1998-11

# 1992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1992年 4 个航次的水文调查资料,运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 断面黑潮在春季和秋季都有两个流核,冬季和夏季则只有一个流核.主核心皆位于坡折处.V<sub>max</sub>值春季最大,冬季和夏季次之,而秋季最小.黑潮以东及以下都存在逆流.(2) TK 断面黑潮在冬季为两核,春、夏季为 3 核.海峡南端及海峡深处存在西向逆流.(3) 通过 A 断面的对马暖流 V<sub>max</sub>值在秋季最大,冬季最小.黄海暖流位于其西侧,相对较弱.(4) 通过 PN 断面净北向流量夏季最大,秋季最小,而冬、春季介于上述二者之间,1992年四季平均值为 28.0×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s; TK 断面的净东向流量也是在夏季最大; A 断面净北向流量则在秋季最大.(5) PN 断面 4 个航次的平均热通量为2.03×10<sup>15</sup>W. TK 断面 3 个航次的平均热通量为2.00×10<sup>15</sup>W.(6) 在计算海区,冬、春和秋季都是由海洋向大气放热; 夏季则从大气吸热.冬季海面上热交换率最大,而夏季热交换率最小.

关键词 东海 黑潮 季节变化

1 引言

对东海黑潮流速与流量的计算,以往大多采用动力计算方法<sup>[1~3]</sup>.近年来袁耀初等<sup>[1]</sup>采用不同的逆方法作过计算,结果表明,对于浅海陆架,改进逆方法是一个更有效的方法.

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. 管秉贤<sup>[1]</sup>利用 PN 断面上 1955~1978年71个航次的水文资料,采用动力计算方法,得到平均流量为(21.3±5.36)× 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. 关于流量的季节变化,他认为春、夏季的流量大于总平均值,冬、初夏及秋季的流 量小于总平均值,其中秋季最小. Nishizawa 等<sup>[2]</sup>利用1954~1984年80个航次 PN 断面上的资 料,计算得到黑潮的平均流量为19.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. 这些值可能都偏小,其原因可能与零面(7 MPa)的选取有关. 汤毓祥和田代知二<sup>[11]</sup>对日本气象台所做的动力计算结果作了分析,指出 1955~1990年期间东海黑潮(实际上是 PN 断面的一部分)多年平均流量为22.8×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. 孙 湘平和金子郁雄<sup>[3]</sup>采用地转法计算出1989~1991年 PN 断面流量的变动范围在19.6×10<sup>6</sup>~

本文于1997-08-28收到,修改稿于1998-02-15收到.

第一作者简介:刘勇刚,男,28岁,硕士,现从事海流研究.

31.2×10° m³/s之间,平均为24.9×10° m³/s. 袁耀初等自1988年以来对黑潮流量作了一系列 计算<sup>[1-10]</sup>,特别是袁耀初等<sup>[8]</sup>采用逆方法及改进逆方法对1987~1990年间11个航次在 PN 断 面上的流量进行计算,得到通过 PN 断面的平均流量约为29×10° m³/s,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.

TK 断面(位于吐噶喇海峡处)观测资料也较多,常为人们所研究.孙湘平和金子郁雄<sup>[3]</sup> 用地转法计算得到1989~1991年间TK 断面平均流量为17.5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,在12.6×10<sup>6</sup>~24.8 ×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s之间变动. 袁耀初等<sup>[8]</sup>采用改进逆方法计算的1987~1990年9个航次TK 断面的 平均流量为24.6×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. 黑潮流经吐噶喇海峡时,黑潮流核有时为一个,但多数为两个或 三个,其位置并非固定在一个水道,而在海峡的北部、中部和南部水道皆有可能,十分复杂<sup>[8]</sup>. 在吐噶喇海峡南端,常有逆流出现;在该海峡的北部水道的中、下层可能也有逆流出现<sup>[3.8]</sup>.

本文采用改进逆方法,利用日本"长风丸"调查船在1992年4个航次以及"凌风丸"调 查船在9201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.

# 2 改进逆方法及数值计算

本文采用了袁耀初等<sup>[8]</sup>的改进逆方法,该方法对以往的逆模式作了3点重要改进:在动量方程中考虑了垂直涡动粘滞项,即流动是非地转的,在密度方程中考虑了垂直涡动扩散项,外加一个海面上海洋向大气放热(或吸热)的不等式约束:

$$q_{\epsilon,1} \leqslant q_{\epsilon} \leqslant q_{\epsilon,2}, \tag{1}$$

其中, q<sub>e</sub>, 与 q<sub>e</sub>, 分别为计算海区多年每月平均值的最小与最大值,从资料得到. q<sub>e</sub> 是未知的,由计算得到. 正的 q<sub>e</sub> (q<sub>e</sub>>0)为热量从海洋传递到大气,而负的 q<sub>e</sub> (q<sub>e</sub><0)为热量从大气传递到海洋.

海水质量与盐量守恒方程组为

$$Ab = -\Gamma \tag{2}$$

其中, A 为已知的系数矩阵; b 为未知数组成的列矩阵,  $\Gamma$  是各层的质量、盐量的初始不平衡 量矩阵<sup>[8]</sup>.对方程组(2)采用 Matear<sup>[12]</sup>的矩阵加权方法:

$$QAWW^{-1}b = -Q\Gamma. \tag{3}$$

令 A' = QAW,  $b' = W^{-1}b$ ,  $\Gamma' = Q\Gamma$ , 则有

$$A'b' = -\Gamma', \qquad (4)$$

其中Q称为资料加权矩阵 (data-weighting matrix), 定义为

$$Q_{i} = \left[\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{2}\right]^{-\frac{1}{2}}, \qquad Q_{i,k} = 0 (i \neq k)$$
(5)

即以 $Q_a$ 为对角线元素的矩阵. 这里 $a_a$ 是矩阵A的元素,n为未知数的个数. 显然,Q矩阵的 加权使方程组中所有的方程"平等对待". W称为参数加权矩阵 (parameter-weighting matrix),定义为

$$W_{jj} = |b_j|^{\frac{1}{2}} \left[ \sum_{i=1}^m a_{ij}^2 \right]^{-\frac{1}{4}}, \qquad W_{j,k} = 0 (j \neq k)$$
(6)

即以  $W_n$ 为对角线元素的矩阵. 这里  $a_n$ 仍是 A 的元素,  $b_i$  是第 j 个未知数的期望量级, m 为方程的个数. 未知数的期望量级可取为水平速度  $|v_0| = 1 \times 10^{-2}$  m/s, 垂直速度  $|w_0| = 1 \times 10^{-6}$ 

m/s. W 矩阵的加权强迫所有的模式参数具有同一量级,而不让未知数出现大量级的偏差.

本计算中采用了以下的计算参数.只有9210航次有风的观测资料,平均风速为10.0 m/s,风向63°. $q_{e,1}$ 与 $q_{e,2}$ 值从文献[8]取值,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×10<sup>3</sup> J/(cm<sup>2</sup>·d).取垂直涡动粘滞系数  $A_z$ 为100 cm<sup>2</sup>/s,垂直涡动扩散系数 K、为10 cm<sup>2</sup>/s.

各航次水文断面和计算单元表示在图 1 中. 每个计算单元分为 5 层,其交界面分别取 σ<sub>ι.</sub>, 为25、27、30和33. 我们采用 Fiadeiro 和 Veronis<sup>[13]</sup>方法选择最佳参考面 Z, 通过计算获得冬、 春、夏、秋季航次相对应的最佳参考面 Z, 分别为1 200、1 100、800和1 000 m. 在计算中取 参考深度如下:如果测站水深 H 大于最佳参面深度 Z, 则取参考面深度值为 Z, 值, 否则该计



图 1 东海海区各航次观测断面分布、计算单元及各断面的净流量(×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s) a. 9201航次(冬季) b. 9204航次(春季) c. 9207航次(夏季) d. 9210航次(秋季) 算点参考面取为 H.

3 计算结果及讨论

以下对1992年冬、春、夏、秋季 4 个航次中的东海黑潮的流速、流量及热通量的改进逆 方法计算结果作说明.

3.1 流速分布

3.1.1 PN 断面流速分布

PN 断面是东海著名的断面,冬季 (9201航次)(见图2a),在 PN 断面黑潮只有一个流核, 位于计算点13~15之间,即坡折处.在200 m 以浅水层,流速都大于100 cm/s,最大流速值为 158 cm/s,在计算点13的表层.断面的绝大部分为东北向流控制,但在黑潮以东,即计算点18 附近的表层出现了南向流,这支逆流表层最大流速为32 cm/s,在计算点20的深处以及黑潮主



图 2 1992年 PN 断面流速分布 (cm/s) a. 冬季 b. 春季 c. 夏季 d. 秋季 (+: 东北向, -: 西南向)

流在800 m 以深处都有弱的逆流存在.在断面西侧陆架,流速都不大,上层多为北向流,下层 为南向流.

春季 (9204航次,见图2b),在 PN 断面黑潮有两个流核.主流核位于计算点13与15之间, 在150 m 以浅水层,流速都大于100 cm/s,最大流速值为188 cm/s,位于计算点14的表层.另 一个流核在计算点17的50~100 m 层,最大流速值为109 cm/s.黑潮20 cm/s 流速线可达600 m 处.黑潮以东,出现了较大范围的南向流,最大流速为46 cm/s,位于计算点20的表层.断面 西侧陆架上的流速都很小,在计算点2~5和计算点7~9之间的上层为北向流,其最大值只有 15 cm/s,位于计算点 8 的表层;陆架上其余海区为南向流,最大流速值为25 cm/s,在计算点 10的表层.

夏季(9207航次,见图2c),在 PN 断面黑潮仅有一个流核,位于计算点13与15之间,200 m 以浅水层流速都大于100 cm/s,最大流速值为155 cm/s,位于计算点13的150 m 层.随深度 增加,每层流速最大值的位置向东偏移.20 cm/s 流速可达700 m 处.在黑潮以东存在范围较 大的南向流,最大流速在计算点21的表层,其值为27 cm/s.断面西侧陆架上计算点7以西主要 为南向流,流速很小;计算点7以东为北向流.

秋季(9210航次,见图2d),在 PN 断面黑潮有两个流核,主流核位于计算点13与15之间, 在120 m 以浅水层,流速大于80 cm/s,最大流速值为116 cm/s,位于计算点14的50 m 层.另 一个流核在计算点18处,最大流速值为48 cm/s,位于250 m 层.在黑潮以东存在很大范围的 逆流,在计算点20处,它的最大流速为33 cm/s,位于表层.一直到底层,这支逆流都存在,在 深层逆流很弱.断面西侧陆架上主要为南向流所控制,而且表层流速相对较大,这可能与较 大的东北风有关,其最大流速值为28 cm/s,位于计算点7的表层.

总述1992年4个季节航次在 PN 断面流速分布,可知:(1) 在春、秋季黑潮有两个核心,而 在冬、夏季黑潮只有一个核心;黑潮主核各季节都在同一个位置,即位于计算点13~15之间; (2) 在四季内黑潮流速都很大,但相对说,春季时最强,秋季时要减弱;(3) 黑潮以东及黑 潮以下都存在逆流,其最大流速值都大于25 cm/s;从逆流范围来说,夏季及秋季较大些. 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. 冬季(9201 航次) TK 断面流速如图3a 所示. 黑潮在 TK 断面有两个流核,分别位于计算点4和7处,最大流速值分别为131及123 cm/s,都在表层,20 cm/s 流速线最深可达700 m. 在海峡深处存在西向逆流. 此外,在海峡南端计算点10的表层以及海峡北端计算点2和3处都存在较弱的西向逆流.

春季(9204航次,见图3b)时,TK 断面黑潮流速有 3 个核心.一个流核位于海峡北部计算 点4处,最大流速为158 cm/s,位于表层.在海峡中部计算点 6和9处存在两个流核,最大流速值 分别为92和59 cm/s,分别位于计算点6的表层和计算点9的300 m 层.20 cm/s 流速可深达800 m 处.在海峡深处存在西向逆流,在海峡南端计算点10和11处也存在一定范围较弱的西向逆 流.在计算点3上层还有一支较强的西向逆流存在,其最大流速值为77 cm/s,位于表层,而在计 算点 2 出现东向流,其 V<sub>max</sub>值为61 cm/s,它很可能与计算点 3 处西向流组成一个反气旋式涡.

夏季(9207航次,见图3c)时,TK断面流速呈三核结构.主流核位于海峡中部计算点7 处,最大流速值为139 cm/s,位于150 m 层;在海峡北部计算点3和海峡南部计算点10处各



图 3 1992年 TK 断面流速分布 (cm/s) a. 冬季 b. 春季 c. 夏季 (+: 东向; -: 西向)

有一个核心,其最大流速值分别为87和59 cm/s,分别位于125和50 m 层处;在海峡的深层以 及海峡南端都存在较弱的西向逆流.此外,在计算点 5 处,即在两个东向流之间存在较强的 西向逆流,最大流速值为63 cm/s,位于表层.

总结1992年3个航次 TK 断面的流速分布,可知:(1) 在冬、春、夏季, TK 断面都有两个以上的流核,在海峡北部计算点 4 (或 3) 以及海峡中部计算点 7 处总有黑潮流核出现. (2) 3个航次中,春季流速最大,而在冬夏季流速减弱.(3) 在海峡深处及海峡南端都有较弱的西向流存在,海峡北部存在西向流或者可能有反气旋涡出现.

3.1.3 A 断面流速分布

A 断面位于东海北部31°55′N,是一条东西向断面(见图 1).对马暖流与黄海暖流都通过此断面.关于对马暖流的来源,Yuan 和 Su<sup>[1]</sup>认为它是一支由黑潮分支与台湾暖流等混合水形成的一支北向海流,关于它的来源还有其他说法(例如文献 [14]).黄海暖流位于对马暖流的西侧.本小节将分别讨论各航次在 A 断面的流速分布.

冬季(9201航次,如图4a 所示)时,A 断面流速相对较小,自计算点8~20存在北向流. 在此地很难分清对马暖流及黄海暖流的界线.对马暖流核心在计算点18处,其最大流速值为 21 cm/s,一直到700 m 以深还存在北向流.在断面东侧从表层至底层都存在沿岸南向逆流.

春季 (9204航次,见图4b)时,在A断面计算点9~19之间都存在北向流,对马暖流和黄海暖流位于此处,最大流速值为27 cm/s,位于计算点15的表层,北向流最深可达600 m 处.断面东侧是一支较强的逆流,最大流速在表层,其值为38 cm/s.

夏季(9207航次,见图4c)时,在A断面北向流位于计算点5~19之间,有两个流核.主流核,即对马暖流核心位于计算点18~19之间,最大流速为21 cm/s,在250 m 层.另一个核



图 4 1992年 A 断面流速分布 (cm/s) a. 冬季 b. 春季 c. 夏季 d. 秋季 (+: 北向, -: 南向)

心在计算点11与16之间,黄海暖流主要位于此处,最大流速值为17 cm/s,断面东侧存在一支 范围较大的南向逆流,最大流速值为25 cm/s,位于计算点20的表层.

秋季(9210航次)如图4d 所示,A 断面自计算点12以东都存在北向流,明显存在两个核 心.一个核心在对马暖流处,它位于断面东侧计算点19~20处,最大流速值为28 cm/s,在150 m 层;另一个核心在黄海暖流处,计算点15附近,其最大流速值为16 cm/s,在30 m 处.断面 东侧的沿岸南向逆流范围减小,而断面西侧也存在南向流,特别在计算点5~11处,在表层存 在南向流,这与秋季较强的东北风有关.

总结1992年4个航次 A 断面流速分布,可以知道:(1)对马暖流通过 A 断面,其核心位置在冬、夏及秋季都位于计算点18~20,而在春季则偏西,位于计算点15.4个季节的流速变化不大,在21~28 cm/s之间.(2)黄海暖流位于对马暖流西侧,约在计算点10~16之间范围内变化,例如在春季,它偏西约在计算点11~12,其他季节则偏东,它的流速要减少.(3)断面东侧总存在南向沿岸流,流速变化在12~38 cm/s之间.

## 3.1.4 其他断面流速分布

IS 断面是位于台湾东北呈西北一东南向的断面,(如图1d 所示).黑潮自我国台湾以东通 过该断面.只有秋季航次才有观测资料.图 5 为该航次 IS 断面流速分布图,在 IS 断面,黑潮 有两个流核.主流核位于陆坡上计算点9~11处,200 m 以浅水层流速大于80 cm/s,最大流速 值为173 cm/s,位于计算点10的50 m 层.与同时期 PN 断面最大流速相比较,要大于 PN 断 面上最大流速.在计算点14处还有一个流核,最大流速值为46 cm/s,位于50 m 层.1 000 m 以下有南向逆流存在,但较弱.在断面西侧大部分陆架上为南向流,上层南向流速较大,这 与较强的东北风有关.

YT 断面位于台湾以东 (图1d).由于断面 YT 的最西端测点距离台湾岛大于30 n mile,而 黑潮主轴较近台湾,因而黑潮主轴并未通过 YT 断面,即在 YT 断面以西.图 6 为该断面流 速分布.从图6可知,存在两个北向流的流核.西侧的一个流核最大流速为60 cm/s,位于计算 点 2 的50 m 层.东侧的一个流核范围较大,其最大流速为62 cm/s,在计算点5的200 m 层处. 在两个流核中间存在一支逆流,其最大流速为30 cm/s,位于计算点 3 的表层.





图 5 1992年秋季航次 IS 断面上流速分布 (cm/s) (+: 东北向, -: 西南向)

图 6 1992年秋季航次 YT 断面流速分布 (cm/s) (+: 东北向, -: 西南向)

#### 3.2 流量分布

流量是描述大洋环流的一个重要物理量.本节我们首先分析各航次流量分布,再讨论黑 潮流量的季节变化.

在冬季(如图1a 所示),通过 PN 和 TK 断面的净北向流量分别为29.4×10<sup>6</sup>和28.2×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,A 断面北向净流量1.0×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. 黑潮通过 PN 断面后,绝大部分流向了 TK 断面.通过 A 断面北向流(对马暖流与黄海暖流)的流量与南向流的流量分别为2.9×10<sup>6</sup>和1.9×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s.

在春季(如图1b 所示)通过 PN 和 TK 断面的净北向流量分别为26.3×10<sup>6</sup>和25.5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,与冬季相比,净北向流量减小,这可能与春季时南向逆流流量增加有关. A 断面北向流的流量与南向流的流量分别为5.0×10<sup>6</sup>和4.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,较冬季均有所增加.

在夏季(如图1c 所示), 通过 PN 和 TK 断面的净北向流量分别为33.6×10<sup>6</sup>和3.16×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. A 断面北向流的流量与南向流的流量分别为3.8×10<sup>6</sup>和1.9×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s.

在秋季(如图1d),黑潮在 IS 断面流量较大,其值为29.5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,流向 PN 断面的流 量减小,其值为22.3×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,是因为有一部分海水通过宫古岛与冲绳岛之间的海域向东流 回了太平洋,袁耀初等<sup>[8]</sup>将东海黑潮及琉球群岛以东海域流型划分为 3 种类型,本航次属于 流型 I.黑潮通过吐噶喇海峡的流量为18.5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,而 A 断面北向流的流量与南向流的流 量分别为4.5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s 和1.4×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s,净流量为3.1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s.

总结1992年4个航次的净流量分布,可以知道在东海黑潮通过 PN 断面流量夏季最大,秋季最小,而冬、春季介于上述二者之间,这与前人的研究结果<sup>[1,3,8]</sup>基本一致; PN 断面的净流量大于 TK 断面的净流量; A 断面净北向流量在秋季大于其他季节.1992年 PN 断面黑潮平均流量为28.0×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s.此结果接近袁耀初等<sup>[8]</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.以下我们分别作讨论.

## 3.3.1 PN 断面的热通量

由表 1 可知, PN 断面热通量在1.6×10<sup>15</sup>~2.5×10<sup>15</sup> W 之间变动, 其季节变化特征与通 过 PN 断面的流量的变化特征基本相一致.4 个航次的平均热通量为2.03×10<sup>15</sup>W, 这与袁耀 初等<sup>[8]</sup>对1988、1989年两年共 8 个航次计算得到的 PN 断面平均热通量值2.109×10<sup>15</sup>W 十分 接近.

项目/航次	9201	9204	9207	9210	平均
$Q_{\rm PN}$ (×10 <sup>15</sup> W)	2.1	1.9	2.5	1.6	2.03
$Q_{\mathrm{TK}}$ ( $ imes 10^{15}\mathrm{W}$ )	1.9	1.8	2.3	$\sim$	2.00
$q_{e} [\times 10^{3} \text{J}/ (\text{cm}^{2} \cdot \text{d}]$	4.58	1.24	-0.22	2.51	2.03

表 1 通过 PN、TK 断面的热通量  $(Q_{PN}, Q_{TK})$  与东海海气平均热交换率  $(q_e)$ 

## 3.3.2 TK 断面的热通量

由表 1 中可以看出, 3 个航次中 TK 断面的热通量的变动范围为1.8×10<sup>15</sup>~2.3×10<sup>15</sup> W,其季节变化特征也与通过该断面的流量变化特征基本相同.3 个航次的平均热通量为2.00×10<sup>15</sup> W,稍大于袁耀初等<sup>[8]</sup>对1988、1989年两年共 8 个航次计算得到的平均热通量值1.824×10<sup>15</sup> W.

### 3.3.3 海面上的热量交换

本小节我们计算以 PN、TK 和 A 断面的所围成的海域平均海气热交换率. 计算结果见表 1,正值为海洋向大气放热,负值则相反. 此平均值是作为东海海面与大气之间的平均热交换 率(q.).由表 1 可知,冬季、春季和秋季都是由海洋向大气放热;夏季则从大气吸热.冬季 海面上热交换率最大,而夏季热交换率最小. 1992年4个航次(四季)平均为海面向大气放热,平均放热率为2.03×10<sup>3</sup> J/(cm<sup>2</sup>·d).

4 结论

基于1992年 4 个航次的水文资料,我们采用改进逆方法对东海黑潮的流速、流量和热通 量等进行了计算,得到以下几点结果:

4.1 PN 断面黑潮在春季和秋季都有两个流核,冬季和夏季则只有一个核. 主核心皆位于坡 折处. 在四季内黑潮流速都很大; V<sub>max</sub>值春季最大,冬季和夏季次之,而秋季最小. 黑潮以东 及以下都存在逆流,黑潮以东逆流最大流速值都大于25 cm/s,在夏季和秋季其范围较大.

4.2 TK断面黑潮在冬季为两核,春、夏季为3核.四季最大流速值也是在春季时最大.海 峡南端及海峡深处都存在西向逆流.

4.3 通过 A 断面的对马暖流 V<sub>max</sub>值在秋季最大,冬季最小,在21~28 cm/s 之间变化.黄海 暖流位于其西侧,相对较弱.对马暖流的东侧总存在南向沿岸逆流.

4.4 通过 PN 断面净北向流量夏季最大,秋季最小,而冬、春季介于上述二者之间,1992年四季平均值为28.0×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s; TK 断面的净东向流量也是在夏季最大; A 断面净北向流量则在秋季最大.

**4.5** PN 断面热通量在1.6×10<sup>15</sup>~2.5×10<sup>15</sup> W 之间变动,其季节变化特征与通过 PN 断面的流量的变化特征基本相一致,4 个航次的平均热通量为2.03×10<sup>15</sup> W.3 个航次中 TK 断面的热通量的变动范围为1.8×10<sup>15</sup>~2.3×10<sup>15</sup> W,其季节变化特征也与通过该断面的流量变化特征基本相同,3 个航次的平均热通量为2.00×10<sup>15</sup> W.

4.6 在计算海区, 冬、春和秋季时都是海洋向大气放热; 夏季则从大气吸热. 冬季海面上热 交换率最大, 而夏季热交换率最小.

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 Yaochu, Su Jilan. The calculation of Kuroshio current structure in the East China Sea—early summer 1986. Progress in Oceanography, 1988, 21, 243~361
- Yuan Yaochu, Su Jilan, Pan Ziqin. A study of Kuroshio in the East China Sea and currents east of Ryukyu Islands in 1988.
   In: Oceanography of Asian Marginal Seas (Takano K ed.), Elsevier Science Publisher, 1991, 305~319
- 6 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
- 7 袁耀初,潘子勤.1989年夏初东海黑潮流量与热通量的变化.黑潮调查研究论文选(四),北京:海洋出版社,1992,265 ~272
- 8 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

- 9 Yuan Yaochu, Takano K, Pan Ziqin et al. The Kuroshio in the East China Sea and the currents east of the Ryukyu Islands during autumn 1991. La mer, 1994, 32, 235~244
- 10 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
- 11 汤毓祥,田代知二. 东海 PN 断面黑潮流况的分析. 黑潮调查研究论文选(五),北京:海洋出版社,1993,69~76
- Matear R J. Circulation within the ocean storms area located in the northeast Pacific Ocean determined by inverse methods.
   J. Phys. Oceanogr., 1993, 23, 648~658
- 13 Fiadeiro M E. Veronis G. On the determination of absolute velocities in the ocean. J. Mar. Res. , 1982, 40 (Suppl): 159  $\sim$ 182
- 14 郭炳火,道田丰,中村保昭.对马暖流源区水文状况极其变异的研究.黑潮调查研究论文选(五),北京:海洋出版社, 1993,16~24

## Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1992

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

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

Abstract — Based on the hydrographic data of the four cruises in 1992, a modified inverse method is used to compute the velocity, volume and heat transports of the Kuroshio in the East China Sea. The computed results show that: (1) There are two current cores of the Kuroshio at Section PN in spring and autumn, but one core in winter and summer. The main core always lies over the shelf break. The Kuroshio is strongest in spring, secondary in winter and summer and weakest in autumn. There are also countercurrents under and east of the Kuroshio at Section PN. (2) There are two current cores of the Kuroshio at Section TK in winter, three cores in spring and summer. Countercurrents exist in the southern part and the deep layer of the Tokara Strait. (3) The Tsushima Warm Current (TSWC) at Section A is strongest in autumn and weakest in winter, and is stronger than the Huanghai Warm Current which lies to the west of the TSWC. (4) The net northeastward volume transport (hereafter VT) through Section PN is largest in summer and smallest in autumn with an average of 28.0 $\times$  $10^6$  m<sup>3</sup>/s in the four cruises of 1992. the net eastward VT at Section TK is also largest in summer. The net northward VT at Section A is largest in autumn. (5) The average heat transport through Section PN during the four cruises is  $2.03 \times 10^{15}$  W, and that through Section TK is  $2.00 \times 10^{15}$  W during the three cruises. (6) In the computation area, heat transfer is from the ocean to the atmosphere during winter, spring and autumn, but from the atmosphere to the ocean in summer. The average rate of heat transfer is largest in winter, but smallest in summer.

Key words The East China Sea, Kuroshio, seasonal variability