

文章编号 1004-924X(2013)10-2704-09

# 卫星遥感海面高度图像的中尺度涡自动提取

陈维真<sup>1</sup>, 张春华<sup>2\*</sup>, 赵仕伟<sup>2</sup>, 李红林<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 信息技术学院, 山东 青岛 266100; 2. 北京 5111 信箱, 北京 100094)

**摘要:**分析了 1992—2008 年海面高度遥感图像, 归纳出了自动检测中尺度涡的难点。以提高检测概率为主旨, 提出了一套中国近海及其附近海域海面高度图像中尺度涡自动提取的方法。首先, 对海面高度图像背景区域进行局部直方图 Gauss 拟合, 根据拟合结果滤除海面背景区域, 得到海面高度异常区域和残留的少部分海面背景区域。然后, 针对中尺度涡的成像特点, 综合利用涡旋的强度/尺度等判据, 设计了一套中尺度涡提取算法, 用于自适应地从海面高度异常区域和少部分海面背景区域提取不同强度/尺度的中尺度涡。对本文检测结果与文献中评述的中尺度涡进行了对比, 结果表明, 提出的算法对中尺度涡海面高度异常区域具有良好的检测性, 有助于全面分析中国近海及其附近海域的中尺度涡的时空特性。

**关键词:**卫星遥感; 遥感图像; 中尺度涡; 自动检测; 直方图; 海面高度

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2704

## Automatic detection of mesoscale eddy for satellite remote sea surface height image

Chen Wei-zhen<sup>1</sup>, ZHANG Chun-hua<sup>2\*</sup>, Zhao Shi-wei<sup>2</sup>, Li Hong-lin<sup>2</sup>

(1. College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Beijing 5111 Postbox, Beijing 100094, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiaohua800506@163.com

**Abstract:** The satellite remote Sea Surface Height (SSH) images from 1992 to 2008 were analyzed, and the difficulty of detecting mesoscale eddies automatically was summarized. To improve the detection probability, a extracting mesoscale eddy method from the SSH images was proposed for the China seas and their adjacent seas. Combined with the characteristics of satellite remote SSH images, the background statistical characteristics were estimated by Gauss fitting method. According to the Gauss fitting results, the sea clutter background area was eliminated, thus the sea height abnormal area and a few of remainder sea clutter background area were derived. Then, according to the imaging characteristics of mesoscale eddies, a sets of detect algorithms for mesoscale eddies were designed combined with the criteria of intension and scale to distill mesoscale eddies in China seas and their adjacent seas adaptively. Finally, The detected mesoscale eddies were compared to those commented in literatures, and results prove that the algorithms have high detecting quality. The proposed method provides basis

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2012-10-24.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB723903)

for analyzing space-time characteristics for mesoscale eddies in China seas and their adjacent seas across-the-board.

**Key words:** satellite remote sensing; remote sensing image; mesoscale eddy; automatic detection; histogram; Sea Surface Height(SSH)

## 1 引 言

中尺度涡旋的空间尺度通常在数十至数百公里范围,时间尺度为数周至数月乃至十几个月,中尺度涡旋一般是由于平均流的不稳定性、海面风的强迫作用或是海底地形变化等原因产生的,而且通常是非常不规则的。这些涡旋所含的能量比海洋中其它类型运动的能量都大<sup>[1]</sup>,它不仅会直接影响海洋环境的温盐结构和流速分布,而且会输送动量和热量,从而对海洋上层水域的物理性质产生强烈影响<sup>[2]</sup>。这会使该区的声传播规律发生显著变化,具体表现为当声波通过海洋涡旋时,由涡心向涡外或由涡外向涡心的能量传播损失可达 20~40 dB 左右,使水下三维声场产生一系列声传播的奇异区域,从而对海面舰船和 underwater 航行器的安全和使用效能发挥产生显著的影响,因此,获取大范围准确的中尺度涡信息是亟待解决的问题。

由于船测资料有局限性,如时空覆盖率比较低等,这在一定程度上限制了中尺度涡的研究。随着卫星资料,尤其是 TOPEX/Poseidon 高度计资料的日益增多,使得中尺度涡的研究又趋于活跃,其中一个重要的领域就是中尺度涡的自动提取方法。Nicholas<sup>[3]</sup>曾经采用计算机搜索图像中相同灰度值所连成的区域,并利用这些区域结构之间生成的关系图进行提取类似涡结构的尝试性研究,但由于海洋遥感图像成像过程复杂,单纯的基于图像等灰度值连通区域的算法难以提取涡的检测特征。之后,Peckinpaugh 等<sup>[4]</sup>基于遥感图像的边缘,提出了直接利用 Hough 变换圆检测算子进行涡检测的方法。由于涡形态的复杂性,其检测边缘曲线一般不是一个规则的圆,故该方法还是比较粗略的。在此基础上,R. M. Gairola<sup>[5]</sup>利用最优匹配滤波法提取直径为 100~250 km,高度为 20~30 cm 的中尺度涡,取得了一定的成果,但是这种方法计算量非常大,而且不能提取强

度较弱的涡旋。姬光荣等<sup>[6]</sup>,Fernandes<sup>[7]</sup>相继提出在局部区域基于椭圆检测原理对中尺度涡进行自动检测的方法,但是这种方法只适合小范围处于成熟期、形态特征比较明显的中尺度涡自动检测。

目前,海洋遥感图像中尺度涡的解译主要依靠“专家目视判读”方法。这种方法不仅劳动强度大,而且具有不可避免的人为因素,无法满足快速/自动检测的需求,严重制约了海洋遥感资料的应用效能。本文面向海面高度融合数据,提出一种中尺度涡自动检测方法,并采用该方法对中国近海及其附近海域进行了中尺度涡自动检测。首先,对海面高度图像的直方图进行 Gauss 拟合,得到海面背景区域高度值的均值和方差,进而对海面背景区域进行滤除,得到海面高度异常区域。然后,针对海面高度异常区域的特点,设计了一套自适应提取候选涡区域的算法。最后,综合利用涡旋的强度/尺度判据对海洋涡区域进行筛选,得到中尺度涡的提取结果。并利用文献中评述的中尺度涡对本文算法进行验证。

## 2 数据说明

本文使用的资料来源于法国 AVISO 计划 (Archivings Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) 提供的 TOPEX/Poseidon(T/P), Jason 和 ERS1/2 或 Envisat 等高度计的融合产品,选取的卫星高度计资料时间为 1992~2008 年,空间为 0~40°N,105~160°E,分辨率为 $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ ,时间分辨率为 7 d。由于原始的高度计数据分辨率较低,为了提高数据的分辨率和可判读性,首先利用双三次插值方法对海面高度数据进行插值与重采样,得到空间分辨率为 $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ 海面高度数据,然后,使用 $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ 经纬度网格的海陆掩模图像替换原始低分辨率的陆地数据。需要说明的是,插值本身不改变数据的信息量,所以插值不会影

响中尺度涡的提取效果,而陆地部分重新使用高分辨率的掩模图像可以提高数据的直观可判读性。

### 3 海面背景区域局部直方图 Gauss 拟合算法

#### 3.1 局部直方图 Gauss 拟合算法

图 1 为 1995 年 8 月 2 日经过插值并添加高分辨率海陆掩模后的高度计图像,空间为  $0\sim 40^\circ\text{N}$ ,  $105\sim 160^\circ\text{E}$ ,空间分辨率为  $(1/12)^\circ\times(1/12)^\circ$ 。

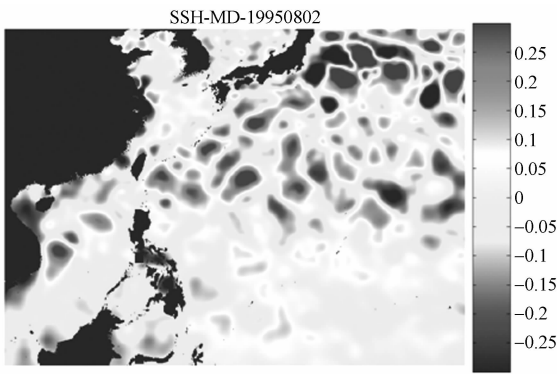


图 1 海面高度图像(1995 年 8 月 2 日)

Fig. 1 SSH image(1995.08.02)

由图 1 可以看出,海面高度图像包括 3 部分内容:海面背景区域、正高度值异常区域、负高度值异常区域。海面高度图像中尺度涡存在于正/负高度值异常区域。图 2 为图 1 的直方图,由图 2 可以看出,海面背景区域直方图曲线比较光滑,近似服从 Gauss 分布。根据 Gauss 分布特性,对于服从  $N(\mu, \sigma^2)$  的 Gauss 分布,将高度值介于  $(\mu - k\sigma, \mu + k\sigma)$  的区域进行滤除后,便得到正/负高度值异常区域和少部分海面背景区域。因此,首先对海面背景区域的直方图进行 Gauss 拟合,根据拟合结果估计出 Gauss 分布的均值  $\mu$  和方差  $\sigma$ ,对高度值介于  $(\mu - k\sigma, \mu + k\sigma)$  的海面背景进行滤除后,利用根据中尺度涡的时空特性设计的合理算法即可对中尺度涡进行检测。 $k$  的选取方法在 4.1 节介绍。

本文利用局部直方图 Gauss 拟合方法估计海面背景参数,这样能够避免海面高度异常区域

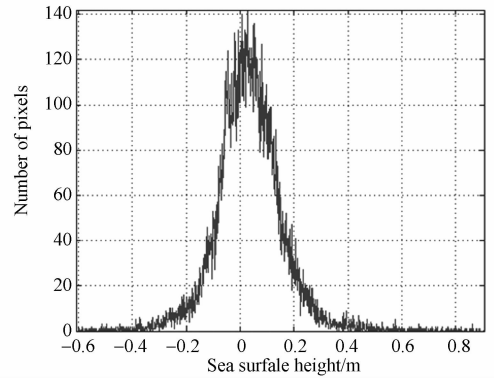


图 2 海面高度直方图

Fig. 2 Histogram of SSH image

的干扰,准确估计海面背景区域高度值的均值和方差。局部直方图选取示意图如图 3 所示:

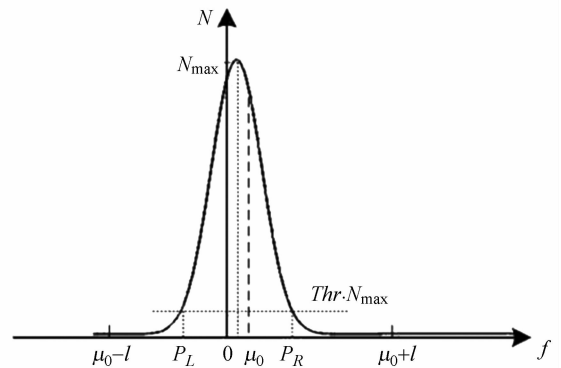


图 3 海面背景区域直方图选取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of histogram selection for sea surface background

具体步骤如下:

(1) 计算整幅海面高度图像的均值  $\mu_0$  和标准差  $\sigma_0$ ;

(2) 以  $\mu_0$  为中心,在直方图中取像素灰度值在  $[\mu_0 - l, \mu_0 + l]$  的一段区域  $Hist$ ,找到  $Hist$  区域中峰值点对应的灰度值  $f_{max}$ ,并记录图像中灰度值为  $f_{max}$  的像素点个数  $N_{max}$ ;

(3) 以  $f_{max}$  为中心,对  $[\mu_0 - l, \mu_0 + l]$  区域进行搜索,取所有大于  $Thr \times N_{max}$  的点,记为  $P = [P_1, P_2, \dots, P_n]$ ,取距离  $\mu_0 - l$  的最近点  $P_1$ ,记为  $P_L$ ,距离  $\mu_0 + l$  最近的点  $P_n$ ,记为  $P_R$ ,  $[P_L, P_R]$  之间的区域即为局部直方图区域  $Hist'$ 。

阈值  $Thr \in (0, 1)$  决定了进行 Gauss 拟合时所用的背景直方图区域的大小。 $Thr$  的下限不宜取得太小,如果太小,  $Hist'$  会包括很多接近零的像素数,这种情况下,在对  $Hist'$  进行高斯拟合,尤

其是对这些数据取对数时,会产生较大的误差,影响拟合精度;Thr 的值太大时,Hist' 包含的数据量少,这样,用来进行拟合的数据又会不足。

为了更科学地选取 Thr 的值,以便对直方图进行更好的拟合,本文利用 Kullback-Leibler (KL)散度衡量直方图之间的相似程度。文献[8]指出 KL 散度是衡量两幅图像之间相似程度的最佳度量。KL 散度也叫 KL 熵,它是 2 个概率密度函数间相似程度的度量,KL 散度值越小,表示两者的相似程度越高。由于用像素数表示的直方图与像素的概率密度一一对应,因此,在不影响分析精度的情况下,可以通过 KL 散度比较局部直方图和拟合直方图的相似程度。

图 4 为 Thr 取值为:0.1~0.6,步长为 0.02 时,拟合直方图与局部直方图的 KL 散度,从图 4 可以看出,当 Thr 取 0.2 时,便可取得良好的拟合效果,当 Thr>0.2 时,拟合精度提高不大,因此,Thr 通常取 0.2~0.4 间的数,这样,既能取得较高的拟合精度,又可使进行拟合的数据量足够大,充分利用了原始图像直方图的信息。本文取 Thr=0.2。

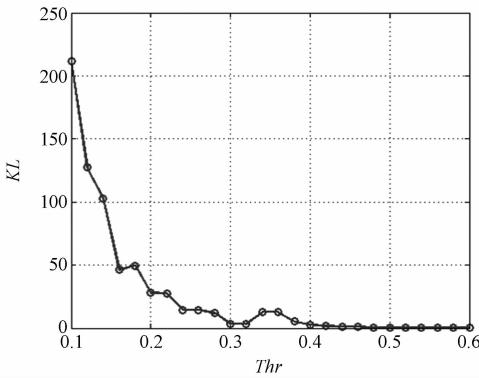


图 4 阈值对拟合精度的影响

Fig. 4 Effect of different thresholds on fitting accuracy

### 3.2 高斯拟合估计背景的参数

假设海面背景区域高度值服从  $N(\mu, \sigma^2)$  的 Gauss 分布,则背景的直方图分布可以表示如下:

$$N(x) = N_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其中, $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$  分别为拟合局部直方图的峰值幅度、均值和标准差。

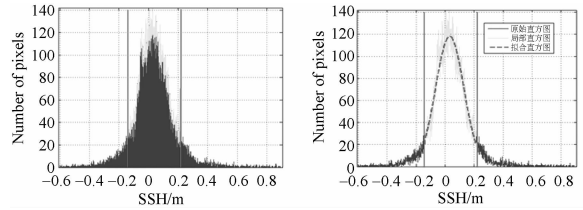
对上式取以 e 为底的对数,并整理得:

$$\ln N(x) = -\frac{1}{2\sigma^2}x^2 + \frac{\mu}{\sigma^2}x + \ln \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}\sigma}. \quad (2)$$

对上式等式右边进行最小二乘二项式拟合即可得到  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$ 。

### 3.3 拟合结果分析

图 5 (a)为 1995 年 8 月 2 日海面高度图像的直方图,两条竖线中间部分为根据式(2)选取出的局部直方图,图 3 (b)为局部直方图及其拟合结果,拟合直方图的均值为 0.031,标准差为 0.048。可以看出,本文算法与原始图像的直方图吻合程度较高。



(a) 局部直方图选取结果 (b) 局部直方图拟合结果  
(a) Selected -results of local-histogram (b) Fitted results of local-histogram

图 5 局部直方图 Gauss 拟合结果

Fig. 5 Gauss fitted results of local-histogram

## 4 中尺度涡提取

### 4.1 中尺度涡区域提取算法

通过对 1992~2008 年间的海面高度图像进行分析、总结,得出中尺度涡检测的主要难点如下:

(1)弱涡形成的海面高度异常区域中尺度涡的检测

弱涡区域的信号强度小,在图像上表现为中尺度涡区域的海面高度值较海面背景的高度平均值  $\mu$  之差小于 15 cm。虽然通过降低阈值的方法能够在较大程度上保留弱涡区域,但同时也会导致阈值处理后的图像信息量(包括噪声和信号)增大,进而增加了后续处理的难度。为了提高弱涡区域的检测精度,本文首先采用较低的阈值对图像进行处理以保留弱涡区域,然后,通过设计合理有效的检测方法来滤除由上述处理带来的噪声(即海面背景区域)的影响,以提高算法的检测性能。

(2)混合强/弱涡区域形成的高度异常区域中尺度涡检测

通过分析发现,海面高度图像存在多个强/弱

涡形成的高度异常区域,通过逐步提高阈值的方法可以使部分涡区分离,形成单涡区/多涡区混合区域,如果对所有区域使用同一阈值,提高阈值时,在检测到强涡的同时会使混合区域的弱涡漏检,为了兼顾弱涡区域和强涡区域的检测精度。因此,对于这种区域,为了兼顾弱涡区域和强涡区域的检测精度,需要设计合理算法以对不同强度的中尺度涡区域可以自适应地调整阈值的大小。

根据海面高度图像中尺度涡检测存在的难点问题,设计了一套中尺度涡检测算法,上述难点的解决方法和参数设置将在算法中一一说明。

为了方便描述,首先对变量进行说明,如下: $k$ 为图像中候选涡区域标记; $T_0$ 为用于对高度计图像进行阈值化处理的初始阈值, $T_0 = \mu + k\sigma$ , $k = 1.73$ ; $T_{\max}$ 为用于对高度计图像进行阈值化处理的初始阈值; $AreaNum$ 为对某一候选涡区域进行阈值化处理后得到的连通区域的个数。

具体步骤如下:

#### (1) 提取候选涡区域

通过式(3)去除海面高度值在 $(\mu - k\sigma, \mu + k\sigma)$ 之间的背景区域,同时对海面高度图像中的陆地数据(-9999)和异常数据(8888)赋零值,得到海面高度异常区域图像  $I$ 。

$$I(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \in (\mu - k\sigma, \mu + k\sigma) \\ f(x, y), & \text{else} \\ 0, & f(x, y) = -9999 \text{ or } 8888 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $\mu, \sigma$ 已经由第3节求出; $k$ 可调,选择较小的 $k$ 值能够检测出弱涡区域。在信号检测领域,通常情况下,如果没有其他辅助信息,当信号的信噪比大于等于3时,才能够有效地对其进行检测。根据对数-峰值信噪比( $SNR_{\log\text{-peak}} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{\max_{(i,j) \in Area} I(x, y) - \mu}{\sigma} \right]$ )的定义,在峰值信噪比为3的情况下, $I(x, y) = \mu \pm 10^{0.3} \sigma$ ,本文 $k = 10^{0.3}$ ,即1.73。

(2)对海面高度异常区域图像  $I$  进行阈值判断,得到暖涡区域海面高度图像  $H$ :

$$H(x, y) = \begin{cases} I(x, y), & I(x, y) > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

对  $H(x, y)$  进行连通区域标记,得到连通区域( $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_p$ ),其中, $p$ 为连通区域的个数。同时记录各个连通区域的面积( $S_1, S_2, \dots,$

$S_i, \dots, S_p$ )。

#### (3) 中尺度涡区域提取

1. 初始化,令  $p = 1$ ;
2. 对于第  $p$  个连通区域  $A_p$ ,其面积为  $S_p$ ;
3. 如果  $S_p < S_{\min}$ ,认为其不满足中尺度涡的尺度条件,则删除此区域,即  $H(x, y) |_{(x,y) \in S_p} = 0$ 。转到步骤6,其中, $S_{\min}$ 为中尺度涡尺度下限对应的海面高度图像区域面积;

4. 如果  $S_{\min} \leq S_p \leq S_{\max}$ ,则该区域满足中尺度涡的尺度条件,保留此区域,并记录此区域的位置信息( $x, y$ )和高度值  $H$ 。转到步骤6,其中, $S_{\max}$ 为中尺度涡尺度上限对应的海面高度图像区域面积;

5. 如果  $S_p > S_{\max}$ ,则区域  $A_p$  可能为单个强涡区域或者多个强/弱涡混合区域,记  $AreaNum$  为区域  $A_p$  的连通区域个数, $A_p$  内像素的行列值为  $[r_n^f, c_n^f]$ ,高度值为  $dat_n^f$ ,其中,上标  $f$  表示  $A_p$  内第  $f$  个连通区域, $1 \leq f \leq AreaNum$ ,初始状态令  $n = 0$ ,通过步骤(2)可知,初始状态  $A_p$  为单个连通区域,即  $AreaNum = 1$ 。

- ①初始化,令  $thr = T_0 + step$ ,  $sig = 0$ ,通常  $step = \sigma/5$ ;

- ②如果  $thr < T_{\max}$ ,记  $num = 0$ ,执行下一步;

- ③初始化  $k_1 = 1$ ;

- ④如果  $k_1 \leq AreaNum$ ,执行下一步,否则,转至步骤6;

- ⑤令  $[R, C] = [r_n^f, c_n^f]$ ,  $Dat = dat_n^f$ ,对由  $[R, C, Dat]$  组成的区域利用  $thr$  进行阈值处理,得到连通区域的个数为  $AN$ ,每个连通区域的行列值记为  $[row_{an}, col_{an}]$ ,海面高度记为  $d_{an}$ ,其中, $1 \leq an \leq AN$ ;

- ⑥初始化,令  $an = 1$ ;

- ⑦如果  $an \leq AN$ ,执行下一步;

- ⑧对由  $[R, C] = [row_{an}, col_{an}]$ ,  $Dat = d_{an}$  组成的区域进行判断,如果区域面积大于  $max$ ,记  $sig = 1$ ,  $num = num + 1$ ,记  $r_{n+1}^{num} = R$ ,  $c_{n+1}^{num} = C$ ,  $dat_{n+1}^{num} = Dat$ ;否则,记录此区域的位置信息和高度值。

- ⑨如果  $sig = 1$ ,  $AreaNum = num$ ,  $thr = thr + step$ ,令  $n = n + 1$ ,返回④,如果  $sig = 0$ ,则  $thr = T_{\max}$ ,令  $n = n + 1$ ,返回④,否则执行下一步;

6.  $i = i + 1$ ,如果  $i = P$ ,返回步骤2,否则结束循环。

通过上述步骤可以检测到暖涡区域,冷涡区域的检测原理与暖涡区域的一致,不再赘述。

通过上述步骤得到候选涡区域以后,需要进一步设定相应的判断准则从候选涡区域提取出满足条件的中尺度涡区域。Wang 等,程旭华等和 Cheng 分别对中尺度涡的标准进行了描述<sup>[9]</sup>,规定单个涡要同时满足下述条件,即(1)最外围等值线闭合;(2)所找的中尺度涡直径不小于 100 km;(3)涡中心和最外层闭合等值线的高度差不小于 7.5 cm;(4)由于卫星资料时间分辨率所限,涡从开始到结束至少要持续 5 周;(5)中尺度涡的中心位置水深大于 200 m(因为高度计在水深小于 200 m 的海域误差较大)。采用上述标准主要基于以下几点考虑:涡旋形态在高度异常图中表现为一系列封闭的等值线,正/负高度值中心与最外层等值线的高度差和水平距离反映了涡旋的强度和水平尺度。

上述标准是从等值线角度来对中尺度涡进行判断的,本文以高度计图像灰度值异常值区域为标准来提取中尺度涡,因此,检测出的候选涡区域肯定满足等值线闭合,满足条件(1)的要求。本文适当对(2)~(5)的条件进行放宽,规定中尺度涡直径大于 30 km,涡中心和最外层闭合等值线的高度差不小于 4 cm,对涡的持续时间不做要求。需要说明的是,本文算法适当的放宽了中尺度涡的检测条件,以尽可能大地保留中尺度涡区域,如果需要提取其它条件的中尺度涡,仅需对候选涡区域进行判断时,通过简单的参数修改便可实现。

### 4.2 中尺度涡的提取结果

图 6 为 1995 年 8 月 2 日海面高度图像的中尺度涡检测结果,可以看出,图 6 对图 2 的海面高度异常区域进行了正确的检测。

对 2000 年 2 月 4 个时次(0202,0209,0216,0223)的海面高度数据进行检测,其中,位于 115~125°E,15~25°N 区域的海面高度图像与检测结果如图 7 所示,其中,吕宋岛西北 115~120°E,16~21°N 海域为吕宋冷涡出现的海域,吕宋冷涡在冬春季节出现,夏秋两季减弱甚至消失<sup>[10-11]</sup>。根据文献<sup>[12]</sup>的描述,本文检测结果中吕宋岛西北约 118°E,18°N 的位置检测到的冷涡为吕宋冷涡,文献<sup>[12]</sup>还指出冬季传统意义下的吕宋冷涡实际上是由 2 个气旋式涡旋组成的,这也与 0216,0223 工作 2 个时次的的数据检测结果相吻合。

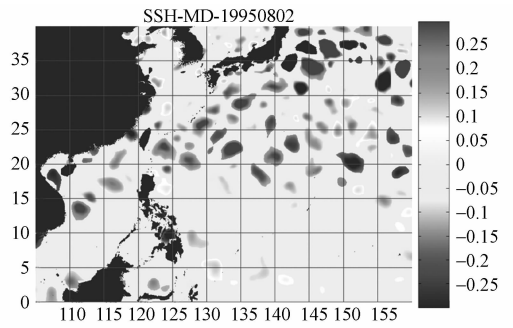
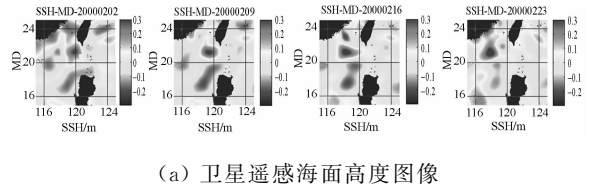
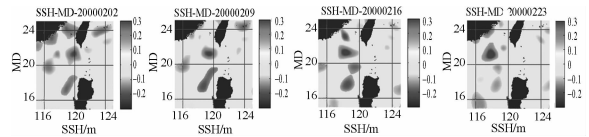


图 6 海面高度图像中尺度涡检测结果(1995.08.02)  
Fig. 6 Test results of mesoscale eddies for SSH image(1995.08.02)



(a) 卫星遥感海面高度图像

(a) SSH images of satellite remote



(b) 检测结果

(b) Test results

图 7 海面高度图像(2000.02)中尺度涡检测结果  
Fig. 7 Test results of mesoscale eddies for SSH images(2000.02)

## 5 真实性检验

检测概率和虚警率是衡量检测算法的重要指标,对算法的检测概率和虚警率进行分析是验证本文算法性能中重要的一步。然而由于资料的时空不连续性,水文调查资料不足以描述中国近海及其附近海域中尺度涡的地理位置,无法统计算法的检测概率与虚警率。本文根据文献<sup>[13]</sup>中评述的中尺度涡对本文算法进行验证,限于篇幅有限,只列出部分结果,如图 8~图 10 所示。

图 8(a)为文献评述的 2000 年 8 月南海及其附近海域存在的中尺度涡,图 8(b)为该海域 2000 年 8 月 9 日的海面高度图像(4~20°N,108~124°E),图 8(c)为中尺度涡的检测结果。对于文献中分析到的 12 个中尺度涡,本文在对应位置成功检测到 9 个。



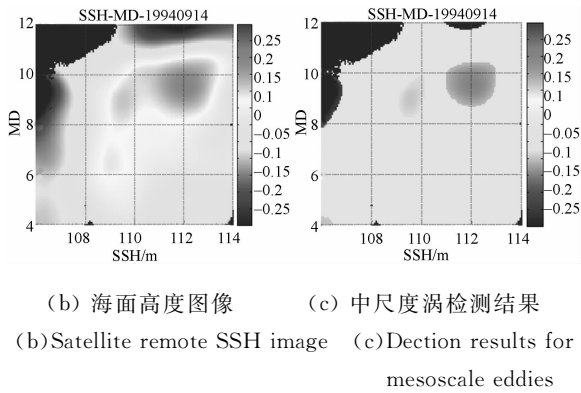


图 10 南沙反气旋涡分析验证

Fig. 10 Validation of Nansha Island Anticyclone Eddy

可以看出,文献描述的南沙反气旋涡中心大概位于  $9.5^{\circ}\text{N}, 112.5^{\circ}\text{E}$ , 在南沙反气旋涡的西南方向大概  $8.5^{\circ}\text{N}, 109.5^{\circ}\text{E}$  的位置还存在一个很弱的等值线包围区域, (c) 为检测结果, 可以看出, 本文算法对图(a)的两个等值线闭合区域均进行了正确的检测, 两个区域中心位置与图(a)中的等值线中心位置基本一致。

## 参考文献:

- [1] 兰键, 于非, 鲍颖. 南海南部海域的多涡结构[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 408-413.  
LANG J, YU F, BAO Y. Multi-eddy structure in the Southern South China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(4): 408-413. (in Chinese)
- [2] 李佳讯, 张韧, 陈奕德, 等. 海洋中尺度涡建模及其在水声传播影响研究中的应用[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 37-46.  
LI J X, ZHANG R, CHEN Y D, et al.. Ocean mesoscale eddy modeling and its application in studying the effect on underwater acoustic propagation [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(1): 37-46. (in Chinese)
- [3] NICHOL D G. Autonomous extraction of an eddy-like structure from infrared images of the ocean [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1987, 25(1): 28-34.
- [4] PECKINGPAUGH S H, HOLYER R J. Circle detection for extracting eddy size and position from satellite imagery of the ocean [J]. *IEEE Trans. on*

## 6 结 论

本文面向卫星遥感海面高度资料, 提出一种中尺度涡自动检测方法。通过对中国近海及其附近海域 15 年的海面高度图像进行分析, 总结出中尺度涡的成像特点, 并有针对性地设计了大面积海域 ( $55^{\circ}\times 40^{\circ}$ ) 海面高度遥感图像中尺度涡自动检测算法, 有效地提取出直径大于等于 30 km、涡中心和最外层闭合等值线的高度差不小于 4 cm 的中尺度涡。另外, 算法本身具备自适应参数调节能力, 通过修改参数设置便可提取不同尺度/强度的中尺度涡。通过与经典文献中评述的中尺度涡进行比较, 对本文算法的检测结果进行验证, 结果表明算法具有较好的检测性能。

需要说明的是, 由于本文所用的数据源为卫星遥感海面高度数据, 所表达的内容只有海表面的高度, 而中尺度涡的判断需要综合海洋剖面的测量资料进行判定, 但是由于常规调查资料的时空覆盖范围不足, 目前只能对极少数的中尺度涡进行真实性验证, 后续的验证工作还任重而道远。

*Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(2): 28-34.

- [5] GAIROLA R M, SUJIT B, PANDEY P C. Eddy detection over Southern Indian Ocean using TOPEX/POSEIDON altimeter data[J]. *Marine Geodesy*, 2001, 24(2): 107-121.
- [6] 姬光荣, 陈霞, 霍玉臻, 等. 一种海洋遥感图像中尺度涡的自动检测方法[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(2): 139-144.  
JI G R, CHEN X, HUO Y ZH, et al.. An automatic detection method of the marine mesoscale eddy in remote sensing image [J]. *Oceanologia ET Limnologia Sinica*, 2002, 33(2): 139-144. (in Chinese)
- [7] FERNANDES A, NASCIMENTO S. Automatic water eddy detection in SST maps using random ellipse fitting and vectorial fields for image segmentation[J]. *Discovery Science*, 2006, 4265: 77-88.
- [8] KULLBACK S, LEIBLER R A. On the information and Sufficiency [J]. *Ann. Math. Statistics*, 1951, 22: 79-86.
- [9] WANG G H, SU J L, CHU P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data

- [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(21): 2121.
- [10] 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 南海中尺度涡研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 882-886.  
WANG G H, SU J L, QI Y Q. Advances in studying mesoscale eddies in South China Sea [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(8): 882-886. (in Chinese)
- [11] 刘金芳, 毛可修, 闫明, 等. 吕宋冷涡时空特征概况 [J]. *海洋预报*, 2006, 23(2): 39-44.  
LIU J F, MAO K X, YAN M, *et al.*. The general distribution characteristics of thermocline of China Sea [J]. *Marine Forecasts*, 2006, 23(2): 39-44. (in Chinese)
- [12] 孙成学. 吕宋岛西北海域气旋式涡旋的结构及其形成机制 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
SUN CH X. *Analysis of the structures and the mechanisms of the cyclonic eddies to the northwest of Luzon Islands* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese)
- [13] 管秉贤, 袁耀初. 中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述 I. 南海和台湾以东海域 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(3): 1-16.  
GUAN B X, YUAN Y CH. Overview of studies on some eddies in the China seas and their adjacent seas I. The South China Sea and the region east of Taiwan [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(3): 1-16. (in Chinese)
- [14] WANG H Q, YUAN Y C, GUAN W B, *et al.*. Circulation in the South China Sea during summer 2000 as obtained from observation and a generalized topography-following ocean model [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: 1-12.
- [15] 方文东, 郭忠信, 黄羽庭. 南海南部海区的环流观测研究 [J]. *科学通报*, 1997, 42(21): 2264-2271.  
FANG W D, GUO ZH X, HUANG Y T. Study of circulation observations in the southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(21): 2264-2271. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈维真(1960—),女,山东青岛人,工程师,1982年于山东大学获得学士学位,主要从事信号处理方面的工作。E-mail: cwzcbey@sina.com



张春华(1980—),女,山东梁山人,工程师,2005年于海军潜艇学院获得硕士学位,2009年于海军航空工程学院获得博士学位,主要从事遥感图像处理、运动估计、空间目标检测等方面的工作。E-mail: xiaohua800506@163.com



赵仕伟(1982—),男,山东泰安人,工程师,2004、2008年于解放军理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事大气遥感方面的工作。E-mail: fqyy0122@163.com



李红林(1979—),女,湖北宜昌人,工程师,2004年于南京信息工程大学获得学士学位,2007年于北京大学获得硕士学位,主要从事光学遥感方面的工作。E-mail: lhl1026@gmail.com