

ATMOSPHERIC SCIENCE

大气科学和 全球气候变化研究

重大科学问题

黄荣辉 吴国雄 陈 文 刘屹岷 周连童 周德刚 刘 永 / 等著



科学出版社

ATMOSPHERIC SCIENCE

大气科学和 全球气候变化研究

重大科学问题

黄荣辉 吴国雄 陈 文 刘屹岷 周连童 周德刚 刘 永 / 等著



科学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

大气科学和全球气候变化研究重大科学问题 / 黄荣辉等著. — 北京: 科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-048463-5

I. ①大… II. ①黄… III. ①大气科学 - 研究 ②气候变化 - 研究 IV. ①P4 ②P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 119647 号

责任编辑: 石 卉 / 责任校对: 郑金红
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 有道文化

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>

北京利丰雅高长城印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张: 13

字数: 262 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编写组^①

组 长

黄荣辉 吴国雄

副组长

陈 文 刘屹岷 周连童 周德刚 刘 永

成 员

(以姓氏笔画为序)

王 林 王会军 卞建春 朱 江 李建平
杨修群 肖子牛 张人禾 陆日宇 林朝辉
郗秀书 周天军 胡 非 胡永云 段安民
徐永福 高守亭 温之平 管兆勇

① 陈洪滨、夏祥鳌、蔡兆南、潘蔚林参加了第十章的编写。

前 言

20世纪，大气科学取得了迅速的发展，已成为一门包括大气动力学、大气物理学和大气化学等的综合性科学。特别是20世纪80年代以来，全球气候变化成为世界各国政府和民众所关心的重大社会和科学问题，亦是各国外交谈判的焦点。同时，旱涝、酷暑和严寒等气候灾害与台风、暴雨等天气灾害的发生日益频繁，大气污染日益加重，这些都严重影响着世界各国社会和经济的可持续发展，并对大气科学和全球气候变化等方面的研究提出了许多新的重大科学问题。

为回顾近百年来大气科学的发展历程及中国科学家对国际大气科学和全球气候变化研究发展做出的贡献，分析当前国际大气科学和全球气候变化研究的发展特点、动向和趋势，提炼出大气科学和全球气候变化研究的重大前沿科学问题及符合我国发展需求的重大战略研究方向及相应的措施，经中国科学院地学部常务委员会批准，“大气科学与全球气候变化重大科学问题”成为中国科学院地学部大气科学的学科发展战略研究项目。此项目自2011年4月18日启动以来，特别从2013年3月20日又作为国家自然科学基金委员会与中国科学院学部关于学科发展战略合作研究项目启动以来，来自中国科学院大气物理研究所、中国气象局及相关大学的两院院士（中国科学院和中国工程院）、著名学者、学科带头人和部分业务骨干，在项目负责人黄荣辉和吴国雄院士的领导下，经过四年多的辛勤调研，系统地回顾了近百年来国内外大气科学和全球气候变化

各个分支领域研究的发展历程及当前的研究现状；分析了大气科学和全球气候变化研究各个分支领域的发展动向、特征及未来发展趋势，提出了今后5~10年是我国大气科学和全球气候变化研究发展的战略机遇期。并且，项目组讨论了今后5~10年我国大气科学和全球气候变化研究需要重点发展的研究领域及关键的科学问题，在此基础上，凝练出大气科学和全球气候变化研究的重大科学问题；并针对当前亟须发展的计算和观测平台及人才培养等方面应采取的重大措施提出建议，为我国从大气科学研究大国走向大气科学研究强国奠定基础。

经过多次研讨，专家学者们提出了大气科学和全球气候变化研究各领域的重大前沿科学问题及我国从大气科学研究大国发展成为大气科学研究强国应采取的重大措施和建议。这些对于国家科技管理和科学基金部门今后制订大气科学和全球气候变化研究的发展规划和计划，以及重大研究项目和课题将可能起到很好的参考和借鉴作用。为此，国家自然科学基金委员会与中国科学院学部学科发展合作研究项目“大气科学与全球气候变化重大科学问题”工作组和秘书组把上述多次研讨会上许多学者和专家所提出的关于大气科学和全球气候变化研究各领域重大科学问题的研讨结果凝练成本书，以供有关部门和学者参考。

本书分为两大部分。第一部分主要回顾并总结国际、国内近百年来大气科学和近几十年全球气候变化的研究进展，近年来国际大气科学和全球气候变化研究的特点、动向及趋势，我国大气科学和全球气候变化研究方面的不足之处，以及未来10~20年经济建设和社会发展对大气科学和全球气候变化研究的国家需求。第二部分是依据国际大气科学和全球气候变化研究的发展动向和针对今后我国国家需求而提出的八个亟须研究的重大科学问题：灾害性天气和气候的发生机理及其预测，大气环境灾害的发生机理与预报理论，东亚气候对全球气候变化的影响、响应、机理和应对，地球/气候系统数值模型的发展，平流层过程与日地关系，青藏高原地-气耦合过程及其气候效应，西太平洋暖池海-气相互作用及其天气气候效应，大气探测新原理和前沿技术。

本项目的研究和本书的出版得到中国科学院地学部学科发展战略研究项目及国家自然科学基金委员会与中国科学院学部学科发展战略合作研究项目的资助。本书的完成凝聚了在多次研讨会上众多专家学者的贡献，这些学者包括

曾庆存、丑纪范、李崇银、符淙斌、吕达仁、穆穆、丁一汇、石广玉、王会军等院士，王守荣、高守亭、张人禾、胡永云、杨修群、管照勇、温之平、陈文、刘屹岷、李建平、戴永久、朱江、陆日宇、周天军、胡非、卞建春、徐永福、鄧秀书、林朝辉、肖子牛、浦一芬、段安民等教授或研究员和王林副研究员，以及中国气象局罗云峰司长、中国科学院任晓波处长、国家自然科学基金委员会张朝林处长。其中有多位学者撰写了本书的有关章节，项目负责人黄荣辉、吴国雄两位院士对本书的章节安排和编写内容做了详细修改。并且，项目秘书组周连童研究员、周德刚和王林副研究员为研讨会的召开及有关材料的整理花费了大量精力，特别是周德刚副研究员、刘永和皇甫静亮助理研究员为本书的文字、插图和参考文献做了大量工作。此外，中国科学院地学部办公室申倚敏主任和龚剑明博士从本项目立项到项目实施和各次研讨会都给予了大力的支持和关照，科学出版社石卉编辑对于本书给予精心编辑。本书中经原作者同意后引用了不少有关领域的研究成果或示意图，对于上述的贡献和帮助谨此表示衷心感谢。

由于时间和编者学识有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者指正。

项目负责人：黄荣辉 吴国雄

项目工作组、秘书组

2015年4月于北京

目 录

前言

第一章 国际近百年大气科学和近几十年全球气候变化研究的重大研究成就… 1

第一节 引言	1
第二节 全球多层次、多尺度三维大气观测网的建立	2
第三节 大气环流波动理论体系和天气预报理论的创立	5
第四节 大气环流演变的预测和数值模拟试验的发展	11
第五节 大气物理学迅速发展	13
第六节 中小尺度天气系统的预报和人工影响天气的发展	14
第七节 大气环境与大气化学学科的兴起和发展	16
第八节 中层大气科学研究的重要进展	19
第九节 气候系统动力学和数值模拟与预测的研究蓬勃发展	23
第十节 全球增暖及其对环境的影响成为地球科学研究的热点	26
参考文献	30

第二章 我国近几十年来大气科学和全球气候变化研究的重大成就…………… 36

第一节 引言	36
第二节 多尺度三维大气综合观测网的建立	37
第三节 东亚季风系统和大气环流的理论体系以及我国天气预报的理论基础的建立	39

第四节	数值天气预报研究蓬勃发展	44
第五节	暴雨及中小尺度天气系统动力学和人工影响天气的研究发展迅速	46
第六节	大气物理学研究有了长足的进步	49
第七节	大气环境与大气化学已成为政府和民众十分关心的研究领域	53
第八节	气候动力学和气候预测研究迅速发展	56
第九节	应对气候变化研究发展迅速	62
参考文献		65
第三章	重大问题一：灾害性天气和气候发生机理及其预测	69
第一节	引言	69
第二节	国际研究动态	73
第三节	亟须开展研究的科学问题	75
第四节	关键的科学问题	80
第五节	对今后研究的主要建议和措施	81
参考文献		83
第四章	重大问题二：大气环境灾害的发生机理与预报理论	85
第一节	引言	85
第二节	我国大气污染的严重性	86
第三节	国际研究动态	90
第四节	亟须开展研究的科学问题	95
第五节	关键的科学问题	97
第六节	对今后研究的主要建议和措施	99
参考文献		100
第五章	重大问题三：东亚气候对全球气候变化的影响、响应、 机理和应对	102
第一节	引言	102
第二节	国际研究动态	103

第三节 亟须开展研究的科学问题	107
第四节 关键的科学问题	111
第五节 对今后研究的主要建议和措施	112
参考文献	114
第六章 重大问题四：地球/气候系统数值模型的发展	115
第一节 引言	115
第二节 发展地球/气候系统数值模型的科学意义	116
第三节 国内外研究动态	118
第四节 亟须开展研究的科学问题	121
第五节 关键的科学问题	123
第六节 对今后研究的主要建议和措施	125
参考文献	126
第七章 重大问题五：平流层过程与日地关系	127
第一节 引言	127
第二节 国内外研究动态	128
第三节 亟须开展研究的科学问题	132
第四节 关键的科学问题	137
第五节 对今后研究的主要建议和措施	138
参考文献	140
第八章 重大问题六：青藏高原地-气耦合过程及其气候效应	141
第一节 引言	141
第二节 国内外研究动态	142
第三节 亟须开展研究的科学问题	147
第四节 关键的科学问题	151
第五节 对今后研究的主要建议和措施	152
参考文献	154

第九章 重大问题七：西太平洋暖池海-气相互作用及其天气气候效应 155

 第一节 引言155

 第二节 国内外研究动态156

 第三节 亟须开展研究的科学问题160

 第四节 关键的科学问题167

 第五节 对今后研究的主要建议和措施168

 参考文献170

第十章 重大科学问题八：大气探测的新原理和前沿技术..... 174

 第一节 引言174

 第二节 我国大气探测技术发展现状和问题175

 第三节 大气探测技术国际发展动态181

 第四节 亟须发展的大气探测前沿技术185

 第五节 对今后研究的主要建议和措施190

 参考文献192

结束语..... 193

第一章

国际近百年大气科学和近几十年全球气候变化研究的重大研究成就

第一节 引言

20 世纪，由于大气观测技术的不断完善，特别是空基和地基遥感技术的发展和应用，以及计算机技术的迅速发展，大气科学得到非常迅速的发展，已成为一门拥有众多分支领域的综合性现代科学(黄荣辉，2001)。

回顾大气科学近百年来的发展历程，大气科学的发展可分为两个时期：第一时期主要是发展大气探测技术，建立大气观测网，对大气各种现象的运动状态、成分演变进行监测，并且运用数理科学对从对流层到平流层和中间层大气运动状态、成分演变的动力、热力过程及其机理进行解释，以及利用计算机和运用描述大气变化的运动方程组进行天气预报和大气环流演变的数值模拟；第二时期则是认识到大气两周以上的气候变化不仅仅是大气内部的动力、热力过程相互作用的结果，而且是大气圈、海洋、陆面、冰雪等相互作用的结果，此时期主要发展大气空基和地基遥感技术，研究气候系统动力学与气候预测、全球气候变化等方面。

本章主要回顾国际近百年大气科学和近几十年全球气候变化研究的重大研究成就。

第二节 全球多层次、多尺度三维大气观测网的建立

大气探测是大气科学的基础,只有充分的观测资料,大气科学的各分支领域才有可能得到发展。经过百年的努力,全球已建立了多层次、多尺度的可定时观测的三维大气观测网,它不仅包括常规观测网,而且还包括空基遥感和地基遥感等非常规观测网(国家自然科学基金委员会,1995;许健民,2000)。

一、多层次、多尺度的大气定时观测网的建立

20 世纪初,大气探测一般只能在地面上对大气温度、湿度、气压进行观测。由于 20 世纪 20 年代(1928 年)无线电探空的发明及三四十年代第二次世界大战对天气预报的需求,高空大气探测迅速在陆地上得到推广。到了 50 年代,全球陆地上初步形成了可定时对大气状态进行观测的高空和地面观测网。并且,60 年代气象卫星的发射成功,使得对大气的空基遥感探测成为可能。由于大气的空基遥感具有许多优点,特别是可以探测到海洋、沙漠和高原区域上空难于用常规方法观测到的气象要素,在 60 年代之后,卫星遥感图像和数据被广泛应用于天气预报。从这些遥感资料中不仅可以得到全球云的分布状况,而且可以获得更高层次的气象要素,因此,气象卫星的遥感资料也被广泛用于短期气候预测。经过近一个世纪的努力,大气探测已形成了全球多层次、多尺度且可定时观测的三维探测网,不仅在全球建立了地面、高空气象要素的常规观测网,而且形成了以气象卫星为中心的全球非常规大气观测网。如图 1-2-1 所示,这个全球大气观测网不仅可以为研究大尺度大气环流的变化和中、小尺度天气系统的发生、发展以及气候变化提供丰富的观测事实,而且还可以为天气预报和气候预测提供大量的观测资料。

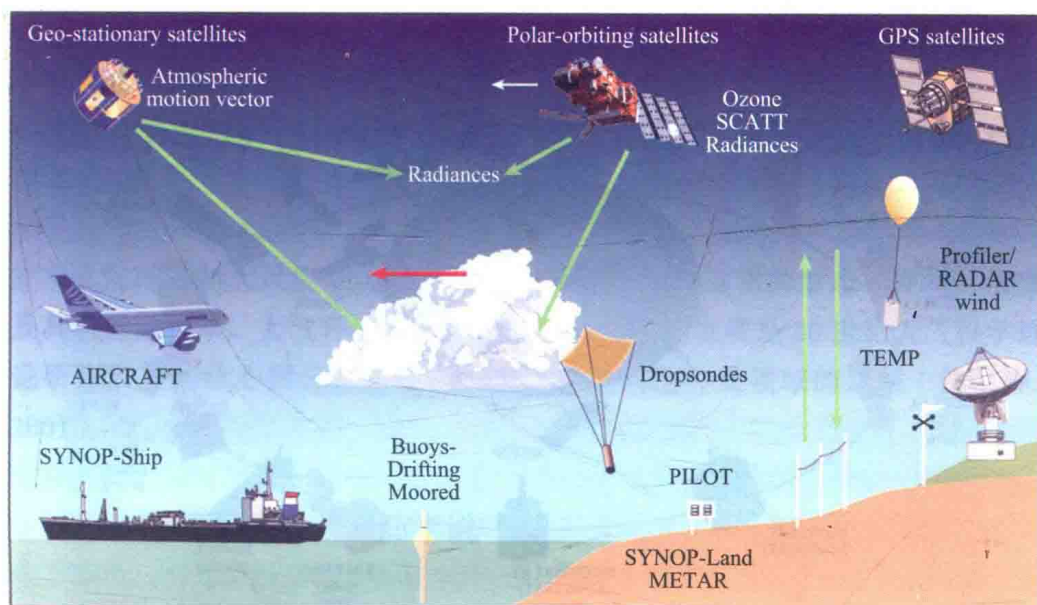


图1-2-1 欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 资料同化的观测 (图引自<http://www.ecmwf.int/en/research/data-assimilation/observations>[2015-5-30])

二、空基大气遥感观测体系的建立

从 20 世纪 70 年代末起, 大气遥感技术不仅实现了空基定性遥感向定量遥感的转变, 而且建立了高轨地球静止环境业务卫星 (GOES) 的观测系统和第三代低轨业务卫星系统。GOES 系统由四个地球静止卫星组成, 它的观测区域覆盖了地球大部分地区。如图 1-2-2 所示, 这两个业务气象卫星系统可以连续观测到不能应用常规观测地区的三维大气的气象要素, 如海洋、沙漠、高原地区上空的气象要素, 因此, 得到不断发展和完善。特别在 20 世纪 90 年代之后它得到进一步发展, 由被动空基遥感向自动空基遥感转移, 使大气各层的温度、气压、湿度、低层风和可降水量的探测误差大大缩小, 全球的风场和雨强的探测也成为可能。可以说, 空基遥感技术的广泛应用使得全球天气和气候探测系统的建立成为可能 (邱金桓, 2000)。

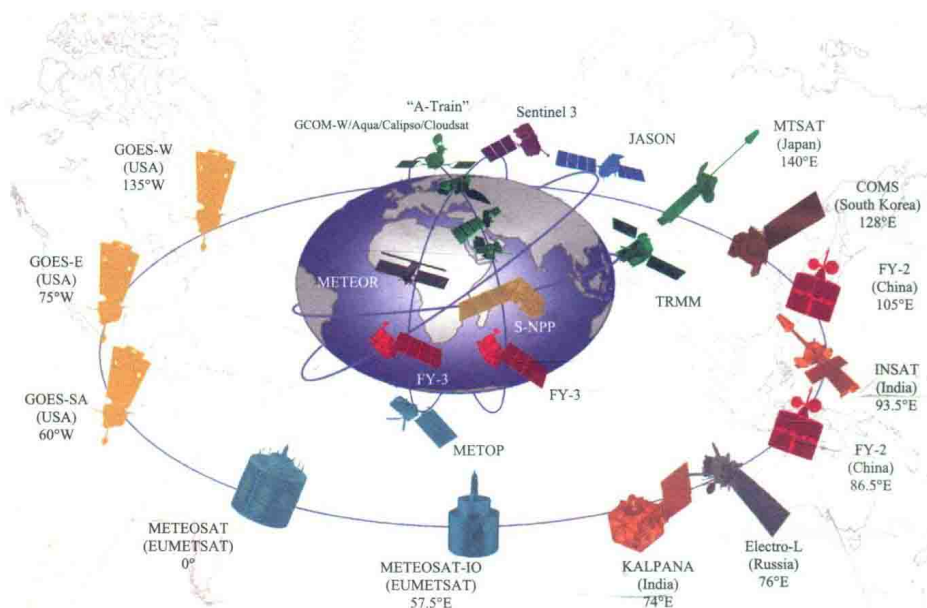


图1-2-2 全球空基大气遥感观测体系图（图引自<http://www.wmo-sat.info/satellite-user-read-iness>[2015-5-30]）

三、地基遥感技术的发展

在空基遥感技术应用的同时，地基遥感技术也大大发展。除天气雷达和多普勒天气雷达广泛地应用于中、小尺度系统的探测外，还出现了利用微波、红外和激光来探测大气的温度、湿度等要素。现在，使用激光探测器可测定大气的温度、水汽、气压、气溶胶浓度、风、湍流、云、降水、能见度和 O_3 等气象要素和物理量，这些都为天气气候和大气环境的研究提供了有用的观测资料。

四、大气辐射的测量成为地球系统观测的重要手段

20 世纪四五十年代，大气分子光谱的精细研究使得利用高空传感器对地球大气及下垫面各种辐射的遥感测量成为可能。1960 年美国成功发射了泰罗斯 1 号气象卫星，这为空基遥感大气各种要素的变化开辟了新途径。空基遥感技术的发展不仅使大气科学分支领域大大发展，而且也使得地球系统各圈层的探测成为可能。到了 20 世纪 90 年代，大气辐射的测量已成为对大气和地球系统空基遥感观测的重要手段，它不仅推动了大气科学的发展，而且使得地球科学其他有关学科取得明显的进展。

第三节 大气环流波动理论体系和天气预报理论的创立

大气环流与大尺度动力学是研究全球各种大气运动的形态、性质、演变及其机理的科学。大气环流与大尺度动力学研究的发展是 20 世纪大气科学理论研究发展的核心部分，它带动了大气科学其他分支领域的发展（黄荣辉，2001）。

一、挪威学派建立锋面学说

受 V. Bjerknes 思想的影响，J. Bjerknes 在 20 世纪 20 年代总结了大量天气变化现象，提出了锋面和气旋的立体模型，并与他的合作者提出气旋是极锋上发展起来不稳定波动的理论（图 1-3-1），创立了挪威的 Bergen 学派，简称挪威学派（Bjerknes, 1919; Bjerknes and Solberg, 1921, 1922）。挪威学派用天气图分析来推测天气的演变被认为是具体地把 V. Bjerknes 所提出的当时无法得到解析的地球流体动力学方程应用到大气中。迄今，锋面学说仍被广泛应用于天气分析和天气预报中，这是 20 世纪大气科学一个重要的理论成就。

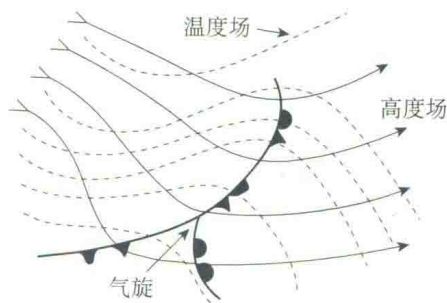


图1-3-1 大气长波与锋面气旋关系示意图（梁必骥，1995）

二、芝加哥学派关于大气长波理论的创立

20 世纪，在大气环流与大尺度动力学研究发展史上最重要的研究应是三四十年代以 Rossby 为首的芝加哥学派所创立的大气长波理论。这个重要理论的创立不

仅具有观测事实的基础，而且也具有理论基础。

自 1928 年无线探空的发明以来，高空大气观测逐渐增多，高层气流的观测事实逐渐清楚。Rossby 从理论和观测两方面发现了控制天气和大气环流变化的大气长波，即水平尺度为 5000km 以上的大气波动。并且，他从二维无辐散涡度方程出发求出了长波公式（Rossby, 1939），得到了与实际吻合的长波移速和增长率。如图 1-3-1 所示，这种长波的演变与地面天气图所看到的锋面气旋的演变相对应，因此，它是控制天气变化的大气波动。在这之后，他的学生及合作者（Charney、Eady、郭晓岚和叶笃正等）相继提出了斜压不稳定理论和正压不稳定理论，以及大气长波的频散理论（Charney, 1947; Eady, 1949; Kuo, 1949; Yeh, 1949）。这些理论不仅对大气长波产生机制作了深入研究，而且很好地说明了大气环流的演变机理，从而形成了在大气科学理论中占有重要位置的芝加哥学派。这个学派的理论是 20 世纪大气科学最重要的理论研究成就，奠定了今日天气预报的理论基础。

芝加哥学派所创立的大气长波理论不仅奠定了大气环流的波动理论体系和天气预报的理论基础，而且也使得后来的数值天气预报和大气环流数值试验成为可能。这个理论使得人们对大气环流的看法发生了根本性的改变。以 Rossby 为首的芝加哥学派提出：大气环流是复杂的，是非对称的，它的变化是基本气流与扰动相互作用的结果，扰动通过角动量和热量输送滋养着基本气流，而基本气流又为扰动发展提供能量。这种看法不仅比 20 世纪以前所提出的轴对称大气环流的看法更符合实际，而且更辩证、更科学。并且，芝加哥学派在研究方法方面引入了小扰动理论，使得控制大气环流的非线性方程有办法得到求解，这为以后的大气动力学理论发展提供了一种有效的研究方法。

三、大气环流形成机理的研究

由于芝加哥学派提出大气环流的波动学说，大气环流形成机理得以深入研究。从 20 世纪 50 年代起，人们关于大气环流形成机理作了很多研究，特别是从大气运动的能量平衡来解释大气环流的演变。Lorenz 提出有效位能的概念（Lorenz, 1967），指出大气温度的空间分布的不均匀性是引起大气运动的根本原因，使得人们对大气环流演变的物理本质有了更深刻的认识。

与国际同时，50 年代我国在大气环流变化方面作出了许多国际领先的研究。我国学者叶笃正等分析了大量东亚大气环流演变的事实，提出了东亚大气环流