

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

冰冻圈科学

国家自然科学基金委员会
中国科学院



科学出版社



国家科学思想库

中国学科发展战略

冰冻圈科学

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

冰冻圈科学 / 国家自然科学基金委员会, 中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2018.6

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-056692-8

I. ①冰… II. ①国… ②中… III. ①冰川学-学科发展-发展战略-中国
IV. ①P343.6-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第042040号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 张 莉 刘巧巧 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张克忠 / 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>

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

*

2018年6月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 240 000

定价: 78.00 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·冰冻圈科学

项 目 组

主 编：秦大河

副 主 编：姚檀栋 丁永建 任贾文

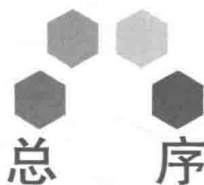
编委会成员（以姓氏汉语拼音为序）：

陈仁升	丁永建	方一平	康世昌	李志军
刘时银	罗 勇	马丽娟	秦大河	任贾文
王根绪	王宁练	王世金	温家洪	吴青柏
效存德	杨建平	姚檀栋	宜树华	张廷军

秘 书 组：马丽娟 王世金 王文华

特邀专家（以姓氏汉语拼音为序）：

陈发虎	崔 鹏	傅伯杰	何大明	赖远明
李新荣	秦为稼	申倚敏	史培军	孙 波
宋长青	张人禾	赵进平		



总 序

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，特别是理论研究与实验科学相结合，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。

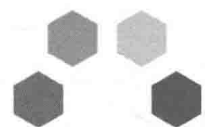
基金委和中科院共同组织的学科发展战略研究既分析相关学科领域的发展趋势与应用前景，又提出与学科发展相关的人才队伍布局、环境条件建设、资助机制创新等方面的政策建议，还针对某一类学科发展所面临的共性政策问题，开展专题学科战略与政策研究。自2012年开始，平均每年部署10项左右学科发展战略研究项目，其中既有传统学科中的新增长点或交叉学科，如物理学中的软凝聚态物理、化学中的能源化学、生物学中生命组学等，也有面向具有重大应用背景的新兴战略研究领域，如再生医学、冰冻圈科学、高功率、高光束质量半导体激光发展战略研究等，还有以具体学科为例开展的关于依托重大科学设施与平台发展的学科政策研究。

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

20 世纪中期以来，随着全球变暖趋势的加快加强，环境保护、生态保育、应对气候变化、实现可持续发展转型被提上议事日程，中国政府提出了树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念，以实现中华民族永续发展、造福全人类、保护地球的伟大目标。国家自然科学基金委员会与中国科学院学部联合部署项目——“冰冻圈科学发展战略”，就是针对特殊自然和人文地理环境，从战略的高度超前部署的学科发展战略研究。

冰冻圈是指地球表层连续分布且具有一定厚度的负温圈层。冰冻圈与大气圈、水圈、岩石圈（表层）、生物圈和人类圈相互作用，通过水分、热量、动量和物质交换，促进了气候系统乃至地球系统各圈层之间的联动，在经济社会和可持续发展中扮演着重要角色。其中，冰川、冻土、积雪、海冰等冰冻圈组成要素的变化已经成为全球关注的热点，而冰冻圈与其他圈层相互作用，以及对经济社会可持续发展的影响更是科学家越来越感兴趣的问题，也是人类社会发展不可忽视的重大科学问题。在半个多世纪几代科学家拼搏的基础上，中国科学家不失时机地把握环境科学发展国际趋势，在国际上率先提出了冰冻圈科学的理念和科学内涵，推动了冰冻圈科学体系的初步形成，使其在短期内得以快速发展。冰冻圈科学的经营理念是将自然科学和社会发展密切结合，为经济社会可持续发展服务。

综观十几年来国内外发展态势，冰冻圈科学在冰冻圈动态过程及其影响因素，冰冻圈变化对天气气候、水文水资源、生态系统等的影响与适应研究等方面做了大量研究，进展显著。在深化认识冰

冻圈形成、演化机理和过程的同时,更关注与其他圈层的相互作用,以及这种相互作用过程中的冰冻圈效应,研究方向也由以往的基础研究向当前的应用研究拓展。由于对气候变化高度敏感及反馈作用突出,冰冻圈成为气候系统最活跃的圈层,也是全球变化与可持续发展研究的热点之一。2007年,国际大地测量学和地球物理学联合会(IUGG)大会决定设立国际冰冻圈科学协会(IACS),这是该联合会成立80多年来,首次增加的一级学会,使以前单纯的雪、冰研究从三级学科跃升到一级学科,成为一门将冰冻圈与气候系统其他圈层和社会经济与可持续发展等多圈层紧密结合、多学科有机融合的新兴交叉学科。

近年来,冰冻圈与其他圈层的互馈联系研究不断深入,建模和预估未来变化的研究水平不断提高;冰冻圈与寒区工程建设、资源开发、防灾减灾、冰冻圈变化影响评估、未来风险防范,以及冰冻圈服务功能的开发利用和制图等许多方面,都受到格外重视。目前,冰冻圈科学在研究范畴、内容、技术手段等方面都发生着迅猛变化。然而,学界内部、社会公众和管理层对冰冻圈科学的新发展和未来趋势并未有充分的了解,高等院校也缺乏适应新需求的师资培养,研究队伍亟待加强。为此,我们开展战略研究,对冰冻圈科学的学科体系、组成架构、未来布局、重点研究内容等进行了梳理,既有详细、系统的论述,也有战略规划,希望能达到促进冰冻圈科学健康发展的目的。

本项目组专家经过反复研讨,总结了冰冻圈科学的学科特点和科学意义,梳理了从冰冻圈到冰冻圈科学的发展历程,追踪了冰冻圈科学研究的国际热点及最新态势,总结了冰冻圈科学前期的研究成果。本书围绕学科特点、国际前沿及社会需求,布局和谋划了未来5~10年冰冻圈科学的总体研究思路和发展方向。基于冰冻圈科学的核心主线,并结合当前国际相关科学发展态势,本书从“冰冻圈物理和化学过程”“冰冻圈与气候模拟”“冰冻圈与生物地球化学循环”“冰冻圈与水文水资源”“冰冻圈与地表环境”“冰冻圈与重大工程”“冰冻圈与可持续发展”七个方面开展了系统性战略研究,不仅涉及冰冻圈自身的机理过程 and 变化规律,而且更多地关注了冰

冻圈与气候、生态、水文、地表环境及可持续发展的关系。立足现状,厘清问题,规划未来,如能付诸实施,将有助于中国科学家在国际冰冻圈科学体系化建设和引领其未来发挥作用。

此前,本项目组专家在国家自然科学基金委员会和中国科学院有关项目支持之下,已经出版了《英汉冰冻圈科学词汇》和《冰冻圈科学辞典》,完成了《冰冻圈科学概论》的编纂工作,这是冰冻圈科学的奠基性工作,也是本书写作的基础。今后,随着全球变暖的进一步加剧,冰冻圈变化的影响范围和程度的日益增加,新技术、新方法、新思路的不断涌现,一些不可预见的科学问题和研究方向也会提到议事日程上。为保持中国冰冻圈科学研究在国际上领跑的态势,考虑到制约发展的政策和措施,项目组从能力建设、队伍建设、平台建设、国际合作政策、组织保障等方面,提出了学科发展的有效资助机制与政策建议。

本项目于2016年1月启动,撰写人员来自中国科学院西北生态环境资源研究院(筹)、中国科学院成都山地灾害与环境研究所、中国科学院青藏高原研究所、清华大学、兰州大学、大连理工大学、西北大学、云南大学、上海师范大学等单位的18名专家,分别于2015年12月20~21日、2016年5月14~15日、2016年7月4~6日、8月27~29日、10月18~20日和2017年4月17~20日召开了6次全体成员会议,另有4次小型专题讨论会。在此期间,还邀请了不同领域的专家进行了咨询与研讨,于2017年4月底基本定稿,2017年8月又进行了小范围最后审稿。本书的主要撰稿人如下:第一章秦大河、姚檀栋、王世金,第二章任贾文、张廷军,第三章罗勇、效存德,第四章王根绪、宜树华,第五章丁永建、陈仁升,第六章王宁练、刘时银、姚檀栋,第七章吴青柏、李志军,第八章方一平、杨建平、王世金、温家洪,第九章康世昌、温家洪。

在本项目执行过程中,国家自然科学基金委员会与中国科学院学部工作局给予了大力支持,并得到云南大学、大连理工大学、上海气象局和依托单位中国科学院西北生态环境资源研究院(筹)等单位的支持。本书出版得到了国家自然科学基金委员会与中国科学院学部联合部署项目(L1524012/2015DXC01)、国家自然科学基金

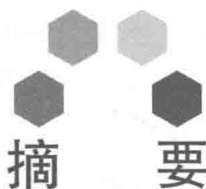
基金创新研究群体项目(41421061)、国家自然科学基金重大项目(41690140)、国家重大科学研究计划项目(2013CBA01800)、冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCS-ZZ-2017)的共同资助,在此一并表示衷心感谢。

一个新学科的成长,需要各方面的支持和关怀。鉴于撰写专家的知识 and 学术水平有限,加之冰冻圈科学的大跨度学科交叉特色,本书内容难免存在不足之处,诚恳希望广大读者关心和支持,不吝批评、斧正,则不胜感激。

秦大河

中国科学院院士、中国科学院学术委员会主任

2018年1月30日



摘 要

冰冻圈是地球表层连续分布并具有一定厚度的负温圈层，是气候系统五大圈层之一，与气候系统其他圈层和人类圈相互作用，在全球变化研究中扮演着重要角色，为人类社会经济发展和向可持续发展转型做贡献。进入 21 世纪，冰冻圈科学已发展成为地球与环境科学和社会经济学交叉的新兴学科。在全球气候变暖的形势下，为促进学科发展，适应和满足社会需求，亟须系统梳理和总结冰冻圈科学的前期研究成果，把握前进方向，提出未来一段时间内的学科发展思路。为此，本书围绕冰冻圈科学体系，明晰了冰冻圈科学的学科特点和规律，系统总结了过去几十年冰冻圈科学研究的发展趋势，提出了未来 5~10 年中国冰冻圈科学拟重点关注的研究方向和关键科学问题，并就为推动、创新、发展冰冻圈科学提出了相应的资助机制和政策建议。

本书共包括九章。第一章明晰了冰冻圈组成要素、分类和时空尺度，界定了冰冻圈的科学内涵和范畴，归纳了冰冻圈科学的发展与学科特点，对近 10 年（2008~2017 年）美国国家科学基金会和国家自然科学基金对冰冻圈科学学科领域的资助项目情况进行了对比分析。在此基础上，提出了未来 5~10 年中国冰冻圈科学研究的若干重要研究领域。

第二章深入研究冰冻圈物理和化学过程，对冰冻圈各种物理和化学特征进行定量刻画，同时提出要继续加强冰冻圈物理和化学过程监测，着力发展各种相关物理化学过程的模式研究，为提高冰冻圈模拟研究水平奠定基础。

第三章在系统梳理冰冻圈在全球和区域气候系统中的作用

及冰冻圈分量模式在国内外发展趋势的基础上,提出未来 10 年应重点突破冰冻圈在气候系统模式中的精细化描述,冰冻圈要素对气候变化响应的定量化研究的总目标。建议通过加强不同时空尺度气候系统与冰冻圈的相互作用与反馈研究、冰冻圈快速变化对气候系统影响的定量辨识研究,在耦合模式与同化系统研发、海平面效应、北极放大器及其气候效应,以及冰冻圈变化对极端天气气候事件、季风与长期气候变化影响等方面深化研究。

第四章系统解析了冰冻圈与生物圈相互作用关系及其对生物地球化学循环的驱动机理,准确识别了冰冻圈生物地球化学循环变化的气候及环境反馈影响,提出未来冰冻圈生物地球化学循环应在生态系统响应冰冻圈变化的中长期综合观测与多源数据集成研究、积雪与冻土变化对陆地生物地球化学过程的影响与驱动机制、冰冻圈生物地球化学循环机理模型与未来变化趋势预估、冰冻圈有机污染物/痕量化学物质变化的环境指示与安全风险、冰冻圈变化对海洋碳氮磷循环的影响几方面作为优先研究方向。

第五章围绕深化对宏观尺度(全球、区域)冰冻圈水循环过程及其影响的科学认识,精细化流域冰冻圈水文过程研究及定量、动态评估冰冻圈水资源影响的科学目标,针对不同冰冻圈水文要素的水文水资源效应和时空尺度与耦合两大关键科学问题,未来应重点开展冰川动力与水文过程的耦合机制、冻土水文过程及效应、雪水文过程的尺度效应及其水资源影响、海冰水文过程、流域冰冻圈全要素水文过程及其模拟与水资源影响评估和不同冰冻圈水文要素在大洋环流中的作用及其尺度问题等方向的研究。

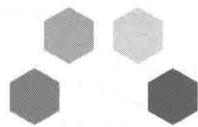
第六章着重介绍与冰冻圈相关的地表过程,未来亟须开展全球气候变化背景下冰冻圈变化对灾害的形成机理及其变化趋势研究、冰冻圈地貌过程的定量化研究。同时,应优先考虑寒区地表化学风化、冰川消融、海平面上升与海岸带过程、冻土退化与地表环境、冰冻圈灾害等研究方向。

第七章提出冰冻圈重大工程应以气候变化、冰冻圈变化与灾害、重大工程相互作用为纽带,以强化重大工程监测网络和工程安全保障技术与预警系统研发为核心技术,针对冰冻圈环境变化与重

大工程的互馈关系、冰冻圈重大工程的致灾机理及其环境效应、重大工程服役性和可靠性评价三大关键科学问题,未来应重点开展冰冻圈作用区重大工程的灾害和环境效应及风险评估、冰冻圈与重大工程的热力作用机制及其反馈效应、冰冻圈作用区重大工程安全与保障关键技术等方向的研究。

第八章系统总结以往冰冻圈与可持续发展方面的研究成果,认为冰冻圈科学已由单一自然学科转向自然-人文学科综合,由定性描述和指标评估转向模型精细刻画,由关注灾害转向灾害风险效应和服务功能并重,由典型流域和关键地区转向典型区、国家和全球冰冻圈并重,由注重学术价值转向学术价值和国家战略服务并重迈进,未来应该构建和完善冰冻圈与社会经济耦合模型,量化冰冻圈变化对社会经济的影响,提出冰冻圈变化风险的适应途径与措施。同时,需要确定冰冻圈可利用的资源形态,量化冰冻圈服务功能及其价值,揭示冰冻圈变化与国际地缘关系,开发应对方案与适应战略。

近10年来,我国冰冻圈科学发展迅速,建立了冰冻圈科学体系,在冰冻圈的形成、机理和变化、冰冻圈与其他圈层的相互作用、冰冻圈变化的影响与经济社会可持续发展方面开展了系统的研究工作,在亚洲山地冰川、多年冻土和积雪研究方面取得了诸多原创性的成果。然而,与冰冻圈科学发展靠前的国家相比,我国在诸多领域仍存在差距,特别是在极地冰冻圈研究方面差距较大。为确保中国在冰冻圈科学的优势领域,弥补不足及相对落后的研究方向,第九章结合制约本学科发展的关键政策和措施问题,从能力建设、人才队伍建设、平台与监测能力建设、国际合作政策、组织保障等方面出发,提出学科发展的有效资助机制与政策建议,特别是提出通过学科交叉、人才培养、国际合作、平台设施建设等综合途径推动学科发展的政策建议。



Abstract

The joint leading group of the Natural Science Foundation of China (NSFC) and the Chinese Academy of Sciences (CAS) organizes and develops a series of national scientific strategies for next 5 to 10 years in China, of which the strategy for cryospheric science has been proposed in this book. The cryosphere is a continuous sphere of the near Earth's surface with temperature at or below the freezing point. It is one of the five spheres, i.e., atmosphere, biosphere, hydrosphere, lithosphere and cryosphere, in climate system. The cryosphere plays a key role in global change because of its closely interactions with the other spheres in climate system and with human beings. Since the turn of the 21st century, cryospheric science has been developed into a new multi-disciplinary subject of earth and environmental sciences and closely interacted with social-economic sciences. In order to promote the development of the scientific discipline and to meet the societal requirements in a warming world, cryospheric science is desperately needed to reorganize and systematically summarize the most up-to-date knowledge, providing an overall strategy for advancements in the near future. Thus, this report comprehensively illustrates scientific achievements of the cryospheric science system over the past several decades. It raises key scientific questions and recommends directions for cryospheric science in China over the next 5 to 10 years. Meanwhile, this book offers recommendations for the corresponding funding mechanisms and policies to government agencies for promoting and advancing