

中国东部海域叶绿素时空变化经验正交分析及探讨

胡松*, 吴奇峰

(上海海洋大学海洋科学学院,海洋生态系统与环境实验室,上海 201306)

摘要: 利用经验正交函数(EOF)分析了中国东部海域 SeaWiFS 叶绿素 a(1998—2007 年)时空变化主要模态,对前 3 个模态进行了功率谱分析。气候平均结果表明,叶绿素 a 空间总体分布特征为近海高、外海低,季节变化为春季 3—4 月最高,夏季 6—7 月最低。EOF 前 3 个模态所占的贡献率分别为 84.89%,3.38%,1.06%。第一模态权重占绝对优势,空间分布与气候平均场基本一致,时间序列表明 1998 年和 2000 年为叶绿素 a 浓度典型低值年,2007 年为叶绿素 a 浓度典型高值年,线性拟合表明总体叶绿素 a 浓度呈缓慢增加趋势。第二模态主要体现为季节变化,功率谱显著周期为 12 个月,空间上呈长江口、杭州湾及浙江沿岸海域为正,离岸海域为负的反位相分布特征。第三模态功率谱显著周期为 12 个月和 6 个月,以 122.9°E, 32.2°N 为中心的区域呈负相位,黄海和浙江外海区域呈正相位分布,这可能受沿岸流、长江径流转向路径和台湾暖流变化所影响。

关键词: 叶绿素 a; EOF 分析; 时空分布; 中国东部海域

中图分类号: P 735

文献标志码: A

关于低营养层次生产力和叶绿素分布的研究越来越多,数据包括现场观测和卫星资料。费尊乐等^[1]根据海洋局 1982 年资料对渤海叶绿素 a 和初级生产力做了详细分析;毛兴华等^[2]根据日本长崎气象站资料分析了东海 PN 断面叶绿素分布规律;陆赛英^[3]利用中日黑潮合作调查研究数据分析了东海北部叶绿素 a 极大值分布和季节变化规律;鲁北伟等^[4]根据实测数据对春季东海表层水叶绿素 a 含量分布特征进行了分析;李宝华等^[5]利用中日联合调查资料探讨了南黄海夏末叶绿素分布特征;王作华等^[6]根据黄东海调查资料分析了黄东海夏季叶绿素 a 分布特征及影响因子。

中国东部海域叶绿素分布复杂,常规逐点测量方法往往成本高且不能很好体现叶绿素大尺度时空分布特征,而航天和卫星遥感可以覆盖大面积水域。刘宝银^[7]利用航天遥感信息分析了黄、渤海叶绿素 a 含量分布并与观测进行了比较,相关系数可达 85%。近年来 SeaWiFS(sea-viewing

wide field-of-view sensor)资料是目前普遍采用的海水叶绿素 a 卫星遥感数据,适用于大尺度海表层叶绿素 a 分布研究。毛志华等^[8]利用 MODIS 数据分析了北太平洋渔场的叶绿素 a 浓度分布;邹斌等^[9]利用 SeaWiFS 数据分析了渤海海温和叶绿素时空分布关系;官文江等^[10]利用 2000 年 SeaWiFS 数据计算了渤、黄、东海初级生产力时空分布特征;赵辉等^[11]利用 1997 年 10 月至 2002 年 9 月 SeaWiFS 卫星遥感数据研究了南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征;伍玉梅等^[12]分析了 1997—2007 年度 SeaWiFS 卫星数据,对东海叶绿素 a 浓度的时空变化特征进行了分析。

中国东部海域动力因子多,北有黄海冷水团、苏北沿岸流,东北侧朝鲜沿岸流随季节变化,中部和南侧受长江径流冲淡水、台湾暖流、对马暖流影响,外海受到黑潮影响,情况十分复杂。作为这样一个复杂的海区,叶绿素 a 的大尺度时空变化分析有必要考虑将整个中国东部海域作为一个整

收稿日期:2010-12-06 修回日期:2011-03-23

资助项目:上海市科委重点项目(09320503700);上海市教委优秀青年基金(B-8101-09-0237);上海市教委高校第 5 期海洋环境工程重点学科建设项目(J50702)

通讯作者:胡松,E-mail:shu@shou.edu.cn

体。因此,本文利用1998—2007年SeaWiFS卫星遥感数据对整个中国东部海域叶绿素a浓度进行了EOF分析。其主要目的是:(1)进一步验证前人的主要结论;(2)综合分析叶绿素a浓度变化主要模态,丰富对中国东部海域低营养层次的认识,为后续海洋生态系统动力学研究提供参考。我国近海水域多属于二类水体,悬浮泥沙浓度大,这可能会对近岸部分结果产生偏差,但应不影响大尺度较粗分辨率叶绿素a的总体时空分布趋势。

1 材料与方法

1.1 材料来源

采用的叶绿素a资料来自美国国家宇航局(NASA)提供的1998至2007年SeaWiFS卫星反演数据,空间分辨率为9 km。月平均数据资料长度从1998年1月—2007年12月,共计120个月。资料范围为中国东部海域及毗邻海域($116^{\circ} \sim 135^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$) (图1)。

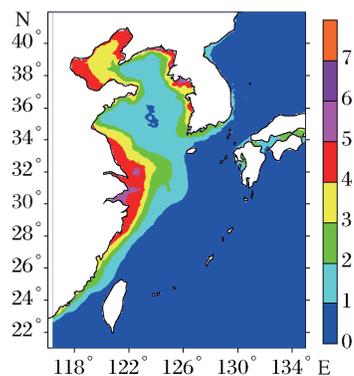


图1 1998—2007年中国东部海域年平均叶绿素a空间分布(mg/m^3)

Fig. 1 The spatial distribution of climatological (1998—2007) Chlorophyll a concentration (mg/m^3)

1.2 研究方法

对原始SeaWiFS叶绿素数据进行kriging插值^[13],补充资料缺损点,得到120个月长序列月平均海表面叶绿素a浓度资料集。资料可表示为矩阵 $m \times n$, m 为空间点, n 为时间点,本研究中 $m = 9\ 881$, $n = 120$ 。首先对资料矩阵作了气候平均,得出气候平均值空间分布和季节特征。随后对资料矩阵作了经验正交函数分析(EOF),为了检查是否存在显著周期变化(>95%置信度),对EOF主要模态的时间序列结果作了离散功率谱分析。

2 结果

2.1 叶绿素的季节变化和多年平均空间分布

对中国东部海域($116^{\circ} \sim 135^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$)1998—2007年叶绿素a数据进行全场逐月平均得到逐月平均值变化曲线。该曲线具有明显的季节变化特征,最高约为 $1.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ (3—4月),最低约为 $0.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ (6—7月)。

图1为中国东部海域叶绿素a浓度多年平均值分布,整体上看趋势是近岸高,外海低。多年平均滤去了季节变化和年际变化,在一定程度上体现出浮游植物总生物量。浮游植物生长与净营养盐输入能力有关,因此,高值主要出现在近岸区域,如辽东湾、渤海湾、长江口附近、舟山群岛、浙江福建沿岸等海域,这些地区多受到陆地径流带来的营养盐、悬浮物质和上升流的影响,水深较浅,垂直混合作用显著。外海主要受台湾暖流及黑潮低营养盐水团影响,叶绿素a浓度很低。在南黄海中心附近(123.5°E , 35°N)也呈现极低的叶绿素a含量。

2.2 叶绿素浓度时空变化特征

EOF分析结果前3个模态贡献率分别为84.89%、3.38%、1.06%,如表1所示。从表1看出,经验正交展开的收敛速度很快,前3个模态特征向量已经反映了中国东部海域叶绿素a分布场近90%的信息。首先由第一模态特征向量图(图2-a)看出,在整个研究海域均为正相关,表明中国东部海域叶绿素a浓度变化趋势在空间上具有很好的整体一致性。第一模态是一个大尺度特征场,数值从沿岸向离岸递减,高值区主要分布在渤海沿岸、江苏省沿岸、长江口附近以及浙江沿岸等地区,低值区主要分布在外海。将平均叶绿素a分布场图(图1)和第一模态特征向量图(图2-a)比较,它们的形态非常相似,所以第一模态特征向量图可以主要解释为平均叶绿素a分布场。因为这个特征场有很大的权重,因此对应的大(小)时间系数基本上对应中国东部海域叶绿素a浓度大(小)。图2-b是第二模态特征向量图,可以看出叶绿素a浓度变化趋势在空间上呈现一个正中心,其它海域为负值的反相分布特征,说明这两个区域具有相反的变化趋势。正值区在长江口及毗邻海域,中国东部海域其他区域为明显的负值区。图2-c是第三模态特征向量图,由黄海向南至台湾海峡,叶绿素a浓度变化趋势大体呈正、负、正位相间隔

分布形式。第三模态方差贡献较少,仅占1%。黄海中心区域存在一个正中心,近岸为负值,说明相互存在反向变化。叶绿素 a 浓度变化最明显的区

域位于长江口附近,大体范围以 $122.9^{\circ}\text{E}, 32.2^{\circ}\text{N}$ 为负值中心。第三模态外海振幅几乎为零,江浙近海到外海逐步从正中心过渡到零。

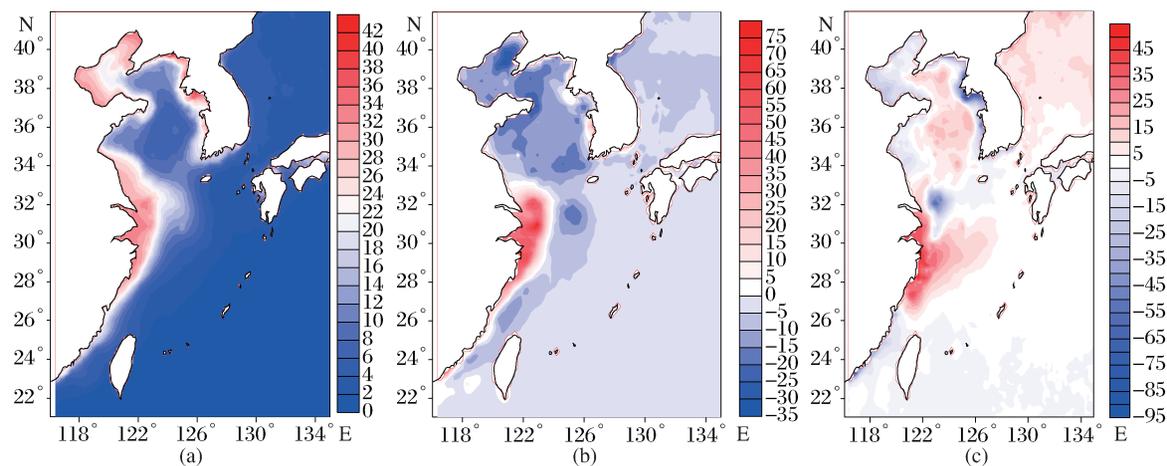


图2 EOF分析前3个模态空间分布

(a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态。

Fig. 2 The spatial distributions of the first 3 modes obtained by EOF analysis

(a) the first mode; (b) the second mode; (c) the third mode.

表1 EOF的前3个模态方差贡献率
Tab. 1 Contributions of the first three EOF modes to variance

	特征值序列 features sequence		
	1	2	3
贡献率/% contributions	84.89	3.38	1.06
累积贡献率/% accumulated contributions	84.89	88.27	89.33

经过标准化处理后的第一模态特征向量逐年时间系数变化如图3-a,在1998和2000年时为明显的小值,这些年对应中国东部海域叶绿素 a 浓度比较低的年份;而在2007年是明显的大值,这些年对应中国东部海域叶绿素 a 浓度偏大的年份。此外,时间序列分布有非常弱的正趋势,表明计算区域总体叶绿素 a 浓度近10年来缓慢增加。图3-b为第二模态的时间变化序列图,当时间系数为正时,表现为沿岸海域叶绿素 a 浓度的上升和离岸海域叶绿素 a 浓度的下降;当时间系数为负数时,表现为沿岸海域叶绿素 a 浓度的下降和离岸海域叶绿素 a 浓度的上升。此时间序列分布线性趋势近似为零,可以认为此振荡近10年大体趋于稳定,没有增强或减弱迹象。图3-c为第三模态的时间变化序列图,此时间序列分布线性趋势近似为零,可以认为此振荡近十年大体趋于稳

定,没有增强或减弱迹象。

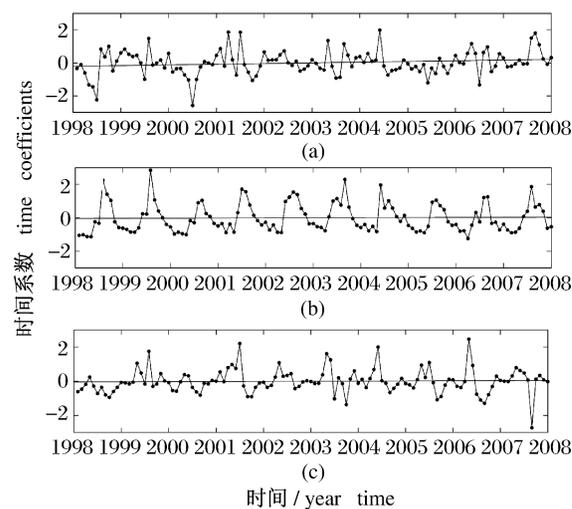


图3 EOF分析前3模态的时间图

(a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态。

Fig. 3 The time coefficients of the first 3 modes obtained by EOF analysis

(a) the first mode; (b) the second mode; (c) the third mode.

对第一模态时间特征序列进行频谱分析(图4-a),可以得到叶绿素具有30个月、20个月、13个月和4个月明显变化周期,其规律有待进一步研究。对第二模态的时间序列进行频谱分析(图4-b),可以得到叶绿素具有12个月显著变化周期,因此第二模态具有明显的季节变化特征。对

第三模态的时间序列进行频谱分析(图 4-c),叶绿素浓度具有 12 个和 6 个月明显变化周期。

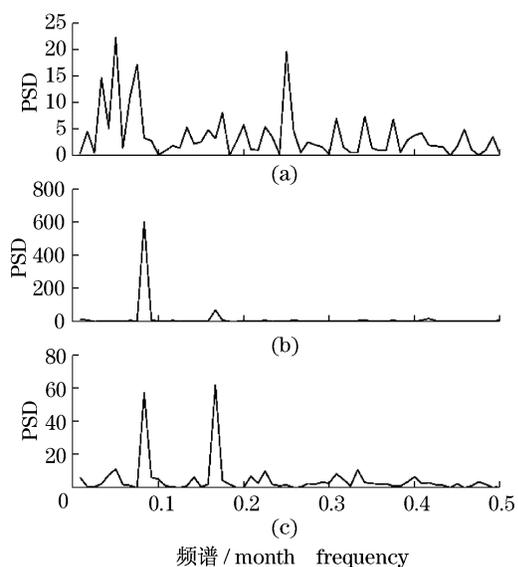


图 4 EOF 分析前 3 模态的时间变化系数功率谱
(a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态。
Fig. 4 The power spectra for the time coefficients of the first 3 modes obtained by EOF analysis
(a) the first mode; (b) the second mode; (c) the third mode.

选定第三模态中的负中心、正中心和外海某一代表性站点,输出了 10 年 SeaWiFS 叶绿素浓度时间序列。由图 5-a, b 可见它们总体上具有负

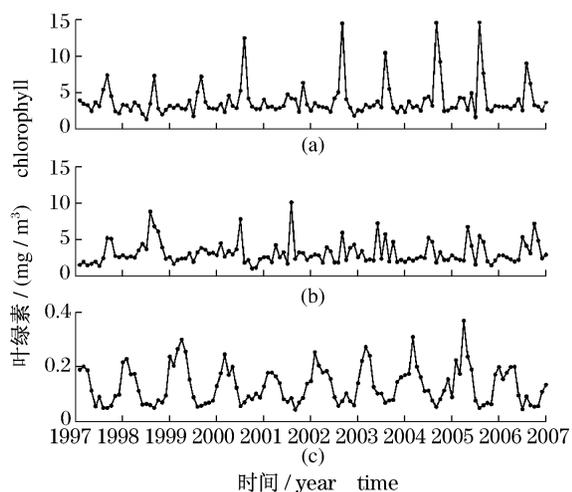


图 5 典型点时间序列图
(a) 负中心站点 (123.05°E, 32.16°N); (b) 正中心站点 (122.08°E, 29.27°N); (c) 外海站点 (129.09°E, 29.64°N)。
Fig. 5 The time coefficients of typical points
(a) point of negative center (123.04°E, 32.13°N); (b) point of positive center (122.54°E, 29.04°N); (c) point of open sea (131.13°E, 28.20°N).

相关性,一般情况下,图 5-a 对应的高值年往往对应着图 5-b 的低值年,长江口外东北处叶绿素浓度偏高,而同时南岸下游则为低叶绿素浓度年,这是否与长江径流转向强度相一致,还需进一步深入研究。图 5-c 为外海某一代表性站点,由于常年受到黑潮的影响,叶绿素浓度 $< 0.4 \text{ mg/m}^3$,为较有规律的年变化,晚冬初春为最大值,绝大部分变化可被 EOF 前两个模态所体现。

3 讨论

根据以往研究^[12],冬季,中国东部海域为偏北季风,海水垂直运动加剧,底层营养盐补充表层,但温度和光照抑制了植物光合作用。春季,海面温度升高风力减弱导致海水层化,温度和光线适宜,冬季营养盐的补充有利于浮游植物的大量繁殖,4 月份出现叶绿素 a 浓度的最大值。夏季,表层营养盐消耗且层化阻碍营养盐补充导致浮游植物最少。

南黄海中心一方面由于远离径流输运,另一方面也可能由于黄海冷水团形成的层化进一步减少了表层水营养盐的补给,叶绿素 a 含量极低(图 1)。丛丕福等^[14]的研究表明,南黄海中央低值区出现在 5 月份左右,直至 12 月完全消失,主要是由于夏秋季跃层导致该海区营养盐缺乏,抑制浮游植物生长。东海主要受长江口径流和上升流影响,如图 1 所示叶绿素 2 mg/m^3 等值线可延伸到济州岛西南侧 (125°E, 33°N),这与李宝华等^[5]根据实测资料分析的南黄海叶绿素 a 分布相符,在他们的资料中,南黄海 33°N 以北站点叶绿素 a 偏低,33°N 以南除济州岛附近外所有站点叶绿素 a 偏高。朱建荣^[15]的研究结果表明,长江冲淡水出口门后其主轴朝东北偏北方向扩展,台湾暖流沿长江口外水下河谷带来的高盐水和长江冲淡水混合,在长江口外 122.6°E 附近形成强大的羽状锋。在该羽状锋内,属于冲淡水和外海水的交界区。此区域是长江冲淡水和台湾暖流的交汇处,海水含有丰富的营养物质和生物量,所以浮游生物现存量较高。周伟华等^[16],观测结果表明长江口外位于 123°E 存在浮游植物浓度高值,而在长江口附近站点由于泥沙含量过高,藻类生长受到光限制^[17]。SeaWiFS 多年平均值(图 1)并未很好地体现长江口这种分布结构,说明在近岸 SeaWiFS 反演精度还需进一步提高。自台湾北部和济州岛

连线以东大部分的海域叶绿素 a 浓度较低,外海低值区主要受到低营养盐黑潮水系影响(图 1)。根据鲁北伟等^[4]测量结果表明,黑潮表层水的叶绿素最低($<0.5 \text{ mg/m}^3$),其次是台湾暖流表层水($1.0 \sim 1.5 \text{ mg/m}^3$),长江冲淡水和江浙沿岸上升流区域叶绿素含量较高($>1.5 \text{ mg/m}^3$),这与图 1 分布极为一致。

对多年叶绿素 a 浓度的经验正交分析第一模态体现了多年的平均叶绿素分布场的特征,沿岸高,离岸低,并且空间上具有很好的一致性。

经验正交分析第二模态体现了具有季节变化的长江径流影响区域及毗邻海域和整体中国东部海域其它海域较明显的反位相振荡特征。叶绿素 a 浓度变化最明显区域位于长江口外附近。秋、冬季节以东北风为主,水温比较低,成为浮游植物生长的限定因子,叶绿素浓度比较低。春、夏季节,海水水温上升为浮游植物的成长提供了适宜的温度条件。春、夏季雨水丰富,长江冲淡水带来了丰富的营养盐,并且海区水体层化现象明显,水体较为稳定,有利于浮游植物的生长,所以叶绿素 a 浓度较高^[18]。此模态表明,长江口及毗邻海域叶绿素 a 偏高(偏低)的年份对应整体中国东部海域其他海域叶绿素 a 偏低(偏高)。本文得出的结果和前人研究^[12]都显示,长江径流季节变化对叶绿素 a 浓度影响显著,李国胜等^[19]根据 1998 年 SeaWiFS 水色遥感资料的研究也证实长江冲淡水的季节变化对叶绿素浓度具有很大影响。林军等^[20]根据 2006 年夏季长江口外海域站点大面积综合调查结果,分析了浮游植物的优势种和分布特征。长江口外海区的浮游植物生物量在冲淡水区域最高,江苏外海居中,近河口和台湾暖流区最低。蒲新明^[21]等分析了 1999 年 5 月在长江口及周围海域的环境调查资料,将长江口附近海区分为:近河口区、冲淡区、台湾暖流影响区和黄海沿岸流区域,其中冲淡水区域叶绿素含量最高。吕华庆^[22]等利用营养盐调查资料得出,长江冲淡水给舟山渔场提供了大量的硅酸盐,对提高该海区的初级生产力起到了积极的作用,有利生物的繁衍生息,提高了生物量。

冷半年(11—4月)长江冲淡水受强烈北风影响,顺岸南下形成闽浙沿岸流,暖半年(5—10月)主流指向济州岛,经转向后南下^[23]。赵保仁^[24]根据实测资料分析得出,径流量、台湾暖流、风应

力的涡度变化是影响长江冲淡水是否转向的关键因子。由于浮游植物生物量在长江冲淡水区域较高,因此长江冲淡水的季节转向和路径变化势必对叶绿素空间分布产生影响。第三模态可能反应了长江冲淡水转向导致长江口门和江浙沿岸的反向振荡,以及台湾暖流变化对叶绿素分布场的影响。第三模态中负值中心位于 $122.9^\circ\text{E}, 32.2^\circ\text{N}$, 接近于夏季长江冲淡水转向区域。而江浙沿岸及外海为正值,中心位于浙江沿岸海域,向外海逐渐减弱,在台湾暖流影响区域附近幅度减弱至零。第三模态 6 个月短周期与丛丕福等^[14]得到的长江径流量存在半年变化周期相一致,进一步说明了第三模态可能体现了长江径流转向作用和台湾暖流变化的影响。然而,由于第三模态贡献率较低,因此物理意义是否明确还需进一步研究。

以往研究利用实测数据,时间空间覆盖面受到局限,多为定性分析。本文通过长达 10 年的卫星叶绿素时间序列,利用经验正交方法分析和总结了我国东部海域叶绿素时空分布规律,量化分离并分析了前 3 种主要模态。典型物理过程如长江冲淡水、沿岸流、黑潮及其分支,在叶绿素时间和空间总体分布特征方面影响显著,进而对整个近海生态系统产生作用。各种物理因子与这些模态的直接相关关系以及浮游植物水华动力学机理,还需在以后的研究中进一步补充和完善。

参考文献:

- [1] 费尊乐,毛兴华,朱明远,等.渤海生产力研究——I.叶绿素 a 的分布特征与季节变化[J].海洋学报,1988,10(1):99-106.
- [2] 毛兴华,管永红.东海 PN 断面 1978—1982 叶绿素 a 含量分布特征及其与环境因子的关系[J].海洋湖沼通报,1987(1):58-63.
- [3] 陆赛英.东海北部叶绿素 a 极大值的分布规律[J].海洋学报,1998,20(3):64-75.
- [4] 鲁北伟,王荣.春季东海表层水叶绿素 a 含量分布特征[J].海洋与湖沼,1996,27(5):487-492.
- [5] 李宝华,傅克付,曾晓起.南黄海夏末叶绿素 a 的分布特征[J].海洋与湖沼,1999,30(3):300-305.
- [6] 王作华,石晓勇,张伟松,等.黄东海夏季叶绿素 a 分布特征的初步探讨[J].渔业科学进展,2009,30(2):120-126.
- [7] 刘宝银.应用航天遥感信息对黄、渤海冬季初级生产力的估算[J].水产学报,1984,8(3):227-234.
- [8] 毛志华,朱乾坤,龚芳.卫星遥感北太平洋渔场叶

- 绿素 a 浓度[J]. 水产学报,2005,29(2):270-274.
- [9] 邹斌,邹亚荣,金振刚. 渤海温度与叶绿素季节空间变化特征分析[J]. 海洋科学进展,2005,23(4):487-492.
- [10] 官文江,何贤强,潘德炉,等. 渤、黄、东海海洋初级生产力的遥感估算[J]. 水产学报,2005,29(3):367-372.
- [11] 赵辉,齐义泉,王东晓. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征分析[J]. 海洋学报,2005,27(4):45-52.
- [12] 伍玉梅,徐兆礼,崔雪森,等. 1997-2007年东海叶绿素 a 质量浓度的时空变化分析[J]. 环境科学研究,2008,21(6):137-142.
- [13] 张仁铎. 空间变异理论与应用[M]. 2版. 北京:科学出版社,2005:215-225.
- [14] 丛丕福,牛铮,蒙继华,等. 1998-2003年卫星反演的中国陆架海叶绿素 a 浓度变化分析[J]. 海洋环境科学,2006,25(1):30-33.
- [15] 朱建荣. 长江口外海区叶绿素 a 浓度分布及其动力成因分析[J]. 中国科学: D 辑,2004,34(8):757-762.
- [16] 周伟华,霍文毅,袁翔城,等. 东海赤潮高发区春季叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. 应用生态学报,2003,14(7):1055-1059.
- [17] 沈新强,胡方西. 长江口外水域叶绿素 a 分布的基本特征[J]. 中国水产科学,1995,2(1):71-80.
- [18] 周伟华,袁翔城,霍文毅,等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报,2004,26(3):143-150.
- [19] 李国胜,王芳,梁强,李继龙. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制[J]. 地理学报,2005,58(4):484-493.
- [20] 林军,朱建荣,张经,等. 长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系[J]. 水产学报,2011,35(1):74-87.
- [21] 蒲新明,吴玉霖,张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 II. 春季的营养限制情况[J]. 海洋学报,2001,23(3):57-64.
- [22] 吕华庆,宋海棠. 长江口渔场、舟山渔场硅酸盐浓度分布与生物量关系的研究[J]. 海洋科学,2007,31(6):56-65.
- [23] 林葵,汤毓祥,郭炳火. 黄海、东海表、上层实测流分析[J]. 海洋学报,2002,24(2):9-19.
- [24] 赵保仁. 长江冲淡水的转向机制问题[J]. 海洋学报,1991,13(5):600-610.

EOF analysis of SeaWiFS Chlorophyll a concentration in the East China Sea waters

HU Song^{*}, WU Qi-feng

(*Marine Ecosystem and Environmental Laboratory, College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: The temporal-spatial distributions of SeaWiFS Chlorophyll a concentration (1998—2007) in the East China Sea waters (116°–135°E, 21°–42°N) were analyzed by using Empirical Orthogonal Function (EOF) method. The first three dominant EOF modes were analyzed using power spectrum. For spatial variability, the climatological SeaWiFS Chlorophyll a shows that the concentrations of Chlorophyll a are high near coast and low offshore; for seasonal variability, the monthly climatological SeaWiFS Chlorophyll a is highest in spring (March-April) and lowest in summer (June-July). The first three modes of EOF contribute 84.89%, 3.38%, and 1.06% of variation, respectively. The first mode accounts for most of the variability; the spatial distribution is consistent with the climatology mean; the time coefficients indicate that years 1998 and 2000 have lower Chlorophyll a than normal years, while year 2007 has higher Chlorophyll a than normal years; the linear fitting of Chlorophyll a concentrations shows a weakly positive trend. The second mode displays the seasonal variability with a significant period of 12 months using discrete power spectral analysis; the area near the Yangtse River Estuary, the Hangzhou Bay and along Zhejiang Province coast is positive and the other areas are negative. The time coefficients of the third mode show two significant periods of 12 months and 6 months; an area centered at 122.95°E, 32.24°N are negative while the Yellow Sea and the area offshore Zhejiang Province are positive, which is probably related with the variability of along-shore currents, expansion of the Changjiang River diluted water and Taiwan Warm Current.

Key words: Chlorophyll a; EOF analysis; temporal-spatial distribution; the East China Sea waters

Corresponding author: HU Song. E-mail: shu@shou.edu.cn