

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

白志鹏, 韩君, 郭贤鹏, 朱科澜

(中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094)

摘要: 利用南海 20 a 逐日海流再分析资料对南海海域中尺度涡进行时空特征分析。经过数据处理、涡旋识别、统计分析等方法,对南海海域中尺度涡空间分布、时间分布、生命周期、空间尺度、移动路径、移动速度、影响频率等特征进行分析,对南海中尺度涡进行全面详细的解读。研究发现:涡旋出现位置跟南海 200 m 等深线较一致。大部分涡旋周期都集中在 30 d 以内,直径大都在 100~300 km,主要向西南方向移动,速率在 15~20 cm/s 的涡旋比例最高。反气旋式中尺度涡影响频率要大于气旋式中尺度涡的影响频率,主要影响区域大致在 200 m 等深线以内海域。

关键词: 中尺度涡,南海,再分析资料

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)02-0073-11

1 引言

南海作为西太平洋最大的半封闭边缘海,其环流结构具有复杂的结构特征,并呈现多涡的特点。中尺度涡是指时间尺度在数天至数月之间、空间尺度在数十到数百公里之间的涡,其生成机制有多种,例如洋流的蛇行、海面风的作用、海面加热和冷却、地形作用、小尺度的混合和波动等。中尺度涡可以传输热能和动能并可以和平均流场相互作用。

随着观测手段日益多样化,中尺度涡现象的研究越来越活跃,有很多学者^[1-6]利用现场实测数据和遥感对数据南海的中尺度涡进行了分析。但实测数据只局限于少量几个涡旋进行分析,遥感数据由于资料时间分辨率的限制无法发现寿命小于 3 d 的涡旋且只能得到基于海面高度的结论。本文利用逐日海流再分析资料,对中尺度涡进行识别统计,比较全面直观的分析了南海中尺度涡的时空分布特征。

2 资料和处理方法

2.1 资料

本文利用国家海洋信息中心制作的逐日海流再分析资料(China Ocean ReAnalysis 2, CORA2)计算识别南海中尺度涡。时间范围为 1993 年 1 月—2012 年 12 月,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ 。该数据发布之前经过了严格的检验评估,利用大量内部资料和国内外相关产品对该数据进行检验。通过与实测海洋资料对比、与常规海洋水文统计分析产品对比和与国外海洋再分析产品的比对检验 3 个模块,细致分析给出了海洋再分析产品在温度、盐度、海流和海面高度的检验结果和误差统计。温度盐度均方根误差分别为 0.70°C 和 0.09 psu ,强流区(流速 $> 50\text{ cm/s}$)流速平均误差小于 25 cm/s ,流向平均误差小于 30° 。其中还针对中尺度现象进行了单独检验,结果表明该数据在南海、东海和

台湾周边海域能够很好的再现海洋涡旋和温度锋结构和变化过程。具体情况在文献中有详细论述。

2.2 资料处理方法

本文参考前人的研究结果^[7-8],经过总结分析并结合南海的实际特点,采用基于海流的中尺度涡识别算法,主要步骤如下:

(1) 涡旋中心的确定

满足以下4个条件的格点被判定为涡旋的中心:①涡旋中心局部区域内海流流速大小为极小值;②沿涡旋中心的東西向,速度北分量在中心点两侧的数值符号相反,大小随距中心点的距离增加而增加;③沿涡旋中心的南北向,速度东分量在中心点两侧的数值符号相反,大小随距中心点的距离增加而增加;④围绕涡旋中心,涡旋速度矢量变化的旋转性一致,即两个相邻的速度矢量方向必须位于同一个或相邻两个象限内;

(2)确定涡旋中心后,求此点周围的流函数,判断最外围准闭合的流线为该涡旋的边界;

(3)边界点到涡旋中心的平均距离为涡旋的半径;

(4)在 $t+1$ 时刻寻找与 t 时刻距离最近(若距离超过一个纬距,即认为不是同一涡旋)的性质相同的涡旋,涡旋生命期第一个(最后一个)记录为涡旋的产生(消亡)时间^[9]。

3 特征统计分析

3.1 空间分布

南海在1993—2012年20 a间共出现涡旋2 349个,其中顺时针涡旋1 287个,逆时针涡旋1 062个。图1为南海中尺度涡出现位置的统计,红色和蓝色分别表示顺时针涡和逆时针涡的出现位置。由图可以看出,涡旋出现位置主要跟南海200 m等深线较一致,但南海东部、南部涡旋出现较少。顺时针涡主要沿南海200 m等深线分布,南海中部较少,苏禄海有相当数量的顺时针涡出现。逆时针涡在南海中北部较多,尤其在北部海盆比较有数量优势。

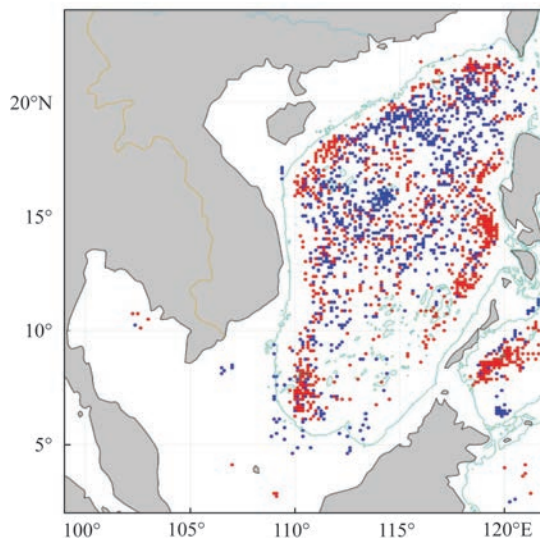


图1 1993—2012年南海中尺度涡出现位置
(红:顺时针涡,蓝:逆时针涡,青色线:200 m等深线)

3.2 时间分布

图2为南海中尺度涡的年分布统计,20 a间南海平均每年出现117个涡旋,其中顺时针涡64个,逆时针涡53个。从每年的统计分布看,1997年、1998年、2008年、2009年、2010年和2012年出现的涡旋较多,2008年以前顺时针涡多于逆时针涡,自2009年开始逆时针涡多于顺时针涡。

图3为南海中尺度涡的月分布统计,从月变化图可看出,中尺度涡变化呈现春夏多、秋冬少的特点。12月出现涡旋最少,随后开始增多,4月增到最多,之后基本维持,9月开始减少。基本上是顺时针涡旋多于逆时针涡旋。

3.3 生命周期

图4给出了南海中尺度涡的生命周期统计结果,由图可以看出,生命周期最长的为138 d,位于苏禄海内的一个顺指针涡旋;周期最短的为6 d。大部分涡旋周期都集中30 d以内,5~10 d周期的涡旋最多,占总数的57.7%;周期在30 d以内的涡旋占总数的91.27%。周期在25~30 d和65~70 d的涡旋逆时针涡多于顺时针涡,其余周期均为顺指针涡多;周期在70 d以上的涡只有顺时针涡。

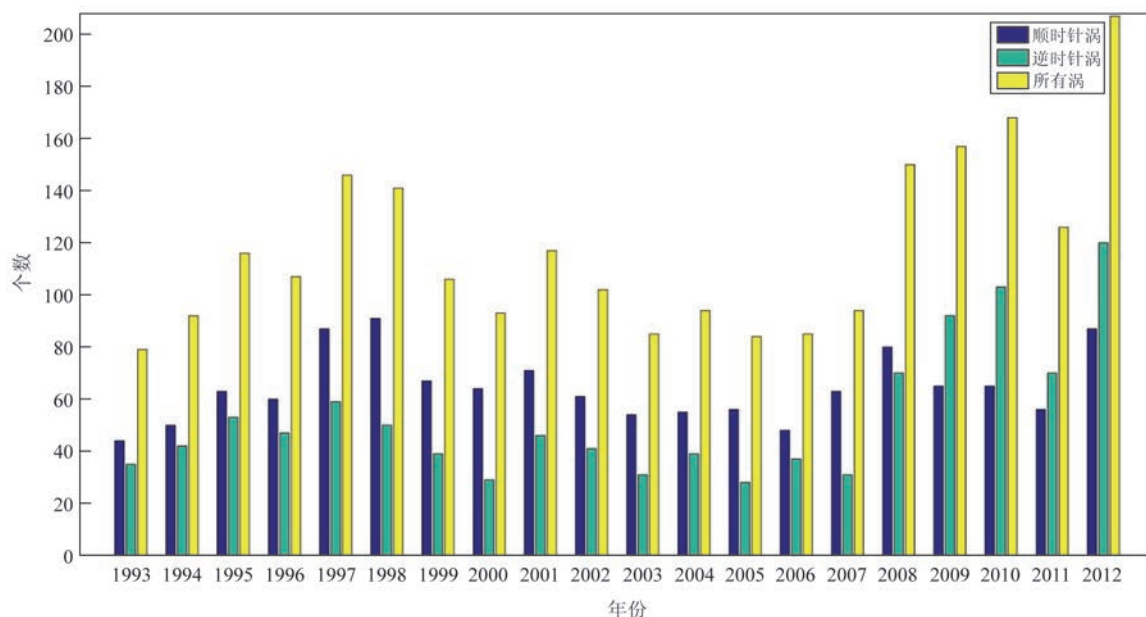


图2 南海中尺度涡个数年统计分布

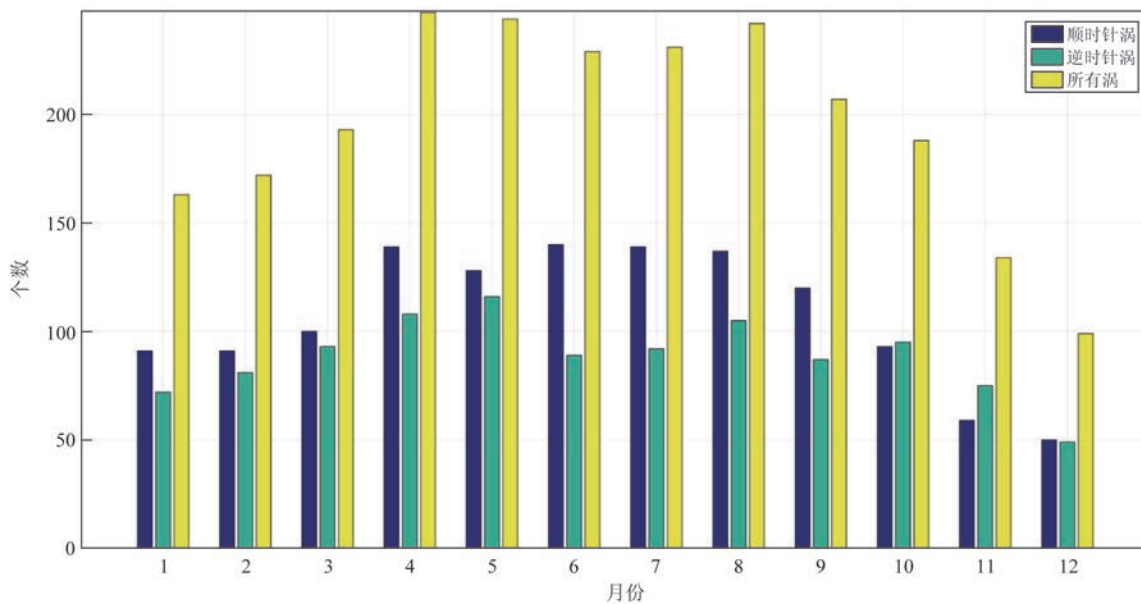


图3 南海中尺度涡个数月统计分布

3.4 空间尺度

本文在计算中尺度涡半径时,定义涡旋每个时次的半径为其边缘到中心的平均距离,每个涡旋的直径为其所有时次半径的平均值的2倍^[10-12]。由图5可看出,直径150~200 km之间的涡旋最多,占总

数的26.9%,以此区间为中心,随着直径的增大和减小,涡旋数量都逐渐减小;直径在100~300 km的涡旋占总数的79.35%。

3.5 移动路径

图6、7分别为南海中尺度涡移动路径和生成消

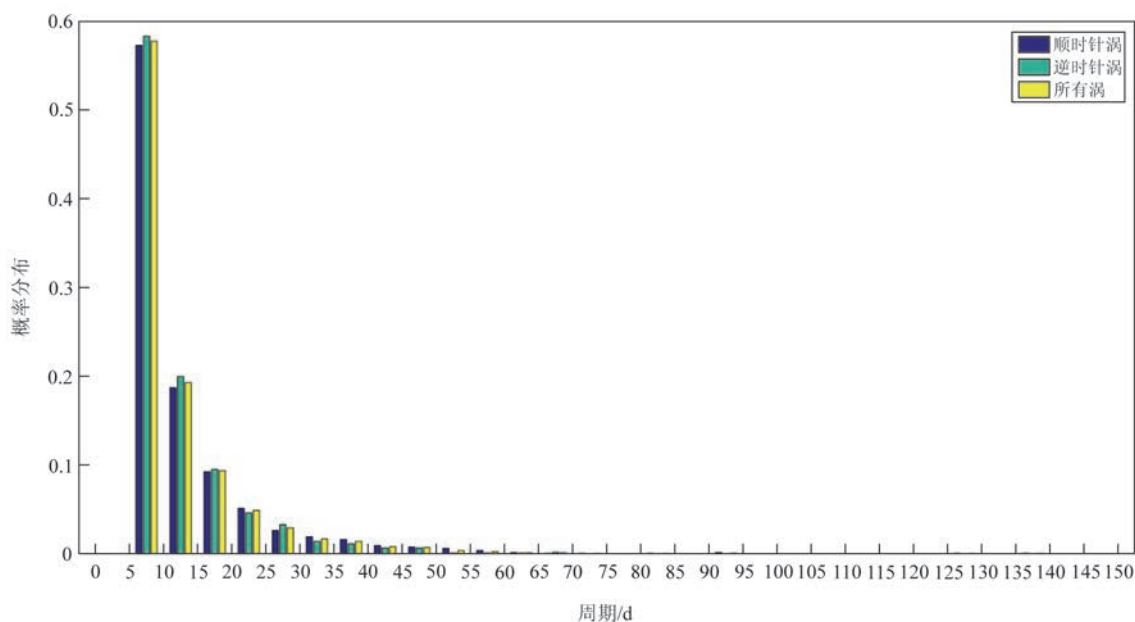


图4 南海中尺度涡周期概率分布

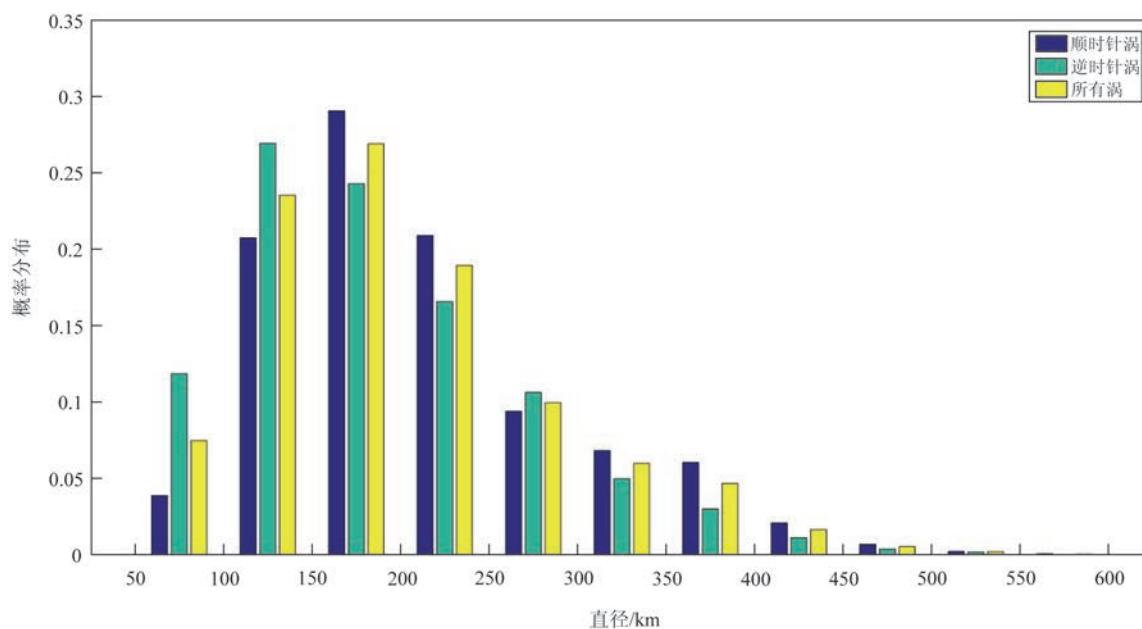


图5 南海中尺度涡直径概率分布

亡的位置,由图可以看出,移动路径比较乱,为了更清楚的了解南海中尺度涡的移动路径,我们进一步把移动路径按东北、西北、西南和东南4个方向分别统计。图8为中尺度涡4个方向的统计结果。可以看出,总体上涡旋东移路径少于西移路径,各占总数的31.49%和68.51%,东移路径顺时针涡多于逆

时针涡,西移路径,逆时针涡多于顺时针涡;南移路径略多于北移路径,各占总数52.66%和47.34%;东南路径最少,西南路径最多,表明涡旋主要向西南方向移动。逆时针涡西南路径最多,占总数的41.31%,西北路径次之,占总数的25.84%,东南路径又次之,占总数的17.58%,东北路径最少,占总

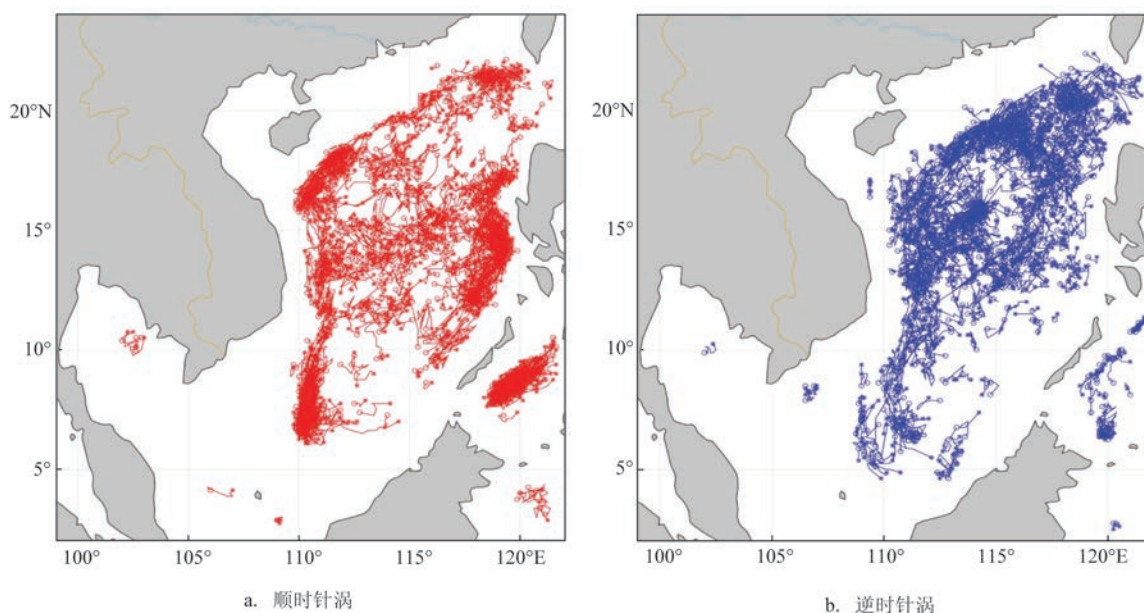


图6 南海中尺度涡移动路径(星号:生成位置;圆:消亡位置)

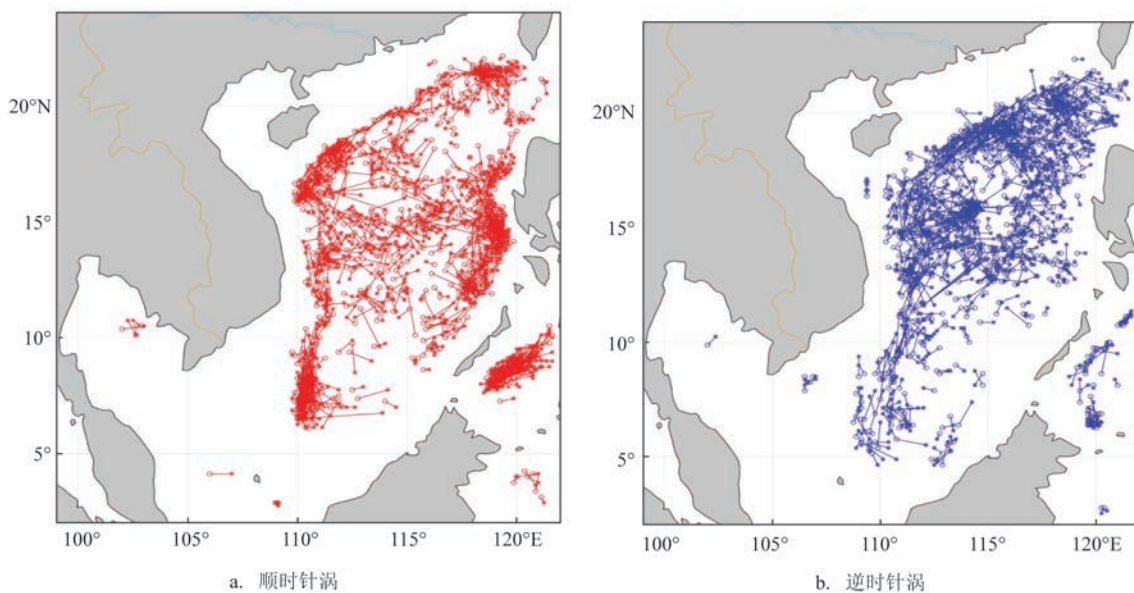


图7 南海中尺度涡生成和消亡位置(星号:生成位置;圆:消亡位置)

15.27%。顺时针涡西南、西北路径最多,各占总数的38.56%和31.07%,东北路径次之,占总数21.37%,东南路径最少,占总数8.99%。

3.6 移动速度

我们把涡旋在它的生命周期中的平均速率作

为该涡旋的平均移动速率^[13-15],在统计的20 a间,最大移动速率为85.80 cm/s,为逆时针涡,位于吕宋海峡以西的海域,也就是黑潮入侵南海的位置。最小移动速率几乎为0,即有原地不动的涡旋存在。如图9所示,速率在15~20 cm/s的涡旋最多,占总数的近20%。顺时针涡速率在5~45 cm/s的涡旋占总

数的90.6%,逆时针涡速率在5~45 cm/s的涡旋占总数的92.8%。

前面提到南海中尺度涡西向移动占多数,下面计算了涡旋的纬向移动速度与纬度的关系,如图11所示,顺时针涡有3个密集带,分别在7°~10°N, 11°~17°N, 19°~22°N。逆时针涡以12.5°N为分界线,北边较密集,南边较稀疏。

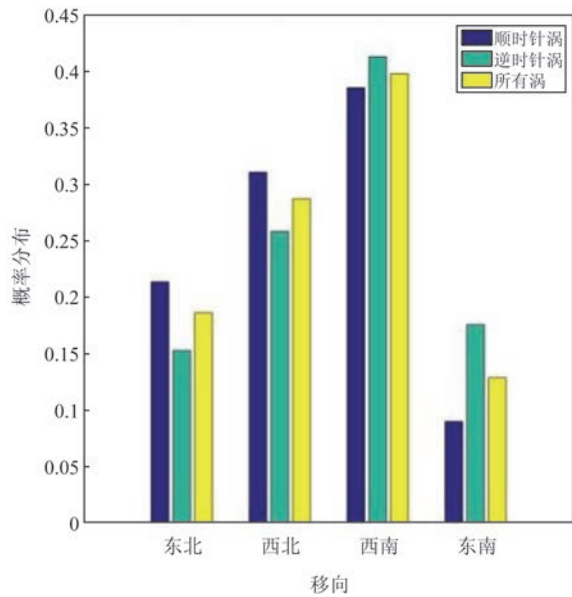


图8 南海中尺度涡移动方向统计

3.7 影响频率

若某点被一个中尺度涡的外缘线包含,则该点受到了中尺度涡的影响,我们将该点受中尺度涡影响的天数除以统计的全部天数,此比值称为该点受中尺度涡的影响频率^[16-19]。

由南海中尺度涡多年平均影响频率图(见图12)可以看出,顺时针中尺度涡影响频率要大于逆时针中尺度涡的影响频率,主要影响区域与地形分布比较一致,大致在200 m等深线以内海域。其中有两个极大值带状区域和3个极大值区。第一个带状海域在吕宋海峡以西至海南岛东南海域的带状海域,影响频率在20%左右。第二个带状海域在13°~15°N海域,影响频率也在20%左右。第一个极大值区域在菲律宾吕宋岛西南海域,影响频率在35%左右。第二极大值区域在中南半岛东南海域,也是面积最大的海域,中心最大影响频率接近40%。第三极大值区在苏禄海,中心海域影响频率在40%以上,另外在泰国湾还存在一个5%左右的极大值区域。逆时针中尺度涡影响频率在南海整体呈东北西南走向,有两个极大值区,第一个在吕宋海峡以西海域,影响频率在25%左右,第二极大值区域在中南半岛以东海域,影响频率在20%左右。在南海南部、苏禄海也有一些影响频率在10%

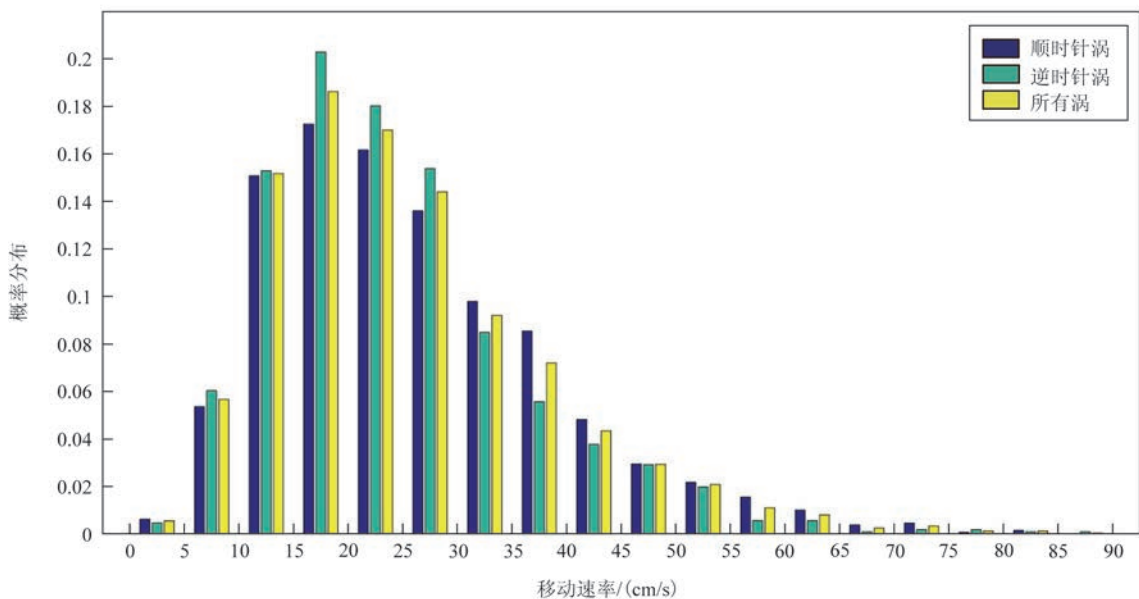


图9 南海中尺度涡移动速率概率分布

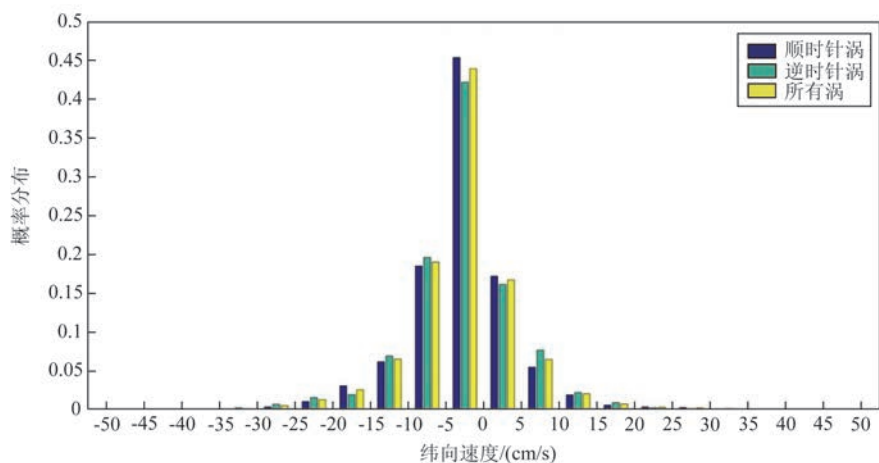


图10 南海中尺度涡纬向速度统计

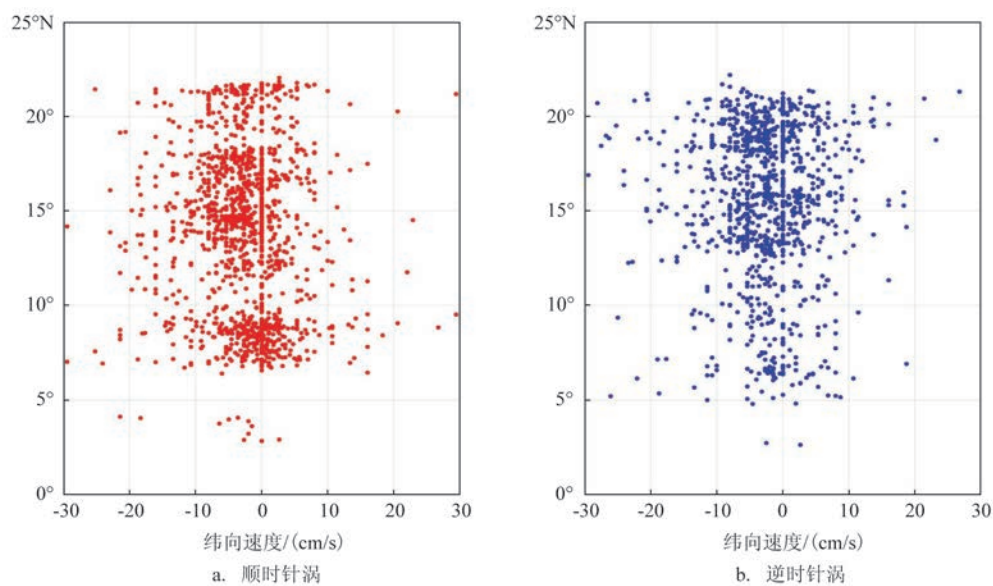


图11 南海中尺度涡纬向速度与纬度关系

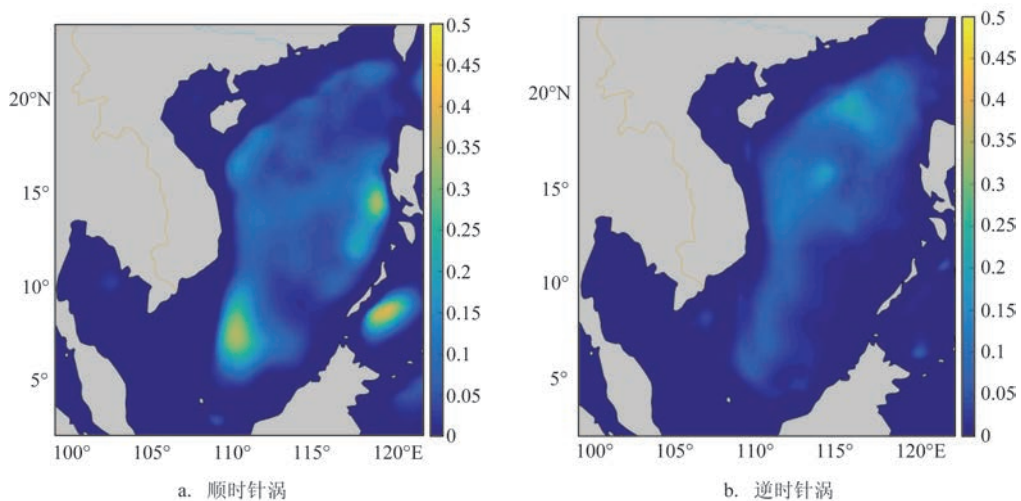


图12 南海顺时针中尺度涡多年平均影响频率

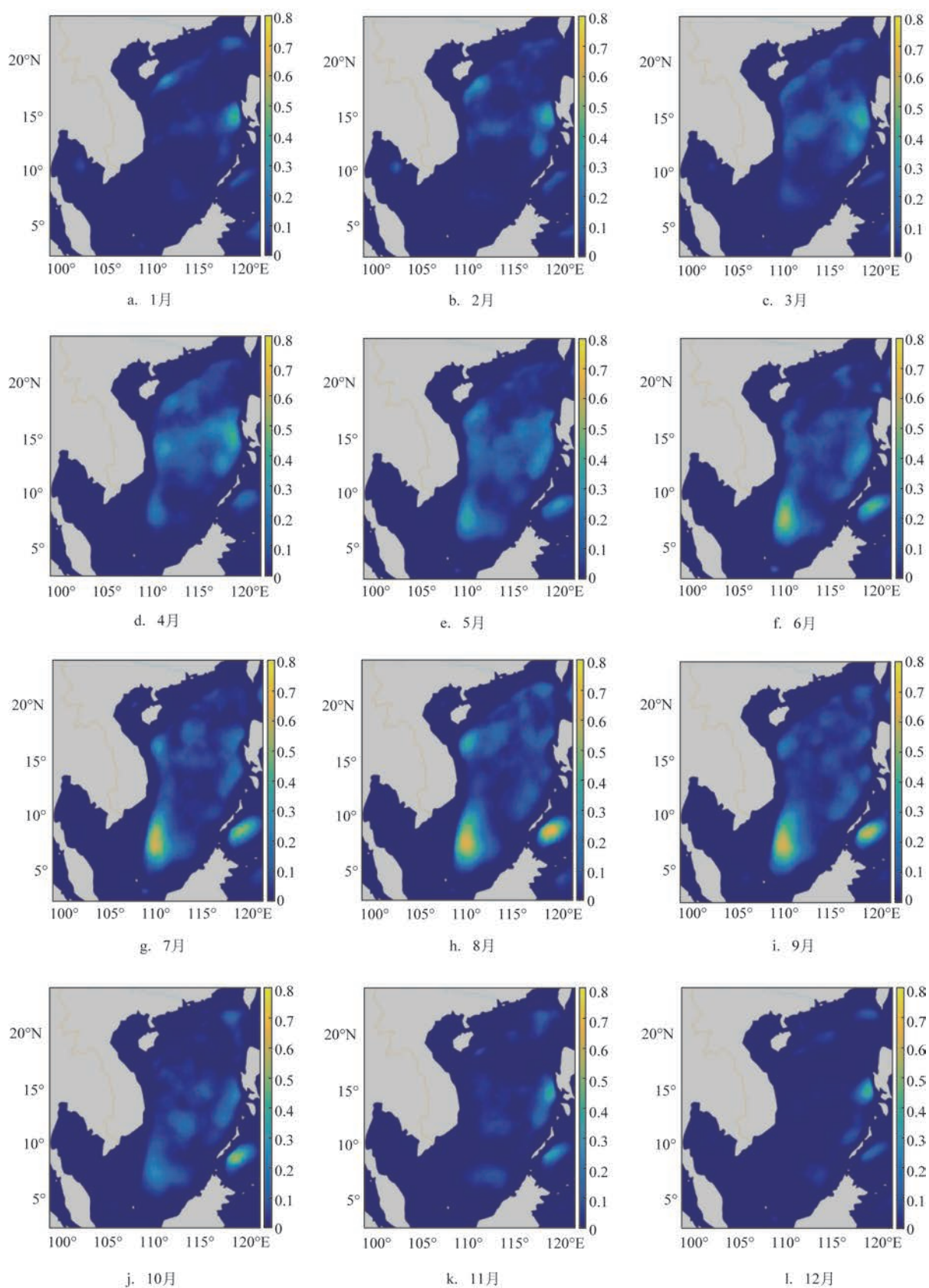


图13 1—12月份南海顺时针中尺度涡影响频率

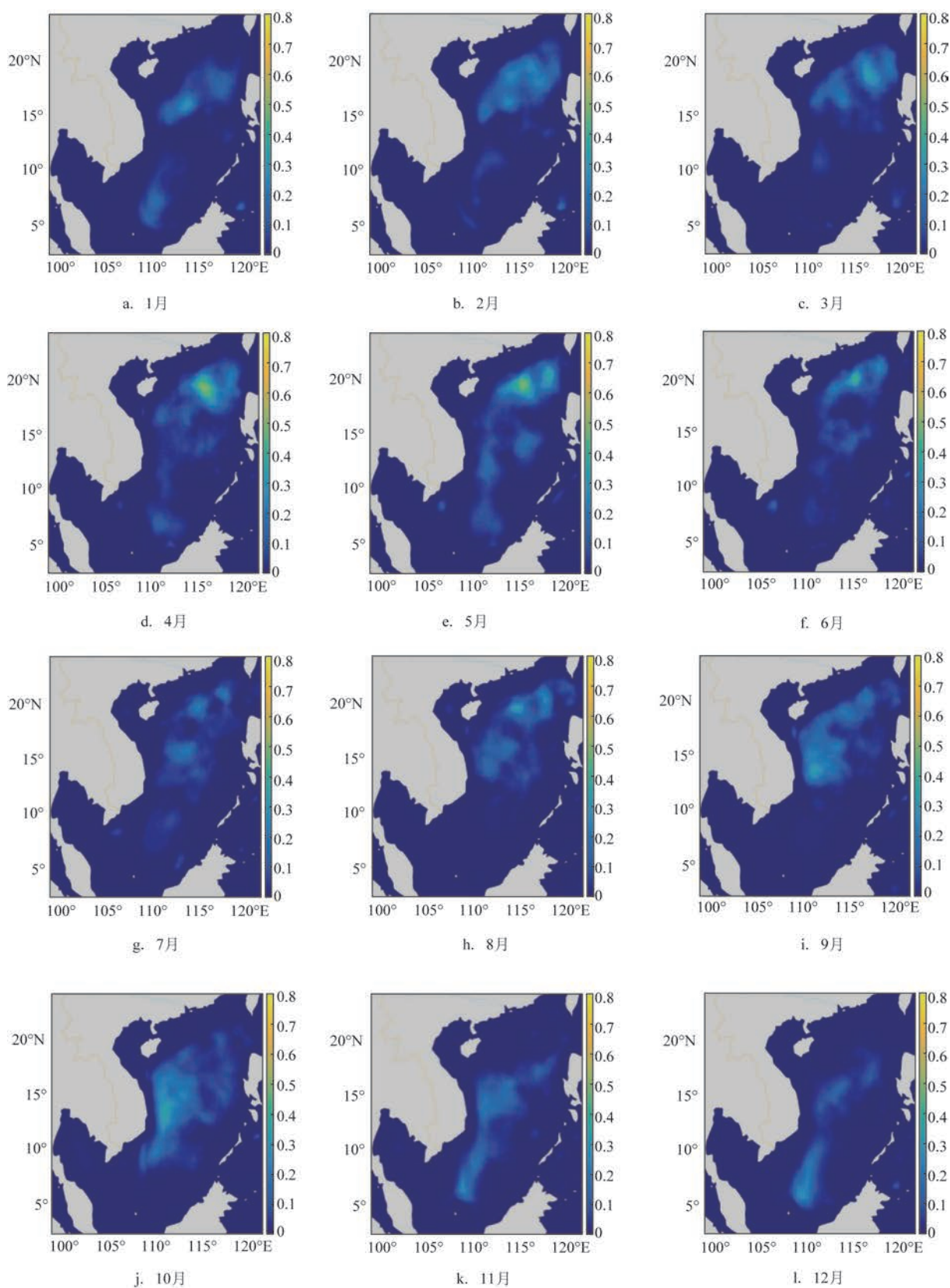


图 14 1—12月份南海逆时针中尺度涡影响频率

左右的海域。

图13为1—12月顺时针中尺度涡影响频率,有以下特点:

(1)吕宋海峡以西海域从8月份出现一个30%左右的极大值区域,9、10月份维持,11、12月减弱,1月又有所加强,2—7月减弱至15%左右;(2)海南岛东南海域1月份出现一极大值区域,2月份增强,面积也有所加大,3月份减弱,4月份向东北方向移动,5月份又向西南方向移动,范围也有所增大,6月份减弱,7、8月份大幅加强,8月份最强可达50%左右,9月份减弱,10—12月逐渐减弱趋于消失;(3)菲律宾吕宋岛西南海域11月份开始出现50%左右的极大值海域,12月一次年1月份逐渐向北移动,强度略有加强,2—4月份范围和强度都逐渐增大,4月最强接近60%,5月份强度减弱,6月在减弱的同时位置逐渐向南移动,7—8月份继续减弱,8月最弱在15%左右,9—10月份逐渐增强;(4)南海南部在4月份开始出现极大值区域,影响频率在20%左右,5—9月份强度和范围逐渐加强,9月影响频率最大可达60%以上,10—12月份减弱,且向东移动,1—2月份向西移回,强度最弱,只有5%左右,3—4月份又逐渐增强;(5)苏禄海存在一个反逆时针中尺度涡的极大值区,3月份最弱,在5%左右,4月份开始逐渐加强,8月份最强,区域也最大可达60%以上,9—12月份开始逐渐减弱,1—3月份维持5%的水平;(6)在水深比较浅的泰国湾也有比较弱的反逆时针中尺度涡存在,主要存在于12月一次年2月份的冬季,影响频率在2月最大,可达20%左右^[20-22]。

图14为1—12月逆时针中尺度涡影响频率,有以下特点^[23,24]:

(1)南海南部海域11月一次年1月份3个月有一极大值区,12月份最大,可达30%以上,其他月份影响频率都不大;(2)吕宋海峡西南海域在3月份出现极大值区,4、5月份逐渐增大,且向西北方向移动,最大可达60%以上,6—10月份开始减弱,后趋于消失;(3)南海中部海域在7月份出现极大值区,8月份开始增强,且向西南方向移动,9—10月份强度和范围都开始增大,10月份最强,影响频率可达45%以上,12月份最弱,影响频率在15%左右,1月份有所增强,后向东北方向移动,3月份与吕宋海峡以西的大值区域连在一起。

4 结论

本文利用国家海洋信息中心制作的西北太平洋及南海海洋再分析海流资料,对南海1993—2012年20a间的中尺度涡进行了识别,并就识别结果进行了统计分析,主要得出以下结论:

(1)共出现涡旋2349个,顺时针涡1287个,逆时针涡1062个,涡旋出现位置主要跟南海200m等深线较一致;

(2)平均每年出现117个涡旋,顺时针涡64个,逆时针涡53个。生命周期最长138d,最短6d,大部分涡旋周期都集中30d以内,涡旋占总数的91.27%;

(3)大部分涡旋直径在100~300km的,占涡旋占总数的79.35%,涡旋主要向西南方向移动;

(4)涡旋移动速率最大85.80cm/s,为逆时针涡,最小移动速率几乎为0。速率在15~20cm/s的涡旋最多,占总数的近20%。顺时针涡涡旋移动随纬度分布有3个密集带,分别在7°~10°N,11°~17°N,19°~22°N。逆时针涡以12.5°N为分界线,北边较密集,南边较稀疏;

(5)顺时针中尺度涡影响频率要大于逆时针中尺度涡的影响频,主要影响区域与地形分布比较一致,大致在200m等深线以内海域。其中有两个极大值带状区域和3个极大值区。逆时针中尺度涡影响频率在南海整体呈东北西南走向,有两个极大值区。

总的来说,本文利用再分析海流资料初步分析了南海中尺度涡的一些特征,但由于数据来源不同,方法及参数选择上的不同,与从卫星资料分析得到的一些结果有所差异。在以后的工作中我们要重点研究导致差异的原因,在此基础上对南海中尺度涡变化的机理、以及与相关物理过程的关系再做进一步讨论。

参考文献:

- [1] 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,2007,29(3):14-22.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 高理. 黑潮延伸区与南海的海平面异常及中尺度涡的统计分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [6] 郑聪聪. 北太平洋中尺度涡现象分析[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [7] Nencioli F, Dong C M, Dickey T, et al. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the southern California bight[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(3): 564-579.
- [8] Sadarjoen I A, Post F H. Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry[J]. Computers & Graphics, 2000, 24(3): 333-341.
- [9] 张凯峰, 邓婉月, 周成钧, 等. ASCAT 与 HY-2A 风场产品在南海的精度评估[J]. 热带气象学报, 2017, 33(5): 774-781.
- [10] 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.
- [11] 李燕初, 蔡文理, 李立, 等. 南海东北部海域中尺度涡的季节和年际变化[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 61-70.
- [12] 郭景松, 袁业立, 熊学军, 等. 吕宋海峡两侧中尺度涡统计[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(2): 139-148.
- [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.
- [14] 袁东亮, 李锐祥. 中尺度涡旋影响吕宋海峡黑潮变异的动力机制[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(4): 1-9.
- [15] 罗哲贤. 台风环流区域内中尺度涡量传播特征的研究[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 396-405.
- [16] 刘广平, 胡建宇. 南海中尺度涡旋对热带气旋的响应: 个例研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28(3): 308-315.
- [17] 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.
- [18] 匡晓迪, 方长芳, 李竞时, 等. 基于概率估算的南海中尺度涡强度定级方法[J]. 海洋预报, 2018, 35(1): 60-63.
- [19] 李惠玲, 郭金运, 沈毅, 等. 基于卫星测高的南海中尺度涡统计特征研究[J]. 海洋测绘, 2016, 36(4): 27-30.
- [20] 曾伟强, 张书文, 马永贵, 等. 1993 - 2017 年南海中尺度涡特征分析[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(5): 96-106.
- [21] 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 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[J]. 台湾海峡, 2012, 31(1): 105-113.
- [22] 黄亚文, 华丽娟, 钟霖浩, 等. 南海中尺度涡旋的统计特征[J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(1): 97-106.
- [23] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(2): 133-158.
- [24] 江伟, 王静, 邢博. 卫星和模式数据分析的南海中尺度涡的统计特征[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 22-27.

Spatial and temporal distribution characteristics of mesoscale eddies in the South China Sea based on the CORA2 reanalysis data

BAI Zhi-peng, HAN Jun, GUO Xian-peng, ZHU Ke-lan

(NO.61741 Army of PLA, Beijing 100094 China)

Abstract: In this paper, the spatial and temporal distribution characteristics of mesoscale eddies in the South China Sea are analyzed using the 20-years daily current reanalysis data. Based on methodologies including data processing, eddy identification and statistical analysis, the spatial and temporal distribution, life cycle, spatial scale, propagating path and speed, influence frequency of mesoscale eddies in the South China Sea are revealed. The results show that the eddies are mostly observed near the 200 m isobath of the South China Sea. The life cycle of most eddies is less than 30 days with a diameters of 100~300 km. The majority of eddies propagate southwestward with a speed of 15~20 cm/s. The anti-cyclonic mesoscale eddies influence frequency is more significant than that of the cyclonic mesoscale eddies, and mainly affect the area shallower than 200 m in the South China Sea.

Key words: mesoscale eddy; the South China Sea; reanalysis data