

基于复杂网络的北半球遥相关年代际变化特征研究*

龚志强¹⁾ 支蓉¹⁾ 侯威¹⁾ 王晓娟^{2)†} 封国林¹⁾³⁾

1) (国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

2) (常熟理工学院物理与电子工程学院, 常熟 215500)

3) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2010年11月22日收到; 2011年4月15日收到修改稿)

基于北半球中高纬度环流系统关联网, 研究了冬季北半球各种遥相关年代际尺度的变化特征及其与气候突变的可能联系等. 研究表明, NAO, EUPA 和 WP 等遥相关的作用中心在 1970 年代中后期和 1990 年代初期均对应有显著的跃变过程, 且主要空间模态也发生一定的变化. 结合网络顶点度, 定义直接体现遥相关作用强弱的指数并分析其随时间的变化: 1980 年代以前以 PNA, EUPA 和 WP 三种模态的共同作用为主导, 1980 年代以后 NAO 的作用显著增强, 1987 年以后 AO 的作用显著增强, 其他模态的作用则相对较弱. 因此, 多种遥相关年代际尺度的调整可能是 1970 年代中后期和 1990 年代初期气候突变的重要表现形式之一.

关键词: 复杂网络, 遥相关, 年代际变化, 气候突变

PACS: 92.60.Wc

1 引言

气候系统是由多个子系统组成的, 多圈层、多要素、多尺度的共同作用, 它们之间以某种或多种方式发生复杂的非线性和非平衡相互作用, 导致其不仅在时间上而且在空间上产生各种复杂形式的关联结构, 形成了外有强迫、内有非线性耗散的复杂巨系统^[1-7]. 气候系统内部的空间关联性是系统复杂性的重要表现形式之一, 主要研究包括: 1) 以 Wallace 和 Gutzler 等^[8] 提出的五大遥相关为代表的环流系统内部关联性研究; 2) 以赤道中东太平洋海表温度同步变化为代表的海洋系统内部的关联性研究等. 因此, 气候系统的整体行为并非简单的子系统行为叠加, 从整体上把握其内部的各种相互作用, 对于更好地理解气候系统内部的各种复杂动力学过程等, 具有重要的指导意义.

以往对遥相关的研究主要基于气候系统内部

的各种关联性, 讨论各种遥相关的空间和时间尺度特征等. 此类研究针对性很强, 可以细致地分析气候系统内区域间的关联作用等, 但大多针对某一种遥相关的分析, 且主要考虑负关联作用, 忽略了从区域子系统的宏观角度研究其结构特征^[9-12]. 然而, 1) 气候系统的空间关联结构特征包括正关联和负关联作用、长程关联和短程关联作用、稳定关联和动态关联作用等, 是空间结构复杂性的宏观体现. 2) 气候系统的关联结构特征体现了系统内部区域作用的强弱及区域之间信息传递的效率等. 因此, 有必要从空间拓扑结构特征的角度研究区域气候子系统的复杂性, 进而更好地抓住系统内部本质的关联作用, 从新的角度理解系统的内秉复杂性^[13-15].

复杂网络理论和气候系统关联作用研究的结合为气候系统空间关联结构特征的研究开辟了新的道路和方向. Tsonis 等^[16] 提出了结合复杂网络

* 国家自然科学基金 (批准号:40930952, 40875040), 公益性行业专项 (批准号:GYHY201006021 和 GYHY20110 6016) 和国家科技支撑计划 (批准号:2007BAC29B01) 资助的课题.

† E-mail: mouse0903@126.com

理论,充分考虑系统内部的负相关和正相关,从宏观整体角度理解气候系统的空间结构,从而使通过简单的结构特征量来描述系统的复杂关联结构特征成为可能. Yamasaki 等^[17]研究了全球温度场对 El nino 和 La nina 事件的响应; 封国林和支蓉等^[7,18]利用 NCEP 再分析资料,研究了全球温度场关联的时空尺度特征,进而为温度场复杂网络的构建奠定了理论基础. 龚志强等^[19,20]分别研究了全球海表温度场复杂网络的动力学统计性质和北半球环流系统的结构特征. Wang 等^[21]分析了中国区域降水和温度场之间的空间关联结构特征等.

对各种遥相关及涛动的研究仍然是当今气象科学领域的一个重要研究课题,关于遥相关的中心位置和月季变化特征,遥相关的配置关系等问题仍值得深入挖掘探讨. 年代际尺度气候状态的变化不仅体现为各种气象要素的位相变化,更体现为气候系统空间关联结构模态的调整. 因此,分析气候系统关联结构复杂性的同时,需要进一步研究系统空间结构的年代际变率及其与气候态变化之间的联系等. 本文通过构建北半球环流系统的复杂网络,试图从一个全新的角度再现环流系统的空间结构特征,并实现遥相关空间配置的图形化. 通过研究各种遥相关在不同年代的作用强弱,即遥相关年代际尺度的变化特征,进而从多种遥相关配合作用的角度研究其与气候突变的可能联系.

2 资料和方法

2.1 资料

高度场资料来源^[22]是 NCEP 再分析格点逐月资料 (500 hPa),分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$,沿纬向有 72 个格点,沿经向有 36 个格点,共计 2592 个格点,每个格点为 1966—2005 年的序列 $H_i(j)$, $j = 480$; $i = 2592$. 考虑环流系统中的各种遥相关等在冬季相对更稳定,同时为了去除月高度场资料中包含的季节振荡信号等,我们主要分析 12 月—2 月的高度场资料 $H_i(j)$, $j = 120$.

2.2 研究方法

复杂网络理论是将复杂系统简化为点以及连接点的线段的集合. 点代表系统的基本单元,称为节点; 线段代表节点之间的相互作用,称为边. 这很

可能是一种合适的、抓住本质的抽象,能够有效的刻画复杂系统内部的结构特征,并且已经取得了一些卓有成效的成果^[23-26]. 本文试图对 500 hPa 基于格点间的关联作用构建环流系统的复杂网络. 主要思想如下.

对原始数据作标准化处理,

$$H'_i(j) = \frac{H_i(j) - \langle H_i \rangle}{\sigma_i}, \quad (1)$$

其中 $\langle H_i \rangle$ 表示平均值, $\sigma_i = \sqrt{\langle H_i^2 \rangle - \langle H_i \rangle^2}$. 任意两格点序列之间的关联系数 C_{ik} 为^[27]

$$C_{ik} = \frac{1}{120} \sum_{j=1}^{120} H'_i(j) H'_k(j), \quad (i = 1, \dots, 2592; k = i, \dots, 2592), \quad (2)$$

C_{ik} 的范围为 $-1 \leq C_{ik} \leq 1$, $C_{ik} = 1$ 表示完全正相关, $C_{ik} = -1$ 表示完全负相关, $C_{ik} = 0$ 表示不相关. 格点作为环流系统关联网络中的节点,因此两两计算关联系数一共可以有 $2592(2592 - 1)/2$ 对组合,即 $2592(2592 - 1)/2$ 个关联系数 C_{ik} . 类似与温度关联网络的研究^[19,28],环流系统关联网络构建的主要思想是以空间格点为节点,如果格点间的关联系数大于 0.5 则认为节点间存在连边. 节点和边的确定,500 hPa 高度场内部错综复杂的关联作用就抽象成一个典型的复杂网络.

赤道等低纬度区域每个格点代表的空间区域显著高于极地附近的高纬度区域格点的情况,在构建网络再现其空间结构特征的同时,我们采用加权重的方法来计算空间格点的顶点度. 如与节点 i 连接的格点个数为 S , 每个格点的纬度为 λ_j , 则 i 的顶点度 k_i 计算公式为

$$k_i = \sum_{j=1}^S \cos \lambda_j / \sum_{j=1}^{2592} \cos \lambda_j, \quad (3)$$

由 (3) 式可知,顶点度越大表明该节点在系统中的作用越强,反之则相反.

3 北半球中高纬度环流系统年代际尺度空间结构特征

图 1 给出了四个不同时期北半球中高纬度 ($27.5^\circ\text{N} - 90^\circ\text{N}$) 环流子系统的网络顶点度分布. 从图中可以看出北极涛动 (AO)、

太平洋北美遥相关 (PNA)、北大西洋涛动 (NAO)、欧亚大西洋型遥相关 (EUPA)、西太平洋涛动 (WP) 等遥相关的空间分布型. 某一区域顶点度的大小直接体现了该区域对其他地区作用的强弱, 因此各种遥相关在年代际尺度上的作用强弱是随时间变化的, 即北半球中高纬度环流系统中必然存在各种遥相关作用强弱的年代际特征. 因此, 1966—1975 年 NAO, WP, AO 等遥相关的作用偏弱, PNA 的作用偏强; 1976—1885 年

则 WP 和 NAO 的作用明显增强. 此外, 1982—1991 年 PNA, NAO 和 WP 的作用相对偏强; 1992—2001 年则 PNA, NAO 和 WP 的作用显著减弱. 值得指出的是 1970 年代中后期和 1990 年代初期均对应有气候突变事件^[29-31], 遥相关作用的调整可能与气候突变有一定的联系. 下面我们进一步从两个方面解释遥相关调整与气候突变的联系: 1) 作用中心年代际尺度的移动特征; 2) 遥相关作用的强弱变化, 即不同时段起主导作用的遥相关是变化的.

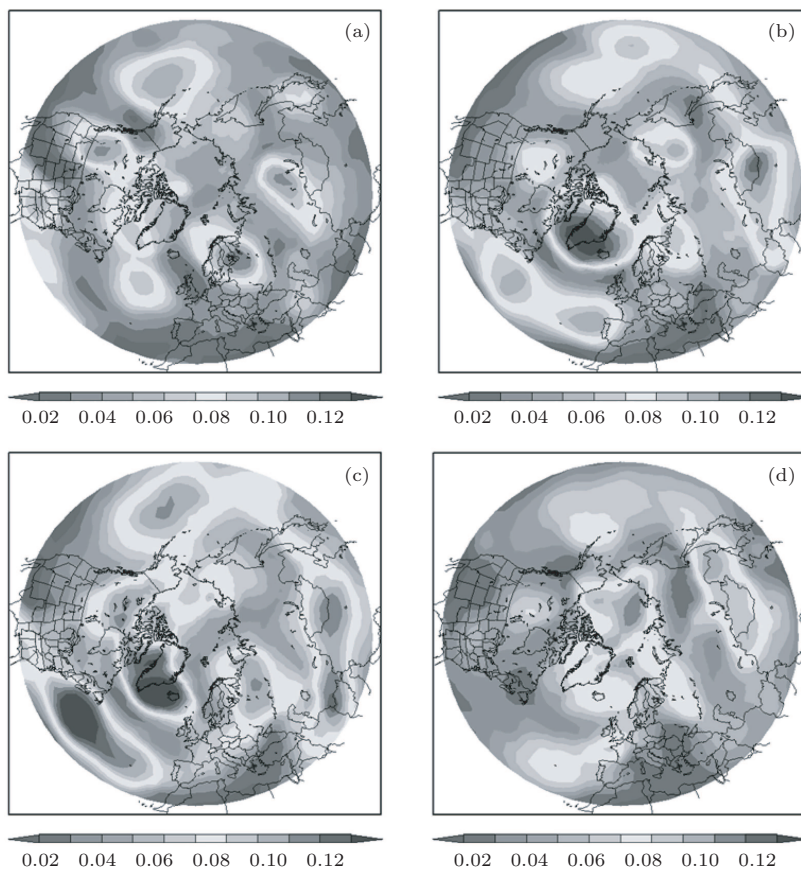


图 1 北半球中高纬度环流子系统网络顶点度分布 (a)—(d) 分别为 1966—1975, 1976—1985, 1982—1991, 1992—2001 年四个年代际尺度北半球中高纬度环流子系统顶点度空间分布

4 北半球中高纬度环流系统遥相关的年代际调整

4.1 遥相关作用中心的移动

图 2 给出了 EUPA(欧洲—亚洲—太平洋—大西洋型遥相关) 遥相关主要作用区域沿 $0^{\circ}\text{W}—60^{\circ}\text{W}$ 的顶点度纬圈平均值随时间的变化图像. 可以看出, 年代际尺度上 EUPA 遥相关的作用中心存在显著的南北方向的移动特征. 大体表现为 1976 年以前,

位于 $20^{\circ}\text{W}—40^{\circ}\text{W}$ 附近的中心北移; 1977—1985 年期间偏南且中心相对稳定; 1986 年以后中心又向北移动. 对 EUPA 遥相关的其他三个主要作用区域做类似计算, 四个作用中心的移动特征在时间上较一致. 根据图 2 中 EUPA 作用中心的移动特征, 图 3 分别给出了三个时段 EUPA 的主要空间模. 3 个时段模态基准点均选取了作用中心顶点度最大值所在的位置. 显然, EUPA 根据其作用中心的空间位置大致可以分成三类主要模态 (图 3): 1960 年代至 1970 年代初, 中间型, 存在 5 个强的显著关联

区域; 1970 年代中期至 80 年代初, 西北型, 在大西洋、欧洲大陆和亚洲大陆存在三个显著关联区域; 1980 年代初开始初至 1980 年代末, 东南型, 存在四个显著关联区域, 而 1990 年代以来, 则又变成了西北型的 EUPA.

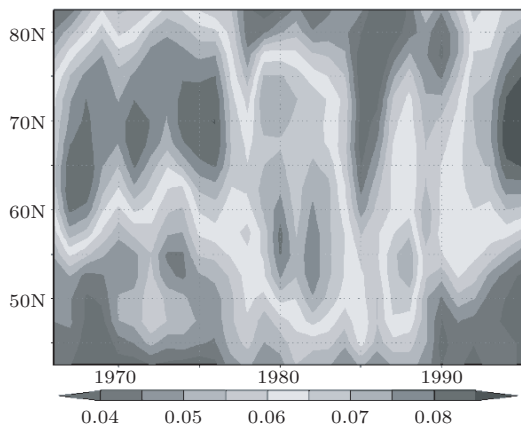


图 2 EUPA 遥相关主要作用区域沿 0°W—60°W 的顶点度纬圈平均值随时间的变化图像

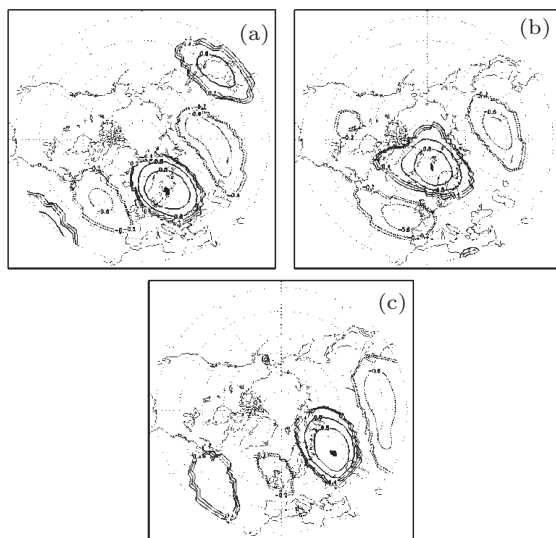


图 3 EUPA 型的三种主要空间模态 (a)1967—1976 年以 (60°N, 25°W) 为基点; (b)1975—1984 年以 (70°N, 10°W) 为基点; (c)1981—1990 年以 (55°N, 50°W) 为基点

图 4 为 NAO(北大西洋涛动) 主要作用区域沿 60°N—65°N 的顶点度经圈平均值随时间的变化图像. 从图 4 可以看出, 1966 年以来, NAO 遥相关在 60°N 附近的中心有一定的东移特征, 并且在 1970 年代后期至 1980 年代中期这一中心的作用最强; 1986 年以后, 作用中心有所西移. 根据图 4 中 NAO 作用中心的移动特征, 图 5 分别给出了三个时段 NAO 的主要空间模: 1960 年代至 70 年代

中期为偏东型 (图 5(a)), NAO 的两个作用中心均偏东, 此时在日本和亚洲大陆之间存在一个显著关联区域; 1970 年代后期至 1980 年代中期为中间型 (图 5(b)), 此时位于格陵兰和北大西洋的两个区域的关联强度和范围均比较大, 但不存在日本附近的关联区; 1990 年代为偏西型 (图 5(c)), 两个作用中心均显著偏西, 两个中心的作用强度和范围较中间型小一些, 日本附近的关联区域存在且偏南. 由此可以推断, 中间型的 NAO 最强, 但不包含日本附近的关联区域, 偏东型或偏西型 NAO 作用相对较弱, 包含日本附近的关联区域.

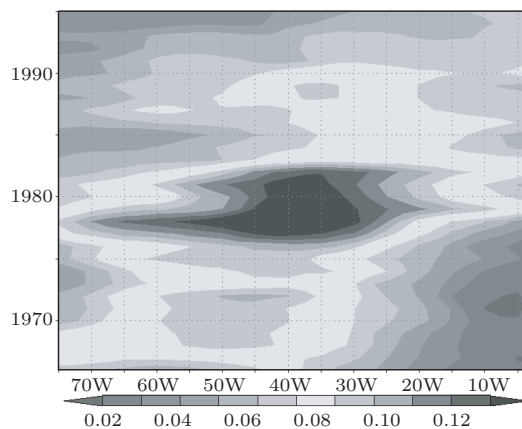


图 4 NAO 主要作用区域沿 60°N—65°N 的顶点度经圈平均值随时间的变化图像

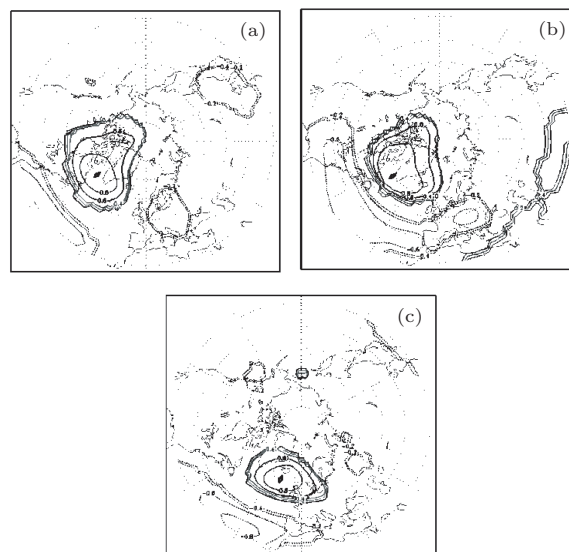


图 5 NAO 型的三种主要空间模态 (a) 1967—1976 年以 (60°N, 55°W) 为基点; (b) 1977—1986 年以 (60°N, 50°W) 为基点; (c) 1991—2000 年以 (60°N, 20°W) 为基点

图 6 给出了 WP(西太平洋涛动) 主要作用区域沿 65°N—75°N 的顶点度经圈平均值随时间变化的

图像. 显然, 位于 70°N 附近的中心 1975 年前存在显著的西移特征, 而 1985 年以后则转为东移. 图 7 中三个时期 WP 的主要模态可以看出, 1970 年代的偏西型 WP(图 7(a)) 的主要模态与 1970 年代末期至 1980 年代初期的偏东型 WP(图 7(b)) 的主要模态的空间分布特征基本类似, 但关联的空间范围偏西型略大一些. 1980 年代末期以来, 当作用中心东移至 160°E 以东时, 此时以 $(72.5^{\circ}\text{N}, 170^{\circ}\text{E})$ 为基点的模态主要表现出 AO 型的特征 (图 7(c)).

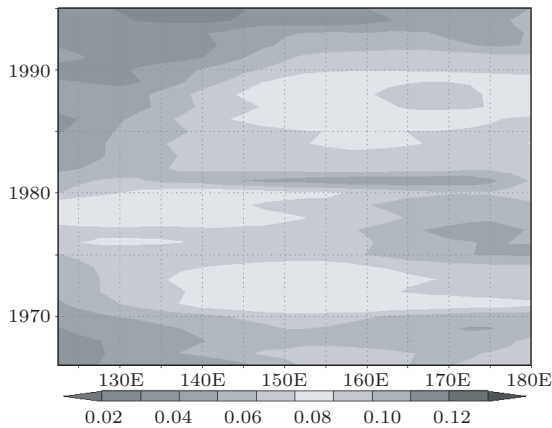


图 6 WP 主要作用区域沿 65°N — 75°N 的顶点度经圈平均值随时间变化的图像

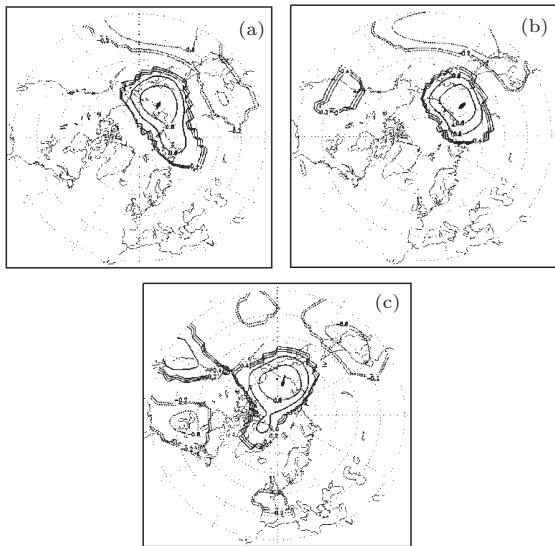


图 7 WP 型的三种主要空间模态 (a)1973—1982 年以 $(70^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{E})$ 为基点; (b)1977—1986 年以 $(65^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E})$ 为基点; (c)1986—1995 年以 $(72.5^{\circ}\text{N}, 170^{\circ}\text{E})$ 为基点

图 8 给出了 AO(北极涛动) 主要作用区域沿 72.5°N — 82.5°N 顶点度经圈平均值随时间的变化图像. 其显著特征是, 1983 年以前极区作用中

心的作用强度较弱; 1983 年以后, 这一中心的作用显著增强, 且作用中心相对稳定. 图 9 给出了两个时期 AO 的主要模态, 可以看出, 无论是 1980 年代还是 1990 年代, AO 的作用中心沿纬圈有所移动, 两个时期分别以 $(75^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{W})$ 和 $(80^{\circ}\text{N}, 160^{\circ}\text{E})$ 为基点模态的空间分布型是类似, 只不过前者的作用区域更大一些. 与此同时, 1960 年代至 1980 年代初期, AO 的作用则比较弱, 模态不显著.

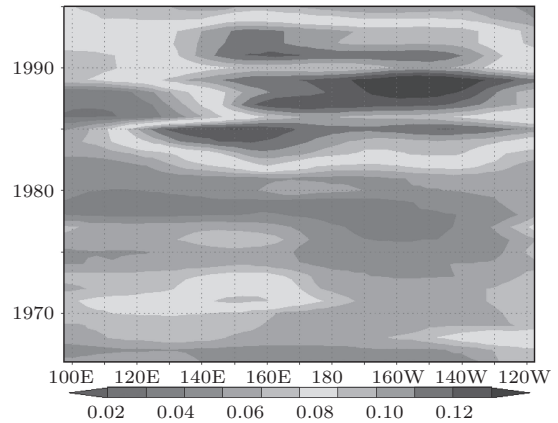


图 8 AO 主要作用区域沿 72.5°N — 82.5°N 顶点度经圈平均值随时间的变化图像

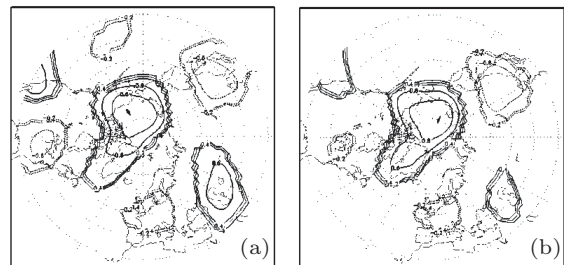


图 9 AO 型的两种主要空间模态 (a)1988—1997 年以 $(75^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{W})$ 为基点; (b) 1992—2001 年以 $(80^{\circ}\text{N}, 160^{\circ}\text{E})$ 为基点

显然, 遥相关年代际尺度变化的特征之一就是其作用中心的移动, 直接原因是遥相关之间存在相互作用的区域发生变化; 意义在于中高纬度环流系统起主导作用的关键区域发生变化, 则气候变化信号监测和检测的重点区域也应该做出相应的调整. 表 1 给出了不同时段各种遥相关的主要模态情况. 显然, 1970 年代中后期和 1990 年代初期 EUPA, NAO, WP 和 AO 作用中心均有显著调整, 多种遥相关作用中心的调整可能是 1970 年代和 1990 年代气候突变的重要表现形式之一. 此外, PNA 型模态的空间分布则相对稳定, 作用中心移动的特征较弱, 这也体现了其在北半球中高纬度系统中是一种相

对独立的模态. 为节省篇幅, 没有给出 PNA 空间模态及其变化的图形.

表 1 不同时段各种遥相关的主要模态

| | 时段 | 类型 | 基点坐标范围 |
|------|-----------|------|-----------------|
| EUPA | 1966—1973 | 中间型 | (60°N, 25°E) |
| | 1974—1980 | 西北型 | (70°N, 10°E) |
| | 1981—1989 | 东南型 | (55°N, 50°E) |
| | 1990—1995 | 西北型 | (70°N, 10°E) |
| NAO | 1966—1976 | 偏西型 | (60°N, 55°W) |
| | 1976—1983 | 中间型 | (60°N, 50°W) |
| | 1984—1995 | 偏东型 | (60°N, 20°W) |
| WP | 1966-1975 | 偏东型 | (70°N, 150°E) |
| | 1976—1982 | 偏西型 | (65°N, 130°E) |
| | 1983—1995 | 过渡型 | (72.5°N, 170°E) |
| AO | 1976—1983 | 弱相关型 | — |
| | 1984—1987 | 偏西型 | (75°N, 150°W) |
| | 1988—1995 | 偏东型 | (80°N, 160°E) |

4.2 遥相关作用的强弱变化

上一节分析了北半球中高纬度环流系统中各种遥相关作用中心的移动特征, 下面我们进一步从遥相关作用强度的角度分析其年代际调整情况. 各种遥相关的定义, Wallace 等已经发展了较为成熟的方法, 即通过计算基点之间气压的差值进行定义, 这种定义可以体现遥相关信号的强弱. 但值得注意的是, 遥相关信号强弱与遥相关在环流系统中作用的强弱并不是等同的, 因此我们从顶点度的角度定义遥相关作用指数, 以定量描述遥相关在气候系统中作用强弱的时间演化特征. 显然, 要分析其强度, 必然首先给出作用强度的明确定义. 这里的作用强度不同于传统意义上的信号强弱, 作用强度主要反映该遥相关在环流系统作用的强弱, 即体现了与其他区域间关联的强弱. 前面分析表明, 遥相关作用最强的中心在不同的时段发生了移动, 如果通过计算某一基点顶点度的大小来定义遥相关作用指数, 必然难以准确地体现遥相关作用的强弱变化特征. 因此, 由 1971—2000 年的北半球中高纬度环流系统网络顶点度的空间分布, 分析遥相关主要作用中心的空间坐标, 然后确定一个能够涵盖大部分作用中心出现位置的区域, 根据 (4)—(8) 式计算这一区域内顶点度的平均值进行定义. 通过这种方法, 可以克服作用中心移动可能带来的偏差问题. (4)—(8)

式则给出了五种遥相关作用指数的计算公式:

$$I_{PNA}(t) = \frac{1}{3} [k_1(t)_{(45^\circ-55^\circ N, 170^\circ W-150^\circ W)} + k_2(t)_{(55^\circ N-65^\circ N, 130^\circ W-95^\circ W)} + k_3(t)_{(30^\circ N-35^\circ N, 90^\circ W-80^\circ W)}], \quad (4)$$

$$I_{EUPA}(t) = \frac{1}{4} [k_1(t)_{(60^\circ-70^\circ N, 0^\circ E-60^\circ E)} + k_2(t)_{(40^\circ N-55^\circ N, 55^\circ E-100^\circ E)} + k_3(t)_{(40^\circ N-45^\circ N, 120^\circ E-130^\circ E)} + k_4(t)_{(50^\circ N-55^\circ N, 40^\circ W-20^\circ W)}], \quad (5)$$

$$I_{NAO}(t) = \frac{1}{3} [k_1(t)_{(60^\circ-65^\circ N, 55^\circ W-5^\circ W)} + k_2(t)_{(30^\circ N-37.5^\circ N, 60^\circ W-20^\circ W)} + k_3(t)_{(37.5^\circ N-40^\circ N, 30^\circ W-15^\circ W)}], \quad (6)$$

$$I_{AO}(t) = k_1(t)_{(75^\circ-80^\circ N, 130^\circ E-160^\circ W)}, \quad (7)$$

$$I_{WP}(t) = \frac{1}{2} [k_1(t)_{(60^\circ N-75^\circ N, 130^\circ E-155^\circ E)} + k_2(t)_{(35^\circ N-40^\circ N, 150^\circ E-180^\circ E)}], \quad (8)$$

其中 $k_s(t)$ 表示 s 区域内所有基点顶点度的平均值, 下表的括号内给出了选定区域的经纬度范围. 自 1966 年起始, 取窗口宽度为 10a, 滑动步长为 1a, 分别计算遥相关作用指数, 这样我们得到遥相关作用 1971—2000 年 30 年的指数序列. 表 2 给出了指数序列的统计特征值: PNA 和 NAO 的均值最大, 因此这两种型作用的平均效果最强; NAO 的标准偏差最大, 说明其作用强弱的年代际尺度波动较大; AO 的均值最小, 年代际尺度上 AO 的作用的平均效果相对较弱.

表 2 五种遥相关作用指数的统计值

| 类型 | 均值 | 标准偏差 | 最小值/大值 |
|------|-------|-------|-------------|
| PNA | 0.074 | 0.016 | 0.048/0.105 |
| EUPA | 0.064 | 0.004 | 0.055/0.074 |
| NAO | 0.074 | 0.020 | 0.044/0.112 |
| WP | 0.072 | 0.012 | 0.045/0.093 |
| AO | 0.037 | 0.013 | 0.018/0.061 |

图 10 给出了五种遥相关作用指数距平值的逐年变化特征. 可以看出, 遥相关作用的年代际变化大致可以分成 5 个阶段: 1971—1974 年 PNA 和 EUPA 偏强, NAO, AO 和 WP 偏弱; 1975—1981 年 EUPA 和 WP 的作用偏强; 1982—1985 年 NAO 和 WP 偏强; 1986—1989 年,

PNA,NAO,EUPA 和 WP 偏强; 1987—1998 年, AO 偏强. 根据遥相关指数我们可以推断不同年代北半球中高纬度环流系统中的主导型(表 3). 主导模态即为遥相关作用指数为正值模态, 此时对应的遥相关在环流系统的作用较强, 可能起到一定的主导作用, 所以称之为“主导模态”. 遥相关主导型的确定对我们研究北半球中高纬度环流系统年代际尺度结构特征的变化具有重要的指导意义. 一方面, 遥相关主导型的确定, 有利于我们明确不同时段重点关注区域的分布, 如 1960 年代应该重点关注亚欧大陆和北太平洋 - 北美区域; 1980 年代则情况较复杂, 需要考虑多种因素, 更广范围的气候变化特征信号等. 另一方面, 我们可以通过遥相关主导型的转变来解释气候系统中存在的气候突变现象等, 如 1970 年代中后期的突变与 PNA, EUPA 和 NAO 等遥相关的作用强度发生显著变化, 而 1990 年代初期的气候突变亦对应了 PNA, NAO, EUPA, WP 等多种遥相关作用强度的整体调整等.

表 3 不同时段北半球中高纬度系统的主导遥相关

| 时段 | 主导型 |
|-----------|-----------------|
| 1971—1974 | PNA,EUPA |
| 1975—1981 | EUPA,WP |
| 1982—1985 | NAO,WP |
| 1986—1989 | PNA,NAO,EUPA,WP |
| 1987—1998 | AO |

5 结论和讨论

基于北半球中高纬度环流系统网络, 研究了冬季北半球各种遥相关的年代际尺度变化特征及其与气候突变的可能联系等. 研究表明, 通过复杂网络顶点度空间分布可以形象的给出 PNA, NAO, AO, EUPA 和 WP 五种显著的遥相关. 总体而言, PNA, NAO, AO, EUPA 和 WP 五种显著的遥相关年代际尺度的变化主要存在以下几个特征:

1. 遥相关作用中心移动特征. NAO, EUPA 和 WP 的作用中心在年代际尺度存在显著的移动特征, 且 1970 年代中后期存在一次共同的跃变过程; 在 1990 年代初期亦对应应有显著的移动过程.

AO 型在 1970 年代中后期以前作用较弱, 1980 年代末期以来作用则显著增强; PNA 型模态的空间分布则相对稳定, 作用中心移动的特征较弱, 这也进一步体现了其在北半球中高纬度系统中是一种相对独立的模态.

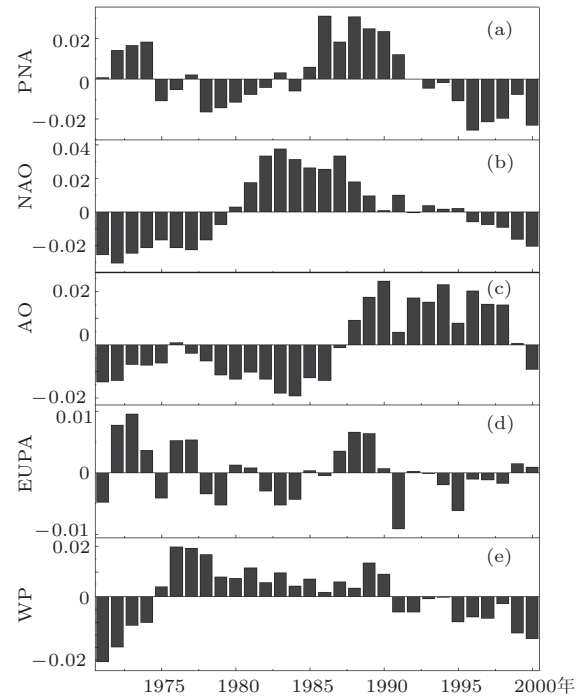


图 10 五种遥相关指数的逐年变化特征 (a)—(e) 分别为 PNA, NAO, AO, EUPA 和 WP 遥相关作用指数距平值横坐标为华东窗口的中间年份

2. 遥相关作用强度的年代际变化特征. 我们从顶点度的角度定义各种遥相关作用指数, 这种定义方法直接从遥相关作用强弱角度进行定义, 更能体现其在气候系统中作用的变化, 并且根据各种指数确定了不同时段北半球中高纬度的主要遥相关模态. 1980 年代年以前是 PNA, EUPA 和 WP 三种模态的共同作用为主导, 1980 年代年以后 NAO 的作用显著增强, 五种模态共同作用, 1987 年以后 AO 的作用显著增强, 其他模态的作用则相对较弱.

3. 遥相关年代际尺度调整与气候突变的可能联系. 1970 年代中后期和 1990 年代初期 EUPA, NAO, WP 和 AO 作用中心均有显著移动特征, PNA, EUPA 和 NAO 等多种遥相关的作用的强弱也发生了显著的位相调整. 因此, 多种遥相关作用的调整可能是气候突变的重要表现形式之一.

- [1] Yang P C, Wang G L, Lu D R 2004 *Advances in Atmospheric Sciences* **21** 296
- [2] Liu S D, Liu S G 1989 *Nonlinear Dynamics and Complicated Phenomenon* (Beijing: Meteorological Press) pp249 (in Chinese) [刘式达, 刘式适 1989 非线性动力学和复杂现象北京: 气象出版社 pp249]
- [3] Li J P, Gao L 2006 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **30** 834 (in Chinese) [李建平, 高丽 2006 大气科学 **30** 834]
- [4] Li J P, Wang X L 2003 *Advances in Atmospheric Sciences* **20** 661
- [5] Li J P, Chou J F 1997 *Acta Meteorol Sinica* **11** 57
- [6] Li J P, Zeng Q C, Chou J F 2000 *Science in China (Series E)* **30** 550 (in Chinese) [李建平, 曾庆存, 丑纪范 2000 中国科学 (E 辑) **30** 550]
- [7] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of the observational data* (Beijing: Metrological press) pp227 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 龚志强, 侯威, 万仕全, 支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京: 气象出版社) pp227]
- [8] Wallace J M, Gutzler D S 1981 *Mon. Wea. Rev.* **109** 784
- [9] Huang R H, Sun F Y 1992 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **16** 52 (in Chinese) [黄荣辉, 孙凤英 1992 大气科学 1992 **16** 52]
- [10] Thompson D W, Wallace J M 1998 *Geophys. Res. Lett.* **25** 1927
- [11] Gong D Y, Wang S W 1999 *Geophys Res. Lett.* **26** 459
- [12] Walker, G T, Bliss E W 1932 *Mem. Roy. Meteor. Soc.* **4** 53
- [13] Dai X G, Wang P and Chou J F 2004 *Progress Natural Sciences* **14** 73
- [14] Shi N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844
- [15] Feng G L and Dong W J 2004 *Chin. Phys.* **13** 413
- [16] Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J 2006 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **87** 585
- [17] Yamasaki K, Gozolchiani A, Havlin S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 228501
- [18] Zhi R, Feng G L, Gong Z Q, Zhou L 2010 *Acta Meteor. Sinica* **24** 150
- [19] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5351 (in Chinese) [龚志强, 周磊, 支蓉, 封国林 2008 物理学报 **57** 5351]
- [20] Gong Z Q, Zhi R, Feng G L, Zhang Q 2010 *Acta Meteor. Sinica* **24** 0
- [21] Wang G L, Tsonis A A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5091
- [22] Kistler R, Kalnay E, Kanamitsu M 2001 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **82** 247
- [23] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [24] Barabasi A O L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [25] Jeong H, Tombor B, Albert R 2000 *Nature* **407** 651
- [26] Wang X J, Gong Z Q, Zhou L, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6651 (in Chinese) [王晓娟, 龚志强, 周磊, 封国林 2009 物理学报 **58** 6651]
- [27] Murirhead R J 1982 *Aspects of multivariate Statistical Theory* (New York: John Wiley & Sons Press) pp151
- [28] Hou W, Lian Y, Feng G L 2007 *Acta Pyhs. Sin.* **56** 589 (in Chinese) [侯威, 廉毅, 封国林 2007 物理学报 **56** 589]
- [29] Fu Z B 1994 *Scientia Atmospheric Sinica* **18** 373
- [30] IPCC 2007 *Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report*. Cambridge (UK: Cambridge University Press) 10
- [31] Yang P, Hou W, Feng G L 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5333 (in Chinese) [杨萍, 侯威, 封国林 2008 物理学报 **57** 5333]

Analysis of decadal characteristics of leading teleconnections based on complex networks theory*

Gong Zhi-Qiang¹⁾ Zhi Rong¹⁾ Hou Wei¹⁾ Wang Xiao-Juan^{2)†} Feng Guo-Ling¹⁾³⁾

1) (*Laboratory for Climate Studies of National Meteorological Bureau Climate Research Center, Beijing 100081, China*)

2) (*College of Physics and Electronic Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China*)

3) (*Department of Physics Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*)

(Received 22 November 2010; revised manuscript received 15 April 2011)

Abstract

We construct a complex network of the middle latitude circulation system of north hemisphere (NCNH). The decadal characteristic of leading teleconnection and its probable correlation with abrupt climate change are analyzed base on the circulation system network. Results show that (1) action centres of NAO, EUPA and WP have all moved during different periods in the recent 40 years and there has been a common abrupt change process as the end of the 1970s and beginning of the 1990s separately; (2) the new index which denotes the importance of teleconnection is defined using the node degree of NCNH. The temporal change of new index shows that the leading modes were PNA, EUPA and WP before the 1980s; index of NAO notably increased and all the five teleconnections were comparatively robust after 1980s; the index of AO notably increased and other modes comparatively decreased after 1987. So, center and index changes of decadal leading teleconnections may be another important phenomenon of abrupt climate change.

Keywords: complex networks, teleconnections, decadal leading teleconnections, abrupt climate change

PACS: 92.60.Wc

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 40875040), the Special Scientific Research Project for Public Interest (Grant Nos. GYHY201006021 and GYHY201106016), and the National Science/Technology Support Program of China (2007BAC03B01).

† E-mail: mouse0903@126.com