

长江河口航道拦门沙冲淤变化的 数学模拟和预测*

朱慧芳 周纪芾

(华东师范大学,上海 200062)

提要 本文选用1975—1978年长江口南槽逐月水下地形图以及相应的大通站的流量和含沙量,中浚、横沙和高桥等站的潮位资料,应用数理统计理论和方法,对长江口南槽航道拦门沙的冲淤变化进行数学模拟。结果表明,多元回归数学模式能够客观地反映拦门沙变化的内在规律。且该模式的拟合计算值与实测值基本相符。因此所建模式可以预测三峡工程和上溯调水后,因水沙改变而引起的拦门沙的变化趋势。

关键词 河口拦门沙 多元回归 数学模拟

河口拦门沙的变化过程是一个受径流、潮流、波浪、盐淡水混合以及生物、化学等多种因子影响的复杂过程。目前国内外对河口拦门沙冲淤变化的预测往往采用数值计算和土工模型等方法。本文将河口拦门沙高程变化看作是一种受多种因子影响的随机过程,应用数理统计理论和多元统计分析方法(方开泰,1989;茆诗松等,1983),对拦门沙的冲淤变化进行模拟计算。

1 南槽拦门沙变化特点

南槽拦门沙有着滩长、坡缓、变化复杂的特点。滩顶平均高程在-6m左右,不足-7m高程的平均滩长为15.7km;不足-10m高程的平均滩长为64km。拦门沙滩顶高程具有长周期、年周期和短周期变化的规律。

1.1 长周期变化 拦门沙滩顶高程的长周期变化主要与长江洪水在河口的造床作用和南、北港,南、北槽的分流分沙密切相关。历史资料表明,长江主泓走南港,南港拦门沙刷深,主泓走北港则南港拦门沙淤浅(陈吉余,1987);(Chen, J. Y., 1985)。此外,南支、南港河槽淤积体的周期性向下推移也是拦门沙长周期变化的因素之一。

1.2 年周期变化 拦门沙洪季淤积、枯季冲刷的规律十分明显。产生洪淤枯冲的主要原因:①洪季来沙量多,河流脱离了两岸的约束,水流扩散以及细颗粒泥沙的絮凝作用,导致了泥沙淤积量的增多。而枯季来沙量少,絮凝作用小,泥沙不易落淤。②滞流点附近是泥沙汇集、沉积最强烈的位置。南槽洪季滞流点在拦门沙滩顶附近,拦门沙滩顶明显淤浅,枯季滞流点位置上移至南港小九段附近,拦门沙滩顶因净上溯流增强而有所冲刷

* 国家教委博士点基金资助,9026911号。孙介民同志在数据库和图形处理技术上给予热情帮助,徐勤丰同学参加计算,谨志谢忱。

收稿日期:1991年1月22日;接受日期:1992年6月20日。

(黄胜等,1980;沈焕庭等,1985)。

1.3 短周期变化 拦门沙短周期变化表现在两个方面: ① 大潮汛冲,小潮汛淤。这种变化主要反映在浮泥厚度上,拦门沙滩顶在洪季大潮期间一般不出现浮泥,而洪季小潮时浮泥发育,厚度有时可达 1m 左右(沈焕庭等,1985)。② 潮周期冲淤变化。在一个潮周期中,随着流速的变化可划分为涨急和落急二个冲刷时段以及涨转落和落转涨二个淤积时段,这种变化突出的反映在最大浑浊带与浮泥层的交替变化上。在流急的冲刷时段,浮泥层变薄,最大浑浊带浓度增加,在转流的淤积时段,最大浑浊带浓度减弱,浮泥层厚度增加。

2 多元回归数学模式的建立

2.1 资料采集 研究范围从东经 $121^{\circ}55'$ — $122^{\circ}15'$ 约 34km 长,它是南槽拦门沙最浅的一段(图 1)。首先对研究区域进行网格处理,在纵向上设 17 个断面,其间隔为 2km,横向上每个断面取 9 点,各点间隔为 500m。然后选取 1975—1978 年逐月南槽航道图共 48 张,按上述网格逐月读取拦门沙高程资料,并取相应月份的大通站平均流量 Q 、含沙量 ρ 、横沙潮位 T 、高桥潮位 T_1 、中浚潮位 T_2 和引水船站盐度 S 等资料,输入计算机,建立数据库文件。

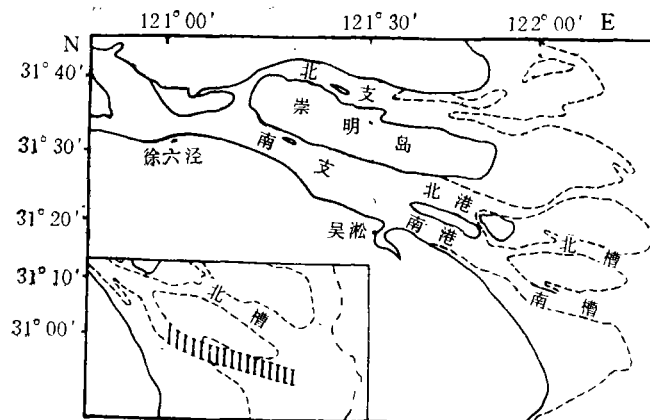


图 1 长江河口航道示意图

Fig. 1 Sketch of navigable channel of the Changjiang River Estuary

实线为堤线;虚线为 -5m 线。

2.2 影响拦门沙滩顶高程因子的选择 将每个断面 9 个网点的平均高程作为随机变量,其影响因子有: 河流因子 Q , ρ ; 海洋因子 T , T_1 , T_2 , S ; 拦门沙前期高程因子 H_1 (前一个月的高程);其它定性综合因子 U_k 。

河口拦门沙受径流、潮汐、波浪、盐淡水混合和生物、化学以及边界条件等多种因子的影响。在诸多因子中,有些是可以用量值来表示,而有些因子尚不能用数量来表示,如波浪、絮凝、生物作用等的影响。如果将这些因子舍去,势必产生较大的误差,在回归模型中,其噪声属于有色噪声。本文应用数理统计计算中定性因子定量化的处理方法,引进变量 U_k 。 U_k 代表不能用数量来表示的各种影响因子的综合因子引入方程,这就使回归模

型中的有色噪声近似地用白噪声表示,提高了计算精度。

U_k 的确定是将 12 月份作为参照月, U_k 是由其它各月拦门沙高程分别与参照月高程相除得到,如 1 月份的 $U_k = U_1$, 是由 1 月份的拦门沙高程除参照月的高程。以此类推,得到 U_2, U_3, \dots, U_{11} 一组数据。再将它们引入多元回归计算中去。

2.3 多元回归数学模式 在影响因子的组合选取中,选择了 $Q, \rho, T_2, \sqrt{Q}, \sqrt{\rho}$ 和 H_1 等因子。计算中反映出用中浚潮位替代其它二站潮位,这并不影响计算精度;同时,由于长江口门附近缺少盐度连续资料,本文选用引水船站仅有的表层盐度资料的计算表明,该资料不足以反映研究区域盐淡水混合情况,其表现为盐度因子在方程中的贡献甚小,以致可以不计。实际上盐淡水混合的影响也在 U_k 中体现。

经过计算,得到了任意断面的回归方程:

$$y_j = B_0 + \sum_{i=1}^6 B_i X_i + \sum_{k=1}^{11} C_k \delta_{jk} U_k$$

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 & j = k \\ 0 & j \neq k \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, 6; k = 1, 2, \dots, 11$$

式中, Y_j 为拦门沙高程; X_i 为可用数量表示的影响因子; U_k 为不能用数量来表示的各种定性因子的综合因子; B_0, B_i, C_k 为方程参数,均由最小二乘法求得。方程

表 1 第 3 断面计算结果

Tab. 1 Calculation results of Profile 3

| 因 子 | 参 数 | P |
|----------|----------------------|--------|
| 常量 | 8.2688 | 0.0000 |
| ρ | -2.8667E-01 | 0.7239 |
| Q | 4.3299E-05 | 0.0641 |
| T_2 | -4.2485E-03 | 0.4291 |
| ρ_2 | 5.4340E-01 | 0.6924 |
| Q_2 | -1.5550E-02 | 0.0909 |
| U_1 | -1.0373E-01 | 0.4314 |
| U_2 | 1.1285E-02 | 0.9368 |
| U_3 | 1.7137E-02 | 0.9029 |
| U_4 | 1.4597E-01 | 0.2476 |
| U_5 | -5.8919E-02 | 0.6855 |
| U_6 | -2.2448E-01 | 0.1650 |
| U_7 | -1.1660E-01 | 0.4980 |
| U_8 | 3.4468E-02 | 0.8271 |
| U_9 | 5.7047E-02 | 0.7816 |
| U_{10} | 2.2015E-01 | 0.1962 |
| U_{11} | 1.8286E-01 | 0.1590 |
| H_1 | -5.4025E-03 | 0.9770 |
| | $R^2 = 0.6261$ | |
| | $\sigma^2 = 0.01991$ | |
| | $P' = 0.0106$ | |

中

$$\sum_{k=1}^{11} C_k \delta_{jk} U_k$$

反映了目前无法用数量来表示的,而在拦门沙沉积过程中又不能忽略的那些因子对拦门沙的综合影响。

3 结果与讨论

各断面计算结果以表格形式列出。下面以第 3 断面为例(表 1)进行讨论。

第一列为影响因子和变量 U_k , 其中 ρ_2 代表 \sqrt{P} , Q_2 代表 \sqrt{Q} ; 第二列为各因子的参数; 第三列为各因子的显著性检验。 P 值小表示该因子在回归方程中所起的作用大, 如表 1 中 Q 和 \sqrt{Q} 因子的 P 值分别为 0.0641 和 0.0909, 表示这二个因子在方程中的贡献要比其它因子大些。表 1 中 P' 为方程显著性检验, P' 值愈小表示方程的显著性愈好; R^2 为复相关系数的平方; σ^2 为标准差的平方。对于第 3 断面, $R = 0.791$, $\sigma = 0.141\text{m}$ 。

将 17 个方程的参数、复相关系数和标准差汇成表 2。从表 2 中可以看到: 方程的显著性除个别断面外, 均为显著或较显著。方程的相关性较好, 其中 8 个断面的复相关系数接近和超过 0.8。方程的标准差均在 0.15m 以下, 这在测量精度为 0.1m 的情况下, 是在允许误差范围内。从方程的显著性、相关性和标准误差等方面的综合分析中可以看出本文建立的多元回归数学模式是可信的, 用于计算拦门沙冲淤变化是可行的。

在回归方程建立过程中, 对每个影响因子都进行显著性检验, P 值愈小表示该因子的显著性愈好, 它在方程中的贡献也愈大。本文将其 $P < 0.1$ 的因子称为方程的最显著因子。17 个断面的最显著因子列表如下。

从表 3 可以看到, 最显著因子在纵向上有明显的分段现象。1—3 断面为径流, 6—12 断面为拦门沙前期高程和潮位, 16, 17 断面为含沙量。这种现象与该地区的动力和地貌特征是一致的。从图 1 可以看出, 1—3 断面处于落潮槽的末端, 其最显著因子是径流。在落潮和涨潮槽衔接处的下游, 逐渐转变为潮汐的影响大些。由于 6—12 断面所在的拦门沙滩顶是洪季滞流点的常驻位置, 是泥沙汇集和淤积最强烈的地区, 拦门沙滩顶的沉积受到它本身前期高程的影响, 因此 6—12 断面的最显著因子为前期高程和潮位。16, 17 两断面在九段沙以东, 已处于口外海滨段, 径流出口门后水流扩散, 泥沙落淤, 这与陈吉余教授提出的长江来沙量落淤的范围是一致的 (Chen, J. Y., 1985)。所以含沙量因子在方程中的贡献要比其它因子大些。4—5 和 12—15 断面, 在其方程中看不出哪个因子最显著, 就是说在这些断面上各因子的贡献不相上下, 可以认为这些断面是处于最显著因子转换的过渡区。

应用上述数学模式进行一系列的拟合计算, 拟合值与实测值基本相等(图 2), 平均标准差为 0.12m。可见, 本文所建的数学模式, 可预测三峡工程和上游调水后, 拦门的变化趋势。

4 三峡工程后河口拦门沙冲淤变化预测

预测方程如下:

表 2 方程的参数、复相

Tab. 2 Summary sheet of parameters, multiple correlation

| 因 子 | 断 | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 常 量 | 7.022 | 4.749 | 8.269 | 7.289 | 4.693 | 5.987 | 5.286 |
| ρ | -1.529 | -1.102 | -0.287 | -0.468 | 0.469 | 0.617 | -1.731 |
| $Q(1E-4)$ | 0.416 | 0.541 | 0.433 | 0.178 | 0.018 | 0.039 | 0.277 |
| $T_2(1E-2)$ | 0.431 | 0.966 | -0.425 | 0.093 | -0.009 | -0.924 | -0.131 |
| ρ_2 | 2.286 | 2.083 | 0.543 | 0.866 | -0.514 | -0.881 | 2.920 |
| Q_2 | -0.017 | -0.023 | -0.016 | -0.009 | -0.001 | -0.002 | -0.017 |
| U_1 | -0.059 | 0.150 | -0.104 | -0.043 | 0.258 | -0.253 | -0.070 |
| U_2 | 0.039 | 0.041 | 0.011 | 0.068 | 0.135 | -0.051 | 0.099 |
| U_3 | 0.005 | 0.035 | 0.017 | 0.102 | 0.072 | -0.101 | 0.135 |
| U_4 | 0.055 | 0.136 | 0.146 | 0.222 | 0.267 | 0.114 | 0.334 |
| U_5 | -0.109 | 0.068 | -0.059 | 0.067 | 0.261 | 0.093 | 0.283 |
| U_6 | -0.174 | -0.075 | -0.224 | -0.072 | 0.322 | 0.086 | 0.425 |
| U_7 | -0.107 | -0.080 | -0.117 | -0.103 | 0.000 | 0.055 | 0.403 |
| U_8 | -0.045 | -0.012 | 0.034 | -0.159 | -0.007 | 0.224 | 0.367 |
| U_9 | -0.193 | -0.298 | 0.057 | -0.230 | 0.022 | 0.181 | 0.132 |
| U_{10} | 0.017 | -0.027 | 0.222 | -0.170 | 0.088 | 0.235 | 0.099 |
| U_{11} | 0.005 | 0.052 | 0.183 | 0.064 | -0.067 | 0.295 | 0.179 |
| H_1 | -0.043 | 0.192 | -0.005 | -0.147 | 0.227 | 0.358 | 0.304 |
| R | 0.656 | 0.738 | 0.791 | 0.845 | 0.808 | 0.890 | 0.847 |
| σ | 0.151 | 0.137 | 0.141 | 0.106 | 0.137 | 0.094 | 0.141 |

表 3 最显著因子的断面分布¹⁾

Tab. 3 Profile distribution of the most distinctive factors

| 因 子 | 断 面 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Q | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | | | | |
| \sqrt{Q} | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | | | | |
| ρ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | ✓ |
| $\sqrt{\rho}$ | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | ✓ |
| T_2 | | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | |
| H_1 | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | |

1) 有✓记号为最显著因子。

关系数和标准差汇总表

coefficients, and standard deviations of the equations

| 面 | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 3.250 | 2.544 | 3.406 | 4.054 | 4.795 | 5.611 | 6.226 | 7.942 | 8.159 | 4.065 |
| -0.732 | -0.372 | 0.060 | 0.219 | 0.264 | -0.372 | 0.363 | 0.841 | 1.827 | 1.061 |
| 0.022 | 0.124 | 0.187 | 0.434 | 0.317 | 0.316 | 0.044 | 0.027 | -0.142 | -0.027 |
| 0.730 | 0.878 | 0.992 | 1.075 | 0.342 | 0.174 | -0.023 | -0.627 | -0.657 | 0.270 |
| 1.181 | 0.869 | 0.080 | 0.023 | -0.308 | 0.743 | -0.425 | -0.987 | -2.763 | -2.544 |
| -0.007 | -0.009 | -0.009 | -0.018 | -0.009 | 0.012 | -0.002 | -0.001 | 0.006 | 0.001 |
| -0.066 | 0.131 | 0.104 | -0.014 | 0.087 | 0.113 | 0.131 | 0.012 | -0.206 | -0.076 |
| 0.049 | 0.188 | 0.072 | -0.024 | 0.179 | 0.274 | 0.097 | 0.057 | -0.129 | -0.143 |
| 0.089 | 0.091 | -0.010 | -0.023 | 0.111 | 0.001 | 0.007 | 0.052 | -0.234 | -0.255 |
| 0.239 | 0.323 | 0.285 | 0.283 | 0.249 | 0.262 | 0.135 | 0.047 | -0.086 | -0.036 |
| 0.164 | 0.247 | 0.098 | 0.132 | -0.001 | 0.070 | -0.081 | -0.012 | -0.093 | 0.005 |
| 0.251 | 0.231 | 0.168 | 0.079 | -0.111 | 0.019 | 0.007 | 0.191 | 0.079 | 0.073 |
| 0.260 | 0.155 | 0.116 | 0.051 | -0.127 | 0.018 | 0.015 | 0.029 | 0.076 | 0.017 |
| 0.174 | 0.085 | -0.030 | -0.079 | -0.061 | 0.045 | -0.010 | -0.019 | -0.117 | -0.076 |
| -0.109 | -0.208 | -0.154 | -0.152 | -0.061 | 0.005 | -0.029 | 0.146 | 0.131 | 0.007 |
| -0.126 | -0.089 | -0.120 | -0.127 | -0.099 | 0.004 | -0.075 | 0.044 | 0.050 | 0.036 |
| 0.083 | 0.231 | 0.114 | 0.149 | 0.220 | 0.188 | 0.017 | 0.020 | 0.047 | 0.154 |
| 0.343 | 0.442 | 0.316 | 0.306 | 0.274 | 0.197 | 0.122 | 0.067 | 0.071 | 0.468 |
| 0.786 | 0.754 | 0.614 | 0.687 | 0.730 | 0.721 | 0.667 | 0.758 | 0.828 | 0.901 |
| 0.135 | 0.142 | 0.141 | 0.141 | 0.132 | 0.115 | 0.126 | 0.134 | 0.121 | 0.090 |

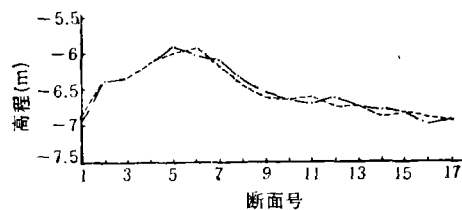


图2 拦门沙拟合值和实测值(1976.4)

Fig. 2 Comparison of fitted values with observed data (1976. 4)

---实测值; - · - 拟合值

$$H_i = B_0 + \sum_{i=1}^6 B_i X_i + \sum_{k=1}^{11} C_k \delta_{ik} U_k$$

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & j = k \\ 0 & j \neq k \end{cases}$$

式中,符号与前相同,参数由原模式给定。

4.1 调水、截沙方案的组合 考虑到三峡水库不同的调蓄方案,会使大通站的流量和沙量有相应的调整,为此提出下列几种假设方案。

4.1.1 假设三峡水库调水后对大通站可能引起的水量调蓄有如下4种方案 (10月蓄水,

表 4 大通站以第 III 方案调水、第 III' 方案减沙

Tab. 4 Predicted values obtained based on III Plan for water diversion, III' Plan for

| 月 份 | 断 | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 10 | 0.05 | 0.05 | 0.11 | 0.06 | 0.01 | 0.11 | 0.19 |
| 11 | 0.04 | -0.05 | -0.01 | -0.03 | 0.00 | 0.05 | -0.00 |
| 12 | -0.05 | -0.06 | -0.01 | -0.02 | 0.01 | 0.04 | -0.07 |
| 1 | -0.17 | -0.16 | -0.07 | -0.08 | 0.00 | 0.08 | -0.16 |
| 2 | -0.09 | -0.16 | -0.14 | -0.06 | -0.00 | -0.07 | -0.18 |
| 3 | -0.10 | -0.14 | -0.10 | -0.05 | -0.00 | -0.07 | -0.16 |
| 4 | 0.01 | -0.06 | -0.01 | -0.00 | -0.02 | -0.03 | -0.18 |
| 5 | -0.02 | -0.06 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.01 | -0.07 |
| 6 | -0.01 | -0.05 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | -0.00 | -0.06 |
| 7 | -0.03 | -0.06 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | 0.01 | -0.07 |
| 8 | 0.02 | -0.04 | -0.01 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.03 |
| 9 | -0.03 | -0.06 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | 0.00 | -0.06 |
| 10 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.05 | 0.01 | 0.08 | 0.15 |
| 11 | -0.04 | -0.04 | -0.01 | -0.03 | -0.00 | 0.04 | -0.01 |
| 12 | -0.05 | -0.06 | -0.01 | -0.02 | 0.01 | 0.03 | -0.07 |
| 1 | -0.11 | -0.14 | -0.09 | -0.06 | 0.00 | -0.02 | -0.15 |
| 2 | -0.12 | -0.16 | -0.09 | -0.06 | -0.00 | -0.02 | -0.18 |
| 3 | -0.14 | -0.19 | -0.06 | -0.06 | 0.00 | 0.04 | -0.16 |
| 4 | -0.04 | -0.10 | -0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.03 | -0.14 |
| 5 | -0.04 | -0.07 | -0.01 | -0.02 | 0.01 | 0.03 | -0.11 |
| 6 | -0.01 | -0.05 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.07 |
| 7 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | -0.06 | -0.04 | 0.06 |
| 8 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | -0.06 | -0.06 | 0.08 |
| 9 | -0.01 | -0.04 | -0.01 | -0.02 | -0.03 | -0.02 | -0.01 |

1) 正为冲;负为淤。

1—3月增泄水,单位 m^3/s 。

| | 10月 | 1月 | 2月 | 3月 |
|--------|--------|-------|-------|-------|
| I 方案 | -3 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 |
| II 方案 | -5 000 | 2 000 | 2 000 | 1 000 |
| III 方案 | -7 000 | 2 500 | 2 500 | 2 000 |
| IV 方案 | -9 000 | 3 000 | 3 000 | 3 000 |

4.1.2 假设三峡水库截沙后,大通站可能出现的沙量变化有 3 种方案: I' 方案,沙量没有变化,即各月含沙量不变; II' 方案,各月沙量减少 10%; III' 方案,各月沙量减少 20%。

将上述各种调水、截沙方案组合成 12 种情况进行预测。由于 1978 年后,南槽拦门沙滩顶附近缺少完整的全年水下地形资料可供验证,因此仍然将 1975—1978 年的流量、含沙量和潮位按照 12 种组合情况修改后作为输入数据,其中潮位由 20 多年的大通流量与中浚潮位关系曲线取得。预测的拦门沙高程作为输出数据,再与未调水、截沙情况的拦门沙高程相比较,得到冲淤的预测结果。计算表明,预测值的累积误差甚小。

拦门沙冲淤变化预测值(1976.10—1978.9)¹⁾

decreasing silting at the mouth bar of Station Datong of the Three Gorges Project

| 面 | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 0.06 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.07 | 0.06 | 0.02 |
| -0.00 | -0.02 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | -0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.05 | 0.06 |
| -0.03 | -0.03 | -0.01 | -0.01 | 0.00 | -0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.08 |
| -0.15 | -0.17 | -0.13 | -0.19 | -0.05 | -0.09 | 0.00 | 0.05 | 0.13 | 0.07 |
| -0.07 | -0.08 | -0.00 | -0.06 | -0.01 | -0.08 | -0.00 | -0.06 | 0.02 | 0.11 |
| -0.07 | -0.07 | -0.01 | -0.07 | -0.01 | -0.07 | -0.00 | -0.03 | 0.04 | 0.11 |
| -0.03 | -0.06 | -0.02 | -0.05 | -0.01 | -0.03 | -0.01 | -0.03 | 0.00 | 0.06 |
| -0.02 | -0.05 | -0.02 | -0.04 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.01 | 0.02 | 0.05 |
| -0.02 | -0.05 | -0.02 | -0.04 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.02 | 0.02 | 0.05 |
| -0.03 | -0.05 | -0.02 | -0.03 | -0.00 | -0.02 | -0.00 | -0.01 | 0.03 | 0.06 |
| -0.01 | -0.05 | -0.02 | -0.04 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.03 | -0.01 | 0.02 |
| -0.02 | -0.05 | -0.02 | -0.03 | -0.00 | -0.02 | -0.00 | -0.01 | 0.03 | 0.05 |
| 0.07 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | -0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.05 |
| 0.00 | -0.02 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | -0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.07 |
| -0.03 | -0.03 | -0.01 | -0.01 | 0.00 | -0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.09 |
| -0.07 | -0.07 | -0.02 | -0.05 | -0.00 | -0.06 | 0.00 | -0.02 | 0.06 | 0.11 |
| -0.10 | -0.11 | -0.05 | -0.10 | -0.02 | -0.08 | 0.00 | -0.00 | 0.08 | 0.11 |
| -0.15 | -0.17 | -0.12 | -0.18 | -0.05 | -0.07 | 0.00 | 0.04 | 0.11 | 0.08 |
| -0.08 | -0.10 | -0.04 | -0.06 | -0.01 | -0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.07 | 0.09 |
| -0.05 | -0.07 | -0.02 | -0.03 | 0.00 | -0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.10 |
| -0.03 | -0.06 | -0.02 | -0.04 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.02 | 0.02 | 0.07 |
| 0.03 | -0.04 | -0.03 | -0.07 | -0.03 | -0.00 | -0.04 | -0.09 | -0.12 | -0.06 |
| 0.04 | -0.03 | -0.03 | -0.07 | -0.03 | 0.00 | -0.04 | -0.09 | -0.11 | -0.10 |
| 0.00 | -0.04 | -0.02 | -0.05 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.02 | 0.00 | -0.03 |

4.2 预测结果分析 在不同的调水、截沙方案下,拦门沙高程在时空上变化相当复杂,但仍有一定的规律。随着水、沙调蓄量的增加,对拦门沙的影响也逐渐明显起来。在4种调水方案中,I,I'方案对拦门沙影响很小。若按III,IV方案调水和II',III'方案减沙,则拦门沙高程变化相应比较明显。

4.2.1 纵向上冲淤变化预测 冲淤部位界限清楚,若只调水不截沙,1—13断面受淤,14—16断面变化不明显,17断面微冲。若调水又截沙,1—13断面受淤,14,15断面淤积甚少,16断面开始转为冲刷。

冲淤量变化见表4。1—2和7—9断面淤积较多,这些断面在1—3月的淤积量大多在10cm以上。第10断面起淤积逐渐减少,14,15断面出现有淤有冲,16—17断面冲刷增加,在调水月份,17断面的冲刷量在10cm左右。

4.2.2 在调蓄周期中的冲淤变化预测 表4也反映出调蓄周期中的冲淤变化。在蓄水的10月和增泄水的1—3月,各断面的冲淤变化较不调水的月份要大,拦门沙高程在一个月调蓄周期中存在着自行调整的过程。下面以8和17断面为例,进一步阐明调蓄周期中的冲淤变化。若只调水不截沙,8和17断面的高程预测由图3表示。

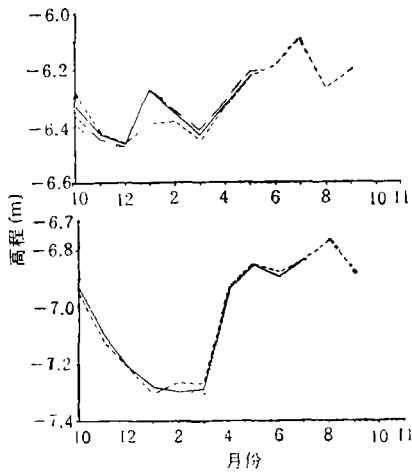


图3 大通站以 II, III, IV 方案调水时
拦门沙高程预测值
----CH00; ——CH02; -·-·-CH03; ····CH04

Fig. 3 Predicted Values of the mouth bar elevation according to II, III and IV Plans of flow discharge at Station Datong

CH02, CH03, CH04 分别表示在 II, III, IV 调水方案下的预测高程; CH00 表示未调水、截沙时的高程。

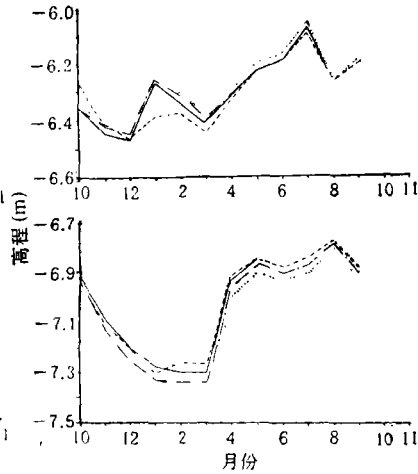


图4 大通站以 III 方案调水和以 I', II', III' 方案减沙时拦门沙高程预测值
----CH00; ——CH03; -·-·-CH13; ····CH23

Fig. 4 Predicted values of the mouth bar elevation according to III Plan of flow discharge and I', II', III' Plans of sediment discharge at Station Datong

CH02, CH03, CH23 分别表示在 III 方案调水和 I', II', III' 方案减沙时的预测高程。

由图3可以看出,第8断面在10月份是冲的,在1—3月份是淤的,且流量调蓄多,冲淤量也增多,在其它不调蓄水的月份,高程变化不大明显。在第17断面,流量调蓄对其高程的影响很小,略有微冲。若调水又截沙,8和17断面的高程预测见图4。

在第8断面10月份冲刷减轻,1—3月淤积量有所增加,而在第17断面,沙量减少则冲刷明显增强。

上述预测计算表明,三峡水库的调蓄作用如果引起河口沙量的减少,这将对在16断面即在 $122^{\circ}14'$ 以东的拦门沙航道的增深是有利的,而在拦门沙滩顶仍将会有些淤积。

5 结语

本文将河口航道拦门沙的高程变化当作是一种受多种因子影响的随机过程,应用数理统计理论建立了多元回归数学模式。从方程的显著性、复相关系数和标准差等综合分析,所建数学模式是可信的。模式中引起定性综合因子 U_k ,借以反映尚不能用数量来表示的其它因子,如波浪絮凝、生物作用等因子对拦门沙的影响,提高了计算精度。

研究区域内,影响拦门沙高程的最显著因子在纵向上有明显的分段现象,航道拦门沙滩顶以内为流量因子,滩顶为潮位和拦门沙前期高程因子,滩顶以外为含沙量因子。这种现象与南槽拦门沙的动力特性是相符的。

经过拟合计算,拟合值与实测值基本相符。这表明所建数学模式可以预测三峡工程和上游调水后河口航道拦门沙的变化趋势。预测结果总的来说,三峡水库的调蓄作用对河口拦门沙有影响,但影响程度不大,冲淤变化在10cm左右。从12种方案的预测结果看,拦

门沙高程在纵向上和调蓄周期中的变化有一定规律。在调蓄周期中,蓄水的 10 月和增泄水的 1—3 月冲淤变化较为明显,其它月份冲淤变化比较小。在纵向上,冲淤部位的界限较清楚,三峡水库调水截沙后,在拦门沙滩顶将仍会有些淤积,而在 $122^{\circ}14'E$ 附近以东的拦门沙航道将会有所加深。

参 考 文 献

- 方开泰编著,1989,实用多元统计分析,华东师范大学出版社(上海),215—246,291—336。
 茆诗松等,1983,回归分析及其试验设计,华东师范大学出版社(上海),116—187。
 陈吉余,1987,长江河口及其邻近海域的自然环境,华东师范大学学报,2: 86—93。
 黄 胜等,1980,长江口拦门沙淤积分析,河流泥沙国际学术讨论会论文集, C6:1—8。
 沈焕庭等,1985,长江河口最大浑浊带的变化规律及其成因探讨,海岸河口动力、地貌、沉积过程论文集,科学出版社(北京),76—89。
 Chen, J. Y., 1985, Development of the Changjiang estuary and its submerged delta, *Contin Shelf Res.*, 29(8A): 953—963.

MATHEMATICAL SIMULATION AND PREDICTION OF THE NAVIGABLE CHANNEL-BAR OF THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

Zhu Huifang Zhou Jixiang

(East China Normal University, Shanghai 200062)

ABSTRACT

The Changjiang River Estuary is an estuary of mesotidal type with abundant discharge and sediment supply. Downward from Xuliujing, the channelized flow is characterized by a regular triple-order bifurcation, emptying into the sea through four outlets: the North Branch, the North Passage, the North Channel and the South Channel. The North Branch is not used for navigation now. As to the North Passage and the North and South Channels, there are bars at their mouths limiting the navigation depth to about 6.0m. For a long time, the South Channel is chosen as the navigable channel of the Changjiang River Estuary.

The bar of the South Channel is the largest one in the Changjiang River Estuary. It is characterized by its long shoal, low gradient and complex variability. The height changes of navigable channel-bar are regarded as a stochastic process which is affected by many factors. A lot of simulative computations have been made by using various theories and methods of mathematical statistics. Multiple linear regression model founded at last, not only objectively reflects the nature and inner law of navigable channel-bar, but also confirms the mathematics model is correct and reliable according to the synthetical analysis of significance of regression equation, multiple correlation coefficient and estimation of standard deviation, etc.

Using the mathematics model, the fitted computation is made. It indicates that the fitted values conform to observed data. So the mathematics model can predict the changing tendency of navigable channel-bar.

Key words Mouth bar Multiple regression Mathematical simulation