

中国河口研究五十年：回顾与展望*

陈吉余 陈沈良

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

提要 过去 50 年中国的河口研究取得了巨大的成就。在理论研究方面, 一个显著的特征是动力、沉积和地貌研究相结合, 取得了一系列的成果, 如河口冲淡水、河口锋、最大浑浊带、泥沙运动、拦门沙的形成、河口不连续现象、河口发育等。在应用方面, 如钱塘江河口和长江河口等有许多成功的范例。然而, 河口是复杂的, 随着人类活动和人工控制的增强, 当前河口研究面临着许多新的挑战, 人类活动已成为第三驱动力, 河口的自然适应与人工控制协调问题将是河口未来理论研究和应用实践的重要问题。

关键词 河口研究, 评述, 展望

中图分类号 P737

中国漫长的海岸线分布着众多大小不同、类型各异的河口。据统计, 我国沿海有 100 多条河流排泄入海。由于流域盆地和邻近海洋环境的差异, 河口类型存在很大的不同, 每个河口都有其各自的特征。这些不同类型的河口为我国的河口研究提供了基础和重要场所。

我国的河口研究有近一个世纪的历史。长江口的潮位记录开始于 1917 年。在 20 世纪早期阶段, 在长江口和杭州湾开展了水文调查。20 世纪上半叶, 港口建设, 如天津新港始于 1939 年等。然而, 上世纪 50 年代以前, 除了一些描述性研究涉及几个大河三角洲外, 很少有关于河口方面的系统研究。近 50 多年来, 科学技术的巨大进步和经济建设的迫切需求使得许多河口的系统研究成为可能。通过研究, 不仅建立和发展了中国的河口研究学科体系, 而且有效地促进了河口三角洲地区的社会经济发展。

1 河口研究的发展

自 20 世纪 50 年代以来, 我国的河口研究有了快速的发展。1957 年在南京召开的“中国河口研讨会”促进了中国河口研究的发展。在前苏联专家的启示下, 我国建立了第一个河口专业研究

机构——基于中国科学院河口研究组成立的华东师范大学河口研究室, 以及钱塘江河口研究站。该研讨会也推动了长江口水文和地貌的系统调查、钱塘江河口治理调查、天津新港泥沙回淤研究和黄河口地形测量等。河口地区人文荟萃、经济发达, 又是国内外贸易的枢纽。经济发展和建设的需求促进了河口研究的进展, 特别是 20 世纪 70 年代末改革开放以及现代化建设以来, 不仅主要河口, 而且一些小的河口都需要开展系统研究。因此, 中国的河口研究已遍及整个沿海地区。

50 年来, 中国河口研究的特征有: (1)形成了动力-沉积-地貌相结合的新的学科体系; (2)研究方向从时空变化到机制(物理的、化学的、生物的和地质的), 并发展到数值模拟和预测; (3)河口研究拓展到了化学、生物和生物地球化学等研究领域; (4)河口研究密切结合工程应用实践; (5)国际交流与合作不断增强, 从过去外方为主, 逐渐成为共同合作, 甚至我方为主。

迄今已出版了数十部有关河口和三角洲方面的专著, 解决了一大批大型工程的关键科学技术问题。研究队伍不断壮大, 至今已有超过 30 个研究单位, 分别在教育部、中国科学院、交通和水务部门, 有国家级的和省部级的重点实验室。

*陈吉余, 教授、中国工程院院士。主要从事河口海岸学及其工程应用研究

收稿日期: 2007-05-21, 收修改稿日期: 2007-08-08

2 基础研究进展

中国有许多独特的入海河口,其中67条河流长度超过100km,包括三大世界级的河口:长江口、黄河口、珠江河口,3条界河:图们江、鸭绿江和北仑河,52个大陆中、小河口,9个岛屿河口(6个在台湾,3个在海南)。

不同类型的河口提供广阔的研究领域,特别是三大河口:长江、黄河和珠江,特征各异。长江每年有丰富的水沙通量排入海,河口潮汐强度中等。黄河以其水少沙多、尾闾频繁改道而著称,塑造了典型的扇形三角洲。珠江口,丰水少沙,是典型的多岛型河口,由8大口门组成,三角洲河网纵横密布。此外,中、小河口中,钱塘江河口是典型的强潮河口,其下游是漏斗状的强潮海湾——杭州湾,形成壮观的涌潮。

2.1 河口冲淡水与河口锋

来自河流的淡水与海水交汇在河口相互掺混形成不稳定的混合水,即冲淡水。河口混合水与河流或河口混合水与海水之间存在界面。河口锋就是河口混合水与海水之间的界面。

长江年径流量达 $9.24 \times 10^{11} \text{m}^3$,占中国河流总径流量($16.0 \times 10^{11} \text{m}^3$)的57%,而黄河仅占3%。形成于淡水与海水相互作用的长江口混合水运动最具代表性。毛汉礼等(1963)最早研究混合水并发现冲淡水夏季向东北扩散,且进一步讨论了其机制。随后许多学者都提出了各自的形成观点。总结起来,主要原因是夏季水量增加,为东南风和台湾暖流所驱使。1980年中美合作长江口沉积动力调查期间,详细研究了长江口外羽状锋。结果显示盐度 < 18 的淡水舌向南扩展,盐度 $18-26$ 的向东北。Milliman等(1985)认为河口锋受台湾暖流的影响。Su等(1989)提出了次级锋的概念。胡方西等(2002)系统讨论了长江河口锋的形成与机制,并发现当高泥沙浓度的淡水与低泥沙浓度的海水相会时河口锋非常明显。因此,关于河口冲淡水、河口锋的分布和河口水与海水的时空变化已有了系统的认识。

2.2 盐水入侵与最大浑浊带

在海水与冲淡水之间的界面存在陆架水入侵的现象,这种现象叫做海水入侵锋。对珠江河口这种锋已作了较系统的研究(李春初,1990)。在

珠江河口,陆架水团占据了伶仃洋的下部,陆架水入侵锋稳定地占据了沙坝前缘斜坡的过渡区。长江口盐度锋的底部远离口门,位于靠近 $122^\circ 30' \text{E}$ 的前缘斜坡。长江口盐水入侵有三条路径:南港、北港和北支,其中以北支最为严重,并向南支倒灌(沈焕庭等,2003)。北支涌潮的出现更加剧了水沙盐的倒灌(陈沈良等,2003)。

在长江口,河口混合水与河水之间的界面位于拦门沙的顶部,夏季变动于20km范围。在此范围和延伸带出现高泥沙浓度带,即最大浑浊带。钱宁等(1964)首先讨论了钱塘江河口高泥沙浓度的分布、时空变化和形成机制。沈焕庭等(1984、2001)讨论了长江口最大浑浊带的形成背景和悬沙富集机制。杨作升等(1990)讨论了黄河口最大浑浊带的形成与潮汐潮流之间的关系。

2.3 河口泥沙运动

黄河平均泥沙浓度达 25.4kg/m^3 。杨作升等(1990)在1986年首次记录到黄河口外超重射流形成低盐-高密度潜流,Wright等(1988)对此问题进行了理论分析。随后1987、1989年泥沙密度流的观测(Wright *et al.*, 1990),发现每立方数百公斤浓度的泥沙沿底部流动,侵蚀海床形成“V”形槽。同时来自河流的上层悬浮泥沙被潮流阻隔沿岸运移,在上部悬浮层和下部潜流层之间的中层是潮流挟带的海水,运移河口沙坝再悬浮的粗颗粒泥沙。因而悬沙的垂向分布显示“细-粗-细”类似三明治的互层结构,这在世界其他河口从没发现过。

长江口悬沙浓度的时空变化特征显示了泥沙再悬浮的重要性(陈沈良等,2004)。泥沙再悬浮在最大浑浊带的形成过程中起着重要的作用(时伟荣等,1993)。徐海根等(1999)研究了浮泥的出现和消亡。现场激光粒度仪(LISST)应用于泥沙运动的研究,提供了研究河口泥沙运动新的途径(程江等,2005)。椒江口高浓度泥沙研究在浮泥中也取得了新的进展。罗宪林等(2001)通过底质中有孔虫的分布和重矿物特征阐述了陆架水入侵。李道季(2000)阐述了长江口悬移质有机质特征和生物地球化学行为¹⁾。长江河口的泥沙扩散,卫星遥感影像显示可影响到福建沿海(恽才兴等,1981)。

1) 李道季,2000. 长江河口悬浮体的有机特性及其动力沉积和生物地球化学行为. 华东师范大学博士学位论文, 1—90

2.4 河口拦门沙

河口拦门沙形成的原因是洪水波扩散淡水与盐水在河口混合(陈吉余等, 1964)。根据钻孔资料, 陈吉余等(1979)进一步论述了长江口拦门沙的形成过程。径流与潮棱体的比例是决定拦门沙位置的关键(钱宁等, 1964)。当此比例 > 0.2 时, 拦门沙位置出现在口内, 例如钱塘江沙坎; 当比例为 $0.02\text{—}0.10$ 之间时, 则为过渡型。

陈吉余等(1964)系统研究了钱塘江河口沙坎, 从沉积学的角度, 讨论了沙坎的分布并计算了沙坎的体积($42.5 \times 10^9 \text{m}^3$), 进一步揭示了钱塘江河口形成的历史和泥沙来源。陈吉余等(1988)研究了长江口拦门沙系, 提出了冰后期海侵过程中拦门沙的沉积过程和沉积结构, 阐明了拦门沙和航道拦门沙之间的概念差异。

此外, 黄茅海河口沉积作用的讨论, Wu 等(1994)提出了垂向密度环流是拦门沙形成的主要原因。谢钦春等(1998)研究了椒江河口的拦门沙。

2.5 河口不连续性

河口拦门沙的出现反映地貌的不连续性。长江口南、北槽分汊口附近出现一明显的界线(恽才兴等, 1995), 粗细泥沙分别出现在分界线的上、下游。长江口的化学过程引起重金属元素在最大浑浊带显著增加, 这一现象叫做屏障效益(陈邦林等, 1995)。生物也出现不连续性。根据这些不连续现象, 陈吉余(1995)提出了河口不连续性, 并讨论了不连续的类型: 地貌、水文、沉积、河口化学、河口环流和生物。钱塘江河口拦门沙是不连续性的另一例子, 椒江口也是。目前, 河口不连续性(实际上这是河口过滤器效应的具体反映)还在进一步研究中。

2.6 河口发育模式

不同的河口、边界条件和过程表现为不同的河口发育模式。根据河口历史过程研究, 陈吉余等(1979)总结了两千年来长江河口的发育模式: 南岸边滩淤涨, 北岸沙洲并岸, 河口束狭, 河槽加深, 三角洲向前伸展。

在黄河口, 河道在其三角洲上摆荡和频繁改道。通常表现两个显著的周期: $7\text{—}8$ 年河道变化和 50 年周期河道从三角洲一侧到另一侧。前者即所谓的小循环, 后者为大循环。有四种状态模式: 扇形扩展, 向海伸展延伸; 在一侧分汊和堆积; 口外新堆积的河口不稳定性。杨作升等(1998)提出水下坡度的块体运动也是一种基本运动方式。

2.7 模型和预测

50 年来, 中国研究者们还将数值分析、物理模型、潮流模型、泥沙运移数值模型和准 3D 流和盐度模拟等新技术、新方法应用于河口研究。

在 20 世纪 70 年代, 1 维潮流和泥沙运移模型参照河流研究方法应用于河口动力特征和河床演变研究。80 年代, 2 维潮流和泥沙运移模型被用于研究河口地区水平和垂向动力过程和泥沙运移特征。至于波浪和盐水楔对河口泥沙运动的显著影响, 自从 90 年代采用波-流相互作用模型和 2 维或 3 维泥沙运移模型成功应用于关键和重要的工程项目。

然而, 河口问题是复杂的, 泥沙运动的机制还在进一步研究, 在数值模型中仍然有许多问题。但是随着研究的深入, 数值模拟在河口研究中将发挥越来越重要的作用。

3 河口研究的应用

20 世纪 50 年代以来, 中国的河口研究已逐步扩展到所有的主要河口, 在水土资源开发和河口治理方面取得了广泛的效益。

3.1 钱塘江人工河口的形成

钱塘江涌潮世界著名。该涌潮河口具有我国最强的动力, 潮差高达 8.93m , 河槽极不稳定。涌潮过后, 流速达 $6\text{—}8\text{m/s}$, 实测最大高达 12m/s , 最大压力为 70kPa 。其河口沙坎由分选良好的粉砂物质组成。由于抗蚀性差, 河床易变, 历史上为减轻潮灾影响, 钱塘江河口两岸建有 254km 的海塘。从 1950 年起, 钱塘江河口开展了大规模的海潮和海底地形测量。1957 年钱塘江研究站开始研究如何控制河槽摆荡。钱宁先生 1961 年提出了钱塘江河口治理的原则。1963 年降低纳潮量被确定为治理的原则。

50 年来, 钱塘江河口治理取得了巨大的成就, 显著地改善了涌潮河段的河势, 600 多 km^2 的滩涂被围垦成陆, 盐官断面从 12km 束窄至 2.3km , 涌潮景观仍然维持。钱塘江典型人工河口的形成是河口研究应用于强潮河口治理工程实践的成功典范(陈吉余, 1997)。

3.2 长江口深水航道治理

长江河口呈三级分汊四口入海的河势格局, 其长度从徐六泾到口门约 40km , 断面宽度从徐六泾 5.7km 至口门增加到 90km , 平均流量为 $293\ 00\text{m}^3/\text{s}$, 平均潮棱体为 $5.3 \times 10^9 \text{m}^3$ 。

长江口深水航道治理工程不仅为建设上海国际航运中心起到重要的推动作用,而且也是充分发挥长江黄金水道航运潜力的一项重要措施。这项宏伟工程分三期进行,一期工程始于1997年1月,用6年时间完成了第一期和第二期工程,水深从7m加深至8.5m,又从8.5m增至10m,现正在进行三期工程的实施,将于2009年建成12.5m的深水航道。

3.3 珠江口

珠江口由三江组成:东江、北江和西江,其中西江最大,长2214km。由于珠江三角洲形成于三江的汇聚,河网密布。过去50年,在改造三角洲河网方面取得了巨大的成就。

3.4 其他河口

海河口,天津新港回淤研究揭示了泥沙来源,围垦降低航道泥沙回淤。其他如鸭绿江河口、辽河口、欧江河口、闽江河口和韩江河口,结合河口、海岸和航道工程也取得了很大的成就。然而,在河口治理取得显著成就的同时,许多河口也出现了很多负面的影响。

4 问题与展望

河口是流域与海洋的枢纽,陆海相互作用的界面,是岩石圈、大气圈、水圈和生物圈相互作用活跃的场所,它是一个复杂的自然综合体,受全球变化和流域的深刻影响。河口是流域物质通量之“汇”,海洋物质通量之“源”。对于自然变化和日益增强的人类活动,流域的变化就像脉搏一样能够敏感地在河口地区反映出来。但是作为地球系统中“局部的”和区域性的动态,对于各种驱动力的综合作用将是怎样的响应,这是河口研究值得深入探讨的问题。当前的人类活动已作为第三驱动力,其作用已非过去一般的人为因素影响可比,就像工业革命前后手工业作坊被大规模机械化生产所替代一样,科学技术的进步,人类对地球表面的作用已经发生了质的变化。无怪乎有人将工业革命以来人类的深刻作用称之为“人类世”(Meybeck *et al*, 2005)。而近50年来,特别是1980年以来,人类作用于地球表层乃至外太空,所触及的全球变化,更加引人关注。

当前,围绕河口这一敏感热点区,在巨大的人类驱动力作用下正面临着巨大的挑战(Chen *et al*, 2002):河流入海泥沙锐减,河口三角洲侵蚀

加剧;入海污染物显著增加,河口及其邻近海域环境急剧恶化,淡水资源短缺,生态系统受损;全球变化,海平面上升,河口地区首当其冲。这些挑战归根结底都是人类活动所驱使。人类这一驱动力正展示其不断增强的态势。当然,自然作用力依然强大,自然驱动力的作用仍然起着重要作用。在此情形下,如何实现河口自然资源的合理开发、河口环境的有效保护、人与自然和谐相处,则是对于河口健康发展、持续利用需要深入研究的问题。

近50年来,长江河口由于人类活动影响,使其演变过程从基本处于自然适应趋向与人工控制相协调的状态。护岸工程控制了长江河口的基本河势,而且拦门沙河段因整治疏浚相结合而加深了航槽,围垦束窄了河道,促进了三角洲向海方向发展。然而,流域高强度的人类活动,导致了河口过程的重大变化,三峡工程的建设对长江河口过程的影响将日益显现。入海污染物增加,近海水质出现富营养化,赤潮频发,缺氧层增强,带来了负面影响。河口滩涂围垦高程的降低,使得潮间带滩涂的大片缺失,带来了生态条件的不利影响。因此,对于河口地区如何合理利用资源,如何更有效地保护环境,如何改善生态条件,这都是需要进一步研究的问题,必须在河口开发治理保护中促进人与自然的和谐。

黄河以其输沙量大,含沙量高和水沙变率大,河口摆动频繁而称著于世。黄河入海径流量320亿 m^3/a ,只有长江入海径流量的3.5%,而入海输沙量7.9亿 t/a (利津站,1950—2005),远大于长江。然而,本世纪以来,黄河入海水沙量分别只有122亿 m^3/a 、1.5亿 t/a 。近年来,黄河入海水、沙、营养盐等物质通量锐减,引起了河口过程、三角洲演变、渤海生态环境的重大变异。对于黄河河口,三角洲海岸侵蚀防护、渤海的生态环境、新水沙条件下的河口过程,这些都是需要进一步研究的问题。

珠江三角洲河道大量采沙,使得入海推移质泥沙大量减少,河道加深。无序挖沙助长了近年珠江口特大咸潮的形成。当然,全球性变化,海平面上升;气候变化,流域降水减少;流域生产和生活用水增加等等,也是珠江口咸潮入侵加剧的成因。这些都需要开展深入研究,采取有效对策。

参 考 文 献

- 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳, 1963. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨. 海洋与湖沼, 5(2): 183—206
- 时伟荣, 李九发, 1993. 长江河口南北槽输沙机制及浑浊带发育分析. 海洋通报, 12(4): 69—76
- 杨作升, Kellor, GH, 陆念祖等, 1990. 现行黄河口水下三角洲海底形貌及不稳定性. 青岛海洋大学学报, 20(1): 7—21
- 沈焕庭, 郭成涛, 朱慧芳等, 1984. 长江河口最大浑浊带的变化规律和成因探讨. 海岸河口区动力地貌沉积过程论文集. 北京: 科学出版社, 76—89
- 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣, 2003. 长江河口盐水入侵. 北京: 海洋出版社, 175
- 沈焕庭, 潘定安, 2001. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 194
- 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴等, 1988. 长江河口动力过程和地貌演变. 上海: 上海科学技术出版社, 300—303
- 陈吉余, 罗祖德, 陈德昌等, 1964. 钱塘江沙坎的形成与演变. 地理学报, 30(2): 109—123
- 陈吉余, 恽才兴, 董永发等, 1979. 两千年来长江河口发育模式. 海洋学报, 1(1): 103—111
- 陈吉余, 1995. 长江河口的自然适应与人工控制. 华东师范大学学报(长江口最大浑浊带和河口锋研究论文集), 1—14
- 陈吉余, 1997. 钱塘江河口治理的成就与展望. 地理研究, 16(2): 52—56
- 陈邦林, 韩庆平, 陈吉余, 1995. 长江河口浑浊带化学过程. 华东师范大学学报(长江口最大浑浊带和河口锋研究论文集), 29—39
- 陈沈良, 张国安, 杨世伦等, 2004. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮. 地理学报, 59(2): 260—266
- 陈沈良, 陈吉余, 谷国传, 2003. 长江口北支的涌潮及其对河口的影响. 华东师范大学学报, 2: 74—80
- 李春初, 1990. 高盐陆架水入侵影响我国河口概括与问题. 海洋科学, (3): 54—59
- 罗宪林, 李春初, 牟崇键, 2001. 伶仃洋有孔虫生物群和埋葬群的比较及河口沉积作用分析. 海洋学报, 23(4): 69—74
- 恽才兴, 时伟荣, 何青, 1995. 长江口通海航道泥沙场动态分析. 华东师范大学学报(长江口深水航道治理与港口建设专辑), 50—79
- 恽才兴, 蔡孟裔, 王宝全, 1981. 利用卫星像片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题. 海洋与湖沼, 12(5): 391—401
- 胡方西, 胡辉, 谷国传, 2002. 长江口锋面研究. 上海: 华东师范大学出版社, 135
- 徐海根, 李九发, 周福根等, 1999. 长江口浮泥的若干特征. 上海水利, 55(2): 34—41
- 钱宁, 谢汉祥, 周志德等, 1964. 钱塘江河口沙坝的近代过程. 地理学报, 30(2): 124—142
- 程江, 何青, 王元叶, 2005. 利用 LISST 观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布. 泥沙研究, 1: 36—42
- 谢钦春, 李伯根, 夏小明等, 1998. 椒江河口悬沙浓度垂向分布和泥跃层发育. 海洋学报, 20(6): 58—69
- Chen J Y, Chen S L, 2002. Estuarine and coastal challenges in China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 20(2): 174—181
- Chen J Y, Zhu H F, Dong Y F *et al*, 1985. Development of the Changjiang Estuary and its submerged delta. Continental Shelf Research, 4(1—2), 47—56
- Meybeck M, Vorosmarty C, 2005. External Geophysics, Climate and Environment: Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. C R Geoscience, 337: 107—123
- Milliman J D, Shen H T, Yang Z S *et al*, 1985. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf. Continental Shelf Research, 4(1/2): 37
- Shen H T, Li J F, Zhu H F *et al*, 1984. Transport of the suspended sediment in the Changjiang Estuary. In: Proceedings of International Symposium on Sedimentation on Continental Shelf, With Special Reference to the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1: 389
- Su J L, Wang K S, 1989. Changjiang River plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay. Continental Shelf Research, 9(1): 93
- Wright L D, Wiseman W J, Bornhold B D *et al*, 1988. Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity-driven underflows. Nature, 332: 629—632
- Wright L D, Wiseman W J, Yang Z-S *et al*, 1990. Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River). Cont Shelf Res, 10 (1): 1—40
- Wu C Y, Wu J X, 1994. Small-scale dynamic structures and their sedimentation effects in estuarine environment. Coastal Dynamics'94 International Conference, Feb. 21—25, Barcelona, Spain, 158—174

CHINA ESTUARINE RESEARCH FOR 50 YEARS: RETROSPECT AND PROSPECTIVE

CHEN Ji-Yu, CHEN Shen-Liang

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062)

Abstract Over the past 50 years, estuarine research in China has made a great achievement. Dynamics, sedimentology, and geomorphology are combined in theoretical research, with a series of achievements, such as estuarine diluted freshwater, estuarine front, the turbidity maximum, fine sediment movement, the formation of mouth bar, estuarine discontinuity, and estuarine development model. Successful research applications included the estuaries of Qiantang River and the Changjiang (Yangtze) River, and many others. However, estuaries are complex. With human activities and artificial control increased, current estuarine researches are facing many new challenges: sharp decrease in riverine sediment discharge into the sea, remarkable increase in the amount of pollutants into the sea, global climate change, and sea level rise. Among them, human activities have become the third large driving force, turning natural estuaries into artificial ones. Therefore, cooperation between natural adaptation and artificial control in estuaries is becoming an important issue for theoretical research and application on estuary in the future.

Key words Estuarine research, Review, Prospective