

# 基于 GIS 的南海中尺度涡旋典型过程的特征分析

杜云艳, 王丽敬, 樊星, 周成虎

(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)

**摘要:** 以具有复杂时空演变过程的海洋中尺度涡旋为研究对象, 以定量表达和组织涡旋典型过程案例为前提, 基于 Global NLOM(Naval Research Laboratory Layered Ocean Model)所得的 SSH(Sea Surface Height)、SST(Sea Surface Temperature)和表层海流场, 对海洋中尺度涡旋进行综合辨认和动态跟踪。以南海为例, 通过提取涡旋典型过程中的典型状态, 建立中尺度涡旋典型案例库。然后以库中所有过程案例为对象对涡旋进行 GIS(Geographic Information System)时空特征分析。所得结果为: (1) 南海中尺度涡旋整体上呈东北-西南向分布, 涡旋水平移动速度为 3~16 cm/s, 平均速度为 8.4 cm/s。(2) 大部分涡旋向西移动。春夏季涡旋主要向西北方向移动, 秋冬季涡旋主要向西南方向移动。(3) 南海东北部涡旋主要集中在 9~10 月以及次年的 1~2 月发生, 涡旋先向西北方向移动, 后又转向西南方向移动, 大部分中尺度涡旋不能西移太远。南海中部气旋涡主要发生在冬、春两季。一部分涡旋沿陆坡向西南运动, 其中一些反气旋涡沿南海海盆向西运动。南海东南部在研究期内只有反气旋涡出现, 向西或西北偏西运动, 这里的涡旋比较弱, 但移动距离较长, 也有较长的生命周期。南海西南部夏季出现的涡旋多于冬季, 且夏季的绝大部分涡旋以偶极子结构出现, 该区域涡旋移动的距离较小。该研究引入 GIS 技术, 基于大量时空数据对具有复杂时空特征的中尺度涡旋的信息进行组织、存储, 以期通过对涡旋生消过程的时空分析来揭示其演变规律, 为进一步研究海洋涡旋的空间推理预测奠定了坚实的基础。

**关键词:** 中尺度涡旋; 典型过程; GIS(Geographic Information System); 时空特征分析; 南海

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)01-00001-09

doi: 10.11759/hyxx20110301004

海洋涡旋对海水中热量、盐分、化学物质的输运及分区动力条件的改变起到至关重要的作用<sup>[1]</sup>。特别是中尺度涡旋, 对分区水动力环境的影响不可忽视<sup>[2]</sup>。近年来, 随着空间探测手段的不断提高, 海洋中尺度涡旋的研究有了长足的进展。已有大量研究成果综合利用了卫星高度计、卫星跟踪浮标、数值模拟和常规水文观测对一定时期内的 1 个或几个中尺度涡旋的生命历程及其与当地环流场的相互作用进行跟踪和统计分析<sup>[2-10]</sup>。本文引入 GIS(Geographic Information System)技术, 基于大量时空数据对具有复杂时空特征的中尺度涡旋的信息进行组织、存储, 以期通过对涡旋生消过程的时空分析来揭示其演变规律, 为进一步研究海洋涡旋的空间推理预测奠定了坚实的基础。

## 1 资料与方法

本文选取南海作为中尺度涡旋特征研究的典型分区。南海(98.5°~122.5°E, 0°~24.5°N)是西北太平洋最大的半封闭边缘海, 地形复杂, 岛屿众多, 海域面积约 350 万 km<sup>2</sup>, 平均水深约为 1 800 m, 最大水深

约为 5 000 m<sup>[11]</sup>。受海面大气强迫场、海洋内部环流的不稳定过程以及复杂地形的共同影响, 南海中尺度涡旋较为活跃<sup>[12]</sup>。根据中尺度涡旋产生机理的差异, 按涡旋产生的地理位置, 将南海分为东北部(Z1)、中部(Z2)、东南部(Z3)和西南部(Z4)4 个分区<sup>[11]</sup>, 如图 1 所示。

### 1.1 资料来源

本文采用美国海军实验室(Navy Research Laboratory, NRL)提供的全球分层海洋数值模式 Global NLOM 模拟所得的 SSH(Sea Surface Height)、SST(Sea Surface Temperature)和表层海流数据([http://www.7320.nrlssc.navy.mil/global\\_nlom32/scs.html](http://www.7320.nrlssc.navy.mil/global_nlom32/scs.html))。该模式同化了 ENVISAT、GFO 和 JASON-1 的 SSH, IR(infrared)的 SST 等多种卫星资料。模式空间分辨

收稿日期: 2012-06-01; 修回日期: 2013-04-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41071250); 国家重点实验室自主创新项目(088RA500KA)

作者简介: 杜云艳(1972-), 女, 河南内乡人, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为海洋地理信息理论与时空分析, 电话: 010-64888973; E-mail: duyuy@lreis.ac.cn

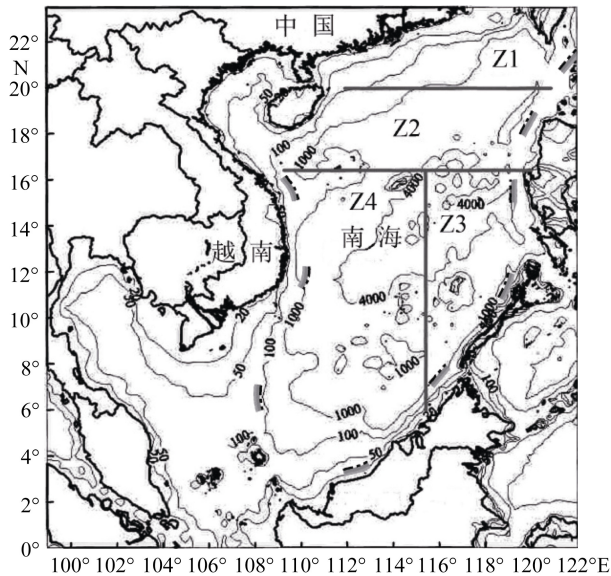


图1 南海地形(m)图

Fig. 1 Topographic map of the South China Sea (SCS)

率为 $(1/32)^\circ \times (1/32)^\circ$ , 时间分辨率为 1 d。Du 等<sup>[13]</sup>利用 2003~2009 年的南海 SSH 进行距平计算得到 SSHA (Sea Surface Height Anomaly), 对 SSHA 与 AVISO 提供的海表面异常观测数据 SLA (Sea Level Anomaly) 进行了对比分析, 同时还对巡海测量数据与 NLOM 表层海流数据进行了对比分析, 分析结果表明 NLOM 模式的 SSH 在南海地区是可用的。本文对全球分层海洋数值模式所得 SST 数据与 2008 年 8 月 16 日~9 月 18 日航次观测数据(由中国科学院南海海洋研究所提供)进行比较(图 2), 模式所得 SST 与观测结果的平均误差为 0.94%, 因此可以认为该模式所得数据可靠。本文构建的典型中尺度涡旋过程案例是在综合分析 SST, SSHA 和流场数据的基础上由目视解译获取。

### 1.2 中尺度涡旋典型过程案例提取方法

涡旋过程典型案例的组织与定量表达尤为重要。

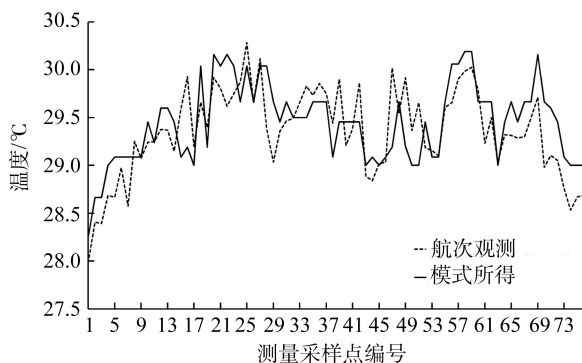


图2 模式所得 SST 与航次观测温度对比图

Fig. 2 Comparison of simulated SST and in situ sea surface temperature

采用 GIS 时空分级表达模型来存储涡旋典型过程案例, 将涡旋的生命周期划分为产生-发展-稳定-减弱-消亡 5 个典型阶段(每个阶段有  $n$  个状态)<sup>[14]</sup>, 每个典型阶段包含 0~3 个典型状态。典型状态需记录涡旋空间位置与空间形态发生较大变化时刻的信息。典型过程的分解方法为: 首先, 由人工目视识别出涡旋产生与消亡阶段的时间和空间位置, 记录为一个典型过程; 然后, 对该过程内的每个阶段及各个状态进行划分。

涡旋典型过程是由涡旋达到稳定阶段的强度、空间尺度及空间形态等指标信息来界定。本文采用的涡旋判定标准为: (1) 闭合的 SSH 等值线<sup>[9, 11]</sup>; (2) 水平空间尺度为 100 km, 涡旋生命周期持续 20 d 以上; (3) 涡旋强度不小于  $8 \text{ cm}^2$ <sup>[9, 11]</sup>。在涡旋时空尺度的选取上, 王桂华<sup>[11]</sup>选取持续 30 d 以上的涡旋; 林鹏飞等<sup>[9]</sup>选取中尺度涡旋直径不小于 100 km, 并要求涡旋至少持续 5 周。参考前人结果, 并结合实际, 确定本文的涡旋时间尺度为持续 20 d 以上。本文所用资料的时空分辨率较高, 因而可识别生命周期相对较短的涡旋。

采用上述判定指标, 对 2003 年 11 月~2009 年 6 月南海中尺度涡旋进行识别和定量提取, 提取流程如图 3 所示。提取方法为: (1) 从 SSH, SST 和表层海流 3 个参数的图像中初步识别出涡旋的典型过程并提取; (2) 采用 GIS 时空分级模型组织存储涡旋过程对象, 构建海洋中尺度涡旋 GIS 案例库。一方面采用 GIS 的快照模型对涡旋每一典型过程的各个状态进行空间形态的组织与存储, 同时定量提取涡旋的空

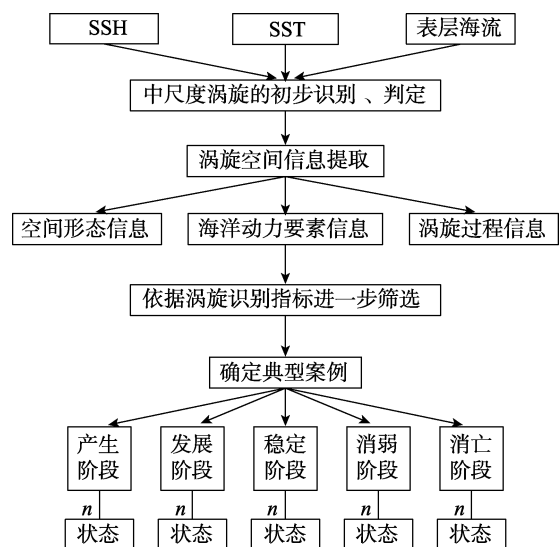


图3 南海典型中尺度涡旋过程的抽取与组织流程

Fig. 3 Flow chart of the extraction and organization of typical meso-scale eddy processes in the SCS

间特征信息(空间尺度、形态指数等);另一方面,根据定量提取出的涡旋空间信息,从原始资料中获取对应的涡旋强度、涡度、中心点温度、中心点与外围温差、表层海流的最大流速等动力参数。

### 1.2.1 海洋涡旋过程案例的 GIS 分级表达模型

GIS 案例库中涡旋过程的表达分为过程、阶段和状态三个级别分别进行,定义如下所示:

过程: {过程唯一标识, 过程起始时间, 过程结束时间, 发生区域, 涡旋类型, 产生阶段标识, 发展阶段标识, 稳定阶段标识, 减弱阶段标识, 消亡阶段标识, (过程名称), (过程属性)};

阶段: {阶段唯一标识, 前一阶段标识, 后一阶段标识, 阶段起始时间, 阶段结束时间, 状态标识, (阶段名称), (阶段属性)};

状态: {状态唯一标识, 中心点经纬度, 状态时刻, 状态属性, 空间形态};

其中, 空间形态= $\{(long_1, lat_1), (long_2, lat_2), \dots, (long_m, lat_m)\}$ , 用一系列坐标串来表示,  $long_m$  为经度,  $lat_m$  为纬度。“{}”表示包含的选项, 其中的“( )”表示可选项, 斜体字表示可重复的选项, 其余为必选项。

在案例过程的分级表达模型中, 案例过程包括案例标识、过程发生的起止时间和区域、涡旋过程类型、可选名称项和案例属性信息, 而其空间信息以及更为详细的属性信息是通过与相关联的阶段案例描述的。阶段定义中包含其描述信息, 如标识、可选名称项、起止时间、属性信息, 同时有其前后阶段标识和案例状态标识。案例状态是过程的最终描述单元, 提供过程和阶段时刻上的属性信息和空间形态信息。

### 1.2.2 涡旋典型状态的属性特征及涡旋过程的移动特征指标

涡旋案例典型状态的属性包括两大类, 其一是空间特征信息, 其二是涡旋的动力参数。主要有:

1) 长轴长度: 经涡旋几何中心, 所能获得的最大弦长定义为长轴(单位: km)。

2) 短轴长度: 经涡旋几何中心, 垂直于长轴的弦长(单位: km)。

3) 空间尺度  $D$ : 长轴尺度与短轴尺度之和的一半(单位: km)。

4) 紧凑度  $C$ : 衡量空间数据图斑的完整性和聚集性的指标, 由公式(1)得到:

$$C = \sqrt{S} / P \quad (1)$$

其中,  $S$  为涡旋表层的总面积,  $P$  为涡旋的周长。

5) 涡旋强度  $M$ : 涡旋中心与外围的振幅差(单

位: cm)。

6) 涡度  $\zeta$  (单位:  $s^{-1}$ ):

$$\text{涡的相对涡度}^{[11]} \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{8gM}{fD^2}$$

其中,  $u, v$  分别为涡的线速度的分量,  $g$  为重力加速度,  $D$  为涡旋空间尺度,  $f$  为科氏力参数<sup>[11]</sup>。

7) 中心点温度: 涡旋中心位置的温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。

8) 中心点与外围温差: 涡旋中心点温度与涡旋外围温度之差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。

9) 涡旋最大流速: 涡旋内最大的表层流速(单位: m/s)。

涡旋过程整体的定量描述采用涡旋移动的路径与移动的特征参数进行, 特征参数包括:

1) 移动距离  $L$ : 从涡旋产生位置到涡旋消失位置的位移(单位: km);

2) 移动速度  $V$ : 单位时间内涡旋移动的位移长度(单位: cm/s);

3) 移动方向  $O$ : 采用标准八方向定性描述和方位角定量描述(定义北为  $0^{\circ}$ , 东为  $90^{\circ}$ )。

### 1.2.3 涡旋典型过程案例介绍

按照上述方法提取南海中尺度涡旋, 共提取出 76 个涡旋(51 个反气旋涡和 25 个气旋涡)的 391 个典型状态来构建中尺度涡旋典型过程案例库(76 个涡旋中包含 58 个完整的过程案例和 18 个只用一个典型状态表示的案例, 我们认为这种只用某一典型状态表示的案例是过程的特例, 后文的统计不再进行细分)。采用 GIS 时空分析方法, 对分布在 Z1~Z4 四个分区内的涡旋在两个季风期间移动的时空特征进行分析。涡旋移动路径和特征参数的计算采用 ArcGIS 软件的二次开发获得。表 1 和表 2 分别是南海涡旋典型过程案例库的过程信息表和状态信息表。图 4 给出了一个涡旋典型移动过程的案例(过程唯一标识为 SCS72)的移动路径示例。

## 2 结果与讨论

### 2.1 中尺度涡旋的时空分布特征

图 5 给出了 76 个涡旋源地的空间分布。由图 5 可知, 中尺度涡旋主要产生在中心海盆边缘 2 000 m 等深线以深海域及吕宋岛以西海域, 呈东北-西南向分布, 与林鹏飞<sup>[9]</sup>的研究结果不甚一致, 是由研究时间段不同和涡旋筛选条件不完全相同所造成的。其中, 气旋涡数量较少, 分布于 2 000 m 等深线附近,

表1 南海区域 2003 年 11 月~2009 年 6 月海洋涡旋案例库——过程信息表

Tab.1 The case library of ocean eddies in the SCS from Nov.2003 to Jun.2009——process information

对象标识	过程标识	南海分区	起始时间 (年-月-日)	结束时间 (年-月-日)	涡旋类型	产生阶段标识	消亡阶段标识	移动距离 (km)	移动速度 (cm/s)	移动方向 (°)
1	SCS1	Z2	2003-12-20	2004-03-05	反气旋	00101	00105	497	10.7	159
2	SCS2	Z1	2004-02-01	2004-03-06	反气旋	00201	00205	250	14.1	143
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
76	SCS76	Z2	2009-02-13	2009-03-17	气旋	07601	07605	202	4.5	261

表2 南海区域 2003 年 11 月~2009 年 6 月海洋涡旋案例库——状态信息表

Tab.2 The case library of ocean eddies in the SCS from Nov.2003 to Jun.2009——state information

对象标识	状态标识	空间尺度(km)	...	强度(cm)	...	中心点温度(°C)	...	阶段标识
1	SCS1_20031230	110	...	6.85	...	23.31	...	00101
2	SCS1_20040107	150	...	7.98	...	23.07	...	00102
3	SCS1_20040117	174	...	11.19	...	23.31	...	00103
4	SCS1_20040127	127	...	7.43	...	23.07	...	00104
5	SCS1_20040305	116	...	3.15	...	23.62	...	00105
...	...	...	...	...	...	...	...	...
387	SCS76_20090213	120	...	2.90	...	27.40	...	07601

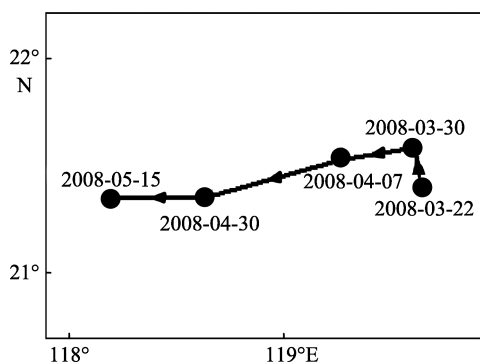


图 4 一个涡旋的空间移动路径示意图(过程唯一标识为 SCS72)

Fig. 4 Moving track of an eddy marked as SCS72 as a case

在台湾岛西南和越南半岛外海分布较为集中;反气旋涡数量明显多于气旋涡,分布的海域也更为广泛,除了沿2 000 m等深线两侧均匀分布之外,在吕宋岛西侧的海盆中心区域(14°~19°N, 117°~121°E)也分布了相当数量的反气旋涡。此外,在(14°~15°N, 118°~120°E)区域内冬季经常出现反气旋涡,气旋涡几乎不出现,这与林鹏飞等<sup>[9]</sup>的统计结果一致。

由统计结果可知,在2003年11月~2009年6月期间,年均出现涡旋13.4个,其中反气旋涡9.0个,气旋涡4.4个。图6给出了涡旋个数在完整年份(2004~2008)的年际变化趋势,由图6可知,4个分区的涡旋总数年际变化较大,且每个分区的情况不尽相同。南海4个分区的涡旋总数年际变化趋势也不

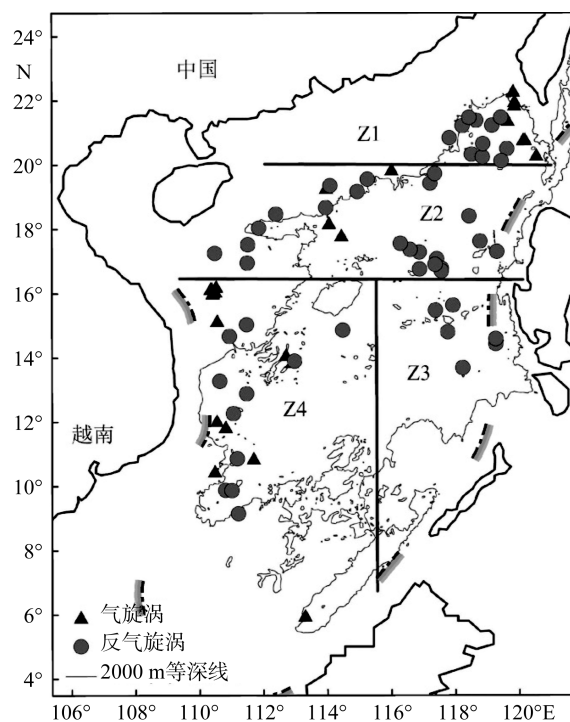


图5 涡旋生成源地的地理位置分布图

Fig. 5 The original locations of mesoscale eddies in the SCS

尽相同,2004年和2008年的差异不大,但在2005~2007年间变化剧烈。表3统计了2003年11月~2009年6月南海4个分区气旋涡与反气旋涡的总数(表3)。南海西南部海域产生的涡旋数量最多

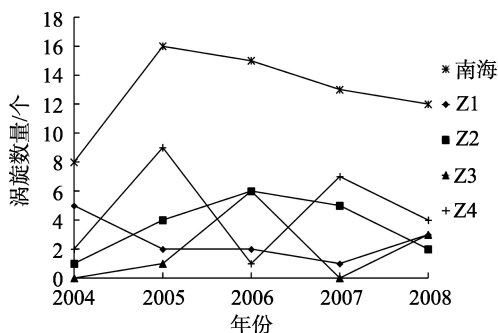


图 6 2004~2008 年南海及 4 个分区涡旋数量的年际变化  
Fig. 6 Annually statistical chart of the numbers of meso-scale eddies in the whole SCS and its four zones during 2004-2008

(25个), 中部次之(23个), 北部17个, 东南部最少(11个)。除西南部海域外, 反气旋涡的数量均多于气旋涡的数量。特别是在东南部海域, 统计时间内没有气旋涡产生。表4统计了2004~2008年气旋涡与反气旋涡总数的年际变化。除2005年气旋涡与反气旋涡的数量持平(8个)之外, 其它年份的反气旋涡数量均显著高于气旋涡。

图7给出了2003年11月~2009年6月南海中尺度涡旋总数的月统计图, 10月和12月产生的涡旋最多, 9月和11月最少。表5分季节统计了2003年11月~2009年6月期间的气旋涡与反气旋涡的总数。反气旋涡的总数比气旋涡多出1倍, 气旋涡在秋冬季生成的数量(18个)远高于春夏季(7个), 反气旋涡的数量在2个季节差异不大, 春夏季比秋冬季少3个。在秋冬季共产生45个涡旋, 春夏季共产生31个。秋冬季

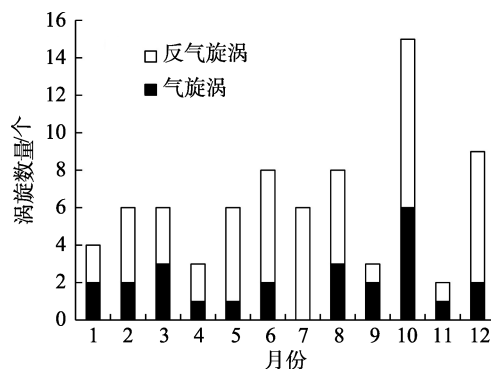


图 7 2003 年 11 月~2009 年 6 月南海涡旋产生数量的月统计图

Fig. 7 Monthly statistical histogram of the number of meso-scale eddies in the SCS from Nov.2003 to Jun.2009

节下, 黑潮的频繁入侵使得涡旋产生的数量高于春夏季<sup>[15-17]</sup>。

南海上层环流受季风影响显著, 因此涡旋的产生具有明显的季节性<sup>[18]</sup>。图 8 给出了春夏季和秋冬季的气旋涡与反气旋涡源地的空间分布。

由图 8 可知: (1) 在南海东北部, 春夏季仅有 1 个气旋涡形成, 而在秋冬季气旋涡的数量明显增加, 反气旋涡的数量也有所增加; 涡旋出现在台湾岛西南, 反气旋涡均位于气旋涡的西侧。(2) 在南海中部, 秋冬季产生的两类涡旋数量均大于春夏季, 在春夏季仅有 1 个气旋涡产生, 在秋冬季有 3 个。(3) 在南海东南部, 涡旋的活动不够活跃。产生的数量极少, 秋冬季多于春夏季, 且两个季节均没有气旋涡产生,

表 3 2003 年 11 月~2009 年 6 月南海及 4 个分区气旋涡与反气旋涡的数量

Tab.3 The numbers of anticyclonic eddies and cyclonic eddies in the four zones of the SCS from Nov.2003 to Jun.2009

涡旋类型	涡旋数量(个)				南海涡旋总数量(个)
	Z1	Z2	Z3	Z4	
气旋涡	8	3	0	14	25
反气旋涡	9	20	11	11	51
分区两种涡旋	17	23	11	25	76

表 4 2004~2008 年每年气旋涡与反气旋涡的数量

Tab.4 The yearly numbers of anticyclonic eddies and cyclonic eddies in the SCS from 2004 to 2008

年份	气旋涡数量(个)	反气旋涡数量(个)	年涡旋总数量(个)
2004	2	6	8
2005	8	8	16
2006	3	15	18
2007	3	10	13
2008	4	8	12
2004~2008 年	20	47	67

表 5 2003 年 11 月~2009 年 6 月春夏季与秋冬季气旋涡与反气旋涡的总数量

Tab.5 The seasonal numbers of anticyclonic eddies and cyclonic eddies in the SCS from Nov.2003 to Jun.2009

涡旋类型	涡旋数量(个)		年涡旋总数 (个)
	春夏季	秋冬季	
气旋涡	7	18	25
反气旋涡	24	27	51
季节两种涡旋	31	45	76

只有反气旋涡。(4) 在南海西南部, 春夏季的涡旋数量明显多于秋冬季, 这与其它 3 个分区的趋势恰好相反。在春夏季形成的主要是反气旋涡, 气旋涡仅有 5 个; 而在秋冬季, 形成的主要是气旋涡, 反气旋涡仅有 1 个。

### 2.2 中尺度涡旋过程移动的区域性特征

图9给出了不同季风期内典型涡旋过程的移动轨迹, 其中箭头所指方向为涡旋移动方向。经计算, 涡旋的平均水平移动距离为237 km, 其中反气旋涡为249 km, 气旋涡为210 km, 此结果略小于王桂华<sup>[11]</sup>的统计结果。涡旋水平移动速度为3~16 cm/s, 平均速度为8.4 cm/s, 其中反气旋涡平均移动速度为9.2 cm/s, 气旋涡平均移动速度为6.8 cm/s, 可见反气旋涡比气旋涡的移动速度大35%。此反气旋结果与Wang等<sup>[4]</sup>采用卫星高度计资料、卫星跟踪浮标资料

以及水文观测资料追踪的南海东北部的两个暖涡的移动特征相似。其中70%的涡旋移动方向为西北和西南向, 平均移动相位角为262°, 即往西移动。

为了讨论涡旋移动的区域特征, 针对南海的 4 个分区分别进行涡旋过程移动的时空特征分析, 图 10 给出了 4 个分区的涡旋移动方向的玫瑰图。由结果可知:

1) 南海东北部: 涡旋主要集中在9~10月以及次年的1~2月发生, 即东北季风期。涡旋平均移动距离为247 km, 大部分涡不能向西跨过118° E, 涡旋平均移动速度为8.1 cm/s, 移动方向为西南(256°)。从涡旋过程内部各阶段的具体演变来看, 产生-发展阶段的移动速度为11.3 cm/s, 向西北方向(280°)移动; 发展-稳定阶段移动速率减小到7.1 cm/s, 转向西南, 移动方向为203°; 减弱-消亡阶段的移动速度又开始增加, 达13 cm/s, 移动方向逐渐偏西, 为260°。大部分中尺度涡不能西移太远, 一方面因为地形的阻挡作用(这里的地形导致中尺度涡旋向西北移动<sup>[11]</sup>); 另一方面由于台湾岛西南侧有一小范围的反气旋式环流, 在其作用下涡旋难以西移<sup>[11]</sup>。

2) 南海中部: 气旋涡主要发生在冬、春两季。一部分涡旋沿陆坡向西南运动, 其中一些反气旋涡沿南海海盆向西运动<sup>[11]</sup>。涡旋平均水平移动距离为215 km, 移动速度为10.2 cm/s, 移动方向为西南

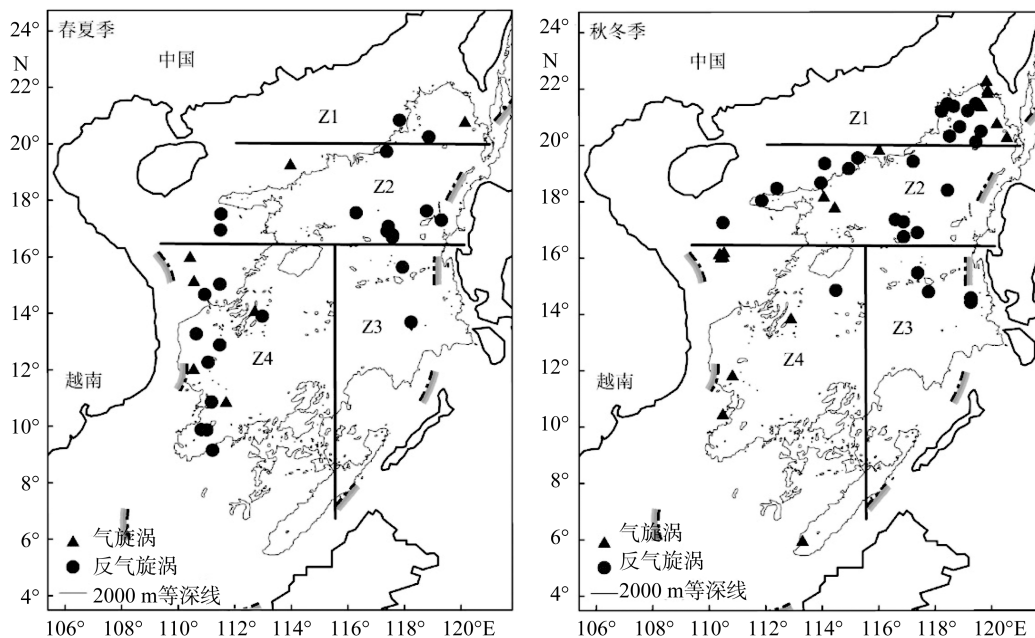


图 8 南海春夏季与秋冬季气旋与反气旋涡的空间分布

Fig. 8 Seasonal distributions of anticyclonic eddies and cyclonic eddies in the SCS

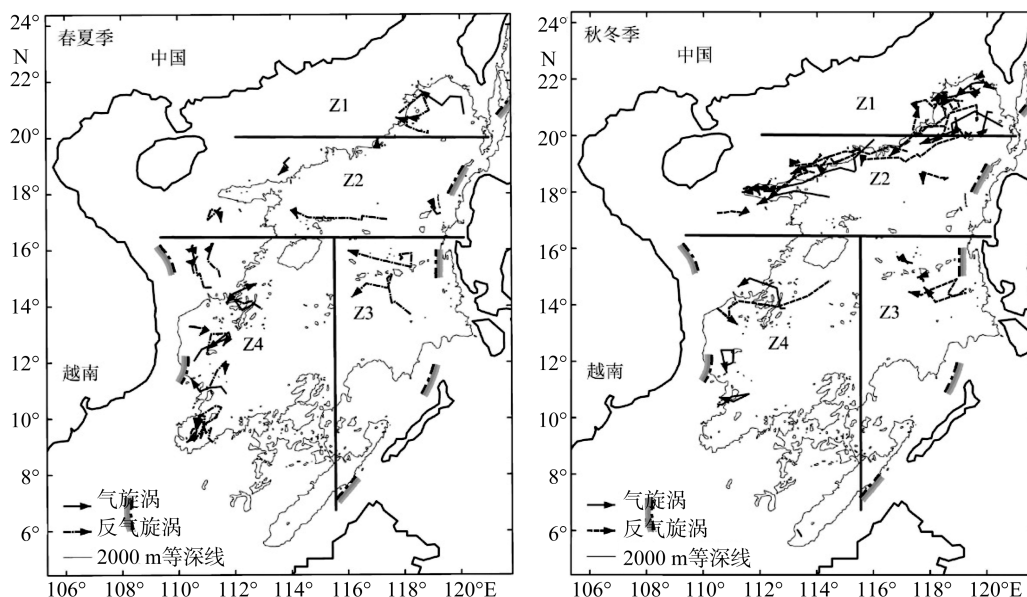


图9 南海春夏季与秋冬季气旋与反气旋涡移动过程路径示意图

Fig. 9 The seasonal sketch maps of the moving tracks of anticyclonic eddies and cyclonic eddies in the SCS

(251°)。从涡旋过程内各阶段的具体演变来看, 涡旋产生-发展阶段移动速度最大, 为 12.5 cm/s, 向西南方向(252°)移动; 到发展-稳定阶段移动速度减小到 8.8 cm/s, 继续向西移动, 移动方向为 264°; 减弱-消亡阶段的移动速度又增大到 11.4 cm/s, 转向西南方向移动(228°)。

3) 南海东南部: 只有反气旋涡出现, 向西或西北偏西运动。这里的涡旋比较弱, 但移动距离较长, 也有较长的生命周期<sup>[11]</sup>。涡旋平均水平移动距离为 323 km, 移动速度为 8.2 cm/s, 向西(274°)移动。从涡旋过程内各阶段的具体演变来看, 从产生到发展、稳定阶段的移动速度较小, 为 6 cm/s, 向西北方向移动, 移动方向为 296°, 稳定-消弱阶段移动速度逐渐变快, 达到 11.4 cm/s, 移动方向为 280°, 减弱-消亡阶段移动速度稍有减慢, 为 10.2 cm/s, 并逐渐转向西南(252°)。

4) 南海西南部: 涡旋移动的轨迹较短。夏季出现的涡旋多于冬季, 且夏季的绝大部分涡旋与偶极子结构相关<sup>[11]</sup>。涡旋平均水平移动距离为 213 km, 移动速度为 9.8 cm/s, 移动方向为西北(300°)。从涡旋过程内各阶段的具体演变来看, 产生-发展阶段的最大移动速度为 11.6 cm/s, 向西北方向(290°)移动; 从发展到稳定、减弱阶段移动速度逐渐减小, 为 8.4 m/s, 移动方向为西北(288°); 减弱-消亡阶段涡旋的移动速度又增至 10.5 cm/s, 向西(270°)移动。其中气旋涡与反气旋涡移动速度差别较大, 气旋涡为 8.2 cm/s, 反气旋涡为 10.6 cm/s, 气旋涡移动逐步加快, 而反

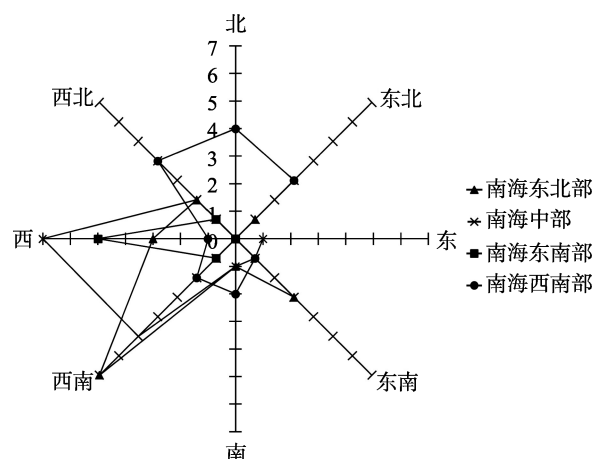


图10 各分区涡旋水平移动方向玫瑰图

Fig. 10 The rose diagram of eddy moving directions in the four zones of the SCS

气旋涡的移动逐步减慢。

### 2.3 中尺度涡旋移动过程的季节性特征

南海位于东亚季风区, 冬季盛行强劲的东北季风, 夏季盛行西南季风。为讨论中尺度涡随季节的变化规律, 按不同的季风期来划分时间段。冬季季风期从10月份到次年3月, 4~5月为春季转换期, 6~8月为夏季季风期, 9月为秋季转换期<sup>[11]</sup>。本文按秋冬季和春夏季两个季风期分别对典型的涡旋过程案例进行统计分析。

由图8和图9可知, 春夏季共产生31个涡旋, 其中气旋涡7个, 反气旋涡24个。该季节产生的涡旋主

要集中在南海西南部海域,以反气旋涡居多,且部分涡旋呈偶极子<sup>[11]</sup>形式出现,南侧为反气旋涡,北侧为气旋涡。在春夏季,涡旋整体上向西北方向移动(291°),平均移动速度为8.2 cm/s。从涡旋生消的不同阶段来看,涡旋产生的早期是向西北方向移动,然后转向西。秋冬季共产生45个涡旋,其中18个气旋涡,27个反气旋涡。该季节出现的涡旋较春夏季多,且主要集中在南海东北部和中部海域<sup>[11]</sup>。在南海东北部,秋冬季期间台湾岛西南部以反气旋涡为主,也出现多个气旋涡;南海中部东侧均为反气旋涡,而在西侧,大部分为反气旋涡,出现少数气旋涡;在南海西南部,以气旋涡为主。由图可知,该季节涡旋主要向西南方向(243°)移动,平均移动速度为8.6 cm/s。从涡旋生消各阶段的移动规律来看,涡旋在产生-发展阶段向西移动,随着涡旋的生命历程发展而逐渐向西南移动,这可能是受经由吕宋海峡进入南海的黑潮水对北部海域环流的影响,以及局地季风的驱动<sup>[19]</sup>。由移动方向不难看出,南海中尺度涡旋移动过程的规律有显著的季节性。

### 3 结论

本文采用 Global NLOM 模式的 SSH、SST 和表层海流结果,在给定判定标准的基础上,对典型海洋中尺度涡旋进行综合识别和涡旋移动过程的提取,并采用 GIS 分级模型对典型过程的信息进行组织和存储。基于中尺度涡旋典型过程案例库,采用 GIS 时空统计分析方法,首先分析了南海中尺度涡旋的分布特征,然后分别分析了四个分区的涡旋移动特征,最后分析了涡旋移动的季节性特征,得出结论如下:(1)南海中尺度涡的移动速度为3~16 cm/s,平均速度为8.4 cm/s。大部分涡旋在产生阶段和消亡阶段移动较快,而稳定阶段移动较慢。(2)大部分涡旋向西移动。其中,南海东北部和中部的涡旋基本上向西南方向移动,东南部的涡旋沿海盆向西移动,西南部的涡旋向西北方向移动。(3)春夏季涡旋主要向西北方向移动,秋冬季涡旋主要向西南方向移动。

本文主要对南海中尺度涡旋的移动过程进行了 GIS 的时空特征分析,今后还将结合其它数据资料对涡旋案例库进行修改完善,以进一步丰富和增强对海洋中尺度涡旋时空运动规律的认识。同时在考虑涡旋产生机制与演变过程的动力等因素方面也仍需进一步研究,未来工作可结合 GIS 的空间案例挖掘方法对构建的中尺度涡旋案例库进行相似性计算

与推理的预测分析。

参考文献:

- [1] Zhu Xiaohua, Park J, Huang Daji. Observation of baroclinic eddies southeast of Okinawa Island[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51: 1802-1812.
- [2] Wu C, Chiang T. Mesoscale eddies in the northern South China Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2007, 54: 1575-1588.
- [3] Cai Shuqun, Long Xiaomin, Wang Shengan. A model study of the summer southeast Vietnam Offshore Current in the southern South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27: 2357-2372.
- [4] Wang Dongxiao, Xu Hongzhou, Lin Jing, et al. Anticyclonic eddies in the northeastern South China Sea during winter 2003/2004[J]. Journal of Oceanography, 2008, 64: 925-935.
- [5] Sanchez R, Gil J. 3D structure, mesoscale interactions and potential vorticity conservation in a swoddy in the Bay of Biscay[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 46: 47-68.
- [6] Souza R, Mata M, Garcia C, et al. Multi-sensor satellite and in situ measurements of a warm core ocean eddy south of the Brazil-Malvinas confluence region[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100: 52-66.
- [7] Hwang C, Chen S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX /Poseidon altimetry[J]. J Geophys Res, 2000, 105(10): 23943-23965.
- [8] Wang Guihua, Su Jilan, Chu P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data [J]. Geo-phys Res Lett, 2003, 30 (21): 2121.
- [9] 林鹏飞, 王凡, 陈永利, 等. 南海中尺度涡的时空变化规律 I. 统计特征分析[J]. 海洋学报, 2007, 5(29): 14-21.
- [10] 程旭华, 齐义泉, 王卫强. 南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(4): 51-59.
- [11] 王桂华. 南海中尺度涡的运动规律探讨[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [12] Su Jilan. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 1745-1760.
- [13] Du Yunyan, Fan Xing, He Zhigang, et al. Extraction of spatial-temporal rules from mesoscale eddies in the South China Sea based on rough set theory[J]. Ocean



- Sci, 2011, 7: 835-849.
- [14] 薛存金. 海洋 GIS 时空过程数据模型研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2008.
- [15] Shaw P. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea water into the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96: 821-827.
- [16] Farris A, Wimbush M. Wind-induced kuroshio intrusion into the South China Sea[J]. Journal of Oceanography, 1996, 52: 771-784.
- [17] Centurioni L R, Niiler P P, Lee D K. Observation of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34: 113-121.
- [18] 管秉贤, 袁耀初. 中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述——南海和台湾以东海域[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 1-15.
- [19] 杨昆, 施平, 王东晓, 等. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 27-34.

## GIS-based analysis on temporal-spatial features of typical processes of meso-scale eddies in the South China Sea

DU Yun-yan, WANG Li-jing, FAN Xing, ZHOU Cheng-hu

(State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Received:** Jun., 1, 2012

**Key words:** meso-scale eddy; typical process; GIS (Geographic Information System); temporal-spatial analysis; the South China Sea

**Abstract:** Meso-scale marine eddies with complicated temporal-spatial evolution process were studied. They are expressed quantitatively and then organized as typical-process cases. These eddies were synthetically identified and dynamically tracked by using SSH (Sea Surface Height), SST (Sea Surface Temperature) and surface horizontal circulation distribution obtained by Global NLOM (Naval Research Laboratory Layered Ocean Model). Taking the South China sea (SCS) as an example, a case-based database was built by some typical states extracted from each process of meso-scale eddies. Then the GIS (Geographic Information System) temporal-spatial features of all cases in the database were analyzed. The results show that the meso-scale eddies were distributed as a belt style in NE-SE direction in the SCS, and the horizontal moving speed was 3-16 cm/s with an average value of 8.4 cm/s. Most of them moved towards west. These eddies moved towards the NW direction in spring and summer but towards the EW direction in autumn and winter. The meso-scale eddies in the northeastern SCS mainly originated in September-October and January- February the following year. They moved toward NW first, and then turned to SW. Most of the westward movement of the northeastern eddies can't be too far. The meso-scale eddies in the central SCS mainly originated in winter and spring, part of which moved toward SW along the slope. Some of anticyclonic eddies moved toward W along the SCS basin. There were only some anticyclonic eddies identified in the southeastern SCS in the study. They moved toward W or WNW. Their intensity and vorticity were weak, but usually they moved a long distance and had a long lifetime. In the southwestern SCS, eddies originated in summer were more than that in winter, most of which appeared in dipole, and usually they moved a short distance.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)