

甬江河床演变及航道治理

沈 承 烈

(杭州大学)

提 要: 本文分析甬江动力、泥沙、边界及河床演变的基本特征, 提出甬江航道整治的原则和措施。

主题词: 河床演变 航道整治 甬江

甬江是位于杭州湾口的弱潮平原河流, 上游为姚江和奉化江, 汇合于宁波市三江口, 三江口以下至镇海入海才称甬江(图1), 三江口至镇海为口内河段, 镇海以下为口门河段, 全长约25km, 流域总面积为42.94km²[1]。

自1842年五口通商至1959年的一个多世纪中, 甬江河床基本稳定¹⁾。航道水深可达5.4m, 3千吨客货轮不必候潮, 随时进出。宁波港为天然良港。1959年姚江兴建挡潮闸(图1)。使进潮量和下泄迳流锐减, 潮波变形加剧, 导致甬江河床全线淤浅缩窄。至1973年, 姚江闸至大小游山河段共淤3168万m³[2], 全河段中潮位平均水深和河宽分别减少2.31m和43m, 致使3千吨客货轮须候潮进港。

1975年在甬江口门兴建镇海新港区。招宝山至大游山防波堤的抛筑, 切断了甬江口与后海塘的水沙交换, 使笠山断面涨落潮潮量分别减少32%和50%。虎(蹲)游(山)河段又迅速淤浅缩窄。1980年后, 经过两年左右的整治, 镇海港已基本满足万吨轮通航水深的要求。甬江口治理所取得的经验将对甬江全面整治以及我国东部中、小河流的治理有参考意义。

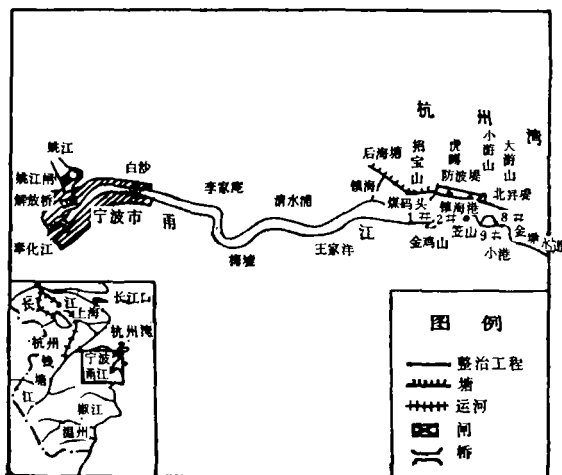


图1 甬江形势图

Location of the Yongjiang river

一、甬江的动力特征

甬江河段为潮流和迳流相互作用的河口段。潮、迳流交互控制了甬江的河道演变过程。

本文1986年12月8日收到, 1987年3月10日收到修改稿。

1) 罗肇森等: 甬江淤积问题分析及航道改善措施初步研究, 1967年。

2) 林显钰: 甬江淤积和姚江闸存废问题的探讨, 1981年。

其动力特征如下:

(一) 潮流作用为主, 潮差小

甬江潮为不正规半日潮, 夜潮潮差大于日潮潮差, 冬半年潮差大于夏半年潮差。12、1、2月的平均潮差为1.83m, 6、7月平均潮差为1.69米。甬江潮差较浙江其他潮汐河流为小, 如钱塘江为5.45m, 椒江为4.01m, 瓯江为4.49m, 飞云江和敖江分别为4.24m和4.16m, 而甬江口门平均潮差仅有1.77m。由于舟山群岛的屏蔽作用, 柯氏力的影响, 金塘水道与甬江口涨、落潮时相位差以及口门宽度受坝头控制等原因, 而使甬江成为本省潮差最小的弱潮河流。潮流动力较弱。但与径流相比, 潮流仍是较强的河床变形动力。建闸后年平均涨潮流量($946\text{m}^3/\text{s}$)为多年平均径流量($77\text{m}^3/\text{s}$)的12倍。山水造床流量与平均涨潮流量之比为0.139。所以潮流是甬江经常作用和维持河床断面尺度的主要动力, 而径流只是在汛期(短暂的)洪峰下泄时才起着重要作用, 其余时间则为次要的河床动力。

(二) 潮波变形剧烈, 近驻波

潮波自杭州湾向甬江传递过程中, 因受河床阻力的影响不断变形, 在镇海断面的潮波即具有驻波特征(图2)。涨落潮最大流速一般出现于涨、落潮中潮位(平均值为2.17m)附近, 其流速大于甬江泥沙的起动流速 $0.3\sim 0.35\text{m/s}^1$)。涨潮加速度大于落潮加速度, 涨潮输沙大于落潮输沙。姚江建闸潮波变形加剧。白沙断面的涨、落潮加速度比由建闸前的1.08变为建闸后的1.38。涨落潮输沙比也由建闸前的0.85增大为1.12^[2]。潮波变形加剧, 必然促使河床淤积。若整治工程布置适当可减小潮波变形的加剧, 口门建堤就是佐证。由于防波堤堤轴方向与潮流流向基本一致, 口门河段由多汊的水下河弯变为水上弯道, 弯道导流作用的增强, 使招虎河段的涨落潮加速度比由建堤前的1.02仅增至1.06^[2]。

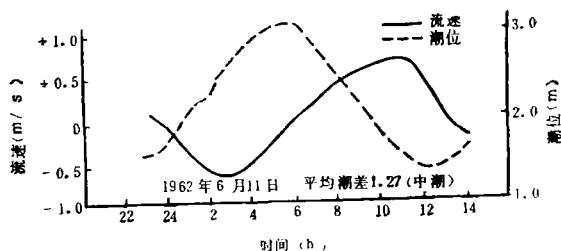


图2 镇海断面潮位、流速过程线
Tidal level and current velocity
hydrographs at section of Zhenhai

(三) 潮流为弯道型往复流

由于甬江河道受多弯坝头和沿岸江塘的控制, 故潮流为弯道型往复流。建闸和建堤引起河床的剧烈变形, 不但没有改变弯道的水流结构, 反而更促进了弯道断面形态的发展和弯道环流强度的增强。如口门建堤后弯道的横向环流强(横向分速与垂线平均流速之比)比建堤前增加1.5倍。这是位于弯道凹岸的镇海港区水深较易维护的重要原因。因此, 整治甬江必须保持和加强弯道往复流的作用。

(四) 洪枯流量悬殊

由于姚江和奉化江流域的低山丘陵面积约占甬江总流域面积的58%^[2], 河床平均坡度较陡, 奉化江约为姚江的4.5倍, 甬江径流洪枯流量悬殊, 汛期(3—6月为春汛, 7—9月

1) 交通部天津水运工程科学研究所: 镇海港航道整治方案水力试验报告, 1981年。

2) 宁波地区水利学会: 甬江流域水利规划和姚江闸利弊评估, 1982年。

为台风暴雨) 迳流量约占全年迳流量的78%。最大洪峰流量 ($2785\text{m}^3/\text{s}$) 为平均枯水流量 ($1.61\text{m}^3/\text{s}$) 的1730倍。入海迳流最大值与最小值之比为5.32, 而长江仅为2.01^[1]。

上述迳流特征对水沙运移和河床冲淤的影响是: 汛期河床动力以迳流为主, 浑浊带下移, 进港含沙量减小, 河床以冲刷为主; 非汛期, 动力以潮流为主, 浑浊带上移, 进港含沙量增大, 河床以淤积为主。

二、甬江的泥沙特征

据1964、1971和1982年甬江口外海域及口内河段近百个表层河床质分析, 姚江建闸后甬江河床严重淤积, 其沉积物主要来自杭州湾南部海域^[3]。流域来沙仅为海域来沙的5%。河床质平均中径全河段约为 0.018mm , 口门和口内河段分别为 0.0195mm 和 0.016mm 。全河段航槽和浅滩平均中径分别为 0.015 和 0.033mm ¹⁾。在潮迳流的共同作用下, 河床质周期性往复冲刷、运移和沉积。其特征如下:

(一) 沉积物为海域细颗粒泥沙

甬江沉积物约有86%为中细粉砂的细颗粒物质^[3]。粉砂以下粒级占75.5%, 其中粘土物质含量约占30%。这种细颗粒沉积物, 在沉积初期, 极易被潮流悬扬、运移和凝聚沉降。但随着沉积时间的增长, 沉积物的粘结力因固结而加大, 沉积物反而不易被冲起、运移。这一特性, 使得河床冲淤产生骤淤和难冲两种截然不同的现象^[2]。

(二) 泥沙运动以悬移为主, 悬底沙频繁交换

甬江悬、底沙均以细粉砂为主, 其中径分别为 0.011 和 0.017mm 。这种悬、底沙细而一致的性质, 为海域来沙的属性, 且决定了泥沙运动以悬移为主(图3)。随着潮流变化, 悬底沙频繁交换。潮流增强, 底沙因冲刷转化为悬沙, 使含沙量增大。潮流减弱, 悬沙沉降转化为底沙, 使含沙量减小(图4)。且悬底沙的转化一般滞后于潮流速的变化。也即最大含沙量出现于落潮最大流速以后约2—3小时, 最小含沙量一般出现于涨憩或落憩附近。

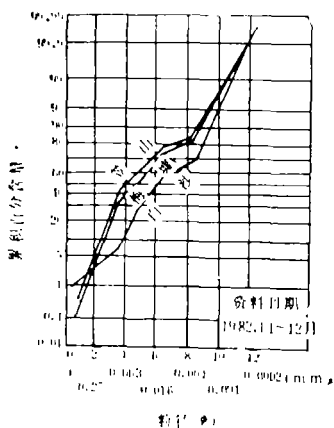


图3 甬江河床质粒径特征

Grain size characteristics diagram of the bed-material in the Yongjiang River

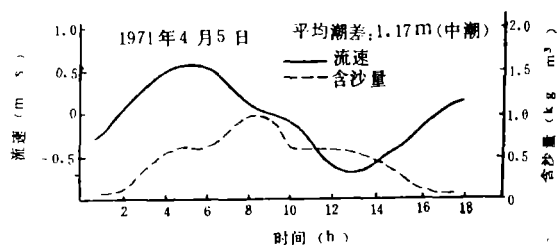


图4 镇海断面流速与含砂量过程线

Current velocity and silt concentration hydrographs at section of Zhenhai

1) 沈承烈: 姚江开闸对甬江河床质粒度的影响, 1983年。

（三）含沙量具有明显的季节变化

据筲山断面含沙量的观测，年平均含沙量为 $1.03\text{kg}/\text{m}^3$ ^[4]。含沙量的季节变化主要决定于口外风浪和上游迳流的相互作用（图 5）。从图 5 知，冬春含沙量大于夏秋含沙量，其平均值分别为 1.27 和 $0.79\text{kg}/\text{m}^3$ 。其原因是冬春多偏北风，强烈的风浪掀沙可使口外滩面水域含沙量增大 2—3 倍（风速为 $10\text{m}/\text{s}$ ），高波度的含沙水流随潮进入甬江。春汛开始，上游河床在枯季淤积的结构松散、粘结不强的泥沙易随迳流下泄向下游输移，两者均使冬春含沙量增大。而夏秋季节，正值高温高盐而含沙量小的台湾暖流北上，促使杭州湾及浙江沿海细泥沙凝絮沉降，加之甬江下泄迳流的稀释和顶浑作用都使夏秋含沙量减小。

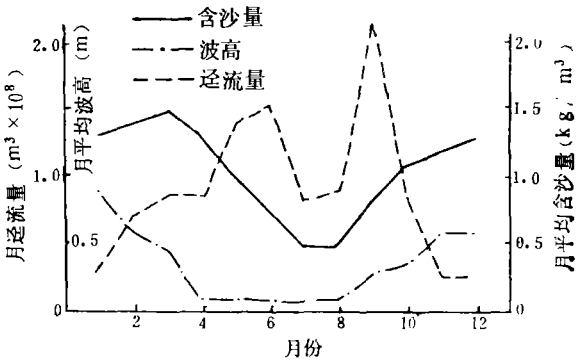


图 5 甬江口含沙量与波高、径流量的关系
Relations between silt concentration and wave height, and runoff in Yongjiang estuary

（四）河床质以逆向分异为主

据历年河床质的观测，甬江河床质的沉积、分异特征如表 1。从表 1 可知，在非汛期，河床质的平均中径、分选系数以及偏态系数均自口门向上游递减，而小于 0.01mm 粒级的含量则从口门向上游递增。上述特点表明，潮流是甬江主要的动力。潮流能量与涨潮优势流强度均由口门向上游减弱。因此，河床质必然出现逆向分异。汛期则相反，迳流作用相对增强，尤其在洪峰下泄时，泥沙从上游向口门运移，河床质顺向分异。1982 年 12 月姚江开闸证实了这一规律。枯期姚江开闸，使白沙河下泄流量约增加 10%。随

表 1 甬江河床质的沉积特征

The depositional characteristics of the river bed material in Yongjiang River

河段	时 期	沉 积 特 征			
		中 径 (md) (mm)	$< 0.01\text{mm}$ 含 量 (%)	分选系数 (S_o)	偏态系数 (SK)
口内河段 (镇海以上)	1971.12	0.015	39.5	2.24	0.67
	1982.11.29	0.017	58.0	1.69	0.48
口门河段 (镇海以下)	1971.12	0.017	34.4	2.37	0.69
	1982.11.29	0.022	49.1	1.84	0.54

注：1. 表中各值均为平均值，2. 1971 年资料引自文献[3]。

着落潮动力增强，从解放桥至三江口河段航槽中径明显变粗，由 0.005 增大至 0.009mm ；而白沙则相反，中径变细，由 0.008 减小到 0.006mm 。中径出现了向下游递减的变化。同时，小于 0.01mm 粒级的含量也由解放桥的 62% 增至白沙的 76% 。上述变化表明，即使在枯期开闸，由于单位潮差的底部落潮优势流比关闸增大 0.5 倍¹⁾，白沙以上河段泥沙也会

1) 沈承烈：姚江开闸对甬江河床质粒度的影响，1983 年。

产生顺向分异。显然,汛期随着径流的显著增加,河床质的分异必然以顺向分异为主。就全年而言,因潮流是主要的动力,故河床质的分异仍以逆向分异为主。

三、甬江的河床演变特征

甬江河床变化曾经历了三个时期,即姚江建闸前相对稳定期以及姚江建闸和口门建堤后的淤积期。演变特征如下:

(一) 潮流量增减与河床冲淤变化一致

据实测资料分析,甬江落潮平均流量(Q)与平均潮位下的河床断面面积(A)的关系(图6)为: $A = 4.16Q^{8/9}$ ^[2]。从式知,潮流量(或潮量)的增加或减少必将引起河床断面冲刷扩大或淤积缩小。姚江建闸前,因甬江进潮量和径流年际变率甚小,分别为2%和3%;来沙条件又无多大变化,故河床容积变差仅为1.7%^[1]。河床相对稳定。

姚江建闸后,甬江落潮流量平均减少47%,则全河段平均中潮位面积减少42%,同样,口门建堤使落潮平均流量虎游河段减少46%,招虎河段却增加6%,则平均中潮位面积虎游河段缩小27%,而招虎河段却扩大5%左右。

(二) 水深变浅,河宽缩窄,河型稳定

建闸和建堤后的河床变形:均是先水深变浅、后河宽缩窄,但变幅却有差异。建闸后水深变浅率为河宽缩窄率的3.3倍,平均宽深比($\sqrt{B/H}$)由建闸前的3.01增至3.98,河床趋于宽浅;相反,建堤后水深变浅率为河宽缩窄率的0.79倍,平均宽深比由建堤前的3.65减至3.42,河床趋于窄深。虽然建闸和建堤均使河床变浅缩窄,但甬江的多弯河型、平面位置始终稳定,仅是弯道的规模变小。如口门弯道的游山深槽断面面积,建闸和建堤分别减小8%和19%左右。

(三) 淤积强度均以建闸、建堤后第一年为最大,以后逐年减小,渐趋相对平衡

姚江建闸后,口内河段第一年的淤积量约占总淤积量的41%,第二年反为8%。约经13年

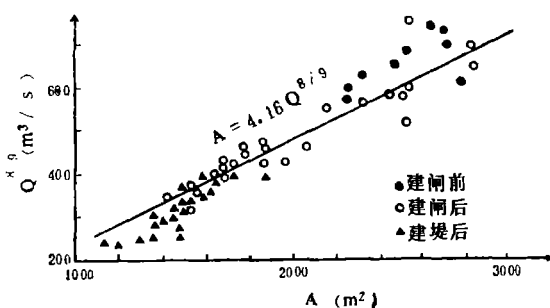


图6 甬江河床断面面积与落潮平均流量关系
Relations between average cross-sectional area and average ebb tide discharge in the Yongjiang River

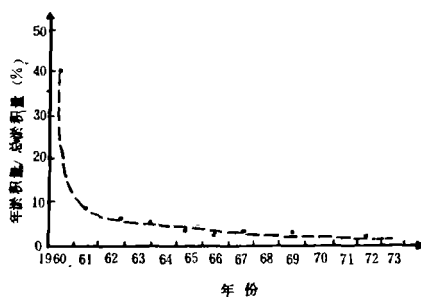


图7 建闸后甬江历年淤积强度
Recent variation of the aggradation intensity in the Yongjiang River after the construction of tidal barrier

1) 罗肇森等:甬江淤积问题分析及航道改善措施初步研究,1967年。

左右的河床调整, 22km的口内河段才趋相对平衡, 如图7。口门建堤后头半年的淤积量约占1973—1976年总淤积量的61%。由于调整河段不到4km, 故经3年左右的时间即达到了相对平衡。

(四) 冲淤具有明显的季节和纵向变化

径流和潮流的年内变化, 必然使河床冲淤亦具有季节和纵向变化的特点: 口内河段为“洪冲枯淤”, 口门河段则为“洪淤枯冲”; 纵向变形为汛期“上冲下淤”, 枯期则“上淤下冲”。如姚江建闸后, 1963.5—1963.10(汛期), 口内河段冲刷 54.86万m^3 , 此时口门河段淤积 4.54万m^2 , 全河段净冲 50.32万m^2 ; 而1963.10—1964.5(枯期), 口内河段淤积 135.4万m^3 , 此时口门河段冲刷 26.66万m^3 , 全河段净淤 108.74万m^3 。

(五) 拦门沙不因建闸建堤而消失

建闸和建堤并没有消除形成拦门沙的条件, 故拦门沙始终存在, 仅有位置、高度和范围的变化。如姚江建闸使招宝拦门沙顶部水深减少1.8m(至1970年)。口门建堤后, 因招宝山断面落潮和涨潮平均流量分别增加18%和9%, 使拦门沙顶向新口门移动。至1982年2月拦门沙顶已由招宝山下移至大游山外0.78km处。由于金塘水道水深流急, 限制了拦门沙外延的条件, 故拦门沙范围也大大缩小。目前水深不足-5.0m的长度仅为110m左右。

四、甬江航道整治的原则和措施

通过甬江动力、泥沙、以及河床演变特征的分析, 对甬江治理提出如下粗浅看法。

(一) 整治原则

1、以航运为主, 结合水利, 综合利用
一, 而甬江是姚江和奉化江泄洪排涝的主要出口, 它与浙东地区的航运、工农业用水以及海涂围垦均有密切关系。因此, 甬江整治必须遵循以航运为主, 结合水利, 统筹兼顾, 综合利用的原则。

2、认识河性, 因势利导, 保持弯道河势
甬江口整治的成功正是充分认识口门为水下河弯以及甬江与后海塘滩面存在着水沙交换这一河演特征(图8); 因势利导变多汊水流为单一弯道往复流; 并将涨落潮主流尽可能一致地挑至凹岸港区航槽, 增强航槽的动力和输沙能力, 从而取得良好的整治效果。

3、整治工程应不减少进港潮量
潮汐河口的断面尺度主要取决于潮流量和含沙量。在来沙条件不变的潮汐河口, 潮量多寡更是决定断面大小的重要因素。上述的河演特征充分

宁波港是东南沿海很有发展前途的港口之一

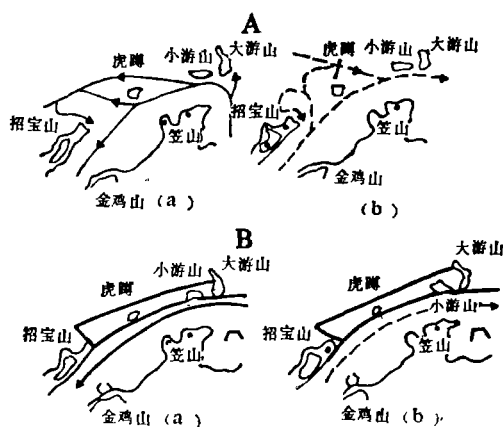


图8 甬江口涨落潮流路示意

Sketch of the flood and ebb flow direction in the Yongjiang estuary

A 整治前 B 整治后
(a) 涨潮流 (b) 落潮流

说明:潮量大小决定着甬江断面的大小。

4、整治与疏浚相结合,束水攻沙 镇海煤码头建成后,1978年3月仅以疏浚开挖万吨级航道,挖泥 350万m^3 。浚后回淤严重,汛期四个月(79年2—6月)内就淤 85万m^3 。1980年3至6月,镇海港区航道又挖泥 169万m^3 。并在南岸抛筑丁坝,束窄河宽,挑落潮流至码头前沿。这使八个月的回淤量仅为 15万m^3 ,泊位水深增加4m多。上述事实说明,整治必须与疏浚相结合,以达到束水归槽、束水攻沙的目的。

5、中低水位治理,截最大流速归槽 浙江大部分中、小河口,落潮最大流速均出现于中潮位附近。因此采取中低水位治理,不仅可截落潮最大流速归槽,增强落潮水流对航槽的输沙能力,而且对泄洪和进潮量的影响较小。整治水位可取 $+2.5\text{m}$ 左右。

(二) 整治措施

1、开闸疏浚,增加纳潮量 从甬江河床演变的规律可知,开放姚江闸,增加纳潮量是治理甬江的根本途径。据初步估算,开闸后的甬江河床尺度可接近建闸前的大小。若口门河段再适当束窄,其整治线宽为 30m 时,则镇海港的航深可基本满足万吨轮要求¹⁾。

由于粘性细颗粒泥沙的冲淤遵循不同的规律,当流速相同时,冲刷稳定含沙量远小于淤积稳定含沙量^[5、6]。因此,仅靠开闸纳潮来冲刷淤积多年、抗冲强度较大的泥沙是有限的。如果取开闸和疏浚相结合的工程措施,能在较短时期内取得较大的纳潮量和断面尺度。

在终年开闸条件还不具备的情况下,可采取枯期开闸纳潮。这样可增加口内河段的落潮流量,减小枯期的淤积强度;且此时口门河段正值枯冲时期,对镇海港区的淤积不会有很大影响。1982年12月姚江开闸试验表明,枯期开闸纳潮,对减轻甬江河床淤积是可行的。

2、围涂固滩,减小进港含沙量 甬江泥沙来自海域,其进港含沙量大小主要决定于口外风浪掀沙的强弱。因此,围垦口外宽广水浅的滩面,不仅可控制风浪掀沙的强度,减小进港含沙量,减轻甬江淤积;而且可拦截高浓度泥流直接进入口门航槽引起骤淤^[2]。此外,以顺堤固定镇海港区南侧浅滩,即可阻止滩槽的泥沙交换²⁾,又可起到束水攻沙,减轻口门航道的淤积。

3、拦门沙治理 甬江口拦门沙治理是改善甬江航道水深的关键。由于拦门沙是河口泥沙稳定沉积区,整治拦门沙的目的是尽可能减小拦门沙的范围和高度,使其不碍航。

甬江拦门沙主要是口门河段迅速展宽,落潮单宽流量沿程减小的结果。因此拦门沙的治理必须采取束窄河宽,增加落潮单宽输沙能力,改善拦门沙区的沉积环境。口门整治宽度可取 300m 左右。同时充分利用口外强劲的金塘水道和 -10m 等深线稳定紧贴口门的优越条件。适当延长导堤至 -10m 等深线附近,并辅以少量疏浚缩短拦门沙的长度。

本文经冯怀珍教授和毕敦洪副教授审阅。浙江省航运局、交通部宁波港务局提供大量资料,谨致谢意。

参 考 文 献

[1] 林显钰等:入海径流的初步分析,东海海洋,2(4),1984年。

1) 林显钰:甬江淤积和姚江闸存废问题的探讨,1981年。

2) 沈承烈:姚江开闸对江河床质粒度的影响,1983年。

- (2) 沈承烈: 甬江的冲淤规律及其影响因素, 杭州大学学报(自然科学版), 10(4), 1983年。
- (3) 冯怀珍、张志忠: 论浙江河口沉积, 杭州大学学报(自然科学版), 待刊。
- (4) 张定邦、袁美琦: 甬江口航道整治效果分析, 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集, 1983年。
- (5) Allersma, E., 《Mud In Estuaries And Along Coast》, 河流泥沙国际学术讨论会论文集, 1, 1980年。
- (6) 沈承烈、阮文杰: 长江口河床质冲淤特性的试验研究, 泥沙研究, (3), 1986年。

THE FLUVIAL PROCESSES OF THE YONGJIANG RIVER AND ITS CHANNEL REGULATION

Shen Chenglie

(Hangzhou University)

Subject terms: Yongjiang River, Fluvial processes, Channel regulation

Abstract

The Yongjiang River is a micro-tidal alluvial stream, but its upstream tridutaries mainly run through mountainous and hilly regions. The configuration and size of this river are relatively stable for a long time. A tidal barrier was built on the Yongjiang River, in 1959. As a result, the sedimentation was so serious that up to 1973, $3168 \times 10^4 \text{ m}^3$ of sediment had been accumulated in the Yongjiang river bed.

In this paper, the basic characteristics of hydrodynamic action, sediment transportation and alluvial processes of the Yongjiang River have been discussed. Based on the above analysis, a preliminary approach to the principles and measures of the regulation for the Yongjiang channel is made. The contents of this paper may be summarized as follows:

In view of the small tidal range, larger variability of runoff and the ratio between the average flood flow and annual mean runoff volumes that is more than 12, the Yongjiang River, therefore, should be considered as a mountainous micro-tidal river. The tidal action is the main dynamics to fluvial processes.

The boundary and bed of the Yongjiang River is composed of fine sediment which mainly derived from sea area. The fine materials are transported as suspended load. The general trend of sediment transportation and sedimentation may be described as follows: During flood seasons, owing to the effects of the ebb currents strengthened by the runoff, the sediment is carried and then silted downstream from the upstream reach. on the contrary, the sediment is carried and then silted upstream from the downstream reach and out of the river mouth in non-flood seasons.

The Yongjiang River is a meandering stream. The serious siltation of it should be attributed to the tremendous decrease of tidal discharge. After the construction of the tidal barrier and the training dikes, the processes of river bed are governed by the laws of siltation in the channel below the barrage, and in the curved mouth reach bifurcated channels has been cut.

By dint of the above discussion, the principles of the regulation for the Yongjiang channel should be:

1. Multi-purpose utilization of water resources.
2. Keeping up pattern of meandering stream.
3. Unchanged tidal inflow of the estuary.
4. Combining regulation with dredging.
5. Regulated elevation of middle tidal stage.

In order to reduce the siltation, the following measures of regulation should be adopted:

1. Operating the gate of the barrier and enlarging tidal prism.
2. Enclosing and fixing tidal beaches.
3. Extending the training dike and narrowing the river width.

重 要 更 正

本刊第七卷第二期陕西省气候的主成分分析与区划的作者李兆元误排为李兆之，特此更正。
谨向李兆元同志致歉。