

· 综述 ·

## 海水交换能力的研究进展

王宏<sup>1,2</sup>, 陈丕茂<sup>1</sup>, 贾晓平<sup>1</sup>, 章守宇<sup>2</sup>, 唐振朝<sup>1</sup>, 余景<sup>1</sup>, 陶峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 广东广州 510300;

2. 上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

**摘要:** 海水交换研究是海洋生态研究的新热点问题, 对海域环境质量的评价有重要作用, 并且对新兴的人工鱼礁区海洋生态变动机制的研究也有重要的意义。文章综述了国内外海水交换能力的研究进展, 系统地分析和评价了国内外海水交换的研究方法, 提出了海湾水交换以及人工鱼礁区水交换研究的发展趋势, 为以后的相关研究提供参考。

**关键词:** 海水交换; 研究方法; 数值模拟

**中图分类号:** P731.26

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-2227-(2008)02-0075-06

## Advance in the research on water exchange in the sea area

WANG Hong<sup>1,2</sup>, CHEN Peimao<sup>1</sup>, JIA Xiaoping<sup>1</sup>, ZHANG Shouyu<sup>2</sup>,

TANG Zhenzhao<sup>1</sup>, YU Jing<sup>1</sup>, TAO Feng<sup>1,2</sup>

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Lab. of

Fishery Ecology Environment, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, China;

2. College of Marine Science and Technology, Shanghai Fishery University, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** As an important topic of marine environment research, seawater exchange research is helpful to assessment of marine environmental quality and the research of marine ecological changing mechanism of artificial reefs area. In this paper, the advances in the research on seawater exchange ability were summarized. The water exchange models and methods were analyzed and compared, and the research hot spot and tendency of water exchange in the field of embayment and artificial reefs in the future were discussed.

**Key words:** seawater exchange; method study; numerical simulation

近岸海域水交换是海洋环境科学研究的一个基本命题, 研究海湾水交换能力是研究海湾的物理自净能力, 评价和预测海湾环境质量的重要指标和手段。污染物通过对流运输和稀释扩散等物理过程与周围水体混合, 与外海水交换, 浓度降低, 水质得到改善。了解海水交换的能力机制, 对于评价海域环境容量及环境质量具有重要作用。

近年来, 海域水交换能力问题已成为国内外学者研究的一个新热点, 专家们基于不同的水交换概念和不同的水动力模式已经开展了一系列的研究。文章介绍了国内外海湾水交换以及人工鱼礁区水交换的研究进展, 期望为海水水交换的研究, 特别是新兴的人工鱼礁区水交换的研究提供参考。

收稿日期: 2007-10-09; 修回日期: 2007-12-20

资助项目: 国家高新技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA100303); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2007ZD03; 2007TS10和2007TS22)

作者简介: 王宏(1984-), 女, 硕士研究生, 从事渔业资源研究。E-mail: redhong-1984@163.com

通讯作者: 陈丕茂, E-mail: cpmgd@yahoo.com.cn

## 1 海湾水交换研究方法的发展

早期人们通过现场实测数据计算海水的交换率,进而又使用箱式模型,用潮周期内水质变化预测海水交换率,或用平均水体更新时间衡量海湾水交换能力。近年来,国内外学者对一些海湾作了潮流和污染物扩散过程的数值模拟,主要的研究方法有实测指示物质浓度法、箱式模型、标识质点数值跟踪法、对流-扩散水交换模型和三维潮流场及物质输送模型等。海水交换研究的各种方法均得到了广泛应用,在海洋环境的保护利用中起到了重要作用。但是,由于不同海域的流场、地形差异,不同海域的水交换能力是不同的,而不同的研究方法也存在着一定的不足。

### 1.1 实测指示物质浓度的计算方法

早期国内外专家应用现场实测指示物质浓度资料对海湾水交换能力进行了大量的研究。(1) PARKER 等<sup>[1]</sup>定义的海水交换率  $rE$  是指涨潮时流入湾内的海水含第一次进入湾内的外海水的比率;(2) 与 PARKER 的定义类似,柏井<sup>[2]</sup>根据川村雅彦和清水浩辅<sup>[3]</sup>的工作,在整个潮周期上定义了一个海水平均交换率,定义海水交换率  $rF$  为落潮时流出水中含第一次流出湾外的湾内水的比率;(3) 如果不考虑径流、降水,只考虑潮汐和海浪作用下的水交换。水交换周期的计算方法为:设湾内海水总量为  $Q$ ,在一个潮周期内涨潮带入湾内的水量与落潮时流出的水量相同,即  $Q_0 = Q_B$ ,则经过  $n$  个潮周期后,湾内所剩的旧水量占湾内总水量的比例为  $a^n = a^{n-1} [1 - (Q_0 \cdot rE \cdot rF/Q)]$ ;(4) 中村武弘和富樫宏由<sup>[4]</sup>,提出湾内水对外海水的交换和外海水对湾内水的交换的概念,定义  $\beta$  为一个潮周期流入湾内的外海水与涨潮水的比,  $\gamma$  为一个潮周期流出的湾内水与落潮水之比;水交换率  $\beta$ 、 $\gamma$  分别反映了单位时间内外海水与涨潮水和湾内水与落潮水的比率。

DAVIES<sup>[5]</sup>和 BACKHAUS 等<sup>[6]</sup>,运用实测资料分别计算了北海的净化时间。曾刚<sup>[7]</sup>采用半日潮流比较分析法,计算厦门港的余流,并引入海水“半交换周期”概念来计算海水交换率。匡国瑞<sup>[8]</sup>运用中村武弘的水质预测公式,对芝罘西湾选用化学耗氧量(COD)作为指标物质,给出了芝罘西湾一个潮周期内的水交换率。木村晴保等<sup>[9]</sup>通过对日本高知县古田湾的研究,提出海水交换量的推算公式。TAKEOKA<sup>[10]</sup>对濠户内海海域水交换随季节的变化进行了深入研究。匡国瑞等<sup>[11]</sup>再次运用中村武弘的水质预测公式以高低潮盐度变化给出了乳山湾一个潮周期内的水交换率,对乳山东湾的海水交换及其环境容量进行了初步探讨。王寿景<sup>[12]</sup>根据“厦门港湾海洋环境综合调查”资料,选用盐度为指标物质浓度,通过计算嵩屿-鼓浪屿和厦门-鼓浪屿断面海水交换率,求得厦门西湾海水交换状况,并计算了由

潮流和潮余流引起的海水半交换期。韩舞鹰和马克美<sup>[13]</sup>根据实测资料探讨了大亚湾的混合交换特征。陈聚法和马绍赛<sup>[14]</sup>根据周日的流通量和盐通量算出湾内外涨落潮的指标物质的平均浓度,从而计算了海水的交换率。毕远博和刘海映<sup>[15]</sup>利用大潮汛期对小窑湾海水交换与环境预测进行的调查,运用 PARKER 和柏井诚定义的海水交换率和中村武弘等导出的水质预测式对小窑湾进行了调查分析。

应用 PARKER、柏井等所定义的海水交换率衡量海湾的海水交换能力得到了广泛的应用,但是经常会出现实测资料缺乏的问题,另外由于公式中对湾内扩散物质均匀程度的假设,使得 PARKER 和柏井等的统计方法更适用于面积小且混合能力强的海湾,对面积较大且混合能力弱的水湾运用此方法会出现一定的偏差。

### 1.2 基于物质守恒的箱式模型

箱式模型是以物质守恒为基础,把水量和物质量的连续方程式作为基本条件式;把海域分割成几个箱型,箱内水与湾外及外海水的交换率定义为  $K^{(n)} = 1 - \Delta C_{n+1} / \Delta C_n$  ( $\Delta C_n$  为  $n$  箱的浓度;  $\Delta C_{n+1}$  为与  $n$  箱相接的湾外浓度)。箱式模型定义了3种表示水体交换能力的时间:(1) 水流通过开边界进入箱内并充满整个箱体所需时间为净化时间(flushing time)<sup>[16]</sup>,其计算公式为  $T = V/F$ ,这里  $V$  为计算海域总体积,  $F$  为通过箱体开边界的总通量;(2) 物质存留时间(residence time)<sup>[16]</sup>,单位时间其它水体进入该海域的物质去除该海域水体体积,假定在单位时间内原有物质得以存留;(3) 水体更新时间(turn-over time)<sup>[17]</sup>,箱内物质质量减少到原有物质总量的37%所需的时间。

高抒和谢钦春<sup>[18]</sup>根据狭长海湾的特点及口门潮交换和纵向弥散交换机制,建立了狭长海湾多箱物理模型,研究了象山港的水交换机制。潘伟然<sup>[19]</sup>利用现场观测数据,采用单箱模型,二维数值模型分别计算了湄洲湾海水的平均交换率,平均半更换期和各区段海水的半更换期;胡建宇<sup>[20]</sup>利用单箱模型计算了罗源湾海水的交换率。以 KUO 和 NEILSON<sup>[21]</sup>的分区段潮交换模式(简称 K-N 模式)为基础,陈伟和苏纪兰<sup>[22]</sup>引进了“内湾各相邻区段间水体混合交换同时发生”的假定,将其应用于象山港海湾水的更新周期估算。董礼先和苏纪兰<sup>[23-25]</sup>分别以不同的模型对象山港不同区域的水交换进行了研究。叶海桃等<sup>[26]</sup>将三沙湾作为一个单箱模型,假设三沙湾内海水与外海海水进行直接交换,湾内海水均匀混合,计算出三沙湾海水平均交换率和半更换期。

基于箱式模型的水交换定义得到广泛应用,该模型可以用于讨论海水交换的平均状况和较大物质移动及扩散的情况。但是,单箱模型前提是假设湾外的海水一旦流入湾内即与整个海湾内海水充分混合,如果考虑到不同区域海湾口的距离、流况、水深及形态的差异,则各个区域海水

的半更换周期会有所不同,所以单箱模型对反映水交换能力的空间分布有一定的局限性。多箱模型的应用也有一定的适用范围,该模型假设箱内水质是均匀的,但实际海域水质具有不均匀性。进入箱内的水体不能立即与原有水体完全混合,造成局部海域交换不充分,海域内的水交换不均匀,因此,应用箱式模型估算海域的水交换能力可能会偏高。

### 1.3 标识质点的拉格朗日数值跟踪方法

运用质点跟踪的方法标示出海域内外的水质点,统计通过某界面流出海域的质点数,采用这种方法计算水体交换率,一旦标志质点穿越设定的界线,则认为水体已经发生了交换。此方法定义:(1)当海域内含原有质点数达到稳态时(或为原有质点数的37%时),纪录为水体更新时间,流出海域的质点数与初始质点数之比为该海域水交换率。(2)标识质点到达湾外,即为与洁净水进行过交换更新,记录下各个质点第一次到达湾外的时间,即为湾内水的存留时间。(3)湾内质点数变化小于2%时为交换达到稳态时间,此时湾外质点数与原来各区域初始标识质点数之比为区域交换率。

孙英兰等<sup>[27]</sup>通过拉格朗日余流分布,标识质点跟踪,对胶州湾水交换活跃程度进行区域划分,将其分为湾顶滞留区,黄岛附近活跃区和湾口良好区,定性分析了胶州湾的水交换能力。SIGNELL和BUTMAN<sup>[28]</sup>以非均匀性的质点追踪法对波士顿港港区与马萨诸塞湾的潮交换与弥散进行了模型研究。赵亮等<sup>[29]</sup>运用拉格朗日质点追踪的方法对胶州湾水交换情况进行了模拟。

质点追踪模型能够刻画出海域内水交换的不均匀性,而且可以描述质点的去向和来源,但是拉格朗日质点追踪只考虑了由水体流动引起的对流输送作用,动力因子的垂向结构对水体混合弥散作用反映不足,无法刻画出垂直结构的差异,对混合扩散作用的效应则无法有效表达。

### 1.4 对流-扩散型的水交换模式

以溶解态的保守性物质作为湾内水的示踪剂,建立了对流-扩散型的海湾水交换数值模型。在建立二维潮流以及浓度对流-扩散数值模型以后,给定的湾内示踪剂的初始浓度假定为 $C_{(t_0)}$ 。湾内水在不同时刻被外海水置换的比率 $R_{(x,y,t)} = (C_{(t_0)} - C_{(t)})/C_{(t_0)}$ ,相应余留在原位置未置换的水体比率为 $L_{(x,y,t)} = 1 - R_{(x,y,t)} = C_{(t)}/C_{(t_0)}$ ,其假设条件是,数学模型中水边界入流时给定这种物质在开边界的浓度为等。

胡建宇和傅子琅<sup>[30]</sup>利用二维对流-扩散方程计算罗源湾海水的交换率和海水半交换期。LUFF和POHLMANN<sup>[31]</sup>引入了半交换时间的概念(half-life time),类似于放射性同位素的半衰期,定义为某海域保守物质浓度通过对流扩散稀释为初始浓度一半所需的时间。董礼先和苏纪兰<sup>[32]</sup>以溶

解态的保守物质作为湾内水的示踪剂,运用对流-扩散型的海湾水交换数值模型,准确地模拟了海湾内、外的水交换过程。刘云旭等<sup>[33]</sup>引用Euler-Lagrange余流模型及二维平流-扩散方程,模拟海湾水质点运移轨迹及污染物浓度场的时空分布,综合分析了大亚湾海域的水交换能力的时空差异性。赵俊和陈聚法<sup>[34]</sup>用二维单层流体力学数值模式和隐式方向交替(ADI)法进行计算,对该海域的潮流系统进行了数值模拟,并计算了海水交换率与交换期。许苏清等<sup>[35]</sup>利用此模式计算浔江湾海水交换时间,并且分析了湾内水交换时空分布的特点。何磊<sup>[36]</sup>通过建立二维水深积分的水动力学模型和二维对流扩散模型,对理想和实际的渤海湾水交换进行了数值模拟。通过对渤海湾的数值模拟,得到了海水半交换周期的空间分布特征。姜海峰等<sup>[37]</sup>同样以溶解态的保守物质为湾内的示踪剂,建立对流-扩散型的海湾水交换数值模型,通过模拟对流-扩散过程来研究对象山港的水体交换情况。刘新成等<sup>[38]</sup>利用无结构三角形网格建立了长江口和杭州湾平面二维有限元潮流数学模型,在模拟了长江口和杭州湾潮流场的基础上计算了欧拉余流场,对长江口和杭州湾的水体交换的范围进行了定量计算和讨论。

海湾水交换问题的本质是湾内水体在潮流场中的对流-扩散问题,因此,对流-扩散型的数值模型在物理上与海湾水交换问题更加一致。但是模型是通过参数化的方法将垂向结构因子的水平扩散作用包纳在水平二维模型中,模型中存在的空间网距、时间步长、扩散项以及扩散系数等参数对模拟的结果影响较大。对流-扩散型的水交换模式采用的是固定边界处理,若考虑潮滩的水交换情况则模拟结果可能与实际海湾有一定的偏差。

### 1.5 三维潮流场及物质输运模型

研究水体交换能力的三维水动力模型主要有河口海岸海洋模型(ECOM)和海洋环境与泥沙模型(ECOMSED)。ECOM(BLUMBERG<sup>[39]</sup>)模式是20世纪80年代中期,在普林斯顿海洋模型(POM)(BLUMBERG和MELLOR<sup>[40]</sup>)的基础上逐渐发展起来的,适于河流、海湾、河口、近海、水库和湖泊等浅水环境计算的三维水动力学模式。模型从原始三维方程出发,以自由水位、3方向速度分量、温度、盐度、密度以及代表湍流的2个特征量的湍动能和湍宏观尺度(turbulence macroscale)作为预报变量。模型嵌套了一个二阶湍流封闭模型,提供垂向混合系数;垂向采用6坐标系统;水平方向采用曲线正交网格;并应用了完整的热力学方程。

张越美和孙英兰<sup>[41]</sup>基于固定边界的ECOM模型,运用引入干湿网格法变动边界处理技术(LEENDERSE<sup>[42]</sup>、FLATHER和HEAPS<sup>[43]</sup>)模拟了渤海湾潮滩沿岸潮流场;模拟结果表明,潮滩沿岸余流明显比湾中部强,进而初步

分析了潮流场与水体交换的关系。赵亮等<sup>[29]</sup>基于 ECOM 水动力模型,对胶州湾潮波系统及其驱动下的标识质点运移规律进行数值模拟。将胶州湾划分为 6 个区域,定量研究了整个海湾水的存留时间和不同区域水的交换能力,并指出流场结构对湾内水交换起了决定性作用。孙英兰和张越美<sup>[44]</sup>通过建立丁字湾三维变动边界的对流-扩散模式、污染物输运模式计算了该湾 COD 浓度分布,较为精确地计算出丁字湾内水交换率和水交换半更替期的空间分布;QI 等<sup>[45]</sup>在一定控制区域释放可溶性的保守物质,运用 ECOM 水动力模式探讨了扬子江口水的交换能力及冲刷时间。

ECOMSED 模型基于 POM 模型 (BLUMBERG 和 MEL-LOR<sup>[40]</sup>) 及 ECOM 模型 (BLUMBERG<sup>[39]</sup>) 的发展,不断增强扩大,增加内容包括广义开边界条件和示踪剂,通过专门为底部边界层物理机制编写的子模块来优化底部剪切应力的计算,水面波模块,非粘性泥沙输移以及溶解态和颗粒态示踪剂的轨迹跟踪。该模型的设计可用于尽可能真实地模拟各个物理量在海洋及淡水中的分布,包括水位、流速、温度、盐度、示踪剂、粘性及非粘性泥沙和波浪。

杜伊等<sup>[46]</sup>利用 ECOMSED 模式中的质点追踪模块,详细地分析不同情况下罗源湾的水交换能力,结果表明,水交换能力的强弱与纳潮量的大小成正比,不同海区湾水逗留期的差异主要是由欧拉余流场的结构差异造成的,不同的风场也会影响水交换能力,为罗源湾水交换研究和环境保护提供了依据。

实际的海水流动为三维流动,海水的上层流动和下层流动会有很大差异甚至截然相反,对水交换产生直接的影响。三维水动力模型能够较好的反映海水交换的特点,因此运用三维变动边界的潮流场及物质输运模型可以对沿岸潮流宽阔海湾的潮流场及水交换情况进行更加准确的研究。

## 2 海湾水交换研究的发展趋势

数值模拟的方法无需建立统计模型就可以利用理论方程和近似计算法得出宏观量(如温度、风速等);在数值模拟中,任何形式的相互作用都可以应用,并且可以避免理论推导中的近似假设。但数值模拟不能描述某些微观结构(如局部紊动结构等),同时受到某些参数的选定和网格的大小、模型方法等影响。因此,在选择模拟方法时常需要根据研究目的、要求、经费等方面综合考虑。

水交换与海湾污染自净和环境容量密切相关,但污染自净还将受到化学和生物过程的影响,特别是悬浮颗粒物对污染物的吸附作用和沉积物再悬浮造成的二次污染及潮流滩动力学过程,都对污染物在水中的存留时间有很大影响,今后应基于一个非保守物质的输运过程来探讨各海域水交换能力。

## 3 人工鱼礁区水交换的研究进展

人工鱼礁是人为设置在海中的构造物,礁区可为鱼类等水生生物的栖息、生长、繁育提供安全场所,营造适宜的生长环境,建设人工鱼礁渔场,能有效地改善和修复海洋生态环境、增殖和养护渔业资源、提高水产品的质量。

对人工鱼礁水交换的相关研究始于 20 世纪 70 年代初期的日本<sup>[48]</sup>。人工鱼礁产生的上升流、背涡流,以及由此引起的促进上下层海水交换、加快营养物质循环、提高海域新生产力水平、改善海域生态环境乃至养护渔业资源等等,对海水养殖业都具有极为重要的意义。国内外学者通过水槽试验,测定不同人工鱼礁效果及铺设方式所产生上升流、背涡流的强度和影响范围<sup>[49-56]</sup>,而人工鱼礁铺设产生的环境效益的试验研究也在不断展开<sup>[57-61]</sup>。FUJIHARA 等<sup>[62]</sup>首次运用数值计算法对设置鱼礁后的定常层流水域的流场变化进行研究,得到了鱼礁流场的上升流范围及分布特点。野添学等<sup>[63]</sup>应用移流项 CIP (cubic-interpolated propagation) 法、差分法研究了垂直障碍物对营养盐分布变化的影响。

上述的这些研究主要涉及人工鱼礁区的流场特点,鱼礁投放而产生的上升流和背涡流规模大小和湍流强度,但涉及的水交换问题只是停留在垂向上的研究,没有形成人工鱼礁区大范围水平尺度的研究。

与国外相比,国内对人工鱼礁水交换能力方面的研究,尤其是定量研究较少。虞聪达<sup>[64]</sup>采用数值研究的方法,以人工船礁水动力学特征及优化组合方式为主要研究内容,探讨了人工船礁的不同组合及其规模大小对于形成上升流与背涡流的效果、促进海水的上下混合与交换的影响。潘灵芝等<sup>[65]</sup>运用数值计算方法定量探讨了铅直二维定常流中人工鱼礁单体规模与产生的上升流、背涡流规模之间的关系。

我国对人工鱼礁的研究仍处于起步阶段,人工鱼礁建设后礁区海洋生态的变动机制至今不是很明了。海水交换能力的研究对礁区海域环境质量的评价有重要作用,对人工鱼礁区海洋的生态变动机制的研究有重要的意义。

## 4 人工鱼礁区水交换研究的发展趋势

人工鱼礁作为一个特定的海洋生态系统,在其自身的循环、运转以及与周围海域的物质交换过程中,具有一定的自净能力,海水交换能力越大,海水的物理净化能力越强。研究人工鱼礁海域的水交换机制,对于研究人工鱼礁生态系统的变动机制有重要作用。但我国专门针对人工鱼礁海域水交换机制的研究还未见过报道。

对人工鱼礁区水交换的研究今后应基于成熟的水动力

模型 ECOM、ECOMSED 和计算流体力学 (CFD) 数值计算软件 Fluent 等模型, 对潮流系统驱动下的礁区海域的潮流场进行数值模拟, 定量研究人工鱼礁区海水的存留时间和水体的交换能力, 流态变化引起的水体交换能力的变化, 流场效应带来的底质粒径变化、营养盐的变化以及营养盐的变动对礁区浮游生物、底栖生物、底泥生物以及游泳生物的影响。人工鱼礁区水交换的定量研究将为我国综合性、系统性的评价人工鱼礁的各方面效益提供理论依据, 为我国人工鱼礁的建设效果和礁区生态系统的功能提供科学依据, 用来指导我国当前人工鱼礁的建设。

#### 参考文献:

- [1] PARKER D S, NORRIS D P, NELSON A W. Tidal exchange at Golden Gate [J]. Proc of ASCE, 1972, 98 (2): 305-323.
- [2] 柏井诚. 海水交换概念と海水交換率 [J]. J Oceanogr Soc Jap, 1984, 40 (2): 135-147.
- [3] 川村雅彦, 清水浩輔. 明石海峡を通じての海水交換 [J]. 海と空, 1981, 57 (1): 41-47.
- [4] 中村武弘, 富樫宏由. 海水交換率による大村湾の水质汚染予測に関する研究 [G]. 第27回海岸工学講演会論文集, 1980.
- [5] DAVIES A. Meteorologically induced circulation on the North West European continental shelf from a three dimensional numerical model [J]. Oceanologica Acta, 1982, 53 (2): 269-280.
- [6] BACKHAUS J. Estimates of the variability of low frequency currents and flushing times of the North Sea [J]. ICES Hydrography Committee C M, 1984: 24.
- [7] 曾刚. 厦门湾海水交换的初步计算 [J]. 海洋通报, 1984, 3 (5): 7-11.
- [8] 匡国瑞. 烟台芝罘西湾水质污染预测的初步探讨 [J]. 海洋环境科学, 1984, 3 (4): 16-25.
- [9] 木村晴保, 宗景志浩, 渡边久芳. 講座ボックスモデル (II) 高知県古満目湾への適用 [J]. 水産土木, 1986, 22 (2): 63-73.
- [10] TAKEOKA H. Water exchange in a time varying transport field [J]. J Oceanogr Soc Jap, 1987, 43 (5): 21-27.
- [11] 匡国瑞, 杨殿荣, 喻祖祥, 等. 海湾水交换的研究——乳山东湾环境容量初步探讨 [J]. 海洋环境科学, 1987, 6 (1): 13-23.
- [12] 王寿景. 厦门西港海水交换计算 [J]. 台湾海峡, 1990, 9 (2): 108-111.
- [13] 韩舞鹰, 马克美. 大亚湾海水混合交换特征 [J]. 海洋科学, 1991, 12 (2): 64-67.
- [14] 陈秉法, 马绍赛. 丁字湾海水交换规律研究 [J]. 海洋水产研究, 1996, 17 (1): 49-56.
- [15] 毕远博, 刘海映. 小窑湾海水交换与环境预测的初步研究 [J]. 海洋环境科学, 2000, 19 (3): 40-43.
- [16] BOLIN B, ROHDE H. A note on the concepts of age distribution and transmit time in natural reservoirs [J]. Tellus, 1973, 25 (2): 58-62.
- [17] PRANDLE D. A modelling study of the mixing of 137C s in the seas of the European Continental Shelf [M]. London: Phil Trans Royal Soc, 1984: 407-436.
- [18] 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, 10 (3): 1-9.
- [19] 潘伟然. 湄洲湾海水交换率和半更替期的计算 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1992, 31 (1): 65-68.
- [20] 胡建宇. 罗源湾海水与外海水的交换研究 [J]. 海洋环境科学, 1998, 17 (3): 51-54.
- [21] KUO A Y, NEILSON B J. A modified tidal prism model for water quality in small coastal embayments [J]. Wat Sci Tech, 1988, 20 (2): 133-142.
- [22] 陈伟, 苏纪兰. 狭窄海湾潮交换的分段模式在象山港的应用 [J]. 海洋环境科学, 1999, 18 (3): 7-10.
- [23] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 II. 模型的应用和水交换研究 [J]. 海洋与湖沼, 1999, 30 (5): 465-470.
- [24] 董礼先, 苏纪兰. 象山港盐度分布和水体混合 I. 盐度分布和环流结构 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31 (3): 322-326.
- [25] 董礼先, 苏纪兰. 象山港盐度分布和水体混合 II. 混合分析 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31 (3): 322-326.
- [26] 叶海桃, 王义刚, 曹兵. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换 [J]. 河海大学学报, 2007, 35 (1): 96-98.
- [27] 孙英兰, 陈时俊, 俞光耀. 海湾物理自净能力分析和水质预测——胶州湾 [J]. 山东海洋学院学报, 1988, 18 (2): 60-65.
- [28] SIGNELL R P, BUTMAN B. Modeling tidal exchange and dispersion in Boston Harbor [J]. J Geophys Res, 1992, 97 (10): 15 591-15 606.
- [29] 赵亮, 魏皓, 赵建中. 胶州湾水交换的数值研究 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33 (1): 23-29.
- [30] 胡建宇, 傅子琅. 罗源湾潮流及海水半更替期的数值研究 [J]. 厦门大学学报, 1989, 28 (S1): 34-39.
- [31] 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, 1996, 47 (4): 287-299.
- [32] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 I. 对流-扩散型的水交换模式 [J]. 海洋与湖沼, 1999, 130 (4): 410-415.
- [33] 刘云旭, 温伟英, 王文介. 大亚湾海域物理自净能力的时空差异性研究 [J]. 热带海洋, 1999, 18 (4): 61-68.
- [34] 赵俊, 陈秉法. 鳌山湾水动力状况研究 [J]. 海洋水产研究, 2001, 22 (3): 59-63.
- [35] 许苏清, 潘伟然, 张国荣, 等. 浔江湾海水交换时间的计算 [J]. 厦门大学学报, 2003, 42 (5): 629-632.
- [36] 何磊. 海湾水交换数值模拟方法研究 [D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2004.

- [37] 娄海峰, 黄世昌, 谢亚力. 象山港内水体交换数值研究 [J]. 浙江水利科技, 2005, 140 (4): 8-12.
- [38] 刘新成, 卢永金, 潘丽红, 等. 长江口和杭州湾潮流数值模拟及水体交换的定量研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21 (2): 171-180.
- [39] BLUMBERG A F. An estuarine and coastal ocean version of POM [C]. Proceedings of the Princeton Ocean Model Users Meeting (POM96), Princeton, NJ, 1996.
- [40] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model; three-dimensional coastal ocean models [M] // HEAPS N S. Washington, D. C. American Geophysical Union, 1987: 1-16.
- [41] 张越美, 孙英兰. 渤海湾三维变动边界潮流数值模拟 [J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32 (3): 337-344.
- [42] LEENDERTSE J J. A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas [G] // Computation Procedures. New York: The Rand Corporation, 1971: 31-35.
- [43] FLATHER R A, HEAPS N S. Tidal computation for Morecambe Bay [J]. Geophys J R Astron Soc, 1975, 42 (1): 489-517.
- [44] 孙英兰, 张越美. 丁字湾物质运输及水交换能力研究 [J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33 (1): 1-6.
- [45] QI Dingman, SHEN Huanting, ZHU Jianrong. Flushing time of the Yangtze estuary by discharge: a model study [J]. 水动力学研究与进展: 英文版, 2003, 15 (3): 63-71.
- [46] 杜伊, 周良明, 郭佩芳, 等. 罗源湾海水交换三维数值模拟 [J]. 海洋湖沼通报, 2007, 7 (1): 7-13.
- [47] 何磊. 海湾水交换数值模拟方法研究 [D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2004.
- [48] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果 [J]. 大连水产学院学报, 2002, 17 (1): 64-69.
- [49] 黑木敏郎, 佐藤修, 尾崎晃. 鱼礁构造的物理学的研究 I [R] // 北海道水产部研究报告书, 1964: 1-19.
- [50] 中村充. 流环境から見る人工礁漁場 [J]. 水産土木, 1979, 15 (2): 5-12.
- [51] 佐久田博司, 佐久田昌昭, 渡边浩一郎, 等. 人工沉设鱼礁模型に門关する基础研究 [J]. 水産土木, 1981, 18 (1): 7-19.
- [52] 影山芳郎, 大阪英雄, 山田英已, 等. 水槽实验による多孔立方体鱼礁モデル周りの可視化 [J]. 水産土木, 1980, 17 (1): 1-10.
- [53] 大島泰雄. 鱼礁の水理构造人工鱼礁的理论和实际 (I) 基础篇 [G]. 日本水产保护协会, 1976: 71-84.
- [54] 王成海. 人工礁部材の流特性にする基础的研究 [D]. 东京: 东京水产大学, 1989.
- [55] CHANG K S, CHEN C P, HSOEN H L, et al. An experiment on the evaluation of artificial reefs with invertebrate community [J]. Bull Inst Zool Academia Sinica, 1977, 16 (1): 37-48.
- [56] LIU C C. Liner regression analysis on the oceanographic and fishing condition for set net fishery [J]. J Fish Soc Taiwan, 1986, 13 (2): 32-42.
- [57] 中村充. 人工鱼礁的设计、施工技术、造成适地判定 [M]. 东京: 恒星社厚生阁, 1984, 51: 46-52.
- [58] FAST D E, PAGEN F A. Comparative observation of an artificial-reef and natural patch reefs off southwestern Puerto Rico [C] // COLUNGA L, STONE R. Proceedings: artificial reef conference. Texas: A & M Univ, 1974: 49-50.
- [59] KIMURA H. A study on local scour of cylindrical artificial fish reef [J]. Fish Engin, 1994, 31 (1): 6-12.
- [60] KIMURA H. Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments [J]. Fish Engin, 1995, 32 (2): 14-18.
- [61] NAKAMURA M. Hydraulic structure of reefs [M] // VIK S F. Japanese artificial reef technology. Aquabio Inc: FLA Tech Rep, 1982: 165-179.
- [62] FUJIHARA M, KAUACHI T, OHASHI G. Physical-biological coupled modeling for artificially generated upwelling [J]. Mar Biol, 1997, 189 (1): 69-79.
- [63] 野添学, 大桥行三, 藤原正幸. 鉛直2次元定常流場に設置された衡立型构造物による植物プランクトンと营养盐的变化予測に関する数值实验 [J]. Fish Engin, 2000, 36 (3): 253-259.
- [64] 虞聪达. 舟山渔场人工鱼礁投放海域生态环境前期评估 [J]. 水产学报, 2004, 28 (3): 316-322.
- [65] 潘灵芝, 林军, 章守宇. 鉛直二维定常流中人工鱼礁流场效应的数值实验 [J]. 上海水产大学学报, 2005, 14 (4): 406-412.