

# 北太平洋中尺度涡温度垂直结构区域差别分析

郑聪聪<sup>1</sup>, 闫忠辉<sup>2,3</sup>, 梁永春<sup>1</sup>, 崔侦久<sup>1</sup>, 孟娜<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局日照海洋环境监测站, 山东 日照 276800; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266000;  
3. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 2266061)

**摘 要:** 利用在北太平洋海域(120°E~100°W, 10°~60°N;) 19a 间(1993—2011 年) 识别追踪出的中尺度涡, 结合该区域内的 Argo 浮标资料, 初步探索了北太平洋不同区域之间涡旋垂直温度结构的差异性。通过对比北太平洋 4 个小区域(副热带逆流区域、黑潮延伸体区域、亲潮区域、东部加利福尼亚沿岸区域) 内的涡旋发现: 每个区域内气旋涡和反气旋涡的垂直温度结构具有很大的相似性, 但不同区域之间则略有差异。其中黑潮延伸体区域跟其它区域的中尺度涡垂直温度结构有较大差别, 该区域内中尺度涡温度异常值明显大于其它区域, 冷暖核的深度比其它区域要深, 并且从 100~600 m 的深度上都有较大的温度异常。

**关键词:** 中尺度涡; 北太平洋; 核结构

**中图分类号:** P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)03-0010-07

## 1 引言

中尺度涡作为中尺度现象的一个重要组成部分, 在海洋热盐和能量的输送及海洋生物、化学过程中都起着非常重要的作用<sup>[1-2]</sup>, 其携带的能量要比平均流大一个量级以上<sup>[3]</sup>, 是海洋动力学的重要组成部分<sup>[4]</sup>。近年来随着卫星遥感观测手段的日益进步, 对海洋中尺度涡的研究也得到了不断的发展<sup>[5]</sup>。Wang 等人利用 8 a 的高度计资料, 将南海分成 4 个海域分别讨论了讨论涡旋的时空特征<sup>[6]</sup>。程旭华等利用 10 a 的高度计融合数据分析了南海中尺度涡的时空分布及涡旋的季节和年际差异<sup>[7]</sup>。程旭华及 Chelton 等都重点研究了全球海洋中尺度涡的空间分布及运动规律<sup>[5,8]</sup>。

北太平洋具有独特的大、小双环流结构, 区域内海流错综复杂, 中尺度涡现象非常活跃。我国大部分海岸线均毗邻北太平洋海域西侧, 因此研究北太平洋区域内中尺度涡的垂直结构具有重要意义。近年来, 随着 Argo 浮标的不断增多, 不少学者对该区域内中尺度涡的垂直结构进行了一定的研

究。Liu 等统计分析副热带逆流区域内的涡旋结构, 发现该区域内冷暖涡旋的核深度相差不多, 最大异常温度大约为 1 °C 左右<sup>[9]</sup>。Chaigneau 等研究了秘鲁智利沿岸涡旋的垂直温度结构, 结果表明涡旋的暖核要比冷核深, 中尺度涡引起的温度异常也在 1 °C 左右<sup>[10-11]</sup>。Roemmich 等利用 T/P 高度计资料, 利用合成方法分析了北太平洋区域中尺度涡的温度结构<sup>[12]</sup>。张正光利用合成分析的方法表明中尺度涡具有统一结构性, 并且给出了利用海表高度资料反演三维结构的方法<sup>[13]</sup>。贺志刚等通过 4 个在南海范围的 Argo 浮标资料和卫星高度计资料, 分析了南海区域中尺度涡旋的活动及空间结构<sup>[14]</sup>。刘金芳等利用 CTD 资料研究了吕宋冷涡的垂直结构<sup>[15]</sup>, 燕丹晨等利用 AVISO 资料和 CTD 资料研究了越南东南外海的涡旋垂向结构<sup>[16]</sup>, 均发现涡旋在温跃层之下、约 100 m 深度上温度异常较为明显。但目前北太平洋中尺度涡垂直结构的研究仍主要集中在个例涡旋的研究上<sup>[17]</sup>, 或者个别小区域上<sup>[18-19]</sup>, 缺乏大量涡旋垂直结构的统计。本文利用统计方法分析了北太平洋区域内中尺度涡的平均垂向温度异常结构, 并

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2016-11-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1402103); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目(2013418031)。

作者简介: 郑聪聪(1987-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事中尺度涡三维结构研究。E-mail: zcclstx@126.com

对比了几个典型小区域内涡旋结构的异同。

## 2 资料方法

### 2.1 数据资料

本文识别追踪中尺度涡所采用的卫星高度计数据是由法国采集定位卫星(Collecte Localisation Satellites, CLS)中心提供的AVISO海平面高度异常(Sea Level Anomaly, SLA)数据,该数据由TOPEX/Poseidon(T/P)和ERS-1/2卫星高度计资料混合而成,数据精度为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ ,时间间隔为7 d,本文选取的时间段是从1993—2011年共19 a<sup>[20]</sup>。

Argo浮标数据资料采用中国Argo实时资料中心提供的浮标原始数据,使用之前做区域性和质量性筛选,只选取在北太平洋海域数据质量合格的2 442个浮标资料,并且在0~800 m深度上做线性插值处理。

海洋气候态平均资料(World Ocean Atlas 2009, WOA09)是由美国海洋资料中心(the U.S. National Oceanographic Data Center)提供,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。为全球海洋经纬网格的气候学客观分析、统计分析数据,包括在33个深度上的温、盐、溶解氧等变量的逐年、月、季节数据。在本文中,我们将WOA09资料中 $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐月温度数据与Argo浮标数据做同样的插值处理。

### 2.2 中尺度涡垂直结构研究方法

本文利用通过SSHA闭合等直线法追踪到的中尺度涡和被投放到北太平洋的Argo浮标数据资料来研究这些中尺度涡垂直温度结构的整体状况。Argo浮标投放的初始时间是2002年,因此我们所选用的中尺度涡也均是2001年之后的。由于中尺度涡和Argo浮标移动的无规律性,大部分涡旋可能只在某段时间内能够捕获一个Argo浮标。在本文中我们只关注那些被中尺度涡所捕获的Argo浮标剖面,将所有这些浮标剖面做统计分析,来表征中尺度涡的垂直温度结构。判断Argo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,浮标剖面数据的时间序列步长为数天左右。若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

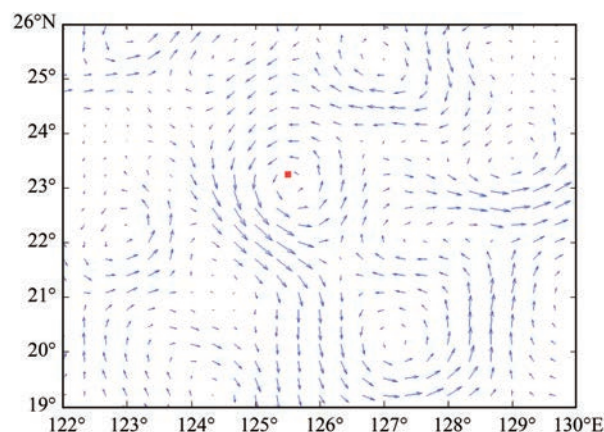


图1 被气旋涡所捕获的Argo浮标

认定这个浮标剖面被这个涡旋所捕获<sup>[20]</sup>(见图1)。另外,由于每个浮标剖面在涡旋中的空间位置不同,有的位于涡旋中心,有的位于涡旋边缘,但有研究认为中尺度涡在基于高度计的观察中是基本轴对称的<sup>[8,11]</sup>,所以在本文中我们同样认为涡旋的三维结构在平均意义下也是基本轴对称的。我们将所捕获到的大量的浮标剖面进行统一平均化处理,忽略掉这种因单个浮标剖面空间位置的不同所带来的整体涡旋结构的差异。

利用自动匹配程序来寻找所有被中尺度涡捕获的Argo浮标剖面。匹配思想是:将所有Argo浮标剖面逐个跟2001年之后的中尺度涡旋做对比,看该剖面是否被中尺度涡捕获。最后分别统计被气旋涡和反气旋涡捕获的剖面,进而查看北太平洋区域中尺度涡的整体结构。

## 3 北太平洋中尺度涡垂向温度结构

利用前文所述方法,我们找出在19 a间共产生18 420个气旋涡和15 965个反气旋涡,利用这些涡旋和浮标剖面匹配共找到符合条件的气旋涡浮标剖面11 979个和反气旋涡浮标剖面13 153个。将每个剖面除去被插值到该剖面所在位置所在月份的WOA09气候态温度平均值,得到温度异常结果,该结果即代表该中尺度涡在垂直方向上所引起的温度异常。将所有温度异常做平均化处理,得到北太平洋气旋涡和反气旋涡的垂向温度结构(见图2)。

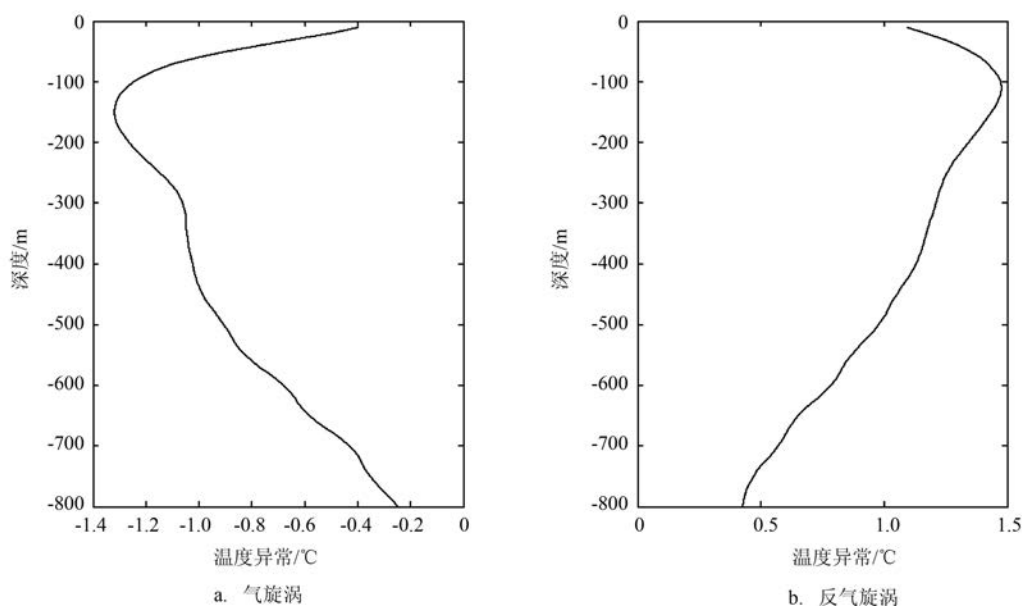


图2 北太平洋中尺度涡垂向温度结构

从图2中可以看到,北太平洋海域气旋涡和反气旋涡的垂向温度结构具有对称性。该区域中尺度涡具有“核”状结构,即涡旋引起的垂向温度异常值都随深度增加而先增后减,这与个例涡旋也具有核状结构的结论相符<sup>[20]</sup>;在800 m深度上,两者温度异常值都降到0.5℃以内,这说明北太平洋中尺度涡影响下层海水温度的平均深度能够达到800 m,但与此同时,在800 m深度时该影响已经比较微弱;反气旋涡的暖核中心位于120 m上下,气旋涡的冷核中心位于150 m上下。在本文中,我们选取1℃作为中尺度涡对海水温度影响较为明显的阈值,大于此温度的深度范围则被视为中尺度涡对下层海水温度的主要影响深度。北太平洋气旋涡对海洋下层海水温度的影响主要集中在50~450 m之间,反气旋涡则集中在0~500 m之间,影响范围更广;反气旋涡的最大温度异常值接近1.5℃,而气旋涡的最大温度异常值为-1.3℃。

#### 4 北太平洋中尺度涡垂向结构区域性差别

为更好的研究分析不同区域之间涡旋结构的差异性,我们选取北太平洋内4个较小的区域(见图3)。所选区域均为中尺度涡高发地段,这4个小区

域的位置和范围如表1所示:

表1 4个小区名称及位置

区域名称	区域范围
(1) 副热带逆流区	18°~27°N, 130°~170°E
(2) 黑潮延伸区	30°~42°N, 130°~165°E
(3) 亲潮区域	42°~60°N, 130°~165°E
(4) 加利福尼亚区域	30°~42°N, 140°~100°W

依据前文所述方法,做出这4个小区内中尺度涡垂直温度异常结构(见图4—7),其中左侧为气旋涡,右侧为反气旋涡。

为更好的对比观察4个区域中尺度涡垂直温度结构的异同,我们总结4个小区内中尺度涡的结构,如冷暖核深度、冷暖核温度异常值等信息(见表2)。

表2 4个区域中尺度涡温度异常结构信息

区域编号	冷核深度 /m	冷核温度 /℃	暖核深度 /m	暖核温度 /℃
(1)	130	-1.3	120	2.1
(2)	350	-3	300	3
(3)	80	-1.5	80	1.5
(4)	100	-1.6	90	1

结合图表对比每个小区内中尺度涡的冷暖核结构可以发现,其各自的冷核和暖核深度相差不



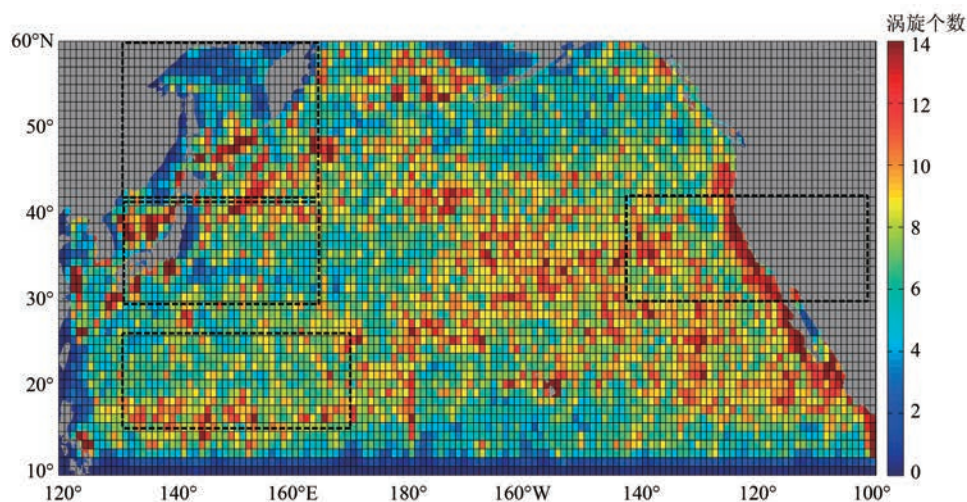


图3 北太平洋4个中尺度涡高发区域

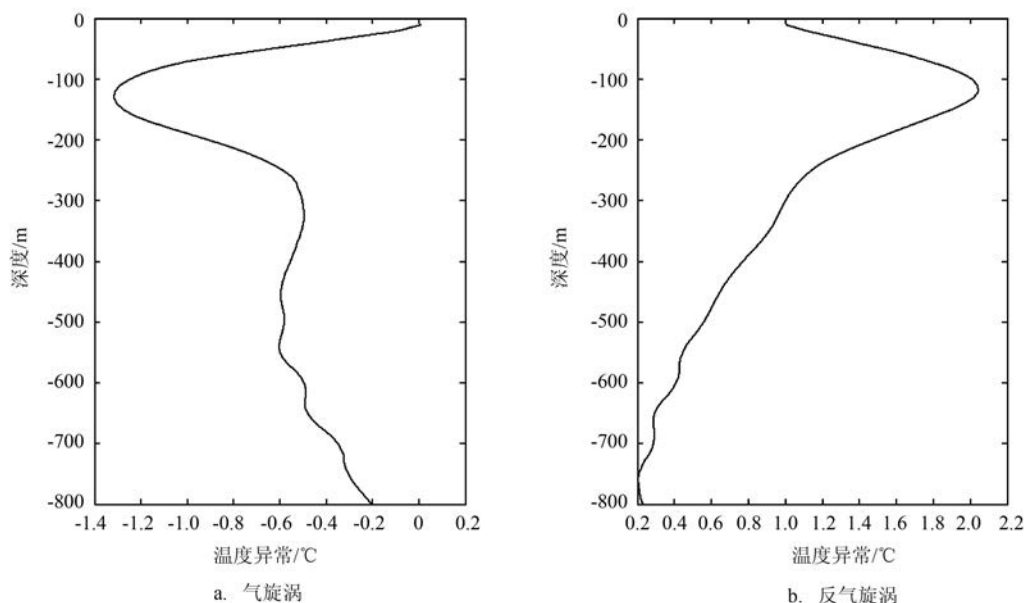


图4 副热带逆流区中尺度涡垂向温度结构

大,冷暖核的温度异常值也比较接近,这说明不管是北太平洋区域还是其内部小区域,气旋涡和反气旋涡的垂直结构都具有相似性,这与前文结论相符。

4个小区域之间中尺度涡的垂直结构则具有一定的差异性。首先,每个区域的冷暖核深度各不相同,亲潮区域最浅,只有不足80 m,黑潮延伸体区域最深,达到300多米。其次,其冷暖核的温度异常值稍有差异,除黑潮延伸体外,其他区域的温度异常大都在1~2 °C之间,而黑潮延伸体区域中尺度涡垂

直结构的温度异常则达到3 °C,远高于其他区域。另外,从图中我们还可以发现,黑潮延伸体区域中尺度涡的冷暖核深度范围更大,远不如其他3个区域集中。对于这种差异,有学者认为是因为黑潮延伸体区域中尺度涡的产生机制多种多样,并且存在迥然各异的性质<sup>[21]</sup>,或者复杂的黑潮-涡旋相互作用可以极大地改变涡旋结构<sup>[22-24]</sup>,进而造成了这种区域上的差别。对此我们做出了北太平洋中尺度涡的平均振幅分布(见图8)。结合图8显示的北太平洋中尺度涡平均振幅分布,本文认为中尺度涡对下

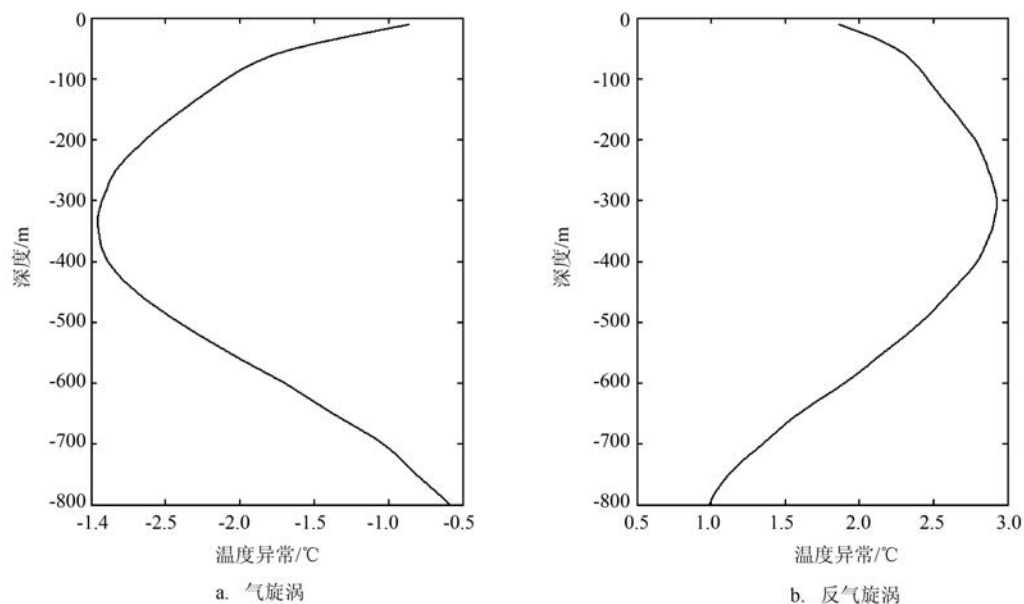


图5 黑潮延伸体区域中尺度涡垂向温度结构

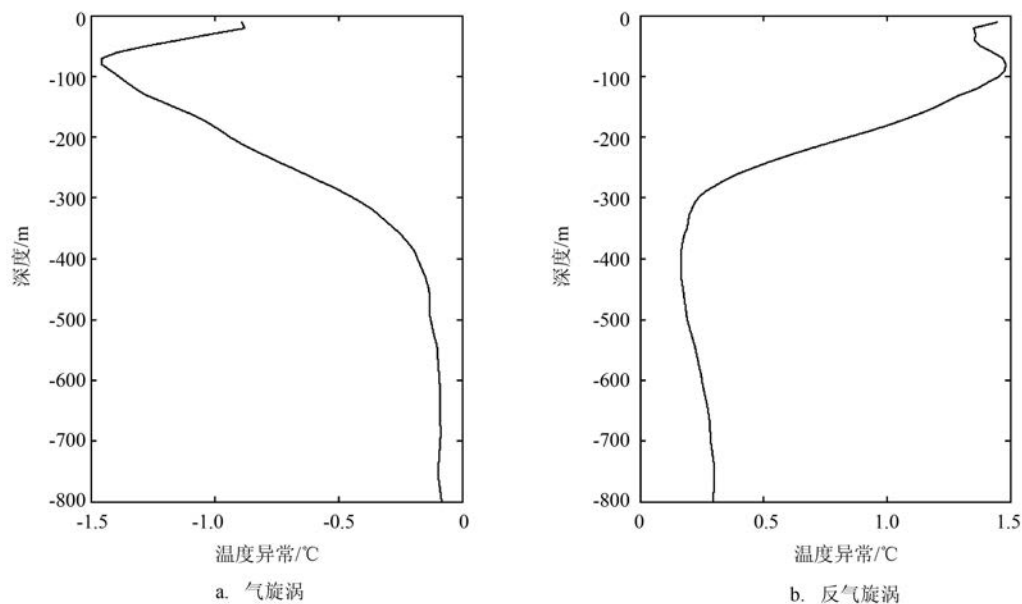


图6 亲潮区域中尺度涡垂向温度结构

层海水的影响可能跟涡旋自身的振幅有关,涡旋振幅越大表明该涡旋活动越强烈,能够引起的上层海水下沉过程或下层海水上翻就越剧烈,进而能够影响的海水深度就越深。

## 5 结论

北太平洋中尺度涡的冷暖核中心位于100~

150 m之间,最大温度异常值约为1~1.5 °C,气旋涡和反气旋涡的垂直结构具有很大的相似性。4个小区域之间中尺度涡的垂直结构略有差异,黑潮延伸体区域内中尺度涡的温度异常值明显大于其它区域,冷暖核中心的深度达到300~400 m,该区域涡旋对下层海水的影响具有温度异常高、冷核暖核深、影响范围广等特点。

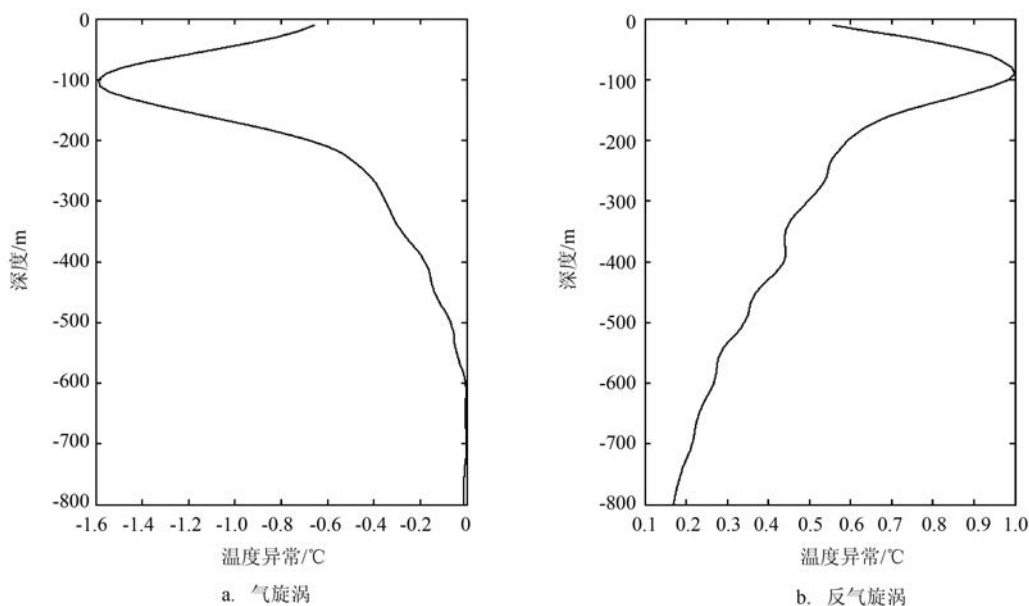


图7 加利福尼亚区域中尺度涡垂向温度结构

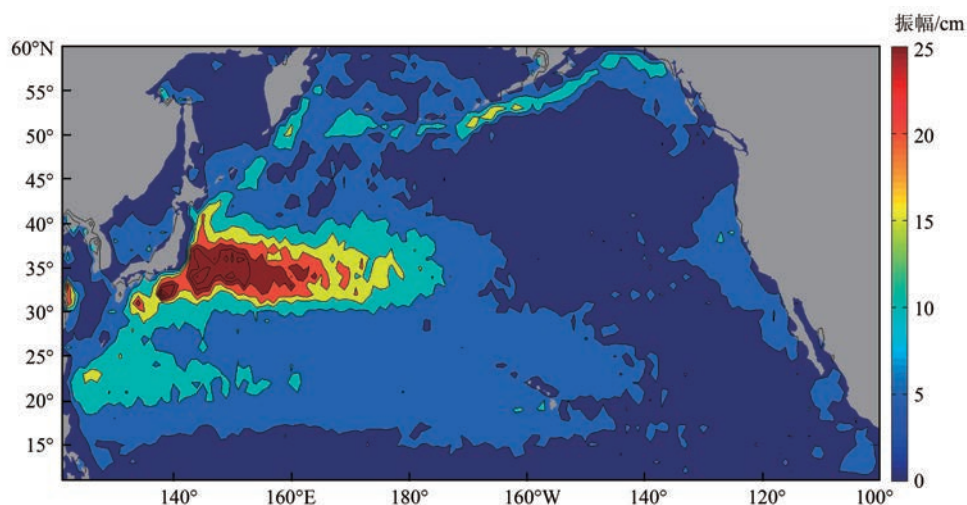


图8 北太平洋中尺度涡平均振幅分布

### 参考文献:

- [1] Qiu B, Chen S M. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. Journal of Physical Oceanography, 2005, 35(11): 2090-2103. DOI: 10.1175/JPO2807.1.
- [2] 李敏, 谢玲玲, 杨庆轩, 等. 湾流区涡旋对海洋垂向混合的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 744-752.
- [3] Le Traon P Y, Morrow R. Chapter 3 Ocean currents and eddies[J]. International Geophysics, 2001, 69: 171-215. DOI: 10.1016/S0074-6142(01)80148-0.
- [4] 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 南海中尺度涡研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 882-886.
- [5] 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.
- [6] 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): 2121.
- [7] 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.
- [8] Chelton D B, Gaube P, Schlax M G, et al. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll[J].

- Science, 334(6054): 328-332.
- [9] 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: 54-67.
- [10] Chaigneau A, Pizarro O. Eddy characteristics in the eastern South Pacific[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2005, 110 (C6): C06005.
- [11] Chaigneau A, Le Texier M, 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): C11025.
- [12] Roemmich D, Gilson J. Eddy transport of heat and thermocline waters in the North Pacific: a key to interannual/decadal climate variability?[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(3): 675-688.
- [13] 张正光. 中尺度涡[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [14] 贺志刚, 王东晓, 陈举, 等. 卫星跟踪浮标和卫星遥感海面高度中的南海涡旋结构[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 27-35.
- [15] 刘金芳, 毛可修, 闫明, 等. 吕宋冷涡时空特征概况[J]. 海洋预报, 2006, 23(2): 39-44.
- [16] 燕丹晨, 仇天宇, 李云, 等. 基于WA方法的2013年夏秋越南东南南海暖涡初步分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(5): 53-60.
- [17] Hu J Y, Gan J P, Sun Z Y, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C5): C05016, doi: 10.1029/2010JC006810.
- [18] 高理, 刘玉光, 荣增瑞. 黑潮延伸区的海平面异常和中尺度涡的统计分析[J]. 海洋湖沼通报, 2007(1): 14-23.
- [19] 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.
- [20] 郑聪聪, 杨宇星, 王法明. 北太平洋中尺度涡时空特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 105-112.
- [21] 杨光. 西北太平洋中尺度涡旋研究[D]. 青岛: 中科院海洋研究所, 2013.
- [22] 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. DOI: 10.1175/2009JPO4285.1.
- [23] Zheng Q N, Tai C K, Hu J Y, et al. Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait [J]. Journal of Oceanography, 2011, 67: 365-376.
- [24] 潘丰, 张有广, 林明森. 黑潮延伸体区海平面异常和中尺度涡的时空特征分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 29-38.

## Analysis of the eddy vertical structure in different areas in the North Pacific

ZHENG Cong-Cong<sup>1</sup>, YIN Zhong-hui<sup>2,3</sup>, LIANG Yong-Chun<sup>1</sup>, CUI Zhen-Jiu<sup>1</sup>, MENG Na<sup>1</sup>

(1. Rizhao Marine environmental monitoring station of SOA, Rizhao, Rizhao 276800 China; 2. North China sea marine forecasting center of state oceanic Administration, Qingdao 266000 China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061 China)

**Abstract:** The difference of eddy vertical structure in different areas in the North Pacific (NP) was analyzed with eddies identified in 19 years (1993—2011) and Argo data in the NP. By comparing eddy vertical structure in four different areas (the Subtropical Countercurrent, the Kuroshio extension, the Oyashio Current and east coast of North Pacific), the results show that the cyclones and anticyclones have similar structure in the same area, but the eddy structure distinct from each other in different areas, especially in the Kuroshio extension. The vertical temperature anomaly of eddies in this area is larger than other areas, and the depth of cores is deeper. Furthermore, the temperature anomaly in depth from 100 m to 600 m is large generally in this area.

**Key words:** mesoscale eddies; North Pacific; core structure