

欧亚 500 hPa 环流、雪盖和中国 降水量 3~4 年耦合振荡

杨秋明

(江苏省气象台, 南京 210008)

摘 要 用 22 年 (1973~1994 年) 观测资料, 由循环主振荡型分析 (CSPOP) 揭示了东半球 500 hPa 环流、雪盖和中国降水量耦合系统的 3~4 年振荡的循环过程。结果表明, 环流-冰雪-降水系统耦合振荡 (ASRO) 存在显著的欧亚太平洋 (EUP) 和中国东部型 (EC) 耦合移动波列, 其中 500 hPa 高度与雪盖波列空间位相相反, 但一致向东南方向移动, 而中国降水波列由北向南传播。这反映出欧亚雪盖异常影响欧亚大陆和海洋加热对比, 并通过大气内部动力过程激发的耦合空间波的能量频散途径。

关键词 循环主振荡型分析 环流-冰雪-降水耦合系统 耦合振荡 欧亚 中国降水

1 引言

大量观测分析和数值模拟已经揭示出 ENSO 过程可引起全球范围的年际气候异常^[1]。但对于我国旱涝异常来说, 除了受到 ENSO 影响之外, 更主要的是受亚洲季风强度的年际变化的影响。文献[2, 3]发现亚洲季风区环流准 2 年周期变化主要受热带海洋-大气耦合系统的准 2 年振荡控制, 欧亚地区大范围海陆加热不均匀引起的环流异常是影响东亚旱涝年际变化的直接原因, 其中欧亚中高纬积雪异常形成的冷源也是引起大气低频流型异常的主要因素之一。由 Hasselmann^[4]提出的分析气象要素场复杂动力系统时空演变的主振荡型分析 (POP) 已广泛用于 ENSO 分析和预测^[5~8]。文献[9]揭示了平流层风、赤道海平面纬向风和赤道海温资料中的 QBO 和 SO 是两种互相独立变化的信号。这表明 POP 方法是客观分析复杂高维气候动力系统主要低频信号循环过程的有效工具。它是一种在马尔可夫过程假设下派生出的广义主成分分析方法, 能较好地观测资料中提取主要低维线性动力子系统反映原来复杂气候动力系统的主要特征, 并且它的推广之一——循环主振荡型分析 (Cyclostationary POP Analysis)^[8]还能同时考虑外部循环 (如季节和日变化等) 的作用。因此, 为了研究冰雪-大气耦合系统内在统一的时空变化特征, 本文用 22 年 (1973~1994 年) 资料对欧亚 500 hPa 高度、雪盖和中国降水进行循环主振荡型分析, 从而揭示出大气-冰雪-降水耦合系统振荡的循环演变规律及其强度的季节和长期变化特征。

2 资料

本文欧亚雪盖资料取自 NOAA (美国) 提供的逐周北半球 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 经纬度网格值,

这里将它合并为 $10^\circ \times 5^\circ$ 经纬度的季频率格点值, 即格点上每季出现雪盖的周数, 时间是 1973 年 3 月~1994 年 11 月, 共 87 季。同期欧亚 500 hPa 季平均高度和中国季降水量由中国气象局提供的北半球月平均 500 hPa 高度 ($10^\circ \times 5^\circ$ 经纬度) 和中国 160 站月降水量计算。500 hPa 高度 (H) 采用东半球 39 个格点, 欧亚雪盖 (S) 选取欧亚大陆均匀分布的 36 个格点以及中国降水 (R) 均匀分布的 53 站, 所有资料都进行标准化处理, 以消除纬际变化的差异, 然后组成扩展基本资料阵

$$F = \begin{bmatrix} H & S & R \end{bmatrix},$$

$m \times n \quad m \times n_1 \quad m \times n_2 \quad m \times n_3$

其中, $m = 87$, $n_1 = 39$, $n_2 = 36$, $n_3 = 53$, $n = n_1 + n_2 + n_3 = 128$ 。

3 方法

对大气-冰雪-降水扩展矩阵 F 进行主成分分析, 用前 3 个主成分进行非整数功率谱分析, 结果表明第 1 主成分存在 40~41 季 (10 年左右) 的显著周期, 而第 3 主成分主要周期是 14 季 (3.5 年), 达 0.05 信度, 因此系统存在显著的 3~4 年周期振荡, 与 ENSO 周期相近。另外, 第 2 个主成分的主要年际变化周期是 9 季 (2.3 年, 其强度略小于 14 季的周期振荡)。下面用主振荡型分析方法 (POP) 研究大气-冰雪-降水耦合系统最显著的 3~4 年振荡循环过程。首先用一阶 Butterworth 滤波器对资料矩阵 F 中的列进行 12~16 季带通滤波, 得到环流、雪盖、降水低频场 $\tilde{F}$ 。图 1 给出了这 3 个要素 3~4 年滤波序列与原始序列的标准差比值的空间分布。图中清楚地表明高度和雪盖在亚洲中高纬地区存在大值区, 高度最大值位于东、西亚副热带 (图 1a), 雪盖另一个大值区是欧洲地区 (图 1b), 中国降水大值中心分别在江淮下游、黄河中游、长江上游和东北地区 (图 1c)。因此, 东亚中高纬环流-雪盖系统存在较显著的 3~4 年低频波的活动, 它对中国季风降水必然产生重要影响。然后, 对 $\tilde{F}$ 进行主成分分析, 取方差贡献大于 75% 的前 k 个主成分构成向量序列 $X(t)$ (空间滤波) 进行 POP 分析。由于冰雪-环流系统相互作用存在明显的季节变化, 所以本文使用循环主振荡型分析^[8]。

设随年-季演变的时间序列 x 在点 (t, τ) 上给出 [$t = 1, 2, \dots, m$ (年); $\tau = 1, 2, \dots, n$ ($n = 4$, $\tau = 1, 2, 3, 4$ 分别表示春(MAM)、夏(JJA)、秋(SON)、冬季(DJF))], 且满足 $x(t, \tau + n) = x(t + 1, \tau)$ 。因此, 受季节循环作用的振荡过程可表示为

$$x(t, \tau + 1) = A(\tau)x(t, \tau) + \text{noise}. \quad (1)$$

各季振荡过程由

$$x(t + 1, \tau) = B(\tau)x(t, \tau) + \text{noise} \quad (2)$$

确定, 且 $B(\tau) = A(\tau + n - 1)A(\tau + n - 2) \cdots A(\tau + 1)A(\tau)$, $A(\tau + n) = A(\tau)$, $x(t, \tau)$ 与 noise 无关, $B(\tau + 1)$ 和 $B(\tau)$ 具有相同的特征值 $\lambda_\tau = \lambda$ ($\lambda = \rho e^{-i\eta}$), 其特征向量是 p_τ , 满足

$$p_{\tau+1} = (r_\tau^{-1} e^{i\eta_\tau}) A(\tau) p_\tau, \quad (3)$$

上式中 $A(\tau) = C_{1,\tau} C_{0,\tau}^{-1}$, $C_{1,\tau}$, $C_{0,\tau}$ 分别是对于 τ 的时滞为 1 和 0 的协方差阵, r_τ 是阻尼率,

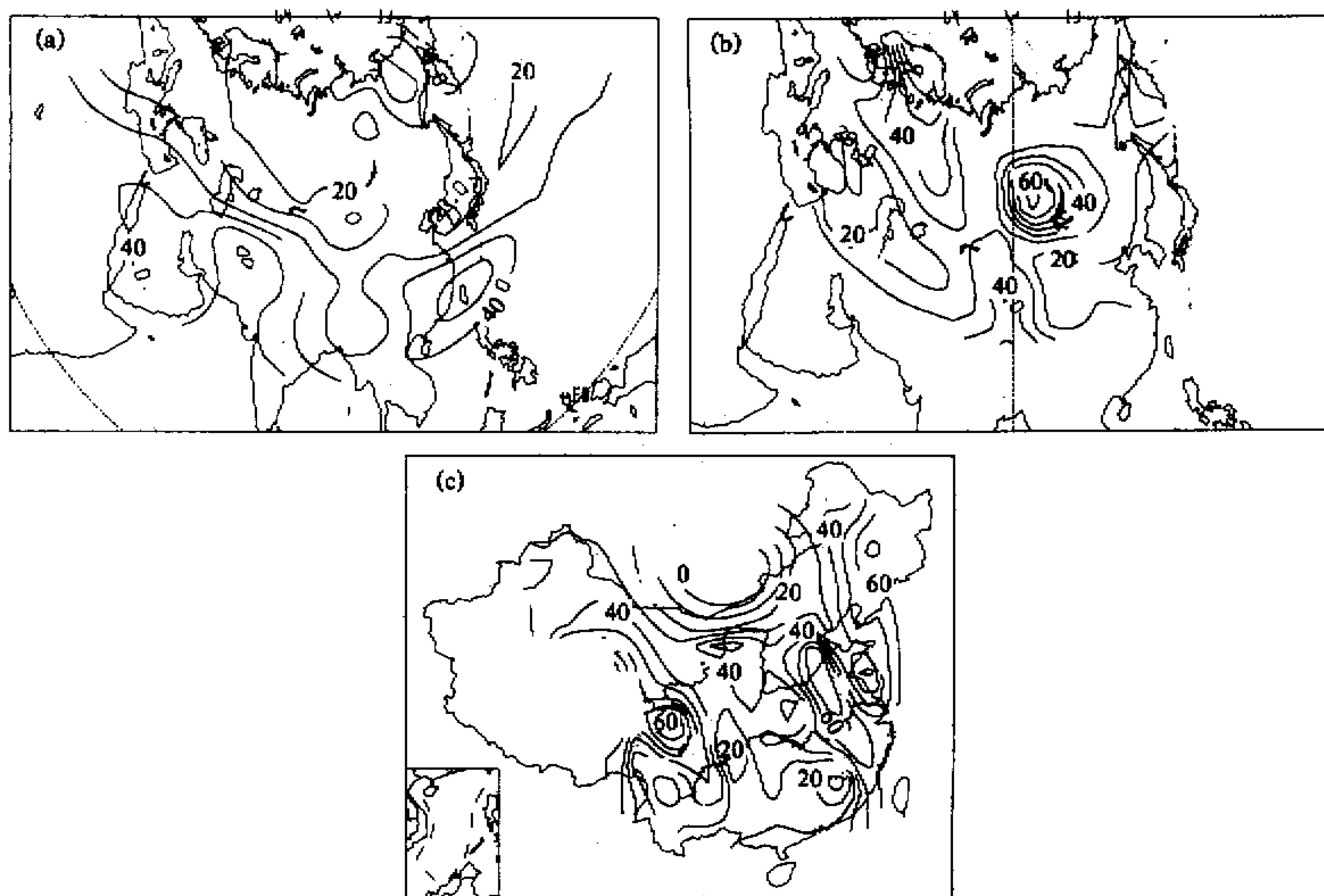


图 1 欧亚环流-雪盖-降水 3~4 年滤波序列与原始序列的标准差比值的空间分布
(a)、(b)、(c)分别是 500 hPa 高度、雪盖、中国降水。等值线间隔是 0.10 (图中数值已乘以 100)

$$r_{\tau} = \|A(\tau)p_{\tau}\|, \quad (4)$$

$$\varphi_{\tau} = \eta / n, \quad (5)$$

满足 $[p_{\tau}]^T \cdot p_{\tau} = 1$ ($p_{\tau} = p_{r,\tau} + ip_{i,\tau}$), 各季 p_{τ} 转动 φ_{τ} , 使 $p_{\tau+n} = p_{\tau}$ 。

各季 POP 系数由

$$z(t, \tau) = x(t, \tau)p_{\tau} \quad (6)$$

计算, $z(t, \tau) = z_r(t, \tau) + iz_i(t, \tau)$, 显然,

$$z(t, \tau + 1) = r_{\tau} e^{-i\eta/n} z(t, \tau) + \text{noise}, \quad (7)$$

$$z(t + 1, \tau) = \rho_{\tau} e^{-i\eta} z(t, \tau) + \text{noise}, \quad (\rho_{\tau} = \prod_{k=0}^{n-1} r_{\tau+k}, \text{ 且 } \rho_{\tau} = \rho). \quad (8)$$

振荡周期是

$$T = 2\pi / \eta, \quad (9)$$

其循环过程是

$$\cdots \rightarrow p_{i,\tau} \rightarrow p_{r,\tau} \rightarrow -p_{i,\tau} \rightarrow -p_{r,\tau} \rightarrow p_{i,\tau} \rightarrow \cdots. \quad (10)$$

由于 F 的主成分包含了环流、冰雪和降水 3 个气候要素相互作用的信息, 因而从时

滞协方差阵 $B(\tau)$ 中抽取的复特征向量反映了这 3 个要素相互作用产生的耦合空间波移动之间的联系, 并体现了对季节变化的响应。

4 大气-冰雪-降水系统 3~4 年耦合振荡

4.1 3~4 年时间尺度变化的循环主振荡型分析

对 12~16 季带通滤波资料阵 $\tilde{F}$ 进行主成分分析, 结果表明前 3 个主成分的累积方差贡献达 76.4%, 因此, 取这 3 个主成分构成向量序列 X 进行循环主振荡型分析 (CSPOP), 得到一对复特征值 $-0.072 \pm i0.764$ 和一个实特征值 0.553, 前者对应于传播型耦合空间波, 方差贡献是 60.2%, 空间波传播周期是 $T=15.1$ 季 (表 1), 而后者反映驻波型耦合空间波的演变, 且方差贡献较小 (30.8%)。所以, 对于 3~4 年时间尺度来说, 欧亚环流-雪盖-中国降水系统存在上述极显著的传播型耦合空间波 (ASRO)。图 2 是循环主振荡型分析结果, 其中 (a) 和 (b)、(c) 和 (d)、(e) 和 (f) 分别是欧亚 500 hPa 高度、雪盖和中国降水第 1 对 CSPOP 型夏季 (JJA) 的实部 $p_{r,t}$ 和虚部 $p_{i,t}$, 其它季节 $p_{r,t}$ 和 $p_{i,t}$ 各分量的空间分布基本相同, 但强度存在明显的季节变化, 其中实部 $p_{r,t}$ 各分量夏、秋季较强, 而虚部 $p_{i,t}$ 各分量中冬、春季更显著 (图略)。(g) 是对应的时系数 z_r 和 z_i , 且 z_i 超前 z_r 3.8 季。表 2 是阻尼率随季节的变化。从表中可以看出阻尼率呈现明显的季节变化, 秋季最大, 春季最小。

表 1 循环主振荡型分析结果

CSPOP1	
特征值	$-0.072 \pm i0.764$
传播周期	15.1(季)
解释方差	60.2%

表 2 阻尼率随季节的变化

时间	1	2	3	4
	春	夏	秋	冬
r_t	0.741	1.073	1.245	0.774

对于实部 $p_{r,t}$ 来说, 环流和雪盖呈现从欧洲北部经西伯利亚到东亚太平洋地区的波列结构 (EUP), 且空间位相基本相反, 而中国降水是以南方较大范围的负值分布为主, 江淮地区存在较弱的正值区, 即中国南部型 (SC), 同时西北地区是降水正值区, 这个状态代表了大气-冰雪-中国降水耦合振荡系统 (ASRO) 的某种距平 (正或负) 空间分布演变的中间位相。而虚部 $p_{i,t}$ 中 500 hPa 高度距平呈现出显著的东亚中低纬反相分布的“翘翘板”结构; 雪盖距平表现为中国北部和中亚地区是负值分布, 西亚和欧洲北部是正值区; 中国降水显示出从西北经黄河流域到长江流域正负相间的波列结构, 主要负值分布区在长江流域和西北地区, 正值分布区在华北北部和黄河上游附近, 表现为中国东部降水型 (EC), 它反映了 ASRO 的某种距平状态演变的峰值位相。由图 2a 和 2b、2c 和 2d 可知, $p_{r,t}$ 和 $p_{i,t}$ 中 500 hPa 高度和雪盖正负距平反相配合密切, 负变高对应多雪区, 且最大作用区域在东亚中高纬地区 ($p_{i,t}$ 位相), 它表明这个地区是欧亚环流-冰雪耦合作用的敏感区, 其雪盖异常直接影响环流的年际低频变化。此外, 时系数的演变 (图 2g) 也表明, ASRO 振幅存在长期变化, 80 年代中期振幅变小 (特别是虚部)。

从上述分析可知, 欧亚环流-冰雪-中国降水 3~4 年耦合振荡存在显著的环流和雪

盖的欧亚太平洋低频波列 (EUP) 和中国东部型 (EC) 降水低频波列, 它决定了 ASRO3~4 年循环过程中各分量的演变特征, 因此, 这对 CSPOP 型揭示了这 3 个气候场中主要的耦合空间波移动特征之间的联系, 其强度随季节变化, 实部夏、秋季显著, 虚部在冬、春季增强。

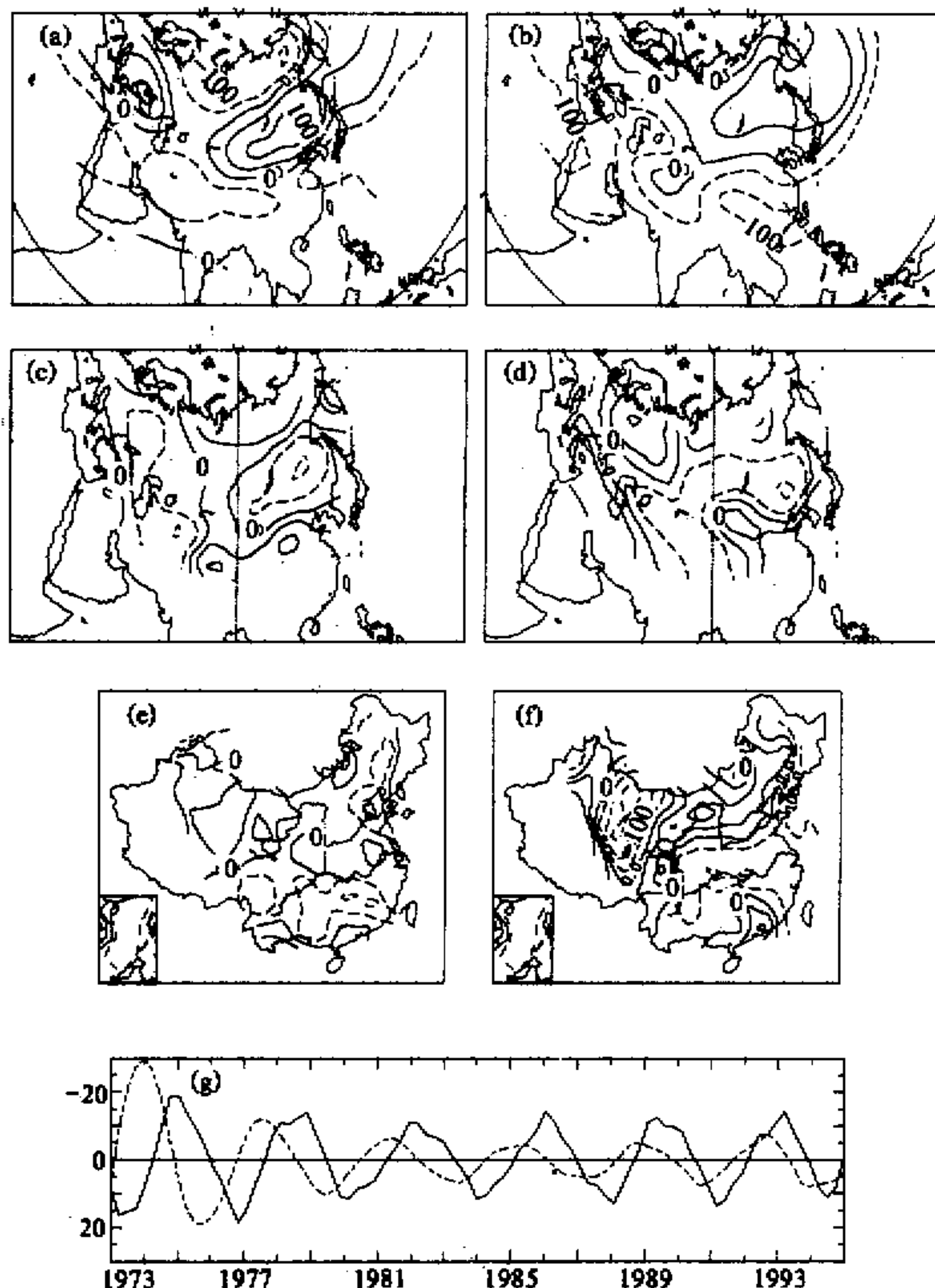


图 2 循环主振荡型的时空演变

(a)和(b)、(c)和(d)、(e)和(f)分别是欧亚 500 hPa 高度、雪盖和中国降水 CSPOP 型夏季(JJA)的实部 $p_{r,t}$ 和虚部 $p_{i,t}$, 图中数值已乘以 1000, 等值线间隔是 50, 虚线表示负值。(g)是对应的时间系数变化曲线, 实线是 z_r , 虚线是 z_i , z_i 超前 z_r 3.8 季

4.2 耦合振荡的循环过程

从第 1 对时间系数 (图 2g) 可知, 系统在一个周期内的循环顺序可用(10)式的环形状链表示, 在这个过程中, 高度和雪盖存在横跨欧亚的 EUP 波列, 一致向东南传播到西太平洋地区, 而中国降水低频波列则表现为从北向南传播的波列结构。结合 4 个季的 $p_{r,t}$ 和 $p_{i,t}$ 可知, 这种传播在冬、春季较显著 (图略)。图 3 给出了 8 个位相中的 4 个状

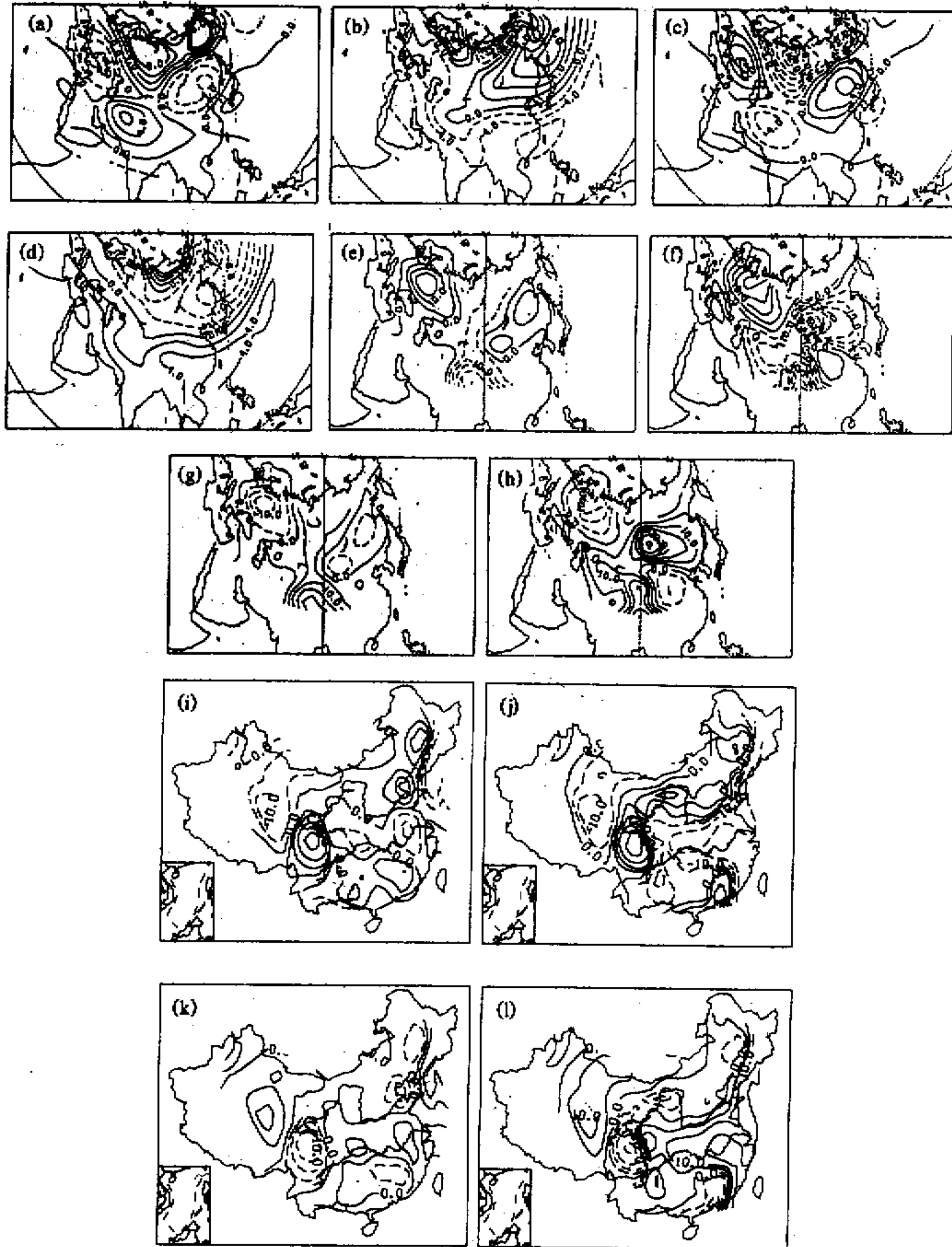


图3 欧亚 500 hPa 环流-冰雪-中国降水 3~4 年耦合振荡 4 个振荡位相合成图

(a)~(d)、(e)~(h)和(i)~(l)分别对应 500 hPa 高度、欧亚雪盖和降水，
4 个位相是 $\theta_1 \in (\frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8})$, $\theta_2 \in (\frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8})$, $\theta_3 \in (-\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8})$ 和 $\theta_4 \in (-\frac{5\pi}{8}, -\frac{3\pi}{8})$ 。

(a)~(d)、(e)~(h)等值线间隔分别是 2 gpm, 0.5%, (i)~(l)等值线级是
-80, -40, -20, -10, 0, 10, 20, 40, 80 mm

态各分量空间分布的合成图, 其中图 3a~3d、3e~3h、3i~3l 分别对应 500 hPa 高度、欧亚雪盖和中国降水在位相 θ_i ($i=1, 3, 5, 7$) 中的平均分布。 θ_i 是第 1 对复时间系数的幅角, 且 $\theta_1 \in (\frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8})$, $\theta_3 \in (\frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8})$, $\theta_5 \in (-\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8})$ 和 $\theta_7 \in (-\frac{5\pi}{8}, -\frac{3\pi}{8})$ 。由 z_r 和 z_i 的变化 (图 2g) 可确定循环的次序是 $\cdots \rightarrow \theta_1 \rightarrow \theta_3 \rightarrow \theta_5 \rightarrow \theta_7 \rightarrow \theta_1 \rightarrow \cdots$ 。图 3 清楚地显示出上述循环过程中 ASRO 一个周期内耦合空间波的移动特征, 反映出环流-雪盖-降水系统复杂的耦合作用激发的主要空间振荡型的时间变化, 体现了欧亚雪盖异常引起冷源强迫异常和影响欧亚大陆和海洋加热对比的季节演变并通过大气内部动力过程激发的空间耦合波的能量频散途径。观测和数值模拟^[10~14]表明, 大范围雪盖异常造成的局地能量收支及其水分循环的异常, 特别是造成欧亚大陆与两大洋间不均匀的加热差异对亚洲季风的年际变化具有重要影响, 理论研究^[15]也表明, 当海陆热力差异达到一定强度时, 将通过大气内部动力过程, 可以激发出流型的显著年际不稳定振荡, 从而引起短期气候异常。ASRO 的 3~4 年周期循环过程可用图 4 来概括。值得注意的是 ASRO 中降水低频波由北向南传播, 而实际低频波北移趋势更显著[对 7~16 季中国降水低频场进行 POP 分析得到两种明显分别北移 (周期是 4 年左右) 和南移 (周期是 3 年左右) 波列, 图略], 这表明对于中国降水 3~4 年低频变化来说, 同时存在低纬热源异常 (ENSO, 西太平洋暖池) 和东亚中高纬冷源的作用, 这两种作用产生的降水低频变化信号的传播特征也不同, 从标准差的空间分布 (图 1) 来看低纬热源的作用更加显著。另外, 上述 ASRO 循环过程演变特征表明在不同位相中, 中国降水空间分布表现出明显的差异性。结合时间系数演变可知, 近 20 年来中国东部主要的旱涝分布型也能很好地反映出来, 表明 ARSO 也是我国夏季旱涝成因之一。例如 1983, 1987, 1991 年长江流域洪涝出现在 $-p_{i,r}$ 位相, 中国东部大范围干旱年份, 如 1978, 1981, 1992 年均出现在 $p_{i,r}$ 位相, 1973, 1976, 1979, 1994 年长江以南降水偏多则由 $-p_{r,r}$ 表示。由此可见, 用主振荡型揭示的系统时空变化的环形状链 (10) 式估计主要低频状态演变过程, 对我国东部主要的旱涝空间分布的预测有重要意义。

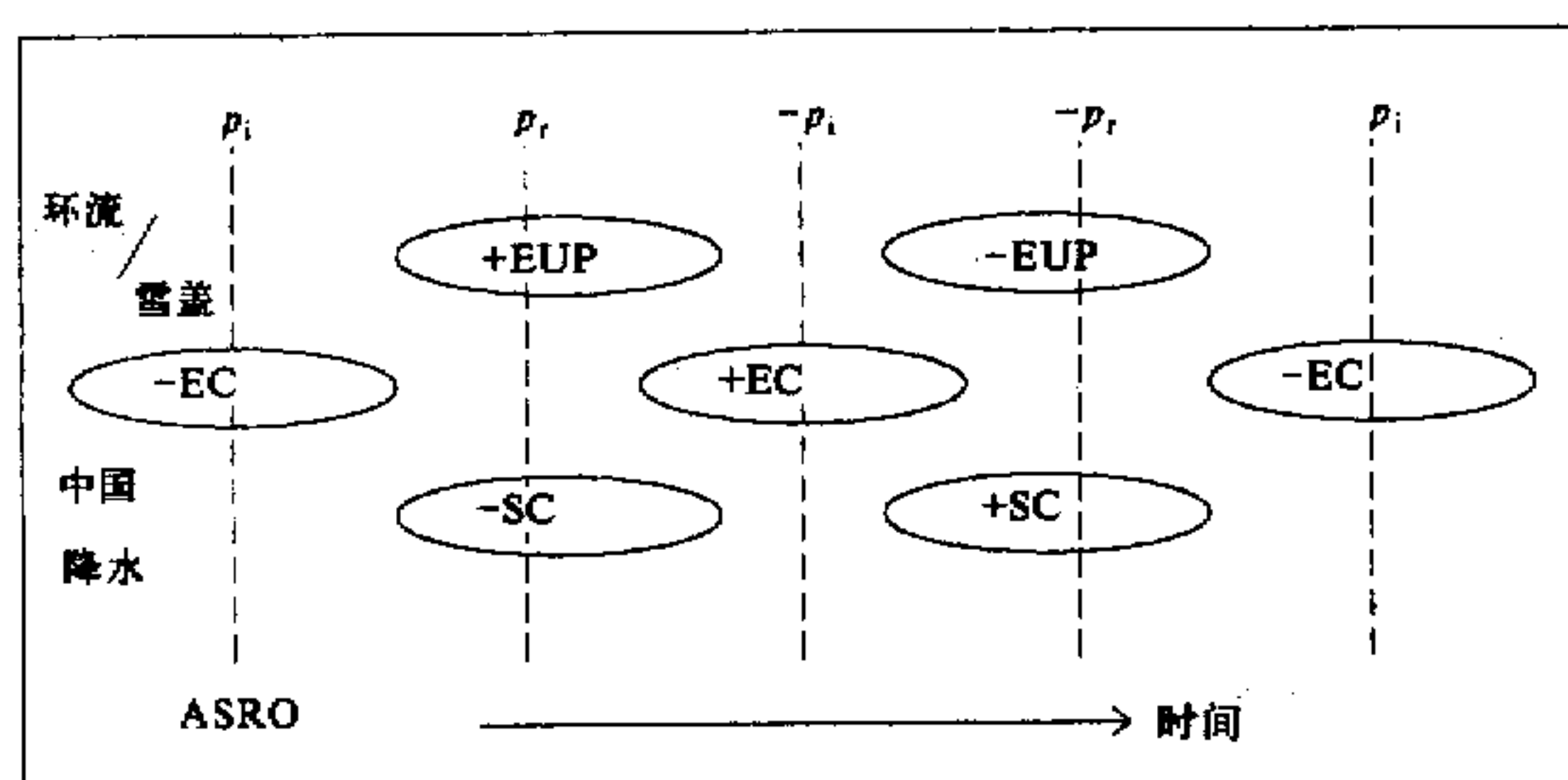


图 4 欧亚环流-雪盖-降水耦合振荡 (ASRO) 示意图

EUP: 欧亚环流、雪盖波列; EC: 中国东部降水型;

SC: 中国南部降水型, 振荡传播 $T=15.1$ 季。+、-表示峰值状态

5 结论

本文用循环主振荡型分析研究了 3~4 年时间尺度欧亚环流、冰雪和中国降水耦合振荡的时空演变,并讨论了振荡的可能机制,得到以下结论:

(1) 对于 3~4 年时间尺度来说,欧亚 500 hPa 环流和冰雪与中国降水存在显著的耦合作用,其振荡的空间分布表现为 500 hPa 环流和雪盖的欧亚太平洋波列 (EUP),两者空间位相基本相反,但一致从欧洲北部向东南方向传播到热带西太平洋地区,对应的中国降水场演变表现为从北向南缓慢传播并减弱的中国东部型波列 (EC),它反映了欧亚雪盖异常造成的冷源强迫形成的大气-冰雪-降水振荡 (ASRO) 的耦合空间波,是东亚气候年际变化的重要组成部分之一,对全球气候年际变化也有较显著影响。

(2) 耦合振荡强度随季节而变化,其中实部 $p_{r,\tau}$ 各分量夏、秋季较强,而虚部 $p_{i,\tau}$ 各分量中冬、春季更显著。其阻尼率秋季最大,春季最小。这表明秋季是 ASRO 的不稳定时期。同时它也存在显著的长期变化,80 年以前振幅较强,进入 80 年代变弱 (特别是虚部),而到 1990 年以后又趋于加强。

(3) 中国降水年际变化与耦合波演变密切相关,降水东部型 (EC) 经过 3.8 季后演变为南部型 (SC),江淮流域某种降水距平状态南移并扩展至中国南部而减弱消失,并且这种传播在冬、春季更加明显。

本文的研究表明中高纬大气冷源强迫以及欧亚海陆热力差异的季节演变引起的低频波列是造成大气环流异常的重要因子之一,它与低纬度热源异常 (ENSO、西太平洋暖池) 的作用共同引起北半球 (特别是东亚季风区) 的气候年际变化,所以全面揭示这类由不同冷热源异常激发的低频波列循环过程将能更好地作出我国短期气候变化的预报。

参 考 文 献

- 1 Jose P. Peixoto and Abraham H. Oort., 1992, *Physics of Climate*, AIP Press.
- 2 Yasunari T., 1991, The monsoon year—a new concept of the climate year in the tropics, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **72**, 1331~1338.
- 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 Hasselmann, K., 1988, PIPs and POPs: the reduction of complex dynamical systems using principal interaction and oscillation patterns, *J. Geophys. Res.*, **93**, 11015~11021.
- 5 Xu J.S. and H. von Storch, 1990, Predicting the state of SO using principal oscillation patterns analysis, *J. Climate*, **3**, 1316~1329.
- 6 Xue Y., M.A. Cane, S.E. Zebiak and M.B. Blumenthal, 1994, On the prediction of ENSO: A study with a low order Markov model, *Tellus*, **46A**, 512~540.
- 7 Tang B., 1995, Periods of linear development of the ENSO cycle and POP forecast experiments, *J. Climate*, **8**, 682~691.
- 8 von Storch H., G.Bürger R. Schunr and J.-S. von Storch, 1995, Principal oscillation pattern: a review, *J. Climate*, **8**, 377~400.
- 9 Xu J.S., 1992, On the relationship between the stratospheric QBO and the tropospheric SO, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 725~734.
- 10 Groisman, P. Ya, T. R. Karl, R. W. Knight and G. L. Stenchikov, 1994, Changes of snow cover, temperature

- and radiative heat balance over the Northern Hemisphere, *J. Climate*, 7(11), 1633~1656.
- 11 Vernekar A.D., J. Zhou and J. Shukla, 1995, The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon, *J. Climate*, 8(2), 248~266.
 - 12 Li, C. and M. Yanai, 1996, The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast, *J. Climate*, 9, 358~375.
 - 13 Yang, S. and K.M. Lau, 1996, Precursory signals associated with interannual variability of the Asian summer monsoon, *J. Climate*, 9(5), 949~964.
 - 14 Barnett, T.P. et al., 1989, The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations, *J. Atmos. Sci.*, 46, 661~685.
 - 15 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 Coupled Oscillations of 500 hPa Circulations / Snow Cover in Eurasia / Rainfall in China on the Time Scale of 3~4 Years

Yang Qiuming

(Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract The cycle evolutions of the coupled systems for the 500 hPa circulations in the Eastern Hemisphere / snow cover in Eurasia / rainfall in China on the time scale of 3~4 years are identified by using the Cyclostationary Principal Oscillation Pattern (CSPOP) analysis, based on the data of 22 years (1973~1994). The results indicate that the coupled oscillation of atmosphere circulation / snow cover / rainfall (ASRO) exhibit the dominant wavetrain from Eurasia to the western Pacific (EUP) for the 500 hPa height and the snow cover with rainfall wavetrain in the eastern China (EC). This is consistent that wavetrain moving towards the southeast and there are the spatial phase with the opposite sign between height field and snow cover. The rainfall wavetrain propagate towards the south. It is reflected that energy dispersion paths of the coupled space waves excited by internal dynamic process of atmosphere as the variations of the sea-land contrast in Eurasia are caused by the snow cover anomalies.

Key words cyclostationary POP analysis coupled systems of circulation / snow cover / rainfall coupled oscillation Eurasia rainfall in China