西北太平洋中尺度涡半径与涡动能的统计关系

赵　军[1, 2, 3], 高　山[1, 2, 3, 4], 王　凡[1, 2, 3, 4], 陈永利[1, 2]

(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 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 中尺度涡的半径与涡动能之间的关系及其内在机制的研究, 对我们理解中尺度涡旋的三维结构特征及其变异规律有很大的帮助。本文利用 AVISO 卫星高度计融合数据, 基于流场几何特征的识别方法对西北太平洋(10°~52°N, 120°~180°E)的中尺度涡进行了识别追踪, 并由此分析了该区域内中尺度涡的半径与涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE)的统计关系。结果表明该区域中尺度涡的半径与 EKE 之间存在类似翻转高斯函数的递增关系, 特别是在涡旋半径达到一定程度后, EKE 将不随半径的变大而继续增强。而且该关系与纬度密切相关, 相同半径条件下, 涡旋的 EKE 近似与其所在纬度的第一斜压 Rossby 变形半径的平方呈反比。进一步分析表明该统计关系与中尺度涡所处的发展阶段没有明显的联系。该结果为建立一个实用性的参数化、归一化的中尺度涡模型提供了一定的理论基础。

关键词: 西北太平洋; 中尺度涡; 涡动能; 涡旋半径; AVISO

中图分类号: P731.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)08-0071-08

DOI: 10.11759/hykx20180115001

中尺度涡是上层海洋的一种重要的中尺度现象[1], 其时间尺度为数天到百天左右, 空间尺度则为 10~500 km。中尺度涡的能量在从大尺度到小尺度的能量级串过程中处于中间环节, 是海洋能量中最重要的一部分, 尺度再分析显示海洋的涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE)可比平均流动能高两个量级[2, 3]。中尺度涡所包含的巨大动能, 能够占到海洋环流总动能的 80%~90%以上[4, 5]。同时, 中尺度涡旋内可产生上升流或下降流, 导致海水垂直运动, 加速涡旋内海水的垂向混合搅拌, 引起温盐能量的交换[6, 7]; 此外, 中尺度涡形成的冷暖中心也可通过冷热源的形式和大气相互作用, 影响海气通量, 成为海洋与大气相互作用的一个通道, 从而对气候产生不可忽视的影响[8]。

西北太平洋环流体系复杂, 中尺度涡现象极为活跃, 尤其是黑潮延伸体以及副热带逆流区附近更是大量中尺度涡的生成源地。黑潮在流经吕宋海峡, 也会以中尺度涡的形式与南海发生质量与能量的交换[9-11]。该区域能量的变化与海气相互作用明显, 对我国的天气、生态、渔业、军事等方面的影响意义深远。因此, 西北太平洋中尺度涡旋的研究一直是海洋学家的研究重点[12-18]。

目前, 对中尺度涡现象的研究分析多集中在涡旋的统计特征及涡旋的内部结构研究, 涡旋的统计特征包括涡旋的生成(消失)地、半径、生命周期、涡动能、移动速度以及季节、年际变化等特征, 但这些特征大都是单独统计的, 并没有过多的对某两个或多个特征之间的联系进行分析。Chaigneau 等[19]利用 15 a(1992~2006 年)的卫星高度计数据计算了东南太平洋秘鲁沿岸(3°~18°S, 70°~90°W)中尺度涡旋的特性, 发现平均 EKE 随着半径自 35 km 的 10 cm^2/s^2 (2.5×10^{-3} $cm^2/(s^2\cdot km^2)$)准线性的增加到半径为 175 km 的 110 cm^2/s^2; 杨光[20]使用 1993~2008 年的卫星高度数据对西北太平洋(12°~28°N, 122°~148°E)的中尺度涡旋进行了统计分析, 对平均 EKE 和涡旋半径进行

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-05-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010102); 国家重点研发计划(2016YFC0301203); 国家自然科学基金项目(41676009); 热带海洋环境国家重点实验室开放课题(LT01701)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11010102; National Key Research and Development Program, No. 2016YFC0301203; National Natural Science Foundation of China, No. 41676009; State Key Laboratory of Tropical Oceanography Project, No.LT01701]

作者简介: 赵军(1989-), 女, 山东青岛人, 博士在读, 主要从事物理海洋学研究, 电话: 0532-82898513, E-mail: zhaojun_89@163.com; 高山, 通信作者, 研究员, 主要从事物理海洋学研究, 电话: 0532-82898515, E-mail: gaoshan@qdio.ac.cn

了多项式拟合, 亦发现平均半径与平均 EKE 大致为线性的关系。实际上, 上述研究在半径达到 120 km 左右的时候, 平均 EKE 与半径并不符合简单的线性关系, 此外, 两者的研究区域比较有限, 并未考虑到纬度因素的影响。而 Chen 等[21]在研究南海中尺度涡现象时, 将所有涡旋进行平均得到平均涡动能密度(Eddy Intensity, EI)随着半径的变化类似高斯函数, 自 50 km 的 2.5×10^{-2} $cm^2/(s^2\cdot km^2)$减少到 300 km 的 2×10^{-3} $cm^2/(s^2\cdot km^2)$。但并没有进一步解释这种关系的产生原因, 也没有考虑纬度的影响。

为进一步了解中尺度涡旋半径与 EKE 的关系, 本文利用 1993~2015 年的 AVISO 卫星高度计资料识别和追踪了西北太平洋的中尺度涡旋, 并对该区域中尺度涡旋半径与 EKE 的关系进行了系统的统计分析, 以期进一步了解西北太平洋地区中尺度涡的生成、消退过程, 有助于理解中尺度涡旋的结构特征, 同时也在统计意义上, 为建立一个实用性的参数化中尺度涡模型提供必要的理论依据。

1 数据和处理方法

1.1 数据

本文中所用的观测数据是法国 CLS (Collecte Localization Satellite)中心的 AVISO 海平面高度异常场(Sea Surface Height Anomaly, SSHA)和地转流数据(http: //www.aviso.oceanobs.com)。该数据融合了 ERS-1、ERS-2、T/P、GFO、Jason-1、Jason-2、Cryosat2、Saral/AltiKa、HY-2 等多种卫星资料。具体选取了时间跨度为 1993~2015 年, 时间间隔为 1 d, 空间分辨率为 1/4°的格点资料。该资料自 2014 年 4 月进行了一次较大的升级, 修正了新的气候态海表面高度参考面, 使该资料能够非常好的分辨研究区域的中尺度涡现象。

1.2 涡旋的识别追踪方法

涡旋的探测和追踪方法采用的是董昌明[22]的涡旋探测追踪方法, 该方法是基于 Nencioli 等[23]2010 年提出的流场几何特征的基础。涡旋识别的约束条件认为涡旋中心位置速度最小, 即涡心; 涡心东西(南北)两侧的速度 $v(u)$的数值符号相反, 大小随着距中心点的距离线性增加; 在涡心附近, 速度矢量的旋转方向必须一致。该方法相比 Okubo-Weiss 方法和 Winding Angle 方法, 拥有很高的探测成功率和较低的误报率[23]。

追踪算法也同样使用了董昌明的计算方法[22], 即在确定好所有的涡旋中心后, 通过比较连续时间的涡旋中心位置来确定涡旋轨迹。简单来说, 以某时刻检测出来的中尺度涡心为中心的 15 km 搜索半径范围内, 寻找下一时刻相离最近的一个相同极性的涡旋。若能找到这样一个涡, 则视为前一个涡旋的后继涡旋, 且该涡旋不会成为其他涡的后继涡旋, 然后以此继续追踪下去; 若该时刻未找到符合条件的涡, 则在下一时刻将搜索半径增加为先前半径的两倍, 若仍未找到, 则该涡的演变终止。

1.3 涡动能与半径的计算方法

在以往的相关研究中[14, 20, 24], 多采用计算地转流速度异常的方法来评估 EKE, 这种计算 EKE 的方法并不准确, 不仅包括了中尺度涡的能量, 而且也包括了乱流等脉动能量, 因为所得的半径只是某点的时间平均半径, 因此实际的半径与 EKE 并非是一一对应关系, 而是一个大概的空间统计结果。

本研究则使用了直接计算单个涡旋 EKE 的方法, 即通过积分计算某个单个涡旋边界范围 S 面积内的动能, 其计算公式为

$$E=\iint\frac{1}{2}(u^2+v^2)\mathrm{d}S/S \tag{1}$$

式中, u, v 为 AVISO 提供的地转流异常数据。

需要指出的是, 已有研究里[19-21]的 EKE 的意义是“单位面积的 EKE”, 我们的研究为了与已有研究接轨, 也沿用该 EKE 的定义。某些研究中的“EI”(能量密度)是单位面积的 EKE 又除了一次涡旋面积, 应当是没有意义的。

而涡旋半径的定义则是: 涡旋边界上各点到涡心的距离平均值。

2 结果与分析

2.1 北太平洋中尺度涡半径与涡动能的关系

使用上述方法和资料, 西北太平洋区域(10°~52°N, 120°~180°E)在 1993~2015 年共检测到 1 007 557 个涡旋。计算统计所有涡旋的 EKE 后, 将所有涡旋的 EKE 插值到 0.25°×0.25°的网格上, 得到西北太平洋中尺度涡的涡动能空间分布图(图 1)。图中明显可见两条很强的 EKE 纬向高值区(黑色虚线内), 北部(31°~39°N)黑潮延伸体区域的涡动能最强, 最大值达 976 cm^2/s^2, 另一个高值区(18°~25°N)位于副热带逆流区域, 其 EKE 最大为 263 cm^2/s^2。这两条 EKE 纬向高值区的位置与 Qiu 等[12-18]和 Liu[14]等研究的北

太平洋涡动能纬向高值区的位置非常吻合。已有的研究也指出黑潮延伸体的 EKE 高值来自于黑潮急流离开海岸流向大洋后的不稳定性[18]; 副热带逆流区涡旋的动力机制主要是副热带锋的锋面不稳定[15-18]。

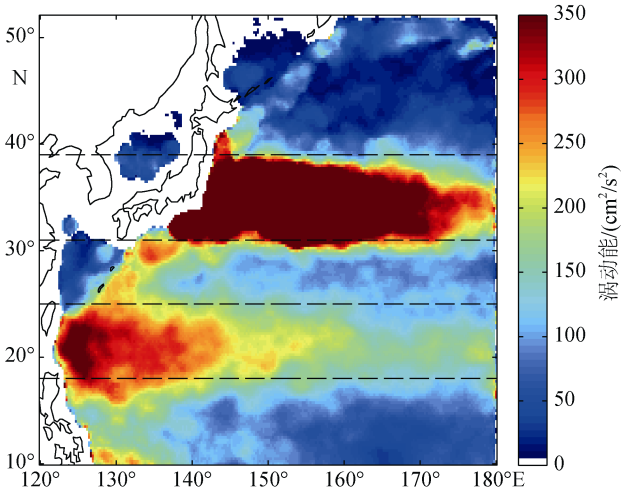


图 1　由 AVISO 数据得到的 1993~2015 年西北太平洋中尺度涡动能的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of the EKE in the Northwestern Pacific Ocean from 1993 to 2015 by AVISO data

利用西北太平洋中尺度涡特征信息数据集得到 1993~2015 年西北太平洋在 0.25°×0.25°网格内中尺度涡平均半径的空间分布(图 2)。图中可见，半径在 35°N 和 20°N 附近也同样有两条相似的条带分布。由图 1 和图 2 的比较表明，西北太平洋中尺度涡的 EKE 和半径在空间分布上呈现出很好的对应性。

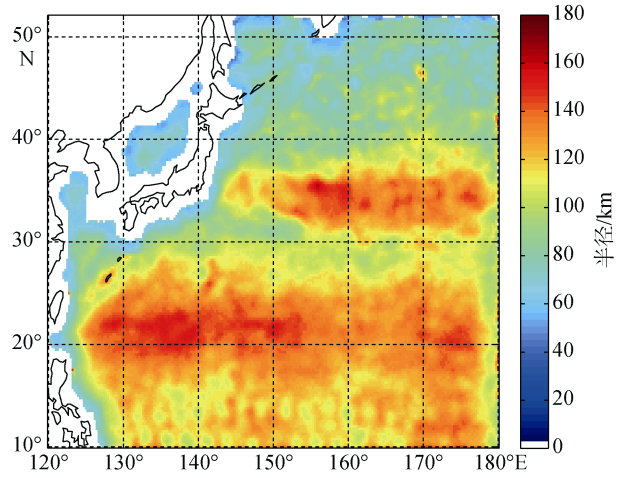


图 2　西北太平洋在 0.25°×0.25°网格内中尺度涡平均半径的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of the eddy average radius (in km) in each 0.25°× 0.25° grid in the Northwestern Pacific Ocean

为分析两者可能存在的对应关系，我们得到了 1993~2015 年西北太平洋中尺度涡纬向平均半径(图 3a)和纬向平均 EKE(图 3b)分别随纬度的变化。从图 3 可见，平均半径和 EKE 在 31°~39°N(蓝色阴影区) 和 18°~25°N(粉色阴影区)两条纬度带上都有明显的高值区。不同的是，在两者平均半径的最大值基本一致时(约 100 km), EKE 的极值却呈现出极大的不同，副热带逆流区(18°~25°N)的最大值小于 200 cm^2/s^2，而黑潮延伸体(31°~39°N)附近的最大值则达到了 641 cm^2/s^2，约为副热带逆流区的 3 倍多。两条纬度带上平均 EKE 的

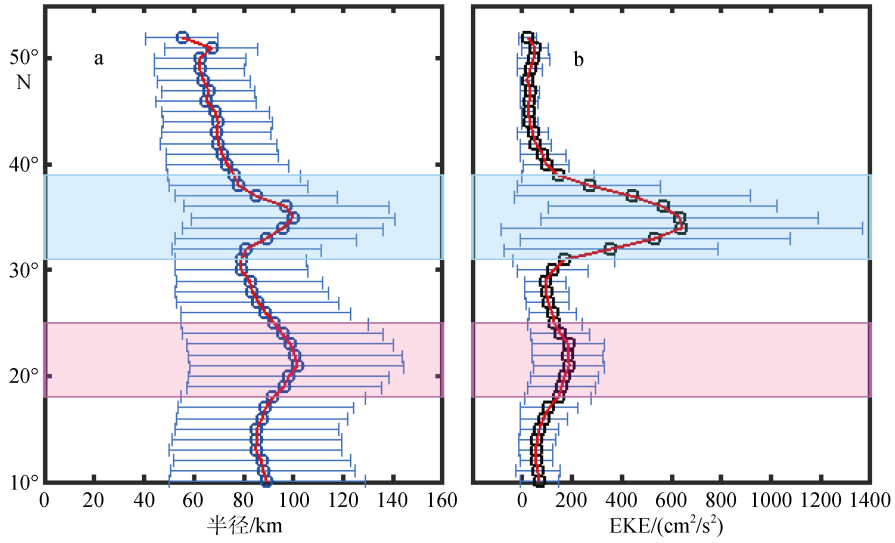


图 3　西北太平洋 120°~180°E 内中尺度涡纬向平均涡旋半径(a)和 EKE(b)随纬度的变化

Fig. 3　Variation in average radius (a) and EKE (b) with latitude in the Northwestern Pacific Ocean (120°~180°E)

这种差异也可以从图 1 中尺度涡动能的空间分布看出来。这一结果表明, 中尺度涡旋的平均 EKE 随半径的变化并不是在各海区都相似, 很可能与纬度相关。

为了进一步理解 EKE 和半径的关系及其随纬度的变化, 我们决定对不同纬度上的中尺度涡分别进行统计。由于在其他区域的涡旋个数稀少(图 1), 其结果的代表性较差, 因此本研究分别选取两个 EKE 极值区条带中心位置(21°N 和 35°N)附近(1 度范围内)的中尺度涡旋的平均 EKE 和半径 R 的关系进行了统计分析。在 21°N 和 35°N 分别提取到了 30 135 和 24 793 个中尺度涡, 对各涡旋的 EKE 根据其半径进行统计平均和拟合分析后, 得到了 EKE 与半径的统计关系。图 4 显示的是 21°N 和 35°N 的涡旋 EKE(单位 cm^2/s^2)统计平均值与半径 R(单位 km)的关系, 图中可见, EKE 并没有随着半径 R 呈线性增加关系, 而是表现为翻转的高斯函数的关系, 其拟合的解析函数形式如公式(2)所示:

$$E = A(1-e^{-\frac{(R-B)^2}{2C^2}}) \tag{2}$$

两个条带的拟合公式中的参数 A、B、C、以及衡量拟合程度的均方根误差 E_{RMS}(root mean square error)和决定系数 $R_{squared}$(coefficientof determination)见表 1。

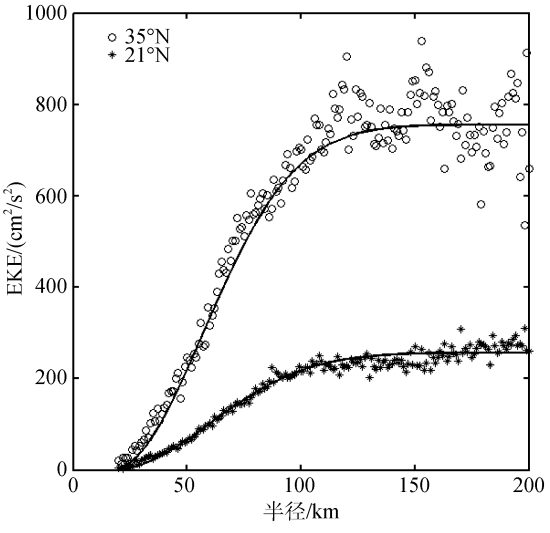


图 4 21°N 和 35°N 统计的涡旋平均 EKE 与半径的关系

Fig. 4 Relationship between the average eddy EKE and the radius in 21°N and 35°N

图 4 中黑色实线(EKE 值较高的为 35°N 结果, 较低的为 21°N 结果)即为平均 EKE 和半径的函数拟合结果。由于在 21°N 和 35°N 上半径大于 200 km 的涡旋的统计样本数太少(总数的 1.4%), 本研究只将半径在 200 km 以内涡旋的平均 EKE 和半径进行拟合。同时因为数据的分辨率不够, 也没有考虑 20 km 以下的小涡。从图 4 可以看出, 与已有的研究结果不同[19-20], EKE 并不是严格的随半径增大而线性增长, 而是呈翻转高斯函数形式的增长关系。两个条带的平均 EKE 均在半径接近 120 km 附近时达到最大值, 但有强度差异, 21°N(低纬)约 257 cm^2/s^2, 35°N(中纬)约 756 cm^2/s^2。随后平均 EKE 将基本不随半径的增加而增长, 而是在最大值上下徘徊。同时还可看到, 半径超过一定大小后, 离散程度逐渐变大, 该现象在 35°N 条带尤为明显, 在半径大于 150 km 之后甚至还出现了半径增大但 EKE 减小的情况。这一反常现象难以解释, 可能是受大半径的中尺度涡旋样本数减少的影响, 另一方面, 可能是由于这里的大型中尺度涡旋正处于消亡期[22], 在半径变化不大的情况下, 旋转速度减慢。

表 1 21°N 和 35°N 平均涡旋 EKE 与半径拟合的各项参数以及其均方根误差和决定系数

Tab. 1 Parameters of the fitted average eddy EKE and the radius in 21°N and 35°N

纬度/N	A	B	C	$R_{squared}$	$E_{RMS}/(cm^2/s^2)$
21°	257	17	40	96.9%	15.1
35°	756	17	39	96.6%	50.0

结合表 1 给出了 21°N 和 35°N 平均涡旋 EKE 与半径 R 拟合的各项参数以及其均方根误差和决定系数, 由公式(2)的物理意义以及图 4 可知参数 B 反应图形的对称轴位置, C 则代表曲线的扁平程度, A 是平均 EKE 变化的最大值。决定系数 $R_{squared}$ 在 21°N 是 96.9%, 在 35°N 是 96.6%, 表明高斯函数曲线较好的拟合了平均 EKE 和半径 R 的关系, 而在 21°N 和 35°N 的均方根误差分别为 15.1 cm^2/s^2 和 50.05 cm^2/s^2, 相对于 200 cm^2/s^2 和 700 cm^2/s^2 量级的 EKE 来说, 也是合理的。由图 4 和表 1 中的各项参数可以看到在 21°N 和 35°N 的平均 EKE 随着半径 R 的变化中, B 和 C 非常相近, 主要差别在 A。由于两区域的显著差别仅为纬度的不同, 所以我们分析该差异主要是由纬度的不同造成的。

2.2 纬度对 EKE—半径关系的影响

林鹏飞等[25]发现南海中尺度涡的半径分布的经向变化与斜压罗斯贝变形半径的经向变化趋势一致, 即在 EKE 变化不大的情况下, 纬度越高, 涡旋的半径越小, 那么可以推断, 在半径条件相同的情况下,

EKE 也会随纬度发生变化。

在大、中尺度海洋环流的理论研究和诊断分析中, 通常通过 Rossby 变形半径确定水体运动的水平尺度[26]。根据罗斯贝变形半径定义[27, 28], 有罗斯贝变形半径公式:

$$R_n = \frac{C_n}{|f|}, (\theta \geqslant 5°), n = 0,1,2,3,\cdots \quad (3)$$

式中, R_n 即第 n 阶罗斯贝变形半径, f=2Ω sin θ, 是纬度 θ 的科氏力参数, 地球自转角速度 Ω=7.29×10^{-5} s^{-1}, C_n 是第 n 模态的重力波速, 其值取决于浮力频率平方的垂直积分[29]。

范海梅等[29]计算了全球第一斜压 Rossby 变形半径的等值线图, 发现全球的第一斜压 Rossby 变形半径分布的主要特征是沿纬向平行, 会在陆坡和大洋中脊处产生弯曲变形。计算可得 21°N 的第一斜压 Rossby 半径为 $R_1^{21°N} = 60$ km, 而 35°N 的第一斜压 Rossby 半径为 $R_1^{35°N} = 35$ km, 后者与前者之比的平方约为 0.34, 即 $\left(\frac{R_1^{35°N}}{R_1^{21°N}}\right)^2 \approx 0.34$。

该值与表 1 中 21°N 和 35°N 拟合的平均 EKE 随半径变化的最大值 A 之比相吻合, 即 $\frac{A_{21N}}{A_{35N}} \approx 0.34$, 这表明, 在相同半径条件下, 不同纬度上的中尺度涡的EKE大致与其第一斜压Rossby变形半径的平方呈反比关系。其物理意义也许可以这样理解: 纬度越高, 科氏力作用越显著, 中尺度涡的地转调整时间就越短, 所以对于相同半径的涡旋, 其旋转速度就越快, 或者说对于相同流速(能量强度)的涡旋, 达到稳定圆周运动的半径就会越小。

2.3 EKE—半径关系与生命周期

由于猜测涡旋半径和 EKE 的关系可能随涡旋的发展阶段不同而不同, 所以我们统计得到了西北太平洋所有中尺度涡旋(生命周期>2 周)的半径和 EKE 与其生命周期的归一化关系, 如图 5 可见, 涡旋的半径和 EKE 均在其生命周期的前 1/3 增加, 中间的 1/3 保持稳定, 在最后的 1/3 急剧下降。所以我们将涡旋生命周期分为了三段: 最初的 1/3 设为涡旋的生长期, 中间 1/3 为成熟稳定期, 最后 1/3 为消亡期。

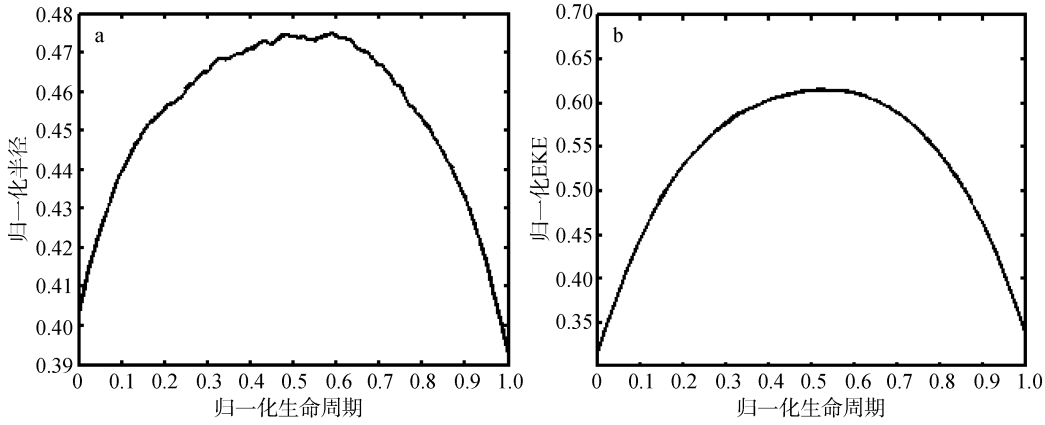


图 5 归一化的半径(a)和涡动能(b)与生命周期的关系

Fig. 5 Normalized relationship of radius (a) and EKE (b) with corresponding lifetime

然后, 我们分别对这 3 个时期的 EKE 随半径的关系进行了拟合, 各个阶段拟合参数以及均方根误差和决定系数见表 2 和图 6。整体来看在 21°N 和 35°N各个阶段的EKE与半径关系同样符合翻转高斯函数的拟合关系公式(2), 且在相同纬度的不同阶段参数 A、B、C 均相差不大。这说明 EKE 与半径的拟合关系式基本适合涡旋生命周期的不同发展阶段, 虽然在参数上有所差别, 但是涡旋所处发展阶段对该关系的影响并不是很大。

3 讨论与结语

本文用 1993~2015 年的 AVISO 海平面高度数据结合董昌明海洋涡旋探测方法[22]对西北太平洋区域(10°~52°N, 120°~180°E)中尺度涡旋的半径和涡动能进行了统计分析。初步的结果表明该区域中尺度涡的半径与 EKE 之间存在着较显著的对应关系, 但是并非简单的线性关系[19, 20], 而是呈类似翻转高斯函数的递增关系, 特别是在涡旋半径达到一定程度后

(>120 km), EKE 将不随半径的变大而继续增强, 而是大体维持在一个最大强度 *A* 的附近。

表 2 21°N 和 35°N 各阶段平均涡旋 EKE 与半径拟合的各项参数
Tab. 2 Parameters of the fitted average eddy EKE and the radius in each stage of 21°N and 35°N

纬度/N	阶段	*A*	*B*	*C*	$R_{squared}$	E_{RMS}/(cm^2/s^2)
21°	生长期	276	15	46	88.5%	30.1
	发展期	283	19	40	91.7%	25.7
	消亡期	251	19	37	93.0%	22.3
35°	生长期	676	18	35	83.0%	99.0
	发展期	826	17	36	88.6%	91.7
	消亡期	755	15	39	81.9%	117

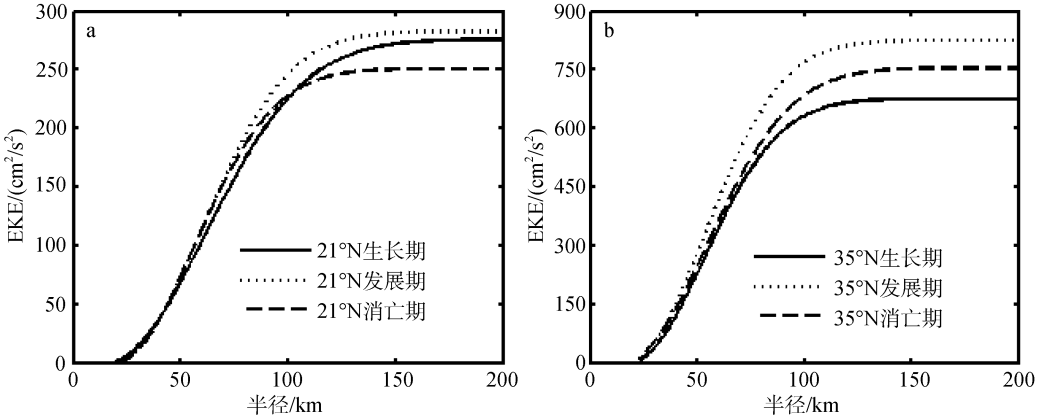


图 6 21°N(a)和 35°N(b)在生长期、发展期、消亡期的半径和 EKE 的拟合曲线
Fig. 6 The fitting curve of radius and EKE in the period of growth, development and extinction in 21°N (a) and 35°N (b)

由于发现 EKE 与半径的空间分布存在强度上的明显差异, 即在相同的半径下, 越往高纬度所对应的 EKE 越大, 所以我们特别选取了 21°N 和 35°N 两个明显的纬向高值带, 分别进行了高斯函数拟合。结果表明, 不同纬度上平均 EKE 随着半径的变化仍然具有非常相似的高斯函数关系, 而且各拟合系数都相近, 唯有强度参数 *A* 随着纬度的不同存在明显差异: 纬度越高, 相同半径的涡旋所具备的 EKE(正比于转速的平方)就越大; 同样的, 相同 EKE 的情况下, 纬度越高, 对应的涡旋半径就越小。科氏力的强度应当是最大的影响因素。计算结果显示, 强度参数 *A* 近似与第一斜压 Rossby 变形半径的平方呈反比。该结果可以这样理解: 由于中尺度涡是一种典型的地转运动, 所以相同转速(能量)的涡旋, 纬度越高, 中尺度涡达到地转平衡的调整时间就越短, 半径也就越小。

为了检验该统计关系是否会随中尺度涡的发展阶段的不同而不同, 我们也针对中尺度涡不同的发展阶段(生长期、发展期以及消亡期)作了进一步的拟合分析, 结果表明不同发展阶段的拟合函数表达式是非常相似的, 其拟合参数与所在的发展阶段没有明显的关系。这一结果从侧面反映了 EKE 与半径的这种关系是非常稳定的, 只要半径发生变化, EKE 必然随之变化。张正光[30]在其文章中指出中尺度涡存在一个统一的三维结构, 特别是沿涡的径向存在一个统一的压强异常的分布形式, 该形式其实也隐含了涡旋的地转流速(对应 EKE)与其涡度(对应半径)之间存在统一的关系。本文的 EKE 与半径的关系应当是该三维结构的一个拓展。

需要指出的是, 该关系是一个统计的结果, 对于单个涡旋来说, 并不是严格成立的, 单涡分析同样纬度的同样半径的涡所对应的 EKE 并不是一致的。同时, 本文目前只分析了西北太平洋的结果, 而且由于其他纬度上的涡的数量稀少, 没有足够的统计样本, 我们只能针对两个 EKE 的高值区做统计。由于水平所限, 本文尚不能解答中尺度涡的 EKE 与半径之间为何存在这样的高斯函数的关系, 特别是为何半径在达到一定程度后 EKE 不再增长的机制问

题。我们认为涡旋的振幅很有可能是导致上述关系的一个关键因素。因为按照地转关系，压强梯度力与科氏力一起决定涡旋的转动速度，也即 EKE，而压强梯度力与振幅与半径的比值成正比(即 $\frac{\partial p}{\partial x} \sim \frac{\partial H}{\partial x}$)，因此对于一个涡旋来说，近似有如下关系：

$$\frac{\partial H}{\partial x} \sim \frac{A_E}{R} \sim fV$$

式中，A_E 为涡旋振幅，V 为半径上的流速。可见 EKE 与 A_E、R 和 f 三者同时相关。因此，未来我们将针对振幅与半径的比值(A_E/R)与 EKE 的关系作进一步的分析。同时，EKE 与半径的关系与纬度密切相关，但具体为何是与其第一斜压 Rossby 变形半径的平方呈反比，这一问题也期望在该分析中得到答案。

参考文献:

[1] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34: L15606.

[2] Huang R X. Ocean circulation: wind-driven and thermohaline processes[M]. New York: Cambridge University Press, 2010: 806.

[3] Cushman-Roison B, Beckers J. Introduction to geophysical fluid dynamics[M]. San Diego: Academic Press, 2011: 875.

[4] Robinson A R, Leslie W G. Estimation and prediction of oceanic Eddy fields[J]. Progress in Oceanography, 1985, 14(1-4): 485-510.

[5] 苏纪兰，李炎，王启. 我国 21 世纪初海洋科学研究中的若干重要问题[J]. 地球科学进展，2001，16(5): 658-663.
Su J L, Li Y, Wang Q. Some important research topics for China in ocean sciences in the early 21st century (in Chinese). Adv Ear Sci, 2001, 16(5): 658-663

[6] Richardson P L. Gulf Stream Ring Trajectories[J]. Journal of Physical Oceanography, 1980, 10(1): 90-104.

[7] Volkov D L, Tong L, Fu L. Eddy‐induced meridional heat transport in the ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 295-296.

[8] Small R J, Deszoeke S P, Xie S P, et al. Air–sea interaction over ocean fronts and eddies[J]. Dynamics of Atmospheres & Oceans, 2008, 45(3-4): 274-319.

[9] Wang D, Xu H, Lin J, et al. Anticyclonic eddies in the northeastern South China Sea during winter 2003/2004[J]. Journal of Oceanography, 2008, 64(6): 925-935.

[10] Jia Y. Seasonal variation of eddy shedding from the Kuroshio intrusion in the Luzon Strait[J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(5): 601-611.

[11] Chen G, Hu P, Hou Y, et al. Intrusion of the Kuroshio into the South China Sea, in September 2008[J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(4): 439-448.

[12] 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.
Cheng X H, Qi Y Q, Distribution and propagation of mesoscale eddies in the global oceans learnt from altimetric data[J]. Advances in Marine Science (in Chinese), 26(4): 447-453.

[13] Qiu B. Seasonal Eddy Field Modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon Observations and Theory[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(10): 2471-2486.

[14] Liu Y, Dong C, Guan Y, et al. Eddy analysis in the subtropical zonal band of the North Pacific Ocean[J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers, 2012, 68(5): 54-67.

[15] Qiu B. Seasonal Eddy Field Modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon Observations and Theory[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(10): 2471-2486.

[16] Hwang C, Wu C R, Kao R. TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: Kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(8): 371-375.

[17] Qiu B, Chen S. Interannual Variability of the North Pacific Subtropical Countercurrent and Its Associated Mesoscale Eddy Field[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(40): 213-225.

[18] Kang L, Wang F, Chen Y. Eddy generation and evolution in the North Pacific Subtropical Countercurrent (NPSC) zone[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(5): 968-973.

[19] Chaigneau A, Gizolme A, Grados C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2-4): 106-119.

[20] 杨光. 西北太平洋中尺度涡旋研究[D]. 北京：中国科学院大学，2013.
Yang G. A study on the mesoscale eddies in the Northweatern Pacific Ocean[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.

[21] Chen G, Hou Y, Chu X. 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): 102-108.

[22] 董昌明. 海洋涡旋探测与分析[M]. 北京：科学出版社，2016.
Dong Changming. The detection and analysis of Ocean eddy[M]. Beijing: Science China Press, 2016.

[23] Nencioli F, Dong C, 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.

[24] Yang G, Wang F, Li Y, et al. Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(4): 1906-1925.

[25] 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.
Lin P F, Wang F, Chen Y L, et al. Temporal and spatial variation characteristics on eddies in the South China Sea. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2007, 29(13): 14-22.

[26] Brekhovskikh L M, Goncharov V V, Naugol'Nykh K A, et al. Waves in the ocean[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 1976, 19(6): 598-614.

[27] 甘子钧, 蔡树群. 南海罗斯贝变形半径的地理及季节变化[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 1-9.
Gan Z J, Cai S Q, Geographical and seasonal variability of Rossby radii in the South China Sea, Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 2001, 20(1): 1-9.

[28] Rossby C G. On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems[J]. Journal of Marine Research, 1938, 1(1): 15-28.

[29] 范海梅, 张庆华, 李丙瑞, 等. 第一斜压 Rossby 波在大洋传播中的调整[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(1): 15-19.
Fan H M, Zhang Q H, Li B R, et al. The adjustment of the first baroclinic Rossby wave in the ocean propagation[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(1): 15-19.

[30] 张正光, 中尺度涡[D].青岛: 中国海洋大学, 2014.
Zhang Z G, Mesoscale eddy[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

Statistical relationship between mesoscale eddy radius and eddy kinetic energy in the Northwestern Pacific

ZHAO Jun[1, 2, 3], GAO Shan[1, 2, 3, 4], WANG Fan[1, 2, 3, 4], CHEN Yong-li[1, 2]

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Received: Jan. 15, 2018
Key words: Northwestern Pacific; mesoscale eddy; eddy kinetic energy; eddy radius; AVISO

Abstract: The mesoscale eddies in the Northwestern Pacific (10°~52°N, 120°~180°E) were detected and tracked using AVISO satellite altimeter data based on the eddy detection scheme of velocity vector geometry. The statistical relationship between the mesoscale eddy radius (*R*) and the eddy kinetic energy (EKE) in this area were analyzed. The results showed that the relationship between the mesoscale eddy radius and EKE in this region is in the form of an inverted bell curve, especially when the eddy reaches a certain size (radius > 120 km), whereupon the EKE stops increasing with increasing radius. Moreover, the EKE-*R* relationship seems highly related to latitude: the EKE of eddies of similar radius seems to be inversely proportional to the square of the Rossby deformation radius of the first baroclinic at the eddies' latitudes. Further analysis indicated that there is no significant correlation between the EKE-R relationship and the development periods of mesoscale eddies.

(本文编辑: 李晓燕)