

海洋水色遥感在海岸带综合管理中的应用

潘德炉 林寿仁 李淑菁 毛志华

(国家海洋局海底科学重点实验室, 310012 杭州)

摘要 文章在概述中国水色遥感器发展和水色遥感算法基础上, 将展示中国近年来利用卫星水色遥感在海岸带水色监测和应用方面的成果, 并提出 21 世纪该技术在海岸带综合管理中的应用潜力和建议。

关键词 水色 遥感器 海岸带综合管理

中图分类号: V474.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-8518(2001)02-0034-06

The Application of Watercolor Remote Sensing in General Management of Coast Zone

Pan Delu Lin Shouren Li Shujing Mao Zhihua

(Important Laboratory of National Sea Bureau on Undersea Scientific, Hangzhou 310012)

Abstract In recent years, many achievements have gained in the field of watercolor monitoring. The paper overviews the development of Chinese watercolor remote sensors, and introduces the arithmetic of watercolor remote sensing. At last, it also brings out some suggestions of application of watercolor remote sensing in general management of coast zone.

Key Words Watercolor Remote sensor General management of coast zone

1 卫星水色遥感的发展

从 20 世纪 70 年代末以来, 随着空间地球观察技术的发展, 海洋水色遥感日益显示出巨大的潜力。1978 年美国 NASA 发射了装载有 CZCS 的 Nimbus-7 号卫星, 一直工作到 1986 年, 它首先揭示了全球性海区色素的时空分布和变化图。1987 和 1989 中国分别发射了 FY-1A 和 FY-1B 卫星, 其中都配置了 2 个海洋水色通道的高分辨率扫描辐射计 VHRSR, 虽然 2 颗卫星的寿命不长, 但首次利用中国自己的卫星获得了海区较高质量的叶绿素浓度和悬浮泥沙浓度的分布图。1996 年日本发射了装有海洋

水色水温扫描仪 OCTS 的 ADEOS-I 号卫星, 运行了 10 个月, 可惜 1997 年 7 月失效。1997 年 9 月美国紧接着又发射了配置有 SeaWiFS 的专门海洋水色卫星 SeaSTAR, 它具有低噪声、高灵敏度、合理波段配置和倾斜扫描等功能, 是当今国际上最先进的海洋水色卫星。中国于 2000 年 5 月成功地发射了 FY-1C 卫星, 卫星上的甚高分辨率辐射计带有 3 个专用海洋水色波段, 它有中国特色, 除了有海洋水色波段外还有两个海洋水温通道。由于测量水色水温功能的结合十分有利于海岸带水体的监测, 这一点连美国 SeaWiFS 也不能及。该卫星 1 年多的运行, 已在海洋环境监测中发挥很大作用。2001 年中国将发射第一颗海洋水色卫星 (HY-1), 这颗专用海洋水色卫

星带有两个遥感器: 10 通道的海洋水色扫描仪 的监测和管理, 有关以上卫星各遥感器性能见表 COCTS 和 CCD 相机, 都十分适合于海岸带水体环境 1。

表 1 各种不同水色遥感器的性能比较表

国家	USA	China	Japan	China	USA	China
卫星	CZCS	FY-1B	OCTS	FY-1C	SeaWiFS	HY-1/COCTS/CZI
使用时间	1978~1986	1990~1991	1996~1997.6	1999~至今	1997~至今	2001发射
视场角/°	78.68	110.8	80.0	110.8	116.6	90/34.78
周期/min	104.07	102.76	—	102.76	98.88	100.8/99.8
倾角/°	99.28	98.9	—	98.9	98.2	98.8
高度/km	955	888.8	804.6	870	705	798
飞行方向	升轨	降轨	降轨	降轨	降轨	降轨
发射窗	11:00am	7:55am	10:30am	9:00am	12:00noon	9:00am
像元点/行	1968	2048	—	2048	1285	1024/2048
扫描倾角	0°, ±20°	0°	0°, ±20°	0°	0°, ±20°	0°
量化等级	8 bit	8 bit	10 bit	10 bit	10 bit	10 bit
CH	±10 nm		±10 nm		±10 nm	COCTS: ±10 nm
1	440 nm	0.58~0.6 μm	412 nm	0.43~0.48 μm	412 nm	412 nm
2	520 nm	0.725~11.0 μm	443 nm	0.48~0.53 μm	443 nm	443 nm
3	560 nm		490 nm	0.53~0.58 μm	490 nm	490 nm
4	670 nm	0.48~0.53 μm	520 nm	0.58~0.68 μm	510 nm	520 nm
5	0.7~0.8 μm	0.53~0.58 μm	565 nm	0.84~0.89 μm	555 nm	565 nm
6	10.5~12.5 μm	10.5~12.5 μm	665 nm	0.9~0.965 μm	670 nm	665 nm
7			765 ± 20 nm	1.58~1.64 μm	765 ± 20 nm	765 ± 20 nm
8			865 ± 20 nm	3.55~3.93 μm	865 ± 20 nm	865 ± 20 nm
9			3.55~3.88 μm	10.3~11.3 μm		10.3~11.4 μm
10			8.25~8.80 μm	11.5~12.5 μm		11.4~12.5 μm
11			10.3~11.4 μm			CZI:
						420~500 nm
						520~600 nm
12			11.4~12.5 μm			610~690 nm
						760~890 nm

2 水色遥应用于沿海的叶绿素和悬浮泥沙监测

随着中国沿海养殖业的发展, 对养殖环境的认识是个首要问题, 如对叶绿素浓度分布的认识和初级生产力的评估等, 利用 SeaWiFS 遥感资料是大面积、多时相认识沿海养殖环境的一种重要手段。

中国沿海属于高浓度泥沙含量的大陆架海水。

万方数据

在这类海水中, 由于含有大量的泥沙, 海面的向上反射光的信息中以泥沙信息为主, 由叶绿素吸收和反射的特征波长的信息被淡化。因此, 通常在大洋使用的蓝、绿光比值法遥感海面叶绿素浓度往往失效。另一种遥感海面叶绿素浓度的方法是荧光高度法 (FLI)。该方法是以波长为 640 nm 和 730 nm 为基线, 测量波长为 685 nm 的荧光峰高度。研究表明, 荧光高度法更适合于沿岸带海区叶绿素浓度高或者当

赤潮出现时的海水的遥感。由于高浓度的叶绿素或者当赤潮时,水表面的吸收和水面反射的特征信息大大地增加,尤其在可见光的红外区域,使得荧光高度法有可能在这类海水的海面叶绿素浓度监测应用。可惜的是在美国的 SeaWiFS 遥感器上没有设置荧光高度法所需的波段。根据荧光高度法的思路,考虑到当海面叶绿素浓度增加时,在海面光谱反射的 685 nm 荧光峰高度增加同时,它附近的 670 nm 的反射率也会相应地增加。所以,采用类似于 FLI 的 SeaWiFS 通道,以波长为 555 nm 和 765 nm 为基线,测量波长为 670 nm 的向上反射强度的高度来遥感沿海海面叶绿素浓度来代替荧光高度法。如图 1 所示:

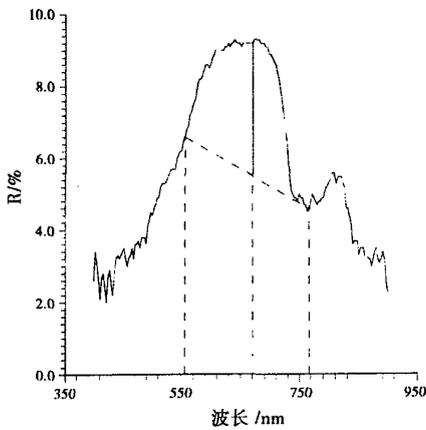


图 1 670 nm 的反射高度来遥感海面叶绿素原理图

670 nm 的反射率高度是指图中海面反射率曲线在 670 nm 处的实线长度 (RH_{670})。那么,海面叶绿素浓度 C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 通过现场光谱测量和实测叶绿素浓度资料,得到以下算法:

$$C = A \cdot RH_{670} \cdot e^{-B \cdot RH} \quad (1)$$

式中: A 和 B 是回归常数, $A = 0.51$; $B = 0.00693$

$$RH_{670} = R_{670} - 0.26 \cdot (R_{555} - R_{750}) \quad (2)$$

式中, R_i 为 i 波段的反射率。

利用式 (1) 由 SeaWiFS 卫星资料得到的 1997 年 10 月 8 日长江口海面叶绿素浓度分布图 (如图 2), 图中色标叶绿素范围从 0 ~ 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由图可见, 在舟山岛屿附近咸淡水交汇处, 呈现较高浓度的叶绿素分布, 长江口内其次, 外海较低。这一结果与 1995 年 9 月 17 日至 21 日调查船在北纬 30° 的 7 个调查站的测量结果相比较表明, 在这一段面的海面叶绿素

浓度分布情况, 调查船调查的结果与遥感结果基本一致, 只是高浓度区前后移动。实测的高浓度区比遥感到的要往外海偏移一些, 这是由于在不同时间它受潮流影响所致。

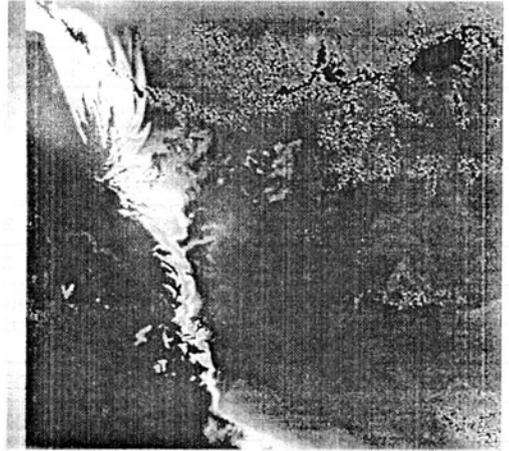


图 2 1997 年 10 月 8 日 SeaWiFS 探测的长江口海面叶绿素浓度分布图

2.1 沿海悬浮泥沙的监测

悬浮泥沙的运移特征是沿海河口形态和演变规律的核心问题。了解和掌握河口悬浮泥沙的来源、含量、分布、运移、沉积, 从而分析河口演变动力特征。其作用在于它将直接影响到河口区资源的开发利用、环境变化, 经济发展和人民生命财产问题。它是河口区发展决策的依据。SeaWiFS 为悬浮泥沙的监测提供了极好资料来源。

长江和钱塘江两条大河流入口处泥沙量高达 200 mg/l 以上。随着离海岸距离增加而悬浮泥沙的含量逐渐减少, 在东经 123° 左右 (绿花岛一带) 有一条明显的水色分界带, 一般说来, 超出东经 123°, 海水比较清, 近似于第一类型海水。我们通过现场海面光谱反射率测量发现, 当海水中悬浮泥沙量达到 100 mg/l 以上时, 可见光波段的反射率可达 10% 以上。而当泥沙量小于 5 mg/l 以下时, 可见光波段的反射率降低到 5% 以下。图 3 是 443 nm 和 555 nm 的平均反射率比值与海表面悬浮泥沙量的关系图。实线是利用最小二乘法拟合的回归曲线。可见, 海表面悬浮泥沙量与 443 nm 和 555 nm 的平均反射率比值有很好的关系。这种关系可以用以下的公式表示:

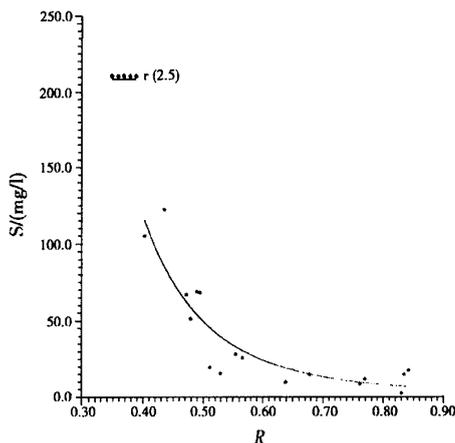


图3 波长为 443 nm 和 555 nm 的反射率比值与海表面悬浮泥沙量的关系图

$$S = a R_{2,5}^b \quad (3)$$

其中, $a = 3.2602$, $b = -3.9322$, $R_{2,5}$ 是 SeaWiFS 的第二和第五通道的反射率比值, 即波长为 $0.443 \mu\text{m}$ 和 $0.555 \mu\text{m}$ 的平均反射率比值。利用 (3) 得到 1997 年 10 月 8 日 SeaWiFS 测量到的长江口海面泥沙分布图(如图 4 所示)。另外我们利用同一天的 AVHRR 的第一通道作了同一地区的海面泥沙分布图, 两者十分相似, 但由于两颗卫星不是同时过境, 使得海面泥沙分布状态略有不同。从 SeaWiFS 图像处理的海面泥沙分布图中更能看到低浓度的泥沙分布状态。相反, 要比 NOAA 图像处理对高浓度的泥沙更有效。

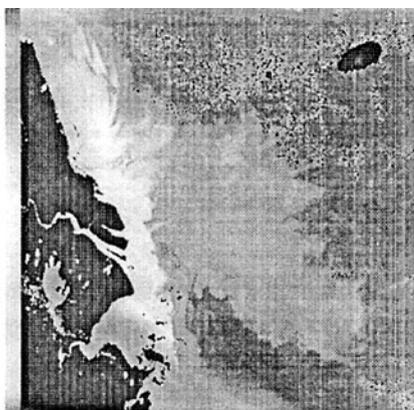


图4 1997年10月8日 SeaWiFS 测量到的悬浮泥沙分布图

3 利用水色遥感进行沿海赤潮监测

赤潮是因海水富营养化加上适宜的其它环境条
万方数据

件, 海洋浮游植物短期内大量繁殖、聚集而引起海水变色的一种现象。赤潮既可发生在远海大洋, 但更经常地发生在河口、内海、港湾等沿海海域。发生在远海或大洋的赤潮可促进海洋生产力, 使更多的碳从大气转移进入海洋, 因而对全球碳平衡产生有益影响, 沿海出现的赤潮则往往对海洋环境造成不同程度的有害影响。虽然赤潮仅有部分是由有毒海洋浮游生物造成, 对海洋生物产生毒害作用, 并通过生物链转移到人类, 从而影响人体健康, 但非毒性赤潮也能引起水体缺氧、生物体大量分解腐败等生物物理性后果, 进而改变海洋生态系统平衡, 降低海洋水体的环境质量, 损害沿海社会经济发展。例如 1997 年秋冬和 1998 年春季相继在闽、粤海域发生较大规模的赤潮, 使澳港两地水产直接经济损失 3.8 亿元; 1998 年 9 月在渤海又出现大范围的赤潮。尽管多年来对赤潮进行了许多调查研究, 由于赤潮的复杂性和偶然性, 对其分布状况、发生规律、形成机理等问题并没有充分了解, 常规的海面调查方式只能部分地了解赤潮发生情况, 而 SeaWiFS 资料可用于赤潮监测和监视的一个重要手段。

在赤潮卫星遥感研究中, 水色资料无疑是最重要的信息源, 赤潮水体的反射光谱有两个特点, 一是在红光的 680 nm 左右有明显的反射峰, 二是在 $3 \sim 5$ 波段有不同正常水体的变化率。从 1997 年闽南微赤潮清水的离水辐射率是单调递减的, 近岸海水无论是否有赤潮, 在 1、2 波段上是相似的, 而在 $3 \sim 5$ 波段上, 无赤潮的海水 $3 \sim 5$ 波段的折线是平直或向上凸的, 而有赤潮的海水 $3 \sim 5$ 波段的折线是向下凹的, 如图 5 所示。因此, 可以通过以下式子来判断赤潮范围:

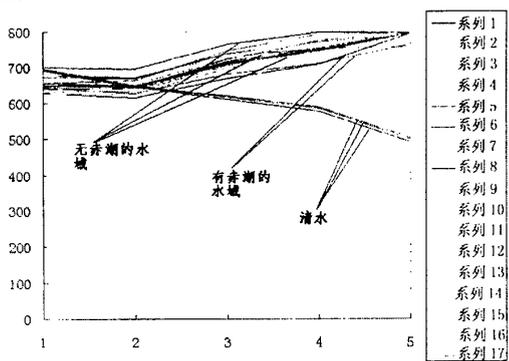


图5 1997年11月2日闽南微赤潮各样品点 1~5 波段的离水辐射率(图中, 横坐标为波段数, 纵坐标为离水辐射率: $0.001 \text{ mW}(\text{cm}^2 \cdot \text{u} \cdot \text{sr})$)

$$(L_5 - L_4) / (L_4 - L_3) > C \quad (4)$$

式中 L_i 为 i 波段的离水辐射率; C 为判断赤潮门限值。

利用式 (4) 成功地监测到发生在厦门湾的微囊藻赤潮。另外, 值得注意的是不同类型赤潮各波段间的辐射率存在不同变化关系, 对于发生在杭州湾甲架藻赤潮区可用以下式子判别;

$$(L_1 - L_2)/(L_1 - L_2) > C \quad (5)$$

式中 L_1, L_2 和 L_4 分别为波段 1, 2, 4 的离水辐射率, 利用 (5) 式成功地监测到 1998 年 9 月中下旬发生在渤海赤潮事件面积大于 3000 km² 的叉状角藻赤潮, 如图 6 所示。

另外, 通过 FY-1C 资料的 3 个海洋水色通道探测到叶绿素浓度的变化, 结合 AVHRR 红外通道探测到的海面水温, 也可以监测到海上异常和赤潮, 如图 7 所示。

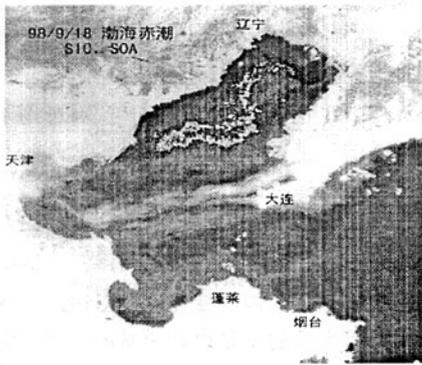


图 6 1998 年 9 月 10 日 SeaWiFS 探测到的发生在渤海湾的赤潮

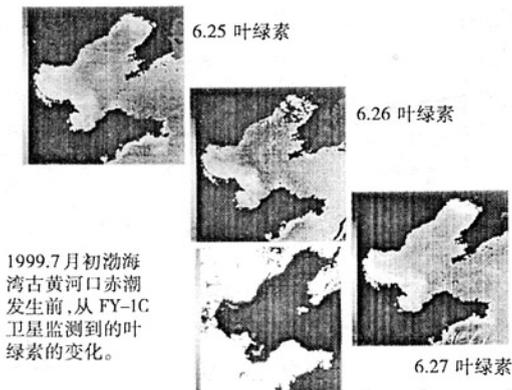


图 7 利用 FY-1 和 AVHRR 监测到的 1999 年发生在渤海的赤潮

4 海洋水色遥应用于沿海海表流态的变化研究

通常利用 AVHRR 的 SST 资料进行海表流态的变化研究, SeaWiFS 测得的叶绿素浓度分布同样可作为海表流态的一种示踪剂。

图 8 展示了 1997 年 10 月 4 日, 1998 年 1 月 11 日、3 月 27 日、5 月 1 日台湾附近海域的叶绿素浓度分布特征。从图可以看到: 台湾海峡的叶绿素浓度最高, 其次是吕宋岛以北的浅水域以及台湾与吕宋岛之间的黑潮水与南海水的交汇域(锋区以及吕宋岛西北的气旋型环流区)。台湾—吕宋岛以北海域的叶绿素浓度较高, 其以东海域, 即副热带环流区的叶绿素浓度较低。这些海区的叶绿素浓度都具有一定的季节变化特点, 相应地显示了台湾岛附近海域表层流场的变化。从图 8 各时期的叶绿素浓度分布图, 大致可以发现:

1) 研究海区的叶绿素浓度分布与水团特性、锋区和环流性质相一致。在沿岸水与外海水的交界处, 叶绿素浓度很高, 其次是在黑潮锋区(如图 9 所示)。南海东北部气旋型环流区叶绿素浓度较高, 似应与上升流有关, 副热带环流区的叶绿素浓度很低, 似与该区存在下降流、营养盐不丰富有关。

2) 研究海区叶绿素浓度分布的季节变化与海流(如台湾海峡流、台湾以东黑潮)或外海水入侵强度的变化有关。台湾海峡和台湾以东黑潮区叶绿素浓度块状分布似与该区流速明显增大有关。台湾与吕宋岛之间的叶绿素浓度锋区的变化与黑潮水入侵南海强度有关。

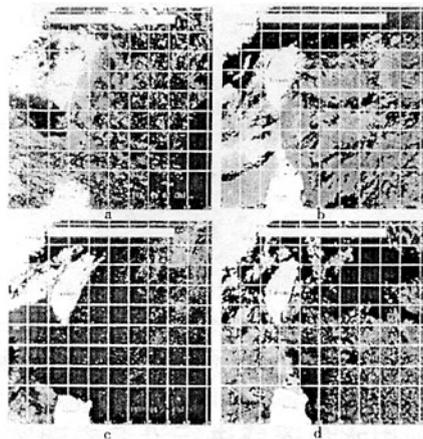


图 8 SeaWiFS 得到的季节叶绿素浓度分布图

a 1997.10.4; b 1998.1.11; c 1998.3.27; d 1998.5.1

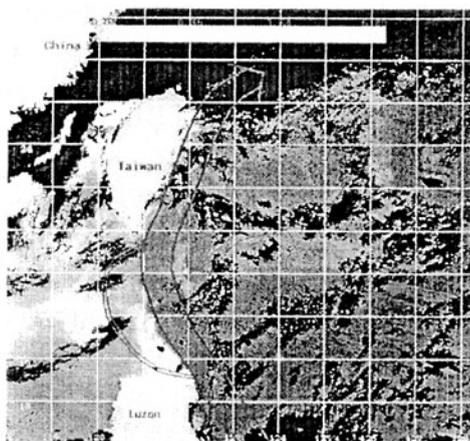


图9 1998年1月11日,SeaWiFS测得的叶绿素浓度分布与黑潮间关系

5 应用潜力和建议

在新世纪里,海洋水色遥感将在海岸带综合管理中发挥更大作用,有以下应用潜力:

1) 针对社会经济发展所面临的人口、资源与环境三大日趋严重的问题,提出了社会经济可持续发展的战略目标,就海岸带水域而言,水产开发(包括捕捞与养殖)与水产资源有限的矛盾更为突出。当务之急,应摸清生物资源量。海洋水色遥感监测的叶绿素浓度和水温可以制作初级生产力专题图作为海岸带水域持续再生产评价的科学依据。

2) 准实时制作灾害性因子遥感专题图,如赤潮、溢油和大面积污染等,以便及时向有关部门和单位发布灾情,以供防灾救灾之用。

3) 由于卫星水色遥感覆盖面广,如SeaWiFS一条扫描带宽约为1285 km, FY-1C约为2048 km,又具有实时性,于是可以在实时的航空的船只岸带水质环境监测中起到方位导向作用,形成一个立体岸带水域环境网监测。

4) 海洋水色遥感资料有多个可见光和近红外波段组成,为植被指数的反演,滩涂分类提供了AVHRR更高光谱分辨率的信息,于是在岸带植被和滩涂的分类、保护和利用中有极大作用。

5) 另外,海洋水色遥感对岸带水域的军事和外交也很有应用潜力。

为使海洋水色遥感更好的发挥以上潜力,有如下建议:

万方数据

1) 建立由卫星、飞机和船只3个层次的岸带监测系统,以达到实时或准实时监测和监视岸带水质环境和突发事件。

2) 海洋水色遥感探测到的只是海面环境因子,有必要开展通过遥感得到的表面因子作为初始条件研究得到垂直剖面的因子分布,加强因子的剖面分布,模型研究。

3) 建立海岸带环境数据库,建成可服务的3S集成库。

4) 尽可能利用多种机会的载体取得生化-光学现场数据,如浮标,调查船和商用运输船及渡轮等机会,以提高遥感精度。

6 结论

1) 从20世纪80年代末以来,中国海洋水色遥感技术已有了长足的进展,发展了系列卫星,初步建立了卫星资料接收、处理和分发的海洋水色遥感应用技术系统。

2) 为监测海岸带水体的水色环境,研究适用于中国的大气校正,叶绿素和悬浮泥沙信息提取算法,得到的水色遥感专题图已成功地应用于赤潮、海岸流场等监测,取得了良好的应用效果。

3) 在新世纪,海洋水色遥感技术将在海岸带持续发展评估、灾害监测、水质环境监测和军事等方面很有应用潜力,将成为海岸带综合管理的有效手段。

4) 有关建立3个层次海岸带环境立体监测系统、3S数据库、垂直剖面分布模型和借用各种机会载体实施验证等技术的建议将有助于遥感技术在海岸带综合管理中的应用。

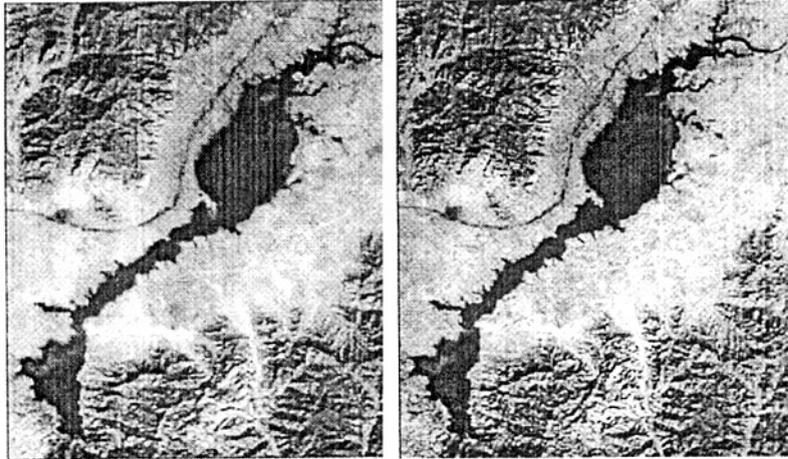
致谢:感谢潘玉球研究员在海表流态分析方面给以的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Pan Delu, J. F. R. Gower & Borstad. Seasonal variation of the surface chlorophyll distribution along the B. C coast as shown by CZCS satellite imagery. *Limnology and Oceanography*. 1988, Vol. 33(2): 227 ~ 224
- 2 潘德炉等. 荧光法遥感海面叶绿素浓度 (下转第25页)

满足国内广大用户的使用要求。处理方法是合理的,软件是自动化程度较高的工程化运行软件,可以用于 CBERS-1 卫星 CCD 相机的图像处理。

作者简介:周胜利,男,1955 年 11 月生。1983 年毕业于北京大学分校物理系。研究员。



a) 处理前的图像

b) 处理后的图像

图 10 MTF 增强

(上接第 39 页)

- 的波段选择研究. 海洋与湖沼学报. 1989, Vol. 20(6): 564~570
- 3 张水浸, 许昆灿, 陈其涣, 曾昭文. 厦门西港区一次赤潮的观测. 厦门港赤潮调查研究论文集. 海洋出版社, 1993.
 - 4 张水浸, 杨清良, 丘辉煌, 林琼芳. 赤潮及其防止对策. 海洋出版社, 1994.
 - 5 潘玉球, 应国玲, 黄树生, 毛天明. 利用 NOAA 卫星图像和水文资料研究东海水文的变化. 东海海洋, Vol. 15(2): 35~45
 - 6 毛志华, 潘德炉, 潘玉球, 黄韦良. 常规信息对遥感海表流场的修正方法. 海洋学报. Vol. 19(3): 142~149

作者简介:潘德炉,男,1945 年生。国家海洋局海底科学重点实验室研究员,博士生导师,主攻海洋遥感专业。