

河口海岸物质输运时间尺度研究进展

张 琴¹, 杨 洁², 陶建峰², 张长宽², 张 晓²

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:从物质输运时间概念、研究方法及应用方面综述了近年来河口海岸物质输运时间尺度的研究进展, 论述了目前物质输运时间尺度主要数学模型的优点和局限性, 着重讨论了基于物质组成的年龄和存留时间(CART)理论的研究进展。针对当前非保守性物质输运时间尺度研究中存在的不足, 指出易被泥沙吸附的污染物的输运时间尺度需要考虑其与泥沙的相互作用过程, 加强非保守性物质、泥沙和易被泥沙吸附的污染物输运时间尺度研究有助于全面了解复杂物质的输运规律; CART 理论应拓展应用于计算非保守性物质、泥沙和考虑泥沙影响的污染物输运时间尺度的研究。

关键词:物质输运; 污染物; 泥沙; 时间尺度; 河口; 海岸

中图分类号:P731.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)06-0088-07

Advances in study of substances transport timescales in estuarine and coastal areas//ZHANG Qin¹, YANG Jie², TAO Jianfeng², ZHANG Changkuan², ZHANG Xiao²(1. *Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China*; 2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Research progression the transport timescales of substances in estuaries and coastal areas in recent years was reviewed from three aspects, including the concepts, the research methods and the applications of transport timescales. The advantages and limitations of the current mathematical models for the computation of substance transport timescales, especially the progress of the constituent-oriented age and residence time (CART) theory are discussed emphatically in this paper. Aiming at the shortcomings of the current non-conservative substance transport timescales, it is pointed out that the interaction between adsorptive pollutants and suspended particles should be considered to describe the transport timescales completely. Strengthening the study on the transport timescales of non-conservative materials, sediments and adsorptive pollutants will help to reveal the transport characteristics of complex substances. The CART theory should be applied to calculate the transport timescales of non-conservative substances, sediments and the pollutant transport process that considers the interaction with sediments.

Key words: transport of substances; pollutants; sediments; transport timescales; estuaries; coastal areas

在河口海岸生态系统中, 流体介质携带了大量的浮游生物、污染物、溶解相气体、悬浮颗粒等物质, 它们的输运过程不仅影响地形地貌, 而且也显著影响到水体系统的水质和生态^[1-2], 因此研究物质输运过程对河口海岸生态系统具有重要意义。水体中的这些物质, 主要在水动力作用下进行输移扩散, 为了解其输运过程, 针对不同的问题, 在研究方法上从余流和物质输运时间尺度方面开展研究, 在数值手段上分别基于欧拉法和拉格朗日法开展研究。物质输运时间尺度是评价水体环境质量和环境容量的重要指标, 海湾和近海海域的污染物通过对流扩散等物理过程输运至外海海域, 使污染物浓度降低, 实现水体的自净。不同区域的水体由于其水动力强弱不同, 其自净能力也就不同, 因此物质输运时间尺度可用来分析排入受纳水体中污染物的输运过程, 定量反映水体的自净能力, 并给出合理的生态保护建议, 对水体系统的生态环境具有重要意义^[1]。

目前对于物质输运时间尺度的研究多集中于水体或溶解性物质, 对非保守性物质、泥沙或易被泥沙吸附的污染物研究较少。本文主要从物质输运时间尺度概念、计算方法及应用状况等方面对河口海岸物质输运时间尺度的研究情况进行综述, 并对其未来的研究方向作了展望。

基金项目: 国家自然科学基金(51409093)
作者简介: 张琴(1992—), 女, 助理工程师, 主要从事水环境数值模拟及环境影响评价研究。E-mail: 1104264732@qq.com
通信作者: 杨洁(1980—), 女, 讲师, 博士, 主要从事海岸水环境与泥沙输运研究。E-mail: jie_yang@hhu.edu.cn

1 物质输运时间尺度概念

从20世纪70年代开始,根据研究对象和问题的不同,不同研究者定义了不同的时间尺度概念来定量描述物质输运过程,如Bolin等^[3]在1973年根据海水交换率的定义引入冲淡时间(flushing time)的概念,即水体全部被置换的时间,主要用来表征河口或海湾的水体被更新的速率,反映的是研究水体整体的运动特征。一些学者认为研究区域内物质的衰减并非线性衰减,而是呈指数形式,于是提出转运时间(turn-over time)^[4]的概念,即研究区域内物质总量减少至初始值的 e^{-1} (约0.37)所需的时间。此外,Bolin等^[3]还引入了年龄(age)概念来描述质点自进入控制区域到某点所经历的时间。Luff等^[5]提出了半交换时间(half-life time)的概念,其定义为研究海域内浓度降低至初始值一半时所需的时间,是使用稀释速率的快慢来反映海域的水体更新能力。1976年,Zimmerman^[6]在年龄的概念基础上定义了存留时间(residence time)的概念,将空间某点的存留时间定义为该点释放的物质第一次离开控制区域所需的时间。Zimmerman认为在同一位置释放后不同质点移动路径不同,存留时间依赖于质点位置和释放时间,需要对不同质点存留时间进行平均来衡量这一空间位置的水交换能力。在此基础上,Takeoka^[7]提出了剩余函数的概念(remnant function),并建立了剩余函数和平均存留时间之间的关系,剩余函数可以反映控制区域内所研究物质含量的下降,因此利用在某时刻剩余在控制区域内物质的比例可得到物质的存留时间。

存留时间在一定程度上反映了污染物对一个特定水体生态系统的健康所造成的影响大小,是一个重要的物理变量,它表示物质在水体中生命的剩余时间,与年龄互为补充^[1,5]。物质在离开控制区域后,由于受潮汐及扩散的影响,可能再次甚至多次返回控制区域,因此在一些考虑生物和地球化学过程的研究中,物质在控制区域内存留的总时间显得更为重要,如受潮汐影响较大的浮游植物,其生长与其在控制区域存留的总时间密切相关,因此定义暴露时间为物质在控制区域内存留的总时间^[1]。在衡量一个海域受污染物质影响的时间时,如果这种污染物质为保守物质,并且在控制区域的边界处动力条件或生物化学条件没有剧烈变化时,就需要考虑其再次进入控制海域的时间;如果离开控制区域后释放的物质的特性会发生剧烈变化,那么存留时间的概念则更适用^[8]。暴露时间在数值上比存留时间大,它们之间的差值与近海海域的环流有关^[9],

例如在强潮河口物质更容易在潮汐作用下再次返回控制区域,使得强潮河口物质的暴露时间与存留时间差异较大。

以上研究表明,物质输运时间尺度可以从系统整体考虑,如冲淡时间、转运时间、半交换时间,也可以从局部出发,如物质在空间各点的存留时间、暴露时间和年龄等。对于复杂海域的物质输运,更需要反映物质输运时间尺度的时空分布特征,因此,年龄、存留时间、暴露时间的概念更适用于实际海域中反映物质输运过程的时空变化特征。迄今为止,没有一种输运时间尺度可以较好地完整刻画物质的整个输运过程^[2],在使用过程中应谨慎对待,针对不同的研究问题选择合适的输运时间尺度。

2 物质输运时间尺度计算方法及应用

随着水动力数值模型及物质输运模型的发展,利用各种数学模型来进行物质输运时间尺度的计算越来越多。目前常用的计算物质输运时间尺度的方法有箱式模型(box model)法、拉格朗日粒子追踪法(Lagrange particle tracking method)、对流扩散模型法和基于物质组成的年龄和存留时间(constituent-oriented age and residence time, CART)理论等^[10-11]。

2.1 箱式模型法

箱式模型法以物质守恒为基础,利用物质通量与水体体积的关系得到海水交换速率,实际应用中可分为单箱模型和多箱模型,将研究水体作为一个整体或者分区研究。典型的箱式模型法有水体体积和水体通量比法、纳潮量法(tidal prism method)和淡水组分法(freshwater fraction method)。

冲淡时间最初利用控制区域内水体的总体积与水体通量的比值或者是物质总量与物质通量的比值来计算,但是水体体积和通量通常很难计算,于是出现了不同的冲淡时间的计算方法。如Dyer等^[12]提出纳潮量法,其原理是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,河口内的原有水体随落潮流出后不再返回控制区域,但该方法不考虑径流影响。Fischer等^[13]提出淡水组分法,考虑淡水流量后,冲淡时间可以表示为水体的总体积与潮流、径流通量之和的比值。根据Knudsen提出的盐度平衡理论^[9],潮流和径流通量之比可用海水盐度和河口内水体的盐度来反映,于是利用不同的盐度平衡理论可以得到不同的淡水组分法的表达形式^[9]。淡水组分法通过随时间变化的海水盐度反映潮流边界的水交换情况,但是需要详尽的水流和盐度资料。

在箱式模型的理论基础上,国内外众多学者对不同河口海湾的水交换时间进行了研究。高抒

等^[14]根据狭长形海湾的特点,将狭长形海湾分成若干个区域,建立多箱物理模型研究了象山港的水交换时间,得出象山港湾顶 80% 水体被湾外水体替换所需时间长达 1 a,而半交换时间需近 0.5 a。潘伟然^[15]将湄洲湾作为一个整体,采用单箱模型分别计算了湾内海水的平均交换率和平均半交换时间,同时指出单箱模型由于采用湾外海水流入湾内瞬时即与整个湾内海水充分混合的假设,与实际情况有一定的差距。箱式模型在估算时把海湾假设成一个或多个箱体,与湾外部水体在一个潮周期内充分交换,并假定控制区域外海水进入控制区域内立即与整个计算区域内水体完全混合,而实际上进入箱内的水体不能立即与原有水体发生混合,因此计算出来的物质运输时间往往偏小^[16]。此外,海区不同位置存在动力差异,水体交换并不是整体简单的进退,而是有先后,甚至有些地方小海湾可能出现滞留现象,运输时间延长,交换能力也相对较差,这类方法不能区分海湾内不同区域水体的运输时间,不能反映水体或者其他物质的运输特征,尤其是对于地形复杂的海湾^[16]。

2.2 拉格朗日粒子追踪法

拉格朗日粒子追踪法在利用数值模拟或实测手段得到流场的基础上,在研究区域内布置用于代表水体的粒子,通过计算粒子的运动来研究水体的流通和交换情况。通过在某一瞬时释放大量粒子,计算其浓度降为一半或 e^{-1} 所需的时间,得到半交换时间或转运时间;通过统计流出研究区域边界的粒子数目,除以初始粒子数目计算出研究区域的水交换率;还可以统计每个粒子在水体中的流动时间,计算水体在研究海域的存留时间或年龄。Anabela 等^[17]曾通过追踪大量粒子,统计分析得到葡萄牙 Tagus 河口的水体平均存留时间,发现该河口的水体存留时间存在明显的时空变化,并且指出拉格朗日粒子追踪法需要足够高的精度才能避免产生严重的错误。Bilgili 等^[18]利用拉格朗日粒子追踪法计算了新罕布什尔州大湾河口的存留时间,并对比了有无叠加随机游走模式的计算结果,结果表明即使很小的扩散率也会导致粒子的存留时间减少,指出计算存留时间需考虑扩散过程。Liu 等^[19]采用拉格朗日粒子追踪法研究了台湾淡水河口三维水体中的存留时间和年龄,结果表明存留时间和径流量存在指数关系,同时密度流对滞留时间和水体年龄影响显著。沈永明等^[20]将大伙房水库划分为 7 个水区,利用拉格朗日粒子追踪法分别计算了各个水区的存留时间,这比单纯的计算整个水区的平均存留时间更符合实际。Sandery 等^[21]通过追踪大量粒子模拟了

Bass Strait 海域真实驱动力作用下的冲淡时间、存留时间和水体年龄的分布,结果表明该海域的物质运输时间尺度存在季节性变化,同时指出未来可研究水体生态系统中的各种物质的运输时间尺度,如溶解性气体、悬浮颗粒物等,可有助于分析其运输特征。拉格朗日粒子追踪法虽然简单直观,且能反映出粒子的运动轨迹,通过分区释放粒子也可以估算研究区域的运输时间尺度的空间分布特征,但要得到运输时间尺度更细致的时空分布特征无疑要释放大量的粒子,计算量很大;另外,尽管拉格朗日粒子追踪法能通过添加随机游走模块模拟扩散过程,但在涡黏系数存在很大的空间变化时,这种模拟方法不能够直观地表达扩散过程^[22]。同时,若考虑非定常流动时,需考虑不同初始释放时间对计算结果的影响。

2.3 对流扩散模型法

对流扩散模型法在数值模拟得到流场的基础上求解对流扩散方程,从而得到示踪物的浓度分布,再通过示踪物浓度计算海水或者其他物质的半交换时间、平均存留时间等。彭辉等^[10]利用三维潮流数学模型,以溶解态的保守性物质为示踪剂,建立对流扩散型的海湾水交换数值模型,通过计算示踪剂浓度,计算了象山港水体半交换时间和平均存留时间,指出对流扩散模型计算结果与箱式模型得到的结果差异较大,箱式模型可能会高估海水的交换能力。刘哲等^[11]在 Tarkeoka 提出的剩余函数概念的基础上,通过对流扩散模型得到了胶州湾水体平均存留时间的空间分布,并通过追踪粒子运动验证了对流扩散模型计算平均存留时间的正确性。Braunschweig 等^[23]利用高精度二维水动力数值模型耦合示踪物运输模型研究了地形对物质存留时间的影响;也有一些学者将研究区域分成多个子区域,在剩余函数和年龄概念定义的基础上,通过对流扩散示踪物浓度数值模型计算多个粒子的浓度分布,分区计算得到水体存留时间和年龄^[2,20,24]。

基于欧拉方法的对流扩散模型计算得到的运输时间尺度仍是整体的概念,虽然可以通过分区分别计算各个区域的运输时间,但是得不到运输时间的空间分布特征。

2.4 CART 理论

CART 理论是 Delhez 和 Deleersnijder 建立的一种基于欧拉方法的计算水体年龄和存留时间的基本理论。根据 Bolin 等^[3]对年龄的定义,不考虑源汇项,CART 理论中年龄的计算方法是首先求解物质浓度方程和年龄浓度的对流扩散方程,然后将空间各点的年龄浓度除以物质浓度值,得到物质在空间

各点的平均年龄^[25]。

CART 理论通过求解两个对流扩散方程,可以得到任意时间任意网格节点上的年龄值,即可以得到物质输运年龄的时空分布。由于同一位置释放的不同粒子移动路径不同,因此不同粒子从同一释放点到达同一位置所需的时间也不尽相同,即任意位置的粒子团包含了具有不同年龄的粒子,当不需要给出每个粒子的年龄时,可采用平均年龄来确定整个粒子团的年龄。CART 理论最关键之处在于引入平均年龄的假定^[25],即假定在空间某点的一组粒子的平均年龄是各个粒子年龄的质量加权平均数,表达成欧拉形式即为年龄浓度与物质浓度的比值,因此,CART 理论计算的年龄实际上为平均年龄。

CART 理论中存留时间的计算方法是通过引入伴随变量 $C^*(T, x)$, 假定伴随变量满足一定条件,利用污染物浓度方程,通过数学推导得到平均存留时间的控制方程,加上存留时间的边界条件,通过一次数值计算就可以得到存留时间的空间分布^[26],该方法也称为伴随方法。但伴随方法在时间上要进行逆向计算,即从后一时刻往前一时刻积分,计算中时间步长为负数,向后积分的物理意义在于 t 时刻 x 位置处释放的物质的存留时间取决于 $[t, T]$ 这一时间间隔内的动力作用,其中 T 为向后积分时的初始时刻,对应于数值模拟的最后时刻^[26]。该方法虽通过一次计算就可得到存留时间的时空分布,但存在一个缺点就是它需要逆向计算,这使得该方法较难实现^[27]。伴随方法需要使用预先计算好的流场数据,同时,进行逆向计算前,需对研究区域水体的传输时间尺度进行预估,以保证足够的计算时长,因而流场刻画精细程度需要在流场存储空间与计算精度之间作平衡,选择较为合适的时间步长及计算时长输出流场数据。

随后,Delhez^[28-29]在平均存留时间的理论基础上提出了暴露时间的计算方法,在边界处理上考虑物质的再返回过程,且暴露时间的计算域要比研究区域大(为了反映物质的再返回过程),从而得到物质在控制区域内存留的总时间,即暴露时间。

综上所述,从计算方法上看,物质输运时间尺度计算方法主要可以分为欧拉方法(如 CART 理论)和拉格朗日方法(如拉格朗日粒子追踪法)。拉格朗日法简单直观,不仅能得到各个粒子的输运时间,还能得到粒子的输运轨迹,但是若要得到输运时间的时空分布则需要大量的计算;欧拉法能较简便地得到输运时间的时空分布特征,但得到的是年龄和存留时间等的平均值。各方法均基于一定的假设,各有优缺点,在具体的运用过程中应根据研究需要、

水体特征、适用范围等具体条件加以选择。

3 CART 理论研究进展

CART 理论因其简单方便,且能反映输运时间的时空变化特征,被广泛应用于河口、海湾、湖泊以及海峡的物质输运研究中,如在分析水体或保守性物质输运时间的影响因素和分布特征等方面。Shen 等^[30]曾利用 CART 理论中的年龄计算方法研究了美国 York River 河口的水流输运年龄,发现在水平和垂直方向上,河口的年龄分布均与盐度的分布类似,且与径流流量有密切关系。Shen 等^[31]通过 CART 理论中年龄的计算方法,研究了 Chesapeake 海湾的溶解性物质的运输过程,得出径流、密度环流、风应力是影响该海湾物质输运的重要因素。de Brye 等^[32]曾利用 CART 理论研究了 Scheldt 河口的年龄、存留时间和暴露时间,表明潮汐和径流是影响水体年龄和平均存留时间的重要因素,存留时间和暴露时间受物质释放时刻影响,不同释放时刻引起的差异可达 75%,并指出河口的物质再返回控制区域的可能性较大,需要考虑物质的再返回过程。Kärnä 等^[33]模拟了 Columbia River 河口的水体年龄分布,指出水体年龄除受径流影响显著外,也受主通道两侧环流影响,两侧环流较弱,导致水流主通道两侧水体年龄较大。张琴等^[34]基于 CART 理论模拟了浙江台州湾海域不同流量条件下的淡水输运年龄,并探讨了岸线变化对淡水年龄的影响。Andutta 等^[27]运用对流扩散模型得到中潮河口的存留时间和暴露时间的分布特征和影响因素,并利用 CART 理论计算得到回复系数(暴露时间减去存留时间与存留时间的比值),指出 CART 理论能很好地计算出水体再返回的频率。蔡忠亚^[8]将该理论应用于研究渤海湾水体平均存留时间及其季节变化上,并分析了潮流、风、密度流对渤海湾水体平均存留时间的影响。这些研究均以淡水水体或溶解性物质为研究对象,假设物质只受水体对流扩散的影响,忽略其源汇项。对于其他物质,如非保守性物质、泥沙和易被泥沙吸附的污染物等物质的输运时间尺度缺乏研究。

从 CART 理论中年龄和存留时间的计算方程推导过程可以看出,如果在污染物浓度方程中加入源汇项,那么年龄和存留时间的计算方程也将发生改变,当源汇项满足一定条件时,可推导得到考虑源汇项后物质的输运时间计算方程。因此,CART 理论中年龄的计算方法在 2007 年首次被拓展应用于研究泥沙的输运年龄^[35]。Mercier 等^[35]基于 CART 理论中年龄的计算方法对比比利时浅海海域的三维悬沙输运时间进行了研究,定义了两种泥沙运输时间:一

是“再悬浮年龄”,指泥沙自床面掀起后在水中所经历的时间(不包括泥沙在床面所滞留的时间);二是“输运年龄”,指泥沙自进入控制区域到空间某点所需的时间(包括泥沙在床面所滞留的时间)。与以往水体年龄或保守性物质的输运年龄不同的是,该研究根据悬沙浓度方程(考虑泥沙的沉降和再悬浮过程,即源汇项),推导出悬浮泥沙的年龄浓度方程,进而分别计算了泥沙的“再悬浮年龄”和“输运年龄”,并得出在床面剪切力较弱的海域,悬沙因长期滞留在床面,导致“再悬浮年龄”较小,而“输运年龄”较大。随后,龚文平等^[36]将该研究中“输运年龄”的概念应用于美国 York River 河口,研究上游来沙的输运特征,指出保守性污染物的年龄主要受对流扩散的影响,而泥沙的“输运年龄”还与径流和泥沙的冲淤运动密切相关,随着泥沙沉速以及临界冲刷剪切应力的减小,泥沙的“输运年龄”也相应减小。Delhez 等^[37]指出,对于易被泥沙吸附的污染物,它们的输运过程需要考虑泥沙对其的吸附解吸作用,于是将年龄概念进一步拓展到考虑泥沙影响的污染物输运时间研究中;以一维河口为例,假设泥沙对污染物的吸附作用大小可用一个分配系数(反映悬移质泥沙的吸附能力)来反映,将泥沙对污染物的吸附解吸作用体现在污染物浓度方程的源汇项中,并根据该污染物浓度方程推导出考虑泥沙影响的污染物年龄浓度方程,进而计算出考虑泥沙影响的污染物年龄,并讨论了不同分配系数(悬移质泥沙的吸附能力大小)对年龄的影响,指出泥沙对污染物的吸附能力越强,年龄越大,但当吸附能力达到一定程度时,这种影响将不再增大。Delhez 等^[37]首次将污染物年龄和泥沙运动结合在一起,具有十分重要的意义,但研究局限于一维河道,且假定泥沙对污染物的吸附能力不随空间变化,存在一定的局限性。

到目前为止,CART 理论用于计算水体年龄和保守性物质的年龄已相对较成熟,对于非保守性物质、泥沙和易被泥沙吸附的污染物年龄的计算上还有较大的发展空间,缺乏非保守性物质、泥沙和易被泥沙吸附的污染物的存留时间、暴露时间的研究。能否将伴随方法与非保守性物质的降解过程、泥沙的沉降和再悬浮过程、易被泥沙吸附的污染物吸附解吸过程相结合^[38-39],计算这些物质的存留时间和暴露时间,是有待探讨的一个问题。

4 结 语

物质输运时间尺度是研究物质输运过程的有效手段之一,对生态环境研究具有重要意义。自 20 世纪 70 年代开始不同的物质输运时间尺度概念被提

出,概念众多,存在定义不严谨的情况。从各种输运时间尺度的定义可以看出,没有一种时间概念可以完整地刻画整个物质输运过程,也没有一种输运时间计算方法适用于所有的研究领域,必须根据研究需要、水体特征、适用范围等具体条件加以选择。

在计算方法上,基于欧拉法的 CART 理论计算年龄和存留时间简单实用,物理意义明确,在河口海岸水体及保守性物质研究中得到了广泛应用。目前,该理论运用于水体年龄或保守性物质年龄的计算研究已经较为成熟,但用于输运过程更为复杂的非保守性物质、泥沙和易被泥沙吸附的污染物年龄的计算上还有较大的发展空间;利用伴随方法虽然可通过一次计算得到存留时间、暴露时间的时空分布,但是也存在一定的缺陷,一方面它较难实现,另一方面该方法基于伴随方程的推导,在应用于计算考虑源汇项的物质存留时间和暴露时间时不具有普适性,需根据具体情况重新推导存留时间的计算方程。将非保守性物质、泥沙或易被泥沙吸附的污染物输运过程与 CART 理论相结合,研究其输运时间尺度,能更全面地掌握这些在水体中较为复杂的物质的输运机理,从而为环境保护及治理提供帮助。

参考文献:

[1] MONSEN N E, CLOERN J E, 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.

[2] 王鹏程. 大辽河口物质输运时间的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

[3] BOLIN B, RODHE H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs [J]. *Tellus*, 1973, 25(1): 58-62.

[4] PRANDLE D. A modelling study of the mixing of ¹³⁷Cs in the seas of the european continental shelf [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1984, 310(1513): 407-436.

[5] LUFF R, POHLMANN T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach [J]. *Ocean Dynamics*, 1995, 47(4): 287-299.

[6] ZIMMERMAN J T F. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea; part I distribution of salinity and calculation of mixing time scales[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1976, 10(2): 149-191.

[7] TAKEOKA H. Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1984, 3(4): 327-341.

- [8] 蔡忠亚. 渤海水体平均存留时间及其季节变化数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [9] ANDUTTA F P, RIDD P V, DELEERSNIJDER E, et al. Contaminant exchange rates in estuaries: new formulae accounting for advection and dispersion [J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 120 (2) : 139-153.
- [10] 彭辉, 姚炎明, 刘莲. 象山港水交换特性研究 [J]. *海洋学研究*, 2012, 30 (4) : 1-12. (PENG Hui, YAO Yanming, LIU Lian. Study on the features of water exchange in Xiangshangang Bay [J]. *Journal of Marine Science*, 2012, 30 (4) : 1-12. (in Chinese))
- [11] LIU Zhe, WEI Hao, LIU Guangshan, et al. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61 (1) : 25-35.
- [12] DYER K R, TAYLOR P A. A simple, segmented prism model of tidal mixing in well-mixed estuaries [J]. *Estuarine & Coastal Marine Science*, 1973, 1 (4) : 411-418.
- [13] FISCHER H B, LIST J E, KOH R C, et al. *Mixing in inland and coastal waters* [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [14] 高抒, 谢钦春. 狭长形海湾与外海水体交换的一个物理模型 [J]. *海洋通报*, 1991 (3) : 1-9. (GAO Shu, XIE Qinchun. Physical model for water exchange process in Xiangshan Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 1991 (3) : 1-9. (in Chinese))
- [15] 潘伟然. 湄洲湾海水交换率和半更换期的计算 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 1992, 31 (1) : 65-68. (PAN Weiran. Computation of the turn-over rate and the half exchange period of seawater in Meizhou Bay [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1992, 31 (1) : 65-68. (in Chinese))
- [16] 陈益明. 规划环评中海湾水环境容量的计算方法 [J]. *水资源保护*, 2014, 30 (3) : 70-75. (CHEN Yiming. A method for calculation of environmental capacity of bay water during planning environmental impact assessment [J]. *Water Resource Protection*, 2014, 30 (3) : 70-75. (in Chinese))
- [17] ANABELA O, BAPTISTA A M. Diagnostic modeling of residence times in estuaries [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33 (8) : 1935-1946.
- [18] BILGILI A, PROEHL J A, LYNCH D R, et al. Estuary/ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: a Lagrangian modeling study [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65 (4) : 607-624.
- [19] LIU Wencheng, CHEN Weibo, HSU M H. Using a three-dimensional particle-tracking model to estimate the residence time and age of water in a tidal estuary [J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37 (8) : 1148-1161.
- [20] SHEN Yongming, WANG Jinhua, ZHENG Binghui, et al. Modeling study of residence time and water age in Dahuofang Reservoir in China [J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2011, 54 (1) : 127-142.
- [21] SANDERY P A, KÄMPF J. Transport timescales for identifying seasonal variation in Bass Strait, South-Eastern Australia [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74 (4) : 684-696.
- [22] DELEERSNIJDER E, DELHEZ E J M. Timescale and tracer-based methods for understanding the results of complex marine models [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74 (4) : 5-7.
- [23] BRAUNSCHWEI G F, MARTINS F, CHAMBEL P, et al. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus estuary case [J]. *Ocean Dynamics*, 2003, 53 (3) : 137-145.
- [24] BRAUWERE A D, BRYE B D, BLAISE S, et al. Residence time, exposure time and connectivity in the Scheldt estuary [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 84 (3/4) : 85-95.
- [25] DELHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modeling [J]. *Ocean Modeling*, 1999, 99 (1) : 17-27.
- [26] DELHEZ R J M, HEEMINK A W, DELEERSNIJDER R. Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61 (4) : 691-702.
- [27] ANDUTTA F P, HELFER F, MIRANDA L B D, et al. An assessment of transport timescales and return coefficient in adjacent tropical estuaries [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 124 : 49-62.
- [28] DELHEZ E J M. Transient residence and exposure times [J]. *Ocean Science*, 2005, 2 (1) : 1-9.
- [29] DELHEZ E J M. On the concept of exposure time [J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 71 (6) : 27-36.
- [30] SHEN Jian, HAAS L. Calculating age and residence time in the tidal York River using three-dimensional model experiments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61 (3) : 449-461.
- [31] SHEN Jian, WANG H V. Determining the age of water and long-term transport timescale of the Chesapeake Bay [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74 (4) : 585-598.
- [32] DE BRYE B, DE BRAUWERE A, GOURGUE O, et al. Reprint of water renewal timescales in the Scheldt Estuary [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 128 (1) : 3-16.
- [33] KÄRNÄ T, BAPTISTA A M. Water age in the Columbia River Estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 183 : 249-259.
- [34] ZHANG Qin, TAO Jianfeng, YANG Jie. Numerical study

on the transport timescale in a river-influenced macro-tidal estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016 (Sup75): 193-197.

[35] MERCIER C, DELHEZ E J M. Diagnosis of the sediment transport in the Belgian Coastal Zone [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(4): 670-683.

[36] GONG Wenping, SHEN Jian. A model diagnostic study of age of river-borne sediment transport in the tidal York River estuary[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2010, 10(1/2): 177-196.

[37] DELHEZ E J M, WOLK F. Diagnosis of the transport of adsorbed material in the Scheldt estuary: a proof of concept [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 128: 17-26.

[38] 马俊超, 李琼芳, 陆国宾, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库不同蓄水阶段对其下游泥沙特性的影响分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 75-78. (MA Junchao, LI Qiongfang, LU Guobin, et al. Analysis of impacts of different impound phases of Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs on sediment regime in downstream [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 75-78. (in Chinese))

[39] 王鹏, 李琼琼, 蔡赟杰. 太湖沉积物再悬浮对双酚 A 吸附性能的影响[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 35-41. (WANG Peng, LI Qiongfong, CAI Yunjie. Effect of sediment resuspension on BPA adsorption in Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 35-41. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-14 编辑: 熊水斌)

(上接第 24 页)

[8] ROWLAND J C, LEPPER K, DIETRICH W E, et al. Tie channel sedimentation rates, oxbow formation age and channel migration rate from optically stimulated luminescence (OSL) analysis of floodplain deposits[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 39(9): 1161-1179.

[9] BABKA B, FUTÓ I, SZABÓ S. Clustering oxbow lakes in the Upper-Tisza Region on the basis of stable isotope measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 410(1/2): 105-113.

[10] GALBARCZYK-GASIOROWSKA L, GASIOROWSKI M, SZEROCZYŃSKA K. Reconstruction of human influence during the last two centuries on two small oxbow lakes near Warsaw (Poland) [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 208(1): 173-183.

[11] TOONEN W H J, KLEINHANS M G, COHEN K M. Sedimentary architecture of abandoned channel fills [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(4): 459-472.

[12] 赵资乐. 黄河上游黑河、白河流域水沙规律[J]. *甘肃水利水电技术*, 2005, 41(4): 336-338. (ZHAO Zile. Water and sediment regulation of Black River and White River basin in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2005, 41(4): 336-338. (in Chinese))

[13] 李志威, 王兆印, 李艳富, 等. 黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征[J]. *泥沙研究*, 2012(4): 11-17. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, LI Yanfu, et al. Planform geometry characteristics of typical meandering rivers in Yellow River Source [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(4): 11-17. (in Chinese))

[14] ISHII Y, HORI K. Formation and infilling of oxbow lakes in the Ishikari lowland, northern Japan [J]. *Quaternary International*, 2015, 397: 136-146.

[15] DIERAS P L, CONSTANTINE J A, HALES T C, et al. The role of oxbow lakes in the off-channel storage of bed material along the Ain River, France [J]. *Geomorphology*, 2013, 188: 110-119.

(收稿日期: 2016-12-07 编辑: 郑孝宇)

(上接第 80 页)

[11] 杨文俊, 朱红兵, 柏林, 等. 三峡工程大江截流平抛垫底砂砾石料漂移特性研究[J]. *长江科学院院报*, 1997, 14(4): 36-40. (YANG Wenjun, ZHU Hongbing, BO Lin, et al. Investigation on drift characteristics of sand gravel materials in forming closure gap's bedding course for TGP [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1997, 14(4): 36-40. (in Chinese))

[12] 韩海骞, 杨永楚, 王卫标, 等. 钱塘江河口闻家堰段护底抛石研究[J]. *泥沙研究*, 2002, 27(2): 29-35. (HAN Haiqian, YANG Yongchu, WANG Weibiao, et al. The research for protecting the riverbed of Wenjiayan on Qiantang River by rock riprap [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002, 27(2): 29-35. (in Chinese))

[13] 陈凯华, 石崇, 梁邦炎, 等. 水下抛石基床动态形成过程数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(31): 314-319. (CHEN Kaihua, SHI Chong, LIANG Bangyan, et al. Numerical simulation research of the falling process for the underwater riprap [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(31): 314-319. (in Chinese))

[14] 李小超, 常留红, 宋俊强, 等. 复杂水流条件下抛石漂移距离的试验研究[J]. *水运工程*, 2017(6): 1-8. (LI Xiaochao, CHANG Liuhong, SONG Junqiang, et al. Experimental study on drift distance of riprap on the condition of complex water flow [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2017(6): 1-8, (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-28 编辑: 郑孝宇)