

基于 HHT 的吕宋岛西北海域叶绿素浓度及相关环境物理要素的多时间尺度分析*

闫桐^{1,2}, 王静³

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275

摘要: 利用基于集合经验模态分解(EEMD)方法而改进的 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法, 分析了吕宋岛西北海域从1997年9月至2009年7月近12年的月平均遥感叶绿素浓度观测序列以及相关环境物理要素时间序列, 分离出各要素的特征振荡模态(IMFs); 在此基础上以叶绿素与相关要素间具有相同或相近频率的 IMF 对偶之间相位差余弦值的方差为指标, 探讨了该海域叶绿素浓度与环境场之间的联系。结果表明: 1)海区各研究变量都具有明显的季节和年际振荡特征, 叶绿素准年周期模态方差贡献达81%, 年际变化中准两年振荡是海区诸要素共同的波动类型, 此外叶绿素浓度还具有4年左右周期的振荡。2)除埃克曼抽吸速度在准年周期振荡上与叶绿素浓度显著正相关、Niño3 区海表温度在准两年周期上有弱的正相关关系外, 其余要素均与叶绿素浓度在不同时间尺度上呈负相关关系。这些结果说明 HHT 是气候序列多时间尺度分析中的一种有力工具。

关键词: 集合经验模态分解; 吕宋海峡; 叶绿素浓度; 多时间尺度分析

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)05-0038-10

Multi-timescale analysis of chlorophyll and its related physical factors northwest of the Luzon Island based on HHT

YAN Tong^{1,2}, WANG Jing³

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, CAS), Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China; 3. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: An improved Hilbert-Huang transform (HHT) based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) is applied to analyze monthly averaged time series of remotely-sensed surface chlorophyll concentration from September 1997 to July 2009 and the relevant hydrological and meteorological factors northwest of the Luzon Island in the South China Sea. On the basis of modes separated by EEMD, we develop a correlation index using the cosine values of the phase differences between a pair of intrinsic mode functions (IMFs), of which one is from chlorophyll and the other is from another variable. Our exploration of the relation between chlorophyll and physical environment shows that a seasonal pattern and an interannual oscillation are common characteristics in the time series. Quasi-annual periodicity accounts for 81% of the total variance of chlorophyll, and there are two other modes (the quasi-biennial oscillation and 4-year period, respectively). Further more, it is revealed that a significant positive correlation between seasonal modes of Ekman pumping velocity and chlorophyll, and a weak positive relationship between quasi-biennial modes of Niño3 SST and chlorophyll. Besides, all the other variables show out-of-phase correlation with chlorophyll at different time-scales. These findings demonstrate the usefulness of HHT in climate time series

收稿日期: 2010-06-07; 修订日期: 2010-08-26。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-204); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB950401); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金项目(SOED0702); 985 工程科技创新平台资助项目(105203200400006)

作者简介: 闫桐(1984—), 男, 山东省齐河县人, 博士研究生, 主要从事海洋卫星遥感资料应用研究。Email: yantong@scsio.ac.cn

通信作者: 王静。E-mail: jwang@scsio.ac.cn

* 本文是在甘子钧研究员悉心指导下完成的, 特此致谢。

analysis.

Key words: ensemble empirical mode decomposition (EEMD); Luzon Strait; chlorophyll concentration; multi-timescale analysis

与生物量成正比关系的叶绿素浓度作为一个海洋生态指标, 是海洋生物和环境学家们研究的主要对象, 其对于海流(上升流、沿岸流等)、涡旋、锋面和湍流混合等物理现象, 以及全球碳循环、初级生产力分布等气候变化和生态动力学研究都具有重要意义^[1]。大尺度年际年代际气候振荡, 海盆尺度环流的季节变化, 短期海洋大气中尺度过程以及径流、沿岸人类活动等诸多不同周期的环境变动均不同程度地影响海洋浮游植物的生物量, 从而使叶绿素浓度也相应具有显著的多时间尺度变化。

从南海卫星遥感叶绿素浓度方差分布图(图 1)看出, 吕宋岛西北海域和越南东岸外海是南海深水区的两个明显方差高值区, 说明其叶绿素浓度时间变化显著。其中前者位于南海与太平洋水体交换的主要通道区, 具有重要的生态学和物理学研究价值。Tang 等^[2]、赵辉等^[3]以及 Peñaflores 等^[4]分别利用海岸带水色扫描仪(coastal zone color scanner, CZCS)、海视宽视场传感器(sea-viewing wide field-of-view sensor, SeaWiFS)和中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectrometer, MODIS)数据对吕宋海峡西南部的冬季叶绿素高值现象作出分析, 认为局地上升流是表层叶绿素浓度激增的主

要原因。然而历史研究多聚焦于冬季水华事件, 对该区域叶绿素浓度多时间尺度的变化尤其是年际变化规律的报道却比较缺乏。随着 SeaWiFS 传感器的继续使用以及搭载 MODIS 的卫星正常在轨运行, 已有可能开展叶绿素浓度长期变化的研究^[5]。

众多的海洋动力和生态学研究已表明影响海水叶绿素浓度变化的因素首当其冲是物理环境的改变, 某些海域的部分气象水文因子与叶绿素浓度有共同的时间演变特征^[6-8]。影响海洋上层环境的基本要素主要包括太阳辐射、海面风场等, 而海表温度、海面高度异常和水体层结等是海洋上层热力和动力状况的重要标志, 与风应力旋度成正比关系的埃克曼抽吸速度从一定程度上反映了海洋上埃克曼层的垂直运动状况, 它们均表征了浮游植物生长的温度和营养盐供给, 与叶绿素浓度关系紧密。所以, 本文选取海表温度、海面高度异常、10m 层的浮力频率、埃克曼抽吸速度构造时间序列; 另外考虑到吕宋岛呈南北狭长状, 东西和南北风分量对沿岸上升流的贡献不一, 故将纬向和经向海面风矢量单列考虑。

本文利用基于集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)而改进的希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)方法考察选定海区区域平均叶绿素浓度及各物理环境要素的时间变化特征, 对不同时间尺度变动的频率、范围和强度进行分析比较, 最后通过各要素与叶绿素浓度的模态对偶之间的瞬时相位差检验两者的相关关系。

1 资料来源

选定深水海域中叶绿素浓度方差较大的吕宋海峡西南海域为研究区域, 范围为 18°—21°N、118°—121°E, 见图 1 虚线矩形区。

除上述各要素外, 还对 Niño3 区海表温度时间序列进行分解以探索研究海区叶绿素浓度与大尺度海气相互作用的关系。所有数据都被处理成空间平均的月平均时间序列, 表 1 详细列举了文中用到的各种海洋环境数据。

叶绿素资料为 SeaWiFS 三级产品, 需要说明的是因为 2008 年上半年搭载 SeaWiFS 传感器的卫星出现故障, 在某些月份数据缺失, 所以我们自 2008

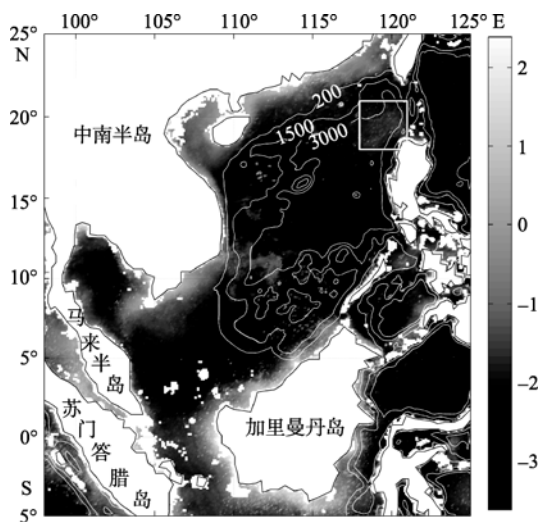


图 1 南海地形、叶绿素浓度方差(色阶, 单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 已取以 10 为底的对数值)分布以及研究区域选取(图中虚线框所示)

Fig. 1 Bathymetry of the South China Sea and distribution of SeaWiFS-derived chlorophyll a variance in $\lg(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$. The rectangle indicates the study area

表 1 资料及其时间范围

Tab. 1 Time span and data sources

| 变 量 | 开始 | 结束 | 数 据 来 源 |
|-----------------------------------|---------|---------|---|
| 叶绿素浓度(CHLO, 图 3a) | 1997-09 | 2009-07 | http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ |
| 海表温度(SST, 图 3b) | 1981-12 | 2009-07 | http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html |
| 埃克曼抽吸速度(EPV, 图 3c) | 1948-01 | 2009-11 | NCEP/NCAR 再分析数据集 10m 处风矢量计算得到 ^[10] |
| 10m 层浮力频率(BVF, 图 3d) | 1945-01 | 2006-12 | 由 Ishii ^[9] 全球温盐数据集计算得到 |
| 海面风分量(E-W wind, N-S wind, 图 3e、f) | 1948-01 | 2009-07 | http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html |
| 海面高度异常(SLA, 图 3g) | 1992-12 | 2009-01 | http://www.aviso.oceanobs.com/ |
| Niño3 区海表温度(N3SST 图 3h) | 1950-01 | 2009-09 | http://www.cpc.ncep.noaa.gov/ |

年开始利用相同空间分辨率的 MODIS 数据将叶绿素浓度时间序列延长^[11]。Ishii 资料在 0—700m 垂直方向上分为 16 个标准层, 我们利用 0、10 和 20m 层数据计算海洋上层的平均浮力频率值, 作为研究海区上层 20m 水体稳定性的指标。

2 研究方法

2.1 Hilbert-Huang 变换

HHT 是最近 10 年新提出的一种时频分析方法, 因为可以自适应地处理各种非线性、非稳态数据, 已被广泛应用于机械振动信号检测^[12]、地球物理学研究^[13]、医学疾病诊断^[14]以及金融时间序列分析^[15]等科研和工程领域。它包括经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和能够灵敏刻画信号瞬时频率、振幅的 Hilbert 转换(Hilbert transform, HT)两部分。EMD 最早由 Huang 等^[16]提出, 作为 HHT 的第一步, 该方法线性地分解一时间序列, 为 HT 提供一组频率和振幅随时间变化的完备的几乎正交的模态, 称为本征模函数(intrinsic mode function, IMF)。IMFs 代表信号中固有的自然振荡模态, 是由信号本身所决定的基函数, 而非分解之前就预先地确定下来的“核”, 因而具有自适应性的特点。其迭代计算过程可参见 Huang 等^[16]。

尽管如此, 由于信号的间歇性(intermittency), EMD 分解结果可能产生模态混叠现象, 即一个本征模函数含有不同时间尺度的振荡或者同一尺度的振荡存在于不同的本征模函数中, 导致 IMF 的物理意义不清晰, 错误地显示出模态中蕴含着不同的物理过程。为解决这一问题, Wu 等^[17-18]提出一种噪音辅助的数据分析方法——集合经验模态分解(ensemble EMD, EEMD), 通过对人工加噪信号的 EMD 分解结果进行集合平均以得到最终的 IMFs。其基本思想是, 利用白噪声频谱的均匀分布特性^[19], 均衡信号中发生跳跃的部分, 以去除模态混叠; 同时凭借零均值

噪声的特性, 多次分解由信号和不同噪声组成的“总体”, 将这些多次分解的结果取“平均”后, 噪声最终将被互相抵消而达到消除, 总体平均的结果即被当做真实的信号分量。

Hilbert 变换(HT)由来已久^[20], 作为 HHT 的第二个步骤, 它可以灵敏地捕捉 IMF 的局部相位变化, 将 IMFs 的幅值和相位写成时间的函数, 求取具有物理意义的瞬时频率, 建立兼具时间、频率、能量三者的分布图以描述信号。

2.2 相关检验

来自不同物理变量的两个振荡模态的同步化程度的估计, 是通过计算两模态在每一时间点的局域相位差完成的^[21-22]。相位差是常数, 表明两序列有共同的驱动机制或两者之间存在一种机制性动力学关系。例如, 在相同的季节驱动力作用下, 一对模态有可能显示出相似的变化特点。

这里假定有两时间序列, $X(t)$ 和 $Y(t)$, 经过 HHT 处理后得到它们的复模态表示形式:

$$X(t) = \text{Re} \left[\sum_n a_n^X(t) e^{i\theta_n^X(t)} \right] + r^X(t), \quad (1)$$

$$Y(t) = \text{Re} \left[\sum_m a_m^Y(t) e^{i\theta_m^Y(t)} \right] + r^Y(t)$$

其中, a 表示信号的瞬时振幅, θ 代表瞬时相位, r 为趋势项。简记来自 X 和 Y 的两复数模态分别为:

$$c_n^X(t) = a_n^X(t) e^{i\theta_n^X(t)}, \quad c_m^Y(t) = a_m^Y(t) e^{i\theta_m^Y(t)} \quad (2)$$

因为两复数模态之间有如下关系:

$$e^{i\Delta\theta_{nm}(t)} = \frac{c_n^X(t) (c_m^Y(t))^*}{|c_n^X(t)| |c_m^Y(t)|} \quad (3)$$

“*”表示共轭复数。由此可推导出其相位差 $\Delta\theta_{nm}(t) = \theta_n^X(t) - \theta_m^Y(t)$ 。这里我们采用一个更实用的变量 $\delta_{nm}(t)$ 来代表实相移, 它给出了两个变量相位一致性的信息, 其定义为:

$$\delta_{nm}(t) \equiv \cos[\Delta\theta_{nm}(t)] = \text{Re}(e^{i\Delta\theta_{nm}(t)}) \quad (4)$$

一些典型的同步情况有: 同相位($\delta_{nm}(t)=1$)、反相位($\delta_{nm}(t)=-1$)和正交延迟($\delta_{nm}(t)=0$)。时间序列 $\delta_{nm}(t)$ 的方差($\text{var}[\delta_{nm}]$)可以用来度量两模态相位同步化程度的高低及其同步程度的稳定性。根据这条标准, $\text{var}[\delta_{nm}]=0$ 意味着相位是常数, 而那些具有明显不同局地频率的两个模态其相位差是变化的, 这将导致一个较大的相位方差, 最大值为 1。在此, 我们设定阈值为 0.35, 这个设定多半是探索性的, 它可以保证在本研究中大约有 1/4 的年际变化模态在此阈值内。相位差的方差低于 0.35, 将认为两模态在相当长一段时间相位是常数, 二者是相关的。如果要求两模态具有更高的相关性, 则可以适当降低阈值; 反之, 若对两模态的相关程度要求不高, 则可提高阈值。

因为各物理量时间序列长度不同, 研究过程中, 先对各变量在整个资料长度上做分解, 统计分析各模态特征; 为了考察物理环境场对海区叶绿素浓度的影响, 以叶绿素资料时间跨度为准截取相同时间范围内的各要素分解结果, 作为分析讨论的基础。

3 结果和分析

3.1 振荡模态

Wu 等^[19]对白噪音进行 EMD 分解, 藉由蒙特卡罗实验(Monte Carlo Test)给定白噪音在 EMD 分解后的能量分布以及统计上的置信区间曲线, 以协助判断 IMF 的性质归属是单纯的噪音还是包含有意义的信息。若分解所得 IMF 的能量相对于周期分布位于置信区间上下界以内, 则认为其所含信息多为白噪声成分。当变量模态的能量分布在置信线以外, 可认为是在所选置信水平范围内包含了具有实际物理意义的信息。图 2 是叶绿素浓度的显著性检验结果。可见, 叶绿素浓度的第 2、3 和 4 模态全部位于 95% 置信水平线之上, 为包含实际物理意义的 IMF; 第 1 和 5 模态能量分布与噪音相似, 将不参与分析讨论。其显著 IMF 如图 3a 所示。

对其他各物理变量分解结果, 经显著性检验后(限于篇幅本文未列出检验结果图)保留有实际物理意义的 IMF 的, 分解结果见图 3。各变量第一高频模态的性质均与噪声类似, 不参与分析讨论; 2 个风分量以及埃克曼抽吸速度也均有低频模态未通过显著性检验。表 2 统计了研究海区各环境物理要素 IMF 的平均周期、方差贡献比率等特征。需要说明的是为了保持信号的总能量, 落在白噪声显著区间内的个别 IMF 尽管未在图 3 和表 2 中显示, 但它们也参

与了方差贡献率的计算。

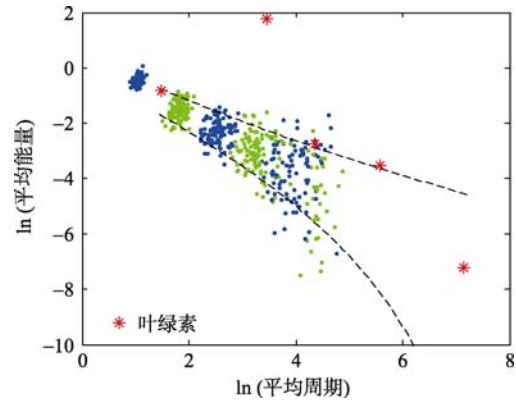


图 2 叶绿素浓度 IMF 显著性检验

蓝色和绿色实点为 100 次随机白噪声后样本的各 IMF 能量相对于平均周期的分布, 红色星点表示叶绿素浓度分解后 1—5 个模态的平均能量与周期关系, 两条黑色曲线分别代表统计上白噪声能量分布 95% 和 5% 置信线

Fig. 2 IMF significance test for chlorophyll concentration

图 3 中各个 IMF 分量分别表示不同要素的不同时间尺度变化, 振幅调制特征明显。结合表 2 可知, 季节型振荡出现在所有物理环境要素和叶绿素浓度 IMF 中, 振幅最大, 方差贡献显著, 且平均周期标准差较小, 说明准年周期变化频带较窄^[23]。叶绿素浓度(图 3aC2)的季节振荡信号十分明显, 除序列起始的 1997、1998 年振幅较小外, 其余时期振幅仅略有差异, 且频率基本为一常值, 方差贡献率显示其占原信号变化的 81%。海表温度(图 3bC3)和海面高度异常(图 3gC2)也显示出类似的特征, 方差贡献分别高达 90% 和 75%。埃克曼抽吸速度(图 3cC3)与 10m 层浮力频率(图 3dC3)的准年周期模态方差相对较小, 两者的半年周期变化更加突出, 35% 和 36% 分别是该频率振动对各自序列的贡献。同样, 图 3bC2 显示海表温度亦存在一半年周期振动, 但方差贡献甚小。2 个风分量准年周期模态波形图最规整, 振幅基本不变, 平均周期均为 12 个月, 标准差亦很小, 方差贡献在 90% 左右。

年际变化的模态中, 叶绿素浓度的 CHLO-C3 模态在 2004 年之前表现为 2 年周期的波动, 之后这种振荡的周期略微变长, 振幅显著降低, 峰值从冬季向春夏季移动, 而 CHLO-C4 模态表现出周期 4 年的波动(图 3aC3、C4), 两种年际尺度振荡的方差贡献和仅为 5.3%。海表温度的年际尺度变化类似于叶绿素浓度, 方差总和约占 5.1%, SST-C4 平均周期 2.8 年, SST-C5 的 2 个峰值与研究时段内的 2 次冷事件过程相吻合, 表明海区海表温度的年际变化与

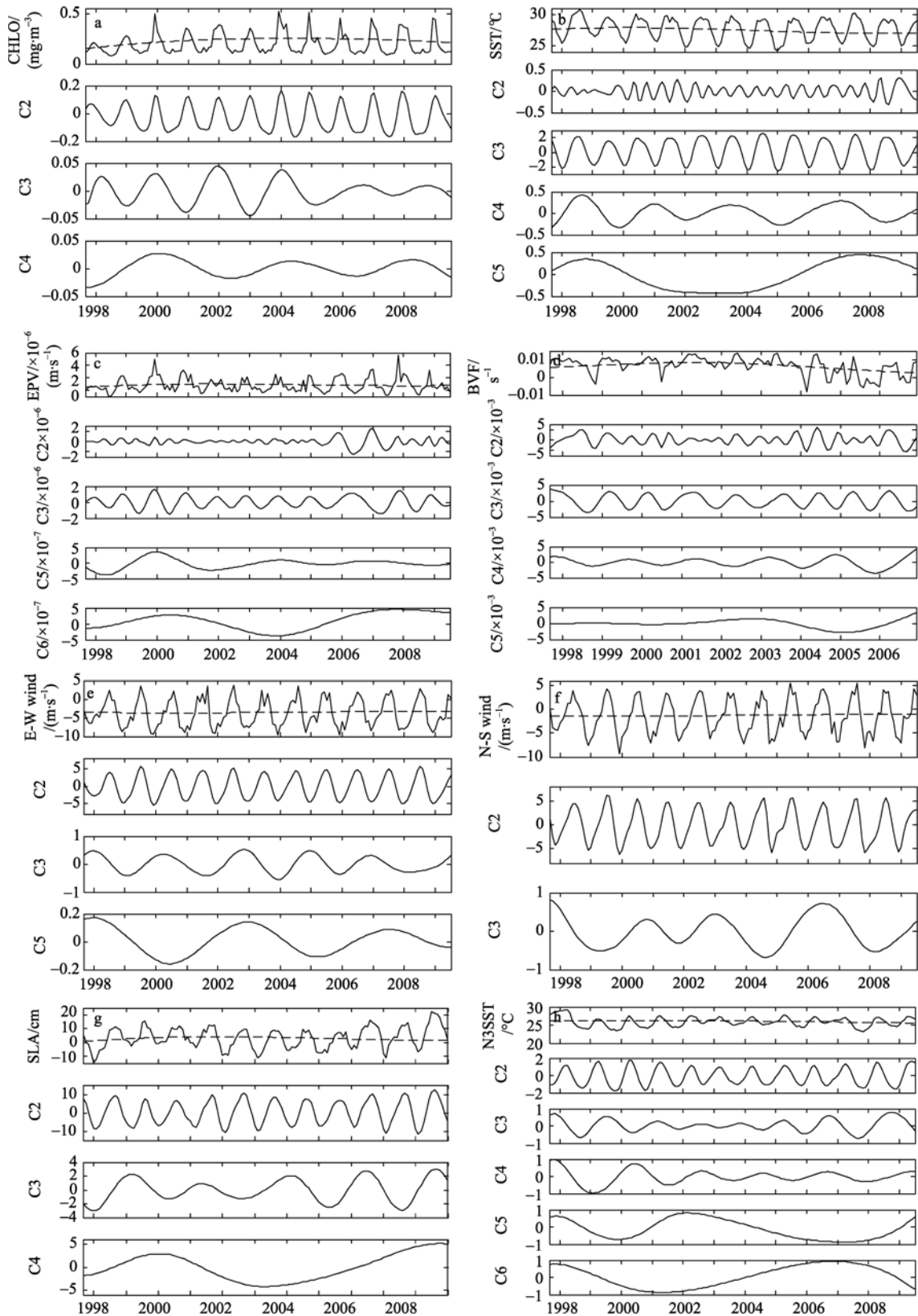


图 3 叶绿素浓度、相关环境物理要素和 Niño3 区 SST 的原始时间序列(顶部框图中的实线)、显著 IMFs(C2、C3 等框图)及趋势(顶部框图中的虚线)

a. 叶绿素浓度; b. 海表温度; c. 埃克曼抽吸速度; d. 10m 层浮力频率; e. 东西风分量; f. 南北风分量; g. 海面高度异常; h. Niño3 区海表温度
 Fig. 3 Raw time series (solid line in the top panel), significant IMFs (C2, C3, etc.), and trend (dashed line in the top panel) for chlorophyll, Niño3 SST, and all environmental physical factors, with (a) for chlorophyll concentration, (b) for SST, (c) for Ekman pumping velocity, (d) for buoyancy frequency at 10m depth, (e) for east-west wind component, (f) for north-south wind component, (g) for sea level anomaly, and (h) for Niño3 SST

表 2 叶绿素浓度、Niño3 区海表温度和海区环境物理要素 IMF 的统计特征

Tab. 2 Statistics of the significant IMF of chlorophyll concentration, Niño3 SST, and related physical factors

| 变量 | 模态 | 平均周期/月 | 平均周期标准差/月 | 方差贡献率/% |
|----------------------------|----|--------|-----------|---------|
| 叶绿素浓度 (CHLO) | C2 | 12.05 | 0.49 | 81.09 |
| | C3 | 25.10 | 3.62 | 3.53 |
| | C4 | 48.00 | 3.74 | 1.78 |
| 海表温度 (SST) | C2 | 6.09 | 1.24 | 0.66 |
| | C3 | 12.14 | 0.76 | 90.49 |
| | C4 | 34.00 | 6.46 | 1.34 |
| 埃克曼抽吸速度 (EPV) | C5 | 107.00 | 0.00 | 3.84 |
| | C2 | 6.42 | 2.51 | 35.26 |
| | C3 | 13.21 | 2.61 | 36.14 |
| 10m 层浮力频率 (BVF) | C5 | 42.25 | 5.89 | 1.63 |
| | C6 | 80.00 | 0.00 | 4.57 |
| | C2 | 6.09 | 1.85 | 36.14 |
| 东西风分量 (E-W wind) | C3 | 12.13 | 1.75 | 21.41 |
| | C4 | 21.13 | 1.45 | 10.88 |
| | C5 | 50.00 | 11.58 | 8.22 |
| 南北风分量 (N-S wind) | C2 | 12.00 | 0.50 | 88.33 |
| | C3 | 24.83 | 5.80 | 0.53 |
| | C5 | 74.06 | 23.36 | 0.84 |
| 海面高度异常 (SLA) | C2 | 12.00 | 0.74 | 92.19 |
| | C3 | 35.83 | 7.78 | 1.19 |
| | C2 | 11.95 | 0.79 | 75.13 |
| Niño3 区 海表温度 (N3SST) | C3 | 28.43 | 3.06 | 5.03 |
| | C4 | 91.00 | 0.00 | 15.07 |
| | C2 | 10.12 | 2.99 | 45.30 |
| | C3 | 16.23 | 4.01 | 15.36 |
| | C4 | 26.80 | 6.61 | 15.82 |
| | C5 | 49.23 | 14.00 | 12.28 |
| | C6 | 71 | 19.07 | 8.65 |

ENSO 关系密切。从分解结果看, 2 个风分量在年际变化上差别显著, 南北风分量得到一周期 3 年左右的振荡模态(见图 3fC3); E-W wind-C3 为东西风分量的准两年振荡, 但方差贡献仅 0.5%, 另有一 6 年左右的更长周期振荡(见图 eC3、C5), 二者的方差贡献和略高于 N-S wind-C3。这种差异体现出热带季风区纬向风与经向风年际变化的不同。埃克曼抽吸速度、海面高度异常和 10m 层浮力频率的年际变化相对显著, 分别达到 6.2%、20%和 19%, 其中后两者的准两年振荡较规则, 平均周期的标准差较小。

如前所述, 研究中我们探索性地分析了 Niño3 区海表温度序列, 结果如图 3h 所示。季节振荡信号亦较明显, 振幅变化不大, 方差贡献为 45.3%。与海区其他环境要素不同, 该序列年际变化模态众多, 所占频带较宽。N3SST-C3 周期接近 1.5 年, C4 周期 2 年左右, C5 的平均周期大约为 4 年, 最后一模态振

荡周期在 6 年左右, 年际变化模态合计方差贡献达 52%。注意到除准年周期模态外各 IMF 起端均位于波峰处, 表明上世纪末的强 El Niño 事件。

EEMD 分解得到的最后一个最低频的脉动项被认为变量在整个研究时期内的趋势^[16, 24](图 3 中的虚线), 它包含了时间尺度大于资料长度的成分。可以看到研究海区叶绿素浓度趋势线呈向序列中部隆起状, 右端点值比左端点值增长约 $0.05\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 这与作为数据起点的 1997、1998 年冬、夏季浓度极低值有很大关系(图 3a); 若从 2000 年算起, 叶绿素浓度趋势线尽管也会略微呈上凸状, 但端点值并无显著增长。对于公众最为关心的温度和海平面高度需要特别指出, 二者变化趋势相像, 都经历了先增长后降低的过程, 可见二者关系紧密。海表温度(图 3b)在 2000 年以后温度开始下降, 这与 Lin 等^[25]对中国气温的研究结果相近, 2008 年有略微

开始回升的迹象,与1997年9月相比,截至2009年7月,海表温度下降了约 0.5°C ,可见在全球变暖的大背景下海表温度受年际甚至年代际变化调制作用的影响明显。海面高度异常的趋势项(图3g)转折点在2001年^[26],但其最终海面高度异常与1997年大致相同。

3.2 要素关系

根据 $\text{var}[\delta_{nm}] < 0.35$ 的同步性标准,表3列举了与叶绿素浓度各IMF相位具有显著相关性的模态对偶,图4描绘出其中几个相关模态对(顶图)及其 $\delta(t)$ 值(底图)。可以看到叶绿素浓度和海表温度准年周期模态具有清晰的反相关关系,它们的 $\delta(t)$ 几乎为常值-1(图4a)。与此相反,与埃克曼抽吸速度的季节振荡模态成同相位关系,但是因2006年埃克曼抽吸速度的准年周期在模态中有所增大,导致在相位移

序列中出现显著的相位差跳动情况(图4b)。分解过程中发生的模态混叠或者IMF调频的本质特征都会改变时间序列中某些点处的周期,造成程度不一的相位差跳跃,如果采用更小的 $\text{var}[\delta_{nm}]$ 阈值准则,便可以抛弃相位差出现剧烈跳跃的模态对偶。海面高度异常的SLA-C2尽管也与CHLO-C2呈反位相关关系,相位差变化方差仅为0.07,但明显 $\delta(t)$ 的平均值略大于-1(图4d)。年际尺度上,海区叶绿素浓度与海表温度、浮力频率以及Niño3区海表温度都存在显著相关,其中前两者与叶绿素浓度呈负相关关系,CHLO-C4和BVF-C5的 $\delta(t)$ 变化(图4e底)给出了一个从1999年至2003年为常值1的相位移;尽管相位移方差稍大,但仍能从图4f中看出叶绿素浓度与Niño3区海表温度在准两年周期年际振荡上多数时刻以正相关为主。

表3 相关IMF对偶

Tab. 3 Pairs of correlated IMFs

| 要素 | 季节变化 | 年际变化 |
|------------------|------------------------|---------------------|
| 海表温度(SST) | CHLO-C2/SST-C3(-) | CHLO-C4/SST-C4(-) |
| 埃克曼抽吸速度(EPV) | CHLO-C2/EPV-C3(+) | × |
| 10m层浮力频率(BVF) | × | CHLO-C4/BVF-C5(-) |
| 东西风分量(E-W wind) | CHLO-C2/E-W wind-C2(-) | × |
| 南北风分量(N-S wind) | CHLO-C2/N-S wind-C2(-) | × |
| 海面高度异常(SLA) | CHLO-C2/SLA-C2(-) | × |
| Niño3区海表温度 N3SST | CHLO-C2/N3SST-C2(-) | CHLO-C3/N3SST-C4(+) |

注: “×”表示模态间相位移方差大于规定阈值0.35,“+”表示同相关,“-”表示反相关。

4 讨论

我们最初的一个设想是,对于不同要素的时间序列,具有相同频率的有效IMF可以被认为是与共同的物理驱动机制有关(例如季节变化或者长期气候振荡)。模态分解结果显示,研究海区的叶绿素浓度和相关物理环境要素都具有十分显著的准年周期变化,对于卫星遥感观测和模式再分析物理量这种变化达总能量的70%—90%不等;另外在海面温度、埃克曼抽吸速度和浮力频率中发现季节内变化,所有时间序列的分解结果亦都证实了年际变化的存在,尤其是准两年周期。这些显著周期变化模态的存在与特征海区乃至整个南海气候的典型特征一致。

研究海区位于南海东北部,中心纬度为 19.5°N ,太阳辐射的季节变化是该海域环境场准年周期变化的根本原因,而太阳一年中两次垂直辐射该海域的特点使海表温度和海洋上层层结都存在半年周期左右的振荡模态,尽管所占比重差异显著。从叶绿素

浓度原始时间序列中我们可以看到,冬季的水华现象明显,大部分年份夏季还会出现一个小的不显著的峰值,此时整个南海盛行西南季风,混合作用较季风转换期有所加强,受限于高海温、弱下降流和稳定的水体层化等因素,叶绿素浓度远小于冬季。由于夏季的这一峰值幅度很小,时有时无,可以认为是信号被高频噪声湮没,因而并没有看到叶绿素浓度的准半年周期模态。

显著的准年周期振荡模态的存在在我们的意料之中,众多有关南海的研究都揭示出水文、气象要素的显著季节变化,吕宋岛西北海域亦不例外。这里大气和上层海洋主要受控于东亚季风,季风是驱动该海域年变化的另一主要因素^[27]。冬季强大的东北季风持续作用于海洋,对水体的充分搅拌使混合层厚度加深,富含营养盐的下层冷水不断卷入上层,同时海面高度的负异常说明海域为气旋式环流所控制,联合西北向的Ekman平流和北向的沿岸潜流使吕宋岛西北部海水上升运动达到全年最大。而海表

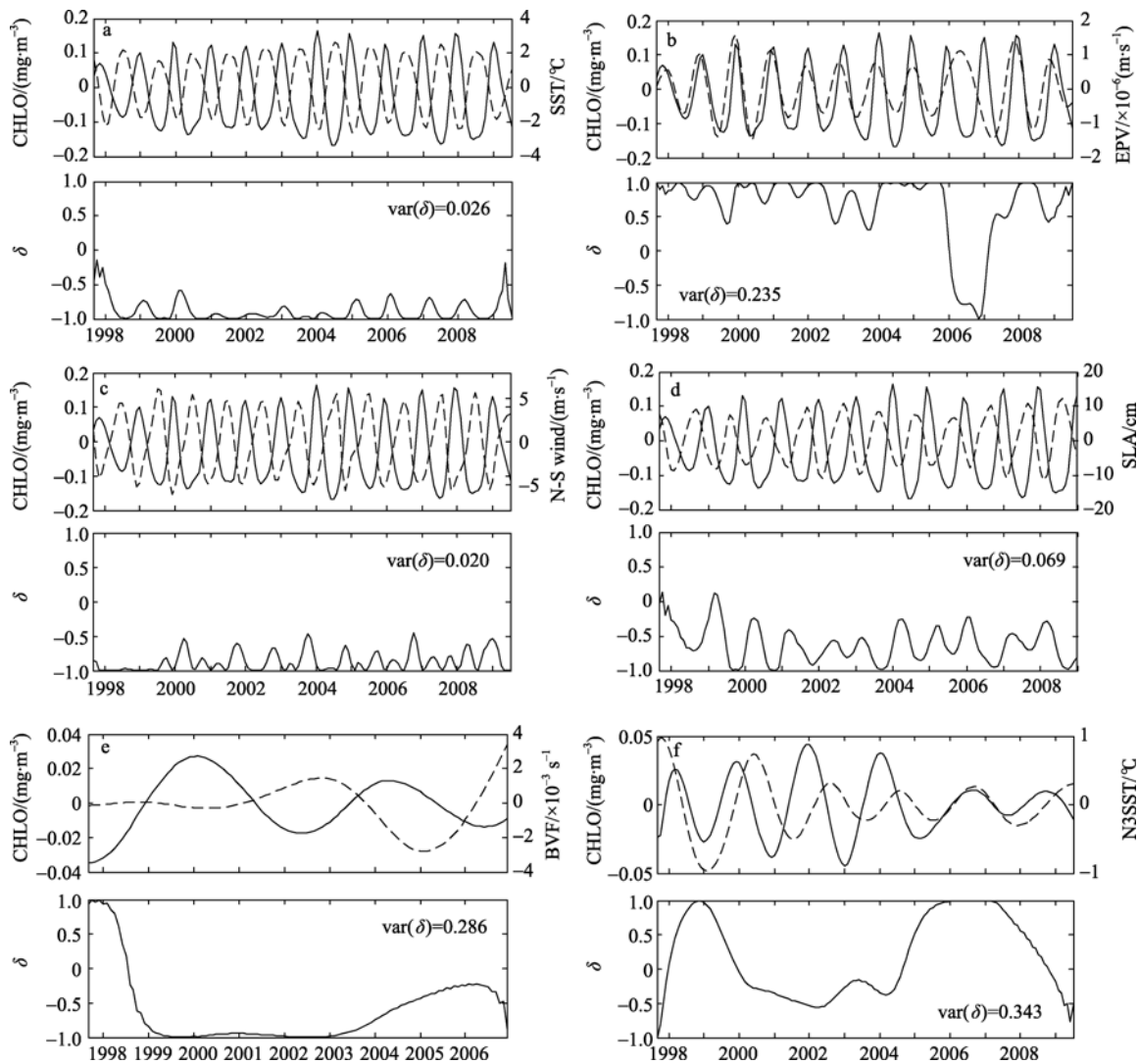


图 4 相关模态对偶(顶图,黑实线对应左轴,灰虚线对应右轴)及其 $\delta(t)$ 变化(底图)

a. 叶绿素浓度和海表温度准年周期模态对偶; b. 叶绿素浓度和埃克曼抽吸速度准年周期模态对偶; c. 叶绿素浓度和南北风分量准年周期模态对偶; d. 叶绿素浓度和海面高度异常准年周期模态对偶; e. 叶绿素浓度和 10m 层浮力频率年际变化模态对偶; f. 叶绿素浓度和 Niño3 区海表温度年际变化模态对偶

Fig. 4 Joint plot of pairs of correlated IMFs (upper panels: black solid line for left ordinate axis; grey dashed line for right ordinate axis)

and associated $\delta(t)$ series (lower panels), with (a) for CHLO-C2 and SST-C3, (b) for CHLO-C2 and EPV-C3, (c) for CHLO-C2 and NS-C2, (d) for CHLO-C2 and SLA-C2, (e) for CHLO-C4 and BVF-C5, and (f) for CHLO-C3 and N3SST-C4.

温度在海面热通量以及海洋动力(平流、垂向夹卷等)的强迫下, 降至四季最低水平。此外, 10m 层浮力频率准年周期变化模态图显示上层水体层化作用明显减弱, 水体的不稳定使深层营养盐极易通过垂向混合进入上层。历史航次资料已证实冬季营养盐跃层显著抬升^[28], 营养盐的充分供给和适宜的水温造成了冬季浮游植物水华事件。春季是东北季风向西南季风的过渡季节, 风速减小, 水温迅速升高, 层化加强, 垂向混合和海水的平流效应均较弱, 海区营养盐得不到补充, 叶绿素浓度迅速降低。夏季在西南季风作用下叶绿素浓度稍有增长, 而秋季尽管研究海域已被很强的东北季风控制, 但海洋仍需一定

的时间完成动力上的调整以影响该区域的温度和营养盐供给, 一般在两个月之后叶绿素浓度就会出现显著增长, 这从海面高度异常和叶绿素浓度的准年周期模态叠加图可以看出(图 4d)。这种共同的波动类型说明大气强迫是研究海区的一个主要驱动力, 叶绿素浓度与环境要素的准年周期模态的相位差余弦值变化图进一步证明了海洋大气动力过程对叶绿素浓度变化的影响, 除埃克曼抽吸速度外, 在吕宋岛西北海域其余各物理量均与其呈很好的反相位关系。比较两个风分量(东西风分量与叶绿素浓度准年周期模态对偶未显示)发现, 南北风分量的振幅调制过程(包络线变化)与叶绿素浓度振幅变化相近, 而

东西风分量的包络线变化无此特征。这可能同海区特殊的地理位置有关,其东接西太平洋,东南邻南北狭长状的吕宋岛,经向风对海峡上层水进入南海和吕宋岛西侧的离岸 Ekman 输送有重要影响,因而与海区叶绿素浓度关系更紧密。

研究海域属于南海的一部分,在东亚季风影响下,表现出显著的季节变化,季节信号主宰海区环境物理要素变化;另一方面,作为南海与热带太平洋的通道区域,这里的年际变化也格外突出。

自热带低平流层纬向风准两年振荡(QBO)现象被揭示以来,热带各参数的准两年周期变化陆续成为研究热点。我们对研究海域要素的分解中于个别变量中发现 2—3 年周期的信号着实是一个惊喜,如 10m 层浮力频率和东-西风分量,海面高度异常亦有一平均周期 2.37 年的振荡模态(SLA-C3)。尤其对于叶绿素浓度时间序列,在方差贡献上 CHLO-C3 是仅次于准年周期变化的模态,并且未见前人报道过这种热带典型周期振荡。从要素间相关关系变化图看出, Niño3 区海表温度与叶绿素浓度在准两年变化模态上有显著相关性(图 4f),但是类似相关未体现在海区各环境物理要素之间。这或许说明在这一时间尺度上局地气象、水文各要素非线性相互作用强烈,难以线性地衡量叶绿素浓度对它们的响应;而从与大尺度海气相互作用的遥相关关系上考虑这种变化会更加合适。

通过 EEMD 分解,4 年左右周期的年际变化从叶绿素浓度时间序列中浮现出来,并且相位移余弦值变化图表明其与海表温度和 10m 层浮力频率的对应模态具有良好的反位相关关系,说明上述要素在长周期上对海区叶绿素浓度的调制作用。

5 结论

为了克服 EMD 方法的模态混叠问题,本文利用改进后的 EEMD 方法对吕宋岛西北海域的叶绿素

浓度及其相关环境物理要素时间序列作分析,将各变量的各个尺度的变化分离出来,得到较规则的显著准年周期振荡模态。在此基础上,利用 HT 方法刻画信号瞬时特征的能力,以 IMF 对偶相位差余弦值的方差为指标,考察了各要素与叶绿素浓度在不同时间尺度上的相关性。

在接近 12 年的叶绿素浓度时间序列中发现了显著准年周期、准 2 年周期和 4 年左右周期的振荡模态;其他变量的分解结果亦显示出显著的准年周期变化和不同时间尺度的年际振荡特征。模态之间的相关分析表明,当地海区的海面温度与卫星遥感叶绿素浓度相关关系最好,在年变化和 3—4 年年际变化上均呈显著负相关,且在准年周期上模态对偶调幅过程也很相近;只有埃克曼抽吸速度与叶绿素浓度在季节变化上呈显著正相关关系;10m 层浮力频率是唯一在准年周期振荡模态上与叶绿素浓度无相关性的物理量,但在年际变化上显示出了负相关;表征 ENSO 循环的 Niño3 区海表温度在准 2 年周期振荡上对海区叶绿素浓度年际变化有重要影响。

本文的研究结果可以帮助我们将海区的水文、气象变化特点与其生态特征联系起来,同时成功地使潜藏于序列中的共同的物理强迫机制凸显出来,结合对应的相关性分析,在研究多尺度变化的时间序列并确定作用于其上的驱动力的相对重要性时,被证明是一个强大的、客观的极其有效的方法。

当然我们的研究仍然有些不足之处。考虑到水色遥感卫星的质量问题,文中统一采用月资料,如果被分解的时间序列采样频率提高,可以将更小时间尺度的周期振荡提取出来,利于对海区物理量高频变化的刻画。另外,我们只是考察了叶绿素浓度与各环境要素相关模态之间的相关性,探讨了物理环境对海区叶绿素浓度的调控作用,然而各物理要素之间也必定互相影响,对它们的研究有助于我们更好地理解海区复杂得多的时间尺度变化过程。

参考文献

- [1] YODER J A, KENNELLY M A. What have we learned about ocean variability from satellite ocean color imagers?[J]. *Oceanography*, 2006, 19(1): 152-171.
- [2] TANG DANLING, NI I-H, DANA R K, et al. Remote sensing observations of winter Phytoplankton blooms southwest of the Luzon Strait in the South China Sea[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1999, 191: 43-51.
- [3] 赵辉, 齐义泉, 王东晓, 等. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 45-52.
- [4] PENAFLOR E L, VILLANOY C L, LIU CHO-TENG, et al. Detection of monsoonal phytoplankton blooms in Luzon Strait with MODIS data[J]. *Rem Sens Environ*, 2007, 109(4): 443-450.
- [5] VANTREPOTTE V, MELIN F. Temporal variability of

- 10-year global SeaWiFS time-series of phytoplankton chlorophyll a concentration[J]. *ICES J Mar Sci*, 2009, 66(7): 1547-1556.
- [6] NEZLIN N P, LI BAILIAN. Time-series analysis of remote-sensed chlorophyll and environmental factors in the Santa Monica-San Pedro Basin off Southern California[J]. *J Marine Syst*, 2003, 39(3-4): 185-202.
- [7] HENSON S A, ROBINSON I, Allen J T, et al. Effect of meteorological conditions on interannual variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Irminger Basin, North Atlantic[J]. *Deep Sea Res, Part I*, 2006, 53(10): 1601-1615.
- [8] WANG JING, QI YIQUAN, JONES I SF. An analysis of the characteristics of chlorophyll in the Sulu Sea[J]. *J Marine Syst*, 2006, 59(1-2): 111-119.
- [9] ISHII M, KIMOTO M, KACHI M. Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates[J]. *Mon Weather Rev*, 2003, 131: 51-73.
- [10] STEWART R H. Introduction to physical oceanography[M/OL]. Texas A & M Univ, Dept of Oceanogr, 2004[2010-04-07]. http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/contents.html.
- [11] ZHANG CAIYUN, HU CHUANMIN, SHANG SHAOLING, et al. Bridging between SeaWiFS and MODIS for continuity of chlorophyll-a concentration assessments off Southeastern China[J]. *Rem Sens Environ*, 2006, 102: 250-263.
- [12] LEI YAGUO, ZUO M J. Fault diagnosis of rotating machinery using an improved HHT based on EEMD and sensitive IMFs[J]. *Meas Sci Technol*, 2009, 20(12): 125701-125713.
- [13] HUANG N E, WU ZHAOHUA. A review on Hilbert-Huang Transform: method and its applications to geophysical studies[J]. *Rev Geophys*, 2008, 46: RG2006. doi:10.1029/2007RG000228.
- [14] WU M-C, HU C-K. Empirical mode decomposition and synchrogram approach to cardiorespiratory synchronization[J]. *Phys Rev E*, 2006, 73: 051917. doi: 10.1103/PhysRevE.73.051917.
- [15] PATRICK M C. How do you make a time series sing like a choir? Using the Hilbert-Huang transform to extract embedded frequencies from economic or financial time series[G]. Helsinki: Bank of Finland, 2009: 7-32.
- [16] HUANG N E, ZHENG SHEN, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proc R Soc Lond*, 1998, 454: 903-995.
- [17] WU ZHAOHUA, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. *Adv Adapt Data Anal*, 2009, 1(1): 1-41.
- [18] CHENG QIAN, FU CONGBIN, WU ZHAOHUA, et al. On the secular of spring onset at Stockholm[J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L12706.
- [19] WU ZHAOHUA, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. *Proc R Soc Lond*, 2004, 460: 1597-1611.
- [20] COHEN L. Time-frequency analysis: Theory and applications[M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 1995: 320.
- [21] SOLE J, TURIEL A, LLEBOT J E. Using empirical mode decomposition to correlate paleoclimatic time-series[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2007, 7: 299-307.
- [22] SOLE J, TURIEL A, ESTRADA M, et al. Climatic forcing on hydrography of a Mediterranean bay (Alfacs Bay)[J]. *Continent Shelf Res*, 2009, 29(15): 1786-1800.
- [23] WU ZHAOHUA, SCHNEIDER E K, KIRTMAN B P, et al. The modulated annual cycle: an alternative reference frame for climate anomalies[J]. *Clim Dyn*, 2008, 31: 823-841.
- [24] WU ZHAOHUA, HUANG N E, LONG S R, et al. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series[J]. *PNAS*, 2007, 104(38): 14889-14894.
- [25] LIN ZHENSHAN, SUN XIAN. Multi-scale analysis of global temperature changes and trend of a drop in temperature in the next 20 years[J]. *Meteorol Atmos Phys.*, 2007, 95: 115-121.
- [26] CHENG XUHUA, QI YIQUAN. Trends of sea level variations in the South China Sea from merged altimetry data[J]. *Glob Planet Change*, 2007, 57(3-4): 371-382.
- [27] LIU K K, CHAO S Y, SHAW P T, et al. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study[J]. *Deep-Sea Research I*, 2002, 49(8): 1387-1412.
- [28] SHAW P T, CHAO S Y, LIU K K, et al. Winter upwelling off Luzon in the northeastern South China Sea[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(C7): 16435-16448.