

1997 年夏季台湾岛以东与东海黑潮 *

袁耀初 刘勇刚 苏纪兰

(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, 杭州 310012)

金子新

蒋松年

(日本广岛大学工学部, 东广岛市 739)

(国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘 要 基于 1997 年 7 月“中日副热带环流合作调查”航次获得的 CTD 及 ADCP 测流资料, 以及 1997 年 7 月日本“长风丸”号调查船在东海获得的 CTD 资料, 采用改进逆方法分别对台湾岛以东黑潮和涡分布及其特征以及东海黑潮进行了计算, 获得的主要结果为: (1) 黑潮通过台湾岛东南断面 K_2 时, 位于 123°E 以西, 其净北向流量约为 $37.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 与 1985 年 5 月、1995 年 10 月以及 1996 年 5~6 月三个航次黑潮通过断面 K_2 的流量相比, 流量减小, 最大流速也减小, 位置也要偏西, 表明在 1997 年夏季的强 El Niño 期间, 黑潮的强度及流量在台湾岛东南海域都减小了; (2) 在台湾岛以东黑潮的右侧存在一个反气旋式暖涡, 暖涡的中心约位于断面 K_3 的 $22^\circ 20' \text{N}$, 123°E 处, 而该反气旋式暖涡的东侧存在一支南向流; (3) 在南向流以东以及计算海域东南分别存在冷涡 C_1 及冷涡 C_2 ; (4) 在 1997 年 7 月期间台湾岛以东黑潮没有一个东分支流向琉球群岛以东海域, 这个流型与 1995 年 10 月及 1996 年 5 月两航次时流型甚不相同; (5) 在宫古岛以南、冲绳岛东南与上述冷涡 C_1 之间的区域, 存在一个反气旋式再生环流; (6) 在 1997 年 7 月通过在东海 PN 断面的流量约为 $23.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. 这些计算结果与 ADCP 测流结果甚为一致

关键词 夏季台湾岛以东及东海黑潮强 El Niño 气旋及反气旋涡

1 引言

关于台湾岛以东黑潮的研究工作, 我们已在文献 [1~3] 作了叙述, 在此不再评述, 需要指出在台湾岛以东黑潮有两种不同流态, 一种如 1985 年初夏时台湾岛以东黑潮并无黑潮的分支流向琉球群岛以东海域^[1], 另一种如 1995 年秋季及 1996 年初夏时台湾岛以东黑潮有一个东分支流向琉球群岛以东海域, 成为琉球群岛以西边界流的一个来源^[2,3], 并已被 ADCP 实测流所证实^[3]. Yuan 等^[2,3]进一步指出, 上述两种不同的黑潮流态与台湾岛以东海域气旋涡及反气旋式涡的位置、尺度大小、强度以及它们的相对位置紧密相关.

本文采用了 Yuan 等^[4]提出的改进逆方法, 利用 1997 年 7 月“向阳红 14”号调查船执行“中日副热带环流合作调查”航次获得的 CTD 及 ADCP 测流资料, 以及 1997 年 7 月日本长崎气象台“长风丸”号调查船获得的 CTD 资料, 分别对台湾岛以东海域环流及东海环流进行

* 国家自然科学基金资助项目 (编号 49736200 及 49776287); 国家重点基础研究发展规划资助项目 (编号 G1999043802).

第一作者简介 袁耀初, 男, 61 岁, 研究员, 博士生导师, 从事海流动力学等研究

了计算. 我们将进一步讨论 1997 年夏季台湾岛以东黑潮及涡的分布及其特性, 以及东海黑潮的流的特性等. 特别注意到 1997 年是强的 El Niño 年, 我们将比较 1997 年夏季航次与以前的几个航次在台湾岛以东海域环流及东海环流的变异.

2 资料及数值计算

本文采用 Yuan 等^[4]提出的改进逆方法计算台湾岛以东海域及东海 (图 1) 环流、流函数及流量. CTD 资料分别来自两个航次, 即 1997 年 7 月“向阳红 14”号调查船执行“中日副

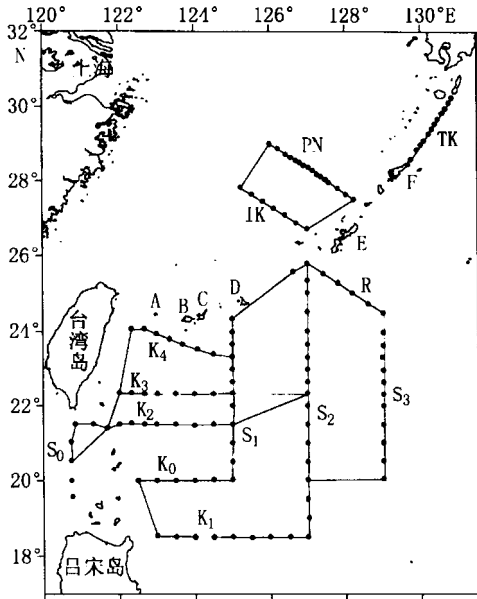


图 1 台湾岛以东、琉球群岛东南海域以及东海的水文站、断面以及计算单元

A. 与那国岛, B. 西表岛, C. 石垣岛,
D. 宫古岛 E. 冲绳岛, F. 奄美大岛

热带环流合作调查”航次 (以下简称为区域 1) 以及 1997 年 7 月日本长崎气象台“长风丸”号调查船在东海执行的航次 (以下简称为区域 2). 由图 1 可知, 在台湾岛以东及琉球群岛东南海域有七个计算单元 (boxes), 而东海仅一个计算单元, 每个计算单元分层等皆与文献 [2, 3] 相同, 在此不再重复.

计算中采用了以下计算参数. 本航次风场资料来自“向阳红 14”号调查船上观测, 在此期间, 平均风速与风向分别为 4.3 m/s 与 152° . 由于缺乏详细的精确风场, 假定风场是定常、均匀的, 并分别为上述的平均风向和风速. 设 q_{e1} 与 q_{e2} 分别为计算海区海面热通量多年每月平均的最小与最大值, 在区域 1 (q_{e1}, q_{e2}) 的值分别取为 $(-1.05, 0.21)$ [单位为 $10^3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$]. $q_{e1} < 0$, 为热量从大气传递到海洋; 在区域 2 (q_{e1}, q_{e2}) 的值分别取为 $(-2.09, -0.21)$, $q_{e1} < 0, q_{e2} < 0$ 为热量从大气传递到海洋. 按照 Yuan 等^[4]的研究, 垂直涡动粘滞系数 A_z 和垂直涡动扩散系数 K_v 分别取为 100 和 $10 \text{ cm}^2/\text{s}$.

别取为 100 和 $10 \text{ cm}^2/\text{s}$.

我们采用 Fiadeiro 和 Veronis 方法^[5]选择最佳参考面, 按照他们的方法确定最佳参考面如下: 在区域 1, 最佳参考面 Z_0 取 2200 m , 即当水深大于 2200 m 时取 $Z_0 = 2200 \text{ m}$, 而当水深小于或等于 2200 m , 取当地水深; 在区域 2, 当水深大于 700 m 时, 最佳参考面 Z_0 取 700 m , 当水深不大于 700 m 时, Z_0 取当地水深.

3 台湾岛以东海域海流的主要特性

主要讨论台湾岛及吕宋岛以东海域断面 K_1, K_2, K_3, K_4, S_1 以及冲绳岛东南断面 R 的流速分布 (各断面位置见图 1), 以了解 1997 年 7 月台湾岛以东黑潮的流速结构及涡等的主要特性.

3.1 断面 K_1

断面 K_1 位于吕宋岛以东海域 (图 1). 图 2 表示断面 K_1 的流速分布. 由图 1 及 2 可知, 黑潮主流位于断面 K_1 以西海域, 北向流分别位于计算点 1, 2, 4, 7 和 8, 其中在计算点 2 较大的北向流速值为 40 cm/s , 在 100 m 水层附近, 在计算点 8 较大的北向流速值为 75 cm/s ,

位于表层处,而在计算点 4,流速值较小.在计算点 3,5,6,出现南向流,南向流在计算点 5 的流速较大,最大流速值为 74 cm/s,位于表层.上述流速分布与 ADCP 测流结果(见图 10a, b)大致上一致.

3.2 断面 K_2

断面 K_2 位于台湾岛南部以东海域(见图 1).图 3 表示断面 K_2 的流速分布.由图 3 可知黑潮在断面 K_2 有两个核心:黑潮主流位于断面 K_2 的西侧,即计算点 1 和 2 其最大流速值为 112 cm/s,位于表层.与其他航次黑潮主流在断面 K_2 处最大流速值 $u_{\max}$ 比较,例如在 1995 年 10 月及 1996 年 5 月在 K_2 断面处 $u_{\max}$ 分别为 257 及 196 cm/s^[2,3],可知在 1997 年 El Niño 期间黑潮在 K_2 断面流速值明显减小;黑潮的第二个核心位于计算点 4,5 其最大流速值为 49 cm/s,位于计算点 4 的表层.南向流分别出现在计算点 3 自表层至 800 m,计算点 6 的 75 m 以上层,计算点 7 的 50 m 以下层,计算点 8,9 以及计算点 10 的 100 m 以上层,南向流的值并不大,最大值出现在计算点 9 的 100 m 处,其值为 40 cm/s.其次,黑潮以下也出现南向流,在不同计算点,黑潮的位置有所不同,例如在计算点 1 和 2 黑潮分别位于 1 400 m 以上以及 1 800 m 以上水层.

比较上述计算流速分布和 ADCP 测流的结果(见图 10a, b),注意图 10a, b 中,在断面 K_2 上 ADCP 测流只在 122° E 以东,即在计算点 4 及其以东的站进行了 ADCP 测流,因此,我们只能比较在计算点 4 及其以东的计算点上两者的结果,由图 3 及 10a, b 可知,两者在定性上是一致的.

3.3 断面 K_3 及 K_4

断面 K_3 位于台湾岛以东、断面 K_2 以北海域.图 4a 表示断面 K_3 上流速分布.由图 1 及图 4a 可知,黑潮主流位于断面 K_3 以西海域,部分黑潮通过断面 K_3 的西部分,即计算点 1, 2 及 3,即由于 K_3 断面未能靠岸,计算得到的黑潮仅是其主流的东侧部分,其西侧部分未能显现,以下 K_4 断面也类似.黑潮在 K_3 断面的最大流速为 81 cm/s,位于计算点 3 的表层.黑潮以下,同样有南向逆流,在计算点 4, 5 及 6 有南向流,南向流速在表层不小于 50 cm/s.由以下 ADCP 测流(见图 10)、温度分布(见图 9)以及流函数分布(见图 8)可知,部分北向流及部分南海流都是反气旋式涡的组成部分.比较上述计算的流速分布和 ADCP 测流的结果(见图 10)可知,它们在定性上是一致的.

断面 K_4 位于断面 K_3 以北,图 4b 表示断面 K_4 上流速分布.由图 4b 知,黑潮通过断面 K_4 的西部分,即计算点 1, 2 及 3,它的最大流速值为 117 cm/s,在计算点 1 的表层.在计算点 4, 5, 6 及 7 都出现南向流,最大流速值为 48 cm/s,在计算点 5 的表层.与断面 K_3 相似,

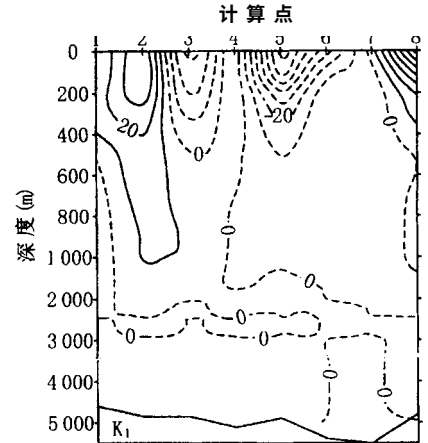


图 2 1997 年 7 月断面 K_1 的流速 (cm/s) 分布
正为北向流

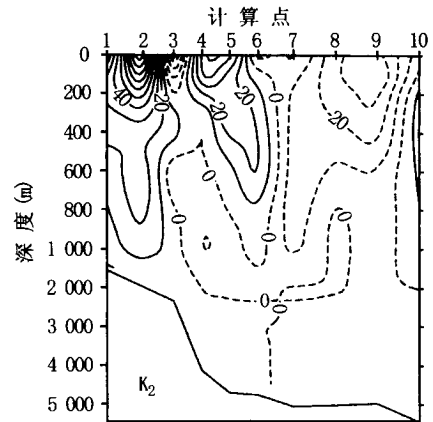


图 3 1997 年 7 月断面 K_2 的流速 (cm/s) 分布
正为北向流

由以下 ADCP 测流 (见图 10a, b)、温度分布 (见图 9) 及流函数分布 (见图 8a) 可知, 部分北向流及部分南向流都是反气旋式涡的组成部分. 比较上述流速分布和 ADCP 测流的结果 (见图 10a, b) 可知, 它们在定性上是一致的.

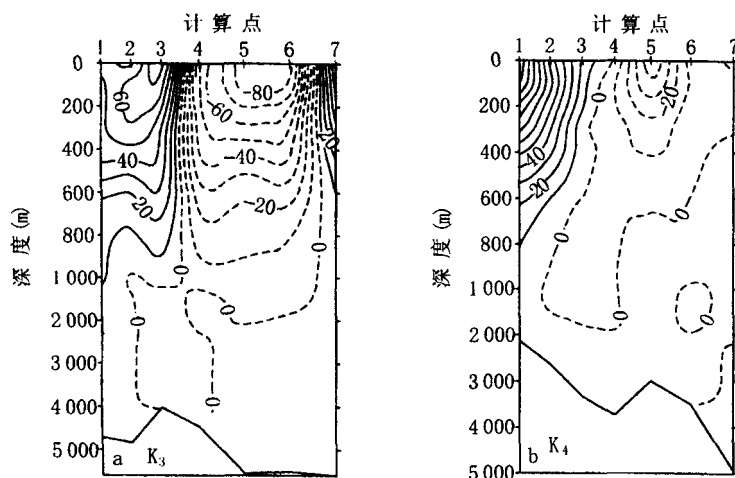


图4 1997年7月断面 K_3 (a) 和断面 K_4 (b) 的流速 (cm/s) 分布
正为北向流

3.4 断面 S_1 及 R

断面 S_1 位于 125°E 处 (见图 1). 图 5 表示断面 S_1 的流速分布. 由图 5 可知, 从计算点 1 到 5, 基本上被西向流所支配, 在计算点 4 西向流的流速值较大, 在表层至 150 m 处, 流速在 $35 \sim 40 \text{ cm/s}$ 变化, 最大流速值为 46 cm/s , 在 300 m 处. 在计算点 6~9 出现东向流, 流速不大, 最大流速为 24 cm/s 位于计算点 7 的表层. 在计算点 10 和 11 又出现西向流, 最大流速值为 29 cm/s , 位于计算点 11 的 30 m 处. 上述的计算结果与 ADCP 测流 (见图 10) 比较, 在定性上基本一致.

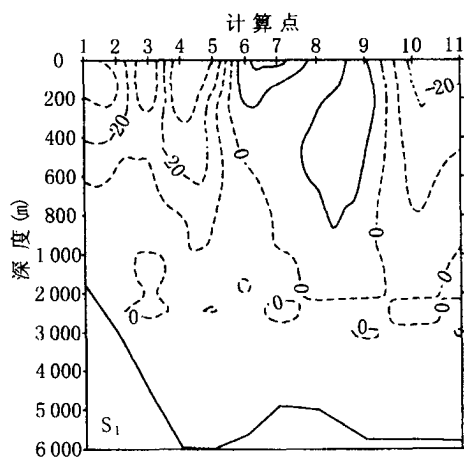


图5 1997年7月断面 S_1 的流速 (cm/s) 分布
正为东向流

断面 R 位于冲绳岛东南, 图 6 表示断面 R 上流速分布. 由图 6 可知, 在计算点 1, 计算点 2 的 100 m 以下及计算点 3 都有东北向流, 其核心位于计算点 1 的次表层 150~700 m 内, 最大流速值为 22 cm/s , 位于计算点 1 的 200 m 处, 这与我们以前的结果相类似 (见文献 [6]). 在计算点 4 与 5 出现西南向流. 由上述计算结果与 ADCP 测流比较可看出, 在定性上它们也基本一致.

4 东海黑潮

讨论在 1997 年 7 月东海断面 PN, IK 以及 TK 的流速分布, 以了解 1997 年 7 月航次东海黑潮的流速特性.

4.1 断面 PN

PN 断面是东海著名断面 (见图 1). 图 7a 表示 PN 断面上流速分布. 图 7a 表明黑潮在 1997 年 7 月 PN 断面上有两个核心: 一个主核心位于陆坡上, 即计算点 6 与 7, 最大流速为 141 cm/s, 在计算点 6 的表层; 第二个核心在计算点 9 和 10, 最大流速为 91 cm/s, 在计算点 9 的 125 m 处. 黑潮深度在不同计算点有不同位置, 约在 700~780 m. 黑潮以下存在逆流, 我们以前的研究也已指出过, 例如在文献 [7]. 黑潮以东, 即在计算点 11 和 12 的表层有南向流, 但在南向流以下又有北向流. 在计算点 13 和 14 也有北向流. 由上述结果与 ADCP 测流比较可看出, 在定性上它们是一致的 (见图 10c).

上节已指出, 在 1997 年 El Niño 期间, 在 K₂ 断面上黑潮流速明显减小, 但在东海黑潮, 与以前相比, 例如文献 [7, 8], 1997 年 7 月黑潮在 PN 断面流速并未明显减小, 即减小值不大. 由下节可知, 在此期间, 通过 PN 断面的流量也减小了.

4.2 断面 IK 及 TK

断面 IK 位于 PN 断面以南, 在冲绳岛以西海域. 图 7b 表示 IK 断面的流速分布. 图 7b 表明黑潮在 IK 断面只有一个核心, 位于计算点 4 和 5, 最大流速约为 122 cm/s, 在计算点 4 的表层上. 黑潮在 IK 断面上最深的深度可达 1 000 m 左右. 黑潮以下也有南向逆流. 由上述结果与 ADCP 测流比较可看出, 在定性上它们是一致的 (见图 10c).

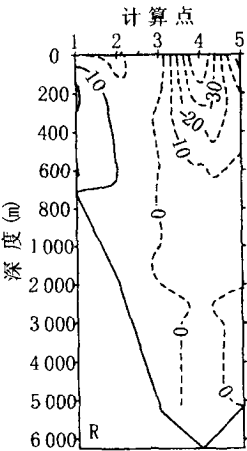


图 6 1997 年 7 月在断面 R 上流速 (cm/s) 分布
正为东北向流

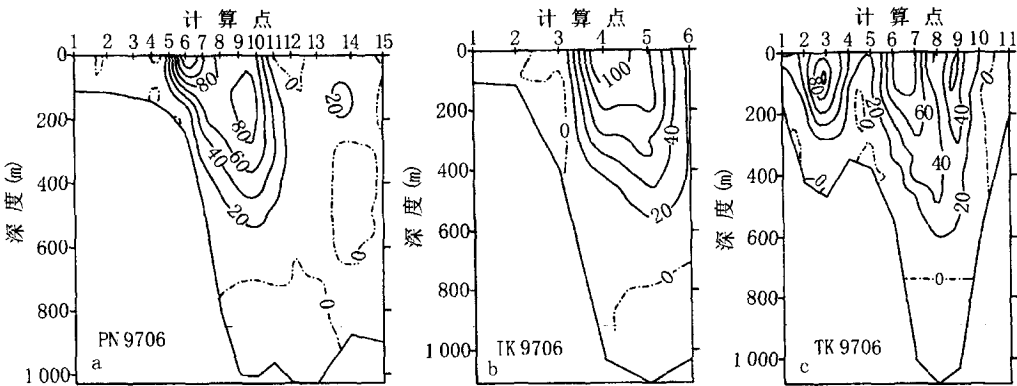


图 7 1997 年 7 月断面 PN (a)、断面 IK (b) 和断面 TK (c) 的流速 (cm/s) 分布
a b. 正为北向流, c 正为东向流

断面 TK 位于吐噶喇海峡 (见图 1). 由于断面 TK 附近没有合适的断面能够与断面 TK 组成一个计算单元, 因此, 我们采用动力计算方法 (参考面深度取 700 m) 来计算断面 TK 的流速分布. 图 7c 表示 TK 断面的流速分布. 由图 7c 知, 东向流在 TK 断面有三个流核心: 黑潮的主核心位于计算点 3, 最大东向流速为 118 cm/s; 第二个核心位于计算点 6 和 7, 其最大东向流速为 88 cm/s, 位于计算点 6 的 75 m 处; 第三个核心位于计算点 9, 其最大东向流速为 63 cm/s. 如文献 [7] 所述, 在 TK 断面黑潮经常出现多核心的结构. 在 TK 断面南侧, 即计算点 11 出现了西向流, 流速不大, 最大西向流约为 11 cm/s. ADCP 测流 (见图 10c) 也表明在 TK 断面的南侧有西向流.

5 流函数及流量

图 8a 表示台湾岛以东及琉球群岛东南海域流函数及流量分布。黑潮在断面 K_2 位于 123°E 以西，然后作反气旋式弯曲进入断面 K_4 。在 1997 年 7 月黑潮通过断面 K_2 的北向净流量约为 $37.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。与 1985 年初夏、1995 年 10 月和 1996 年初夏比较，黑潮在 K_2 断面位置在 1997 年 7 月时要偏西，黑潮的流量明显减小，表 1 表明在 1997 年夏季的强 El Niño 期间，黑潮的强度及流量在台湾岛东南海域明显减小。与 1995 年 10 月及 1996 年初夏时台湾岛以东黑

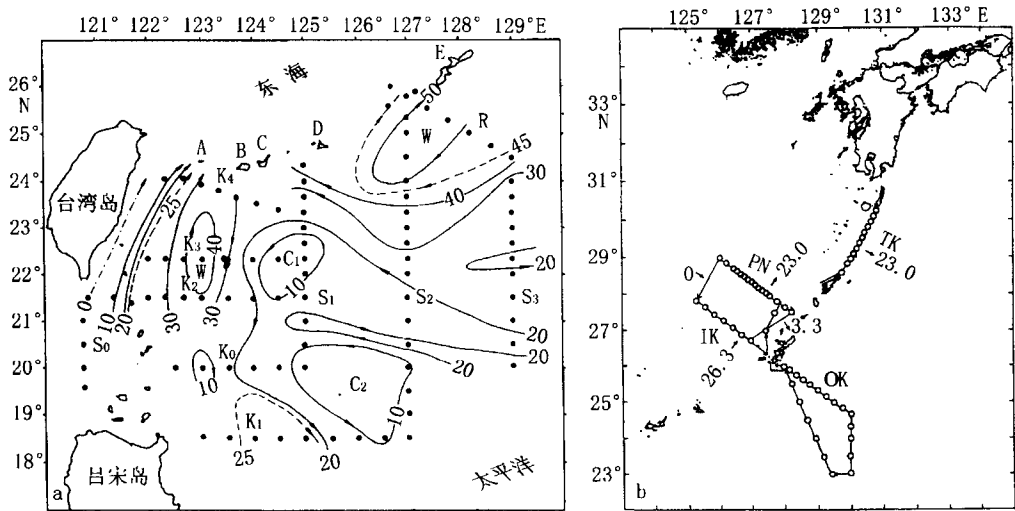


图 8 1997 年 7 月台湾岛以东及吕宋岛以东海域流函数及流量 ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) (a) 和东海海域各断面的流量 (b) 分布

A—F 说明同图 1

表 1 在一些航次黑潮通过断面 K_2 的位置及流量

航次	黑潮的流量 ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)	黑潮的位置
1985 年初夏	45.0	123°E 以西
1995 年 10 月	57.8	$123^\circ 20'\text{E}$ 以西
1996 年初夏	44.6	$123^\circ 40'\text{E}$ 以西
1997 年 7 月	37.5	123°E 以西

潮流态比较^[2,3]，1997 年 7 月在台湾岛以东海域并没有黑潮分支流向琉球群岛以东海域，这不同于 1995 年 10 月及 1996 年初夏时黑潮在台湾岛以东海域的流态。黑潮以东有一个反气旋式暖涡，其暖涡中心位于 $22^\circ 20'\text{N}$, 123°E ，水平温度分布自表层至 1 000 m 以深，都显示这个暖涡的存在（见图 9a—c）。图 8a 还表明在暖涡以东存在南向流，而在南向流以东存在一个气旋式冷涡 C_1 ，冷涡中心约位于 $22^\circ 20'\text{N}$, $124^\circ 30'\text{E}$ ，水平温度分布也显示这支南向流及冷涡 C_1 的存在。其次，在宫古岛以东及冲绳岛东南和上述冷涡 C_1 之间的海域，有一个反气旋式的再生环流（recirculation）（见图 8a 及图 9a—c），这个反气旋式的再生环流在其他航次^[1~3]也总是存在，只是它的强度及尺度范围有所不同，如文献^[1~3]所述，此反气旋式的再生环流是琉球群岛以东北向海流的来源之一。最后，在计算海域东南也有一个冷涡 C_2 。

图 10 表示 1997 年 7 月航次在调查海域 ADCP 的测流结果。把上述计算结果（见图 8a）、

温度分布 (图 9) 与 ADCP 测流结果 (见图 10) 比较, 它们在定性上甚为一致, 例如图 10 证实黑潮以东有一个暖涡, 其中心约位于 $22^{\circ}20'N$, $123^{\circ}E$, 暖涡以东有一支南向流, 而在南向流以东有一个气旋式冷涡 C_1 . 图 10 还证实宫古岛以东、冲绳岛东南有一个反气旋式的再生环流等.

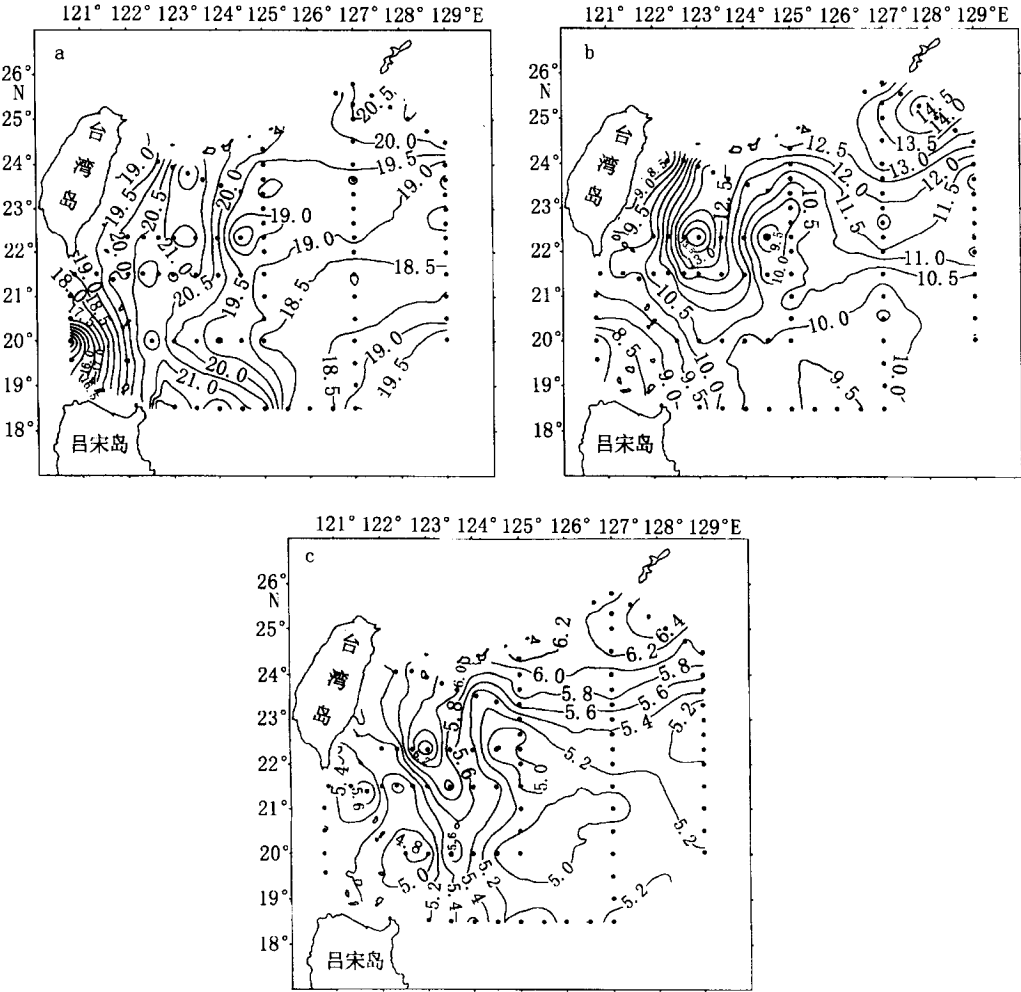


图 9 1997 年 7 月在 200 m (a)、500 m (b) 和 800 m (c) 的水平方向温度 ($^{\circ}C$) 分布

图 8b 表示在东海断面的流量分布. 由图 8b 可知, 通过断面 IK 及 PN 的北向净流量分别为 26.3×10^6 及 $23.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 而通过断面 TK 的东向净流量为 $23.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. 由水平温度分布可知, 在 IK 断面上黑潮以东可能存在一个反气旋式暖涡, 其中心位于 IK 断面的东端, 该反气旋式暖涡的流量约为 $3.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 如图 8b 所示.

6 结语

基于 1997 年 7 月“中日副热带环流合作调查”航次获得的 CTD 及 ADCP 测流资料, 以及 1997 年 7 月日本“长风丸”号调查船在东海获得的 CTD 资料, 采用改进逆方法分别对这两个调查海域进行了计算, 得到以下的主要结果:

6.1 1997年7月黑潮通过台湾岛东南断面 K_2 时位于 123°E 以西，其北向净流量约为 $37.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，与 1985 年 5 月、1995 年 10 月及 1996 年 5~6 月三个航次比较，本航次黑潮在 K_2 断面位置要偏西，黑潮的强度及流量都明显减小，表明在 1997 年强 El Niño 期间，黑潮的强度及流量在台湾岛东南海域都减小。

6.2 1997 年 7 月在台湾岛以东海域并没有黑潮分支流向琉球群岛以东海域，这不同于 1995 年 10 月及 1996 年初夏时黑潮在台湾岛以东海域的流态。

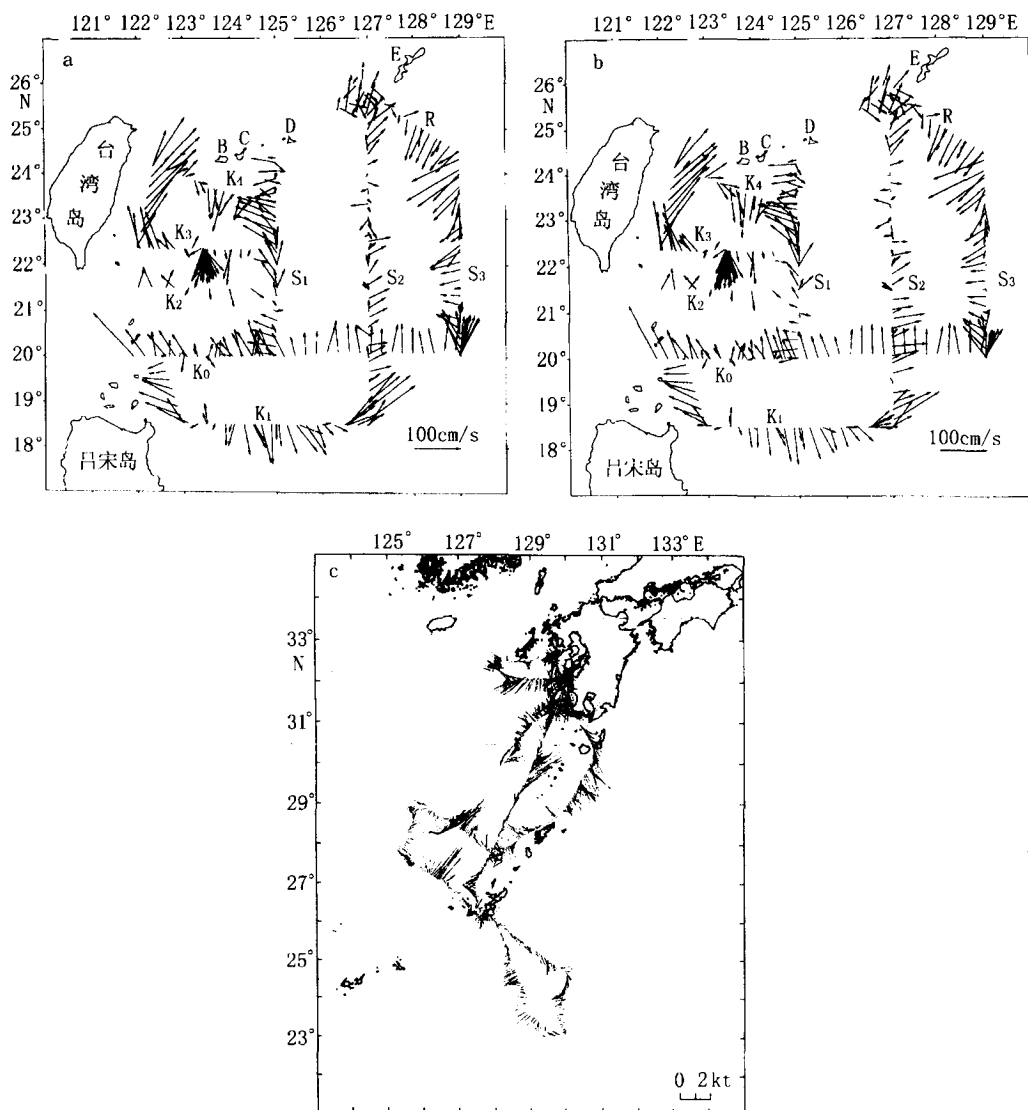


图 10 1997 年夏季在调查海域 ADCP 测流在以下层次的平均流速矢量分布

a. 25~75 m 层次, b. 75~125 m 层次, c. 在东海 ADCP 实测表层流

(6 月 13 日至 8 月 1 日, 图 c 来自长崎气象台“海洋速报”第 163 号)

B—F 说明同图 1

6.3 黑潮以下有南向逆流。

6.4 在台湾岛以东黑潮的右侧有一个反气旋式涡，暖涡中心位于 $22^\circ 20' \text{N}$, 123°E 处，而该

反气旋式暖涡的东侧也有一支南向流。

6.5 在该南向流以东以及计算海域东南分别有一个冷涡 C_1 及 C_2 。

6.6 在宫古岛以南、冲绳岛东南和上述冷涡 C_1 之间的区域，有一个反气旋式的再生环流。

6.7 1997年7月在东海通过断面 IK 及 PN 的北向净流量分别约为 26.3×10^6 及 23.0×10^6 m^3/s ，而通过断面 TK 的东向净流量约为 23.0×10^6 m^3/s 。

6.8 在区域 1 及区域 2 获得的上述计算结果与 ADCP 实测流结果比较，在定性上甚为一致。

参考文献

- 1 Yuan Yaochu, Liu Cho-teng, Pan Ziqin *et al.* Circulation east of Taiwan Island and in the East China Sea and east of Ryūkyū Islands in the early summer of 1985. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, **15** (4): 423~435
- 2 Yuan Yaochu, Liu Yonggang, Liu Cho-teng *et al.* The Kuroshio east of Taiwan Island and the currents east of the Ryūkyū-guntō during October of 1995. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, **17** (1): 1~13
- 3 Yuan Yaochu, Arata Kaneko, Su Jilan *et al.* The Kuroshio east of Taiwan Island and in the East China Sea and the currents east of Ryūkyū Islands during the early summer of 1996. *Journal of Oceanography*, 1998, **54**, 217~226
- 4 Yuan Yaochu, Su Jilan, Pan Ziqin. Volume and heat transports of the Kuroshio in the East China Sea in 1989. *La Mer*, 1992, **30**, 251~262
- 5 Fiadeiro M E, Veronis G. On the determination of absolute velocities in the ocean. *Journal of Marine Research*, 1982, **40** (Supp. 1): 159~182
- 6 Yuan Yaochu, Su Jilan, Pan Ziqin *et al.* The western boundary current east of the Ryūkyū Islands. *La Mer*, 1995, **33**, 1~11
- 7 Yuan Yaochu, Pan Ziqin, Kaneko Ikuo *et al.* Variability of the Kuroshio in the East China Sea and the currents east of the Ryūkyū Islands. In: *Proceedings of China-Japan Joint Symposium of the Cooperative Research on the Kuroshio*. Beijing: China Ocean Press, 1992, 121~144
- 8 刘勇刚, 袁耀初. 1992 年东海黑潮的变异. *海洋学报*, 1998, **20** (6): 1~11

The Kuroshio East of Taiwan Island and in the East China Sea during the Summer of 1997

Yuan Yaochu,^{1,2} Liu Yonggang,^{1,2} Su Jilan,^{1,2} Kaneko Arata,³ Jiang Songnian⁴

1. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

2. Key Lab of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

3. Hiroshima University, Faculty of Engineering, Higashi-Hiroshima 739

4. National Marine Data and Information Service, State Oceanic Administration, Tianjin 300171

Abstract—The hydrographic data were obtained from two cruises, i. e., a cruise of the China-Japan Joint Investigation on Sub-tropical Circulation System during July 1997 and another cruise during July 1997 by the R/V *Chofu-Maru*. Using above data, a modified inverse method is used to compute the Kuroshio east of Taiwan Island and in the East China Sea, respectively. It is found that: (1) the northward net volume transport (VT) of the Kuroshio through Section K₂ southeast of Taiwan Island is about 37.5×10^6 m^3/s during July 1997. In comparison with the VT of the Kuroshio through Section K₂ during October 1995 and May-June 1996, this value of VT of the Kuroshio decreases obviously, i. e., the VT of the Kuroshio southeast of Taiwan Island decreases obviously during the stronger El Niño of 1997 year; (2) the Kuroshio is located west of 123° E at Section K₂ during July 1997; (3) there is not a branch of the Kuroshio east of Taiwan Island to flow northeastward to the region east of Ryūkyū-guntō during July 1997; (4) there is an anticyclonic eddy east of the Kuroshio and its center is located at about 22°20' N, 123°E, and there is also a southward flow east of this anticyclonic eddy; (5) there are the cold eddy C_1 east of a southward flow and the cold eddy C_2 in a south-eastern part of computed region, respectively; (6) there is an anticyclonic recirculating gyre south of Miyako-jima and southeast of

Okinawa-jima during July 1997; (7) the northward net VT of the Kuroshio through Section PN in the East China Sea is about $23.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ during July 1997. The comparison between the above computed results and the ADCP observed currents shows that they agree qualitatively each other.

Key words Kuroshio east of Taiwan Island and in East China Sea during summer, stronger El Niño, cyclonic and anticyclonic eddies

1997 年冬季台湾岛以东与东海黑潮

袁耀初 刘勇刚 苏纪兰

(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, 杭州 310012)

金子新

(日本广岛大学工学部, 东广岛市 739)

摘 要 基于1997年12月“中日副热带环流合作调查”航次获得的CTD及ADCP测流资料,以及1997年11月至12月日本“长风丸”号调查船在东海获得的CTD资料,分别采用改进逆方法及改进动力计算方法对台湾岛以东黑潮和涡以及东海黑潮进行了计算,获得的主要结果是:(1)在台湾岛东南、巴士海峡附近海域存在一个较强的气旋式冷涡 C_1 ,方向自西南向东北,呈舌状.在 K_0 断面东部(约 20°N 附近)也存在一个冷涡 C_2 ,其中心位置约在 $20^\circ\text{N}, 124^\circ30'\text{E}$ 。(2)黑潮在台湾岛东南通过冷涡 C_1 以东海域,然后作气旋式弯曲.台湾岛以东黑潮分为主流及一个分支,黑潮主流向西北方向流动,最后转为向北,通过与那国岛以西海域进入东海.黑潮的一个分支,其流量不大,并不流向冲绳岛以东海域,而向北通过与那国岛和西表岛之间海域进入东海。(3)该航次黑潮在断面 K_2 的位置在 124°E 以西,与其他航次时期相比,此时黑潮通过台湾岛东南断面 K_2 的位置明显向东移动.黑潮通过断面 K_2 的北向净流量约为 $27.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,与其他航次相比,明显减小.这表明,在1997年冬季出现很强的El Niño现象时,黑潮的强度及流量在台湾岛东南海域明显减小了。(4)在石垣岛、宫古岛及冲绳岛以南海域,存在一个范围较大的反气旋式再生环流,与其他航次相比,范围扩大,它的中心向西移动,约位于 $24^\circ\text{N}, 125^\circ \sim 126^\circ\text{E}$ 之间。(5)在1997年11月通过东海PN断面的北向净流量约为 $25.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词 冬季台湾岛以东及东海黑潮 很强 El Niño 舌状冷涡 反气旋式再生环流

1 引言

已在文献[1~3]叙述了台湾岛以东黑潮的研究工作,在文献[4]还特别指出台湾岛以东黑潮存在两种不同流态,以及这些流态与黑潮周围存在气旋式涡和反气旋式涡的位置、尺度大小、强度、它们的相对位置密切关系等,在此不再评述。

本文采用了Yuan等提出的改进逆方法^[5]以及改进动力计算方法^[6],利用1997年12月“向阳红14”号调查船执行“中日副热带环流合作调查”航次获得的CTD等资料,以及1997年11月日本长崎气象台“长风丸”号调查船获得的CTD资料,分别对台湾岛以东海域环流及东海环流进行了计算.我们将进一步讨论1997年冬季台湾岛以东黑潮与涡的分布及其特性,以及东海黑潮的特性等,特别注意到,1997年是强El Niño年,冬季的要比夏季的更强,本文将比较各

* 国家自然科学基金资助项目(编号:49736200及49776287)国家重点基础研究发展规划资助项目(编号:G1999043802)

第一作者简介 袁耀初,男,61岁,研究员,博士生导师,从事海流动力学等研究。

航次,以及 El Niño 期间与非 El Niño 时期在台湾岛以东海域环流及东海环流的变异.

2 资料及数值计算

图 1 表示计算海域水文站、断面及计算单元.本文分别采用 Yuan 等提出的改进逆方法^[5]及动力计算方法^[6]计算台湾岛以东海域及东海(图 1)环流、流函数及流量.CTD 资料分别来自

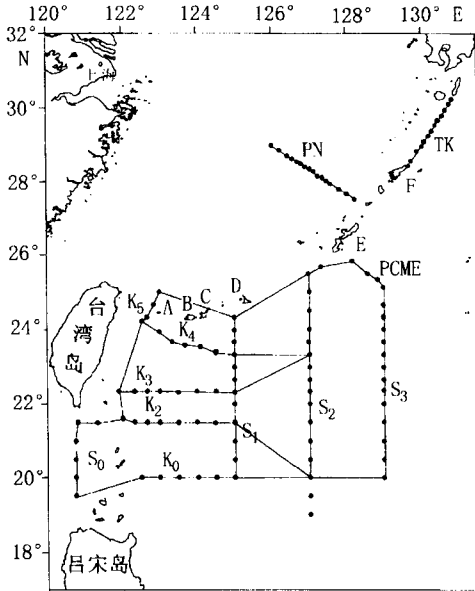


图 1 台湾岛以东、琉球群岛东南海域以及东海的水文站、断面和计算单元

A. 与那国岛, B. 西表岛, C. 石垣岛, D. 宫古岛, E. 冲绳岛, F. 奄美大岛

以下两个航次,即 1997 年 12 月“向阳红 14”号调查船执行“中日副热带环流合作调查”航次(以下简称区域 1)以及 1997 年 11 月下旬至 12 月日本长崎气象台“长风丸”号调查船在东海执行的航次(以下简称区域 2).由图 1 可知,在台湾岛以东及琉球群岛东南海域有 9 个计算单元(boxes),而在东海断面 PN 及 TK 不能组成一个计算单元,我们采用改进动力计算方法^[6],每个计算单元分层皆与文献[2,3]相同,在此不再重复.如文献[5]所述,计算点位于两测站之间的中间处.

计算中我们采用了以下的计算参数 风场资料来自“向阳红 14”号调查船上的观测,在调查期间,平均风速与风向分别为 5.3 m/s 和 78°.由于缺乏详细的精确风场,假定风场是定常、均匀的,并分别等于上述的平均风速和风向.设 q_{e1} 与 q_{e2} 分别为计算海区海面热通量多年每月平均的最小和最大值,在区域 1(q_{e1}, q_{e2})的值分别为(1.47,

3.78)[单位: $10^3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$],若 $q_{e1} > 0, q_{e2} > 0$, 表示热量从海洋传递到大气.按照 Yuan 等^[5]研究,垂直涡动粘滞系数 A_z 与垂直涡动扩散系数 K_v 分别取 100 和 $10 \text{ cm}^2/\text{s}$.

我们采用 Fiadeiro 和 Veronis^[7]方法选择最佳参考面深度,确定最佳参考面深度如下在区域 1,最佳参考面深度 Z_0 取 1 900 m,即当水深不小于 1 900 m 时, $Z_0 = 1 900 \text{ m}$ 但当水深小于 1 900 m 时,则取当地水深 在区域 2,如上所述,我们采用了改进动力计算方法,取参考面深度为 700 m.

3 台湾岛以东海域海流的主要特性

主要讨论台湾岛东南及其以东海域断面 K_1, K_2, K_3, K_4 ,位于巴士海峡断面 S_0 ,南北向断面 S_1, S_2 以及冲绳岛东南断面 PCME(如图 1 中各断面的位置)上的流速分布,以进一步了解 1997 年 12 月台湾岛以东黑潮及其附近涡等的主要特性.

3.1 断面 K_0

断面 K_0 位于台湾岛东南及吕宋东北海域(图 1),图 2 表示断面 K_0 的流速分布.由图 1 及 2 可知,黑潮通过断面 K_0 的计算点 1 及其以西海域.在计算点 1,最大北向流速为 75 cm/s,位于 30 m 处,1 900 m 以浅皆为北向流,1 900 m 以深则出现南向流.在计算点 5 也出现北向流,其最大北向流速为 51 cm/s,位于 200 m 处.在计算点 2 和 4 之间,主要被南向流所控制.由以下水平温度分布(见图 9a-d)及流函数分布(见图 8)可知,在计算点 5 北向流和计算点 4,3 的南向流可

能皆为气旋式冷涡的一部分。

3.2 断面 K_2

断面 K_2 位于台湾岛东南海域(见图 1),图 3 表示断面 K_2 的流速分布。由图 3 可知,在巴士海峡附近及台湾岛南部附近计算点 1 处流速方向皆为南向,计算点 2 处 200 m 以浅也为南向,黑潮位于计算点 2 以东,这表明,与以前几个航次相比,黑潮位置明显向东移动。黑潮的最大流速只有 87 cm/s,位于计算点 3 的 20 m 处。与其他航次黑潮在断面 K_2 处最大流速 $u_{\max}$ 相比,例如 1995 年 10 月及 1996 年 5 月在 K_2 断面处 $u_{\max}$ 分别为 257 及 196 cm/s^[2,3],而 1997 年 7 月在断面 K_2 处 $u_{\max}$ 为 112 cm/s。注意 1997 年 12 月 El Niño 的强度比 7 月时更强,表明在 1997 年 12 月很强的 El Niño 期间,黑潮流速剧减。除计算点 8 在 100 m 以浅表层出现南向流外,计算点 3 以东皆为北向流,但黑潮以下又出现南向逆流。上述流速分布与 ADCP 测流结果(见图 10)比较,在定性上基本一致。要说明一点,与 1997 年 7 月航次相比,本航次 ADCP 测流资料的质量不是十分好,特别是流速测量值,仅供参考。为此,我们对某些断面上速度分布作了比较,最后在讨论流函数分布时(见图 8)也作了一些比较。

3.3 断面 K_3 及 K_4

断面 K_3 位于台湾岛以东、断面 K_2 以北海域(见图 1)。图 4a 表示断面 K_3 上的流速分布。由图 4a 可知,黑潮在断面 K_3 上流核心位于计算点 2 和 3,最大流速只有 54 cm/s,在计算点 3 的 30 m 处。由图 1 知,由于 K_3 断面未能靠岸,计算得到的黑潮是其主流的东侧部分,其西侧部分未能显现。在计算点 4 及 7 的 150 m 以浅水层处均出现南向流。北向流还有一个核心出现在计算点 6,最大流速为 35 cm/s 在计算点 6 的 125 m 处。由第 4 节讨论可知,这支北向流部分即为黑潮的东分支。黑潮以下存在南向逆流。

断面 K_4 位于断面 K_3 以北海域,图 4b 表示断面 K_4 上的流速分布。由图 1 及图 4b 可知,与 K_3 断面相似,由于 K_4 断面也未靠岸,计算得到的是黑潮主流的东侧部分,其西侧部分未能显现。部分黑潮位于计算点 1,其最大流速为 40 cm/s,在 30 m 处。计算点 5 处又出现北向流,其流速较大,最大流速为 70 cm/s,位于 100 m 处。由以下第 4 节讨论可知,这支北向流部分即为黑潮东分支。南向流出现在计算点 2 和 4 的 300 m 以浅,以及计算点 6 的 200 m 以浅水层等。上述流速分布与 ADCP 测流结果(见图 10)在定性上基本一致。

3.4 断面 S_0

断面 S_0 位于巴士海峡(见图 1),是南北向断面。图 5 为断面 S_0 上的流速分布。由图 5 可知,在计算点 1,即断面 S_0 的北端,150 m 以浅水层皆为西向流,而在 150 m 以深被东向流所控制,最大东

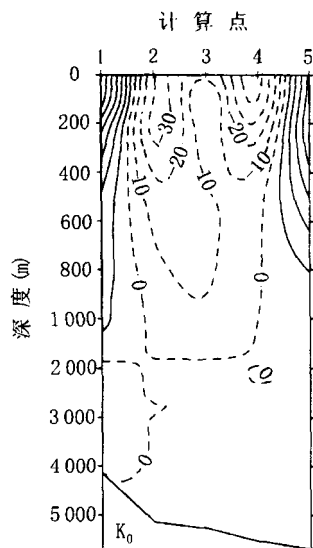


图 2 1997 年 12 月断面 K_0 的流速 (cm/s) 分布
正为北向流

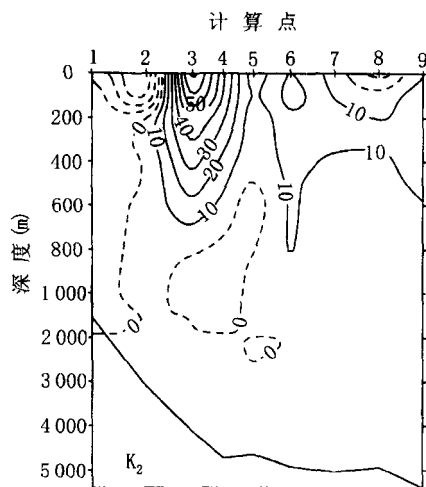


图 3 1997 年 12 月断面 K_2 的流速 (cm/s) 分布
正为北向

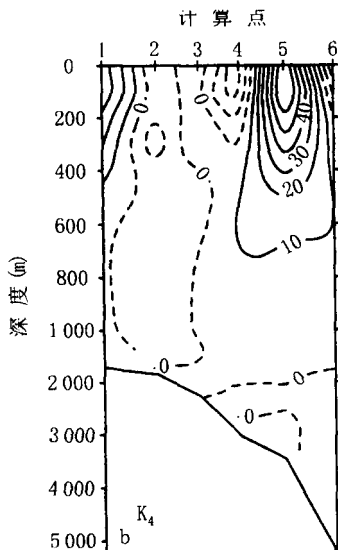
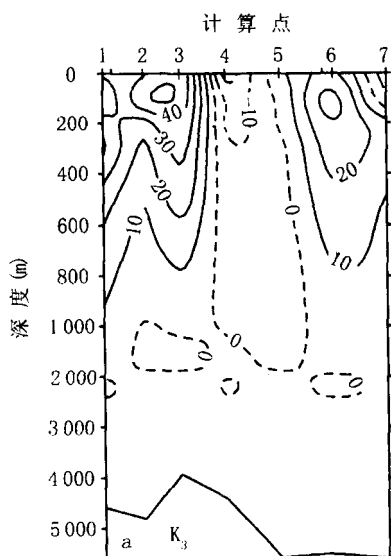


图4 1997年12月断面 K_3 (a) 和断面 K_4 (b) 上的流速 (cm/s) 分布
正为北向流

向流速为 18 cm/s , 在 300 m 处. 在计算点 4 (断面 S_0 的南端) 自表层至底部皆为东向流, 最大速度为 27 cm/s , 在 400 m 处, 而在中间计算点 2 和 3 皆被西向流所控制. 由水平温度分布 (见图 9) 及流函数分布 (见图 8) 可知, 计算点 4 的东向流、计算点 3 及 2 的部分西向流皆是气旋式冷涡的组成部分. 与 ADCP 实测流的结果 (见图 10) 比较, 在定性上也是一致的.

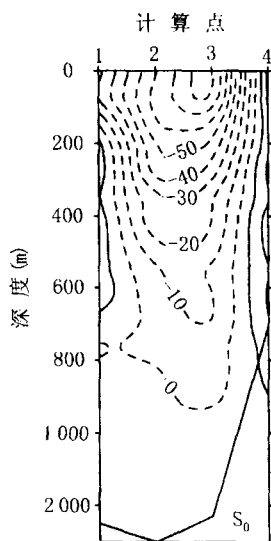


图5 1997年12月断面 S_0 上流速 (cm/s) 分布
正为东向流

3.5 断面 S_1 , S_2 及 PCME

断面 S_1 位于 125° E (见图 1). 图 6a 表示断面 S_1 的流速分布. 由图 6a 可知, 东向流出现在计算点 1 的 150 m 以深的水层、计算点 3 的上层、计算点 6, 7 和 8 的上层, 以及计算点 11, 在其余处皆被西向流所控制. 由水平温度分布 (见图 9) 及流函数分布 (见图 8) 可知, 断面 S_1 的北部存在暖涡, 表明在断面 S_1 北部的东向流及西向流是反气旋式暖涡的组成部分.

断面 S_2 位于 127° E (见图 1). 图 6b 表示断面 S_2 的流速分布. 由图 6b 可知, 东向流出现在计算点 2, 3, 4 的 500 m 以浅水层, 以及计算点 12, 在其余处皆被西向流所控制. 水平温度分布 (见图 9) 及流函数分布 (见图 8) 表明, 断面 S_2 的北部的东向流及西向流是反气旋式再生环流的一个部分. ADCP 测流结果与在断面 S_2 上计算的流速分布, 在定性上基本一致.

断面 PCME 位于冲绳岛东南, 图 6c 表示断面 PCME 的流速分布. 由图 6c 可知, 在计算点 1, 即在冲绳岛附近存在东北向海流, 这支东北向流以东存在西南向海流, 详细讨论见文献 [8].

4 东海黑潮

讨论 1997 年 11 月下旬至 12 月航次东海断面 PN 及 TK 的流速分布, 以了解该航次东海黑潮的流速特性.

PN 断面是东海著名断面 (见图 1), 图 7a 表示 PN 断面上的流速分布. 由图 7a 可知, 黑潮在 PN 断面只有一个核心, 位于陆坡上, 即在计算点 8 和 9, 其最大流速 $u_{\max} = 172 \text{ cm/s}$, 位于计算

点 9 表面处,在计算点 9 的 200 m 以浅水层,流速均大于 100 cm/s.在计算点 12 的 100 m 以浅水层,存在南向流,在计算点 15 的 150 m 以深也存在南向流.

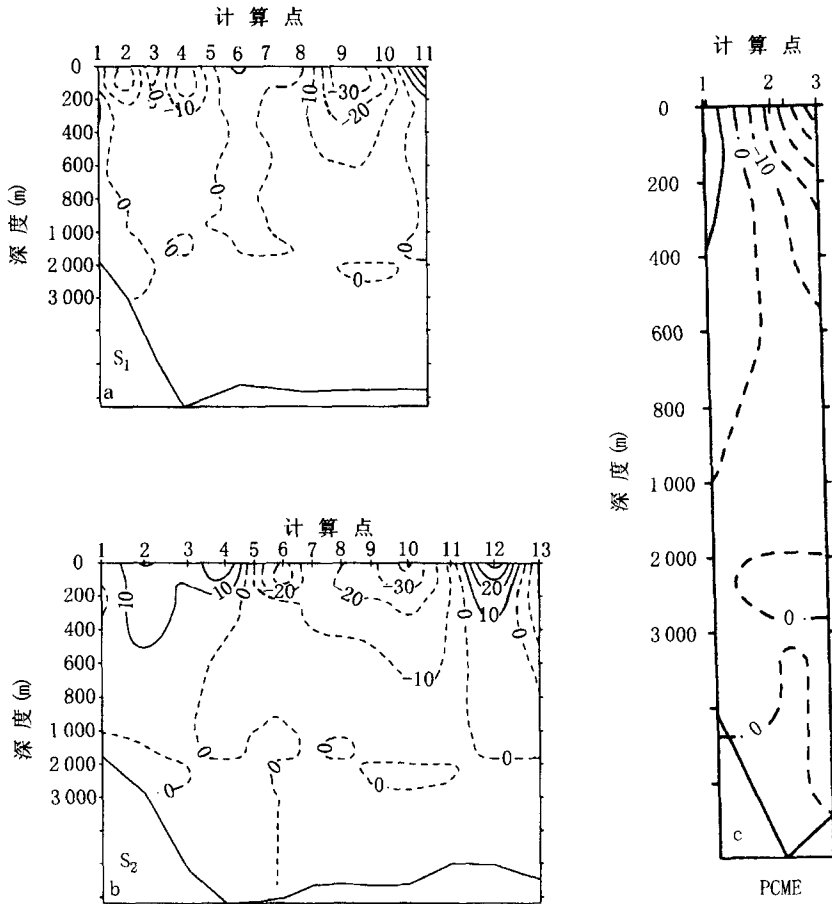


图 6 1997 年 12 月断面 S_1 (a)、断面 S_2 (b) 和断面 PCME (c) 流速 (cm/s) 分布

在断面 S_1 及 S_2 上正为东向流, 在断面 PCME 上正为东北向流

上节已指出,在 1997 年 El Niño 期间,黑潮在台湾岛东南 K_2 断面流速明显减小,而在东海,与以前年份相比,例如参见文献 [9, 10], 1997 年 11 月黑潮流速在 PN 断面上并未明显减小,即变化不大,这是台湾岛以东黑潮与东海黑潮的流速变化在 1997 年 El Niño 期间变化的区别.上述流速分布与 ADCP 实测流分布(见图 10c)在定性上甚为吻合.

断面 TK 位于吐噶喇海峡(见图 1).图 7b 表示 TK 断面上的流速分布.由图 7b 可知,东向流在 TK 断面上有三个流核心,与 1997 年 7 月航次相同.黑潮主核心位于计算点 8,其最大流速为 87.3 cm/s.第二个核心位于计算点 4,其最大流速为 64.6 cm/s.第三个核心位于计算点 2,其最大流速为 41.1 cm/s.西向流出现在计算点 3 处 150 m 以浅水层,计算点 6 处 125 m 以浅水层以及计算点 9~11,特别 TK 断面南部计算点 9 和 10,西向流速较大,最大西向流的流速为 59 cm/s,位于计算点 9 处表层,这与 ADCP 实测流分布(见图 10c)在定性上甚为吻合.

5 流函数及流量

图 8 表示台湾岛以东及琉球群岛东南海域流函数及流量分布.由图 8 可知,在台湾岛东南、

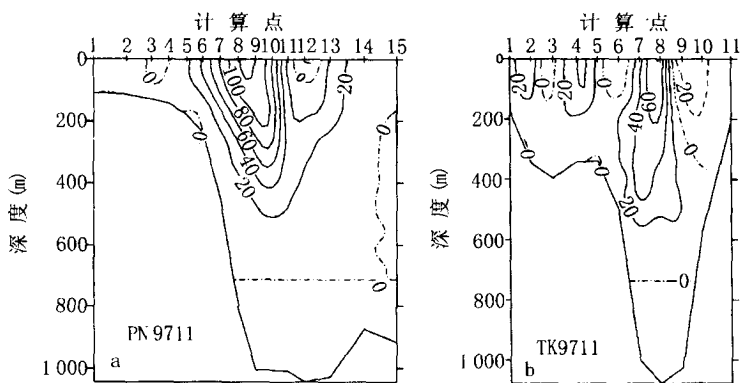


图7 1997年12月断面PN(a)和断面TK断面上(b)流速(cm/s)分布
a. 正为北向流, b. 正为东向流

区域黑潮的流态相比,是很不相同的^[3].黑潮在台湾岛以东有主流及其一个分支,黑潮主流在台湾岛以东向西北方向流动,最后转为北向,通过与那国岛以西流入东海黑潮的一个分支作气旋式弯曲,最后通过与那国岛和西表岛之间海域进入东海.黑潮这个分支的流量不大,它并不流向冲绳岛以东海域,这不同于1995年10月及1996年初夏时黑潮在台湾岛以东海域的流态^[2,3].其次,关于黑潮的位置,与其他航次相比,此时黑潮通过台湾岛东南断面 K_2 的位置,由于气旋式

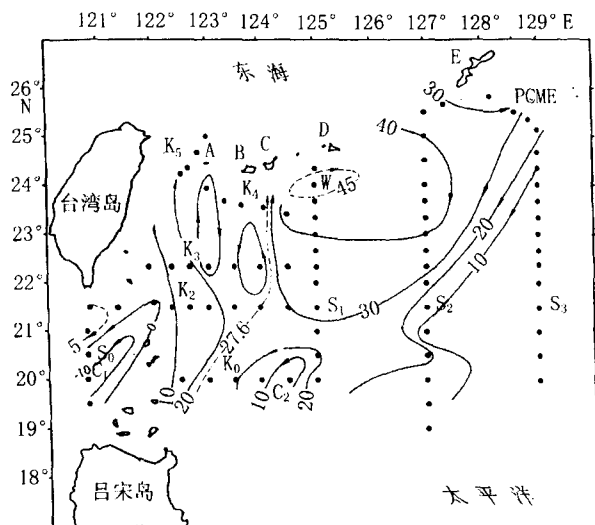


图8 1997年12月台湾岛以东及吕宋东北海域
流函数与流量($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)分布

A—F 说明同图1

冷涡 C_1 存在,明显向东移动,即在该航次时黑潮在断面 K_2 上约位于 124°E 以西.黑潮通过断面 K_2 的北向净流量约为 $27.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,与其他航次相比(见表1),此流量值明显减小了.注意1997年12月El Niño的强度比1997年7月时还要强,表明1997年12月发生很强El Niño期间,黑潮的强度及流量在台湾岛东南海域减小更明显.第三,由图8,9还可以得到以下几点:(1)在黑潮主流以东 123°E 处存在一个较弱的反气旋式涡;(2)在石垣岛、宫古岛以及冲绳岛以南海域,存在一个范围较大的反气旋再生环流,其中心约在 24°N , $125^\circ \sim 126^\circ \text{E}$ 之间,与1985年初夏、1995年10月、1996年初夏以及1997年7月等航次^[1~4]比较,它的范围要扩大,暖中心向西移动,约制着黑潮东分支向东北方向流动,如文献^[3]所述,台湾岛以东黑潮流态与台湾岛以东海域存在各种涡的位置、尺度大小和强度,以及它们的相对位置密切相关.此外,ADCP测流(见图10a,b)也显示这个反气旋式再生环流的存在;(3)在 K_0 断面(20°N 附近)的东部存在一个气旋式冷涡 C_2 ,其中心约在 20°N , $124^\circ 30' \text{E}$.

1997年11月下旬至12月航次通过PN断面的北向净流量为 $25.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.与其他航次^[3,9,10]相比,通过PN断面的北向净流量在1997年11月至12月有所减小,但在这些航次中

巴士海峡附近海域存在一个较强的气旋式冷涡 C_1 ,方向自西南向东北,呈舌状,一直延伸到 K_2 断面,水平温度分布(见图9)及ADCP实测流(见图10a,b)也都表明这个气旋式冷涡 C_1 存在.黑潮在1997年12月很强El Niño期间没有一个分支入侵南海,而在台湾岛东南海域通过上述冷涡 C_1 以东海域,然后作气旋式弯曲与非El Niño期间在此

区域黑潮的流态相比,是很不相同的^[3].黑潮在台湾岛以东有主流及其一个分支,黑潮主流在台湾岛以东向西北方向流动,最后转为北向,通过与那国岛以西流入东海黑潮的一个分支作气旋式弯曲,最后通过与那国岛和西表岛之间海域进入东海.黑潮这个分支的流量不大,它并不流向冲绳岛以东海域,这不同于1995年10月及1996年初夏时黑潮在台湾岛以东海域的流态^[2,3].其次,关于黑潮的位置,与其他航次相比,此时黑潮通过台湾岛东南断面 K_2 的位置,由于气旋式冷涡 C_1 存在,明显向东移动,即在该航次时黑潮在断面 K_2 上约位于 124°E 以西.黑潮通过断面 K_2 的北向净流量约为 $27.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,与其他航次相比(见表1),此流量值明显减小了.注意1997年12月El Niño的强度比1997年7月时还要强,表明1997年12月发生很强El Niño期间,黑潮的强度及流量在台湾岛东南海域减小更明显.第三,由图8,9还可以得到以下几点:(1)在黑潮主流以东 123°E 处存在一个较弱的反气旋式涡;(2)在石垣岛、宫古岛以及冲绳岛以南海域,存在一个范围较大的反气旋再生环流,其中心约在 24°N , $125^\circ \sim 126^\circ \text{E}$ 之间,与1985年初夏、1995年10月、1996年初夏以及1997年7月等航次^[1~4]比较,它的范围要扩大,暖中心向西移动,约制着黑潮东分支向东北方向流动,如文献^[3]所述,台湾岛以东黑潮流态与台湾岛以东海域存在各种涡的位置、尺度大小和强度,以及它们的相对位置密切相关.此外,ADCP测流(见图10a,b)也显示这个反气旋式再生环流的存在;(3)在 K_0 断面(20°N 附近)的东部存在一个气旋式冷涡 C_2 ,其中心约在 20°N , $124^\circ 30' \text{E}$.

变化不是很大的。

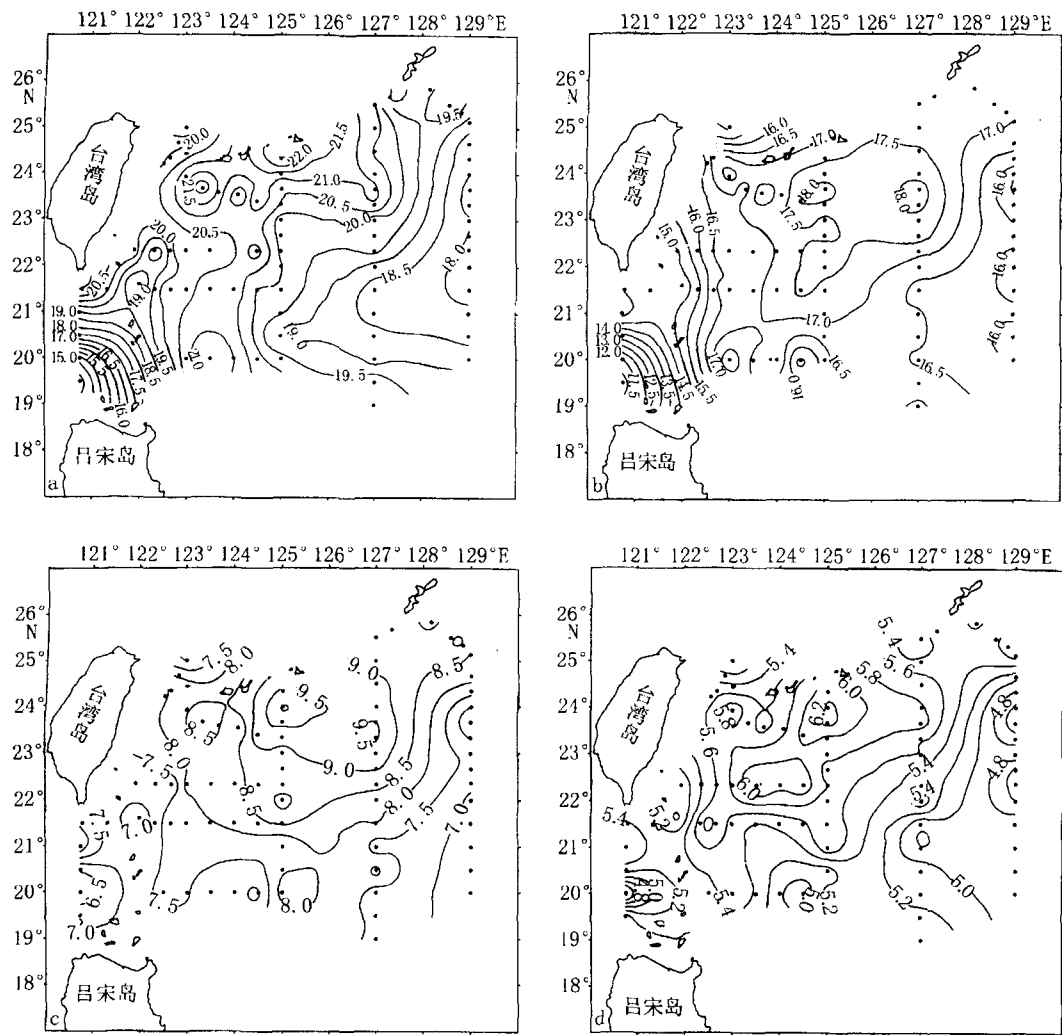


图9 1997 年 12 月水平方向温度(℃)分布

a. 200 m, b. 300 m, c. 600 m, d. 800 m

表 1 在一些航次黑潮通过断面 K₂ 的位置及流量

航 次	黑潮的流量($\times 10^6\text{m}^3/\text{s}$)	黑潮的位置
1985 年初夏	45.0	123°E 以西
1995 年 10 月	57.8	123°20'E 以西
1996 年初夏	44.6	123°40'E 以西
1997 年 7 月	37.5	123°E 以西
1997 年 12 月	27.6	124°E 以西