

南海南部与外海间的体积和热、盐输运及其对印尼贯穿流的贡献*

方国洪 魏泽勋 黄企洲[†] 方文东[‡]

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

[†](中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

提要 根据中国近海高分辨率(1/6)环流模式的模拟结果,计算了南沙邻近海域与外海之间的海水体积、热量和盐量输运及其对印度尼西亚贯穿流的贡献。研究海域为 0° — 14° N 的整个南海南部海域。计算得出,穿过研究海域流向印度尼西亚海域,最终流向印度洋的年平均体积、热量和盐量输运分别为 $5.2Sv$ ($1Sv = 1 \times 10^6 m^3 \cdot s^{-1}$)、 $0.57PW$ 和 $184Gg \cdot s^{-1}$,大约占印度尼西亚贯穿流相应输运量的1/4。这一结果表明南海是全球大传送带这一全球海洋最主要热盐环流系统的重要通道之一。从南海流向印度尼西亚海域的通道以卡里马塔海峡为最主要,以下依次为巴拉巴克海峡、民都洛海峡和马六甲海峡。大的南向通量主要发生在冬、秋季,春末夏初总的通量向北。计算还得出输入本海区的热输运量比输出少 $0.064PW$,由这一结果推得,通过海-气界面由大气进入海洋的年平均净热通量约为 $30W \cdot m^{-2}$ 。

关键词 南海南部, 体积输运, 热输运, 盐输运, 印度尼西亚贯穿流

中图分类号 P 732

南海作为热带海洋的一部分对气候有重要影响(丁一汇等, 1999)。近年来,已有若干研究表明,南海对印度尼西亚贯穿流(Indonesian Throughflow)亦有重要贡献(Metzger *et al.*, 1996; Lebedev *et al.*, 2000)。因而南海在全球气候系统中起着一定的作用。一方面它通过海面水、热交换影响大气;另一方面,它通过对印度尼西亚贯穿流而对全球热盐大传送带有所贡献。因此,研究南海与外海的水量、热量和盐量的交换并进一步估算海-气界面的水、热交换十分有意义。

Metzger 等(1996)模式一个主要缺点是它在模式中排除或部分排除了水深小于200m的陆架部分,因而作为南海南部与外海的主要通道卡里马塔海峡未被恰当地模拟,从而由吕宋海峡进入南海的水体主要通过民都洛海峡流向印度尼西亚群岛,这显然不符合实际。Lebedev 等(2000)模式包括了陆架区,因而比Metzger 等(1996)合理,不过其结果显示卡里马塔的输运差不多终年向南,这与实际观测结果不一致(Wyrtki, 1961)。此外,这两项工作只研究了体积输运,没有给出热、盐输运和平衡的估计。本文试图在数值模式方面作出改

* 国家重点科技专项, 97- 926- 05- 01号;国家重点基础发展规划项目, G1999043808号;国家自然科学基金资助项目, 49876010号;中国科学院知识创新工程项目, KZCX2-202A号。方国洪,男,出生于1939年12月,研究员,博士生导师, Email: ghfang@ms. qdio. ac. cn

收稿日期: 2000- 11- 18, 收修改稿日期: 2001- 04- 23

进,并用模式结果研究南沙邻近海域,即对南海南部与外部的交换特征,作出初步量值估计。

1 数值模式概述

本研究发展了一个近海高分辨率与全球低分辨率嵌套的模式。近海部分的分辨率为 $1/6^\circ$,包括了南海、渤、黄、东海和日本海;全球部分最低分辨率为 3° 。高分辨率和低分辨率区域之间为分辨率逐渐变化的过渡区(图 1)。垂直方向分 15 层,近海面处最密(25m),向下逐渐变稀。

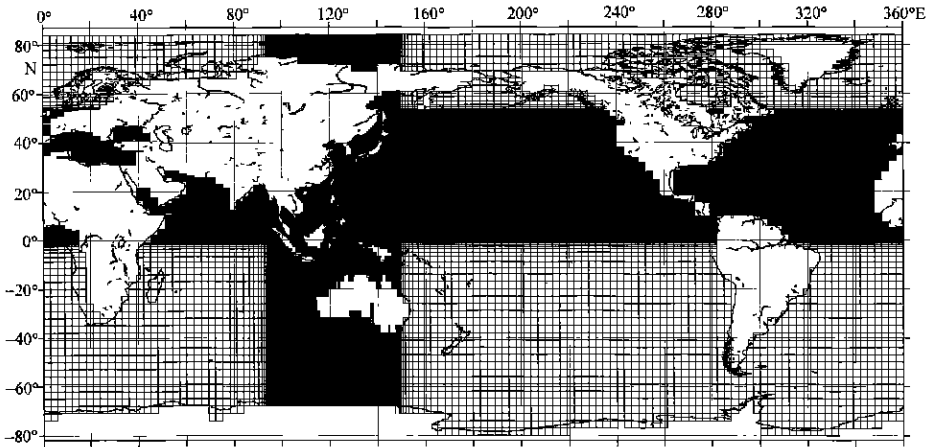


图 1 中国近海高分辨率($1/6^\circ$)网格和全球低分辨率(3°)网格嵌套的计算网格图

Fig. 1 Model grid with fine resolution ($1/6^\circ$) covering the seas adjacent to China and coarse resolution(3°) covering the global ocean

本研究关注的海域是南沙邻近海域,因而以 14°N 纬线将南海分为南、北两部分。这样划分的目的是为了把与南沙群岛有紧密关系的民都洛海峡包括在研究海区之内。这样,除民都洛海峡之外,研究海区还通过巴拉巴克海峡与苏禄海相通;通过卡里马塔海峡与爪哇海相通;此外,还有马六甲海峡与安达曼海相通(图 2)。这些海峡最终通向印度洋。

环流数值模式采用美国 Princeton 大学地球流体动力学实验室发展的 MOM2。该模式的设计原理见 Semtner (1986)。

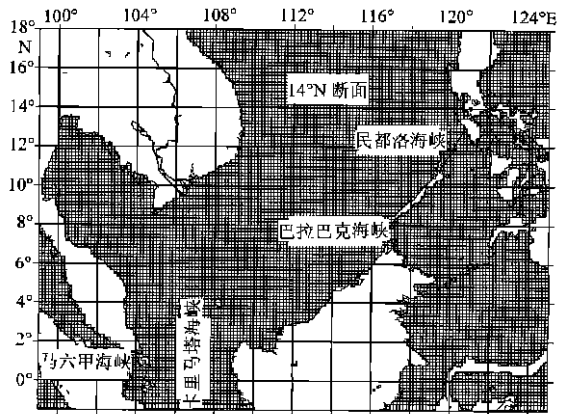


图 2 南海南部海域网格及其与外海的通道

Fig. 2 Model grid of the southern South China Sea and cross sections connecting outer oceans

由于缺乏高分辨率的海洋观测资料,研究中采用了 Levitus 等(1994a, b)的 1° 分辨率的

逐月气候平均资料并内插到 $1/6^\circ$ 分辨率的格点上。内插得出数值的一个主要缺点是它的空间变化过于平滑,不能反映网格尺度的变化。因此在计算中,内插得出的温、盐分布仅作为初始场,通过预测方式计算,逐渐使温、盐、流场调整到与网格尺度相匹配的状态。计算中海面动量交换由 Helleman 等(1983)的气候式风应力场给定,海面热量和水汽交换则通过使模式最上层向 Levitus 等(1994a、b)平均海表温度和盐度值趋近的方式来确定。

本研究用上述模式进行了6年积分,最后两年结果的比较表明此时模拟已达到了稳定的年周期变化。最后1年的各月平均场结果用于分析。图3示出南海1月和7月的流函数分布,其结构与 Fang 等(1998)给出的格局基本一致。海面高度计算结果与根据卫星高度计得出的格局亦较一致(李立等,2000;王东晓等,2001)。

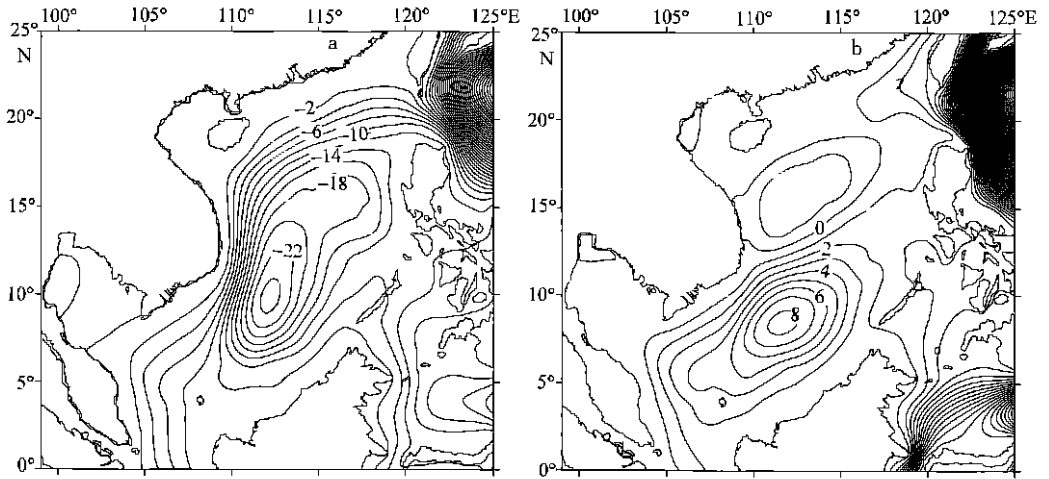


图3 计算所得南海1月(a)和7月(b)的流函数分布图(单位: Sv)

Fig. 3 Model-produced stream function of the South China Sea for January (a) and July (b) (in Sv)

2 体积输运

通过某一断面的体积输运由断面各网格面积和垂直该网格的流速分量乘积之和给出:

$$V = \sum_i A_i v_{ni} \quad (1)$$

其中, A_i 为断面上第 i 个网格的面积, v_{ni} 为该网格法向流速分量的平均值, \sum_i 代表对该断面所有网格求和。计算所得各断面的体积输运值如表1所示,单位 $1\text{Sv} = 1 \times 10^6 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表1 各断面体积输运值(Sv)

Tab. 1 Volume transports through the various cross sections(Sv)

月份	14°N 断面	民都洛海峡	巴拉巴克海峡	卡里马塔海峡	马六甲海峡
1	- 11. 31	0. 37	1. 73	8. 07	1. 14
2	- 8. 31	- 0. 15	0. 92	6. 56	1. 00
3	- 5. 21	- 0. 47	0. 40	4. 50	0. 79
4	- 2. 07	- 0. 64	0. 13	2. 14	0. 46

续表

月份	14°N 断面	民都洛海峡	巴拉巴克海峡	卡里马塔海峡	马六甲海峡
5	0.47	-0.64	0.01	0.08	0.09
6	1.56	-0.39	0.27	-1.29	-0.14
7	0.49	0.38	1.20	-1.88	-0.19
8	-0.99	0.55	1.44	-0.93	-0.08
9	-3.79	0.65	1.73	1.21	0.20
10	-7.97	0.90	2.44	4.04	0.59
11	-12.23	1.33	3.07	6.86	0.95
12	-13.59	1.13	2.91	8.40	1.14
年平均	-5.25	0.25	1.35	3.15	0.50

注:流出为正;流入为负(表2表3同)

由表1可看到,从全年平均值来看,有5.25Sv体积输运通过14°N断面进入南沙邻近海域。这些流量通过4个海峡流向印度尼西亚海域,最终进入印度洋。Wei等(2001)计算曾得出印度尼西亚贯穿流的体积输运平均约为20Sv,因此作为全球海洋大输送带的一部分,通过南海向印度尼西亚贯穿流的流量约占贯穿流总输运值的1/4。由表1还可看到流入和流出的年平均输运是相等的,这表明所得数值解满足体积守恒要求,而且达到稳定年变化状态。

从通过印度尼西亚海域的4个出口的输运量分配来看,卡里马塔海峡为主要通道,出流量占了一半以上。这个结果与Metzger等(1996)的结果是十分不同的,Metzger等的模式中排除或部分排除了陆架部分,南海主要只有吕宋海峡和民都洛海峡与外海相通,从吕宋海峡进入的海流主要通过民都洛海峡流出。

另外,本文得出卡里马塔海峡6—8月为北向流,最大输运量接近2Sv。与Wyrki(1961)估计值相比较,本文结果比Lebedev等(2000)的更符合实际,Lebedev等计算的夏季流量显著偏小(<0.5Sv)。

从季节分配来看,冬季输运值大,可超过10Sv。这显然是中国东南近海的东北季风起了主导作用。冬季也正是印度尼西亚贯穿流较弱的期间,在这期间,通过南海的输运占到贯穿流输运的80%左右。在春末夏初(5—7月)则海流的输运方向相反,不过这段时间比较短。因此可以推断,不同季节里,印度尼西亚海域的海流状况应当有相当大的差异。

3 热输运和热平衡

通过一断面的热输运由下式计算:

$$H = \sum_i c_p A_i v_{ni} \rho_i T_i \quad (2)$$

式中, c_p 为海水定压比热, ρ_i 和 T_i 为断面上第*i*个网格的平均密度和温度。由模式结果计算所得各断面的热输运如表2所示。

由表2可看到,热输运的季节变化特征和各断面的分配情况均与体积输运相近。从卡里马塔等4个海峡流向印度尼西亚水域的年平均总热输运量为0.568PW,也大约相当于印度尼西亚贯穿流热输运量的1/4(Wei *et al.*, 2001)。

表 2 各断面热输运值(PW)

Tab. 2 Heat transport through the various cross sections(PW)

月份	14°N 断面	民都洛海峡	巴拉巴克海峡	卡里马塔海峡	马六甲海峡
1	- 1.096	0.012	0.178	0.885	0.127
2	- 0.815	- 0.034	0.094	0.721	0.110
3	- 0.467	- 0.063	0.041	0.501	0.088
4	- 0.156	- 0.073	0.014	0.239	0.052
5	0.124	- 0.067	0.003	0.006	0.011
6	0.242	- 0.037	0.033	- 0.153	- 0.016
7	0.136	0.047	0.137	- 0.222	- 0.022
8	- 0.061	0.062	0.164	- 0.111	- 0.010
9	- 0.448	0.065	0.194	0.137	0.024
10	- 0.919	0.078	0.272	0.468	0.068
11	- 1.262	0.110	0.332	0.788	0.110
12	- 1.326	0.084	0.304	0.934	0.130
年平均	- 0.504	0.016	0.147	0.349	0.056

对于所研究的南沙邻近海域, 输出的热输运值比输入的热输运值大 0.064PW。或者说, 输出比输入大 13%, 这与体积输运有所不同。这是由于输出各断面处于输入断面(14°N)的南方且水深较浅, 海水温度比输入断面高, 因此在输出和输入的体积输运相同情况下, 输出的热量要比输入的多。这种不平衡必须由海面热交换来补充, 也就是说必须有同样多的热通量通过海面进入海水。这意味着, 在研究海区, 太阳辐射和空气向海洋的感热通量要大于海洋的长波辐射和蒸发潜热损失, 亦即, 海洋获得净热通量。所研究海区的面积大约为 200 万 km², 因海面净热收入为 0.064PW, 可以得出单位面积的净热通量约为 30W·m⁻²。王东晓等(1997)曾给出过南海部分海区的海面热交换, 在南海南部净热通量数值与这里从海洋热输运收支得出的结果大体一致。

4 盐输运和盐量平衡

通过某一断面的盐输运由下式确定:

$$S = \sum_i v_{ni} \rho S_i \quad (3)$$

式中, S_i 为网格 i 的平均盐度。由模拟结果计算所得的各断面盐输运如表 3 所示。由表 3 可见通过本海区向印度洋输送的盐通量约为 184Gg·s⁻¹。流入和流出本海区的盐通量基本持平。这显示本海区通过径流和降水的淡水输入与通过蒸发的淡水输出基本平衡。

表 3 各断面盐运输值($Gg \cdot s^{-1}$)Tab. 3 Salt transports through the various cross sections($Gg \cdot s^{-1}$)

月份	14°N 断面	民都洛海峡	巴拉巴克海峡	卡里马塔海峡	马六甲海峡
1	- 395.8	12.9	60.7	282.4	40.0
2	- 290.9	- 5.2	32.1	229.5	34.9
3	- 182.2	- 16.5	14.1	157.6	27.5
4	- 72.5	- 22.4	4.6	74.7	16.0
5	16.4	- 22.4	0.5	2.9	3.2
6	54.6	- 13.7	9.5	- 45.1	- 4.8
7	17.3	13.1	41.9	- 65.8	- 6.5
8	- 34.7	19.4	50.6	- 32.4	- 2.9
9	- 132.7	22.9	60.4	42.3	7.1
10	- 278.9	31.6	85.3	141.2	20.5
11	- 428.0	46.6	107.5	240.2	33.2
12	- 475.5	39.6	101.7	293.9	39.9
年平均	- 183.6	8.9	47.4	110.1	17.3

5 结语

本文利用一个高分辨率数值模拟结果计算了通过南沙邻近海域(本研究中即 14°N 以南的南海南部)的海水体积、热、盐运输。结果表明,从太平洋流向印度洋的印度尼西亚贯穿流约有 1/4 通过研究海区,其中年平均体积输运为 5.2Sv、热输运为 0.57PW、盐输运为 $184Gg \cdot s^{-1}$ 。从本海区进入印度尼西亚海域的海流通道以最南部的卡里马塔海峡为最主要,以下依此为巴拉巴克、民都洛和马六甲海峡。由海洋平流携带进入本海区的热输运比输出的少 0.064PW,由此可估算出通过海面进入本海区平均净热通量约为 $30W \cdot m^{-2}$ 。流入和流出本海区的年平均盐量基本相等,表明径流加降水的淡水输入与蒸发淡水输出基本平衡。

需要说明的是,本工作采用了 Helleman 等(1983)的风应力场,根据作者的经验及 Josey(2000)¹⁾的比较研究,这个风应力场偏大。因而计算得出穿越本海区的南向流,特别是冬季,也会偏大。但是总体数值趋向是正确的。作者拟在将来的工作中采用更好的风应力场,作出更准确的计算。

参 考 文 献

- 丁一汇,李崇银,1999. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京:气象出版社,1—423
- 王东晓,周发,李永平,1997. 南海表层水温和海面热收支的年循环特征. 海洋学报,19(3): 35—44
- 王东晓,施平,杨昆,齐义泉,2001. 南海 TOPEX 海面高度计资料混合同化试验. 海洋与湖沼,32(1): 101—108
- 李立,吴日升,郭小钢,2000. 南海的季节环流—TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究. 海洋学报,22(6): 13—25
- Fang G, Fang W, Fang Y *et al.*, 1998. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. Acta Oceanographica

1) Josey S A, 2000. WOCE/CLIVAR Representativeness and Variability Workshop. Fukuoka, Japan(会议交流)

Taiwanica, 37(1): 1—16

Helleman S, Rosenstein M, 1983. Nomal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J Phys Oceanogr*, 13: 1093—1104

Lebedev K V, Yaremchuk M I, 2000. A diagnostic study of the Indonesian Throughflow. *J Geophys Res*, 105(C5): 11243—11258

Levitus S, Boyer T, 1994a. World Ocean Atlas, Vol. 4: Temperature. NOAA, Washington DC, 1—117

Levitus S, Bugett R, Boyer T, 1994b. World Ocean Atlas, Vol. 3: Salinity. NOAA, Washington D C, 1—100

Metzger E J, Hurlburt H E, 1996. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean. *J Geophys Res*, 101(C5): 12331—12352

Semtner A J, 1986. History and methodology of modelling the circulation of the world ocean. In: O' Brien J J ed. *Advanced Physical Oceanographic Numerical Modelling*. D. Reidel Publishing Co, Dordrecht, 23—32

Wei Z, Choi B, Fang G, 2001. Water, heat and salt transports from diagnostic world ocean and North Pacific circulation models. *La Mer*, 38: 211—218

Wyrki K, 1961. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*. Naga Report, 2: 1—195

VOLUME, HEAT AND SALT TRANSPORTS BETWEEN THE SOUTHERN SOUTH CHINA SEA AND ITS ADJACENT WATERS, AND THEIR CONTRIBUTION TO THE INDONESIAN THROUGHFLOW

FANG Guo-Hong, WEI Ze-Xun, HUANG Qi-Zhou, FANG Wen-Dong

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

(*Institute of Oceanology of the South China Sea, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301*)

Abstract The water volume, heat and salt transports between the Southern South China Sea and its adjacent waters are estimated from the simulated results of a high-resolution ($1/6^\circ$) numerical circulation model of the Pacific-Asian marginal seas. The contribution of these transports to the Indonesian Throughflow is also evaluated. The study area covers the entire Southern South China Sea from 0° to 14°N . The calculation shows that the mean volume, heat and salt transports through the study area are 5.25 Sv ($1\text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 0.57PW ($1\text{PW} = 1 \times 10^{15} \text{ W}$) and $184 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, with the flow being directed toward the Indonesian waters and eventually entering the Indian Ocean. These transports account for around 1/4 of the corresponding transports of the Indonesian Throughflow. The results indicate that the South China Sea is an important passage of the Great Ocean Conveyor, the most important global thermohaline circulation belt. Among the passway for water to flow from the South China Sea to the Indonesian area the Karimata Strait is the most important, followed by subsequently the Balabac, Mindoro and Malacca Straits. More intense southward transports mainly occur in winter and autumn, while in later spring and summer the total transports are towards the north. As revealed by the calculation of heat balance, the heat entering the study area is less than that leaving the study area by an amount of 0.064PW , implying that the mean net heat flux through the sea surface is about $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, from the atmosphere to the ocean.

Key words Southern South China Sea, Volume transport, Heat transport, Salt transport, Indonesian Throughflow