

李崇银 等

动力气象学概论

气象出版社

动力气象学概论

李崇银 等著

气象出版社

内 容 简 介

本书共分十四章，包括了动力气象与天气分析预报实践，大气运动方程组，大气热力学，大气静力稳定度，大气中的平衡运动，环流和涡度，大气中的波动，长波动力学，不稳定理论，中纬度天气系统的演变，中小尺度动力学，大气运动的适应过程，热带大气动力学基础与大气环流等内容。全书深入浅出，着重物理意义，简化公式推导，且包括了国内外 80 年代最新的进展。

本书适于广大气象工作者、特别是中专以上台站预报员提高，也可作为科研和教学参考之用。

动力气象学概论

李崇银 等著

责任编辑：陆勇 庞小琪

* * *

气 象 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路 46 号)

北京环球印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

* * *

开本：787×1092 1/32 印张：8.5 字数：185千字

1985年12月第1版 1985年12月第1次印刷

印数：1—3,000

统一书号：13194.0243 定价：2.00 元

前 言

为适应广大气象工作者，特别是长期从事气象台站天气预报工作者学习理论和提高业务的需要，《气象》杂志于1983年4月—1984年3月举办了“动力气象讲座”。该“讲座”以简明扼要的方式，深入浅出地论述了动力气象学的基本内容，同时也介绍和讨论了近年来动力气象学的一些新进展。根据读者的要求，在保留原“动力气象讲座”的基本体系和特点的基础上，我们重新进行了改写，增补了一些内容，现以《动力气象学概论》一书出版。

本书绪言和第一章由叶笃正和李崇银编写；第二章和第七章由黄荣辉编写；第三章由王两铭编写；第四章由刘式适编写；第五、八、九、十三章和附录由李崇银编写；第六章由孙淑清编写；第十章由曾庆存和卢佩生编写；第十一章由杨大升编写；第十二章由袁重光编写；第十四章由朱抱真编写；最后由李崇银统一定稿。

“动力气象讲座”及本书的出版都得到《气象》编辑部汪文修和陆同文同志的支持和帮助，特表示感谢。

鉴于作者学识水平以及篇幅的关系，本书会存在不少错误和不足，欢迎读者批评指正。

作者（李崇银执笔）

一九八四年六月

目 录

绪言	(1)
第一章 动力气象与天气分析预报实践	(4)
§ 1. 动力气象与天气分析预报实践	
§ 2. 动力气象与数值天气预报	
§ 3. 几个重要研究课题	
第二章 大气运动的基本方程组	(14)
§ 1. 大气中基本的作用力	
§ 2. 地球大气的运动方程式	
§ 3. 运动方程式的简化	
§ 4. 连续方程	
§ 5. p -坐标系中的大气运动基本方程组	
第三章 大气热力学	(35)
§ 1. 状态方程	
§ 2. 热力学第一定律	
§ 3. 热力学第二定律	
§ 4. 大气中的几种主要温度参数的表示方法及其在分析预报中的应用	
§ 5. 干、湿绝热过程	
§ 6. 水汽对大气运动的影响	
第四章 大气静力稳定度	(51)
§ 1. 大气层结与静力平衡	
§ 2. 静力稳定度	
§ 3. 不稳定能量	
§ 4. 加热对不稳定能量的影响	
第五章 自由大气中的平衡运动	(64)
§ 1. 静力平衡下的大气状态	
§ 2. 地转风	
§ 3. 热成风——地转风随高度的变化	
§ 4. 梯度风	
§ 5. 惯性圆	
§ 6. 流线和轨迹	
§ 7. 正压与斜压	
第六章 环流与涡度	(80)
§ 1. 环流与涡度	
§ 2. 环流定理	
§ 3. 散度	
§ 4. 涡度方程,位势涡度	
§ 5. 散度方程	
第七章 大气中的波动	(96)
§ 1. β 平面近似与小扰动理论	
§ 2. 大气中的声波和重力	

波 § 3. 惯性重力波 § 4. 罗斯贝波 § 5. 滤波的概念及方法 § 6. 热带波动 § 7. 非线性波	
第八章 长波和超长波动力学	(120)
§ 1. 长波形成的机理 § 2. 长波的移动 § 3. 长波频散及上游效应 § 4. 超长波的一般特征 § 5. 超长波活动与中期天气演变 § 6. 大尺度运动的多时态特征	
第九章 大尺度大气运动的不稳定理论	(136)
§ 1. 大气运动的不稳定概念 § 2. 惯性不稳定 § 3. 正压不稳定 § 4. 斜压不稳定 § 5. 环境对斜压不稳定的影响 § 6. 凝结加热对斜压不稳定的影响 § 7. 非纬向气流的斜压不稳定	
第十章 中纬度天气系统的演变过程	(156)
§ 1. 天气系统的表示法——波包 § 2. 天气系统的发展问题 § 3. 槽脊线的移动和变形 § 4. 天气系统垂直尺度和剖面图上槽线坡度随时间的演变 § 5. 扰动和基本气流的相互作用	
第十一章 中小尺度动力学	(173)
§ 1. 非静力平衡 § 2. 重力惯性波 § 3. 飚线 § 4. 对称(惯性)不稳定性 § 5. 龙卷 § 6. 对流云的数值试验 § 7. 湿对流研究的一个新进展	
第十二章 地转适应过程	(197)
§ 1. 大气中的地转适应过程 § 2. 适应过程和演变过程的可分性 § 3. 扰动尺度对适应过程的影响 § 4. 正压大气中的适应场 § 5. 非线性作用和不平衡区域很大的情况 § 6. 斜压大气中的地转适应 § 7. 适应问题研究的一些应用	
第十三章 热带大气动力学基础	(210)
§ 1. 热带大气运动的尺度 § 2. 对流凝结加热的参数化 § 3. 第二类条件不稳定(CISK)和台风的发生发展 § 4. 切变基本气流中的 CISK § 5. 热带辐合带 § 6. 西南季风	

第十四章 大气环流动力学问题	(234)
§ 1. 东西风带和经圈环流的维持	
§ 2. 平均槽脊的形成	
§ 3. 阻塞形势的建立和崩溃	
§ 4. 大气环流数值模拟	
附录	(251)
1. 气象上常用物理常数	
2. 标准大气	
3. 气象上常用英文缩写词	

绪 言

动力气象学是大气科学的一个分支，它应用流体力学方程组及有关物理定律研究大气运动和天气演变的规律。然而它不同于一般流体力学：首先，由于地球在不断自转，地转偏向力(又称科里奥利力)对于大尺度大气运动有着重要的影响。在一般情况下，水平气压梯度力和地转偏向力接近平衡，大气运动的水平加速很小。其次，对于运动的地球大气，重力和铅直气压梯度力接近平衡，大气经常处于所谓“静力平衡”状态。因而，除一些尺度很小的大气运动系统(如龙卷、对流云等)外，大尺度大气运动的铅直速度和铅直加速度均很小，使其具有准水平特征。

提到动力气象，部分长期从事台站工作的同志，可能会感到深奥，尤其是对于一些数学表达式觉得难于掌握。实际上，广大气象工作者随时都在运用动力气象理论。例如在分析高空天气图时，我们总是尽量让等高线的切线方向同风向保持一致，而并不单纯地划等值线。在这里，不仅用到了地转风这个基本原理，也用到了大尺度大气运动基本上处于地转平衡的动力气象学理论。再如，在天气预报中，当高空温度槽落后于高度槽时，我们会考虑该高空槽可能发展加深。这又正是长波斜压不稳定理论的应用，因为温度场和高度场的这种配置，正好造成温度和垂直速度间的正相关，暖空气上升、冷空气下沉，有效位能将向扰动动能转换，促使扰动发展，高空槽加深。由此可见，动力气象并非深奥莫测，而是日常业务工作中经常会遇到的。

提到动力气象,也许还有一些同志认为它比较空洞,解决不了实际问题。为此,我们准备从两方面来谈谈。首先,动力气象主要来源于天气学,它将天气学中所发现和分析出现象,通过基本方程组对有关大气运动和天气现象给予物理的、定性或定量的解释。同时,动力气象研究的结果又应用于天气预报,特别是定量的数值天气预报。大气行星波(长波)理论是动力气象学的一个重大发展,而这个理论正是在大量高空观测资料的基础上,结合多年锋面气旋的天气学分析研究而发展起来的。这一理论的建立,包括行星波的能量频散,长波的正压和斜压不稳定等,不仅对大气运动规律给出了理论解释、为天气分析和预报提供了理论依据、提高了天气分析和预报水平,并且为近代数值天气预报的发展奠定了物理基础。数值天气预报从1921年里查逊(Richardson)的失败到五十年代初期取得成功,并不是偶然的。行星波理论的建立,尤其是涡度方程的使用,引入准地转假定而滤去了模式中的重力惯性波,是极为重要的原因。数值预报在其后的发展也直接同动力气象研究的新成果有紧密联系。其次,我们也要指出,地球大气的运动及天气演变都是极其复杂的,比较难于用一种数学模式给予完全的描写。为了求得方程组的解答,理论研究中往往要针对所论对象作必要的简化假定,因此动力气象的研究结果一般都只能揭示大气运动的主要性质及某些特定对象的运动特征、要用来说明天气演变的各种具体现象或用于业务预报,还需要有进一步工作相配合。可以预料,如果一大批有丰富实践经验的台站气象工作者也对动力气象的一些基本问题进行研究和应用,不但可以促进动力气象学的发展,也将对天气分析预报实践带来极大的好处。

这本《动力气象学概论》共分十四章,将简单介绍动力气

象学的主要内容和近年来的重要进展。第一章的主要目的是说明动力气象在气象学以及在天气分析预报实践中的地位和作用，使读者对动力气象有一个概略的认识。第二—七章，将简要但比较系统地讨论动力气象学的基本概念。第八—十章主要针对中纬度地区的大尺度运动，叙述各种基本理论，也将介绍一些新的发展。第十一和十三章分别介绍中小尺度系统和热带大气运动的基本动力学特征及一些主要理论。第十二章介绍大气运动的适应过程。大气环流的基本状态以及大气环流（包括行星风带和大型槽脊等）的维持机制，是最后一章——大气环流的主要内容。

第一章 动力气象与天气

分析预报实践

动力气象学及其所研究的问题主要源于天气学，它将天气学中所发现和分析出现象，通过大气运动基本方程组或针对性的简化方程组进行物理的、定性或定量的解释；同时，动力气象学研究的结果又提供一定的理论依据，且广泛应用于天气预报，特别是定量的数值天气预报。因此，动力气象学所讨论的问题不仅具有理论意义，同时也有实用价值。

§ 1 动力气象与天气分析预报实践

为了说明动力气象同天气分析预报实践的紧密联系，以及动力气象理论在天气分析预报实践中的应用，下面我们举几个实例。

1. 风场和气压场的调整

在天气分析中，我们经常用到地转平衡。但地转关系成立时，大气运动就无时间变化，天气系统也就没有时间演变。实际大气经常出现非地转的情况。当某一地区出现非地转风场之后，随即就会有环流的演变，而且这种演变非常迅速，经过很短的时间（约 3—6 小时），风场和气压场又将接近地转平衡。一般把环流由非地转向地转调整的过程叫做地转适应过程。

预报实践中会看到这样的情况，夏季我国江淮气旋（水平

尺度约几百公里)的形成,大多先在风场上表现出气旋性环流,其后在天气图上才能分析出低压系统。相反夏季西太平洋副热带高压西伸发展时,可以先划出等高(等压)线(此时风场不明显),其后才有反气旋性环流建立。平时我们可能把它们视为当然的现象并不去追究其原因,实际上它们是遵循着动力气象规律的。

上述两种天气系统发展变化的特征,不难从地转适应的尺度理论得到解答。例如,假定初始时刻气压场为零,有一圆形风场存在,用流函数可表示成

$$\psi_0(x, y) = A \left[2 + \left(\frac{R}{L_0} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] e^{-\frac{r^2}{2R^2}} \quad (1.1)$$

其中 $r^2 = x^2 + y^2$; R 是扰动系统(涡旋)的半径; L_0 是所谓“变形半径”; A 为某常数。根据地转适应理论,可以计算出适应后的流场为

$$\psi_1(x, y) = A \left[2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] e^{-\frac{r^2}{2R^2}} \quad (1.2)$$

而最终风场和初始风场之比则为

$$c_v = \frac{4 - \left(\frac{r}{R} \right)^2}{4 + \left(\frac{R}{L_0} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2} \quad (1.3)$$

很显然,当 $R \ll L_0$ 时, $c_v \approx 1$; 而当 $R \gg L_0$ 时,则 $c_v \ll 1$ 。这就是说,较小范围的没有气压场支持的风场可以维持,气压场要向它适应,相反,大范围的没有气压场支持的风场,则不能维持,将迅速改变。另一方面,如果在初始时刻风场为零,只有气压场存在,则地转适应理论表明,小范围的没有风场支持的气压场是不能维持的;大范围的没有风场支持的气压场可以

维持,而风场向它适应。

从上述分析讨论可以看到,用地转适应的尺度理论可以很好地解释一些天气系统的变化情形,大尺度系统往往在气压场(高度场)上反映清楚,而较小尺度的系统往往在流场(风场)上表现明显。由此可以得出有益的启示,就是对于分析预报来讲,较大尺度的系统(如副热带高压等)应该抓气压场,较小尺度的系统(如江淮气旋等)需要抓风场。

2. 中纬度地区天气系统的演变

图 1.1—1.3 是一次北欧高空小槽强烈发展又减弱的例子。1972 年 3 月 22 日 12 时(世界时)的 500 毫巴图上,北欧地区有一个槽,在急流轴以南的槽线基本呈西北——东南向,在急流轴以北的槽线基本呈东北——西南向(图 1.1)。两天之后,小槽得到强烈发展,此时扰动的纬向尺度(波长)明显增大,槽线也都转为近乎南——北向(图 1.2)。3 月 27 日槽已显著减弱,槽线由南北向变为东北——西南向,波长也显著缩短(图 1.3)。中纬度天气系统的这种演变过程并非偶然,而是一种较为普遍的现象。近年来将天气系统作为波包处理,得到了一些很有意义的结果。就正压情况而言,天气系统在其演变过程中,系统的位置、强度、尺度、形状和倾斜度等一般都要变化。因此,从动力学上既可以写出相速公式,还可以写出强度变化和波数变化的方程式(公式略)。由图 1.4 还可以看出,在急流轴以北的槽线呈东北——西南向,以南的槽线呈西北——东南向,这是正压发展型;在系统发展过程中槽线将逐渐趋于南北向,并且扰动尺度增大。相反,在急流轴以北槽线呈西北——东南向,以南槽线呈东北——西南向,这是正压衰减型;在系统衰减过程中槽线亦逐渐趋于南北向,并且扰动

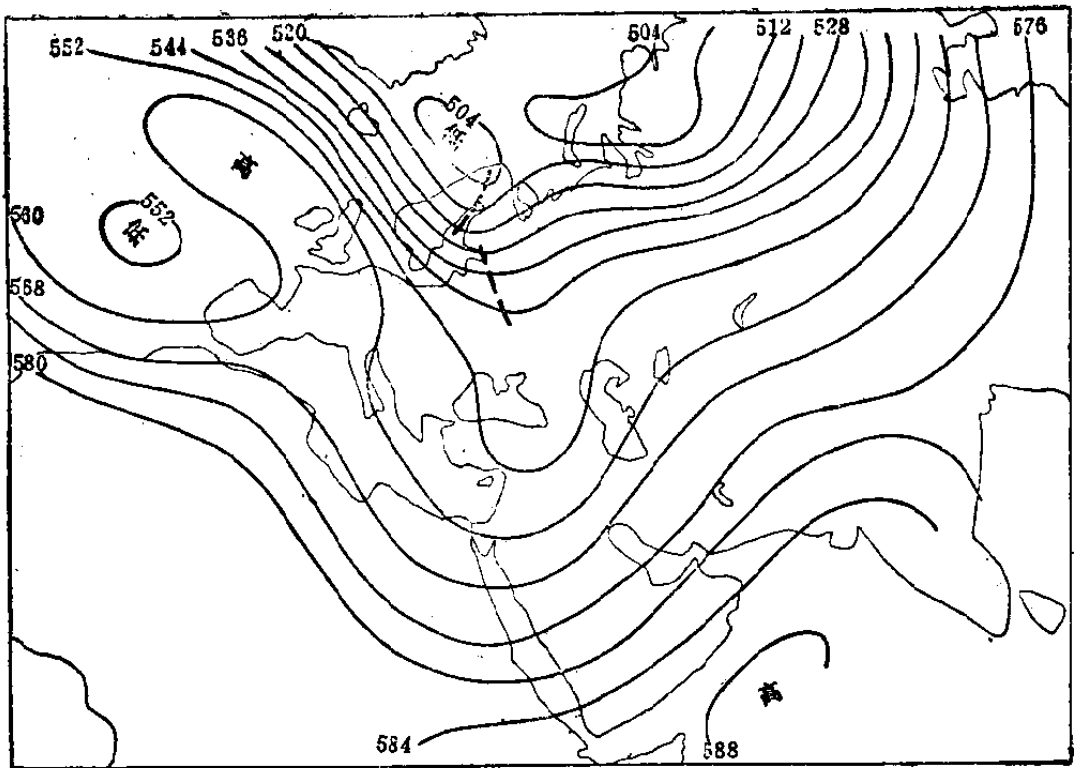


图 1.1 1972年3月22日12时(世界时,下同)500毫巴形势图

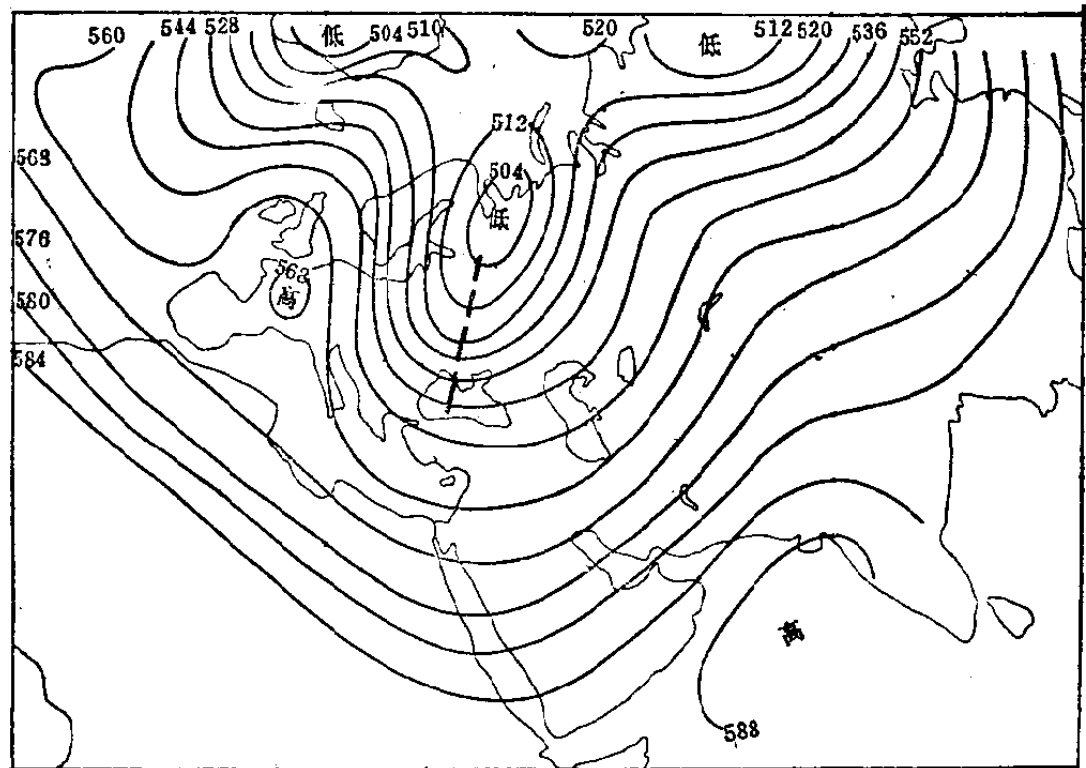


图 1.2 1972年3月24日12时500毫巴形势图

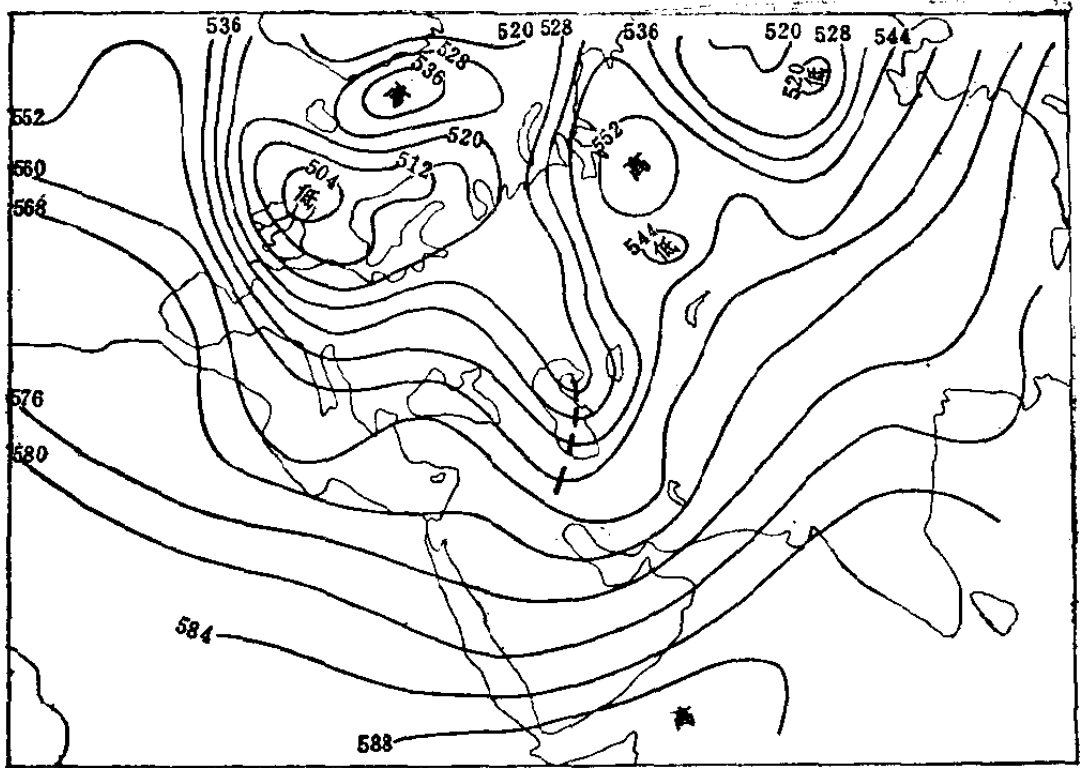


图 1.3 1972 年 3 月 27 日 12 时 500 毫巴形势图

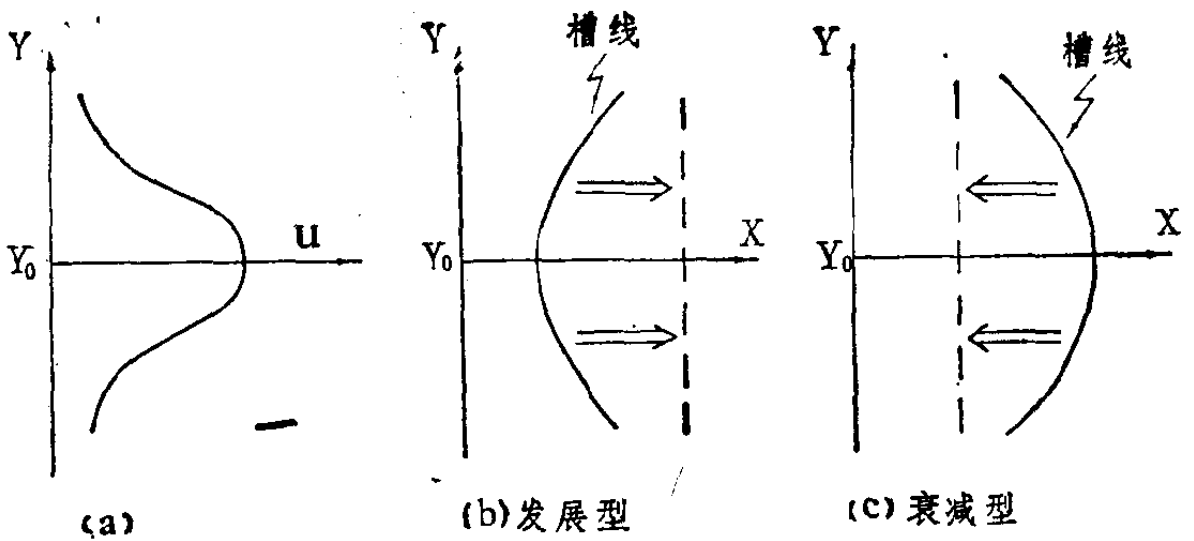


图 1.4 正压发展型和衰减型扰动的结构

尺度减小。

理论分析结果同天气系统演变规律是基本一致的，天气系统的演变由此得到一定理论解释，而我们又可以应用理论

结果指导天气预报实践。

3. 台风发生发展的垂直通风条件

关于台风的发展，六十年代提出了第二类条件不稳定 (CISK) 理论，这个理论的物理本质是：热带低压扰动通过边界层摩擦辐合，使潮湿空气强迫抬升，引起积云对流，水汽凝结潜热的释放使低压中心温度升高、气压下降，出现指向中心的低层流入气流，由于绝对角动量守恒，切向风增大，低压环流加强，从而使对流加强，凝结加热更厉害……，如此循环，造成积云对流与低压环流间的正反馈，使低压发展加强。

最近我们将垂直切变基本气流引入 CISK 模式，在简单的板对称两层模式下，讨论了垂直切变基本气流对 CISK 的影响。在无垂直风切变情况下，扰动发展的增长率类似于过去已有研究的结果。在有基本气流的垂直切变时，增长率将受到削弱，而且其影响同扰动水平尺度有关。图 1.5 是从计算结果得出的，实线为没有基本气流垂直切变的情况，虚线是

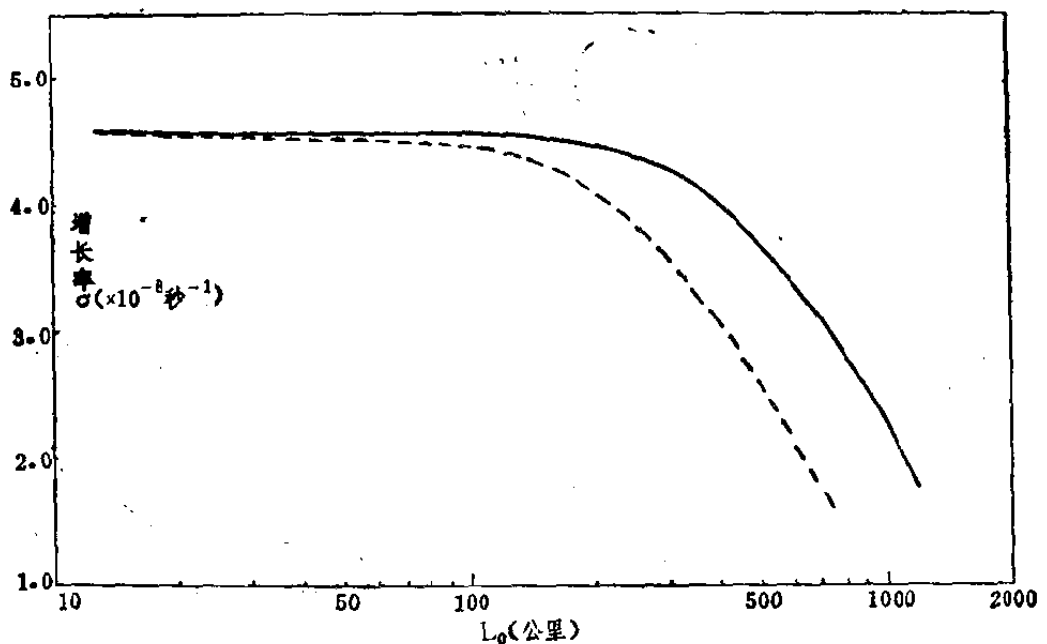


图 1.5 基本气流垂直切变对增长率的影响

有基本气流垂直切变的情况 $\left(\frac{d\bar{u}}{dy}=5\text{米}\cdot\text{秒}^{-1}\cdot(100\text{毫巴})^{1)}\right)$ 。很显然,基本气流的垂直切变将削弱扰动发展的增长率,即不利于台风的发生发展。关于台风发生发展的一系列天气和气候学研究都一致指出,纬向风垂直切变的极小值区同扰动和风暴发展相关,大的切变风场使扰动和风暴受阻。从而人们一直把“弱的对流层风垂直切变”作为扰动和风暴发展的一个必要条件,即所谓“对流层通风”条件。显然,依据 CISK 的理论结果可以对“对流层通风”条件给予动力学解释。

§ 2 动力气象与数值天气预报

动力气象理论奠定了数值预报的物理基础,其成果可直接提供数值预报使用。四十年代发展起来的大气长波理论,由于引入了地转近似,得到了大气大尺度运动中的许多基本规律,特别是依据滤波概念建立了数值预报上所称的滤波模式,使数值天气预报在 50 年代的计算条件下得以实现。里查逊当年所用的预报方程组含有大气中可能出现的各种波动,在计算过程中,声波和重力波等一类快波不仅会模糊大型天气过程的本质,而且更严重的是方程组对快波的敏感性,虚假地产生和放大快波的影响,造成所谓计算不稳定。引入地转近似就滤去了上述快波,仅保留了控制大型天气变化的缓慢涡旋运动。但是,实际大气中存在的重力惯性波对天气演变是有影响的,又需要在预报模式中保留它,因此,七十年代以来已普遍放弃滤波模式而采用原始方程模式。计算不稳定问题

1) 按国家法定计量单位毫巴因改为帕斯卡(1 毫巴=100 帕斯卡)。下文同