南海上层中尺度涡统一三维结构*

郑 堃[1, 2] 林霄沛[1, 2①] 朱亚楠[1, 2]

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋与大气学院 青岛 266100)

摘要 本文基于归一化合成分析的方法, 利用卫星高度计资料和 CTD 观测资料, 在满足静力平衡和地转平衡条件的假设下研究了南海中尺度涡的三维结构, 给出了南海中尺度涡归一化之后的三维结构, 并与全球大洋中尺度涡统一的三维结构进行对比。结果显示, 在 1.5 倍涡旋半径以外, 南海中尺度涡水平结构的收敛速度大约为全球大洋中尺度涡水平结构收敛速度的 2.5 倍, 前者比后者的影响范围要小约 1.5 倍涡旋半径。由于数据原因, 我们仅合成了南海 0 至 800m 水深中尺度涡的垂直结构, 从垂直结构的合成结果来看, 由于受到背景层结和科氏参数的影响, 南海与全球大洋各海区中尺度涡的垂直结构具有明显的不同, 随着深度的增加, 南海中尺度涡垂直结构的衰减速度明显更快。

关键词 南海; 中尺度涡; 三维结构; 归一化; 合成分析

中图分类号 P722.7 doi: 10.11693/hyhz20170300042

中尺度涡通常是指生存周期在几十到数百天, 空间尺度在几十到数百千米的长期封闭环流。中尺度涡在海洋之中无处不在, 是海洋的重要组成部分, 它蕴含巨大能量, 对全球海洋的物质和能量的输运发挥着重要作用, 同时对海洋的气象和水文环境产生重要影响(Qiu *et al*, 2005; Yang *et al*, 2015)。

南海是西北太平洋最大的边缘海, 地形非常复杂, 受东亚季风和黑潮入侵影响, 蕴含着较为复杂的多尺度海洋动力过程。卫星资料、观测资料以及海洋模式资料均显示南海涡旋活动十分活跃, 多个发生在南海的涡旋也被通过海洋观测手段捕捉发现并进行研究。高度计资料极大提高了人们对南海中尺度涡的空间分布、季节特征和运动学特征的认识, 但是由于水下观测资料获取难度较大, 因此目前对南海中尺度涡空间结构的研究成果比较少, 只有针对个别涡旋的研究。例如 Li 等(1998)运用 CTD 资料分析了 1994 年秋季出现在南海东北部的一个反气旋涡的空间结构, 发现涡旋能够从表层延伸到 1000m 的深度。Nan 等(2011)利用 18°N 断面的 CTD 资料, 分析了 2007 年夏季吕宋岛西侧三个反气旋涡的垂直结构, 发现由涡旋引起的地转流速在 900m 深度能够达到 5cm/s 的量级。Hu 等(2011)在 2007 年 9 月对越南冷涡进行了走航观测, 利用大面积 CTD 观测资料给出了越南冷涡由表层至 500m 深度的三维结构, 发现涡旋的流速随着深度的增加迅速衰减, 到 300m 深度基本为 0, 同时冷涡的中心随着深度增加略微地向东北方向倾斜。Zhang 等(2016)通过 2013 年 10 月至 2014 年 6 月期间在南海北部布放的潜标阵列获得的观测数据, 运用合成分析的方法刻画了南海北部的一对涡旋的全水深三维结构, 发现中尺度涡的信号能够从表层一直延伸到海底, 并且在海底处的流速仍然可以达到 5cm/s, 同时也发现中尺度涡从表层至海底轴心逐渐往西南方向倾斜, 最大倾斜距离达到 150km。除此之外, 部分学者分别运用高分辨率海洋模式对南海中尺度涡的垂向结构也进行了研究(Chen *et al*, 2010; Chu *et al*, 2014; Zhang *et al*, 2015), 他们指出在模式中涡旋的形状主要分为“碗状”、“棱镜状”和“锥状”三种结构, 其中“碗状”结构的中尺度涡占总数的 80%。

Argo 浮标的出现使得海洋学家能够获得全球范围大量的温盐剖面数据。结合卫星高度计资料, 通过合成分析方法, 前人在不同的研究海区分析了中尺

* 科技部重点研发计划项目, 2016YFA0601803 号; 国家自然科学基金项目, 41490641 号, U1406401 号。郑 堃, 硕士研究生, E-mail: princebk@163.com

① 通讯作者: 林霄沛, 博士生导师, 教授, E-mail: linxiaop@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017-03-01, 收修改稿日期: 2017-03-23

度涡的结构, 如东南太平洋(Chaigneau *et al*,2011)、西北太平洋(Qiu *et al*, 2005; Yang *et al*, 2013)、热带印度洋(Yang *et al*, 2015)、东南印度洋(Souza *et al*, 2011)等。Zhang 等(2013)结合高度计和 Argo 资料, 运用合成分析的方法对大洋中尺度涡的空间结构进行了深入的研究, 发现在地转近似的条件下, 全球大洋中尺度涡的水平结构和垂直结构可以分离并且具有统一的空间结构。

综上所述, 前人通过观测资料和数值模拟研究了南海个别中尺度涡的空间结构, 也通过大量的温盐剖面数据和高度计资料研究得到了全球大洋中尺度涡统一的水平和垂直结构。但是, 南海中尺度涡是否也具有统一的空间结构, 南海中尺度涡空间结构与大洋中尺度涡空间结构有何异同等问题我们尚不清楚。由于南海 Argo 资料较少, 因此我们利用 CTD 资料和卫星高度计资料, 通过合成分析的方法得到了归一化之后南海中尺度涡统一的空间结构, 并将结果与全球大洋中尺度涡的结构特征进行对比, 从而更好地理解南海中尺度涡的结构特征。

1　数据与方法

1.1　数据资料

1.1.1　卫星高度计资料　　本文使用的卫星高度计资料为海表面高度异常数据(SLA), 是由法国国家空间研究中心卫星海洋学数据存档中心(AVISO)提供的延迟时间海表面高度异常格点数据(DT-MSLA), 该数据由 TOPEX/Poseidon、Jason-1 和 ERS 卫星数据融合得到, 为格点数年集。该数据采用 Mercator 坐标系, 时间分辨率为 7 天, 空间分辨率为 1/4°×1/4°。本文选取的空间范围是 0°—25°N, 105°—125°E。本文中使用的海表面高度异常(SLA)都是相对以七年为时间窗口的平均值计算得到的。

1.1.2　CTD 数据　　本文采用的 CTD 数据是来自国际合作与交流资料、东方红 2 号海洋科学考察船高分辨率 CTD 调查资料和国内其他涉海部门 1993 年至 2009 年在南海进行的 CTD 调查资料, 共计 1460 个 CTD 剖面。使用的 CTD 型号为海鸟 CTD 911(917)。图 1 展示了这些 CTD 剖面在南海的空间分布情况, 数据主要分布在 4°—25°N, 105°—125°E 之间, 基本遍布南海海域。

图 2 展示了不同深度 CTD 观测数据的数量。由于水深大于 900m 之后 CTD 数据数量较少, 为使得我们的研究具有代表性和可信性, 只取了 800m 以上的

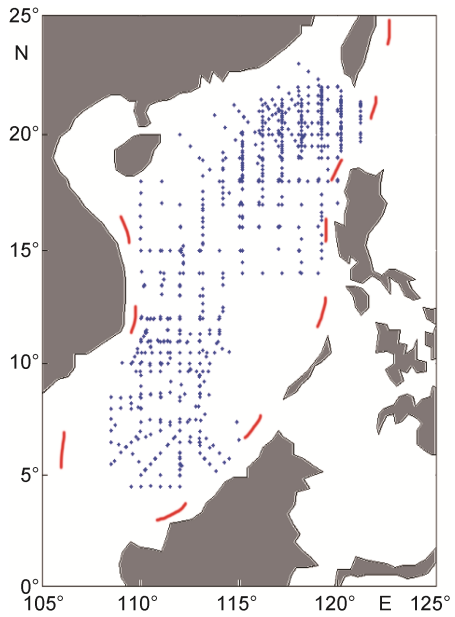


图 1　CTD 剖面在南海的分布

Fig.1　The distribution of CTD profile in SouthChina Sea(SCS)

CTD 数据进行合成分析。

1.1.3　水文背景资料　　WOA09(World Ocean Atlas 09)数据是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)旗下的美国海洋资料研究中心(NODC)制作的世界海洋水文数据。WOA09 数据空间分辨率有 5°×5°和 1°×1°之分, 时间分辨率有年平均数据、季平均数据和月平均数据。数据包括溶氧量、表观耗氧量、磷酸盐、硅酸盐、硝酸盐、盐度和温度等水文数据信息。年平均数据与季平均数据可选择 0—5500m 的深度范围, 分为 33 层, 月平均数据可选择 0—1500m 的深度范围, 分为 24 层。本文采用的数据范围是 0°—25°N, 105°—125°E, 空间分辨率为 1°×1°的月平均数据, 垂向水深取 0—800m。

1.2　涡旋的归一化合成方法

1.2.1　涡旋与 CTD 的匹配方法　　我们根据 CTD 剖面观测时间找出时间上最接近的高度计观测数据, 然后通过 Okubo-Weiss 方法对中尺度涡进行识别。在这里我们将所有的海表面高度异常的局地极大值和极小值被 Okubo-Weiss 参数 $W=-2\times10^{-12}/s^2$ (Chaigneau *et al*, 2011)的闭合等值线包围的点认定为一个真实的涡旋中心。其中 Okubo-Weiss 参数为(Isern-Fontanet*et al*, 2003): $W=4(u_x^2+v_xu_y)$, 下标 x, y 分别代表东西向与南北向的空间导数。然后通过地转平衡关系, 由高度计数据计算得出地转流 $u=-(g/f)\eta_y$ 和 $v=-(g/f)\eta_x$

(η 是海表面高度异常，g 是重力加速度)。我们将 $W=-2\times10^{-12}/\mathrm{s}^2$ 等值线所包围的面积 A 作为涡旋的面积，将 $R_0=\sqrt{A/\pi}$ (Cheltonet *al*, 2007)作为涡旋的半径。

通过高度计资料得涡旋的中心和半径之后，比较涡心与 CTD 剖面的距离，选择 L(L=3 倍涡旋半径 R)为搜索半径，将所有落入搜索范围的涡旋与 CTD 剖面进行匹配。匹配的方法见图 3。

在这里有必要解释一下选择 3 倍涡旋半径作为搜索半径的原因。如果 L 选取的较小，那么落入搜索范围的 CTD 剖面数据数量就会减少。由于统计样本不足，就容易造成较大的相对误差。而如果 L 选取过大，则统计区域内数据不能够真实表征涡旋的信息，从而得到错误的合成结果。我们分别尝试过 L 选取从 R 到 $5R$，结果证明 L=3R 时既能保证获得较多的统计样本，又能保证统计区域足够小，涵盖尽量多的涡旋信息。

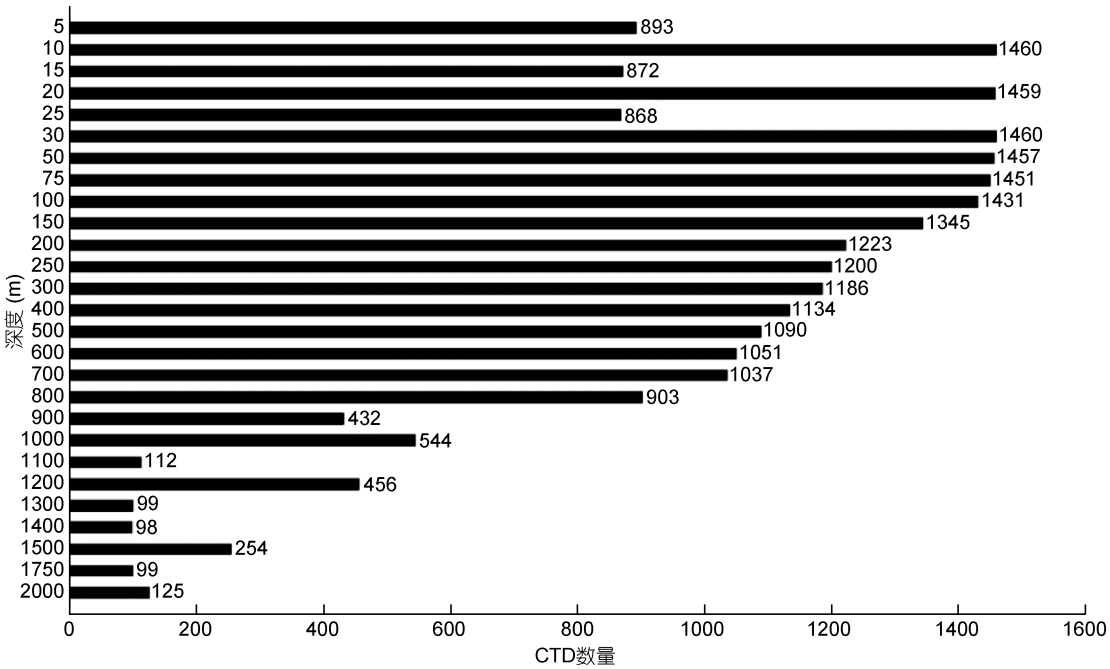


图 2 CTD 数据在不同深度的分布

Fig.2 Distribution of CTD data in different depth

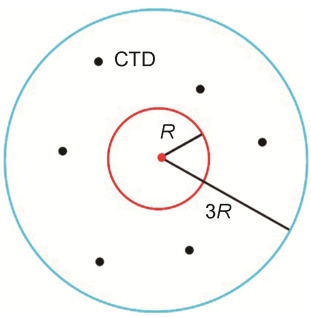


图 3 涡旋匹配方法

Fig.3 The method of mesoscale eddiesmatching

注：红点为涡旋中心，黑色圆点为 CTD 剖面的位置，红色圆圈为涡旋半径 R 确定的涡旋边缘，蓝色圆圈为搜索半径 L=3R 确定的搜索区域

根据我们采用的涡旋与 CTD 数据的匹配方法，共有 247 个涡旋与 CTD 剖面匹配成功，参与了南海中尺度涡统一三维结构的合成，其中气旋涡 116 个，反气旋涡 131 个。由于现场观测的不确定性，不同涡旋匹配的 CTD 数目有所不同，匹配 CTD 数目最多的涡旋匹配的 CTD 的数目为 53 个，最少的仅有 3 个。

以 1994 年 4 月 13 日出现在南海北部的一个中尺度涡为例，展示了涡旋的识别过程及涡旋与 CTD 的匹配情况(图 4)，匹配出的 CTD 的温度及盐度剖面(图 5)。

1.2.2 归一化 匹配完成后，以涡旋中心为原点，建立涡心坐标系(r, z),r 是 CTD 剖面与涡心的距离，z 是深度。为了排除中尺度涡水平尺度大小造成的影响，我们用 R_0 去归一化 r，得到归一化之后的距心距离 $r_n=r/R_0$ 作为合成时使用的径向坐标。我们将大量的观测数据投射到以涡旋中心为原点的坐标系下，从而得到一个涡旋在平均意义下的结构图像。投影方法见图 6。由于每一个 CTD 剖面观测到的涡旋的振幅、极性和强度存在差别，为了排除这些因素的影响，我

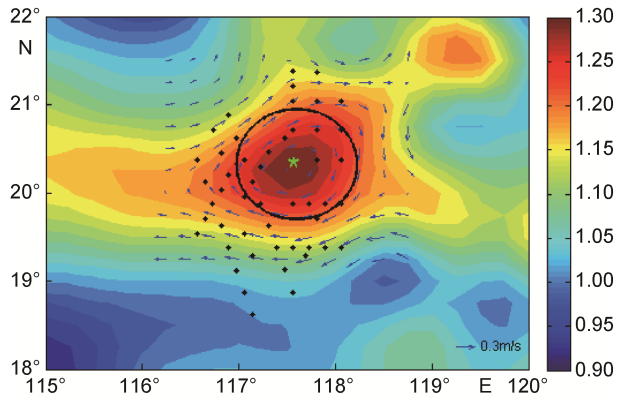


图 4　利用高度计资料识别中尺度涡

Fig.4　Using altimeter data to identify mesoscale eddies

注: 图中背景颜色代表海表面高度异常, 单位: m。绿色*标志是用 Okubo-Weiss 方法识别出的涡旋中心的位置, 黑色的圆圈是识别出的涡旋半径, 蓝色矢量箭头为地转流速, 黑色点为匹配出的 CTD 剖面

们还需要对振幅和极性进行归一化, 方法就是通过涡旋在海表涡心位置的压强异常对应的 CTD 观测到的压强剖面进行归一化, 即: $p_n(r_n,z)=p_0^{-1}\cdot p'(r/R_0,z)$。其中压强异常 p'被它在海表面涡旋中心处的观测值 p_0 归一化, 得到归一化之后的压强异常 p_n; 距心距离 r 被涡旋半径 R_0 归一化, 得到归一化的径向坐标 r_n。

1.2.3　合成压强异常场　　中尺度涡的压强异常场 p' 代表了涡旋的水平地转流函数 $\varphi(\varphi=p'/f$, f是科氏参数), 并将决定整个涡旋的动力结构。位势密度可以通过温盐剖面直接计算得到, $p(z)=-\int_{z_0}^{z}g\rho\cdot dz+C$, g 是重力加速度, C 是 z_0 处的压强, 选择不同的 z_0 只会改变 C 的值, 但是不会影响合成分析得到的涡旋结构。选取 $z_0=800$m 为积分下限, 在不同的深度, 都会得到一个压强值 $p(z)$, 海表的压强值可以通过卫星高度计计算得到: $p(0)=g\cdot\rho_0\cdot SSH$, ρ_0 是海表面处的密度(1030kg/m³)。将 p 转化到标准层, 通过 WOA09 的月平均数据计算得到南海的多年季节平均的压强值作为季节信号 $\bar{p}$, p 减去 $\bar{p}$ 得到 p'即为压强异常值。

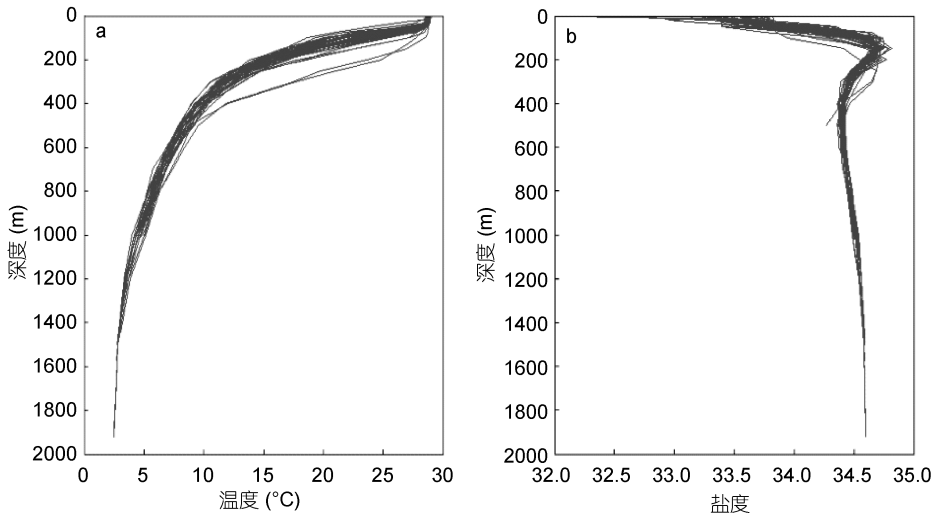


图 5　匹配出的 CTD 温度(a)及盐度(b)剖面

Fig.5　Matched CTD temperature salinity profile

注: 蓝色实线代表每一个 CTD 得到的温度剖面和盐度剖面

1.2.4　中尺度涡水平结构和垂直结构的合成方法　根据 Zhang 等(2013)的结论中尺度涡的水平结构和垂直结构是可以分离的, 即 p' 可以表示为 $p'=F_1(x,y,t)\cdot F_2(z)$。因此我们可以分别合成水平和垂直结构。考虑到中尺度涡通过高度计观察基本上是轴对称的(Chelton *et al*, 2011), 并且不同层次的中尺度涡的压强异常在结构上具有一致性(Zhang *et al*, 2013), 压强异常 p_n 在各个深度上水平分布应该一致, 只是振幅不一样, p_n 的最大值总是出现在涡旋中心处, 因此, 我们用各个深度层次上涡旋中心处 p_n 的值对这一深度上 p_n 的水平分布进行振幅的归一化: $p_n(r_n,z)/p_n(0,z)$, 它是深度 z 层次上振幅归一化的压强异常的水平分布, 即代表了 p_n 在各个深度上的水平分布的性状。对 $p_n(r_n,z)/p_n(0,z)$ 求垂向平均, 就

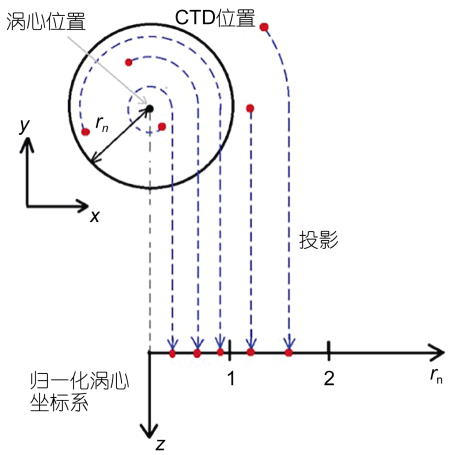


图 6 将 CTD 剖面投影到归一化涡心坐标系(改自张正光, 2014)

Fig.6 Project CTD profiles to the normalized cylindrical coordinates

注: 上半部分是涡旋中心和与其配对的 CTD 剖面的相对位置, 其中的黑点代表涡旋的中心, 红点则代表 CTD 剖面的位置; 下半部分是将匹配的 CTD 剖面投影到归一化的涡心坐标系(r_n, z)

得到 $R(r_n)$。

类似的, 对不同距心距离 r_n 上 p_n 的垂向分布也可以用对应距心距离海表面处的值进行振幅归一化: $p_n(r_n,z)/p_n(r_n,0)$, 它是距心距离 r_n 处振幅归一化的压强异常的垂向分布, 即代表了 p_n 在不同 r_n 处垂直分布的形状。对 $p_n(r_n,z)/p_n(r_n,0)$ 求径向平均就得到了 $H(z)$。

2 结果与分析

2.1 南海中尺度涡水平结构的合成结果

图 7 蓝色实线为南海海域不同深度(5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800m)归一化合成的中尺度涡压强异常的水平结构, 横坐标是归一化涡心距离 r_n, 黑色实线则代表了它们的平均曲线。红色虚线为全球大洋中尺度涡水平结构的解析函数曲线(Zhang *et al*, 2013): $R(r_n)=(1-r_n^2/2)\cdot\exp(-r_n^2/2)$。

由图 7 我们可以看出, 不同的深度条件下, 通过对涡旋的极性、振幅和半径进行归一化之后得到的压强异常曲线十分接近, 这说明南海的中尺度涡在统计意义下具有统一的水平结构。对 $p_n=(r_n,z)/p_n(0,z)$ 求垂向平均得到 $R(r_n)$, 即图 7 中的黑色实线。

通过与全球大洋中尺度涡水平结构的解析函数曲线对比, 我们发现南海中尺度涡水平压强异常曲线与全球大洋中尺度涡的水平压强异常曲线的解析函数在 $r_n<1.5$ 区间, 两者结构比较一致, 但是在 $r_n>1.5$ 区间两者结构具有明显的不同。南海中尺度涡水平结构在 2.5 倍涡旋半径处水平结构已经收敛趋近于 0, 全球大洋中尺度涡的水平结构在 4 倍涡旋半径处水平结构才收敛趋近于 0。经测算, 在 1.5 倍涡旋半径之外, 前者水平结构的收敛速度约为后者的 2.5 倍, 前者比后者水平结构的影响范围要小约 1.5 倍涡旋半径。这说明南海中尺度涡的影响范围要小于全球大洋中尺度涡的影响范围, 主要是由于 1.5 倍涡旋半径之外的南海中尺度涡水平结构的收敛速度更快。

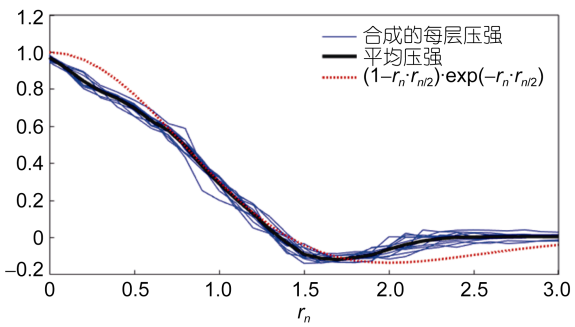


图 7 南海中尺度涡统一的压强异常的水平结构

Fig.7 The universal horizontal structure of abnormal pressure in mesoscale eddies in SCS

2.2 南海中尺度涡垂直结构的合成结果

图 8a 为南海中尺度涡垂直结构的合成结果, 图 8b 为全球大洋四个代表海区中尺度涡垂直结构的合成结果。横坐标为垂直结构 $H(z)$, 纵坐标为深度 z, 单位为 m。

由于数据原因, 我们仅得到了 0 至 800m 水深南海中尺度涡的垂直结构, 未能体现涡旋的全水深结构。图 8a 实线部分为南海归一化合成的中尺度涡的垂直结构 $H(z)$的实际结果, 虚线部分为沿着实测结果的自然延伸, 仅作为垂直结构的参考, 并无实际意义。通过与图 8b 同等深度全球大洋四个代表海区中尺度涡垂直结构的对比我们可以看出, 中尺度涡的垂直结构在不同海区均有较大差别, 并不具有统一性, 这主要是由于背景层结和科氏参数的差别所致, 符合我们的预期。南海相较于其他四个海区, 中尺度涡的垂直结构随着水深的增加, 衰减速度明显更快。800m 水深处, 南海中尺度涡的垂直结构 $H(z)$已经小于 0.1, 与北太平洋副热带逆流区涡旋的垂直结构较为接近, 明显小于其他三个海区。

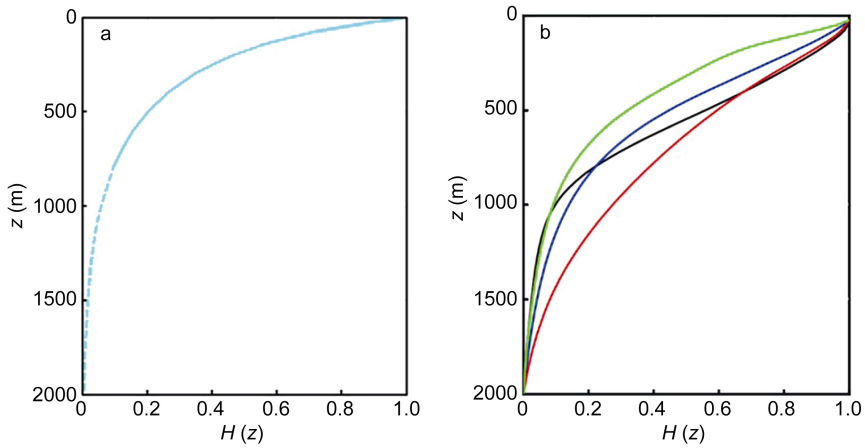


图 8　中尺度涡的统一的压强异常的垂向结构

Fig.8　The universal vertical structure of mesoscale eddies

注: a: 南海中尺度涡区域合成的垂直结构(青色); b: 湾流区(黑色)、阿古拉斯流区(红色)、北太平洋副热带逆流区(绿色)、黑潮延伸体区(蓝色)区域内合成的中尺度涡的垂直结构。b 图摘自张正光(2014)

3　结论

为了更好地理解南海中尺度涡的结构特征，我们利用 CTD 资料和卫星高度计资料通过归一化合成分析的方法，在满足静力平衡条件和地转平衡条件的假设下，分别得到了南海中尺度涡统一的水平结构和垂直结构。得到结论如下。

(1) 从水平结构的合成结果来看，南海的中尺度涡具有统一的水平结构特征。在 0 至 1.5 倍涡旋半径区间，基本与解析函数 $R(r_n)=(1-r_n^2/2)\cdot\exp(-r_n^2/2)$ 重合，这与 Zhang 等(2013)得到的全球大洋中尺度涡水平结构的合成结果一致。

(2) 在 1.5 倍涡旋半径以外，南海中尺度涡的水平结构的收敛速度明显要快于全球大洋中尺度涡水平结构的收敛速度，前者在 2.5 倍涡旋半径处水平结构已经收敛趋近于 0，后者在 4 倍涡旋半径处水平结构才收敛趋近于 0。经测算，在 1.5 倍涡旋半径之外，南海中尺度涡水平结构的收敛速度约为全球大洋中尺度涡水平结构收敛速度的 2.5 倍，前者比后者水平结构的影响范围要小约 1.5 倍涡旋半径。

(3) 从南海 0 至 800m 水深南海中尺度涡垂直结构的合成结果来看，南海中尺度涡的垂直结构与全球大洋各海区中尺度涡的垂直结构存在明显差别。这主要是不同海区科氏参数和背景层结不同所致，这一点符合我们的预期。但是通过对比我们可以看出，南海中尺度涡的垂直结构随着深度的增加，相较于其他海区衰减的速度明显更快。

综上所述，我们通过 CTD 资料和卫星高度计资料得到的南海中尺度涡统一的水平结构与 Zhang 等(2013)得到的全球大洋中尺度涡的结果存在差异，南海中尺度涡的水平结构明显要比全球大洋中尺度涡水平结构的收敛速度更快，这也说明在经过归一化之后，南海中尺度涡水平结构的影响范围要明显小于全球大洋中尺度涡水平结构的影响范围。南海中尺度涡的垂向构与全球大洋各个海区中尺度涡垂直结构相比，其随深度的衰减速度明显更快。这两种差异究竟是由于计算和仪器的误差导致还是在海洋中真实存在，两者之间是否有什么联系，还需要我们下一步通过更多的观测数据来进一步验证。中尺度涡的三维空间结构在很大程度上能够影响其输运能力，正确认识南海中尺度涡的结构特征，有助于更好地评估南海中尺度涡对物质和能量的输运能力。

参　考　文　献

张正光, 2014. 中尺度涡. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文

Chaigneau A, Le Texier M, Eldin G *et al*, 2011. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: a composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(C11): C11025

Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M *et al*, 2007. Global observations of large oceanic eddies. Geophysical Research Letters, 34(15): L15606

Chelton D B, Gaube P, Schlax M G *et al*, 2011. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. Science, 334(6054): 328—332

Chen G X, Hou Y J, Chu X Q *et al*, 2010. Vertical structure and evolution of the Luzon Warm Eddy. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 28(5): 955—961

Chu X Q, Xue H J, Qi Y Q *et al*, 2014. An exceptional anticyclonic eddy in the South China Sea in 2010. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(2): 881—897

Hu J Y, Gan J P, Sun Z Y *et al*, 2011. Observed three—dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C5): C05016

Isern-Fontanet J, Garcia-Ladona E, Font J, 2003. Identification of marine eddies from altimetric maps. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20(5): 772—778

Li L, Nowlin W, Su J L *et al*, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. Deep Sea ResearchPart I: Oceanographic Research Papers, 45(9): 1469—1482

Nan F, He Z G, Zhou H *et al*, 2011. Three long—lived anticyclonic eddies in the northern South China Sea. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(C5): C05002

Qiu B, Chen S M, 2005. Eddy-induced heat transport in the subtropical North Pacific from Argo, TMI, and altimetry measurements. Journal of Physical Oceanography, 35(4): 458—473

Souza J M A C, Montégut C D B, Cabanes C *et al*, 2011. Estimation of the Agulhas ring impacts on meridional heat fluxes and transport using ARGO floats and satellite data. Geophysical Research Letters, 38(21): L21602

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

Yang G, Yu W D, Yuan Y L *et al*, 2015. Characteristics, vertical structures, and heat/salt transports of mesoscale eddies in the southeastern tropical Indian Ocean. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(10): 6733—6750

Zhang W Z, Xue H J, Chai F *et al*, 2015. Dynamical processes within an anticyclonic eddy revealed from Argo floats. Geophysical Research Letters, 42(7): 2342—2350

Zhang Z G, Zhang Y, Wang W *et al*, 2013. Universal structure of mesoscale eddies in the ocean. Geophysical Research Letters, 40(14): 3677—3681

Zhang Z W, Tian J W, Qiu B *et al*, 2016. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the South China Sea. Scientific Reports, 6: 24349

ON UNIVERSAL 3D STRUCTURE OF MESOSCALE EDDIES IN UPPER LAYER OF SOUTH CHINA SEA

ZHENG Kun[1, 2], LIN Xiao-Pei[1, 2], ZHU Ya-Nan[1, 2]

(1. *Key Laboratory of Physical Oceanography*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*;
2. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*)

Abstract Under the assumption of geostrophic balance and hydrostatic balance,we investigated the spatial structure of the mesoscale eddies in the South China Sea (SCS) and used normalized composite analysis of satellite altimetry and CTD data. Compared with the universal structure of mesoscale eddies in the globe oceans, the horizontal structure of mesoscale eddies in SCS converge 2.5 times faster than those in 1.5 radius outside. The measurement and calculation show, the influence range of eddies in SCS is about 2 radius smaller than those in the globe oceans. Due to lack of deep level data, we could composite the vertical structure of mesoscale eddies in 0—800m only in SCS. Because of the background stratification and the Coriolis force, the vertical structure is much more different from those in the globe oceans. With the increase of depth, the vertical structure attenuates much more rapidly in SCS.

Key words South China Sea; mesoscale eddies; three-dimensional structure; normalization; composite analysis