

南海中尺度涡强度的季节和年际变化分析

王文杰^{1,2}, 刘宇迪¹, 朱金双¹, 沈俊³

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 93968 部队气象台, 新疆 乌鲁木齐 830075; 3. 94926 部队气象台, 江苏 无锡 214008)

摘要: 为了研究南海中尺度涡强度的季节和年际变化规律, 利用 Matlab 提取 50 a(1958~2007 年)简单海洋资料同化(Simple Ocean Data Assimilation, SODA)月平均数据集中流场和海表面高度场数据, 应用一个涡旋自动探测算法对南海中尺度涡初始生成位置进行分析, 并分析了海表面高度异常均方根值的季节变化和年际变化。结果表明: 50 a 南海中尺度涡主要分布在吕宋岛西北海域、吕宋岛西南海域和越南以东广大海域, 秋、冬季中尺度涡能量较高, 春季中尺度涡最弱, 中尺度涡强度高值区年际变化明显。从季节变化上看, 海面高度异常均方根春、夏季最小, 秋冬季最大; 从年际变化上看, 与同时期 Nino3 指数有显著负相关, 周期大约为 3 a。

关键词: 简单海洋资料同化(Simple Ocean Data Assimilation, SODA); 南海; 中尺度涡; 季节和年际变化
中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2016)12-0094-13
doi: 10.11759/hyqx20130122005

20 世纪 70 年代多次的大洋实验揭示了长期以来被认为是弱流区的广大中大洋区域, 几乎都存在着流速较强(量级为 10 cm/s)的中尺度涡^[1]。作为海洋中尺度现象的一个重要部分, 海洋中尺度涡既不同于潮汐、波浪等短周期现象, 也有别于洋流等大尺度现象和周年、年际、年代际变化等长周期过程^[2], 时间尺度在数天至数月之间、空间尺度在数十到数百公里, 其动能在大多数海域皆高出平均动能一个量级^[3], 在海洋动力学以及热、盐、水团、动量和其他化学物质输送中起着重要的作用, 对海域环流结构、温盐分布、大面积水团分布和海洋生物有着很大影响, 可对水面船只活动、水下潜艇活动和海军兵器产生重要影响, 是军事海洋学研究和海洋战场建设必须考虑的问题。

南海^[4]约位于 2.5°S~23.5°N, 99.2°~121.8°E, 四周几乎被大陆、岛屿包围, 外形似一菱形, 长轴呈东北-西南向, 长约 3 100 km, 短轴呈西北-东南向, 宽约 1 200 km, 海域面积约 3 500 000 km², 包含两大海湾——北部湾和泰国湾。南海通过中国台湾海峡与东海相连, 通过较深的吕宋海峡(巴士海峡与巴林塘海峡合称)与西太平洋相通, 通过海槛深度约 400 m 的民都洛海峡及巴拉巴克海峡与苏禄海相通, 通过很浅的加里曼丹海峡与爪哇海相连, 通过马六甲海峡与印度洋相连。南海平均水深 1 212 m, 最大深度 5 559 m, 半封闭海盆内东西两侧地形陡峭, 西北和

西南部存在宽广的大陆架, 从外向中央, 依次分布着大陆架、岛架、大陆坡、岛坡和深水海盆, 200 m 水深等值线基本位于东北-西南走向的菱形海盆的长轴上, 中部和东部深度超过 4 000 m, 之间散布着众多的岛礁、浅滩及暗沙, 尤其是在南部海区。

南海海域港口资源、生物资源、石油资源丰富, 有着重要的社会效益, 同时又由于地处印度洋和太平洋连接处, 是国际交通线上的重要关口。正因如此, 近年来, 南海中尺度涡成为海洋科学家关注和研究的焦点。

由于地处印度季风和亚洲季风的中间地带^[5], 这一半封闭深水边缘海盆区域, 常年受季风系统控制^[6]。受南海海底地形和侧边界条件影响及季风环流的驱动, 南海海域中尺度涡生成、成熟、消亡活动明显, 涡多生成于越南以东海域、吕宋岛西北海域、中国台湾西南海域, 并且涡旋的季节变化、年际变化明显^[7], 水文资料和高度计资料也都证实了南海的多涡结构。

收稿日期: 2015-11-22; 修回日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175089)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41175089]

作者简介: 王文杰(1987-), 男, 陕西汉中, 硕士, 工程师, 主要从事物理海洋学研究, E-mail: wwj10604031987@126.com; 刘宇迪(1971-), 通信作者, 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博导, 主要从事数值模式和微波资料反演研究, E-mail: udy.liu@pku.edu.cn

目前,已有的关于南海中尺度涡的研究,多是针对某一重点区域,使用几年或十几年的水文观测抑或高度计观测资料,例如,王霄等^[8-9]利用1974年4月13~19日的温盐资料,描述了中心位于中国台湾岛西南侧119°E、21°N处,水平尺度大约为200 km的一个反气旋涡,他们认为该反气旋涡与黑潮的入侵相关;在吕宋岛西北部,许建平^[10]发现有一个气旋式冷涡(吕宋冷涡);杨海军等^[11]通过Levitus资料分析发现一中心位于13.5°N、111°E,100 m层中心水温低于17°C的冷涡(越南冷涡)。随着海洋卫星遥感技术不断发展,大面积、准同步的海表面高度资料,使得在连续时间步长上对涡旋探测、追踪成为可能。如Hwang等^[12]采用7年T/P月平均资料共辨认出218个中尺度涡,其中冷涡94个,暖涡124个;王桂华^[13]利用1993~2000年融合卫星高度计资料对南海海域中尺度涡进行判别,得到58个反气旋涡,28个气旋涡。对南海海域进行过长时间序列的气候态统计特征分析目前研究中得到的结论较少,另外,泰国湾、北部湾、南海南部等海域目前关注较少。本文试图利用SODA资料,采用气候统计方法对整个南海及上述关注较少海域中尺度涡强度的季节和年际变化特征进行分析探讨。得到的这些统计特征,一方面对于海域内中尺度涡的分布特征和演变规律提供更多的理论依据;另一方面在此基础上,分析涡旋场分布对海洋要素的影响,为潜艇的保障提供技术参考。

1 资料和方法

1.1 SODA 资料

本文所用资料来源于美国马里兰大学和美国德州农工大学共同研制开发的全球简单海洋同化分析系统SODA(Simple Ocean Data Assimilation)海洋数据集^[14]。随着同化系统的不断开发与升级,陆续有多种SODA数据集版本问世。本文研究中使用SODA-2.1.6版本的1958~2007年月平均数据资料,获取网址为: http://dsrs.atmos.umd.edu/DATA/soda_2.1.6/。数据集包含的变量分别为温度(temp)、盐度(salt)、纬向海流速度(u)、径向海流速度(v)、纬向海表风应力(τ_{ux})、径向海表风应力(τ_{uy})和海平面高度(ssh)共7个。资料水平覆盖范围:0.25°~359.75°E,75.25°S~89.25°N,水平方向上的分辨率为0.5°×0.5°,因此在经、纬向上的格点数分别为720个和330个。垂直方向上的分辨率为不等间距,从上向下共40层,深度(单位:m)分别为5,15,25,35,46,57,70,82,96,

112,129,148,171,197,229,268,317,381,465,579,729,918,1139,1378,1625,1875,2125,2375,2624,2874,3124,3374,3624,3874,4124,4374,4624,4874,5124,5374。资料存储形式为每个月1个文件,每个文件包含本月7个变量的月平均信息,共600个文件。每个文件的容量是147 MB,51a资料的总计容量为88.23 GB。资料存储文件的命名规则:(系统名)_(版本号)_(年月),如SODA_2.1.6_195801这个文件就表示SODA同化系统2.1.6版本的1958年1月的7个变量月平均资料。数据以NetCDF格式存储,可以用GrADS软件或者安装有NetCDF插件的Matlab直接读取,NetCDF插件可在<http://mexcdf.sourceforge.net>获取。本文研究中,使用Matlab提取1958年1月至2007年12月水平覆盖范围在98.75°~122.25°E,1.25°S~24.25°N的海表面高度和海流速度数据。

1.2 探测中尺度涡方法

在过去的20多年中,一些研究^[15]指出涡旋的速度场特征主要有:局地速度的最小值接近涡旋中心,切向速度和远离中心的距离呈正的线性关系,且在达到最大值之后又逐渐减小。基于涡旋速度场的这一特征,本文中尺度涡探测采用Nencioli等^[16]提出的一种基于几何矢量的涡旋自动探测、追踪算法。算法应用4个限制条件来确定涡旋中心位置:(1)东西方向上,速度分量 v 在穿过涡旋中心时,速度的大小径向增大,方向反向;(2)南北方向上,速度分量 u 在穿过涡旋中心时,速度的大小径向增大,方向反向,且其转动的方向要与 v 一致;(3)在满足条件(1)和(2)后,要求局地的速度最小值在涡旋的中心位置附近;(4)在满足前3个条件之后,为了防止对对流中心或者湾流误检,还要求在涡旋中心位置周围,速度矢量旋转的方向要一致,而两个相邻的速度矢量要在同一个或者相邻的象限之内。算法中使用了两个参数 a 和 b ,其中参数 a 用于条件(1)、(2)和(4),规定为检测到的速度分量 v 沿东西方向增大的格点数和速度分量 u 沿南北方向增大的格点数;参数 b 用于条件(3),规定了速度局地最小值所在搜寻域的格点数。参数 a 和 b 的选取有较大的灵活性,这使得算法也有很大的灵活性:它规定了能够探测到的涡旋最小尺度以便适用于不同分辨率的网格点。另一方面,它们的值可以根据所给数据的空间分辨率进行调整来优化算法的性能。

涡旋中心确定之后需要计算涡旋边界。算法中隐含地假设了涡旋速度场辐散较弱,这样涡旋速度

场流函数等值线正切于速度矢量,因此本文采用的算法将距离涡旋中心最远的闭合流函数等值线作为涡旋的边界,穿过这一边界速度仍径向增大。算法中计算流函数时假设 $\psi(1,1) = 0$,流函数在给定点 (i,j) 上的计算公式为:

$$\psi(i,j) = \frac{(\psi_{xy} + \psi_{yx})}{2} \quad (1)$$

$$\psi_{xy} = -\sum_{x=1}^i v(x,1)\Delta x + \sum_{y=1}^j u(i,y)\Delta y \quad (2)$$

$$\psi_{yx} = -\sum_{x=1}^i v(x,j)\Delta x + \sum_{y=1}^j u(1,y)\Delta y \quad (3)$$

其中, u 和 v 为流速的两个分量, Δx 与 Δy 为纬向和经向格距, ψ_{xy} 为先对 v 分量沿 x 方向积分,再对 u 分量沿 y 方向积分, ψ_{yx} 则恰好相反。由于速度场有辐合辐散, ψ 值取决于积分路径,因此通过求方程(2)和(3)的平均,可以有效减小算法中对涡旋速度场辐散较弱这一假设带来的误差。

利用 Matlab 提取 50 a 月平均数据集中的经纬向海流速度数据,写为 NC 文件后,取参数 $a=2, b=1$ 使用上述算法得到每个时间步长上涡旋的中心位置及半径大小。由于资料的时空分辨率及平均流场的强度对搜索区域大小有很大影响,本文采用 SODA 资料仅计算了中心位置、数量和半径等涡旋参数。结合相应时段卫星高度计资料分析结果,对海域内涡旋分布的季节和年际特征进行了讨论。

接着,提取 50 a 月平均数据集中的海表面高度数据,用于计算海面高度异常均方根。对于某空间点上的海面高度时间序列 $\{X_i\}$,海面高度异常均方根 (R) 可用公式(4)算得,其中 \bar{X} 为该点上的平均海面高度, N 为样本长度。

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (4)$$

海面高度异常均方根高值区是海面高度变化最大的区域,即动力上的高能区域^[2]。通过对海面高度异常均方根季节和年际空间分布特征的分析,和探测所得涡旋分布特征进行对比,讨论南海中尺度涡旋强度的时空分布变化规律。

2 结果

2.1 南海中尺度涡的空间分布特征

表 1 给出了 1993~2000 年南海各区域及整个海域出现中尺度涡数量,表 2 给出了同时间段王桂华^[13]利

用分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的融合卫星高度计资料得到的结果,可见上述算法探测得到的各海域中尺度涡数目总和及全海域涡旋数目总和远大于王桂华的统计结果。造成这种差异的原因,一方面对涡旋定义和判别标准不同,另一方面,使用资料和对资料的处理方法不同:王桂华对融合卫星高度计资料,先采用 7 点 Hanning 低通滤波,滤去 60 d 以下可能引起潮汐混淆的信号,从最基本的海面高度异常资料出发对涡旋探测,得到平均半径在 100 km 左右的典型涡旋;本文从 SODA 月平均数据集中海表经纬向流速资料出发对涡旋探测,资料时空分辨率低于卫星高度计资料的分辨率,且包含 200 m 水浅的巽他陆架海域,因而尺度较小的涡旋(取半径大于 45 km)也在本文分析中。利用上述算法,50 a 间,在南海海区共探测到 1 420 个涡旋(图 1,包括 200 m 水浅的巽他陆架海域),就涡旋数目总体而言,大约有 56% 是气旋涡,这一结果与 Peng 等^[17]的结果一致。气旋涡、反气旋涡在南海海盆几乎处处可见,呈东北-西南走向的菱形分布,绝大部分出现在 2 000 m 以深的深水区,主要分布在吕宋岛西北海域(Z2)、吕宋岛西南海域(Z3)及越南以东的广大海域(Z4),而在中国台湾西南海域(Z1)、泰国湾(Z5)和纳土纳岛以南海域及 200 m 以浅的巽他陆架海域分布相对较少,这一结果和程旭华等^[2]使用 11 a(1993~2003 年)融合高度计资料得到的结论一致。

具体来看,50 a 中国台湾西南海域共有 51 个涡旋生成,其中气旋式涡旋出现数量多于反气旋式涡旋,数目之比约为 2 : 1;吕宋岛西北海域主要以气旋涡为主,生成气旋涡 218 个,反气旋涡 53 个,数目之比约为 4 : 1,特别是靠近吕宋海峡一侧气旋涡频发,这可能和黑潮以涡等斜压不稳定方式入侵南海有关, β 效应驱使不稳定涡西行,导致黑潮水向南海净输运^[18]。吕宋西南海域气旋涡与反气旋涡数目相当,分别为 160 个和 136 个,值得注意的是,在 $14^\circ \sim 15^\circ \text{N}$, $118^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 这一范围内气旋涡几乎不出现, Su 等^[19]认为这是当冬季风停止后苏禄海海水通过民都洛海峡涌入南海的缘故。越南以东外海海域面积最广,50 a 共探测得到气旋涡 384 个,反气旋涡 359 个,且大部分涡旋生成于 200 m 以深的海盆中央, Gan 等^[20]指出这一海域中尺度涡频发的一个重要原因是越南沿岸强流的不稳定,在中沙群岛附近海域气旋涡与反气旋涡数目大致相等,在中沙—南沙群岛这一东北西南走向轴线海域和纳土纳群岛附近海

域,反气旋占优。而在南沙群岛的东南海域气旋涡数量明显偏多。泰国湾海域受地形和季风影响,50 a 仅有 2 个气旋涡被探测到,其余 57 个均为反气旋涡。从涡旋平均半径与发生频数的关系图(图 2)来看,气旋涡

和反气旋平均半径集中在 55 km 左右,其次为 80 km 和 120 km 左右,同一频数下,反气旋平均半径大于气旋涡半径,150 km 以上和 50 km 以下涡旋较少,这主要因为月平均资料中使用了对流场的平均化处理。

表 1 1993~2000 年南海各区域及整个海域出现中尺度涡数量统计

Tab. 1 Mesoscale vortex number in regional areas and all of South China sea during 1993~2000

年份	中尺度涡数量(个)												A&C 总和
	Z1		Z2		Z3		Z4		Z5		ALL		
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	
1993	0	1	2	2	3	3	11	7	1	1	17	14	31
1994	0	0	1	4	2	2	8	7	2	0	13	13	26
1995	0	1	0	6	3	5	14	8	0	0	17	20	37
1996	0	0	1	6	2	3	8	10	3	0	14	19	33
1997	1	1	1	2	0	7	13	7	3	0	18	17	35
1998	1	0	2	6	6	4	6	7	2	0	17	17	34
1999	0	0	4	6	6	5	10	7	1	0	21	18	39
2000	1	0	2	7	0	4	8	8	0	0	11	19	30
1993~2000 总和	3	3	13	39	22	33	78	61	12	1	128	137	265

注: ALL 表示整个海域; A 表示反气旋涡; C 表示气旋涡; A&C 总和表示气旋涡和反气旋涡之和; 1993~2000 总和是指在 1993~2000 年的中尺度涡数量之和。(表 2、表 3 同)

表 2 王桂华博士论文中统计各区域中尺度涡数量^[13]

Tab. 2 Mesoscale vortex number in regional areas and all of South China sea in dissertation of Guihua Wang^[13]

年份	中尺度涡数量(个)										A&C 总和
	Z1		Z2		Z3		Z4		ALL		
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	
1993	2	0	3	2	2	0	2	3	9	5	14
1994	2	0	1	1	2	0	2	1	7	2	9
1995	2	0	2	1	0	0	3	1	7	2	9
1996	2	0	2	1	2	0	2	2	8	3	11
1997	1	1	2	3	0	2	3	1	6	7	13
1998	2	0	3	1	0	0	2	1	7	2	9
1999	1	0	2	2	2	0	3	1	8	3	11
2000	1	0	3	2	1	0	1	2	6	4	10
1993~2000 总和	13	1	18	13	9	2	18	12	58	28	86

2.2 南海中尺度涡的季节变化特征

南海地处印度季风和亚洲季风的中间地带,冬季盛行强劲的东北季风,夏季为西南季风,中尺度涡活动有明显季节变化。从表 3 给出的 5 个海域 50 a 生成中尺度涡总数来看,春季南海中尺度涡生成得最多,其次为冬季、秋季和夏季,气旋涡主要发生在冬季,其次为秋季和春季,夏季发生较少;反气旋涡主要发生在春季和夏末秋初。下面主要对冬、夏季南海中尺度涡分布特征进行分析。

2.2.1 冬季变化特征

图 3 为冬夏季南海中尺度涡生成初始位置空间分布,从图中来看,冬季海域气旋涡明显占优,且主要分布在南海东侧及越南外海,而反气旋涡主要集中在吕宋西南、泰国湾和南海中部 2 000 m 以深深水区。具体看,中国台湾西南海域 50 a 冬季仅有一个反气旋涡,这主要是由于月平均资料中对流场的平均化处理使得通过吕宋海峡的海流速度大大弱化,使得这一海域中尺度涡未细致体现出来。从温盐特性来

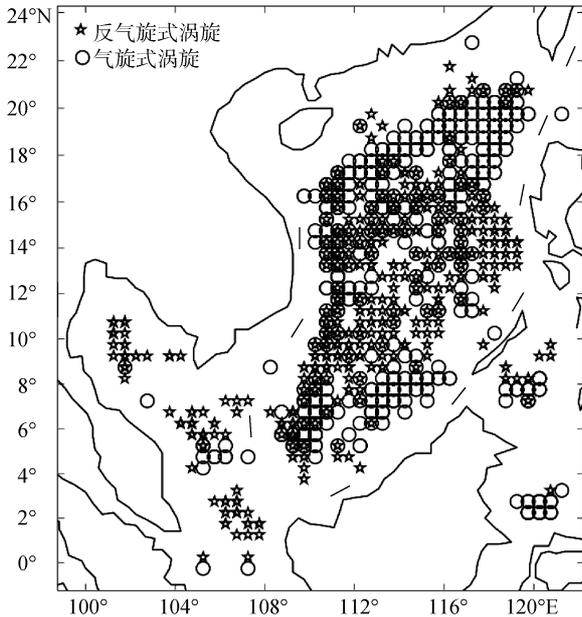


图 1 南海中尺度涡产生地点的空间分布

Fig. 1 Distribution of mesoscale vortex generated in South China Sea

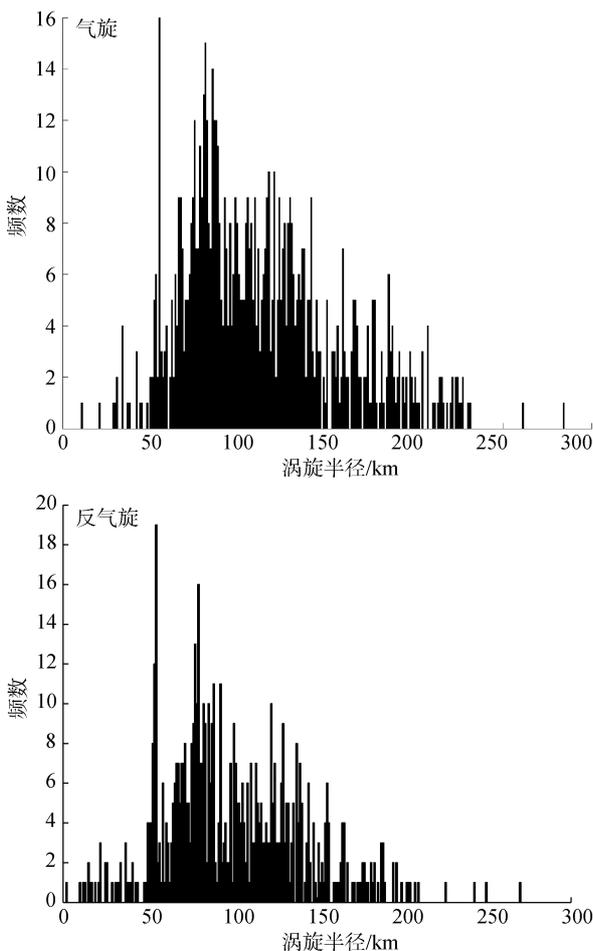


图 2 气旋、反气旋涡平均涡旋半径与发生频数的关系

Fig. 2 Relationship between mean cyclone or anticyclone vortex radius and occurrence frequency

看, 东北季风期间这一海域主要是黑潮水^[21], 许多研究表明^[8-9, 22]冬季风期间黑潮在巴士海峡向南摆动, 并指出在 Ekman 作用下更容易驱使黑潮水经由吕宋海峡进入南海而在中国台湾西南堆积, 受地形与环流共同作用形成该反气旋涡。王^[13]指出在这一区域涡旋主要在冬季形成, 且由于地形阻拦作用加之存在一小范围的反气旋性环流, 这一海域中尺度涡旋不能移动太远, 本文统计中这一海域则在夏季(6~8 月)涡旋较为活跃, 不一致的原因可能是王^[13]对季节的划分是从季风角度, 将 10 月至翌年 3 月纳入冬季风期间。至于黑潮的不稳定性及风应力旋度如何变化影响中国台湾西南海域反气旋涡的生成和发展有待进一步的研究。

吕宋岛西北海域的气旋涡主要发生在冬春季, 且春季更为集中(87 个), 从冬季分布情况看除 3 个反气旋涡外, 以气旋涡为主(44 个), 体现了这一海域冬季风期间气旋涡分布为主的主要特征, 且涡旋全部位于 2 000 m 以深深水区。在冬季, 强的气旋式风应力旋度^[23]和黑潮锋引起的涡度西向平流输送^[24]利于这一海域涡旋的产生。水文资料证实这一海域东北季风期间气旋涡主要沿着 2 000 m 水深等值线气旋性地向西南运动。在靠近吕宋海峡西侧的海域, 黑潮与巴布延岛的相互作用是目前研究中知道的中尺度涡可能的形成机制^[25]。另外, 吕宋岛西北海域冬季产生反气旋涡全年最少, 主要集中在春夏季, 这与王^[13]得到的吕宋西北反气旋涡在季风爆发和季风盛行期间(4~8 月)较多, 而在冬季消失的结论一致。

在吕宋西南海域气旋涡和反气旋涡皆主要在冬季形成, 这和管秉贤等^[1]得到结论一致, 且气旋涡数量约是反气旋涡数量的 2 倍, 从空间分布上看偏北海区气旋涡反气旋涡交替出现, 且以气旋涡为主, 而在吕宋西南偏南海区则主要以反气旋为主, cai 等^[26]认为强的正压陆架流和局地地形相互作用可能是这一区域反气旋式涡旋发生的一个原因。从季节变化来看, 气旋涡和反气旋涡在冬春季之后, 都有一个明显减弱的过程。

越南以东外海是南海中尺度涡的另一个多发区域, 这一海域存在典型的“越南冷涡”^[11]和“越南暖涡”^[27]。冬季, 越南以东外海发生的中尺度涡也主要以气旋涡为主, 数量明显多于其他三个季节, 相反, 反气旋涡在冬季最少(28 个), 夏秋季最多。一个有趣的现象是, 以北纬 12°为轴, 气旋涡在其两侧基本对称分布, 图 4 分别给出了 1993 年 1 月和 7 月南海海面高度异常的空间分布。上述对称分布形态体现

在海表高度异常分布结构上表现为冬季越南外海的偶极子型，即北侧和南侧均为气旋性涡旋，而反气旋性涡旋受冬季气旋性环流影响，出现在 12°~14°附近，这和王^[13]在这一区域分析得到的结论相同。导致这种偶极子形态产生可能有两种原因，冬季气旋性涡旋是一个背景，此外可能是南海中部或东部受到扰动，进而在气旋涡的周边形成了反气旋涡^[7]。一些研究认为越南南向沿岸流与海山的相互作用利于该海区气旋涡的产生，而越南以东，风场及急流的不稳定性是该区域中尺度涡可能的形成机制^[28, 23]，之间相互作用有待进一步研究。另外，值得注意的是，春秋季海盆中央海域的反气旋涡明显多于季风季节，然而这一现象的原因仍不太清楚。

泰国湾海域在迄今许多研究中未加考虑，本文统计结果显示该海域主要以反气旋涡为主，且涡旋数量从冬季到夏季一直递增，气旋涡仅在春季出现

一个。从气候态冬季表层流场分布形式(图略)，可以看出越南南向沿岸流在到达马来西亚岛东侧时，受地形阻挡在北纬 6°附近绕流分支，一支沿西北而上进入泰国湾后，受湾内地形的连续阻挡作用，形成一个个封闭在湾内的反气旋涡；另一支则沿岛南下到达纳土纳群岛西南，东侧流受岛地形阻拦形成反气旋涡，西侧流顺着马来西亚岛进入爪哇海。到春季后随着东北季风减弱，越南南向沿岸流强度虽不如冬季强，但是分支绕流的位置向北偏移到北纬 8°附近，实质上是加强了这一海湾的反气旋性涡旋。

2.2.2 夏季变化特征

图 3 为冬夏季所有探测到的涡旋首次生成的位置分布，前面已经提到，冬季在深海盆地区主要以气旋涡为主，而在夏季，12°N 以北仍存在气旋式涡旋，南部则主要是反气旋式涡旋。这一基本的特征和动力机制已被采用不同风产品的数值模式^[25, 29-30]

表 3 1958~2007 年四个季节各海域出现中尺度涡数量

Tab. 3 Mesoscale vortex number in all sea areas in four seasons during 1958–2007

季节	中尺度涡数量(个)												A&C 总和
	Z1		Z2		Z3		Z4		Z5		ALL		
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	
冬季	1	0	3	44	37	66	28	149	8	0	77	259	336
春季	3	4	22	87	40	38	70	91	14	1	149	221	370
夏季	4	25	20	41	25	18	130	31	19	0	198	115	313
秋季	9	2	8	43	23	23	115	81	16	0	171	149	320

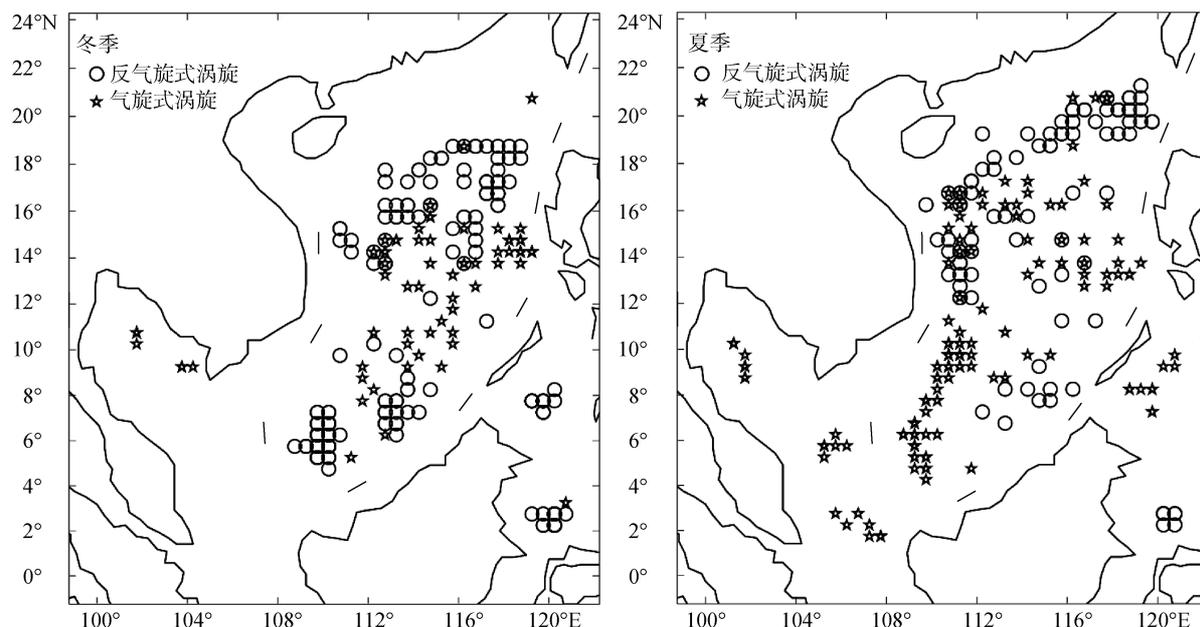


图 3 南海冬季和夏季中尺度涡旋生成位置分布

Fig. 3 Distribution of mesoscale vortex generated in winter and in summer in South China Sea

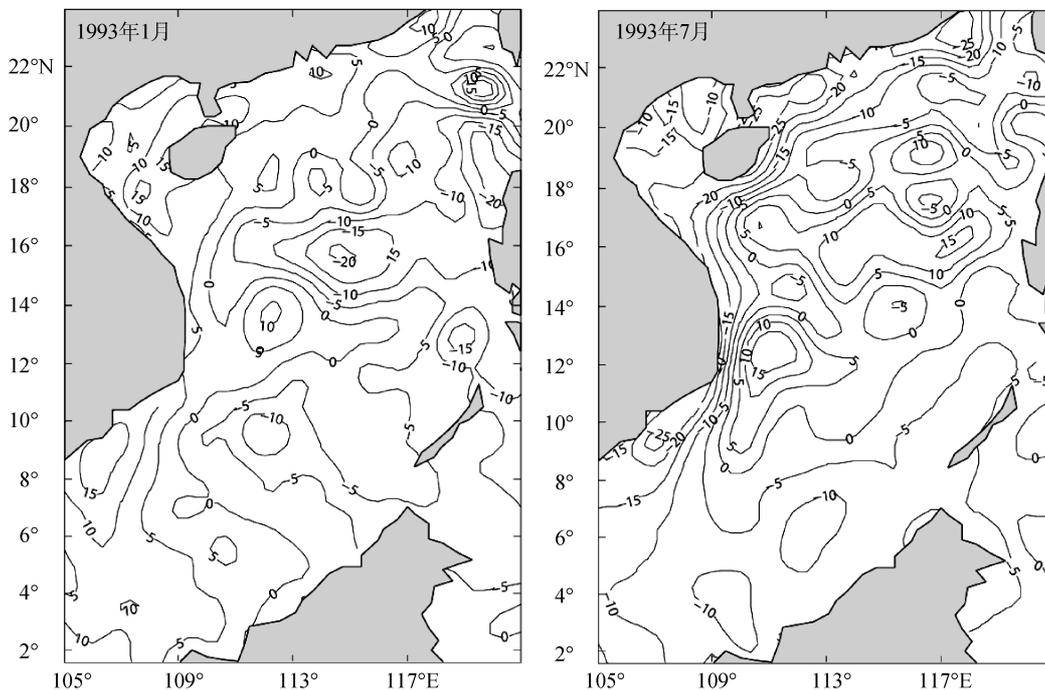


图 4 南海海表面高度异常(SSHA)分布(cm)

Fig. 4 Distribution of sea surface height anomaly (SSHA) (cm) in South China Sea in January 1993 and July 1993

所印证。具体来看,在中国台湾西南海域,夏季气旋涡数量明显多于反气旋涡,两种涡旋生成的地理位置规律性较强且相对固定。在对南海涡动能的季节变化讨论中,我们将看到夏季这一海域也是南海涡动能的第二高值中心。Tai 等^[31]认为背景流的不稳定是中尺度变化的主要因素,加之中国台湾西南海域特殊的地理位置,可以认为这一海域的中尺度涡是由于强背景流黑潮入侵的斜压不稳定造成的。

夏季,在吕宋西北海域出现 41 个气旋涡, 20 个反气旋涡,和冬季相比较,气旋涡数目相当。反气旋涡则主要发生在夏季和春季,气旋涡出现位置较反气旋涡偏北,且多位于 2 000 m 以深深水区。Yuan 等^[32]指出夏季这一海域存在一典型涡旋——“吕宋暖涡”,并认为这一反气旋涡向西传播,然而其产生机制尚不明确。吕宋岛西南海域夏季出现了 25 个反气旋涡和 18 个气旋涡,涡旋数量均偏少于其他季节,从空间分布来看,反气旋涡均位于 2 000 m 以深的南海深水海盆及苏禄海中央。陈^[33]研究得出,这一海域夏季涡旋生命都较长,且由于没有陆架等的影响,涡旋可自由传播。从垂向流场分布来看,这一区域涡旋也能伸展到 200 m 以深,只是水平尺度向下不断收缩。

夏季,越南以东外海涡旋生成总数和冬季相近,但是类型相反,即反气旋涡数目明显多于气旋涡。以北纬 12°为界,以南主要分布着反气旋涡,北纬 7°以南

的浅水区均为反气旋涡,垂直伸展深度不超过 100 m。海表面高度异常的空间分布显示(图 4),夏季越南以东外海也存在一对偶极子,急流轴位置相比冬季偏北(14°N 附近),急流轴以南为反气旋涡,急流轴以北为气旋涡。这样的偶极子形态可从夏季一直维持到秋末,chen 等^[34]指出这对偶极子为季节性涡旋,并对偶极子的年际变化及其对温盐结构的影响进行了分析。

受从 5 月份形成的西南季风影响,夏季,泰国湾海域生成了 19 个反气旋涡,反气旋涡数目多于冬季。由于 5 月份西南季风刚刚建立,泰国湾海域内仍维持着冬季季风形成的反气旋式涡旋,由于流体的连续性,在 6°N 脱离北向环流的马来西亚离岸流的西侧流系必进入泰国湾,受湾内连续地形阻拦作用,反气旋性环流在湾内继续维持并加强,反映在夏季这一海域反气旋涡性涡旋增多,但是垂直伸展深度不超过 100 m。9 月份以后由于西南季风逐渐减弱,流入泰国湾海域的北向流减弱,湾内反气旋性涡旋也减少。

2.3 南海中尺度涡的年际变化特征

涡旋个数除了显著的季节变化外,还表现出明显的年际变化。从 50 a 涡旋逐年数量变化(图 5)来看,涡旋生成个数的年际变化较大,平均每年出现 28.4 个,低于 Peng 等^[17]使用 1993~2007 年高度计资料和

模式数据分别得到的 32.8 ± 2.6 个和 32.8 ± 3.4 个。反气旋涡最多 21 个, 最少 6 个; 气旋涡最多 27 个, 最少 9 个; 1974, 1978, 1979, 1982, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1992, 1993, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001 和 2002 年涡旋个数超过 30 个, 属于涡旋“多发”年份, 而在 1962 和 1976 年仅有 18 个涡旋, 远小于平均数, 属于涡旋“匮乏”年份。

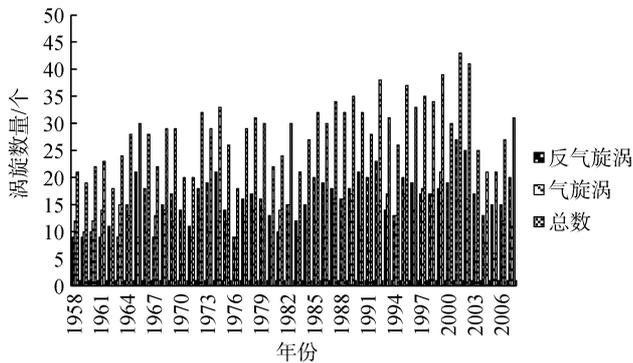


图 5 1958~2007 年涡旋逐年出现数量

Fig. 5 The number of vortex generated every year during 1958—2007

2.4 中尺度涡强度的季节变化

程旭华等^[2]指出中尺度涡是海洋中具有高能量的一种运动类型, 其强弱应该在海面高度异常均方根的大小上有所反映。李燕初等^[7]采用 7 a 的 T/P 高度计资料对南海东北部海域高度异常及其季节变化和年际变化进行研究, 认为中尺度涡的高能量区主要分布在中国台湾西南部(21.3°N、119.0°E)和吕宋岛西北部(19.5°N、119.5°E)附近的深水域, 海面高度异常均方根除了季节变化外, 还有明显年际变化, 并指出与 ENSO 有关。下面分别就海面高度异常均方根的季节和年际变化特征进行分析。

2.4.1 季节变化

图 6 是采用 Gauss 带通滤波保留 13 个月以上、8 年以下年际信号后计算得到的 50 a 海面高度的标准偏差, 即海面高度时间序列距平的均方根值, 从图 6 看, 海域内 RMS 分布不均匀, 3 cm 等值线与 2 000 m 水深等值线走向大体一致, 从全海域看 RMS 有 3 个闭合大值区域: 一个在吕宋海峡西侧(118°~121°E, 19°~21°N), 中心幅值超过 7 cm; 一个在越南以东海域(109°~112°E, 11°~14°N), 中心幅值超过 6 cm; 另一个在吕宋岛的西部海域, 中心幅值在 3.5 cm 以上。说明这三个位置是南海中尺度涡活动频繁、强度较大的区域, 其较大的年际变化标准差对应本文中尺度

涡的生成与变化较大的区域。实际上, 在吕宋海峡以东还有一个 RMS 的高值区, 受黑潮动力屏障作用, 两个高值区分隔, 因此可以猜测吕宋海峡两侧的海洋变异在动力学上可能相对独立, 太平洋对南海的作用更像是黑潮通过吕宋海峡向南海入侵来传递, 而不是两个高能区之间直接的信号耦合来实现的^[7]。前面对冬季中尺度涡空间分布分析时提到, 这一海域涡旋活动和分布受黑潮水影响显著。

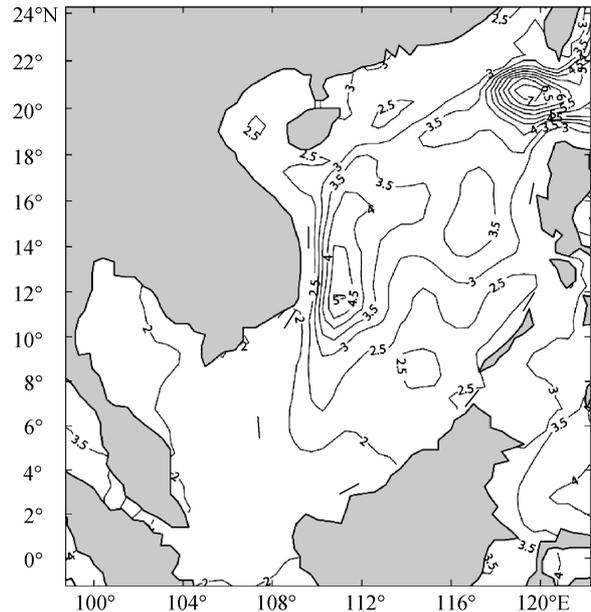


图 6 50 a 平均的海面高度 RMS 分布(cm)

Fig. 6 Root-mean-square distribution of mean sea surface height during 50 years (cm)

依据 Peng 等^[17]对南海海域涡旋活动的调查, 以 12 月到次年 2 月作为冬季, 3 到 5 月作为春季, 6 到 8 月作为夏季, 9 到 11 月作为秋季, 将 50 a 资料按季节统计, 得到南海海面高度异常均方根空间分布的季节变化, 如图 7 所示, 阴影区为数值大于 6 cm 的区域。从空间分布上看, 冬季海面高度 RMS 的高值区主要分布在吕宋海峡西侧海域, 中心幅值超过 12 cm, 与秋季相当, 较春季、夏季大, 超过 6 cm 的大值区范围比秋季小。除在吕宋海峡西侧集中分布外, 在吕宋西部的深水区也有零星超过 6 cm 高值区。春季, RMS 超过 6 cm 的高值区中心幅值和水平范围均减小, 吕宋西侧海域高值继续维持。进入 6 月份后, 吕宋西侧高值中心略向西移大约一个纬度, 南海北部高值区开始向西南扩散至越南以东海域, 中心幅值超过 8 cm, 至秋季, 越南以东海域超过 6 cm 的高值区向北可到达 8°N, 全海域形成两个(117°~121°E,

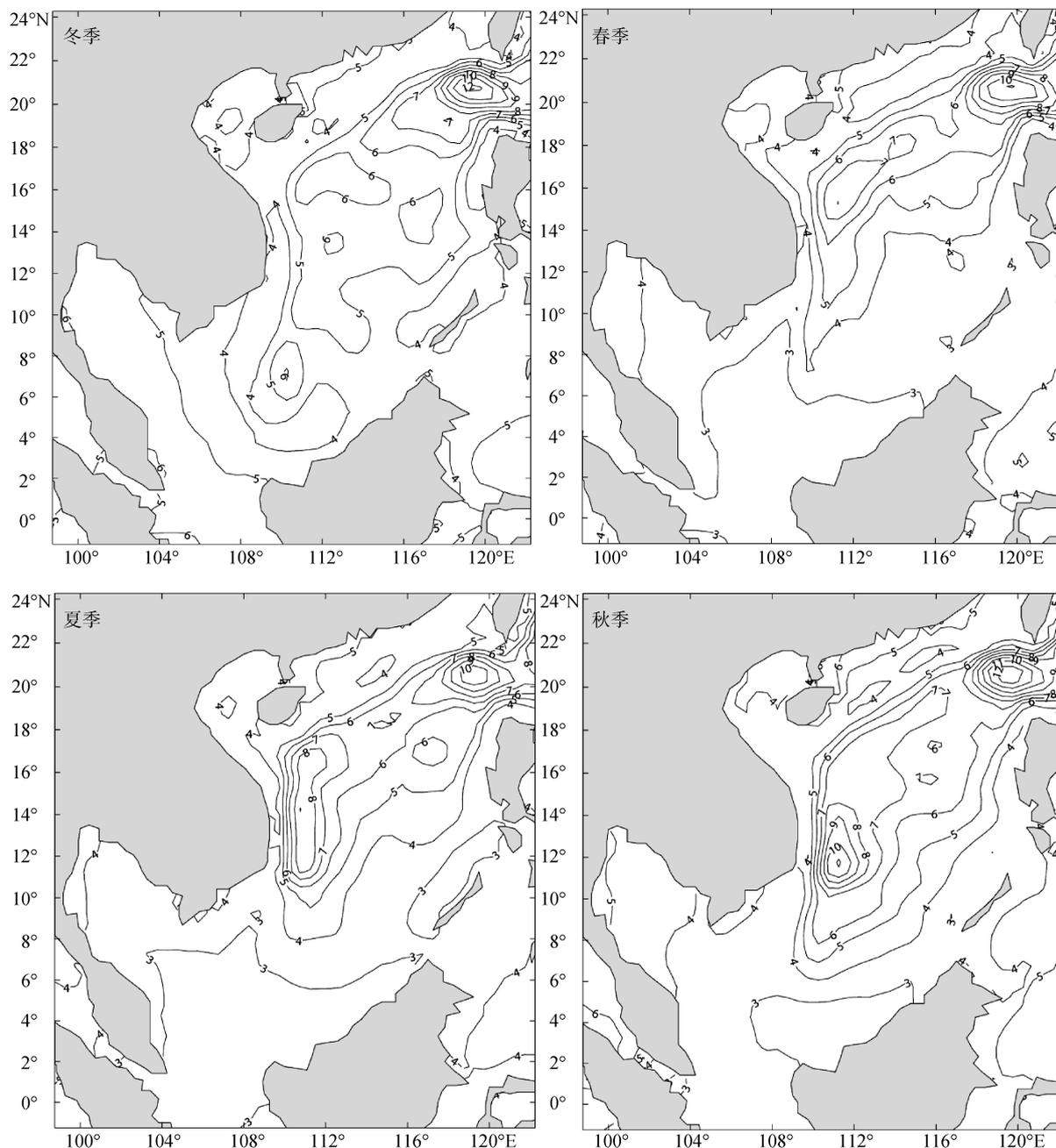


图 7 南海 4 个季节海面高度异常 RMS 的空间分布(cm)

Fig.7 RMS distribution of sea surface height anomaly in South China Sea: (a) in winter from December to February; (b) in spring from March to May; (c) in summer from June to August; and (d) in autumn from September to November (unit: cm)

19°~21°N; 110°~112.5°E, 10°~14°N)10 cm 以上的高值中心, 无论中心幅值还是水平范围均达到全年最大。图 8 是海域平均的气候态逐月海面高度异常均方根变化, 从图中看到春、夏季 RMS 最小, 秋冬季 RMS 最大。

2.4.2 年际变化

南海海面高度异常均方根的空间分布除了明显的季节变化外, 还有显著年际特征。从 1958~2007 年 50 a 逐年的海面高度异常均方根的空间分布图(图 9, 这里

仅给出 1971、1972 年)看出, 各年均方根高值区主要分布在中国台湾西南海域、吕宋西北海域和越南以东海域和吕宋西南海域, 高值中心数值一般超过 7 cm, 而泰国湾海域仅在 1967、1998 和 2004 年出现中心值大于 7 cm 的高值区。在南海东北部, 各年的 RMS 高值主要分布在中国台湾西南海域和吕宋西北海域, 其中又以中国台湾西南海域占优, 各年 RMS 高值区中心位置、大小和水平尺度等有较大差异, 说明这一海区涡

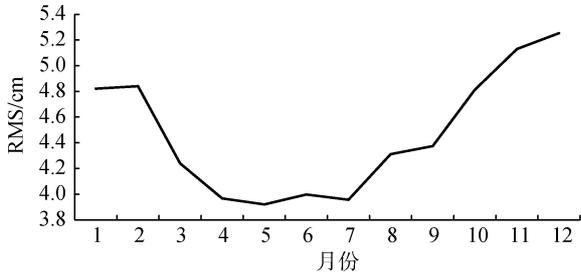


图 8 南海海域平均的逐月海面高度异常均方根变化
Fig. 8 RMS change in mean sea surface height anomaly with month in South China Sea

旋强度的空间分布有较大的年际变化。特别是 1965、1970、1971、1972、1973 年出现在中国台湾西南海

域和吕宋西北海域区峰值区的水平尺度和峰值都较小, 这可能与 1965~1966、1972~1973 年的强 El Niño 有关系。而在南海西南部海域, RMS 高值区主要在越南以东及其东南的深水海域, 从数值上看中心幅值大于南海东北部海域 RMS 高值区中心值。从 50 a 海面高度异常均方根最大值随时间的变化(图略)可以看到最大值不同年份波动较大, 最大值出现在 1960 年(31.7 cm), 最小值出现在 1970 年(7.8 cm), 其余年份围绕 14 cm 上下波动, 周期约 4 a。RMS 的这种分布特征和相应年份涡旋分布有一致对应关系, 这也说明海面高度异常均方根的高值区往往对应着涡旋活动频繁或强度较大的区域, 反之亦然。

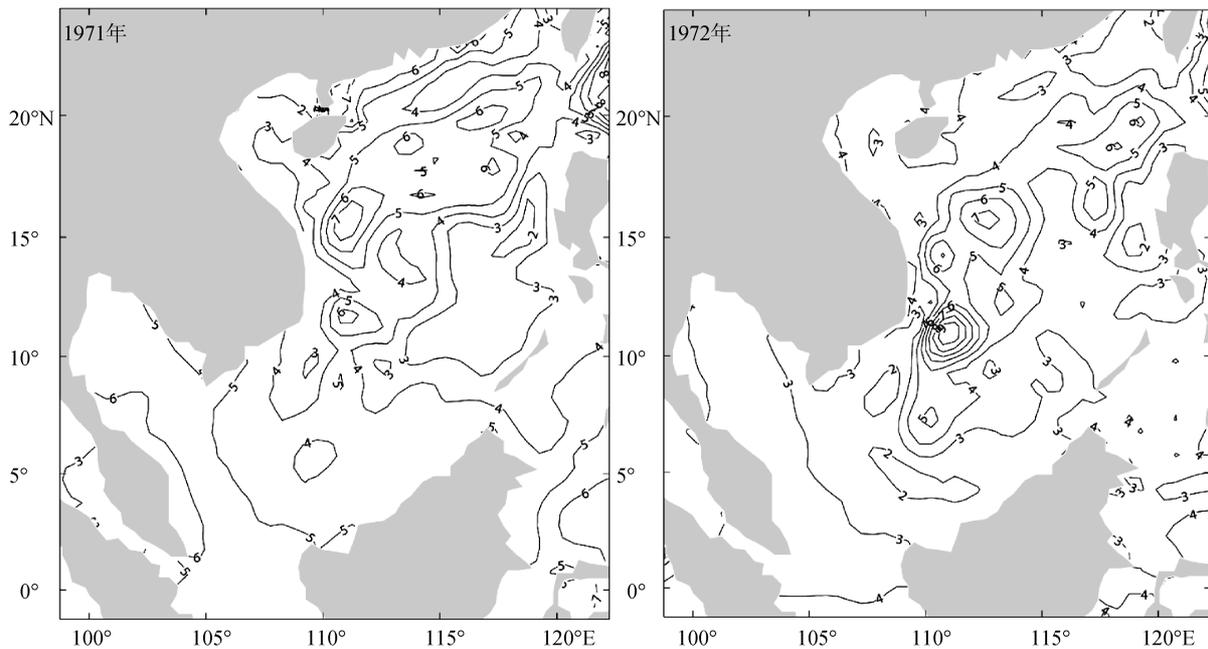


图 9 1971 年和 1972 年海面高度异常均方根的空间分布(cm)
Fig. 9 RMS distribution of sea surface height anomaly in 1971 and 1972

对 50 a 逐月海表面高度异常数据进行海域平均, 与同时期 Nino3 指数(热带东太平洋海域: 5°S~5°N, 90°~150°W 的海表面温度异常)的相关分析表明二者之间有显著负相关。图 10 给出了海域平均 SSHA 与 Nino3 指数的逐月变化, 从图看出当海域内 SSHA 出现负异常大时(如 1972~1973 年, 1982~1983 年及 1997~1998 年)对应着强 Nino3 指数, 即强的 El Niño 事件; 相反, Nino3 指数出现负极大时, 海域内 SSHA 一般呈现正异常或正异常大, 即强的拉尼娜事件对应着 SSHA 正异常, SSHA 振幅适中的年份则对应强度中等的 El Niño 或者拉尼娜事件。

将海面高度异常均方根做南海海域面积平均后

再进行标准化(图 11), 从时间变化上来看 20 世纪 70 年代以前海面高度异常均方根的标准化值随时间呈正负交错分布, 年际变化明显周期大约为 3 a。20 世纪 70 年代初到 90 年代中期主要以负值为主, 说明海面高度异常均方根值偏小, 90 年代末期以后海面高度异常均方根值显著增大, 这可从逐年的海面高度异常均方根的空间分布图得到印证。另外, 1999、2004 和 2006 年, 海面高度异常均方根的分布范围和中心幅值都异常偏大, 这可能因为 El Niño 事件结束东亚季风再次加强, 南海环流加强、中尺度涡再度活跃^[7]。

结合前面得到的结果, 从空间分布上看, 越南以东和吕宋海峡以西是海表面高度异常均方根有显

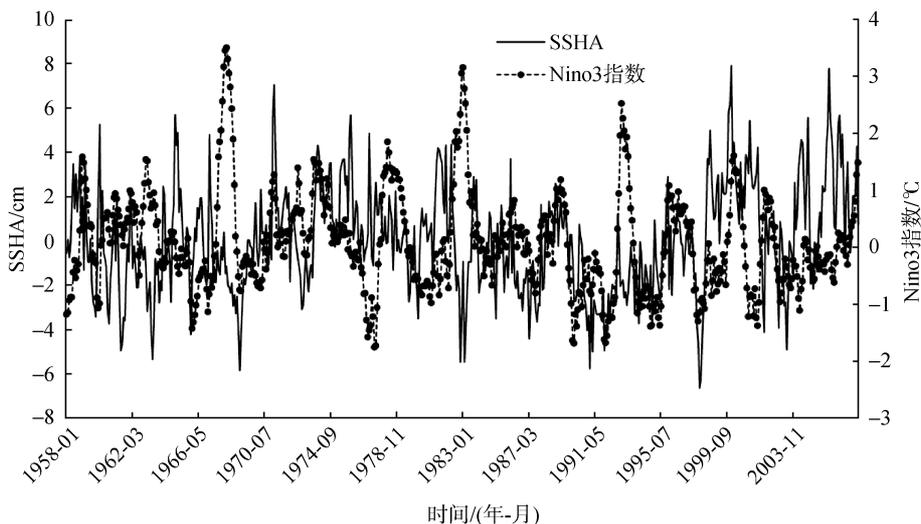


图 10 海域平均的逐月 SSHA 与 Nino3 指数时间变化

Fig. 10 Monthly average SSHA and Nino3 index with year in South China Sea

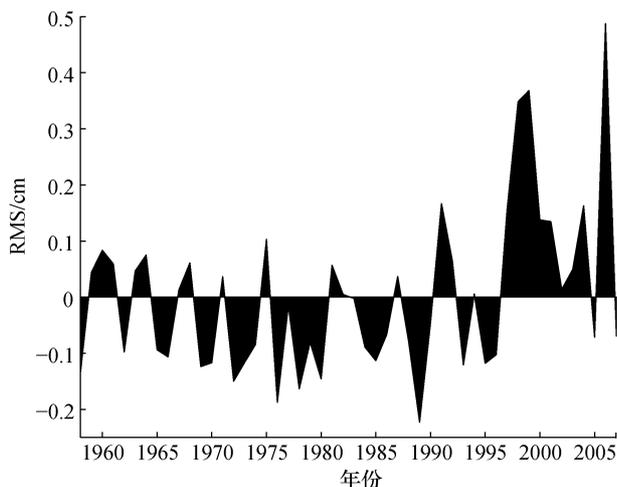


图 11 南海海域平均的海面高度异常均方根标准化后的年变化

Fig. 11 Standardized RMS of mean sea surface height anomaly with year in South China Sea

著变化的海域, SODA 资料得到的涡旋位置分布也显示了这一东北—西南走向的菱形分布格局; 从时间演变上看, 涡旋在春季形成最多, 其次为冬季、秋季和夏季, 然而海表面高度异常均方根的季节变化却显示秋冬季有着最明显的变化, 而冬春季次之, 由于涡旋是直接从表层经纬向速度场探测得到, 海表面高度异常均方根季节变化主要由风应力旋度的季节变化引起, 因而初步猜测造成季节变化上不一致的原因可能由于风应力旋度相对流场存在时间上的滞后^[35]。此外, 海域内涡旋数量的年际变化较大, 也反映在海表面高度异常均方根包含显著 ENSO 信号, 但是周期并不相同, 至于年际尺度上

ENSO 如何影响涡旋活动有待进一步研究。

3 结论

本文通过对 50 a 南海海域中尺度涡空间分布特征和海面高度异常均方根的季节和年际变化分析后, 初步得到以下结论: (1)50 a 海域内探测所得涡旋中约有 56%是气旋涡, 分布呈东北—西南走向, 绝大部分出现在 2 000 m 以深海域, 涡旋个数主要被 Z2、Z3 和 Z4 区控制, 涡旋分布和个数有明显季节和年际变化。(2)海面高度异常的均方根在全海域有 3 个高值区: 分别位于吕宋海峡西侧、越南以东和吕宋岛西部, 反映为中尺度涡活动频繁、强度较大的区域; 从季节变化上看, 海面高度异常均方根春、夏季最小, 秋冬季最大; 从年际变化上看, 与同时期 Nino3 指数有显著负相关, 周期大约为 3 a。(3)海表面高度异常均方根确实反映了南海中尺度涡分布的主要特征, 但是, 在季节尺度上存在时间上的滞后, 在年际尺度上, 海表面高度异常均方根和海域内中尺度涡旋数量的年际变化中包含 ENSO 信号周期并不相同, 年际尺度上 ENSO 如何影响涡旋活动仍有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 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 Binxian, Yuan Yaochu. 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.

- [2] 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 Xuhua, Qi Yiquan, Wang Weiqiang. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in the south China sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(4): 51-59.
- [3] Richardson P. Eddy kinetic energy in the North Atlantic from surface drifters[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88 (C7): 4 355-4 367.
- [4] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
Sun Xiangping. The Regional Sea in Offshore China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [5] 陈秋颖, 杨坤德. 南海海温年际变化的均方差分析[J]. 电声技术, 2010, 34(17): 72-75.
Chen Qiuying, Yang Kunde. Mean square deviation analysis of the sea surface temperature interannual variability in the South China Sea[J]. Audio Engineering, 2010, 34(17): 72-75.
- [6] Wyrtki K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters: Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand[J]. Naga Report, 1961, 2: 195.
- [7] 李燕初, 蔡文理, 李立. 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.
Li Yanchu, Cai Wenli, Li Li. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in northeastern south China sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 61-70.
- [8] 王胄, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流(一)对南海暖涡之初步观测[J]. 台湾大学海洋学刊, 1987, 18: 92-103.
Wang Zhou, Chen Qingsheng. Warm eddy currents in the northern part of the South China Sea I: A preliminary observation of the warm eddy in the South China Sea[J]. Oceanography Journal of National Taiwan University, 1987, 18: 92-103.
- [9] 王胄, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流(二)对南海暖涡之理论观测[J]. 台湾大学海洋学刊, 1987, 18: 92-103.
Wang Zhou, Chen Qingsheng. Warm eddy currents in the northern part of the South China Sea II: A theoretical observation of the warm eddy in the South China Sea[J]. Oceanography Journal of National Taiwan University, 1987, 18: 92-103.
- [10] Xu Jianping, Su Jilan, Qiu Dezhong. Hydrographic analysis on the intruding of Kuroshio water into the South China Sea[J]. Oceanography in China, 1996, 6: 1-12.
- [11] 杨海军, 刘秦玉. 南海上层水温分布的季节特征[J]. 海洋与湖沼, 1998, 24(5): 494-502.
Yang Haijun, Liu Qinyu. The seasonal features of temperature distributions in the upper layer of the south China sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 24(5): 494-502.
- [12] Hwang Cheinway, Chen Sungan. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 105(C10): 23943-23965.
- [13] 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.
Wang Guihua. Discussions on the movement of mesoscale eddies in the south China sea[D]. Qingdao: Chinese Marine University, 2004.
- [14] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation [J]. Monthly Weather Review, 2008, 136: 2999-3016.
- [15] Dickey T D, Nencioli F, Kuwahara V S. Physical and bio-optical observations of oceanic cyclones west of the island of Hawaii[J]. Deep Sea Res, 2008, 55(10-15): 1195-1217.
- [16] Nencioli F, Changming Dong, Dickey.T. 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: 564-579.
- [17] Xiu Peng, Chai Fei, Shi Lei, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993-2007[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, C03012, doi: 10.1029/2009JC005657.
- [18] Wang Guihua, Chen Dake, Su Jilan. Winter eddy genesis in the Eastern South China Sea due to orographic wind jets[J]. J Phys Oceanogr, 2008, 38: 726-732.
- [19] Su Jilan, Xu Jianping, Cai Shuqun. Onset and evolution of the South China Sea monsoon and its interaction with the ocean[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [20] Gan Jianping, Qu Tangdong. Coastal jet separation and associated flow variability in the southwest South China Sea[J]. Deep-Sea Research I, 2008, 55: 1-19.
- [21] Shaw P T. 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.
- [22] Wang Guihua, Xue Huijie, Xu Jianping. Study of northeastern circulation by improved inverse method[J]. Oceanography in China, 2001, 13: 15-22.
- [23] Qu Tangdong. Notes and correspondence upper-layer circulation in the South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30: 1450-1460.
- [24] 刘先炳, 苏纪兰. 南海环流的一个约化模式[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(2): 117-167.
Liu Xianbing, Su Jilan. A reduced gravity model of the circulation in the south China Sea[J]. Oceanologia et limnologia Sinica, 1992, 23(2): 117-167.
- [25] Metzger E J, Hurlburt H. The importance of high horizontal resolution and accurate coastline geometry in modeling South China Sea inflow[J]. Geophysical Research Letter, 2001, 28: 1059-1062.
- [26] Cai Shuqun, Su Jilan, Gan Zijun, et al. The numerical

- study of the South China Sea upper circulation characteristics and its dynamic mechanism in winter[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22: 2247-2264.
- [27] 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 Wendong, Guo Zhongxin, Huang Yuting. Observation of circulation in the south of the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(21): 2264-2271.
- [28] 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.
- [29] Metzger E J. Upper ocean sensitivity to wind forcing in the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 59: 783-798.
- [30] Liu Zhengyu, Yang Haijun, Liu Qinyu. Regional dynamics of seasonal variability in the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31: 272-284.
- [31] Tai C, White W. Eddy variability in the Kuroshio extension as revealed by geosat altimetry: energy propagation away from the jet, Reynolds stress, and seasonal cycle [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(11): 1761-1777.
- [32] Yuan Dongliang, Han Weiqing, Hu Dunxin. Anti-cyclonic eddies northwest of Luzon in summer-fall observed by satellite altimeters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L13610.
- [33] 陈更新. 南海中尺度涡的时空特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
Chen Gengxin. Spatio-temporal characteristics of the mesoscale eddies in the South China sea[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [34] Chen Gengxin, Hou Yijun, Zhang Qilong, et al. The eddy pair off eastern Vietnam: interannual variability and impact on thermohaline structure [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(7): 715-723.
- [35] 刘秦玉, 杨海军, 贾英来, 等. 南海海面高度季节变化的数值模拟[J]. *海洋学报*, 2001, 23(2): 9-17.
Liu Qinyu, Yang Haijun, Jia Yinglai, et al. The numerical simulation of the seasonal variation of the sea surface height in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(2): 9-17.

Seasonal and interannual variability of mesoscale eddy intensity in the South China Sea

WANG Wen-Jie^{1, 2}, LIU Yu-di¹, ZHU Jin-shuang¹, SHEN Jun³

(1. Institute of Meteorology, People's Liberation Army of China University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. Meteorological Station of 93968 Armed Forces, Wulumuqi 830075, China; 3. Meteorological Station of 94926 Armed Forces, Wuxi 214008, China)

Received: Jan. 22, 2013

Key words: simple ocean data assimilation (SODA); the South China Sea; mesoscale eddy; seasonal and interannual variability

Abstract: To research seasonal and interannual variations of the mesoscale eddy intensity in the South China Sea, an auto eddy detection algorithm is used to analyze initial position of mesoscale eddies in the South China Sea (SCS) by using velocity and surface height field data extracted by Matlab software from the 50 years of simple ocean data assimilation (SODA) monthly datasets (1958–2007). In addition, seasonal and interannual variability of the root-mean-square (RMS) of sea surface height (SSH) anomalies are analyzed. Results show that mesoscale eddies in the SCS are mainly distributed off the southwest of Taiwan close to the Luzon Strait, southwest of the Luzon Island, and east of Vietnam in the deep basin of the SCS. The mesoscale eddy energy shows significant seasonal changes; maximum between autumn and winter and minimum in spring. In addition, the high value area of mesoscale eddy intensity also has significant interannual variability. Conclusions from viewing seasonal change show that the root mean square of the sea surface height anomaly is at a minimum (maximum) in spring and summer (autumn and winter) and that interannual variation has a significant negative correlation with the Nino3 index in the same period, which is about three years.

(本文编辑: 刘珊珊)