

台湾海峡表层叶绿素 a 年变化特征的空间差异

张彩云^{1,2}, 商少凌¹, 洪华生¹

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门大学, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 海洋系, 福建 厦门 361005)

关键词: 叶绿素 a; 年变化; SeaWiFS; 台湾海峡

中图分类号: S922.9⁺4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2006)02-0165-06

1 引言

SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor) 数据自 1997 年 9 月开始发布以来, 为世界各地开展水色遥感研究提供了丰富的信息源. 遥感数据本身所具有的大范围、海量、易形成时间序列的优势不仅使其非常适合大尺度的时空变化研究, 而且它为世界各地海洋提供的大量叶绿素分布数据, 对于海洋生态系统浮游植物、初级生产力、中心渔场、碳循环、海流等相关研究都具有重要意义. 目前国内外 SeaWiFS 水色遥感的应用研究已取得许多成果^[1-3], 并已成为各海区叶绿素数据获取的重要来源之一.

台湾海峡海底地形颇为复杂, 兼有水深仅在 10~30 m 之间的台湾浅滩和水深达 200 m 的澎湖水道(图 1), 且受季风影响显著. 根据过往大量的现场调查研究的结果, 季风驱动多种不同水系在海峡内交汇, 造成了复杂的水动力环境, 也造成了复杂的生物、化学环境^[4,5]. 就叶绿素 a (Chl a) 的季节变化特征而言, 25 个航次的现场实测数据表明海峡南北部海区具有不同的变化形态, 北部在春、秋季出现高值, 南部在夏季呈持续高值特征, 上升流和沿岸流分别造成的南、北海区营养盐输入方式的差异可能是决定海峡 Chl a 季节分布图形南北差异的关键因素^[6]. 然而, 仅仅依据现场数据进行分析毕竟有其局限性, 特别是空间上的覆盖度不足, 只能粗略区分南北海区, 特征不够详尽. 欲确知台湾海峡不同子区域季节变化特征的异同, 显然需要综合各有长处的现

场实测与遥感数据. SeaWiFS 遥测 Chl a 迄今已积累了 6 a 多, 虽然目前的卫星遥感反演方法还难以保证取得高精度度的数据, 在不同的区域不同的季节遥测叶绿素与实测叶绿素之间总是存在或多或少的偏差, 但充分利用这组数据时间连续的特点来进一步探讨台湾海峡表层 Chl a 的年变化特征, 不失为具有科学意义和价值的尝试. 需要指出的是, 遥感仅只限于探测表层, 因此以下分析探讨皆指表层 Chl a 的变化特征, 将不再一一说明.

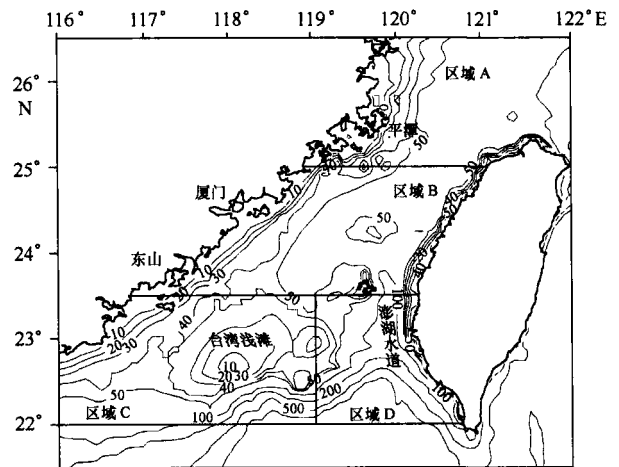


图 1 台湾海峡地形及各子区域示意图

2 数据和方法

2.1 数据来源与遥感数据处理方法

作为 NASA GSFC (goddard space light cen-

收稿日期: 2004-09-27; 修订日期: 2005-04-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点(40331004); 国家自然科学基金(49906008) 共同资助; 长江学者和创新团队发展; 厦门大学新世纪优秀人才支持计划共同资助.

作者简介: 张彩云(1972—), 女, 福建厦门市人, 讲师, 在职博士生, 从事海洋遥感应用研究. E-mail: cyzhang@xmu.edu.cn

ter) 数据分发中心 (<http://daac.gsfc.nasa.gov>) 的授权用户,我们下载了 1997~2003 年覆盖整个中国海域的所有 SeaWiFS 叶绿素 L2 级数据,采用 SeaDAS/IDL (SeaWiFS data analysis software/interactive development Language) 软件,处理生成空间分辨率 4 km × 4 km、墨卡托投影的 L3 级产品(以下简称 SeaWiFS Chl a)。而后进行平均计算,根据每张图的有效数据平均计算生成时跨 1997 年 9 月至 2003 年 8 月的月平均数据,然后再计算多年平均的月平均值。最后运用 SeaDAS 软件切割出台湾海峡 (21.5°~26.5°N, 116°~122°E) 数据,并进行图像处理和数据读取。

实测叶绿素数据取自 1998 年 2~3 月和 1999 年 8 月厦门大学在台湾海峡进行生源要素生物地球化学过程研究的现场综合调查资料。

2.2 子区域划分

6 年平均的 SeaWiFS Chl a 年平均分布图(图 2)

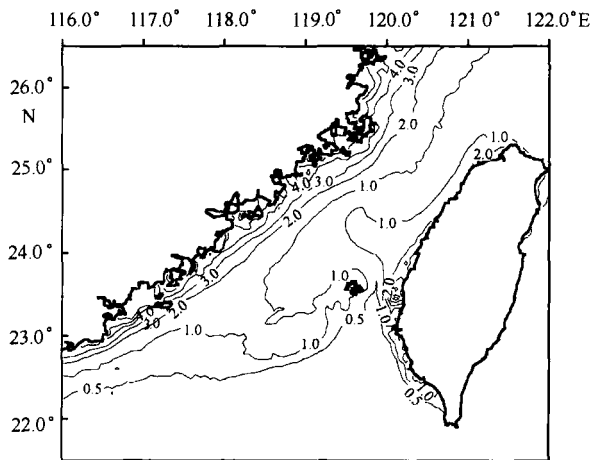


图 2 1997 年 9 月至 2003 年 8 月 SeaWiFS Chl a 的年平均分布 (mg/m^3)

所提示的台湾海峡 Chl a 场与历年来基于零散的现场数据而勾画出的图形基本上是一致的^[6-8],这也佐证了 SeaWiFS Chl a 数据在台湾海峡的适用性。但是海峡中部以及东南部是现场数据较为匮乏的区域,从图 2 可以看到这两个区域与海峡北部和西南部的明显差异。故而本文将台湾海峡细分成 A、B、C、D 四个子区域,分别代表海峡北部、中部、西南部以及东南部子区域,如图 1 所示。其中区域 A: 25.0°~26.5°N; 区域 B: 23.5°~25.0°N; 区域 C: 22.0°~23.5°N, 119°E 以西; 区域 D: 22.0°~23.5°N, 119.0°E 以东。考虑到沿岸以及台湾浅滩浅水区的遥感反演可能受

到海底反射或悬浮泥沙的干扰^[9],可信度低,水深不足 30 m 的近岸海域和台湾浅滩数据点被屏蔽,不参与子区域场平均值的计算。

2.3 遥感数据检验

本文的目标是分析台湾海峡不同子区域 Chl a 季节变化特征的异同及成因,首先必须检验月平均遥感 Chl a 与实测 Chl a 规律的一致性,通过以下两个步骤实现。

(1) 取 1998 年 2~3 月和 1999 年 8 月两个现场调查航次所获取的 Chl a 实测数据,与当年当月对应采样点的 SeaWiFS Chl a 月平均值构成检验数据组,共 32 组(分布如图 3 所示),而后参考 Sasaoka 等^[10]的方法,对检验数据组取对数后进行相关分析。假设前提是某月某时取得的现场 Chl a 浓度可以代表该月的 Chl a 水平,那么任何依据现场实测数据的季节变化分析都是以此为前提的。

(2) 取北部与南部子区域,对比实测与遥感的季节分布形态。实测 Chl a 各月平均值的来源见表 1,而 SeaWiFS Chl a 则取与其相对应的海峡北部 (24.0°~26.5°N) 和南部 (22.0°~24.0°N, 119.0°E 以西) 两个区域多年平均的月平均值。

表 1 实测 Chl a 各月平均值的引用来源

海区	月份	来源	资料依据
海峡北部	1~10月、12月	张钜等 ^[6] ,1997	1983~1984 调查资料
海峡南部	4月、6~8月、11月	张钜等 ^[6] ,1997	1987~1988 调查资料
海峡南部	12月	杨尧等 ^[7] ,1991	1987~1988 调查资料
海峡南部	2月	本文	1995 年 调查资料

如此可以确证遥感是否可以获得真实的季节变化规律,但必须指出这不是严格意义上的卫星验证,后者需要采用与卫星过境同步的现场观测数据^[11]。本文采用粗略的检验方法,首先是因为大多数采样站点所对应的当天图像质量都比较差,完全无法找到相对应的遥测数据值;另一方面,这种粗略的方法是我们的研究目标所允许的,因为进行季节变化形态的空间差异比较决定了我们的需求是一个有效的相对的遥感时间序列,可以不要求是一个精确的绝对的遥感数据。

3 结果与讨论

3.1 SeaWiFS Chl a 有效时间序列的检验

图3为两个航次现场实测 Chl a 含量与相对应的月平均图像提取的 SeaWiFS Chl a 的比较,可以看出,大部分站位二者吻合得比较好,尤其在 Chl a 浓度小于 1.0 mg/m³时. 检验该组数据相关分析的结果,在 95%的置信度下相关系数(R²)达到 0.69(n=32). 说明了跨两年两个季节并且在空间上覆盖了大部分研究区域的 SeaWiFS Chl a 和实测 Chl a 存在较好的相

关系,SeaWiFS Chl a 在相当程度上可反映实测 Chl a 的分布趋势.

北部、南部子区域季节变化形态的比较结果如图4所示. 除了海峡北部冬季之外,其他各月的分布趋势基本一致. 需要说明的是,图4b海峡南部7~8月份实测 Chl a 和 SeaWiFS Chl a 的明显差异可能是因为本文在计算 SeaWiFS Chl a 区域平均时并不考虑水深小于 30 m 的海区(其中包括台湾浅滩附近海区),而该区域实测 Chl a 的高值区主要是位于台湾浅滩西南附近的测站^[7].

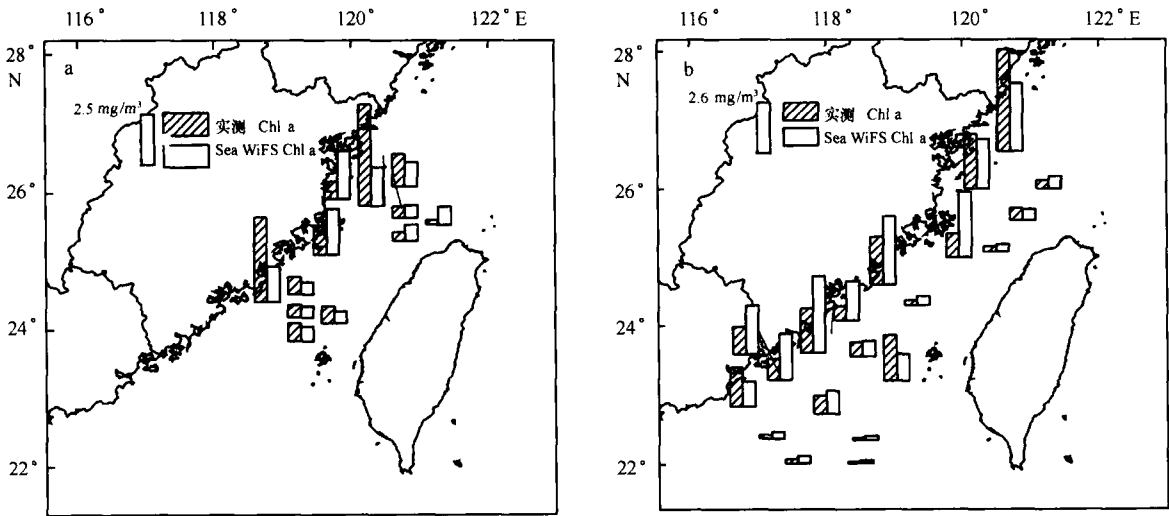


图3 实测叶绿素和 SeaWiFS Chl a 的比较
a. 1998年2~3月, b. 1999年8月

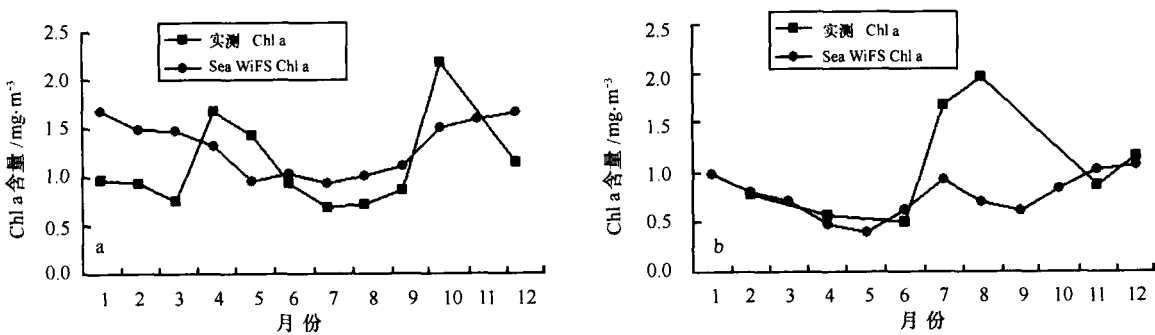


图4 海峡北部(a)和南部(b) SeaWiFS Chl a 与实测 Chl a 季节变化的比较

冬季的 SeaWiFS Chl a 表现为全年最高值,而实际上调查表明冬季(12~2月)海峡中北部实测 Chl a 的平均值仅约为 1.0 mg/m³^[6],为全年最低值. 冬季在东北季风驱动下,影响台湾海峡的沿岸径流势力强大,特别在海峡北部,影响范围比南部大得多,呈北厚南薄的分布,加上水体混合密度

高,悬浮颗粒物质的含量偏高,海水光学衰减系数自北向南递减^[5,12],12月海水总悬浮物质(TSM)大于 5.0 mg/dm³,频率高达 18.6%^[13];另一方面冬季(12~2月)的遥测数据,因天气状况恶劣的缘故,相当缺乏,其样本数往往比夏季的样本数少得多,个别月份的有效数据点甚至只有总数的 30%左右,平

均数据的可靠性大大降低,因此反演叶绿素时必然受到很大干扰,可能导致遥测叶绿素被严重高估^[9]. 两方面的因素综合,笔者认为冬季台湾海峡北部遥测叶绿素的可信度较低. 因此本文对冬季的 SeaWiFS Chl a 数据将不予采信,以下关于季节变化分析的图表将略去 12~2 月的数据.

以上对比和分析仅是一种粗略的近似的方法,结果可以说明在台湾海峡 SeaWiFS 遥测数据至少在 3 个季节里虽不足以取得精确的绝对数值,但能

够在一定程度上反映真实的时空分布形态,本文取之进行季节变化的分析,虽不甚理想,仍将是可行的. 以下将综合实测与 SeaWiFS Chl a 的结果,讨论台湾海峡 Chl a 季节变化特征的空间差异.

3.2 台湾海峡叶绿素 a 年变化的空间差异

3.2.1 各区域 Chl a 年分布的差异

图 5 给出了 3~11 月份(6 年平均)海峡北部、中部、西南部和东南部 4 个子区域 SeaWiFS Chl a 的年分布,显然其图景各不相同.

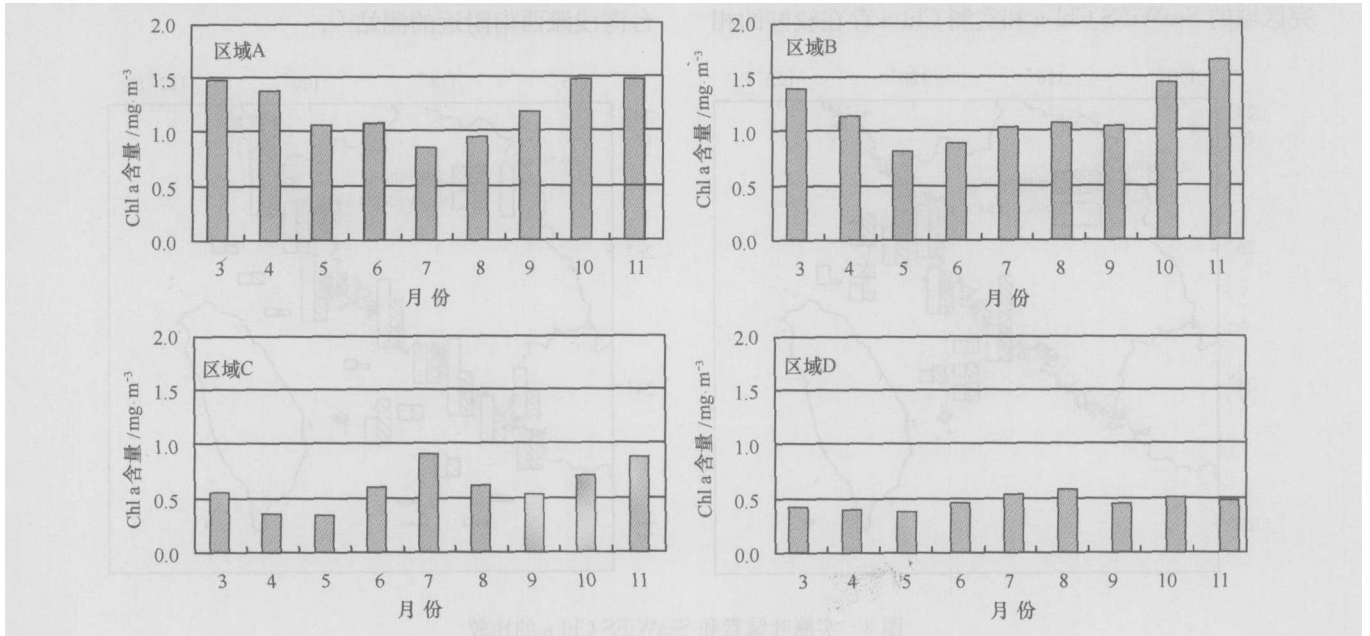


图 5 各区域 SeaWiFS Chl a 的年变化

位于海峡北部的区域 A,分别在 3 和 11 月份出现 Chl a 峰值. 3~4 月份后 Chl a 含量逐渐降低,在 7 月达到最低,夏季过后该区域的 Chl a 含量又逐渐增加,发生秋季水华. 而区域 B(海峡中部)的年分布图形与区域 A 近似,都在春秋两季出现 Chl a 峰值,但区域 B 的 Chl a 含量最低值出现在 5 月份,并在 7~8 月有一小高值.

区域 C(海峡西南部) Chl a 的年变化趋势与区域 A, B 明显不同,在 7 月份出现一显著的 Chl a 高峰,且含量高于其他各月份. 7 月份过后 Chl a 虽有所降低,但到了 10~11 月份又逐渐升高.

海峡东南部(区域 D)的 Chl a 分布同其他各区域相比含量最低,受季节变化影响不显著.

3.2.2 空间差异的成因

由以上 SeaWiFS Chl a 的年变化以及历史现场观测资料^[6,7]看来,台湾海峡 Chl a 的季节变化特征可以

分为三类,子区 A 和 B,也就是台湾海峡的北部和中部区域,可以归为第一类,呈现春、秋季双峰型的分布;子区 C,也就是台湾海峡的西南部,呈现夏季单峰的分布,归为第二类;子区 D,也就是台湾海峡的东南部,不存在显著的季节变化,归为第三类.

在这样一个狭长的跨约 4 个纬度的亚热带近海域出现了 3 种类型的季节分布特征,究竟是怎样不同的驱动机理导致的? Chl a 含量的高低,控制因素不外乎浮游植物生长、流失过程的抗衡. 其生长取决于适宜的光照、温度和丰富的营养盐,其本身的自然死亡率以及浮游动物摄食率则决定了流失的速率. 流失速率的季节变化我们认为在不同子区域的差异是不大的,也不存在光限制的问题,所以主要的影响因素还在于水动力与太阳辐射二者引起的温度与营养盐的变化.

中、北部子区域(区域 A 和 B)出现的春、秋季双峰型的分布实际上是较为常见的近海的 Chl a 季

节分布形态^[14]。除了夏季之外该区域主要受以低温高营养盐为特征的浙-闽沿岸流的控制^[5,15],营养盐来源充足,但太阳辐射和沿岸流本身的温度性质决定了春、秋季水体温度适宜浮游植物生长而冬季温度偏低,如1995年2月近岸海区总溶解态磷(TDP)和溶解无机磷(DIP)高达0.67和0.57 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ^[16],但彼时多年平均遥感表层水温(SSST)的变化范围仅在13~20之间;故在春秋季节有Chl a高峰出现,而冬季浮游植物生长受到温度限制,Chl a含量较低。夏季该区域主要受寡营养的南海暖水控制,虽有西南季风和地形导致的沿岸上升流^[17,18]补充营养盐,但影响局限在近岸一带^[5],大部分水体浮游植物生长受到营养盐的限制,导致总体上整个子区域平均的Chl a信号不及春、秋季强。

西南部子区域(区域C)的夏季单峰分布,盖因该区域在夏季得到西南季风驱动的沿岸上升流的营养盐补充,并且西南部的上升流相对于西北部其影响范围大^[1],曾观察到TDP高于0.8 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$,DIP大于0.4 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ^[19],因此浮游植物得到充足的滋养,Chl a出现全年的最高值;其他季节多受寡营养的南海暖水的控制,浙-闽沿岸流至此已是末梢^[20],影响力甚弱,浮游植物生长受到营养盐的限制,使得Chl a浓度普遍偏低。

东南部子区域(区域D)Chl a微弱波动的分布特征,与本研究组分析南海海盆Chl a年变化所得的特征类似。该区常年受高温高盐南海暖水的控

制^[21],营养盐浓度低^[22]。

可见,台湾海峡Chl a的年分布具有明显的空间差异,这一特征与该海区复杂的水动力过程有着密切关联,尤其是浙-闽沿岸水和南海暖水在海峡内的季节消长以及夏季沿岸上升流的变化。

4 结语

(1)比较跨两年不同季节并且在空间上覆盖大部分研究区域的SeaWiFS Chl a与实测Chl a,同时取海峡北部与南部子区域对比实测与遥感的季节分布形态,本文对SeaWiFS遥感数据在台湾海峡的应用进行非严格意义上的验证。结果表明采用标准算法反演的SeaWiFS Chl a除了冬季在台湾海峡北部可信度较低外,在其他3个季节基本上能反映真实的时空分布形态。已积累6年多的SeaWiFS水色遥感资料为我们进一步探讨台湾海峡Chl a年变化特征提供了一个有效的时间序列。

(2)结合历史观测资料并分析多年平均SeaWiFS Chl a的年变化,台湾海峡Chl a的季节变化特征大致可分为三类,第一类为海峡北部和中部的春秋季节双峰型;第二类为海峡西南部的夏季单峰型;第三类为海峡东南部的季节变化不显著型。分析表明,台湾海峡Chl a年分布的区域性差异与直接调控本海区营养盐输入和分布的海洋动力过程的季节演变密切相关,特别是浙-闽沿岸水和南海暖水在海峡内的季节消长以及夏季沿岸上升流的变化。

参考文献:

- [1] SHANG Shao-ling, ZHANG Cai-yun, HONG Hua-sheng, et al. Short-term variability of chlorophyll associated with upwelling events in the Taiwan Strait region during southeast monsoon of 1998[J]. Deep Sea Research, 2004, 51(10,11): 1113—1127.
- [2] MCCLAIN C R, FELDMAN G C, HOOKER S B. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series[J]. Deep Sea Research, 2004, 51(1): 5—42.
- [3] DONEY S C, GLOVER D M, MCCUE S J, et al. Mesoscale variability of sea-viewing wide field-of-view sensor(SeaWiFS) satellite ocean color: global patterns and spatial scales[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C2): 3024, doi:10.1029/2001JC000843.
- [4] 洪华生,丘书院,阮五崎,等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流生态系研究概述[A]. 洪华生等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流生态系研究[C]. 北京:科学出版社,1991. 1—8.
- [5] 福建省海洋研究所. 台湾海峡中、北部海洋综合调查研究报告[C]. 北京:科学出版社,1988.
- [6] 张钊,杨尧,黄邦钦. 营养盐输入对台湾海峡叶绿素 a 含量的调控作用[A]. 洪华生等. 中国海洋学文集(7)[C]. 北京:海洋出版社,1997. 81—88.
- [7] 杨尧,张钊,高素华. 闽南-台湾浅滩渔场叶绿素 a 含量及分布[A]. 洪华生等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流生态系研究[C]. 北京:科学出版社,1991. 341—345.
- [8] 张钊,黄邦钦,陈照章,等. 1998年8月台湾海峡表层叶绿素 a 含量的分布特征[J]. 海洋科学,2001, 25(10): 1—4.
- [9] IOCCG. Remote sensing of ocean color in coastal and other optically-complex waters. SATHYENDRANATH S. Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group:No. 3[R]. 2000. Dartmouth, Canada:IOCCG
- [10] SASAOKA KOSEI, SAITOH S, ASANUMA I, et al. Temporal and spatial variability of chlorophyll-a in the western subarctic Pacific determined from satellite and ship observations from 1997 to 1999[J]. Deep-Sea Research, 2002, 49(24,25): 5557—5576.

- [11] WERDELL P J, BAILEY S, FARGION G S. SeaBASS data protocols and policy[A]. FARGION G S, MUELLER J L. Ocean Optics Protocols for Ocean Color Sensor Validation[M]. 2nd rev, NASA TM 2000-209966. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000.
- [12] 张彩云, 商少平, 胡建宇, 等. 台湾海峡 1997 年 8 月至 1999 年 8 月海水光学衰减系数的分布特征[J]. 台湾海峡, 2001, 20(1): 127—131.
- [13] 郭劳动, 洪华生, 陈敬虔, 等. 台湾海峡南部悬浮物质的分布与变化[A]. 洪华生等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系研究[C]. 北京: 科学出版社, 1991. 273—281.
- [14] THOMAS A C, TOWNSEND D W, WEATHERBEE R. Satellite-measured phytoplankton variability in the Gulf of Maine[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23(10): 971—989.
- [15] 翁学传, 张启龙, 颜廷壮, 等. 台湾海峡中、北部海域春、夏季水团分析[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(3): 235—243.
- [16] 吴丽云, 阮五崎, 陈 岚. 台湾海峡磷的地球化学行为(I)[A]. 中国海洋学文集(7)[C]. 北京: 海洋出版社, 1997. 97—105.
- [17] 黄荣祥. 台湾海峡中、北部海域的上升流现象[J]. 海洋湖沼通报, 1989, (4): 8—12.
- [18] 肖 晖. 台湾海峡西部沿岸上升流的研究[J]. 台湾海峡, 1988, 7(2): 135—142.
- [19] 吴丽云, 阮五崎. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区营养盐的研究[A]. 洪华生等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系研究[C]. 北京: 科学出版社, 1991. 169—177.
- [20] 梁红星, 李 虹. 台湾海峡南部水团的模糊聚类划分[A]. 洪华生等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系研究[C]. 北京: 科学出版社, 1991. 85—93.
- [21] JAN Sen, WANG Joe, CHERN C S, et al. Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait[J]. Journal of Marine Systems, 2002, 35(3, 4): 249—268.
- [22] CHEN Chen-tung Arthur, HSING L Y, LIU Ching-lin, et al. Degree of nutrient consumption of upwelled in the Taiwan Strait based on dissolved organic phosphorus or nitrogen[J]. Marine Chemistry, 2004, 87(3, 4): 73—86.

Spatial patterns of annual cycles in surface chlorophyll a in the Taiwan Strait

ZHANG Cai-yun^{1,2}, SHANG Shao-ling¹, HONG Hua-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Key words: Chl a; annual cycle; SeaWiFS; Taiwan Strait