



闽江口外沙地区河道演变分析

魏光裕

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 闽江口 2.0 万吨级入海航道在口外有 2 处拦门沙, 即内沙与外沙。在以陆域来沙为主的河口中, 该类型河口有一定的代表性。探讨以下两方面的问题: 1) 根据外沙的地形、水流、河型以及实测水文、泥沙等资料, 对外沙的成因进行分析。结论是: 弯道环流是外沙的主要成因。2) 通过对 1886—1986 年河口实测地形图的分析, 并结合外沙地区泥沙淤积过程的演绎, 提出“水流具有自动转换阻力特性”的概念, 初步从理论层面诠释了主流改道分汊的机理, 并给出改道的条件。

关键词: 河道演变; 闽江口; 外沙成因; 改道分汊; 机理

中图分类号: U 611 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)04-0170-07

Channel evolution at outer bar of Minjiang estuary

WEI Guang-yu

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: There're two bars outside the entrance of Minjiang river 0.2 million DWT entrance channel, i. e. the inner bar and the outer bar. It is a representative river estuary at which sand mainly comes from the land. This paper probes into two issues: 1) To carry out an analysis on the formation causes of the outer bar according to the topography, flow & river type and based on the real-measured data concerning hydrology and sediment, and get the conclusion that the circulating current in the river bend is the main formation cause of the outer bar. 2) Based on the analysis of the real-measured topographic map of the river estuary from 1886 to 1986, and considering the siltation process at the outer bar area, to propose the concept of “current having the characteristics of automatic transmission of resistance”, and explain theoretically the mechanism of diversion and bifurcation of the main current and put forward the condition of diverting.

Keywords: channel evolution; Minjiang estuary; formation cause of outer bar; diversion and bifurcation; mechanism

1 概况

1.1 河段的划分

闽江是福建省第一大河, 集水面积 60 992 km², 占全省面积的半壁江山。主流源头在沙溪的上游, 由源头至外沙, 全长 567 km。各主要河段划分见图 1。

由源头至南平, 长 328 km, 为上游段; 南平至水口, 长 98 km, 为中游段; 水口以下为下游段。从地形上看, 约 90% 的河段穿行于高山峡谷之间, 河道坡陡流急, 是典型的山溪性河流。

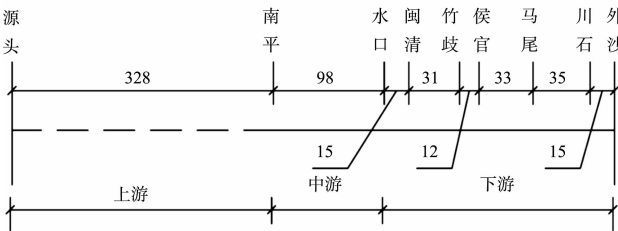


图 1 闽江河道里程 (单位: km)

1.2 来水来沙条件

闽江竹歧水文站以及长江、黄河相关水文站的实测资料见表 1。由表 1 可知: 1) 闽江径流模

数最大，说明该河径流量丰沛；2) 产沙模数闽江很小，说明流域供沙量不丰；3) 含沙量很低，仅 0.135 kg/m³，说明河道（含河口）即便有所淤积，强度也不大，有利于整治。

表 1 河道水文泥沙特征值

河流	站名	多年平均值					
		面积/km ²	径流量/亿 m ³	沙量/万 t	含沙量/(kg·m ⁻³)	径流模数/(m ³ ·km ⁻²)	产沙模数/(t·km ⁻²)
闽江	竹歧	54 550	540.0	730	0.135	989 918	134
长江	大通	1 705 383	8 630.0	49 100	0.557	506 045	289
黄河	利津	751 869	419.4	108 000	25.600	55 781	1 436

注：沙量均指悬移质沙量，不包括推移质。

1.3 潮汐

闽江下游自侯官镇起进入河口区（图 1）。从侯官以下至外沙为感潮河段。潮型为正规半日潮，潮波近似驻波，其潮位沿程变化见表 2。表 2 说明：无论是闽江干流（亭江、琯头站），还是河口（芭蕉尾站），以及支汊（梅花水道），其平均潮差均在 4 m 以上，属强潮河口。

表 2 实测潮位特征值 m

位置	平均高潮位	平均低潮位	平均潮差
亭江	4.72	0.65	4.07
琯头	4.59	0.50	4.09
芭蕉尾	4.68	0.29	4.39
梅花	4.61	0.16	4.45

1.4 潮流

各有关测站涨、落潮平均流速见表 3。总的来看，各测站的流速均是落潮流速大于涨潮流速，

落潮优势流明显。

表 3 1986 年 6 月实测垂线流速

位置	潮别	平均流速/(m·s ⁻¹)	
		涨	落
亭江	大	0.643	0.756
	小	0.485	0.681
川石岛	大	0.322	0.680
	小	0.228	0.454
梅花水道(浮岐)	大	0.468	0.499
	小	0.310	0.457

1.5 床沙组成

外沙河段航道床沙组成见表 4。航道床沙组成中，中砂和细砂（0.5 ~ 0.125 mm）占总量的 74.33% ~ 83.77%，极细砂以下的占总量的 5.1% ~ 6.5%，黏土含量很少。床沙底质相对较粗。

表 4 外沙航道表层粒度组成

取样日期	各粒径含量/%							中值 粒径/mm
	>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.125~0.25	0.063~0.125	<0.063	
1987-06-20	0.06	0.66	1.87	1.80	72.93	5.66	0.82	0.203
1987-07-20	0.16	1.22	9.76	55.52	28.25	2.89	2.20	0.327

1.6 汉道分流条件

闽江入海水道有 5 条：梅花水道、川石水道、乌猪水道、壶江水道和熨斗水道。特点如下：

- 1) 这 5 条水道均没有各自独立的流域范围和面积，本身均不具备生成和爆发洪水的条件。
- 2) 5 条水道只有共同的流域面积和范围，即闽江干流亭江断面以上的流域面积和范围，并通过该断面向各水道按一定比例分水分沙。
- 3) 当亭江断面的流量为峰值时，分入各水道

的流量均为峰值；当亭江断面的流量为枯值时，分入各水道的流量均为枯值。不可能同时出现有的水道是峰值、有的水道是枯值的状况。

- 4) 经对实测资料分析，确认由于流亭江断面向梅花水道分流的比例：洪季大潮为 28%，枯季大潮为 23%。

1.7 研究重点

闽江 2.0 万吨级的入海航道共有 6 处碍航浅滩，其中除外沙浅滩外，其余浅滩已于 1991 年后

陆续实施工程整治并卓有成效；1993 年 4 月，水口电站投入运转。上述两项工程实施后，河道的演变发生了重大变化，有的甚至出现逆转趋向，河道演变的研究必须考虑这一背景。为此，本研究拟将重点放在 1886—1986 年的时间跨度内，并尽可能采用同期的实测资料和数据^[1-2]。重点研究 2 个问题：1) 外沙的成因；2) 主流改道分汊的演变机理。

2 外沙的成因

2.1 河势

闽江入海航道的口门在川石水道的玉霞山灯—乌猪洲洲头断面（图 2），川石岛是孤悬在口外海域

中的一处小岛。由口门至外沙 -5 m 堆积体的外缘全长 17.5 km。其间按动力条件可划分为 2 段。

1) 内沙河段。

自口门至芭蕉尾稍下的 4[#]浮（图 2），长约 7 km，为内沙河段。段内还有壶江水道、熨斗水道。川石水道口门宽约 1 000 m，断面平均水深约 10 m。在口门附近存在一处 -5 m 水深的落潮槽，据水文测验，全潮平均为净向下游输沙，落潮流是塑造本河段河床的主要动力。在芭蕉尾上下，存在一处碍航浅滩，即内沙浅滩。该沙体相对较小，这也说明来自川石水道的泥沙只有极小部分淤积在这里，大部被携至外沙地区落淤。

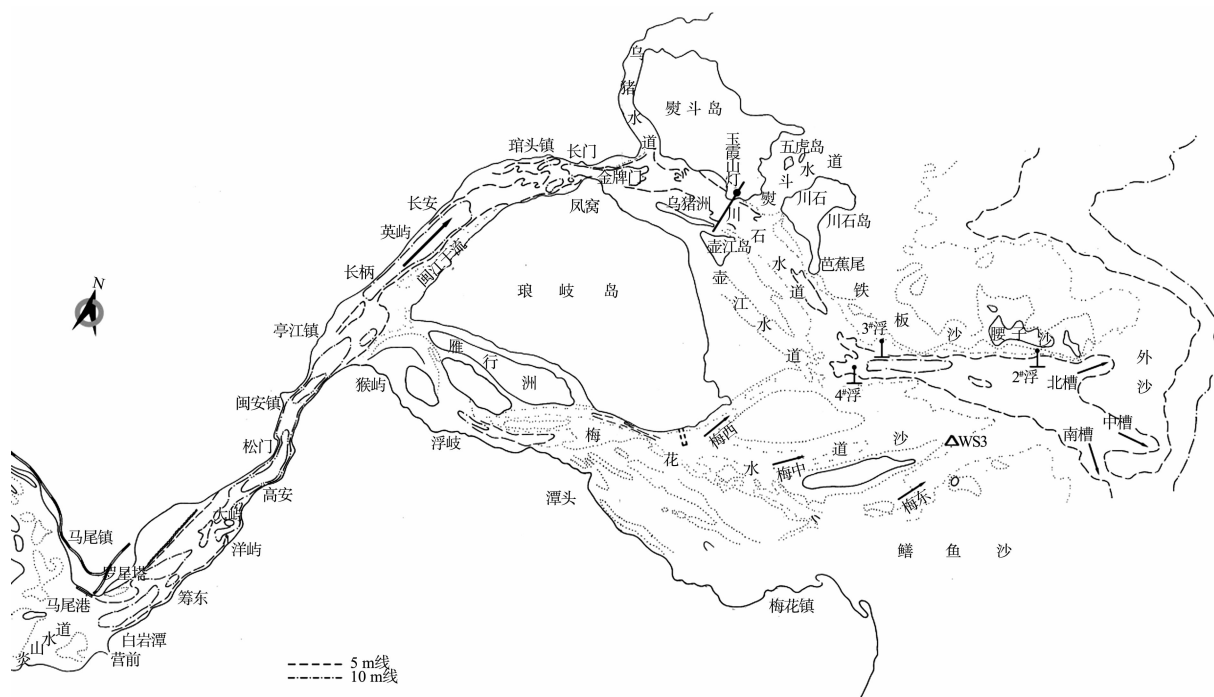


图 2 闽江口河势

2) 外沙河段。

上自 4[#]浮，下至滨海 -5 m 线外缘，长约 10.5 km，为外沙河段。在 4[#]浮附近，-5 m 主槽宽约 1 km，为一典型的涨潮槽。下行约 10 km，主槽拓宽为 6 km，平面上呈上窄下宽喇叭口状，外沙沙体即横亘于此。外沙沙体面积约 20 km²，其上有 3 条入海通道，即北槽、中槽和南槽（图 2）。弯道环流是塑造本河段河床的主要动力。川石水道左侧为铁板沙堆积体，其滩顶高程为 1.0 m，右侧为梅花水道口外拦门沙堆积体的外缘，其上分布有

梅西、梅中和梅东 3 条入海通道。在稍高潮位时，梅花水道的落潮流沿着宽达 10 km 的拦门沙沙体，漫滩行水，一路伴随在川石水道的右侧，边汇入川石主流，边进入大海。

2.2 成因

由图 2 知，川石主流出口门后，因受左侧川石岛的控导，落潮流轴线的走向是 308°~128°的东南向。在脱离芭蕉尾后，靠其惯性本可继续南行，但因受到梅花沙沙体的阻隔，水流欲进无路，只得急转弯，使水流由原来的 308°~128°的东南

向，改为 265°~85° 的东北向。落潮流在转向的过程中，自然天成般的走出一处大弯道，这一弯道对外沙的形成与发展起了决定性的作用。

挟沙落潮流脱离芭蕉尾进入弯道后，就被弯道环流所控制，根据弯道环流理论，弯道的凹岸即右岸将发生冲刷，其中包括对梅花沙堆积体前缘的冲蚀；弯道的凸岸即左岸将发生淤积，造成铁板沙沙体不断增高、拓展。更重要的是在弯顶附近将形成较高的流速区，并衍生出 -10 m 的局部冲刷深槽。从历史测图看（图 3a）），1886 年该深槽尚未出现（据查，至 1913 年已出现 -8 m 深槽），而在 1934 年测图上（图 3b）），已呈现完整的 -10 m 深槽。此后该深槽一直存在，只是形态、尺度有所差异和变化。-10 m 局部冲刷槽稳定的存在，标志着外沙河段的大弯道已臻成熟、定型。图 4 为 1886—1973 年共 4 次主泓线的叠加图，显示在弯顶一带叠加相当密合，但在 2[#]浮以下主泓线较分散。这里已接近外沙堆积区，水流扩散、分汊属正常现象。

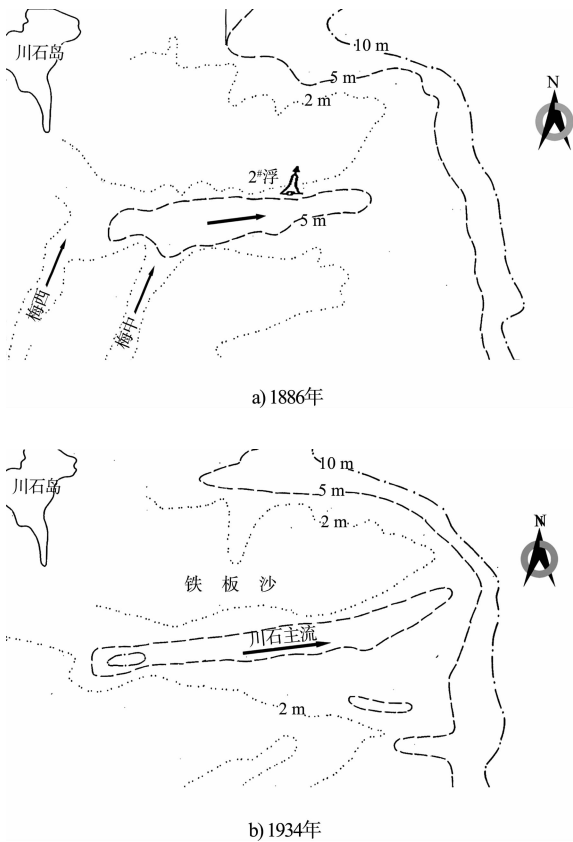


图 3 河口河势

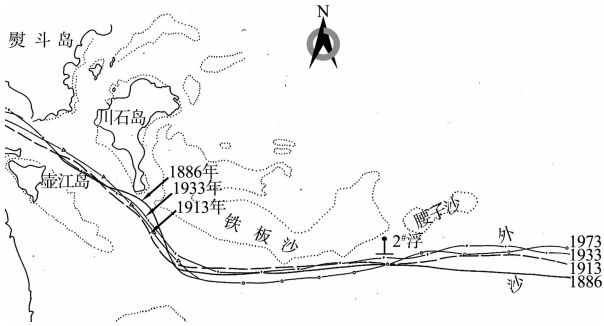


图 4 历年主泓线变化

1984 年对川石水道几处关键部位进行了流速观测。1987 年 8 月又对外沙堆积体的流速进行了补测。其施测点位和实测流速结果见表 5。

表 5 1984 年实测垂线平均落潮流速		
位置	流速/(m·s ⁻¹)	间距/m
口门(玉霞山灯)	0.72	5 000
内沙下浅滩(芭蕉尾下)	0.56	2 200
3 [#] 浮(-10 m 深槽)	0.72	5 600
2 [#] 浮(铁板沙下段)	0.69	4 400
外沙堆积体	0.28	

表 5 中，弯顶部位的 3[#]浮平均落潮流速为 0.72 m/s，已接近弯顶最大平均流速值，它将对上下游河段产生双向效应：

- 1) 对上游河段产生吸流效应。参照图 2，挟沙落潮流脱离芭蕉尾后，两侧已无边界约束，理应水流扩散，流速降低。但事实是，流速不仅不减，反而增大。如表 5 所示，在内沙下浅滩处，平均流速为 0.56 m/s，经过 2 200 m 到达弯顶 3[#]浮处，平均流速增至 0.72 m/s，增幅近 30%。这就是弯道环流所产生的吸流效应造成的。
- 2) 对下游河段产生泥沙中转运输的动力源效应。挟沙落潮流在弯顶附近平均流速达到极值 0.72 m/s，以此处为起点，并利用其动力源，将所挟带的泥沙向口外中转运送。由 3[#]浮至 2[#]浮，间距约 5 600 m，平均流速由 0.72 m/s 降至 0.69 m/s，降幅仅 4%。说明这段距离内水流仍比较集中，基本不淤，甚至略有冲刷，凸显了弯道环流中转运输动力源的功效。落潮流由 2[#]浮至外沙堆积体，间距约 4 400 m，平均落潮流速由 0.69 m/s 突降至 0.28 m/s，降幅高达 59%。这里已是淤积区，泥

沙将会充分淤积,主流开始改道分汊。落淤的泥沙经过风、浪、流长时间的冲刷、分选,留存下来的泥沙就构成外沙的主体。因此,外沙河段的弯道及其环流,就成为外沙堆积体的主要成因。

需强调的是,如果外沙河段没有弯道环流,其演变结局会大相径庭:挟沙落潮流脱离芭蕉尾后,因主流两侧已无边界约束,水流扩散、流速骤降,泥沙将在这一带充分淤积(图2)。其淤积体将与上段内沙淤积体相衔接形成一个整体。若此,闽江口外只能有1个拦门沙,不可能有第2个。因此,可以将外沙定位为:外沙是内沙淤积的延续。

2.3 梅花水道的汇入

闽江干流在亭江断面稍下的右侧,通过猴屿口门向梅花水道分水分沙(图2)。口门宽1 000 m,口门—潭头间距8 000 m,河宽由1 000 m展至2 000 m;潭头—梅花镇,间距7 000 m,河宽由2 000 m展至6 500 m。梅花镇以下已是大片淤沙,如佛手沙、鱔鱼沙等组成庞大的水下拦门沙,现暂称之为梅花沙。梅花水道在此分为3汊入海,自西而东分别为梅西、梅中和梅东3条水道。其中梅西水道因其上端筑有丁坝基本淤堵。现主流是梅中水道。关于梅花水道向川石主流汇入水、沙的作用问题,可以从两个层面讨论:

1) 从来水层面看,问题较简单。可以认为梅花水道落潮流的汇入增大了川石主流的动力条件,有利于将泥沙排向外海,也有利于入海航道的维护,作用是正面的。

2) 从来沙层面看,问题相对复杂。梅花水道在平面上呈上窄下宽喇叭口形态,这种地形有利于泥沙自上而下的淤积。梅花水道自中部的潭头起,至梅花镇止,距离约7 km,河宽由2 km拓宽为6.5 km,水流扩散,流速降低,部分粗颗粒泥沙率先在此河段内淤积;从梅花镇以下,落潮流进入梅花水道的拦门沙地区,此处河宽展至约10 km,水道由单汊变为3汊,水流大范围扩散,漫滩行水,粗颗粒泥沙在这里得到再次的淤积。当落潮流下行至拦门沙前缘附近时,根据对汉道下段 Δ WS3测线的观测(图2),其平均落潮流

速:大潮为0.36 m/s,小潮为0.33 m/s,流速较低,说明粗颗粒泥沙继续下行的动力不足。换言之,来自梅花水道的泥沙经过层层拦截后,大量较粗颗粒的泥沙沉积在拦门沙以里,使得进入川石水道并通过川石主流运送至外沙地区的泥沙大为减少,这对外沙堆积体的淤涨,不会产生明显的作用。因此可以认为,外沙堆积体的沙源主要来自川石水道本身。

3 主流改道分汊的机理

3.1 百年河道演变(1886—1986年)

关于闽江口川石主流进入外沙地区改道分汊方面的问题,可以从1886—1986年历史测图中,探寻其百年演变的沧桑历程。

1) 1886年测图(图3a))。

这是闽江口有史以来所能找到的最早的一幅实测地形图。图中-5 m线主槽单汊独流入海,口门严重淤堵,而主槽基本完整,无明显淤积。如果以-5 m线作为主槽边界线,推测该主槽在口门未淤堵前的原长度约为9 km,淤堵长为2.5 km,占原主槽长度的28%。如此严重淤堵的主槽仍能长期单汊发挥输水、输沙的功能,这在多沙河流中实属罕见。

2) 1934年测图(图3b))。

至47 a后的1934年,闽江口仍维持单汊独流入海的格局,但在主槽的上端出现了-10 m局部小深槽(据查该局部小深槽1913年就已出现,当时是-8 m),而主槽左侧铁板沙沙体已明显增高扩大。上文也已指出,-10 m深槽是弯道环流所导致的局部冲刷槽。该深槽的出现,标志着主槽的落潮动力条件已得到明显的加强,并向海的方向冲刷,但口门的淤堵仍未完全消除。历年主泓线变化见图4。

3) 1967测图(图5a))。

时隔33 a后的1967年,闽江口首次由单汊变为双汊无障碍入海,在两汊之间出现了心滩,主流仍走北汊。而在南汊的中部,过水宽度有局部萎缩现象,预示着两汊畅通入海的格局未必就是稳定的河势。

4) 1983 年测图 (图 5b))。

上述双汉无障碍入海的格局只维持了约 16 a。至 1983 年,北汉由贯通复变为口门严重淤堵;南汉虽是当时的入海航道,但其中部过水宽度局部萎缩的现象,仍然存在,说明南汉并不稳定。而在南北两槽之间,似有新汉冒出的迹象。

5) 1986 年测图 (图 5c))。

仅仅时隔 3 a,中汉异军突起,首次出现两堵一通三汉并存的格局。其中南汉仍是入海航道所在,但其入海口门附近局部萎缩现象依然如故,伏有隐患。与之相反,中汉发展较迅速,行将打开。

纵观闽江口外沙河段的百年演变历程,可以看出具有浓厚的少沙河流的基本特征。主要表现在以下两个方面:

1) 在河口淤积三角洲地区,主流改道分汉是演变中的常态,而且与供沙条件有关。以我国多沙河流黄河为例,年供沙约 10 亿 t,其中约 6 成以上淤积在三角洲地区,其余进入敞海。三角洲面积很大,约达 5 500 km²,洲上汉道分布有如树枝分叉,密密麻麻,数不胜数。通过水流不断改道堆积出较小的三角洲(小改道几乎每年洪季都发生),若干小的三角洲叠加成大的三角洲。完成一次横扫整个三角洲的大循环,约历时 50~80 a。闽江是少沙河流,其年供沙量仅 730 万 t,外沙堆积体面积仅 20 km²,历经百年演变仅出现过 3 股汉道,即北槽、中槽和南槽,从未出现过 3 汉以上的情况。与多沙河流相比,其演变过程并不剧烈,一切都在相对较慢的节奏中进行。例如河道由北槽(1934 年)改道至南槽(1983 年),用了约半个世纪。如果说多沙河流是“10 年河东,10 年河西”的话,这里则是“50 年河东,50 年河西”。在这演变速度为进一步提高通航标准和整治提供了比较有利的条件。

2) 从 1886 年至 1934 年的 49 a 中,一直保持着单汉独流入海的局面,而且是在口门严重淤堵的情况下,仍能维持输水输沙,这在多沙河流中是难以见到的。在多沙河流中,一旦口门淤堵,很快将波及主槽,甚至一场洪水过后,主槽完全被淤平。少沙河流来沙量少,河流长期处于非饱和和输沙状态,当口门发生严重淤堵后,主槽有可能在较低水位的一定时间内出现水流不畅,甚至出现少量泥沙回淤,但当潮位高过口门淤堵面后,主槽旋即恢复输水输沙功能,甚至将前期淤积在主槽内的泥沙,部分或全部冲出,恢复其原有的输水输沙能力。这就是为什么口门严重淤堵长达半个世纪,仍能维持单汉独流入海的原因。外沙地区的河道可谓“堵而不死,淤而不废”,充分显示出少沙河流所独具的、极强的生存能力。

3.2 改道分汉机理的探讨

1) 主流改道分汉过程的演绎。

为进一步探讨主流改道分汉的过程,现对其

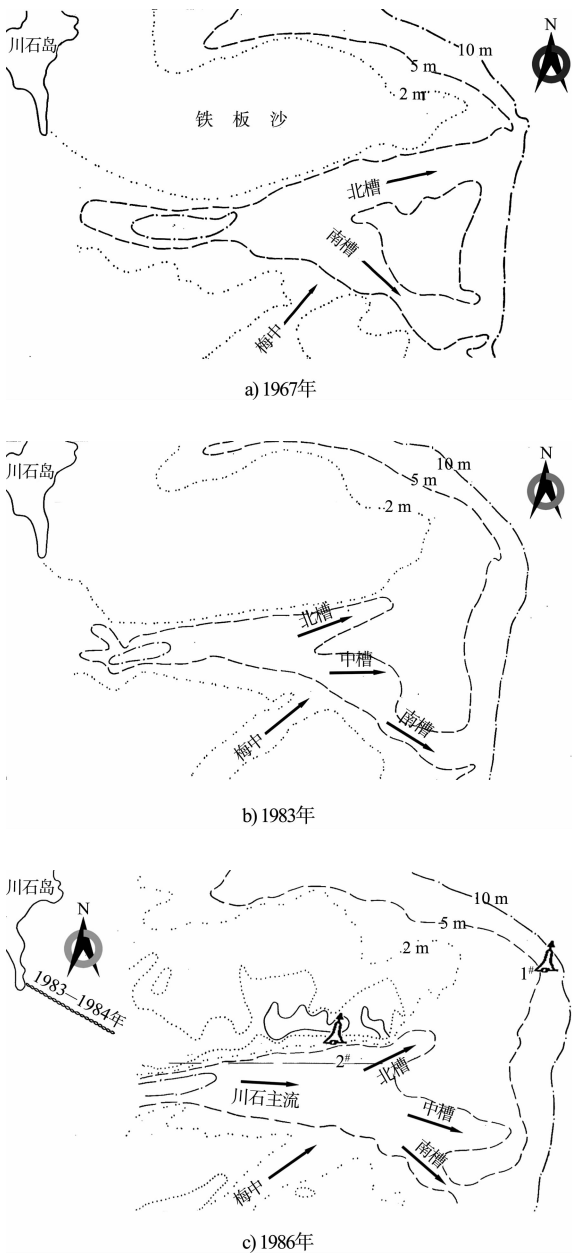


图 5 河口河势

间的若干主要环节简化演绎如下:

①挟沙水流出主槽进入外沙地区,水流迅速扩散,流速衰减,泥沙落淤。这种自上而下的淤积称为缓流淤积。

②泥沙不断淤积,造成口外床面淤高,侵蚀基准面上升、比降减缓、水流阻力增大,导致流速进一步衰减,泥沙进一步淤积。

③口内、口外原本就是一个整体。口外因泥沙淤积而产生的包括阻力增大、流速衰减等一系列的变化,必将向口内延伸,从而导致口门以里的局部河段比降减缓、阻力增大、流速减缓并造成泥沙的淤积。

④随着口内局部河段不断淤积,主槽洩流不畅,造成水位雍高,并向上游延伸,同时泥沙的淤积范围也随之向上游发展。这种自下而上的淤积称为溯源淤积。口门的位置则随着淤积的上溯而不断后退。

⑤在口外缓流淤积、口内溯源淤积的双重作用下,主槽的水位与其两侧(或一侧)滩地水位间的落差不断加大,即横比降加大。

⑥当上述双向淤积、水流阻力、主槽与滩地间的横比降增大到一定程度时,落潮流将从主槽的某侧,以较大的流速夺路冲出一条新的入海通道,这就是改道。

2) 改道分汊的机理。

通过以上演绎过程可清楚看出,水流阻力的增大与改道分汊之间存在着直接的因果关系,即水流具有自动转换阻力的特性。其内涵是:水流要流动,必须克服阻力。而克服阻力,就要消耗能量。当由于自然原因(如泥沙淤积等)或人为原因(如修建了不当的阻水工程等)而导致水流阻力增大,水流严重阻滞不畅并达到一定程度的时候,水流将自行启动阻力转换机制,使水流由高阻力区的老河道自动转换至低阻力区的新河道,这一转换过程就是改道。可见,改道并非目的,而是一种演变的方式或手段,通过这种方式,使水流由高阻力区转向低阻力区,使水流由阻滞不畅变为通畅,这才是改道分汊的目的。这一概念不仅适用于潮汐河口,而且适用于无潮的内河。

3.3 改道的条件

改道有 2 种方式:1) 冲出一条新的入海通道;2) 重新冲开一条已被淤堵的老河道。

改道能否成功,以下 3 个条件很重要:1) 具有足够大的冲刷流速;2) 落潮冲刷量远大于涨潮回淤量;3) 被冲刷河槽的底质是可下切的、两侧是可拓宽的。

河口地区主流改道分汊是一个很复杂的累积过程,其演变是双向的——既有淤积,也有冲刷。由于闽江是少沙河流,因此其累积的过程是漫长的,其间任何一个偶然因素都有可能改变演变的走向。

4 结语

1993 年 4 月,水口电站枢纽投入运转,电站水库总库容 30 亿 m^3 ,相对闽江来沙量来讲,这是一个很大的水库。粗略估计,如果将上游来沙(包括悬移质和推移质)全部淤积在水库内并将其淤满,理论上可淤 300 a。电站启用后,闽江口以及外沙地区的来沙条件将发生很大的变化:

1) 在沙源的供应上,建库前是流域供沙、河流搬运;建库后除水库下泄部分泥沙外,主要由坝下 140 km 河道冲刷供沙。

2) 在供沙的数量上,建库后将逐步减少。

3) 在供沙的质量上,建库前沙量中细颗粒泥沙占绝大多数,粗颗粒泥沙占极少数;建库后河流供沙将逐步粗化。

4) 在河流的属性上,建库前属堆积型河流;建库后则逐步变为侵蚀性河流。

上述变化必将影响到包括外沙地区在内的整个河口区的河道演变走向,也将对今后河道的整治提出新的要求。因此,应引起关注。

参考文献:

- [1] 交通部水运规划设计院.福州港航道第二期整治工程工程可行性研究报告[R].北京:交通部水运规划设计院,1988.
- [2] 福建省港航勘测设计中心,福建省港航勘测设计院.福州港闽江口拦门沙航道加深工程工程可行性研究报告[R].福州:福建省港航勘测设计中心,福建省港航勘测设计院,2003.

(本文编辑 郭雪珍)