

Advanced Synoptic Meteorology

高等天气学

丁一汇编著

高等教育出版社

高等天气学

丁一汇 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书作者汇集多年研究工作的心血,借鉴国内外在近代天气学的各个方面的成果,撰写了这本高水平的近代天气学教材。全书以流畅的文笔、精炼的语言阐述了大气中各类尺度运动系统的结构、生命史以及发生和发展的规律,说明了各种系统间的相互作用以及它们在全球大气环流中的功能。本书是一本供研究生阅读的教材,它将高等天气学、中尺度气象学和大气环流三方面有机地融合在一起加以论述,使之在合理的安排下体现了近代天气学中的各个方面。同时它有选择地舍去了一些基本常识和基本公式推导,而着重于对观测事实的物理解释,使全书内容充实又不至累赘。本书是教学和研究中不可多得的高水平著作。

本书适合于有一定基础的研究生、大学生、研究人员及台站预报人员学习使用,可供各大专院校、气象部门作教学、研究用书。

高 等 天 气 学

王 汇 编著

* 责任编辑 陆勇

*

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路11号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

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: 25.125 字数: 650千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数: 1—3000 定价: 7.85元

ISBN 7-5029-0539-1/P·0308 (课)

序 言

过去的二十年中，随着常规气象观测网的不断改善、新的大气探测技术（如气象卫星和多普勒雷达）的出现以及计算机技术的不断更新，使得天气学有了迅速的发展。天气学的内涵在不断扩充，天气学和动力气象学日益靠拢。我们在目前很难对近代的天气学下一个确切的定义。每年有关天气学的文章数量很多，要想对近代天气学作一系统性的概括并不是一件容易的事。这也说明了自从1969年Palmén和Newton的《大气运动系统》一书出版以来，国际上还没有一本新的高水平的近代天气学专著。当然，有关天气分析和预报的技术材料仍是不少的。

大气中的运动系统（天气系统）种类很多。从时间尺度讲，有引起大气环流年际变化、季节变化、季节内变化（30—50天的大气环流变化）、中期变化（5—15天）、短期变化（1—3天）、甚短期变化（6小时）以及超短期变化（1—3小时）的运动系统。各种不同尺度系统之间相互有作用。近代天气学的任务在于阐明大气中各类尺度运动系统的结构、生命史及其发生和发展的物理图像，说明各类系统的相互作用以及它们在全球大气环流中的功能。丁一汇同志编著的《高等天气学》一书，就是按照这个新观点撰写的。

编著这样一本教材是有很多困难的。现时国内外大学研究生院的天气学教材，很多是分成以下三个课程讲授的：高等天气学、中尺度气象学和大气环流，而高等天气学的内容则限于准地转理论的应用、锋和锋生、高低空急流、气旋和反气旋、台风以及阻塞形势等内容。这本书将上述三方面的内容合并在一起，便出现了如何取舍材料的问题。在研究生院一学期或二学期的天气学教

材中，不可能包括近代天气学的全部领域。作者在书中作了比较好的安排，使得近代天气学中的各个主要方面都能在本书中出现。该书的另外一个特点是取材新颖，书中不少材料是八十年代后期的研究新成果。书中没有包括传统的天气分析和诊断分析方法的内容，天气预报的内容只介绍五十年代以来的预报技术。在天气学教材的撰写中，必须分清楚对观测事实的叙述和对观察事实所作的物理解释。作者在写作中很注意这一点，这也是本书的又一特点。

本书虽然是本教材，但写法有些象一本专著。在书中对一些公式没有给出推导，因为这些推导可以在其它书中找到。本书的读者对象是对天气学和动力气象学有一定基础、并且对天气分析和预报有一定知识的研究生和在工作岗位上的预报员及研究人员。

由于近年来天气学研究的领域在不断扩充，新的研究成果在不断涌现。预计在10年以后本书的有些内容也许会显得陈旧，我希望在6、7年以后本书在再版时应该对有些内容作新的调整。

陶诗言

1989年1月31日

前 言

十年前作者开始在中国科学院研究生院讲授天气学课程，但那时讲授的方式主要是专题或讲座，整个课程显得系统性不够强，各部分之间联系也不够紧密。1982年经叶笃正和陶诗言先生建议，要给研究生系统地讲授近代天气学的基础知识和最新研究成果，以使他们在学完之后对当前的一些重要问题有一个较全面和较深入的了解，并在毕业之后能更好地迎接未来研究工作和实际工作向他们提出的挑战。高等天气学就是在这样的指导思想之下开设和成书的。

本课程的讲义始写于1982年春。后几经修改，又多次在不同气象部门讲授。近年来又在国家气象局气象科学研究所研究生部讲授。作为硕士研究生的一门学位课，一般可用80学时讲完（一个学期）。但本书的内容从量上远远超出了这个要求。为此在讲授时可根据具体情况加以适当取舍。书中带星号（*）的章节即为供参考的部分。

本书不仅限于研究生使用，对于气象专业的高年级学生，中专和高等学校教师，研究工作者和预报员等也有参考价值。

作者在讲授和编写本书的过程中，不断地得到叶笃正和陶诗言先生的热情鼓励，对此表示深切的谢意。孙淑清同志和张可苏同志对本书第四章和第五章的讲授和编写作了大量工作；中国科学院研究生院的何铸文老师，刘征宇和李长青同志以及北京气象学院的林芸美老师对作者给予了许多帮助和支持，对此一并表示感谢。

丁一汇

于国家气象局气象科学研究所

1988年8月

目 录

前言

第一章 大气环流的基本问题	(1)
§1.1 引言	(1)
§1.2* 大气环流资料的处理方法	(3)
§1.3 大气环流的平均状况	(8)
§1.4 定常波的特征及其在大气环流中的作用	(18)
§1.5 瞬变波的特征及其在大气环流中的作用	(33)
§1.6 大气角动量的输送和收支	(66)
§1.7* 大气中水汽的输送和收支	(81)
§1.8 大气中能量的输送和收支	(96)
§1.9 大气的能量循环	(107)
§1.10* 大气环流的数值模拟	(115)
第二章 中纬度天气系统	(131)
§2.1 锋面的结构	(131)
§2.2 锋生动力学	(139)
§2.3 锋区的次级环流及其诊断方程	(149)
§2.4* 锋区次级环流理论的进一步推广和讨论	(160)
§2.5 高空急流及其有关的次级环流	(171)
§2.6 温带气旋的发生发展和大尺度结构	(188)
§2.7* 温带气旋的能量收支	(208)
§2.8* 海洋温带气旋的爆发性发展	(223)
第三章 热带大气环流和天气系统	(251)
§3.1* 热带大气环流的基本特征和扰动	(251)
§3.2 热带大气的动力学特征和辐散环流	(266)
§3.3 夏季风及其变率	(277)
§3.4* 季风扰动	(302)

§3.5*	低频运动及其与季风活动的关系	(312)
§3.6	冬季风及其变率	(321)
§3.7	高低纬和南北半球之间的相互作用	(336)
§3.8	台风的结构和发生发展	(352)
§3.9*	对流云在热带大气环流和扰动中的作用	(374)
第四章	中尺度天气系统	(392)
§4.1	中尺度气象学的一般问题	(392)
§4.2	中小尺度系统发生发展的天气和环境条件	(401)
§4.3*	雷暴和强风暴结构模式	(428)
§4.4	中尺度系统	(463)
§4.5	重力波与强对流的关系	(505)
§4.6*	中尺度天气系统的能量收支及其对大尺度环境的反馈作用	(516)
§4.7*	中小尺度系统的运动	(529)
§4.8	中尺度对流复合体(MCC)	(536)
§4.9	暴雨的形成	(548)
§4.10	低空急流在暴雨和强对流天气形成中的作用	(573)
第五章	平流层大气环流和高空扰动	(591)
§5.1	平流层大气的平均结构	(591)
§5.2	平流层的动力学问题	(595)
§5.3	平流层中的扰动和爆发性增温	(604)
§5.4*	热带平流层大气环流和风场的准两年振荡(QBO)	(625)
§5.5*	平流层的年际变化	(634)
第六章	大尺度地形对大气环流和天气的影响	(644)
§6.1*	各种尺度地形的一般作用	(644)
§6.2	青藏高原和落基山在大气环流中的热力和动力作用及其对周围天气的影响	(648)
§6.3	青藏高原对亚洲季风的影响	(671)
§6.4*	高原对背风气旋生成的影响	(682)
§6.5	阻塞高压形成的理论及其重要性	(689)
第七章	大尺度环流的遥相关和海气相互作用	(717)

§7.1	南方涛动	(718)
§7.2	厄·尼诺 (El Niño) 现象和ENSO事件	(722)
§7.3	瓦克环流 (Walker Circulation)	(740)
§7.4	大气遥相关	(745)
§7.5*	海气相互作用与长期天气预报和气候年际变化	(752)
第八章	大气的可预报性和天气预报方法	(770)
§8.1	可预报性问题	(770)
§8.2	近代天气预报方法简介	(774)
§8.3*	欧洲中期天气预报中心的业务中期预报	(784)
附录	符号和缩写名词表	(790)

第一章 大气环流的基本问题

§1.1 引言

40年代以前,大气环流的研究主要限于地面观测资料的分析和统计,诊断分析和理论研究十分有限。40年代末和50年代初,全球无线电观测网建立并不断改善,由此获得了许多台站的高空资料,尤其是在北美,欧亚大陆以及澳大利亚地区。这使人们开始有可能对对流层的大气环流高空特征进行研究。许多人作了大量的观测分析和数值计算。文献[1]总结了这一时期的主要研究成果。这一时期理论工作如转盘试验也有相当的进展。以后从60年代开始,人们根据日益增多的观测资料(包括卫星、飞机及其它特殊观测资料)得到了许多更准确、更可靠的大气环流观测和统计结果。与此同时,大气环流数值模拟试验开始成为研究大气环流的主要方法之一[2,3]。这使人们对制约大气环流的物理条件和演变过程从理论上有了更深入的认识。最近20年来,随着大型电子计算机的应用,不断采用新的资料处理方法和客观分析方法,为大气环流的观测分析、统计和数值计算提供了更多更长时期的资料。并且资料的分析质量也得到了改善。例如现在已很少用地转风来表征大气的行星风系。另一方面,用大型计算机进行更复杂的大气环流数值模拟和气候模拟也已成为可能。本章将主要讨论最近一二十年得到的一些结果。

大气环流所包含的内容很广泛,并且定义也不完全相同。有人认为大气环流是指某些区域大气的平均状态;有人认为大气环流是指全球大气的瞬时状态;也有人认为大气环流主要指所有永久性或半永久性大气活动中心的集合体,包括:赤道辐合带、

急流、季风、副热带高压和各种永久性或半永久性气旋和反气旋中心；另外还有人认为大气环流是所有特征的定量统计结果。但总的来说，大气环流是指大范围（水平尺度几千公里以上）较长时间尺度的（几天以上）大气运动的基本状况。它们的变化不但影响着天气的类型和变化，而且影响着气候的形成。近年来由于大气科学中各个分支之间的渗透，大气环流日益变成天气学，动力气象学（尤其是数值模拟）和气候学相结合的产物，从而使大气环流具备了许多新的内容。本章将着重讨论所得到的一些新事实和理论结果。

从上面的说明可以看到大气环流的研究主要有四种方法：

（1）观测资料的分析和统计。根据这种方法可以发现一些新的事实和概念，甚至规律。近年来人们广泛地用诊断分析方法来定量地解释由观测分析揭示出的事实；（2）理论研究。尤其是研究经过大大简化但又保留物理本质的某些物理模型，从而常可得到解析解。这种研究方法和结果与（1）的工作最好能同时进行以求相互促进；（3）数值模拟试验。主要用计算机从数值上模拟大尺度流场和气候形成。近年来气候模拟获得很大的成功。与（2）相比这种方法的缺点是：由计算机得到的统计结果分析起来与观测分析一样也很复杂，常常不易得到明确的结论。另外模式中总是包含次网格尺度过程的参数化，这常常会对结果的正确性带来一定问题。但是数值模拟试验最大的优点在于：通过改变外部条件可以模拟控制大气环流和气候的不同制约因子。如改变太阳辐射流入量、地转速度、地面结构和状况，云量和反照率以及大气的化学成分等，可以了解引起气候变化的原因和过程。事实上这种模式研究方法是使人们由定性到定量解释大气环流的主要方法；（4）实验室研究。主要用转盘试验研究大气环流的各种基本性质。这可以更好地了解不同大气气流区和过渡区的特征。但是用这种方法对大气过程一般只能得到定性的了解。上面几种方法最好是结合起来应用，尤其前面三种。但在任何情况下，由

第一种方法得到的结果，都是后三种方法研究的依据和基础。因而下面我们将着重讨论如何用这种方法来研究大气环流。

大气环流的基本问题有以下几个方面：

(1) 大气环流的平均状态：包括平均环流和距平场以及它们形成的原因；

(2) 经圈环流；

(3) 定常波和瞬变波的特征及其作用；

(4) 热量、水汽、角动量和动能收支以及大气环流的维持；

(5) 大气环流的模拟。

下面我们将详细讨论在上述问题研究中得到的一些主要结果。但在这之前还要说明大气环流资料的处理方法。

§1.2 大气环流资料的处理方法

在大气环流研究中，观测资料的处理是很重要的。这是进行观测分析和统计研究的第一步。资料处理的好坏直接影响最后研究结果的可靠性。因而在讨论主要之前，先讨论一下资料问题是很必要的。

关于大气环流资料的处理有两种方法。第一种方法是先求出各台站一定时期内的平均值。例如一个月或一个季的平均值，以后再把这些台站的统计结果内插到适当的格点上。在资料自动化处理时代之前，内插到水平网格区上一般是用主观的手分析进行的。现在有时也采用这种方法。六十年代以后，主要用客观分析方法进行内插。客观分析中所用的初值或猜值是平滑的量，如台站资料的纬向或区域平均值。对具有相当平滑分布的长期平均统计而言，这样选取的初值是合理的。但在无资料地区，分析结果大致反映了纬向或区域的平均条件，得不到实际的极值。

第二种方法是以日常的时间间隔（如12小时）在规则格点上对各台站观测值进行客观分析，以得到天气图。以后由这些客观

分析的图的长时间序列（如一个月或一个季）对各格点资料进行统计得到待求的大气环流的统计量。客观天气分析通常是业务中心数值预报的副产品。我们知道这些中心的业务数值预报一般由预报—分析—预报三个环节重复进行，即数值预报模式利用格点天气资料作出下一时刻的预报；以后又输入新的资料对预报进行订正；订正后的结果又被用作新的初值来作下一循环的预报。客观分析用的初值场是模式作出的预报值。通过上述过程可把新的资料不断引入资料稀少地区。模式的初值也可用观测时刻的温度、风场、高度等，然后考虑一定的动力约束如静力平衡、梯度风平衡等。这种情况下可根据某一地区实测的气压梯度来得到风场。但这种约束也会造成系统性偏差，如在初值中用梯度风方程或平衡方程，则在资料稀少的地区所得到的非地转风分量偏低。对于第一种分析方案，不存在这种问题。在第二种方案中可包括飞机、船舶和卫星测风资料。如在分析时刻得不到这些资料，则以后无法再在此方案中应用。但晚到的报可在第一方案中使用。关于上两种资料分析方案的流程图总结在图1.1中。

过去三十多年大气环流的观测分析基本上是根据上两种资料处理方法进行的。由两种方法得到的结果有一定差别，尤其是在资料稀少的地区。例如根据美国国家气象中心(NMC)资料(第二种方法)计算的地转纬向风和纬向动量的经向输送在中太平洋地区比由台站统计值内插(第一种方法)得到的值大得多[4]。Mak[5]指出，由NMC每日客观分析的资料算得的500hPa静止涡动动量通量比由台站内插资料算出的要强。最近Lau和Oort[6][7]对这两种资料处理方法对计算大气环流各量统计值的影响进行了全面而详细的对比分析。他们计算了1963—1973年9个冬季和夏季各要素值的平均值($\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{T}$, $\bar{z}$)、定常涡动方差、定常波对西风动量、位能和热量的经向输送与相应的瞬变量及其输送等。计算表明，两套资料的结果在资料较密的北美和欧亚大陆地区是十分一致的，但在资料较稀少的海洋和北非地区差别较大。与实际观

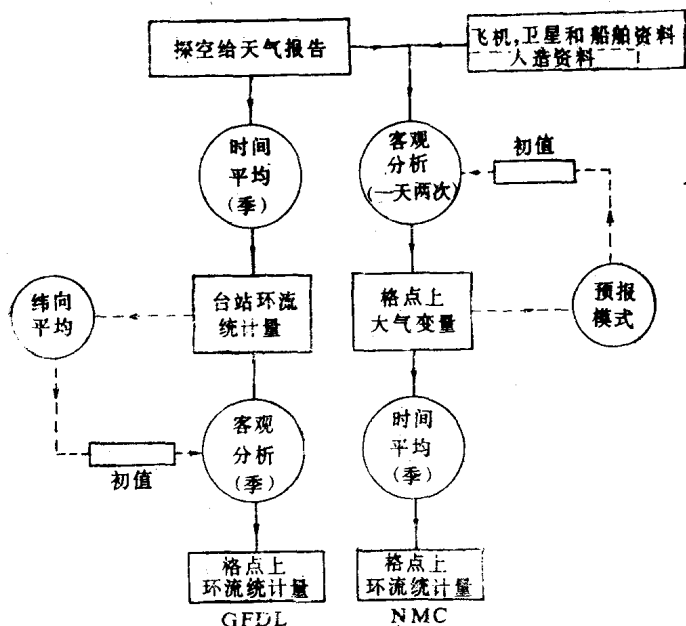


图1.1 用于大气环流研究的两种资料处理方法的比较

测相比, 在这些地区的急流出口区, 由第一种方法得到的纬向风风速较弱、经向非地转风运动较强、副热带对流层下部温度偏低、副热带对流层顶以上温度偏高。纬向风的最大局地偏差为 $10-15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 经向风为 $6-8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 位势高度为 $50-70\text{m}$, 温度为 $2-4^{\circ}\text{C}$ 。所以会产生这种差别, 是由于在 GFDL 分析中, 定常涡动动能要弱得多, 而定常波向赤道的位能输送则强得多。在 GFDL 分析中, 在资料稀少地区的初值选取的是纬向平均值, 这种值一般比相应的局地量值变化要小, 因而这造成了 GFDL 分析中变率的减小。

对于 NMC 分析, 主要问题是在资料稀少地区风场分析总是出现趋向梯度风平衡的系统偏差、因而与非地转过程有关的参数计算必然不够准确。这包括时间平均的经向风, 平均经圈环流和位能的经向输送。对于涡动量, 一般给出的涡动振幅较高, 涡动

输送较强，最大偏差达20—30%。作为一个例子，给出 200hPa 纬向风的比较（图1.2）。

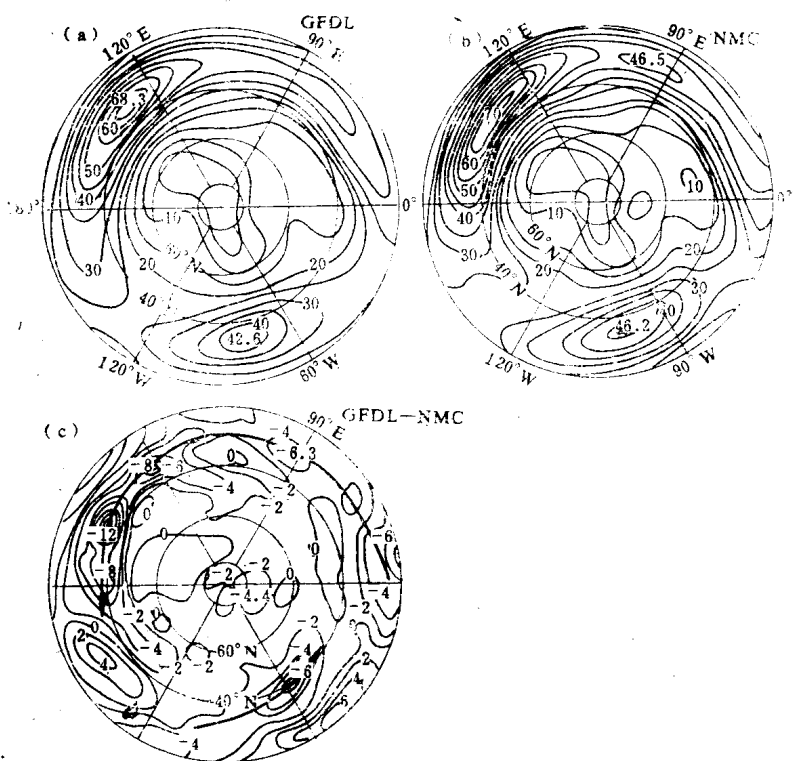


图1.2 9个冬季（1963—1973）200hPa纬向风分布

(a) GFDL资料(由美国地球物理流体实验室按第一种方法得到的资料)；(b) NMC资料；(c) GFDL与NMC之差。箭头表示两支主要的冬季急流位置。单位：米/秒

由上面可见，分析模式或客观分析方案的不同，可以给大气环流的统计计算带来不同的结果，尤其是在资料稀少的地区。除了这种由客观分析方案造成的误差外，还有另外三种类型的误差，它们分别由下面三种原因造成：（1）全球无线电探空站网分布不合理。大陆地区比海洋地区观测站密得多，而北半球海洋地区

又比南半球海洋地区条件为好。在有些地区实际上没有任何观测站。Oort[8]曾用全球气候模式的数值资料去确定目前无线电探空站的水平分布是否适合研究全球大气的时空结构及其变率。一般半球月平均风 ($\bar{u}$ 和 $\bar{v}$) 的均方根误差为 $2-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在急流高度附近 $\bar{u}$ 的误差增加到 $5-6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。自由大气中月平均 $\bar{T}$ 的误差为 $0.5^{\circ}-1^{\circ}\text{C}$ ，而在地面边界层为 $2^{\circ}-3^{\circ}\text{C}$ 。对流层上部的月平均 $\bar{z}$ (位势高度) 的误差在 $20-30 \text{ gpm}$ 之间。平均湿度的误差随高度减小，近地面为 $1-2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，到 500 hPa 为 $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由这个原因造成的误差最大，它使某些大气环流物理量的统计结果十分不可靠，尤其是在南半球；(2) 无线电探空站的缺测和缺报。由这个原因造成的各层误差为： $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 约为 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $\bar{T}$ 为 0.2°C ， $\overline{u'^2}$ 和 $\overline{v'^2}$ 为 $5 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ， $\overline{T'^2}$ 为 1°C^2 ，动量输送 $\overline{u'v'}$ 为 $5 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ，热量输送 $\overline{v'T'}$ 为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\text{C}$ 。因而与 (1) 中的误差相比，(2) 中的误差要小得多；(3) 仪器和观测误差以及代表性问题。前者包括纯粹由仪器精度和探空气球在垂直和水平方向位置确定不准造成的误差。由这两个原因产生的误差一般随高度增加。在对流层上部，风的分量的均方根误差约为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，温度为十分之几度，位势高度为几十位势米，相对湿度约 10% 。另一种误差由探空的代表性引起。一般认为一个台站的探空代表 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 或更大区域的平均值。虽然仪器测到的沿上升路径的大气参数是十分准确的，但由于存在着微尺度和中尺度脉动，可使所得的观测记录不能代表较大地区的状况。这种误差一般比前述的误差要大。在对流层上部，风分量的均方根误差在 $5-10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，温度约 1°C ，位势高度约 50 米 。

(3) 中的误差一般认为是随机的和不相关的。这意味着对某一台站计算的大气参数的统计量随平均时期的加长而愈益可靠。考虑有几个 (n) 资料点 (独立的) 的一个平均时段，则可使线性的统计量的误差减小 $1/n^{1/2}$ 倍。在每一个台站，由微尺度和中尺度脉动引起的逐日变化应是不相关的。可认为一个月有 30 个独立的资

料点。这意味着月平均值的误差为每日观测值误差的 $\frac{1}{5}$ 或 $\frac{1}{6}$ 。因

而月平均 $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 误差约为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\bar{T}$ 为 0.2°C , $\bar{z}$ 为 10 gpm 。此外由分析方案造成的误差也可减少30—40%。

在北半球,目前的无线电探空网资料一般是适于计算大尺度环流参数的平均值,但在南半球,误差较大,因而必须增加其它的资料来源(如探空,卫星,船舶观测等),尤其在计算平均经圈环流和定常涡动环流的通量时更需如此。

§1.3 大气环流的平均状况

大气环流的平均状况是指时间平均图或空间平均图上看到的状况。平均的时间间隔或空间格距不同,所得到的平均状况的特征也不同。过去很多人绘制过不同时段或不同地区的平均图。由于所用的资料和方法不同,它们之间有一定的差别^{[9][10]}。近年来,有人根据较长时段的资料,并用较可靠的客观分析方法重新绘制了新的平均图^{[6][11][12]}。以下我们将简略讨论这些平均图的基本特征。图1.3a和图1.3b分别是一月气候平均500hPa和海平面气压图^[13]。500hPa高度场表明在青藏高原和落基山上空为一致的西北气流,其下游为两个大槽,其南侧是平均高空急流的位置。在两大洋的西岸有明显的高压脊。许多研究表明山脉在决定冬季500hPa北半球主要槽脊的位置中起着主要作用。这说明高原动力作用的重要性。但是海平面气压场反映了热力的明显影响,低压位于高纬的海洋区,沿海岸线等压线密集。在欧亚大陆和北美大陆以及副热带大西洋地区是地面高压带。最近的大气环流数值模拟表明,只在下边界施加热力作用,而除去山脉就能够复制十分真实的气候平均海平面气压场。因而地形强迫在决定急流高度处北半球冬季定常波主槽主脊的位置上是主要因子,而热力因子在维持高纬海洋区地面低压上是十分重要的。因而热力强迫以低层为主,动力强迫以高层为主。从这个意义上看,在对流