥	宋振雷	唐功利
唐叶峰	涂永强	王定胜	王梅祥
王 树	王 为	王雪松	王 野
王志鹏	吴骊珠	谢建华	徐 俊
许建和	游书力	于吉红	袁 斌
张辅民	张 健	张 希	甄永刚
郑高伟	左景林		



# 九层之台，起于累土<sup>①</sup>

白春礼

近代科学诞生以来，科学的光辉引领和促进了人类文明的进步，在人类不断深化对自然和社会认识的过程中，形成了以学科为重要标志的、丰富的科学知识体系。学科不但是科学知识的基本的单元，同时也是科学活动的基本单元：每一学科都有其特定的问题域、研究方法、学术传统乃至学术共同体，都有其独特的历史发展轨迹；学科内和学科间的思想互动，为科学创新提供了原动力。因此，发展科技，必须研究并把握学科内部运作及其与社会相互作用的机制及规律。

中国科学院学部作为我国自然科学的最高学术机构和国家在科学技术方面的最高咨询机构，历来十分重视研究学科发展战略。2009年4月与国家自然科学基金委员会联合启动了“2011~2020年我国学科发展战略研究”19个专题咨询研究，并组建了总体报告研究组。在此工作基础上，为持续深入开展有关研究，学部于2010年年底，在一些特定的领域和方向上重点部署了学科发展战略研究项目，研究成果现以“中国学科发展战略”丛书形式系列出版，供大家交流讨论，希望起到引导之效。

根据学科发展战略研究总体研究工作成果，我们特别注意到学

---

<sup>①</sup> 题注：李耳《老子》第64章：“合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土；千里之行，始于足下。”

科发展的以下几方面的特征和趋势。

一是学科发展已越出单一学科的范围，呈现出集群化发展的态势，呈现出多学科互动共同导致学科分化整合的机制。学科间交叉和融合、重点突破和“整体统一”，成为许多相关学科得以实现集群式发展的重要方式，一些学科边界更加模糊。

二是学科发展体现了一定的周期性，一般要经历源头创新期、创新密集区、完善与扩散期，并在科学革命性突破的基础上呈螺旋上升式发展，进入新一轮发展周期。根据不同阶段的学科发展特点，实现学科均衡与协调发展成为了学科整体发展的必然要求。

三是学科发展的驱动因素、研究方式和表征方式发生了相应的变化。学科的发展以好奇心牵引下的问题驱动为主，逐渐向社会需求牵引下的问题驱动转变；计算成为了理论、实验之外的第三种研究方式；基于动态模拟和图像显示等信息技术，为各学科纯粹的抽象数学语言提供了更加生动、直观的辅助表征手段。

四是科学方法和工具的突破与学科发展互相促进作用更加显著。技术科学的进步为激发新现象并揭示物质多尺度、极端条件下的本质和规律提供了积极有效手段。同时，学科的进步也为技术科学的发展和催生战略新兴产业奠定了重要基础。

五是文化、制度成为了促进学科发展的重要前提。崇尚科学精神的文化环境、避免过多行政干预和利益博弈的制度建设、追求可持续发展的目标和思想，将不仅极大促进传统学科和当代新兴学科的快速发展，而且也为人材成长并进而促进学科创新提供了必要条件。

我国学科体系系由西方移植而来，学科制度的跨文化移植及其在中国文化中的本土化进程，延续已达百年之久，至今仍未结束。

鸦片战争之后，代数学、微积分、三角学、概率论、解析几何、力学、声学、光学、电学、化学、生物学和工程科学等的近代科学知识被介绍到中国，其中有些知识成为一些学堂和书院的教学内容。1904年清政府颁布“癸卯学制”，该学制将科学技术分为格致科（自然科学）、农业科、工艺科和医术科，各科又分为诸多学

科。1905年清朝废除科举，此后中国传统学科体系逐步被来自西方的新学科体系取代。

民国时期现代教育发展较快，科学社团与科研机构纷纷创建，现代学科体系的框架基础成型，一些重要学科实现了制度化。大学引进欧美的通才教育模式，培育各学科的人才。1912年詹天佑发起成立中华工程师会，该会后来与类似团体合为中国工程师学会。1914年留学美国的学者创办中国科学社。1922年中国地质学会成立，此后，生理、地理、气象、天文、植物、动物、物理、化学、机械、水利、统计、航空、药学、医学、农学、数学等学科的学会相继创建。这些学会及其创办的《科学》、《工程》等期刊加速了现代学科体系在中国的构建和本土化。1928年国民政府创建中央研究院，这标志着现代科学技术研究在中国的制度化。中央研究院主要开展数学、天文学与气象学、物理学、化学、地质与地理学、生物科学、人类学与考古学、社会科学、工程科学、农林学、医学等学科的研究，将现代学科在中国的建设提升到了研究层次。

中华人民共和国建立之后，学科建设进入了一个新阶段，逐步形成了比较完整的体系。1949年11月新中国组建了中国科学院，建设以学科为基础的各类研究所。1952年，教育部对全国高等学校进行院系调整，推行苏联式的专业教育模式，学科体系不断细化。1956年，国家制定出《十二年科学技术发展远景规划纲要》，该规划包括57项任务和12个重点项目。规划制定过程中形成的“以任务带学科”的理念主导了以后全国科技发展的模式。1978年召开全国科学大会之后，科学技术事业从国防动力向经济动力的转变，推进了科学技术转化为生产力的进程。

科技规划和“任务带学科”模式都加速了我国科研的尖端研究，有力带动了核技术、航天技术、电子学、半导体、计算技术、自动化等前沿学科建设与新方向的开辟，填补了学科和领域的空白，不断奠定工业化建设与国防建设的科学技术基础。不过，这种模式在某些时期或多或少地弱化了学科的基础建设、前瞻发展与创新活力。比如，发展尖端技术的任务直接带动了计算机技术的兴起



与计算机的研制，但科研力量长期跟着任务走，而对学科建设着力不够，已成为制约我国计算机科学技术发展的“短板”。面对建设创新型国家的历史使命，我国亟待夯实学科基础，为科学技术的持续发展与创新能力的提升而开辟知识源泉。

反思现代科学学科制度在我国移植与本土化的进程，应该看到，20世纪上半叶，由于西方列强和日本入侵，再加上频繁的内战，科学与救亡结下了不解之缘，新中国建立以来，更是长期面临着经济建设和国家安全的紧迫任务。中国科学家、政治家、思想家乃至一般民众均不得不以实用的心态考虑科学及学科发展问题，我国科学体制缺乏应有的学科独立发展空间和学术自主意识。改革开放以来，中国取得了卓越的经济建设成就，今天我们可以也应该静下心来思考“任务”与学科的相互关系，重审学科发展战略。

现代科学不仅表现为其最终成果的科学知识，还包括这些知识背后的科学方法、科学思想和科学精神，以及让科学得以运行的科学体制，科学家的行为规范和科学价值观。相对于我国的传统文化，现代科学是一个“陌生的”、“移植的”东西。尽管西方科学传入我国已有一百多年的历史，但我们更多地还是关注器物层面，强调科学之实用价值，而较少触及科学的文化层面，未能有效而普遍地触及到整个科学文化的移植和本土化问题。中国传统文化以及当今的社会文化仍在深刻地影响着中国科学的灵魂。可以说，迄20世纪结束，我国移植了现代科学及其学科体制，却在很大程度上拒斥与之相关的科学文化及相应制度安排。

科学是一项探索真理的事业，学科发展也有其内在的目标，探求真理的目标。在科技政策制定过程中，以外在的目标替代学科发展的内在目标，或是只看到外在目标而未能看到内在目标，均是不适当的。现代科学制度化进程的含义就在于：探索真理对于人类发展来说是必要的和有至上价值的，因而现代社会和国家须为探索真理的事业和人们提供制度性的支持和保护，须为之提供稳定的经费支持，更须为之提供基本的学术自由。

20世纪以来，科学与国家的目的不可分割地联系在一起，科

学事业的发展不可避免地要接受来自政府的直接或间接的支持、监督或干预，但这并不意味着，从此便不再谈科学自主和自由。事实上，在现当代条件下，在制定国家科技政策时充分考虑“任务”和学科的平衡，不但是最大限度实现学术自由、提升科学创造活力的有效路径，同时也是让科学服务于国家和社会需要的最有效的做法。这里存在着这样一种辩证法：科学技术系统只有在具有高度创造活力的情形下，才能在创新型国家建设过程中发挥最大作用。

在全社会范围内创造一种允许失败、自由探讨的科研氛围；尊重学科发展的内在规律，让科研人员充分发挥自己的创造潜能；充分尊重科学家的个人自由，不以“任务”作为学科发展的目标，让科学共同体自主地来决定学科的发展方向。这样做的结果往往比事先规划要更加激动人心。比如，19世纪末德国化学学科的发展史就充分说明了这一点。从内部条件上讲，首先是由于洪堡兄弟所创办的新型大学模式，主张教与学的自由、教学与研究相结合，使得自由创新成为德国的主流学术生态。从外部环境来看，德国是一个后发国家，不像英、法等国拥有大量的海外殖民地，只有依赖技术创新弥补资源的稀缺。在强大爱国热情的感召下，德国化学家的创新激情迸发，与市场开发相结合，在染料工业、化学制药工业方面进步神速，十余年间便领先于世界。

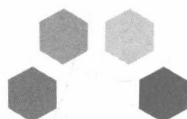
中国科学院作为国家科技事业“火车头”，有责任提升我国原始创新能力，有责任解决关系国家全局和长远发展的基础性、前瞻性、战略性重大科技问题，有责任引领中国科学走自主创新之路。中国科学院学部汇聚了我国优秀科学家的代表，更要责无旁贷地承担起引领中国科技进步和创新的重任，系统、深入地对自然科学各学科进行前瞻性战略研究。这一研究工作，旨在系统梳理世界自然科学各学科的发展历程，总结各学科的发展规律和内在逻辑，前瞻各学科中长期发展趋势，从而提炼出学科前沿的重大科学问题，提出学科发展的新概念和新思路。开展学科发展战略研究，也要面向我国现代化建设的长远战略需求，系统分析科技创新对人类社会发展 and 我国现代化进程的影响，注重新技术、新方法和新手段研究，



提炼出符合中国发展需求的新问题和重大战略方向。开展学科发展战略研究，还要从支撑学科发展的软、硬件环境和建设国家创新体系的整体要求出发，重点关注学科政策、重点领域、人才培养、经费投入、基础平台、管理体制等核心要素，为学科的均衡、持续、健康发展出谋划策。

2010年，在中国科学院各学部常委会的领导下，各学部依托国内高水平科研教育等单位，积极酝酿和组建了以院士为主体、众多专家参与的学科发展战略研究组。经过各研究组的深入调查和广泛研讨，形成了“中国学科发展战略”丛书，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。学部诚挚感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家们！

按照学部“十二五”工作规划部署，学科发展战略研究将持续开展，希望学科发展战略系列研究报告持续关注前沿，不断推陈出新，引导广大科学家与中国科学院学部一起，把握世界科学发展动态，夯实中国科学发展的基础，共同推动中国科学早日实现创新跨越！



# 前 言

---

合成化学是研究物质创造与转化的科学，它在人类认识自然和改造自然、提高人类生活质量和健康水平、推动社会进步等方面发挥着不可替代的作用。2006年国务院颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中明确地将“新物质创造与转化的化学过程”列为前沿科学问题。在中国科学院学部“十二五”规划关于学科发展战略研究部署中，合成化学被列为发展战略研究的学科之一。根据中国科学院学部要求，成立了“中国学科发展战略—合成化学”研究项目组。项目组经过两年多的系统、深入工作，反复研讨，最后形成了研究报告《中国学科发展战略·合成化学》。

《中国学科发展战略·合成化学》分为绪论、合成方法、合成材料和合成化学新方向四篇。绪论部分评估了合成化学的学科地位、对人类文明进步和社会发展作出的贡献及其与其他学科的相互关系。在此基础上，总结了合成化学学科发展水平和发展方向，分析了我国合成化学学科的发展现状和对策；合成方法部分阐述了合成化学的发展轨迹，它是一个不断追求高效、高选择性、高原子经济、更加环境友好、低能耗和可持续地创造新物质的过程。从这几章中，我们可以窥见合成方法已经发展到了一个相当高的水平。化学家现在几乎已经做到“只要能够设计出来的化合物，就能被合成出来”。但是，合成方法距离我们的目标“完美合成”还非常遥远。合成材料最能展现合成化学所取得的辉煌成就。这部分选取了几个代表性的研究领域，介绍了合成材料的发展历史和它对人类社会发展的巨大推动作用。可以说，多样性的合成材料不但使人类生活变

得更加丰富多彩，也保护了人类的健康。新材料是科学技术发展的物质基础，这部分还介绍了几个新兴的合成材料领域，它们在未来科技发展中将扮演重要角色。合成化学新方向部分选取了几个近期广受关注的领域，进行剖析。从中可以看出，合成化学的发展日新月异，新方向、新领域不断涌现。合成化学的研究内涵和外延正经历着快速而深刻的变化，很多过去认为是不可能的，现在也都变成了现实。

合成化学的根本任务是为人类社会发展和科技进步提供新物质。为了完成这一光荣使命，合成化学家正在努力发展“完美合成”，即以最低的能耗和100%的收率得到所需化合物，不产生任何副产物。只有这样，才能做到可持续发展。

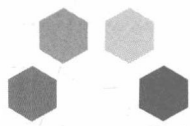
《中国学科发展战略·合成化学》由周其林和冯守华设计、组织和审定，其编写工作得到了众多合成化学家的大力支持和参与。参加本书撰写的人员包括：第一篇绪论，第一~三章，周其林、冯守华、谢建华、施展；第二篇合成方法，第四章，冯守华、施展；第五章，刘刚、唐叶峰、于吉红；第六章，丁奎岭、黄正；第七章，龚流柱、游书力、冯小明；第八章，许建和、倪燕、郑高伟、王梅祥；第九章，吴骊珠、王雪松、刘强、孟庆元、李治军、陈彬；第十章，康岳桐、袁斌、宋桥、徐俊、刘凯、张希；第三篇合成材料，第十一章，左景林、张健、陈忠宁；第十二章，于吉红、霍启升、王为；第十三章，王定胜、李亚栋；第十四章，甄永刚、王树、胡文平；第十五章，李悦生、刘晓辉、李晓芳；第十六章，张辅民、宋振雷、涂永强；第四篇合成化学新方向，第十七章，韩布兴、何良年、渠瑾；第十八章，王野、邓亮；第十九章，郭庆祥、刘海超、邓理；第二十章，刘磊、王志鹏、刘文、唐功利。对这些学者在本书撰写过程中所付出的智慧和艰辛表示由衷的感谢。

由于合成化学覆盖范围较广，加上篇幅有限，很多重要的研究方向和研究内容未能包含进去。另外，由于作者水平有限，疏漏在所难免，许多分析观点也不一定全面。所有不妥之处，敬请广大专家、读者批评指正。

本书在编写过程中得到了中国科学院学部和院士工作局的指导和帮助，科学出版社编辑主动热情做好本书的出版工作，邹聪等在统稿和编辑过程中付出了辛勤劳动，在此一并致谢！

周其林 冯守华

2015年8月



# 目 录

## 第一篇 绪 论

### 第一章 合成化学的学科地位 ..... 2

第一节 引言 ..... 2

第二节 合成化学促进人类文明进步和社会可持续发展 ..... 3

一、合成化学护航粮食生产 ..... 3

二、合成化学保障人类健康 ..... 4

三、合成化学呵护环境、创造新能源 ..... 5

四、合成化学是先进材料、信息技术和产业的基础 ..... 6

第三节 合成化学为相关学科插上腾飞的翅膀 ..... 7

一、合成化学与生命科学 ..... 8

二、合成化学与材料科学 ..... 10

三、合成化学与环境科学 ..... 11

第四节 合成化学必将创造更美好的未来 ..... 13

参考文献 ..... 13

### 第二章 合成化学学科的发展水平和发展方向 ..... 14

第一节 引言 ..... 14

第二节 合成新反应、新方法和新技术 ..... 16

第三节 合成新物质 ..... 21

第四节 合成化学的发展方向 ..... 24

一、绿色合成 ..... 24

二、仿生合成 ..... 25

三、高效催化合成 .....	25
四、碳-氢键直接官能团化 .....	26
五、生物质及二氧化碳转化 .....	26
参考文献 .....	27

### 第三章 我国合成化学学科的发展现状 ..... 32

第一节 我国合成化学学科发展及国际地位 .....	32
第二节 我国合成新反应、新方法、新技术的发展状况 .....	33
第三节 我国新物质合成发展现状 .....	39
第四节 我国合成化学学科发展的不足与对策 .....	42
参考文献 .....	45

## 第二篇 合成方法

### 第四章 水热与溶剂热合成 ..... 54

第一节 水热与溶剂热合成法概述 .....	55
一、水热与溶剂热合成发展历史 .....	55
二、水热与溶剂热合成法合成技术和方法 .....	57
三、水热与溶剂热合成方法的特点 .....	57
第二节 水热与溶剂热在合成化学中的应用 .....	58
一、水热与溶剂热合成在大单晶合成中的应用 .....	59
二、水热与溶剂热合成在分子筛合成中的应用 .....	63
三、水热与溶剂热合成在金属有机骨架材料合成中的应用 .....	65
四、水热与溶剂热合成在复合氧化物和氟化物材料合成中的 应用 .....	68
五、水热与溶剂热合成在有机物和生物小分子合成中的应用 .....	70
第三节 水热与溶剂热合成的新发展 .....	74
一、微波辅助水(溶剂)热合成 .....	74
二、磁场辅助水(溶剂)热合成 .....	75
三、离子热合成 .....	76
四、超临界水合成 .....	78



五、组合化学水热合成 .....	79
参考文献 .....	81

## 第五章 组合合成 .....

第一节 组合合成及发展历程 .....	92
第二节 组合合成优势 .....	94
第三节 组合合成的发展现状 .....	95
一、组合合成构建杂环小分子库 .....	95
二、组合合成构建类天然产物库 .....	101
三、组合合成与合成方法学研究 .....	108
四、组合无机合成 .....	109
五、组合生物合成 .....	116
第四节 组合合成的发展趋势 .....	119
参考文献 .....	121

## 第六章 金属有机催化合成 .....

第一节 金属有机催化简介 .....	129
第二节 还原反应 .....	129
一、氢化反应 .....	130
二、氢官能团化反应 .....	131
第三节 氧化反应 .....	134
一、烃类物质的氧化反应 .....	134
二、醇和胺的氧化反应 .....	138
第四节 C—C键和C—X键构筑反应 .....	139
一、C—C键交叉偶联反应 .....	139
二、C—X键交叉偶联反应 .....	141
三、交叉偶联反应在复杂分子合成中的应用 .....	142
四、交叉偶联反应的最新进展 .....	144
五、烯烃复分解 .....	145
第五节 碳-氢键官能团化反应 .....	147
一、邻位基团导向的选择性碳-氢键活化 .....	147
二、间位基团导向的选择性碳-氢键活化 .....	148
三、芳烃直接偶联反应 .....	149