

欧亚雪盖准2年振荡对中国降水的影响

杨秋明

(江苏省气象台, 南京 210008)

摘要 用22年(1973~1994年)季平均欧亚大陆雪盖资料和中国降水资料进行主振荡型分析(POP)和伴随相关分析,研究了欧亚雪盖准2年振荡(QBO)对中国降水影响的循环过程,结果表明中国降水低频场存在两种不同的伴随相关型,其主要响应区域在西部和长江以南地区,另外,长江下游和东北部分地区也有较显著响应,这是欧亚积雪造成的不均匀加热分布激发的大气异常流型的反映。

关键词 欧亚雪盖 准2年振荡 主振荡型分析 中国降水 伴随相关分析

1 引言

热带海气耦合系统的QBO和ENSO主要由低纬洋面热源异常引起^[1~3],而对于北半球中高纬度来说,积雪所在的下垫面形成的异常冷源是作用于大气环流的主要因子之一,它的时空变化对于陆地的能量收支和水分循环有显著影响^[1,4]。因此,研究中高纬大陆冰雪时空演变特征及其对环流和降水的影响是认识短期气候变化规律的一个重要方面。文献[5]分析了近30年来我国积雪的变化规律,文献[6,7]分别用数值模拟研究了欧亚雪盖对印度夏季风的作用和青藏高原积雪对东亚大气环流的影响,而欧亚大范围雪盖异常对我国降水变化影响的空间分布尚未分析。因此,本文用22年(1973~1994年)季平均欧亚雪盖和中国降水资料进行主振荡型分析和伴随相关分析,详细研究了欧亚雪盖准2年主振荡型的时空变化及其对中国降水影响的循环过程和可能机制。

2 资料与方法

欧亚雪盖资料取自NOAA(美国)提供的1973~1994年期间的逐周北半球雪盖 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度网格值,这里将它合并为 $10^\circ \times 5^\circ$ 经纬度的季频率网格值(格点上每季出现雪盖的周数,22年共87个季),它反映了雪盖强度的分布。中国季降水资料由中央气象台长期科提供的中国160站月降水量选取53站计算。首先对欧亚范围内均匀分布58个网格点的雪盖资料进行标准化处理,经主成分分析后,对第1主成分由非整数功率谱分析精确计算主要年际变化周期,然后用一阶Batterworth滤波器对原始资料作带通滤波处理得到欧亚雪盖低频场 $S_{m \times n}$,序列长度 $m=87$,空间点数 $n=58$ 。下面对 $S_{m \times n}$ 进行主振荡型(POP)^[8]分析,揭示低频循环过程的演变特征。取 $S_{m \times n}$ 的累积方差贡献较大的 k_0 个主成分构成向量序列 $X(i)$,并设 $X(i)$ 满足

$$X(t+1) = AX(t) + \text{forcing}, \quad (1)$$

其中, 非对称实矩阵 $A = C_1 C_0^{T-1}$, C_1 和 C_0 分别是 $X(t)$ 的时滞 1 和 0 的相关阵, 且 $X(t)$ 与 forcing 无关。由 QR 方法计算得到 A 的复特征根 $\lambda = \lambda_1 \pm i\lambda_2$ 和复特征向量 $p = p_r \pm ip_i$ 。作变换 $p = \alpha p$ (α 是复常数), 使 $(p_r \cdot p_i) = 0$, 且 $|p| = 1$, 得到雪盖主振荡型的空间分布 p_r (实部) 和 p_i (虚部)。 $X(t)$ 在 p 上展开得到时间系数

$$Z(t) = X(t)p, \quad (2)$$

其中, $Z(t) = z_r + iz_i$, 且满足差分方程

$$Z(t+1) = \lambda Z(t). \quad (3)$$

对应的主振荡型的时空演变可表示为

$$X(t) = z_r p_r + z_i p_i = |\lambda|^t (\cos(\eta t) p_r - \sin(\eta t) p_i), \quad (4)$$

其中, $\lambda = |\lambda| \exp(-i\eta)$, η 是复特征值 λ 的幅角 ($\eta = \arctan(\lambda_2/\lambda_1)$), 它的方差贡献是

$$s_r = 1 - \frac{\langle e^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle} \quad (5)$$

(5) 式中误差向量 $e = X(t) - z_r(t)p_r - z_i(t)p_i$, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均, 则系统的空间演变表现为一环形状链:

$$\cdots \rightarrow p_i \rightarrow p_r \rightarrow -p_i \rightarrow -p_r \rightarrow p_i \rightarrow \cdots \quad (\eta > 0) \quad (6)$$

或

$$\cdots \rightarrow p_r \rightarrow p_i \rightarrow -p_r \rightarrow -p_i \rightarrow p_r \rightarrow \cdots \quad (\eta < 0), \quad (7)$$

振荡传播周期是

$$T = 2\pi/\arctan(\lambda_2/\lambda_1), \quad (8)$$

衰减时间是

$$\tau = -1/\ln|\lambda| \quad (9)$$

为了在中国低频降水场 $R_m \times l$ ($m = 87$, $l = 53$) 中寻找上述振荡的相关信号, 由下式

$$\langle ||R - \frac{z_r}{\sigma_r} r_r - \frac{z_i}{\sigma_i} r_i||_2 \rangle = \min \quad (10)$$

计算 r_r 和 r_i 。令 $z_{r1} = z_r/\sigma_r$, $z_{i1} = z_i/\sigma_i$, (10) 式相当于求解 R 对于 z_{r1} 和 z_{i1} 的回归:

$$R(t) = z_{r1}(t)r_r + z_{i1}(t)r_i, \quad (11)$$

于是, 可得到降水低频场伴随相关型:

$$r_r = \frac{\langle R(t) \cdot z_r(t) \rangle}{\langle z_r(t) \cdot z_r(t) \rangle} \quad (12)$$

和

$$r_i = \frac{\langle R(t) \cdot z_i(t) \rangle}{\langle z_i(t) \cdot z_i(t) \rangle}, \quad (13)$$

(10) 式中 $||\cdot||_2$ 表示 2-范数, σ_r , σ_i 分别是 z_r 和 z_i 的标准差。与 (6)、(7) 式对应,

伴随相关型的空间演变也是一环形状链:

$$\cdots \rightarrow r_i \rightarrow r_r \rightarrow -r_i \rightarrow -r_r \rightarrow r_i \rightarrow \cdots \quad (\eta > 0) \quad (14)$$

或

$$\cdots \rightarrow r_r \rightarrow r_i \rightarrow -r_r \rightarrow -r_i \rightarrow r_r \rightarrow \cdots \quad (\eta < 0), \quad (15)$$

而解释方差的空间分布是

$$\epsilon_a(r) = - \frac{\alpha_{a,j}^2}{\sigma_j^2}, \quad (16)$$

其中, $\alpha_{a,j}^2$ 和 σ_j^2 ($j = 1, l$) 分别是拟合误差方差和总方差。

3 主振荡型分析

用非整数功率谱分析对欧亚雪盖原始资料的第 1 主成分进行计算, 表明仅存在较显著的 9 季左右的周期, 其统计量 F 值是 2.40, 没有达到 0.05 信度, 说明原始资料中包含了较强的噪声。经 7~10 季带通滤波后, 得到欧亚雪盖准 2 年时间尺度低频场进行主成分分析, 采用前 7 个主成分 (累积方差贡献是 87.2%) 组成向量序列 $X(t)$, 得到两对显著的主振荡型空间分布 p_r 和 p_i 以及对应的时间系数实部 $z_r(t)$ 和虚部 $z_i(t)$ (图 1), 解释方差分别是 29.8% 和 22.1%, 空间波传播周期分别是 8.33 和 7.80 季 (2 年左右), 衰减时间分别是 120.3 和 30.4 季。其余的主振荡型解释方差贡献较小且衰减时间较短, 因而稳定性较小。

3.1 第 1 主振荡型 (POP1)

3.1.1 实部

图 1a 是第 1 主振荡型的实部 (p_r), 以正值分布为主, 主要大值区域在中亚到东北亚一带, 中国黄河以南和东欧地区存在弱的负值区, 它反映了欧亚大范围某种雪盖距平异常发展的峰值状态。

3.1.2 虚部

图 1b 表示虚部 (p_i), 它呈现正负相间分布的带状结构, 正值分布带在东北亚至西伯利亚向南到我国西部和北部以及东南亚到欧洲南部一带, 而北欧到中欧直至伊朗高原地区是负值分布带, 另外, 贝加尔湖附近还有一个弱的负值中心, 它体现了欧亚某种雪盖距平异常的中间状态。

3.1.3 时间变化

由图 1c 可发现 z_r (实部) 落后 z_i (虚部) 四分之一周期 (约 2 季), 且振幅随时间不均匀变化, 1976 年以前和 80 年代振幅较大, 处于活跃阶段。而 1977~1980 年和 90 年代以来振幅变小, 是相对平静阶段。雪盖准 2 年振荡强度的长期变化反映了复杂的冰

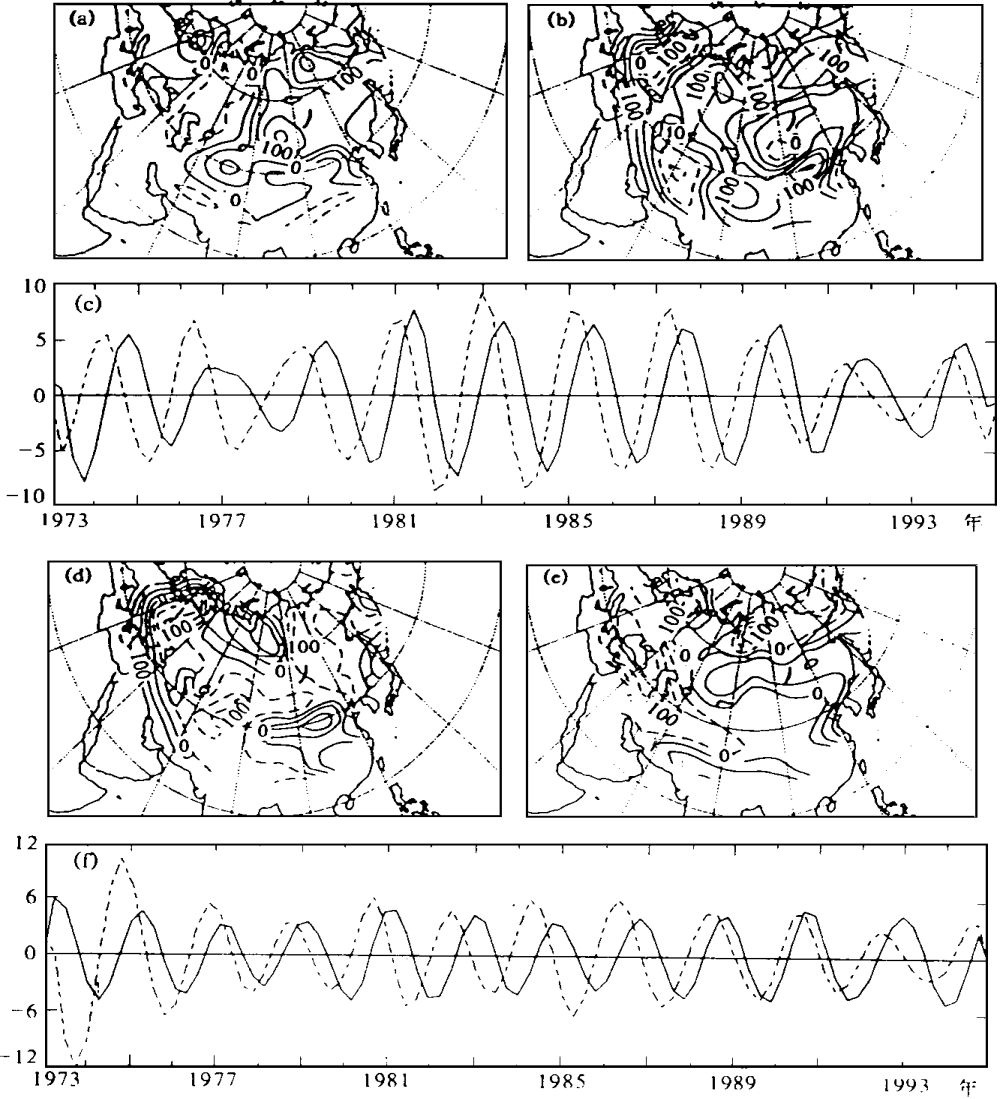


图1 欧亚雪盖准2年主振荡型的空间分布

(a) ~ (c) 和 (d) ~ (f) 分别对应于 POP1 和 POP2, (a)、(d) 是 p_r (实部),
(b)、(e) 是 p_i (虚部), 其中等值线间隔是 50, 图中数值已乘以 1000, 虚线表示负值;
(c)、(f) 是时间系数, 其中实线和虚线分别表示 z_r 和 z_i , z_i 超前 z_r 四分之一周期 (半年)

雪/大气系统内部反馈过程产生的气候自然变化的不稳定性,这也是非线性系统演变的共同特征。

3.2 第2主振荡型 (POP2)

3.2.1 实部

图1d是第2主振荡型的实部 (p_r),从中亚到东北亚以负值分布为主,主要正值区域在西亚到欧洲南部和西伯利亚北部一带,此外,中国北部还有一个较小范围的正值区,它反映了欧亚大范围另一种雪盖距平异常发展的中间状态。

3.2.2 虚部

图 1e 表示虚部 (p_i), 它在东亚青藏高原向北到东北亚呈现正负相间分布的带状波列结构, 正值分布带在青藏高原和东亚中纬 $50 \sim 60^\circ\text{N}$ 附近, 负值带在中国北部和东北亚, 另外, 西亚中纬到欧洲是负值区, 它体现了东亚中纬某种雪盖距平空间波 (称为东亚型 (EA)) 发展的峰值状态。

3.2.3 时间变化

由图 1f 可发现 z_r (实部) 也落后 z_i (虚部) 四分之一周期 (约 2 季), 但振幅随时间变化较小, 说明近 22 年来 PO P2 具有较好的时间稳定性, 这种雪盖准 2 年振荡由冰雪/大气相互作用的线性子系统控制。

因此, 以上分析表明这两种分别以纬向和经向传播为主的振荡空间分布型是欧亚大陆地区冰雪与大气环流相互作用激发的准 2 年振荡的基本模态, 它的演变改变了下垫面不均匀加热分布以及能量收支和水分循环过程, 对东亚冬夏季风的强弱有直接影响。

3.3 欧亚雪盖准 2 年振荡的循环过程

下面对欧亚雪盖准 2 年振荡循环过程中的重要特征进行分析。由时间系数 z_r, z_i 的变化, 可知这两个振荡系统按下列顺序变化:

$$\cdots \rightarrow p_i \rightarrow p_r \rightarrow -p_i \rightarrow -p_r \rightarrow p_i \rightarrow \cdots .$$

对于第 1 主振荡型 (图 1a~c), 不失一般性, 可设初始位相是 p_r , 这时欧洲大部分、中亚到东北亚是大范围正距平区, 仅东欧和黄河以南有微弱的负距平存在, 经过 2 季 (四分之一周期), $-p_i$ 占主导地位, 欧洲正距平区加强, 中亚正距平区西移到伊朗高原地区并加强, 而中亚到东北亚被大范围负距平区代替, 贝加尔湖地区仅维持小片正距平区, 即多雪区收缩到欧洲大部 and 伊朗高原地区一带, 表示大范围欧亚雪盖西南与东北正负相反的距平分布的峰值位相。到了一半周期时, 空间分布变为 $-p_r$, 正距平带减弱消失, 欧亚变成大范围负距平分布, 紧接着的四分之一周期后, 发生与前半周期中的相反状态的变化, 大范围负距平加强西移并收缩到欧洲中部和北部以及西亚中纬度一带, 西伯利亚到中亚正距平发展到峰值状态。到一个周期时, 这种强烈的欧亚西南部与东北部负正距平对比分布消失, 出现最初的正距平分布, 如此循环往复。这个循环过程的特点是一种亚洲大范围雪盖距平状态建立后在之后的四分之一周期内西移加强且范围收缩到欧洲和西亚中纬度一带并发展至纬向正负距平反相分布状态, 到半周期时消失, 接着出现另一种距平状态, 在下半周期中向相反距平分布演变。同样对于第 2 主振荡型 (图 2d~f) 其循环过程的特点是表现东亚和西亚、欧洲地区两支向北传播的雪盖波列。这两种显著的下垫面冷源分布的变化将有利于激发中纬度西风带中 Rossby 波动形成和能量频散。另一方面, 积雪造成的土壤湿度异常将导致后期欧亚大陆内部加热源 (汇) 的重新分布, 激发出新的流型, 这种间接强迫机制也是大气环流异常形成的一个动力学途径^[1, 5~7]。

4 伴随相关分析

对中国降水量准 2 年低频场 (经 7~10 季带通滤波处理) 与欧亚雪盖主振荡型进行

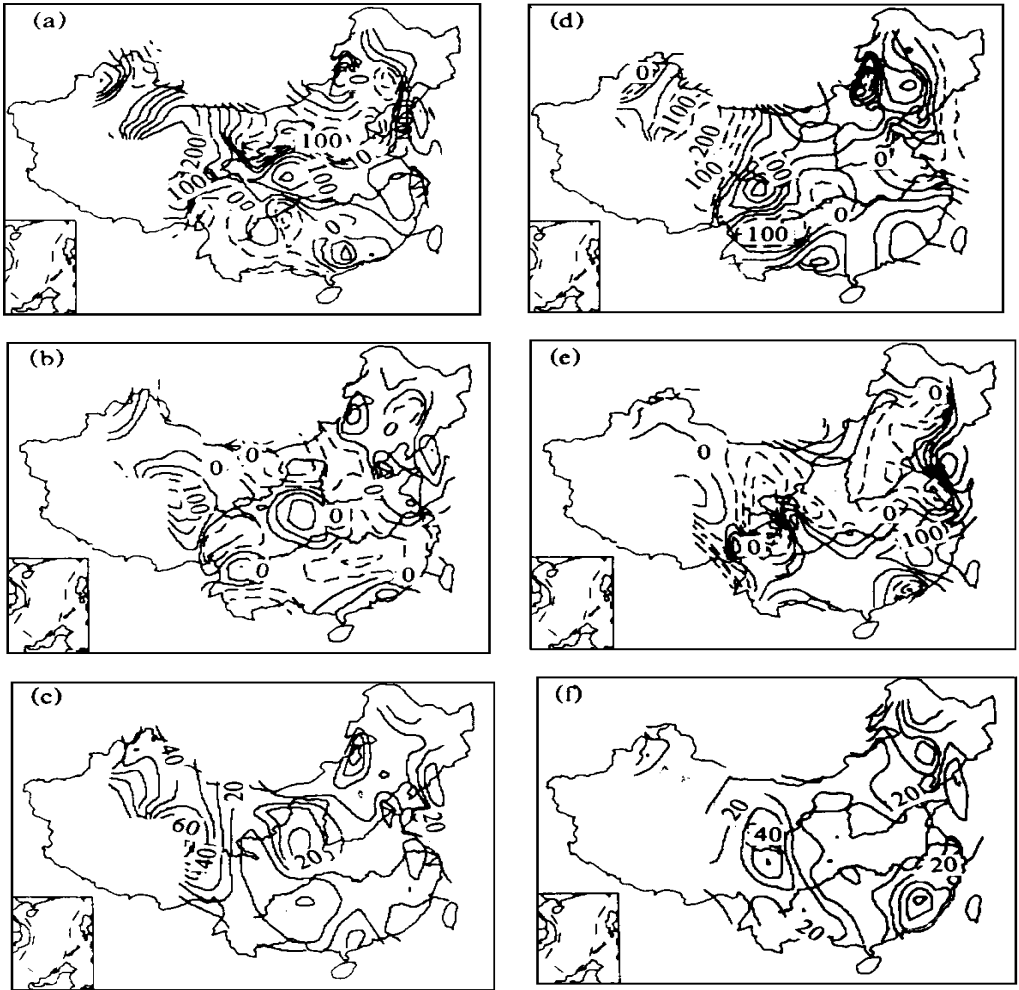


图2 中国降水伴随相关型

(a) ~ (c) 和 (d) ~ (f) 分别对应于 POP1 和 POP2, (a)、(d) 是 r_r (实部);

(b)、(e) 是 r_i 虚部; (c)、(f) 是解释方差。(a)、(b) 和 (d)、(e) 中等值线间隔是 50,

虚线表示负值, 图中数值已乘以 1000; (c)、(f) 中等值线间隔是 10%, 图中数值已乘以 100

伴随相关分析, 结果见图 2。对于第 1 主振荡型 (图 2a~c), 从其实部 (r_r) 可以看出西南和华北北部是负值区, 华南东部、长江下游和黄河上游各存在一个正值中心 (图 2a), 而虚部 (r_i) 中, 从西南到长江流域向北至华北是大范围负值带, 汉水流域和东北西部存在显著正值中心 (图 2b), 这两个空间分布型反映了中国低频降水场某种距平响应分布的初始状态和峰值状态, 其循环过程是

$$\cdots \rightarrow r_i \rightarrow r_r \rightarrow -r_i \rightarrow -r_r \rightarrow r_i^* \rightarrow \cdots$$

它的主要特点是黄河上游以北地区某种降水距平 (正或负) 建立在四分之一周期内 (2 季) 南移至汉水流域, 然后减弱消失。另外, 在华南南部、东北西部和长江下游地区各存在较弱的空间波的传播。图 3 给出了亚洲中高纬雪盖 (A SN)、黄河上游以北 (N YR)

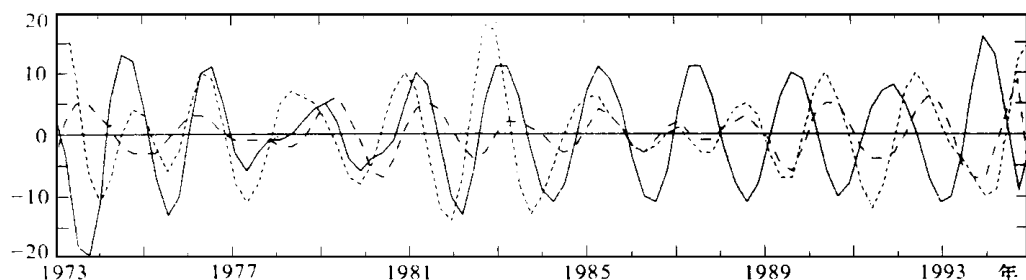


图3 准 2 年低频滤波曲线

实线: ASN; 虚线: NYR; 点线: SCR。雪盖单位: %, 降水单位: mm

和华南和西南 (SCR) 降水准 2 年低频滤波曲线。图 3 显示出 ASN 与 NYR 反位相 (对于 1976 年以前和 1986 年以后的活跃期), 且超前 SCR $\pi/2$ 位相。但是, 在 1976~1985 年间却呈现出 ASN 落后 SCR $\pi/2$ 位相, 这与 1977~1980 年间振荡强度突然变小有关 (图 1c)。从解释方差的空间分布 (图 2c) 可清楚地表明黄河上游是强响应区, 而华南、西北、东北及长江下游部分地区是较强响应区。另外, 由时间系数 z_n 、 z_i 变化可知, 我国黄河上游与华南和西南旱涝年均与 p_r 和 p_i (或 r_r 和 r_i) 状态变化有密切联系, 对于黄河上游多雨年 (1973、1976、1981、1983、1989 年) 和少雨年 (1974、1978、1986 年) 分别对应于 p_i 和 $-p_i$ 位相, 华南西部旱涝变化与 p_n 、 p_i 也有类似关系。所以伴随相关型的循环演变过程也为上述地区夏季降水预测提供了有用的预测信号, 有助于提高长期预报精度。

同样, 图 2d~f 给出了中国降水准 2 年低频场与第 2 主振荡型的伴随相关型及解释方差空间分布。从图 2f 可以看出主要响应区在长江以南和上游地区以及东北地区, 由伴随相关型的循环过程可知这 3 个区域降水扰动分别向南、西北和西传播。结合第 2 主振荡型的演变可知青藏高原雪盖出现正距平 (p_i) 半年后中国长江以南形成大范围多雨区 (r_r), 这与已有的关于前期冬季青藏高原雪盖与后期长江以南降水成显著正相关是一致的^[4], 并且本文进一步客观地揭示了这种雪盖距平向北移动与长江以南降水扰动向南传播且发展之间的联系, 它是东亚冰雪/环流相互作用引起中国东部降水异常的一种主要过程。

此外, 从图 2c 可发现, 对于 POP1 的响应的主要解释方差大值中心在黄河上游和西北、东北以及长江下游、华南部分地区。而东北或西北虽然个别站点数值较大, 但影响区域不大。对于 POP2, 其主要响应区集中在长江以南和上游附近以及东北大部分地区。所以欧亚雪盖准 2 年周期振荡对中国降水低频场上述地区具有较大的可预报性。而对未滤波的中国降水量计算伴随相关型 (图略), 不存在解释方差显著区域 ($> 10\%$), 这说明降水量中噪声较大, 影响我国降水量年际变化因子的多元性和复杂性, 即使某种时间尺度的低频降水场, 其响应范围也局限在少数几个区域, 所以欧亚雪盖异常对我国降水的影响是仅在一定的时空尺度上进行的。同时上述结果也表明中国降水对欧亚雪盖变化的响应是一种低频响应, 季节时间尺度以上冰雪异常将明显影响大气环流的季节调整和年际变化 (通过冷源直接强迫或改变大气内部加热分布引起新的流型的间接强迫), 从

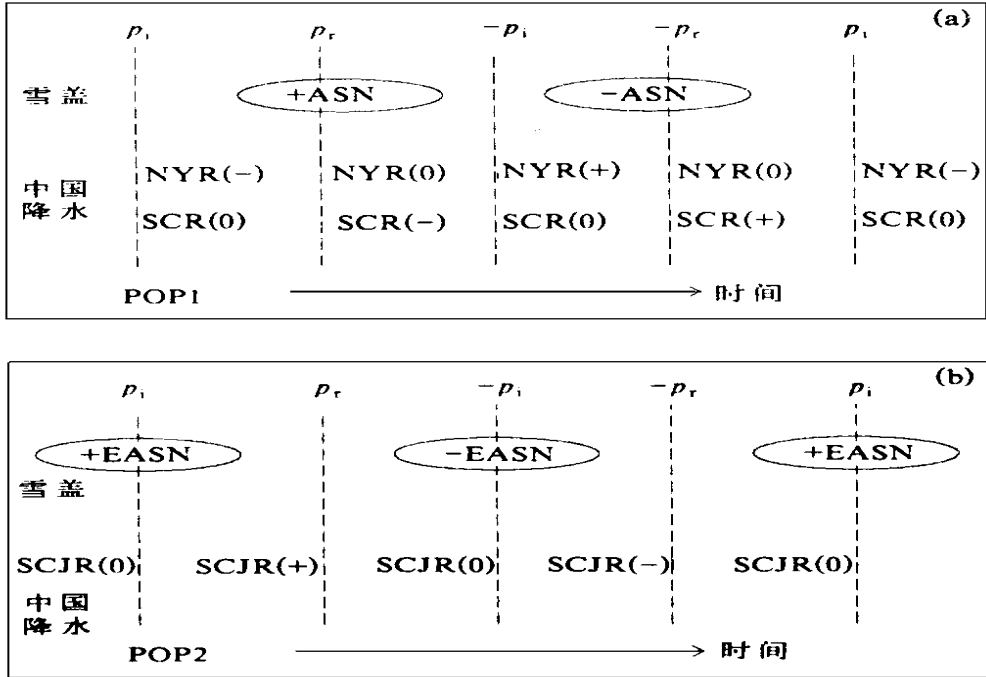


图4 欧亚雪盖准2年振荡对中国降水影响示意图

- (a) POP1 (ASN: 亚洲中高纬雪盖; NYR: 黄河上游以北降水; SCR: 华南降水);
(b) POP2 (EASN: 东亚中纬雪盖波列; SCJR: 长江以南降水)。(a)、(b) 的振荡周期分别是 2.1、1.9 年。+、- 是峰值位相, 0 是中间位相

而引起亚洲冬、夏季风强度的年际变化。通过以上分析, 中国降水低频场对欧亚雪盖准 2 年振荡响应的两种循环过程可用图 4 来归纳。

5 结论

(1) 欧亚雪盖年际变化中存在极显著的准 2 年周期振荡, 由主振荡型客观揭示出反映欧亚大范围雪盖距平异常状态的峰值位相和中间位相的两对主振荡型的 p_r (实部) 和 p_i (虚部), 系统按顺序 $\cdots \rightarrow p_i \rightarrow p_r \rightarrow -p_i \rightarrow -p_r \rightarrow p_i \rightarrow \cdots$ 演变, POP1 的特征是中亚到东北亚一种雪盖距平状态建立后的 2 季中西移加强且范围收缩到欧洲和西亚中纬度一带并发展到欧亚西南与东北部显著的正负距平反相分布状态而减弱消失。POP2 的演变特征表现在东亚和西亚、欧洲地区两支向北传播的雪盖波列。雪盖距平场空间波的这两种主要演变过程将造成下垫面冷源异常直接激发大气低频流型或影响欧亚大陆地区能量收支和水分循环而改变大气内部加热源 (汇) 的强度, 间接激发出异常流型, 造成亚洲冬夏季风强度的年际变化。

(2) 中国降水对欧亚雪盖准 2 年周期产生显著的低频响应, 对于 POP1, 主要响应区在黄河上游附近, 另外, 在东北和西北部分地区也存在范围较小的强响应中心, 而长江下游和华南西南部还各有一块较强的响应区。POP2 的响应区域主要在长江以南地区、长江上游和东北地区, 其中中国西部和东北部降水异常由雪盖异常直接引起, 长江以南和

上游降水异常可能由雪盖空间波的变化影响欧亚大陆加热状态使东亚季风环流异常而引起。

(3) 欧亚雪盖准 2 年振荡循环过程对中国降水低频场中的黄河、长江上游地区、长江以南地区和东北地区具有较大的可预报性, 其它地区可预报性较小。这反映了中国降水低频变化成因的复杂性和多元性。

参 考 文 献

- 1 Peixoto, Jose P. and Abraham H. Oort, 1992, *Physics of Climate*, A ip 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 章基嘉等, 1994, 中长期天气预报基础, 北京: 气象出版社, 313~319.
- 5 李培基, 1990, 近 30 年来我国雪量变化的初步探讨, *气象学报*, **48** (4), 433~437.
- 6 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.
- 7 卢咸池、罗勇, 1994, 青藏高原冬春雪盖对东亚夏季大气环流影响的数值试验, *应用气象学报*, **5**, 385~393.
- 8 Hasselmann, K., 1988, PIPs and POPs: The reduction of complex dynamical systems using principal interaction and oscillation patterns, *J. Geophys. Res.*, **93**, 11015~11021.

The Effect of Biennial Oscillation of Snow Cover in Eurasia on the Rainfall in China

Yang Qiuming

(Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract The principal oscillation pattern (POP) analysis and associated correlation analysis are performed based on the data of a recent 22-year period (1973~1994), and the cycle evolutions for the effect of biennial oscillations of snow cover in Eurasia on the rainfall in China are investigated. Results suggest that there are two kinds of the notable associated correlation patterns and that the dominant response regions of low frequency field of the rainfall appear in the western China and the south of the Yangtze River. In addition, there are more stronger response region in northeast China and the lower reaches of the Yangtze River. It is caused by the anomalous flow patterns excited by uneven heating distribution associated with the intensity of snow cover in Eurasia.

Key words Eurasian snow cover biennial oscillation principal oscillation pattern analysis rainfall in China associated correlation analysis