夏季黄河入海泥沙的数值模拟研究

计建强¹, 汪一航¹, 王新怡^{2,3}, 王永刚^{2,3}, 滕 涌^{2,3}

(1. 宁波大学理学院, 浙江 宁波 315211; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 青岛海洋科 学与技术国家实验室 区域海洋动力学和数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266071)

> 摘要:掌握黄河入海泥沙输运、沉积的规律可以为渤海沿岸经济发展的规划及环境保护管理提供理论 参考。本文基于 FVCOM(Finite-Volume Community Ocean Model)建立了三维水动力、泥沙耦合数值模 式,利用实测水位、海流和悬沙资料,对模式进行了检验,模拟结果与观测符合较好。利用该模式研究 了 2007 年夏季丰水丰沙期黄河入海泥沙的输运过程,并对渤海悬沙空间分布特征进行数值模拟。模式 较好地再现了夏季黄河口入海泥沙的空间分布特征及底部冲淤状况。结合黄河口附近的潮流和余流特 征,对悬沙分布特征和底部冲淤结果进行了分析,结果表明:黄河入海泥沙随余流向南和东南方向输 运到菜州湾,在菜州湾中部向外海扩散,很可能沿东北方向进入渤海中部。在这个输运过程中,菜州湾 表现为入海泥沙向外海扩散的通道。

关键词: FVCOM; 黄河入海泥沙; 悬移输运; 数值模拟 中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)03-0118-10 doi: 10.11759/hykx20160224001

黄河发源于青藏高原,干流全长为 5 464 km, 流域面积为 7.52×10⁵ km²,是我国的第二长河。近 50a来,由于黄河流域降水量减少等自然原因和水库 修建等一些人为因素,黄河入海水沙急剧减少。据 《黄河泥沙公报》截止到 2009 年,黄河利津站多年 平均入海径流量仅为 313.3 亿立方米,利津站输沙量 7.78 亿吨^[1]。黄河通过河水注入到海洋的泥沙不仅是 中国东部陆架海陆源沉积物的主要来源,而且对黄 河三角洲的发育和演化,甚至整个西北太平洋的物 质交换和沉积都起到重要的作用。因此,黄河入海泥 沙的运移路径和扩散范围及其对邻近渤海、黄河沉 积的影响一直备受国内外许多学者的关注。

前人对黄河入海泥沙在渤海中的沉积悬移输运 已作了大量的研究。早期对渤海泥沙的研究绝大多 数都是基于海洋的调查资料进行定性的分析^[2-3]。江 文胜^[4]最初利用一个三维的悬浮颗粒物(suspended particulate materials, SPM)输运模型对黄河输出的悬 沙分布进行了数值模拟分析,给出了渤海表层悬沙 浓度的时空分布特征,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^[5-6]。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,但并未说明黄河入海泥沙在渤海中的输 运过程。王开荣等^[7]利用统计方法,基于实测资料, 对黄河河口泥沙的输移和分布规律进行了系统的探

讨总结。王海龙等^[8]运用 ECOMSED 模拟了黄河口 入海泥沙, 分析了渤海悬沙移运的季节性变化。王厚 杰等^[9]研究了黄河口潮流切变峰对泥沙输运的作用。 一些学者也慢慢开始探讨波浪作用下悬沙的运动特 征。韩丹岫等^[10]试验研究了波浪作用下细颗粒泥沙 的悬移特性。腾涌等[11]研究了波浪在对渤海悬沙的 悬浮输运中所起的关键作用。近几年,对黄河入海泥 沙的输运研究越来越细致。边昌伟^[12]运用 ROMS 数 值模式对中国近海泥沙在东中国海的输运和沉积过 程进行了研究、认为黄河泥沙可以常年输运到南黄 海。庞重光等[13-14]分析了渤海表层悬沙分布的时空 分布、并进一步讨论了其动力成因。综上、利用数值 模拟方法研究黄河河口潮流和入海泥沙输运过程也 已取得了很大进展,但伴随着黄河入海径流量及输 沙量的变化以及黄河河口地形的不断变迁、致使该 区域的水动力及泥沙冲淤问题复杂多变,因此利用 数值模式针对性开展具体时段的黄河入海泥沙的数

收稿日期: 2016-01-24; 修回日期: 2016-03-01

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费项目(201205001)

[[]Foundation: Pulic Science and Technology Research Funds Projects of Ocean, NO.201205001]

作者简介: 计建强(1990-), 男, 硕士, 主要从事潮汐潮流的数值模拟计算, 泥沙输运的模拟研究, 电话: 0532-88962702, E-mail: jijq0306@sina.com; 汪一航, 通信作者, 副教授, 主要从事潮汐潮流的数 值模拟计算, 电话: 0574-87600744, E-mail: wangyihang@nbu.edu.cn

值模拟研究尚需进一步加强。

本文在李秉天等^[15]构建的渤海海域潮波模式基础上,通过考虑较完备的水动力和沉积动力过程(海 浪、潮汐、潮流、表面风强迫、径流、泥沙再悬浮 等),数值研究了2007年夏季黄河丰水丰沙期入海泥 沙的输运和沉积规律以及渤海悬沙浓度的空间分布 特征。

1 模型介绍及其配置

1.1 模型介绍

非结构网格有限体积法海洋数值模型(Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM)是美国麻 州大学海洋科学技术学院陈长胜所领导的研究小组 开发,水平方向采用非结构三角形网格,垂直方向 采用 坐标系来体现不规则的底部边界,能够较好 地拟合了渤海曲折的海岸线和复杂的地形。同时,采 用基于干湿判别方法来处理潮滩移动边界^[16]。

FVCOM 中的泥沙模型 FVCOM-SED 是基于 CSTM(Community Sediment Transport Mode)的泥沙 模型,具有许多先进的特性,如考虑波浪,活动表层, 考虑底部沙纹对粗糙度等的影响。模式可以将泥沙 按径粒大小分组,按有无黏性分类,根据海床底质 的不同,可以将海床沿垂向进行分层。FVCOM-SED 不但可以考虑悬移质泥沙运动,而且也可以兼顾推 移质泥沙运动。

FVCOM 模型中悬移质泥沙计算采用浓度扩散 方程如下:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial u C_i}{\partial x} + \frac{\partial v C_i}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_i) C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial C_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_H)$$
(1)

其中, C_i 为第 *i* 类泥沙的悬浮泥沙浓度, A_H 为水平涡 黏性系数, K_H 为垂向涡黏性系数, w_i 为第 *i* 类泥沙的 沉降速率, x、y、z 分别为坐标轴东向, 北向和垂向的 分量, u、v、w 分别为 x、y、z 方向上的速度矢量。 模式开边界条件:

$$K_{\rm H} \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0, z \to \eta$$
 (2)

$$K_{\rm H} \frac{\partial C_i}{\partial z} = E - 0, z \to -H$$
 (3)

其中, E和 D分别为沉积物的再悬浮和沉积通量。

FVCOM 的泥沙模块根据海床底质的不同,可以将海床沿垂向分层。底部泥沙层在每个时间步长

内随着泥沙的侵蚀和沉降进行变化,在每个时间步 长计算开始时刻,会先计算泥沙顶层的活跃层厚度 z, 如果底部泥沙表层的厚度小于 z,则从下面一层进行 补充,然后对底部泥沙进行重新分层。如果表层泥沙 的沉降厚度大于指定厚度,则重新更新泥沙表层, 即将原来的表层变为第二层,沉积增加的厚度指定 为第一层。

本模式中海浪通过 FVCOM-SED 的 DWAVE_ OFFLINE 选项参与流和泥沙计算。采用的海浪数据 源自腾涌等^[11]的模拟结果。其利用 SWAN(Simulating Waves Nearshore)模式对渤海区域 2007 年海浪进行 了数值模拟,模拟结果与实测值符合较好。

1.2 水深数据来源

在数值模拟中,水深是至关重要的基础资料。为 了较真实的反映渤海近海地形,本文应用李秉天 等^[15]融合得到的2002年渤海水深资料,该水深资料 是利用海军司令部航海保证部出版的渤海及黄海北 部海图和莱州湾海图,通过对海图进行数字化处理 和基准面订正,并结合渤海其它海域水深、岸线资 料,最终融合得到的研究区域的水深资料及岸线资 料(图 1)。



图 1 渤海水深(单位: m)示意图及观察站分布



1.3 模型配置

本文计算海区为 117.5°~122.5°E, 37°~41°N(图 1),模型采用无结构的三角形网格系统,在垂直方向 采用 坐标,垂向分 6 层。计算区域共包含 58 977 个三角单元, 30 155 个网格节点,开边界为 122.5°E 经线,开边界节点数为 38 个。FVCOM 模型采用内 外模分离的方式求解,二维外模数值格式是基于三 角形网格的有限体积法,将连续方程和动量方程在 三角形单元内积分后,通过改进的四阶龙格库塔方 式求解。三维内模的动量方程采用简单的显式和隐式 相结合的差分格式求解。为了研究黄河入海泥沙,对黄 河口及莱州湾进行了加密,水平分辨率小于 500 m,较 好的拟合了岸线。水动力模块中参数设置:开边界 (122.5°E)处水位(主要考虑 M₂、S₂、K₁、O₁四个主要 分潮)由 T_tide^[17]预报程序给出,模式时间步长为1 s, 底摩擦系数设置为 0.001 3。本文采用正压模式,假 设海洋是静止的,水位初始值设为 0,所有三角单元 中心点的水平和垂向流速为0,整个海域内温度和盐 度均取常数。风场数据采用 NCEP2 资料(http: //www. cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanaly-sis2.html)。

泥沙模块中的参数设定:据《中国河流泥沙公报》, 黄河入海泥沙粒径设为 0.02 mm, 2007 年 8、9 月黄 河径流量及泥沙浓度分别为: 1 350 m³/s, 12.65 kg/m³, 1 264 m³/s, 10.34 kg/m³,临界启动应力为 0.15 N/m²。 各泥沙参数如表 1 所示。

表1 模型参量设置

Tab. 1 The parameter settings of the model

模型参数	参数设置
计算区域	37°~41°N, 117.5°~122.5°E
浪、流、泥沙同步计算	开启
节点数,三角元数, σ 层数	30155, 58977, 6
模拟时长	61 d
温盐计算	正压
底摩擦系数	0.0013
时间步长	1s
悬移质,推移质计算	共同开启
SD50	0.02mm
泥沙密度	2650kg/m^3
泥沙沉降速度	0.1mm/s
侵蚀速率	$5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
临界启动应力	0.15N/m^2
床底分层数及厚度	6层, 每层2m
孔隙度	0.5

泥沙耦合模式初始水位、流场、海浪场和泥沙 含量场都设位 0, 计算初始时间为 2007 年 8 月 1 日 0 时, 结束时间为 2007 年 9 月 31 日 24 时, 内模时间 步长设为 1s。

2 模型检验

2.1 水动力检验

前人针对渤海潮波系统已经开展了很多数值模

拟工作,基于 FVCOM 模式的潮波模拟结果也较为 理想。尼建军等^[18]基于 FVCOM 模拟了渤海的潮波, 并验证了 M₂、S₂、K₁、O₁ 四个分潮。李秉天等^[15] 已给出了潮汐调和常数的验证结果,模拟结果较为 准确。本文进一步收集了渤海海域 3 个潮位站的实 测水位资料和 6 个连续站的实测海流资料(站位见图 1),将模拟结果与实测数据进行比较,对模拟的水位 和潮流进行了验证。潮流验证均采用表层流速,其它 层的对比结果基本一致。

由图 2 可见,模拟的水位与实测水位吻合程度 良好,数值模拟结果能较好地重现渤海真实的潮 位变化情况。将模式模拟的海流东分量和北分量与 6 个观测站的实测数据进行对比(如图 3),模拟海流 与实测海流具有较好的一致性,较为准确地模拟出 了涨急和落急的流速及对应的时刻。总的来说模拟 得到的水动力场作为研究泥沙运动的动力驱动场是 可靠的。

2.2 泥沙模型验证

因渤海悬沙浓度场具有季节稳定性^[19],本文利 用 2007 年夏季的模拟结果来分析夏季黄河口附近的 泥沙输移规律。对表层悬沙含量而言,模型基本上反 映了夏季黄河口附近表层泥沙的空间分布状况(图 4)。本模式模拟的黄河口附近悬沙浓度的空间分布状 况与王海龙等^[8]的大致相同。

利用收集的 2007 年 9 月 1 日 32 个观测点(如图 4 所示)的实测悬沙数据, 对本模式模拟的结果作进 一步的验证。通过对比表层泥沙浓度的实测值与模 拟值(图 5 和表 2)发现, 模拟值要比实测值要小一些, 但两者的量级一致, 差值也在可接受范围。可见, 模 拟悬沙浓度与实测浓度基本吻合, 表明建立的泥沙 模型是合理的, 能够较好的模拟渤海区域的泥沙运 动, 用来研究夏季黄河入海泥沙的沉积和输运过程 是可信的。

3 夏季黄河泥沙输运过程

3.1 夏季渤海悬沙分布特点

总体来看(图 6), 在浪流的共同作用下, 夏季渤 海悬沙浓度分布的总体趋势是由岸向海逐步降低, 近海海域的泥沙浓度高于海区中央, 而近海海域的 泥沙浓度也随区域的不同有很大的差别, 辽东湾悬 沙含量较高, 最大能达到 200 mg/L, 而秦皇岛海域 附近悬沙浓度非常低, 大都在 1 mg/L 左右。黄河入



图 2 模拟水位与实测水位对比

Fig. 2 Comparison of elevation between simulation and observation

表	2	悬沙浓度对	٤Ł

Tab. 2	Comparison of	of suspended	sediment	concentration	between	simulation	and	observati	on

纬度(°N)	经度 (°E)	实测值 (mg/L)	模拟值(mg/L)	差值(mg/L)
37.608	119.564	18.333	30.842	-12.508
37.609	119.616	23.517	27.623	-4.107
37.641	119.588	20.283	20.854	-0.571
37.670	119.589	19.433	13.808	5.625
37.669	119.537	22.090	20.090	2.000
37.670	119.487	30.075	25.225	4.850
37.669	119.437	19.092	29.983	-10.891
37.698	119.437	25.790	20.828	4.962
37.699	119.488	34.370	16.019	18.351
37.700	119.537	28.960	11.687	17.273
37.730	119.539	14.900	6.513	8.387
37.731	119.637	7.500	2.593	4.907
37.898	119.941	4.246	0.500	3.746
37.640	120.245	10.586	9.524	1.062
37.640	120.193	17.220	14.318	2.902
37.617	120.216	11.810	8.628	3.182
37.699	119.589	8.590	7.827	0.763
37.699	119.638	7.930	5.205	2.725
37.669	119.740	9.575	3.336	6.239
37.668	119.689	8.425	6.644	1.781
37.668	119.638	14.340	10.559	3.781
37.640	119.638	16.450	18.411	-1.961
37.640	119.689	11.500	14.642	-3.142

				终衣
纬度(°N)	经度 (°E)	实测值 (mg/L)	模拟值(mg/L)	差值(mg/L)
37.640	119.689	13.280	14.642	-1.362
37.608	119.663	18.410	30.122	-11.712
37.640	119.538	26.260	28.332	-2.072
37.640	119.486	24.490	37.616	-13.126
37.640	119.438	34.420	42.775	-8.355
37.668	119.387	27.283	6.833	20.450
37.515	119.184	21.625	25.654	-4.029
37.486	119.158	21.188	16.678	4.510
37.454	119.234	65.780	70.879	-5.099



海洋科学 / 2016 年 / 第 40 卷 / 第 3 期



Fig. 3 Comparison of velocity between simulation and observation

海口附近存在一个高浓度区。黄河现行流路清 8 口 外的悬沙浓度最高,这是黄河入海泥沙直接输入的 结果。夏季,黄河处于丰水丰沙期,径流量及输沙量 最大,携带大量泥沙入海,并向莱州湾西部扩散。由 于本模式在陆源入海泥沙方面只考虑了黄河的作用, 因此其他海域的悬沙来源主要是波浪和潮流共同作 用造成的底部沉积物再悬浮的结果。其他海域的悬 沙分布基本与底部切应力相吻合(图 7),底部切应力 较大海域的悬沙含量也比较高,如辽东湾东岸以及 渤海湾,而底部切应力小的海域悬沙含量普遍偏低, 如秦皇岛附近海域及渤海中部海盆。夏季在没有大 风过程影响的情况下渤海底部切应力相对较小,泥 沙的再悬浮作用较弱,因此除黄河口和辽东湾东部 海域外其他海域的悬沙浓度一般在 10 mg/L 以下。

3.2 黄河入海泥沙的扩散与运移

早期研究表明,在黄河口附近,泥沙主要向东 及东北方向运移,最终进入渤海中部^[20];也有学者



图 4 2007 年夏季黄河口附近悬沙浓度(a, 单位: mg/L)模拟结果及观测站位分布(b) Fig. 4 Simulation of suspended sediment in the summer of 2007 near the estuary (a, units: mg/L) and observation stations (b)



图 5 悬沙实测与模拟散点图

Fig. 5 Scatterplot of simulation and observation





提出黄河泥沙入海后主要向东南方向淤积,其中细 颗粒部分大部分最终转向北偏东方向扩散到外海^[21]; 还有学者认为黄河口外悬浮体,一部分向北进入渤



图 7 底部切应力 Fig. 7 The bottom of shear stress concentration

海湾,另外一部分进入莱州湾并沿莱州湾东北沿岸 进入渤海海峡^[4]。近几年,随着对黄河入海泥沙研究 的深入,一些学者对入海泥沙的输运过程有了新的 看法,认为黄河泥沙在进入渤海海域以后总体是朝 向辽东湾西侧海岸扩散,主要沉积区域是黄河口附 近^[22]。针对夏季黄河入海泥沙,有学者认为悬沙以黄 河口为中心,北向渤海湾南岸,南向莱州湾西岸扩 散输运,并迅速沉积^[13];也有学者认为黄河泥沙沿 山东半岛向东沉积,沉积中心在 20~30 m等水深线, 潮致混合引起的夏季逆时针环流是决定黄河物质沿 山东半岛向东输运的关键^[23]。

从本文计算的黄河口附近悬沙浓度空间来看(图 4), 黄河口存在高浓度悬浮泥沙区,浓度超过 1 000 mg/L, 出了高浓度区后悬沙浓度迅速降低,普遍低于5 mg/L。 从东西方向泥沙浓度变化来看,距离河口大约 20 km 处,泥沙浓度变化梯度很大,这主要是因为黄河口 的悬沙运移主要受潮流和余流的控制(图 8)。该区域 的潮流为典型的往复流,主流向与岸线平行,涨落 潮方向为东南向,落潮流方向为西北向,涨潮流历时大于落潮流历时。黄河入海泥沙被沿岸的往复流挟带,沿平行岸线方向南北往复运动,这是造成黄河口附近一直存在高浓度悬沙的主要原因,并限制了黄河入海泥沙向外海方向扩散和运移。模拟结果 表明,夏季黄河入海泥沙并没有直接向东扩散到海 湾中部。



图 8 黄河口余流分布 Fig. 8 Residual current near the Yellow River estuary 1: 黄河口逆时针环流; 2: 黄河口顺时针环流

1: Counterclockwise residual circulation; 2: clockwise residual circulation

从南北方向浓度变化来看, 泥沙浓度沿清水沟 以南的莱州湾西岸往莱州湾内湾呈逐步降低的趋势, 但不同于东西方向, 水体中的悬浮泥沙浓度变化梯 度明显小于东西方向。泥沙浓度南北方向上的递减 趋势与莱州湾内的余流方向一致(图 8)。而莱州湾其 他海域悬沙浓度比较低, 可见莱州湾的悬沙主要受 黄河入海泥沙的影响, 水动力引起的底部泥沙再悬 浮作用很小, 并且进入莱州湾的泥沙并没有持续向 湾顶扩散。在余流的作用下, 夏季来自黄河的泥沙沿 莱州湾西岸向南输移, 然后向湾口中部扩散, 达到 湾口中部区域后也未向湾顶运移。

图 9 是模拟的 2007 年夏季 8 月 1 日~10 月 1 日 的渤海底部冲淤结果。由图 9 可见,黄河三角洲的沉 积率非常的大,夏季黄河入海泥沙很大一部分直接 沉积在河口附近,只有很少一部分泥沙通过余流向 外扩散。除黄河口及莱州湾的其他海域,悬沙浓度分 布(图 6)与底部冲淤模拟结果(图 9)之间存在非常好 的对应关系,悬沙浓度高的区域一般表现为侵蚀状 态,而悬沙浓度低的区域一般表现为沉积。这是因为 模式中这些海域的悬沙都来自于底部泥沙的再悬 浮。莱州湾西岸与莱州湾东岸的冲淤明显不同,莱州 湾西岸及附近海域为沉积区,但沉积不是很大,大 致在 1 cm 以下;莱州湾东岸及莱州湾中部为侵蚀。 可见,夏季黄河口入海泥沙向南进入到莱州湾,最 后只有很小的一部分在输运过程中沉积在莱州湾西 岸的附近海域,大部分都没有沉积在此,莱州湾主 要表现为黄河入海泥沙向外海输运的通道。夏季黄 河入海泥沙随余流进入到莱州湾,最后在莱州湾中 部向外海扩散,并可能沿东北方向进入渤海中部。





Fig. 9 Simulation results of eroded or deposited sediment in the Bohai Sea in the summer of 2007

总的来说,黄河入海悬浮体的分布和运移主要 受潮流和余流的控制。受往复潮流的影响,在河口附 近形成悬沙高浓度区。平行岸线的往复流还限制了 泥沙向东的直接扩散。在余流作用下,黄河入海泥沙 主要沿正南和东南方向进入莱州湾,并在莱州湾中 部向外海扩散。

4 结语

本文成功应用 FVCOM(3.16)建立了三维水动 力、泥沙耦合数值模式,并利用实测数据对模式进行 了验证,模拟了 2007 年夏季黄河入海泥沙的输运过 程。通过对渤海泥沙的模拟计算,很好的展现了夏季 悬沙的空间分布特征和底部冲淤结果。通过对悬沙 分布特征和底部冲淤结果的分析,并结合黄河口附 近的潮流和余流,从整体上得到了 2007 年夏季黄河 入海泥沙的输运特征:

1) 黄河泥沙的输运主要受余流的控制;

 2)夏季丰水丰沙期,黄河挟带的沉积物进入海 洋后,在潮流作用下,不能形成长距离的输运状态, 绝大多数泥沙沉积在黄河口附近。悬沙受往复潮流 的影响,在河口附近形成悬沙高浓度区;

3)黄河入海泥沙未沉积的部分随余流向南和东

南方向输运到莱州湾,且并没有在此沉积,由莱州 湾中部向外海扩散,很可能沿东北方向进入渤海中 部。在这个输运过程中,莱州湾主要表现为黄河口入 海泥沙向外海扩散的通道。

同时,本文还存在一定的不足,比如模式是正 压的,无法考虑温盐对泥沙动力过程的影响。当前只 模拟了夏季黄河口入海泥沙的冲淤状况,尚无法给 出黄河口入海泥输移的全过程。在今后的研究工作 中,将进一步完善模式,考虑斜压过程,开展季节甚 至年际尺度的模拟,从整体上把握黄河入海泥沙的 时空变化规律。

参考文献:

- [1] 黄河水利委员会水文局. 2009 年黄河泥沙公报[R].
 郑州:水利部黄河水利委员会, 2009.
 Hydrological Bureau of Yellow River Water Conservancy Committee. Yellow River sediment bulletin 2009[R]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Committee, 2009.
- [2] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic tectonic controlof sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers[J]. Journal of Geology, 1992, 100: 525-544.
- [3] 秦蕴珊,李凡. 渤海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋学 报, 1982, 4(2): 191-200.

Qin Yunshan, Li Fan.Study on the suspend matter of the sea water of the Bohaigulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(2): 191-200.

 [4] 江文胜, Mayer B. 用三维粒子模式研究黄河输出的 悬浮颗粒物的输运[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(4): 429-445.

Jiang Wensheng, Mayer B. A study on the transport of suspended particulate matter from the Yellow River by using a 3d particle model[J]. Periodical of Ocean University of China, 1997, 27(4): 429-445.

- [5] 江文胜, 孙文心. 渤海悬浮颗粒物的三维输运模式 I. 模式[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 682-688.
 Jiang Wensheng, SUN Wenxin. 3D suspended particulate matter transportationmodel in the Bohai Sea I.introduction of the model[J]. Oceanologiaet Limnologia Sinica, 2000, 31(6): 682-688.
- [6] 江文胜, 孙文心. 渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究 II.模拟结果[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 94-100.
 Jiang Wensheng, Sun wenxin. 3D suspended particulate matter transportationmodel in the Bohai Sea II.Simulation results[J]. Oceanologiaet Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 94-100.
- [7] 王开荣, 李萍, 郑春梅. 黄河河口泥沙输移分布特性 及其回归计算[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 22-25. Wang Kairong, LI Ping, Zheng Chunmei. Regression analysis on sediment transportation-deposition pattern

in Huanghe River Estuary[J]. Marine Sciences, 2004, 28(12): 22-25.

- [8] 王海龙,李国胜. 黄河入海泥沙在渤海中悬移输送季 节变化的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 129-136.
 Wang hailong, LI guosheng. Numerical simulation on seasonal transportation of suspended sediment from the Yellow River to Bohai Sea[J]. Oceanologiaet Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 129-136.
- [9] 王厚杰,杨作升,毕乃升.黄河口泥沙输运三维数值 模拟 黄河口切变锋[J]. 泥沙研究,2006,2:1-9.
 Wang Houjie, Yang Zuosheng, Bi Naisheng. 3-D simulation of the suspended sediment transport in the Yellow River mouth : Shear front off the Yellow River mouth[J]. Journal of Sediment Research, 2006, 2: 1-9.
- [10] 韩丹岫, 庞重光, 李广伟. 波浪作用下细颗粒泥沙悬 移特性的试验研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(6): 46-51.
 Han Danxiu, Pang Chongguang, Li Guangwei. Experimental study on characteristic of suspended fine sediment under wave-loading[J]. Marine Sciences, 2008, 32(6): 46-51.
- [11] 腾涌,杨永增,芦静.波浪对泥沙作用的数值研究及
 在渤海区域的检验[J].海洋学报,2015,34(5):174-182.

Teng Yong, Yang Yongzeng, Lu Jing. A numerical study of the wave effect on sediment transport and test in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(5): 174-182.

[12] 边昌伟,中国近岸泥沙在渤海、黄河和东海的输运[D].青岛:中国海洋大学,2012.
Bian Changwei, Chinese coastal sediment transport in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[D].

Qingdao: Ocean University of China, 2012. [13] 庞重光, 于烨. 渤海表层悬浮泥沙的空间模态及其时 间变化[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 723-727. Pang Chongguang, Yu Ye. Spatial modes of suspended sediment conceration in surface water in Bohai Sea and their temporal variations[J]. Advances In Water Science,

2013, 24(5): 723-727. [14] 庞重光, 李坤, 于炜. 渤海表层悬沙的时空分布特征 及其动力成因[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(24): 450-458.

Pang Chongguang, Li Kun, Yu Wei. Distribution characteristics, seasonal variability and dynamical mechanism of suspend sediment in the surfca layer of the Bohai Sea[J]. Advances In Marine Science, 2014, 32(4): 450-458.

[15] 李秉天, 王永刚, 魏泽勋, 等. 渤海主要分潮的模拟及地形演变对潮波影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 9-16.

Li Bingtian, Wang Yonggang, Wei Zexun, et al. Numerical study on tidesof Bohai Sea and impact of topography changes on the tidel wave system[J]. Oceanologiaet Limnologia Sinica, 2015, 46(1): 9-16.

- [16] Chen C, Beardsley R, Cowles G. An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM User manual[M]. Boston : Smast/Umassd, 2006: 6-8.
- [17] Pawlowic R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in Matlab using T_TIDE [J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [18] 尼建军, 王新怡, 张凤烨, 等. 基于 FVCOM 的渤海 潮波数值模拟[J]. 海洋科学, 2013, 37(2): 89-94.
 Ni Jianjun, Wang Xinyi, Zhang Fengye, et al. Numerical simulation of tide in the Bohai Sea based on the finite-volume coastal numerical model (FVCOM)[J].
 Marine Sciences, 2013, 37(2): 89-94.
- [19] 江文胜,苏健,杨华,等. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 212-217.
 JIANG Wensheng, SU Jian, Yang Hua, et al. The relationship between SPM concentration and hydrodynamic condition in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(1): 212-217.
- [20] 杨作升, 孙宝喜, 沈渭铨. 黄河口毗邻海域细粒级沉

积物特征及沉积物入海后的运移[J]. 山东海洋学院 学报, 1985, 15(2): 121-129.

YANG Zuosheng, SUN Baoxi, SHEN Weiquan. Characteristics of fine-graind sediment of the shelf area adjacent to the mouth of the Huanghe River and sediment dispersion in that region[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1985, 15(2): 121-129.

- [21] 臧启运. 黄河三角洲近岸泥沙[M]. 北京: 海洋出版 社, 1996: 152.
 ZANG QIyun. Thesedimentof Yellow River Delta Costal [M]. Beijing: China Ocean Press, 1996: 152.
- [22] 李国胜,王海龙,董超.黄河入海泥沙输运及沉积过 程的数值模拟[J]. 地理学报,2005,60(5):707-716.
 LI Guosheng, WANGhailong, DONG Chao. Numerical simulations on transportation and deposition of SPM introduced from the Yellow River to the Bohai Sea[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(5): 707-716.
- [23] LU J, Fang L Q, et al. Modeling the Yellow River sediment flux and its deposition patterns under climatological conditions[J]. Ocean Dynamics, 2013, 63(6): 709-722.

A numerical study of the transport process of Yellow River sediment in summer

JI Jian-qiang¹, WANG Yi-hang¹, WANG Xin-yi^{2, 3}, WANG Yong-gang^{2, 3}, TENG Yong^{2, 3} (1. Faculty of science, Ningbouniversity, Ningbo 315211, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. 24, 2016

Key words: FVCOM; Yellow river sediment; suspended transport; numerical model

Abstract: We established a three-dimensional hydrodynamic and sediment coupled numerical model on the basis of FVCOM(3.1.6). The model results were validated by sea level, sea currents, and suspended sediment data, showing satisfactory agreement. A numerical study was conducted on the sediment transport process in the summer of 2007. The model results suggested that the sands carried by the Yellow River were conveyed by residue currents. The sands were transported to the Laizhou Bay in the southerly and southeasterly directions and then to the middle of the Bohai Sea.

(本文编辑:李晓燕)