

北半球月平均环流异常垂直结构的综合分析^{*}

靳立亚 张邦林 丑纪范

(兰州大学大气科学系, 兰州 730001)

提 要

本文用一种时空综合的经验正交函数分析方法, 对北半球 100、500 和 700hPa 三层月平均高度距平场进行展开, 得到了不仅能反映各层高度距平场本身的空间结构分布特征, 而且能同时反映各层高层距平场之间有机联系的特征向量场。分析结果表明: 北半球月平均环流异常在垂直方向上具有明显的相当正压性结构特征。

关键词: 时空综合; 环流异常; 经验正交函数; 相当正压性。

一、引 言

目前一般认为, 大气环流的持续异常是造成大范围天气异常的直接原因。因而对大气环流异常的分布结构及其演变规律的研究是深入认识长期天气过程和短期气候变化的重要课题之一。国内外许多工作对大气环流空间分布结构的基本特征、形成和演变的物理原因做了大量研究, 得到了一些有意义的结果, 如大气环流异常的相当正压性特点和空间结构上的遥相关分布^[1, 2]等等。然而, 过去研究大气环流异常, 由于缺乏资料, 往往只限于一个高度。近年来虽有不少工作对不同高度环流异常的水平结构进行比较, 以研究大气环流异常的垂直分布结构^[3-5], 但这些工作大多是分别对不同高度的大气环流异常结构进行研究, 然后再分析它们之间的相关性, 从而揭示环流异常的三维空间结构分布特征。然而大气环流异常状态的三维空间结构具有内在的统一性, 这启示我们将大气环流异常三维空间分布作为一个整体结构来研究。为此, 我们设计了一种时空综合的经验正交函数分析方法, 并利用 1956—1983 年北半球 100、500 和 700hPa 月平均高度距平资料研究了北半球月平均环流异常的空间分布结构, 其中着重探讨了环流异常的垂直结构特征。

二、时空综合的经验正交函数分析方法

经验正交函数 (EOF) 展开分析方法在气象上已获得了广泛的应用^[6]。由于正交函

1990 年 10 月 31 日收到, 1991 年 4 月 1 日收到修改稿。

^{*} 国家教委高等学校博士点专项科研基金资助。

数根据气象要素的主要特征来确定, 因而没有固定的形式; 同时正交函数展开又能将高维空间中的点变换到低维空间, 从而使信息压缩和集中。

时空综合的 EOF 方法就是在经验正交函数的基础上, 通过对不同气象要素场资料矩阵作某种变换, 使该矩阵含有不同气象要素场不同时间和空间点上的信息。对这种经过变换的矩阵作经验正交函数展开, 得到的特征向量场不仅能反映某要素场本身的空间结构特征, 而且还能反映不同要素场之间相互联系和作用的信息, 其时间函数则刻画了这种特征向量场的时变过程。

设第 l 层等压面上的月平均位势高度距平场资料矩阵为 F_l , 其中 N 为时间样本数, M 为空间格点数。令 L 个等压面层上的资料矩阵 F_l ($l=1, 2, \dots, L$) 为矩阵 F 的子块矩阵, 且按下列方式排列:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & \cdots & F_L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$N \times LM \quad N \times M \quad N \times M \quad N \times M$

对矩阵 F 做经验正交函数分解的基本过程是首先求实对称矩阵 S :

$$S = F' \cdot F = \begin{bmatrix} F_1' \\ F_2' \\ \vdots \\ F_L' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & \cdots & F_L \end{bmatrix},$$

$LM \times LM \quad LM \times N \quad N \times LM$ $M \times N \quad M \times N \quad \cdots \quad M \times N$

F' 为 F 的转置矩阵, 即

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1L} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{L1} & S_{L2} & \cdots & S_{LL} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$LM \times LM$

式中子块矩阵 $S_{ij} = F_i' \cdot F_j$ 为第 i 层等压面与第 j 层等压面上月平均高度距平场资料之间的协方差矩阵, 当 $i=j$ 时, S_{ii} 则是第 i 层等压面上月平均高度距平场资料自身的协

方差矩阵。所以实对称矩阵 S 中不仅含有各层等压面上的距平场本身的分布结构信息, 还含有各层等压面距平场相互联系的信息。由经验正交函数分解的基本原理, 实对称矩阵 S 的特征向量场 V 构成了对矩阵 F 展开的基本场, 因而特征向量场 V 实际上也包含着各层等压面距平场之间相互影响和作用的信息, 这也正是时空综合的经验正交函数分解方法的优点所在。用数学表达式写出原始资料矩阵 F 的分解过程为

$$F = \sum_{K_0} T \cdot V, \quad (3)$$

$N \times LM \quad K_0 \times N \quad K_0 \times LM$

式中 K_0 为截断波数。如果取前 K_0 个特征向量场拟合原距平场, 则经验正交函数展开

的方差拟合精度表示为^[6]

$$Q(K_0) = \sum_{k=1}^{K_0} \lambda_k / \sum_{k=1}^{LM} \lambda_k, \quad (4)$$

这里 λ_k 为第 k 个特征向量所对应的特征值。

(3)式中 T 为经验正交函数展开的时间系数矩阵, 它包含着各等压面上的距平场整体结构的时间演变特征。 V 是经验正交函数展开的特征向量矩阵, 显然它也可以看作由 L 个子块矩阵所构成, 即

$$V = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_L \\ K_0 \times M & K_0 \times M & & K_0 \times M \end{bmatrix},$$

这里 V_l ($l=1, 2, \dots, L$) 代表某一特征向量的空间函数在第 l 层等压面上的分布结构。由此可知, 通过时空综合的经验正交函数展开, 可以一次给出各等压面上的空间分布, 因而通过分析满足一定拟合精度的前几个特征向量场 $V_{K_0 \times LM}$, 能够从整体上了解月平均高度距平场的三维空间分布特征。

三、特征向量场的分析

本文所用资料为国家气象局国家气象中心分析整理的 1956—1983 年 1 月和 7 月的 100、500 和 700hPa 三层北半球 $10^\circ-80^\circ\text{N}$ 地区 $10^\circ \times 10^\circ$ 经纬网格上的格点资料。按照公式 (1) 所指定的顺序分别将 1 月和 7 月的高度距平资料排列成两个二维资料矩阵 F_1 , F_2 , 这里 $N=28$, $L=3$, $M=288$, 对这两个矩阵做经验正交函数展开。表 1 给出了 1 月和 7 月前 10 个特征向量场对高度距平场的累积拟合精度 Q , Q 之值是根据公式 (4) 求出的, $K_0=10$ 。

表 1 前 10 个特征向量场对距平场的方差拟合精度 Q

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	1 月	0.454	0.582	0.652	0.715	0.775	0.813	0.846	0.872	0.891
	7 月	0.179	0.317	0.428	0.508	0.577	0.628	0.674	0.717	0.750

由表 1 知, 7 月份经验正交函数展开的前 10 个特征向量场拟合了距平场总方差的 78.2%, 而 1 月份前 10 个特征向量场拟合的总方差(累积方差)高达 90.6%, 特别是冬季(1 月)第一特征向量场的方差贡献就占总方差的 45.4%。这表示各层高度距平场可以用较少的三维特征向量场来拟合, 因此在下面的讨论中我们主要分析前三个特征向量场的空间结构特征。

由于每一个特征向量场都有两个形势完全相反的距平型, 而与其对应的时间展开系数可以是正或负。为了简洁起见, 在此只讨论时间系数为正值的情况。图 1 给出了冬季(1 月)第一特征向量场对应 100、500 和 700hPa 等压面上的空间函数分布。

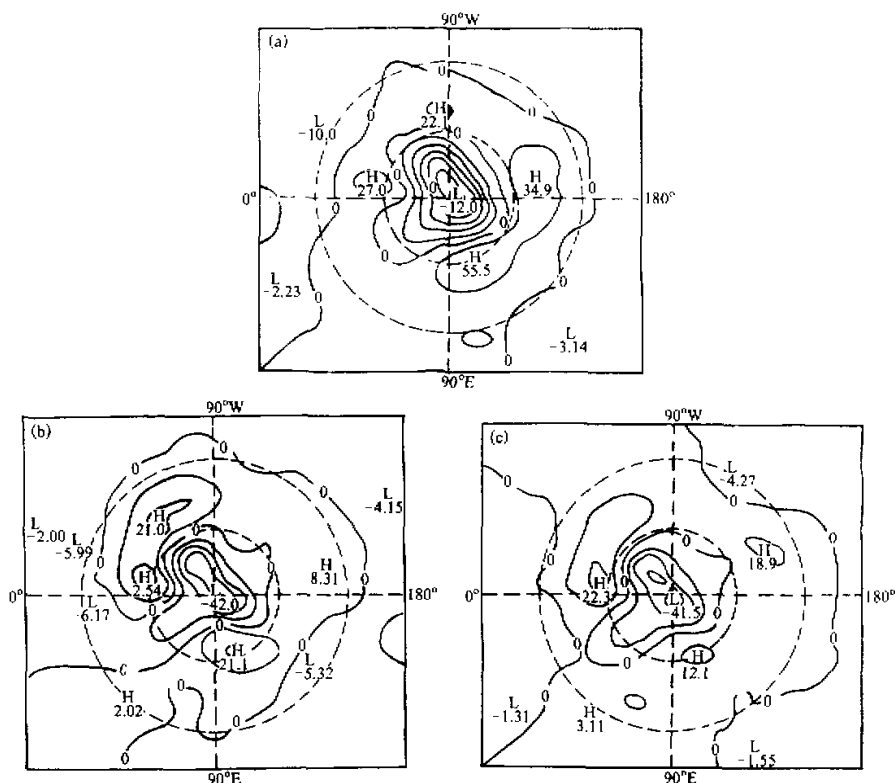


图 1 1 月第一特征向量场分布
(a) 100hPa, (b) 500hPa, (c) 700hPa.

由图 1 可见, 冬季第一特征向量场对应的三层等压面上, 从高层的 100hPa 到低层的 700hPa, 环绕极地上空均为距平低值, 而几乎半球的中高纬度地区上空为距平高值区, 热带和副热带地区为距平低值区。比较 100、500 和 700hPa 三层等压面上的空间函数分布, 可以发现它们的距平场分布结构特征极为相似。其中 500hPa 等压面上距平场的分布与冬季北半球对流层中部西风带中的三个平均槽脊的位置有很好的对应关系。在 7 月的第一特征向量场中 (图 2), 500hPa 等压面上的空间函数分布特征, 极区附近以 (75°N , 30°W) 为中心, 有一距平高值区, 在与之相应的中高纬度地区有三个明显的距平低值区, 分别位于太平洋上空、大西洋到北美上空以及欧洲北部上空。比较三层等压面上的空间分布结构, 可以看到它们的距平场分布结构仍然具有较好的相似。略有不同的是, 从高层 100hPa 到低层 700hPa, 极区附近的距平高值范围有减小的趋势, 而中纬度地区的距平低值区范围有向南扩展的趋势。上述结果初步说明, 时空综合 EOF 展开的第一特征向量场十分直观地反映了 100、500 和 700hPa 等压面上高度距平场的有机联系, 各层之间的整体结构在垂直方向上表现出明显的一致性, 即正压性特点。

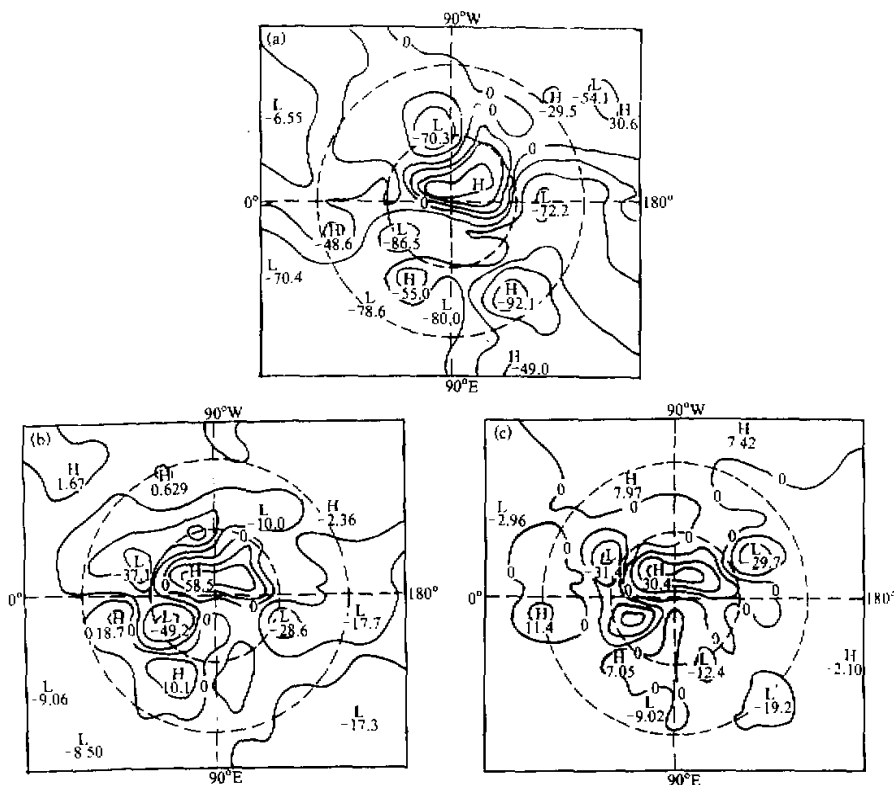


图2 7月第一特

(a) 100hPa, (b) 500hPa, (c) 700hPa.

图3是冬季(1月)第二特征向量场对应100、500和700hPa的空间结构分布图。由图可见,500hPa等压面上空间函数的分布,在热带及副热带地区的距平场是距平低值区;在中高纬度地区,距平场呈三波型结构,其中中纬度太平洋到阿留申地区为距平高值区域,而北美北部是距平低值区,在美国南部与东部是距平高值区域。这种距平高低值沿着大圆路径传播的波列结构正好对应着PNA型大气环流的异常。比较三个层次的空间分布结构可以看出:从高层100hPa到低层700hPa,除了位于东西伯利亚海附近(160°E , 70°N)的高值中心略向东南偏移外,空间场分布的其他特征基本不变。通过对1月第三特征向量场各层等压面上空间函数的分析,也发现各层之间有相似的分佈特征。

为了更清楚地看出月平均环流异常垂直结构的正压性特点,图4给出了1月前三个特征向量场沿 40°N 纬圈的剖面图。由图4可以看出:100、500和700hPa各层在 40°N 纬圈的分布大致是第一特征向量呈二波型,第二、第三特征向量呈三波型。在垂直方向上,主要槽脊的分布近于垂直。这表明:冬季前三个特征向量场相应的各层空间结构具有明显的正压性特点。夏季(7月)的特征向量场分布也具有类似的结构。

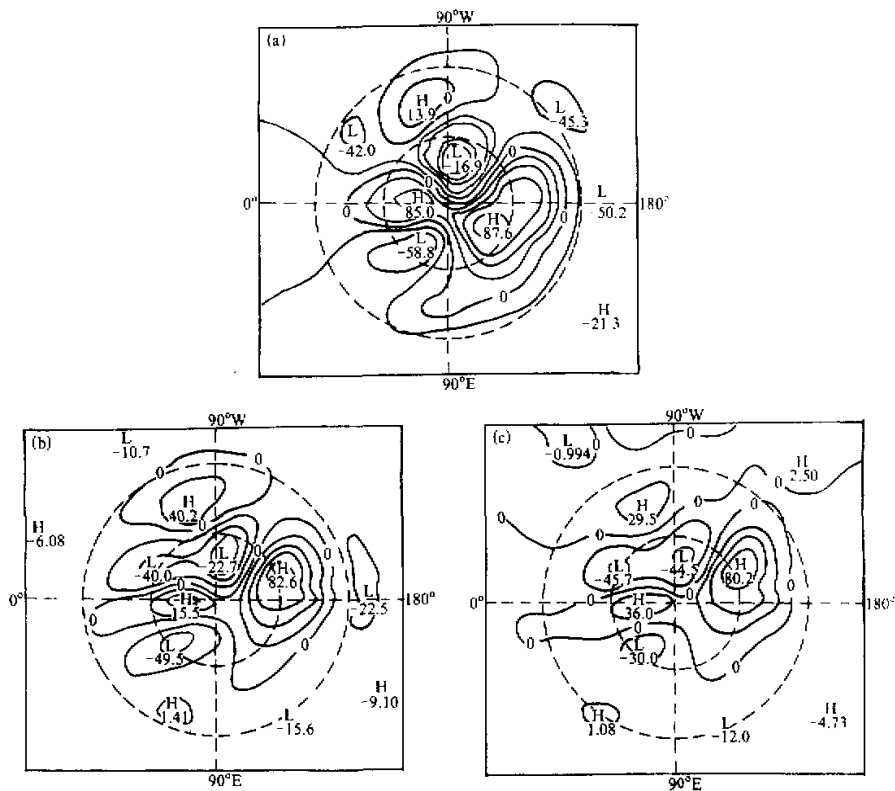


图3 1月第二特征向量场分布
(a) 100hPa, (b) 500hPa, (c) 700hPa.

图5和图6分别是7月前三个特征向量沿大西洋东部20°W经圈和沿太平洋上空的180°经圈剖面图。由图可见,夏季(7月)月平均环流异常垂直结构在大洋地区表现出很强的正压性特点,其中从700hPa到500hPa层槽脊的分布几乎完全一致。

表2 前8个特征向量场对应各层空间型的相关系数R

层次 (hPa)	季节	R							
		1	2	3	4	5	6	7	8
100—500	1月	0.9352	0.8230	0.8864	0.7675	0.7355	0.7574	0.5824	0.1382
	7月	0.7070	0.7358	0.6276	0.7421	0.4556	0.4640	0.5445	0.5360
100—700	1月	0.9435	0.7154	0.8053	0.6834	0.7742	0.7160	0.5489	-0.0430
	7月	0.7252	0.7155	0.4977	0.6631	0.2931	0.4922	0.4919	0.3418
500—700	1月	0.9821	0.9602	0.9630	0.9534	0.9671	0.9517	0.9554	0.9032
	7月	0.9126	0.9690	0.9157	0.9145	0.8941	0.8906	0.8765	0.8581

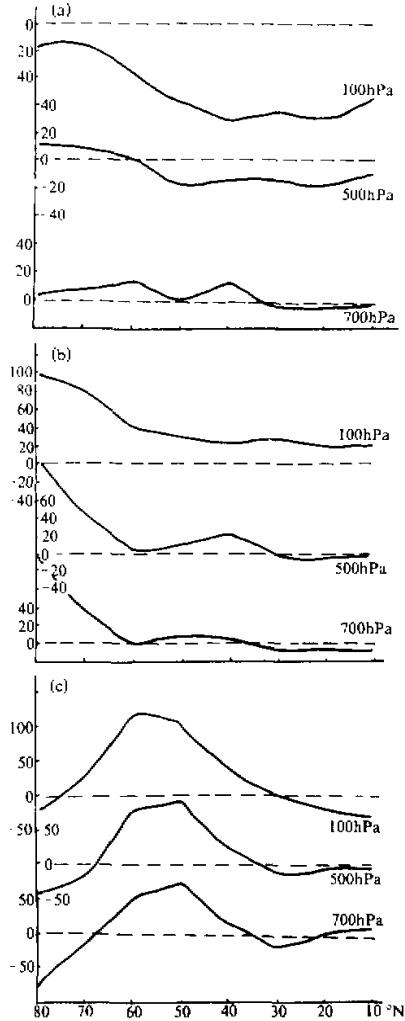


图 4 1 月前三个特征向量场沿 40°N 剖面图
(a) EOF-1, (b) EOF-2, (c) EOF-3.

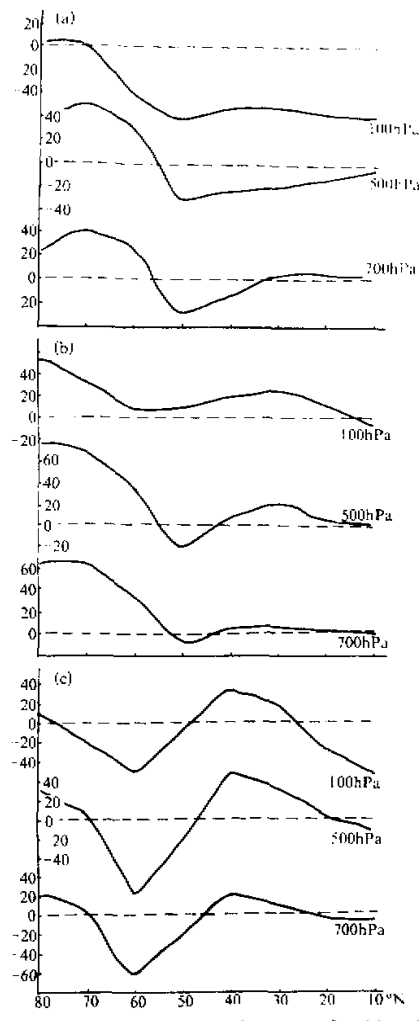


图 5 7 月前三个特征向量场沿 20°W 剖面图
(a) EOF-1, (b) EOF-2, (c) EOF-3.

为了进一步揭示月平均环流异常的正压性结构, 表 2 给出了 1 月和 7 月前 8 个特征向量对应 100、500 和 700hPa 三层空间型两两之间的相关系数. 由表 2 知, 7 月第一和第二特征向量三层空间型两两之间的相关在 0.70 以上, 其中 700hPa 与 500hPa 层之间的相关高达 0.9690. 其他特征向量场中各层空间型之间的相关性也远远超过信度 0.001 的置信水平. 1 月特征向量场中各层空间型之间的相关性更好. 其中第一特征向量场中各层之间的相关均在 0.90 以上, 而 700hPa 与 500hPa 层之间的相关更高达 0.9821, 这也说明冬季 (1 月) 环流异常的正压性要好于夏季 (7 月) 的.

通过以上分析可知, 北半球月平均环流异常垂直结构上的正压性特点在前几个特征

向量场中都得到了较充分的反映. 这一结果是一般经验正交函数分析方法所不能得到的. 文献 [7] 用经验正交函数方法分别对各层等压面高度距平场做展开, 然后再比较各层前几个特征向量的空间函数分布, 得出了第一特征向量在对流层中具有正压性结构的结论. 显然, 分别对各层高度距平场做经验正交函数展开的结果并未包含各层距平场之间的相互联系, 因而不便进行统一的比较.

四、讨 论

本文通过对 1956—1983 年北半球 100、500 和 700hPa 月平均高度距平场进行时空综合的经验正交函数展开, 得到了描述大气环流异常三维空间结构的特征向量场. 分析表明: 北半球大气环流异常的相当正压性不仅在第一特征向量场中有清晰的反映, 而且在其它特征向量场中也有很好的反映. 时空综合的经验正交函数分析方法的根本优越性就在于能够将各层等压面上的高度距平场作为一个整体进行统一的展开, 因而更客观地揭示了环流异常的三维空间结构. 另外, 北半球冬季月平均高度距平场在水平方向的 PNA 型遥相关结构从 1 月第二特征向量场中的三个层次上都得到了较好的反映, 所以遥相关结构在三维空间中也是一个统一的整体. 此外, 对月平均高度距平场进行时空综合的经验正交函数展开获得的时间系数, 刻画了环流异常三维空间结构的时间演变特征, 对它的分析讨论将另文给出.

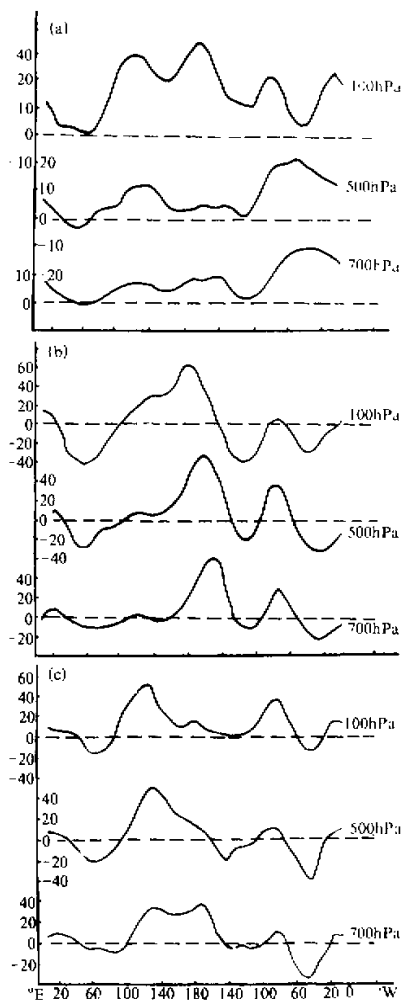


图 6 7 月前三个特征向量沿 180° 剖面图
(a) EOF-1, (b) EOF-2, (c) EOF-3.

参 考 文 献

- [1] Wallace, J. M. and Gutzler, D. S., 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784—812.
- [2] 丑纪范, 1986, 长期数值天气预报, 气象出版社, 201—204.

- [3] Edmon, Jr. H. J., 1980, A study of the general circulation over the Northern Hemisphere during the winter of 1976 — 1977 and 1977 — 1978, *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1538 — 1543.
- [4] Quiroz, R. S., 1979, Long-wave contributions to tropospheric and stratospheric temperature anomalies in winter, *Proceedings of the Fourth Annual Climate Diagnostics Workshop*, Wisconsin, October 16 — 18, 37 — 40.
- [5] Blackmon, M. L., and Wallace, J. M., 1979, Geographical variations in the vertical structure of geopotential height fluctuation, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 2450 — 2466.
- [6] 黄嘉佑, 1990, 气象统计分析与预报方法, 气象出版社, 170 — 197.
- [7] 周琴芳, 黄建平, 杨成彬, 1989, 北半球冬季环流异常的垂直结构特征, *气象学报*, **47**, No.2, 173 — 179.

The Composite Analysis on Vertical Structure of the Monthly Mean Circulation Anomalies over the Northern Hemisphere

Jin Liya, Zhang Banglin and Chou Jifan

(Atmospheric Science Department of Lanzhou University, Lanzhou 730001)

Abstract

By using a joint-space and time EOF method, the monthly mean geopotential height anomaly fields of 100, 500 and 700 hPa over the Northern Hemisphere are expanded. The eigenvectors indicate not only the distribution features in each level (isobathic surface), but also the organic relationship between them. The results show that there is a significant equivalent barotropic feature in the vertical direction of the monthly mean geopotential height anomalies over the Northern Hemisphere.

Key words: Joint-space and time; Circulation anomaly; Empirical orthogonal function (EOF); Equivalent barotropy.