

# 基于海洋模式数据的吕宋海峡输运量和 菲律宾黑潮流量关系的分析\*

周艳芳<sup>1,2</sup> 谢强<sup>1,3</sup> 陈更新<sup>3</sup> 曾丽丽<sup>3</sup>

(1. 中国科学院深海科学与工程研究所 三亚 572099; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室 广州 510301)

**摘要** 利用全球涡分辨率海洋环流模式 OFES 的 60 年(1950—2009)输出资料,用流速资料计算了吕宋岛东侧 18°N 断面黑潮上游流量(Kuroshio Transport, KT)和 120.5°E 断面吕宋海峡输运量(Luzon Strait Transport, LST)。研究表明,KT 和 LST 存在四种情况,即: KT 大 LST 小、KT 大 LST 大、KT 小 LST 小和 KT 小 LST 大,分别占其总数的 34%、11%、13%、42%。合成分析证实:一般情况下,KT 大对应黑潮跨越吕宋海峡流态,此时 LST 较小;KT 小时,地转  $\beta$  效应迫使黑潮向西入侵吕宋海峡,此时 LST 大。然而,吕宋岛东侧和台湾东南沿岸的涡旋常削弱黑潮在吕宋海峡处流量,造成 KT 大时黑潮亦入侵吕宋海峡,从而出现 KT 大 LST 大的情形;太平洋一侧的异常高海表高度诱发吕宋海峡处强地转流,造成 KT 虽小而黑潮在吕宋海峡处仍是跨越流态,因而 LST 小。结果表明,LST 不仅受 KT 影响,亦受局地涡旋和海表高度的重要控制。

**关键词** 吕宋海峡; 黑潮入侵; 输运量

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20170900222

南海是西北太平洋最大的边缘海,其通过台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡和巴拉巴克海峡、卡里马塔海峡和马六甲海峡分别与东海、太平洋、苏禄海和印度洋相连。其中吕宋海峡位于中国台湾岛与菲律宾吕宋岛之间,是南海与西太平洋环流体系进行水交换的重要通道。西太平洋环流体系调制着全球最大的暖池,对局地和邻近海域南海具有的重要影响。它主要由北赤道流-黑潮-棉兰老流(NEC-KC-MC)组成,当北赤道流(North Equatorial Current, NEC)自东向西流动,抵达菲律宾以东沿岸之后,由于陆地的阻隔,北赤道流发生分叉形成向北的黑潮(KC)和向南的棉兰老流(MC)(Toole *et al.*, 1988)。

黑潮沿着菲律宾东岸向北流动经过吕宋海峡时,可能以多种形式携带高盐高温的太平洋水体入侵南

海,主要可分为黑潮分支(Nitani, 1972; 仇德忠等, 1984; Li *et al.*, 1998; Centurioni *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2008)和黑潮流套(或伴随反气旋涡脱离)(李立等, 1989; Fang *et al.*, 1998; Li *et al.*, 1998; Jia *et al.*, 2004; Yuan *et al.*, 2006)。Nan 等(2011)把在吕宋海峡的黑潮流态分为 3 种: 黑潮分支(leaking)、黑潮流套(looping)和黑潮跨越(leaping)。黑潮水的入侵必然会对南海北部的温盐结构、环流及气候变异产生重要影响(Zeng *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2017)。

南海与西太平洋之间通过吕宋海峡进行的水体交换为吕宋海峡输运量(Luzon Strait Transport, LST)。LST 受风应力、局地压力梯度、 $\beta$  效应以及涡旋活动等不同因素的影响,存在显著的季节变化,表现为冬季大而夏季小(Metzger *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2007)。季

\* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)项目, XDA11010302, XDA11010203 号; 国家自然科学基金项目, 41676015, 41506022, 41476014, 41776025, 41476011 号; 广州市珠江科技新星专项, 201610010148 号; 热带海洋环境国家重点实验室自主研究项目, LTOZZ1601 号; 国家重点研发计划, 2016YFC1402603 号。周艳芳, 硕士研究生, E-mail: zhouyf@idsse.ac.cn

通讯作者: 谢强, 博士生导师, 研究员, E-mail: gordonxie@idsse.ac.cn

收稿日期: 2017-09-02, 收修改稿日期: 2017-09-30

风引起海水堆积所产生的经向压强差是 LST 季节变化的主要原因(Metzger *et al*, 1996; Qu, 2000)。另外, LST 还存在年际变化, 且与西太环流体系 NEC 分叉点的南北位置有关(Kim *et al*, 2004; Qu *et al*, 2004), 研究表明在厄尔尼诺年, 北赤道流的分叉点北移, 黑潮流量减弱, 使得 LST 增大; 在拉尼娜年, 北赤道流的分叉点南移, 黑潮流量增强, 使得 LST 减小。

黑潮流量的变化会对太平洋经吕宋海峡进入南海水体的输运量产生重要的影响, 前人已经认识到黑潮流量较小时, 有利于太平洋水体的入侵, LST 大; 而黑潮流量大则不利于太平洋水体入侵, LST 小。然而由于受到局地中尺度涡的调制, 黑潮流量变异和吕宋海峡输运量之间的关系及其产生原因尚存在许多未解决的问题, 如黑潮流量较大(小)对应着 LST 大(小)的状况, 亟需进一步深入研究。基于高分辨率海洋模式数据, 本文将对吕宋岛东侧 18°N 断面黑潮上游流量与吕宋海峡输运量之间的四种关系进行分析和探讨。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

本文使用的是 OFES(ocean general circulation model for the earth simulator)全球涡分辨模式 60 年(1950—2009)的月输出数据。OFES 模式是由日本海洋地球科学技术中心(JAMSTEC, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)提供, 该模式是基于 GFDL/NOAA(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration)的 MOM3(modular ocean model)模式, 并改进为并行算法, 计算区域为 75°S—75°N 的全球海域(除北冰洋以外)。水平分辨率为 0.1°×0.1°, 垂直分层为 54 层, 垂向的每层深度为不等间距, 从表层的 5m 到最底层的 330m, 最大水深达到 6065m。模式地形采用南安普顿海洋中心涡分辨率 OCCAM 处理得到的 1/30°精度的地形测量数据(由 GFDL/NOAA 提供), 而后采用局部盒子的方法将地形场进行平滑, 水平扩散项采用双调和方案, 垂直混合采用 K-剖面参数化方案(K-Profile Parameterization, KPP)。月平均风应力和表面热通量采用 1950—1999 年 NCEP/NCAR 再分析数据, 温盐初始场采用 WOA98 结果, 初始速度取为零, 积分 50 年, 把第 51 年的输出结果当作启动场, 进行实时模拟(Masumoto *et al*, 2004; Sasaki *et al*, 2004; Sasaki *et al*, 2008)。

### 1.2 输运量计算方法

海峡体积输运量的计算公式为  $F_v = \int_A v_n dA$ , 其中  $A$  表示选取断面的面积,  $dA$  为积分单元,  $v_n$  为垂直该断面的平均速度。具体计算方法为各网格单元面积和垂直于该网格平均速度乘积之和求出  $F_v = \sum_i [\Delta l_i \sum_k v_{i,k} \Delta z_k]$ , 其中  $i$  和  $k$  分别为断面水平方向和垂向网格序号;  $v_{i,k}$  为网格  $(i, k)$  中心处的法向流速, 取向西为正;  $\Delta l_i, \Delta z_k$  为第  $(i, k)$  网格的宽度和厚度。

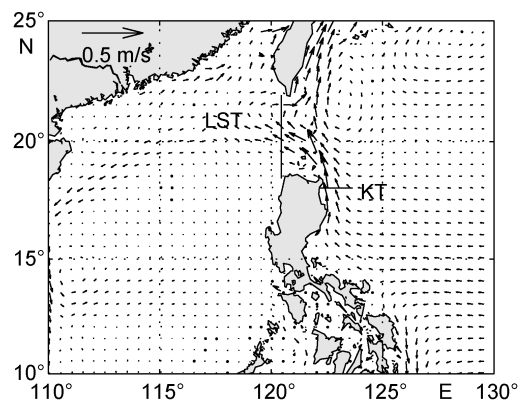


图 1 OFES 模式输出的吕宋海峡附近区域长期(1950—2009)平均的上层(0—404m)流场(矢量)

Fig.1 The long term-mean (1950—2009) upper-layer (0—404m) velocity field (vector) in Luzon Strait and the neighboring area simulated with OFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator)

注: 黑色实线为吕宋海峡输运量(LST)和黑潮上游流量(KT)断面所在的位置

黑潮上游的流量一直以来都是以 18°N 为代表(Qu *et al*, 2004; Zhu *et al*, 2015), 本文选取吕宋岛东侧 18°N 断面(122.25°—123.65°E)的黑潮上游流量(Kuroshio Transport, 以下简称 KT)和 120.5°E 断面(18.45°—21.95°N)的吕宋海峡输运量(Luzon Strait Transport, 以下简称 LST)(图 1)。海峡断面流速剖面图(图略)显示黑潮在吕宋岛东侧以及吕宋海峡断面的流速基本集中于上层 400m, 由上至下流速逐渐减小, 其中吕宋海峡南部主要出现入流, 北部则主要为出流, 上层体积输运的时间序列与整层积分的结果几乎重合, 因此本文积分计算了上层(自海面至 404m 深度)的体积输运量。

## 2 结果与分析

### 2.1 四种情况

以 KT 和 LST 变化超过 1 个标准差作为判断 KT(LST)大小的标准, 分别选取了 KT 大 LST 小、

KT 大 LST 大、KT 小 LST 小和 KT 小 LST 大这四种情况(表 1), 本文将初步探讨这四种情况下的吕宋海峡区域环流场的特征和动力机制。

表 1 根据标准差选取的四种不同情况  
Tab.1 Four typical cases in standard deviation

类型	KT 范围(Sv)	LST 范围(Sv)	数目
KT 大 LST 小	KT>21.13	LST<1.36	26
KT 大 LST 大	KT>21.13	LST>5.89	8
KT 小 LST 小	KT<5.50	LST<1.36	10
KT 小 LST 大	KT<5.50	LST>5.89	32

注: 其中 LST 西向为正, 单位: Sv ( $1\text{Sv}=10^6\text{m}^3/\text{s}$ ); KT 平均值(标准差):  $13.32\text{Sv}$  ( $7.81\text{Sv}$ ); LST 平均值(标准差):  $3.63\text{Sv}$  ( $2.27\text{Sv}$ )

图 2 所示为 1950—2009 年上层 404m 积分的 KT 和 LST 月平均长时间序列, 其中自东向西进入南海, LST 为正值。吕宋岛东侧  $18^\circ\text{N}$  断面黑潮流量(KT)的平均值  $\mu_1$  为  $13.32\text{Sv}$ , 标准差  $\sigma_1$  为  $7.81\text{Sv}$ , 吕宋海峡  $120.5^\circ\text{E}$  断面输运量(LST)平均值  $\mu_2$  为  $3.63\text{Sv}$ , 标准差  $\sigma_2$  为  $2.27\text{Sv}$ 。关于 LST 已有大量的研究, 不同文章对 LST 平均值的估算大小为  $0.5\text{—}10\text{Sv}$  ( $1\text{Sv}=10^6\text{m}^3/\text{s}$ ) (Wyrтки, 1961; Metzger *et al*, 1996; Chu *et al*, 2000; Lebedev *et al*, 2000; Xue *et al*, 2004; Yaremchuk *et al*, 2004; Song, 2006; Wang *et al*, 2006; Yu *et al*, 2007), 本文的结果表明西太平洋黑潮水通过吕宋海峡终年进入南海, 与前人的结果一致。

图 2 中绿点表示 KT 大 LST 小[即 KT 大于平均值加标准差( $\mu_1+\sigma_1$ ), LST 小于平均值减标准差( $\mu_2-\sigma_2$ )]的情况发生, 总数为 26 个, 发生时间一般是 3 至 9 月, 持续时间最长可达 3 个月, 而其中有 54% 出现在 6、7 月。红点表示 KT 小 LST 大[即 KT 小于平均值减标准差( $\mu_1-\sigma_1$ ), LST 大于平均值加标准差( $\mu_2+\sigma_2$ )]的情况发生, 总数为 32 个, 一般于 1 至 3 月和 10 至 12 月期间发生, 并且有 60% 发生在 1、2 月。

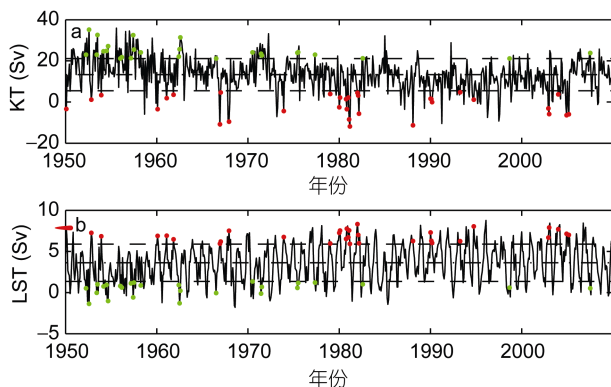


图 2 1950—2009 年 KT (a)和 LST(b)(单位: Sv)月平均长时间序列

Fig.2 The time series of the monthly KT (a) and LST (b) from 1950 to 2009 (unit: Sv)

注: 点划线表示平均值, 虚线表示平均值±标准差; 绿点代表 KT 大 LST 小发生, 红点代表 KT 小 LST 大发生

准差( $\mu_1-\sigma_1$ ), LST 大于平均值加标准差( $\mu_2+\sigma_2$ )]的情况, 总数为 32 个, 一般于 1 至 3 月和 10 至 12 月期间发生, 并且有 60% 发生在 1、2 月。

吕宋海峡区域的流场受复杂地形、季风、黑潮入侵及东西两侧活跃的涡旋运动等因素影响; 另外还有两种少数情况出现, 即当黑潮上游流量大时, 吕宋海峡输运量大, 以及黑潮上游流量小时, 吕宋海峡输运量小。图 3 中蓝点表示 KT 大 LST 大发生, 1950—2009 年中一共有 8 个月发生这一情况, 对比 KT 大 LST 小发生的个数, 数目较少, 不过仍集中于冬季的 1、2 月。图 3 中黄点表示的则是 KT 小 LST 小发生, 总数为 10 个, 其中有 60% 出现在 6、7 月。

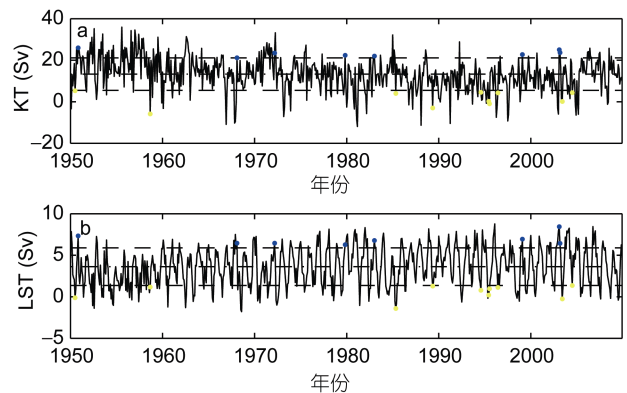


图 3 1950—2009 年 KT (a)和 LST(b)(单位: Sv)月平均长时间序列

Fig.3 The time series of the monthly KT (a) and LST (b) from 1950 to 2009 (unit: Sv)

注: 点划线表示平均值, 虚线表示平均值±标准差; 蓝点代表 KT 大 LST 大发生, 黄点代表 KT 小 LST 小发生

由此可见, 1950—2009 年期间 KT 大 LST 小、KT 大 LST 大、KT 小 LST 小和 KT 小 LST 大发生的总数目为 76 个月, 其中四种情况分别占 34%、11%、13%、42%, 其中 KT 大 LST 小和 KT 小 LST 小多发生于 6、7 月, KT 大 LST 大和 KT 小 LST 大则多发生于 1、2 月, 有明显的季节性。接下来将对这四种情况下的海表高度和上层流场做合成分析。

## 2.2 合成分析

图 4 为 KT 大 LST 小和 KT 小 LST 大这两种一般情况下平均的海表高度和上层流场, 所有 KT 大 LST 小情形合成后的平均态(图 4a)表明当黑潮北上经过吕宋海峡时, 失去西边界的支持, 部分水体从吕宋海峡中部有入侵南海的趋势, 但在吕宋海峡北部顺时针折回重新汇入黑潮主轴沿着台湾岛东侧向北流动, 基本不跨越  $120.5^\circ\text{E}$ , 呈现黑潮跨越流态, 这种情况吕宋海峡输运量很小。而所有 KT 小 LST 大情形

合成后的结果(图 4b)则显示吕宋岛东侧 18°N 断面以南菲律宾群岛周边的海表高度低于气候态值, 从流场可更直观的看出此时更多的西太平洋水经过吕宋海峡入侵南海, 并且会一直向西延伸至南海北部 117°E 左右, 显然黑潮在吕宋海峡处呈入侵流态, 通过吕宋海峡的输运量自然很大。

关于这两种情况的机制也早有研究, Stommel 等 (1960)认为在线性条件下, 由于  $\beta$  效应, 西边界流会一直入侵海峡。Sheremet(2001)提出当西边界流流量较大时, 因惯性效应西边界流会跨越缺口向北流动, 而当流量较小时, 地转  $\beta$  效应会迫使西边界流入侵西海盆。并且西边界流在这两种流态之间转变时, 会出现迟滞现象, 这一变化, 过程可以形象地比喻为“茶壶效应”, 即减小茶壶的倾斜可以使壶嘴的水流由射流转为贴嘴壁的流。那么, 关于黑潮流量较小对应入侵流态, 流量较大对应跨越流态的动力机制可解释为惯性项和  $\beta$  项分别占主导时, 西边界流流态不同: 即当黑潮上游流量较少时, 在位涡方程

中地转  $\beta$  效应占主导, 迫使黑潮向西入侵吕宋海峡, 此时 LST 较大; 当黑潮上游流量较大时, 在位涡方程中惯性项占主导, 导致黑潮跨越吕宋海峡向北流动, LST 较小。

下面讨论 KT 大 LST 大和 KT 小 LST 小这两种情况, 同样将海表高度和上层流场做平均来解释其可能的原因。对于 KT 大 LST 大的情况, 从图 5 的流场和海表高度异常可发现, 吕宋岛东侧 125°E 左右以及台湾岛东南侧 22°N 分别存在反气旋涡, 黑潮流经吕宋岛和台湾岛时由于受到其东侧局地反气旋涡的影响, 流速较大, 但在由南往北流经吕宋海峡处时, 黑潮主轴中的部分水体跟随着反气旋涡流向太平洋这一侧, 并且与吕宋海峡东侧的负海表高度异常共同作用导致吕宋海峡处黑潮流速减小, 使得吕宋海峡断面 18.5°N 至中部出现西向水体入侵, LST 较大。由此得知, 吕宋岛东侧和台湾东南沿岸的涡旋和太平洋一侧的负海表高度异常共同削弱了黑潮在吕宋海峡处的流量, 创造了有利于黑潮入侵南海的条件,

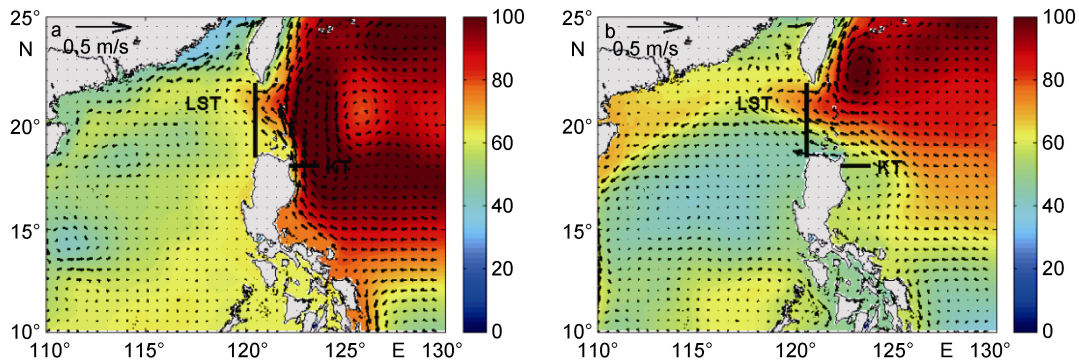


图 4 KT 大 LST 小(a)和 KT 小 LST 大(b)情形下的平均海表高度和上层(0—404m)流场

Fig.4 The mean SSH (unit: cm) and the upper-layer (0—404m) velocity field (a) strong KT and weak LST; (b) weak KT and strong LST

注: 填色区为海表高度(单位: cm), 矢量箭头为流场, 黑色实线分别为吕宋海峡输运量(LST)和黑潮上游流量(KT)断面所在的位置(下同)

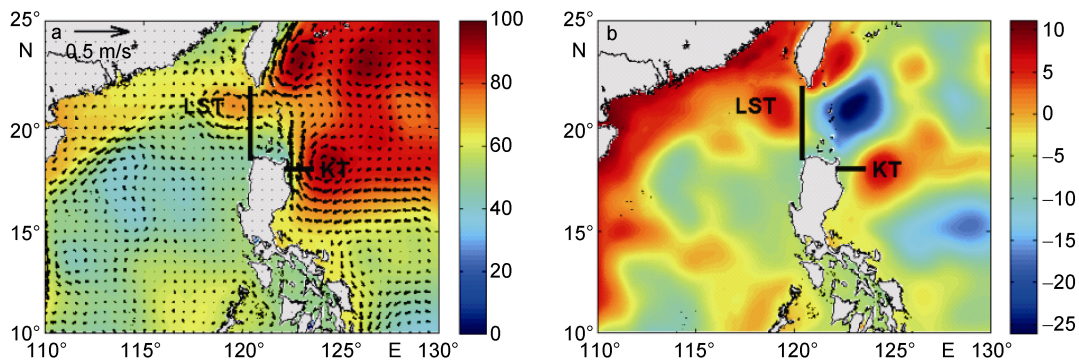


图 5 KT 大 LST 大情形下的平均海表高度(单位: cm)和上层(0—404m)流场(矢量)(a)以及海表高度异常场(单位: cm)(b)

Fig.5 The mean SSH (unit: cm) with the upper-layer (0—404m) velocity field (vector) (a) and SSH anomaly (b) of strong KT and strong LST



造成 KT 大时黑潮亦入侵吕宋海峡, 从而出现 KT 大 LST 大的情形。

对于 KT 小 LST 小的情况, 虽然发现吕宋岛东侧以及台湾岛东南沿岸海表高度为负异常(图 6b), 但在流场图中并没有发现对应气旋涡的存在。但我们注意到吕宋海峡断面南部海表高度为显著正异常, 南端海表高度

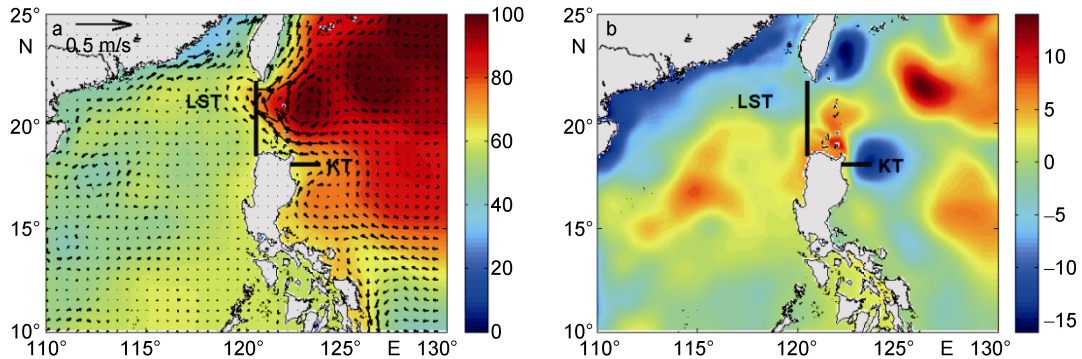


图 6 KT 小 LST 小情形下的平均的海表高度(单位: cm)和上层(0—404m)流场(矢量)(a)以及海表高度异常场(单位: cm)(b)  
Fig.6 The mean SSH (unit: cm) with the upper-layer (0—404m) velocity field (vector) (a) and SSH anomaly (b) of weak KT and weak LST

综上所述, 吕宋岛东侧 18°N 黑潮上游流量较大, 多数对应黑潮在吕宋海峡的跨越流态, 由于惯性效应黑潮不会穿过吕宋海峡, 而会沿着台湾东侧海岸继续北行(图 4a)。Nan 等(2011)利用台湾西南部地转涡度指数(KLI)所分类出的“leaping”跨越流径的特征为黑潮通过吕宋海峡后向西进入南海, 基本不越过 120°E 然后折回, 本文的结果与其非常一致, 跨越流态造成吕宋海峡 120.5°E 断面输运量小。黑潮上游流量较小, 多数则是对应了吕宋海峡处黑潮的入侵流态, 并且可以沿着南海北部陆架一直入侵至南海北部 117°E 左右(图 4b)。

另外存在少数黑潮流量较大, 吕宋海峡输运量大的情况, 这是由于黑潮在经过吕宋海峡处受到太平洋一侧的涡旋的影响, 黑潮流态发生了复杂变化, 最终入侵吕宋海峡。Chang 等(2015)认为吕宋海峡东侧的冷涡可以减弱黑潮在吕宋海峡处的流速, 且黑潮会以“loop”的形式入侵南海, 暖涡则相反。本文也发现类似的情况, 反气旋涡增强了吕宋岛东侧的黑潮流速, 而吕宋海峡东侧负海表高度异常削弱了黑潮在吕宋海峡缺口处的流量, 导致黑潮入侵, LST 大。黑潮的反气旋入侵使吕宋海峡 120.5°E 断面西侧呈现出正海表高度异常(图 5b)。而少数黑潮流量较小, 吕宋海峡输运量小的情况虽然也有可能是受到中尺度涡的影响, 但本文的结果表明是太平洋一侧的高海

高于北端, 那么根据地转关系, 此时形成北向的压强梯度力将造成东向输运异常, 减弱了吕宋海峡的输运量。从图 6a 流场可以看出, 吕宋海峡东侧黑潮基本没有跨越 LST 断面, 由于太平洋一侧水体辐聚产生的异常高海表高度诱发吕宋海峡处强地转流, 黑潮在吕宋海峡处呈跨越流态, 造成 KT 小而 LST 小的结果。

表高度诱发强地转流所造成。这一情况下黑潮没有入侵, LST 小, 同时 120.5°E 断面西侧海表高度相对偏低(图 6b)。由此我们还发现在这两种少数情况下吕宋海峡 120.5°E 断面东西两侧海表高度异常相反的现象, LST 断面西侧海表高度异常正负与黑潮入侵与否有关系。

### 3 结论

本文基于连续 60 年(1950—2009)全球涡分辨海洋环流模式 OFES 输出资料, 利用流速资料计算了吕宋岛东侧 18°N 断面(122.25°—123.65°E)黑潮上游流量(KT)和 120.5°E 断面(18.45°—21.95°N)吕宋海峡输运量(LST), 分析了 LST 和 KT 的变化关系, 发现存在 KT 大 LST 小、KT 大 LST 大、KT 小 LST 小和 KT 小 LST 大这四种不同情况。合成分析的结果表明: 一般情况下, 黑潮上游流量较大对应黑潮跨越吕宋海峡的流态, 由于惯性项作用黑潮跨越吕宋海峡继续向北流动, LST 较小; 黑潮上游流量较小有利于太平洋水入侵南海, 地转  $\beta$  效应迫使黑潮向西入侵吕宋海峡, 此时 LST 大。而少数情况下, 黑潮上游流量较大时, 吕宋岛东侧和台湾岛东南沿岸的涡旋削弱黑潮在吕宋海峡处的流量, 造成黑潮显著入侵, LST 大。黑潮上游流量较小时, 太平洋一侧的异常高海表高度导致吕宋海峡仍是跨越流态, 黑潮没有入

侵, LST 小。本文结果表明, 局地涡旋和海表高度会控制黑潮流经吕宋海峡的流速, 激发吕宋海峡黑潮的不稳定流态, 从而对 LST 的变化产生影响。

**致谢** 感谢中国科学院南海海洋研究所王东晓研究员给予的指导与帮助, 感谢审稿专家对本文的宝贵意见。

### 参 考 文 献

- 仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信, 1984. 夏季南海北部一支向西流动的海流. 热带海洋, 3(4): 65—73
- 李立, 伍伯瑜, 1989. 黑潮的南海流套?——南海东北部环流结构探讨. 台湾海峡, 8(1): 89—95
- Centurioni L R, Niiler P P, Lee D K, 2004. Observations of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 34(1): 113—121
- Chang Y L, Miyazawa Y, Guo X Y, 2015. Effects of the STCC eddies on the Kuroshio based on the 20-year JCOPE2 reanalysis results. *Progress in Oceanography*, 135: 64—76
- Chu P C, Li R F, 2000. South China Sea isopycnal-surface circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 30(9): 2419—2438
- Fang G H, Fang W D, Fang Y *et al*, 1998. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 37(1): 1—16
- Hu X M, Xiong X J, Qiao F L *et al*, 2008. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent regions derived from satellite-tracked drifter data. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(3): 11—29
- Jia Y L, Liu Q Y, 2004. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon Strait. *Journal of Oceanography*, 60(6): 1063—1069
- Kim Y Y, Qu T D, Jensen T *et al*, 2004. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C3): C03040
- Lebedev K V, Yaremchuk M I, 2000. A diagnostic study of the Indonesian Throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5): 11243—11258
- Li L, Nowlin W D, Su J L, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(9): 1469—1482
- Masumoto Y, Sasaki H, Kagimoto T *et al*, 2004. A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean—preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *Journal of the Earth Simulator*, 1: 35—56
- Metzger E J, Hurlburt H E, 1996. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12331—12352
- Metzger E J, Hurlburt H E, 2001. The nondeterministic nature of Kuroshio penetration and eddy shedding in the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 31(7): 1712—1732
- Nan F, Xue H J, Chai F *et al*, 2011. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea. *Ocean Dynamics*, 61(9): 1291—1304
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K eds. *Kuroshio, Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle: University of Washington Press, 129—163
- Qu T D, 2000. Upper-layer circulation in the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 30(6): 1450—1460
- Qu T D, Kim Y Y, Yaremchuk M *et al*, 2004. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? *Journal of Climate*, 17(18): 3644—3657
- Sasaki H, Sasai Y, Kawahara S *et al*, 2004. A series of eddy-resolving ocean simulations in the world ocean—OFES (OGCM for the Earth Simulator) project. In: *Proceedings of OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, Kobe, Japan: IEEE, 1535—1541
- Sasaki H, Nonaka M, Masumoto Y *et al*, 2008. An eddy-resolving hindcast simulation of the quasiglobal ocean from 1950 to 2003 on the earth simulator. In: Hamilton K, Ohfuchi W eds. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*. New York, NY: Springer, 157—185
- Sheremet V A, 2001. Hysteresis of a western boundary current leaping across a gap. *Journal of Physical Oceanography*, 31(5): 1247—1259
- Song Y T, 2006. Estimation of interbasin transport using ocean bottom pressure: Theory and model for Asian marginal seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11): C11S19
- Stommel H, Arons A B, 1960. On the abyssal circulation of the world ocean—I: Stationary planetary flow patterns on a sphere. *Deep Sea Research (1953)*, 6: 140—154
- Toole J M, Zou E, Millard R C, 1988. On the circulation of the upper waters in the western equatorial Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 35(9): 1451—1482
- Wang D X, Liu Q Y, Huang R X *et al*, 2006. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product. *Geophysical Research Letters*, 33(14): L14605
- Wyrtki K, 1961. *Scientific Results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961*. San Diego: University of California, 164—169
- Xiao F, Zeng L L, Liu Q Y *et al*, 2017. Extreme subsurface warm events in the South China Sea during 1998/99 and 2006/07: observations and mechanisms. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-017-3588-y (in press)
- Xue H J, Chai F, Pettigrew N *et al*, 2004. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C2): C02017
- Yaremchuk M, Qu T D, 2004. Seasonal variability of the large-scale currents near the coast of the Philippines. *Journal of Physical Oceanography*, 34(4): 844—855
- Yu Z, Shen S, McCreary J P *et al*, 2007. South China Sea throughflow as evidenced by satellite images and numerical experiments. *Geophysical Research Letters*, 34(1): L01601
- Yuan D L, Han W Q, Hu D X, 2006. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11):

C11007

Zeng L L, Timothy Liu W, Xue H J *et al*, 2014. Freshening in the South China Sea during 2012 revealed by Aquarius and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12):

8296—8314

Zhu X M, Liu G M, Wang J *et al*, 2015. A numerical study on the relationships of the variations of volume transport around the China seas. *Journal of Marine Systems*, 145: 15—36

## ANALYSIS ON THE RELATIONSHIP BETWEEN LUZON STRAIT TRANSPORT AND PHILIPPINE KUROSHIO TRANSPORT BASED ON OCEAN MODEL DATA

ZHOU Yan-Fang<sup>1,2</sup>, XIE Qiang<sup>1,3</sup>, CHEN Geng-Xin<sup>3</sup>, ZENG Li-Li<sup>3</sup>

(1. *Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572099, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*)

**Abstract** Based on 60-year (1950—2009) monthly mean output from a high eddy-resolving numerical model OFES (OGCM for Earth Simulator), the variability of the Kuroshio Transport (KT) at 18°N section and the Luzon Strait Transport (LST) at 120.5°E section are investigated. Results indicate that there are four typical cases (strong KT and weak LST, strong KT and strong LST, weak KT and weak LST, and weak KT and strong LST). The probability of occurrence is 34%, 11%, 13%, and 42% respectively. The composite analysis shows that strong (weak) KT associated with weak (strong) LST occurs frequently during the simulated period. When the KT is strong, the majority of Kuroshio Current traverses off the Luzon Strait and moves northward due to an inertial effect, resulting in weak LST. When the KT is weak, a branch of Kuroshio intrudes through the Luzon Strait and into the SCS due to the  $\beta$  effect, leading to strong LST. However, the Kuroshio can be reduced by anti-cyclonic eddies located at the east of the Luzon Island and off southwest Taiwan, resulting in Kuroshio intrusion and occurrence of strong KT and strong LST. When KT is strong, sea surface height anomaly (SSHA) of the Pacific would be positive, which leads to a strong geostrophic current in the Luzon Strait, and the Kuroshio tends to leap across the LS, resulting in the occurrence of weak KT and weak LST. Therefore, we believe that LST is not only under the influence of KT, but also those of local eddies and sea surface height.

**Key words** Luzon Strait; Kuroshio intrusion; volume transport