

河口物质输运时间尺度研究综述*

Review of Transport Time Scales on Estuarine

李谊纯, 牙韩争, 董德信

LI Yi-chun, YA Han-zheng, DONG De-xin

(广西科学院 广西北部湾海洋研究中心, 广西南宁 530007)

(Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

摘要:河口物质输运时间尺度是将河口物理过程与生态过程联系起来的一个重要指标。输运时间尺度经常与生物化学过程的时间尺度进行比较以量化水动力过程在污染物输入及演化过程中的重要性。本文对目前国内国外河口输运时间尺度的常用尺度的概念、计算方法及其应用状况进行综述,以期对河口物质输运及生态环境研究提供帮助。

关键词:河口 时间尺度 滞留时间 龄

中图分类号:P731.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2014)03-0143-05

Abstract: Estuarine transport time scale is an important index which connects the estuarine physical and ecological processes. Transport time scale is always compared with the time scales of bio-chemical processes to quantify the importance of the hydrodynamics in pollution transport and evolution. Some commonly used concepts and computational methods of estuarine transport time scales, and their current application are synthesized concisely in this paper. The summarization is predicted to provide some references for the estuarine transport and ecological environment researches.

Key words: estuary, time scale, residence time, age

人类对河口各种各样的开发利用导致河口环境状况恶化,严重影响着河口生态系统的健康,河口与近岸海域的环境保护问题必须予以高度重视并采取相应的保障措施。河口作为联结河流与海洋的交汇点,物质的输运时间尺度问题越来越引起人们的关注。河口物质的输运时间尺度是将河口物理过程与生态过程联系起来的一个重要指标。输运时间尺度经常与生物化学过程的时间尺度进行比较以量化水动力过程在污染物输入及演化过程中的重要性。以滞留时间为例,如果滞留时间小于河口内生物化学过程的时间或二者基本相当,即可认为河道内的物

质基本上可以排出;相反,如果滞留时间大于生物化学过程的时间尺度,则可以认为河口内的生态环境是易受到负面影响的。因此,为有效控制河口海洋的环境污染,防止入海污染物质损害河口及其邻近海域的海洋生态环境、危害人类健康,开展河口物质的输运时间尺度的研究具有现实和指导意义。

1 河口输运时间尺度

河口是位于陆地与海洋交界处的半封闭水体,河口及近海受到潮汐、径流、地形、气象等多因素影响,是高度复杂的系统。对近海海洋环境产生重要影响的河口及浅海物理过程包括风生流、密度流、风混合、潮汐混合、余流、表底边界层、海洋锋等^[1]。其物理和化学特征的时空变化剧烈。河口及海岸地区的人口增长及海洋工程开发不可避免的影响海水、沉积物以及进入河口的物质的运动输运规律。污染物进入河口水体内之后,随河口内径流及潮流的运

收稿日期:2014-05-10

修回日期:2014-06-13

作者简介:李谊纯(1977-),男,工程师,博士,主要从事河口海岸学研究。

* 广西自然科学基金北部湾重大专项(2011GXNSFE018002),国家自然科学基金项目(40766001)资助。

动向口外输运。同时水体中的污染物在物理、化学、生物以及地质等因素的综合作用下,发生扩散、稀释、氧化、还原等反应,河口生态环境得到净化。为了使河口及其流域在未来能够达到可持续利用,在河口管理方面要求我们开发出切实可行的模型来对各种措施和策略的结果进行预测。

河口质量交换和输运过程的时间尺度对于环境的评估及生物地球化学演变的研究意义重大。量化河口输运时间尺度的概念有很多种^[2~5]。诸如:恢复时间(renewal time)^[6]、平均阻留时间(mean detention time)、更新时间(turn-over time)、交换时间(exchange time)及转移时间(transit time)等^[7~10]。更新时间指某一水体内原有的某物质(如悬浮物、污染物等)被新进入水体内的同类物质全部替换掉所需的时间。转移时间是指某一分子或微团从进入某一水体(如港湾、河口等)到其离开所需的时间。这些概念大多相互关联,但由于各自的定义及所依据的假设不同而不完全相同。目前,在海洋工程领域常通过数学模型计算某一水体中示踪物的总量或浓度随时间的变化确定水交换时间。3种常用的概念有:冲刷时间,龄和滞留时间。

2 常用的河口输运时间尺度及其计算方法

2.1 冲刷时间

冲刷时间常用来衡量一个河口系统对于污染的承受能力,定义为以河流径流量替换整个河口或部分河段所含淡水需要的时间^[11~13]:

$$T_f = \frac{V_f}{R}, \quad (1)$$

其中 T_f 为冲刷时间, V_f 为河口淡水体积, R 为径流量。在有些文献中,该定义也被称作滞留时间^[11]。

Bowden 和 Dyer 依据潮棱体模型提出了一个计算方法^[11,13],在这个方法中,假设涨潮期间进入河口的水体与河口内原有水体完全混合,进入河口的海水和淡水体积等于潮棱体的体积。设 V 为低潮位时整个河口或部分河段的体积, P 为潮棱体的体积,则有:

$$T_f = \frac{(V+P)T}{P}, \quad (2)$$

其中 T 为潮周期。可以看出,此方法可以应用于无径流的情况。事实上,这个方法所计算的冲刷时间是偏低的,产生这种现象的原因是在该定义中,未考虑涨潮时“回流”的影响,而这一影响一般情况下是

相当可观的。

另外一个常用的冲刷时间的计算方法是淡水比率法(fraction of fresh water method)。河口或其部分河段的淡水比率定义为:

$$f = \frac{S_s - S_n}{S_s}, \quad (3)$$

其中, S_s 和 S_n 分别为海水的盐度和河口内水体的盐度。则冲刷时间计算公式为:

$$T = \frac{fV}{R}. \quad (4)$$

当河口口门处水交换近似两层模式时,利用 Kundsen 定理,式(4)可以改写为:

$$T = \frac{V(S_2 - S_1)}{S_2 R}, \quad (5)$$

其中, S_1 、 S_2 分别为口门处上下层水体的盐度。这也称为水盐收支法(water and salt budget method)。

随涨潮进入河口的水部分为落潮时流出口门后与海水混合的水,也包括涨潮进入河口的海水。在一个潮周期内自口门流出的淡水应等于同时间内河流下泄的径流量。Van De Kreeke^[14]在稳态条件下得出:

$$R = \frac{\epsilon P(S_s - S_{out})}{S_s}, \quad (6)$$

其中, S_{out} 为落潮流按流量加权平均的盐度。 ϵ 为回流系数,需根据具体研究区域及物理过程予以确定。综合式(3)、式(4)和式(6)可有:

$$T = \frac{V(S_s - S_n)}{(S_s - S_{out})} \cdot \frac{1}{\epsilon P}. \quad (7)$$

2.2 龄

另一个常用的时间尺度是龄。Bolin 和 Rodhe^[15]给出了其定义:对某一微团(如污染物、水、盐等),从它进入某一水体(如河口、水库)时刻开始停留在该水体中的时间。设 $M(\tau)$ 为质量函数,代表进入水体后并停留在水体中的时间小于或等于 τ 的物质的总量。定义质量分布函数为:

$$\phi = \frac{1}{M_0} \frac{dM(\tau)}{d\tau}, \quad (8)$$

其中, $M_0 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} M(\tau)$ 。则龄定义为: $\tau_a = \int_0^{\infty} \tau \phi(\tau) d\tau$ 。此定义是一个平均意义的概念,它反映了物质进入后在所研究的水体中停留的平均时间。

为了细致描述龄的空间变化特征,Deleersnijder 等^[16]给出了一个更普适的概念,设

$c(t, X, \tau)$ 为浓度分布函数, 为时间 t , 空间 X 以及 τ 的函数, 水体中挟带物质的浓度表示为:

$$C(t, X) = \int_0^{\infty} c(t, X, \tau) d\tau, \quad (9)$$

则在 t 时刻、空间 X 的龄可由下式得出:

$$a(t, X) = \frac{\int_0^{\infty} \tau c(t, X, \tau) d\tau}{\int_0^{\infty} c(t, X, \tau) d\tau}. \quad (10)$$

定义函数为: $\alpha(t, X) = \int_0^{\infty} \tau c(t, X, \tau) d\tau$, 则有:

$$a(t, X) = \frac{\alpha(t, X)}{C(t, X)}. \quad (11)$$

对于仅有一种物质存在于水体中, 且在忽略源、汇项的情况下, Deleersnijder 等给出了关于 $\alpha(t, X)$ 和 $C(t, X)$ 的输运方程:

$$\frac{\partial C(t, X)}{\partial t} + \nabla(uC(t, X) - k \nabla C(t, X)) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, X)}{\partial t} + \nabla(u\alpha(t, X) - k \nabla \alpha(t, X)) =$$

$$C(t, X). \quad (13)$$

其中, u 为流速变量。上述两个方程, 结合合适的初边值条件, 即可组成适定方程组, 离散求数值解, 进而得出研究区域的龄的空间分布。

2.3 滞留时间

滞留时间也是水体中物质更新速率的一个基本度量, 滞留时间可以将河口生态系统研究的许多方面统一起来, 反映了水动力过程和生态过程间最根本的联系。滞留时间是水体微团或其它要素如盐、污染物等自其进入某一水体至被输运到水体以外滞留在水体中的平均时间, 在稳态条件下, 可以根据水体(如河口)内该变量与其在边界处的交换速率的比值估算。

Hansen 等^[1,17]的河口环流理论描述了滞留时间与河流流量 U_r 和潮流速度 U_t 的关系。在典型的河口, 径流量随季节的变化可达到 5~1000 倍甚至更大。但河口的潮差及最大潮流流速的变化很难超过 2~3 倍。因此在大多数的中型河口, 滞留时间主要是 U_r 的函数。尽管潮汐对滞留时间的影响比河流的影响小, 但潮汐对滞留时间的影响更复杂。滞留时间的确定是应用物质守恒原理的一个方面。在稳态条件下, 滞留时间由流入(加上内源)或流出(加上内部的汇)研究区域的物质通量决定。但是实际情况几乎无法满足关于“含量稳定和输运稳定”的假设, 在非稳态的条件下, 可以使用区域中物质含量

的变化速率的方法。

Zimmerman^[18]给出的滞留时间的定义为: 水体中某一个物质的微团的滞留时间为它在到达水体的出口前在水体中的停留时间。可以看出, 滞留时间也是时间和空间要素的函数。不同空间位置的物质微团在不同时刻排放将会导致其在水体中具有不同的滞留时间。图 1 给出了 Zimmerman 定义的滞留时间与前述所定义的龄的关系。

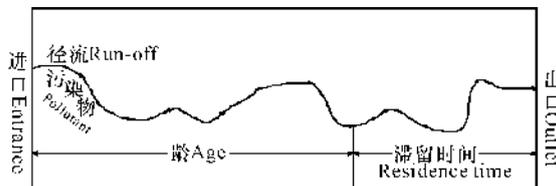


图 1 龄与滞留时间的关系

Fig. 1 Age and residence time

类似于前述龄的定义, Takeoka^[19]给出了一个滞留时间的定义和计算方法。设在 $t=0$ 时刻, 水体里的物质的总量为 R_0 , 在 $t=\tau$ 时刻仍留在水体里的物质的量为 $R(\tau)$ 。 $R(\tau)$ 即为滞留时间大于 τ 的物质的含量。定义如下函数:

$$\varphi = -\frac{1}{R_0} \frac{dR(\tau)}{d\tau}. \quad (14)$$

那么, 平均滞留时间 τ_r 则可以定义为:

$$\tau_r = \int_0^{+\infty} \tau \varphi(\tau) d\tau. \quad (15)$$

分部积分并考虑到 $\lim R(\tau) = 0$, 则有:

$$\tau_r = \int_0^{+\infty} \frac{R(\tau)}{R_0} d\tau = \int_0^{+\infty} r(\tau) d\tau, \quad (16)$$

其中 $r(\tau) = \frac{R(\tau)}{R_0}$ 称为滞留函数。依此定义, $r(\tau)$ 是针对每一个物质微团的, 所以这种方法可以考虑到空间上的变化。如果能确定滞留函数, 那么就可以将此定义直接应用于某一水体滞留时间的计算中。

与前述式(12)、式(13)所示的龄计算方法类似, Delhez 等^[20]提出计算滞留时间的一个求解伴随问题的方法。其控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial C(t, X)}{\partial t} + \nabla(uC(t, X) - k \nabla C(t, X)) = 0 \\ C(t_0, x) = \delta(x - x_0) \end{cases}. \quad (17)$$

其中, $\delta(x)$ 为 Dirac 函数。此控制方程组配以边界条件及初值条件即可以得出 $C(t, X)$, 进而可得滞留函数的空间分布。如果所选的基本变量为伴随函数 $C_T^*(t, X)$, 则控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_T^*(t, X)}{\partial t} + \nabla(uC_T^*(t, X) - \\ k \nabla C_T^*(t, X)) = 0 \\ C_T^*(t_0, x) = \delta_\omega(x) \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\delta_\omega(x)$ 为控制区域 ω 的特征函数, 这组控制方程需要在某时刻 T 给定“初始条件”, 而方程的时间积分需要向后计算。待求出 $C_T^*(t, X)$ 后可进一步计算研究区域的滞留时间的空间分布。

此外, 滞留时间常用的计算方法还有诸如:

$$\text{Sanford 等}^{[21]}: T_r = \frac{(V + P/2) T}{(1 - \epsilon) P + RT}, \quad (19)$$

$$\text{Luketina}^{[22]}: T_r = \frac{(V + P) T}{(1 - \epsilon) P + RT/2}。 \quad (20)$$

河口水动力要素复杂, 相对于采用数学模型手段, 这两种定义由于涉及太多假设, 在河口输运过程及物质交换的时间尺度的研究中需谨慎应用。

3 结语

河口与口外的水体交换率对河口内化学及生物过程有至关重要的影响。将河口物理过程与生态过程联系起来的一个重要指标是河口输运时间尺度。输运时间尺度经常与生物化学过程的时间尺度进行比较以量化水动力过程在污染物输入、输运及演化过程中的重要性。随着河口环境问题越来越引起重视, 河口输运的时间尺度方面的研究在近几年也取得了很大进展^[23~30]。这些应用的输运时间尺度的不同的量化概念均是从水体的物理性质(如体积、潮汐、径流、混合过程等)以及水体所挟带物质的性质(如浓度、质量、衰减率等因素)为出发点, 由于各自的产生背景、适用范围以及河口自然条件的复杂性, 这些概念及其计算方法在实际应用中应根据具体情况加以选择。

参考文献:

- [1] Hobbie J E. 河口科学-研究与实践的综合方法[M]. 孟伟, 雷坤, 郑丙辉, 译. 北京: 海洋出版社, 2005.
Hobbie J E. Estuarine science: a synthetic approach to research and practice[M]. Meng W, Lei K, Zheng B H, translated. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [2] Gillibrand P A. Calculating exchange times in a Scottish fjord using a two-dimensional, laterally-integrated numerical model[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001(53): 437-449.
- [3] Edinger J E, Buchak E M, Kolluru V S. Modeling flushing and mixing in a deep estuary[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1998(102): 345-353.
- [4] Dyer K R, Taylor P A. A simple, segmented prism model of tidal mixing in well-mixed estuaries[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1973(1): 411-448.
- [5] Delhez E J M, Deleersnijder E. Age and the time lag method[J]. Continental Shelf Research, 2008(28): 1057-1067.
- [6] Benjamin B, Brauwere A, Gourgue O. Reprint of water renewal timescales in the Scheldt Estuary[J]. Journal of Marine Systems, 2013(128): 3-16.
- [7] Wang C F, Hsu M H, Kuo A Y. Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004(60): 381-393.
- [8] Pritchard D W. Salt balance and exchange rate for Chincoteague Bay[J]. Chesapeake Science, 1960(1): 48-57.
- [9] Fischer H B, List E J, Koh R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters[M]. New York: Academic Press, 1983.
- [10] Prandle D A. A modeling study of the mixing of ¹³⁷Cs in the sea of the European continental shelf[J]. Philosophical Transaction of the Royal Society of London, 1984(310): 407-436.
- [11] Dyer K R. Estuaries: a physical introduction[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [12] Luff R, Pohlman T. Calculation of water exchange times in the ICE Boxes with an Eulerian dispersion model using a half-life time approach[J]. German Journal of Hydrography, 1996(47): 287-299.
- [13] Bowden K F. Circulation and diffusion[C]//Lauff G H, ed. Estuaries, American Association for Advancement of Science, Publication No 83. Washington D C: [s. n.], 1967: 15-36.
- [14] Van de Kreeke. Residence time: application to small boat basins[J]. ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1983, 109(4): 416-428.
- [15] Bolin B, Rodhe H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs[J]. Tellus, 1973(25): 58-62.
- [16] Deleersnijder E, Campin J M, Delhez E J M. The concept of age in marine modeling, I. Theory and preliminary model results[J]. Journal of Marine Systems, 2008(28): 229-267.
- [17] Hansen D V, Rattray M Jr. Gravitational circulation in straits and estuaries [J]. Journal of Marine Research, 1965(23): 104-122.
- [18] Zimmerman J T F. Estuarine residence times[C]//Kjerfve B, ed. Hydrodynamics of Estuaries 1, Estuar-

- ine Physics. Boca Raton, Florida; CRC Press, 1988; 76-84.
- [19] Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1984, 3(3): 322-326.
- [20] Delhez E J M, Heemink A W, Deleersnijder E. Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004(61): 691-702.
- [21] Sanford L P, Boicourt W C, Rives S R. Model for estimating tidal flushing of small embayments[J]. *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1992, 118(6): 635-654.
- [22] Luketina D. Simple tidal prism model revisited[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998(46): 77-84.
- [23] Shen J, Lin J. Modeling study of the influences of tide and stratification on age of water in tidal James River [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006(68): 101-112.
- [24] Liu Z, Wei H, Liu G, et al. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004(61): 25-35.
- [25] Sheldon J E, Alber M. A comparison of residence time calculations using simple compartment models of the Altamaha River estuary[J]. *Georgia Estuaries*, 2002, 25(6B): 1304-1317.
- [26] Beckers J M, Delhez E, Deleersnijder E. Some properties of generalized age-distribution equations in fluid dynamics[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2001, 61(5): 1526-1544.
- [27] Monsen N E, James E C, Lucas L V, et al. A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(5): 1545-1553.
- [28] Arega F, Armstrong S, Badr A W. Modeling of residence time in the East Scott Creek Estuary, South Carolina, USA[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2008(2): 99-108.
- [29] Cifroya P, Reyssb J, Sicleta F. Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by ^7Be analysis[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003(57): 553-568.
- [30] Wu Y, Falconer R A, Lin B. Modeling trace metal concentration distributions in estuarine waters [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005(64): 699-709.

(责任编辑:陆 雁)