

基于引力模型的海洋锋信息提取

平 博^{1,2}, 苏奋振^{2*}, 杜云艳², 孟云闪², 苏伟光^{2,3}

(1. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 烟台海岸带研究所, 烟台 264003)

摘要: 海洋锋面是海洋水团特性明显不同的两种或几种水体之间的狭窄过渡带。本文旨在对遥感反演海洋温度场数据(SST), 引入引力模型进行海洋锋面的检测。鉴于海洋锋受噪声干扰大, 锋面强度小的特点, 本文提出了基于引力算法的引力模型。其中, 引力算法是将温度数据中的每一个像元点都作为一个独立的天体, 其质量对应像元的温度值, 根据引力定律计算 3×3 区域中, 邻域像元对中心点像元的引力和。模型首先对原始数据进行去0处理, 为消除对原始数据明暗程度的依赖, 对 3×3 区域数据进行归一化, 然后利用函数对归一化后的数据进行增强处理, 最后, 以引力算法进行锋面检测。验证表明, 该模型能有效强化不同区域或水体差异性, 并能够有效针对海洋锋信息进行提取, 受噪声影响小。

关键词: 海洋锋; 万有引力; 边缘检测; SST

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00187

1 引言

海洋锋是海洋水团特性明显不同的两种或几种水体之间的狭窄过渡带, 对国民生产、国防、海洋及气象有重大影响^[1]。目前, 海洋锋面的提取方法主要有直方图方法^[2-7]、熵方法^[8-9]、Canny边缘算子方法^[10-11]和梯度方法^[12-14]等。

万有引力定律的边缘检测算法^[15]是将数字影像的每一个像元点都作为一个天体, 将其像元值作为其质量, 根据牛顿的万有引力定律, 计算邻域像元对中心点的引力和, 得到引力幅值, 并以Ostu方法得到阈值, 最终得到边缘影像。文献[16]利用两个非线性梯度为自变量的函数代替中心像元点的质量, 并结合万有引力算法进行边缘检测。上述方法多用于边缘检测, 而且万有引力算法也有一些问题, 例如, 当邻域内中心点的像元值为0时, 无论其邻域其他像元点的像元值为多少, 此中心像元所受引力的合力都为0。其次, 直接用中心像元点的像元值代替中心物体的质量, 那么像元值大的区域的引力值必然大于像元值小的区域, 这将使得检测

结果严重依赖于原始图像的明暗度。

因此, 本文根据海洋锋面和引力算法的特点, 提出了一种以引力算法为基础的引力模型, 并将该模型应用于海洋锋面的检测。首先, 对原始海洋表面温度数据进行中值滤波, 去除噪声和细小边缘对锋面检测的影响, 对滤波后数据进行去0处理, 去除像元值为0的像元对引力计算的干扰, 针对引力算法对原始图像明暗程度依赖性强的特点, 对引力计算的 3×3 邻域进行归一化处理。海洋锋相比海陆边缘等, 其引力值较低, 且锋面信息多易受到噪声等的影响, 如果直接使用引力算法对归一化后的数据进行锋面检测, 效果不佳。因此, 为了增强引力算法对海洋锋检测的能力, 对 3×3 邻域归一化后的数据进行增强处理。最后, 应用引力算法进行锋面检测。实验表明, 该模型对海洋锋信息的提取有效可行。

2 基于引力算法的引力模型

2.1 引力算法

根据牛顿的万有引力定律, 2个有质量的物体

收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2013-01-07.

基金项目: 国家科技支撑课题“小卫星智能观测荒漠化和海岸带监测应用示范”(2011BAH23B04); 国家海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201005011)。

作者简介: 平博(1986-), 男, 博士生, 研究方向为摄影测量与遥感。E-mail: pingb@lres.ac.cn

*通讯作者: 苏奋振(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为时空过程分析。E-mail: sufz@lreis.ac.cn

会产生通过其连心线方向的相互吸引的力,并且这种力会分别施加到两个物体上,其大小相等,方向相反,其具体表现如图1所示。该引力的大小与两个物体的质量乘积成正比,与它们距离的平方成反比,与两物体的化学本质或物理状态,以及中介物质无关。万有引力定律可以表达为:

$$\vec{f}_{1,2} = \frac{Gm_1m_2\hat{r}_{2,1}}{\|\vec{r}_{2,1}\|^2} = \frac{Gm_1m_2\hat{r}_{2,1}}{\|\vec{r}_{2,1}\|^3} \quad (1)$$

其中, $\vec{f}_{1,2}$ 表示物体2施加到物体1上的引力; G 表示万有引力常量值,近似取为 $6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$; m_1 和 m_2 分别是两个物体的质量; $\vec{r}_{2,1} = \|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\|$, 表示两个物体之间的距离; $\hat{r}_{2,1} = (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)/\|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\|$, 是从物体2到物体1的单位矢量; \vec{r}_1 和 \vec{r}_2 分别表示两个物体的矢量位置。同样,物体1施加到物体2上的引力 $\vec{f}_{2,1} = -\vec{f}_{1,2}$ 。

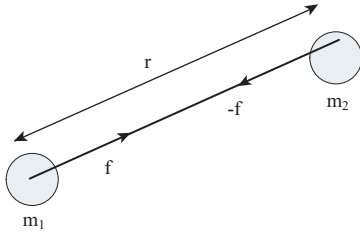


图1 牛顿定律

Fig.1 Law of Newton

在引力算法中,将数字影像的每一个像元点都看作是一个天体,其质量就是其像元值(在本文中利用 SST 数据,因此像元值是一个索引值,与实际温度呈线性关系)。每一个像元点都会对其邻域的像元点施加一个引力,当两个像元点之间的距离超过一个预设值时,就认为这两个像元点之间的引力为0。根据^[17]中分析,较大的窗口尺度(如 5×5)会增加引力计算的误差,其外层像元的引力会受到内层像元的干扰,从而使其施加到中心点的引力下降,并且外层像元与中心点像元不在一条线上,需要单独处理这些像元。因此,本文的预设值为1,即中心点的 3×3 邻域。邻域像元对中心点的引力的总和为锋面检测提供了很多重要信息^[15]。

针对任一像元,如图2的1点,取其 3×3 区域,其邻域像元任一点 (k,l) 对中心点 (i,j) 的引力可以由式(1)得到,即式(2)。

$$f_{ij;k,l} = G \cdot \frac{m_{ij}m_{k,l}\vec{r}}{\|\vec{r}\|^3}, \quad \|\vec{r}\| = \sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2} \quad (2)$$

考虑 x,y 方向,因为只考虑 3×3 区域,故可以设

定中心点的坐标为 $(0,0)$, 即 $i=j=0$, 则 (k,l) 点对中心点的引力为式(3):

$$\begin{aligned} f_{ij;k,l}^x &= G \cdot \frac{m_{ij}m_{k,l}k}{\|\vec{r}\|^3} \\ f_{ij;k,l}^y &= G \cdot \frac{m_{ij}m_{k,l}l}{\|\vec{r}\|^3} \end{aligned} \quad (3)$$

根据文献[15]中介绍,邻域像元对中心点的引力为邻域各个点对中心点引力的和,即式(4)。

$$\begin{aligned} F^x \sum &= G \cdot \frac{m_{ij}m_{k,l}k}{(\sqrt{k^2+l^2})^3} \\ F^y \sum &= G \cdot \frac{m_{ij}m_{k,l}l}{(\sqrt{k^2+l^2})^3} \end{aligned} \quad (4)$$

其引力幅值为式(5):

$$F = \sqrt{(F^x)^2 + (F^y)^2} \quad (5)$$

如图2所示的理想边缘图像,通过上式的计算得到,1点和2点的邻域像元对其中心点的引力值大于0,而3点的引力值为0,因此,可以通过设定合适的阈值得到边缘。并且,图中的1点和2点,其引力值是不相同的,但传统的边缘检测算子,如 Sobel 和 Prewitt 等,1点和2点的梯度值是相同的,因此,通过设定合适的阈值,万有引力算法可以得到单像元性的锋面,定位精度更高。

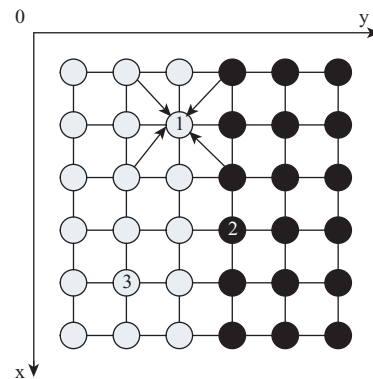


图2 垂直边缘示意图

Fig.2 Schematic diagram of vertical edge

2.2 引力模型

海洋锋检测极易受到噪声的干扰,对最终的结果势必产生影响。对此,作者采用中值滤波算子遍历图像,滤除原始数据中的噪声和细小边缘^[18]。

对于数据中像元值为0的点,即质量为0,从引力公式(1)可知,无论其邻域像元的值是多少,该像元的引力值都为0,这样会对最后的锋面检测造成干扰,并且会对噪声较为敏感。因此,参照文献

[17],利用式(6)对像元值为0的点进行修正,可以消除上述问题。

$$q_{new} = \frac{q_{old} + \xi q}{1 + \xi q} \quad (6)$$

其中, q_{new} 为变换后的像元值, q_{old} 为像元值为0的点的像元值, ξq 为一个极小的正数, 本文取0.001。

传统的万有引力边缘检测算法依赖于原始数据的明暗程度,如图3所示,(a)和(b)都是两个边缘区域,但(a)和(b)区域对中心像元的引力相差10倍,因此,以单一阈值的锋面检测,可能将(a)区域作为非锋面区域,从而造成锋面漏检。故此,针对每一个3×3的区域,均采用(7)式将其区域内的像元进行归一化。

$$X_{new} = \frac{X_{old}}{\max} \quad (7)$$

其中, X_{new} 为归一化后像元值, X_{old} 为原始像元值, \max 为3×3区域内的最大值。

2	3	2
2	3	2
20	30	20

(a)

20	30	20
20	30	20
200	300	200

(b)

图3 边缘实例

Fig.3 An example of edge

针对归一化后的3×3邻域,采用算法公式(8)进行非线性变换,增强数据对比度。

$$X_{new(i,j)} = \begin{cases} 2X_{old(i,j)}^2 & 0 \leq X_{old(i,j)} \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - X_{old(i,j)})^2 & 0.5 < X_{old(i,j)} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $X_{new(i,j)}$ 为增强后像元值, $X_{old(i,j)}$ 为原始像元值。

以引力算法,对增强后的数据进行引力计算,并据引力累计直方图,设定阈值,提取海洋锋信息。

2.3 算法流程

模型首先对原始数据进行中值滤波,去除相关噪声和细小边缘,提高锋面定位精度。接着对滤波后数据进行去0处理,消除因像元值为0的像元造成引力值计算误差。对数据进行归一化,消除对原始图像明暗程度的依赖,接着使用公式(8)对局部数据进行增强。最后,利用引力算法对增强数据进行锋面检测。具体算法流程如图4所示。

3 算法的实验与分析

3.1 实验数据

实验数据中的海洋锋(黑潮)是强西边界流边

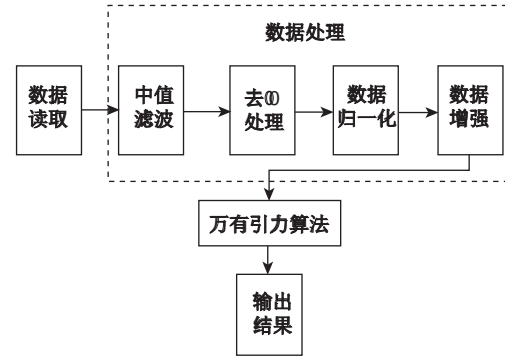


图4 算法流程

Fig.4 The algorithm flowchart

缘锋,其对中国近海影响显著。选取的是2007年5月的月平均海温数据(如图5),该数据源自NOAA-18极轨卫星的SST海温数据(the National Oceanic and Atmospheric Administration),根据文献[5]中的介绍,该数据选取卫星红外波段4(10.3~11.3μm)和波段5(11.5~12.5μm)计算海表温度,温度分辨率为0.125℃,数据空间分辨率为4km,采用等角投影方式,原始索引数据与实际海表温度数据采用公式(9)进行换算。实验区域是25°33'N~34°33'N, 121°5'E~143°33'E。由于地面点无数据,以公式(9)可以得到该区域的海洋温度范围是从0~33℃。

$$\text{Temperature} = A(x,y) \times 0.075 - 3 \quad (9)$$

其中, Temperature 是海洋的实际温度, $A(x,y)$ 是坐标为 x 和 y 的点的原始数据。

3.2 实验结果与分析

本文算法中,阈值的设定基于引力累积直方图,如图6所示。根据Canny(1986)的介绍,在梯度累积直方图中噪声近似符合高斯分布,然而边缘信息多是由梯度较大的像元点组成,且边缘占的比例相对较低。因此,当引力值小于或等于某一引力 d 的像元数占总像元数的比例达到一个给定的值时,其引力值 d 为阈值。该阈值选取方法已经多次用于锋面检测,文献[12]应用Canny算法对南加州湾进行锋面检测,其高低阈值的设定应用累积直方图;文献[19]应用水平梯度法进行锋面检测,其阈值的选取同样以梯度累积直方图。针对本文选取实验区域,经过多次实验,选取比例为85%的引力值作为对应的阈值。在其他对比实验中的阈值选取方法同样采用引力累积直方图或梯度累积直方图。

如图7所示,(a)是海洋锋面模型检测结果,(b)

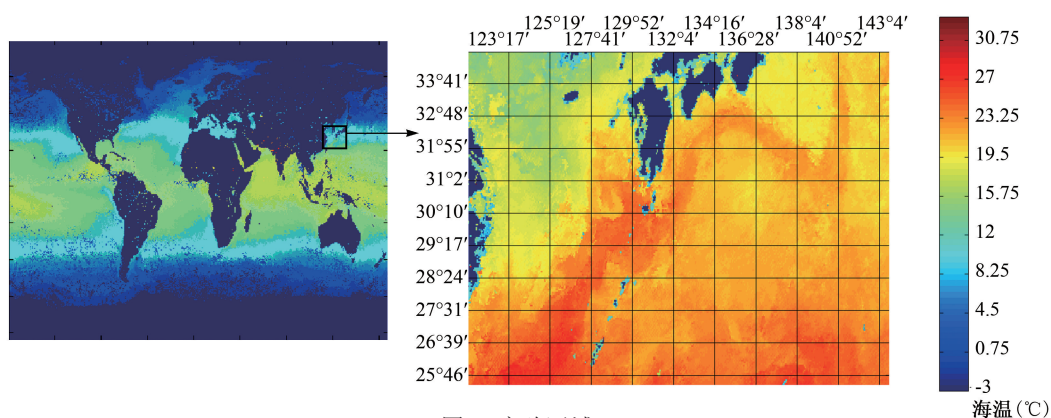


图5 实验区域

Fig.5 The experimental area

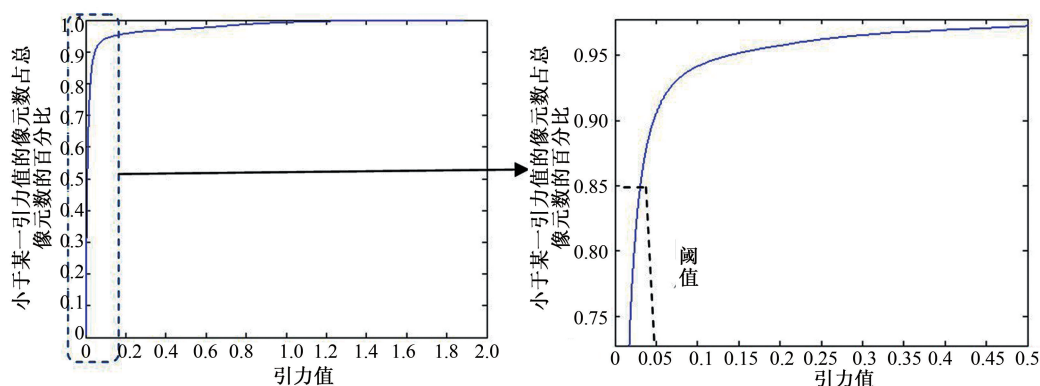
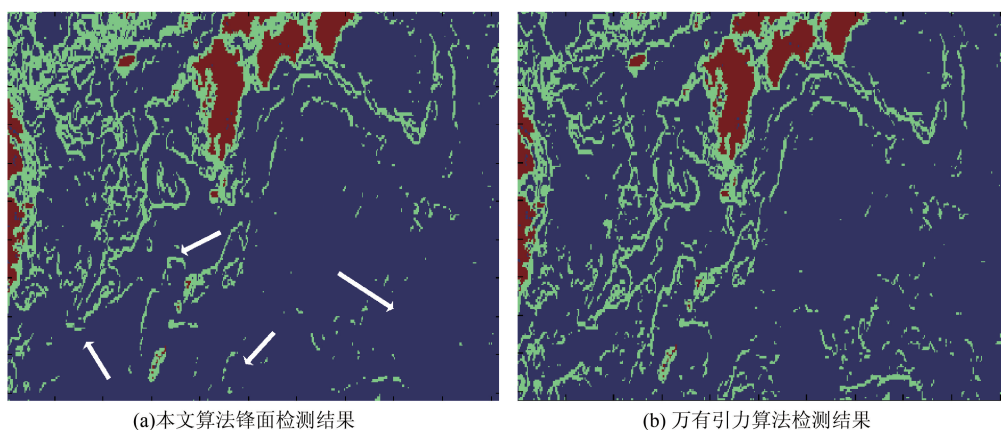


图6 引力累积直方图与其局部放大图

Fig.6 Normalized gradient cumulative histogram



(a)本文算法锋面检测结果

(b)万有引力算法检测结果

图7 本文算法与万有引力算法锋面检测结果

Fig.7 Comparison between algorithm proposed in this paper and algorithm based on the law of universal gravitation

是以原始万有引力算法的海洋锋面检测结果。从图7(a)和(b)两图中可以看出,本文算法可以较好地滤除噪声和细小的边缘,且没有破坏锋面的连续性(如箭头所示区域)。因此,相比于原始万有引力算法,本文模型在较好地保持锋面的同时,滤除了噪声的影响。

图8是本文算法与Sobel和熵方法进行锋面检测的结果,其中,(a)是本文算法的结果,(b)是Sobel算法的结果,(c)是熵方法的结果。其中,Sobel和熵方法都是经典的锋面检测算法,多次用于不同区域的锋面检测,因此,将上述两种方法的结果与本文算法的结果进行比较。

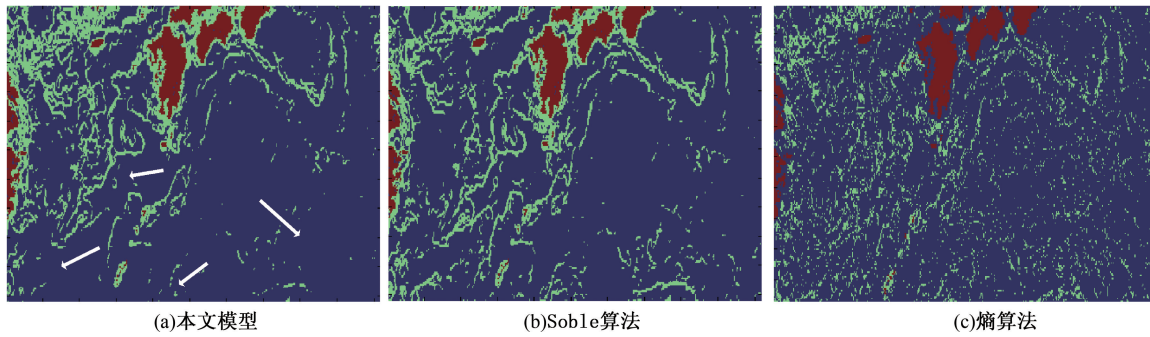


图8 本文算法与经典锋面检测算法比较

Fig.8 Comparison between algorithm proposed in this paper and the classic edge detection algorithm

从图8可以看出,基于本文模型的锋面检测进行局部数据归一化和增强,可以较好地保留锋面信息(黑潮区域),更好地消除噪声和细小边缘的影响,边缘定位精度相比于sobel算子和熵更高。图8中3种方法阈值的确定都是依据梯度累积直方图或熵值累积直方图,全部选取累积直方图85%对应的梯度值或熵值作为阈值。如图8(a)中白色箭头所示区域,本文算法能够滤除掉这些区域的噪声和细小边缘,而sobel算子和熵方法都无法消除该区域的噪声。当提高阈值设置时,即使sobel算法和熵方法能够滤除这些区域的噪声,但无法保证锋面的连续性,即无法满足保持锋面连续性的同时降低噪声的干扰。而本文模型可在保持锋面连续性的同时,消除噪声等的干扰。

4 结语

万有引力算法已经应用于边缘检测技术,但是海洋锋面的特性与图像边缘不同,锋面的引力值相对较小,因此,针对海洋锋和万有引力算法的特点,本文提出了基于引力算法的引力模型,在应用引力算法进行锋面检测前,对数据进行去0处理,局部归一化和局部增强处理,消除了对原始数据明暗程度的依赖,并且突出了锋面信息。经验证,本文算法可以较好地保留锋面信息,同时消除相关噪声和细小边缘的影响。

本文算法也存在提升空间,阈值的选取一直是锋面检测的难点,国内外很多学者进行了研究,但仍很难达到理想的自适应阈值选取,因此,应用引力模型得到图像引力值之后的阈值确定仍需要大量的工作。并且可以针对不同区域,不同特性的锋面的特点,提出更适合锋面检测的区域增强算法。

由于锋面的弱信息性,其检测效果易受到噪声的干扰,因此,可以在该算法的基础上,提高算法的性能,即在提升锋面检测精度的同时,降低噪声的影响。

参考文献:

- [1] 李凤岐,苏育嵩.海洋水团分析[M].青岛:青岛海洋大学出版社,2000.
- [2] Cayula J F, Cornillon P. Edge detection algorithm for sst images[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992,9(1):67-80.
- [3] Cornillon P. Multi-image edge detection for sst images[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1995,12(1):821-829.
- [4] Cayula J F, Cornillon P, Holyer P, *et al.* Comparative study of two recent edge-detection algorithms designed to process sea-surface temperature fields[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, , 1991,29(1):175-177.
- [5] Ullman D S, Cornillon P C. Evaluation of front detection methods for satellite-derived sst data using in situ observations[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000,17(12):1667-1675.
- [6] Miller P. Multi-spectral front maps for automatic detection of ocean colour features from seawifs[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(7-8):1437-1442.
- [7] Diehl S F, Budd J W, Ullman D, *et al.* Geographic window sizes applied to remote sensing sea surface temperature front detection[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002,19(7):1105-1113.
- [8] Vázquez D P, Atae-Allah C, Escamilla P L L. Entropic approach to edge detection for sst images[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1999,16(7):970-979.
- [9] Shimada T, Sakaida F, Kawamura H, *et al.* Application of an edge detection method to satellite images for distinguishing sea surface temperature fronts near the Japanese

- coast[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,98(1): 21-34.
- [10] Castelao R M, Mavor T P, Barth J A, *et al.* Sea surface temperature fronts in the california current system from geostationary satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2006(111):C09026(1-13) .
- [11] 石汉青,张伟,尹志泉.基于 Canny 算子和数学形态学的海洋锋检测方法研究[C]. 2010 年国际遥感大会(ICRS 2010), 杭州, 2010 年 10 月.
- [12] Oram J J, McWilliams J C, Stolzenbach K D. Gradient-based edge detection and feature classification of sea-surface images of the southern california bight[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(5):2397-2415.
- [13] 尹劲峰,刘仁义,刘南.SST 图像温锋提取算法研究[J]. *计算机应用研究*,2005,22(2):225-226.
- [14] 薛存金,苏奋振,周军其,等.基于形态学的海洋锋形态特征提取[J].*海洋科学*,2008,32(5):57-61.
- [15] Sun G Y, Liu Q H, Liu Q, *et al.* A novel approach for edge detection based on the theory of universal gravity [J]. *Pattern Recognition*, 2007(40): 2766-2775.
- [16] 张春雪,陈秀宏.基于非线性滤波的万有引力边缘检测方法[J].*计算机应用*,2011,31(3):763-766.
- [17] Lopez-Molina C, Bustince H, Fernandez J, *et al.* A gravitational approach to edge detection based on triangular norms[J]. *Pattern Recognition*, 2010,43(2010):3730-3741.
- [18] Belkin I M, O'Reilly J E. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009(78):319-326.
- [19] Rivas A L, Pisoni J P. Identification, characteristics and seasonal evolution of surface thermal fronts in the Argentinean Continental Shelf[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010(9):134-143.

Application of the Model of Universal Gravity to Oceanic Front Detection Near the Kuroshio Front

PING Bo^{1,2}, SU Fenzhen², DU Yunyan², MENG Yunshan² and SU Weiguang^{2,3}

(1. *School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

2. *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

3. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China)*

Abstract: Oceanic front is a narrow transitional zone that the penetration of sea is obviously different between two or more waters there, and it plays an important role in the national production, national defense, marine and weather. Based on the modified theory of universal gravity, sea surface temperature (SST) data near the Kuroshio front are used for front detection. The theory of universal gravity assumes that each image pixel is a celestial body with a mass represented by its value. According to the law of universal gravity, the forces of the pixels in the 3×3 neighbourhood exerted on the central pixels can be calculated. Because fronts are susceptible to the noise and intense of fronts are commonly low, a modified method are proposed to solve these problems in this article. This method firstly eliminates the pixels that values equal to 0. Then in order to decrease the reliance on the brightness level of original data, a normalization step is applied to each 3×3 neighbourhood and next based on image enhancement function, each normalized 3×3 area can be enhanced. Finally, the theory of universal gravity is applied to enhanced data for front detection. The algorithm was tested and compared with conventional methods using in the fronts detection such as Sobel, Jensen-Shannon. The results show that compared to conventional methods in some areas, the proposed algorithm can decrease noise while not cause fronts discontinuous.

Key words: oceanic fronts; the theory of universal gravity; edge detection; SST