

中国科学院地球物理研究所

平流层大气环流及太阳活动对 大气环流影响的研究

陶 詩 言 等 著
揚 鑑 初

科学出版社

中国科学院地球物理研究所

平流层大气环流及太阳活动对 大气环流影响的研究

陶 詩 言 等 著
楊 鑑 初

科 学 出 版 社

1 9 6 4

內 容 簡 介

本文集系作者近一二年內，对平流层大气环流及太阳活动对大气环流影响的研究总结。全文集可以分为三部分，共有論文十篇。

第一部分共有論文二篇，主要是有关平流层和对流层大气环流相互影响的理論研究。第二部分共有論文三篇，主要是天气学方面的研究，包括平流层中下部大气环流的季节变化和平流层与对流层相互作用的一些天气学事实分析。第三部分共有論文五篇，主要是有关太阳异常辐射对平流层和对流层影响的统计相关分析的研究。

通过这些研究，作者指出：平流层和对流层大气环流上下层之間有密切的联系；而太阳异常辐射，不論是对平流层溫度的变化或对流层流型变化的影响都是很显著的。

平流层环流的变化、太阳活动能否影响大气环流和平流层环流与对流层环流相互如何影响等問題，是目前气象学中迫切需要解决的問題。近年来，随着高空探测技术的改进，已給开展上述研究工作提供了有利条件。本文集虽系初步研究成果，但对今后进一步开展这方面的研究工作是有很大的帮助的。

本文集可供气象业务工作者、研究工作者和地球物理工作者以及高等院校有关专业师生参考。

平流层大气环流及太阳活动对 大气环流影响的研究

陶詩言 等著
翁震初

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业登记注册证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1964 年 2 月第 一 版 书 号：2674 字 数：157,000
1961 年 2 月第一次印刷 开 本：787×1092 1/16
(京) 0061—2,900 印 张：7.3/4

定价：(7) 1.10 元

前 言

近十余年来,随着现代先进科学技术的发展,在气象学领域中的观测技术也有了很大的改进,因此给现代气象学的发展开辟了新的领域。目前,人们随着火箭和卫星的观测,对于平流层大气环流和日地关系方面的研究愈来愈重视。关于平流层大气环流的研究,人们多着重于分析研究平流层流型的变化、冬季平流层的爆发性增温以及探索平流层与对流层之间的相互影响问题。在日地关系的研究方面(这里是指太阳活动对平流层和对流层大气环流的影响),主要是分析了太阳活动与平流层和对流层之间的相关事实,近来也有人开始研究太阳活动对平流层和对流层影响的物理机制问题。

最近一二年来,中国科学院地球物理研究所也开始进行平流层大气环流和太阳活动对大气环流影响的研究工作。本文集就是根据我们近一二年内所完成的研究成果汇集而成。

本文集共包括三部分。第一部分是有关平流层和对流层大气环流相互作用的理论研究。这方面的研究工作在国内外进行得很多,但结论并不一致。本文集中所收集的这方面的二篇论文,一篇是利用三和四层地转线性模式,在各种大气风速和温度层结条件下,研究了平流层与对流层环流的相互作用;另一篇则利用讨论大气振荡时所运用的方法,以一个非地转模式求得波动垂直传播的折射指数,以此来讨论不同尺度的波动上下层之间相互影响的可能性。根据我们的研究结果,认为两者的相互影响是可能的。

第二部分是平流层中下部环流的季节变化和与对流层相互作用的一些事实分析。我们发现平流层环流从冬到夏的转变过程和时程迟早,有两年的周期现象,而从夏到冬的转变各年均是一致的。我们又发现冬季30(或25)毫巴和500毫巴上流型变化有显著的一致性。这种上下一致性的现象,是大气中超长波活动的表现,并且北半球冬季阻塞形势不连续后退的现象也是与超长波向西传播相联系的。

第三部分是关于太阳异常辐射对平流层和对流层的相关分析。结果指出,不论是对平流层的温度变化方面或是对对流层流型的变化方面,都表现出受太阳异常辐射的影响。此外,还作了近十年来太阳活动和北半球700毫巴等压面高度场月偏距的对比分析,结果亦指出,太阳活动所引起的太阳辐射变化,能对对流层环流发生一定的影响。

由于我们对这方面的研究工作开始不久,经验还不多,其中有些论点还需更多的资料和分析来论证,希望各方面多加指正。

目 录

前言.....	(iii)
平流层和对流层环流的相互作用.....	孙淑清 陈隆勳 叶篤正 (1)
非地轉模式下各种尺度大气波动的垂直传播.....	陈隆勳 (18)
北半球平流层中下部大气环流的季节变化.....	陶詩言 (27)
冬季中高緯度平流层和对流层大气环流相互联系的一些事实.....	陈隆勳 陶詩言 (46)
1958年1月下旬平流层爆发性增温时期北半球25和500毫巴流型的变化.....	陶詩言 朱福康 (67)
太阳活动对冬半年平流层中部温度的影响.....	楊鑑初 林学椿 (77)
平流层突然增温与太阳异常辐射的关系.....	林学椿 (90)
太阳活动对对流层中部环流演变的影响.....	陈烈庭 (96)
冬半年太阳活动对东亚500毫巴等压面高度場的影响.....	王煥德 (103)
太阳活动第十九周内北半球700毫巴等压面高度月偏距的对比分析.....	楊鑑初 (109)

平流层和对流层环流的相互作用

孙淑清 陳隆勳 叶篤正

提 要

本文利用了三层地轉性模式,研究了各种大气风速和湿度层結条件下,平流层和对流层环流的相互作用,主要結果有以下几点:

1. 在冬季环流形势下,对流层扰源对平流层上部有显著的影响,而平流层上部扰源也可以影响对流层。在超长波波段里,这种上下层的相互作用比长波要显著得多,对流层頂对长波扰源有很强的阻尼作用。

2. 大气温度层結越不稳定,或西风垂直切变越大,则对流层扰源对平流层各层的影响也越大。

3. 在超长波波段里,对流层中的后退波扰源最容易影响到平流层上层,駐波次之。不論扰源是前进的或是后退的,平流层中引起的超长波都是后退的。在长波波段里,以駐波的影响最为显著(沒有計算长波的后退波扰源)。

4. 在模式中选择适当的合理的边界条件对于研究高低层相互影响有重要的意义。

最后,简单地討論了扰波波系的结构。

一、引 言

随着平流层环流研究的开展,平流层和对流层环流之间的关系越来越成为人們注意的对象。許多天气现象都指出,对流层和平流层的关系是密切的。冬季 10 毫巴的平均图就有非常明显的槽脊,形势和 500 毫巴的平均形势相似。这显然表明在对流层下部由海陆分布引起的不均匀加热,以及大地形的动力作用所影响的高度,至少可达平流层頂部。小地形引起的重力波可以透过对流层頂进入平流层,这也是早已观测到的事实。所以重力波以及非常长的天气波段里,对流层的扰动是可以影响平流层的。

平流层里的扰动是否可以影响对流层呢?在分析 1957 和 1958 年平流层爆发性增强后的环流演变时, R. A. 克賴格 (Craig)^[1] 和 R. 謝尔哈格 (Scherhag)^[2] 曾分别发现对流层下部有相应于平流层的环流变化。在各层扰动的譜波分析中,陈隆勳和陶詩言^[3] 以及 B. W. 鮑威尔 (Bovill)^[4] 都发现 25 毫巴和 500 毫巴上的超长波(波数 1—2 的波动)的变化是一致的,此外陈隆勳和陶詩言^[3] 更发现在冬季 25 毫巴和 500 毫巴的五天滑动平均变高,无论是强度或移动都是一致的。五天的平均变高所表现的仅是 1—3 的超长波,所以这些研究指出:在超长波的波段里平流层的扰动是可以影响对流层的,或者平流

层和对流层的超长波是一个变化一致的统一体。

但多数动力学的分析是和天气学研究的結果不同的，多数結果都表示平流层和对流层不能相互作用。陈雄山^[5]曾从 ω 方程出发，計算各层間相互影响的函数，认为对流层扰源对平流层有一定的影响，而平流层扰源則很难影响下来。J. 斯巴 (Spar)^[6]也用影响函数的方法解 ω 方程，认为中层大气的加热作用很难影响到对流层。陈隆勳^[8]曾用类似的方法，在不同的西风风速和温度层結情况下，計算了各层扰动的相互影响系数，指出了大气結構对影响系数的作用，在本文第二节里，我們将要对此工作予以討論。不过应当指出，仅由影响函数的分布一般是不易得出上下层的相互作用的。不仅平流层和对流层如此，即使是对流层内部之間的相互作用也不会大。若干模式的計算給出对流层上部扰源对它的下部(或者反过来)的影响比扰源对本层的影响要小1—2个量級。然而，我們不能由此认为对流层上部和下部的相互作用是非常小的。

J. G. 恰尼 (Charney) 和 P. G. 特賴辛 (Drazin)^[7]引用波在連續介质中传播的折射指数概念，来討論对流层中行星波能量向上传播的可能性。他們认为無論冬夏，行星波的能量仅能传到20公里左右，只有在过渡季节，而且只有超长波才有可能影响更高的高空。这显然和上面所指出的冬季10毫巴和500毫巴平均形势很相似的事实是不相容的。J. G. 恰尼和 P. G. 特賴辛所用的是地轉模式，最近陈隆勳^[9]采用非地轉模式作了类似 J. G. 恰尼的研究，这个模式里允許了重力慣性波的存在，結果表示出波长为五、六百里以下的短波和超长波的能量在冬季的高緯度地区都能透过对流层頂上下传递。这和前面的观测事实就相近了。

无论是影响函数或折射指数的上下分布，在很大的程度上决定于西风风速(\bar{u})和温度(T)的垂直分布。在平均的 \bar{u} 和 T 的分布下，上下层的影响較小，这并不能表示在其他的情况下，上下层的相互作用也小。因此，在本文里我們首先結合陈隆勳^[8]过去的工作，討論了不同的 \bar{u} 和 T 的分布情况，利用类似影响函数的方法討論了上下层的相互作用。但是无论是影响函数的方法或折射指数的方法，所討論的都是瞬时的上下相互作用，没有积累的效果，而天气过程中往往积累的效果是不容忽視的，只有标出最后的积累来，才比較更能肯定上下层的相互影响的大小，因此本文主要是在固定的扰源下解出各层扰动随时间的变化，然后討論上下层的相互作用。此外顾震潮^[10]和陈雄山^[11]曾把大气看作自动調整的系統，在这系統里輸出能量和輸入能量之比和輸入扰动的波长和頻率有关。过去的研究都指出波长的改变是重要的，但是頻率变化的影响如何則尚未注意过，因此本文对此也将加以研究，最后我們討論了扰动的結構以及边界条件的影响等。

二、高低层扰动相互作用的影响函数

我們首先介紹陈隆勳^[8]过去的工作，他用比較简单的办法，研究不同层結对于对流层和平流层环流相互作用的影响。

假定运动是准地轉的，并与 y 无关，則綫性化后的涡度方程和絕热方程可以写为：

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) \frac{\partial^2 \chi'}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial \chi'}{\partial x} = \left(\frac{\partial \omega}{\partial p}\right) \frac{f}{g}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) \frac{\partial \chi'}{\partial p} - \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial p}\right) \frac{\partial \chi'}{\partial x} = -\frac{\sigma}{g} \omega. \quad (2)$$

其中 \bar{u} 为纬向风速; χ' 为扰动等压面高度; $\beta = \frac{df}{dy}$; f 为地转参数; g 为重力加速度; $\omega = \frac{dp}{dt}$; $\sigma = \frac{R^2 T}{g p^2} (\Gamma_d - \Gamma)$, 其中 R 为气体常数, Γ_d 为干绝热递减率, $\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$ 为温度垂直分布.

在 p 方向上取差分, 把大气分成六层(图 1), 把涡度方程写到 1, 3, 5 层上, 热力学方程写到 2, 4, 6 层上, 并假定 $\omega_0 = \omega_6 = 0$. 令解的形式为 $\chi'_i = T_i(z) e^{imx}$, $m = \frac{2\pi}{L}$ 为波长的函数, 代入方程组, 约去 e^{imx} , 把方程组写成关于 T_i 的倾向方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= i D_1 T_1 + i D_3 T_3 + i D_5 T_5, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= i E_1 T_1 + i E_3 T_3 + i E_5 T_5, \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} &= i F_1 T_1 + i F_3 T_3 + i F_5 T_5, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

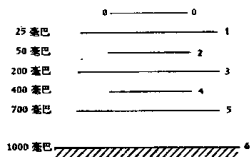


图 1

其中 D_i, E_i, F_i 都是 T, P, \bar{u} 和 m 等的函数, 比较方程组中每个方程中系数(如 D_1, D_3, D_5)的大小, 就可以定性地了解各层扰动对其中某一层(如 T_1) 的高度倾向所起的作用. 我们给

出了九种不同的基本气流 \bar{u} 和温度 T 的分布, 求超长波 ($L = 20000$ 公里) 和行星波 ($L = 5000$ 公里) 情况下方程的各个系数. 给定的各组参数见表 1, 在各组参数下求得的系数见表 2. 陈隆勋取超长波的波长为 20000 公里, 这在纬度 60° 的地方正好波数为二. 我们下面将专门讨论对流层扰动对平流层的影响, 而在对流层中一般以波数为二的超长波比较显著. 在中纬度, 波数为二的超长波波长约为 15000 公里, 故在表 2 中补算了二种 $L = 15000$ 公里的影响系数, 以便和下面进行比较. 从表 2 我们可以看出以下几点:

1. 对于 $L = 5000$ 公里的行星波, 在一般的大气层结下 (I-IV), $D_1 \approx 10 D_3 \approx 10 D_5$, $E_3 \approx 10^2 E_1 \approx E_5$, $F_3 \approx 500 F_1 \approx 50 F_5$, 即使考虑到平流层扰动一般比对流层扰动强度大, 但也还是 $|D_1 T_1| \gg |D_3 T_3|, |D_5 T_5|; |F_3 T_3| \gg |F_1 T_1|, |F_5 T_5|$. 这说明平流层和对流层中, 行星波系统的变化主要决定于本层环流的变化, 平流层和对流层之间很难相互作用. 而在对流层顶上, 除了本层波动的影响以外, 还可以受到对流层的影响 (即 $|E_3 T_3| \approx |E_5 T_5|$), 而平流层的影响却是很小的.

2. 对于波长 $L = 20000$ 公里的超长波, 在一般的大气层结分布下 (I-IV), $|D_1| \approx \frac{1}{3} |D_3| \approx (10^{-1} - 10^{-2}) |D_5|$, $|E_3| \approx |E_1| \approx 10^{-1} |E_5|$, $|F_3| \approx 50 |F_1| \approx 5 |F_5|$. 所以当各层扰动强度相同时, 对流层的扰动强度可以很容易的影响到平流层 (即 $|D_1| \approx (10^{-1} - 10^{-2}) |D_3|$), 而平流层的扰动则不易影响到对流层 ($|F_3| \approx 10 |F_1|$). 但是由天

表 1 影响系数计算中的各组参数

组别	层次	1	2	3	4	5	6
	p (毫巴)	25	50	200	400	700	1000
I	T ($^{\circ}K$)	200	200	200	230	254	273
	\bar{u} (米/秒)	40	40	40	30	15	0
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.6		
II	T ($^{\circ}K$)	239	224	200	230	254	273
	\bar{u} (米/秒)	40	40	40	30	15	0
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		-0.3		0.6		
III	T ($^{\circ}K$)	237	237	237	250	264	273
	\bar{u} (米/秒)	40	40	40	30	15	0
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.3		
IV	T ($^{\circ}K$)	200	200	200	230	254	273
	\bar{u} (米/秒)	25	25	25	25	25	25
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.6		
V	T ($^{\circ}K$)	200	200	200	230	254	273
	\bar{u} (米/秒)	80	80	80	60	30	0
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.6		
VI	T ($^{\circ}K$)	177	177	177	217	249	273
	\bar{u} (米/秒)	40	40	40	30	15	0
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.8		
VII	T ($^{\circ}K$)	200	200	200	234	262	283
	\bar{u} (米/秒)	20	20	20	12	4	4
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.7		
VIII	T ($^{\circ}K$)	200	200	200	234	262	283
	\bar{u} (米/秒)	32	32	32	24	12	4
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.7		
IX	T ($^{\circ}K$)	235	235	235	268	276	290
	\bar{u} (米/秒)	-10	0	15	10	5	0
	Γ ($^{\circ}C/100$ 米)		0		0.35		

气学事实证明:一般大气中 25 毫巴高度扰动值比 200 毫巴和 700 毫巴 (3, 5 层) 的高度扰动值要大得多, 因此虽然平流层对对流层各层的影响 ($E_1 T_1, F_1 T_1$) 比对流层扰动对本层的影响要小, 但是平流层扰动还是可以下传至对流层的。这就是说: 对于超长波系统, 平流层和对流层之间是可以相互影响的。这从 D_1, E_1 和 F_1 以及 D_3, E_3 和 F_3 的比较也可以看出: 一般 $|D_1| > |E_1|, |F_1|$, 但 $|D_3|, |E_3|$ 和 $|F_3|$ 的值却大致相同。这说明对流层的扰动可以很容易地影响平流层, 而平流层的向下影响, 由于该层本身的扰动值一般都较对流层大, 所以即使 E_1, F_1 较 D_1 为小, 但它对对流层各层还是有一定的影响。而在大气的某种结构下 (如 II), $|D_1|$ 反而小于 $|E_1|, |F_1|$, 这时平流层的扰动可以非常容易地传到对流层来。

3. 大气的结构对于高低层波动的相互作用有很大的影响, 在不同的风速分布和温度

表 2 各超参数下的影响系数
(10^3秒^{-2})

组别	L = 5000 公里										L = 20000 公里										备注						
	波 长					系 数					D _h					E _h						F _h					
	D _h	D _h	D _h	E _h	F _h	D _h	D _h	D _h	E _h	F _h	D _h	D _h	D _h	E _h	F _h	D _h	D _h	D _h	E _h	F _h		D _h	D _h	D _h	E _h	F _h	
I	-4.32	0.24	-0.51	0.02	-3.99	-2.24	0.01	-0.09	-4.37	-0.49	1.27	-7.60	0.16	0.28	-9.21	0.15	1.12	-9.79									
II	-4.27	0.18	-0.39	0.01	-3.99	-2.30	0.01	-0.09	-4.40	0.04	1.18	-7.16	0.20	0.29	-9.37	0.18	1.13	-9.95									
III	-4.29	0.20	-0.19	0.02	-4.02	-0.95	0.01	-0.07	-2.85	-0.35	1.28	-2.95	0.17	0.35	-3.69	0.15	1.10	-4.18									
IV	-2.43	0.12	-0.40	0.02	-2.62	-1.75	0.01	0.22	-3.33	-0.02	1.12	-4.53	0.16	0.57	-5.49	0.15	1.24	-5.83									
V	-9.35	0.35	-1.28	0.02	-8.50	-5.61	0.01	-0.40	-10.85	-1.74	1.47	-16.96	0.16	-0.86	-20.55	0.15	0.94	-21.84									
VI	-4.35	0.30	-1.42	0.01	-3.84	-5.68	0.01	-0.04	-8.03	-0.55	1.27	-19.48	0.16	0.41	-23.18	0.15	1.69	-23.83									
VII	-1.81	0.21	-0.28	0.02	-1.60	-1.23	0.01	-0.04	-2.08	-0.03	0.86	-2.90	0.10	0.36	-4.03	0.09	0.77	-4.38									超长波 L = 15000 公里
VIII	-3.33	0.21	-0.56	-0.01	-3.11	-2.45	-0.01	-0.04	-4.18	-0.53	0.87	-5.29	0.10	-0.13	7.35	0.09	0.79	-7.97									超长波 L = 15000 公里
IX	1.75	-0.83	-0.05	0.06	-0.98	-0.25	0.02	0.09	-0.67	1.26	-0.72	-0.15	0.07	0.13	-0.30	0.04	0.49	-0.46									超长波 L = 10000 公里

遞減率下,高低層的影響係數就有很大的變化。比較表 1 中 I, II, III, VI 四種情況, 這里 \bar{u} 的分布是相同的, 而 \bar{T} 不同, 從表 2 可以看出, 不論是長波或是超長波, $|D_3(VI)| > |D_3(I)| > |D_3(II)| > |D_3(III)|$, D_3 也是如此。這就是說: 溫度層結越不穩定, 對流層的擾動就越容易影響平流層; 而反過來, 平流層的擾動對對流層的影響, 則對於溫度層結的依賴不大 (F_1 的數值大致相等)。再比較 I, IV, V 三種情況, 表 1 指出, 它們的溫度層結是相同的, 而風速分布則不同, 這時長波或超長波情況下都有 $|D_3(V)| > |D_3(I)| > |D_3(IV)|$, 所以在風速垂直切變加大和平流層風速相應增大時, 對流層擾動容易上傳。同樣, 風速切變對平流層擾動的下傳影響不顯著。VII, VIII 兩種情況也是溫度層結相同而風速切變不同, 結果和 I, IV, V 三種情況的比較是一致的。這里特別指出 V 和 VI 的情形, V 是溫度遞減率取通常的數值, 而加大大西風風速的垂直切變, 這時平流層中, 低層為比較少見的 80 米/秒大風, 而在 VI 情況下則西風分布取通常的數值, 而對流層的溫度遞減率 Γ 取比通常稍大的 $0.8^\circ\text{C}/100$ 米, 這時不論是超長波還是行星波, D_3 的數值都顯著增大, 即不僅對流層的超長波系統可以影響平流層的發展, 對流層的行星波系統也可以對平流層環流有顯著的影響。

由此可見, 對流層內溫度遞減率 and 西風垂直切變增大, 而平流層風速也相應增大時, 不論是行星波或是超長波的波段, 對流層對平流層的影響也逐漸增大。當大氣實際層結強度接近 VI 的情況時, 這時對行星波系統, 對流層對平流層的影響也將變得十分顯著。

4. 最後, 我們討論 IX 的情況, 這是比較典型的夏季條件的風速和溫度分布, 這里考慮了 50 毫巴以上的東風帶以及夏季的風速及溫度垂直梯度較小的特點。由於夏季對流層中波數增多, $L = 20000$ 公里的波強度很小, 因此我們計算了 $L = 10000$ 公里的情形。表 2 中的計算結果表明: 不論 $L = 5000$ 公里或 $L = 10000$ 公里, D_3 和 F_1 的數值都是很小的。這說明不論是對夏季為正常波段的 $L = 5000$ 公里, 還是較長的 $L = 10000$ 公里的波, 對流層和平流層之間的相互影響是很小的。這個結果和天氣學的事實是一致的。天氣分析指出, 在夏季, 平流層環流和對流層環流有很大的差別; 夏季平流層為穩定的以極地高壓為中心的東風環流, 而對流層環流卻仍為繞極地的西風。這時, 平流層和對流層的擾動差異和各自的特性表現得格外突出, 而它們的共同性就變得比較次要和不明顯了。因此在夏季, 可以比冬季更近似地把平流層和對流層看作是兩個孤立地發展的區域。

本文以下將專對冬季層結情況作進一步的研究。

三、對流層中部擾動的向上影響

引言中已經指出, 從方程組 (3) 的 D_i , E_j 和 F_i 的量級只能看出擾動的瞬時影響, 不能看出積累的效果。因此我們將在一定的初值和邊界條件下求解 (1) — (2) 式, 然後再討論擾動影響的上下傳遞。採取的初值均為西風環流, 其上沒有擾動, 邊值則有不同的變化。

1. 方程組及其解答

我們將要討論的是對流層擾源對平流層上部 10 毫巴環流的影响，所以以 10 毫巴為第一高度，自此以下直至地面 1000 毫巴，等分為五層（見圖 2），首先討論對流層中部擾源向上的影响。現將擾源設在 604 毫巴以下的對流層，把渦度方程(1)寫到圖 2 的 1, 3, 5 層上，把熱力學方程(2)寫到 2, 4, 6 層上，得方程組：

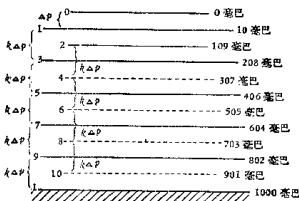


圖 2

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial^2 z_1'}{\partial t \partial x^2} + \bar{u}_1 \frac{\partial^3 z_1'}{\partial x^3} + \beta \frac{\partial z_1'}{\partial x} &= (\omega_1 - \omega_0) \frac{f^2}{g} \frac{1}{10.9(\Delta p)}, \\
 \frac{\partial^3 z_1'}{\partial t \partial x^2} + \bar{u}_3 \frac{\partial^3 z_1'}{\partial x^3} + \beta \frac{\partial z_1'}{\partial x} &= (\omega_3 - \omega_2) \frac{f^2}{g} \frac{1}{k(\Delta p)}, \\
 \frac{\partial^3 z_1'}{\partial t \partial x^2} + \bar{u}_5 \frac{\partial^3 z_1'}{\partial x^3} + \beta \frac{\partial z_1'}{\partial x} &= (\omega_5 - \omega_4) \frac{f^2}{g} \frac{1}{k(\Delta p)}. \\
 \omega_2 &= -\frac{g}{\sigma_2 k(\Delta p)} \left[\frac{\partial}{\partial t} (z_3' - z_1') + \bar{u}_2 \frac{\partial}{\partial x} (z_3' - z_1') - (\bar{u}_3 - \bar{u}_1) \frac{\partial z_1'}{\partial x} \right], \\
 \omega_4 &= -\frac{g}{\sigma_4 k(\Delta p)} \left[\frac{\partial}{\partial t} (z_5' - z_3') + \bar{u}_4 \frac{\partial}{\partial x} (z_5' - z_3') - (\bar{u}_5 - \bar{u}_3) \frac{\partial z_1'}{\partial x} \right], \\
 \omega_6 &= -\frac{g}{\sigma_6 k(\Delta p)} \left[\frac{\partial}{\partial t} (z_7' - z_5') + \bar{u}_6 \frac{\partial}{\partial x} (z_7' - z_5') - (\bar{u}_7 - \bar{u}_5) \frac{\partial z_1'}{\partial x} \right].
 \end{aligned} \right\} (4)$$

其中 $\Delta p = 10$ 毫巴， $k = 19.8$ 。在上式中，近似地把 $\frac{\partial z_1'}{\partial x}$ ， $\frac{\partial z_3'}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial z_5'}{\partial x}$ 分別代以 $\frac{\partial z_1'}{\partial x}$ ，

$\frac{\partial z_3'}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial z_5'}{\partial x}$ ，上邊界條件取 $\omega_0 = 0$ ，下邊界條件則 $z_7' = A e^{im(x-ct)}$ ， $L = \frac{2\pi}{m}$ 為波長， c 為擾源波速，在方程組中消去 ω ，假定解的形式為 $z_i' = T_i(t) e^{imx}$ ，則得

$$\left. \begin{aligned}
 s_1 \frac{dT_1}{dt} - s_1 \frac{dT_3}{dt} + iq_1 T_1 + ir_1 T_3 &= 0, \\
 -s_2 \frac{dT_1}{dt} + s_2 \frac{dT_3}{dt} - s_3 \frac{dT_5}{dt} + ir_2 T_1 + iq_2 T_3 + ir_3 T_5 &= 0, \\
 -s_3 \frac{dT_3}{dt} + s_3 \frac{dT_5}{dt} + ir_4 T_3 + iq_3 T_5 &= ir_5 A e^{-imct}.
 \end{aligned} \right\} (5)$$

并有初值条件,
式中

$$T_i(0) = 0, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\frac{f^2}{\sigma_2 k(10.9)\Delta p^2}, & \varepsilon_2 &= -\frac{f^2}{\sigma_7(k\Delta p)^2}, \\ \varepsilon_3 &= -\frac{f^2}{\sigma_4(k\Delta p)^2}, & \varepsilon_4 &= -\frac{f^2}{\sigma_6(k\Delta p)^2}; \\ s_1 &= -m^2 + \varepsilon_1, & s_2 &= -m^2 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \\ s_3 &= -m^2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4; \\ q_1 &= m[-m^2 \bar{u}_1 + \beta + \varepsilon_1(\bar{u}_2 + \bar{u}_3 - \bar{u}_1)], \\ q_2 &= m[-m^2 \bar{u}_3 + \beta + \varepsilon_2 \bar{u}_2 + \varepsilon_3(\bar{u}_4 + \bar{u}_5 - \bar{u}_3)], \\ q_3 &= m[-m^2 \bar{u}_5 + \beta + \varepsilon_3 \bar{u}_4 + \varepsilon_4(\bar{u}_6 + \bar{u}_7 - \bar{u}_5)]; \\ r_1 &= -m \bar{u}_2 \varepsilon_1, & r_2 &= -m(\bar{u}_2 + \bar{u}_3 - \bar{u}_1)\varepsilon_2, \\ r_3 &= -m \bar{u}_1 \varepsilon_3, & r_4 &= -m(\bar{u}_4 + \bar{u}_5 - \bar{u}_3)\varepsilon_3, \\ r_5 &= m \varepsilon_4(\bar{u}_6 - c). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

这是线性非齐次常微分方程组,可以令解的形式为 $T_i = T'_i + T''_i$, 其中 T'_i 为它的齐次解,而 T''_i 为特解. 令特解 $T''_i = A_i e^{-ime t}$, 其中 T_i 为常数,可由方程求得为:

$$A_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}, \quad (8)$$

Δ_1 和 Δ 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= r_5(\varepsilon_1 mc + r_1)(\varepsilon_3 mc + r_3), \\ \Delta_3 &= -r_5(\varepsilon_3 mc + r_3)(-s_1 mc + q_1), \\ \Delta_5 &= r_5[(-s_1 mc + q_1)(-s_2 mc + q_2) - (\varepsilon_1 mc + r_1)(\varepsilon_2 mc + r_2)], \\ \Delta &= (-s_1 mc + q_1)(-s_2 mc + q_2)(-s_3 mc + q_3) - \\ &\quad - (-s_1 mc + q_1)(\varepsilon_1 mc + r_1)(\varepsilon_3 mc + r_3) - \\ &\quad - (\varepsilon_1 mc + r_1)(\varepsilon_2 mc + r_2)(-s_3 mc + q_3). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

因为当 $t = 0$ 时, $T_{i0} = T'_{i0} + T''_{i0} = 0$, 故 T'_i 的初值为:

$$i = 0, \quad T'_{i0} = -A_i, \quad (10)$$

对 T'_i 所满足的齐次方程组可以进行拉氏变换,得代数方程:

$$\left. \begin{aligned} (s_1 p + i q_1) \bar{T}'_1 + (-\varepsilon_1 p + i r_1) \bar{T}'_2 &= \alpha_1, \\ (-\varepsilon_2 p + i r_2) \bar{T}'_1 + (s_2 p + i q_2) \bar{T}'_3 + \\ &\quad + (-\varepsilon_3 p + i r_3) \bar{T}'_5 = \alpha_3, \\ (-\varepsilon_3 p + i r_3) \bar{T}'_3 + (s_3 p + i q_3) \bar{T}'_5 &= \alpha_5. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -s_1 A_1 + \varepsilon_1 A_3, \\ \alpha_3 &= \varepsilon_2 A_1 - s_2 A_3 + \varepsilon_3 A_5, \\ \alpha_5 &= \varepsilon_3 A_3 - s_3 A_5. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

这样 z_i' 的解就不难求出, 我们把它写成下列形式:

$$z_i' = R_i \cos(mx + \varphi_i), \quad (13)$$

其中 R_i 和 φ_i 都是 t 的一组三角函数或双曲线函数之和, 它们的表达式这里不再列出。

2. 计算结果

我们取下列风速和温度分布(见表 3), 这相当于表 1 中 VII 的情况, 对两种波长 ($L = 5 \times 10^6$ 米, $L = 15 \times 10^6$ 米) 的扰动进行了计算。

表 3

层 次	0	1	2	3	4	5	6	7
p (毫巴)	0	10	109	208	307	406	505	604
T (°K)		200	200	200	213	234	244	254
u (米/秒)		20	20	20	16	12	8	4

f 取为 10^{-1} /秒, β 取为 1.62×10^{-2} /厘米·秒, g 取为 10 米/秒², 边界扰源的波速 c 取了下列不同的数值: $c = -6, 0.6, 10, 16, 20$ 米/秒。

但对 $L = 15 \times 10^6$ 米的扰动, 只取了前四个波速, 因为超长波以 16 米/秒以上的速度东进的情况是非常罕见的; 对 $L = 5 \times 10^6$ 米的扰动, 则没有计算 $c = -6$ 米/秒的情况, 计算结果见图 3-5。

图 3-5 是 604 毫巴上不同波速和不同波长的波在对流层及平流层各层所引起的扰动, 横坐标表示日期, 纵坐标表示所引起的扰动振幅 R_i ; 对于 604 毫巴上固定振幅 A

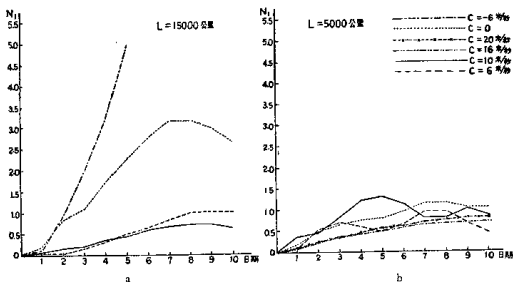


图 3 对流层中层扰源对平流层上部的影响

(纵坐标 $N_i = \frac{R_i}{A}$, 为 10 毫巴上的扰动振幅 R_i 对于 604 毫巴扰源振幅 A 的比值, 横坐标为日期。

图 a 为 $L = 15000$ 公里的情形, (b) 为 $L = 5000$ 公里的情形, 各条曲线代表不同的扰源波速)

的倍数，即 $N_1 = \frac{R_1}{A}$ 。其中 a 图为 $L = 15000$ 公里的情形， b 图为 $L = 5000$ 公里的情形。对于所有情况，我们都计算到 $t = 10$ 天，但因一般很少有扰源能维持这么久，所以四、五天以上的计算结果仅供参考而已。由图可以看出，对流层中下部的扰源是可以影响平流层的上部的，至少超长波的影响是显著的。如后退的扰源 ($c = -6$ 米/秒)，三、四天以后，在 10 毫巴等压面上可以引起相当于扰源振幅三倍以上的振动 (图 3 a)。即使波长为 5000 公里的扰动，在不长的时间内，10 毫巴所引起的响应也可以等于扰源本身的强度

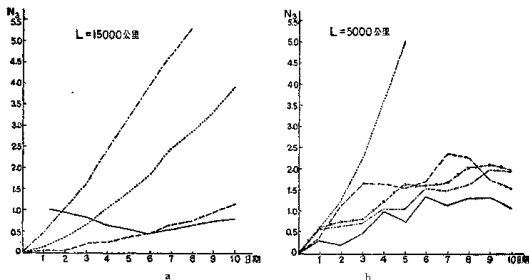


图 4 对流层中层扰源对对流层顶的影响

(纵坐标 $N_2 = \frac{R_2}{A}$ 为 208 毫巴上扰动振幅 R_2 对于 604 毫巴扰源振幅 A 的比值，

横坐标为日期，其余说明同图 3)

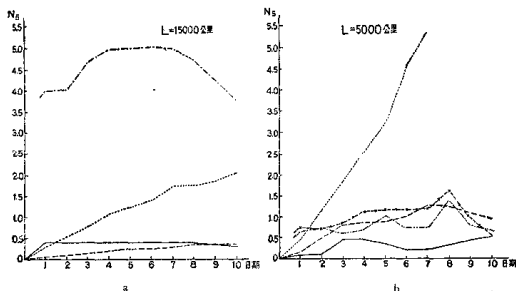


图 5 对流层中层扰源对对流层的影响

(纵坐标 $N_3 = \frac{R_3}{A}$ 为 406 毫巴上扰动振幅 R_3 对于 604 毫巴扰源振幅 A 的比值，

横坐标为日期，其余说明同图 3)

(图 3 b)。至于对于对流层顶 (208 毫巴)(图 4a, 4b), 则无论是超长波或长波都是有非常明显影响的。有意思的是: 无论是超长波或长波波段的扰动, 在对流层顶引起的扰动要比在对流层中上层所引起的扰动强度大, 这由图 4 a 与图 5 a 和图 4 b 与图 5 b 的比较可以看出。纵观图 3—5, 可以看出: 在对流层中下部的长波扰源对高层大气所引起的扰动强度先是向上增加, 在对流层顶达最强, 过对流层顶再向上减小; 而超长波扰源所引起的扰动有自下向上增强的趋势, 这个结果和上节的影响系数计算的推论有了很大的差别。表 2 中 VII 的情况指出: 对长波波段, $|F_3| > |E_3| > |D_3|$, 并没有在对流层顶达到最大的象征, 而超长波 ($L = 15000$ 公里) 的情况, $|F_3|, |E_3|, |D_3|$ 也大致相等, 也没有向上增加的趋势。由此可以看出, 扰源影响的积累效应还是重要的。

从上述的讨论可以看到, 在一定的条件下 (如超长波, 固定不动的扰源), 对流层中层的扰源是可以向上传的, 甚至还可以在平流层上层 10 毫巴处引起相当可观的扰动。

3. 波长的作用

比较图 3 a—图 5 a 和图 3 b—图 5 b, 可以发现, 不同波长的扰源在上下影响中的作用是很不一样的。我们先看它们对 10 毫巴的影响, 对于 $L = 15000$ 公里的超长波系统 (图 3 a), 10 毫巴上引起的扰动振幅除了个别情况下, 一般可达扰源振幅 1.5 倍以上, 尤其是很少移动或后退的超长波, 它的影响更为显著; 而当波长为 $L = 5000$ 公里时 (图 3 b), 不论扰源的移动速度是多少, 它们对 10 毫巴流场的影响一般都不能超过本身的 1 倍以上, 也就是说对于 10 毫巴而言, 它的影响是较小的, 这和过去的理论研究结果是一致的。然而在对流层顶上则不然 (见图 4 a, b), 一般来说超长波的影响较长波的影响为小, 如超长波在四天内, 在对流层顶引起的扰动强度为其本身强度的 0.3—2.5 倍, 而长波引起的扰动强度则可以达到其本身强度的 1—3.5 倍, 再往下到 400 毫巴左右 (图 5 a, b), 这种情况就更明显, 即长波比超长波引起的扰动更为显著。总之, 超长波透过对流层顶在平流层引起扰动的能力比长波大, 而在对流层内部, 长波引起扰动的能力反而大。这是和一般的观测事实相符合的, 即平流层中超长波显著, 而在对流层中则长波显著。

4. 扰源移动波速在高低层影响中的作用

扰源移动波速的大小, 在高低层相互影响问题中有很大的作用。在计算中, 我们取了几种波速, 从图 3 a—图 5 b 中可以看出, 对于超长波的情况, 无论是平流层上部, 对流层顶或者对流层内部, 都以后退的 ($c = -6$ 米/秒) 扰源影响最大, 其次为固定扰源的影响。对于长波系统, 对影响比较显著的对流层顶和对流层来说, 也是以固定不动的扰动影响最为显著 (因为对于行星波系统来说后退的情形不多, 所以没有用 $c = -6$ 米/秒来计算)。而一般自西向东运行的扰源 ($c > 0$), 无论对超长波系统或者长波系统影响都比较小。固定的 $L = 15000$ 公里的扰源, 相当于地球上海陆分布所引起的扰源, 因此从计算结果可以推断: 海陆分布是可以对平流层上层的流场有重要的动力作用的。

在方程(5)的非齐次项 ($ir_5 A e^{-imc}$) 中, $r_5 = m \varepsilon_4 (\bar{u}_6 - c)$, 而 \bar{u}_6 为第六层上的风速, 因此当边界强迫扰动的波速 $c = \bar{u}_6$ 时, $r_5 = 0$, 即非齐次方程组退化为齐次方程组, 这时在初值为零的条件下, 方程组得零解, 即边界为 $z'_0 = A e^{im(x-\bar{u}_6 t)}$ 的扰动对以上各层都没有影响, 而当 $c \gg \bar{u}_6$ 时, 即扰源速度非常非常大时, 它对以上各层也不再产生影响。这些结果告诉我们对层流中的扰源对其他各层流场作用的大小, 不仅与大气本身的要素 (\bar{u}, Γ) 分布有很大的关系, 而且也决定于扰源的波长和波速。在一定的温度和基本气流分布下, 某种波长和波速的扰源有最大的影响能力, 而另一种就可能没有影响。按照顾震潮^[10]所介绍的控制论的观点, 我们可以把边界强迫扰动看作是输入, 把在各层引起的扰动看作是输出, 在一定的系统结构下, 输入和输出之比决定于输入扰动的频率。因而在我们的模式里, 在一定的大气温度场、基本气流场的分布下, 不同波速的扰源就会使各层有不同的响应。

四、边界条件的影响

上面讨论的模式中, 上边界条件取的是 $\omega_0 = 0$, 现在我们把它改为 $z'_0 = 0$, 即在大气顶上永远没有扰动, 看结果有什么变化。这时先由(1)和(2)中消去 ω , 得基本的方程:

$$\frac{\partial^2 z'_i}{\partial t \partial x^2} + \bar{u}_i \frac{\partial^2 z'_i}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial z'_i}{\partial x} + \frac{f^2}{\sigma_i} \left(\frac{\partial^2 z'_i}{\partial t \partial p^2} + \bar{u}_i \frac{\partial^2 z'_i}{\partial x \partial p^2} \right) = 0, \quad (14)$$

p 方向上的差分仍如图 2, 604 毫巴上波长为 $L = 15000$ 公里, 波速 $c = 0$ 的扰源对 10 毫巴的影响计算结果, 见表 4。

表 4 $z'_0 = 0$ 的边界条件下层扰动对 10 毫巴的影响

日 期	1	2	3	4	5	6	7	8
10毫巴上N值	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01

由表 4 指出, 这时对层流中部的扰动对平流层基本上没有作用。把扰源放在图 2 的 1000 毫巴上, 再进行计算, 结果也是一样。把此结果和图 3 a 中 $c = 0$ 的曲线比较, 可以看出边界条件的影响是非常大的。对于扰源在 1000 毫巴上的情况, 我们发现所激发的扰动强度迅速向上减小, 这和巢纪平^[12]和 III. A. 慕萨也良 (Мусаелин)^[13] 等大地形影响指数向上递减的理论相符合。但这不能说明地形分布定常扰动的影响, 很难到达平流层上部, 这可能是边界条件引用不当的缘故。天气学事实指出, 平流层各层都有十分明显的定常的槽脊分布, 这种比较固定的槽脊系统应该和地面的地形海陆分布有关系。因此根据这一节的讨论, 如果巢纪平和 III. A. 慕萨也良在他们的模式中, 把 $p = 0, \varphi' = 0$ 的上边界条件换为 $p = 0, \omega = 0$, 大地形的动力作用应该在平流层里显著起来。

上述结果的物理意义是明显的, $\omega_0 = 0$ 的假定相当于把大气看作是一个自由表面, 因此下层的扰动有可能在这层及其附近的大气层引起相应的高度变化。而 $z'_0 = 0$ 的条