

## 台湾以东黑潮流量的年际变化特征\*

贾英来 刘秦玉 刘伟 林霄沛

(中国海洋大学 物理海洋实验室 大气-海洋相互作用实验室 青岛 266003)

**提要** 利用长时间序列的石垣和基隆两个验潮站的海平面高度记录(18年)计算了台湾以东的黑潮流量,并结合风应力资料(SODA),探讨了台湾以东黑潮流量的年际变化及其和风应力旋度的关系。台湾以东黑潮流量的峰值出现在1980—1981、1982—1983、1986、1988及1991年,低值出现在1984、1990、1993—1995年。小波分析结果显示,台湾以东黑潮流量具有2—5年的显著周期(峰值在2年和5年);台湾以东北太平洋区域风应力旋度具有2—7年的显著周期(峰值在3年和6年)。在1980—1991年间,黑潮大弯曲频繁发生,台湾以东黑潮流量偏大,与台湾以东太平洋区域风应力旋度间的关系较好;而在1991—1995年间,没有黑潮大弯曲发生,台湾以东黑潮流量偏低,与台湾以东太平洋区域风应力旋度间的关系较差。

**关键词** 台湾以东黑潮流量,风应力旋度,年际变化

**中图分类号** P731

台湾以东黑潮(24°N附近)是东海黑潮的源头,其流量的低频变异会直接影响到黑潮流域 SST 的异常,也会影响到我国夏季的大气环流和降水(黄荣辉等 1996)。根据船舶观测结果,台湾以东黑潮流量平均约为 21—33Sv (Liu *et al.*, 1998),变化范围主要在 15—50Sv 之间 Nitani, 1972; Zhang *et al.*, 2001)。Chu Tsu-You (1970)研究了台湾以东黑潮流量与石垣—台湾东海岸平均海平面差之间的关系,指出利用岛屿上的水位资料来监测黑潮流量变化的优点。袁耀初等(1998, 2000a, b)。则利用断面调查资料对经过台湾东南 K2 断面(21.5°N 附近)的黑潮流量进行过研究。Hwang 等(2002)利用 7 年的卫星高度计观测资料进行过研究,发现台湾以东黑潮流量具有两年振荡特征,并且在滞后 ENSO 1 个月时正相关达到 0.6,超前 ENSO 9—10 个月时负相关达到 0.6。另外, Qiu 等(1992)利用 22 个冬季航次的水文调查资料发现在黑潮大弯曲年,22°N 以北的黑潮流量会增长 30%。近年来, Imawaki 等(2001)提出跨黑潮的海平面高度差与锚定浮标观测的流之间有极

高的相关; Yang 等(2001)利用海洋观测资料给出台湾附近黑潮流量与横跨黑潮的海平面差之间的关系。根据这些研究结果,作者利用长时间序列验潮站资料,结合客观分析资料(SODA),研究了台湾以东黑潮流量的年际变化特征。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

采用基隆港和石垣岛两个验潮站的逐日的海平面高度观测资料来计算黑潮流量,资料来源为世界海洋环流实验(WOCE Global Data, Version 3.0, WOCE International Project Office, WOCE Report No.180/02, Southampton, UK.)获得的测潮站海表高度数据(fast delivery in situ sea level data),其中基隆港(25°09.0'N, 121°45.0'E)资料的时间长度为1980—1999年,石垣岛(24°20.0'N, 124°09.0'E)资料的时间长度为1969—2000年。由于1997年以后的数据中有较多缺测值,因此本文中所用的海平面高度差数据的时间长度为1980—1997年。

本文中所用海面风应力场来自 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)客观分析资料,即简单海

\* 国家自然科学基金资助项目,40333030号;中国海洋大学引进人才科研启动基金资助项目,2003—2005。贾英来,讲师, E-mail: jiayingl@ouc.edu.cn

洋数据同化资料 (Carton *et al.*, 2000a, b)。该资料在同化过程中利用了一个以 MOM2 的物理过程为基础的海洋模式, 风场同化资料来源于 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) (1950—1992 年) 和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (1992—1995 年)。SODA 资料水平网格分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间分辨率为 1 个月, 资料的时间长度为 1950 年 1 月—1999 年 12 月。

### 1.2 计算黑潮流量的方法

根据 Imawaki 等 (2001)、Yang 等 (2001)、Johns 等 (2001) 的研究结果表明, 台湾附近黑潮流量与横跨黑潮的海平面高度差之间存在密切的关系。Johns 等 (2001) 将石垣—基隆两站间的海平面高

度差与沿 PCM-1 断面 (图 1) 的锚定测流计观测的黑潮流量进行了对比, 发现两者间的相关系数超过 0.7 以上, 并给出了沿 PCM-1 断面的黑潮流量和石垣—基隆两站 (位置见图 1) 间海平面高度差之间的回归系数 ( $0.36 \text{ Sv/cm}$ )。Yang 等 (2001) 给出了实测黑潮流量和石垣—基隆两站间海平面高度差之间的回归公式。根据该公式, 作者利用石垣—基隆两站的验潮站资料计算了 1980—1997 年间台湾以东的黑潮流量 (称为 SLD-KV)。

$$KVT_{10} = 0.36 \times SLDA_{10} (\text{石垣} - \text{基隆}) + 20.89$$

其中,  $KVT_{10}$  为根据 10 天平滑后的海平面高度差计算的黑潮流量;  $SLDA_{10}$  为海平面高度差。

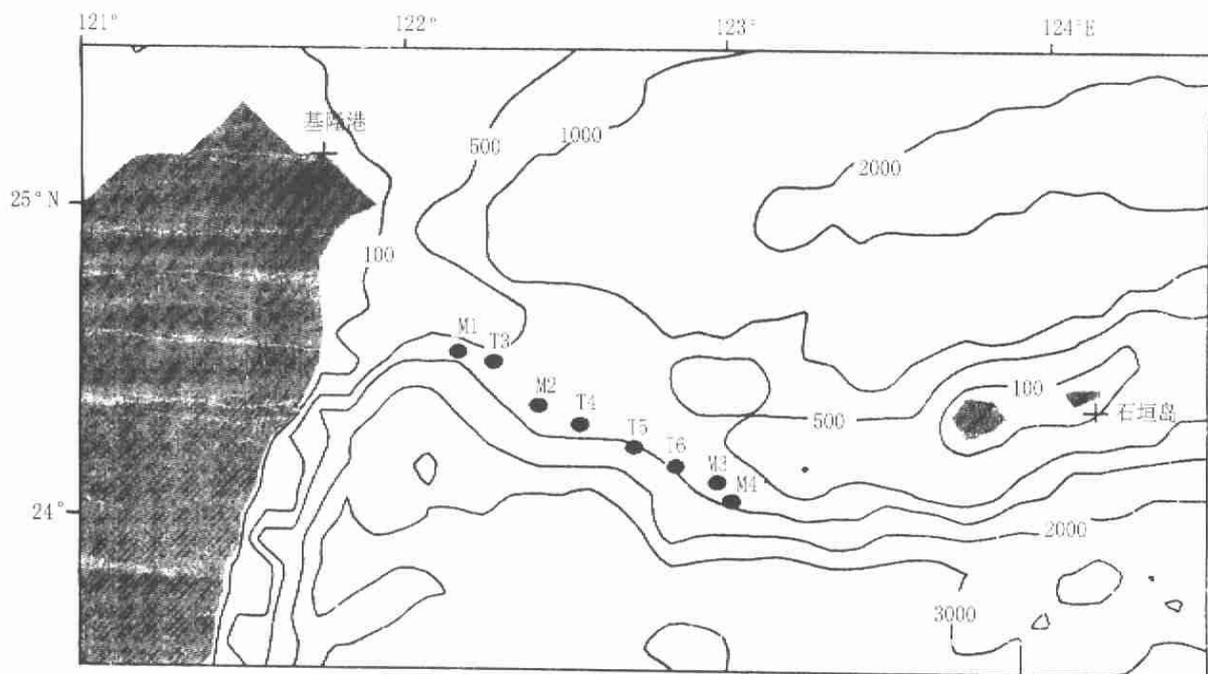


图 1 沿 PCM-1 断面锚定浮标的分布 (图中等深线单位 m)

Fig. 1 Plan view of the PCM-1 array and mooring locations

## 2 台湾以东黑潮流量的年际变化

Johns (2001) 根据沿 WOCE PCM-1 断面锚定浮标的观测数据 (图 1), 给出了 1994 年 9 月—1996 年 6 月间台湾以东黑潮流量 (简称 PCMKV) 的观测值 (图 2), 并指出在该阶段台湾以东黑潮流量的均值为  $21.5 \text{ Sv}$ , 方差为  $4.1 \text{ Sv}$ , 并且具有明显的 100 天周期的季节内振荡。根据验潮站资料计算的台湾以东黑潮流量 (SLDKV) 在 PCM-1 观测期间的均值为  $22.9 \text{ Sv}$ , 比 PCMKV 偏大; 方差为  $2 \text{ Sv}$ , 比 PCMKV 偏小。除 1995 年 1—4 月和 1996 年 1—2 月以外, 计算的黑潮流量 SLDKV 和观测

的黑潮流量 PCMKV 的变化趋势大致相同。Zhang 等 (2001) 曾指出, 在上述两个阶段, SLDKV 和 PCMKV 之间的不同是因为当时黑潮流轴受到来自菲律宾海的涡旋的影响而发生偏离。

在 PCM-1 观测期间, 计算的黑潮流量 SLDKV 能够较好地反映台湾以东的黑潮流量, 两者相关系数达 0.72 (Johns *et al.*, 2001), 远远超过了 95% 的信度。但是, 由于 PCM-1 观测的时间长度 (22 个月) 较短, 不足以用来研究台湾以东黑潮流量的年际变化, 而只能借助于验潮站资料 (18 年)。对 SLDKV 进行 13 个月的滑动平均以滤去

季节及季节内变化,结果如图 3 所示。在 1980—1983、1986、1988 及 1991 年,台湾以东黑潮流量偏大,正距平超过 0.5Sv;在 1984、1990、1993—1995 年,台湾以东黑潮流量偏小,负距平超过 -0.5Sv。可见,黑潮流量在 1991 年以后变小。根据 Kawabe (1995,2001),1980—1991 年间是黑潮大弯曲频繁

发生的年份(1981—1984、1986—1991 年是黑潮大弯曲年),而 1991—1995 年间,没有黑潮大弯曲发生。上述黑潮流量偏大的年份与黑潮大弯曲年对应较好,且 1991 年后,没有黑潮大弯曲发生,黑潮流量也偏小。可见,台湾以东黑潮流量的年际变化特征和黑潮大弯曲之间存在密切的关系。

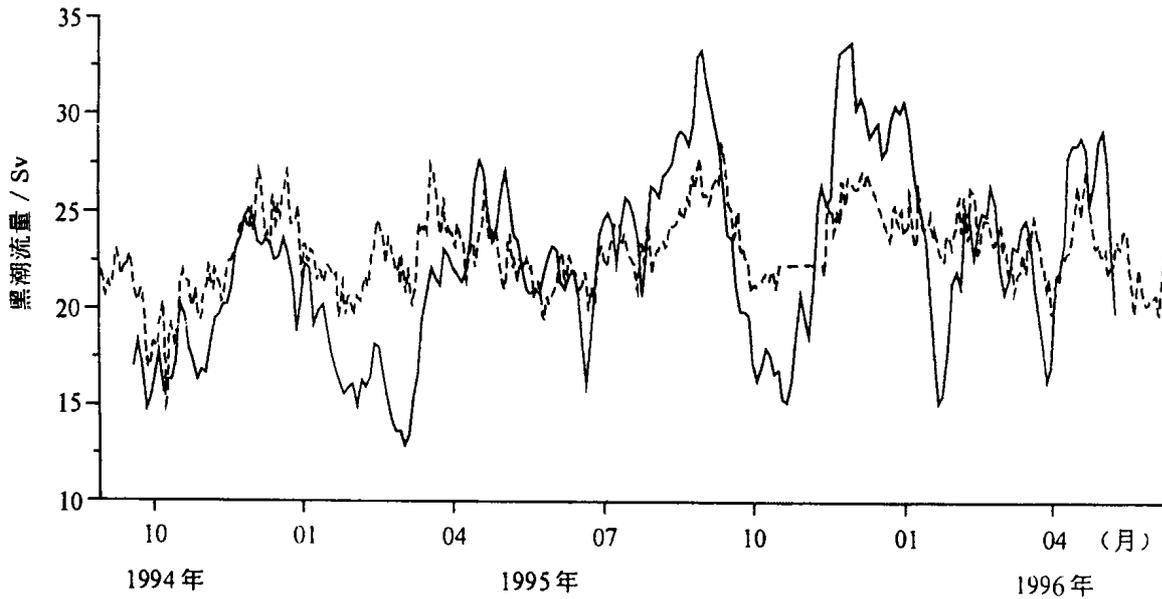


图 2 PCM-1 断面的黑潮流量,根据石垣-基隆验潮站的海平面高度差计算的黑潮流量 (简称 SLDKV,虚线)单位:Sv

Fig.2 Kuroshio transport cross PCM-1 section, Kuroshio transport calculated by the sea level difference between Ishigaki and Keelung(SLDKV, dashed line)

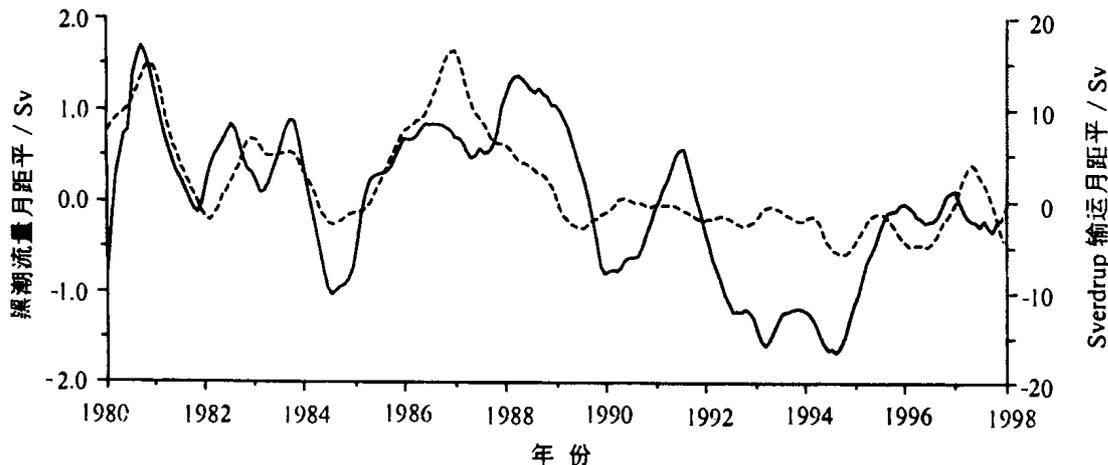


图 3 根据验潮站资料计算的黑潮流量月距平值 SLDKV(实线),负的台湾以东太平洋内区的 Sverdrup 输运月距平值(为便于和 SLDKV 比较,Sverdrup 输运的方向反向)(虚线)

Fig.3 Monthly anomaly of the Kuroshio transport;SLDKV(solid line);and reversed Sverdrup transport east of Taiwan in Pacific ocean(dashed line)

对SLDKV的小波分析结果(图4a)显示其具有2—5年的显著周期,峰值在2年和5年;1980—1990年间,黑潮流量变化的2—3年周期比较显著(小波谱值超过 $8\text{dm}^2$ ),而1990—1997年间5年周期的谱值也比较强。可见,台湾以东黑潮流量具有较显著的年际变化,并且在1991年前后变化特征有所不同。那么,这种年际变化特征是什么原因造成的呢?根据Sverdrup理论,作为北太平洋西边界流的黑潮的年际变化特征应该和北太平洋内区的风应力旋度有关。为进一步探讨这个问题,作者利用SODA海面风场资料,根据正压Sverdrup理论,计算了沿 $24.5^\circ\text{N}$ (台湾以东)太平洋内区( $125^\circ\text{E}$ — $140^\circ\text{W}$ )的Sverdrup输运(由于海洋内区的Sverdrup输运和西边界流的方向相反,为方便讨论,将Sverdrup输运取负值)。和黑潮流量资料的处理方式一样,对Sverdrup输运(简称WDKV)求月距平值并进行13个月的滑动平均,以滤去季节及季节内变化信号,如图3所示。黑

潮流量(SLDKV)和Sverdrup输运(WDKV)间的相关系数为0.67(216个样本,95%信度=0.13),远超过了95%的信度检验。对照黑潮流量(SLDKV)和Sverdrup输运(WDKV)的时间变化趋势,发现台湾以东黑潮流量异常偏大的年份(1980—1981、1982—1983、1986—1988年),Sverdrup输运也异常偏大;在黑潮流量异常偏小的年份(1984、1990、1993—1995年),Sverdrup输运却没有相应减小。Sverdrup输运的小波分析结果显示(图4b)其具有2—7年的显著周期,峰值在3年和6年;在1980—1994年间,Sverdrup输运的6—7年周期比较显著(小波谱值超过 $8\text{dm}^2$ ),而2—3年周期仅在1980—1990年间比较显著。总之,在1991年前,台湾以东黑潮流量的年际变化和太平洋内区的风应力旋度的年际变化间存在密切的关系,两者的时间变化趋势相近,显著周期也较一致;而1991年后,两者间存在较大差异。

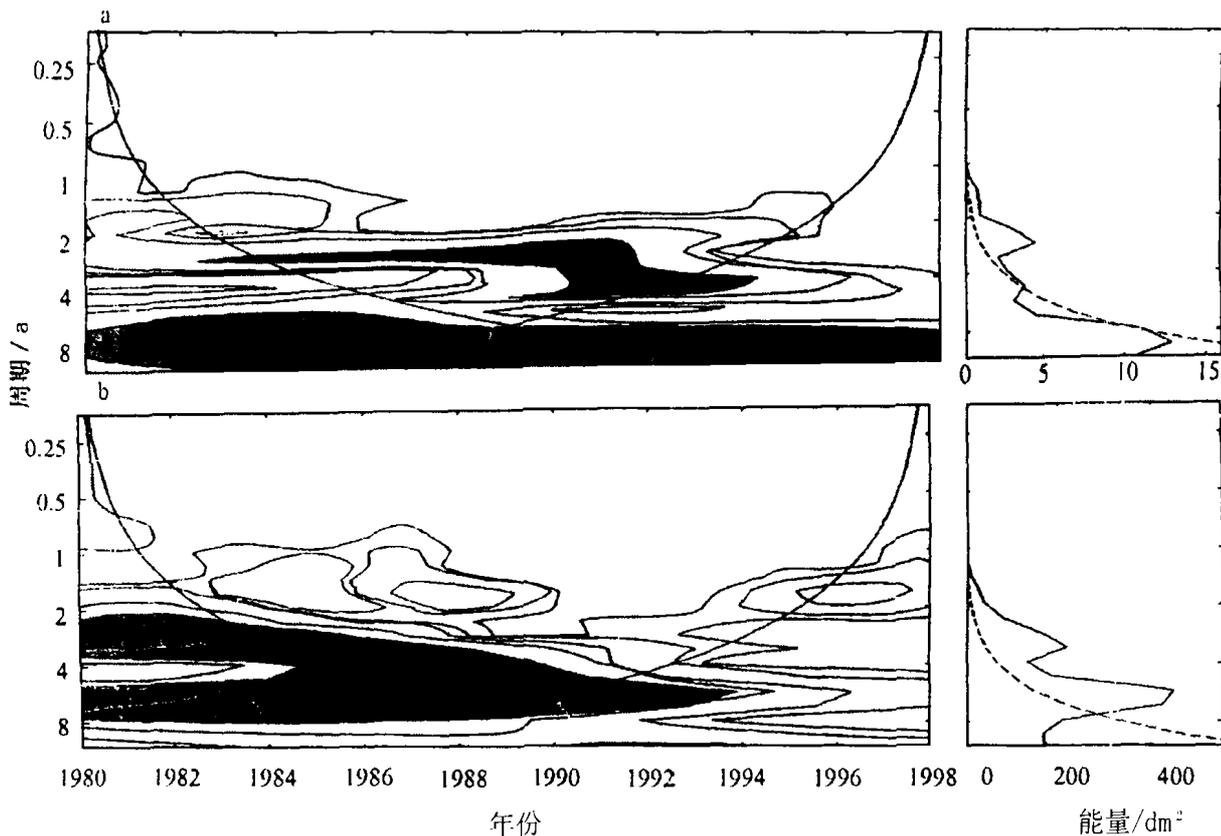


图4 小波分析谱值(a)SLDKV(1980—1998年),(b)台湾以东太平洋内区的Sverdrup输运,

阴影区表示谱值高于 $8\text{dm}^2$ 的区域,单位: $\text{dm}^2$

Fig.4 Wavelet analysis on the (a)SLDKV(1980—1998),(b)Sverdrup transport in

Pacific east of Taiwan. In the shaded area the power spectrum is higher than  $8\text{dm}^2$ . Unit:  $\text{dm}^2$

### 3 结论

利用长时间序列的石垣和基隆两个验潮站的海平面高度记录(18年),结合风应力资料(SODA),计算了台湾以东的黑潮流量,探讨了台湾以东黑潮流量的年际变化及其和风应力旋度的关系,在1980—1983、1986、1988及1991年,台湾以东黑潮流量偏大,正距平超过0.5Sv;在1984、1990、1993—1995年,台湾以东黑潮流量偏小,负距平超过-0.5Sv;台湾以东黑潮流量具有2—5年的显著周期,峰值在2年和5年,其中2—3年周期在1980—1990年间显著,而5年周期在1990—1997年间显著。台湾以东北太平洋区域风应力旋度具有2—7年的显著周期(峰值在3年和6年),在1991年前,台湾以东黑潮流量的年际变化和太平洋内区的风应力旋度的年际变化间存在密切的关系,两者的时间变化趋势相近,显著周期较一致;1991年后,两者间存在较大差异。这说明,1991年前,台湾以东黑潮流量的年际变化主要受太平洋内区的风应力旋度的影响,而1991年以后,台湾以东黑潮流量的年际变化可能受其它因素所控制。在黑潮大弯曲频繁发生的年份(比如1980—1991年间)台湾以东黑潮流量偏大、与台湾以东太平洋区域风应力旋度间的关系较好;在没有黑潮大弯曲发生的年份(比如1991—1995年间),台湾以东黑潮流量偏低,和台湾以东太平洋区域风应力旋度间的关系较差。关于台湾以东黑潮流量的年际变化机制,尤其是1991年以后黑潮流量的变化机制,值得进一步研究。另外,袁耀初等(2000a,b)的研究结果表明,1997年强ElNino期间经过台湾东南区域K2断面(21.5°N附近)黑潮的强度与流量都比正常年份明显减少。而本文中沿PCM-1断面(24.5°N附近)黑潮流量在1997年并没有比正常年份明显减少,两者不一致的原因有待进一步的研究。

### 参 考 文 献

袁耀初,刘勇刚,苏纪兰,2000a.1997年夏季台湾岛以东与东海黑潮,中国海洋文集(12).北京:海洋出版社,1—10

- 袁耀初,刘勇刚,苏纪兰,2000b.1997年冬季台湾岛以东与东海黑潮,中国海洋文集(12).北京:海洋出版社,11—20
- 黄荣辉.1996.中国气候灾害的分布和变化.北京:气象出版社,1—20
- Carton, J.A., Chepurin G, Cao X, 2000a. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950—1995. Part I. Methodology. *J Phys Oceanogr*, 30:294—309
- Carton J A, Chepurin C, Cao X, 2000b. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950—1995. Part II. Results. *J Phys Oceanogr*, 30:311—326
- Chu Tsu You, 1970. Report of the variation of the velocity and volume transport of the Kuroshio. First Symposium of CSK. Honolulu, 164—174
- Hwang C, Kao R, 2002. Topex/Poseidon-derived space-time variations of the Kuroshio Current: applications of a gravimetric geoid and wavelet analysis. *Geophys J Int*, 151:35—847
- Imawaki S, Uchida H, Ichikawa H *et al*, 2001. Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport South of Japan. *Geophys Research Letters*, 28:17—20
- Johns W E, Lee T N, Zhang D *et al*, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Moored transport observations from the WOCE PCM-1 array. *J Phys Oceanogr*, 31:1031—1053
- Kawabe M, 1995. Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander. *J Phys Oceanogr*, 25:3103—3117
- Kawabe M, 2001. Interannual variations of sea level at the Nansei Islands and volume transport of the Kuroshio due to wind changes. *J Phys Oceanogr*, 57:189—205
- Liu C T, Cheng S P, Chuang W S *et al*, 1998. Mean structure and transport of Taiwan Current (Kuroshio). *Acta Oceanogr Taiwan*, 36:159—176
- Qiu B, Joyce T M, 1992. Interannual Variability in the Mid-and low Latitude western North Pacific. *J Phys Oceanogr*, 22:1062—1079
- Yang Y, Liu C T, Lee T N *et al*, 2001. Sea Surface slope as an estimator of the Kuroshio volume transport east of Taiwan. *Geophysical Research Letter*, 28:2461—2464
- Yuan Y C, Liu Y, Liu C T, Su J L, 1998. The Kuroshio east of Taiwan and the currents east of the Ryukyu-gunto during October of 1995. *Acta Oceanologica Sinica*, 17:1—13
- Zhang D, Lee T N, Johns W E *et al*, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies. *J Phys Oceanogr*, 31:1054—1074

## THE INTERANNUAL VARIATION OF THE KUROSHIO TRANSPORT EAST OF TAIWAN

JIA Ying-Lai, LIU Qin-Yu, LIU Wei, LIN Xiao-Pei

(*physical Oceanography Laboratory & Ocean-Atmosphere Interaction  
and Climate Laboratory Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

**Abstract** Based on the regression relationship along the WOCE PCM-1 section between the sea level records and the Kuroshio transport, sea level records are employed to calculate Kuroshio transport between 1980 and 1997 at 1 day's interval which comes from Keelung and Ishigaki in World Ocean Circulation Experiment (WOCE) dataset. The wind stress data involved in this study is available from Simple Ocean Data Assimilation (SODA) which is  $1^\circ \times 1^\circ$  (resolution from October 1992 to August 2001 at 1 month's interval).

The Kuroshio transport calculated from sea level records data accordant well with that from the PCM-1 mooring data that the correlation coefficient between the two amounts to as high as 0.72, far above the 95% significant level. The 13-month running averaging of the Kuroshio transport is subtracted to reduce the seasonal and intraseasonal variation of the Kuroshio transport. From the Kuroshio transport anomaly time serial (also called SLDKV in this paper), maximum of the Kuroshio transport occurred at 1980—1983, 1986, 1988 and 1991 (positive anomaly, exceeds 0.5Sv), while minimum of the Kuroshio transport occurred at 1984, 1990, 1993—1995 (positive anomaly exceeds -0.5 Sv), which indicates a trend of reduction of the Kuroshio transport east of Taiwan after 1991. The results of wavelet analysis suggest the 2—5 years significant variation in the Kuroshio transport to the east of Taiwan with the peaks at 2 and 5 years. The 2—3 years fluctuation is stronger during 1980 and 1990 and the 5 years fluctuation stronger in the following 8 years.

From the Sverdrup relationship, the interannual variation of Kuroshio east of Taiwan relates to that in the wind stress curl field above the interior gyre. Based on the wind stress data in SODA dataset, the barotropic Sverdrup transport along  $24.5^\circ\text{N}$  in the interior gyre of the North Pacific is calculated. The seasonal and intraseasonal variation of the Sverdrup transport (also called WDKV in this paper) is subtracted. The correlation coefficient between the WDKV and SLDKV is 0.67, far above the 95% significant level. In the years (1980—1983, 1986—1988) when the SLDKV is much larger than normal, the Sverdrup transport reaches to maximum. While in the years (1981, 1990, 1993—1995) when the SLDKV is much lower than normal, the Sverdrup transport did not decrease as the SLDKV. The wavelet analysis shows that the primary period of the WDKV is 2—7 years with maximum of 3 and 6 years. Between 1980 and 1994, the 6—7 years period is dominate while the 2—3 years period is dominate between 1980—1990. Before 1991, the interannual variation of the Kuroshio transport agrees well with that of the Sverdrup transport. While after 1991, there is great difference between the variation of the Kuroshio transport and the Sverdrup transport.

During the years when the Kuroshio large meander frequently occurred (such as 1980—1991), the Kuroshio transport was large and the 2—5 year variation was distinct. Beside, there was close relationship between the Kuroshio transport and the wind stress curl. While in years of no Kuroshio large meander (such as 1991—1995), the Kuroshio transport became small and the close relationship with wind stress curl disappeared.

**Key words** Kuroshio transport east of Taiwan, Wind stress curl, Interannual variation