

关于台湾-对马-津轻流系的结构及其与黑潮的关系*

THE STRUCTURE OF THE TAIWAN-TSUSHIMA-TSUGARU CURRENT SYSTEM AND ITS RELATION TO THE KUROSHIO

方国洪

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

作为世界两大洋流,黑潮和湾流有许多共同之处,但也有不少差异,其中之一是这两支强流的西侧陆架特征基本上是相反的。在湾流的离岸点——哈特拉斯角以北,陆架比较宽而离岸点以南则很窄。相反,黑潮流岸点——犬吠角以北则陆架很窄,而其南方,从台湾到九州这一段的西侧则有着很宽广的东海陆架。故对于位于副热带大洋西边界流西侧宽陆架上的这一流系的研究,在世界海洋的陆架环流研究中具有独特的意义。

基于实际观测到的海流和水文资料,管秉贤^[14]指出,在我国东南近海存在着自海南岛以东海区向东北流经台湾海峡,穿过东海陆架并流向对马海峡的海流。在他给出的夏季海流示意图上这支流很清楚。方国洪等^[1,18]根据台湾海峡、东海陆架和对马海峡实测流资料,认为存在台湾-对马-津轻暖流系统,并取这三个海峡英文首字母(TTT)作为该系的名称。李荣风和曾庆存^[6]的数值实验也显示这支海流,他们还把海南岛至台湾海峡的暖流同上述流系放在一起,叫“海南-台湾-对马-津轻暖流”。由于这支流的东海部分与黑潮水域是相通的,它和黑潮的关系也是十分重要的。这里仅把一些不成熟的看法提出来供进一步探讨参考。其中有许多观点是前人已提出过的,这里不一一考证其出处。

1 黑潮在中国近海的入侵(分叉)

黑潮在南自吕宋海峡,北至吐噶喇海峡这一段与南海和东海相通。为了研究黑潮与中国近海环流的关系,我们进行了一次简单的二维正压数值模拟。这项数值模拟除了计算基本流态外,还研究了不同因子对海流结构的影响。这里引用的图1和图2是基本流态,计算中风应力取作零,热盐效应忽略,因而其结果只代表了黑潮的动力作用。因为中国近海冬季盛行东北风,夏季盛行西南风而前者风力较强,持续时间较长,故无风代表了年平均但略偏于夏季的情况。图1是流失分布,图2是输运量流函数图。

1995年第4期

实线的流量间隔为0.5Sv;在-2至2Sv之间用虚线示出0.25Sv间隔的等值线(来源同上)。

由图可以看到,黑潮首先在吕宋岛北方入侵南海(可简称吕北入侵)并在海峡附近形成一个“套流”(Loop current),即有大量海水西进南海,但大部分很快又流回太平洋。不过其中还有一部分脱离“套流”继续西进,一直到南海北部的西岸。从这个特征来看,这支西向流被称为黑潮南海分支^[3,10,12]是合适的。不过整个西向流并不完全直接来自黑潮,在黑潮分支南侧还存在着一股南海海盆尺度的“回流”(Recirculation)。这股回流在苏纪兰、刘先炳^[8]的正压模式中也得出过。由实测温、盐资料计算的海面动力高度也可到在吕宋岛西侧存在一支北向流,一个比较自然的推论是它将与黑潮分支合并。苏纪兰等曾建议称之为“巴士海流”。不过在无证据说明回流经过巴士海峡之前,暂时称由黑潮分支和回流合并后的西向流为“吕宋海流”可能更稳妥,因为黑潮分支来自吕宋岛附近且经过吕宋海峡,回流亦经过吕宋岛西侧。

“吕宋海流”到达南海西岸后,部分转向南成为“回流”,另一部分先转向北,再转向东偏北,成为南海暖流。南海暖流一部分进入台湾海峡,一部分与“套流”合并。台湾海峡的北向流一部分来自南海暖流,另一部分则是从“套流”中分离出来的。早先人们都认为澎湖水道(甚至台湾海峡)中的北向流是黑潮的一个直接分支。似乎近年来许多人已比较倾向于不存在(或多数时候不存在)这一直接分支(例如见王曹等^[23])。这样,台湾海峡海流的直接源地应在南海。

* 国家自然科学基金资助项目。

中国科学院海洋研究所调查报告第2606号。

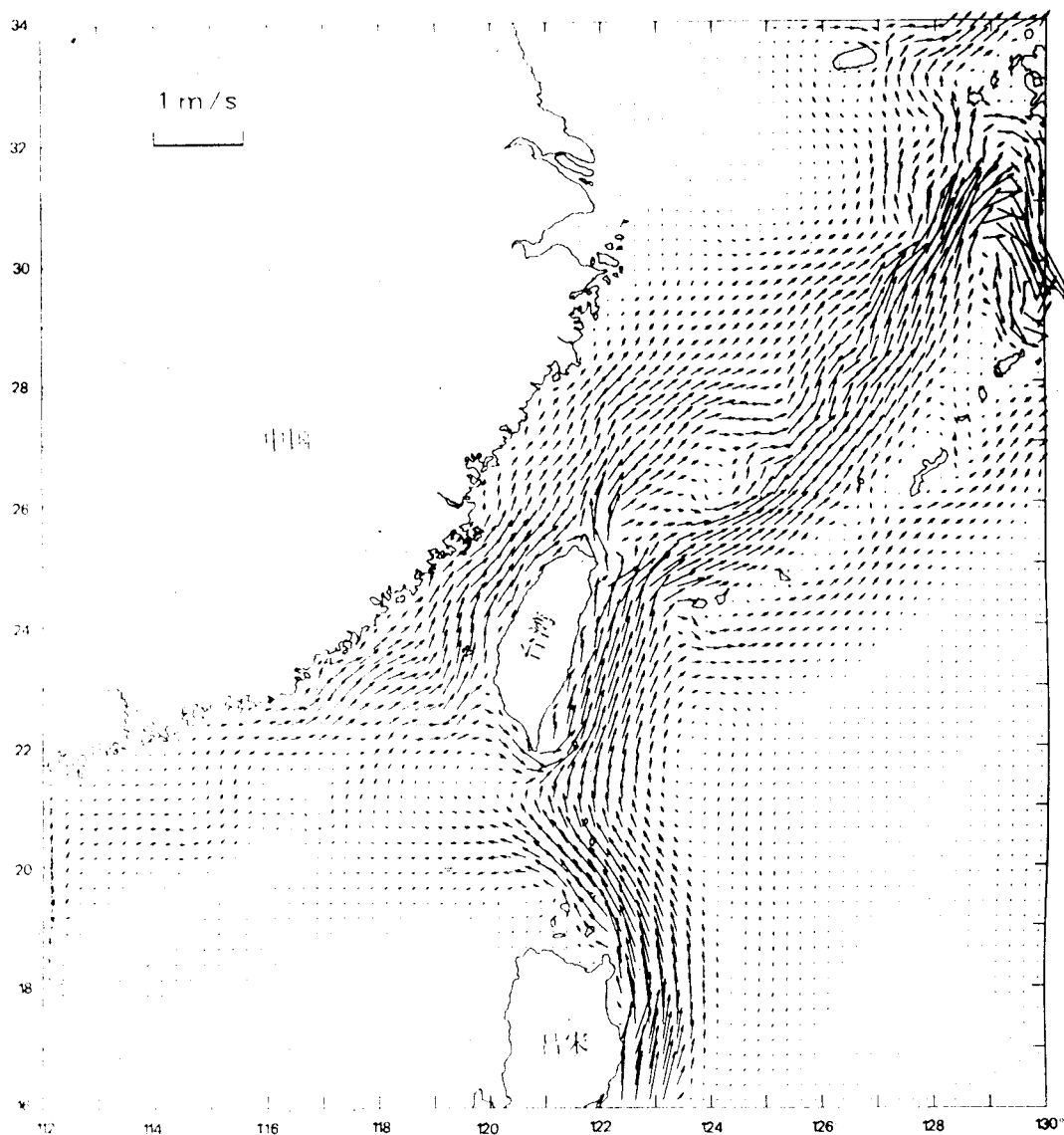


图1 数值模拟所得垂直平均海流流失分布

数值模式为二维正压,分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,水深除大于 800m 用 800m 代替外,均用实际水深。开边界有 4 处:吕宋岛东侧(4 个格点)入流流量共 44Sv ($1\text{Sv}=10^6\text{m}^3/\text{s}$);对马海峡(8 个格点)。吐噶喇海峡(6 个格点)和喜界岛南方(6 个格点)的出流流量分别为 3, 27 和 14Sv;其余为闭边界。风应力取零(引自方越等手稿,1995)。

台湾海峡的北向流进入东海后就与黑潮在台湾东北方入侵(可简称台北入侵)的,传统上称作台湾暖流的海流汇合,在东海陆架形成一支东北向流。这支流在北上的同时还有趋向黑潮之趋势,在 30°N 附近部分地与黑潮合并,然后先向北和西北,再向东北偏转,进入对马海峡,成为对马暖流。由于日本列岛分隔,对马暖流与黑潮分得很清楚,它流过日本海后从津轻和宗谷海峡流入

太平洋,加入亲潮。

总起来说,黑潮对中国近海的影响的突出之点是 3 处入侵(分叉)和连接这些入侵海流的一支从吕宋海峡出发,经过海南东侧、台湾海峡、对马海峡和津轻/宗谷海峡进入太平洋的流系。按照方国洪等^[1,18]和李荣凤、曾庆存^[6]的叫法,我们暂且称之为“吕宋-海南-台湾-对马-津轻流系”,或简单地叫“吕海台对津流系”,用西文

海洋科学

字母可简写为“LHTTT CS”。

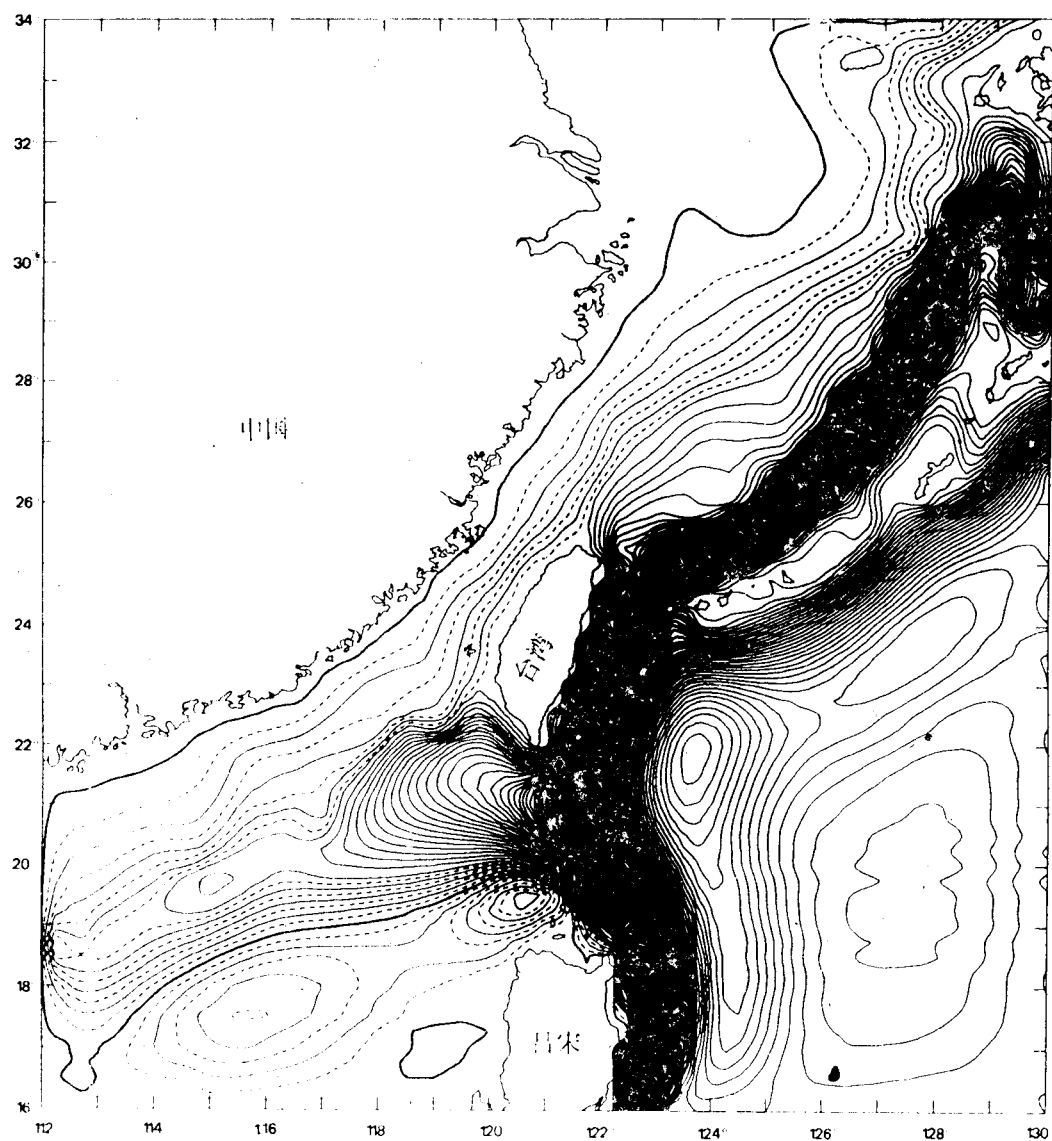


图2 与图1对应的输运流函数分布

2 “吕海台对津流系”的变化性及与其他海流分量的相互作用

“LHTTT CS”在数值模拟结果中显示得很清楚,与实测海流总趋势也是一致的^[18]。但海水要素(如保守性较强的盐度)的分布往往不能清楚显示出流系的存在。其原因是由于这个流系比较弱,受到外部,特别是大气

和黑潮的重大影响。此外长江等迳流所引起的沿岸流对其亦有一定影响。

夏季,西南季风与“TTT”流系方向基本一致,流系发展得比较完整而强盛。此期间东海陆架上,除沿岸流外,东北向流相当明显^[18]。但即使在这个季节,这个流系并不完全控制东海陆架水文结构。台湾东北的黑潮入侵仍不可忽视^[18]。特别在下层,低温高盐的黑潮次表层水可一直向陆架内部延伸。这种低温高盐水的入侵现象

可能部分地与台湾海峡较浅(特别在南部,深于 60m 的只有很窄的澎湖水道),水温较高有关。这时所谓台湾暖流在下层实际上是“寒流”。此外,冬季形成的黄海冷水仍盘据着东海西北部。反过来,“TTT”流系也带动了台湾暖流水向北延伸;同时这个流系在驱动部分长江冲淡水向东北偏转中可能起到主导作用^[2]。此外,这支流在 30°N 附近的转向所造成的流场涡度对于济州岛西南冷涡^[11]的形成和维持可能也起到关键作用。

冬半年,强劲的东北季风会使台湾海峡的北向流大大减弱,甚至可以在一段时间内阻断海峡中的北向入流。目前我们在东海陆架上尚无长期连续测流资料。王胄(1986,内部报告)曾在台湾西北,新竹外海水深约 60m 的采油平台上进行了一年半(1984 年 7 月至 1985 年 12 月)海流连续观测,月平均海流除 1985 年 1 月外都指向东北。如取季平均,则冬季也是东北向流,只是流速很小。方国洪等^[1,18]所得冬季台湾海峡流量 1Sv 可能偏大,主要是由于海流资料太少,而且观测都是依靠船只抛锚进行的,故代表了冬季风力较弱时的海流情况。这样,在冬季,台湾海峡北向海流对东海影响甚小,相反,台北入侵海水对东海陆架水文结构影响则很大。但是,即使在冬季,引起“TTT”流系的驱动机制并不消失,在风速减弱时,北向流就会表现出来;同时风力影响较小的底层流也几乎始终是向北的^[7]。除风应力外,海面强烈冷却及其伴随而来的垂直对流混合对这支近海环流也有很大影响。已有一些研究表明^[24],沿岸区冷而重的海水向南推进能够加强南海暖流并使流轴外移。对于东海陆架上的东北向流亦应有类似现象出现。黄海暖流有冬季强化除了风的作用(参见^[19])外,也可能与这种热力效应有关。此外,已有资料表明,这种机制还会对台北入侵起到加强的作用^[16]。

在季风转换的月份,情形界于上述两者之间。这时“TTT”流系虽不强盛,但这种流动是存在的。前面提到过的王胄(1986)观测到的海流月平均值,在 5~9 月期间大都是 30~40cm/s 之间,大约持续四个半月。冬、夏季之外的其他月份大都在 10~15cm/s 间,年平均值大约 20cm/s。从大量锚碇船只测流资料的统计结果来看^[18],春秋的东北向流趋势也是十分明显的。

除了台北入侵外,黑潮对“TTT”流系另一个有重大影响的区域是 30°N, 127.5°E 附近,这一带传统上被看作对马暖流的发源地。这里实际上也是黑潮向近海的一次入侵。这里附近没有陆地或岛屿,最近的要数东边约 200km 外的吐噶喇群岛,我们暂且叫它吐噶喇西方(或简称吐西)入侵。从图 2 可看出,“TTT”流系在这里趋近黑潮,表现出一个“海水集散区”^[5]的特征。“TTT”流系

所携带的海水和黑潮水也得到充分混合。由于黑潮所携带的水量极大,加上入侵海水,使得对马海峡中的海水具有较接近黑潮水的性质。

除此之外,西边界流的左侧往往伴生上升流,这种流动也会把高盐的黑潮次表层水带向陆架。作为补偿,上层海水应有流向黑潮之趋势,只是由于黑潮水量很大,在水文分布上难以察觉。这样,入侵和涌升流的综合效应会构成一个在“TTT”流系和黑潮之间的横向水循环:下层海水向岸,上层海水离岸。这种环流不断地改变了“TTT”流系所携带的海水的性质。因此,这里需着重说明,所谓“LHTTT 流系”并不暗示对马暖流水来自南海,因为太强烈的海水交换已不可能保持此流系中海水的原有性质。但是在一段比较不太长的距离内,在其下游将可以找到其上游海水的某些特征。

为了较形象地表达上面叙述的流系关系,我们画出了如图 3 的中国近海和邻近洋区的流系结构图。因为“LHTTT”延伸的距离很长,这幅图的范围也就很大,图中又画出了一些与本文主题关系不大的海流分量。因而该图除包含了作者等的成果外^①,还参考了文献^[4,14,20]。这里给出的是一种平均流格局。平均的意义包括时间上的四季平均和空间上的垂直平均(深海和大洋中的中深层流不在内)。由于时间平均,诸如台湾海峡北向流的冬季受阻等季节性现象,上面谈到的横向环流,等均不能表示出来。图中双箭头表示黑潮主流,短的单箭头为“LHTTT”,长的箭头为其他海流分量。

3 关于“吕海台对津流系”驱动机制的若干问题

关于“吕海台对津流系”的驱动机制还是个正在探讨的问题。由于它与黑潮的 3 个主要入侵(分叉)联系在一起,问题就更要复杂一些,而且除了总的驱动机制外,各个部分都有各部分特殊的问题。

赵进平和方国洪^②的解析研究表明,大洋西边界流可以在其西侧的陆架上诱生一支与西边界流同方向的陆架环流。这种西边界流向陆架的入侵是必要的。否则,在陆架边缘流场的涡度将变为负无穷大。陆架环流的强度则决定于其水深。在“LHTTT”流系问题中则决定于吕宋、台湾、对马、津轻等海峡的深度和宽度,以及东海陆架的地形。北美洲东北方陆架(Middle Atlantic Bight)海

① 方国洪、朱耀华、李鸿雁、潘海,1993。西北太平洋环流若干计算结果(将于《台湾海峡及邻近海域讨论会论文集》刊出)。

② 大洋西边界陆架环流的解析研究(投《海洋与湖沼》)。

流是向南的^[15],这可能引起人们的疑惑。实际上这与东海陆架海流向北并不矛盾。实际上北美东北陆架处于湾流离岸点以北,那里的西边界流是拉布拉多海流,相当于太平洋的亲潮,是向南的。

在陆架上,海底摩擦也相当重要。因此在顺流方向必须有一个海面坡度以克服摩擦力。有不少学者注意到横流方向的海面坡度比沿流方向大得多,这个事实当然是毫无疑问的,因为在大尺度或准定常环流中,地转

平衡是基本的,横流方向必须有一个大的压力梯度力以平衡柯氏力。如果不是有某种外力(如江河入流、热盐引起的密度变化等)造成此压力梯度力以驱使海流流动,而是海流流动中海面高度被调整形成地转平衡,那么这种横向压力梯度力似不应看作基本的驱动力。实际上这种力只起平衡作用,它并不做功。

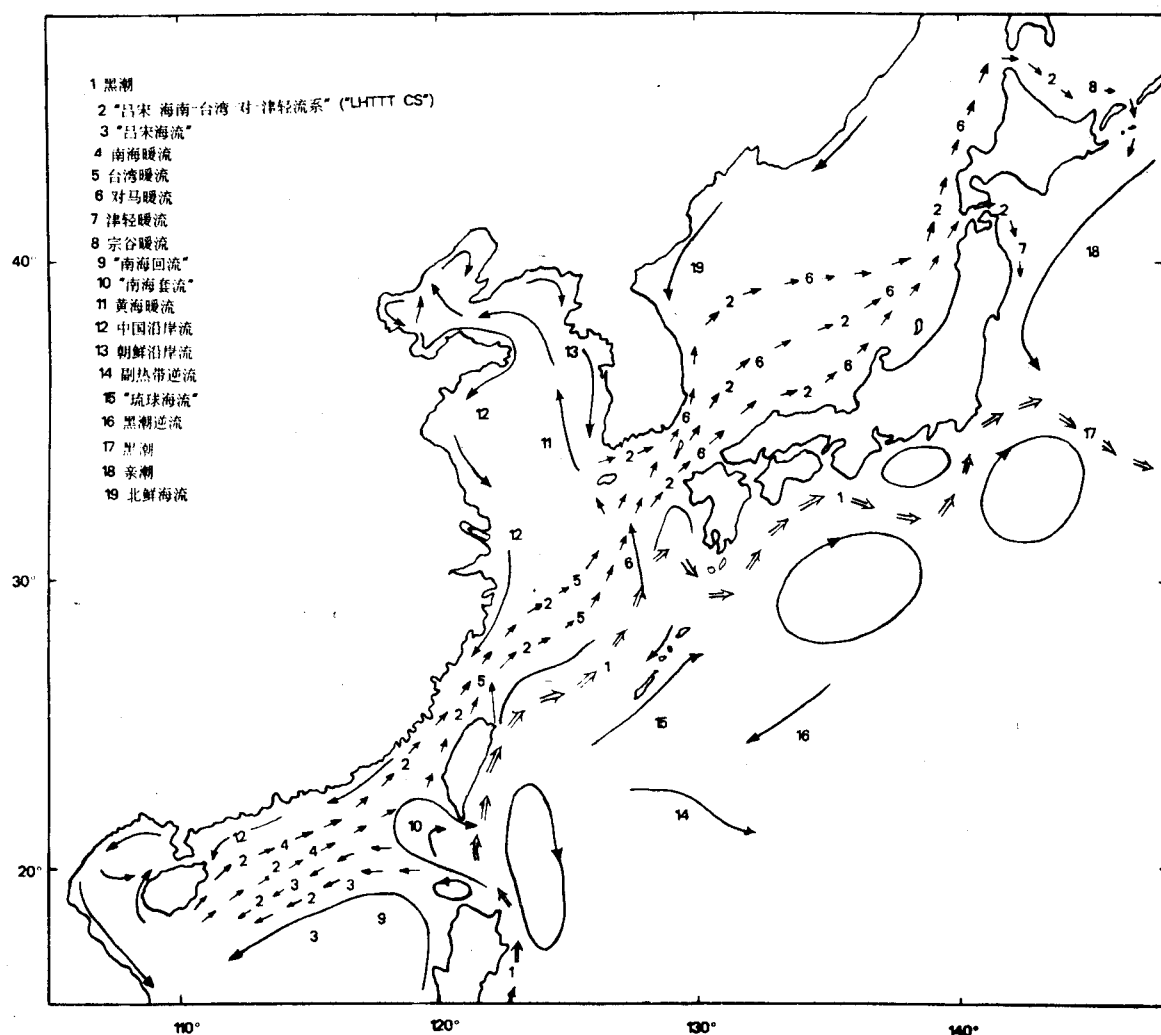


图3 中国近海和邻近洋区平均海流格局示意图

作者等^[1,18]曾提出,由于南方海水较北方热,南方水位也会比北方高,由此可造成南高北低的水位坡度。这里我们想提出西边界流西侧水位南高北低的另一种可能成因。如果西边界流的表层流速和宽度不变,则因柯氏参量变化海流两侧的横流方向水位差在北方要比

南方大。如果西边界流的东缘水位高度一样(否则就会有横向流出现),则在流的西缘,南面的水位就要比北面高。这也将引起两西侧陆架上南高北低的水位差。作者等^[17]根据陆地水准测量,指出中国东南沿岸水位是南高北低的,坡度为 2.62×10^{-7} 。肖屏东^[22]根据美国大地

测时的经验,认为 10^{-7} 坡度的准确度达不到,故南海和东海的绝对水位差可能有问题。这种情形在美国确实出现过。根据 Balazs and Douglas (见 Pugh, 1987^[21])报道,圣迭哥和旧金山相距约 1000km,1968~1969 和 1968~1971 水准测量结果是前者比后者低 0.6m,而 1977~1978 的结果是前者反而比后者高 0.15m! 这种情况在中国则似乎没有那么严重。陈宗镛等^[9]报道的中国沿岸海平面高度变化南海至东海一段与作者等^[17]所引用的刘天珍和王志豪的数据基本一致(但东海至渤海一段相差较大,这与本文讨论的问题无关)。

这里还想提出的一个事实,即地形对台湾-对马-津轻流系的流量和途径的制约作用是十分重要的。台湾浅滩和澎湖水道北方海脊可大大减弱台湾海峡的水流量。东海以 200m 和 100m 为代表的等深线走向对于黑潮和“TTT”流系的位置影响很大。在钓鱼岛北方,100m 和 200m 等深线互相分离,黑潮和“TTT”分得较清楚。这里在两支流之间可能会诱生某种小涡旋。在 30°N 附近,两条等深线趋近,同时也引起了两支流的部分地汇合。在东海,大致上可以把 200m 等深线附近及以深区域看作黑潮控制区,100m 等深线附近及以浅(不包括沿岸流区)区域可看作“TTT”流系控制区。

4 结语

(1) 黑潮对中国东南近海的影响有 4 个主要特征,即在吕宋北方、台湾东北和吐噶喇群岛西方的 3 处入侵和一支从吕宋海峡出发,经过海南南方、台湾海峡、对马海峡和津轻/宗谷海峡,回到太平洋的流系,简称“吕海台对津流系”或“LHTTT CS”。

(2) “吕海台对津流系”的东海至日本海部分即“台湾-对马-津轻暖流系统”与黑潮在日本海相互隔离,但在东海有强烈的海水交换。黑潮通过在台湾东北和吐噶喇西方的入侵和黑潮西缘底部涌升对该流系有重大影响,以至该流系不能在长距离内维持海水特性。但在不太长距离内,下游海不可保持上游海水的一定特性。

(3) 台湾-对马海流起到携带入侵海水北上的作用,它对长江冲淡水的东北转向及济州岛西南冷涡的形成和维持可能起主导作用。

(4) 黑潮的动力效应及近海的岸形和水深分布在“吕海台对津流系”的形成中的作用是基本的,大气的动力和热力效应及海洋中的热盐效应对流系形成和变化也有重大影响。

致谢作者对台湾大学王胄教授惠予提供海流观测报告深表谢意。管秉贤教授与作者的有益讨论对于本文

思想的形成有重要帮助(当然本文提出的观点由作者负责)。本文的计算、绘图等工作由方越、杜湄山和王新怡完成。

参考文献

- [1] 方国洪、赵保仁、朱耀华,1992. 海洋环流研讨会论文集. 海洋出版社,13~17.
- [2] 王从敏、翁学传,1986. 海洋与湖沼论文集. 科学出版社: 13~19.
- [3] 仇德忠、杨天鸿、郭忠信,1984. 热带海洋 3(4):65~73.
- [4] 日本海洋资料中心,1983. 日本近海海流统计图. 165pp.
- [5] 孙湘平,1993. 海洋通报 12(1):1~9.
- [6] 李荣凤、曾庆存,1993. 中国科学 B 23(12):1 329~1 338.
- [7] 张以愚等,1992. 海洋环流研讨会论文集. 海洋出版社:28~40.
- [8] 苏纪兰、刘先炳,1992. 海洋环流研讨会论文集. 海洋出版社,206~215.
- [9] 陈作镛等,1988. 青岛海洋大学学报 18(1):9~14.
- [10] 郭忠信、杨天鸿、仇德忠,1985. 热带海洋 4(1):1~8.
- [11] 胡敦欣、丁余信、熊庆成,1984. 海洋科学集刊 21:87~100.
- [12] 黄企洲,1983. 热带海洋 2(1):35~46.
- [13] 翁学传、王从敏,1984. 海洋科学集刊 21:113~133.
- [14] 管秉贤,1986. 海洋科学集刊 27:1~21.
- [15] Beardsley, R. C. and W. C. Boicourt, 1981. Evolution of Physical Oceanography, The MIT Press, 198-233.
- [16] Chern, C. -S. and J. Wang, 1992. Acta Oceanographica Taiwanica 29:1-17.
- [17] Fang, G. and B. Zhao, 1988. Progress in Oceanography 21: 363-372.
- [18] Fang, G., B. Zhao and Y. Zhu, 1991. Oceanography of Asian Marginal Seas. Elsevier, 345-358.
- [19] Hsueh, Y. and R. D. Romea, 1986. Journal of Physical Oceanography 16: 241-261.
- [20] Nitani, H., 1972. Kuroshio—Its Physical Aspects. University of Tokyo Press, 129-164.
- [21] Pugh, D. T., 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level, John Wiley & Sons, 334.
- [22] Shaw P.-T., 1993. Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas. China Ocean Press: 81-90.
- [23] Wang, J. and C.-S. Chern, 1988. Progress in Oceanography 21:469-491.
- [24] Ye, L., 1994. Terrestrial, Atmospheric and Ocean Sciences (TAO) 5(4): 597-640.