

## 论水库的三角洲淤积(一)

韩 其 为

(水利部水利水电科学研究院, 北京 100044)

**提要** 根据不平衡输沙方程, 论证了水库淤积的三角洲趋向性。用水库淤积与河床演变通用数学模型对水库淤积过程进行了“试验”, 得到了典型三角洲的形成与发展的全过程。据此对于已形成三角洲的水库, 利用非均匀悬移质不平衡输沙理论, 推导了一整套三角洲形态特征的理论表达式, 包括三角洲淤积百分数、前坡淤积百分数、洲面线方程、水面线方程、前坡长度、洲面和前坡淤积物级配及各特征断面的悬移质级配。阐述了三角洲推进的定量方程和三角洲形成的条件, 包括水库淤积百分数及水位变幅。对三角洲的形成、形态特征、推进及转化作较全面和系统的定量分析。

**关键词** 水库三角洲 淤积沿程分布 顶坡纵剖面 悬移质 前坡

水库的来水来沙、坝前水位的变化、地形条件等, 决定了泥沙运动, 因而也决定了水库淤积形态。水库淤积的外形可以概括为几种基本类型。淤积形态形成后, 反过来明显地影响着泥沙运动和继续淤积。因此, 研究水库淤积形态, 不仅能提高对水库淤积本质的认识, 而且能够根据形态, 判断出泥沙运动情况, 这对于了解水库排沙情况、淤积部位、库容损失以及“翘尾巴”等也有实际意义。

大量实际资料表明, 水库淤积的典型形态共有三角洲、锥体和带状淤积体等三种。其中三角洲淤积体是最普遍的一种, 也是水库在淤积过程中的一种基本趋向。本文限于篇幅仅论及这种淤积形态, 对锥体和带状淤积体已有研究<sup>[1,2], ①, ②</sup>。

对水库淤积三角洲早期较为系统的阐述, 当推文献[3]。在60年代初, 我国大兴水利, 从水库淤积计算出发, 对三角洲做了一些研究, 并提出通过计算三角洲推进确定水库淤积的方法<sup>[1,4,5]</sup>。但它们对三角洲形成的机理仍缺乏较深入的揭示, 对与泥沙运动的联系缺乏具体阐述, 有关形态参数的确定带有相当的经验性。

针对这些问题, 在70年代, 我们深入研究非均匀悬移质不平衡输沙时, 先后专门对上述问题作过研究, 得到了一系列结果<sup>[6-7], ③</sup>。它们利用水库泥沙运动的基本理论——非均匀悬移质不平衡输沙理论<sup>[6]</sup>, 阐述了三角洲形成机理, 并用相应的数学模型<sup>[7]</sup>复演了其过程; 在理论上对三角洲形态做了深入分析, 给出了各个参数的理论表达式, 同时用实际资料进行检

① 韩其为等。水库淤积(第二册), 长江流域规划办公室水文处印, 1980。

② 焦恩泽。水库淤积形态的商榷, 黄河泥沙研究报告选编(第四辑)。1980: 229~243。

③ 韩其为。不平衡输沙成果在水库淤积中的应用。长江水利水电科学研究院, 1971。

收稿日期: 1994年7月8日; 接受日期: 1994年10月17日。

作者简介: 韩其为, 男, 1933年生, 教授级高工、博士生导师。主要从事泥沙运动理论、水库淤积、河床演变研究。著有《泥沙运动统计理论》, 发表论文90余篇。

验。这些结果不仅具有很大理论意义,而且有较好的实用价值,并已在实际工作中使用<sup>①、②</sup>。最近我们对这些成果又做了补充研究,并结合以往未发表成果,综述如下。

## 1 水库淤积的三角洲趋向性

水库淤积形态是多种多样的,它决定于坝前水位壅高程度、含沙量高低和粗细、流量大小及水库地形条件等。但是其中较为普遍的一种形态是三角洲,其实际纵剖面如图1。理想化的具有三角洲淤积体的水库纵剖面图形如图2。对于一般河道型或峡谷型水库,三角洲向前推进则属于一维的;但是对于湖泊型水库,三角洲向纵向推进的同时,还常在横向冲破自然段,左、右摆动,最后使全河宽淤平为止。

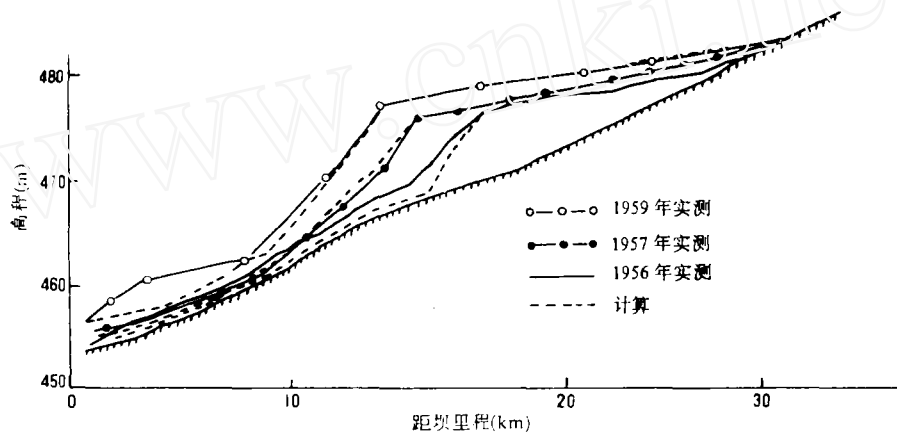


图1 官厅水库淤积纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal profile of sedimentation of Guanting Reservoir

实际资料表明,当坝前水位和来水、来沙不发生变化时,水库淤积沿程是不均匀的,即中间某一段淤积最厚,两头淤积则较薄。需指出,这种不均匀性往往并不是由于水库地形复杂、水力因素沿程变化大所致;即令对于规则的二维壅水段,也会出现这种现象。这种不均匀性不是偶然的,可以用不平衡输沙时含沙量沿程变化的基本方程来说明。泥沙沿程的淤积不均匀,为三角洲的形成提供了内在可能性即为水库淤积的三角洲趋向性。这是说,如果坝前水位和来水、来沙不变,则淤积将导致三角洲的形成(至于是否完整,则与水库长度有关)。而当坝前水位、来水来沙变化很大,特别是水位变化很大时,这种趋向性就不能实现,而出现其它淤积体。现在对就悬沙淤积的三角洲趋向性进行讨论。根据水库淤积的基本规律——悬移质不平衡输沙规律,先讨论均匀沙,不平衡输沙的基本方程为<sup>[6]</sup>:

① 韩其为等。水库淤积(第二册)。长江流域规划办公室水文处,1980。

② 罗敏逊。水库淤积三角洲及其计算方法。长江水利水电科学研究,1977。

$$\frac{dS}{dx} = -\frac{\alpha\omega}{q}(S - S^*) \quad (1)$$

此处  $S$  为含沙量,  $S^*$  为水流挟沙能力,  $\omega$  为泥沙沉速,  $q$  为单宽流量,  $x$  为沿水流方向的距离,  $\alpha$  为恢复饱和系数. 注意到河床变形方程为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma_s'} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2)$$

其中  $z$  为床面高程,  $\gamma_s'$  为泥沙干容重,  $q_s = Sq$ ,  $t$  为时间. 则将(1)式代入后遂有:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial \omega}{\partial S'}(S - S^*) \quad (3)$$

再将含沙量沿程变化公式<sup>[6]</sup>:

$$S = S^* + (S_0 - S_0^*)e^{-\alpha\omega x/q} + (S_0^* - S^*) \frac{q}{\alpha\omega x} (1 - e^{-\alpha\omega x/q}) \quad (4)$$

代入(3)并将起点断面选在饱和点, 即  $S_0 = S_0^*$ , 则:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\alpha\omega}{\gamma_s'} (S_0^* - S^*) \frac{q}{\alpha\omega x} (1 - e^{-\alpha\omega x/q}) \quad (5)$$

此处, 脚标“0”表示进口断面的值, 不带脚标的为出口断面的值.

设水库为完全的二维(即为等宽的矩形断面), 并且水深  $h$  沿程按直线增加(图 3).

$$h = h_k + \frac{h_L - h_k}{L}x \quad (6)$$

其中  $h_k$  为平衡水深,  $h_L$  为出库断面(坝前)水深,  $L$  为水库长度. 则当挟沙能力按公式

$$S^* = K \left( \frac{\gamma^3}{gh\omega} \right) = K \left( \frac{q^3}{gh^4\omega} \right) \quad (7)$$

确定时,

$$\begin{aligned} S_0^* - S &= S_0^* \left( 1 - \frac{S^*}{S_0^*} \right) = S_0^* \left[ 1 - \left( \frac{h_k}{h} \right)^4 \right] \\ &= S_0^* \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + \frac{h_L - h_k}{h_k} \frac{x}{L}} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

(7)式中的  $K$  为常数. 将其代入(5), 并引用相对长度

$$\left. \begin{aligned} \frac{\alpha\omega L}{q} &= \frac{\alpha L}{l} = \tilde{l} \\ \frac{\alpha\omega x}{q} &= \frac{\alpha x}{l} = \tilde{x} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

之后得:

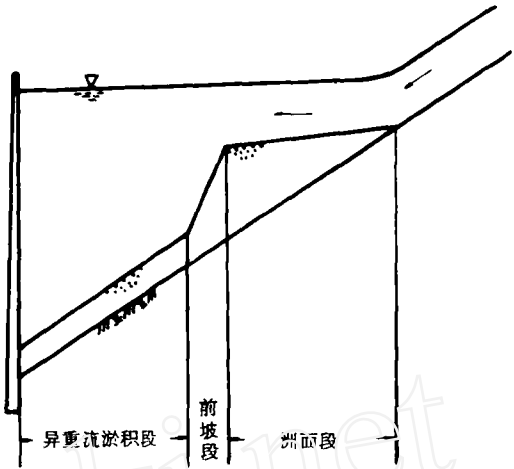


图 2 水库三角洲淤积纵剖面图

Fig. 2 Longitudinal profile of deposit delta in the reservoir

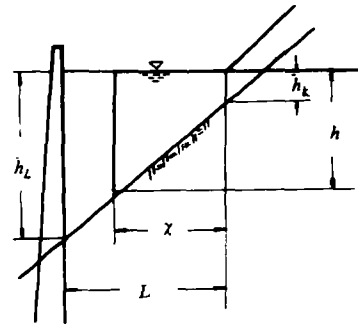


图 3 水深变化示意图

Fig. 3 Sketch of water depth variation

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\alpha\omega S_0}{\gamma_s'} \left[ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \frac{h_L - h_k}{h_k} \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} \right]^4} \right] \frac{1}{\tilde{x}} (1 - e^{-\tilde{x}}) = \frac{\alpha\omega S_0}{\gamma_s'} f(\tilde{x}, \frac{h_L - h_k}{h_k \tilde{L}}) \quad (10)$$

(9)式中的  $l = \frac{q}{\omega}$  为泥沙的落距,注意到  $\frac{dz}{dx}$  表示单位时间的淤积厚度,即淤积速度,因此当水力因素不变时,(10)式充分反应了淤积厚度沿程变化的特性。事实上当  $\tilde{x} \rightarrow 0$  和  $\tilde{x} \rightarrow \infty$  时,均有  $\frac{dz}{dx} \rightarrow 0$ ;而在其余各点,  $\frac{dz}{dx} > 0$ ,所以,在中间应存在淤积最厚处。为简单起见直接由公式(10)作数值计算,找出极大值点。可以看出极值点位置随水库的相对长度  $\tilde{L} = \frac{\alpha L}{l}$  及相对水深  $\frac{h_L}{h_k}$  而异。图4中绘出了当  $\frac{h_L - h_k}{h_k \tilde{L}} = 1$  时  $f(\tilde{x})$  曲线。例如当  $\tilde{L} = 10$ ,  $\frac{h_L - h_k}{h_k \tilde{L}} = 10$ , 即  $\frac{h_L - h_k}{h_k \tilde{L}} = 1$  时极值点在  $\tilde{x} = 0.600$  处(图4)。由此  $x = \frac{0.6}{\alpha} l$ , 当  $\alpha = 0.25$ ,  $\omega = 0.001 \text{ m/s}$ ,  $q = 10 \text{ m}^2/\text{s}$  时,则  $x = 24 \text{ km}$ 。即在所给条件下,最初淤积的瞬间,24km处淤积最厚,有可能

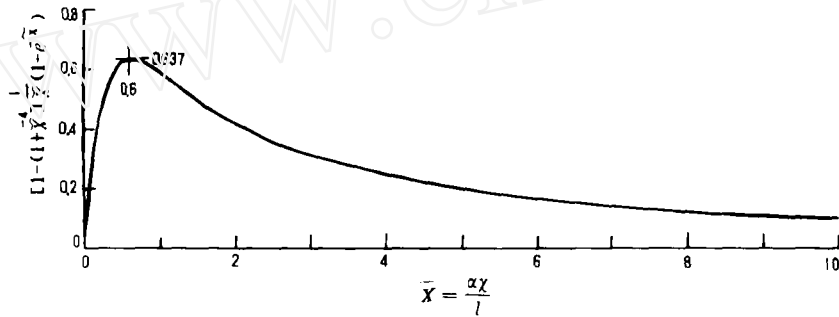


图4 淤积沿程分布

Fig. 4 Deposit distribution along river course

形成三角洲的顶点。现在来求出极值点的淤积百分数。由公式(4)知,当  $S_0 = S_0^*$  时,有:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{S^*}{S_0^*} + \left( 1 - \frac{S^*}{S_0^*} \right) \frac{1}{\tilde{x}} (1 - e^{-\tilde{x}})$$

这样淤积百分数  $\lambda$  为:

$$\lambda = 1 - \frac{S}{S_0} = \left( 1 - \frac{S^*}{S_0^*} \right) \left[ 1 - \frac{1}{\tilde{x}} (1 - e^{-\tilde{x}}) \right] \quad (11)$$

并应用公式(8),略加变换后得:

$$\lambda = \left[ 1 - \frac{1}{\left( 1 + \frac{h_L - h_k}{h_k} \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} \right)^4} \right] \left[ 1 - \frac{1}{\tilde{x}} (1 - e^{-\tilde{x}}) \right] \quad (12)$$

而在上述条件下,在极值点,  $\lambda = 0.210$ 。(12)式给出的  $\lambda$  值,可称为最初瞬间“三角洲”洲面淤积百分数。

综上所述,对于均匀悬移质,在进入水库后,其最初瞬间的淤积特性为:

(1)淤积厚度沿程是不均匀的,在某一点达到极大值,该点也就是三角洲顶点的最初位

置。这就是水库淤积的三角洲趋向性。

(2) 淤积厚度极大值的位置,取决于水库壅水程度  $\frac{h_L - h_t}{h_t}$  和水库的相对长度  $\tilde{L}$ 。而水库的相对长度又决定于它的绝对长度  $L$ 、恢复饱和系数  $\alpha$  以及泥沙的落距  $\frac{q}{\omega}$ 。

(3) 对应极值点的不同位置,自入库点至该点的淤积百分数  $\lambda$  就会不同。但是根据一些理论和实际资料分析, $\lambda$  一般在 0.16 至 0.26 之间,变化不大。这个  $\lambda$  也就是最初瞬时三角洲锥形的洲面淤积百分数。

## 2 非均匀悬移质三角洲形成的过程

非均匀悬移质不平衡输沙的规律,是水库淤积的基本规律<sup>[6]</sup>。用这一套规律和有关公式,不但能定性地解释三角洲的形成,且能够定量地描述其过程。考虑到公式较多,难以给出分析的答案,这里只能给出数字结果。我们曾根据不平衡输沙的成果,拟定一套水库冲淤过程及河床变形的通用数学模型<sup>[7]</sup>,编制了通用程序。并据此计算了一个三角洲形成的模型水库,结果典型地再现了三角洲形成的全过程,与实际情况完全一致。并且能反映各种细节和各种因果关系,能弥补实际水库观测资料的限制<sup>①</sup>。

计算条件是:模型水库长 630km,共设 64 个横断面(断面间距 10km)。断面形状为矩形,水面宽 1000m,坝前水位壅高 70.9m,进库流量 30000m<sup>3</sup>/s,进库含沙量 1.62kg/m<sup>3</sup>(相当于天然条件下挟沙能力 3.24kg/m<sup>3</sup> 的 1/2),进库级配中  $d > 0.1\text{mm}$ ,占 14.8%, $d < 0.01\text{mm}$ ,占 16.9%,平均沉速  $\omega_0 = 0.005\text{m/s}$ 。天然河道坡降 2‰,水深 12.1m,糙率  $n = 0.03$ ,并且淤积过程中不考虑糙率变化。计算结果如下:

表 1 淤积平衡后水力因素沿程变化

Tab. 1 Variation of hydraulic parameter along river course under sedimentation equilibrium

断面编号	间距(km)	水面坡降(‰)	河底坡降(‰)	水深(m)
14				
20	60	0.700	0.749	16.10
30	100	0.690	0.709	16.49
40	100	0.690	0.687	16.68
50	100	0.670	0.682	16.65
60	100	0.663	0.669	16.77
63	30	0.656	0.667	16.83
坝前(63)	—	—	—	16.86
总计	490	0.680	0.696	

(1) 纵剖面(由于是矩形断面平淤平冲,因此河底纵剖面即是深泓高程,也是平均高程,或是淤积面高程)的淤积过程如图 5 所示。图中绘出了河底线与水面线的变化过程。可见,从第 2 年起三角洲的锥形就已存在,第 4 年就很明显了,第 20 年顶点已达坝前,到第 42 年淤积已接近平衡。42 年末的河底与水面分段坡降,以及相应的水深如表 1 所示。从表中看

① 韩其为等。水库淤积(第二册),长江流域规划办公室水文处印,1980。

出,水面坡降与河底坡降沿程有所递减,并且河底坡降大于水面坡降,说明水库尚未完全达到淤积平衡,而略有壅水。与此相应是水深沿程有所递增。

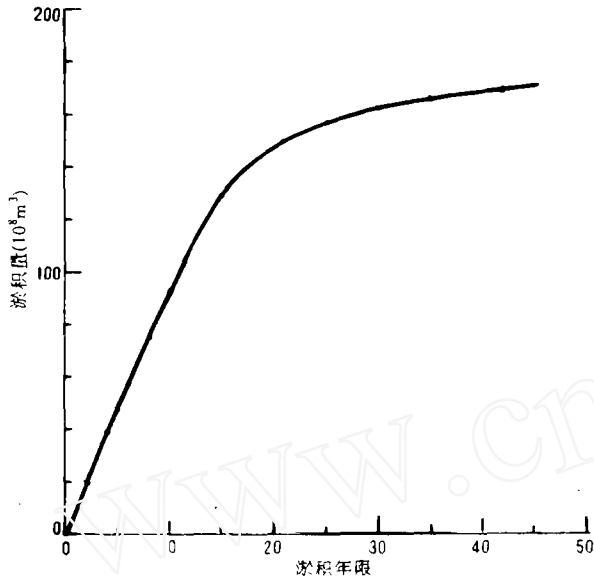


图5 累计淤积量变化过程

Fig. 5 Variation of accumulative sedimentation

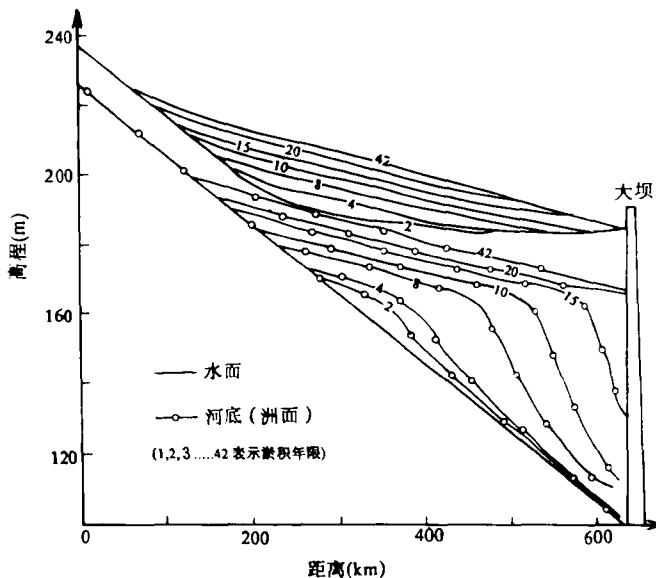


图6 水库淤积三角洲的形成

Fig. 6 Delta formation process in the reservoir

不是由冲刷分选引起,而是由于进入该断面悬沙不断变粗,相应的淤积物级配也不断变粗。

(2) 从总淤积量过程线看(图5),总的趋势是淤积量逐年有所减少,到第42年末淤积已很微弱,接近平衡,淤积百分数 $\lambda$ 仅为2.7%,相应的排沙比为97.3%。从该线看出,大体上以第21年为淤积转折点,在这以前淤积多,以后淤积较少。该转折点就是三角洲顶点到达坝前的时间(图6)。

这是很自然的,在这以前由于有前坡的淤积,所以淤积减少不很明显;而在这以后前坡淤积停止,只有洲面的淤积,故淤积大量减少。事实上到21年为止,其淤积量已达42年总淤积量88.6%,而其后的21年,仅淤积11.4%。可见图5的淤积过程线,反映了具有三角洲水库的淤积特点。

(3) 对于一个固定断面,淤积厚度及级配随时间而变化(图7),该断面为60号断面,位于坝前段(距坝30km),故有关参数随时间变化较典型,反映了水库淤积全过程。例如从河底平均高程看,初期(第10年以前)淤积缓慢;第10~21年处于三角洲前坡,淤积迅速。第21年以后逐渐接近平衡。再如从淤积物级配看,初期细颗粒( $d < 0.01\text{mm}$ )有一定比例,后期可以忽略,中粗颗粒( $d > 0.05\text{mm}$  或  $d > 0.1\text{mm}$ )随着淤积发展迅速增加,反映出床沙明显粗化,特别是淤积物 $d$ 的变化几乎与该断面水深变化完全同步。但是这种粗化

表 2 淤积末端与回水末端的上延

Tab. 2 Variation of end of deposition and back water area

断面 编号	距坝里程 (km)	蓄水前		第 1 年末			第 42 年末			淤积引起的 回水抬高 (m)	断面特征
		水位 (m)	河床 (m)	水位 (m)	河床 (m)	淤积厚度 (m)	水位 (m)	河床 (m)	淤积厚度 (m)		
3	600	232.1	220	232.1	220	0	232.1	220	0	0	第 42 年末回水末端
4	590	230.1	218	230.1	218	0	230.2	218	0	0.1	
13	500	212.1	200	212.1	200	0	217.0	200	0	4.9	
14	490	210.1	198	210.1	198	0	216.3	200.2	2.2	6.2	第 1 年末回水末端
18	450	202.1	190	202.1	190	0	213.5	197.0	7.0	11.4	
22	410	194.1	182	194.6	182	0	210.7	194.1	12.1	16.1	
27	360	184.1	172	188.1	172	0	207.2	190.6	18.6	19.1	第 1 年末淤积末端
28	350	182.1	170	187.5	170.4	0.4	206.5	190.0	20.0	19.0	
39	240	160.1	148	183.5	153.1	5.1	199.0	182.3	34.3	15.5	
49	140	140.1	128	183.1	129.6	1.6	192.3	175.5	47.5	5.2	大坝
60	30	118.1	106	183.0	106.7	0.7	185.0	163.1	62.1	2.0	
63	0	112.1	100	183.0	100.5	0.5	133.0	166.1	53.1	0	

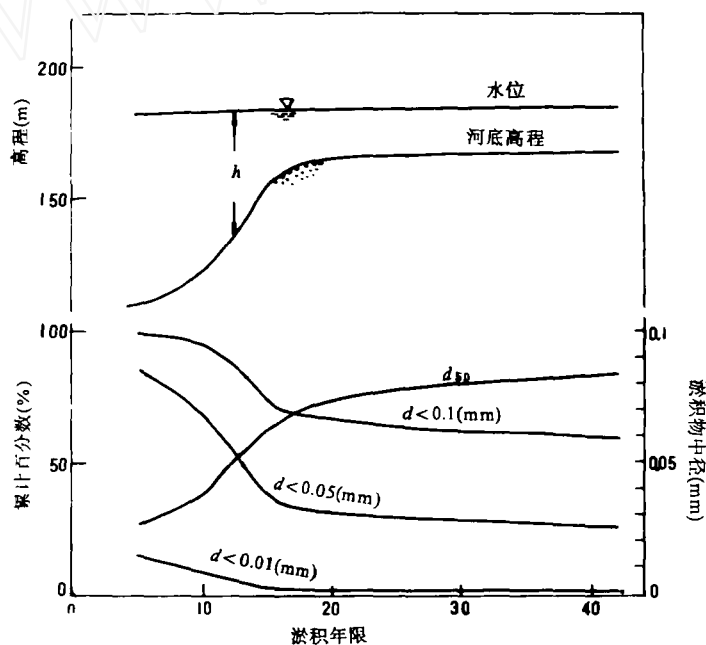


图 7 60 号断面水深、河床高程、淤积物级配变化过程

Fig. 7 Variation of water depth, river bed elevation and size distribution of sedimentation at the 60th cross section

(4) 对于一个固定瞬间, 累计淤积物沿程变化是逐渐变细。图 8 绘出了第 10 年末三种粒径的累计百分数沿程变化情况。图中看出, 在洲面淤积物粒径较粗, 大部分是  $d > 0.05\text{mm}$  以上,  $d < 0.01\text{mm}$  基本上没有, 并且  $d < 0.1\text{mm}$  和  $d < 0.05\text{mm}$  曲线略有升高, 表示淤积物级配沿程有所细化。在前坡,  $d < 0.05\text{mm}$  曲线迅速升高, 表示  $d > 0.05\text{mm}$  颗粒则大量淤

积,到前坡脚其百分数降为30%以下。前坡以下的细颗粒淤积段,沿程淤积较少,淤积物级配细化也较慢。

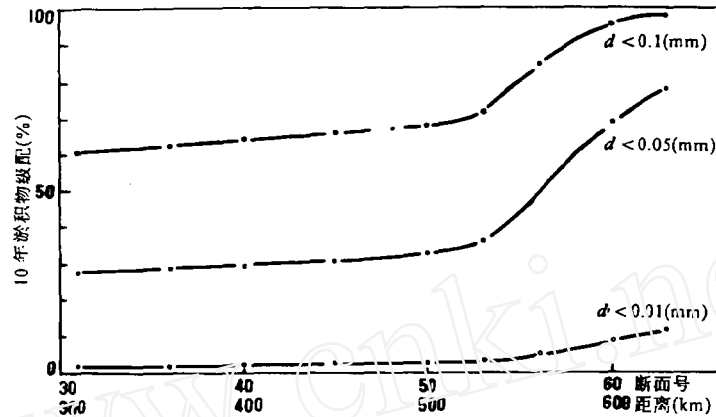


图8 淤积10年淤积物级配沿程变化

Fig. 8 Variation of size distribution of deposits along river course after 10-year sedimentation

(5) 到第21年末三角洲顶点已达坝前,但是直到第42年末,虽已接近平衡,但是仍未达到平衡。具体表现出三点:第一,淤积量过程线还在缓慢上升(图5),即进出沙量没有完全相等。第二,水面坡降与河床坡降仍然是沿程递减,水深则沿程有所加大。说明还不是均匀流。在矩形断面且宽度不变的条件下,最后达到平衡应该是均匀流。第三,从淤积物级配沿程分布看,仍然有所变细(图9)。

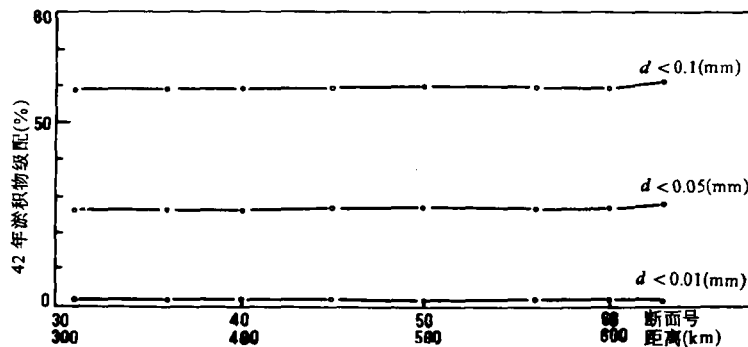


图9 淤积42年淤积物级配沿程变化

Fig. 9 Variation of size distribution of deposits along river course after 42-year sedimentation

(6) 由于计算中未考虑糙率随淤积的减少,淤积后退与回水上延是很可观的。从图5及表2知,到第42年末,淤积末端由27断面后退至13断面,即后退140km;回水末端由18断面上延到3断面,即上延150km。同时淤积引起的回水抬高,也是非常明显的。从表2列出



的淤积 42 年对第 1 年回水抬高的数据看出,在 4 断面至 63 断面整个回水范围内水位均有不同程度抬高;其中水位最大抬高在 27 断面,即第 1 年淤积末端处,抬高值达 19.1m。

将上述模型水库计算结果与官厅水库实测资料对比后(图 6 与图 12 对比),可见彼此是符合的,并在揭露过程的某些方面和细节上更清楚和详细。这样,我们不仅从理论上论证了水库非均匀悬移质淤积的三角洲趋向性,而且定量地说明了其形成与发展的全过程。

### 3 三角洲淤积百分数

以下在三角洲已经形成的前提下,根据非均匀悬移质不平衡输沙的一般规律<sup>[6]</sup>,研究它的形态特征、推进及变化。

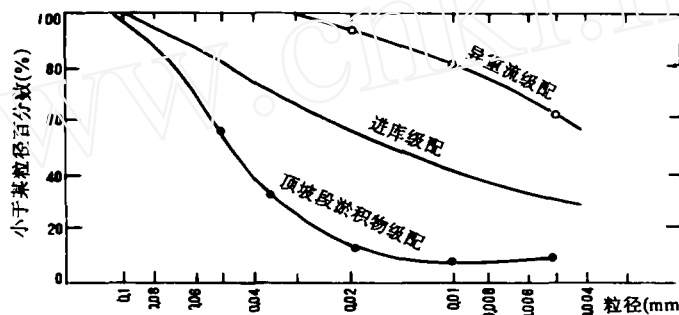


图 10 官厅水库顶坡淤积物级配与异重流级配分解

Fig. 10 Separation of size distribution of deposits at top-slope and density flow in Guanting Reservoir

实际资料表明在形成三角洲淤积体的水库,三角洲淤积的泥沙与三角洲以下的悬移质泥沙在颗粒组成方面差别明显。图 10 列出了官厅水库三角洲洲面段(顶坡段)淤积物级配、进入前坡坡脚的悬移质级配(异重流级配)、以及进库悬移质级配等实测资料。从该图看出,进库悬移质泥沙,经过洲面段淤积,分成两部分:一是淤下了一部分粗和较粗的颗粒,它的级配就是洲面淤积物级配;另一是剩下的细颗粒,它的级配就是异重流级配。并且从图中看出,这两部分级配在  $d < 0.01\text{mm}$  范围内是重合的。过去习惯上将三角洲淤积物称为床沙质,剩下的悬移

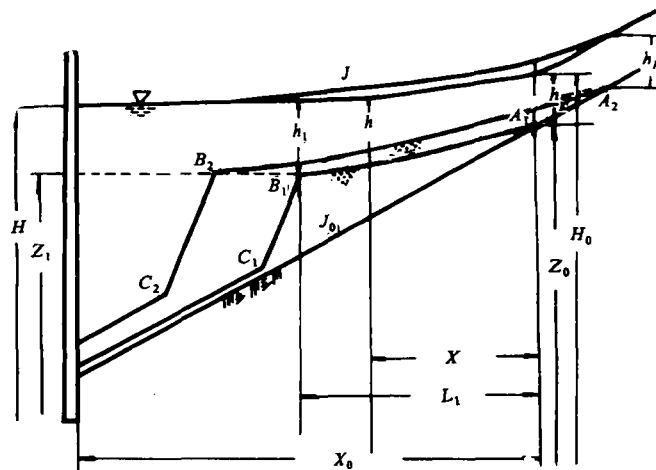


图 11 水库三角洲淤积示意图

Fig. 11 Sketch of deltaic deposit in the reservoir

配在  $d < 0.01\text{mm}$  范围内是重合的。过去习惯上将三角洲淤积物称为床沙质,剩下的悬移

质称为冲泻质,而通过截然的分界粒径来分开它们<sup>[1,4,5]</sup>。如果已经知道了分界粒径,截然划分的方法只是准确与否的问题。但是一些资料表明,水库中的床沙质与冲泻质的概念并不是很明确,相应的分界粒径也是变化的。因而对于规划中的水库常常难以确定。

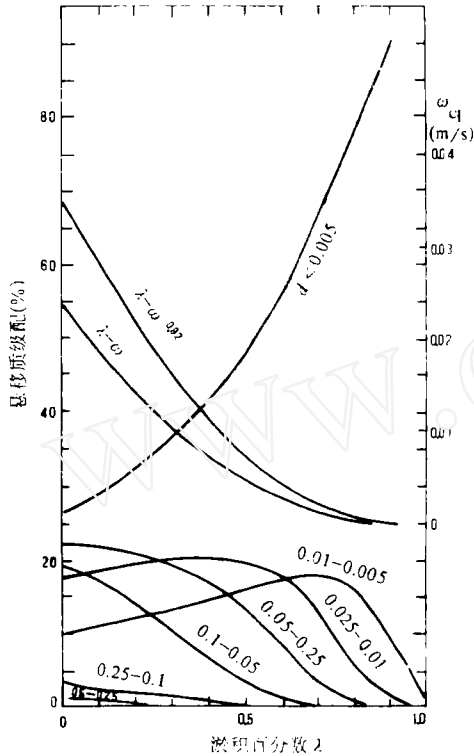


图 12 官厅水库悬移质级配分选曲线  
Fig. 12 Grade curves of size distribution of suspended load in Gungting Reservoir

从淤积时悬移质级配分选的规律看,经过三角洲淤积,将泥沙分成两部分的现象是很容易理解的。而且知道了三角洲淤积百分数,则可以分开这两部分泥沙,并不要采用截然分割的方法,问题是三角洲淤积百分数 $\lambda_{\Delta}$ 。如何定?为此必须分析前坡段以下的淤积特征。设已形成的三角洲为 A、B、C(图 11)。现研究顶点以下的淤积沿程分布和特性。自前坡顶点以下一定距离后,本断面挟沙能力可以忽略,注意到此时为明显淤积, $P_{i,L} = P_{i,i}$  以及  $S_{b1} = S_{b1}^*$ ,所以式(4)给出含沙量公式为:

$$S = S_1 \sum_{i=1}^n P_{i,L} = \frac{q}{\alpha \omega_i x} (1 - e^{-\frac{\alpha \omega_i x}{q}}) \quad (13)$$

此处起点断面选择在三角洲顶点。这样由不平衡输沙的基本方程:

$$\frac{dS}{dx} = -\frac{\alpha \omega}{q} (S - S^*) \approx -\frac{\alpha \omega}{q} S$$

及河床变形方程(2),有:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma_s'} \frac{\partial (S q)}{\partial x} = \frac{\alpha \omega}{\gamma_s'} S \quad (14)$$

式中,  $\omega = \sum_{i=1}^n P_{i,\omega_i}$  为平均沉速。将(13)代入(14)式后为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\alpha \omega}{\gamma_s'} S \sum_{i=1}^n P_{i,L} \frac{q}{\alpha \omega_i x} (1 - e^{-\frac{\alpha \omega_i x}{q}}) \quad (15)$$

就上式对  $x$  微分,得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) = \frac{1}{\omega} \frac{\partial h}{\partial t} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\alpha \omega}{\gamma_s'} S_1 \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,L}}{x} \left[ \frac{q}{\alpha \omega_i x} (1 - e^{-\frac{\alpha \omega_i x}{q}}) - e^{-\frac{\alpha \omega_i x}{q}} \right] \quad (16)$$

据此,可以分析顶点以下的淤积特性:第一,由式(15)知  $\frac{\partial h}{\partial t} > 0$ , 即库底恒淤高;第二,由于悬移质级配沿程变细,沉速沿程减少,因此  $\frac{\partial \omega}{\partial x} < 0$ , 所以式(16)给出  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) < 0$ , 即(单位时间)淤积厚度沿程递减;第三,从式(15)知,淤积厚度沿程变化的情况,决定于这顶点的距离  $x$  及  $\omega_0$ ;第四,式(16)右边的第二项,随着  $x$  的增加而迅速趋于零,而第一项趋近于零的

速度则较慢。此时要满足淤积厚度较均匀,即要满足  $\frac{\partial}{\partial x}(\frac{\partial h}{\partial x}) = 0$ , 则必须  $\frac{\partial \omega}{\partial x}$  也很快地接近于零。注意到实际资料表明有明显三角洲的水库,前坡脚以下的淤积(不论有无异重流)是较均匀的(图 1),因此在前坡脚以下,  $\frac{\partial \omega}{\partial x}$  也应接近于零。这在物理上相当于悬移质级配已经很细,进一步淤积时已难显出分选,故平均沉速已接近于常数。这样,我们可以根据进库级配,作出淤积时的分选曲线,并绘出  $\omega = \omega(\lambda)$ , 由该曲线查出  $\omega \approx$  常数的  $\lambda$ , 它就是从进库断面至前坡脚的淤积百分数,亦即三角洲的淤积百分数  $\lambda_{\Delta}$ 。在图 12 中绘出官厅水库的分选曲线和  $\omega = \omega(x)$ ①。从该图知,在  $\lambda \approx 0.7$  处,  $\omega$  已变化很小,据此求得剩下的悬移质级配如表 3。另一方面官厅水库多年平均三角洲淤积百分数也约为 0.7(系按重量计的淤积百分数,如按体积计则要小于 0.7),同时从表 3 看出前坡脚以下的实测异重流级配与计算剩下的悬移质级配也是接近的。这说明,由分选曲线  $\omega(\lambda)$  开始接近于常数的淤积百分数作为  $\lambda_{\Delta}$  是可行的。

表 3 前坡脚计算悬沙级配与实测的比较

Tab. 3 Comparison between calculated and measured size distribution of suspended load at the end of top-slope

粒 径 组	计算悬移质级配	实测异重流级配
<0.005	66.1	60.1
0.005~0.010	18.0	23.5
0.010~0.025	12.8	15.6
0.025~0.050	2.9	0.8
0.050~0.100	0.2	

也曾用丹江口水库进库级配,按上述办法求出了三角洲淤积百分数为  $\lambda_{\Delta} = 0.85$ ②。由于该水库没有明显三角洲,所以不能直接对比  $\lambda_{\Delta}$ 。但是当  $\lambda_{\Delta} = 0.85$  时,剩下的悬移质级配与潜入点的异重流级配是一致的,这就间接地说明了所确定的  $\lambda_{\Delta}$  是有一定根据的。附带指出,尽管丹江口水库三角洲淤积百分数大于官厅水库,但剩下的悬移质级配仍粗于官厅的。从上述对比看出,三角洲淤积百分数至少与级配有关,不能固定为一个常数在各水库通用。

## 参 考 文 献

- 1 水利水电科学院河渠研究所. 水库淤积问题研究. 北京: 水利电力出版社, 1960
- 2 韩其为、沈锡琪. 水库的锥体淤积及库容淤积过程和壅水排沙关系. 泥沙研究, 1984, (2)
- 3 Harrison A S (冯启德译). 水库库首的淤积. 泥沙研究, 1956, 1(1). 96~109
- 4 姜乃森. 多沙河流水库三角洲的淤积计算方法. 见: 水利水电科学院科学研究论文集, 第二集, 北京: 中国工业出版社, 1963. 96
- 5 张 威. 水库三角洲淤积及其近似计算. 人民长江, 1964, (2)
- 6 韩其为. 悬移质不平衡输沙的研究. 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 光华出版社, 1980. 793~802
- 7 韩其为、何明民. 水库淤积与河床演变的(一维)数学模型. 泥沙研究, 1987, (3). 14~29
- 8 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室编著. 河流泥沙工程学(下册), 北京: 水利出版社, 1982, 9

① 韩其为等. 水库淤积(第二册), 长江流域规划办公室水文处印, 1980.

② 韩其为. 不平衡输沙成果在水库淤积中的应用. 长江水利水电科学研究院, 1971.

## DELTA DEPOSITION IN RESERVOIR ( I )

Han Qiwei

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

### Abstract

There exist three typical profiles of sediment deposition in reservoir, among which delta profile is the most general one. Based on the nonequilibrium transportation equation, it is verified in theory that the delta formation is the tendency of reservoir sedimentation. A general mathematical model of reservoir sedimentation and river fluvial established by the author is used to simulate the entire process of the formation and development of delta, thus its characteristics and mechanism involved are clearly exposed. A series of theoretical results are presented, including: 1. deposit percentage of delta, which is dependent on the grade curve of suspended load during sedimentation; 2. equations of gradient and longitudinal profile of top-slope of delta. The former belongs to the second order polynomial and the later to the third order polynomial, both of which are concave-up curves, meaning that the curve slope is decreased along the flow direction and the top-slope of delta is not a linear curve as shown in some previous papers; 3. expressions of water level upon the delta top-slope and the slope of water level, which are also third order and the second order polynomials respectively and the concave-up curves as well. But the decreasing of water level is smaller than that of the delta bed and the water depth is increased along the flow direction; 4. expression of the length of the front slope, the end of which is the location where the deposit percentage is just equal to that of the delta; 5. deposit percentage of the top-slope, which is derived from the calculation of profile; 6. variation of size distribution of suspended load at each section of the delta and the grade curves of deposit at the front and top-slope respectively.

All these theoretical results are verified by the measured data at Guanting Reservoir, a typical depositional deltaic one, showing a satisfactory agreement.

**Key Words** Deposit delta in the reservoir, deposit distribution along river course, longitudinal profile of top-slope, suspended load, front-slope