

# 南海东北部海域海面高度的时空变化特征

李燕初 李立 靖春生 蔡文理

( 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 厦门大学海洋系, 厦门 361005. E-mail: liyanch.cn@sina.com)

**摘要** 对1993年1月至2001年12月TOPEX/POSEIDON卫星高度计海面高度距平的分析表明, 在吕宋海峡两侧各有一个海面高度波动高能区, 其中心分别在(19.5°N, 119.5°E)和(22.0°N, 124.0°E), 其间有一低能带将二者隔离。“远区”EOF分析亦显示二者的波动规律相对独立。对“近区”的EOF分析揭示南海东北部海域海面高度波动以季节变化为主, 伴有明显的季节内变化和年际变化。其中EOF 1和EOF 2占总波动能量的66.7%, 均主要表现为季节变化, 但相位相差约3个月。EOF 1的主要形态是以吕宋岛西北(18.0°N, 119.0°E)为中心的海面高度振荡, 其峰值出现于8~9月间, 谷值则出现于1~2月间, 主要反映了南海深水海盆比容高度的季节变化和相应的环流调整。EOF 2的形态则表现为东南至西北向的季节性交替起伏, 主要反映了南海北部近海季风导致的海面高度Ekmen调整。分析还表明, 季节内变化是南海东北海域海面高度波动的重要分量, 它主要反映了吕宋海峡西侧海域中尺度过程的频繁活动。此外, 所有主要EOF模态都呈现年际变化。

**关键词** 南海东北海域 海面高度 时空变化 EOF分析

南海是亚洲最大的半封闭海, 主要经吕宋海峡与太平洋沟通并相互作用。受季风、黑潮以及ENSO涛动等诸多因素的影响, 吕宋海峡和南海东北部是动力上十分活跃的海区之一。南海处在热带季风区, 受强盛的季风的作用, 南海环流呈现显著的季节性时空变化<sup>[1,2]</sup>。在吕宋海峡一带黑潮常蛇行入侵, 直接作用于南海<sup>[3]</sup>, 并可形成中尺度强涡<sup>[4-6]</sup>; 此外近期的研究还表明, 太平洋的ENSO涛动也对南海有明显影响<sup>[7,8]</sup>。受各种因素的共同作用, 南海东北部海域的海洋变异呈明显的多尺度特征<sup>[9,10]</sup>。

作为研究海洋环流及其变异的新手段, 近年来卫星高度计资料在南海研究中的应用日渐增多, 如Shaw等人<sup>[7]</sup>、Ho等人<sup>[8,11]</sup>和Liu等人<sup>[12]</sup>分别用T/P资料研究了南海海面高度的海盆尺度低频变化特征; Wang等人<sup>[13]</sup>则用T/P资料研究了南海的中尺度变异。但这些研究多注重整个南海海盆的大尺度特征, 对南海东北这一特殊海域海面高度的变化特征及机制少有论及。

为此, 本文利用9年(1993年1月至2001年12月)的T/P高度计资料, 集中研究南海东北海域海面高度的时空变化特征, 总结其规律, 并探讨其形成机制及与之相关的环流变异。

## 1 数据与方法

卫星高度计数据, 取自美国国家航空航天局物

理海洋学在发档案中心(NASA/PODAAC)分发的TOPEX/POSEIDON MGDR-B CD-ROM光盘, 数据覆盖时段为1993年1月到2001年12月共333个T/P观测周期(cycle)。

为探讨海面高度时空变化特征, 我们主要采用经验正交函数(EOF)方法对预处理后的T/P资料进行分析。EOF方法是分析大气、海洋等物理过程的有用工具<sup>[14]</sup>, 它通过线性正交变换对4D分布的物理场进行压缩, 提取运动变化的主要信息, 也就是把多空间点的时间序列数组分解成一系列相互独立的经验正交模态, 并将这些模态按照对波动总能量贡献的大小进行排序。每个EOF模态可由一个幅值系数时间序列和一个空间分布矩阵来描述。在本分析中, 海面上某空间点、某时刻的海面高度偏差值就等于所在点的幅值空间分布值与该时刻幅值系数的乘积。

由于我们感兴趣的是南海东北海域的海面高度波动特征, 因此重点分析范围(“近区”)选在(15°~27°N, 112°~123°E)间的海域, 在此海域主要有10条T/P高度计轨道通过; 为验证分析的可靠性和探讨南海东北部与西太平洋海面高度波动之间的相互联系, 我们对包括菲律宾海在内的“远区”(15°~27°N, 112°~130°E)也做了类似分析, 通过远区的T/P高度计轨道增至15条(图1)。分析前要对这些数据进行预处理, 首先进行环境参数修正, 包括气压效应, 电磁偏差, 电离层偏差, 干、湿对流层偏差, 以及潮汐修

正等. 为避免浅海潮汐修正的偏差, 深度小于 200 m 的海域不包含在本文分析的范围內. 环境参数修正后对数据沿轨进行重新取样, 为了得到较好的空间分辨, 沿轨取样间距取 32 km, 共含 350 个测点. 在减去多年的平均值后, 便得到各取样点的海面高度距平的时间序列(以下均称海面高度时间序列). 另外, 为了消除因为潮汐混淆所产生的强 60 d 振荡, 分析前采用 7 点的汉宁滤波器对每个时间序列进行了滤波.

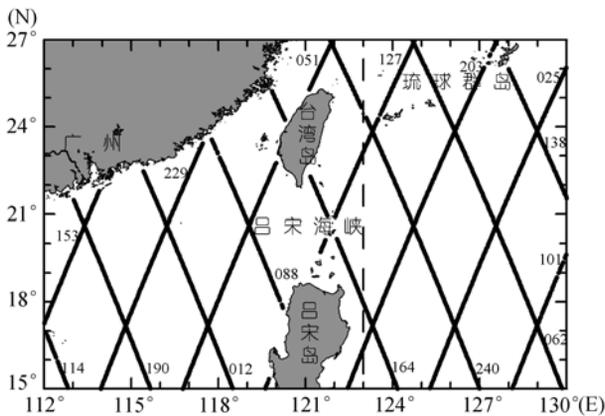


图 1 研究海域及其 T/P 高度计卫星的地面轨道  
图中虚线左侧部分为“近区”

## 2 海面高度平均偏差的空间分布

为了解南海东北部海域海面高度异常的主要空间分布特征, 我们计算了 1993 年 1 月至 2001 年 12 月海面高度的标准偏差, 即海面高度时间序列距平的均方根值:

$$RMS = \left[ \left( \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right) / N \right]^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $\{X_i\}$  是某空间点海面高度时间序列,  $N$  是它的长度,  $\bar{X}$  是该点的平均海面高度.

整个研究海区的 RMS 的空间分布绘于图 2, 由图可看出在吕宋海峡两侧各有一个海面高度平均偏差的高值区, 其中心位于(19.5°N, 119.5°E)和(22.0°N, 124.0°E)附近, 分别标记为 A 和 B. 在它们之间有一沿吕宋海峡黑潮流径分布的低值带, 这低值带将二者分隔. A 区的 RMS 峰值可达 15 cm, B 区则达 18 cm, 比 A 区的强度和范围都大. 图 2 中 RMS 高值区是海面高度变化最大的区域, 即动力上的高能区域.

图 2 揭示的一个重要特征是两个相邻的高变异海区(A 和 B)为黑潮所隔离, 它们位于吕宋海峡的两

侧, 也位于黑潮流径的两侧, 黑潮似乎是将二者分开的主要动力学屏障, 即两者由黑潮一水相隔. 这一格局提示我们: 吕宋海峡两侧的海洋变异在规律上有所差异, 在动力学上可能相对独立, 太平洋对南海的作用更像是黑潮通过吕宋海峡向南海入侵来传递, 而不是两个高能区之间直接的信号耦合来实现的.

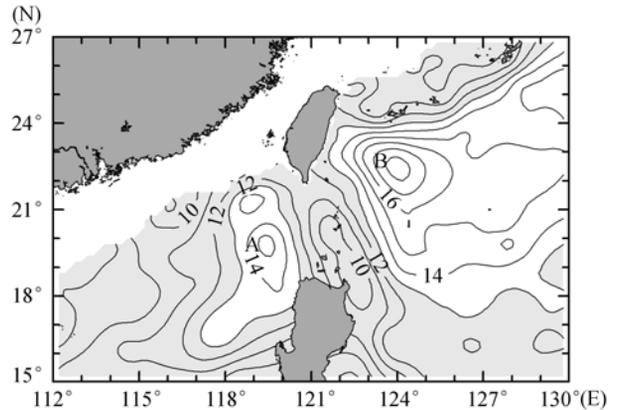


图 2 1993 年 1 月至 2001 年 12 月海面高度距平均方根值的空间分布(单位: cm)

## 3 EOF 分析的结果: “近区”

对南海东北部“近区”的分析结果表明, 海面高度波动的前 4 个 EOF 模态占海面高度波动总能量的 76.1%(表 1). 由前 4 个 EOF 模态可以描述南海东北部海域海面高度变化的主要特征.

表 1 “近区”前 4 个 EOF 模态占总能量的百分数

EOF 模态	占总能量的百分数	累计/%
1	50.8	50.8
2	15.9	66.7
3	5.7	72.4
4	3.7	76.1

### 3.1 EOF 1: 海盆的季节模式

第 1 个 EOF 模态(EOF 1)是南海东北部海面高度波动的主要分量, 对海面高度波动总能量的贡献达 50.8%. 图 3(a)是其幅值系数的时间变化曲线, 图 3(b)是幅值系数的功率谱, 其最大谱峰值 4.0 对应频率为 1 周/a, 次级谱峰出现在低频端, 其幅值较主峰值低一个量级. 该模态主要代表海面高度的年变化, 即季节波动, 但含有年际变化的影响. 图 3(c)是 EOF 1 模态幅值的空间分布图, 可看出该模态在分析海域中呈一大涡状分布, 其高值中心位于吕宋岛西北部

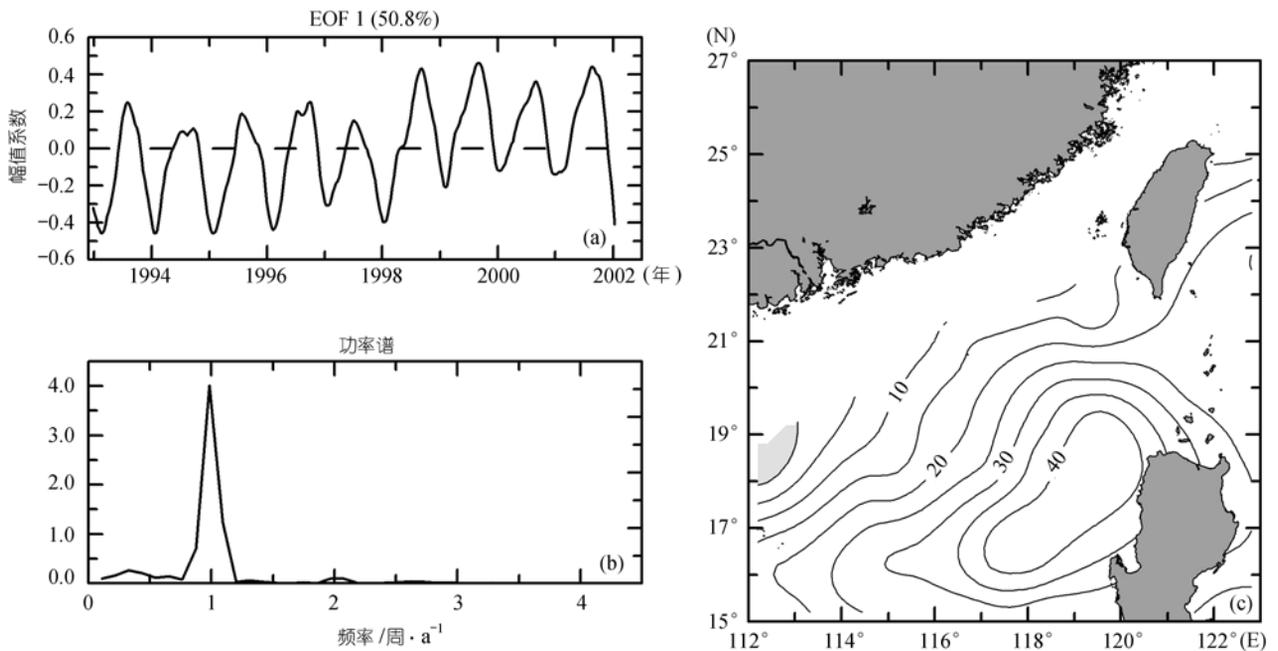


图3 EOF 1 模态的幅值系数(a)、幅值系数的功率谱(无量纲)(b)和幅值空间分布(无量纲)(c) (等值线间隔: 5 cm)

海域(18.0°N, 119.0°E)附近. 这一位置与图 2 中的高 RMS 的 A 区相接近, 说明该模态所描述的海面高度季节变化是产生这个高 RMS 区的主要因素. 图 3(c) 给出的另一重要信息是: EOF 1 模态的幅值在研究海域(除个别区域外)均为正值, 反映了整个海区海面高度随季节的同步涨落, 涨落幅度以吕宋岛西北部海域(18.0°N, 119.0°E)附近为最大. 由图 3(a)还可看出, 在每年的 6~10 月(夏、秋季)幅值系数大部分为正值, 极大值都出现在 8~9 月间, 这时 EOF 1 表现为以吕宋岛西北海域为中心的反气旋环流. 反之, 在每年的 11 月至下一年的 5 月(冬、春季节) EOF 1 的幅值系数大部份为负值, 极小值出现在 1~2 月间, 这时 EOF 1 表现为以吕宋岛西北海域为中心的气旋环流. 在这几年中, EOF 1 所导致的海面高度正偏差最大出现在 1999 年 8 月, 其偏差值约为 20 cm ( $0.46 \times 44 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$ ); 海面高度最大负偏差出现在 1993 年 2 月和 1994 年 1 月, 其偏差值约为 -20 cm ( $-0.46 \times 44 \text{ cm} = -20 \text{ cm}$ ).

综上所述, EOF 1 模态是以吕宋岛西北海域(18.0°N, 119.0°E)附近为中心的海面高度随季节的同步涨落, 振荡的峰值出现在每年的 8~9 月间, 谷值则发生在 1~2 月间, 最大振荡幅度可达 40 cm. 有关研究表明, 南海北部的次海盆尺度环流是南海季节环流的主要动力特征, 该环流的中心位置和尺度与图

3(c)中涡状结构的中心接近<sup>[2]</sup>; 南海深水海盆最强的 SSHa 季节变化出现在吕宋岛西北外海, SSHa 在 1~3 月最低, 7~9 月最高<sup>[12]</sup>, 这一波动是与南海北部次海盆尺度环流的季节变化紧密相关的<sup>[2]</sup>. 因此, EOF 1 模态代表的是南海深水海盆因水体季节性加热和环流的季节变化所导致的海面比容高度的季节波动, 是南海海盆海面高度波动的基本模态<sup>[7,8]</sup>. 值得注意的是, 1997~1998 年强 El Niño 事件期间 EOF 1 幅值系数的年变化明显异常, 该异常可能与 El Niño 事件的影响有关.

### 3.2 EOF 2: 北部近海的季节模态

第 2 个 EOF 模态(EOF 2)幅值系数的时间变化曲线与功率谱、以及空间分布绘于图 4, 它包含海面高度波动总能量的 15.9%. 其功率谱主峰(谱值为 1.62)对应的频率为 1 周/a, 在 0.32 周/a 的频率上有一小的谱峰(谱值为 0.17), 所以该模态主要也表现为海面高度的季节波动(图 4(a), (b)). 从图 4(c)可看出其等值线分布大致呈南西至北东走向与华南岸线平行, 海域南侧为负值区, 北侧为正值区. 在每年的 9 月至下年的 2~3 月(秋、冬季节)该模态的幅值系数大部分为正值, 其极大值都出现在每年的 11~12 月间, 这时华南近海海面偏高, 外海则偏低, 海面高度由西北向东南下倾. 反之, 在每年的 3~9 月(春、夏季节)的幅值系

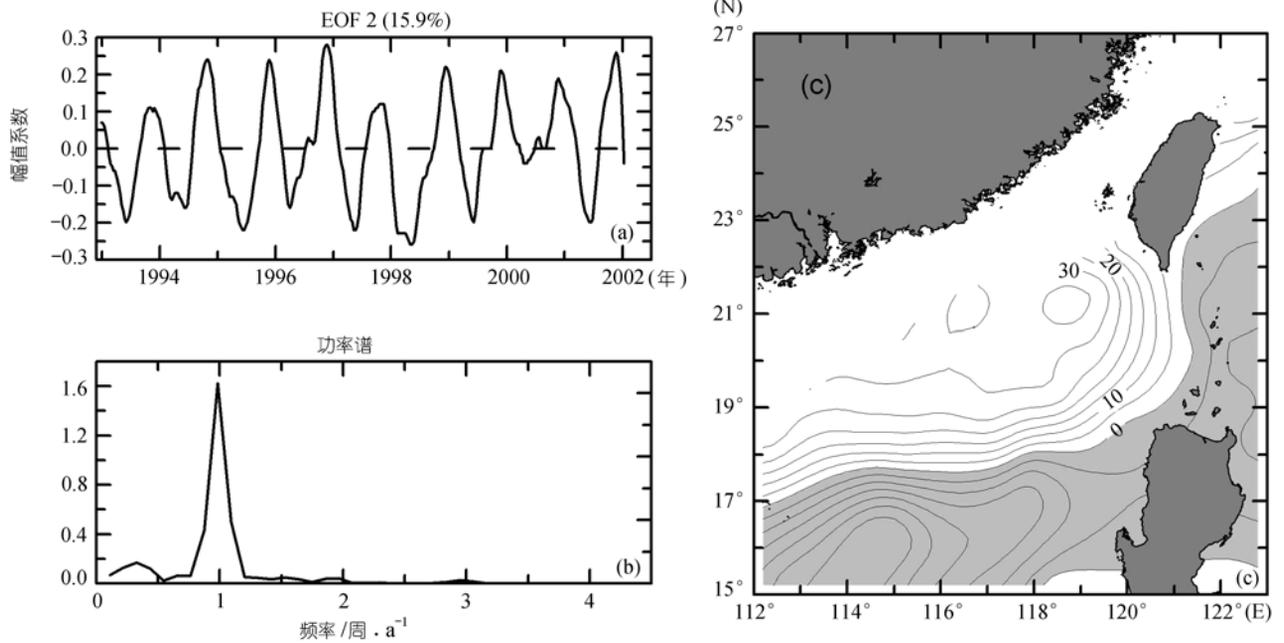


图 4 EOF 2 模态的幅值系数(a)、幅值系数的功率谱(b)和幅值空间分布(c)(等值线间隔: 5 cm)

数大部份为负值, 其极小值出现在每年的 5~7 月间, 这时该海域 EOF 2 模态的海面高度由西北向东南上倾.

综上所述, EOF 2 模态的主要特征表现为与陆坡走向垂直的南东至北西向跷跷板状季节性海面交替起伏, 秋、冬两季海面由西北向东南下倾, 春、夏两季海面则由西北向东南上倾. 这一过程与南海北部季风的年变化基本同步, 可能反映了南海北部陆坡附近季风引起的 Ekmen 调整: 秋、冬两季在东北季风和科氏力的作用下海水向岸输运并堆积, 形成近岸一侧的高水位; 春、夏季则相反, 西南季风驱动海水离岸运动, 在近岸一侧形成低水位. 此外, 季风引发近岸侧冬季的上层水的下沉运动和夏季下层冷水的爬升, 导致陆坡附近水柱斜压结构的调整, 可进一步加强这一过程.

比较 EOF 1 和 EOF 2 两个模态幅值系数的平均周年变化曲线(图 5)可见, EOF 1 模态在 2 月达到最低值, 在 9 月达到最高值; EOF 2 模态在 6 月达到最低值, 在 12 月达到最高值, 二者最低幅值的出现时间平均相差 4 个月, 而最高幅值的出现时间平均相差 3 个月. 因此, EOF 1 和 EOF 2 分别反映了形式和机制都不相同的两种海面高度季节波动. 它们的共同作用, 形成了南海东北部海域海面高度季节变化的基本特征.

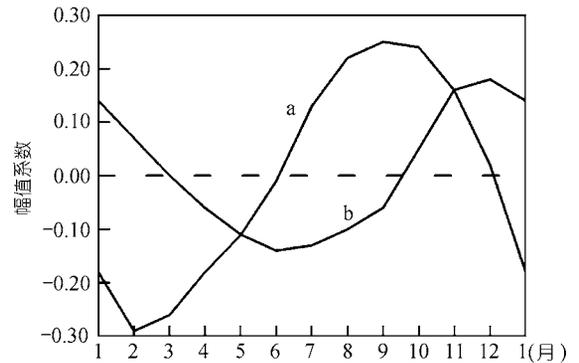


图 5 幅值系数的平均周年变化曲线 EOF 1(a)和 EOF 2(b)

以往的研究表明, 华南沿岸水位春夏低、秋冬高, 最高水位出现在 10 月(而非冬季风最为强盛的 12~1 月), 其后反而下降<sup>[15]</sup>, 造成这一现象的原因一直缺少中肯的解释. 现在看来, 这一现象的形成应是南海海盆水柱斜压结构的季节调整所导致的海平面比容高度变化(steric changes)和季风输运(wind setup)共同作用的结果, 其中 EOF 1 模态所代表的比容高度季节变化的贡献(50.8%)是主要的, 它是反映季风影响的 EOF 2 模态的贡献(15.9%)的 3 倍.

### 3.3 EOF 3 和 EOF 4: 非季节模态

EOF 3 模态占海面高度波动总能量的 5.7%(图 6(a)), 其功率谱曲线在年际到季节内频段呈现多个

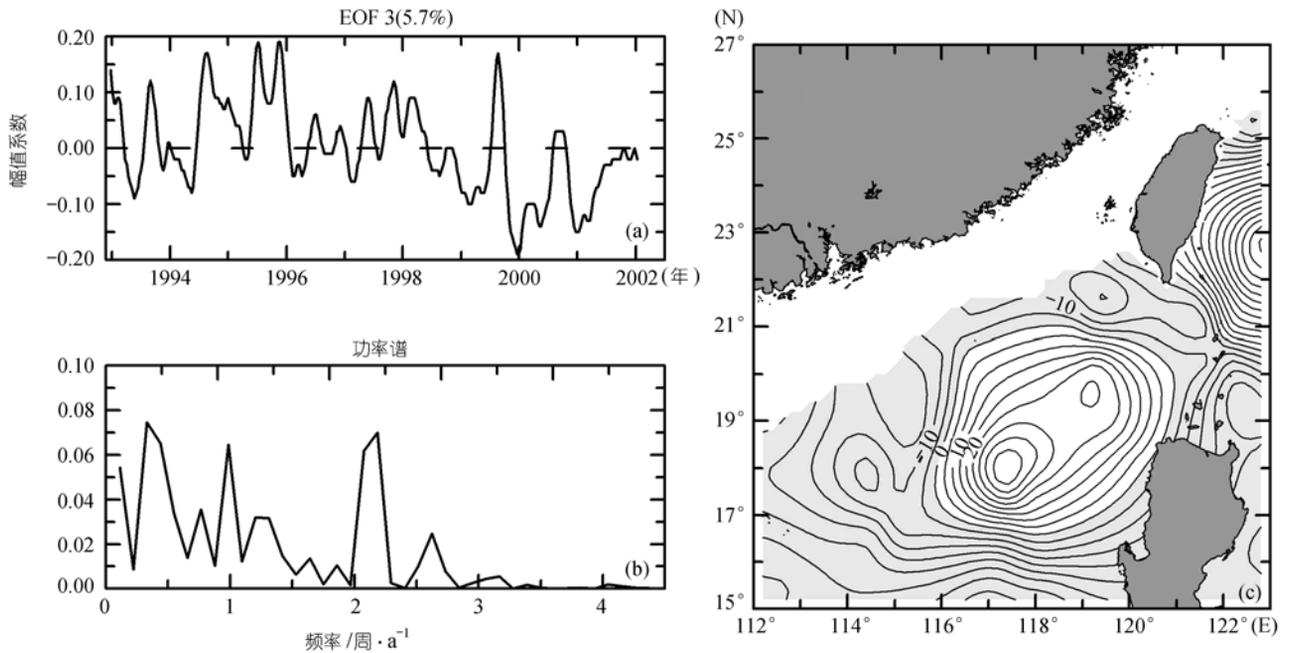


图6 EOF 3 模态的幅值系数(a)、幅值系数的功率谱(b)和幅值空间分布(c)(等值线间隔: 5 cm)

谱峰,主要谱峰频率分别为 0.32, 1.0 和 2.18 周/a, 谱峰值分别为 0.074, 0.064 和 0.070(图 6(b)). 该模态的空间分布与 EOF 1 相似, 表现为吕宋岛西北的强涡状结构, 其中心位置在(18.5°N, 118.0°E)附近, 直径约为 4 个纬距. 与 EOF 1 不同的是, 涡状结构内外幅值的符号相反, 在中心海面上升时, 周边的水位下降.

图 6(c)和图 3(c)结构上的相似性, 提示 EOF 3 和 EOF 1 之间可能存在某种联系. 南海北部的次海盆尺度环流是南海季节环流的主要动力特征, 该环流的中心位置和尺度与图 3(c)和图 6(c)中涡状结构的中心接近<sup>[2]</sup>. 考虑到图 3(b)所显示的窄带特征和图 6(b)所显示的宽带特性之间的互补性, 我们推测, EOF 3 主要反映了南海北部次海盆尺度季节环流强度(在各种时间尺度上)的中尺度波动, 而 EOF 1 则主要代表其周年变化的常态. 此外图 6(c)中涡状结构为负值带所环绕, 在北侧和西侧并伴有若干小涡结构, 说明当冬季气旋型次海盆尺度环流支配南海北部时, 其中心海面高度偏低, 周边偏高, 易于诱导黑潮对南海的入侵和中尺度涡旋的形成.

EOF 4 模态占海面高度波动总能量的 3.7%(图 7), 其功率谱图曲线也在年际到季节内频段呈现多个谱峰, 但主要谱峰位于季节内频段. 两个主峰的频率分别为 1.97 和 2.62 周/a(谱峰值为 0.092 和 0.066), 说明

该模态主要反映了海面高度的季节内波动. 由图 7(c)可知, 该模态空间分布的主要特征表现为南海东北部的偶极子结构: 在台湾岛西南(20.5°N, 119.0°E)附近为一涡状低中心, 其西南侧(18.0°N, 115.0°E)附近则有一个高中心.

有关研究表明南海东北部是中尺度过程十分活跃的海区, 黑潮常经吕宋海峡入侵该海域<sup>[16,17]</sup>, 并时有中尺度暖涡环从黑潮脱落进入南海<sup>[4,5]</sup>. EOF 4 的分布(图 7(c)), 可能主要反映了黑潮穿过吕宋海峡入侵南海及涡环形成过程的主要空间形态.

对 EOF 3 和 EOF 4 的分析说明, 除占支配地位的年变化之外, 季节内变异是南海东北部海面高度变化的另一个重要分量. 一般而言, 中尺度涡环的水平尺度多在一百至数百公里之间, 其发生频率及存在周期大致介于数月至十余个月之间不等<sup>[18]</sup>. 对南海来说, 黑潮入侵和由其派生的涡环的时空特征也大致如此<sup>[4,16]</sup>. 因此, 它们的发展、迁移过程往往在时域表现为季节内变异, 应是造成该海区海面高度季节内变异的主要因素.

#### 4 EOF 分析的结果: “远区”

为验证上述分析的可靠性并进一步探讨南海东北部与西太平洋海面高度波动之间的相互联系, 我们对包括西菲律宾海在内的“远区”(图 1)也做了类似

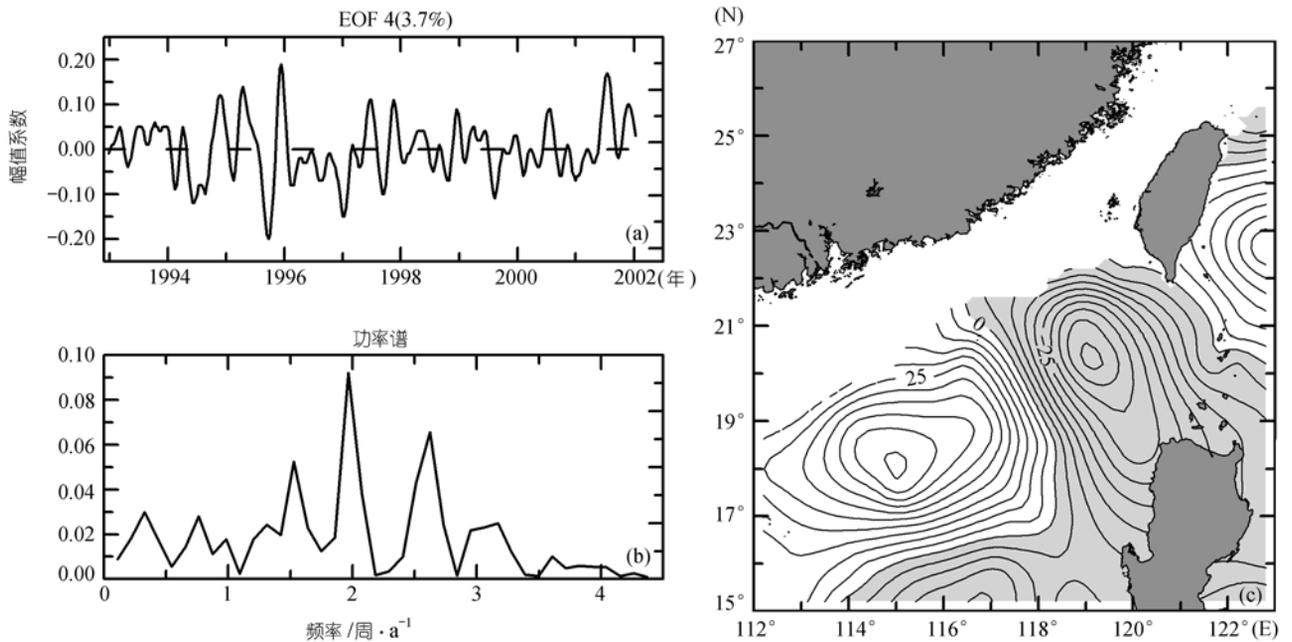


图 7 EOF 4 模式的幅值系数(a)、幅值系数的功率谱(b)和幅值空间分布(c)(等值线间隔: 5 cm)

表 2 “远区” EOF 分析的主要结果

“远区” EOF 模态	占总能量的百分数	能量累计/%	主要谱峰周期/a	空间分布形态 重心位置	相似的“近区”模态
1	36.8	36.8	1.0, 3.1	南海	EOF 1
2	11.4	48.2	1.0, 2.3	台湾以东	EOF 2
3	7.6	55.8	1.0, 4.5	台湾以东	
4	5.6	61.4	2.3	台湾以东	
5	4.9	66.3	9.0	台湾以东	
6	4.5	70.8	0.5	台湾以东	

的 EOF 分析. 分析结果显示主要 EOF 模态的能量相当分散(表 2), 前 6 个模态占总能量的 70.8% (“近区”分析前两个模态的能量便占 66.7%), 其中第 1 模态仅占 36.8%, 其后 5 个模态各自的比重相差不大. 除 EOF 1 外(图 8), “远区”各模态空间分布的重心都在台湾以东海域(如 EOF 2, 见图 9). 也就是说, 除海面比容高度的季节变化比菲律宾海显著外, 南海东北部海面高度波动的其他经验模态都比菲律宾海弱. 从表 2 中还可看出, “远区”分析的 EOF 1, EOF 3 模态分别与“近区”分析的 EOF 1, EOF 2 相似, 其中“远区” EOF 1 模态的基本物理特征(图 8)与“近区” EOF 1(图 3)尤为接近.

以上分析一方面显示了南海东北部“近区”与“远区”结果的一致性, 说明经验正交函数分析方法的适用性和可信性. 另一方面则说明, 南海和菲律宾海海面高度的波动规律有相当差异, 就其物理特征而言

并不属于同一系统, 更像是两个相互联系的独立系统. 因此, 由于海域的扩大, “远区”分析涵盖了两个相互关系并不紧密(或者说相互关系无法由经验正交模型表达)的系统, 从而比近区分析引入了更多相互独立的波动分量, 致使结果分散, 不足以充分揭示南海东北部海面高度波动的多尺度特征. 为此, 本文主要采用“近区” EOF 分析的结论.

### 5 结论

( ) 在吕宋海峡两侧各有一个海面高度波动高能区, 其中心分别在 (19.5°N, 119.5°E) 和 (22.0°N, 124.0°E), 其间有一低能带将二者隔离. 由“远区” EOF 分析亦显示二者的波动规律相对独立.

( ) 南海东北部海域海面高度波动以季节变化为主, “近区”主要经验正交分量 EOF 1 和 EOF 2 均主要表现为季节变化, 占总波动能量的 66.7%.

( ) 南海东北部海域海面高度变化存在两种不

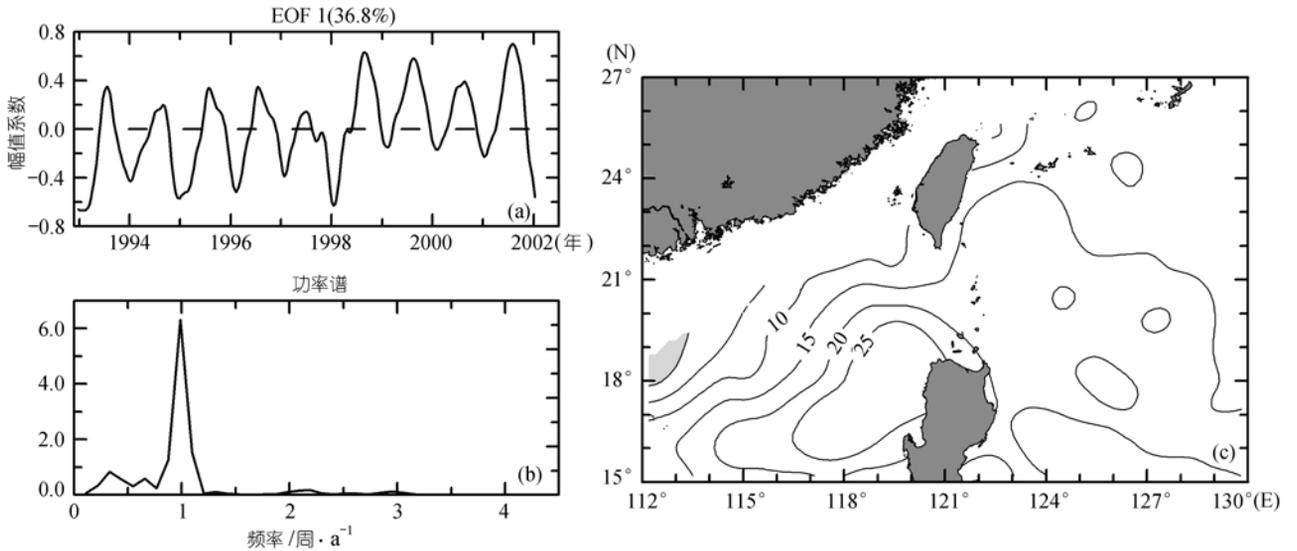


图8 远区 EOF 1 模态的幅值系数(a)、幅值系数的功率谱(b)和幅值空间分布(c)(等值线间隔: 5 cm)

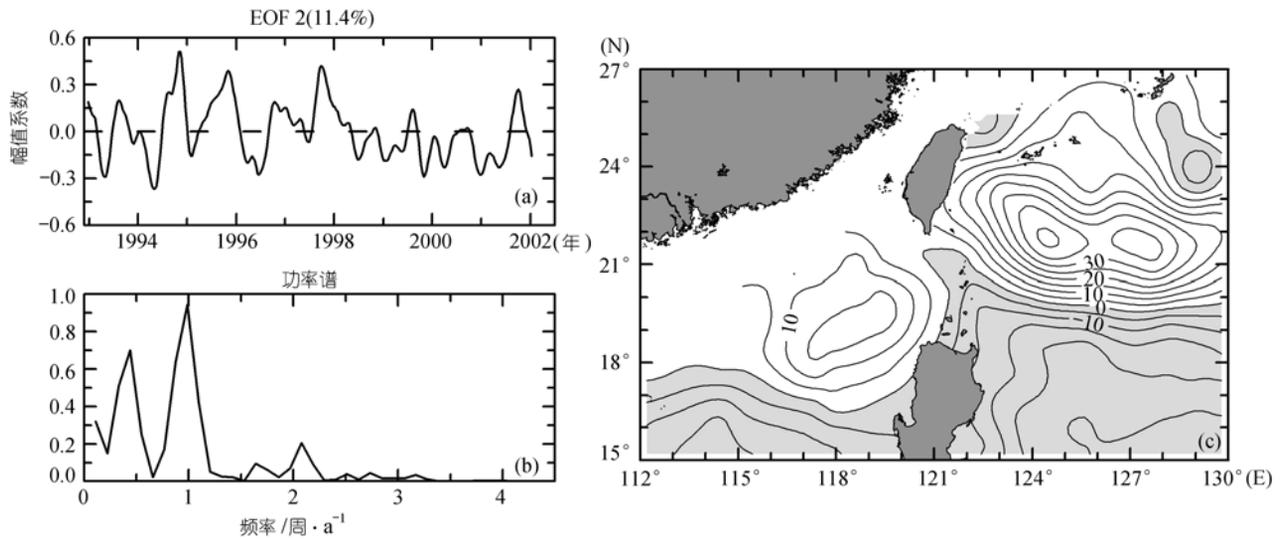


图9 远区 EOF 2 模态的幅值系数(a)、幅值系数的功率谱(b)和幅值空间分布(c)(等值线间隔: 5 cm)

同的季节变化模态: EOF 1 和 EOF 2, 两模态的相位相差约 3 个月. EOF 1 的主要形态是以吕宋岛西北 (19.5°N, 119.5°E) 为中心的海面高度的同步振荡, 其峰值出现于 8~9 月间, 谷值则出现于 1~2 月间, 主要反映了南海深水海盆比容高度的季节变化和相应的环流动力调整. EOF 2 的形态则表现为东南至西北向的季节性交替起伏, 主要反映了季风作用下南海北部近海海面高度的 Ekmen 调整. 他们的共同作用, 使吕宋岛西北部海域成为南海东北部海面高度季节变化最显著的海区.

( ) 季节内变化是南海东北海域海面高度波动的重要分量, 它主要反映了吕宋海峡西侧海域中尺度过程的频繁活动, 包括黑潮的蛇形入侵、由其分离而来的中尺度暖涡环、以及南海北部次海盆尺度环流的变异等等.

( ) 鉴于所有主要 EOF 模态都呈现年际变化特征, 年际变异应是南海东北部海域的另一重要特征, 需要进一步的研究.

致谢 T/P 资料由美国 NASA/JPL PO. DAAC 提供. 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999043807)和国家

自然科学基金项目(批准号: 49976010)资助.

参 考 文 献

- 1 Wyrski K. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959~1961, Physical oceanographic of the Southeast Asia waters. Naga Report 2, La Jolla, CA: Scripps Institute of Oceanography, 1961
- 2 李立, 许金电, 靖春生, 等. 南海海面高度、动力地形和环流的周年变化——TOPEX/Poseidon 卫星测高应用研究. 中国科学, D 辑, 2002, 32(12): 978~994
- 3 Nitani H. Oceanographic conditions in the sea east of the Philippines and Luzon strait in summer of 1965 and 1966. In: Marr J C, ed. The Kuroshio: a symposium on the Japan Current. Honolulu: East-West Center Press, 1970. 213~232
- 4 Li L, Nowlin W D, Su J. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. Deep-Sea Research (Part 1), 1998, 45: 1469~1482[DOI]
- 5 李燕初, 李立, 林明森, 等. 用 TOPEX/POSEIDON 高度计识别台湾西南海域中尺度强涡. 海洋学报, 2002, 24(增刊): 163~170
- 6 杨昆, 施平, 王东晓, 等. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究. 海洋学报, 2000, 22(1): 27~34
- 7 Shaw P T, Chao S Y, Fu L L. Sea Surface height variation in the South China Sea from satellite altimetry. Oceanologica Acta, 1999, 22(1): 1~17[DOI]
- 8 Ho C R, Kuo N J, Zheng Q, et al. Dynamically active areas in South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data. Remote Sensing of Environment, 2000, 71: 320~328[DOI]
- 9 苏纪兰, 许建平, 蔡树群, 等. 南海的环流和涡旋. 见: 丁一汇, 李崇银, 主编. 南海季风暴发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 66~72
- 10 李燕初, 蔡文理, 李立, 等. 南海东北部海域中尺度涡的季节和年际变化. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 61~70
- 11 Ho C R, Zheng Q, Soong Y S, et al. Seasonal variability of surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data. J Geophysical Research, 2000, 105: 13981~13990[DOI]
- 12 Liu Q, Jia Y, Wang X, et al. On the annual cycle characteristics of the sea surface height in the South China Sea. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18: 613~622
- 13 Wang L, Koblinsky C, Howden S. Mesoscale variability in the South China Sea from the TOPEX/Poseidon altimetry data. Deep-Sea Research (Part 1), 2000, 47: 681~708[DOI]
- 14 Stidd C K. The use of eigenvector for climatic estimates. J Applied Meteorology, 1967, 6: 255~264
- 15 李坤平, 周天华, 陈宗镛. 中国近海月平均海平面的变化及其原因的初步分析. 海洋学报, 1982, 4(5): 529~536
- 16 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套? ——南海东北部环流结构探讨. 台湾海峡, 1989, 8(1): 89~95
- 17 Shaw P T. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan. J Geophysical Research, 1989, 94: 18213~18226
- 18 Robinson A R. Eddies in Marine Science. Berlin : Springer, 1983

(2003-09-19 收稿, 2003-12-01 收修改稿)