

自净度场 —— 量度海域物理 自净能力的新概念

黄 河 宁

(国家海洋局海洋环境保护研究所, 大连)

摘 要

本文提出了一种量度海域物自净能力的新概念——自净度及自净度场。所研究水域中任一点的自净度随时间和空间的分布(自净度场)取决于水域的自然地理因素(如海湾面积、水深和地形)、水文物理因素(如潮流场和扩散系数)和排污点的位置。对于特定的水域,自净度场仅取决于排污点的位置。因此,自净度场可以方便地评价海域的物理自净能力,比以往采用的平衡影响浓度场,而不需要对每一污染指标物,每一排放量进行平衡影响浓度场的计算。

进入海域的污染物质通常经历三种净化过程,即物理过程、化学过程和生物过程。在三种过程中,物理过程是最基本和最重要的。特别对于溶解的或悬浮的保守性物质更是如此。物理过程主要是指污染物与海水的混合稀释以及在海洋中的扩散和输移。而所谓物理自净能力是指水体通过物理过程使污染物浓度降低,从而使水体得到净化的能力。

在考虑污染物在海洋中的被动扩散和输移问题时,以往的研究总是计算污染指标物(比如COD)在研究海域中经过长时间混合后形成的平衡浓度场,或是平衡影响浓度场^[1-3](即只考虑由于排污引起的污染指标物浓度的增值,而不考虑污染指标物的背景浓度值)。

在实际应用中,一般要对每一种污染指标物在不同的入海通量条件下进行平衡影响浓度场的计算。此项计算工作量是很大的。况且,虽然污染物的影响浓度场可以间接地反映出海区的物理自净能力,但却不能直观地显示出自净能力的大小。换言之,由众多的、各种污染指标物在各种排放量条件下的影响浓度场并不能够给出海域物理自净能力的定量的、清晰的图像。

本文的目的是引入一种能够量度海洋物理自净能力的新概念——自净度场。首先通过一个简单的无限域的二维对流-扩散问题引出自净度的概念,然后给出了复杂海域自净度场的计算方法和例子,最后对自净度场的概念进行了讨论。

一、自净度概念的引出

考虑一水深为常数 h ,以均匀流速 U 运动的无限大流场,假定流场中某一污染指标物

在垂向为均匀分布,而在水平方向上的分布则满足稳态的二维对流-扩散方程:

$$Uh \frac{\partial C}{\partial x} = K_H h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + S(x, y), \quad (1)$$

式中, U 为 x 方向上的均匀流速; C 为污染物浓度; K_H 为水平扩散系数; $S(x, y)$ 为污染源密度, 即单位时间、单位面积上释放的污染物质量. 污染物总释放量 S_m (即源强) 为:

$$S_m = \iint_{\omega} S(x, y) dx dy, \quad (2)$$

式中, ω 表示源域.

对于无限域二维均匀流流场中的连续点源排放, 即 $S = S_m \delta(x=0, y=0)$, Carslaw 和 Jaeger^[1] 给出的解为:

$$C = \frac{S_m}{2\pi h K_H} e^{-\frac{Ux}{2K_H}} K_0 \left(\frac{Ur}{2K_H} \right), \quad (3)$$

式中, $K_0(\)$ 为修正的贝塞尔函数; $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$.

现在我们引进自净度的概念. 定义水体中某一点处的自净度为: 当源强 $S_m = 1$ 时, 该点处污染物伪浓度 (因其不是浓度的量纲) 的倒数, 即

$$S_p = \frac{1}{C^*}, \quad (4)$$

式中, $C^* = C/S_m$, 为伪浓度.

根据式 (4) 的定义, 由式 (3) 可以得到连续点源排放时, 流场中某点处的自净度为:

$$S_p = 2\pi h K_H e^{-\frac{Ux}{2K_H}} \left[K_0 \left(\frac{Ur}{2K_H} \right) \right]. \quad (5)$$

显然, 自净度 S_p 具有流量的量纲 ($L^3 T^{-1}$).

由式 (5) 可以看出, 连续点源排放条件下流场中某点处的自净度是水深、流速和扩散系数的函数, 即当表征流场特性的参数 h 、 U 、 K_H 一定时, 流场的自净度或者自净能力就完全确定了. 在污染源处, $S_p \rightarrow \infty$. 因此, 式 (5) 直观地显示了二维均匀流流场对连续点源排放的污染物的净化能力.

根据式 (5), 给出了二维均匀流流场中连续点排放时的自净度场 (即自净度等值线,

图 1). 图中自净度取无量纲形式: $S_p^* = \frac{S_p}{2\pi h K_H}$, 坐标形式为 $x^* = \frac{Ux}{2K_H}$, $y^* = \frac{Ur}{2K_H}$.

对于任意给定的源强 S_m , 污染指标物的浓度可以方便地由自由度求出:

$$C = \frac{S_m}{S_p}. \quad (6)$$

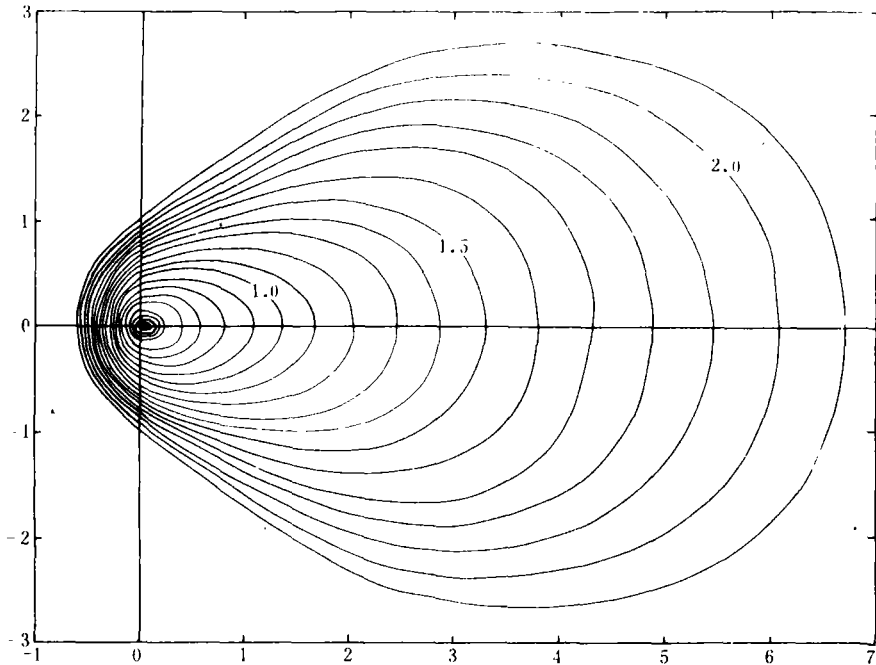


图1 二维均匀流场中连续点源排放时的自净度场

二、海域自净度场

考虑一开敞的或半封闭的海域(如海湾), 假定水深较浅, 水体垂直混合充分, 则悬浮或溶解的保守性物质满足垂向平均对流-扩散方程

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HUC) + \frac{\partial}{\partial y}(HVC) = \frac{\partial}{\partial x}(HK_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(HK_y \frac{\partial C}{\partial y}) + S(x, y), \quad (7)$$

式中, $H = \zeta + h$, ζ 为平均海面以上水位高度; h 为水深; $S(x, y)$ 为源密度; 源强 S_m 意义同式(2); K_x, K_y 为扩散系数; U, V 为垂向平均流速在 x 和 y 轴上的分量

$$U = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad V = \int_{-h}^{\zeta} v dz. \quad (8)$$

C 为污染物垂向平均浓度

$$C = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} c dz. \quad (9)$$

C 满足的边界条件为:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad \text{沿岸边界} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_n \frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad \text{开边界, 流出时} \quad (11)$$

$$C = C_0(x, y), \quad \text{开边界, 流入时} \quad (12)$$

式中, $C_0(x, y)$ 为规定值.

假定在所研究海域中仅有一个污染源, 其源强为 S_m , 则设

$$C = C^* \cdot S_m, \quad (13)$$

式中, C^* 为 $S_m = 1$ 时, 某一污染指标物的伪浓度值, 将式(13)代入式(7)、(10)、(11)、(12)整理后得到关于 C^* 的控制方程和边界条件

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (HC^*)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (HUC^*) + \frac{\partial}{\partial y} (HVC^*) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (HK_x \frac{\partial C^*}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (HK_y \frac{\partial C^*}{\partial y}) + S'(x, y), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \quad \text{沿岸边界} \quad (15)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial t} + V_n \frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \quad \text{开边界, 流出时} \quad (16)$$

$$C^* = C_0^*(x, y), \quad \text{开边界, 流入时} \quad (17)$$

式中, $S'(x, y)$ 为当源强 $S_m = 1$ 时的源密度, 即它满足

$$\iint_{\omega} S'(x, y) dx dy = 1. \quad (18)$$

事实上, 如果取污染源域 ω 的形状为边长为 a 和 b 的矩形, 且源密度在矩形域上为均匀分布, 则

$$S(x, y) = \frac{S_m}{ab}, \quad \omega \quad (19)$$

$$S'(x, y) = \frac{1}{ab}, \quad \omega \quad (20)$$

由式(14)–(17), 采用差分方法(如ADI法)或有限元法, 可以解出源强 $S_m = 1$ 时的伪浓度 (C^*) 场, 然后根据上一节中给出的自净度的定义 $S_p = \frac{1}{C^*}$, 即可以求出所研究海域的自净度场.

三、应用举例

大连市政府拟将马栏河污水截流, 经一级处理后通过排污管线和扩散器排入黑石礁湾.

在大连市马栏河污水排海工程环境可行性研究中¹⁾，对 3 个排污方案(排污点不同)，两种设计流量，5 个水质污染指标物 (BOD、COD、油、总氮和悬浮物)，共进行了 60 个影响浓度场计算。计算采用了 ADI 方法，达到平衡的时间为 20 个潮周期。计算工作量和花费都相当大。虽然通过这些浓度场可以分析各方案的优劣，但不能给出黑石礁湾相应于各个排污点的物理自净能力的清晰图像。而运用自净度场，可以方便地比较各方案的优劣。同时，可以使计算工作量大大减小。对于上述研究，只需计算 6 个自净度场(每个方案分为涨潮自净度场和落潮自净度场)，计算工作量只为原来的十分之一。

图 2—5 显示了大连市马栏河污水排海工程方案 I 和方案 III 的自净度场(据王锡侯等文章¹⁾整理)。可以看到，方案 I 由于离岸较近，离湾口较远，其自净能力远不如方案 III。以涨潮流自净度场为例，在保护区星海公园和傅家庄水域，方案 I 的自净度(单位为 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)分别为 750 和 1 000，而方案 III 中均为 2 500。另外还可以看到，涨潮自净度场与落潮自净度场有所不同。涨潮时，由于外海潮水的涌入使海湾的自净度比落潮时略有提高。

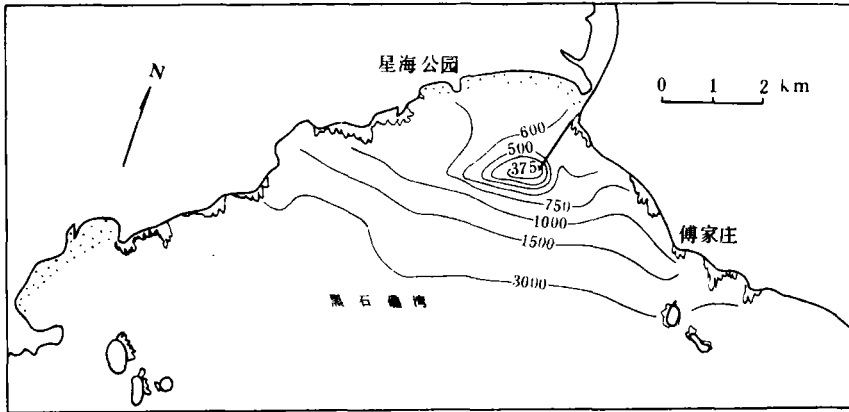


图 2 方案 I 自净度场(涨潮时)

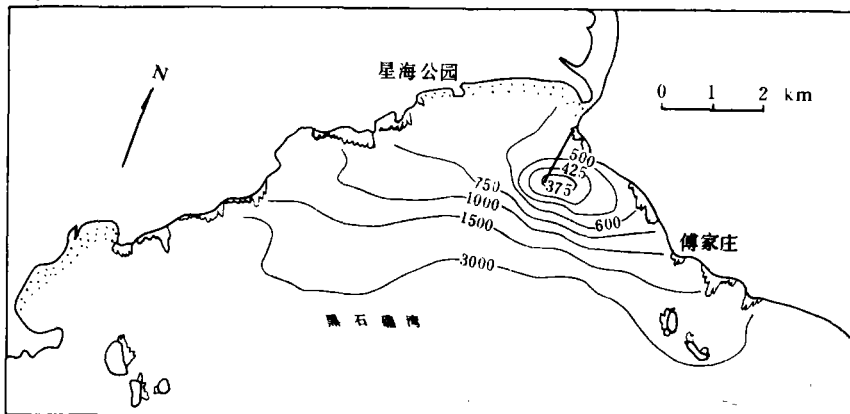


图 3 方案 I 自净度场(落潮时)

1) 王锡侯等，大连市马栏河污水排海工程可行性研究海洋环境预测评价，1987。

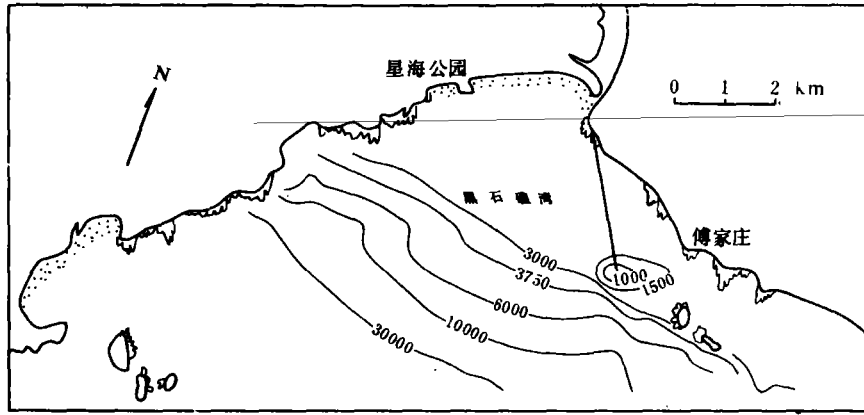


图4 方案Ⅲ自净度场(涨潮时)

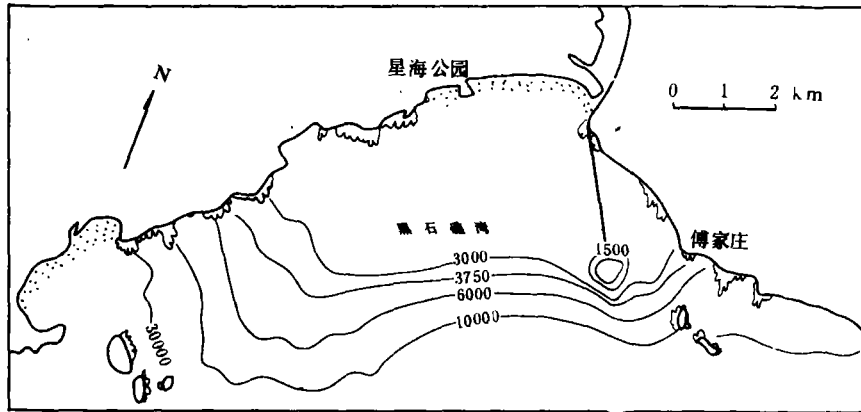


图5 方案Ⅲ自净度场(落潮时)

四、讨 论

1. 本文的目的在于提出一种量度海域物理自净能力的新概念。以往采用的浓度场概念不足以量度海域的物理自净能力。尽管自净度与影响浓度的关系如此简单，但它在概念上却发生了很大的变化。从式(5)可以看出，自净度具有流量的量纲(L^3T^{-1})，它相当于单位时间参与稀释的流体的体积，可以称其为稀释流量或冲洗流量。当然，参与稀释的流体体积越大，则水体的物理自净能力就越强。Csanady^[5]也曾注意到 hK_H (见式(5))的量纲为(L^3T^{-1})，并将之称为冲洗体积输运(flushing volume transport)。

2. 自净度场取决于水域的自然地理因素(如海湾面积、水深和地形)、水文物理因素(如潮流场和扩散系数)和排污点的位置。对于特定的水域，其自然地理和水文物理因素

都是确定的, 而自净度场则仅取决于排污点的位置。因此, 自净度场直观地、定量地反映了海域的物理自净能力。利用自净度场, 可以方便地、经济地进行污水排海工程方案比较, 选择最佳排污点的位置。根据自净度场, 还可以方便地求出各种污染指标物在各种排放量条件下的平衡影响浓度场。显然, 自净度场比以往采用的平衡浓度场的概念更具有普遍意义。

3. 本文论述了所考虑的海域中只有一个污染源情况下的自净度场。然而, 自净度和自净度场的概念可以推广到多个污染源的情况。由于方程(14)和边界条件式(15)——(17)关于 C^* 均为线性, 因此可以对每一污染源分别求出与其相对应的自净度场, 而总影响浓度场中某点处的浓度可由下式求出

$$C(x, y) = \sum_{i=1}^n \frac{S_{mi}}{S_{pi}(x, y)}, \quad (21)$$

式中, S_{mi} 为第 i 个污染源的源强, $S_{pi}(x, y)$ 为与第 i 个污染源相对应的某点 (坐标为 x, y) 处的自净度, n 为污染源总数。

式(21)对于海域的水质管理是十分有意义的。由于各个污染源的各种污染物入海通量 (即源强) 是经常变化的 (比如月变化或季节变化), 而相应于海域内每一污染源的自净度场都是确定的, 可以预先求出。因此, 当各个污染源各种污染物入海通量发生变化时, 由式(21)可以立刻得到总影响浓度场, 而不必重新进行繁杂的计算。关于多元情况下的自净度场及其在海域环境管理上的应用将另文详述。

参 考 文 献

- [1] 窦振兴等, 渤海潮流污染扩散的数值模拟, 海洋学报, 4 (1982), 6: 667—678.
- [2] 顾佩玉等, 长江口污水排放试验和计算的研究, 水利水运科学研究, 1987, 1: 1—13.
- [3] James, A., *Mathematical Model in Water Pollution Control*, John Wiley & Sons Ltd., 1978, 193—225.
- [4] Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd edn., Oxford University Press, 1959, 267.
- [5] Csanady, G. T., Dispersal randomly varying currents, *J. Fluid Mech.*, 132 (1983), 375—394.