

研究简报

湾流锋面涡旋的三维结构*

李立

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门)

湾流从佛罗里达海峡北口至哈特勒斯角 (Cape Hatteras), 沿美国东南陆架外缘流动, 该海域称为南大西洋湾 (South Atlantic Bight, 以下简称 SAB)。SAB 的陆架宽度为 30—120km, 两头窄中间宽。

SAB 湾流存在很强的中尺度变异^[3], 如湾流锋面的波状结构(或称“蛇行”)及锋面涡旋。锋面涡旋指的是在湾流西侧伴随着离岸蛇行出现的气旋型冷涡。涡旋的中心是沿陆坡涌升的湾流深层水, 离岸蛇行的湾流和向南突入陆架的上层湾流水舌构成了涡旋的外围。锋面涡旋与蛇行一起向北移行, 其水平尺度为数十至数百公里, 垂直尺度可达 800m 以上^[4]。图 1 示意性地给出湾流锋面涡旋的表层特征。可看出涡旋的表层温度结构是不完全封闭的, 而且其纵向尺度远大于横向尺度。

人们常把湾流的蛇行视为其流轴的水平移动, 而忽略其垂直结构的变化。这一观念基本上是二维的。锋面涡旋的概念则前进了一步, 近年提出的锋面涡旋定性模式都具三维结构^[4,7]。Bane 等用 AXBT 准同步地测绘了湾流锋面的三维温度结构^[3]。作者等则将一般观测手段与 IES (Inverted Echo Sounder) 结合研究了垂直断面上湾流锋面波动的物理特性, 并提出了湾流“扭转”(Twisting)的概念^[5,6]。本文在以往工作的基础上进一步讨论湾流蛇行及锋面涡旋的三维结构, 并提出一个改进的定性模式。

本文引用 1978 年 1 月底至 4 月初在美国乔治亚州外与湾流垂直的一个断面上设置的潜标阵中 E 站记录的海流资料 (图 1)。有关潜标阵细节及数据处理方法请参见文献 [5]。

一、锋面涡旋的 LEE 模式

湾流锋面涡旋的三维定性模式中最具代表性的是湾流锋面涡旋概念的建立者 T. N. Lee 教授等提出的模式 (图 2)^[4]。图中清楚地给出蛇行湾流的向岸波峰。在该波峰的后方伴随着离岸蛇行在陆折附近有一个锋面涡旋。离岸蛇行的湾流构成涡旋的外侧, 而从蛇行的近岸波峰向南延伸突入陆架的湾流上层水舌构成了涡旋的另一侧 (该水舌在涡旋南侧与湾流并不重新汇合)。涡旋的内核是沿陆坡涌升的湾流深层冷水, 该冷水有经暖水舌下方向岸运动的趋势。涡旋的横向尺度一般为几十公里, 而其纵向尺度常达数百公里。

* 美国迈阿密大学 T. N. Lee 教授提供数据, 美国罗得岛大学 M. Wimbush 教授提供部分研究条件, 谨此志谢。

收稿日期: 1986 年 11 月 20 日。

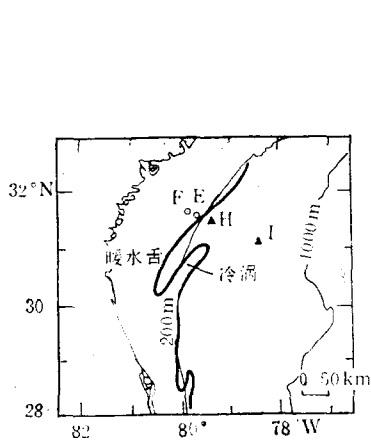


图1 研究海域站位设置及锋面涡旋示意图
Fig. 1 Locations of stations and sketch of frontal eddies in the study area

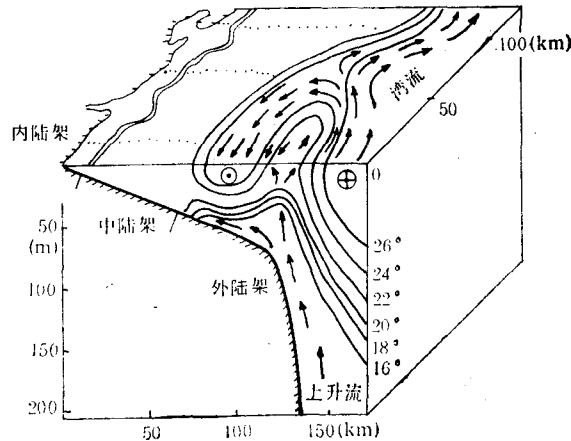


图2 锋面涡旋的 LEE 模式
Fig. 2 LEE Model of frontal eddy

涡旋以每秒数十厘米的相速顺流向北移动,平均约每两周出现一个。

Piترافesa (1980) 也提出过一种模式^[7],与 LEE 模式的宏观结构相似,但认为暖水舌内湾流水呈反气旋式流动而不是都向南流。这一说法得到 Chew (1981) 的支持^[2]。最近 Chew 等人^[3]又提出冷水的涌升发生在涡旋的前部而在尾部水体下沉的观点。

各家的看法,在近表层及横断面的温度结构上是一致的。因为这些模式主要都是根据卫星照片及水文断面观测的结果提出的。各模式间的主要分歧在于涡旋的流速结构。因此,深入研究锋面涡旋流场的特征是揭示锋面涡旋三维结构的重要环节。

二、锋面涡流速度结构的一个特征

本节根据 1978 年初在 E 站 17m 和 72m 层记录的海流资料讨论锋面涡旋的流场。E 站水深 75m,位于该海域陆架和陆坡的转折处。因锋面涡横跨陆架与陆坡,E 站大体位于涡旋的纵轴附近。早先的研究已经证明该站海流主要受湾流流轴波动的支配^[5],因此若假设涡旋北行通过 E 站时本身结构变化不大,而且移行的速度均匀,则所观测的海流时序可近似做为对涡旋顺流方向流速结构的空间取样,并可借此研究锋面涡旋的流速结构。

图 3 给出 E 站上 (ETOP)、下 (EBOT) 两层的余流流矢时序。图中流向向上表示顺流方向,向右表示离岸方向。相邻流矢间隔 6 小时,潮流用数字滤波器滤除。从图中可以看出 E 站海流“南北”(指顺流方向,下同)波动强烈,反映了涡旋纵横向尺度的差异。该海域湾流蛇行及锋面涡旋的纵向尺度达数百公里,而横向幅度仅几十公里^[4],因此与一般近乎圆形的封闭涡旋不同 E 站实测流矢的南北波动更为明显。研究表明,E 站海流的波动是与蛇行及锋面涡旋关联的,北向流标志着湾流流轴向岸蛇行,南向流则标志着湾流离岸蛇行及锋面涡旋的通过^[6]。如前所述,涡旋内侧向南突入陆架的暖水舌是导致 E 站南向流的原因。

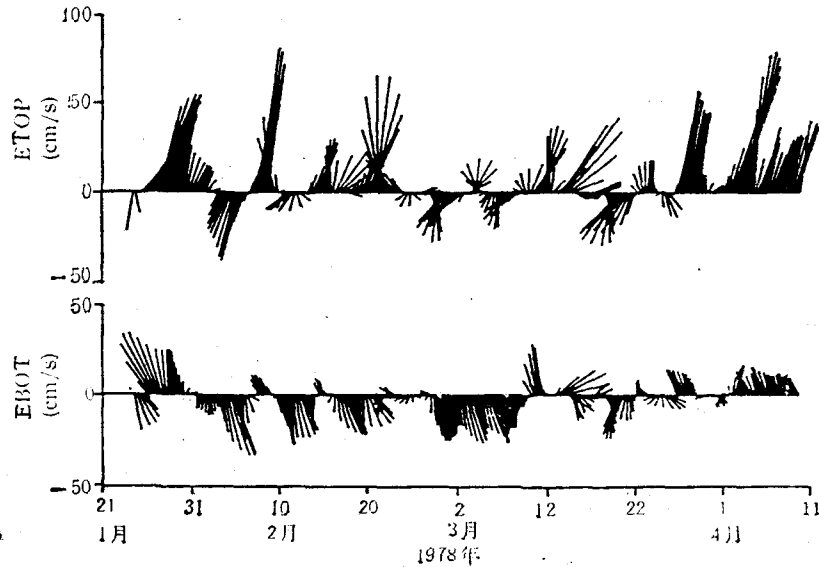


图3 E站上、下层实测余流流矢序列

Fig. 3 Order of residual current vectors in upper and lower layers at station E
(朝上为沿岸方向;向北为正)

仔细地观察可以发现: (1) ETOP 与 EBOT 流向的南北波动大抵同步, 但 ETOP 波动较大; (2) ETOP 流矢呈东北-西南走向, EBOT 却呈西北-东南走向; (3) 当 ETOP 流矢指向离岸时 EBOT 流矢向岸, 反之亦反。上述现象表明, 锋面涡旋在 E 站附近上下流速结构是不同的, 在纵向上流向一致, 而在横向上相位则相反。这是研究海域锋面涡旋流速结构的一个新揭示的特征。这一特征与近岸流系二维垂直平面横向环流存在的上下层流向相反的现象, 有某种相似之处。但锋面涡旋剧烈的纵向结构变化呈明显的三维特征, 引用二维连续性概念加以解释并不充分。

锋面涡旋流场的这一特征还可以从统计分析看出。图 4 给出 ETOP 和 EBOT 各自余流 u, v 分量间的相干谱和相位谱。ETOP 的 u, v 分量在 5—8 天频带相关, 相差接近 0° (同相); EBOT 的 u, v 分量在 8—12 天频带相关, 相差却接近 180° (反相)。因谱分析本身已在频域上分离了均值的影响, 涡旋作为整体移行的平均速度已不含在上述相关频带中, u, v 的相位关系代表了涡旋本身速度场的特征。如前所述, 若假设涡旋以恒定速度沿 y 方向移行, 则上述 u, v 相位关系反映了涡旋通过 E 站时流矢沿 y 方向的分布。假设 u, v 均呈正弦波动而且幅度相等, 则当 u, v 同相时可得图 5a 所示流矢沿 y 方向的分布; 反之当 u, v 反相时可有图 5b 的分布。显然, 图 5a 的分布与实测 ETOP 余流是一致的, 而图 5b 的分布与 EBOT 是一致的(见图 1)。如果把向北流速最大点作为湾流近岸蛇行峰的标志的话, 上述关系表明: 在涡旋陆架一侧的下层, 海水在湾流蛇行的近岸波峰附近向岸爬升(此处上层流矢指向东北, 下层流矢指向西北); 而在向南延伸的暖水舌下方, 海水离岸下沉(此处上层流矢指向西南, 下层流矢指向东南, 见图 5)。因此, 在研究海域从暖水舌底部到海底 (-75m) 这一层次锋面涡旋的结构既不同于上层, 也不同于陆折以深的涡旋深部。根据这一结果, 我们提出锋面涡旋三维结构的一种三层改进模式。

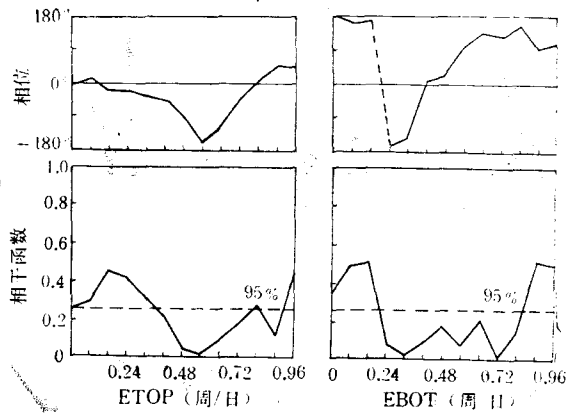


图 4 E 站上、下层余流 u, v 分量间的相位谱及相干谱

Fig. 4 Phase frequency and coherence spectrum between u, v components of residual current vectors in upper and lower layers at station E

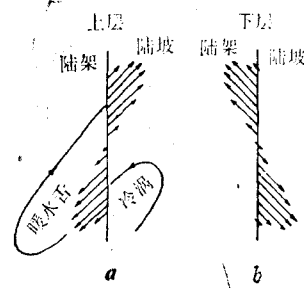


图 5 u, v 呈正弦同相波动时 (a) 和反相波动时 (b) 流矢沿平行岸线方向的空间分布

Fig. 5 Space distribution of current vector along parallel coast line of u, v in phase (a) and out of phase (b) wave motion

三、锋面涡旋的一种改进模式

图 6 给出锋面涡旋的三层改进模式。该模式的上层及深层结构与 LEE 模式、AXBT 观测^[1]一致：离岸蛇行的湾流和向陆架南伸的暖水舌构成锋面涡旋的上层；离岸蛇行的湾流及它所包围的沿陆坡涌升的冷水构成涡旋的深层。在这两个层次上涡旋都是“不完整”的。

介于上层及深层之间是一独特层次，深度大约为 30—75m。在该层次湾流次表层水

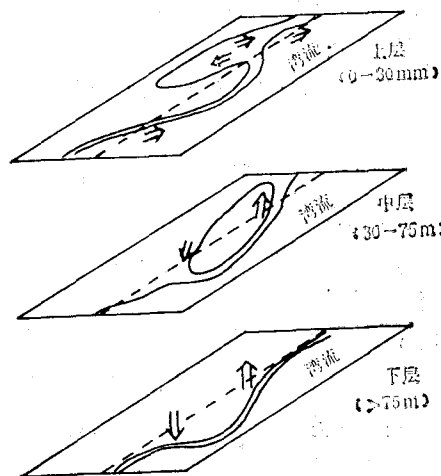


图 6 锋面涡旋的三层改进模式

Fig. 6 Modified 3-layer model of frontal eddies

虚线为陆折位置；箭头指示涡旋海水运动方向。

以高盐水舌的形式沿底层楔入陆架。由于风及海水层化状态的影响, 楔入陆架的高盐水舌在夏季强而明显, 在冬季较弱。只有在该层次冷核的等温线为封闭曲线时, 其主轴与 y 方向呈反时针偏角。冷涡前沿位于近岸蛇行波峰下方, 流向向北向岸; 海水横向运动的方向与上层相反, 水体向岸涌升。在冷涡的尾部, 该层次流向离岸向南; 水体横向运动方向亦与上层暖水舌相反。我们姑且称该层次为“下层”。

总之, 我们认为在研究海域锋面涡旋存在三层结构: (1) 上层: 离岸蛇行的湾流和向南伸入陆架的湾流水舌以及被它们包围的冷核; (2) 下层: 陆折附近及陆架下层的封闭冷涡, 冷涡前沿位于近岸蛇行波峰下方, 冷涡前部湾流次表层水向岸爬升楔入陆架, 冷涡尾部海水离岸下沉; (3) 深层: 主要表现为陆坡上升流, 上升流出现于离岸蛇行的湾流与陆坡之间, 上升冷水强化了湾流锋面。

参 考 文 献

- [1] Bane, J. M., D. A. Brooks and K. R. Lorenson, 1981. Synoptic observation of the three-dimensional structure and propagation of Gulf Stream meanders along the Carolina continental margin. *J. Geophys. Res.* **86**: 6411—6425.
- [2] Chew, F., 1981. Shingles, spin-off eddies and an hypothesis. *Deep-Sea Res.* **28**: 379—391.
- [3] Chew, F., J. M. Bane and D. A. Brooks, 1985. On vertical motion, divergence, and the thermal wind balance in cold-dome meanders: a diagnostic study. *J. Geophys. Res.* **90**: 3173—3183.
- [4] Lee, T. N., L. P. Atkinson and R. Legeckic, 1981. Observations of a Gulf Stream frontal eddy on the Georgia continental shelf, April, 1977. *Deep-Sea Res.* **28**: 347—378.
- [5] Li, L., M. Wimbush, D. R. Watts et al., 1985. Gulf Stream and wind induced current variability on the Georgia continental shelf, winter 1978. *J. Geophys. Res.* **90**: 3199—3210.
- [6] Li, L., M. Wimbush, D. R. Watts et al., 1986. Variability of thermal structure off Georgia, Winter, 1978. *J. Geophys. Res.* **6**: 561—584.
- [7] Pietrafesa, L. J. and G. S. Janowitz, 1980. In Proceeding of the Second International Symposium on Stratified Flows, Norway, 24—27, June, 1980. Tapir Pub. Co., pp. 184—197.
- [8] Watts, D. R., 1983. In Eddies in Marine Science. Springer-Verlag, New York, pp. 114—144.

NOTES ON 3-DIMENSIONAL STRUCTURE OF GULF STREAM FRONTAL EDDIES

Li Li

(Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen)

ABSTRACT

Discussion is given to the 3-dimensional structure of Gulf Stream frontal eddies and associated meanders off Georgia, United States. Careful study of current measured over the shelf-break off Georgia indicates that longshore and offshore current fluctuations are in phase in the upper layer and out of phase in the lower layer over the shelf break. This suggests different circulation patterns in upper and lower layers of a frontal eddy over outer continental shelf and further offshore. Considering the deeper layer over the continental slope, a modified 3-layer conceptual circulation model of frontal eddies is proposed.