

文章编号: 1007-4619 (2001) 05-0383-05

1998年冬季台湾海峡的暖水入侵及其生态响应

商少凌, 洪华生, 商少平, 张彩云

(厦门大学 国家教育部海洋环境科学重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 就1998年2—3月台湾海峡 AVHRR 表层水温和 SeaWiFS 叶绿素数据以及当年2月20日至3月8日在台湾海峡北部海区所实施的多学科现场调查资料进行综合分析, 着重探讨暖水入侵的过程及其生态响应。结果表明, 1998年冬季由澎湖水道北上进入台湾海峡的高温高盐黑潮入侵水强度大于往年, 在2月8日—3月13日期间不断增强, 直至侵占整个海峡东侧海域, 迫使低温低盐且富含营养盐的闽浙沿岸水主流顺大陆沿岸南下。这一过程向海峡西侧海域输入营养盐并使之达到适宜的水温, 极可能是西侧海域出现叶绿素高值区、呈现出与往年相反的叶绿素分布态势的主控机制。分析这一现象与1997—1998年的 El Nino 事件可能存在着某种关联。

关键词: 台湾海峡; 黑潮; AVHRR; SeaWiFS

中图分类号: TP79/P71 **文献标识码:** A

1 引言

台湾海峡是连接中国南海和东海的海上走廊, 其重要性不言而喻。近十余年来在台湾海峡多次实施多学科交叉的综合性调查研究, 获取了宝贵的第一手资料, 在上升流生态系结构功能、生物生产力调控机制及生物地球化学过程的研究上取得了显著的成果^[1,2]。然而所有的分析皆只能依据相对分散且非同步的实测调查数据, 具有大面同步优势的海洋遥感数据的应用研究一直未能得以顺利开展, 仅在1988年夏季尝试过利用 AVHRR 表层水温图像, 初步印证海域近岸上升流的存在以及南海水的流路^[3]; 而近十几年来国际上运用水色水温遥感资源的海洋学研究相当活跃, 1978—1986年间运行的 CZCS (Coastal Zone Color Scanner)、1996—1997年间运行的 OCTS (Ocean Color Temperature Scanner) 及1997年发射目前正在运行中的 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 水色传感器所得供的高分辨的水色数据以及 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 红外辐射计提供的表层水温数据, 使人们对海洋中发生的各种过程的认识得以极大地

提高^[4-9]。目前正在开展中的国家基金委 95 重点课题“台湾海峡生源要素生物地球化学过程研究”, 连续在 1997年8月, 1998年2—3月, 1998年8月及1999年8月实施现场出海取样观测, 捕捉到有趣的年际变动信号, 发现 1997年8月上升流减弱, 1998年冬暖水入侵增强。本文将针对 1998年2—3月暖水入侵问题, 结合 AVHRR 表层水温和 SeaWiFS 叶绿素遥感数据, 尝试剖析这一现象的发生发展及其引发的生态效应。

2 数据来源

现场温度、盐度、叶绿素、颗粒有机碳、营养盐数据由“台湾海峡生源要素生物地球化学过程研究”课题组提供。AVHRR 表层水温图像由国家海洋局第二海洋研究所 NOAA 卫星地面站提供; 地面站接收获得 AVHRR 一级数据后, 经常规定标处理反演成为 SST 数据。SeaWiFS 叶绿素二级数据由日本宇宙开发团获取, 再利用 SeaDAS 软件进一步处理成三级图像; SeaWiFS 一级数据由日本东海大学信息技术中心接收, 日本航天发展署 (NASDA) 地球观测研究中心 (EORC) SeaWiFS 组负责处理生成二级数据, 采

收稿日期: 2000-08-16; 修订日期: 2001-02-26

基金项目: 本研究得到国家自然科学基金重点项目 49636220, 国家自然科学基金 49906008 资助。

作者简介: 商少凌 (1968—), 女, 副研究员。1995年于厦门大学海洋与环境学院获博士学位; 1996—1998年进入日本名古屋大学进行博士后研究。现从事海洋生物地球化学研究, 主攻海洋遥感应用及生物地球化学模式。已发表论文 12 篇。

用单一散射算法进行大气校正, OC² 算法反演叶绿素。

3 结果与讨论

3.1 现场温、盐度平面和垂直分布

1998 年 2—3 月现场观测在台湾海峡北部海区进行, 图 1 为调查站位。CTD 观测提供的表层温、盐度平面分布提示^[10], 海峡东侧表层水温、盐度皆高于西侧, 也即在研究海区, 大陆一侧为低温低盐水, 而台湾岛一侧为高温高盐水, 且低温低盐水向海峡中部偏折; 并且海峡西侧存在温盐跃层而东侧垂直均匀, 东侧整个水柱皆为高温高盐水, 最高盐度可达 35.0^[11]。根据王胄和陈庆生^[12]的研究结果, 每年秋

冬季海峡盛行东北风, 闽浙沿岸水通常应当足够强劲, 将表层黑潮水主要阻隔在海峡南部; 据此似乎可以认为, 1998 年冬季黑潮水对台湾海峡的入侵强度大于常年。

3.2 AVHRR 表层水温演变

由于本次航次的 CTD 数据毕竟只限于北部海区, 且不能形成时间序列, 不足以示意黑潮水入侵的过程。为此我们收集了 1998 年 2—3 月中仅有的三张清晰的 AVHRR 表层水温图像(图版 I 图 2)。

黑潮水沿台湾西岸北上, 势力不断增强的过程, 依靠 AVHRR 图像得以全面揭示。2 月 8 日, 18°C 等温线所代表的高温水舌端接近 25°N 海域; 显然暖水是经由澎湖水道自南海东北部进入海峡, 在澎湖以北折向西北; 同时以 15°C 等温线表征的低温水舌确侵入海峡东侧, 呈现反时针环流构造, 与王胄和陈庆生^[12]的观测结果仍然一致。2 月 25 日, 暖水大举北上, 海峡东南部水域已全部为暖水占据, 18°C 等温线已逼近 25.5°N; 同时低温水在强大北上暖水的作用下, 开始撤出海峡东侧海域, 而更多地顺大陆沿岸南下。至 3 月 13 日, 暖水已蔓延在整个海峡东侧海域, 18°C 等温线达到 26°N 附近海域; 低温水主流已被驱使沿海峡西岸流向西南, 影响到海峡西南的大片海域。

此外可以观察到, 台湾岛东北部外也有暖水入侵的迹象。因此我们认为, 北上黑潮水强度增大只是造成现场 CTD 所观测到的海峡北部高温分布的一个方面, 黑潮水从台湾岛东北部外向海峡内的入侵也是起因之一。不过 AVHRR 图像表明, 这一股入侵水的强度并不足以与北上的入侵水抗衡, 3 月 13 日, 随着北上黑潮水的逐渐加强, 它已基本撤出台湾海峡海域。

3.3 生态响应的初步分析

相应于强大的黑潮入侵事件, 高温高盐寡营养盐的黑潮水与低温低盐富含营养盐的闽浙沿岸水交汇, 形成显著的海洋锋, 则应当有一定的生态响应信号首先体现在初级生产上。为此我们收集了 1998 年 2—3 月间的 SeaWiFS 叶绿素数据, 与实测数据结合进行分析。

SeaWiFS 在整个 2—3 月甚少清晰的图像, 故而只能取 3 月 27 日的图像作为实际验证分析的参考(图版 I 图 3)。通过一个粗略的比对, 我们发现 SeaWiFS 叶绿素与现场实测值之间具有良好的相关性

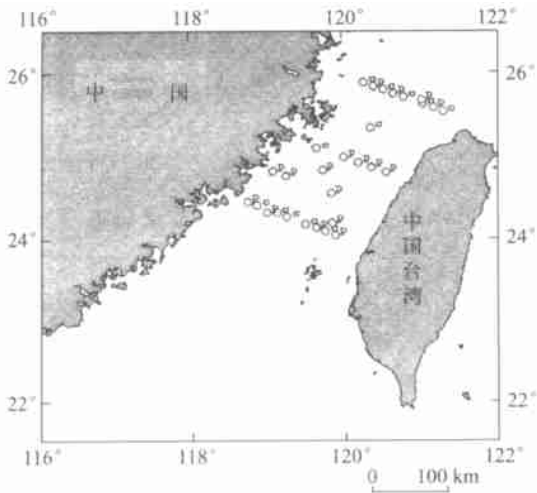


图 1 台湾海峡地图。圆圈符号代表 1998 年 2—3 月现场调查站位, 其中 C 表示叶绿素调查站位, P 和 C 表示 CTD 调查站位

Fig. 1 Map of the Taiwan Strait. Open circles with P and C annotation denote stations where CTD cast was done, and open circles with C annotation represent stations where Chla was sampled from February to March, 1998

季开始, 随着东北季风的逐渐增强, 低温低盐闽浙沿岸水舌从海坛岛向南延伸侵入海峡东侧, 呈反时针环流构造, 占据澎湖以北的海域; 同时黑潮水开始大举入侵南海, 其分支进入台湾海峡, 形成高温高盐水舌沿澎湖水道向北伸展。因此正如胡建宇等^[11, 13]所指出的, 现场观测所示特征应当是北上的黑潮水和南下的闽浙沿岸水两支水系各据一方形成的局面。然而有趣的是, 高温高盐水可以一直穿过海峡, 18°C 等温线舌端逼近 26°N 附近海域; 这个特征在往年, 如 1984 年、1992 年和 1995 年的现场和遥感表层水温观测资料中都未曾发现^[10, 13], 机理在于

($r^2=0.81$, $n=7$), 尽管实测与遥测时间差最长达 35 天, 而且只有区区 7 个数据点^[14]。看来 SeaWiFS 标准产品应当可以在一定程度上反映海区叶绿素的实际分布。

首先 3 月 27 日的叶绿素图像进一步验证了贫瘠的黑潮水顺澎湖水道北上的现象, 水道中的叶绿素含量为整个海域的最低值。

其次, 图 3 提示平面分布上较为显著的特征, 是在海峡西侧(大陆沿岸)的叶绿素含量相对于东侧(台湾岛一侧)来得高。尽管海峡北部大陆一侧为云覆盖没有数据, 但至少在海峡西南部, 叶绿素高值区相当明显, 这在以往的现场观测中未曾发现, 因为通常冬季海峡内高营养盐区水温太低, 而高温区营养盐不足, 不利于浮游植物的繁茂^[15]。我们推测, 海峡西侧叶绿素高值区的出现, 其机制在于闽浙沿岸

水在其受强大的黑潮入侵水推动、顺大陆沿岸南下的过程中, 与增强中的黑潮水之间实现热交换, 增温变暖, 其自身又携带丰富的营养盐, 从而使浮游植物得以充分繁育。

现场实测表层叶绿素的断面分布示于图 4(a)。图中两个断面, 断面 1 位于断面 2 之北。站位由西到东依序标号, 站位 1 最贴近大陆, 站位 5 靠近台湾。同样地取 1995 年 2—3 月大致沿断面 1 实测的叶绿素数据(图 4(b))作比较, 显然 1998 年表层叶绿素的水平梯度大大增强, 最高值在 1998 年约 $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, 而在 1995 年仅 $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右; 并且高值出现在海峡西侧, 而并非如以往报道的台湾岛西北淡水河口以外区域^[16]。这就部分证实了遥感提示的信息, 即海峡西侧表层叶绿素高于东侧, 且总的分布态势的确区别于往年报道的结果。

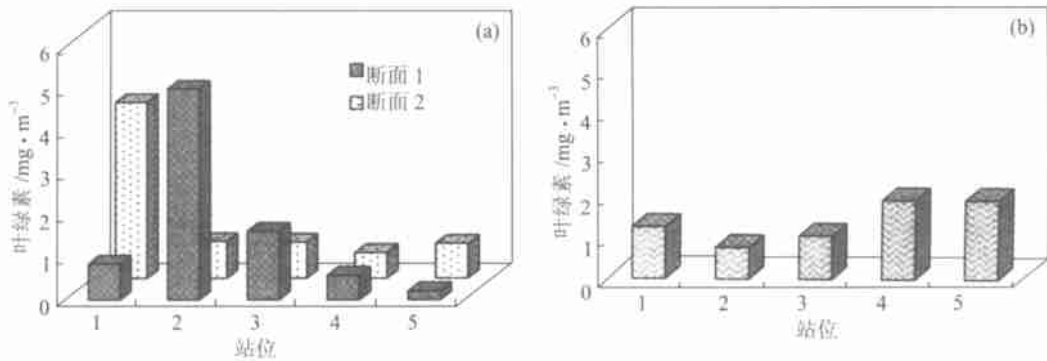


图 4 台湾海峡北部实测表层叶绿素断面分布(a)1998年2—3月;(b)1995年2—3月

Fig. 4 Concentration of surface Chl a observed in situ in the northern Taiwan Strait (a) from February to March, 1998; (b) from February to March, 1995

4 结 论

本文通过 AVHRR 表层水温、SeaWiFS 表层叶绿素遥感数据与现场实测温度、盐度和叶绿素数据的综合分析, 得出以下结论:

(1) 1998 年 2—3 月间黑潮水主要由南海东北部沿台湾西岸顺澎湖水道北上进入台湾海峡, 强度不断增强, 可以推进到 26°N 附近海域; 并驱使闽浙沿岸水退出海峡东侧, 主流顺大陆沿岸南下, 影响到海峡西南部海域; 同时也有部分黑潮水由台湾岛东北角外侵入台湾海峡, 但随着北上黑潮水的增强, 其影响减弱。

(2) 表层叶绿素含量在海峡西侧高于东侧, 特别是在海峡西南部出现叶绿素增强的迹象。我们认为其主要机制在于黑潮水北上入侵且逐渐加强的过程中, 闽浙沿岸水主流南下使海峡西侧海域营养盐

输入增强所致。

(3) 对比历史资料, 认为 1998 年 2—3 月黑潮水对本海区的入侵强度特异, 相应叶绿素的分布特征亦发生变化。我们注意到 1997—1998 为 El Nino 年, 在 1998 年 1 月达到顶峰, 那么这一现象的发生机制是否与此有一定的关联, 目前尚不得而知。欲探索这一问题, 越出本海区的范围分析黑潮流路变动与 ENSO 的遥相关将是途径之一。

致谢 SeaWiFS 水色遥感二级数据从日本航天发展署(NASDA)地球观测研究中心(EORC)获取, 数据的使用符合美国航空航天局(NASA)SeaWiFS 研究数据使用协定; 日本东海大学信息技术中心负责提供一级数据, NASDA/EORC SeaWiFS 组负责处理生成二级数据。AVHRR 表层水温图像由国家海洋局第二海洋研究所毛天明研究员处理。谨此一并致谢。

参 考 文 献 (References)

- [1] Hong Huasheng, Qiu Shuyuan, Ruan Wuqi, *et al.* Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground Upwelling Ecosystem Study [C]. Beijing: Science Press, 1991. [洪华生, 丘书院, 阮五崎等. 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.]
- [2] Hong Huasheng *et al.* Oceanography in China (7): Primary Productivity and its Controlling Mechanisms in the Taiwan Strait Region [C]. Beijing: China Ocean Press, 1997. [洪华生等. 中国海洋学文集(7): 台湾海峡初级生产力及其调控机制研究[C]. 北京: 海洋出版社, 1997.]
- [3] Wang Huan, Hong Huasheng, Li Wenquan *et al.* Application of Remote Sensing in the Study of Taiwan Strait. In: Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground Upwelling Ecosystem Study [C]. Beijing: Science Press, 1991. 699—703. [王欢, 洪华生, 李文权等. 遥感在台湾海峡研究中的应用. 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. 699—703.]
- [4] O B Brown, R H Evans, J W Brown, *et al.* Phytoplankton blooming off the U.S. coast: a satellite description [J]. *Science*, 1985, **229**: 163—167.
- [5] Campbell, J W and T Aarup. New production in the North Atlantic derived from seasonal patterns of surface chlorophyll [J]. *Deep-Sea Research*, 1992, **39**: 1669—1694.
- [6] D Inagake and S Saitoh. Description of the oceanographic condition off Sanriku, northwestern Pacific, and its relation to spring bloom detected by the Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) images [J]. *Journal of Oceanography*, 1998, **54**: 479—494.
- [7] X Ning, Z Liu, Y Cai *et al.* Physico-biological oceanographic remote sensing of the East China Sea: satellite and in situ observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C10): 21623—21635.
- [8] D Stramski, R A Reynolds, M Kahru, *et al.* Estimatio of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing [J]. *Science*, 1999, **285**: 239—242.
- [9] J P Ryan, J A Yoder, J A Barth, *et al.* Chlorophyll enhancement and mixing associated with meanders of the shelfbreak front in the Mid-Atlantic Bight [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**: 23479—23493.
- [10] Hu Jianyu, Hong Huasheng, Chen Zhaozhang, *et al.* On Horizontal Distribution of Temperature and Salinity in the Northern Taiwan Strait in Winter, 1998 [J]. *Marine Science Bulletin*, 1999, **18**(2): 11—16. [胡建宇, 洪华生, 陈照章等. 台湾海峡北部海区 1998 年 2—3 月温、盐平面分布及其特征[J]. 海洋通报, 1999, **18**(2): 11—16.]
- [11] Hu Jianyu, Hong Huasheng, He Zhigang, *et al.*, Vertical Distribution of Temperature and Salinity in the Northern Taiwan Strait Region in Winter, 1998 [J]. *Marine Science*. 1994, **4**: 51—53. [胡建宇, 洪华生, 贺志刚等. 台湾海峡北部海区 1998 年 2—3 月温、盐的垂直分布特征[J]. 海洋科学, 1999, **4**: 51—53.]
- [12] Wang Zhou, Chen Qingsheng. On Cold Water Intrusion in the Eastern Taiwan Strait during the Cold Season [J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*. 1989, **22**: 43—67. [王 青, 陈庆生. 台湾海峡东侧冷季之闽浙沿岸水入侵事件[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1989, **22**: 43—67.]
- [13] Li Li, Guo Xiaogang, Xu Risheng. Oceanic fronts in southern Taiwan Strait [J]. *Taiwan Strait*, 2000, **19**(2): 147—156. [李 立, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋[J]. 台湾海峡, 2000, **19**(2): 147—156.]
- [14] Shang Shaoling, Hong Huasheng, Zhang Caiyun, *et al.*, Chla Distribution Feature of the Taiwan Strait region in Winter, 1998, as Observed by SeaWiFS [J]. *Marine Science Bulletin*. 2000, **2**: 25—29. [商少凌, 洪华生, 张彩云等. 1998 年冬季台湾海峡遥测叶绿素分布特征[J]. 海洋通报. 2000, **2**: 25—29.]
- [15] Zhang Fan, Yang Yao, Huang Bangqin. Effect of physical input of nutrients on Chlorophyll a content in Taiwan Strait. In: *Oceanography in China (7)* [C]. Beijing: China Ocean Press. 81—88. [张 帆, 杨 尧, 黄邦钦. 营养盐物理输入对台湾海峡叶绿素 a 含量的调控作用. 中国海洋学文集(7)[C]. 北京: 海洋出版社, 81—88.]
- [16] Hong Huasheng, Wang Haili, Li Wenquan *et al.*, The Primary Production Processes in the Taiwan Strait I: Spatial and Temporal Variations of Phytoplankton Biomass and Productivity. In: *Oceanography in China (7)* [C]. Beijing: China Ocean Press. 16—24. [洪华生, 王海黎, 李文权等. 台湾海峡初级生产过程研究 I. 浮游植物生物量、生产力的时空变化. 中国海洋学文集(7)[C]. 北京: 海洋出版社, 16—24.]

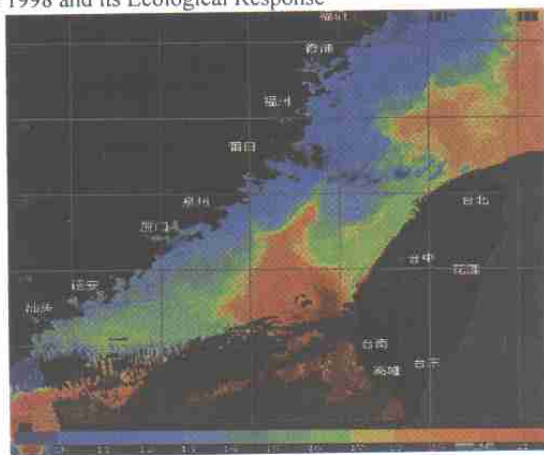
Intrusion of Warm Water into the Taiwan Strait during Winter Monsoon of 1998 and its Ecological Response

SHANG Shao-ling, HONG Hua-sheng, SHANG Shao-ping, ZHANG Cai-yun

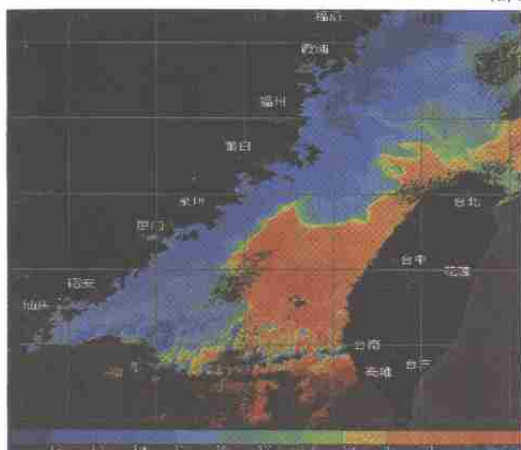
(Marine Environmental Laboratory, Ministry of Education Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Taiwan Strait is a shallow shelf channel linking the East China Sea (ECS) and the South China Sea (SCS). During winter monsoon, cold Min-Zhe Coastal Water (hereafter MZCW) rich of nutrients generally dominates the northern Taiwan Strait; warm oligotrophic Kuroshio water (hereafter KW) and South China Sea Water (hereafter SCSW) from SCS intrude into the southern Taiwan Strait. Nevertheless, Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait was found to be stronger than usual during winter monsoon of 1998, as observed by a satellite instrument, AVHRR, and a CTD in situ. In situ data were obtained in the northern Taiwan Strait during a winter cruise of 1998 from February 20th to March 8th, which suggested that warm streamer as indicated by 18°C isotherm approached as north as 26°N . A series of AVHRR SST daily images covering the whole Taiwan Strait region, which were got on Feb. 8th, Feb. 25th and Mar. 13th, respectively, confirmed that warm water mainly intruded into the Taiwan Strait from the southernmost tip of Taiwan, heading north-eastward along the Penghu Channel. There were also some evidences hinting that warm water coming from the Kuroshio mainstream off Taiwan in the Pacific ocean, intermittently influenced the northern Taiwan Strait from the northernmost tip of Taiwan. This effect seemed to be weakening while the northeastward Kuroshio intrusion was strengthening from February to March. The mainstream of Min-Zhe Coastal Water was thus forced to go southwestward along the Mainland coast into the southern Taiwan Strait. This process probably heated Min-Zhe Coastal Water and led to the injection of nutrients into the southern Taiwan Strait, enabling unusual high winter Chla along the Mainland coast, especially in the southwestern Taiwan Strait, as shown by a single SeaWiFS Chla imagery on March 27th. Observation in situ from February to March also confirmed Chla enhancement in the northwestern Taiwan Strait. Chla content reached as high as ca. $5\text{ mg}/\text{m}^3$, which were 4 times greater than that was observed in 1995. It was suspected that the unusual strong Kuroshio intrusion and the corresponded Chla enhancement in the Taiwan Strait during winter 1998 were probably related to the very strong tropic El Nino of 1997~1998.

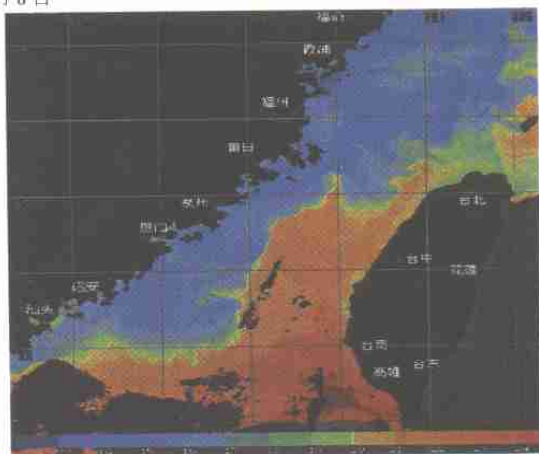
Key words: Taiwan Strait; Kuroshio; AVHRR; SeaWiFS



(a) 2月8日



(b) 2月25日



(c) 3月13日

图2 1998年2—3月 AVHRR 表层水温图像

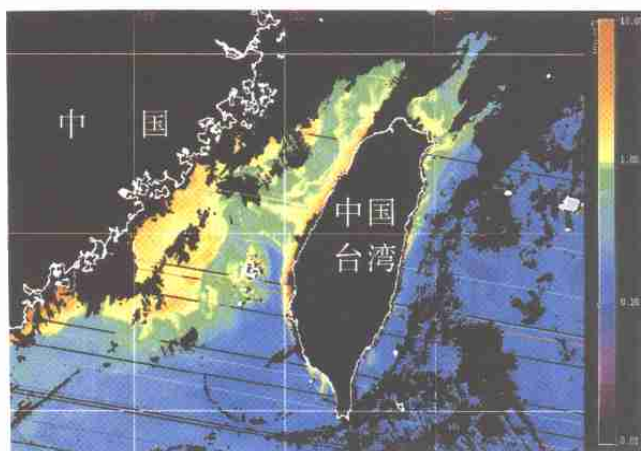


图3 1998-03-27 SeaWiFS 叶绿素图像