

# 1993 和 1994 年东海黑潮的变异\*

刘 勇 刚      袁 耀 初

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

**摘 要** 基于“长风丸”1993~1994 年共 8 个航次的水文调查资料, 采用改进逆方法计算了东海黑潮的流速、流量和热通量. 计算结果表明: (1) PN 断面黑潮流速在秋季时均呈双核结构; 而在其他季节, 有时为单核, 有时为双核; 黑潮主核心皆位于坡折处. 黑潮以东及黑潮以下都存在南向逆流. (2) TK 断面较复杂, 可出现单、双或三核结构. 在吐噶喇海峡中部、北部出现流核的机率较高. 海峡南端及海峡深处都存在西向逆流, 而且海峡南端的逆流在秋季较强. (3) 在 A 断面, 对马暖流核心位于陆坡上, 但有时偏西或偏东.  $V_{\max}$  值的变动范围为 26~46 cm/s. 黄海暖流位于其西侧, 流速则相对减小. (4) 东海黑潮流量在这两年中, 在春季均出现最小值, 在夏季出现最大或较大值. 黑潮流量, 以 PN 断面为例, 每年四季平均流量值 1994 年与 1993 年几乎相同, 但略小于 1992 年的平均流量值. 8 个航次中通过 PN、TK 断面的平均净流量分别为  $27.1 \times 10^6$  和  $25.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . (5) 8 个航次中, 通过 PN、TK 断面的热通量的平均值分别为  $1.99 \times 10^{15}$  和  $1.78 \times 10^{15} \text{ W}$ . (6) 在计算海域秋季和冬季均是由海洋向大气放热; 夏季则均从大气吸热; 春季则不确定. 海面上热交换率在冬季最大, 而春、夏季较小.

**关键词** 东海 黑潮 季节变化

## 1 引言

关于东海黑潮的流量及其季节变化已有不少学者进行过研究<sup>[1~7]</sup>, 以往大多采用动力计算方法<sup>[1~3]</sup>. 近年来袁耀初等<sup>[4~7]</sup>采用逆方法和改进逆方法进行了计算. 由于采用不同的计算方法, 他们得到的东海黑潮平均流量差异较大, 从  $19.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  至  $29 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  不等, 但对于流量的季节变化基本认同, 即从统计平均趋势看, 流量夏季大, 秋季小, 冬、春季介于上述二者之间. 最近, 刘勇刚和袁耀初<sup>[8]</sup>也采用改进逆方法对 1992 年 4 个航次的资料进行了计算, 得到通过 PN 断面的平均流量为  $28 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 流量也是在夏季最大, 秋季最小, 冬、春季

本文于 1997-06-03 收到, 修改稿于 1998-02-30 收到.

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:49776287).

第一作者简介: 刘勇刚, 男, 29 岁, 助研, 硕士, 现从事海流动力学研究.

介于上述二者之间.

本文采用改进逆方法,利用日本“长风丸”调查船在 1993~1994 年共 8 个航次的水文资料,对东海黑潮的流速、流量及热通量进行了计算,并讨论在此期间黑潮在东海的变异.

## 2 资料与数值计算

在东海海区,本文采用了日本“长风丸”调查船在 1993~1994 年共 8 个航次的 CTD 和风场观测资料,即 9301、9304、9307、9310、9401、9404、9407、9410 航次的观测资料(表 1).

表 1 东海海区观测资料情况一览表

航次	资料时间	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	风向/ $^{\circ}$	$Z_r/\text{m}$
9301	1993-01-19~02-20	9.3	72.3	900
9304	1993-04-26~05-20	6.0	180.3	900
9307	1993-07-21~08-07	4.5	184.6	900
9310	1993-10-18~11-20	8.9	69.1	1 100
9401	1994-01-18~02-28	11.8	345.1	900
9404	1994-04-26~05-10	5.9	85.7	700
9407	1994-07-20~08-06	4.1	269.8	900
9410	1994-10-04~11-22	9.8	65.7	1 000

文献[8]对改进逆方法作了说明,这里不再赘述.本计算中采用了以下的计算参数.由于缺乏详细的风场资料,假定风场是均匀的.各航次风速、风向见表 1.  $q_{e,1}$  与  $q_{e,2}$  在各季节时取值与文献[8]在相同季节时取值相同,即冬、春、夏、秋季分别为(0.42, 6.28)、(-0.84, 1.26)、(-2.09, -0.21)和(0, 2.51),单位为  $\times 10^3 \text{J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$ . 取涡动粘滞系数  $A_z$  为  $100 \text{cm}^2/\text{s}$ , 涡动扩散系数  $K_v$  为  $10 \text{cm}^2/\text{s}$ .

各航次水文断面和计算单元表示于图 1,每个计算单元分为 5 层,其交界面分别取  $\sigma_{t,p}$  为 25、27、30 和 33. 我们采用经验搜寻法选择最佳参考面<sup>[9]</sup>. 通过计算获得各航次相对应的最佳参考面  $Z_r$  列于表 1. 取参考深度如下:如果测站水深  $H$  大于最佳参面深度  $Z_r$ ,则按表 1 取值为  $Z_r$  值,否则该计算点参考面取为  $H$ .

## 3 计算结果及讨论

以下分别讨论 1993 和 1994 年东海黑潮的流速、流量及热通量的改进逆方法计算结果.

### 3.1 流速分布

#### 3.1.1 PN 断面流速分布

本节首先讨论 1993~1994 年 8 个航次在 PN 断面上的流速分布.

1993 年冬季(9301 航次,参见图 2a),在 PN 断面黑潮有两个核心.一个位于计算点 15~16 之间,在 300 m 以浅水层,流速大于  $80 \text{cm/s}$ ,最大流速值为  $101 \text{cm/s}$ ,位于计算点 16 的 125 m 层.另一个流核在此流核以西,即位于计算点 14 的 30 m 层,最大流速为  $98 \text{cm/s}$ .在黑潮以东,即计算点 20 处有一支范围较小的南向流,最大流速在表层,其值为  $18 \text{cm/s}$ .深层亦有

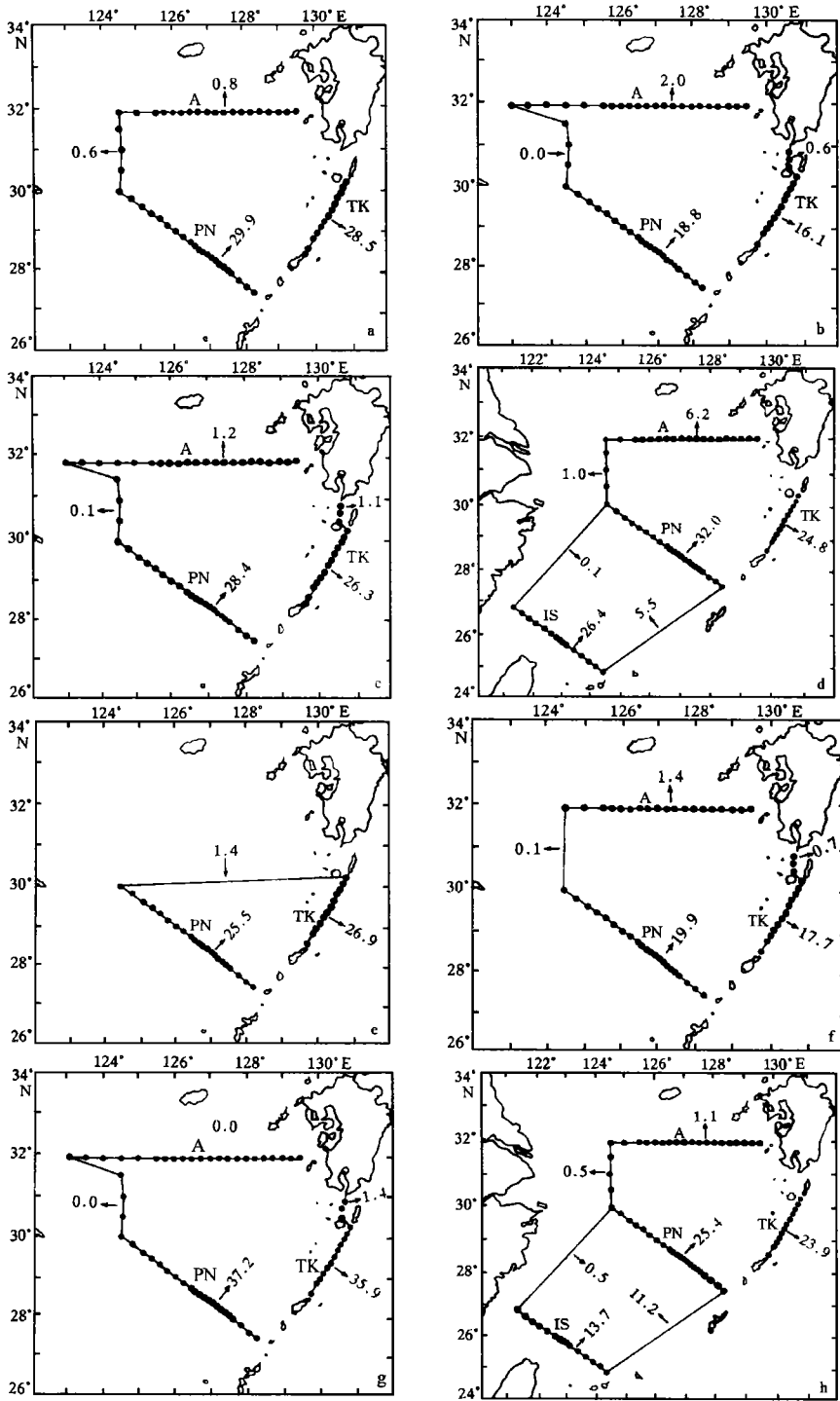


图1 各航次的断面分布、计算单元及流量分布( $\times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$ )

a. 9301航次 b. 9304航次 c. 9307航次 d. 9310航次 e. 9401航次 f. 9404航次 g. 9407航次 h. 9410航次

逆流存在. 计算点 8 以西, 即陆架海区大部分为南向流所控制, 且表层流速较大, 这可能与较强的冬季风场有关, 其最大流速值为 16 cm/s, 在计算点 6 的表层.

1993 年春季(9304 航次, 见图 2b), 在 PN 断面黑潮仅有一个流核. 它位于计算点 14~17 之间, 200 m 以浅水层的流速均大于 60 cm/s, 最大流速值仅有 88 cm/s, 位于计算点 16 的 100 m 层, 表明此时黑潮流速减弱. 注意到, 在此季节黑潮入侵陆架较西, 例如在计算点 10 的表层流速可达 56 cm/s. 黑潮以东存在较大范围的南向流. 南向流核心在计算点 20 的表层, 其值为 40 cm/s. 底层 900 m 以下也有逆流存在. 断面西侧陆架上流速均很小, 以北向流为主, 其值小于 6 cm/s.

1993 年夏季(9307 航次, 见图 2c), 在 PN 断面黑潮有两个流核. 主流核位于计算点 12~15 之间, 在 250 m 以浅水层, 流速均大于 80 cm/s, 最大流速值为 137 cm/s, 位于计算点 13 的 50 m 层; 随深度增加, 最大流速位置向东偏移. 在计算点 18~19 处, 还有一个较弱的流核, 最大流速为 34 cm/s, 位于计算点 19 的表层. 断面东侧有南向流存在, 在黑潮主流以下也有逆流存在, 但流速均很小. 断面西侧陆架上, 计算点 6 以东上层为北向流, 下层为南向流; 计算点 5 以西流向分布较复杂, 但流速均很小.

1993 年秋季(9310 航次, 见图 2d), 在 PN 断面黑潮也有两个流核. 主流核位于计算点 13~15 之间, 200 m 以浅水层的流速大于 100 cm/s, 最大流速值为 174 cm/s, 位于计算点 14 的 200 m 层. 另一个流核位于计算点 17 处, 最大流速在 200 m 层, 其值为 70 cm/s. 在黑潮流核以下深层及断面东侧, 均存在南向流, 其最大流速在计算点 21 的表层, 其值为 17 cm/s. 其次, 与春、夏季航次比较, 黑潮入侵陆架不远, 计算点 9~10 处, 有一个南向流核心, 表层最大流速为 37 cm/s. 断面西侧陆架上, 也被南向流所控制, 这也与秋季较强的东北风有关.

总结 1993 年 4 个季节在 PN 断面的流速分布, 有如下几点: (1) 在冬、秋季黑潮有两个流的核心, 春、夏季时, 仅有一个核心. 关于黑潮主核的位置, 与 1992 年相应季节作比较, 在冬、春季向东移动, 而在夏、秋两季则与 1992 年相应季节时黑潮的核心位置相同. (2) 黑潮流速在夏、秋季时较强, 而在冬、春季时则较弱, 尤其是春季时最弱. (3) 在 1993 年 4 个航次中, 秋季时黑潮入侵陆架不远. (4) 黑潮以东及黑潮以下均存在逆流. 春季逆流较强, 其最大流速为 40 cm/s, 逆流的范围也最大, 而在冬、秋季, 最大流速分别为 18 和 19 cm/s, 夏季则最弱.

1994 年冬季(9401 航次, 见图 2e), 在 PN 断面黑潮仅有一个流核, 位于计算点 13~15 之间, 200 m 以浅水层中流速均大于 100 cm/s, 最大流速为 130 cm/s, 位于计算点 15 的 100 m 层. 黑潮以东, 即在计算点 21 处有一支范围较小的南向流, 流速最大值在表层, 为 42 cm/s, 这支南向流可深达 600 m. 断面西侧陆架上, 除在计算点 5 与 7 之间表层有很弱的北向流之外, 主要被南向流所控制; 其最大流速为 13 cm/s, 在计算点 9 的表层.

1994 年春季(9404 航次, 见图 2f), 在 PN 断面黑潮也仅有一个流核, 位于计算点 13~15 之间, 在 100 m 以浅水层流速均大于 90 cm/s, 最大流速为 152 cm/s, 位于计算点 14 的表层. 在计算点 18 处附近, 存在一支范围较小但较强的南向流, 其表层流速可达 72 cm/s. 断面东侧以及 700 m 以深的水层亦均存在南向流. 断面西侧陆架上, 除在计算点 4~5 和计算点 11 处有小股较弱的南向流存在之外, 主要被北向流所控制, 但流速均不大.

1994 年夏季(9407 航次, 见图 2g), 黑潮流速较大, 呈单核结构. 流核位于计算点 13~15 之间, 在 300 m 以浅水层中流速均大于 100 cm/s, 最大流速值为 197 cm/s, 位于计算点 13 的表

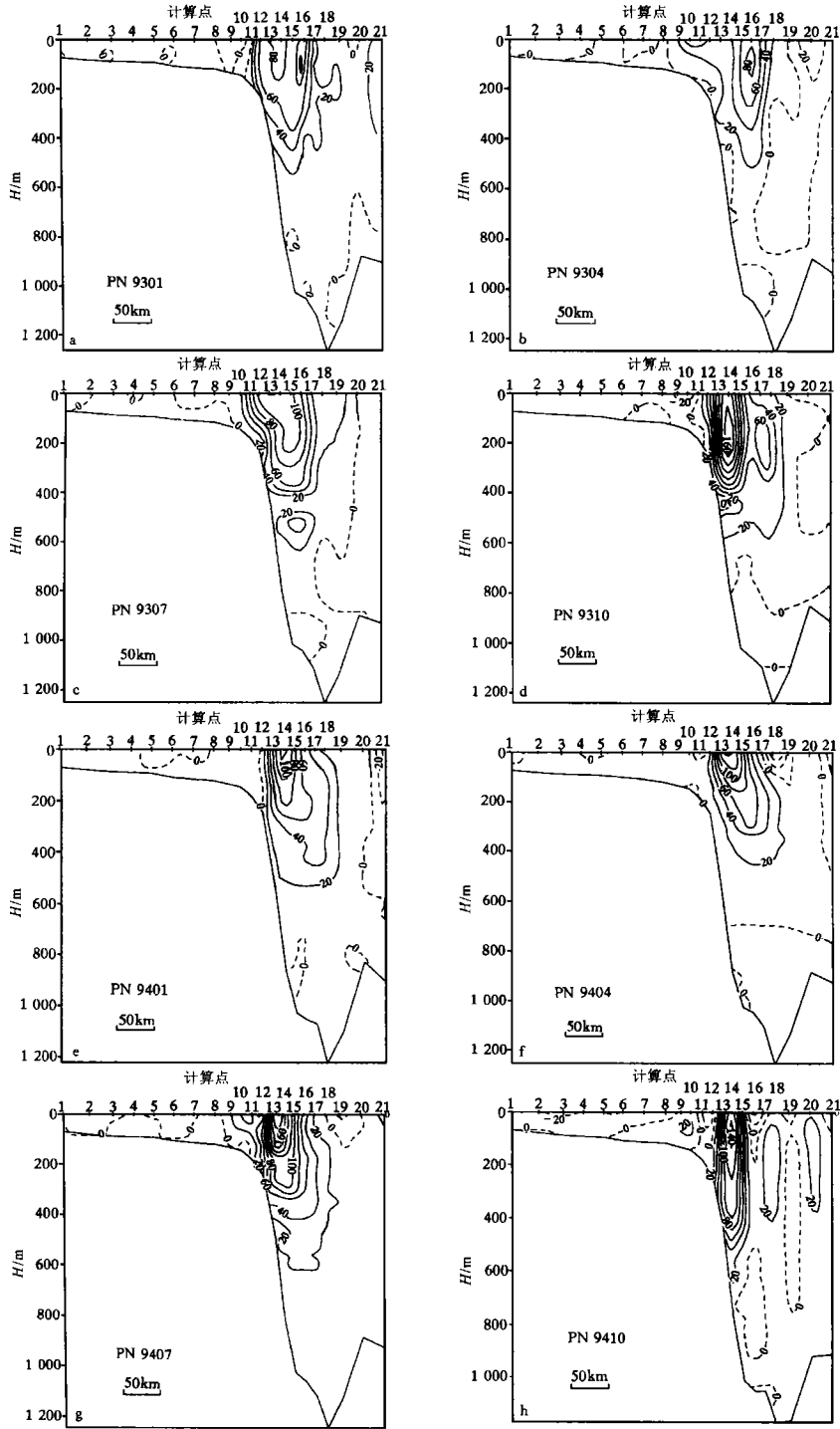


图2 PN断面流速分布(cm/s)

a. 9301航次 b. 9304航次 c. 9307航次 d. 9310航次 e. 9401航次 f. 9404航次 g. 9407航次 h. 9410航次  
 +:北向 -:南向

层. 在 600 m 处, 流速可达 20 cm/s. 在计算点 11 处, 表层流速可达 60 cm/s, 表明黑潮入侵陆架架较远. 在计算点 18~20 之间, 存在一支较弱的南向流, 位于 200 m 以浅水层, 最大流速值为 26 cm/s, 在计算点 19 的表层. 在断面西侧, 计算点 8 处的南向流较强, 其最大流速值达 22 cm/s, 而在计算点 4 处的南向流相对较弱; 在计算点 3 以西及计算点 5 与 7 之间为很弱的北向流.

1994 年秋季(9410 航次, 见图 2h), PN 断面流速呈多核结构. 主流核位于计算点 13~15 之间, 在 300 m 以浅水层, 流速大于 80 cm/s, 最大流速值为 149 cm/s, 位于计算点 14 的 50 m 处. 另一流核在计算点 18 的 50~300 m 的水层中, 流速不大, 其最大值在 200 m 层, 为 39 cm/s. 在北向流以东, 在计算点 19 附近存在一支南向流, 在该南向流以东, 即计算点 20 附近, 又出现北向流, 它们可能都是气旋式涡的一部分. 断面西侧陆架上, 计算点 8 以西主要被南向流控制, 且上层流速较大, 其最大值为 24 cm/s, 在计算点 3 的表层, 这可能也与风场有关.

总结 1994 年 4 个季节 PN 断面的速度分布, 可得出: (1) 在冬、春、夏 3 季黑潮仅有一个核心, 而秋季有两个核心; 主核心位置都位于计算点 13 与 15 之间. (2) 黑潮流速在 1994 年 4 个航次均较强, 相比之下, 在夏季最强, 最大流速可达 197 cm/s. (3) 黑潮以东及以下都存在逆流. 在 4 个季节中, 春季时逆流流速最强, 这与 1993 年相似.

### 3.1.2 TK 断面流速分布

TK 断面位于吐噶喇海峡, 如图 1 所示. 黑潮自 PN 断面东北向流向 TK 断面. 现在我们分别讨论 1993~1994 年 8 个航次在 TK 断面的流速分布.

1993 年冬季(9301 航次, 见图 3a), TK 断面黑潮有 3 个流核. 主流核位于海峡中部计算点 7 处, 最大流速值为 122 cm/s, 位于表层. 在海峡北部计算点 3~4 之间以及海峡南部计算点 10 处各有一个流核, 最大流速值分别为 113 和 45 cm/s, 分别位于计算点 3 的表层和计算点 10 的 50 m 层. 在海峡深处及海峡南端均存在弱的西向逆流. 在海峡北端计算点 1 与 2 之间也存在一支西向流, 最大流速值为 39 cm/s, 位于计点 2 的表层.

1993 年春季(9304 航次, 见图 3b), TK 断面黑潮有两个流核. 一个位于海峡北部的计算点 3 处, 最大流速值为 71 cm/s, 位于表层; 另一个位于计算点 8 处, 最大流速值为 64 cm/s, 在表层. 可知在此时黑潮流速减弱, 这与在 PN 断面相同时期黑潮流速减弱相一致. 海峡南部存在一支很强的西向逆流, 最大流速值达 61 cm/s. 在计算点 7 的表层以及海峡深处均存在较弱的西向逆流.

1993 年夏季(9307 航次, 见图 3c), TK 断面黑潮也呈三核结构. 3 个流核分别位于计算点 2、5、8 处, 最大流速分别为 61、119 和 59 cm/s, 分别位于表层、表层和 200 m 层. 在海峡深处以及海峡南端均有逆流存在, 其最大流速值为 21 cm/s, 位于计算点 11 的表层.

1993 年秋季(9310 航次, 见图 3d), TK 断面黑潮仅有一个流核, 位于计算点 9 处, 最大流速值为 98 cm/s, 在 50 m 层处. 在海峡的南部计算点 10 以南存在一支较强的西向逆流, 其最大流速值为 95 cm/s, 位于计算点 10 的表层. 在海峡深处存在较弱的西向逆流. 在海峡北部计算点 2 的上层也存在较弱的西向逆流, 但它也可能是涡的一个部分.

总结 1993 年 4 个航次 TK 断面的流速分布可知: (1) 除了秋季航次黑潮仅有一个流核之外, 冬、春、夏季呈二或三核结构. (2) 黑潮流速冬季最强, 夏季次之, 春季最弱. (3) 海峡南端总有西向逆流存在, 相比之下, 秋季逆流范围最大, 流速最强, 其次为春季, 夏、冬季均较弱. 海

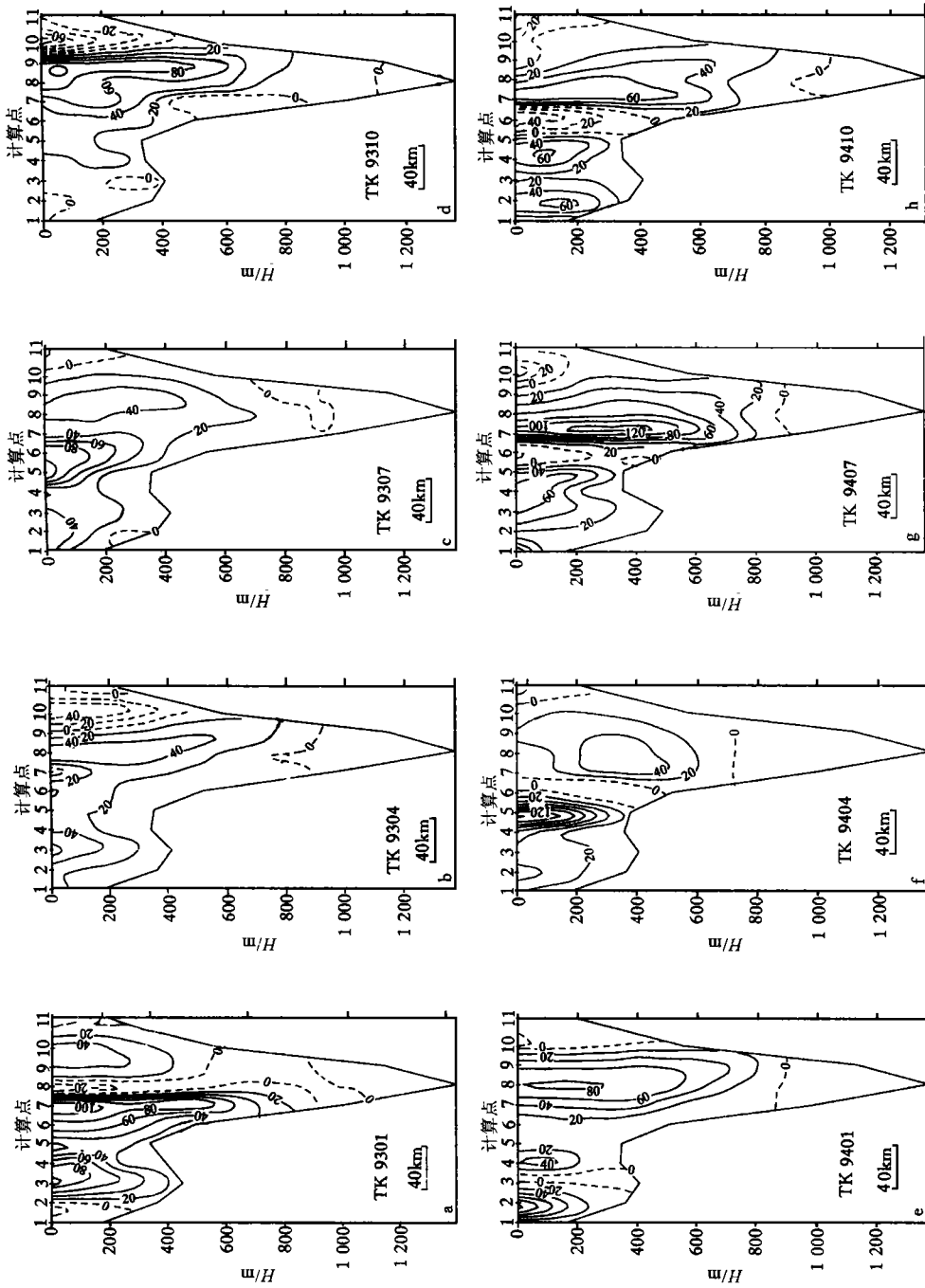


图3 TK断面流速分布(cm/s)  
a. 9301航次 b. 9304航次 c. 9307航次 d. 9310航次 e. 9401航次 f. 9404航次 g. 9407航次 h. 9410航次 (+: 东向; -: 西向)

峡深处总有较弱的西向逆流存在。

1994 年冬季(9401 航次, 见图 3e), TK 断面黑潮呈三核结构。3 个核心分别位于计算点 2、4 和 8 处, 最大流速值分别为 126、52 和 86 cm/s, 分别位于表层、20 m 和 200 m 处。海峡南部, 即计算点 10 以南为较弱的西向逆流, 其最大流速值为 28 cm/s, 位于计算点 10 的表层。在海峡深处以及海峡北部的计算点 3 处均存在较弱的西向逆流。

1994 年春季(9404 航次, 见图 3f), TK 断面黑潮也呈三核结构。最强流核位于计算点 5 处, 最大流速值为 146 cm/s, 在表层。在海峡北部计算点 2 处有一个小的核心, 最大流速位于表层, 其值为 48 cm/s。在计算点 7~10 之间还有一个流核, 最大流速值为 52 cm/s, 位于计算点 8 的 300 m 处。在海峡的深处以及海峡的南端均存在西向逆流, 其最大流速值为 28 cm/s, 位于计算点 11 的表层。

1994 年夏季(9407 航次, 见图 3g), TK 断面的黑潮呈两核结构。主流核位于海峡中部计算点 7 处, 最大流速值为 132 cm/s, 位于 200 m 处。海峡北部计算点 3~4 之间还存在一个核心, 最大流速值为 78 cm/s, 位于计算点 3 的表层。海峡南部计算点 10 以南的 150 m 以浅水层出现了西向逆流, 其最大流速值为 62 cm/s, 位于计算点 10 的表层。其次在两个东向流核之间, 即计算点 6 处存在一支西向逆流, 其最大流速值为 44 cm/s, 位于表层。海峡深处也存在较弱的西向逆流。

1994 年秋季(9410 航次, 见图 3h), TK 断面黑潮呈三核结构。在海峡北部计算点 2 和 4 处各有一个核心, 最大流速值分别为 82 和 60 cm/s, 分别位于 200 和 100 m 处。在计算点 7~8 之间还有一个流核, 其最大流速值为 74 cm/s, 位于计算点 7 的 50 m 层处。其次, 在海峡中部两个东向流核之间, 即计算点 6 处存在一支较强的西向逆流, 其最大流速值为 79 cm/s, 位于表层。海峡南部存在范围较大的西向逆流, 其最大流速值为 47 cm/s, 位于计算点 11 的表层。在海峡深处也有弱的逆流存在。

总结 1994 年 4 个航次在 TK 断面的流速分布可知: (1) TK 断面黑潮除了夏季出现两个流核之外, 冬、春、秋季均呈三核结构。在海峡中部计算点 7~8 之间总有黑潮流核出现, 海峡北部计算点 2 和(或)4 处也常出现东向流核。(2) 黑潮流速在春、夏及冬季均较强, 相比之下春季最强, 夏季和冬季次之, 秋季最弱。(3) 海峡南端总出现西向逆流, 相比之下, 夏季流速最强, 秋季次之, 但秋季逆流的范围最大。海峡深处各季节均存在弱的西向逆流。

### 3.1.3 A 断面流速分布

A 断面位于东海北部  $31^{\circ}55'N$ , 是一条东西向断面(见图 1)。对马暖流和黄海暖流北向流过 A 断面。以下讨论 A 断面的流速分布。

1993 年冬季(9301 航次, 见图 4a), A 断面对马暖流的流核位于计算点 16~17 处, 其最大流速值为 26 cm/s, 位于计算点 16 的 30 m 处。黄海暖流相对较弱, 其最大流速值仅有 9 cm/s, 位于计算点 10 的 30 m 层处。在 A 断面西侧表层、两个北向流核之间、海槽 500 m 以深以及北向流主流核以东均存在南向逆流, 其最大流速值为 25 cm/s, 位于计算点 13 的表层。

1993 年春季(9304 航次, 见图 4b), 在 A 断面自计算点 19 以东以及计算点 12~15 之间均存在北向流。前者为对马暖流, 最大流速值为 46 cm/s, 位于计算点 20 的表层, 一直到 700m 深处还存在北向流。后者可能是黄海暖流所在处, 流速较弱, 最大流速值为 15 cm/s, 位于计算点 15 的表层。在这两支北向流之间是南向逆流, 其最大流速值为 27 cm/s, 位于计算点 17 的 30



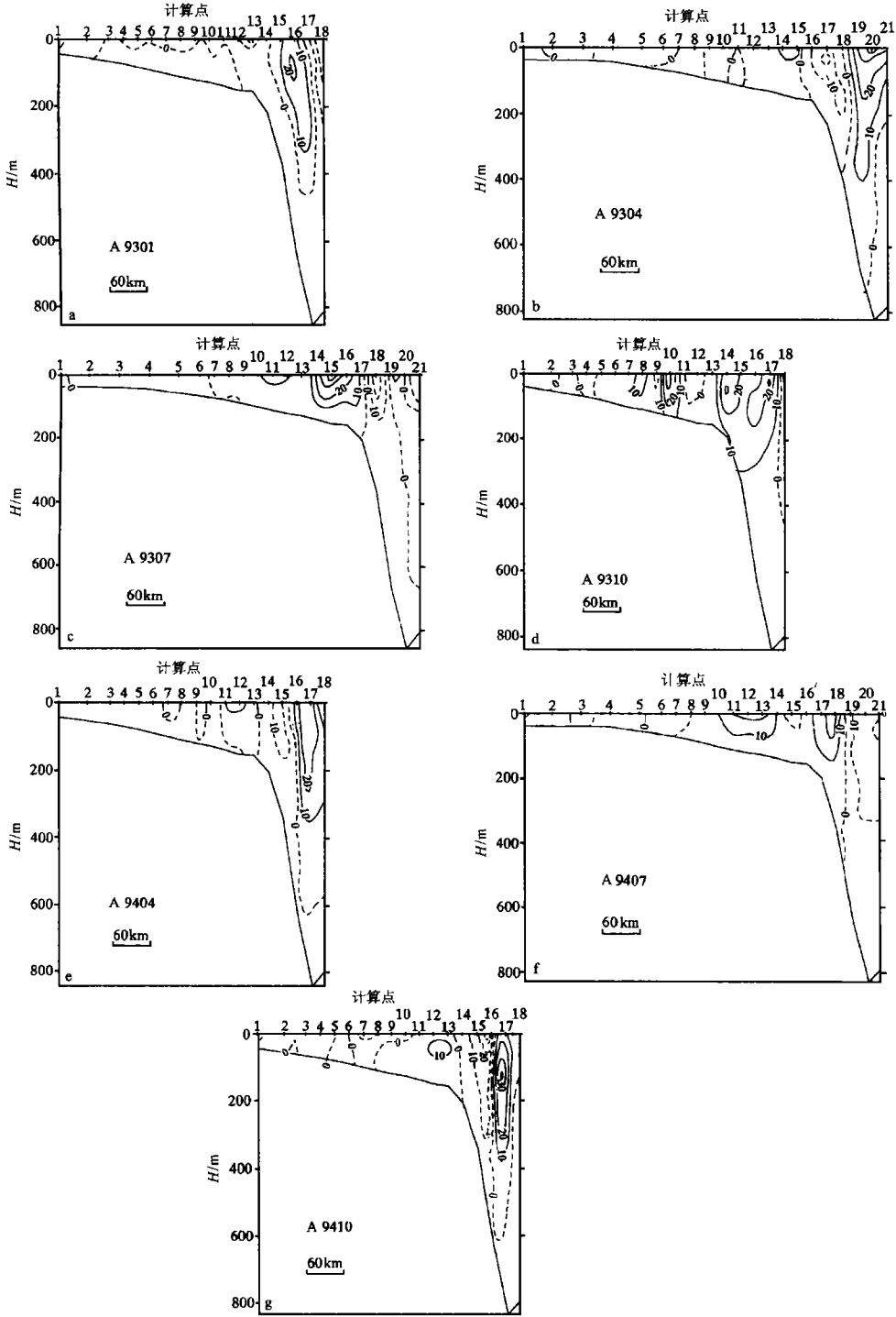


图4 A断面流速分布(cm/s)

a. 9301 航次 b. 9304 航次 c. 9307 航次 d. 9310 航次 e. 9404 航次 f. 9407 航次 g. 9410 航次  
+ : 北向 - : 南向

m 层,由图 4b 可知,在断面 A 其他航次出现的南向流此时消失,均被北向流所占。

1993 年夏季(9307 航次,图 4c),在 A 断面计算点 8~17 之间以及计算点 20 处皆存在北向流,明显可见有 3 个核心。对马暖流的主核在计算点 15~16 处,最大流速为 41 cm/s,在表层;另两个流核分别位于计算点 11~12 及 20 处,它们的最大流速值分别为 22 和 18 cm/s,都在表层。黄海暖流位于计算点 8~13 处。在计算点 18 与 19 之间存在南向逆流,其最大流速值为 46 cm/s,位于计算点 18 的表层,这支南向流控了海槽的大部分区域。断面西侧计算点 7 以西以及断面东侧计算点 21 处均存在较弱的南向流。

1993 年秋季(9310 航次,图 4d),在 A 断面计算点 5~17 之间存在北向流,具有多个核心。对马暖流的主流核在计算点 14 处,最大流速值为 36 cm/s,位于 30 m 层,一直到海底均存在北向流。在计算点 8、10 和 17 处各存在一个流核,其最大流速值分别为 20、42 和 33 cm/s,均位于 30 m 层。计算点 8 和 10 也是黄海暖流的核心。在断面东端计算点 18 处以及计算点 11~12 之间的表层均存在弱的南向逆流,其最大流速值仅有 19 cm/s,位于计算点 18 的表层。

总结 1993 年 4 个航次 A 断面流速分布可知:(1)对马暖流通过 A 断面,其核心位置在冬、春季偏东,而在夏、秋季则偏西,位于陆架坡折附近。流速较强,其变化范围为 26~46 cm/s。(2)黄海暖流位于对马暖流的西侧,其核心位置在夏、秋季偏西,冬、春季则偏东,与对马暖流相比,其流速相对较弱。(3)在断面东侧除春季以外,其他季节均存在南向逆流,其最大流速值约在 19~46 cm/s 范围内变化。

1994 年春季(9404 航次,图 4e),在 A 断面计算点 16 以东以及计算点 12~14 之间均存在北向流,两支北向流核中,前者为对马暖流,其核心位于计算点 17 处,最大流速值为 29 cm/s,在 75m 层处;其北向流一直到 600 m 深处都存在。后者则为黄海暖流,其最大流速值为 20 cm/s,位于计算点 12 的表层。在这两支北向流之间存在范围较大的南向逆流,其最大流速值为 23 cm/s,位于计算点 15 的 75 m 层处。在海槽深处以及断面西侧大部分海区被弱的南向流所控制。

1994 年夏季(9407 航次,图 4f),在 A 断面计算点 9~19 之间均存在北向流。对马暖流核心位于计算点 18 处,其最大流速值为 28 cm/s,在表层;从表层一直到 500 m 处均存在北向流。黄海暖流核心位于计算点 11~14 之间,其最大流速值为 22 cm/s,位于计算点 12 的表层。断面东侧存在沿岸南向逆流,其最大流速值为 20 cm/s,位于计算点 21 的 50 m 层。海槽深处以及断面西侧均存在较弱的南向逆流。

1994 年秋季(9410 航次,图 4g),A 断面上对马暖流加强,其位置东移,核心位于计算点 17 处,最大流速值为 44 cm/s,位于 125 m 层处,北向流在 600 m 深处尚存在。在计算点 9~14 之间也存在北向流,即黄海暖流,其最大流速值为 13 cm/s,位于计算点 12 和 13 的 30 m 层处。在这两支北向流之间存在一支较强的南向逆流,其最大流速值为 40 cm/s,位于计算点 16 的表层。在海槽深处以及断面西侧计算点 9 以西也均存在南向逆流。

总结 1994 年 3 个航次 A 断面流速分布,可以发现:(1)春、夏、秋季 A 断面均出现两支北向流,其中一支为对马暖流,其核心位置夏季偏西,位于陆架坡折处,而春、秋季偏东,位于海槽上方。对马暖流秋季最强,春、夏季相对较弱,最大流速变化范围为 28~44 cm/s。(2)另一支北向流,黄海暖流,位于对马暖流的西侧,相对较弱,其最大流速值在 13~22 cm/s 范围内。(3)夏季出现沿岸南向流,而春、秋季南向逆流出现在两支北向流之间。

### 3.1.4 IS断面流速分布

IS断面是位于台湾东北呈西北—东南向的断面(如图1d所示). 黑潮自我国台湾以东通过该断面. 只有秋季才有观测资料, 下面我们分别讨论这两个航次IS断面上的流速分布.

1993年秋季航次(图5a)IS断面上黑潮仅有一个流核, 位于计算点7~11之间, 最大流速值为98 cm/s, 位于计算点8的30 m层处. 最大流速值与1992年10月相比明显减小, 这可能是由于计算点8~11之间测站较稀, 因而低估了流速. 断面东侧计算点13处自表层至底层均存在南向逆流, 其表层最大流速值为12 cm/s. 断面西侧计算点2~4处表层为较强逆流控制, 最大流速值为45 cm/s, 在计算点3处.

1994年秋季航次(图5b)IS断面流核位于计算点11~13之间, 最大流速值为94 cm/s, 位于计算点11的表层. 与PN断面同时期黑潮最大流速相比较, 也明显减小, 其原因也与上述相类似, 由于在计算点10~13之间, 测站较稀, 因而低估了流速值. 在断面IS西侧、东侧以及深层均有范围不同的南向逆流存在.

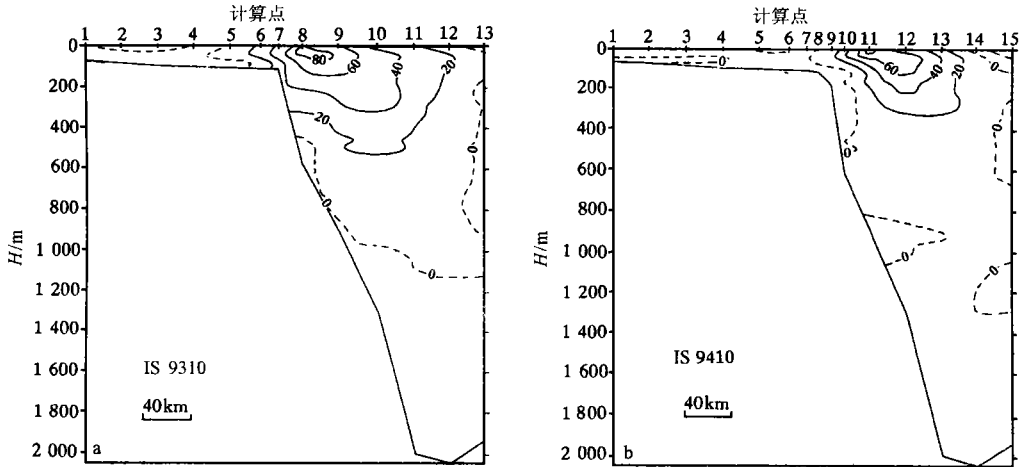


图5 IS断面上1993(a)、1994年(b)秋季航次流速分布(cm/s)

+ : 东北向 - : 西南向

### 3.2 流量分布

本节将分别叙述上述各航次在PN等断面的流量分布.

1993年冬季(见图1a), 黑潮在PN和TK断面的净流量分别为 $29.9 \times 10^6$ 和 $28.5 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ , 相差不大. 通过A断面的南、北向流量分别为 $2.4 \times 10^6$ 和 $3.2 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ .

1993年春季(见图1b), 黑潮流量减小, 在PN和TK断面净流量分别为 $18.8 \times 10^6$ 和 $16.1 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ . PN断面在某些年春季流量减小, 这一点袁耀初等<sup>[5]</sup>已指出过. 通过A断面的南、北向流量分别为 $2.3 \times 10^6$ 和 $4.3 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ .

1993年夏季(见图1c), 在PN和TK断面黑潮流量增加, 分别为 $28.4 \times 10^6$ 和 $26.3 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ . 通过A断面的南、北向流量分别为 $2.5 \times 10^6$ 和 $3.7 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ .

1993年秋季(见图1d), 在PN和TK断面黑潮流量增加, 分别为 $32.0 \times 10^6$ 和 $24.8 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ . TK断面净流量与PN断面净流量相差约为 $7.2 \times 10^6$   $\text{m}^3/\text{s}$ . 其原因有两个: 一、在A断

面净北向流量增加(通过 A 断面的南、北向流量分别为  $1.1 \times 10^6$  和  $7.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ .) 即对马暖流等流量增加;二、TK 断面南侧逆流加强,使 TK 断面东向净流量减小. IS 断面流量为  $26.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 小于 PN 面的流量,其原因有两个:一、IS 断面上因测站较稀,因而低估了黑潮流速及流量;二、从冲绳岛与宫古岛之间的海域有海水往西流入东海,加入黑潮流向了 PN 断面. 袁耀初等<sup>[5]</sup>将东海流型分为 3 种,本季节属于流型 III.

总结 1993 年 4 个航次各断面的净流量分布可知,在东海 PN 断面黑潮流量秋季时最大,春季最小,冬、夏季稍小于秋季,4 个航次的平均值为  $27.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 稍小于 1992 年的平均值 ( $28.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>[8]</sup>;PN 断面流量大于 TK 断面的流量值;A 断面净北向流量在秋季最大.

1994 年冬季(见图 1e),黑潮流过 PN 和 TK 断面的净流量分别为  $25.5 \times 10^6$  和  $26.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , PN 断面净流量略小,这是由于在 PN 断面南向流的流量要比 TK 断面的西向流要大.

1994 年春季(见图 1f),在东海黑潮通过 PN 和 TK 断面净流量如前面所指出,在某些年春季黑潮在东海流量要减小,分别为  $19.9 \times 10^6$  和  $17.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 通过 A 断面的南、北向流量分别为  $2.4 \times 10^6$  和  $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

1994 年夏季(见图 1g),东海黑潮流量剧增,在 PN 和 TK 断面分别达到  $37.2 \times 10^6$  和  $35.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 通过 A 断面的南、北向流量均为  $3.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 即南北向流量几乎平衡.

1994 年秋季(见图 1h)黑潮通过 PN 断面和 TK 断面流量分别为  $25.4 \times 10^6$  和  $23.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 即比夏季时减小. 通过 A 断面的南、北向流量分别为  $3.3 \times 10^6$  和  $4.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . IS 断面的净流量为  $13.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 要小于 PN 断面的净流量. 其原因有二:一、在 IS 断面黑潮流轴附近测站太稀,低估了流速,从而低估了流量;二、也有海水从冲绳岛与宫古岛之间的海域向西流进东海,并与 IS 断面的黑潮水一起流向了 PN 断面,造成 PN 断面流量增大. 与 1993 年相同,属于流型 III<sup>[7]</sup>.

总结 1994 年 4 个航次各断面流量分布可知,东海黑潮流量在夏季最大,春季最小,冬、秋季介于二者之间,4 个航次 PN 断面平均净流量为  $27.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 在 TK 断面平均净流量为  $26.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . A 断面的净流量值一直较小.

由以上分析可得出如下几点:

(1) 在 1993 年,PN、TK 断面流量在春季均为最小值,在夏季出现最大或较大值.

(2) 黑潮流量,以 PN 断面为例,每年四季平均流量值 1994 年与 1993 年几乎相同,但均略小于 1992 年的平均流量值<sup>[8]</sup>( $28.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

(3) 8 个航次中通过 PN 断面流量的变动范围在  $18.6 \times 10^6 \sim 37.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  之间,其总平均流量为  $27.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 8 个航次中通过 TK 断面流量的变动范围为  $16.0 \times 10^6 \sim 35.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 其平均值为  $25.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 这两个平均值比前人采用动力计算方法的结果均要大<sup>[1-3]</sup>, 这可能是因为动力计算方法存在基本缺点,即零参考面的选取问题;而我们的结果更接近袁耀初等<sup>[5]</sup>改进逆方法的计算结果.

### 3.3 热通量分布

我们采用了热量不等式约制的改进逆方法,计算了 PN、TK 断面的热通量和东海海面与大气的热交换率. 下面我们分别讨论.

#### 3.3.1 PN 断面的热通量

由表 2 可知,PN 断面热通量在  $1.3 \times 10^{15} \sim 2.3 \times 10^{15} \text{ W}$  之间变动,其季节变化及年际变

化的特征均与通过 PN 断面的流量的变化特征基本相一致. 8 个航次的平均热通量为  $1.99 \times 10^{15} \text{ W}$ , 这与袁耀初等<sup>[5]</sup>计算的 1988、1989 年两年 8 个航次得到的 PN 断面平均热通量值  $2.109 \times 10^{15} \text{ W}$  以及刘勇刚和袁耀初<sup>[8]</sup>计算的 1992 年 4 个航次得到的 PN 断面平均热通量值  $2.03 \times 10^{15} \text{ W}$  均十分接近.

表 2 通过 PN、TK 断面的热通量  $Q_{\text{PN}}$ 、 $Q_{\text{TK}}$  与东海海面平均放(吸)热率  $q_e$

航次	9301	9304	9307	9310	9401	9404	9407	9410	平均
$Q_{\text{PN}}/10^{15} \text{ W}$	2.2	1.3	2.3	2.3	1.8	1.6	2.7	1.7	1.99
$Q_{\text{TK}}/10^{15} \text{ W}$	2.0	1.1	2.1	1.7	1.8	1.4	2.6	1.5	1.78
$q_e/10^3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	6.26	1.26	-0.22	2.49	6.25	-0.84	-1.25	2.04	2.00

### 3.3.2 TK 断面的热通量

由表 2 可看出, TK 断面的热通量的变动范围为  $1.1 \times 10^{15} \sim 2.6 \times 10^{15} \text{ W}$ , 其季节变化及年变化特征也与通过该断面的流量变化特征基本相同. 8 个航次的平均热通量为  $1.78 \times 10^{15} \text{ W}$ , 这也与袁耀初等<sup>[5]</sup>计算的 1988、1989 年两年 8 个航次得到的热通量值  $1.824 \times 10^{15} \text{ W}$  是十分接近的, 但稍小于 1992 年 3 个航次的结果  $2.00 \times 10^{15} \text{ W}$ <sup>[8]</sup>.

### 3.3.3 海面上的热量交换

热交换率是以 PN、TK 和 A 断面所围成的海域海气热交换率的平均值. 计算结果见表 2, 正值为放热率, 负值为吸热率. 此平均值是作为东海海面与大气之间的平均热交换率( $q_e$ ). 由表 2 可知, 秋季和冬季均是由海洋向大气放热; 夏季则均是从大气吸热; 春季不确定, 在 1993 年是由海洋向大气放热, 但在 1994 年则是从大气吸热. 冬季海面上热交换率最大, 而春、夏季热交换率较小.

## 4 结论

基于 1993~1994 年 8 个航次水文资料, 采用改进逆方法对东海黑潮的流速、流量及热通量进行了计算, 得到以下结果.

4.1 PN 断面的流速结构, 在秋季都呈双核结构; 而在其他季节, 有时为单核, 有时为双核; 黑潮主核心皆位于坡折处. 在 8 个航次中, 黑潮以东及黑潮以下均存在南向逆流.

4.2 TK 断面的流速结构比较复杂, 可以出现单、双或三核结构. 在海峡中部计算点 6、7(或 8)处总能出现流核, 在海峡北部的计算点 2、3、4 出现流核的机率也较高. 在 8 个航次中, 海峡南端及海峡深处均存在西向逆流, 而且海峡南端的逆流在秋季较强.

4.3 对马暖流和黄海暖流通过 A 断面, 对马暖流核心位于陆坡上, 但有时偏西或偏东.  $V_{\text{max}}$  值的变动范围为  $26 \sim 46 \text{ cm/s}$ . 黄海暖流位于对马暖流的西侧, 流速相对减小. 断面 A 东侧经常存在南向逆流, 在海槽深处总是存在南向逆流.

4.4 东海黑潮的流量在这两年中, 在春季均为最小值, 在夏季为最大或较大值. 黑潮流量, 以 PN 断面为例, 每年四季平均流量值 1994 年与 1993 年几乎相同, 略小于 1992 年的平均流量值. 8 个航次中通过 PN 断面流量的变动范围在  $18.6 \times 10^6 \sim 37.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  之间, 其总平均流量为  $27.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 8 个航次中通过 TK 断面流量的变动范围为  $16.0 \times 10^6 \sim 35.9 \times 10^6$

$\text{m}^3/\text{s}$ , 其平均值为  $25.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

4.5 PN 断面热通量在  $1.3 \times 10^{15} \sim 2.3 \times 10^{15} \text{ W}$  之间变动, 8 个航次的平均值为  $1.99 \times 10^{15} \text{ W}$ . TK 断面的热通量的变动范围为  $1.1 \times 10^{15} \sim 2.6 \times 10^{15} \text{ W}$ , 8 个航次的平均值为  $1.78 \times 10^{15} \text{ W}$ .

4.6 东海海面与大气的热交换: 秋季和冬季均是由海面向大气放热; 夏季则均是从大气吸热; 春季不确定, 在 1993 年海面向大气放热, 但在 1994 年则从大气吸热. 海面上热交换率冬季最大, 而春、夏季较小.

日本气象厅长崎海洋气象台为我们提供了宝贵的观测资料, 在此表示感谢.

## 参考文献

- 1 管秉贤. 东海黑潮流量的变动及其原因的分析. 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议(1980)论文集, 北京: 科学出版社, 1982, 103~116
- 2 Nishizawa J, Eamihira E, Komura K *et al.* Estimation of the Kuroshio mass transport flowing out of the East China Sea to the North Pacific. *La mer*, 1982, **20**, 37~40
- 3 孙湘平, 金子郁雄. 1989-1991 年黑潮的变异. 黑潮调查研究论文选(五), 北京: 海洋出版社, 1993, 52~68
- 4 Yuan Y C, Endoh M, Ishizaki H. The study of Kuroshio in the East China Sea and currents east of Ryukyu Islands. In: Proc. Japan-China Symp. Cooperative Study on the Kuroshio. Science and Technology Agency, Japan SOA, China, 1990, 39~57
- 5 袁耀初, 潘子勤, 金子郁雄等. 东海黑潮的变异与琉球群岛以东海流. 黑潮调查研究论文选(五). 北京: 海洋出版社, 1993, 279~297
- 6 Yuan Y, Takano K, Pan Z *et al.* The Kuroshio in the East China Sea and the currents east of the Ryukyu Islands during autumn 1994. *La mer*, 1994, **32**, 235~244
- 7 袁耀初, 高野健三, 潘子勤等. 1991 年秋季东海黑潮与琉球群岛以东的海流. 中国海洋学文集, 第 5 集, 北京: 海洋出版社, 1995, 1~11
- 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
- 9 Fjadero M E, Veronis G. On the determination of absolute velocities in the ocean. *J. Mar. Res.*, 1982, **40** (suppl): 159~182

## Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1993 and 1994

Liu Yonggang,<sup>1</sup> Yuan Yaochu<sup>1</sup>

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

**Abstract**—Based on hydrographic data obtained by R/V *Chofu Maru* during eight cruises of 1993~1994, a modified inverse method is used to compute the velocity, volume and heat transports of the Kuroshio in the East China Sea. The calculated results show that: (1) at Section PN, there are two current cores of the Kuroshio in autumn, one or two cores in other seasons. The main core always lies over the shelf break. Countercurrent always exists east of and in the deep layer under the Kuroshio; (2) at Section TK, the velocity distribution is more complicated, and it may have one, two or three current cores of the Kuroshio. Current cores often appear in the middle and northern parts of the Tokara Strait. There are westward countercurrents in the southern end and deep layer of the strait, and the countercurrent in the southern end of the strait is stronger in autumn; (3) at Section A, the Tsushima Warm Current (hereafter TSWC) core lies in the shelf break area, and its  $V_{\max}$  varies between 26~46 cm/s. The

Huanghai Warm Current lies to the west of the TSWC, and it is weaker; (4) in 1993 and 1994 the volume transport (hereafter  $VT$ ) of the Kuroshio is the smallest in spring, but it is the largest or has a larger value in summer. The average net northward  $VT$  of the Kuroshio during four seasons each year, for example through Section PN, almost has the same value for 1993 and 1994, but both is smaller than that in 1992. The average net northward  $VT$  through Sections PN and TK during the eight cruises is  $27.1 \times 10^6$  and  $25.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectively; (5) the average heat transports through Sections PN and TK are  $1.99 \times 10^{15}$  and  $1.78 \times 10^{15} \text{ W}$ , respectively and (6) at the computation area, heat transfer is from the ocean to the atmosphere in autumn and winter, but the direction reverses in summer, and the direction of heat transfer is uncertain in spring. The average rate of heat transfer is the largest in winter, but smaller in spring and summer.

**Key words** East China Sea, Kuroshio, seasonal variability