

长江河口拦门沙地形变化的统计预报*

黄卫凯

(广东省海洋资源研究发展中心, 广州 510033)

陈吉余

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海 200062)

提 要 根据1975—1985年长江河口拦门沙地形、长江河口河流和海洋水文泥沙等11年的实测资料,应用经验特征函数分析和现代控制理论方法对长江河口拦门沙地形变化进行系统辨识和预报。结果表明,长江河口拦门沙地形变化可以表述为三输入-三输出的CARMA一阶模型,根据这些模型对长江河口拦门沙地形变化进行预报,取得了与实测资料较一致的预报结果。

关键词 长江 河口拦门沙 经验特征函数(EOF) 受控自回归滑动平均(CARMA) 模型 预报

长江河口拦门沙在纵向上呈上凸形,在横向上则表现为滩槽相间,自北至南分别为北港、横沙东滩、北槽、九段沙浅滩和南槽。本文的研究区域是南槽和北槽两部分,即长江河口航道拦门沙。

不少学者和专家分别从不同的角度研究了长江河口拦门沙的形成、发育和演变(Chen et al., 1982a, b; Chen et al., 1985; Huang, 1980; 同济大学海洋地质系三角洲科研组, 1978)。然而,直到80年代中期,有关研究仍表明,尽管长江河口拦门沙的位置、长度和平均高程与大通站的来水来沙有关,但要找出定量关系尚为困难(中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组, 1987)。为了解决这一难题,本文首次从现代控制理论的角度出发,把长江河口拦门沙看作一个动态系统来加以研究。

1 资料和方法

本研究所采用的数据包括长江河口高桥站的潮位观测资料、长江大通站的水文泥沙观测资料¹⁾和长江河口南槽、北槽的水深测量资料等²⁾。

长江大通站位于下游与河口潮汐影响的分界点,是长江河口的代表站。本文采用该站的逐月径流量和悬移质含沙量资料。

长江河口南槽、北槽(图1)的水深测量图件为连续的或不连续的月测资料,测图的

* 国家教委博士点基金资助项目。黄卫凯,男,出生于1960年3月,博士。

在成文过程中,沈焕庭教授和金庆祥教授提出宝贵意见,同时,还得到章可奇博士、孙建国、张波和徐建刚同志的大力支持和帮助;上海市航道局提供长江河口南槽和北槽的地形实测资料;刘慧屏同志协助清绘图件,谨志谢忱。

收稿日期:1992年4月23日,接受日期:1993年4月14日。

1) 黄卫凯,1988,长江口拦门沙动态系统分析,华东师范大学博士学位论文,1—93。

2) 上海航道局资料室提供。

区域、计量单位 (m)、比例尺 (1:50000) 和基面(理论深度基准面) 都一致。测量仪器采用回声测深仪, 测量误差 $\Delta \leq |0.1| \text{m}$ 。因此, 作者直接对测图进行定点数据采样, 采样点间距在纵向上为 1 100m, 横向上为 700m。

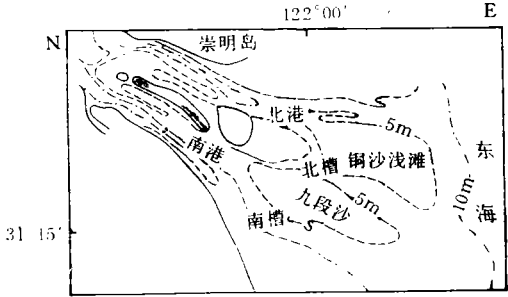


图 1 长江河口拦门沙分布图
Fig. 1 Location of the Changjiang River-Estuary Bar

指长江河口拦门沙的地形。

长江河口拦门沙是长江河口河流和海洋相互作用的结果, 其地形变化是一个极其复杂的过程。考虑到: (1)长江来沙是长江河口拦门沙的主要物质来源, 而长江河口悬移质含沙量受到再悬浮和絮凝作用的影响; (2)长江河口潮差和潮量、潮差和河口悬移质含沙量都有很好的相关关系(任汝述, 1982); (3)根据 Bagnold (1963) 的输沙概念模式可知, 波浪掀沙, 有向水流输沙。因此, 本文选取长江大通站河流径流量、河流悬移质含沙量及长江河口高桥站潮位作为输入变量, 以此来表征长江河口河流和海洋的相互作用。也就是说, 上述选取的输入变量是影响长江河口拦门沙地形变化的主要因子。

对长江河口南槽和北槽的地形时间序列数据 $h(x,y,t)$ 进行经验特征函数展开:

$$h(x,y,t) = \bar{h}(x,y) + \sum_{l=1}^{n \times y} (\lambda_l n_x n_t)^{1/2} c_l(t) e_l(x,y)$$

式中, x,y 为测点在地形场中的位置; t 为测量时间; λ_l 为第 l 个特征函数的特征值; n_x 为长江河口南槽和北槽水深测图数据采样点数, n_t 为水深测量次数; $c_l(t)$ 为时间特征函数; $e_l(x,y)$ 为空间特征函数。关于经验特征函数的详细算法和性质可参见 Lazumasa 等(1984)文献。

长江河口南槽水深测图数据采样点数为 $n_x = 100$, 测量次数为 $n_t = 50$, 故南槽地形的原始资料构成了 100×50 阶矩阵。对于长江河口北槽来说, $n_x = 170$, $n_t = 36$, 因此, 北槽地形的原始资料构成了 170×36 阶矩阵。

计算结果(表 1) 表明, 长江河口南槽和北槽的第 1,2,3 特征函数的累积贡献率分别为 68.16% 和 80.65%, 这说明南槽和北槽的前三个特征函数(图 2a、图 2b) 分别解释了南槽和北槽地形的大部分变化。具体地说, 长江河口南槽和北槽的第 1,2,3 空间特征函数分别代表南槽和北槽地形不同程度的变化, 而第 1,2,3 时间特征函数分别代表南槽和北槽地形随时间的变化, 所以, 对长江河口南槽和北槽地形变化的预报问题就转化为对长江河口南槽和北槽的时间特征函数变化的预报问题。因此, 作者选取第 1,2,3 时间特征函

用于研究长江河口南槽和北槽地形变化的资料时限分别是 1975—1985 年和 1977—1985 年。依据这些资料应用经验特征函数分析和现代控制论的方法对长江河口拦门沙地形变化进行系统辨识和预报。

2 研究结果

2.1 系统输入和输出变量的选取

系统由输入和输出组成, 输入是指长江河口河流和海洋水文泥沙因子, 输出是

数作为输出变量,以此来表述长江河口南槽和北槽地形随时间的变化。

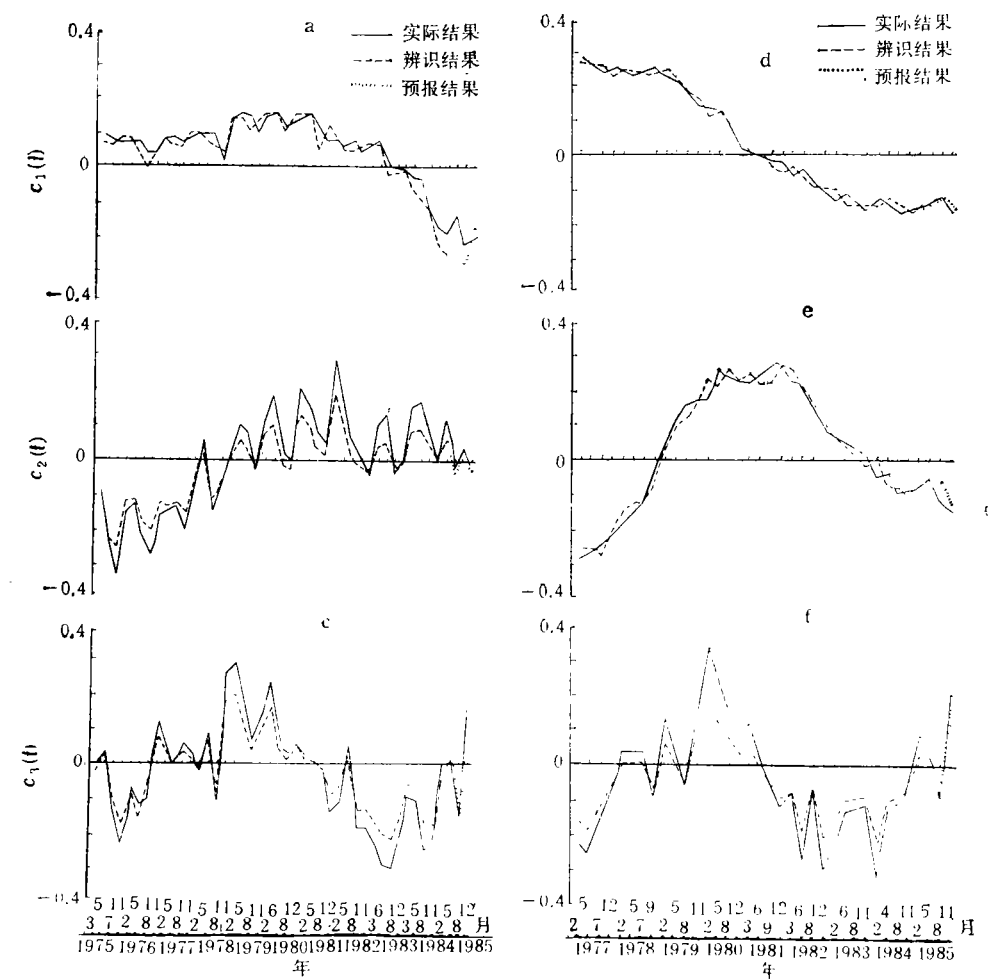


图 2 长江河口南槽 (a,b,c)、北槽 (d,e,f) CARMA(1) 模型及预报曲线
Fig. 2 CAARMA(1) model and prediction curves in South (a,b,c) and North (d,e,f) Passages of the Changjiang River Estuary
a,d 第 1 时间特征函数;b,e 第 2 时间特征函数;c,f 第 3 时间特征函数。

表 1 长江河口南槽和北槽地形经验特征函数分析结果
Tab. 1 The results of EOF analysis for topography in South and North Passage of the Changjiang River Estuary

特征函数	特征根		贡献率(%)		累积贡献率(%)	
	南 槽	北 槽	南 槽	北 槽	南 槽	北 槽
1	0.103	0.344	45.68	65.71	45.68	65.71
2	0.036	0.056	15.89	10.76	61.57	76.47
3	0.015	0.022	6.59	4.18	68.16	80.65

通过上述分析,作者把长江河口拦门沙动态系统表述为三输入-三输出的 CARMA

模型,即:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + D(q^{-1})e(t)$$

式中,

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ c_3(t) \end{bmatrix}$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q(t)/\bar{Q} \\ S(t)/\bar{S} \\ H(t)/\bar{H} \end{bmatrix}$$

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \end{bmatrix}$$

$y(t)$ 是输出向量, $c_1(t)$, $c_2(t)$, $c_3(t)$ 分别为第 1, 2, 3 时间特征函数; $u(t)$ 是输入向量, $Q(t)/\bar{Q}$, $S(t)/\bar{S}$, $H(t)/\bar{H}$ 分别为无因次径流量、悬移质含沙量和潮位; $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$ 为零均值的白噪声; $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $D(q^{-1})$ 是系数矩阵。关于 CARMA 模型的详细算法和性质参见邓自立等(1986)文献。

2.2 系统辨识 根据上述模型的计算方法和长江河口南槽、北槽的输入、输出时间序列 $u(t)$, $y(t)$, $t = 1, 2, \dots, N$, 其中 $N(\text{南槽}) = 40$, $N(\text{北槽}) = 32$, 分别对南槽、北槽的 CARMA 模型进行系统辨识, 即计算模型的参数阵及模型的阶、子阶和时滞。计算结果分别如下。

2.2.1 长江河口南槽一阶模型 CARMA(1)

$$\hat{A}_1 = \begin{bmatrix} 1.31 & -0.05 & -0.05 \\ 0.22 & 0.77 & 0.04 \\ 0.62 & -0.04 & 0.45 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B}_0 = \begin{bmatrix} 0.11 & -0.13 & -0.30 \\ -1.36 & 0.28 & 0.24 \\ -0.53 & -0.92 & -0.21 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B}_1 = \begin{bmatrix} 0.32 & 0.97 & -1.32 \\ 0.46 & -0.31 & 0.52 \\ 0.54 & 0.41 & 0.02 \end{bmatrix}$$

$$\hat{D}_1 = \begin{bmatrix} -0.47 & 0.01 & 0.08 \\ 0.06 & 0.04 & -0.10 \\ -0.95 & -0.01 & 0.19 \end{bmatrix}$$

一阶模型各子模型的残差平方和为: $v_1(1) = 2.33$, $v_2(1) = 22.56$, $v_3(1) = 31.91$ 。

二阶模型各子模型的残差平方和为: $v_1(2) = 2.21$, $v_2(2) = 11.50$, $v_3(2) = 20.05$ 。

用 F 检验来决定子模型的阶, 取置信度 $\alpha = 0.05$, 已知 $N = 40$, 查 F 分布表可知, 临界值 $F_\alpha = 2.42$, 各子模型的 F 值分别为: $F_1 = 0.11 < F_\alpha$, $F_2 = 2.03 < F_\alpha$, $F_3 = 1.25 < F_\alpha$ 。

因此, 长江河口南槽全参数的 CARMA(1) 模型是合适的。

2.2.2 长江河口北槽一阶模型 CARMA(1)

$$\begin{aligned}\hat{A}_1 &= \begin{bmatrix} 0.91 & -0.06 & 0.02 \\ 0.09 & 0.92 & 0.12 \\ 0.32 & 0.14 & 0.47 \end{bmatrix} \\ \hat{B}_0 &= \begin{bmatrix} -0.32 & -0.19 & 0.01 \\ 0.25 & -0.76 & 0.09 \\ -0.07 & 0.01 & -0.02 \end{bmatrix} \\ \hat{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0.12 & 3.16 & -2.82 \\ 0.27 & -3.26 & 3.53 \\ -0.06 & -2.78 & 2.44 \end{bmatrix} \\ \hat{D}_1 &= \begin{bmatrix} 0.05 & 0.06 & 0.01 \\ -0.13 & -0.02 & -0.01 \\ 0.04 & 0.11 & -0.01 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

一阶模型各子模型的残差平方和分别为: $\nu_1(1) = 0.71, \nu_2(1) = 1.60, \nu_3(1) = 31.38$ 。

二阶模型各子模型的残差平方和分别为: $\nu_1(2) = 0.31, \nu_2(2) = 0.83, \nu_3(2) = 18.40$ 。

取置信度 $\alpha = 0.05$, 已知 $N = 32$, 查 F 分布表可知, 临界值 $F_\alpha = 2.90$, 各子模型的 F 值分别为: $F_1 = 1.58 < F_\alpha, F_2 = 1.14 < F_\alpha, F_3 = 0.86 < F_\alpha$ 。

因此, 长江河口北槽全参数的 CARMA(1) 模型是合适的。

2.3 预报 利用长江河口南槽、北槽的输入、输出时间序列数据进行系统辨识, 得到了南槽和北槽的全参数 CARMA(1) 模型。在此基础上, 为了对长江河口南槽和北槽的地形变化进行预报, 本文采用自校正预报方法(邓自立等, 1983)。

记 $y(t+k|t)$ 表示基于到时刻 t 的信息对 $y(t+k)$ 的最优预报, 那么, $y(t)$ 的自校正多步递推预报器为: 当 $1 \leq k \leq n$ 时,

$$\begin{aligned}y(t+k|t) &= \sum_{i=1}^n \hat{A}_i y(t+k-i|t) + \sum_{i=0}^n \hat{B}_i u(t+k-d-i) \\ &\quad + \sum_{i=k}^n \hat{D}_i e(t+k-i)\end{aligned}$$

当 $k > n$ 时,

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^n \hat{A}_i \hat{y}(t+k-i|t) + \sum_{i=0}^n \hat{B}_i u(t+k-d-i)$$

其中 $e(t) = [D(q^{-1})]^{-1} A(q^{-1}) y(t) - [D(q^{-1})]^{-1} B(q^{-1}) u(t-d)$ 。至此, 得到了南槽和北槽地形变化的多步自校正预报模型。

用于进行南槽和北槽全参数 CARMA 模型系统辨识的时间序列数据的采样周期 $\Delta t = 1/4a$, 因此, 超前预报一年范围内南槽和北槽地形的变化相当于进行 4 步多步预报。

3 结语

长江河口南槽和北槽地形变化的超前 4 步预报结果和真实情况对比(图 2、图 3)表明, 根据南槽和北槽地形变化的全参数 CARMA(1) 模型, 应用自校正预报方法对南槽和北槽的地形变化进行预报, 预报结果和实际结果在变化趋势上是完全一致的, 但在变化量

方面仍存在不同程度的误差。这一方面是长江河口拦门沙地形变化的复杂性所致;另一方面,也说明本研究受长江河口拦门沙动态系统输入、输出时间序列的维数和长度的局限性所影响。总的说来,在长江河口拦门沙地形变化的预报中,作者取得了与实测资料较一致的预报结果。

参 考 文 献

- 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组,1987,长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集,科学出版社(北京),365—367。
- 邓自立等,1983,多变量多步自校正递推预报器及其应用,自动化学报,9(4): 241—247。
- 邓自立等,1986,多变量 CARMA 模型的结构辨识,自动化学报,12(1): 18—23。
- 任汝述等,1982,长江口水流挟沙能力,全国海岸带和海涂资源综合调查、海岸工程学术会议论文集,海洋出版社(北京),271—280。
- 同济大学海洋地质系三角洲科研组,1978,全新世长江三角洲的形成和发育,科学通报,23(5): 310—313。
- Bagnold, R. A., 1963, *Mechanics of Marine Sedimentation in Sea*, Vol. 3, Interscience (New York), pp. 507—528.
- Chen, J. et al., 1982a, The Model of Development of the Changjiang Estuary During the Last 2000 Years, *In Estuarine Comparisons*, Academic Press (New York), pp. 655—666.
- Chen, J. et al., 1982b, Descriptions of the River Mouth Bar in the Changjiang Estuary, *In Estuarine Comparisons*, Academic Press (New York), pp. 667—676.
- Chen, J., 1985, Development of the Changjiang estuary and its submerged delta, *Contin. Shelf Res.*, 4(1—2):47—56.
- Huang, S. et al., 1980, Analysis of Siltation at Mouth Bar of the Yangtze River Estuary, *In Proceedings of International Symposium on River Sedimentation*, Guanhua Press (Beijing), pp. 447—456.
- Lazumasa, K. and Akira, Y., 1984, A new method of three-dimensional empirical eigenfunction analysis for contour maps, *Rep. of the Port and Harb. Res. Inst.*, 23(2):27—47.

PREDICTION OF TOPOGRAPHY CHANGES IN CHANGJIANG RIVER-ESTUARY BAR

Huang Weikai

(Guangdong Center for Marine Resources R & D, Guangzhou 510033)

Chen Jiyu

(Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

ABSTRACT

The topography changes of the Changjiang River-Estuary Bar are treated as a dynamic system and predicted by the techniques of controlled autoregressive moving average (CARMA) model and empirical orthogonal functions (EOFs) analysis. A three month interval 1975 to 1985 data set on the bar topography, river discharge and suspended sediment concentration from Datong Station and tide height at Gao-qiao Station constituted the multiple time series of this study. Based on the selection of input and output variables, multiple input and multiple output (MIMO) CARMA models(1) for the system were identified, obtained, and validated, and used for multistep prediction of topography changes in the Changjiang River-Estuary Bar, with model results on good agreement, with observations.

Key words Changjiang River River-Estuary Bar EOF CARMA model Prediction