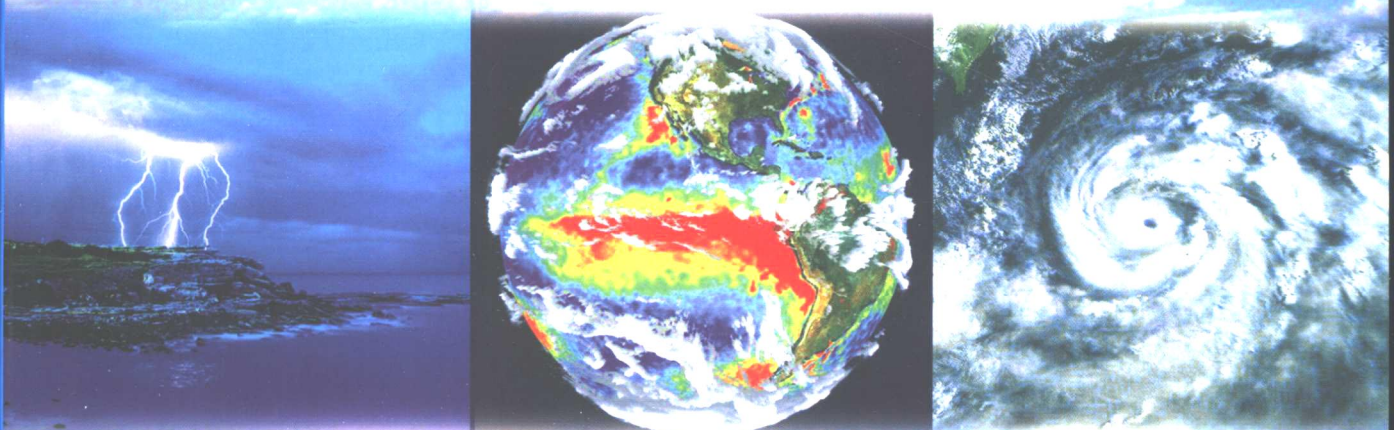


大气科学国家理科基础科学研究和
教学人才培养基地教学用书

天 气 学

钱维宏 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

大气科学国家理科基础科学研究和
教学人才培养基地教学用书

天 气 学

钱维宏 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

天气学/钱维宏编著. —北京: 北京大学出版社, 2004. 9

ISBN 7-301-06598-1

I. 天… II. 钱… III. 天气学 IV. P44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 091853 号

书 名: 天气学

著作责任者: 钱维宏 编著

责任编辑: E 艳

标准书号: ISBN 7-301-06598-1/P·0061

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村 北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

排 版 者: 兴盛达打字服务社 82715400

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 436 千字

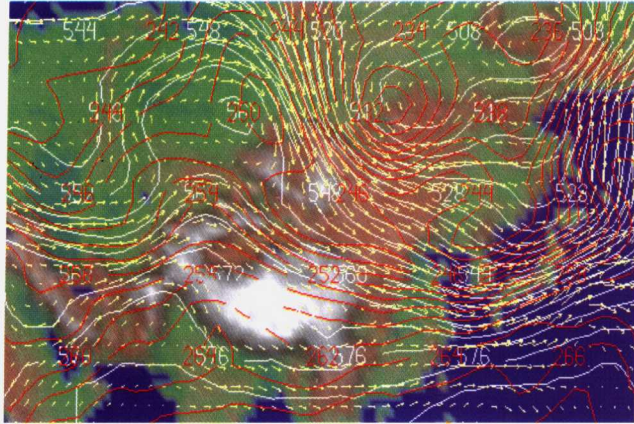
2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 0001~3000 册

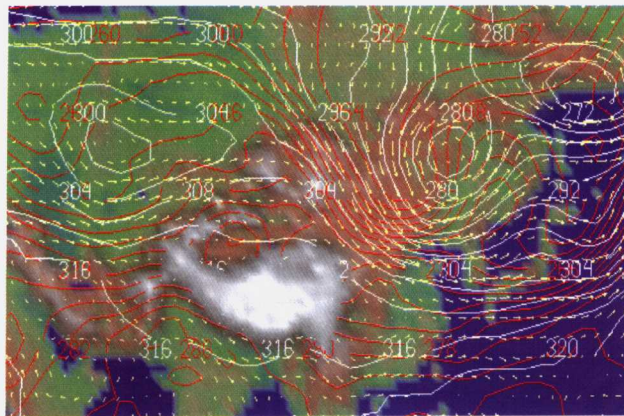
定 价: 29.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

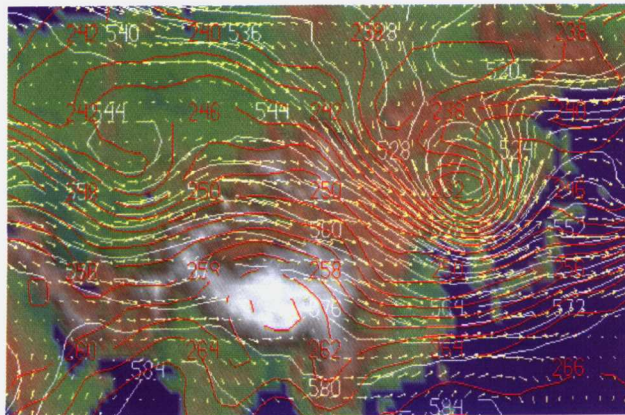
版权所有, 翻版必究



彩图 1 1990年4月24日08时500 hPa形势
白实线为等高线(10 gpm), 矢线为气流, 红实线为温度(K), 下同

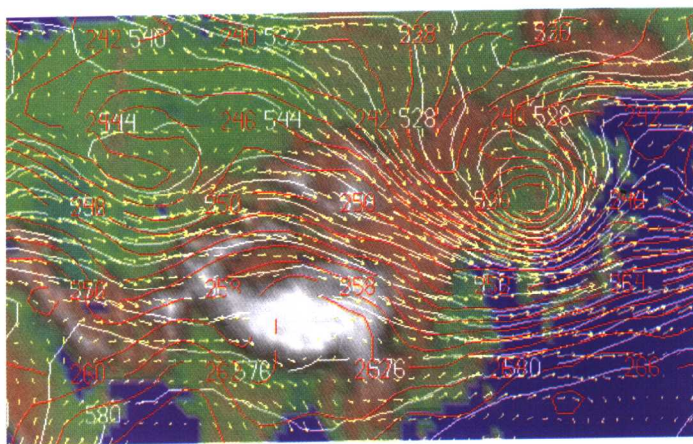


彩图 2 1990年4月25日08时700 hPa形势

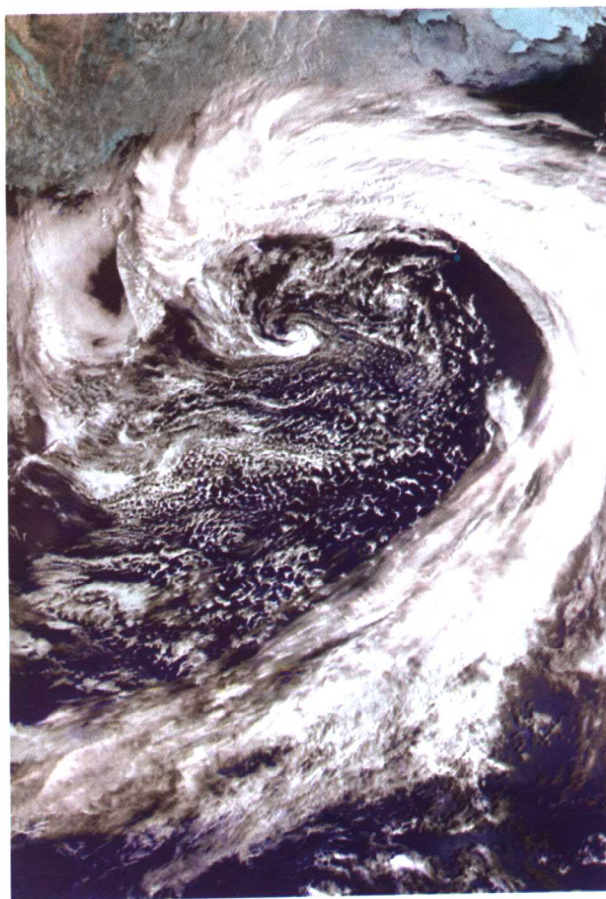


彩图 3 1990年4月25日20时500 hPa形势

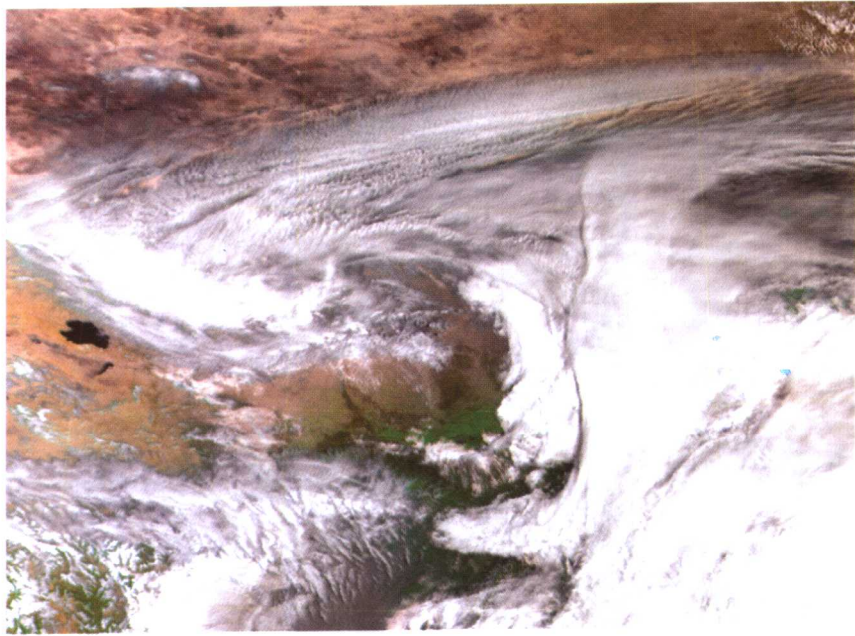
3337-13



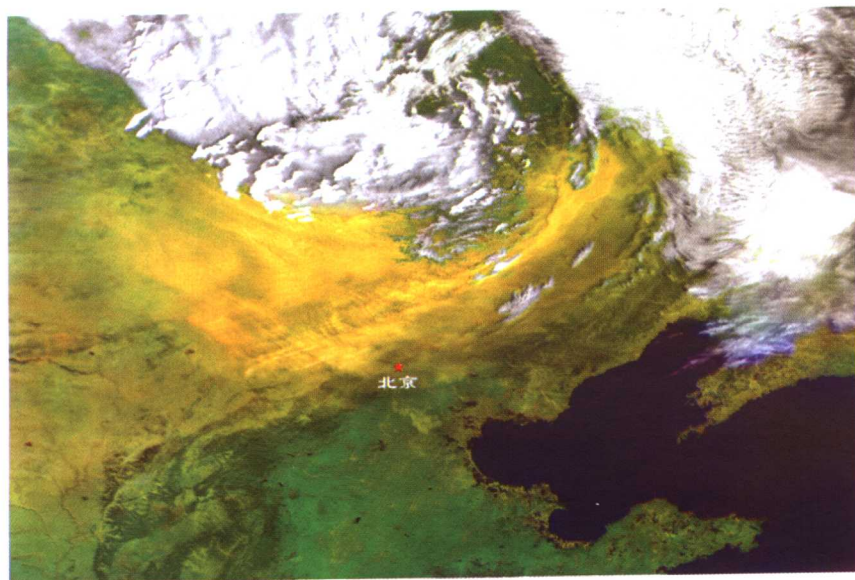
彩图 4 1990 年 4 月 26 日 08 时 500 hPa 形势



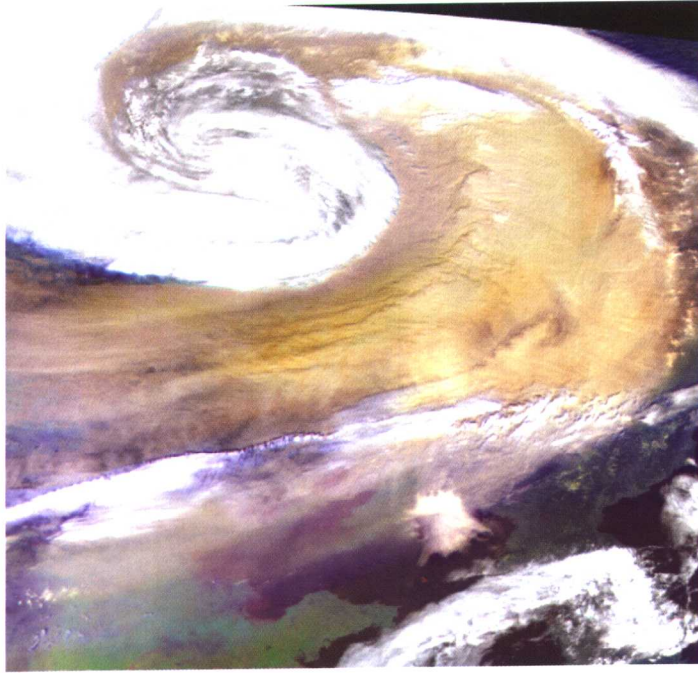
彩图 5 1999 年 4 月 3 日我国风云气象卫星观测到的北太平洋温带气旋可见光和近红外合成云图(国家卫星气象中心提供)



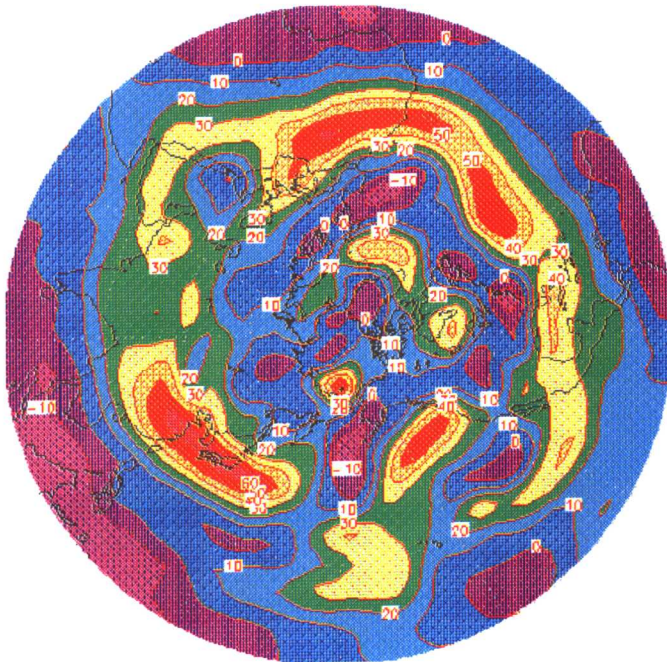
彩图 6 2000 年 4 月 14 日中国西北地区可见光和近红外合成冷涡云图
(国家卫星气象中心提供)



彩图 7 2000 年 4 月 6 日气旋大风与沙尘暴云图(国家卫星气象中心提供)



彩图 8 2001 年 4 月 7 日气旋与影响我国北方地区的强沙尘暴(国家卫星气象中心提供)



彩图 9 冬季对流层上部的纬向风速(单位: m/s)分布

序 言 I

钱维宏教授编著的《天气学》是国内最新出版的一本天气学教材。这是根据作者在北京大学多年讲授天气学的讲义、多次进行修改而完成的一本高质量的天气学教材。

近四十年来,天气学的内容与 20 世纪 50~60 年代相比较,已经有很大扩充。气象卫星和多普勒雷达的出现,国际上和国内多次外场观测试验,为天气学提供了很多新现象、新事实和新问题。准地转理论有了新的发展,即 Q 矢量在天气诊断中的应用。在 20 世纪 30 年代提出的位涡理论和应用,被冷落了 50 年后,80 年代又被人们重新重视并应用。由于计算机技术的发展,使得天气动力学中的诊断分析更加容易进行。有关天气学研究的文献也很多,可以说天气学已发展到一个新阶段。因此,目前需要有一本新的天气学教材。钱维宏教授的这本教材适应了目前的需要。

《天气学》分原理和应用两部分。本书专讲原理部分。至于天气学在天气分析和预报上的应用,北京大学出版社已在 1989 年出版过一本教材。本书共分十章,第一章至第三章是天气学基础理论部分,第四章至第七章讲述大气中的主要天气系统。第八章讲季风,这是因为中国地处亚洲季风区,在亚洲季风区有特殊的天气和气候,单独列成一章讨论是必要的。本书作者对东亚季风也做过大量研究,书中不少是作者的研究结果。第九章讲述热带天气系统的活动。第十章专讲中国的降水。中国地域甚广,南方和北方降水系统有很大不同,例如华南在 5 月底 6 月初出现前汛期暴雨,长江流域 6 月中至 7 月中出现梅雨期降水,7 月下旬至 8 月上旬是华北主要雨季,南北的降水性质也不同。通过第十章也使读者对中国季风气候特征有更深入的理解。本书的一个特点是书中的例子或附图尽量采用国内的,并不大量引用外国的例子。

总之,本教材反映了天气学近四十年来发展的新动向,是目前国内最新的一本天气学教材。预计本书出版后,将受到广大讲授天气学的教师和学习天气学课程的学生欢迎。

陶诗言

2003 年 3 月

序 言 II

天气学是一门研究大气中实际天气问题的学科。它应用大气动力学和热力学的原理研究实际大气,经诊断分析定出大气各种时空尺度的演变过程,是天气预报的基础。随着大气探测技术的更新和观测资料的积累,天气学的未来研究将能够提出新问题、发现新现象并推动动力学和其他相关学科的发展。大家知道,天气无时没有,问题也太多,有的问题正在讨论,有的还未讨论过。在这种情况下,遇到常喜欢问问题的人们,即使从事气象问题的专家学者,有时能回答得头头是道,但有时也张口结舌。正因为如此,理论联系实际问题多,谁都可以提出一两个问题。这对于写天气学书来说有好的一面,也有难写的一面。

进行天气学方面的教学与研究,前前后后 20 多年,见到《天气学》教材,屡屡想起许多事。今受钱维宏教授所约,写一段回顾文字。回顾《天气学》的演变,大体分三个时期。

第一时期,是解放前及解放初期。这一时期的主要特点是使用外国教材为主。就气象学科的几个方面来说,天气学从研究到写成正式的书要比动力气象学和大气物理学晚些。直到 20 世纪 40 年代,由于世界大战需要知道天气和天气预报,才出版了几本天气学方面的书。最早,也是最突出的一本书,是在 1940 年出版的 S. Petterssen 的《天气分析与预报》,其次有日本荒川秀俊的《天气分析》,德国 Scherhag 的《天气分析和天气预报的新方法》,以及苏联学者赫绕莫夫的《天气学原理》。我国也出版了一本卢鏊写的《天气预告学》。S. Petterssen 的《天气分析与预报》一书,主要是从大气热力学和大气运动学,少数大气动力学的观点出发,利用单站探空资料作间接高空天气学,以及利用气团、锋面和变压场等特点作地面图分析和预报。由于该书是第一次介绍可用的分析和预报方法,虽然简单但说清其依据,比起过去经验成分为主,是前进了一步。作者很得意地在书的第一页引用了 Lord Kelvin 的一句名言:When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager, unsatisfactory。该书印刷量很大,清华大学在 1946 年前后买的原版书,已是第八次印刷。该书在 1956 年出过第二版,内容前后差别很大,只能作为一般参考书。

第二时期,编写教材是由党政领导,要求适合“以我为主”的国情,提倡理论联系实际。1959 年 1 月北京大学成立了地球物理系,同年以谢义炳先生为主出版了《天气学基础》一书。该书原想以大气动力学观点,并从大气环流概念入手,用三度空间分析法来探讨天气学问题。从最初的设想来看,比 Petterssen 体系向前推进了一大步,但其目标并未达到。时隔 2 年的 1961 年初,北京大学校系领导接受教育部指示,要我系主持编写天气学教材。大纲要北京大学、南京大学两个教师比较齐全的气象专业指定几位教师编写,由我任组长。这本名为《天气学》(上册)的书,在内容上以北京大学、南京大学的讲义及谢义炳的书为主,并吸取 S. Petterssen 和苏联赫绕莫夫等编写的书的精华,还参考当时空军气象专科学校编写的《天气学》,最终编写出了一本适合于综合性大学和师范学院气象系(室)应用的教材。此书原稿已送请南

京大学审阅,后因政策有变,只作为试用教材由北京大学教材科付印,满足不了需求。1964年春,高教部约气象局科教司召开以北京大学、南京大学教师为主的高校气象教材会议,讨论天气、动力、普通气象、气候四门课程教材的编写,天气学是重点,决定由南京大学黄士松先生同我合作编写,计划2年完成。可是不久就进入各项政治运动时期,编教材一事不了了之。进入20世纪70年代,北京大学为地方气象台站办了几期短期学习班,科学出版社找到王绍武同志写本天气预报方面的书,并有不少教师参加,最终在1976年出版了《天气分析与预报》一书。这本书销路很好,再三重印。

第三时期,进入改革开放以来,气象院校进入正规的招生和教学程序,教材需要量增加。在此阶段,正经有三本书出版了,包括南京气象学院的《天气学原理与方法》、中山大学梁必骐的《天气学教程》,以及南京大学伍荣生等的《现代天气学原理》。北京大学天气学教师,对于天气学教材建设方面曾做过不少贡献,也有很多想法。最近,钱维宏教授在执教天气学四年的经验上深有心得,编写成一本教材,即将在北京大学出版社出版,大家非常欢迎并支持。将来编写教材,绝对不会像过去那样,一枝独秀,而是百花争艳。

我知道钱教授是重视“全而新”的,看了他将要出版的教材目录,听了他在大气科学系的介绍,深得体会。这本《天气学》有传统的“气旋”,又有最新的“季风”,反映了经典与新近发展的结合。估计这样安排后对同学复习与阅读很有利。我建议钱教授出版后多听取学习者的意见,了解一下究竟哪一种写法较好。这样可以为将来撰写世界一流大学天气学教材打下良好基础。

仇永炎

2003年4月

序 言 Ⅲ

自从 20 世纪 70 年代前期教了几年天气分析和预报,并同教研室的同事合编了一本《天气分析与预报》的教材之后我就很少从事天气学的教学了,研究工作集中在气候学方面,因此应该说没有什么资格来评论天气学,无论是教学还是科研。但是,自己是一个过来人,正因为不再从事天气学的工作,反而可以从侧面来说明天气学的重要性。

20 世纪 50 年代中期,北京大学物理系气象专业的教员人数不多。以仇永炎教授为主,有一个不成形的小组,三四个人每天吃过晚饭都要到南阁去画当天的天气图,仇先生当时是讲师,我是助教。我最爱画的是 500 hPa 图。仇先生则经常画地面图,有时也画 850 hPa 图。我的天气学知识,应该说主要就是这几年中积累起来的。当时天气学教学中有一种“恍然大悟”的说法。意思是说学生在上课时往往觉得糊里糊涂,但是有一天突然觉得能看懂天气图了。当时的天气学教员的一个主要想法就是如何使学生早一点“大悟”。实际上我也是有这种体会的。开始到气象台参加天气汇商会,预报员手一挥说,这个槽如何如何,我不知道指的是哪个槽,甚至于这个槽在高空还是在地面也搞不清楚。用现代的话说,就是“一头雾水”。等画过一年半载天气图,又天天同仇先生等长一辈及年龄相仿的同事讨论,就逐渐地“悟”了出来。因此,我的体会就是:要学好天气学,实践是最重要的。现在有机画图了,听说学生的画图训练似乎也不如以前多了。但是我却觉得这是必不可少的课程。听说有的预报员报完天气下班就不管了。也许这只是个别人,但是我却很不以为然。我们在气象台实习时,预报员值完夜班,吃完早饭应该休息了,可还要一次、两次地回来看天气图,担心自己的预报是否有问题。只有在这种精神的指导下,才能通过实践,做到“恍然大悟”。

其次,记得我们教天气分析和预报时,对一些课程之间的关系,总是理不太清楚,不同教员之间的看法也有分歧。一个是动力气象学与天气学的交叉问题,一个是天气学原理与中国天气的特点问题。如地转风,动力气象学中要讲,天气学中也要讲。又如锋面与气旋,经典的模型是北欧的气旋,这种气旋在东亚特别是中国南部是很少见的。归根结蒂,就是一个理论与实践结合的问题。当然过了三十余年,短期数值预报已经完全承担起形势预报的任务,没有什么人再用手画等压线来预报天气形势了。中小尺度模式也有了很大发展。教学内容与教材显然比过去丰富多了。但是,不同的人来教天气学,总会有他自己的设想。《天气分析和预报》一书反映了我们在大约三十年前的教学思想,今天自然应该有今天的教学思想。因此,过去在教研室工作时,也曾提倡不同的人有不同的教材,有自己的教学风格。这对天气学的教学与研究都是有利的。所以,从这种角度讲,我是非常支持能把教材写出来,这样才能交流。陶诗言先生是资深的天气学专家,我只是一个天气学爱好者,谈到天气学勾起了我的回忆,写这几句,算作序言。

王绍武

2003 年 3 月 15 日

前 言

我国幅员辽阔,春季南方的连阴雨、北方的沙尘暴,夏季的暴雨,秋季的台风和冬季的寒潮常常给我国很多地区带来重大自然灾害。当然,适时和适宜的风雨又是一种自然资源。我国是受季风影响的国家,无论自然灾害,还是自然资源,都与影响我国的季风活动有着密切关系。要防御灾害,做好上述灾害性天气的预报,首先需要认识和把握各种天气系统发生、发展和移动的机制与规律,认识对应的天气现象配置。天气学就是分析和研究这方面问题的学科。

北京大学“天气学”的教学历史悠久,具有特色。20世纪50~60年代谢义炳、仇永炎和王绍武等老一辈气象学家参与和主讲了“天气学”。1959年谢义炳先生等编写出版了北京大学第一本教材《天气学基础》。“文革”以后,张镔教授和蒋尚城教授多年主讲天气学,积累了丰富的经验。北京大学举办过多期全国天气学讲学班,培养了大批气象业务人才和科研人才。

自1976年北京大学地球物理系气象教研室出版了《天气分析和预报》教材后,其他院校先后出版了多本天气学内容的教材。随着大气探测技术和研究方法的发展及新知识的积累,特别是我国季风天气气候特色研究内容的扩充,这些极大地丰富了天气学的教学内容。此外,北京大学近年来对气象学科的教学内容也作了很多的改革,因此天气学教材也需要适应新的教学实践。北京大学这20多年没有出天气学方面的书,其中一个原因就是思考这些问题。

1998年原北京大学地球物理系的天气学课程教学着手新老交替,编者听了老教师一个学期的天气学课,1999年开始在北京大学讲授天气学课程。与此同时,在教育部“大气科学国家理科基础科学研究和教学人才培养基地”的资助下,编者和朱亚芬老师一起带领2000届的本科生,一边做毕业论文,一边开始制作“温带天气系统”的多媒体课件。经过一年的努力,三位同学不但完成了课件建设,还在国际核心刊物上发表了4篇论文。在2001年多媒体课件开始投入教学的同时,我们也开始了这本《天气学》教材电子版的编写工作。考虑到北京大学研究生招生考试中增加了气候部分,主要是季风和大气环流,我们在电子版教材中扩展了这些内容。2002年《天气学》的电子版开始用于教学。通过教学,同学们仍然觉得还是需要一本教材才方便学习。于是,我们把编写出版教材的计划提前了。

这本《天气学》书终于能够与同学们见面了。它的出版凝聚了北京大学很多老教师和同学的辛勤劳动和汗水。在此作者难以一一表达对校内外各位老师的衷心感谢。仇永炎教授、王绍武教授、陈受钧教授、黄嘉佑教授、蒋尚城教授、刘式适教授、刘式达教授、陶祖钰教授、张镔教授、谢安教授等对北京大学天气气候学的研究和发展都做出了很大的贡献,尤其是蒋尚城教授、张镔教授和陶祖钰教授对年轻教师的培养付出了大量劳动并提供了很多素材。陶诗言、仇永炎和王绍武三位先生欣然同意为本书写序。陶先生并为目录顺序和有关内容提出了修改意见。仇永炎先生还亲自参加了大气科学系组织的天气学教材编写论证会。

对发展“温带天气系统”多媒体做出主要贡献的朱亚芬老师,目前在美國读博士的邓毅和张鹤年同学,目前仍在北京大学读博士的胡豪然同学表示诚挚的谢意。非常感谢瑞典Gothenburg大学D. Chen教授与我的多次讨论,感谢D. Chen教授、WA Gough教授、叶谦博

士、张文健研究员和许焕斌研究员提供图片。在我参加国内外学术会议期间,热心的同行为我提供了很好的素材。物理学院的刘玉鑫教授和郭华教授对教材的出版给予了极大关注。我的学生全林生、胡豪然、林祥和徐袁帮助完成了很多插图,杨喜峰和汤绪同志阅读了全书。

本书是为大气科学专业本科生编写的天气学专业课教材,也可供相关专业的本科生或研究生学习与研究参考。注意到北京大学另有“天气诊断分析和当前天气讨论”的课程,也有《天气过程诊断分析原理和实践》的教材,故本教材中不包括天气分析和预报的天气实习内容。为方便复习和研究生入学考试,除教材外还提供了每章的要点与思考题。要点与思考题没有在此列出,同学们可以在网址 www.phy.pku.edu.cn/merg 下拷贝。

本教材在很多方面仍沿用了北京大学 1976 年教材的做法,如将基础理论部分集中写,但对内容作了压缩。第一章是绪论,目的是从系统、尺度和天气学的发展过程等方面对这门学科建立一个初步的认识。第二章是基础理论,它删除了动力气象学中的复杂推导,注重用结论解释天气学中的现象和问题。第三章讲大气环流,将流体实验与大气环流联系起来,以增加对大气环流的理解,也涉及了海气耦合的内容。“气团和锋”与“气旋”部分在第四章和第五章作了论述,对我国不同地区的气旋也作了介绍。第六章讲西风带大型扰动,注重分析影响我国的冬季风系统与寒潮。第七章是中小尺度天气,其内容相对较多,也是天气学的重要部分。第八章讲季风,主要是夏季风,内容从东亚季风延伸到了全球季风。第九章讲低纬度天气,对影响我国的低纬度环流及高低值系统进行了介绍。第十章是中国降水,内容反映了降水的地区性、季节性和极端情况。

北京大学大气科学专业的天气学和大气动力学两门专业基础课都是 4 个学分,在大三下学期讲。经过几年的磨合,按照本教材的目录顺序讲,就能够与大气动力学课程的进度有机配合。编者曾在气象台站工作多年,画了几年天气图,因此在讲课过程中仍然习惯在黑板上用多色粉笔画很多的简易天气图。也要求学生在做笔记的同时画彩色图。据统计,学完本课程的学生笔记本上有 100~120 幅图。很多的简易天气图都没有能够包含在这本书中。无论我们的同学将来是做天气学研究,还是做气候或环境问题的研究,总要画图描述一些现象,再看图说话,写出报告和文章来。学习天气学过程中画一些图对未来的工作应该是有用的。现代天气学教学还是需要传统的黑板、教材和多媒体三者紧密结合,专业术语还是要多知道一些,因此书中的内容较多。

每次给本科生上天气学都发现有些同学还忙着上经济学的课程,拿双学位。上完这两门课后有的同学做起了气象经济学的毕业论文。看来,天气学不但可以在农业、林业、水利等方面有应用,也与热门学科交叉上了。

无论在教学实践、编写教材,还是在科研过程中,作者总是在思考每个天气气候问题从现象到本质的联系。这个联系是江苏省气象局王式中总工程师 20 年前给我讲的:热(生)风,风(生)雨,即热力对比(热力学)形成大气的运动(风,也即动力学),而大气的运动通过辐合、辐散与降水(天气现象)有关。后者就是天气学的主要内容。通过这个联系,作者试图讲好天气学的课程,也努力使同学们比较容易地理解天气现象形成的来龙去脉。而在这本书里编者的愿望是要把天气学教材写好,但编者毕竟学识有限,时间仓促,只能是把前人的工作做一个排序,谬误仍在所难免,敬请读者批评指正。

钱维宏

2003 年 4 月

目 录

第一章 绪论	(1)	§ 2.14 长波理论	(31)
§ 1.1 系统	(1)	2.14.1 高层大气中的长波	(31)
1.1.1 孤立系统	(1)	2.14.2 大气长波理论	(31)
1.1.2 封闭系统	(1)	2.14.3 大气长波与地面系统	(33)
1.1.3 开放系统	(1)	§ 2.15 位势涡度	(34)
§ 1.2 天气与气候	(2)	§ 2.16 发展方程	(36)
§ 1.3 地球大气的特征	(2)	§ 2.17 位势倾向方程和	
§ 1.4 不同纬带的天气	(4)	ω 方程	(38)
§ 1.5 尺度	(5)	2.17.1 位势倾向方程	(38)
§ 1.6 天气系统分类	(7)	2.17.2 ω 方程	(39)
§ 1.7 天气学的基本原理	(8)	§ 2.18 准地转 Q 矢量分析	(40)
§ 1.8 发展史与前景	(9)	§ 2.19 斜压大气中高空天气系统的	
第二章 基础理论	(12)	发展	(44)
§ 2.1 作用于空气微团的力	(12)	第三章 大气环流概述	(46)
2.1.1 地心引力	(12)	§ 3.1 热力环流	(46)
2.1.2 气压梯度力	(12)	§ 3.2 环流实验	(48)
2.1.3 分子摩擦力	(13)	3.2.1 泰勒实验和贝纳尔对流	(48)
2.1.4 地转偏向力	(13)	3.2.2 Hide 实验	(49)
2.1.5 惯性离心力	(14)	3.2.3 绕流实验	(51)
2.1.6 重力与重力位势面	(14)	§ 3.3 大气环流水平平均场	(53)
§ 2.2 大气运动方程	(15)	3.3.1 下垫面热力和流场特征	(53)
§ 2.3 热力学方程	(16)	3.3.2 ENSO 循环与 Walker 环流	(56)
§ 2.4 气压坐标与厚度方程	(17)	3.3.3 海平面的气压特征	(59)
§ 2.5 静力学方程	(19)	3.3.4 高层大气环流特征——	
§ 2.6 地转风	(20)	极涡	(60)
§ 2.7 梯度风	(21)	3.3.5 降水特征	(63)
§ 2.8 热成风	(22)	§ 3.4 大气垂直环流	(64)
§ 2.9 锋面坡度公式	(23)	3.4.1 经向环流	(64)
§ 2.10 地转偏差	(24)	3.4.2 经向环流模型	(66)
§ 2.11 散度和连续方程	(25)	3.4.3 气候带	(68)
§ 2.12 涡度	(27)	3.4.4 角动量输送	(69)
§ 2.13 涡度方程	(28)	§ 3.5 高原加热与行星环流	(70)

3.5.1 高层环流·····	(70)	§ 5.3 锋面气旋发生和发展的天气学模式·····	(108)
3.5.2 高原加热·····	(71)	5.3.1 准静止锋上锋面波动过程·····	(109)
3.5.3 高原热力环流·····	(72)	5.3.2 极锋理论模型·····	(110)
3.5.4 地形作用·····	(74)	5.3.3 冷锋进入倒槽暖锋锋生过程·····	(110)
3.5.5 高原对南北半球环流的影响·····	(75)	§ 5.4 气旋天气与输送带模式·····	(111)
§ 3.6 高原环流·····	(75)	§ 5.5 气旋再生与气旋族·····	(113)
3.6.1 一级环流·····	(76)	5.5.1 锢囚再生·····	(114)
3.6.2 二级环流·····	(78)	5.5.2 副冷锋加入后再生·····	(114)
3.6.3 三级环流·····	(80)	5.5.3 气旋入海后再生·····	(114)
第四章 气团和锋面 ·····	(82)	5.5.4 两个锢囚气旋合并再生·····	(115)
§ 4.1 气团·····	(82)	5.5.5 气旋族·····	(115)
4.1.1 气团的概念·····	(82)	§ 5.6 卫星云图上锋面气旋发生和发展的特征·····	(115)
4.1.2 气团的形成与变性·····	(83)	5.6.1 江淮气旋云系的演变·····	(115)
4.1.3 气团的分类·····	(83)	5.6.2 东北气旋云系的演变·····	(116)
4.1.4 我国境内的气团活动·····	(84)	§ 5.7 气旋发生和发展天气过程实例·····	(117)
§ 4.2 锋面系统·····	(85)	§ 5.8 成熟气旋与沙尘云图实例·····	(117)
4.2.1 锋的概念和定义·····	(85)	§ 5.9 成熟气旋云图结构及气旋发展动力学解释·····	(118)
4.2.2 锋面结构·····	(86)	5.9.1 成熟气旋云图结构·····	(118)
§ 4.3 锋的分类·····	(87)	5.9.2 气旋发展动力学解释·····	(120)
4.3.1 锋的分类方法·····	(87)	第六章 西风带大型扰动 ·····	(123)
4.3.2 锋的第一种分类法·····	(87)	§ 6.1 行星锋区·····	(123)
4.3.3 锋的第二种分类法·····	(92)	§ 6.2 急流·····	(126)
§ 4.4 锋面附近的要素特征·····	(92)	6.2.1 急流的基本特征·····	(126)
4.4.1 温度场特征·····	(92)	6.2.2 温带急流·····	(128)
4.4.2 位温场特征·····	(93)	6.2.3 副热带急流·····	(128)
4.4.3 气压场和风场特征·····	(93)	6.2.4 极区平流层急流·····	(129)
4.4.4 变压场·····	(94)	6.2.5 热带东风急流·····	(129)
§ 4.5 锋面天气·····	(95)	6.2.6 低空急流·····	(129)
§ 4.6 锋区输送带·····	(98)	§ 6.3 大气长波·····	(130)
4.6.1 暖输送带·····	(98)	6.3.1 高空长波与地面锋面系统·····	(130)
4.6.2 冷输送带·····	(100)	6.3.2 长波温压场结构·····	(131)
§ 4.7 锋生与锋消·····	(100)	6.3.3 长波与气旋族·····	(133)
第五章 气旋 ·····	(104)	6.3.4 大气长波上的散度和涡度·····	(134)
§ 5.1 气旋的定义和源地·····	(104)		
5.1.1 气旋的定义·····	(104)		
5.1.2 气旋与反气旋的分类·····	(104)		
5.1.3 气旋源地·····	(105)		
§ 5.2 经典气旋模式与天气·····	(107)		

6.3.5 指数循环	(134)	7.5.4 南支槽	(165)
§ 6.4 阻塞形势	(134)	第八章 季风	(166)
6.4.1 阻塞高压的定义	(135)	§ 8.1 热力环流	(166)
6.4.2 阻塞高压	(135)	§ 8.2 季风的定义	(166)
6.4.3 切断低压	(136)	8.2.1 亚洲的季风现象	(167)
§ 6.5 寒潮	(137)	8.2.2 扩展的季风	(168)
6.5.1 寒潮的定义和冷空气 的路径	(138)	8.2.3 季风成员	(169)
6.5.2 寒潮灾害	(140)	§ 8.3 亚洲季风的子系统	(171)
6.5.3 寒潮天气的分类	(141)	8.3.1 亚洲季风降水与季风 气流	(171)
第七章 中小尺度天气	(144)	8.3.2 南亚季风区	(173)
§ 7.1 对流性天气和对流系统 ..	(144)	8.3.3 东南亚季风区	(174)
7.1.1 中小尺度天气系统的 基本特征	(144)	8.3.4 东亚季风区	(174)
7.1.2 产生对流系统的动力 条件	(145)	8.3.5 高原季风区	(174)
7.1.3 雷暴单体	(145)	§ 8.4 东南亚季风	(174)
7.1.4 飑线	(147)	8.4.1 最早季风爆发	(175)
7.1.5 冰雹	(149)	8.4.2 南海季风的突然爆发	(175)
7.1.6 龙卷	(150)	8.4.3 东南亚季风爆发的区域 差异	(176)
§ 7.2 中尺度系统	(151)	8.4.4 南海季风爆发早晚对东亚 季风的影响	(176)
7.2.1 中尺度雨团	(151)	§ 8.5 南亚季风	(178)
7.2.2 中尺度对流复合体	(152)	§ 8.6 东亚季风	(181)
7.2.3 中尺度雨带	(153)	8.6.1 东亚地区的季节转换和 降水时段	(181)
7.2.4 中尺度低压系统	(154)	8.6.2 中国夏季风降水的阶段	(185)
§ 7.3 中尺度天气分析	(155)	8.6.3 中国冬季风气候	(186)
7.3.1 飑中系统的发生和发展 过程	(155)	§ 8.7 亚洲-澳大利亚季风	(187)
7.3.2 飑线的移动	(155)	§ 8.8 全球季风	(188)
7.3.3 时空转换分析	(158)	8.8.1 水汽反映的全球季风区	(189)
7.3.4 变量场分析	(158)	8.8.2 风场揭示的全球季风区	(191)
7.3.5 飑中系统的移动	(158)	8.8.3 假相当位温揭示的全球 夏季风区域	(193)
§ 7.4 对流性天气发生的条件 ..	(160)	第九章 低纬度天气	(195)
7.4.1 静力不稳定	(160)	§ 9.1 低纬度天气的基本特征 ..	(195)
7.4.2 对流性不稳定	(162)	§ 9.2 热带辐合带	(196)
§ 7.5 对流性天气发生的环境 ..	(163)	§ 9.3 副热带高压	(200)
7.5.1 逆温层	(163)	9.3.1 副热带高压的成因	(200)
7.5.2 高低空急流	(163)	9.3.2 副热带高压的垂直结构	(204)
7.5.3 高空冷涡	(164)		

9.3.3 风场特征	(205)	10.1.5 垂直运动条件的分析	(234)
9.3.4 副热带高压的强度和 位置变化	(205)	10.1.6 中国降水区域特征	(235)
9.3.5 水汽输送	(208)	10.1.7 极端降水	(237)
§ 9.4 热带气旋	(210)	§ 10.2 短波系统	(241)
9.4.1 概况	(210)	10.2.1 短波活动形势场	(242)
9.4.2 台风结构	(214)	10.2.2 短波活动时的天气	(243)
9.4.3 热带气旋天气	(217)	10.2.3 切变线和涡	(244)
9.4.4 热带气旋形成的必要条件 ..	(218)	§ 10.3 梅雨	(246)
9.4.5 热带气旋形成的物理机制 ..	(219)	10.3.1 梅雨的一般概况	(247)
9.4.6 台风的移动	(220)	10.3.2 梅雨大尺度环流	(250)
9.4.7 台风的消失与诱生低压的 形成	(223)	10.3.3 梅雨区低层环流	(254)
9.4.8 环境场对台风降水的影响 ..	(223)	§ 10.4 华南降水	(254)
§ 9.5 南亚高压	(224)	10.4.1 高空环流形势	(255)
§ 9.6 东风波	(226)	10.4.2 低空急流	(256)
§ 9.7 高空冷涡	(227)	10.4.3 锋面系统	(256)
第十章 中国降水	(230)	10.4.4 暖切变和暖区辐合	(257)
§ 10.1 降水条件与极端降水	(230)	§ 10.5 北方降水	(259)
10.1.1 一般降水的形成过程	(230)	10.5.1 北方降水的基本特点	(259)
10.1.2 暴雨形成的条件	(231)	10.5.2 环流特征	(260)
10.1.3 水汽和降水率	(231)	10.5.3 影响北方地区的热带气旋 与暴雨	(262)
10.1.4 水汽通量与通量散度	(233)	参考文献	(264)