

瓯江河口输沙模式与应用研究*

祝永康 孙志林

(杭州大学河口港湾研究室)

提 要: 本文从河口塑造与输沙关系、流域泄沙与输移模式, 以及口外来沙与潮流输移特征等三方面, 探讨河口区的泥沙运移规律和补给来源。并在此基础上, 提出粗细不同粒级的造床泥沙按不同方式治理的设想。

主题词: 河口 输沙模式 潮流输移 瓯江

浙闽入海河流除个别河口外, 均具山溪性和强潮型特征。该类河口的潮流界与潮区界的间距甚近, 河床质既有山地河流性质的砾卵石堆积, 又有潮流输送的细粒泥沙充填。

潮区河口泥沙运移较无潮河口为复杂, 通过对资料相对较多的瓯江河口的分析, 我们期望以下几方面的总结, 对深入研究浙闽河口提供借鉴。

1 河口塑造与输沙关系

根据钻孔资料分析, 河口的泥沙来向、来量与运移规律, 与河口的发育历史有关。

瓯江干流长388km, 流域面积17 985km² [1], 是浙江第二大河。

现感潮河段长100km (图1), 其中梅岙以上为近口段 (径流段), 长32km; 梅岙—龙湾为河口段 (过渡段), 长约32km; 龙湾以下至温州湾的大门、洞头诸岛外缘称口外海滨段 (潮流段), 直线距离36km [2]。

古瓯江河口的外形, 与现今不同。大约距今6 000年前的全新世中期, 海平面较现今略高 [3], 根据相应的沉积物分布范围, 当时潮流上溯可达青田城西的黄浦附近, 较现今上移了13.5km; 现河口平原两侧均属海湾相环境, 水域外形属于主湾湾顶楔入峡谷、两侧支湾和沿程岸线曲折的潮谷型海湾。以后, 海平面虽有振荡, 主要是持续充填成为现今的河口湾。

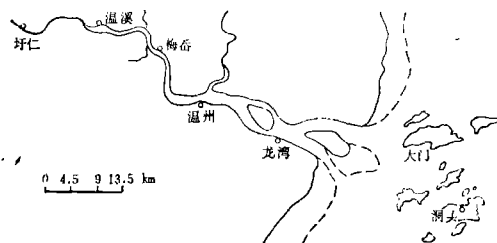


图1 瓯江口概图

Simplified map of Qujiang River estuary

本文1991年4月4日收到, 1993年1月21日收到修改稿。

* 本课题由浙江省教委省自然科学基金资助。论文曾参加1999年全国河床演变学术交流会、亚洲国际地理大会 (1990) 交流。

由溺谷型海湾演变成现今的河口湾大约经历了10 000年。据钻孔资料统计,总淤积量 $2322.6 \times 10^8 \text{ t}$,其中流域输入占26%,属粗颗粒粒级(大于 0.1 mm)约 $78 \times 10^8 \text{ t}$,细颗粒粒级(小于 0.1 mm)约 $525.8 \times 10^8 \text{ t}$ 。海域来沙占74%,几乎全属细泥沙物质(岩岛山麓除外)。这一泥沙充填过程有以下特点¹⁾:

(1) 溺谷型海湾首先在湾顶、支汊段淤积成陆,这是由于河口区有干流、支流注入,与流域来沙的比重增加有关。

(2) 潟湖型充填成陆属次之,目前河口两侧平原即为潟湖型充填,主要为海域来沙的细颗粒沉积物。

(3) 滨海平原是在潮流和波浪等海洋水文动力条件下形成的,沉积物除潮流挟运的细泥沙外,还有风浪塑造的由陆域供给的粗颗粒砂性物质构成的沙堤。滨海平原的形成年代和成陆顺序,约略迟于潟湖平原。

(4) 河槽成型和主槽淤积是河口湾形成过程中年龄相对最年轻的沉积类型,因为在成槽的同时,河口向口外延伸,由河流流域输入的粗颗粒泥沙呈条带状镶嵌于海相淤泥层之中。

2 流域泄沙和输移模式

流域来沙的数量由河口湾湾顶测站(圩仁,控制流域面积88%)资料的统计中得到。

根据多年统计(1950—1980),悬移质输移量多年平均 $273 \times 10^4 \text{ t}$ (最高年 $571 \times 10^4 \text{ t}$,最低年 214×10^4)。按流域侵蚀模数 178 t/km^2 计,与全国主要河流比较,属少沙河流^[4]。流域输沙的季节分配极不平衡,枯水季节江水清澈见底,输沙量接近为零;洪水季节,含沙量最高达 2.68 kg/m^3 ,汛期输沙占全年95%。床底粗大颗粒的卵石,在洪水输移期间有明显的曳移,但缺实测资料。

圩仁站900多个悬移质样品的粒径分析结果见表1,由表可知,属洪季悬移质输移的粗颗粒占18.66%,小于细砂的粉砂粒级占56.44%,粘土淤泥粒级占24.90%。

表1 瓯江圩仁站悬移质粒度特征

Size characteristics of suspended load (at Xuren Station) in the Oujiang River

粒级百分含量%				粒 度 参 数				资 料	
1-0.5 (mm)	0.5-0.1 (mm)	0.1-0.01 (mm)	0.01-0.001 (mm)	标准差 δ	偏 度 Sk	峰 态 Kg	峰态描述	d_{50} (mm)	年 代
0.46	18.20	56.44	24.90	0.108	1.04	1.77	单峰	0.066	1964—1967

粒度参数以福克公式计算。

悬移质在洪季输移中的粒级分级输移量,如果按多年平均总输移 $273 \times 10^4 \text{ t}$ 计,则按方程计算²⁾,得粗颗粒悬移质由流域进入河口的每年为 $50.97 \times 10^4 \text{ t}$,粉砂为 $154.08 \times 10^4 \text{ t}$,淤

1) 祝永康等,瓯江溺谷型海湾的充填成陆和河口湾的形成过程,1992。

2) 祝永康、孙志林,潮汐河口推移质输沙率计算,全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集(第一卷) 中国水利学会泥沙专业委员会,1992。

泥、粘土等细颗粒为 $67.98 \times 10^4 \text{t}$ 。

在缺失实测推移质资料的条件下，断面推移质输移量可按悬沙输移量的10%估算¹⁾，故由流域进入河口的垵仁站，多年平均卵砾石（包括细砾）的输移量为 $27.3 \times 10^4 \text{t}$ 。

综上所述，由流域输入河口区的泥沙总量每年约 $300 \times 10^4 \text{t}$ ，而它们的输移过程和规律是：

（1）卵砾石的输移主要在洪峰下泄时期，每年估算为 $27.3 \times 10^4 \text{t}$ ，一般停积在梅岙以上的河口径流段。从河床沿程定量统计，表2列出潮区界（温溪）和潮流界（西周）的砾石统计值，统计表明，推移质的沿程细化是清楚的。

表 2 瓯江河口径流段床底砾石统计
Statistical data of gravel bed materials in Onjiang River

地 点	粒 径 范 围	粒 级 百 分 含 量 %							平均粒 径 (cm)
		>10 (cm)	10-6.0 (cm)	6.0-5.0 (cm)	5.0-4.0 (cm)	4.0-3.0 (cm)	3.0-2.0 (cm)	2.0-1.0 (cm)	
温 溪		1	20	16	13	14	20	13	6.20
天王寺（西周）		0	11	10	15	26	12	16	3.72

注：采样点采样，以100颗为统计标准。

（2）中等大小的粗、中、细砂粒级物质的输移由图2、3可知：沉积于河床底部的物质，河口径流段以卵砾石和粗砂为主；而河口过渡段则逐渐转为中细砂为主；出口门河段，细砂仅呈舌状分布。造成该河床沿程沉积的分异，是由于洪水期因洪峰下泄，河口顶端原来的砂性物质呈悬移质下泄，但随着洪水波向下游逐渐展平，流速相应减弱，部分粗颗粒也逐渐转为推移质，悬移质内粒径迅速变细。表3是上游洪峰（总径流量为 $12.46 \times 10^8 \text{m}^3$ ）过

表 3 洪水影响下瓯江口悬移质的潮流输移（1960.6.25-26）

Tidal flow transport properties of suspended load in Oujiang River estuary
under runoff of high water

站 名	项 目	粒 级 百 分 含 量 %				少量特性	水流特性
		>0.1 (mm)	0.1-0.01 (mm)	<0.01 (mm)	d_{50} (mm)	含沙量 (kg/m^3)	平均流速 (m/s)
温州 1 #	涨	15.43	62.97	21.6	0.06	0.511	0.623
	落	21.98	58.25	19.67	0.064	0.296	0.876
蒲州 11 #	涨	12.97	73.53	13.5	0.06	1.024	0.559
	落	10.56	74.47	15.03	0.046	0.732	0.398
开洋 7 #	涨	38.11	54.22	7.67	0.07	1.186	0.613
	落	33.7	78.22	11.37	0.042	1.054	1.19
龙湾 13 #	涨	0.82	66.07	33.11	0.017	0.954	0.818
	落	0.43	67.41	32.16	0.020	1.274	0.712

1) 张书农,河流泥沙讲义(上册)。华东水利学院(1981年清华大学泥沙进修班翻印),1976。

后的悬沙粒径分布状况。此时,温州—龙湾河段的悬移质粗颗粒(砂粒级)有10%—40%,明显地反映了部分粗颗粒已转为推移质输移。

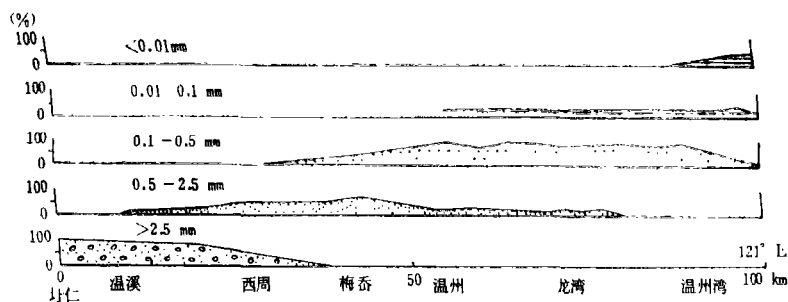


图 2 瓯江河口底质沿程变化

Longitudinal changes of bed material of the Oujiang River estuary

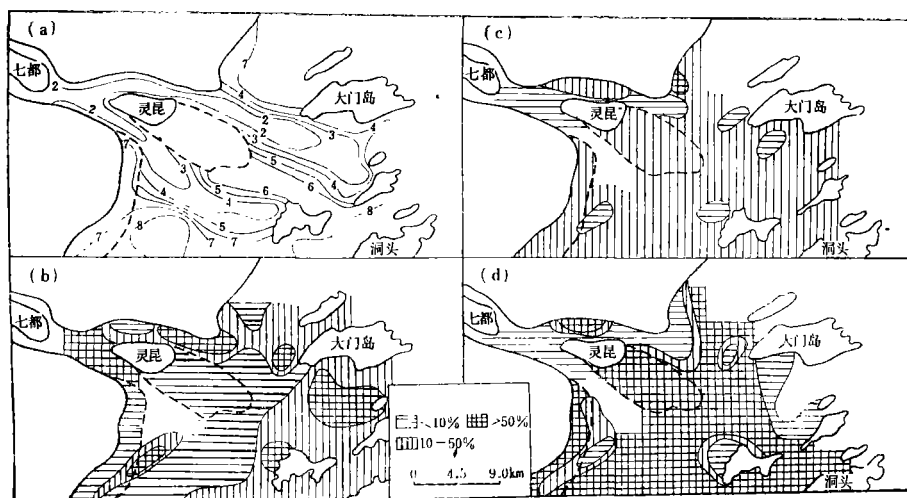


图 3 瓯江口外底质平面分布

Plane distribution of bed materials in the Oujiang River mouth

枯水季节,河口动力以潮流作用为主,表4是枯水径流下悬移质沿程的粒径分布状况,它表明涨落潮的流速场与表2流场相当,但在流域输沙少,海域来沙为主的条件下,粗颗粒(砂粒级)在悬移质内仅占7%,说明在枯水季节,原属流域来沙的粗颗粒已以推移方式进行。

(3) 粗粉砂以下的细颗粒物每年由流域输入河口的有近 $200 \times 10^4 \text{ t}$,均以悬浮方式参与温州湾和口内河段高滩高洲的塑造。

值得提及的是,在梅岙—龙湾的河口过渡段,河床底质属中细砂组成,根据地形资料统计,河段冲淤幅度达百万吨之巨(一个洪水期),年内可达数百万吨¹⁾,这与流域每年下泄

1) 南京水利科学研究所等,温州港航道整治一、二期工程总结,1977。

表 4 枯水径流下瓯江口悬移质的潮流输移特征 (1970.10)、
Tidal flow transport properties of suspended load in the Oujiang
River estuary under dry season (1970. 10)

项 目			粒 级 百 分 含 量%			粒 径	沙量特性	水流特性
地 点			>0.1 (mm)	0.1-0.01 (mm)	<0.01 (mm)	d ₅₀ (mm)	含沙量kg/m ³	平均流速 m/s
口 内 河 段	江 心 屿	涨	7.3	51	41.7	0.014	4.47	0.73
		落	7.7	58.4	33.9	0.02	4.84	0.73
	杨 府 山	涨	1.9	55.8	42.3	0.012	3.71	0.44
		落	3.6	47.6	48.8	0.0105	3.44	0.425
	状 元 桥	涨	1.1	58.9	40.0	0.0135	2.30	0.678
		落	0	58.5	41.5	0.012	2.60	0.665
	黄 华	涨	0.6	62.9	36.5	0.014	1.33	0.67
		落	0.2	70.0	29.8	0.016	1.45	0.775
温 州 湾	小 五 星	涨	5.3	56.3	38.4	0.014	0.287	0.217
		落	3.9	68.2	28.9	0.02	0.420	0.291
	黄 大 岙	涨	3.0	60.5	36.5	0.018	0.368	0.352
		落	4.4	63.6	32	0.02	0.376	0.337
	南 山	涨	1.0	71.6	27.4	0.022	0.267	0.269
		落	2.1	72.4	25.5	0.019	0.27	0.297

量相差甚远。这种现象，我们在1983年实际计算中（应用梅耶-彼德公式）也证实过¹⁾，如该年6月为12月份的3倍。造成该冲淤方式的原因有二：1.该河段有较厚的中细砂层（根据河床钻孔资料揭示，河槽内的中细砂层厚度在6—15m左右），这与河口河床东延的发育历史有关，即汛期泄沙除流域直接提供外，尚有历史时期河床累计淤积的底沙，也可供下泄。2.汛期冲刷段常出现在本段的上段，一般断面扩大，被刷的底沙又淤积于下游河段，断面缩小。冲刷和淤积段的位置和大小与上游洪峰的强度、持续时间有关。枯季，河口恢复为以潮流为主的时期，在下游河段，随涨潮流沿床底逆河而上以推移质搬运方式将底沙回填于原冲刷河段，使其达到相对平衡。这种分别为上游洪季径流和下游枯季潮流为主的造床动力，在河床纵向变形上构成大冲大淤或上游段洪冲枯淤和下游段洪淤枯冲的演变特点。近年来通过动床河口物理模型试验也得到了证实²⁾。

3 口外来沙和潮流输移特征

河口细泥沙的来源，杭州大学在60年代初曾提出“径流输沙、潮流输泥”之说，80年代

1) 祝永康、孙志林等，瓯江南口堵坝工程对北口河床演变的影响分析与整治对策，1992。

2) 李浩麟等，瓯江灵珊南口堵坝围垦对航道影响模型试验研究，1992。

初, 经过多次综合调查和研究¹⁾, 认为在10m水深的口外海域, 根据地形变化量的量值统计, 约1/10的细泥沙物质由流域提供, 9/10的细泥沙物质来自海域。文献报道, 口外来沙除了有沿岸流南下的长江入海悬浮物外^[6], 还有陆棚输入^[6-8]。通过沉积层的体积计算, 作者也获得了河口以潮流输移为主的细泥沙物质主要来自口外的认识²⁾。

河口湾的口内河段, 发育了典型的两头清中间浑的高含沙量区, 有人称之为最大浑浊带(turbidity marimum)^[9]。

潮汐河口高含沙量区的发育, 是一个普遍的自然现象^[10], 我国除了属咸淡水弱混合型的长江、珠江河口有发育外^[11-12], 在属咸淡水强混合型的浙江椒江、甌江河口也均有发育, 而且, 椒江河口还发育了浮泥层。对于它们的成因机制, 除了一般论述的有充分的泥沙供给、河口环流、细泥沙絮凝等诸因素外, 在河口环流并不发育的强混合型类型, 我们也有过进一步的说明^[13], 就甌江口而言, 高含沙量区的特征与运移规律为:

(1) 枯季大潮期间, 由于潮流为主要造床动力, 沿程大于 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 的含沙量可以伸入到河口径流段的西周、洋湾一带, 所以, 在河床砾卵石的滩面上, 有潮流挟运的细泥沙沉积。高含沙量区的核部上溯上限可达河口过渡段的上段, 即温州至梅岙之间, 上下迁移变幅18km(图4)。

(2) 上游径流增加, 山水的顶浑和释稀作用明显, 但高含沙量区的沿程分布依然存在,

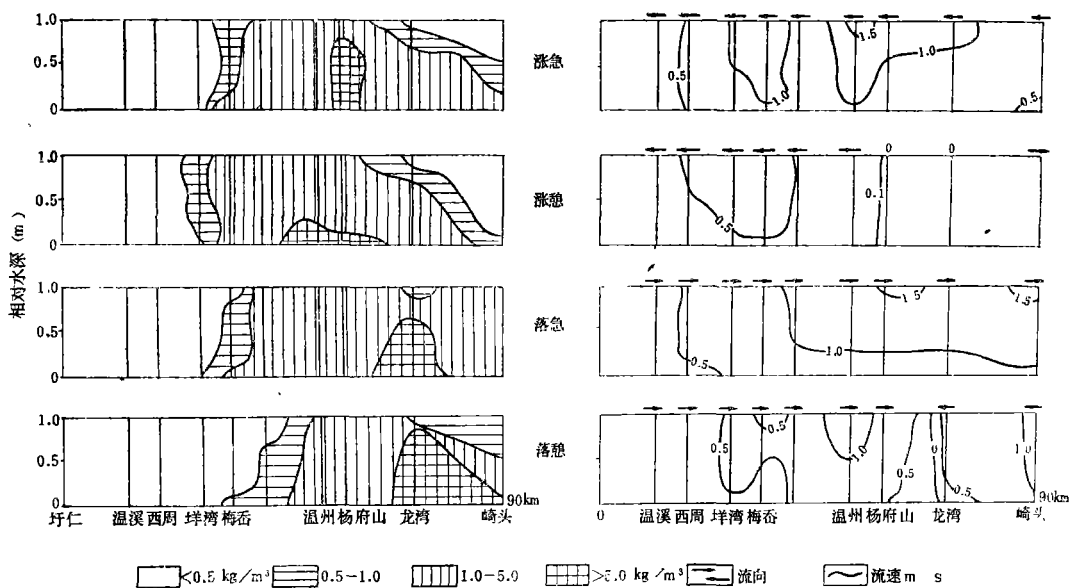


图4 甌江口悬移质含沙量的时空变化(枯水期)

Variation of suspended sediment concentration with time and space
in the Oujiang River estuary under dry season

1) 全国海岸带和海洋资源综合调查温州试点队, 统筹规划全面安排因地制宜开发利用温州地区海洋资源, 华东师大出版社, 1980。

2) 祝永康等, 甌江溺谷型海湾的充填成陆和河滩的形成过程, 1992。

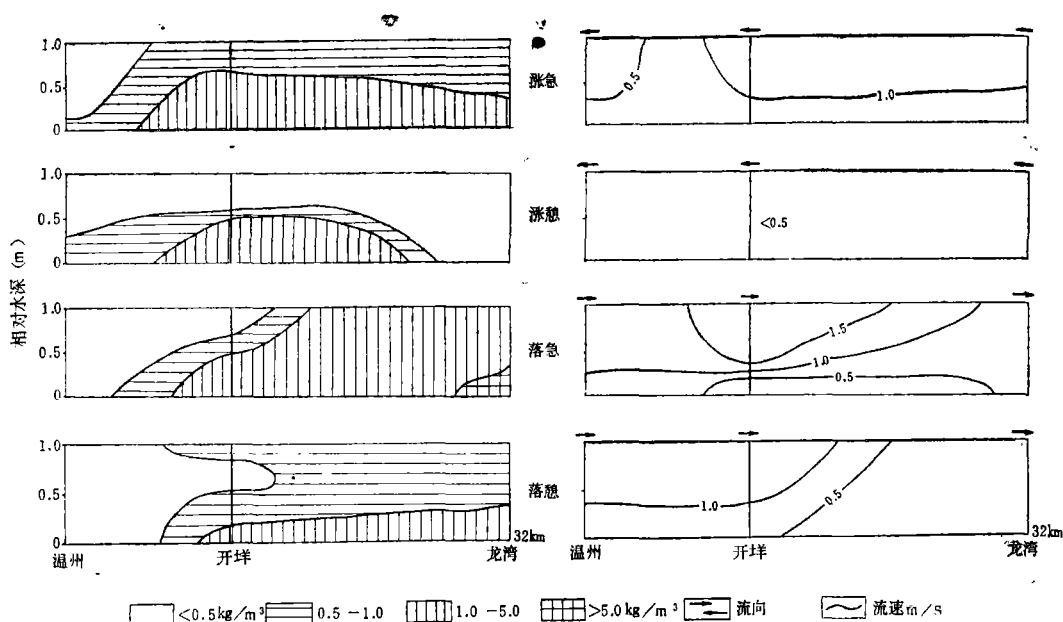


图5 瓯江口悬移质含沙量的时空变化 (洪水期)

Variation of suspended sediment concentration with time and space
in the Oujiang River estuary under runoff of high water

图5是据1960年6月25—26日温州、开垵涂、龙湾的同步测验资料整理 (此次洪峰最大流量 $10800 \text{ m}^3/\text{s}$, 洪水总径流量 $12.46 \times 10^8 \text{ m}^3$, 实测系洪峰过后的第七天)得到。统计表明, 含沙浓度释稀明显。

(3) 高含沙量区的核部位置迁移与山、潮水相互作用有关, 我们还可以通过定量形式表达。设高含沙量核部位置以相对值 l/L 表示 (l ——河口顶点至核部位置间距离; L ——河口总长度), 山潮水力量对比以 Q_0^2/Q_f 表示 (Q_0 ——山水径流量; Q_f ——涨潮流量), 根据4次实测同步资料, 得到:

$$\text{低平潮: } \frac{l}{L} = 0.0172 \frac{Q_0^2}{Q_f} + 0.565 \quad (1)$$

$$\text{高平潮: } \frac{l}{L} = 0.0196 \frac{Q_0^2}{Q_f} + 0.468 \quad (2)$$

前者表明落潮低憩时期核部的下移位置; 后者表明涨潮高憩期间核部的上溯位置。方程具有预测意义。

4 河口输沙对港航的影响及其防治对策

4.1 粗颗粒物输移的影响与防治对策

与温州港港航有关的粗颗粒泥沙以推移质方式输移, 主要分布在温州至龙湾河段, 其

表现为:

(1) 由中细砂组成的低滩低洲, 在洪水径流作用下会大幅度下移, 这种下移作用会引起河段航道和港池的改变, 现温州港的朔门港区淤浅与楠溪口至七都河段航道多变, 均与此低滩低洲下移有关。

(2) 低滩低洲的下移, 也会影响下段分汊河段分流、分沙比的改变, 导致主、支汊互为交替并引起航道或港池的改变与废弃。现温州港上游段三条江的演变¹⁾和七都分汊段主支汊的互为转化为典型。

控制粗颗粒泥沙组成的低滩低洲的迁徙, 除促使其自然淤涨成高滩高洲达到相对稳定外, 主要靠人为的保滩和固滩工程。若工程措施达到了保滩和固滩的目的, 原有的滩槽和主支汊易位就可以防止, 港池和航道亦得到了稳定。

近20年来, 温州港港区和航道曾进行过4次较大的工程整治, 已见良好的效果²⁾。

从减少原有床沙质数量着眼, 疏浚工程和建筑用砂的河床取沙, 亦是防治对策的重要内容。结合瓯江的整治工程, 多次疏浚活动均是有效的²⁾, 但建筑用砂的取沙, 有的地段由于与整治规划线没有很好结合, 结果有可能引起相反的作用, 如七都北汊出口段的滩地取沙活动, 曾引起了主槽分流, 从而影响到龙湾港区的水深稳定。

4.2 细颗粒泥沙输移的影响与防治对策

细颗粒泥沙在悬浮输移过程中可以在浅水区塑造高滩高洲, 其形成机理已有专述^[12]。在深水区淤积, 易使港池或航道淤浅, 起降低泊位规格和减小通航能力等不利作用。

细颗粒泥沙参与港池或航道淤浅, 主要发生在单一河段或分汊河段趋向急变的前后, 如在单一河段, 往往是洪水下泄、低滩低洲迁徙引起了深槽淤积; 又如分汊河段汊口急变, 可引起分流分沙比的改变, 导致主支汊易位。淤积河段的动力指标是涨潮流速大于落潮流速, 亦即一个潮期内涨潮进沙大于出沙, 河床淤积, 反之, 则冲刷。根据贺松林的涨落潮优势流统计^[13], 我们也发现在涨潮优势流地段, 多呈现为细颗粒泥沙落淤, 床面细化; 反之, 落潮优势流地段, 河床冲刷, 床面粗化。

要控制上述高含沙量区输移的淤积, 最理想的方法是改变河段流场的水流结构, 使之达到在潮流为主要动力条件下, 仍能保持落潮优势流的流势, 从而构成为每潮出沙大于入沙的输移形式。

改变局部河段水流结构, 一般采用工程措施。瓯江口整治工程, 曾累积到不少的有用经验, 对工程的技术尺寸和建筑物的设计高程均有认真总结^[5]。

位于口外的温州湾, 细颗粒悬浮物主要是塑造了大片的泥质滩涂, 目前多数整治工程是围垦活动。海塘工程一方面使部分高滩变陆, 另一方面因滩地剖面重新调整, 又利于滩面持续淤涨。所以, 从整体上考虑, 这些活动有利于悬移质被截留而成为沉积层的一部分。

1) 杭州大学海洋地质地貌专业, 温州港第一期整治工程与河床演变, 1974。

2) 南京水利科学研究所等, 瓯江口航道整治规划设计商榷, 海岸工程会议论文集, 1982。

参 考 文 献

- 〔1〕 周翔.温州港发展展望.科技通报(杭州), 1986, 2 (3): 215-223
- 〔2〕 毕敦洪等.瓯江河口区海岸和河谷地貌.海洋文集.北京:海洋出版社, 1964, (2): 46-55
- 〔3〕 杨建明等.关于海平面变化研究理论的新进展.见:中国地理学会地貌与第四纪专业委员会编.地貌及第四纪研究进展.北京:测绘出版社, 1991, 29-35
- 〔4〕 武汉水电学院泥沙工程教研室.河流泥沙工程学.北京:水利出版社, 1981, 4-8.
- 〔5〕 恽才兴等.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, 1981, 12 (5): 391-401
- 〔6〕 孙英等.浙江海岸的淤涨及其泥沙来源.东海海洋, 1984, 2 (4): 34-42
- 〔7〕 逢自安.谈谈冰后期海侵以来的东海海岸砂源.东海海洋, 1984, 2 (2): 14-20
- 〔8〕 沈焕庭等.长江口最大浑浊带的变化规律及其成因探讨.见:海洋河口区动力地貌沉积过程论文集, 北京:科学出版社, 1985, 76-89
- 〔9〕 H.Postma. Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment, Estuaries A.A.A.S. 158-179
- 〔10〕 田向平.珠江口伶仃洋最大浑浊带研究, 热带海洋, 1986, 5 (2): 27-35
- 〔11〕 毕敦洪等.椒江河口过程初步研究.泥沙研究, 1984, (3): 12-26
- 〔12〕 祝永康.闽江口分汊河床的特征、成因与类型.海洋学报, 1991, 13 (3): 363-370
- 〔13〕 贺松林.瓯江河口内外淤积带的形成分析.海洋学报, 1983, 5 (5): 612-623

欢迎订阅《长江流域资源与环境》

《长江流域资源与环境》是中国科学院资源环境科学局和中国科学院武汉文献情报中心联合主办的综合性学术刊物(国内统一刊号CN-42-1320/X国际标准刊号ISSN1004-8227)。《长江流域资源与环境》集中报道长江流域资源开发、生态环境保护与经济建设等方面的科研成果,为从事资源、环境科学的科研工作者、高等院校师生、决策机构管理人员提供服务。《长江流域资源与环境》为季刊,每期5.00元,全年订价20.00元。凡需订购者可向编辑部函索订单或直接从邮局、银行汇款至编辑部。

编辑部地址:武昌小洪山,中国科学院武汉文献情报中心内。

银行帐号:中国科学院武汉文献情报中心

2559088010052434工商银行水果湖办事处2559。

邮编: 430071 电话: 723711-607

THE STUDIES ON SEDIMENT TRANSPORT MODE AND ITS APPLICATION IN THE OUJIANG RIVER ESTUARY

Zhu Yongkang Sun Zhilin

(Hangzhou University)

Subject terms: estuary, sediment transport modes, tidal flow transport, Oujiang River

Abstract

In view of the general character of several mountainous macrotidal estuaries in the provinces of Zhejiang and Fujian, the authors try to probe both the universal law of sediment transport and, the control means in estuaries of this kind by the monographic research on the Oujiang River estuary. The methods for geography and river mechanics as well as sedimentology are applied to the detailed analysis of sedimentation in the estuary on three aspects: (1) a relation between the formation of an estuary and the sediment transport. (2) sediment from the river basin and its transport modes. (3) sediment from the adjacent coastal waters and its characteristics of transport by the tidal current. The basic conclusions are as follows:

1. The coarse sediment grains larger than 0.1 mm in size are widely distributed in the estuarine channel, among which the gravel particles move downstream by way of bed load and deposit in the upper estuary while the sand particles, except some inlaid in the gravel deposits as well as a small amount moved as bed load and tongued eastward in the Wenzhou Bay, are largely transported in such ways as either rolling and saltation or suspension into the lower estuary during flood season. In dry season the sand particles move there and back as bed load by the tidal current in the main channel.

2. According to quantitative analysis on the measured data, the amount of coarse sediments from the Oujiang River basin every year, approximately 780 000 tons is much less than that of erosion and deposition in the estuary, several millions of tons. This shows that the movement of sand particles on local estuarine bed is the main causes for erosion and deposition of the estuary, and thus should be considered emphatically in the estuarine regulation.

3. Transported in suspension, the fine sediment grains less than 0.1 mm in size are mostly derived from the adjacent coastal waters besides a little from the Oujiang River. An obvious feature of suspended sediment transport is the presence of a turbidity maximum which migrates to and from with the tidal current. The maximum distance of shift is about 18 km.

4. Because the coarse sediment differs from the fine in the laws for transportation and deposition, it is suggested that the different control principles of both sediments should be adopted for the estuarine regulation.