

# 吕宋海峡黑潮脱落涡旋的特征分析\*

王鼎琦<sup>1</sup> 方国洪<sup>1,2</sup> 邱婷<sup>3</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所海洋环境科学和数值模拟重点实验室 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室  
区域海洋动力学与数值模拟功能实验室 青岛 266200; 3. 河海大学海洋学院 南京 210098)

**摘要** 涡旋脱落西太平洋和南海的海水属性交换中起到重要作用。为研究吕宋海峡附近海域由黑潮脱落并进入南海的涡旋特征, 本文采用 1993—2014 年法国空间局(AVISO)多卫星融合海面高度距平(SLA)和绝对动力地形(ADT)全球网格化延时数据, 美国国家海洋数据中心(NODC)的 WOA13 年平均温盐剖面气候数据, 以及 1993—2010 年 SODA2.2.4 月平均海洋同化数据集, 并分析了黑潮脱落涡旋与大尺度环流的关系。结果表明: (1)暖涡脱落数量远多于冷涡数量, 且脱落的冷涡绝大部分在黑潮西侧边缘生成, 而脱落的暖涡则大部分在黑潮控制区生成。(2)冷涡、暖涡脱落时的平均半径、平均振幅相近, 但是冷涡的平均生命、平均迁移距离约为暖涡的一半。(3)冷涡不是每年都有脱落, 主要在冬季脱落; 暖涡则每年均有脱落, 主要发生在秋季。(4)脱落涡旋数量与脱落时的黑潮路径类型相关。(5)脱落涡旋的平均西行速度为 5.8cm/s, 与斜压第一模态长 Rossby 波波速及大尺度环流的西向平流流速之和相近。

**关键词** 吕宋海峡; 黑潮; 脱落涡旋; 南海

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20170200037

南海是最大的边缘海之一, 具有独特的水文和海洋环流特征, 与西北太平洋之间的水体交换只能通过吕宋海峡进行(Yang *et al.*, 2011)。吕宋海峡位于台湾岛与吕宋岛之间(图 1), 宽约 380km, 平均水深约 1400m, 海槛深度在 2200—2400m(孙湘平, 2006)。黑潮是西北太平洋的一支强西边界流, 沿太平洋西岸北上过程中, 受到吕宋海峡的影响, 失去西侧陆坡的支持而发生形变, 从而影响南海北部的水文特征、海流结构以及涡旋的生成等(李薇等, 1998; Wang *et al.*, 2012; Nan *et al.*, 2015)。

黑潮的脱落涡旋是黑潮入侵南海的一种重要方式。1994 年 8—9 月南海东北部水文调查首次观测到一个中心位于 21°N、117.5°E, 直径约 150km, 垂直尺度达 1000m 的反气旋式涡旋(暖涡), 并发现这个涡旋可能来自于黑潮(李立等, 1997; Li *et al.*, 1998)。

Pichevin 等(1997)通过基于  $\beta$  平面含非线性项的一层半模式以及动量守恒角度分析, 认为黑潮能通过涡旋等不稳定过程流经吕宋海峡进入南海。杨昆等(2000)改进了 POM 数值模式的涡分辨率, 结果认为黑潮在吕宋海峡也能形成如墨西哥湾似的“流套”并脱落出中尺度涡。Jia 等(2004)结合卫星高度计资料和 POCM 模式结果, 发现暖涡在黑潮弯曲区域活动较为活跃, 且在夏季风和冬季风盛行时期, 在 119.5°E 和 120°E 之间频繁脱落。Yuan 等(2006)结合卫星遥感水色、海表温度和高度计资料, 分析得到, 黑潮在吕宋岛西北海域以脱落暖涡形式向西入侵南海, 且这一现象一年四季都存在。郭景松等(2007)通过统计 1993—2000 年间吕宋海峡两侧涡旋, 分析得到南海东北部中尺度暖涡的形成与黑潮有一定联系。Nan 等(2011b)研究了中国台湾西南侧海域涡旋的形成和传

\* 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1606405 号; 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目, 2013AA09A506 号; 中国科学院战略性先导科技专项, XDA11010304 号, XDA11010301 号。王鼎琦, 硕士研究生, E-mail: 691294332@qq.com

通讯作者: 方国洪, 中国工程院院士, 博士生导师, 研究员, E-mail: fanggh@fio.org.cn

收稿日期: 2017-02-28, 收修改稿日期: 2017-03-29

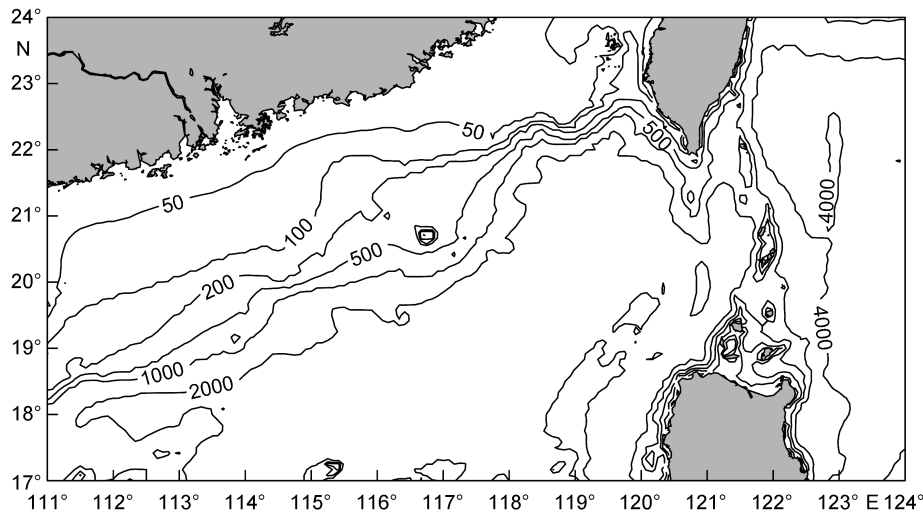


图1 吕宋海峡及附近海域地形分布

Fig.1 Topographic distribution of the Luzon Strait and the neighboring area

注: 等值线为水深(单位: m)

播, 发现在这个区域冷涡多于暖涡, 但暖涡较强且生存时间较长。Wang 等(2012)研究了吕宋海峡西部涡旋并估算了它们引起的体积、热量和盐量的运输。在上面提到的各项研究中, 大都没有区分黑潮脱落的涡旋和非黑潮脱落的涡旋。Jia 等(2004)虽专注于从黑潮脱落的涡旋, 但只针对黑潮发生弯曲时的情况, 而且只考察了暖涡的发生和迁移。

本文将分析 1993—2014 年间在吕宋海峡附近海域, 从黑潮脱落并进入南海的涡旋的时空分布、迁移路径等统计特征, 并研究黑潮的三种路径类型对涡旋脱落的影响以及脱落涡旋的向西迁移速度与 Rossby 波波速和大尺度海流流速的关系。由于涡旋在海洋的物质和能量运输过程中扮演极为重要的作用(Zhang *et al.*, 2014), 且吕宋海峡是连接南海和西北太平洋的唯一深水通道, 因此分析黑潮脱落涡旋的统计特征, 对于研究吕宋海峡的水交换等具有重要的意义。

## 1 数据和方法

本研究主要使用了三个数据集。首先是法国空间局(AVISO)中心网站的卫星高度计全球网格化延时数据产品, 包括多卫星(包括 ERS-1、ERS-2、Jason-1、Jason-2、HY-2 等卫星)融合的海面高度距平(SLA)和绝对动力地形(ADT)数据(数据网址: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>)。数据的时间范围为 1993 年 1 月至 2014 年 12 月, 时间分辨率为 1 天, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。该数据集包含了海面高度和相应的

地转流流矢分布。由于 ADT 数据已计入平均动力高度 MDT(Rio *et al.*, 2011), 故黑潮的位置可以清楚地分辨出来, 这极大地便利了从黑潮脱落涡旋的辨识。其次是美国国家海洋数据中心(NODC)的 World Ocean Atlas(WOA13)数据(数据网址: <https://www.nodc.noaa.gov/>), 本文采用水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的年平均温盐剖面气候数据(Locarnini *et al.*, 2011)。最后是 1993—2010 年全球海洋同化再分析资料 SODA2.2.4 的月平均海洋数据集, 其水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (数据网址: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.CARTON-GIESE/.SODA/.v2p2p4/>)。

AVISO 的 SLA 和 ADT 产品已被广泛应用于南海中尺度涡的研究(Nan *et al.*, 2011b; Wang *et al.*, 2012, 2015; Chu *et al.*, 2014), 虽然高度计数据已经包括了对潮汐和海平面压强的修正, 但是在浅海海域, 仍然包含潮汐和内波的干扰(Yuan *et al.*, 2007)。因此, 为了保证结果的准确性, 本文仅采用水深不小于 200m 的 SLA 和 ADT 数据。

中尺度涡以持续性封闭环流为主要特征, 通常典型的空间尺度为 50—500km, 时间尺度为几天到上百天, 是海洋环流的一个重要组成部分(王桂华等, 2005)。近几十年, 科学家们提出了多种中尺度涡自动识别方法, 大致可分为三大类: 第一类是基于涡旋速度场的物理特性的算法, 主要包括 Okubo-Weiss(OW)参数法、小波分解方法等; 第二类是基于涡旋几何特性的算法, 主要包括 Winding-Angle(WA)方法、矢量几何法、自由等值线法等; 第三类是混合法。Souza

等(2011)比较了小波分解、OW和变型WA(即几何准则)三种方法,认为变型WA方法性能最好。此外,Chen等(2011)也成功地应用了WA方法识别南海中尺度涡,因此,本文选择变型WA方法对研究区域内的涡旋进行自动识别。

变型WA方法首先寻找在一个 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度移动窗口内SLA或ADT最小(大)值,用于判断可能的冷涡(暖涡)中心。再从每个可能的涡旋中心出发,以1cm的增幅(减幅)向外寻找闭合的SLA或ADT等值线,最外层的等值线即是涡旋的边缘。

在得到全部的涡旋中心后,我们再利用距离法(Nencioli *et al.*, 2010),逐个判定涡旋轨迹。在连续时间的SLA场中,对在第 $t$ 时刻每一个识别出来的涡旋进行追踪,即寻找在下一个 $t+1$ 时刻相应的类型相同(同为冷涡或暖涡)且距离最近的涡旋,并认为这个涡旋是上一个涡旋迁移了一定距离后的同一个涡旋。由于涡旋的平均迁移速度小于 $0.1\text{m/s}$ (见下文),即每天迁移的平均距离小于10km,而AVISO提供的SLA和ADT数据的时间分辨率为一天,故采用本方法能够准确地追踪各个涡旋并判定其轨迹,从而进一步得知涡旋的演变、迁移和消亡过程。

为了更可靠地根据海面高度来识别涡旋,需要一个优质的平均流场,尤其是强流海区(Lee *et al.*, 2010)。因此,本文结合SLA和ADT两种数据绘制出逐日的等值线图(图略),观察黑潮脱落的涡旋的过程,记录黑潮脱落的涡旋,再对这些涡旋进行识别与追踪,得到脱落涡旋的中心位置、迁移轨迹、迁移速度等信息。利用距离法我们同样可以倒过来追踪涡旋的产生源地,并利用ADT资料所提供的黑潮信息,确定涡旋是不是起源于黑潮。

## 2 统计结果

通过识别,我们发现1993—2014年间,在吕宋海峡附近一共有16个冷涡(气旋式涡旋)和66个暖涡(反气旋式涡旋)从黑潮脱落并进入南海。其中只有3个冷涡在黑潮内部生成,其余13个则是在黑潮西侧边缘生成;大部分暖涡均在黑潮控制区(包括黑潮流套区)生成,仅19个暖涡是在黑潮西侧边缘生成。暖涡数量远多于冷涡数量的原因是由于黑潮水体的垂向平均温度明显高于南海水体的垂向平均温度(海洋图集编委会, 2006),故从黑潮脱落的涡旋多为暖涡。涡旋脱落的空间位置和迁移轨迹如图2所示。涡旋的脱落均发生在 $117.5^\circ\text{E}—120.5^\circ\text{E}$ ,  $18^\circ\text{N}—22.5^\circ\text{N}$ 区域内,此范围与

Jia等(2004)利用1992—2001年海表高度(SSH)数据自动判断得到的结果相近。可以看出,脱落涡旋迁移轨迹主要以自东向西为主;但由于受到陆坡地形的限制,在西行过程中,具有明显的向南偏移的趋势。

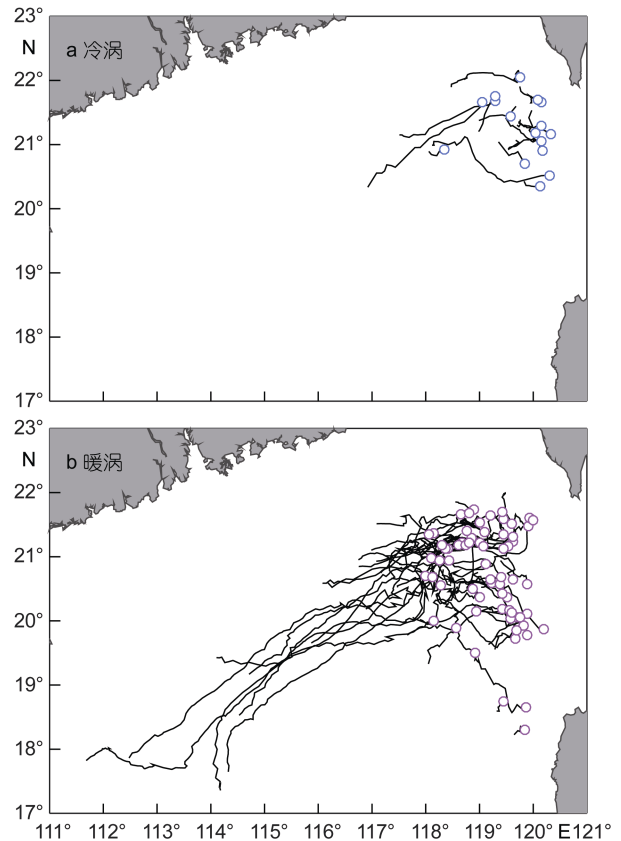


图2 黑潮脱落冷涡(a)、暖涡(b)的空间分布及其迁移轨迹  
Fig.2 Spatial distribution and migration tracks of the cold (a) and warm (b) eddies shedding from Kuroshio  
注: 蓝色和红色圆圈分别代表冷涡和暖涡的脱落位置

涡旋的半径、振幅、生存时长和迁移距离是描述涡旋特征的重要参数,为此本文统计了冷、暖涡这些参数的出现频率分布。在本研究中,定义涡旋半径为与脱落涡旋边界内面积( $A$ )相等的圆的半径,即 $r = \sqrt{A/\pi}$ ;涡旋振幅为脱落时涡旋中心和涡旋边缘之间的海面高度差的绝对值;涡旋生存时长为涡旋消亡时刻与涡旋脱落时刻的时间差;涡旋迁移距离为涡旋生存时段内各个时刻涡旋中心迁移距离的依次累加长度(Chu *et al.*, 2014; 祖永灿等, 2016)。

在统计涡旋半径的出现频率时,我们取间隔10km,分别统计半径在0—10, 10—20, 20—30km等各区间内冷涡和暖涡的个数,并分别除以冷涡和暖涡的总数,从而得到各区间的出现频率,如图3a所示。对涡旋振幅、生存时长和迁移距离,其出现频率

的统计方法也类似, 所取间隔分别为 2cm, 5d 和 50km, 所得结果分别如图 3b, 3c 和 3d。由图可知, 黑潮脱落并进入南海的涡旋半径集中分布在 30—150km, 其中冷涡和暖涡的平均半径分别为 72.2km、83.2km; 振幅

别为 11.8cm、11.4 cm; 生存时长则主要分布在 0—50d, 其中冷涡和暖涡的平均生存时长分别为 15.7d 和 29.2d; 迁移距离在 0—400km 之间的涡旋较多, 个别暖涡最远可以迁移 1000km 以上, 其中冷涡和暖涡的平均迁移距离分别为 118.7km 和 218.1km。

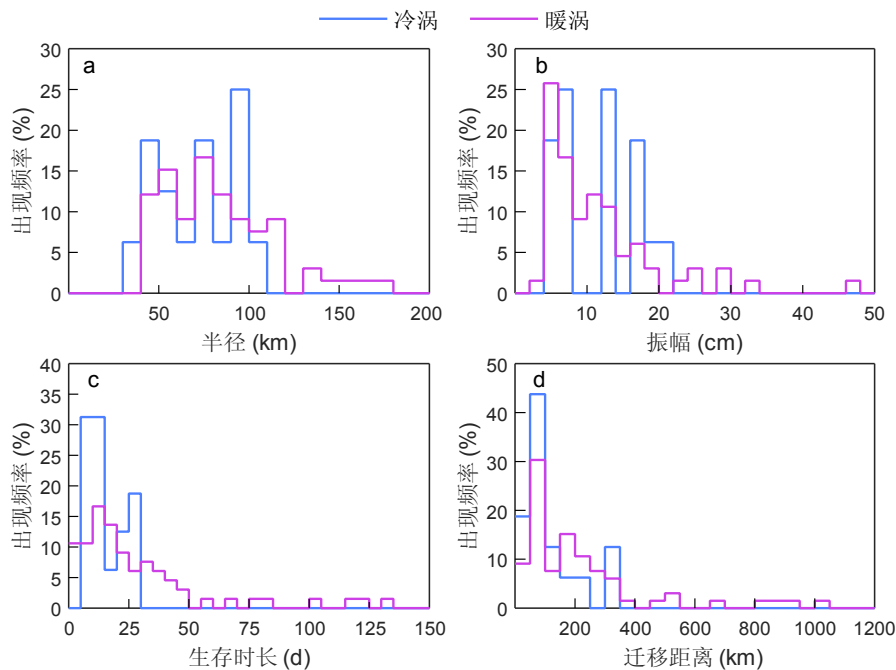


图 3 黑潮脱落涡旋的半径(a)、振幅(b)、生存时长(c)和迁移距离(d)的出现频率分布

Fig.3 Occurrence frequency of the eddy radius(a), amplitude(b), lifetime(c) and migration distance(d) of the eddies shedding from Kuroshio

### 3 涡旋脱落的季节、年际变化

吕宋海峡地处黑潮源区, 在这里黑潮的强度和路径均具有强烈的可变性(例如 Rudnick *et al*, 2011), 因而涡旋从黑潮脱落的发生频率也有显著的可变性。我们统计了脱落涡旋个数的季节和年际变化, 如图 4 所示。图 4a 和图 4b 分别示出脱落的冷涡个数(蓝线)、暖涡个数(红线)和涡旋总数(黑线)的逐月和逐年变化。从图 4a 中可以看出, 冷涡不是每个月都脱落, 暖涡脱落则是每个月都可以发生。如采用通常的季节划分, 12—2 月为冬季, 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 则可以发现: 在春季, 涡旋鲜有脱落, 冷涡主要在冬季脱落; 暖涡脱落则是在秋季最频繁, 夏、冬两季脱落的也较多, 春季最少。

整个南海位于季风气候带, 冬季盛行强劲的东北季风, 夏季盛行西南季风(王桂华等, 2005)。为研究方便, 本文不考虑时间较为短暂的春、秋季风转换时期, 将 11 月到翌年 4 月定义为冬季季风期, 5—10 月

定义为夏季季风期。通过统计发现, 冬季风时期脱落的暖涡、冷涡个数分别为 30, 10 个, 夏季风时期脱落的暖涡、冷涡个数分别为 36, 6 个。虽然冬季风时期, 风的作用更为强劲, 但是脱落的涡旋总数和夏季风时期差异不大。

从图 4b 可以看出, 冷涡不是每年都有脱落, 平均每年脱落 0.7 个; 暖涡则每年都有脱落, 平均每年脱落 3 个, 即黑潮在吕宋海峡海域, 一年四季均可以通过脱落暖涡的方式入侵南海, 这与前人研究(Yuan *et al*, 2006)一致。黑潮每年脱落 3.7 个涡旋入侵南海, 略多于 Jia 等(2004)的统计结果, 这可能是由于 Jia 等只考虑了黑潮存在弯曲的情况, 而本文的结果包括黑潮在跨越路径下脱落的涡旋。

### 4 涡旋脱落与黑潮路径的关系

Nan 等(2011a)根据吕宋海峡区域地转流的相对涡度平均值的大小将黑潮路径划分为三种类型, 分

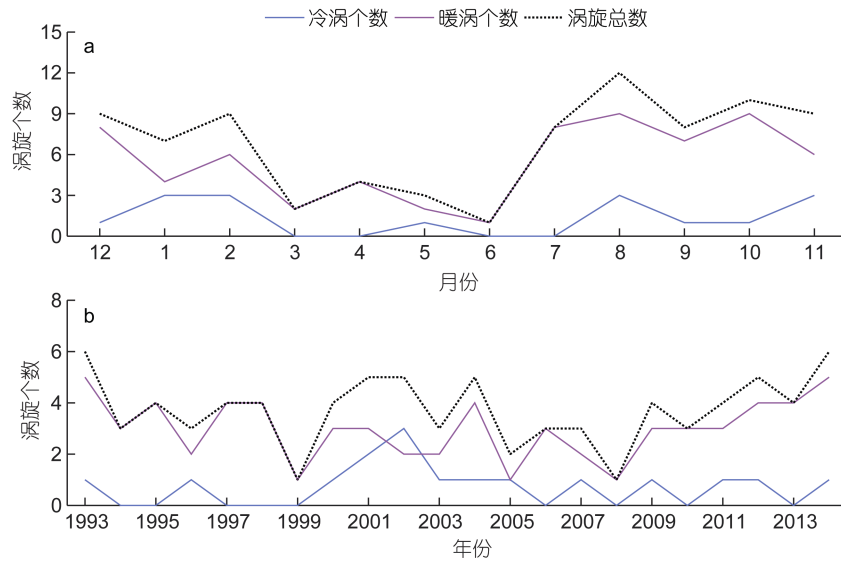


图 4 黑潮脱落涡旋个数的逐月(a)、逐年(b)变化

Fig.4 Monthly (a) and yearly (b) variations in the number of eddies shedding from Kuroshio

别称为 leaping, leaking 和 looping 路径。本文依据其特征,用中文分别称为跨越、入侵和流套路径。根据地转关系,由绝对动力地形数据集的海面高度  $\eta$  可以得到相应的地转流速,具体公式为

$$\begin{cases} u = -g/f(\partial\eta/\partial y) \\ v = g/f(\partial\eta/\partial x) \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $u$  和  $v$  分别为地转流的东分量和北分量;  $g$  是重力加速度;  $f$  是科式参数。地转流相对涡度的平均值 (GV) 为

$$GV = \frac{1}{S} \iint (g/f) \nabla^2 \eta ds. \quad (2)$$

本文把  $118^\circ\text{--}121^\circ\text{E}$ ,  $19^\circ\text{--}23^\circ\text{N}$  中的水深不小于 200m 的海域作为 GV 的积分区域 ( $S$ )。当 GV 为正(负)值时,表示积分海区中气旋式(反气旋式)流动占优。

利用 1993—2014 年的逐日 ADT 数据,根据式(2)得到逐日的 GV。由这些逐日值可得到 GV 的平均值 ( $\mu$ ) 为  $6.55 \times 10^{-7}/\text{s}$ , 标准差 ( $\sigma$ ) 为  $1.04 \times 10^{-6}/\text{s}$ 。GV 的时间序列如图 5 所示,其中蓝点、红点分别表示黑潮脱落冷涡、暖涡时的 GV 值。我们根据 Nan 等(2011a)的分类方法,当 GV 值大于  $\mu + \sigma$  时的黑潮路径,定义为跨越路径,约占 16.8%;当 GV 值在  $\mu \pm \sigma$  之间的黑潮路径,定义为入侵路径,约占 67.5%;当 GV 值

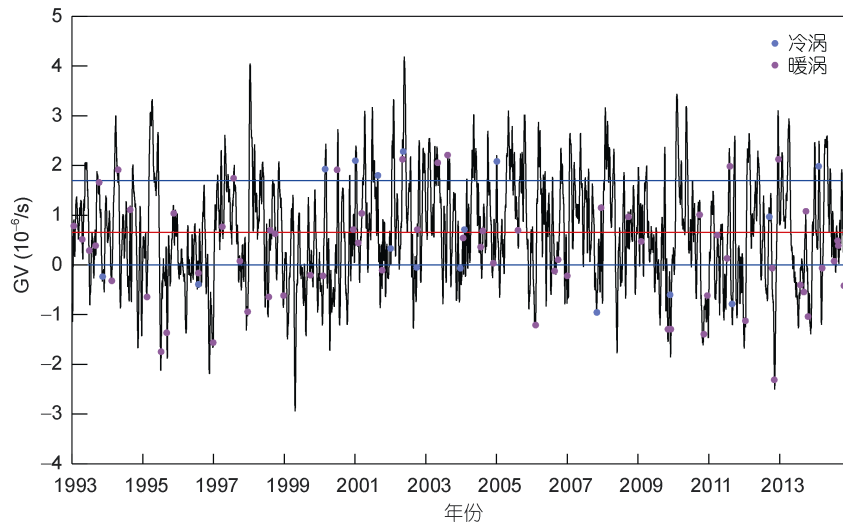


图 5 1993—2014 年 GV 值(单位: /s)的逐日时间序列

Fig.5 Time series of the daily GV values (unit: /s) from 1993 to 2014

注: 红线表示平均值, 蓝线表示平均值  $\pm$  标准差

小于  $\mu-\sigma$  时的黑潮路径, 定义为流套路径, 约占 15.7%。

根据这种分类方法, 本文分别平均得出了吕宋海峡附近海区的 ADT 值和地转流速值, 如图 6 所示。当 GV 大于  $\mu+\sigma$  时, 表示吕宋海峡西侧海域存在较强的气旋式流动, 黑潮沿着吕宋海峡前行, 不易入侵南海, 如图 6a 所示; 当 GV 处于  $\mu\pm\sigma$  之间时, 吕宋海峡西侧的气旋式流动强度减弱, 在台湾岛西南出现了较弱的反气旋流, 黑潮从而形成一个西向型的分支,

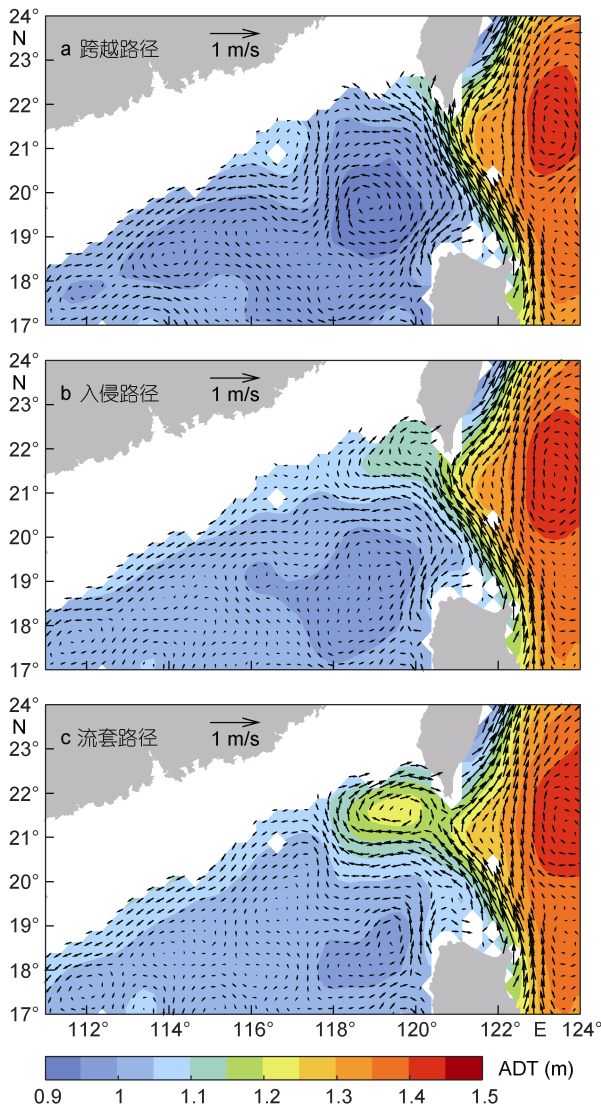


图 6 黑潮在跨越路径(a)、入侵路径(b)和流套路径(c)条件下的平均 ADT 和相应海表地转流速的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the mean ADT and the corresponding surface geostrophic velocities associated with the leaping path (a), the leaking path (b), and the looping path (c) of Kuroshio

注: 填色区为 ADT, 矢量箭头为海表地转流, 白色部分为水深不足 200m 的浅水海域

使得较多的黑潮水可以流入南海(图 6b); 当 GV 值小于  $\mu-\sigma$  时, 台湾岛西南出现了较强的反气旋式流动, 形成流套路径, 如图 6c 所示。

本文统计了不同黑潮路径类型条件下冷涡和暖涡脱落个数的百分比, 如图 7 所示。由图可见, 入侵和跨越路径条件下脱落冷涡所占的比例均为 37.5%, 流套路径条件下占 25.0%; 而对于暖涡, 入侵路径所占比例大幅度增加, 为 60.6%, 其次是流套路径, 为 27.3%, 最后是跨越路径, 仅占 12.1%。可以看出, 入侵路径下脱落的涡旋最多, 因为在该路径下, 更多的黑潮水可以偏离主干流入南海, 从而更有利于脱落的涡旋离开黑潮主干。流套路径较为弯曲, 当反气旋流动足够强时, 流套可以脱离黑潮主干, 从而以暖涡形式入侵南海; 而流套以南区域的黑潮又容易形成气旋式流动的水体, 该水体脱离主干流则会形成冷涡, 因此在该路径条件下仍然有可能脱落冷涡, 虽然数量相对较少。跨越路径条件下, 海峡西侧的强气旋式流动不利于暖涡的形成和脱落, 但是有利于冷涡的形成, 所以脱落的冷涡也较多。从图 5 还可以看出, 有许多脱落涡旋分布在 GV 值等于  $\mu\pm\sigma$ (蓝线)周围, 显示出黑潮路径转换时较容易发生涡旋脱落。

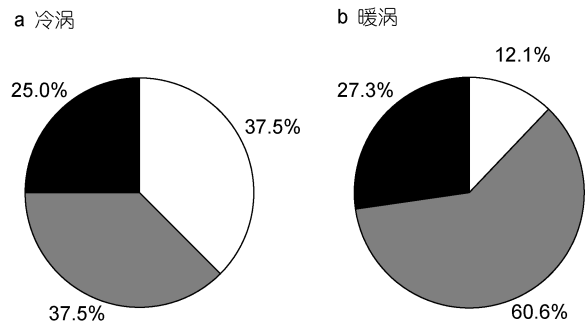


图 7 在跨越路径(白)、入侵路径(灰)和流套路径(黑)条件下黑潮脱落冷涡(a)和暖涡(b)所占的比例

Fig.7 Ratio of the leaping path (white), the leaking path (gray), and the looping path (black) when the Kuroshio shed the cold eddies (a) and warm eddies (b)

### 5 脱落涡旋的迁移速度

涡旋迁移速度是涡旋研究中一个非常受关注的问题, 并且一般认为它与斜压第一模态 Rossby 波的波速有良好的一致性(Chelton *et al*, 2007; Fu, 2009)。Chen 等(2011)统计过南海涡旋的迁移速度, 得到靠近北部陆坡处移速为 5—9cm/s。本文利用各个脱落涡旋在迁移过程中在不同日期其涡旋中心所在的地理位置, 可以计算相应的迁移速度。为了了解迁移速度的

分布情况, 我们取 2 cm/s 为间隔, 统计出移速在 0—2, 2—4, 4—6cm/s 等各个间隔的出现频率(即出现次数除以总数), 如图 8 所示。由图可见, 脱落的冷涡、暖涡迁移速度在 0—10cm/s 的分别有 73.5%和 75.9%, 速度大于 20cm/s 的分别有 6.0%和 3.6%。统计还得到, 脱落冷涡和暖涡的平均迁移速度分别为 8.4cm/s 和 8.3cm/s, 这一结果与 Chen 等(2011)基本一致, 但偏向于其估计值的上界。

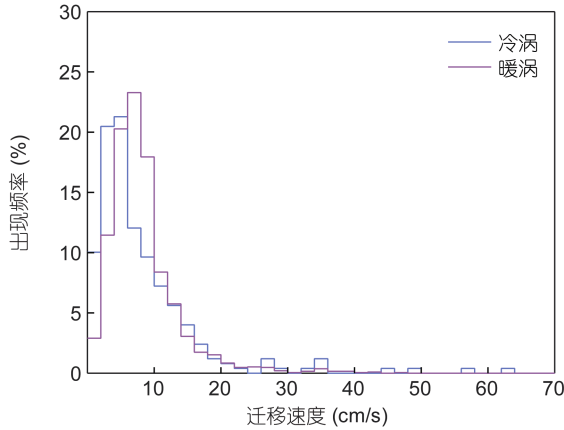


图 8 黑潮脱落涡旋迁移速度的出现频率分布  
Fig.8 Occurrence frequency of the migration speed of the eddies shedding from Kuroshio

为了与斜压第一模态长 Rossby 波波速比较, 我们又计算了涡旋的平均纬向速度, 为-5.8cm/s (正值表示向东, 负值表示向西, 后为了省略负号, 将向西的纬向速度称为西行速度)。

Rossby 波波速可以利用 WOA13 年平均温盐剖面气候数据得到。我们计算了吕宋海峡海域的位势密度( $\rho_\theta$ )剖面以及平均密度( $\rho_0$ )值, 从而可得浮力频率 ( $N$ )剖面:

$$N(z) = \left(-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_\theta}{dz}\right)^{1/2} \quad (3)$$

相应的斜压第一模态长 Rossby 波的纬向波速 ( $c_{R1}$ )可用下式计算:

$$c_{R1} = -\beta \frac{c_1^2}{f^2} \quad (4)$$

式中,  $c_1 \approx \frac{1}{\pi} \int_{-D}^0 N(z) dz$ ,  $\beta = \partial f / \partial y = a^{-1} \partial f / \partial \varphi = 2\Omega a^{-1} \cos \varphi$ ,  $D$  为水深,  $\Omega$  为地球自转角速度,  $a$  为地球半径,  $\varphi$  为纬度。

图 9 为斜压第一模态长 Rossby 波年平均纬向波速  $c_{R1}$  在吕宋海峡及附近海域的空间分布, 这个结果与 Cai 等(2008)的计算结果相符。本文又根据脱落冷涡、暖涡在迁移过程中的不同地理位置, 线性插值得到相应位置的  $c_{R1}$ 。将涡旋在所有各个位置上的  $c_{R1}$  值进行平均, 得到平均值为-4.4cm/s。由此可见, 涡旋西行速度要略大于斜压第一模态长 Rossby 波向西行波速。

Fu(2009)的研究指出, 涡旋的迁移路径与大尺度流场密切相关。考虑到南海东北部涡旋的垂直尺度大约可达 1000m(李立等, 1997), 本文又利用 SODA2.2.4 数据集的 0—1000m 速度剖面数据, 计算了各个时刻的

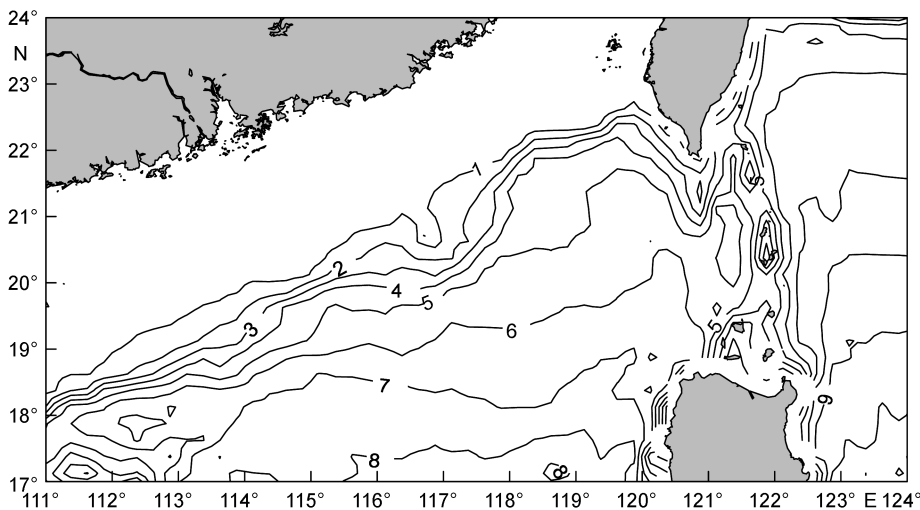


图 9 吕宋海峡及附近斜压第一模态长 Rossby 波年平均纬向波速  $c_{R1}$ (单位: cm/s)的空间分布  
Fig. 9 Spatial distribution of the annual mean zonal phase speed  $c_{R1}$  of the first baroclinic Rossby wave in the Luzon Strait and neighboring area (unit: cm/s)  
注: 等值线标注时省略了负号

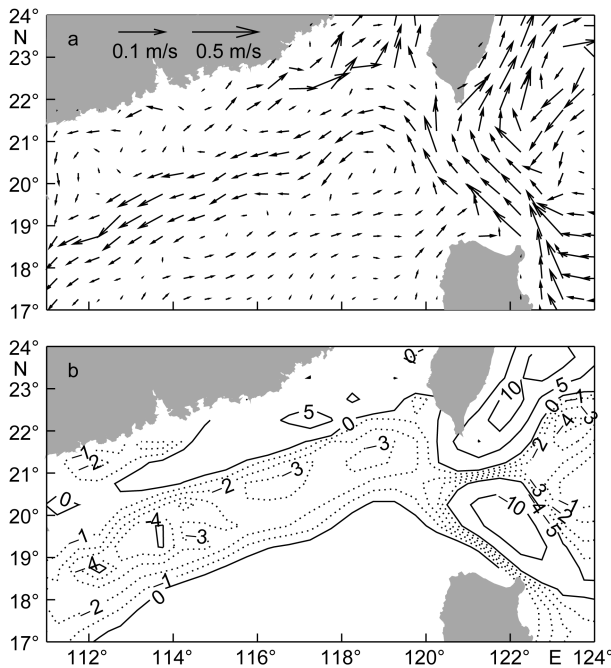


图 10 吕宋海峡及附近海域年平均 0—1000m 垂向平均流  
流矢分布(a)和纬向速度分布(b)

Fig.10 Spatial distribution of the annual mean velocity vectors  
(a) and zonal speed (b), vertically averaged from 0 to 1000  
meters in the Luzon Strait and neighboring area

垂向平均流场,其年平均的流矢分布和纬向速度的等值线分布见图 10。由于黑潮的流速比南海内部流速大得多,因此在图 10a 中,将流速大小不超过和超过 0.1m/s 的流矢分别用了细线和粗线矢量箭头表示。可以看出从吕宋海峡西侧沿南海北部陆坡有一支较强的西南向海流,其流向与大部分脱落涡旋迁移方向一致。因此,本文进一步计算了脱落涡旋在迁移过程中的不同时间和相应地理位置的 0—1000m 垂向平均纬向迁移速度,得到平流西行速度的平均值为 1.9cm/s。如果把西向平流和斜压第一模态长 Rossby 波波速简单相加,则得到西向速度平均值为 6.3cm/s,这个数值与观测到的涡旋迁移的平均西向分量 5.8cm/s 比较接近。当然,涡旋迁移是一个非常复杂的动力学过程,实际的情况不只是一个单纯的移动过程,特别涡旋在迁移时会与周围水体和流场相互作用而产生演变。因而上述的一致性仅是一个相当粗糙的近似。

## 6 结论

本文对吕宋海峡附近海域黑潮在不同路径下脱落并进入南海的涡旋进行了统计分析,得到以下结论:

(1) 1993 年 1 月—2014 年 12 月共脱落冷涡 16 个,

暖涡 66 个,脱落位置均分布在 117.5°—120.5°E, 18°—22.5°E 区域内。其中 3 个冷涡在黑潮控制区生成,其余 13 个在黑潮西侧边缘生成;大部分暖涡均在黑潮控制区生成,仅 19 个暖涡在黑潮西侧边缘生成。涡旋脱落后主要向西迁移,遇到陆坡后主要向西偏南迁移。

(2) 利用变型 WA 方法和追踪法对脱落的涡旋进行识别与追踪,并统计得到冷涡、暖涡脱落时的平均半径分别为 72.2km、83.2km,平均振幅分别为 11.8cm、11.4cm,平均生命周期分别为 15.7d 和 29.2d,平均移动距离分别为 118.7km、218.1km。

(3) 涡旋的脱落和季节有关,冷涡主要在冬季脱落,暖涡则主要在秋季脱落,春季,冷涡和暖涡都鲜有脱落。冷涡脱落并不是每年都能发生,平均每年脱落 0.7 个;暖涡脱落则每年都发生,平均每年脱落 3 个。

(4) 当黑潮为入侵路径时,最容易脱落涡旋,其次是反气旋式流套型路径。当黑潮路径发生转换时,也容易脱落涡旋。

(5) 脱落涡旋的平均迁移速度分别为 8.4cm/s 和 8.3cm/s,涡旋迁移速度的西分量平均为 5.8cm/s。这个数值与斜压第一模态长 Rossby 波平均波速和大尺度环流 0—1000m 垂向平均西向流速平均值之和相近。

## 参 考 文 献

- 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉, 2005. 南海中尺度涡研究进展. 地球科学进展, 20(8): 882—886
- 孙湘平, 2006. 若干海洋水文现象的记述. 见: 孙湘平主编. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 356
- 李立, 苏纪兰, 许建平, 1997. 南海的黑潮分离流环. 热带海洋, 16(2): 42—57
- 李薇, 刘秦玉, 杨海军, 1998. 吕宋海峡海洋环流的基本特征. 青岛海洋大学学报, 28(3): 345—352
- 杨昆, 施平, 王东晓等, 2000. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究. 海洋学报, 22(1): 27—34
- 祖永灿, 方越, 高晓倩等, 2016. 北太平洋中尺度涡季节和年际变化的统计分析. 海洋科学进展, 34(2): 197—206
- 郭景松, 袁业立, 熊学军等, 2007. 吕宋海峡两侧中尺度涡统计. 海洋科学进展, 25(2): 139—148
- 海洋图集编委会, 2006. 南海海洋图集: 水文. 北京: 海洋出版社, 13—97
- Cai S Q, Long X M, Wu R H *et al*, 2008. Geographical and monthly variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation in the South China Sea. *Journal of Marine Systems*, 74(1—2): 711—720
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M *et al*, 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15): L15606
- Chen G X, Hou Y J, Chu X Q, 2011. Mesoscale eddies in the South China Sea: mean properties, spatiotemporal variability,



- and impact on thermohaline structure. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C6): C06018
- 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
- Fu L L, 2009. Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C11): C11017
- Jia Y L, Liu Q Y, 2004. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon strait. *Journal of Oceanography*, 60(6): 1063—1069
- Lee D K, Niiler P, 2010. Surface circulation in the southwestern Japan/East Sea as observed from drifters and sea surface height. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(10): 1222—1232
- Li L, Nowlin Jr W D, Su J L, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(9): 1469—1482
- Locarnini R A, Mishonov A V, Antonov J I *et al*, 2013. World ocean atlas 2013, Volume 1: temperature. In: Levitus S, Mishonov A. NOAA Atlas NESDIS 73. National Oceanic and Atmospheric Administration, Department of Commerce: 1—40
- Nan F, Xue H J, Chai F *et al*, 2011a. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea. *Ocean Dynamics*, 61(9): 1291—1304
- Nan F, Xue H J, Xiu P *et al*, 2011b. Oceanic eddy formation and propagation southwest of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12): C12045
- Nan F, Xue H J, Yu F, 2015. Kuroshio intrusion into the South China Sea: a review. *Progress in Oceanography*, 137: 314—333
- Nencioli F, Dong C M, Dickey T *et al*, 2010. 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. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(3): 564—579
- Pichevin T, Nof D, 1997. The momentum imbalance paradox. *Tellus A*, 49(2): 298—319
- Rio M H, Guinehut S, Larnicol G, 2011. New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7): C07018
- Rudnick D L, Jan S, Centurioni L *et al*, 2011. Seasonal and mesoscale variability of the Kuroshio near its origin. *Oceanography*, 24(4): 52—63
- Souza J M A C, de Boyer Montégut C, Le Traon P Y, 2011. Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean. *Ocean Science*, 7(3): 317—334
- Wang Q, Zeng L L, Zhou W D *et al*, 2015. Mesoscale eddies cases study at Xisha waters in the South China Sea in 2009/2010. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(1): 517—532
- Wang X D, Li W, Qi Y Q *et al*, 2012. Heat, salt and volume transports by eddies in the vicinity of the Luzon Strait. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 61: 21—33
- Yang Q X, Tian J W, Zhao W, 2011. Observation of material fluxes through the Luzon Strait. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(1): 26—32
- Yuan D L, Han W Q, Hu D X, 2006. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11): C11007
- Yuan D L, Han W Q, Hu D X, 2007. Anti-cyclonic eddies northwest of Luzon in summer-fall observed by satellite altimeters. *Geophysical Research Letters*, 34(13): L13610
- Zhang Z G, Wang W, Qiu B, 2014. Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science*, 345(6194): 322—324

## THE CHARACTERISTICS OF EDDIES SHEDDING FROM KUROSHIO IN THE LUZON STRAIT

WANG Ding-Qi<sup>1</sup>, FANG Guo-Hong<sup>1,2</sup>, QIU Ting<sup>3</sup>

(1. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*  
2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China;* 3. *College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract** The characteristics of eddy shed from Kuroshio in the Luzon Strait area and entering into the South China Sea were studied in statistics. Three datasets were used, i.e., 22-year (1993—2014) of global gridded multi-satellite merged sea level anomaly and absolute dynamic topography products in delay time provided by Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO), the climatological annual mean temperature and salinity profiles of World Ocean Atlas 2013 (WOA13) data provided by National Oceanographic Data Center (NODC) and the monthly SODA2.2.4 data set from 1993 to 2010. As compared to cold eddies shed (CEs) in this area, the warm eddies shed (WEs) are much greater in number. The most CEs are formed at the western edge of the Kuroshio, while the most WEs are formed within the Kuroshio-controlled areas. The average radius and average amplitude of CEs and WEs are similar, but the average lifetime and average migration distance of CEs are almost a half of those of WEs. WEs take place in all seasons but mostly in autumn, while CEs do mostly in winter. In addition, the amount of the eddy shedding is related to the path type of Kuroshio at the shedding time. The average westward migration speed of eddy shed is 5.8cm/s, which is close to the sum of the mean baroclinic first phase speed of Rossby wave and that of the mean west component of the large-scale circulation currents.

**Key words** Luzon Strait; Kuroshio; shedding eddy; South China Sea