

# 基于聚类的时空轨迹特征挖掘——以中尺度涡轨迹为例

杜艳玲<sup>1</sup>, 刘江勇<sup>1</sup>, 贺琪<sup>1</sup>, 苏诚<sup>2</sup>, 黄冬梅<sup>1,3</sup>

(1. 上海海洋大学 信息学院, 上海 201306; 2. 自然资源部东海预报中心, 上海 200136; 3. 上海电力大学, 上海 200090)

**摘 要:** 采用密度聚类方法对中长生命周期中尺度涡轨迹进行聚类分析, 分析比较了不同类簇中尺度涡的轨迹特征、时空分布以及生成和消亡的空间分布特征。结果表明: 随着纬度的增加, 不同轨迹类别的振幅增大, 旋转速度和半径却呈现递减趋势, 反气旋涡轨迹变化更快速, 轨迹更易受地理位置影响。南海南部春冬季气旋涡较多, 反气旋涡更易出现在夏秋季; 南海中部中尺度涡向西移动; 南海北部中尺度涡向西北移动。此外, 位于越南东南部的中尺度涡轨迹表现出更活跃、更复杂的特性。

**关键词:** 中尺度涡; 中长生命周期; 轨迹; 聚类

**中图分类号:** P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)04-0069-10

## 1 引言

海洋中尺度涡流场以绕一中心点旋转为特征, 呈现非规则的三维螺旋状结构, 并保持快速的水平与垂向移动<sup>[1-4]</sup>, 空间尺度在 50~300 km 之间, 时间尺度一般在数周至数月。中尺度涡在热量、动能、碳和营养盐等重要气候示踪物的水平运输和垂向交换中扮演着重要角色, 因此, 研究中尺度涡的时空分布特征和移动模式对于更好地理解全球物质和能量的收支具有重要意义。

当前, 对于海洋中尺度涡的自动识别、轨迹追踪和时空特征分析已有较丰富的研究。海洋中尺度涡轨迹特征分析与移动模式研究大致可分为两类。一类是基于海洋物理要素场, 如海表面温度、流场和海表面高度等数据分析中尺度涡轨迹的特征和移动模式<sup>[2-6]</sup>。Chelton 等<sup>[7-8]</sup>对全球大空间尺度和长生命周期的中尺度涡进行了较全面的分析, 发现反气旋的生命周期更长, 移动距离更远; Zhuang 等<sup>[9]</sup>分析了南海海平面中尺度涡的年平均标准偏

差、移动速度和季节变化, 发现吕宋海峡西北部条带中的中尺度涡主要向西南方向移动, 西南部的中尺度涡主要朝经线方向移动; 杜云艳等<sup>[10]</sup>将海表面高度与海表面温度和表层海流场相结合, 分析了中尺度涡的移动过程; 郑聪聪等<sup>[11-12]</sup>探讨了北太平洋中尺度涡的高发区和高发季节; 徐茗等<sup>[13]</sup>对短生命周期海洋中尺度涡进行时空特征分析, 证明其与大洋环流系统密切相关。另一类是利用聚类方法对特定区域的中尺度涡轨迹模式进行挖掘分析。吴笛<sup>[14]</sup>将轨迹聚类方法引入海洋中尺度涡的研究中, 探讨了中尺度涡的时空移动规律; Yang 等<sup>[15]</sup>使用模糊 C 均值聚类(Fuzzy C-Means algorithm, FCM)的方法对南海热带气旋进行聚类, 分析了中尺度涡对热带气旋的影响; 莫洋等<sup>[16]</sup>提出了一种海洋中尺度涡移动特征的网格区域化方法, 采用基于平均邻接的层次聚类和基于模块度的划分步骤, 实现了南海中尺度涡移动模式的区域划分; 孙勇等<sup>[17]</sup>对图同构算法 VF2 进行改进, 将空间信息融入图节点中, 发现了南海复杂轨迹之间相似的聚集模式; Wang 等<sup>[18]</sup>

收稿日期: 2021-07-01; 修回日期: 2021-08-24。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41906179); 上海市科委地方高校能力建设项目(20050501900); 上海市教育发展基金项目(AASH2004)。

作者简介: 杜艳玲(1987-), 女, 讲师, 博士, 主要从事海洋中尺度涡识别与轨迹特征挖掘研究。E-mail: yldu@shou.edu.cn

通讯作者: 黄冬梅(1964-), 女, 教授, 博士, 主要从事海洋大数据管理及遥感图像处理研究。E-mail: dmhuang@shou.edu.cn

在文献[17]的基础上,提出了基于结构演化的周期性模式挖掘算法,探讨了不同区域中尺度涡的不同演化模式。

准确的海洋中尺度涡轨迹研究是分析其轨迹特征和时空模式的关键,是研究其对海洋资源分布和海洋生态环境变化影响的基础。对中尺度涡轨迹进行聚类分析,才能获得对影响南海的中尺度涡轨迹特征更全面的理解。然而,受限遥观测技术,目前中尺度涡轨迹研究主要存在两个局限:其一,对中长生命周期的中尺度涡时空轨迹挖掘研究较少;其二,针对不同类簇的中尺度涡轨迹之间的异同性探讨研究有限。本文采用轨迹密度聚类方法对南海中长生命周期的中尺度涡轨迹进行聚类,分析比较了正反中尺度涡轨迹时空特征,以及不同类簇之间的差异性。

经统计分析发现,生命周期大于 27 d 的中尺度涡数量突增,因此,本文将中长生命周期中尺度涡轨迹定义为生命周期大于 27 d 的中尺度涡轨迹,文中所提及的中尺度涡轨迹指的都是中长生命周期。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

实验数据来源于法国 AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic) 提供的资料。该资料由 TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2 和 Environment Satellite (Envisat) 数据融合而成,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。数据包含了轨迹 ID、经纬度、振幅、半径、速度和涡旋类型等特征,其中速度指的是旋转速度,具体定义见文献[7]附录。使用 Mason 等<sup>[19]</sup>提出的算法,提取出 1993 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日南海 ( $0^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ ,  $100^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$ ) 的中尺度涡轨迹,并对不同长度生命周期的轨迹数量进行了统计(见表 1)。

根据对中尺度涡轨迹的统计分析,得到生命周期超过 27 d 并且小于 60 d 的中尺度涡涡旋轨迹的数量占比达到 67.07%,生命周期超过 60 d 的数量占比为 30.54%。无论是气旋涡还是反气旋涡,中长生命周期的中尺度涡轨迹都占据了绝大部分比重,肯

表 1 不同生命周期涡旋轨迹的数量/条数

Tab.1 Eddy trajectories numbers of different lifetime

涡旋轨迹 极性	短生命周期 (0~27 d)	中生命周期 (28~60 d)	长生命周期 (>60 d)	总量
气旋式	28	621	245	894
反气旋式	12	499	265	776
总量/条数	40	1 120	510	1 670

定了本文研究中长生命周期中尺度涡轨迹的价值。因此,我们选取南海海域 1 630 条(气旋涡轨迹 866 条,反气旋涡轨迹 764 条)中长生命周期的中尺度涡轨迹开展研究。

### 2.2 轨迹密度聚类方法

轨迹密度聚类方法既考虑了多条轨迹的相似子轨迹,又显示了轨迹间的差异性,能够有效地挖掘出中尺度涡轨迹特征。本文将中尺度涡原始轨迹按照时间节点分割成若干子轨迹,然后在基于密度聚类的原理上对子轨迹进行聚类分析,从而挖掘出中尺度涡轨迹特征。

对于点与点之间距离的度量,最常用的距离函数是欧氏距离。为了衡量线段与线段间的相对位置关系,欧氏距离定义了垂直距离、平行距离和角距离,将三者按照不同的权重进行求和,得到线段与线段之间的距离。具体定义在文献[20]中已给出,本文不再赘述。

基于线段密度的轨迹聚类算法就是在轨迹集合  $T$  中找到每个类簇的最大集合,然后在集合中计算出一条轨迹代表该类簇的整体移动轨迹。计算类簇的代表轨迹要给出相应的参数半径  $\varepsilon$  和最少线段数  $MinLns$ 。图 1 给出了生成类簇代表轨迹的事例。代表轨迹为:

$$Trj_i = p_1 p_2 p_3 \cdots p_j \cdots p_{len_i} (1 \leq i \leq num_{clus})$$

式中,  $p_i$  点是由扫描线方法确定的。沿着类簇的主轴方向横扫垂直线并计算穿过横扫线的线段数,如果穿过的线段的个数等于或大于  $MinLns$ ,则取这些点的平均值作为代表轨迹的点,小于  $MinLns$  的,选择跳过当前点(见图 1 中 5、6 位置),如果两个点位置比较近,则选择跳过比较近的点来生成代表轨迹点(见图 1 中 3 位置)。

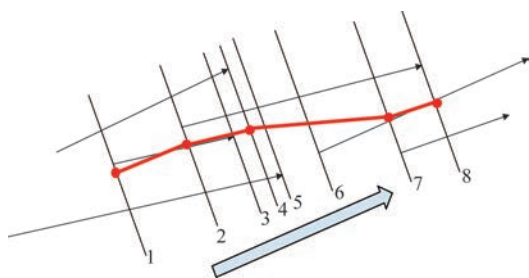


图1 一个簇及其代表轨迹的例子

Fig.1 An example of a cluster and its representative trajectory

## 2.3 类簇数量选择

确定最优类簇数量是聚类分析的核心问题。在轨迹密度聚类中,参数 $\varepsilon$ 不宜过小,  $MinLns$  不宜过大,在选择参数 $\varepsilon$ 时,使用信息熵(entropy)<sup>[20]</sup>来表示,利用启发式算法确定参数 $\varepsilon$ 的范围。图2分别给出了气旋涡和反气旋涡的参数 $\varepsilon$ 与信息熵的关系。

在信息熵相对较小的对应的参数 $\varepsilon$ 范围内,调整参数  $MinLns$  确定最终的类簇数量,最终得到气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹的参数 $\varepsilon$ 和  $MinLns$  都为0.54和9。

中尺度涡轨迹密度聚类过程中存在噪声轨迹,即不属于气旋涡或反气旋涡的任何一类,在轨迹分类时,将该类轨迹不划分为任何一类。此外,由于中尺度涡在生命周期中变化剧烈,尤其是对于生命周期较长的中尺度涡,不同的轨迹段特征存在

显著差异,此时,如果一条轨迹划分的段数在某一类中较多,则把整条轨迹划分到该类。

## 3 结果与讨论

### 3.1 中尺度涡轨迹聚类结果分析

图3展示了气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹的轨迹密度聚类结果,其中,浅蓝色和浅红色的细线分别为气旋涡和反气旋涡原始轨迹,蓝色和红色的线段为每一类簇的代表轨迹。图3a把南海气旋涡轨迹划分为5类,分别标记为类A、类B、类C、类D和类E,3个较大的类A、B、C分别位于南海西北部、南海中东部和越南东南部,另外两个较小的类D、E分别位于马来西亚东北部和婆罗洲西北部。图3b把南海反气旋涡轨迹划分为4类,分别标记为类A、类B、类C和类D,其中类D相对较小,位于马来西亚东北部。

气旋涡和反气旋涡的类A、类B、类C和类D的空间分布大体一致,但是气旋涡轨迹中的类E与其他类有显著的不同。在空间范围内( $3^{\circ} \sim 9^{\circ}N$ ,  $110^{\circ} \sim 115^{\circ}E$ ),反气旋涡轨迹杂乱,而气旋涡轨迹则较密集,尽管类E占据的气旋涡轨迹的数量比重相对较小,但是该处的中尺度涡轨迹的平均长度较大,轨迹长度相对稳定。

表2和表3分别列出了两种中尺度涡轨迹长度和不同类簇中尺度涡轨迹的占比。表2显示,随着纬度增加,不同类簇气旋涡轨迹的平均长度不断减

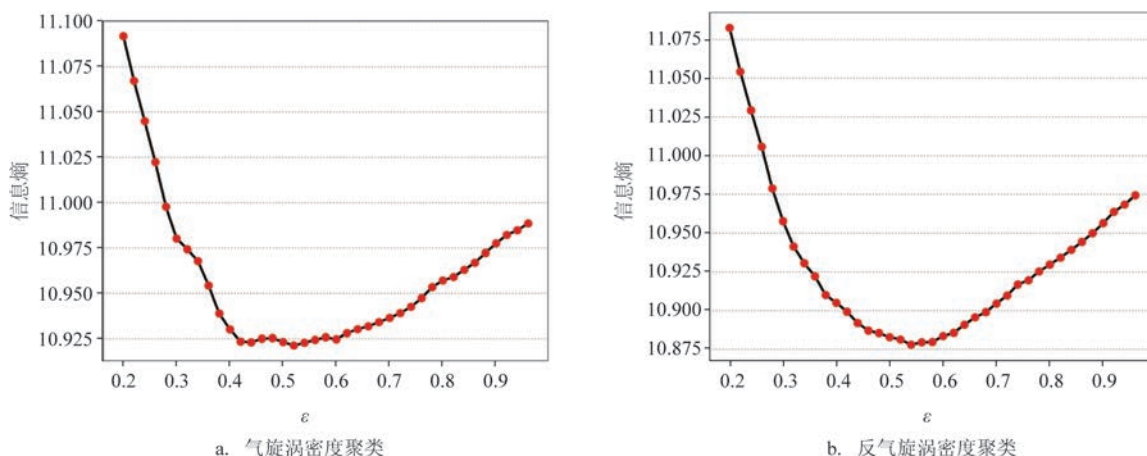


图2 参数 $\varepsilon$ 和信息熵的变化关系

Fig.2 The variation relationship between the parameter and information entropy



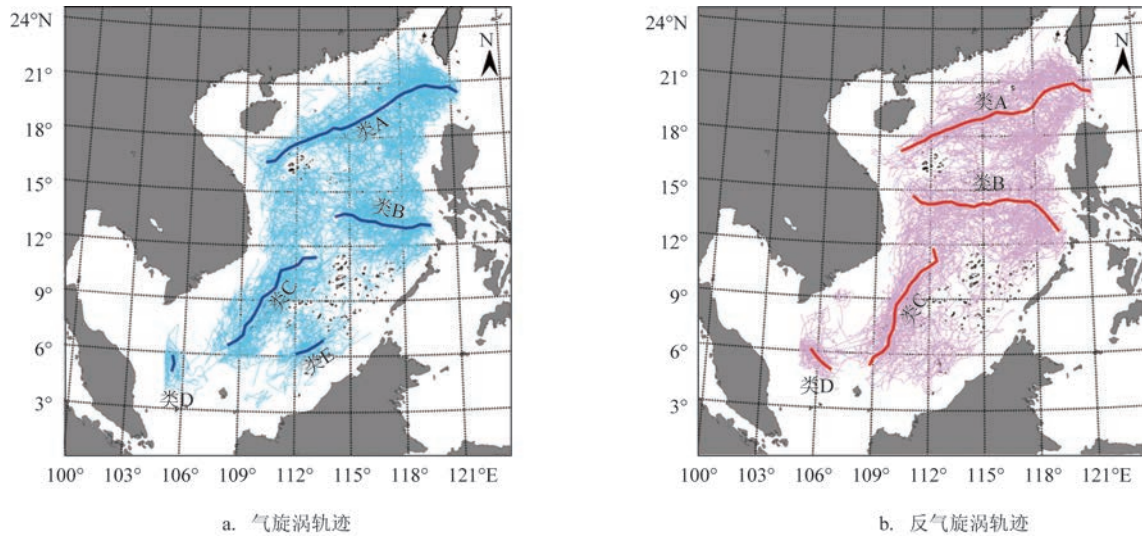


图3 轨迹密度聚类结果

Fig.3 The result of density clustering of trajectories

表2 不同类中尺度涡轨迹的长度(单位:km)

Tab.2 The length of trajectories of the mesoscale eddy in each category (unit: km)

类别	气旋涡轨迹		反气旋涡轨迹	
	平均长度	标准差	平均长度	标准差
类 A	578.47	318.50	627.49	367.01
类 B	653.33	405.33	618.86	416.35
类 C	675.18	373.21	852.50	556.19
类 D	901.14	297.43	811.93	442.60
类 E	684.85	270.13	—	—

小,尽管反气旋涡轨迹整体上也表现出这一特性,但是部分仍存在一定的差异。例如,反气旋涡轨迹类A的平均长度大于类B。另外,空间上位于南海北部的类A和越南东南部的类C,其气旋涡轨迹的平均长度都大于反气旋涡轨迹,但是整体可以看到反气旋涡轨迹的标准偏差更大,即反气旋涡轨迹的波动范围更大,轨迹长度的大小更易受地理位置影响。

从表3可以看出,不论是气旋涡还是反气旋涡,不同类簇轨迹数量都在类A处达到峰值,在空间位置3°~8°N,104°~107°E上的数量相对较少,分别占比1.49%和3.95%。另外,整个南海气旋涡轨迹的数量多于反气旋涡轨迹的数量。

利用聚类结果,我们详细计算了特定区域的涡旋轨迹数量和平均长度,分析比较后得出结论:不

表3 不同类中尺度涡轨迹的数量和相对于总中尺度涡轨迹数的比例

Tab.3 Number of trajectories of mesoscale eddy in different classes and the proportion relative to the total trajectories number of mesoscale eddy

类别	气旋涡轨迹		反气旋涡轨迹	
	轨迹数量/条	百分比/%	轨迹数量/条	百分比/%
类 A	368	45.66	298	42.09
类 B	208	25.81	255	36.02
类 C	168	20.84	127	17.94
类 D	12	1.49	28	3.95
类 E	50	6.20	—	—
轨迹总数/条	806	100	708	100

同类簇轨迹的数量随着纬度的增加而不断增加,轨迹的平均长度随着纬度的增加而不断减小。尽管整体在空间位置的分布上呈现一致性,但是不同的类别也存在差异,这些差异性将在下面章节中进行讨论。

### 3.2 不同类中尺度涡轨迹特征

图4a为不同类中尺度涡轨迹的振幅分布。从图中可以看出,气旋涡轨迹在越南东南部类C的振幅分布范围更广泛,中位数和平均值相对较大,平均值达到0.08 m;类D和类E占据中尺度涡轨迹的

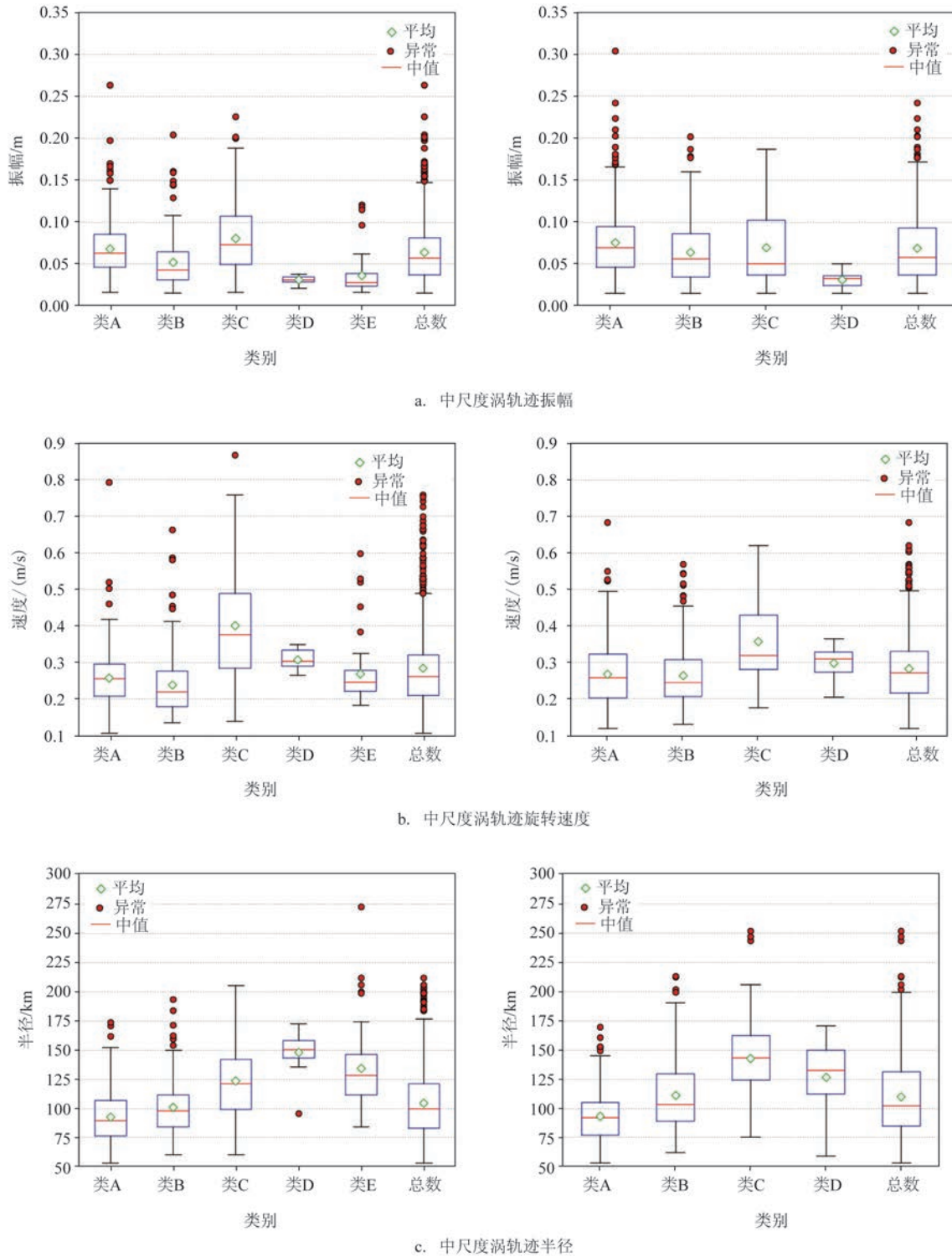


图4 气旋涡轨迹特征(左列)和反气旋涡轨迹特征(右列)

Fig.4 The trajectory characteristics of cyclonic(left) and anticyclonic(right)

数量较少,且振幅相对较小,类D的振幅平均值为0.035 m;除了类C外,气旋涡轨迹的振幅随着纬度

的增加而递增,类A的异常振幅数据最多,即在该处中尺度涡轨迹的振幅变化更大。反气旋涡轨迹

也是越南东南部类C的振幅分布范围较大,平均值达到0.07 m,而位于马来西亚东北部的类D振幅相对较小。对比气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹,两者的振幅都是随着纬度的增加而递增,纬度越高振幅变化越大。

图4b为不同类中尺度涡轨迹旋转速度的分布。从图中可以看出,位于越南东南部的反气旋涡轨迹类C的速度分布范围更广,轨迹速度平均达到0.4 m/s,位于南海中部的类B中尺度涡轨迹的旋转速度平均值最小。空间位置一致的反气旋涡轨迹的速度与气旋涡轨迹分析结果具有一致性。两种轨迹的旋转速度在南海中部都相对较小,从南海中部到北部,随着纬度的增加,开始出现一些旋转速度波动较大的中尺度涡轨迹,两种中尺度涡轨迹的旋转速度相差较小。

图4c为不同类中尺度涡轨迹半径的分布。从图中可以看出,尽管位于马来西亚东北部的类D的轨迹数量较少,但是该处轨迹的平均半径相对较大,而位于南海北部的类A的平均半径最小,此外类C的平均半径分布范围较广泛。位于越南东南部的类C的轨迹平均半径较大,达到140 km,除了类C外,反气旋涡轨迹的平均半径随着纬度的增加而不断减小。整体而言,两种中尺度涡轨迹的平均半径都随着纬度的增加而不断减小,但两者存在一定的差异,在空间位置 $4^{\circ}\sim 7^{\circ}\text{N}$ ,  $104.5^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 上,气旋涡轨迹的平均半径更大。

相较已有的研究,我们详细讨论了涡旋轨迹的特有属性,包括振幅、旋转速度和半径,并对其差异性进行了探讨。研究发现除了位于越南东南部的类C外,南海两种中尺度涡轨迹随着纬度的增加振幅增大,而旋转速度和半径都呈现递减趋势,两种轨迹在振幅、旋转速度和半径上整体相差较小。而位于越南东南部的类C的轨迹更复杂,振幅、旋转速度和半径都表现出显著的差异性,验证了文献[18]的结论。

### 3.3 不同类中尺度涡季节分布

经统计,我们给出了春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月—翌年2月)四季的中尺度涡轨迹数量分布(见图5)。就气旋涡轨迹而言,位于马来西亚东北部的类D轨迹主要分布在冬季,类

E与类D则相反,在冬季的气旋涡轨迹的数量较少,位于越南东南部的类C轨迹在夏季相对较少,类A和类B四季分布较均匀,没有明显差异。图5显示,反气旋涡轨迹的类D在夏季更易出现,而位于越南东南部的类C在冬季的轨迹数量较少,对于南海中部的类B,反气旋涡轨迹的数量从夏季到秋季递减,直到12月轨迹数量才增加,南海北部的类A中尺度涡轨迹分布相对较均匀。

对比两种中尺度涡轨迹的季节分布结果,可以看出位于越南东南部的类C和位于马来西亚东北部的类D,气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹呈现相反的表现,气旋涡易出现在春冬季,反气旋涡更易出现在夏秋季;类B的反气旋涡轨迹在夏秋季节递减,而气旋涡轨迹分布较均匀;处于南海北部的类A由于距离台湾海峡和巴士海峡较近,处于半开放海洋区域,全年易受影响,所以气旋涡和反气旋涡的季节分布差异较小。

我们对气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹的季节分布进行分析,比较两种类型的中尺度涡轨迹后发现,南海南部气旋涡轨迹在春冬季较多,反气旋涡轨迹在夏秋季较多,南海中部和北部中尺度涡轨迹的季节分布差异较小。

### 3.4 不同类中尺度涡生成和消亡位置分布

从图6可以看出,中尺度涡轨迹的类D生成位置集中在 $4.5^{\circ}\sim 6.5^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$ ;气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹的类A和类B的生成位置表现出一致性,分别集中在台湾南部和吕宋岛西南部;越南东南部的类C轨迹的生成位置略有不同,气旋涡轨迹主要集中在 $9^{\circ}\sim 11^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 111.5^{\circ}\text{E}$ 和 $10^{\circ}\sim 11^{\circ}\text{N}$ ,  $113^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ ,反气旋涡轨迹集中在 $8.5^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 111^{\circ}\text{E}$ ,气旋涡轨迹的类E的生成位置位于婆罗洲海岸的西北部。整体上,两种中尺度涡轨迹的生成位置具有一致性。

图7为两种中尺度涡轨迹的消亡位置。从图中可以发现,两种中尺度涡轨迹的类D相对于生成位置都向西移动;类A的两种轨迹集中在两个位置,分别为 $20^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ ,  $117^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ 和海南岛的东南部;类C表现出一定的差异性,气旋涡轨迹的消亡位置主要位于 $9^{\circ}\sim 11^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ ,反气旋涡轨迹主要集中在 $5^{\circ}\sim 9^{\circ}\text{N}$ ,  $109^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ;由于轨迹密度



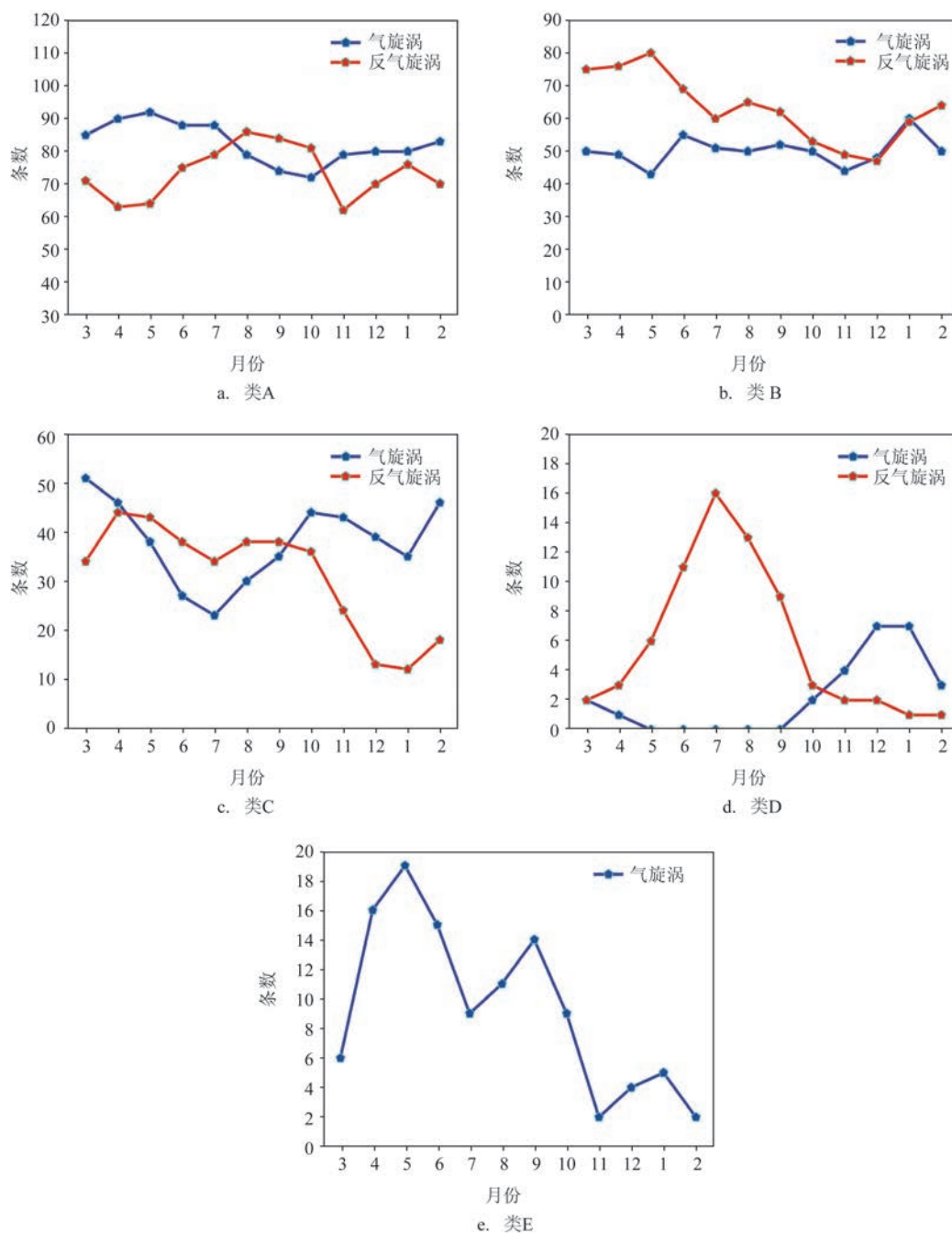


图5 不同类的中尺度涡轨迹数量

Fig.5 Numbers of mesoscale eddy trajectories in each category

聚类在划分归属类簇阶段抛弃了部分噪声轨迹,导致两种轨迹的类B的消亡位置表现出了差异性,但整体都是自东向西移动;气旋涡轨迹的类E的消亡位置主要集中于 $6^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{N}$ ,  $111^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 。整体上,两种中尺度涡轨迹的消亡位置表现出了一致性。

我们对气旋涡轨迹和反气旋涡轨迹的生成位置和消亡位置进行了分析比较,发现两者都表现出了一致性,位于南海中部的中尺度涡向西移动,南海北部即吕宋岛西北部存在着向西北移动的中尺度涡轨迹,而其余地区轨迹自东北向西南移动。

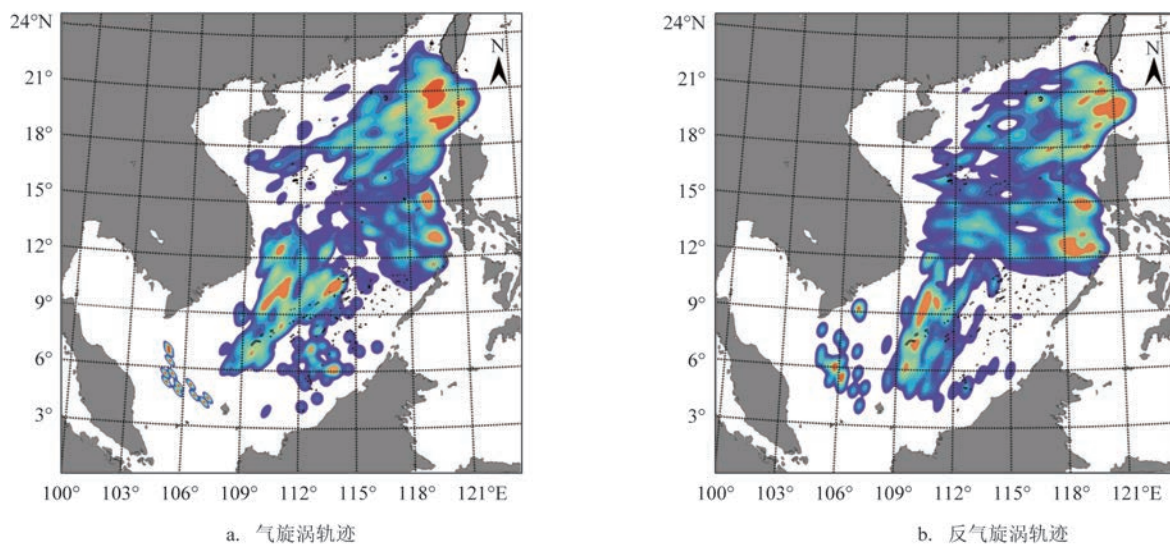


图6 中尺度涡生成位置

Fig.6 The locations of the mesoscale eddy generation

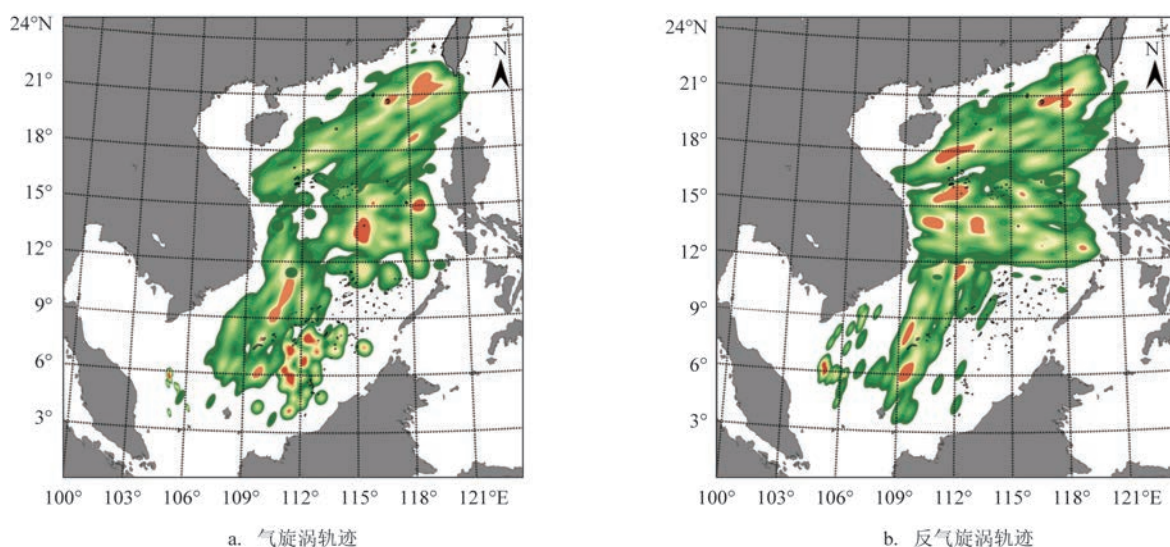


图7 中尺度涡消亡位置

Fig.7 The locations of the mesoscale eddy decay

## 4 结语

本文对南海涡旋轨迹进行了统计分析,分析结果表明 97% 的涡旋轨迹属于本文所定义的中长生命周期涡旋轨迹,相较已有研究更具有全面性。现有研究<sup>[21-23]</sup>仅从数量和季节对涡旋进行讨论,而本文将完整的涡旋轨迹作为研究重点,详细探讨了涡旋轨迹不同生命阶段的特征。

本文采用轨迹密度聚类方法对1993年1月1日—2019年12月31日南海中长生命周期中尺度涡轨迹进行分析,把气旋涡轨迹划分为5类,把反气旋涡轨迹划分为4类。在特定分布区域上,两种中尺度涡轨迹呈现出一致性,主要分布在南海北部、南海中部、越南东南部以及马来西亚东北部,但区域性特征仍存在差异,我们对差异性原因进行了进一步探讨。结论如下:



(1)南海北部涡旋轨迹数量较多,平均长度较短,南海南部呈现与北部相反的现象。

(2)两种中尺度涡轨迹在越南东南部的类C中表现出鲜明的差异性,该处中尺度涡轨迹更为复杂,进一步验证了文献[18]的分析结果。

(3)两种中尺度涡轨迹数量均在中国南海北部达到峰值,除位于越南东南部的类C外,随着纬度的增加,不同轨迹类别的平均振幅增大,而平均旋转速度和平均半径都呈现递减趋势。

(4)南海南部春夏季气旋涡较多,反气旋涡更易出现在夏秋季。但在南海北部,由于距离台湾海峡和巴士海峡较近,属于半开放区域,中尺度涡的季节分布差异较小。

(5)从生成位置和消亡位置上看,两种中尺度涡轨迹都产生于南海东部海岸附近,消亡于南海西部海岸附近,位于南海中部的中尺度涡向西移动,南海北部即吕宋岛西北部存在着向西北移动的中尺度涡轨迹。

本文采用密度轨迹聚类方法对南海中尺度涡轨迹进行分析,挖掘出该海域中尺度涡轨迹存在的显著的区域性特征,并分析比较了特定区域内特有的时空特性,为开展南海涡旋轨迹研究提供了参考。对于其在各区域的形成机制,则需要结合具体的海洋物理特性开展进一步的研究与探讨。

#### 参考文献:

- [1] 李立. 南海中尺度海洋现象研究概述[J]. 台湾海峡, 2002, 21(2): 265-274.  
LI L. A review on mesoscale oceanographical phenomena in the South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2002, 21(2): 265-274.
- [2] XIU P, CHAI F, SHI L, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993-2007[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C3): C03012.
- [3] HAN G Y, TIAN F L, MA C Y, et al. The geometry of mesoscale eddies in the South China Sea: characteristics and implications[J]. International Journal of Digital Earth, 2021, 14(4): 464-479.
- [4] 白志鹏, 韩君, 郭贤鹏, 等. 基于CORA2再分析数据的南海中尺度涡时空分布特征初步研究[J]. 海洋预报, 2020, 37(2): 73-83.  
BAI Z P, HAN J, GUO X P, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of mesoscale eddies in the South China Sea based on the CORA2 reanalysis data[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(2): 73-83.
- [5] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C6): C06018.
- [6] DONG C M, MCWILLIAMS J C, LIU Y, et al. Global heat and salt transports by eddy movement[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3294.
- [7] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. Progress in Oceanography, 2011, 91(2): 167-216.
- [8] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(15): L15606.
- [9] ZHUANG W, DU Y, WANG D X, et al. Pathways of mesoscale variability in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(5): 1055-1067.
- [10] 杜云艳, 王丽敬, 樊星, 等. 基于GIS的南海中尺度涡旋典型过程的特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(1): 1-9.  
DU Y Y, WANG L J, FAN X, et al. GIS-based analysis on temporal-spatial features of typical processes of meso-scale eddies in the South China Sea[J]. Marine Sciences, 2014, 38(1): 1-9.
- [11] 郑聪聪, 杨宇星, 王法明. 北太平洋中尺度涡时空特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 105-112.  
ZHENG C C, YANG Y X, WANG F M. Spatial-Temporal features of eddies in the North Pacific[J]. Marine Sciences, 2014, 38(10): 105-112.
- [12] 郑聪聪, 阚忠辉, 梁永春, 等. 北太平洋中尺度涡温度垂直结构区域差别分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 10-16.  
ZHENG C C, YIN Z H, LIANG Y C, et al. Analysis of the eddy vertical structure in different areas in the North Pacific[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(3): 10-16.
- [13] 徐茗, 陈戈, 彭琳. 短生命周期海洋涡旋的时空分布特征[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 94-104.  
XU M, CHEN G, PENG L. Temporal and spatial properties of short-life oceanic eddies[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 94-104.
- [14] 吴笛. 南海中尺度涡移动轨迹聚类分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.  
WU D. Trajectory clustering on mesoscale eddies in the South China Sea[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [15] YANG F, PENG H, DU Y Y, et al. A GIS study of the influences of warm ocean eddies on the intensity variations of tropical cyclones in the South China Sea[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5(10): 169.
- [16] 莫洋, 杜云艳, 吴笛, 等. 海洋涡旋移动特征的区域划分方法及应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 910-919.  
MO Y, DU Y Y, WU D, et al. Regionalization based on the propagation of ocean eddies: methods and applications[J]. Journal

- of Geo-Information Science, 2016, 18(7): 910-919.
- [17] 孙勇, 王会蒙, 靳奉祥, 等. 一种基于空间-拓扑结构相似性的复杂轨迹聚类算法[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(11): 1669-1678.
- SUN Y, WANG H M, JIN F X, et al. Complex trajectory clustering based on a spatial-topological similarity measurement [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(11): 1669-1678.
- [18] WANG H M, DU Y Y, YI J W, et al. Mining evolution patterns from complex trajectory structures—A case study of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(7): 441.
- [19] MASON E, PASCUAL A, MCWILLIAMS J C. A new sea surface height-based code for oceanic mesoscale eddy tracking[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(5): 1181-1188.
- [20] LEE J G, HAN J W, WHANG K Y. Trajectory clustering: a partition-and-group framework[C]//Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Beijing: ACM, 2007: 593-604.
- [21] 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.
- CHENG X H, QI Y Q, WANG W Q. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(4): 51-59.
- [22] 崔凤娟, 匡晓迪, 王玉. 南海中尺度涡年际变化特征及动力机制分析[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 508-516.
- CUI F J, KUANG X D, WANG Y. The analysis on interannual variation characteristics of eddy activities and its dynamic mechanism in the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 508-516.
- [23] 王文杰, 刘宇迪, 朱金双, 等. 南海中尺度涡强度的季节和年际变化分析[J]. 海洋科学, 2016, 40(12): 94-106.
- WANG W J, LIU Y D, ZHU J S, et al. Seasonal and interannual variability of mesoscale eddy intensity in the South China Sea[J]. Marine Sciences, 2016, 40(12): 94-106.

## Clustering-based mining of the characteristics of spatio-temporal trajectory: a case study of mesoscale eddy trajectory

DU Yanling<sup>1</sup>, LIU Jiangyong<sup>1</sup>, HE Qi<sup>1</sup>, SU Cheng<sup>2</sup>, HUANG Dongmei<sup>1,3</sup>

(1. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. East China Sea Forecast Center, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200136, China; 3. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China )

**Abstract:** We analyze the trajectory of medium and long life cycle eddy in the South China Sea using the density clustering method, and compare the track, spatial and temporal characteristics, spatial distribution of generation and decay of the mesoscale eddies belonging to different clusters. The results show that the amplitude of different trajectory clusters increases with latitude, while the rotational speed and radius shows a decrease trend. In addition, the trajectory of anticyclonic eddy changes faster and is more susceptible to geographical location. In the southern South China Sea, there are more cyclonic eddies in spring and winter, while anticyclonic eddies are more likely to occur in summer and autumn. The mesoscale eddies move westward in the middle of the South China Sea, and there are eddies moving northwestward in the northern South China Sea. In addition, the trajectories of mesoscale eddies show more active and complex characteristics to the southeast of Vietnam.

**Key words:** mesoscale eddies; medium and long life cycle; trajectory; clustering