

# 北太平洋中尺度涡时空特征分析

郑聪聪<sup>1,2,3</sup>, 杨宇星<sup>1,3</sup>, 王法明<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 利用 1993~2011 年 19 a 的 AVISO 卫星高度计资料研究了北太平洋(10°~60°N, 120°E~100°W)中尺度涡的时空分布特征, 结果表明: 北太平洋每年约产生 1 800 余个涡旋, 其中气旋涡稍多。北太平洋东部沿岸、西北沿岸、黑潮延伸体北侧、副热带逆流区是中尺度涡的高发区, 春、冬季是涡旋的高发季节。涡极性分布以 35°N 为界, 北部多反气旋涡, 南部多气旋涡。涡旋半径以 100 km 左右为主, 并且基本随纬度升高而减小, 涡旋数量随着周期增长而急剧下降。反气旋涡的平均半径和周期均大于气旋涡。利用 Argo 浮标剖面资料分析的 6 个个例涡旋的垂直结构显示, 每个涡旋都有其独特的冷暖核结构, 深度不同。研究结果对于分析北太平洋涡动能分布及传输具有一定的参考价值。

**关键词:** 中尺度涡; 识别追踪; 时空分布; 垂直结构

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)10-0105-08

doi: 10.11759/hyxx20130129004

北太平洋与我国大部分海岸相接壤, 在经济和军事方面都有着非常重要的地位, 其面积广阔, 有自己独立的双环流结构, 中尺度涡现象活跃。最近几年, 很多学者对北太平洋尤其是北太平洋西侧局部区域的中尺度涡活动进行了大量的研究<sup>[1-8]</sup>, 如林鹏飞等<sup>[2]</sup>、何志杰<sup>[3]</sup>、赵杰<sup>[7]</sup>等分别对南海、西北太平洋及吕宋海峡附近的中尺度涡分布特征做了统计。北太平洋有些中尺度涡西传距离较长, 南北向移动不确定性较大, 因此特定区域内涡旋和外部区域涡旋之间的相互渗透会影响区域内涡旋的识别追踪以及生命周期、移动距离等时空特征的准确性。Chelton 等<sup>[9]</sup>、程旭华等<sup>[10]</sup>等研究了全球范围中尺度涡旋的统计规律, Chelton 的研究结果表明, 涡旋几乎产生于全球各个海洋区域, 其中约 3/4 的涡旋是西向传播, 西向传播速度随纬度增加而减小, 半径为 50~150 km 的涡旋几乎占 90%以上, 也随纬度增加而减小。但由于赤道地区几乎没有中尺度涡存在, 北太平洋区域的中尺度涡不会与其他区域相互渗透, 因此其活动具有独立性, 全球范围的涡旋研究难以体现北太平洋中尺度涡独特的时空特征。

Argo 浮标的出现使得人们对于中尺度涡三维结构的研究成为了可能<sup>[11]</sup>, 但由于 Argo 浮标移动的无规律性, 很难对某个涡旋进行长时间的追踪。因此对于中尺度涡三维结构的研究主要以集合统计不同浮标剖面资料为主。Chaigneau 等<sup>[12-13]</sup>利用批量浮标的

方法研究了秘鲁智利沿岸的涡旋垂直结构, 发现暖核要比冷核深, 涡旋引起的温度异常大约为 1°C。Liu 等<sup>[14]</sup>统计了副热带逆流区的涡旋结构, 发现冷涡和暖涡的冷暖核深度相差不多, 最大异常温度也在 1°C 左右。目前在涡旋个例的独特特征研究方面尚有所欠缺。本文利用 19 a 的 AVISO 卫星高度计资料研究了北太平洋中尺度涡的时空统计规律, 并利用 Argo 浮标剖面资料对几个分别被同一浮标追踪较长时间的中尺度涡的垂直结构进行了初步分析。

## 1 资料方法

### 1.1 数据资料

本文采用的卫星高度计资料是由法国 CLS (Collecte Localisation Satellites)中心提供的 AVISO 海平面高度异常 (SLA) 数据, 该资料由 TOPEX/Poseidon (T/P)和 ERS-1/2 卫星高度计资料混合而成, 精度为(1/4)°×(1/4)°, 空间上采用 MERCATOR 网格,

收稿日期: 2013-01-29; 修回日期: 2013-05-23

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA11010102); 山东省杰出青年基金(JQ201010); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB950402)

作者简介: 郑聪聪(1987-), 男, 山东泰安人, 硕士, 主要从事海洋动力学, 电话: 18063338196, E-mail: zcclstx@126.com; 王法明, 通信作者, 研究员, 主要从事气候动力学, 电话: 0532-82898933, E-mail: faming.wang@qdio.ac.cn

从1992年10月开始,每7 d一次,本文选取1993~2011年19 a的数据。

利用Argo浮标剖面温度资料分析中尺度涡旋的垂直温度结构,将WOA09(World Ocean Atlas 2009)温盐资料进行插值,得到浮标剖面所在时刻位置的气候态温盐值,其分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

## 1.2 中尺度涡识别追踪方法

中尺度涡的识别采用海表高度距平(sea surface height anomaly, SSHA)闭合等值线法<sup>[15]</sup>,在识别时另做如下限制:(1)外围要有闭合等值线;(2)识别过程中对半径不作要求,但追踪时忽略平均半径小于50 km的涡旋;(3)涡旋的振幅大于1 cm;(4)通过对8个方向上取平均值得到涡半径。识别完成后进行涡旋的追踪:涡旋追踪时首先要求极性相同,即气旋涡只追踪气旋涡。对于一个涡旋,取下一组涡旋中距离其中心150 km范围内振幅半径均满足一定比例关系的最近涡旋为其一周后演变成的涡旋,然后以此继续追踪下去。被追踪到的涡旋不再参与其他涡旋的追踪。

## 1.3 涡旋垂直结构研究方法

由于涡旋和Argo浮标移动无规律,两者往往不能一块移动较长时间。但如果一个Argo浮标能够较长时间的跟随同一涡旋移动,可以避免不同浮标测量之间的误差。本文通过跟随单个涡旋移动的浮标来简要查看涡旋的垂直温度结构。采用双重筛选的方法寻找共同移动的浮标和涡旋:首先确定一个涡旋的移动范围,看在这个范围内是否有较长时间的浮标被捕获,然后对这个浮标的每个剖面进行二次判断,看在浮标剖面所在的时刻该剖面是否被这个涡旋捕获,如果同一浮标被这个涡旋捕获的近乎连续的剖面超过20个,则这些被捕获的剖面将被用来查看这个涡旋的垂直结构。其中判断浮标剖面是否被涡旋捕获的标准如下:涡旋的识别时间步长为7 d一次,如果一个浮标剖面在这个涡旋步长的前后3 d内并且位于这个涡旋的0.8倍半径之内,那么我们就认定这个浮标剖面被这个涡旋所捕获。

## 2 中尺度涡时空特征

根据前文所述方法,研究了北太平洋的中尺度涡的空间分布和季节变化,尤其是对目前北太平洋中尺度涡的半径、周期以及运动学特征和季节变化等尚不明确的方面做了论述。

## 2.1 空间分布

北太平洋在1993~2011年共产生18 420个气旋涡,15 965个反气旋涡,平均每年产生1 800余个涡旋。图1是北太平洋中尺度涡产生地的空间分布,每个格点颜色代表区域内产生涡旋的数量。从图1中可以看出,北太平洋中尺度涡产生比较多的地方主要有东太沿岸、西北沿岸,中东太平洋、黑潮延伸体北部以及副热带逆流区。与Chelton<sup>[9]</sup>统计的全球中尺度涡分布相比,中东太平洋中尺度涡明显增多,可能是因为该地区短周期的涡旋数量较多,而Chelton只统计了长生命周期的涡旋分布。图2显示了中尺度涡旋消失地的空间分布,与生成地的空间分布相比,消失地的高发区整体西移一段距离,其中表现最明显的是东部沿岸高发区的消失和西边界高值区的凸显。

## 2.2 涡极性分布

图3是1993~2011年19 a间北太平洋涡极性的分布示意图,涡极性是指涡旋内某点位于反气旋涡(涡极性 $>0$ )或者气旋涡(涡极性 $<0$ )内的概率,定义为: $(N_{反气旋} - N_{气旋}) / (N_{反气旋} + N_{气旋})$ <sup>[16]</sup>,其中 $N$ 表示每个格点内产生气旋涡或反气旋涡的个数。涡极性可以反映一个区域内是气旋涡还是反气旋涡占主导。从图3可以看到,基本上可以以 $35^{\circ}N$ 作为涡极性的分界线,北部反气旋涡稍多,而南部则是气旋涡占多。尤其北太平洋高纬度地区反气旋涡数量明显多于气旋涡,而在黑潮延伸体南部、副热带逆流区及东部沿岸则是以气旋涡为主。涡极性的分布与洋流分布有很大关系<sup>[9]</sup>,在不稳定东向流的极地方向,脱离洋流而产生的弯曲流有反气旋涡涡度,容易产生反气旋涡,赤道方向则相反,更容易产生气旋涡。

## 2.3 涡半径分布

我们对追踪出来的涡旋做半径频率统计,如图4所示。不论是气旋涡还是反气旋涡,都以100 km左右内的涡旋数量最多,其中80~110 km的涡旋占一半以上。图中显示反气旋涡峰度系数更高,说明反气旋涡半径分布更加集中。将处于同一纬度上的涡旋半径做统计平均,然后得出平均半径随纬度变化的趋势,如图5所示,气旋涡和反气旋涡半径随纬度变化的趋势相同,基本上都随着纬度增高而降低。对于图中显示的低纬度时涡旋半径较小的现象,可能是由于程序本身问题导致。值得注意的是北太平洋反气旋涡的平均半径要比气旋涡大5 km左右,但具体原因还有待进一步分析。

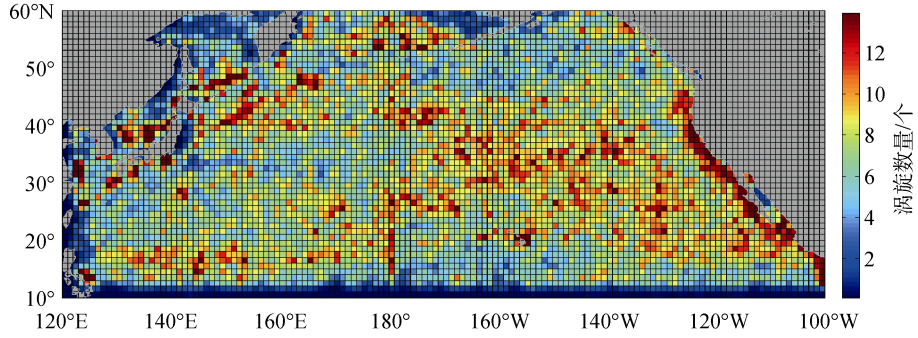


图 1 1993~2011 年北太平洋中尺度涡产生数量的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the number of all the mesoscale eddies generated in the North Pacific from 1993 to 2011

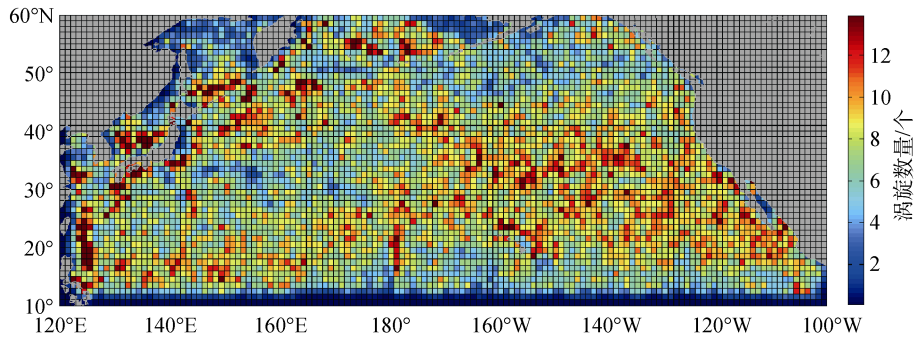


图 2 1993~2011 年北太平洋中尺度涡消亡数量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the number of all the mesoscale eddies generated in the North Pacific from 1993 to 2011

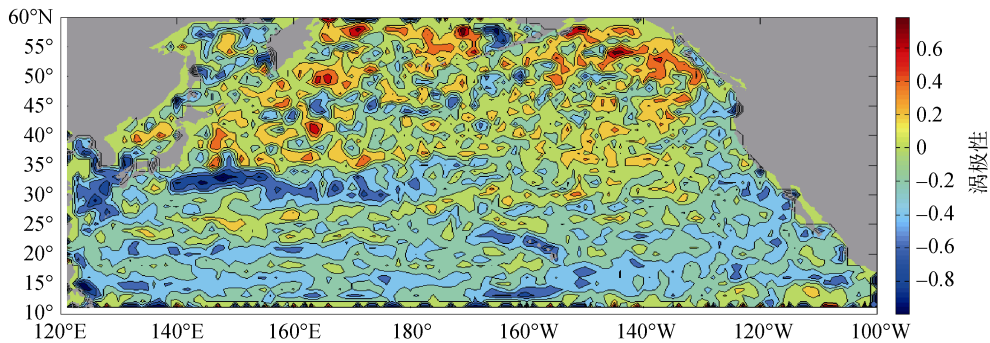


图 3 1993~2011 年北太平洋中尺度涡极性分布

Fig. 3 The vortex polarity distribution of mesoscale eddy in the North Pacific from 1993 to 2011

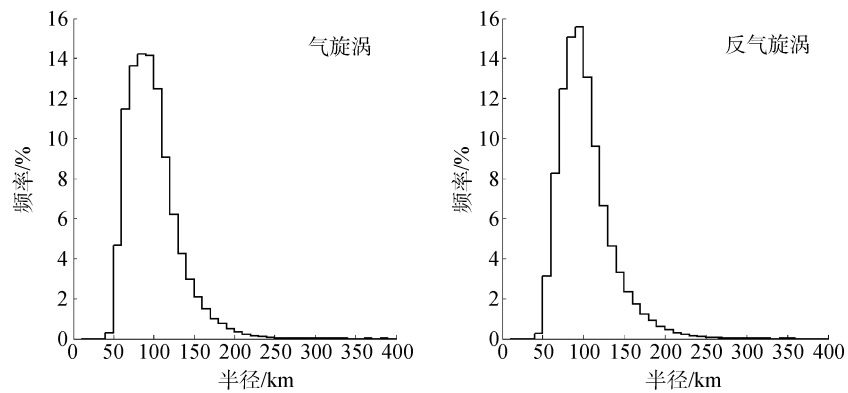


图 4 北太平洋中尺度涡半径概率分布

Fig.4 The probability distribution of mesoscale eddy radius in the North Pacific

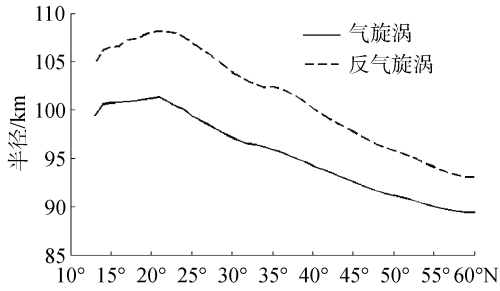


图5 北太平洋中尺度涡半径随纬度的变化趋势

Fig.5 The variation trend of mesoscale eddy radius along with the changes of latitude in the North Pacific

## 2.4 涡周期分布

在所有涡旋中, 周期达到 150 周以上的只有 15 个, 而且长周期的涡旋中以反气旋偏多。从平均周期来看, 气旋涡平均周期为 12.7 周, 反气旋涡稍长于气旋涡, 为 13.2 周。图 6 显示了气旋涡和反气旋涡的生命周期分布, 涡旋数量随生命周期的增加急剧下降, 到 60 周时涡旋数量已经下降到不足 1%。图 7 显示了生命周期大于 150 周的反气旋涡数量远大于气旋涡, 并且都位于北太平洋北侧, 而仅有的一个气旋涡位于南侧区域。

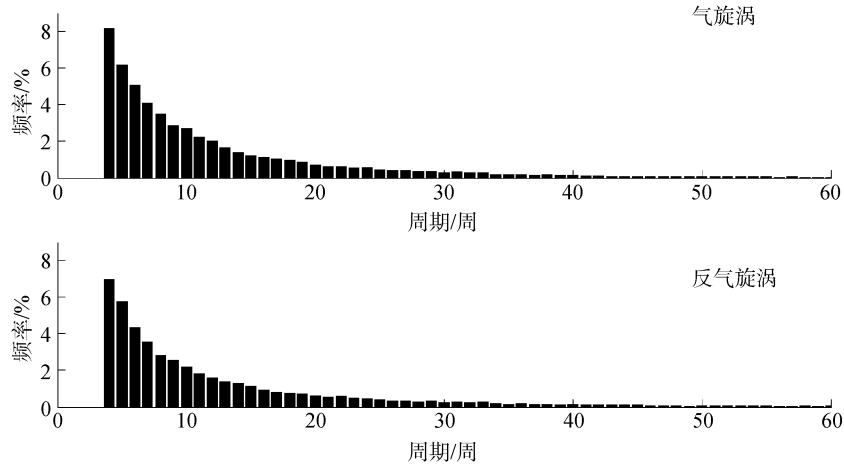


图6 北太平洋中尺度涡生命周期分布

Fig.6 The life cycle distribution of mesoscale eddy in the North Pacific

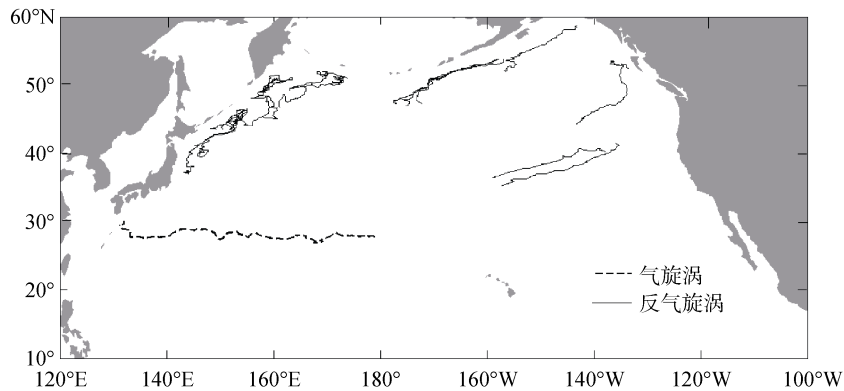


图7 北太平洋中尺度涡长生命周期(>150周)涡旋轨迹图

Fig.7 The trajectories of mesoscale eddies with long life cycle (>150 weeks)

## 2.5 涡移动特征

在分析涡旋移动特征的时候做如下规定: 这里的涡旋移动指的是涡中心在整个生命周期的移动, 并且南北向移动和东西向移动分开讨论, 不考虑其绝对移动速率, 如果涡中心起始点和终点的移动距离小于  $1^\circ$ , 则被视为静止涡旋。图 8 显示了气旋涡、

反气旋涡和所有涡旋的南北向及东西向统计值。图 8a 为经向统计值, 可以看到中尺度涡超过 60% 都是处于类静止状态, 说明其大部分涡旋南北向移动距离很小, 剩下的涡旋中向赤道方向移动的涡旋稍多于向极地方向移动的涡旋, 3 者比例约为 9:3:2。图 8b 显示了所有涡旋的纬向统计值, 可以看到几乎

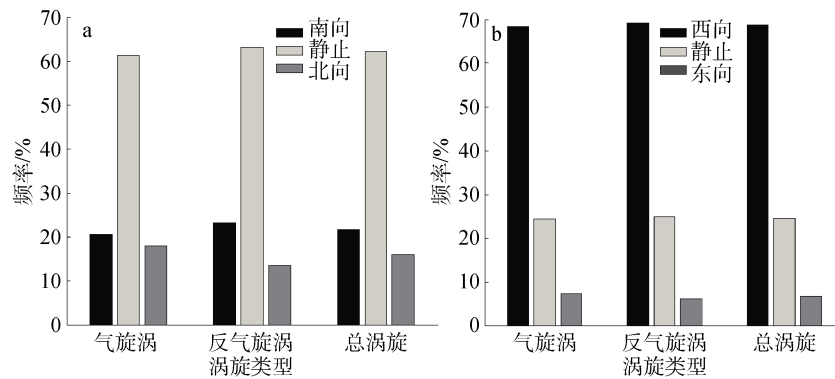


图 8 北太平洋中尺度涡经向、纬向移动分布

Fig.8 The movement distribution of mesoscale eddy in the North Pacific

70%的涡旋都是西向传播的, 只有不到 10%的涡旋向东传播, 西向、类静止和东向传播 3 者之间的比例接近 9 : 3 : 1。

对于西向传播的涡旋, 我们统计了其传播速度随纬度变化的趋势, 如图 9 所示, 考虑到大部分涡旋南北向移动不大, 故每个涡旋的纬度取其产生时的纬度位置。可以看出, 中尺度涡的西传速度是随纬度升高而降低的, 其中最低大约为 1.65 cm/s, 平均西向传播速度为 4.97 cm/s。所有涡旋中西传速度最快能达到 19.97 cm/s。

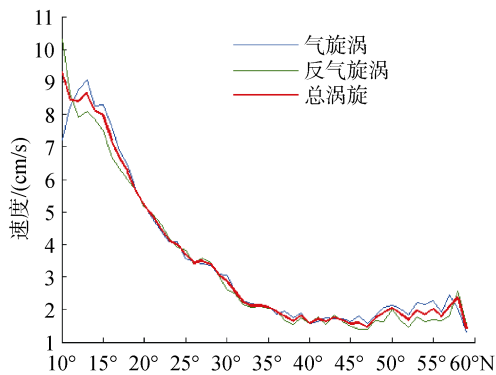


图 9 北太平洋中尺度涡西向移动速度随纬度变化

Fig.9 The speed variation of mesoscale eddy in the North Pacific along with the changes of latitude

## 2.6 季节变化

图 10 显示了 19 a 北太平洋中尺度涡旋生成数量的月际变化。从月际变化中可以看到, 气旋涡和反气旋涡产生的分布趋势相当一致, 只是气旋涡数量稍多。3 月份产生涡旋数量最多, 10 月和 11 月最少。另外还可以看到北太平洋中尺度涡的产生有明显的季节变化, 春季是高发季节, 而秋季则产生数量最少。

## 3 涡旋垂直结构

为了避免不同浮标之间的误差, 本文找到 6 个分别被同一 Argo 浮标追踪较长时间的涡旋, 简单分析了它们的垂直温度结构。

### 3.1 涡旋和浮标信息

采用前文所述方法我们初步找到 5 个这样的 Argo 浮标, 为 2900713 号、2900666 号、2901361 号、2900334 号、2900966 号, 对应的 6 个涡旋都是移动范围很小的涡旋, 5 个浮标分别对应 1#、2#、3#气旋涡和 4#、5#、6#反气旋涡, 其中 5#、6#反气旋涡被 2900966 号浮标在前后不同时期内追踪。对于每个涡旋而言, 都捕获不少于 20 个近乎连续的温度剖面(表 1)。

### 3.2 涡旋垂向结构异常

图 11 是 6 个涡旋垂向结构的温度异常图, Argo 浮标剖面温度数据除去被插值到剖面所在位置所在月份的 WOA09 气候态温度平均值, 得到图中异常值。将这 6 个涡旋所捕获的浮标剖面的温度异常平均化, 如图 12 所示, 图 12a 分别是 1#、2#、3#气旋涡, 图 12b 代表 4#、5#、6#反气旋涡。需要说明的是, 这些浮标剖面所在的时间段只占涡旋生命周期中的一部分, 并不是全程跟踪。

从图 11 中我们可以看到, 涡旋在几个月的时间内垂直结构相对比较稳定, 尤其是最大温度异常值和所在的深度位置变化不大。6 个涡旋导致的冷(暖)异常大小在垂向上随深度而变化, 具有冷(暖)核的结构。结合图 12 可以看到 3 个冷涡的核深度普遍较深, 3 个暖涡的核深度相对较浅。另外, 除 5#反气旋引起最大 5°C 的温度异常外, 其他涡旋都引起最大 2°C 左右的温度异常。跟 Chaigneau 等<sup>[12]</sup>和 Liu 等<sup>[14]</sup>的结

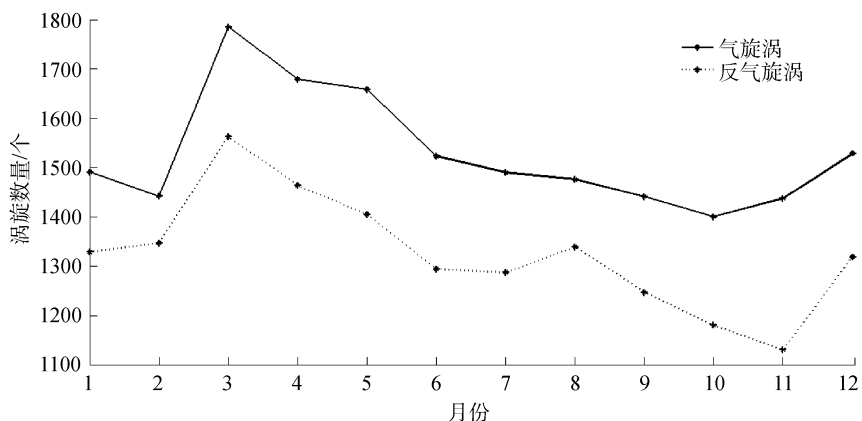


图 10 北太平洋中尺度涡产生数量的季节变化

Fig.10 Seasonal variability of eddy numbers in North Pacific

表 1 6 个涡旋所捕获的浮标

Tab.1 Floats trapped by six eddies

涡旋号	大约位置	捕获浮标号	捕获剖面数量(个)	生命周期(年-月)
1#	30°N, 143°E	2900713	20	2009-07~2009-10
2#	28°N, 150°E	2900666	29	2008-02~2008-08
3#	23°N, 124°E	2901361	20	2010-08~2010-12
4#	43°N, 147°E	2900334	33	2003-09~2004-10
5#	41°N, 146°E	2900966	33	2009-08~2010-02
6#	43°N, 148°E	2900966	58	2010-02~2010-12

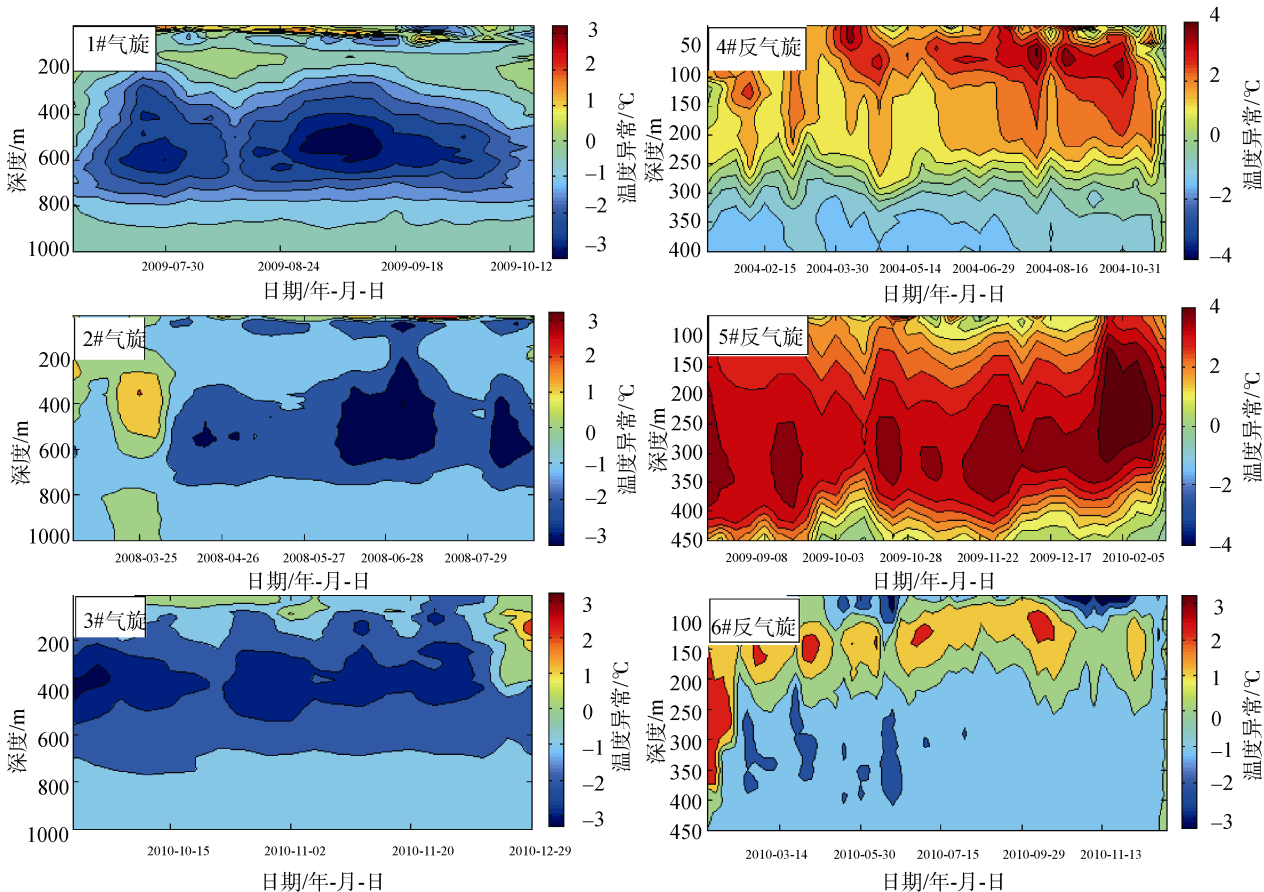


图 11 6 个涡旋垂直结构温度异常

Fig.11 The vertical temperature anomaly of six eddies

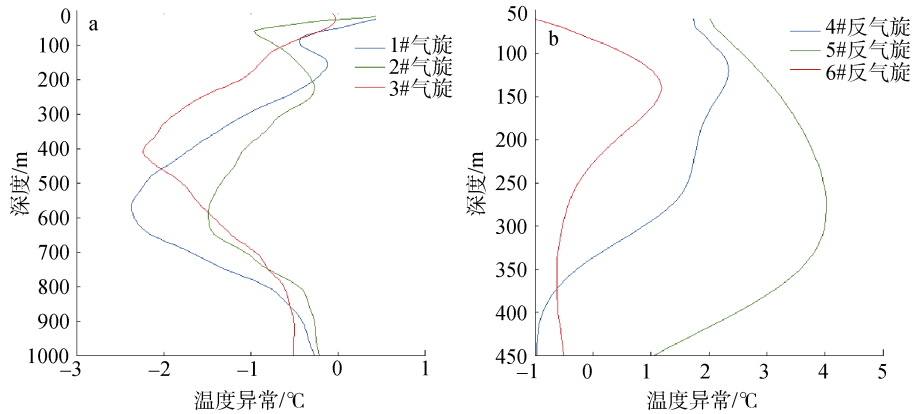


图 12 涡旋垂直温度异常

Fig.12 The vertical sea temperature anomaly of six eddies

表 2 涡旋垂直结构异常

Tab.2 Vertical sea temperature anomaly of eddies

涡旋	大约位置	核深度 (m)	最大温度异常 (°C)
1#气旋	30°N, 143°E	550	-2.4
2#气旋	28°N, 150°E	600	-1.5
3#气旋	23°N, 124°E	400	-2.3
4#反气旋	43°N, 147°E	120	2.2
5#反气旋	47°N, 146°E	300	5.0
6#反气旋	43°N, 148°E	150	1.5

果相比, 本文的个例涡旋冷暖核的最大温度异常值相对较大, 首先可能是因为单独涡旋的温度异常值各不相同; 其次, 这是否与纬度和涡强度也有一定关系, 是本文下一步研究的方向。

## 4 结论

本文采用 19 a (1993~2011 年)的 AVISO 海表高度数据分析了北太平洋的中尺度涡时空分布特征: 北太平洋中尺度涡呈现近 X 状分布, 涡旋产生比较多的地方主要有东太平洋加利福尼亚沿岸、西北太平洋日本沿岸、中东太平洋、黑潮延伸体北侧及副热带逆流区; 涡极性分布以 35°N 为界, 北部反气旋涡稍多, 南部气旋涡偏多。涡旋半径以 100 km 左右为主, 随纬度升高而降低, 涡数量随涡生命周期增长而下降, 反气旋涡的平均半径和周期均大于气旋涡, 可能暗示了反气旋涡比气旋涡更加稳定; 涡旋南北向和东西向移动的比例分别为 9 : 3 : 2 和 9 : 3 : 1, 平均西向传播速度随纬度升高而降低; 涡旋产生数量具有明显的季节变化, 春季数量最多, 秋季最少。

采用 Argo 浮标资料简单分析了几个中尺度涡的

垂直温度结构, 发现 3 个冷涡结构相似, 引起最大 2°C 左右的温度异常, 冷核深度能够达到 500 m 左右, 3 个暖涡的暖核都相对较浅, 温度异常有较大差异。需要指出的是, 这几个涡旋表现出的特征与整个北太平洋涡旋平均特征的区别, 将在下一步的工作中继续加以验证。

参考文献:

- [1] Qiu B, Chen S M. Interannual variability of the North Pacific subtropical countercurrent and its associated mesoscale eddy field[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(1): 213-225.
- [2] 林鹏飞, 王凡, 陈永利, 等. 南海中尺度涡的时空变化规律. 统计特征分析[J]. *海洋学报*, 2007, 29(3): 14-22.
- [3] 何忠杰. 西北太平洋副热带逆流区及其邻近海域中尺度涡研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [4] Qiu B, Chen S M. Eddy-induced heat transport in the subtropical North Pacific from Argo, TMI, and altimetry measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(4): 458-473.
- [5] 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 吕宋海峡附近中尺度涡特征的统计分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 1-7.
- [6] Qiu B, Chen S M, Hacker P. Effect of mesoscale eddies on subtropical mode water variability from the Kuroshio Extension System Study (KESS)[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(4): 982-1000.
- [7] 赵杰. 吕宋海峡东侧海区中尺度涡旋的统计特征及对黑潮平均流的影响初探[D]. 青岛: 中国海洋大学,

- 2010 .
- [8] 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 .
- [9] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [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] 许建平, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 利用 Argo 剖面浮标研究西北太平洋环流和水团[C]//中国首届 Argo 科学研讨会. Argo 应用研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2006: 1-15.
- [12] Chaigneau A, Texier M L, Eldin G, et al. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats[J]. *Journal of Geophysical Research-oceans*, 2011, 116(C11): 1-16.
- [13] Chaigneau A, Pizarro O. Eddy characteristics in the eastern South Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research-oceans*, 2005, 110(C6): 1-12.
- [14] Liu Y, Dong C M, Guan Y P, 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(1): 54-67.
- [15] Wang G H, Su J L, Chu P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21): 1-6.
- [16] Chen G X, Hou Y J, Chu X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. *Journal of Geophysical Research-oceans*, 2011, 116(6): 1-19.

## Spatial-Temporal features of eddies in the North Pacific

ZHENG Cong-cong<sup>1, 2, 3</sup>, YANG Yu-xing<sup>1, 3</sup>, WANG Fa-ming<sup>1, 3</sup>

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** Jan., 29, 2013

**Key words:** mesoscale eddies; identify and trace; spatial-temporal distribution; vertical structure

**Abstract:** The spatial-temporal features of eddies in the North Pacific (NP) were analyzed based on the AVISO satellite altimetry data obtained during 19 years (1993-2011). The vertical structure of six eddies was also studied using the Argo floats data. Averagely, about 1810 eddies emerge annually in the NP and the cyclonic eddies are preferred. The eastern coast and northwest of the NP, Kuroshio extension and subtropical area are high incidence areas for eddies. Furthermore, there are more eddies emerging in spring and winter. 35°N can be used as the dividing line on eddy polarity with more cyclonic eddies than anti-cyclonic eddies in the north of it. The eddy scale and lifetime decrease as altitude increases, but the average scale and lifetime of anti-cyclonic eddies are longer than cyclonic eddies. The vertical structure of six eddies shows different warm (cold) cores for structure and depth.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)