第12卷 第4期
1989年12月

南京气象学院学报
Journal of Nanjing Institute of Meteorology

Vol.12, No.4
Dec., 1989

恢复亚欧大气环流场的一个统计试验

戴 瑛

（四川省气象科研所）

提 要

本文采用自然正交展开和典型相关分析相结合的方法建立了恢复亚欧大气环流场的统计模式，通过对权重系数场的恢复进而达到恢复大气环流场的目的。并用1951—1980年的实测资料对所恢复的1月、4月、7月、10月同期500hPa月平均高度距平场的效果进行了考察，为恢复历史时期的亚欧大气环流场提供了一定的参考信息。

在研究长期天气过程及气候变化时，人们迫切需要了解大型环流系统的长期演变规律，通过对大尺度环流系统的研究，进而探讨局地天气、气候变化的物理机制。目前，可供人们分析大气环流时空发展特征的资料是很不充分的，世界上大多数国家的气象观测记录只有几十年至一、二百年的历史，高空气象观测记录基本上是从本世纪50年代开始的，至今不过30多年的资料。实际的需要使人们开始尝试利用与大气环流密切相关的气候要素来恢复环流场。为了解历史时期的气候变化，人们曾通过历史文献记载、树木年轮、物候、植物孢粉、同位素、自然地理因子等方法，建立了较长的气候参数序列，并据此分析了较长时期的气候史料[1]，这就为利用间接方法恢复环流场提供了可能。拉姆(Lamb, H.H.)等人(1966)根据海洋钻探资料利用C^{14}推算了对流层下部的平均温度图，进而恢复了公元前8000年到公元0年的北半球1月及7月的大气环流图[2,3]。对于更早时期，如冰期、间冰期的环流状况，人们也做过推测，但由于气候史料本身的粗糙，恢复的环流形势也很粗略。随着科技水平的提高以及实测资料长度的积累，为恢复大气环流场提供了更大的可能性。美国树木年轮实验室的学者布莱辛(Blassing, P.J.)、弗里茨(Fritts, H.C.)等人(1975)用1700—1962年的美国西部的年轮年表资料恢复了18世纪以来北美部分地区的地面环流[4]。在目前，恢复大气环流场的工作仍然受到很大限制，主要原因之一是系统的收集反映历史时期气候变化的史料需要大量的人力、物力，且往往只能得到局地的较长的气候史料。利用局地的史料恢复局地性的大气环流场可能比恢复整个半球的环流场效果要好。所以了解整体的大气环流的多年变化需要共同的努力。

我国地域广阔，且有着丰富的历史文献资料，国家气象局与有关省、市气象局协作

1988年2月26日收到，7月15日收到修改稿

完成了全国近五百年旱涝史料的分析、整编，历史温度分布正在研究之中，为恢复历史时期亚欧大气环流场提供了有利的条件。黄嘉佑、王绍武作了初步尝试。他们利用25个站的降水级别史料恢复了历史时期东半球夏季的大气环流场[5]。我们知道，不同气候要素在不同季节与大气环流的联系具有其特定的规律，考察各种气候要素在各季节恢复大气环流场的可能性是很有意义的，对利用我国的气候史料来恢复亚欧地区历史时期的大气环流也是十分必要的。本文就是这方面工作的一个尝试。

一、恢复亚欧大气环流场的统计模式

本文以气候要素距平场的日平均特征和高度距平场的日平均特征的相互联系为基础，建立统计恢复模式。高度场资料采用1951～1980年的500hPa日平均网格点资料，范围为10～70°N，10～150°E，每隔10°×10°取一点，共105个网格点。气温、降水资料采用我国及邻近地区62个测点的实测资料以及插补、延长的均一性序列(1881～1980)。62个测点均匀散布在我国及邻近地区范围内，西北地区的测点也占了一定的比例(图1)。

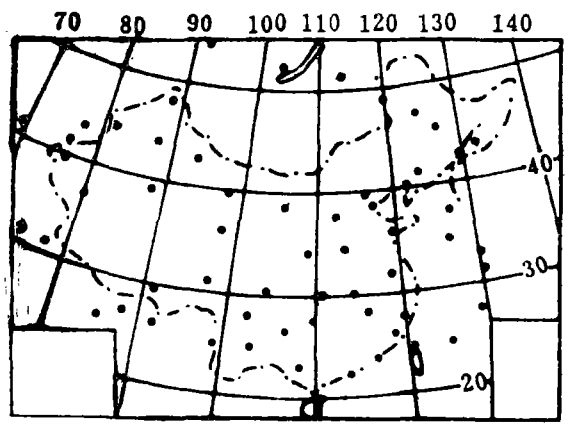

图1 地面测点的位置

首先利用1951～1980年的气温、降水、500hPa高度月平均距平资料建立统计恢复模式。

以[ΔT]、[ΔR]、[ΔP]分别代表气温、降水、高度月平均资料阵。对其分别进行自然正交分解，即

$$\Delta \mathbf{T}_i = E_{1i}\vec{e}_1 + E_{2i}\vec{e}_2 + \cdots\cdots + E_{pi}\vec{e}_p + \cdots\cdots \quad (1\cdot1)$$

$$\Delta \mathbf{R}_i = F_{1i}\vec{f}_1 + F_{2i}\vec{f}_2 + \cdots\cdots + F_{qi}\vec{f}_q + \cdots\cdots \quad (1\cdot2)$$

$$\Delta \mathbf{P}_i = G_{1i}\vec{g}_1 + G_{2i}\vec{g}_2 + \cdots\cdots + G_{ri}\vec{g}_r + \cdots\cdots \quad (1\cdot3)$$

$$(i = 1, 30)$$

$\vec{e}_p$、$\vec{f}_q$、$\vec{g}_r$为相应气象要素的典型场，反映了气象要素场的空间变化特征，考虑到所取资料的长度(30年)，可以认为$\vec{e}_p$、$\vec{f}_q$、$\vec{g}_r$具有客观性。E_{pi}、F_{qi}、G_{ri}(i=1，30)为相应气象要素的权重场。

对于反映气象要素时间变化特征的权重系数，我们进行了典型相关分析，所定义的典型相关变量如下

$$Z_{Ti}=a_1E_{1i}+a_2E_{2i}+\cdots\cdots+a_pE_{pi} \tag{2·1}$$

$$Z_{Ri}=b_1F_{1i}+b_2F_{2i}+\cdots\cdots+b_qF_{qi} \tag{2·2}$$

$$Z_{pi}=c_1G_{1i}+c_2G_{2i}+\cdots\cdots+c_rG_{ri} \tag{2·3}$$

$$(i=1,30;p,q,r=20)$$

式中的典型相关变量Z_{Ti}、Z_{Ri}、Z_{Pi}为相应年份自然正交展开场权重系数的线性组合，反映了原气象要素场的某种时间变化特征。500hPa高度月平均距平场与地面气候要素月平均距平场随时间变化的相关性是进行典型相关分析的基础。

假设${}_nX_p$、${}_nY_q$分别代表两随机向量组成的矩阵(n为年份)，以${}_pA_k$、${}_qB_k$分别代表其相应的典型系数阵，以${}_k\lambda_k$代表典型相关系数阵，根据多元统计分析理论，典型相关变量满足以下的条件

$${}_kA_p\nu_{xxp}A_k={}_kI_k \tag{3·1}$$

$${}_kB_q\nu_{yyq}B_k={}_kI_k \tag{3·2}$$

$${}_kA_p\nu_{xyq}B_k={}_k\lambda_k \tag{3·3}$$

其中ν_{xx}、ν_{yy}、ν_{xy}为相应的协差阵，I为单位阵。

据公式(3.1)、(3.2)、(3.3)可以得到以下的式子

$${}_nY_q=[{}_nX_p-{}_n\overline{Z}_p]{}_pA_k\lambda_kB_q'\nu_{yyq}+{}_n\overline{Y}_q \tag{4}$$

$$(k=1,20)$$

公式(4)是我们用的恢复环流场的基本统计模式，通过模式我们利用地面气候要素的前20个特征向量场首先恢复了高度场的权重系数场，进而恢复高度场。我们亦利用地面气候要素的前10个特征向量场作了恢复试验，恢复场与实测场的相关系数亦可达0.70以上。

若我们以${}_pR_q$代表${}_pA_k\lambda_kB_q'\nu_{yyq}$，则${}_pR_q$可以认为是pxq个回归系数组成的回归系数阵，统计恢复模式可写为

$${}_nY_q=[{}_nX_p-{}_n\overline{X}_p]{}_pR_q+{}_nY_q \tag{5}$$

二、近三十年亚欧地区月平均高度距平场的恢复试验

从统计模式出发，利用1951～1980年的温度、降水月平均资料恢复了亚欧地区500hPa月平均高度距平场，并用实测资料进行了对比、分析，在这里采用了文献[5]中所用的

相似系数指标

$$\text{相似系数}R_i=\frac{\sum_{k=1}^{105} x_{ik}\hat{x}_{ik}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{105} x_{ik}^2}\sqrt{\sum_{k=1}^{105} \hat{x}_{ik}^2}} \quad (6)$$

$$(i=1,30)$$

$$\text{平均相似系数}\overline{R}=\frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30} R_i \quad (7)$$

x_{ik}为实测场资料，$\hat{x}_{ik}$为恢复场资料。下面分别对1月、4月、7月、10月四个典型月份的500hPa月平均高度距平场的恢复情况加以讨论。

表1 500hPa月平均高度距平恢复场的相似系数

月份及恢复因子 / 相似系数 / 年份	1月		4月		7月		10月	
	T	R	T	R	T	R	T	R
1951	0.81	0.40	0.94	0.96	0.78	0.81	0.87	0.99
52	0.91	-0.30	0.83	0.68	0.90	0.86	0.90	0.88
53	0.80	0.94	0.88	0.98	0.90	0.84	0.93	0.93
54	0.86	0.85	0.66	0.44	0.94	0.91	0.84	0.87
55	0.85	0.95	0.91	0.91	0.89	0.88	0.79	0.92
56	0.90	0.92	0.74	0.71	0.93	0.85	0.83	0.63
57	0.90	0.97	0.90	0.95	0.85	0.93	0.81	0.81
58	0.87	0.92	0.83	0.91	0.44	0.57	0.78	0.88
59	0.73	0.89	0.81	0.28	0.87	0.75	0.65	0.82
60	0.87	0.80	0.93	0.50	0.85	0.95	0.54	0.59
61	0.82	0.94	0.77	0.89	0.48	0.58	0.92	0.93
62	0.93	-0.25	0.59	0.92	0.85	0.58	0.85	0.81
63	0.95	0.64	0.95	0.66	0.45	0.67	0.71	0.52
64	0.96	0.99	0.94	0.87	0.71	0.67	0.90	0.99
65	0.75	0.67	0.92	0.27	0.80	0.90	0.78	0.38

续表 1

月份及恢复因子 / 相似系数 / 年份	1 月		4 月		7 月		10 月	
	T	R	T	R	T	R	T	R
66	0.93	0.96	0.84	0.77	0.83	0.92	0.83	0.85
67	0.92	0.93	0.69	0.89	0.46	0.25	0.70	0.92
68	0.95	0.86	0.89	0.95	0.75	0.99	0.75	0.94
69	0.91	0.98	0.89	0.89	0.83	0.80	0.80	0.71
70	0.67	0.66	0.66	0.82	0.81	0.80	0.39	0.85
71	0.95	0.94	0.89	0.98	0.84	0.97	0.92	0.44
72	0.95	0.98	0.79	0.73	0.88	0.98	0.61	0.78
73	0.95	0.99	0.78	0.97	0.84	0.79	0.82	0.98
74	0.96	0.92	0.84	0.96	0.84	0.95	0.96	0.94
75	0.88	0.87	0.92	0.84	0.49	0.65	0.90	0.84
76	0.88	0.97	0.70	0.80	0.92	0.91	0.89	0.45
77	0.96	0.98	0.74	0.94	0.84	0.77	0.84	0.88
78	0.93	0.85	0.93	0.04	0.71	0.67	0.82	0.69
79	0.60	0.96	0.76	0.15	0.81	0.81	0.51	0.54
80	0.63	-0.48	0.80	0.87	0.85	0.85	0.93	0.83
平　均	0.87	0.76	0.82	0.75	0.78	0.80	0.79	0.79

由表 1 可见，利用气温及降水所做各季恢复场的平均相似系数均在0.75以上，也就是说，恢复场的总体效果是较为理想的。本文所用统计模式是以气候要素月平均特征和500hPa高度月平均特征相互联系的统计特征为基础的，可见统计模式能反映出二者之间相互联系的基本形式，所以大部分年份的恢复效果是好的。

表 2　相似系数统计表

月份及恢复因子 / 年数 / 等级	1 月		4 月		7 月		10 月	
	T	R	T	R	T	R	T	R
>0.80	25	25	19	19	21	19	19	20
>0.90	16	17	9	9	5	10	8	9

由表2可见，在各季中，利用气温所做恢复场的相似系数大于0.80的年数与降水恢复场接近，且利用降水所做恢复场的相似系数大于0.90的年数一般高于气温恢复场。但从表1所列的平均相似系数中可看出，降水恢复场的总体效果只是接近，甚至低于气温恢复场。我们知道，气温及降水均受到大气环流的直接影响，气温具有较好的连续性，与大气环流关系密切，是大气环流场较为理想的恢复因子。降水的影响因子较多，局地性强、变率大。表2所列的统计结果也正反映出在一般情况下，利用气温所做恢复场的恢复效果的平稳性较降水恢复场好。

下面进一步讨论冬季及夏季的情况。

1.冬季(1月) 在冬季，我国大部分地区为极锋控制，天气形势相对较稳定，气温年际变化平稳，降水量少，降水变率也较其余季节为小，一般能得到较好的恢复效果。由表2可看出，在1月利用气温及降水所做恢复场其相似系数大于0.80及0.90以上的年数明显高于其余各季，在表1中所列平均相似系数中，1月气温恢复场具有最高值。可见冬季较为平稳的天气条件为环流场的恢复提供了有利条件。但一些特殊年份中，利用降水所做的恢复场有可能出现与实测场相反的情况。

图2.1、2.2、2.3为利用气温及降水所作的1977年1月500hPa高度月平均距平场的恢复情况。

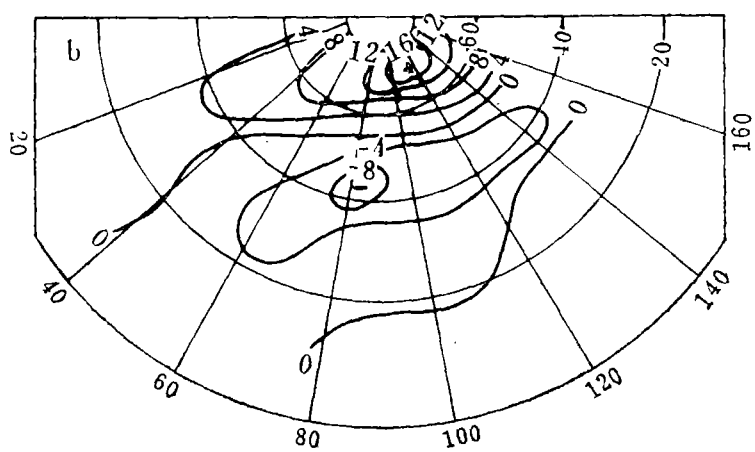

图2.1 1977年1月实测场

图2.1的实测场表明，55°N以北为大片的正距平区，55°N以南出现大片的负距平区，正、负距平区呈带状分布。

图2.2利用气温所作的恢复场中($R_i=0.96$)，正、负距平区亦呈带状分布，正、负距平中心强度吻合得较好，但中心位置略为东移。

用降水所作的恢复场中(图2.3，$R_i=0.98$)，正、负距平区呈带状分布，中心及强度吻合得较好，在西太平洋副高的位置上强度较实测场偏强。

2.夏季(7月) 与冬季恢复场相比，夏季恢复场出现了值得注意的相反情况。在冬季，利用气温所作恢复场的平均相似系数明显高于降水恢复场，而在夏季却相反，利用

降水所做恢复场的平均相似系数高于气温恢复场，且不再出现负的相似系数。同时由表2看出，利用降水所作恢复场其相似系数大于0.90的年数为气温恢复场的一倍，这说明在夏季，降水可能比气温能更好的恢复环流场。但夏季降水恢复场其平均相似系数只略高于气温恢复场，可见降水变率对其恢复效果的平稳性影响是较大的。

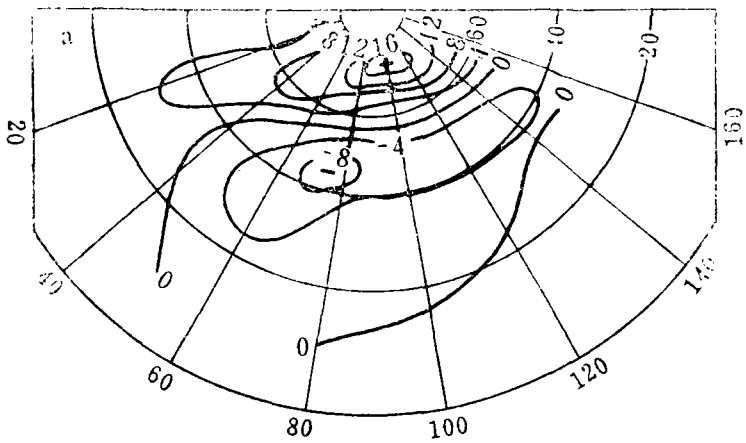

图2.2　利用气温所作1977年1月恢复场

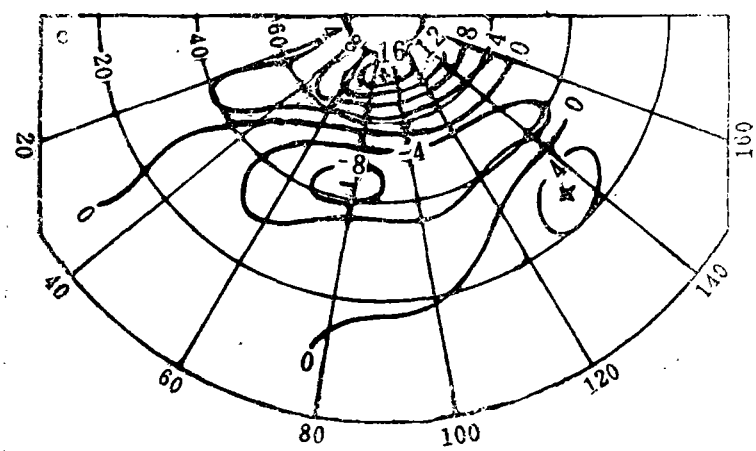

图2.3　利用降水所作1977年1月恢复场

在夏季，对流层中部的西风带槽脊，西太平洋副高以及其北侧的急流是影响我国天气的主导系统，我国绝大多数地区的雨量集中在夏季，由于暴雨的出现，夏季降水变率较大[6]，对局地气温影响也较大，所以从总体效果来讲，其恢复效果较冬季差。但7月份降水亦有其明显的气候规律性，即7月上旬的江淮梅雨和7月下旬的华北、东北雨季，这与大气环流系统是密切相关的，所以在大部分年份利用统计恢复模式仍能达到较为理想的恢复效果。值得注意的是，在利用夏季降水所作的7月恢复场中，相似系数最低的4年(<0.60)是1958、1961、1962、1967，其中1958年为空梅，1961年长江中下游严重干旱，1967年的梅雨天数很短[7]。而且在相应年份，利用气温所作7月恢复场的相似系

数也是最低的。正如文献[5]中所指出的，局地的气候史料恢复局地的大气环流效果较恢复整个半球的环流效果要好。中国气候不一定完全反映亚欧大陆的环流，如能用亚欧大陆的气象要素来作恢复，其效果可能会更好些。

图3.1、3.2、3.3给出了利用气温及降水所作的1980年7月恢复场的情况。

利用气温及降水所恢复的1980年7月500hPa月平均高度距平场其相似系数均为0.85。

由图可见，从欧亚大陆上空向东北方向延伸的负距平区得到较好的恢复，降水所作的恢复场中欧亚上空的负距平中心强度较实测场为弱，我国大陆东部的负距平区也得到较好的恢复，利用气温所恢复的大陆东部的负距平区较实测场范围偏大，利用降水所恢复的大陆东部的负距平区较实测场略弱，印度半岛上空的负距平区均恢复得较好，贝加尔湖以东，靠近极地的负距平区恢复的均较实测场为弱。可见，夏季环流场的主要特征能得到较好的恢复。

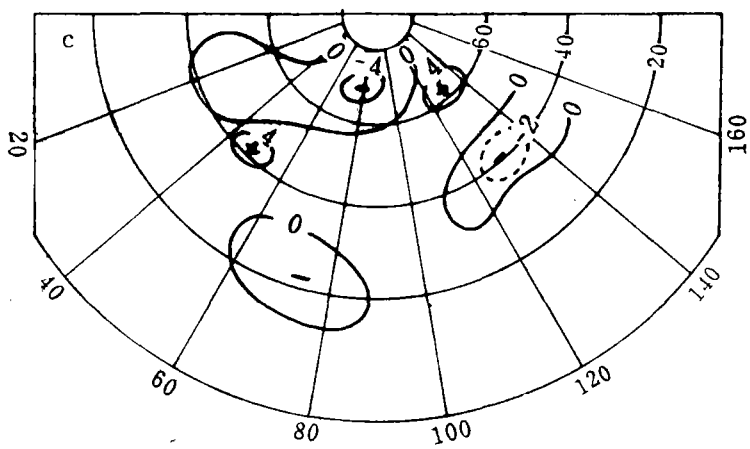

图3.1 1980年7月实测场

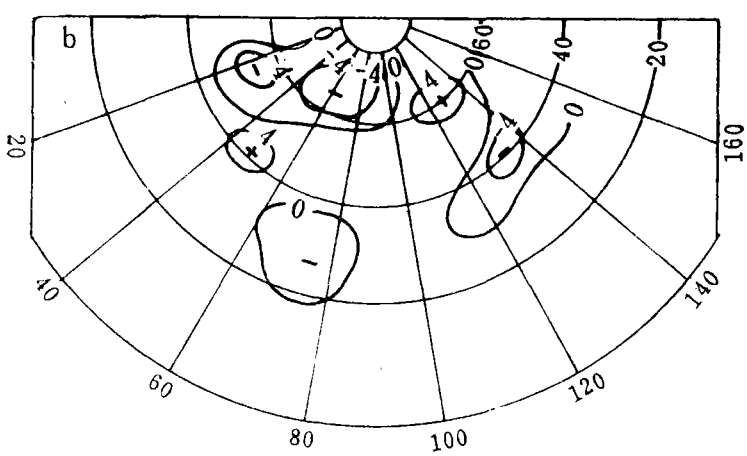

图3.2 利用气温所作1980年7月恢复场

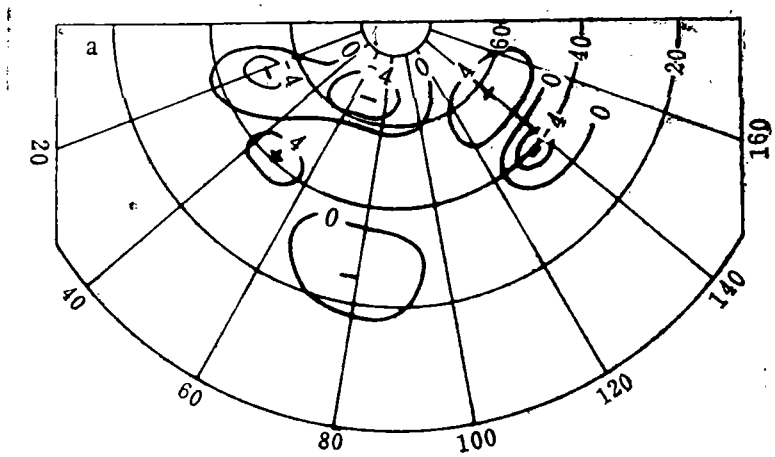

图3.3　利用降水所作1980年7月恢复场

由表1、表2中还可看出，作为过渡性季节的春季和秋季其恢复场中大于0.80及0.90的年数很接近，但较夏季及冬季略少。

三、恢复近百年来亚欧地区1月及7月500hPa月平均高度距平场

通过恢复近30年亚欧地区500hPa月平均高度距平场的试验，可以看出，利用气候要素及统计模式恢复环流场是可行的，鉴于利用气温所作的恢复场具有较好的稳定性，我们利用气温百年序列资料，从统计模式出发，恢复了1881年以来的亚欧地区500hPa 1月及7月的月平均高度距平场。为了考察所恢复的环流场的多年演变规律，对所恢复的1月及7月500hPa高度月平均距平场自1901年起逐年计算了其环流指数。

这里采用了长茨(KAЦ)提出的给定区域中的环流指数计算公式[6]

$$\text{纬向环流指数}\ I_3=\frac{b(n_{\lambda 1}+n_{\lambda 2}+\cdots\cdots+n_{\lambda j})}{(\phi_i-\phi_1)j} \tag{8}$$

$$\text{经向环流指数}\ I_M=\frac{b(k_1m_{\phi 1}+k_2m_{\phi 2}+\cdots\cdots+k_im_{\phi i}}{(\lambda_j-\lambda_1)i} \tag{9}$$

$$\text{总环流指数}\ I=\frac{I_3}{I_M} \tag{10}$$

b取4十位势米，$n_{\lambda i}$为通过经线λ_i在纬度ϕ_1到ϕ_i范围内等高线的数目，$m_{\phi i}$为通过纬线ϕ_i在经线λ_1到λ_i范围内的等高线数目，　$k_i=\frac{1}{\cos\phi_i}$为订正系数。

根据1951～1980年间的500hPa 1月及月7月平均高度场的实测资料计算的环流指数的多年平均值为气候值，则得到给定区域中总环流指数的气候值在1月份和7月份分别

为$\overline{I_W}=0.30$，$\overline{I_S}=2.95$，总环流指数反映了给定区域中环流的基本状况。当$I>\overline{I}$时，纬向环流较为盛行；当$I<\overline{I}$时，则表明盛行经向环流。

对所恢复的1月及7月500hPa月平均高度场从1901～1950年逐年计算了其总环流指数的距平值，并制作了1月及7月恢复场的总环流指数的累积距平曲线图。累积距平曲线的上升支反映了正距平的作用，下降支反映了负距平的作用。

由图4可见，在1月，1928年以前曲线的总趋势是上升的 说明所恢复的500hPa月平均高度场在1901～1928年间是以纬向环流占优势；1928年的各曲线是下降的，说明是以经向环流占优势。也就是说，在1928年以后，1月500hPa月平均高度恢复场由纬向型转为经向型，存在明显的长期变化趋势。

由图5可见，7月恢复场总环流指数的累积距平曲线，也具有同样明显的长期变化趋势。1930年以前，累积距平曲线波动较大，说明经向运动也很活跃，但总趋势仍是上升的，表明仍以纬向环流占优势；在1930年以后，累积距平曲线迅速下降，说明这期间盛行经向环流。

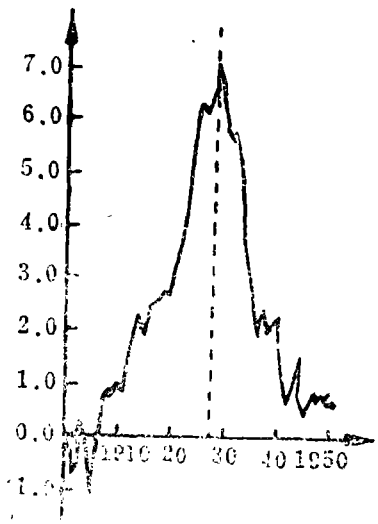

图4 1月恢复场总环流指数累积距平曲线

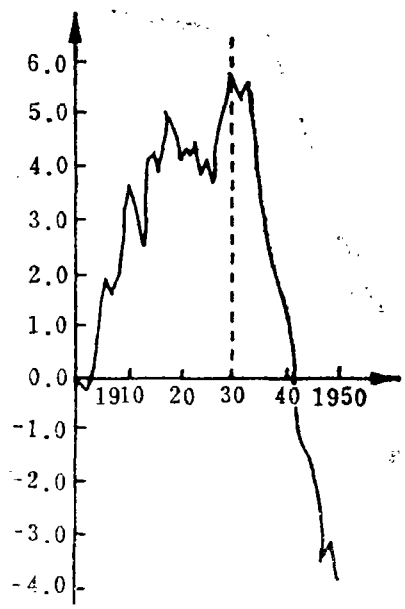

图5 7月恢复场总环流指数累积距平曲线

苏联学者吉尔斯(Гирс, А.А.)曾对1900～1972年间500hPa高度场逐年逐月作了较为详尽的考察。研究结果表明，1928年以前W型环流异常发展，为W型环流纪；1928年以后，E型和C型环流占优势。也就是说，1900～1928年为纬向环流纪，1929～1948年为经向环流纪[8]。由此可见，利用气温所恢复的1月及7月500hPa月平均高度场很好地体现了这一特征。

为了具体的考察近百年来环流恢复的情况，我们对一些典型年份进行了考察。

据吉尔斯的普查结果认为：1916年1月W型环流异常发展，1937年1月E型环流异常发展，1941年1月C型环流异常发展。也就是说，在1月中，其相应环流型的出现天

数超过20天，这在月平均图上应能得到明显表征。图6.1、6.2、6.3给出了利用气温所恢复的1月500hPa月平均高度距平场在1916、1937、1941年的情况。

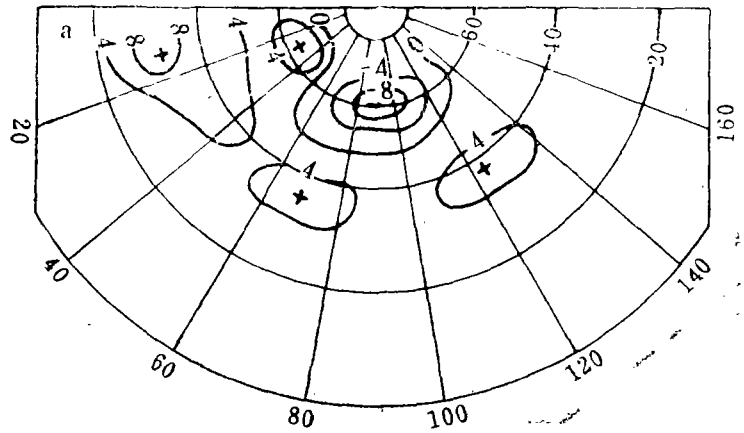

图6.1　1916年1月恢复场

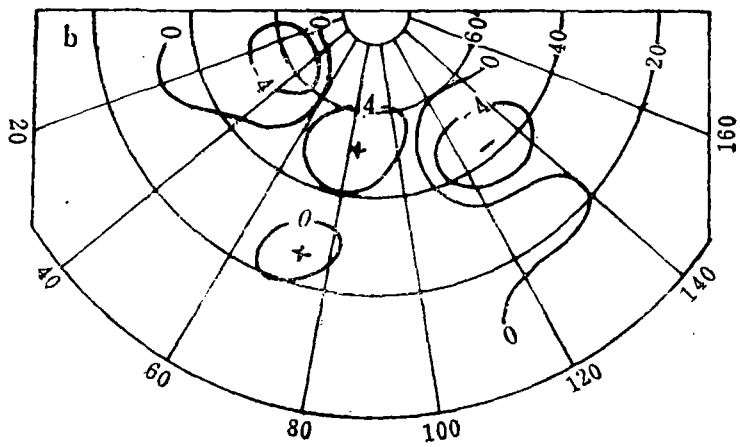

图6.2　1937年1月恢复场

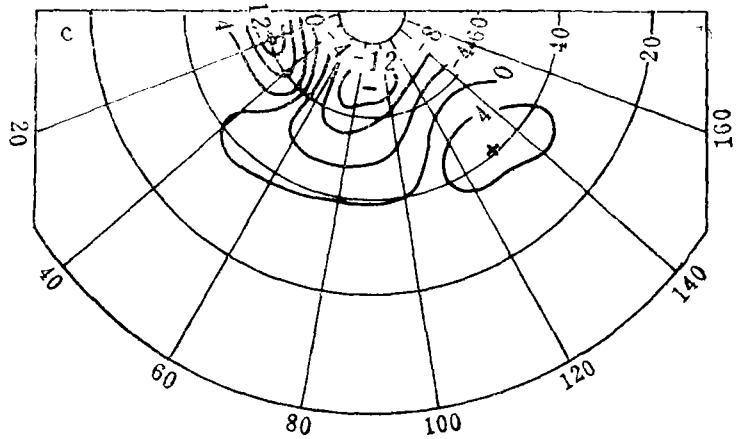

图6.3　1941年1月恢复场

由图6.1所示的恢复场上在55°N以北表现为两正负相间的距平中心，由于其位置偏北，中纬度西风带呈现较平直的形势，自西向东迅速移动的短波槽脊的动力作用使得中纬度产生大片的正距平区，这正是W型环流的主要特征。

图6.2、6.3所示的恢复场上均表现为正、负相间的距平分布，且正、负距平区位置正好相反，分别反映了E型和C型环流的主要特征。

在夏季(7月)，一些环流型异常发展的年份，恢复场上所表现的特征与吉尔斯的普查结果基本一致，但特征不如冬季显著。

四、初步结论

1.利用我国的气候资料恢复亚欧地区的高空大气环流场是可行的，选择与大气环流密切相关的气候要素(如气温、降水)恢复大气环流场可使其基本特征得到较好的反映。

2.利用气温所作的恢复场在各季都具有较稳定的恢复效果。在1月及7月，利用气温所恢复的近百年来亚欧500hPa月平均高度距平场的主要特征也得到了较好的反映。

3.利用降水所作恢复场稳定性较差一些。在对大气环流场方差贡献大的年份中具有较高的相似系数，尤其夏季较为理想。但一些特殊年份其相似系数可能很低，甚至出现负值。

4.不同的气候要素通过其特定的与大气环流相联系的规律，在不同年份、不同季节具有不同的恢复效果。在实际可能情况下，利用不同的恢复因子，对所恢复的环流场加以对比、分析，可能有利于得到较客观的大气环流恢复场，这方面有待于进一步的研究。

本文得到了翁笃鸣教授，屠其璞、丁裕国副教授等的热心指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 龚高法等，历史时期气候变化研究方法，2—3，科学出版社，1983.

[2] 张家诚等，气候变迁及其原因，科学出版社，1983.

[3] Lamb, H.H., Reconstruction of the prevailing atmospheric circulation regiems, Climatic history and the future, 380—400, 1977.

[4] Bradely, R.S., Methods derived by principal componends and multiple canonical regression analysis, Quaternary paleoclimatology, 353—367, 1985.

[5] 黄嘉佑、王绍武，利用我国气温降水场作恢复东半球夏季大气环流场的实验，大气科学，8卷，3期，252—259，1984.

[6] 章基嘉、葛 玲，中长期天气预报基础，225—229，气象出版社，1983.

[7] 史久恩、徐 群，长江中下游夏季降水长期预报，气象学报，32卷，1期，1962.

[8] 吉尔斯，A.A.，长期气象预报的大型环流方法，280—285，科学出版社，1983.

A STATISTICAL EXPERIMENT ON THE RESTORATION OF THE EURASIAN GENERAL CIRCULATION FIELD

Dai Ying*

ABSTRACT

Through natural orthoginal expansion and typical correlation analysis, a statistical model for restoring the Eurasia general circulation field is established. For this purpose, the weight coefficient field is also restored. By using the real-time observational data from 1951 to 1980, examination is made on the effects of the restored 500hPa monthly average height anomaly field in January, April, July and October of the same years so that a certain reference information is provided for restoring the Eurasian general circulation field in the historic periods.

*Affiliated with the Institute of Meteorological Science, Sichuan