

吴胜安,邢彩盈,朱晶晶.南海区域对流活动的气候特征及其与 ENSO 的关系[J].海洋气象学报,2019,39(4):75-82.
WU Sheng'an, XING Caiying, ZHU Jingjing. Climate characteristics of convective activity over the South China Sea and their relation with ENSO[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(4): 75-82. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.009. (in Chinese)

南海区域对流活动的气候特征及其与 ENSO 的关系

吴胜安^{1,2}, 邢彩盈^{1,2}, 朱晶晶^{1,2}

(1. 海南省气候中心, 海南 海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口 570203)

摘要: 利用 1979—2013 年 NCEP 再分析向外长波辐射、降水率和 ENSO 指数资料, 运用联合经验正交函数等诊断方法, 分析了南海区域各季对流活动年内、年际尺度变化特征和年际变化与同期 ENSO 指数的关系。结果表明: 南海南部对流活动各月之间少变, 南海中北部区域对流被抑制期和活跃期均较为持久, 对流活跃区 5 月中旬中期跳跃北扩, 9 月后由北向南缓慢撤退; 南海区域秋、冬和春季变化表现出良好的全区一致性, 冬季对流活动较好地保留了上年秋季的异常状态, 并进一步稳定地持续到春季; 秋、冬和春季活动的年际变化很可能受 ENSO 调制, 厄尔尼诺状态下, 南海对流活动受抑制, 拉尼娜状态下相反; 夏季对流活动表现出南北反向型和全区一致型的两类重要年际变化形态, 前者可能受 ENSO 的调制, 厄尔尼诺抑制南端对流而使北端对流更活跃, 后者有明显的线性趋势, 气候变暖使夏季南海上空对流更活跃; 春季对流的异常状态很难持续到夏季。

关键词: 南海区域; 对流活动; 变化特征; 联合经验正交函数

中图分类号: P444 ; P461 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)04-0075-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.009

Climate characteristics of convective activity over the South China Sea and their relation with ENSO

WU Sheng'an^{1,2}, XING Caiying^{1,2}, ZHU Jingjing^{1,2}

(1. Hainan Climate Center, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract The annual and interannual characteristics of convective activities over the South China Sea (SCS) in each season and the relations between interannual variations and simultaneous ENSO index are analyzed by joint empirical orthogonal function (JEOF) using the 35 a (1979–2013) monthly averaged NOAA Interpolated Outgoing Longwave Radiation (OLR), precipitation rate data of CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation), and ENSO index data. The results are as follows. 1) Convective activities present less change over the south of SCS between months. Over the middle and north of SCS, a persistent stage of suppressing convection is countered with another lasting active stage during a year, and the area of active convection shows abrupt bounce from south to north in mid-May and gradual retreat from north to south after September. 2) The interannual change of OLR or precipitation rate shows good consistency over the whole SCS area in autumn, winter, and spring. Convective activities in winter keep some abnormal information of those in last autumn and it lasts well until spring. 3) The interannual variations of convective activities over the SCS in autumn, winter, and spring are probably influenced by

收稿日期: 2019-08-28; 修订日期: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41765005, 41765007); 海南省自然科学基金项目(417298)

作者简介: 吴胜安, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事气候诊断分析与预测研究, wsa01@sohu.com。

ENSO. The convective activities are restrained in El Niño status while more active in La Niña status. 4) In summer, the interannual variations of convective activities show two mainly spatial distributions, the inversion between the south and the north of SCS and the consistency over the whole SCS area. The former is probably influenced by ENSO with El Niño suppressing convection over the south and activating convection over the north; the latter has significant linear trend and climate warming makes the convection over SCS more active in summer. 5) There is abrupt change in convective activity's abnormal status from spring to summer.

Key words the South China Sea; convective activity; variation characteristics; joint empirical orthogonal function

引言

南海是东亚夏季风首先爆发的区域,对我国东部的降水有非常重要的作用^[1-2]。随着我国南海战略的提出和海南三沙市的设立,在南海上的航行、生产、建设及旅游等各种活动越来越多。了解这片海洋性领土上的气候及其变化特征,对气象工作者来说极其必要。同时,南海是连接西太平洋、爪哇海和印度洋的重要纽带,南海地区也是世界经济发展最重要的区域,了解南海地区的气候特征,探索该地区大气活动的规律,对改善该地区的气象预报预测、防范和减缓气象灾害有着重要的意义。

南海作为一个大气活动中心,上空的季风活动^[3-7]及其对其他区域的影响^[8-11]广受关注。有众多的研究分析了南海季风及其爆发的规律^[12-13]或季风爆发早晚、季风强弱对我国天气气候的影响^[14-15]。南海区域自身气象要素场的变化特征也广受研究学者的关注。于慎余等^[16]分析了南海海面散度场与涡度场的季节变化特征,认为南海海面风场的散度和涡度分布并非单一,而是具有明显的季节变化。周发琇等^[17]发现南海季风区存在地域性环流系统,它不但与南海冬季风与夏季华南降水显著的隔季相关现象(即冬季风强的年代,夏季风来的晚,华南降水迟而少;冬季风弱时则反之)有关,也与夏季风首先在南海北部爆发而后在南部建立现象有关。阮成卿和刘秦玉^[18]的分析指出南海对流活动与南海海面温度有关,南海对流是否加强需考虑海面温度是否超过 27 °C。王锡东和陈涛锋^[19]用卫星红外云顶亮温(black body temperature, TBB)资料初步分析了南海及邻域对流活动的早晚差异及四季进退。戴彩梯和梁必骥^[20]简易分析了南海地区对流活动的时空变化特征,指出南海地区对流活动主要呈一致性的分布形势,同时也具有明显的季节转换特征。

对流活动是南海区域重要的大气活动,也是气象灾害发生的主要表现。本文旨在从预测服务角度,在年内、年际两个时间尺度较细致地分析南海区域(0°~20°N, 105°~120°E)对流活动的变化特征,同时初步分析其与 ENSO 的关系,拟为南海区域气象预报预测、防灾减灾等研究和服务相关工作提供参考。降水是热带对流活动的结果,而向外长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)是热带对流的指示量^[21],本文联合降水资料和 OLR 资料共同分析南海区域对流活动的年内、年际变化特征。

1 资料与方法

本文采用美国 NCEP 再分析月平均 OLR 资料(1979—2013 年共 35 a)、长期(1981—2010 年)平均的逐日和逐月 OLR 资料^[22](格点间隔 1°×1°,单位:W·m⁻²)、再分析月平均降水率资料^[23](格点间隔 2.5°×2.5°,单位:mm·d⁻¹)和 ENSO 指数资料(BEST 指数, Bivariate ENSO time series, calculated from combining a standardized SOI and a standardized Niño3.4 SST time series, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/> from NOAA/ESRL, 1978—2013 年共 36 a),使用联合经验正交函数(joint empirical orthogonal function, JEOP)方法^[24],讨论了南海地区的向外长波辐射和降水率的冬(1月)、春(4月)、夏(7月)和秋季(10月)的时空变化特征。

JEOP 类似于扩展经验正交函数(extended empirical orthogonal function, EEOF),由经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)发展而来,它不仅具有 EOF 的优点,而且能够充分利用不同气候要素场的相关性,得到要素场间相互联系的空间分布结构及其随时间的变化^[25-26]。其实,根据 JEOP 的原理,它同样可分析有内在相关性的不同要素场的空间分布结构及其随时间的变化。在本文中,可把 OLR 场和降水率场连接起来,构成如下扩展的

$M \times N$ 维矩阵:

$$A_{M \times N} = \begin{bmatrix} A_{M_1 \times N} \\ A_{M_2 \times N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $A_{M_1 \times N}$, $A_{M_2 \times N}$ 分别表示 OLR 场和降水率场, M_1 、 M_2 分别为 OLR 场和降水率场的格点数, N 为样本数。 $A_{M \times N}$ 为扩展后的分析对象场, $M = M_1 + M_2$ 为总格点数。

对矩阵 $A_{M \times N}$ 进行 EOF 分析, 展开成只依赖于时间和只依赖于空间的函数部分如式(2),

$$A_{M \times N} = X_{M \times N} \times T_{M \times N} \quad (2)$$

文中在 JEOF 分析之前已对各场进行了标准化处理。

2 南海对流活动的时空分布

图 1 所示的是气候态 (1981—2010 年) $105^\circ \sim 120^\circ\text{E}$ 区间平均 OLR 逐月 (图 1a) 和逐日 (图 1b) 时间-纬度剖面图, 由图可见南海区域经向平均的 OLR 随纬度和时间的分布 (降水率时间-纬度剖面图与之相似, 图略)。若把等值线“235”当作对流 OLR 是否活跃的分界线, 那么从图中可见, 在南海南部 (4°N 以南), 活跃的对流持续全年。南海中部和北部, 月际差异较南部显著变大。在 5°N 以北, 1—4 月对流是不活跃的, 这与南海 1—4 月热带气旋活动不活跃也是一致的。5 月, 对流活跃区从 5°N 迅速扩展至 20°N 以北, 覆盖了整个南海。在图上显示为等值线高度密集, 呈竖状排列, 说明这种变化是突变式的。这反应了南海季风 5 月爆发的现象, 也反应了南海区域热带辐合带突变式的北跳现

象。相对 OLR 或降水在 5 月的突变式北扩而言, 它们在秋后的南撤是缓慢的, 9 月开始南撤, 12 月撤至南海中部。在南海中部, 11°N 附近, 7—9 月是其对流活跃高峰; 在南海北部, 15°N 以北, 8 月是其对流活跃高峰。

为了更细致地认识对流在 5 月的突然北扩 (对应南海季风爆发) 现象, 分析了 4 月中旬至 6 月上旬 OLR 的逐日变化 (图 1b)。由图可见, 从 4 月中旬至 5 月上旬, 对流相对活跃区 (值小于 235) 局限在 5°N 以南, 从 5 月中旬前期至 5 月中旬中期, 活跃区跳跃至南海北部 15°N 线附近 (西沙群岛南部), 从 5 月中旬后期继续向北跳跃覆盖整个南海, 之后处于全面覆盖南海的稳定状态。平均来看, OLR 的“235”等值线在 5 月 18 日 (第 28 候) 覆盖整个南海, 这与 LIANG and WU^[27] 用天气—气候学方法确定的南海夏季风平均爆发日期和曾庆存等^[28] 用大气环流季节突变理论确定的夏季风来临日期是一致的。朱敏等^[29] 认为, 5 月中旬, 南海上空高、低层风场突然发生逆转, 高空西风转变为东风, 低层东风转变为西风, 大气环流发生重大调整, 导致南海季风爆发。季风爆发导致对流区活跃突跳跃式北扩, 覆盖整个南海。

总体而言, 南海对流活动的时空分布特征表现为, 南海南部对流活动各月之间少变; 南海中、北部区域对流被抑制期和活跃期均较为持久。对流活跃区 5 月中旬前期跳跃至西沙群岛南部, 中旬中期跳跃式北扩, 后期覆盖整个南海; 9 月后对流活跃区由北向南缓慢撤退。

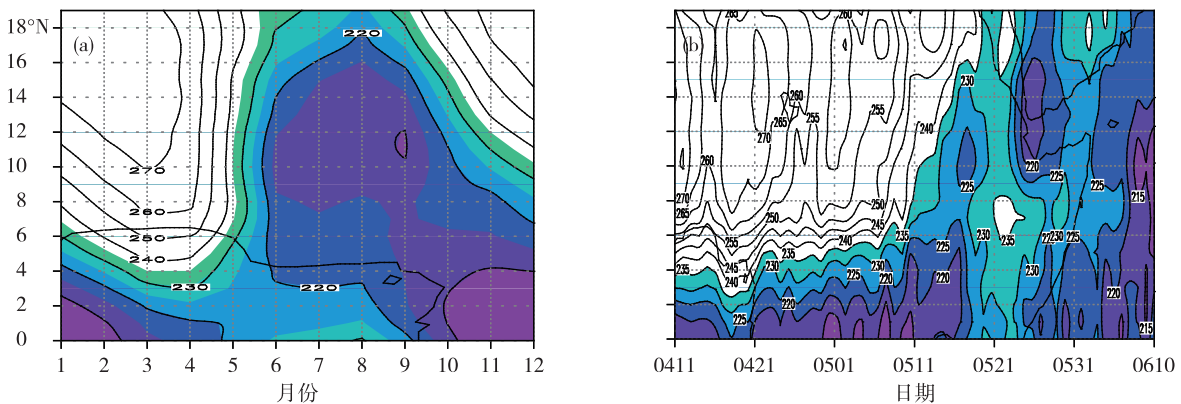


图 1 1981—2010 年 $105^\circ \sim 120^\circ\text{E}$ 区间平均 OLR 逐月 (a) 和逐日 (b) 时间-纬度剖面图

Fig.1 Time-latitude cross section of monthly (a) and daily (b) averaged OLR variation between 105°E and 120°E from 1981 to 2010

3 南海对流活动的变化特征及其与 ENSO 的关系

3.1 空间分布型

为了分析南海区域对流活动的变化特征,用 JEOF 方法对与对流活动相关的 OLR 场和降水率场进行了联合正交分解。表 1 是南海各季 OLR 和降水率 JEOF 前三特征向量的方差贡献率。由表可见,各季 JEOF 前两特征向量的累积方差贡献率均超过 60%,且第二特征向量(JEOF2)的方差贡献率远大于第三特征向量(JEOF3),说明前两特征向量的变化特征可代表相应场的主要特征。四季比较而言,冬、春和秋季的第一特征向量(JEOF1)的变化特征相对第二特征向量占绝对优势,前者的方差贡献远大于后者,且占总方差贡献率的一半以上。夏季第一和第二特征向量(JEOF1+2)均占有较大比重,差异相对不太明显,第一、二特征向量的变化共同代表该场的变化特征。

表 1 南海区域各季 OLR 和降水率 JEOF 前三特征向量的方差贡献率

Table 1 Variance contribution rate of the first three JEOF characteristic vectors of OLR and precipitation rate in each season over the South China Sea (SCS) %

	JEOF1	JEOF2	JEOF3	JEOF1+2
冬(1月)	56.4	20.6	4.9	77.0
春(4月)	54.9	18.3	7.6	73.2
夏(7月)	37.3	23.4	9.3	60.7
秋(10月)	61.9	13.1	4.5	75.0

图 2 所示的是南海区域秋、冬和春季 OLR 和降水率第一特征向量的空间分布。由图可见,冬季 OLR(图 2a)和降水率(图 2b)的 JEOF1 空间分布表现为全区一致性(全区同向变化,仅海南岛北部以北少部分区域反向),主体(OLR 场中等值线-4 围成的区域;降水率场中则为等值线 3 所围绕的范围)占据南海中南部绝大部分区域。冬季 JEOF1 的空间分布表明,当南海中南部区域对流相对不活跃时,该区的降水率也相对偏少,整个区域以偏少为主。春季 OLR(图 2c)和降水率(图 2d)的 JEOF1 空间分布同样表现为全区一致性,主体位于南海中部,相对于冬季的空间分布,春季 OLR 的主体南侧部分向中部收缩,而降水率场的主体部分则由中东部伸展到西部,范围有所扩大。秋季 OLR(图 2e)和降水率(图 2f)的 JEOF1 空间分布仍为全区一致性,

相比冬季和春季的空间分布,其主体占据了南海更多的空间,即南海各地变化的差异最小。

JEOF1 的高方差贡献占比及空间分布的高度一致性说明了 OLR 与降水资料内在联系的紧密性,也从一个侧面验证了降水资料在南海区域的适用性。为了进一步对此进行补充说明,计算了整个南海区($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)和秋季分布主体区($10^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$) OLR 及降水率逐年值,两者相关系数分别为-0.641 和-0.730,均可通过置信度 99.9%的显著性检验。

由于夏季 JEOF 第一特征向量(JEOF1)的方差贡献相对于第二特征向量(JEOF2)优势不明显,有必要对第一、二特征向量同时进行分析。图 3 所示的是南海区域夏季 OLR 和降水率 JEOF1、JEOF2 的空间分布。由图可见,JEOF1 的空间分布表现为南北反向型,OLR 空间分布(图 3a)的主体位于南海南北两端(6°N 以南和 17°N 以北);相比 OLR 的空间分布,降水率的空间分布主体更明显(图 3b),当南海南部(10°N 以南)降水率偏少时,南海东北部降水偏多。夏季 JEOF2 的空间分布表现为全区一致性(图 3c、d),两要素场的主体均位于南海中部中央。与冬、春、秋季第一特征向量的一致分布相比,夏季第二特征向量的主体范围要小很多。

3.2 变化特征及与 ENSO 的关系

图 4 所示的是冬、春季 OLR 和降水率 JEOF1 对应的时间系数(冬季:WIN-EOF1;春季:SPR-EOF1)。由图可见,冬季和春季各自 JEOF1 对应时间曲线有较好的相似性,两者的相关系数达 0.632,可通过置信度 99.9%的显著性检验。结合该特征向量对应空间分布良好的一致性可知,南海区域从冬季至春季的对流活动异常有较好的持续性,即冬季对流偏活跃时,春季相应也偏活跃;冬季对流被抑制时,春季对流被抑制的可能性也大。南海处于热带地区,其上空对流活动可能受 ENSO 的影响显著。分析冬、春季 JEOF1 时间系数与对应季节 ENSO 指数的相关性可知,两季的相关系数分别达 0.720 和 0.726,可通过置信度 99.9%的显著性检验。这种良好的相关性,结合该向量的高方差贡献率,说明冬、春季南海上空的对流活动极有可能受 ENSO 活动的调制。

由上述分析可见,秋季 JEOF1 的方差贡献率与冬、春季相似,其空间分布也与冬、春季相似,均为明显的一致性,那么,秋季和冬季或春季对流活动异常的关系怎样? 分别计算秋季同春季(当年)和

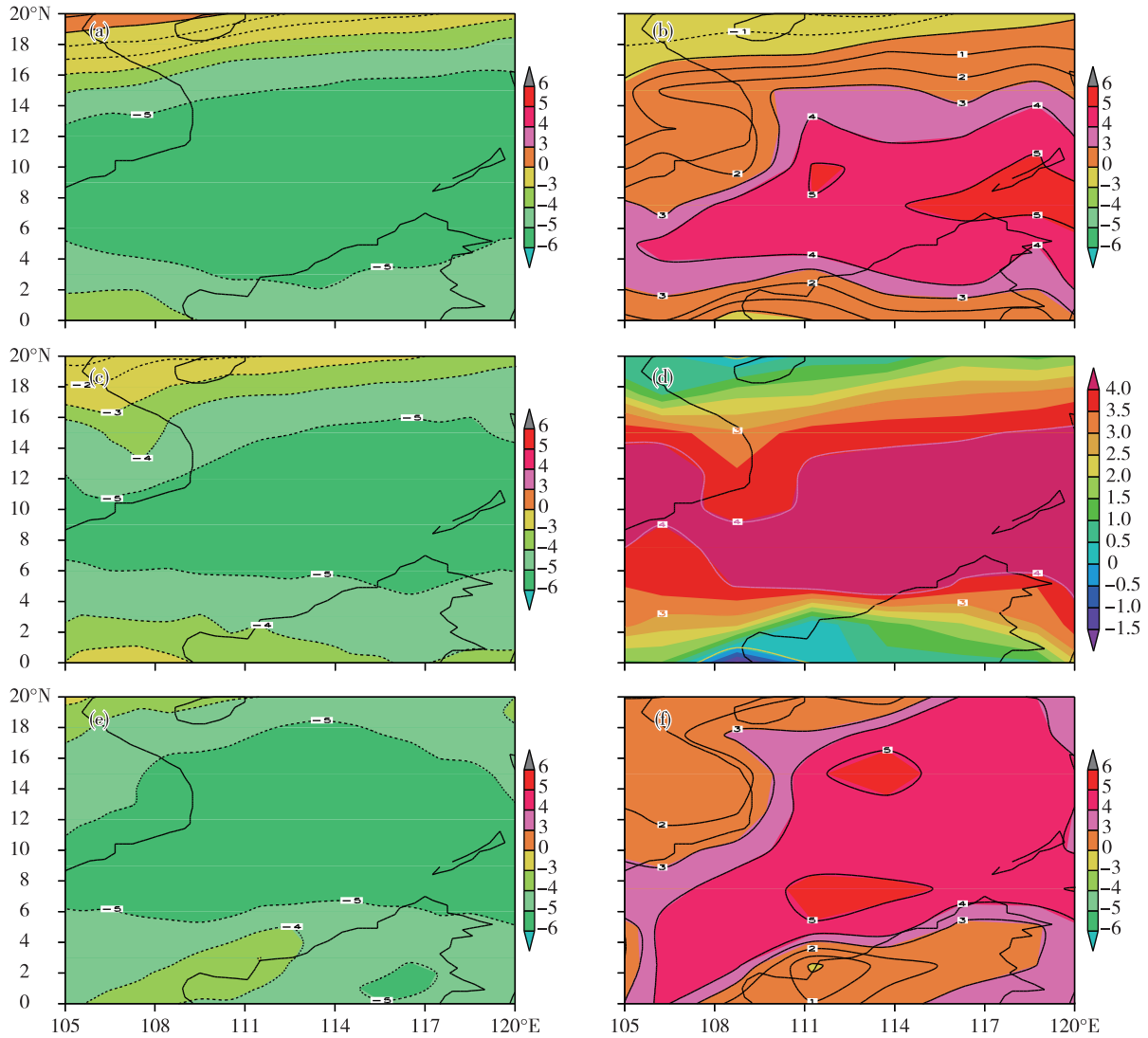


图 2 南海区域各季 OLR 和降水率 JEOF 第一特征向量的空间分布 (a、b.冬季;c、d.春季;e、f.秋季;a、c、e.OLR;b、d、f.降水率)

Fig.2 Spatial distribution of JEOF1 of OLR and precipitation rate in each season over SCS (a, b. winter; c, d. spring; e, f. autumn; a, c, e. OLR; b, d, f. precipitation rate)

冬季(次年)JEOF1 对应时间系数的相关性,其相关系数分别为 0.178 和 0.478,前者不能通过置信度 90%的显著性检验,而后者可通过置信度 99%的显著性检验。这说明南海上空秋季对流活动的异常状态可持续到次年冬季和春季,但春季的异常状态很难持续到秋季。

对秋季 JEOF1 时间系数(AUT-EOF1)与同期 ENSO 指数(AUT-BEST)的相关性(图 5)进行分析,可见,JEOF1 时间系数与同期 ENSO 指数的变化曲线有很好的相似性,呈显著正相关,两者的相关系数可达 0.784,可通过置信度 99.9%的显著性检验。这说明秋季 JEOF1 以及南海上空对流活动异常的年际变化受 ENSO 调制,即 El Niño 状态年,南海秋

季对流活动被抑制,La Niña 状态年,南海秋季对流活动更活跃,这也与冬、春季一致。

综上所述,南海区域秋、冬和春季对流活动变化表现出良好的全区一致性,冬季对流活动较好地保留了上年秋季的状态,并进一步稳定地持续至春季。秋、冬和春季南海上空对流活动异常的年际变化很可能受 ENSO 的调制,El Niño 状态年,南海对流活动被抑制,La Niña 状态年相反。

同样分析了夏季 JEOF1 年际变化与 ENSO 的关系(图 6),两者间的相关系数为 0.442,可通过置信度 99%的显著性检验,说明夏季南海对流活动依然受 ENSO 影响,但对流活动对 ENSO 的响应在南部和在北部相反。El Niño 状态年,南海南部(特别是

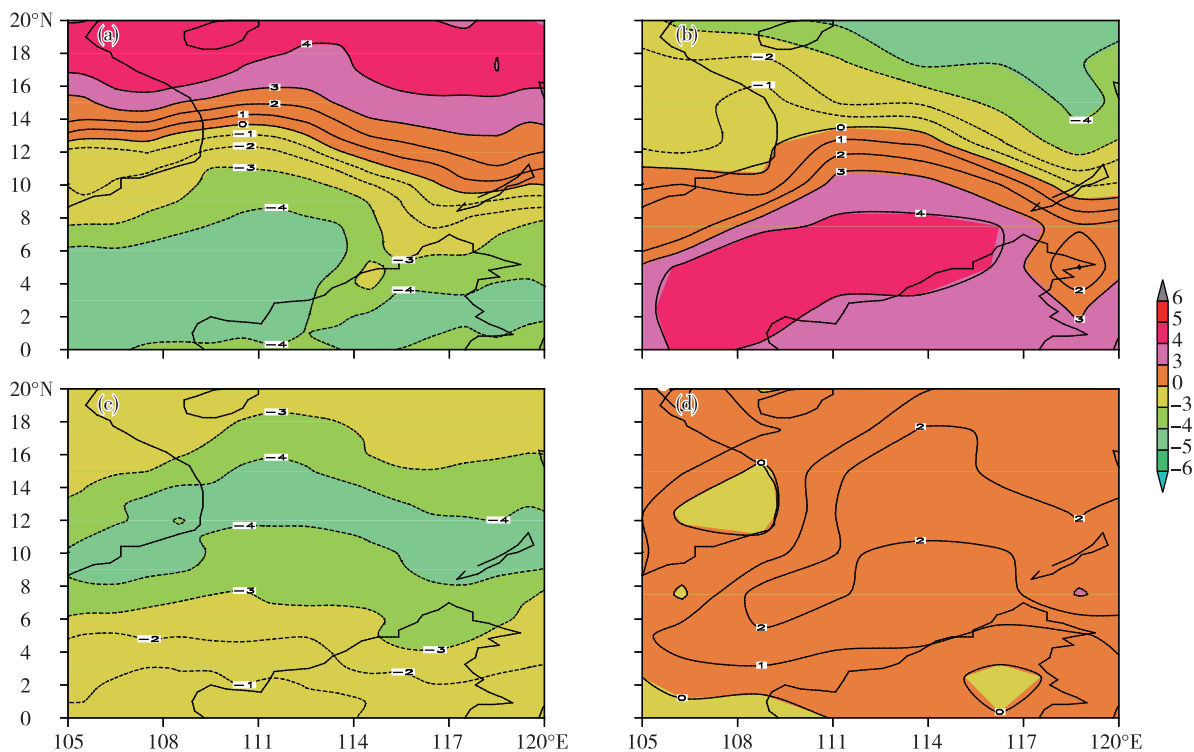


图3 南海区域夏季 OLR 和降水率 JEOF 第一、二特征向量的空间分布 (a、b.第一特征向量;c、d.第二特征向量;a、c.OLR; b、d.降水率)

Fig.3 Spatial distribution of JEOF1 and JEOF2 of OLR and precipitation rate in summer over SCS (a, b. JEOF1; c, d. JEOF2; a, c. OLR; b, d. precipitation rate)

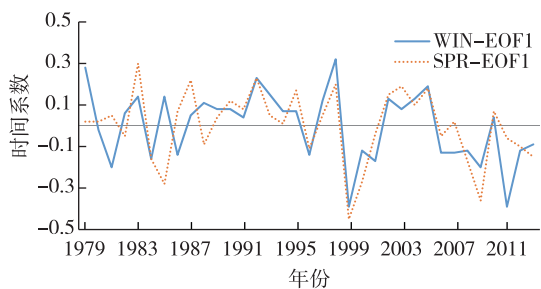


图4 南海区域冬季和春季 OLR 和降水率 JEOF 第一特征向量的时间系数

Fig.4 Time coefficients of JEOF1 of OLR and precipitation rate in winter (WIN-EOF1) and spring (SPR-EOF1) over SCS

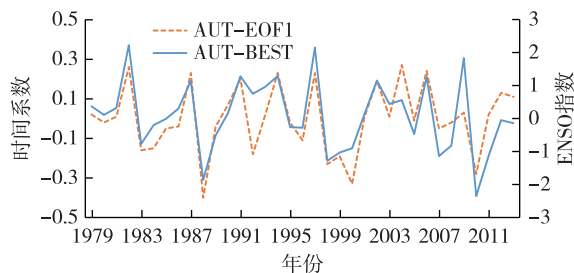


图5 南海区域秋季 OLR 和降水率 JEOF1 时间系数与同期 ENSO 指数

Fig.5 Time coefficients of JEOF1 of OLR and precipitation rate in autumn (AUT-EOF1) over SCS and simultaneous ENSO index

南端)对流活动被抑制,南部降水率偏小;南海北部(特别是北端)对流活动更活跃,北部的东南半部降水率偏大。在 La Niña 状态年则相反。对比夏季与冬、春或秋季南海对流活动 EOF1 的方差贡献率、空间分布主体大小及各自时间曲线与同期 ENSO 指数的相关性可知,夏季 ENSO 对南海对流活动的调制作用可能弱于其他季节。另外,分析夏季 JEOF1 时间系数与春季、秋季 JEOF1 时间系数的关系,相关系数分别为 -0.05 和 0.451 ,前者相关性不显著,后

者可通过置信度 99% 的显著性检验。也就是说,南海上空夏季对流活动的状态向秋季状态转换过程中仍存在一定的连续性,但从春季的状态向夏季状态转换过程则是不连续的,是一种突变性的转换。那么,为什么存在这种不连续性?

由于南海区域各季对流活动均受 ENSO 调制,分析 ENSO 的连续性有利于了解南海区域对流活动从春季到夏季的不连续性。计算了 1979—2013 年前秋、冬、春、夏、秋各季两两间 BEST 指数的相关系

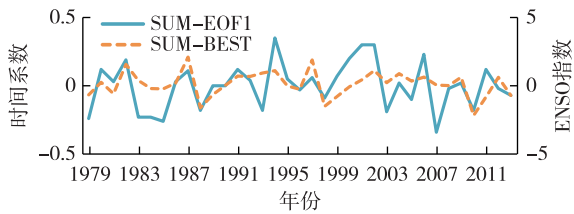


图6 南海区域夏季 OLR 和降水率 JEOF1 时间系数与同期 ENSO 指数

Fig.6 The same as Fig.5, but for summer

数,分别为 0.924、0.783、0.449 和 0.833。这表明尽管由于海温有较好的持续性,导致 BEST 指数相邻两季间均表现出较好的相关性,可通过置信度 99% 的显著性检验,但春季和夏季间的相关性明显低于其他邻近两季间的相关,相关系数甚至远低于从前秋季与春季横跨 3 个季度的相关系数(0.741)。这说明与热带东太平洋海温相关的 BEST 指数确实存在从春季到夏季的不连续性(通常 ENSO 是在下半年开始发展,冬季成熟,次年上半年趋于减弱,次年下半年海温往往发生相反的变化),这可能是南海区域对流活动异常状态无法持续到夏季的重要原因。而南海区域对流活动在 5 月的突变及南海季风在 5 月的爆发是否与此有关则需更多的研究。

夏季 JEOF2 的时间系数(图 7)表现出明显的线性趋势,趋势系数为 0.447,通过置信度 99% 的显著性检验。结合其空间分布形态分析,JEOF2 的这种线性趋势可能与气候变暖有关,即随着气候变暖,南海海温升高,导致其上空夏季的对流活动更加活跃(OLR 值变低,降水率值增大)。

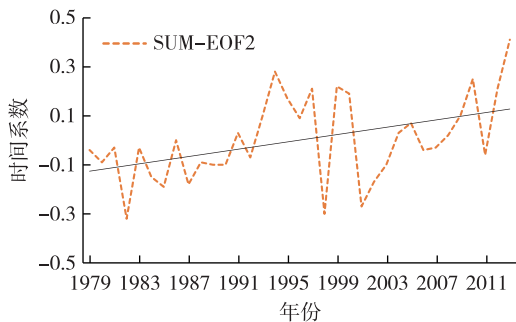


图7 南海区域夏季 OLR 和降水率 JEOF2 时间系数及其趋势线

Fig.7 Time coefficients of JEOF2 of OLR and precipitation rate in summer (SUM - EOF2) over SCS and its tendency

4 结论

利用 NCEP 再分析向外长波辐射资料和降水率

资料,运用联合经验正交函数等统计诊断方法,分析了南海区域对流活动的时空分布特征和气候变化特征,主要结论有:

1)南海对流活动的时空分布特征表现为,南海南部对流活动各月之间少变;南海中北部区域对流被抑制期和活跃期均较为持久,对流活跃区 5 月中旬中期跳跃式北扩,9 月后对流活跃区由北向南缓慢撤退。

2)秋、冬和春季对流活动变化表现出良好的全区一致性;冬季对流活动较好地保留了上年秋季的状态,并进一步稳定地持续至春季,其年际变化主要受 ENSO 的调制,El Niño 状态年,南海对流活动被抑制,La Niña 状态年则相反。

3)夏季对流活动表现出两种重要类型:第一型为南北反向型,第二型为全区一致型;第一型受 ENSO 的调制,在 El Niño 状态年,南海南端对流活动被抑制,南部降水率偏小,南海北端对流活动更活跃,北部的东南半部降水率偏大,La Niña 状态年相反;第二型有明显的线性趋势,气候变暖使其上空夏季的对流更活跃。

4)春季的对流异常状态很难持续到夏季,这可能与 ENSO 指数春夏间相对较差的持续性有关。

本文对南海区域年内和年际尺度对流活动和降水的气候特征进行了分析,初步认识其时空分布特征及与 ENSO 的线性关系,可为进一步认识南海区域气候并提供气象服务和应用提供参考。ENSO 对南海对流活动的调制机理,对流活动异常在秋、冬、春季良好的持续性及春、夏季间的跳跃性成因还有待进一步地研究。

参考文献:

- [1] 丁一汇,李崇银,何金海,等. 南海季风试验与东亚夏季季风[J]. 气象学报,2004,62(5): 561-586.
- [2] 丁一汇,柳艳菊,张锦,等. 南海季风试验研究[J]. 气候与环境研究,2002,7(2): 202-208.
- [3] 吴国雄,段安民,刘屹岷,等. 关于亚洲夏季风爆发的动力学研究的若干近期进展[J]. 大气科学,2013,37(2):211-228.
- [4] 杨辉,李崇银,潘静. 一次引发华南大暴雨的南海季风槽异常特征及其原因分析[J]. 气候与环境研究,2011,16(1):1-14.
- [5] 叶成志,李昉英. 热带气旋“碧利斯”与南海季风相互作用的强水汽特征数值研究[J]. 气象学报,2011,69(3):496-507.
- [6] 周悦,刘宣飞,陈海山. 青藏高原冬春积雪影响南海季

- 风爆发的数值研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(6): 912-919.
- [7] 张东凌, 何卷雄, 曾庆存. 南海季风爆发的统计动力分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 99-108.
- [8] 梁建茵, 林爱兰, 李春晖. 南海及周边地区 TBB 季节内振荡及其与 ENSO 的联系[J]. 气象学报, 2005, 63(3): 267-277.
- [9] 戴彩梯, 陈中一. 南海及周边地区对流活动的时空变化及其与长江流域夏季降水的遥相关[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(1): 93-98.
- [10] 胡娅敏, 翟盘茂, 罗晓玲, 等. 2013 年华南前汛期持续性强降雨的大尺度环流与低频信号特征[J]. 气象学报, 2014, 72(3): 465-477.
- [11] 吴乃庚, 林良勋, 曾沁, 等. 南海季风爆发前罕见连续 3 场暴雨特征及成因[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 129-139.
- [12] 刘屹民, 陈仲良, 毛江玉, 等. 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 I: 个例分析[J]. 气象学报, 2003, 61(1): 1-9.
- [13] 吴国雄, 段安民, 刘屹岷, 等. 关于亚洲夏季风爆发的动力学研究的若干近期进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 211-228.
- [14] 杨林, 魏应植, 丁一汇, 等. 东亚地区夏季旱涝分布与南海夏季风爆发时间关系[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 52-58.
- [15] 霍利微, 郭品文. 夏季风期间南海对流活动对西北太平洋热带气旋的影响分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(1): 101-110.
- [16] 于慎余, 周发琇, 王东晓. 南海海面散度场与涡度场的季节变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 1994(2): 179-183.
- [17] 周发琇, 张涛, 高荣珍. 南海季风区地域性大气环流的结构[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2001, 31(4): 467-472.
- [18] 阮成卿, 刘秦玉. 中国南海海表面温度与对流关系初探[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(7/8): 24-28.
- [19] 王锡东, 陈涛锋. 南海及邻域弱对流云系活动的 TBB 资料特征[J]. 气象, 2004, 30(7): 23-26.
- [20] 戴彩梯, 梁必骐. 南海地区对流活动的时空变化特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(6): 116-119.
- [21] 郭艳君, 翟盘茂, 贺敬安. OLR 资料在 ENSO 监测中的应用[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1): 101-106.
- [22] LIEBMANN B, SMITH C A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(6): 1275-1277.
- [23] XIE P, ARKIN P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [24] 郝振华, 余锦华. 中国东部地区春季降水与气温异常型的联合 EOF 分析[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1898-1907.
- [25] WEARE B C, NASSTROM J S. Examples of extended empirical orthogonal function analyses [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(6): 481-485.
- [26] 谢炯光. 扩展经验正交函数(EEOF)及其在月、季降水预测中的应用[J]. 大气科学, 1995, 19(4): 481-486.
- [27] LIANG J Y, WU S S. Diagnostic analysis of interdecadal changes of the summer monsoon in the South China Sea [J]. J Meteor Res, 2003, 17(S1): 81-95.
- [28] 曾庆存, 张东凌, 张铭, 等. 大气环流的季节突变与季风的建立 I: 基本理论方法和气候场分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 285-302.
- [29] 朱敏, 左瑞亭, 张铭. 南海季风爆发与风向改变指数关系初探[J]. 气象科学, 2009, 29(6): 787-792.