

台湾岛东南准稳态兰屿冷涡的初次记录

靖春生^{①②} 李立^①

(^①国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; ^②厦门大学海洋系, 厦门 361005. E-mail: jingcs@public.xm.fj.cn)

摘要 对卫星跟踪表层漂流浮标、卫星高度计和遥感 SST 图像资料的分析均发现, 1996 年 3 月前后在台湾岛东南、恒春半岛与兰屿之间有一个大型的气旋型黑潮锋面冷涡。该冷涡的水平尺度在纬向和经向分别可以达到 70 和 100 km 左右, 并伴随有黑潮在兰屿附近相应的离岸蛇形。冷涡与常见的黑潮锋面涡不同, 在兰屿一带呈准稳态滞留, 时间达两个月以上。有证据表明, 冷涡滞留期间, 黑潮可能呈套状侵入南海, 而且类似的涡旋在同一位置不时发生。对比此前墨西哥湾的相关研究, 兰屿锋面涡应是美国佛罗里达半岛南端 Tortugas 涡的南海版本。蛇行的黑潮在离开南海时所发生的超射和位涡守恒是冷涡形成的可能原因。

关键词 黑潮 锋面涡 台湾岛

锋面涡是海洋中常见的一种中尺度现象, 在湾流和黑潮等强大的西边界流靠大陆架一侧的锋面边缘, 常可观测到锋面涡的存在。有关锋面涡的研究多见于湾流, 尤其集中在美国东南外海南大西洋湾一带^[1]。锋面涡通常出现在离岸蛇形的湾流内侧(近岸一侧), 呈现气旋型和冷中心的特点, 并与蛇形一道向北传播。以佛罗里达外海为例, 湾流锋面涡的水平尺度在离岸方向约 10 km, 在顺岸方向为 20~30 km, 大约每周形成一个, 以 20 km/d 的速度向北传播, 寿命为 1~3 周^[2]。自佛罗里达往北, 湾流锋面涡的传播速度加快(35~60 km/d), 在锋面涡近岸侧可形成湾流暖水涡丝, 向南延伸 100~200 km^[3]。

虽然亚洲的航海者很早就注意到在黑潮的近岸一侧间或有南向流出现, 但直到 1980 年代红外卫星遥感手段投入应用之后, 黑潮锋面涡的研究才受到注意^[4]。1989 年 4 月我国海洋学家对东海北部的锋面涡进行了初次观测^[5], 并于 1992 年春季组织了专题考察^[6]。其结果表明: 在 30°N 以南黑潮锋面涡呈折叠波状, 其倒卷暖水舌的厚度约 50 m, 冷中心呈带状; 锋面涡移动速度约为 30 cm/s, 其发生周期约 10 d^[5,6]。之后 Yanagi 等人^[7]于 1996 年 5、6 月间的观测则揭示: 沿东海陆架外缘黑潮锋面涡冷核的长和宽分别约 60 和 40 km, 其相速度大约是 30 cm/s, 锋面涡的中心在深层向离岸方向偏移。

迄今为止, 有关黑潮锋面涡的研究大多集中在东海北部(28°N 以北)和日本以南海域, 最近虽然发现了台湾以东黑潮的大弯曲现象^[8,9], 但对这一带的

黑潮锋面涡却鲜有研究。本文根据 Argos 浮标资料和 AVHRR 卫星红外图像, 揭示了 1996 年 3 月前后发生在台湾岛东南、恒春半岛与兰屿之间的一次锋面涡事件, 并结合同期的 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)卫星高度计资料估计了该锋面涡的基本物理特征。分析表明: 该锋面涡的水平尺度在纬向和经向分别可以达到 70 和 100 km 左右, 是一个大型黑潮锋面冷涡; 伴随冷涡的出现, 黑潮主轴离岸蛇形; 该锋面涡与常见的东海黑潮锋面涡不同, 在兰屿一带呈准稳态滞留, 滞留时间达两个月以上。

1 资料

本文中使用的 Argos 浮标资料取自世界海洋环流实验(WOCE)全球数据(第 2 版)海面流速计划部分, 由加拿大 MEDS 提供。其中有 6 枚浮标于 1996 年 3 月初投放在台湾岛东南方, 它们所提供资料的开始位置和时间见表 1。AVHRR 红外卫星图像取自 Wood Hole 海洋研究所遥感分析小组的南海档案库。T/P 高度计的沿轨海面高度异常(SSHA)资料由 NASA/JPL 下属的 PO.DAAC 提供, 资料在发布前已进行了必要得校正^[10]。

表 1 卫星定位漂流浮标初始时间、位置一览表

浮标编号	投放日期(UTC)	初始纬度(°N)	初始经度(°E)
21972	1996-03-04	21.51	120.91
21973	1996-03-04	21.51	121.03
21976	1996-03-04	21.60	120.90
21977	1996-03-04	21.49	120.91
21978	1996-03-04	21.61	120.93
21979	1996-03-04	21.53	121.01

2 结果

2.1 漂流浮标轨迹和流场

通过 Argos 浮标的轨迹, 可以清晰地观察到以上 6 个浮标在恒春半岛与兰屿之间均呈气旋式运动, 作反时针旋转(图 1). 其中, 编号为 21972, 21977 和 21978 的 3 个浮标在台湾岛东南外海沿反时针方向转了一圈以上(21977 号浮标转了两圈); 编号为 21973, 21976 和 21979 的浮标则在投放后先向南逆黑潮而行, 在云林海脊南端作气旋式大回转, 然后在兰屿附近向北流去, 在 22.5°N 附近返回台湾岛东岸. 此外, 在 23°N 以北 21976 和 21977 号浮标再次离开台湾岛海岸作气旋式运动, 并在 24.5°N 再次返回台湾岛近岸.

上述漂流浮标的轨迹显示, 观测期间在台东到

台湾岛最南端沿岸有与黑潮流向相反的南向流, 沿云林海脊东侧表层流向亦偏南, 南向流在 21.2°N 附近向东作 U 字型转向, 然后在兰屿两侧向北流去(在兰屿的东西两侧均有漂流浮标的轨迹经过). 因此, 观测期间在台湾岛东南恒春半岛与兰屿之间应存在气旋型的局部环流; 与此同时, 黑潮向东蛇形离开恒春半岛, 其主轴移至兰屿附近; 此外在 23°N 以北可能还另有一黑潮蛇形存在.

由于漂流浮标的位置每隔一段时间由卫星测定并记录一次, 依据记录间隔内浮标位置的移动可以粗略地估算浮标的漂移速度, 并依此代表相应的表层流速. 为此, 我们分别计算了各漂流浮标的区间漂移速度, 再对所有的计算值进行 0.1°×0.1° 网格的平均, 得到观测期间台湾岛东侧海域的表层流场近似

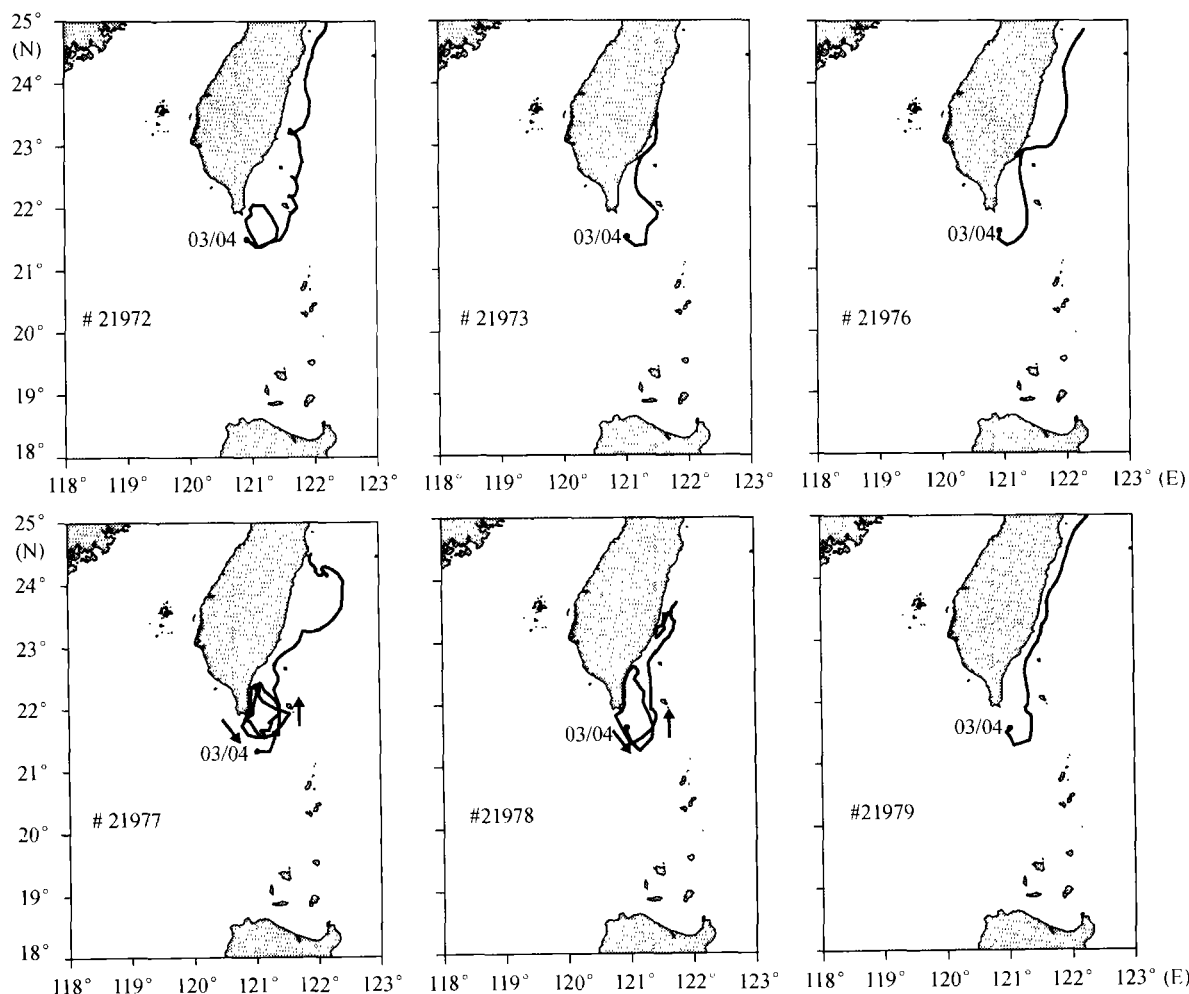


图 1 1996 年 3 月投放的 6 个漂流浮标的运动轨迹

分布(图 2, 空白处无观测值). 由图 2 可以清楚看到, 观测期间台湾以东黑潮主轴的位置与通常所说的平均位置有较明显的差异, 除 22.7°N 附近和 24.3°N 以北离岸较近外, 急流区大都离岸较远, 说明黑潮主轴偏东蛇形, 在台湾岛的南部和中部各有一个蛇形出现, 其顺流尺度约 150 km. 值得注意的是台湾岛东南尤其特别: (1) 有一支强流自恒春半岛西侧向东南方向流出, 在 21.2°N 汇入黑潮干流后向兰屿方向运动; (2) 黑潮在兰屿似乎分为两支, 一支折向西北返回台湾岛东岸, 另一支在兰屿至绿岛一线以东向北运动; (3) 流矢在恒春半岛与兰屿之间形成一气旋涡, 其东侧的流速较强(黑潮的影响), 西侧(靠近恒春半岛东岸的一侧)流速较弱, 最大流速为 1.5 m/s, 出现在涡的南端, 即流出南海的东南向强流与黑潮主干交汇处.

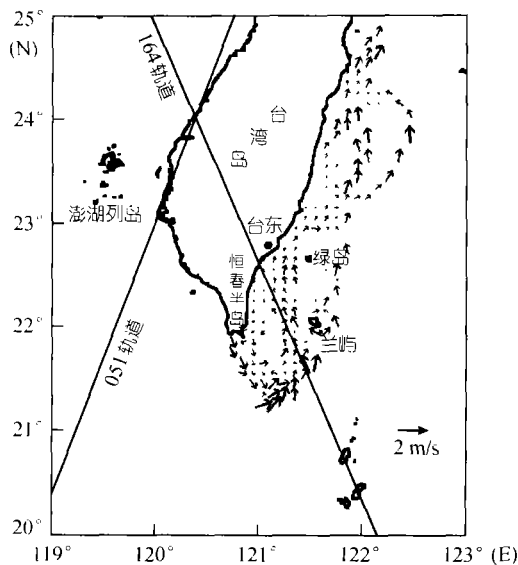


图 2 台湾岛东侧海域的表层流场近似分布

2.2 海表面温度

由于漂流浮标本身携带温度探头, 根据上述 6 个浮标的水温观测可以给出台湾岛东侧浮标覆盖海域的表层温度分布(图 3(a)). 图 3(a)清楚显示, 在恒春半岛与兰屿及绿岛之间有一冷中心, 其水平尺度在纬向约为 70 km, 在经向约为 100 km, 中心水温约 22.5°C , 较周围低约 1.5°C . 图 3(a)中叠加的 21973 号浮标轨迹表明, 浮标围绕该冷中心作气旋式运动.

上述冷中心的存在还得到同期 AVHRR 红外卫星图像的证实. 图 3(b)给出 1996 年 3 月 13 日的 AVHRR

红外卫星图片以供比较, 可以看到在卫星图片上 21973 号浮标轨迹所环绕的海域同样为一冷中心, 其表层水温比周围海域大约要低 1.2°C .

因此, 漂流浮标观测和卫星遥感所得到的 SST 分布进一步证明: 1996 年 3 月在台湾岛东南恒春半岛与兰屿之间有一大型黑潮锋面涡发育, 锋面涡在表层表现为冷中心, 冷中心周围为气旋式流场, 同时黑潮流轴向外海大幅度偏移.

2.3 海面高度异常——卫星高度计之结果

卫星高度计是揭示海洋中尺度变异的有效手段之一, 漂流浮标观测期间 T/P 卫星沿 164 轨道(图 2)每 10d 左右经过台湾岛东南海域的上空一次, 提供了对上述锋面涡所导致的海面高度波动的连续监测. 我们选取该轨道 1996 年 3 月前后的数据(从 120~134, 共 15 个周期, 约 150d), 得到海面高度异常(SSHA)的沿轨变化(图 4). 其中 127, 128, 130 和 131 周期都观测到比较大的 SSHA 水平差异, 以 21.8°N 为中心海面高度明显低于均值, 偏差达 -40 cm . 与此相反, 两侧海面高度均近乎或高于均值, 沿星下点轨迹 SSHA 呈 U 字型变化. 此水平差异表明在 127~131 周期时段黑潮明显向东偏移, 对应于漂流浮标捕捉到的锋面涡事件.

根据地转关系可以估算由海面高度差异对应的地转流速的变化, 冷涡中心与边缘的平均 SSHA 差约为 0.4 m, 水平距离约为 55 km, 对应的地转流速变化可达到 1.3 m/s, 与由漂流浮标估算的最大绝对流速值接近.

卫星高度计揭示的另一重要事实是: 与东海常见的黑潮锋面涡不同, 本文所报道的兰屿冷涡在 164 轨道维持了 60 d 左右(图 5(a)), 在此期间呈准稳定状态, 不向黑潮下游传播.

3 小结与讨论

通过卫星定位漂流浮标资料捕捉到台湾岛东南方的一次大型黑潮锋面涡事件, AVHRR 卫星红外图像和 T/P 卫星高度计资料, 均证实了 1996 年 3 月前后台湾岛东南方黑潮锋面西侧冷涡的存在. 该锋面涡的水平尺度在纬向约为 70 km, 在经向约为 100 km, 并伴随有黑潮在吕宋海峡北部和兰屿附近相应的蛇形. 分析 T/P 卫星高度计 164 轨道的沿轨 SSHA 资料, 发现该锋面涡事件在 164 轨道的维持时间约为 60 d, 呈准稳定状态. 分析还表明, 此次锋面涡事件并不是

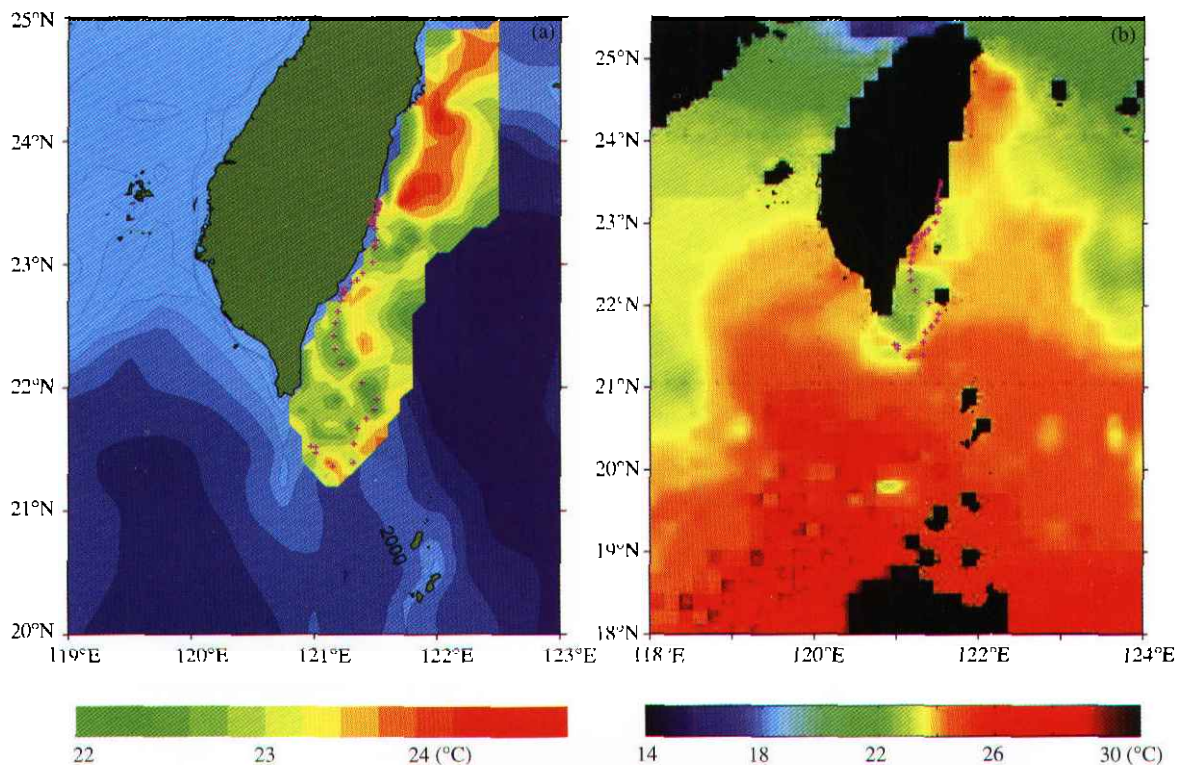


图3 表面温度分布
(a) 漂流浮标观测结果, (b) AVHRR 红外卫星图片

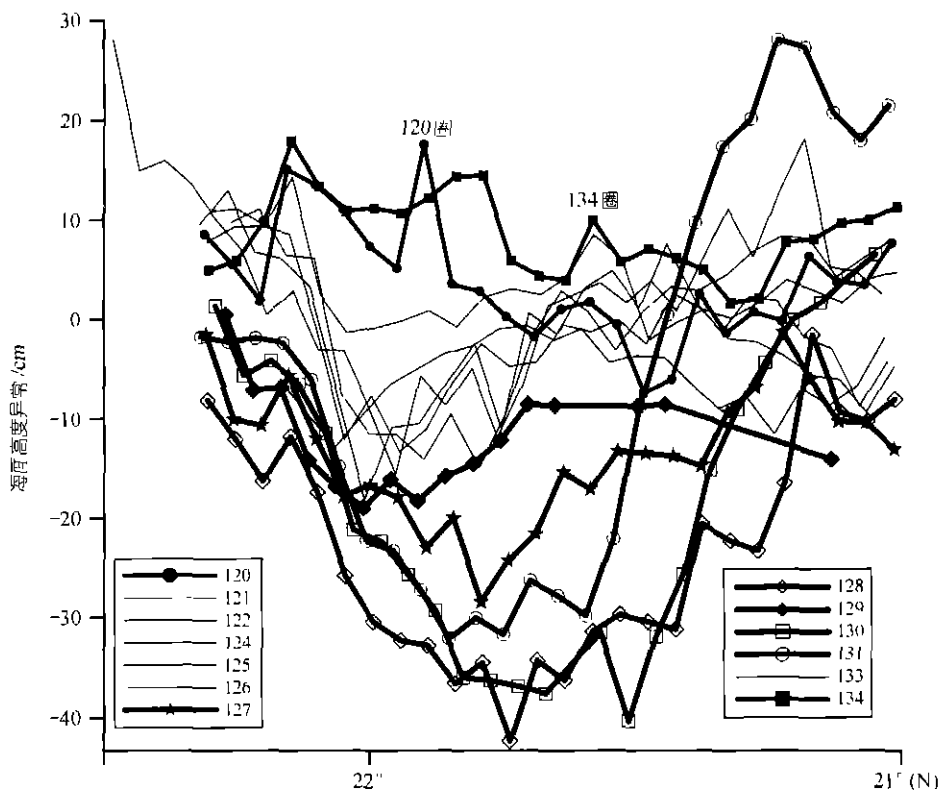


图4 海面高度异常的沿轨变化(164 轨道)

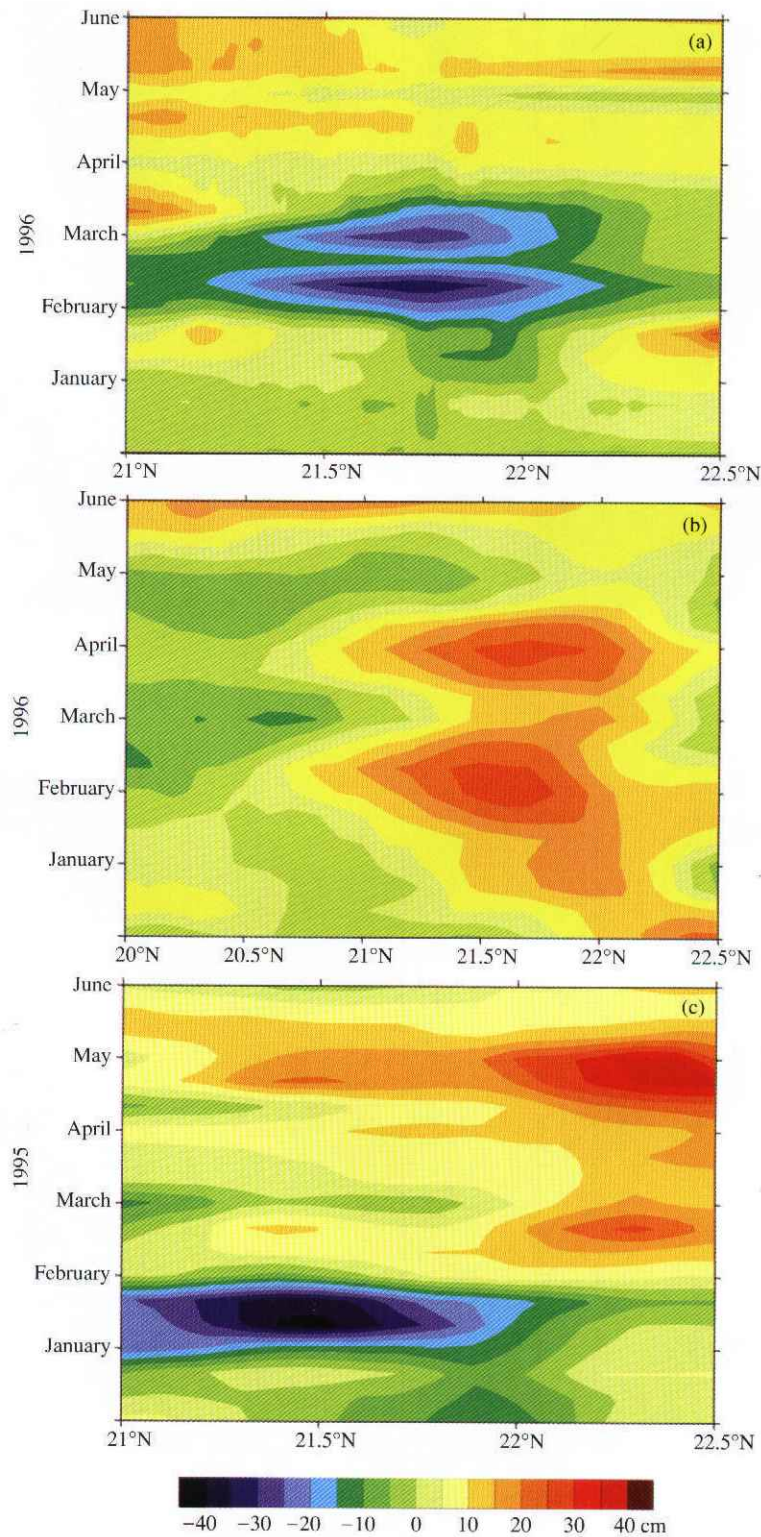


图5 1~6月TIP高度计海面高度异常的沿轨变化时间序列
(a) 1996年164轨道; (b) 1996年051轨道; (c) 1995年164轨道

一次偶发孤立事件, 164 轨道类似的海面高度异常偏低现象曾多次出现 (如图 5(c)), 为此建议称之为“兰屿冷涡”。

Lee 等人^[11]通过多种观测资料分析发现, 在南佛罗里达海峡入口处 Dry Tortugas 附近经常出现一冷的准稳态(quasi-stationary)气旋式环流, 并伴随有佛罗里达海流的离岸大蛇行. 该气旋式环流称之为“Tortugas 涡”, 其水平尺度接近 200 km, 存在的时间尺度约 100 d. 他们认为, 充分发展的墨西哥湾绕流在南佛罗里达海峡的入口处的超射是 Tortugas 涡形成的原因. 进一步的研究证实 Tortugas 涡寿命在 50 ~ 140 d 之间, 其演变和发展与墨西哥湾绕流是否产生反气旋涡环(rings)有很强的关联^[12].

比较本文的结果和前人对 Tortugas 涡的研究不难发现, 兰屿冷涡与 Tortugas 涡有很多相似之处, 它们都是位于北半球西边界锋面内侧的气旋式冷涡; 都伴有西边界流的大幅度离岸蛇行; 二者的时空尺度相近, 都呈准稳态存在; 都发生在西边界流与边缘海盆交界, 可有绕流产生并向边缘海分离出涡环的特殊环境. 总体而言, 黑潮在吕宋海峡与墨西哥湾绕流在佛罗里达海峡所面临的动力学环境有许多相似之处. 因此, 兰屿冷涡的发生规律和机制也可能与 Tortugas 涡有某些类似.

黑潮起源于菲律宾群岛以东, 由太平洋的北赤道流延续转向而形成. 黑潮在北上离开吕宋岛以后因失去了大陆的支撑而作用于南海, 在吕宋海峡一带可发生显著的蛇行, 呈套状侵入南海^[13], 并可在南海分离出中尺度流涡^[14].

从图 3(b)可以看到, 观测期间在台湾岛西南海域有大面积的暖水存在, 有一暖水舌从吕宋海峡南部向西北方向延伸到 119° E, 然后折向东北返回台湾岛近岸. 台湾岛西南海域清晰的冷暖水锋面表明, 此时黑潮可能在吕宋海峡发生蛇形弯曲, 呈套状侵入南海, 并在台湾南端返回太平洋.

受条件限制, 我们不掌握观测期间吕宋海峡以西的流场信息, 但以上观察得到卫星高度计观测的支持. 图 5(b)为同期台湾岛西南方沿 T/P 高度计 051 轨道(图 2) SSHA 的时空演变过程, 其中季节变化和原资料中的残余潮汐混淆已进一步除去, 以突出其中尺度变化. 比较显示, 与 164 轨道相反, 冷涡滞留期间台湾西南海域呈现异常的高水位, 反映了黑潮入侵的影响. 二者的消长大抵同步, 但相位相反. 这说明兰屿冷涡的出现与黑潮侵入南海是相互关联的. 此外, 漂流浮标在恒春半岛以南海域所观测到的东南向表层强流(>1m/s, 图 2)也支持这一判断.

除以上同期观测之外, 近年来有若干漂流浮标

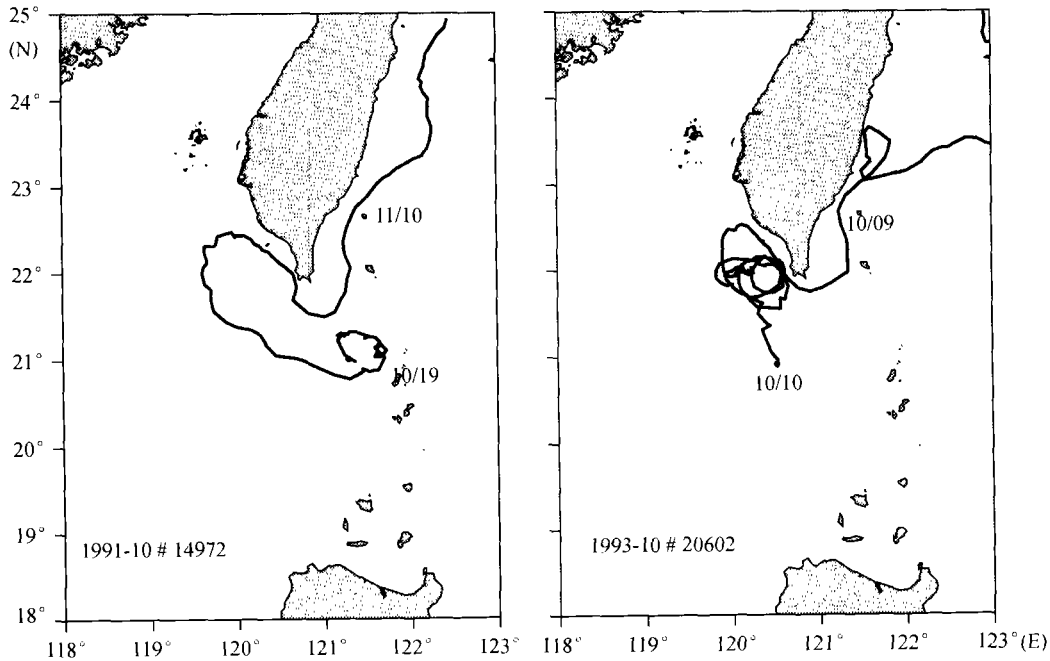


图 6 1991 年 10 月(左)和 1993 年 10 月(右)漂流浮标轨迹

的观测个例表明黑潮对南海的套状入侵是可能的(图6)。当这种入侵发生时,黑潮入侵流在台湾西南海域遭遇陆坡后,做反气旋回转,形成绕流,而后沿台湾岛西南海岸返回太平洋。

与墨西哥湾绕流类似,侵入南海的套状流在返回太平洋时产生超射,在越过云林海脊之后向东南进入深水区。根据位涡守恒原理,这时无论水深的变化或 β 效应都使相对涡度增加,其中水深的变化的贡献(也称地形 β 效应)远大于 β 效应。位涡守恒迫使超射的套状流在兰屿附近产生大幅度的气旋式弯曲,应该是恒春半岛与兰屿之间气旋涡得以形成的主要动力学原因。这与南佛罗里达海峡入口处的 Tortugas 涡的形成机制是相似的。故而,可以认为兰屿冷涡是 Tortugas 涡的南海版本。

兰屿冷涡虽为一局地现象,但究其发生的原因应与黑潮的变异及其所携带的大洋涡动信息有密切的关联。近期若干研究表明,台湾以东海域在动力学上十分活跃:卫星高度计分析显示该海域是涡动能的高值区^[15],其海面高度年代际变化幅度也要比周边海域高出不少^[16],沿 22°N 黑潮的流量的波动范围(峰值)甚至超过其均值($22.9\pm 14.2\text{ Sv}$)^[17],它们均反映了台湾以东黑潮的不稳定性。诸多因素可能导致黑潮在这一带的不稳定,太平洋西传的 Rossby 波^[18]所造成的能量积累、夏威夷群岛涡列尾迹远程效应^[19]、以及西北太平洋中尺度涡旋对黑潮的冲击^[17]都可能是吕宋海峡和台湾以东黑潮变异的诱因。

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999043807, G1999043805)和国家自然科学基金项目(批准号:49976010)资助。

参 考 文 献

- Lee T N, Yoder J A, Atkinson L P. Gulf Stream frontal eddy influence on productivity of southeast US continental shelf. *J Geophys Res*, 1991, 96: 22191 ~ 22205
- Lee T N. Florida current spin-off eddies. *Deep Sea Res*, 1975, 22: 753 ~ 765
- Glenn S M, Ebbesmeyer C C. The structure and propagation of a gulf stream frontal eddy along the north carolina shelf break. *J Geophys Res*, 1994, 99(C3): 5029 ~ 5046
- Toda T. Movement of the surface front induced by Kuroshio frontal eddy. *J Geophys Res*, 1993, 98(C9): 16331 ~ 16340
- Zheng Y, Huang W, Yasuaki N. A preliminary analysis on the characteristics of the Kuroshio frontal eddy in the East China Sea in spring. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1993, 11(3): 276 ~ 285
- 郭炳火, 汤毓祥, 陆赛英, 等. 春季东海黑潮锋面涡旋的观测与分析. *海洋学报*, 1995, 17(1): 13 ~ 23
- Yanagi T, Shimizu T, Lie H J, et al. Detailed structure of the Kuroshio frontal eddy along the shelf edge of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 1998, 18: 1039 ~ 1056
- Yang Y, Liu C T, Hu J H, et al. Taiwan current (Kuroshio) and impinging eddies. *Journal of Oceanography*, 1999, 55(5): 609 ~ 617
- Zhang D, Lee T N, Johns W E. The Kuroshio east of Taiwan: modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies. *J Phy Oceanogr*, 2001, 31(4): 1054 ~ 1074
- Berwin R W, Benada J R. TOPEX/POSEIDON sea surface anomaly product user's reference manual. PO DAAC NASA/JPL, 1999
- Lee T N, Leaman K, Williams E, et al. Florida current meanders and gyre formation in the southern Strait of Florida. *J Geophys Res*, 1995, 100(c5): 8607 ~ 8620
- Fratantoni P S, Lee T N, Podesta G P, et al. The influence of loop current perturbations on the formation and evolution of Tortugas eddies in the southern Straits of Florida. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C11): 24759 ~ 24779
- 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套?——南海东北部环流结构探讨. *台湾海峡*, 1989, 8(1), 89 ~ 95
- Li L, Nowlin W, Su J. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. *Deep Sea Res (Part I)*, 1998, 45: 1469 ~ 1482
- He Z, Wang D, Hu J. Features of eddy kinetic energy and variations of upper circulation in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 21(2): 305 ~ 314
- 李立, 许金电, 蔡榕硕. 20世纪90年代南海海平面的上升趋势: 卫星高度计观测结果. *科学通报*, 2002, 47(1): 59 ~ 62
- Yang Y, Liu C T. Uncertainty reduction of estimated geostrophic volume transports with altimeter observations east of Taiwan. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(2): 251 ~ 257
- Chelton D B, Schlax M G. Global observations of oceanic rossby waves. *Science*, 1996, 272: 234 ~ 238
- Xie S P, Liu W T, Liu Q, et al. Far-reaching effects of the Hawaiian Islands on the Pacific ocean-atmosphere system. *Science*, 2001, 292: 2057 ~ 2060

(2003-03-28 收稿, 2003-05-26 收修修改稿)