

学术引领系列



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

地下水科学

中国科学院



科学出版社

学术引领系列



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

地下水科学

中国科学院

科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

地下水科学/中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2018. 3

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-054945-7

I. ①地… II. ①中… III. ①地下水水文学-学科发展-发展战略-中国
IV. ①P641-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 258407 号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 牛 玲 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张欣秀 / 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>

北京东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 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 5 月第二次印刷 印张: 30 插页: 7

字数: 539 000

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：张 涛 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：苏荣辉

成 员：钱莹洁 马新勇 薛 淮

冯 霞 林宏侠 王振宇

赵剑锋

中国学科发展战略·地下水科学

项 目 组

组 长：林学钰 王焰新

成 员：（以姓氏汉语拼音为序）

葛社民 刘崇炫 马 腾 曲建升

石建省 苏小四 王广才 王文科

文冬光 吴吉春 熊巨华 姚玉鹏

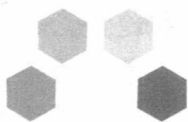
学术秘书：苏小四 甘义群

撰 写 组

组 长：林学钰 王焰新

成 员：（以姓氏汉语拼音为序）

蔡五田	陈 立	陈鸿汉	陈宗宇	邓 林
董海良	段 磊	葛社民	宫程程	宫辉力
郭 芳	郭 亮	郭华明	郭海鹏	何江涛
胡伏生	黄丹丹	黄金廷	姜光辉	蒋万军
靳继红	孔庆敏	李广贺	李颖智	李志红
梁永平	刘 菲	刘崇炫	刘文浩	刘再斌
马 瑞	马 腾	毛 郁	穆文清	钱家忠
曲建升	施小清	石建省	史浙明	束龙仓
苏春利	苏小四	孙继朝	孙晓熠	孙自永
汤 洁	唐 霞	王广才	王金生	王文科
王晓光	王旭升	文冬光	吴吉春	吴剑锋
吴秀平	熊巨华	许庆宇	杨泽元	姚玉鹏
曾献奎	张 俊	张二勇	张福存	张进德
张生岐	张翼龙	张在勇	张兆吉	赵 伟
赵勇胜	郑邵铎	朱 琳		



总 序

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

^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。”

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 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。

中华人民共和国成立之后，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月中华人民共和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，中华人民共和国成立以来，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。

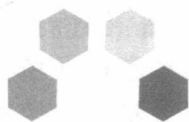
在全社会范围内创造一种允许失败、自由探讨的科研氛围；尊重学科发展的内在规律，让科研人员充分发挥自己的创造潜能；充分尊重科学家的个人自由，不以“任务”作为学科发展的目标，让科学共同体自主地来决定学科的发展方向。这样做的结果往往比事先规划要更加激动人心。比如，19世纪末德国化学学科的发展史就充分说明了这一点。从内部条件上讲，首先是由于洪堡兄弟所创办的新型大学模式，主张教与学的自由、教学与研究相结合，使得自由创新成为德国的主流学术生态。从外部环境来看，德国是一个后发国家，不像英、法等国拥有大量的海外殖民地，只有依赖技术创新弥补资源的稀缺。在强大爱国热情的感召下，德国化学家的创新激情迸发，与市场开发相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

地下水科学（即水文地质学，这两个学科名称在本书中完全通用）是20世纪中叶以来国际上地球科学发展最为迅猛的分支学科之一，成为流体地球科学的主干和基础学科。

水资源的可持续供给是当今人类社会面临的重大挑战。地下水是自然界中水循环的一个重要环节，是全球的重要供水水源。我国是一个水资源十分紧缺的国家。近30年来，强烈的人类活动使得我国原本有限的供水水源变得愈加稀缺，地表水和地下水的水质日趋恶化，地下水开发利用不当导致的地下水水位下降、流量衰减、水质恶化，以及地面沉降、地面塌陷等地质环境问题频繁发生。加快发展地下水科学，显然迫在眉睫。

我国地下水科学是一门伴随着中华人民共和国一起成长的学科。经过60余年的发展，我国地下水科学的教育、科研和生产体系已基本形成。在国家和社会需求的驱动下，科技创新取得一系列重要进展。20世纪50年代至今，大规模的经济建设和人民生活都迫切需要地下水资源的可持续供给，矿产资源开发则迫切需要防治矿坑突水。因此，地下水资源（尤其是清洁淡水资源）的勘查、评价始终是该学科发展的主要方向。20世纪70年代后期以来，与强烈的人类活动有关的地质环境保护问题成为学科的又一重要研究内容。近年来，供水水质安全、污染场地修复、流域生态环境保护、二氧化碳地质封存、核废料地质处置和地热资源的开发利用等方面的研究取得了较好的成果，极大地推动了学科的创新发展。

2005~2007年，国家自然科学基金委员会地球科学部、中国地质调查局曾经组织开展“中国地下水科学的机遇与挑战”战略研究。但由于近10年来，学科发展迅猛，亟须进一步凝练重大科学

问题,对学科近年来的研究进展进行深入、系统的评述与趋势分析。因此,中国科学院地球科学部立项开展“地下水资源”学科发展战略研究,以期发挥学部对我国科学技术前沿和未来创新发展的引领作用,并推动我国水文地质学科的发展。本项目在2015年年底由林学钰向中国科学院学部提出申请,2016年2月25日向中国科学院学部常委会议汇报后获批立项实施。这是中国科学院学部首次部署地下水科学领域的学科发展战略研究项目。在项目研究过程中,邀请到袁道先、汪集旻、薛禹群、夏军、武强等7位院士、专家提供咨询,来自教育部、中国科学院、国土资源部、国家自然科学基金委员会、美国科罗拉多大学的70余位专家与项目组成员一起参与学科发展战略报告的撰写。

本学科战略报告分为7章,报告编制工作采用分章负责人制,同时注重加强各章之间内容的衔接,力求体例的协调一致。各章撰写负责人如下:第一章、第七章,林学钰、王焰新;第二章,王文科、王广才;第三章,文冬光、郭华明;第四章,王焰新;第五章,吴吉春;第六章,曲建升、姚玉鹏。王焰新和林学钰负责全书统稿。苏小四参与统稿和图件清绘、文字校对工作。

本书是在向中国科学院提交的学科战略研究报告的基础上修改、完善而成的。全书以分析地下水科学的发展趋势、介绍地下水资源与环境研究的前沿领域为宗旨。主要内容为:针对当前国际地下水科学研究的前沿领域和新技术、新方法,阐述其发展现状与趋势;系统分析发达国家和我国地下水科学领域的资助战略;围绕我国在地下水资源与地质-生态环境和地下水水质安全两大领域的发展现状,对存在的瓶颈、需突破的关键点等做出尽可能详尽的分析。为促进我国地下水科学的进步,项目组成员还从宏观上研讨了学科发展所需的资助机制、平台建设和人才培养改革。

本书目的不是提供一个百科全书式的地下水科学战略研究概论,而是遵循有所为有所不为的原则,力图体现科技战略研究的前沿性、国家和社会需求的紧迫性,从而助力学科的创新发展;力图通过简明扼要和通俗易懂的语言让深奥的科学道理被公众所理解,从而促进社会各界对地下水科学研究的支持;力图较全面地列出国内外代表性文献,从而方便从事地下水科学领域研究、教学和生产

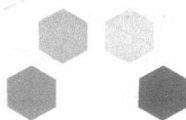
一线的科技人员、研究生查询和参阅。

在项目研究过程中，得到了由陈颀院士、傅伯杰院士先后担任主任的两届中国科学院地学部常委们的关心和指导，得到众多同行的大力支持和无私帮助。书稿初稿完成后，承蒙香港大学焦赳赳教授、中国地质环境监测院李文鹏教授、中国科学院地理科学与资源研究所宋献方研究员、南方科技大学郑春苗教授、河海大学周志芳教授、中国地质大学（北京）周训教授等专家对书稿进行了审查并提出了宝贵的修改建议，在此一并致谢！

由于本书从立项到完成的时间不足两年，加上为作者水平所限，书中缺漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

林学钰

2017年10月8日



目 录

总序	i
前言	vii
第一章 学科战略地位分析	1
第一节 学科特点	1
第二节 国家和社会需求分析	7
一、维持水资源安全供给是地下水科学的首要任务	8
二、水质利用和地质环境保护的需求强劲	11
三、生态文明建设全过程需要地下水科学支撑	15
四、地下水科学在地球系统科学发展中具有重要地位和作用	16
第三节 学科战略目标与发展重点	19
一、深刻认知地球水循环特征,揭示地下水资源形成分布规律	19
二、探讨复杂地下水系统中的物质与能量输运机理	20
三、提升精细观测、模拟地下水系统性状和行为的能力	23
本章参考文献	24
第二章 地下水资源与地质-生态环境	27
第一节 地下水资源构成与可持续性	27
一、地下水资源及其特点	27
二、地下水资源分类与构成	29
三、气候变化和人类活动对地下水资源构成的影响	32
四、地下水资源的可持续利用	59
五、关键科学问题	65
第二节 地下水与地质环境	67
一、区域地下水位下降与上升	68
二、地面沉降	69
三、岩溶塌陷	73

四、海水入侵	77
五、土壤盐渍化	80
第三节 地下水与表生生态环境	84
一、研究现状	86
二、关键科学问题	92
第四节 特殊类型地下水	93
一、地下热水	93
二、矿泉水	96
三、卤水资源	98
第五节 中国区域水文地质	101
一、青藏高原	101
二、干旱内陆盆地	102
三、黄土高原	103
四、大型平原	103
五、沿海地区	104
六、岩溶地区	104
七、基岩山区	105
八、红层地区	106
九、展望	106
本章参考文献	108

第三章 地下水水质安全

第一节 地下水水质与人体健康	131
一、特殊地下水的水质特征与人体健康	132
二、地下水灌溉与食品安全	135
三、未来的研究重点	140
第二节 原生劣质地下水	140
一、概述	140
二、我国原生劣质水分布特征	141
三、高砷地下水	144
四、未来的研究趋势	151
第三节 地下水污染与防控	152
一、地下水污染研究现状	152
二、地下水污染研究中存在的问题	160