


全国普通高等教育师范类地理系列教材

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

# 气象学与气候学

回姜世中 主编

 科学出版社  
www.sciencep.com

## 内 容 简 介

本书是大学本科地理科学类专业的专业基础课教材。全书分为气象、天气和气候三篇,内容包括大气结构、辐射、大气运动、大气降水、天气系统、天气过程、气候形成因子、气候分类与区划、气候变化,以及五个实验。本书结合国内外现代大气科学的最新发展成果,采用了较多的图表、公式、权威最新数据阐明本学科的基本原理、方法,略去了繁琐的公式推导,突出基本定理、基本公式的物理意义及应用,描述了当前最引人注目的天气、气候现象。

本书为高校地理科学专业、资源环境与城乡规划管理专业、地理信息系统专业、大气科学专业、应用气象专业的本科生教材,可作为农林、水利、环境、生态等学科中相关专业的教材或教学参考书,也可供相关科技人员和中学地理教师参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

气象学与气候学 / 姜世中主编. —北京: 科学出版社, 2010

全国普通高等教育师范类地理系列教材

ISBN 978-7-03-029417-3

I. ①气… II. ①姜… III. ①气象学—高等学校—教材  
②气候学—高等学校—教材 IV. ①P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 214649 号

责任编辑: 许 健 韩 芳 / 责任校对: 刘珊珊  
责任印制: 刘 宇 / 封面设计: 殷 靛

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>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏省句容市排印厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 11 月第 一 版 开本: 889×1 194 1/16

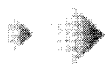
2010 年 11 月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—4 200 字数: 634 000

定价: 39.00 元

# 《气象学与气候学》编委会名单

---



主 编

姜世中

副主编

刘贤赵 黄秀英

编 委

(按姓氏笔画排序)

丁 辉(四川师范大学)

刘 鹏(绵阳师范学院)

刘长秀(绵阳师范学院)

刘贤赵(鲁东大学)

刘春燕(江西师范大学)

张海鹰(齐齐哈尔大学)

陈子玉(南京晓庄学院)

陈艳梅(河北师范大学)

罗礼洪(四川省气象局)

周 丽(内江师范学院)

胡晓东(内江师范学院)

姜世中(四川师范大学)

骆 红(四川大学)

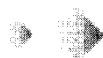
郭太平(山西师范大学)

黄秀英(佳木斯大学)

雷金蓉(西华师范大学)

雷建华(重庆师范大学)

# 《全国普通高等教育师范类地理系列教材》 专家委员会



## 主任

曾从盛(福建师范大学)

## 副主任

明庆忠(云南师范大学)

任建兰(山东师范大学)

周国华(湖南师范大学)

## 委员

(按姓氏笔画排序)

万鲁河(哈尔滨师范大学)

毛德华(湖南师范大学)

石培基(西北师范大学)

仝川(福建师范大学)

毕华(海南师范大学)

杨新(湖南师范大学)

杨玉盛(福建师范大学)

李小娟(首都师范大学)

李玉江(山东师范大学)

李永化(辽宁师范大学)

沙晋明(福建师范大学)

张戈(辽宁师范大学)

张果(四川师范大学)

张永清(山西师范大学)

张军海(河北师范大学)

张述林(重庆师范大学)

张祖陆(山东师范大学)

张雪萍(哈尔滨师范大学)

陆林(安徽师范大学)

陈晓玲(江西师范大学)

陈健飞(广州大学)

金海龙(新疆师范大学)

姜世中(四川师范大学)

官辉力(首都师范大学)

骆高远(浙江师范大学)

秦树辉(内蒙古师范大学)

袁书琪(福建师范大学)

高峻(上海师范大学)

高传喜(天津师范大学)

海春兴(内蒙古师范大学)

康建成(上海师范大学)

梁雨华(吉林师范大学)

葛京凤(河北师范大学)

程道平(山东师范大学)

舒晓波(江西师范大学)

温家洪(上海师范大学)

管华(徐州师范大学)

翟有龙(西华师范大学)



正值中国地理学会在北京人民大会堂举行百年庆典之际,欣闻科学出版社组织全国高等师范院校共同编写地理科学类系列精编教材,以适应我国高等师范院校教学改革和综合化发展的需要,我作为教育部地球科学教学指导委员会主任委员感到由衷地高兴和鼓舞。

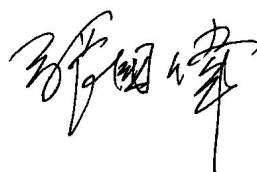
众所周知,高等师范院校的设置和发展可以说是中国高等教育在世界上的特色之一,为我国开展基础教育、提高国民素质教育作出了杰出贡献。地理科学类专业最早于1921年在东南大学(今南京大学的前身)设立了我国大学中的第一个地理学系,随后清华大学、金陵大学、北平师范大学纷纷增设地理学或地学系,因此地理科学类专业教育迄今已有八十多年的历史,培养了一大批服务于地理、环境与社会经济的地理科学人才。现今随着日益凸显的全球性的资源环境问题与人地关系矛盾的加剧和地理信息技术的迅速兴起、发展与应用,地理科学新的快速发展与拓展,地理科学类专业由原较单一的地理教育专业发展为地理科学、地理信息系统、资源环境与城乡规划管理等三个本科专业,并在综合性大学、高等师范院校、农林类高校等都有广泛开办。其中,高等师范院校较完整地设立了三个专业,在培养地理科学类的地理教学师资、地理信息系统、资源环境和城乡规划管理等人才方面发挥了主力军的作用,成为了我国培养这一类型人才的重要阵地,多被誉为“教师的摇篮”;与此同时,高等师范院校根据我国师范院校的性质和发展战略方向,以及我国高等教育改革的趋势,依托各区域的地理特点和文化积淀,针对社会的迫切需求,办出了不同于综合性大学的立足本土与本身的基础教育师资和区域性应用人才的特色。

由高等师范院校的资源环境与地理科学类的学院联合撰编系列精品教材,可紧密结合高等师范院校地理科学类专业的特点,量体裁衣,因校制宜,形成高等师范院校不同于综合性大学的自己系列精品教材;同时,可充分发挥师范院校教师们在师范院校地理科学类专业教学经验丰富和服务于基础教育及地方社会经济发展等的优势,将多年来精品课程建设、实践(实验)教学、专业建设、教学研究与教学改革等成果融入其中,形成真正的精品教材;再者,高等师范院校共同搭建系列精品教材编写平台,每本教材以1~2校为主编单位,多家院校参与、相互学习、相互交流、相互借鉴,取长补短,优势互补,共同提高,不仅利于每本教材编写水平的提升,也可促进师范院校专业建设和整体教学水平的提高,将提高本科教学质量、培养高素质人才、服务于地方基础教育和社会经济发展

# Preface

落到实处,推动我国高等教育的改革和发展。

我相信,科学出版社和高等师范院校精诚团结,真诚合作,各院校相互交流协作,一定能编出适合中国国情与需要,适应我国高等教育发展,适合高等师范院校的一系列精品教材。



中国科学院院士

教育部高等学校地球科学教学指导委员会主任委员

# 前 言

本教材是为了满足高等师范院校地理科学、资源环境与城乡规划管理、地理信息系统、环境科学等专业开设的《气象学与气候学》课程教学需要,按照地理科学类专业培养目标的要求,在九所高等院校的通力合作下,共同商定了编写大纲,以国内现有教材为基础,并结合国内外大气科学的最新发展成果,总结过去教学经验的基础上,编写而成的。

随着计算机、卫星遥感技术的提高,大气科学有了长足发展,取得了许多创新与突破,揭示了许多新的观测事实,包括那些最引人注目的极端天气、气候事件。本教材尽可能地反映这些新理论、新进展。同时,针对高师本科学生将来主要在中学任教,注重与中学相关内容衔接,适应当前中学新课标改革,并兼顾学生考研需要。高师多次调整教学计划,重基础、宽口径,培养通识性人才,强调培养学生创新能力和动手能力。本教材采用图表、公式等简捷直观形象描述,注重与我国实际相结合,尽量用简明物理概念说明问题,避免繁琐叙述和繁杂公式推导,尽力做到内容深入,知识要点突出,基本概念和原理简明扼要、通俗易懂,便于教师在课时短缺情况下完成教学任务。

本教材在内容上安排了气象、天气、气候及实习四个方面的内容,包括太阳、地面和大气的辐射,降水形成机制,地转风和梯度风,大气环流,天气系统,天气过程,气候形成因子,气候分类与区划,气候变化。以天气、气候的形成原理为核心和纽带,使各部分内容协调统一。对本课程教学中的一些难点问题及全球最关注的天气、气候现象,以翔实资料和权威数据进行了全面阐述。例如,亚洲季风类型、范围划分及各成员相互作用;视示力(惯性离心力、地转偏向力)的本质;暖池、海洋传动带、沃克环流、厄尔尼诺、拉尼娜和南方涛动、冰盖及海冰、青藏高原影响、气溶胶气候效应等。为了加强实践环节,共安排了五个实验,可根据实验课时多少加以取舍。

本书编写分工如下:绪论,第七章——姜世中;第一章,第六章——刘贤赵;第二章,第八章第二节、第三节——黄秀英;第三章——丁辉、姜世中;第四章——雷建华;第五章——雷金蓉、骆红、罗礼洪;第八章第一节——胡晓东;第九章——陈艳梅;实验五——周丽、刘长秀。姜世中对全书内容进行了审定、补正和统稿,经过充分讨论和进一步完善,最后定稿。

尽管在诸多方面作了不少努力,但由于编者学识所限,谬误仍在所难免,我们真诚地欢迎大家批评、指正。

编 者

2010年7月22日

# 目 录

序  
前言  
绪论 /1

## 气 象 篇

10

**第一章 大气的成分、状态与结构 /10**  
第一节 大气的组成 /10  
第二节 大气的垂直结构 /16

**第二章 大气的热能和温度 /20**  
第一节 辐射的基本知识 /20  
第二节 太阳辐射 /24  
第三节 地-气系统的长波辐射 /34  
第四节 辐射差额 /37  
第五节 大气的增温和冷却 /40  
实验一 空气温度和日照的观测 /54

**第三章 大气动力学基础 /58**  
第一节 气压的时空分布 /58  
第二节 大气的水平运动 /66  
第三节 大气环流 /81  
第四节 季风与海陆风 /94  
实验二 气压和风的观测 /102

**第四章 水汽凝结物与降水 /106**  
第一节 大气中的水相变化 /106  
第二节 降 水 /119  
实验三 空气湿度、蒸发和降水的观测 /127

## 天 气 篇

131

**第五章 天气系统 /131**  
第一节 中、高纬度天气系统 /131



# Contents

- 第二节 低纬度天气系统 /151
- 第六章 天气过程 /166**
  - 第一节 寒潮天气过程 /166
  - 第二节 大型降水天气过程 /170
  - 第三节 对流性天气过程 /172
  - 实验四 天气图的认读 /177

## 气候篇

180

- 第七章 气候形成因子 /180**
  - 第一节 太阳辐射因子 /180
  - 第二节 环流因子 /185
  - 第三节 下垫面因子 /191
  - 第四节 人类活动 /230
- 第八章 气候分类 /254**
  - 第一节 柯本气候分类法 /254
  - 第二节 全球主要气候类型 /257
  - 第三节 中国气候区划简介 /271
  - 实验五 气候类型的判别 /274
- 第九章 气候变化 /278**
  - 第一节 气候变化概述 /278
  - 第二节 气候变化的原因 /292
- 参考文献 /298**

# 绪 论

## 一、气象学与气候学的研究对象和分科

地球科学的研究对象是大气圈、水圈、冰雪圈和岩石圈,其主要任务在于揭示地球本身的发展规律,揭示人类活动与地球环境相互作用的效应,从而为合理开发与利用自然资源、防治自然灾害、保护和优化生态环境,为社会经济发展提供基础理论和资料。地球科学有众多分支学科,包括地理学、地质学、海洋学和大气科学等。

大气科学的研究对象是大气圈,是研究大气中各种现象、过程的成因和时空分布规律,以及如何利用这些规律为人类服务的科学。大气科学的主要分支科学有大气物理学、大气化学、大气探测学、天气学、动力气象学、气候学、灾害气象学、大气环境学、应用气象学、全球变化化学等。

气象学与气候学的研究对象是大气圈,即研究大气圈及大气圈与水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈之间的相互作用,通过对大气、天气和气候的探索,掌握大气中各种现象和过程的时空分布规律和成因,并用以为人类服务。气象学与气候学研究的内容包括大气科学分支学科中大气探测学、大气物理学、大气化学、天气学、气候学的基础知识。

**大气探测学:**主要研究各种气象要素观测仪器的原理、构造与观测方法,观测数据的计算,地基遥感与空基遥感仪器的原理、构造和观测方法。

**大气物理学:**主要研究大气现象与过程的物理机制和规律。即研究大气结构与成分,大气热力学原理,大气中所发生的光、电、声和云、雾、霜、雨、雪等现象和机制,以及人工局部影响大气中发生物理现象的原理。

**大气化学:**主要研究大气温室气体和痕量气体、气溶胶的化学过程及气候效应,在大气、海洋中化学物质的循环过程及其对全球气候的影响。

**天气学:**以不同尺度的天气系统(如气旋、反气旋、锋面、低压槽、高压脊和台风等)为研究对象,研究天气系统和天气现象的特征、分布和发生、发展、演变规律及其诊断分析和预报方法的科学。20世纪50年代以前,在天气学研究中基本上采用天气图方法,分析和预报方法多是定性的;60年代以后,随着电子计算机的发展和普及,数值量化成为天气学发展的主流。数值模拟诊断分析成为了解天气系统物理机制的重要工具,根据流体力学原理和统计学原理设计的数值预报方法,分别在天气形势和现象的预报中取得愈来愈好的预报效果。除天气图外,卫星探测资料、雷达回波也成为天气学研究的基本工具。一般把60年代以后的天气学称为近代天气学。

**气候学:**以气候系统(包括大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈)为研究对象,研究气候的形成原因、时空分布特点,以及与其他自然环境因子和人类活动的相互关系,并有效地预报未来的气候及其变化趋势的科学。气候学内容广泛,分支学科很多。按研究目的可分为理论气候学、区域气候学和应用气候学;按研究所用的分析方法可分为统计气候学、天气气候学、物理气候学、动力气候学、卫星气候学和地理气候学等;按研究尺度大小可分为大气候学、局地气候学和小气候学;按研究时段可分为地质时期气候学、历史时期气候学和近代气候学等。

**动力气象学:**主要研究控制大气运动的基本动力、热力方程组,大气中动力、热力过程的基本问题,大气中各种空间尺度运动的物理机制。

**大气环境学:**主要研究大气边界层的物理过程、大气湍流、边界层数值模拟、大气污染及其污染物在大气的扩散过程、酸雨、环境保护与治理等。

**灾害气象学:**主要研究灾害性天气(如气旋、台风、雷暴、阵雨、暴雨、龙卷、沙尘暴及积云对流、锋、飚线、中尺度对流等其他扰动产生的灾害效应)、灾害性气候及其损失评估。

**应用气象学:**主要研究农业气象、林业气象、水文气象、医疗气象、局地气候与小气候、应用气候。

**全球变化学:**以气候系统为研究对象,研究发生在气候系统各部分的各种现象和过程,以及各部分之间

的相互作用和非线性多重耦合系统的运行机制,包括大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈之间相互作用的物理、化学和生物学过程,以及人与环境相互作用过程。目前,全球变化研究已成为规模最大的跨学科、跨国界的国际合作研究活动,涉及地球科学、生物科学、环境科学、天体科学及遥感技术、GIS 和高网络化高科技技术的应用等众多的学科领域。

## 二、大气、天气、气候和气候系统的概念

### (一) 大气的概念

包围着地球的整个空气层称为大气。大气与地球上的一切生命休戚相关,大约在 4 亿年前,当陆地绿色植物出现时,地球大气就已经演变成现在结构的组成了。大气层使生物免受过多太阳紫外辐射的伤害,并且大气中许多气体满足了生物圈中动物和植物维持生命的需要。大气层中各种尺度的天气系统的产生、发展、消亡和移动成为全球气候的基础。各种天气现象及其变化可以造福人类,但也可带来严寒、酷热、干旱、洪水、冰雹和龙卷等灾害性天气和气候,给工农业生产、交通运输和人民生活造成巨大破坏,甚至威胁人民的生命财产。每年气象灾害均会造成全世界数百亿美元的经济损失。

### (二) 天气的概念

天气指某一地区在某一瞬间或某一短时间内大气状态(如气温、湿度、压强等)和大气现象(如风、云、雾、降水等)的综合。天气随时间的变化,即天气变化。

### (三) 气候的概念

气候是地球与大气之间长期进行能量交换和物质交换所形成的自然现象。气候的形成原因复杂多样,并且人类对气候及其变化的认识不断深化,因此,气候的概念不仅复杂而且还在不断深化。

**1. 古代的气候概念** “气候”一词源于希腊语中的 klima,意思是倾斜,指的是太阳光线照射到地球表面各地的倾斜角大小。古希腊人就已经知道如果太阳倾角较小,则气候较冷,因此,接近赤道的地方较热,而高纬度地区较冷。我国汉代《淮南子》中就记载了完整的二十四节气,15 天为一“气”。汉代《逸周书》中的一篇《时训解》又将每气分为三“候”,即 5 天为 1 候。

**2. 经典的气候概念** 长期以来,人们都把气候看着气象要素的平均,指某一地区长时期的大气平均状态,即长时期的天气的综合表现。所谓长期的时间范围,通常指半个月以上时间。因此,月平均气温、月总降水量、月平均气压就构成了气候的三大要素。既然气候是一种平均概念,对气候统计量取时间平均就成为至关重要的问题。世界气象组织(WMO)规定,30 年为整编气候资料时段长度的最短年限,并以 1931~1960 年的气候要素的统计量作为可比较标准。对于当前气候,规定用刚刚过去的 30 年的平均值作为准平均,每过 10 年更新一次。目前应用 1971~2000 年准平均,2011 年将更新为 1981~2010 年准平均。从有气象观测记录以来,将 30 年的气候平均值进行对比,可以发现它们具有近似稳定性。气候统计通常更注重其平均值,但人们最感兴趣的却是那些持续时间较长的极端天气事件,如 20 世纪 70 年代初期撒赫勒和埃塞俄比亚的干旱、印度季风区连年少雨和巴西的洪水等,这些不常发生但非常危险,乃至致命的灾难事件。人们逐渐认识到气候可以而且确实在迅速地变化着,并且在很大程度上影响我们的社会经济活动。虽然气候不能被看做是一成不变的自然现象,但只要提及气候,人们首先想到的还是温、湿、压三个要素。

**3. 现代的气候概念** 自 20 世纪 70 年代以来,人们认识到要解释气候的形成、预测气候的变化,绝不能仅限于研究古典气候的三个要素,也不能仅限于研究大气圈,而是要研究包括大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈的整个系统——气候系统。气候变化是由气候系统作用的结果已成为共识。因此,现代气候指包括大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈在内的整个气候系统物理状态的统计特征,包括平均值、极值、各阶矩和各气候变量的联合概率分布,反映了气候相对稳定又不断变化的双重性。

天气和气候是两个既有区别又有联系的两个不同的概念。天气指在特定短时间内大气的活动情况,而

气候则是对月、季或年时间尺度上大气状况的一种估计,是对多年观测的统计结果。天气和气候的空间尺度基本一致,从几千米到几千千米乃至上万千米。而时间尺度却相差悬殊,天气的时间尺度从几小时到几天、十几天,天气过程是大气中的短期过程;气候的时间尺度要长得多,从一个月到一年甚至千年、万年。气候是一直持续不断的,而天气只能延续几天。

**4. 气候变化、气候变率和气候变迁的概念** 了解气候变化规律,特别是异常气候出现的规律和原因,不仅是气候学家们致力研究的难题,而且也是许多国家的政府和人民关心的重大问题。气候变化指气象状况持续多年的变动。气候变化可能只包括单一的气候要素,如温度或降水量,但通常也伴随着天气型的改变,如持续的气候变暖、干旱和日照状况的变化。在世界气象组织规定的各个基本时段之内,气候要素平均值的差异所反映的就是现代气候变化,气候变化总是与全球变暖或变冷紧密联系。而在世界气象组织规定的表现气候状态的基本时段(30年)内气候振动称为气候变率。振幅愈大气候变率就愈大,反之亦然。随着气候变暖,气候变率很可能也随之增大。气候变迁指气候的长期演变,指时间尺度为万年的地质时期的气候变化。

#### (四) 气候系统的概念

气候系统是20世纪70年代以后出现的一个概念。由大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈组成的整个系统,以及系统内各子系统间一系列复杂的相互作用过程统称为气候系统。可见,气候系统实际上是包括大气及地球表面的一个整体系统,是一个包括大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈在内的,能够决定气候形成、气候分布和气候变化的统一的物理系统。太阳辐射是气候系统的主要能源,气候系统受入射太阳辐射的能量驱动而运行,并通过向太空放射热辐射而达到能量平衡。在太阳辐射的作用下,气候系统内部产生一系列相互作用的复杂过程,且各组成部分之间,通过物质交换和能量交换,紧密地结合成一个复杂的、有机联系的物理系统(图0-1)。

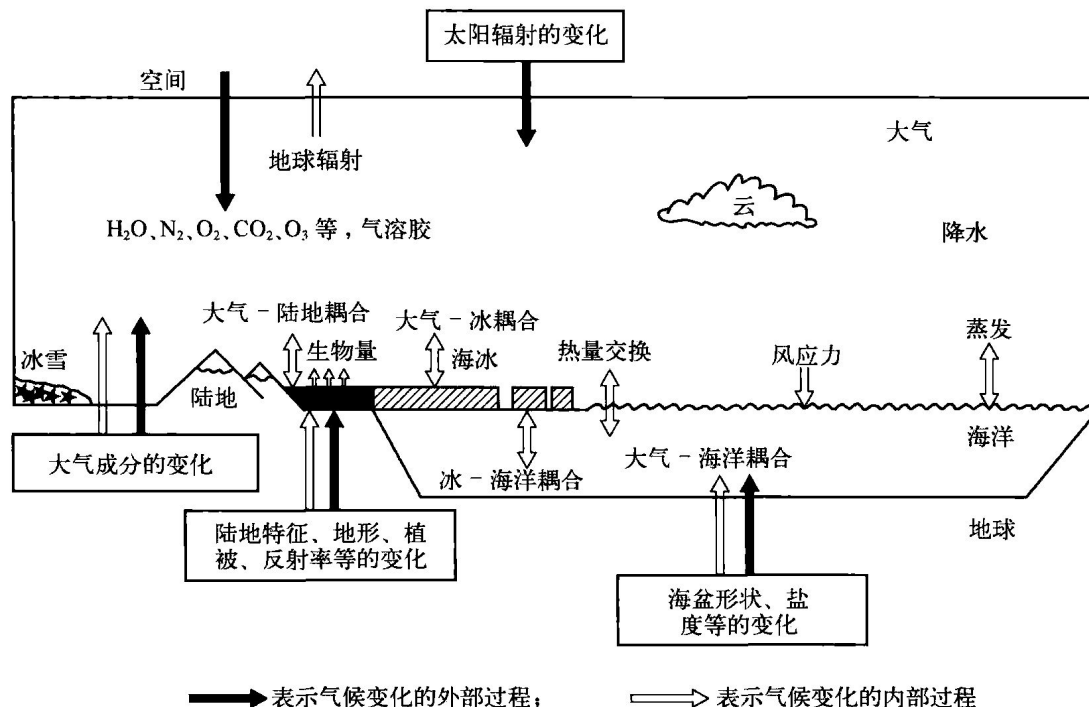


图0-1 气候系统示意图

**1. 大气圈** 它是气候系统的主体部分,也是最活跃的、变化最大的部分。即使认为气候系统只包括100 m深的海洋表层,大气圈具有的热量也仅占整个气候系统总热量的3.4%,因此,大气对气候系统其他成员的影响主要是动力作用,而海洋、冰雪、陆面等其他成员对大气的影晌主要是热力作用。在经典气候学中,大气环流与太阳辐射、海陆分布并列为气候形成的三大因子。干旱、洪涝、热浪、严冬等气候异常也正是大气

环流异常所致。通过大气运动对垂直和水平的热量传输,去适应大气圈外部施加的影响的响应时间称为热力调整时间,约为1个月。如果没有大气动能的补充过程,动能因摩擦作用而耗尽的时间也需要1个月。另外,大气成分通过吸收、散射太阳辐射和地面热辐射来影响大气系统的能量传输过程,从而影响地球表面和大气的温度状况。对气候变化影响最重要的有水汽、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub>、氯氟烃等气体成分和炭黑气溶胶粒子。由于自然或人为的原因,大气成分及气溶胶产生激烈变化,改变气候系统的热量平衡,从而改变气候。例如,火山活动造成平流层气溶胶,散射太阳辐射,减少地面接收到的太阳能,形成“阳伞效应”;人为活动造成大气中CO<sub>2</sub>等温室气体浓度增加,使“温室效应”加剧等。

**2. 水圈** 包括海洋、湖泊、河流、地下水及大气中的液态水,其中海洋对气候变化影响最大。

海洋是气候系统中热容量最大的成员,是气候系统的热量储藏库与调节器。海洋约占地球表面积的70.8%,最深处约11 km,它的总体积相当于用2.6 km厚的水层覆盖整个地球表面。海洋总质量约为大气质量的250倍。仅100 m深的表层海水,就占整个气候系统总热量的95.6%。穿过大气到达地球表面的太阳辐射,约有80%被海洋吸收,然后,通过长波辐射、潜热释放及感热输送的形式传输给大气。由于海洋热惯性大,海温异常不仅空间尺度大,持续时间也长,一般在中高纬可持续数月之久,低纬持续时间则更长。海洋上层与大气间的相互作用时间尺度为数月甚至数年,而海洋深层的热力调整时间尺度则为世纪。

海洋在海-气系统中具有低通滤波作用。海洋的热容量大,而大气密度小、热容量小,因此,在海-气耦合系统中,海洋是大气的稳定器。许多大气中瞬变天气波动仅仅只能引起海洋运动的微弱变化,并且大气很多的快速变化输入到海洋后,会被海洋所滤掉,随后在此耦合系统中呈现出一种缓慢的低频运动,如在赤道太平洋每隔3~4年就经常发生1次厄尔尼诺、南方涛动事件(ENSO事件),这就是这个耦合系统中一种低频运动。

海洋与大气之间不仅有能量交换,而且还有水汽、CO<sub>2</sub>等大气化学成分的交换,对CO<sub>2</sub>增加造成温室效应的估计,就与海洋对CO<sub>2</sub>的溶解及向深海的输送有密切关系。

短期数值天气预报的经验表明,对24小时以上的预报,下垫面的加热已经有决定性的作用。进行月平均环流的气候预报则需要考虑下垫面,尤其是海洋状况的异常。因此,海洋对气候变化与气候异常的形成具有重要意义。

**3. 冰雪圈** 包括大陆冰盖、海冰、高山冰川、季节性雪被、永久性冻土以及湖冰和河冰。目前全球陆地约有10.6%被冰覆盖。海冰的面积比陆冰要大,但由于世界海洋广阔,仅占海洋面积的6.5%。冰雪圈是大气和海洋的冷源。冰雪圈对气候系统储热贡献很大,在夏季储存大量热量,在冬季释放同等的热量;增加反照率(反照率与辐射成正反馈);阻止地表与大气间的热量交换;在极区通过吸收和释放淡水影响海洋的温盐环流,同时冰雪储藏的大量水资源对全球海平面高度产生影响。在冰雪圈中,冰原、高山冰川和永冻土要在数百年或更长时间内才会呈现出明显变化。因此,在研究长期气候变化时,常把冰川进退作为一个重要指标。但由于惯性作用,冰川的变化常落后于气候变化。滞后时间从几年到几十年,随冰川大小及具体环境而异。在近年的全球变暖过程中,海冰、高山冰川、永冻土以及南极冰原的范围和厚度都已明显减少,反映它们对气候变化的敏感性。海冰和季节性雪与气候系统的相互作用时间尺度较短,为几个月至几年,尤其是海冰,它与气候的年际和年代际变化有十分密切的联系,这正是目前气候模拟和气候变化研究的时间尺度。冰雪圈既是气候变化的指示器,又对气候长期变化产生反馈作用。

**4. 岩石圈** 亦称陆面,包括山脉、地表岩石、沉积物、土壤和洋底。古代大陆漂移、造山运动、火山爆发等这些岩石圈的巨大变化,对地质时期的气候形成和变化影响巨大。但是,在气候系统所有组成部分中,陆地位置、地形的变化是最缓慢的,其时间尺度可与地球本身年龄相比拟。例如,造山运动和大陆板块移动,时间尺度为10万~100万年。因此,对于月、季到几十年,最多几百年的气候变化,全球海陆分布和地形的变化是可以忽略不计的。这时,陆面对大气主要有动力和热力两个方面的影响。海陆分布和山脉大地形是大气环流形成的重要因素。土壤温度和湿度对土壤反射率、蒸发、局地环流和气候均有显著影响。另外,土壤还是大气气溶胶的源,它们对气候变化具有重要意义。

**5. 生物圈** 指地球上的动物、植物和微生物,其中包括人类本身。生物圈各组成部分变化的时间尺度差异很大,农田为数周,大片森林可长达数十年至数百年。生物对气候变化十分敏感,反过来生物也影响气候。气候会影响森林、草原、冻原和沙漠的地理分布和状况,从而影响动物及人类。全球生物群落的分布主要取决于气温、降水量和太阳辐射。冻原和森林的分界线由年平均气温决定,不同陆地植被类型的分界线

主要由植被所需的水量决定。在全年皆冬、最热月平均气温也低于 $10^{\circ}\text{C}$ 的地区,其主要植被类型就是苔原。森林比草原需要更多的水分,而草原又比沙漠的需水量多。反过来,植物的生长与破坏又会改变地表反照率、粗糙度、蒸散发和物质循环,从而影响气候。自然植被(如森林)的反照率一般仅有土壤的一半大小,植被破坏会减少对太阳辐射的吸收,同时还会影响水分循环。大范围的植被变化甚至可能影响全球的热量平衡及水分平衡,更容易使局部地区气候恶化。砍伐森林,燃烧化石燃料,增加了大气中的 $\text{CO}_2$ ,导致20世纪末的全球年平均气温比19世纪末高 $0.6^{\circ}\text{C}$ 。西非萨赫勒地区从20世纪60年代末到90年代持续干旱,沙漠以大约 $50\text{ km/a}$ 的速度向南推进,每年有超过 $2\,000\times 10^4\text{ hm}^2$ 的肥沃土地(相当于比利时国土总面积)变成颗粒无收的沙漠。撒哈拉沙漠显著扩张,一方面归因于人类过度放牧,以及引入深井技术改变了牧民逐草而牧的传统游牧生活,使牧畜长期逗留在深井附近,过度啃食植被,土壤也发生了严重退化。植被受到破坏后,地表反射率就会增大,反过来又会加速荒漠化进程。这是由于裸露地表比植被反射更多的太阳辐射,沙漠吸收的热量较少,在雨季(6~9月)热带辐合带向北移至萨赫勒时,对流减弱,降水减少。同时,气溶胶可以作为水汽凝结核,有助于形成云雨,而植被减少会使大气中生物源气溶胶减少,降水也会减少。另一方面原因是大尺度气候波动的作用。研究表明,沙漠边缘植被的改变主要是由降水的年代际变化所引起的。在干旱地区,植物种子能休眠好几年,一旦有降水就会生根发芽。卫星观测表明,雨季的植被变化与降水量变化密切相关,多雨年植被面积显著增加。1980~1995年,随着降水的年际变化,萨赫勒西部的沙漠范围可扩大或缩小 $300\text{ km}$ 。

可见,气候系统这一概念的引入,极大地拓宽了传统气候学的研究范畴。现代的气候学从概念上已经不再是过去常常被作为气象学或地理学的一个分支的经典气候学,而是大气科学、海洋学、地球物理、地球化学、地理学、冰川学、地质学、天文学、生物学等众多学科相互渗透、共同研究的交叉科学。气候系统是一个非常复杂的非线性系统,各子系统彼此独立,又相互作用。只有研究整个气候系统,才能正确认识气候形成和气候变化。现代监测手段,如卫星、火箭等能够提供许多过去很少了解的宝贵信息,如冰雪分布、广阔大洋的海温,地面射出长波辐射、反照率等。这些资料大大地增进了人们对气候系统的认识,也为理论研究及数值实验研究提供了基础资料。

### 三、气象学与气候学的研究方法

#### (一) 气象观测

气象学与气候学的研究对象是地球大气,不同于物理、化学等可以在实验室做实验的学科。大气科学的一切知识均来源于对大气中发生的物理的、动力的和化学的现象进行实地观测,然后根据观测事实分析出这些现象变化的规律和成因。因此,气象观测是气象学与气候学的基础。气象观测的发展经历了地面气象要素观测系统的建立与发展、高空气象要素探测系统的建立与发展、大气遥感技术应用三个阶段。

从16世纪末至20世纪初的200多年里,是地面气象观测发展并趋于成熟的阶段。气象观测仪器的陆续发明和不断改进,使气压、气温、大气湿度、风速等实现了定量观测。1597年,意大利的物理学家和天文学家伽利略(Galileo)发明了空气温度表;1643年,伽利略的学生托里拆利(Torricelli)发明了水银气压表;1662年,英国的雷恩(Wren)发明了虹吸式自记雨量计;1667年,英国物理学家和数学家胡克(Hooke)发明了压板式风速器,后来又发明了自记仪器上的自记钟;1674年,英国的玻义耳(Robert Boyle)制作出了自记湿度计;1783年,瑞士的索修尔(Saussure)发明了毛发湿度计;1794年,英国的卢瑟福(Daniel Rutherford)研制出最高、最低温度表;1799年,英国的赖斯拉(John Leslie)研制出干湿球湿度表;1802年,法国的拉马克(Chevalier de Lamarck)进行了云状分类,逐步发展成为现今使用的云与天气现象的目测内容;1810年,法国的福丁(J. Fortin)设计出福丁式水银气压表;1825年,英国的赫歇耳(John Herschel)发明了黑白球日射计;1828年,德国的奥古斯特(August)创制出干湿球温度表;1838年,英国的乔唐(T. B. Jordan)发明日照计;1846年,英国的罗宾逊(John Robinson)制造出转杯型风速表;1866年,英国的斯蒂文森(Thomas Stevenson)发明百叶箱;1891年,德国的阿斯曼(Richard Assmann)创制出通风干湿表。从19世纪中期开始,一些船舶开始在海洋上进行系统的气象观测,这些观测数据最初是用来加强航海安全的,而后来却成了研究气候系统的珍贵资料。从19世纪后期到20世纪30年代,世界范围的气象观测还仅限于地面气温、降水量和气压。现

代天气和气候观测站网是构建在 19 世纪后半叶建立的观测网之上的。

第二阶段是 20 世纪 30 年代之后,逐渐有了高空探测。20 世纪 20 年代,人们开始使用飞机对低层大气进行观测。1928 年,苏联的莫尔恰诺夫发明无线电探空仪,使得高空观测网迅速建立,从而出现了高空环流图,大气探测扩展到了更广阔的三维空间。20 世纪 40 年代开始,探测高度从平流层底部、对流层顶部扩展到二三十千米的高度,而火箭探测的应用进一步把探测高度提高到 100 km。

第三阶段是大气遥感技术的应用。1941~1942 年开始应用专门的云雨测量雷达,一台气象雷达可以对数百千米范围内的雷暴云雨系统分布及其结构进行连续性观测。1960 年 4 月,美国发射第一颗气象卫星泰罗斯-1 号,开创了从宇宙空间观测全球大气的时代。一颗极轨气象卫星每 12 小时就给出一次全球气象观测资料,而静止卫星(位于地球赤道上方,与地球同步旋转)则每 30 分钟就向地面发送全圆面图片资料。气象卫星不仅能够观测陆地、海洋表面及不同高度大气层的温度,而且还可以对极地冰和雪的范围变化、海洋风速和波浪情况,以及从极地到赤道的植被状况进行日常观测,甚至还可以用于全球污染和臭氧层变化等方面的监测,使得广阔的海洋、高原无法建立气象观测站的地方可以通过气象卫星来获得气象观测资料。另外,自 20 世纪 90 年代以来,全球建立了很多地面观测自动气象站。由于测量探头十分坚固而稳定,并且拥有低功耗控制板和收发系统,即使在荒芜的地区和严酷的气候条件下,也能保证测站稳定可靠地运行。这些自动气象台站系统还包括许多以往必须依赖于目测的项目,如能见度和降水性质的鉴别等。

海洋观测包括海面温度(SST)、盐度、洋流及深层海温等,但资料最丰富的是海面温度。在卫星观测系统建立之前,海面温度主要依靠商船进行观测,覆盖面很小。随着卫星观测精度的提高,目前已经可以提供海面温度的格点资料,但还达不到船舶观测的精度,所以多用混合资料绘制海面温度的距平图。对盐度及深层海温还缺少系统的长期观测。

雪盖与海冰面积观测是对冰雪圈监测的主要内容。在卫星观测系统建立之前,除了个别站有局地雪盖观测之外,只有前苏联有目测海冰序列。它开始于 1924 年,且每年只有 8 月份的值。目前,美国科罗拉多大学与美国国家海洋大气管理局联合设立了全球冰雪分析中心,公布每周及月平均南北半球海冰及雪盖面积。雪盖序列从 1966 年开始,海冰序列从 1974 年开始。至今对陆面还缺少系统的观测,特别缺少土壤温度和湿度的大范围观测资料。

为了监视世界各地的天气,给出最好的气候图,由世界气象组织主持,并于 1968 年开始构建世界天气监视网。它由全球观测系统、全球资料处理系统和全球电信系统三大部分组成。我国是世界天气监视网的参加国,有义务向世界天气监视网提供气象观测资料进行交换,也有权利通过世界天气监视网获得其他国家的气象观测资料和成品。

全球观测系统的职能为获得全球各地的观测资料,供日常业务和研究之用。全球观测系统包括卫星、火箭、雷达、飞机、船舶、定高气球、海洋浮标和地面常规观测网等,分为两个基本副系统:① 地面基本副系统,由区域基本天气网(有地面站 9 000 个)和其他陆地、海洋站网(如自动气象站、固定的海洋站、船舶站、供气象和海洋用的自动海洋站以及本底污染站等)及飞机观测所构成。在 20 世纪初期,地面基本副系统还有很多观测空白区域,但到 20 世纪末,除了条件恶劣的极地地区以外,气象观测网络已经遍布世界各地。② 空间卫星副系统,由若干极轨卫星和五颗地球静止卫星组成。它们可以观测到全球云量和云的特征、有可能发展为风暴和飓风的天气系统,可以测量海面温度(精确到 1℃)及温度和水汽的铅直廓线,并可据云的移动推算风速。到 90 年代末,全球观测系统就向全世界各个国家和地区提供地面气压、温度、露点和风速,高空温度、风速和相对湿度,洋面温度,卫星云图等全球气象观测资料。

全球资料处理系统由世界气象中心、区域气象中心和国家气象中心所构成。其主要职能是提供分析和预报以及对气象资料进行加工、整编、存储和复原,供气候研究之用。世界气象中心有三个,分别设在墨尔本、华盛顿和莫斯科,它们从全世界收集常规资料和卫星资料,并以数字和图片形式在相互之间以及向区域气象中心和国家气象中心提供加工后的基本气象资料及半球范围的大尺度(1 000~5 000 km 以上)天气分析和预报,还有储存资料的职责,也承担全球通信系统的任务,为收集、编辑并传送本世界中心负责范围的气象情报,接收并发送其他世界气象中心的传真等。区域气象中心有 24 个,它们用电子计算机或手工进行本区域的大尺度和中尺度(100~1 000 km)分析和预报,向国家气象中心及航空、农业等部门提供服务。1997 年发布的百年时间尺度资料集包括全球约 7 000 个地面观测站的逐月地表观测。第二版的全球历史气候网是目前可获得的最完整的数字化气候数据集之一。

全球电信系统的主要功能是迅速、可靠、有效地收集、交换、分发气象观测资料和加工产品,以满足世界气象组织各会员国气象业务部门以及世界气象中心、区域气象中心的需要。全球电信系统由主干电信网(包括支线)、区域气象电信网和国家气象电信网三级网路组成。目前共有 12 段主干线及 5 条支线,它们组成的闭合回路,环绕北半球并伸至南半球的布宜诺斯艾利斯、巴西利亚、墨尔本和内罗毕,把 11 个区域电信枢纽和 3 个世界气象中心连接在一起。其中,已有 11 段主干线和 4 条支线使用卫星或电缆。华盛顿、莫斯科和墨尔本 3 个世界气象中心和布拉克内尔、新德里、巴黎、奥芬巴赫、布拉格、东京、北京 7 个区域电信枢纽,已完全或部分实现自动化,提高了资料传递的精度和速度。区域气象电信网由 246 条线路组成,目前已有 127 条使用卫星和电缆,有 7 条使用高频/甚高频线路。

自有观测记录以来,人们对气候及气候变化的研究主要基于两方面的资料。其一是来源于天气预报、飞机航行和船舶航海等常规服务;另一来源是全球环境监测系统的有关专项科学实验和计划。由于许多观测本身不是直接为了气候研究和业务目的而设计的,如天气预报要求资料更准确,促使气象观测仪器不断改进,把这些长时间序列资料用于气候变化研究时,会带入因观测仪器改变而产生的系统偏差,从而影响气候变化研究结果。1992 年,在世界气象组织(WMO)、联合国环境署(UNEP)等国际组织的支持下,在世界天气监视网全球观测系统和综合性全球海洋站系统的基础上建立了全球气候观测系统(GCOS),其主要任务是监测全球气候要素的变化以及气候系统中云-辐射的变化,海洋、水文、陆地生态系统和冰雪的变化。全球气候观测系统由大气观测系统、海洋观测系统和陆地观测系统三个子系统组成,其部分内容与全球海洋观测系统(GOOS)和全球陆地观测系统(GTOS)相交叉。全球气候观测系统使大气观测系统和海洋、水文、陆地和冰雪的观测系统统一起来,并以此综合观测系统来代替全球各地日常进行的气象常规观测的世界天气监视网(WWW)。

## (二) 天气与气候分析

**1. 天气气候图分析** 1820 年,德国的布兰德斯(Brandes)利用《巴拉丁气象学会杂志》刊载的气象观测资料,将 1783 年西欧与中欧稀少的同期多天的气压和风的记录填在地图上,绘制了世界上第一张天气图。它虽然是用历史资料而不是用当时资料绘制成的,但已为分析气压、风和天气的关系以及建立天气系统的概念做出了贡献。现代的天气图就是在此基础上发展起来的。电报的发明,为各地气象观测资料的迅速传递和集中提供了条件,使绘制当日天气图成为可能。1851 年,英国的格莱谢尔(James Glaisher)用电报传送资料,绘制了天气图。1856 年,法国政府组织了气象观测网,1860 年,创立风暴警报业务。从此,绘制天气图便成为一项日常业务,并陆续推广到欧美各国。1857 年,荷兰的白贝罗(Buys-Ballot)提出风压定律。1861 年,美国的费雷尔(Ferrel)引入科里奥利力。当时天气分析预报的业务工作只能采用简单的外推法来预报高、低气压系统的移动。至 20 世纪 20~30 年代,以皮叶克尼斯(V. Bjerknes)为首的挪威学派,奠定了锋面天气的基础。20 世纪 20 年代前后,他们在挪威沿海等地组建了稠密的地面气象观测网,并仔细分析了由稠密站网所提供的资料绘制而成的天气图,在 1917~1918 年间发现了暖锋,并得出了概括冷锋、暖锋、锢囚锋、静止锋和低压及其云雨分布的完整的气旋模式。他们还提出了反映气旋生命史的极锋学说,并把上述模式、理论和学说用于日常的天气分析和天气预报。从此以后,锋面和气团便成为天气分析预报业务的主要对象和依据。芝加哥学派的创始人罗斯贝(Rossby),在高空天气图上发现了长波,1939 年,他提出了长波动力学,并由此引出了位势涡度理论,创立了长波理论。同时,1940 年,苏联的基培尔提出了计算气压和温度局地变化的方法,揭开了近代动力数值预报的序幕。第二次世界大战以后,世界高空观测网大大加密,在日常业务工作中开始大量分析和应用高空天气图。天气分析从二维扩充到三维,由电子计算机制作气压形势预报图开始在天气预报业务中应用。

**2. 四维分析** 天气图和气候图分析是三维分析,由于海洋和高原地区缺少定时观测资料,因此在海洋和高原地区只能利用飞机、气象卫星对这些地区观测的气象资料。但飞机只能沿它飞行的航线、气象卫星只能沿它运行的轨道对地球大气或地面进行观测,且观测资料是不定时的,必须采用最优内插方法把这些观测资料引用到天气预报中,这就是四维分析。四维分析是当今数值天气预报业务最常用的分析方法。四维分析方法与传统的天气图分析方法不同,它利用最优内插方法或变分方法把一个数值天气预报模式的预报值与卫星、飞机等非定时气象要素值的最优同化到定时观测时刻的气象要素值,从而可以弥补定时观测系统



在海洋和高原上空没有资料的不足。它是一个连续分析系统,这个系统中利用数值天气模式,不断输入定时和非定时观测系统所观测的资料,从而分析出天气图。

**3. 统计分析** 统计预报方法是利用数理统计的原理,导出预报量与预报因子的关系式进行天气预报的方法。统计方法的优点是它以观测的实际大气的特点为依据。不足之处在于,根据现有的气候资料序列建立起来的一些简单的回归方程具有显著的抽样误差,也不能反映大气中复杂的非线性物理过程和动力过程。统计预报方法可以分为经典统计方法(CS)和统计-动力预报方法。经典统计方法需要得到初条件与某个以后时刻条件之间的统计后延关系。用这种关系可直接由今天的观测资料预报明天或后天的天气。这种方法完全不考虑数值预报或动力模式的结果,是一种纯统计方法。经典统计方法包括概率天气预报方法、分类预报(是/否预报、多类预报)、相关回归预报(一元或多元回归、逐次回归、事件概率回归等)、判别分析(一元与多元判别、逐步判别)、时间序列分析(平稳分析、谱波分析)、谱分析与滤波技术等。

**4. 诊断分析** 诊断分析是根据气象观测资料,用不包含有时间变量的动力学和热力学方程(称为诊断方程)对所研究天气现象、天气系统或天气过程的影响因素进行定量计算,从而定量地分析与解释这些天气现象的物理过程,证明大气中所发生现象的变化应满足的物理上或动力上的定则,并推断各影响因素与天气、气候的关系,分析各种因素的相对重要性。诊断分析是认识和理解天气、气候过程的一种有效途径,许多现象的规律和成因所满足的定则是利用这种诊断方法来发现的,其结果可以为预报提供依据。现代的诊断分析往往要利用电子计算机根据诊断方程计算各种不直接观测的物理量,所分析的量都是观测或计算的“实况”,这是与数值试验不同的。大气中最主要的诊断方程有平衡方程、地转关系、静力关系、 $\omega$ 方程等。其中,平衡方程和地转关系描述气压场与流场之间的平衡关系;静力方程描述气压场与温度场之间的平衡关系; $\omega$ 方程描述气压场、温度场、流场以及非绝热作用与空气垂直速度 $\omega$ 之间的关系。

(1) 气候变化的诊断 判别气候变化需要有一个标准,即气候平均值差异有多大时才能认为气候发生了变化。一般用 $t$ -检验,检查某个30年平均与100年平均或长时期平均的差异达到多高的置信度,或者检查两段30年平均的差异达到多高置信度。通常至少要达到95%,最好达到99%的置信度才能认为气候发生了变化。当然诊断气候突变还有其他方法,如曼-肯达尔(Mann-Kendall)法、小波分析法等,但最简单而通用的方法还是 $t$ -检验法。

(2) 气候异常的诊断 衡量气候是否异常的标准则是气候要素的方差值。如果该要素接近正态分布,超过或低于平均值一个方差的概率为15.9%。世界气象组织(WMO)曾经把达到两倍方差作为气候异常的标准,日本气象厅采用了这一标准。但近来在WMO的监测公报中采取概率10%为异常的标准,大约相当于1.3倍方差。然而对气温采用高斯分布,对降水量采用 $\Gamma$ 分布。

### (三) 天气与气候的数值模拟

天气、气候一个重要特点是不能在实验室做实验,但是有了电子计算机以后,就可以借助于电子计算机和大气运动方程组的数值模式,通过改变模式的物理因子或改变初始场的结构,或改变模式边界条件,对天气、气候状态及其变化进行数值模拟和预测分析。早在1904年,皮叶克尼斯首次提出数值天气预报的理论思想,将预测大气未来时刻的状态问题归结为一组数学物理方程的初值问题。1922年,英国气象学家理查逊(Richardson)首次尝试实践皮叶克尼斯的数值天气预报的理论思想,用差分法求解,制作了数值天气预报。虽然由于观测站网的密度和资料的精确度不够,用的又是完全的原始方程组,所取的时间和空间的间隔不合适,使计算出现不稳定,导致预报试验失败,但它却为后来开展数值预报积累了经验。1950年,诺伊曼和查尼等利用计算机做出了第一张数值天气预报图,首次成功地做出了数值天气预报。1956年,美国气象学家菲利普斯采用低纬加热、高纬冷却的热源热汇,同时考虑地面摩擦,成功地模拟出中纬度的西风急流和费雷尔环流。到20世纪60年代初,不少国家都已建立了数值预报的业务预报。目前数值预报的业务预报能力不断提高,预报准确率到90年代提高了一倍,从30%提高到60%;环流的预报能力也从3天增加到一周或10天。从数值模式看,也变得愈来愈复杂和完善。最早用的是正压模式和地转模式,以后变成半球的原始方程模式,又发展到全球模式,并用实际风观测资料直接输入。同时为满足要素预报又发展了区域模式、细网格模式和套网格模式(用大网格模式预报结果为中、小网格预报模式提供边界条件)。目前美国使用的有限区细网格模式仅限于北美,预报时效为24~48小时。在最近30年中,模式的垂直分辨率和水平分辨率都大大