中 国 科 学 (B 辑)
第 23 卷 第 12 期 SCIENCE IN CHINA (Series B) 1993 年 12 月

冬季中国海及其邻近海域海流系统的数值模拟*

李荣凤 曾庆存

(LASG, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要

本文用一个水平分辨率比较高的非线性正压模式,计算了整个太平洋各月的月平均环流. 给出的冬季(1 月)数值模拟结果表明,冬季从南海北部,通过台湾海峡和对马海峡,到津轻海峡,的确存在一支所谓的"台湾— 对马— 津轻暖流"系统,这支暖流源自海南岛的东南海域,1 月份主要从津轻海峡流入太平洋. 模式满意地再现了中国海及其邻近海域的海流系统.

关键词 暖流、涡旋、黑潮分支、海面坡度

1 引 言

中国的近海包括渤海、黄海、东海和南海. 其整个海域略呈一凸出的 $NE-SW$ 向的弧形自东北向西南延伸,从温带一直延续到热带,纵跨近 44 个纬度.

管秉贤等根据 60 年代中期以前所能搜集到的国内外有关渤黄东海的各种海流资料和海流图,曾编绘出版了"渤黄东海表层海流图(1977)[1)],此图共 12 幅,每月一幅,是国内首次较完整地绘出的渤黄东海各月定常海流分布图. 稍后管秉贤和毛汉礼[1]、管秉贤[2)]分别对东海环流和整个中国海海流系统进行了较全面的论述. 图 1 引自文献[1],表明了 18°N 以北的中国海域及其临近海区冬季海流系统的传统认识,同时也标出了在中国全国海洋综合调查(1958 — 1960)中新发现的两支海流.

关于冬季渤黄东海环流系统的传统看法是:东侧为黑潮— 对马暖流— 黄海暖流及其延伸部分构成一自南向北的暖流系统,西侧是黄海沿岸流和东海沿岸流顺风自北向南流动,其中在黄海中部和东海北部济州岛以南又各存在一个气旋式的小环流. 黄海暖流的余脉从渤海海峡的北部流入渤海后分成南北两支,于是在渤海的南部和北部各形成一个气旋式和反气旋式的小环流. 南海是中国最大的海,也是调查研究最为薄弱的海域,海流的实测资料极为缺

1992-11-19 收稿,1993-06-07 收修改稿.

* 国家基础性研究重大关键项目"气候动力学和气候预测理论的研究"和 LASG 资助课题.

1) 管秉贤、丁文兰、李长松,渤黄东海表层海流图,1977.

2) 管秉贤,渤海黄海东海调查研究报告,1984,116— 141.

乏. Dale[2] 根据美国海军水道部和气象局海洋司出版的图集绘制了南海12个月的表层海水漂流图. Wyrtki[3] 根据一些科学考察、商船观测和海洋站观测资料绘制了包括整个南海在内的东南亚海域双月表层海流图. 在这两份海流图上,南海冬季环流最主要的特点是:北起

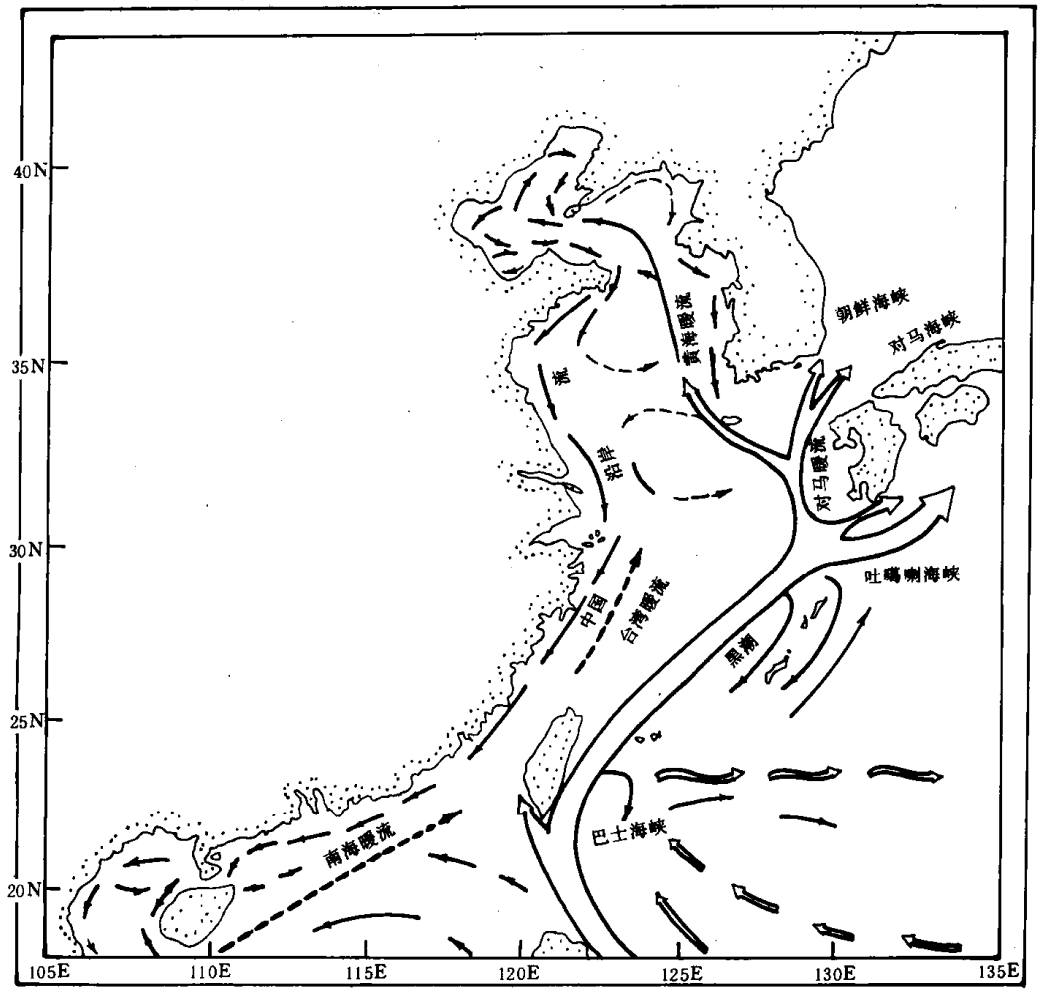


图1 渤、黄、东海及其邻近海域冬季环流示意图(引自文献[1])

台湾海峡,沿海岸有一支强大的顺风自东北流向西南的海流. 在Dale[2]所给的南海1月表层海流图上,在南海北部和南部还各存在一个气旋式的小涡旋.

上述关于台湾海峡和南海北部冬季的流动态势,在我们迄今为止所看到的国内外出版的旧海流图上,几乎无一例外的全是一派自东北向西南的流动. 直到50年代末,国内外的海洋学家也都毫无异议的接受这一传统的认识. 图1中粗虚线表示了冬季有两支逆风向北的海流,这是在中国海洋综合调查中揭示出来的新异现象.管秉贤和陈上及[1]首先发现并命名南海北部的那支叫作"南海暖流",浙东近海的那支称作"台湾暖流".

南海暖流和台湾暖流的发现的确动摇和改变了人们对南海和东海冬季环流结构的传统认识. 因此,许多海洋学家对南海暖流和台湾暖流的存在性,来源以及它们之间的关系等产生了极大的兴趣.管秉贤经过长期的研究[4,5],发现南海暖流通过台湾海峡与台湾暖流相联接,形成海水北上的大动脉. 近期又发现东海黑潮的西侧也终年存在着东北向的海流,提出了南海

1) 管秉贤、陈上及,全国海洋综合调查报告,第五册,第六章,1964,1—85.

暖流— 台湾海峡暖流—台湾暖流——对马暖流相联接的证据．方国洪等[6]则进一步揭示在黑潮西侧，存在着一支流经台湾海峡与东海陆架而进入朝鲜海峡的暖流，这支暖流通过日本海以后，大部分从津轻海峡，小部分从宗谷海峡流出日本海进入太平洋，加入亲潮．方国洪等把这支海流称作台湾— 对马— 津轻 暖流系统(TTTWCS)(图 2).

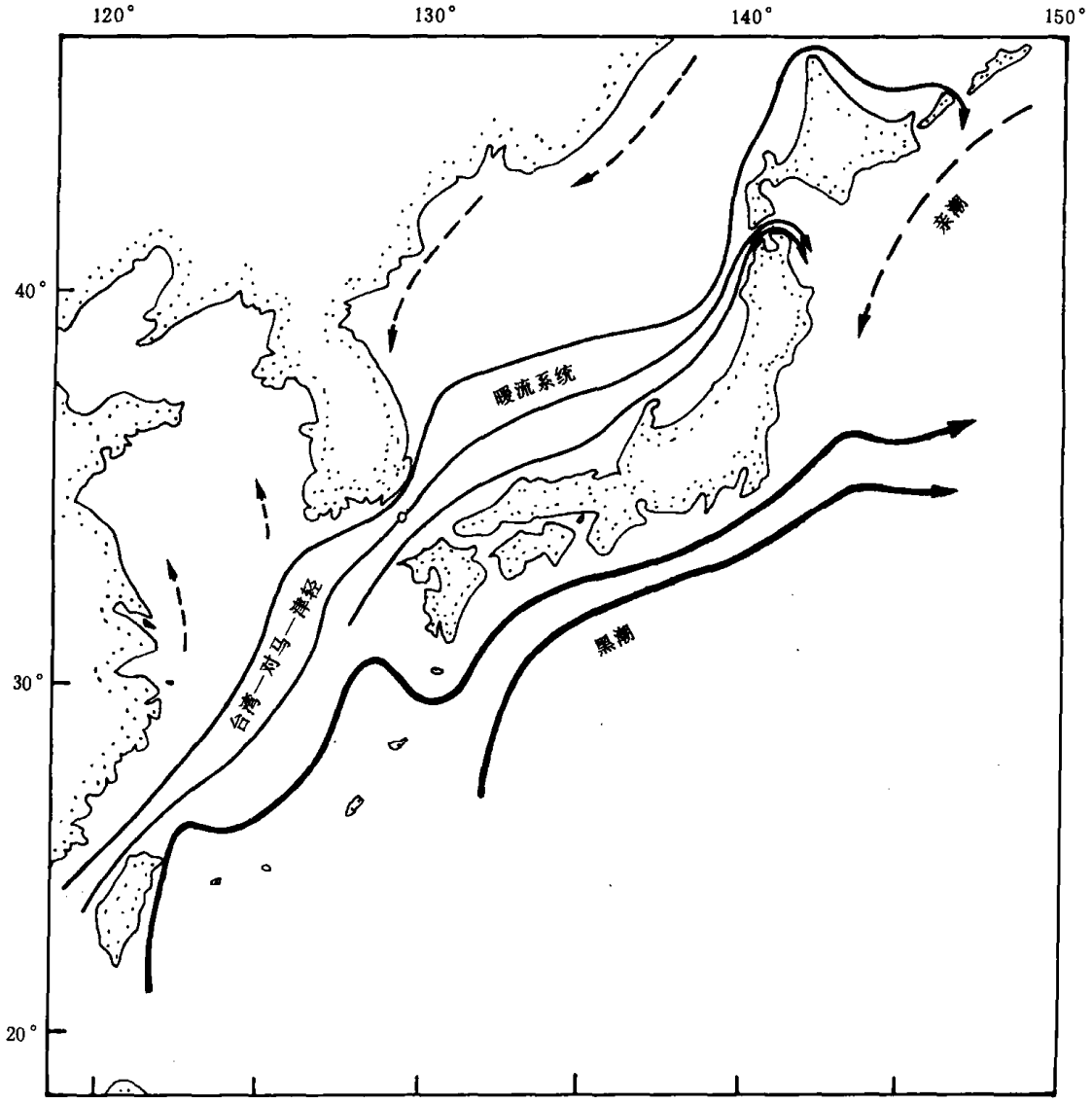


图 2　台湾— 对马— 津轻暖流系统模式图

图中细线代表大约 $1\times10^6 m^3/s$ 流量，粗线代表大约 $25\times10^6 m^3/s$(引自文献[6])

在 70 年代，日本海洋学家根据 50m 层上的温度和盐度分布所给出的东海流型示意图上标明了从台湾东北到钱塘江口外海有一支北向海流被称之为黑潮分派，它所处的位置似乎比台湾暖流更靠外海一些．鉴于中国海洋学家和日本海洋学家关于东海陆架环流的认识本来就存在一些差异，所以管秉贤和方国洪提出的台湾— 对马暖流系统在从事东海和日本海研究的中外海洋学家中引起了不小的轰动．有的人不相信它的存在，有的人还提出了“是黑潮分派？还是台湾— 对马暖流系统？”这样的问题．

80 年代以来，不少学者用区域海流模式分别研究了中国的渤、黄、东、南海以及其它局部

区域的海流. 这些研究工作所得到的结果对弥补我国海洋调查的不足和了解我国各海的海流状况起到了重要的作用. 但是,由于模式区域的局限性,尚不能从这些数值结果中了解我国近海海流的整体分布状况,而且,如果模式的空间分辨率不够高的话还会漏掉或不能完全描述那些较窄的海流.

本文目的是想用数值计算来研究整个中国海域的海流状况,并试图与现有的观测结果进行对比. 迄今我们所看到的关于中国海的海流图,不仅有空白区,也都还存在一些用虚线表示的推测海流,我们期望用数值模拟结果弥补空白并对那些推测的海流加以证实,也想根据数值模拟结果对一些目前认识仍不一致的问题提出我们的一些看法.

2 模 式 概 况

采用球面坐标系下的垂直平均的运动方程和连续性方程. 为了设计能量守恒的时间-空间差分格式,引入了新的变量. 在取垂直于边界的速度为零的侧边界条件下,模式的控制方程组和在C网格上离散得到的差分方程均有以下整体性质: (1) 总质量守恒, (2) 若忽略强迫项和耗散项则能量守恒, (3) 非线性平流算子为反对称算子, (4) 科氏项和曲率项不改变动能密度.

在我国海域的东侧南北方向那么长的水边界上,需要给定开边界条件,如果给定的边条件不准确或不协调的话,那么边界误差的积累就会大大歪曲我国近海的海流分布. 我们的计算区域取为从 98.75°E 到 69.75°W 和从 60.25°N 到 60.25°S, 这就避开了困难的水边界处理问题. 同时也可以充分考虑太平洋流系特别是黑潮与我国海域海流的相互作用和水交换.

在理想化的中国海底地形中,取最大无扰动水深为 200m. 就是说,我们计算的是一个200m 深的平底太平洋,但是大部分中国海域的真实海底地形仍能得到真实反映. 取网络距 $\Delta\theta=\Delta\lambda=0.5°$, 这足以分辨出符合要求的足够细微的海流结构,且使大陆甚至岛屿的岸线形状得到很好的描述.

在气候月平均的风应力[7]的驱动下对模式进行数值积分. 为了节省计算时间,还采用分解算法,取 $\Delta t_1=6$min 作为适应过程的积分时间步长,取 $\Delta t_2=60$min 作为演变过程和耗散过程的积分时间步长. 从静止状态开始,积分约 40 天,总动能和总有效位能就不再变化了. 再计算下去各点上的流速和海面高度值都大体上趋于常数,故取第 80 天的结果代表环流的定常状态(即月平均流).

3 结 果 分 析

图 3 给出在冬季(1 月)偏北风的情况下计算的中国海及其邻近海域的海流. 虽然模式的水平网格距对渤海来说过于大了些,但是从图上仍可以看到,计算海流与图 1 所给的观测结果的流动趋势是一致的. 在渤海海峡的南端一部分海水流出渤海后沿山东半岛的北岸向东流,绕过成山角以后就加入了黄海沿岸流向南直达长江口. 在福建和浙东近海,主要由逆风向北的台湾海峡暖流和台湾暖流所占据.

图 3 中另一个明显的流动特征是,模式中的黑潮沿台湾东岸向北流,进入东海后,就转向东北流动,最后在吐噶喇海峡流出东海. 与图 1 所示的黑潮流动不同的是,模式中的黑潮的流动路径在台湾东北和奄美大岛西北出现了两个明显的反气旋式弯曲. 由于黑潮的深兰色特

征("黑潮"的本来意思就是"黑色海流"),因此在卫星图片上,黑潮水就很容易被区别出来,1982 年 1 月 NOAA-6 的卫星图象上所显示的东海黑潮的两处弯曲与我们的模式结果颇相一致. 似乎有弯曲更能代表黑潮的真实流动路径.

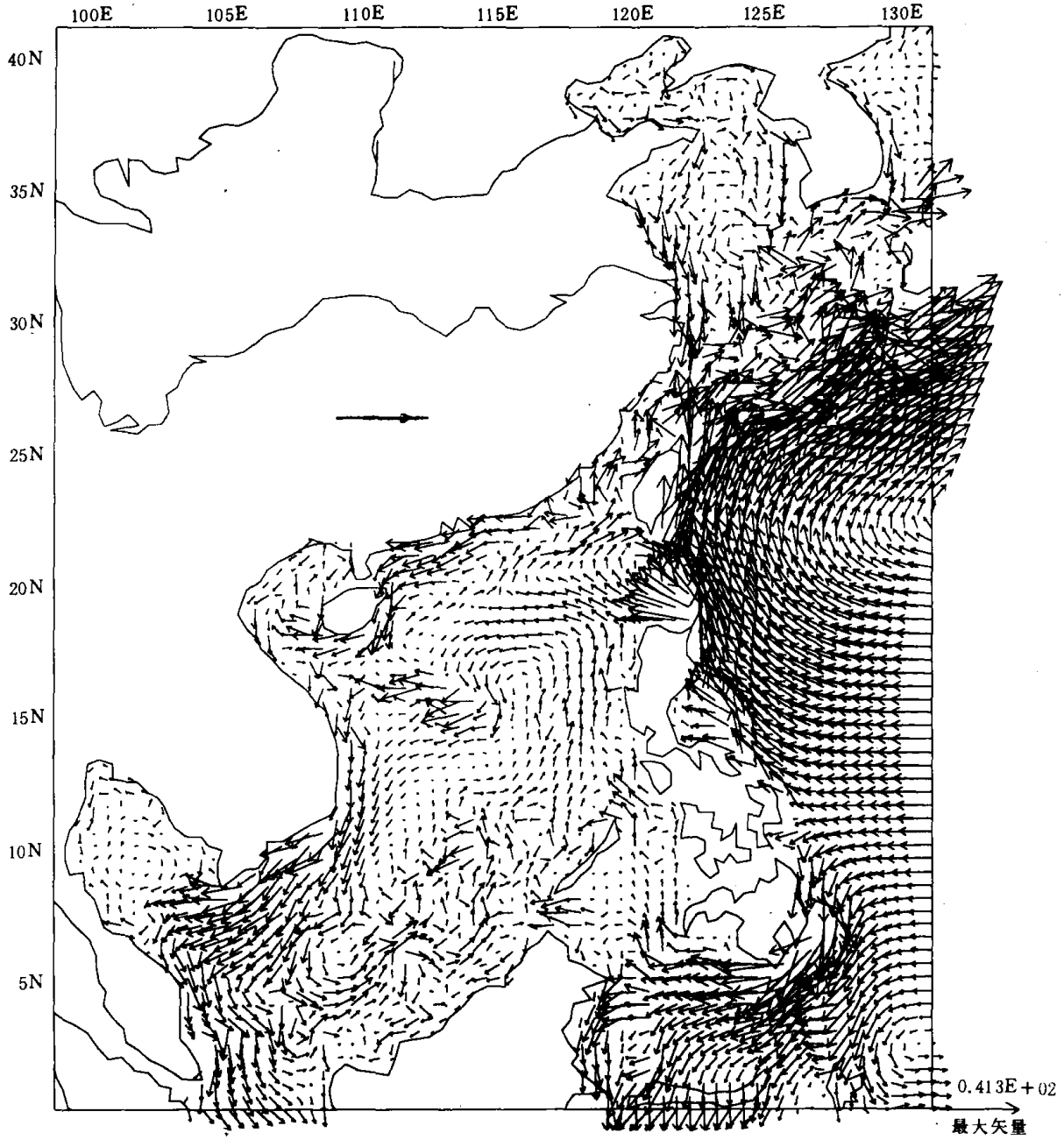


图 3　计算得到的中国海及其邻近海域 1 月份月平均流场(单位: cm/s)

从图 3 还可以看到,台湾暖流向北流到钱塘江口以南大约 29°N,123°E 的地方与东海沿岸流相遇,并与部分东海沿岸流一起向东转,然后朝东北方向流动. 在奄美大岛西北与黑潮的反气旋弯曲的外缘部分相混合,一部分北转,一部分继续向东流. 在九州以西大约 30°30′N, 128°E 的地方分成两支,主要的一支转向东南又回到黑潮的主干;另一支较弱的分支向北流,相当于传统上所说的"对马暖流". 对马暖流通过对马海峡流入日本海. 在对马海峡的入口处,对马暖流又分出一个小分支沿九州西海岸向南流. 在这个沿岸流和对马暖流之间存在一

个弱的反气旋式的回流区. 在大约31°N,125°30′E的地方,东北向海流的一部分海水偏离出来先向西北,后向东北,然后又向西北弯曲地向海区北部流动. 在济州岛以西就分成两支,较大的一支绕过济州岛向东北流入朝鲜海峡; 另一支较小的流入黄海,沿黄海槽向北流动. 它就相应于实际观测到的"黄海暖流". 在北黄海,黄海暖流的余脉,一部分向东北沿辽东半岛的东岸流入西朝鲜湾,于是在北黄海形成一个反气旋式涡旋. 这支海流在图1和其它一些海流图上都是用虚线表示的. 可见,以往对这支海流的观测和研究都很有限,所以图上的流动形势多半是推测出来的. 我们的数值结果则证实了这种推测的正确性. 另外,图1用虚线显示出在东海北部济州岛西南有个气旋式涡旋. 胡敦欣等[8]分析了这个涡旋的特征及成因,并认为它似乎是终年存在着的. 由图3可以看到,这个涡旋在模式结果中也显现得十分清楚,其中心大约在30°30′N,125°E.

图3还显示出,模式中的南海冬季环流的主要特征与文献[3,4]所给的观测结果相当一致. 南海北部的陆架区一支西向强化的沿岸流,从东北向西南流经越南沿岸,然后通过加斯帕和卡里马塔海峡流入爪哇海. 观测到的南海北部和南部的两个气旋涡旋也都清楚可见. 另外,本模式更完整地模拟出了南海北部冬季逆风流动的"南海暖流",其出现的地理位置和流态不仅与图1一致,而且与文献[4]中由观测资料所揭示的结果也非常一致. 与图1不同的是,南海暖流继续向北蜿蜒地流过台湾海峡形成了冬季的台湾海峡暖流.

50年代以前,一般认为台湾海峡的海流冬季顺风向南流,夏季顺风向北流. 管秉贤等[1]曾推测台湾海峡冬季也可能存在逆风海流. 但是,冬季向北流动的台湾海峡暖流终归未被标在图1中,说明了直到80年代初,人们对台湾海峡冬季流况的认识还是很有限的. 张以垦等[9]根据1984年2月到1988年7月在台湾海峡及其邻近海域投放"人工水母"的结果得出结论是,在台湾海峡的底层流一年四季都是向东北方向流动的. 庄文思[10]在台湾海峡进行的实测海流也证实了台湾海峡的海流在冬季和夏季都是向北流的. 本文则是用另一种方法——数值计算证明了冬季向北流动的台湾海峡暖流的存在性.

为了完整地理解台湾—对马—津轻暖流系统,本文还给出了计算的日本海冬季(1月)的海流分布(图4). 可以看到,模式中的这个暖流系统在日本海的流况与图2不尽相同. 一般都认为对马海峡是入口,津轻和宗谷海峡都是出口. 图2表征了这个主要特征. 而图4所表明的是,亲潮的一部分海水通过宗谷海峡向西流入日本海,沿西伯利亚海岸向西南流动,在大约40°N的地方分为两支,小分支继续沿岸向南流; 主要的一支离开海岸向东转,然后向东北流动,大部分从津轻海峡流出日本海,小部分则继续北上,于是在日本海形成一个气旋式的环流. 对马暖流通过对马海峡进入日本海以后在大约35°30′N, 132°E的地方分为三支,第一支沿日本海岸向东北流; 第二支在近海向北流,第三支在远离朝鲜东岸的地方向西北流. 但是三个分支最终都汇入气旋式环流的南翼一起向东北流.

图4所给的日本海的模式流型与文献[11]所给的2月份的海流观测结果一致. 不同的是,在观测结果中,宗谷海峡是出口而不是入口. 在宗谷海峡是入口而不是出口的这一反传统认识的计算结果,一度曾使我们对它的正确性产生怀疑. 有趣的是,文献[12,13]所给的观测海流图上表明,冬季一支海流从鄂霍次克海通过宗谷海峡向西流入日本海,在其它季节则相反. 这些观测结果与我们的计算结果颇为一致.

现根据计算结果讨论以下几个问题

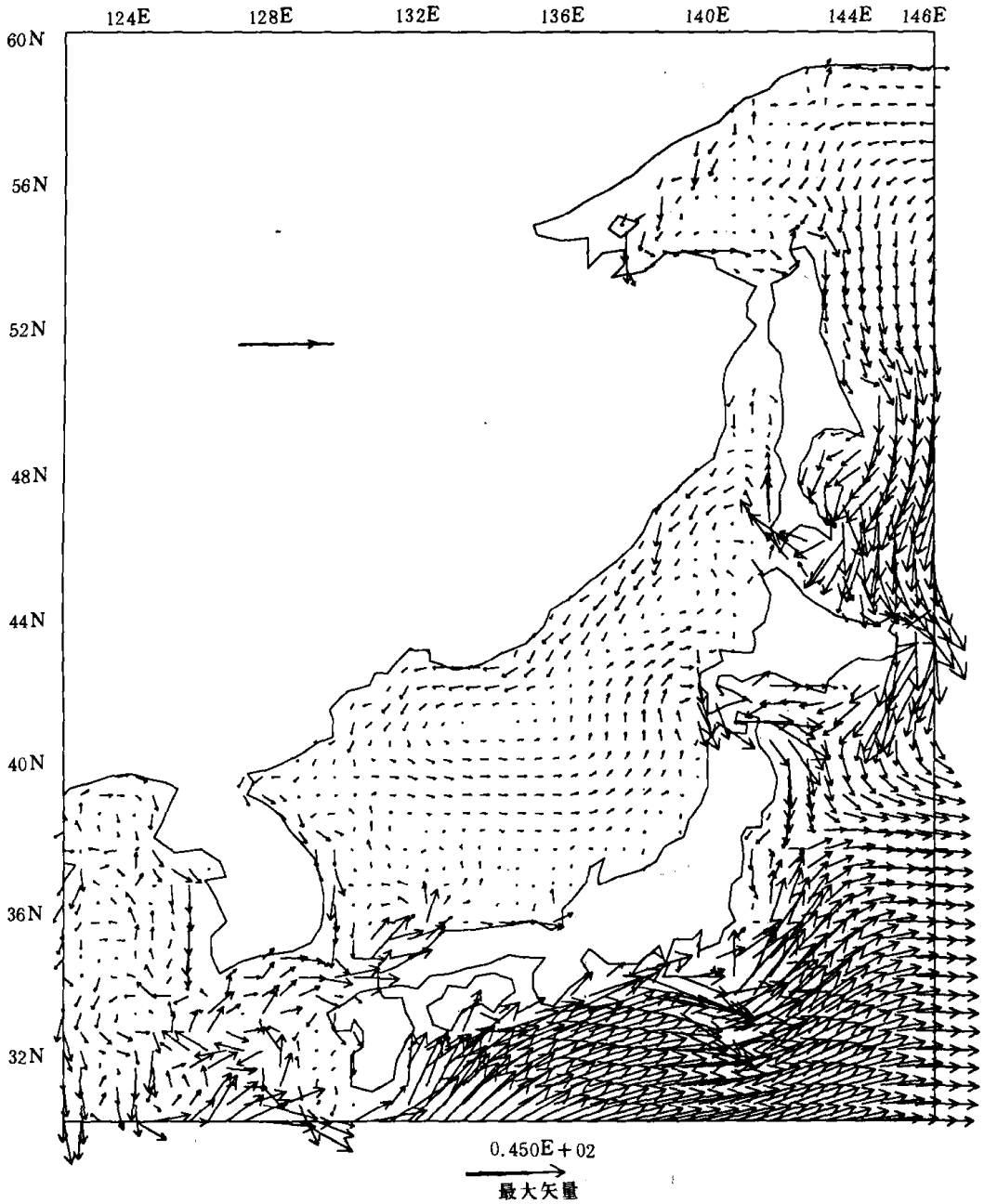


图 4　计算得到的日本海及其邻近海域 1 月份月平均流场(单位: cm/s)

3.1　对马暖流的源地

传统上一直认为对马暖流是黑潮的一个直接分支. 近年来, 人们对这一观点提出了异议. 我们的计算结果显示出, 由南海暖流、台湾海峡暖流、台湾暖流和对马暖流互相连接构成一支独立于黑潮的在陆架上向东北流动的海流. 自然, 南海暖流应当是对马暖流的主要源渊. 在九州以西向北流的那个小分支, 只是对马暖流的一部分, 并不是对马暖流的主要源地.

3.2　黑潮的分支现象

传统上认为, 东海黑潮有两个分支, 即对马暖流(自九州西南、奄美大岛西北分出)和台湾

暖流(自台湾以北分出),若再考虑巴士海峡黑潮,则还有一个分支即黑潮巴士海峡南海分支. 实际上,至今关于这些分支的实测海流资料仍然非常稀少,所以对这些分支的存在与否,在认识上远没有统一. 在本文,我们只是根据模式流场分布,给出由直观判断得到的一些初步看法.

(1) 由图3可以看到,在奄美大岛西北,黑潮的部分水体,由于地形的诱导,出现一个反气旋式的弯曲,其外侧水与东海陆架上向东北流动的水混合,在九州西南大约30°30′N,128°E的地方向北分出一个小分支,这个分支就对 应传统上所认为的对马暖流的源渊. 但是,似乎不能认为是黑潮的一个直接分支.

(2) 从图3还可以看到,黑潮在台湾东北的流动路径也有一个明显的反气旋式弯曲,由于来自台湾海峡的海流在台湾以北明显地加速,这似乎可以说明这里确有黑潮的一个分支汇入台湾暖流.

(3) 黑潮巴士海峡的南海分支

Niino 和 Emery[14] 认为黑潮有一个分支沿台湾西南岸北上进入台湾海峡. Nitani[15] 认为黑潮在流过巴士海峡附近时,流向先偏西,从海峡南部入南海,后流向复偏东,在海峡北部沿台湾东南端返回太平洋. 由图3可以看到,黑潮在巴士海峡的流动确如 Nitani[15] 所描述的,在海峡南部流入,在海峡北部流出. 于是在海峡西侧呈现一反气旋式弯曲. 但是,在海峡南部,有一部分黑潮水流入了南海,与南海北部气旋式环流的北侧部分的水体一起向西流到了南海内部海域. 另外,南海暖流流到台湾附近时由于台湾岛的阻挡和那里海底地形的诱导一部分海水转向东南,从巴士海峡的北端流入太平洋. 因此,我们认为通过台湾海峡向北流动的海水主要来自南海暖流,黑潮并没有分支沿台湾西岸向北流入台湾海峡.

3.3 海南— 台湾— 对马— 津轻暖流及其形成机制

管秉贤[5] 曾指出,在东海黑潮的西侧存在一个很强的温度锋面,可能是这个锋面导致了台湾— 对马暖流. 方国洪等[6] 指出,由于大洋密度的不均一性,南海东北部海面高度要比津轻和宗谷海峡东口来得高. 这个水位差可以引起一支近海环流.

图5是计算得到的冬季(1月)太平洋上的海面高度分布. 可以看到,在黑潮以东的西北太平洋是整个太平洋海面高度的最高区. 日本以东则是海面高度的最低区. 海南岛以东海域和津轻海峡东口的海面高度差高达90cm,计算出从汕尾到对马海峡的海面坡度为 3.15×10^{-7}. 由于南海,东海和日本海的海面高度相对较低,所以还存在从东南向西北下降的横穿"海南—台湾—对马—津轻暖流"的海面坡度. 由此,顺流方向的海面坡度引起的压力梯度力可以抵消底摩擦力,而从东南向西北下降的海面坡度产生的横穿海流方向的压力梯度力则可以与柯氏力相平衡,这两种海面坡度的联合作用就会维持这支东北向海流.

南海暖流主要沿100— 200m等深线走向流动,台湾— 对马暖流在东海主要沿50— 80m等深线走向流动. 似乎可以认为,"海南— 台湾— 对马— 津轻暖流"受控于中国海及其邻近海域的陆架地形和强大的黑潮,反映了北太平洋环流系统对我国海域的海流状况有着重要的影响.

4 结 果 和 讨 论

与实际观测结果比较表明了,本文模式结果满意地给出了比较符合实况的整个中国海域

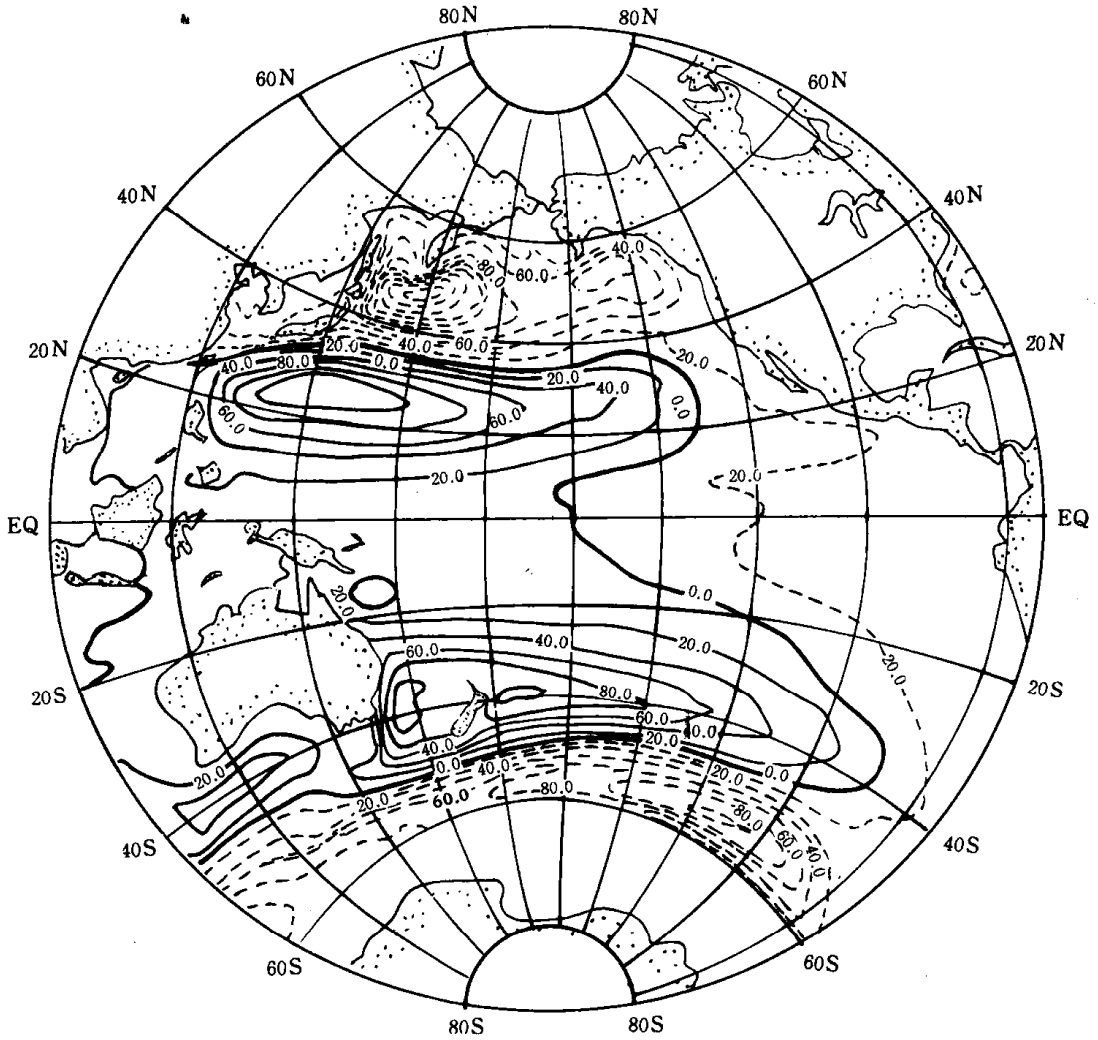


图 5　计算得到的太平洋区域海面起伏(单位:cm)

的冬季环流系统. 观测到的几支冬季逆风流动的暖流如:"南海暖流"、"台湾海峡暖流"、"台湾暖流"、"对马暖流"、"黄海暖流"以及一些中小尺度的涡旋均被模式较好地模拟出来了,这不仅是这些暖流和涡旋存在性的又一证明,同时也表明了在它们的形成过程当中,正压效应具有很重要的作用.

由于篇幅所限,本文只是根据模式结果做了一些初步分析,对一些目前认识仍不一致的问题谈了点粗浅的看法. 实际上一些问题如:黑潮的分支、对马暖流的源地、"海南— 台湾— 对马— 津轻暖流"的驱动机制等,都是很复杂的,仅根据正压模式结果不可能全面认识这些问题,更何况我们也还没有做进一步的动力分析.

本模式的主要缺点是略掉了斜压效应,所以无法考查东海黑潮西侧的温度锋面和密度不均一性对"海南— 台湾— 对马— 津轻暖流"的形成到底能起多大作用. 另外,模式中的黑潮路径太宽,可能是因为取理想化地形的缘故.

致谢　孙燕斌曾帮助整理水深资料并析印本文手稿,在此表示感谢.

参 考 文 献

[1] Guan, B. X., Mao, H. L., *C. J. of Oceanology and Limnology*, 1982, **1**(1): 5—16.

[2] Dale, W. L., *The Malayan Journal of Tropical Geography*, 1956, **8**: 1—31.

[3] Wyrtki, K., NAGA,Report 2 1961.

[4] 管秉贤，海洋与湖沼，1978, **9** (2): 117—127.

[5] 管秉贤，海洋科学集刊，1986, **27**: 1—21.

[6] 方国洪、赵保仁、朱跃华，海洋环流研讨会论文选集，海洋出版社，北京，1992, 13—27.

[7] Sol, H., Mel, R., *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, **13**: 1093—1104.

[8] 胡敦欣、丁宗信、熊庆成，科学通报，1980, **25**(1): 29—31.

[9] 张以垦等，海洋环流研讨会论文选集，海洋出版社，北京，1992, 28—40.

[10] Chuang, W. S., *Jourual of Oceanographic Society of Japan*. 1986, **42**: 355—361.

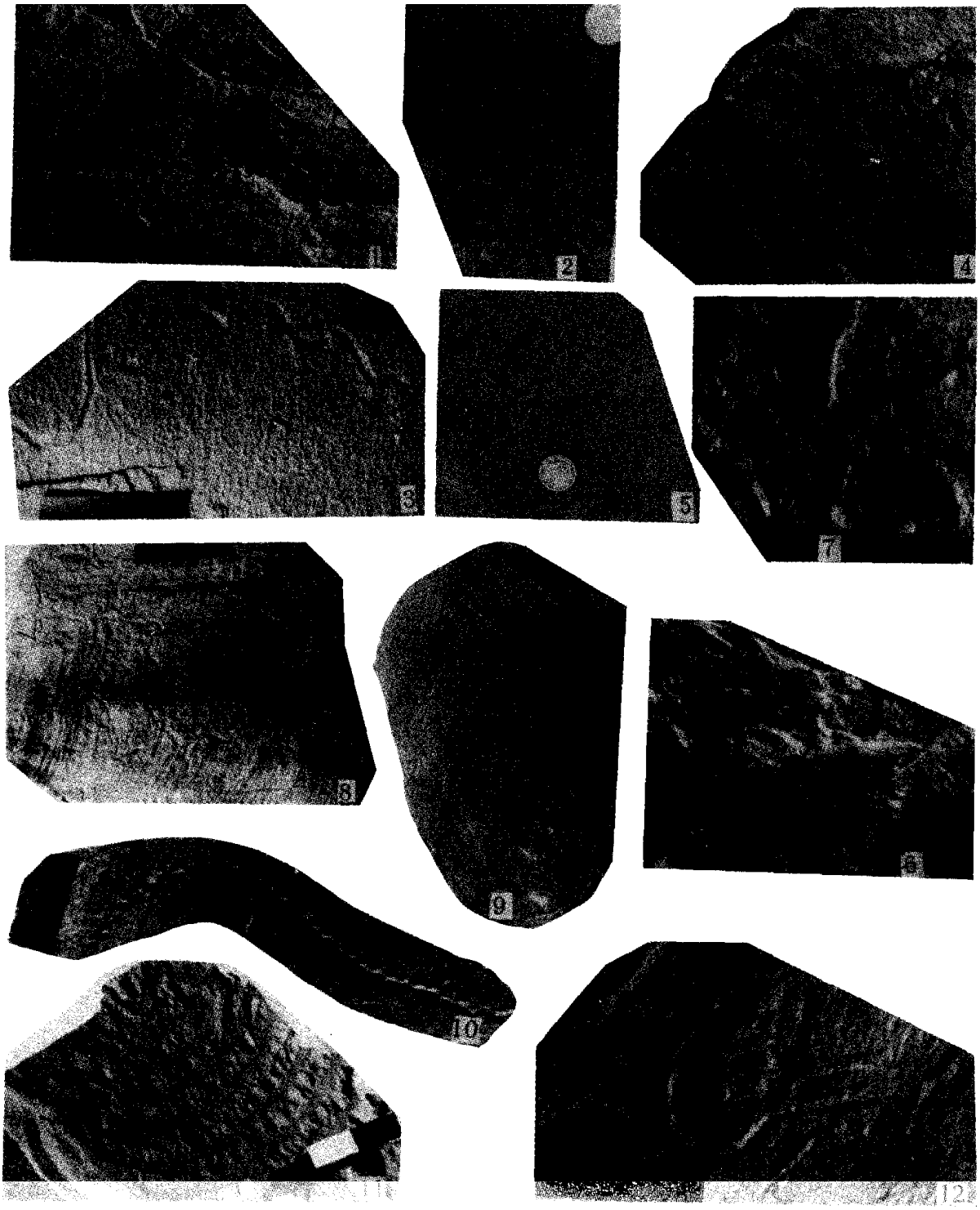
[11] *Ocean Currents in the Vicinity of the Japanese Islands and China Coast*, 2nd Edition, Washington, 1964.

[12] 日本海洋資料中心编制，海洋環境：海流篇 —— 日本近海，日本水路协会出版，1979.

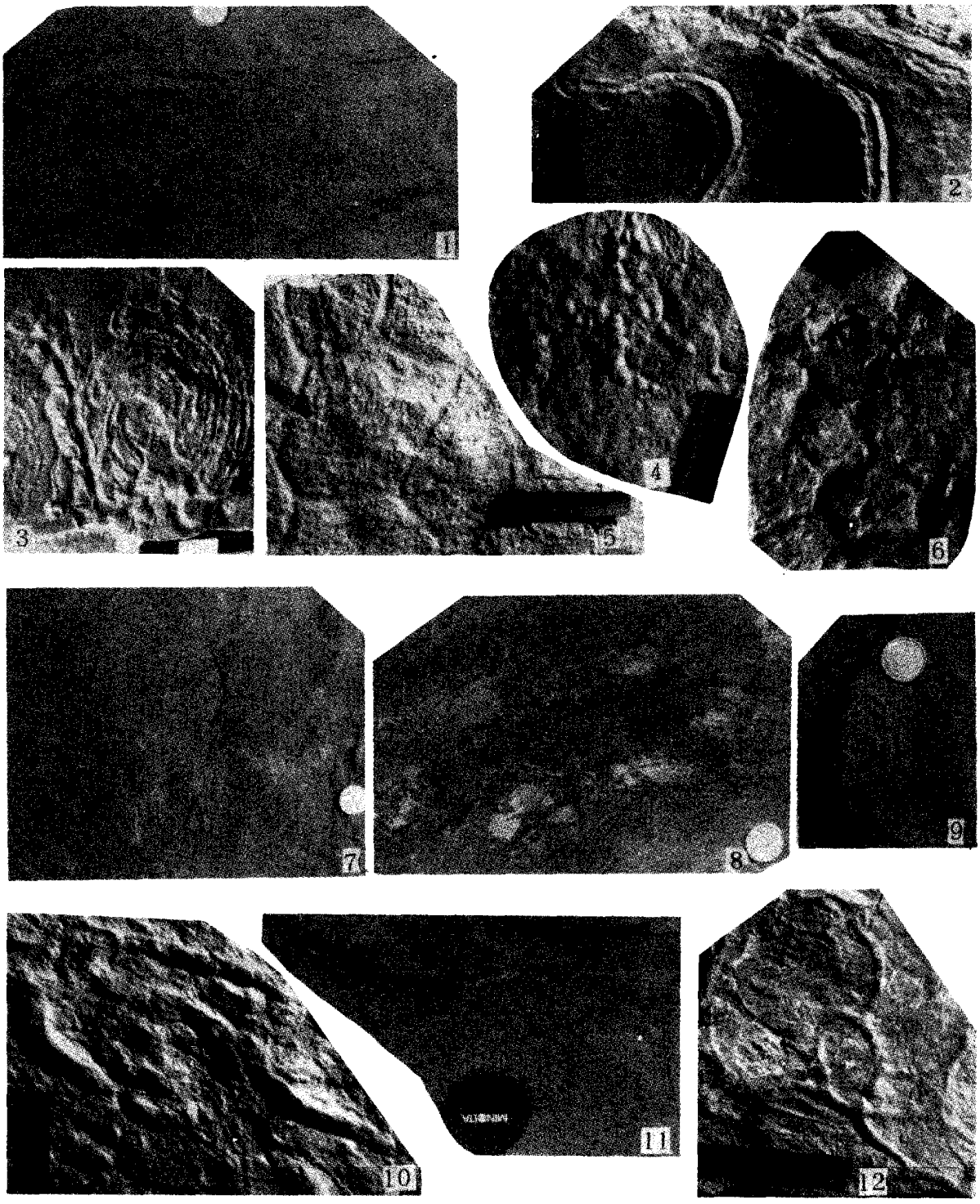
[13] 日本近海海流統計図，日本海洋データセンター海上保安庁水路部，1991.

[14] Niino, H., Emery, K. O., *Geological Society of American Bulletin*, 1961, **72**: 1611—1651.

[15] Nitani, H., *Beginning of the Kuroshio, in Kuroshio—Its Physical Aspects* (eds. Stommel, H., Yoshida, K.), University of Tokyo Press, Tokyo, 1972, 129—183.



1. 圆齿迹 *Belorhaphe*, 比例尺长 2.8cm, 崖城剖面； 2. 壳线迹 *Bostrichophyton*, 硬币直径 2cm, 固城剖面； 3. 螺旋迹 *Cochlichnus*, 固城剖面； 4. 圈线迹 *Cosmorhaphe*, 比例尺长 5cm, 固城剖面； 5. 圈线迹 *Cosmorhaphe*, 硬币直径 1.8cm, 崖城剖面； 6. 首线迹 *Lucusopsis*, 比例尺长 6cm, 固城剖面； 7. 鼻洛克迹 *Glockeria*, 崖城剖面； 8. 线形迹 *Gordia*, 比例尺长 8cm, 固城剖面； 9. 螺旋迹 *Helicolithus*, 崖城剖面； 10. 剖腹 9 的部分放大； 11. 蠕形迹 *Helminthoida*, 麻沿河剖面； 12. 拟蠕形迹 *Helminthopsis*, 比例尺长 4.5cm, 崖城剖面．



1. 发梳迹 *Lophoctenium*，硬币直径 2cm，固城剖面； 2. 类沟蠕迹 *Taphrhelminthopsis*，固城剖面； 3. 类沙蚕迹 *Nereites*，固城剖面； 4. 新沙蚕迹 *Neonereites*，固城剖面； 5, 6. 古网迹 *Paleodictyon*，崖城剖面； 7. 旋螺迹 *Spirorhaphe*，硬币直径 2cm，崖城剖面； 8. 尾蠕形迹 *Urohelminthoida*，硬币直径 2cm，崖城剖面； 9. 旋叶迹 *Spirophycus*，硬币直径 2cm，崖城剖面； 10. 旋叶迹 *Spirophycus*，比例尺长 2.5cm，崖城剖面； 11. 巨画迹 *Magagrapton*，麻沿河剖面； 12. 始网迹 *Protopaleodictyon*，固城剖面。