



成与输沙路径后，选择在上游进口处进行全断面铺沙。

通过在动床模型表层铺设红色模型沙，底层铺设本色天然沙，从而更直观的观察研究泥沙输移及河道冲刷特性，模型铺沙范围见图3。

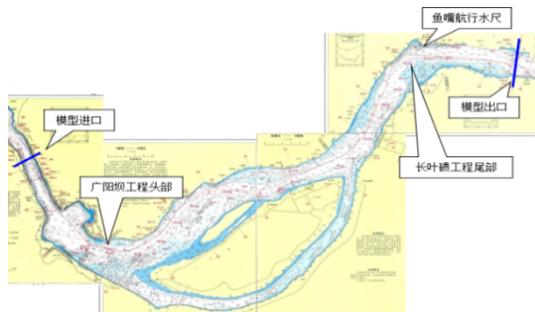


图2 物理模型试验范围示意图

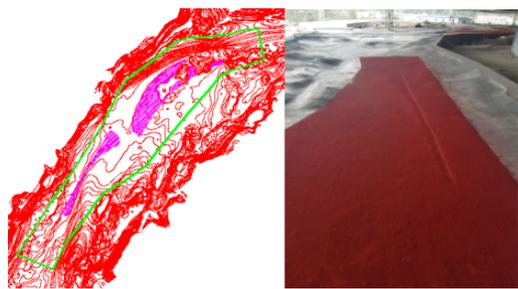


图3 长叶碛动床铺沙范围布置图

## 1.2 动床模型比尺

根据模型水沙运动相似条件<sup>[9]</sup>，长江上游长叶碛动床河工模型比尺设计见表1。

表1 动床模型比尺表

平面比尺 $\lambda_l$	100	垂直比尺 $\lambda_n$	100	流速比尺 $\lambda_v$	10
水流运动时间比尺 $\lambda_t$	10	起动功率比尺 $\lambda_w$	1	流量比尺 $\lambda_Q$	$10^5$
糙率比尺 $\lambda_n$	2.15	粒径比尺 $\lambda_d$	100	推移质输沙率比尺 $\lambda_{s_b}$	1000
冲淤时间比尺 $\lambda_s$	10	容重比尺 $\lambda_s$	1	干容重比尺 $\lambda_{\rho_0}$	1

## 1.3 动床模型流量水位控制条件

寸滩水文站至长叶碛河段的距离不足三十公里，之间无支流汇入，因此可根据寸滩站实测水文数据进行试验工况的选取。各级流量及水位控制条件见下表2。

表2 各级流量及水位条件表

流量 (m <sup>3</sup> /s)	尾水位 (m)	设计水位以上水深 (m)	备注
4500	156.55	0	设计水位
9350	160.05	3.5	整治流量
13500	162.55	6	
22100	166.55	10	
37100	173.03	16.48	汛期常遇

## 2 长叶碛卵石输移特性

### 2.1 长叶碛边滩航槽泥沙输移情况

根据图4分析可知，在中枯水时期，流量小，水流

冲击弱，河段卵石输移十分困难。流量施放到整治流量9350m<sup>3</sup>/s时，卵石向前输移，在上游的航槽边缘处形成了卵石输移带，局部也出现卵石输移点，但可以观察到卵石移动速度十分缓慢，在此流量下输沙带只向前移动了220m。

在施放20000m<sup>3</sup>/s的流量时，在滩面处出现较多的卵石输移现象，在长叶碛尾部河段，卵石输移带覆盖了近整个航槽。

在施放35400m<sup>3</sup>/s的流量时，卵石输移带明显向上游发展，而且输移宽度较原来增加了一倍达到400m左右，但输移带向前输移距离却不足100m。

总而言之，可以发现长叶碛边滩输沙能力与流量成正比，流量小时，边滩输沙能力弱；流量大时，长叶碛滩面输沙能力强。此外，由于床面受斜流冲击，长叶碛输沙方向偏向于凹岸。



图4 长叶碛航槽冲淤发展变化图

### 2.2 长叶碛水道输沙带卵石输移特性

在长叶碛动床物理模型中，先后进行了四组流量工况的卵石输沙带分布情况的动床试验<sup>[10]</sup>。各组流量条件下的输沙率根据寸滩站实测卵石输沙率与长叶碛上游断面实际输沙能力进行相应的调整。长叶碛水道卵石推移质输移带分布特征试验条件如下表3所示。

表3 长叶碛卵石推移质输沙带分布特征试验条件

工况	鱼嘴水位 (m)	流量 (m <sup>3</sup> /s)	加沙量 (kg)	输沙量 (kg)	原型输沙率 (kg/s)
一	158.31	6900	3.00	1.40	2.00
二	160.05	9350	7.22	3.74	5.04
三	162.55	13500	9.16	4.88	7.42
四	173.03	37100	8.50	4.26	13.40

通过图5分析可知，在消落枯水时期，长叶碛输沙带主要沿长叶碛碛翅分布，范围较窄，例如流量为6900m<sup>3</sup>/s时，卵石输沙带宽度约为130-230m，主要分布在航槽右边缘到长叶碛碛翅区域，泥沙主要淤积在弯道弯顶区域；流量施放增加至9350m<sup>3</sup>/s时，输沙范围向

滩面扩宽约 30m, 并且在长叶碛尾部形成了一条狭长的输沙带; 流量施放增加至 13500m<sup>3</sup>/s, 输沙带分布范围与 9350m<sup>3</sup>/s 时相差不大, 但输沙带向左右拓宽, 宽度明显增加, 且长叶碛尾部河段的航槽区域近乎被卵石输沙带覆盖; 流量施放增加至 37100m<sup>3</sup>/s 时, 可以观察到, 上游河段全部断面基本被输沙带所覆盖, 河段弯道区域近乎整个滩面被输沙带涵盖, 输沙带宽度达 550m。

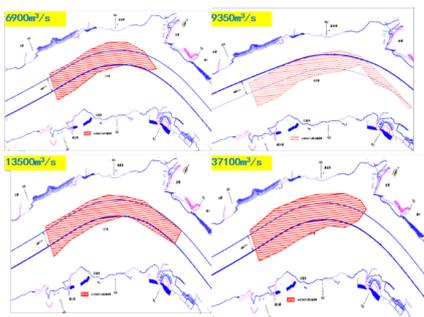


图 5 各级流量卵石输沙带分布示意图

表 4 卵石推移速度记录表

流量 (m <sup>3</sup> /s)	距离 (cm)	时间 (min)	运动速度 (cm/s)
4500	500	910	0.0092
6900	500	646	0.0129
	1000	905	0.0184
9350	500	398	0.0210
	1000	627	0.0266
	1500	755	0.0331
13500	600	395	0.0253
	1000	498	0.0341
	1600	560	0.0476
22100	500	330	0.0252
	1000	376	0.0443
	1500	447	0.0559

### 2.3 卵石推移速度公式拟合

根据 Van Rijn, L.C 的自由系数与升力系数的数学模型, 结合表 4 的实测卵石推移速度记录数据, 推导出如下卵石推移速度表达式:

$$\frac{u_b}{[(s-1)gD_{50}]^{0.5}} = 1.5T^{0.6} \quad (1)$$

$$u_b = 1.5\tau_*^{0.6} [(\rho_s / \rho - 1)gD_{50}]^{0.5} \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{\gamma H J}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \quad (3)$$

其中:  $u_b$  为卵石推移速度;  $\rho_s$  为泥沙密度;  $\gamma_s$  为泥沙容重;  $T$  为运输参数;  $s$  为比密度;  $\tau_*$  为水流剪切力。

结合本次试验实测数据得知, 对长叶碛卵石推移质运动速度公式 2 进行修正得:

$$u_b = 0.63\tau_*^{1.67} [(\rho_s / \rho - 1)gD_{50}]^{0.5} \quad (4)$$

### 3 结论

长叶碛弯道凸岸流速较小, 泥沙在此处淤积, 凹岸流速较大, 顶冲作用强, 使弯道向下游不断运动。长叶碛边滩滩面输沙能力与流量成正比, 由于床面受斜流的冲击, 输沙方向总体偏向凹岸。消落枯水时期输沙带范围较窄, 沿长叶碛翅分布, 泥沙淤积主要在长叶碛弯顶区域; 随流量增大, 输沙能力增强, 输沙带向左右拓展, 汛期时上游输沙带基本覆盖全断面, 弯道处几乎布满整个滩面。

长叶碛水道为长江上游朝天门至涪陵河段 4.5 米水深航道整治工程的一部分, 水道水势复杂, 不良流态显著。本文通过长叶碛河段动床物理模型试验, 得到长叶碛河段卵石推移质输移规律及输移特性, 测定卵石输移速度, 并拟合适用于本河段的卵石输移速度表达式, 为长叶碛整治工程提供相关依据, 也为其他卵石大边滩弯曲水道整治工程提供参考。

### 参考文献:

- [1] 向新宇. 长江上游广阳坝水道河床演变分析 [J]. 珠江水运, 2019, (23): 25-26.
- [2] 赵志舟, 吕娜. 长江上游急弯分叉河段通航整治河道选择 [J]. 水运工程, 2009, (10): 112-117.
- [3] 赵志舟. 长江上游弯曲放宽河段卵石浅滩航道整治 [J]. 港工技术, 2010, 47(04): 29-32.
- [4] 杨胜发, 高凯春. 山区河流泥沙运动规律及航道整治技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014, (03): 275-276.
- [5] 李晶. 斗笠子卵石沙波运动规律及对航道的影响 [J]. 水运工程, 2018, (10): 166-171+176.
- [6] 杨成刚, 许全喜, 袁晶, 董炳江. 长江重庆主城区河段卵石推移质走沙条件研究 [J]. 人民长江, 2020, 51(07): 1-6+12.
- [7] 长江上游广阳坝水道航道整治工程可阶段物理模型试验 [R]. 重庆交通大学, 2018.7.
- [8] 肖毅, 李文杰, 杨胜发, 李霖林. 长江上游卵石输移运动规律研究及数值模拟 [J]. 水运工程, 2019, (02): 93-100.
- [9] 李林. 三峡变动回水区广阳坝河段卵石不平衡、非连续输移特性及对航道影响研究 [D]. 重庆交通大学, 2019.
- [10] 肖毅, 李文杰, 杨胜发, 阙思思. 三峡库尾卵石推移质输移对航道的影响 [J]. 水运工程, 2019, (07): 122-129.