

渤、黄、东海海流和潮汐共同作用下的 悬浮物输运、沉积及其季节变化*

庞重光 白学志 胡敦欣

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

渤、黄、东海是一个水动力状况相当复杂的半封闭宽陆架海, 本海区悬浮颗粒物含量高, 季节变化明显, 影响范围广, 是世界上悬浮物含量最高的海域之一。对于该海域悬浮物的输运沉积过程、分布规律以及底质分布等中外学者均进行过比较深入的研究(秦蕴珊, 1963; Honjo *et al.*, 1974; Milliman *et al.*, 1985, 1986; 秦蕴珊等, 1987, 1989; 杨作升等, 1992; Li *et al.*, 1997; 孙效功等, 2000; 雷坤等, 2001)。然而, 以往的研究大都基于实际海洋调查资料, 由于受实测资料在时间和空间覆盖范围上的限制, 很难从整体上把握渤、黄、东海陆架区悬浮物输运的时间和空间变化规律。数值模拟的方法能很好地克服上述局限, 已有学者从不同角度对渤、黄、东海的某些海域的悬浮物进行了模拟研究。

董礼先等(1989)首先模拟了在二维潮流场作用下, 黄、渤海推移质和悬移质的输运状况, 得出潮流作用下海底的冲淤状况。Graber 等(1989)利用有限水深的风浪模型, 模拟了风浪对悬浮物输运、沉积的作用。Yanagi 等(1995)用拉格朗日粒子追踪方法对整个东中国海冬季悬浮物的输运、沉积过程进行了计算。江文胜等(2000, 2001)考虑了风等气象要素、外海传入的潮波的作用、悬浮物的沉降及再悬浮机制, 对渤海中悬浮物的浓度进行了数值模拟。

海洋环流、潮汐、潮流和波浪均对悬浮物的输运与沉积产生影响, 尤其在中陆架和外陆架地区, 环流对悬浮物的长期输运起决定性作用, 因此以往仅针对潮流、风浪作用的模拟很不完整, 其结果与实际情况的差别也会较大。其次, 海水的流动处在不断变化之中, 小到日变化、月变化, 大到季节变化、年际变化, 因此定常风场、定常温盐场的环流模拟, 即诊断流场并不符合实际情形。本文将首先对渤、黄、东海月平均风场、温盐场作用下的环流场进行模拟, 进而探讨环流以及潮汐、潮流共同作用下的悬浮物输运、沉积过程及其季节变化规律。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 4893 号。中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-207), 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043803)联合资助

通信作者: 庞重光, 女, 研究员, 现从事近海物质输运和通量研究。E-mail: chgpang@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2002 年 9 月 6 日

一、模式与方法

1. 海洋环流及潮汐、潮流模式及模拟方法

作者首先用 Princeton Ocean Model (POM) 来数值模拟渤、黄、东海的环流。POM(Blumberg *et al.*, 1987)是一个三维斜压海洋模式。

数值模拟范围从 $24^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $118^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 。水平及垂向分辨率分别为 0.25° 、10 层。在开边界处, 即长江口、台湾海峡、台湾以东到琉球群岛、大隅-吐噶喇海峡和对马海峡, 给定流量分别为 5~9 月份 0.04 Sv、2.60 Sv、25.00 Sv、24.80 Sv 和 2.84 Sv; 其余月份为 0.02 Sv、1.80 Sv、21.50 Sv、20.90 Sv 和 2.42 Sv, 并采用呈对数分布的垂向流速结构; 闭边界处法向流速为零; 琉球群岛岛弧地区取无流量通过条件。

采用 Levitus(1994, $1^{\circ}\times 1^{\circ}$)气候月平均温盐资料作为初始场输入, 气候月平均的海面风应力、净海面热量通量和太阳辐射由 COADS 资料内插得到, 作为模式积分的强迫场, 共积分 5 年, 第 1 年采用温度和盐度强迫恢复方案, 从第 2 年开始代之以浮力通量的强迫恢复方案。取第 5 年月平均的计算结果为渤黄东海环流的模拟结果。

潮汐、潮流对悬浮物的输运, 尤其是悬浮物的沉积和再悬浮起决定性作用, 因此仅模拟环流作用下的悬浮物输运是不全面的。作者在模拟了渤、黄、东海环流之后, 又通过在边界点上给定潮汐调和常数的方法, 同步模拟了渤、黄、东海的海洋环流与潮汐、潮流, 这里仅考虑主要分潮 M_2 。需要指出的是, 在同步模拟渤、黄、东海的海洋环流与潮汐时, 由于东海地形复杂, 陆坡处水深急剧变化, 潮汐、潮流的高频性等原因, 使得计算 σ 坐标下的斜压项时产生的误差较大, 甚至使计算发散, 所以只计算正压部分。

2. 悬浮物输运模式

(1) 控制方程

在潮汐、潮流、海洋环流的共同作用下, 考虑悬浮物输运、沉积的季节变化规律。悬浮物在水中的运动, 有对流、扩散和沉降三个过程, 其控制方程(σ 坐标)如下:

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C(\omega + \omega_s)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_v}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(DA_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DA_h \frac{\partial C}{\partial y} \right)$$

式中: C 为悬浮物浓度; U 、 V 、 ω 为海水的流速; ω_s 为悬浮物的沉降速度; A_h 、 A_v 为悬浮物的水平和垂向湍扩散系数; D 为扰动水深。

(2) 边界条件、沉积与侵蚀过程

a. 海洋表面: 尽管风尘等大气沉降物是海水中悬浮物的重要来源之一, 但由于目前对其量值还不确定, 作者只好取海面净通量为 0 的条件。

b. 海底界面: 海底是悬浮物沉积和沉积物再悬浮的重要源汇之地。

沉积过程: 海底界面处的沉积包括物理沉积和生物沉积, 由于生物沉积过程的复杂性和时空变化显著, 本文暂不考虑此过程。悬浮物沉积的临界速度($V_{cr,d}$, 单位: cm/s)

通过其所受拖曳力和摩阻力的平衡求得(钱宁等, 1983)

$$V_{cr,d}^2 = \frac{10d}{3} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g$$

式中: ρ_s 、 ρ_w 分别代表悬浮物和水体密度; d 为悬浮物粒径。

单位时间、单位面积沉积的悬浮物量(q_d)如下式所示:

$$q_d = \omega_s C_{bot} \left(1 - (V/V_{cr,d})^2 \right) \quad V < V_{cr,d} \quad (V \text{ 是海底剪切速度})$$

侵蚀过程: 以往对沉积物被侵蚀的临界速度($V_{cr,e}$)即起动流速的研究较多, 相应的经验和半经验公式亦不少。作者采用 Miller 等(1977)的经验关系式(如下式所示), 再参考 Shields 起动剪切力曲线求得。 $V_{cr,e} = 134.3D^{0.29}$, 其中, D 为沉积物粒径。

根据渤、黄、东海表层底质类型(按粒径分类)分布, 定出不同底质类型区的起动流速。

单位时间、单位面积侵蚀的沉积物量(q_e)如下式所示(Teisson, 1997)

$$q_e = M \left((V/V_{cr,e})^2 - 1 \right) \quad V > V_{cr,e} \quad (M \text{ 是侵蚀常数})$$

这里需要指出的是, 在某一地点, 即使 $V > V_{cr,e}$, 侵蚀也不可能无限进行, 当近底层悬浮物浓度大于此处近底层水流的饱和浓度(C_{bot}^* , 与水流流速、水深、悬浮物沉降速度等有关)即挟沙力时, 侵蚀停止。

c. 侧边界: 陆地边界采用无悬浮物通量条件; 开边界采取法向浓度梯度为 0 的条件; 在河口, 采用第一类边界条件, 即给定该点处的悬浮物浓度。在黄河、长江入海口处我们给定悬浮物浓度(汛期和非汛期)分别为: 黄河 40 000 mg/L 和 20 000 mg/L; 长江 1 000 mg/L 和 700 mg/L。

在悬浮物的输运及沉降过程中, 其粒径是决定性因素之一, 不同粒径悬浮物的扩散及沉降均不相同, 因此为了尽量准确地模拟实际情况, 作者把总悬浮物根据长江入海悬浮物多年平均的粒径累级曲线(Shen *et al.*, 1998)划分为五种粒径(各占 20%)分别进行了计算, (0.004 mm, 0.012mm, 0.025mm, 0.044mm 和 0.080mm)。它们对应的沉降速度据 Stokes 公式计算。

二、模拟结果与分析

1. 渤、黄、东海环流及潮汐、潮流的模拟

图 1 中的模拟结果较好地再现了渤、黄、东海的环流系统及其季节变化。从总体来看, 渤、黄、东海的环流是由一个气旋式的流涡所组成。东侧主要是向北来自大洋的高温、高盐水系, 即黑潮主干-对马暖流-黄海暖流及其延伸部分; 西侧为南向的、低盐的、冬季最强的沿岸流系: 苏北沿岸流, 闽浙沿岸流, 其间伴随着涡旋现象(如东海冷涡、东海黑潮左右两侧的涡旋等)。当然, 冬季最强的西朝鲜沿岸流亦不可忽视。

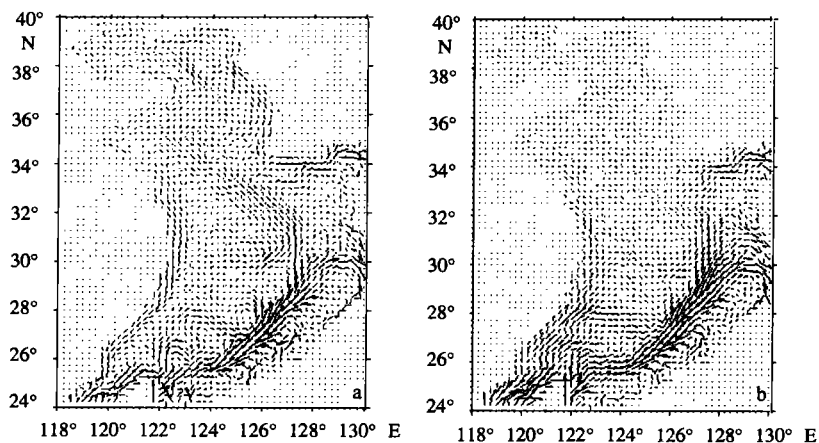
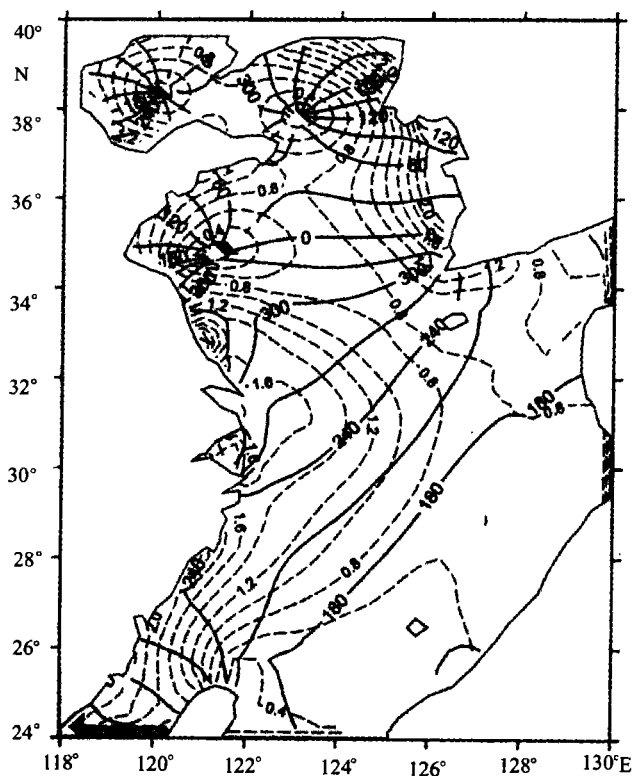


图1 渤、黄、东海水平环流场模拟结果(10m层)

a. 冬季; b. 夏季

图2是计算所得的 M_2 分潮同潮图。 M_2 分潮的模拟结果与实际观测和前人的数值模拟结果(Fang, 1986; 王凯, 1999)基本相符。

图2 渤、黄、东海模拟的 M_2 分潮同潮图

2. 渤、黄、东海不同粒径悬浮物的扩散

作者对五种不同粒径悬浮物在渤黄东海的输运、扩散进行了模拟,以冬季为例,其深度平均悬浮物浓度(mg/L)平面分布见图3。图3a、b分别代表粒径为0.004mm和0.025mm的悬浮物的扩散。悬浮物粒径越细,其沉降速度以及沉积的临界速度越小,越有利于其向外海或远源处输运、扩散。

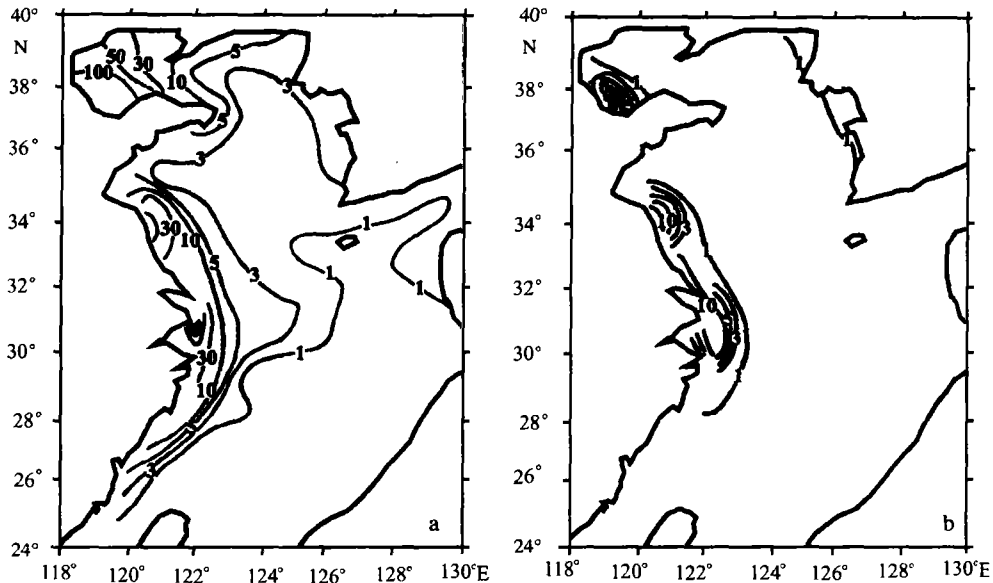


图3 渤、黄、东海不同粒径悬浮物浓度的平面分布

a. 黏土 0.004 mm; b. 中粉砂 0.025 mm

苏北老黄河口以及长江入海的粒径为0.004mm的悬浮物在冬季向东最远可扩散至125.5°E,向南可达25°N;而粒径为0.025mm的悬浮物只在28°N、123°E范围内扩散。粒径为0.004mm的黄河入海物质在冬季可越过渤海海峡,进入北黄海,之后分东西两支分别沿西朝鲜沿岸和山东半岛沿岸扩散。而粒径为0.025mm的黄河入海物质根本不能被输运至渤海海峡,最远仅达120°E。

3. 渤、黄、东海悬浮物扩散的季节变化

(1) 渤、黄、东海悬浮物的季节性输运

将含量各占20%的五种不同粒径悬浮物在渤、黄、东海的输运、扩散结果相加,得到总悬浮物的输运、扩散情况,其深度平均的悬浮物浓度(mg/L)平面分布见图4。总体来看,长江、黄河的入海悬浮物在冬季和秋季向外海或远源处输运、扩散,而在夏季和春季绝大部分沉积在河口附近。模拟结果与由实际调查资料推断的悬浮物的“夏储冬输”的季节性输运格局(杨作升等,1992),以及由海面反射率遥感资料所得的研究结果(孙效功等,2000)基本上一致。

在秋、冬季,尤其是冬季,南向流动的苏北沿岸流、长江冲淡水、浙闽沿岸流连成一片,与之相应的浑浊水体亦沿岸呈带状分布,促使浙闽沿岸泥的发育。由于模拟的冬

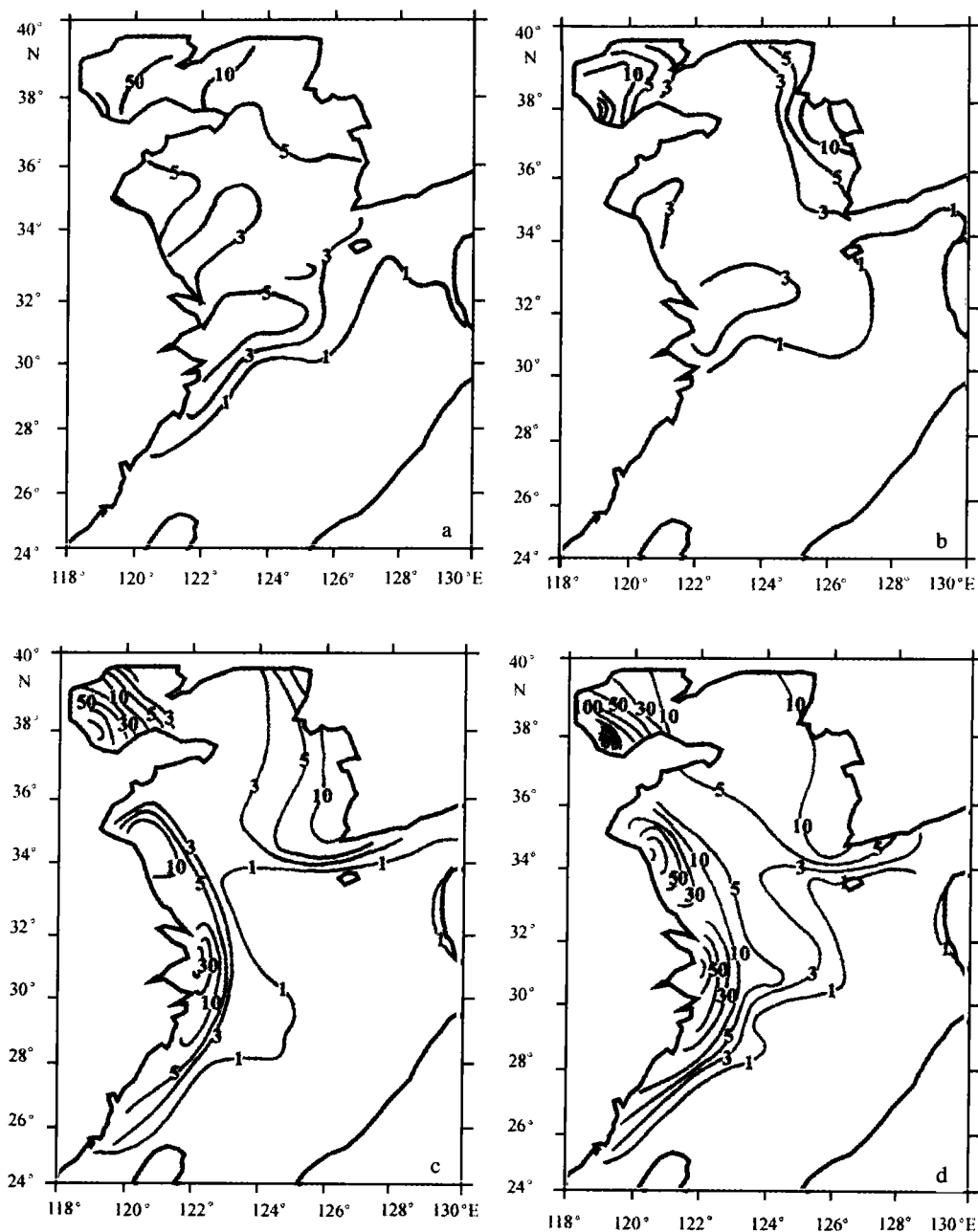


图4 渤、黄、东海总悬浮物浓度平面分布的季节变化

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季

季台湾暖流的爬升较弱,进而苏北沿岸流始终沿岸流动,未能转向偏东流动,所以微弱向北的台湾暖流未能阻止长江口及浙闽沿岸浑浊水体向外海的扩散,亦未能使苏北沿岸的浑浊水体呈舌状向东南输运。在春、夏季,尤其是夏季,仅有少量入海悬浮物向外海

扩散,而且最远仅到 124°E。少量黄河入海物质仅在冬季和春季可以越过渤海海峡,进入北黄海;而夏、秋季,黄河入海物质最远可扩散至海峡处。在朝鲜沿岸,由于潮流流速大,海底基本处于被侵蚀状态,使得水体中悬浮物浓度常年偏高,尤其在冬半年,西朝鲜沿岸流更加增强了悬浮物的浓度及其南向的输运。

(2) 黄、东海与渤、黄海的悬浮物质交换

黄、东海以及渤、黄海的物质交换问题历来备受关注,又说法不一(李本川, 1980; 胡敦欣等, 2001; 秦蕴珊等, 1986; Alexander *et al.*, 1991)。如渤、黄海的物质交换,秦蕴珊等(1986)认为进入黄海的黄河入海物质质量不超过其总量的 1%; Alexander 等(1991)则认为这个量大约为 9%~15%。作者将利用数模结果对此问题进行讨论。

利用数值模拟所得的流速值和悬浮物浓度值得通过 32°N 断面以及渤海海峡的悬浮物通量,乘以时间得季节输送量(表 1)。在 32°N 断面,取 126.75°E 为界,是因为这一位置经验上是黄海暖流和对马暖流的分流处,126.75°E 以西基本代表黄、东海悬浮物质的交换。

表 1 渤、黄、东海通过不同断面悬浮物的季节输送量

	春季	夏季	秋季	冬季	年净输送量 (平均)
悬浮物输送量(A)/10 ⁶ t	14.28	21.59	-35.88	-50.08	-50.09
悬浮物输送量(B)/10 ⁶ t	3.55	1.28	0.16	9.75	14.74

注: A 为通过 32°N 断面(126.75°E 以西); B 为通过渤海海峡。

由表 1 可看出,不同季节通过 32°N 断面悬浮物输送的量值和方向明显不同。冬季与秋季悬浮物向南输送,而且冬季高于秋季,约为秋季输送量的 1.4 倍,说明从老黄河口剥蚀的泥沙主要在秋、冬两季,以苏北沿岸流为载体从黄海输入东海,而且以冬季为主;春、夏两季悬浮物向北输送,而且夏季高于春季,是夏季长江冲淡水转向偏北方向输送的另一佐证。一年四季,通过渤海海峡的悬浮物输送均向东,即从渤海输向黄海,其年净输送量约占黄河入海悬浮物质总量的 2%。而且输运主要发生在冬、春季,占总输送量的 90%,而夏、秋季的东向输运则十分微弱。全年平均物质交换量分别为 -50.09×10^6 t 和 14.74×10^6 t,即黄海向东海年净输送约 0.50 亿 t 悬浮物,渤海向黄海年净输送约 0.15 亿 t 悬浮物。

4. 模拟的渤、黄、东海底质分布

根据海底边界悬浮物的沉积通量(q_d)和沉积物的侵蚀通量(q_e),绘制沉积侵蚀分区图 5b(阴影部分为沉积区,空白为侵蚀区),图中等值线的数值表示每年单位面积的沉积量(单位: kg; $2.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 约相当于 3 mm/a 的沉积速率)。与图 5a 渤、黄、东海底质类型实测分布图(胡敦欣等, 2001)相比较,两图沉积区(多数情况相当于泥质区)、侵蚀区(砂质区)的位置基本吻合,尤其是渤海中部泥、黄海中部泥、南黄海西部泥、长江口外泥、浙闽沿岸泥的位置及范围非常一致;而且模拟的黄海中部泥、浙闽沿岸泥的沉积速率与实测结果(DeMaster *et al.*, 1985; 陈毓蔚等, 1982)大致相当,约为 3 mm/a。

据申顺喜等(2000)研究, 济州岛西北部的泥质沉积属侵蚀泥质沉积, 该沉积并非现在沉积动力环境的产物。在作者的模拟结果中, 此处亦为侵蚀区。惟一的缺憾是济州岛西南泥的模拟并不成功, 而且从长江口到 127°E 沉积区连成一片。这同样是由于模拟的冬季台湾暖流的爬升较弱造成的(图 1)。与悬浮物浓度的平面分布(图 4)相对应, 悬浮物向外海输运的同时沿程沉积, 造成了大片的沉积区, 因此济州岛西南区域的沉积量也不会明显高于其周围地区。

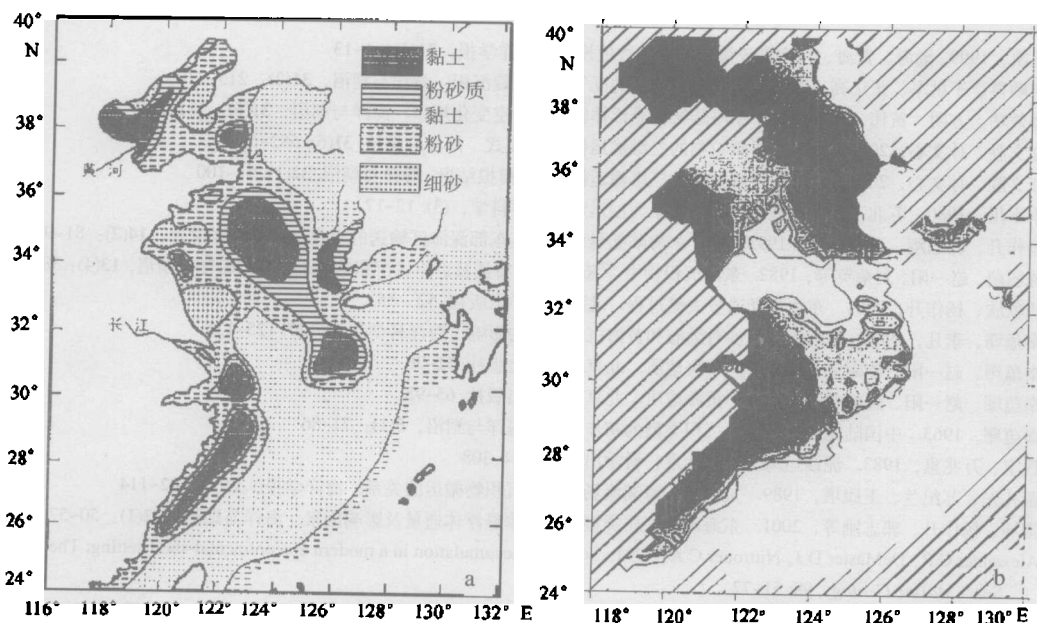


图 5 渤、黄、东海表层底质分布
a. 实测分布; b. 仅受悬移质影响的数模结果

三、结 论

基于 POM 模式, 对渤、黄、东海环流及潮汐、潮流共同作用下的悬浮物输运、扩散、沉积与侵蚀进行了模拟。

- 1) 环流模拟结果较好地再现了渤、黄、东海的环流系统及其季节变化。
- 2) 悬浮物粒径越细, 越有利于其向外海或远源处输运、扩散; 总悬浮物浓度时空分布的模拟结果显示并进一步证实了渤、黄、东海悬浮物的季节性输运特征: “春、夏储, 秋、冬输”。
- 3) 黄海向东海年净输送约 0.50 亿 t 悬浮物, 发生在秋、冬季; 渤海向黄海年净输送约 0.15 亿 t 悬浮物, 约占黄河入海悬浮物质总量的 2%, 而且 90% 的输运发生在冬、春季。

4) 模拟的渤、黄、东海仅受悬移质影响的底质分布同实测结果基本吻合;而且在浙闽沿岸泥等处计算的沉积速率与实测相当,约为 3 mm/a。

本模式在整个计算中,未考虑推移质的输运、沉积,因此数值计算的底质分布尚不完善。波浪的掀沙和搬运作用,悬浮物的絮凝过程等问题将有待今后作更深入、细致的研究。

参 考 文 献

- 王凯, 1999. 渤海、黄海、东海潮汐潮流的三维数值模拟. 海洋学报, 21(4): 1~13
- 申顺喜、于洪军、张法高, 2000. 济州岛西北部的反气旋型涡旋沉积. 海洋与湖沼, 31(2): 215~220
- 孙效功、方明、黄伟, 2000. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律. 海洋与湖沼, 31(6): 581~587
- 江文胜、孙文心, 2000. 渤海悬浮颗粒物的三维输运模式 I. 模式. 海洋与湖沼, 31(6): 682~687
- 江文胜、孙文心, 2001. 渤海悬浮颗粒物的三维输运模式 II. 模拟结果. 海洋与湖沼, 32(1): 94~100
- 李本川, 1980. 苏北平原海岸地貌特征及沿岸泥沙运动. 海洋科学, (3): 12~17
- 杨作升、郭志刚、王兆祥等, 1992. 黄、东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局. 海洋学报, 14(2): 81~90
- 陈毓蔚、赵一阳、刘菊英等, 1982. 东海沉积物中 ^{226}Ra 的分布特征及近岸区沉积速率的测定. 海洋与湖沼, 13(4): 380~388
- 胡敦欣、杨作升, 2001. 东海海洋通量关键过程. 北京: 海洋出版社. 52~55
- 秦蕴珊、李凡, 1986. 黄河入海泥沙对渤海和黄海沉积作用的影响. 海洋科学集刊, 27: 125~135
- 秦蕴珊、赵一阳、陈丽蓉等, 1987. 东海地质. 北京: 科学出版社. 31~38
- 秦蕴珊、赵一阳、陈丽蓉等, 1989. 黄海地质. 北京: 科学出版社. 65~98
- 秦蕴珊, 1963. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究. 海洋与湖沼, 5(1): 71~86
- 钱宁、万兆惠, 1983. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社. 304~308
- 董礼先、苏纪兰、王康塘, 1989. 黄、渤、海潮流场及其与沉积物搬运的关系. 海洋学报, 11(1): 102~114
- 雷坤、杨作升、郭志刚等, 2001. 东海不同底质类型海域春季悬浮体通量及影响因素. 海洋与湖沼, 32(1): 50~57
- Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A, 1991. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea. *Marine Geology*, 98: 51~72
- Blumberg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In: Three-Dimensional Coastal Ocean Models, American Geophysical Union. Washington: D C. 208
- DeMaster D J, McKee B A, Nittrouer C A *et al.*, 1985. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4(1): 143~158
- Fang G H, 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 4(1): 1~16
- Graber H C, Beardsley R C, Grant W D, 1989. Storm-generated surface waves and sediment resuspension in the East China and Yellow Seas. *J. Phys. Oceanogr.*, 19: 1034~1059
- Honjo S, Emery K O, Yamamoto S, 1974. Non-combustible suspended matter in surface waters off eastern Asia. *Sedimentology*, 21(4): 555~575
- Li F, Li P, Zhang X R *et al.*, 1997. Transport of suspended matter from the Changjiang River to the East China Sea shelf. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 15(3): 264~270
- Miller M C, McCave I N, Komar P D, 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24: 507~527
- Milliman J D, Li F, Shao Y Y *et al.*, 1986. Suspended matter regime in the Yellow Sea. *Progress in Oceanography*, 17: 215~227
- Milliman J D, Shen H T, Yang Z S *et al.*, 1985. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. *Continental Shelf Research*, 4(1/2): 37~45
- Shen H T, Zhang C, Xiao C Y *et al.*, 1998. Change of the discharge and sediment flux to Estuary in Changjiang River. In: Health of the Yellow Sea. Seoul: The Earth Love Publication Association. 129~148
- Teisson C, 1997. A review of cohesive sediment transport models. In: Cohesive Sediments. Chichester: John Wiley. 367~381
- Yanagi T, Inoue K. 1995. A numerical experiment on the sedimentation processes in the Yellow Sea and East China Sea. *J. Oceanography*, 51: 537~552

The Transport and Sedimentation of Suspended Matter and Their Seasonal Variation are Affected by Circulation and Tide Current in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea*

PANG Chongguang BAI Xuezhi HU Dunxin

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

Abstract

The circulation, tide and tide current in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea were relatively successfully simulated by POM (Princeton Ocean Model). Then after the governing equation of suspended matter transport was added into POM, and with due consideration of the mechanism of the sedimentation and re-suspension, the transport, dispersion, sedimentation and erosion of suspended matter affected by circulation and tide current were simulated. Simulated results on the temporal and spatial distribution of total suspended matter concentration revealed and further proved that the seasonal characteristics of suspended matter transport were: storage in summer and autumn; transport in winter and spring in the East China Seas. Shelf circulation has crucial influence on long-term suspended matter transport. The finer the grain size of suspended matter was, the farther it dispersed. The simulated distribution of surface sediment accorded with that measured; and the simulated settling velocity on the mud off Zhejiang coast is similar to the measured. The calculated result of suspended matter exchange showed that net flux of suspended matter from the Yellow Sea to the East China Sea was 5.0×10^7 tons every year, especially in autumn and winter; the net flux from the Bohai Sea to the Yellow Sea was 1.5×10^7 tons every year, about 2% of total suspended matter derived from the Yellow River.

* Contribution No.4893 from Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences