春季北极涛动对南海气候的影响

屈静玄*, 龚道溢, 李桑

北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

* 联系人, E-mail: qjx@mail.bnu.edu.cn

2015-04-20 收稿, 2015-06-16 接受, 2015-07-30 网络版发表

国家自然科学基金(41375071)和国家重大科学研究计划(2012CB955401)资助

摘要 利用1979~2013年月降水量和NCEP再分析大气环流资料, 分析了春季(3~5月)北极涛动对南海气候变率的可能影响. 结果表明, 春季南海多气候要素主导模态的时间系数与同期北极涛动指数相关系数达-0.4, 超过95%的信度水平, 二者反位相的特征在年际尺度上更加明显. 当北极涛动指数为正异常时, 西太平洋副热带高压减弱, 热带西太平洋有异常气旋式环流, 南海地区偏南风减弱, 南海大部分地区降水增多, 北部到华南地区降水减少, 北极涛动指数为负异常时情况则相反. 北极涛动可由两条途径影响南海地区气候, 一是通过青藏高原南侧西风急流的波列, 二是通过北太平洋西风急流区南北侧的偶极型环流异常. 南海地区环流和气候的异常与这两条途径的相对强弱和配置有关, 当高原南侧波列异常偏强同时北太平洋偶极型异常偏弱时, 二者共同作用可增强西太平洋副热带高压和南海地区异常反气旋环流, 导致降水的显著减少. 当北极涛动指数为正异常时, 北太平洋偶极型南支的气旋还可触发热带地区海气相互作用间接影响南海气候.

关键词

南海气候
北极涛动
波列
北太平洋偶极型
环流异常

春季南海地区大气环流和海洋状况直接影响局地气温、降水、辐射等要素的波动与异常, 而作为南海地区最重要的气候系统, 南海季风的活动对东亚夏季风和东亚夏季气候也具有重要的前兆指示意义^[1]. 以往研究发现南海地区气候和南海季风变率受诸多因子的影响: 其一, 局地 and 区域外海表温度可直接或间接影响南海气候. 南海前冬和春季海温偏高(低)时, 南海季风常提早(推迟)爆发^[2,3]; 同时春季海温偏高(偏低)常伴随南海夏季风的增强(减弱)^[4]. 相邻的西太平洋暖池偏暖时, 从中印半岛到菲律宾一带对流活动更加活跃, 同时西太平洋副热带高压位置偏东, 均利于南海季风爆发^[5~7]; 而赤道中、东太平洋异常增暖时, 环流配置不利于南海夏季风的爆发, 反之, 拉尼娜事件发生时有利于南海夏季风的爆发^[8,9]. 近年来强调的中太平洋增温型厄尔尼诺导致南海地区降水增多, 比东太平洋增温型厄尔尼诺

对南海气候的影响可能更为显著^[10]. 有研究指出热带印度洋整体增暖(变冷)时, 西太平洋副热带高压偏强, 南海夏季风爆发常推迟(提早)^[11], 南海地区降水和西太副高对印度洋海温强迫的响应, 也被许多数值模拟工作证实^[12]. 印度洋海温偶极子型(IOD)异常也可影响南海气候, 当偶极子型处于正(负)位相时, 南海夏季风偏强(弱)^[13]. 其次, 南北两个半球的相互作用也是影响南海春季气候的因子. 4, 5月份在105°E附近出现的赤道涡旋引导越赤道气流进入南海, 能为南海季风的爆发创造有利条件^[14], 而索马里和南海越赤道气流的增强利于西太平洋副高东撤, 促进季风的全面爆发, 另外当这两支气流建立偏早(晚)、强度偏强(弱)时, 会使得南海夏季风爆发时间提早(推迟)^[15]. 此外, 海陆热力对比也影响南海季风变率. 青藏高原关键区地表感热及其相关的南亚高压强弱变化均发现与南海夏季风爆发和强度指数存在

引用格式: 屈静玄, 龚道溢, 李桑. 春季北极涛动对南海气候的影响. 科学通报, 2015, 60: 2327–2337

Qu J X, Gong D Y, Li S. The possible influence of Arctic Oscillation on South China Sea climate during boreal spring (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2327–2337, doi: 10.1360/N972015-00175

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00175>

显著相关^[16,17]；而东亚冬季风导致的下垫面热力异常可持续影响春季海陆热力差异，进而影响春季南海季风的爆发时间及强度^[18]。

需要指出的是以往这些研究多强调热带或者相邻地区的因子对南海气候的影响，有诸多研究表明中高纬度的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)的状态与低纬度地区气候之间存在显著联系。AO可通过南亚西风急流影响下游地区，如在AO正位相年，孟加拉湾上空南支槽和南亚急流偏强，常伴随中国中南地区极端降水的增加^[19]，以及热带印度洋降水的增加^[20]。同时AO可影响西北太平洋热带大气环流和海温^[21]，进而影响热带气旋路径^[22]以及对流活动^[23]。那么，AO是否也是影响春季南海气候的一个因子呢？本文的目的是分析南海地区春季气候与AO是否存在统计上的联系以及可能的机理。

1 资料和方法

本文使用的大气环流资料为NCEP-DOE再分析资料，包括200, 250, 700和850 hPa风场以及海平面气压、500 hPa位势高度，水平空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。使用的降水资料为全球降水气候计划数据(GPCP)，分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。海表温度资料来自美国海洋大气局的扩展重建海表温度资料第三版(ERSSTv3b)，水平空间分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。所用的AO指数定义为 20°N 以北的1000 hPa高度场经验正交函数分析第一模态对应的时间系数，取自于气候预测中心(CPC)。所有资料选取的时间段均为1979~2013年，时间分辨率为月，主要分析季节为春季(3~5月)。

ENSO对南海区域气候及中高纬度气候均有影响，因此分析时需要考虑降低或者去除其影响。采用线性回归的方法，线性拟合气候要素中的ENSO信号，然后从原始时间序列中减掉，得到的余差认为是统计上独立于ENSO的部分，然后对其进行分析。拟合时考虑了ENSO影响的时滞性，由于ENSO在冬季发展最为强烈，拟合时考虑了从同期到前冬(上年12月到当年2月)的ENSO信号，这里ENSO指标用美国海洋大气局气候预测中心提供的Niño3.4区海温指数表征。

2 AO与南海气候的显著相关

分析气候变率的影响时需要考虑气候背景场的状况，因此本文首先检查了南海地区春季高中低层大气环流和降水量的多年平均值及其空间分布。如

图1(a)和(b)所示，东亚地区对流层高层最重要的环流系统是东亚西风急流，春季其中心位于长江中下游到日本南部一带，其位置的变化会影响南海夏季风爆发^[24]。对流层中层500 hPa等高线在 20°N 以北较平直， 20°N 以南包括南海在内的西太平洋地区则为西太平洋副热带高压所控制，588千米等高线西端位于南海中部。与此对应，南海区域对流层低层主导气流为反气旋的环流特征，南海中部及南部呈偏东风，北部为西南风。伴随上述大气环流气候特征，降水空间分布上有两条明显的雨带：一条位于中国华南至日本南部一带，呈西南-东北走向，该区为环流辐合带且与高层急流入口南侧上升区相对应；另一条雨带则位于赤道附近。

为了刻画南海地区气候系统变化的宏观特征，借鉴了常用的多变量经验正交函数分析方法(MV-EOF)^[25]，该方法可以较好地描述多个气候要素变化及物理过程的总体特征。选取 $3.75^\circ\text{S} \sim 23.75^\circ\text{N}$ ， $106.25^\circ \sim 123.75^\circ\text{E}$ 范围内的春季850 hPa水平风速(u , v)、降水和海表温度，分别求3~5月的平均值，然后对各自标准化后进行多变量经验正交函数分析。前3个模态的方差贡献率分别为27.8%，21.5%和8.1%。从降水量、850 hPa风场和海温对主分量的回归系数分布(图2)中可以看出，对应第一模态正位相，南海大部分海域降水偏少，低层为反气旋式环流，海温异常高值中心位于南海中西部。热带西太平洋暖的海温常加强对流降水，这里发现的南海海温的正异常则可能主要是对大气的响应，因为反气旋式环流意味着副高加强，导致降水减少和下行短波辐射增强，对海温有加热作用，因此后面的分析主要关注环流和降水。在第二模态的空间分布中(图略)，正负降水中心分别位于 $2^\circ\text{S} \sim 0^\circ$ 和 $16^\circ \sim 20^\circ\text{N}$ ，南海区域以偏西风为主，海温异常偏高。在第三模态空间分布中(图略)， 10°N 以北地区降水偏多，以南地区降水偏少，西南风控制整个南海地区，且海温异常偏低。由于第二、三模态的时间系数与AO无显著相关，其与AO指数的相关系数仅分别为-0.10，-0.13，故本文只分析第一模态。图2中第一模态的降水和风场的异常分布与已有工作揭示的空间特征也是类似的^[9]。从第一模态的时间系数(PC1)看，南海气候具有显著的年际变率， ≤ 10 a尺度的变率占总方差的80.9%。此外，第一模态时间系数也有比较明显的低频波动特征，1999年之前的20 a，时间系数以正为主，有13 a为正值，并且值大于 1σ

的有5 a, 包括1981, 1983, 1987, 1992和1998年, 平均看这些高值年的振幅较负值年份更大; 而1999年在内的之后15 a, 第一模态的时间系数以负值为主, 其中有10 a为负值. 还对3~5月各个月份分别进行了MV-EOF分析(图略), 发现南海南部的偏东风控制的区域和赤道附近的降水均有逐月向北推进的趋势, 这可能与5月中下旬南海季风的爆发有关, 但850 hPa风场、海温以及降水率的基本型较为一致, 因此总的看来春季南海气候变化的第一模态是稳定的, 图1和2揭示的3~5月平均能较合理地反映春季整体情况.

直观比较AO和第一模态时间序列(均线性去除

了ENSO信号), 发现二者呈现明显的反位相变化关系(图3). 第一模态时间序列为正距平的有21 a, 其中有14 a AO指数为负值, 占66.7%; 第一模态时间序列为负距平的14 a中, 对应AO为正值的有8 a, 占57.1%. 一些极大值年二者的反向关系也很突出, 第一模态5个最大正距平年(1981, 1983, 1984, 1998和2013年)和5个最大的负距平年(1994, 2003, 2004, 2009和2011年)中, 有8 a都对应AO的反相异常. 整体看, 春季AO指数和同期第一模态时间系数二者的相关系数为-0.4, 超过95%的信度水平. 若进一步对两个时间序列进行高通滤波, 二者年际尺度波动的相

图1 南海地区气候平均状况. (a) 200 hPa 纬向风和 500 hPa 位势高度(m), 阴影表示 200 hPa 纬向风速大于 30 m/s, 间隔 5 m/s; (b) 850 hPa 风场和降水. 资料时间长度为 1979~2013 年

Figure 1 Climate means of (a) 200 hPa zonal winds, 500 hPa geopotential height (m), (b) 850 hPa winds, and precipitation. Shadings denote 200 hPa horizontal winds velocity > 30 m/s, with interval of 5 m/s. All means are averaged for data period of 1979-2013

图2 MV-EOF 第一模态空间分布(a)及时间系数(b). 空间模态以降水(填色)、海表温度(灰色等值线, °C)和 850 hPa 风场对应时间系数变化 1 个单位的回归系数来表征. 风场和降水只标出了达到 99%信度水平的区域

Figure 2 The spatial pattern (a) and time coefficient series (b) of the leading MV-EOF. The spatial pattern is indicated by the regression pattern of precipitation (shaded, mm/d), SST (contour in gray, °C) and 850 hPa winds upon the time coefficient series of the leading MV-EOF. Only significant (99% level) winds and rainfall are shown

图3 1979~2013年春季南海气候第一模态时间系数与同期AO指数的时间序列(ENSO信号已去除)

Figure 3 Time coefficient series of the leading MV-EOF and MAM AO index (ENSO signal has been removed)

关性更加明显. 另外, 直观地看2000年之前的AO与PC1的反位相变化较弱, 计算两者相关系数, 只有中等程度相关($r=-0.22$). 但从图中不难看出, 二者逐年的反位相相关很明显. 二者经过高通滤波后, 相关系数为 -0.37 左右, 超过90%信度水平. 同时, 前后两段PC1和AO在相关的环流变化上都是稳定的(图略), 反映出1979~2013年二者的联系是稳定存在的. 以往的研究发现AO与区域气候变化可存在数月的时间滞后, 本文进一步做了AO和第一模态时间系数的交叉相关分析. 结果表明南海气候时间系数与上一年冬季和秋季AO的相关系数均接近于0, 二者的显著相关只出现在同期(表1). 显然, 这与南海气候和ENSO的持续相关不同. 本文比较了ENSO和第一模态时间系数的交叉相关关系(这里计算前均去除了AO信号), 从表1看第一模态时间系数与同期和超前一个季节及超前2个季节的ENSO指数, 相关系数都非常高(分别达到0.82, 0.83和0.73), 都超过99%的信度水平, 表明ENSO对南海气候变率的主导作用和持续影响. 就3~5月的南海气候变率来看, ENSO和AO分别解释了总方差的67.2%和16.0%, 二者加起来能解释83.2%的南海气候变率.

表1 春季第一模态时间系数(PC1)与不同季节的AO指数和ENSO指数的相关系数^{a)}

Table 1 The correlation coefficients of PC1 with AO and ENSO index for different seasons

	AO(去除ENSO信号)	ENSO(去除AO信号)
前秋	0.05	0.73*
前冬	0.06	0.83*
春季	-0.40*	0.82*

a) *, 达到95%信度水平

为了进一步检查南海地区单个气候要素对应AO指数的变化, 分别计算了850 hPa风场和降水对AO指数的回归系数(均已线性去除ENSO信号), 结果如图4(a)显示, 当AO指数下降1个单位时, 南海和西太平洋地区低层为反气旋型异常, 中国华南地区及西北太平洋出现两个正的降水大值中心, 负的降水中心位于南海中西部, 这种特征与MV-EOF第一模态的分布一致. 值得注意的是AO反映的是北半球中高纬度行星尺度大气环流的变化, 如果AO能影响南海气候, 那么从统计上来看, 南海气候变化应该与北半球中高纬度环流也存在显著关系. 为此, 我们计算了北半球海平面气压对第一模态时间系数的回归系数(均已线性去除ENSO信号)(图4(b)), 结果表明当南海主气候模态时间系数偏高1个单位时, 北冰洋及邻近地区的气压偏高0.5~2 hPa, 与此同时北太平洋北部气压降低, 北大西洋-欧洲-亚洲北部一带气压偏低0.5~2 hPa, 显然, 这种海平面气压异常的分布与负位相的AO气压分布型十分相似^[26,27]. 此外, 选择非ENSO年, 计算AO与PC1的关系, 相关系数同样显著($r=-0.39$), 同时, 伴随PC1的北半球海平面气压异常同样对应负位相的AO分布. 南海气候与高纬度环流联系的这种特征在更长时段的南海气候代用资料中也有反映^[28], 说明南海气候与高纬度环流因子之间的关系是稳健和长期存在的.

3 AO影响南海气候的可能途径

3.1 大气环流的相关变化

已有研究指出AO可通过多条途径影响西北太平洋低纬气候, 其中比较受关注的有自中东到南亚的

大气波列、北太平洋西风急流以及东亚冬季风。其一，从北非、中东到南亚的急流是北大西洋和欧洲扰动向东南亚输送的重要纽带^[33]，与AO相关的上游地区的海洋、陆面及大气的异常可通过波列(特别是沿南亚急流传播的波列)影响到下游东亚地区气候^[20,29]，可导致中国南方冬季极端降水^[19]、西南干旱^[30]等异常事件。Takaya和Nakamura^[34]也曾指出中高纬的Rossby波活动可延伸到东南亚地区。其二，AO还可通过北太平洋西风急流区的波流相互作用，在北太平洋中高纬度和低纬度激发出气旋和反气旋偶极环流型，其中低纬的异常环流可直接影响西太平洋热带地区的降水等要素^[23]。其三，以往研究发现AO显著影响东亚冬季风^[31]，而冬季风的变化对南海地区的环流和温度有一定影响^[28]。那么，本文发现的南海地区气候变率与AO显著相关主要通过何种途径相联系呢？

为此，本文检查了与北极涛动对应的北半球大气环流变化。图5给出了AO指数变化1个单位情况下的250 hPa异常风场(均已线性去除ENSO信号)。首先，对流层高层最突出的特点是从北大西洋到东亚地区存在南北两支明显的气旋-反气旋相间的遥相关波列，北支波列从北大西洋经西伯利亚至北太平洋，南支波列经过阿拉伯海北部至孟加拉湾北部。值得注意的是南支波列的几个异常中心，包括位于阿拉伯海北部的异常反气旋环流中心和位于孟加拉湾的异常气旋中心，以往研究中曾指出这些异常环流中心在联系AO与华南和西南气候异常中起到了重要作

用^[19,30]。南海地区位于南支波列路径的下游，AO可能通过南支波列影响南海气候。其次，北太平洋地区有偶极型环流异常，急流轴北侧的异常反气旋式环流中心位于173°W，57°N附近，南侧异常气旋中心位于175°E，28°N附近。注意到南海处于太平洋偶极子异常气旋的西南侧，偏强偶极型异常可造成南海至菲律宾群岛一带异常偏北风，可能进而影响南海地区海温和降水。其三，中、东西伯利亚有一巨大反气旋，中心位于110°E，52°N附近。不过反气旋南侧的偏北风范围伸展到约40°N，说明春季西伯利亚高压和冬季风都较弱，对低纬度影响可能较小，所以后面的分析只关注南支波列和北太平洋偶极型环流。另外，图5中还同时给出了700 hPa风场对AO指数的回归系数，很明显700和250 hPa风场异常显示出上下层基本一致的特征，太平洋偶极型、大陆反气旋以及南支波列的中心位置大体一致，总体上为深厚的准正压结构。此外，选择非ENSO年，计算AO与700和250 hPa风场异常关系，结果相似(图略)。

为了定量描述南支波列与北太平洋偶极型，本文定义了2个指标。首先，考虑到经向风(v)可以较好描述波列的特征^[33]，根据图5选择紧临的上游3个显著经向风区，包括一区(42.5°~50°E，17.5°~22.5°N)、二区(75°~80°E，17.5°~22.5°N)和三区(100°~105°E，17.5°~22.5°N)，各区域的平均经向风分别记为 v_1 ， v_2 和 v_3 ，定义南支波列指数为 $v_1-v_2+v_3$ 。其次，用250 hPa高度场的差值来描述北太平洋偶极型对应的大尺度环流特征。根据图5，选取北部异常反气旋的中心

图4 (a) 春季850 hPa风场和降水(填色)对AO指数的回归系数;(b) 春季海平面气压场对PC1的回归系数(hPa)，阴影部分为通过95%显著性检验的区域。均已去除ENSO信号。时间长度为1979~2013年，为方便比较AO指数已乘-1

Figure 4 (a) Regression of the 850 hPa winds and precipitation (shaded) upon the MAM AO index. (b) Regression of sea level pressure upon PC1 (hPa). Values significant at the 95% level are shown by shadings. ENSO signal has been removed. Data period is 1979–2013. AO index have been multiplied by -1 to facilitate comparison

图5 1979–2013年春季250 hPa(黑色箭头)以及700 hPa(浅蓝色箭头)风场对AO的回归系数. 均已去除ENSO信号

Figure 5 Regression of 250 hPa winds (black vectors) and 700 hPa winds (blue vectors) upon MAM AO index. ENSO signal has been removed. Time periods of data is 1979–2013

区(165°W~180°, 45°~50°N), 和南部异常气旋中心区(162.5°~177.5°E, 25°~30°N), 两个关键区的区域平均高度场各自标准化, 北部区减南部区的差定义为北太平洋偶极型指数. 此外还比较了用中低层(500和700 hPa)的高度场来表征的北太平洋偶极型, 结果与250 hPa高度场的类似.

南支波列指数和北太平洋偶极型指数与AO指数的相关系数分别为0.41和0.46, 均达到95%的信度水平, 表明上述2条途径在传播AO的影响过程中都起到了重要作用. 但2个指数与南海气候主模态时间序列仅为中等程度相关, PC1与南支波列指数和北太平洋偶极型指数的偏相关系数分别为0.23和-0.18, 都不显著. 这可能有几个方面的原因. 同样对应AO正位相时, 偏强的南支波列在南海对应南风异常, 而偏强的北太平洋偶极型环流异常对应南海地区偏北风异常, 二者对南海地区环流的作用是不一致的. 这说明二者的配置非常关键. 南支波列异常正值和北太平洋偶极型异常负值, 对应南海地区异常偏南风 and 降水负距平, 反之对应南海偏北风和降水正距平. 南支波列指数为较强正异常($>-0.5\sigma$), 同时北太平洋偶极型指数为较强负异常($<-0.5\sigma$)的非ENSO年有3年, 分别是1981, 1997和2000年; 与此相反, 南支波列指数为较强负异常同时北太平洋偶极型指数为较强正异常的非ENSO年只有2009年, 考虑到年份太少, 可能产生较大的随机性, 因此把满足南支波列指数为负异常(-0.33σ), 同时北太平洋偶极型指数为较强正异常的非ENSO年1982年也算上. 前者与后者的各自

平均值相减, 得到南海地区850 hPa风场和降水量合成图(图6(a)). 很明显, 南海地区有异常反气旋式环流, 以偏南风为主, 南海西部以及南海南部到菲律宾一带降水显著偏少. 整体特征与经验正交函数分析的结果以及回归分析的结果相似(图2(a)和4(a)). 而当出现南支波列指数和北太平洋偶极型指数同为正以及同为负的时候, 情况会怎样呢? 挑选南支波列指数和太平洋偶极型指数均为较强正异常的非ENSO年(包括1986, 1990和2002年), 以及二者同为较强负异常的非ENSO年(1979, 1980和1984)分别进行合成分析. 结果显示在图6(b)和(c). 虽然两种情况下2个环流因子的作用都是相反的, 但是从降水和850 hPa风场的变化看, 有不对称的情况. 当南支波列指数和北太平洋偶极型都为异常正值时, 南海北部存在气旋式异常, 且降水显著偏多. 出现这种情况可能说明北太平洋偶极型在分析的这些年份中起了主导作用. 而当2个指数都为负值时, 南海北部有异常西南风同时降水无显著变化, 南海存在着不显著的反气旋式环流, 此时北太平洋偶极型的南侧为异常反气旋, 西太平洋副热带高压强度增强, 与观测到的南海环流相吻合. 当然, 有很多因素可能会影响南支波列和北太平洋偶极型的活动及其配置, 如南支波列的强度和位置可能受波导作用调制^[36], 而北太平洋偶极型也可能受海气相互作用的影响^[35], 这些都可能对南海气候关系的复杂化, 需要进一步细致的分析. 特别需要注意的是热带海温的反馈可能对南海气候的作用, 在下节讨论.

图6 南海地区降水和850 hPa风场合成分析。(a) 1981, 1997和2000年平均减1982和2009年平均, 前3a对应南支波列异常正值同时北太平洋偶极型异常负值的非ENSO年, 后3a对应南支波列异常负值同时北太平洋偶极型异常正值的非ENSO年; (b) 南支波列指数与太平洋偶极型指数同为异常正值的非ENSO年; (c) 南支波列指数与太平洋偶极型指数同为异常负值的非ENSO年。箭头为风矢, 填色为降水(mm/d)。仅显示超过90%显著水平的值

Figure 6 Composite of precipitation and 850 hPa winds over South China Sea. (a) Means of precipitation and 850 hPa winds for the year of 1981, 1997 and 2000 minus the means for 1982 and 2009. (b) Means for the years when south wave train index and Pacific dipole index are both positive. (c) Means for the years when south wave train index and Pacific dipole index are both negative. Vectors are winds, shadings are precipitation (mm/d). Only significant (90% level) shadings are plotted

3.2 海温的相关变化

热带大气变化与海洋过程密切相关, AO可能通过海洋过程进而影响南海地区大气环流和气候。那么伴随AO逐年波动, 南海以及相邻的印度洋到西太平洋地区相应的海温是如何变化的呢? 本文检查了3~5月平均海表温度(SST)距平。与上节大气环流分析方法相同, 首先将SST距平时间序列中的ENSO信号去掉, 然后再计算对应AO偏高1个单位时的SST变化值。结果如图7所示, 最突出的特点是热带中太平洋存在大范围的显著暖海温异常, 中心区位于 160°E ~ 160°W 之间赤道附近区域。正SST距平的出现可能与AO导致的大气环流有关。为方便比较, 图7中同时给出了850 hPa风场对AO指数的回归系数, 很明显西太平洋低层异常的气旋式环流控制了北太平洋 40°N 以南海域, 中心位于 170°E , 22°N 附近, 即上节分析的北太平洋偶极型的南侧气旋。在气旋南部(2°S ~ 10°N , 150°E ~ 150°W)以及气旋北部(30°N 以北)的海温均显著偏高, 气旋中心以及向西延伸至南海地区海温异常偏低。北太平洋海温的这种三极型海温异常分布与北太平洋的异常偶极型大气环流型密切相关^[40]。特别需要指出的是赤道附近的暖SST异常, 很可能是热带低层的异常气旋所致。低层的背景风场为盛行东风, 异常气

旋削弱了 135°E ~ 170°W 间赤道附近地区的风速, 使得海水表面蒸发速率降低, 海水垂直混合以及冷水上翻减弱, 这些都有利于SST升高。大量研究表明赤道太平洋SST可影响东亚气候。如Wang等人^[39]指出赤道中、东太平洋暖海温强迫显著影响西太平洋地区大气环流异常。图7中热带中太平洋地区异常的暖海温, 同样也会导致其西北侧的大气Rossby波响应。显然, 大气的响应可加强低纬气旋, 从而有利于热带异常西风 and 异常暖海温的维持。因此, 海温的正反馈机制有利于加强南海海域的异常偏北风。需要指出的是除ENSO之外, AO也是影响西太平洋低纬地区海温的一个因子, 而西太平洋区域性的海温变化, 是否能发展为成熟的ENSO还需要进一步研究^[40~42]。目前也有研究表明AO和ENSO之间不同的配置可影响东亚冬季的气候^[43]。

其次, 南海地区局地的海温可能会影响南海区域气候, 南海及西太平洋地区暖海温可加强局地对流活动, 以及强迫大气环流的遥相关。但是图7显示对应AO指数正异常的情况, 整个南海SST虽然为一致的负距平, 但是统计上并不显著。从前面的分析知道, AO指数为正(负)位相时, 南海地区有异常气旋(反气旋), 说明西太平洋副热带高压偏弱(偏强), 南海降水偏多(偏少), 这会导致下行短波辐射的减少(增加), 从而有利于海温的偏低(偏高)。前面的分析中发现第一模态整个南海降

图7 3~5月 SST(等值线), 降水(填色), 春季 850 hPa 风场距平(黑色箭头)对 AO 的回归系数. 均已线性去除 ENSO 信号. 等值线的实线为正, 虚线为负; 降水和风矢只画出达到 90% 显著水平的值, SST 显著的区域以散点标出

Figure 7 Regression of SST (contours), precipitation (shading), 850 hPa winds anomalies upon MAM AO index. ENSO signal has been removed. Positive values are shown with solid lines, the negative with dashed lines. Only significant (90% level) winds and precipitation are plotted. Significant SST area are indicated by dots

水异常偏少, 将其时间系数反号(即 $-PC1$), 以此来代表对应 AO 正位相时的降水偏多, 计算 $-PC1$ 与海温距平倾向的相关. 如果海温的变暖驱动大气和降水, 二者应该是正相关. 但是发现降水偏多对应海温倾向的负值, 这从另外一个方面表明 AO 相关的南海局地的海温变化可能主要是对大气的响应, 而其对降水和大气的影响可能处于次要地位.

4 结论

上述分析表明, 春季 AO 对同期南海气候变率有显著的影响. 根据 1979~2013 年观测资料统计, 去掉 ENSO 信号后, AO 指数与南海气候主导模态时间系数的相关达 -0.4 , 超过 95% 的信度水平. 在春季 AO 指数偏强的正位相年份, 南海地区呈气旋式异常环流, 偏南风减弱, 西太平洋副热带高压偏弱, 同时南海北部以及中国华南地区降水偏少, 南海中西部地区降水显著偏多. 春季 AO 指数负位相时, 情况相反. AO

可能主要由 2 条途径影响南海气候. 对应 AO 变化, 从北非、中东到南亚的西风急流有异常 Rossby 波列, 位于上游的阿拉伯海北部、孟加拉湾分别出现异常反气旋和气旋, 同时中南半岛和相邻的南海出现异常偏南风; 同时, 在北太平洋西风急流轴北、南两侧分别出现异常反气旋和气旋, 低纬的异常气旋可直接影响包括西北太平洋的广大地区. AO 通过上述 2 条大气环流途径导致的南海地区环流异常的位置很微妙, 南支波列强的正位相和北太平洋偶极型强的负位相的配置, 可加强西太平洋副热带高压强度, 导致南海地区出现异常的反气旋进而导致降水显著减少. 低纬的异常气旋也可通过触发热带海气相互作用而间接影响南海气候, 异常的气旋削弱了西太平洋赤道附近的东风, 使得海温升高. 暖海温导致的大气 Rossby 波响应又加强了异常气旋. 该正反馈机制可加强南海地区的偏北风, 减弱西太平洋副热带高压强度, 有利于南海地区降水的增多.

参考文献

- 1 Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60–92
- 2 Zhao Y P, Chen Y L. The seasonal and inter-annual variability of the South China Sea warm pool and its relation to the South China Sea Monsoon onset (in Chinese). J Trop Meteorol, 2000, 16: 202–211 [赵永平, 陈永利. 南海暖池的季节和年际变化及其与南海季风爆发的关系. 热带气象学报, 2000, 16: 202–211]
- 3 Lai Z J, Peng S Q, Li Y N, et al. Relationship between summer monsoon outbreak and upper-ocean heat content anomalies over the South China Sea (in Chinese). J Trop Oceanogr, 2011, 30: 47–56 [赖志娟, 彭世球, 李毅能, 等. 南海夏季风爆发与南海热含量异常特征的相关分析. 热带海洋学报, 2011, 30: 47–56]
- 4 Jiang J, Qian Y F. Numerical experiments of impacts of sea surface temperature in South China Sea on South China Sea Monsoon (in Chinese). J Nanjing Univ, 2002, 38: 556–564 [江静, 钱永甫. 南海表面海温异常对南海季风影响的数值模拟. 南京大学学报, 2002, 38: 556–564]

- 5 Liang J Y, Yang S, Li C H, et al. Long-term changes in the South China Sea summer monsoon revealed by station observations of the Xisha Islands. *J Geophys Res*, 2007, 112: 104–115
- 6 Huang R H, Gu L, Zhou L T, et al. Impact of the thermal state of the tropical western Pacific on onset date and process of the South China Sea summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 909–924
- 7 Zhang Y S, Li T, Wang B, et al. Onset of the summer monsoon over the Indochina Peninsula: Climatology and interannual variations. *J Clim*, 2002, 15: 3206–3221
- 8 Wu R G, Wang B. Interannual variability of summer monsoon onset over the western North Pacific and the underlying processes. *J Clim*, 2000, 13: 2483–2500
- 9 Wang B, Huang F, Wu Z W, et al. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review. *Dyn Atmos Oceans*, 2009, 47: 15–37
- 10 Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: A numerical study. *Clim Dyn*, 2013: 1–13
- 11 Yuan Y, Li C Y. Possible Impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea Summer Monsoon onset (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2009, 33: 325–336 [袁媛, 李崇银. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响. *大气科学*, 2009, 33: 325–336]
- 12 Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *J Clim*, 2009, 22: 2199–2215
- 13 Li C Y, Mu M Q. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2001, 25: 433–443 [李崇银, 穆明权. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. *大气科学*, 2001, 25: 433–443]
- 14 Xie A, Liu X, Ye Q. Equatorial vortex and the onset of summer monsoon over South China Sea (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1997, 55: 611–619 [谢安, 刘霞, 叶 Q. 赤道涡旋与南海夏季风爆发. *气象学报*, 1997, 55: 611–619]
- 15 Gao H, Xue F. Seasonal variation of the cross-equatorial flows and their influences on the onset of South China Sea Summer Monsoon. (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2006, 11: 57–68 [高辉, 薛峰. 越赤道气流的季节变化及其对南海夏季风爆发的影响. *气候与环境研究*, 2006, 11: 57–68]
- 16 Wu G X, Zhang Y S. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea. *Mon Weather Rev*, 1998, 126: 913–927
- 17 Qian Y F, Zhang Y, Huang Y Y, et al. The effects of the thermal anomalies over the Tibetan Plateau and its vicinities on climate variability in China. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 369–381
- 18 Chen J, Sun S Q. Eastern Asian Winter Monsoon anomaly and variation of global circulation. Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 1999, 23: 101–111 [陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化. *大气科学*, 1999, 23: 101–110]
- 19 Mao R, Gong D Y, Yang J, et al. Linkage between the Arctic Oscillation and winter extreme precipitation over central-southern China. *Clim Res*, 2012, 50: 187
- 20 Gong D Y, Gao Y Q, Guo D, et al. Interannual linkage between Arctic/North Atlantic Oscillation and tropical Indian Ocean precipitation during boreal winter. *Clim Dyn*, 2014, 42: 1007–1027
- 21 Hu M, Gong D Y, Mao R. Possible influence of February–April Arctic Oscillation on the ITCZ activity of Western-Central Pacific (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2013, 29: 55–65 [胡森, 龚道溢, 毛睿. 2–4月北极涛动对中西太平洋ITCZ活动的可能影响. *热带气象学报*, 2013, 29: 55–65]
- 22 Choi K S, Wu C C, Byun H R. Possible connection between summer tropical cyclone frequency and spring Arctic Oscillation over East Asia. *Clim Dyn*, 2012, 38: 2613–2629
- 23 Hu M, Gong D Y, Wang L, et al. Possible influence of January–March Arctic Oscillation on the convection of tropical North Pacific and North Atlantic (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2012, 70: 479–491 [胡森, 龚道溢, 王璐, 等. 1–3月AO对北半球热带太平洋和大西洋对流活动的可能影响. *气象学报*, 2012, 70: 479–491]
- 24 Li C Y, Wang J T, Lin S Z, et al. The relationship between East Asian Summer Monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2004, 28: 641–658 [李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究. *大气科学*, 2004, 28: 641–658]
- 25 Wang B. The vertical structure and development of the ENSO anomaly mode during 1979–1989. *J Atmos Sci*, 1992, 49: 698–712
- 26 Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J Geophys Res*, 1999, 104: 30937–30946
- 27 Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J Clim*, 2000, 13: 1000–1015

- 28 Gong D Y, Kim S J, Ho C H. Arctic and Antarctic Oscillation signatures in tropical coral proxies over the South China Sea. *Ann Geophys*, 2009, 27: 1979–1988
- 29 Gao M N, Yang J, Gong D Y, et al. Unstable relationship between spring Arctic Oscillation and East Asian summer monsoon. *Int J Climatol*, 2013, 34: 2522–2528
- 30 Jing Y, Gong D Y, Wang W S, et al. Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China. *Meteorol Atmos Phys*, 2012, 115: 173–174
- 31 Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2073–2076
- 32 Chen L T. Effect of zonal difference of sea surface temperature anomalies in the Arabian Sea and the South China Sea on summer rainfall over the Yangtze River (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 1991, 15: 33–42 [陈烈庭. 阿拉伯海-南海海温距平纬向差异对长江中下游降水的影响. *大气科学*, 1991, 15: 33–42]
- 33 Branstator G. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation. *J Clim*, 2002, 15: 1893–1910
- 34 Takaya K, Nakamura H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 608–627
- 35 Gong D Y, Yang J, Kim S J, et al. Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 2011, 37: 2199–2216
- 36 Luo D H, Zhou W, Wei K. Dynamics of eddy-driven North Atlantic Oscillations in a localized shifting jet: Zonal structure and downstream blocking. *Clim Dyn*, 2010, 34: 73–100
- 37 Cui X D, Gao Y Q, Gong D Y, et al. Teleconnection between winter Arctic Oscillation and Southeast Asian summer monsoon in the pre-industry simulation of a coupled climate model. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2013, 6: 349–354
- 38 Furevik T, Bentsen M, Drange H, et al. Description and evaluation of the Bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM. *Clim Dyn*, 2003, 21: 27–51
- 39 Wang B, Wu R G, Fu X H. Pacific-east Asian teleconnection: How does ENSO affect east Asian climate? *J Clim*, 2000, 13: 1517–1536
- 40 Gong D Y, Yang J, Kim S J, et al. Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 2011, 37: 2199–2216
- 41 Chen S F, Yu B, Chen W. An interdecadal change in the influence of the spring Arctic Oscillation on the subsequent ENSO around the early 1970s. *Clim Dyn*, 2014, 44: 1109–1126
- 42 Nakamura T, Tachibana Y, Honda M, et al. Influence of the northern hemisphere annular mode on ENSO by modulating westerly wind bursts. *Geophys Res Lett*, 2007, 33: 197–200
- 43 Chen W, Lan X Q, Wang L, et al. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1355–1362 [陈文, 兰晓青, 王林, 等. ENSO和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响. *科学通报*, 2013, 58: 634–641]

The possible influence of Arctic Oscillation on South China Sea climate during boreal spring

QU JingXuan, GONG DaoYi & LI Sang

Beijing Normal University, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China

In this study, the possible influences of the springtime Arctic Oscillation (AO) on climate over South China Sea (SCS) has been studied, by employing monthly precipitation data (GPCP) and atmospheric circulation reanalysis data from NCEP-NCAR during the period of 1979–2013. Prior to analysis, the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) signals have been linearly fitted and subtracted from the time series under consideration. To capture the major feature of the regional climate variability, multi-variable empirical orthogonal function (MV-EOF) analysis was performed, by taking into account sea surface temperature (SST), precipitation, and horizontal and vertical winds at 850 hPa over the domain of 3.75°S–23.75°N and 106.25°E–123.75°E. The first mode explains 27.8% of the total variance. The corresponding temporal variations of the first mode co-changes tightly with the spring AO. Their correlation coefficient is -0.4 , being significant at the 0.05 level. Their out-of-phase relationship is even more dominant on the interannual time scales. During positive (negative) AO years, a cyclonic (anticyclonic) anomalous circulation is observed over the tropical Western Pacific in the mid- and lower troposphere. There are more (less) precipitation in the central SCS, corresponding to the circulation anomalies. There are two possible mechanisms linking AO and SCS climate. The first mechanism is the wave train along the westerly jet stream extending from northern Africa through mid-Asia to northern India. Along this route, there are two anomalous circulation centers in the upstream direction, one being located in the Bay of Bengal, and the other located in the Arabian Sea. The second mechanism seems to be related to the dipole-structure circulation anomalies over the North Pacific, which characterized by a dipole of anticyclone and cyclone located to the north and south of the northern Pacific storm tracks, respectively. Their phase and corresponding circulation center locations are crucial with regard to the AO-SCS links. In cases of a strong positive phase of southern Asian waves and negative phase of northern Pacific dipole, there is an enhanced anticyclone circulation over the SCS and reduced precipitation. In addition to the influences on the SCS climate from the atmosphere, positive feedback from the tropical western Pacific Ocean strengthens the anomalous north winds of SCS. Local SST of SCS mainly responds to (rather than affects) the atmospheric circulation.

SCS climate, Arctic Oscillation (AO), wavetrain, northern Pacific Dipole

doi: 10.1360/N972015-00175