

El Niño 事件期间南海环流的异常特征*

邢延松^{1,2} 程国胜¹ 舒业强² 王东晓²

(1. 南京信息工程大学 数理学院 南京 210044; 2. 中国科学院南海海洋研究所
热带海洋环境国家重点实验室 广州 510301)

提要 基于 CORA 再分析资料对南海环流的季节特征和其受 El Niño 事件的响应进行了分析。结果表明, 冬季整个南海海区表现为一个大的气旋式环流, 夏季南海北部是气旋式环流, 南部是一个反气旋式环流。通过对南海海区异常流场进行 MV-EOF 分解, 分析其前两个模态, 其空间型主要体现了南海环流冬季和夏季的特征, 对应的时间系数与 Niño3.4_NDJ 指数有很好的相关性。通过分析南海环流在 1986—2008 年间 El Niño 年份的异常流场和异常流函数场, 证明了 MV-EOF 分解后得到的联合时间系数所反映各阶段南海环流的季节特征与 El Niño 事件有相关性, 即在 8 月[0], 南海南部异常流函数场表现为反气旋式环流, 北部为气旋式环流, 南海夏季环流被增强, 且 El Niño 事件时间尺度越长, 北部的气旋式异常流场的影响范围就越大; 在 12 月[0], 南海除了东南部外, 其余整个海区异常流函数场主要表现为反气旋式环流, 冬季环流被减弱; 在 8 月[+1], 南海夏季流场强度都被削弱了。

关键词 南海环流, 季节特征, MV-EOF, El Niño, 异常流函数

中图分类号 P731.1

南海是最大的热带边缘海, 它的南部是加里曼丹岛和苏门答腊岛, 西面是中南半岛, 东面是菲律宾群岛, 整个南海几乎被大陆、半岛和岛屿所包围。南海东北部经台湾海峡和东海, 通过吕宋海峡与太平洋相通; 南部经马六甲海峡和安达曼海与印度洋相通, 经加里曼丹海峡与爪哇海相通; 东部经巴士海峡, 与苏禄海相通。南海的面积约为 350 万 km², 约等于渤海、黄海和东海总面积的 3 倍, 仅次于南太平洋的珊瑚海和印度洋的阿拉伯海, 其面积居世界第 3 位。南海生物种类和石油资源也十分丰富, 是我国海洋经济发展战略重点海域。

南海冬、夏两季盛行季风, 冬季为强大的东亚季风, 夏季为西南季风(又称南海季风), 季风驱动的风生环流是南海总环流中的主要成分(Pohlmann, 1987; 曾庆存等, 1989)。Dale (1956)最早指出了南海

环流的季风差异; Wyrski(1961)提出季风是南海环流的主要驱动力, 也有很多学者使用实地观测资料(徐锡桢等, 1982; 刘勇刚等, 2000; 卜献卫等, 2001; 袁耀初等, 2004a, b; 廖光洪等, 2005)、数值模拟资料(Shaw *et al.*, 1994; Metzger *et al.*, 1996; 蔡树群等, 2001; 蔡树群等, 2002)和卫星高度计资料(李立等, 2000)等研究分析南海季节性环流变化, 这些研究都表明南海环流是由局地风场所驱动的, 南海环流具有明显的双涡结构, 而且在风场的作用下具有明显的季节性变化。王卫强等(2001)通过 COADS 风应力计算流函数得出南海北部冬季和夏季都是气旋式环流, 冬季要略强于夏季; 南海南部冬季为气旋式环流, 夏季为反气旋式环流。但是方文东等(1998)分析南海南部海区环流时指出, 在东北季风期, 南海西南部主要由南沙气旋式环流控制, 东南部则受较弱的东南

* 国家重点基础研究规划(973)项目: “南海海气相互作用与海洋环流和涡旋演变规律”第四课题“南海上层热力过程对热带天气系统的影响”, KZCX2-YW-Q11-02 号; 国家自然科学基金青年基金, 41006011 号; 国家海洋局海洋环境信息保障技术重点实验室开放课题: CORA 再分析资料的评估及其在南海的应用研究, 2012—2014; 中国科学院南海海洋研究所 LED 开放课题, LED1004 号。邢延松, E-mail: xingyansong@scsio.ac.cn

通讯作者: 舒业强, 博士, E-mail: shuyeq@scsio.ac.cn

收稿日期: 2011-05-07, 收修改稿日期: 2012-03-13

沙上层反气旋式环流控制;在西南季风期,南海南部大部分受反气旋式环流控制,其东南侧由两个弱的气旋式环流控制。

ENSO 是热带太平洋海气相互作用中显著的年际信号,并通过某些途径影响南海的大气环流(陈永利等, 2010)。Chao 等(1996)以 1982—1983 年的 El Niño 事件为例,描述了南海环流的异常变化,揭示了 El Niño 事件是减弱了南海风场,从而改变了南海的环流。Wu 等(1998)利用 NCEP/NCAR 提供的三维风场和海表温度场的数值模拟结果,探讨了 1991—1995 年南海环流的季节变化和年际变化,认为风应力是控制南海环流季节变化和年际变化的主要因素。鲍颖等(2008)应用 NOAA OISST.V2 月平均资料分析 1997/1998 年 El Niño 事件后流场的异常,并指出,冬季整个南海海盆气旋式环流减弱,次年夏季南海南部的反气旋式环流向北移动、扩大,北部的气旋式环流减弱;王卫强等(2001)应用 COADS 风应力、Levitus 温度资料分析了 1958—1987 年间 ENSO 年份南海冬、夏季的斯韦尔德鲁普(Sverdrup)异常流场与上层海温关系,指出异常流函数场在 El Niño 期间的夏季主要是强化南海自身的环流结构,冬季则削弱整个南海的气旋式流场;La Niña 期间夏季主要是削弱北部气旋式涡流,冬季强化整个南海的气旋式环流。

上述文章对南海环流的季节和年际变化分析多数只用卫星海表资料反演得到,这样单一因素不能完全体现南海内部流场的季节和年际变化特征。本文使用中国近海的 CORA(China Ocean ReAnalysis)再分析资料(Han *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2006; Han *et al.*, 2004)分析了南海海洋内部环流的异常流场和异常流函数场的季节和年际变化,探讨了南海海洋环流对 El Niño 事件的响应特征,以期为进一步加深理解南海及其域季环流特征提供基础资料。

1 数据的使用及处理

1.1 资料

海洋观测数据的时空分布极不均匀,包含多尺度信息。为了有效提取海洋观测数据中的多尺度信息,并结合海洋要素的变化特征及其观测数据的时空分布特点,中国海洋信息中心使用温盐和卫星测温以及卫星测高数据研制开发了我国近海及邻近海域海洋月平均再分析产品(CORA)。该数据集的再分析要素包括海平面高度、三维温度、盐度和纬向海流速度、经向海流速度,时间覆盖是从 1986 年 1 月至 2008 年

12 月共 23 年的月平均资料;海区范围为 99°E—148°E、10°S—52°N,即同时包括渤海、黄海、东海和南海及其邻近海域;时间分辨率为月平均的,空间水平网格分辨率为 0.5°×0.5°、垂向上的分辨率为不等间距,共 25 层。本文主要对南海海区 50 m 深处的流场进行了分析,讨论了南海流场对 El Niño 事件的响应。

1.2 计算方法

Sverdrup 平衡是海洋中最基本的平衡,而对于无旋运动一定存在一个速度势 ψ ,也称势函数。它可以明确的表现海洋环流的地转偏向力和海洋环流的流向。为说明南海的流速和流向的变化,文中计算流函数场、异常流函数场的变化和使用联合经验正交分解(MV-EOF)方法分析 CORA 再分析资料表现的南海环流场,分析南海流场在 El Niño 事件发生期间表现出来的季节特征。计算流函数:

$$\psi(x) = \int_E^l -vdx + udy \quad (1)$$

式中 ψ 是流函数, l 为经纬向方向, E 为东、南边界。本文使用超张弛迭代法计算流函数。外边界使用流速进行强迫驱动。

2 南海环流的季节变化特征

南海环流多受季风控制,存在明显的季节变化,南海夏季(6—8 月份)受西南季风控制,8 月份达到最强;冬季(11 月至次年 3 月)受东北季风控制,12 月份最强,春、秋季节处于季风的转换时期。Shaw 等(1994)指出,南海海区 43.5 m 深度以上的表层流主要受 Ekman 流的影响,不能完全表现出南海自身的环流变化,为研究南海内部的流场变化,选择 50 m 深处的 CORA 资料提供的南海海流进行分析。由南海的气候态流场可以看出,东北季风期(图 1a),南海的整个海区受一个大的气旋式环流控制,且分别在南海的南部和北部都存在气旋式环流,但在南海的南部还有东南沙上层反气旋环流。在西南季风期(图 1b),在南海的南部有一个大的南沙上层反气旋环流,在南海的北部是一个大的气旋式环流。这些特征和方文东等(1998)的结论一致,这样说明气候态的 CORA 再分析资料能够表现出南海海区流场的季节变化。南海海区冬季和夏季的气候态流函数场能进一步说明南海大尺度环流的季节特征。从气候态的季节流函数图 1c 中可以看出,冬季整个南海海区被一个大的环流所控制,在其北部,环流的核心位置在 115°E、17°N,中心处为低值(相对于中心外侧的流函数值大小,若

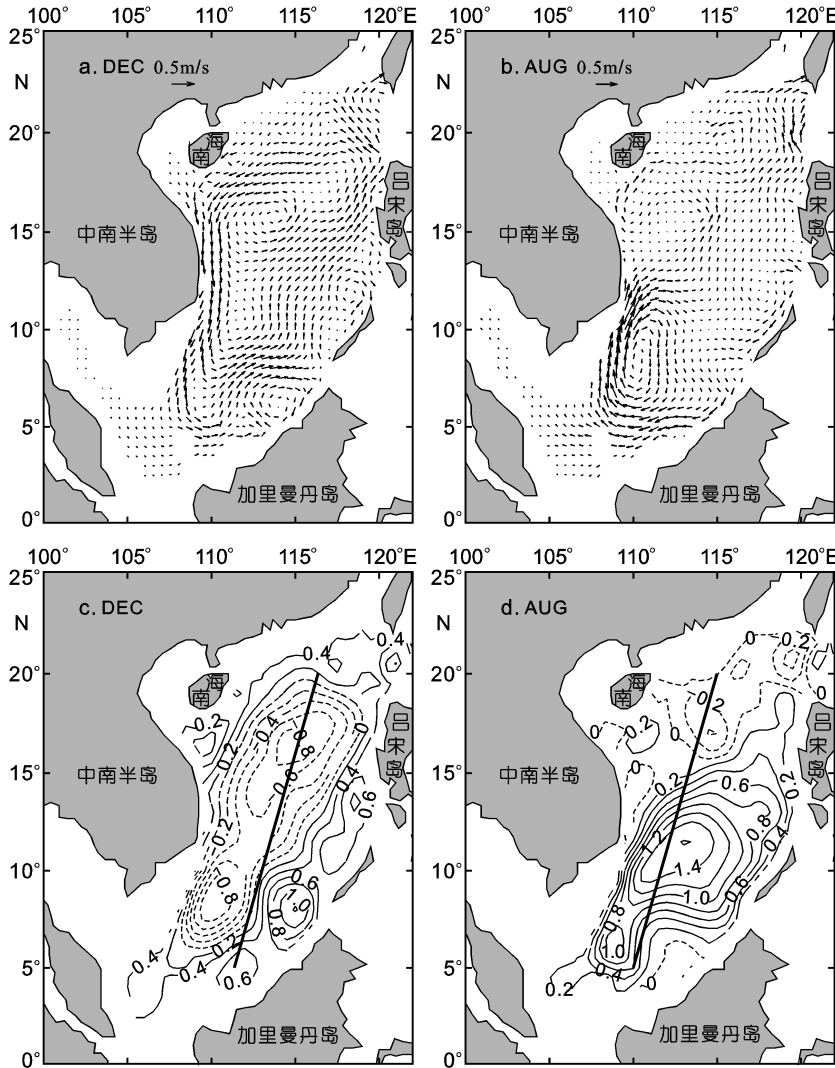


图1 1986—2008年冬季(12月)和夏季(8月)50m深的平均流场(单位: m/s)和流函数场(单位: Sv)(c、d等值线间隔为0.2 Sv, 粗实线为选取的经纬线剖面)
 Fig.1 The circulation (unit: m/s) and stream function (unit: Sv) at 50 m averaged by 1986—2008. The interval was 0.2Sv and the solid lines represent the profile of the Longitude and latitude direction in c and d

在中心出的流函数值小, 则地转偏向力指向中心, 则环流为气旋式, 即低值中心为气旋, 相反易知, 下同), 即为气旋式环流。在南海的南部, 东北季风期, 两个环流核心, 位置分别在 111°E、8°N 的低值中心和 115°E、7°N 的高值中心, 即是方文东等(1998)等所表述的南沙气旋流和东南沙上层反气旋流; 夏季, 南海的北部 115°E、17°N 位置是以低值中心为主的气旋式环流, 影响范围和强度弱于冬季气旋式环流, 且影响区域要略偏东北。在南海的南部, 112°E、12°N 位置是以高值中心为主南沙上层反气旋环流和 112°E、5°N 位置是以低值中心为主的一个小的万安气旋环流。可以看出南海的北部环流常年都是以气旋式环流为

主, 只是不同季节, 强度和影响的区域有一定的变化和偏移。这与方文东等(1998)和王卫强等(2001)分析的结果和南海本身的环流变化较一致, 这也说明 CORA 再分析资料提供的南海环流数据可以表现出南海真实的季节性环流信息。

为说明南海冬季和夏季流场的异同, 在 110°—115°E、5°—20°N 区域选取一个经纬向剖面, 选取区域如图 1c, 此范围基本包括了南海南部和北部涡流的核心。从两者的经纬向的流函数变化关系来看, 很明显在南海北部 15°—19°N 之间, 流函数在空间上的变化是比较一致的(图 2), 但是冬季的流函数绝对值要略大于夏季, 在南海北部 5°—10°N 之间变化相反。也就是说在南海北部一直是以气旋式环流为主, 冬季略强于夏季。

为确定南海海区的海流在长时间的季节和年际变化, 本文对南海海区 50 m 深(Wang *et al*, 2008)的 CORA 再分析资料进行联合经验正交分解(MVEOF), 得到南海流场的 MVEOF 后的空间模态和时间系数图(图 3、图 4)。图 4 中的第一、二模态解析率分别为 39.13% 和 10.54%。从模态环流特征可以看出, 南海的整个海区的第一空间模态流场在被一个大的气旋式环流控制, 且在南海的南部和北部各有一个环流中心(图 3a), 这和南海气候态

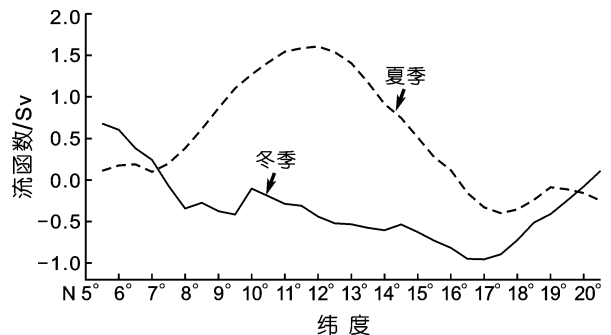


图2 经纬向剖面的冬、夏流函数对比
 Fig.2 The comparison between the stream functions of summer and winter in the section across the largest center

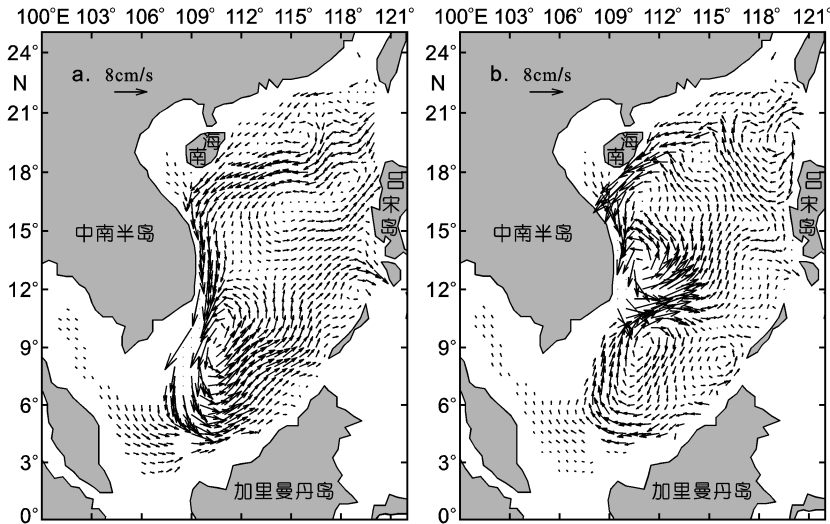


图3 50 m 流场 MV-EOF 分解的第一、二模态

Fig.3 The first and second mode of the circulation analyzed by MV-EOF at 50 m

的冬季海流特征一致，而第二模态表现的是南部是反气旋环流，北部是气旋式环流(图 3b)，这与气候态的夏季流场特征基本一致，也可以认为分解后的前两个模态主要体现了南海的冬季和夏季环流特征。从模态的时间系数曲线(PC1, PC2)变化可以看出冬季大概在 12、1 月份的值最大，夏季大概在 8、9 月份的值最大，为便于分析本文就以 8 月份代表夏季(西南季风期)，12 月份代表冬季(东北季风期)。从 PC1 最大值与 El Niño3.4 指数对比可以发现，在 El Niño 事件发生期间的冬季流场强度(强度是指时间系数值的大

小，下同)略小于邻近年份的强度(图 4A)；夏季流场强度会略高于前一年，在 El Niño 事件消亡的夏季流场强度会略低于邻近年份(图 4B)。为进一步说明，文中取两个模态的时间系数的正值，一般取第一模态各年 10—3 月份时间系数，作为合成系数的 10—3 月份；取第二模态各年 7—12 月份时间系数，作为合成系数的 4—9 月份，即得到一个合成时间系数。分析 23 年的合成时间系数，按相邻两年为一段，计算相邻 22 段时间系数的平均，得到邻近两年平均系数变化的平均变化值。在合成时间系数中找到 El Niño 事件发生年间连续两年的时间系数曲线和平均系数变化值对比，得到图 5。

为便于文章的表达，文中用“[0]”表示 El Niño 事件发生的当年；用“[+1]”表示 El Niño 事件发生的第 2 年。从图 5 中可以看出，在夏季[0]时间系数强度都要强于平均态；在冬季[0]都要略弱于平均态；但在夏季[+1]的强度变化却不稳定，1998、1995 年都明显的弱于平均态而 1995 年变异的略强。从合成系数对比中可以说明，在 El Niño 事件南海环流的季节变化，[0]年夏季的流场明显被加强，冬季流场被削弱，而[+1]年夏季异常变化表现得不明显。

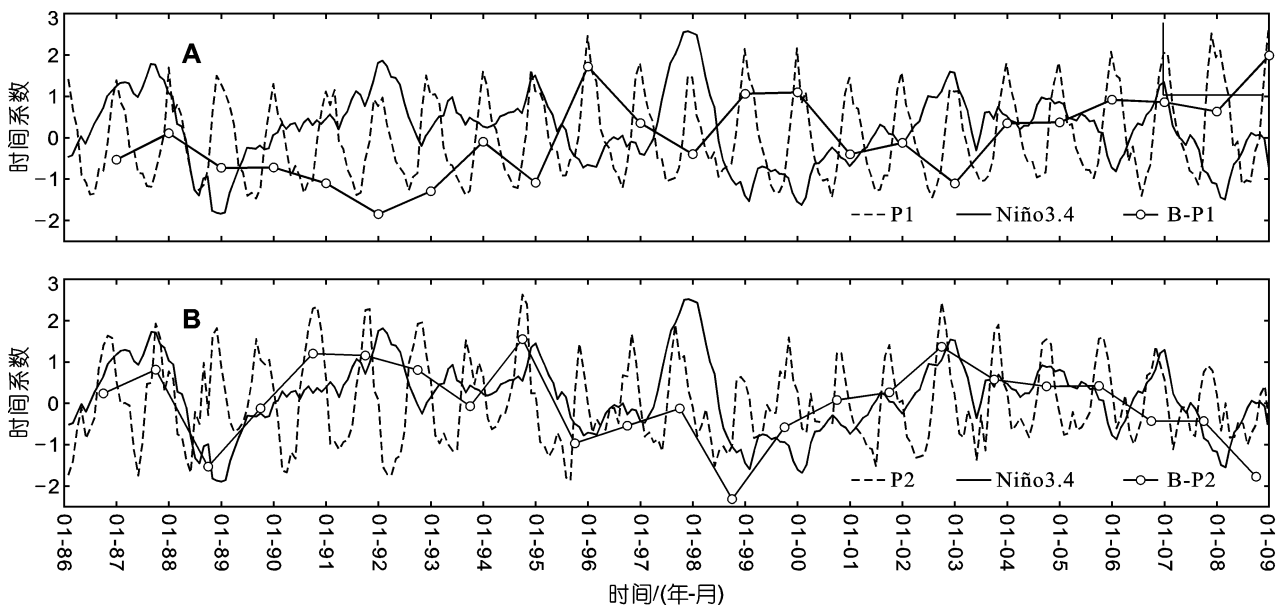


图4 第一、二模态的时间系数(虚线), El Niño3.4 指数(实线)和时间系数最大值的连线(空心圆实线; 已做过标准化处理)

Fig.4 The temporal coefficients of the first and second mode (dashed line), the El Niño3.4 index (solid line) and the line connected the peak values (solid line with hollow circles; standardized)

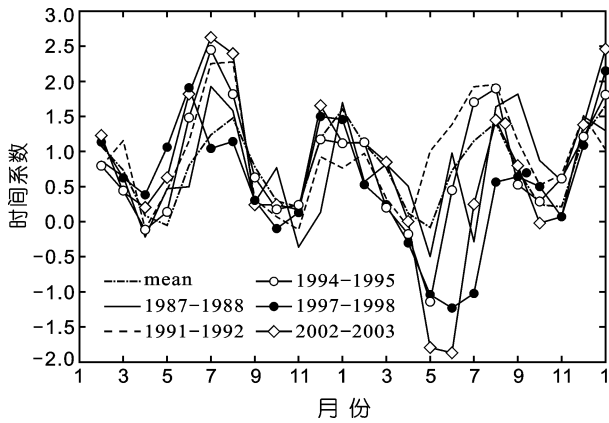


图5 1986—2008年间的El Niño事件期间流场的MV-EOF分解得到的前两个模态时间系数合成后的变化曲线。点虚线为24个月平均曲线，X轴表示El Niño发生当年和次年的24个月

Fig.5 The temporal coefficients of El Niño events during 1986—2008 (the temporal coefficients were restructured using the temporal coefficients of the first two modes of the current analyzed by MV-EOF), the dot-and-dash line is the 24 months value averaged by years, X-axis is the 24 months of the El Niño year and the following year

3 南海环流的年际变化阶段性特征

从上文的分析中可以确定南海大尺度流场存在明显的年际变化，本文以 Niño3.4 指数为标准，在1986—2008年期间选取 El Niño 年份 1987/1988, 1991/1992, 1994/1995, 1997/1998, 2002/2003 年等，对南海的流场、异常流场和异常流函数在冬季(12月份)和夏季(8月份)的影响进行分析。本文只选取分析

1994—2002年间的 El Niño 年份为例，说明 El Niño 事件对南海环流的影响。在这期间发生的 El Niño 时间都是在夏季爆发，发展到冬季是最强，在春季是减弱，且都在5月份之前结束。文中将1994—2002年间的 El Niño 事件的发生时的南海海区的流场进行合成分析，说明 El Niño 事件对南海流场的影响。

3.1 夏季[0]异常流场型

将1994、1997、2002年8月份合成后的流场减去气候态8月份流场，计算其流函数，得到异常流场和异常流函数场(图7)。由图7可知，夏季[0]南海海区主要受西南季风的影响，其南部流场主要是由一个大的反气旋式环流和北部流场由气旋环流控制(图6a)。夏季的异常流场(图6b，异常是相对于气候态，下同)整体趋势是加强原流场；如在南海北部异常流场和原流场都是以大的气旋式环流为主，在吕宋口处异常流场和原流场都有一个北上的分流，在海南岛正南部两者都有一个小的反气旋式环流。在南海东部巴拉望岛附近两者都是以反气旋式环流为主，只有在南海的南部南沙群岛附近，两者的流场不完全一致，但是此区域的异常流速很小，对于原流场的影响较小。而从异常流函数场(图6c)中也可以明显的表现出南海的整个海区的流速被加强，如在吕宋口东部、巴拉望岛东部和海南岛南部附近的异常流函数值都是高值中心，即此处的流场都以反气旋流为主，在南海中北部区域的异常流函数值是几个低值中心，说明此区域主要是气旋式环流为主。上面异常流和异常流函数场的现象表明，夏季[0]对南海流场的影响

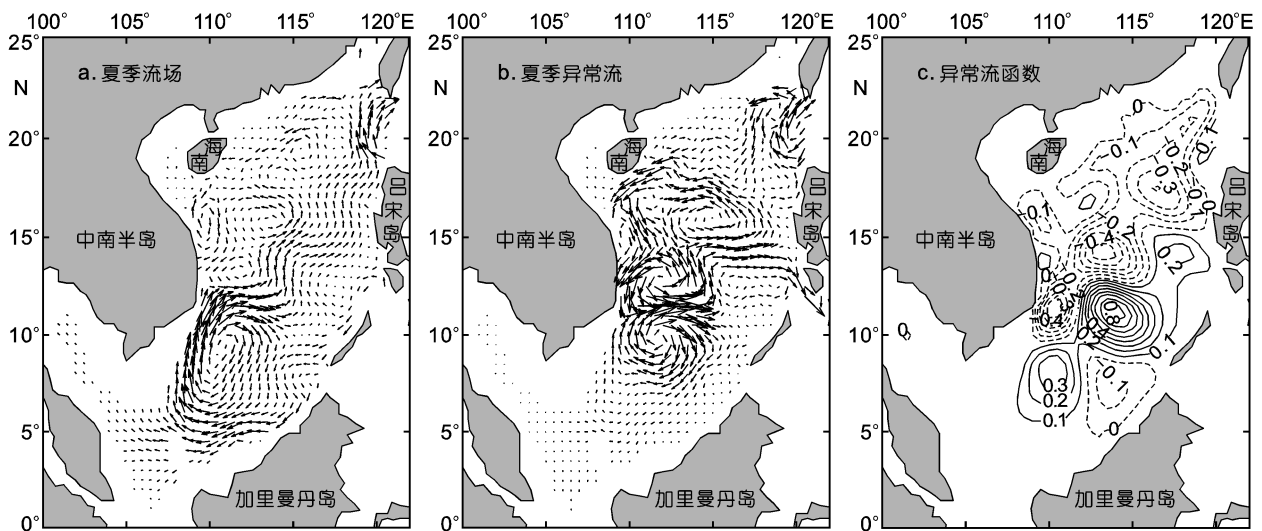


图6 夏季[0]南海的流场(a)、异常流场(b, 单位: m/s)和异常流函数场(c, 单位: Sv), 等值线间隔为

Fig.6 The circulation (a), anomaly circulation (b, unit: m/s) and anomaly stream function (c, unit: Sv) in the South China Sea during the summer of the El Niño

是加强南海整个海区的流速大小。

分别对比 1994、1997、2002 年的 El Niño 事件发生时间和对应的异常流函数场的影响范围可知, 1997 年的 El Niño 事件对南海中部流场的影响范围更大, 也可以说 El Niño 事件对南海中部的影响时间越长, 南海中北部的气旋式异常流场的影响范围就越大(图 7)。

3.2 冬季[0]异常流场型

将 1994、1997、2002 年 12 月份合成后的流场减去气候态 12 月份流场, 计算其流函数, 得到异常流和异常流函数场(图 8)。由图 8 可知, 冬季[0]南海的

整个海区受东北季风的影响, 其流场主要是由几个大的气旋式环流控制(图 8a)。而其冬季的异常流场的整体趋势是减弱原流场, 即南海冬季的气旋式环流和东南沙上层反气旋环流的流场值都减小。从南海冬季的异常流和流函数场(图 8b,c)可以看出, 在海南岛沿岸附近、南海海区中部和南部区的域异常流函数场都是高值中心, 即异常流是反气旋式流, 它们都与原流场正好相反; 在巴拉望岛附近的原流场是北上的趋势, 且在其北部有一个弱的反气旋流, 而在此区域的异常流函数场是一个大的低值中心, 即异常流场是一个强的气旋式环流, 它也有削弱原流速的趋

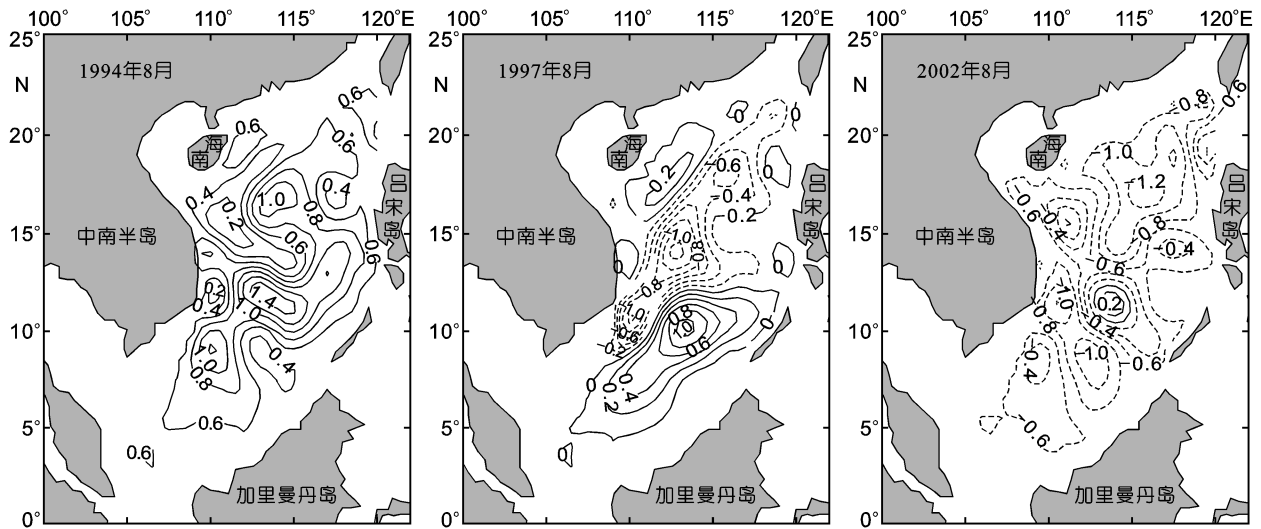


图 7 夏季[0]南海的异常流函数场(单位: Sv, 等值线间隔为 0.2 Sv)

Fig.7 The anomaly stream function (unit, Sv) in the South China Sea during the summer of the El Niño, the interval is 0.2 Sv

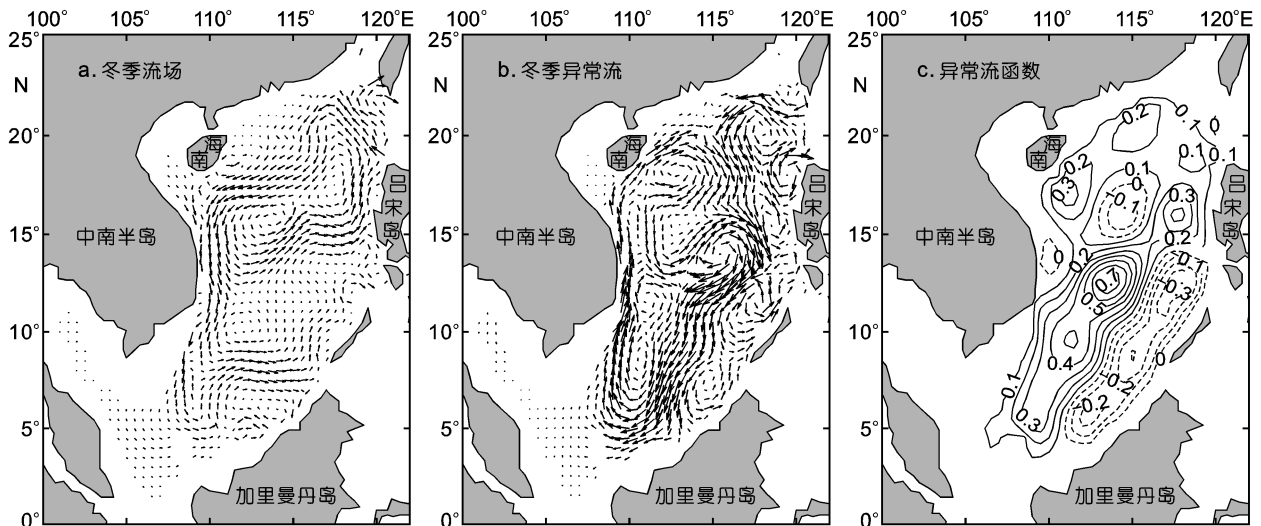


图 8 冬季[0]南海的流场(a)、异常流场(b, 单位: m/s)和异常流函数场(c, 单位: Sv, 等值线间隔为 0.1 Sv)

Fig.8 The circulation(a), anomaly circulation (b, unit: m/s) and anomaly stream function (c, unit: Sv) in the South China Sea during the winter of the El Niño, the interval is 0.1 Sv

势;但是在吕宋口出的异常流场和原流场的流向基本一致,这可能是在此处的太平洋黑潮流速太强的影响。由上面的分析可知,除了吕宋口处的海流受太平洋黑潮影响外,在冬季[0]南海的整个海区的流场大小都有相对减弱的趋势。

3.3 夏季[+1]异常流场型

分析合成后的[+1]年期间夏季异常流场和异常流函数场,在夏季[+1]南海的海区主要受西南季风的影响,其南部流场是由一个大的反气旋式环流和北部流场是由一个弱的气旋环流所控制(图 9a),而在[+1]年夏季与[0]年夏季不同,南海异常流场的整体趋势是削弱的原流场大小,即南海夏季南部反气旋

式环流和北部气旋环流的流场值都削弱。从南海冬季的异常流场和异常流函数场也可以看出(图 9b,c),南海的西北部的异常流函数都是以高值中心为主,而南部的都是以低值中心为主,也就是说南海的西北部是以反气旋式异常环流为主,南部是以气旋式异常流为主,即在[+1]年夏季,南海的西北部气旋式环流和南海南部的反气旋式环流都被削弱了。

综上,在冬季[0]南海的整个海区的流场都被削弱,夏季[0]的整个海区的流场都被加强了;而在[+1]年夏季南海的整个海区的流场都被削弱。这也说明了图 5 中的[0]年夏季增强、冬季削弱的结论,而在[+1]年夏季的不稳定态是削弱的南海原流场流速的大小。

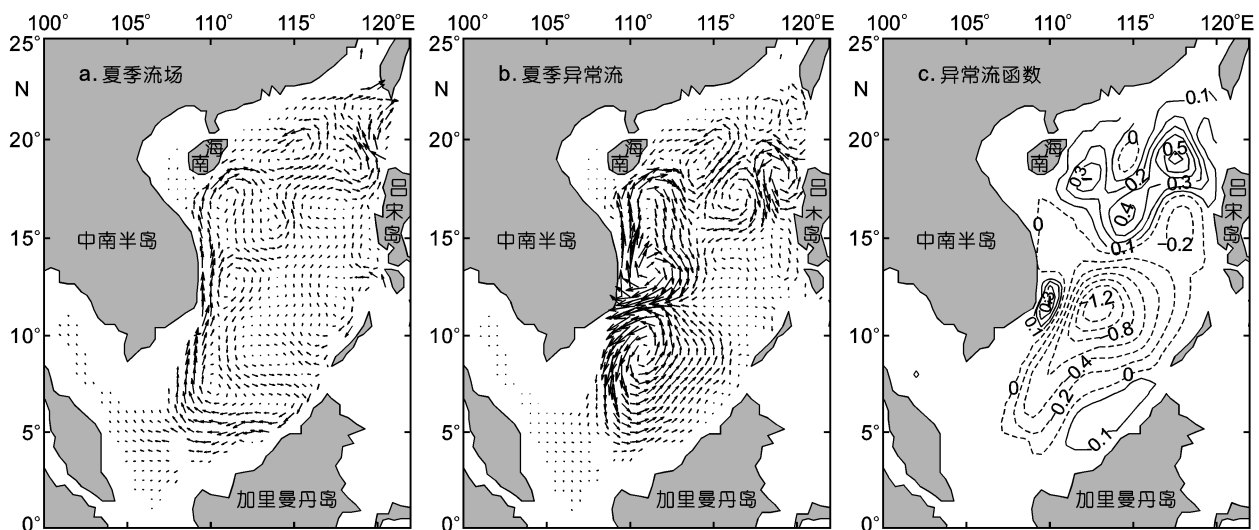


图 9 夏季[+1]南海的流场(a)、异常流场(b, 单位: m/s)和异常流函数场(c, 单位: Sv, 等值线间隔为 0.2 Sv)

Fig.9 The circulation(a), anomaly circulation (b, unit: m/s) and anomaly stream function (c, unit: Sv) in the South China Sea during the next summer of the El Niño, the interval is 0.2 Sv

4 讨论

上文只对南海 50 m 层的海流资料进行分析,但是 Niño 事件对表层以下的影响如何,在南海会影响到的深度是多少?本文使用 CORA 再分析资料对此问题进行初步探讨。将南海的 100 m、400 m 和 800 m 深的三维流场资料分别做 MV-EOF 分解,对比其前两个空间模态(图略),发现除强度上有所减弱外,不同深上的空间型和表层的基本一致,即可以进行比较。取出其前两个模态的时间系数,重复图 5 的工作,得到不同深度的平均合成时间系数曲线进行对比(图 10)。

在 50 m 和 100 m 的合成时间系数的大小和变化趋势是一致的,两者的 El Niño 发生年间连续两年的

时间系数曲线对比图的变化也基本相同(图略),得到的结论也是相同的;而 400 m 的合成时间系数变化不同于 50 m 深的,其冬季和夏季的最大值都晚于表层 1—2 个月,这是因为表层流场向深层流场传递时的时间滞后及能量减弱导致的。800 m 深的合成时间系数的最大值相对于表层出现的月份,冬季略晚夏季略早,这和表层受 El Niño 事件影响的响应不一致。可能是 El Niño 事件对南海的流场的影响在 400 m 以上较明显,400 m 以下影响较弱,对于 400 m 以下流场的变化机制以及受那些外界因素的影响以后将进一步分析讨论。

5 结论

本文利用 CORA 流场再分析资料分析了 1986—

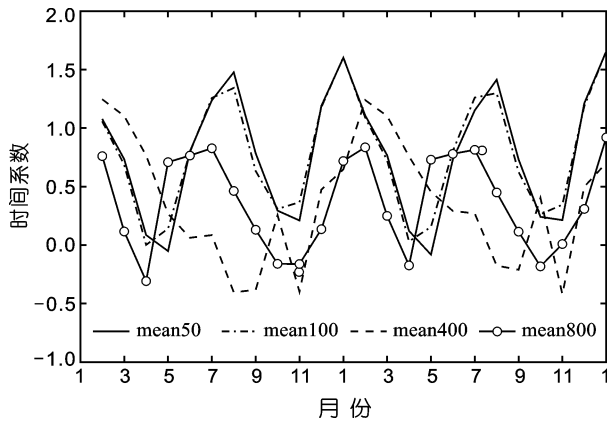


图 10 不同深度上的流场做 MV-EOF 分解得到的前两个模态时间系数合成后再做 El Niño 事件的合成曲线(X 轴表示 El Niño 发生的当年和次年的 24 个月)

Fig.10 The composed temporal coefficients during El Niño using the restructured temporal coefficients of the first two modes of the current analyzed by MV-EOF at different depths. X-axis is the 24 months of the El Niño year and the following year

2008 年间南海的气候态流场的季节性变化以及在 El Niño 事件期间的南海异常流和异常流函数场的变化之后, 得到以下结论:

(1) CORA 再分析流场数据能够准确的表现出南海冬、夏季气候态流场信号, 即冬季整个南海海盆以气旋式环流为主, 在南海东南部有一个东南沙上层反气旋式环流; 夏季南海北部是一个气旋式环流, 南部有一个大的南沙上层反气旋和一个小的万安气旋式环流。

(2) 由不同年份的南海异常流场和异常流函数场的变化表明: El Niño 事件期间南海海盆的异常流场在冬季和夏季存在显著的异常分布: 8月[0]南海南部异常流函数场表现的是南部为反气旋式环流, 北部是气旋式环流, 即整个南海的环流均被增强, 且影响时间越长, 北部的气旋式异常流场的影响范围就越大; 12月[0]南海处理东南部外, 其整个海区异常流函数场表现的是反气旋式环流, 即冬季整个南海海盆的环流被减弱; 8月[+1], 南海海盆夏季流场强度均被削弱了。

致谢 国家海洋信息中心提供 CORA 再分析资料 (<http://www.cora.net.cn/>); 国家海洋信息中心韩桂军和李威老师在文章完成过程中给予帮助, 谨致谢忱。

参 考 文 献

卜献卫, 袁耀初, 刘勇刚, 2001. P 矢量方法在南海夏季环流诊断计算中的应用. 海洋学报, 23 (3): 8—17

- 王卫强, 王东晓, 施平等, 2001. 南海大尺度动力场年循环和年际变化. 热带海洋学报, 20(1): 61—68
- 方文东, 方国洪, 1998. 南海南部海洋环流研究的新进展. 地球科学进展, 13(2): 166—172
- 刘勇刚, 袁耀初, 苏纪兰等, 2000. 1998 年夏季南海环流. 科学通报, 45 (2): 1252—1259
- 李立, 吴日升, 郭小钢, 2000. 南海的季节环流-TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究. 海洋学报, 22(6): 13—26
- 陈永利, 李琦, 赵永平等, 2010. 太平洋次表层海温异常年际变率的信号通道与 ENSO 循环. 海洋与湖沼, 41(5): 657—666
- 袁耀初, 卜献卫, 楼如云等, 2004a. 1998 年冬季南海上层环流诊断计算. 海洋学报, 26 (2): 1—9
- 袁耀初, 刘勇刚, 楼如云等, 2004b. 2000 年夏季南海环流的改进逆方法计算. 海洋学报, 26 (1): 1—13
- 徐锡桢, 邱章, 陈慧昌, 1980. 南海水平环流的概述. 见: 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 137—145
- 曾庆存, 李荣凤, 季仲贞等, 1989. 南海月平均流的计算. 大气科学, 13(2): 127—138
- 鲍颖, 兰健, 王毅, 2008. 南海在 1997/1998 年 El Niño 事件后的异常变化. 地球科学进展, 23(10): 1027—1036
- 蔡树群, 苏纪兰, 甘子钧等, 2001. 冬季南海上层环流动力机制的数值研究. 海洋学报, 23(5):14—23
- 蔡树群, 苏纪兰, 甘子钧等, 2002. 夏季南海上层环流动力机制的数值研究. 海洋学报, 24(1): 1—7
- 廖光洪, 袁耀初, 徐晓华, 2005. 1998 年冬季南海环流的三维结构. 海洋学报, 27(2): 8—17
- Chao S Y, Shaw P T, Wu S Y, 1996. El Niño modulation of the South China Sea Circulation. Progress in Oceanography, 38: 51—93
- Dale W L, 1956. Wind and drift currents in the South China Sea. The Malaysian Journal of Tropical Geography, 8: 1—31
- Han G-J, Li W, He Z-J *et al.*, 2006. Assimilated tidal results of tide gauge and TOPEX/POSEIDON data over the China Seas using a variational adjoint approach with a nonlinear numerical model. Adv Atmos Sci, 23(3):449—460
- Han G-J, Li W, Zhang X-F *et al.*, 2011. A regional ocean reanalysis system for China coastal waters and adjacent seas. Advances in Atmospheric Sciences, 28(3): 682—690
- Han, G-J, Zhu J, Zhou G-Q, 2004. Salinity estimation using the T-S relation in the context of variational data assimilation. J Geophys Res, 109: C03018, doi:10.1029/2003J C001781
- Metzger E J, Hurlburt H E, 1996. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea and the Pacific Ocean. J Geophys Res, 101 (12): 331—352
- Pohlmann T, 1987. A three-dimensional circulation model of the South China Sea. In: Nihoul C *et al.* Three dimensional models of marine and estuarine dynamics. Elsevier Oceanography Series, 45:245—268
- Shaw P T, Chao S Y, 1994. Surface circulation in the South China

Sea. Deep Sea Research, 41: 1663—1683
Wang B, Wu Z, Li J *et al*, 2008. How to Measure the Strength of
the East Asian Summer Monsoon. *J Climate*. 21:4449—4463
Wu C R, Shaw P T, Chao S Y, 1998. Seasonal and Interannual

Variations in the Velocity Field of the South China Sea.
Journal of Oceanography, 54: 361—372
Wyrski K, 1961. *Physical Oceanography of the Southeast Asia
Waters*. NAGA Report, 2: 1—195

ANOMALOUS CHARACTERISTICS OF THE OCEAN CIRCULATION IN SOUTH CHINA SEA DURING THE EI NIÑO EVENTS

XING Yan-Song^{1,2}, CHENG Guo-Sheng¹, SHU Ye-Qiang², WANG Dong-Xiao²

(1. *School of Mathematics & Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044*; 2. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy Sciences, Guangzhou, 510301*)

Abstract Based on the CORA (China Ocean ReAnalysis) data sets, we analyze the seasonal characteristics of the circulation in the South China Sea (SCS) and its response to El Niño. The winter circulation in the SCS is overall cyclonic. The summer circulation can be divided into two parts, cyclonic in the north and anti-cyclonic in the south. We analyze the circulation anomalies in the SCS using the MV-EOF method. The first and second space modes of the circulation represent winter and summer circulation, respectively. The corresponding temporal coefficients have clear relationship with the Niño3.4 index. By analyzing the current and stream function anomaly during the El Niño events from 1986 to 2008, we find that the circulation changes during the different stages of the El Niño. In August, the stream function anomaly shows an anti-cyclonic circulation in the southern SCS and a cyclonic circulation in the northern part, strengthening the background summer circulation. The northern cyclonic circulation anomaly becomes larger as El Niño event goes on. By December, anti-cyclonic circulation anomalies prevail in the whole SCS except for the southeastern region, weakening the background winter circulation. In next August the circulations in the SCS were obviously weakened.

Key words The South China Sea circulation, Seasonal characteristic, MV-EOF, El Niño, Stream function anomaly

2011 年度《海洋与湖沼》动态

(1) 《海洋与湖沼》2011 年最新公布的总被引频次在海洋科学期刊中名列第一位; 影响因子为 1.404, 学科影响指标和综合评价总分均列海洋科学期刊首位; 综合评价总分在全国科技期刊中排第 18 位。

(2) 荣获 2011 年度百种中国杰出学术期刊奖。

(3) 荣获 2011 年度中国精品科技期刊奖。