

台湾海峡夏季与冬季的水体及热盐通量观测

田川¹, 王树新¹, 徐霄阳²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 利用在台湾海峡附近的下放式声学多普勒流速剖面仪(Lowered Acoustic Doppler Current Profiler, LADCP)观测资料和温盐观测资料, 通过对连续站的两个季节观测进行正压和斜压潮流分析从而去除潮流得到准定常流, 并在此基础上计算了南海和东海之间通过台湾海峡运输的水体及热盐通量。结果表明: 台湾海峡大部分海域是半日潮海区(正规半日潮及不正规半日潮海区), 半日潮主要分量为太阴半日分潮 M_2 ; 台湾海峡的水体运输及热盐通量呈现明显的季节变化: 夏季台湾海峡内表现为一支东北流向的海流, 即台湾海峡暖流, 存在 3.3 Sv ($1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)的东北向水体运输, 冬季东北季风较强, 西南方向的海流加强, 混合层可到底部, 存在 1.8 Sv 的东北向水体运输。与此对应的热盐通量分别为: 夏季热通量为 $0.34 \times 10^{15} \text{ W}$, 盐通量为 $118.6 \times 10^9 \text{ g/s}$; 冬季热通量为 $0.14 \times 10^{15} \text{ W}$, 盐通量为 $72.9 \times 10^9 \text{ g/s}$ 。该结果对台湾海峡通量的研究给出了一个直接观测的准确值, 并为相关的数值研究提供了参考。

关键词: 台湾海峡; 水体通量; 热通量; 盐通量

中图分类号: P722.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)01-0110-06
doi: 10.11759/hyxx20120606002

台湾海峡是东海与南海之间进行水体交换的唯一通道。在冬、夏季不同方向的季风驱动下, 东海和南海的海水都可能进入台湾海峡, 使台湾海峡内的水文特征分布和海流状况变得比较复杂。海洋调查资料表明, 台湾海峡终年存在着一般称为台湾海峡暖流^[1]。夏季南海水可以经台湾海峡进入东海, 冬季在东北季风控制下, 虽然海表层是顺风漂流, 但在次表层以下, 仍保持东北向。Guan^[1]利用 1910 年至 1976 年的观测资料, 分析验证了这股逆风流的存在。

Fang^[2]等根据收集到的定点海流观测站资料计算了通过台湾海峡的流量, 得出冬半年平均流量约为 1.0 Sv ($1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), 夏半年约为 3.1 Sv, 年平均流量约为 2 Sv(指向东北为正)。Teague^[3]等利用海底锚碇的声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)的观测资料, 计算了 1999 年 10~12 月的平均流量为 0.14 Sv。Wang^[4]等利用船载走航 ADCP 资料计算出 1999~2001 年平均流量为 1.8 Sv。Guo^[5]采用 POM 模式计算了台湾海峡的流量, 得出通过台湾海峡的平均流量约为 1.9 Sv, 变幅为 1 Sv。并指出流量具有明显的季节变化, 最大值出现在夏季 ($>3.0 \text{ Sv}$), 最小值出现在冬季 ($<1.0 \text{ Sv}$)。方国洪等^[6]采用 MOM2.0 模式计算得到通过台湾海峡的平均流量为 1.15 Sv, 并给出了逐月的流通量值, 7 月份最大

为 2.87 Sv, 11 月份最小为 -0.36 Sv 。Isobe^[7]利用季节平均风场和海水密度资料, 采用垂直平均涡度方程计算了东海流量的季节变化, 并利用对马海峡流量推算出台湾海峡春季流量为 1.6 Sv, 秋季为 0.8 Sv, 冬、夏季为 2 Sv。张庆华等^[8]求解了一个渠道中的线性化流动问题, 同时考虑纵向海面坡度和风应力的驱动, 得到台湾海峡流量的解析表达式, 很好地揭示了台湾海峡冬季逆风流的形成机制。

迄今为止, 有关台湾海峡海流的实测资料十分稀少。由于海流观测不易进行, 特别是定点测流站资料更加难得, 加之海流与其他水文要素同步观测资料的不足, 使得对台湾海峡流量变化的研究受到了限制。本文利用夏季、冬季两个航次实际观测的流速、温盐同步资料, 计算了通过台湾海峡的水体及温盐通量。

1 实验与数据

1.1 站位设计及仪器介绍

2006 年 6 月和 2007 年 2 月, 利用东方红 2 号综

收稿日期: 2012-06-06; 修回日期: 2014-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(41006005)

作者简介: 田川(1985-), 男, 山东青岛人, 博士, 主要从事海洋环境监测研究, 0532-66786332, E-mail: tianchuanqd@gmail.com; 通信作者, 王树新, E-mail: shuxinw@tju.edu.cn

合考察船在台湾海峡东北部分别在同一个断面进行了两次观测(图 1)。该断面共由 10 个站位组成(stn1 至 stn10), 每个站位间的距离平均为 30 km, 其中包括两个 24 h 连续观测站。在每个站位, 都进行了下放水声学多普勒海流计(Lowered Acoustic Doppler Current Profiler, LADCP)和温盐深系统(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)的全水深观测。在每个连续站, 每隔 1 h 观测 1 次, 共获得 25 个剖面。

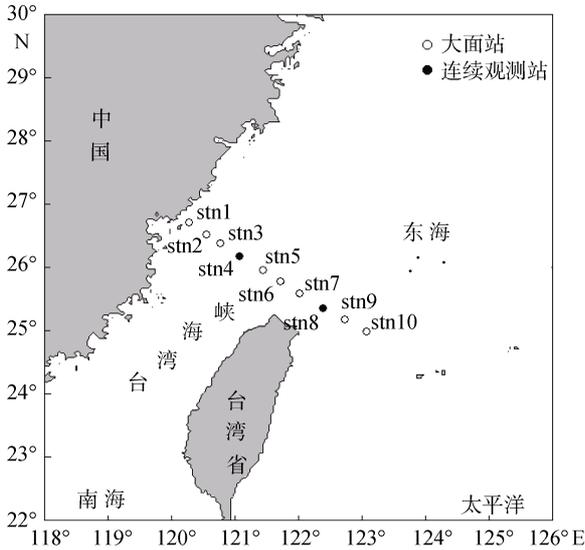


图 1 2006 年 6 月和 2007 年 2 月在台湾海峡执行的观测站位

Fig.1 Stations in the Taiwan Strait in June 2006 and February 2007

流速测量仪器为 RDI 300-kHz LADCP, 层数设置为 25 层, 层厚设置为 4 m。LADCP 测量海水相对流速的不确定度为 1 cm/s, 绝对流速通过线性逆方法从相对流速求得^[9], 其不确定度为 1.5 cm/s。在使用线性逆方法计算绝对流速时, 船只的 GPS 资料或者 LADCP 本身的底跟踪速度是必须的。温盐测量仪器为 SBE 911 Plus CTD, 采样频率为 24 Hz, 电导率的观测精度为 0.0003 S/m, 温度的观测精度为 0.001 °C, 深度在整个观测范围内的观测精度是 0.015%。

1.2 数据处理

本文中, 选择临近中国大陆的 6 个测站作为分析对象, 其中包括 1 个连续观测站。首先, 对这个连续站的两个季节观测进行正压和斜压潮流分析, 其中正压流速为 $u_{bt}(t)$, 斜压流速为 $u_{bc}(z,t) = u(z,t)u_{bt}(t)$, 并令 $u_{bt}(t) = u_{bt}^0 + u_{bt}^{M_2}(t) + u_{bt}^{K_1}(t) = u_{bt}^0 +$ 和

$$\sum_{j=1}^2 A_{bt}^j \cos(\omega_{bt}^j - \varphi_{bt}^j) u_{bt}(t,h) = u_{bt}^0 + u_{bt}^{M_2}(t,h) + u_{bt}^{K_1}(t,h) = u_{bt}^0 + \sum_{j=1}^2 A_{bt}^j \cos(\omega_{bt}^j - \varphi_{bt}^j)。$$

其中 M_2 、 K_1 分别表示半日分潮、全日分潮, $A^j, \omega^j, \varphi^j (j=1,2)$ 分别表示半日潮、全日潮流的振幅、频率和初始位相。南北方向流速 v 也作同样的处理, 利用最小二乘法可以确定上述各系数, 进而得到对应的潮流椭圆。两个季节的潮流椭圆如图 2, 斜压潮流椭圆对应的深度从 12 m 开始到 80 m 结束, 4 m 的间隔, 共 18 层。台湾海峡大部分海域是半日潮海区(正规半日潮及不正规半日潮海区), 半日潮主要分量为太阳半日分潮 M_2 ^[10], 这在图 2 中得到了很好的说明, 尤其对于正压潮, M_2 分潮的振幅最大值已达到 46 cm/s, 而 K_1 分潮的振幅最大值仅为 6.5 cm/s, M_2 分潮约是 K_1 分潮的 7 倍。这个结果与一些数模结果符合较好^[11-12]。 M_2 斜压潮的最大值发生在底部附近, 最大振幅约为 25 cm/s, 而 K_1 斜压潮的最大值发生在上 30 m 层, 振幅最大值约为 5 cm/s。整体而言, 潮流在 2006 年 6 月与 2007 年 2 月的差异不是很大。

由于 6 个测站跨越的距离约为 150 km, 所以在非连续站仍然利用在连续站得到的 M_2 和 K_1 分潮的振幅及相角, 以达到去除潮流而得到准定常流的目的。这个假设势必会引起一些误差, 但不会影响计算结果的可信度。

2 结果

2.1 流速及水文特征(温、盐)分布

这里讨论的流速 $u = u_{bt}^0 + u_{bc}^0(h)$, $v = v_{bt}^0 + v_{bc}^0(h)$, 并且把 u, v 投影到与断面垂直的方向上, 得到流速 V , 规定垂直于断面且指向东北方向为正。两个季节的流速及水文特征(温、盐)沿断面分布见图 3。2006 年 6 月的流速图中最明显的就是表现为一支东北流向的海流, 流速最大值约为 45 cm/s, 流幅约为 100 km, 这就是台湾海峡暖流^[1], 说明夏季南海水经台湾海峡进入东海。在冬季的流速图上, 虽然此海流流速减小, 最大值约为 30 cm/s, 流幅也变窄, 约为 50 km, 但还是存在的, 这与 Guan^[1]的结论是一致的。夏季的流速图中, 东北流向的台湾海峡暖流占据了大部分范围, 尽管在西岸存在一支西南流向的闽浙沿岸流, 流速约为 15 cm/s。夏季海峡内的流场基本以东北向为主, 这个看法现在较为一致^[13], Wang^[14]也指出夏季海峡内的平均流速达 20~40 cm/s, 而且流速

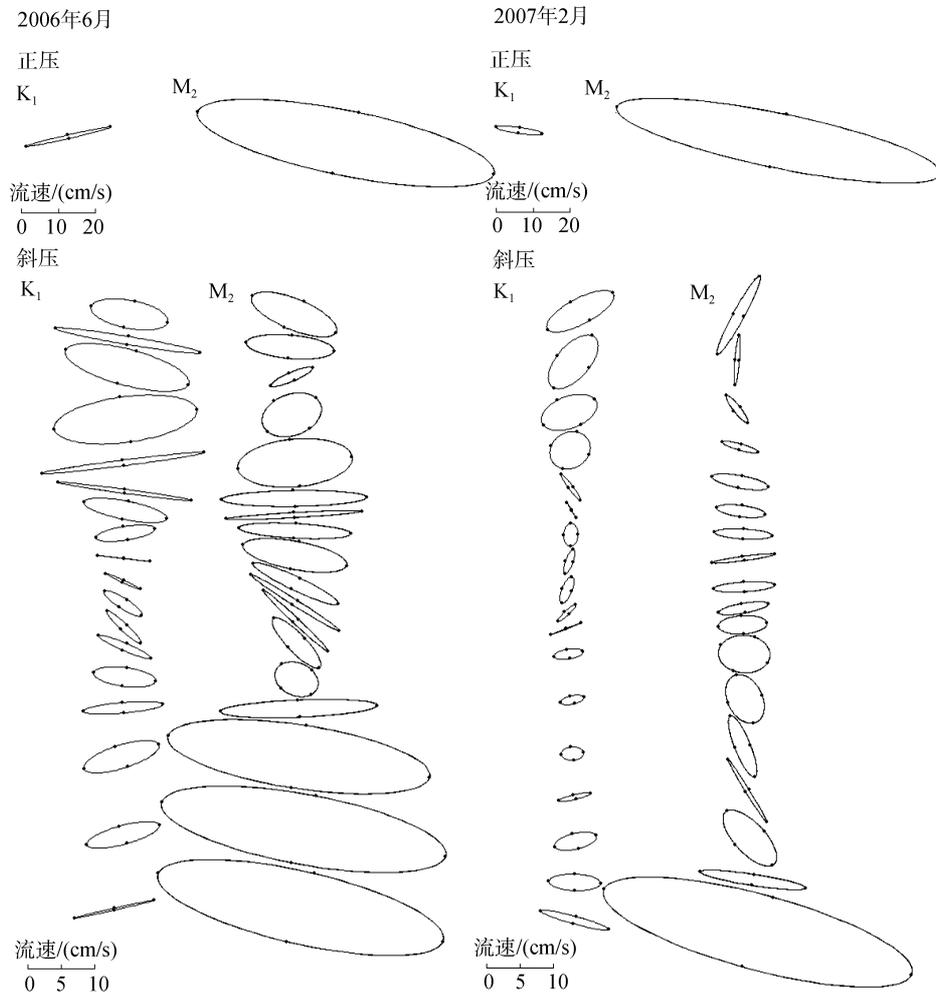


图2 2006年6月与2007年2月24小时连续观测站的正压与斜压潮流椭圆

Fig.2 The tidal ellipses of barotropic velocity and baroclinic velocity at 24-hour station in June 2006 and February 2007

稳定, 为东北流向。Chuang^[15-16]和 Wang^[17]等的一些实际观测资料也表明夏季澎湖水道海流除去潮流的影响外, 仍有 30~40 cm/s 的北向流。但是冬季海峡内的流况较为复杂, 由图 3 可以看出, 西南方向的海流占据了约一半的区域, 这与冬季的东北季风有直接关系, 并且流速比夏季要小。值得说明的是冬季的温度和盐度图, 垂向上呈条状分布, 这说明冬季的东北季风较强, 导致较强的混合, 使得混合层达到底部, 从表层至底层的温盐趋于一致, 这种现象在黄海某些海区和东海近岸都有观测。

2.2 水体及热盐通量

由以上得到的流速及温盐分布, 利用下面的方法分别计算通过台湾海峡的水体及热盐通量, 即水体通量 $Q_V = \int_0^L \int_{-H}^0 V dz dl$, 热通量 $Q_T = \int_0^L \int_{-H}^0 C_p \theta \rho V dz dl$, 盐通量 $Q_S = \int_0^L \int_{-H}^0 S \rho V dz dl$, 其中 l 为所取断面方向,

z 为水深, C_p 为定压比热, ρ 为海水密度, θ 为温度, V 为垂直于所取断面的流速分量。在这里, 计算断面宽度约为 180 km, 即接近于中国大陆的 6 个站位。深度是每个站位观测所到达的最大深度, 分别为 24, 48, 68, 80, 96 和 100 m。结果表明在 2006 年 6 月有 3.3 Sv 的南海水经过台湾海峡进入东海, 这与方国洪^[6]、Guo^[5]等的结果较为一致, 在 2007 年 2 月有 1.8 Sv 的南海水经过台湾海峡进入东海, 这个结果比一些数值结果^[3, 5]偏大约 0.5~1.0 Sv。显然, 经过台湾海峡向东海的水体输运存在着季节变化, 这已经被证实^[5], 本文的计算结果表明夏季的水通量比冬季大 1.5 Sv。Cai^[18]等的数值结果也表明台湾海峡的水体输送夏半年增长、冬半年减弱, 但他们的结果显示冬夏差别较小, 约为 0.5 Sv。对应的热盐通量也存在此变化, 2006 年 6 月的热通量为 0.34×10^{15} W, 冬季的热通量为 0.14×10^{15} W, 比蔡树群等^[19]数值

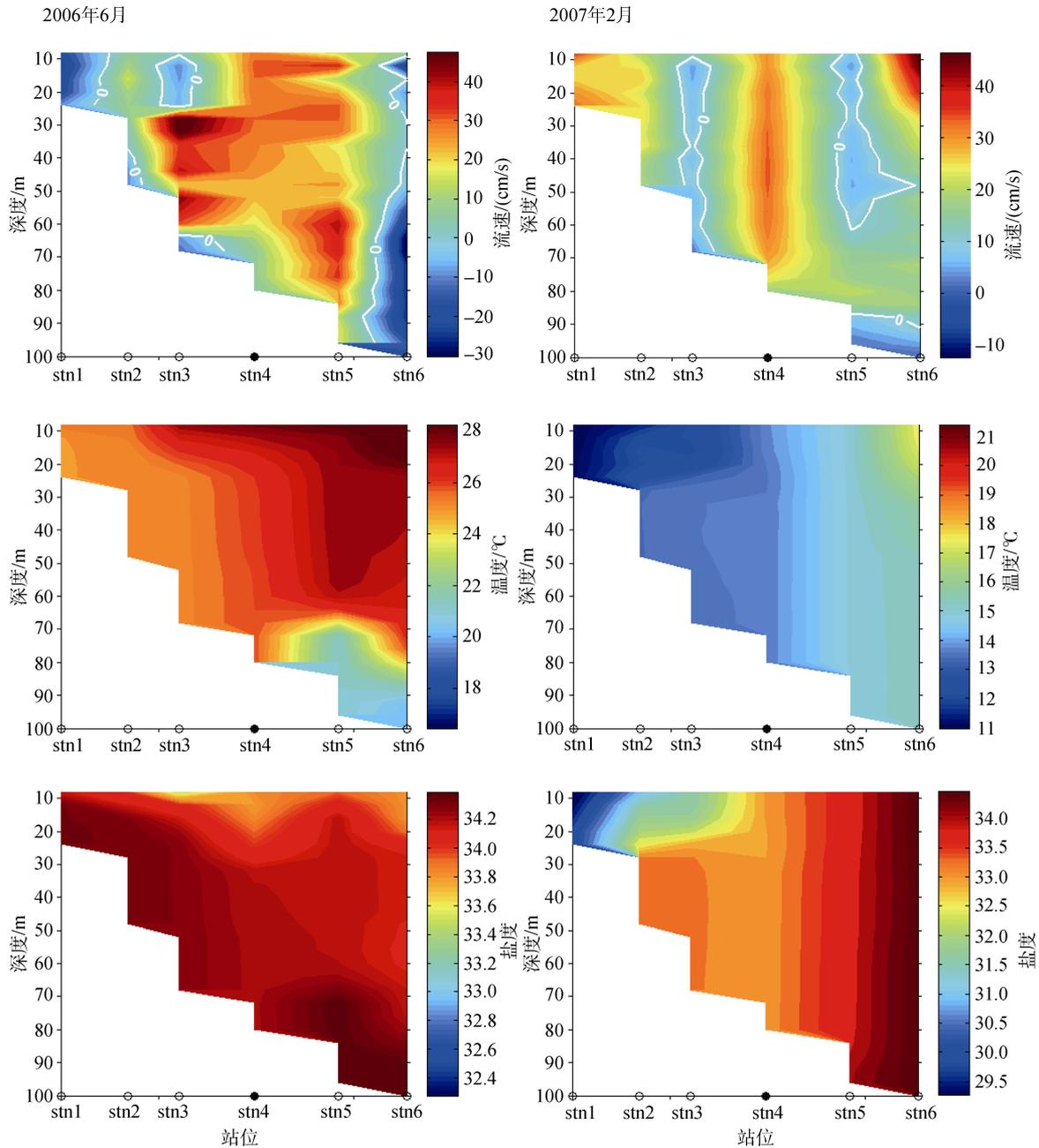


图3 2006年6月和2007年2月断面的流速、温度及盐度分布

Fig.3 The distribution of velocity, temperature, and salinity along the section in June 2006 and February 2007

结果偏大, 与傅子琅^[20]的实际观测较为一致。2006年6月的盐通量为 118.6×10^9 g/s, 冬季的盐通量为 72.9×10^9 g/s, 这也与傅子琅^[20]的实际观测较为一致。Cai^[18]的数值结果显示台湾海峡年平均热量运输为 0.27×10^{15} W, 年平均盐量运输为 90.13×10^9 g/s, 且年际变化不大, 我们的结果与他们较为一致。对于上层、下层及东北向、西南向的计算结果已经详细列在表1中, 这里不再赘述。

3 讨论与结论

本文利用2006年6月和2007年2月在同一个断面的流速和温盐同步观测资料, 尤其是对24h连续观测站的两个季节观测进行正压和斜压潮流分析, 得出台湾海峡大部分海域是半日潮海区(正规半日潮及不正规半日潮海区), 半日潮主要分量为太阴半日分潮 M_2 , 去除潮流影响后得到了此断面的准定常流

表 1 2006 年 6 月和 2007 年 2 月经过台湾海峡的水体及热盐通量

Tab.1 The water transport and the fluxes of temperature and salinity across the Taiwan Strait in June 2006 and February 2007

水层	方向	$Q_T(\text{Sv})$		$Q_T(\times 10^{15} \text{ W})$		$Q_S(\times 10^9 \text{ g/s})$	
		2006 年 6 月	2007 年 2 月	2006 年 6 月	2007 年 2 月	2006 年 6 月	2007 年 2 月
上层	东北向	1.3	1.1	0.14	0.08	44.0	38.5
	西南向	0.2	0.3	0.02	0.01	5.8	5.2
	净	1.1	0.8	0.12	0.07	38.2	33.3
下层	东北向	2.9	1.5	0.29	0.10	104.3	52.4
	西南向	0.7	0.5	0.07	0.03	23.9	12.8
	净	2.2	1.0	0.22	0.07	80.5	39.6
整体	东北向	4.2	2.6	0.43	0.18	148.3	90.9
	西南向	0.9	0.8	0.09	0.04	29.7	18.0
	净	3.3	1.8	0.34	0.14	118.6	72.9

注: 上层表示 30 m 以浅, 下层表示 30 m 以深

的流速分布。夏季台湾海峡内表现为一支东北流向的海流, 即台湾海峡暖流, 冬季东北季风较强, 西南方向的海流加强, 混合层可达到底部。

在此基础上本文主要计算了南海与东海之间经过台湾海峡输送的水体通量及热盐通量。结果表明台湾海峡的水体输运及热盐通量呈现明显的季节变化。夏季台湾海峡内存在 3.3 Sv 的东北向水体输运, $0.34 \times 10^{15} \text{ W}$ 的热通量, $118.6 \times 10^9 \text{ g/s}$ 的盐通量; 冬季存在 1.8 Sv 的东北向水体输运, $0.14 \times 10^{15} \text{ W}$ 的热通量, $72.9 \times 10^9 \text{ g/s}$ 的盐通量。本文的结果能够为此海域的研究提供一定参考, 也期待着更为完善的观测资料给我们提供更多的信息。

参考文献:

[1] Guan Bingxian. Evidence for a counter-wind current in winter off the southeast coast of China [J]. Chin J Oceano Limno, 1986, 4(4): 319-332.

[2] Fang Guohong, Zhao Baoren, Zhu Yaohua. Water volume transport through the Taiwan and the continental shelf of the East China Sea measured with current meters [C]//Takano K. Oceanography of Asia Marginal Seas. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1991: 345-358.

[3] Teague W, Jacobs G, Ko D, et al. Connectivity of the Taiwan, Cheju and Korea straits [J]. Cont Shelf Res, 2003, 23: 63-77.

[4] Wang Y, Jan S, Wang D. Transports and tidal current estimates in the Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999-2001) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 193-199.

[5] Guo X. On the volume transport of the Taiwan Strait[C]//PAM. The 10th PAM & JECSS Workshop-Program and Extended Abstract. Kagoshima, Japan: PAM, 1999: 2-12.

[6] 方国洪, 魏泽勋, 崔秉吴, 等. 中国近海域际水、热、盐输运: 全球变网格模式结果 [J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 969-977.

[7] Isobe A. On the origin of the Tsushima Warm Current and its seasonality [J]. Cont Shelf Res, 1999, 19: 117-133.

[8] 张庆华, 乔方利. 台湾海峡暖流成因的研究[J]. 海洋学报, 1993, 15(3): 19-28.

[9] Visbeck M. Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profilers: Bottom track and inverse solutions [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2002, 19, 794-807.

[10] 曾淦宁, 齐义泉, 胡建宇, 等. 台湾海峡 M_2 分潮潮波研究进展 [J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 508-518.

[11] Niwa Y, Hibiya T. Three-dimensional numerical simulation of M_2 internal tides in the East China Sea [J]. J Geophys Res, 2004, 109, C04027, doi: 10.1029/2003JC001923.

[12] Jan S, Chern C S, Wang J, et al. Generation of diurnal K_1 internal tide in the Luzon Strait and its influence on surface tide in the South China Sea [J]. J Geophys Res, 2007, 112, C06019, doi: 10.1029/2006JC004003.

[13] Fan K L, Yu C Y. A study of water masses in the seas of southernmost Taiwan [J]. Acta Oceanogr Taiwanica, 1981, 12: 94-111.

- [14] Wang J, Chern C S. On the Kuroshio branch in the Taiwan Strait during wintertime [J]. Prog Oceanogr, 1988, 21: 469-491.
- [15] Chung W. Dynamics of subtidal flow in the Taiwan Strait [J]. J Oceanogr Soc, 1985, 41(2): 65-72.
- [16] Chung W. A note on the driving mechanisms of current in the Taiwan Strait [J]. J Oceanogr Soc, 1986, 42(5): 355-361.
- [17] Wang J, Chern C S. On the deflection of a rotational, baroclinic jet by an angular coast with application to the branching of currents southwest of Taiwan [J]. Acta Oceanogr Taiwanica, 1992, 29: 18-33.
- [18] Cai Shuqun, Liu Hailong, Li Wei, et al. Application of LICOM model to the numerical study of the water exchange between the South China Sea and its adjacent oceans [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 24(4): 10-19.
- [19] 蔡树群, 刘海龙, 李薇. 南海与邻近海洋的水通量交换[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 29-34.
- [20] 傅子琅. 台湾海峡海流输送的海洋热盐通量[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1995, 34(4): 664-666.

The observation of transport of volume, heat and salt through the Taiwan Strait in summer and winter

TIAN Chuan¹, WANG Shu-xin¹, XU Xiao-yang²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Jun., 6, 2012

Key words: the Taiwan Strait; volume transport; heat transport; salt transport

Abstract: Based on the Lowered Acoustic Doppler Current Profiler (LADCP) and Conductivity-Temperature-Depth (CTD) observation, this work examined the transport of volume, heat and salt through the Taiwan Strait in summer and winter. The barotropic and baroclinic tidal currents as well as the subinertial flow were obtained. The results show that the major area in the Taiwan Strait is typical of semi-diurnal tides and the most important component Lunar semidiurnal tidal, M_2 . The transport of water volume, flux of heat and salt through the Taiwan Strait was determined by seasons and there was a volume transport of 3.3 Sv (northeastward) in summer and 1.8 Sv (northeastward) in winter. In summer, the heat transport was 0.34×10^{15} W, and salt transport was 118.6×10^9 g/s. In winter, the heat transport was 0.14×10^{15} W, and salt transport was 72.9×10^9 g/s. These results provide an accurate flux value of the Taiwan Strait especially for the related research in this area.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)