

# 试论河口湾

金长茂 睦良仁

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

## 一、河口湾的定义

对于河口湾 (estuary), 许多欧美学者有过各种类似的定义, 其中较全面的有两家:

Pritchard 提出:“河口湾是一个半封闭的海岸水体, 它与外海有自由的联系, 在此水体内的海水受到来自陆地径流某种程度的冲淡。”他对其定义还作了如下进一步的说明:

首先, “河口湾是一个半封闭的海岸水体”。这意味着河口湾的重要特性是其间的水运动受到它的海岸边界的明显制约。据此, 像波罗的海、波的尼亚湾和芬兰湾等较大的水体, 其海岸边界对水体运动的运动学和动力学所起的作用很小, 所以它们不属于河口湾的范畴。

其次, “它与外海有自由的联系”。这种联系必须使海洋与河口湾之间的水交换基本上是连续的, 这就限制了那些在口门处由于沙坝岛 (barrier island) 的封堵, 使与海洋的水交换不畅的海岸水体, 这实际上是海岸潟湖, 而不是河口湾。

再次, “这个水体内的海水被来自陆地河流的径流某种程度的冲淡”。海水和淡水的混合, 也是河口湾的一个重要特性, 并产生密度梯度, 导致河口湾所特有的环流形式。

美国《地质辞典》<sup>[8]</sup>对河口湾列出了三种解释:(1)河流向海的末段或被展宽的喇叭形潮汐口门, 在那里河流的淡水与海水混合, 明显地冲淡了海水, 而且潮汐的影响是主要的;(2)海洋的一部分, 是受淡水影响的一个狭窄海湾;(3)近岸陆地的沉陷, 或海平面上升使非冰川河谷的下游段沉没于海水之下所形成的沉溺河口。

上述二定义均谈到了河口湾同潮汐和河流有关, 但Pritchard的定义被很多学者所接受和引用<sup>[9,10]</sup>, 我们也认为Pritchard的定义比较简明、严密和科学。联系到我国国内, 某些英汉词典将estuary只解释为河口, 并往往把estuary与河口相等同是不恰当的。某些河口, 例如黄河口, 并不存在“一个半封闭的海岸水体”, 即不是一个河口湾, 在译成英文时不能用Huanghe Estuary, 只能用Huanghe Mouth才比较合适; 而许多海湾, 除了像渤海、北部湾不符合Pritchard定义者外, 很多中小海湾, 只要有不论大小的河流注入, 均属河口湾范畴, 例如浙江的乐清湾、象山港、三门湾等。总之, 河口湾兼具河口和海湾的性质, 但不等于河口, 也不等于海湾, 它是由Pritchard定义明确限定的一种自然综合体。我国较大的河口湾有杭州湾、伶仃洋等。长江河口段也基本符合上述定义, 但由于崇明岛等大小岛屿的淤长, 是一个正在消亡中的河口湾。

## 二、河口湾的成因类型

河口湾的成因类型,也就是根据河口湾盆地的形成机制,可概括地分为五大类。

1. 沉溺河谷型河口湾:是最主要的、分布最广的一种河口湾类型。它们的形成主要是由于最近一次全球性海平面上升,淹没了河谷平原所成,但目前已有一部分这类河口湾,由于泥沙淤积,使盆地逐渐消失,河口湾也随之消亡,或正处于消亡过程中。所以,有的学者指出,河口湾在地质历史上是短暂的,其依据也就在此。沉溺河谷型河口湾一般的水深较浅,且向海方向水深有增加的趋势。底部多为泥沙沉积物,其横剖面呈U字型。世界上研究比较深入的这一类型,有美国的 Chesapeake Bay、Delaware Bay,英国的 Thames,联邦德国的 Ems,法国的 Seine 以及澳大利亚的 Murray 河口湾。

2. 峡湾型河口湾:是由大陆冰川的冰舌刻蚀先前的谷地所形成。是所有河口湾中最深的一种类型。水深可以超过800米,但在口门处常有一水深较浅的“门槛”,其组成有的是基岩,也有的为冰碛物。这类河口湾的分布有明显的地域性,即仅仅在以前的大陆冰川分布地区,例如沿智利、阿拉斯加、格陵兰、挪威、西伯利亚等海岸地区。

3. 拦门沙型河口湾:主要特征是在其口门附近或口外有沙洲、沙坝或沙坝岛分布。但沙坝岛必须有缺口,即有一条或数条潮汐水道,使外部海水和河口湾内的水随着潮汐的涨落而进行自由、连续的水体交换。这种潮汐水道的位置也可能移动。如果水道堵塞,其内侧的河口湾就立即消亡而成为潟湖。由于潮汐水道的面积相对于整个河口湾来说要小得多,因此,潮汐的作用由水道向内迅速减弱,河口湾内水体混合作用主要动力往往以风的作用为主。本类型河口湾的水深一般较浅,水体盐度随河流注入的淡水量而变化。这类河口湾主要分布于美国东部沿沙坝岛的海岸,如北卡罗来纳州的 Albemarle Sound 和 Pamlico Sound 的河口湾等。

4. 构造型河口湾:由断裂、褶皱等构造作用所形成。主要分布在像美国西海岸构造活动强烈的海岸地区,例如旧金山湾,至少部分是由于断块滑动所形成。

5. 新生型河口湾:由于三角洲的发育,不仅填淤了原有的河口湾盆地,而且向海伸展而形成的新的河口湾,也可称为次生河口湾。显然,这是一种最年轻的河口湾,一般面积较小,并且其平面形状和水深还在不断地变化中。例如美国密西西比河三角洲前缘的密西西比海峡和一些小的盆地水域以及我国珠江三角洲的前缘等都有这类河口湾。

## 三、河口湾流场的混合作用

河口湾流场比较复杂,Stommel<sup>[1]</sup>试图从物理海洋学观点,提出以河口湾内引起水运动的原因分为三种类型:(1)由风控制的河口湾,例如拦门沙型河口湾,风起了水运动和混合的最重要作用;(2)由潮汐控制的河口湾,如很多强潮河口湾,潮汐作用是主要因素;(3)由河流径流控制的河口湾,例如密西西比河三角洲前缘的一些河口湾,由于不稳定的内波在淡水和盐水之间的一个陡峻界面上的破碎,混合作用是最重要的。很多学者主张以河口湾内的盐度分布、环流方式和混合作用过程作为分类依据,将有利于

深入了解河口湾的流场性质。其中Pritchard<sup>[2,4]</sup>,总结性地提出盐淡水相遇可能的四种理论模式,他称之为河口湾非潮汐环流类型,成为经典的研究成果被普遍引用,其主要内容如下:

1. 盐水楔型河口湾(A型):河流的径流占优势,入侵海水呈楔形位于密度较小的径流淡水之下。盐水楔的位置可以随着潮汐的涨落和径流大小的变化而移动。在盐水楔楔顶的上游,水流流向在任何时间和在整个深度都是下泄流;在楔顶的向海一侧,上层也都是下泄流,而下层可能在所有时间指向上游,也可能随潮汐转向,但总的来说下层水的净流是指向上游的。这种上层向海流,下层向陆流就形成了河口湾所特有的纵向非潮汐环流。在楔顶附近发生泥沙大量沉积,并随楔顶位置的上下移动而形成堆积区。密西西比河西南水道是研究比较深入的一个盐水楔河口湾的典型例子,随着密西西比河流量的变化,楔顶的位置迁移可超过217千米。

2. 部分混合型河口湾(B型):在潮汐增强、潮流量远远超过径流量的情况下所形成。在A型河口湾分隔上层淡水与下层盐水的陡峻界面,由于潮流增强,加之湍流对盐水楔的破坏,不仅盐水向上混合,淡水也向下混合,即在盐淡水之间的界面处存在平流和湍流的混合作用而形成一个盐度和缓变化的区域,这就由A型过渡成B型河口湾。B型河口湾的特征是上层净的向海流量比径流本身可以大一个数量级,而河口湾作为一个整体,它既不满溢,也不排空,所以必须有大量的海水自口门的下层进入湾内。例如美国的James河口湾,在口门的流出水量是James河流量的20倍,其中的19倍即自口门的下层海水进入来补偿。

3. 垂直均匀型河口湾(C型):如果潮汐的作用相对于径流来说超过B型河口湾,这样潮汐的混合作用使垂直的盐度梯度完全消失,则形成C型河口湾。其特征是存在纵向盐度梯度,即盐度从上游向海逐渐增加。而且,由于科氏力的作用还存在横向的盐度梯度,即面向海的左侧盐度较高,但在任何位置的垂向上,即由水表面到底部盐度基本一致。在C型河口湾,水流的净流向,一般是在面向海的左侧为上溯流,右侧为下泄流。Delaware河口湾和Raritan河口湾的开阔地段是C型的典型代表。杭州湾是我国著名的强潮河口湾,平均潮差达5.45米,平均涨潮流量达190 000米<sup>3</sup>/秒,而钱塘江的平均流量仅1 468米<sup>3</sup>/秒,其比值 $<0.01$ 。因此,杭州湾为C型河口湾。但是,由于长江淡水随潮流带入,因而盐度平面分布的总趋势为南高北低,东高西低,等盐度线呈东北—西南走向<sup>[13]</sup>。

4. 断面均匀型河口湾(D型):由于潮汐作用进一步加强,几乎完全压倒径流的影响而形成,其特点是盐度在垂向上和横断面上都是均一的,但还存在纵向的盐度梯度。真正断面均匀的河口湾,在自然界可能并不存在。

上述这四种理论模式,是根据淡水和咸水的相对关系,具体表现在盐度等值线的分布上。显然,这四种类型是逐渐变化的,并且对于某一个河口湾来说,可以随着径流量的季节变化,由一种类型转变成另一种类型。需要指出的是,这里以淡水和咸水之间的密度差为基础来划分盐水楔、部分混合、垂直均匀、断面均一这四种类型。事实上,无论径流还是潮流,均携带有悬浮泥沙,而由含沙量不同所引起的密度差比盐度重要得多。特别是高浓度悬沙的情况下,几乎完全控制了密度场的变化,使河口湾流场性质复杂化。

#### 四、河口湾的沉积作用

从地质历史上看, 现今所有的河口湾都是非常年轻的, 它们是在最近一次海平面上升到现在海面位置后才形成的。距今 15 000—18 000 年时, 海平面比现今低 130—150 米左右<sup>[11, 12]</sup>, 世界上大陆架的极大部分被暴露成陆。那时, 河口湾也可能存在, 但并非在现今的位置; 而是在陆架边缘。随着海平面的上升, 低位的河口湾被淹没、消失, 在较高位置可能出现新的河口湾, 直到海平面逐渐接近现今海面位置(距今 6 000—7 000 年前), 当今的河口湾才逐渐形成。因此, 河口湾具有现今的外貌轮廓, 充其量也只有几千年的历史。河口湾内泥沙的沉积速率, 一般情况下, 以靠近它的顶部最高, 逐渐向下发展, 最后整个水域被泥沙淤满, 河口湾的生命就结束了, 代之而成为三角洲平原, 这就是最简化的河口湾演变模式。当然, 河口湾演变的实际情况相当复杂。关于河口湾泥沙填淤率问题, 同它所处的环境、泥沙来源、动力状况等因素密切相关, 现概述如下:

1. 海平面的相对稳定性: 如果海平面是相对稳定的, 河口湾被泥沙填淤, 有可能逐渐转变成泛滥平原或三角洲平原; 如果海平面下降, 将促进河口湾的这种转变过程; 但如果海平面相对上升, 则可能复原河口湾, 并有利于其他新河口湾的形成, 所以海平面的变化不仅对河口湾的形成, 而且对河口湾的演变也有密切关系。此外, 河口湾地区的近期区域构造活动性, 对河口湾演变的影响也应予充分考虑。

2. 河口湾泥沙的输入率: 河口湾内沉积的泥沙, 有四种可能的主要来源, 即河流输入、外海输入、河口湾内两侧海岸的侵蚀以及生物沉积等。世界上各个河口湾的这四种泥沙来源的比例是不同的, 但实际上对任何一个河口湾来说, 要计算出这四种来源的各自百分比是相当困难的, 而往往只能确定以哪一种来源为主。显然, 生物沉积主要是浮游、自游和底栖生物的遗体和壳体骨骼沉积, 其相对量是很小的, 它们一般不可能成为河口湾沉积的主要来源。而生物更重要的作用可能是捕食过滤, 即捕食细的悬浮物质, 使之聚凝成粒状排泄物而沉积下来。但是, 从沉积物来源考虑, 这些并非是生物沉积(可以称为生物作用沉积), 而应该根据原始细悬浮物质的来源所决定。关于两侧岸滩的泥沙侵蚀, 可能对某些河口湾的沉积起一定作用。但是正如 Rusnak<sup>[6]</sup>所指出的“填淤一个河口湾盆地, 主要靠外部泥沙的供应, 盆地边缘的侵蚀仅仅是现已存在泥沙的再分配, 即此冲彼淤而已, 并没有减小盆地的实际容积”。世界上研究比较详细的许多河口湾, 其中极大部分所沉积的泥沙主要来自河流输沙。需要指出的是河流的径流大, 其输沙量不一定就大, 这与流域供沙状况有关。对某一条河流来说, 洪水时期的泥沙含量往往比较高。因此, 在河口湾的沉积作用中, 洪水时期的输沙量可能是十分重要的<sup>[5]</sup>。例如 Susquahanna 河(位于美国东中部, 流入切萨皮克湾)春季洪水期间排出的泥沙约占年输沙量的 70% 以上<sup>[7]</sup>。又如 Delaware 河(流入 Delaware 湾的主要河流, 位于切萨皮克湾的东北侧), 在 1955 年洪水期, 2 天中携带的泥沙比 1950—1966 年中任何一年的全年输沙量还多<sup>[7]</sup>。这些河流输沙的大部分在河口湾内沉积下来, 也有部分通过河口湾输入海洋, 特别是一些较小的河口湾, 洪水时期所带来的泥沙, 有可能其大部分经过河口湾而进入海洋。所以, 河口湾泥沙的实

际沉积率, 应该是河流泥沙的输入量与通过口门输出量之间的净输沙量。河口湾泥沙的另一种主要来源是海域泥沙, 随着涨潮流等通过口门输入。据有关资料, 某些河口湾的泥沙主要来自外部海域, 例如位于联邦德国和荷兰边界上的Ems河口湾, 根据Vam Stratten<sup>31</sup>的研究, 粒径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的物质约有85%来自北海, 只有5%左右从Ems河输入。其他, 如法国的Seine河口湾、英国的Mersey河口湾、美国佛罗里达州的Tampa Bay等也被认为海域是泥沙的主要来源。

此外, 对于河口湾泥沙的供给和沉积率, 人为作用也是很重要的。例如, 陆上由于植被破坏加速水土流失, 使河流的输沙增大; 或由于河流上修建水库, 使输沙减少; 河口湾内围垦筑堤以及其他工程措施等, 也均会直接影响泥沙的运移和沉积率。

3. 河口湾内的动力状况: 径流和潮流不仅把泥沙输入或输出河口湾, 而且由于它们的混合作用所产生的净的非潮汐环流, 也对河口湾内悬浮泥沙的沉降和再悬浮起重要作用, 并且这种非潮汐环流所形成的最大湍流带, 将是河口湾内的主要沉积区。一般来说, 盐水楔型河口湾和部分混合型河口湾的泥沙填淤率比垂直均匀型河口湾更为迅速。

从沉积作用强度和演变趋势考虑, 可以把河口湾分为下列四种类型:

1. 基本稳定型: 这类河口湾净的泥沙进出趋向平衡, 即使有局部冲刷或沉积, 如洪冲枯淤或洪淤枯冲, 但是年或多年平均的盆地形状保持稳定。实际上绝对的稳定是不存在的, 大部分河口湾以沉积为主, 如果目前河口湾的容积较大, 而泥沙的年淤积量相对很小, 则此类河口湾也就属于基本稳定型, 如美国的长岛海峡和切萨皮克湾。

2. 淤积消亡型: 如果河口湾输入的泥沙较输出的泥沙多得多, 势必在其内部逐步淤积, 形成宽广的浅滩、沙洲或岛屿, 使盆地容积渐趋缩小。例如, 长江河口湾内有崇明岛、长兴岛、横沙、铜沙浅滩等不断淤涨, 即是淤积消亡型河口湾的典型。

3. 空间移动型: 随着河口湾内泥沙的淤积, 其湾口两侧的陆地也向海淤长, 且其淤长速率大于或等于湾内的淤积率, 从而使河口湾的位置向海移动。有的河口湾长期地一岸淤涨, 另一岸侵蚀后退, 使河口湾盆地位置横向移动, 均属空间移动型。例如, 长江河口湾的两侧陆地(启东角和南汇嘴)向海伸展的速率不及其内部的淤积率, 因此, 它属于消亡型河口湾。而根据杭州湾的演变历史分析, 它的北岸长江三角洲南侧的淤长率大于其内部的淤积率, 使河口湾向东发展。并且, 杭州湾内部, 南岸长期趋于淤涨, 而北岸遭受侵蚀后退(由于人工建造了坚固的堤坝, 现在渐趋稳定), 使河口湾的位置向北移动, 所以杭州湾是一个较为典型的空间移动型河口湾。

4. 侵蚀扩大型: 径流和涨潮流所携带的泥沙较少, 而河口湾内的动力活跃, 侵蚀作用较强, 使泥沙的输出量大于输入量, 河口湾遭受侵蚀而扩大。这种河口湾在理论上应该存在, 但笔者查阅的一些国内外资料, 未发现较好的实例。

## 五、讨 论

我国有大量河口湾分布, 深入研究这些河口湾的流场性质和沉积作用过程, 将会充实和提高世界河口湾学研究的许多基本理论问题。例如, 杭州湾含有较高浓度的悬浮泥沙,

其表层可达 1 000 克/升, 底层甚至达 5 000 克/升以上, 这种悬沙浓度在垂向、横向、纵向上的梯度所引起的密度差, 显然比盐度梯度重要得多。据有关资料, 含沙量 1 000 克/升的密度相当于含盐量 1.3‰, 本文前述河口湾环流的各种类型是根据盐度差来划分的, 对于悬沙浓度对流场性质的影响, 世界上还没有人进行过定量的研究。杭州湾为我们提供了这方面研究的理想场所。对我国大量河口湾的系统研究, 亦将为河口湾的成因和演变模式提出许多新的观点。在生产实践上的意义更为直接和明显, 例如杭州湾北岸、伶仃洋的妈湾、乐清湾的大麦屿等, 均具有一定的建港条件, 需要深入开展流场性质和泊稳条件、泥沙运动规律和冲淤状况的调查研究, 为工程建设提供必要的基础资料。为此, 笔者就我国河口湾研究问题提出一些意见:

### 1. 关于现场观测问题

河口湾的流场性质和沉积作用过程, 主要通过野外实地观测和取样, 包括测量流速、流向和温盐深、取水样和底质样等, 目前我们采用多船同步的水文泥沙测验来获取基本资料。这种方法一般是每小时作一次测量和取样, 这对于流场复杂的河口湾而言, 这些资料是否真实地反映了实际情况是值得怀疑的。因此, 改进和提高野外现场观测的仪器设备是我国目前河口湾研究中亟待解决的问题。当前欧美国家对河口湾的调查多采用大量投放锚系 (mooring system), 每套锚系根据需要悬挂 3—4 套仪器, 每套仪器可以测量流速、流向、温度、盐度、深度以及混浊度等, 都是自动连续记录资料, 并用少量船只进行面上的观测与取样相结合。这样所获取的大量连续的系统资料, 对了解和分析河口湾流场和沉积作用提供了可靠的依据, 适当引进和仿造这些仪器设备, 是提高我国河口湾研究水平的首要关键, 希望能引起有关方面的充分重视。

### 2. 关于流场和冲淤状况的预测问题

各种港口码头建设、航道浚深、滩涂围堤等工程措施均会影响河口湾内的流场和冲淤状况, 因此必须进行预测研究。目前, 我国的有关部门对物理模型试验比较重视。其实, 欧美的一些著名物理海洋学家和沉积学家普遍认为, 河流上的冲淤状况预测, 应用物理模型试验是比较可信可靠的。但对河口湾来说由于流场太复杂, 用物理模拟试验预测变化趋势, 则是不可能的, 也是不可信的。据此美国最大的切萨皮克模型试验场近期已经关闭。他们认为在获取大量的、正确的现场观测资料的基础上, 应用数学模拟-电子计算机的复杂计算, 可以得到比较理想的预测变化趋势。这种情况值得我们借鉴, 笔者衷心地希望我国有关的主管部门把有限的经费应用于提高现场观测仪器设备和开展数学模拟研究上。

### 3. 关于统一规划, 合理开发利用问题

河口湾及其周围海岸地区, 具有丰富的建港资源、生物资源、岸滩土地资源等。河口湾是一个统一的整体, 任何一项工程措施都可能影响整个河口湾的流场和沉积作用现状。而一个河口湾, 往往跨越不同的省、市、县。因此, 要处理好局部与整体利益、近期与长远利益、单一利用与综合发展的关系, 必须进行统一规划以及加强污染监测、保护生态环境等, 真正做到合理开发利用。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Stommel, H., Recent developments in the study of tidal estuaries, *WHOI Tech. Rep.*, 1951, No. 51—53.
- [ 2 ] Pritchard, D. W., Estuarine circulation, *Proc. Amer. Soc. Civil. Eng.*, 1955, 81, No. 717.
- [ 3 ] Van Stratler, L. M., Transport and Composition of sediments, in symposium Ems-Estuarium, *Nordsee. Verhand. Koninkl. Ned. Geol. Mijnbouw. Genoot. Geol. Ser.*, 1960, 19, 279—292.
- [ 4 ] Pritchard, D. W., What is an Estuary: physical view point, in *Estuaries*, G. H. Lauff, ed., *Amer. Assoc. Adv. Sci.*, 1967, Wash. D. C., 3—5.
- [ 5 ] Postma, H., Sediment transport and sedimentation in the estuaries environment, in *Estuaries*, G. H. Lauff, ed., *Amer. Assoc. Adv. Sci.*, 1967, Wash. D. C., 158—179.
- [ 6 ] Rusnak, G. A., Rates of sediment accumulation modern estuaries, in *Estuaries*, G. H. Lauff, ed., *Amer. Assoc. Adv. Sci.*, 1967, Wash. D. C., 180—184.
- [ 7 ] Schubel, J. R., Tidal variation of the size distribution of suspended sediment at a station in the Chesapeake Bay Turbidity Maximum, Netherlands, *Jour. Sea Res.*, 5 (1971), 2: 252—266.
- [ 8 ] Margaret Gary, Robert McAfee Jr. and Carob L. Wolf, ed. *Glossary of Geology*, 1972, Amer. Geol. Institute, Wash. D. C.
- [ 9 ] Dyer, K. R., *Estuaries: A physical introduction*, John Wiley & Sons, Printed in Great Britan, 1973.
- [ 10 ] Geophysics of Estuaries Panel, etc. ed., *Estuaries, Geophysics and the Environment*, National Academy of Sciences, Wash. D. C., 1977.
- [ 11 ] Jin Changmao, Schubel J. R., Geomorphological and sea level changes on the Continental shelf of the East China Sea since the Late Pleistocene, *Proceedings of Korea-U.S. Seminar*, 1984, Seoul, South Korea, 117—127.
- [ 12 ] 彭阜南、睦良仁、梁居廷、沈华悌, 关于东海晚更新世最低海平面的论证, *中国科学 (B 辑)*, 1984, 6.
- [ 13 ] Jin Changmao, An estuary with special feature: Hangzhou Bay, China, *Marine Science Bulletin*, 1988, No. 1.