

黑潮延伸体邻近海区中尺度涡三维合成结构分析

胡冬¹, 陈希², 宋海波³, 毛科峰², 余丹丹¹, 陈飞¹

(1. 解放军 31010 部队 北京 100081; 2. 国防科技大学气象海洋学院 南京 211101; 3. 解放军 92721 部队 舟山 316000)

摘要:文章基于卫星高度计资料和 Argo 浮标资料,采用合成方法,构建了黑潮延伸体邻近海区中尺度涡的温盐三维结构。合成结果表明,表层至 1×10^7 Pa,合成气旋涡(反气旋涡)呈现较为一致的位温负(正)异常,气旋(反气旋)涡内呈现较为一致的位温负(正)异常,混合层至约 7×10^6 Pa 深度,气旋(反气旋)涡存在位温负(正)异常的冷核(暖)核结构。气旋(反气旋)涡的平均盐度在垂向上呈现“负—正”(“正—负”)上下相反的异常结构。

关键词:黑潮延伸体;中尺度涡;三维结构;合成分析;Argo 浮标

中图分类号:P731 文献标志码:A 文章编号:1005—9857(2021)01—0042—07

Three Dimensional Structures of Composed Mesoscale Eddies near the Kuroshio Extension Region

HU Dong¹, CHEN Xi², SONG Haibo³, MAO Kefeng², YU Dandan¹, CHEN Fei¹

(1. The 31010 Army of PLA, Beijing 100081, China; 2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China; 3. The 92721 Army of PLA, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Three dimensional structures of temperature, salinity, velocity of mesoscale eddies near the Kuroshio Extension Region were constructed by a composing method based on satellite altimetry data and Argo profile data. The results of the structures showed that, from surface to 1000 dbar depth, composed cyclonic (anticyclonic) eddy represent consistent temperature negative (positive) anomaly, from the mixed layer to about 700 dbar depth, there exists a cold (warm) core with negative (positive) temperature anomaly. The structure of the salinity of cyclonic eddy presented as “negative-positive” salinity anomaly structure in upper and lower layer, while it is opposite for anticyclonic eddy.

Keywords: Kuroshio extension, Mesoscale eddies, Three dimensional structure, Composing method, Argo profile

收稿日期:2019-09-19;修订日期:2020-12-21
基金项目:国家自然科学基金项目(11102232);江苏省自然科学基金(BK20150711).
作者简介:胡冬,助理工程师,硕士,研究方向为海洋环境保障
通信作者:陈希,教授,博士,研究方向为海洋调查和军事海洋环境保障

0 引言

中尺度涡是广泛存在于世界海洋中的一种中尺度现象,它的能量比平均流的能量要大一个量级以上^[1],可引起局地水团的调整^[2],造成涡旋内外温盐特性的差异^[3],并对局地和大尺度环流产生重要影响^[4]。中尺度涡在世界大洋中的分布极不均匀,如,郑聪聪等^[5]和 Itoh 等^[6]分别基于统计分析发现黑潮延伸体区域的中尺度涡活动十分活跃。

近 20 余年来,卫星高度计数据在中尺度涡研究领域得到广泛使用,黑潮延伸体区域中尺度涡的表层特征的研究逐渐开展。如:Itoh 等^[6]利用融合高度计资料,对黑潮延伸体区域中尺度涡的数量分布、涡旋强度、移动等特征进行统计分析,结果表明,黑潮流轴及其南侧为气旋涡的密集区,而黑潮延伸体北侧是反气旋涡的密集区。然而,依托卫星高度计资料仅能得到涡旋的表层信息,无法获取水下温盐三维结构信息,因此,现场水文观测对于中尺度涡的研究是必不可少的。Itouh 等^[7]综合利用卫星高度计资料和 Argo 剖面资料,对黑潮延伸体西部涡旋的水团性质进行分析,结果表明,85% 以上的反气旋涡具有高盐暖核结构,这种涡旋在垂向上具有双核结构,上层为高盐暖核,下层为低盐冷核,影响范围可达 2×10^7 Pa 以上,但仍无法得到该区域的涡旋三维结构。本研究将卫星高度计资料与 Argo 剖面数据进行结合,参考 CHAIGNEAUA 等^[8]和 Yang 等^[9]的合成分析方法,构建黑潮延伸体邻近海区(25°N — 45°N , 135°E — 175°W)涡旋的三维温盐合成结构,并对其特征进行定量化研究。

1 资料及涡旋识别方法

1.1 卫星高度计资料

卫星高度计资料中的地转流异常数据由法国国家空间研究中心的卫星海洋存档数据中心(AVISO)提供,这套资料融合了包括 Cryosat-2 等在内的多颗卫星数据,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本研究选取的数据时间跨度为 2000 年 1 月至 2012 年 12 月,时间分辨率为 7 d。

1.2 中尺度涡自动识别方法

本研究采用由 Nencioli 等^[10]提出的基于流场

几何形态方法对中尺度涡进行自动识别和跟踪,该方法在许多海域的中尺度涡研究中得到运用。该方法分为以下 3 个步骤。

(1)通过 4 个约束条件判断存在涡旋中心:①沿东西向穿过涡中心时,其两侧的 v (速度的经向分量)方向须相反,且离涡中心越远 v 的值越大;②沿南北向穿过涡中心时,其两侧的 u (速度的纬向分量)方向须相反,且离涡中心越远 u 的值越大;③存在局部速度最小值,最小值位置即为涡中心;④涡中心附近,速度向量须沿同一方向旋转,且相邻两个速度向量位于同一象限或相邻象限。

(2)计算流函数,以距涡中心最远的闭合流函数等值线作为涡的边界。

(3)对不同时次的涡旋轨迹进行跟踪:①搜索 t 时次的所有涡中心;②在 $t+1$ 时次,分别以 t 时次各涡旋的中心为原点,以某个设定值为半径,在其范围内搜索到的同类型涡旋与 t 时次的涡旋属于同一涡旋轨迹,如未找到同类型涡旋,则在 $t+2$ 时次将搜索半径扩大为 1.5 倍再次搜索,若仍未搜索到同类型涡旋,则认为该涡旋已经消亡。

1.3 Argo 浮标资料

本研究所采用的 Argo 浮标资料由中国 Argo 实时资料中心提供,时间跨度为 2000 年 1 月至 2012 年 12 月。所有数据都经过了 Argo 数据中心的实时和延时质量控制^[11],且本研究只使用延迟模式且质量标识符为“1”(表示质量为优)的 Argo 剖面数据。在此基础上,为提高合成结果的精度,参考 YANG 等^[9]和 CHAIGNEAUA 等^[8]的工作,同时满足以下条件的剖面数据才能被利用。

(1)最浅和最深的剖面数据须分别位于 1×10^5 Pa 以浅和 1×10^7 Pa 以深;

(2)垂向上两个连续数据点之间的深度间隔不得超出给定范围;

(3)每个剖面在 1×10^7 Pa 以浅至少有 30 个有效的数据点。

1.4 CARS2009 气候态资料

气候态温盐数据采用 CARS2009 资料,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。相对于其他气候态资料而言,CARS2009 资料更适用于西边界海域^[7]。

2 涡旋合成方法

2.1 搜索中尺度涡

基于卫星高度计资料和 1.2 节的中尺度涡自动识别方法,共搜索到 3 763 个涡旋轨迹,其中气旋涡和反气旋涡轨迹分别为 1 927 个和 1 836 个,若将各时次内所有搜索到的涡旋相加,则共包含 18 421 个气旋涡和 19 238 个反气旋涡。如图 1 所示为 2011 年 9 月 28 日搜索到的涡旋分布示意。其中:图 1(a)为 2011 年 9 月 28 日涡旋探测结果,箭头为表层地转流,星号为涡旋中心,闭合曲线为涡旋边界,实心点为 Argo 浮标的位置;图 1(b)位于涡旋外部的一个浮标(M1)与其对应涡旋中心 C1 的位置关系, Δx_E 和 Δy_E 分别为 M1 到 C1 的纬向距离和经向距离;图 1(c)位于涡旋内部的一个浮标(M2)与其对应涡旋中心 C2 的位置关系, Δx_E 和 Δy_E 分别为 M2 到 C2 的纬向距离和经向距离。

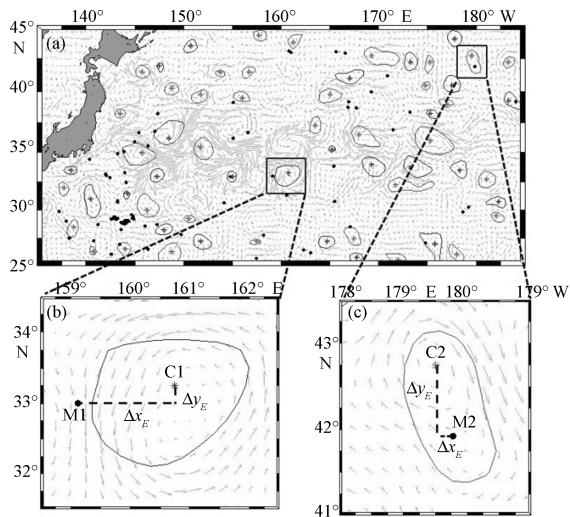


图 1 涡旋探测结果及浮标位置与涡旋的对应关系

2.2 Argo 数据与涡旋的匹配

基于 1.3 节的条件,共筛选出 39 569 条 Argo 剖面数据。对于每一条剖面数据,找出与其观测时次最近的一个涡旋搜索时次(二者的时间差不大于 3 天),若浮标位置满足以下其中一个条件则被用来进行涡旋合成。①Argo 浮标位于涡旋内部,如图 1(c)中的浮标 C2;②Argo 浮标位于涡旋外部,但距其最近的一个涡旋中心小于 1.5 倍涡旋半径,如图 1(b)中的浮标 C1。

2.3 确定分区方案

本研究区域范围较大,黑潮和涡旋之间存在复杂的相互作用,涡旋在西传过程中不可避免地会发生结构的变化^[12]。考虑到这些因素,参考 YANG 等^[9]的方案,将研究区域分为 5 个较小的子区域:区域 I、II、III 的经度范围分别为 175°E—175°W,165°E—175°E,155°E—165°E,区域 IV 和区域 V 以过(140°E,25°N)和(150°E,45°N)两点的直线为界,并可认为区域 V 为西边界流区。

2.4 构建涡旋坐标系

对于所有用于合成涡旋结构的 Argo 剖面,它们分别有一个与之对应的涡旋(即可使 Argo 剖面满足 2.2 节中条件的涡旋),参考 CHAIGNEAU 等^[8]的方法,计算出浮标 M 相对于对应涡旋中心 C 的坐标 Δx_E 和 Δy_E ,如图 1(c),再分别将 Δx_E 和 Δy_E 除以对应的涡旋半径 R 得到相对坐标(ΔX , ΔY),以消除涡旋半径对合成结果的影响。最后,将该剖面包含的温盐等要素按相对坐标(ΔX , ΔY)转换到一个统一的“涡旋坐标系”中。

2.5 要素插值

对每条 Argo 剖面上的位温(θ)和盐度(S)分别进行 Akima 线性插值^[13],以 1×10^5 Pa 为间隔从海表至 1×10^7 Pa 分为 101 层,再将插值后的位温(θ)和盐度(S)数据减去对应位置和时次的 CARS2009 气候态数据,分别得到位温异常(θ')、盐度异常(S')。

基于 2.4 节的方法将位温、盐度转换到涡旋坐标中后,在插值后的 101 个深度层内,分别利用四分位检测法将各层可能的不合理值剔除,再将剩余的离散点利用客观分析法^[14]插值到涡旋坐标系中 0.1×0.1 的规则网格上,构建各层的二维要素场。对每一层采用相同的方法分别对温盐要素进行插值,即可得到三维涡旋结构^[8,15],包括涡旋的位温异常、盐度异常。

3 涡旋三维合成结构特征

基于第 2 节的合成方法,得到了合成涡旋的三维结构,本节主要分析合成涡的位温异常、盐度异常的三维结构,并在此基础上估算由涡旋引起的水体和温盐输运。

3.1 水团

由于中尺度涡引起的温盐异常结构与当地水团分布有着很大关系,因此,在分析合成涡旋三维结构之前,首先对存在于该区域的主要水团进行简要描述。

基于 Argo 剖面数据,分别计算出 5 个子区域内平均位温和盐度的垂向分布,并做出 θ — S 廓线(图 2)。图 2 表明,5 个子区域的 θ — S 曲线存在明显差异,但整体上均呈反“S”形状分布:表层为高温低盐水;次表层为北太平洋亚热带水(North Pacific Sub-Tropical Water, NPSTW),盐度出现极大值;中层为北太平洋中层水(North Pacific Intermediate Water, NPIW),盐度最低; $\sigma_\theta > 27.1 \text{ kg/m}^3$ 的深度中存在的是北太平洋底层水(North Pacific Deep Water, NPDW),盐度逐渐增大。此外,在次表层和中层水之间,存在着低位涡的北太平洋副热带模态水(North Pacific Subtropical Mode Water, NPSTMW)^[16],它的范围为 $16^\circ\text{C} \leq \theta \leq 19.5^\circ\text{C}$, $25.0 \text{ kg/m}^3 \leq \sigma_\theta \leq 25.6 \text{ kg/m}^3$ ^[17],在 $2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 附近平均位势涡度出现极小值,存在于主温跃层内^[18-19],并将主温跃层分为上下两个部分。

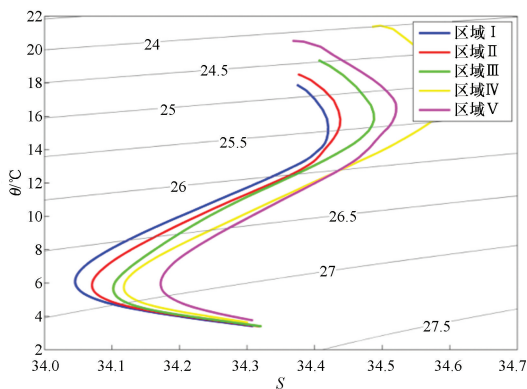


图 2 5 个子区域内平均 θ — S 廓线

注:等值线为位势密度 σ_θ

3.2 温度结构

图 3 和图 4 为区域 I 至区域 V 中合成气旋涡和反气旋涡在 $\Delta Y=0$ 断面上的位温异常(θ')分布,图 3 和图 4 表明,不同区域内涡旋的位温异常具有相似分布特征,气旋(反气旋)涡内呈现较为一致的位温负(正)异常,表层及次表层内,位温异常较小,而在混合层以深至约 $7 \times 10^6 \text{ Pa}$ 深度,气旋涡(反气

旋涡)存在位温负(正)异常的冷(暖)核结构,但冷(暖)核的位置及强度在不同区域内存在明显差异,从西向东:气旋涡的冷核中心逐渐变深,中心最大位温负异常分别为 -1.5°C , -2.1°C , -3.3°C , -3.0°C , -1.3°C ,冷核强度以区域 II、III、IV 较大;反气旋的暖核中心的深度差异不大,中心最大位温正异常值分别为 1.1°C , 2.1°C , 2.8°C , 2.2°C , 2.6°C ,暖核强度以区域 II~V 较强。

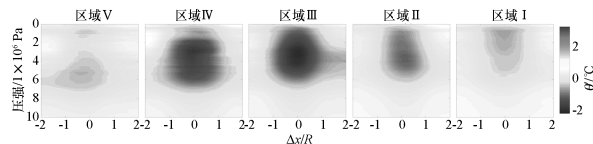


图 3 各子区域内合成气旋涡的位温异常(θ')在 $\Delta Y=0$ 断面上的分布

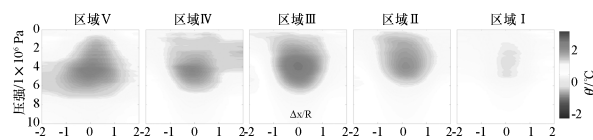


图 4 各子区域内合成反气旋涡的位温异常(θ')在 $\Delta Y=0$ 断面上的分布

图 5 和图 6 分别显示了 5 个子区域内合成气旋涡和反气旋涡在不同压强深度上的位温异常(θ')水平分布,图中所示压强从上至下分别为 0 Pa 、 $1 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $7.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $1 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。

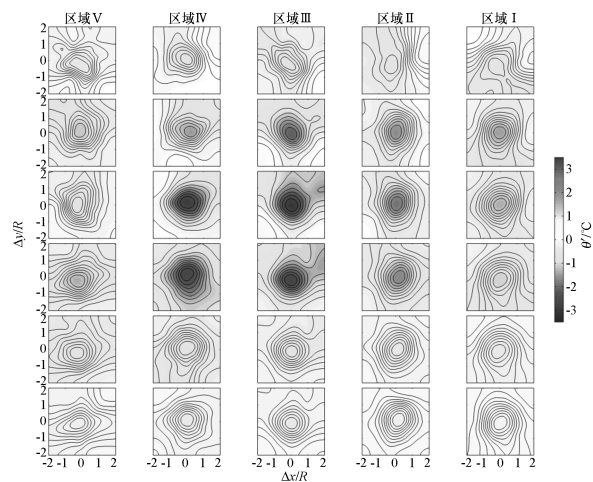


图 5 各子区域内合成气旋涡的位温异常(θ')水平分布

从表层至 $1 \times 10^7 \text{ Pa}$,合成气旋涡(反气旋涡)呈现较为一致的位温负(正)异常。在涡旋的表层,位温异常值较小,且区域 I 至区域 V 内的气旋涡,以

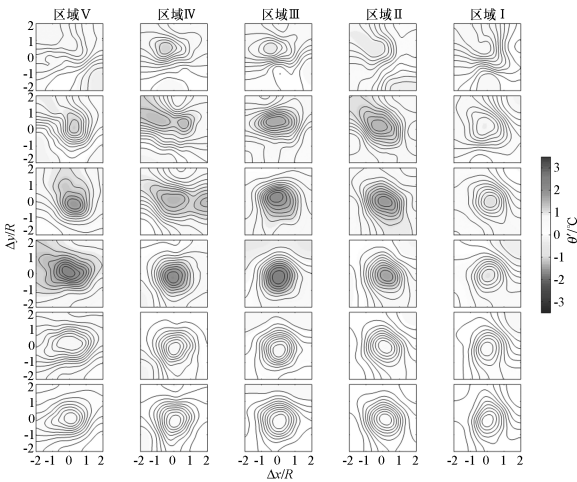


图6 各子区域内合成反气旋涡的位温异常(θ')水平分布

及区域 III、区域 IV 内的反气旋涡,表层呈现较为清晰的环状结构,但位温异常等值线不太规则。随着深度的增加,各区域内气旋涡和反气旋涡的环状结构逐渐规则、位温异常值逐渐增大,最大异常值出现在 $(2.5 \sim 5) \times 10^6$ Pa 深度层之间,分别可达 -3.5°C 和 2.4°C 。 5×10^6 Pa 以深,位温异常值逐渐减小,但直至 1×10^7 Pa 深度层,仍保持较好的结构,气旋涡和反气旋涡的位温异常值分别可达 -0.4°C 和 0.3°C 以上。

3.3 盐度结构

图 7 和图 8 为区域 I 至区域 V 中合成气旋涡和反气旋涡在 $\Delta Y=0$ 断面上的盐度异常(S')分布,其显著特征为:涡旋在断面的上下两层分别引起相反的盐度异常。

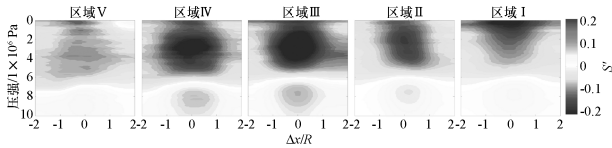


图7 各子区域内合成气旋涡的盐度异常(S')在 $\Delta Y=0$ 断面上的分布

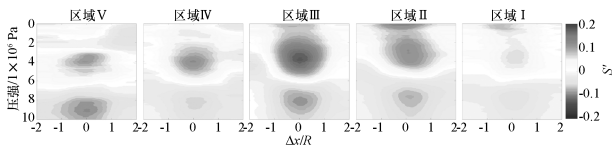


图8 各子区域内反气旋涡的盐度异常(S')在 $\Delta Y=0$ 断面上的分布

具体地,对于气旋涡而言,断面整体呈现“负—正”上下层相反的盐度异常结构。由于涡旋内部存在上升运动,次表层的高盐 NPSTW、中层的低盐 NPIW 和深层 NPDW 被整体抬升,因此 NPSTW 至 NPIW 位置之间水体的盐度降低,产生盐度负异常,由于 NPSTW 厚度很小、深度较浅且很靠近海表面的混合层,它与上下两层水体混合作用减小了它对上层海水盐度的影响,因此表层和次表层也表现为盐度的负异常。由于从西向东 NPSTW 的深度逐渐加深,涡旋中心处盐度负异常的范围也随之加深。中心最大异常值以区域 II~IV 较大,最大异常值所在深度从西向东也是逐渐加深。在深层,涡旋内部的 NPDW 向上抬升至原来盐度较低的深度,引起盐度的正异常,最大异常值与上层的负异常值相比较小,这是因为涡旋信号在深层受到减弱,且较深层海水的盐度梯度也有所减小^[8]。

对于反气旋涡而言,整体上呈现“正—负”上下层相反的盐度异常结构。由于涡旋内部存在下沉运动,高盐的 NPSTW 深度变深,在次表层及其以下范围产生盐度正异常,中心最大异常值以区域 II~IV 较强,这与气旋涡的情况类似。位于较深层的低盐 NPIW 下沉并引起较弱的盐度负异常结构,中心最大异常值与气旋涡相比较小。

综上分析,气旋涡引起的盐度异常大于反气旋涡,且以区域 II~IV 的盐度异常较大。

图 9 和图 10 分别为 5 个子区域内合成气旋涡和反气旋涡在不同压强深度上的盐度异常(S')水平分布,图中所示压强从上至下分别为 0 Pa、 1×10^6 Pa、 2.5×10^6 Pa、 5×10^6 Pa、 7.5×10^6 Pa、 1×10^7 Pa。图 9 表明,气旋涡各水平层上的盐度异常均呈现较为清晰、规则的环状结构。与位温异常的水平分布有所不同,盐度异常值在表层附近较大,区域 I 的盐度异常最大值甚至出现在表层附近;从 $(5 \sim 7.5) \times 10^6$ Pa,合成气旋涡的盐度异常发生了从负向正的变化。在 1×10^7 Pa 深度层上,盐度异常的结构仍较为明显。对于反气旋涡而言,各层的盐度异常也呈现比较清晰的环状结构,从 $(5 \sim 7.5) \times 10^6$ Pa,盐度异常发生了从正向负的变化,在 1×10^7 Pa 深度层上,盐度异常的结构仍较为明显。

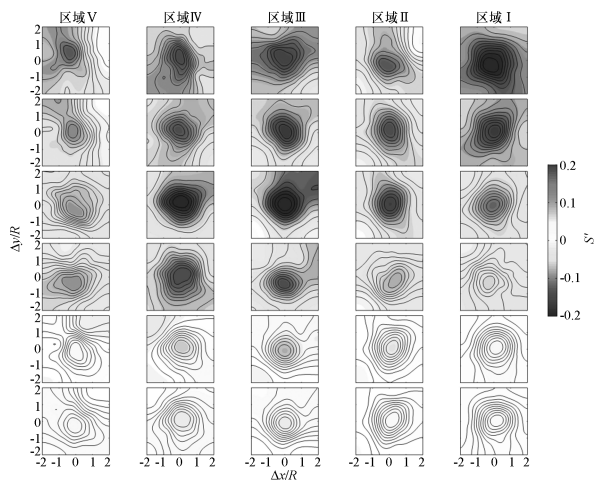


图 9 各子区域内合成气旋涡的
盐度异常(S')水平分布

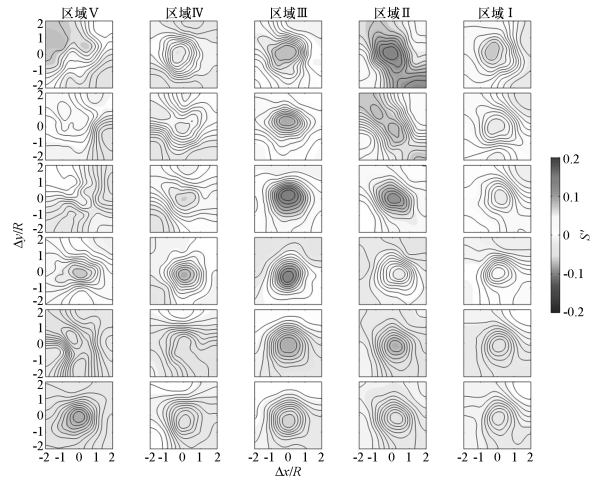


图 10 各子区域内合成反气旋涡的
盐度异常(S')水平分布

4 总结

本研究结合中尺度涡的探测结果和 Argo 浮标数据,基于涡旋合成分析方法,构建了黑潮延伸体邻近海区中尺度涡的三维温度、盐度结构。主要结论如下。

(1)表层至 1×10^7 Pa,合成气旋涡(反气旋涡)呈现较为一致的位温负(正)异常,表层和次表层内的位温异常较小,混合层至约 7×10^6 Pa 深度,气旋(反气旋)涡存在位温负(正)异常的冷(暖)核结构。从平面分布来看,涡旋表层位温异常值较小,随着深度增加至 5×10^6 Pa,各区域内合成气旋涡和反气

旋涡的位温异常值逐渐增大,直至 1×10^7 Pa 深度层,位温异常的环状结构仍十分明显。

(2)气旋(反气旋)涡的平均盐度在垂向上呈现“负—正”(“正—负”)上下相反的异常结构,气旋涡引起的盐度异常大于反气旋涡。不同子区域内的涡旋在各水平深度层上的盐度异常均呈现较清晰、规则的结构。

参考文献

- [1] SOUZA J M A C, MONTÉGUT C D B, TRAON P Y L. Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean [J]. Ocean Science, 2011, 7(3): 317—334.
- [2] QIU B, CHEN S. Eddy-induced heat transport in the subtropical north pacific from Argo, TMI and altimetry measurements [J]. Gayana, 2004, 68(4): 458.
- [3] NAN F, HE Z, ZHOU H, et al. Three long-lived anticyclonic eddies in the northern South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(C5): 879—889.
- [4] ZHANG Z, ZHAO W, TIAN J, et al. A mesoscale eddy pair southwest of Taiwan and its influence on deep circulation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(12): 6479—6494.
- [5] 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.
- [6] ITOH S, YASUDA I. Characteristics of Mesoscale Eddies in the Kuroshio-Oyashio Extension Region Detected from the Distribution of the Sea Surface Height Anomaly [J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(5): 1018—1034.
- [7] ITOH S, YASUDA I. Water mass structure of warm and cold anticyclonic eddies in the western boundary region of the subarctic North Pacific [J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(12): 2624—2642.
- [8] CHAIGNEAU, 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 Atmospheres, 2011, 116(C11): 476—487.
- [9] YANG G, WANG F, LI Y, et al. Mesoscale eddies in the north-western subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(4): 1906—1925.
- [10] 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 & Oceanic Technology, 2010, 27(27):564.

[11] 童明荣,刘增宏,孙朝辉,等.ARG0 剖面浮标数据质量控制过程剖析[J].海洋技术,2003,22(4):79—84.

[12] ZHENG Q,TAI C K,HU J,et al.Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait[J].Journal of Oceanography,2011,67(4):365—376.

[13] AKIMA H.A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures[J].Journal of the Acm,1970,17(4):589—602.

[14] BARTH A,BECKERS J M,TROUPIN C,et al.divand-1.0:n-dimensional variational data analysis for ocean observations[J].Geoscientific Model Development,2014,7(1):225—241.

[15] 胡冬,陈希,毛科峰,等.南印度洋中尺度涡统计特征及三维合成结构研究[J].海洋学报,2017,39(9):1—14.

[16] HIRATA K,KARASHIMA K,TAKAMUKU S,et al.The Subtropical Mode Water Circulation in the North Pacific[J].Journal of Physical Oceanography,1995,25(5):958—970.

[17] OKA E,SUGA T,SUKIGARA C,et al.“Eddy Resolving” Observation of the North Pacific Subtropical Mode Water[J].Journal of Physical Oceanography,2011,41(4):666—681.

[18] MASUZAWA J.Subtropical mode water[J].Deep Sea Research & Oceanographic Abstracts,1969,16(5):463—468.

[19] SUGA T,HANAWA K.Subtropical Mode Water in the 137°E Section[J].J.phys.oceanogr,2010,19:1605—1619.