

南海混合层深度的季节和年际变化特征

武扬, 程国胜

(南京信息工程大学, 数学与统计学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 利用1871—2008年SODA资料和月平均的Levitus资料计算了南海混合层深度(MLD)的季节及年际变化特征。资料分析表明: 季风通过流场调整对南海MLD的时空分布特征有显著的影响。南海MLD的距平变化总体上呈上升趋势, 南海南部MLD的距平变化趋势和北部的有显著差异, 特别在1955年后北部整体呈下降趋势而南部呈上升趋势, 二者的显著周期北部为2—3年, 南部与整个区域平均的基本相似有2—6年的显著周期。SOI指数对滞后的南海各个区域有较好的相关性。EOF分析表明第一模态整体呈单极型最大变率分布在南海南部, 由南往北逐渐减小显著周期2—3年变化为主; 第二模态呈偶极子型, 显著周期以2—5年变化为主。回归分析表明南海南部深水区域呈现增深的趋势, 而吕宋海峡至南海北部陆架区呈变浅趋势, 滑动t检验表明南海MLD有6个显著的突变年份。

关键词: 南海; 混合层深度; 季节和年际变化; EOF分析

中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0239(2013)03-0009-09

1 引言

混合层是海洋的上边界层, 它的上界面同时又是大气的下界面。在大尺度海气相互作用中, 能量、动量和物质交换主要通过混合层进行。相对于海洋中的温跃层而言, 混合层随时间急剧变化, 更明显的体现海洋对大气强迫的响应。在动力强迫、热力强迫及淡水通量作用下, 混合层呈现明显的季节、年际变化特征^[1]。

南海地处低纬, 属于热带深海, 它是联系太平洋及印度洋的海上重要通道, 同时又是印度季风与亚洲季风的中间地带, 无论地理位置还是其对大气环流、气候的影响都有着重要的地位。对于南海这样一个具有较大面积的热带深水边缘海, 在季风作用下其上层海洋存在明显的季节性反转^[2]。在季风转换期风力较弱, 上层海水垂直混合也较弱上混合层较薄主温跃层上抬, 而在季风盛行期则相反最大的混合层厚度多偏于海盆盛行风向右侧海域, 即冬

季出现于海区偏西海域, 夏季出现于东部海域。此外, 混合层的厚度在有回流或暖涡存在的海域也较大, 而在有冷涡存在或涌升流较强的海域则较小^[3]。同时上层海洋的热状况也存在明显的季节性变化^[4-5]。通过混合层的质量、动量和能量的输送提供了几乎海洋的全部动能。混合层深度对净热通量的分配、近表层声速场分布及海洋生态等均具有重要影响^[6]。混合层深度直接反应了上层海洋对各种外界强迫响应的强度, 是刻画海洋混合层的一个重要物理参数, 它对净热通量的分布、海表温度异常的季节变化、障碍层的形成、模态水的形成和变化及海洋声学 and 生态动力学等都具有重要影响^[7]。关于南海混合层及上层水温前人已经做了不少的研究: Jin等^[8]使用HadISST资料分析了中国海海表面温度(SST)的多时间尺度变化发现, 季节变化明显, 年际变化主要集中在深海盆区域, 年代际变化比较明显的区域在长江口附近。Wang等^[9]分析了南海SST的年际变化与ENSO的关系。Qu等^[10]用

收稿日期: 2012-02-27

基金项目: 中国科学院南海海洋研究所LED开放课题(LED1004)

作者简介: 武扬 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: wuyanggood@163.com

WOD01的资料分析了南海等温线深度的季节循环发现,其除了受海气界面的强迫作用的影响外还受制于Ekman抽吸以及黑潮通过吕宋海峡的入侵。年平均的等温线深度存在两个高值区,集中在南海北部的陆架区和南部的深水区,主要是受冬夏季风的作用。同时混合层深度的变化对大气也有一个反馈作用特别是在夏季风发展阶段^[11]。杨海军等^[12]分析了南海上层海洋的热量收支情况,并指出上层海洋热含量的变化与海洋中热量输运以及垂直运动紧密联系;刘秦玉^[13]利用1998年“南海季风实验(SCSMEX)”南北部2个点的资料,计算了潜热通量、感热通量和风应力,分析了南海上混合层动力、热力特征及其与南海夏季风爆发的关系;杜岩等^[1]利用Levitus 1994版气候平均温盐资料剖析了混合层深度及其内部温度的季节变化规律;刘秦玉等^[14]用一维湍动能模式对南海南部的SST及混合层进行数值模拟和数值试验。孙成学等^[15]分析了南海混合层深度的季节及年际变化特征。

本文借助多年的SODA(Simple Ocean Data Assimilation)资料和气候平均的温度资料通过对混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)的分析,得到了其多时间尺度的分布特征,并试图对其变化特征给出相应的解释。亦讨论了MLD对ENSO的响应和其变化趋势以及其突变特征。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用SODA SST数据,其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间跨度为1871—2008年分辨率为一个月,垂向为40层。包括的海洋再分析要素为海表面高度、三维温度、盐度和海流。也使用了1994年版Levitus多年气候平均的逐月温度资料,该资料在垂直方向1000 m深度上分为19层,水平方向的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。用3次样条方法将SODA、Levitus温度数据在垂直方向插值成1 m间隔的数据。关于混合层深度的定义本文采用类似于Huang等^[16]的定义方式,是以温度的阶跃代替密度的阶跃。由于海洋中温度或密度层化是连续的,故混合层的深度定义也不是唯一的。由于南海地处热带海区,降水较为频繁,在风速度较小、垂直混合弱、降水较为剧烈时,常

常出现“淡盖”现象,造成在表层海水出现密度梯度较大的“浅混合层”现象^[15]。文献[6]中采用的定义方法为:选取比近表层10 m深处温度低 0.8°C 所在的深度来定义混合层深度。文中将表层温度取为表层10 m的平均温度,以减小局地异常值的影响。采用上述方法,可以使混合层的深度减少受“淡盖”的影响^[15]。综合参考文献[6]、[15]中的定义方法所以本文关于混合层的定义为:求出比表层10 m平均温度低 0.8°C 的深度位置,将该深度定义为混合层深度。

2.2 方法

为了侧重分析南海MLD的异常情况减小季节周期性的影响,本文对MLD的距平进行分析,并用落后交叉相关分析法分析MLD的距平和SOI指数的相关性,分析MLD对ENSO的响应情况,进一步用最大熵谱方法分析其显著性周期。然后利用经验正交函数分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)方法对MLD进行时空特征分析。在分析年际变化时为消除季节变化的影响,对每个测点的时间序列扣除其年以下的信号再对其进行EOF分解,用以探讨此区域MLD的年际变化特征。进一步对每个格点进行回归分析得到其变化趋势,最后对年平均的MLD的距平进行滑动T检验探讨其突变特性。

3 季节变化特征

混合层深度受多种因素的影响,如风应力、太阳辐射、海气间的感热通量和潜热通量,另外它也受局地涡旋的影响,南海混合层的深度在此诸多要素的共同影响下而存在着季节和年际的变化。

图1给出了南海混合层深度的季节平均分布(春a、夏b、秋c、冬d)、年平均分布(e)以及季节变化的标准差(f)分布。由图1b可以看出夏季由于西南季风盛行Ekman输运在东南海区堆积,混合层深度由南向北逐渐递减高值中心在南海东南部。冬季(见图1d)南海上层在东北季风强迫下,Ekman漂流在中国近岸陆架约束作用下在南海西北陆架区堆积,南海混合层表现为西北较厚东南较浅的分布结构。春季(a)为冬季风向夏季风转换期间冬季风减弱所提供的能量不能维持深的混合层深度因此混合层深度变浅,此时的分布特征仍然是由北向南逐

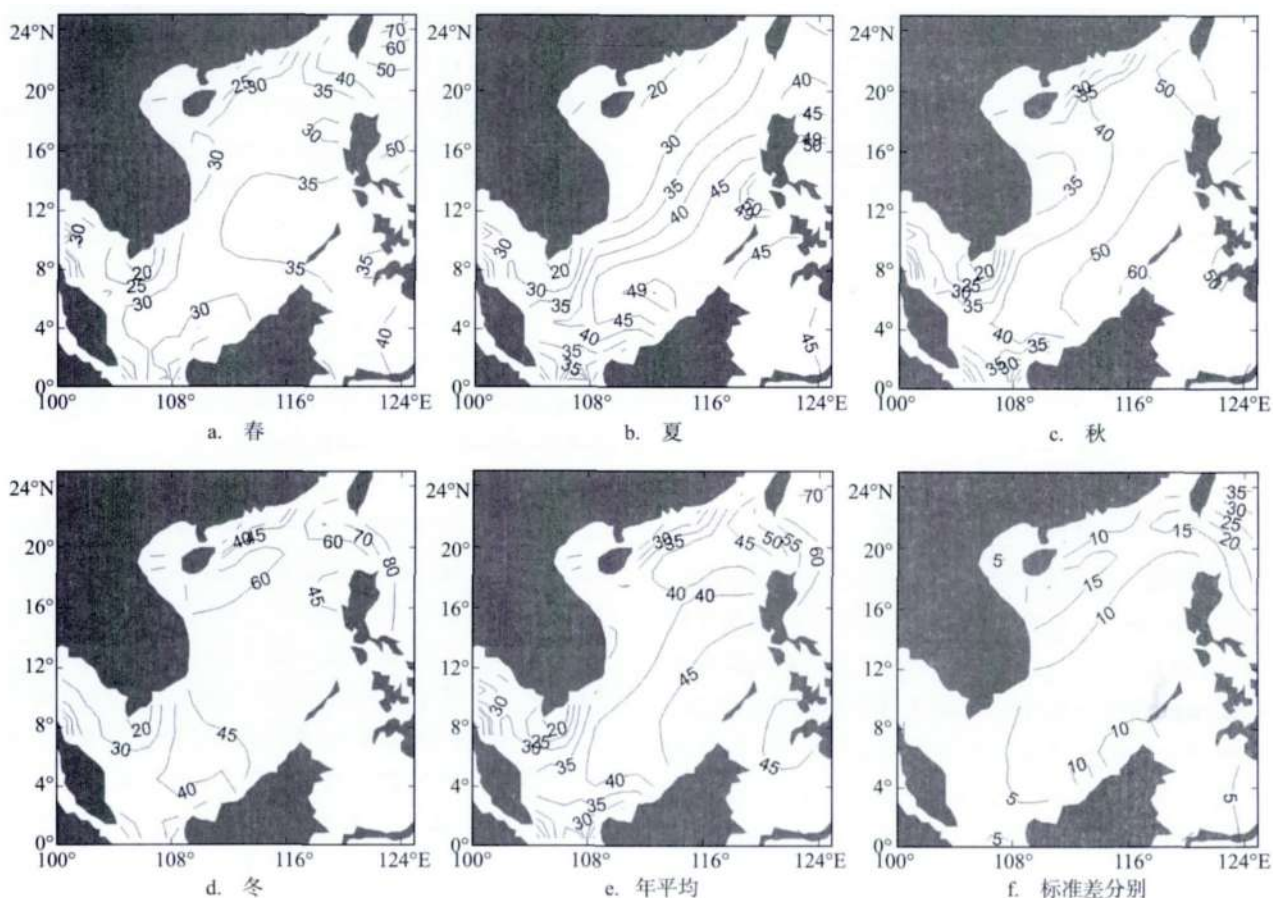


图1 南海混合层深度的季节平均、年平均、季节标准差分布

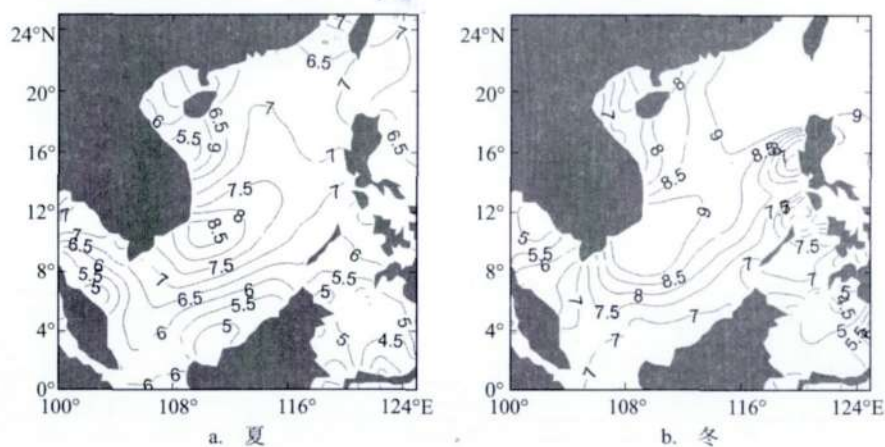


图2 风速的季节平均分布

渐变浅。秋季(c)为夏季风向冬季风转换期,混合层深度在整体上变浅,但仍然保持住夏季分布形态为:由南向北逐渐变浅。混合层年平均的分布形态(e)为南海北部以及南部各有一个高值区域,北部的高值区表现的是受东北季风的影响,南部的高值区

表现的是受西南季风的影响。季节变化的标准差(f)大值区主要集中在吕宋海峡和西北陆架区,因在西北陆架区存在丰富的地面径流。另外在加里曼丹岛的西北侧变化也较大。混合层的水平分布特征与贾英来等^[17]和蔡树群等^[18]的分析结果是一致的。

图2为南海海表面风速的冬(b)夏(a)季分布,在南海南部冬季风强于夏季风,但混合层深度在冬季反而要比夏季浅一些。这是因为冬季风所驱动的环境为一气旋式环流海水在垂直方向上呈上升运动;而夏季风所驱动的环境为一反气旋式环流海水在垂直方向上呈下沉运动。这样一来,在相同风速条件下,南海夏季混合层也就会发展到比冬季较大的深度上。季风通过流场调整对南海混合层深度有着明显的影响。

4 年际变化

4.1 混合层深度的距平变化特征

南海混合层深度年循环的空间分布在南海南、北部各存在一个高值区域,二者的影响机制是不同的:北部的高值中心主要受到冬季东北季风的影响和Ekman抽吸的作用使水体在这区域堆积;南部的高值中心主要受到夏季西南季风的影响^[10]。而二者和海气界面热通量和风应力也有很好的相关性^[10]。由下文图中图9混合层变化趋势分析可知:在南海北部和南部的大部分区域呈现出完全相反的变化趋势。另外年际变化EOF分析的第二模态的空间分布也呈现出南部和北部完全反对称的结构,这都说明在南部和北部的区域影响混合层的机制是不同的。因此以 18°N 为界把南海分为南部和北部对混合层深度的变化进行分析。

对南海海区内的所有点进行算术平均,计算其

年距平变化序列,同时为减小极端异常事件对长期趋势的影响对MLD的距平值做了5a的滑动平均。南海海区的年平均MLD距平变化范围为 $-4\sim 4\text{ m}$ (见图3a),最大值发生在1938年,最小值发生在1877年。在1910年之前MLD主要呈现为负距平,1910—1955年MLD呈现正距平,在此期间MLD变化比较明显。1955—1996年MLD变化比较平稳,1996—2008年MLD呈明显的上升趋势。利用最大熵谱分析计算南海MLD的显著性周期(见图3b),分别有2.3年、3.7年、6年的显著周期,最显著的周期为6年,这与ENSO的变化周期相当。

将南北部两个海区的MLD进行对比(见图4),二者的变化曲线是不完全一样的,南海南部的变化最剧烈达到 $-4\sim 4\text{ m}$,北部变化范围为 $-3\sim 4\text{ m}$ 。南部的变化趋势基本上和整个区域的年变化相当,北部在1910年前基本上呈现为负距平。但在1981—1987年的正距平期间北部的5点滑动值达到 2 m 远大于同时期的南部和整个区域平均的距平值。在北部1955年以后都呈现为负距平,而南部基本上呈现为正距平且为上升趋势。这说明在南海影响MLD的机制在南部和北部是不同的。南海MLD的显著性周期(见图5),北部的最显著周期为3年,南部与整个区域平均的基本相似有2.3年、3.7年、6年的显著周期,最显著的周期为6年。

4.2 EOF分解结果

借助EOF分解及功率谱分析,对南海混合层深度的年际变化特征进行研究。对混合层深度求距

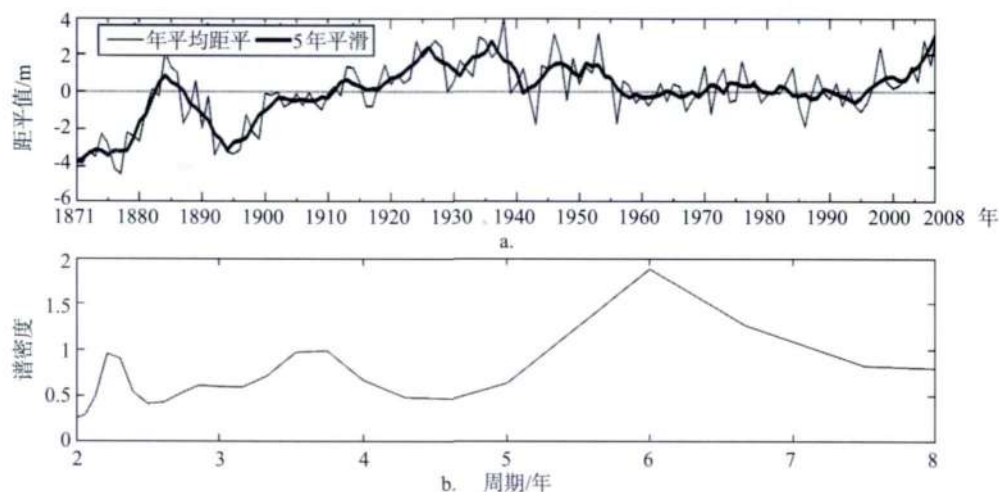


图3 年平均的MLD距平(a)、及其最大熵谱分析(b),粗线为5年平滑值

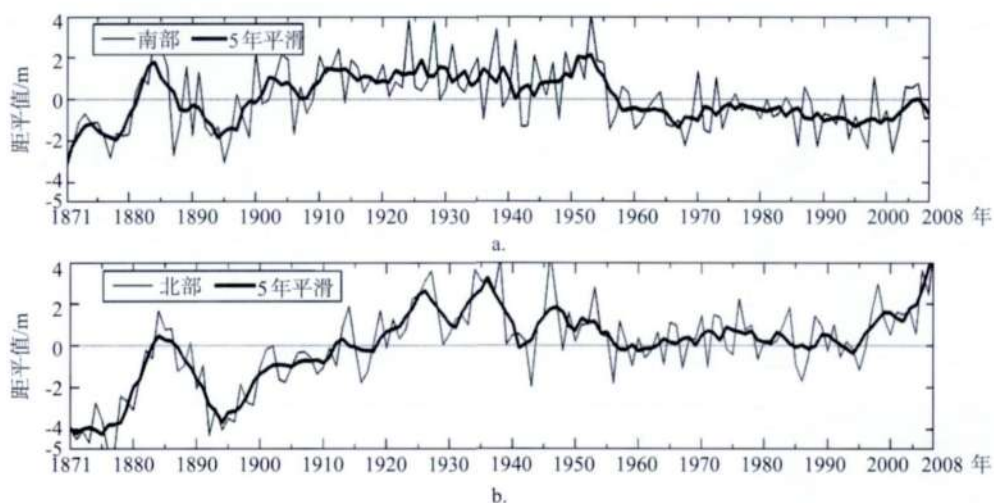


图4 南海南部(a)、北部(b)混合层深度年距平,粗线为5年平滑值

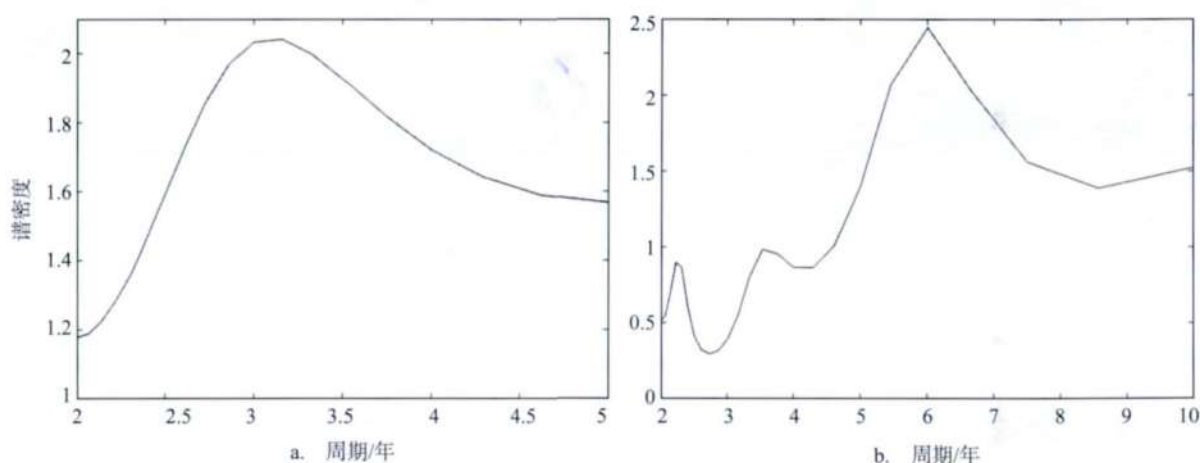


图5 南海北部(a)、南部(b)混合层深度显著性周期

平场,且进行1a以上高通滤波去掉周期小于1a的信号,得到它所对应的几个主要模态的空间分布及其时间序列。然后对时间序列进行功率谱分析。其前两个主要模态的方差贡献分别是28.3%、19.2%。

南海混合层深度距平EOF分解得到的第一模态特征向量的空间分布型见图6a。该模态是南海混合层深度变率的最主要的形式,菲律宾附近海域除外其空间分布明显为单极型,整个南海混合层深度的变率基本上呈同相分布。然而其深度的变率分布也并非均是均一的,最大深度变率中心在南海的东南部,由南往北逐渐减小。在菲律宾海区呈现正的变率,可能与黑潮流经此区域有关。对该时间序列进行功率谱分析(见图7a),得到其主要的变化周

期为10—20,25—33,35—37个月,以2—3年变化为主。从时间序列(6b)中还可以看出其有更长时间尺度的变化趋势如:1960—1969年整体呈下降趋势;1970—1996在零线上下波动,有个别年份变化比较大;1997—2008年整体呈上升趋势。

南海混合层深度距平EOF分解得到的第二模态特征向量的空间分布型见图6b,其空间明显为一南北的偶极子型,整个南海混合层深度变率存在2个正负相反的中心,位置分别在 20°N 和 11°N 。从吕宋海峡到南海北部陆架区整个为正的变率,是受黑潮通过吕宋海峡对南海入侵的影响。对其时间序列进行功率谱分析(见图7b),得到其主要的变化周期为18—21,26—30,66—70个月同时也表现了ENSO的信号。

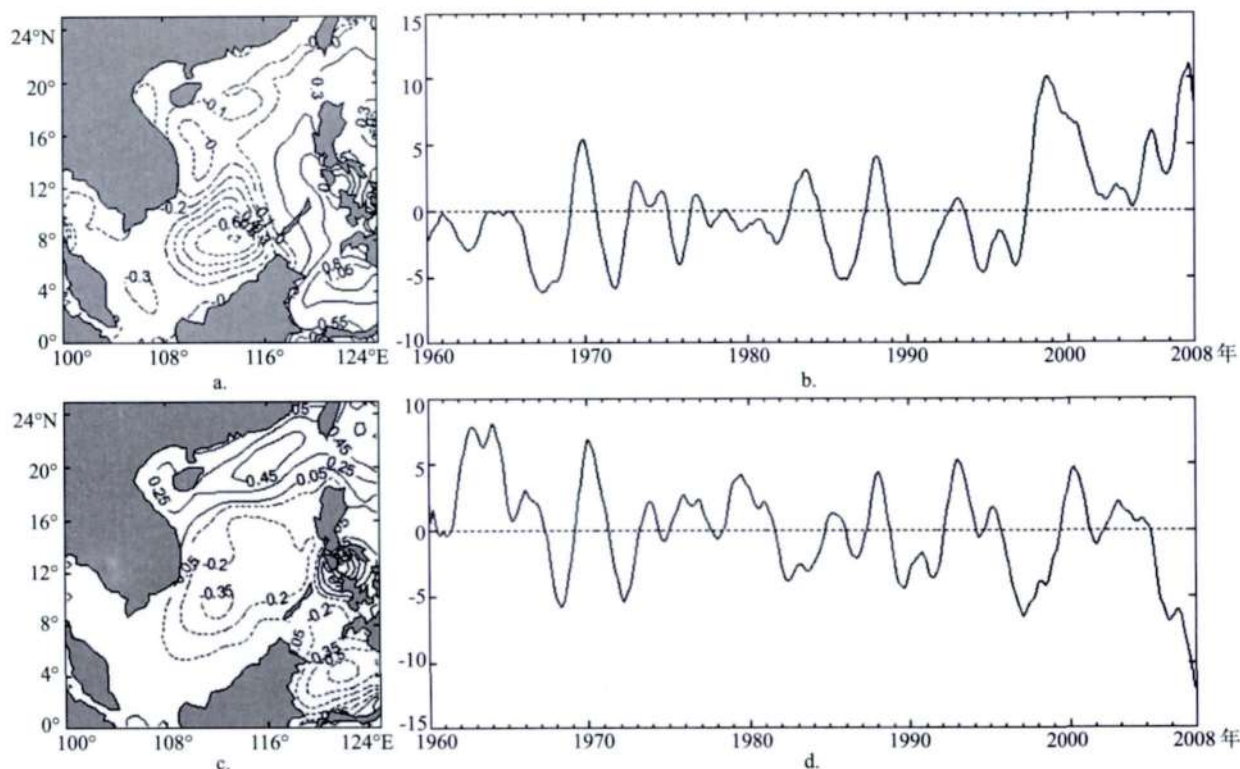


图6 年际EOF的第一(a、b)第二(c、d)模态及其时间系数

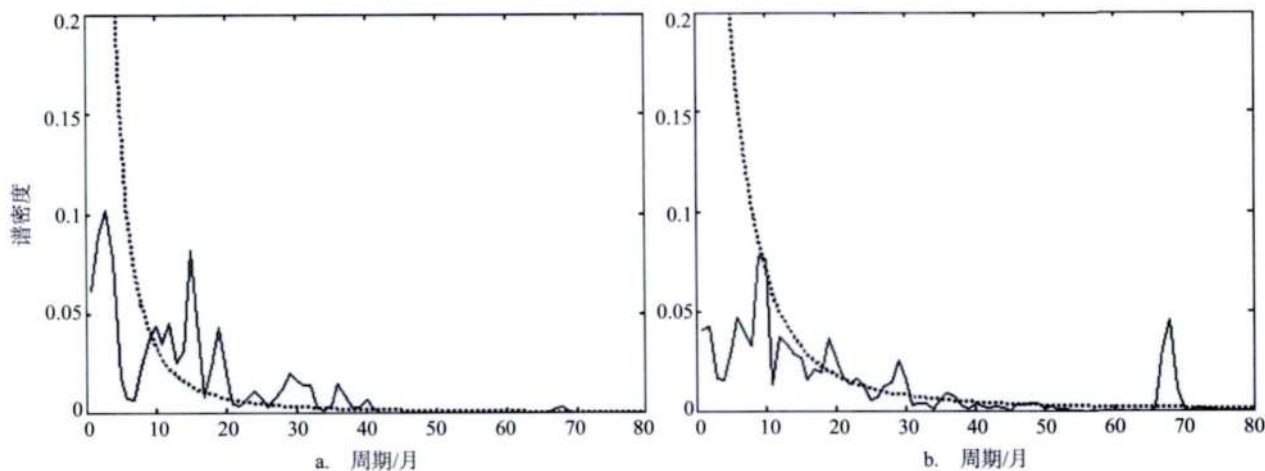


图7 年际EOF的前两个时间系数的功率谱分析

利用落后交叉相关分析法分别对南海2个海区MLD距平与SOI指数进行了交叉相关分析(见图8), SOI与滞后6—7, 10—12, 21—23, 34—35个月的南海北部MLD距平相关性均超过了0.2, 达到了95%的置信度; SOI与滞后5—6, 11—17, 21—23, 25—26, 31—35个月的南海南部MLD距平相关性均超过了0.2, 达到了95%的置信度, 除25—26月外都超过了0.3, 达到了99%的置信度; SOI与滞后5—7, 10—16, 21—23, 31—35个月的南海MLD距平

相关性均超过了0.2, 达到了95%的置信度, 其中31—35月外都超过了0.4, 达到了99%的置信度。SOI与滞后其2 a左右的南海两个区域相关性非常显著, 这说明对南海的MLD异常进行年平均后, 表现出与ENSO发生具有一定的相关性, 但滞后2a以上的相关性更为强烈。

南方涛动指的是南太平洋与印度洋之间气压变化的相反关系, 是赤道地面气压的大尺度振动, 它表示赤道南太平洋气压高于正常值时, 赤道印度

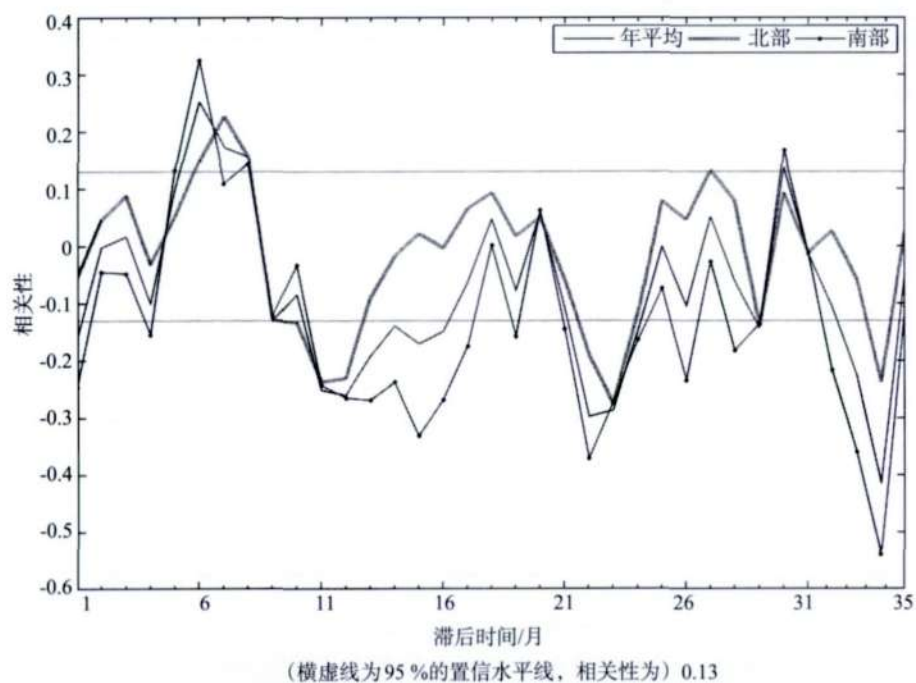


图8 SOI指数与不同滞后时间南海各海区MLD距平的落后交叉相关系数

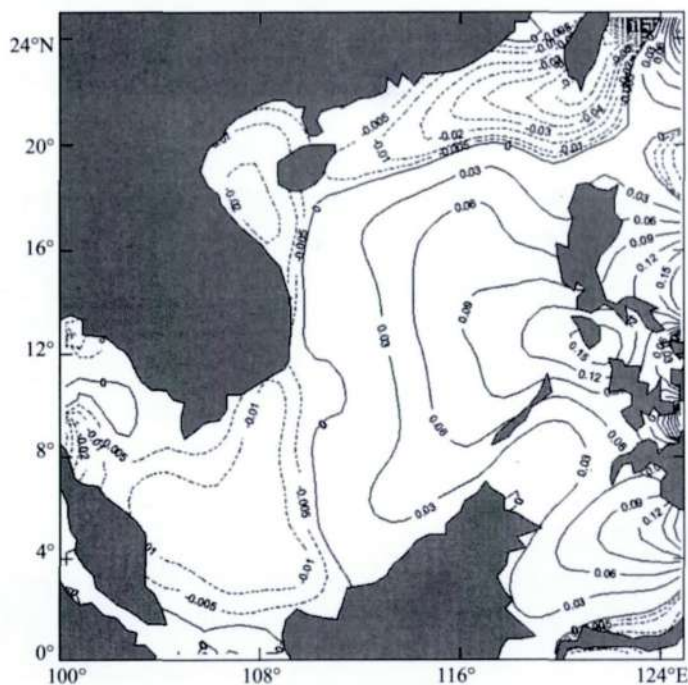


图9 南海混合层深度年距平线性变化趋势 (单位/ $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)

洋气压相对低于正常值的一个相关联的振动。常用SOI表征其强度。因此图8中南海MLD与SOI指数在滞后31—35月之间表现出的相关性最显著,表明大气对ENSO现象的反馈传播到南海,又通过海气界面的热通量以及风的作用对混合层产生

影响。

4.3 混合层深度变化趋势分析

将研究区域的数据处理成年距平进行逐点线性回归,得到回归系数的空间分布场(见图9),从吕

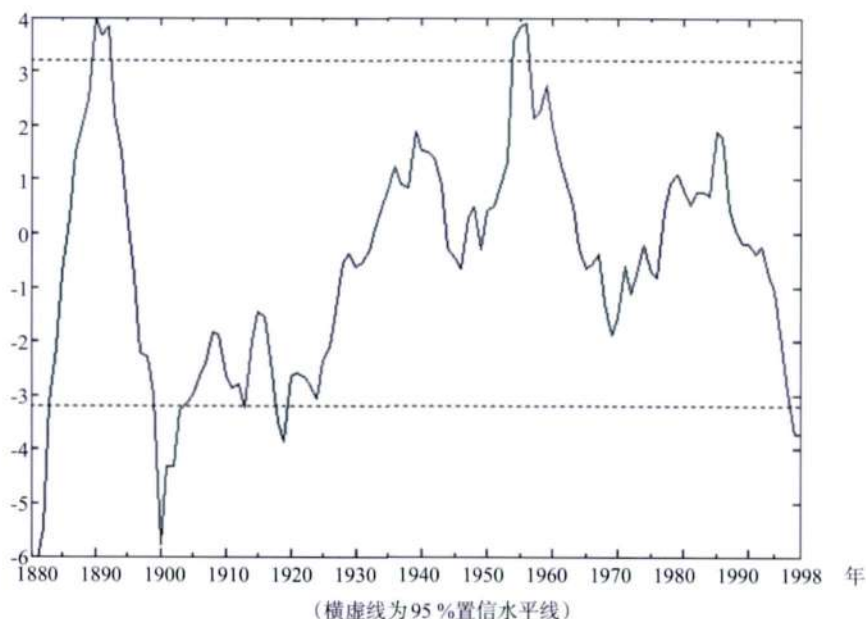


图10 南海混合层深度年距平滑动T检验曲线

宋海峡到南海北部陆架区处于变浅的趋势中,负的最大值在台湾岛东北侧。而南海深水海域的MLD都处于增深的趋势中,特别是在菲律宾海域附近最大能达到 $0.15 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,这可能与全球变暖以及黑潮的长期变化有关。另外一部分区域MLD变化较为稳定,在所研究的时间段内总体上没有变化。利用滑动t检验对南海MLD年变化进行10年检验,取 $t_{\alpha=0.01}=\pm 3.2$ 做年平均逐年t值变化曲线。由图10在1883年、1890年、1900年、1920年、1955年、1998年均发生了显著性的突变现象均已超过显著性水平,其中1883年、1900年、1998年这三年为负值说明南海MLD在所研究的时段内出现了明显的突变经历了三次明显的由浅到深的突变。1890年、1920年、1955年这三年为正值,说明南海MLD在所研究的时段内出现了明显的突变经历了三次明显的由深到浅的突变,这些突变点在图3a上吻合的很好。

5 结论

本文利用SODA、Levitus资料共同分析了南海混合层深度的季节和年际变化特征。得到以下几点结论:

(1) 季风通过表层流场对南海混合层的深度有着明显的影响。一方面通过海洋表层Ekman输运效应来影响混合层水平分布;另一方面通过大尺

度环流造成的辐合或辐散来限制或促进混合层深度的发展;

(2) 南海MLD总体上表现为上升趋势,最大可相差8 m。南部和北部的变化趋势不同,在1955年以后南部整体上呈现为上升趋势而北部为下降趋势。北部的显著周期为3年,南部有2—6年的显著周期;

(3) 南海的年际变化中,EOF第一模态的空间分布为一单极型,显著周期为2—3年;第二模态的空间分布呈明显的偶极子分布,显著周期为2—4年。SOI指数和南海北部、南部、区域平均的MLD异常都有较好的相关性。SOI与滞后其2a左右的南海两个区域相关性非常显著,这说明南海的MLD异常进行年平均后,表现出与ENSO发生具有一定的同步性,但滞后2a以上的相关性更为密切;

(4) 回归分析表明,南海混合层深度的变化趋势为:从吕宋海峡到南海北部陆架区处于变浅的趋势中,而南海深水海域都处于增深的趋势中,特别是在菲律宾海域附近最大能达到 0.15 m 每年,这可能与全球变暖以及黑潮的长期变化有关。在1883年、1890年、1900年、1920年、1955年、1998年混合层深度均发生了显著的突变。

参考文献:

[1] 施平,杜言,王东晓,等. 南海混合层年循环特征[J]. 热带海洋学

- 报,2001,20(1):10-17.
- [2] 王东晓,周发琇,秦曾灏.南海上层海洋环流两层半模式的数值模拟[J].海洋学报,1996,18(5):30-40.
- [3] 何有海,关翠华,王盛安.南海南部热结构和水温的垂直分布.南沙群岛海区物理海洋学研究论文集[M].北京:海洋出版社,1994.167-177.
- [4] 王东晓,周发琇,李永平.南海表层水温和海面热收支的年循环特征[J].海洋学报,1997,19(3):33-44.
- [5] 杨海军,刘秦玉.南海表层水温分布的季节特征[J].海洋与湖沼,1998,29(5):501-507.
- [6] 刘辉,江丽芳,齐义泉.南沙群岛海域混合层深度季节变化特征[J].海洋科学进展,2007,25(3):268-279.
- [7] 李丽平,靳莉莉.热带太平洋混合层深度的年际异常及其与中国夏季降水关系分析[J].热带气象学报,2010,26,(6):659-666.
- [8] Jin Q H, Wang H. Multitime scale variations of sea surface temperature in the China seas based on the HadISST dataset[J]. Acta Oceanol. Sin, 2011,30(4):14-23.
- [9] Wang C, Wang W Q, Wang D X, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Nino [J]. Journal of Geophys. Res, 2006, 111, C03023, doi:10.1029/2005JC003333.
- [10] Qu T D, Du Y, Gan J P, et al. Mean seasonal cycle of isothermal depth in the South China Sea [J]. Journal of Geophys. Res, 2007, 112, C02020, doi:10.1029.
- [11] Qu T. Role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China Sea surface temperature. Journal of Geophys. Res, 2001, 106, 6943-6955.
- [12] Yang H J, Liu Q Y, Jia X J. On the upper oceanic heat budget in the South China Sea: Annual cycle [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1999, 16(4) : 619-629.
- [13] 刘秦玉,贾旭晶,孙即霖,等. 1998年夏季风爆发前后南海上混合层的特征及成因[J].气候与环流研究, 2000,5(4):469-481.
- [14] 刘秦玉,孙即霖,贾旭晶.春季南海南部上混合层数值模拟与数值实验[J].青岛海洋大学学报,2001,31(2) : 6-14.
- [15] 孙成学,刘秦玉,贾英来.南海混合层深度的季节变化及年际变化特征[J].中国海洋大学学报,2007,37(2):197-203.
- [16] Huang R X, Qiu B. Three-dimensional structure of the wind-driven circulation in the subtropical North Pacific [J]. J Phys Oceanogr, 1994, 24: 1608-1622.
- [17] 贾英来,刘秦玉,孙即霖.南海暖水的季节变化特征及数值模拟[J].海洋与湖沼,2000,31(4):354-362.
- [18] 蔡树群,甘子钧.三维斜压陆架海模式的应用:南海上混合层的季节变化[J].海洋学报,2000,22(3):7-14.

Seasonal and inter-annual variations of the mixed layer depth in the South China Sea

WU Yang, CHENG Guo-sheng

(School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044 China)

Abstract: Based on the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) data, characteristics of seasonal and inter-annual variations of the mixed layer depth (MLD) in the South China Sea (SCS) are derived. Data analysis indicates that monsoon has an obvious impact on the temporal and spatial features of MLD in the SCS through an adjustment of the current field. The MLD of the SCS has a deepening trend in general, however the differences between northern and southern areas are obvious, for example there is a shallowing trend in the north but opposite in the south after 1955. The main period is 2—3a in the north while 2—6a in the south and the area average of the SCS. The variability of MLD was analyzed by the Empirical Orthogonal Function (EOF) and Spectrum method. The first mode shows that the variability is same in the whole area of SCS basically and the main cycle is about 2—3a. The second mode shows that the variability is dipole-type and the main cycle is 2—5a. The trend of MLD in the SCS is different from the north to the south, that is, it is shallowing from the Luzon Strait to the west continental shelf in the SCS, and is deepening in the deep basin of the southern SCS. There are six times suddenly change of MLD detected by moving t-test technique.

Key words: South China Sea; mixed layer depth; seasonal and interannual variability; EOF analysis