

大气环流的奇偶对称性(I) 理论依据和气候特征^①

管兆勇 徐建军 王鑫兴

(南京气象学院)

提 要

文中使用奇偶对称分析方法,利用观测资料对全球环流的奇偶对称分量的分布做了分析,指出奇偶分布的气候特征及其时间演变能反映南北半球海陆差异带来的影响,揭示大气对辐射加热响应的时问尺度、环流的波动结构及全球环流季节性调整等一些特征。

关键词:大气环流,对称性,理论依据,气候特征

一、引 言

从全球范围考察平均环流的状态时,若从现象学的角度看,南、北半球平均环流^(1,2)最基本的点应当是它们相对于赤道平面的对称和反对称性(以下简称奇偶对称性)。这一性质在各高度上的平均环流中均得到清楚的反映;并且存在明显的季节变化。后者实际上是环流在时间域上的奇偶对称性的反映。

从动力学角度看,大气环流的奇偶对称性源于控制大气环流主要因子⁽³⁾的奇偶对称性。地球自转(以柯氏参数 $f=2\Omega\sin\varphi$ 表征)可以认为是一种奇对称作用;地球绕太阳公转及地轴相对于黄道面的倾斜使地气系统吸收太阳辐射能随纬度出现明显的季节差异,在两分点附近它们呈偶对称分布,而在二至点附近,则存在明显的奇对称分量;地球表面的不均匀性呈现出明显的奇对称性,以海陆差异为例,南北半球陆地面积之比 1:2,并且在地理分布上呈现出明显的疏分布⁽⁴⁾。可以认为,平均环流的奇偶对称性是上述因素的综合作用的结果。

在以往的工作中,针对平均环流奇偶对称性的研究已有一些,这之中有正压过滤模式中的对称和反对称运动⁽⁵⁾,正压大气对称和反对称运动的数值试验⁽⁶⁾,大气对称和反对称运动的物理性质及其间的能量转换^(7,8)及热带平流层中存在的 Kelvin 波和 Rossby 一重力混合波的分析⁽⁹⁾。所有这些都从理论和数值方法出发研究了环流的奇偶对称性质,其结果对环流变化机制的深入认识具有重要意义。但是用观测资料对全球对流层中奇偶对称性的气候特征的分析研究尚不多见。那么奇偶对称性的气候特征如何呢?象 ENSO 事件这样的热带海洋温度局部异

^① 1993 年 12 月 25 日收到。

本工作得到“长期天气预报理论和方法研究”课题的资助。

常事件是否可引起奇偶分量的显著异常呢?

本文阐述平均环流奇偶对称性的气候特征。关于奇偶分量的异常之诊断方法和主要结果将另文介绍。

二、理论依据

对于任一标量函数 $F(\lambda, \varphi, p, t)$, 其关于 φ 的变化有下列分解:

$$F(\lambda, \varphi, p, t) = F_e(\lambda, \varphi, p, t) + F_o(\lambda, \varphi, p, t) \quad (1)$$

关于 $\varphi=0$, F_e 为偶对称分量, F_o 为奇对称分量, 满足:

$$F_e(\lambda, \varphi, p, t) = \frac{1}{2}[F(\lambda, \varphi, p, t) + F(\lambda, -\varphi, p, t)],$$

$$F_o(\lambda, \varphi, p, t) = \frac{1}{2}[F(\lambda, \varphi, p, t) - F(\lambda, -\varphi, p, t)] \quad (2)$$

这里 $\varphi=0$ 表示赤道所在纬度。从此, 容易地把(1)、(2)写入大气动力学方程组, 并可进一步讨论它们的意义^[7,8]。这些公式可参见文献^[7,8]。

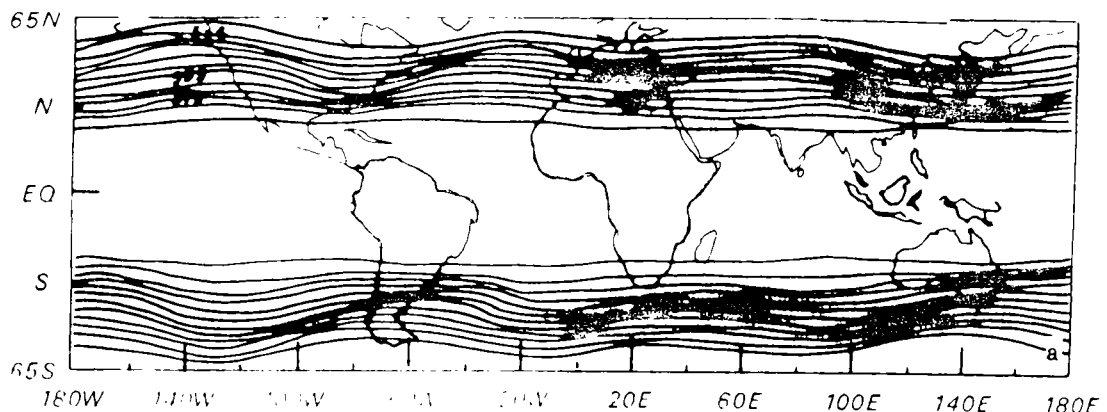
根据上列考虑, 我们在本文中首先探讨奇偶对称分量之相互作用及各项演化的结果——表征环流特征的基本要素的奇偶分量的时间演变和分布特征。

三、观测事实研究: 奇偶分布的气候特征

根据奇偶分量的分解方式, 利用 1980—1986 年 7 年月平均格点资料分析了位势高度 Φ 、温度 T , 纬向风 u 和经向风 v 及其合成矢量场的关于赤道奇偶对称分量的全球分布。

1. 位势高度场揭示的奇偶特征 $\Phi = \Phi_e + \Phi_o$

下图是北半球冬、夏季位势高度场的奇偶分量分布情况。



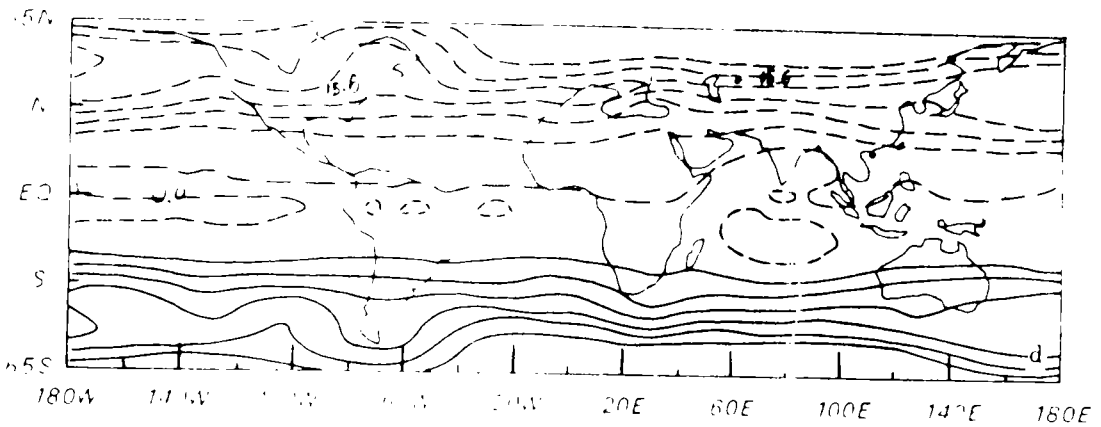
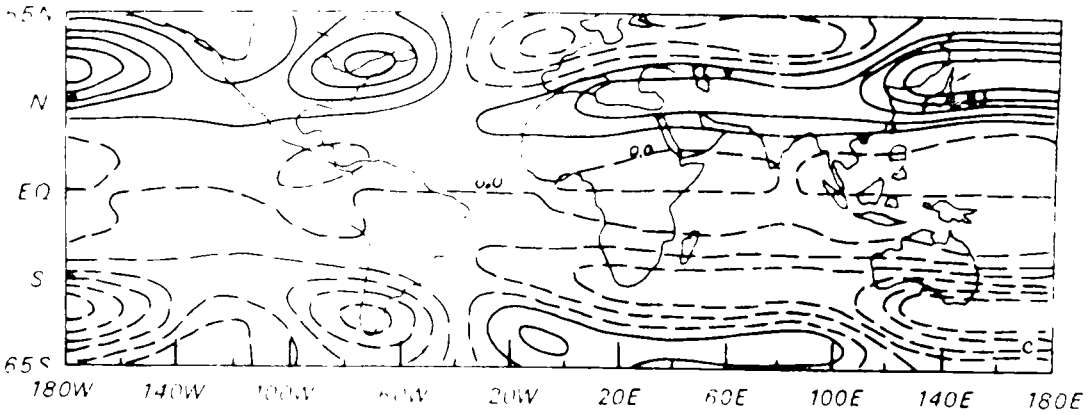
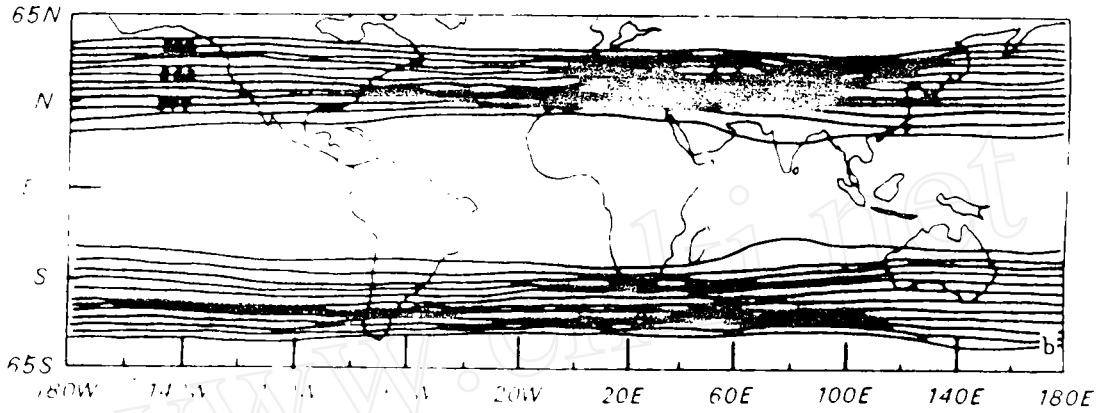


图1:7年平均1月及7月份位势高度场奇分量(图1c、1d)和偶分量(图1a、1b)的空间分布[在a、b中实线为正,虚线为负;在图c、d中,虚线为正,实线表示负值。以下各图相同]

由图可见,偶分量展示的特征表明环流呈纬向分布型而波动的强度在冬夏季有一些差别。在纬度不是很低的地区,等 Φ_e 线的分布基本反映了两半球对称的基本气流结构(西风)。在奇对称图上 Φ_o 的水平分布有较为复杂的特征。北半球冬季期间,中高纬度(60°N 以北)要比南半球 60°S 以南的位势场高,而中纬度地区则存在相反的奇对称分布,在热带地区,北半球的位势亦高于南半球位势。在北半球夏季,整个北半球位势均高于相对纬度上南半球的位势高度,形成了总体上奇分量的北高南低形势。且环流亦较为平直。纵观 12 个月的演变,位于北美大陆,欧洲大陆及太平洋上空中纬度区域的低值区经过减弱至 5 月份转变成夏季的基本形势,而恢复至冬季图式是在 11 月份。这种奇分量的特殊分布和演变显然与南北半球大陆分布不同而产生的动力作用和对太阳辐射的吸收率不同有关。而奇偶环流的纬向结构则与两半球上相应的准定常(因这里是月平均的)波动有关。

定义两半球间环流的对称程度指数: $I_o = \Phi_{o\max} - \Phi_{o\min} = 2|\Phi_{o\min}|$,这里 $\Phi_{o\max}$ 和 $\Phi_{o\min}$ 是奇对称分量 Φ_o 在球带($65^\circ\text{S} \sim 65^\circ\text{N}$)上的最大值和最小值,则与上图相应,在该球带上, I_o 的变化见下表:

表 1:南北半球奇对称度变化(I_o 单位:位势什米)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_o	42.3	46.7	39.4	19.2	31.4	40.4	46.8	51.3	42.2	31.8	19.2	32.6

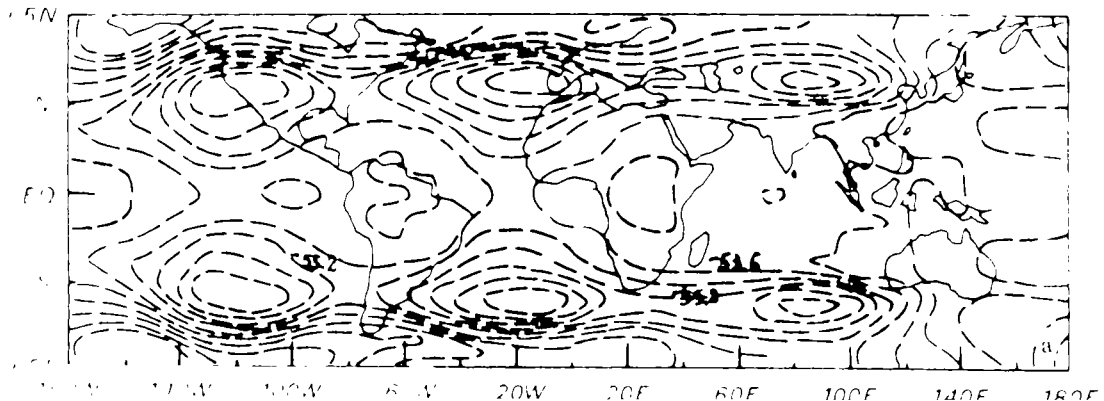
由此看到大气环流在季节转变过程中最强的南北不对称出现在 2 月及 8 月份,而奇对称程度最弱的时间则在 4 月及 11 月。由于太阳辐射的变化及大气与下垫面的相互作用,大气内部动力过程控制的大气对外强迫响应的的时间尺度由表 1 可以看出。如果两半球下垫面性状完全对称,则奇对称分量的产生及大小变化应受重大异常事件(如 ENSO)和内部动力过程控制(非线性),而大气对辐射强迫响应的的时间尺度应在一个月左右,这已是公认的结果。其与 12 月 22 日、6 月 22 日的冬至夏至前后 I_o 达到极大值相一致。但是,3 月 21 日春分之后 I_o 第一次达到极小;而 9 月 23 日秋分之后 I_o 则在 11 月达到极小,这似乎表明秋季大气对太阳辐射的响应时间要比春季响应时间长,这可能与大气在二分点时不同的初始状态有关。

由表 1 还可看到 I_o 随时间的变化速率在冬夏转换中有显著的差别, $|I_{o,t+1} - I_{o,t}|$ 在 3 月至 4 月达 20.2,而在其他月份间则小于 13.4,这表明全球环流的最剧烈的调整出现在春分之后。而 8 月份的 I_o 要强于 2 月份的 I_o ,这充分显示了冬季季风活动对两半球环流奇对称的不同贡献。

上列结果在 200hPa 高度场分析中亦可得到,为简洁,不予赘述。

2 200hPa 温度场显示的奇偶对称性 $T = T_e + T_o$

图 2 是 200hPa 高度场在 1 月及 7 月份的奇偶对称分布。



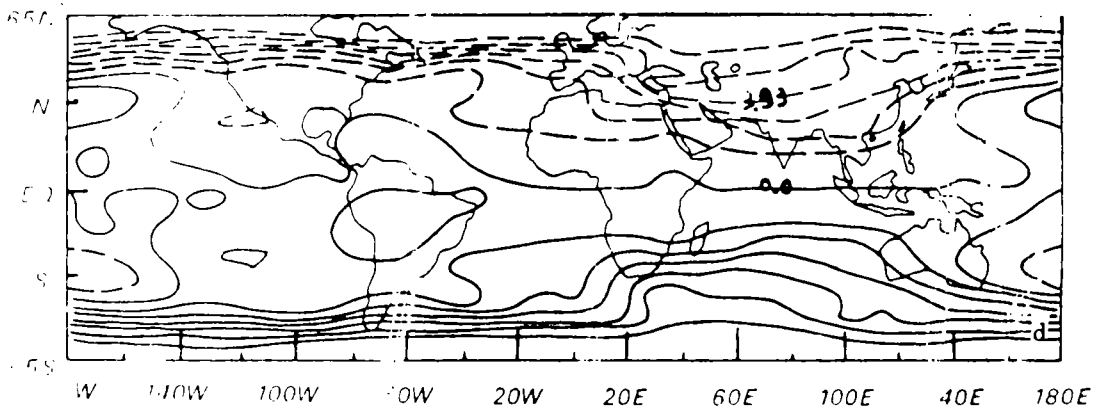
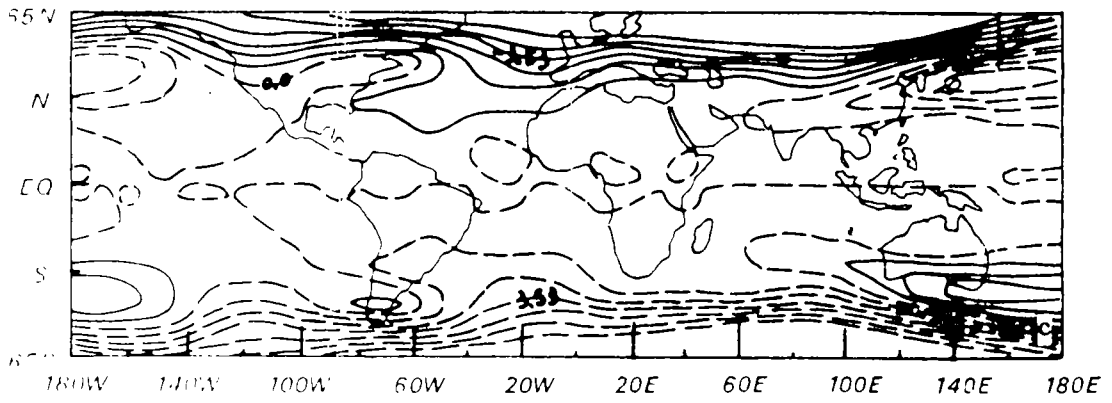
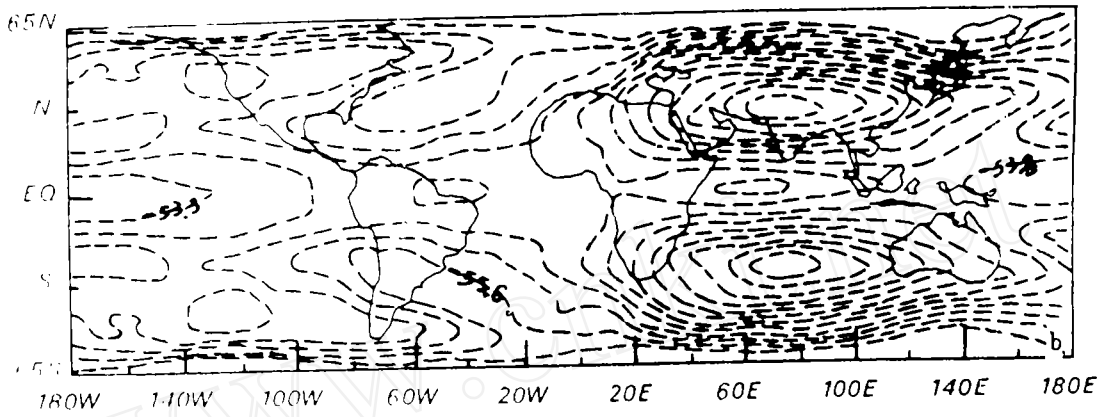


图 2:1 月份及 7 月份 200hPa 温度场奇偶分量分布 [a,b 为偶分量 T_e ;c,d 为奇分量场 T_o]

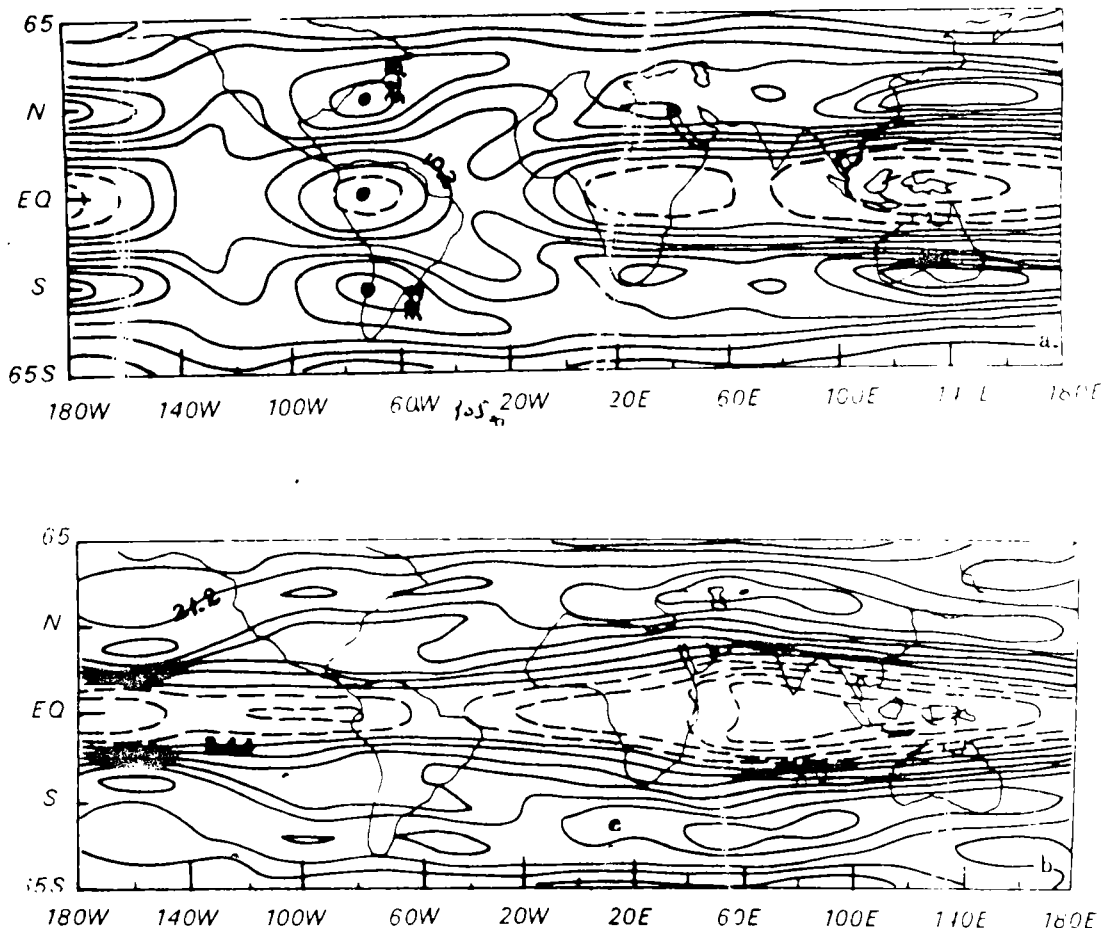
在偶分量图上,中纬度地区显示出清楚的三波扰动(冬季),分别有三个中心位于东太平洋、东大西洋和青藏高原上空。随着夏季到来,这纬向排列的三个冷中心减弱而在 70°E 上空出现强大的暖性对称中心,赤道上空则有冷中心,这种分布与季风活动关系密切。70°E 处暖中心由 5 到 6 月间自赤道 100°E 处发展北进形成。

在奇分量图上,北半球冬季大气温度在 50°N 以北的中高纬度及 20°N 以北的大西洋上空要较南半球对称的区域低,在 20°N 以南至赤道则低于南半球热带地区。在中纬度太平洋上空则比南半球中纬度太平洋上空暖。在 7 月份,这种情形正好相反。因此,季节变化在太平洋上空则出现反位相的变化特征。1、7 月形势的反转在 3—4 月份并首先从 60°N 以北及 60°S 以南的极区开始和 0—20°N 之间太平洋上空冷区的北移。欧亚大陆上空的冷区则在 5 月份消失。1 月到 7 月形势的彻底反转出现在 6 月份。由 7 月到 1 月,最强的冷却首先从 30—50°N 的欧亚大陆上空开始,在 12 月份彻底反转。检查奇对称的强度,则在 1 月与 7 月最强,而在 4 月及 10 月份最弱,这与高度场反映的特点不同。

因此,在全球大气环流的季节转化中,温度场的调整首先应当考虑极区温度场的变化(由春到夏),和由夏到冬时的中纬度欧亚大陆上空的温度变化(这里其他各月的图略)。

3. 关于纬向气流 $u = u_e + u_o$ 。

由实测纬向风分解的纬向气流的奇偶对称分量在 200hPa 上的分布见下图。



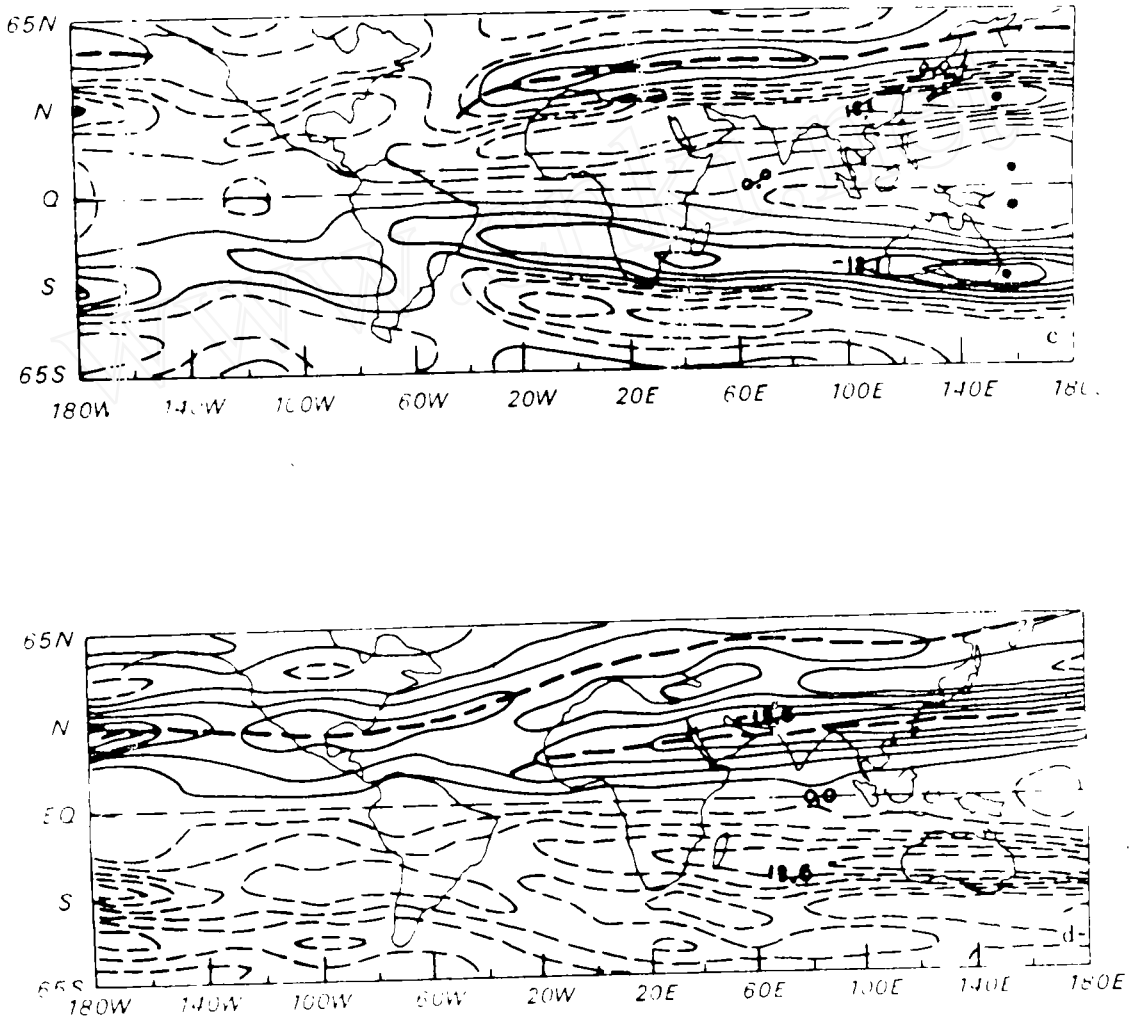


图3:7年月平均1月及7月纬向风的奇分量分布(其中:图3a、3b为偶分量,实线为正,虚线为负。图3c、3d为奇分量,虚正实负。)

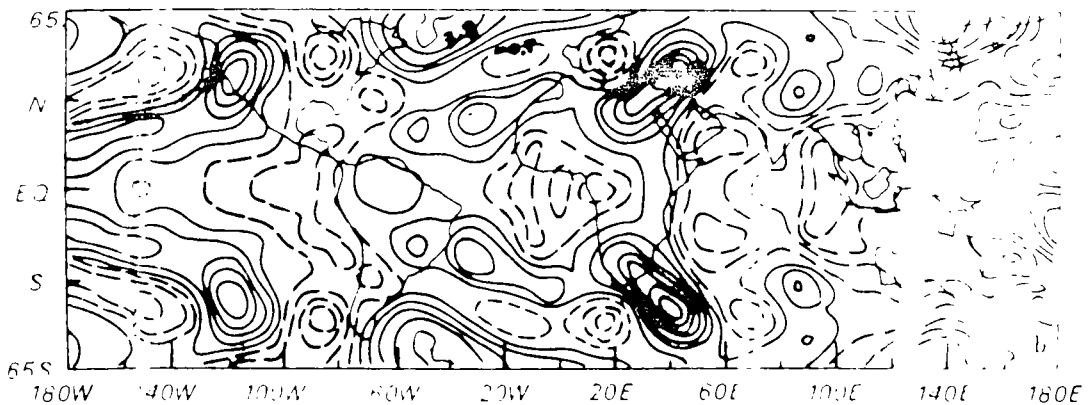
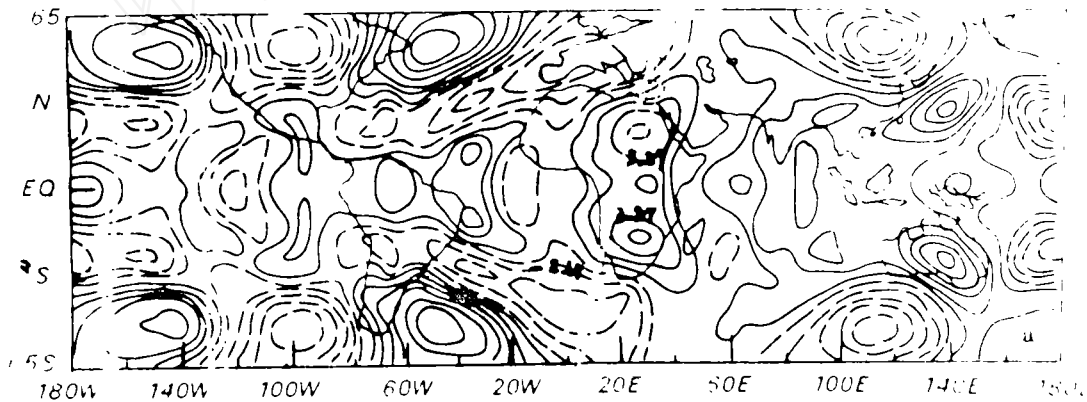
由图可见,偶对称的西风带上急流中心在1月份位于西太平洋及中国大陆沿岸所处经度位置,而在热带地区大西洋及东太平洋上空则维持西风,而在7月份,西风减弱,中心位置西移至 80°E 附近。受季风影响,印度洋上空出现东风区,而在赤道附近的其它位置上也为东风气流。一个显著的特点是主要西风急流中心所在同一经度上可找到相应的东风大值区。即纬向

风的偶对称分量的扰动有显著的经向排列。

奇对称分量反映出两半球纬向流动的不对称,当南半球夏季北半球冬季时,在低纬度及高纬度,北半球有强于南半球的西风,而在中纬度地带,存在一个东风补偿区,该地区的实测西风较南半球同样纬度上的西风弱。但这样的在夏季(北半球)时,则正好相反。除了与偶对称环流一样有扰动的经向排列结构之外,一个显著的特征是北半球奇对称东风带在球面上有由低纬向高纬绕行北进的趋势,这在每张月平均图(其它月份图略),其起始于大西洋上空(见图 3d 中点线),终止于 65°N 以北或 65°N 附近。

4. 关于经向运动 $v=v_e+v_o$

矢量场的奇偶对称性这样定义(与流函数场相应): $\vec{V}_e = u_e \vec{i} + v_e \vec{j}$, $\vec{V}_o = u_o \vec{i} + v_o \vec{j}$. 这里对标量 v 作分解。对 200hPa 经向风的分解如下图。



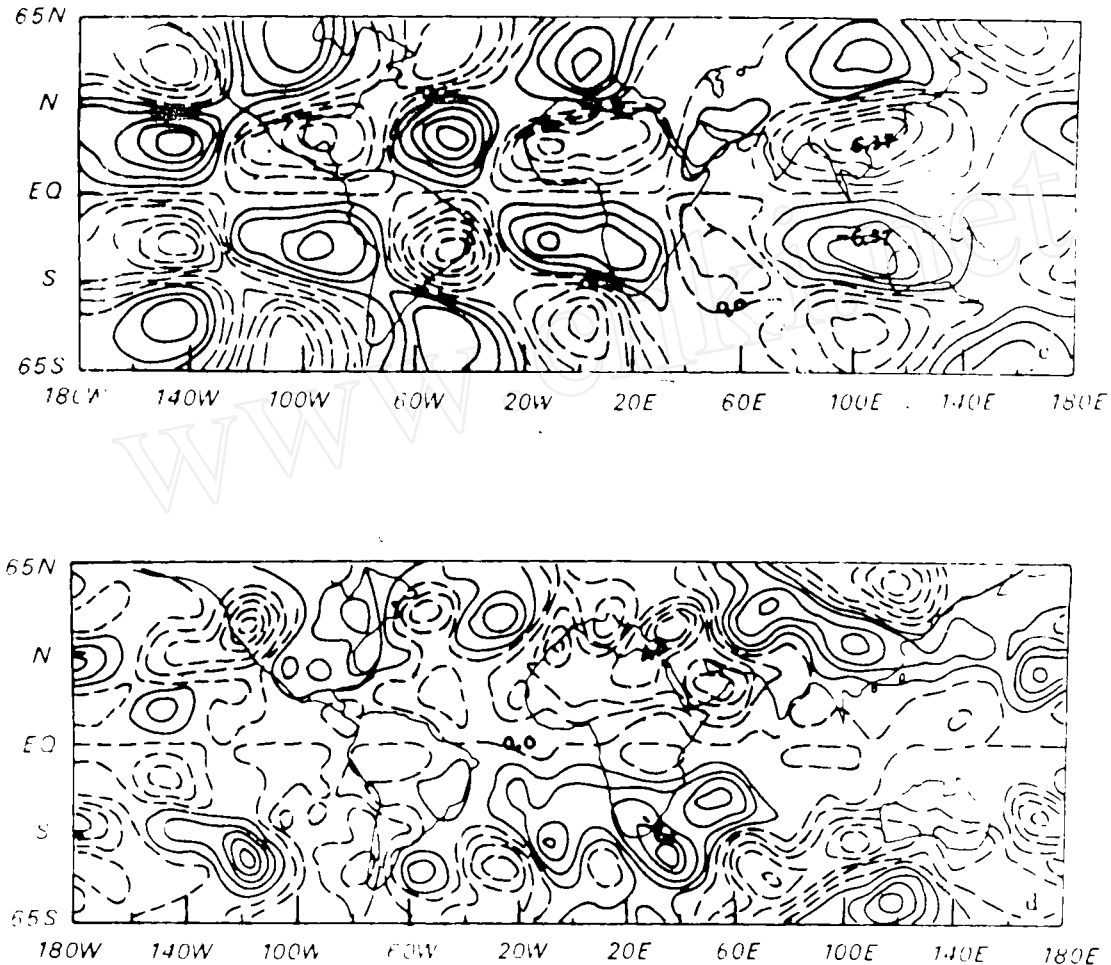


图4: 多年月平均1月及7月份经向风的奇偶分布(等值线说明同图3)

由图见偶对称(奇对称的南风矢量)图上表现出的冬季(北半球)经向运动在高纬度为二波型:太平洋及大西洋的中高纬地区维持南风区,而大陆上空则维持北风。在赤道地区,有三个主要南风区,分别位于 $100^{\circ}\text{W}-20^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{E}-40^{\circ}\text{E}$ 和 $60^{\circ}\text{E}-150^{\circ}\text{E}$ 。与季风活动相关,7月份,亚洲季风区上空的这一南风区变为向南的越赤道气流区。与墨西哥季风相应的风向转变亦是,但非洲大陆上空,这种现象不很明显。1月份最强的南风出现在 140°E 的中低纬及 50°W 处的中纬度,而7月最强的南风则出现在 40°E 的 30°N 、 30°S 附近。偶对称分量显示出的扰动结构的纬向排列在中高纬度比较清楚,在低纬度不很清楚。

在奇对称(偶对称的向量场)图上,1月份所展示出的经向风扰动很有趣。以 32.5°N 、 32.5°S 为界线,在赤道两侧两个正负相间的排列,且这两个排列的位相正好相反。在整个图面上,纬向方向上具有三波结构,经向方向上呈二波结构。它与偶对称分量的波动特征不同。赤道上, u_0

$=0$,但辐散辐合也应具有三波的特征。

北半球夏季到来时,奇对称的经向风扰动减弱,且低纬度的扰动结构的纬向排列特征不明显,而在 $\pm 35^\circ$ 附近,纬向扰动结构排列仍很清楚。

四、解释与联系

上列对 7 年平均场所展示的各要素的奇偶分布的主要特征进行了描写。但是何以形成这样的特点及各种量场之间的联系尚需进一步阐明。诚然,奇偶分布是由数学处理而得,但其反映了 Fourier 或球函数分解中的奇对称波与偶对称波。对于全球环流这个整体而言,以往的环流分析虽注重两半球之间的异同但并未给予专门研究。一个偶对称动力学模型的结果——赤道 Kelvin 波以及奇偶分量同时分析的赤道重力 Rossby 混合^[10,9]给出了低纬大气波动的描述,而赤道海温异常所引起的强迫响应使得南北两半球应存在异常结构,它们之间属偶对称分布。那么,多年平均的逐月奇偶对称性则是太阳辐射强迫之下,因两半球海陆分布差异,通过两半球相互作用以及内在的大气波动过程及物理量输送过程而产生的结果。

1. 偶对称分量的分布反映了全球环流的基本结构,如中高纬度的基本西风气流等。而在 1、7 月份的差异应反映南北海陆差异的影响。

2. 奇对称分量的分布反映了大气运动和季节的变化,而其在 1、7 月份分布的南北不完全性反转,也反映了南北半球海陆差异的重大影响。同时,天文节气中的二分点与奇对称程度达到极小的日期差应反映大气对太阳辐射热力强迫响应的时(尺)度。

3. 急流中心的经向排列(图 3a, b)反映了气旋性或反气旋性环流系统中心南北侧由水平准不可压而规定的气流强度空间变化的一致性。而奇对称的经向风(即偶对称的向量场)的扰动结构反映出大气二维波动特征。

4. 两半球相互作用过程中,偶对称(奇对称的经向风矢量)的经向风分量代表着越赤道气流,它使得两半球间产生质量、动量、能量交换。因其在赤道上达到极值,故偶分量经向风对赤道上空的铅直环流没有贡献。

5. 由 1 月至 7 月全球环流的季节性调整首先由极区开始,这应当与极区受太阳照射的南北极间的反转相联系。而西风气流的变化与高度场间的联系由准地转关系约束。奇偶部之间存在着相互作用^[7,8],这使得在南北半球环流变化的过程中,奇偶分量的变化并不相独立。

五、结束语

奇偶对称分析(南北半球间)方法在数学上相当于球函数展开后对奇对称部分和偶对称部分,进行单独分析的方法。在物理上,是对大气环流经向结构的两个正交分量的剖析。通过对大气动力学方程组的分解,可以进一步了解;全球环流作为一个整体时,其变化在这两种分量上的体现。利用观测资料对奇偶分析的气候特征的探讨,可指出:奇偶分布及其变化可以揭示南北半球海陆分布差异及季风活动带来的影响,可以了解大气在不同季节对太阳辐射强迫响应的时(尺)度,可以揭示大气大尺度波动结构等等。

我们将在本工作的第二部分中更为深入地讨论奇偶对称程度的度量指数,奇偶性和全球

重大气候异常事件的关系。

参 考 文 献

- [1]Palman, E., and C. W. Newton, Atmospheric circulation systems, Academic Press, 1969
 [2]Погосян, X. П., ОБщая Циркуляция Атмосферы, Гидрометеонагот, 1972
 [3]叶笃正,朱抱真,大气环流的若干基本问题,科学出版社,1958
 [4]Tchernia, P., Descriptive Regional Oceanography, Pergamon Press, 1980
 [5]廖洞贤等,正压过滤模式中的对称和反对称运动,气象学报 44(1986),28-36
 [6]余海安等,关于正压大气对称运动和非对称运动的数值试验,气象学报 48(1990),284-292
 [7]廖洞贤等,大气对称和反对称运动的物理性质及它们之间的能量转换,气象学报,48(1990),385-395
 [8]王诗文等,对多层原始方程模式的合理性分析(中期数值预报研究成果汇编(四)),(1990),71-87
 [9]杨云峰,热带平流层低层的对称运动和反对称运动,15(1991)
 [10]Matsuno, T., Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, J. Meteor. Soc. Japan. 44 (1966),25-43

ODD AND EVEN SYMMETRY OF ATMOSPHERIC CIRCULATION—PART I: THEORETICAL BASIS AND CLIMATIC CHARACTERISTICS *

Guan Zhaoyong, Xu Jianjun, Wang Panxing
 (Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstyact

Analysis is done of the distribution of odd and even symmetric components of circulations on a global basis in terms of observations and technique for the odd / even symmetry, indicating that climatic features of the component patterns and their temporal evolution are able to reveal their influence of land-sea discrepancy in the Northern and Southern Hemispheres, the time scale of atmospheric response to radiation heating, circulation waveform structure and seasonal adjustment of global circulation.

Key words: Atmospheric Circulation, Symmetry, Theoretical Basis, Climatic Characteristics