

# 我国东南沿海区域海表面流场卫星遥感监测

程 亮<sup>1</sup>, 郭洪涛<sup>1</sup>, 李 琰<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 总参气象水文中心, 北京 100081)

摘 要: 应用 MODIS 极轨卫星云图资料, 进行 MODIS 资料的数据处理及大气环境参数反演和海表特性反演后, 对我国东南沿海区域表面海流进行了监测, 建立了集信息综合分析和动态监测为一体的 MODIS 云图和海表面流场监测系统。实践证明整个系统运行稳定, 具有实用性和可扩展性强的特点。

关键词: MODIS; 云图处理系统; VC++

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2007)3 - 0065 - 10

## 1 引言

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer 中分辨率成像光谱仪) 是新一代遥感探测器, 其提供的遥感数据是当前全世界可免费接收的唯一的 中分辨率成像光谱仪数据。MODIS 是 NOAA AVHRR 的换代产品, 相对 AVHRR 而言 MODIS 在空间分辨率、光谱通道数、波段范围、辐射计算等众多方面具有显著的优势。我国已经开展了对 MODIS 的实验, 并计划在未来发射的 FY-3 系列业务卫星上搭载这种传感器, 这充分说明对 MODIS 资料的研究应用符合当前卫星资料发展应用的趋势, 也是适应当前气象水文、气象环境保障的迫切需要。随着 MODIS 数据资料的日益普及, 其在海洋气象业务领域中的应用将越来越广泛。我国周边海域的表面海流监测一直是气象水文保障的一个重要方面, 然而, 目前利用的常规手段对大面积海域的表面海流难以实施同步的高频率的实时监测, 相比之下, 利用 MODIS 资料对开展表面海流的监测具有十分明显的优势。

## 2 系统设计思路

气象卫星遥感监测进入 20 世纪 90 年代后在国内得到了广泛的应用, 如基于 NOAA 卫星进行植被覆盖监测、森林火情监测、地表积雪监测、水情监测、旱情监测、农作物产量评估等; 基于 GMS-5 进行云和降水分类估计、海面温度场、湿度场反演等。国外从 1988 年开始, 气象卫星遥感监测在海表面流场监测与研究方面得到应用, 如 Cracknell A. P. 等<sup>[1]</sup>, 而在国内一直到 2001 年许建平<sup>[2]</sup>利用多年经过南海上空的 AVHRR 资料, 结合现场观测所获的 CTD 资料, 揭示并讨论了发生在南海区域的一些物理海洋学现象。结果表明, 利用卫星资料对研究物理海洋学问题有着较好的效果, 并结合现场观测资料

收稿日期: 2006-12-31; 修订日期: 2007-06-27

作者简介: 程 亮 (1981-), 男, 博士研究生, 从事海洋遥感资料处理研究。

的综合分析,给出了一幅南海东北部动机表面环流的形式图(图略)。

MODIS 资料是一种近年才开始在气象水文环境等研究领域逐渐使用的卫星资料,对 MODIS 资料开展广泛的研究是新形势下的气象水文保障的迫切需要。从 1999 年 12 月 Terra 成功发射开始,我们有机会获得 MODIS36 个覆盖可见光、近红外和远红外波段的百米量级,可对大气、海洋和陆地进行综合观测,其信息十分丰富,与目前广泛使用的 NOAA-AVHRR 数据相比,保留了其应用功能和免费接受的特点,在数据波段数目、应用范围、数据分辨率、数据接收和数据格式等方面都有了很大改进,这些改进构成了 MODIS,成为 AVHRR 的换代产品。监测东南沿海表面海流是气象水文保障的一个重要方面,因为它对该海域的军事、经济活动有着直接的影响,对区域的气象水文环境有着重要的影响<sup>[5]</sup>。

### 3 系统的处理模块

#### 3.1 条带噪声去除

MODIS 采用“多元并归”的对地遥感方式,由于某个通道探测器之间的光谱特性不完全相同,尽管在发射前作了相对定标,但随着时间的推移,探测器之间仍然会产生差异,在图像上会产生类似“条纹”效应的条带噪声(图略),这个问题会不同程度地影响后期开发产品的质量。MODIS 的条带噪声是非常有规律的,条带噪声线的位置并不总是在扫描带的分界处。基于以上特点,可以通过统计每行可能的噪声数来判断条带噪声所在行。定位方法如下:对于像素点  $(i, j)$ , 值为  $G_{i,j}$ , 如果该像素属性值相对于上下两个像素的属性平均值增加的百分比超过阈值  $T$ ,我们就认为该点“噪声像素”为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{G} = \frac{G_{i+1,j} + G_{i-1,j}}{2} \\ (G_{i,j} - \bar{G}) / \bar{G} > T \end{array} \right.$$

#### 3.2 图像的几何纠正、投影实现

由于 MODIS 探测器对地球观测的视野几何特性、地球表面的曲率、地形起伏和 MODIS 探测器运动中的抖动等因素的共同影响,MODIS 数据存在几何畸形。这种几何畸形随着观测角度的增大而日趋严重,计算表明,在视角为 24 度时,条带之间的重叠为 10%,而在条带两端重叠度达到 50%。

##### 3.2.1 几何纠正

- (1) 读入 HDF 格式的 MODIS 影像和相应的 1km 分辨率的坐标数据。
- (2) 如果映像的分辨率为 250m 或 500m,需采用双线形对经纬度坐标进行插值,使得映像的每一个像素点都有一个坐标点与其对应。
- (3) 确定投影方式,等面积圆锥或等经纬度坐标投影。
- (4) 扫描原影像,用前向映像算法计算原影像  $S(i, j)$  点在目标影像内的对应点  $D$

$(i, j)$ 。

(5) 以  $D(i, j)$  为中心, 搜索周围的像素点  $D(i_1, j_1)$ 。如果  $D(i_1, j_1)$  点的属性值为背景填充值, 则搜索下一个值。

(6) 采用后向映像算法, 计算  $D(i_1, j_1)$  在原始影像的映射点  $S(i_1, j_1)$ 。根据该点所在位置的条带重叠度, 确定每一个搜索窗口, 然后在确定的子窗口内查找  $S(i_1, j_1)$  周围的采样点。如果搜索到的采样点个数小于一定的数目, 则以背景值填充。

(7) 采用归一化反距离加权插值内叉目标影像点  $D(i_1, j_1)$  的属性。

(8) 重复步骤 5、6、7, 直至  $D(i, j)$  周围的像素处理完毕。

(9) 重复 4 ~ 8, 直至整幅影像纠正完毕。纠正前后的影像见图 1a 和图 1b。

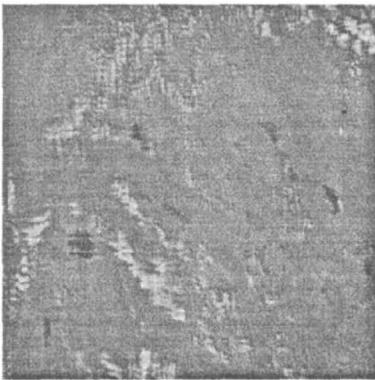


图 1a 具有双眼皮现象的云图

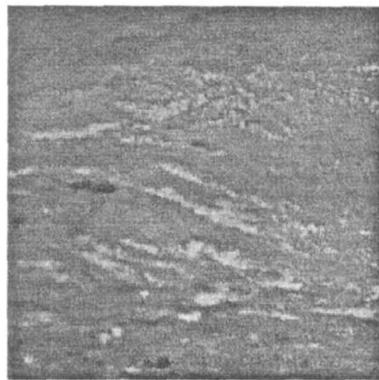


图 1b 去除双眼皮效应之后的云图

### 3.2.2 地图投影及插值

本文采用了等经纬度投影及归一化反距离加权插值的方法。等经纬度投影是一种应用最广泛的投影方式, 是一种极简单的坐标变换。它用相等角度 (可以是两种情况: 既经度和纬度的分辨率完全相同或经纬度有自己各自不同的分辨率) 来划分图象, 图象的每一个象素在列方向表示相同的经度范围, 在行方向表示相同的纬度范围。只要定义了图象的中心纬度、经度、行分辨率和列分辨率 (以度为单位) 及总行列数, 则能很容易地将图象上的行、列号转换为地理坐标 (经、纬度), 也能将已知地理经纬度转换为行列号。值得注意的问题是, 等经纬度投影并非在低纬度地区变形最小, 而是在与分辨率相一致的纬度圈上变形最小。本文用到的归一化反距离加权插值方法是根据距离的远近来确定某个象素对插值结果的贡献: 距离越近, 贡献越大; 反之, 贡献越小。为了使纠正前后的象素属性变化尽可能的小, 通常对权值进行归一化处理, 称之为归一化反距离加权插值 (见图 2)。

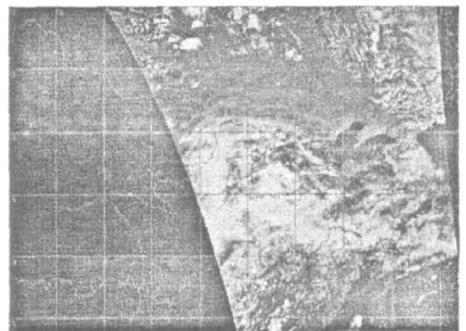


图 2 MODIS 第 2 通道等经纬度投影后云图

### 3.3 大气环境参数反演模块

#### 3.3.1 太阳耀斑区的识别

当太阳反射角度  $\theta$  位于  $0^\circ \sim 36^\circ$  时,需作太阳耀斑区处理。太阳反射角按下式确定： $\cos\theta_r = \sin\theta_s \sin\theta_0 \cos\phi + \cos\theta_s \cos\theta_0$ ， $\theta$  为太阳天顶角， $\theta_0$  为视角， $\phi$  为方位角。 $\theta$  和  $\phi$  可以从 MODIS 文件中读取， $\theta_0$  可由  $\theta$  和  $\phi$  与像素点的经纬度计算得到。本文剔除太阳耀斑区的具体流程见图 3。识别结果如图 4，其中耀斑区以白色显示。



图 3 剔除太阳耀斑区的具体流程

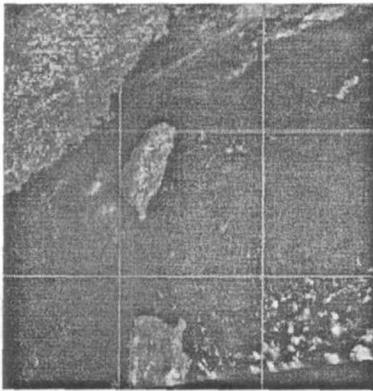


图 4a 识别前通道 2 图像

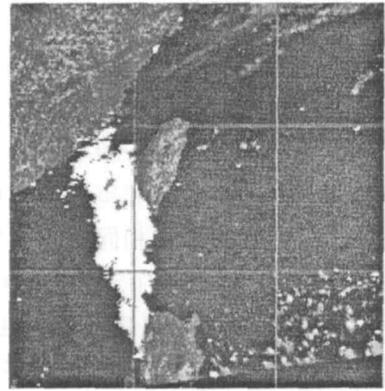


图 4b 识别后耀斑区位置

#### 3.3.2 云检测

云检测工作是海温反演当中必须的，其精度直接影响到海温反演的精度。具有 36 个探测通道的 MODIS 仪器为云检测提供了利用多个光谱进行云检测的有力手段。本文采用了盛夏(2004 年)的云检测算法<sup>[4]</sup>，选择了 MODIS 六个对云、地表比较敏感的波段(波段 1、6、8、26、29、31)进行研究，检测算法流程图可用图 5 表示，其中 TH 代表阈值，譬如 TH1 代表第一个阈值。R 代表反照率，譬如 R0.412 代表 0.412  $\mu\text{m}$  的反照率。

BTD 代表亮温差。图 5 中 TH1 至 TH8 分别为 0.01,0.12, -0.7K, -3.0K, -0.09,0.20,0.17,0.20。云检测结果见图 6。

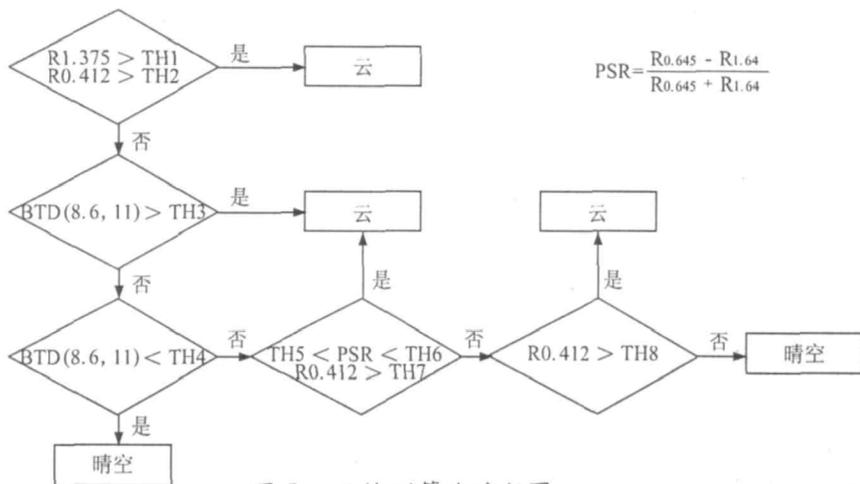


图 5 云检测算法流程图



图 6a 通道 1 云图



图 6b 通道 31 云图



图 6c 云检测结果

### 3.4 海洋特性反演模块

#### 3.4.1 海温反演 [3]

MODIS 热红外海表温度反演算法使用到 MODIS 第 31 和第 32 两个波段,这两个波段处于大气窗口,可以通过第 31 和第 32 两个波段来消除由于大气吸收造成的影响,反演算法形式如下:  $SST=a+bT_{31}+c(T_{31} - T_{32})+d(sec(\theta) - 1)(T_{31} - T_{32})$ ,其中  $T_{31}$ 和  $T_{32}$ 分别是 31 和 32 波段的亮温,  $\theta$ 是卫星天顶角。a、b、c、d 为系数(见表 1)。

表 1 SST 算法的系数

卫星 Satellite	昼夜 D/N	系数 Coefficient			
		a	b	c	d
Aqua	白天 Day	1.152	0.960	0.151	2.021
	夜晚 Night	2.133	0.926	0.125	1.198
Terra	白天 Day	1.052	0.984	0.130	1.860
	夜晚 Night	1.886	0.938	0.128	1.094

### 3.4.2 海色反演

大洋中的海色主要受到叶绿素浓度的影响,本文主要研究了叶绿素浓度的反演方法。

叶绿素浓度的统计计算公式如下: $\log(chla)=-1.40(\log X)+0.07$ ,其中: $X=\frac{L_{wn}(band9443nm)}{L_{wn}(band12550nm)}$ , $L_{wn}(band9443nm)$ 为 MODIS 波段 9 的归一化离水辐射率, $L_{wn}(band12550nm)$ 为 MODIS 波段 12 的归一化离水辐射率。

### 3.5 表面海流监测演模块

本文将主要以海表面温度和叶绿素浓度来作为估计海流的示踪物。在特征量跟踪法中用于估计海流的第一幅云图我们称之为“模板窗口(template window)”,第二幅云图我们称之为“搜索窗口(search window)”。本文利用最大相关系数法来跟踪一幅云图到下一幅云图的海表特征的位移。在“搜索窗口”中找出与“模板窗口”大小相同且相关性最好的那个子窗口,假设“搜索窗口”子窗口的中心坐标为 $(X_{mcc}, Y_{mcc})$ ，“模板窗口”的中心坐标为 $(X, Y)$ ,则有 $(X_{mcc}-X, Y_{mcc}-Y)$ ,既可假设为流动的矢量(见图 7)。对许多“模板窗口”进行重复的操作,将得到完整的表面海流区域。

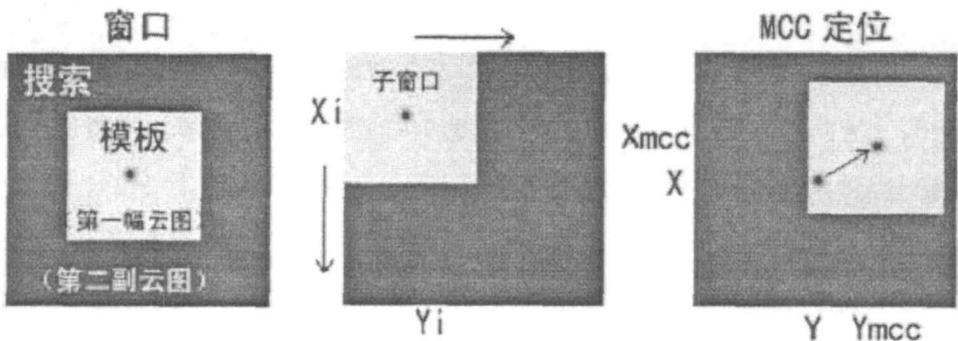


图 7 最大相关系数法计算海流的例子

没有什么直接的方法来选择“模板窗口”和“搜索窗口”的大小,他们的大小要能估计出本区域中最大的海流速度,“模板窗口”要大到具有一定的统计能力,但是也不能太大,以免海表面流的特征变形。利用本方法精确估计海流的一个重要方面是对云图的精确定位,对云图中云的剔除也是非常重要的。因为移动较慢的云也能引起速度出现误差。同时本方法在估计海面锋以及涡旋附近的海表面流的时候也存在内在的缺陷,在这些区域中提供更多的空间参数来消除错误的流向流速。

## 4 关键技术的应用

本文利用 VC++ 6.0 中 MFC 开发的东南沿海区域表面海流卫星遥感监测系统。其中,海流监测的质量控制、多特征量综合跟踪和软件设计观念是关键技术。

### 4.1 质量控制

#### 4.1.1 用相关系数进行质量控制

用相关系数进行质量控制。统计表明海表面流最大相关系数绝大部分在 0.7 以上,本文中相关系数小于 0.7 的点去掉。

#### 4.1.2 空间连续性质量控制

某点的表面流场与周围点的流场应当没有大的矢量差。矢量差大于阈值的点被认为没有空间连续性,剔除。

#### 4.1.3 变分同化技术质量控制

设特征量跟踪法得到的表面流场为  $(u^b, v^b)$ ,我们要得到的是经过变分同化的质量控制得到流场  $(u, v)$ 。问题提出,寻找表面流场的分析值  $(u, v)$ ,使得  $(u, v)$  满足散度场:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = D(x, y) \quad (1)$$

$(u^b, v^b)$  为推导得到的表面流场,使得分析值  $(u, v)$  与表面流场充分接近,满足(1)式时又同时满足:

$$J[u, v] = \int [(u - u^b)^2 + (v - v^b)^2] dx dy = \min! \quad (2)$$

利用 Lagrange 乘子法,把(1)式作为约束条件,即条件变分法,引进新的泛函:

$$J_1[u, v] = \int_{\Omega} [(u - u^b)^2 + (v - v^b)^2 - 2\lambda(x, y) (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - D(x, y))] dx dy = \min \quad (3)$$

利用欧拉方程得:

$$\frac{\delta J_1}{2} = \int_{\Omega} [(u - u^b)\delta u + (v - v^b)\delta v - \lambda(x, y) (\frac{\partial(\delta u)}{\partial x} + \frac{\partial(\delta v)}{\partial y})] dx dy = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\Omega} [(u-u^b + \frac{\partial \lambda}{\partial x})\delta u + (v-v^b + \frac{\partial \lambda}{\partial y})\delta v] dx dy - \int_{\partial \Omega} \lambda (\delta u, \delta v) \vec{n} ds = 0 \quad (5)$$

得出：

$$\begin{cases} u = u^b - \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ v = v^b - \frac{\partial \lambda}{\partial y} \end{cases} \quad (6)$$

另一方面： $(u, v)$ 满足：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u^b}{\partial x} + \frac{\partial v^b}{\partial y} = D(x, y) \quad (7)$$

将(6)式代入(7)得：

$$\frac{\partial u^b}{\partial x} + \frac{\partial v^b}{\partial y} - \Delta \lambda = D(x, y) \quad (8)$$

得出：

$$\begin{cases} \Delta \lambda = D^b(x, y) - D(x, y) \\ \lambda|_r = 0 \end{cases} \quad (9)$$

利用图 8 所示的松弛法(Relaxation method)得到  $\lambda$ ，从而得到分析值  $u, v$ 。

令  $f(x, y) = D^b(x, y) - D(x, y)$ ，由(8)式离散得： $\lambda_{i+1, j} + \lambda_{i-1, j} + \lambda_{i, j+1} + \lambda_{i, j-1} - 4\lambda_{i, j} = f_{i, j}$

每一格点上给定的初始猜值  $\lambda_{i, j}^{(0)}$ ，经过  $m$  次叠代后，余量  $R_{i, j}^{(m)} = \lambda_{i+1, j}^{(m)} + \lambda_{i-1, j}^{(m)} + \lambda_{i, j+1}^{(m)} + \lambda_{i, j-1}^{(m)} - 4\lambda_{i, j}^{(m)} - f_{i, j}$ ，重新求出  $(i, j)$  点  $\lambda_{i, j}^{(m+1)}$  的值，使得余量等于或接近于 0，从而得到  $\lambda_{i, j}$  的最后叠代值。将得到的  $\lambda_{x, y}$  叠代值代入(6)式，就可以得到表面海流的分析值  $(u, v)$ 。图 9 是 2003 年 6 月 29 日 5 时 11 分 MODIS 表面海流的监测结果。

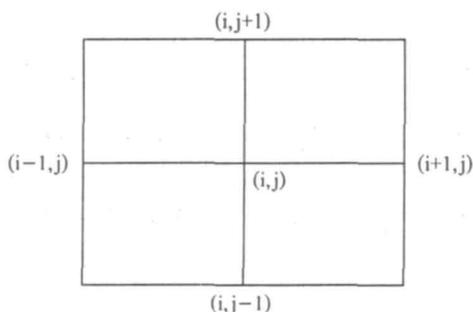


图 8 松弛叠代示意图



图 9 2003 年 6 月 29 日 5 时 11 分 MODIS 表面海流监测结果

## 4.2 海温、叶绿素浓度两种特征量综合跟踪的创新

国外许多学者曾尝试用海温一种特征量跟踪海表面流,本文在对研究区域及资料的分析后,首次提出了两种特征量的综合跟踪,经实验证明,其监测结果好于只利用一种特征量的跟踪方法。

## 4.3 软件设计理念上有新颖性

为便于软件的移植,我们在读资料的模块中采用了预处理,将资料格式转换成规范的处理格式,所有计算模块只对处理格式进行编程,以避免遇到不同情况需要大量修改程序代码的麻烦,并可及时地把系统升级,为水文监测资料的共享提供了有利条件。

广泛采用动态链接库,将大大提高用户的理解能力和应用能力。

# 5 结论

本文详细地论述了我国东南沿海区域表面海流卫星遥感监测系统的可视化原理、思想和方法以及该系统实现的主要功能,介绍了为实现这些功能所采用的质量控制、多特征量跟踪监测和软件设计等关键技术。该系统实现了 MODIS 多光谱卫星图像的条带噪声去除、几何纠正和投影、太阳耀斑区的识别、云检测、海温和海色的反演以及表面海流的监测,使得气象卫星大气海洋遥感的新技术和新方法得到了简便、高效、快捷的应用。

## 参考文献:

- [1] Cracknell A P, Vaughan R A. Remote sensing from research to operation-proceeding of the 18th annual conference of the remote sensing society [M]. England: Whitstable Liths Printers Ltd., 1992.
- [2] 许建平. 南海东北部冬季表面环流的卫星红外遥感观测研究[J]. 东海海洋, 2001,19 (4), 1 ~ 12.
- [3] 邓嘉金, 李继龙, 杨文波. 利用 MODIS 遥感数据反演东海海域海表温度的研究[J]. 海洋渔业, 2006,28 (2):141 ~ 146.
- [4] 盛 夏, 孙龙祥, 郑庆梅. 利用 MODIS 数据进行云检测[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2004,5 (4): 98 ~ 102.
- [5] 刘玉洁, 杨忠东, 等. MODIS 遥感信息处理原理与算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

## A Monitoring System of Sea Surface Current of China Southeast Sea

CHENG Liang<sup>1</sup>, GUO Hong-tao<sup>1</sup>, LI Long<sup>2</sup>

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China ; 2. Head General Staff Meteorological and Hydrological Center, Beijing 100081 China)

Abstract : Using MOIDS Multi-Spectral satellite imageries data, monitoring the China Southeast Sea surface current, after the data pre-procession, atmospheric parameter retrieval, sea surface parameter retrieval, a MODIS satellite imagery procession and monitoring sea surface current system was established, which provides the functions of data analysis and dynamic monitoring was set up, the system makes the monitoring work simpler, more effective and quicker.

Key words : MODIS ; Satellite procession system ; VC++