

朱小华, 黄大吉. 2004~2006 年奄美大岛以东的琉球海流. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1354~1363

Zhu X H, Huang D J. The Ryukyu Current east of Amami-Oshima during 2004 to 2006. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1354~1363

## 2004~2006 年奄美大岛以东的琉球海流

朱小华, 黄大吉

卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

**摘 要** 基于 2004~2006 年 12 个航次的水文资料, 用逆方法计算得到了奄美大岛以东 AE 断面琉球海流的流速和体积流量. 再次证实琉球海流具有较稳定的次表层流核结构, 流核位于 110~600 m 深度, 并沿 AE 线分布于 27.2°~28.2°N, 流核的最大流速为 15.1~80.0 cm·s<sup>-1</sup>. 12 个航次的平均流速断面显示了一个完整的次表层流核, 其流核的最大流速为 21.3 cm·s<sup>-1</sup>, 流核的垂直和水平尺度分别为 800 m 和 30 km. 观测结果表明, 2004~2006 年之间, 琉球海流冬季、春季、夏季、秋季和年平均的流量分别为 10.9, 10.1, 5.9, 23.9 和 12.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, 秋季最强, 夏季最弱. 日本以南黑潮净流量为 52.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, 其中源于吐噶喇海峡黑潮和琉球海流的流量平均比为 0.40.

**关键词** 琉球海流, 黑潮, 次表层流核, 流速, 体积流量

文章编号 0001-5733(2008)05-1354-10

中图分类号 P714

收稿日期 2007-09-13, 2008-06-11 收修定稿

## The Ryukyu Current east of Amami-Oshima during 2004 to 2006

ZHU Xiao-Hua, HUANG Da-Ji

State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography,  
State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012, China

**Abstract** An inverse calculation using twelve repeat hydrographic section data collected from 2004 to 2006 yields velocity structures and volume transports (VTs) of the Ryukyu Current (RC) in the region east of northern Ryukyu Islands. The results show that the RC is dominated by subsurface velocity core with maximum velocities varying from 15.1 to 80.0 cm·s<sup>-1</sup>. The positions of subsurface maximum velocity core distribute between 110 and 600 m and 27.2°~28.2° N along the AE line. The mean velocity section exhibits a perfect subsurface velocity core with a mean maximum velocity of 21.3 cm·s<sup>-1</sup>, and vertical and horizontal dimensions of 800 m and 30 km, respectively. The seasonal mean velocity sections exhibit that the RC is the strongest in autumn and the weakest in summer. The mean VT for winter, spring, summer, autumn, and all twelve observations are 10.9, 10.1, 5.9, 23.9, and 12.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively. The mean net VT of the Kuroshio south of Japan is estimated to be 52.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. The rate of Kuroshio VT supplied by the Kuroshio from Tokara Strait and by the RC from the region southeast of Amami-Oshima is 0.40.

**Keywords** Ryukyu Current, Kuroshio, Subsurface maximum velocity core and volume transport

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40776021); 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400603); 国家高科技发展项目(2006AA09Z102); 浙江省钱江人才计划(2007R10035)资助.

**作者简介** 朱小华, 男, 1963 年生. 1998 年获日本广岛大学工学博士学位. 2000~2006 年在日本海洋科学技术中心(JAMSTEC) 全球环境观测研究所任研究员. 现为国家海洋局第二海洋研究所研究员. 主要从事物理海洋学的观测研究. E-mail: xhzh001@yahoo.com.cn

## 1 引言

琉球群岛以东存在一支东北向的海流,它最早由 Nitani<sup>[1]</sup>提出,后被命名为琉球海流<sup>[2]</sup>,它是北太平洋一支重要的西边界流.20 世纪 80 年代起,中外海洋学家对冲绳以东的琉球海流进行了不少观测研究.如我国科学家在中日黑潮调查、中日副热带环流调查等项目中对琉球海流进行了调查研究.日本气象厅长崎海洋气象台对冲绳岛以东的断面进行了长期定期观测.基于上述的这些观测资料,研究分析表明:冲绳岛以东的琉球海流有体积流量变化大,琉球海流存在次表层极大值的特点<sup>[3~6]</sup>.袁耀初和苏纪兰(2000)对 1995 年以来中国科学家关于琉球海流的研究进行了综述<sup>[7]</sup>.

在 1992~1995 年的 4 年时间,日本海洋界对日本四国以南黑潮进行了集中观测,根据观测所得到的黑潮流量,并结合卫星海面高度计资料,推算出了 1992~1999 年 7 年间日本四国以南黑潮的平均流量为  $42 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[8]</sup>.这一流量大大地超过了东海 PN 断面的流量  $23 \sim 29 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[9~13]</sup>.这一结果,说明了在琉球群岛以东必须有一支强大的东北向流来弥补四国以南黑潮流量和东海黑潮流量之差.

Zhu 等<sup>[14]</sup>通过断面锚系观测资料,得到了冲绳岛以东断面 2000 年 11 月到 2001 年 8 月的流速和流量,发现冲绳岛以东的琉球海流受中尺度涡影响非常强烈.琉球海流的流速变化范围为  $-20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (西南向)至  $60 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (东北向),流量变化范围为  $-9.8 \sim 25 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,首次通过实测资料得到了琉球海流 9 个月的平均流量为  $6.1 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,证实了在冲绳岛以东确实稳定地存在着一支东北向的海流——琉球海流. Ichikawa 等<sup>[15]</sup>在琉球海流的下游海域奄美大岛以东进行了较大规模的锚系观测,基于 4 年的断面锚系资料,得到了琉球海流在奄美大岛以东的平均流量为  $13 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,并发现琉球海流的次表层极大值结构较为稳定.

Nakano 等<sup>[16]</sup>和 Zhu 等<sup>[17]</sup>通过逆方法计算得到了 1987 年 9 月和 2000 年末奄美大岛以东琉球海流的流速分布,并证实两个断面在 200~400 m 的次表层都存在着东北向流速的极大值的流核.但由于观测次数太少,无法阐明琉球海流在奄美大岛以东海域的变化规律. Ichikawa 等<sup>[15]</sup>虽得到了琉球海流在奄美大岛以东海域 4 年的流速和流量的平均值

及其变化,但由于锚系资料的空间分辨率较低,对于阐述琉球海流的详细空间结构存在不足.

为进一步探讨琉球海流的时空特征和它对日本以南黑潮的影响,从 2004 年起,日本气象厅加强了对奄美大岛以东海域的观测.本文运用这些观测资料,着重阐述这一海域琉球海流流速和流量的空间分布特征、季节变化规律以及它的流量在日本以南黑潮流量中所占的比例.

## 2 资料与计算

本文使用的资料是日本气象厅组织实施的定期 CTD(Conductivity-Temperature-Depth)观测数据,从 2004 年至 2006 年每年每季各一次,共计 12 个航次. CTD 观测主要使用了日本长崎海洋气象台的调查船长风丸(R/V Chofu-Maru),其中也有部分航次是由日本气象厅所属的两艘调查船共同完成的.本文选了 4 条断面共 46 站,分别是吐噶喇海峡的 TK 断面、奄美大岛以东的 AE 断面、日本以南的 ASUKA 断面和连接 AE 与 ASUKA 的 AA 断面(图 1).这 4 条断面和海岸、岛屿形成了一个封闭的计算单元(computational box).在海底地形复杂和斜面较多的 TK 和 AE 断面,CTD 站位间的距离约为 20 km,AA 断面站位间的距离约为 45 km,ASUKA 断面站位间的距离约为 30~60 km. CTD 观测深度在近岸海域接近海底,在深海区则超过了 2000 m.这样的观测资料对于研究琉球海流、黑潮及中尺度涡具有足够高的空间分辨率.

在忽略了丰后水道和九州一种子岛(位置参见图 1)间流量的条件下,采用了 Wunsch<sup>[18]</sup>提出的逆方法对图 1 的计算单元进行了计算.首先把计算单元垂直按位密度(potential density,  $\sigma_\theta$ )分成以下 5 层:25.00, 26.00, 27.00, 27.50 和 27.65 $\sigma_\theta$ (水深约 200, 500, 900, 1400 和 1900 m).假设各层质量、盐量守恒,便可得到如下基本约束方程组:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{b} = -\mathbf{I}, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{A}$  为  $9 \times 46$  的系数矩阵; $\mathbf{b}$  为  $1 \times 46$  未知数组成的列矩阵,也就是 46 个站位间在参考面(2000 m 或站位间有效最深深度)的未知流速; $\mathbf{I}$ ( $1 \times 9$ )是 5 层的质量、第 2~5 层的盐量通量.

为求解欠定方程组(1),根据这一海域的特点,我们用一个预测误差( $\epsilon$ )首先对方程组进行无因次化,然后用一个对角矩阵  $W_{ii} = d_i \times \Delta x_i$  ( $d_i$  和  $\Delta x_i$  分别为站位  $i$  间的深度和距离)对(1)进行加权来平

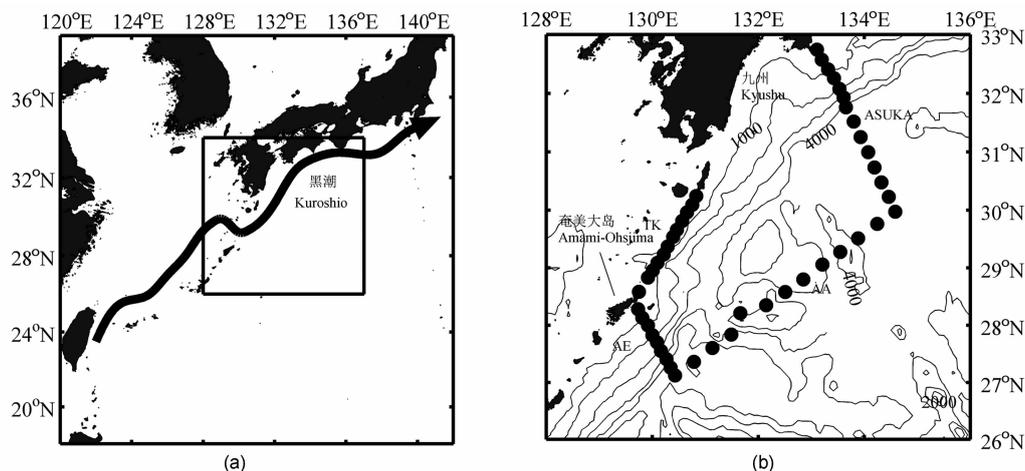


图 1 观测站位图

(a) 观测站位置;(b)a 中方框的放大.

黑圆表示 CTD 站位. AE、AA、ASUKA 和 TK 分别是 4 条观测断面名称. 水深等值线单位:m.

Fig. 1 Location map of hydrographic stations

Solid circles indicate CTD stations. AE, AA, ASUKA and TK are the names of the four hydrographic sections. Bathymetric contours are in meters.

滑因深度和站位距离不同而引起的误差. 最后本文采用了“tapered least squares(渐缩最小二乘)”来求解方程组(1)<sup>[18,19]</sup>.

为便于讨论,约定主流向的流速和流量为正值,即 AE 和 ASUKA 断面的东北向流、TK 断面的东南向流和 AA 断面的西北向流为正值,反之为负值.

为讨论中尺度涡对流速和流量的影响,本文还使用了海表面高度异常资料(Sea Surface Height Anomaly, 以下简称 SSHA). 该资料来源于法国图卢兹 CLS 空间海洋局,以 7 天周期和 $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ 的网格,融合了 TOPEX/Poseidon, ERS 和 Jason1 的卫星高度计资料.

### 3 流速结构及其变化

通过逆方法求解,得到了 TK、AE、AA 和 ASUKA 4 条断面的流速分布. 因 TK 和 ASUKA 断面的流速分布特征较清楚<sup>[13,20]</sup>,而 AA 断面不是主要断面,限于篇幅,本文仅讨论 AE 断面的流速特征. 图 2 是 2004~2006 年 12 个航次的流速分布. 流速为  $20 \sim 80 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  东北向的琉球海流可以较清楚地从每个航次中得以确认. 总体来说琉球海流以次表层流核(Subsurface Current Core, 简称 SCC)的存在为特点,其 SCC 有单个的(第 1, 4~5, 7~9 航次),也有双流核或多流核(第 2~3, 6, 10~12 航次). SCC 的位置在水平和垂直方向都有较大变化:有时

SCC 极其靠近奄美大岛(第 2, 5~6, 11 航次),有时它移到  $27.6^\circ\text{N}$  以南处(第 3, 4, 8, 10 航次); SCC 分布于  $110 \sim 800 \text{ m}$  深度之间. SCC 的最大流速变化也很大,最小为  $15.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (第 7 航次),最大为  $80.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (第 12 航次). 另外,有一些航次还出现了西南向的逆流<sup>[1]</sup>(第 5~8, 10~11 航次),有关西南向逆流将在第 5 节中讨论.

为讨论琉球海流的季节变化和平均状态,对流速断面分季节进行了平均. 图 3(a~d)表明, SCC 结构在所有季节都可以较为清晰地看到,春夏两季出现了多个较弱的 SCC 结构,而秋冬季的流速较其他两季强,并显示了单个 SCC 结构. 冬、春、夏和秋季 SCC 的最大流速分别为  $22.2$ ,  $21.9$ ,  $15.9$  和  $46.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . 需要说明的是,如果仅对 2004 年和 2005 年秋季流速进行平均, SCC 的最大流速为  $44.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,也超过了其他季节的平均最大流速. 所以,秋季 RC 流速最大并不是 2006 年秋季(第 12 航次) SCC 特别强而造成的平均效果.

12 个航次的平均流速清楚地显示了一个完整的 SCC(图 3e),其核心最大流速为  $21.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位于  $455 \text{ m}$  和 AE 断面的  $27.62^\circ\text{N}$ ,此处水深约  $2700 \text{ m}$ . 流速大于  $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  的范围处于位密度  $25 \sim 27 \sigma_\theta$  间,其水平和垂直尺度分别为  $30 \text{ km}$  和  $800 \text{ m}$ . 关于 AE 断面的 SCC 的结构, Ichikawa 等<sup>[15]</sup> 基于锚系资料,用内插法也得到了一个不完整的 SCC 分布图. 虽然其 SCC 的最大流速( $23 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )和本文的结果



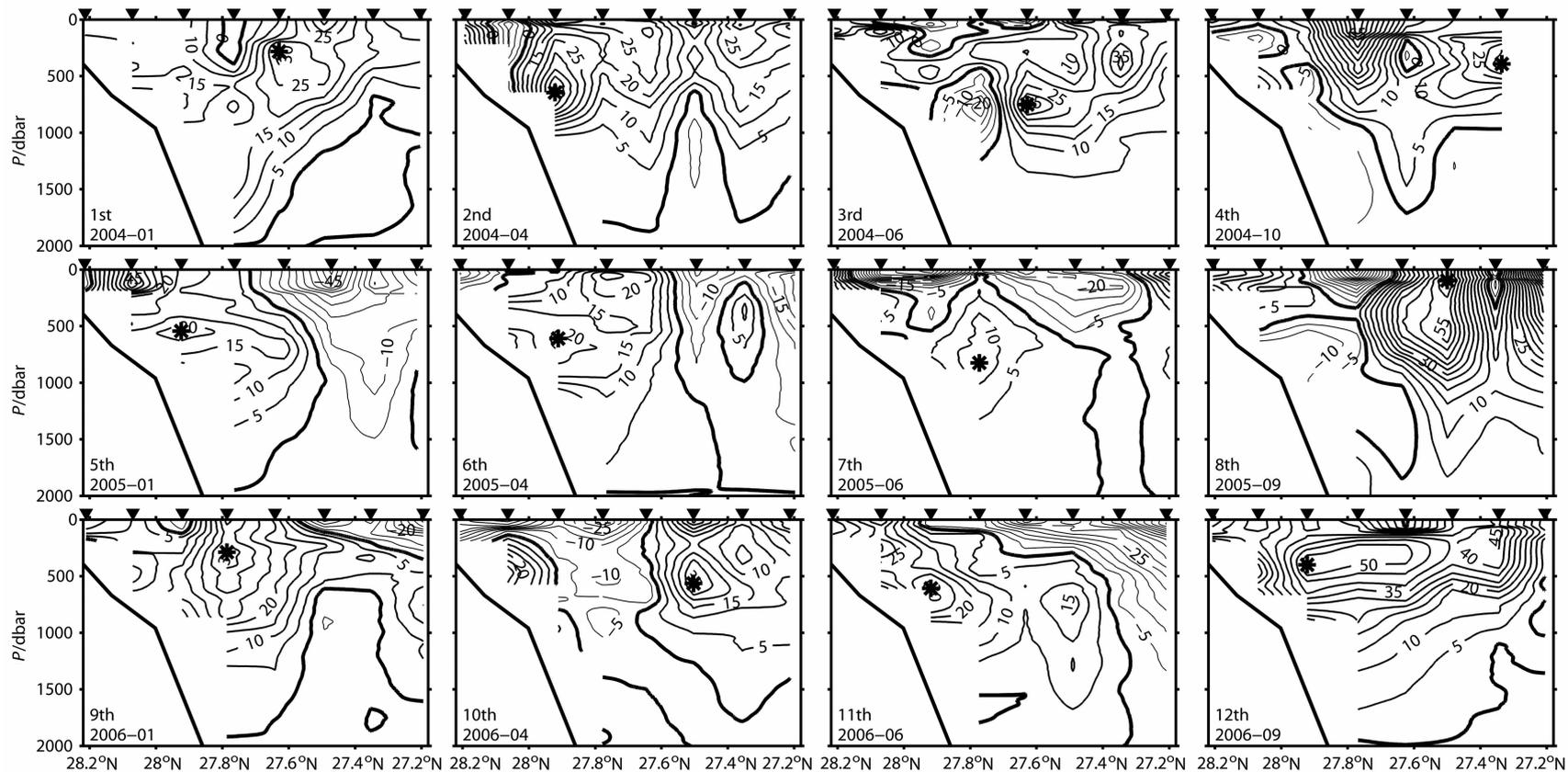


图 2 AE 断面的流速分布

流速等值线间隔为  $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 正代表东北向流速, 粗等值线代表流速为零, \* 表示次表层流速极大值的位置, 倒三角表示逆方法计算点位置, 航次和观测时间在各图的左下方表示。

Fig. 2 Absolute geostrophic velocity at the AE line

Black contours indicate current velocity with  $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  interval. Positive value indicates northeastward velocity. Thick contours show 0 velocity.

The positions of subsurface maximum velocity are marked with \*. Inverted triangles indicate the locations of inverse computational points.

The cruise number and period of the hydrographic survey are shown in the left-bottom corner of each panel.

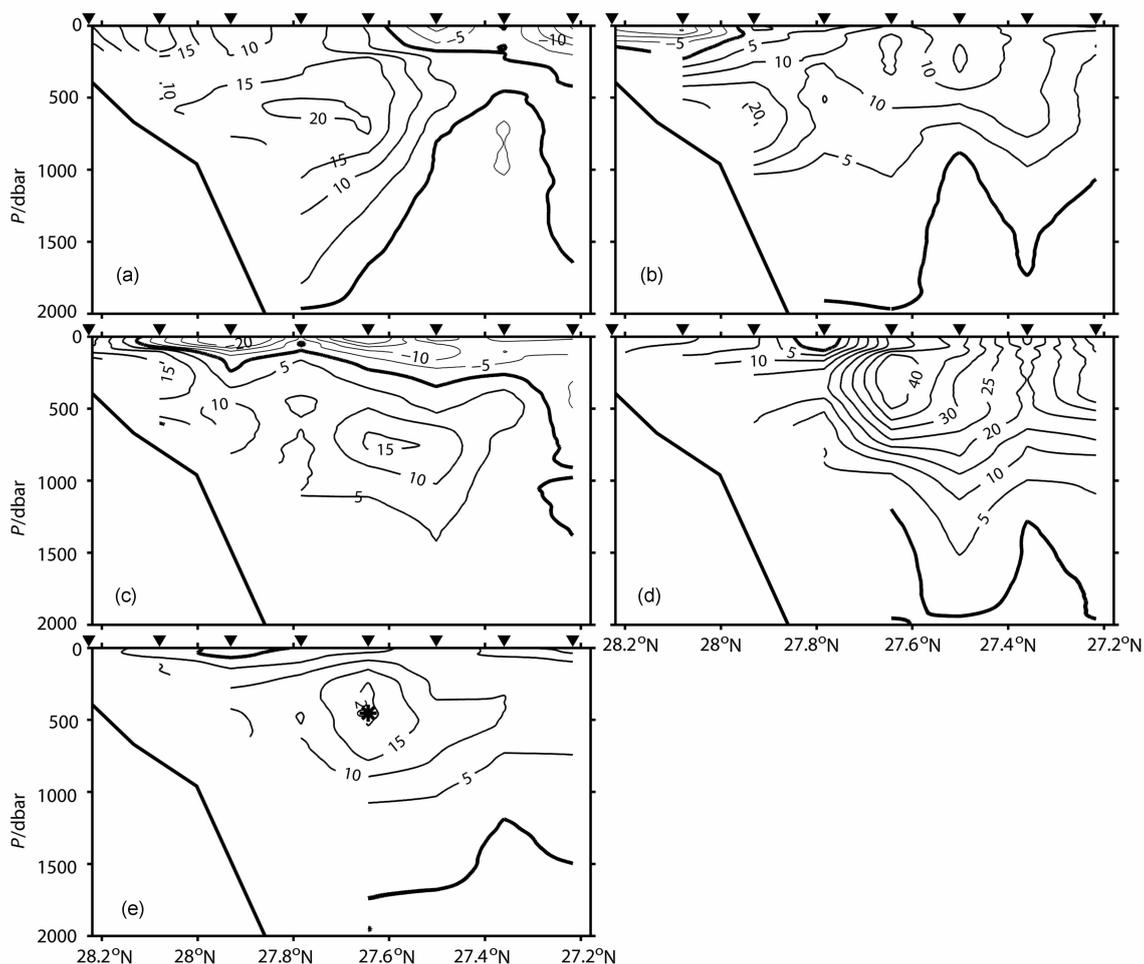


图3 AE断面的平均流速分布

(a)冬季;(b)春季;(c)夏季;(d)秋季;(e)全航次断面平均. 流速等值线间隔为  $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3 Mean absolute geostrophic velocity at the AE line

(a) Winter; (b) Spring; (c) Summer; (d) Autumn and (e) all sections. Black contours indicate current velocity with  $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  interval.

很接近,但如详细比较两者的流速结构,可以发现如下差别:本文的结果显示了SCC位于455 m和 $27.6^{\circ}\text{N}$ ,而Ichikawa等<sup>[15]</sup>的结果为600 m和 $27.9^{\circ}\text{N}$ ;本文的流核的水平垂直尺度要明显比Ichikawa等的结果小.这一SCC结构上的差别主要是因为Ichikawa等在最重要的SCC深度上没有布放海流计,100~600 m的流速是由100 m层ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)和600 m以深海流计资料线性内插所得,即没有直接对SCC进行观测;而本文是基于多次观测资料得到了这一海域的SCC的平均结构.

#### 4 体积流量

从图4a可知,AE断面的净流量(net volume

transport)变化很大,由最小的 $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 到最大的 $35.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,其平均值(MVT)±正态分布值 $\delta = 12.7 \pm 10.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .TK断面的流量变化相对较小(图4b),其MVT $\delta = 23.9 \pm 6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .TK断面的流量从时间(月)坐标6至30发生了有规律的振荡,即秋季和春季的流量小于前一个季节的夏季和冬季的流量,而冬季和夏季的流量大于前一个季节的秋季和春季的流量.这实际上是冬季和夏季流量大于其他两个季节的季节变化特征,这和以往东海与TK断面的黑潮流量变化特征相吻合<sup>[21]</sup>.AUSUKA断面的流量明显大于TK或AE断面的流量,其MVT $\delta = 52.7 \pm 18.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .AUSUKA断面的黑潮平均流量 $52.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 虽大于文献[8]的 $42 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,但文献[8]的流量是黑潮0~1000m的流量,如换

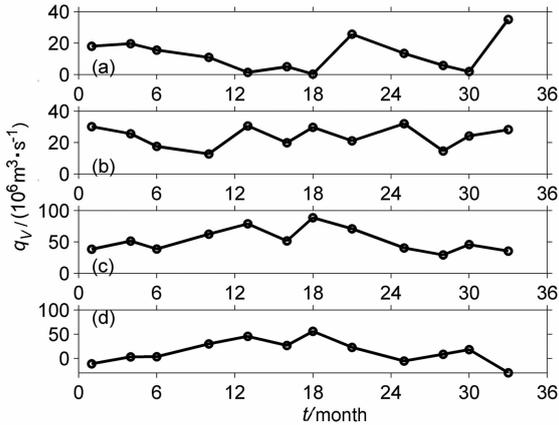


图4 断面 AE(a)、TK (b)、ASUKA(c) 和 AA(d)的净流量

Fig. 4 The net volume transports across the AE(a), TK(b), ASUKA(c) and AA(d) sections

算成本文的 0~2000 m 的流量,和本文的基本相同. AA 断面的流量有时出现了负值,即 AA 断面的海流有时为净流出,其 MVT  $\delta = 14.0 \pm 24.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . ASUKA 和 AA 断面流量的绝对值

虽然差别很大,但两者的变化极其相近,这主要是由于这两个断面的流量都受到黑潮再循环(Kuroshio Recirculation)(俗称四国以南的暖水涡)的控制和影响.

从表 1 可知,AE 断面的平均流量在秋季最大( $23.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),夏季最小( $5.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),冬季和春季几乎相同(约  $10 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).需要说明的是,2004 年和 2005 年秋季的平均流量为  $18 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,也大于其他季节的平均流量.因此,秋季流量最大并不是第 12 次航次的流量特大而造成的平均效果. AE 断面的平均流量夏季最小,很可能与日本以南黑潮再循环夏季最弱有关<sup>[22]</sup>. TK 断面的流量显示了冬季和夏季大于春季和秋季,春季和秋季流量基本相同,这和以往的观测结果基本相同. ASUKA 断面的四季流量的  $\delta$ ( $18.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 仅是其 MVT( $52.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的 35.5%,说明其季节变化较小. ASUKA 断面的平均流量和季节变化特征和以往的观测结果也基本相同<sup>[8]</sup>. AA 断面流量的年 MVT 仅  $14.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,但其季节变化最大( $\delta = 24.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

表 1 2004~2006 年通过各断面的 MTV

Table 1 MTV across each section during 2004~2006 (units:  $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

断面	春季	夏季	秋季	冬季	全季节
AE	10.1±8.2	5.9±8.4	23.9±12.2	10.9±8.6	12.7±10.7
TK	20.0±5.5	23.8±6.1	20.7±7.8	30.9±0.9	23.9±6.6
ASUKA	44.1±12.9	57.7±27.0	56.3±18.6	52.5±22.8	52.7±18.7
AA	10.1±8.2	12.8±12.4	25.8±27.0	7.7±32.5	14.0±24.2

下面讨论 AE 断面的琉球海流究竟有多少流向了 ASUKA 断面. 图 5 是 12 个航次的流函数分布. 需要说明的是,观测数据仅局限于 4 条观测断面,计算单元内的流函数不是实际观测数据而是内插所得.

首先来观察一下黑潮的流轴(指黑潮流速最大处):在 ASUKA 断面上,第 2 和第 9 航次的黑潮是离岸流路(offshore path),其他航次基本都是近岸流路(onshore path),体现了日本以南黑潮流路的 2 种模态<sup>[20]</sup>;TK 断面上的黑潮流轴基本位于 TK 的中部或南部;琉球海流在 AE 断面上的位置变化较大. 图 5 的流函数分布基本呈西南向东北走向,这和黑潮的流向基本相同. 综合 12 个航次的流函数可把 AE 断面的琉球海流去向分成几种:(1) 琉球海流几乎全部流至 ASUKA 断面(第 2~4, 6, 8~9 航次);(2) 琉球海流除流至 ASUKA 断面,有相当部分以反气旋的方式从 AA 断面流出(第 1, 10, 12 航次);(3) 琉球海流很少流向 ASUKA 断面(第 5, 7,

11 航次). 从流函数分布可以发现,除了在 ASUKA 断面黑潮发生离岸的第 2 航次以外,琉球海流基本是从黑潮流轴南侧流入 ASUKA 断面.

ASUKA 断面  $30^\circ\text{N}$  以北的黑潮净流量,由 TK 断面的黑潮、AE 断面的琉球海流和黑潮再循环的流量组成. 要计算 ASUKA 断面的黑潮东向流(Kuroshio throughflow),必须从黑潮净流量中去除第 3 部分的再循环流量. 而再循环流量不仅取决于其循环的强度,还取决于循环的位置,要正确地估算有较大难度. 为讨论琉球海流在 ASUKA 断面黑潮流量中的比例,这里把从 AE 断面流至 ASUKA 断面的琉球海流流量(RCVT)和 TK 断面流至 ASUKA 断面的黑潮的流量(TKVT)作一比较. 在 ASUKA 断面黑潮流量中,源于吐噶喇海峡黑潮和琉球海流的流量比(RCVT/TKVT)变化很大(0.05~0.83),平均为 0.40(图 7). 从图 7 可知,琉球海流所占的比例有时还超过了黑潮的 80%(第 2, 4 航

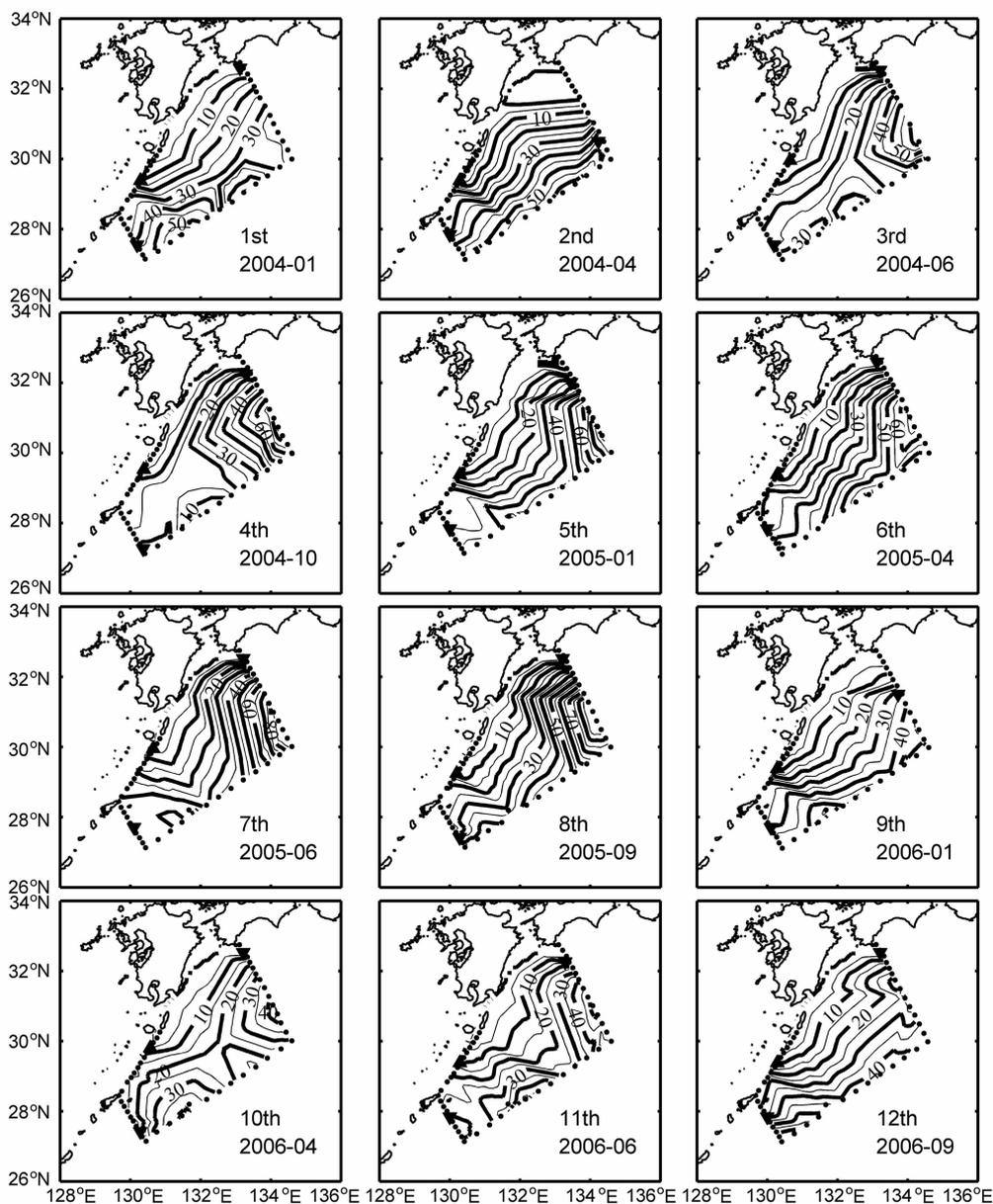


图 5 流函数分布(单位:  $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

三角代表黑潮和琉球海流的流轴位置,航次和观测时间在右下方表示.

Fig. 5 Distribution of the stream function (units:  $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

Triangles indicate the locations of the Kuroshio and the Ryukyu Current axis. The cruise number and period of the hydrographic survey are shown in the right-bottom corner of each panel.

次),可见琉球海流的重要性.这一比例不仅与吐噶喇海峡黑潮和琉球海流的净流量有关,还与这两支流的流路以及这一海区的动力学环境如中尺度涡等有关,这需要更深入研究.

## 5 中尺度涡的影响

为讨论中尺度涡对流速和流量的影响,图 7 给出了各个航次期间的 SSHA 分布图.

首先讨论 AE 断面的流速和中尺度涡的关系.从图 2 可知,第 5~8 和 10,11 航次 AE 断面部分出现了西南向流.比较图 7 的 SSHA 的分布,可以看到这些西南向流和中尺度涡的分布有关.例如:第 5 和 6 航次的西南向流出现在 AE 断面的南端,而此时刚好有一较弱的反气旋涡(顺时针旋转)到达 AE 断面,反气旋性涡使其西北侧产生东北向流,东南侧产生西南向流,这和图 2 的流速分布吻合.第 7,8 和 10 航次则有一气旋涡(反时针旋转)出现在 AE 断面,

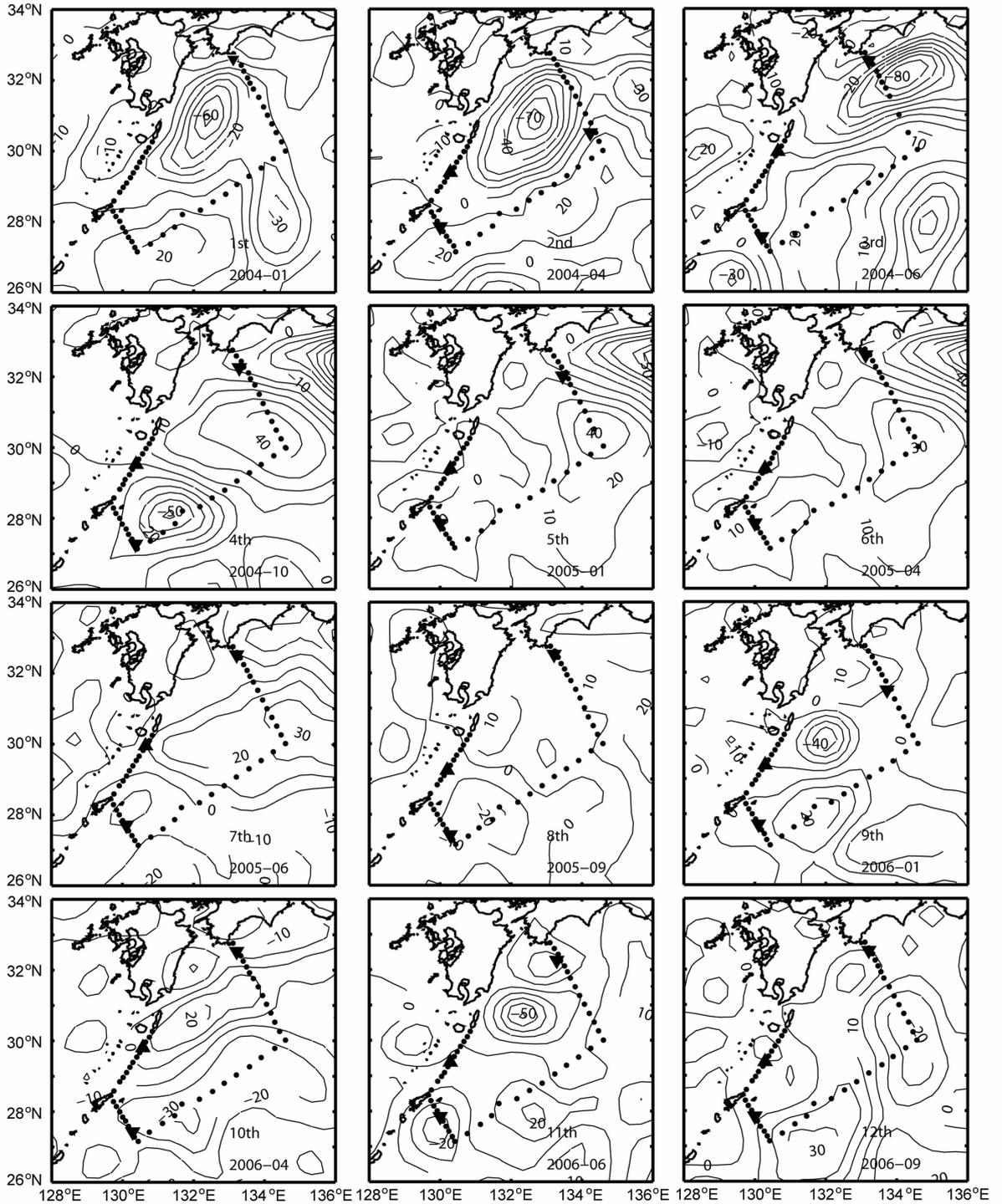


图 7 卫星海面高度分布(单位:cm)

三角代表黑潮和琉球海流的流轴位置,等值线间隔均为 10 cm,航次和观测时间在各图的右下方表示。

Fig. 7 Distribution of sea surface height anomaly from satellite (units: cm)

Triangles indicate the locations of the Kuroshio and the Ryukyu Current axis. Contour interval is 10 cm .

The cruise number and period of the hydrographic survey are shown in the right-bottom corner of each panel.

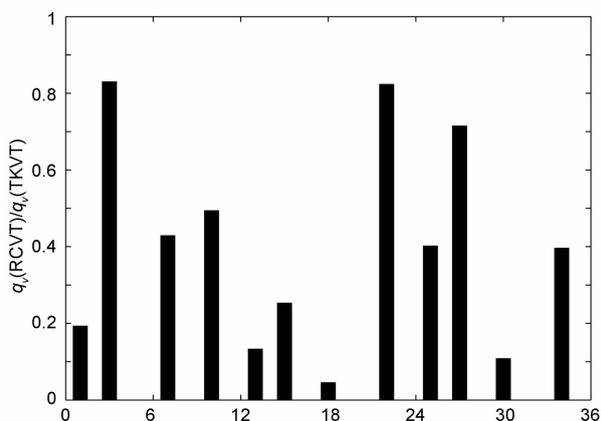


图6 ASUKA 黑潮流量中源于吐噶喇海峡黑潮流量和琉球海流流量的比例

Fig. 6 The rate of the Kuroshio transport from Tokara Strait and the Ryukyu current

使 AE 断面西北侧产生西南向流, 东南侧产生东北向流. 其中, 第 7 航次的流速结构较为典型, 表层是由气旋涡引起北侧的西南向流, 次表层是 SSC 结构的东北向流. SSC 结构向上凸起从而造成了表层西南向流速分布的缺口. 第 11 航次因 SSHA 分布较复杂, 流场与 SSHA 的对应关系不是很清楚.

中尺度涡旋对体积流量影响很大. 尤其是对离岸较远的 ASUKA 和 AA 断面来说, 由于到达这两个断面的涡旋较强, 对这两断面体积流量的影响也很大. 例如 ASUKA 断面南端出现反气旋涡时, 其东北向体积流量显著增加(第 4~7 航次), 而当其南端出现气旋涡时, 东北向流量显著减少(第 10, 12 航次). 相对来说, 到达 AE 和 TK 断面的涡旋强度要比到达 ASUKA 和 AA 断面的小得多, 这也可能是其流量的  $\delta(\pm 10.7 \times 10^6$  和  $\pm 6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 小于 ASUKA 和 AA 断面 ( $\pm 18.7 \times 10^6$  和  $\pm 24.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的原因.

上节中提到 ASUKA 断面黑潮流量中, 源于吐噶喇海峡黑潮和琉球海流的流量比不仅和吐噶喇海峡黑潮和琉球海流的净流量有关, 还和这两支流的流路以及这一海区的动力学环境如中尺度涡等有关. 图 5 中从第 1 航次到第 3 航次, ASUKA 断面的黑潮流轴完成了一次从近岸—离岸—近岸的变化(见 ASUKA 断面的黑 3 角位置), 这也是一次黑潮小弯曲通过 ASUKA 断面. 图 7 显示了此时有一个较强的气旋涡由西至东通过 ASUKA 断面, 黑潮的离岸与这一气旋涡与黑潮的相互作用有关<sup>[23]</sup>. 因此, 中尺度涡不仅影响这一海区的流场, 如黑潮流路, 还影响琉球海流流向 ASUKA 断面的体积流

量, 这需要更深入研究.

## 6 结 论

本文采用逆方法, 通过对 2004~2006 年 12 个航次的 CTD 资料的计算, 得到了奄美大岛以东琉球海流和日本以南黑潮的流速和流量.

(1) 奄美大岛以东琉球海流具有次表层极大值的特点, 其次表层流核有单个或多个结构. 流核的最大流速为  $15.1 \sim 80.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . 流核位于水深 110~600 m, 并沿 AE 线分布于  $27.2 \sim 28.2^\circ \text{N}$ . 12 个航次的平均流速断面显示了一个完整的次表层流核, 其最高流速为  $21.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 流核的垂直和水平尺度分别为 800 m 和 30 km.

(2) 琉球海流具有明显的季节变化, 秋冬季要强于春夏季. 冬季, 春季, 夏季和秋季的平均流量分别为  $10.9, 10.1, 5.9$  和  $23.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . 12 个航次平均流量为  $12.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

(3) 琉球海流在九州东南和吐噶喇海峡流出的黑潮汇合, 在 ASUKA 断面黑潮流量中, 源于吐噶喇海峡黑潮和琉球海流的流量比为  $0.05 \sim 0.83$ , 平均比为 0.40.

由上可见, 琉球海流是一支可和黑潮相匹敌的西边界流, 它和黑潮一样在从低纬度向高纬度的海水与热量的输送、环境和全球气候变化中起着重要的作用.

致 谢 感谢国家海洋局第二海洋研究所袁耀初教授对本文提出的意见和建议.

## 参考文献(References)

- [1] Nitani H. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K eds. Kuroshio; Its Physical Aspects. Univ. Tokyo Press, Tokyo, 1972. 129~163
- [2] Wang Y P, Sun X P. A study on the features of Ryukyu Current. In: Proceedings of Investigation of Kuroshio. Beijing, China Ocean Press, 1990, 2: 237~245
- [3] Yuan Y C, Takano K, Pan Z Q, et al. The Kuroshio east in the East China Sea and the currents east of Ryukyu Islands during autumn 1991. *La mer*, 1994, 32: 235~224
- [4] Yuan Y C, Su J L, Pan Z Q, et al. The west boundary current east of Ryukyu Islands. *La mer*, 1995, 33: 1~11
- [5] Liu Y G, Yuan Y C. Variation of the currents east of Ryukyu Islands in 1998. *La mer*, 2000, 38: 1~15
- [6] Liu Y G, Yuan Y C, Shiga T, et al. Circulation southeast of the Ryukyu Islands, Nagasaki. In: Proceedings of China and Japan Joint Symposium on Cooperative Study of Subtropical

- Circulation System. Beijing:China Ocean Press, 2000. 23~37
- [7] 袁耀初, 苏纪兰. 1995 年以来我国对黑潮及琉球海流的研究. 科学通报, 2000, **45**(22):2353~2356  
Yuan Y C, Su J L. Study on the Kuroshio and the Ryukyu Current in China since 1995. *China Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45**(22): 2353~2356
- [8] Imawaki S, Uchida H, Ichikawa H, et al. Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 17~20
- [9] Ichikawa H, Beardsley R C. Temporal and spatial variability of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea. *Deep-Sea Res.*, 1993, **40**: 583~605
- [10] Kaneko A, Koterayama W, Honji H, et al. Cross-stream survey of up 400m of Kuroshio by an ADCP on a towed fish. *Deep-Sea Res.*, 1990, **37**: 875~889
- [11] Yuan Y C, Kaneko A, Su J L, et al. The Kuroshio east of Taiwan and in the East China Sea and the currents east of Ryukyu Islands during early summer of 1996. *J. Oceanogr.*, 1998, **54**:217~226
- [12] 刘勇刚, 袁耀初. 1992 年东海黑潮的变异. 海洋学报, 1999, **18**: 179~184  
Liu Y G, Yuan Y C. Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1992. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, **18**: 179~184
- [13] Oka E, Kawabe M. Dynamic structure of the Kuroshio south of Kyushu in relation to the Kuroshio path variations. *J. Oceanogr.*, 2003, **59**: 595~608
- [14] Zhu X H, Han I S, Park J H, et al. The northeastward current southeast of Okinawa Island observed during November 2000 to August 2001. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**, 1071, doi:10.1029/2002GL015867
- [15] Ichikawa H, Nakamura H, Nishina A, et al. Variability of northeastward current southeast of northern Ryukyu Islands. *J. Oceanogr.*, 2004, **60**: 351~363
- [16] Nakano T, Kaneko I, Takatsuki Y. The Kuroshio structure and transport estimated by the inverse method. *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, **24**: 609~618
- [17] Zhu X H, Park J H, Kaneko I. The northeastward current southeast of Ryukyu Islands in early winter of 2000 estimated by an inverse technique. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L05608, doi: 10.1029/2004GL022135
- [18] Wunsch C. The North Atlantic general circulation west of 50°W determined by inverse methods. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1978, **16**: 583~620
- [19] Zhu X H, Park J H, Kaneko I. Velocity structures and transports of the Kuroshio and the Ryukyu Current during fall of 2000 estimated by an inverse technique. *J. Oceanogr.*, 2006, **62**: 587~596
- [20] Zhu X H, Kaneko A, Saito T, et al. Kuroshio stream path variation and its associated velocity structures south of Shikoku, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 4615~4618
- [21] Andres M, Park J H, Wimbush M, et al. A study of Ryukyu Current-Kuroshio system based on the integrated use of satellite altimetry and in situ data. *J. Oceanogr.*, 2008, in Press
- [22] 谷德军, 王东晓, 袁金南. 黑潮输送的异常及其与大尺度海气相互作用的关系. 热带海洋学报, 2004, **6**: 30~39  
Gu D J, Wang D X, Yuan J N. Anomalous transport of Kuroshio and its relationship with large scale atmosphere-sea interaction. *J. Tropical Oceanogr.* 2004, **6**: 30~39
- [23] Miyazawa Y, Guo X Y, Yamagata T. Roles of mesoscale eddies in the kuroshio paths. *J Phys Oceanogr*, 2004, **34**: 2203~2222

(本文编辑 胡素芳)