

南海盐度锋的年际变化特征分析

赵宝宏^{1, 2}, 刘宇迪¹, 付邦雨²

(1. 解放军理工大学气象学院 江苏 南京 211101; 2. 71320部队 74分队 河南 开封 475003)

摘 要:为了探究南海表层5 m盐度锋的年际变化特征,应用50年(1958—2007年)的SODA月平均资料,采用均方差和经验正交函数进行研究。结果表明,盐度锋年际变化显著的区域集中在北部湾、海南岛以东、南海北部、吕宋海峡、东马来西亚西北部和越南最南端;第一模态和第二模态时间系数变化趋势均表明南海盐度锋强度在逐渐减小;前者呈单极子型空间分布,后者空间分布型则为偶极子型。第一模态时间系数功率谱分析表明该模态存在3—5年和7—16年的周期,Morlet小波分析显示1965—2000年该模态主要存在4年、9年和12年左右的周期。第一模态确立的3个负位相中心区域(海南岛以东、吕宋海峡和越南最南端)的均值变化趋势一致,强度都在逐渐增大,具有同位相变化特征;第二模态时间系数功率谱分析表明该模态存在3年、5年和8—12年的周期。Morlet小波分析表明1962—2001年期间该模态存在3年、5年和9—12年的周期。第二模态找出的两个正负位相中心分别在东马来西亚西北部和南海北部,前者盐度锋强度在逐渐减小,而后者强度却在持续增大,强度的年际变化呈现反位相变化特征。

关键词:南海;盐度锋;空间分布;年际变化

中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2012)06-0074-10

1 引言

海洋锋定义为某一个水文变量的梯度达到极大值的地方,由于水文变量可以是水温、盐度、密度等^[1]。从水团研究的观点来看,不同性质的水团,在水平方向上的边界称为海洋锋。海洋锋是水平方向毗邻的不同性质水团间的边界,是海洋学研究的一个重要领域。有关研究表明锋面通常是海洋中的高生产力区,鱼群通常沿锋面聚集形成渔场^[2-3]。

海洋锋的定量指标在海洋界目前尚无统一规定。国内外学者根据研究区域和研究目的不同,选取的海洋锋强度标准不一。对于黄东海来说,海洋锋的研究从上世纪80年代开始,汤毓详、郭炳火、Hickox、刘传玉等许多学者应用不同的资料,揭示了海洋锋的存在和初步的分布范围以及

变化特征^[4-8]。对南海而言,李立、王东晓等学者对海洋锋的研究也只停留在北部湾以及台湾海峡及其以西的海域范围^[9-11]。对于整个南海盐度锋的年际变化究竟有什么特点和规律,尚未见到相关的文章。盐度锋具有很强的季节变化规律,有一个问题就摆在我们面前:盐度锋的年际变化是不是也有规律,规律是怎么样的,有没有发生突变的情况。因此,本文主要研究这些问题。

2 资料和方法

所用资料来源于美国马里兰大学和美国德州农工大学共同研制开发的全球简单海洋同化分析系统SODA-2.1.6的月平均数据资料^[12-13]。SODA海洋数据集包含的变量有温度、盐度、海流速度、海表风应力、海洋上层0—500 m热含量、海洋上层0—125 m热含量、海平面高度等。水平分辨率

收稿日期:2011-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(40505024)

作者简介:赵宝宏(1986-)男,助理工程师,主要从事天气预报和物理海洋学研究。E-mail: baohong_zhao@163.com

为 $0.50^{\circ} \times 0.50^{\circ}$, 垂直方向上的分辨率为不等间距, 海表以下共 40 层, 深度(单位/m)分别为 5、15、25、35、46、57、70、82、96、112、129、148、171、197、229、268、317、381、465、579、729、918、1139、1378、1625、1875、2125、2375、2624、2874、3124、3374、3624、3874、4124、4374、4624、4874、5124、5374。覆盖时段为 1958 年 1 月—2007 年 12 月, 总共 50 年。

本文采用梯度法来确定每个格点的梯度值大小, 即: $GM = \sqrt{(\frac{\partial T}{\partial x})^2 + (\frac{\partial T}{\partial y})^2}$, 式中 T 代表盐度。梯度也就是盐度锋的强度大小。这样可以确定 50

年各月盐度锋强度的均方差分布, 可以看出盐度锋强度在哪些海域变化比较剧烈和异常。

另外, 使用经验正交函数(EOF)方法^[14-15]对盐度锋强度的距平场进行展开, 可以得到盐度锋强度的空间分布和时间系数, 通过功率谱和 Morlet 小波分析其变化趋势和周期变化, 可以得出盐度锋的年际变化特征。同时, 利用 Mann-Kendall 方法对某一序列做突变检测, 可以找出这个序列发生突变的情况。

3 盐度锋强度的均方差分布

为了解盐度锋强度在南海哪些区域变化比较

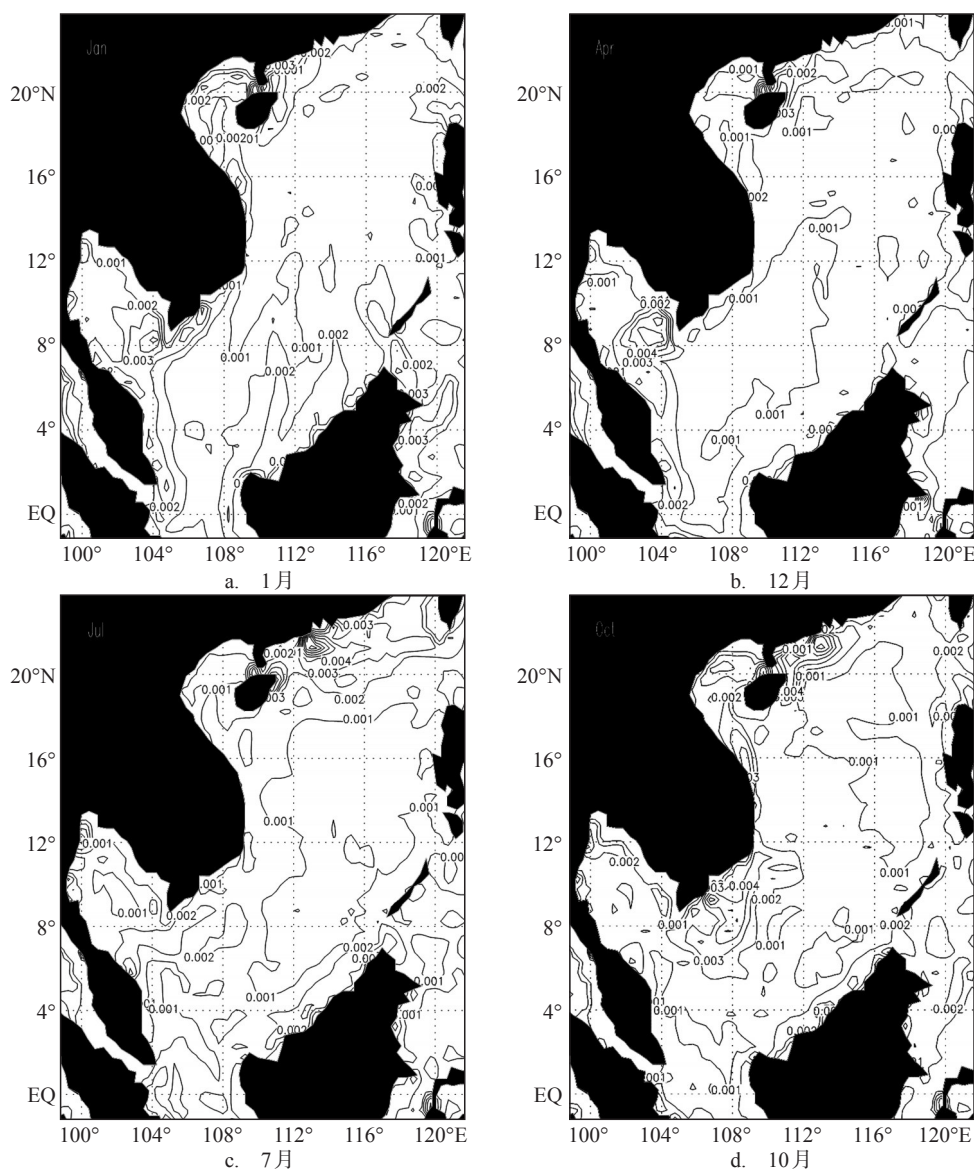


图1 南海盐度锋强度在1、4、7、10月的均方差分布(分别代表冬、春、夏和秋季)

表1 EOF展开前6个模态的方差贡献和North检验

模态数	1	2	3	4	5	6
方差贡献/%	4.55	4.15	3.15	2.77	2.55	2.20
是否通过North检验	是	是	是	是	是	是

突出，以便找出重点要作季节变化分析的区域。图1是1958—2007年50年盐度锋强度4个季节代表月份的均方差图(其余月份的均方差图略)。从图上可以分析出：盐度锋强度在以下6个地方异常增大，分别是在北部湾、海南岛以东及其南海北部、吕宋海峡、东马来西亚西北和越南最南端。具体来看，北部湾的盐度锋强度均方差只在秋冬两季节变化显著，可以达到0.002。南海北部均方差显著变化出现在夏秋两季，海南岛以东、吕宋海峡和东马来西亚西北部一年四季均方差都是大值分布区。这些规律说明，整个南海盐度锋强度具有很强的季节变化特点。同时，也说明盐度锋的季节变化也只是在某些区域变化比较显著，研究的重点可以落到这些相关海域。因此，揭示这种季节变化的规律和特点，对我们进一步认识南海的环流和水团混合，具有重要的意义和科学价值。

4 EOF第一模态的时空演变特征分析

盐度锋强度距平场EOF分解得到的前6个模态

的North显著性检验见表一。前6个主要模态的方差贡献分别是4.55%，4.15%，3.15%，2.77%，2.55%，2.20%，第一、二模态的异常位相中心基本覆盖了均方差的异常区域。因此，前两个模态基本代表了南海盐度锋强度的基本特征，本文主要分析盐度锋强度第一模态和第二模态的情况。

南海盐度锋强度距平场EOF分解得到的第一模态特征向量(解释总方差的4.55%)的空间分布型(见图2a)。从图上可以看出，该模态是南海盐度锋强度变率的主要形式：整个南海海域呈单极子变化特征。海南岛以东、吕宋海峡、越南最南端和东马来西亚西北部海域同位相变化，存在明显的负位相中心，其余海域包括整个南海海盆基本都呈现负位相。负位相中心与图1中均方差所呈现的极大值中心一致。

图3a为盐度锋强度距平场EOF分解的第一模态特征向量对应的时间序列图。时间序列代表了盐度锋强度空间分布的时间变化特征。从图上可以看出，盐度锋强度变化总趋势是减小的。盐度锋强度呈现周期性减小和周期性增大的规律。

为了分析盐度锋强度的周期性变化规律，对

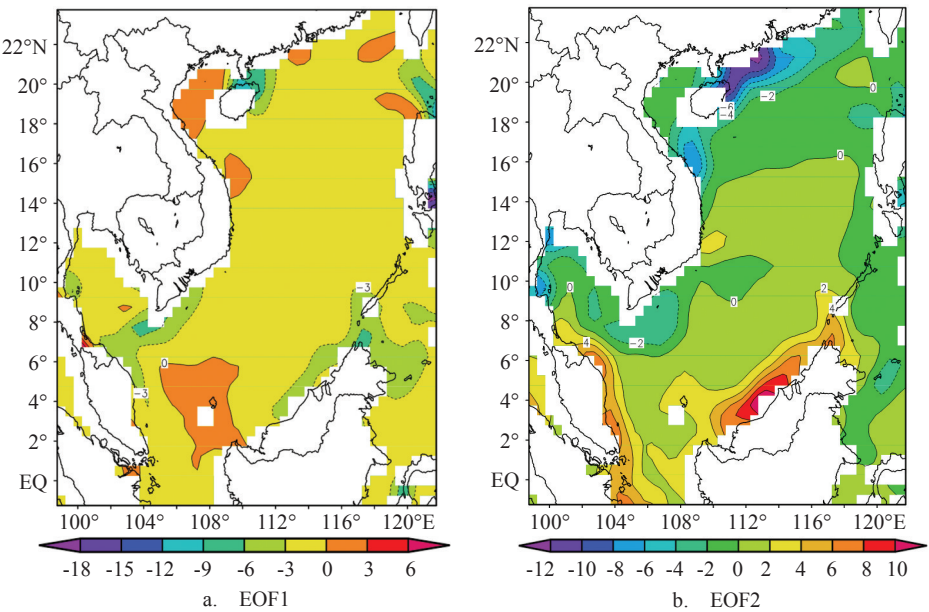


图2 盐度锋强度50年距平场空间分布

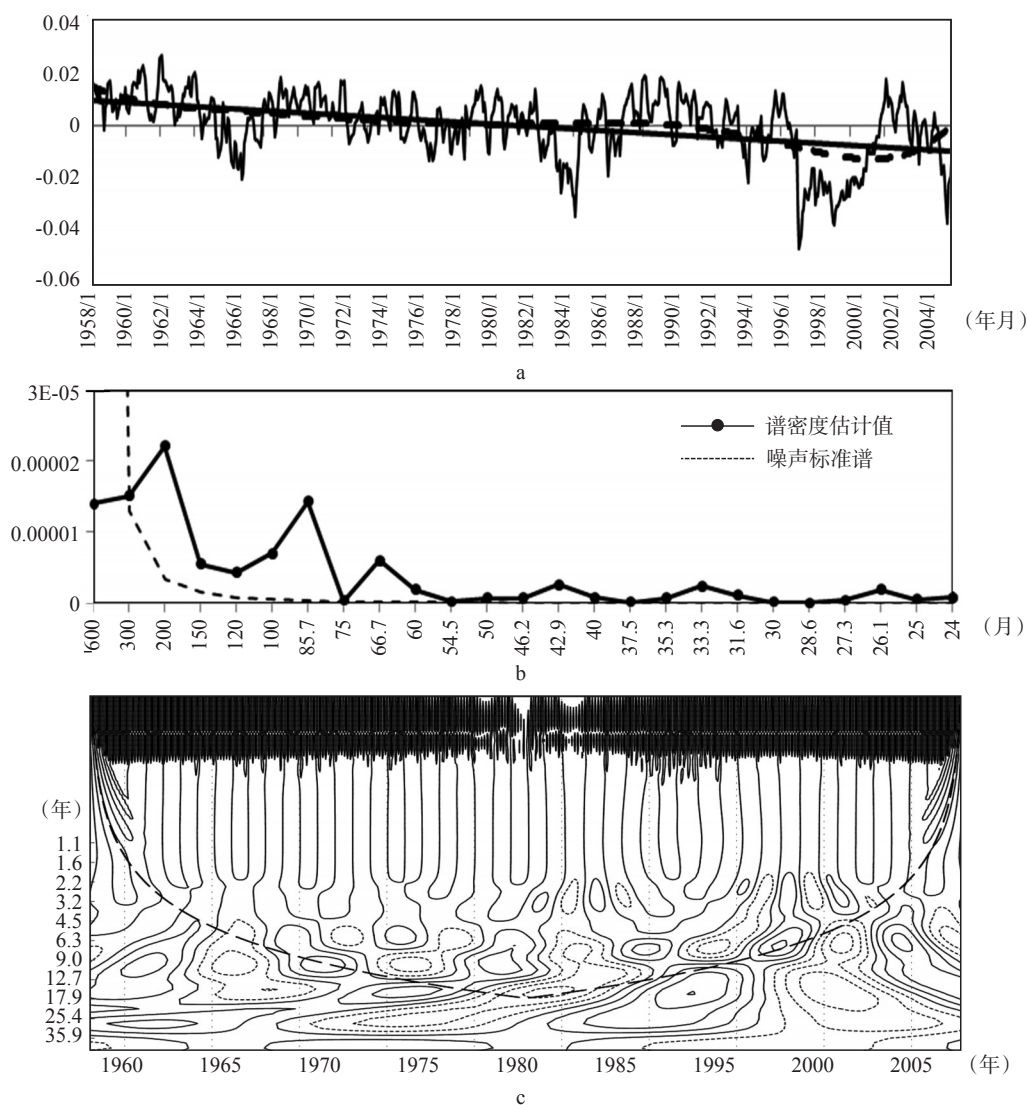


图3 盐度锋强度第一模态时间序列(a)、时间系数功率谱(b)和时间序列小波分析(c)

第一模态时间序列做功率谱分析。从图3b功率谱结果来看,该模态分别主要存在200、85.7、66.7和42.9个月的年际变化周期。为了进一步的分析发生周期的时间段,对时间序列做Morlet小波分析,见图3c。从结果来看,1965—2000年主要存在4、9和12年左右的周期。

图2a确定的第一模态3个负位相中心(110.75°E, 20.25°N)、(121.25°E, 19.75°N)和(103.75°E, 7.75°N),分别在海南岛以东(109.75°—111.75°E, 19.25°—21.75°N)、吕宋海峡(118.25°—121.75°E, 18.75°—20.75°N)和越南最南端(102.25°—104.25°E, 7.75°—9.75°N)。然后对上述负位相中心所在区域的盐度锋强度分别进行突变检测。

图4a是盐度锋强度在海南岛以东选取的负位相中心区域的50年平均值变化图。从图中看出1958—1981年之间,海南岛以东的盐度锋强度基本维持在一个稳定的数值0.005 psu上下,之后强度开始急剧增大,1981年之后盐度锋强度基本维持在0.007 psu左右。

图4b是盐度锋强度在海南岛以东选取的负位相中心区域的50年均值变化M-K检验。从UF正序列曲线来看,1981年前后UF和UB曲线相交且位于临界线内,因此,1981年前后可以认为是发生了一次突变,强度急剧增大;并且1981年以后UF曲线一直大于零,表明盐度锋强度一直在增大。这与图4a分析结果一致。

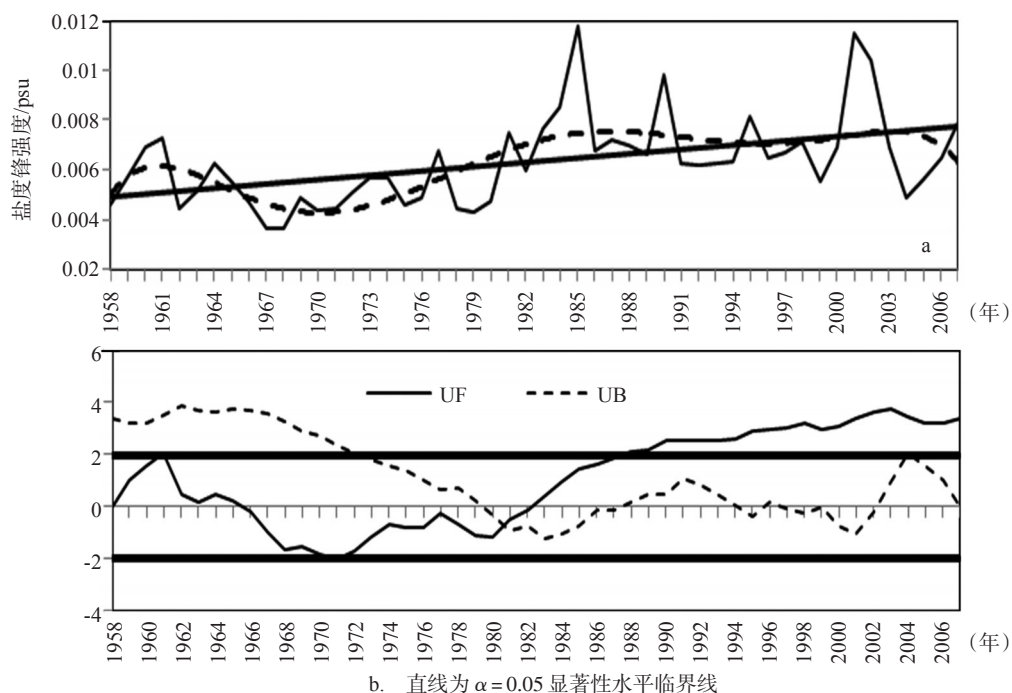


图4 盐度锋强度在海南岛以东选取区域的50年平均值变化(a)及其M-K突变检测(b)

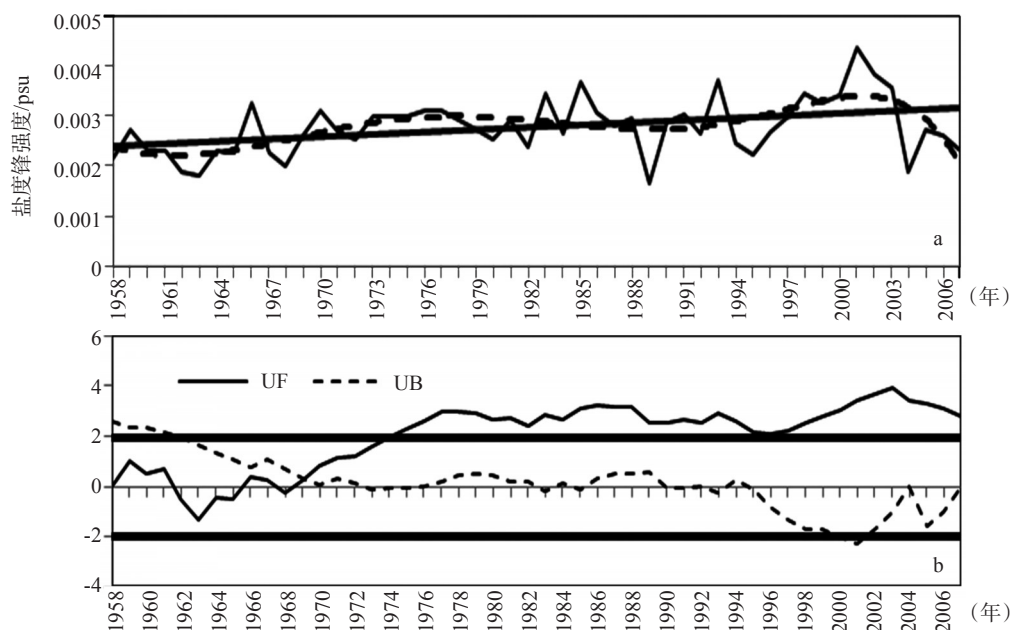
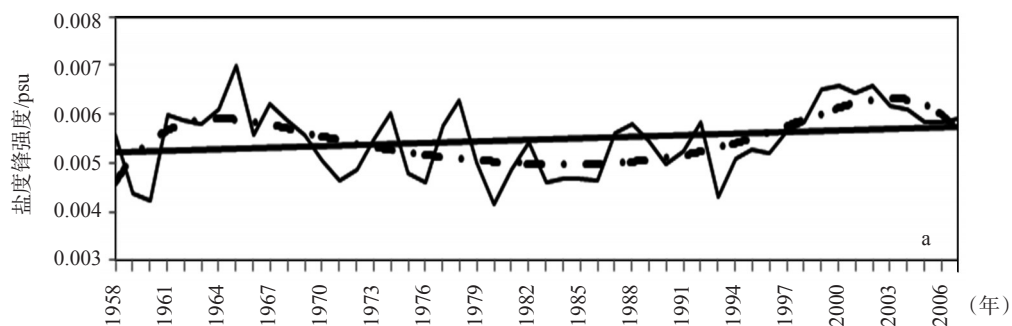


图5 盐度锋强度在吕宋海峡选取区域的50年平均值变化(a)及其M-K突变检测(b)



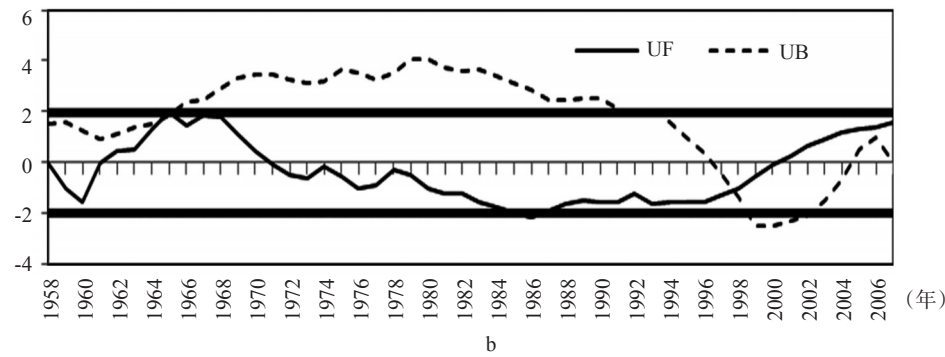


图6 盐度锋强度在越南最南端选取区域的50年平均值变化(a)及其M-K突变检测(b)

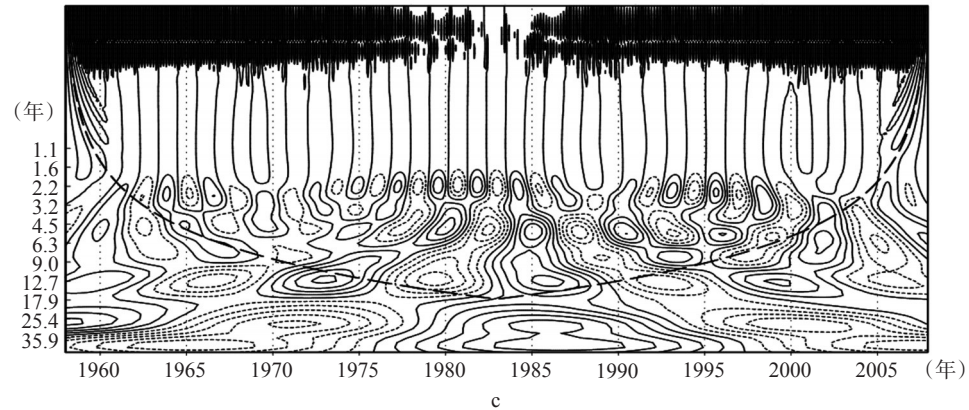
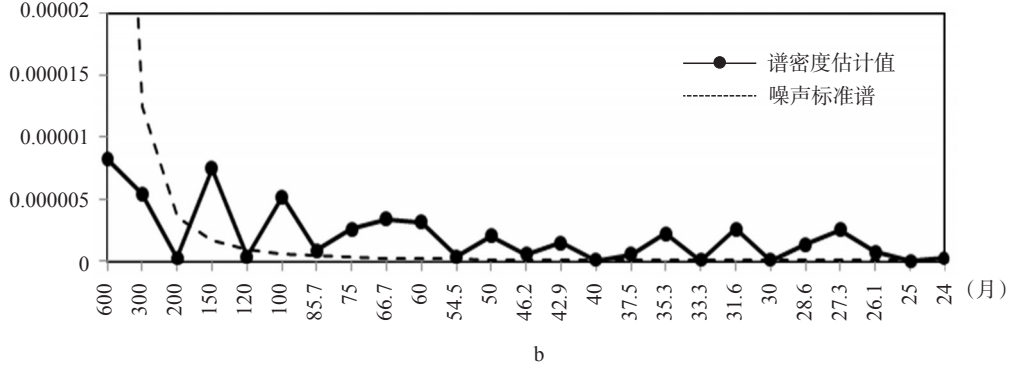
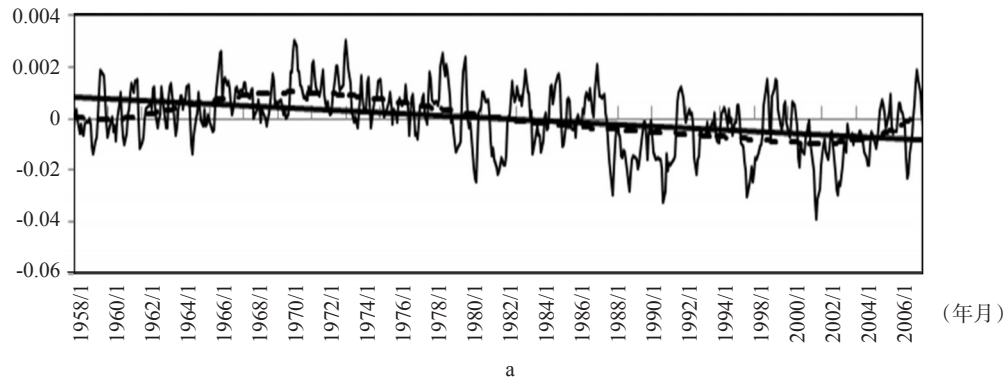


图7 盐度锋强度第二模态时间序列(a)、时间系数功率谱(b)和时间序列小波分析(c)

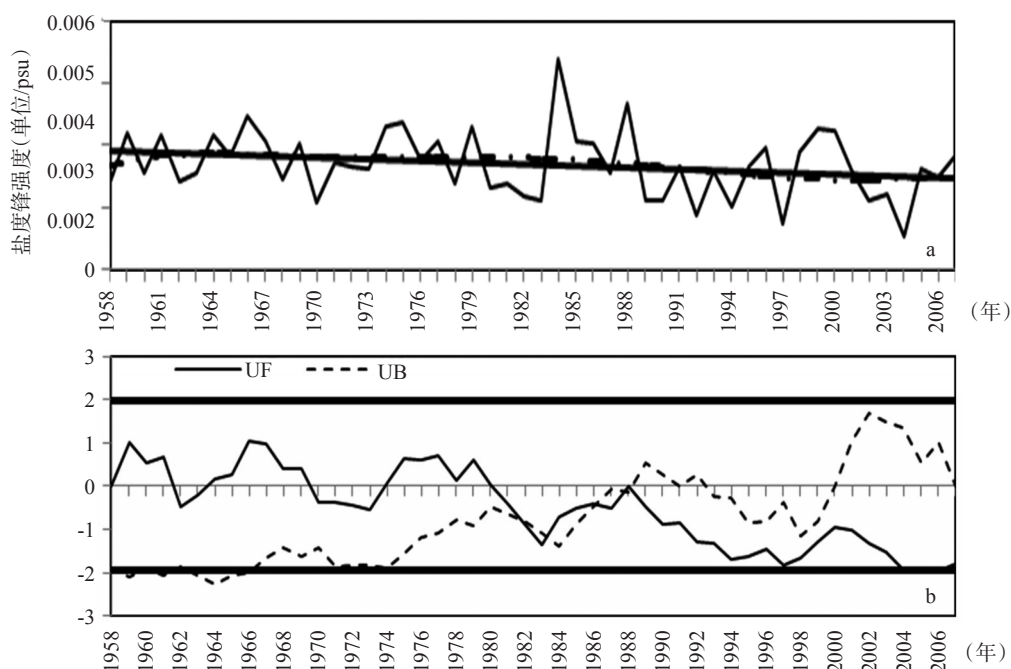


图8 盐度锋强度在东马来西亚西北部选取区域的50年平均值变化(a)及其M-K突变检测(b)

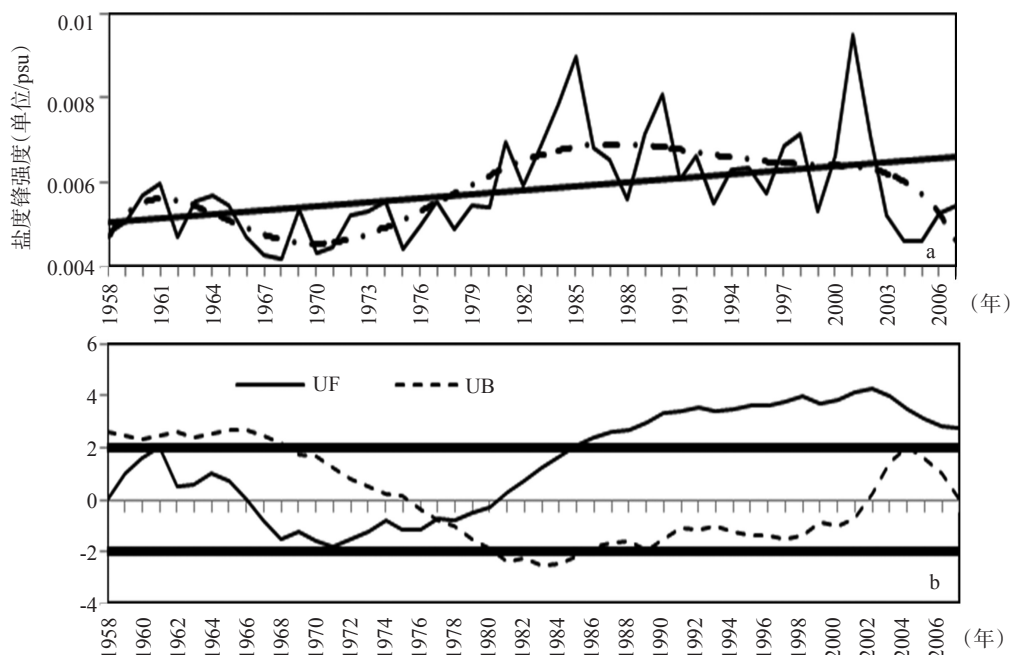


图9 盐度锋强度在南海北部选取区域的50年平均值变化(a)及其M-K突变检测(b)

下面我们来分析吕宋海峡的负位相中心50年的面积均值变化(见图5a)。从线性倾向看,吕宋海峡的盐度锋强度变化总趋势也是逐渐增大的,强度呈现周期性增大和减小的螺旋式上升,增大的幅度很小,不超过0.001 psu/50 a。结合吕宋海峡面积均值的M-K突变检测的图5b可以看出,UF

和UB曲线在1969年相交,说明1969年发生了一次突变,之后强度显著增大。

下面接着分析处在越南最南端的负位相中心所在区域的盐度锋强度50年面积均值变化情况(见图6a)。可以看出,盐度锋强度50年的变化总趋势是强度缓慢增大的。具体来说,1965—1980年,

强度在减小,1980—1996年左右强度基本保持不变,之后强度急剧增强。为了反映这种突变发生的情况,图6(b)是对越南最南端负位相中心所做的面积均值的M-K突变检测。可以看到,UF和UB曲线相交点处在1997年且位于临界线之内。因此,1997年既是一个突变点,UF曲线在2000年之后一直大于零,所以越南最南端盐度锋强度增大显著。

5 EOF第二模态的时空演变特征分析

南海盐度锋强度距平场EOF分解得到的第二模态向量的空间分布型(见图2b),向量的解释总方差为4.15%。空间分布呈现偶极子型,基本沿着南海东北-西南方向把正负位相分开,左上部分为负位相,右下部分为正位相分布,整个南海的强度变率存在一正一负相反的中心,两个中心的位置分别在东马来西亚西北部和南海北部。这两个海域的盐度锋强度在均方差图上很显著。说明南海除了这两个正负中心所在海域有变化外,南海其余地方的盐度锋强度发生变化不大。

图7a为盐度锋强度第二特征向量对应的时间序列的50年变化趋势。从图上可以看出,线性倾向估计线表明盐度锋强度是逐渐减小的,Cubic拟合曲线说明盐度锋强度有周期性变化特征。因此,我们后面主要分别来研究正负中心的年际变化情况。

进一步分析第二模态时间序列的功率谱,结果见图7b。可以看出,该模态主要存在150、100、60和35.3个月的年际变化周期。对该模态的时间序列进行Morlet小波分析,结果见图7c。可以得出,1962—2001年期间存在3年左右的周期,1973—1999年存在5年左右的周期,1977—1988年存在9—12年的周期。

由以上讨论可以发现,盐度锋强度第二模态对应的时间序列所反映的强度在整个南海来说,整体上强度也是逐渐减小的。但从第三节均方差图上可以知道,整个南海的盐度锋强度的差异性是很明显的。且从图2(右)的第二模态空间分布型上可以看到,南海存在年际变化尺度显著的正负位相中心,东马来西亚西北部(110.25° — 115.75° E, 2.25° — 6.25° N)和南海北部(109.25° — 114.25° E,

19.25° — 21.75° N)。

首先,我们先分析正位相中心在东马来西亚西北部海域的盐度锋强度变化。图8a给出了这个区域的盐度锋强度50年面积均值的变化情况。可以看出,Cubic拟合曲线和线性倾向曲线基本重合,强度变化的总趋势是逐渐减小的。结合图8b盐度锋强度在这个区域的50年均值M-K突变检测结果来看,UF和UB曲线在1983年相交,说明突变在1981年发生,并且UF曲线一直小于零,说明盐度锋强度是显著减小的。

下面接着分析第二模态负位相中心在南海北部的盐度锋强度变化情况。图9a给出了其50年面积均值的变化。从线性倾向看,强度的变化总趋势逐渐增大的。1958—1980年,强度基本维持在0.005 psu的数值上。结合图9b面积均值的M-K突变检测结果来看,1977年正序列UF和逆序列UB曲线相交,说明一次突变开始,1980年后UF曲线一直大于零,说明突变发生后,强度是逐渐增大的,甚至1984年UF曲线超过了临界线,说明强度显著增大。

6 结论

结合对盐度锋强度距平场所作EOF展开的空间分布图,通过对其第一模态和第二模态时间序列的分析,加上时间序列的功率谱和Morlet小波分析,可以确定整个南海盐度锋强度的年际变化特征和周期规律。然后结合盐度锋强度均方差的分布特征,对确定的正负位相中心作面积均值变化分析和M-K突变检测,来探讨南海盐度锋关键区的年际变化趋势。为以后的理论分析和资料验证提供一个参考依据。得到以下主要结论:

(1) 通过盐度锋强度的均方差分析,发现了6个强度显著变化的海域,分别是北部湾、海南岛以东及其南海北部、吕宋海峡、东马来西亚西北和越南最南端。与第一模态和第二模态的位相中心位置基本一致。

(2) 盐度锋强度EOF展开第一模态:第一模态的空间分布主要呈现单极子型分布,存在的三个负位相中心分别在海南岛以东、吕宋海峡和越南最南端,其余海域呈负位相变化。作为主模态,反映了盐度锋强度主要的变率信息。从时间

序列看,盐度锋强度变化总趋势在逐渐减小,周期分析显示出该模态存在200、85.7、66.7和42.9个月的周期,Morlet小波分析表明1965—2000年期间主要存在4年、9年和12年左右的周期;

3个负位相中心区域的均值变化趋势一致,强度都在逐渐增大。强度都发生急剧增大的突变点,但发生时间不同。总的来看,整个南海盐度锋强度在减小,而只有小范围区域的强度在增大。至于如何解释这一现象有待于进一步研究;

(3) 盐度锋强度EOF展开第二模态:第二模态的空间分布呈现偶极子型,基本沿着南海东北-西南方向把正负位相分开,左上部分为负位相,右下部为正位相分布。正负位相中心分别位于东马来西亚西北部和南海北部。盐度锋强度在该模态下总趋势也是逐渐减小的,但减小幅度不大。从功率谱分析表明该模态存在150、100、60和35.3个月的周期。Morlet小波分析表明1962—2001年期间存在3年左右的周期,1973—1999年存在5年左右的周期,1977—1988年存在9—12年的周期。

东马来西亚西北部正位相中心突变的时间是1983年,南海北部负位相中心的突变时间是1977年。前者突变发生后,强度却在减小,而后者却显著增大。结果表明,两个正负位相中心的盐度锋强度的年际变化呈现反位相变化特征。

参考文献:

- [1] Gunnar I.Roden. Thermohaline Structure, Fronts, and Sea-Air Energy Exchange of the Trade Wind Region East of Hawaii[J]. Journal of Physical Oceanography,1974,(4): 168-182
- [2] 张瑞安,郑东. 黄海西部春季海洋锋及其与渔业的关系[J].海洋科学,1984(1):5-8
- [3] 林传兰. 东海黑潮锋的海洋学特征及其与渔场的关系[J].东海海洋, 1986,4(2):8-16
- [4] 汤毓详,郑义芳.关于黄、东海海洋锋的研究[J].海洋通报,1990,9(5):89-96.
- [5] 汤毓详.东海海洋锋分类的初步探讨[J].黄渤海海洋,1995,13(2): 16-22.
- [6] 郭炳火,万邦君,汤毓详.东海海洋锋的波动及演变特征[J].黄渤海海洋,1995,13(2):1-10.
- [7] Ryan Hickox,Igor Belkin,Peter Cornillon, et al. Climatology and Seasonal Variability of Ocean Fronts in the East China, Yellow and Bohai Seas From Satellite SST DATA[J].Geophysical Research Letters, 2000,27(18):2945-2948.
- [8] 刘传玉,王凡. 黄海暖流源区海表面温度锋的结构及季节内演变[J]. 海洋科学, 2009,33(7):87-93.
- [9] 罗琳,王东晓,刘赞等.北部湾温度锋的季节与年际变化[J]. 热带海洋学报,2003,22(4):60-67.
- [10] 李立,郭小钢,吴日升.台湾海峡南部的海洋锋[J].台湾海峡, 2000,19(2):147-156.
- [11] Dongxiao Wang,Yun Liu,Yiquan Qi, et al. Seasonal variability of Thermal Fronts in the Northern South China Sea from Satellite Data[J], Geophysical Research Letters,2001,28(20): 3963-3966.
- [12] Carton, James A., Benjamin S. Giese. A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA) [J]. Monthly Weather Review, 2008,136, 2999-3017.
- [13] 李莹,朱云.国家自然科学基金委员会地球科学部南京信息工程大学大气资料服务中心资料通讯:SODA月平均海洋数据集简介[J]. 南京气象学院学报,2006,(6):864-865.
- [14] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社, 1999.
- [15] North G.R, Bell T, Cahalan R, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function[J]. Monthly Weather Review, 1982,110:699-706.

Inter-annual variability of salinity front in the South China Sea

ZHAO Bao-hong¹, LIU Yu-d¹, FU Bang-yu

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China; 2. No. 71320 troops of PLA, Kaifeng 475003 China)

Abstract: Based on the 50 years SODA monthly data (1958—2007 years), the standard deviation and empirical orthogonal function studies is used to investigate inter-annual variation of surface salinity front under 5 meters in the South China Sea. The results show that the area of the remarkable inter-annual variability of the salinity front concentrates in the northern Gulf, east of Hainan Island & the northern South China Sea, the Luzon Strait, north-west of East Malaysia and northern South China Sea. The time series trends of the first mode and the second mode show that the intensity of salinity front is both decreasing. Spatial distribution type of the former is unipolar and the latter is dipole. The power spectral analysis of the first mode time coefficients shows that there are 3 to 5 years and 7 to 16 years cycle. Morlet wavelet analysis shows that from 1965 to 2000 it mainly exists 4, 9 and 12 year cycle or so. The mean strength of three negative phase central region (Hainan Island, east of Luzon Strait and the southernmost tip of Vietnam) established by the first mode is gradually increasing, with the same phase variation trend. Power spectrum analysis of the second mode time coefficients indicate that the mode exists 3, 5 and 8 to 12 years cycle. Morlet wavelet analysis shows that during the period 1962 to 2001, there are 3, 5 and 9 to 12 years cycle. Two positive and negative phase center identified by second mode is respectively in northwest of Malaysia and the northern South China Sea, and the strength of the salinity front of the former is gradually reducing, but the latter increasing. The inter-annual variability of strength shows the anti-phase variability characteristics.

Key words: the South China Sea; salinity front; spatial distribution; inter-annual variability