

河口咸潮入侵研究进展

Research development in estuarine saltwater intrusion

黄洪城¹, 匡翠萍¹, 顾杰², 陈维¹, 冒小丹¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

中图分类号: TV148 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)09-0109-07

doi: 10.11759/hyxx20130130002

河口地区是海洋与河流的交汇地带, 拥有丰富的海洋资源, 交通便利, 是人类生活、生产、贸易活动频繁的场所。沿海及河口地区居住着全球三分之二的人口, 孕育了城市, 且其中很多发展成为重要的经济、贸易、文化中心^[1]。然而, 长期以来, 河口地区饱受咸潮灾害侵袭, 包括荷兰、德国、意大利、美国、中国在内的很多国家, 每年均因河口地区咸潮入侵遭受巨大损失^[2]。近年来, 人类对河口地区的改造、全球气候变化引起的河流径流改变, 特别是全球海平面的不断上升, 都对河口地区的咸潮灾害造成了一定的影响, 不少河口地区的咸潮灾害有频率增大、灾害加重的趋势。因此, 咸潮入侵作为河口水环境中普遍存在的问题, 受到越来越多的关注, 不少学者都在进行咸潮入侵的研究。

20 世纪 30 年代, 美国的水道试验站(WES)和荷兰 Delft 水工实验所就在咸潮研究上做了很多基础工作, 而对河口或三角洲地区的咸潮研究则始于 20 世纪 50 年代左右, 美国潮汐力学委员会在 1954 年对哥伦比亚河口的咸潮及其现象首先进行调查分析。国内对河口咸潮的研究起步较晚, 始于 20 世纪 60 年代, 到 20 世纪 80 年代才有较为系统的研究, 且研究区域集中在长江口、珠江口等区域^[3]。

本文归纳总结了河口咸潮入侵的研究方法、影响因素及其危害的分析研究, 阐述了与咸潮入侵相关的河口基本现象和过程。河口咸潮入侵的数学模型经过 30 多年的发展, 从最初的一维模型到后来的二维模型, 直至今天的三维模型, 不断地丰富进步。最后, 在总结目前研究的基础上, 展望了河口咸潮入侵未来的研究方向。

1 河口咸潮入侵的研究方法

咸潮入侵研究的方法主要有 3 种, 分别是现场

观测分析、物理模型试验和数学模型模拟。

1.1 现场观测分析

现场观测分析是研究咸潮入侵的基本方法, 该方法主要是通过实地观测获得大量盐度数据, 进行统计分析, 得到一些咸潮入侵的时空变化规律, 并且可以分析径流、潮汐等因素对咸潮入侵的影响。现场观测的数据同时可应用于物理模型和数值模拟的验证。

现场观测虽然能够获得大量实测资料, 但其研究成果易受观测资料的时间跨度、观测站点布置、观测指标个数等影响, 而且现场观测还受测量准确性等人为因素和天气等自然因素的影响。

1.2 物理模型试验

物理模型试验主要是通过建立研究区域的物理模型, 设计不同的河口水文情况、工况来研究河口咸潮入侵, 分析盐度的扩散机理及其与河口水环境、泥沙输运等的关系。

然而, 该方法作为一个模型试验方法, 对于地形地貌复杂的大河口以及具体的工程, 往往需要进行模型概化, 导致物理模型与实际河口地形地貌存在一定偏差。同时, 物理模型研究咸潮入侵过程中的咸水处理工艺、咸水混合、咸界控制等也存在一定困难, 且盐水是一种强电解质, 易对试验仪器造成腐蚀, 增加了咸潮入侵物理模型试验的成本。

收稿日期: 2013-01-30; 修回日期: 2013-05-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB957704); 上海教委重点学科建设项目(J50702)

作者简介: 黄洪城(1989-), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸数值模拟方面研究, E-mail: 721hhc@tongji.edu.cn; 顾杰, 通信作者, E-mail: jgu@shou.edu.cn

1.3 数学模型模拟

数学模型模拟方法是目前研究咸潮入侵最为普遍的方法,该方法从盐度守恒方程出发,结合水动力的变化,分析不同水文条件下的咸潮入侵情况。咸潮入侵的数值模拟方法包括一维、二维和三维的数值模拟,其中二维咸潮入侵数值模拟又可以分为平面二维数值模拟和垂向二维数值模拟^[1, 4-5]。

利用数值模拟方法研究河口咸潮入侵,可以直观地展现出河口盐度的时空变化过程,揭示水文条件变化后河口系统的响应;采用单因子敏感性试验,能够清楚地了解不同动力因子对河口咸潮入侵的影响;而分析数学模型的计算结果,可以进一步研究河口咸潮入侵的机制^[6]。

数值模拟研究河口咸潮入侵能够很好地弥补现场观测易受观测站点布置、测量精度、天气影响及物理模型的高投入等不足,这也是其成为目前主流研究方法的主要原因。

2 河口咸潮入侵相关的物理现象和过程

20世纪50年代开始,以Pritchard^[7-9]、Ippen^[10]、Simmons^[11]、Dyer^[12]、Officer^[13]等为代表,对与咸潮入侵相关的基本河口现象和过程,主要包括:咸潮入侵长度、河口的混合过程、河口咸淡水混合类型、河口密度环流、河口环流与最大浑浊带的关系等,进行了富有开创性和奠基性的研究探索。Simmons^[11]将一个潮周期内流入河口的径流量与潮流量之比定义为混合模数 M ,来判别咸淡水混合的类型。Hansen等^[14]根据实测盐度和流速,将河口分为4大类:充分混合型(余流单一向海)、部分分层型(底部余流出现向陆)、盐水楔类型(具有明显的重力环流结构)、高度分层但无明显重力环流结构型。Wolanski等^[15]通过二维数学模型证明Fly河口最大浑浊带的形成与潮泵作用、床面侵蚀和沉积过程、密度流、沉降速度等因素有关。

国内对河口咸潮入侵的相关现象、过程研究主要集中在长江口、珠江口等大河口。茅志昌等^[16-17]依据实测资料,对长江口咸潮入侵锋及潮汐分汊河口入侵类型等进行了探讨。张重乐等^[18]利用实测资料讨论了咸淡水混合及潮差、高潮位的关系。沈焕庭等^[19]在对长江口咸潮入侵进行大量研究的基础上,编著了《长江河口盐水入侵》,对长江口咸淡水混合

类型、咸潮入侵的来源以及盐度的时空变化规律等作了全面、深入的探讨。周济福等^[20]建立准二维盐度数学模型来研究长江口混合过程,得到盐度分布、盐度锋强度随径流和潮差定量变化的规律。朱建荣等^[21]研究了河口最大浑浊带形成的动力机制。应秩甫等^[22]研究珠江口伶仃洋的咸淡水混合时发现,伶仃洋横向存在东咸西淡的盐度梯度,盐度为5的等盐度线可侵入珠江口各口门。Mao等^[23]基于1998年实测资料发现伶仃洋东槽有明显的密度环流。Dong等^[24]研究分析了1999~2000年实测资料,发现伶仃洋东部存在明显的重力环流,枯季则一致向海。

3 河口咸潮入侵的影响因素

河口地区是河流与海洋的过渡地带,受到二者的双重作用,而入侵河口的咸潮又主要来源于海洋咸水,因此,径流与潮汐是河口咸潮入侵的两大主要影响因素。近年来,全球海平面不断上升,海平面上升对河口咸潮入侵的影响逐渐变大。此外,河口区域历来是人类的聚居地,经济发达,愈来愈频繁的人类活动对其产生的影响不断加大。风也是影响河口咸潮入侵的重要因素。

3.1 径流

径流是影响河口咸潮入侵的一个重要因素,它主要通过径流量的大小、径流的季节变化和径流量变化幅度大小等影响河口的咸潮入侵^[19]。朱建荣等^[25]、胡松等^[26]利用ECOM模式研究了径流对河口咸潮入侵的影响,发现径流量增大后,口门内咸潮入侵减弱,口外盐度减小,冲淡水扩展范围增大。可见,径流直接影响河口的咸潮入侵,但因为径流与海水的混合需要一定时间,使得径流量变化和盐度变化通常不同步,存在一定的时间滞后,例如,肖成猷等^[27]在分析径流对长江口咸潮入侵影响时发现,长江口咸潮入侵存在明显的季节变化,径流量变化与盐度变化的时间滞后在小径流量情况下更加明显。

3.2 潮汐和潮流

潮汐和潮流分别是天体引潮力引起的海面垂直方向的涨落和海水水平方向的流动,是咸淡水混合的“动力源”,对咸潮入侵的影响是至关重要的。潮汐、潮流对咸潮入侵的影响包括:潮流对咸潮的对流运输、潮汐引起的紊动混合、潮汐与地形共同作用引起的“潮汐捕集”和“潮汐输送”^[28]。

3.3 风

风对咸潮入侵具有较大影响, 风速、风向不同, 河口地区涨、落潮流的强度就不同, 对河口地区的咸潮入侵影响也就会有差异。不同的风速和风向作用下, 河口地区可以产生不同的水平环流^[29], 所产生的水平环流, 可能对河口地区的咸潮入侵产生一定作用。例如, 朱建荣等^[30]探讨了风应力对长江口没冒沙淡水带的影响, 得出枯季北风产生向岸的埃克曼输运, 生成了北港流进南港和南槽流出的水平风生环流, 阻碍了南槽外海的咸潮入侵。通过建立珠江口三维水动力模型, 匡翠萍等^[31]研究风速、风向对夏季河口环流和咸淡水混合的影响, 发现常南风下河口产生强分层现象, 强西南风则加强了河口表层的混合, 但河口仍处于弱分层状态, 而强东北风使得香港水域盐度大大增加, 水体形成强混合现象。

3.4 海平面上升

近年来, 全球变暖以及日益密集的人类活动使得海平面持续上升, 这可能使得咸潮上溯的距离增加, 加剧河口的咸潮入侵灾害。Hong 等^[32]利用三维水动力—富营养化数学模型(HEM-3D)对美国的 Chesapeake Bay 的盐度、咸潮入侵深度、盐度分层进行研究, 发现海平面上升后, Chesapeake Bay 的平均盐度、咸潮入侵深度等呈增加趋势。Mohsen 等^[33]利用 2D-FED 模型研究海平面上升对尼罗河三角洲的影响, 发现海平面上升 50 cm 将使尼罗河三角洲咸潮入侵距离增加 9 km。Bhuiyan 等^[34]利用数学模型研究了海平面上升对 Gorai 河咸潮入侵的影响, 发现海平面上升 59 cm 后, 河口上游 80 km 处的盐度增加了 0.9。

据 2011 年中国海平面公报统计, 1980 年至 2011 年, 中国沿海海平面平均上升速率为 2.7 mm/a, 高于全球平均海平面上升速率 1.8 mm/a^[35], 海平面上升对中国河口(珠江口、长江口等)咸潮入侵的影响受到越来越多学者的关注。孔兰等^[36]建立一维动态潮流、含氯度数学模型, 计算了海平面上升对咸潮上溯的影响, 并对珠江口代表口门在海平面上升 10, 30 和 60 cm 后的咸潮上溯距离进行计算。

3.5 人类活动

河口地区人类活动频繁, 修筑挡潮闸、大量采砂、建造导堤、开挖深水航道等, 均对河口咸潮入侵有很大影响。其中, 不少人类活动会加剧河口的咸潮入侵, 如南水北调东线工程若按预期调水方案实施

将加剧长江口的咸潮入侵, 加大长江口水库取水口附近的盐度^[37]; 长江口深水航道工程增大了长江口南槽和北槽上段的盐度^[29]; 珠江口人工挖沙可能破坏东江咸、淡水的回荡平衡^[38]。还有一些人类活动则会弱化河口的咸潮入侵, 如长江口南北支整治工程能减少北支盐水倒灌, 降低陈行水库附近盐度^[39]; 三峡水库修建后, 枯水期水库下泄流量增加, 有利于缓解长江口水源地的咸潮入侵^[37]。也就是说, 人类活动对河口咸潮入侵的影响不一定是负面的, 也有正面的影响。

河口地区因其地理位置优越, 人类活动在将来肯定会更加频繁、剧烈, 对于河口咸潮入侵的影响将不断扩大。

4 河口咸潮入侵的危害及其相关研究

河口地区经济发达, 人口众多, 供应充足的日常用水是维持河口地区正常生产生活的必要条件, 同时, 河口地区往往是大型港口所在地, 需要足够的港口水深, 以满足船只的正常通航。河口地区一旦遭遇咸潮入侵影响, 不仅日常用水得不到正常供应, 咸潮入侵造成的泥沙絮凝淤积亦将妨碍港口的正常通航, 甚至造成航运事故。

4.1 河口地区供水

中国《生活饮用水水源水质标准》^[40]规定, 饮用水氯化物含氯应小于 250 mg/L, 当河口地区发生咸潮入侵, 导致河口水源地附近盐度增大, 将威胁河口地区居民的生活饮用水, 如 2007~2008 年珠江口强咸潮事件影响了广州地区和珠海各水厂的供水^[41]、2004 年珠江口持续了近 5 个月的海水倒灌影响了 1 000 多万人的饮用水^[42]等。

很多学者研究了咸潮入侵对河口地区供水的影响, 顾玉亮等^[43]研究了北支咸潮入侵对长江口水源地的影响; 余奕昌等^[44]分析长江口咸潮入侵途径与规律, 进而探讨咸潮入侵对上海水资源的影响; 李勇等^[45]分析了咸潮的成因与危害, 发现咸潮来临时不仅带来高浓度的氯化物, 同时也导致了下游污染物的上溯, 使得原水中其他水质指标上升; 鉴于咸潮入侵对河口地区供水的影响越来越大, 孔兰等^[42]对咸潮影响下磨刀门水道取淡时机进行了研究, 提出了“最早取淡日”与“最后取淡日”等概念。

河口地区人口密集, 经济发达, 一旦遭遇咸潮入侵的影响, 必将对该地区居民生产生活用水产生强烈影响, 并带来巨大的经济损失, 因而河口地区

咸潮入侵对供水的影响将会受到更多学者的关注。

4.2 泥沙絮凝淤积

河口地区往往是大型港口所在地,要求能够满足良好的通航条件,而咸潮入侵会促使细颗粒泥沙发生絮凝沉降,进而造成河口泥沙淤积,改变河口水动力,影响河口通航。Meade^[46]、Sholkovitz^[47]和Kate^[48-49]等研究发现,盐水内含有大量强电解质,使得细颗粒泥沙在盐水中具有物理化学粘聚力,在水流内相互碰撞后粘附在一起,形成较大絮凝体,加速沉降。关许为等^[50-51]通过室内试验证实,当盐度小于5时,泥沙沉积速率随盐度增加而加快,而当盐度大于5后,沉积速度基本与盐度变化无关。金鹰等^[52]发现,在径流与咸水混合初期,咸水中高价阳离子的吸附与离子强度的增大,细颗粒泥沙的电位突降,从而大大降低了双电层间的排斥作用,使细颗粒泥沙趋于不稳定。陈庆强等^[53]认为盐度在影响泥沙絮凝淤积的各个因子(盐度、含沙量、水温、有机质等)中占据主导地位。

关于河口泥沙絮凝淤积问题已进行了大量研究,但缺少将河口泥沙絮凝淤积与实际咸潮入侵时空分布联系起来的系统研究。

5 河口咸潮入侵数学模型的研究进展

20世纪80年代,咸潮入侵相关的数学模型开始发展。Savenije等^[54-56]通过对大量河口咸潮入侵曲线的研究,发展了一系列咸潮上溯模型,用来模拟预测河口的咸潮。Gillibrand等^[57]利用一维数学模型对Ythan河口的水位、盐度及总氮进行了模拟,并将迎风差分与中心差分相结合以模拟强潮流。Wolanski等^[15]模拟研究Fly河口的咸潮入侵情况,探讨了浅水效应、潮波等对咸潮入侵的影响。Essink^[58]采用MOCDENS3D模拟了北部Nether岛屿附近的淡水、盐水的分布,研究了其三维空间的咸潮入侵情况。Thain等^[59]对部分混合型河口的咸潮上溯和潮汐入侵进行了详细的研究。

现今国际上使用较广泛、发展较成熟的三维水动力海洋数学模型主要有: POM模型^[60]、ECOM模型^[60]、ROMS模型^[61]、TRIM模型^[62]等结构网格模式,以及FVCOM模型^[63]、ELCIRC模型^[64]、UNTRIM模型^[65]等无结构网格模式,它们均可应用于河口咸潮入侵的数值模拟研究。其中ECOM模式和FVCOM模式已在许多河口海岸地区得到广泛应用和验证。还有一些可视化的商业软件,如Delft 3D和Mike等,都

能很好地模拟水流、咸潮入侵、泥沙输运等物理过程。

国内学者同样建立了大量一维、二维和三维数学模型。

一维咸潮入侵数值模拟主要是对一维盐度扩散方程进行离散和数值计算,并利用计算结果研究盐度纵向分布及入侵长度等。黄昌筑^[66]利用一维盐度扩散方程分析了长江口咸潮入侵现象;韩乃斌^[67]基于一维盐度扩散方程研究了南水北调工程对长江口咸潮入侵深度的影响;易家豪^[68]采用一维河口分汉水流数学模型研究河口纵向各断面水流、盐度均值的变化。

二维咸潮入侵数学模型包括平面和垂向二维模型,周济福等^[20]、王义刚^[69]、匡翠萍^[70]等建立的长江口垂向二维咸潮入侵模型,以及肖成猷等^[71]、陶学为^[72]、罗小峰^[73]等建立的长江口平面二维咸潮入侵模型,对长江口的咸潮入侵进行了很好的模拟研究。

关于三维咸潮入侵模型,匡翠萍^[74]、宋元平等^[75]分别建立了长江口咸潮入侵的三维数学模型,研究长江口盐度分层现象。严以新等^[76]建立了河口三维非线性斜压水流盐度数学模型。罗小峰^[73]通过三维数值模拟研究了长江口深水航道工程实施后北槽咸潮入侵的变化。

近年来,国内也有很多学者基于国外数学模型和商业软件(如Delft 3D、Mike 21等)来研究河口的咸潮入侵。龚政等^[77-78]基于POM模型得到适合长江口的 σ 坐标下的三维非线性斜压流场及盐度数学模型。朱建荣等^[79]、马钢锋等^[80]在ECOM模式基础上,分别建立了长江口三维盐度数值模式。刘均卫^[81]利用ELCIRC模型对长江口的咸潮入侵作了研究。王彪^[6]基于FVCOM模型建立了珠江口三维咸潮入侵数学模型,模型中考虑了径流、潮汐、风、斜压以及陆架环流等各种动力因子。匡翠萍等^[31]利用Delft 3D模型建立珠江口水动力模型,研究风速、风向对香港水域环流和咸淡水混合的影响。

6 总结

(1) 河口咸潮入侵的研究方法有现场观测分析、物理模型试验和数学模型模拟3种。数值模拟研究河口咸潮入侵能够很好地弥补现场观测易受观测站点布置、测量精度、天气影响及物理模型的高投入等不足。

(2) 与咸潮入侵相关的现象和过程的机理研究主要包括:咸潮入侵长度、河口的混合过程、河口咸淡水混合类型、河口密度环流、河口环流与最大浑浊带的关系等,对于这些基本河口现象、过程的研究,国外早在20世纪50年代便已经开始,国内的研究则相

对起步较晚,且主要集中在长江口、珠江口等大河口。

(3) 影响河口咸潮入侵的因素包括径流、潮汐、潮流、风、海平面上升、人类活动等,近年来由于全球气候的变化,海平面不断上升,海平面上升以及人类活动对河口咸潮入侵的影响越来越大,当然,人类活动对咸潮入侵有正面和负面两方面的影响。

(4) 河口咸潮入侵会造成河口地区生产、生活供水困难、河口泥沙絮凝淤积等危害,进而影响河口地区的生产生活和经济发展,学者们在咸潮入侵对河口地区供水危害方面作了很多研究,但关于咸潮入侵对河口泥沙絮凝淤积影响方面的研究,主要集中在盐度对泥沙絮凝淤积影响的机理研究,而缺少将咸潮入侵过程、时空分布与河口泥沙絮凝淤积联系起来的系统研究。

(5) 河口咸潮入侵的数学模型在国外的的发展已经相当成熟,国际上目前也已经有一大批先进的咸潮入侵数学模型得到广泛应用;国内的学者们同样建立了大量一维、二维和三维咸潮入侵数学模型,而近年来国内不少学者利用国外先进的咸潮入侵数学模型和可视化的商业软件研究河口咸潮入侵,并取得不少成果。

7 展望

(1) 利用数学模型方法研究河口的咸潮入侵,伴随着计算机功能的快速发展,未来将受到更多学者的青睐,物理模型和现场观测分析是机理性方面研究和验证数学模型不可缺少的研究手段。

(2) 对于咸潮入侵相关的基本河口现象和过程的研究,可以从对长江口、珠江口等大河口地区的重点关注延伸扩展到国内的其他中小型河口,为解决中国整体的咸潮入侵问题服务。

(3) 伴随着全球气候变化,以及人类日益密集的生产生活活动,海平面上升、人类活动对于河口咸潮入侵的影响将越来越大,尤其是海平面的上升,近些年全球海平面上升速度不断加快,海平面上升对河口咸潮入侵的影响应受到更多关注。

(4) 河口咸潮入侵引起的生产生活用水问题将继续保持研究热度,对河口咸潮入侵引起的泥沙絮凝淤积问题,应该加强泥沙絮凝淤积机理与咸潮入侵过程、时空分布之间关系的系统研究。

参考文献:

[1] 杨莉玲. 河口盐水入侵的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

[2] 张更生. 海水入侵机理及防治措施的三维数值模拟[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.

[3] 彭靖. 磨刀门咸潮上溯的数值模拟及其机理分析[D]. 广州: 中山大学, 2007.

[4] 胡溪. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

[5] 张宗坤. 河口水域盐水入侵的试验研究和数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.

[6] 王彪. 珠江河口盐水入侵[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.

[7] Pritchard D W. A study of the salt balance of a coastal plain estuary[J]. *Marine Sciences*, 1954, 13: 133-144.

[8] Pritchard D W. Estuarine Hydrography[J]. *Advances in Geophysics*, 1952, 1: 243-280.

[9] Pritchard D W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system[J]. *Marine Research*, 1952, 11: 106-123.

[10] Ippen A T, Harleman D R F. One-dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries: Technical Bulletin number 5[R]. U.S.A: Committee on Tidal Hydraulics, 1961.

[11] Simmons H B. Salinity effects on estuarine hydraulics and sedimentation[C]. Tanaka H. Process of 13th IAHR (3). Kyoto, Japan: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 1969: 311-325.

[12] Dyer K R. Estuaries and estuarine sedimentation[M]. London: Cambridge University Press, 1979.

[13] Officer C B. Physical oceanography of estuaries [M]. New York: Academic Press, 1976.

[14] Hansen D V, Maurice R J. New dimensions in estuary classification[J]. *Limnology and Oceanography*, 1966, 1: 319-326.

[15] Wolanski E, King B, Galloway D. Salinity intrusion in the Fly River Estuary, Papua New Guinea[J]. *Journal of Coastal Research*, 1997, 13(4): 983-994.

[16] 茅志昌, 沈焕庭. 潮汐分汊河口盐水入侵类型探讨——以长江口为例[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 2: 77-85.

[17] 茅志昌. 长江河口盐水入侵锋研究[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(6): 643-649.

[18] 张重乐, 沈焕庭. 长江口咸淡水混合及其对悬沙的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1988, 4: 83-88.

[19] 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.

- [20] 周济福, 刘青泉, 李家春. 河口混合过程的研究[J]. 中国科学(A 辑), 1999, 29(9): 835-843.
- [21] 朱建荣, 傅德健, 吴辉, 等. 河口最大浑浊带形成的动力模式和数值试验[J]. 海洋工程, 2004, 22(1): 66-73.
- [22] 应秩甫, 陈世光. 珠江口伶仃洋咸淡水混合特征[J]. 海洋学报, 1983, 5(1): 1-10.
- [23] Mao Q, Shi P, Yin K, et al. Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(16): 1797-1808.
- [24] Dong L, Su J, Ah Wong L, et al. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(16): 1761-1777.
- [25] 朱建荣, 胡松, 傅得健, 等. 河口环流和盐水入侵 I——模式及控制数值试验[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(2): 180-184.
- [26] 胡松, 朱建荣, 傅得健, 等. 河口环流和盐水入侵——径流量和海平面上升的影响[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 337-342.
- [27] 肖成猷, 沈焕庭. 长江河口盐水入侵影响因子分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1998, 3: 74-80.
- [28] Fischer H B. Mixing in Inland and Coastal Waters[M]. New York: Academic Press, 1979.
- [29] 吴辉. 长江河口盐水入侵研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [30] 朱建荣, 傅利辉, 吴辉. 风应力和科氏力对长江河口没冒沙淡水带的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008, 6: 1-8.
- [31] Kuang C P, Lee J H W, Harrison P J, et al. Effect of wind speed and direction on summer tidal circulation and vertical mixing in Hong Kong waters[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27(6A): 74-86.
- [32] Hong B, Shen J. Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea level rise in the Chesapeake Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 104: 33-45.
- [33] Mohsen M S, Vijay P S. Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers[J]. Hydrological Processes, 1999, 13: 1277-1287.
- [34] Bhuiyan M J A N, Dutta D. Assessing impacts of sea level rise on river salinity in the Gorai river network, Bangladesh[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 96: 219-227.
- [35] 国家海洋局, 2012 年中国海平面公报[EB/OL]. [2012-12-21]. http://www.coi.gov.cn/gongbao/haiping-mian/201303/t20130308_26217.html.
- [36] 孔兰, 陈晓宏, 杜建, 等. 基于数学模型的海平面上升对咸潮上溯的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1097-1104.
- [37] 孙波, 刘曙光, 顾杰, 等. 三峡与南水北调工程对长江口水源地的影响[J]. 人民长江, 2008, 39(16): 4-7.
- [38] 韩龙喜, 李伟, 陆永军, 等. 人工挖沙对东江水系水动力及环境影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 123-126.
- [39] 李禔来, 李谊纯, 高祥宇, 等. 长江口整治工程对盐水入侵影响研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 31-38.
- [40] CJ 3020-1993, 生活饮用水水源水质标准[S].
- [41] 罗琳, 陈举, 杨威, 等. 2007-2008 年冬季珠江三角洲强咸潮事件[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(6): 22-28.
- [42] 孔兰, 陈晓宏, 刘斌, 等. 咸潮影响下磨刀门水道取淡时机初探[J]. 水资源保护, 2011, 27(6): 24-27.
- [43] 顾玉亮, 吴守培, 乐勤. 北支盐水入侵对长江口水源地影响研究[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 1-3.
- [44] 余奕昌, 陈景山. 咸潮入侵对上海市水质影响研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1991, 3: 70-78.
- [45] 李勇, 陈超, 张晓健, 等. 咸潮对城镇供水水质的影响及对策[J]. 水利水电技术, 2008, 39(10): 21-23.
- [46] Meade R H. Transport and deposition of sediments in estuaries[J]. Mem Geol Soc Am, 1972, 133: 91-119.
- [47] Sholkovitz E R. Flocculation of dissolved organic and inorganic matter during the mixing of river water and seawater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1976, 40(7): 831-845.
- [48] Kate K. Sediment deposition flocculated suspensions[J]. Sedimentology, 1975, 22(1): 111-123.
- [49] Kate K. Particulate matter grain-size characteristics and flocculation in a partially mixed estuary[J]. Sedimentology, 1981, 28(1): 107-114.
- [50] 关许为, 陈英祖, 杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. 水利学报, 1996, 6: 70-74.
- [51] 关许为, 陈英祖. 长江口泥沙絮凝静水沉降动力学模式的试验研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(1): 46-50.
- [52] 金鹰, 王义刚, 李宇. 长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 61-63.
- [53] 陈庆强, 孟翊, 周菊珍, 等. 长江口细颗粒泥沙絮凝作

- 用及其制约因素研究[J].海洋工程, 2005, 23(1): 74-82.
- [54] Savenije H H G. Predictive model for salt intrusion in estuaries[J]. Journal of Hydrology, 1993, 148(1-4): 203-218.
- [55] Savenije H H G. Rapid assessment technique for salt intrusion in alluvial estuaries[D]. Netherland: Delft University of Technology, 1992.
- [56] Savenije H H G. A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries[J]. Journal of Hydrology, 1986, 85(1): 87-109.
- [57] Gillibrand P A, Balls P W. Modelling salt intrusion and nitrate concentrations in the Ythan Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47(6): 695-706.
- [58] Essink O G H P. Saltwater intrusion in 3D large-scale aquifers: a dutch case[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2001, 26(4): 337-344.
- [59] Thain R H, Priestley A D, Davidson M A. The formation of a tidal intrusion front at the mouth of a macrotidal, partially mixed estuary: a field study of the Dart estuary, UK[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61(1): 161-172.
- [60] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[R]. American Geophysical Union. 1987.
- [61] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [62] Casulli V, Cheng R T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow[J]. Int J Numer Methods Fluids, 1992, 15: 629-648.
- [63] Chen C S, Liu H, Beardsley R C. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 159-186.
- [64] Zhang Y, Baptista A M, Myers E P. A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(18): 2187-2214.
- [65] Casulli V, Walters R A. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations[J]. Int J Numer Methods Fluids, 2000, 32: 331-348.
- [66] 黄昌筑. 长江口盐水入侵及其对河口拦门沙的作用 [D].南京: 河海大学, 1982.
- [67] 韩乃斌. 南水北调对长江口盐水入侵影响的预测[J]. 地理研究, 1983, 2(2): 99-107.
- [68] 易家豪. 长江口南水北调盐水模型计算研究[R].南京: 南京水利科学研究院, 1987.
- [69] 王义刚. 河口盐水入侵垂向二维数值计算[D]. 南京: 河海大学, 1989.
- [70] 匡翠萍. 长江口拦门沙冲淤及悬沙沉降规律研究和水流盐度泥沙数学模型[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 1993.
- [71] 肖成猷, 朱建荣, 沈焕庭. 长江口北支盐水倒灌的数值模型研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 124-132.
- [72] 陶学为. 长江口水体入侵研究[J]. 水利学报, 1991, 9: 36-41.
- [73] 罗小峰. 长江口水流盐度数值模拟[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.
- [74] 匡翠萍. 长江口盐水入侵三维数值模拟[J]. 河海大学学报, 1997, 25(4): 56-62.
- [75] 宋元平, 胡方西, 谷国传, 等. 长江口口外海滨盐度扩散的分层数学模型[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1990, 4: 74-84.
- [76] 严以新, 宋志尧. 长江口深水航道整治期工程二、三期三维数值研究[R]. 南京: 河海大学, 1998.
- [77] 龚政. 长江口三维斜压流场及盐度场数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [78] 龚政, 张长宽, 张东生, 等. 长江口正压、斜压诊断及斜压预报模式——三维流场数值模拟[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 39-45.
- [79] 朱建荣, 朱首贤. ECOM 模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(4): 364-374.
- [80] 马钢峰, 刘曙光, 戚定满. 长江口盐水入侵数值模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2006, 21(1): 53-61.
- [81] 刘均卫. ELCIRC 模型在长江口盐水入侵研究中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2008.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)