

学术引领系列



国家出版基金项目



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

环境科学

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 PUBLISHING FUND PROJECT



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

环境科学

中国科学院

科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

环境科学 / 中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2016.12

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-047553-4

I. ①环… II. ①中… III. ①环境科学-学科发展-发展战略-中国 IV.
①X-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044423 号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 杨婵娟 卜 新 / 责任校对: 郑金红 桂伟利 张小霞

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

联系电话: 010-6403 5853

电子邮箱: 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 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 53

字数: 951 000

定价: 248.00 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：王恩哥 朱道本 傅伯杰

陈宜瑜 李树深 杨 卫

工 作 组

组 长：李 婷

副组长：王敬泽

成 员：钱莹洁 马新勇 薛 淮

冯 霞 林宏侠 王振宇

赵剑峰

中国学科发展战略·环境科学

专 家 组

负责人：陶 澍

成 员：傅家谟 孙鸿烈 周卫健 姚檀栋

傅伯杰

工 作 组

负责人：丁永建 王仰麟

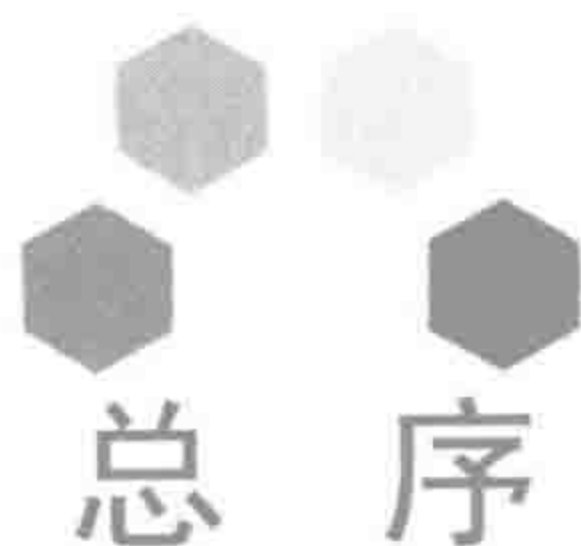
成 员：陈建民 崔 鹏 冯新斌 李本纲

李新荣 骆永明 朴世龙 秦伯强

田立德 王子健 吴丰昌 曾永平

张 干 朱利中 成天涛 许宜平

周 丰 朱 波



九层之台，起于累土^①

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

^① 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。”

论，希望起到引导之效。

根据学科发展战略研究总体研究成果，我们特别注意到学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的手段。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快速发展，而且也为人才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，新中国成立以来，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，尽管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。例如，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和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

产业革命以来，人类在社会文明和经济发展方面取得巨大的成就，导致自然环境发生重大改变。改革开放 30 多年来，中国社会经济发展进步巨大，对环境的压力日渐增大，由此导致的灾害、污染、生态、资源、能源问题已成为中国社会经济可持续发展的障碍。

环境科学研究是人类认识环境问题的成因、效应及发展趋势的重要途径。环境科学从局部地区的局部问题研究拓展到区域乃至全球问题探讨，从分别关注环境问题的不同侧面延伸到从地球系统整体角度探讨各类环境问题的内在联系，从侧重研究环境问题发生和发展的自然过程扩展到全面认识自然环境问题与人类社会经济活动之间的相互关系和相互作用。进入 21 世纪，环境科学研究已覆盖人类活动的各个方面，涉及自然、技术、社会和人文科学等多个方面，逐渐成为一门新兴交叉学科。

然而，与传统学科相比，对环境科学的研究范畴、理论体系，特别是今后研究的战略重点等，仍然存在着不同的学术观点和认识。因此，当前开展环境科学发展的战略研究，具有特别重要的科学意义。

经中国科学院地学部第十四届常务委员会第十七次会议批准，由陶澍院士牵头，开展“环境科学发展战略研究”（2012 年 7 月至 2014 年 7 月）。该战略研究旨在系统梳理近半个世纪以来环境科学的发展轨迹，了解国内外环境科学发展动态和趋势，认识中国社会经

济发展对环境科学的主要需求，在此基础上分析环境科学未来若干年内发展的主导方向，提炼出符合中国环境科学发展的主要优势和特点、未来若干年内的重大战略研究方向、面临的核心科学问题、学科队伍和平台建设方面的重大需求。

2012年9月，“环境科学发展战略研讨会”第一次会议（无锡）拟定《环境科学发展战略报告》的15个主题。2013年7月，“环境科学发展战略研讨会”第二次会议（都江堰）拟定各主题报告的内容。2014年5月，“环境科学发展战略研讨会”第三次会议（北京）初步审议各主题报告，并讨论总报告的框架。2014年5~7月，完成各主题报告的专家评审。2014年8月，“环境科学发展战略研讨会”第四次会议（北京）进一步明确各主题报告的修改意见，完成总报告初稿。2014年12月，环境科学发展战略研究的总报告及主题报告定稿。

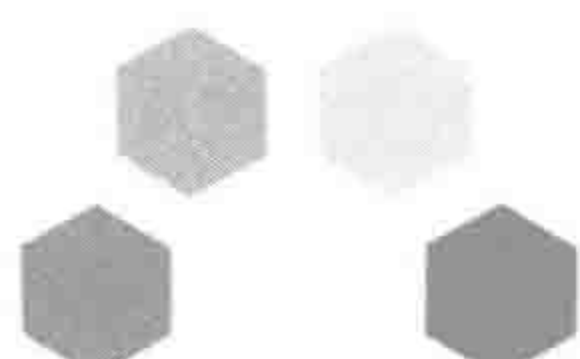
本报告包括学科基础、环境过程、环境效应、相关学科四部分，共15个主题报告。第一部分：环境化学研究发展战略由朱利中教授完成，环境地球化学研究发展战略由冯新斌研究员完成，区域环境污染研究发展战略由张干研究员完成。第二部分：大气环境研究发展战略由陈建民教授和成天涛教授完成，水环境研究发展战略由曾永平教授和周丰副教授完成，土壤环境研究发展战略由骆永明研究员完成，水体富营养化研究发展战略由秦伯强研究员和朱波研究员完成。第三部分：环境与健康研究发展战略由曾永平教授完成，环境毒理与环境基准研究发展战略由吴丰昌研究员完成，生态风险研究发展战略由王子健研究员和许宜平研究员完成。第四部分：水文水资源研究发展战略由丁永建、张世强、韩添丁研究员完成，全球变化生态学研究发展战略由朴世龙教授完成，恢复生态学研究发展战略由李新荣研究员完成，环境山地灾害研究发展战略由崔鹏院士完成，

近代环境变化研究发展战略由田立德研究员完成。

本报告在完成过程中，得到中国科学院学部工作局申倚敏处长，国家自然科学基金委员会地球科学部宋长青研究员、冷疏影研究员的指导和支 持。在此，表示衷心感谢！

中国科学院

2016年9月1日



目 录

总序
前言

绪论 环境科学发展战略报告	1
第一节 国家需求与国际背景	1
一、国家需求	1
二、国际背景	4
第二节 环境科学研究现状与趋势	6
一、学科基础	8
二、环境过程	11
三、环境效应	17
四、相关学科	22
第三节 前沿科学问题与研究热点	26
一、环境学科基础	26
二、大气、水、土壤环境科学问题与研究重点	26
三、人体暴露、环境毒理学、生态风险等环境效应是未来 研究重点	28
四、相关学科领域的未来发展重点	30
第四节 建议与展望	32
一、复杂环境系统所带来的挑战	32
二、复杂环境系统下环境科学未来发展方向	33
三、环境科学研究的组织与管理	33
参考文献	34

第一部分 学科基础

第一章 环境化学	37
第一节 引言	37
第二节 研究进展	40
一、环境分析化学	41
二、环境污染化学	42
三、污染控制化学	42
四、污染生态化学	43
五、理论环境化学	43
第三节 前沿科学问题	44
一、环境分析化学	44
二、大气污染与控制	50
三、水体污染与控制	58
四、土壤污染与控制	63
五、污染生态化学	66
六、生态毒理与健康	67
七、理论环境化学	69
第四节 未来发展方向	70
一、污染物多介质界面行为、区域环境过程与调控	70
二、纳米颗粒物的环境行为与生物效应	70
三、环境友好和功能材料在污染控制中的应用	73
四、化学污染物暴露与食品安全	74
五、化学品的风险评估与管理的理论与方法	77
参考文献	77
第二章 环境地球化学	92
第一节 引言	92
一、环境地球化学与健康研究	92
二、环境地球化学与污染研究	93

三、环境地球化学与全球环境变化研究	94
第二节 研究进展	95
一、有害元素汞的环境地球化学研究进展	95
二、过去全球气候变化的环境地球化学研究进展	98
三、非传统稳定同位素环境地球化学研究进展	100
第三节 前沿科学问题	104
一、重金属污染物的大尺度长距离跨境传输研究	104
二、传统稳定同位素体系的新发展	105
三、非传统稳定同位素理论框架建立及运用	109
四、环境微生物对有害元素迁移转化影响	109
第四节 未来发展方向	115
一、Clumped 同位素体系发展	115
二、微小非质量依赖分馏的研究	116
三、重金属元素的非传统稳定同位素的运用	116
四、环境地球化学与微生物学的交叉与融合	116
五、重金属污染物的大尺度迁移与微观过程研究相结合	116
参考文献	117

第三章 区域环境污染

第一节 引言	134
一、环境污染问题的区域性	136
二、区域环境污染研究的特点和方法	137
三、我国和全球区域环境污染研究	138
第二节 研究进展	139
一、区域环境污染来源与大气污染排放清单	139
二、区域环境污染观测	141
三、区域环境污染物的界面交换	144
四、区域环境有机污染的长距离迁移	148
五、区域污染历史与区域循环	150
六、区域环境污染数值模拟	151
七、区域环境污染暴露与健康风险	153