

吕宋海峡水交换季节变化的数值研究*

赵伟^{1,2} 侯一筠¹ 乐肯堂¹ 李明悝¹ 齐鹏¹

(1.中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2.中国科学院研究生院 北京 100039)

提要 利用 POM(Princeton Ocean Model)对吕宋海峡附近的环流情况进行数值模拟, 结果表明, 吕宋海峡净流量季节变化明显, 除 5 月和 6 月为东向净流外, 全年自 7 月至翌年 4 月皆为西向净流。7 月至 11 月净流量由 1.6Sv($1\text{ Sv}=1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)持续增加至 14Sv, 12 月至翌年 4 月净流量从 13.8Sv 持续减小至 3.1Sv。年平均值为 5.7Sv。500m 以上, 秋、冬季有明显的黑潮分支进入南海, 而在春、夏季黑潮南海分支消失或者较弱。在 500m 以下, 黑潮位置由于北赤道流分岔位置的变化而发生南北移动, 从而影响黑潮深层入侵南海。作者以保持与表层流速方向相一致的最大深度为界将流场分为上下两层, 上层西向(入)流区域占据吕宋海峡南部、中部, 秋、冬季范围最大, 夏季向中部收缩, 其深度空间分布呈东浅西深结构, 在吕宋海峡入口处, 入流深度呈南北浅中间深的结构。上层东向(出)流主要分布在海峡北部, 夏季向南部扩展, 范围最大。120.75°E 断面除 9 月和 10 月外, 下层净输运量与上层反方向。9 月和 10 月上、下层净输运量皆为西向。上层年平均净流量为 -7.6Sv(这里“-”表示净流量向西, 下同), 下层为 1.8Sv。上层出入流深度随季节上下浮动范围可达数百米, 海峡中部入、出流最深可达 1800m。

关键词 吕宋海峡, 黑潮, 数值模拟

中图分类号 P731.21

吕宋海峡是联系南海与太平洋的主要通道, 太平洋水与南海水通过吕宋海峡的出入流通常被称为吕宋海峡输运。发源于吕宋岛以东的黑潮在其经过吕宋海峡时, 一部分入侵南海, 必然影响吕宋海峡输运。Wyrki(1961)指出, 通过吕宋海峡的海流在垂向上会改变方向, 其深度冬季为 300m, 夏季为 400m。后来的观测结果表明, 尽管存在很大的季节差异, 南海水在中层经吕宋海峡流出南海以补偿近表层太平洋水的流入(Chen *et al.*, 1996)。吕宋海峡输运有明显的季节变化。Qu 等(1999)根据大量历史温、盐资料进行动力计算的结果表明, 吕宋海峡上层(>400dbar)平均净输运量为 -3.0Sv, 1—2 月最大为 -5.3Sv, 6—7 月最小为 -0.2Sv。Chu 等(2000)采用 P 矢量方法分析气候态温、盐资料得到吕宋海峡年平均净输运量为 -6.5Sv, 2 月入侵最强可达 -13.7Sv, 9 月最弱为

-1.4Sv。2005 年 10 月“东方红 2 号”科学考察船在吕宋海峡进行了高精度的观测, 得到吕宋海峡净输运量为 $-6.0 \pm 3.0\text{ Sv}$ (Tian *et al.*, 2006)。

关于黑潮入侵的方式现在有很多争论。Nitani(1972)根据 CSK 调查期间所得的 GEK 观测资料及海面动力高度分布指出, 当黑潮沿吕宋岛东侧以北流进入吕宋海峡后, 约在 20°N 有一分支, 经常向西流动进入南海, 其中大部分绕暖涡顺时针流动后又流出南海回到黑潮主轴。李立等(1989, 1997)提出了“黑潮南海流套”的概念, 并于 1994 年 9 月在南海北部的海洋调查中发现从黑潮分离出来的反气旋涡旋结构。Caruso 等(2006)从卫星观测资料中得出黑潮入侵每年都有所不同。通常黑潮入侵南海会发生在吕宋海峡中部, 并且在南海东北部形成反气旋式环流。然而在某些年份, 黑潮入侵南海会发生在吕宋海峡北部, 形成气旋式入侵。

*国家自然科学基金重点基金资助项目, 90411013 号; “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目: 2006BAC03B04 号。

赵伟, 博士, E-mail: yjhou@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2006-01-04; 收修改稿日期: 2007-12-06

鉴于缺乏长时期南海北部及吕宋海峡现场观测数据,故目前该区域数值模拟成为研究的主要手段。由于计算条件的限制,以往的工作仅考虑南海及西北太平洋的局部,或者垂直方向仅考虑1.5层或者2层结构。黑潮模拟效果的优劣依赖于边界条件,特别是当考虑黑潮位置及流量季节性变化的时候,难以给出合适的边界条件,并且只考虑小区域难以模拟出来自大洋的波动或涡旋现象对南海及黑潮的影响。鉴于此,模式需要考虑全球或至少包括太平洋海盆区域。方国洪等(2002)基于MOM模式建立了一个全球大洋变网格环流模式,该模式得到的吕宋海峡年平均流量为 -6.4Sv ,最大值出现在12月为 -13.32Sv ,最小值出现在6月为 -1.16Sv 。Cai等(2005)采用LICOM全球模式模拟得到吕宋海峡年平均流量为 4.27Sv ,12月最大为 -6.16Sv ,6月最小为 -2.67Sv 。综合前人的研究方法,本文中作者利用POM,考虑 20°S 以北太平洋海盆区域,垂直方向分为15层,采用气候态月平均风应力场,模拟吕宋海峡水交换的季节性变化。由于模拟的区域较大,作者采用了可变网格以减小计算负担。

1 数值模式的建立

1.1 模式设置

本文中所采用的海洋模式为三维斜压原始方程模式POM(Blumberg *et al.*, 1987),其具有如下主要特征:

垂直方向采用 s -坐标,这对于模拟有显著地形变化的海盆内的海水运动是非常必要的;垂直混合系数由Mellor-Yamada二阶湍流闭合方案确

定(Mellor *et al.*, 1974, 1982),在一定程度上摆脱了人为因素的干扰。这套方案是基于Rotta和Kolmogorov的湍流假设;水平有限差分格式是交错的,即“Arakawa C型”差分方案;水平时间差分是显式的,而垂向差分是隐式的,后者允许模式在海洋表层和底边界层可以有很高的垂向分辨率;模式具有自由表面。

为了提高模式的计算效率,POM采用时间分裂算法。即模式的外部模(正压模)方程是二维的,限于CFL条件和外重力波波速,时间积分步长较短。内部模(斜压模)方程是三维的,限于CFL条件和内重力波波速,时间步长较长;海平面高度(SSH)和垂向平均速度在正压模方程中计算得到,而各层密度和速度通过斜压模方程来求得。两种模通过如下方式耦合,正压模为斜压模提供海面压力梯度项,斜压模为正压模提供底摩擦应力项以及水平扩散项和内压力梯度项。这样,在正压模方程中也包含了斜压效应。

模式包含完整的热力学过程,采用静力近似和Boussinesq近似,此模式是原始方程模式。

本文中模式区域(图1)为 20°S — 60°N , 100°E — 70°W ,水平方向为非均匀网格。在区域(100°E — 140°E , 0° — 32°N)内,格距为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。从 20°S 到 0° ,经向格距从 2° 到 0.25° 线性变化;从 32°N 到 60°N ,经向格距从 0.25° 线性增加到 2° ;从 140°E 到 70°W ,纬向格距从 0.25° 线性增加到 2° ,水平格点总数为 250×216 (Lon/Lat)。模式垂直方向分为15层,最大水深为2500m。模式中外部模的时间步长取60s,内部模的时间步长为1800s。

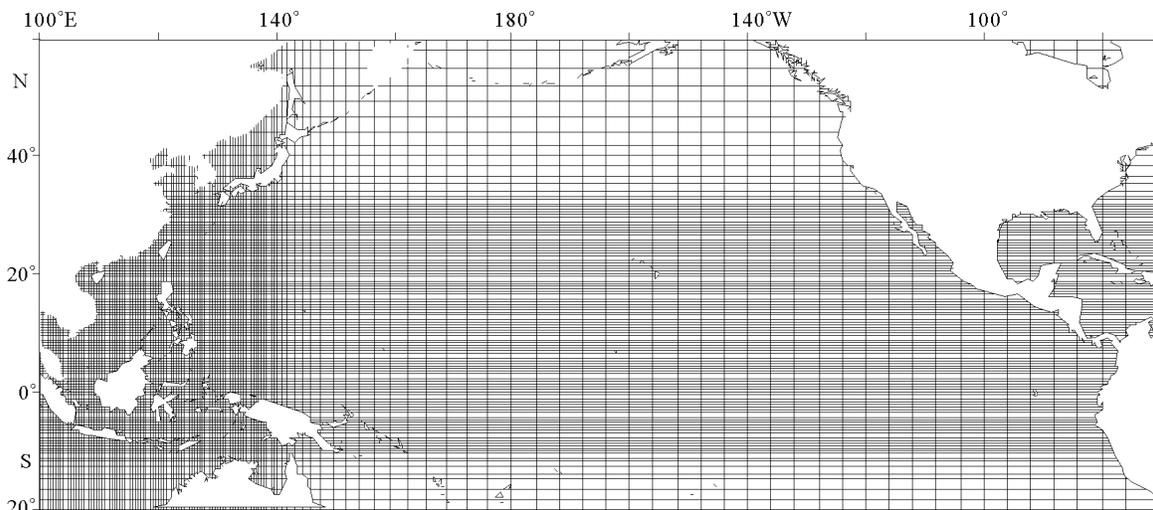


图1 模式计算区域及网格划分

Fig.1 The model's variable grid

1.2 海面边界条件

海面风应力采用 Hellerman 等(1983)气候月平均风应力场,分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$, 经最优内插法插值到模式所需的网格点上。海表面边界条件采用 World Ocean Atlas 2001 (WOA01) (Boyer *et al.*, 2004)气候月平均表层(0m)温、盐资料,精度为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

1.3 侧边界条件

模式的东边界为大陆,西边界赤道以北部分为大陆,取闭边界;西边界赤道以南部分和模式北边界由于距离研究的区域较远,将其封闭对计算结果不会有较大影响;南边界位于 20°S , 接近年平均风应力旋度的零线位置,因此可近似认为穿过这个纬带的经向质量输送为零。这样,作者取整个模式区域为封闭边界。

1.4 初始条件

选用 World Ocean Atlas 2001 (WOA01) (Boyer *et al.*, 2004)气候年平均温、盐资料作为模式输入的初始场。

1.5 积分方案

模式在逐月气候平均风应力驱动下连续积分4年后基本达到稳定,将第4年模式结果逐月平均并保存。

2 模拟结果检验

2.1 年平均流函数分布

流函数定义 ψ 如下:

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

式中 u, v 分别是东西向、南北向速度分量。

从图2可以看出,北太平洋的主要流系都得

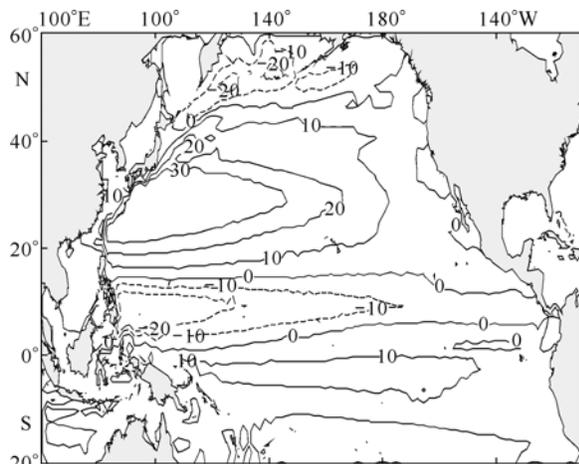


图2 年平均流函数 ψ (单位: Sv, 等值线间隔: 10Sv)

Fig.2 The annual mean stream function ψ (Unit: Sv, Contour interval is 10Sv)

到很好的体现,而且当北赤道流在 15°N 附近,吕宋岛以东分成南北两支,北上的分支黑潮和南下分支棉兰老流(Mindanao Current)流量均与观测结果相符合。

2.2 吕宋海峡断面流量的季节变化

模式模拟结果表明,吕宋海峡净流量具有明显的季节变化特征,除5月和6月为东向净流外,全年自7月至翌年4月皆为西向净流。7—11月净流量由 1.6Sv 持续增加至 14Sv , 12月至翌年4月净流量从 13.8Sv 持续减小至 3.1Sv 。年平均净流量为 -5.7Sv 。模式计算结果与历史观测结构符合较好(Qu *et al.*, 1999; Qu, 2000; Chu *et al.*, 2000; Tian *et al.*, 2006), 也与其他学者(方国洪等, 2002; Cai *et al.*, 2005)的模拟结果相当接近。

3 吕宋海峡附近流场结构

3.1 水平流场

50m层(图3)、100m层(图略)、200m(图略)层流场表明,冬季,北上黑潮的一部分进入吕宋海峡后流向西北,在 119°E 附近发生分岔,其中一支先向西,然后沿大陆架坡折向西南流动深入南海,形成黑潮南海分支;另外一支向北做顺时针偏转后流出南海,形成流套。春季,黑潮南海分支已经消失,黑潮流套的形态较冬季有所收缩。夏季,黑潮南海分支消失,黑潮流套明显。秋季,黑潮南海分支重新形成,黑潮流套依旧明显。

500m层(图4)流场表明,冬季,北上黑潮的一部分进入吕宋海峡后流向西北,做顺时针旋转后离开南海。春季情况与冬季类似,只是流套较冬季收缩。夏季,北赤道流分岔纬度北移至 21.5°N 。此时,西行的北赤道流并没有进入南海,而是在 124°E 附近分成北上的分支即黑潮和南下分支。南下分支在吕宋岛东北转向北并入吕宋海峡以西的反气旋结构中。在此反气旋结构的南侧存在一支西向流,但其并没有深入南海。秋季,北赤道流分岔纬度回到 16°N 附近,北上黑潮的一部分进入吕宋海峡后流向西北,然后偏向西或西南,沿大陆架坡折进入南海,向西可达 113°E 。在吕宋海峡以西存在反气旋涡旋。

800m层(图5)流场表明,冬季,北上的黑潮基本没有分支入侵南海。春季,北赤道流分岔纬度北移至 22°N 附近,南下分支的一部分在吕宋岛东北转向西北,在 19°N 附近转向西进入吕宋

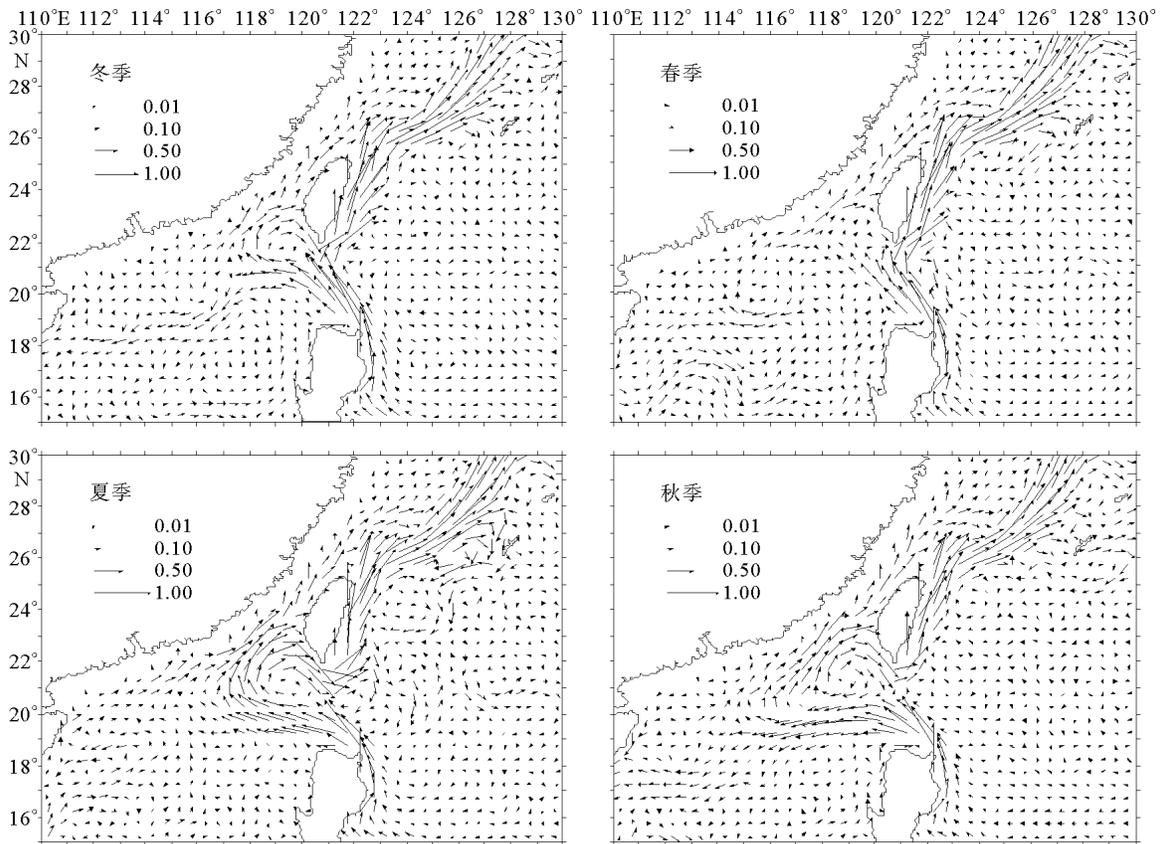


图3 50m层流场(m/s)季节变化

Fig.3 Seasonal mean velocity vectors(m/s) at the depth of 50m

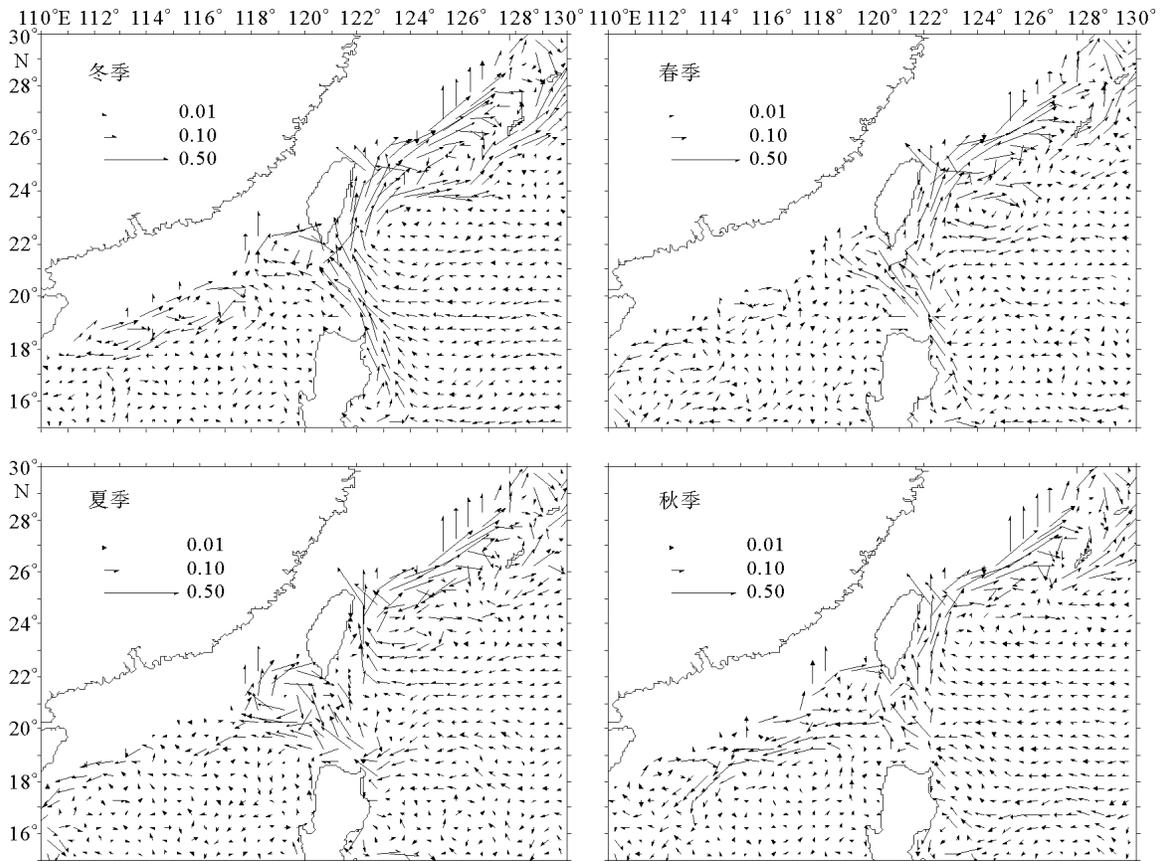


图4 500m层流场(m/s)季节变化

Fig.4 Seasonal mean velocity vectors(m/s) at the depth of 500m

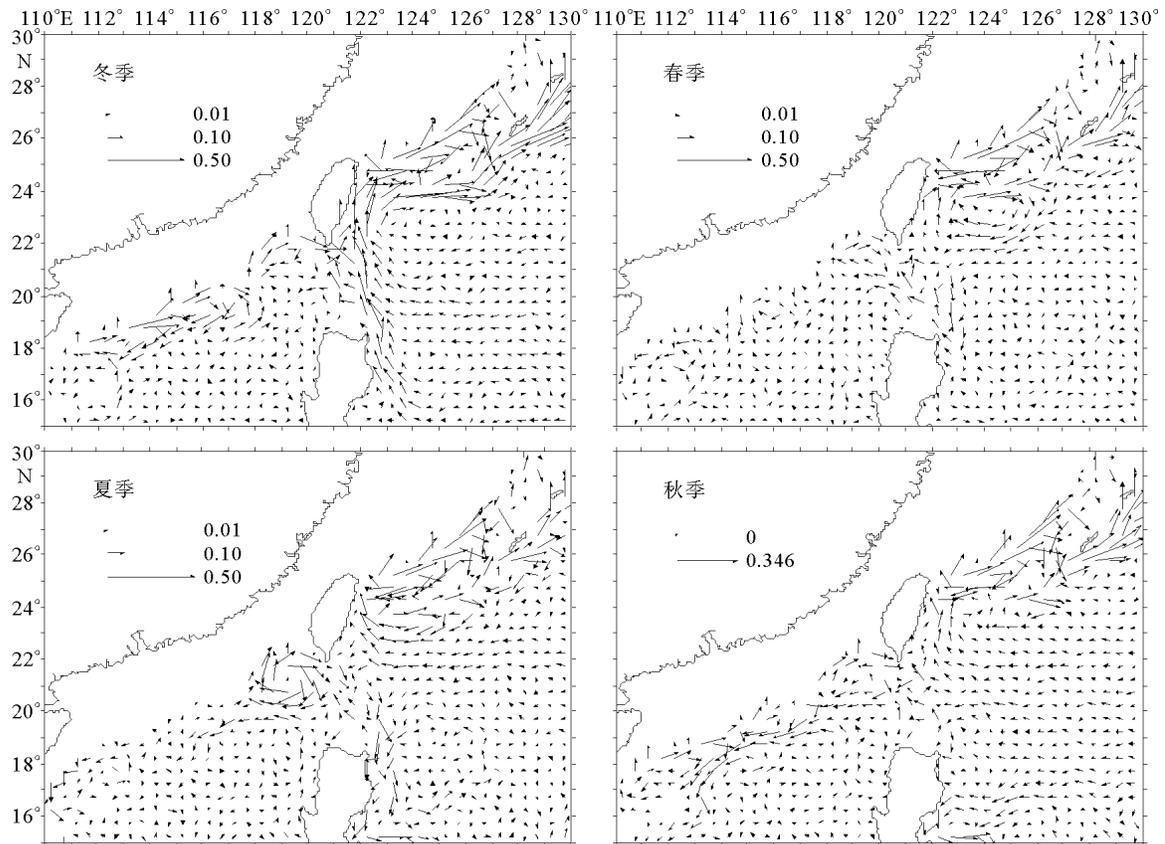


图5 800m层流场(m/s)季节变化

Fig.5 Seasonal mean velocity vectors(m/s) at the depth of 800m

海峡, 然后转向北并入吕宋海峡以西的反气旋结构中。夏季, 北赤道流分岔纬度在 21.5°N 附近, 没有明显的流入侵南海。在吕宋海峡以西的反气旋涡结构依然很明显。秋季, 北赤道流分岔纬度位于 21°N , 无明显的流入侵南海。

上述结果表明, 黑潮水通过吕宋海峡进入南海依赖于深度。500m以上, 秋、冬季有明显的黑潮分支进入南海, 而在春、夏季黑潮南海分支消失或者较弱。700m以下, 由于北赤道流分岔位置向北最远可达 22°N (Qu *et al.*, 2003), 黑潮位置随之北移, 黑潮对吕宋海峡运输的影响减弱。而此时, 北赤道流的南下分支也有可能沿吕宋岛东北入侵南海。

3.2 吕宋海峡垂向流场结构

Qu(2000)通过分析历史水文数据, 发现在盐度最大值层(120—170m), 北太平洋水全年都通过吕宋海峡入侵南海; 而在盐度最小值层(480—600m), 北太平洋水只在春季进入南海。为了分析模式模拟的吕宋海峡水交换的垂向流场结构, 作者以与表层纬向流速方向相一致的最大深度为界将流场分为上、下两层, 并将此深度定义为变号深度。图6给出了上层西向(入)流变号深度随季

节变化情况。图7给出上层东向(出)流变号深度随季节性变化情况。表1给出了吕宋海峡上、下层净运输的情况。

由图6中可以看出, 西向(入)流区域占据吕宋海峡南部、中部较大范围, 西向(入)流深度空间分布呈东浅西深结构, 在吕宋海峡入口处, 入流深度呈南北浅中间深的结构。入流深度分布的这种结构一方面与吕宋海峡地形有较大关系; 另一方面, 这种结构季节变化较为明显, 春、夏季较冬、秋季向中部收缩。在吕宋海峡入口处, 冬、春季入流深度最深可达1600m, 位于海峡中部。夏、秋季入流深度最深为1100m。吕宋海峡以西, 入流深度随地形的起伏而变化。入流深度分布冬、秋季较春、夏季, 南北距离加大, 其中在秋季可以看到入流深度最大值区域明显分为南北两部分。

从图7中可以看出, 上层东向(出)流主要分布在海峡北部, 夏、秋季较冬、春季东向(出)流范围向海峡中部、西部扩大。夏季东向(出)流范围最大, 变号深度最深, 深度超过1400m。春、夏季海峡南部及西南部也有东向流存在。

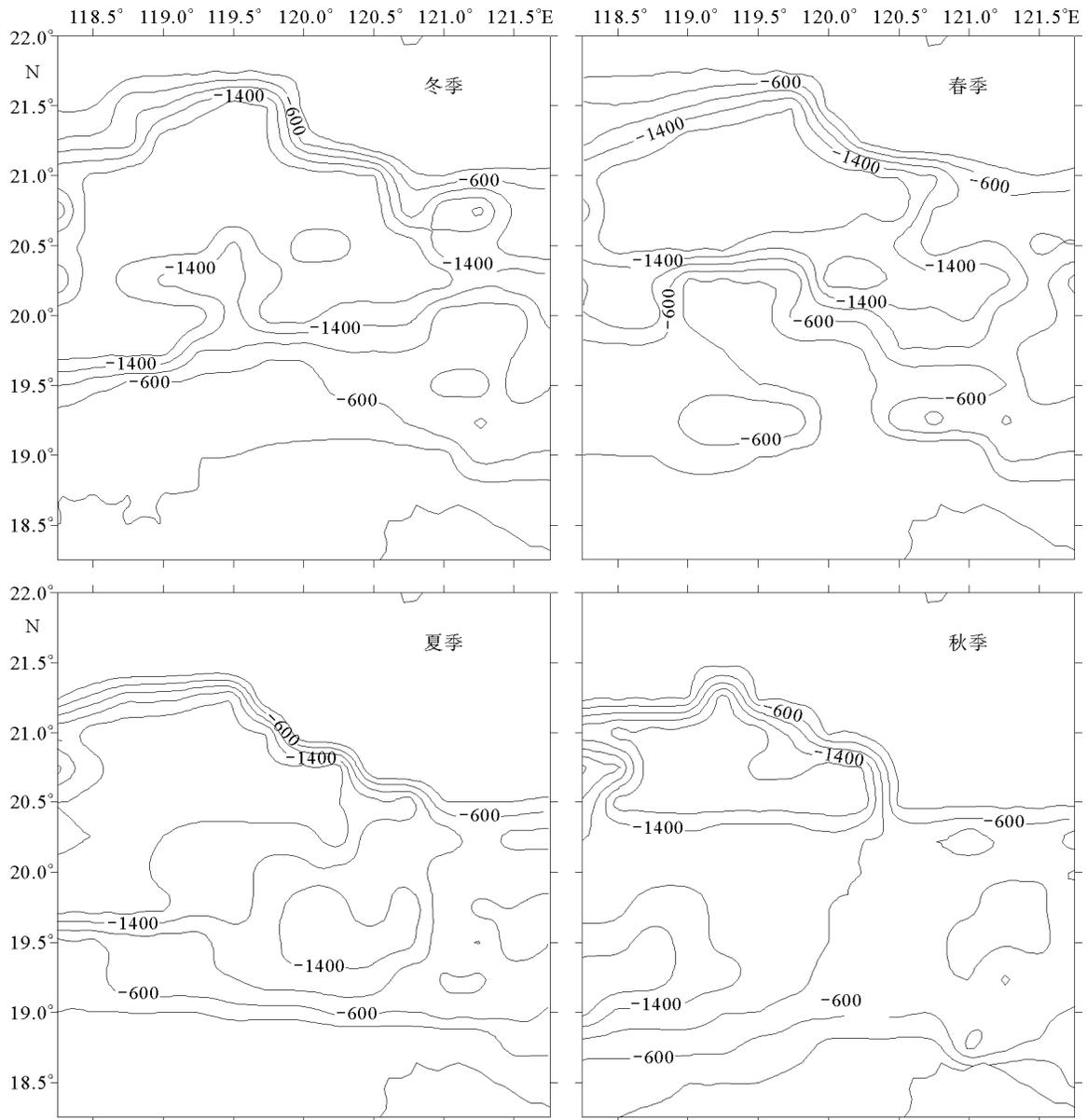


图6 西向(入)流变号深度(m)的季节变化(等值线间隔: 400m)

Fig.6 Mean seasonal sign-changing depth (m) of the westward velocities (inflow)(Contour interval is 400m)

3.3 120.75°E 断面变号深度与上下层流量的季节变化

从模拟得到的纬向流变号深度的季节变化(图 8a, b)可见, 上层入流主要分布在海峡南部与中部, 出流分布在海峡北部。上层入流或出流深度变化一方面受海峡深度限制, 另一方面入流与出流的深度随季节变化上下浮动可达数百米。就同一时间来说, 入流与出流并不局限在 500m 以浅, 而是随地形的变化上下起伏, 最深可达 1800m。

表 1 给出了 120.75°E 断面上、下层通过吕宋海峡的月平均净流量。上层除 8 月外净流量均向西, 冬、春季较夏、秋季净流量大。12 月净流量最大为 16.2Sv, 8 月净流量最小为 0.2Sv。下层

净流量除 8—10 月外均向东, 9 月净流量向西最大为 2.8Sv, 2 月净流量向东最大为 6.5Sv。

4 结果与讨论

(1) 吕宋海峡净流量季节变化明显, 年平均净流量为 -5.7Sv。

(2) 黑潮对吕宋海峡运输的影响依赖于深度。500m 以上, 秋、冬季有明显的黑潮分支进入南海, 而在春、夏季黑潮南海分支消失或者减弱。在 500m 以下, 黑潮位置由于北赤道流分岔位置的变化而发生南北移动, 从而影响黑潮入侵南海。

(3) 根据作者定义的分层规则发现, 上层西向(入)流占据吕宋海峡南部、中部区域, 秋、冬季范围最大, 夏季向中部收缩, 范围最小, 其深度

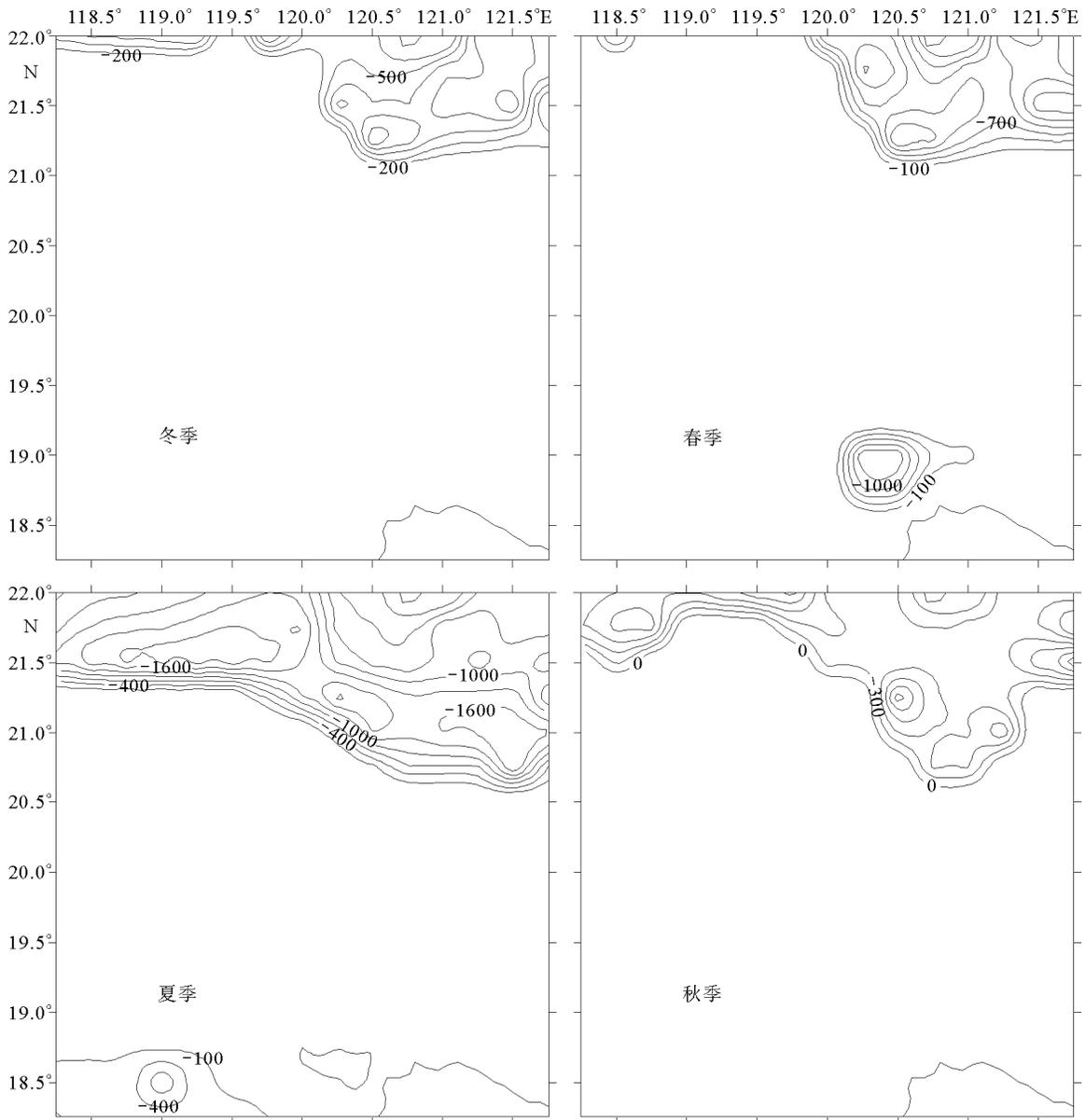


图7 东向(出)流变号深度(m)的季节变化(等值线间隔: 300m)

Fig.7 Mean seasonal sign-changing depth (m) of the eastward velocities (outflow) (Contour interval is 300m)

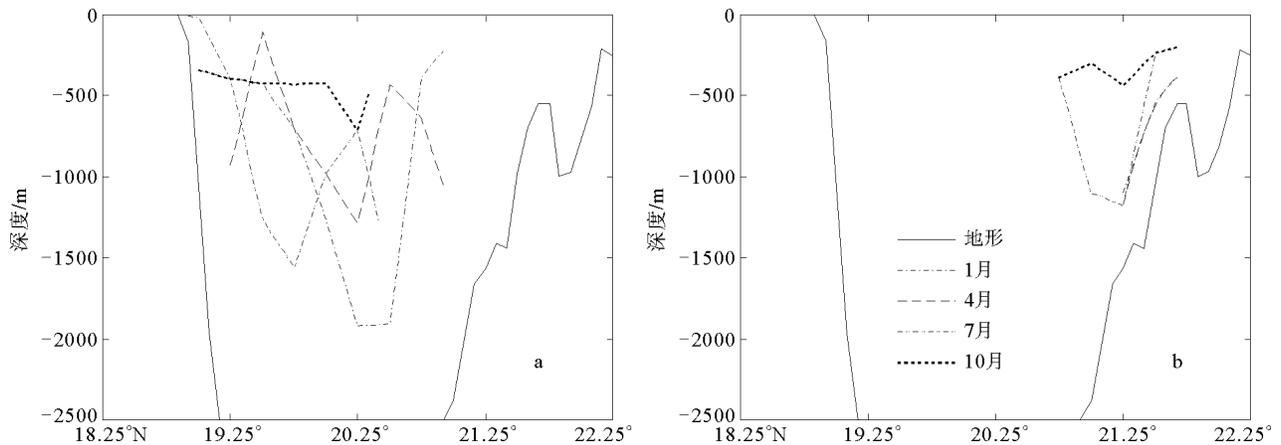


图8 120.75°E 断面入流(西向)变号深度(m)的季节变化(a)与 120.75°E 断面出流(东向)变号深度(m)的季节变化(b)

Fig.8 Mean seasonal sign-changing depth (m) of the (a) westward velocities (inflow) and (b) eastward velocities on the 120.75°E section

表1 120.75°E断面上、下层流量(单位: Sv; 负号表示流入南海)值

Tab.1 The volume transport of the 120.75°E section on the upper layer and lower layer(The “-” sign indicates flow into the SCS; Unit: Sv)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
上层	-12.8	-13.6	-9.6	-6.7	-3.1	-2.4	-2.0	0.2	-1.1	-8.5	-15.3	-16.2	-7.6
下层	3.3	6.5	3.9	3.4	3.9	3.0	0.4	-2.6	-2.8	-0.8	1.3	2.3	1.8
总计	-9.5	-7.1	-5.7	-3.1	1.0	0.9	-1.6	-2.4	-3.9	-9.2	-14.0	-13.8	-5.7

空间分布呈东浅西深结构,在吕宋海峡入口处,入流深度呈南北浅中间深的结构。上层东向流主要分布在海峡北部,夏季向南部扩展,范围最大。120.75°E断面除9月和10月外,下层净输运量与上层反方向。9月和10月上、下层净输运量皆为西向。上层年平均净流量为-7.6Sv,下层为1.8Sv。其中上层出入流深度随季节上下浮动范围可达数百米,海峡中部最深可达1800m。

(4) 本模式关于吕宋海峡流量的计算结果与历史观测结果比较一致,也与其他作者的数值模式结果相符。但由于影响模式结果的因素很多,故计算结果并不唯一,今后有待于通过与实测值尤其是与长期观测值的比较对模式的模拟效果予以进一步完善。

参 考 文 献

- 方国洪,魏泽勋,崔秉昊等,2002. 中国近海域际水、热、盐输运:全球变网格模式结果. 中国科学(D辑), 32(12), 969—977
- 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
- 李立,苏纪兰,许建平,1997. 南海的黑潮分离流环. 热带海洋, 16(2): 42—57
- Blumberg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. AGU, Washington, D C, 4: 1—16
- Boyer T, Levitus S, Garcia H *et al*, 2005. Objective analyses of annual, seasonal, and monthly temperature and salinity for the world ocean on a 0.25° Grid. *Int. J. Climatol*, 25: 931—945
- Cai Shuqun, Liu Hailong, Li Wei *et al*, 2005. Application of LICOM to the numerical study of the water exchange between the South China Sea and its adjacent oceans. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(4): 10—19
- Caruso M J, Gawarkiewicz G G, Beardsley R C, 2006. Inter-annual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea. *J. Oceanogr*, 62(4): 559—575
- Chen C-T, Huang M H, 1996. A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water. *J. Oceanogr*, 52(1): 17—25
- Chu P C, Li R, 2000. South China Sea isopycnal-surface circulation. *J. Phys. Oceanogr*, 30(9): 2419—2438
- Hellerman S, Rosenstein M, 1983. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr*, 13(7): 1093—1104
- Mellor G L, Yamada T, 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci*, 31: 1791—1806
- Mellor G L, Yamada T, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys*, 20: 851—875
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K ed. *Kuroshio. Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle: University of Washington Press, 129—163
- Qu T, 2000. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea. *J. Geophys. Res*, 105(C3): 6415—6424
- Qu T, Lukas R, 2003. The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific. *J. Phys. Oceanogr*, 33 (1): 5—18
- Qu T, Mitsudera H, Yamagata T, 1999. A climatology of the circulation and water mass distribution near the Philippine coast. *J. Phys. Oceanogr*, 29(7): 1488—1505
- Tian J, Yang Q, Liang X. *et al*, 2006. Observation of Luzon Strait transport, *Geophys. Res. Lett*, 33 L19607, doi: 10.1029/2006GL026272
- Wyrtki K, 1961. *Physical oceanography of the southeast Asian waters*, La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 1—195

NUMERICAL STUDY ON SEASONAL VARIATION OF WATER EXCHANGE IN THE LUZON STRAIT

ZHAO Wei^{1,2}, HOU Yi-Jun¹, LE Ken-Tang¹, LI Ming-Kui¹, QI Peng¹

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039*)

Abstract The Princeton Ocean Model (POM) was used to simulate the seasonal variation of water exchange in the Luzon Strait. The model domain covers the North Pacific (20°S—60°N, 100°E—70°W) with closed boundaries. A variable horizontal grid was set up with the finest grid of 0.25° in the South China Sea (SCS). It is found that the Luzon Strait Transport (LST) has seasonal variations. Except for the eastward LST in May (1.0Sv) and June (0.9Sv), westward LST dominates from July to the next April. The LST increases rapidly from July (1.6Sv) to November (14.0Sv), and decreases from December (13.8Sv) to the next April (3.1Sv). In the depth above 500m, a clear branch of the Kuroshio intrudes the SCS from winter to spring; and this branch disappears from summer to fall. Below 500m, the Kuroshio affects the LST less significantly because the bifurcation latitude of the North Equatorial Current moves northward. Furthermore, we divided the velocity field of Luzon Strait into upper and lower layers at the depth at which the flow direction remains the same to the surface one. We called it the sign-changing depth. In the upper layer, the inflow of the northern SCS occupies the west and middle parts of the Luzon Strait, while the outflow (eastward), the northern part. In autumn and winter the area of the inflow in the upper layer is the largest. In summer the area of the inflow contracts to the middle, while the area of the outflow extends southward. The sign-changing depth is shallower in the east, but deeper in the west. Considering the 120.75°E section in the Luzon Strait, in the upper layer, the direction of net LST is westward in almost all year except August with the maximum LST (16.2Sv) in December. In the lower layer however, the direction of the net LST is westward only from August to October. The annual mean net transport is -7.6Sv in the upper layer and 1.8 Sv in the lower layer (“-” indicates the net LST is to the westward). The sign-changing depth varies seasonally to an extent of several hundred meters with the maximum depth near 1800m in the middle of the section. The model results are consistent with historical observations in the Luzon Strait.

Key words Luzon Strait, Kuroshio, Numerical simulation