

中国近海的环流动力机制研究*

苏 纪 兰¹

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 国家海洋局 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 本文总结国内外对我国近海环流所作的工作, 对渤海、黄海、东海和南海等环流的主要动力机制作一简述。

关键词: 渤海; 黄海; 东海; 南海; 环流; 海洋动力学

中图分类号: 731.2 文献标识码: A 文章编号: 0253- 4193(2001)04- 0001- 11

1 引言

渤海、黄海、东海和南海 4 个海区由北往南紧靠着中国大陆, 其中渤海、黄海和东海陆架形成宽广的陆缘浅海。渤海平均水深仅为 18 m, 黄海平均水深也只有 44 m。渤海和黄海构成一个浅的向东海敞开的海湾。穿过该海湾中部偏东有一个浅的海槽, 它向南一直可以通至东海的冲绳海槽北端。东海大部分是一宽广陆架, 陆架北邻黄海, 东北通过朝鲜海峡(或称对马海峡)和日本海相接, 南面通过台湾海峡和南海相连。黄河从渤海的南部流入渤海, 长江则在上海附近进入东海。

东海东侧是冲绳海槽, 其最大深度约为 2 300 m。冲绳海槽通过琉球群岛和太平洋紧密相连。沿琉球群岛边缘有 3 个深陷区: 最北面为吐噶喇海峡, 最大深度浅于 1 000 m; 最南端紧靠台湾东岸有大约 700 m 深的海沟; 在中间位于冲绳岛南侧是一个深于 1 000 m 的海谷。

南海的面积几乎是渤海、黄海、东海面积总和的 3 倍。其中部北侧有一很大的深海盆, 最大深度超过 5 000 m。南海通过数个海峡和邻近海区相连: 其中巴士海峡最深, 其海槛深度大约为 2 400 m, 限制了太平洋深层水向南海入侵; 其次为连结苏禄海, 海槛深度超过 200 m 的民都洛海峡; 其他的海峡都浅于 100 m。珠江从中国大陆流入南海北部, 湄公河则从中南半岛注入南海南部。

四大海区均有明显的环流特征。由于缺少长期锚系测流资料, 这些环流特征的认识主要

收稿日期: 2000- 10- 06; 修订日期: 2000- 03- 10.

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(G1999043805; G1999043701).

作者简介: 苏纪兰(1938—), 男, 湖南省攸县人, 教授, 中国科学院院士, 博士, 从事物理海洋学研究.

* 原文载于《The Sea》, 1998, Vol. II, 中文有所补充. 此外, 凡国内中、英文并存的文献一律采用中文文献.

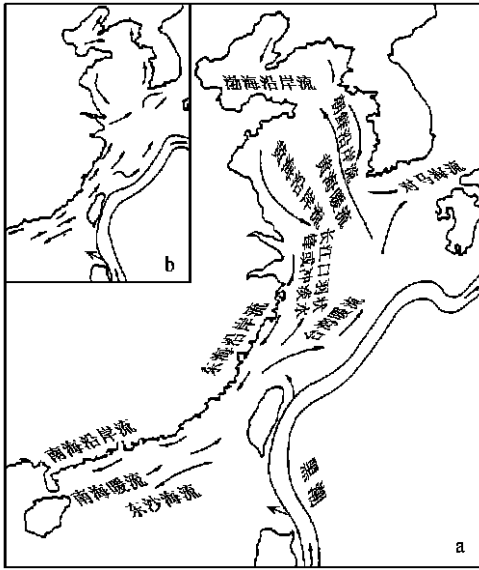


图1 中国近海的季节性环流路径
a. 冬季 b. 夏季

是通过大量的水文调查、简单的过程模式和三维数值模拟结果所得到的。以下将综述这些海区环流动力机制的研究工作和成果。有关评述也可参阅文献[1, 2]。

为讨论方便起见,图1给出了中国近海季节性环流分布,黑潮沿吕宋岛东岸向北流,途经巴士海峡,从台湾东岸向北进入东海,接着沿东海陆坡北上,直到 30°N 转向东,经吐噶喇海峡重新进入太平洋。作为大洋对陆缘浅海区环流的一个驱动力,黑潮对中国近海环流起着十分重要的作用。这里所说的黑潮包括它的流场、温盐结构以及和黑潮有关的副热带环流压力场。大洋对中国近海海区的另一重要驱动力是跨越日本海的压力场差,即朝鲜海峡附近的副热带环流压力场和津轻海峡附近的副极地环流压力场之间的压力差。对马海流是该压力差和其他因素(如东海的盐度比日本海低等)的综合结果。本文把对马海流也作为中国近海环流的一个外部驱动力。

2 渤海和黄海

2.1 冬季环流

冬季,黄海、渤海海洋状况主要由频繁暴发的西伯利亚高压所控制。强烈的北风以及伴随的干燥大陆冷空气使得黄海、渤海的水文特征在垂向上呈混合均匀。风的暴发激发了海平面的亚潮波动,它们沿着黄海的西岸向南传播,一直到南海^[3]。相同的海平面亚潮波动也沿着黄海的东岸向北传播^[4],虽然在渤海看起来没有明显的类似波动^[3]。有足够证据表明,风场可以在整个黄海、渤海激活一个周期约为两天的“抽吸”模态振荡^[5]。

南黄海的舌状温盐结构显示,黄海暖流的温盐特性来自于横跨东海陆架的黑潮(如文献[6, 7])。一般认为黄海暖流可以影响到渤海,例如,沈鸿书和毛汉礼^[8]发现渤海东部在2~3月盐度达极大值。鉴于黄海、渤海半封闭的特性,袁耀初等^[9]建立了一个定态的正压模式,其结果显示,冬季的北风能驱动垂向平均的北向流逆风穿越黄海、渤海海槽,而在黄海的两侧则产生南向的沿岸流,这与湖泊中的风生环流相似。非定常的正压模式显示,黄海暖流实际上在北风松弛后不久最强^[10]。冬季的锚系测流资料也显示,在强劲北风作用下黄海东部的沿岸流大多顺风向南,而在海槽紧跟北风风暴后则是很强的逆风流动^[11]。利用这些资料,Hsueh和Tinsman^[12]推论大量的热量被黄海暖流以平流方式周期性地输入黄海、渤海。

渤海沿岸和黄海北岸通常在12月出现海冰,海冰在次年的3月初融化^[13],一般来说,结冰仅限于水深10 m以浅的海区。然而,也有几乎整个渤海被海冰覆盖的记录^[13]。

2.2 夏季环流

夏季,黄海南部和东海北部的底层盐度分布依然保持着冬季黄海暖流的舌状特征(如文献[14, 15])。因此Uda^[6]最早提出,夏季时黄海暖流有可能也和冬季一样起源于同一区域。然

而毛汉礼等^[16]根据该盐度舌在黄海的温度和营养盐和该舌南部的水文性质的显著差异,对该盐度舌是表征一支流提出质疑. 夏季盛行的南风也不利于黄海暖流的发展. 只有黑潮和台湾暖流的共同作用有利于黄海暖流的发展,但没有依据来说明这个机制起到此作用. 水文分析(如文献[17])和浮标实验^[18]均表明,在夏季,黄海暖流即使存在也是相当弱的,在向东转向朝鲜海峡前,它仅能到达济州岛以北很短的距离. 袁耀初等^[19]的诊断计算结果显示,由于地形诱导,来自东海的台湾暖流对夏季的黄海暖流可能有部分贡献.

夏季最引人注目的是黄海、渤海底层有一个大冷水团,即黄海冷水团^[6]. 赫崇本等^[20]通过历史水文数据分析,认为黄海冷水团来源于冬季滞留的海水. 黄海冷水团是由于夏季表层水变暖,再加上风混合很弱,进而层化的结果. 赵保仁^[21]的分析表明, Simpson Hunter 潮混合参数能很好地标定黄渤海潮锋的位置. 黄海冷水团的存在,夏季在黄海表层诱生一个大尺度的气旋环流^[18]. 模式结果显示,黄海冷水团中心在跃层之上为上升流、之下为下降流^[22]. 黄海层化通常在5月出现,11月消失. 在较浅的渤海,暖季时层化随着风场强弱发生消长,当夏季末北风来时层化被破坏. 黄大吉等^[23]用一个三维模式很好地模拟了这些特征,他们的结果表明对渤海环流动力学的研究必须包含潮流的作用.

3 东海

3.1 黑潮和对马海流

如引言所述,黑潮和对马海流作为外部驱动力,对东海陆架环流有很强的影响. 在菲律宾海,黑潮水通常被认为由四大水团组成:次表层极高盐的“热带水”、极低盐的“中层水”、介于上述两个水团之间的“温跃层水”以及温度低于3℃的“北太平洋深层水”. 然而毛汉礼等^[24]提出一种更适合于研究黑潮水和东海陆架水相互作用的分类方法,他们的“黑潮表层水”(KSW)包括表层水和热带水,他们还把温跃层水的上端部分称为“黑潮次表层水”(KSSW). 确切地说,毛汉礼的水团分类定义更广,黑潮表层水和黑潮次表层水的定义都包含东海陆架上的一些水团.

基于1973~1992年期间的资料,长崎海洋气象台^[25]根据地转计算(参考层70000 hPa)估计,黑潮年平均流量大致为 $25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,季节平均值与年平均值相差小于5%. 有证据表明,黑潮中层水明显通过冲绳南面的海谷从太平洋输入东海^[26]. 该水团为琉球群岛东部的西边界流,即琉球海流,携带北上. 琉球海流核心位于表层下面400~800 m之间^[27],大致为中层水所在的深度.

过去,根据Uda^[6]的观点,普遍认为对马海流是黑潮的分支. 然而,通过Lim^[28]的水文研究,现在一般认为对马海流来源于黑潮和陆架水的混合. 而且,该混合水能从济州岛的南面或北面进入朝鲜海峡(如Beardsley^[18]和Michida^[29]的浮标实验). 也有人认为在冬季,脱离黑潮水的卷流或暖涡可能是提供对马海流水体的直接来源(如文献[30]). 郭炳火等^[31]的研究表明这些卷流或暖涡可能是黑潮从东海陆架转向吐噶喇海峡时,锋面涡被拉伸而产生的部分. 总之,还没有足够的证据表明黑潮对对马海流有很明显的直接贡献(如文献[32]).

对马海流的年平均流量为 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,流量的年变化量为 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,2月到5月之间较小,7月到11月之间较大. 1990~1991年间,通过对朝鲜海峡每两个月一次的ADCP调查显示,除9月份流量超过 $5.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,其他调查月份的流量均为 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右^[33],朝鲜海峡东西通道流量的输送比为3:1^[34].

3.2 黑潮入侵陆架和台湾暖流

台湾东北部的观测总能找到黑潮入侵陆架的证据. 这种入侵最明显的特征是夏季黑潮表层水的强烈涌升和冬季黑潮表层水大量入侵陆架(如图 2 和图 3, 也见文献[35]). 南大西洋的海湾区也常发现相似的特征(如文献[36]), 不同的是台湾东北部的现象有相当大的空间结构且基本上稳定.

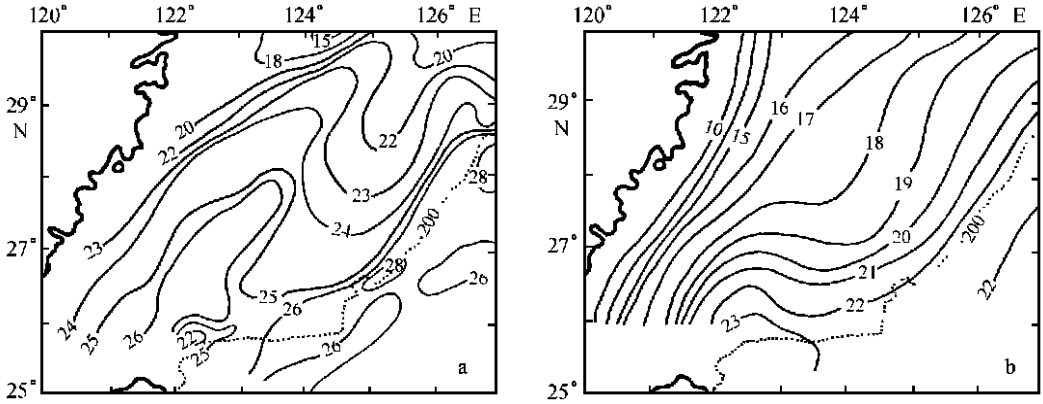


图 2 台湾以北的温度($^{\circ}\text{C}$)分布

a. 1984 年夏季的 30 m 层 b. 1984~1985 年冬季表层. 点线为 200 m 等深线(根据文献[44])

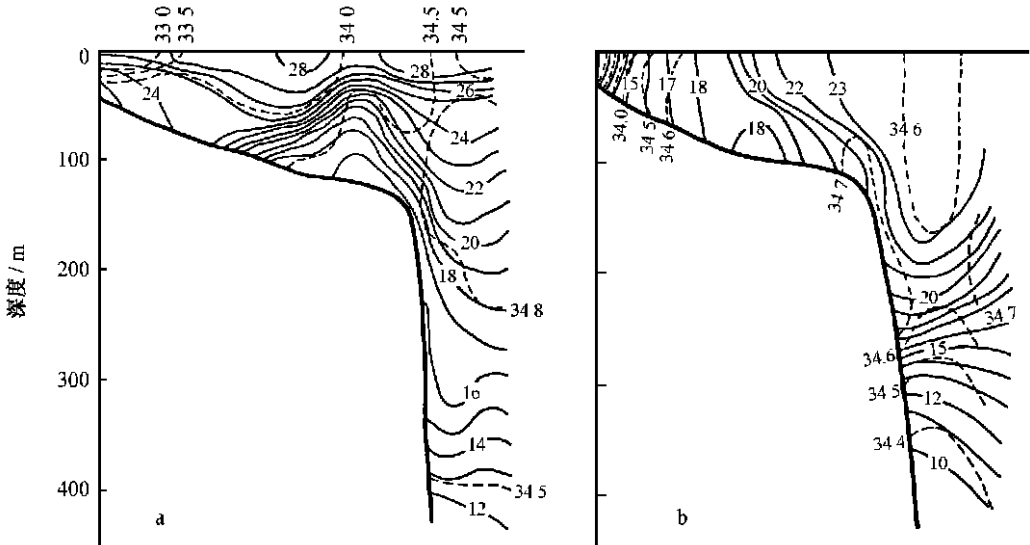


图 3 台湾以北 B 断面上温度($^{\circ}\text{C}$)及盐度的分布

a. 1984 年夏季 b. 1984~1985 年冬季

实线为温度($^{\circ}\text{C}$), 虚线为盐度. 断面大致在图 2 中从(27°N , 121°E)到(25°N , 124°E)的位置(根据文献[44])

在夏季这种上升流常以一个冷中心形式在表层出现, 殷富^[37]首先报道此现象, 后来范光龙^[38]证实了这个冷中心与上升流的关系. 卫星图片显示随着长期南风的加强, 可能由于大量台湾海峡水的涌入, 冷中心强度会减弱甚至消失^[39]. 涌升的黑潮次表层水和陆架水进行了相

当强的垂向混合, 这种混合部分是由于振幅可达 40 m 的内潮作用的缘故^[40]. 混合导致的黑潮次表层水在东海陆架下层甚至长江口的外面也能被观测到^[16, 41]. 冬季时, 在陆架上黑潮表层水与黑潮次表层水仅能于 27°N 以南的层化区域发现^[42]. 潘玉球等^[43]综述了和黑潮入侵有关的东海南部陆架的季节性水文特征.

水文分析和短期测流资料显示, 东海西部受台湾暖流的影响十分明显. 台湾暖流大致在 50~100 m 的等深线之间全年向北流, 甚至在冬季东北季风强盛时期也如此^[44]. 由于在冬季它比向南的沿岸流温度高, 毛汉礼等^[24]称之为台湾暖流. 早期的水文调查^[24]和底部浮标研究^[45]认为台湾暖流起源于台湾东北, 是黑潮的一个分支. 然而管秉贤^[46]指出, 1972~1973 年间日本科学家获取的 GEK 数据不支持黑潮分支的假定, 至少上层水不是这样. 翁学传和王从敏^[47]的水文分析表明, 夏季台湾暖流的底层水来源于台湾东北的黑潮入侵, 而上层水则来自台湾海峡. 台湾暖流进一步地被证实有内侧分支和外侧分支(如文献[44]). 同时, 长期锚系浮标^[48]和海底漂流器^[49]资料均显示, 即使在强北风的冬季, 台湾海峡一直有北向流.

目前的调查和模式研究提供了有关黑潮入侵、台湾暖流及其相互作用的一致性解释, 综述如下(也可参考文献[42]).

(1) 当黑潮自台湾以东进入东海时, 其西倾的等压面突然失去了台湾岸边的“支撑”, 因而黑潮在台湾东北发生空间上的地转调整, 黑潮入侵陆架是这种调整的一种表现. 换句话说, 黑潮的等压面梯度在台湾北部陆架上诱生出沿陆架方向的东北向流, 质量守恒要求在台湾北岸有一非地转西向流. 这支近岸流来源于黑潮, 从动力学上它需要通过台湾北部的边界层来完成, 其间底摩擦起重要作用, 而非线性作用则在黑潮和边界层的连接区是很重要的. 入侵的黑潮水通过底摩擦作用和地形 β 效应获得负涡度, 这导致它又有回到陆坡区的倾向. 由于地形影响, 台湾海峡的入流对本海域浅于 100 m 的环流是重要的.

简单的解析模式^[44]、考虑侧向密度梯度的正压数值模式^[50]以及两层数值模式^[51]均支持以上所述的这个基本机制. 解析模式是 Csanady^[52]为计算深度平均海流而提出的一种诊断模式的扩充. 正压数值模式考虑河口流量、海表层热输送、风场和边界上流量(即黑潮和台湾暖流)等驱动力. 正压模式包括整个中国近海, 但南海只考虑 15°N 以北, 在 15°N 的开边界上加强辐射条件和无净输送流量. 另外, 取 500 m 以深的地形为平底. 两层数值模式考虑了东海的南半部分, 为避免在积分初始时下层水“露顶”, 把陆架水深普遍加深了 100 m, 模型仅有入流和出流.

(2) 横跨巴士海峡与台湾东北之间并和黑潮有关的大尺度压力场, 是终年北向的台湾海峡流及台湾暖流的一个重要驱动力^[53]. 简言之, 此压力场在横跨台湾海峡方向的梯度驱动北向的海峡流, 而其沿台湾海峡方向的梯度则补偿底摩擦及北风的阻力. 然而, 在相当强的北风作用下, 台湾海峡的所有水体确实也会向南流^[54, 50]. 对台湾北部台湾暖流的水文特征有重要影响^[43]. 对马暖流作为东海环流的另一个外部驱动力, 其对于台湾暖流的重要性主要是在东海的北侧.

(3) 冬季时, 陆架水比黑潮水剪度高, 这也是黑潮表层水大量入侵东海陆架的原因. 图 4 给出了考虑侧向密度梯度的正压模式在定常北风下的计算结果. 在上面总结(1)中所列出的情况皆可十分明显地看到. 如总结(1)所述, 大量入侵的黑潮表层水回到了陆坡区, 形成台湾暖流的外侧离岸分支. 从入侵黑潮表层水的主体中又分出台湾暖流的内侧近岸分支, 且紧挨

着向南的沿岸流向北流去(图 4, 也可参考苏纪兰和潘玉球^[44] 讨论的调查结果). 利用刘先炳等^[50] 的模式可以得出, 即使在强北风作用下台湾海峡流转向南时, 海峡以北的台湾暖流近岸分支依然存在; 但当模式中的对马海流消失时, 台湾暖流近岸分支也就不复存在.

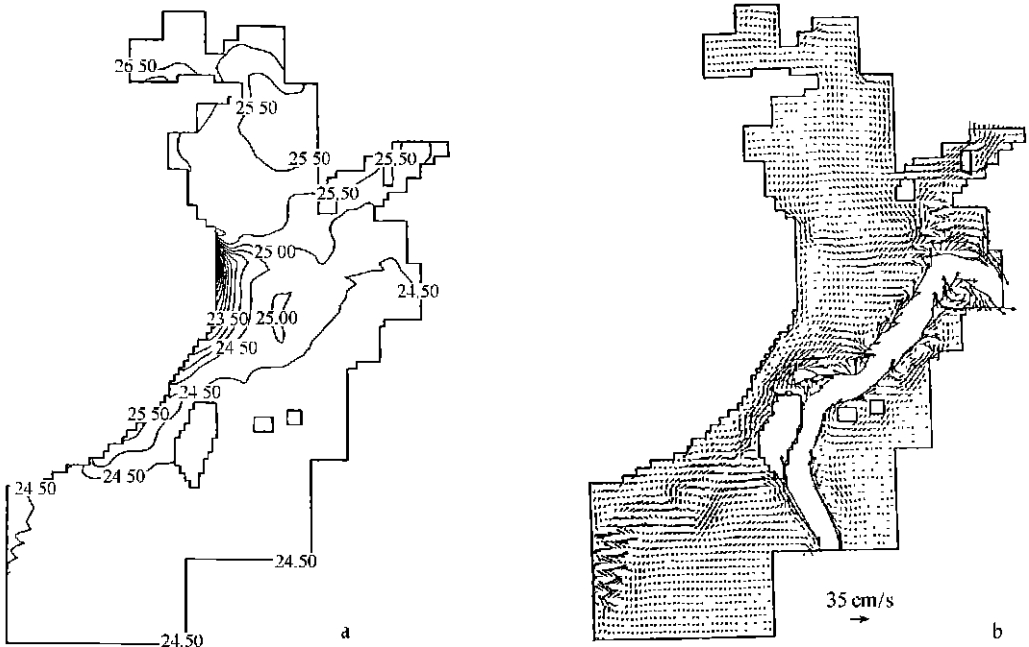


图 4 考虑侧向密度的正压模式在定常见作用下的结果(根据文献^[50] 重计算)

a 密度(σ_t)分布 b. 速度分布

吕宋岛以东的黑潮输送为 $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 对马海流的输送为 $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 北风的量级为 $7.5 \times 10^{-2} \text{ N/m}$. 时间积分到 1 月底. (因网格关系, 长江口外的封闭高密度区在原文未出现)

先前的正压模式^[55, 56] 也得出台湾北部黑潮表层水入侵的相似路径. 这些模式都没考虑侧向密度变化, 因此没能模拟出沿岸流. 两者也都没有考虑风的作用. 应当指出的是, 在图 4 中黄海暖流和黄渤海沿岸流也都被模拟出来.

(4) 夏季时, 陆架上层水比黑潮水密度低, 不利于黑潮表层水的入侵. 其次, 夏季层化很强, 上层水缺乏动力机制(底摩擦力)去改变地转平衡, 因此, 台湾北部不可能有明显的黑潮表层水入侵. 两层模式结果^[50] 支持这种流态假设(见图 5). 下层水通过底层摩擦作用能变成非地转, 因此, 黑潮次表层水的入侵是可能的. 黑潮次表层水的入侵及其折回到坡折地带导致温跃层的穹顶(见图 5a, 图 5b, 图 5c). 换句话说, 不同于一般深海的动力状况, 黑潮次表层水在这里陆架的涌升并不会在上层诱导出气旋式涡. 正如所预料的, 底层入侵的流态和单层模式的结果十分相似(见图 5b).

上层的台湾暖流水来源于穿过台湾海峡的北向流, 该北向流主要是西南季风以及与黑潮有关的压力场共同驱动的结果. 当上层的台湾暖流近岸分支流经温跃层穹顶而得到负涡度后, 一部分水体将从近岸分支分离出来, 成为台湾暖流离岸分支(见图 5a). 被起源于台湾海峡的台湾暖流上层近岸分支所诱导, 部分在下层入侵的黑潮次表层水从离岸分支中分离出来, 并

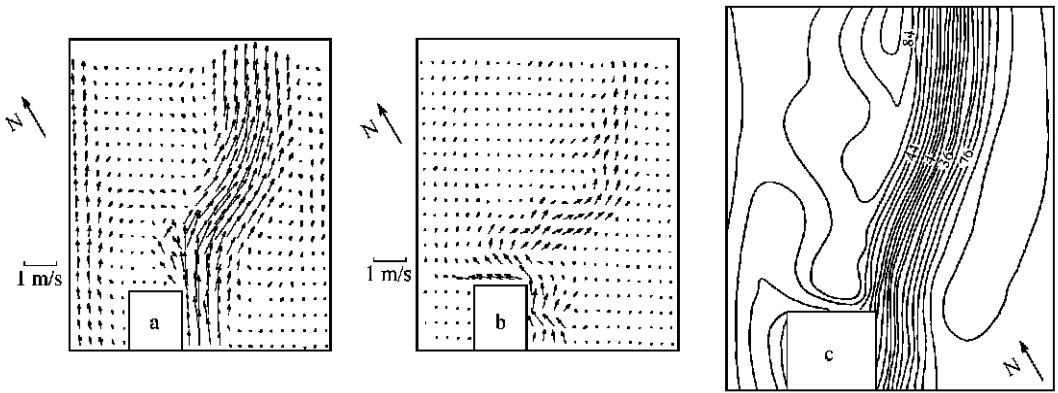


图5 东海南部两层模式结果

a 上层流速(m/s) b. 底层流速(m/s) c. 密度跃层深度(m)

黑潮输送取为 $23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中底层为 $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 台湾暖流的上层入流量为 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. (根据文献[51])

沿岸向北流去(图5b). 台湾暖流上层近岸分支还引起近岸的上升流, 导致温跃层在近岸的抬升. 当模式中台湾海峡的入流被关闭时, 黑潮次表层水的北上扩展也会消失^[51], 同时温跃层的穹顶变得更强, 这和龚国庆等^[39]调查结果一致.

上面所列举的黑潮入侵机制中, 没有考虑台湾北部的东向沿岸流的作用. ADCP 观测结果证实了这支沿岸流的存在, 且该流在冬季^[57]和春末^[58]皆输送大量的陆架水离开陆架. 在暖季, 也发现台湾北部有大量的陆架水被黑潮带出外海, 这可能与当时经过的台风有关^[59].

台湾北部坡折的走向从北向突然转为东北向, 因此由于惯性作用而引起黑潮入侵陆架也是可能的. 然而, 这种作用尚未被充足地研究. 理论上这个因素在所有的数值模式中皆被包括, 但由于它们的网格一般都较粗, 难以很好地解决陡峭陆坡问题. Hsueh 等^[60]用一个侧向无边界的两层海洋模式来研究该机制. 他考虑一个斜压流冲向阶梯型陆架, 上层流的未扰动厚度比阶梯地形的上层大, 并采用解析重力约化模式. 其结果与用 30 a 的 GEK 累积数据得到的平均表层流相比较, 虽然两者在前述的强涌升区下游处皆为向陆架流, 但模式并未考虑下层的重要积极作用, 因此台湾北部坡折走向对黑潮入侵陆架的作用尚有待深入研究. 黑潮受东海陆架阻挡偏转, 也被认为对其南面坡折处观测到的南向逆流有所贡献^[61, 62].

Chao^[63]用三维模式研究了东海密度场的季节变化, 结果再现了一些台湾北部的表层盐度分布特征. 东北季风暴发以后, 黑潮锋面的变陡及相应的上升流强度加强也被模拟出来^[64]. 在Chao的模式中, 没有考虑对马海流的驱动力, 因此, 台湾暖流的内侧分支没有出现. Chao^[63]的结果还显示, 在冬季, 沿陆架南向风应力导致的 Ekman 漂移会对黑潮水跨越陆坡起作用. 然而, 海流观测结果显示^[64, 65], 东北季风暴发 1 个月以后, 上层水才大量入侵陆架(底层水入侵发生在此 10 d 以后). 西伯利亚冷空气引起陆架水的冷却更可能是黑潮入侵的直接原因^[66], 这同上面总结的(3), (4)观点一致. Chuang 和 Liang^[66]还发现, 在夏季, 当台风经过台湾西部时, 黑潮水容易随之入侵或离开陆架.

3.3 100 m 以浅东海陆架的水文特征

夏季, 长江冲淡水(羽状锋)进入东海后初始以逆时针方向偏转. 然而它并不继续顺着海

岸向南流, 相反地它很快转向东北, 横穿陆架向外扩展. 毛汉礼^[67]首次报道这种不寻常的冲淡水行为特征, 并指出该变化和长江流量有关. 一般认为盛行的南风 and 台湾暖流的加强皆促进这种转向(如文献[68]). 实际上长江口以南的东海沿岸流也因同样的因素在夏季向北流去, 结果导致东海的沿岸锋夏季比冬季更为扩散. Beardsley 等^[69]指出: 在夏季, 与长江大流量相关的较大惯性将引起它的冲淡水冲出近岸的浅水区; 冲淡水到深水区后, 因为重力调整的作用较小, 会随陆架流和风场向外扩展. 潘玉球等^[70]历史资料分析得出, 看起来春、夏均会有部分的长江冲淡水沿底层的一块高密度水(见下文)的南边界, 以逆时针旋转离岸而去.

夏季, 长江口以南沿东海近岸有很强的上升流^[16, 71], 西南季风和台湾暖流共同皆是导致该上升流的机制^[72]. 上升流区的底层水和黑潮次表层水的水文特性相近, 因而被毛汉礼等^[16]划为广义的黑潮次表层水. 梁湘三和苏纪兰^[51]的两层模式结果显示, 来源于台湾海峡的台湾暖流近岸分支北向流, 是诱导自台湾北部涌升的黑潮次表层水北上和向岸扩展的主要因素之一.

潘玉球等^[73]分析了大量的历史数据, 发现在冬季有一高密度水核心存在于长江口外东南、水深为 50~100 m 的区域. 并论证这是北上的台湾暖流与两侧的黑潮暖水和沿岸水分别混合、并同时受大气冷却的结果. 这种观点得到了考虑侧向密度梯度的正压模式结果的支持(见图 4). 在暖季东北季风停止后, 这种高密度水一直滞留在温跃层下面且保持着冬季的水文特征. 这个冷高密度的底层水块没有如 Shaw 和 Csanady^[74]所分析的, 会由于斜压和地形共同作用的结果向南移动, 而是向偏北缓慢移动^[73]. 此底层水块的异常运动可能是被在夏季增强的台湾暖流以平流方式携带北上, 并沿程耗失. 潘玉球等^[73]称这个水团为东海冬季高密水, 并给出其水文特征为 $11^{\circ}\text{C} < t < 17^{\circ}\text{C}$, $33.5 < S < 34.5$ 和 $5.2 \times 10^{-3} < \text{DO} < 6.6 \times 10^{-3}$. Kim 等^[75]利用 1986 年 1 月和 7 月的水文资料所作的 T-S 点聚图分析, 也发现了这一显著水团的存在.

济州岛西南有一块横跨 100 km 以上含黏土较高的沉积区, 基于冬季底层漂移物的运动及其他季节有限的 25 h 定点测流结果, 曾得出此处存在中尺度涡并可能与黏土沉积有关的推论(如文献[46]). 严格地说, 中尺度涡有其特殊的定义, 这仅能说是一种流态. 由于通往黄海的深槽紧靠济州岛以西, 而此流态又位处此深槽西侧, 冬季时向南的沿岸流与沿槽北上的风生补偿流可以作为此流态形成的一个机制. 夏季时沿等深线北上的台湾暖流^[72]也可以部分解释此流态的形成. 此外, 上述底层高密水也北上至此, 它与此流态及其伴随的底层冷水块有何关联也是一个值得探讨的问题^[73]. 总之, 迄今尚无对此流态动力学的严格探讨.

4 南海

自 Wyrtki^[76]的经典性南海环流研究后, 对南海 18°N 以南环流的系统研究尚不多. 方文东等^[77]总结了“南沙调查”的结果. 苏纪兰等^[78]结合模式分析, 总结了“南海季风试验”对整个南海的观测结果. 后者调查发现南海南部一些有趣现象, 如越南外海的强反气旋涡、吕宋以西的上层大面积略高盐高温水池等. 其他较多的是有关风生环流的数值模拟(如文献[79, 80]). 本文主要讨论研究较多的南海北部环流的一些特征问题.

4.1 巴士海峡的水交换

菲律宾海西部海域(WPS)的北太平洋水是进入南海的惟一重要大洋水来源, 虽然由巴士海峡进入南海的净流量可能高达 $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上^[80], 但巴士海峡两侧的水文和化学特征是

十分不同的. 南海海盆水的 T-S 关系虽然和 WPS 的一样呈反 S 型, 但南海的次表层极高盐水的值明显较 WPS 的低而中层极低盐水的值则明显较 WPS 的高^[81, 82].

巴士海峡的海槛深度(大约 2 400 m)阻止了 WPS 的底层水进入南海. 温-盐分析表明南海的底层水来源于 WPS 的深层水(1 500~ 2 000m). 由水文分析^[83]和直接测流结果^[84]的估算得出, 此深层水进入南海的流量分别为 $0.42 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. 基于这个估计值, 南海深层水的滞留时间约为 40~ 115 a^[82]. 韩舞鹰和林洪瑛^[85]的盒子模式给出南海 2 000 m 以下的深层水滞留时间为 76 a, 与前者估算相当.

南海盐度的特征支持 WPS 的热带水和中层水入侵南海的看法, 但是至今仍不清楚它们是如何进入南海的. 早期的研究曾提出黑潮有直接分支进入南海^[81, 86], 但到目前为止, 还没有水文证据支持这个看法. 最近两次覆盖整个南海东北部的调查(1992 年 3 月, 1994 年 8~ 9 月)和两次覆盖整个南海的调查(1998 年 4~ 5 月, 6~ 7 月)均表明, WPS 水入侵南海只限于巴士海峡附近, 且没有证据表明黑潮有直接分支进入南海^[87, 88, 78]. 1 000 m 层以上 WPS 海水的入侵可能是由黑潮锋面的不稳定引起的.

在南海东北部的台湾西南角经常出现与 WPS 的极高盐水团性质相近的水(如文献[89]). 从历史资料来看, 这种极高盐水也出现在南海北部陆坡区, 最远离巴士海峡达 800 km^[90]. WPS 的极低盐度水有时也能在南海北部东北角找到^[86]. 上面所提到的 1994 年资料表明存在与黑潮锋面水文特征相似的两个反气旋涡(图 6), 一个已西移到南海北部陆坡, 中心位于 21°N , 117.5°E ; 另一个小涡似乎刚在巴士海峡形成, 中心位于 21°N , 121°E ^[92]. 但其他的几次较全面的调查均未发现类似情况.

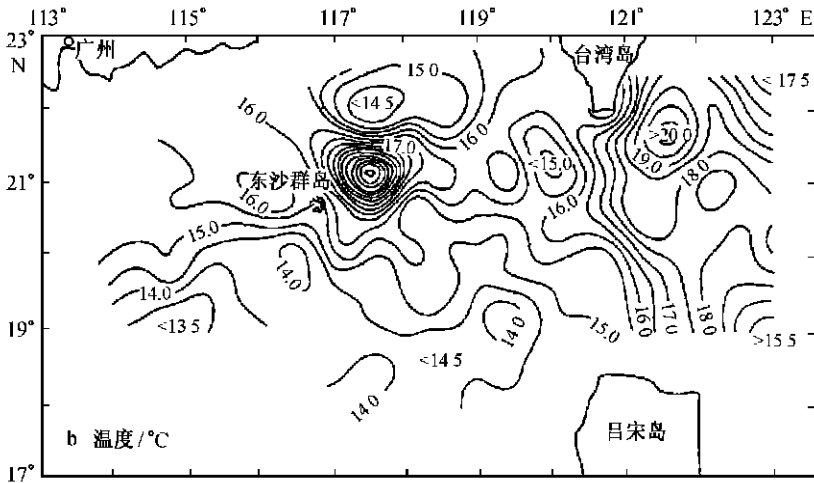


图 6 1994 年 8~ 9 月南海北部 200 m 水深的温度(°C)分布(取自文献[88])

Gong 等^[82]通过化学特征分析得出, 盐度极小层到 1 500 m 之间的南海水可能是南海输出的主要途径, 这和 Wyrki^[76]基于季风作用所得的结论是一致的.

4.2 “东沙海流”

在香港东南 200 km、水深为 320 m 的锚系测流结果显示(Oceanographic Company of Nor-

way, 个人通信), 从 1987 年 8 月到 1988 年 10 月该处全年有一支稳定的西南向流. 在观测期间, 该测流站水深 50, 100, 200 m 的平均速度分别为 0.11, 0.13 和 0.11 m/s, 方向约为 225° (正北为零). 300 m 层的测流仪至调查期间一半以上时失效, 失效之前测得的流向与上层相似, 但流速减半. 这支海流最先在 1979~1982 年获得的 7 组水文资料由动力计算结果发现^[86]. 计算得到夏季流量约 $4 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6 \text{ m}^3$, 冬季流量为 $6 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3$ (参考层为 50 000 hPa). 《南海综合调查报告 (1985)》^[86] 认为该流是黑潮通过巴士海峡进入南海的一个分支, 因此称之为南海黑潮分支. 如 4.1 节所述, 从水文特性分析, 目前所掌握的水文调查资料的皆不支持这个观点. 因此, 对东沙群岛附近陆坡上的这支长年存在的西南向流, 本文称之为“东沙海流”. 苏纪兰等^[1] 曾称之为“巴士海流”, 似不恰当.

刘先炳和苏纪兰^[93] 利用只考虑黑潮驱动的约化重力模式, 发现在南海北部存在着海盆尺度的气旋环流, 它通过平流作用从黑潮获得正涡度, 并有约半年的准周期性振荡 (图 7). 当这

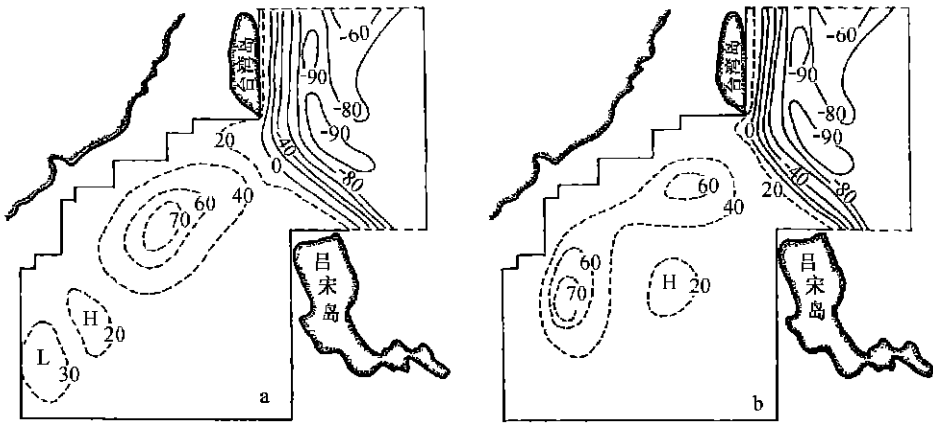


图 7 约化模式给出的南海密跃层深度异常分布(m)
(a) 的分布领先于 (b) 80 d. (取自文献^[93])

个气旋环流周期性增强时, 它的中心先会向西再向西南移动, 并最终从主体脱离出来, 形成向西南移动的气旋涡. 若用 2.5 层约化重力模式, 所得到的振荡周期约为 120d^[78]. 最近 1998 年 4~5 月和 6~7 月两次覆盖整个南海的调查都似乎支持上述海盆尺度气旋涡的存在 (见图 8). 可以认为, 这个海盆尺度气旋环流的受西方强化作用的西边界流, 是对“东沙海流”的一个贡献 (模拟所得的“东沙海流”流量为 $4.5 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$).

应当指出, 不考虑地形及密度场而仅用平均季度风应力旋度场所计算出的 Sverdrup 输送, 无论夏、冬季在南海 $15^\circ \sim 20^\circ \text{N}$ 皆形成大尺度气旋环流^[94], 其西边界流也是对“东沙海流”的另一个贡献. 在 Shaw 和 Chao^[79] 的工作中“东沙海流”只出现在东北季风情况下, 而西南季风时却不出现, 其原因不详. Metzger 和 Hurlbut^[80] 没有给出环流的季节变化, 但他给出的年平均环流明显有“东沙海流”的存在 (流量未给出). 有意义待研究的是, 黑潮和季风这两个动力因子对这个气旋性环流及其“东沙海流”的相对贡献如何.

刘先炳和苏纪兰^[50] 采用的考虑侧向密度梯度的正压模式 (以 500 m 为平底, 但考虑黑潮和北向风的共同作用) 也得到一个海盆尺度的气旋式涡, 其西部和东沙海流相似. 正如所意料

的,与斜压结果相比,正压模式所得的东沙海流在东沙群岛的更东边(即在东沙平台的下坡面),正压的振荡周期也更短些。

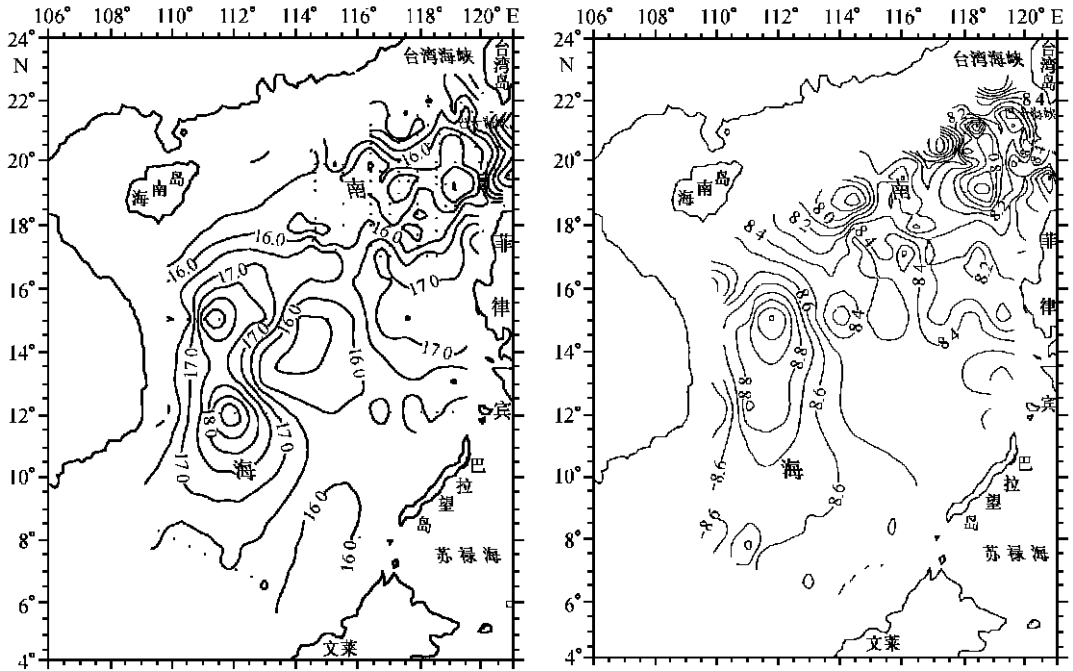


图8 1998年4~5月南海(a)150 m和(b)500 m水深的温度(°C)分布。(取自文献[78])

不论是哪一个机制在起主导作用,这个气旋环流的存在,有利于诱导出在南海东北角台湾西南方生成反气旋环流,也有利于很快地将巴士海峡附近入侵的WPS水输送到南海的东北角和陆坡一带,即Shaw^[90,91]从历史数据中发现WPS水常出现的海区。

由稀疏的历史数据得到的重力位势图来看,黑潮有时似呈流套状(loop)进入南海118°E以西(如文献[81])。不考虑风场的两层模式试验表明,只有当黑潮流量或流幅相当小时流套才会出现,但模拟结果没有出现流套被掐断的情形^[95]。事实上,至今尚没有水文特征的观测依据,支持黑潮曾经以流套形式进入过南海,也没有发现过流套被掐断后留在南海的黑潮环(ring)。

4.3 南海暖流

从1958年到1961年,中国在其邻近陆架进行了广泛的海洋调查。该次调查获得的许多25 h的连续测流站资料显示,在冬季东海南部到南海沿岸流的外侧均为一致的北向流或东北向流。南海的一支称为南海暖流,管秉贤^[96]首先在公开杂志上报道此流,并以历史水文资料的动力计算结果来支持此看法。苏纪兰和王卫^[53]指出,黑潮(更确切地说,北太平洋副热带环流)所带来的海面高度场可能是南海暖流的主要驱动力,即横跨陆架的海面梯度驱动着北向的南海暖流,而沿陆架的海面梯度则与底摩擦、风应力相平衡(见图4)。方国洪和赵保仁^[97]的水位分析,很好地说明了沿陆架方向各种力的平衡关系。夏季时西南季风导致南海暖流比冬季宽。也有观测记录表明珠江水能被南海暖流带向东北^[86]。

虽然南海暖流和“东沙海流”同时存在,但尚没有研究它们相互作用的论文.另外,一般认为南海暖流可穿过台湾海峡继续北上,然而仍不清楚这种流态是如何完成.台湾西南存在的反气旋涡^[98]会使得这个问题十分复杂.该反气旋涡也可能是由4.2节所讨论的南海北部的大尺度气旋涡所诱导而形成.

5 中国近海主要的独特环流特征

中国近海的环流受强季风、大量淡水输入、强烈的潮汐混合以及很强的外海(大洋)驱动力驱使.然而,外海驱动力及中国近海独特地形的相互作用,是导致这个地区存在许多独特环流特征的主要因素.其主要表征如下:

(1) 黑潮在巴士海峡向西入侵有限.黑潮锋的正涡度由平流向西输入南海,在南海北部形成一个横跨海盆尺度的周期性振荡气旋环流,其西侧表现为在东沙群岛附近的一支长年存在的西南向强流.风应力旋度对此气旋环流的形成可能有同等的重要作用.另外,可能有从黑潮锋脱离出来的反气旋涡不时地向西传播进入南海.

(2) 黑潮从台湾东部向北进入东海,陆架由狭窄突然变得宽广,导致黑潮长期地在台湾北部大尺度入侵陆架.入侵有明显的季节特征,冬季从表到次表层皆入侵,而夏季只发生在次表层.黑潮的小尺度陆架入侵以锋面涡动形式出现在下游 26°N 以北.

(3) 南海通过台湾海峡和东海相连.台湾海峡不是黑潮的一个通道,但它为副热带环流的压力场驱动南海到东海的北向陆架流提供了场所,这支北向陆架流仅在强北风作用下才会暂时中断.

(4) 在世界上所有与副热带西边界流相邻的陆架中,以东海的陆架最宽.黑潮的陆架入侵直接影响了东海外陆架(深度大于100 m)的环流动力学.在中陆架(水深为50~100 m),陆架流(台湾暖流)起着相当重要的作用.台湾暖流是由与亚极地环流和副热带环流两者相关的压力场驱动的结果.东海中陆架的突出特征是:东海冬季高密度水的形成、长江冲淡水春夏季向东北的扩散、涌升到台湾北部陆架的黑潮次表层水继续北上且向近岸扩展.

(5) 黄海、渤海的特征一般像一个浅的湖泊,冬季时受强劲北风的作用,带有副热带特征的水体通过南面的开边界由深槽影响该区.

参考文献:

- [1] SU J L, GUAN B X, JIANG J Z. The Kuroshio, Part I, Physical Features[J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1990, 28: 11~ 71.
- [2] 曾呈奎, 周海鸥, 李本川. 中国海洋科学研究及开发[M]. 青岛: 青岛出版社, 1993.
- [3] 陈大可, 苏纪兰. 中国沿岸陆架波的初步研究[J]. *海洋学报*, 1987, 9: 1~ 15.
- [4] HSUEH Y, ROMEA R D. Winter time winds and coastal sea level fluctuations in the north east China sea. Part I: Observations[J]. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 2 091~ 2 106.
- [5] 陈伟, 苏纪兰. 杭州湾水位低频波动机制分析[J]. *海洋学报*, 1991, 13: 1~ 12.
- [6] UDA M. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932[R]. *Japan Imperial Fishery Experimental Station*. 1934, 5: 57~ 190 (in Japanese).
- [7] 管秉贤. 中国海近岸海流研究的一些问题[J]. *海洋与湖沼*, 1962, 4: 121~ 141.
- [8] 沈鸿书, 毛汉礼. 渤海和北黄海西部的的基本水文地质特征[J]. *海洋科学集刊*, 1964, (1): 1~ 22.
- [9] 袁耀初, 苏纪兰, 赵金三. 东中国海陆架环流的单层模式[J]. *海洋学报*, 1982, 4: 1~ 11.

- [10] HSU EH Y, ROMEA R D, deWITT P W. Wintertime winds and coastal sea level fluctuations in the northeast China Sea. Part II: numerical model[J]. *J Phys Oceanogr*, 1986, 16: 241~ 261.
- [11] HSUEH Y. Recent current observation in the Eastern Yellow Sea[J]. *J Geophys Res*, 1988, 93: 612~ 625.
- [12] HSU EH Y, TINSMAN III J H. Synoptic band wintertime heat exchanges in the Yellow Sea[A]. Takano K ed. *Oceanography of Asian Marginal Seas* [M]. Elsevier Oceanography Series, 1991. 54: 269~ 276.
- [13] 孙湘平,姚静娴,黄易畅. 中国沿岸水文气象特征介绍[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 159. 海洋出版社, 220~ 234.
- [14] 赵保仁, LIMBURNER R, 胡敦欣. 夏季黄海南部和东海北部的水文特征[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22: 132~ 139.
- [15] 乐肯堂, 毛汉礼. 冬季黄海南部温盐结构和流系[J]. *海洋与湖沼*, 1990, 21: 505~ 515.
- [16] 毛汉礼, 任允武, 孙国栋. 夏季黄海南部和东海北部水团性质和水文特征的初步分析[J]. *海洋科学集刊*, 1964, (1): 23~ 77.
- [17] PARK Y H. Water characteristics and movements of the Yellow Sea Warm Current in summer[J]. *Progress in Oceanography*, 1986, 17: 243~ 254.
- [18] BEARDSLEY R C, LIMBURNER R, KIM K, et al. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas[J]. *La mer*, 1992, 30: 297~ 314.
- [19] YUAN Y C, SU J L, XIA S Y. A diagnostic model of summer circulation on the northwest shelf of the East China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 1986, 17: 163~ 176.
- [20] 赫崇本, 汪园祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1959, 2: 1~ 14.
- [21] 赵保仁. 潮汐混合诱导的黄海冷水团锋面[J]. *海洋与湖沼*, 1985, 16: 451~ 460.
- [22] 苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团的环流结构[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 1~ 7.
- [23] HUANG D J, SU J L, BACKHAUS J O. Modelling of the seasonal thermal stratification and baroclinic circulation in the Bohai Sea[J]. *Cont Shelf Res*, 1999, 19: 1485~ 1505.
- [24] 毛汉礼, 任允武, 万国铭. 浅海水团的定性分析: T-S 点聚图运用的初步调查[J]. *海洋与湖沼*, 1964, 6: 1~ 22.
- [25] KAGIMOTO T, YAMAGATO T. Seasonal transport variations of the Kuroshio: An OGCM simulation [J]. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27: 403~ 418.
- [26] 于洪华, 苏纪兰, 苗育田, 等. 东海黑潮低盐水核与琉球以东西边界流的入侵[A]. *黑潮研究论文选*[C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 225~ 241.
- [27] 袁耀初, 藤昌宏, 石崎广. 东海黑潮与琉球群岛以东海流的研究[A]. *黑潮调查研究论文集(三)*[C]. 北京: 海洋出版社, 1991. 220~ 234.
- [28] LIM D B. On the origin of Tsushima Current Water[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Korea*, 1971, 6: 85~ 91.
- [29] MICHIDA Y, ISHII H, TANAKA K. Current field of the Kuroshio region observed with ARGOS surface drifters[A]. In: *Proceedings of the Symposium of the China Japan Joint Research Program on the Kuroshio*[C]. Beijing: China Ocean Press, 1994. 62~ 70.
- [30] HUH O K. Spring season flow of the Tsushima Current and its separation from the Kuroshio: satellite evidence[J]. *J Geophys Res*, 1982, 87: 9687~ 9693.
- [31] GUO B H, XIU S M, ISHII H, et al. Kuroshio warm filament and the source of the warm water of the Tsushima Current [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 10: 325~ 340.
- [32] LIE H J, CHO C H. On the origin of the Tsushima Warm Current[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 25081~ 25091.
- [33] ISOBE A, TAWARA S, KANEKO A, et al. Seasonal variability in the Tsushima Warm Current, Tsushima Korea Strait [J]. *Continental Shelf Research*, 1994, 14: 23~ 35.
- [34] YI S U. Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Korea*, 1966, 12: 7~ 13.
- [35] LIN C Y, SHYU C Z, SHIH W H. The Kuroshio fronts and cold eddies off northeastern Taiwan observed by NOAA-AVHRR imageries[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1992, 3: 225~ 242.
- [36] ATKINSON L P, MENZEL DM, BUSH K A. *Oceanography of the Southeastern U. S. Continental Shelf*[C]. American

- Geophysical Union, Washington, D. C. 1986.
- [37] YIN F. Preliminary study of cold water mass near N. N. E. of Taiwan[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1973, 3: 157 ~ 180.
- [38] FAN K L. On upwelling off northeastern shore of Taiwan[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1980, 11: 105~ 117.
- [39] 龚国庆, 徐崇仁, 施文鸿, 等. 台湾东北部海域冷水消长: 1990年6~12月[J]. *台湾海洋学刊*, 1992, 28: 118~ 127.
- [40] CHERN C S, WANG J. On the mixing of waters at a northern offshore area of Taiwan[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1990, 1: 297~ 306.
- [41] WANG K S, SU J L, DONG L X. Hydrographic features of the Changjiang Estuary[A]. *Proc. International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf*[C]. Beijing: China Ocean Press, 1983, 335~ 345.
- [42] SU J L, PAN Y Q, LIANG X S. Kuroshio intrusion and Taiwan Warm Current[A]. Zhou Di, Liang Yuan Bo and Zeng Cheng kui ed. *Oceanology of China Seas*, [M], Vol. I. Kluwer Academic Publishers, 1994, 59~ 70.
- [43] 潘玉球, 苏纪兰, 苏玉芬. 东南南部水文的季节特征[A]. *黑潮调查研究论文集*[C]. 北京: 海洋出版社, 1993, 186 ~ 200.
- [44] 苏纪兰, 潘玉球. 台湾以北陆架环流动力学初步研究[J]. *海洋学报*, 1989, 11: 1~ 14.
- [45] INOUE N. Bottom current on the continental shelf of the East China Sea[J]. *Marine Science Monthly*, 1975, 2: 12~ 18 (in Japanese).
- [46] GUAN B X. A sketch of the current structure and eddy characteristics in the East China Sea[A]. *Proceedings of the International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea* [C]. Beijing: China Ocean Press, 1983, 52~ 73.
- [47] 翁学传, 王从敏. T-S点聚的初步研究和夏季台湾暖流的起源[J]. *海洋科学集刊*, 1984, 21: 113~ 133.
- [48] CHUANG W S. A note of the driving mechanisms of current in the Taiwan Strait[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1986, 42: 355~ 361.
- [49] 张以恩, 翁学传, 张启龙, 等. 台湾海峡的底层流[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22: 124~ 131.
- [50] LIU X B, SU J L. A numerical model of winter circulation in shelf seas adjacent to China. Su J L, Chuang W S, Hsueh Y eds. *Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas*. Beijing: China Ocean Press, 1993, 288~ 298.
- [51] 梁湘三, 苏纪兰. 东海环流的一个两层模式[J]. *东海海洋*, 1994, 12(1): 1~ 20.
- [52] CSANADY G T. Mean circulation in shallow seas[J]. *J Geophys Res*, 1976, 81: 5 389~ 5 399.
- [53] 苏纪兰, 王卫. 南海域台湾暖流源地问题[J]. *东海海洋*, 1990, 8(3): 1~ 9.
- [54] 王 胄, 陈庆生. 冷季台湾海峡东部冷水入侵[J]. *台湾海洋学刊*, 1989, 22: 43~ 67.
- [55] 王卫, 苏纪兰. 东中国海黑潮流系和涡旋现象的一个正压模式[J]. *海洋学报*, 1987, (9): 271~ 285.
- [56] QIU B, IMASATO N. A numerical study on the formation of the Kuroshio countercurrent and the Kuroshio branch current in the East China Sea[J]. *Cont Shelf Res*, 1990, 10: 165~ 184.
- [57] WANG J, CHERN C S. A transect across the thermohaline front north of Taiwan in wintertime[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1990, 25: 31~ 54.
- [58] TANG T Y and TANG W T. Current on the edge of the continental shelf northeast of Taiwan[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1994, 5: 335~ 348.
- [59] CHERN C S, WANG J, WANG D P. The exchange of Kuroshio and East China Sea shelf water[J]. *J Geophys Res*, 1990, 95: 16 017~ 16 023.
- [60] HSUEH Y, WANG J, CHERN C S. The intrusion of the Kuroshio across the continental slope northeast of Taiwan[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97: 14 323~ 14 330.
- [61] HSUEH Y, CHERN C S, WANG J. The blocking of the Kuroshio by the continental shelf northeast of Taiwan[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98: 12 351~ 12 359.
- [62] CHUANG W S, LI H W, TANG T Y, et al. Observations of the countercurrent on the inshore side of the Kuroshio northeast of Taiwan[J]. *Journal of Oceanography*, 1993, 49: 581~ 592.

- [63] CHAO S Y. Circulation of the East China Sea, a numerical model[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1990, 46: 273~ 295.
- [64] LIU K K, GONG G C, SHYU C Z, et al. Response of Kuroshio upwelling to the onset of the northeast monsoon in the sea north of Taiwan: observations and a numerical simulation. *J Geophys Res*, 1992, 97: 12 511~ 12 526.
- [65] TANG T Y, YANG Y J. Low frequency current variability on the shelf break northeast of Taiwan[J]. *Journal of Oceanography*, 1993, 49: 193~ 210.
- [66] CHUANG W S, LIANG W D. Seasonal variability of intrusion of the Kuroshio Water across the continental shelf northeast of Taiwan[J]. *Journal of Oceanography*, 1994, 50: 531~ 542.
- [67] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水混合扩散的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1963, 5: 183~ 206.
- [68] YU HH, ZHENG D C, JIANG J Z. Basic hydrographic characteristics of the studied area[A]. *Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea*[C]. Beijing: China Ocean Press, 1983. 270~ 279.
- [69] BEARDSLEY R. C, LIMEBURNER R, YU H, et al. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4: 57~ 76.
- [70] 潘玉球, 梁湘三, 黄树生. 东海高密度水环流的演变及其对长江口外混合扩散的影响[J]. *东海海洋*, 1997, 15(2): 15~ 24.
- [71] 潘玉球, 徐端蓉, 许建平. 浙江沿岸上升流区的锋面结构、变化及其原因[J]. *海洋学报*, 1985, 7(4): 401~ 411.
- [72] 袁耀初, 苏纪兰, 郝松筠. 东海 1984 年夏季三维海流诊断计算[A]. *黑潮调查研究论文集*[C]. 海洋出版社, 1987. 45~ 53.
- [73] 潘玉球, 苏纪兰, 徐端蓉. 东海冬季高密水的形成和演化[A]. *黑潮调查研究论文集(三)*[C]. 北京: 海洋出版社, 1991. 183~ 192.
- [74] SHAW P T, CSANADY G T. Self advection of density perturbation on a sloping continental shelf [J]. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 769~ 782.
- [75] KIM K, KIM K R, RHEE T S, et al. Identification of water masses in the Yellow Sea and the East China Sea by cluster analysis[A]. *Oceanography of Asian Marginal Seas* [C]. Elsevier Oceanography Series, 54, 1991. 253~ 267.
- [76] WYRTKI K. Scientific results of marine investigation of the South China Sea and Gulf of Thailand. *NAGA Report 2*[R], 1961. 195.
- [77] 方文东, 郭忠信, 黄羽庭. 南海南部海区的环流观测研究[J]. *科学通报*, 1997, 42: 2 264~ 2 271.
- [78] 苏纪兰, 许建平, 蔡树群等. 南海的环流和涡旋[A]. *南海季风暴发和演变及其与海洋的相互作用*(主编: 丁一汇、李崇银). 北京: 气象出版社, 1999. 66~ 72.
- [79] SHAW P T, CHAO S Y. Surface circulation in the South China Sea[J]. *Deep Sea Res I*, 1994, 41: 1 663~ 1 883.
- [80] METZGER E J, HURLBURT H. Coupled dynamics of the South China Sea, Sulu Sea, and the Pacific Ocean[J]. *Journal Geophys Res*, 1996, 101: 12 331~ 12 352.
- [81] NITANI H. Beginning of the Kuroshio[A]. *Stommel H, Yoshida K ed. Kuroshio: Its Physical Aspects*[M]. Seattle: University of Washington Press, 1972. 129~ 163.
- [82] GONG G C, LIU K K, LIU C T, et al. The chemical hydrography of the South China Sea west of Luzon and a comparison with the west Philippine Sea[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1992, 3: 587~ 602.
- [83] WANG J. Observation of abyssal flows in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1986, 16: 36~ 45.
- [84] LIU C T, LIU R J. The deep current in the Bashi Channel[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1988, 20: 107~ 116.
- [85] 韩舞鹰, 林洪瑛. 南海的水通量[J]. *海洋通报*, 1992, 11: 89~ 90.
- [86] 南海综合调查报告. 1979~ 1982 南海北部多学科研究报告, 第二卷[R]. 北京: 科学出版社, 1985. 432.
- [87] XU J P, SU J L, CHOU D Z. Hydrographic analysis on the intrusion of Kuroshio Water into the South China Sea[A]. *Proceedings of the Symposium on Oceanography of the Taiwan Strait and Adjacent Seas*[C]. Beijing: China Ocean Press, 1995. 30~ 44.

- [88] 许建平, 苏纪兰. 黑潮入侵南海的水文分析 II. 1994 年 8~ 9 月航次调查结果[J]. 热带海洋, 1997, 16(2): 1~ 23.
- [89] FAN K L, YU C Y. A study of water masses in the seas of southernmost Taiwan[J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1981, 12: 94~ 111.
- [90] SHAW P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea Water into the South China Sea[J]. J Geophys Res, 1991, 96: 821~ 827.
- [91] SHAW P T. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan [J]. J Geophys Res, 94: 18 213~ 18 226.
- [92] LI L, NOWLIN W, SU J L. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea[J]. Deep Sea Research, Part I, 1998, 45: 1 469~ 1 482.
- [93] 刘先炳, 苏纪兰. 南海环流的一个简化模式[J]. 海洋与湖沼, 1992, 6: 1~ 22.
- [94] 刘秦玉, 杨海军, 刘征宇. 南海 Sverdrup 环流的季节性特征[J]. 自然科学进展, 2000, 10: 1 035~ 1 039.
- [95] 蔡树群. 苏纪兰南海环流的一个两层模式[J]. 海洋学报, 1995, 17(2): 12~ 20.
- [96] 管秉贤. 南海暖流[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9: 117~ 127.
- [97] FANG G H, ZHAO B R. A note on the main forcing of the northeastward flowing current off the southeast China coast[J]. Progress in Oceanography, 1988, 21: 363~ 372.
- [98] 王 甬, 陈庆生. 中国南海北部的暖涡 I. 暖涡的初步观测结果[J]. 台湾海洋学刊, 1987, 18: 92~ 103.

A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China

SU Jir lan¹

(1. Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Recent studies on the circulation dynamics of the coastal oceans next to China are reviewed. These studies were based on extensive hydrographic surveys and some moored (mostly short term) current meter observations, as well as through numerical models. Although strong monsoonal winds, large buoyancy fluxes and active tidal mixing are all important in driving circulation in these oceans, interaction between the open ocean forcing and the unique topography of the coastal oceans seems to be a major contributing factor to many of the outstanding features found here north of 16°N.

Key words: circulation; ocean dynamics; Bohai Sea; Huanghai Sea; East China Sea; South China Sea