

基于 Voxler 平台的太平洋中尺度涡合成三维结构

聂雄风,毛科峰,赵则正

(国防科技大学气象海洋学院 南京 210000)

摘要:为深入研究太平洋中尺度涡的三维结构特征,解决常规一维剖面 and 二维平面图对温盐空间分布规律分析不足的弊端,文章在三维结构合成分析的基础上首次引入 Voxler 平台,建立太平洋中尺度涡温盐要素的三维数据模型,实现太平洋中尺度涡三维结构的可视化表达,利用历史观测数据合成的太平洋中尺度涡三维结构,对温盐结构特征进行直观的全空间三维分析。研究结果表明:太平洋反气旋涡温度异常的主体结构深度约 200 m,呈鹅卵石状,涡旋结构可维持到 1 000 m;盐度异常的主体结构深度约 300 m,呈水平扁平水滴状,涡旋结构仅维持约 800 m;与盐度异常的三维结构相比,温度异常结构较复杂,且涡旋结构更明显,到达深度也更深,即温度受中尺度涡的影响更显著。

关键词:中尺度涡;反气旋涡;三维合成;温盐特征;太平洋

中图分类号:P73

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2018)12-0079-06

The Three-dimensional Structure of Mesoscale Eddies by Voxler Platform

NIE Xiongfeng, MAO Kefeng, ZHAO Zezheng

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to deeply study the three-dimensional structural characteristics of the mesoscale vortex in the Pacific Ocean and solve the shortcomings of the conventional one-dimensional section and two-dimensional plan interpretation on the spatial distribution of warm salt, the paper introduced the Voxler platform for the first time based on the three-dimensional structural synthesis analysis, and established the Pacific mesoscale vortex temperature salt. The three-dimensional data model of the element realized the visual expression of the three-dimensional structure of the mesoscale vortex in the Pacific Ocean. The three-dimensional structure of the Pacific mesoscale vortex synthesized by historical observation data was used to perform an intuitive full-space three-dimensional analysis of the temperature and salt structure features. The results showed that the main structure of the anti-cyclonic vortex temperature in the Pacific Ocean is about 200 m deep and cobblestone-like, and the vortex structure can be maintained to 1 000 m. The main body structure with an abnormal salinity is about 300 m deep, showing a horizontal flat drop

收稿日期:2018-06-04;修订日期:2018-12-02

作者简介:聂雄风,研究方向为海洋工程装备和军事海洋

通信作者:毛科峰,副教授,博士,研究方向为海洋调查和军事海洋

and vortex. The spin structure is only maintained to about 800 m; compared with the three-dimensional structure with abnormal salinity, the temperature anomaly structure is more complicated, and the vortex structure is more obvious, and the reaching depth is also deeper, that is, the temperature is more affected by the mesoscale vortex.

Key words: Mesoscale vortex, Anti-gas vortex, Three-dimensional synthesis, Temperature and salt characteristics, The Pacific Ocean

0 引言

中尺度涡是上层海洋的显著海洋现象^[1], 空间尺度在数十千米至数百千米, 时间尺度在数十天至数百天, 动能可占全球海洋总动能的 90%^[2], 在海洋动力、海洋热力和海气能量交换等过程中发挥非常重要的作用, 对整个海洋环境意义重大。

目前天基(卫星遥感)、船基(船载仪器)和海床基(浮标和潜标)等丰富多样的海洋观测资料被越来越多地应用于中尺度涡研究, 为中尺度涡研究提供重要数据来源。截止到 2018 年 4 月, 全球海洋正在运行的 Argo 浮标超过 3 850 个, 空间分辨率约为 300 km, 每年可提供 10 万个剖面的海水温度和盐度资料, 为研究中尺度涡水下温盐流三维结构提供第一手资料, 解决依托卫星高度计观测资料仅能获取涡旋表层信息的问题。Roemmich 等^[3]基于 1991—1999 年 T/P 卫星高度计资料, 得到 410 个中尺度涡, 并结合 XBT 数据重建涡旋的垂直结构; Chaigneau 等^[4]结合卫星高度计资料和 Argo 浮标资料, 构建南太平洋东部中尺度涡的复合三维结构, 并对涡旋引起的体积、热量和盐量输运进行估算; 胡冬等^[5]假设南印度洋海域同种类型涡旋具有相似的三维结构, 结合卫星高度计资料和 Argo 剖面温盐资料, 开展中尺度涡三维结构的合成和特征分析; 谢旭丹等^[6]基于 1994—2015 年海面高度异常数据, 采用 winding-angle 中尺度涡旋探测算法识别南海海域涡旋, 并结合世界海洋数据集和中国科学院南海海洋研究所温盐观测数据集合成南海各区域中尺度涡的温盐异常三维结构; Yang 等^[7]采用相似的方法, 构建副热带西北太平洋地区中尺度涡的复合三维结构。

海洋中尺度涡合成分析方法已成为研究中尺度涡三维结构和机理的重要方法。然而受三维可

视化表达和分析平台的限制, 以往的研究大多分析中尺度涡在不同深度垂直分层的平面结构, 或分析某一调查断面的剖面结构和温盐断面结构特征, 而很少展现中尺度涡完整的三维温盐结构, 且未能深入分析各海洋要素在各深度的立体结构特征和联系。本研究首次引入 Voxler 平台对太平洋海洋中尺度涡的三维结构进行刻画, 并研究其结构特征, 为清晰地分析太平洋海洋中尺度涡三维结构特征和各海洋要素之间的关系提供新方法, 促进对太平洋海洋中尺度涡三维结构的认知, 为深入研究太平洋海洋中尺度涡现象和机理奠定基础。

1 资料和方法

1.1 数据资料

本研究采用由法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋存档数据中心(AVISO)提供的卫星高度计数据, 利用延迟模式数据, 对海洋中尺度涡进行识别和跟踪^[4]。该数据利用后期更高精度的校正提供了长时间序列的高度资料, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 1 d, 空间范围为 25°N — 45°N 、 135°E — 175°W , 时间跨度为 1993 年 1 月至 2012 年 12 月, 各时次数据的时间间隔为 7 d。

中尺度涡三维结构合成采用由法国科里奥利全球数据中心提供的、经 Argo 数据中心自动质量控制和再分析的观测资料, 时间跨度为 2000 年 1 月至 2012 年 12 月, 空间范围为 25°N — 45°N 、 135°E — 175°W 。在使用资料前, 还需参考 Chaigneau 等^[4]和 Yang 等^[7]的工作进行筛选。

分析中尺度涡结构异常的背景资料^[4]采用由澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)提供的 CARS2009 气候态温盐数据, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。CARS2009 结合历史上所有可用的海洋观测

资料和自动化浮标剖面资料,包含各种海洋要素的平均态和季节性变化,并已进行质量控制。与其他气候态资料相比,CARS2009 更适用于西边界海域。

1.2 海洋中尺度涡合成分析方法

海洋中尺度涡合成分析的技术路线如图 1 所示。

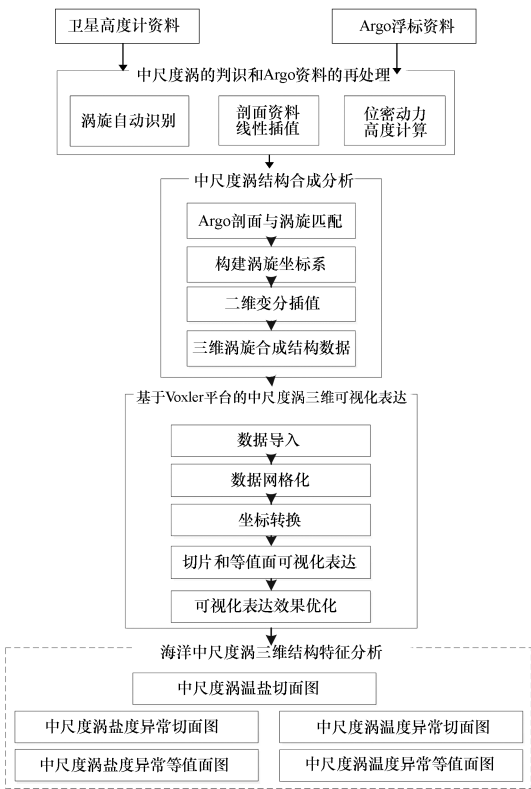


图 1 海洋中尺度涡合成分析技术路线

借鉴已有研究成果,本研究合成太平洋海洋中尺度涡结构的思路是:假设太平洋同种类型涡旋具有相似的三维结构,结合卫星高度计资料和 Argo 剖面温盐资料,合成中尺度涡三维结构。总体步骤是:基于涡旋识别结果,将 Argo 剖面资料与识别出的不同类型的涡旋按一定的规则匹配,然后通过插值处理得到合成涡旋的三维结构。

采用 Nencioli 等^[8]提出的基于流场几何形态的方法,对中尺度涡进行自动识别和跟踪;该方法的理论基础是:对于中尺度涡而言,其内部的流失量总是围绕某个点旋转,在靠近涡旋中心的位置存在最小流速,从涡旋中心向外,切向速度随距离增加呈线性增大,当达到某个最大值后速度减小。根据

涡旋识别和跟踪的结果,选取与时间最近的卫星高度计资料相差不超过 3 d 的 Argo 数据,对 Argo 剖面 and 涡旋进行匹配,构建涡旋坐标系,采用四分位法对插值结果进行质量控制,对每层采用相同的方法分别对温盐等要素进行二维变分插值,即可得到三维涡旋结果。将得到的数据导入 Voxler 平台,对中尺度涡完整的三维温盐结构进行刻画,深入分析各海洋要素的立体结构和联系,得出太平洋海洋中尺度涡三维结构特征。

1.3 基于 Voxler 平台的中尺度涡三维可视化表达

用时间换空间,合成三维结构能够体现西北太平洋中尺度涡群体的典型特征。基于 Voxler 平台对典型中尺度涡进行分析,可对中尺度涡形成整体的认知,揭示各海洋要素在不同深度的联系。

1.3.1 Voxler 平台

Voxler 是专业的三维数据可视化制图软件,提供全新的三维数据可视化方式,可从多种资源中导入数据,利用二维网格数据和散点数据制作图形,从而清晰地展现这些数据之间的关系。该软件于 2006 年面世,已更新到 4.0 版,利用格点数据进行三维制图,并对三维数据体的显示和表达进行渲染和优化,具有建模项目保存和模型对象导出功能(网格、ASCII 码数据以及 DXF、SPN 图形图像等文件格式),并可导入其他软件,便于用户对所建模型进行全方位的观察。在 Voxler 三维数据建模时,按照数据导入—数据处理—模型和数据输出 3 个阶段,完成散点、截面、切片、图像切片、等值面、等值线和高度场等特定制图任务。

目前 Voxler 平台在地质学研究领域应用较多。本研究首次将其引入海洋中尺度涡合成三维结构的可视化表达和特征分析。

1.3.2 中尺度涡三维可视化表达的步骤

(1)处理数据文件。本研究采用 Matlab 编程合成的中尺度涡数据,是 Matlab 数据存储的标准格式,但不能直接输入 Voxler,需对其进行预处理。以温盐数据为例,对合成中尺度涡数据进行预处理,将温盐数据及其相对应的坐标整理成五维矩阵,并将其保存为 dat 文件待用。

(2)导入数据。在 Voxler 中,通过 File-New-

Project 菜单命令建立新的项目,通过 File-Import 菜单命令导入上述 dat 文件。同时,可通过属性管理器的相应命令查看和编辑数据。

(3)网格化数据。在联络图管理器 Network Manager 界面,右击导入的 dat 数据,通过 Computational-Gridder 命令对数据进行网格化。点击 Gridder,在属性管理器 Property Manager 界面,在 Input component 一栏选定要进行网格化的数据,在 Action 一栏点击 Begin Gridding,完成网格化。

(4)转换坐标。在联络图管理器 Network Manager 界面,右击 Gridder,通过 Computational-Transform 命令对坐标进行转化。在属性管理器 Property Manager 界面,点击 Transform,在 Scale 栏将 X 和 Y 对应的数值由 1 改成 250。在联络图管理器 Network Manager 界面,右击 Transform,通过 Graphics Output-Axes 命令画出三维坐标轴。

(5)绘制中尺度涡的切片图。在联络图管理器 Network Manager 界面,右击 Transform,通过 Graphics Output-Obliquelimage 命令添加第 1 个切面。点击 Obliquelimage,在属性管理器 Property Manager 界面,通过 General-Colormap 命令选择 Rainbow2,并取消 Lighting 的勾选,设定第 1 个切面的属性,同时在 Cutting Plane-Offset from center 栏设定切片深度。重复上述操作,完成中尺度涡三维切片图的绘制。

(6)优化可视化表达效果。在联络图管理器 Network Manager 界面,点击 Viewer Window,在属性管理器 Property Manager 界面,在 Background color 栏调整图形界面背景色。在联络图管理器 Network Manager 界面,点击任意 Obliquelimage 模块,在 Legend-Legend 栏勾选 Show Legend,并设置说明图例的形状和空间位置,在 Legend-Labels 栏调整说明图例的属性。

(7)绘制中尺度涡的三维等值面图。在联络图管理器 Network Manager 界面,在完成数据网格化和坐标转换后,通过 Graphics Output-Isosurface 命令添加等值面,并在属性管理器 Property Manager 界面设置等值面的各项属性,最后对图形界面进行优化,即可完成中尺度涡三维等值面图的绘制。具

体过程参考中尺度涡切片图的绘制。

2 中尺度涡三维合成结构

基于 Voxler 平台对海洋中尺度涡三维结构的可视化表达,可更加直观地揭示其海洋要素在垂直方向的联系,易于对中尺度涡形成整体的认知。本研究以反气旋涡为例,将合成反气旋涡的温盐资料与气候态资料进行对比,得到温盐异常的数据,从而分析海洋中尺度涡的温盐三维结构。由于海水具有暖涡性质,反气旋涡涡心的海水温度明显高于周围的海水温度,盐度的涡旋结构更为明显,高盐高温的海水主要集中在海水上层。

2.1 温度结构

本研究将形成的闭合等值面称为涡旋的主体结构,反气旋涡温度异常的三维结构如图 2 所示。

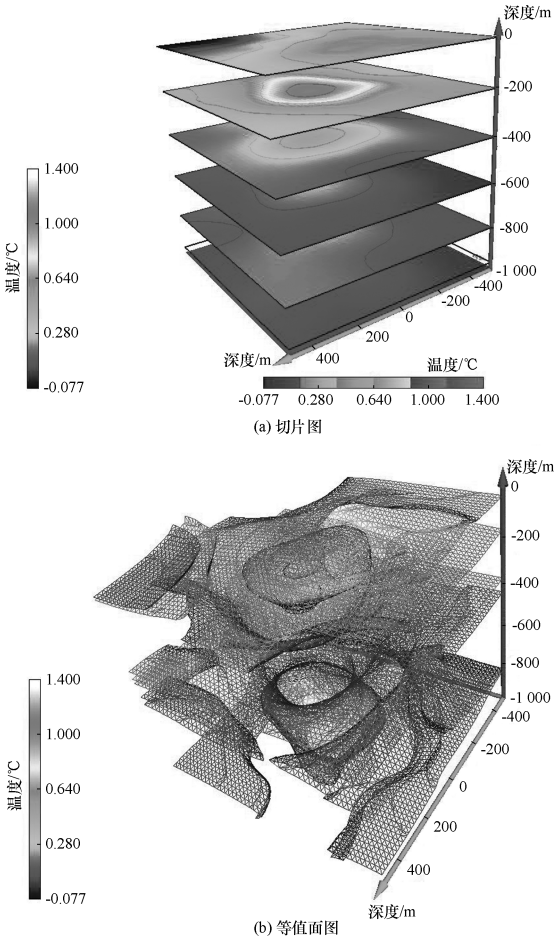


图 2 反气旋涡温度异常的三维结构

太平洋反气旋涡温度异常的主体结构深度约

200 m, 温度异常最大值为 1.4°C 、最小值为 -0.077°C 。其中, 温度异常负值几乎不可见, 仅在约 1 000 m 处有所体现; 最大温度异常出现在约 100 m, 主体结构呈鹅卵石状。温度异常值为 0.2°C 的等值面从约 400 m 处开始, 随着深度增加而逐渐收窄, 然而到约 600 m 处又逐渐加宽, 在 800 m 处再度收窄, 整体呈不规则柱状体; 等值面可达到 1 000 m, 且涡旋结构仍较显著, 表明反气旋涡的涡旋结构可维持到 1 000 m。

2.2 盐度结构

反气旋涡盐度异常的三维结构如图 3 所示。

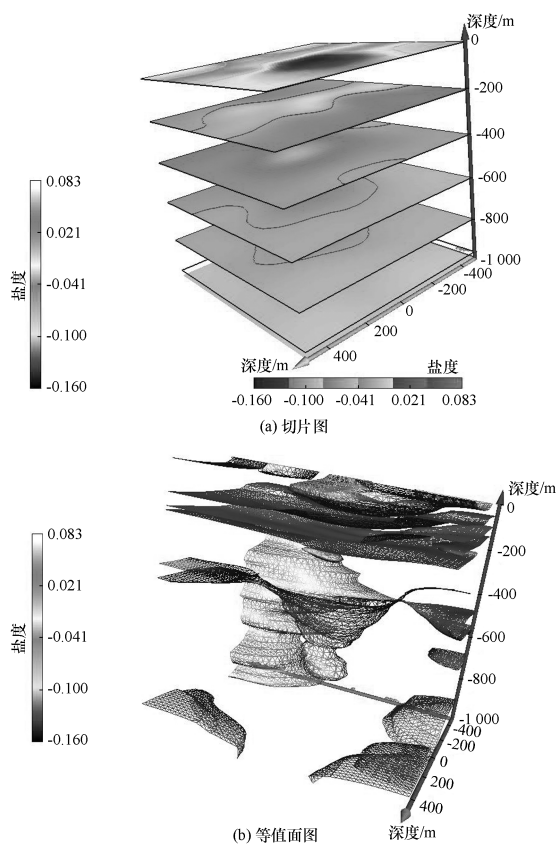


图 3 反气旋涡盐度异常的三维结构

太平洋反气旋涡盐度异常的主体结构深度约 300 m, 盐度异常最大值为 0.083、最小值为 -0.16 。其中, 盐度异常负值主要出现在海水上层, 盐度异常正值则主要出现在海水中、下层, 最大盐度异常出现在约 300 m 处。盐度异常主体结构呈水平扁平水滴状, 在主体结构下部呈漏斗状, 盐度异常值为 0.02 的等值面最深约 800 m。

与盐度异常的三维结构相比, 温度异常结构较

复杂, 且涡旋结构更明显, 到达深度也更深, 表明温度受中尺度涡的影响更显著。

3 结语

Voxler 为海洋中尺度涡数据的三维可视化提供良好的平台, 利用其强大的空间网格化三维显示功能, 对海洋中尺度涡温盐数据进行三维可视化处理, 分析温盐要素的三维结构, 揭示温盐要素在各深度上的联系, 建立海洋中尺度涡温盐要素的三维数据模型, 直观地进行全空间三维解释, 从而解决常规一维剖面和二维平面图对温盐空间分布规律分析不足的弊端。

此外, 本研究区域存在副热带逆流区和黑潮延伸区 2 个年平均涡动能较大的区域: 副热带逆流区 (18°N — 27°N , 130°E — 170°E) 的冷核深度为 130 m、温度异常为 -1.3°C , 暖核深度为 120 m、温度异常为 2.1°C ; 黑潮延伸区 (30°N — 42°N , 130°E — 165°E) 的冷核深度为 350 m、温度异常为 -3°C , 暖核深度为 300 m、温度异常为 3°C ^[9]。这 2 个区域与本研究区域各自的冷、暖核深度相差不大, 同时冷、暖核的温度异常也较接近, 表明不管是本研究区域还是副热带逆流区和黑潮延伸区, 气旋涡和反气旋涡的垂直结构具有相似性, 这也与本研究开展合成分析的前提相符合。

参考文献

- [1] AOKI S, IMAWAKI S. Eddy activities of the surface layer in the western North Pacific detected by satellite altimeter and radiometer [J]. *Journal of Oceanography*, 1996, 52 (4): 457—474.
- [2] 林鹏飞. 南海和西北太平洋中尺度涡的统计特征分析 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.
- [3] 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*, 1999, 31(3): 675—688.
- [4] 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): C11025.
- [5] 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.

[6] 谢旭丹,王静,储小青,等.南海中尺度涡温盐异常三维结构[J].海洋学报,2018,40(4):1—14.

[7] 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.

[8] 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(3):564.

[9] 郑聪聪,简忠辉,梁永春,等.北太平洋中尺度涡温度垂直结构区域差别分析[J].海洋预报,2017,34(3):10—16.



大陆架划界国家实践的研究案例

——《沿海国 200 海里以外大陆架外部界限划界案执行摘要选编》书评

根据 1982 年《联合国海洋法公约》(以下简称《公约》)第六部分大陆架及其附件二的规定,如果沿海国陆地领土的自然延伸超过自领海基线量起 200 海里,则该沿海国可以主张 200 海里以外的大陆架。若划定 200 海里以外大陆架的外部界限,沿海国必须将确定外部界限的相关数据资料(即划界案)提交大陆架界限委员会(以下简称委员会)审议,在委员会建议的基础上划定的大陆架外部界限才具有确定性和拘束力。《沿海国 200 海里以外大陆架外部界限划界案执行摘要选编》收录了 2011 年 9 月至 2017 年 12 月由委员会官方公布的沿海国 200 海里以外大陆架外部界限划界案执行摘要,包括 22 份划界案和 6 份修订案,是《公约》大陆架制度国家实践的最直接的案例。

大陆架和专属经济区划界是通过法律途径对世界海洋区域的重新分配,包括沿海国之间的海域划界以及沿海国大陆架与国际海底区域之间的划界,前者直接涉及当事国的海洋权益,后者则涉及国际社会和全人类的共同利益。海洋划界将不可避免地导致利益冲突,事关国家主权、领土安全以及资源开发和管理等,对沿海国的根本利益和长远利益都有重大而深远的影响,一直受到各沿海国的高度关注。

目前海洋划界的大量实践不断促进大陆架法律制度的发展。大陆架划界的主要法律依据和基础是《公约》第七十六条,这是涵盖海洋法学、自然科学和划界技术等多因素的复杂条款,既涉及地质学、地球物理学、沉积学和测深学等科学技术问题,又涉及大陆架法律制度实质和内涵的扩展等国际法理论问题,在国际社会引发许多争论。同时,《公约》的规定是一般性的,而全球大陆架划界的具体情况却是特殊的,如何在特殊和具体的地理和地质条件下适用《公约》的一般性规定,在理论和实践方面都亟须解决。随着大陆架划界实践的不断丰富,对《公约》有关条款的科学和法律解释及其适用性研究已成为国际社会关注的热点问题和前沿领域。作为《公约》缔约国,我国理应提出主张和表明立场,而这需要建立在对《公约》相关条款的法理和技术问题进行深入研究的基础上。

《沿海国 200 海里以外大陆架外部界限划界案执行摘要选编》反映目前大陆架划界国家实践的最新进展和发展趋势,不仅为全球大陆架划界主张的分析和评估提供具体案例,而且为大陆架划界相关的科学和法律研究提供基础性的参考资料。(海洋出版社 王小惑)