

中国近海域际水、热、盐输运: 全球变网格模式结果*

方国洪^{①②} 魏泽勋^① 崔秉昊^③ 王凯^① 方越^④ 李薇^⑤

(①中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; ②国家海洋局第一海洋研究所海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 青岛 266061; ③成均馆大学土木和环境工程系, 水原 440-746, 韩国; ④Texas A & M University, College Station, TX 77843-3146, USA; ⑤中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 建立了一个全球大洋变网格环流数值模式, 中国近海的分辨率为 $1/6^\circ$. 由模式得出了通过南海和东海开边界的体积、热、盐输运的各月和全年平均值. 所得结果与已有的基于观测所得的体积输运估计值有良好一致性. 结果显示, 通过南海加入印尼贯穿流的体积、热、盐输运值为 5.3 Sv , 0.57 PW 和 $184 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$, 约占印尼贯穿流的 $1/4$, 表明南海是太平洋到印度洋贯穿流的重要通道之一. 东海的黑潮输运值各为 25.6 Sv , 2.32 PW 和 $894 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中不到 $1/4$ 通过西表岛与冲绳岛之间的水道. 热平衡计算表明, 南海从太阳和大气获得净热通量, 其值为 0.08 PW ; 而大气则从渤黄东海获得净热通量, 其值为 0.05 PW .

关键词 南海 东海 体积输运 热输运 盐输运 热平衡 印尼贯穿流

长久以来人们即认识到东海和日本海环流与太平洋环流, 特别与黑潮有着密切的关系^[1,2]. 根据台湾海峡和东海陆架海流观测结果, Fang 等^[3,4]提出海面高度的从南向北下倾可以引起一支从南海东北部经过东海、日本海直达津轻和宗谷海峡的流系. 近年, Metzger 等及 Lebedev 等^[5,6]的数值模拟显示了通过南海的输运在印尼贯穿流中的重要性. 这些研究都表明, 南海、东海和日本海的环流是密切相关的, 而且它们与太平洋, 甚至全球环流也是相互联系的. 因此将中国近海环流模式置于全球大洋环流模式之中是十分有好处的, 这可以避免以往区域性模式中先验地给定开边界条件这一缺陷, 也有利于研究边缘海之间及边缘海与大洋环流之间的相互作用.

1 数值模式

本研究建立了一个变网格格距的全球模式, 中国近海部分($0^\circ \sim 53^\circ \text{ N}$, $99^\circ \sim 149^\circ \text{ E}$)具有 $1/6^\circ$ 分辨率, 覆盖南海、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. 垂直方向分 15 层, 近海面处最密(25 m), 向下逐渐变稀^[7].

模式所采用的计算方案为美国普林斯顿大学地球流体力学实验室发展的原始方程模式

2002-02-08 收稿

* 国家重大基础研究发展规划(编号: G1999043808)、国家自然科学基金(批准号: 49876010)、国家重点科技专项(编号: 97-926-05-01)、国家 863 计划青年基金(编号: 2001AA630910)、中国科学院知识创新工程(编号: KZCX2-202A)资助项目

MOM2.0 版本. 海面风应力采用 Hellerman 等^[8]气候平均值; 海面温、盐度向 Levitus 等^[9]气候值趋近. 计算以 Levitus 等^[9] 1 月温盐气候值为初始条件, 采用预测 (Prognostic)方式计算 6 a, 达到平稳状态. 本文将不研究环流的演变过程(如王卫强等^[10]), 而采用第 6 a 模拟得出的各月平均值研究各海域气候态特征. 图 1 示出 2 月和 8 月的流函数分布.

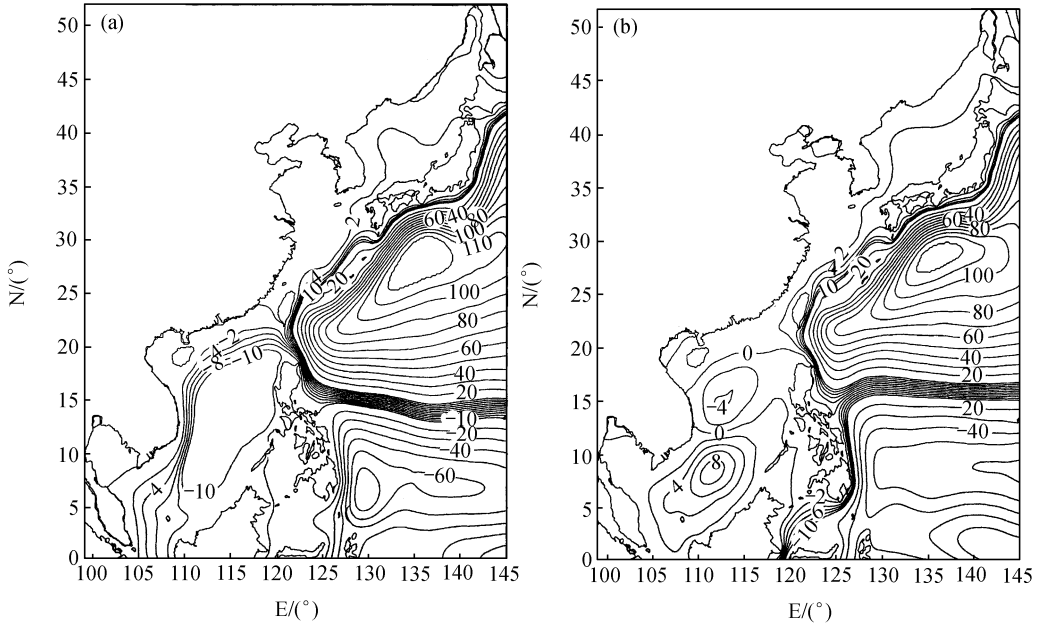


图 1 模拟所得 2 月(a)和 8 月(b)的流函数(ψ)分布
等值线间隔为 2Sv($|\psi| < 10$ Sv 时)和 10Sv($|\psi| > 10$ Sv 时)

为了研究各海域之间, 即域际体积、热量和盐量输运和平衡, 我们在海域的全部开边处取若干垂直断面, 由下式计算出通过各断面的体积输运值 F_V , 热输运 F_H 和盐输运 F_S :

$$F_V = \sum_i \left[\Delta l_i \sum_k v_{i,k} \Delta z_k \right],$$

$$F_H = c_p \sum_i \left[\Delta l_i \sum_k T_{i,k} \rho_{i,k} v_{i,k} \Delta z_k \right],$$

$$F_S = \sum_i \left[\Delta l_i \sum_k S_{i,k} \rho_{i,k} v_{i,k} \Delta z_k \right] \times 10^{-3},$$

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, 向外为正; Δl_i 和 Δz_k 为第 (i,k) 网格的宽度和厚度; c_p, T, S 和 ρ 分别代表海水定压比热容, 温度, 盐度和密度.

2 南海的域际输运和热盐平衡

通过南海开边界的各月和全年平均输运值见表 1 和图 2. 由表 1 可知, 就总体积输运而言,

表 1 通过南海开边界的体积运输($Sv = 10^6 m^3 \cdot s^{-1}$)、热运输($PW = 10^{15} W$)及盐运输($Gg \cdot s^{-1} = 10^6 kg \cdot s^{-1}$), 向外为正

(a) 海水体积运输						
月份	卡里马塔海峡	马六甲海峡	巴拉巴克海峡	民都洛海峡	台湾海峡	吕宋海峡
1	8.07	1.14	1.73	0.37	-0.04	-11.27
2	6.56	1.00	0.92	-0.15	0.56	-8.88
3	4.50	0.79	0.40	-0.47	1.53	-6.75
4	2.14	0.46	0.13	-0.64	2.02	-4.11
5	0.08	0.09	0.01	-0.64	2.35	-1.91
6	-1.29	-0.14	0.27	-0.39	2.69	-1.16
7	-1.88	-0.19	1.20	0.38	2.87	-2.40
8	-0.93	-0.08	1.44	0.55	2.07	-3.08
9	1.21	0.20	1.73	0.65	0.64	-4.44
10	4.04	0.59	2.44	0.90	-0.32	-7.65
11	6.86	0.95	3.07	1.33	-0.36	-11.86
12	8.40	1.14	2.91	1.13	-0.26	-13.32
平均	3.15	0.50	1.35	0.25	1.15	-6.40
合计		5.25			1.15	-6.40
(b) 热运输						
月份	卡里马塔海峡	马六甲海峡	巴拉巴克海峡	民都洛海峡	台湾海峡	吕宋海峡
1	0.885	0.127	0.178	0.012	-0.004	-1.027
2	0.721	0.110	0.094	-0.034	0.054	-0.865
3	0.501	0.088	0.041	-0.063	0.155	-0.642
4	0.239	0.052	0.014	-0.074	0.210	-0.366
5	0.006	0.011	0.003	-0.067	0.244	-0.085
6	-0.153	-0.016	0.033	-0.037	0.278	0.044
7	-0.222	-0.022	0.137	0.047	0.297	-0.068
8	-0.111	-0.010	0.164	0.063	0.217	-0.237
9	0.137	0.024	0.195	0.065	0.068	-0.630
10	0.468	0.068	0.273	0.079	-0.034	-1.038
11	0.788	0.110	0.332	0.110	-0.038	-1.187
12	0.934	0.130	0.304	0.084	-0.027	-1.174
平均	0.349	0.056	0.148	0.016	0.118	-0.606
合计		0.569			0.118	-0.606
(c) 盐运输						
月份	卡里马塔海峡	马六甲海峡	巴拉巴克海峡	民都洛海峡	台湾海峡	吕宋海峡
1	282.4	40.0	60.7	12.9	-1.3	-394.4
2	229.5	34.9	32.1	-5.2	19.6	-310.6
3	157.6	27.5	14.1	-16.5	53.4	-236.1
4	74.7	16.0	4.7	-22.4	70.6	-143.7
5	2.9	3.2	0.5	-22.5	82.2	-66.7
6	-45.1	-4.8	9.6	-13.8	94.1	-40.5
7	-65.8	-6.5	41.9	13.1	100.4	-84.2
8	-32.4	-2.9	50.6	19.5	72.4	-107.7
9	42.3	7.1	60.5	22.9	22.3	-155.2
10	141.2	20.5	85.3	31.6	-11.2	-267.6
11	240.2	33.2	107.5	46.6	-12.6	-415.2
12	293.9	39.9	101.8	39.7	-9.1	-466.2
平均	110.1	17.3	47.5	8.9	40.1	-224.0
合计		183.8			40.1	-224.0

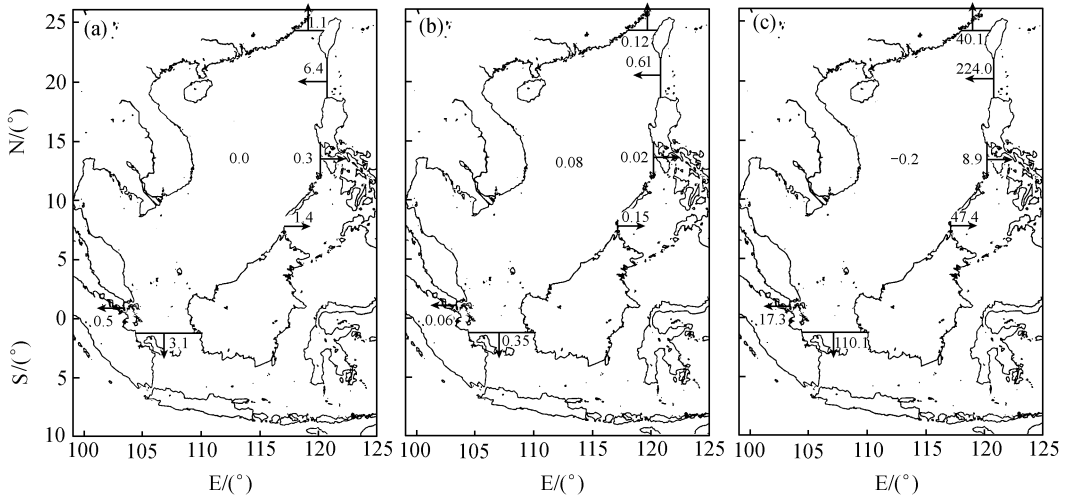


图 2 通过南海开边界的体积运输(a), 热运输(b)和盐运输(c)
单位分别为 Sv, PW 和 $Gg \cdot s^{-1}$, 海区中部数字为各开边界运输值总和

太平洋海水终年通过吕宋海峡流入南海. 其最大流量发生在 12 月, 为 13.3 Sv; 最小值发生在 6 月, 为 1.2 Sv; 年平均 6.4 Sv. 其余 5 个海峡年平均体积运输都是向外的, 但年变化十分显著, 在某些季节可能反过来向南海流入. 这 5 个海峡的年平均流量分别为 1.1, 0.3, 1.4, 3.1 和 0.5 Sv. 这表明, 通过南海的海流对太平洋-印度洋贯穿流有 5.3Sv(约占 1/4)的贡献, 而对台湾暖流有 1.1 Sv 的贡献.

热盐运输特别是盐运输在数值上基本上与体积运输成比例. 从太平洋通过吕宋海峡进入南海年平均热盐通量分别为 0.61 PW 和 $224 Gg \cdot s^{-1}$. 其中小部通过台湾海峡向北输运, 大部 (0.57 PW 和 $184 Gg \cdot s^{-1}$) 通过南部 4 个海峡向南输运. 向南的水、热、盐输运最终都加入太平洋-印度洋贯穿流进入印度洋, 量值均约占印尼贯穿流的 1/4. 由此可见, 一方面通过南海的海流在全球大传送带(globe great conveyor)中起到相当重要的作用. 另一方面, 大洋环流又对南海有极其重要的影响. 如所周知, 南海次表层以下的海水特征与菲律宾海有很大的相似性. 例如, 与菲律宾海盐度垂直分布类似, 次表层(~150 m)有高盐核, 中层(~500 m)有低盐核, 这种结构表明南海的海水主要源自菲律宾海, 本文得出的结果(即全球大传送带有部分海流通过南海)为这一现象提供了一种可能解释.

但是热运输与体积运输并不完全成比例, 例如在吕宋海峡, 6 月的体积输运向西, 而热输运则向东. 这是由于这里 Ekman 输运引起的表层流是向东的, 它携带的海水温度较高; 下层流是向西的, 它的西向体积输运超过表层, 但西向热输运则小于表层热输运.

还有一个重要的区别是, 对于体积输运, 流入和流出年平均总量是相等的, 均为 6.40 Sv (表 1(a)). 但对热输运则通过吕宋海峡流入的少, 通过其他海峡流出的总量较多. 其差值为

0.08 PW(表 1(b)). 这主要有两个原因, 一个是吕宋海峡较深, 故从下层进来了一部分海水相对较冷; 另一个原因是与除台湾海峡以外的其余各海峡相比吕宋海峡位置偏北, 故相对地海水较冷. 这种差额实际上是由海面的热交换来平衡的. 亦即, 太阳辐射提供给海水的热量要超过海水回辐射和潜热、感热损失, 净热通量为从上指向海水内部, 其值平均约为 23 Wm^{-2} .

由于不同地点和水深处盐度的差异要比温度差异小得多, 故用与热收支同样的方法估算海面水/汽通量其准确性要差很多. 从表 1 或图 2 可看出, 流入南海的盐输运和流出值大体相等, 似乎暗示, 在南海蒸发量与降水加径流量大致可以相抵.

3 东海的域际输运和热盐平衡

本研究中将渤黄东海视为一个海域, 并简称为东海. 该海域西南方通过台湾海峡与南海相通, 东边通过朝鲜海峡与日本海相通, 而东南方向有琉球岛链诸水道与太平洋相通. 由于琉球岛链水域宽广, 我们将它分为 4 段. 从南往北分别为台湾至西表岛水道, 西表岛至冲绳岛水道, 冲绳岛至奄美大岛水道及奄美大岛至九州的吐噶喇海峡. 为了研究济州海峡的输运, 在计算中我们取济州海峡和济州至九州两个断面. 通过各海峡或水道的各月和全年平均体积、热盐输运见表 2 和图 3.

与传统认识一样, 计算所得的黑潮主要由台湾-西表岛水道流入, 由吐噶喇海峡流出. 但计算还表明, 通过西表岛-冲绳岛水道亦有海流进入东海, 大约占黑潮总流量的 1/4 弱. 合计黑潮年平均流量为 25.6 Sv. 冲绳至奄美大岛有海水流出东海, 但输运量甚小. 台湾至西表岛及西表岛至冲绳两水道输运量之和的季节变化不大, 但两者分配比例变化比较显著, 这显然是季风引起的 Ekman 输运季节变化所致. 冲绳岛至奄美大岛断面和吐噶喇海峡的输运量分配亦有相似的季节变化. 台湾海峡输运量有很显著的季节变化, 显然是季风所致. 济州岛至九州断面的输运量亦有较显著季节变化, 但幅度不如台湾海峡. 济州海峡的输运量则相对比较稳定.

黑潮携带巨大的热量进入东海, 年平均热输运量为 2.32 PW. 南海亦有可观热量通过台湾海峡向东海输运(0.12 PW). 黑潮携带的热量大部分通过吐噶喇海峡和冲绳至奄美大岛水道回到太平洋, 但有相当大的热量(0.28PW)由对马暖流输运至日本海. 由表 2 可见, 由海流输入到东海内部的热量要多于输出的热量. 这表明通过东海海面的净热通量是由海洋向大气输送的. 由表 2 可算出输入的年平均热通量比输出多 0.05 PW, 其中又以冬季较大. 例如 2 月输入比输出多 0.09 PW, 这对于调节我国东部沿海气候起到很重要的作用. 以 0.05 PW 除以渤黄东海面积, 可知海面的热通量约为 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 由海洋向大气.

由表 2 的盐输运结果可知年平均输入量为 $934.6 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$, 输出为 $932.4 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$, 输入比输出多 $2.2 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$. 这个差额只是总量的 0.24%, 与热平衡计算比较(相应的比例为 2.1%), 其值要小一个量级, 故计算相对误差比较大. 不过此结果还是有一些参考意义. 因为对于一个周年过程, 海水盐度要回复到原来值, 现在输入盐输运量多了 $2.2 \text{ Gg} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明另有相应的淡水进入东海. 如东海平均盐度取 34, 则需要 0.06 Sv 淡水进入. 我们知道, 长江的年平均径流流量为 0.03 Sv, 加上其他江河, 径流在 0.04 Sv 左右. 这个数与 0.06 Sv 相差还算不大. 当然更完全的估算还要考虑降水和蒸发过程.

表 2 通过渤黄东海开边界的体积运输($Sv = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 热运输($PW = 10^{15} \text{ W}$)及盐运输($Gg \cdot \text{s}^{-1} = 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), 向外为正

(a) 海水体积运输							
月份	台湾海峡	台湾-西表岛	西表岛-冲绳	冲绳-奄美大岛	吐噶喇海峡	济州-九州	济州海峡
1	0.04	-18.64	-7.17	1.32	21.91	2.01	0.47
2	-0.56	-19.46	-6.37	1.62	21.91	2.29	0.51
3	-1.53	-20.84	-5.70	1.92	22.82	2.71	0.56
4	-2.02	-22.12	-4.94	2.10	23.34	2.97	0.60
5	-2.35	-22.42	-4.28	2.19	23.28	2.94	0.58
6	-2.69	-22.49	-4.18	2.27	23.61	2.84	0.57
7	-2.87	-21.79	-4.82	1.97	23.95	2.85	0.65
8	-2.07	-19.60	-5.38	1.26	22.26	2.86	0.59
9	-0.64	-17.06	-6.53	0.64	20.12	2.85	0.55
10	0.32	-15.38	-7.67	0.37	18.82	2.87	0.60
11	0.36	-16.02	-8.45	0.60	20.19	2.62	0.63
12	0.26	-16.99	-8.40	0.90	21.24	2.33	0.59
平均	-1.15	-19.40	-6.16	1.43	21.95	2.68	0.58
合计	-1.15		-25.56		23.38		3.26
(b) 热运输							
月份	台湾海峡	台湾-西表岛	西表岛-冲绳	冲绳-奄美大岛	吐噶喇海峡	济州-九州	济州海峡
1	0.004	-1.634	-0.696	0.114	1.935	0.179	0.032
2	-0.054	-1.727	-0.628	0.144	1.944	0.200	0.031
3	-0.155	-1.851	-0.564	0.174	2.043	0.233	0.031
4	-0.210	-1.957	-0.481	0.196	2.104	0.251	0.033
5	-0.244	-1.993	-0.407	0.211	2.105	0.247	0.033
6	-0.278	-2.012	-0.397	0.222	2.145	0.243	0.034
7	-0.297	-1.965	-0.462	0.195	2.210	0.254	0.045
8	-0.217	-1.754	-0.508	0.122	2.050	0.264	0.045
9	-0.068	-1.528	-0.633	0.054	1.824	0.264	0.041
10	0.034	-1.371	-0.749	0.023	1.687	0.267	0.045
11	0.038	-1.404	-0.811	0.047	1.800	0.242	0.047
12	0.027	-1.474	-0.803	0.077	1.885	0.214	0.043
平均	-0.118	-1.723	-0.595	0.132	1.978	0.238	0.038
合计	-0.118		-2.318		2.110		0.276
(c) 盐运输							
月份	台湾海峡	台湾-西表岛	西表岛-冲绳	冲绳-奄美大岛	吐噶喇海峡	济州-九州	济州海峡
1	1.3	-652.4	-251.1	46.3	766.8	70.3	16.6
2	-19.6	-681.1	-223.0	56.7	766.9	80.0	18.0
3	-53.4	-729.5	-199.3	67.0	798.5	94.9	19.6
4	-70.6	-774.1	-172.7	73.5	816.8	103.9	21.0
5	-82.2	-784.8	-149.8	76.8	814.6	102.9	20.2
6	-94.1	-787.2	-146.2	79.6	826.4	99.5	20.0
7	-100.4	-762.8	-168.5	68.8	838.4	99.9	22.7
8	-72.4	-686.0	-188.2	44.2	779.1	100.3	20.8
9	-22.3	-597.1	-228.5	22.5	704.1	99.7	19.1
10	11.2	-538.4	-268.6	13.0	658.6	100.6	21.0
11	12.6	-560.5	-295.6	20.9	706.5	91.6	22.1
12	9.1	-594.8	-294.0	31.6	743.5	81.6	20.6
平均	-40.1	-679.0	-215.5	50.1	768.4	93.8	20.1
合计	-40.1		-894.5		818.5		113.9

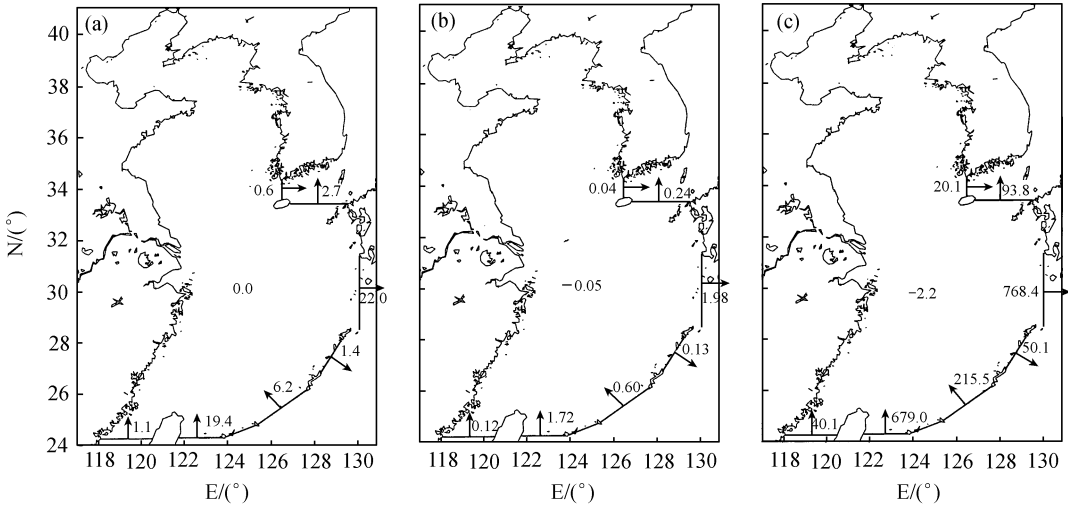


图 3 通过东海开边界的体积运输(a), 热运输(b)和盐运输(c)
单位分别为 Sv, PW 和 $Gg \cdot s^{-1}$, 海区中部数字为各开边界运输值总和

4 讨论

上面我们给出了中国近海各海域与外部海域之间的海水体积、热量和盐量运输计算结果, 并对热、盐平衡作了估算. 在本节我们将对结果的可信性和意义作一讨论.

4.1 模式结果的可靠性分析

首先我们对本文计算结果与已有的依据实测资料得出的结果作比较.

在所有海流分量中, 黑潮是研究得最多的. Mizuno 等^[11]曾在冲绳西北黑潮流轴处放置 3 个测流浮标, 他们取黑潮流幅宽度 80 km, 得出从 1989 年 12 月至 1990 年 7 月共 232 d 的黑潮平均输运量为 (23 ± 3) Sv. 袁耀初等^[12]曾用逆方法对 PN 断面输运量作过多次计算, 所得不同年份平均体积运输变化于 23.6 至 28.0 之间. 对 PN 断面, Fujiwara 等得出 25.5 Sv, Hinata 得出 25.4 Sv, Bingham 等得出 26.6 Sv (Liu 等^[13]). 本研究得出的体积输运值 (25.6 Sv) 与上列结果十分一致. Liu 等^[13]还在台湾至西表岛附近的断面进行了 12 个航次 ADCP 和 CTD 观测, 算得平均输运量为 22.6 Sv. 可见本文计算结果 (19.4 Sv) 亦属合理范围之内, 但略偏小 (14%). 早在 70 年代, Nitani^[1]即认为太平洋海水可通过冲绳岛以南水道进入东海. 于洪华等^[14]亦依据盐度观测再次证实了这支海流的存在. 本计算亦表明在冲绳以南水道有西向入侵海流, 与上述观测事实相符.

Miita 等^[15]依据海流观测得到对马暖流的流量为 3.3~3.7 Sv, 其中通过济州海峡为 0.5 Sv. 考虑到他们的观测数据夏季偏多, 流量估计有所偏高. 因此本计算结果 (对马暖流 3.3 Sv, 济州海流 0.6 Sv) 可认为与实测基本一致.

台湾海峡的测流资料还十分缺乏. 迄今还只有 Fang 等^[4]和傅子琅等依据少量实测资料对其流量作出过估计, 结果冬季和夏季均为北向, 流量分别为 1 和 3 Sv. 本研究夏季向北, 最大 2.9 Sv, 与观测估计值一致; 但冬季向南, 最大 0.4 Sv, 与 Fang 等^[4]结果差异较大. 一种可能的原因是计算中所用的 Hellerman 等^[8]风应力在中国近海偏大^[16], 另一可能原因是 Fang 等使用的冬季海流资料在观测时一般倾向于在风力较弱的期间进行.

目前在中国近海有关热、盐运输的计算尚不多见。袁耀初等有多篇文献(参见[12]所列参考文献)给出过不同航次在 PN 断面的热运输计算结果,多在 2PW 左右,与本文基本一致。

有关南海各海峡体积运输的观测十分缺乏。郭忠信等^[17]计算出 1985 年 9 月在 120°E 断面上黑潮有一支向西的 11 ~ 12 Sv 体积运输。但这一断面未能包括整个吕宋海峡。蒲书箴等^[18]依据海面下 175 ~ 225 m 层 ADCP 观测得到黑潮在吕宋海峡终年有向西分支。这些结果在定性上与本研究相符。最近,Chu 等^[19]根据历史长期海温和盐度资料计算出吕宋海峡逐月体积运输。最大值为 13.7 Sv,最小值为 1.4 Sv,年平均为 6.5 Sv,均向西。其结果与本计算十分一致。

Wyrski^[20]曾用不同的资料来源作综合分析,给出东南亚海域双月的上层海洋(150 ~ 200 m 以浅)运输图。其中 10 ~ 4 月卡里马塔海峡的海流向南,最大 4.5 Sv,6 ~ 8 月向北,最大 3 Sv。本计算结果与之方向一致,而冬季最大 8.4 Sv,夏季最大 1.9 Sv。由于所依据的资料缺乏,Wyrski 的估计也多半只具有定性上的意义,实际流量如何还难以肯定。但本计算卡里马塔海峡冬季输运量似乎有些偏大,这可能与所采用的 Hellerman 等^[8]风应力偏大以及本模式在卡里马塔海峡最狭窄处分辨率不够有关^[7]。

王东晓等^[21]对南海部分海区作过海面热通量计算,从分布图看,年平均净热通量也是向下进入海洋的,数值上与本研究大体一致。

此外,我们还对模式所得的中国沿岸平均海面高度与大地水准测量所得沿岸 28 个验潮站观测值作了比较,相关系数大于 95%(见方国洪等^[22]);模式所得南海月平均海面距平与卫星高度计测量值的比较表明,相关系数达 84%^[7]。

4.2 计算和分析结果的意义

计算表明,在东海部分,西表岛至冲绳水道有可观的海流入侵,这对了解冲绳海脊及其附近海区的环流有重要意义。在南海部分,从太平洋经过南海流向印度洋的体积、热、盐运输均十分可观。这一结果对于了解南海的环流、水文结构和海气交换具有头等重要意义。这表明,太平洋海水向南海的入侵不能单纯理解为黑潮入侵,它还是太平洋至印度洋的贯穿流的一部分,这一作用比单纯的黑潮入侵影响更深远。同时也表明,南海并不象人们想象的那样具有很大的封闭性,而是与外洋有着活跃的水交换。按照吕宋海峡入侵流量 6.4 Sv 来估计,并扣除距离较短的台湾海峡出流量,则平均而言,南海海水更新的时间尺度约为 25 a。这一结果支持了一些学者先前得出的南海深层水滞留时间为 40 ~ 115 a 或 76 a 的结果(见苏纪兰^[23]),也为这些结果提供了合理的解释。因为这种水交换有利于维持南海海水特性与西菲律宾海海水的相似性。同时,如果南海是封闭的话,年平均海面热通量将为零,而观测表明,它是由大气进入海洋的^[21],这种热汇性质,也是这支贯穿南海的海流造成的。同时另一方面,由于印尼贯穿流是全球大传送带的一个关键环节,而通过南海的输运量约占贯穿流的 1/4,表明南海在全球海洋热盐运输中起到相当重要的作用。

海面热量和水汽交换对于海洋环流乃至气候变化研究至关重要,然而由于交换过程的复杂性和观测的困难性,目前通过海面资料计算得到的热通量仍具有相当大的不确定性。例如,英国南安普顿海洋中心海面通量资料集中的全球海洋热通量仍有 30 Wm⁻² 的不平衡(Josey 等^[24])。因而从海洋环流的角度来推算热通量已成为重要手段之一。对于中国近海这方面的研究还很少。本研究得出的全海域的平均值可从海洋本身的角度提供海一气通量的初步估计值。

本研究有关热运输计算结果表明,中国近海在全球大气—海洋系统热运输和平衡中的作

用不可忽视. 与北太平洋在中纬度区的极向热输运(在 0.5 ~ 1 PW 之间)相比较, 本研究得出中国近海的下列有关结果具有一定的重要性: (1) 台湾海峡和对马海峡的北向热输运分别是 0.12 和 0.28 PW; (2) 南海对太阳辐射和大气而言是一个热汇(0.08 PW), 东海是一个热源(0.05 PW); (3) 太平洋向印度洋的热输运中有 1/4 通过南海, 输运值可观.

最后, 需要说明的是, 由于数值模拟结果与外强迫场及各种模式参数的选取有关, 本模式计算结果在数值上仍具有较大的不确定性. 模式仍然有许多值得进一步改进的地方. 因而本文所得结果在数值上也还要通过不断地与实测比较及模式的改进予以准确化. 本文虽然给出了定量数值, 但更重要的是其定性结论.

参 考 文 献

- 1 Nitani H. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, ed. *Kuroshio, Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle: University of Washington Press, 1972. 129 ~ 163
- 2 Hidaka K. Japan Sea. In: Fairbridge R W, ed. *The Encyclopedia of Oceanography*. Stroudsburg: Dowen, Hutchinson & Ross Inc, 1966. 417 ~ 424
- 3 Fang G, Zhao B. A note on the main forcing of the northeastward flowing current off the southeast China coast. *Progr Oceanogr*, 1988, 21: 363 ~ 372
- 4 Fang G, Zhao B, Zhu Y. Water volume transports through the Taiwan Strait and the East China Sea measured with current meters. In: Takano K, ed. *Oceanography of Asian Marginal Seas*. Amsterdam: Elsevier, 1991. 345 ~ 358
- 5 Metzger E J, Hurlburt H E. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean. *J Geophys Res*, 1996, 101(C5): 12331 ~ 12352
- 6 Lebedev K V, Yaremchuk M I. A diagnostic study of the Indonesian Throughflow. *J Geophys Res*, 2000, 105(C5): 11243 ~ 11258
- 7 魏泽勋, 方国洪, 崔秉昊, 等. 南海海面高度和输运流函数: 全球变网格模式结果. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(12): 987 ~ 994
- 8 Hellerman S, Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 1093 ~ 1104
- 9 Levitus S, Boyer T P. *World Ocean Atlas*. Washington D C: NOAA, 1994. 1 ~ 117
- 10 王卫强, 王东晓, 施平, 等. 南海上层海洋大尺度环流的建立与调整. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(12): 995 ~ 1002
- 11 Mizuno S, Kawatate K, Kaneko A, et al. Results of direct measurements of Kuroshio currents in the East China Sea. *Fukuoka: Kyushu University Research Institute for Applied Mechanics*, 1991. 1 ~ 18
- 12 袁耀初, 刘勇刚, 苏纪兰. 1997 ~ 1998 El Nino 至 La Nina 期间东海黑潮的变异. *地球物理学报*, 2001, 44: 1 ~ 10
- 13 Liu C -T, Cheng S -P, Chuang W -S, et al. Mean structure and transport of Taiwan Current (Kuroshio). *Acta Oceanogr Taiwan*, 1998, 36: 159 ~ 176
- 14 于洪华, 苏纪兰, 苗育田, 等. 东海黑潮低盐水核与琉球以东西边界流的入侵. 见: *黑潮调查研究论文选*, 5. 北京: 海洋出版社, 1993. 235 ~ 241
- 15 Miita T, Ogawa Y. Tsushima currents measured with current meters and drifters. In: Ichiye T, ed. *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. Amsterdam: Elsevier, 1984. 67 ~ 76
- 16 谢强, 王东晓, 王卫强, 等. 南海几种海面风应力资料的比较分析. *热带海洋学报*, 2001, 20(1): 91 ~ 100
- 17 郭宗信, 方文东. 1985 年 9 月的吕宋海峡黑潮及其输送. *热带海洋*, 1988, 7: 13 ~ 19
- 18 蒲书箴, 于惠苓. 巴士海峡和南海东北部黑潮分支. *热带海洋*, 1992, 11: 1 ~ 8
- 19 Chu P C, Li R. South China Sea isopycnal-surface circulation. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 2419 ~ 2438
- 20 Wyrski K. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 1961. 1 ~ 195
- 21 王东晓, 周发琇, 李永平. 南海表层水温和海面热收支的年循环特征. *海洋学报*, 1997, 19: 35 ~ 44
- 22 方国洪, 魏泽勋, 方越, 等. 依据海洋环流模式和大地水准测量获取的中国近海平均海面高度分布. *科学通报*, 2001, 46(18): 1572 ~ 1575
- 23 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究. *海洋学报*, 2001, 23(4): 1 ~ 16
- 24 Josey S A, Kent E C, Taylor P K. New insights into the ocean heat budget closure problem from analysis of the SOC air-sea flux climatology. *J Climate*, 1999, 12: 2856 ~ 2880