

热带西太平洋北赤道逆流区涡旋统计分析

律明坤^{1,2,3}, 臧楠^{1,2}, 王凡^{1,2,4,5}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266071; 5. 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 随着海洋技术的发展, 中尺度的海洋过程越来越多的被揭示, 中尺度涡旋作为重要的中尺度海洋过程, 已经被大量的研究。但对于热带西北太平洋海区, 中尺度涡旋特征的空间分布、季节变化以及移动规律等方面的研究还有所欠缺。本文使用 Chelton 提供的涡旋数据集, 统计分析了热带西北太平洋海区涡旋特征的空间分布, 发现以往研究较少的北赤道逆流(North Equatorial Countercurrent, NECC)区(A海区, 120°~180°E, 4°~6°N)较临近海域生成涡旋数量更多, 涡旋半径、振幅、生命周期及非线性强度更大, 移动距离更远, 并且 A 海区涡旋径向移动距离服从伽马分布。涡旋在靠近西边界的区域更易向南移动, 而在西边界以东的区域更易向北移动。A 海区涡旋的生成数量具有明显的季节变化, 主要受到流场剪切强度的影响。同时 ENSO 会对该区涡旋生成产生影响, 其影响机制需要进一步的研究。

关键词: 中尺度涡; 北赤道逆流; 特征分布; 季节变化; ENSO

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)10-0067-10
DOI: 10.11759/hyxx20170508002

热带西北太平洋拥有着复杂的表层环流系统^[1-3]。北赤道流(North Equatorial Current, NEC)在抵达菲律宾沿岸后分叉形成向北流动的黑潮(Kuroshio Current, KC)和向南流动的棉兰老海流(Mindanao Current, MC)^[2, 4-5]。大部分 KC 沿着中国东部陆坡向北流动, 小部分通过吕宋海峡入侵南海^[6-7]。MC 在向南流动的过程中在棉兰老岛东南部发生分叉, 大部分 MC 流入苏拉威西海汇入印尼贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF), 其余部分汇入北赤道逆流(North Equatorial Countercurrent, NECC)^[5, 7-10](图 1, 背景底色和黑色矢量箭头使用 AVISO 的 1993 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日的海表面高度数据和地转流数据绘制)。

热带西北太平洋海区普遍存在着涡旋活动。其中有两个重要的涡旋, 一个是棉兰老岛以东的气旋式的棉兰老涡(Mindanao Eddy, ME), 中心位于 7°N, 129°~130°E 附近(图 1)。另一个是反气旋式的哈马黑拉涡(Halmahera Eddy, HE), 它是一个季节性涡旋, 位于 ME 东南, 中心位于(131°E, 4°N)附近, 是连接新几内亚沿岸流(New Guinea Coastal Current, NGCC)和 NECC 的通道^[3]。除了两个大型的涡旋, 热带西北太平洋海区还存在着中尺度涡旋活动, Heron 等^[11]利用海洋表面流实时分析场数据(Ocean Surface Currents Analyses—Real-time, OSCAR), 实测 TRITON

(TRIangle Trans-Ocean buoy Network)浮标资料, 海军研究实验室分层海洋模式(Naval Research Laboratory Layered Ocean Model, NLOM)资料, 和 1985—2000 年 31 个航次的船载声学多普勒海流计(Joint Archive for Shipboard ADCP Data, JASADCP)资料研究了帕劳(Palau)海域环流的季节变化, 发现了之前没有被人注意到的季节性涡旋——帕劳涡、加罗琳涡和密克罗尼西亚涡。Chen 等^[12]利用卫星高度计数据研究了棉兰老穹顶(Mindanao Dome, MD)海区的中尺度涡, 发现此海区中尺度涡多具有非线性, 直径小于 300 km, 由于地形阻碍多为局地产生。Chen 等^[13]计算热带西北太平洋的中尺度涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE)的季节变化, 发现此海区 EKE 夏强冬弱, 且局限在

收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406014); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010204); “全球变化与海气相互作用”专项(GASI-03-01-01-05); 山东省科技发展计划(2013GRC31503)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41406014; the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDA11010201; the Global Change and Air-Sea Interaction Program, No. GASI-03-01-01-05; the Scientific and Technological Development Plan Project of Shandong Province, No. 2013GRC31503]

作者简介: 律明坤(1990-), 男, 山东胶州人, 硕士在读, 主要从事中尺度涡旋研究, Email: qdlvmingkun@126.com; 王凡, 通信作者, 研究员, 主要从事物理海洋学研究, Email: fwang@qdio.ac.cn

上层 200 m 内。此外，中尺度涡旋可以带来水体的拉格朗日输运^[14-15]，其纬向质量输运可与风驱和热盐环流相比拟^[15]。

在热带西北太平洋海区，大尺度环流除西边界流外，主要是纬向的 NEC 和 NECC，其经向输运的量级要远小于纬向输运的量级。而中尺度涡引起的经向输运就可能在这一海区的经向输运中占有很大

比例，从而影响这一海区的温盐结构和环流结构。这些重要问题的解决必然要建立在了解热带西北太平洋海区涡旋的空间分布特征及其时间变化规律的基础上，但是目前这方面的统计分析工作还比较欠缺。因此，本文使用 Chelton 的数据，详细地分析了热带西北太平洋涡旋的主要统计特征，并讨论了涡旋数量的季节变化以及 ENSO 循环对涡旋生成数量的影响。

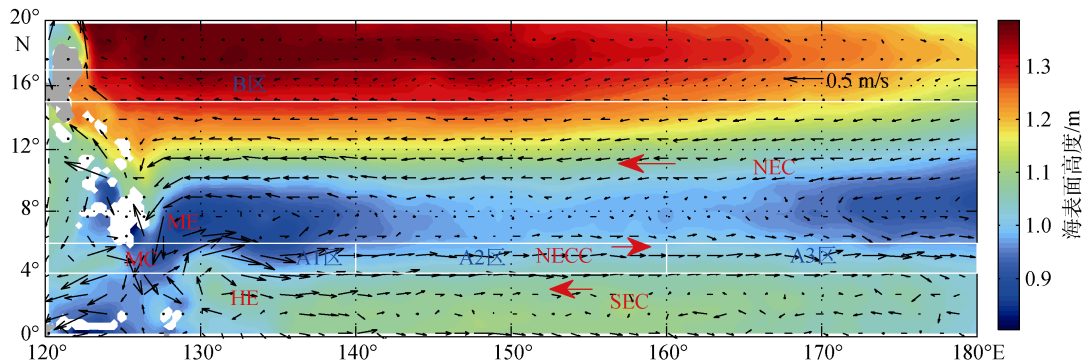


图 1 热带西北太平洋气候态流场及海表面高度

Fig. 1 Climatological mean flow field and sea level in the northwestern tropical Pacific

1 数据与方法

本文使用的涡旋数据是 Chelton 通过 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, <https://www.aviso.altimetry.fr>) 的海表面高度(sea surface height, SSH)数据识别的涡旋数据集，数据集的时间范围是 1993 年 1 月~2015 年 4 月，空间范围是全球海洋(除去 2°S~2°N)(<http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/>)。涡旋的产生伴随着流场的辐聚辐散，从而产生 SSH 的变化，而流线近似和海表面高度异常的等值线重合，那么最外侧的等高线就可以被定义为涡旋边界。Chelton 就是基于这一事实识别出气旋涡和反气旋涡。本文的研究海区为 120°~180°E, 2°~20°N，将使用此海区内全部的涡旋数据。

本文还使用 AVISO 的海表面地转流速数据(<https://www.aviso.altimetry.fr>)来计算 NECC 和 NEC 的流轴。使用的地转流速数据的时间范围为 1993 年 1 月 1 日~2014 年 12 月 30 日，空间范围为 120°~180°E, 2°~20°N，空间分辨率为 0.25°×0.25°。

在文章中讨论涡旋的生成位置时需要计算流轴的位置^[16]，其计算公式为

$$Y_{CM}(x, t) = \frac{\int_{Y_S}^{Y_N} y \cdot u(x, y, t) dy}{\int_{Y_S}^{Y_N} u(x, y, t) dy} \quad (1)$$

其中， Y_{CM} 为流轴的位置坐标， Y_S ， Y_N 为海流的南北纬度边界， u 为流场的水平流速。

另外，在研究中我们使用流场剪切强度和流场强度的概念来分析涡旋生成的季节变化与周围环境的关系。流场强度的计算公式为

$$I_{NT}(x, t) = \int_{Y_S}^{Y_N} u(x, y, t) dy \quad (2)$$

它是通过流场对水体的输运量来定义的，流场对水体的输运量越大意味着流场的强度越强。

根据剪切的物理意义可认为两支海流的剪切强度等于两支海流的流场强度之差，所以海流的剪切强度计算公式为

$$S_{INT}(x, t) = |I_{NT_1}(x, t) - I_{NT_2}(x, t)| \quad (3)$$

分别定义 NECC, NEC, SEC 的纬度范围为 1°~6°N, 6°~10°N, 7°S~1°N，并由此计算三支海流之间的剪切强度。

2 热带西北太平洋涡旋的空间分布与基本特征统计

本文统计研究了热带西北太平洋海区 1°×1°网格内产生的涡旋数量、振幅、半径、生命周期的空间分布及随纬度的变化(图 2a~图 2h)。整个研究海域内共有涡旋 5 115 个，其中气旋涡 2 517 个，反气旋涡 2 598 个(图 2a)。进一步统计涡旋个数在不同纬度带上的分布，涡旋产生数量的两个极大值分别位于

北赤道逆流区(4°~6°N)和副热带逆流区(15°~17°N), 分别定义为 A 区和 B 区(图 1)。在 Chelton 涡旋数据集中, 涡旋的振幅定义为涡旋边界处的基础高度和涡旋中心 SSH 的极值之间的差值^[17]。涡旋近似处于地转平衡(即沿着流的方向, 右侧的压力高, 水位高)^[17], 因此对于气旋涡(反气旋涡), 涡旋中心 SSH 低于(高于)涡旋边界的基础高度。整个海区涡旋生成时的平均振幅为 3.07 cm, 其中小于 5 cm 的占 84.22%, 大于 10 cm 的占 2.74%。振幅较大的涡旋主要分布在流速较大海区, 包括 NECC 西部、MC 和 KC 海区(图 2c),

这主要是由于地转近似下, 流速越大, 海表面高度起伏越大(即振幅越大)。涡旋半径在南部较大, 北部较小, 12°N 以南平均半径为 110.70 km, 12°N 以北平均半径为 79.75 km(图 2(e))。这种涡旋半径随纬度的变化是由于科氏参数随纬度变化引起的。随着纬度的升高, 科氏参数变大, 罗斯贝变形半径将变小^[18], 相应的涡旋的半径也将减小。涡旋生命周期存在两个极大值区, 分别位于 16°N 以北和 6°N 以南, 平均生命周期分别为 83.78 d 和 54.85 d。6°~16°N 的涡旋的平均生命周期为 53.80 d。

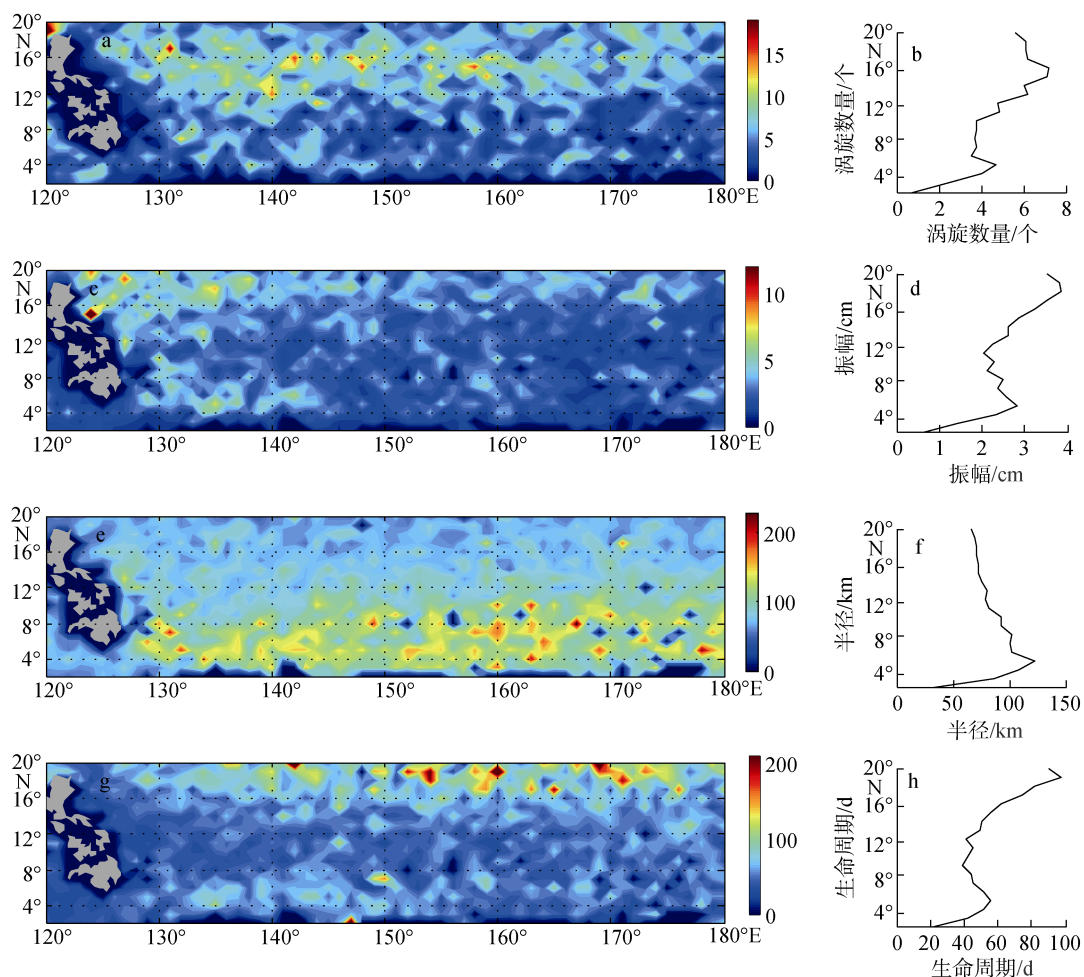


图 2 1993 年 1 月~2015 年 4 月涡旋各变量的空间分布(a、c、e、g)及纬向平均值(b、d、f、h)

Fig. 2 Spatial distribution of eddy variables (a, c, e, g) and zonal mean values (b, d, f, h) from Jan. 1993 to Apr. 2015

热带西北太平洋生成涡旋的个数随半径、振幅和生命周期的变化也有明显的规律(图 3)。气旋涡和反气旋涡表现出了相同的变化规律。气旋涡和反气旋涡数量皆随振幅的增大而减小, 95.61%的气旋涡振幅小于 10 cm(图 3a), 98.97%的反气旋涡振幅小于 10 cm。气旋涡最大半径为 329.23 km, 94.84%的气旋

涡半径在 30~170 km(图 3b); 反气旋涡最大半径为 358.84 km, 95.43%的反气旋涡半径在 30~170 km。90.84%的气旋涡生命周期小于 120 d, 91.34%的反气旋涡生命周期小于 120 d, 生命周期 ≥ 38 d 的气旋涡和反气旋涡的数量随着生命周期的增加而减少(图 3c)。

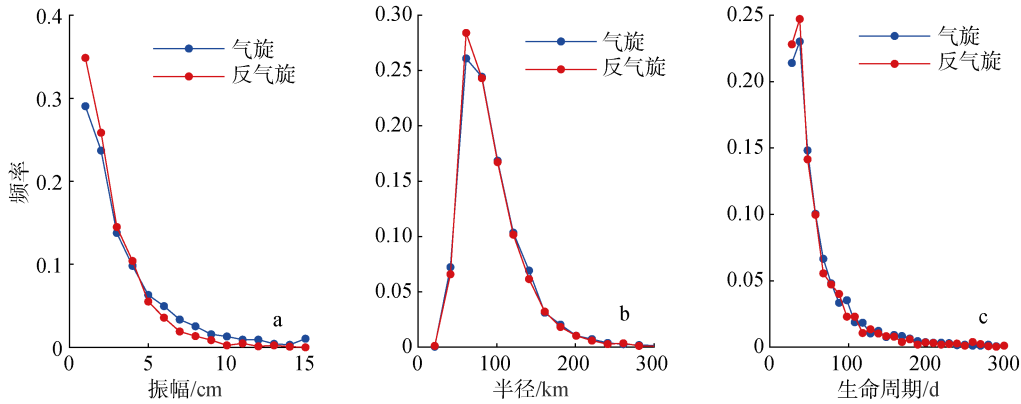


图3 涡旋振幅(a)半径(b)以及生命周期(c)的频率分布图
 Fig. 3 Frequency distributions of amplitude (a), radius (b), and lifecycle (c)

3 热带西太平洋北赤道逆流区涡旋的经向移动与输运

热带西北太平洋的大尺度环流除西边边界流之外,主要是纬向流,这种大尺度的环流的质量、盐度和热量的输运都有过相应的研究。而对于中尺度及更小尺度的输运研究的很少。更重要的一点是对于大尺度的环流,纬向的输运要远远大于经向的输运。那么,中尺度涡旋的经向输运就有可能对质量热量的经向输运起到重要作用。另外,这一海区盐度的经向梯度远远大于纬向梯度^[19],中尺度涡旋的经向盐度输运对这一海区的盐度结构很可能也有重要影响。为研究这

些问题,就需要对涡旋的经向移动有一个初步的认识。因此,本节我们对涡旋经向移动规律做了统计分析。

涡旋因不稳定而产生后,因为受各种条件的影响,具有了不可预测性,涡旋的消亡位置在经向上可以看成是随机的。因此在大样本的前提下,通过统计得到的频率分布可以近似的作为概率分布。将A海区详细划分为A1海区(120°~140°E, 4°~6°N), A2海区(140°~160°E, 4°~6°N), A3海区(160°~180°E, 4°~6°N),分别统计A1、A2、A3海区涡旋的经向移动距离的频率分布并对其进行拟合,拟合曲线皆通过K-S伽马分布检验(图4)。三个海区的形状参数 α 分别为2.915 0、5.589 6、4.881 6,尺度参数 $\beta=0.834 0$ 、

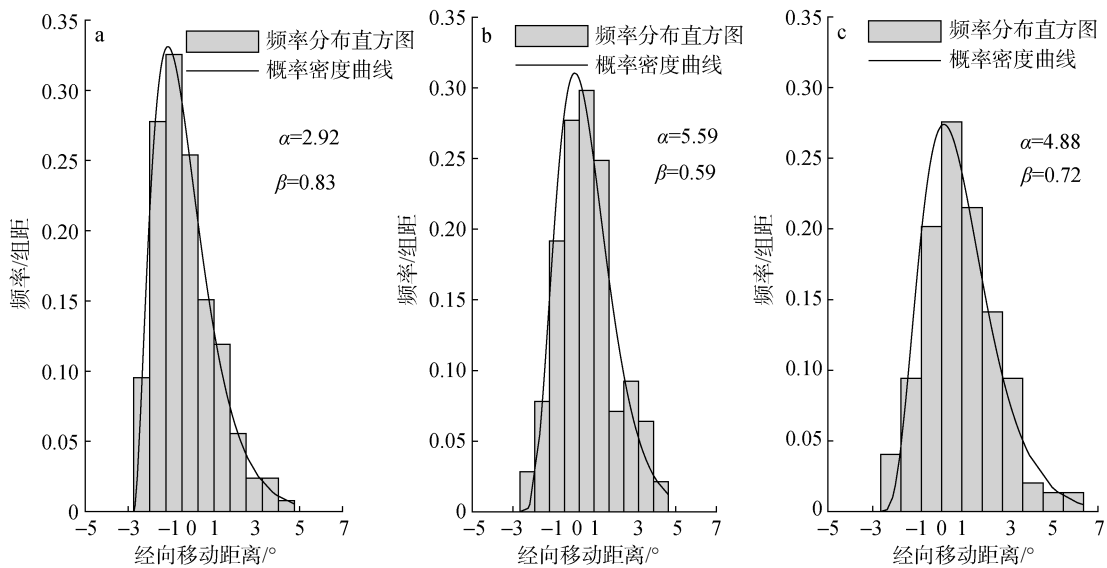


图4 A1(a)、A2(b)和A3(c)区涡旋经向移动距离的概率密度分布拟合图

Fig. 4 Probability density distribution fitted to eddy movement distance in (a) A1, (b) A2, and (c) A3 zones

移动距离的正值: 涡旋向北移动; 移动距离负值: 涡旋向南移动

Positive value of movement distance: eddy moving northward; negative value of movement distance: eddy moving southward

0.588 9、0.723 4。经过统计 A1 区共 168 个涡旋, 其中 65.72% 的涡旋向南移动; A2 区共 193 个涡旋, 其中 63.26% 的涡旋向北移动; A3 区共 165 个涡旋, 其中 67.39% 的涡旋向北移动。由年平均地转流数据计算的 A1、A2、A3 三个海区的平均经向流速分别为: -0.0034 m/s , 0.0165 m/s , 0.0069 m/s 。因此在 A1 海区中向南运动的涡旋较多, 在 A2, A3 海区中向北移动的涡旋较多的现象是由背景流的平流作用引起的。在 B 海区产生的涡旋的经向移动距离不符合任

何常见的分布(图略)。

为了进一步分析涡旋在不同纬度带上的经向移动距离的远近, 分别给出涡旋的经向移动距离分布(图 5a)和经向移动距离(绝对值)的纬向平均分布(图 5b), 发现 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}\text{N}$ 生成的涡旋普遍能够在经向上移动的更远, 这与该海区的背景流有关。图 5c 为该海区的 AVISO 地转流经向流速的纬向平均分布, 可以看出, 经向地转流在 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}\text{N}$ 达到最强, 强的背景流能把涡旋带到更远的纬度位置。

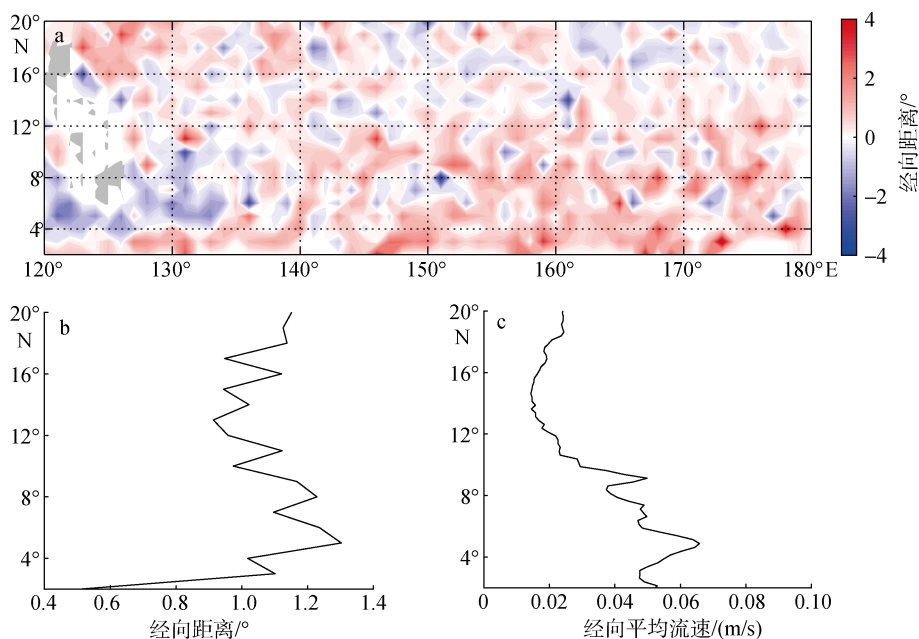


图 5 涡旋经向移动距离分布(a)、距离(绝对值)的纬向平均分布(b)以及 AVISO 地转流经向流速(绝对值)的纬向平均分布(c)
Fig. 5 Distribution of meridional movement distance (a), zonal average value of eddy meridional movement distance (absolute value, b), and zonal average value of meridional geostrophic velocity (absolute value) from AVISO (c)

以往的研究表明, 并不是所有识别出的涡旋都能够有效地输运水体, 涡旋的非线性作用使得涡旋可以携带水体移动^[14-15]。涡旋能否进行直接的质量输运取决于涡旋是否具有非线性。涡旋的非线性可以用非线性度 $N=U/c$ 来估计^[14], 其中 U 为涡旋的最大平均旋转速度(一般为涡旋边界处的平均速度), c 为涡旋移动速度, 当 $N>1$ 时, 认为涡旋具有非线性。分别统计三个海区($120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $160^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)的涡旋非线性特性, 由涡旋平均非线性度和非线性涡旋所占比例随纬度变化曲线可知, 三个海区涡旋的平均非线性度和非线性涡旋所占比例皆在 10°N 附近达到最小值(图 6a、图 6b)。随着纬度的升高, 涡旋的非线性度和非线性涡旋所占比例在量值增加的同时发生收束现象, 不同经度区间差异变小。而越往南, 涡旋的非线性度和非线性涡旋所占比例

在不同经度区间的差异变大, 10°N 以南的三个区域非线性度分别为 4.08、1.78 和 1.28, 非线性涡旋所占比例分别为 0.73、0.48 和 0.36。因此, 在低纬度地区, 越靠近西边界涡旋的非线性越强, 非线性涡旋比例越大。低纬度的西边界区的非线性强度明显高于其它海区, 可能是由于此海区内流场和风场复杂多变, 涡旋和海流之间, 涡旋和风场之间的非线性相互作用更加频繁而剧烈导致的。

4 北赤道逆流区(A海区)中涡旋生成数量的季节变化及其与副热带逆流区(B海区)的比较

由涡旋的空间分布特征得知 A、B 海区(图 2a)生成涡旋较多, 进一步分析这两个海区内生成涡旋

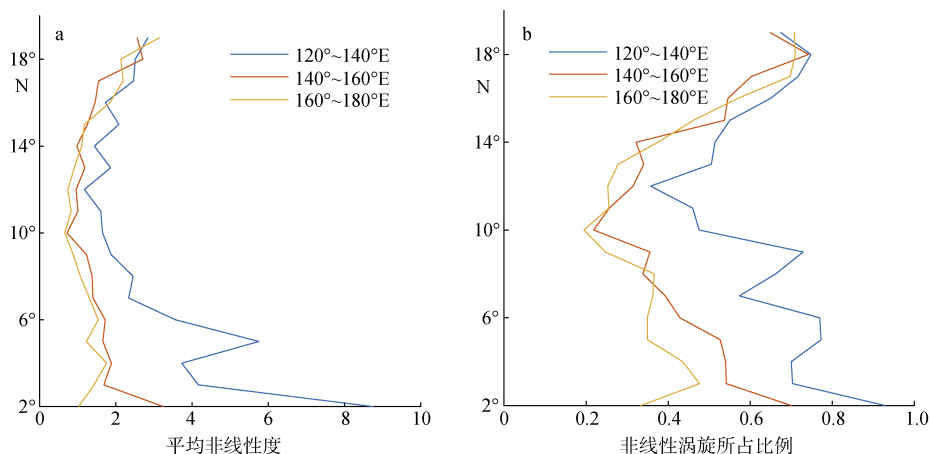


图 6 三个区域(120°~140°E, 140°~160°E, 160°~180°E)涡旋非线性度(a)、非线性涡旋($U/c > 1$, b)所占比例的纬向平均分布
Fig. 6 Zonal average distributions of eddy nonlinearity (a) and the proportion of nonlinear eddies ($U/c > 1$, b) in three regions (120°~140°E, 140°~160°E, 160°~180°E)

的季节变化。统计得到涡旋生成个数的气候态月平均曲线(图 7), A 海区的气旋涡和反气旋涡均具有明显的季节变化。气旋涡夏季和冬季多, 春季和秋季少

(图 7b)。而反气旋涡在夏季数量最少, 冬季数量最多(图 7a)。B 海区气旋涡和反气旋涡均没有明显的季节变化(图 8a、图 8b)。

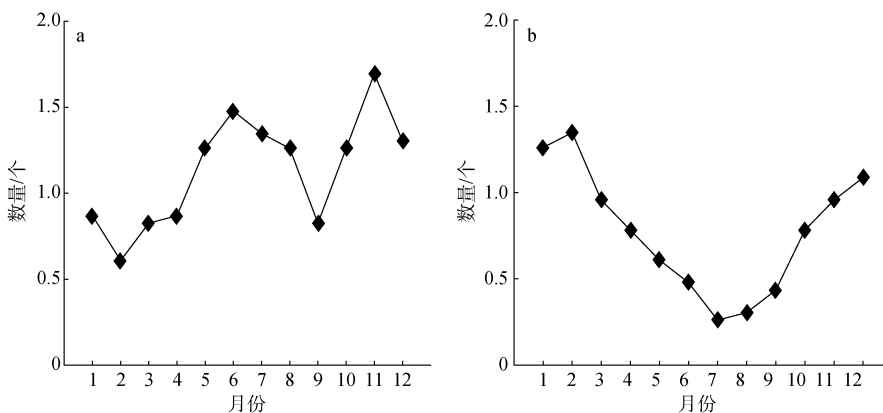


图 7 A 区气旋涡(a)反气旋涡(b)数量的气候态月平均分布

Fig. 7 Climatological monthly mean numbers of cyclonic (a) and anticyclonic (b) eddies in A zone

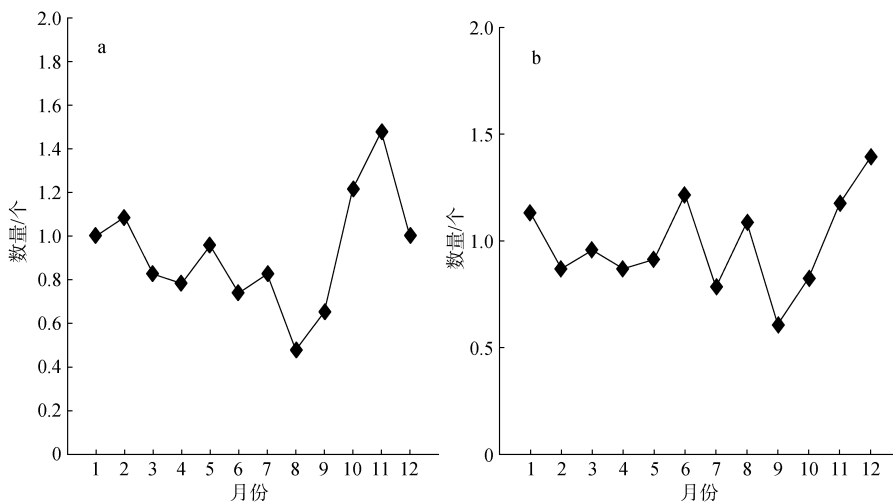


图 8 B 区(a)气旋涡(b)反气旋涡数量的气候态月平均分布

Fig. 8 Climatological monthly mean numbers of (a) cyclonic and (b) anticyclonic eddies in B zone

为了解释 A 区涡旋生成数量季节变化的成因, 我们统计了 NECC 流轴附近不同区域的涡旋生成数量(表 1), 其中流轴位置通过公式(1)计算。NECC 是东向流, NEC 和 SEC 是西向流, 如果涡旋是海流的

剪切作用产生的, 那么在 NECC 以北会多出现气旋, NECC 以南会多出现反气旋。经统计实际情况也是如此(表 1), 气旋涡大部分生成在了 NECC 以北, 反气旋涡大部分生成在了 NECC 以南。

表 1 NECC 流轴附近不同区域的涡旋数量(个)

Tab. 1 Number of eddies in different regions near the NECC axis

气旋涡生成位置	A1 海区	A2 海区	A3 海区	反气旋涡生成位置	A1 海区	A2 海区	A3 海区
NECC 以北	54	57	77	NECC 以北	11	25	9
NECC 以南	6	7	22	NECC 以南	29	58	58

使用 AVISO 提供的地转流数据通过公式(2)和公式(3), 计算得到流场剪切强度 $S_{INT}(x, t)$ 的气候态月平均变化曲线(图 9)。比较图 9 和图 7, 可见它们的变化基本上同相位。NECC 与 NEC 的剪切在夏季和冬季最强, 春

季和秋季最弱, 气旋涡的产生也有同样的季节变化。NECC 与 SEC 的剪切在夏季弱, 冬季强, 反气旋涡的变化遵循同样的规律。因此可以推断, 涡旋的生成个数的季节变化主要是由流场剪切的季节变化引起的。

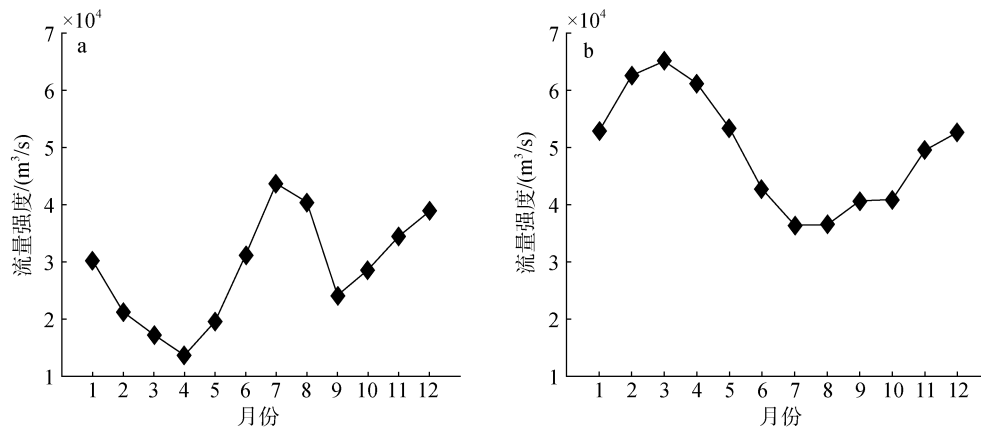


图 9 气候态月平均的 NEC 和 NECC(a)、NECC 和 SEC(b)的流场剪切强度变化

Fig. 9 Climatological monthly mean shear intensities between NEC and NECC (a), NECC and SEC (b)

5 北赤道逆流区(A 海区)涡旋生成与气候异常事件的关联

根据气候预测中心(Climat Prediction Center, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>) 发布的 Nino3.4 指数, 定义 Nino3.4 指数 >0.5 并持续 5 个月的事件为一次厄尔尼诺事件, Nino3.4 指数 <-0.5 并持续 5 个月的事件为一次拉尼娜事件。则 1993 年 1 月~2014 年 12 月一共发生了 6 次厄尔尼诺事件(分别为: 1994~1995、1997~1998、2002~2003、2004~2005、2006~2007、2009~2010), 一共发生了 5 次拉尼娜事件(分别为: 1995~1996、1998~1999、2000~2001、2007~2008、2010~2012)。我们将所有厄尔尼诺事件和拉尼娜事件中生成的涡旋个数和对应的 Nino3.4 指数分别合成序列, 得到图 10。可以看出 A 的三个

海区气旋涡大部分产生在厄尔尼诺成熟期及成熟期之前, 反气旋涡大部分产生在厄尔尼诺成熟期和成熟期之后, 而在拉尼娜事件中并没有明显的规律。

为了分析涡旋生成个数在厄尔尼诺事件中的变化原因, 同样合成得到流场剪切强度在厄尔尼诺事件中的变化曲线(图 11)。可见, NECC 和 NEC 剪切强度的变化以及 NECC 和 SEC 剪切强度的变化滞后于 Nino3.4 指数。而 NECC 和 NEC 的剪切产生气旋涡, NECC 和 SEC 的剪切产生反气旋涡。因此, 可以通过 NECC 和 SEC 的剪切强度的变化滞后 Nino3.4 指数的变化来解释反气旋涡滞后厄尔尼诺成熟期大量生成的现象。而气旋涡超前于厄尔尼诺成熟期大量生成的现象则不能单独通过 NECC 和 NEC 的剪切作用解释。因此, 推测在年际尺度上其他影响气旋生成的因素(比如风场)的作用将会显现, 而这有待进一步研究。

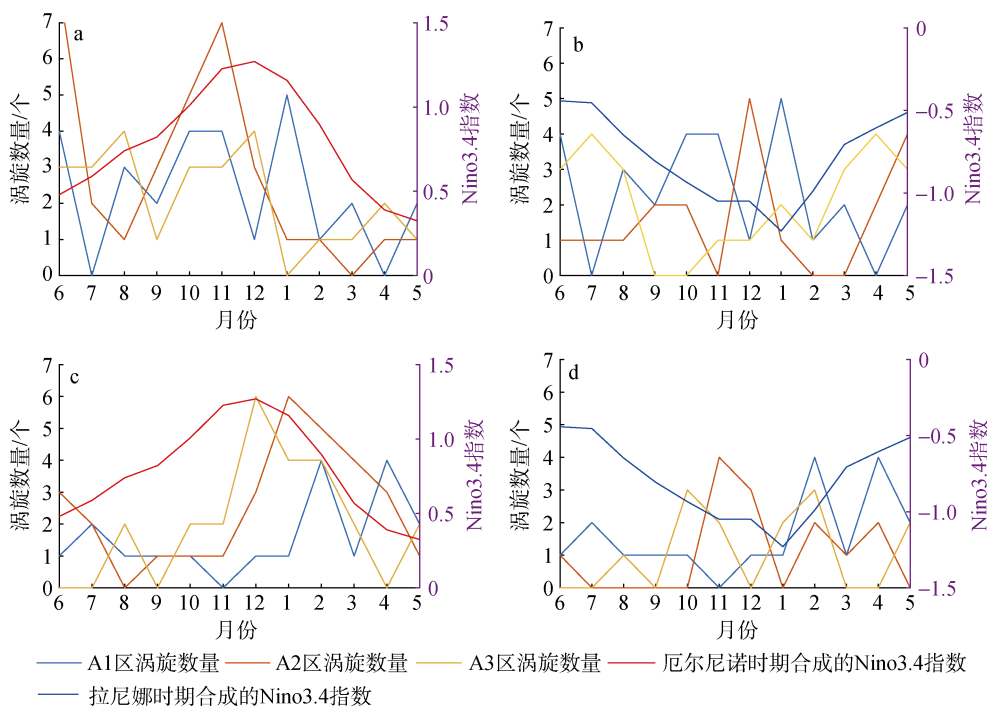


图 10 A 海区气旋涡在厄尔尼诺事件(a)以及拉尼娜事件(b)中的数量变化, 反气旋涡在厄尔尼诺事件(c)以及拉尼娜事件(d)中数量的变化

Fig. 10 Number of cyclonic eddies in El Niño event (a) and La Niña event (b), and number of anticyclonic eddies in El Niño event (c) and La Niña event (d) in A zone

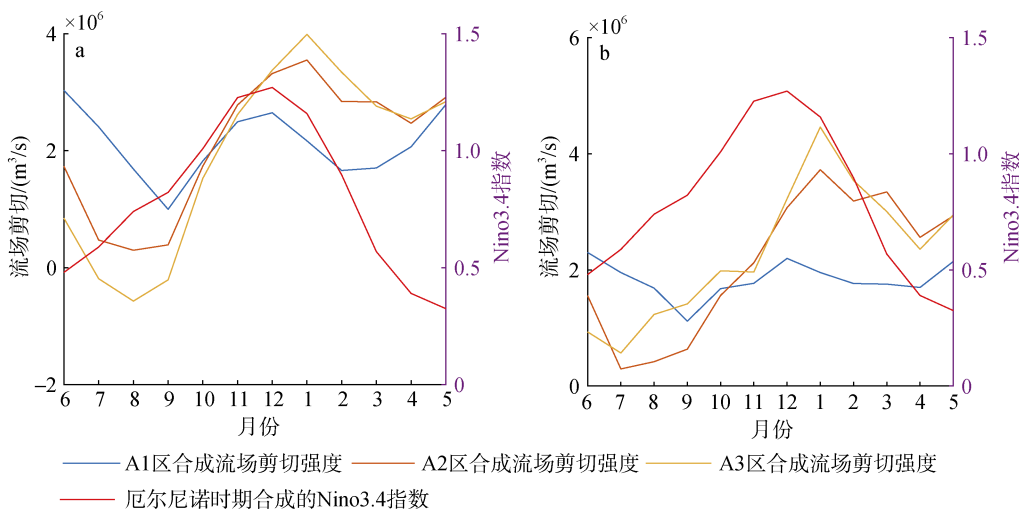


图 11 A 海区 NECC 和 NEC 的流场剪切强度在厄尔尼诺事件中的变化(a)以及 NEC 和 NECC 的流场剪切强度在厄尔尼诺事件中的变化(b)

Fig. 11 NEC and NECC shear intensity variations (a) and NEC and NECC shear intensity variations (b) in El Niño event in A zone

6 总结与讨论

本文使用 Chelton 提供的涡旋数据集, 统计分析了热带西北太平洋海区涡旋特征的空间分布, 发现以往研究较少的 NECC 区(A 海区, 120°~180°E, 4°~6°N)较临近海域生成涡旋数量更多, 涡旋半径、

振幅、生命周期及非线性强度更大, 移动距离更远, 并且 A 海区涡旋经向移动距离服从伽马分布。涡旋在靠近西边界的区域更易向南移动, 而在西边界以东的区域更易向北移动, 这是由此海域背景流场的平流作用引起的。A 海区气旋涡和反气旋涡的生成数量存在明显的季节变化: 气旋涡夏季和冬季多,

春季和秋季少；而反气旋涡在夏季数目少，冬季数目多。B 海区生成的涡旋数量没有明显的季节变化。A 区气旋涡和反气旋涡的季节变化分别由 NECC 与 NEC、以及 NECC 和 SEC 的流场剪切的季节变化引起。分别将研究期间的厄尔尼诺事件和拉尼娜事件中的涡旋数量和 Nino3.4 指数进行合成，对比发现在厄尔尼诺期间，三个海区气旋涡超前于厄尔尼诺成熟期大量产生，反气旋涡滞后于厄尔尼诺成熟期大量产生，而在拉尼娜期间并未发现明显的规律。通过分析发现，NECC 和 NEC 剪切强度的变化以及 NECC 和 SEC 剪切强度的变化均滞后于 Nino3.4 指数的变化。反气旋涡滞后于厄尔尼诺成熟期的大量产生可以通过 NECC 和 SEC 的剪切强度峰值滞后于 Nino3.4 指数峰值来解释，而气旋涡超前于厄尔尼诺成熟期的大量产生则可能由于受到其他因素(比如风场)的影响，这有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Fine R A, Lukas R, Bingham F M, et al. The western equatorial Pacific: A water mass crossroads [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1994, 99(C12): 25063-25080.
- [2] Lukas R, Yamagata T, McCreary J P. Pacific low-latitude western boundary currents and the Indonesian through-flow[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996, 101(C5): 12209-12216.
- [3] Hu D, Wu L, Cai W, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate[J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299-308.
- [4] Qu T, Lukas R. The Bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(1): 5-18.
- [5] Wang F, Song L, Li Y, et al. Semi annually alternating exchange of intermediate waters east of the Philippines[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7059-7065.
- [6] Lee S K. On the structure of supercritical western boundary currents[J]. *Dynamics of Atmospheres & Oceans*, 2001, 33(4): 303-319.
- [7] Wyrtki K. The thermohaline circulation in relation to the general circulation in the oceans[J]. *Deep Sea Research*, 1961, 8(1): 39-64.
- [8] Lukas R, Firing E, Hacker P, et al. Observations of the Mindanao Current during the western equatorial Pacific Ocean circulation study[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1991, 96(C4): 7089-7104.
- [9] Zhao J, Li Y, Wang F. Dynamical responses of the west Pacific North Equatorial Countercurrent (NECC) system to El Niño events[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2013, 118(6): 2828-2844.
- [10] Zhao J, Li Y, Wang F. Seasonal variation of the surface North Equatorial Countercurrent (NECC) in the western Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(6): 1332-1346.
- [11] Heron S F, Metzger E J, Skirving W J. Seasonal variations of the ocean surface circulation in the vicinity of Palau[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(4): 413-426.
- [12] Chen L, Jia Y, Liu Q. Mesoscale eddies in the Mindanao Dome region[J]. *Journal of Oceanography*, 2014, 71(1): 133-140.
- [13] Chen X, Qiu B, Chen S, et al. Seasonal eddy kinetic energy modulations along the North Equatorial Countercurrent in the western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(9): 6351-6362.
- [14] Early J J, Samelson R M, Chelton D B. The Evolution and Propagation of Quasigeostrophic Ocean Eddies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(8): 1535-1555.
- [15] Zhang Z, Wang W, Qiu B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 322-324.
- [16] Hsin Y C, Qiu B. Seasonal fluctuations of the surface North Equatorial Countercurrent (NECC) across the Pacific basin[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117(C6): 6001.
- [17] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [18] Pedlosky J. *Geophysical fluid dynamics*[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1987: 710.
- [19] Melnichenko O, Hacker P, Maximenko N, et al. Optimum interpolation analysis of Aquarius sea surface salinity[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2016, 121(1): 602-616.

Statistical analysis of North Equatorial Countercurrent area in tropical western Pacific

LÜ Ming-kun^{1, 2, 3}, ZANG Nan^{1, 2}, WANG Fan^{1, 2, 4, 5}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 5. Marine Dynamics Process and Climate Functional Laboratory, Qingdao 266100, China)

Received: Aug. 5, 2017

Key words: mesoscale eddies; North Equatorial Countercurrent; characteristic distribution; seasonal variation; ENSO

Abstract: With the development of ocean technology, more and more mesoscale ocean processes have been revealed. Mesoscale eddies are an important mesoscale ocean process that has been the subject of much research in recent decades. However, research on the spatial distribution, seasonal variation, and movement characteristics of mesoscale eddies in the northwestern Pacific is lacking. In this paper, we statistically analyzed the spatial distribution of eddies in the northwestern tropical Pacific using the eddy dataset provided by Chelton. We found that more eddies are generated in the North Equatorial Countercurrent (NECC) area (A zone, 120°–180°E, 4°–6°N) where less research effort has been focused. Moreover, the eddy radii, amplitudes, lifecycles, and nonlinear intensities are larger, the movement distances are farther, and the meridional eddy movement distances obey a gamma distribution in the A zone. Most eddies move southward in the region close to the western boundary, and most move northward far away from the western boundary. The quantity of eddies generated in the A zone exhibits obvious seasonal variation, which is mainly affected by the shear intensity of the currents. At the same time, eddy formation is affected by the ENSO in this area, and its mechanism requires further study.

(本文编辑: 李晓燕)