

# 入侵南海的黑潮流套及其脱落涡旋\*

郭景松<sup>1,2</sup> 冯颖<sup>2</sup> 袁业立<sup>2</sup> 郭炳火<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

**提要** 将 2003 年、2004 年和 2005 年秋、冬季在吕宋海峡投放的卫星跟踪漂流浮标(Argos)资料用于分析黑潮通过吕宋海峡时的流型。结果表明, 秋、冬季黑潮表层流存在 3 种类型: 北向型、西向型和流套-涡旋型, 后两种入侵南海。统计分析指出吕宋海峡表层流进入流套-涡旋型路径的概率为 0.23, 黑潮流套的纬向尺度最大达 210km, 仅发生在恒春海脊西侧的台湾岛西南海域。黑潮流套仅是黑潮流分离的一部分, 而非黑潮整体蛇形入侵南海, 这与墨西哥湾的蛇形流不一样。在流套内西向流速大于东向流速, 这可能是流套西向发展的原因之一, 黑潮流套常可演变成脱落涡旋, 也可能就地消亡。脱落涡旋以约 10cm/s 速度西移。

**关键词** 漂流浮标轨迹; 黑潮流套; 脱落涡旋; 统计分析; 吕宋海峡

**中图分类号** P731.27

吕宋海峡位于台湾岛和吕宋岛之间, 是南海连接西太平洋的一个重要通道。源于北赤道流的黑潮沿吕宋岛东岸北上, 并于巴布延水道、巴林塘水道进入吕宋海峡, 然后在台湾南端附近流出, 继续沿台湾岛东海岸北上(Nitani, 1972; Qiu *et al*, 1996)。在吕宋海峡, 黑潮的属性是复杂的, 其主流在通过海峡时略向西弯曲, 并且常出现黑潮水以不同形式向南海入侵。Hu 等(2000)、Caruso 等(2006)把黑潮入侵南海归纳为如下三类: (1) 黑潮分支。早期的观测注意到吕宋海峡常有一个高温水舌离开黑潮向西进入南海, 进而从稳态的观点出发, 将之解释为黑潮分支(管秉贤, 1978; 仇德忠等, 1984)。近几年来, 有许多调查研究进一步证实了黑潮分支的存在(Ho *et al*, 2004a, b; Centurioni *et al*, 2004; Caruso *et al*, 2006; Yuan *et al*, 2006; Hu *et al*, 2008)。(2) 黑潮流套。一些学者根据水文资料计算海面动力高度的结果发现黑潮路径弯曲(或迂回)入南海, 而被称之为“loop current”(Nitani, 1972; 朱祖佑, 1972), 李立等(1989)起中文名为“黑潮流套”。(3) 涡旋(或流环)。Wang 等(1987)、Li 等(1998)报道了在南海东北部海域存在反气旋流环(涡旋), 并根据流环的温盐特征和地转流速度计算结果, 认为

是从黑潮脱离出来的脱落涡旋。但是, 1992 年冬、夏季和 1998 年春、夏季的水文调查表明, 西北太平洋水入侵南海仅限于巴士海峡附近(许建平等, 1996; 苏纪兰等, 1999)。上述结论都是根据海洋大面观测资料得出的, 由于这类资料存在着明显的时空局限性, Su(2003)在评述文章中认为: 迄今为止可获得的水文资料并不能支持黑潮水入侵南海, 无论是以一支流或主要以涡旋的方式。

近十几年来, 许多学者利用卫星高度计资料计算海平面距平(SLA)资料, 分析了南海东北部海域的中尺度涡旋特征及其黑潮的关系(Ho *et al*, 2004; Wang *et al*, 2000; Hu *et al*, 2001; 李燕初等, 2002; Wang *et al*, 2003; Li *et al*, 2007; 郭景松等, 2007), 但是在这些论文中很少见到有关“黑潮流套”的描述。Jia 等(2004)将数值模式的长期平均值叠加 SLA 分析了中尺度涡旋从黑潮剥离出现象, Yuan 等(2006)利用 SLA 融合平均动力高度得出的绝对动力地形, 分析了黑潮的反气旋入侵, 认为黑潮流套仅偶尔被观测到。有关黑潮流套和脱落涡旋, 已有不少理论和数值模拟的研究(Metzger *et al*, 2001; Xue *et al*, 2004; Hsueh *et al*, 2004), 但机制研究比较少见。其中较重

\* 国家自然科学基金项目资助, 41206025 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务费, 2012 年项目“中尺度涡旋在西北太平洋与南海水交换过程中的作用及其机制”资助。郭景松, 副研究员, E-mail: gjings23@fio.org.cn

收稿日期: 2011-12-12, 收修改稿日期: 2012-03-29

要的有 Sheremet(2001)采用数值分析方法所做的研究,得到的结果表明西边流在边界豁口处存在多种流态,并指出流态间转换时存在迟滞现象。之后 Sheremet等(2007)在圆形水槽模拟中验证了数值分析的结果。Yuan 等(2011)进一步研究了中尺度涡旋在入侵流态转换到跨隙流态时的作用,认为只有反气旋式中尺度涡旋才有可能诱发黑潮流由跨隙态向入侵流态转变。然而,把吕宋海峡视为一个简单豁口的理论或数值的模拟研究,其得到的结果都是黑潮“豁口南端进、北端出,中部突入南海”,这与海洋观测的结果(图 5)有着明显差别。Metzger 等(2001)的数值模拟研究中采用实际地形,其结果表明,当水平计算网格为  $(1/8)^{\circ} \times (1/8)^{\circ}$  时,黑潮以流套(loop current)方式入侵到南海内部;而当水平计算网格为  $(1/16)^{\circ} \times (1/16)^{\circ}$  时,黑潮通过吕宋海峡时,仅出现轻微的弯曲,其主流被限制在吕宋海峡内。

显然,迄今人们对黑潮流套及其脱落涡旋的了解仍然十分不足,为此在本研究工作中,作者将利用在吕宋海峡投放的 Argos 浮标资料,进一步分析这种海洋现象。文中的第 2 节首先分析吕宋海峡表层流的基本类型及其统计特征,第 3 节描述在 2003—2005 年秋冬季观测到的黑潮流套及其脱落涡旋事件,第 4 节为结果与讨论。

## 1 资料

本研究工作利用 2003 年、2004 年和 2005 年 9 月下旬—1 月上旬在吕宋海峡投放 145 个 Argos 卫星跟踪浮标的轨迹资料,进行了以下两种处理:(1)根据浮标轨迹的特征进行分类,并绘制相关的轨迹图;(2)利用 6h 间隔的插值轨迹资料,计算关键轨迹段浮标的日平均速度。为探讨黑潮流套的形成和演变过程,卫星高度计 SSHA 资料也被利用。吕宋海峡指台湾岛南端至吕宋北岸之间的水域,它的东边界为吕宋岛弧,但西边界位置  $K$  不明确。Guo 等(2012)为界定黑潮是否入侵南海,根据 Argos 卫星跟踪浮标在暖半年随黑潮通过吕宋海峡时的轨迹最西可达  $120.4^{\circ}E$  的事实,把它视为吕宋海峡的西边界(图 1)。

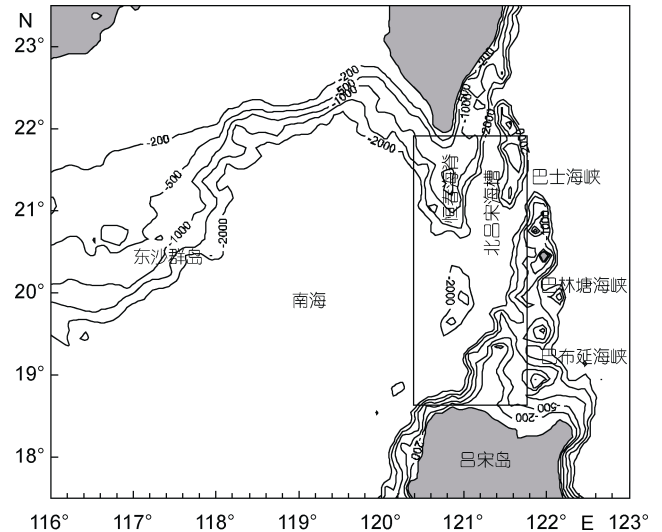


图 1 吕宋海峡及其邻近海域地形

Fig.1 Bottom topography map of the Luzon Strait and its adjacent area

## 2 海区的基本流型及其统计特征

### 2.1 基本流型

2003 年 10 月 13 日—2004 年 1 月 5 日, 2004 年 11 月 10 日—12 月 5 日, 以及 2005 年 9 月 29 日—12 月 31 日, 分别在吕宋海峡共投放了 145 个 Argos 浮标。其中在吕宋海峡西南角投放的 39 个 Argos 浮标, 它们的投放点离开了通常黑潮弧形路径的可能范围(在图 2a、b 中用间断线分出), 一般不能表示黑潮水质点的运动, 因而不考虑。余下的 106 个 Argos 浮

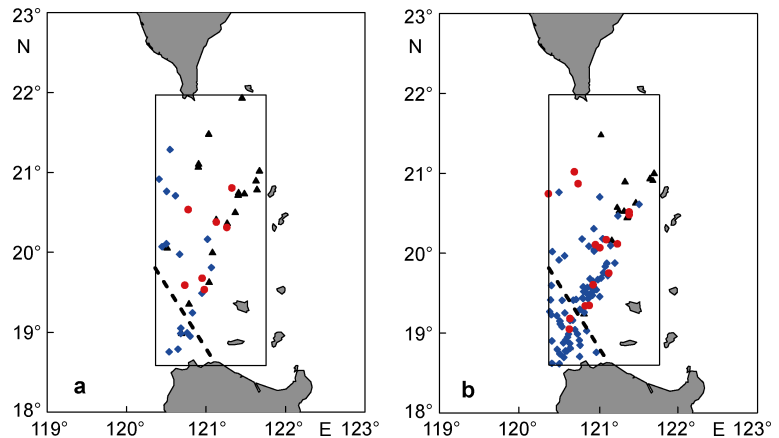


图 2 2003 年、2004 年和 2005 年秋、冬季在吕宋海峡投放的 Argos 浮标位置及其运动轨迹类型

Fig.2 Locations of Argos drifters deployed at the Luzon Strait in autumn and winter of 2003, 2004 and 2005 and their moving trajectory types  
注: a 为 9 月下旬—11 月上旬投放; b 为 11 月中旬—1 月上旬投放。黑色为北向型, 蓝色为西向型, 红色为流套-涡旋型

标, 根据浮标的移动轨迹将其归纳为 3 种类型, 并在图 2 中给出浮标的投放位置及其移动轨迹的类型。第 1 类为北向型, 浮标随黑潮向北进入台湾以东海域(如图 5 中 ID41113 浮标轨迹), 它们的移动轨迹直接指示出黑潮表面流的特征; 第 2 类为西向型, 浮标都在 21.0°N 以南通过 120.4°E 线进入南海, 流向西北, 大体在 119°E 附近转向西, 抵达粤东陆架坡后, 转向西南(如图 5 中 ID49712、49702 浮标轨迹); 第 3 类为流套-涡旋型(loop current-shed eddy), 浮标进入台湾西南海域后, 沿蛇形的路径移动, 最终返回吕宋海峡, 继续随黑潮主流向北(如图 5 中 ID49725、49679 浮标轨迹)。由黑潮流套演变而成的反气旋涡即脱落涡旋(如图 5 中 ID49698 浮标轨迹)也被归入这一类型中, 因此称流套-涡旋型。

本文主要关注的第 3 类型, 其黑潮流套的特征明显而稳定, 形态都是非对称的。此类 Argos 浮标绝大多数都是从吕宋海峡中部(20°—21°N)进入南海, 而非从吕宋海峡南部进入, 并在台湾西南海域大致以 21°40'N、120°00'E 为中心做顺时针方向运动。即首先向西或西北移动, 范围不超过 118°20'E; 再转向北, 范围不超过 22°50'E; 然后转向东, 随后贴近台湾岛西南海岸返回吕宋海峡。这与将吕宋海峡视为一个简单豁口所建立的理论或数值模拟研究结果有着明显的差别, 后者的结果都是黑潮“豁口南端进、北端出, 中部突入南海”, 出入的流线几乎对称。冬季在台湾岛西南海域 Argos 浮标轨迹为反时针方向旋转是十分罕见的, 在纳入统计的浮标中仅有一例, 而且仅其轨迹出现在澎湖水道南侧一个范围不大的区域内(图 5)。

## 2.2 统计特征

作者将在吕宋海峡投放的 106 个 Argos 浮标按投

放的时间划分两个时段进行统计, 9 月下旬至 11 月上旬为秋季, 11 月中旬至 1 月上旬为冬季。然后按上述三种类型分别进行统计, 结果列于表 1, 并标识在图 2a 和 2b 中。统计结果表明: (1) 9 月下旬—11 月上旬, 北向型和西向型轨迹的出现概率分别为 0.46 和 0.33; 流套-涡旋型轨迹的出现概率为 0.21。(2) 11 月中旬—1 月上旬, 西向型出现的概率增大到 0.57, 流套-涡旋型为 0.25, 而北向型减少到 0.18。从图 2b 中可以看出, 北向型浮标几乎都出现在吕宋海峡的东北部(121.2°E 以东, 20.4°N 以北)并独占了这一区域。由此可见, 11 月中旬—1 月上旬北向流仅从吕宋海峡东北部通过, 西向流已成为吕宋海峡和南海东北部海域的基本流态, 这与 Yuan 等(2006)关于冬季表层黑潮以直接的路径入侵南海占支配地位的结论一致。此外, 冬半年(9 月下旬—来年 1 月)黑潮流套-涡旋型的出现概率平均达到 0.23, 显然也是一种重要的流态。

## 3 黑潮流套及涡旋事件

图 3、图 4、图 5 分别是 2003 年、2004 年、2005 年秋、冬季由 Argos 浮标轨迹显示出的几次黑潮流套及涡旋事件, 作者还在图中勾绘了与流套-涡旋事件同时存在的西向流型和北向流型浮标中的少数几条代表性轨迹线(以黑色线表示)。为进一步了解它们的演变过程, 还利用 AVIVO 数据库中的海平面高度距平(SSHa)绘制 21.5°N(或 21.25°N)纬线上的海平面高度变化(图 6)。下面分别对观测到的黑潮流套及涡旋事件进行具体描述:

### 3.1 2003 年秋、冬季

从图 3a、3b 和图 6a 可知, 2003—2004 年秋、冬季的出现 2 次黑潮流套及涡旋事件, 分别发生于 10

表 1 在吕宋海峡内投放 Argos 浮标运动轨迹类型统计表  
Tab.1 Statistics of the moving trajectory types of Argos drifters deployed in the LS

投放期间		投放数量	轨迹类型		
月、旬	年份		北向型	西向型	流套-涡旋型
9 月下旬—	2003	12	4	4	4
11 月上旬	2004	0	0	0	0
	2005	21	11	7	3
	合计\概率	33	15\0.46	11\0.33	7\0.21
11 月中旬—	2003	27	4	15	8
1 月上旬	2004	15	0	11	4
	2005	31	9	16	6
	合计\概率	73	13\0.18	42\0.57	18\0.25

注: 浮标投放时间为: 2003 年 10 月 13 日—2004 年 1 月 5 日、2004 年 11 月 10 日—12 月 5 日和 2005 年 9 月 29 日—12 月 31 日

月下旬—11月下旬、11月下旬—翌年2月下旬。分别描述如下:

在第一次事件中(图 3a)可以看到: 首先 ID41250 和 ID41249 浮标于 10 月下旬在  $119.8^{\circ}\text{E}$ — $120.4^{\circ}\text{E}$ ,  $21.6^{\circ}$ — $22.4^{\circ}\text{N}$  的范围内各走完了一个闭合环路, 中心分别位于  $120.15^{\circ}\text{E}$ ,  $21.85^{\circ}\text{N}$  和  $120.1^{\circ}\text{E}$ ,  $22.05^{\circ}\text{N}$ , 可见那里出现一个小反气旋涡旋, 其平均速度分别为  $36.8\text{cm/s}$  和  $39.0\text{cm/s}$ 。紧接着在 11 月上旬 ID41249 浮标完成一个不完全闭合的环路, 平均速度为  $53.8\text{cm/s}$ , 中心西移到  $119.5^{\circ}\text{E}$ ,  $21.9^{\circ}\text{N}$ , 其轨迹的区

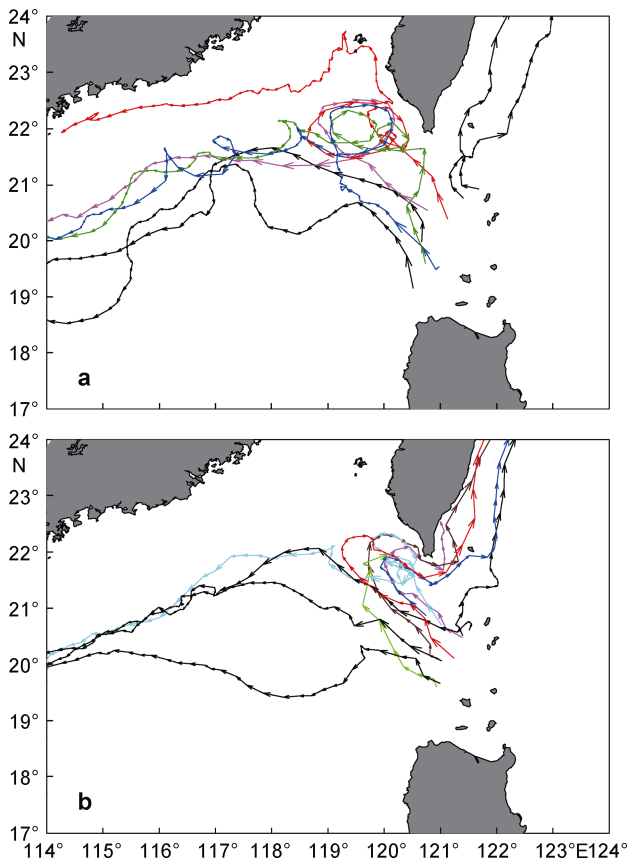


图 3 2003—2004 年秋、冬季黑潮流套-涡旋(KLC-SE)事件期间 Argos 浮标移动轨迹

Fig.3 Drifter moving trajectory maps in the period of the Kuroshio Loop current-shed eddy (KLC-SE) events in autumn and winter of 2003—2004

注: 图中 Argos 浮标的编号、投放时间(日/月)以及移动轨迹(用颜色线表示)分别为:

- a. 在第一次事件中, ID41249, 20.75/10(红线); ID41481, 13.50/10(蓝线); ID41250, 20.75/10(绿线); ID41150, 28.00/10(洋红线)。b. 在第二次事件中, ID41127, 05.25/01(绿线); ID41167, 15.75/12(红线); ID41139, 18.25/01(青线); ID41102, 24.75/11(洋红线); ID41120, 29.75/12(咖啡线); ID41116, 03.50/12(蓝线)

域范围迅速扩大到  $118.64^{\circ}\text{E}$ — $120.15^{\circ}\text{E}$ ,  $21.45^{\circ}$ — $22.46^{\circ}\text{N}$ 。在此期间, ID41250、ID41150 和 ID41481 浮标在同一范围内各走完了一个闭合环路, 中心在  $119.5^{\circ}\text{E}$ ,  $22.0^{\circ}\text{N}$  附近, 平均速度分别为  $46.3\text{cm/s}$ 、 $37.4\text{cm/s}$  和  $33.6\text{cm/s}$ , 是涡旋强盛区。11 月 8 日以后 4 个浮标西移轨迹差别较大, 其中浮标 ID41250 于 11 月 8 日、ID41481 于 11 月 9 日先后越过  $119^{\circ}\text{E}$  纬度线, 以螺距较大的螺旋线型路线西移, 可见涡旋除自身旋转外还有整体西移。作者在这里用螺旋线闭合部分的平均位置和平均时刻来计算涡旋的西移速度, 其结果分别为  $9.1\text{cm/s}$  和  $10.3\text{cm/s}$ ; 螺旋线形态于 11 月下旬消逝在陆架坡附近, 这意味着漂流浮标已脱离了涡旋或者涡旋已消亡。然而浮标 ID41150 和 ID41249 于 11 月 11 日离开强盛涡旋区后, 其中前者没有跟上西移的涡旋, 其轨迹较为平直; 后者西移轨迹偏北, 远离了西移的涡旋。从图 6a 中可以看到 10 月下旬—11 月上旬出现一个 SLA 高值区(E3-1), 与 Argos 浮标观测的结果一致。由此可见, 这次观测的涡旋事件, 包含了一个反气旋涡旋发展、西移的过程: 即 10 月下旬在  $119.8^{\circ}\text{E}$ — $120.4^{\circ}\text{E}$ ,  $21.6^{\circ}$ — $22.4^{\circ}\text{N}$  的范围出现一个小的反气旋涡旋; 11 月上旬涡旋迅速加强, 涡旋中心西移到  $119.5^{\circ}\text{E}$ , 范围迅速扩大到  $118.64^{\circ}\text{E}$ — $120.15^{\circ}\text{E}$ ,  $21.45^{\circ}$ — $22.46^{\circ}\text{N}$ ; 11 月中旬—下旬涡旋大约以  $10\text{cm/s}$  的速度继续西移至陆架坡附近。

在第二次事件中, 完成流套型路程的 Argos 浮标有 ID41102、41116、41120、41167 等 4 个, 还有 ID41127 走完半程后丢失(图 3b)。ID41102 于 11 月 28 日—12 月 1 日最早完成流套型路程, 用时 3.1d, 流套范围也最小, 西达  $120.0^{\circ}\text{E}$ ; ID41167 于 12 月 18—29 日最晚完成流套型路程, 用时 12d, 范围也最大, 西达  $119.2^{\circ}\text{E}$ 。显示出黑潮流套向西发展, 且范围扩大。对于走完全程的 4 个 Argos 浮标西行时平均速度  $44.4\text{cm/s}$ , 东返时平均速度  $30.5\text{cm/s}$ , 可见西行速度明显大于东返速度。由此不难推知: 流套紧贴台湾西南海岸, 边界的粘滞作用将使东返速度降低, 似乎西行和东返速度的不对称性就是黑潮流套向西发展的原因之一。此外, 在流套存在的期间, ID41139 浮标先后流套区内走完了一大两小闭合环路, 其中大的闭合环路长轴  $48\text{km}$ 、短轴  $18\text{km}$ 。似乎 ID41139 浮标完成的闭合环路所指示的是流套中心区的环流, 并非脱落涡旋。紧接着 1 月中旬 ID41127 和 ID41173 浮标轨迹也出现流套型路程。尽管 ID41173 浮标在  $19.57^{\circ}\text{N}$  进入南海, 但流套中心仍然位于台湾西南海

区。从图 6a 中的 SLA 高值区(E3-2)可以看出: 上述由 Argos 浮标轨迹所指示的是同一流套事件, 即这一事件发生于 11 月下旬, 直至 1 月下旬都停留在 119.5°E 以东的区域, 但其 SLA 明显变弱, 2 月上旬这一弱的 SLA 区开始西移, 2 月下旬在粤东陆架坡处并入另一涡旋中。

### 3.2 2004 年秋、冬季

一个典型的流套及其脱落演变成涡旋的事件发生于 2004 年 11 月中旬, 2005 年 1 月中旬结束。从图 6b 可以看到, 在 21.25°N 纬线上的 119.8°—121.0°E 的范围里, 11 月上旬开始出现海平面快速升高, 随之范围也扩大。从图 4 可以看到, 11 月中旬 Argos 浮标开始进入流套型轨道, ID49725 浮标于 11 月 17 日—12 月 2 日、ID49679 浮标于 11 月 15 日—12 月 1 日大致在同一时段完成流套型路程, 平均速度 29.7cm/s; 其轨迹几乎重叠, 最西达 119.2°E; 流套中心位于 120.1°E、21.25°N, 与图 6b 中显示的海平面高值点位置一致。由 ID49698 浮标的轨迹得知: 它于 12 月 2—5 日向南, 后转向西, 这表明了流套已脱落, 并演变成反气旋涡旋。此后, 它以螺旋形的轨线向西移动, 共走完了 7 个闭合环路, 最终于 1 月 7—13 日停留在东沙群岛以北海域; 1 月 14 日绕过东沙群岛, 之后沿广东陆架坡以较为平直的路径向西南运动, 这意味着涡旋已消亡或者漂流浮标已离开了涡旋区。

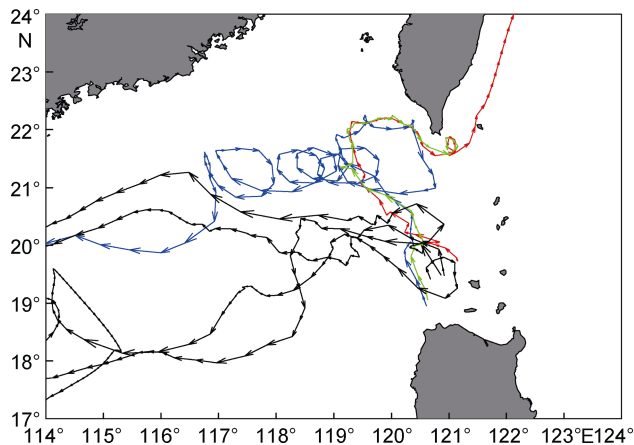


图 4 2004—2005 年冬季(11 月下旬—1 月中旬)流套-涡旋事件中 Argos 浮标轨迹

Fig.4 Drifter moving trajectory maps in the period of the Kuroshio Loop current-shed eddy (KLC-SE) events in winter (last of November—middle of January) of 2004—2005

注: 图中 Argos 浮标的编号、投放时间(日/月)以及移动轨迹(用颜色线表示)分别为: ID49679, 10.50/11(红线); ID49698, 10.75/11(蓝线); ID49725, 10.75/11(绿线)

ID49698 浮标的第 1 个(No.1)环路最大(椭圆长轴 200km、短轴 116km), 行程用时 17d, 平均速度 39.3cm/s。No.2—No.6 环路明显变小, 椭圆大小(长轴 116km、短轴 80km)—(长轴 63km、短轴 47km); 行程用时 4.0—7.5d, 平均速度 48.0—56.5cm/s, 涡旋旋转的速度明显加快。此外, 从图 6b 的 SLA 高值区(E4)可以看到对应于涡旋中心位置上海平面也明显升高, 体现出流套脱落后, 加强了表层水体向中心辐聚。最后一个(No.7)环路被限制在陆坡处, 其轨迹椭圆被高度压扁, 椭圆长轴(南北向)49km、短轴仅 3km, 行程用时 6d, 平均速度 25.1cm/s。闭合环路的西移速度平均为 9.6cm/s, 它可视为脱落涡旋西移速度。由 ID49641 浮标轨迹显示出, 1 月中旬又有一流套事件发生(文中未给出图)。

### 3.3 2005 年秋、冬季

图 5 中的 5 个浮标轨迹和图 6c 的 SLA 图像表明: 一次流套事件于 2005 年 11 月下旬开始出现, 2006 年 1 月中旬结束。其中 ID56694、56644、ID56642 分别于 11 月 25 日—12 月 10 日、11 月 19 日—12 月 2 日、12 月 18 日—29 日都完成一个典型流套行程; 轨迹最西分别到达 118.6°E、118.7°E、118.5°E、流套中心位于 119.8°E、21.5°N; 这 3 个浮标的平均移动速度分别 36.8cm/s、45.3cm/s、47.5cm/s; 总的平均速度 43.2cm/s, 其中西行的平均速度 52.7cm/s, 东行 37.2cm/s, 西行

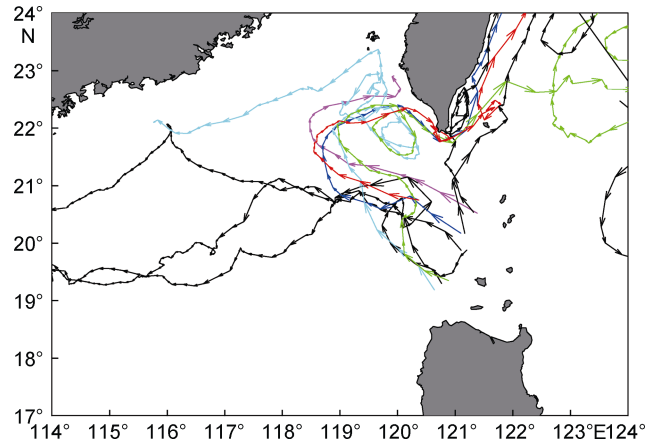


图 5 2005—2006 年秋、冬季(11 月下旬—1 月中旬)Argos 浮标轨迹

Fig.5 Drifter moving trajectory maps in the period of the Kuroshio Loop current-shed eddy (KLC-SE) events in autumn and winter (last of November—middle of January) of 2005—2006

注: 图中 Argos 浮标号、投放时间(日/月)和移动轨迹(用颜色线表示)分别为: ID56671, 24.50/12(青线); ID56685, 17.25/12(绿线); ID56694, 25.75/11(红线); ID56644, 18.50/11(蓝线); ID56642, 17.00/12(洋红线)



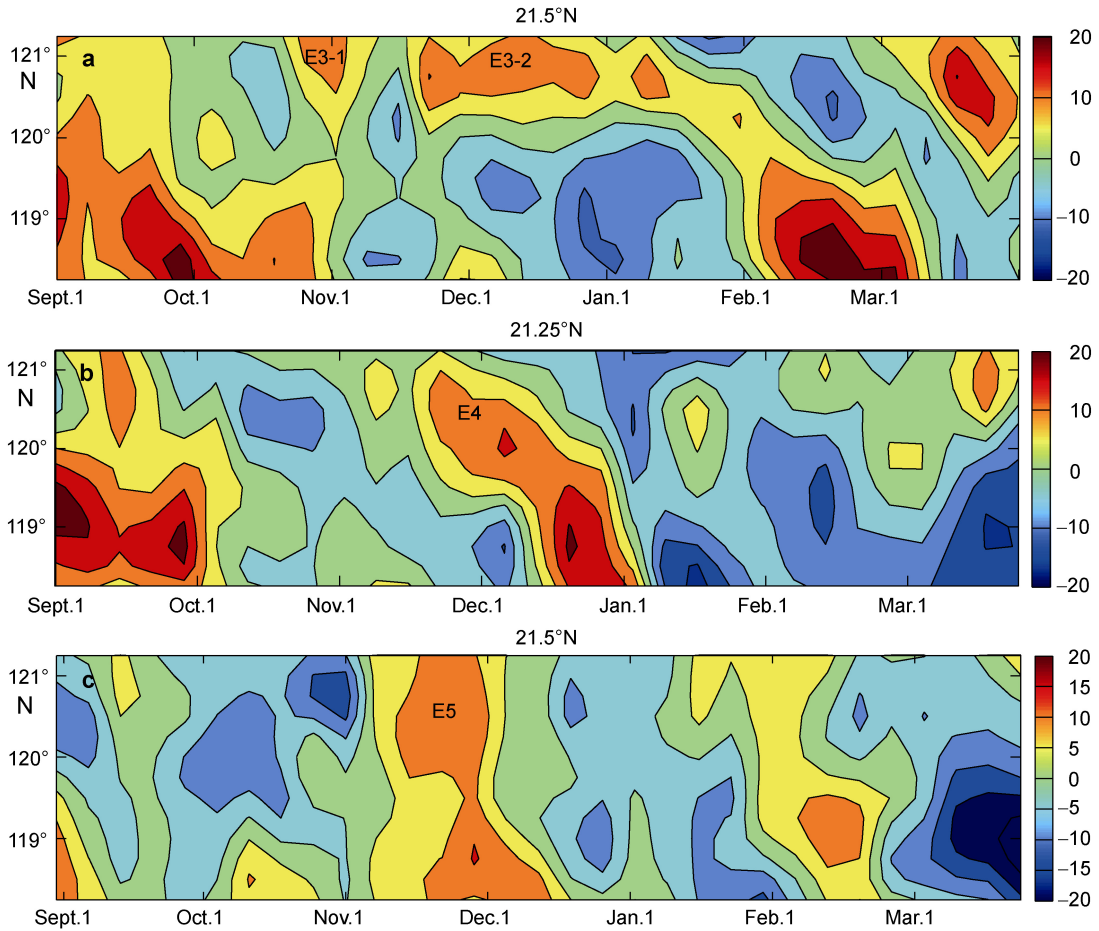


图 6 利用 AVIVO 数据绘制 21.5°N(或 21.25°N)纬线上的海平面高度距平(SLA)变化

Fig.6 Variation maps of the sea level anomaly along the 21.5°N or 21.25°N latitude line derived from AVIVO data  
注: a. 2003—2004 年; b. 2004—2005 年; c. 2005—2006 年

速度明显大于东行速度。ID56671 和 ID56685 的移动轨迹比较复杂。其中 ID56685 浮标于 12 月 14 日—1 月 15 日一个完整的流套和一个涡旋路径, 轨迹最西到达 119.1°E, 移动平均速度 33.9cm/s; 1 月 6—13 日流套内还完成一个顺时针方向旋转的闭合环路, 平均速度 31.5cm/s, 涡旋中心位于 120.0°E、21.7°N。ID56671 浮标于 12 月 25 日—1 月 6 日走完了一个流套行程, 平均速度 48.7cm/s; 接着 1 月 6—22 日在该流套内部完成 1.5 个环路; 之后, 于 1 月下旬离开流套生成区, 向西北移动并在高雄西侧海域完成 2 个闭合环路, 但它们是反时针方向旋转的, 显然该涡旋它与流套无直接关联。以上分析表明, 此次流套事件持续的时间约 2 个月。图 6c 的 SLA 高值区(E5)表明在此期间 21°N 以北都是 SLA 高值区, 没有出现如同图 6a、图 6b 展示的海面距平高值区西移的图像。由此可见, 在本流套事件中, 流套并没有演变成涡旋, 而是就地衰亡。

以上分析 2003 年、2004 年、2005 年秋冬季在吕宋海峡共投放的 Argos 浮标轨迹表明: 入侵南海黑潮流套-涡旋发生在恒春海脊西侧的台湾岛西南海域, 流套最西达 118.5°E, 中心在 119.8°—120.1°E、21.5°—21.8°N 的范围内; 流套可能演变成脱落涡旋西移, 也可能就地消亡。脱落涡旋西移速度约为 10cm/s, 这与太平洋似波状的涡旋列涡旋列的平均相速  $O$  (0.1m/s) 一致(Chelton *et al*, 1996; Hu *et al*, 2001; 郭景松等, 2007; Ho *et al*, 2009)。

此外, 从图 3、图 4、图 5 还可以看到另一个重要的事实。图 3 和图 5 显示了在流套-涡旋事件的期间内, 西向流型和北向流型同时存在, 只是它们出现在不同的区域: 流套-涡旋在台湾西南海域; 西向流型从吕宋海峡南部向西北进入南海, 大致在 21°N 以南区域转向西或西南; 北向流型集中在吕宋海峡东北部通过。图 4 中没有出现北向流型 Argos 浮标轨迹, 这是由于 2004 年 11—12 月在吕宋海峡区的 Argos 浮

标都在 20.1°N 以南, 其轨迹都是西向流型。由此可见, 黑潮流套仅是黑潮流分离的一部分, 而非黑潮整体蛇形入侵南海, 这与湾流在墨西哥湾中的蛇形有很大的不同。

#### 4 结果与讨论

2003 年、2004 年、2005 年秋冬季在吕宋海峡共投放的 Argos 浮标轨迹表明了, 在秋、冬季吕宋海峡的表层流存在三种类型的路径: 即北向型、西向型和流套-涡旋型。北向型、西向型的出现概率, 秋季分别为 0.46 和 0.33, 而冬季为 0.18 和 0.57; 流套-涡旋型的出现概率秋、冬季为 0.21—0.25。

入侵南海黑潮流套-涡旋仅发生在恒春海脊西侧的台湾岛西南海域, 流套最西达 118.5°E, 纬向尺度最大达 210km, 中心在 119.8°—120.1°E、21.5°—21.8°N 的范围内。流套的西行部分速度大于东行部分, 这可能是流套向西发展原因之一。流套最终常可演变成脱落涡旋, 并以约 10cm/s 的速度西移, 跟随脱落涡旋西移的漂流浮标轨迹呈现螺旋线形; 黑潮流套也可能就地消亡。入侵南海的流套仅是黑潮流分离的一部分, 而非黑潮整体蛇形入侵南海, 这与墨西哥湾中的湾流蛇形有很大的不同。

由于台湾西南海域尽管其北边有台湾海峡与东海连通, 但海峡水浅(<75m), 而且在冬季东北季风驱动的 Ekman 流向南, 几乎抵消了由海峡南北海平面高度差驱动的北向流(郭景松等, 2005), 因而它可视它为一个良好的湾顶区。入侵南海的黑潮流套-脱落涡旋或从巴士海峡进入的反气旋涡带大量的太平洋水将堆积于此, 并造成经向的海面倾斜, 以维持与黑潮分支的地转平衡, 即支持入侵南海的黑潮分支向西流动。

流套形成存在两种可能机制: (1) 黑潮弧形地通过吕宋海峡, 当它的一部分水体流经恒春海脊上方时, 由于海脊向西下倾的地形有利于扰动的发展, 从而可能使这部分黑潮水体的路径从弧形发展到大的弯曲(即流套); (2) 来自巴士海峡的反气旋涡旋, 虽然旋涡在进入黑潮流区时被大大削弱, 甚至消亡; 但对于足够强的旋涡来说, 它仍然可以顺岸绕过台湾岛南端; 而且当它越过恒春海脊时, 会重新得到加强, 并在恒春海脊的西处形成流套。

#### 参 考 文 献

仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信, 1984. 夏季南海北部一支向西流动

- 的海流. 热带海洋, 3(4): 65—73
- 朱祖佑, 1972. 太平洋和南海的水交换. 台湾大学海洋学刊, 1: 11—24
- 许建平, 苏纪兰, 仇德忠, 1996. 黑潮入侵南海的水文分析. 见: 南海东北部海区环流课题组编. 中国海洋学文集(6): 南海东北部海区环流研究. 北京: 海洋出版社, 1—12
- 苏纪兰, 许建平, 蔡树群等, 1999. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 南海的环流和涡旋. 北京: 气象出版社, 66—72
- 李立, 伍伯瑜, 1989. 黑潮的南海流套-南海东北部环流结构探讨. 台湾海峡, 8(1): 89—95
- 李燕初, 李立, 林明森等, 2002. 用 Topex/Poseidon 高度计识别台湾西南海域中尺度强涡. 海洋学报, 24(supp.1): 163—170
- 郭景松, 胡筱敏, 袁业立, 2005. 利用卫星高度计资料对台湾海峡流量变化的诊断分析. 海洋科学进展, 23(1): 20—26
- 郭景松, 袁业立, 熊学军等, 2007. 吕宋海峡两侧中尺涡旋统计. 海洋科学进展, 25(2): 139—148
- 管秉贤, 1978. 我国台湾及其附近海底地形对黑潮途径的影响. 海洋科学集刊, 14: 1—21
- Caruso M J, Gawarkiewica G G, Beardsley R C, 2006. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea. *J Oceanogr*, 62: 559—575
- Centurioni L R, Pearn P N, Dong-Kyu L, 2004. Observations of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait. *J Phys Oceanogr*, 34: 113—121
- Chelton D B, Schlax M G, 1996. Global observation of oceanic Rossby waves. *Science*, 272(5259): 234—238
- Guo J S, Chen X Y, Janet S *et al*, 2012. Surface in flow into the South China Sea through the Luzon Strait in winter. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 30(1): 163—168
- Ho C R, Zheng Q, Kuo J J *et al*, 2004a. Observation of Kuroshio intrusion region in South China Sea derived from AvHRR data. *Int J Remote Sensing*, 25(21): 4583—4591
- Ho C R, Zheng Q, Soong Y S *et al*, 2004b. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J Geophys Res*, 105(C6): 13981—13990
- Ho C R, Zheng Q, Zheng Z W *et al*, 2009. Reply to Comment by A. Wada *et al.* on “The importance of pre-existing oceanic conditions to upper ocean response induced by Super Typhoon Hai-Tang”. *Geophys Res Lett*, 36, L09604, doi: 10.1029/2009G103443
- Hsueh Y, Zhong L, 2004. A pressure-driven South China Sea Warm Current. *J Geophys Res*, 109: C09014, doi: 10.1029/2004JC002374
- Hu J, Kawamura H, Hong H *et al*, 2000. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio Intrusion. *J Oceanogr*, 56: 607—624
- Hu J, Kawamura H, Hong H *et al*, 2001. 3—6 months variations

- of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean, *J Oceanogr*, 57(1): 69—78
- Hu X M, Xiong X J, Qiao F L *et al*, 2008. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent region derived from satellite tracked drifter data. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(3): 11—29
- Jia Y, Liu Q, 2004. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon Strait. *J Oceanogr*, 60: 1063—1069
- Li L, Jing C, Zhu D, 2007. Coupling and propagating of mesoscale sea level variability between the western Pacific and the South China Sea. *Chin Sci Bull*, 52(12): 1699—1707
- Li L, Nowlin W D, Su Jilan, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. *Deep-Sea Res*, 45A: 1469—1482
- Metzger E J, Hurlburt H E, 2001. The nondeterministic nature of Kuroshio penetration and eddy shedding in the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 31(7): 1712—1732
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K ed. *Kuroshio: Its Physical Aspects*. University of Tokyo Press, 129—163
- Qiu B, Lukas R, 1996. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current, and the Kuroshio along the western boundary. *J Geophys Res*, 101: 12315—12330
- Sheremet V A, 2001. Hysteresis of a western boundary current leaping across a gap. *J Phys Oceanogr*, 32: 314—335
- Sheremet V A, Kuehl J, 2007. Gap-leaping western boundary current in a circular tank model. *J Phys Oceanogr*, 37: 1488—1495
- Su J L, 2003. Overview of the South China Sea circulation and the coastal oceanography south of China. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> PAMS/JECSS Workshop*, 1: 1—6
- Wang G, Su J, Chu P C, 2003. Meso-scale eddies in the South China Sea observed with altimeter data. *Geophysical Letters*, 30(6): 1—6
- Wang J, Chern C S, 1987. The warm-core eddy in northern South China Sea, 1. Preliminary observations on the warm-core eddy. *Acta Oceanogr Taiwanica*, 18: 92—103
- Wang J, Chern C S, 2000. Observations and views on the Kuroshio penetrating into the South China Sea. *Acta Oceanogr Taiwanica*, 38: 129—151 (in Chinese with English abstract)
- Xue H, Chai F, Pettigrew N R *et al*, 2004. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea. *J Geophys Res*, Vol. 109, C02017. doi: 10(1029/2002JC001724
- Yuan D, Han W, Hu D, 2006. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data, *J Geophys Res*, 111, C11007. doi: 1029/2005JC003412
- Yuan D, Wang Z, 2011. Hysteresis and dynamics a western boundary current flowing by a gap forced by impingement of mesoscale eddies. *J Phys Oceanogr*, 41: 878—888

## KUROSHIO LOOP CURRENT INTRUDING INTO THE SOUTH CHINA SEA AND ITS SHEDDING EDDY

GUO Jing-Song<sup>1,2</sup>, FENG Ying<sup>2</sup>, YUAN Ye-Li<sup>2</sup>, GUO Bing-Huo<sup>2</sup>

(1. *Ocean University of China, Qingdao*, 266100; 2. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao*, 266061)

**Abstract** Observational data of the Argos satellite-tracked drifters deployed in the Luzon Strait (LS) in autumn and winter of 2003, 2004 and 2005 are used to analyze the Kuroshio current pattern passing through the LS. The result show that the surface current paths of Kuroshio in autumn and winter can be classified to three types: northward type, westward type and Loop Current-Shedding Eddy type, and the currents of the letter two are types of intrusion into the South China Sea (SCS). The statistical analysis indicates that the occurring probability of Loop Current-Shedding Eddy type is 0.23. The Kuroshio Loop Current (KLC), with the maximum latitudinal scale of 210km, occurred southwest of the Taiwan Island, and west of the Hengchun Sea Ridge only. KLC is only a part of current separated from the Kuroshio rather than the whole Kuroshio current cruised into the SCS meanderingly, which differs from the Loop Current in the Gulf of Mexico. The westward current velocity was greater than eastward current velocity in the KLC, which is one of the reasons of its developing westward. The KLC may evolve into the Shed Eddy or disappear on the spot. The Shed Eddy moved westward with a speed of about 10cm/s.

**Key words** drifter trajectory; Kuroshio Loop Current; shedding eddy; statistics analysis; Luzon Strait