

潮汐驱动下的辽东湾水动力及 入海污染物输移特征

李东辉¹, 晁 雷¹, 赵丰泽², 雷 坤³, 李原仪^{4*}

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072;

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012;

4. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘 要: 通过建立水动力学模型、物质输运模型和年龄模型, 对渤海辽东湾潮汐驱动下的水动力状况和污染物输移扩散过程进行了数值模拟研究。结果表明, 辽东湾海域入海径流对辽东湾整体流场和水交换过程影响不大, 其主要影响集中在河口附近海域。在潮汐的驱动下, 辽东湾内形成了复杂的环流结构, 辽东湾南北海域分别存在顺时针、逆时针的环流, 而辽东湾湾口又存在逆时针环流, 使得水交换能力较弱, 对辽东湾向外海的物质输运产生不利影响, 湾顶附近海域的物质主要通过扩散过程与外海进行交换。年龄模型的计算结果表明, 辽东湾河流入海污染物在河口附近停留时间较长, 向远区的输运需要较长时间。入海污染物的影响具有局地性, 对局部海域水质尤其是辽东湾湾顶的水质会产生不利影响。

关键词: 辽东湾; 水交换; 输移扩散; 水体年龄

中图分类号: P76

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0423-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210729001

引用格式: 李东辉, 晁雷, 赵丰泽, 等. 潮汐驱动下的辽东湾水动力及入海污染物输移特征[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 423-434. LI D H, CHAO L, ZHAO F Z, et al. Characteristics of hydrodynamics and pollutant transport into the sea in the Liaodong Bay[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 423-434.

辽东湾位于我国渤海北部, 为典型的半封闭型海湾, 其三面环陆, 南接渤海中央海盆, 东西较窄, 南北狭长, 与外海水交换困难^[1-2]。随着社会和经济的快速发展, 大量污染物随入海径流进入辽东湾, 对其海洋环境造成了巨大影响^[2-3]。辽东湾等近岸海域是陆海相互作用强烈的区域, 陆源排放的污染物对近岸海域水质产生显著影响, 研究辽东湾入海物质的输移扩散特征对认识辽东湾海水自净能力和改善辽东湾水环境具有重要意义^[4-8]。

潮流是驱动近海物质输运的关键性因素, 近海的潮流特征决定了海域物质输运的主要路径及其分布特征^[9-11]。目前, 对辽东湾潮流和物质输运特征已开展了大量研究。赵保仁等^[11]基于早期综合调查资料对该海域环流和潮流进行分析认为辽东湾南部海域的潮流方向是顺时针, 徐珊珊等^[12]利用海上浮标数据对辽东湾湾口附近的海流进行分析得出了相似的结论。而 Shang 等^[13]基于数值模拟认为辽东湾南部海域的潮流余流是逆时针的。魏皓等^[14]通过数值模拟发现辽东湾北部海域存在自封闭的环流而导致北部海域与外海水交换较弱。孔祥鹏^[15]通过数值模拟的方法研究发现辽东湾北部海域的环流主要为逆时针方向, 这与胡雪明^[16]在夏季辽东湾北部海域研究结果基本一致。由此可知, 目前对辽东湾潮流环流特征的认识存在一定分歧, 对辽东湾海域环流影响范围与河流入海水体的输运路径也需要深入研究。由于辽东湾复杂的环流结构,

收稿日期: 2021-07-29

资助项目: 国家重点研发计划项目——辽东湾污染防治与生态环境修复关键技术研究(2019YFC1407700)

作者简介: 李东辉(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水环境和水动力方面研究. E-mail: 118731231682@163.com

* 通信作者: 李原仪(1988—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事水环境和水动力方面研究. E-mail: liyuanyi@tju.edu.cn

(王佳实 编辑)

仅从潮致本身研究物质输运可能得不到清晰明确的结论,有必要通过具有明确物理意义的参量对辽东湾的水交换和物理自净能力进行定量描述。本研究采用平均年龄理论呈现出入海水体在时空上的运动趋势,从而实现对辽东湾物质输运特征的全面认识。

本文采用数值模拟的方法对辽东湾潮汐驱动下的水动力条件和物质输运进行了研究,使用基于欧拉观点的示踪物质输运模型研究了辽东湾海域余环流特征和辽东湾不同海区的水交换特性,将基于欧拉观点的年龄模型应用于物质输运的时间尺度研究,分析潮汐驱动下的辽东湾水交换和物理自净能力,以为辽东湾环境承载力评估提供科学依据。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区域

辽东湾所属岸线西起六股河口,东到辽东半岛西侧的长兴岛(图1),沿岸有辽河、大辽河、复州河、六股河等河流流入。湾内平均水深约18 m,最深处约32 m,受不正规半日潮控制,平均潮差约2.7 m,水动力条件较弱^[17-18]。为全面研究辽东湾海域的物质输运特征及其与渤海中央盆地北部海域间的水交换过程,本文将研究区域扩大至图1中虚线位置(唐山市乐亭县至大连市旅顺口)以北区域。

1.2 入海流量数据

本研究考虑了位于辽东湾湾顶地区的辽河和大辽河、位于辽东湾西岸的六股河与辽东湾东岸的复州河等辽东湾入海径流(图2)。4条河流的入海流量数据来自1988—2016年《中华人民共和国水文年鉴》^[19],搜集整理了上述4条河流入海控制水文站的逐日平均流量数据(部分年份数据缺失)。选取12月、1月和2月作为冬季,3月、4月和5月作为春季,6月、7月和8月作为夏季,9月、10月和11月作为秋季,计算出各条河流不同季节的平均入海流量(图2),并将其用于数值模拟计算。由图2可见,辽东湾海域入海径流表现出显著的干枯季特征,夏季流量最大,冬季流量最小甚至断流,春秋两季流量居中且差别不大。4条河流中,大辽河和辽河流量较大,六股河流量较小,复州河在全年的入海流量均为最小。

1.3 模型简介

1.3.1 水动力学模型

Delft3D为荷兰Deltare公司开发的用于模拟近海、湖泊、水库及河流环境水动力学过程的开源软件包。该软件采用有限差分法对控制方程进行离散求解,可以对三维环境水动力学过程进行数值模拟。本研究基

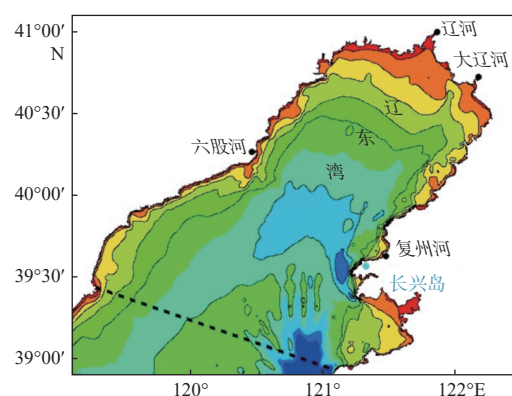


图1 研究区域(虚线以北区域)及沿岸径流入海位置
Fig. 1 Study area (north of dotted line) and locations of rivers entering the Liaodong Bay

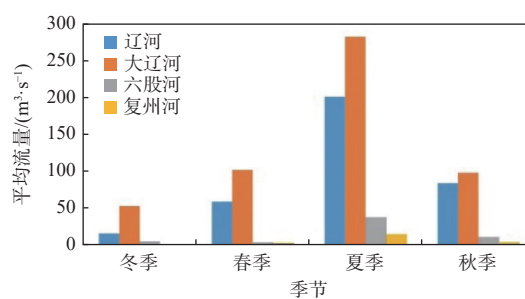


图2 各河流季节平均入海流量
Fig. 2 Seasonal average discharge of rivers into the sea

于 Delft3D 建立辽东湾环境水动力学模型, 对潮汐和入海径流共同作用下的辽东湾流场和水动力过程进行数值模拟。

由于水深较浅, 在潮汐作用下辽东湾垂向混合较好^[20-21], 而海水和污染物输运主要由水平方向的运动决定。因此, 本文采用垂向平均的水平二维模式对辽东湾海水和物质的水平运动进行数值模拟(见 Delft3D 用户手册^[22])。Delft3D 采用大涡模拟方法对水平方向的综合扩散系数进行计算, 可以较好地反映水平方向的湍流扩散对流场和物质输运的影响。

1.3.2 物质输运和年龄模型

本研究将入海水体作为示踪物质, 设定各入海径流的示踪物质浓度为 1(质量比, 无量纲量), 其他区域示踪物质浓度设为 0。本文还对辽东湾及渤海中央盆地北部海域进行分区, 对各个分区内的水体看作示踪物质分别进行标记, 研究各海区水体输移扩散路径。在初始时刻设定海区 j 的标记示踪物质浓度为 1(质量比, 无量纲量), 其他区域设为 0, 统计不同时刻各海区标记海水量占海区 j 初始总量的比例, 其计算公式为:

$$r_{ij}(t) = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} V_{ik} C_{ijk}}{V_{j0} C_{j0}}, \quad (1)$$

式中: $r_{ij}(t)$ 为 t 时刻、海区 i 的标记海水量占海区 j 标记海水总量的比例, 称作剩余函数值; V_{j0} 和 C_{j0} 分别为初始时刻海区 j 的总体积和示踪物质浓度, C_{j0} 指的是在 0 时刻, 海区 j 中的示踪物质浓度, $C_{j0}=1$; V_{ik} 为海区 i 中的第 k 个控制单元的体积; C_{ijk} 为海区 j 的标记示踪物质在海区 i 的第 k 个控制单元中的平均浓度。

Delhez 等^[23] 和 Deleersnijder 等^[24] 提出了基于欧拉观点的平均年龄理论。该理论利用代表水体组分的保守物质的浓度计算水体质点进入某一区域后所经历的平均时间(年龄), 该理论将年龄定义为 2 个标量的比值:

$$a(t, \bar{x}) = \frac{\alpha(t, \bar{x})}{C(t, \bar{x})}, \quad (2)$$

式中: a 为水深平均的年龄; $\bar{x}$ 为水平面内的坐标 (x, y) ; $C(t, \bar{x})$ 为水深平均的保守物质浓度; $\alpha(t, \bar{x})$ 为该保守物质的年龄密度。按照平均年龄理论^[23-24], $C(t, \bar{x})$ 和 $\alpha(t, \bar{x})$ 分别满足保守物质输运模型的控制方程(对流扩散方程):

$$\frac{\partial C(t, \bar{x})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} C(t, \bar{x}) - K \cdot \nabla C(t, \bar{x})) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, \bar{x})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} \alpha(t, \bar{x}) - K \cdot \nabla \alpha(t, \bar{x})) = C(t, \bar{x}), \quad (4)$$

其中: $\bar{v}$ 为水深平均的速度矢量; K (张量)为综合扩散系数:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda H U & 0 \\ 0 & \lambda H V \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(5)中: λ 为无量纲参数; H 为水深; U 和 V 分别为 x 和 y 方向的流速分量。

1.4 模型设置

为消除开边界对研究区域内计算结果的不利影响, 将数值模型的开边界设置在我国山东成山头与韩国仁川之间, 模型计算区域包含渤海及黄海北部海域(图 3)。采用空间交错网格系统对计算区域进行离散, 经向和纬向网格尺度均约为 2 km。水下地形数据由中国海军出版社出版的海图^[25] 获得, 并通过空间线性插值得到网格角点上的水深数据。

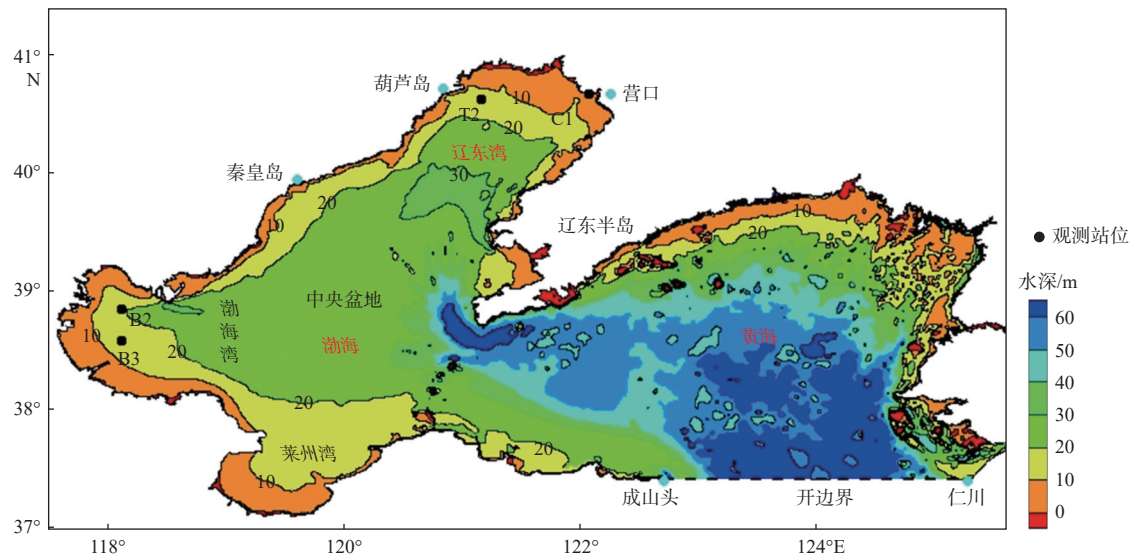


图3 数值模型计算区域及观测站位

Fig. 3 The model area and of observations stations

水陆边界设为无渗透滑动边界,海水到边界处的垂直岸线方向速度为 0 m/s 。为考虑潮汐涨落引起的岸线位置变化,采用干湿判断法确定每一计算时间步长的水陆交界线位置。开边界处给定水位时间序列。为保证开边界条件的准确性,将开边界分为6段,确保每段内水位在空间上近似呈线性变化。各段端点处的水位时间序列采用 OSU Tidal Prediction 软件^[26]给出的8个主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 和 Q_1 分潮)的调和常数进行计算得到,开边界各网格点的水位时间序列由各段两端点相应时刻的水位进行空间线性插值获得。

模型采用冷启动,初始时刻计算域内的海流流速为 0 m/s ,水位为渤海平均海平面高度(水位为 0 m)。水动力学模型和物质输运模型的计算时间步长均设为 4 min 。计算结果表明,水动力学模型启动 10 d 后的结果接近物理真实值,因此水动力学模型开始运行 10 d 后启动物质输运模型和年龄模型。水动力学模型的运行时间为2010年1月1日00:00至2017年12月31日24:00,共8 a。

1.5 水动力学模型验证

采用天津大学于2003年7月海洋调查获得的位于渤海湾中部海域的B2、B3站的实测水位、流速和流向数据^[21]与Guo等^[27]2007年1月、4月分别获得的位于辽东湾西北部海域T2站的水位、位于大辽河口附近海域C1站的流速数据^[27](图3)对本研究建立的水动力学模型进行验证。由于C1站位于河口附近海域,海水流向受到河流入海水干扰较大,故未收集C1站流向数据。图4和图5分别为渤海各站位模型计算结果与实测结果的对比情况。

统计分析表明,B2和B3站的水位、流速和流向计算结果与实测结果的相对误差均控制在5%以内,吻合度较高。T2站的水位计算结果与实测结果的相对误差均控制在12%以内,这可能是由于1月辽东湾海域存在的海冰对潮汐产生了一定影响^[28];C1站的流速计算结果与实测结果的相对误差控制在7%以内,吻合度较高。总体上看,本文建立的水动力学模型可以较好地模拟渤海湾与辽东湾水位、流速和流向的变化,具有较高的计算精度。

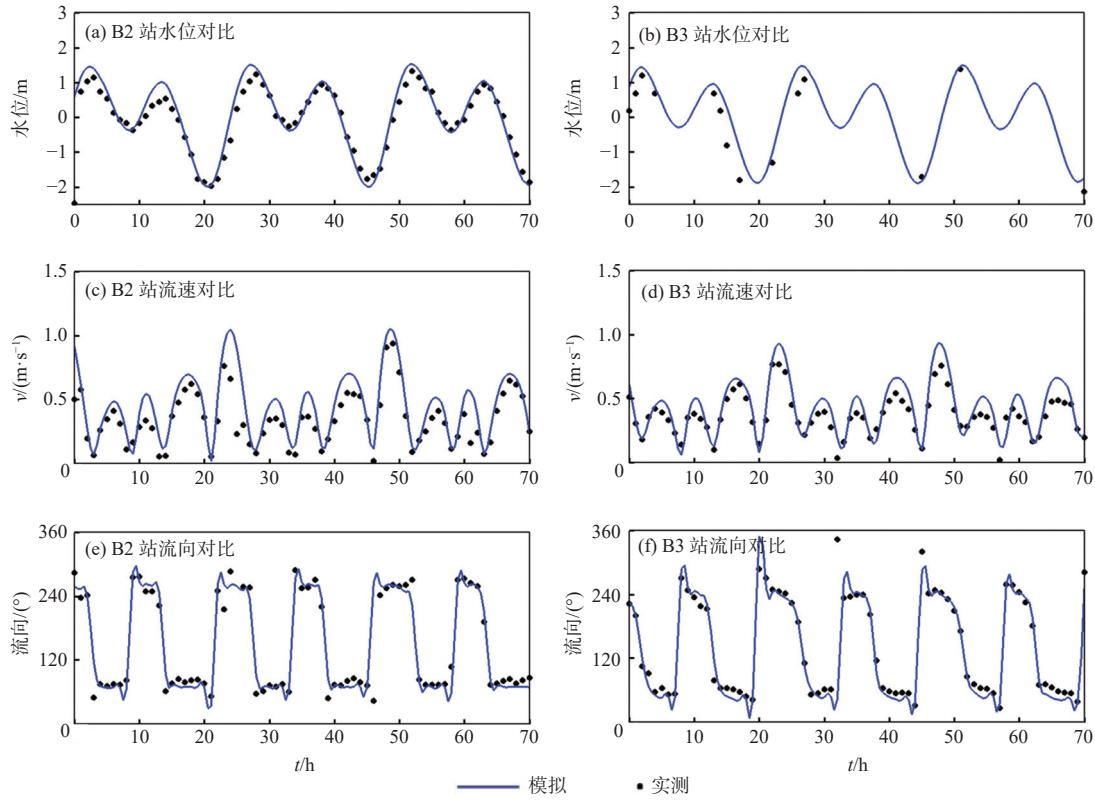


图 4 渤海湾 B2 和 B3 站水位、流速和流向模拟与实测结果对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured results of water level, flow velocity and flow direction at B2 and B3 stations in Bohai Bay

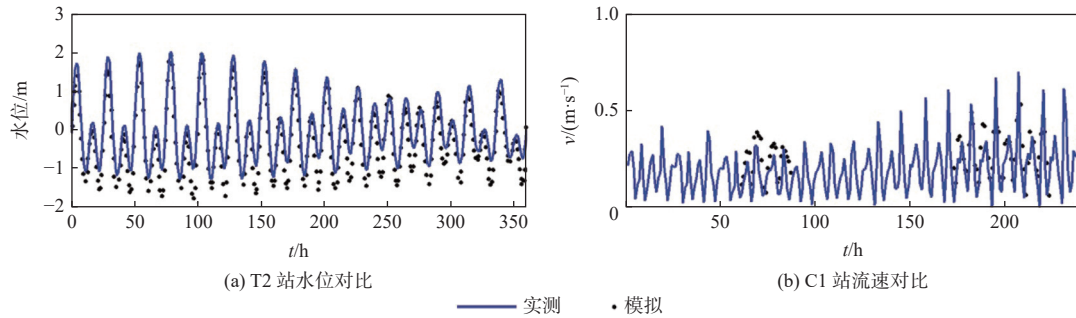


图 5 辽东湾 T2 站水位和 C1 站流速模拟与实测结果对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured results of water level at T2 station and flow velocity at C1 station in Liaodong Bay

2 结果与讨论

2.1 辽东湾入海水体输运特征

由图 2 可知, 辽东湾沿岸各条入海河流的流量存在显著的季节变化, 本研究将辽河、大辽河、六股河与复州河在春、夏、秋三个季节的入海水体分别作为示踪物质, 用河流入海水季节平均浓度研究入海水体的输运情况和辽东湾内的水交换特征, 得到模型计算结果如图 6 和图 7 所示(图中示踪物质浓度为质量比, 是无量纲量)。因冬季辽东湾沿岸的海冰影响物质输运^[28], 故本文不讨论冬季入海水体的输运状况。

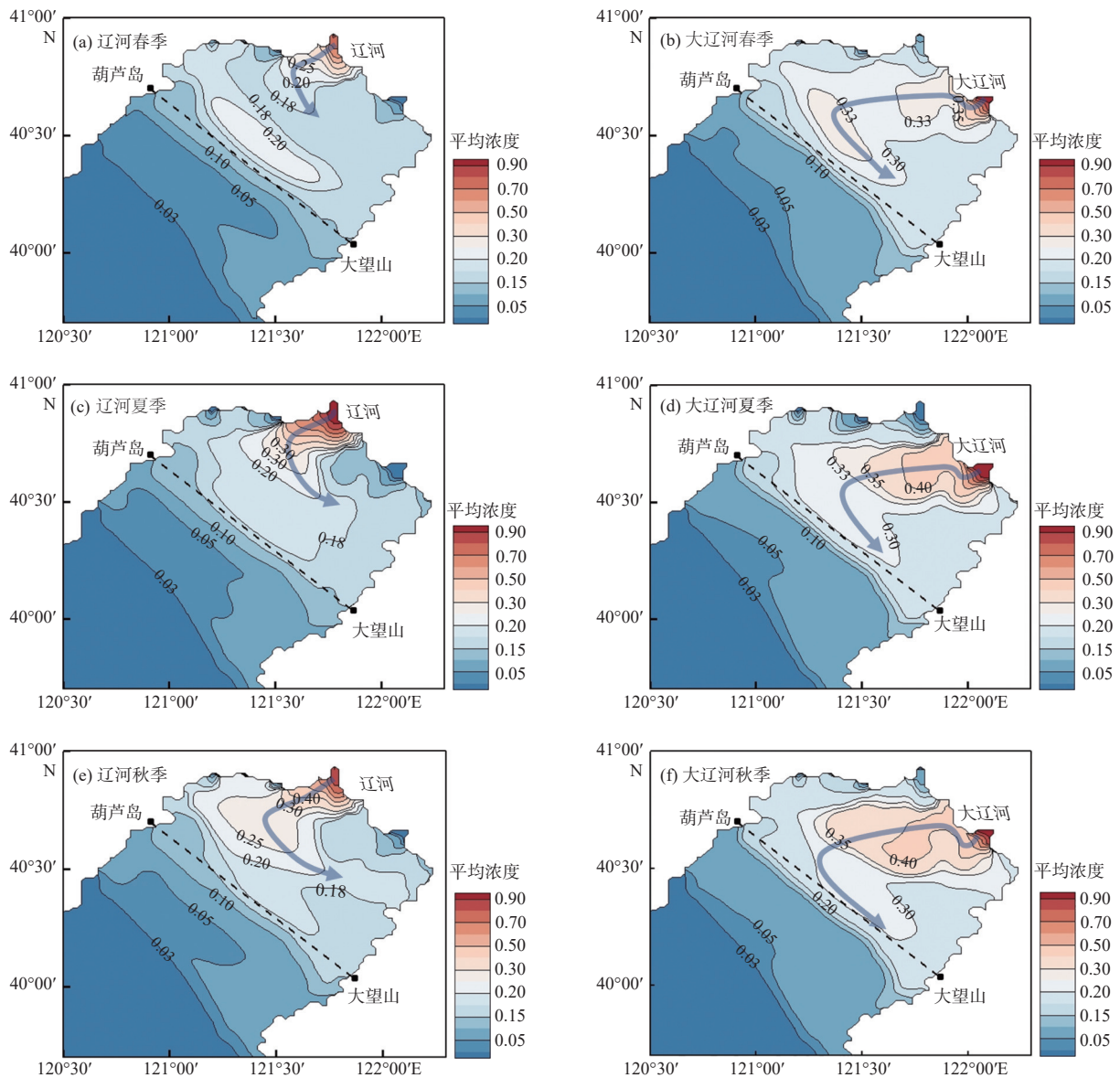


图6 辽河与大辽河入海水体季节平均浓度分布

Fig. 6 Seasonal mean concentrations of the water discharged from the Liao River and the Daliao River

图6为辽河与大辽河入海水体(示踪物质)季度平均浓度分布,可以看出辽河与大辽河入海水体具有相似的输运特征。在这2条河流的河口附近海域,入海水体代表的示踪物质在空间上的浓度分布呈现出由东北至西南递减的分布特征,表明由这2条河流入海的水体主要向西南方向输移,这与李卫卫等^[18]的数值模拟结果类似。在远离河口后,2条河流的入海水体显现向东南输移的趋势,在辽东湾的葫芦岛—大望山一线,水体沿西南方向扩散速度减慢,而沿东南方向输运趋势更加明显(图6)。入海水体的输运趋势由西南方向转向东南,表明在辽东湾北部海域存在逆时针环流,且该环流阻碍了辽东湾北部海域和南部海域之间的水交换,是造成辽东湾湾顶污染物聚集和水质较差状况的重要因素。

如图7a至图7c所示,由六股河入海的水体向河口外东南方向扩散的同时,还沿辽东湾西岸向西南漂移,这表明六股河口及附近海域海水具有沿海岸向西南流动的趋势。如图7d至图7f所示,复州河入海水体主要沿西北方向输运至六股河口以北海域。到达辽东湾西岸后,其向西南方向的输运过程与六股河入海水体相似,由此可见,辽东湾湾口与渤海中央盆地北部存在一个逆时针的环流。Shang等^[13]的研究也表明

由渤海海峡进入的外海水在潮汐的作用下沿辽东半岛东岸向辽东湾湾口流动, 大部分在辽东湾湾口附近转向西南, 然后沿西岸流向渤海湾, 在辽东湾湾口形成了逆时针环流; 董娇娇等^[29]使用 2003 年和 2015 年的海洋资料研究渤海潮余流场发现, 在六股河口附近海域存在逆时针环流。这些结论与本研究的计算分析结果基本一致。

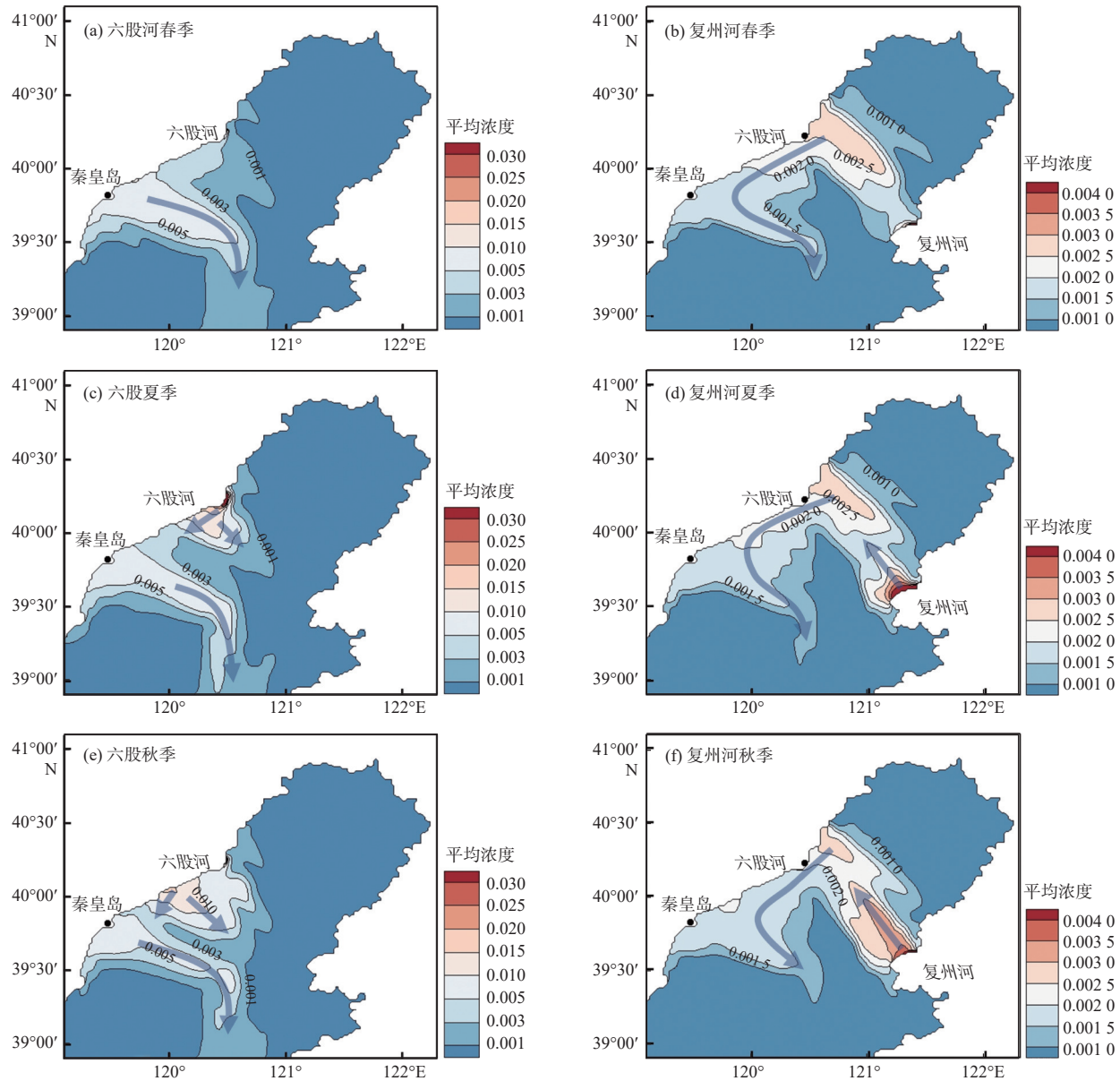


图 7 六股河与复州河入海水体季节平均浓度分布

Fig. 7 Seasonal mean concentrations of the water discharged from the Liugu River and the Fuzhou River

如图 6 和图 7 所示, 这 4 条河流的入海水体在各季节的输运路径基本相同, 表明在潮汐的影响下, 流场特征基本没有发生明显变化。这 4 条河流春季流量较小, 水体平均浓度较高的区域仅存在于河口附近海域; 进入夏季后, 随着流量增加, 水体平均浓度较高的区域明显扩大; 秋季流量下降, 河口附近水体平均浓度较高区域(如辽河 $C > 0.3000$, 大辽河 $C > 0.5000$, 六股河 $C > 0.0100$, 复州河 $C > 0.0035$ 的区域)减小, 但在距离河口较远海域, 平均浓度较低的区域(如辽河 $C > 0.1000$, 大辽河 $C > 0.3000$, 六股河 $C > 0.0030$, 复州河 $C > 0.0015$ 的区域)变化不大, 这表明辽东湾入海径流的流量季节性变化对海域的影响主要位于河口附近, 辽东湾及渤海中央盆地北部海域的环流主要是潮致流。

2.2 辽东湾水交换特性

按照地理位置和水动力特征将辽东湾及渤海中央盆地北部海域分成辽东湾西北部(海区1)、辽东湾东北部(海区2)、辽东湾西南部(海区3)、辽东湾东南部(海区4)和渤海中央盆地北部海域(海区5)五个海区(图8)。图9为设定各海区在0时刻(2010年1月1日00:00)的海水总量作为标记水体总量(即示踪物质),在不同时刻各海区标记水体量占标记水体总量的剩余函数曲线,见式(1),北部海域为海区1和海区2范围之和,南部海域为海区3和海区4范围之和。水体在潮汐的驱动下流动的同时,水体质点还与相邻区域的水体进行掺混,因此本研究考虑水体扩散作用,对流扩散方程的综合扩散系数 K 根据聂红涛^[30]的率定结果换算得到。

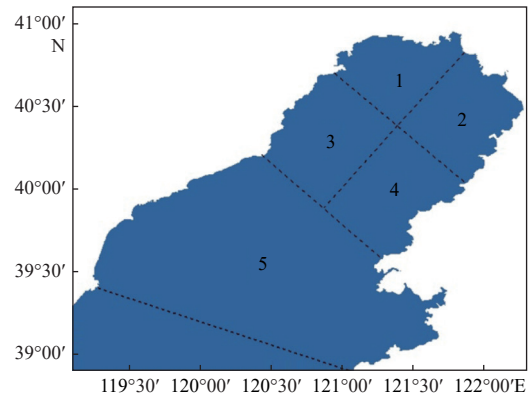


图8 海域分区

Fig. 8 Divided zones in the study area

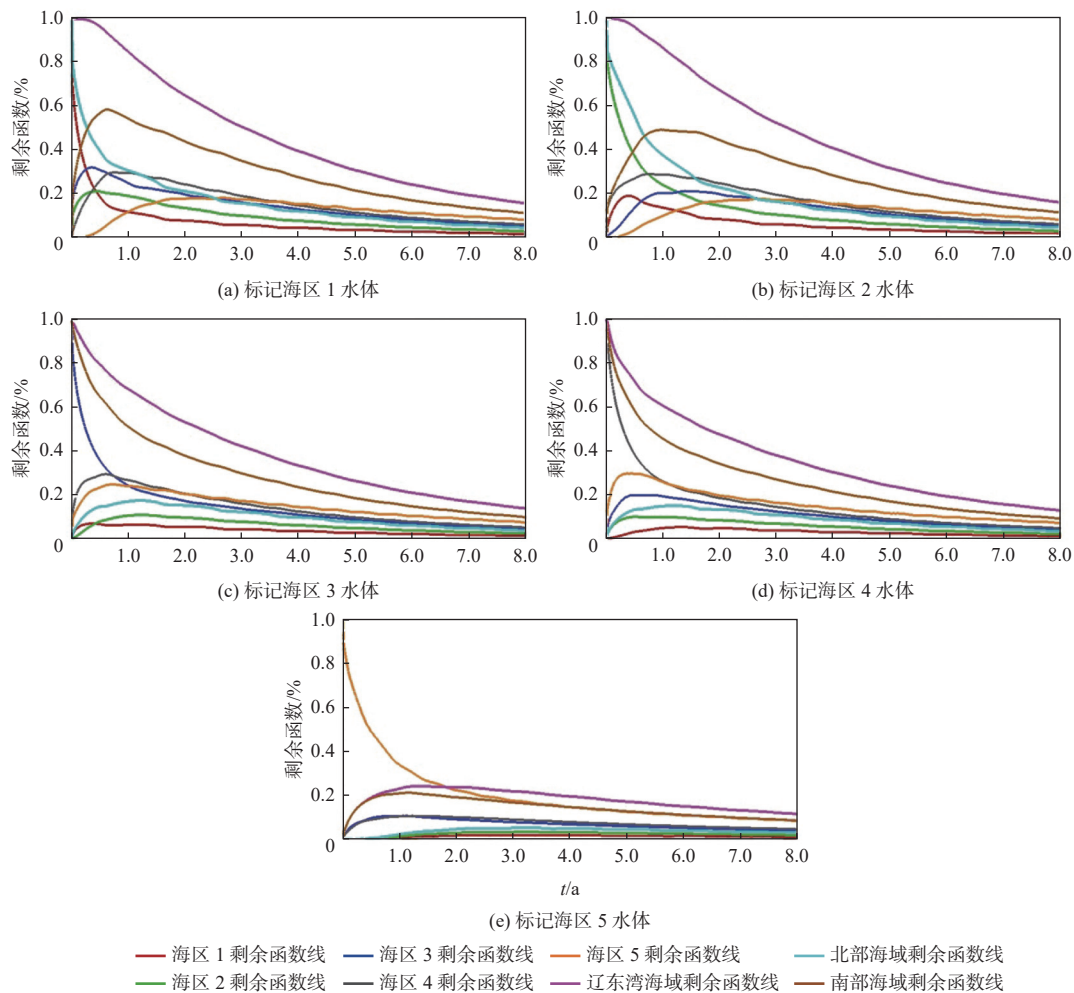


图9 各海区标记水体剩余函数曲线

Fig. 9 Curves of residual functions of the marked water bodies in the divided zones

如图 9a 所示, 海区 1 在 0.1 年时已有超过总量 50% 的标记水体流出, 是 5 个海区中向外迁移速度最快的海区, 说明海区 1 与其他海区之间的水交换能力较强; 海区 2 和海区 3 内的标记水体的比重迅速上升, 在 0.4 年时达到峰值, 分别占海区 1 标记水体总量的 21% 和 32%。由图 9b 可知, 在计算开始后, 海区 2 的标记水体向海区 1 和海区 4 输移扩散的速度较快, 在 0.4 年和 0.9 年时, 海区 1 和海区 4 分别达到占比为 19% 和 29% 的峰值。结合图 9a 和图 9b 可知, 在计算开始阶段, 标记海区与其他海区存在较高浓度差, 驱动标记水体向其他海区迅速迁移, 一段时间后, 浓度差减小, 南部海域内标记水体比重仍在以较快速率上升达到峰值; 虽然海区 1 和海区 2 之间存在的环流促进了这 2 个海区的物质交换, 但入海水体示踪的研究结果表明, 海区 1 和海区 2 存在一个相对独立的逆时针环流, 这 2 个海区通过对流作用与其他海区进行水交换的能力较弱, 海区 1 和海区 2 的水体均向位于其南部的邻近海区迁移速度最快、迁移的水体量较多, 表明北部海域水体主要向南输移扩散。

由图 9c 可知, 计算开始后, 海区 3 的标记海水迅速向海区 4 和海区 5 输移扩散, 且在相同时间内向海区 4 输运量最大; 由图 9d 可知, 海区 4 的标记海水向海区 5 迁移速度最快, 其次为海区 3, 结合图 7d 至图 7f, 在六股河北部海域, 复州河入海水体的季节平均浓度存在由西北向东南递减的趋势, 可以推断在辽东湾南部海域存在一个顺时针潮汐环流。如图 9c 和图 9d 所示, 海区 3 和海区 4 的标记海水向海区 1 和海区 2 的迁移量较少, 表明辽东湾南部海域水体主要向南输运, 向北输运趋势较弱。图 9e 可知, 由海区 5 进入辽东湾海域的标记海水量占比较小, 说明渤海中央盆地北部海域主要向南输运, 该海域的海水主要通过扩散作用向辽东湾迁移。

综上所述, 辽东湾内部复杂的环流结构阻碍了辽东湾南北海域的水交换进程, 但辽东湾及渤海中央盆地北部海域水体仍表现出向南输移扩散的总趋势, 而向北输移扩散的趋势较弱。由图 9 可知, 辽东湾各海区(海区 1-4)标记水体在辽东湾海域的半交换时间(即一半的标记水体流出辽东湾所需的时间)可达 3.1 a、3.2 a、2.3 a 和 1.8 a, 表明辽东湾与渤海中央盆地之间的水交换能力较弱, 导致辽东湾内的污染物将对其自身水生态环境产生较大负担。

2.3 河流入海水体平均年龄

由图 10a 至图 10c 可知, 辽河入海水体的平均年龄在空间上呈现由东北向西南递增的特征。辽东湾西北部海域平均年龄比东北部海域平均年龄小, 体现出北部海域逆时针的环流特征。辽河口入海水体输运至葫芦岛—大望山一线需 800 d 以上, 表明辽河入海水及污染物会长期在辽东湾北部海域停留聚集, 这有可能使该区域承受较大的环境压力。由于夏季辽河入海流量大于春、秋两季, 河口附近海域的夏季平均年龄较春、秋两季平均年龄小, 这表明在辽河口附近入海物质输移扩散能力会受到河流流量的影响。然而, 辽东湾湾口和渤海中央海盆北部海域的平均年龄变化不大, 在春、夏、秋三季, 1 400 d 的年龄等值线基本位于辽东湾湾口附近, 1 600 d 和 1 800 d 的年龄等值线也均未发生明显位移, 表明入海水体和污染物在辽东湾海域输移扩散主要受潮流驱动。

由图 10d 至图 10f 可知, 在六股河河口附近, 六股河入海水体的平均年龄随季节变化而不断变化, 这表明在河口附近海域入海水体输移扩散受河流流量影响较为明显。但辽东湾北部及渤海中央盆地北部海域的平均年龄分布变化并不明显, 在辽东湾北部海域, 六股河入海水体的平均年龄约为 1 400 d。考虑到污染物输运过程中的物理的、化学的和生物的降解作用, 六股河入海水体中的污染物对辽东湾北部海域的环境影响较小。六股河入海水体的年龄等值线向南和西南方向延伸较明显, 表明由六股河入海的物质有向南和西南两个方向输移扩散的趋势。

由图 10 可知, 辽河、六股河等辽东湾河流的入海水体在河口附近停留时间较长, 向远区输移扩散需要较长的时间, 所以入海水体所带来的污染物的影响区域主要集中在其河口及其邻近海域。

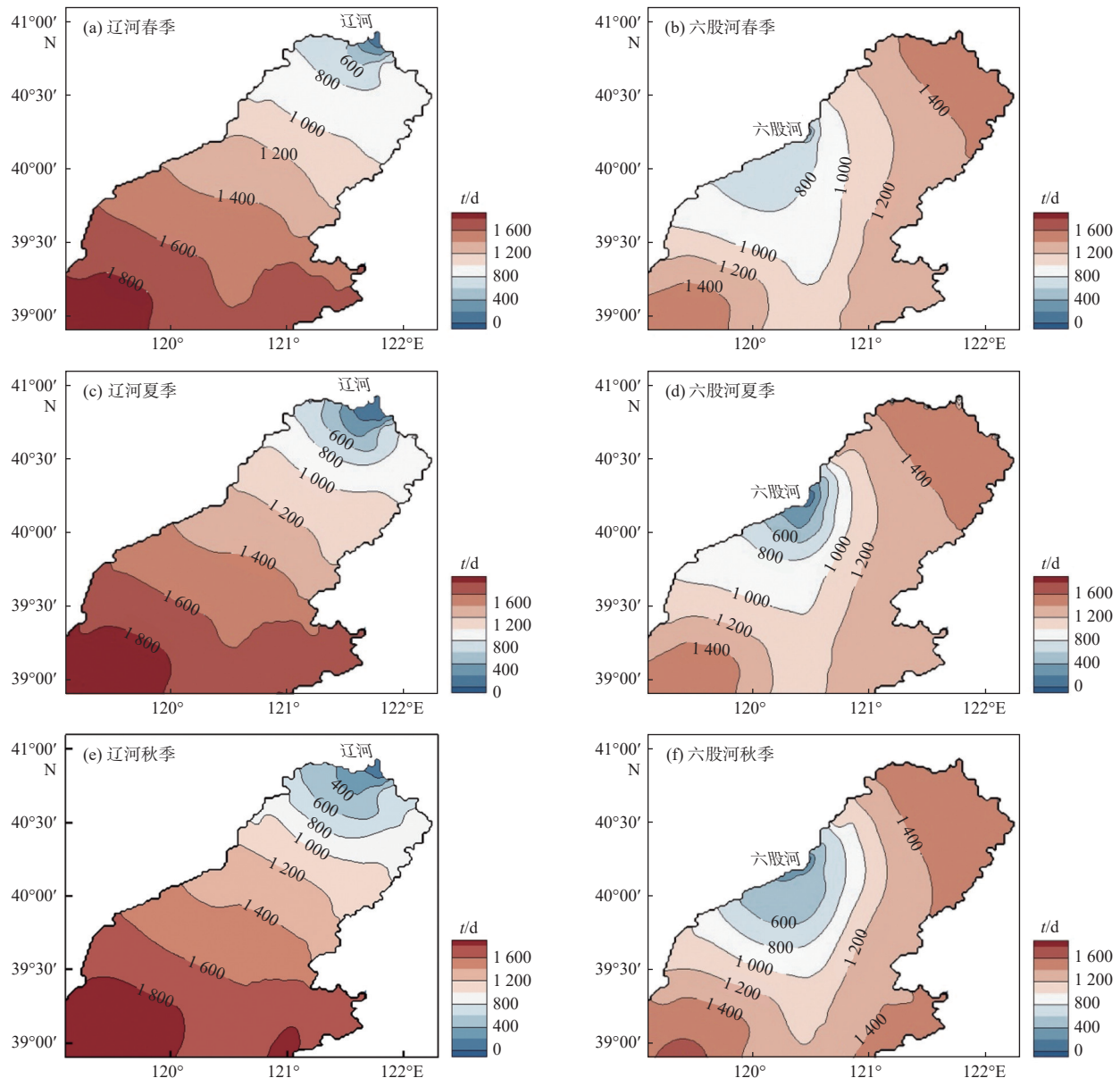


图 10 辽河与六股河入海污染物季节平均时间(d)分布

Fig. 10 Seasonal mean time (d) distribution of pollutants entering the sea from the Liaohe River and the Liuguhe River

3 结 语

本文利用 Delft3D 建立了辽东湾水动力学模型和物质输运模型,在此基础上进一步建立了辽东湾河流入海物质的年龄模型,对潮汐驱动下的辽东湾流场和物质输运路径及其时间尺度进行了研究,主要得到以下结论。

辽东湾海域入海径流对其流场和水交换的作用主要集中在河口附近,不同季节流量变化会对河口附近海域的水动力及物质的输移速度产生较明显的影响,但对距离河口较远的海域影响较弱,不影响辽东湾整体的环流结构。

以葫芦岛—大望山一线作为辽东湾南北海域分界线,辽东湾南北海域分别存在顺时针、逆时针环流,湾口附近又存在逆时针环流,虽然复杂的环流结构削弱了辽东湾内部以及它与外海的水交换能力,但辽东

湾海域内物质仍可通过扩散过程与外海进行交换。

复杂的环流结构减缓了北部河流入海水体向外海的迁移速率,这些物质在北部海域停留时间超过 2.2 a,对辽东湾北部的水质状况和生态环境产生不利影响。位于辽东湾西南湾口位置的六股河入海水体呈现出向南迁移趋势,到达辽东湾北部和东南海域所需时间较长,对辽东湾整体环境质量影响较小。

参考文献 (References):

- [1] WANG J, YE S, LAWS E A, et al. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the Shallow Sea Wetland of the Liaodong Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 120(1/2): 347.
- [2] 田思瑶, 于晓彩, 塔荣凤, 等. 辽东湾中部近岸海域 COD、石油类、叶绿素分布特征及富营养化状态评价[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(5): 739-745. TIAN S Y, YU X C, TA R F, et al. Distribution characteristics of COD, petroleum, chlorophyll a and evaluation of eutrophication status in the coastal waters in central Liaodong Bay[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(5): 739-745.
- [3] LIN H S, LI H J, YANG X L, et al. Comprehensive investigation and assessment of nutrient and heavy metal contamination in the surface water of coastal Bohai Sea in China[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(4): 843-852.
- [4] JIA H, SHEN Y M, SU M R, et al. Numerical simulation of hydrodynamic and water quality effects of shoreline changes in Bohai Bay[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(3): 625-639.
- [5] REN Y H, LIN B L, SUN J, et al. Predicting water age distribution in the Pearl River Estuary using a three-dimensional model[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 139: 276-287.
- [6] 刘喜惠, 刘方, 丁页, 等. 渤海环流对近岸海域无机氮分布特征的影响[J]. 中国环境监测, 2019, 35(6): 78-84. LIU X H, LIU F, DING Y, et al. Influence of circulation on the distribution characteristics of inorganic nitrogen in the Bohai Coastal Sea[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(6): 78-84.
- [7] 张连杰, 赵博, 王鹏, 等. 大连湾海域沉积动力环境与物质输运[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(6): 12-19. ZHANG L J, ZHAO B, WANG P, et al. Sedimentary dynamic environment and its bearing on material transport in Dalian Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(6): 12-19.
- [8] 孙英兰, 张越美. 丁字湾物质输运及水交换能力研究[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 1-6. SUN Y L, ZHANG Y M. A numerical model of pollutant transport and seawater exchange in Dingzi Bay[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 1-6.
- [9] LI Y Y, FENG H, Yuan D K, et al. Mechanism study of transport and distributions of trace metals in the Bohai Bay, China[J]. *China Ocean Engineering*, 2019, 33(1): 73-85.
- [10] 陶磊, 孙健, 刘海英, 等. 潮汐和季风作用下渤海湾水交换研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 99-107. TAO L, SUN J, LIU H Y, et al. Study on the water exchange in the Bohai Bay under the effects of tides and seasonal winds[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(5): 99-107.
- [11] 赵保仁, 庄国文, 曹得明. 渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473. ZHAO B R, ZHUANG G W, CAO D M. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 466-473.
- [12] 徐珊珊, 杨锦坤, 武双全, 等. 渤海中部海域表层潮流和余流特征分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(2): 128-134. XU S S, YANG J K, WU S Q, et al. Characteristics of surface tidal and residual currents of the central Bohai Sea[J]. *Haiyang Tongbao*, 2017, 36(2): 128-134.
- [13] SHANG J C, SUN J, TAO L, et al. Combined effect of tides and wind on water exchange in a semi-enclosed shallow sea[J]. *Water*, 2019, 11(9): 1-17.
- [14] 魏皓, 田恬, 周锋, 等. 渤海水交换的数值研究-水质模型对半交换时间的模拟[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002(4): 519-525. WEI H, TIAN K, ZHOU F, et al. Numerical study on the water exchange of the Bohai Sea: simulation of the half-life time by dispersion model[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002(4): 519-525.
- [15] 孔祥鹏. 辽东湾顶自净能力季节变化与排污调控策略[D]. 大连: 大连海事大学, 2014. KONG X P. Study on seasonal variations of waters self-purification capacity and strategy of the pollution discharge regulation at the top of Liaodong Bay[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [16] 胡雪明. 辽东湾水质数值模拟及富营养化状况分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. HU X M. Water quality numerical simulation and eutrophication assessment in the Liaodong Bay[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [17] 王鹏程, 张学庆, 孙刚, 等. 基于 FVCOM 的辽东湾潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2012(3): 146-152. WANG P C, ZHANG X Q, SUN G, et al. Numerical simulation of tides and tidal currents in Liaodong Bay based on FVCOM[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2012(3): 146-152.
- [18] 李卫卫, 孙昭晨, 梁书秀. 辽河口区径流对污染物漂移扩散的影响[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(2): 294-302. LI W W, SUN Z C, LIANG S X. Effects of the Liao river discharge on the dispersion of pollutants[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(2): 294-302.
- [19] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴第二卷[M]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1988—2016. The Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The second volume of the hydrology yearbook of the People's Republic of China[M]. Beijing:

- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1988—2016.
- [20] 刘浩, 尹宝树. 辽东湾氮、磷和COD环境容量的数值计算[J]. *海洋通报*, 2006, 25(2): 46-54. LIU H, YIN B S. Numerical calculation on the content of nitrogen, phosphate and COD in the Liaodong Bay[J]. *Haiyang Tongbao*, 2006, 25(2): 46-54.
- [21] 孙健. 海湾、近岸海域水交换研究的关联矩阵方法及应用[D]. 天津: 天津大学, 2007. SUN J. The relation matrix method and its application of water exchange study for sea bay and coastal water[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [22] DELTARES. Delft3D-FLOW user manual[M]. The Netherlands: Deltares, 2018: 176-177.
- [23] DELHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modelling[J]. *Ocean Modelling*, 1999, 1(1): 17-27.
- [24] DELEERSNIJDER E, CAMPIN J M, DELHEZ E J M. The concept of age in marine modelling: I. Theory and preliminary model results[J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, 28(3/4): 229-267.
- [25] 中国人民解放军海军司令部航海保证部. 中国渤海[M]. 天津: 中国航海地图出版社, 2010. Navigation Guarantee Department of the Chinese Navy Headquarters. China Bohai Sea[M]. Tianjin: China Navigation Publications Press, 2010.
- [26] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183-204.
- [27] GUO W J, WU G X, LIANG B C, et al. The influence of surface wave on water exchange in the Bohai Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 118: 128-142.
- [28] SUN H, WANG P J. Risk assessment of sea ice disaster in Bohai Sea and Yellow Sea of China[J]. *Journal of Natural Disasters*. 2012, 21(4): 8-13.
- [29] 董娇娇, 孙健, 陈燕珍, 等. 渤海岸线及水深变化对水动力影响的数值模拟[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 676-687. DONG J J, SUN J, CHEN Y Z, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics affected by coastline and bathymetry changes in the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(4): 676-687.
- [30] 聂红涛. 近岸海域水环境综合管理中的若干基础问题研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2010. NIE H T. Study on some basic problems of integrated coastal water environment management and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

Characteristics of Hydrodynamics and Pollutant Transport Into the Sea in the Liaodong Bay

LI Dong-hui¹, CHAO Lei¹, ZHAO Feng-ze², LEI Kun³, LI Yuan-yi⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Second Institute of Oceanography Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

4. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, by establishing a hydrodynamic model, a material transport model and an age model, a numerical simulation study was carried out on the hydrodynamic conditions and the process of pollutant transport and diffusion driven by the tides in the Liaodong Bay of the Bohai Sea. The results show that the runoffs have little effect on the flow field and water exchange process in the Liaodong Bay, and their impacts are mainly concentrated near estuaries. Driven by the tides, a complex circulation structure is formed in the Liaodong Bay. There are clockwise and counterclockwise circulations in the Liaodong Bay. A counterclockwise circulation is formed at the mouth of the Liaodong Bay, adversely affecting the transportation of materials from the bay to the open sea, and the materials in the top of the bay are exchanged with open sea mainly through diffusion process. The result of the age model shows that the pollutant from runoffs in the Liaodong Bay stays for a long time near the estuary, and takes a longer time to be transported to distant area. The pollutant entering the sea has adverse impacts on the water quality of local sea areas, especially on the water quality at the top of the Liaodong Bay.

Key words: Liaodong Bay; water exchange; transport and diffusion; water age

Received: July 29, 2021