

北太平洋副热带逆流区中尺度涡旋的统计特征及其分布规律*

汤博^{1, 2, 3, 4} 侯一筠^{1, 2, 3, 4, 5} 殷玉齐^{1, 2, 4, 5} 胡珀^{1, 2, 4, 5}

(1. 中国科学院海洋研究所环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237)

摘要 本文基于卫星高度计得到的全球非线性中尺度涡旋数据集, 分析了北太平洋副热带逆流(Subtropical Countercurrent, STCC)区域中尺度涡旋的统计特征, 包括其基本特征、空间分布、传播特征、季节和年际变化; 给出了该区域涡旋振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数的分布直方图, 并利用瑞利分布和对数正态分布对其进行了拟合。结果显示, 涡旋振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数的直方图很好地服从于对数正态分布。此外, 通过与北太平洋中涡旋的对比研究, 我们发现在 STCC 区中对数正态分布的拟合效果更好。本研究提高了对 STCC 区域中尺度涡旋统计特征的认识, 明确了其与大洋中涡旋的区别; 通过对数正态分布对涡旋特征的拟合, 清晰地体现出了其分布规律, 这在很大程度上降低了对观测数据的依赖, 从而帮助我们更加有效地判断和预测涡旋特征的变化, 同时为数值模式中涡旋的参数化提供了依据。

关键词 中尺度涡旋; 副热带逆流(Subtropical Countercurrent, STCC); 统计特征; 对数正态分布
中图分类号 P722 **doi:** 10.11693/hyhz20190300050

中尺度涡旋在全球海洋中普遍存在, 具有数天至数百天的时间尺度, 数十公里至数百公里的空间尺度, 是非线性和孤立的, 具有气旋和反气旋特征。一般来说, 它们会捕获海水并向西传播, 从而影响物质的运输(Chelton *et al.*, 2011; Chaigneau *et al.*, 2011)。它们还可以调节海洋环流, 影响温度, 盐度和叶绿素的水平和垂直分布(Stammer, 1997, 1998; Qiu *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2011, 2012; Liu *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2011)。一直以来, 现场观测资料是研究中尺度涡旋的重要形式, 主要包括实测数据(Li *et al.*, 1998; Hu *et al.*, 2012)、Argo 剖面浮标数据(Chen *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012)、漂流浮标数据(Chow *et al.*, 2008; Nan *et al.*, 2011)和 XBT 数据(Lee *et al.*, 2003)等。近年来, 卫星高度计数据的日益完善在很大程度上解决了观测数

据的时间不连续和区域局限性等问题, 衍生了大量涡旋研究成果(Qiu, 1999; Qiu *et al.*, 2010; Chelton *et al.*, 2007, 2011; Liu *et al.*, 2012; Hwang *et al.*, 2004; Yin *et al.*, 2017)。其中, Chelton 等(2011)通过 16a(1993—2008 年)的卫星高度计 SLA 数据, 详细地分析了全球中尺度涡旋的统计特征、分布特征、运动特性、形状、非线性和传播特征等。

由于与北赤道流(North Equatorial Current, NEC)的垂直剪切作用, 北太平洋副热带逆流区(Subtropical Countercurrent, STCC)具有复杂的环流结构, 伴随着显著的中尺度涡旋过程, 成为近年国内外学者研究的重点。Hwang 等(2004)利用基于卫星高度计数据的地转流场, 识别了 STCC 区域中的涡旋。Liu 等(2012)利用卫星资料构建了 STCC 区域的涡旋数据集。他们

* 国家自然科学基金, 41630967 号; “全球变化与海气相互作用”专项项目, GASI-IPOVAI-01-06 号; 国家自然科学基金-山东省联合资助海洋科学研究中心项目, U1606402 号; 国家自然科学基金创新研究群体项目, 41421005 号。汤博, 博士研究生, E-mail: 1534250939@qq.com

通信作者: 侯一筠, 博士生导师, 研究员, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

收稿日期: 2019-03-10, 收修改稿日期: 2019-04-14

的结果表明该区域的涡旋以 8km/d 的速度向西传播,直到到达台湾以东的黑潮附近。Qiu(1999)利用多年的卫星资料,指出 STCC 区的涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE)具有显著的季节变化,且该变化特征是斜压不稳定的一种体现。Qiu 等(2010)研究了西北太平洋 STCC 区域中尺度涡旋的年际变化:在 1996—1998 年和 2003—2008 年涡旋非常活跃,在 1993—1995 年以及 1999—2002 年涡旋的活跃程度低于平均水平。此外,STCC 区中尺度涡的重要性还体现在其对水团的输运(Qiu *et al.*, 2005)。

值得一提的是,不同地区中尺度涡旋的分布特征表现出一些相似的性质。总体而言,在全球海洋中,涡旋的振幅、半径和旋转速度值大多分别在 2—20cm、50—150km 和 5—40cm/s 的范围内,且具有右偏分布的特征(Chelton *et al.*, 2011)。最近的一项研究指出北太平洋中尺度涡旋的半径、振幅、传播速度和 EKE 服从瑞利分布(Cheng *et al.*, 2014)。

综上所述,前人通过实测资料和卫星资料,分析了全球、北太平洋乃至 STCC 等区域中尺度涡旋的统计特征及其和概率分布。但是,STCC 区域涡旋的统计、分布特征还缺乏系统的归纳,其与全球、大洋涡旋特征的差异也没有对比研究。此外,瑞利分布并未充分体现涡旋的某些性质,拟合曲线和统计数据在数值较大时存在明显的偏差。因此,本文基于 Chelton 等(2011)

提供的全球涡旋数据集,详细归纳了 STCC 区域中尺度涡旋的统计特征、空间分布、移动特征及其季节、年际变化,利用效果更优的对数正态分布对其进行拟合,并将结果与北太平洋中尺度涡的特征进行对比,从而更好地理解 STCC 区域中尺度涡的统计、分布特征。

1 数据资料

1.1 卫星高度计资料

本文使用 DUACS 2014 近 20a 的地表地转速度异常数据来计算中尺度涡旋中的 EKE(Pujol *et al.*, 2016)。该数据由法国国家空间研究中心卫星海洋学数据存档中心(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO)提供,融合了 Topex/Poseidon、ERS-1 和 ERS-2、Jason-1 和 Jason-2、EnviSat 和 GFO(Geo Follow-On)卫星数据。它的时间分辨率为 1d,空间分辨率为 0.25°。此外,地转速度异常数据代表了 20a(1993—2012 年)地转速度和平均速度之间的差异。每单位质量的 EKE 定义为:

$$EKE = \frac{(u'^2 + v'^2)}{2}, \quad (1)$$

其中, u' 和 v' 表示纬向和经向地转速度异常。图 1 为近 25a 来北太平洋涡旋平均 EKE 的分布,不难看出,除了黑潮延伸体区域,STCC 区域具有较大的 EKE,是涡旋活跃的区域。

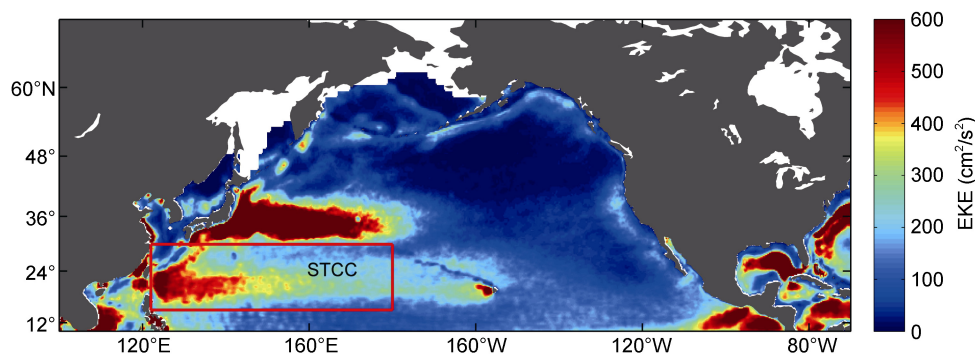


图 1 1993—2018 年北太平洋中尺度涡旋平均涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE)的分布

Fig.1 Mean EKE from 1993 to 2018 in the North Pacific

注:红色方框表示本文所研究的北太平洋副热带逆流(Subtropical Countercurrent, STCC)区域

1.2 涡旋数据

本文使用的涡旋数据基于 Chelton 等利用多年的 AVISO 卫星高度计探测得到的涡旋数据集,其时间分辨率为 7d,空间分辨率为 0.25°×0.25°。他们采用海面高度异常(sea surface height anomaly, SSHA)闭合等值线法探测涡旋(Chelton *et al.*, 2011),探测过

程中所需要满足的条件为:气旋涡(反气旋涡)范围内的所有格点的海表面高度必须全部低于(高于)该阈值;闭合曲线内的格点数至少为 8 个,且不能超过 1000 个;气旋涡(反气旋涡)范围内必须存在一个海表面高度的最小值(最大值);涡旋的生命周期必须在 4 周以上;涡旋的水位异常必须在 1cm 以上;

闭合曲线内任意格点之间的距离不能超过给定的阈值。涡旋的追踪方法为椭圆追踪法(Chelton *et al.*, 2007, 2011), 其基本追踪过程为: 从第一周起, 由东侧海区开始, 将首次探测到的涡旋中心定义为圆心, 随后假定一个圆形区域并将其视为此涡旋下一周可能到达的区域, 限定相邻步长的涡旋半径和振幅比值小于 10。按照上述的判断标准, 每一周追踪一次, 直到没有满足探测条件的涡旋为止。如果单次追踪持续 4 周以上, 则由此次追踪所得的结果就被视为同一个中尺度涡旋。如果在某一周追踪到多个满足探测条件的涡旋, 则选择与上周涡旋中心距离最近的结果。

目前, Chelton 涡旋数据集已更新至 2018 年, 时间分辨率已提高至 1d, 可以在 AVISO 上网站直接下载 (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddytrajectory-product.html>)。本文选取了 1993—2018 年的数据, 包含 179127 个气旋涡和 173245 个反气旋涡。该数据集提供了涡旋的振幅(海表面高度(sea surface height, SSH)的极值与涡旋内 SSH 的平均值之间的差值)、半径(涡旋的半径, 其面积等于最大旋转速度的轮廓所包围的圆)以及旋转速度(涡旋内的最大环绕速度)。此外, 我们通过半径 L 和旋转速度 U 定义了罗斯贝数 R , 如方程(2)所示:

$$R = \frac{U}{fL}, \quad (2)$$

其中, f 为科氏参数。由于考虑到中尺度涡旋需要满足地转平衡, 因此在由方程(2)得到的结果中剔除了罗斯贝数超过 0.1 的数据。

2 结果与分析

2.1 STCC 区域涡旋的基本特征

基于 Chelton 数据集, 本文首先分析了 1993—2018 年 STCC 中 3601 个气旋涡和 3373 个反气旋涡的振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数(表 1)。两种涡旋的平均寿命分别为 16 周和 17 周, 最长可达 200 周以上。气旋涡的平均振幅(旋转速度, 罗斯贝数)为 8.1cm(24.98cm/s, 0.053), 略高于反气旋涡的 7.3cm(22.89cm/s, 0.042)。振幅(旋转速度)最大值为 39cm(92.19cm/s), 同样略高于反气旋涡的 23cm(57.74cm/s)。而二者具有相似的空间尺度, 气旋涡(反气旋涡)半径的平均值和最大值分别为 91km(94km)和 176km(179km)。反气旋涡的最大罗斯贝数(0.1)与气旋涡相同。气旋涡和反气旋涡的平均 EKE 分别为 $315\text{cm}^2/\text{s}^2$ 和 $351\text{cm}^2/\text{s}^2$, 最大 EKE 分别为 $680\text{cm}^2/\text{s}^2$ 和 $706\text{cm}^2/\text{s}^2$ 。

上述所得的涡旋特征基本符合与前人在同一区域的研究结果(Liu *et al.*, 2012), 但部分涡旋特征在数值上存在一定的差异。例如, 涡旋的数量和平均半径略大于 Liu 等(2012)的结果: 3315(2987)、84.7km(86.2km); 而涡旋的平均生命周期略小于前人的结果: 约 18 周。这与所用涡旋数据集的差异有关, 本文所用的 Chelton 数据集基于 SSHA 方法探测涡旋, 而 Liu 等(2012)所用的涡旋数据集是基于几何流速的方法探测涡旋, 不同的涡旋探测方法在一定程度上影响了涡旋的数量和水平尺度。此外, Liu 等(2012)选取了 8 周以上的涡旋进行分析, 而本文中分析了生命周期为 4 周的涡旋, 故所得的涡旋数量较多而平均生命周期较短。

表 1 1993—2018 年北太平洋副热带逆流(Subtropical Countercurrent, STCC)区域和整个北太平洋中涡旋的统计特征
Tab.1 Statistics of eddies in the STCC and North Pacific from 1993 to 2018

区域	特征	数量(个)	生命周期(周)	振幅(cm)	半径(km)	旋转速度(cm/s)	罗斯贝数	涡动能(cm^2/s^2)
STCC	气旋涡	3601	16±18 (4, 211)	8.1±5.6 (1.7, 39.0)	91±23 (48, 176)	24.98±9.51 (9.08, 92.19)	0.053±0.051 (0.002, 0.100)	315±112 (30, 680)
	反气旋涡	3373	17±20 (4, 236)	7.3±5.4 (1.9, 23.0)	94±25 (45, 179)	22.89±6.11 (8.01, 57.74)	0.042±0.045 (0.002, 0.100)	351±120 (40, 706)
北太平洋	气旋涡	23968	12±15 (4, 225)	5.2±4.9 (1.2, 40.0)	86±34 (27, 303)	17.12±12.31 (3.11, 143.21)	0.051±0.055 (0, 0.100)	262±322 (1, 3748)
	反气旋涡	22732	12±18 (4, 225)	5.0±4.7 (1.3, 41.0)	87±35 (34, 311)	16.05±10.52 (3.06, 162.32)	0.045±0.046 (0.001, 0.100)	280±325 (1, 4836)

注: 数据格式为均值±标准差(最小值, 最大值)

图 2 和图 3 分别展示了 STCC 区域内涡旋产生频率和半径的空间分布。结果表明, 该区域中的中尺度涡旋大多分布于 160°E 以东的大洋内部, 在 150° — 180°E 之间的产生频率较大; 在 140°E 以西, 涡旋的产生频率明显降低。而该区域涡旋半径的空间分布则恰

好相反, 在 160°E 以东, 涡旋的半径普遍低于 100km; 在 150°E 以西, 涡旋的半径明显增大, 普遍超过 120km; 到了 130°E 以西, 涡旋的半径又逐渐降低。此外, 气旋涡和反气旋涡的产生频率基本一致, 而反气旋涡的半径在 130° — 140°E 之间略大于气旋涡的半径。

涡旋产生频率、半径、EKE(图 1)的空间分布在一定程度上体现了移动特征,即 STCC 区域中的大部分中尺度涡旋在区域东侧生成,随后向西传播,在传播的过程中,涡旋的半径逐渐增大,在接近西边界后又逐渐减少,而 EKE 在 140°E 以西不断增强,这可能

与涡旋和强西边界流之间的相互作用有关。图 4 展示了该区域中长生命生命周期涡旋(50 周以上)的移动轨迹,显然,大部分涡旋生成于 150°E 以东且向西传播,部分涡旋的传播距离较长,最远可以到达吕宋海峡东侧。

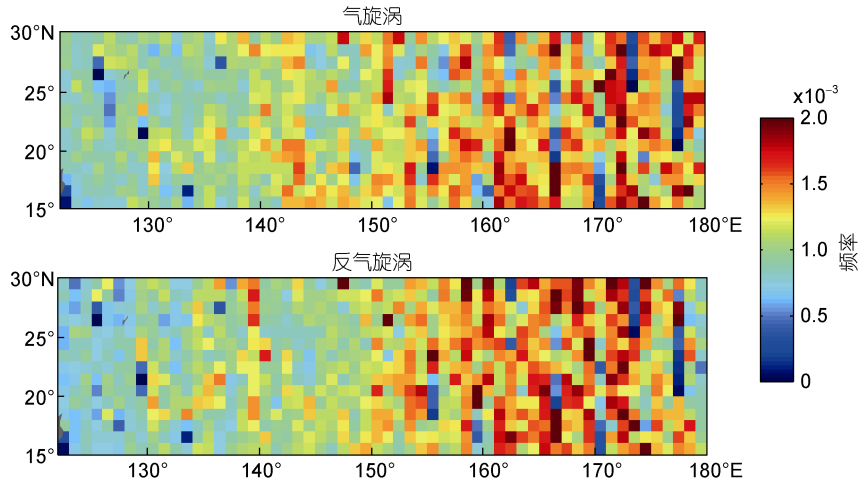


图 2 北太平洋副热带逆流(Subtropical Countercurrent, STCC)区域中尺度涡旋产生频率的空间分布
Fig.2 The spatial distribution of the frequency of eddies in the Subtropical Countercurrent(STCC)

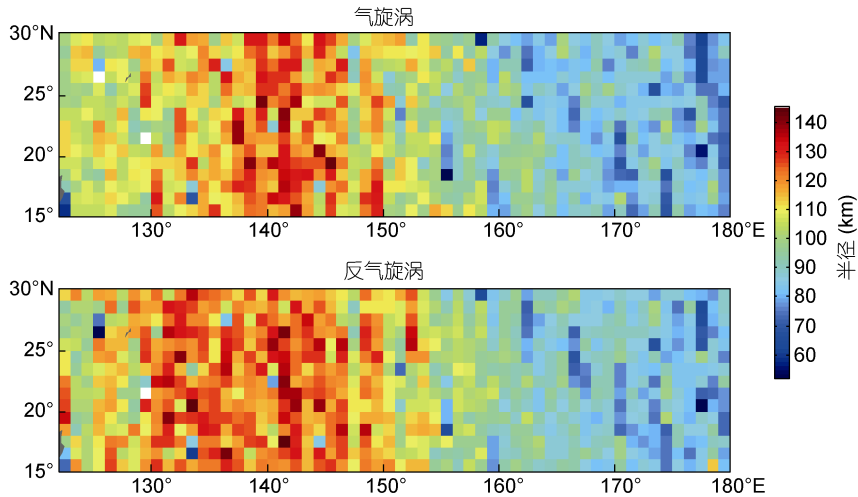


图 3 STCC 区域中尺度涡旋半径的空间分布
Fig.3 The spatial distribution of the radius of eddies in the STCC

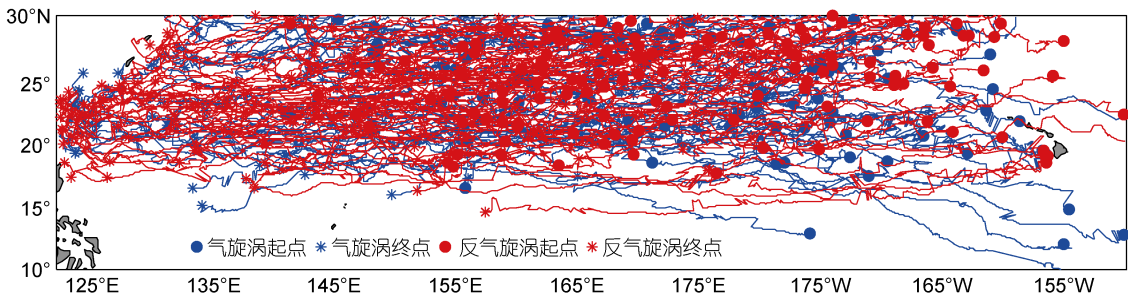


图 4 STCC 区域长周期中尺度涡旋(50 周以上)的移动轨迹
Fig.4 The trajectories of eddies with the lifetime more than 50 weeks in the STCC

图 5 展示了 STCC 区域中部分涡旋特征的经向分布, 不难看出, 涡旋在 23° — 30° N 和 15° — 17° N 之间的生成数量较多, 达到 200 个以上, 而在 20° — 22° E 之间的生成数量最低; 气旋涡在各纬度的生成数量普遍多于反气旋涡。涡旋的振幅和半径在 17° — 21° N 之间较大, 分别达到 105km 和 10cm 以上, 其中气旋涡的振幅大于反气旋涡, 而反气旋涡具有更大的半径; 在 20° — 25° N 之间, 涡旋振幅和半径随着纬度的升高逐渐降低, 其中气旋涡的振幅

在 25° N 附近达到最小值约 7cm, 其降低的幅度明显大于反气旋涡, 而二者的半径在 25° N 附近均降低至 92km 左右; 在 25° N 以上, 涡旋振幅逐渐增大, 尤其是气旋涡, 其振幅在 30° N 达到约 13cm, 而涡旋的半径继续降低至 90km 以下。涡旋西向传播速度的纬向变化与 Liu 等(2012)中的结果基本一致, 其在 15° N 处最大, 达到 10cm/s 以上, 随着纬度的升高而不断降低, 在 25° N 以北逐渐稳定在约 5cm/s。

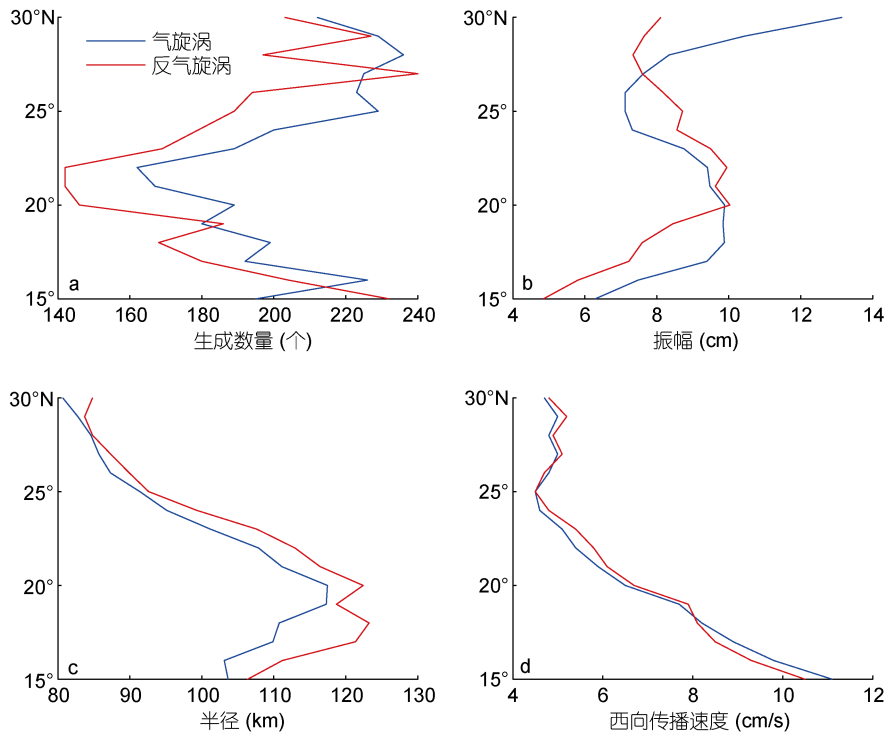


图 5 STCC 区域中尺度涡旋生成数量(a)、振幅(b)、半径(c)和西向传播速度(d)的经向分布

Fig.5 The longitude distribution of the number(a), amplitude(b), radius(c), and westward propagation speed(d) of eddies in the STCC

2.2 STCC 区域涡旋特征的分布规律

基于 Chelton 数据集, 图 6 给出了涡旋振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数的分布直方图, 可以看出气旋涡和反气旋涡之间没有统计学上的显著差异, 它们大多分布在 4—10cm, 60—120km, 18—30cm/s 和 0.03—0.06。除了瑞利分布函数(Cheng *et al.*, 2014)之外, 还使用了对数正态分布函数(lognormal)来拟合分布直方图。公式(3)、公式(4)分别是瑞利分布和对数正态分布的概率密度函数。

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), x > 0, \mu = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma, \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0, \quad (4)$$

其中, x 代表涡旋数据并被视为随机变量, $f(x)$ 是 x 的概率密度函数, μ 和 σ 分别是涡旋数据的平均值和标准差。

STCC 区涡旋特征平均值的拟合曲线如图 6 所示。拟合曲线的峰值均小于原始数据的峰值, 对数正态分布拟合曲线更接近直方图。结果表明, 相较于瑞利分布, STCC 区域中涡旋的振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数更好地服从于对数正态分布。

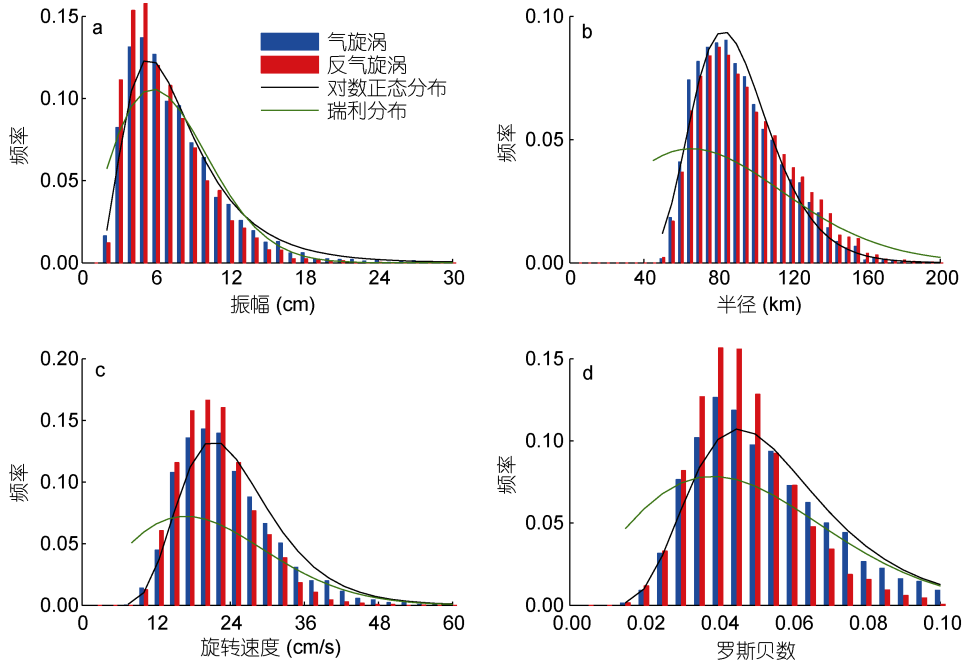


图 6 STCC 区域中尺度涡旋振幅(a)、半径(b)、旋转速度(c)和罗斯贝数(d)的分布直方图

Fig.6 Histograms of eddy Amplitude(a), Radius(b), Rotation speed(c), and the Rossby number(d) in the STCC, respectively

为了定量估计两个分布函数的拟合结果，定义拟合误差 E 为：

$$E = \frac{\sqrt{\sum (y - y_0)^2}}{y_0}, \quad (5)$$

其中, y 和 y_0 分别是拟合值和原始数据。

STCC 区涡旋特征平均值的拟合误差如表 2 所示。振幅、半径、转速和罗斯贝数的对数正态分布的拟合误差分别为 1.28、1.66、0.98 和 0.67，而瑞利分布的拟合误差分别为 4.28、4.39、2.31 和 3.88。结果表明，对数正态分布的拟合误差更低，其更适用于拟合 STCC 区中尺度涡旋统计特征的分布。

2.3 STCC 区域涡旋特征与大区域中尺度涡特征的对比

虽然中尺度涡旋普遍存在于全球海洋，但涡旋活跃水平差异很大，可以通过 EKE 的分布来体现涡旋的活跃程度，即 EKE 越大的区域涡旋越活跃(图 1)。为了更好的认识 STCC 区涡旋特征的特殊性，表 1 同时给出了北太平洋中尺度涡旋的统计特征作为对比。可以看到，北太平洋中气旋涡(反气旋涡)的平均 EKE 为 $262\text{cm}^2/\text{s}^2$ ($280\text{cm}^2/\text{s}^2$)。而在 STCC 区域，气旋涡(反气旋涡)的平均 EKE 达到 $315\text{cm}^2/\text{s}^2$ ($351\text{cm}^2/\text{s}^2$)，高于北太平洋的平均水平，说明 STCC 区域的涡旋更加活跃。

表 2 对数正态分布(瑞利分布)在 STCC 区域及北太平洋中的拟合误差
Tab.2 Errors of fitting lognormal(Rayleigh) distribution in the STCC and North Pacific

区域	对数正态(瑞利)的拟合误差			
	振幅(cm)	半径(km)	旋转速度(cm/s)	罗斯贝数
副热带逆流区(STCC)	1.28 (4.28)	1.66 (4.39)	0.98 (2.31)	0.67 (3.88)
北太平洋	2.77 (5.22)	1.70 (4.64)	1.45 (2.26)	1.31 (3.97)

北太平洋存在 23968(22732)个气旋涡(反气旋涡)，该区域的涡旋平均寿命为 12 周，气旋涡的平均振幅(旋转速度，罗斯贝数)为 5.2cm(17.12cm/s, 0.051)，略高于反气旋涡的 5.0cm(16.05cm/s,0.046)，显然，与北

太平洋相比，STCC 区涡旋的平均振幅、旋转速度和罗斯贝数有比较明显的增加。此外，相对于全球海洋和北太平洋，STCC 区气旋涡与反气旋涡的特征差异更大。例如，STCC 区气旋涡旋的平均振幅(旋转速

度, 罗斯贝数)为 $8.1\text{cm}(24.98\text{cm/s}, 0.053)$, 比反气旋涡旋高; 气旋涡旋的最大振幅(旋转速度)为 $39\text{cm}(92.19\text{cm/s})$, 也高于反气旋涡; 气旋涡的平均 EKE($315\text{cm}^2/\text{s}^2$)低于反气旋涡($351\text{cm}^2/\text{s}^2$)。

图 7 为北太平洋中涡旋特征值的拟合曲线, 表 2 也分别给出了它的拟合误差。结果表明, 类似于 STCC 区域涡旋特征的拟合结果, 对数正态分布对北太平洋中涡旋的拟合效果同样明显优于瑞利分布, 是检验涡旋统计特征分布的最佳选择。此外, 在北太平洋中, 涡旋振幅、旋转速度和罗斯贝数的拟合误差明显高于

STCC 区域, 说明在涡旋更活跃的 STCC 区域, 对数正态分布具有更好的拟合效果。这两个可能原因: 拟合结果很可能与所拟合区域涡旋的 EKE 有关, 由方程(1)可以看出, 在 EKE 高的区域, 涡旋的运动特征更加明显, 涡旋本身也更加活跃, 所以能更好的体现出一定的规律性; 拟合结果与所在区域的大小有关, 在大洋区域, 涡旋较为分散, 在不同背景流场和环境的影响下, 涡旋之间的差异也会增大, 故其规律性较弱。而在 STCC 区域, 由于区域较小, 涡旋非常集中, 在相同背景流场的作用下所表现出的特征非常具有规律性。

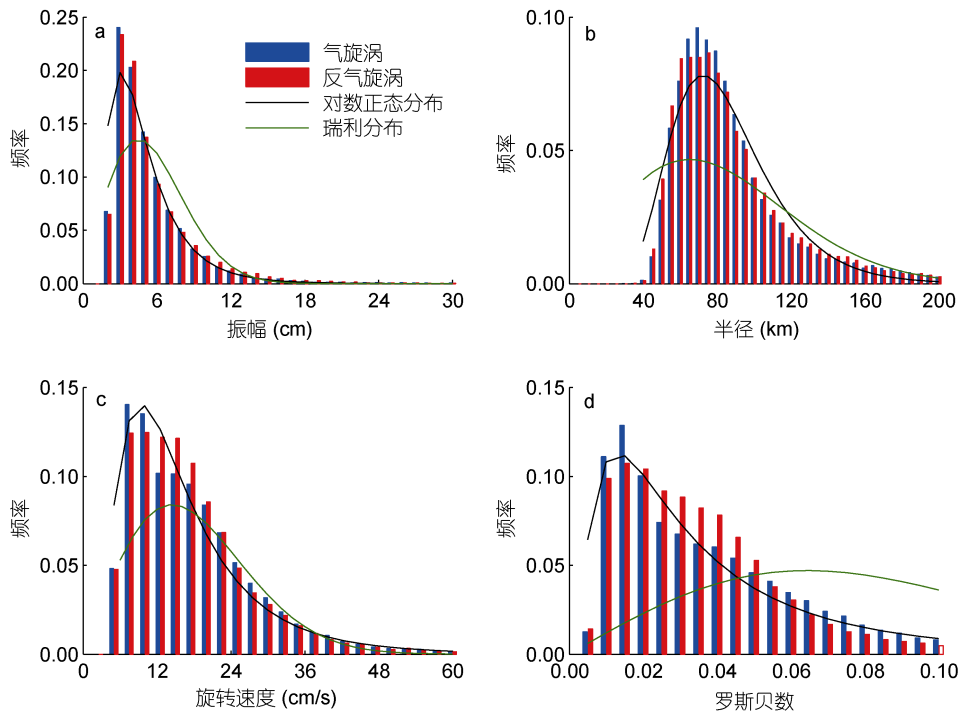


图 7 北太平洋中尺度涡旋振幅(a)、半径(b)、旋转速度(c)和罗斯贝数(d)的分布直方图

Fig.7 Histograms of eddy Amplitude(a), Radius(b), Rotation speed(c), and the Rossby number(d) in the North Pacific, respectively. Red and blue bars indicate anticyclonic and cyclonic eddies

此外, STCC 区域涡旋生命周期、传播距离和传播速度的分布特征如图 8 所示, 该区域涡旋的生命周期和传播距离呈明显的右偏分布, 主要集中在 24 周和 500km 以下, 最大生命周期和传播距离分别达到 96 周和 3000km 以上。涡旋的西向传播速度也具有一定的右偏分布特征, 其主要集中在 4—10cm/s, 最大可达到 25cm/s。值得一提的是, 对数正态分布同样能很好的拟合 STCC 区域涡旋生命周期和传播特征分布。

2.4 STCC 区域涡旋基本特征的季节变化和年际变化
前人的研究成果指出, STCC 区的 EKE 具有显著的季节变化, 它与副热带逆流-北赤道流(Subtropical

Countercurrent- North Equatorial Current, STCC-NEC) 系统的垂直剪切有关, 是斜压不稳定的体现(Qiu, 1999)。图 9 为 STCC 区域涡旋数量、EKE、振幅和半径的季节变化特征。与前人的结果一致, 涡旋的 EKE 存在较为明显的季节变化特征, 在 4—9 月份 EKE 较大, 达到在 $300\text{cm}^2/\text{s}^2$ 以上, 明显高于其他月份。气旋涡的 EKE 在 3 月份明显高于反气旋涡, 而在 11—1 月(冬季), 反气旋涡的 EKE 在 $300\text{cm}^2/\text{s}^2$ 左右, 明显高于气旋涡, 其余月份二者差异不大。此外, 我们还分析了涡旋数量、振幅和半径的季节变化特征: 其中涡旋的数量在 3—6 月(春季)较多, 均超过 400 个, 在其他月份为 300—350 个, 气旋涡的数量普遍略高

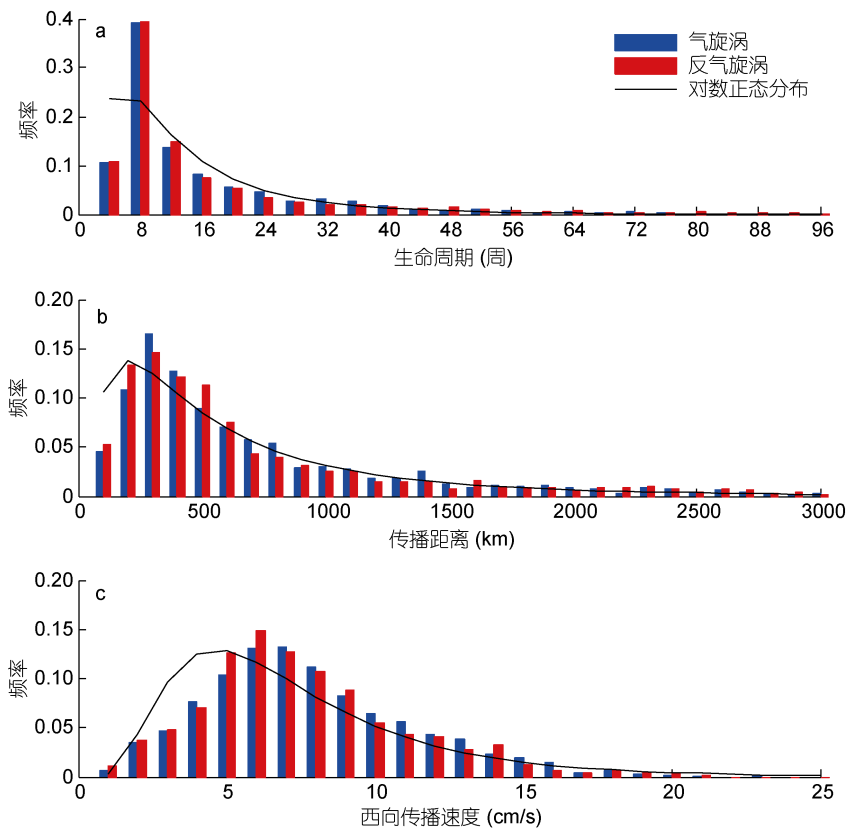


图 8 STCC 区域中尺度涡旋生命周期(a)、传播距离(b)、和西向传播速度(c)的分布直方图

Fig.8 Histograms of eddy Lifetime(a), Propagation distance(b) and Propagation speed(c) in the STCC, respectively. Red and blue bars indicate anticyclonic and cyclonic eddies

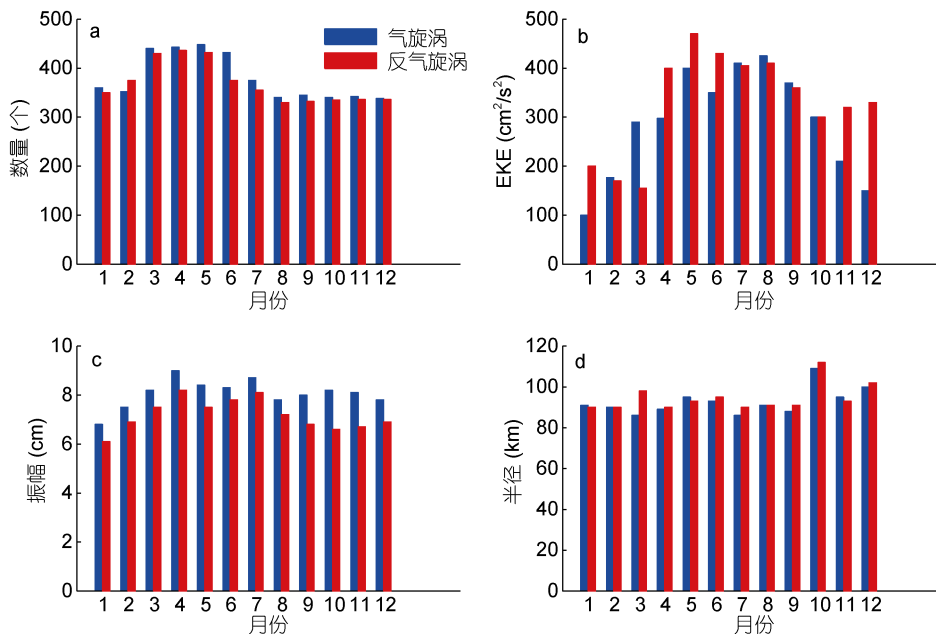


图 9 STCC 区域中尺度涡旋数量(a)、EKE(b)、振幅(c)和半径(d)的季节分布

Fig.9 Seasonal distribution of the quantity(a), EKE(b), amplitude(c) and radius(d) of eddies in the STCC

于反气旋涡; 涡旋的振幅在 4—7 月略大, 达到 8cm 左右, 气旋涡各月的振幅同样大于反气旋涡。而涡旋半径不存在明显的季节变化特征, 其仅在 10 月份出现一个 110km 左右的高值, 其余月份气旋涡和反气旋涡的半径均为 90km 左右。

Qiu 等(2010)指出 STCC 区域中尺度涡旋的年际变化仍然与 STCC-NEC 系统的垂直剪切有关, 在涡旋强年垂直流速剪切大于涡旋弱年。图 10 描述了涡旋数量、EKE、振幅和半径的年际变化。类似于前人的结果, 在涡旋强年(1996—1998 年、2003—2008 年、2014—2016 年), 涡旋的 EKE 明显高于平均水平, 而在涡旋弱年(1993—1995 年、1999—2002 年), 涡旋的 EKE 明显低于平均水平。此外, 涡旋的数量、

振幅和半径均表现出了较为明显的年际变化特征: 1996—2001 年以及 2006—2010 年, 涡旋的数量较多, 而 2001—2003 年, 涡旋的数量较少; 涡旋振幅和半径均存在一个 2—3a 周期的振荡变化, 其中振幅在 2002、2004 和 2010 年较大, 半径在 1994、2009 和 2016 年较大。图 10 还利用太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数作为比较, 分析了涡旋特征的年际变化规律。结果显示, 涡旋 EKE 的年际变化与 PDO 指数之间存在着较强的正相关性, 气旋涡、反气旋涡与 PDO 指数的相关系数分别达到 0.50 和 0.66, 而涡旋数量、振幅和半径的年际变化与 PDO 指数的相关性较弱, 相关系数的大小均低于 0.3。

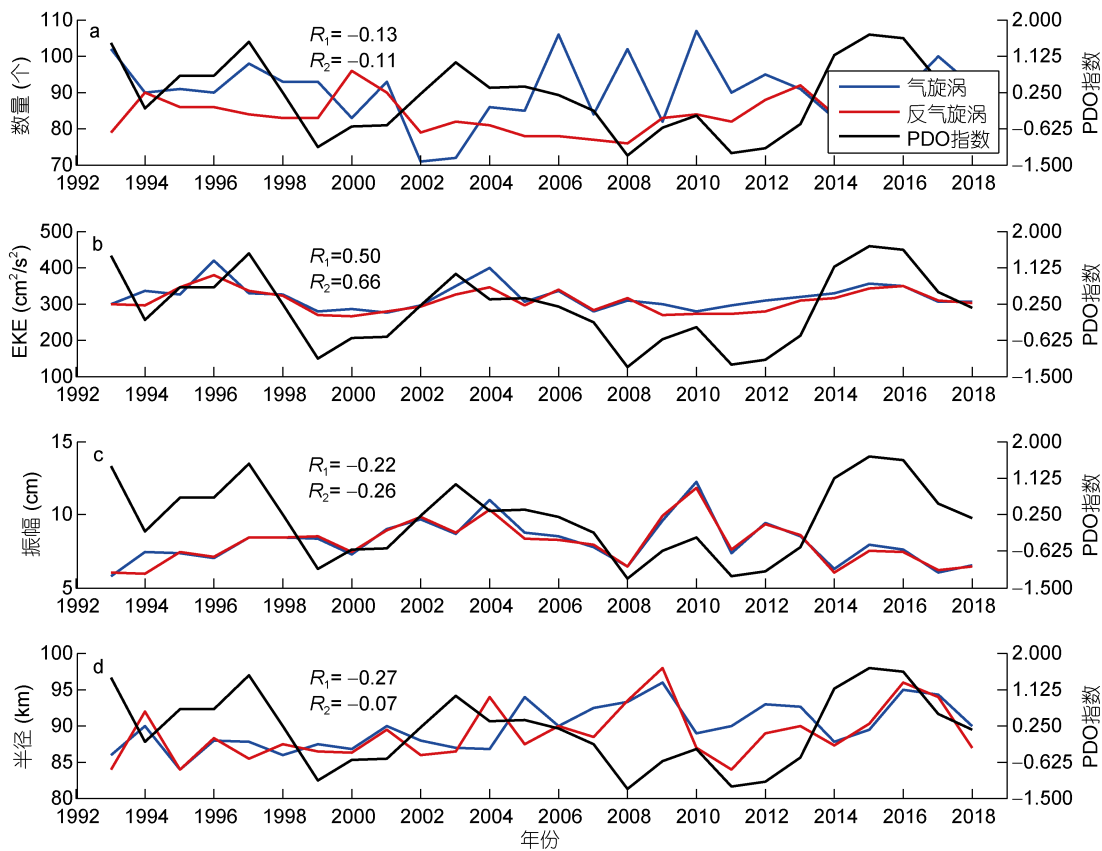


图 10 STCC 区域中尺度涡旋数量(a)、EKE(b)、振幅(c)和半径(d)的年际变化

Fig.10 Interannual variability of the quantity (a), EKE(b), amplitude(c) and radius(d) of eddies in the STCC

注: PDO(Pacific Decadal Oscillation)表示太平洋年代际振荡; R_1 和 R_2 分别为气旋涡、反气旋涡特征与 PDO 指数的相关系数

3 结论

由于具有较大的 EKE, 北太平洋 STCC 区域被视为中尺度涡旋较为活跃的区域。为了更好地理解 STCC 区域中尺度涡旋的统计特征及其概率分布, 本

文利用 Chelton 等(2011)提供的涡旋数据集, 详细分析了 STCC 区域中尺度涡旋的统计特征和概率分布, 并将结果与北太平洋的中尺度涡旋进行对比。

本文首先分析了 STCC 区域中尺度涡旋的基本特征, 包括其振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数的数

值, 以及部分涡旋特征的空间分布和移动特征, 并与前人的结果进行了对比研究。指出该区域的涡旋大多产生于东侧海区, 并逐渐向西传播, 在传播的过程中涡旋的整体半径变大。随后, 通过分析涡旋特征分布直方图和两种概率密度函数的拟合曲线(图 7), 说明与前人的研究结果(Cheng *et al.*, 2014)不同, 对数正态分布的拟合误差明显小于瑞利分布, 它是更加适合 STCC 区域涡旋特征的分布函数。进一步, 以北太平洋的中尺度涡旋特征作为对比, 指出相较于与大区域内的涡旋, STCC 区域涡旋统计特征的数值除半径外均有较为明显的增大, 且气旋涡和反气旋涡的差异更加明显, 这些结果反映了 STCC 区的涡旋具有显著的区域性特征, 它们可能与局部背景流、层结以及斜压不稳定有关。此外, STCC 区域的部分涡旋特征还具有显著的季节变化和年际变化: 涡旋的数量在 3—6 月(春季)较多, EKE 在 4—9 月明显高于其他月份, 振幅在 4—7 月较大; 涡旋数量、EKE、振幅和半径均有较为明显的年际变化特征, 其中 EKE 的年际变化与 PDO 指数之间存在明显的正相关性。

中尺度涡旋在调节海洋动力、生物化学环境以及能量由大尺度传向中小尺度过程中起着至关重要的作用, 正确理解涡旋的分布特征对高分辨率海洋数值模型中的涡旋混合参数化是非常有益的。由于涡旋的振幅、半径、旋转速度和罗斯贝数均服从对数正态分布, 且在 STCC 区域内具有更好的拟合效果, 降低了对观测数据的依赖, 为该区域内中尺度涡旋在数值模式中的参数化提供了依据。

参 考 文 献

- Chaigneau A, Le Texier M, Eldin G *et al.*, 2011. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C11): C11025
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M *et al.*, 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15): L15606, doi: 10.1029/2007GL030812
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2): 167—216
- Chen G X, Hou Y J, Chu X Q, 2011. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C6): C06018, doi: 10.1029/2010JC006716
- Chen G X, Gan J P, Xie Q *et al.*, 2012. Eddy heat and salt transports in the South China Sea and their seasonal modulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C5): C05021, doi: 10.1029/2011JC007724
- Cheng Y H, Ho C R, Zheng Q A *et al.*, 2014. Statistical characteristics of mesoscale eddies in the north pacific derived from satellite altimetry. *Remote Sensing*, 6(6): 5164—5183
- Chow C H, Hu J H, Centurioni L R *et al.*, 2008. Mesoscale Dongsha cyclonic eddy in the northern South China Sea by drifter and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C4): C04018, doi: 10.1029/2007JC004542
- Dong C M, Nencioli F, Liu Y *et al.*, 2011. An automated approach to detect oceanic eddies from satellite remotely sensed sea surface temperature data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(6): 1055—1059
- Hu J Y, Zheng Q A, Sun Z Y *et al.*, 2012. Penetration of nonlinear Rossby eddies into South China Sea evidenced by cruise data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3): C03010, doi: 10.1029/2011JC007525
- Hwang C, Wu C R, Kao R, 2004. TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: Kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C8): C08013, doi: 10.1029/2003JC002026
- Lee I H, Chuang W S, Wang D P, 2003. Structure and propagation of a large cyclonic eddy in the western north pacific from analysis of XBT and altimetry data and numerical simulation. *TAO: Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 14(2): 183—200
- Li L, Nowlin W D Jr, Su J L, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(9): 1469—1482
- Liu F F, Chen C Q, Tang S L *et al.*, 2011. Retrieval of chlorophyll *a* concentration from a fluorescence enveloped area using hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(13): 3611—3623
- Liu Y, Dong C M, Guan Y P *et al.*, 2012. Eddy analysis in the subtropical zonal band of the North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 68: 54—67
- Nan F, He Z G, Zhou H *et al.*, 2011. Three long-lived anticyclonic eddies in the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C5): C05002, doi: 10.1029/2010JC006790
- Pujol M I, Faugère Y, Taburet G *et al.*, 2016. DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years. *Ocean Science*, 12(5): 1067—1090
- Qiu B, 1999. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory. *Journal of Physical Oceanography*, 29(10): 2471—2486
- Qiu B, Chen S M, 2005. Eddy-induced heat transport in the subtropical North Pacific from Argo, TMI, and altimetry measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 35(4): 458—473
- Qiu B, Chen S M, 2010. Interannual variability of the north

- Pacific subtropical countercurrent and its associated mesoscale eddy field. *Journal of Physical Oceanography*, 40(1): 213—225
- Stammer D, 1997. Global characteristics of ocean variability estimated from regional TOPEX/Poseidon altimeter measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 27(8): 1743—1769
- Stammer D, 1998. On eddy characteristics, eddy transports, and mean flow properties. *Journal of Physical Oceanography*, 28(4): 727—739
- Yin Y Q, Lin X P, He R Y *et al*, 2017. Impact of mesoscale eddies on Kuroshio intrusion variability northeast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(4): 3021—3040

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF MESOSCALE EDDIES AND THE DISTRIBUTION IN THE NORTH PACIFIC SUBTROPICAL COUNTERCURRENT

TANG Bo^{1, 2, 3, 4}, HOU Yi-Jun^{1, 2, 3, 4, 5}, YIN Yu-Qi^{1, 2, 4, 5}, HU Po^{1, 2, 4, 5}

(1. *Institute of Oceanology, 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. *Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 5. *Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*)

Abstract Based on the satellite altimeter, the global observations of nonlinear mesoscale eddy datasets are analyzed and the statistical characteristics of the mesoscale eddies in the North Pacific Subtropical Countercurrent (STCC), including its basic characteristics, spatial distribution, transmission characteristics, seasonal and interannual changes. The histograms of amplitude, radius, rotation speed, and Rossby number of mesoscale the eddies, for which the given and lognormal distribution were used to fit them. The results show that the histogram of these features was well approximated in the lognormal distribution. In addition, by comparing eddies in the North Pacific, we find that the lognormal distribution in the STCC has a better fitting effect. This study improves the understanding of eddies in the STCC, and clarifies differences from an oceanic eddy. The eddies distribution can be clearly reflected by the fitting with lognormal distribution, which can largely reduce the dependence on the observation data to help us in making more effective judgement and prediction on the changes of eddy characteristics, and provide a basis for the parameterized numerical model of eddies.

Key words mesoscale eddies; subtropical countercurrent; statistical characteristics; lognormal distribution