

含沙河流入湖后沙体形成、发展的水槽实验

王泽中 汪崎生 刘忠保

(江汉石油学院地质系, 湖北沙市)

含沙河流入湖后, 沙体首先在河口呈舌形向前发展。上游来沙时, 沙体前积、侧积几乎同样发育且速率相等或相似, 沙体表面以一条河道为主, 近河口一侧为淤, 远河口一侧为冲; 若上游不来沙, 沙体则只有侧积而没有前积, 沙体表面存在多条分支河道, 近河口端为冲, 远河口端为淤, 河道分流主要发生在 $y=30-60\text{ cm}$ 之间, 其后却有闭合的趋势。六次实验的沙体的最大宽度都集中在距河口距离为河道宽度三倍的断面上, 最大厚度集中在距河口 150 cm 的断面上。

关键词 含沙河流 湖泊 沙体 模拟实验

第一作者简介 王泽中 男 28岁 助教 石油地质

含沙河流入湖后, 由于过水断面的突然增大, 流速将急骤下降, 河水所携带的沉积物, 尤其是其中的推移质将迅速沉积下来, 在河口形成一定规模的沙体。扇三角洲沙体就是这类沙体的典型代表。虽然对古代和现代扇三角洲的研究已有很多^[1], 但都很难将它们的形成机制与水力学条件、上游来沙条件及湖面升降等因素联系起来。本文试图用实验方法, 在以上三个因素可知可控的条件下研究含沙河流入湖后沙体的形成及发展过程, 希望有助于了解扇三角洲沙体, 以及其它沙体的沉积机制, 为油气勘探服务。

一、实验装置

实验的主体由一个木制的水槽及水盆组成(图1)。水槽长 3.5 m , 宽 1.0 m , 深 0.6 m , 为一矩形槽, 其坡度可调。在水槽的中央装有两块木板, 移动木板之间的距离便可调节水槽内河道的宽度。水盆长 5 m , 宽 2.5 m , 深 0.6 m 。其底板由木板拼接而成, 其上覆有水泥沙浆, 可通过沙浆的厚度调节水盆坡度。水盆前部和尾部均为木板, 两侧装有玻璃, 以观察泥沙冲淤和底形运动。在水盆的尾部装有活动尾门, 通过其升降便可调节盆内水深, 以模拟湖面升降。水槽在水盆前部中央进入水盆。

本次实验预先固定的水槽宽度为 20 cm , 坡度为 8.47% ; 水盆坡度可分三段, 从水盆入口起算 $0-1\text{ m}$ 为 25% , $1-2\text{ m}$ 为 20% , $2-5\text{ m}$ 为 15% 。这种从入口至中心坡度递减的趋势与自然界的实际情况相似。

供水系统由蓄水池、水泵、高位水箱、淤水池、量水堰、前池和沉沙池组成(图1)。实验前可用水泵或直接利用自来水压将水抽至高位水箱。高位水箱的水经一可调阀门流入淤水池、过量水堰,经前池稳定后流经水槽及水盆并从尾门流出进入沉沙池。沉沙池中的水可由潜水泵抽至淤水槽中形成循环。在潜水泵的出口装有可调阀门以控制流量。

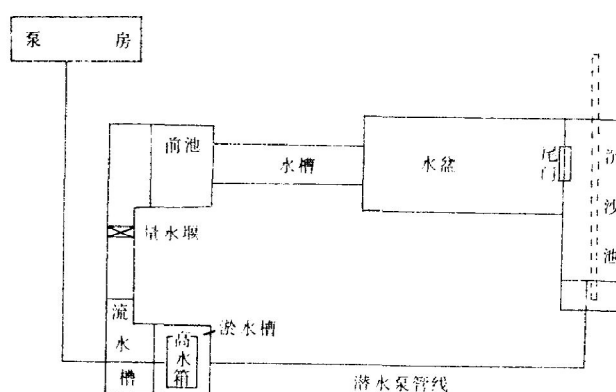


图1 实验装置示意图

加沙是由水槽入口处安装的圆柱形盛沙桶完成的。在桶的底部有矩形槽,其上装有一活动隔板,在隔板上钻有孔径为5 mm、6.5 mm、9 mm和11 mm的四个小孔。在实验开始前,事先检测出不同粒径的单孔流量(表1)。然后根据实际需要确定孔数及孔径。实验表明,在桶内盛沙高度大于桶高三分之一时,单孔沙流量保持恒定。这意味着实验中不必连续地向桶内加沙。

表1 不同粒径沙粒单孔流量(g/s)

孔径(mm) 粒径(mm)	5	6	9	11
0.25—0.42	3.4	6.2	15.1	25.5
0.15—0.25	3.5	7.3	未测	未测
0.1—0.15	3.22	7.05	未测	未测

实验中我们检测了水流量、沙流量、槽内水深、槽内水流表面速度、水盆入口处水深、尾门高度等参数(表2,3)。其中水流量由三角量水堰测得,计算公式为 $Q=1.4H^{2.5}$ 。式中 H 为堰上水头(m); Q 为流量(m^3/s)。当冲淤平衡时沙流量为单孔流量用天秤和秒表测得。槽内表面流速用浮子法测得。水深利用地形仪测量。槽内水深已知时还可利用 $Q=BH\bar{U}$ 计算断面平均流速 $\bar{U}$ 。其中 Q 为流量(m^3/s), B 为水槽宽(m), H 为水深(m)。

为了便于描述沙体,我们建立了如图2所示的坐标系。在今后的叙述中,剖面及点位均用坐标表示。

表2 六次实验条件表

流次	日期	时间 t (h)	水流量 Q (l/s)	沙流量 Q_s (g/s)	尾门高度 h (cm)	粒径 d (mm)
Run1	1990.10.11	6	2.46	9.6	14.4	0.25—0.42
Run2	1990.10.15	6	2.46	9.6	14.4	0.25—0.42
Run3	1990.10.16	5	2.46	0	14.4	0.25—0.42
Run4	1990.10.18	6	1.82	6.6	14.4	0.25—0.42
Run5	1990.10.19	5	1.82	0	14.4	0.25—0.42
Run6	1990.10.20	5	1.24	0	13.4	0.25—0.42

表 3 各次实验水流参数表

流 次	槽内水深 H_f (cm)	表面流速 U_s (m/s)	断面平均流速 $\bar{U}$ (m/s)	$Fr = \frac{\bar{U}}{\sqrt{gH}}$	盆内入口水深 H_i (cm)
Run1	未测	未测	未测	未测	未测
Run2	3.1	0.61	0.39	0.71	9.2
Run3	5	0.33	0.25	0.36	10.6
Run4	3.5	0.56	0.26	0.44	9.4
Run5	4	0.34	0.23	0.37	9.4
Run6	3.5	0.27	0.17	0.29	8.2

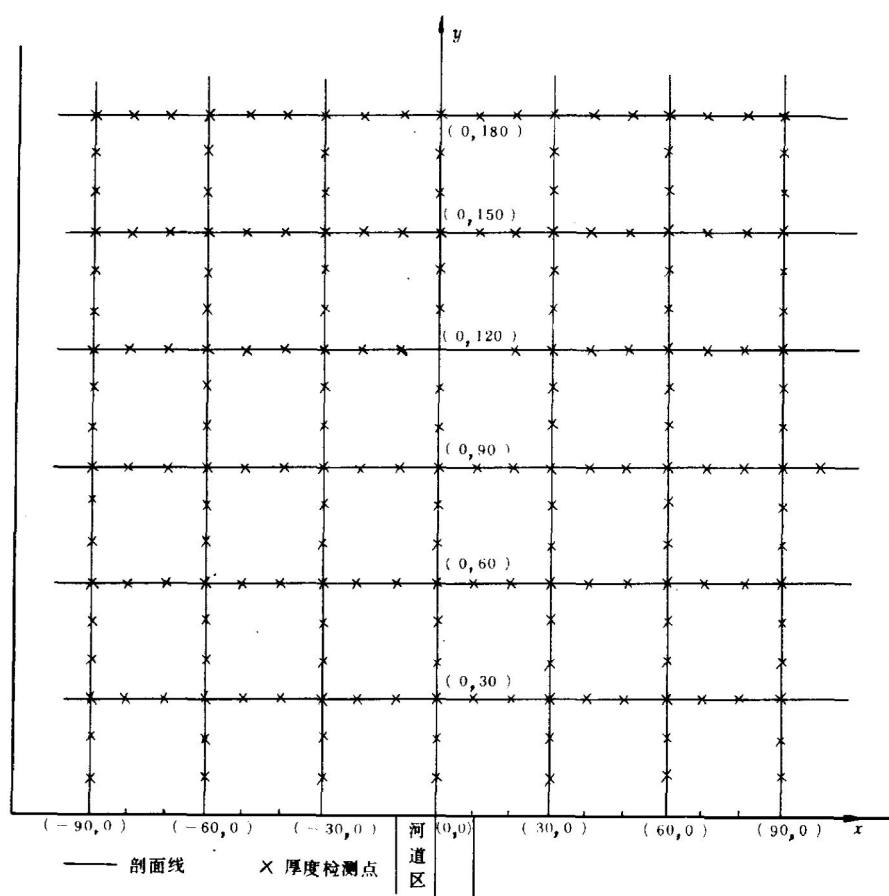


图 2 水盆中坐标轴的选择及厚度测点分布
(图中数字单位均为 cm)

二、实验流程

在每次实验开始前,先测量及确定所用沙的流量,然后在槽内铺一层 3 cm 的沙。将尾门

提至预定高度以上,用潜水泵抽水将水盆灌满,当水淹至铺沙表面时,徐徐打开高水箱的阀门使水流缓慢地由水槽流入水盆,同时调节水槽内流量,当与预定的流量相等时,便可将尾门降至需要的高度并开始加沙。待水流平稳后即可检测水深、流速等各种参数。实验结束时先停止加沙,抬高尾门并逐渐减少水流量直至使其为零。用一塑料虹吸管将盆内水放空,这样沙体形态便能得到完整的保存,便于进行各种参数的检测。若在此基础上接着做下一轮实验,除槽内不需铺沙外,其余步骤同前。

本次实验所用沙粒粒径为 0.25—0.42 mm,取自长江河道,晒干过筛取得所需粒径的沙粒。

三、实验条件

本组实验共进行了六次,其相应实验条件如表 2 所列,水流参数如表 3 所列。

由表 2 看出,第二次实验 (Run2) 与第一次实验 (Run1) 条件完全相同,实际上是 Run1 的继续。Run3 的时间稍短,更未加沙,目的是要了解在不加沙条件下沙体的冲蚀、淤积变化规律。第四次实验 (Run4) 加沙量及水流量都相对变小,用以了解沙体在 Run3 的基础上如何发展。Run5 的结果可与 Run3 对比,而 Run6 则主要观察尾门降低后(相当于湖面下降)沙体的形成及发展。

表 3 是各次实验的水流参数。其中,槽内水深、槽内表面流速及盆内入口处水深均系实测的结果。弗劳德数 Fr 和平均流速 $\bar{U}$ 是通过计算得出的,都与槽内水深 H_t 关系极大,各次实验的 H_t 都是在停水前测得的。对加沙的 Run1、Run2、Run4 而言,实验开始时的水深最大,随实验的进行水深变浅,流速增大。但水流足以将所加的沙全部带入水盆时,水深便相对保持恒定并持续到实验结束。不加沙实验的情况相反。从表 3 可以看出,实验结束时 Fr 均小于 1,这与我们在停水后观察到槽内底形均为沙丘的结果一致。

四、实验结果

为了便于叙述,首先说明几个术语。沙体的前部是指沙体在水流下游的部分,后部或尾部是指水流上游即靠近河口的部分;沙体的底边线是指沙体与人造底床的接触线;沙体的倾斜层是指沙体表面边缘向底边线过渡的部分,某一点倾斜层的倾向与该点的水流方向一致;沙体顶边线是指沙体表面与倾斜层的交线;沙体长度是指平行水流方向测得的从河口到沙体前部顶边线的距离;沙体宽度是指垂直水流方向所测得的两侧顶边线间的距离;沙体厚度是指从沙体表面到底床的垂直距离。沙体的长宽比、长厚比、宽厚比都是指最大长度、最大厚度、最大宽度之比。沙体向前发展叫前积,向两侧发展叫侧积,向上发展叫叠积。

1. 沙体形态

图 3 表示六次实验结束后沙体顶边线的平面形态。Run1、Run2 沙体呈明显的舌状,长宽比较大,随着实验的进行,最大长度和最大宽度相应增加,但从 Run3 后,最大长度增加的幅度远小于最大宽度的增加幅度,使二者的比值越来越小,并在 Run5、Run6 后保持在 1 左右(表 4)。稍有例外的是 Run6 的最大长度比 Run5 小 1cm,这并非沙体退缩,而是在实验结束后 Run6 前缘沙体坍塌造成的。

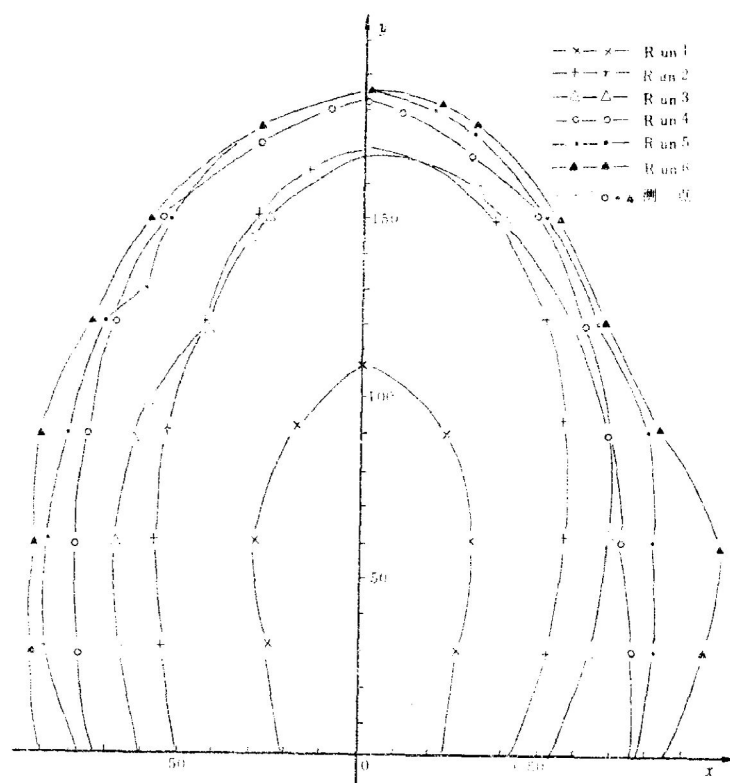


图3 六次实验沙体表面的平面形态

表4 六次实验沙体特征参数表

流次	最大长度 $L_{\max}$ (cm)	最大宽度 $B_{\max}$ (cm)	最大厚度 $H_{\max}$ (cm)	长宽比 $L_{\max}/B_{\max}$	长厚比 $L_{\max}/H_{\max}$	宽厚比 $B_{\max}/H_{\max}$	上顶面面积 (m^2)
Run1	110	58.5	12.8	1.88	8.59	4.87	0.54
Run2	165	114	13.5	3.45	12.4	8.57	1.56
Run3	168	138	14.1	1.22	11.9	11.5	1.81
Run4	182	152	13.1	1.19	13.89	11.6	2.31
Run5	185	170	13.5	1.09	13.7	12.59	2.54
Run6	184	186	13.5	0.99	13.63	13.78	2.75

进一步分析各次实验沙体发育情况可以看出,Run2的前积和侧积范围很大;Run3几乎没有前积,但侧积明显;Run4与Run2相似,不过侧积和前积范围都比Run2偏小,这主要是其本身的含沙量及流量较小的缘故。Run5、Run6与Run3相似。由此可以看出,加沙时前积和侧积几乎同样发育;不加沙时,前积几乎不发育,而侧积却很明显。

每次实验结束后 $x=0$ 剖面(即主流线)的沙体表面坡度,虽然大小各不相等,但均为负值,即沙体表面为倒坡(表5)。这主要是由于沙粒在水盆中大量堆积造成的,致使水流畅向前流动的阻力明显增大而迫使水流向两侧流动。从表5看出,Run2、Run4的倒坡小,前积距离大;Run3、

Run5、Run6 倒坡大,几乎没有前积。这充分表明上游来沙控制了沙体表面倒坡大小,进而也控制了沙体前积和侧积的相对发育规模。

表5 各次实验结束后 $x=0$ 剖面沙体表面坡度(度)

参 数 \ 流 次	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6
河口厚度(cm)	8.6	8.8	7.7	8.6	6.6	7.4
河口标高(cm)	10.85	12.25	11.15	12.25	10.45	11.05
最大标高(cm)	12.6	13.0	13.4	12.7	12.7	12.9
距离(cm)	90	150	140	160	170	160
坡度	-1.11	-0.29	-0.71	-0.16	-0.76	-0.66

对沙体在六个不同断面上宽度的测量结果表明,六次实验的最大宽度均位于 $y=60$ cm 的断面上(表6)。该断面距河口的距离正好为河宽的三倍。从 $x=0$ 的纵剖面厚度变化图中可以看出,每次实验均在 $y=30-50$ cm 之间存在一个厚度突然增加的转折点,未加沙的 Run3、Run5、Run6 实验尤为明显(图5,6)。对各次实验在不同断面上的河道条数的统计也表明, $y=60$ 剖面的河道最多(表9)。这些都是促使 $y=60$ 剖面宽度最大的原因。

表6 六次实验砂体不同断面的宽度(cm)

流 次 \ 剖 面	$y=30$	$y=60$	$y=90$	$y=120$	$y=150$	$y=180$
Run1	50	58.5	45	—	—	—
Run2	107	114	110.5	94.5	65	—
Run3	131	138	133.5	99	64	—
Run4	152	149	144.5	126	107	—
Run5	169	170	169	137	107	39
Run6	185	186	170	142	104	40

—沙体未发育至该断面

2. 沙体厚度

六次实验结束后沙体最大厚度如表4所示。Run3 未加沙,但最大厚度却由 Run2 的 13.3 cm 增至 14.1 cm; Run4 加沙后反使最大厚度减少了 1 cm; Run5 未加沙,最大厚度又增至 13.5 cm; 尽管 Run6 的尾门已有降低,但最大厚度仍然保持不变,表明上游来沙明显地控制着沙体最大厚度的变化,非含沙水流促使沙体最大厚度增加。

在实验过程中我们曾观察到来自河道的水流进入水盆区后,有时左时右偏离河道中心的现象。图3表明,河道向右侧偏离的机率要大些。图4表明六次实验中有四次实验的最大厚度分布在河道左侧。更有趣的是,从 Run2 开始,最大厚度均集中在 $y=150$ 的剖面上。尽管 Run4 沙体前积距离较大和 Run6 的尾门有所降低。

为了进一步分析厚度在平面上的变化,我们列出了各次实验 10 个不同断面的最大厚度、最小厚度和平均厚度(表7)。从表7中可以看出,在垂直水流方向的剖面中,对同一次实验而言,随着离河口距离的增加,最大厚度、最小厚度和平均厚度都增加。三种厚度增加的趋势一致,到 $y=150$ 剖面都达到了最大值。对不同实验而言,观察 $y=90$ 剖面可以发现,该剖面在不

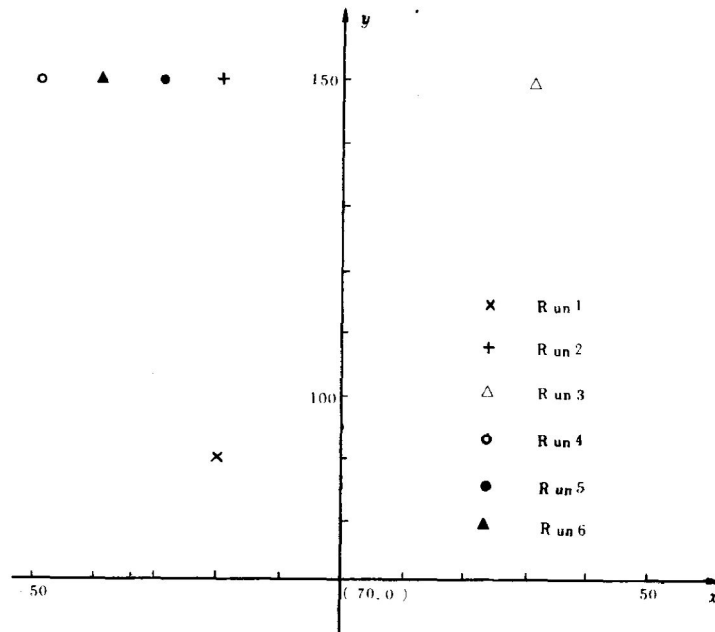


图4 六次实验最大厚度的位置

同的实验中最大厚度和平均厚度的变化幅度都不大。而在 $y=90$ 剖面两侧的 $y=30$ 和 $y=150$ 剖面却恰恰相反,不仅变化幅度大,而且变化趋势正好相反。例如从 Run2 到 Run3, $y=30$ 剖面三种厚度都减小,而 $y=150$ 剖面却增加(最小厚度不变)。这就是说, $y=90$ 剖面(或其附近)沙体厚度可能相对稳定,而且可能成了沙体头部和尾部厚度变化的“支点”。另外,在 $y=150$ 剖面上,最大厚度与最小厚度差别不大,最大 1.6 cm(Run3),最小仅 0.8 cm(Run2);而 $y=30$ 剖面最大厚度与最小厚度相差最大为 2.1 cm(Run5),最小为 0.9 cm(Run1、Run2)。这说明沙体在尾部的冲淤变化要比其前部强些。

表7 六次实验各断面沙体厚度(最大厚度 最小厚度 平均厚度 单位 cm)

剖面 流次	$x=0$	$x=30$	$x=-30$	$x=60$	$x=-60$	$y=30$	$y=60$	$y=90$	$y=120$	$y=150$
Run1	12.6 $\frac{8.6}{10.9}$	未测	未测	—	—	11.4 $\frac{9.5}{10.7}$	12.3 $\frac{11.0}{11.6}$	12.8 $\frac{12.0}{12.4}$	—	—
Run2	13.0 $\frac{8.2}{11.1}$	未测	未测	未测	未测	10.9 $\frac{10.0}{10.45}$	11.9 $\frac{11.0}{11.5}$	12.4 $\frac{11.9}{12.1}$	13.2 $\frac{12.3}{12.7}$	13.3 $\frac{12.5}{12.9}$
Run3	13.4 $\frac{7.7}{11.1}$	13.6 $\frac{11.0}{11.7}$	13.5 $\frac{9.4}{11.6}$	12.5 $\frac{10.2}{11.4}$	11.8 $\frac{9.9}{10.7}$	10.5 $\frac{9.1}{9.7}$	12.0 $\frac{10.2}{10.9}$	12.5 $\frac{10.5}{11.8}$	13.4 $\frac{9.1}{11.7}$	14.1 $\frac{12.5}{13.4}$
Run4	12.7 $\frac{8.6}{11.3}$	12.4 $\frac{10.4}{11.8}$	12.9 $\frac{10.8}{12.1}$	12.3 $\frac{10.3}{11.5}$	12.8 $\frac{10.3}{11.8}$	11.3 $\frac{9.7}{10.4}$	12.4 $\frac{10.6}{11.4}$	12.3 $\frac{10.8}{11.8}$	13.1 $\frac{11.9}{12.4}$	13.1 $\frac{12.0}{12.6}$
Run5	12.9 $\frac{6.6}{11.3}$	13.2 $\frac{8.5}{11.3}$	13.4 $\frac{8.7}{10.7}$	12.2 $\frac{9.8}{10.7}$	11.9 $\frac{8.3}{10.8}$	10.2 $\frac{8.1}{9.2}$	11.6 $\frac{10.3}{10.0}$	12.3 $\frac{10.3}{11.3}$	13.0 $\frac{10.3}{12}$	13.5 $\frac{12.0}{12.8}$
Run6	12.9 $\frac{6.5}{10.8}$	13.0 $\frac{5}{10.4}$	13.4 $\frac{8.0}{10.9}$	12.0 $\frac{7.6}{9.6}$	12.4 $\frac{8.3}{10.2}$	9.2 $\frac{8.1}{8.5}$	11.8 $\frac{7.6}{9.9}$	12.2 $\frac{9.5}{11.4}$	12.8 $\frac{11.1}{12.1}$	13.5 $\frac{12.5}{12.9}$

—沙体未发育至该断面。

在平行流向的剖面上,各次实验在 $x=\pm 30$ 剖面附近的厚度相对较大,而 $x=\pm 60$ 及河道中心 $x=0$ 剖面厚度相对较小,这表明 $x=\pm 30$ 剖面是最容易形成天然堤的。

3. 冲淤变化

沙体表面冲淤变化是沙体形成和发育的重要组成部分。沙体冲淤变化非常复杂,这里主要选择主河道的 $x=0$ 剖面进行分析。

图 5(A)是 $x=0$ 剖面 Run1—Run3 的厚度叠加图。从中可以看出 Run2 在 Run1 基础上在距河口 30 cm 以前基本上未冲未淤,即与 Run1 保持冲淤平衡。从 30 cm 以后,Run2 明显地冲蚀了 Run1 的顶部,使最大厚度的位置从 (0,100) 移至 (0,150),前积距离极为明显,而且最大厚度也略有增加。Run3 未加沙时,在距河口 60 cm 以前对 Run2 造成强烈的冲蚀,但 60 cm 以后却有明显的沉积,几乎没有前积,但叠积明显。Run4 加沙时,在 65 cm 以前对 Run3 河道沉积明显,其后又有明显的冲刷(图 5B),Run5 对 Run4 的改造与 Run3 对 Run2 的改造极为类似,只不过其叠积远不如 Run3 明显(图 6A)。而且在第一个冲淤平衡点 (0,35) 后又出现了四个冲淤平衡点 (0,90), (0,115), (0,125), (0,150)。这可能反映了流量降低后,水流对沙体表面的冲刷能力明显减弱,而且水流具有更强的波动性。在六次实验中,Run6 是唯一一次尾门降低的实验。从图 6B 中可以看出,Run6 在总体上形成了对 Run5 表面的冲蚀,但在 (0,50) 以前的近河口部位要比其后冲蚀更为明显。即使如此,也存在若干冲淤平衡点如: (0,50), (0,85), (0,95), (0,110)。

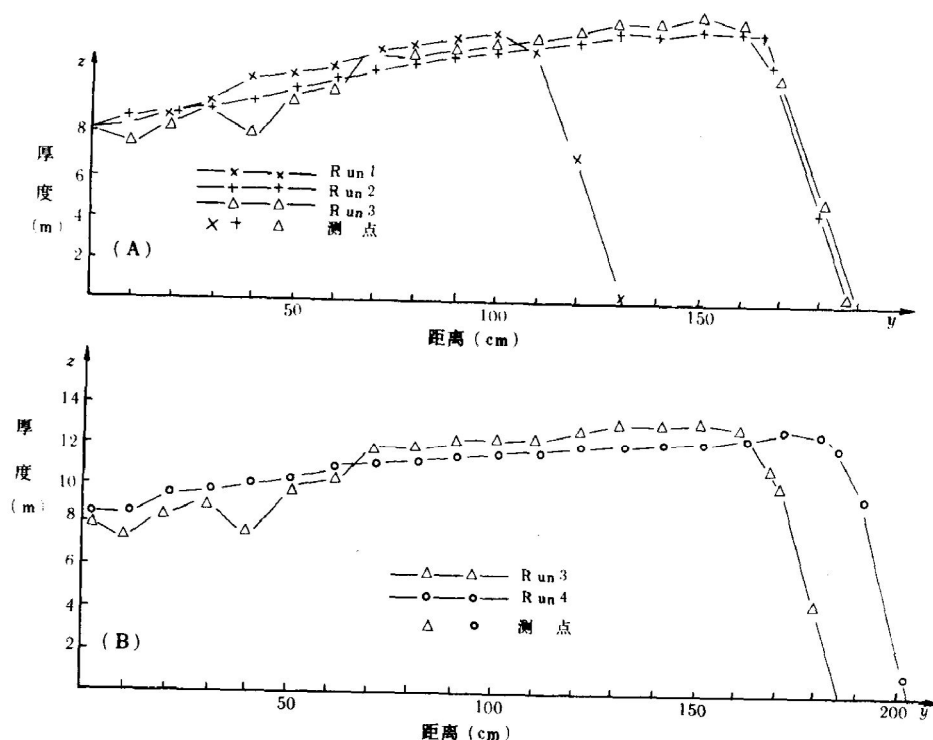


图 5 第一至第四次实验 $x=0$ 剖面厚度叠加图

从上述分析可知,每次实验都可能存在一个平衡点或平衡段,在它们的两侧冲淤变化相

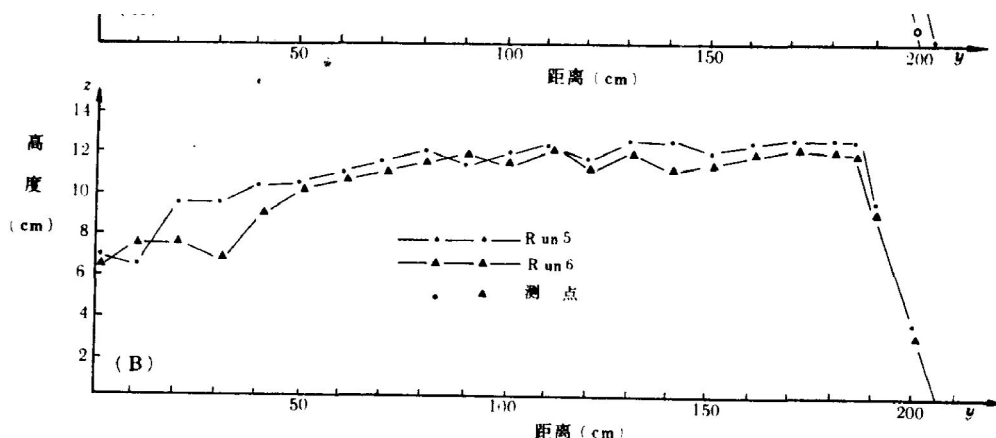


图 6 第四至第六次实验 $x=0$ 剖面厚度叠加图

反。上游来沙时,近河口一侧为淤,远河口一侧为冲;上游未来沙时,近河口一侧为冲,远河口一侧为淤。

在垂直水流方向上,沙体表面冲淤变化规律远不如平行水流方向的剖面明显,主要是通过沙体表面河道迁移及数量变化表现出来的(图 7,表 9)。

4. 沉积速率

为了更精确地衡量前积、侧积和叠积的相对大小,我们计算了各次实验的三个沉积速率(表 8)。由于沙体长度、宽度均与剖面位置有关,而厚度也与坐标有关,因此表 8 中的前积、侧积和叠积速率分别是以最大长度、最大宽度和最大厚度计算的。

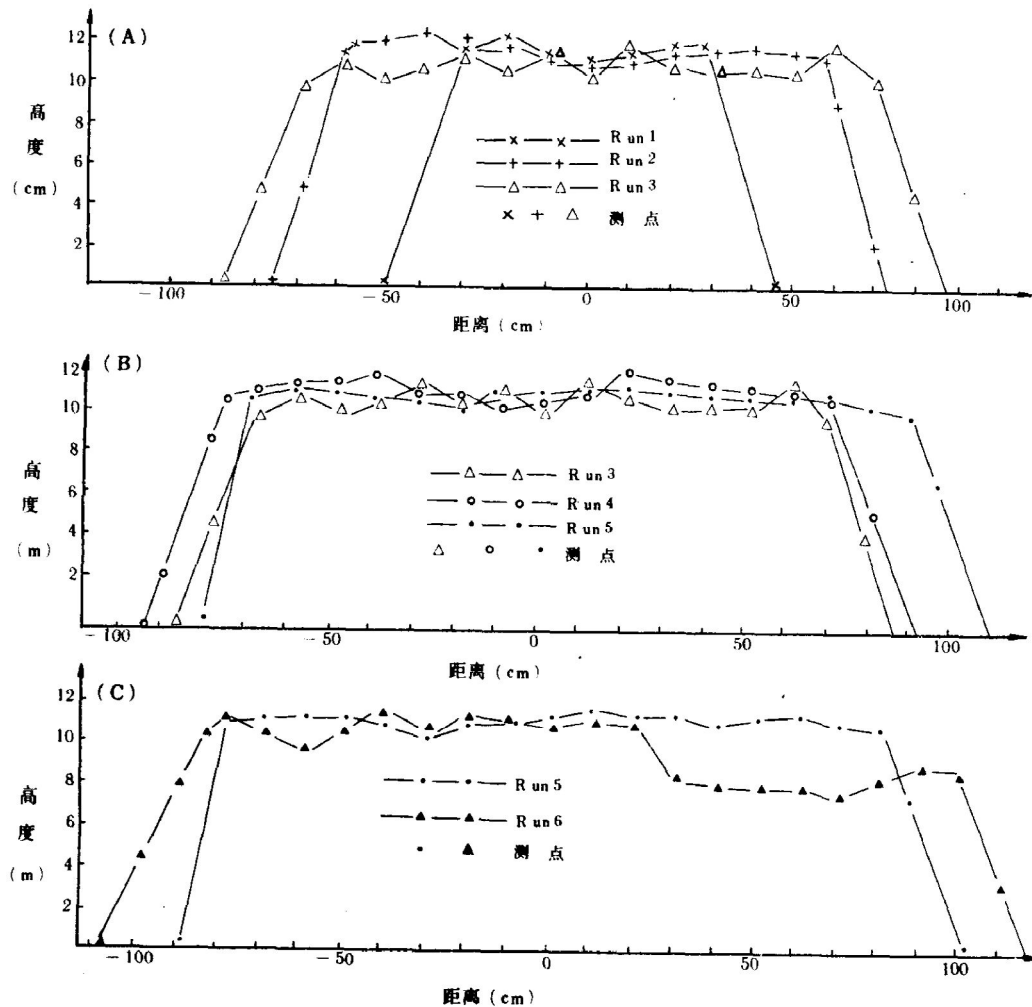
表 8 六次实验的沉积速率

流 次	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6
前积速率(cm/h)	未计算	9.16	0.6	2.33	0.6	-0.2*
侧积速率(cm/h)	未计算	9.25	4.8	2.33	3.6	3.2
叠积速率(cm/h)	未计算	0.08	0.13	-0.17	0.08	0
面积速率(cm^2/h)	未计算	0.17	0.046	0.08	0.046	0.042

* 有误差

前积和侧积速率都与原有体积和大小有关。在加沙量、水流量等参数都不变的条件下,如果沙体本身面积小则前积、侧积速率都会很大,反之,前积、侧积速率都会很小。为此,必须增加面积速率这个参数来反映沙体扩展的速度。

从表 8 不难看出,加沙实验的前积速率和侧积速率相等或相似,如 Run4、Run2。但大流量、高沙量的 Run2 明显要比小流量、小含沙量的 Run4 的前积和侧积速率为大。未加沙的 Run3、

图7 六次实验 $y=60$ 剖面沙体表面河道变迁

Run5、Run6,侧积速率明显大于前积速率,同时这三次实验的面积速率极为相似,尽管它们的流量及尾门高度相差悬殊。值得注意的是Run3与Run5流量相差很大,但尾门高度相等,面积速率完全相同。对比Run2及Run4的结果可以发现,Run2的前积和侧积速率分别为Run4的四倍,而其面积速率却仅为Run4的二倍。这充分说明了原来的沙体面积对前积和侧积速率的影响。

由于叠积速率是以最大厚度计算的,而最大厚度并不能很好地反映沙体的本质,因而表8中看不出明显的变化规律。例如,Run6已对Run5表面进行了明显的冲刷,其叠积速率应小于0而非等于0。可见,用最大厚度计算的叠积速率只能近似地反映沙体叠积的真实情况。

5. 河道变迁

包括两个方面,一是随着距河口距离的增加,河道如何变化;二是不同实验河道的变迁状况。

表9 各次实验沙体表面在不同剖面的河道条数

剖 面 流 次	$y=30$	$y=60$	$y=90$	$y=120$	$y=150$
Run1	1	1	1	—	—
Run2	1	1	1	0	0
Run3	2	4	3	1	1
Run4	1	1	2	1	1
Run5	3	2	2	1	1
Run6	2	3	2	1	1

—沙体未发育至该断面,0沙体表面平坦,无明显河道

从表9中不难发现,加沙的Run1、Run2、Run4都以一条主河道为主,此河道中心就是 y 轴;而不加沙的Run3、Run5及Run6有多条河道,河道的分叉主要发生在 $y=30$ 至 $y=60$ 的剖面之间,至 $y=120$ 剖面就完全闭合。河道的这种变化与前述 $y=60$ 剖面宽度最大的现象是吻合的。

图7A、B、C表示了 $y=60$ 剖面Run1至Run6的河道变迁。Run1及Run2均有一条主河道,但Run2河道更为宽缓,河谷与天然堤之间高差较小,这是在Run1的基础上沙体侧向加积的必然结果。未加沙的Run3除主河道基本保持与Run2的冲淤平衡外,在两侧对Run2形成了明显的冲刷,并形成了三条分支河道。Run4加沙后,Run3的三条分支河道受到充填,重新形成了以 y 轴为中心的主河道。Run5与Run3类似,但冲刷强度明显低于Run3,主要是因为Run5流量降低,流速亦随之降低。至Run6主河道已完全偏离 y 轴,移至 $y=70$ 附近,这说明尾门降低后,尽管流量也同时减小,但河流还是有明显改道,准备形成另一沙体。

5. 沙体边缘倾角

沙体边缘倾角是指沙体顶边线与底边线之间倾斜层的角度,表10所列是六次实验不同断面的倾角。其中最大者为 37.5° (Run6, $y=150$ 剖面右侧),最小者仅 21.4° (Run6, $x=60$ 剖面左侧)。一般都在 30° 上下波动。同一轮实验的同一剖面两侧倾角有的相等,有的左侧大于右侧,而有的则相反。同一实验的不同剖面及不同实验的同一剖面倾角变化都缺乏一定的规律。这说明沙体边缘倾角可能是由若干可变因素随机决定的。

表10 六次实验不同断面的倾角(度)

剖 面 流 次	$y=30$		$y=60$		$y=90$		$y=120$		$y=150$		$x=0$
	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	x^+	x^-	
Run1	31.4	32.3	34.2	31.6	30.5	30.5	—	—	—	—	31
Run2	30.5	30.5	31.4	31.4	32.9	31.6	31.6	30.7	29.6	28.1	32.2
Run3	31.2	26.1	30.3	28.2	32.2	32.7	24.1	24.1	24.8	28.5	31.2
Run4	22.4	33.2	32.6	31.9	34	32.4	28.6	30.7	32.2	32.8	32.3
Run5	30.9	29.8	31.2	32.7	35.2	31.2	24.9	24.1	29.6	33.6	32.6
Run6	31.9	22.9	32.7	21.4	26.7	34.2	25.5	24.8	37.5	25	32.7

x^+ 表示 x 轴右侧, x^- 表示 x 轴左侧,—沙体未发育至该断面

根据天津大学的研究,静水中泥沙水下休止角的经验公式可表示为^[2]

$$\varphi = 32.5 + 1.27d$$

式中 φ 为泥沙水下休止角, d 为粒径。将本次实验用沙粒径 0.25—0.42 mm 代入后可得出水下休止角为 32.8°—33°。表 10 所列的 62 个倾角中,大于 32.8°者有 8 个,占 12.99%;大于 33°者有 7 个,占 11.3%。可见有近 90%的倾角小于泥沙水下休止角。决定沙体边缘倾角大小的因素可能是(1)沙的粒径,(2)该点的水流速度,(3)沙体边缘的水深。但这一问题尚待深入研究。

五、结 论

一条含沙河流入湖后,沙体首先在河口呈舌形向前发展。若上游来沙,沙体前积、侧积几乎同样发育且速率相等或相似。前积、侧积速率的大小取决于流量及含沙量大小,面积速率也与流量及含沙量有关;若上游不来沙,则沙体只有侧积而没有前积,此时,侧积速率与流量大小有关,而面积速率却与流量大小无关。无论实验条件如何变化,沙体最大宽度总是集中于离河口距离为河道宽度 3 倍的垂直于流向的剖面上。在沙体表面离河口 30—50 cm 的范围内存在着一个冲淤平衡点。该点两侧沙体冲淤变化相反。上游来沙时近河口一侧为淤,远河口一侧为冲;上游不来沙时近河口一侧为冲,远河口一侧为淤。沙体表面冲淤变化是促使河道分支的主要原因。上游来沙时,沙体表面以一条河道为主;上游不来沙时,沙体表面存在若干分支河道。这些河道的分支主要发生在 30—60 cm 的范围内,60—90 cm 段河道开始闭合,至 120 cm 时完全闭合。换言之,在距河口 30—60 cm 之间最易发生河流改道或决口,形成新的沙体。

以上结论都是在本文特定的实验装置及实验条件下得到的。由于检测手段及我们分析水平的限制,目前还不能评论这些结论在多大程度上反映了自然界的真实情况。但作为一种在特定条件下的结果,这些结论是明确无误的,因而我们相信它们对理解各种河流入湖沙体的形成及发展有所裨益。

本文是在赖志云教授负责和指导下完成的。陈学球副教授、严家桢老师参加了实验前的很多准备工作,李敏老师也给了我们很多帮助,均此致谢。

参 考 文 献

- [1] Schumm S. A. et al., *Experimental Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons, 1987; 351—365.
- [2] 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室, *河流泥沙工程学(上册)*, 水利电力出版社, 1983.

FLUME EXPERIMENT ON FORMATION AND DEVELOPMENT OF SANDBODIES IN LAKE WITH SAND- BEARING VARIETY OF RIVER

Wang Zezhong Wang Qisheng Liu Zhongbao

(Jiangnan College of Petroleum, Shashi)

Abstract

Experimental facilities include a $3.5 \times 0.2 \times 0.6$ m flume, a $5.0 \times 2.5 \times 0.6$ m basin, a sand feeding device and a water circulating system. The sands, with grain-size ranges 0.25 to 0.42 mm, were taken from the Yangtze River. The independent slope of the flume and basin was predetermined, but the water discharge (Q), the sand discharge (Q_s), and the water levels in the basin were varied between runs.

The results of six experiments showed that the sandbodies developed as lingulate form at the beginning. When the sand was fed, the progradation and lateral deposition developed almost at the same rate, and the rate depended on Q and Q_s . When no sand was fed, there was no progradation but the lateral deposition rate was great, and this rate also depended on Q . However, the water discharge (Q) was not related to the rate of area. In all the six-run experiments, the maximum width of the sandbodies located at a distance of 60 cm from the river mouth; the maximum thickness located at a distance of 150 cm from the mouth. A balance point of erosion and deposition existed between 30-50 cm from the mouth. When sand was fed, the near mouth side received deposition and the other side eroded; when sand was not fed, things were opposite. The erosion and deposition cycle resulted in the creation of new channels. The main channel began to separate between 30-60 cm and rejoined at 120 cm from the mouth. In other words, the distributary mouth bars were easy to form at a distance of 30-60 cm from the mouth.