

冬季大尺度流型与夏季中国降水量

杨秋明

(江苏省气象台, 南京 210008)

摘要 对近45年(1951~1995年)前期冬季北半球500 hPa高度距平场和夏季中国降水量进行旋转奇异值分解(RSVD), 研究了耦合相关空间分布的区域特性, 同时分析了相关型的时间演变。结果表明, 旋转奇异值分解有效地揭示了前期冬季北半球500 hPa大尺度流型与夏季中国降水耦合相关型的区域分布特征, 并且物理意义明确。

关键词 旋转奇异值分解 大尺度流型 中国降水 耦合相关 夏季

1 引言

异常大气环流的持续存在, 将引起广大区域上的降水、温度相对于正常情况的大的偏差。这种偏差以干旱、洪涝等形式出现, 对人类的生存产生显著的影响, 因此研究大范围气候异常变化规律对于正确预测其演变趋势是重要的^[1]。文献[2]较全面地分析了北半球冬季风环流异常与中国江淮地区旱涝的关系, 得到许多重要结果。文献[3]则用奇异值分解发现前期冬季热带太平洋海温与夏季中国东南部降水之间的耦合关系。本文将用旋转奇异值分解(RSVD)^[4]研究前期冬季北半球500 hPa高度距平与中国夏季降水耦合相关结构的区域特性, 进一步揭示不同空间尺度的冬季北半球500 hPa大尺度环流异常对后期中国夏季降水分布的影响, 为我国短期气候预测提供有用信息。

2 资料和方法

500 hPa高度资料和中国降水资料由中央气象台长期科提供。500 hPa高度是北半球10~85°N范围内的105个格点的季平均值, 资料年代是1951年12月~1952年2月, …… , 1994年12月~1995年2月, 共44个冬季。中国夏季降水量取1952~1995年每年6~8月降水距平场中均匀分布的53个格点值。首先对原始资料标准化, 并用主成分分析进行截断处理(保留前 s 个方差贡献较大的主成分的信息)后构成基本资料阵 $H(x, t)$ 和 $R(y, t)$, 其中序列长度 $m=44$, 空间点数 $l=105$, $n=53$ 。它们反映了大尺度高度和降水距平空间分布信息, 滤去了小尺度空间扰动的作用。然后进行奇异值分解(SVD), 设这两个气象要素场的协方差阵是

$$C = \frac{1}{m} H^T R,$$

它可分解成

$$C = P \sum_{j=1}^r Q^T,$$

其中 $\sum = (\sigma_j)$ 是对角阵, $\sigma_j = \lambda_j^{1/2}$, λ_j 是矩阵 $C^T C$ 的第 j 个非零特征值, 且 σ_j 是第 j 个奇异值, $j=1, \dots, r$; $r = \min(l, n)$, P 和 Q 的第 j 列是对应的第 j 对奇异向量, 第 j 对时间系数是 $A = H P$, $B = R Q$, 它所表达的协方差贡献是 $c_j = \sigma_j / \sum \sigma_j$, 相关系数是 $\rho_j = (a_j(t), b_j(t))$, 其中 $a_j(t)$, $b_j(t)$ 分别是 A 和 B 对应的第 j 列 (具体算法见文献[5])。为了进一步揭示耦合相关型的区域特性, 下面对主要奇异向量对进行正交旋转^[4]。构造矩阵

$$L_{(l+n) \times k} = \begin{bmatrix} P_{l \times k} \\ Q_{n \times k} \end{bmatrix} \sum^{1/2},$$

按极大方差准则^[6]求出正交矩阵 $U_{k \times k}$, k 是参加旋转的显著奇异向量的个数, 作正交变换 $L^* = LU$, $P^* = P \sum^{1/2} U W_l^{-1}$, $Q^* = Q \sum^{1/2} U W_n^{-1}$, 其中矩阵 W_l , W_n 使 P^* , Q^* 标准化, 可得旋转后的协方差阵 $\sum^* = (\sigma_j^*)$, 对应的旋转时间系数矩阵 $A^*_{m \times k} =$

$A \sum^{-1/2} U W_l$, $B^*_{m \times k} = B \sum^{-1/2} U W_n$, 且满足 $\frac{1}{m} A^{*T} B^* = \sum^*$, 协方差贡献及相关系数分别是

$$c_j^* = \sigma_j^* / \sum \sigma_j^*, \quad \rho_j^* = (a_j^*(t), b_j^*(t)),$$

对应的异性回归图正比于旋转奇异向量:

$$\begin{aligned} \text{reg}[H(x, t), b_j^*(t)] &= (\sigma_j^* / \langle b_j^{*2}(t) \rangle^{1/2}) p_j^*, \\ \text{reg}[R(y, t), a_j^*(t)] &= (\sigma_j^* / \langle a_j^{*2}(t) \rangle^{1/2}) q_j^*. \end{aligned}$$

reg 表示资料场对时间系数的回归系数, 它体现了两个要素场间相互影响的空间分布。旋转后, P^* 、 Q^* 的列不再正交, 但 A^* 、 B^* 的列仍然正交。与旋转主成分分析 (RPCA) 类似^[6,7], 旋转后的奇异向量对能更显著地反映原始协方差场提供的耦合相关信息, 且场的协方差贡献集中在少数几个区域, 满足简单结构的特征, 较明显地区分耦合相关类型, 所以旋转奇异值分解 (RSVD) 使耦合相关信号能更好地揭示前期冬季北半球 500 hPa 大尺度高度距平场和中国夏季大尺度降水之间耦合的敏感区, 以便提高夏季降水预报的精度。

3 耦合相关型

冬季北半球 500 hPa 高度距平和后期中国夏季降水[分别经主成分截断处理 (高度和降水分别保留前 9 个和前 5 个主成分的信息, 其累积方差贡献分别是 75.6%和

43.8%)]旋转奇异值分解 (RSVD) 的结果见图 1 和表 1 (由 Scree 法^[7], 取前 5 对奇异向量进行旋转, 累积协方差贡献是 98.6%), 相关系数分别是 0.606、0.507、0.356、0.441 和 0.256。

表 1 前 5 个旋转奇异向量所表达的协方差贡献

序 号	1	2	3	4	5	Σ
旋转前 / %	32.7	25.4	20.5	12.5	7.5	98.6
旋转后 / %	32.6	24.4	16.0	17.0	8.6	98.6

前 1、2、4 个旋转奇异向量所表达的协方差贡献较显著且相关系数大于 0.40 (达 0.01 信度)。因此, 冬季北半球 500 hPa 高度距平场和后期中国夏季降水存在上述 3 种显著的耦合相关型。图 1 中(a)~(c)是旋转后的第 1、2、4 左奇异向量 (表示冬季北半球 500 hPa 高度距平), (d)~(f)是旋转后的第 1、2、4 右奇异向量 (表示中国夏季降水)。上述转动前后第 1~3 型协方差减小, 而第 4、5 型增大, 表明第 4、5 型两个场局部区域的协方差贡献增大, 其它区域协方差贡献减小, 更客观地揭示了这两个场之间的本质联系。下面分析这 3 对主要奇异向量对的空间特征。

3.1 第 1 型

图 1a、d 分别是第 1 对旋转左、右奇异向量, 500 hPa 高度场西北太平洋地区呈现明显的南北反相空间分布, 与月平均高度场的 WP 遥相关型类似^[8], 而中国降水表现为从西北经黄河流域到长江以南地区的波列结构, 主要作用区域在黄河中上游地区 (MUY, 它反映了冬季西太平洋遥相关型 (WP) 对后期我国夏季大范围降水异常的影响, 这个耦合相关型占总协方差贡献的 32.6%, 是影响我国夏季大尺度降水异常最主要的因素。

3.2 第 2 型

图 1b、e 分别是第 2 对旋转左、右奇异向量, 它的协方差贡献是 24.4%, 500 hPa 高度场表现为显著的欧亚型 (EU), 与月平均高度场 EU 遥相关型一致, 中国降水量主要响应区域在西北和东北地区 (NWNE), 并且降水距平符号相反, 它表明了欧亚中高纬大陆不均匀加热激发的环流持续异常^[9]对中国夏季西北和东北地区降水的作用。

3.3 第 4 型

图 1c、f 对应第 4 对旋转左、右奇异向量, 协方差贡献是 17.0%, 500 hPa 高度场从北大西洋经欧洲到亚洲中部大陆存在一显著波列 (AMA), 对应的中国夏季降水敏感区主要在长江以南地区, 定义为中国南部型 (SC), 它体现了欧洲到亚洲中西部地区陆气相互作用产生的低频流型对中国南部夏季大范围降水的影响。

以上分析表明, 旋转奇异值分析成功地揭示出了区域协方差贡献显著的耦合相关型, 对我国汛期降水预报具有重要参考意义。第 1、2、4 旋转奇异向量反映了影响夏季中国降水的前期冬季北半球 500 hPa 高度距平的 3 种不同的空间分布型: (1) 西太平洋

型(WP); (2)欧亚型(EU); (3)北大西洋亚洲中部型(AMA), 显示出中国夏季降水异常成因的复杂性, 不同的高度场异常空间分布型对中国汛期降水的影响有显著差异。图 2 给出了异性回归的统计量 F 的空间分布图。从图 2 可以看出, 这 3 对 RSVD 的

表 2 耦合相关显著区域分布

序号	区 域	
	冬季北半球 500 hPa 高度	夏季中国降水
1	南亚、北太平洋、北大西洋热带地区和北太平洋中纬地区	黄河中上游地区
2	欧亚大陆中高纬地区	西北和东北地区
4	欧洲、亚洲中部地区	长江以南地区

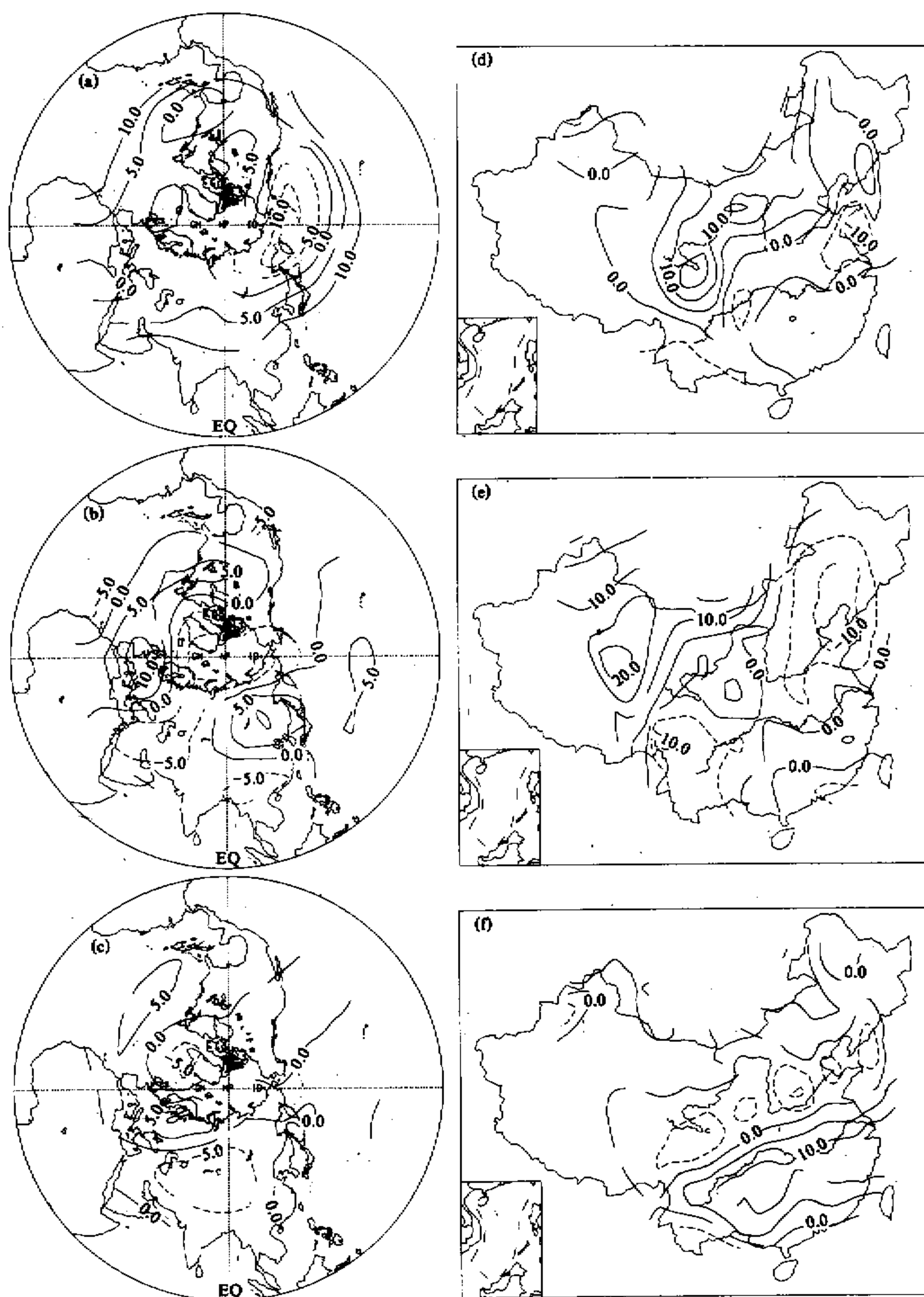


图1 旋转奇异向量的空间分布

(a)~(c)分别是与第1、2、4旋转左奇异向量对应的异性回归图(冬季北半球500 hPa 高度), (d)~(f)分别是与第1、2、4旋转右奇异向量对应的异性回归图(夏季中国降水), 等值线间隔是5(图中数值已乘以100), 虚线表示负值

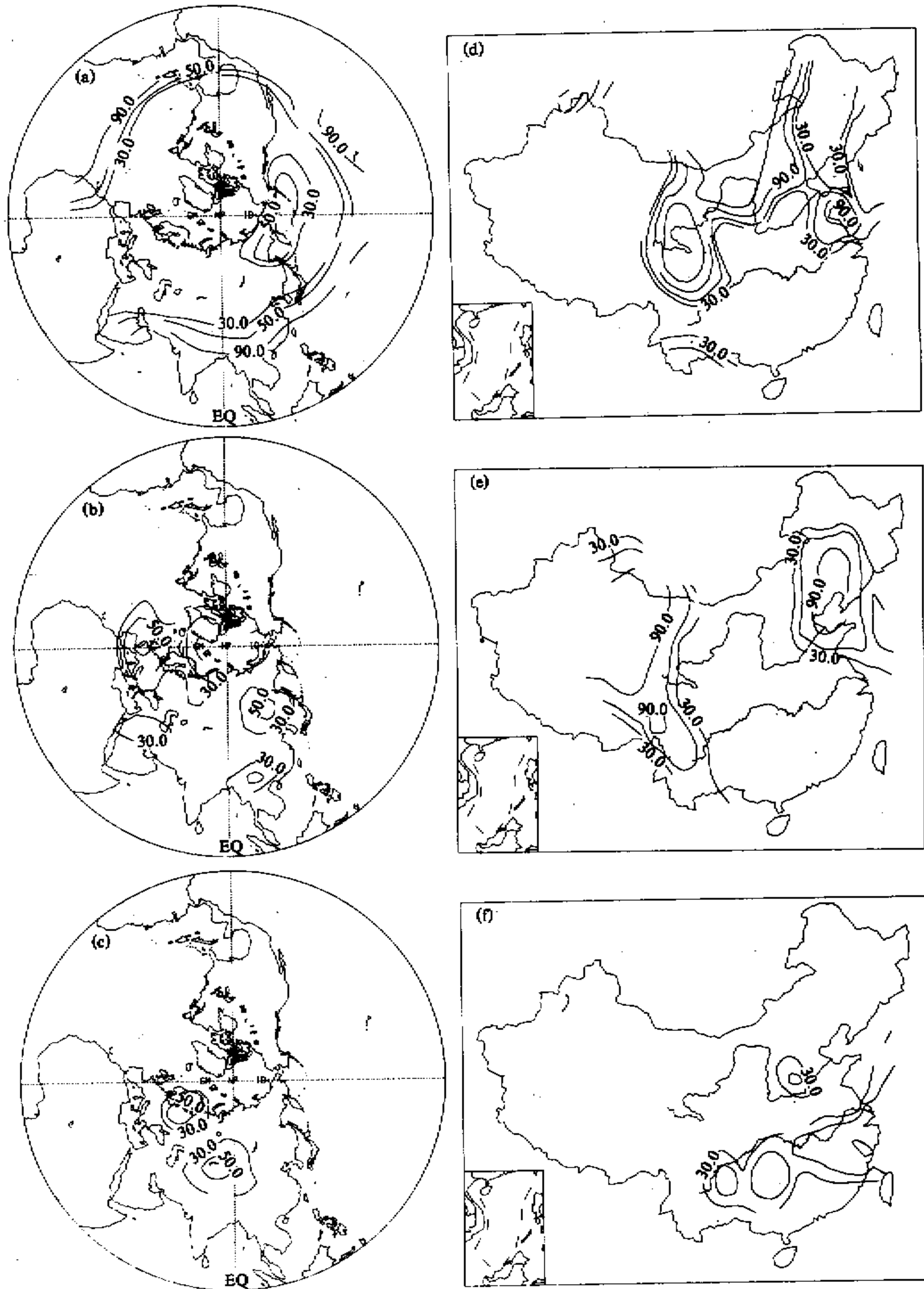


图2 异性回归的统计量 F 的空间分布
等线值间隔是30、50、90、150 (图中数值已乘以10), 其它说明同图1

空间分布的作用区域(表 2) F 值均大于 4.07 (达 0.05 信度), 并且显著区域范围较大, 有力地表明了区域耦合相关型的显著性, 因此能较好地预测中国夏季大尺度降水的空间分布。

4 相关的时间演变

图 3 给出了第 1、2、4 三对旋转奇异向量 (RSVD1、RSVD2、RSVD4) 对应的时间系数, 它反映了这 3 种相关型的时间演变。这三对时间序列的相关系数分别为 0.606, 0.507 (达 0.001 信度), 0.441 (达 0.01 信度)。而第 3、5 对旋转奇异向量 (RSVD3、RSVD5) 的相关系数较小 (分别是 0.356 和 0.256)。因此, RSVD1、RSVD2、RSVD4 的耦合是极显著的, 其中 RSVD1 的耦合最强 (图 3a)。从图 3b 也可看出, RSVD2 的耦合呈明显上升趋势, 表明近 40 年来西北地区夏季降水增加, 东北地区减少。时间系数变化的另一个特点是各型之间的耦合强度随时间变化。RSVD1 在 1980~1986 年期间、RSVD2 在 1952~1956、1970~1978 年期间以及 RSVD4 在 1986~1991 年期间耦合不显著。它可能是由于环流/降水系统内部非线性作用引起的

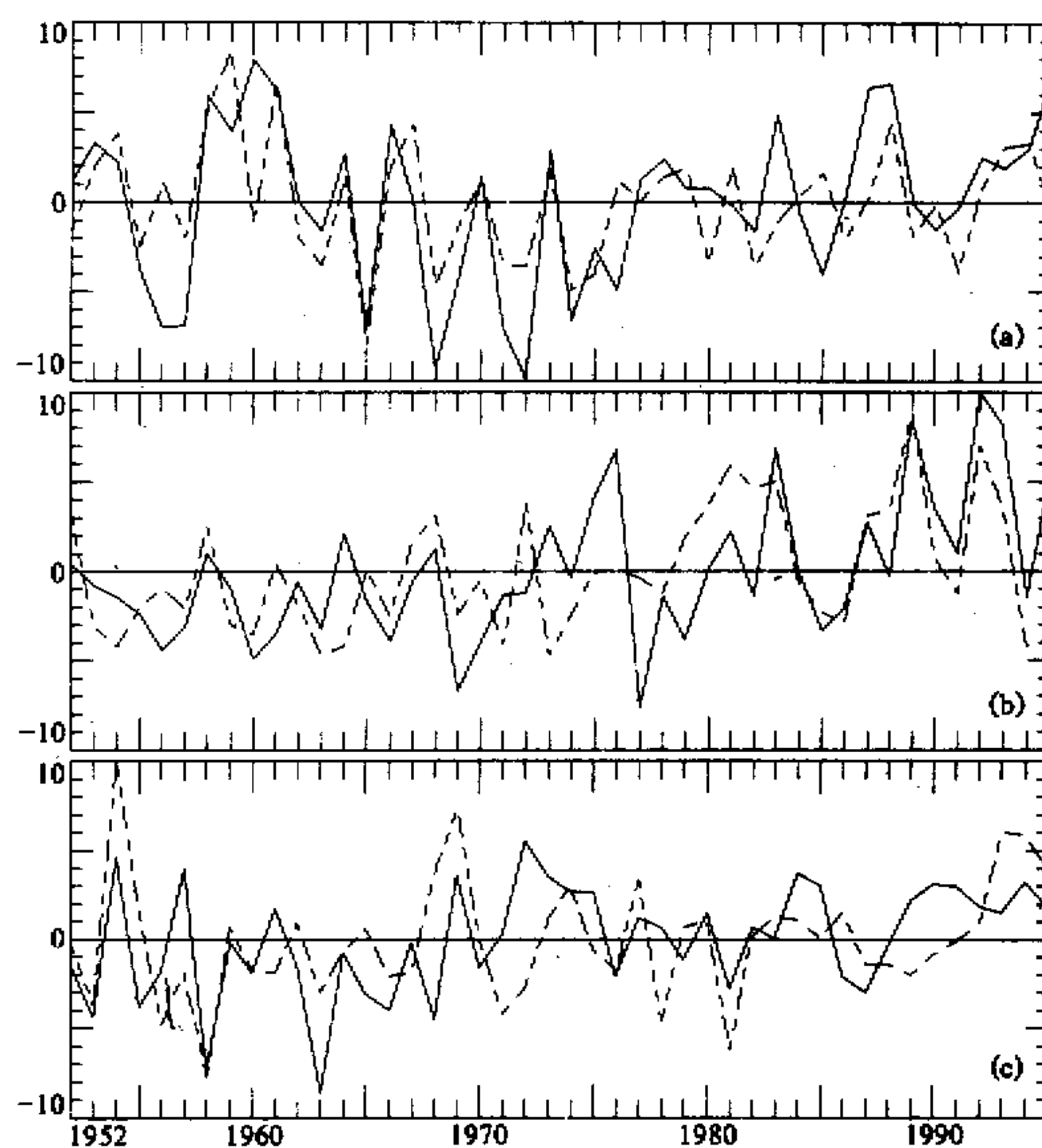


图 3 旋转时间系数变化曲线

(a)~(c)分别表示 RSVD1、RSVD2、RSVD4, 实线: 冬季北半球 500 hPa 高度, 虚线: 夏季中国降水

耦合空间结构的改变。我国近 40 年来主要的几次洪涝和干旱中的一部分也能很好地反映出来, 如 1954、1969、1993、1994 年长江以南地区洪涝由+RSVD4 表示 (图 3c); 1965、1968、1974 年江淮下游多雨由-RSVD1 反映 (图 3a), 且 1959、1961、1966、1988 年呈相反的降水分布; 1958 年我国东部大范围干旱对应于+RSVD1、-RSVD4; 而 1989、1992 年西北地区多雨对应于+RSVD2, 这时东北地区少雨。因此, 中国夏季降水异常可以由这 3 种主要大尺度流型中的一种或几种共同作用而引起, 其主要原因是前期冬季欧亚大陆和太平洋、大西洋地区海陆气耦合系统内部各分量间反馈作用导致大气内部新的低频波列对东亚季风降水产生重要影响^[9]。另外, 1978 年长江流域干旱, 1980、1991 年长江中下游洪涝没有反映出来, 这表明这个时期上述 3 种冬季大尺度流型持续异常对夏季江淮流域降水的作用不明显, 原因是 1978 年 (1980、1991 年) 夏季黄河中上游多 (少) 雨不太明显, 干旱 (洪涝) 区域仅集中在江淮下游和长江中下游地区, 且降水异常区域较小, 所以不能用第 1 对旋转奇异向量很好表示, 可能其它季节 (前期秋季、春季) 的流型和其它因子 (如海温、雪盖等) 的耦合作用更重要。

5 结论

(1) 冬季北半球 500 hPa 高度和后期夏季中国降水存在 3 对显著的旋转奇异向量的空间分布型, 分别反映了 500 hPa 高度西太平洋型、欧亚型、北大西洋亚洲中部型和中国夏季降水黄河中上游型、西北东北型、中国南部型之间的耦合关系 (协方差贡献分别是 32.6%、24.4%、17.0%)。第 1 对旋转奇异向量反映了前期南亚到热带太平洋地区加热异常的作用, 第 2、4 对旋转奇异向量分别由欧亚大陆中高纬和欧洲到中亚地区陆气相互作用引起。因此, 不同的北半球 500 hPa 高度大尺度流型异常对中国旱涝分布的作用是不同的。

(2) 旋转奇异值分解得到的旋转奇异向量不受空间正交的约束, 能更客观地反映相关场的耦合相关空间分布结构的区域特性, 物理意义明确, 有效地提高区域气候要素的可预报性。

(3) 由于原始气象要素场 (如降水等) 的噪声较大, 所以在旋转奇异值分解之前对资料进行主成分截断处理, 滤去小尺度空间扰动的作用, 能更好地揭示两个要素场间的较大尺度耦合作用区域。

参 考 文 献

- 1 Jose P. Peixoto and Abraham H. Oort, 1992, *Physics of Climate*, AIP Press, 338~353.
- 2 孙淑清、孙柏民, 1995, 北半球冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系, *气象学报*, 53(4), 440~450.
- 3 Shen S. and K.-M. Lau, 1995, Biennial oscillation associated with the East Asian summer monsoon and tropical sea surface temperatures, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 105~124.
- 4 Cheng Xinhua and Timothy J. Dunkerton, 1995, Orthogonal rotation of spatial pattern derived from singular value decomposition analysis, *J. Climate*, 8(11), 2631~2643.
- 5 章基嘉等, 1994, 中长期天气预报基础, 北京: 气象出版社, 91~98.
- 6 方开泰, 1989, 实用多元统计分析, 上海: 华东师范大学出版社, 330~336.

- 7 王晓春、吴国雄, 1996, 利用空间均匀网格对中国夏季降水异常区域特性分析, 气象学报, 54(3), 324~332.
- 8 Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981, Teleconnection in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784~812.
- 9 罗哲贤, 1993, 大尺度流型年际变化可能机制的研究, 气象学报, 51(3), 266~273.

The Relationships between the Large Scale Flow Patterns during the Northern Hemisphere Winter and the Rainfall in China Summer

Yang Qiuming

(Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract The rotated singular value decomposition (RSVD) between the 500 hPa height field anomalies over the Northern Hemisphere the preceding winter and the rainfall in China summer are performed based on both data sets of 45 years in the period of 1951 to 1995. The regional characteristic and the time evolution of the dominant coupled correlation patterns are investigated. The researches show that the regional characteristic of the coupled correlation patterns between the large scale flow patterns during the Northern Hemisphere winter and the rainfall in China summer are identified effectively and have a significant physical sense.

Key words rotated singular value decomposition the large scale flow pattern rainfall in China the coupled correlation summer