

# 南海及西北太平洋卫星高度计资料分析: 海洋中尺度涡统计特征

林宏阳<sup>1</sup> 胡建宇<sup>1,2</sup> 郑全安<sup>2,3</sup>

(1. 厦门大学海洋学系 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室 福建 厦门 361005;  
3. 马里兰大学大气与海洋科学系 马里兰 美国)

**摘要:** 采用 AVISO 提供的卫星高度计融合数据,对南海及西北太平洋( $5^{\circ} \sim 35^{\circ}N$ ,  $105^{\circ} \sim 150^{\circ}E$ ) 1993~2009年17a间的中尺度涡活动进行统计分析. 结果表明南海中尺度涡活动具有明显的年际变化,每年观测到产生的中尺度涡个数平均为21~22个,标准差约为4个,占年平均值的20%;而西北太平洋中尺度涡个数的年际差异不大,平均每年观测到150~151个中尺度涡产生,标准差约为14个,仅占年平均值的9%. 中尺度涡的逐月统计结果表明南海和西北太平洋的中尺度涡活动均有明显季节变化,1993~2009年间的各月南海和西北太平洋分别观测到30~31个和213~214个中尺度涡产生,标准差分别约为6个和41个,均占各自月平均值的19%. 中尺度涡主要集中分布在南海东北部、越南东部和黑潮流轴附近海域. 涡动能、海面高度距平均方根以及涡度均方根的空间分布大致与涡旋个数分布一致,但在西北太平洋的低纬海区和黑潮延伸体区域则不甚吻合. 在相同的涡旋判别标准下,西北太平洋低纬海区( $5^{\circ} \sim 15^{\circ}N$ )观测到的中尺度涡个数比中高纬海区要少得多.

**关键词:** 物理海洋学; 中尺度涡; 统计特征; 卫星高度计; 南海; 西北太平洋

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-8160. 2012. 01. 017

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1000-8160(2012)01-0105-09

中尺度涡是指空间尺度约为几十至几百公里、时间尺度约为几天至几个月的海洋涡旋. 作为海洋中一种特殊的中尺度现象,中尺度涡对大洋的能量传输起到重要的作用<sup>[1]</sup>. 南海和西北太平洋的中尺度涡活动十分活跃,机制也较为复杂,研究该区域中尺度涡的各种特征,对于进一步认识这两个区域的海洋环流有重要意义.

由于卫星高度计数据在时间分辨率和空间覆盖范围上的优势,人们可以利用高度计数据对海面高度的时空变化规律进行研究<sup>[2-6]</sup>. 如 Chelton 等(1996)利用 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)数据分析了 Rossby 波的传播特征<sup>[2]</sup>; Qiu(1999)同样利用 T/P 数据得到北太平洋海面高度变化特征,并分析了北太平洋副热带逆流的时间变化规律<sup>[3]</sup>. 由于中尺度涡在形态上表现为一系列闭合的海面高度等

值线,近年来随着卫星高度计数据的积累,利用海面高度数据对区域或全球海洋中尺度涡的分布和传播等特征进行统计分析的工作也逐渐开展起来<sup>[7-14]</sup>. 如 Wang 等(2003)利用 1993~2000 年的海面高度距平(SSHA)数据统计分析了南海中尺度涡的时空分布<sup>[9]</sup>. Chelton 等(2007)通过分析 10a(1992~2002年)卫星高度计数据,揭示了全球海洋中尺度涡分布及传播等特征<sup>[11]</sup>. Xiu 等(2010)利用模型结果统计分析了南海 1993~2007 年的中尺度涡,并与卫星高度计的数据进行对比,得到了中尺度涡的各种统计特征<sup>[13]</sup>. 由此可见,以前的研究或主要关注区域或全球海洋海面高度的变化特征,或集中于对中尺度涡的个数、持续时间等涡旋自身特征的统计分析,而缺乏探讨中尺度涡活动与海面高度变化、涡度等的联系. 另外,这些研究所用的数据长度也相对

收稿日期: 2010-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB411803, 2009CB421208); 国家自然科学基金资助项目(40976013, A0821063); 美国 NOAA 计划资助项目(05-01-11-000)

作者简介: 林宏阳(1987~),男,硕士研究生; E-mail: linhongyang7311@126.com

通讯作者: 胡建宇,教授; E-mail: hujy@xmu.edu.cn

较短.

本文采用法国空间局 AVISO 中心提供的更长时间序列(17a)的卫星高度计融合数据(MSLA),分别统计分析了南海和西北太平洋(5°~35°N,

105°~150°E;图1)1993~2009年观测到的中尺度涡,并初步探讨了南海与西北太平洋中尺度涡的时间变化规律,以及中尺度涡分布与涡动能、涡度等参数的关系.

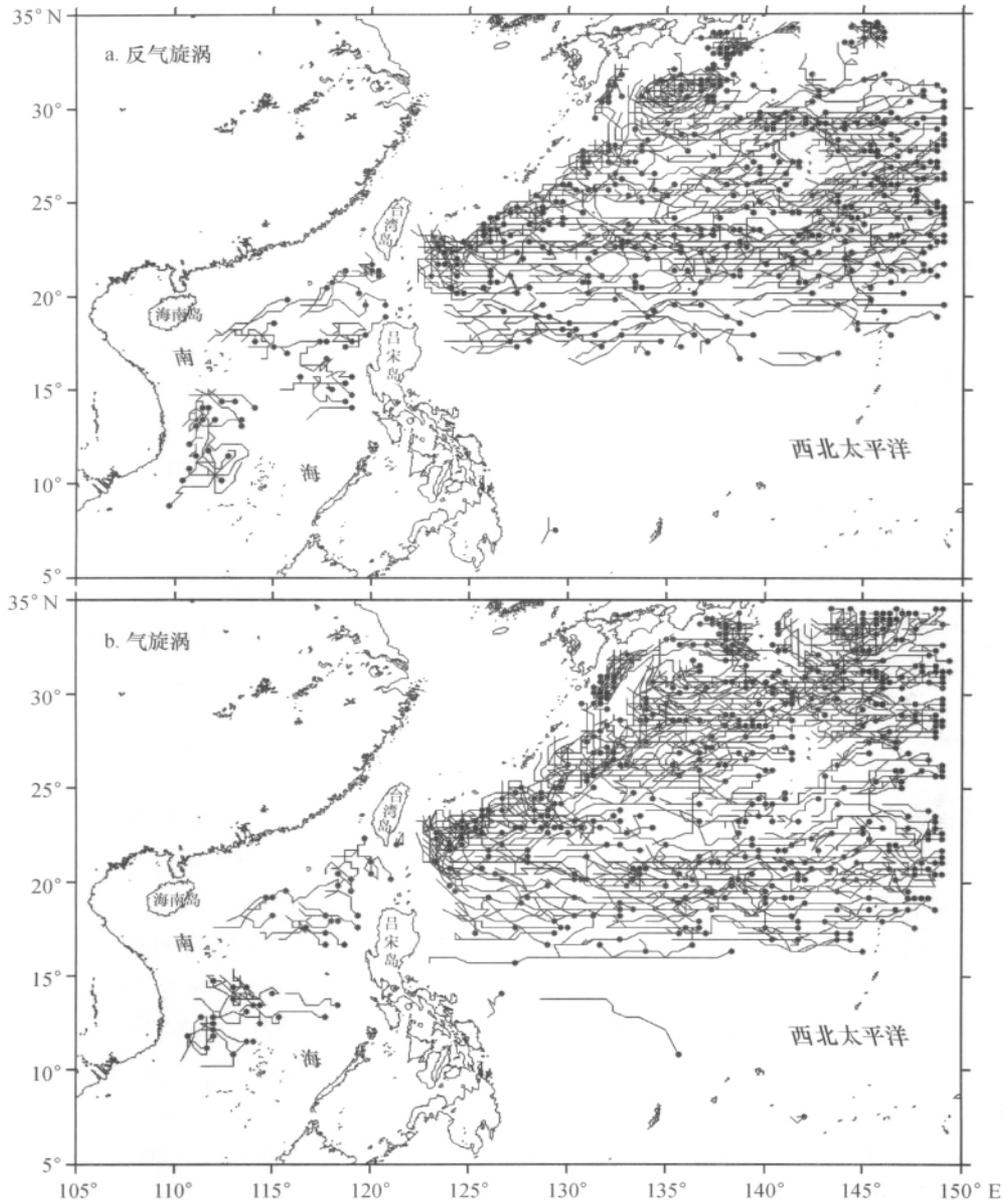


图1 1993~2009年观测到的南海及西北太平洋持续8周以上的中尺度涡的轨迹示意

Fig.1 Trajectories of observed mesoscale eddies with lifetime  $\geq 8$  weeks during 1993 ~ 2009 in the South China Sea and the northwest Pacific Ocean

图中•处表示中尺度涡的初始产生位置,与其相连的线表示涡的移动轨迹;本文视121°E为南海与西北太平洋的分界线

### 1 数据及处理方法

本文所采用的卫星高度计数据来自法国空间局 AVISO 提供的 T/P、Jason 和 ERS1/2 等卫星的 MS-LA 数据(包括海面高度数据  $h$  和地转流数据  $u、v$ , 距平值是相对于 1993~1999 年的平均值),时间跨

度为 1993~2009 年共 17a. 该数据的经向空间分辨率为  $1^\circ/3$ ,采用墨卡托投影,覆盖范围为南、北纬  $82^\circ$ ,时间分辨率为 7 d,已经过潮汐和海面气压校正<sup>[15]</sup>.

本文借鉴 Wang 等(2003)的识别标准<sup>[9]</sup>采用如下中尺度涡判别标准:①海面距平(sea level anoma-

ly, SLA) 有闭合等值线; ②中尺度涡的中心处水深大于 1 000 m; ③涡中心与最外圈闭合等值线的高度差(记为  $M$ ) 不小于 7.5 cm; ④中尺度涡持续存在时间不短于 4 周. 文中关于中尺度涡的“传播”定义如下: 相邻 2 个时间点(相隔 7 d) 中的涡中心距离小于  $1^\circ$  的视为同 1 个涡<sup>[16]</sup>, 即由上 1 个时间点移动至下 1 个时间点“初始产生位置”则表示第 1 次在研究区域内出现的涡中心位置.

## 2 结果与讨论

经统计, 1993 ~ 2009 年研究区域内共观测到 2 927 个满足上述 4 个判别标准的中尺度涡, 其中反气旋涡 1 359 个, 气旋涡 1 568 个. 中尺度涡的具体分布和传播路径见图 1(为使轨迹图更为简洁清晰, 图 1 中仅呈现持续时间不短于 8 周的中尺度涡). 在这 17 a 间, 南海共观测到 366 个中尺度涡产生, 其中反气旋涡、气旋涡分别为 189、177 个; 西北

太平洋( $5^\circ \sim 35^\circ N, 121^\circ \sim 150^\circ E$ ) 观测到了 2 561 个中尺度涡产生, 其中的反气旋涡、气旋涡分别为 1 170、1 391 个.

### 2.1 中尺度涡活动的时间变化规律

2.1.1 中尺度涡活动的年际变化 图 2a1、b1 分别为南海和西北太平洋 1993 ~ 2009 年每年观测到的中尺度涡统计结果. 从图 2a1 看出, 南海观测到的中尺度涡总数最多的是 1999 年和 2001 年, 均为 28 个; 最少的是 2003 年和 2007 年, 各 15 个. 平均每年约观测到 21 ~ 22 个中尺度涡产生, 其中反气旋涡约 11 个, 气旋涡约 10 个. 南海不同年份观测到的中尺度涡个数相差较大, 其标准差大约为 4 个, 占年平均值的 20%. 而反气旋涡最多的为 2001 年, 有 16 个; 最少的为 2006 年, 仅 7 个. 气旋涡最多的为 1993、2009 年, 均观测到 14 个; 最少的为 1994、2003、2005、2007 年, 均只有 7 个.

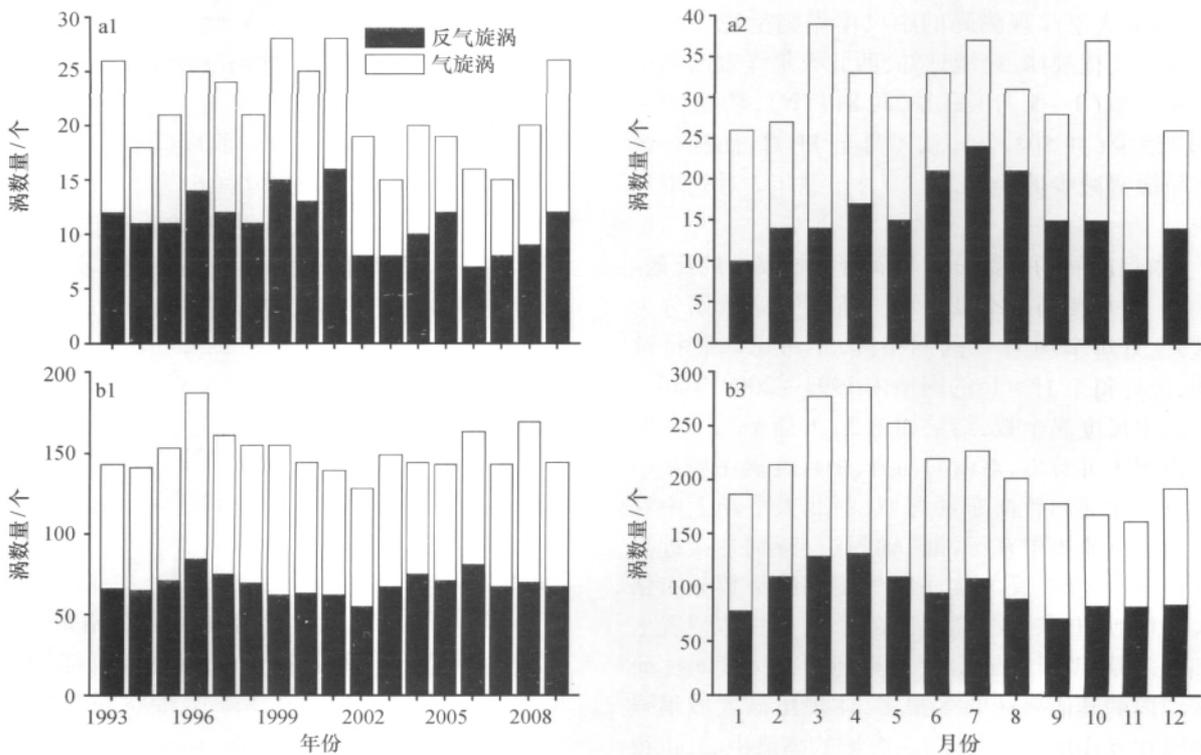


图 2 南海及西北太平洋中尺度涡个数的逐年和逐月变化

Fig. 2 Annual and monthly variation of the numbers of mesoscale eddies in the South China Sea and the northwest Pacific Ocean  
a、b 系列分别为南海、西北太平洋的统计结果; a 和 b 后的数字 1、2 分别表示逐年和逐月统计结果

由图 2b1 可看出, 西北太平洋观测到最多中尺度涡的是 1996 年, 有 187 个; 最少的是 2002 年, 为 128 个. 每年平均观测到 150 ~ 151 个中尺度涡, 其中反气旋涡约 69 个, 气旋涡约 82 个. 相比南海而言, 西北太平洋每年观测到的中尺度涡个数则较为接近, 其标准差大约为 14 个, 仅占其年平均值的

9%. 西北太平洋观测到的反气旋涡最多和最少的年份也为 1996 年和 2002 年, 分别有 84、55 个; 气旋涡最多的也是 1996 年, 有 103 个, 但最少的是 2004 年, 为 69 个. 另外, 除 2003 年外, 西北太平洋每年观测到的气旋涡均多于反气旋涡, 这很可能与统计区域的选取有较大关系, 也可能与所采用的中尺度涡

判别标准有关.

2.1.2 中尺度涡活动的月变化 图 2a2、b2 分别为南海和西北太平洋中尺度涡个数的逐月统计结果. 由图 2a2 可见,南海 17a 间 3 月份观测到的中尺度涡最多,共 39 个;11 月份最少,为 19 个. 17a 间各月平均观测到 30~31 个中尺度涡产生,其中反气旋涡和气旋涡分别约为 16、15 个. 与年际变化类似,南海不同月份观测到的中尺度涡个数相差较大,其标准差约为 6 个,约占月平均值的 19%. 反气旋涡最多和最少的月份分别为 7 月和 11 月,各观测到 24、9 个;气旋涡最多的为 3 月份,有 25 个;最少的为 8 月和 11 月,均为 10 个.

由图 2b2 可知,西北太平洋涡旋个数峰值出现在 4 月,有 214 个;最少的为 11 月,有 161 个. 17a 间各月大约观测到 213~214 个中尺度涡产生,反气旋涡和气旋涡分别约为 98 个和 116 个. 其标准差约为 41 个,占其月平均值的 19%. 由此可见,与年际变化不同,西北太平洋观测到的中尺度涡则呈现出较明显的季节变化规律. 经统计知,西北太平洋观测的中尺度涡春季(3~5 月)最多(共 814 个),秋季(9~11 月)最少(共 507 个). 从 4 月至 11 月,涡旋个数大致呈缓慢减少的趋势,从 11 月至翌年 3 月则增加较快.

### 2.2 中尺度涡的个数分布与涡旋其他属性的比较

2.2.1 中尺度涡的个数分布 将研究区域划分为经、纬度分辨率均为 1°的网格阵,不考虑涡旋持续时间,统计每个 1°×1°的网格内 1993~2009 年间出现过的中尺度涡个数,结果如图 3a、b 所示.

由图 3 可看出,对南海而言,中尺度涡主要集中在南海东北部和越南东部海域;西北太平洋上中尺度涡则明显地集中在黑潮流轴附近,特别是接近黑潮延伸体的区域. 反气旋涡和气旋涡的个数分布格局大体相似,但在这些高值区的个数和具体位置上有细微差异. 黑潮流轴附近观测到的中尺度涡比研究区域内的其他海区要多很多,体现出该区域很强的涡流相互作用. 台湾岛西南海域的高值中心,也很可能是黑潮通过吕宋海峡对它产生的作用引起的. 从图 3 还可看出,西北太平洋低纬海区(5°~15°N)观测到的的涡旋比高纬海区的要少得多.

为研究中尺度涡个数分布和其他与中尺度涡密切相关的物理属性之间的关系,下面分析研究区域内涡动能、海面高度距平均方根值和涡度均方根值的分布,并将其与图 3 的涡旋个数分布进行对比.

2.2.2 涡动能( $E_{EK}$ ) 中尺度涡活动较强的区域一般表现为较大的涡动能(eddy kinetic energy,

EKE,记为  $E_{EK}$ ) 值.  $E_{EK}$  在地转假设条件下定义为<sup>[17]</sup>:

$$E_{EK} = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$$

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\partial h'}{\partial y} \quad v' = \frac{g}{f} \frac{\partial h'}{\partial x} \quad (1)$$

式中: $h'$ 为海面高度距平, $u'$ 和 $v'$ 分别表示纬向和经向的水平地转流速距平值(这可直接从 AVISO 得到;经过验证可知,至少研究区域内的 $u'$ 和 $v'$ 资料确实是由 $h'$ 资料基于地转假设计算得到的) $f$ 和 $g$ 分别为科氏参数和重力加速度.

2.2.3 海面高度距平均方根( $h'_{rms}$ ) 由于反气旋涡(气旋涡)在形态上表现为一系列闭合的正(负)海面高度距平( $h'$ )等值线,对于涡旋活动较强(海面高度距平绝对值较大)的区域, $h'$ 的均方根值一般也较大. 据此定义:

$$h'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N h_t'^2} \quad (2)$$

式中: $h'_t$ 表示 $t$ 时刻的海面高度距平值, $N$ 表示数据个数.

2.2.4 涡度均方根( $\zeta_{rms}$ ) 涡度(这里指地转相对涡度)即数学上定义的旋度(记为 $\zeta$ ). $\zeta$ 是中尺度涡最重要的物理属性之一, $\zeta$ 值的大小代表着中尺度涡的强弱. 因此中尺度涡活动强的区域一般也为 $\zeta$ 的均方根高值区. 本文中其定义如下:

$$\zeta = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y}$$

$$\zeta_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \zeta_t^2} \quad (3)$$

式中: $u'$ 和 $v'$ 的含义与式(1)相同, $\zeta_t$ 为 $t$ 时刻计算得到的涡度值.

2.2.5  $E_{EK}$ 、 $h'_{rms}$ 和 $\zeta_{rms}$ 的空间分布 由图 4a-c 可看出, $E_{EK}$ 、 $h'_{rms}$ 和 $\zeta_{rms}$ 三者的空间分布格局大体类似. 南海上存在着 2 个高值中心:越南东部、南海东北部;西北太平洋上存在着 3 个带状高值区<sup>[3]</sup>:黑潮及黑潮延伸体区(Kuroshio/Kuroshio Extension)、北太平洋副热带逆流区(subtropical countercurrent, STCC)和北赤道逆流区(north equatorial countercurrent, NECC). 西北太平洋主要流系示意图可参阅 Qiu (2001) 的图 1<sup>[18]</sup>.

“2.2.1 节”中提到的涡旋数高值区在图 4a-c 中均能大致找出对应的相对高值,这也从侧面验证了中尺度涡的检测效果. 当然, $E_{EK}$ 、 $h'_{rms}$ 和 $\zeta_{rms}$ 的空间分布出现高值,并不一定完全是中尺度涡的作用,如 STCC 区的高值则还包含了西传的 Rossby 波的作

用. 值得注意的是, 西北太平洋低纬海区(15°N 以南)的涡旋个数很少, 但在图 4a、c 的相应区域却出现了  $E_{EK}$ 、 $\zeta_{rms}$  的相对高值. 这可能是由于低纬地区科氏参数  $f$  很小, 式(1)的假设前提(即地转假设)在低纬海区并不完全符合所致. 关于西北太平洋低纬海区识别出的中尺度涡较少的解释详见“2.3 节”. 另外, 从图 4a - c 中可看出, 黑潮延伸体区的  $E_{EK}$ 、 $h'_{rms}$  和  $\zeta_{rms}$  值均比其他区域的高出很多, 但图 3 涡旋个数分布图中此区域的数值并没有明显比其他区域高. 这可能的原因是黑潮延伸体区的海流蛇行( meander) 的幅度较大, 且具有很强的斜压不稳

定性<sup>[19]</sup>, 但却不足以促使中尺度涡形成, 从而导致观测到的涡旋个数没有太多但  $E_{EK}$  等属性值却较大; 还有可能由于该区域海流具有很强的不稳定性, 涡旋的脱落和重新并入海流的过程均较为短暂, 而时间分辨率为 7 d 的高度计资料没有完全观测到这些过程. 从 Chelton 等(2007)应用 Okubo-Weiss 涡旋判别法则<sup>[16, 20]</sup>对全球海洋中尺度涡统计的结果<sup>[11]</sup>也可看到, 黑潮延伸体区域的涡旋个数并没有明显比北太平洋其他区域的高, 但是该区域的涡旋强度却比北太平洋其他区域的高很多[见 Chelton 等(2007)的图 3b<sup>[11]</sup>].

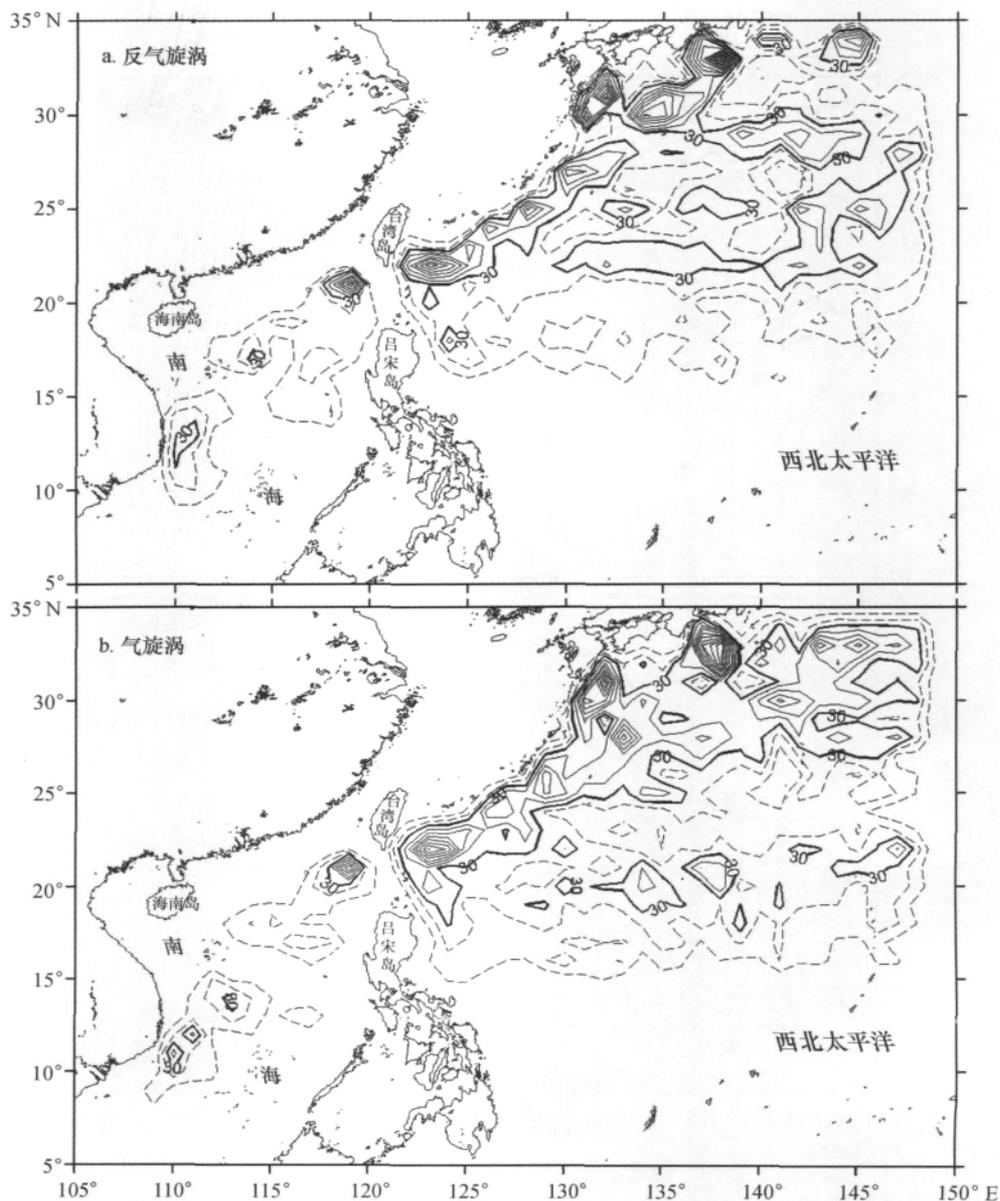


图 3 1993 ~ 2009 年观测到研究海域每个 1° × 1° 的网格内的中尺度涡个数分布

Fig. 3 Numbers of mesoscale eddies observed in each 1° × 1° grid of the studied area during 1993 ~ 2009  
图中粗实线代表个数为 30 的等值线, 个数大于和小于 30 的等值线分别用细实线和细虚线表示; 等值线数值间隔为 10

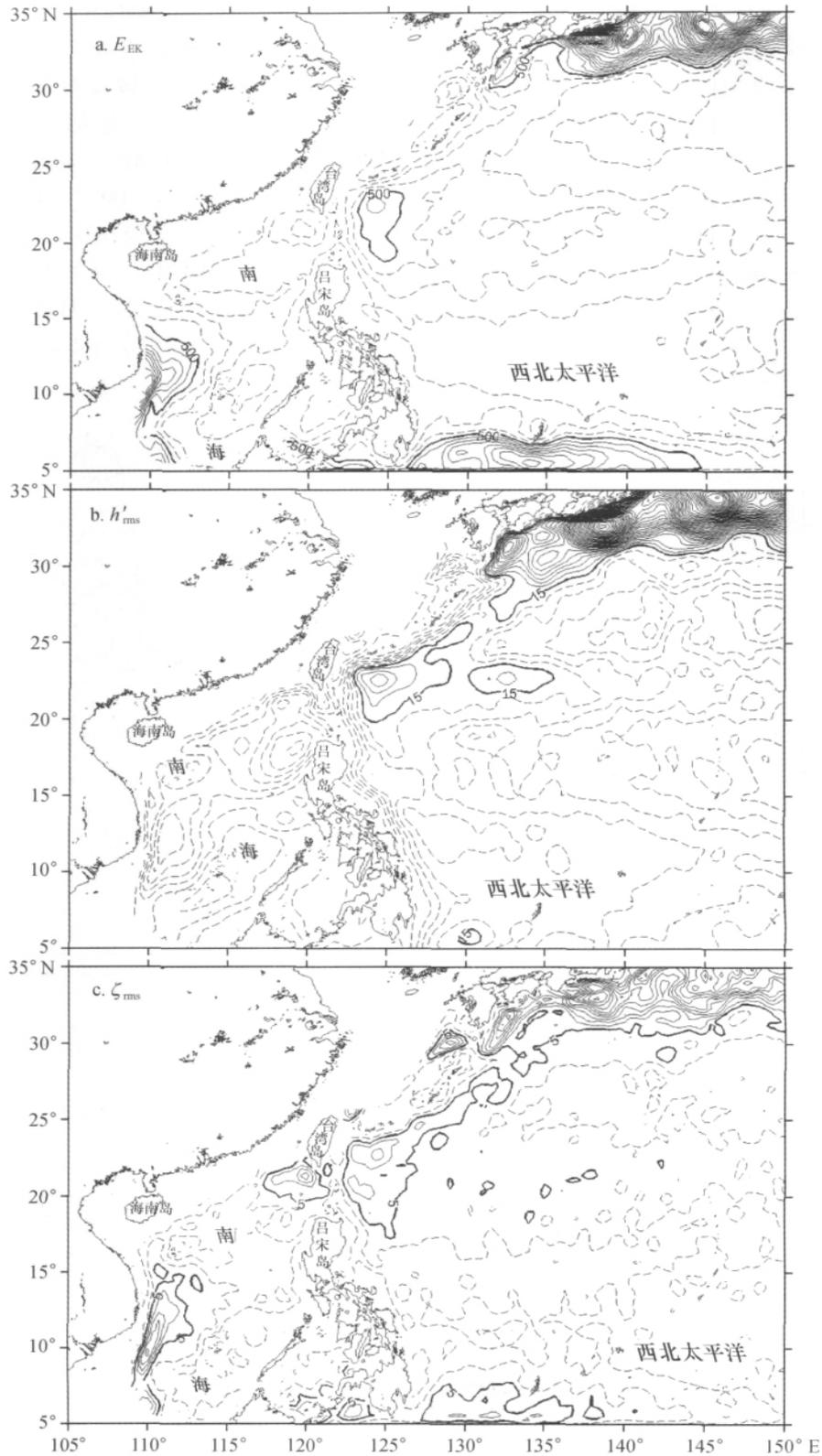


图4 研究海域内  $E_{EK}$ 、 $h'_{rms}$  和  $\zeta_{rms}$  值的平面分布

Fig.4 Spatial patterns of the eddy kinetic energy ( $E_{EK}$ , a), the root mean square (rms) of sea level anomaly ( $h'_{rms}$ , b) and the rms of vorticity ( $\zeta_{rms}$ , c) in the studied area

a. 粗实线代表值为 500 的等值线, 值大于和小于 500 的等值线分别用细实线和细虚线表示 (等值线数值间隔为 100, 单位为  $cm^2/s^2$ );  
b、c 与 a 相似, 但粗实线分别表示值为 15、5 的等值线 (等值线数值间隔均为 1, 单位分别为  $cm \cdot 10^{-6} s^{-1}$ )

### 2.3 西北太平洋低纬海区中尺度涡的特征

西北太平洋绝大部分观测到的中尺度涡均分布在  $15^{\circ}\text{N}$  以北,即  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$  纬度带内满足“第 1 章”提出的 4 个判别标准的中尺度涡极少被观测到. 这从图 1 的中尺度涡轨迹图中也可清晰地看出. 其可能的原因一是低纬海区的 *SLA* 或 *SSHA* 值比高纬海区相对较小,从而导致识别出的涡旋较少;二是低纬海区的 Rossby 变形半径较大,中尺度涡的平均半径也比高纬海区的要大. 因为本文采用的涡旋判别算法在程序上将中尺度涡判别标准③处理为:涡中心

与距涡中心约 200 km 范围内的海面高度差不小于 7.5 cm (即  $M \geq 7.5 \text{ cm}$ ). 该限制条件对于中高纬海区的中尺度涡的识别几乎没有影响,但对低纬海区而言,强度较弱的中尺度涡在 200 km 范围内的 *M* 值可能未能达到 7.5 cm,从而导致未能被识别出.

为了更深入地研究该区域内的中尺度涡活动,将标准③改为  $M \geq 5 \text{ cm}$ ,对西北太平洋  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$  海区的中尺度涡重新进行了识别,并调整标准④,按持续时间(2 周、3 周和 4 周以上)的不同分别画出其传播路径于图 5.

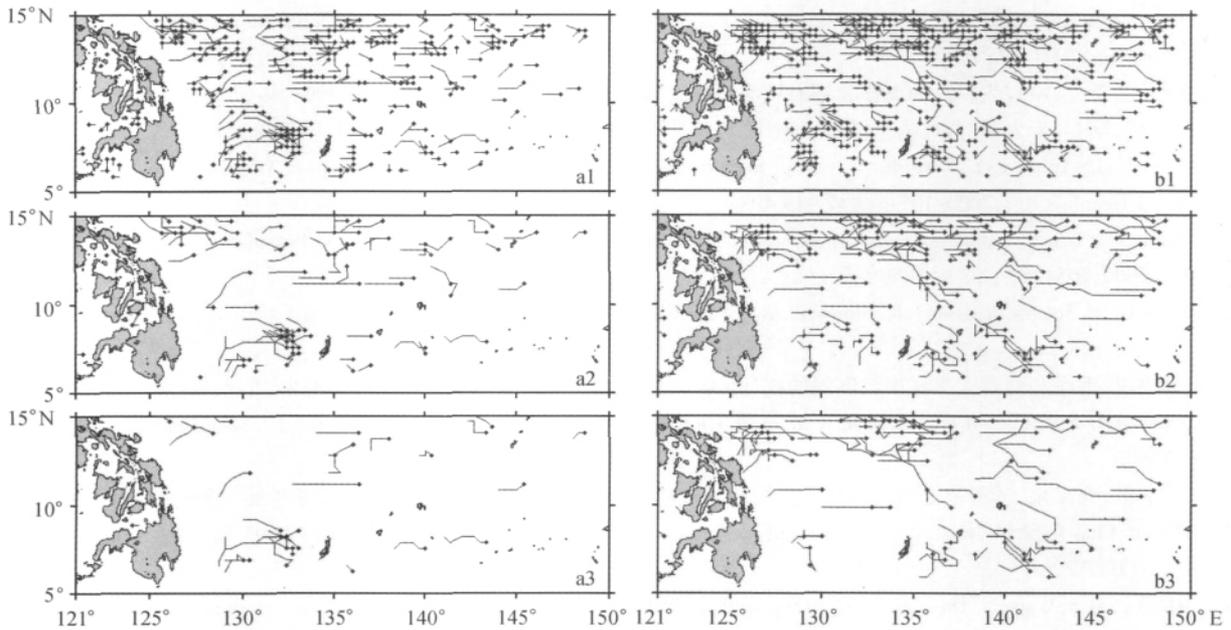


图 5 在  $M \geq 5 \text{ cm}$  标准下  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ ,  $121^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$  海域内不同持续时间的中尺度涡的轨迹示意

Fig. 5 Trajectories of mesoscale eddies with different durations observed in  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ ,  $121^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$  under the criterion of  $M \geq 5 \text{ cm}$

a、b 系列分别表示反气旋涡、气旋涡的情况; a 和 b 后的数字 1~3 分别表示持续时间为 2~4 周以上

从图 5a3、b3(涡持续时间 4 周以上)可看出,调整了判别标准后,确实在该区域识别出相对较多的中尺度涡. 但是在同样的判别标准下,西北太平洋低纬海区识别出的中尺度涡个数仍比高纬海区的来得少(图未示). 这是因为低纬海区的 Rossby 变形半径较大,对于同样的 *M* 值,在低纬海区识别出同样大小的涡需比中高纬度海区的强. 从图 5 还可看出随着持续时间的增加,识别出的涡数量逐渐减少,而且针对同一持续时间的情况而言,该区域识别出的气旋涡均比反气旋涡个数要多. 这可能是受局地环流的锋面涡旋影响的缘故.

### 3 结语

本文利用 1993~2009 年 17a 的 AVISO 融合高度计资料,对南海和西北太平洋的中尺度涡活动进

行统计分析,得到以下初步结论:

(1) 南海不同年份或不同月份观测到的中尺度涡个数均相差较大;西北太平洋中尺度涡个数的年际变化差别不大,但月变化则与南海的一样比较大,表现出明显的季节变化规律.

(2) 中尺度涡主要集中分布在南海东北部、越南东部和黑潮流轴附近,从中可看出黑潮流轴附近较强的涡流相互作用. 涡旋个数分布的高值区在涡动能( $E_{EK}$ )、海面高度距平均方根( $h'_{rms}$ )和涡度均方根( $\zeta'_{rms}$ )数值的空间分布图上均能找到相对应的高值,但在西北太平洋低纬海区和黑潮延伸体区则不太吻合.

(3) 在西北太平洋低纬海区( $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ )观测到的涡旋个数相比高纬海区要少得多. 这是由于低纬

海区的 Rossby 变形半径较大,对于同样的  $M$  值,在低纬海区识别出同样大小的中尺度涡需比中高纬度的强。

本文主要统计分析了南海和西北太平洋的中尺度涡活动,对于中尺度涡的形成机制以及涡的分布等

是否受其他更大区域的影响则有待进一步的研究。

致谢: AVISO 网站提供融合高度计资料,匿名审稿专家及编辑部提出宝贵修改意见,谨在此一并致谢。

#### 参考文献:

- [1] 冯士筭,李凤岐,李少菁. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [2] Chelton D B, Schlax M G. Global observations of oceanic Rossby waves [J]. *Science*, 1996, 272: 234-238.
- [3] Qiu B. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory [J]. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 2 471-2 486.
- [4] Hu J, Kawamura H, Hong H, et al. 3 ~ 6 month variation of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean [J]. *J Oceanogr* 2001, 57: 69-78.
- [5] 李燕初, 李立, 靖春生, 等. 南海东北部海域海面高度的时空变化特征 [J]. *科学通报*, 2004, 49(7): 702-709.
- [6] 靖春生, 李立, 朱大勇. 西北太平洋-南海中尺度水位波动的耦合传播特征 [J]. *科学通报*, 2006, 51(20): 2 422-2 428.
- [7] Ducet N, Le Traon P-Y, Reverdin G. Global high resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1/2 [J]. *J Geophys Res* 2000, 105: 19 477-19 498.
- [8] Hwang C, Chen S. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry [J]. *J Geophys Res* 2000, 105(10): 23 943-23 965.
- [9] Wang G, Su J, Chu P. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data [J]. *Geophys Res Lett* 2003, 30(21): 2 121.
- [10] 林鹏飞. 南海和西北太平洋中尺度涡的统计特征分析 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.
- [11] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, et al. Global observations of large oceanic eddies [J]. *Geophys Res Lett* 2007, 34: L15606.
- [12] 程旭华, 齐义泉. 基于卫星高度计观测的全球中尺度涡的分布和传播特征 [J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(4): 447-453.
- [13] Xiu P, Chai F, Shi L, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993 ~ 2007 [J]. *J Geophys Res* 2010, 115: C03012.
- [14] He Y, Cai S, Wang S. The correlation of the surface circulation between the Western Pacific and the South China Sea from satellite altimetry data [J]. *Int J Remote Sens* 2010, 31(17): 4 757-4 778.
- [15] Qiu B, Chen S. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system [J]. *Deep Sea Res II*, 2010, 57: 1 098-1 110.
- [16] Isern-Fontanet J, Garcia-Ladona E, Font J. Vortices of the Mediterranean Sea: an altimetric perspective [J]. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36: 87-103.
- [17] Kobashi F, Kawamura H. Seasonal variation and instability nature of the North Pacific Subtropical Countercurrent and the Hawaiian Lee Countercurrent [J]. *J Geophys Res* 2002, 107: C113185.
- [18] Qiu B. Kuroshio and Oyashio Currents [M] // Steele J H, Thorpe S A, Turekian K K. *Encyclopedia of ocean sciences*. San Diego: Academic Press, 2001: 1 413-1 425.
- [19] Qiu B. Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: responses and potential feedback [J]. *J Phys Oceanogr* 2003, 33: 2 465-2 482.
- [20] Isern-Fontanet J, Garcia-Ladona E, Font J. Identification of marine eddies from altimetric maps [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20: 772-778.

## Satellite altimeter data analysis of the South China Sea and the northwest Pacific Ocean: statistical features of oceanic mesoscale eddies

LIN Hong-yang<sup>1</sup>, HU Jian-yu<sup>1,2</sup>, ZHENG Quan-an<sup>2,3</sup>

(1. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. State Key Laboratory of Marine Environment Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland, USA)

**Abstract:** 17 years (1993 ~ 2009) of merged gridded satellite altimeter sea level anomaly (MSLA) data obtained from Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO) are used to analyze the activity of mesoscale eddies in the South China Sea (SCS) and the northwest Pacific Ocean (NPO; 5° ~ 35°N, 105° ~ 150°E). The results indicate that the eddy activity in the SCS has distinct annual variation. The average number of newly generated mesoscale eddies observed in the SCS is 21 ~ 22 in each year and the standard deviation is around 4, accounting for 20% of the annual mean value. By contrast, in the NPO, the eddy number varies relatively little in different years. Newly generated eddies observed in the NPO average 150 ~ 151 every year with a standard deviation of about 14, only 9% of its annual mean value. The monthly statistical results suggest that there are remarkable seasonal variations in both the SCS and the NPO. The average number of newly generated mesoscale eddies observed in the SCS and the NPO per month during 1993 ~ 2009 are 30 ~ 31 and 213 ~ 214, respectively, and the standard deviations are approximately 6 and 41, both accounting for 19% of the respective monthly mean value. Eddies are observed more frequently in the northeastern SCS, east off Vietnam and the vicinity of the Kuroshio axis. The spatial patterns of eddy number distribution are about the same with each other for anticyclonic eddies and cyclonic eddies, while there are some discrepancies in terms of the specific amount and positions. The spatial patterns of eddy number distribution are in good agreement with those of the eddy kinetic energy, the root mean square of sea level anomaly and the root mean square of vorticity in the studied area, except for that in the Kuroshio Extension area and in the tropical band of the NPO. The disagreements may be caused by the large-amplitude meanders and baroclinic instabilities for the former area, and that the geostrophic hypothesis is not valid in low-latitude area for the latter one. Under the premise of the same criteria for eddy identification, mesoscale eddies observed in the tropical area (5° ~ 15°N) of the NPO are quite less than those at higher latitudes, the reason for which may be that the Rossby deformation radius is larger there.

**Key words:** physical oceanography; mesoscale eddies; statistical features; satellite altimeter; South China Sea; northwest Pacific Ocean

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-8160. 2012. 01. 017

(责任编辑: 郭水伙)