

文章编号:0559-9350(2011)05-0544-10

## 基于拉格朗日粒子追踪的渤海冬季与夏季环流及影响因素

王金华, 沈永明, 石峰, 陈晓亮

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 基于三维非结构有限体积海洋模式(FVCOM)对渤海环流进行了数值模拟研究。数值模拟中采用三角形网格, 以更好地拟合渤海复杂的岸线边界。潮位、潮流、温盐模拟结果验证良好。通过对粒子的拉格朗日追踪研究了渤海冬季与夏季环流及潮、风、海气热交换和入海径流对渤海环流的影响。研究表明: 粒子输移存在明显的三维结构; 与渤海中部及海峡附近相比, 3个湾内水体输送均较小、表底层相差不大; 渤海夏季环流强度较冬季强; 由风引起的水体输送对渤海环流影响较大; 温盐环流对水体输送的影响主要在夏季, 在冬季, 影响可以忽略; 河流只对河口附近环流结构有影响; 夏季, 与热盐、风相比潮流对水体输送贡献较小; 在研究渤海的拉格朗日余流时, 只考虑单分潮的作用将不能反映渤海的实际环流情况。

**关键词:** 渤海; Lagrangian; 非结构网格; 有限体积法; 三维水动力模型

**中图分类号:** TV139.2

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

渤海是一个近封闭型的超浅海, 平均水深只有18m。一些学者基于实测资料对渤海环流进行了研究, 徐如彦、匡国瑞等根据渤海长期测流站的实测资料分析得出渤海的余流季节变化特征不明显<sup>[1-2]</sup>; 江文胜等通过跟踪底层人工水母研究了渤海的底层环流<sup>[3]</sup>; 管秉贤基于观测资料分析了渤海冬季环流的基本特征<sup>[4]</sup>。渤海环流的数值模拟主要是通过模拟余流场来进行。拉格朗日余流定义为质点在一个周期或多个周期的净输移<sup>[5]</sup>, 是欧拉余流与非线性引起的斯托克斯漂流的叠加。Delhez<sup>[6]</sup>计算了欧洲西北部陆架的斯托克斯漂流, 对比发现拉格朗日余流与欧拉余流差异较大, 拉格朗日余流、欧拉余流之间的显著差异主要由流场强非线性性质所产生的与地形和层化有关的斯托克斯速度引起的<sup>[7-8]</sup>。魏皓等通过计算斯托克斯漂流研究了渤海的拉格朗日余流, 指出沿渤海湾南岸的流动是造成黄河排放的泥沙入侵渤海湾的原因<sup>[9]</sup>。对质点净输移进行长周期平均, 如一月、一年, 等效于拉格朗日余流的算术平均<sup>[10]</sup>, 由于欧拉余流不满足物质面守恒, 拉格朗日平均速度较欧拉平均速度更能决定水体的输送<sup>[11]</sup>, 追踪水质点的拉格朗日运动能直观地反映物质运输的环流场<sup>[12-13]</sup>。

关于渤海环流的数值研究, 前人已经做了不少工作<sup>[14-16]</sup>, 但由于其复杂性, 还需要进一步深入研究, 如延长模拟天数、考虑多个分潮的作用、考虑温盐的斜压效应、采用实际风场、考虑入海径流对环流结构的影响等; 正是由于这些因素及采用的潮、风、温盐资料的差异, 导致以往工作对渤海环流的模拟结果不统一, 驱动机理分析也有所不同。本文全面地考虑了潮流、风、温盐、降雨量、蒸发量、入海径流的影响, 对渤海进行长期的模拟, 通过对粒子的拉格朗日追踪研究了渤海冬季与夏季环流, 以及潮、风、温盐、入海径流对渤海冬季与夏季环流结构的影响。

收稿日期: 2009-04-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50839001); 国家自然科学基金项目(50979036)

作者简介: 王金华(1984-), 男, 江苏连云港人, 博士生, 主要从事环境水力学研究。E-mail: wangjh@student.dlut.edu.cn

## 2 数值模型

**2.1 模型简介** 本文的数值模拟采用三维、自由表面、非结构有限体积模型(FVCOM),该模型垂向采用 $\sigma$ 坐标系,模型中使用改进后的 Mellor and Yamada 2.5 阶紊流闭合模型<sup>[17-18]</sup>和 Smagorinsky 公式<sup>[19]</sup>分别计算垂向与水平涡粘性系数,采用模分离技术求解动量方程。与有限差分 and 有限元模型不同,FVCOM 通过对控制方程在每一个非结构的控制体积上进行积分求解,从而得到一组离散方程,通过求解方程得到网格点上的变量。这种方法不仅结合了有限元的网格易曲性与有限差分的计算效率,而且能够保证动量、体积、温盐在整个计算区域的积分守恒。与 C 网格不同,FVCOM 的标量布置在网格节点,而速度在三角形的中心求解,关于 FVCOM 的详细描述见文献[20]。模型已成功应用于多个河口与海湾地区<sup>[21-24]</sup>,与差分模型相比,无论在实际应用还是在与解析解的对比上均具有明显的优势<sup>[25]</sup>。

粒子的运动轨迹通过下述方程求解

$$\frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\omega}{H + \zeta} \quad (1)$$

其中  $u$ 、 $v$ 、 $\omega$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $\sigma$  方向的速度分量;  $H$  为基准面到海底的距离;  $\zeta$  为基准面到海表面的距离。 $\omega$ 、 $w$  的关系如下

$$\omega = w - (2 + \sigma) \frac{d\zeta}{dt} - \sigma \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

$w$  为  $z$  坐标下的垂向速度,方程(1)通过四阶龙格-库塔积分求解,粒子的流速通过周围最近3点进行双线性插值获得。

**2.2 模型配置、边界条件、初始条件** 计算网格(覆盖 $37^{\circ}07'N \sim 41^{\circ}N$ ,  $117^{\circ}35'E \sim 123^{\circ}14'E$ )如图1所示。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提供的渤海实测水深数据,采用加权反距离法插值到每个网格节点。为了更好地拟合边界处的地形变化,对岛屿与岸边界附近进行网格加密。水平分辨率在岸线与岛屿周围为3km,在海湾内部以及开边界处为8~9.5km,平面网格单元数为5 887,网格节点数为3 200,垂向共均分10个 $\sigma$ 层,对应的垂直分辨率在浅于10m的近岸为0.2~1.0m,在60m等深线处为6m。根据判别格式稳定性和收敛性的 CFL 条件,外模时间步长取24s,内模时间步长取外模的15倍。开边界采用潮位控制,开边界上的各潮波和位相由观测资料绘制的东中国海和黄河的等潮位和位相图确定,并根据北部的大长山( $39^{\circ}16'N$ ,  $122^{\circ}35'E$ )和南部的鸡鸣岛( $37^{\circ}7'N$ ,  $122^{\circ}29'E$ )两个潮位站的分潮调和常数进行适当的调整。温盐的开边界条件采用辐射边界条件并采用张弛逼近技术,在侧边界和海底,温盐的法向梯度为零。考虑了沿岸7条河流的淡水排放,入海口位置见图2,流量数据来自文献[26]。降雨量、蒸发量、云量、空气温度、风、相对湿度采用 NCEP<sup>[27]</sup>每隔6h平均的再分析资料并插值到每个网格点,考虑到渤海平均水深较浅,采用文献[28]中的公式计算海表热通量。模型计算采用冷起动,初始水位与流速均为零,初始温度、盐度采用 Levitus 的月平均资料插值到网格节点。模型从1991年7月1号开始计算到1992年年底,取1992年的结果进行分析。

**2.3 计算工况** 为了研究渤海的冬夏季环流,分别在2月、8月初在近表层(水面下5m)与近底层释放示踪点,对粒子跟踪一个月。为了既能够反映渤海各个区域的水体输送,又能够方便描绘粒子在一个月内的输移轨迹,在渤海布置了35个点粒子,初始释放位置见图2所示。本文设计了6种数值试验,具体见表1。其中,工况1为综合考虑潮流、风、热通量、入海径流的影响,通过工况1与工况2、工况3、工况4的对比可以分别反映风、热通量以及入海径流对渤海水体输送的影响;工况5、6为正压条件下只考虑合成潮及  $M_2$  分潮的作用,工况5可以反映潮流对水体输送的贡献,工况5与工况6对比可以反映单分潮与多分潮作用下水体输送的异同。

表1 本文设计的数值试验

工况	计算条件
1	潮(5个主要分潮合成潮)+风+海面热通量+入海径流
2	潮(5个主要分潮合成潮)+海面热通量+入海径流
3	潮(5个主要分潮合成潮)+风+入海径流
4	潮(5个主要分潮合成潮)+风+海面热通量
5	潮(5个主要分潮合成潮)
6	潮(只考虑 $M_2$ 分潮)

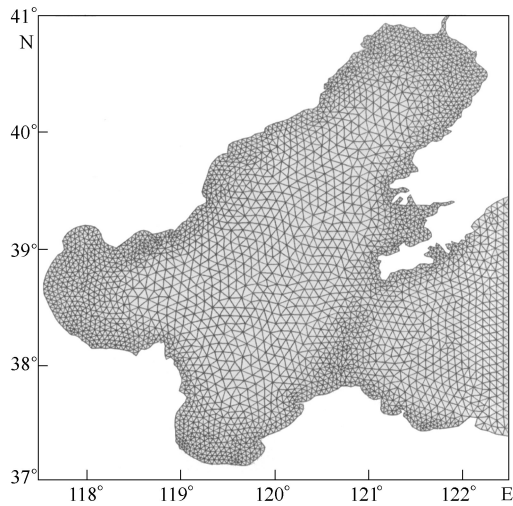
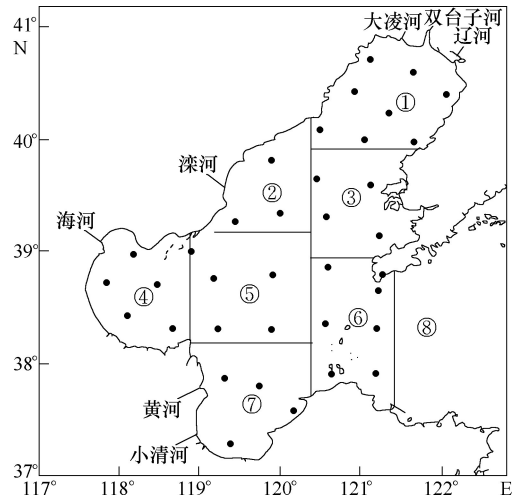


图1 渤海数值计算网格布置



(①-⑧分别为辽东湾、秦皇岛外海、长兴岛海域、渤海湾、渤海中部、渤海海峡内侧、莱州湾、渤海海峡外侧)

图2 渤海入海河流以及粒子释放位置及渤海分区

### 3 模拟结果与分析

**3.1 渤海的潮汐、潮流及温盐** 根据每个网格点一年的潮位、潮流模拟值,采用调和分析方法分离出潮位与潮流的调和常数,由于渤海的主要半日与全日分潮分别为  $M_2$  和  $K_1$ ,故文中只对这两个分潮进行分析。图3给出了  $M_2$  和  $K_1$  分潮的等振幅线、同潮时线以及潮流椭圆图,模型再现了  $M_2$  分潮位于秦皇岛外海附近与老黄河口附近以及  $K_1$  分潮在渤海海峡附近的无潮点;从潮流椭圆图可以看出,在老铁山水道、及长兴岛附近海域  $M_2$  潮流较强,而  $K_1$  潮流仅在老铁山水道处较强,在秦皇岛外海  $M_2$ 、 $K_1$  潮流均较弱。潮汐、潮流与实测结果<sup>[29]</sup>相比符合良好,说明模型的模拟结果是可信的。图4给出了渤海1992年4个海洋测站的温度、盐度模拟值与实测值对比,其中实测值为每个月的月平均值,温度验证良好,由于使用的降雨量资料精度不够高,导致模型不能精确地捕捉到盐度的突变,但是整体的变化趋势是合理的,再现了渤海一年内的温盐变化过程。图5给出了2月、8月中旬表层温度、盐度的平面分布。从温度模拟结果来看:夏季,3个湾内温度较高,这是因为水深较浅,热容量小有关,其次在秦皇岛外海附近存在一个高温区,因为该区域潮流较弱(图3),由潮导致的垂向混合较弱,存在较强的温跃层,这与文献[30]的模拟结果一致;冬季,3个湾内温度相对较低,在辽东湾顶部温度低于零度,这与辽东湾每年冬季会结冰吻合。从盐度模拟结果来看:冬季,渤海中部盐度较高,辽东湾、黄河口受入海径流的影响盐度较低,海河、滦河92年因入海流量很小对盐度分布的影响不大;夏季,黄河入海流量较大,从盐度30psu等值线可以看出,冲淡水低盐锋面向渤海海峡扩展,并沿着渤海湾南岸深入渤海湾。

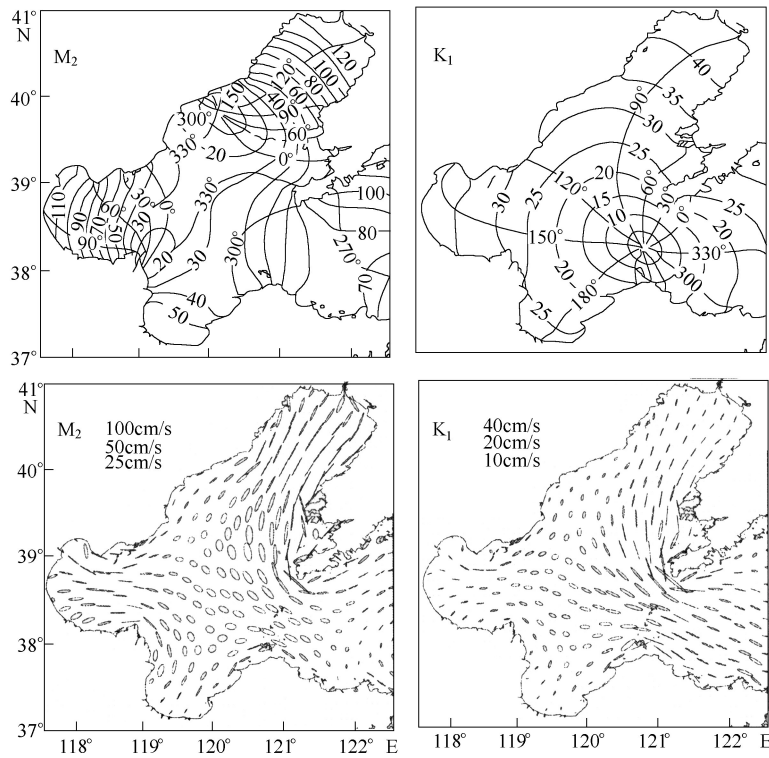


图3 M<sub>2</sub>和K<sub>1</sub>分潮等振幅与等位相线以及表层潮流椭圆

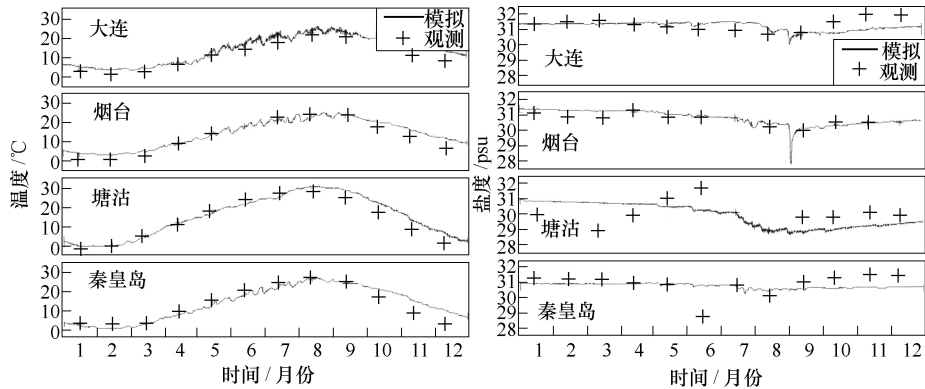


图4 表层温度、盐度模拟值与观测值对比

### 3.2 冬季粒子输移轨迹模拟与分析

冬季表底层粒子在6种工况下输移轨迹见图6，分别对6种工况进行分析。

工况1：近表层，从粒子的运动轨迹可以看出，渤海海峡处粒子朝东南方向流出渤海，辽东湾存在一个顺时针的环流；秦皇岛外海处粒子向东南方向运动；渤海湾湾口北部水域，可以看到一支流入渤海湾的流动，但是深入渤海湾不远即左转向东南向偏转，与渤海湾南岸的顺时针环流汇集从渤海湾中部流出，即存在一个双涡旋结构，这与天津海岸带调查资料、及文献[14]的模拟结果一致；莱州湾，粒子在黄河口及莱州湾中部输移较大，黄河口外的粒子沿莱州湾西岸南下，从图5黄河口的低盐锋面也可以看出，低盐水沿岸向莱州湾湾顶运输，这与文献[31]的结果并不一致，分析原因可能是黄河在1976年改道清水沟后口门朝东，并在科氏力作用下有转向东南的趋势，这与观察到的黄河口化学要素分布<sup>[32]</sup>以及对黄河口泥沙输运的数值模拟结果<sup>[33]</sup>相吻合；渤海中部粒子向南移动，后偏向东南，最后从渤海海峡南端流出渤海；粒子输移路程(表2)，在近岸较短，约30km，渤海海峡中南部净输移最大，约146km，7个区域的平均最大输移路程为48km。近底层，在3个湾内粒子的运

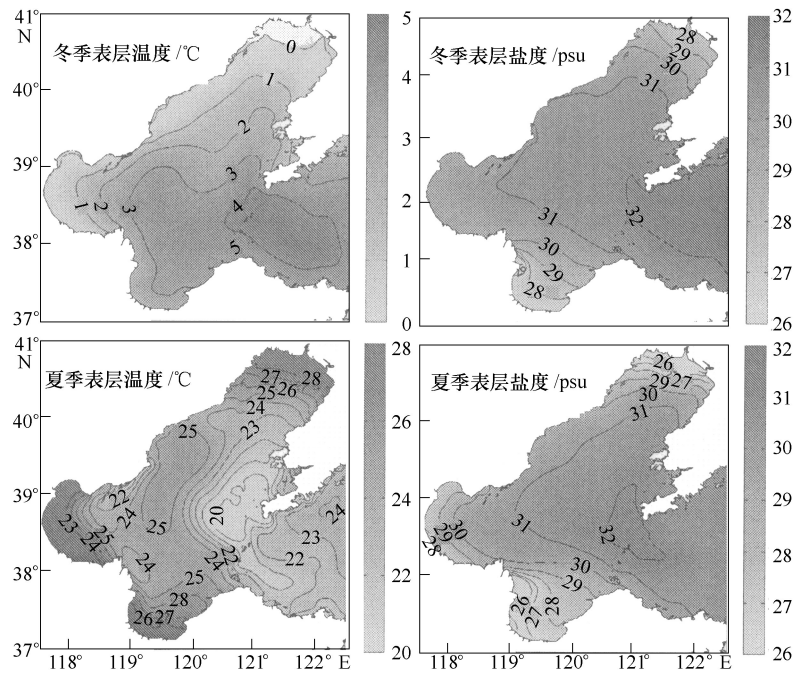


图5 冬夏季(2月、8月中旬)表层温盐平面分布

动轨迹与表层基本一致，这与在3个湾内水深较浅有关；在辽东湾中部及西岸，与表层不同，表层为离岸流，底层为向岸流；在秦皇岛外海、渤海中部，底层粒子流向与表层相反，整体向西北方向移动，这是因为表层主要为风漂流，下层具有明显补偿流性质<sup>[34]</sup>；在整个渤海范围内粒子输移距离相差不大，最大输移发生在渤海海峡附近，约32km。

工况2：近表层，与工况1相比，在3个湾内粒子的运动轨迹基本保持不变；在辽东湾中南部，与考虑风应力时粒子偏向辽东湾东岸不同，粒子沿辽东湾中轴线运动；在秦皇岛外海，粒子输移路程较工况1明显减小，粒子最大输移路程为19.5km，约为工况1的2/5；在渤海中部，粒子输移距离较有风应力情况下略有减小；在渤海海峡处，粒子表现为北进南出，且输移距离明显减小，最大输移路程为40km，约为工况1的1/4。近底层，与考虑风应力的时候相比，粒子输移路程与方向上基本一致。对比近表层与近底层的粒子输移轨迹，发现除了在辽东湾中部粒子输移路径略有变化外，其它区域基本一致，由此可以得出冬季表底层水体输送的差异主要是由风引起的。

工况3：不考虑热通量的影响，近表层、近底层的粒子运动轨迹与工况1基本一致，说明在冬季由于表底层混合均匀，由温度变化引起的密度流对水体的拉格朗日输送贡献很小。

工况4：不考虑入海径流的影响，近表层、近底层的粒子运动轨迹只在黄河口附近区域有所改变，黄河口附近、莱州湾中部的粒子净输移与考虑径流时相比有所减小，莱州湾的粒子最大输移路程为13.5km，约为工况1的1/2。其它几条河流由于流量较黄河小很多，对周围的水体输送的贡献不大。

工况5：只考虑5个分潮的合成潮的作用，表底层的模拟结果与不考虑风应力情况下的粒子运动轨迹相似，只在距离上略有减小(表2)，说明在冬季，由温盐变化引起的密度流对粒子的输移贡献很小，粒子输移主要受风及潮流控制。

工况6：只考虑 $M_2$ 分潮作用时，大部分粒子在一个月内的净输移很小，在黄河口、辽东湾西岸团山角处、渤海湾北部入口以及渤海海峡两侧由于地形突变造成的非线性影响使得输移路程略大，一个月内最大净输移路程约为18km，也就说在只考虑 $M_2$ 分潮时最大拉格朗日平均余流不到1cm/s。与工况5只考虑合成潮相比，粒子输移路径要小很多(表2)，这说明虽然 $M_2$ 分潮在渤海的潮位、潮流中占优，但在研究渤海的水体输送时，如果只考虑单分潮的作用将不能反映渤海的实际环流情况。

表2 粒子输移最大距离

工况	季节	层面	粒子输移最大距离/km						
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1	冬季	近表层	31.76	50.63	38.21	22.15	54.98	146.83	28.40
		近底层	33.03	25.14	28.46	18.80	29.06	31.98	30.62
	夏季	近表层	40.38	83.86	70.82	113.94	175.04	139.06	89.58
		近底层	35.00	28.09	19.73	28.65	28.93	52.30	39.95
2	冬季	近表层	46.86	19.50	25.95	12.72	28.30	39.98	25.66
		近底层	26.99	16.08	22.31	23.65	25.53	29.56	27.30
	夏季	近表层	86.06	65.06	55.39	105.84	140.70	127.90	80.72
		近底层	52.72	39.05	18.85	28.52	23.20	47.28	39.70
3	冬季	近表层	37.55	66.31	38.93	21.56	59.95	158.13	28.81
		近底层	35.24	25.49	28.64	23.27	26.70	39.91	34.43
	夏季	近表层	45.67	15.40	42.93	32.52	72.92	104.67	80.28
		近底层	22.81	18.40	19.33	16.74	37.92	37.44	41.37
4	冬季	近表层	31.78	51.37	38.09	21.10	60.95	146.68	13.48
		近底层	33.77	20.32	28.45	19.79	23.14	31.13	22.42
	夏季	近表层	27.91	85.16	79.48	75.66	185.14	148.74	79.89
		近底层	33.06	28.48	14.46	28.34	25.79	46.96	27.21
5	冬季	近表层	24.02	11.12	67.00	20.81	22.72	35.06	30.65
		近底层	18.09	17.58	19.86	22.57	11.77	26.10	30.85
	夏季	近表层	31.89	18.37	25.98	25.21	31.76	45.85	13.08
		近底层	15.93	21.35	32.87	17.69	23.75	31.88	8.45
6	冬季	近表层	18.19	4.29	8.04	10.82	16.76	12.72	8.59
		近底层	16.68	4.50	8.04	6.42	13.65	10.63	9.00
	夏季	近表层	20.31	5.42	7.22	11.40	16.12	14.13	15.70
		近底层	17.33	6.47	7.46	11.96	14.36	8.70	7.63

注：①—⑦分别为辽东湾、秦皇岛外海、长兴岛海域、渤海湾、渤海中部、渤海海峡内侧和莱州湾。

### 3.3 夏季粒子输移轨迹模拟与分析

夏季表底层粒子在6种工况下输移轨迹见图7，分别对6种工况进行分析。

工况1：近表层，在渤海海峡处的粒子北进南出，海峡南部粒子输移路程长达140km，在一个月可以接近右边的开边界处；从粒子运动轨迹可以看出，外海海流沿辽东湾东岸向上到达湾顶后沿辽东湾西岸南下，达到秦皇岛附近时分成两支，一支离岸向东流动，在辽东湾形成一个小的逆时针涡旋，另一支沿渤海湾北岸进入渤海湾，但在未深入渤海湾即从渤海湾口流出渤海湾，在渤海湾中部存在较强的粒子输移；在黄河口处的粒子向东流动，这与图5黄河口的低盐锋面向东扩展一致，莱州湾中部的粒子输移路程较长；渤海中部的粒子向东南方向移动，最后从渤海海峡南端流出；粒子输移路程(表2)，在近岸较短，渤海中部净输移最大，约175km，7个区域的平均最大输移路程为96km，是冬季的2倍。近底层，粒子在3个海湾均有向湾顶运动的趋势，具有明显的补偿流性质；与表层一样，粒子在渤海海峡处表现为北进南出；底层粒子输移路程要较表层小很多，在整个渤海范围内约30km，约为表层的1/3，三维结构非常明显。

工况2：近表层，粒子在渤海海峡处表现为北进南出，整个区域内的粒子输移路程与工况1基本相同；但是在渤海中部及北部，粒子的运动方向与工况1差别较大，辽东湾口及秦皇岛外海粒子向西南方向运动，在渤海中部粒子向南运动，最后从渤海海峡南端流出渤海，说明在夏季，由风导致的埃克曼效应对渤海北部的粒子输移方向起决定性作用。底层粒子运动轨迹与工况1基本一致，表明夏季风对底层水体输送影响很小。

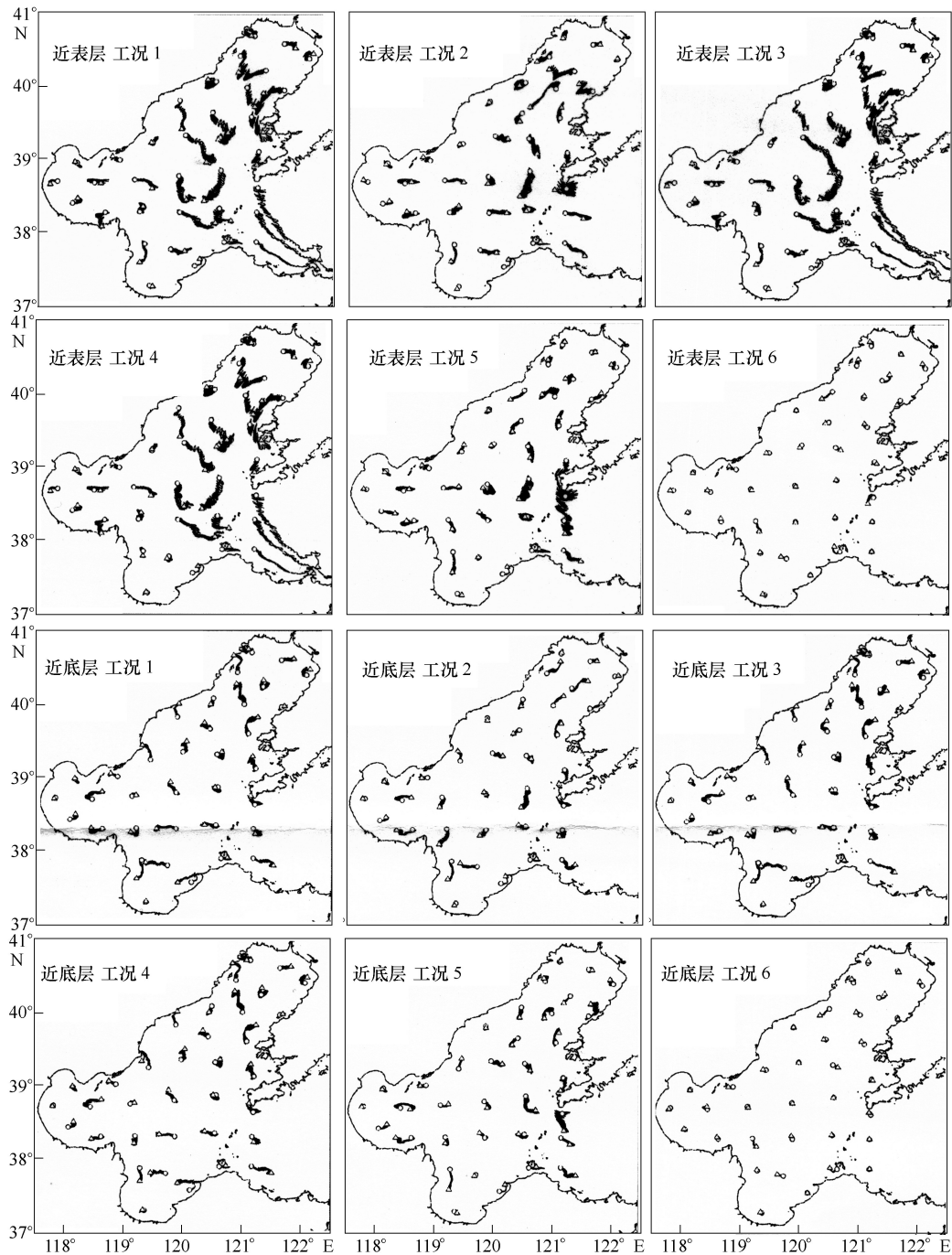


图6 冬季表底层粒子在一个月内的运动轨迹(○代表初始释位置, △代表月末位置)

工况3: 不考虑热通量的影响, 与工况1相比近表层的粒子输移路程明显减小, 但是粒子运动方向基本与考虑热通量的时候一致, 说明在夏季, 表面海气热交换加剧了粒子的输移, 这与冬季不同。近底层, 在渤海湾口及秦皇岛外海粒子的运动方向有所变化, 这是由表层粒子输移距离明显减小造成的。

工况4: 不考虑入海径流的影响, 近表层粒子的运动轨迹在黄河口附近及辽东湾发生较大改变, 其它地区与工况1一致, 表明尽管夏季径流量较大, 河流只对河口附近有所影响, 并不足以改变渤海的环流结构。近底层受径流影响较小, 基本与工况1一致。

工况5: 只考虑合成潮时, 7个区域的表层粒子平均最大输移路程为20km, 仅为工况2的1/4, 表明在夏季, 由温盐效应导致的斜压流起着主导作用。只考虑 $M_2$ 分潮时与冬季的结果一致, 分析略去。

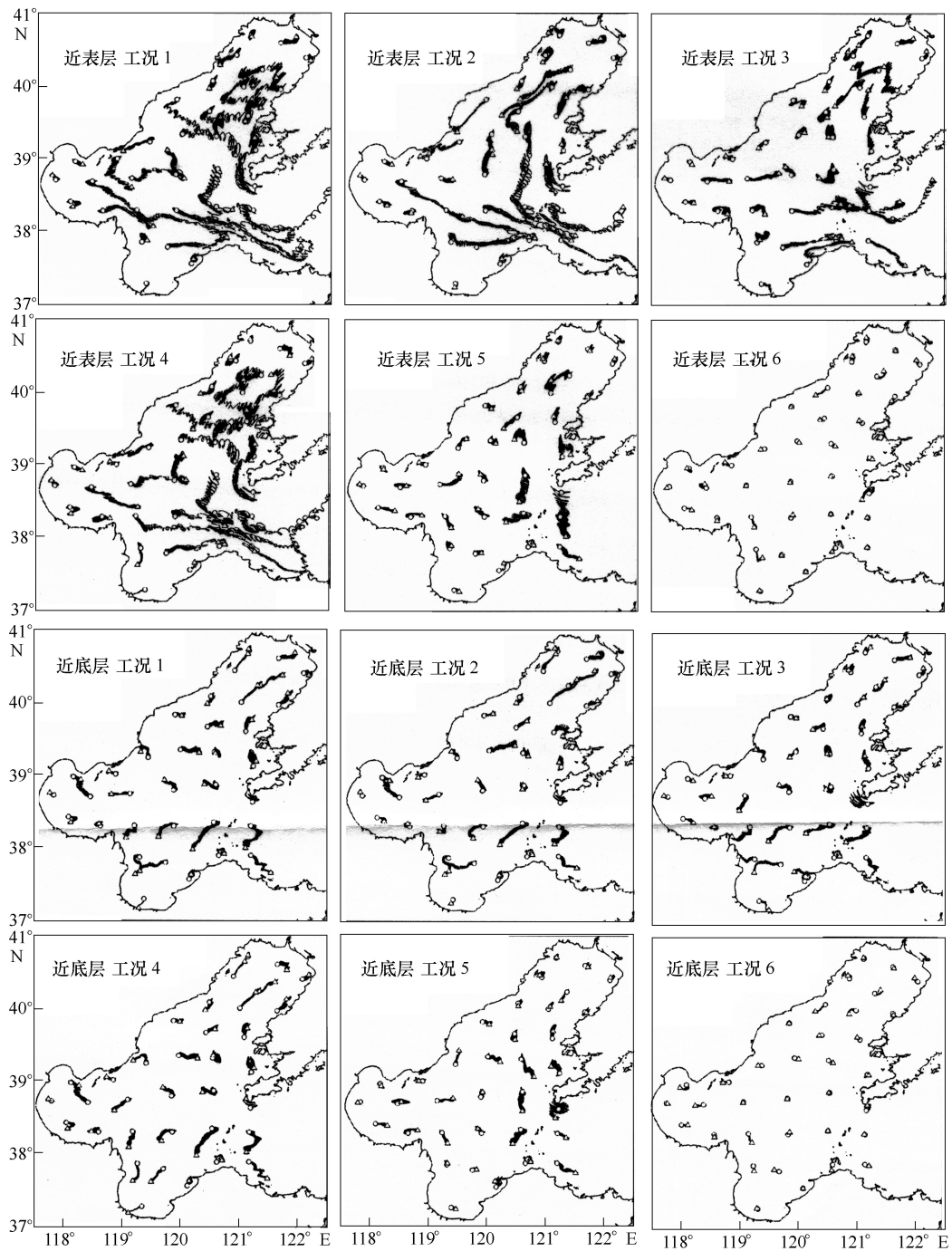


图7 夏季表底层粒子在一个月内的运动轨迹(○代表初始释位置, △代表月末位置)

#### 4 结论

基于非结构有限体积海洋模式对渤海环流进行了数值模拟, 由于使用了任意大小的三角形网格, 模型能够更好地拟合渤海海域复杂的不规则岸线边界。模型综合考虑了潮、风、热交换、降雨量、蒸发量、及入海径流的影响, 潮位、潮流、温盐模拟结果与实测值验证良好, 再现了渤海的水动力与一年内温度、盐度的变化过程。

通过跟踪的粒子水体输送, 研究了渤海的冬夏季环流及其影响因素。研究表明: 夏季环流较冬



季强；辽东湾在冬季存在一个顺时针的环流，在夏季存在一个逆时针的环流；冬季，渤海湾存在一个双圈环流，北部为逆时针，南部为顺时针，沿渤海湾中部流出渤海湾；黄河口附近存在向莱州湾湾顶的输移；粒子输移存在明显的三维结构，表层表现为风漂流，底层为补偿流性质；冬季，温盐变化引起的密度流对环流影响很小，环流主要受潮流与风控制；夏季，风应力与表面海气热交换对夏季渤海环流影响显著，与热盐、风相比潮流对水体的输送贡献较小；河流只对河口附近环流结构有影响；在研究渤海的拉格朗日余流时，如果只考虑  $M_2$  分潮的作用将不能反映渤海的实际环流情况。文中风场和温盐场都是变化的，使得模拟结果更贴近渤海的实际环流。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 徐如彦, 赵保仁, 黄景洲, 等. 渤海的平均余环流[J]. 海洋科学, 2006, 30(11): 47-52.
- [ 2 ] 匡国瑞, 张琦, 戴煜芝. 渤海中部长期流的观测与余流分析[J]. 海洋湖沼通报, 1991(02): 1-11.
- [ 3 ] 江文胜, 吴德星, 高会旺. 渤海夏季底层环流的观测与模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 511-518.
- [ 4 ] 管秉贤. 有关我国近海海流研究的若干问题[J]. 海洋与湖沼, 1962, 4(3): 121-141.
- [ 5 ] Cheng R T, Casulli V. On Lagrangian residual currents with applications in South San Francisco Bay, California [J]. Water Resources Research, 1982, 18(6): 1652-1662.
- [ 6 ] Delhez E J. On the residual advection of passive constituents [J]. Journal of Marine Systems, 1996, 8(3): 147-169.
- [ 7 ] Chen C S, Xu Q C, Beardsley R C, et al. Model study of the cross-frontal water exchange on Georges Bank: a three-dimensional Lagrangian experiment [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C5): 3142.
- [ 8 ] Loder J W, Shen Y, Ridderinkhof H. Characterization of three-dimensional Lagrangian circulation associated with tidal rectification over a submarine bank [J]. Journal of Physical Oceanography, 1997, 27(8): 1729-1742.
- [ 9 ] Wei H, Hainbucher D, Pohlmann T, et al. Tidal-induced Lagrangian and Eulerian mean circulation in the Bohai Sea [J]. Journal of Marine Systems, 2004, 44(3-4): 141-151.
- [ 10 ] Feng S Z. A three-dimensional weakly nonlinear dynamics on tide-induced Lagrangian residual current and mass-transport [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1986, 4(02): 139-158.
- [ 11 ] Longuet-Higgins M S. On the transport of mass by time-varying ocean currents [J]. Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1969, 16(5): 431-447.
- [ 12 ] Edwards K P, Hare J A, Werner F E, et al. Lagrangian circulation on the Southeast US Continental Shelf: Implications for larval dispersal and retention [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(12-13): 1375-1394.
- [ 13 ] Jakobsen P K, Ribergaard M H, Quadfasel D, et al. Near-surface circulation in the northern North Atlantic as inferred from Lagrangian drifters: Variability from the mesoscale to interannual [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C8): 3251.
- [ 14 ] 赵保仁, 曹德明. 渤海冬季环流形成机制动力学分析及数值研究 [J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(01): 86-96.
- [ 15 ] Li G S, Wang H L, Li B L. A model study on seasonal spatial-temporal variability of the Lagrangian Residual Circulations in the Bohai Sea [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(03): 273-285.
- [ 16 ] Wei H, Zhao L, Feng S Z. Comparison of the Eulerian and Lagrangian tidal residuals in the Bohai Sea [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2001, 19(02): 119-127.
- [ 17 ] Galperin B, Kantha L H, Hassid S, et al. A Quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(1): 55-62.
- [ 18 ] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(4): 851-875.
- [ 19 ] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. the basic experiment [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [ 20 ] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technolo-

- gy, 2003, 20(1): 159–186.
- [ 21 ] Zhao L Z, Chen C S, Cowles G. Tidal flushing and eddy shedding in Mount Hope Bay and Narragansett Bay: An application of FVCOM[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: C10015.
- [ 22 ] Xue P F, Chen C S, Ding P X, et al. Saltwater intrusion into the Changjiang River: A model-guided mechanism study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: C02006.
- [ 23 ] Chen C S, Qi J H, Li C Y, et al. Complexity of the flooding/drying process in an estuarine tidal-creek salt-marsh system: An application of FVCOM[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C07052.
- [ 24 ] Huang H S, Chen C S, Blanton J O, et al. A numerical study of tidal asymmetry in Okatee Creek, South Carolina [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(1): 190–202.
- [ 25 ] Chen C S, Huang H S, Beardsley R C, et al. A finite volume numerical approach for coastal ocean circulation studies: Comparisons with finite difference models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C03018.
- [ 26 ] 戴仕宝, 杨世伦, 郜昂, 等. 近50年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. *泥沙研究*, 2007(02): 49–58.
- [ 27 ] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437–471.
- [ 28 ] Ahsan A K, Blumberg A F. Three-dimensional hydrothermal model of Onondaga Lake, New York [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(9): 912–923.
- [ 29 ] 渤海、黄海、东海地图集—水文分册, 气候分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [ 30 ] Huang D J, Su J L, Backhaus J O. Modelling the seasonal thermal stratification and baroclinic circulation in the Bohai Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(11): 1485–1505.
- [ 31 ] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(05): 466–473.
- [ 32 ] 沈志良, 乐肯堂. 黄河口演变对河口水化学环境的影响[J]. *海洋科学集刊*, 1993, (00): 93–105.
- [ 33 ] 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.
- [ 34 ] 黄大吉, 陈宗镛, 苏纪兰. 三维陆架海模式在渤海中的应用 I. 潮流、风生环流及其相互作用[J]. *海洋学报*, 1996, 18(05): 1–13.

## Study of Bohai Sea circulation and its influencing factors during winter and summer based on Lagrangian particle tracing method

WANG Jin-hua, SHEN Yong-ming, SHI Feng, CHEN Xiao-liang

( *Dalian University of Technology, Dalian 116023, China* )

**Abstract:** Numerical study of the Bohai Sea circulation was carried out based on three-dimensional primitive equation ocean model. The model was easy to fit the irregular coastal boundary of the Bohai Sea with the unstructured triangular grid. The simulated tides, tidal current and thermohaline field were well verified by observation data. The circulation of Bohai Sea during winter and summer and their relations between tides, wind, river discharge as well as the heat flux were studied by means of Lagrangian trajectory. It shows that the transport of particles behaved 3D structure in the Bohai Sea. Compared with central Bohai Sea and Bohai strait, transportation in three bays and the differences between surface and bottom layer were small. Circulation in summer was stronger than that in winter. Wind played an important role in circulation, and the thermohaline circulation was important during summer; however it was negligible during winter. River runoff only affects the area around river mouth. Compared with wind and thermohaline effect, the contribution of tides was small during summer.

**Key words:** Bohai Sea; Lagrangian; unstructured grid; finite-volume method; three-dimensional hydrodynamic model

(责任编辑: 李福田)