

烟台四十里湾叶绿素 a 浓度的时空分布特征及其影响机制

沈春燕^{1,2,3}, 施 平¹, 赵 辉²

(1. 中国科学院 南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 广东海洋大学, 广东 湛江 524088; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文利用 2003~2012 年 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)卫星遥感数据, 分析了四十里湾叶绿素 a 浓度的时空分布特征, 并探讨其影响机制。结果表明, 四十里湾叶绿素 a 浓度具有显著的时空分布特征。从空间分布来看, 全年均是南部近岸较高, 从西南的湾内向东北的湾外逐渐降低。逛荡河口正北约 6 km 海域在 4~5、7~9 月出现叶绿素 a 高值羽。从时间分布来看, 四十里湾叶绿素 a 浓度夏季最高, 春秋次之, 冬季最低, 5 月份和 8 月份出现峰值, 呈现温带海域特有的“双峰”特性。四十里湾年平均叶绿素 a 浓度呈现波动状态, 波动范围约为 6~12 mg/m³。四十里湾叶绿素 a 浓度的分布及变化与海表面温度成正相关, 相关系数是 0.41。另外, 入海排污和海水养殖业等人类活动可能也是影响四十里湾叶绿素 a 浓度时空变化的重要因素。

关键词: 四十里湾; 叶绿素 a 浓度; MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer); 海表面温度; 风场
中图分类号: P76, Q948.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2014)09-0033-06
doi: 10.11759/hyxx20130925002

近年来, 快速增长的人口和工业化的发展给海洋环境带来巨大的压力, 一个最显著的现象就是水体富营养化和赤潮的发生。水体叶绿素 a 浓度是衡量浮游生物分布、水体初级生产力和富营养化状况的一个基本指标^[1], 监测和分析叶绿素 a 浓度的时空分布特征对于海洋生物资源的评估和海洋环境监测非常重要。

烟台四十里湾位于烟台市莱山区北部海域(图 1), 三面邻陆, 一面向海, 为耳状半封闭海湾, 海岸线长约 20 km, 平均水深 8~10 m, 是中国北方一个重要的浅海养殖区, 也是烟台的重要水产养殖场所。近年来, 随着人口的增长和沿岸经济的迅速发展, 特别是水产养殖和旅游观光等人类活动加剧, 大量污染物进入海湾, 对该海域的生态环境破坏严重, 赤潮时有发生。根据山东省海洋环境监测中心监测记录, 四十里湾在 1998~2010 年, 除 2000、2003 和 2006 年外, 每年都有赤潮发生, 富营养化程度比较严重^[2]。2003~2008 年, 四十里湾海水中氮、磷、硅营养盐浓度均增加 3 倍以上^[3]。2007~2010 年, 四十里湾氮磷呈现历年增加的趋势, 表明该海域有污染加重的趋势^[2]。营养物质的增加和赤潮的发生对该区域整个生态系统造成很大的危害, 严重影响了滨海旅游业和渔业经济的可持续发展。四十里湾的富营养化现象引起不少学者的重视。但是以往的研究主要是集中

于水质^[4]和营养盐^[2, 5-8], 特别是赤潮^[9-11]等方面的分析。对于叶绿素 a 方面的研究, 只有喻龙^[12]和 Hao 等^[3]分析过 2003~2008 年 5~9 月份赤潮高发期叶绿素 a 浓度的变化, 李斌等^[13]研究了 2006~2010 年 5、8、10 月叶绿素 a 的分布特征。但是以往的研究仅限于短时间段和有限站点的采样研究, 对于整个四十里湾水域和长时间序列的叶绿素 a 的研究还没见报道。本文在已有研究的基础上, 利用 2003~2012 年 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)卫星遥感数据, 在初步分析四十里湾叶绿素 a 浓度的时空分布特征的基础上, 对叶绿素 a 时空变化的可能机制进行了探讨, 为四十里湾的海洋生态环境保护和可持续发展提供参考。

1 资料与方法

本文使用的叶绿素 a 数据及海表温度是 MODIS 遥感资料。MODIS 是搭载在土星 EOS-Terra(Earth

收稿日期: 2013-09-25; 修回日期: 2014-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41376125, 41006070); 广东省教育厅项目(2012KJX0065); 广东海洋大学引进人才科研启动项目

作者简介: 沈春燕(1981-), 女, 广东徐闻人, 汉族, 讲师, 博士生, 主要从事海洋遥感应用教学与研究, 电话: 0759-2339421, E-mail: cyshejob@163.com; 施平, 通信作者, 研究员, 主要从事物理海洋学等方面的研究, 电话: 020-89023184, E-mail: pshi@scsio.ac.cn

Observation System-Terra)和水星 EOS-Aqua(Earth Observation System-Aqua)上的中分辨率成像光谱仪。MODIS 有 36 个波段,其中 8~16 波段用于海洋水色观测,中心波长 412、443、488、531、551、667、678、748、867 nm,星下点分辨率是 1 km。本文使用美国宇航局(NASA)网站(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)提供的 EOS-Aqua 获取的 MODIS 逐日叶绿素 a 浓度,资料的空间分辨率是 1 km,时间是 2003 年 1 月~2012 年 12 月。本文共挑选了 2 730 幅图像,其中 725 幅是无云或者云覆盖很少的。下载的资料在 ENVI(The Environment for Visualizing Images)进行简单的坐标投影转换才能应用。坐标投影转换时,所有的图像都采样同样的投影参数。经过投影后进行区域裁剪,多时相合成,算术平均分别获得研究区域内的月平均和年平均叶绿素 a 浓度数据。海表面温度数据与叶绿素 a 数据同步,处理方法类似,最终获取 2003~2012 年海表面月平均温度数据。将单日 MODIS 叶绿素浓度大于 100 mg/m^3 的极高值当做异常值予以剔除,由于叶绿素浓度异常值较少,该剔除方法对统计的结果影响不大。

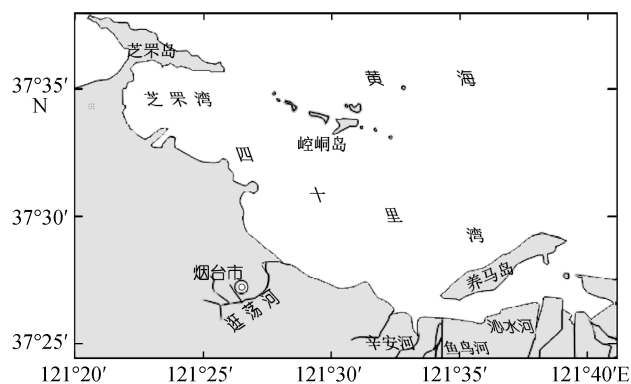


图 1 四十里湾研究区域
Fig.1 Study area of the Sishili Bay

2 结果分析

2.1 四十里湾叶绿素 a 浓度的空间分布特征

图 2 为烟台四十里湾海域 2003~2012 年月平均海表面叶绿素 a 的空间分布。四十里湾叶绿素 a 浓度具有显著的水平分布特征,全年均是南部的近岸高,从西南的湾内向东北的湾外逐渐降低。

冬季(12~2月),四十里湾叶绿素 a 浓度范围是 $2 \sim 17 \text{ mg/m}^3$ 。12 月份,最高值($>12 \text{ mg/m}^3$)出现在四十里湾最西侧与芝罘湾交界的一带沿岸海域。南部离

岸约 4 km 宽以内的海域分布值大概是 5 mg/m^3 。最低值(2.5 mg/m^3)出现在崆峒岛北部,呈条带状一直延伸到北黄海。1、2 月份叶绿素 a 浓度的平面分布基本一致,高值区($>4 \text{ mg/m}^3$)出现在辛安河入海口,叶绿素 a 浓度总体从近岸向外湾逐步降低,但是变化梯度不大,最低值($<2 \text{ mg/m}^3$)分布在崆峒岛附近海域。

春季(3~5月),四十里湾叶绿素 a 浓度范围是 $1.8 \sim 18 \text{ mg/m}^3$,明显比冬季高。3~5 月份叶绿素 a 浓度的水平分布趋势基本一致,都是近岸高,逐渐向外海降低,但是同一个地点的叶绿素 a 浓度逐月升高。从 4 月份开始,在逛荡河入海口正北方大约 6 km 左右有一个高值羽分 2 支向北流去,从该区域一直延伸至崆峒岛附近海域,5 月份该高值羽的强度继续加强。

夏季(6~8月),四十里湾湾内的叶绿素 a 浓度达到年高峰,最高值达到 36 mg/m^3 。6 月份,高值区($>15 \text{ mg/m}^3$)出现在辛安河入海口正北方大约 5 km 的海域,大于 10 mg/m^3 的区域向西延伸至逛荡河入海口一带海域,然后沿着海岸线向东延伸至辛安河入海口。另外还有 2 个较高值($>10 \text{ mg/m}^3$)区域出现在养马岛西边部和崆峒岛西南海域。7 月份,叶绿素 a 浓度值相比 6 月份有所降低,湾内叶绿素 a 分布没有规律,高值区出现在辛安河入海口,有 2 个低值区,一个出现在逛荡河口,另一个在养马岛西北侧。6、7 月份,以崆峒岛为界,湾内外叶绿素 a 浓度的变化梯度比较大。而且,原来出现在春季的高值羽在 6 月份基本消失,在 7 月份有一点痕迹,直到 8 月份,高值羽合并为一支,并扩大增强。大于 15 mg/m^3 的区域在 8 月份占据了整个内湾的差不多三分之一的区域,是全年叶绿素 a 浓度最高的月份。

秋季(9~11月),叶绿素 a 浓度逐月下降。9 月份,叶绿素 a 浓度比 8 月份有所下降,高值区的范围也缩小。9 月份叶绿素高值羽的宽度比 8 月份的小,而且向东偏移,在 10 月份消失。

2.2 四十里湾叶绿素 a 浓度的时间分布特征

2003~2012 年四十里湾叶绿素 a 月平均变化浓度是 $4.2 \sim 13.9 \text{ mg/m}^3$,标准偏差的变化范围是 $0.5 \sim 7.8 \text{ mg/m}^3$ 。叶绿素 a 中值的分布趋势与均值基本一致,而且在同一个月份两者的值差别不大。在春季 5 月份(10.3 mg/m^3)和夏季 8 月(13.9 mg/m^3)出现 2 个高峰,呈现温带海域特有的叶绿素 a“双峰”现象。从季节变化来看,夏季叶绿素 a 浓度最高,平均值是

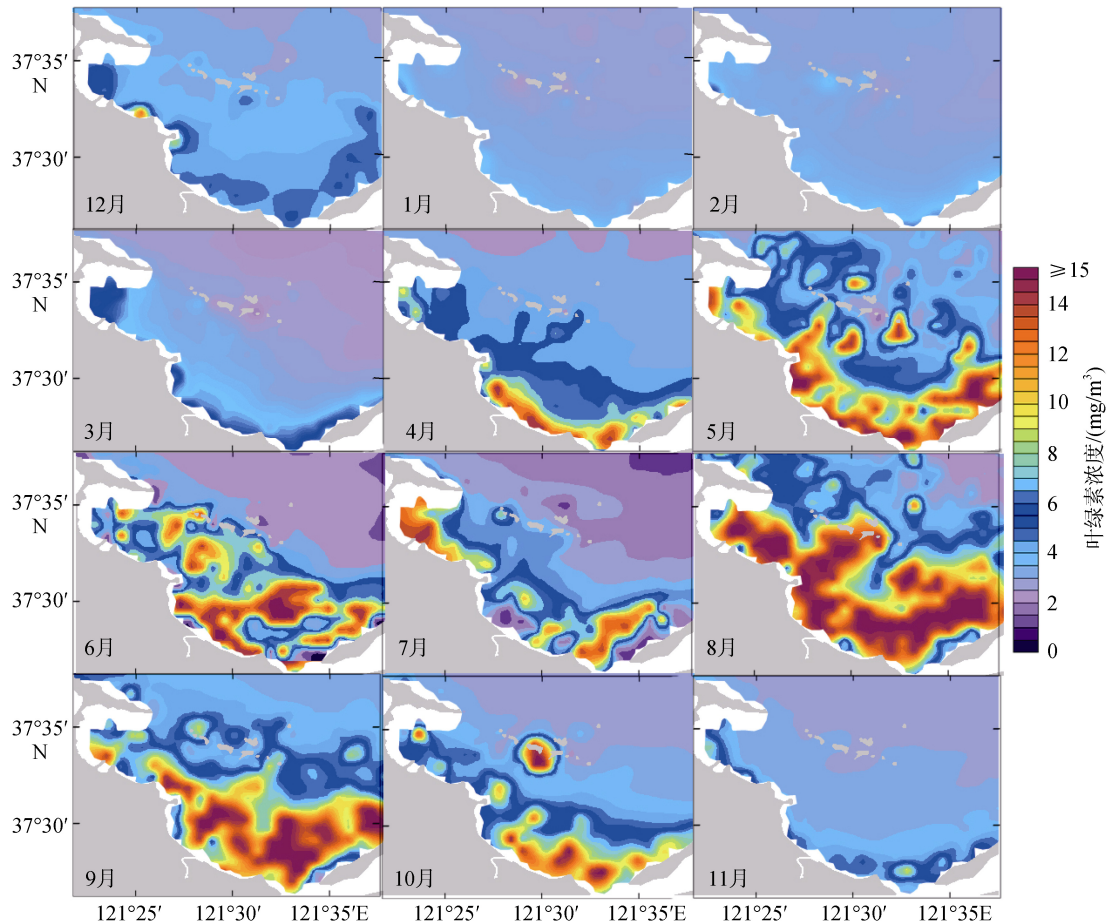


图2 四十里湾 2003~2012 年月平均叶绿素 a 浓度的平面分布

Fig.2 Monthly averaged MODIS Chl-a in the Sishili Bay from 2003 to 2012

10.1 mg/m^3 , 春秋季差别不大, 平均值都约 7.3 mg/m^3 , 位于其次, 冬季最低, 平均值是 4.7 mg/m^3 。

从年际变化来看(图 3b), 四十里湾叶绿素 a 年平均值有波动性, 最低值出现在 2003 年, 整个海湾平均值是 6.7 mg/m^3 , 最高值出现在 2011 年, 平均值是 12.0 mg/m^3 。标准偏差的变化范围是 1.2~5.6 mg/m^3 。中值的分布趋势与均值一致, 而且每年的中值和均值比较相近。

3 讨论

3.1 四十里湾 MODISA 遥感叶绿素 a 浓度与已有研究的对比

卫星遥感数据在近海二类水体的应用是有争议性的。为了验证卫星遥感产品的可用性, 我们收集四十里湾已有的叶绿素 a 浓度的研究资料与本研究结果进行对比分析。喻龙等^[12]分析了 2003~2008 年赤潮高发期(5~9 月)的营养盐与叶绿素 a 的年际变化, 发现四十里湾叶绿素 a 含量大体上呈上升趋势, 2003 年

为 2.7 mg/m^3 , 到 2007 年上升到了 11.5 mg/m^3 , 2008 年略有下降, 为 7.26 mg/m^3 , 叶绿素 a 含量的升高也暗示该海域有富营养化的趋势。李斌等^[13]利用 2006~2010 年 5、8、10 月的四十里湾的调查资料, 分析了该海域的水质、浮游植物、叶绿素及水文气象要素。结果显示, 2006~2009 年, 四十里湾表层叶绿素 a 年平均含量有逐年增加的趋势。除了 2009 年, 其他年份的叶绿素 a 含量均为 8 月最高。从已有的研究来看, 对于叶绿素 a 浓度的时空变化, 喻龙等^[12]和李斌等^[13]的研究结果不尽相同。本研究的结果尽管与前人的研究也有所不同: MODIS 卫星遥感叶绿素 a 的值普遍比前人采样实测的值高, 空间分布的实际结果略有微小差异; 但本研究得到的四十里湾叶绿素 a 浓度值数量级、叶绿素 a 年波动以及最高峰所在的月份与已有的 2 个研究结果一致。造成本研究与已有的研究结果有差异的主要原因有: (1) 实测数据是离散点采样, 一些重要信息缺漏, 而遥感数据的数据点要密很多; (2) 研究的具体时间不尽相同,

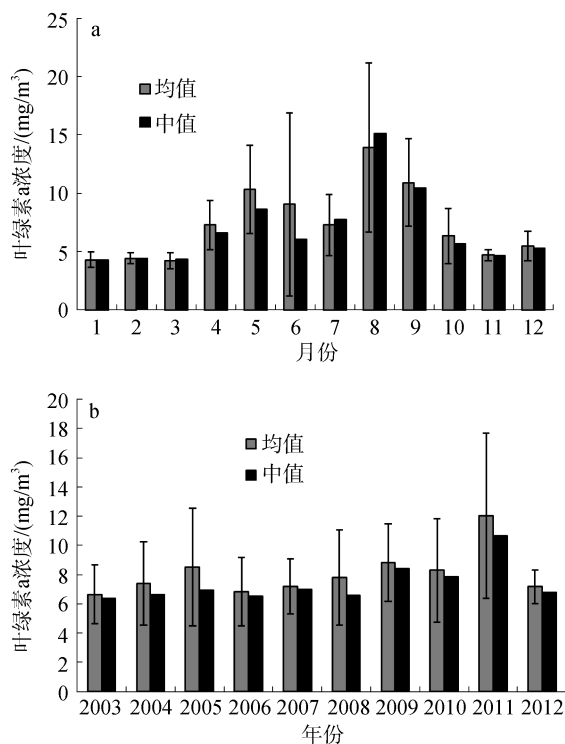


图3 四十里湾 2003~2012 年叶绿素 a 浓度的时间分布
Fig. 3 Temporal distribution of MODIS Chl-a concentrations in the Sishili Bay from 2003 to 2012

a: 10 年月平均; b: 年际变化

a: Monthly variation of MODIS Chl-a averaged from 2003 to 2012;
b: Interannual variation of MODIS Chl-a

因为面积较小的四十里湾被迅速发展的烟台市包围, 水域环境因子严重受调查期间人类活动、气象因素等影响, 所以结果也有偏差。

通过与已有的研究结果的对比分析证明, 利用 MODIS 遥感资料反演四十里湾叶绿素 a 浓度具有可行性。同时, 本文主要关注该海域叶绿素 a 的时空变化特征, 有关定性研究 MODIS 卫星遥感该海域叶绿素 a 的精度和误差方面的问题将在今后开展实施。

3.2 海表面温度和异常天气对叶绿素 a 分布的影响

一般来说, 海水中叶绿素 a 浓度的分布变化在一定程度上受到水域环境因子的影响, 其中, 温度、透明度、营养盐和风场是首要因子。以往的研究表明, 海水温度是影响四十里湾叶绿素 a 含量的重要因子, 叶绿素 a 和海水温度呈显著正相关^[12-13]。图 4 是四十里湾 2003~2012 年 10 年月平均海表面浓度分布。四十里湾夏季海水温度最高, 平均值的 22.4℃, 其次是秋季, 18.66℃, 春季和冬季分别是 8.41℃和

3.56℃。对 10 a 120 个月平均的叶绿素 a 浓度和海表面温度做相关分析显示, 叶绿素 a 和海表面温度呈正相关(相关系数是 0.41, $P < 0.05$)。夏季阳光充足, 营养物质供应丰富, 浮游植物光合作用旺盛, 所以叶绿素 a 浓度含量相对较高, 相反, 冬季就比较低(图 2、图 3b)。

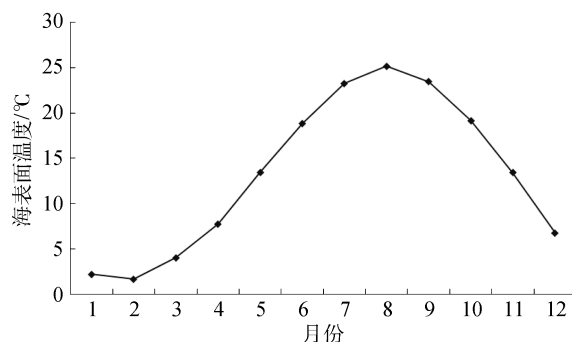


图4 四十里湾多年月平均海表面温度图

Fig. 4 Monthly averaged sea surface temperature in the Sishili Bay

四十里湾历来很少受到台风的影响。2011 年出现年平均值的高峰, 可能与罕见地出现在该年度的 2 个台风“米雷”和“梅花”有关。由于台风所伴随的强风、向上的埃克曼抽吸、降温等对台风路经海域的浮游植物有极其重要的影响, 图 3b 显示 2011 年的叶绿素 a 浓度平均值达到 12 mg/m³, 浮游植物迅速增长。类似的现象也出现在 2005 年 11 月和 2007 年 11 月, 台风导致南海相应的海域发生水华现象^[14], 2007 年台风海贝思期间, 南海相应的海域出现叶绿素浓度高值区^[15]。

3.3 人类活动对叶绿素 a 分布的可能影响

随着四十里湾经济发展和人口的增长, 该海域受到人类的影响也越来越大, 生活污水、工农业排放和水产养殖和海洋旅游业带来的污染物质中富含的营养盐是影响海水叶绿素 a 浓度分布的重要因素。进入四十里湾的主要河流是东南角的辛安河、鱼鸟河和西边的逛荡河。辛安河污水处理厂一期工程从 2003 年底开始, 日排污量从 2 万吨增加到 2012 年的 9 万吨^[2], 近年来排污带来的营养物质的增加可能是该海域叶绿素 a 浓度较高的一个因素。从 2003 年开始, 18 个排污口和芝罘区南郊的工业废水和生活污水 4 万 m³/d, 这些污水部分处理, 然后全部经逛荡河入海, 牟平区的污水也是未经处理直接经鱼鸟河注入该海域^[11]。这些入海的污水富含丰富的有机物, 是

沿岸出现高浓度叶绿素 a 的主要原因(图 2)。高浓度的叶绿素 a 向外海扩散, 浓度慢慢降低。孙珊等^[7]也指出, 烟台四十里湾海域营养盐的分布整体趋势是近岸高, 由近岸向外部海域递减。图 2 中 4~5、7~9 这几个月在逛荡河口正北出现的叶绿素 a 高值羽, 也有可能是逛荡河富含有机物的污水入海后扩散流形成的。另外, 四十里湾营养盐含量与降雨量显著相关。烟台属于温带季风气候, 雨季一般出现在 7~9 月, 降雨引起径流量增大, 其中丰富的营养物质导致这几个月的叶绿素 a 浓度较高(图 2、图 3a), 这也是导致赤潮发生的主要原因^[10]。李斌等^[13]也证实, 8、9 月份烟台进入雨季, 充足的降水携带着大量的陆源污染物经辛安河流入四十里湾, 该过程在改变了海水的营养状态的同时也加强了海水上层的层结, 为赤潮发生提供了物质和物理基础。因此, 浮游植物在每年的 8、9 月快速增长, 叶绿素 a 浓度就相对较高, 这与本文的结果一致(图 3a)。

叶孟杰等^[8]指出, 四十里湾赤潮形成的营养物质主要是养殖粪便及其废弃物提供的。高昊东等^[11]也指出, 四十里湾的各类污染物总量以贝类养殖排泄物居首, 赤潮发生的几率及范围与贝类养殖面积以及 N、P 和 C 排泄物年际变化有直接的关系。四十里湾海水养殖历史悠久, 早在 20 世纪 80 年代就开展海带和裙带菜的养殖实验, 养殖对象有贻贝、栉孔扇贝、海湾扇贝和海带, 养殖区遍布整个内湾, 过密的养殖, 阻碍了海流的畅通, 不利于污染物稀释扩散^[11], 这也是造成内湾叶绿素 a 浓度高(图 2)的原因, 而且高浓度的叶绿素 a 主要是集中在内湾, 无法扩散出去。

随着四十里湾经济的发展, 入海排污量日增, 同时, 养殖业也迅速发展, 所以湾内的营养物质逐年增长, 这可能也是导致四十里湾叶绿素 a 浓度较高的(图 3b)的重要原因。

4 结论

卫星遥感技术为海洋研究提供了大量、大面积的同步监测数据, 弥补了常规监测的不足。本文利用卫星遥感资料, 详细分析了四十里湾海洋的叶绿素 a 时空分布及变化特征, 并分析其影响机制, 得到如下的几点结论:

1) 四十里湾叶绿素 a 浓度总体上是湾内高, 湾口低。逛荡河口正北约 6 km 海域在 4~5、7~9 月出现叶绿素 a 高值羽。

2) 四十里湾叶绿素 a 浓度夏季最高, 冬季最低, 每年的 5、8 月份出现高峰, 呈现温带海域特有的“双峰”特性。年平均值呈现波动状态, 2011 年出现年平均值的高值峰, 可能与当年过境该海域的 2 个台风有关。

3) 四十里湾叶绿素 a 浓度的分布及变化与海表面温度以及人类的影响密切相关。其中人类活动的影响, 特别是入海排污和海水养殖业是影响叶绿素 a 浓度分布的重要原因。

受当前观测数据限制, 本文仅是我们初步的研究结果, 我们当前的目标是定性的研究以遥感叶绿素 a 为指标该区域浮游植物分布及变化特征, 今后我们会增加大气浑浊、水体光学性质的观测研究, 以期更准确地定量地评价该区域的叶绿素浓度分布特征。

参考文献:

- [1] 沈春燕, 陈楚群, 詹海刚. 人工神经网络反演珠江口海域叶绿素浓度[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(6): 38-43.
- [2] 邢红艳, 孙珊, 马元庆, 等. 四十里湾海域营养盐年际变化及影响因素研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 53-57.
- [3] Hao Y J, Tang D L, Yu L, et al. Nutrient and chlorophyll a anomaly in red-tide periods of 2003-2008 in Sishili Bay, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(3): 664-673.
- [4] 刘义豪, 刘晓静, 邢红艳, 等. 2003 年烟台四十里湾海域主要水质指标分析[J]. 海洋湖沼通报, 2006(3): 93-97.
- [5] 赵卫红, 焦念志, 赵增霞. 烟台四十里湾养殖水域营养盐的分布及动态变化[J]. 海洋科学, 2000, 24(4): 31-34.
- [6] 李斌, 白艳艳, 邢红艳, 等. 四十里湾营养状况与浮游植物生态特征[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 260-266.
- [7] 孙珊, 李佳蕙, 靳洋, 等. 烟台四十里湾海域营养盐和沉积物-水界面交换通量[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 195-200.
- [8] 叶孟杰, 孙红成, 高昊东, 等. 烟台四十里湾营养物质产生特征及影响分析[J]. 中国环境监测, 2006, 22(5): 88-91.
- [9] 迟守峰. 烟台市四十里湾海域赤潮成因分析及预防对策[J]. 齐鲁渔业, 2008, 25(9): 55-57.
- [10] 梁爱萍, 张涛, 刘伟. 烟台市四十里湾海域赤潮预报

- 方法研究[J]. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 2007, 20(4): 304-308.
- [11] 高昊东, 邓忠伟, 孙万龙, 等. 烟台四十里湾赤潮发生与生态环境污染研究[J]. 中国环境监测, 2011, 27(2): 50-55, 101.
- [12] 喻龙, 郝彦菊, 蔡悦荫. 四十里湾赤潮高发期营养盐与叶绿素 a 的年际变化[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 558-561.
- [13] 李斌, 谷伟丽, 靳洋, 等. 烟台四十里湾叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(2): 19-23.
- [14] 刘昕, 王静, 程旭华, 等. 南海叶绿素浓度的时空变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 42-48.
- [15] Sun L, Yang Y J, Xian T, et al. Strong enhancement of chlorophyll a concentration by a weak typhoon[J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 404: 39-50.

Spatial-temporal distribution characteristics of chlorophyll a and the controlling factors in the Sishili Bay of Yantai

SHEN Chun-yan^{1, 2, 3}, SHI Ping¹, ZHAO Hui²

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Sep., 25, 2013

Key words: Sishili Bay; chlorophyll a concentration; MODIS; sea surface temperature; wind

Abstract: This study investigated the spatial-temporal distribution characteristics of chlorophyll a (chl-a) in Sishili Bay using MODIS satellite remote sensing data from 2003 to 2012, and analyzed the relationship between chl-a distribution and influential factors. Results showed that the chl-a concentration in Sishili Bay had a significant spatial-temporal characteristics. The chl-a showed a decreased tendency from estuary to offshore. A plume appeared 6 km away from Guangdong River estuary in April, May, July, August and September. The highest value of chl-a appeared in summer, and the lowest in winter. The higher value appeared in May and August showed an obvious double-peak character. The relationship between chl-a and sea surface temperature was positive with a correlation coefficient of 0.41. The distribution of chl-a may also be related to the human activities, especially sewage and aquaculture.

(本文编辑: 李晓燕)