

# 黄河入海泥沙在渤海中悬移输送季节变化的数值研究\*

王海龙<sup>1</sup> 李国胜<sup>2</sup>

(1. 广东省电力设计研究院, 广州, 510663; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

**提要** 利用实际的风场和地形等条件, 基于一个浪流耦合模型提供的动力场驱动一个悬沙输送模型, 研究黄河入海泥沙在渤海中悬浮输送的季节变化特征。通过数值计算发现, 69%的黄河入海泥沙最终滞留在滨海区, 输往外海的泥沙占入海泥沙总量的 31%, 尚有 4%的泥沙通过渤海海峡输往北黄海。因此, 黄河口附近的悬沙含量非常高(  $1\text{kg/m}^3$ ), 且其季节变化主要受到入海水沙通量多寡的影响, 丰水丰沙的夏秋季最高。除黄河口外, 渤海其他海域海水中悬浮体含量的平面分布具有明显的地区性和季节性, 其基本趋势是悬浮体含量随离岸距离的增加而减少, 且其季节变化主要受风场时变控制。数值计算得到的悬沙输运年平均结构显示: 黄河入海泥沙部分输向渤海湾南岸; 而大部分泥沙向东南输向莱州湾, 大量泥沙并不在此沉积, 继而向东北方向输运, 莱州湾只是一个向外输沙的通道。泥沙输运通量的结构与海底冲淤之间有良好的对应关系, 最具典型代表性的是黄河口南北两侧涡状通量以及与之对应的泥质沉积区。

**关键词** 渤海, 数值模拟, 悬沙输运, 泥沙冲淤

**中图分类号** P731

陆源泥沙不但影响着海岸线变迁以及岸滩冲淤, 而且还将所携带的大量营养盐和污染物倾入海洋, 因此陆源泥沙在海洋中的输运对海洋地貌和生态动力环境都有重要的影响(Hwang *et al.*, 1998; Birch *et al.*, 1999; Murphy *et al.*, 1999)。渤海是一半封闭浅海, 周围有黄河、辽河、海河与滦河等大小河流注入, 其中黄河经利津站输入渤海泥沙量的多年平均值(1950—1985年)达到 10.49 亿 t (武桂秋等, 1994), 占汇入渤海泥沙总量 90%以上(秦蕴珊等, 1985)。近年来, 由于黄河上游自然因素和人类活动的影响, 黄河入海水沙通量逐年递减, 对黄河三角洲附近的造陆运动和渤海生态环境造成了严重影响(Wu *et al.*, 2004; Sundermann *et al.*, 2004)。

有关黄河入海泥沙在渤海中的悬移输运已有大量工作(Milliman *et al.*, 1986; 秦蕴珊等, 1985; Park *et al.*, 1990; Martin *et al.*, 1993)。然而, 绝大多数有关悬

浮物浓度的研究都是基于海洋调查资料的分析, 受到水文调查时间和资料空间范围的限制(秦蕴珊等, 1985; 江文胜等, 2002); 而且绝大部分工作都是围绕黄河口附近开展的(武桂秋等, 1994; 胡春宏等, 1996; 董年虎, 1997; 曹文洪等, 2001), 因而很难从整体上把握黄河入海泥沙悬移输运的时空变化规律。而有关黄河入海泥沙输运方向和机制的研究, 基本上都是根据地质调查资料和水动力环境资料所做的定性分析(Martin *et al.*, 1993; 赵保仁等, 1995; 顾玉荷等, 1996; 武桂秋等, 1994; 王桂芝等, 2002)。Jiang 等(1997)最初利用数值模拟的方法计算分析了黄河入海泥沙在渤海中的悬浮扩散过程, 随后就不同问题对黄河入海泥沙的悬移输运进行了数值研究(Jiang *et al.*, 1997, 2000, 2004; 江文胜等, 2000, 2001)。这些数值模拟工作在一定程度上给出了渤海表层悬沙浓度的时空分布特征, 然而所选用的数值模型中一个值得

\* 国家自然科学基金资助项目, 40771030 号、40571020 号、40271020 号。王海龙, 博士, E-mail: wanghl.cn@gmail.com  
收稿日期: 2007-03-30, 收修改稿日期: 2008-05-16

注意的问题是没有考虑粘性泥沙的絮凝过程。而统计表明, 94.2%的黄河入海泥沙的粒径小于 0.063mm(秦蕴珊等, 1985); 海洋环境中粒径小于 0.075mm 的泥沙在沉降过程中都会出现絮凝现象, 宜作为粘性泥沙来处理(Blumberg, 2002)。前人研究中多设定入海泥沙中值粒径的比例, 然后采用 Stokes 公式计算其沉降速度, 这样对粘性泥沙而言自始至终都保持同样的沉降速度, 而根据(钱宁等, 2003; McAnally, 1999)等的研究成果可知, 不同粒径的粘性泥沙之间存在不同的絮凝过程, 使得絮团的沉降速度呈现复杂的变化过程。因此不考虑絮凝效应势必对悬沙沉降速度的计算结果产生较大的负面影响, Jiang 等(2000)在模拟计算中也提到了这个问题。另外一些模型采用标量相加的方法来处理底边界层中浪流共同作用下的剪切应力(江文胜等, 2000), 而 Grant-Madsen 模型采用迭代的方法来求解浪流共同作用下的底剪切应力, 因此前人数值模拟中对底边界层的处理也待商榷。尚有部分泥沙输送模型只考虑了潮流贡献, 没有考虑海浪和环流的作用(Zhu *et al*, 2000), 而海浪可以增加海底剪切应力, 波浪掀沙为潮流和余流输沙提供大量的物质源(曹祖德, 1993; Davies *et al*, 2002)。

综上, 过去的研究工作多是基于短时间、小范围的调查资料, 很难从整体上把握黄河入海泥沙悬移运输的时空变化规律; 而有关的数值模拟工作中的某些简化也给计算结果带来一定误差, 而且多是分析悬沙浓度的分布, 并未说明黄河入海泥沙在渤海的输送过程。因此, 本文主要目标是, 用浪流耦合模型驱动一个综合考虑了粘性泥沙和非粘性泥沙沉积动力学的输沙模型, 分析渤海悬沙浓度和输沙通量的季节变化特征, 从而从整体上把握黄河入海泥沙悬浮运输过程的时空变化规律。

## 1 模型介绍及其配置

### 1.1 模型介绍

SED 是 ECOMSED 模型(Estuary, Coastal Ocean Model and SEDiment transportation)中描述三维沉积物运输过程的模块, 可以计算多种水动力环境中(湖泊、河流、河口、海湾和陆架海)沉积物运输过程(Blumberg, 2002)。SED 模块中综合考虑了粘性和非粘性沉积物的再悬浮、沉降和水平运输。粘性沉积物包括细颗粒粉砂和直径小于 0.075mm 的黏土碎屑; 非粘性沉积物主要是由直径介于 0.075—0.5mm 之间的细砂组成; 粗砂和砾石(直径大于 0.5mm)主要呈推

移质形式运输, 这里不作考虑。

模型对粘性泥沙和非粘性泥沙选用了两种不同的计算方法。对粘性泥沙而言, 理论、实验和实际观测均证明, 粘性泥沙絮凝以及絮团形成后受含沙量、紊流等因素影响, 这些因素和过程都影响到粘性泥沙的沉降速度(钱宁等, 2003; McAnally *et al*, 2002)。Jiang 等(2000)在用数值模拟的方法讨论渤海悬沙浓度时也提到不考虑絮凝效应会导致泥沙沉降速度偏低。因此这个模型一个重要的改进就是在粘性泥沙沉积动力学中考虑了絮凝作用的影响, 采用 Burban 等(1990)公式计算粘性絮团的沉降速度。此外还增加了一个粘性沉积床冲淤的计算模块(MacIntyre *et al*, 1990)。非粘性泥沙的再悬浮与沉降过程的计算采用 van-Rijn(1984)提出的算法, 假定海底沉积物再悬浮发生在泥沙活动层中(Karim *et al*, 1986), 需考虑屏蔽效应。

泥沙再悬浮和沉降都要受到水沙界面诱生的剪切应力的影响, 所以计算底剪切应力是计算沉积物运输过程中非常重要的一部分。波、流致底剪切应力对计算沉积物再悬浮和沉降通量非常重要(van-Rijn *et al*, 1993)。波流耦合产生的剪切应力比纯流致剪切应力要大一倍, 这样海底侵蚀和沉积物运输的结果差异很大(Grant *et al*, 1979)。SED 模块中采用 Grant-Madsen 浪流耦合模型(Grant *et al*, 1979)来计算浪流耦合作用下的底剪切应力。

水动力背景场由下面两个模型提供: 模拟环流的 ECOM 模块和模拟海浪特征的 SWAN(Simulating WAVes Nearshore)模型。ECOM 是在 POM(Princeton Ocean Model)的基础上发展而来的, 主要应用于浅水动力环境研究, 如河流、海湾、河口、浅海以及水库湖泊(Blumberg, 2002)。ECOM 的方程组以及数值方法与 POM 相同, 控制方程和物质运输方程中垂向混合系数也是通过一个二阶湍封闭模式求解(Mellor *et al*, 1982)。SWAN 模式是一种更加适用于海岸、湖泊及河口地区的浅水波浪(风浪、涌浪和混合浪)数值预报模式, 该模式全面合理的考虑了风能输入、波浪成长和消衰、能量的耗散和传递机制(Campbell *et al*, 2004)。

### 1.2 在渤海中配置

计算网格南起莱州湾南岸, 北至辽东湾顶, 西起渤海湾西海岸, 东至渤海海峡东口(37°07′—41°00′N, 117°35′—122°30′E)。海底地形数据采用中国人民解放军海军司令部航海保证部所提供的 1983 年渤海实

测水深数据, 经重采样网格分辨率修正为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , 整个渤海有  $96 \times 77$  个网格点。

**悬沙运输模块中参数设定** 根据相应时段内黄河河口门区与利津站泥沙通量的比值(钱意颖等, 1993), 将利津站泥沙通量乘一系数( $\sim 1.05$ )调整为黄河入海泥沙通量值。海底粘性沉积物和非粘性沉积物的含量, 以及中值粒径分布资料来源于 1992 年版海洋图集地球物理分册, 将其数字化的结果作为模型运行参数。

**水动力模块中参数设定** 开边界潮高和幅角选用 6 个主要分潮的潮参数:  $S_2$ 、 $M_2$ 、 $N_2$ 、 $K_1$ 、 $P_1$ 、 $O_1$ , 由南北两岸验潮站资料进行最优插值获取, 在计算中需要进行相应的调整。开边界流速和温、盐采用无梯度边界条件。风场以及浮力强迫通量采用 NCEP2 资料(<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.2.html>), 采样间隔为 6 h。SWAN 模拟中波谱区分为 25 个频率, 最低频率取为 0.05Hz, 最高频率取为 0.5Hz, 波向区分为 360 个方向, 每个方向区分为  $1^\circ$ 。

初始水位、流场、海浪场和泥沙含量场都设为 0, 初始温、盐场采用 1992 年版海洋图集数字化结果。模拟从静止海面算起, 计算初始时间为 1982 年 1 月 1 日, 结束时间为 1983 年 12 月 31 日, 内模时间步长设为 447.12 s, 这里利用 1983 年的计算结果进行分析。

## 2 模型验证

模型验证主要包括背景动力和悬沙浓度的验证, 背景动力场的验证资料主要是验潮站数据的调和和分析结果, 悬沙浓度的验证主要采用部分实测数据与文献资料, 其中实测资料来源于国家海洋局海洋卫星中心。在 Li 等(2005)中已给出水动力场的验证结果; 与文献资料的对比验证在文后讨论部分进行阐述, 这里仅仅给出实测资料的验证结果。国家海洋局海洋卫星中心为校准“海洋 1 号”水色卫星探头, 于 2004 年 6 月 21—27 日在黄河口外设了 43 个站点对海洋表层的悬沙浓度进行了观测。

对比验证模型设置: 计算网格、开边界条件、海底沉积物分布与中值粒径的设定同前所述; 因悬沙浓度场具有季节稳定性(江文胜等, 2002), 因此悬沙浓度初始场采用春季平均值来代替; 海表面强迫场(风应力强迫与浮力通量强迫)选用的是 2004 年 5 月 1 日—6 月 27 日期间的 NCEP Reanalysis2 资料。黄河口径流和泥沙通量采用黄河网提供的利津站逐日资料。黄委网上 (<http://www.yrcc.gov.cn/other/hhsq/>

hhsq.asp) 利津站的泥沙通量数据有很多空缺, 在实际的计算中用前后相邻两点进行插值获取缺测点资料值。

对表层悬沙含量而言, 模型结果基本上反映了该时段内黄河口附近表层悬沙浓度的空间分布特征。实测结果(图 1)和模拟结果(图 2)都显示黄河口附近泥沙浓度在离岸方向上存在非常大的梯度: 最靠近黄河口处悬沙浓度最高, 大于  $1.50 \text{ kg/m}^3$ ; 向外海迅速递减, 距离黄河口 11 km 处海域的悬沙含量就迅速降至不足  $0.01 \text{ kg/m}^3$ 。

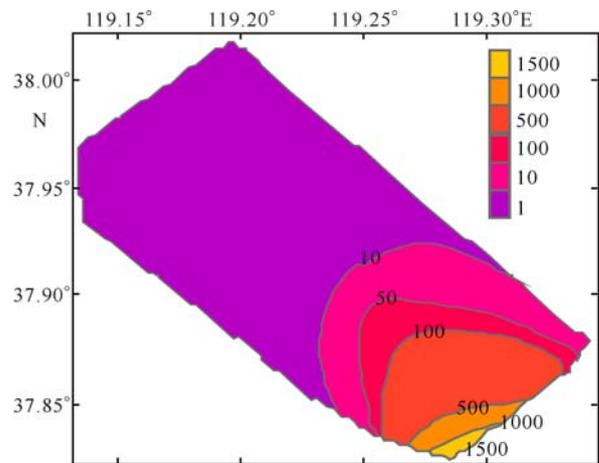


图 1 观测得到的 2004 年 6 月 21—27 日黄河口附近表层泥沙含量(单位: mg/L)

Fig.1 The sediment concentration of the surface layer during June 21—27, 2004 near the Huanghe (Yellow) River estuary (Units: mg/L)

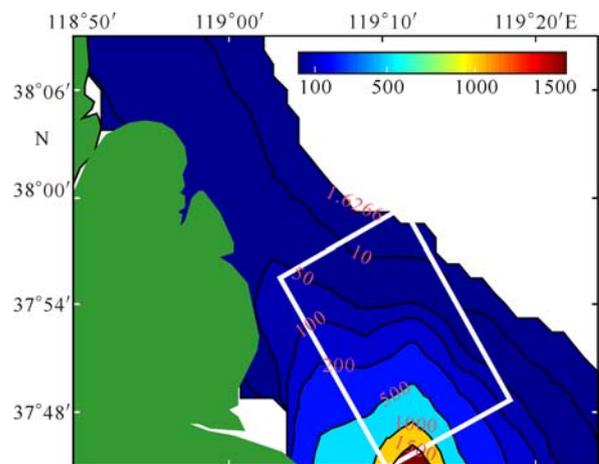


图 2 黄河口附近表层泥沙含量模拟结果(2004 年 6 月 21—27 日。单位: mg/L)

Fig.2 The simulated spatial structure of the surface sediment concentration near the Huanghe (Yellow) River estuary during June 21—27, 2004. Units: mg/L

### 3 黄河入海泥沙悬移运输的时空变化规律

本文中作者选取有关悬沙垂向运动和水平运输的几个特征参量来反映黄河入海泥沙在渤海中悬移运输的时空变化规律,如悬沙浓度的季节变化(图3)、悬沙运输结构的季节变化(图4)、年平均状态下的悬沙运输通量与海底冲淤(图5)。

#### 3.1 渤海悬沙浓度的季节变化特征

冬季:黄河口附近表层悬沙浓度高于  $1\text{kg/m}^3$ ,且向外海迅速减小,形成非常大的泥沙浓度梯度。其他海域的泥沙高浓度区主要分布在近岸浅海区。泥沙浓度高值区( $>0.1\text{kg/m}^3$ )分布在渤海湾与辽东湾  $40^\circ\text{N}$  向北的海域,渤海湾南北两岸与辽东湾湾顶更是高达  $1\text{kg/m}^3$ 。莱州湾东岸泥沙浓度较低,基本上小于  $0.01\text{kg/m}^3$ ,而渤海中部以及秦皇岛附近海域的泥沙浓度更低( $\sim 10^{-3}\text{kg/m}^3$ )。

春季:与冬季相比,春季悬沙浓度呈现一定的降低趋势,因为没有大量的泥沙源的供应,所以黄河三

角洲外海附近悬沙浓度的最大值小于  $1\text{kg/m}^3$ ,而且空间范围呈现明显的缩减状态。渤海湾南北两岸和辽东湾泥沙高浓度区( $>0.1\text{kg/m}^3$ )向岸退化。海盆中央与秦皇岛外海泥沙低浓度区( $\sim 10^{-3}\text{kg/m}^3$ )面积扩大。

夏季:渤海海域泥沙浓度整体上有减小,表现为渤海湾南北两岸和辽东湾湾顶的高浓度区( $>0.1\text{kg/m}^3$ )范围减小。而秦皇岛外海悬沙浓度减至小于  $0.1\text{kg/m}^3$ 。海盆中央出现大面积低浓度区( $\sim 10^{-3}\text{kg/m}^3$ ),并延伸向渤海海峡口附近。黄河三角洲外海泥沙浓度大于  $1\text{kg/m}^3$ ,这是因为该时段是丰水丰沙期。

秋季:除黄河三角洲附近外,整个海域泥沙浓度仍呈现降低趋势。海盆中央泥沙浓度低值区( $\sim 10^{-3}\text{kg/m}^3$ )明显扩大,秦皇岛外海泥沙浓度小于  $0.1\text{kg/m}^3$ 。渤海湾和辽东湾悬沙含量最高值小于  $1\text{kg/m}^3$ 。因为该时段内黄河水沙通量最大,所以三角洲外海泥沙浓度最高,最大值达到  $5\text{kg/m}^3$ 。

总体看来,浪流耦合作用条件下,近岸海域的悬

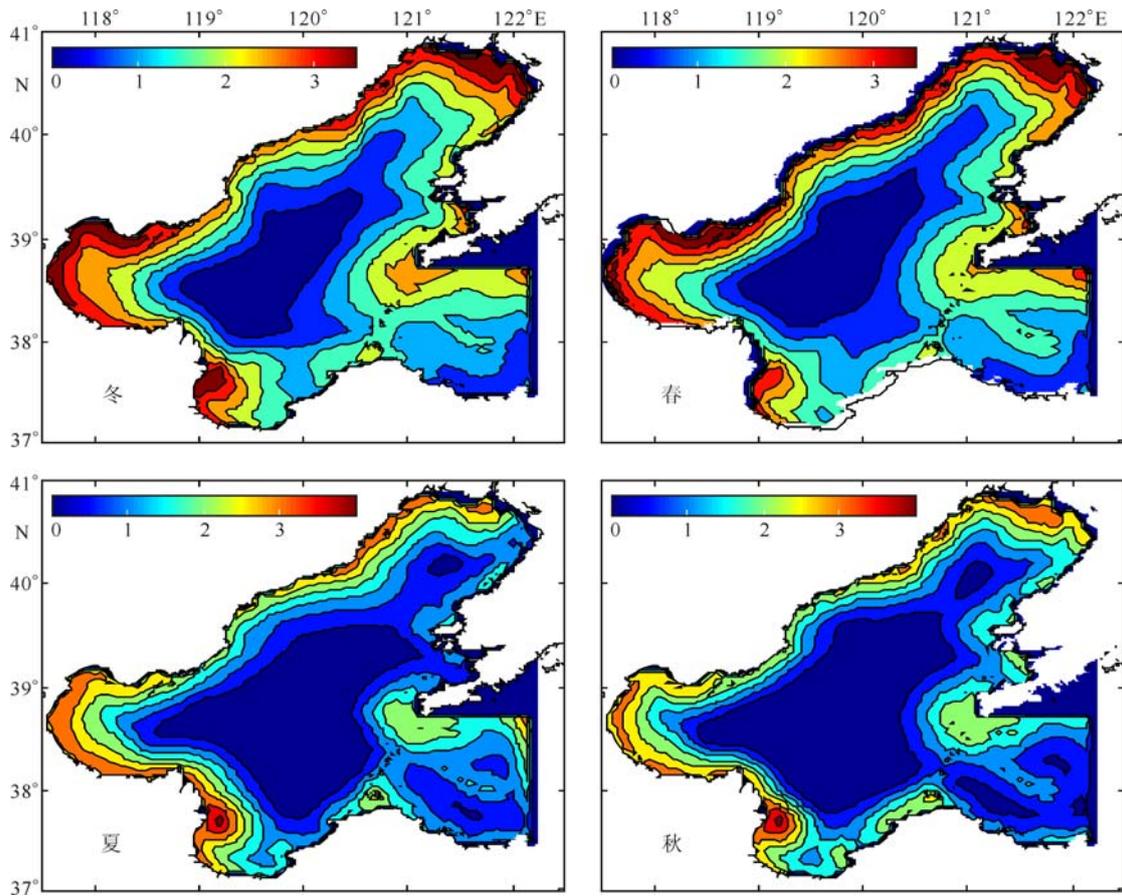


图3 浪流耦合条件下的渤海表层悬沙浓度的季节变化(这里取的是对数值,单位:mg/L)

Fig.3 The seasonal variation of the surface sediment concentration due to the wave-current coupling effects (Logarithmic value are used. Units: mg/L)

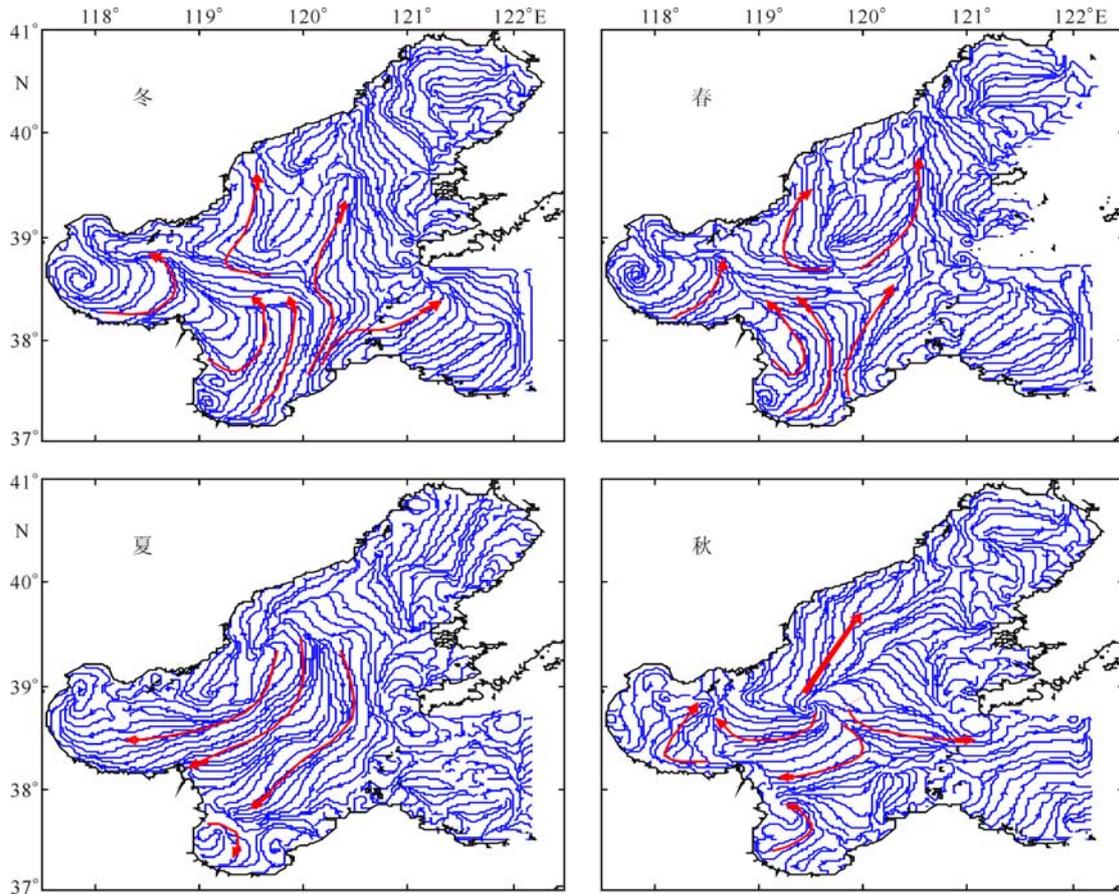


图 4 1983 年黄河入海泥沙在渤海中的悬移运输方向的季节变化

Fig.4 The seasonal variation of the sediment transport direction in 1983 in the Bohai Sea

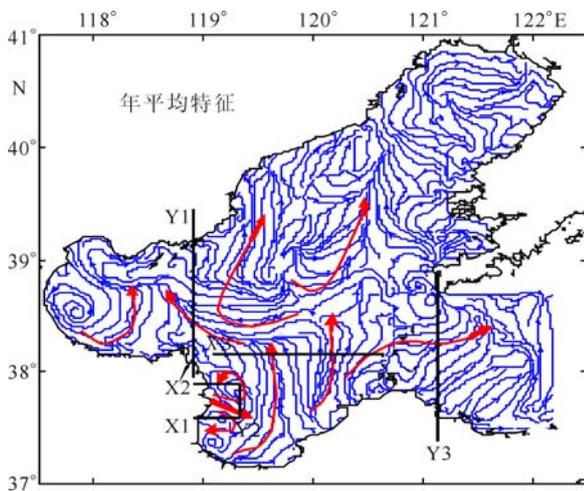


图 5 1983 年渤海泥沙运输通量的年平均特征

Fig.5 The annual mean structure of the suspended sediment transportation in 1983 in the Bohai Sea

沙浓度明显高于海区中央, 而近岸海域悬沙浓度差别也很大, 辽东湾和渤海湾悬沙含量明显偏大, 而秦皇岛海域附近悬沙浓度非常低。黄河口口门外悬沙浓

度的季节变化主要受来水来沙多寡控制, 丰水丰沙的夏、秋季节最高; 其他海域悬沙含量的季节变化主要受风场的影响, 基本吻合(曹祖德, 1993)波浪掀沙的原理。另外, 潮动能较大海域的悬沙含量也比较高, 如辽东湾东岸以及渤海湾; 而潮动能小的海域悬沙含量低, 如秦皇岛附近海域。

### 3.2 悬沙运输通量的季节变化

瞬时泥沙通量可表示为速度与悬沙浓度的乘积, 而某时段内某一垂向剖面上悬沙通量可通过周期平均得到(吴永胜等, 2002)。深度平均的泥沙通量主要反映了泥沙垂向运动过程和水平运动过程的长时间累积效应, 同时也基本上反映了黄河入海泥沙的主要输送方向。根据定义, 这里某一断面上输沙量的计算采用下述公式:

$$qF(x, y, t) = \vec{V} \cdot C$$

这里,  $C$  为悬沙浓度;  $\vec{V}$  为瞬时速度矢量;  $qF$  为单位时间内悬沙通量矢量, 单位为  $kg/(m^2 \cdot s)$ , 则某时段内某一垂向剖面上悬沙通量可通过对周期平均得到:

$$\bar{Q}F(x, y) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\bar{v}C + \overline{\overline{v}C}) \cdot dt = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\overline{\overline{v}C}) \cdot dt$$

式中，符号“ - ”和“ ~ ”分别表示瞬时流速的时均量和周期变化量。

悬沙运输通量包含两方面的信息：悬沙运输结构和量级大小。因为绝大部分文献资料中给出的是年平均输沙量，因此这里仅仅讨论悬沙运输结构的季节变化，不计算悬沙运输通量大小的季节变化。

黄河入海泥沙运输方向的季节变化显示(图 4)：冬季，黄河三角洲附近的部分泥沙输向莱州湾，而输入莱州湾泥沙的一部分继续向东北方向运输，到达海盆中央后转向西北方向，然后在渤海湾湾口外转向东北，进入辽东湾内；进入莱州湾的部分泥沙沿岸输出渤海海峡。渤海湾内的泥沙主要从南岸出发，呈现向东北输送的特征。春季的泥沙运输方向在渤海海盆和辽东湾内保持了冬季的结构特征，而渤海海峡附近的泥沙运输方向特征不明显，不能形成显著的向外运输的状态。黄河河口附近泥沙向莱州湾运输矢量的南侧，有一个涡旋状泥沙运输结构，这样有利于泥沙的沉积，形成黄河三角洲南侧的烂泥区。夏季，黄河三角洲附近的泥沙部分输向莱州湾，而三角洲北端的泥沙主要向西输送，沿渤海湾南岸进入渤海湾湾顶。秋季，黄河三角洲附近的泥沙向莱州湾内输运，南侧有一个涡状运输结构，不利于泥沙的向外海扩散。图 4 中可以看出，除夏季外渤海湾南岸的泥沙基本上都是向东北方向输送，那里大量堆积了老黄河河口留下来的泥沙，再加上现行黄河入海泥沙，所以，这就解释了黄河入海泥沙最终扩散到渤海中部的原因，同时也解释了渤海湾南岸附近海底和海岸线侵蚀的原因。

### 3.3 悬沙运输通量与海底冲淤

根据上述计算方法给出年平均的悬沙运输通量大小(表 1)和运输结构(图 5)。黄河三角洲附近所选取的三个断面上主要是东向输沙(3.5 亿 t)，南向输沙(0.50 亿 t)输向莱州湾西岸。另外由老黄河口附近向黄河口口门北侧输送了 0.65 亿 t 泥沙，这样黄河水下三角洲的悬沙净通量是 3.35 亿 t，因此 1983 年滨海区的悬沙沉积率为 69%。第二个讨论的是渤海海峡处的断面，这里计算所得的东向输沙量为 0.42 亿 t，占黄河输入渤海泥沙总量的 4%。渤海湾湾口的垂向剖面为西向输沙，量值大约为 0.71 亿 t，而且现行黄河入海泥沙向渤海湾的输送主要不是沿岸输送，而是通过中部进入渤海湾。同时可以发现，老黄河口(神仙沟流路)

南北两侧的泥沙通量主要是向东南向与西向运输，所以对应着海底与岸线的强烈冲刷(图 6)。另外可以发现，渤海海盆中部的横向断面上存在一个 0.34 亿 t 的北向输沙量。

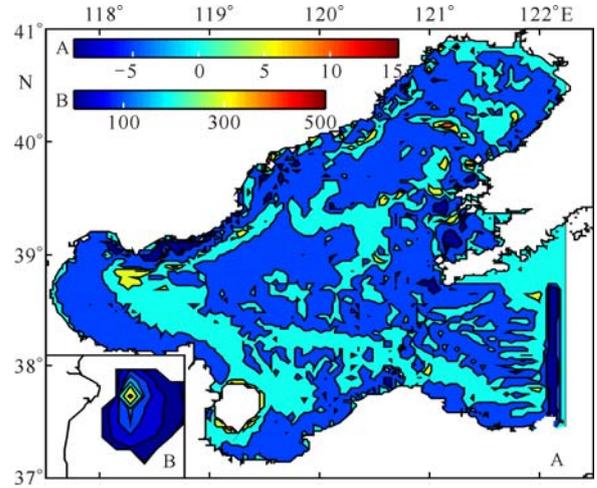


图 6 1983 年海底冲淤变化的模拟结果(单位: cm)  
Fig.6 The simulation results of eroded or deposited sediment in 1983 in the Bohai Sea (Units: cm)

年平均悬沙运输通量与运输结构显示(表 1、图 5)，黄河入海泥沙部分沿莱州湾西岸进入莱州湾，而大部分输向东南(莱州湾的中部)，这部分泥沙并不在莱州湾沉积，而是继续向东 - 东北方向输送。在渤海海盆的南部，这些泥沙中有一部分向西输送，通过渤海湾湾口中部进入渤海湾；还有一部分继续向西北输送，在 39°N 附近转向东北输送，进入辽东湾湾口。黄河入海泥沙向渤海海峡的输送主要是渤海南岸的贴岸输送。另外一个明显的特征是个明显的环状运输结构，对应的是淤积区—最具有代表性的黄河入海口南北两侧的泥质沉积区。

图 6 表示浪流耦合作用下海底的冲淤变化。除黄河三角洲之外，整个渤海近岸海域(水深小于 5m)都呈现为冲刷特征，其中老铁山水道、渤海湾南岸以及秦皇岛附近的侵蚀率都超过 0.05 m/a；废弃的黄河入海口(神仙沟流路)附近、渤海湾南岸和西岸、莱州湾

表 1 断面上年平均泥沙运输通量(单位: 亿 t; 东向、北向输沙为正)

Tab.1 The annual mean sediment flux across corresponding sections (Units: 10<sup>8</sup> t. Components in eastward and northward directions are defined as positive flux)

项目	黄河三角洲			渤海湾湾口	渤海海盆	渤海海峡
断面	X1	X2	Y2	Y1	X3	Y3
通量	-0.50	-0.65	3.50	-0.71	0.34	0.42

东岸、渤海海盆中央的侵蚀率约为 0.05m/a。从近岸侵蚀区向外海逐渐变为堆积区(水深介于 5—10m 之间), 而水深大于 15m 的海域有冲有淤, 渤海中部海域大部分表现为侵蚀。黄河三角洲的沉积率非常大(4 m/a)。另外, 曹妃甸外海以及渤海湾湾口、渤海海盆的外围和渤海海峡的南端都表现为沉积状态。

泥沙输送通量年平均结构(图 5)与海底冲淤变化(图 6)之间存在非常好的对应关系。如渤海湾南岸的泥沙基本上都是向东北方向输送, 这就解释了渤海湾南岸附近海底和海岸线侵蚀的成因。此外老黄河口(神仙沟流路)附近的悬沙分别向南与向西成沿岸输运状态, 对应着海底的冲刷。另外一个非常明显的特征是泥沙输运通量图中的涡状结构, 这些海域基本上都对应了海底的淤积区, 最典型的一个就是黄河入海口南侧的涡状泥沙通量, 对应形成了黄河入海口南侧的泥质沉积区。

#### 4 讨论

本文的计算结果与秦蕴珊等(1985)所得到的悬浮体含量的水平结构吻合较好: 黄河口外海、渤海湾北岸贴岸附近海域以及渤海湾南岸存在悬沙浓度高值区, 而秦皇岛外海的悬沙含量很低。遥感图像资料(SeaWiFS, 1999 年 5 月)展示了黄河改道清水沟流路后渤海表层悬沙浓度的分布特征(Jiang *et al*, 2004), 尽管这些资料不是同期对比, 但渤海悬浮体含量分布呈一定的季节稳定性(江文胜等, 2002)。SeaWiFS 资料反演的渤海海盆的悬沙浓度约为 10mg/L, 略大于本文的计算结果, 这是因为 SeaWiFS 资料反映的是瞬时悬沙浓度场, 而本文所计算的结果为季节平均值。通过上述对比分析可以佐证本文计算结果的合理性。

除了悬沙浓度场的时空结构与前人物合较好之外, 与前人研究成果相比, 悬沙浓度量级也基本一致。本文通过计算发现, 悬沙含量的最大量级(黄河口外)约为  $1\text{kg}/\text{m}^3$ , 而最大值更是高达  $5\text{kg}/\text{m}^3$ 。根据海洋卫星中心提供的资料, 2004 年 6 月黄河口附近悬沙含量也高于  $1\text{kg}/\text{m}^3$ 。程义吉等(2000)也指出, 黄河新口门外三个断面上表层悬沙浓度介于  $0.73\text{—}6.15\text{kg}/\text{m}^3$  之间。因秦蕴珊等(1985)调查主要侧重相对较深海域, 因此其所得到的渤海表层悬浮物浓度的最大值相对偏低。因为浅水海域的悬沙浓度受风影响很大, 因此诸如莱州湾等某些观测资料所得到的悬沙含量时间变化很大, 故在与江文胜等(2002)调查结果进行对比时发现, 本文计算结果(季节平均值)相比某

个大风过程偏低。

基于底质调查(秦蕴珊等, 1985)和历史资料(胡春宏等, 1996)对海底沉积物分布趋势所做的定性分析表明, 部分黄河入海泥沙向东北输运进入渤海中部海区; 向南输向莱州湾的泥沙并不在此沉积, 继而向东北输运。本文中计算所得到的泥沙通量结构和量级具有相同的趋势(图 5、表 1)。表 2 对比了黄河入海泥沙进入渤海后的分配比例, 本文的计算结果基本上符合历史调查资料, 说明本文中作者对黄河入海泥沙通量分析的合理性。其中穿过渤海海峡的泥沙百分比, Martin 等(1993)计算得到的结果为 1%, 本文的结果为 4%, 这可能是因为分析方法和分析时段不同造成的。因为黄河入海口位置不同以及入海泥沙量大小不同, 因而泥沙输送的比例也不同(武桂秋等, 1994)。

表 2 黄河入海泥沙的比例分配对比<sup>1)</sup>

Tab.2 The comparison with former studies in percentage of input sediment amount transported from the Huanghe (Yellow) River

文 献	滨海淤积	输往外海	穿过海峡
胡春宏等, 1996	70	30	
武桂秋等, 1994	80	20	
Martin <i>et al</i> , 1993	70	30	1
本文	69	31	4

1) 这里的比例不是针对利津站而言, 而是抛去陆上河道的冲淤, 将进入河口的泥沙总量设为 100%。

另外, 可以用海底冲淤来反演泥沙垂向运动和水平运动计算结果的正确与否。孙效功等(1993)与武桂秋等(1994)用渤海水深变化推算出黄河三角洲附近的海底冲淤, 与本文所得出的冲淤趋势基本一致: 黄河口外海对应强烈淤积, 而神仙沟老黄河口附近对应冲刷。本文中作者没有考虑入海泥沙淤积对海岸线向前推延的贡献, 因此就黄河口附近的淤积量而言, 本文结果比实际结果稍大。

泥沙运动的复杂性、渤海调查资料的局限性, 使得对渤海悬沙输运的认识和相关的数值模拟工作进展缓慢。作者所采用的数值模型虽然考虑了粘性泥沙的絮凝, 但这种计算方法是基于统计方法得到的经验关系, 不同的泥沙粒径组合下絮凝发生的情况也不同(McAnally *et al*, 1999)。另外本文中作者采用的模型没有考虑生物对悬沙的影响, 以及悬沙对水流的影响, 而在局部海域如黄河三角洲附近这些过程对计算的影响比较大(江文胜等, 2000; Jiang *et al*, 2000)。因此, 拟在后续工作中陆续开展絮凝对悬沙输运影响的讨论; 对浪流潮在渤海悬沙输运中所起到

的作用,亦即黄河入海泥沙在渤海中悬移运输的机制进行研究等。

## 5 结论

基于悬沙运输数值模型,计算了黄河入海泥沙在渤海中悬移运输季节和年尺度上的特征:悬沙浓度的季节变化、悬沙运输结构的季节变化、悬沙运输年平均效应以及海底冲淤等。综上所述,可以看出本文模型设计合理,相比调查资料分析,可以从整体上给出了黄河入海泥沙悬移输送特征:

渤海海水中悬浮体含量的平面分布具有明显的地区性和季节性,其基本趋势是悬浮体含量随离岸距离的增加而减少,黄河口( $1\text{kg}/\text{m}^3$ )以及其他浅海( $1\text{kg}/\text{m}^3 < C < 0.1\text{kg}/\text{m}^3$ )的悬浮体含量明显高于其他海区,秦皇岛附近海域和渤海中部悬沙含量非常低( $\sim 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^3$ )。黄河口附近的悬沙浓度的季节变化主要受到入海水沙通量多寡的影响,丰水丰沙的夏、秋季最高;其他海域的悬沙浓度的季节变化主要受到风场时变的控制。

黄河入海泥沙向东南-南输向莱州湾的泥沙并不在此沉积,莱州湾只是一个向外输沙的通道,部分泥沙经莱州湾向东北输往渤海中部,部分向东输往渤海海峡。悬沙运输通量的年平均结果显示:69%的黄河入海泥沙滞留在黄河口附近的滨海区,31%输往外海,最终有4%的悬沙贴岸东向输往渤海海峡。

泥沙运输通量结构与海底冲淤之间存在非常好的对应关系,如渤海湾南岸附近为东北向泥沙通量的起点,因此对应着强烈的冲刷特征;神仙沟流路老黄河口的悬沙运输结构与局地冲刷;涡状泥沙运输通量对应了海底淤积,其中最典型的是黄河入海口南侧的涡状泥沙通量和与之对应的泥质沉积区。

## 参 考 文 献

王桂芝,高抒,2002.黄渤海水体交换、悬沙特征及其对渤海海峡沉积的影响.海洋通报,21(1):43—48  
江文胜,孙文心,2000.渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究 I. 模式.海洋与湖沼,31(6):682—688  
江文胜,孙文心,2001.渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究 II. 模拟结果.海洋与湖沼,32(1):94—100  
江文胜,苏键,杨华等,2002.渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系.海洋学报,24(增刊1):212—217  
孙效功,杨作升,陈彰榕,1993.现行黄河口海域泥沙冲淤的定量计算及其规律探讨.海洋学报,15(1):129—136  
吴永胜,王兆印,2002.渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响.黄渤海海洋,20(2):22—30  
武桂秋,夏东兴,王文海,1994.现行黄河入海泥沙分布与海

洋动力要素的关系.海岸工程,13(1):24—30  
赵保仁,庄国文,曹德明,1995.渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响.海洋与湖沼,26(5):466—473  
胡春宏,吉祖稳,王涛,1996.黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散.泥沙研究,4:1—10  
顾玉荷,修日晨,1996.渤海海流概况及其输沙作用初析.黄渤海海洋,14(1):1—6  
钱宁,万兆惠,200.泥沙运动力学.北京:科学出版社,45—84  
钱意颖,叶青超,周文浩,1993.黄河干流水沙变化与河床演变.北京:中国建材工业出版社,1—230  
秦蕴珊,1985.渤海地质.北京:科学出版社,13—76  
曹文洪,张启舜,胡春宏,2001.黄河河口海岸近岸带水体含沙量的横向分布.水利学报,2:54—58  
曹祖德,1993.波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟.海洋学报,15(1):107—118  
董年虎,1997.黄河口清水沟流路泥沙淤积分布及扩散.黄渤海海洋,15(2):33—37  
程义吉,程建刚,2000.黄河口新河口海域流场分析.海岸工程,19(4):5—11  
Birch G F, Eyer B, Taylor S E, 1999. The distribution of nutrients in bottom sediments of port Jackson (Sydney Harbor), Australia. Marine Pollution Bulletin, 38(12): 1247—1251  
Blumberg A F, 2002. A Primer for ECOMSED. Mahwah NJ: Hydro Qual Inc, 1—194  
Burban P Y, Xu Y, McNeil J *et al*, 1990. Settling Speeds of Floccs in Fresh and Sea Waters. Journal of Geophysical Research, 95(C10): 18213—18220  
Campbell T, Cazes J, Hashimoto N *et al*, 2004. SWAN user manual. The Netherlands: Delft University of Technology, 1—116  
Davies A M, Xing J, Huthnance J M *et al*, 2002. Models of near-bed dynamics and sediment movement at the Iberian margin. Progress in Oceanography, 52: 373—397  
Grant W D, Madsen O S, 1979. Combined Wave and Current Interaction with a Rough Bottom. Journal of Geophysical Research, 84(C4): 1797—1808  
Hwang B G, Jun K S, Lee Y D *et al*, 1998. Importance of DOC in sediment for contaminant transport modeling. Wat Sci Tech, 38(11): 193—199  
Jiang W S, Mayer B, 1997. A study on the transportation of suspended particulate matter from Yellow River by using a 3D particle model. Journal of Ocean University of Qingdao, 27(4): 439—445  
Jiang W S, Pohlmann T, Sun J *et al*, 2004. SPM transport in the Bohai Sea: field experiments and numerical modelling. Journal of Marine Systems, 44: 175—188  
Jiang W S, Pohlmann T, Sundermann J *et al*, 2000. A modelling study of SPM transport in the Bohai Sea. Journal of Marine Systems, 24: 175—200  
Karim M F, Holly F M, 1986. Armoring and Sorting Simulation in Alluvial Rivers. ASCE J Hydr Engr, 112(8): 705—715  
Li G S, Wang H L, Li B L, 2005. A model study on seasonal spatial-temporal variability of the Lagrangian Residual Cir-

- culations in the Bohai Sea. *Journal of Geographical Sciences*, 15(3): 273—285
- McAnally W H, 1999. Aggregation and deposition of estuarial fine sediment. Gainesville FL: University of Florida, 1—156
- McAnally W H, Mehta A J, 2002. Significance of aggregation of fine sediment particles in their deposition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 643—653
- MacIntyre S, Lick W, Tsai C H, 1990. Variability of Entrainment of Cohesive Sediments in Freshwater. *Biogeochemistry*, 9: 187—209
- Martin J M, Zhang J, Shi M C *et al*, 1993. Actual flux of the Huanghe (Yellow River) sediment to the western Pacific Ocean. *Netherlands Journal of Sea Research*, 31: 243—254
- Mellor G L, Yamada T, 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Rev Geophys Space Phys*, 20: 851—875
- Milliman J D, Li F, Zhao Y Y *et al*, 1986. Suspended matter regime in the Yellow Sea. *Progress in Oceanography*, 17: 215—228
- Murphy T P, Lawson A, Kumagai M *et al*, 1999. Review of emerging issues in sediment treatment. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2: 419—434
- Park Y A, Kim B M, 1990. Clay minerals of the recent fine-grained sediment on the Korean continental shelves. *Continental Shelf Research*, 10: 1179—1191
- Sundermann J, Feng S Z, 2004. Analysis and modeling of the Bohai Sea ecosystem—a joint German-Chinese study. *Journal of Marine Systems*, 44: 127—140
- van-Rijn L C, 1984. Sediment transport, part II: suspended load transport. *ASCE J Hydr Engr*, 110(11): 1613—1638
- van-Rijn L C, Nieuwjaar M W C, Van der Kaay T *et al*, 1993. Transport of fine sands by currents and waves. *ASCE J Hydr Engr*, 119(2): 123—143
- Wu D X, Wan X Q, Bao X W *et al*, 2004. Comparison of summer thermohaline field and circulation structure of the Bohai Sea between 1958 and 2000. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 363—369
- Zhu Y, Chang R, 2000. Preliminary Study of the Dynamic Origin of the Distribution Pattern of Bottom Sediments on the Continental Shelves of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51: 663—680

## NUMERICAL SIMULATION ON SEASONAL TRANSPORTATION OF SUSPENDED SEDIMENT FROM HUANGHE (YELLOW) RIVER TO BOHAI SEA

WANG Hai-Long<sup>1</sup>, LI Guo-Sheng<sup>2</sup>

(1. *Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou, 510663;*

2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101)*

**Abstract** It has been recognized for years that the transportation of suspended load from the Huanghe (Yellow) River contributed greatly to shoreline position, sediment distribution, shoal erosion, and ecological environment of the Bohai Sea, the estuary host. Using data of sediment flux of the river and real forcing fields, and the bathymetry of the Bohai Sea, a numerical module driven by a wave-current coupled model was developed to simulate the seasonal cycle of suspended load transportation in the Bohai Sea. The simulation results were shown good consistency with the observation data of 2004. Physical data of 1982 were used as the initial condition for two-year numerical simulation, and the simulation result of the second year was analyzed, showing that 69% of the sediment from the river deposited on the river delta 31% conveyed to outer waters, and 4% exported to the northern Yellow Sea through the Bohai Strait. The suspended load concentration was fairly high near estuary ( $\geq 1 \text{ kg/m}^3$ ). The maximum concentration occurred in summer and fall. Moreover, the spatial distribution and seasonal variation in other waters in the Bohai Sea besides the estuary were distinct. For example, the sediment concentration decreased rapidly with distance from coastal line, and stayed very low in central Bohai Sea and the offshore of Qinhuangdao ( $\leq 1 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ ). Except the estuary area, the seasonal variation in sediment concentration was dominated by wind fields in other Bohai Sea areas. Only a small amount of river-derived sediment was transported northward and reached the southern coast of the Bohai Bay, while the majority of them was transported southeastward into Laizhou Bay, moved again northeastward, and then deposited in the central Bohai Sea; and some were transported eastward alongshore to the Bohai Strait. The suspended load transportation structure simulated with the module well agreed with the deposition and erosion of the sea-bed, which is shown typically by the case that in the southern area of the estuary, the suspended load transportation rotates clockwise forming a clayey sediment zone.

**Key words** The Bohai Sea, Numerical modeling, Suspended load Transportation, Seasonal cycle