

•
▽
,
✱

大气环流基础

谢 安 江剑民 编

气象出版社

[illegible]

大气环流基础

谢 安 江剑民 编

气象出版社

(京)新登字046号

内 容 简 介

本书系统地介绍了大气环流的一些基本问题,包括大气环流的基本观测事实和诊断分析结果(含大气中的热量平衡、水份平衡、角动量平衡和能量平衡),大气环流的理论研究,大气环流的数值试验和实验室模拟。

本书是在北京大学地球物理系气象专业和北京气象学院多年教学实践基础上形成的。所引用的资料,包括了部分最新的统计和研究成果。经中国气象局高等学校气象类教材编审领导小组审查,确认为大学本科通用教材。

本书可作为高等院校气象专业和气候专业的教材,也可供研究生,有关科研和专业技术人员参考。

大气环流基础

谢安 江剑民 编

责任编辑:黄丽荣 终审:纪乃晋

封面设计:牛涛 责任技编:席大光 责任校对:白璐

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

*

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:8 字数:202千字

1994年8月第一版 1994年8月第一次印刷

印数:1—1000

ISBN 7-5029-1651-2/P·0668(课)

定价:5.80元

序

建国四十余年来，我国大学气象专业的课程，大多有了自己编著的多种教科书籍。但作为大气环流专门课程的正式出版教材，却由于众所周知的原因，一直未能编写。现在这本“大气环流基础”正好填补了这一空白。

这本书可以说是在北京大学地球物理系气象专业本科“大气环流”课程多年教学积累的基础上编写成的。本书有以下几个突出的特点：一是内容组成的重要方面比较全面。全书八章，不仅全面地介绍了迄今大气环流观测资料的统计结果和维持大气环流的主要物理量平衡过程，还增加了理论研究，大气环流的数值试验和实验室模拟研究。二是吸取了近年来国内外的主要研究成果。如诊断分析部分与垂直运动有关的所有物理量输送的具体图形、大气环流气候模式的数值试验方面的内容，都是80年代以来的新研究成果。三是十分重视对国内有关成果的介绍。如国内实验室模拟研究的进展，关于Hadley环流双层结构的研究，和中国科学院大气物理研究所发展的气候模式等等，都作了必要的综合与介绍。第四个特点是尽量做到语言精练易读，适合于本科的教学，也可供研究生、以及科研、预报业务等专业人员参考。

我对这本书的出版感到高兴，并希望今后不断吸取国内外新的科研成果，使将来的大气环流教科书，更加好的反映我们对大气环流的逐步认识过程。

赵宗义

一九九三年十二月二八日于北京

前 言

北京大学地球物理系谢义炳教授于50年代末开设了“大气环流”课程。此后，陈受钧、林本达和谢安等相继讲授过这门课程。在这几十年教学过程中，积累了一些资料和教学经验，但因种种原因，一直没有正式出版过适用于本科教学的自编教材。1987年夏，为适应当时的教学需要，在谢安的教学讲稿基础上，我们合作编写了一本“大气环流讲义”，并分别在北京大学和北京气象学院两校试用。该讲义主要参考了国外出版的一些大气环流诊断分析资料和著作，及陈受钧、林本达先生的讲稿。当时限于资料和时间，只编写了现在这本书中的前六章。后经中国气象局高等学校气象类教材编审领导小组审查通过，决定在该讲义的基础上扩充和完善内容，正式出版“大气环流基础”一书，作为大学本科的通用教材。

经气象出版社责任编辑和本书编者广泛征求多方面的意见，对原讲义作了较大的补充和修改。这些修改主要是在大气环流基本观测事实和诊断分析部分（即第一章至第五章），引用了几种利用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）积累的1979—1989年间历史资料所作的不同统计计算分析成果，增补了有关大气环流物理量垂直输送的具体图表和解释。在这部分修改中，江剑民作了主要的工作。考虑到本书的完整性以及目前大气环流研究的进展，增加第七章和第八章是必要的。第七章由谢安执笔，简述了大气环流数值试验的基础知识，介绍了一些国内外主要的气候模式的特点和部分模拟结果。还特别介绍了中国科学院大气物理研究所有一定特色的大气环流模式。第八章由江剑民执笔，除介绍一些大气环流实验室模拟的基础知识和综合国外较早年代的研究成果外，还侧重于介绍国内近期所取得的进展。

限于作者水平，可能有错误或不妥之处，欢迎读者提出批评与建议，以利于今后作进一步的修改和充实。

北京大学陈受钧、刘式适教授和中国科学院大气物理研究所吴国雄教授审阅过原稿，提出了宝贵的修改意见，并热情提供一些新的重要参考资料。谨此一并表示热忱的感谢。

编者

一九九三年十二月廿九日

绪 言

一、大气环流的主要研究对象

人们在对局部地区的天气变化、天气系统的活动有了一些了解之后，便自然地提出这样的问题：整个地球上的大气是怎样一种运动状态？这种状态是怎样形成和维持的？几乎在气象观测、天气预报发展的同时，就有一些科学家开始从事这方面问题的研究，并逐渐形成了气象学中的另一个分支——大气环流。

但对于“大气环流”的定义，至今并没有严格一致的认识。气候学家们多倾向于认为它是指某些区域大气在长时期里的平均状态；天气学家们多侧重于认为它是指全球范围或某些较大区域里大气的瞬时变化；而从事中长期天气预报的人，又可能把大气环流看作是那些永久性、半永久性大气活动中心、季风、以及赤道辐合带、高空急流、行星尺度的波动等构成的整体。

然而在本学科里，通常认为大气环流是指大气的整体运动，即世界规模的大气运动状况。着重于研究全球范围或其它较大尺度上，大气各种气象参数的统计特征，并相对集中于探讨对时间和经度取平均的流场、温度场以及湿度场的特征及其形成和维持的原因。这并不是主张把这些特征定义为“大气环流”，而是因为这方面的研究和探讨，在整个气象学中不同于其它学科，而具有其独特重要的性质。这一学科的目的，是在于探求解答气象学中的一个最根本的问题和促进天气预报的实践。自然，目前所达到的成就，距离完全解决这一根本问题的目标还相距较远。本课程仅着重于介绍目前已经获得的基本认识和存在的主要问题。

二、大气环流学科的发展简史

大气环流的研究工作，最早的尝试是试图解释信风形成的原由。发展至今约有300年的历史，并大致可划分为四个阶段：

第一阶段主要特征是形成了Hadley单圈环流的假说(1686—1836)。

第二阶段主要是三圈环流假说的发展(1837—1887)

第三阶段主要是开展了对大型涡旋在大气环流物理量输送和平衡过程中的作用问题的讨论(1888—1947)。

第四阶段,随着气象观测和科学技术的发展,形成了对大气环流的多方面研究方法:诊断分析方法,转盘模拟试验,数值试验,和理论的研究等等,近二十年来,还发展了对大气环流变化规律和模拟气候变化的研究(1948—)。

三、大气环流的研究方法

40年代以后,人们才逐步明确研究大气环流的基本理论,是旋转坐标系中的流体力学,或称地球流体力学。并且把海洋环流与大气环流都统一到这个理论基础上来进行研究。从而同时促进了这两个学科的理论研究的发展。

关于大气环流的研究方法,如上所述,自40年代以来,已逐步形成有以下四个方面:

1. 诊断分析:采用实测资料,根据相应的物理方程,定量计算有关的物理量及其分布,并作比较分析,以证实或揭示大气物理量输送和平衡的主要环节和过程以及不同物理过程的相对重要性。

2. 实验室模拟实验研究:其基本的实验装置是根据动力学相似理论设计出的旋转圆盘或圆环,以圆盘或环中的流体的运动来模拟地球大气的某些运动特征。通过调节转速、圆盘中心或圆环内圈与外圈的温差,以及盘底地形等因子来研究旋转流体的某些特征与不同因子状况的关系。

3. 数值试验:是运用流体力学数值预报方法所设计的大气环流数值模式,根据不同的初始条件和边界条件,通过计算机的数值计算结果来模拟大气运动,考察大气运动的某些特性和规律。

4. 理论研究:主要采用求解相应运动方程组的解析解来探讨

大气环流的成因、物理机制等。由于数学理论本身的限制，目前还只能对一些简化后的数学模式求得解析解。

本书不仅着重介绍诊断分析的主要成果，同时对理论研究工作、数值试验研究及实验室模拟实验研究的进展，也作概要的介绍。

目 录

序

前言

绪言

第一章	大气环流的基本观测事实	(1)
§1.1	大气环流中物理量及其通量的分解.....	(1)
§1.2	平均纬向环流和平均经向环流.....	(4)
§1.3	平均水平环流.....	(11)
§1.4	瞬变涡旋.....	(19)
§1.5	大气的平均温度场.....	(23)
§1.6	地气系统的辐射收支及辐射差额的 不均匀分布.....	(29)
§1.7	小结.....	(34)
第二章	大气中的热量平衡	(36)
§2.1	热量平衡方程.....	(36)
§2.2	大气运动各分量对热量平衡的贡献.....	(38)
§2.3	非绝热过程的影响.....	(48)
§2.4	小结.....	(54)
第三章	大气中的水分平衡	(57)
§3.1	水分平衡方程.....	(58)
§3.2	蒸发与降水.....	(60)
§3.3	平均经圈环流对水汽的输送.....	(62)
§3.4	涡旋对水汽的输送.....	(66)
§3.5	小结.....	(70)
第四章	大气的角动量平衡	(73)
§4.1	角动量连续方程.....	(74)

§4.2	角动量倾向方程的分解式	(76)
§4.3	纬向平均的角动量水平输送	(78)
§4.4	纬向平均角动量的垂直输送	(86)
§4.5	地球与大气之间的角动量输送	(92)
§4.6	角动量平衡	(98)
§4.7	纬向西风的维持	(101)
§4.8	小结	(107)
第五章	大气中的能量平衡	(109)
§5.1	动能方程	(109)
§5.2	动能方程的积分形式	(112)
§5.3	有效位能方程	(115)
§5.4	纬向平均和涡动动能方程	(120)
§5.5	纬向平均和涡旋的有效位能方程	(129)
§5.6	小结	(136)
第六章	大气环流的理论研究	(140)
§6.1	经圈环流的形成理论	(140)
§6.2	平均槽脊的形成理论	(149)
§6.3	大气环流形成的理论	(160)
§6.4	大气环流的维持理论	(170)
第七章	大气环流的数值试验	(176)
§7.1	大气环流模式的一些基本问题	(178)
§7.2	国内外大气环流模式简介	(186)
§7.3	大气环流模拟的一些结果	(198)
第八章	大气环流的实验室模拟	(208)
§8.1	实验室模拟的基本装置和基本原理	(208)
§8.2	大气环流一般特征的实验模拟	(211)
§8.3	关于地形影响的实验模拟	(219)
§8.4	对台风天气系统的实验模拟	(232)
§8.5	小结	(238)

参考文献..... (239)

第一章 大气环流的基本观测事实

大气环流的观测和研究工作，在很大程度上是靠天气预报的实践来推动的，特别是依赖于高空探测的进展。世界上高空探测资料已大约积累有40年时间的序列。目前全世界地面测站已达7000多个，其中发报站1500个。高空测站约有2500个，其中发报站800个。但是分布很不均匀，海洋、沙漠、极地以及高原上测站还很稀疏。通讯系统虽有很大发展，但仍赶不上需要。60年代以来卫星气象观测开始发展，世界气象组织开始主持协调世界各国参加“世界天气监视网”（WWW）及其它一些国际协作计划，除了把观测网扩大到人烟稀少的大陆地区外，还采用施放飘移气球。海上浮标，发展人造气象卫星的遥测和其它非常规观测方法，以进一步改善天气预报业务和大气环流的研究条件。

通过多年积累的大量观测资料和分析研究结果，已使我们对大气环流的基本状态获得了相当程度的了解，从而也给大气环流的研究提出了基本的问题，为数值试验、模型实验、理论研究提供了事实依据。

§1.1 大气环流中物理量及其通量的分解

由于大气运动的复杂性，我们所观测到的运动场、温度场和湿度场，都不能用任何简单的解析函数来表示，还只能采用各种图表来表示大气环流的各种定量统计特征。为了分别讨论大气不同尺度的运动在有关物理量输送和平衡过程中的不同作用，人们曾经采用多种不同的分解计算方法，这些方法大致可归为三种类型：一是传统的平均与扰动分解方法。二是谐波分析方法。三是时间、空间的滤波方法。本书中主要介绍第一种方法的诊断计算分析成果。这种方法是Starr等人较早应用于大气环流研究中

来的。

一、物理量的分解

大气中的任一物理量观测值 A ，可以分解为对时间平均和距平（即对时间平均值的偏差）两个部分。即

$$A = \overline{A} + A' \quad (1.1.1)$$

其中 $\overline{A} = \frac{1}{T} \int_0^T A dt \simeq \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T A_i \Delta t$ ，表示 A 在一段时期里的平均值。

$A' = A - \overline{A}$ ，表示对时间平均值的偏差，气象上常称为距平。

类似地，物理量场的观测值 A ，可以分解为空间平均和偏差两个部分。在大气环流研究中，最常采用对纬圈的平均。并记为

$$[A] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A d\lambda$$

表示对某纬圈上所有经度上的观测值的平均。于是

$$A = [A] + A^* \quad (1.1.2)$$

这里， $A^* = A - [A]$ ，表示对纬圈平均值的偏差，气象上称作纬偏值。显然

$$\overline{A'} = 0$$

$$[A^*] = 0$$

气象要素的观测是全球范围和长年积累的，通常可作时间与空间两个方面的平均，将 (1.1.2) 代入 (1.1.1)，可有

$$\begin{aligned} A &= \overline{[A] + A^*} + ([A] + A^*)' \\ &= \overline{[A]} + \overline{A^*} + [A]' + A^{*'} \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

其中， $\overline{[A]}$ 表示长期的纬圈平均值。对于高度场、风场来说，这种统计量主要可反映信风带或纬向平均的气候带，常称作纬向平均环流项。 $\overline{A^*}$ 表示时间平均图上的纬偏值，主要反映大气活动中心，高空平均槽脊，以及季风一类特征，常称为常定涡旋或常驻涡旋项。 $[A]'$ 表示瞬时的纬圈平均对其多年平均值的偏差。就

逐日相对于多年日平均来说，这部分主要反映指数循环过程，就逐年、逐月平均相对于多年平均来说，可反映年际和季节变化。称作瞬变纬圈平均项。 $A^{*'}$ 表示瞬时偏差。主要反映天气尺度系统，如移动性气旋、反气旋、锋面、斜压扰动等系统的物理特征。常称瞬变涡旋项。

上述后两项是与长、中、短期天气变化相联系的，是天气预报所关心的对象。由于习惯上不大计算 $[A]'$ 这一项，更常用的是将后两项合并考虑，采用分解式

$$A = [\overline{A}] + \overline{A^{*'}} + A' \quad (1.1.4)$$

即其中 $A' = [A]' + A^{*'}$ ，并统称为瞬变涡旋项。

二、物理量通量的分解

这里所说的通量是指大气运动所引起的某物理量的输送率。如对风的径向分量来说，物理量 A 的经向（向北输送）通量，用 AV 来表达。它的纬圈和时间平均可以分解为

$$\begin{aligned} [\overline{AV}] &= [(\overline{[A]} + [A]' + \overline{A^{*'}} + A^{*'}) (\overline{[V]} + [V]' + \overline{V^{*'}} + V^{*'})] \\ &= [\overline{A}][\overline{V}] + [\overline{A}'][\overline{V}'] + [\overline{A^{*'}}\overline{V^{*'}}] + [\overline{A^{*'}}V^{*'}] \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

右方第一项 $[\overline{A}][\overline{V}]$ 称平均经向环流的通量；第二项 $[\overline{A}'][\overline{V}']$ 称瞬变经向环流的通量；第三项 $[\overline{A^{*'}}\overline{V^{*'}}]$ 称为常定涡旋的通量；第四项 $[\overline{A^{*'}}V^{*'}]$ 称瞬变涡旋的通量。或者，更常用的是将第(2)、(4)项合并，统称为瞬变涡旋的通量。这样(1.1.5)式可写成

$$[\overline{AV}] = [\overline{A}][\overline{V}] + [\overline{A^{*'}}\overline{V^{*'}}] + [\overline{A'}V'] \quad (1.1.6)$$

这里 $[\overline{A'}V'] = [\overline{A'}][\overline{V}'] + [\overline{A^{*'}}V^{*'}]$

相应地(1.1.6)式右方第一项反映Hadley、Ferrel环流这类平均经向环流的输送作用；第二项反映大气活动中心，平均槽脊等海陆分布及地形的影响；第三项反映斜压不稳定作用。

大气环流研究的一个重要问题，就是考察上述三种运动分量的特征，以及各自在大气环流物理量平衡中的不同作用。

§1.2 平均纬向环流和平均经向环流

一、平均纬向环流

严格说来, 平均纬向环流 $\overline{u}$ 的计算应该采用实测风记录,

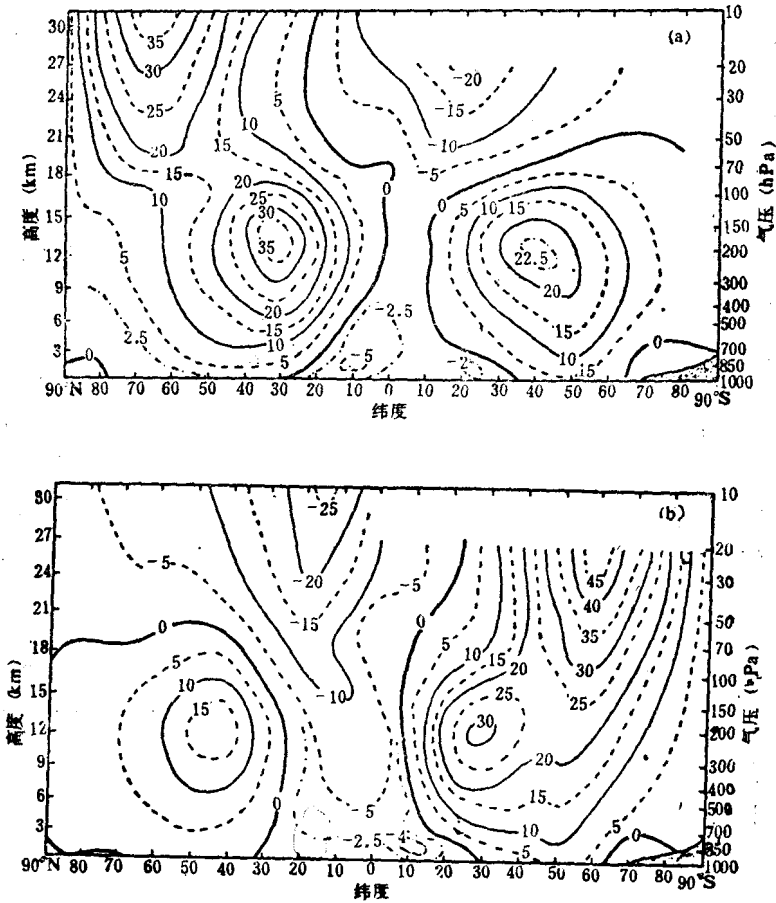


图1.1 纬向平均西风 $\overline{u}$ 的分布(单位: m/s)
(a) 北半球冬季 (12—1月) 平均; (b) 北半球夏季 (6—8月) 平均

但由于海洋上和高层的实测风记录太少，只好采用地转风近似。因为实测风通常是次地转的，所以采用地转风近似的估算值一般比实测风稍偏大一些。

图1.1是Newell等根据1957年7月—1963年6月6年的资料计算出的全球平均纬向西风随纬度和高度的分布。其主要特征是：在对流层上部（200hPa附近），南北半球各有一个西风极大值（副热带急流轴），冬季位于 30° 上空，强度30—40m/s；夏季偏

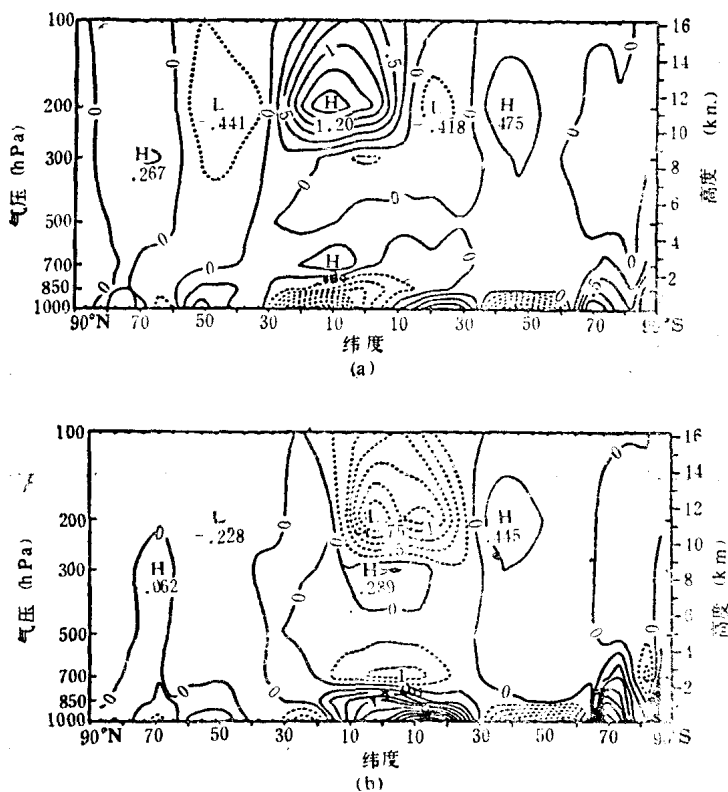


图1.2 平均经向风 $[\bar{V}]$ 的分布
(单位:m/s。等值线间隔0.25) (a) 1月, (b) 7月