

渤海风海流污染输运的数值模拟

窦振兴 张存智 张砚峰

(国家海洋局海洋环境保护研究所, 大连)

提要 本文试验用渤海风海流模型和水质模型, 考查了季风对潮扩散浓度场的影响以及平均风海流的污染输运能力。结果表明, 潮流在污染扩散中起支配作用, 而平均风海流对浓度分布的影响居次要地位。通过纯风海流的污染输运模拟发现, 辽东湾的风海流终年有利于该区的污染扩散; 而在渤海湾, 冬季平均风海流具有比夏季更强的物理自净能力, 这种季节性差异, 可能是导致渤海冬季水质优于夏季水质的一个重要原因。

渤海是我国重要的海洋经济区。大规模海洋开发必然会带来许多新的海洋环境问题。石油开采等海洋工程, 可能对海洋生态环境和海洋生产力产生一定影响。为使海洋开发工程与水域环境保护协调进行, 必须对海洋环境实行计划管理。本文拟在潮流污染扩散数值模拟的基础上, 探讨风生环流的污染输运能力, 逐步完善渤海水质模型, 使其成为环境计划管理的有用工具。

实验模型包括风海流模型和污染输运模型两大部分。风海流模型是含风摩擦项的二维非线性流体动力模型, 用以提供污染输运模拟所需风生流场; 输运模型, 类似以前使用的二维模型^[4], 适用于模拟多种可溶物质的输运过程。本文仍以化学耗氧量(COD)为有机污染指标, 计算入海污染物在潮流和季风作用下的稀释扩散, 考查风海流的污染输运能力及其在渤海水体自净中的作用。

一、控制方程和边界条件

污染物的输运过程, 主要决定于海区的流动特征。首先计算平均风生环流, 而后模拟风海流污染输运。

渤海为半封闭型浅海, 潮流强盛, 海水垂直混合比较充分, 因此海水流动和物质输运方程可取垂向平均的二维形式,

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla_H \mathbf{U} + g \nabla_H \zeta + f \mathbf{K} \times \mathbf{U} - \nu \nabla_H^2 \mathbf{U} - \frac{\tau^a - \tau^b}{\rho_w (h + \zeta)} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla_H \cdot [(h + \zeta) \mathbf{U}] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(h + \zeta) p] + \nabla_H \cdot [(h + \zeta) \mathbf{U} p - (h + \zeta) K \nabla p] = S_m \quad (3)$$

方程(1)和(2)分别为运动方程和连续方程。其中, $\mathbf{U}$ 为深度平均速度向量; h 为水深; ζ 为平均海平面以上的自由海面高程; f 为科氏参量; τ^a 和 τ^b 分别为海面风应力和海底摩擦应力。 τ^a 为海面风的扰动函数, 借用秦曾灏^[1]整理的近似公式计算

$$\tau^a \approx 10^{-3} \rho_a [0.8719 + 0.0704 |W_{10}|] |W_{10}| W_{10} \quad (4)$$

其中, W_{10} 为海面上 10m 高处的平均风速 (m/s)。海面风场是风海流计算中起决定作用的因素, 鉴于海上直接观测风资料极端缺乏, 在此我们采用大连市气象台建立的经验方法来推算海面平均风速。该经验预报方程以 438 次天气过程和海上船舶的大量风资料为依据。至于季风的平均风向, 则参照张美芳^[2]等人的多年季风统计结果确定。海底湍流摩擦应力 τ^b , 以传统的二次律表示^[6]

$$\tau^b = g n^2 \rho_w H^{-1/3} |\mathbf{U}| (u, v) \quad (5)$$

其中, Manning 系数 n 决定于雷诺数和底面糙度, 可通过数值试验确定。

方程(3)是垂向平均的输运方程, 亦称平流-弥散方程。其中 $p = p(x, y; t)$ 为 COD 的深度平均浓度, S_m 为污染源的源强。弥散系数 $\mathbf{K}$ 为对称二阶张量, 表示剪流和湍流混合对浓度 p 进行再分配的一种机制。如不计湍流转移机制并引用 Fick 扩散假定, 扩散项中的叉积部分便被忽略, $\mathbf{K}$ 简化为向量。虽然不同作者使用的求 K 值的公式彼此出入甚大, 但是考虑到方程(3)中的平流质量通量比扩散通量大得多^[8], 浓度分布主要决定于平流过程, 因此, 输运模拟对流场精度要求较高, 而弥散系数 K 容许在一个相当宽的数值范围内选择。在此引用 Elder^[6,8] 计算公式

$$K = 5.93 g^{1/2} h / c (|\bar{u}|, |\bar{v}|) \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{n} \bar{h}^{1/6}$$

计算海流和物质输运, 要求各自的边界条件。运动方程的海底和海面边界条件, 均出现在方程(1)中, 勿需另行规定。侧向边界条件, 可分为岸边界(闭边界)和水边界(开边界)。岸边界规定为

$$U_n = 0 \quad (7)$$

开边界条件, 通常是边值问题中起决定作用的重要问题。据已有观测资料, 在海峡边界上, 受风应力控制的水位, 时刻作适应性调整而处于非定常的准平衡状态。可以认为, 在每一特定时刻, 湾口边界上的水位坡度总是与其邻域的坡度相近, 因而开边界水位可直接用其邻近内点的计算水位加以线性外推来确定

$$\zeta^k \approx 2\zeta_{B-1}^k - \zeta_{B-2}^k \quad (8)$$

应用 ADI 差分格式时, 采用(8)式作开边界条件可以获得计算稳定^[9]。

输运方程(3)要求的边界条件为: 在闭边界上没有污染通量

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

在开边界上, 流出湾口边界时, 满足连续性条件

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

而当流入时, 边界浓度作两种规定, 即 $P_B = 0$ 和 $P_B = \text{常量}$ 。 $P_B = 0$ 相当于从湾口流入的

清洁海水,而 P_B = 常量则指湾口边界上的浓度为潮周期平均值。由于排污对水质的影响范围,主要局限于排污口外附近水域,而对远场影响甚小。在此取湾口断面上多次监测浓度的平均值作为流入时的边界浓度。

求解方程(1),(2)的初值,为简便计选取

$$U(t_0) = 0, \zeta(t_0) = 0 \quad (11)$$

求解输运方程(3)的初始值,采用潮流污染扩散模拟输出的潮平衡浓度场^[4]

$$C(x, y, t_0) = C_0(x, y) \quad (12)$$

二、计算格式和参数

为求方程(1)~(3)的差分逼近,在交错式网格(图1)上建立方程(1)~(3)的 ADI

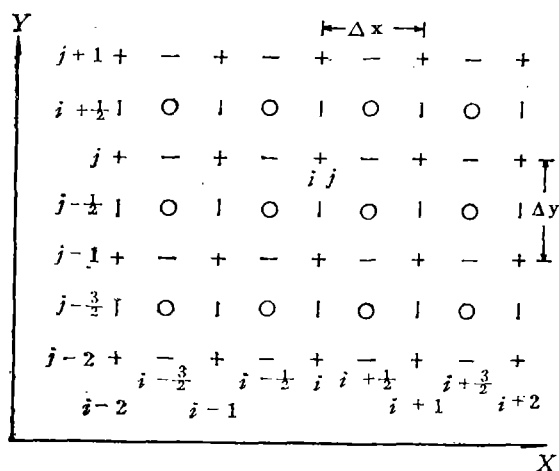


图1 交错式差分网格
+水位,浓度; -流速分量 U ;
| 流速分量 V ; $\circ$ 水深点。

差分格式^[3,4]。对方程(1)和(2),时间差商用前差,空间差商用中差。对于方程(3)中的质量平流项的空间差分,按照输运的物理过程应采用“逆流”格式,即利用变权系数造成的偏心差分代替中心差分^[4]。

如记 $\left(k\Delta t + \frac{\Delta t}{2}\right)$ 为 $\left(k + \frac{1}{2}\right)$,

$(k\Delta t + \Delta t)$ 为 $k+1$, 方程(1)~(3)相应的差分方程形如:

$$[A] \left\{ \zeta_u \right\}^{k+\frac{1}{2}} = \{E\} \quad (13)$$

$$\{v\}^{k+\frac{1}{2}} = f_1 \quad (14)$$

$$[B] \left\{ \zeta_v \right\}^{k+1} = \{F\} \quad (15)$$

$$\{u\}^{k+1} = f_2 \quad (16)$$

$$[C] \{P\}^{k+\frac{1}{2}} = \{G\} \quad (17)$$

$$[D] \{P\}^{k+1} = \{R\} \quad (18)$$

其中隐式代数方程(13),(15),(17),(18)中的系数 $[A]$, $[B]$, $[C]$ 和 $[D]$ 为三对角矩阵,这些方程利用上述边界条件,用追赶法容易求解。差分方程(13),(15)关于 Δt 的稳定条件很宽,而方程(17),(18)又是无条件稳定的,因此模拟计算容许使用较大的时间步长,从而可使计算进程加快,节省机时。

鉴于我们的模拟对象是发生在自然水域中的一个与时间有关的物理过程,计算输入信息应尽可能符合本区的动力、地理的实际条件。

(1) 水域范围: 烟台-小平岛连线以西,海图零米等深线所包围的渤海及海峡水域。

(2) 水深 h : 从海图上读取,求出各网格平均水深并订正到平均海平面。

(3) 科氏参量 f : 按渤海平均地理纬度 39° 计算。

(4) *Manning* 系数: 通过数值试验确定为 $n = 0.016$ 。

(5) 海面平均风应力: 用近似计算公式(4)确定, 其中 W_{10} 借上述经验方法求定。

(6) 入海污染(COD)通量: 输入沿岸 28 个排污口 1979 年 COD 平均入海通量。

(7) 开边界浓度: 在湾口断面上监测平均浓度。

(8) 初始条件: 风海流计算的初始条件为 $U(t_0) = 0$, $\zeta(t_0) = 0$; 输运计算取潮扩散的平衡浓度场作为计算的初始浓度。

(9) 步长: 空间步长取 $\Delta S = 10\text{km}$; 时间步长风海流计算取 $\Delta t/2 = 360\text{s}$ 输运计算取 $\Delta t/2 = 30\text{min}$ 。

(10) 计算实时: 风海流计算实时取 48h, 输运模拟实时取 60 个潮周期($60 \times 12\text{h}$)。

三、计算结果

模拟计算用自编 FORTRAN 程序 IMEPT, IMEPD 和 IMEPW 在 Siemens 7760 机上执行。主要图幅在 Benson 绘图机上绘制。主要输出结果有冬季及夏季的平均风生环流, 潮流-平均风海流合成流的污染输运以及风海流污染输运所形成的浓度场。

(一) 渤海平均风海流

渤海处于季风区, 因而平均风海流也有冬、夏季类型之分。冬季渤海盛行偏北风, 平

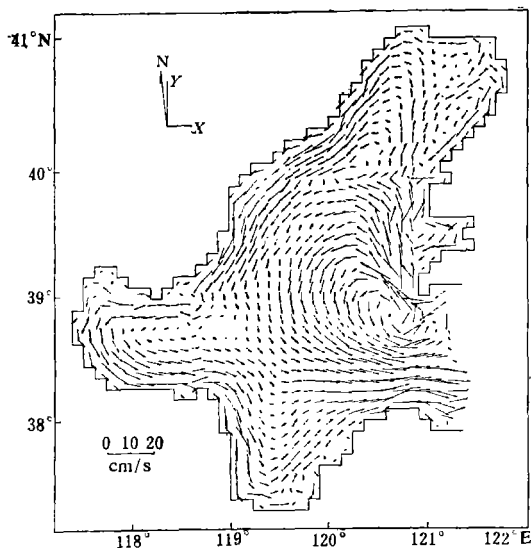


图 2 渤海冬季平均风海流

均风速 $8-10\text{m/s}$, 相应的风应力介于 $0.13-0.17\text{N/m}^2$, 图 2 表示冬季平均风海流场。图上可见, 冬季风生环流是一结构单调的气旋式环流系统。整个流场似由两个嵌套的气旋式循环所构成, 外循环为环绕渤海沿岸逆时针流动的沿岸流带, 内循环是盘据于中部的气旋式偏心涡。在这两个强流之间的过渡区, 形成若干小尺度涡流。

夏季盛行偏南风, 海面平均风速 $6-8\text{m/s}$, 相应海面风应力为 0.1N/m^2 左右。由于夏季季风较弱, 其风生环流不如冬季。夏季平均风海流(图 3) 系统以反气旋型环流为主, 兼

有气旋型环流。大体而言,南部和北部分属两个不同类型:南部为反气旋式流动;而北部略似冬季环流仍为气旋式流动。

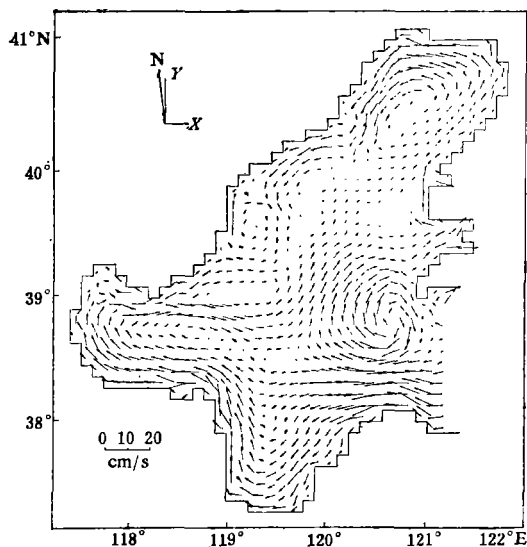


图 3 渤海夏季平均风海流

(二) 风海流对潮流污染扩散的影响

如方程(1)略去风应力项且相应开边界条件以正弦潮表示,由方程(3)便可得到单独

潮流扩散所形成的平衡浓度场(图4)^[4]。如方程(1)中纳入风应力项,相应开边界条件以正弦潮和季风平均风潮的合成水位表示,则得到潮流和季风同时作用下形成的浓度分布,分别以图5和图6表示。

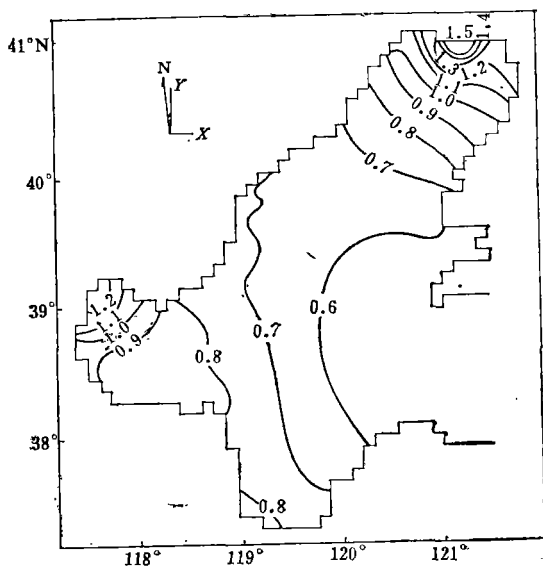


图 4 潮流扩散平衡浓度场

布起支配作用,或者说污染浓度场决定于潮流输运过程。

潮流对于污染输运的贡献,归因于潮流水平速度剪变或位相空间变化所造成的海水

将图5,6与图4加以对照可明显看出,这三幅图上的浓度分布趋势类同,就是说潮流-季风海流合成流动形成的浓度场与潮流扩散形成的平衡浓度场几乎没有多大差别。在三大海湾内彼此差异很小,仅在渤海中部等值线分布彼此略有不同。这一结果表明,潮流是污染输运的主要环境动力,在一般天气情况下,对污染浓度的分布

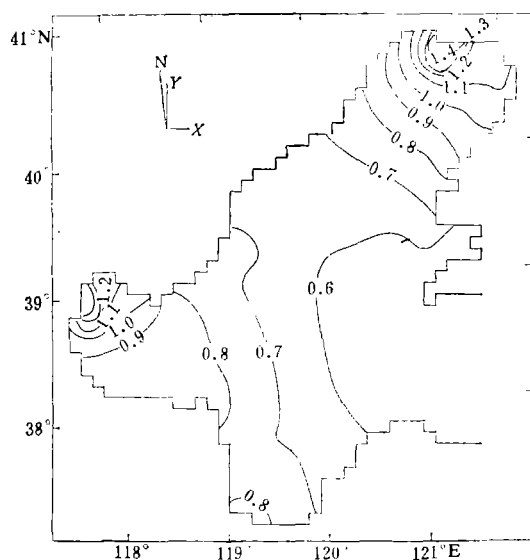


图5 冬季潮流-风海流合成流动的扩散浓度场

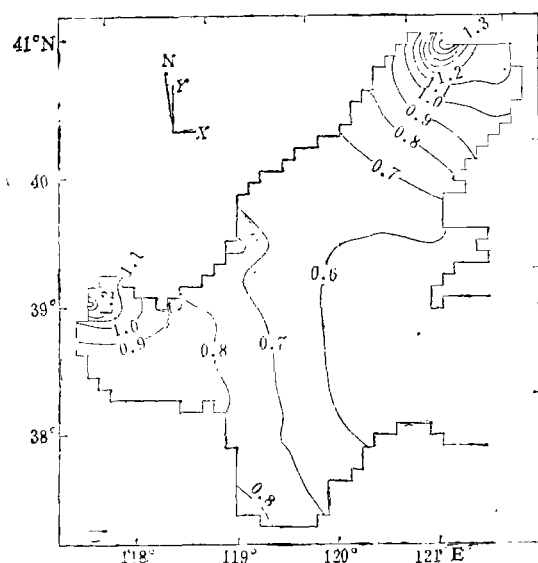


图6 夏季潮流-风海流合成流动的扩散浓度场

质点 Stokes 漂移以及潮余流的作用,而在一个潮周期中, Stokes 漂移对于输运的贡献通常比潮余流的贡献更大^[7]。由于渤海潮流场存在颇大的速度梯度^[3],从而导致相当强的污染输运能力。

(三) 风海流的污染输运

应用水质模型考查季风环流的污染输运能力,是在下述设定条件下进行的: (1)假定

风海流是唯一的环境动力条件;(2)潮扩散平衡浓度场为初始浓度(初值);(3)模拟实时定为 60 个潮周期,与潮扩散模拟计算的实时长度相同。风海流对潮扩散平衡浓度分布进行重新分配持续一月之后所形成的浓度场,示于图 7(夏季)和图 8(冬季)。这两幅图与潮扩散平衡浓度场(图 4)的差别是显而易见的。

夏季,辽东湾由于存在闭合的气旋型环流而致湾区中部等浓度线正向旋转约 90° ,并形成明显的舌状分布。潮扩散在湾顶大凌河口外形成的高浓度区,由于较强沿岸流的冲释而消失,浓度分布趋于均匀。浓度高值区转移到湾顶的西北角,最高值仅 1.3ppm。这表明,夏季风海流有利于辽东湾污染物的向外输出。在渤海湾,高浓度区明显的北移,并且恰在南、北两股沿岸流交汇的弱流区,形成最高浓度区,且浓度梯度很大。莱州湾内的浓度分布没有多大改变。

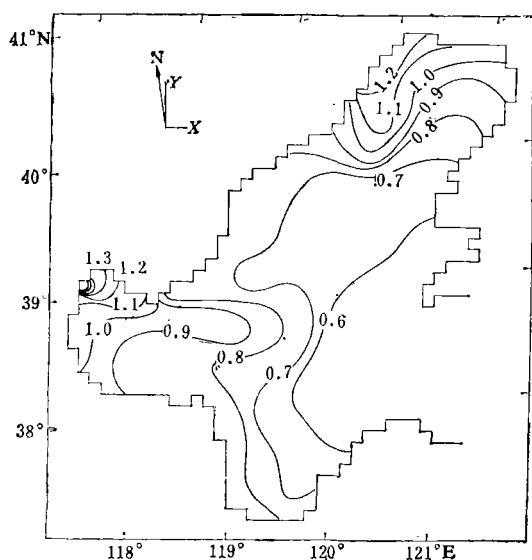


图 7 夏季平均风海流控制下的浓度场

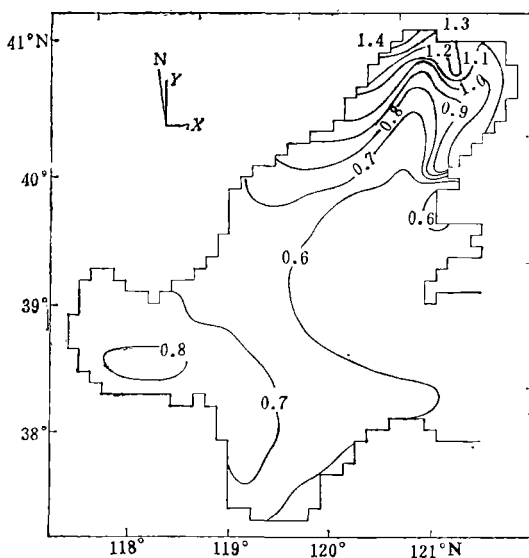


图 8 冬季平均风海流控制下的浓度场

冬季,辽东湾风海流基本上也是气旋式环流。本区的浓度分布,相对于潮扩散浓度场(图 4)有很大改变。湾区中部的北流使浓度等值线分布向北突出,并将浓度的高值区推向湾顶西北角。辽东湾西岸,沿岸流流向和强度均酷似夏季情况(图 2,3),这对排海废水的稀释扩散终年都是有利的。渤海湾浓度场的变化尤其引人注目。这里湾顶排污口附近的高浓度区(图 4)已经消失,整个湾内浓度分布均匀(0.8ppm 左右),污染负荷总量相当于潮扩散浓度场正常负荷量的一半稍多,这显然是本区内非闭合气旋式环流对潮扩散浓度分布进行再分配的结果。图 8 中渤海湾的浓度甚至低于图 5 中潮流-冬季风海流合成流动作用下的浓度,这是由于它们的污染输运通量的不同所致。诚然,在一个潮周期内,合成流动的净体积输运应与风海流的大体相当。但是,合成流携带的是经潮混合后生成的低浓度海水,而单独风海流却将污染源附近未经潮混合的高浓度冲淡水直接带出海湾。由于单独风海流的污染输出通量较高而导致海湾相应的浓度水平较低。

与夏季情况相比,冬季风海流不仅流速较大,而且通过海峡与北黄海的水交换也比较

活跃,因而具有较强的物理自净能力。渤海净化能力的这种季节性差异,可能是导致其冬季水质优于夏季水质的一个重要原因。

参 考 文 献

- [1] 张美芳、陈金保,1983。冬夏季渤海平均海面风应力场。海洋湖沼通报 1:1—6。
- [2] 秦曾灏,1980。关于海面风应力的计算问题。海洋湖沼通报 3:1—8。
- [3] 窦振兴、罗远途、黄克辛,1981。渤海潮流及潮余流的数值计算。海洋学报 3(3):355—369。
- [4] 窦振兴、罗远途、黄克辛,1982。渤海潮流污染扩散的数值模拟。海洋学报 4(6): 667—678。
- [5] 罗奇, J., 1983。计算流体力学(钟锡昌译)。科学出版社, 204—219 页。
- [6] 金子安雄、堀江毅、村上和男,1975 ADI による潮流と汚染拡散の数值計算。港湾技術研究報告 14(1):9—36
- [7] Awaji, T., 1980. Tidal Exchange through a strait: A numerical experiment using a simple model basin. *J. Phys. Oceanogr.* 10(10): 1499—1508.

NUMERICAL MODELING OF POLLUTANT TRANSPORT BY WIND-DRIVEN CURRENT IN THE BOHAI SEA

Dou Zhenxing, Zhang Cunzhi and Zhang Yanfeng

(Institute of Marine Environmental Protection, SOA, Dalian)

ABSTRACT

The main purposes of this paper is to examine the pollutant transport capacity of wind-driven circulation in the Bohai Sea. Both the previously developed water-quality model and the seasonal mean wind-driven circulation model of the Bohai Sea are applied to calculate the temporal and spatial dispersal of the organic pollutant (COD) inflowing into the sea from 28 source sites along the coasts. The effect of seasonal wind on the COD concentration field produced by the tidal current dispersion has been investigated.

The obtained results show that the mean wind-driven current has a minor effect on the concentration field induced by the tidal current. Through numerical calculation of the net pollution transport by wind-driven current we find that the mean wind-driven circulation in Liaodong Bay is of advantage to the pollutant transport outflowing, and that in Bohai Bay, the winter mean wind-driven circulation has greater capacity for physical-purification than the summer mean wind-driven circulation. This is one of the main causes for the better water quality in the Bohai Sea in winter than in summer.