

我国大气物理研究进展*

吕 达 仁

(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

摘 要 简单介绍了建国 50 年来我国大气物理学研究进展.我国大气物理研究的进展紧密结合国家和社会发展的需求,又与国际前沿科技进展密切相连,使学科发展处于国际前沿.文章还分别介绍了云雾降水物理和大气电学、大气边界层物理和大气湍流、大气辐射物理、大气遥感物理、大气臭氧和中层大气物理.

关键词 中国,大气物理

PROGRESS OF ATMOSPHERIC PHYSICS IN CHINA

Lu Daren

(Institute of Atmospheric Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The progress of atmospheric physics research in China during the last 50 years is reviewed. It is shown that atmospheric physics is closely related to the needs of national economic and social developments. The following six subdisciplines are covered cloud physics and atmospheric electricity, atmospheric boundary layer physics, atmospheric radiation, atmospheric remote sensing, atmospheric ozone and middle atmosphere physics.

Key words China, atmospheric physics

1 引言^[1,2]

大气物理学研究发生于地球大气中的各种现象和过程的物理机制和变化规律.它应用理论物理原理和各种实验物理方法来观察、解释和定量描述大气的动力、热力、相变过程、电磁辐射转移、光、声、电现象及大气与上下层面间的相互作用,并利用这些知识来研究天气气候和大气环境.大气物理学的发展是与整个物理学的发展紧密相连的.物理学早期的实验测量,很多均与大气物理有关,如气温与气压测量、分子散射与蓝色天空、闪电的放电本质等均与大气物理有密切的关系.大气物理在国际上形成系统的学科分支则在本世纪 40 年代以后.我国

大气物理的发展在其早期阶段同样亦受到我国物理学家的关注与参与^[1].本世纪 30 年代,中国近代气象学创始人竺可桢大力提倡气象观测,物理学家叶企孙、吴有训、严济慈等都积极提倡并参与大气物理的实验研究.严济慈等所做的大气臭氧紫外吸收光谱测量曾驰名中外.在三四十年代,老一辈大气科学家中的不少人,如程纯枢、叶笃正、郭晓岚、顾震潮等都分别参加了大气电、光、辐射、湍流等方面研究.赵九章作为我国现代大气科学的主要带头人,不仅自己在动力气象方面作出了出色的成就,同时也大力推动了当时中国气象探空事业的发展.总体而言,在 1949 年以前我国大气物理研究还比

* 1999 - 07 - 21 收到

较零星,并未形成系统的学科分支.

新中国成立 50 年来,我国大气物理研究获得了蓬勃的发展.这首先是国家需求推动的结果.1958 年开始的为发展农业生产而提出的人工降雨、人工防雹需求,促使我国科学界在短短的几年内形成了规模的云降水物理和人工影响天气的理论和实验研究.60 年代,核工业和石油化工的发展对污染扩散研究的要求极大地促进了大气边界层物理和大气湍流的发展.航空航天事业的发展对大气辐射传输、大气遥感和中层大气物理的发展提出了新的需求,同时也为大气遥感发展提供了新的技术条件.70 年代以来,南极臭氧洞、全球变暖等全球环境气候重大变化以及人类活动影响地球生存环境的重大问题,将大气物理学研究推到一个新的高度.我国处于气候多变、灾害多发的区域,对全球变化十分敏感,同时我国人口众多,能量与资源利用水平不高,我国人类活动对环境也不断造成重要的消极影响.为理解大气环境和气候变化,并提出预测和对策,我国大气物理研究不断作出新的重大贡献.

我国大气物理研究是由老一辈大气科学家带领开展的^[2],其中特别值得提出的是赵九章在开创我国大气物理系统研究的关键作用和顾震潮在云降水物理和雷雨云物理研究方面的学术带头作用.50 年来,在大气物理方面我国已经形成了一支高水平的理论和实验观测相结合的研究队伍.

当前我国大气物理的研究主要集中于如下几个方面:云降水物理、大气电学、大气边界层物理、大气辐射、大气遥感物理、大气臭氧和中层大气物理.本文将介绍我国大气物理几个主要分支的研究现状与主要进展.由于作者水平和时间、篇幅的限制,介绍中定有遗漏、片面和不当之处.

2 云雾降水物理学和大气电学研究^[3-13]

50 年代中期,从中国农业发展需求出发,

28 卷 (1999 年) 11 期

赵九章等向国家提出发展云降水物理的建议,并被正式列入 1956—1967 年科学规划中:“进行云雾和降水物理的观测、实验研究,得出经济有效的消除云雾和防止冰雹的方法,并探索在有利的天气条件下,用人工促进局地降雨的途径.”我国云雾降水物理的研究就是在这一规划下从 1958 年起系统开展的.40 年来,我国云雾降水物理的研究一方面注意这一学科的重大基础问题,同时一直密切结合对人工增雨、防雹、消雾等重大应用的指导.

2.1 早期工作与贡献

1958—1962 年期间,中国科学院地球物理研究所(现大气物理研究所)在顾震潮等主持下,开展了衡山、泰山、黄山等高山云雾站和飞机云雨滴特征的系统观测,中央气象局和吉林等省局、北京大学等也相继进行了庐山地面和飞机等观测.这些观测获得了我国云雾滴谱的基本特征.从高山站观测到云滴谱浓度与尺度分布具有很强的变动性,反映出宏观与微观的不均匀与变动性,同时发现云滴谱具有多峰结构.我国科学家发展了暖云随机起伏增长理论,认为云中湍流等因素造成的随机起伏分布使云滴增长不是等概率的均匀增长,由此建立的云滴增长模型克服了均匀增长理论在增长时间与形成云滴谱和实测云滴尺度分布的矛盾.这些理论和观测得到了国际同行的高度重视.与此同时,我国科学家认识到云与降水过程是一个宏微观相互作用的、多尺度的、高度非线性过程.云与降水的形成演化是由宏观尺度的云物理、动力作用、相变热力学与微观尺度的云滴谱动力学相结合的结果.基此,我国于 60 年代在国际上率先发展了积云动力学.

2.2 各类降水云发展数值模拟及对人工影响天气的指导

60 年代以后,在一系列人工影响天气作业与云降水研究基础上,我国科学家认识到要真正解决人工影响天气问题,必须了解云降水系统的整体结构与演变规律,特别是宏观动力过程与微观云降水粒子增长转化过程之间的相互作用.为此需要充分发展数值模拟,并继续观测

研究.一方面,我国科学家对不同类型的降水云系进行了系统的观察研究,其中对南方的梅雨云系、西北高原的冰雹云系和雹块微结构、北方地区降雨云系结构与物理过程进行了系统的观测,建立了各自的概念模式.在此基础上,中国气象科学研究所和中国科学院等分别建立了几个有特色的降水云演变的动力-微物理数值模式,包括卷云微物理参数化模式、多种降水元参数化的冰雹云模式、层状降水云发展模式等.当前我国的云降水物理研究正试验将数值模拟与实际对降水云的监测相结合,用以实时指导人工降雨和防雹作业的时机与作业部位的选择.使人工影响天气建立在云降水科学规律和高技术监测系统支持下的降水云结构与发展监测的科学基础上.

2.3 大气电学研究进展

60年代初,为系统研究雷暴云物理学,中国科学院地球物理研究所(现大气物理研究所)开始了地面和探空大气电场仪研制与观测,为森林防雷监测开始了雷电定位试验,特别是利用闪电辐射电磁场特征开展了单站雷电定位研究.这项研究试验直到90年代初才形成了国际先进的应用技术.同时开始了雷暴云起电理论和大气射电信号特征研究,发现了闪电的云中预放电辐射特征(中国科学院大气物理研究所集刊4,科学出版社,1975).1978年后,中国科学院兰州高原大气物理研究所等单位系统开展了闪电物理实验研究和全球大气电过程研究,取得了多方面的重要研究成果.

在闪电物理方面,发现北方、高原地区雷暴雨广泛存在云中电荷的三极结构,不同于国外总结的双极结构;通过高速电磁场和光学观测证实了闪电先导的双向传输;建立了雷暴云下地面电晕离子产生和演化的数值模式,发现地面气溶胶浓度是重要参量;实现了人工引雷试验,自1989年起,用火箭-人工引发闪电试验成功,为闪电物理和防雷技术验证提供了关键技术,通过空间电荷演化的数值模拟,提出了人工引雷的空中电场判据,在国际上首次发现人工引雷有抑制冰雹增加降水的作用.在大气电

过程及其作用研究方面,对日地关系中大气电过程的作用作了相关分析和可能过程探讨,发展了积云动力-电数值模式,研究了电过程在改变雷暴云结构的可能作用.

3 边界层大气物理与大气湍流^[14-20]

接近地球表面的大气层称为大气边界层,该层是地球表面与自由大气之间产生相互作用与相应动量、能量、物质交换的区域.由于地球表面也是人类活动和生态系统主要所在地,发生于该层的各种过程对于人类生产与生活具有直接的影响,同样人类活动对大气层造成的影响也是在这一层内发生并通过边界层大气向自由大气的交换而引起全球性的大气层变化.因此边界层大气物理具有极大的应用价值.

我国大气边界层研究一直与应用需求密切结合,并重视理论上的发展.早在50年代,中国科学院由赵九章创导地球物理研究所和地理研究所开展了农田微气象过程观测研究,北京大学严开伟等在官厅水库进行了水面蒸发实验研究.

3.1 大气边界层扩散研究

60年代中期起,由于核工业以及内地大量石油、化工工业的发展,迫切需要了解大气中的污染扩散输运过程及效应.直到80年代中,中国科学院大气物理研究所、北京大学、南京大学等多个单位先后开展了一系列边界层大气扩散的大规模野外实验,在内陆地区,如核试验基地、灾害地区、云南滇池、福建沿海、广东大亚湾,以及一系列山区工业基地,获得了不同地区、不同气候、不同区域尺度的大气边界层结构变化与发展模型、污染扩散规律.大气边界层实验需求促使我国大气物理学家独立发展和应用了一系列先进的探测设备,包括超声风速仪、声雷达、激光雷达、低空探空仪、无线电声仪(RASS)、系留气球以及大气采样分析仪等等,在北京、南京、天津分别建立了边界层气象观测塔.在此基础上发展了自己的大气边界层中尺度污染扩散模式.这一类模式充分利用了中尺

度动力学的基本模式,结合烟团扩散模式,形成可用于评估工矿建设的实用模式,构成环保管理部门大气质量评估的理论和方法基础。

3.2 理论与数值模式研究

我国科学家通过实验揭示了边界层湍流的团状结构、湍流能量与耗散率偏态分布的新现象,并应用现代非线性科学方法研究了湍流间隙性等特征。我国已发展了几类边界层湍流高阶矩数值模式,应用于边界层大气与不同地表的相互作用。

3.3 海气陆气相互作用的观测与模式研究

自80年代中期以来,大气边界层物理已经与全球变化中海气和陆气相互作用有关的重大研究计划相结合。与世界气候研究计划(WCRP)中的核心实验“热带海洋与全球大气(TOGA)”相配合,我国在1987—1990年连续4年开展了赤道西太平洋暖池区域海气相互作用的综合观测,1992—1993年作为主要参加国参与了国际TOGA/COARE综合实验,其中海洋上空大气边界层特征与海面湍流通量是主要观测项目之一。在陆气相互作用方面,1988—1992年在国家自然科学基金委员会的支持下,以中国科学院兰州高原大气物理研究所为主进行了甘肃黑河干旱区实验(HEIFE),这是一项具有国际代表性的干旱区(沙漠、戈壁与绿洲)大气边界层与陆气相互作用特征的综合实验。实验显示了干旱地表的典型陆气相互作用特征,并系统揭示了干旱区中绿洲的“冷岛”效应。

“九五”期间,我国目前正在开展的几项大气综合试验,均强调了边界层过程及参数化,其区域包括内蒙半干旱草原、青藏高原、南海、淮河流域等。

4 大气辐射物理研究^[21-25]

大气辐射作为大气运动变化的最主要能源,一直是气象学关注的内容。大气辐射物理学的探测与研究是当前大气物理学中最为活跃的分支之一。大气中的辐射传输具有不同的效应,这些效应包括:对大气、地表的加热或冷却(能

量效应),它构成经典大气辐射能量学的物理基础;各类电磁辐射经大气介质作用后的特征变化(大气信号,并进而应用于大气遥感探测);激发大气成分之间的光化学反应(光化学效应)。由于大气介质对电磁波的散射与吸收具有极大的波长依赖性,各类(紫外、可见、红外、微波等)电磁波在大气中的传输、发射及作用具有极强的时空变化,与大气状态、成分分布、云与气溶胶分布密切相关。

我国大气辐射研究中一部分工作是利用气象台站的辐射观测资料进行分析统计,形成辐射气候学基础。我国科学家对我国区域的辐射气候学已有很好的研究。近20年来我国在前沿理论与应用方面的贡献主要有:

(1)非球形粒子的散射特征计算。我国兰州高原大气物理研究所和成都气象学院的科学家建立了卷云冰晶粒子光学散射特性的近似计算公式,应用了射线追踪、衍射光分布以及有吸收情况下的散射。这些工作为卷云遥感及卷云辐射效应研究提供了基础。南京气象学院对某些典型椭球形冰雹粒子的微波散射建立了表达式。

(2)大气辐射计算的吸收系数分布模式建立。由于大气辐射面临大气非均匀路径、波长积分、天顶角积分,以及不同气体吸收带系的重叠,最基本的逐线计算法的实用化是现有计算机能力所不能胜任的。处理大气辐射平均透过率的精确而简化方法成为应用辐射传输研究大气过程的“瓶颈”。70年代以来,国际上提出用指数求和拟合(或称K分布)方法计算均匀大气路径透过率,用相关K方法来处理非均匀大气路径透过率。我国科学家在80年代以来在K分布方法的建立方面作出了重要贡献,并深入分析了最优的K分布和相关K分布方法的建立途径。

(3)发展新的辐射传输算法。我国科学家在广泛分析和应用国际上知名的辐射传输算法的同时,还发展了相关的算式,其中包括球面分层大气极化辐射传输算法。该算法已用于火山云气溶胶的曙暮光遥感和卫星多波长偏振成像仪

(法国 POLDER) 的大气/地表遥感,还有改进的 Gauss - Siedel 迭代求解法等,由辐射传输算法为基础建立的光谱辐射特征经验拟合算式也获得了很多发展,其中一部分算法已广泛应用于遥感、大气与环境辐射特性模拟。

(4) 大气辐射的野外测量.60 年代以来,我国科学家对中国各地区的多谱段(如紫外、可见光、近红外、热红外光波)和大气辐射的高分辨率光谱进行了测量,这些地区包括典型农业区、青藏高原、西北高原干旱区、华北平原以及内蒙古草原区等,从而为我国的辐射气候学及相关大气状况定量关系的建立奠定了基础.其中,由于紫外辐射对人类健康与生态有重要影响,我国已开展了紫外宽光谱段的测量,提供了基本情况.在北京、长春和青海毛里关山已建立起亚洲大陆上紫外绝对光谱的长期监测,为大气紫外辐射模式建立提供了重要验证基础,也为紫外光谱辐射与人类健康、生态影响提供深入研究的基础。

在“863”计划航天领域支持下,中国科学院长春光学精密机械研究所和大气物理研究所联合开展高空气球所载太阳/大气紫外光谱仪观测与研究,成功地将仪器升至 33km 高空,实现了对太阳的直射观测和大气反射测量.在国家有关计划支持下,空间太阳/大气反射紫外光谱仪正在研制和试验中。

5 大气遥感物理学^[26-35]

60 年代以来,国际信息技术(激光和光学技术、微波技术、声波技术等)和航天技术蓬勃发展,为大气与环境的快速、多要素、多时空分辨率进行探测提供了新的机会与新的需求,即发展大气与环境遥感。

大气遥感研究是理论与实验结合,密切依赖于遥感技术的发展,它包括:物理基础,即大气中电磁波、力学波与地球/大气介质相互作用的物理规律;遥感原理,并探讨利用这些规律通过测量某些波动特征而反演地球/大气要素的可行性;实验研究,即设计并研制遥感探测器,

例如激光雷达、微波雷达、光谱仪及相应平台等,开展大气遥感实验,进行原理验证与应用方法试验;遥感反演的数学物理算法,其中包括根据大气与地球的实际状况建立适用的遥感地球科学模型.尽管地球/大气过程中包含物理、化学甚至生物学过程,由于遥感测量是物理测量,其定量科学模型最终总是一个数学物理模型。

我国大气遥感始于 60 年代中期,几乎与国际遥感发展同步.起步的需求来自对危险天气系统的监测以及航空气象的需求.由于我国空间对地观测技术发展的限制,地基大气遥感研究长期以来是我国的重点.但同时无论地基和在空基大气遥感原理研究方面,我国科学家都做出了开创性的研究成果。

5.1 遥感原理和反演算法

70 年代以来,我们先后做出了国际上具有创新性的系列成果,其中包括:首次提出水汽遥感的最佳信息层的新概念,最早引入空间滤波来理解反演解的稳定性;创立了用微波辐射计与雷达相结合的主被动联合遥感反演方法,提高降水云遥感的精度与分辨率;最早提出了消光/小角散射联合遥感气溶胶特性的反演算法.此外,对红外遥感大气温湿廓线、紫外遥感大气臭氧分布的反演算法方面都对国际已有算法作了改进.90 年代以来,大气遥感研究正深入利用多波长多极化的特点,我国科学家提出了同时反演地表反射率和大气气溶胶的多波长光学反演方案,并正将云降水物理模型与微波辐射传输模型结合,以及应用神经网络等方法对微波遥感降水进行反演.这些创造性成果已被国内外肯定与引用。

5.2 遥感技术发展与实验研究

60 年代中期,我国研制成第一台激光气象雷达,与美国当时的水平相当.基此,我国科学家迅速开展了大气能见度、边界层大气结构、大气光学特征、云、平流层气溶胶与火山云的激光雷达遥感研究,在不少方面走在当时的国际前沿.90 年代以来,我国已先后研制中层大气大型激光雷达,探测已扩展到平流层大气臭氧、中层大气密度、中间层顶的钠原子层结构,从而形

成了地基大气激光探测的完整系列.70年代开始,我国科学家陆续研制了微波辐射计系列,分别用于大气温度、水汽、云的遥感,这些地基遥感与中尺度气象网和其他大气探测结合,构成了对水汽循环研究的重要支持.70年代起,我国陆续研制了遥感大气边界层温度层结和风结构的声雷达和声多普勒雷达.80年代末期和90年代中期,我国分别研制成功用于对流层和对流层/平流层探测的UHF和VHF多普勒相控阵雷达,进入了国际先进行列.作为降水遥感的大型微波多普勒雷达,我国亦已研制成功.在大气气溶胶的光学遥感方面,80年代以来,已研制了太阳/大气光谱仪和多波长曙暮光偏振光度计,对我国大气气溶胶的分布与光学特性进行了系统的观测研究,为进一步的气溶胶气候与环境效应测量研究,也为地物空基遥感大气订正提供了重要基础.

在空基大气遥感技术发展方面,我国已发射了极轨气象卫星(风云1号,1988,1990,1999)和地球同步气象卫星(风云2号,1997),在技术试验上获得了成功.由于卫星所载仪器与国外业务卫星接近,我国科学家在利用这些资料方面已有较多的应用经验.

6 大气臭氧与中层大气物理研究^[36-42]

处于10—100km高度的大气层统称为中层大气.该层大气下部(平流层)是大气臭氧的主要分布范围.由于臭氧对太阳紫外辐射的吸收,臭氧层的变化对气候与对生态系统和人类健康有害的地表紫外辐射均有重要影响.臭氧层本身是太阳辐射与大气成分作用下光化反应的平衡产物,对该层大气其他微量成分的存在十分敏感.由于自然和人类活动造成全球臭氧层变薄,其突出标志为南极春季臭氧洞的出现以及北半球中纬臭氧总量的持续减少.中层大气又是大气上下层相互作用以及日地关系中物理过程发生的重要区域,也是航空航天活动的重要区域,因此中层大气物理研究也是我国科学家着重发展的一个新热点.

6.1 大气臭氧研究

从国际地球物理年(1957—1958年)开始,中国科学院先后在北京、武汉(后移至昆明)开始了用Dobson臭氧仪监测大气臭氧,在1978年后,这些观测参加世界臭氧监测网,其质量获高度评价.90年代以来,中国气象局在青海瓦里关山等地增加了观测.中国科学院和中国气象局在南极中山站开展了臭氧探空、地面紫外辐射和臭氧总量观测,获得了臭氧洞期间的臭氧廓线和紫外辐射增加数据.

在分析研究方面,我国科学家也作出了前沿贡献.其中主要有:1962年,在国际上首次证明了国际通用臭氧分布反演算法解的不唯一性,并据此提出了改进算法;将对流层臭氧与平流层臭氧作统一研究,利用美国TOMS卫星资料 and 我国北京、昆明观测资料,分析了1979年以来我国(东亚)上空臭氧变化规律.结果表明,中国大气臭氧总量近年来平均递减率超过全球平均值,并首次发现每年6—9月青藏高原10—22km高空形成大气臭氧总量地值中心,水平范围近千公里.对此进行资料分析与数值模拟,证实夏季高原上空对流运动是造成低值的主要原因.同时,我国科学家也发现世界其他地方的高大山脉区的臭氧分布亦有相似的结构;开展了与臭氧总量观测同时进行的北京、长春、青海瓦里关山地面紫外光谱辐射研究,并用紫外辐射传输模式分析验证;与大气臭氧层变薄相反,我国近地层大气臭氧浓度由于人类活动排放污染物的增加而显著增加,在兰州、北京、浙江、山东、黑龙江的观测表明,地面臭氧浓度已超过影响农作物产量的临界值.对此我国科学家已建立相关数值模式,开展机制和调控对策研究.

6.2 中层大气探测研究

中国科学院大气物理研究所研制了大型相控阵VHF波段多普勒雷达,实现了对流层和低平流层大气风场波动和湍流探测.大气物理研究所在80年代利用研制的平流层气溶胶激光雷达和曙暮光偏振光度计结合实现了El Chichon和Pinatobu火山云和平流层气溶胶垂

直结构的长期监测.中国科学院安徽光学精密机械研究所从 90 年代以来研制了平流层气溶胶和臭氧激光雷达,并作连续监测.中国科学院武汉物理研究所研制了中层激光雷达,实现了对钠层结构和中层大气密度的观测.空间中心研制气辉光度计,实现对气辉的监测.20 年来,在中国科学院高空科学气球工程基础上实现了气溶胶、臭氧、大气波动和湍流的高空气球直接测量.利用毫米波谱仪,中国科学院紫金山天文台和南京大学的科学家实现了中间层臭氧垂直分布的遥感.

6.3 中层大气动力学与光化学研究

武汉物理研究所、北京大学、大气物理研究所分别研究了中层大气波动传播特征与相互作用,大气物理研究所研究了线性近似下重力波上传时的滤波方向效应,武汉物理研究所和北京大学对弱非线性与分子粘性损耗共同作用下的重力波演变与相互作用方程的建立,以及波-波相互作用的研究,推进了重力波在中层大气过程中作用的认识.空间中心研究了中间层顶光化学与波动的相互作用,提出了波动影响光化学过程的新见解.利用 VHF 雷达和高空气球探测,大气物理研究所系统分析了对流层上部到平流层中部重力波的波谱特征.

7 展望^[43]

与国际大气物理前沿发展同步,我国大气物理学研究在新世纪将向如下一些重大领域发展.

(1) 全球气候变化与气候系统研究涉及到的地球系统各圈层的相互作用研究.由于大气圈居于最活跃多变而对人类社会影响最为直接的地位,一系列海气、陆气、大气上下层、日地关系中的物理问题需要深入研究.大气物理将与海洋、地表、植被的生物地球物理问题相结合,定量处理其间的物质、能量、动量的交换;

(2) 全球与区域环境变化研究中的大气物理-化学前沿研究.包括人类活动引起的污染成分与温室气体排放,对区域与全球环境变化

影响有一系列物理与化学紧密结合的前沿问题;

(3) 强烈天气灾害过程的监测、过程研究与预测中的一系列大气物理过程研究和遥感监测;

(4) 人工影响地球气候环境中的大气物理研究.这里包括着多种时空尺度的综合大气物理问题.总之,21 世纪的大气物理学将进一步发挥在大气科学、环境科学与一系列应用中的基础学科作用.

参 考 文 献

- [1] 周秀骥,陶善昌,姚克亚.高等大气物理学(上册).北京:气象出版社,1991.1-5
- [2] 周秀骥,吕达仁,周明煜.中国大气物理学的发展与赵九章.见:叶笃正主编.赵九章纪念文集.北京:科学出版社,1997.87-92
- [3] 顾震潮.云雾降水物理基础.北京:科学出版社,1980.1-340
- [4] 周秀骥.暖云降水微物理机制的研究.北京:科学出版社,1964.1-95
- [5] 巢纪平,周晓平.积云动力学.北京:科学出版社,1964
- [6] 黄美元,吉武胜,徐华英.中国科学 B 辑,1987(2):214-224
- [7] 黄美元,洪延超,徐华英.气象学报,1987,45(1):72-77
- [8] 毛玉华,胡志晋.气象学报,1993,51(2):189-194
- [9] 胡志晋,严采葵.气象科学研究院院刊,1(1):37-52
- [10] 中国科学院大气物理研究所集刊第 4 号,雷暴探测与雷电物理研究.北京:科学出版社,1976
- [11] 陶善昌,周秀骥.科学通报,1992,37(21):1970-1973
- [12] Liu Xincheng, Wang Caiwei, Zhang Yijun et al. JGR, 1994, 99(D5):10727-10731
- [13] 郗秀书,刘欣生,郭昌明等.气象学报,1998,56(3):312-321
- [14] 刘振兴.科学记录,1958,2(5):152-158
- [15] 洪钟祥等.大气科学,1988,12(特刊):217-235
- [16] 周明煜,吕乃平,陈炎涓等.中国科学,1981,5:614-622
- [17] 周明煜.大气科学,1980,4(1):79-83
- [18] 李兴生,杨硕文.大气科学,1986,10(2):154-163
- [19] 苏从先,胡隐樵,张永丰等.大气科学,1987,11(4):390-396
- [20] 胡隐樵,高由禧.气象学报,1994,52(3):285-296
- [21] 高国栋,陆渝蓉.中国物理气候图集.北京:农业出版社,1981

- [22] 石广玉 . 大气科学 , 1998 , 22(4) : 650 — 676
- [23] Wu Beiyang , Lu Daren . Appl . Opt . , 1988 , 27 (23) : 4884 — 4890
- [24] 吕达仁 , 李卫 , 李福田等 . 大气科学 , 1996 , 20(3) : 343 — 351
- [25] 季国良 , 邹基玲 . 高原气象 , 1994 , 13(3) : 323 — 329
- [26] 曾庆存 . 大气红外遥测原理 . 北京 : 科学出版社 , 1974 . 1 — 150
- [27] 周秀骥等 . 大气微波辐射及遥感原理 . 北京 : 科学出版社 , 1981 . 1 — 178
- [28] 中国科学院大气物理研究所集刊第 1 号 , 激光在气象探测中的应用 . 北京 : 科学出版社 , 1973
- [29] 中国科学院大气物理研究所集刊第 5 号 , 大气遥感探测问题的研究 . 北京 : 科学出版社 , 1977
- [30] 吕达仁 , 林海 . 大气科学 , 1980 , 4(1) : 30 — 39
- [31] 吕达仁 , 周秀骥 , 邱金桓 . 中国科学 , 1981 , 12 : 1516 — 1523
- [32] 赵柏林等 . 中国科学 , 1980(9) : 879 — 882
- [33] 李卫 , 吕达仁 . 香河 MST 雷达大气湍流探测初步结果 . 见 : 吕达仁主编 . 地球环境和气候变化探测与过程研究 . 北京 : 气象出版社 , 1997
- [34] 胡欢陵 , 王志恩 , 吴永华等 . 平流层臭氧测量用紫外差分吸收激光雷达 . 见 : 吕达仁主编 . 地球环境和气候变化探测与过程研究 . 北京 : 气象出版社 , 1997 , 172 — 178
- [35] 刘长盛 , 曾琴 , 裴立本等 . 南京大学学报 , 1992 , 28(4) : 657 — 662
- [36] 魏鼎文 , 林启锦 . 地球物理学报 , 1964 , 13(4) : 260 — 270
- [37] 周秀骥 , 罗超 , 李维亮 . 科学通报 , 1995 , 39(6) : 1396 — 1398
- [38] 周秀骥 , 郑向东 , 陆龙骅等 . 南极研究 , 1994 , 6(12) : 14 — 22
- [39] Lu Daren , Van Zandt T E , Clark W L . Adv . Atmos . Sci . 1987 , 4(1) : 105 — 112
- [40] 王英鉴 , 徐寄遥 . 大气科学 , 1992 , 16(4) : 385 — 392
- [41] 易帆 , 肖佐 . 空间科学学报 , 1993 , 13(4) : 278 — 284
- [42] 熊建刚 , 易帆 , 李钧 . 地球物理学报 , 1994 , 37 : 415 — 421
- [43] 国家自然科学基金委员会等 . 现代大气科学前沿与展望 . 北京 : 气象出版社 , 1996 . 1 — 201

50 年来的中国电离层物理研究 *

萧 佐

(北京大学地球物理系 北京 100871)

摘 要 简要叙述了电离层物理这门基础学科的主要研究对象和领域 , 强调电离层研究应作为整个日地空间环境的一部分 , 从它与太阳和行星际空间、磁层、热层和中低层大气相互作用角度开展整体的研究 . 描述了电离层、磁层和中性大气耦合过程的基本图像 . 对我国电离层研究概况和现状 , 从探测、形态资料分析、模式建立、物理过程机制研究、新技术应用等几个方面作了介绍 , 并对某些重要的进展和特色加以简要的评述 , 同时也特别强调了大力加强我国电离层探测事业的必要性 .

关键词 电离层 , 日地物理学

IONOSPHERIC RESEARCH IN CHINA OVER THE PAST 50 YEARS

Xiao Zuo

(Department of Geophysics , Beijing University , Beijing 100871)

Abstract A brief description is given of ionospheric physics , with special emphasis on the trend that the ionosphere should now be studied as an important part of the whole solar - terrestrial system . The couplings between the ionosphere and the magnetosphere , thermosphere , and mesosphere

* 国家自然科学基金资助项目

1999 - 06 - 02 收到初稿 , 1999 - 07 - 16 修回