基于水交换关联矩阵的天津近海水交换特性研究

张伟^{1,2} 张云霞¹

1 天津市市政工程设计研究院 2 天津大学机械工程学院

DOI:10.32629/hwr.v4i1.2726

[摘要] 水交换关联矩阵是通过计算特定时段内海域各分区水体相互贡献的权重,从而描述大型海湾水交换的一个重要工具。本文将渤海湾天津近海和其邻近的海域分成九个海区,建立了水交换关联矩阵,模拟了不同季节风场作用下的水体交换状况。结果表明:天津近岸海域的水体在天津港北部和南部形成两个相对独立的环流体系。从天津港以北入海的污染物对渤海湾中北部区域的影响较大,而临港产业区以南入海的污染物,会迅速影响渤海湾中南部区域。从天津港和临港产业区之间入海的污染物由于处于上下两个环流体系之间,影响范围甚广,此区域污染物会迁移扩散至渤海湾南北各分区区域。总体上看,区域水体交换速率呈现冬季>春秋>夏季的特征,且南部尤为明显。故此,在优化排污布局方案时,应充分考虑南北区域各自的水动力特性,结合海区功能规划及季节性的水交换特征,分别制定有针对性的削减计划。

[关键词] 水交换; 关联矩阵; 天津近海; 数值模拟

Research on the water exchange of Tianjin near shore based on Water Relation Matrix

Zhang Wei^{1,2} Zhang Yunxia¹

1 Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute 2 School of Mechanical Engineering, Tianjin University

[Abstract] Water Relation Matrix is defined as an important measure which describes the water exchange for the sea bay by calculating the weight of each partition sea water contribution to each other. In this paper, a 9-areas Water Relation Matrix is set up to simulate Tianjin near shore sea area water exchange conditions, and the effects of seasonal variation wind is taken into consideration. The results show that two independent circulations systems are found in north and south sea around the Tianjin port. The sewage that discharged in the north of Tianjin port will make a great influence on the north central area of Bohai Bay, as discharged in the south of industrial area near port may produce an quickly effect on the southern Bohai Bay. The sewage discharged between Tianjin port and industrial area near port among the two circulations has a widely effects, which will move and diffuse to all the regions of Bohai Bay. Water exchange rate presents a seasonal characteristic that much faster in winter than it in spring and autumn, and relatively slow in summer. We must make the reduce discharge plan fairly and reasonably to the seasonal and spatial variable water exchange condition and the management and function planning for different sea area.

[Key word] water exchange; Relation Matrix; Tianjin near shore; numerical stimulate

引言

海湾、近岸海域水交换是海洋环境科学研究的一个基本课题。污染物通过对流输运和稀释扩散等物理过程与周围水体混合,并与外部清洁海水交换,浓度降低,达到净化目的。水交换不畅的海域,污染物将持续累积,往往会形成富营养化等问题。水交换能力是海湾、近岸海域的重要水动力学特性,是研究海湾、近岸环境容量的基础。天津近岸海域位于渤海湾西部,是高强度开发和高强度排污海岸,海岸线上集中了海洋化工、港口、滩涂养殖、浅海油气、矿产资源开发、旅游、盐业等多种经济活动,陆源污染排放十分严重,渤海湾又是渤海中的滞缓区,陆源排放的污染物,难以交换到渤海中部或外海^[1,2],从而造成滩涂和近岸海域的严重污染,致使该地区生态环境退化严重,赤潮频发,水环境问题比较严重。认识渤海湾水交换特性和污染物输移扩散规律可以为制定合理的区域发展规划和污染物排放计划提供强有力的科学依据。

目前,关于海湾水交换研究多是针对研究区域整体的不同尺度的水交换周期^[3]、水交换率^[4]及回流系数^[5]的研究,但对于渤海湾这种大型海湾,存在水体混合不均的现象,往往更需要我们研究各区域水体之间的流动去向和相互影响。本文应用水交换关联矩阵的方法研究渤海湾内天津近海岸北部区域、临港和南港工业区之间水体交换情况,并根据各个区域之间的水体迁移规律,为天津近海的优化排污布局方案提出合理建议。

1 数值模型和方法

1.1 水交换关联矩阵

对于研究面积较大或地形复杂的海域的水交换问题, Sun和Tao^[2]提出了“水交换关联矩阵”的概念和方法,可将海湾分为若干海区,研究各区域之间的水交换相互关系。

图1为一矩形海湾,可分为 A_1 , A_2 , A_3 , A_4 四个海区,将研究的初始时刻设为 t_0 。若在某特征时刻 t_1 ($t_1 > t_0$),海区 A_1 内来自四个海区以及外海的水体体积分别为 V_{11} , V_{12} , V_{13} , V_{14} , V_{out} 。

图1 海湾分区示意图

Fig.1. The partition of sea bay

则海区 A_1 中来自各海区的水体权重 $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}$ 可表示为:

$$r_{11} = \frac{V_{11}}{V_1} \quad (1)$$

$$r_{12} = \frac{V_{12}}{V_1} \quad (2)$$

$$r_{13} = \frac{V_{13}}{V_1} \quad (3)$$

$$r_{14} = \frac{V_{14}}{V_1} \quad (4)$$

其中, V_1 为海区 A_1 内总的水体体积; $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}$ 分别代表来自区域1、2、3、4的水体分别占研究区域也就是区域1的水体比例。

A_1 内海水的构成可由行向量 $(r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{14})$ 来表示。同理, 在某特征时刻 $t_2/t_3/t_4$, 对于 A_2, A_3, A_4 三个海区可分别得到行向量 $(r_{21} \ r_{22} \ r_{23} \ r_{24}), (r_{31} \ r_{32} \ r_{33} \ r_{34}), (r_{41} \ r_{42} \ r_{43} \ r_{44})$; 四个行向量组装到一起, 得到矩阵 R , 即:

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据定义显然有如下不等式成立:

$$r_{i1} + r_{i2} + r_{i3} + r_{i4} \leq 1 \quad (6)$$

其中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。当“ $<$ ”时表示有研究区域以外的海水进入 A_i 。而特征时刻可以组成列向量:

$$\{\tau\} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, t_1, t_2, t_3, t_4 分别为关联矩阵 R 在海区的特征时刻。

若取各海区特征时间相同, 即 $t_1 = t_2 = t_3 = t_4$ 则称水交换关联矩阵 R 为同步的, 否则称其为异步的。例如: 若定义各个区域海区内水体的半交换周期 $T_i^{(1/2)}$ 为海区内原有海水减少到原来的一半所用的时间, 即

$$r_{ii}(T_i^{(1/2)}) = \frac{1}{2}, \text{ 则特征时间可以表示为向量组:}$$

$$\{\tau_{1/2}\} = \begin{bmatrix} t_1^* \\ t_2^* \\ t_3^* \\ t_4^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

显然 $t_1^*, t_2^*, t_3^*, t_4^*$ 是不一定相等的, 则水交换矩阵 $R_{1/2}$ 是异步的。

水体组成权重可以由保守性溶质的输运扩散来计算。研究某海区 A_j 对其他海区的影响时可将研究海域内指标物质(溶质)的初始浓度场 $\phi_j(x, y, t_0)$ 设为:

$$\phi_j(x, y, t_0) = \begin{cases} \phi_j^0 & (x, y) \in A_j \\ 0 & (x, y) \notin A_j \end{cases} \quad (9)$$

在对流扩散作用下由以上初始浓度分布引起的 $t > t_0$ 时刻的全场浓度分布为 $\phi_j(x, y, t)$ 。海区 A_i 内的来自 A_j 的溶质的平均浓度定义为:

$$\overline{\phi_{ij}}(t) = \frac{1}{V_i} \int_{A_i} \left[\frac{1}{T_i} \int_t^{t+T_{ide}} \phi_j(x, y, t) dt \right] dA_i \quad (10)$$

其中, V_i 为海区 A_i 内的水体体积, T_{ide} 为大于潮汐周期的时间尺度。不失一般性, 可设 $\phi_j^0 = 1$ 则平均浓度 $\overline{\phi_{ij}}(t)$ 代表了海区 A_i 中, 来自于海区 A_j 的海水所占的权重。所以可将 $\overline{\phi_{ij}}(t)$ 与海水的权重 $r_{ij}(t_i)$

视为等同, 即 $r_{ij}(t_i) \equiv \overline{\phi_{ij}}(t_i)$ 。

1.2模型的控制方程

水交换关联矩阵其数据信息来源于水动力模型和水质模型对实际海域的模拟。渤海湾是一个浅水缓坡淤泥质海湾, 垂向混合较均匀, 具有宽阔的潮间带, 水动力模型采用沿水深积分的二维模型, 其模型控制方程如下:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = S_m \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\beta p U)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta p V)}{\partial y} = & f q - g H \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\rho_a}{\rho} C_w W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C_r^2} \\ & + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + U_m S_m \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta q U)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta q V)}{\partial y} = & -f p - g H \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\rho_a}{\rho} C_w W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C_r^2} \\ & + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + V_m S_m \end{aligned} \quad (13)$$

式中, t 为时间、 z 为水位(高于基准面), H 为总水深, $p=UH$ 、 $q=VH$ 分别为流体 x 、 y 方向的单宽通量, U 、 V 分别为水深平均下 x 、 y 方向流速, S_m 、 U_m 、 V_m 分别为单位面积上源项强度和源项初始速度在 x 、 y 方向分量, β 为非均

匀流的动量修正系数, $f = 2\omega \sin \theta$ 为科氏力系数, ω 为地球自转角频率, θ 为纬度, $C_r = H^{1/6} / n$ 为谢才系数, n 为曼宁系数, ε 平均涡粘系数, W_x 、 W_y 为风速在 x 、 y 方向上分量, ρ_a 、 ρ 分别为空气密度和水体密度, C_w 风应力系数, g 为重力加速度。

水质模型的控制方程:

$$\frac{\partial(H\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(p\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(q\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{yx} \frac{\partial \phi}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (14)$$

式中, ϕ 为沿水深平均的溶质浓度, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} 为 x , y 方向水深平均的综合扩散系数, 在这里 $D_{xx} = aHU$, $D_{yy} = aHV$, $D_{xy} = D_{yx} = 0$, a 为经验参数^[6], S_ϕ 为在单位水平面积上溶质的源项强度。

应用空间交错网格对空间进行离散, 采用ADI法对水动力模型和水质模型控制方程进行求解^[7], 动边界判断采用干湿判断法^[8]。本文所使用模型已经经过多次实测数据验证^[2-4], 在此不赘述。

风场数据来自NCEP(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds744.4/>), 如图2以月矢量平均风场的方式研究季节性变化的风对水交换的影响, 统计结果与已有的研究相符合^[9-10]。

图2 2005-2009年渤海湾月均风场统计(箭头方向代表风向)

Fig. 2. Monthly averaged wind velocity averaged during 5 years (2005-2009) over Bohai Bay

2 模型设置与模拟分析

2.1模型设置

计算区域为渤海湾区域(117.5~119.2E, 37.9~39.5N), 网格空间步长为0.005x0.005, 时间步长180s。模型采用冷启动, 初始流速水位为零, 以(118.907E, 37.995N)和(118.907E, 39.135N)之间连线作为开边界, 开边界上的水位根据全潮验证过的大连和烟台八个分潮潮位计算所得。为了研究沿岸排口附近区域的水交换特性, 结合排口分布和余流场特性将天津沿岸划分成5个主要研究区域和4个辅助研究区域总共9个区域(如图2和3): 天津沿岸北部北塘口区域(区域1), 海河和永定新河入海口区域(区域2), 临港工业产业区(区域3), 南港工业区(区域4), 天津沿岸南部子牙新河和北排河排口区域(区域5), 渤海湾中北部区域6, 中部区域7, 南部区域8, 以及渤海湾东部及湾口区域9。根据保守物质迁移扩散数值模拟结果, 讨论5个主要研究区域水交换特性。在考察季节性变化的风场对于沿岸水交换特性的影响时, 应除去初始时刻不同潮位所带来的影响, 为此全部取当月大潮高潮时刻作为初始时刻计算。

图3 渤海湾天津近海入海口概化

Fig. 3. Layout of major entrances around Tianjin near shore

图4 水体分区示意图

Fig. 4. The division of Bohai Bay

2.2水交换特性分析

图5给出了30天、90天、180天和365天四个时刻5个主要研究区域水体组成情况, 可以看出: 区域1和2在前30天内主要水体的来源来自区域6的海水, 而之后至90天左右来自区域7和9以及湾外海水开始进入, 直至180天到一年以后, 来自湾外海水占主体。值得注意的是, 在此过程中间, 区域1和2中, 来自其他主区域3, 4, 5和渤海湾南部的区域8的水体所占比例极少, 几乎不到3%。可见, 区域1、2、6、7及区域9组成一个相对独立的循环区域。此部分水体间相互影响明显, 而区域3、4、5及渤海湾南部区域8水体对该循环区域影响不大。继而可以推断: 在区域3、4、5以及渤海湾南部区域8有排放的污染物对于区域1和2的影响甚微。

图5 区域1-5水体来源分布图(30天、60天、90天和365天)

Fig.5. The Proportion of water sources in Areas 1-5

区域4、5中水体组成变化与区域1、2相反,来自区域8的水体首先流入并在30天时占主体,而后区域7水体逐渐流入,至90天时区域7、8占据其水体的绝大比例,而渤海湾北部区域1、2、6海水仅有很少比例的流入。可见区域4、5和渤海中部区域7、南部区域8及东部区域9组成另一个相对独立的水体循环区域。值得注意的是,区域5位于天津近海域最南部,水体交换能力较强,30天时沿岸5个主体区域水体就已经全部交换出去,然而90天时主区域水体比例相比30天时又有所增加,至180天时来自5个主区域水体之和又回流至约10%左右。这种现象是由于海湾水体的环流

效应,流出该区域的水体经过一段时间后又流回到该区域。因而,该区域污水排放规划时要考虑回流的影响,尤其是涉及到难降解的持久性污染物排放问题时,更需谨慎。

天津沿岸中部的区域3是与外界水体交换作用较差的区域,30天时主区域水体之和占其水体组成的61%,相比其他4个主区域,更容易受到沿岸污染水体的影响。30天之后,来自区域6、7、8、9的水体都有所流入,直至180天以后,湾外海水大量的进入,最终趋于稳定。可见,沿岸其他排放区域都会影响到区域3,而且在一段时间内不易通过水体交换降低污染物浓度。

统计渤海湾余流场(图6)可知,天津近岸海域存在南北双环流,以天津港为分界北部顺时针南部逆时针,且夏季比冬季要强。赵宝仁^[11]等、王金华等^[12]分别利用多年实测资料、拉格朗日数值模拟方法对渤海湾余环流场进行研究,并发现在渤海湾存在南北双环流,这与本次研究结果相符。由此可见,北塘口(区1)、海河和永定新河入海口区域(区2)位于北部环流系统中,此区域污染物会较大影响渤海湾中北部区域,而对南港(区4)、子牙新河、北排河口区域(区5)及渤海湾中南部的影响较小。相对的,南港、子牙新河和北排河口区域处于渤海湾南部环流系统中,其污染物会迅速影响渤海湾中南部区域,但很少影响到天津沿岸北部区域。来自临港工业产业区(区3)的污染水体,由于处于上下环流之间,影响作用范围较广,此部分水体会流向渤海湾南北各部分区域。

图6 渤海湾冬季、夏季余流场
(黑色代表冬季,红色代表夏季)

Fig.6. Residual currents of Bohai Bay in summer and winter
图7显示了5主区域不同季节下90天的水体交换曲线,以此研究沿岸区域水体受污染后短时间内的流动状况,结果如下:(1)总体上,随着时间的推移,区域自身水体逐渐流出,渤海湾中北部(区6)和中部(区7)的水体逐渐流入北部的北塘口(区1)、海河永定新河口区域(区2)和临港工业区(区3);而渤海湾中部(区7)和南部区域(区8)的水体逐渐流入南港工业区(区4)和子牙河和北排河口区域(区5),并占据各区域主体。区域1,2,3水体相互之间有流动影响,而不会流入区域4、5;相应的,区域4,5水体有相互流动,而不会影响区域1,2。不同区域水体交换能力不同,北部的北塘口、海河永定新河口区域和临港工业区水体交换能力明显相对较弱,自身水体流出的时间要略长于南港工业区和子牙河和北排河口区域。(2)从季节性差异上看,冬季水体交换速度较快,春秋季次之,夏季最慢。南港(区4)和子牙河和北排河口区域(区5)水交换情况有明显的季节性差异:冬季在10~15天时其自身水体流出近90%,而同时时间段在秋季和春季则流出60%~70%,夏季仅40%左右。而夏季南港近45天,子牙河和北排河口区域近30天自身水体才能大致流出90%。相比之下,北部的区域1、2、3水体交换情况的季节性变化要小一些。综上,可以看出:(1)天津沿岸北部的北塘口区域,海河永定新河入海口区域以及临港工业区,全年水体交换能力较差,自身水体基本流出(90%)需40~60天左右,渤海湾北部和中部的的水体将逐渐流入这些区域并占主体。(2)天津沿岸南部的南港工业区和子牙河和北排河口区域水交换情况受季节性影响明显,冬季水交换能力强,春秋季其次,夏季最弱。自身水体基本流出冬季需10~15天,而夏季则需要30~45天。之后,渤海湾中部和南部水体将逐渐流入这两个区域并占据区域水体的主体。

(a) 冬季

(b) 春季

(c) 夏季

(d) 秋季

图7 研究区域1-5水体权重随时间的变化

Fig.7. Changes of the water weight with time in the study area 1-5

2.3 沿岸排放区域对于水体功能区的影响

图8 沿海洋功能区划示意图

Fig.8. The management and function plan of Tianjin near shore area

图9 结合沿岸排放区、功能区的计算区域划分

Fig.9. The division of Tianjin near shore

(a) 区域6

(b) 区域7

(c) 区域8

(d) 区域9

图10 天津沿海功能区域水体来源组成

Fig. 10. The Proportion of water sources of function zones around Tianjin near shore area

可以应用水交换矩阵法研究沿岸不同排放区域对于各水体功能区的影响,根据国家海洋局的《天津市海洋功能区划》(图8)及沿排放区域分布,归并划分后进行计算(图9)。结果可以看出(图10),位于天津南部的农渔业区6、7水体多来自于天津沿岸南部的临港工业区(区3),南港工业区(区4),子牙新河北排河口(区5),这些区域的污染物排放量和种类应该严格按照一类水质标准进行控制;而北部航运区8、9多受来自北塘口(区1),海河永定新河(区2),临港工业区(区3)水体的影响,考虑到北部区域的海河、永定新河等天津主要的排放污染物的河流,由于污水来自多条河流和产业区污染排放的汇集,原本排放量就很大,污染物种类多,大量削减污染物排放或全面控制所有种类的污染物排放达标不是很

现实。可以根据当地具体排污种类,筛选重要的污染物作为主要污染物,进行优先控制。

3 结论

针对大型海湾水体交换不均的现象,本文应用水交换关联矩阵法研究天津近岸及临近海域不同海区之间水体的相互交换状况。结果表明:天津近岸海域的水体在天津港北部和南部形成两个相对独立的环流体系,且不同季节风场的变化会影响沿岸排放区域水体交换的状况。并根据研究结果,给出合理化排污的建议,为研究海湾水环境治理提供一个新思路。

[参考文献]

- [1]孙涛,陶建华.波浪作用下渤海湾近岸海域污染物的输移扩散规律[J].海洋与湖沼,2004,(02):110-119.
- [2]SUN Jian, TAO Jian-hua. Relation matrix of water exchange for sea bays and its application. China Ocean Engineering, 2006,20:529-544.
- [3]MONSEN E N, CLOERN J E, LUCAS L V. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport timescales[J]. Limnology Oceanography, 2002,47(5):1545-1553.
- [4]YUAND D, LIN B, FALCONER R A. A modeling study of residence time in a macro-tidal estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007,71,401-411.
- [5]DE BRAUWERE A, DE BRYE B, BLAISE S, et al. Residence time, exposure time and connectivity in the Scheldt Estuary[J]. Journal of Marine Systems, 2011,84:85-89.
- [6]徐洪达,王钟楦,刘赞沛.渤海潮混合数值模拟III.渤海污染物潮扩散的数值计算[J].海洋与湖沼,1984,15(2):137-145.
- [7]何磊.海湾水交换数值模拟方法研究[D].天津大学,天津,2004.
- [8]孙健,陶建华.潮流数值模拟中动边界处理方法研究[J].水动力学研究与进展, A辑, 2007,22(1):44-52.
- [9]万修全,鲍献文,吴德星,等.渤海夏季潮致-风生-热盐环流的数值诊断计算[J].海洋与湖沼,2004,35(1):41-47.
- [10]郑东升.风场对海湾水交换影响的数值模拟研究[D].天津大学,天津,2010.
- [11]赵保仁,庄国文,曹德明.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(5):466-473.
- [12]王金华,沈永明,石峰,等.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[J].水力学报,2011,42(5):544-553.