

冬季北半球 Hadley 环流圈的增强 及其与 ENSO 关系*

马 杰^{1,2} 李建平^{2**}

1. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 对 1948—2005 年冬季(12 月—次年 2 月)的质量流函数进行了经验正交分析(EOF), 结果显示其主要是由两个空间模态组成, 即关于赤道非对称和对称模态. 进一步分析表明这两个模态具有明显不同的时间变化特征, 它们分别代表了冬季北半球 Hadley 环流圈在年代际和年际尺度上的变化. 非对称模态的时间系数(定义为非对称模态的强度指数 AMI)呈现出显著的年代际增强趋势, 表明该模态对北半球冬季 Hadley 环流圈在最近几十年的增强具有显著贡献. 同时它还与热带海洋, 尤其是印度洋到西太平洋暖池地区的海温相关显著. 而对称模态时间系数(定义为对称模态强度指数 SMI)主要体现了 Hadley 环流在年际尺度上的变化, 它与 ENSO 之间的相关系数在整个时段都是显著的. 结果还显示: 冬季北半球 Hadley 环流与 ENSO 之间的相关系数在 20 世纪 70 年代中后期发生的年代际突变也很可能是由于非对称模态引起的.

关键词 经向环流圈 Hadley 环流 年际变化 年代际变化

1735 年 Hadley 为了解释信风带的存在, 提出了经向单圈环流模型. 随后很多研究者指出这种单一环流圈模型存在很大缺陷, 并逐渐提出了三圈环流的模型. 这些前期研究主要是在理论上进行探讨. 随着观测资料的不断丰富, 文献[1—6]研究证实了南北半球的确分别存在三个环流圈, 并指出北半球的 Hadley 环流圈占主导地位.

经向环流圈的存在对维持全球热量、角动量等的平衡具有重要的意义. 尤其在低纬度地区, Hadley 环流圈对这些物理量的输送占主导地位. 在气候系统中, Hadley 环流的变化可以影响其他地区气候也发生改变^[7,8].

近来的研究发现冬季北半球 Hadley 环流圈在最近几十年明显增强^[9—12]. 同时 Quan^[10]认为热带海洋的增温和 1976 年后 ENSO 事件特征的改变,

是造成这一现象的主要原因. 而 Mitas^[12]指出将 Hadley 环流指数中的 ENSO 信息去除后其增强趋势依然存在, 因此 Hadley 环流的增强可能与 ENSO 无关. 然而, ENSO 事件却与北半球冬季 Hadley 环流圈之间的关系非常密切^[6,13]: El Niño(La Niña)时 Hadley 环流圈增强(减弱). 这些研究提示我们思考: ENSO 与 Hadley 环流之间的联系是否只体现在年际尺度上而与环流的年代际增强趋势无关? 此外, Dima 和 Wallace^[14](简称 DM)指出年循环的经向环流圈由两部分组成: 赤道对称和非对称部分, 且二者强度相当. 那么冬季经向环流圈的年际变化的主要模态是什么? 它们又与热带海洋关系如何, 哪部分与北半球冬季 Hadley 环流的增强有关? 本文将对这些问题进行探讨.

2007-02-13 收稿, 2007-04-23 收修稿稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40325015, 40528006)

** 通信作者, E-mail: lj@lasg.iap.ac.cn

1 资料和方法

本文采用的是 NCEP/NCAR 全球再分析的月平均经向和垂直风场资料^[15], 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向上从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层. NOAA(美国国家海洋和大气局)的 SST 资料^[16], 分辨率为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$. ENSO 指数(1948—2004)来自华盛顿大学网站(<http://jisao.washington.edu/data/globalstenso/index2.html>). 本文资料除了 ENSO 指数均选取 1948 年 1 月—2005 年 12 月.

文章利用质量流函数来表征纬向平均的经向环流圈. 具体做法是对球面-气压坐标系下的连续方程做纬向平均, 得到

$$\frac{\partial[\bar{v}]\cos\phi}{R\cos\phi\partial\phi} + \frac{\partial[\bar{\omega}]}{\partial p} = 0 \quad (1)$$

这里 R 为地球半径, ω 为 P 坐标系下的垂直速度, ϕ 为纬度. 符号 “[]” 表示纬向平均, 上标 “-” 代表时间平均. 利用方程(1)定义一个二维的质量流函数 ψ , 其满足:

$$[\bar{v}] = g \frac{2\psi}{R\cos\phi\partial p} \quad (2)$$

$$[\bar{\omega}] = -g \frac{2\psi}{2\pi R^2 \cos\phi\partial\phi} \quad (3)$$

利用方程(2), (3)均可以计算得到 ψ . 这里对(2)式进行积分得到

$$\psi = \int \frac{2\pi R\cos\phi}{g} [\bar{v}] dp \quad (4)$$

详细的计算过程参见文献[17, 18]. 同时需要指出的是本文利用距平场做经验正交分析(EOF), 因此所得模态代表叠加在气候态之上的异常场. 此外, 这里的讨论利用 ECMWF 再分析资料(1961 年 1 月—2000 年 12 月)也能得到类似结果.

2 冬季质量流函数的时空变化

为了便于下面的讨论, 图 1(a)给出了气候态的冬季质量流函数分布. 由图可见, 冬季北半球

Hadley 环流最强, 其中心位于 15°N 左右, 极值达到了 $18 \times 10^{10} \text{ kg/s}$, 并且在南北方向跨越了大约 40 个纬度. 而南半球 Hadley 环流较弱, 它甚至比同半球的 Ferrel 环流还弱, 南北范围只有 20 个纬度, 中心在 25°S 附近. 冬季, 两半球 Hadley 环流共同的上升支位于南半球, 与纬向平均的海温最大值位置相对应^[19]. 而它们的下沉支分别处在南北纬 30° 附近. 图 1(a)的分布与文献[20, 21]的结果是一致的.

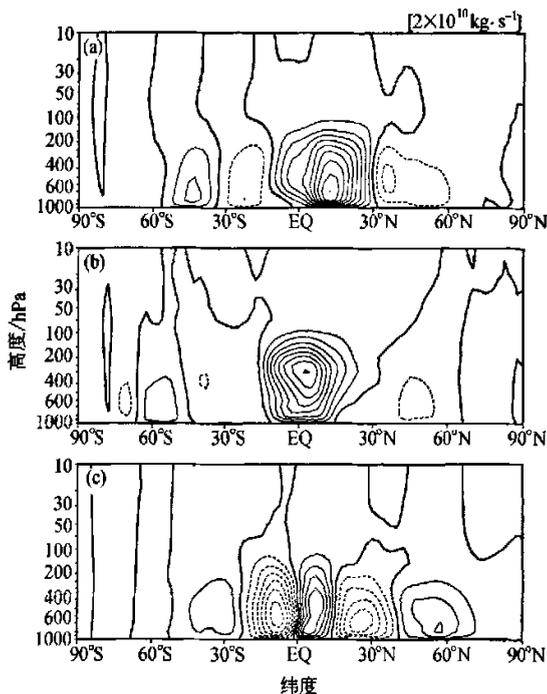


图 1 气候(1948—2005)平均的冬季质量流函数及其年际变化的主要模态

(a) 冬季气候态的质量流函数, 等值线间隔 $2 \times 10^{10} \text{ kg/s}$; (b) 冬季质量流函数年际变化的第一模态(解释方差为 55%); (c) 如图(b), 这里为第二模态(解释方差为 10.3%)

2.1 质量流函数的主要空间模态

为了研究冬季北半球 Hadley 环流圈的变化规律, 本文利用 EOF 方法分析了 1948—2005 年冬季的质量流函数. 图 1(b), (c)分别给出了前两个主要模态的空间分布. 由图 1(b)可见, 第一模态(EOF1)呈现出关于赤道非对称型的分布. 在南北半球低纬度地区存在一跨越赤道的环流圈, 它与图

1(a)中北半球 Hadley 环流圈分布很相似, 解释了总方差的 55%。第二模态(EOF2)的解释方差为 10.3%, 此时南北半球低纬度各存在一个环流圈。位置上它们关于赤道对称, 强度上南半球稍强于北半球(图 1(c))。由此, 冬季质量流函数包含了两个主要空间模态: 关于赤道非对称(或跨赤道)和赤道对称模态。需要说明的是, 这里的两个空间模态与 DM 文中所强调的组成经向环流圈的两部分虽然有类似之处, 但它们却是不同的。前者所得到的对称型模态来自于 EOF 分解, 而 DM 将年平均的经向环流圈(或去掉非对称模态后的剩余环流圈)称为对称部分。另外, 前者利用了 58 个冬季的质量流函数, 指的是年际尺度上的变化。而后者采用了气候态 12 个月的质量流函数, 讨论的是年循环尺度上的变化特征。

2.2 质量流函数主要空间模态的变化特征

我们接下来讨论上述两个空间模态的强度变化特征。图 2(b), (c)给出了 AMI 和 SMI 的时间序列。由图 2(b)可知, AMI 在最近几十年明显增强, 其线性变化趋势超过了 0.001 的显著性水平。因此该模态叠加在图 1(a)中气候态的经向环流圈之上会使北半球 Hadley 环流圈不断增强。同时, 我们可以看到在 1976 年前后 AMI 由负值变为正值, 表明非对称模态位相发生了突变。由此, 1976 年后的 Hadley 环流圈大多强于 1976 年前的。这也包含了 Quan^[10]指出的: “ENSO 暖事件时, 1976 年后的 Hadley 环流强度明显大于 1976 年前的环流圈强度”。

由图 2(c)可知, 对称模态的变化对北半球 Hadley 环流圈的增强趋势没有贡献。因为 SMI 只有年际尺度上的变化, 趋势不显著。

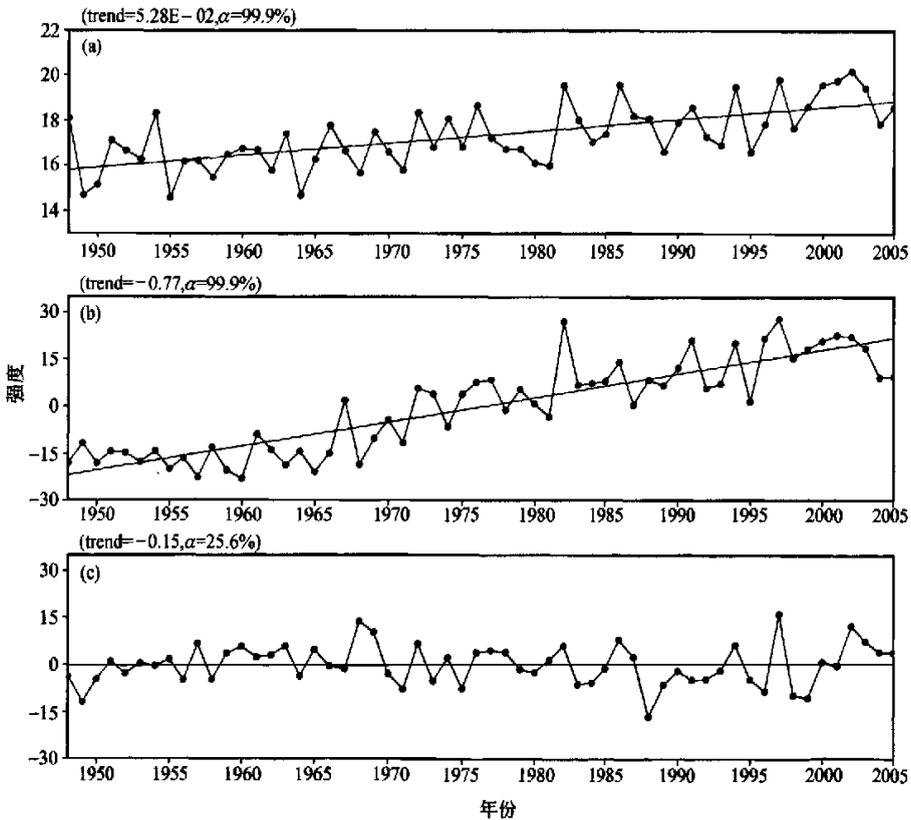


图 2 冬季北半球 Hadley 环流圈和非对称、对称模态强度的时间序列

(a) 冬季北半球 Hadley 环流的指数序列 HCI; (b) 图 1(b)中非对称模态强度的时间序列 AMI; (c) 同图 1(a), 这里为图 1(c)中对称模态强度的时间序列 SMI。图中标出了时间系数序列的线性趋势(trend)和其置信度(也应为 α)

2.3 质量流函数空间模态与北半球 Hadley 环流的关系

由以上讨论可知, 非对称模态呈现出显著的年代际增强趋势, 而对称模态的变化则主要体现在年际尺度上. 已有的研究表明冬季北半球 Hadley 环流强度具有明显的年代和年际变化特征^[22]. 那么冬季质量流函数的这两个空间模态是否与冬季北半球 Hadley 环流圈的强度变化有关呢? 为此, 本文选取冬季质量流函数在 0—30°N 之间的极大值作为北半球 Hadley 环流圈的强度指数^[6], 记为 HCI (图 2 (a)). 表 1 给出了 HCI 以及 Gauss 滤波后 HCI 的低频、高频率列与 AMI, SMI 的相关系数. 由表 1 可见, 两模态均与冬季北半球 Hadley 环流圈相关

显著. 进一步分析表明, AMI 与 Hadley 环流的显著相关主要体现在年代际尺度上, 它们的相关系数为 0.87, 超过了 99.9% 的置信度, 而在年际尺度上二者几乎彼此独立. 同理, 对称模态则体现了年际尺度上的 Hadley 环流变化.

表 1 两个模态时间系数 AMI, SMI 与 Hadley 环流强度指数 (HCI) 之间的相关系数

	AMI	SMI
HCI	0.74	0.31
HCI(H)	0.23	0.47
HCI(L)	0.87	0.01

HCI(H), HCI(L) 分别代表 HCI 时间序列经过 7 点 Gauss 滤波后得到的高频、低频序列. 黑体的数字代表通过了 95% 的置信度

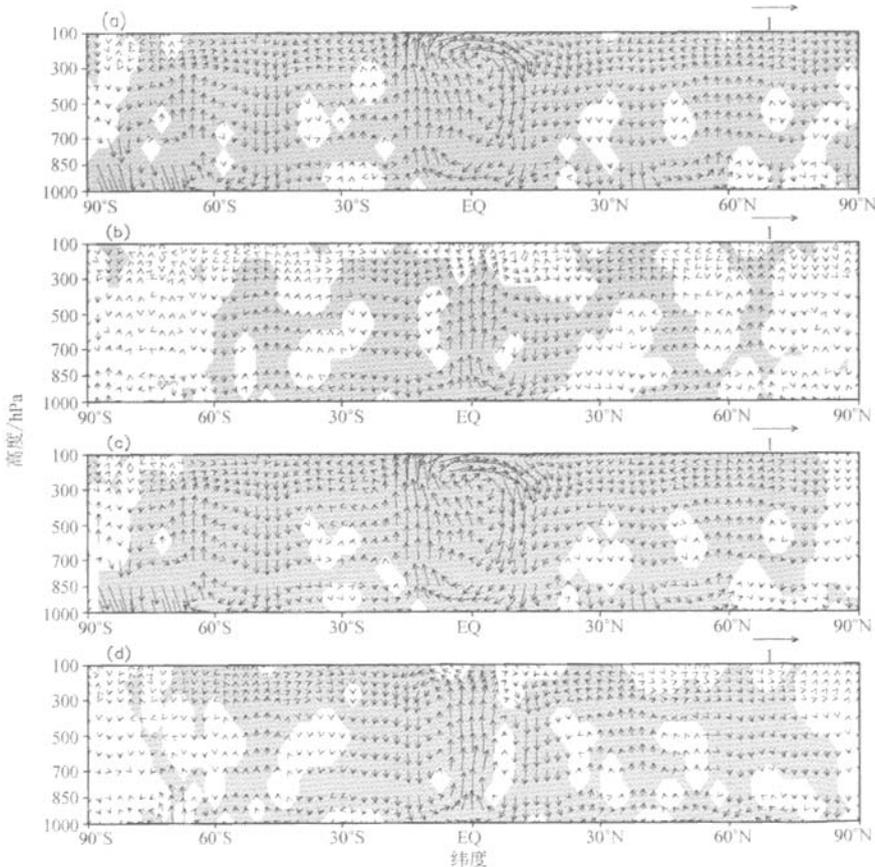


图 3 纬向平均的经向环流圈在 HCI 环流低频和高频的时间序列以及在非对称和对称模态强度序列偏强时的合成差分分析 (a) 纬向平均的经向环流圈在 HCI 的低频率序列偏强年的合成差分分析; (b) 同图 3(a), 这里是 HCI 高频率序列偏强年的合成差分分析; (c) 同图 3(a), 为 AMI 偏强年的合成差分分析; (d) 同图 3(a), 为 SMI 偏强年的合成差分分析. 图中矢量箭头为 v 和 $-100 \times \omega$ 的合成. 阴影区代表通过 95% 置信度的区域

图3给出了纬向平均的经向环流圈在HCI低频和高频时间序列以及AMI和SMI(图略)强年的合成差分分析。这里取 $\sigma \geq 1$ 为强年, $\sigma \leq -1$ 为弱年。HCI低频率序列的强年是1997—2004; 弱年是1949—1951, 1955—1959, 1962—1964。而HCI低频率序列的强年有1948, 1954, 1963, 1966, 1972, 1976, 1982, 1986, 1994, 1997; 弱年有1949, 1950, 1955, 1964, 1968, 1971, 1981, 1989, 1995, 1998。由图可见, HCI的低频率序列偏强时, 纬向平均的经向环流圈呈现出非对称型模态的分布(图3(a))。而高频率序列偏强时, 南北半球低纬度的环流圈为赤道对称型分布(图3(b))。同样, 由图3(c), (d)可知, 当AMI(SMI)偏强时, 经向环流圈也表现出非对称(对称)型的分布。这些说明了非对称和对称模态都是冬季北半球Hadley环流的一部分, 它们使得Hadley环流具有年代和年际变化特征。

综上所述, 冬季质量流函数的两个主要空间模态均与北半球冬季Hadley环流圈关系密切, 二者分别对应Hadley环流在年代和年际尺度上的变化。或者, 冬季北半球Hadley环流主要由两部分组成: 非对称和对称型部分, 它们使得Hadley环流具有年代和年际时间尺度上的变化特征。此外, 上述讨论还表明冬季北半球Hadley环流圈在最近几十年的增强主要是由其非对称部分(非对称模态中低纬度的经向环流圈)造成的。

3 空间模态与海温、ENSO的关系

研究指出跨越赤道的经向环流圈表征了季风区季风的变化^[23,24], 而冬季季风区主要受大洋的控制^[10]。那么, 非对称模态与低纬度海温存在怎样的联系?

3.1 非对称模态与海温关系

为了讨论上面提出的问题, 我们计算了AMI, SMI的时间序列与冬季海温场之间的相关(如图4)。图中阴影区代表通过95%的置信度区域。图4(a)是AMI与海温的相关系数场分布。由图可见, 低纬度的印度洋到西太平洋暖池、东太平洋以及大

西洋均为显著正相关区。图4(b)表明这些主要存在于年代际时间尺度上。图4(a)与图4(d)比较发现, 二者显著区的分布非常相似, 说明热带海洋的增温与北半球Hadley环流(或AMI)的增强有关^[10]。需要强调的是, 印度洋到西太平洋暖池区域的作用可能占主导。因为该地区相关系数最显著, 同时这里也是全球海温最高, 并且对其他地区气候影响最明显的区域。由图4(d)还可以看到这里的海温升高最快。虽然南大西洋也存在高趋势区, 但其范围很小。因此, 热带海洋尤其是印度洋到西太平洋暖池地区海洋的增温可能是赤道模态(或者冬季北半球Hadley环流)显著增强的主要原因。

3.2 对称模态与海温关系

图4(c)是SMI与海温的相关系数场。由图可见, 太平洋上的显著相关系数呈现出明显的ENSO型分布。再次表明ENSO与冬季北半球Hadley环流圈之间的显著相关^[6]主要体现在环流圈对称部分与ENSO的联系上, 或者它们的相关只体现在年际尺度上。此外, 印度洋到西太平洋暖池地区也存在显著的正相关区, 表明该区域不但对年代际尺度上Hadley环流的增强有重要贡献, 而且可能在某种程度上影响着年际尺度上Hadley环流的变化。

3.3 两模态与ENSO关系

为进一步讨论两模态与ENSO之间的关系, 图5给出了ENSO指数和AMI, SMI时间序列以及它们之间的相关系数。由于ENSO主要体现年际时间尺度的信号, 这里忽略其年代际的变化特征。因此图5中的曲线均去掉了线性趋势。由图5(b)可知, SMI与ENSO指数非常相似, 二者的相关系数达到0.7067, 超过了0.001的显著性水平。而AMI与ENSO指数的相关系数非常小(图5(a)), 二者几乎彼此独立。因此, 由图5(b)可知, “ENSO暖(冷)事件时, Hadley环流的增强(减弱)”^[6,13]这一结论主要体现在ENSO对Hadley环流对称部分的影响上。

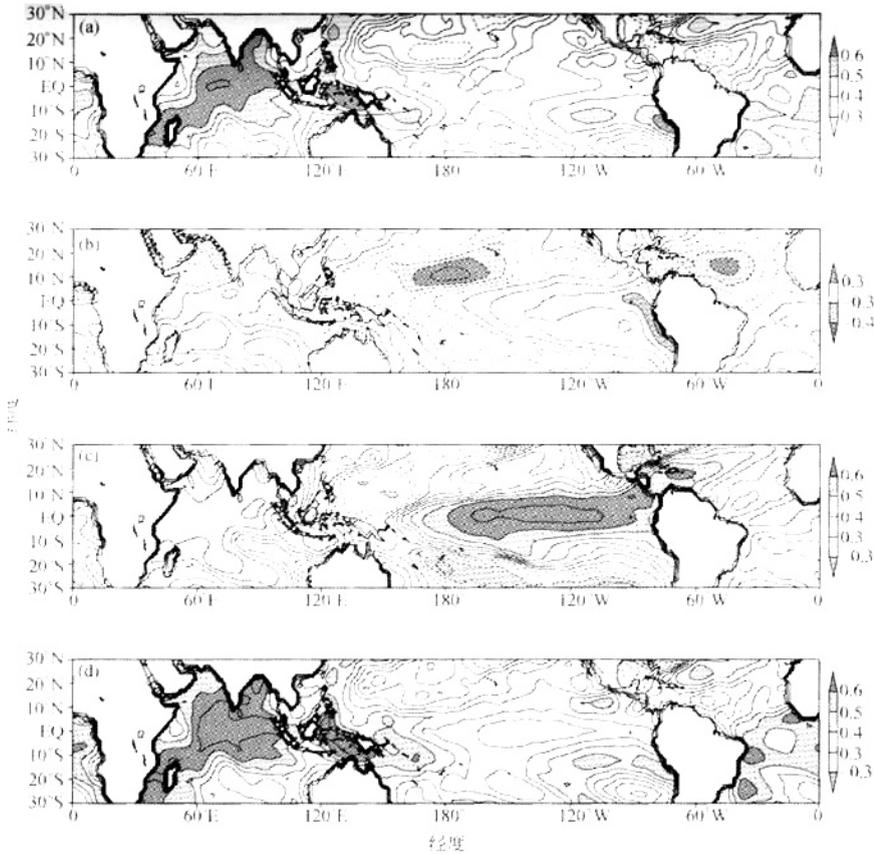


图4 AMI和SMI与冬季海温场的相关系数分布

(a) AMI和冬季海温场的相关分布；(b)为图4(a)中二者去掉线性趋势后的相关分布；(c)同图4(a)，这里为SMI和海温场的相关分布；(d)冬季海温场在1948—2005年的线性变化趋势图。图中阴影区为通过95%置信度的区域

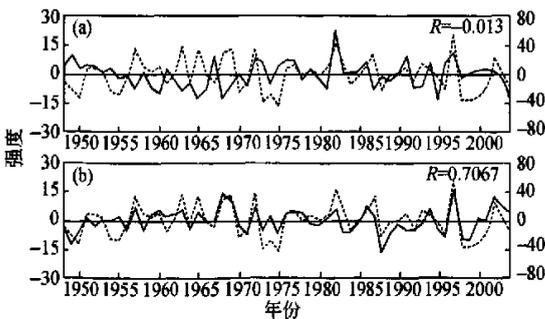


图5 AMI和SMI与ENSO指数的时间序列

(a) AMI(黑实线, 对应左边坐标)和ENSO指数(点线, 对应右边坐标)的时间序列；(b)同图(a), 这里为SMI与ENSO指数的时间序列。图中曲线均去掉了线性趋势。R代表图中两序列之间的相关系数

此外, 由图5(b)还可以看到SMI与MEI指数在整个时间段的变化趋势都很相似。二者在1976年前的相关为0.7329, 1976年后为0.7416, 均超过了0.001的显著性水平。为什么冬季北半球Hadley环流与ENSO的相关系数在1976年后明显增强^[22]? 图6给出了AMI, SMI与ENSO指数的11a滑动相关系数。由图6(a)可见, AMI与MEI的相关系数发生了明显的年代际突变。1974年之前二者是显著的负相关(1948—1974年二者相关系数为-0.46, 超过95%的置信度)。此时图6(b)中的情形恰好与之相反, SMI与ENSO之间是显著的正相关。而在1974年之后(1977—2003年PC1与MEI的相关系数为0.3753, 达到了0.05的显著性水

平), AMI, SMI 均与 ENSO 指数显著正相关。因此, AMI 和 SMI 与 ENSO 之间相关系数符号的一致可能使得北半球冬季 Hadley 环流与 ENSO 的相关在 1976 年后显著增强。

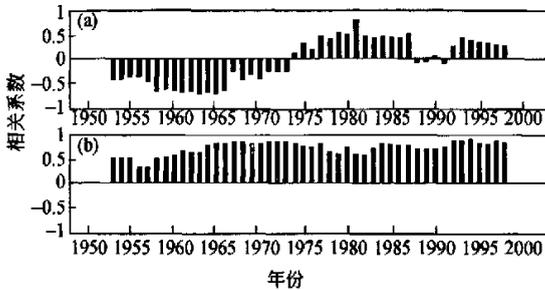


图 6 非对称和对称模态强度指数与 ENSO 指数的 11a 滑动相关

(a) AMI 时间序列与 ENSO 指数的 11a 滑动相关;
(b) 同图 6(a), 这里为 SMI 与 ENSO 的滑动相关

综上所述, 冬季北半球 Hadley 环流圈在过去几十年的增强趋势是由于其非对称部分的增强引起的, 而热带海洋尤其是印度洋到西太平洋暖池地区海温的升高可能是造成这一现象的主要原因。同时第一模态位相的变化也可能使得 1976 年前后 ENSO 和北半球 Hadley 环流之间的相关系数发生了突变。而环流圈的对称部分与 ENSO 之间的相关一直显著并且稳定, 它体现了 Hadley 环流与 ENSO 之间联系。这一关系主要反映在年际尺度上, 因此将 Hadley 环流强度指数中的 ENSO 信息去除后, Hadley 环流圈的增强趋势依然存在^[12]。这种做法相当于将 Hadley 环流圈的对称部分去除, 因此剩下的非对称部分依然保留着 Hadley 环流的增强趋势。

4 结论和讨论

(1) 冬季质量流函数的年际变化包含两个主要空间模态: 关于赤道非对称 (EOF1) 和赤道对称 (EOF2) 模态。它们具有明显不同的变化特征, 分别对应着冬季北半球 Hadley 环流圈在年代际、年际时间尺度上的变化。

(2) 非对称模态的变化使得冬季北半球 Hadley 环流圈在最近几十年显著增强 (即冬季北半球 Hadley 环流圈的增强主要是由其跨越赤道部分的增强

引起)。在年代际尺度上, 该模态的增强与热带海洋尤其是印度洋到西太平洋暖池的增温关系密切。而在年际尺度上, 该模态使得北半球 Hadley 环流与 ENSO 之间的相关系数在 1976 年前后发生了显著变化。

(3) 对称模态只有年际尺度上的变化, 它与 ENSO 之间存在显著的正相关, 并且这种相关在整个时间段均很稳定, 说明北半球 Hadley 环流与 ENSO 之间的相互作用主要体现在环流圈对称部分与 ENSO 的联系上。

文章中还有很多问题有待进一步研究, 比如海洋增温通过什么方式使得冬季 Hadley 环流的非对称模态增强。这一方式是否也存在于夏季的 Hadley 环流圈上? 另外, 海洋年代际增温对其他环流圈的影响是什么? 例如中纬度的 Ferrel 环流。它同时受热带海洋^[25,26]和高纬度环状模^[27]影响, 而南北半球环状模在近些年来也具有明显的增强趋势, 这些是否使得 Ferrel 环流的强度增强? 我们将在后续文章中继续这些讨论。

参 考 文 献

- 1 叶笃正, 朱抱真. 大气环流若干基本问题. 北京: 科学出版社, 1958, 157
- 2 Oort AH, Rasmusson EM. On the annual variation of the monthly mean meridional circulation. *Mon Wea Rev*, 1970, 98 (6): 423-442
- 3 Newell RE, Kidson JW, Vincent DG, et al. The General Circulation of the Tropical Atmosphere and Interactions With Extratropical Latitudes. The MIT Press, 1972, vol 1, 2, 629
- 4 Oort AH. Global Atmospheric Circulation Statistics, 1958-1973. NOAA Prof. Pap 4. US Government Printing Office, Washington, DC, 1983, 180
- 5 Oort AH, Peixoto JP. Global angular momentum and energy balance requirements from observations. *Advances in Geophysics*, 1983, (25): 355-490
- 6 Oort AH, Yienger JJ. Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J Climate*, 1996, (9): 2751-2767
- 7 Chang EKM. The Influence of Hadley circulation intensity changes on extratropical climate in an idealized model. *J Atmos Sci*, 1995, (52): 2006-2024
- 8 Hurrell JW. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophys Res Lett*, 1996, (23): 665-668

- 9 Chen JY, Carlson BE, Genio AD Del. Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s. *Science*, 2002, 295(5556): 838—841
- 10 Quan XW, Diaz HF, Hoerling MP. Changes in the Hadley Circulation since 1950. In: Diaz HF, Bradley RS, eds. *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Kluwer Academic, 2004, 85—120
- 11 Tanaka HL, Ishizaki N, Kitoh A. Trend and interannual variability of Walker, monsoon and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere. *Tellus A*, 2004, 56(3): 250—269
- 12 Mitas CM, Clement A. Has the Hadley cell been strengthening in recent decades? *Geophys Res Lett*, 2005 (32) L03809, doi: 10.1029/2004GL021765
- 13 Waliser, DE, Shi Z, Lanzante J, et al. The Hadley circulation: Assessing reanalysis and sparse in-situ estimates. *Clim Dyn*, 1999, (15): 719—735
- 14 Dima IM, Wallace JM. On the seasonality of the Hadley cell. *J Atmo Sci*, 2003, (60): 1522—1527
- 15 Kalnay E, Kanamitsu M. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3): 437—472
- 16 Smith TM, Reynolds RW. Improved extended reconstruction of SST (1854—1997). *J Climate*, 2004, 17(12): 2466—2477
- 17 龚振淦, 王盘兴, 马杰. 平均经圈环流质量流函数简化计算方案的应用. *南京气象学院学报*, 2002, 25(3): 328—333
- 18 秦育婧, 王盘兴, 管兆勇. 两种再分析资料的 Hadley 环流比较. *科学通报*, 2006, 51(12): 1469—1473
- 19 程亚军, 王盘兴, 李丽平. 低纬平均经圈环流异常与低纬平均海温异常关系的诊断分析. *热带气象学报*, 2002, 18(3): 193—202
- 20 吴国雄, Stefano Tibaldi. 关于大气平均经圈环流的一种计算方案. *中国科学*, 1988, (4): 442—450
- 21 李建平. 全球大气环流气候图集 I. 气候平均态. 北京: 气象出版社, 2001, 279
- 22 周波涛, 王会军. Hadley 环流的年际和年代际变化特征及其与热带海温的关系. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1271—1278
- 23 Webster PJ. The elementary monsoon. Fein JS, Stephens PL, eds., *Monsoons*, New York: John Wiley & Sons, 1987, 3—32
- 24 Trenberth KE, Stepaniak DP, Caron JM. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation. *J Climate*, 2000, 13: 3969—3993
- 25 Wang C. Atlantic climate variability and its associated atmospheric circulation cells. *J Climate*, 2002, 15: 1516—1536
- 26 Wang C. Atmosphere circulation cells associated with the El Nino Southern Oscillation. *J Climate*, 2002, 15: 399—419
- 27 Li J, Wang JXL. A modified zonal index and its physical sense. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(12): 1632, doi: 10.1029/2003GL017441