



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

现代天气学原理

伍荣生 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

现代天气学原理

伍荣生 主编

王元 王兴宝 伍荣生 邹力
何齐强 谈哲敏 章东华 潘益农 编著
(按姓氏笔划为序)



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和国家级重点教材。本书以国内外现代大气学发展趋势为思路,结合经典的天气学理论与 80 年代以来天气学研究新成果,阐述现代天气学的基本原理。本书主要内容:天气学基础知识和基本研究方法;大气环流;中纬度天气系统;低纬天气系统;亚洲季风和我国主要的天气过程;中尺度天气系统;天气形势和气象要素预报。

本书为大气科学类大气科学专业、应用气象学专业的本科生教材,可作为地理、农林、水利、环境等学科中相关专业的教材或教学参考书,亦可供气象科研和业务工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代天气学原理 / 伍荣生主编;王元等编著. - 北京:
高等教育出版社, 1999.9 (2002 重印)

ISBN 7-04-007743-4

I. 现… II. ①伍… ②王… III. 天气学-教材 IV. P44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 37310 号

现代天气学原理

伍荣生 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 1999 年 10 月第 1 版

印 张 20.75

印 次 2002 年 4 月第 2 次印刷

字 数 380 000

定 价 21.90 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

1996年在杭州召开了“教育部大气科学教学指导委员会”会议，在此会议期间，许多教授、学者就面向21世纪大气科学人才培养等问题，进行了热烈而深入的研讨。会上还就天气学的教学与教材建设问题，提出了许多建议，同时，还推荐我来主持编写一本面向21世纪、适用于大学本科生、符合教学改革精神的“天气学原理”教材，由于本人才疏学浅，同时天气学也非本人所长，实在感到困难重重。在许多气象院校的大力支持下，经过多次讨论，共同商定了编写大纲。最后，邀请南京大学和中国人民解放军理工大学气象学院（原空军气象学院）的多名专家、教授参加编写。

本书编写小组经过多次的讨论，逐渐明确了编写目的和要求。编写小组一致认为，我国许多学者已经编写过多种很好的天气学方面的教材，这为我们的撰写提供了很好的基础。我们应在此基础上，结合近代天气学的新发展和教学改革的新要求，进行编写。

现代大气探测技术的发展，揭示了许多新的观测事实，新的天气学教材应尽可能地反映这些新的观测与分析结果。同时，由于现代大气动力学的发展，动力学与天气学的结合趋于紧密，所以，在本书中也应力求反映出这一进展。此外，现代天气分析与预报的方法已从过去单纯的天气图分析方法，发展为包括运用统计分析、动力诊断、数值模式产品、卫星、雷达数值图像等多种手段的综合分析方法。尽管上述内容已各自构成了独立的课程，但在现代天气学教材中也应能反映出这一发展趋势。在讨论中，大家一致认为，让学生建立起天气系统的三维立体的概念模型是天气学教学的重要内容，也是我国天气学教材的传统特色。因此，在本书的编写中，对每一类天气系统均按该系统的定义、结构（概念模型）、天气特征、发生发展规律和运动机理这一线索编写。在教材中还注意尽量用简明物理概念说明问题，尽可能避免用复杂的数学运算，力图使学生掌握问题的物理本质。由于参加编写的人员较多，在内容的取舍、文笔风格等方面也是各有特色，于是编写小组又进行了多次的研讨，统一了认识，经过多次的调整，有时甚至于逐字逐句的推敲，才形成了本书初稿。尽管在诸多方面作了很多努力，但是，由于编者的学识所限，谬误仍在所难免，我们热诚希望大家能不吝指教。

本书编写分工如下：第一章，伍荣生；第二章，邹力；第三章，王元；第四章，王兴宝、谈哲敏；第五章，潘益农；第六章，邹力；第七章，何齐强；第八章，章东华。由伍荣生对全书初稿进行整理和协调。

本书在编写过程中，得到中国人民解放军理工大学气象学院(原空军气象学院)孔玉寿副教授、赵树海教授，以及南京大学大气科学系领导的关心与支持，在此向他们表示衷心感谢。本教材审稿会于1999年4月5日在南京召开，南京气象学院朱乾根教授、何金海教授，南京大学党人庆教授，中国人民解放军理工大学气象学院(原空军气象学院)孔玉寿副教授等参加了审稿会，认真审阅了本书初稿，并提出了许多宝贵的意见，在此向他们致以谢忱。本书的出版得到高等教育出版社的支持。本书责任编辑崔凤文同志为本书的出版做了许多工作；该社绘图科李维平同志清绘插图，在此一并致谢。

伍荣生

1999. 7. 12 于南京

责任编辑	崔凤文
封面设计	张楠
责任绘图	李维平
版式设计	周顺银
责任校对	陈荣
责任印制	陈伟光



面向 21 世纪课程教材

普通高等教育“九五”
国家级重点教材

目 录

第一章 绪论	1
§1.1 天气学的研究对象	1
§1.2 天气学的研究方法	4
§1.3 天气学发展简史与展望	5
参考文献	9
第二章 天气学基础知识和基本研究方法	10
§2.1 基本天气图的分析方法	10
§2.1.1 天气图的基本知识	10
§2.1.2 等值线的分析方法	15
§2.1.3 辅助图的制作与分析	18
§2.2 大气运动的基本方程组	22
§2.2.1 基本方程组	22
§2.2.2 尺度分析与基本方程组的简化	23
§2.2.3 气象常用坐标系	28
§2.2.4 涡度方程	32
§2.3 资料的处理分析和基本运动学量的计算	34
§2.3.1 资料的处理分析	34
§2.3.2 基本运动学量的计算	41
参考文献	56
第三章 大气环流	57
§3.1 大气环流的基本概念	57
§3.2 热力驱动的环境	66
§3.2.1 Hadley 环流	66
§3.2.2 大气平均加热场	71
§3.2.3 海洋对大气环流的影响	79
§3.2.4 “温室”气体对大气环流的影响	80
§3.3 旋转地球上的环流	82
§3.3.1 大气环流的运动特征	82

§3.3.2	三圈环流	83
§3.3.3	摩擦作用	88
§3.3.4	地形影响	92
§3.4	实际大气环流的平均特征	96
§3.4.1	平均低层环流	97
§3.4.2	对流层平均环流	99
	参考文献	106
第四章	中纬度天气系统	107
§4.1	锋面系统	107
§4.1.1	锋面的基本特征	107
§4.1.2	锋面结构模型	111
§4.1.3	锋面天气	115
§4.1.4	锋生和锋消	121
§4.2	温带气旋和反气旋	124
§4.2.1	概述	124
§4.2.2	温带气旋和反气旋发展理论	131
§4.2.3	温带气旋的结构和概念模型	152
§4.3	西风带槽脊系统的发展	161
§4.3.1	西风带槽脊的移动	161
§4.3.2	西风带槽脊的垂直结构	163
§4.3.3	位势倾向方程与西风带槽脊的发展	165
§4.3.4	波槽发展的简单动力模式	168
	参考文献	172
第五章	低纬天气系统	173
§5.1	热带气旋	173
§5.1.1	热带气旋活动概况	174
§5.1.2	成熟热带气旋的基本结构	178
§5.1.3	热带气旋天气	180
§5.1.4	热带气旋发生与发展	182
§5.1.5	热带气旋移动	185
§5.2	西太平洋副热带高压和南亚高压	188
§5.2.1	副热带高压的成因	188
§5.2.2	西太平洋副热带高压的结构	189
§5.2.3	西太平洋副热带高压位置和强度的变动	189
§5.2.4	西太平洋副热带高压活动与我国天气	191

§5.2.5 影响西太平洋副热带高压变动的因子	192
§5.2.6 南亚高压	193
§5.3 热带辐合带和热带云团	195
§5.3.1 热带辐合带的位置及其季节变化	196
§5.3.2 热带辐合带的季节内变动	198
§5.3.3 热带辐合带的形成机制	198
§5.3.4 热带云团	198
§5.4 东风波	201
§5.4.1 概述	201
§5.4.2 东风波的结构	202
§5.5 热带副热带涡旋	203
§5.5.1 气旋性涡旋	203
§5.5.2 赤道反气旋	205
参考文献	208
第六章 亚洲季风和中国主要的天气过程	209
§6.1 亚洲季风系统概述	209
§6.1.1 季风的定义	209
§6.1.2 季风的主要成员	210
§6.2 亚洲季风活动与低频振荡	213
§6.2.1 季风的爆发和建立	213
§6.2.2 低频振荡与季风活动的关系	215
§6.3 亚洲季风的形成与维持	219
§6.3.1 季风的形成机制	219
§6.3.2 季风数值模拟研究的现状	222
§6.4 冬季季风与寒潮	224
§6.4.1 概述	224
§6.4.2 冷空气南下过程中的结构及其变化	227
§6.4.3 寒潮天气形势	230
§6.5 夏季季风与中国的暴雨	232
§6.5.1 概述	232
§6.5.2 夏季暴雨的环流形势	233
§6.5.3 夏季暴雨的天气系统	235
参考文献	236
第七章 中尺度天气系统	238
§7.1 概述	238

§7.1.1	什么是中尺度天气系统	238
§7.1.2	中尺度天气系统的基本特征	238
§7.2	中尺度系统	239
§7.2.1	中尺度雨团	239
§7.2.2	中尺度雨带	241
§7.2.3	中尺度对流复合体	246
§7.2.4	飚线	252
§7.3	中尺度系统发生发展的大尺度环境条件	260
§7.3.1	位势不稳定层结	260
§7.3.2	强垂直风切变	261
§7.3.3	水汽辐合和湿舌	262
§7.3.4	急流的作用	263
§7.3.5	低空辐合和上升运动	265
§7.3.6	地形的作用	265
§7.4	中尺度系统发展和大气过程不稳定	267
§7.4.1	对流不稳定	267
§7.4.2	对称不稳定	268
§7.4.3	锋生强迫的次级环流	271
§7.5	中尺度分析	274
§7.5.1	资料来源及其处理	274
§7.5.2	时空转换分析	275
§7.5.3	相对坐标分析	277
§7.5.4	变量场分析	279
§7.5.5	雨团和雨带分析	280
	参考文献	280
第八章	天气形势和气象要素预报	282
§8.1	天气形势预报的基本方法	282
§8.1.1	趋势法	283
§8.1.2	涡度观点的应用	284
§8.1.3	位涡思想的应用	289
§8.1.4	经验预报法	293
§8.2	气象要素预报	294
§8.2.1	几种主要气象要素形成的宏观条件	294
§8.2.2	垂直运动的定性判断	300
§8.2.3	用天气学方法制作气象要素预报的一般思路和方法	307

§8.2.4 数值预报产品的统计释用	309
§8.3 卫星、雷达探测资料的应用	311
§8.3.1 气象卫星探测资料的应用	311
§8.3.2 雷达探测资料的应用	314
§8.4 天气预报业务现代化系统简介	315
参考文献	317

第一章 绪 论

本章将扼要介绍天气学的研究对象、内容和方法。同时，对天气学发展史作一简要的说明。

§ 1.1 天气学的研究对象

天气学是研究天气系统和天气现象发生、发展及其变化的基本规律，并利用这些规律来预测未来天气的学科。为了更好地理解天气系统的意义，现分以下几点来加以说明。

系统 所谓系统是指在时间或空间上可以与其他系统区分开来的一个实体。在系统与系统之间存在着一个界面，而各系统的物理量，如辐射、热量和动量等可以通过界面而进行交换。从严格意义上来说，这里所指的系统是开放系统。整个大气可看作是一个系统，因为大气与海洋之间就存在着一个明确的界面，大气中的水汽、热量与动量可以通过这个界面进行交换。但是，在天气学中，又往往把气旋或反气旋等看作是系统，虽然它们与周围大气并没有什么明确的界面，但它们与周围大气在性质上有明显的不同。对于整个大气或是整个背景场而言，在某一段时间内，其变化是较缓慢的。而气旋或反气旋的变化则相对于背景场来说是较快的，它们可以看作是背景场上的一种扰动。因此在天气学中，往往把天气系统看作是一个扰动。例如，气旋或者反气旋可看作是大气背景场或气候场中的一种扰动，称之为大尺度天气系统。而气旋中的积云对流，由于它的变化远比气旋的变化为快，这样又可把它看作是气旋中的一个扰动，是气旋系统中的一种尺度较小的天气系统。在大气中，系统与系统之间存在着各种物理量的交换，也就是说天气系统是一种开放系统。

尺度 所谓尺度是表征一个系统在空间上的大小，或者在时间上持续的长短。例如，在一般情况下，气旋的半径大约为数百公里到数千公里，而其持续时间大约为数天到数周。可取气旋的半径作为气旋的空间尺度，而把气旋持续时间看作是气旋的时间尺度。对于积云而言，它的水平范围只有数公里到数十公里，其持续时间也只有数小时到半天。显然，气旋与积云的时间或空间尺度都是不同的。由于不同尺度的天气系统具有不同的动力学特性，因而，气旋

的发生、发展机制与积云的发生、发展机制也是有所不同的。

在中高纬度地区，低层大气天气系统的水平尺度与时间尺度，可概括起来如表 1.1 所示。而中、高层扰动的空间尺度与时间尺度，可见表 1.2 所示。由这两个表可见，不论在高空还是在地面，空间尺度越小，持续时间即时间尺度也越短，而其强度一般来说也是越大。

表 1.1 地面附近天气系统的水平尺度与时间尺度的特征

(取自 Fujita T. T., 1986)

天气系统	水平尺度	时间尺度	最大风速/($m \cdot s^{-1}$)
温带气旋	500~2000 km	3~15 d	55
冷锋	500~2000 km	3~7 d	25
反气旋	500~2000 km	3~15 d	10
暖锋	300~1000 km	1~3 d	15
飓风	300~2000 km	1~7 d	90
热带气旋	300~1500 km	3~15 d	33
热带低压	300~1000 km	5~10 d	17
干锋	200~1000 km	1~3 d	20
小型台风	50~300 km	2~5 d	50
中尺度高压	10~500 km	3~12 h	25
阵风锋	10~300 km	0.5~6 h	35
中尺度气旋	10~100 km	0.5~6 h	60
下坡风	10~100 km	2~12 h	55
大暴流	4~20 km	10~60 min	40
微暴流	1~4 km	2~15 min	70
龙卷	30~3000 m	0.5~90 min	100
抽吸性涡旋	5~50 m	5~60 s	140
沙尘暴	1~100 m	0.2~15 min	40

表 1.2 中、高层天气系统的空间和时间尺度的特征

(取自 Fujita T. T., 1986)

天气系统	水平尺度	时间尺度
长波	8000~40000 km	15+ d
短波	3000~8000 km	3~15 d
气旋波	1000~3000 km	2~5 d
西风急流	1000~8000 km	5~15 d
低空急流	300~1000 km	1~3 d
急流轴	200~1000 km	2~5 d
砧状云团(中尺度对流复合体)	50~1000 km	3~36 h
单体砧状云	30~200 km	1~5 h
超级单体风暴	20~50 km	2~6 h
积雨云	10~30 km	1~3 h
积云	2~5 km	10~100 min
上冲堆状云	2~5 km	2~10 min

续表

天气系统	水平尺度	时间尺度
龙卷涡旋扰动	1~5 km	20~90 min
上冲塔状云	100~500 m	1~3 min
热泡	100~1000 m	5~20 min
云内团流涡动	10~100 m	不定

天气系统的分类 为了更方便地描述不同天气系统的特征,许多学者又把它划分为大尺度、中尺度、小尺度及微尺度等不同尺度的天气系统。不同学者之间,其划分的标准,也略有不同。如图 1.1 是 Fujita (1986) 综合其他几位学者按水平尺度大小所划分的天气系统情况。

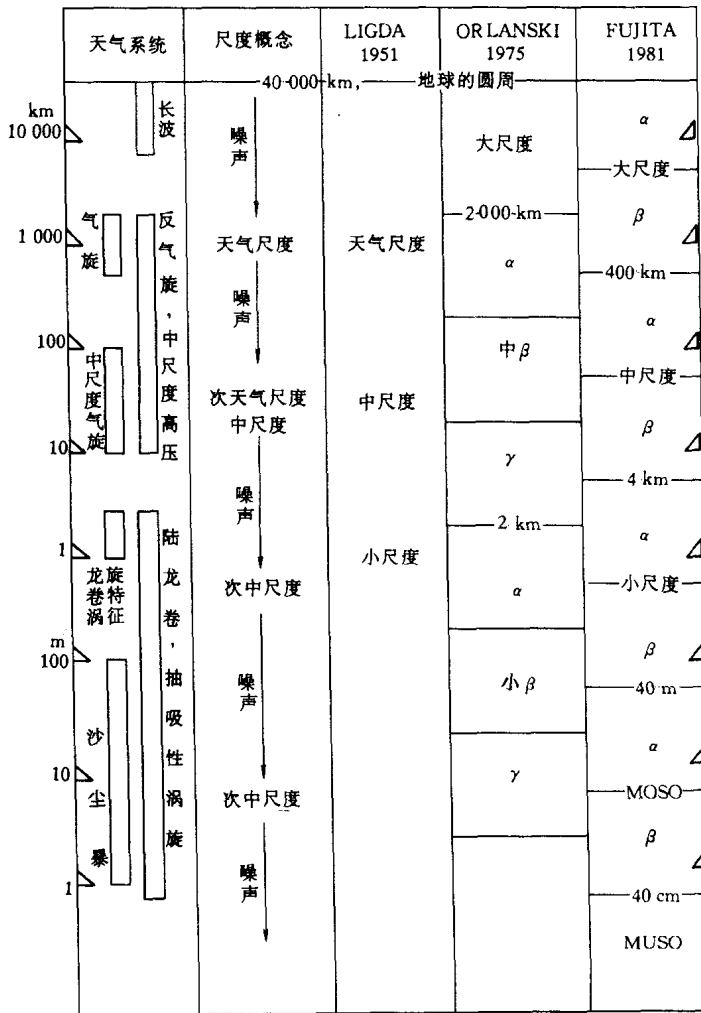


图 1.1 按水平尺度的大小来划分天气系统(取自 Fujita T. T., 1986)

从上图可以看到,大致在 400 km 以上的系统,称之为大尺度系统;而在 4 km 到 400 km 之间的系统,称之为中尺度系统;在 40 m 到 4 km 之间的天气尺度称之为小尺度系统;小于 40 m 的系统称为微尺度系统。每一个等级的大小均差一个量级,即差十倍。

天气学的研究对象就是上述不同尺度的天气系统,其目的是了解这些系统的特征与发生、发展的规律。由于不同尺度的天气系统,其影响的范围、持续的时间与发展的强度都是显著不同的,而其发生、发展的动力学和热力学机制也是不同的,因此,就构成了天气学的不同分支,例如大尺度天气学、中小尺度天气学等。本书将于以后章节中分别予以说明。

§ 1.2 天气学的研究方法

天气学的最终目的是要正确地预报出天气情况。所以,首先必须仔细分析天气图中的观测资料,了解天气系统与天气状况分布与演变的特点;然后,利用天气学原理,诊断与分析为什么在这些地区有这样的天气出现,为什么有这样的天气特点;最后,利用天气学和动力学原理,结合天气学模型和数值预报的产品,以及最新的观测资料,进行未来的天气预报,这是天气预报的一般原理与方法。由于影响天气变化的因子是非常复杂的,除上述的一般原理之外,还须注意以下几点。

1. 天气现象与天气系统的分析与综合

利用观测到的天气现象与有关资料,分析与揭示出天气系统与天气现象分布的联系、特点及其演变规律。在一般情况下,天气系统比较容易确定,而其移动规律也是比较容易掌握的,因此,在分析了天气系统的移动、发生、发展和演变的规律之后,再研究与这些系统相联系的天气现象的变化特征,有助于作出未来天气现象的正确预报。

2. 研究不同地区、不同地理环境下的天气特征与变化规律

在地球上,有陆地和海洋,有高山与湖泊,这些地表状况会影响到天气变化。除此之外,在不同的地理位置,也有不同的天气系统与不同的天气现象。例如,在极地有极地的天气系统,如极地低压等;在中纬度地区,地面有气旋波与锋面等系统,而在高空有槽脊系统等;在热带地区,也有其独特的天气系统,如台风、赤道辐合带等。不同地区的天气系统,有不同的变化规律,有不同的发生、发展的机制。对于不同地区的天气预报,要掌握不同天气特征与变化的规律。

3. 研究不同尺度天气系统的结构及其相互作用

不同尺度的天气系统有其独特的发生、发展规律,但是不同尺度天气系

统之间又是相互联系的。因此，在研究不同尺度的天气系统的结构与其动力学性质的同时，还应特别注意各种尺度之间的相互作用与相互影响。只有这样，才能精确地了解主要系统的演变过程，最终作出正确的预报。例如，热带气旋是在一定的大尺度环境场中才能生成，而当它生成之后，它的移动又会受到大尺度系统如副热带高压外围气流的引导作用。所以，了解不同尺度天气系统的相互作用，是天气学也是大气动力学中的一项重要内容。

4. 研究与掌握各种天气的预报方法

利用天气学的基本原理，提高预报准确率，研究并发展天气预报方法，是天气学的最终目的。整个天气学发展的历史，就是天气预报原理与方法的发展历史。例如，最早是利用单站气象要素来预测未来天气，后来利用地面天气图进行预报，这是一个发展，即从一个点发展到一个面。后来又发展了高空天气图，结合单站与地面天气图进行预报，就是从二维发展到三维空间的问题。近年来，随着科学技术的迅猛发展，特别是计算机的快速发展，天气预报技术在短短的几十年间，也随之有了飞速的发展。目前的天气预报也逐步从定性走向定量，数值预报已成为目前天气预报方法中的一种主要的工具。但正确的数值预报，除了要有完善的数值预报模式，快速的计算条件外，还必需有正确的天气观测资料与正确的天气分析，因此，要提高天气预报准确率，必须综合多种学科，不断改进与发展各种预报方法。

在当前众多的预报方法中，天气图方法仍是一种最基本的方法。天气分析的原理和方法构成了天气学的主要内容，但从其发展来看，天气学必然要与近代大气动力学紧密地结合起来，必然要与计算机等现代科学技术的发展密切结合起来。这三者紧密结合是天气学学科发展的主要趋势。本书力图从这一角度来讲解天气学。

§ 1.3 天气学发展简史与展望

由于人们的生活与生产活动的需要，天气预报早就成为一项重要的科学活动。早在十九世纪初期，就已有天气观测和预报的组织和活动。到目前为止，它已经历了百余年的发展历程，按其发展的不同时期的不同特点，可分为以下几个主要阶段：

1. 单站预报方法阶段

在电报发明之前，各处的观测资料不能及时传送，因而不能及时了解天气现象和天气系统在空间上的分布特点，只能利用当地单站的天气资料及其变化进行预报。各地都有许多天气谚语，它们实际上是利用这些观测资料与天气演变的规律，进行天气预报的经验总结。由于应用的是单站的资料，不能全面