

# 吕宋海峡深层水体体积输运的诊断分析

王志勇<sup>1</sup>, 赵 玮<sup>1</sup>, 周 春<sup>1</sup>, 王 斌<sup>1</sup>, 田纪伟<sup>1</sup>, 张 军<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 使用 WOD09, WOA05, WOA01 和 SODA 四种水文数据, 利用水力学理论对吕宋海峡的深层水体体积输运进行了估计。结果表明: 由于忽略了摩擦和地形等因素的影响, 水力学理论得到的输运结果是深层体积输运的上限。不同数据以及吕宋海峡东西两侧选取的不同区域, 都对水力学理论的体积输运估计存在显著影响。SODA 数据在吕宋海峡附近的深层海区存在偏差, 得到体积输运估计明显偏大, 因而不适用于水力学理论进行吕宋海峡深层水体体积输运的估计。为对于南海的环流、混合及生态环境存在重要影响的吕宋海峡深层水体体积输运进行合理估计, 对利用水力学理论估计深层水体体积输运的研究方法做了进一步探讨。

**关键词:** 吕宋海峡; 体积输运; 位势密度; 水力学理论; SODA

中图分类号: P722.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)04-0095-08

吕宋海峡北起中国台湾岛南至菲律宾吕宋岛, 海槛深度 2 200~2 400 m, 是连接南海与太平洋的唯一深水通道。通过吕宋海峡的水体体积输运以及该海域的环流状况, 对于南海水团性质、环流、混合及生态环境特征具有重要影响<sup>[1-3]</sup>。

近年来随着对南海研究的逐步深入, 对吕宋海峡水体体积输运的研究开始增多, 但是目前对于其空间特征及时间变异尚没有定论。对于吕宋海峡水体体积输运的垂向结构, 目前公认的观点是分为三层的类似“三明治”结构<sup>[4]</sup>, 表层和深层水体由太平洋通过吕宋海峡进入南海, 而在中层由南海流出太平洋<sup>[5-8]</sup>。目前对吕宋海峡深层流场的直接观测非常少, 一些单点的流速观测, 包括 Liu<sup>[9]</sup>等在巴士海峡底部获得了 82 d 的海流观测, 估计深层体积输运大约为 1.2 Sv (1 Sv=10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s); Chang<sup>[10]</sup>等在巴士海峡和 Taltung Canyon 分别获得了近 9 个月和 6 个月的流速观测, 认为巴士海峡是太平洋深层水进入南海的主要通道, 其体积输运为 1.06 Sv±0.44 Sv, 这些观测时间较长但是仅为单点观测, 很难完全反映整个海峡深层的水体体积输运情况。Tian<sup>[11]</sup>, Yang<sup>[12]</sup>等在吕宋海峡附近进行了断面连续站流速观测, 估计深层体积输运在 2 Sv 左右, 其观测范围较大但是持续时间较短, 不能提供一个长期的体积输运估计。总体来说, 现有观测得到的吕宋海峡深层水体体积输运大约在 1~2 Sv。

在目前缺乏系统长期的流速观测的情况下, 除了高精度的数值模式, 利用温盐资料结合水力学理论估计体积输运, 是对于深层水体体积输运研究的一种有效补充。Qu<sup>[13]</sup>利用 WOD01 数据, 通过水力学理论, 对于吕宋海峡深层的水体输运和南海深层环流进行了诊断分析, 得到吕宋海峡深层的体积输运约为 2.5 Sv, 进而得到南海深层水体滞留时间约为 24 a, 远低于 Broecker<sup>[14]</sup>基于放射性示踪物提出的 100 a 的上限。

本文基于 Qu<sup>[13]</sup>的分析方法, 使用 WOD09, WOA05, WOA01 和 SODA 四种水文数据, 选取吕宋海峡东西两侧不同区域, 使用水力学理论分析吕宋海峡的深层水体体积输运, 并且讨论不同数据、不同选取区域对于水力学理论诊断结果的影响。

## 1 数据介绍

本文选用了 NODC(美国国家海洋数据中心)收集整理的全球水文数据集 WOD09, WOA05, WOA01 以及全球海洋再分析数据 SODA。

WOD(World Ocean Database), 是 NODC 收集从

收稿日期: 2012-01-09; 修回日期: 2013-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176010, 91028008, 40890153, 41176008)

作者简介: 王志勇(1987-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事南海环流和内波方面研究, E-mail: haidaxiaobei@gmail.com; 赵玮, 通信作者, 教授, E-mail: weizhao@ouc.edu.cn

1773 年 1 月至今的全球多个国家的原始水文数据剖面, 未经过网格化和平均处理, 数据繁多而全面, 这里使用其最新版本 WOD09。为估计深层水体体积输运, 在吕宋海峡东西两侧, 采用与 Qu<sup>[13]</sup>相同的区域 W1(120°~121°E, 19°~21°N) 和 E1(122°~123°E, 21°~23°N), 另外又在海峡两侧各选取了两个区域 W2(119°~120°E, 19°~21°N), W3(119°~120°E, 17°~19°N) 和 E2(122°~123°E, 19°~21°N), E3(123°~124°E, 21°~23°N)(见图 1), 基本覆盖了海峡两侧的深水区域, 分析不同选取区域对于水力学理论结果的影响。由于早期的一些盐度观测存在误差, 这里使用各区域内 1970 年以后所有观测深度大于 1 500 m 的有效的温盐观测剖面, 并且进行了质量控制, 得到共 387 个温度剖面 and 383 个盐度剖面。

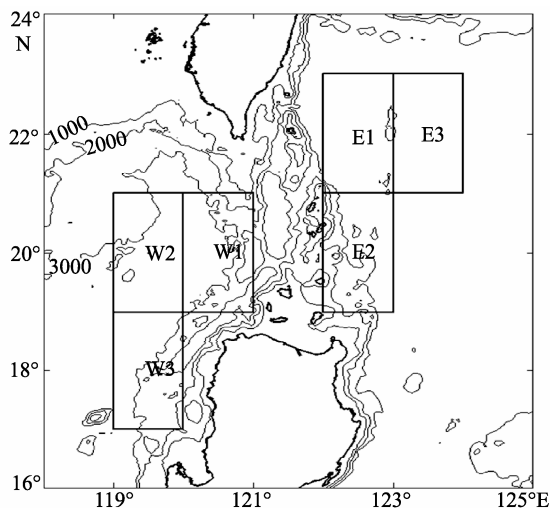


图 1 吕宋海峡附近地形(m)和数据选取区域

Fig. 1 Bottom topography near the Luzon Strait (m) and selected data regions

WOA05(World Ocean Atlas 2005)和 WOA01(World Ocean Atlas 2001), 是 NODC 推出的包含温、盐、溶解氧等水文要素的气候态水文数据, WOA05 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , WOA01 水平分辨率为  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ , 垂向均为 33 个分层。

SODA(Simple Ocean Data Assimilation)是美国马里兰大学发布的全球范围的简易海洋同化再分析数据, 它的空间分辨率是  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 垂向 40 个分层, 这里将 1958 年 1 月到 2007 年 12 月的 50 a 月平均数据进行时间平均, 得到关注海区的多年平均的气候态温盐场<sup>[15]</sup>。

## 2 吕宋海峡海区位势密度分布

根据吕宋海峡的水深状况(2 000 m 左右), 我们选取以 2 000 dbar 为参考的位势密度进行分析, 以下记作  $\sigma_2$ , 单位为  $\text{kg/m}^3$ (通常  $\sigma_2 + 1\,000$  表示参考面为 2 000 dbar 的位势密度)。通过位势密度的分布, 我们可以判断深层水体的流动方向。利用 WOA05, WOA01 和 SODA 数据得到穿过吕宋海峡的  $\sigma_2$  在  $20.5^\circ \text{N}$  附近纬向断面分布(图 2), 由于数据本身的网格点不同, 3 个断面的纬度略有不同, 但对结论无显著影响。另外 WOD09 不是网格化数据, 这里未得到相应的断面分布。

利用 WOA05 数据计算得到横穿吕宋海峡位势密度  $\sigma_2$  的纬向断面(图 2), 在 1 500 m 以上, 南海和太平洋的等位密线基本相平, 垂向梯度也比较大, 反映中层及上层水体层结较强。太平洋深层水体有较好的分层, 2 000 m 以下  $\sigma_2$  从  $36.84 \text{ kg/m}^3$  增至  $37 \text{ kg/m}^3$ , 等位密面向南海方向倾斜。南海深层水体垂向比较均匀, 在 2 000 m 以下  $\sigma_2$  只有大约  $0.03 \text{ kg/m}^3$  的变化, 等位密面自东向西倾斜。横穿吕宋海峡在大约 2 000 m 深度, 太平洋和南海之间始终存在一个密度差异, 位势密度  $\sigma_2$  从太平洋一侧的大约  $36.88 \text{ kg/m}^3$  下降到南海一侧大约  $36.84 \text{ kg/m}^3$ , 反映了从太平洋指向南海的很强的压强梯度。WOA01 数据得到的分布和 WOA05 基本一致(图 2), 只是等位密面的分布存在很小的差异。

利用 SODA 数据得到的纬向断面分布(图 2), 与 WOA05 和 WOA01 结果存在较大差异。太平洋深层水依然明显的层化, 但是等位密面基本平行, 没有沿纬向的倾斜。南海深层水垂向比较均匀, 等位密面也几乎没有纬向的倾斜, 2 000 m 以下  $\sigma_2$  的变化约为  $0.05 \text{ kg/m}^3$ , 明显大于其他两个数据。SODA 数据得到的等位密面的分布深度与其他两个数据存在明显差异, 等位密面有明显抬升, 这对后面深层水体体积输运的估计会产生较大影响。

## 3 吕宋海峡深层水体体积输运估计

### 3.1 不同数据的深层体积输运估计

在吕宋海峡东西两侧的 W1 和 E1 区域, 分别采用以上 WOD09, WOA05, WOA01 和 SODA 四种数据, 利用温盐数据计算多年区域平均的位势密度(图 3)。吕宋海峡东西两侧密度剖面存在两个交点, 与前人描述基本一致<sup>[16-18]</sup>, 第一个交点出现在 100 m 以

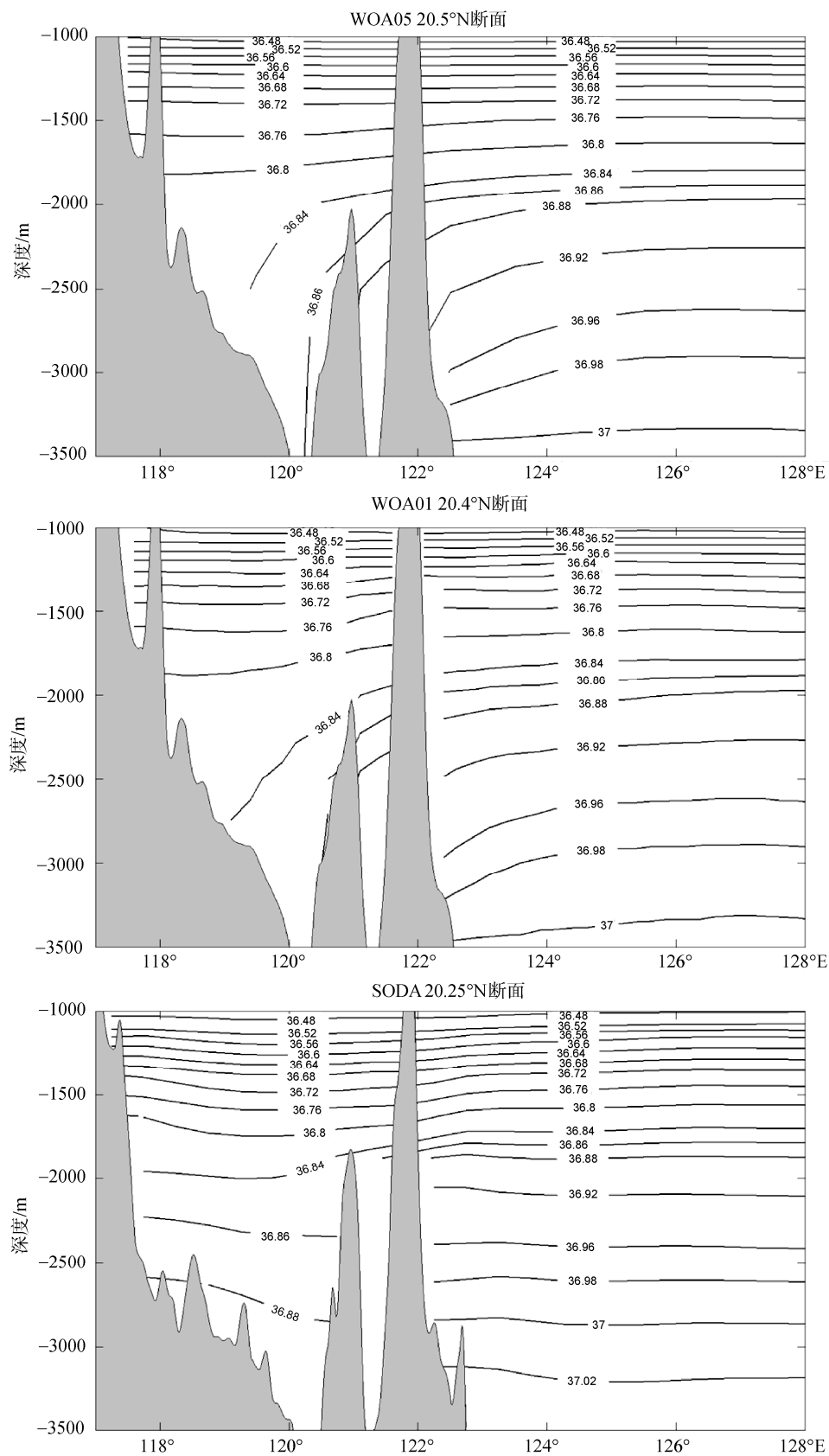


图2 不同数据得到的  $\sigma_2$  断面分布  
Fig. 2 Vertical distribution of  $\sigma_2$  by different databases

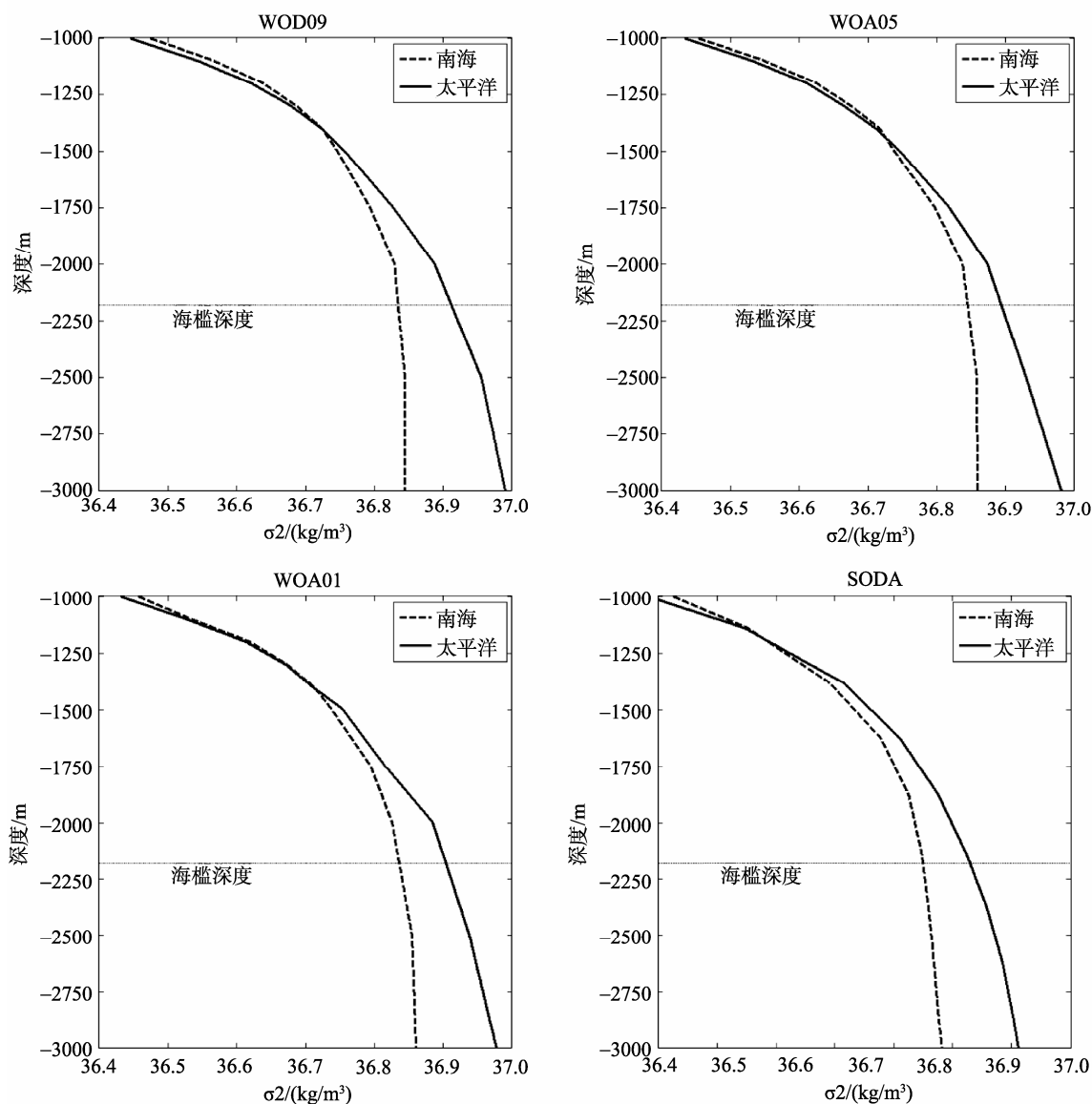


图3 不同数据得到的1 000 m以下  $\sigma_2$  剖面

Fig. 3 Vertical profiles of  $\sigma_2$  below 1000 m from different databases

浅,第二个交点出现的深度(以下称为“分叉点深度”)因不同数据而异,除了 SODA 数据的结果基本都在 1 400 m 左右(表 1)。太平洋深层水位势密度明显大于南海一侧,形成较强的压强梯度,驱动太平洋深层水穿过吕宋海峡进入南海。选择 2 181 m 作为海峡的代表深度,在此深度不同的数据得到东西两侧的密度差不同(表 1),大约在 0.05 ~ 0.08 kg/m<sup>3</sup>之间。

基于以上得到的吕宋海峡东西两侧的密度分布,我们利用水力学理论对吕宋海峡深层水体体积输运进行了估计。Whitehead<sup>[16,19]</sup> 已利用水力学理论估计了全球多个海峡的深层水体体积输运,并且和实际观测取得较好的吻合,结合 Qu<sup>[13]</sup>对吕宋海峡深层水

体体积输运的估计,假设海峡是平底的,利用约化重力模型,使用不同的数据计算得到了深层体积输运估计和南海深层海水的滞留时间(表 1)。

从表 1 中可以发现,选取不同的数据对于深层体积输运估计存在显著的影响,不同数据得到的输运结果在 2.4 ~ 7.0 Sv,南海深层水滞留时间为 8.5 ~ 25 a,远低于 Broecker<sup>[14]</sup>基于放射性示踪物提出的 100a 的上限,总体上得到的体积输运比观测和早期的一些估计偏大<sup>[9-10,20-21]</sup>。这是由于水力学理论忽略了复杂的地形和摩擦等因素的影响,导致高估了深层体积输运,因此水力学理论得到的是深层体积输运的上限<sup>[13]</sup>。SODA 数据得到的体积输运比其他数

据明显偏大,从前面对于位势密度的分析可以发现, SODA 数据得到的位势密度分布与其他数据存在较大差异,东西两侧密度剖面的分叉点深度约为 1 113 m,明显比其他的数据偏浅。其原因可能是 SODA 数据

在吕宋海峡附近的南海和太平洋深层的数据与实际存在偏差,导致对深层水体体积输运估计存在较大的偏差,因而 SODA 数据不适用于水力学理论进行吕宋海峡深层水体体积输运的估计。

表 1 不同数据得到深层体积输运和南海深层水滞留时间的估计

Tab. 1 The calculation of deep water volume transport and SCS deep water residence time with different databases

| 数据     | 分叉点深度(m) | 深层密度差(kg/m <sup>3</sup> ) | 深层体积输运(Sv) | 南海深层水滞留时间(a) |
|--------|----------|---------------------------|------------|--------------|
| WOD09  | 1406     | 0.077                     | 4.1        | 14.8         |
| WOA05  | 1446     | 0.049                     | 2.4        | 25           |
| WOA01  | 1413     | 0.068                     | 3.4        | 18           |
| SODA   | 1113     | 0.077                     | 7.0        | 8.5          |
| 文献[13] | 1489     | 0.058                     | 2.5        | 24           |

### 3.2 不同选取区域的深层体积输运估计

水力学理论的体积输运估计依赖于吕宋海峡附近南海和太平洋深层的密度差异,而选取区域的不同会导致两侧密度差异存在一定的变化。为了分析水力学理论对于两侧区域选取的敏感性,在吕宋海峡东西两侧选取不同的区域,采用上文的方法,分别计算吕宋海峡的深层水体输运。从图 1 可以看出,吕宋海峡深层的水道主要呈东北-西南走向,由此在前面选择的区域 W1 和 E1 的附近又选择了 W2, W3, E2 和 E3 四个区域,基本覆盖了海峡两侧的深水区域。使用不同数据得到各个区域的平均位势密度剖面(图 4)。各数据得到结果总体上分布和前面的分析一致,在深层太平洋的密度要大于南海,太平洋一侧不同区域深层水体密度变化较小,而南海一侧不同区域深层水体密度变化较大,距离吕宋海峡深层通道出口越远密度越小,可能与深层水体进入南海后混合增强有关。不同的选取区域在海槛深度上得到东西两侧的密度差不同,导致得到深层水体体积输运存在较大变化。与上文结果相同, SODA 数据得到的剖面和其他数据存在明显差异,得到分叉点深度要比其他数据偏浅。

分别以 W1 和 E1 为海峡西东两侧的基准区域,采用其他不同区域和基准区域的温盐数据,估计深层体积输运和南海深层水的滞留时间(表 2)。不同数据得到深层体积输运为 2.4~9.4 Sv,南海深层水的滞留时间为 6.4~25.5 a,体积输运估计比观测还是偏大。与前面分析类似, SODA 数据得到体积输运结果比其他数据明显偏大,不同选取区域平均值达到了 7.6 Sv。不同数据在选取不同的区域时估计体积输运

的标准差均超过 1 Sv,选取的区域不同得到的输运结果存在较大的变化。当选取的区域包括 E2 或者 W3 时估计体积输运都会明显增大,反映了区域的选取可能对于纬度变化更加敏感,而选择更接近海峡两侧深层通道出口的区域(如 W1 和 E1)得到的输运结果更小,更接近于 Qu<sup>[13]</sup>的估计。由此可知,水力学理论对于吕宋海峡东西两侧区域的选取有较强的敏感性,不同区域温盐数据的选取会显著影响深层体积输运的大小。

## 4 结论与讨论

本次研究基于水力学理论利用 WOD09, WOA05, WOA01 和 SODA 数据对吕宋海峡深层水体体积输运进行了诊断分析,并且讨论了不同数据和不同的选取区域对于水力学理论估计深层体积输运的影响。通过位势密度的分布可以发现吕宋海峡深层水体体积输运是由太平洋进入南海,在吕宋海峡东西两侧 1 500 m 以下始终存在较强的密度差异,太平洋深层海水密度要大于南海,为深层水体体积输运提供了斜压驱动力。

不同的数据对于水力学理论得到深层体积输运的估计存在显著的影响。不同数据得到的输运结果在 2.4~7.0 Sv 之间,南海深层水滞留时间为 8.5~25 a。各数据得到的输运结果之间存在较大差异,其中 SODA 数据得到的深层体积输运显著偏大,南海深层水的滞留时间显著偏小。这是由于 SODA 数据得到的位势密度分布与其他数据存在较大差异, SODA 数据在吕宋海峡附近的南海和太平洋深层,数据存在偏差,导致过高估计了体积输运。因此 SODA 数据并不适用于水力学理论估计吕宋海峡的深层水体体积输运。

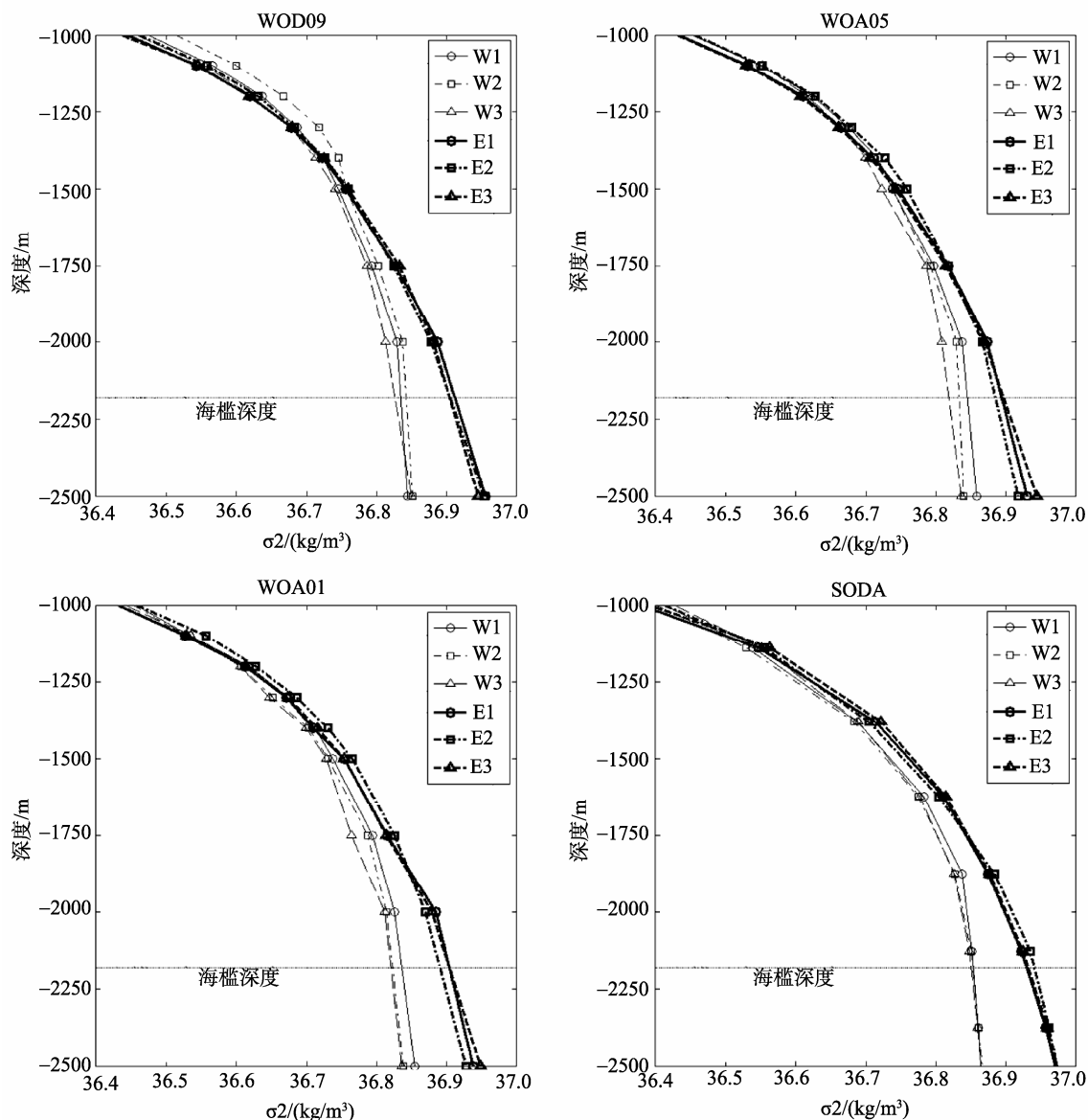


图 4 吕宋海峡两侧不同区域不同数据得到 1 000 m 以下  $\sigma_2$  剖面

Fig. 4 Vertical profiles of  $\sigma_2$  below 1 000 m on both sides of the Luzon Strait with different data regions selected from different databases

表 2 选取海峡两侧不同区域估算的深层体积输运  $Q$  和南海深层水的滞留时间  $T$

Tab. 2 The calculation of deep water volume transport( $Q$ ) and SCS deep water residence time( $T$ ) with different regions selected on both sides of the Luzon Strait

| 数据    | WOD09   |        | WOA05   |        | WOA01   |        | SODA    |        |
|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|       | $Q(Sv)$ | $T(a)$ | $Q(Sv)$ | $T(a)$ | $Q(Sv)$ | $T(a)$ | $Q(Sv)$ | $T(a)$ |
| W1/E1 | 4.1     | 14.8   | 2.4     | 25.0   | 3.6     | 16.8   | 7.0     | 8.5    |
| W1/E2 | 4.2     | 14.5   | 5.2     | 11.7   | 6.6     | 9.1    | 9.4     | 6.4    |
| W1/E3 | 3.9     | 15.4   | 2.4     | 25.5   | 4.6     | 13.1   | 7.8     | 7.7    |
| W2/E1 | 2.6     | 22.7   | 3       | 20.0   | 7.3     | 9.3    | 7.5     | 8.0    |
| W3/E1 | 5.9     | 10.0   | 4.9     | 12.4   | 7.4     | 8.1    | 6.5     | 9.3    |
| 平均值   | 4.1     | 15.5   | 3.6     | 18.9   | 5.9     | 11.3   | 7.6     | 8.0    |
| 标准差   | 1.2     | 4.6    | 1.4     | 6.6    | 1.7     | 3.6    | 1.1     | 1.1    |

在吕宋海峡东西两侧选取的不同区域对于深层水体体积输运的估计也存在显著的影响。不同选取区域之间输运结果变化较大,不同数据得到深层体积输运在 2.4~9.4 Sv,南海深层水的滞留时间为 6.4~25.5 a。不同数据在选取不同的区域时估计体积输运的标准差均超过 1 Sv,说明选取的不同区域对于深层体积输运存在显著的影响。当选取的区域包括 E2 或者 W3 时水力学理论估计的体积输运都会明显增大,反映了区域的选取可能对于纬度变化更加敏感,选取与海峡两侧深层通道出口更接近的区域,得到的体积输运结果更小,接近于 Qu 的估计。

在缺乏高质量观测的情况下,水力学理论为吕宋海峡深层水体体积输运研究提供了有效的支持。由于忽略了复杂地形和摩擦等因素的影响,水力学理论只能提供深层水体体积输运的上限,因而这里不同数据和不同选取区域得到的输运结果都比已有观测偏大。采用不同的数据,选取海峡两侧不同的区域,都对水力学理论有显著的影响,在使用过程中需要根据具体情况来分析。另外由于使用的数据时空分辨率的限制,这里所得到的研究结果存在一定的误差,进一步的研究还需要结合高质量观测数据和高分辨率的数值模式来进行。

#### 参考文献:

- [1] 杨海军, 刘秦玉. 南海海洋环流研究综述[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 364-368.
- [2] Tian Jiwei, Yang Qingxuan, Zhao Wei. Enhanced diapycnal mixing in the South China Sea[J]. J Phys Oceanogr, 2009, 39(12): 3191-3203.
- [3] 杨丽芬, 田纪伟, 谢玲玲. 南海北部陆坡区混合过程观测[J]. 海洋科学, 2008, 32(12): 10-16.
- [4] Yuan Dongliang. A numerical study of the South China Sea deep circulation and its relation to the Luzon Strait transport[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 21(2): 187-202.
- [5] Yang Qingxuan, Tian Jiwei, Zhao Wei. Observation of material fluxes through the Luzon Strait[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(1): 26-32.
- [6] Qu Tangdong. Evidence for water exchange between the South China Sea and the Pacific Ocean through the Luzon Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 21(2): 175-185.
- [7] 赵伟, 侯一筠, 乐肯堂, 等. 吕宋海峡水交换季节变化的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(6): 495-503.
- [8] 鲍献文, 鞠霞, 吴德星. 吕宋海峡 120°E 断面水交换特征[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(1): 1-6.
- [9] Liu Cho-teng, Liu Ray-jen. The deep current in the Bashi Channel [J]. Acta Oceanogr Taiwan, 1988, 20: 107-116.
- [10] Chang Ya-ting, Hsu Wei-lun, Tai Jen-hua, et al. Cold deep water in the South China Sea[J]. J Oceanogr, 2010, 66: 183-190.
- [11] Tian Jiwei, Yang Qingxuan, Liang Xinfeng, et al. Observation of Luzon Strait transport[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33, L19607, doi: 10.1029/2006GL026272.
- [12] Yang Qingxuan, Tian Jiwei, Zhao Wei. Observation of Luzon Strait transport in Summer 2007[J]. Deep-Sea Res, 2007, 57(5): 670-676.
- [13] Qu Tangdong, Girton J, Whitehead J. Deepwater overflow through Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, C01002, doi:10.1028/2005JC003139
- [14] Broecker W, Patzert W, Toggweiler J, et al. Hydrography, chemistry and radioisotopes in the southeast asian basins[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(C12): 14345-14354.
- [15] Carton J, Giese B. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation(SODA)[J]. Monthly Weather Review, 2005, 136(8): 2999-3017.
- [16] Whitehead J. Topographic control of oceanic flows in deep passages and straits[J]. Reviews of geophysics, 1998, 36(3): 423-440.
- [17] Qu Tangdong, Mitsudera H, Yamagata T. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C3): 6415-6424.
- [18] Chen-tung, Arthur C. A mid depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water[J]. Journal of Oceanography, 1996, 52: 17-25.
- [19] Whitehead J, Leetmaa A, Knox R. Rotating hydraulics of strait and sill flows[J]. Geophysical Fluid Dynamics, 1974, 6:101-125.
- [20] Wang Joe. Observation of abyssal flows in the Northern

- South China Sea[J]. Acta Oceanogr. Taiwan., 1986, 16: 36–45.
- [21] Zhang Zhengguang, Zhao Wei, Liu Qinyu. Sub-seasonal variability of Luzon Strait Transport in a high resolution global model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(3): 9-17.

## The diagnostic analysis of deep water volume transport through the Luzon Strait

WANG Zhi-yong<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHOU Chun<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, TIAN Ji-wei<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>

(1. Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

**Received:** Jan., 9, 2012

**Key words:** the Luzon Strait; volume transport; potential density; hydraulic theory; SODA

**Abstract:** Using four databases WOD09, WOA05, WOA01 and SODA, we calculated the deep water volume transport on the basis of the hydraulic theory with the potential density distribution. Ignoring friction and complex bathymetry, the result of hydraulic theory was the upper limit of the actual deep water volume transport. Both different databases and different regions on both sides of the Luzon Strait had an evident effect on the estimate of the volume transport using hydraulic theory. Some errors in the deep layer of the SODA database near the Luzon Strait lead to an obvious overestimate of the transport, which implies that SODA database do not apply to the volume transport estimate on the basis of hydraulic theory. We had a proper calculation on the deep water volume transport through the Luzon Strait which had great effects on the circulation, mixing and ecological environment in the South China Sea and had an extended discussion on the method which used the hydraulic theory to calculate the deep water volume transport.

(本文编辑: 刘珊珊)