

郭品文, 刘畅. 北半球大气环流的纬向对称模态 [J]. 南京气象学院学报, 2008 31(3): 293-299

北半球大气环流的纬向对称模态

郭品文, 刘畅

(南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 运用自然正交分解方法 (EOF) 提取了北半球冬季热带外地区标准化纬向平均纬向风场的前两个模态。第 1 模态 (方差贡献为 34%) 表现为中高纬带的西风 (东风) 异常和中纬带的东风 (西风) 异常, 与之相联系的海平面气压场的异常表现为极区与中高纬度地区海平面气压场的反位相变化, 即北极涛动 (AO); 第 2 模态 (方差贡献为 21%) 表现为中纬带的西风 (东风) 异常和中低纬带的东风 (西风) 异常, 与之相联系的海平面气压场的异常表现为副极地地区与副热带地区海平面气压场的反位相变化, 即副热带涛动 STO (sub-tropical oscillation)。副热带涛动的水平结构表现出较强的纬向对称性, 垂直方向上表现出相当正压性; 与副热带涛动正位相相联系的纬向平均温度场表现为中高纬度地区负异常和副热带地区正异常, 而且费雷尔环流加强南移。副热带涛动不仅在冬季有所表现, 而且在整个冬半年 (11 月—翌年 4 月) 都有所表现, 但在夏半年则不存在。
关键词: 副热带涛动; 纬向对称; 经向偶极子
中图分类号: P434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008) 03-0293-07

Zonally Symmetric Modes of Northern Hemisphere General Circulation
GUO Pin-wen, LIU Chang

(Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044 China)

Abstract The two important modes of standardized winter time zonal-mean zonal wind in Northern extratropics are extracted using the method of empirical orthogonal function (EOF). The leading mode (explaining 34% of the variance) is characterized by anomalous westerly (easterly) in high-m iddle latitudes and anomalous easterly (westerly) in mid-latitudes, and the antiphase variations of SLP anomalies between polar regions and high-m iddle latitudes. The leading mode is Arctic Oscillation (AO). The second mode defined as sub-tropical oscillation (STO) (explaining 21% of the variance) emerges as anomalous westerly (easterly) in mid-latitude regions and easterly (westerly) in middle-lw latitude regions and shows opposite variations of SLP anomalies between sub-polar regions and sub-tropics. The spatial structure of STO is studied. The results indicate that STO shows a prominent zonally symmetric structure in the horizontal and a quasi-barotropic structure in the vertical. The zonal-mean temperature field associated with a positive phase of STO shows negative anomalies in high-m iddle latitudes and positive anomalies in sub-tropics, and the enhanced Ferrel moves equatorward. We still concluded that STO can both be found in winter or the whole winter half year, but not in the summer half year.
Key words subtropical oscillation; zonally symmetry; meridional dipole

0 引言

Thompson 等^[1]于 1998 年首次引入了北极涛动 (Arctic oscillation, AO) 的概念, 指出北半球冬季热带外地区海平面气压距平场 EOF (empirical orthogonal function) 第 1 特征向量呈现中纬度和极区反位

收稿日期: 2007-03-06 改回日期: 2007-06-05
基金项目: 江苏省高校自然科学基金计划 (05KJB170072)
作者简介: 郭品文 (1962—), 男, 江苏苏州人, 博士, 教授, 博士生导师, guo@nuist.edu.cn

相变化的南北振荡形式, 并强调指出 AO 具有高的纬向对称性, 其主要的活动中心位于北极地区, 能解释北半球大部分的大气环流变率。Thompson 等^[1]进一步对 AO 的结构进行了三维分析, 指出从对流层到平流层底层各层位势高度场对 AO 指数的回归形式呈现出明显的纬向对称结构和相当正压结构, 而对流层低层温度场的回归形式则表现出纬向不对称性, 他们认为这可能与北半球冬季海陆的热力差异有关。

在此后的几年, AO 研究受到越来越多的重视。Wallace^[2]指出, AO 反映的是中纬度西风的位置和强弱。而 Namias^[3]认为, 在西风高指数阶段, 西风急流向高纬度地区移动, 极涡加深, 冷空气被局限在极地地区, 冷空气爆发颇少, 导致北半球中高纬地区偏暖; 西风低指数阶段, 急流南扩, 冷空气则频繁暴发, 北半球中高纬大部分地区偏冷。这样当 AO 强度和位置发生变化时, 天气型就会发生变化, 如果这种变化持续一段时间, 就导致了气候的变化。研究^[4-11]表明: 北极涛动对北半球中高纬地区的气候有着较强的影响。孙兰涛等^[12]指出: AO 令人满意地表示了极涡强度变化的特性。顾思南等^[13]发现, 北半球绕极涡的总体面积变异与我国气候异常在年代际时间尺度上密切相关, 在年际时间尺度上北半球绕极涡的局地变异与我国气候异常显著相关。杨秋明^[14]用旋转奇异值分解 (RSVD, rotated singular value decomposition) 方法研究初夏长江中下游降水与北半球 500 hPa 环流之间的关系时发现: 第 6 对旋转左右奇异向量反映初夏 500 hPa 高度北极欧洲型与苏北南部型之间的耦合关系, 其中北极欧洲型与 AO 类似。Thompson 等^[15]研究表明: 北半球冬季海平面气压场, 地表温度场的 30 a (1968—1997 年) 变化趋势图和与 AO 指数相联系的海平面气压场、地表温度场的变化趋势图的形式有着惊人的相似, 只是数值上有差别。这足以说明近几十年来 AO 指数变化趋势是北半球气候变化的重要原因。

由以上研究成果可看出近些年 AO 对北半球气候变化的影响不可忽视。为了更好地掌握气候变化的原因和规律, 有必要探索主要影响气候变化的大尺度大气环流诸多模态。郭燕娟等^[16]指出: 大气年际和年代际变化最大的区域均位于全球的中高纬度地区, 气压的年际和年代际变化基本为高纬度地区与中低纬度地区呈相反变化。覃军^[17]指出, 纬向对称环流变率除了 AO 外, 还存在一个环流变率主体位于副热带地区的涛动, 并将其定义为副热带涛动

STO (sub-tropical oscillation)。本文在此基础上揭示了存在于北半球冬季热带外地区季节尺度的 STO, 进一步证实了该涛动的存在, 并分析了其空间结构特征。

1 资料

采用 NCEP/NCAR 再分析月平均资料 (包括海平面气压、17 层的纬向风、经向风、位势高度, 12 层垂直速度), 时间跨度为 1948 年 1 月—2005 年 12 月 (共 696 个月), 全球格点数为 144×73 个, 格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 取热带外地区为 $20^\circ \sim 90^\circ \text{N}$; 取气候变量冬季平均值为 12 月—翌年 2 月的平均。

2 北半球冬季标准化的纬向平均纬向风场的两个重要模态

图 1 给出了北半球 1948/1949—2004/2005 年冬季标准化纬向平均纬向风场 EOF 分析的第 1、第 2 模态及其时间系数。

第 1 模态 (图 1a) 表现为: 平流层底层以下异常纬向平均纬向风场表现为中高纬度地区西风异常和中纬度地区的东风异常的径向偶极子结构, 垂直结构上表现为相当正压的特征。这一模态所解释的环流变率为 34%。为了更好地理解这一模态的环流意义, 将 1948/1949—2004/2005 年 57 a 冬季平均的海平面气压场对第 1 模态的强度指数进行一元线性回归分析 (图 2a)。由图 2a 可见, 当第 1 模态呈现为正位相时, 海平面气压场的变化呈现出沿纬圈近似环状的南北方向的偶极子结构, 在极区为负异常, 中高纬北大西洋、北太平洋地区为正异常。其中北大西洋的正异常中心偏向于欧亚大陆, 北太平洋的正异常中心位于阿留申群岛地区。这种形势与 Thompson 等^[1]定义的北极涛动的形势极为类似, 且算得图 1b 中第 1 模态指数与按 Thompson 等的方法所定义的北极涛动指数的相关系数为 0.56 通过了显著性水平为 0.001 的 t 检验。由此可见: 第 1 模态即为北极涛动。

第 2 模态的环流变率主体较第 1 模态偏南 (图 2c), 表现为中纬度带西风异常与中低纬带东风异常的经向偶极子结构, 垂直结构上也表现为相当正压的特征。这一模态所解释的环流变率为 21%。图 1d 揭示的第 2 模态强度变化特征为: 不仅有年际变化, 还有很明显的年代际变化, 20 世纪 80 年代中期以后强度指数整体上呈现上升趋势。为了更好地理解第 2 模态的环流意义, 将 1948/1949—

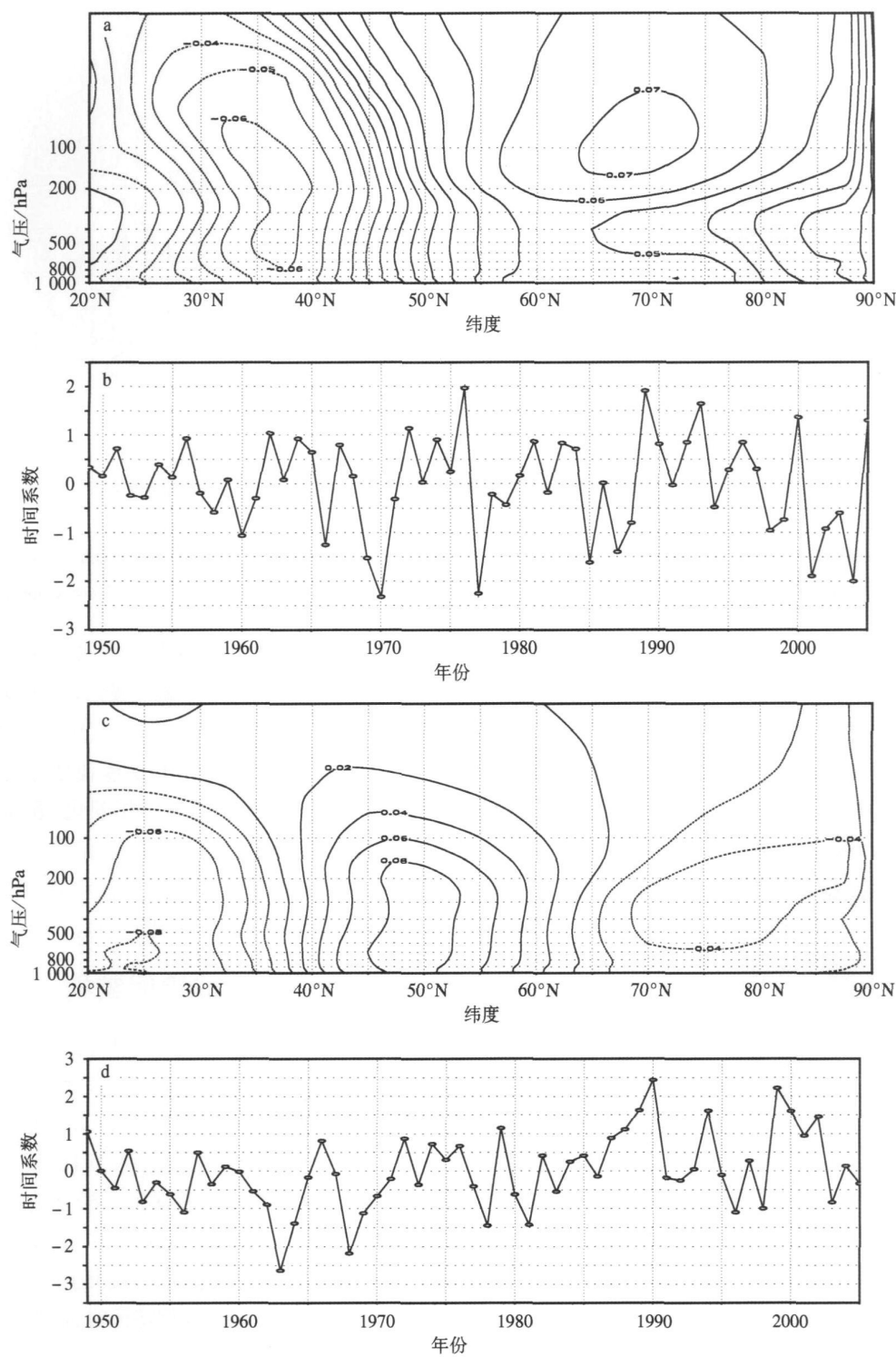


图 1 北半球冬季标准化纬向平均纬向风场经 EOF 分析的第 1(a)、2(c)特征向量及其时间系数(b、d)

Fig 1 EOFs of the standardized wintertime zonal-mean zonal wind in Northern Hemisphere

(a) first mode; (c) second mode; and (b、d) their time series respectively

2004/2005 年 57 a 冬季平均的海平面气压场对第 2 模态的强度指数进行一元线性回归分析(图 2b)。由图 2b 可见, 当第 2 模态呈现出正位相时, 副极地地区海平面气压场为负异常响应, 中心位于冰岛附

近。副热带地区海平面气压场为正异常响应, 中心位于地中海、中低纬度大西洋西岸和北太平洋中部, 整体形势呈现出具有较强纬向对称性的经向南北振荡。

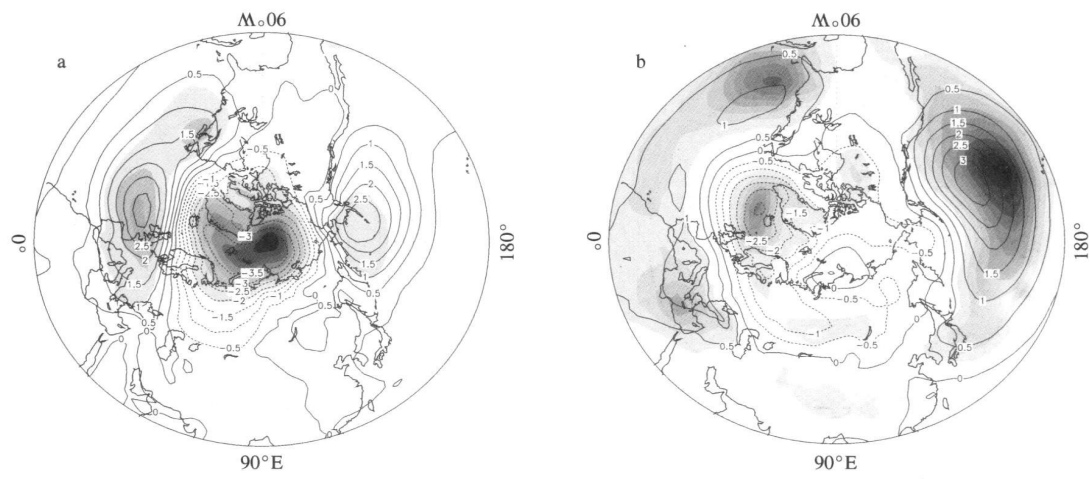


图 2 北半球冬季海平面场对第 1 第 2 模态指数一元线性回归系数 (单位: hPa)
(等值线间隔: 0.5 hPa 阴影区为通过显著性水平为 0.05 的 F 检验的区域)

Fig 2 Regressions for SLP in Northern Hemisphere wintertime versus the indices of (a) the first mode and (b) second mode respectively (Contour intervals is 0.5 hPa and areas passing the F -test significance level of 0.05 are shaded)

由此认为, 在北半球冬季热带外地区海平面气压场中除了 AO 这一重要的涛动外, 在副热带地区存在着另一个重要的涛动。为了证实这一结论, 做了 1948/1949—2004/2005 年冬季纬圈平均的海平面气压距平的交叉相关 (图 3)。由图 3 可见, 整体特征表现为以 50°N 为界限的高、低纬地区海平面气压场变化的反相关。其中有两个负相关系数绝对值大值区域, 一个表示北极区与中高纬度海平面气压距平场的反位相变化, 即北极涛动 AO; 另一个表示了副极地地区与副热带地区海平面气压场反位相变化。

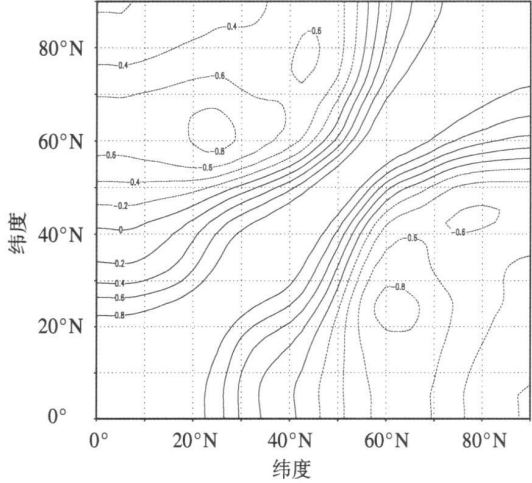


图 3 北半球冬季纬圈平均的海平面气压距平的交叉相关系数

Fig 3 Cross-correlation coefficients of the zonal mean anomaly of SLP in Northern Hemisphere wintertime

综上所述, 北半球冬季海平面气压场的变化形式中存在两个涛动, 一个为北极涛动, 表现了极区与中高纬度地区海平面气压场的反位相变化关系; 另一个表现为以 60°N 为中心副极地地区与副热带地区海平面气压距平场的反位相变化, 表现出较强的纬向对称性, 反映了副极地地区和副热带地区之间大气动量、热量以及质量交换, 故将其定义为副热带涛动 STO (sub-tropical oscillation)。

3 副热带涛动的空间结构

为了更全面了解 STO 的空间结构, 将 1948/1949—2004/2005 年冬季平均 850、500、200 hPa 位势高度场 (分别代表对流层的低层、中层、高层) 对 STO 指数作线性回归分析 (图 4)。由图 4 可见, 副热带涛动表现出了较强的纬向对称性和相当正压性。在整个对流层中 STO 表现为副极地地区和副热带地区位势高度场的反位相变化关系。当 STO 呈现为正位相特征时, 副极地地区位势高度场异常降低, 副热带地区位势高度场异常升高。图 4a、b、c 中的位势高度异常的正、负极值中心与图 2b 的正、负极值中心位置基本一致, 只是 STO 在位势高度场中的表现形式在阿留申群岛地区出现了负极值中心。由此可见, 副热带涛动反映了北大西洋高压和冰岛低压、北太平洋高压和阿留申低压之间的关系。值得关注的是: 各个极值中心的数值随高度的增加而增大, 且越到高层 STO 的纬向对称性越明显, 这反映了自由大气的动力特征, 同时说明了副热

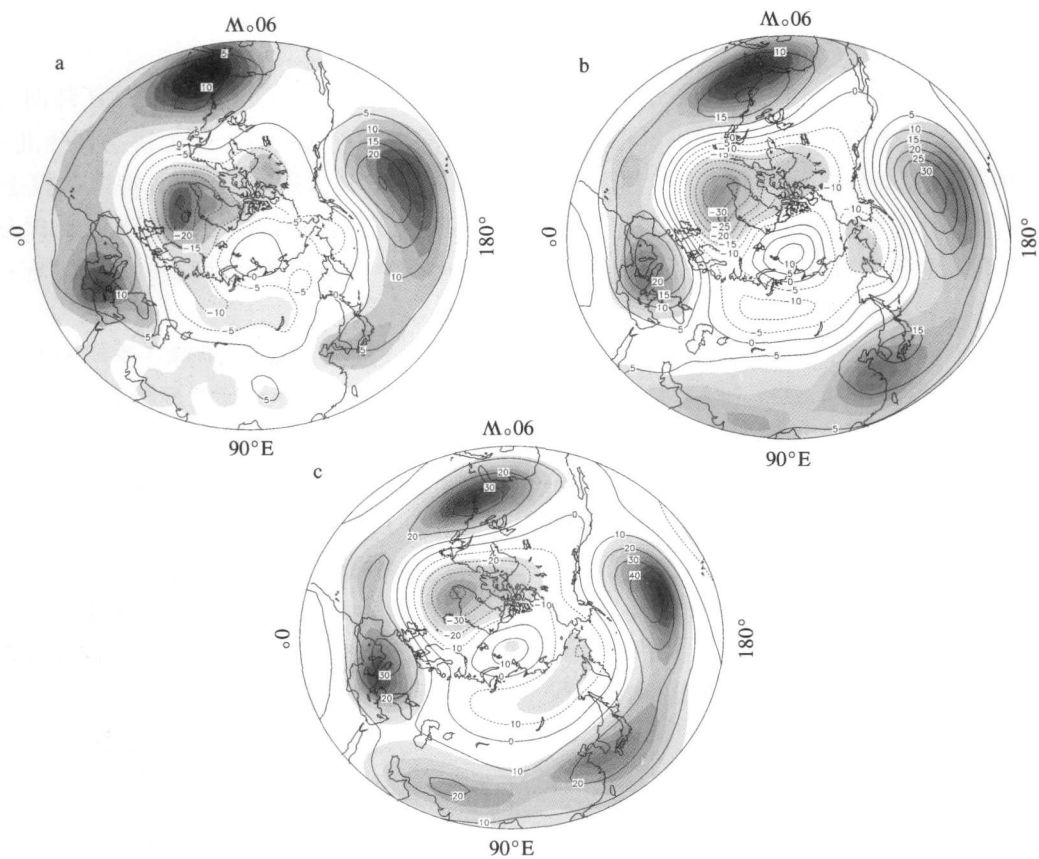


图 4 北半球冬季 850 500 200 hPa位势高度场对 STO指数的线形回归 (单位: gpm)
Fig 4 Regression maps for intertime geopotential height fields (a) 850 hPa (b) 500 hPa (c) 200 hPa in Northern Hemisphere versus the index of STO (units gpm)

带涛动的相当正压性。

图 5 表示 STO 偏强一个标准差时纬向平均的温度场以及经圈环流的异常情况。纬向平均的温度场表现为对流层中中高纬度地区的负温度异常和副热带地区的正温度异常。其中正的温度异常中心位于 60~ 65°N 对流层中层, 负温度异常中心位于 35 ~ 40°N 对流层中层。与 STO 正位相相联系的异常经圈环流最明显的特征表现为费雷尔环流圈的加强和南移。对流层中 35~ 45°N 为异常强的下沉气流, 50~ 60°N 为异常强的上升气流, 这种垂直运动和与之相对应的近地面层强大的南风和对流层上层的北风分量构成了加强的费雷尔环流, 中心位于 45°N 附近, 较气候平均的费雷尔环流圈的位置 (60°N) 偏南。

4 其他季节副热带涛动的表现情况

前文指出在北半球冬季海平面气压场的变化形势中存在两种涛动: 北极涛动和副热带涛动。北极涛动全年都存在, 那么副热带涛动是否同北极涛动一样在全年都有所表现? 为此作了北半球春季

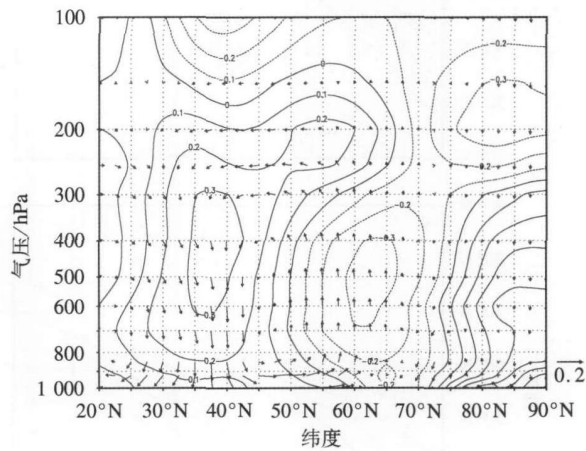


图 5 纬向平均的温度场(等值线)、经圈环流(矢量)对 STO 指数的线性回归分布
(等值线间隔 0.1 °C, 矢量单位: m / s 垂直速度 × 50)
Fig 5 Regressions of zonal mean temperature(contour), and meridional circulation(vectors) versus the index of STO(contour interval 0.1 °C; vectors are in units of m / s vertical velocity × 50)

(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)纬向平均的海平面气压距平场的交叉相关(图 6)。由图 6 可见:春、夏、秋 3 季中,北半球海平面气压场都存在高、低纬度间反位相变化的特点,即表现出遥相关的特征,但在不同的季节这种遥相关的表现形式有所差别。在北半球春季海平面气压场异常中,图 6a 主要表现为一个位于副热带地区的遥相关,即副热带涛动 STO。此时在较高纬度地区,极地地区和中高纬度地区海平气压的反位相变化形势仍然存在,即 AO 存在,只是 AO 强度弱于 STO。而在夏季和冬季的海平面气压异常形势中,即图 6b 和图 6c 中只表现出极区和中高纬度地区的遥相关,在副热带地区无涛动的表现形式。即夏、秋季节在北半球的海平面气压场的异常形势中只存在北极涛动 AO,不存在副热带涛动 STO。综上所述:副热带涛动在北半球冬季大气环流异常形势中有体现,在冬半年(包括冬、春季)存在,而在夏半年(包括夏、秋季)不存在。

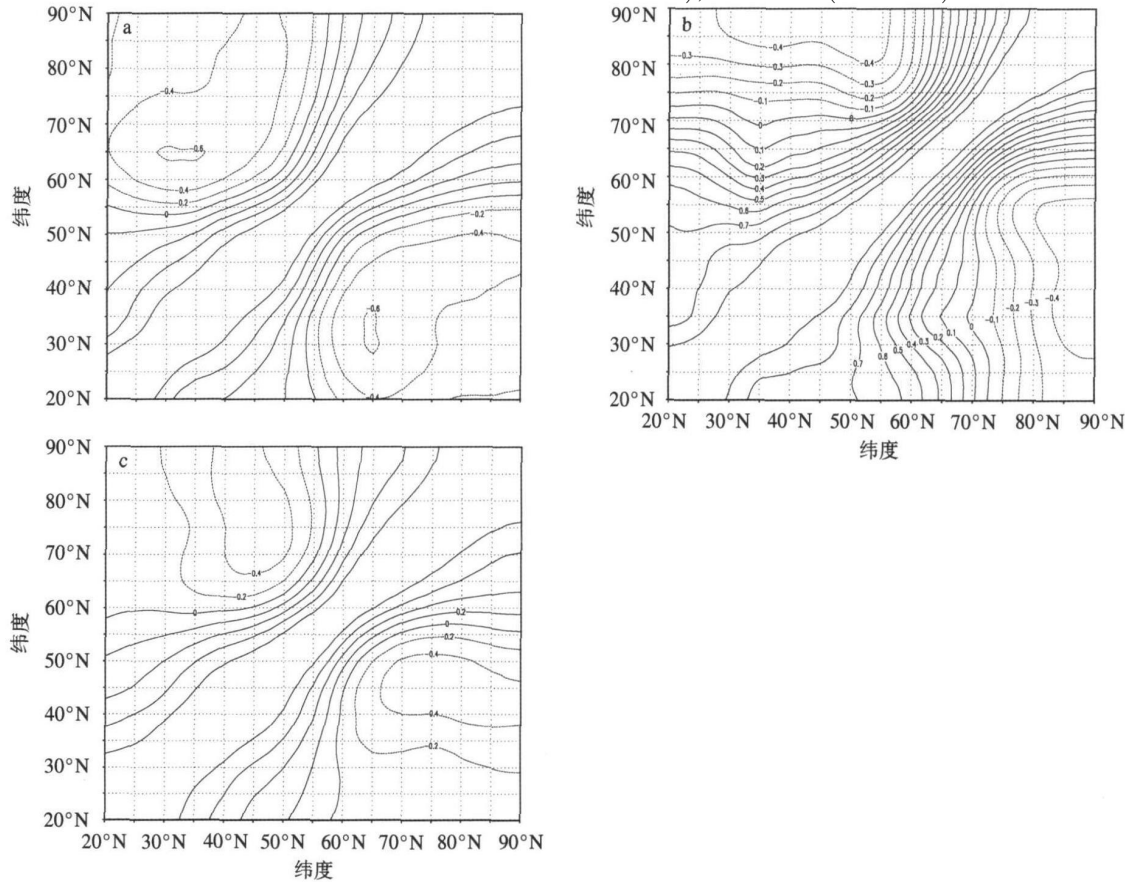


图 6 春季 (a)、夏季 (b) 和秋季 (c) 海平面气压距平场的交叉相关系数
Fig 6 Cross-correlation coefficients of the zonal-mean anomaly of SLP
in (a) winter (b) spring and (c) autumn in Northern Hemisphere

5 结论

- (1) 本文应用 EOF 方法提取了纬向对称环流变率的前 2 个空间模态。第 1 模态即为北极涛动; 第 2 模态被定义为副热带涛动; 将第 2 模态的标准化时间系数定义为副热带涛动指数。此模态解释北半球异常的纬向对称环流变率的 21%, 是一个显著的模式。
- (2) STO 表现为北半球冬季海平面气压距平场在副极地和副热带地区的反位相变化, 水平方向表现出较强的纬向对称特征。副热带涛动正位相表现为副极地地区海平面气压的异常降低, 副热带地区的海平面气压场的异常升高, 并且这样的遥相关型在整个对流层均存在, 表现出相当正压特征。与之相联系的纬向平均温度场表现为中高纬度地区的负异常和副热带地区的正异常。相应地费雷尔环流表现为加强且南移。
- (3) 北半球副热带涛动在冬半年存在 (冬、春季), 在夏半年 (夏、秋季) 不存在。

参考文献:

[1] Thompson D W, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature field [J]. Geophy Res Lett 1998 25(9): 1297-1300

[2] Wallace J M. North Atlantic oscillation /annular modes: Two paradigms-one phenomenon [J]. Quart J Roy Meteor Soc 2000 126(564): 791-805

[3] Namias J The index cycle and its role in the general circulation [J]. J Meteor 1950, 7(2): 130-139.

[4] 琚建华,任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 2004 23(4): 429-434

[5] 任菊章,琚建华, 赵刚. 亚洲冬季地表温度与北半球海平面气压场的关系 [J]. 气候与环境研究, 2003 8(4): 436-442

[6] 龚道溢,王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气温变化的研究 [J]. 地理学报, 2003, 58(4): 559-568.

[7] 武炳义,卞林根, 张人禾. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响 [J]. 极地研究, 2004 16(3): 211-220

[8] 何春,何金海. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系的研究 [J]. 南京气象学院学报, 2003 26 (1): 1-7

[9] 邓伟涛,孙照渤. 冬季北极涛动与极涡的变化分析 [J]. 南京气象学院学报, 2006 29(5): 613-619

[10] 胡秀玲,刘宣飞. 东北地区冬季气温与北极涛动年代际关系研究 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 640-648.

[11] Wu Bingyi Wang Jia Possible impacts of winter arctic oscillation on Siberian High the East Asian Winter Monsoon and Sea-Ice extent [J]. Adv Atmos Sci 2002 9(2): 297-320.

[12] 孙兰涛,吴辉碇,李响. 对北极涡的认识 [J]. 极地研究, 2006 18(1): 52-62

[13] 顾思南,杨修群. 北半球绕极涡的变异及其与气候异常的联系 [J]. 气象科学, 2006 26(2): 135-142

[14] 杨秋明. 梅雨期间长江中下游降水与北半球环流的耦合相关 [J]. 气象科学, 2002 22(1): 81-87

[15] Thompson D W, Wallace J M, Hegerl G C. Annular modes in the extra-tropical circulation Part ii: Trends [J]. J Climate 2000 13(5): 1018-1036.

[16] 郭燕娟,杨修群. 全球海气系统年际和年代际变化的时空特征分析 [J]. 气象科学, 2002, 22(2): 127-138.

[17] 覃军. 北极涛动年际、年代际变化特征的诊断研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学大气科学学院, 2006.