



创新2050: 科学技术与中国的未来

中国至2050年 重大交叉前沿科技领域发展 路线图

中国科学院重大交叉前沿领域战略研究组

■ 创新2050：科学技术与中国的未来



中国至2050年重大交叉前沿 科技领域发展路线图

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是中国科学院“创新2050：科学技术与中国的未来”战略研究成果之一，集中探讨自然科学中的重大交叉前沿问题：宇宙起源、中微子、暗物质与暗能量的探索，量子世界的调控与信息、能源、材料技术新突破的探索，生命起源、进化和人造生命的探索，脑与认知科学及其计算建模的探索，以及作为定量研究与系统思维基本工具的数学研究与复杂系统的探索。路线图概要地阐述了以上五个重大交叉前沿领域的重要性、研究现状、发展态势和面临的挑战，提出了发展战略目标，分析了有关领域近期和中长期的发展战略及主要可能的突破，并为我国在这些领域的发展提出了若干政策建议。

希望本书对于我国从事相关交叉前沿学科科学研究、教学的科研人员、教师与学生能够有所帮助，对于政策制定部门能够起参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

中国至2050年重大交叉前沿科技领域发展路线图/中国科学院重大交叉前沿领域战略研究组. —北京：科学出版社，2011

(创新2050：科学技术与中国的未来)

ISBN 978-7-03-029982-6

I. ①中… II. ①中… III. ①跨学科学—发展战略—研究报告—中国 IV. ①G301

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第005651号

责任编辑：刘凤娟 鄢德平 / 责任校对：李 影

责任印制：钱玉芬 / 封面设计：王 浩

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第 一 版 开本：889×1194 1/16

2011年2月第一次印刷 印张：13

印数：1—8000 字数：135 000

定价：78.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

“创新2050：科学技术与中国的未来” 战略研究组织

总负责

路甬祥

战略总体组

路甬祥 白春礼 施尔畏 方 新 李志刚 曹效业 潘教峰

重大交叉前沿领域战略研究组

组 长：于 淦 郭 雷

成 员：

秦 波	中国科学院国家天文台
武向平	中国科学院国家天文台
邢志忠	中国科学院高能物理研究所
李 淼	中国科学院理论物理研究所
张鹏杰	中国科学院上海天文台
赵宏武	中国科学院物理研究所
赵国屏	中国科学院上海生命科学研究院
王 文	中国科学院昆明动物研究所
熊 燕	中国科学院上海生命科学研究院
赫荣乔	中国科学院生物物理研究所
史忠植	中国科学院计算技术研究所
于 淦	中国科学院物理研究所
傅小兰	中国科学院心理研究所
刘 力	中国科学院生物物理研究所
卓 彦	中国科学院生物物理研究所
路惠民	中国科学院生物物理研究所
刘 纓	中国科学院生物物理研究所
马 丽	中国科学院生物物理研究所
郭 雷	中国科学院数学与系统科学研究院
高小山	中国科学院数学与系统科学研究院
陈志明	中国科学院数学与系统科学研究院
巩馥洲	中国科学院数学与系统科学研究院
韩 靖	中国科学院数学与系统科学研究院

刘润球	中国科学院数学与系统科学研究院
汪寿阳	中国科学院数学与系统科学研究院
张纪峰	中国科学院数学与系统科学研究院
章祥荪	中国科学院数学与系统科学研究院
周向宇	中国科学院数学与系统科学研究院

总序^{*}

中国的现代化是人类现代化进程中的大事件、大变革。中国科学院决定面向中国现代化进程开展重要领域科技发展路线图研究,这项工作的思路和起因究竟是怎样的?是不是有道理?是不是应该做?我觉得这是很基本、很重要的。

一、开展中国至2050年重要领域科技发展路线图研究的重要性

温家宝总理亲自担任组长,全国两千多位专家直接参加,经过两年多的工作,制定了到2020年的国家中长期科技发展规划纲要。所以,到2020年以前中国科技发展已经有了蓝图。那么,为什么还提出研究我国至2050年重要领域科技发展路线图这样一个问题呢?

2007年夏季,在研究中国科学院未来科技发展战略重点时,我们感到有一些问题必须要从更长远考虑,比如能源问题。能源问题过去也有15年的战略研究,但是主要还是研究如何利用好煤,怎样开发利用好国内外两种油气资源,怎样能够有限地发展核能,对可再生能源只是作为一种补充性的、方向性的能源,并没有将其摆到未来能源支柱的位置上。近年来,世界各国越来越关注温室气体排放问题,应对全球气候变化成为重要议题,这背后其实主要还是能源结构问题。这就使我们认识到,必须高效清洁利用化石能源,以减少对环境的影响,但是,化石能源

^{*} 该总序为路甬祥院长在2007年10月中国科学院组织的“中国至2050年重要领域科技发展路线图”第一次交流研讨会上的讲话。文字略有删减。

2050

时代终究要过去,悲观估计有100年左右,乐观估计还有200年左右。油气资源可能首先逐步走向枯竭,然后是煤资源。人类不得不走向以可再生能源为主体、核能为补充的能源体系。现在各国政府都在积极准备,欧洲走得最快,美国现在态度也有变化,就是在利用好化石能源的同时,加大对可再生能源的开发力度,加大对先进核能的研究开发力度,逐步向可再生能源方向过渡。这个时间跨度可能50年,也可能100年。由此带来的科学技术问题非常多,譬如在基础研究领域,物理学家、化学家、生命科学家要研究新一代的光电池、染料敏化电池、高效的光化学催化和储存、高效的光合作用物种,或者通过基因工程创造高效的光合作用物种,而且这种生物物种又不与粮油争土地争水分,能够利用坡地、盐碱地或者半干旱土地等生产人类所需要的能源。同时,未来能源的整体结构要发生改变,现在能源是比较稳定的系统,以后可能是大量的不稳定系统,可能要发展分布式能源体系,发展更高效的直流传输和储能技术,解决网络的控制、安全、可靠性问题,还要解决二氧化碳捕捉、储存、转化、利用方面的问题,这里面隐含着大量的科技问题,几乎涉及所有学科。所以,能源问题引起的从基础到应用方面的研究,整体的、结构性的变化和冲击恐怕是很普遍、很大的,而这个时间跨度是50年或者100年。以核能为例,从布局到重大技术突破往往需要20年乃至更长时间,而商业化大规模应用也大致需要20年乃至更长时间。如果我们现在不前瞻布局,未来就会落后。法国已经做到第三代、第四代裂变能核反应堆,制定了到2040年、2050年的路线图。我们还没有认真做。为国家利益着想,中国科学院应该考虑这些问题,应该做前瞻的研究工作。

这次战略研究中涉及的十几个领域,只考虑近期或者中近期是不够的。比如农业,在过去,我们考虑要增产,后来讲优质,主要还是讲粮食和农副产品;在未来,肯定要走生态高值农业之路,需要多样化技术才能满足。日本、丹麦等发达国家开始用畜牧业来做生物反应器和农药,日本开始用植物来做生物反应器,

它比用动物来做更安全、成本更低。用无菌暖房种番茄、草莓、马铃薯等典型物种,通过转基因技术来生产高附加值产品。中国农业不仅要解决十几亿人口的粮食问题,也要考虑农副产品的增值问题,考虑农业的高技术发展问题。未来的农业还要生产一部分能源和工业所需要的原料,未来人类生存发展所需要的大量的材料可能从农业来。这些前瞻性的问题,现在一些发达国家已经在做,而我们过去考虑得不够。

还有人口问题。当年中国人口政策的失误要纠正过来,要到21世纪末才有可能回归到10亿左右人口,其带来的老龄化问题则很可能到22世纪才能得到化解。现在人口健康也面临许多新的挑战,我们是否现在就要研究未来50年应该采取的一些对策,13亿或15亿人口怎么能够享受到公平的、基本的公共卫生和医疗保障?必须发展先进的能够普及的健康科学和诊断治疗保健技术。随着社会进步和环境改善,发达国家的主要疾病从感染性疾病逐步转变为变异性疾病、代谢性疾病,研究重点也随之发生转变。很多问题世界上也没有解决,要从基础研究做起。

空天海洋是未来人类新拓展的发展空间和重要资源。在空天领域大家比较关注的有载人航天计划、嫦娥计划,可以做20年或25年。中国的空间技术究竟要走什么道路、什么目标?是不是走发达国家走过的老路?值得我们认真研究。现在空间运载工具的主流技术基本是化学燃料发动机推力火箭,以后的深空探测,是否还依靠化学燃料发动机?还是要发展新的等离子推进、核能推进、太阳风动力推进技术等?过去,这些问题只有少数科学家在想,我们在整体上没有战略性的前瞻研究和部署。海洋有丰富的矿产资源、油气、天然气水合物,还有大量的生物资源、能源,包括无光照条件下生物进化过程,都值得我们去探索。最近有许多国家出台了新的海洋战略规划,俄罗斯、加拿大、美国、瑞典、挪威都已加入争夺北极的行列。这方面我们有一点规划,但是很有限。

在国家与公共安全领域,安全的概念也在发展,包括传统安全与非传统安全,传统安全主要是外族入侵、战争威胁,现在的安全问题有自然原因的、人为原因的、外部的、内部的,还有生态的、环境的,网络发展以后,虚拟的安全问题也出现了。要从人类文明历史的长河角度观察分析矛盾的起因,从科技进步的角度提供解决问题的手段和方法,注重消除危及安全的根源,要在解决矛盾的同时更加珍惜生命。

总之,从面向未来中国的发展、面向未来人类的发展看,都需要我们开展前瞻的战略研究。过去250年工业化的发展,只解决了不到10亿人口的现代化问题,主要集中在欧洲、北美、日本和新加坡。今后50年,可以肯定的是,包括中国十几亿人口在内,至少有20亿、很可能有30亿人口,通过实现小康走向现代化,比过去250年要多2至3倍,这将为世界发展注入新的动力和活力,但也必然对地球的有限资源和生态环境带来新的挑战。需要找到新的发展模式,才能使生活在地球上的人类能够公平地分享现代文明的成果。这就要求我们要面向中国现代化建设进程,前瞻思考世界科技发展大势、前瞻思考人类文明进步的走向、前瞻思考现代化建设对科技的新要求,研究制定未来50年重要领域科技发展路线图,理清其中的核心科学问题和关键技术问题及其实现途径,为国家科技战略决策提供依据。

二、制定中国至2050年重要领域科技发展路线图的可能性

过去有一种观点认为,科学很难预见,它是随机发生的,主要依靠科学家的创造性思维;技术可以预见,但是有人说最多可以预见15年。我们做了一些思考,看来适当地前瞻领域方向还是可能的。比如,需求推动下的能源问题。随着化石能源的枯竭,更多的聪明人就想,要解决高效的太阳能薄膜材料和器件,要筛选或发展新的物种,把太阳能转化为高生物量。因为需求的推动,有更多的资源投入到这些方向,所以可以预见,在未来的50

年,可再生能源领域、核能领域一定会有新的突破性进展,大方向也是确定无疑的。比如,在太阳能方面,就是提高光电转化效率、光热转化效率。但具体技术路径可能有多种,如可能通过改变太阳能电池表面的形貌,经过反射能够更高效地全光谱吸收;可能把功能性薄膜建成多层,有透射有吸收;还有可能采用纳米技术、量子调控等。过去我们考虑量子调控,主要是要解决以后的信息功能材料,这是不够的,是否要有相当一部分量子调控的研究转移到能源问题上来,或者以能源为背景开展基础前沿的探索。

在计算机领域,我们过去的习惯是跟踪,现在我们要有信心前瞻,考虑未来的发展。这是可能的,并不是胡思乱想。要组织信息科技专家与物质科学和生命科学专家共同思考,进行前瞻性的探索。2007年诺贝尔物理学奖授予巨磁阻的发现者,现在这项技术已经用在硬盘存储上了,而这一发现是在20年前做出的。我们的初步结论是,做长周期的前瞻,做突破常规的科学思考和技术预见是可能的,通过战略研究,在长远目标指导下制定路线图也是可行的,比如说,到2020年为一个阶段,到2030年或2035年为一个阶段,然后再前瞻到2050年。

我们还可以分析其他领域,都能找到可能性。最重要的是要解放思想,当然也要尊重客观规律,不能胡思乱想。党的十一届三中全会确定了解放思想、实事求是的思想路线,中国才有今天的发展。我们就是要打破条条框框的束缚,根据中国的实际来探索发展的道路。科技发展的历史也无数次证明,只有不断地前瞻,不断地解放思想,打破已有常规,才有可能促进新的发现和新的突破。确定方向和领域,加大在这方面的支持强度,吸引更多的优秀科学家投入相关研究,这与需求牵引和自由探索并不矛盾。

三、中国科学院开展中国至2050年重要领域科技发展路线图研究的必要性

为什么我们要发起这项研究？中国科学院是国家科研机构，要作基础性、前瞻性、战略性贡献，要发挥骨干和引领作用，不往前思考怎么引领？从中国科学院自身发展来看，也很有必要，要以发展的眼光，站在世界科技发展的前沿，来思考知识创新工程三期以后做什么，是按着惯性走？还是想着国家民族的未来，在各领域提出我们的见解，逐步调整我们的结构，改革体制，把中国科学院创新能力提到一个新的发展阶段，把我们的科学使命、技术使命提到新的高度？显然，后者是积极的、有希望的、必须的。世界科技发展日新月异，在全球经济发展的态势下，如果不发展就会落后，如果不前瞻就会失去先机。我们做科技创新，必须不断地团结奋斗，打破陈规，不受干扰，不僵化，不停滞，这也是我们自身发展的需要。

这次路线图研究要站在国家和全局的角度，使这些战略研究报告成为国家更长远的发展规划的重要内涵，所提出的目标不一定是中国科学院都可以做的，我们不能包打天下。我们可以选择一些有能力做的进行前瞻布局，到时候就很自然地形成2010年以后中国科学院各个领域的发展目标和发展重点，很自然地形成我们改革调整的方向。

如果把长远目标和路线图搞清楚了，实现它还是要有体制机制、人才队伍、资源来源与配置等的保证。我们还要研究未来30~50年世界的创新体系和机制究竟会发生什么变化？是不是还是由大学、研究机构、企业组成？研究所会不会发展成为网格式的结构？基础与高技术融合的前沿研究、前沿研究与产业化迅速过渡与衔接的转化型研究，会不会在某些领域发展成为主流？未来创新体系的人才构成与人才激励机制、更新机制有什么新的发展变化？创新资源的投入来源与结构会有什么变化？如果我们把这些问题搞得比较清楚、比较前瞻，而且大胆地在某

些研究所进行试点,就可能走出一条有竞争力的、有更好发展态势的路子来。

社会的变革是无止境的,科技各领域也有无止境的前沿,创新体制与管理也要不断发展。中国科学院不能停止,必须要前进,科学技术要前瞻,组织结构、人才队伍、管理模式、资源结构也要前瞻,这样我们才能始终站在时代的前沿,不断发挥在国家创新体系中的骨干和引领作用,有些领域在国际上起引领作用也不是不可以设想的。这是我们这次组织科技路线图战略研究基本的出发点。

洛育祥

总 前 言

中国科学院是国家科学思想库,为国家科技战略决策提供科学依据、引领中国科学技术的发展,是我们的重要责任。

2007年7月,路甬祥院长提出:“看来在创新为科学发展观落实这一大题目之下,还要深入进行战略研究,刻画出未来20~30年的路线图(Roadmap)和关键科技创新领域来。并组织院内外专家深入讨论,进一步凝聚创新方向和目标。我们也不能只讲自由探索,只讲论文数量和质量,只满足于‘PI制’模式了。必须根据国家社会未来发展需求,尤其是经济持续增长和竞争力提升,社会持续和谐发展,生态环境持续进化和人类社会相协调的重点目标出发进行研究和归纳。”

2007年7月,中国科学院院务会议决定,根据国家社会未来发展需求,从经济持续增长和竞争力提升、社会持续和谐发展、生态环境持续进化与人类社会相协调等三大目标出发,开展面向未来的科技发展路线图战略研究。

2007年8月,路甬祥院长进一步提出:“战略研究看来还是要前瞻研究2050年世界、中国、科技。一是研究2050年的世界,分别从经济、社会、国家安全、生态与环境、科学技术进行前瞻,尤其要研究能源、资源、人口、健康、信息、安全、生态与环境、空间、海洋等,预测未来,了解面临的机会和挑战。二是研究未来2050年我国经济社会发展的前景和挑战,包括:经济结构、社会发展、能源结构、人口健康、生态与环境、国家安全、创新能力等应达到的目标和实现途径,科学技术需要给予的支持。三是研究科学发展对科学技术的指导作用,包括以人为本、科学与技

术、科技与经济、科技与社会、科技与生态环境、科技与文化、自主创新与开放合作等。四是研究科技对科学发展的支撑作用,包括支撑经济结构优化和增长方式的转变,农业发展、能源结构、资源节约、循环经济、知识社会,人与自然的和谐协调,区域发展的协调,和谐社会和国家安全,国际交流与合作。在此基础上再进一步明确我院的定位和职责。”

其后,中国科学院启动并组织开展了中国至2050年重要领域科技发展路线图战略研究,分18个领域进行,包括:能源、水资源、矿产资源、海洋、油气资源、人口健康、农业、生态与环境、生物质资源、区域发展、空间、信息、先进制造、先进材料、纳米、大科学装置、重大交叉前沿、国家与公共安全。该项研究集中了中国科学院300多位高水平科技、管理和情报专家,其中包括近60名院士,涉及80多个研究所。

经过历时一年多的深入研究,各领域研究组取得了实质性重大进展,基本理清了至2050年中国现代化建设对重要科技领域的战略需求,提出了若干核心科学问题与关键技术问题,从中国国情出发设计了相应的科技发展路线图,形成了18个领域中国至2050年科技发展路线图的战略研究报告。在此基础上,路甬祥院长领导战略总体组和起草组完成了《迎接新科技革命挑战,支持科学与持续发展》的战略研究总报告。这些研究报告将以“《创新2050:科学技术与中国的未来》中国科学院战略研究系列报告”的形式陆续出版。

这次战略研究的鲜明特色是采用了科技路线图的方法。科技路线图研究有别于一般的规划和技术预见,它包含了满足未来发展需求的科学和技术,以及实现这些目标所选择的路径,描绘环境变化、研究需求、科技发展方向、创新轨迹、技术演进等。以路线图为基础的科技规划,科技目标更加清晰,与市场的结合更加紧密,选择的方向、项目间更有内在联系和更加系统,实现目标的途径更加明确,规划的操作性更强。我们借鉴国际上制

定路线图的方法,吸纳我国进行科技战略规划的成功经验,在研究实践中形成了制定重要领域科技路线图的系统方法。

一是建立重要领域科技发展路线图战略研究的组织体系。成立战略总体组,路甬祥院长总负责,白春礼、施尔畏、方新、李志刚、曹效业、潘教峰参加。成立总报告起草组,负责总报告的研究与撰写。规划战略局作为主管部门,具体负责路线图研究的组织与协调,通过组织研究队伍、明确节点目标、提出任务要求、提供研究方法、组织集中研讨、进行独立评议、参与研究工作等方式,保证了重要领域科技发展路线图战略研究工作的顺利开展。

二是明确重要领域科技发展路线图的基本要求。集中从国家层面考虑问题,分近期(2020年前后)、中期(2030年前后或2035年前后)、长期(2050年前后)三个阶段,描绘相关领域的需求、目标、任务、途径,重点刻画核心科学问题和关键技术问题,总体上体现方向性、战略性、一定的可操作性。提出路线图研究的基本框架。

三是组织好重要领域科技发展路线图战略研究队伍。建立集战略科技专家、一线中青年专家、情报专家和管理专家为一体的专题研究组持续开展研究。选择具有战略眼光、强烈的责任心和组织协调能力的战略科学家作为研究组负责人,把握好研究的整体和方向。在主要方向上,选择一线高水平科技专家作为骨干,使战略研究工作建构在最前沿研究基础之上。各研究组均配备文献情报专家,采用数据挖掘与分析等战略情报工具,提高研究效率和系统性。参加研究的科技管理专家着重开展国家战略需求和可操作性研究。

四是建立多层次、经常化交流研讨机制。将交流研讨作为确定研究节点和推动研究工作的抓手。组织开展了五个层次的交流研讨,包括:第一,集中交流研讨。2007年10月、12月和2008年6月组织了三次交流汇报会,18个领域研究组负责人和

主要科技专家、中国科学院相关院局领导参加,相互交流、相互促进、寻求共识,进一步明确研究方向。路甬祥院长在三次研讨会上,系统阐释了路线图研究的重要性、必要性和可能性等,并对各研究组的研究工作进行点评,有力地促进了研究工作的深入开展。第二,专题研讨。战略总体组组织相关研究组的战略科技专家,围绕我国八大经济社会基础和战略体系的构建进行专题研讨,着重刻画了至2050年依靠科技支撑我国现代化进程的宏观图景、八大体系的特征与目标,提炼出影响我国现代化进程的22个战略性科技问题。第三,研究组层面的交流研讨。各领域研究组根据具体领域内容又分成若干研究小组,通过集中研讨、分小组研究、综合集成等形式,组织本组专家深入研究。一些研究组在集中研讨时还根据研究主题,吸收相关领域的专家参加研讨。初步统计,研究组层面的集中交流研讨约70次。第四,相关研究组之间交流研讨。采取相关研究组自发组织和规划战略局协调组织等方式,组织跨领域、跨研究组的交叉研讨,使相关领域的研究相互协调。第五,一些研究组以召开领域发展战略研讨会等方式,吸纳国内外专家的意见。

五是建立重要领域科技发展路线图评议机制。为保证各领域战略研究报告的质量,加强相关领域的协调,2008年11月,规划战略局组织了重要科技领域发展路线图战略研究评议工作,近30位评议专家和50位研究组专家参加研讨。评议分资源环境、战略高技术、生物技术和基础研究等4个大组进行,评议专家听取了相关研究组的报告,对报告的总体情况、创新点、存在的问题进行了评议,并提出了许多建设性意见和建议。评议结果形成书面评议意见,反馈给相关研究组修改。

六是建立重要领域科技发展路线图持续研究的机制。从路线图研究的特点看,为适应世界科技和国家需求的迅速变化,需要持续研究,3~5年修订一次。为此,需要从组织和队伍上保持一批战略科技专家持续关注和研究国家长远发展的重点科技领

域和重大科技问题；同时，在持续战略研究中，培养和造就更多的战略科技专家。

这套系列报告是中国科学院立足当前、展望未来、凝聚专家智慧的报告，体现了一丝不苟、严谨求实的治学作风。在此，向参与研究和咨询评议的专家表示衷心的感谢。正是他们的辛勤劳动和共同努力，才使得这套系列报告在一年多的时间内就得以公开出版、与社会见面。

准确预见未来发展是一件令人激动而又相当困难的事情。这次战略研究涉及领域众多、时间跨度大、研究方法新，加之认识和判断本身上的局限性，系列报告还存在不足之处，欢迎国内外各方面专家、学者不吝赐教。需要说明的是，报告中提到的未来50年是指到21世纪中叶。

系列报告的出版，不是研究的终点，而是新的起点，我们将在此基础上持续深入开展重要领域科技发展路线图战略研究，并适时发布研究成果，每5年修订一次相关领域科技发展路线图，为国家宏观科技决策提供科学建议，为科技管理部门、科研机构、企业和大学等进行科技战略选择提供参考，使社会和公众更好地了解科技对我国现代化建设至关重要的作用。

总报告起草组

2009年2月