

珠江磨刀门河口亚潮频率水位的控制论研究*

吴超羽

徐家隽

(中山大学河口海岸研究所, 广州 510275) (中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

提要 本文应用现代控制论研究河口非潮汐海平面变化及其与影响要素的关系。两年连续的水位及水文气象要素资料表明, 在 $0.01-0.50\text{cpd}$ 的频带上水位有相当高能的波动, 这些波动的能量主要直接或间接来自风应力、河流径流以及河口外的海平面波动。本文应用 1982 年时间序列辨识了五个二阶的 MISO CAR 模型, 系统输出是河口亚潮频率海平面; 系统输入是河流入注流量、风应力和气压。模型检验后对 1983 年亚潮频率海平面进行一步和多步后报, 符合良好。系统仿真定量地估计了各控制因素对水位的相对重要性。频域和时域分析都表明河口水位系统具有振荡特性。

关键词 河口 亚潮 珠江口 控制论

50 年代, Pritchard^[5,6] 主要在切萨皮克湾河口进行一系列海洋水文测验, 在其一系列开拓性的河口物理学研究中描述了河口环流。当时的研究主要集中在可以直接观测的现象, 如潮汐振荡, 由盐度梯度引起的斜压密度环流等。70 年代以来, 由于长期(3 个月至 1 年以上)的连续水文观测, 发现河口各种现象在亚潮频带, 主要在 $0.01-1.00\text{cpd}$ (cycle per day) 的广阔频带上具有相当高能的波动^[2,3]。这些波动对河口和陆架水体交换有很重要的作用。据 Smith^[6] 在墨西哥湾 Corpus Christi 湾的研究, 在气象要素激烈变动期间, 亚潮频率水体输运可以比天文潮引起的输运大一个数量级以上。而珠江口伶仃洋亚潮频率水体输运在寻常天气也较天文潮的输运大一个数量级。

一、研究区域和资料处理

1. 研究区域

磨刀门是珠江主要出海口门, 位于珠江三角洲西侧。自思贤滘以下至磨刀门出口, 全长 160km。自大鳌以下称为磨刀门水道, 全长 52km (图 1)。水道下段平均宽度为 2000m, 平均水深为 5m。

西江马口站年平均流量为 $7460\text{m}^3/\text{s}$ 。进入磨刀门水道流量为 $2130\text{m}^3/\text{s}$ 。口门灯笼山站年平均潮差为 0.86m, 是珠江各河口中最小的。枯水期河口呈缓混合状态, 洪水期河口高度层化。

2. 资料收集及处理

* 国家自然科学基金资助项目, 编号 48970278
接受日期: 1990 年 3 月 25 日。

(1) 海平面 沿磨刀门河口向上游依次收集了三灶、横琴、灯笼山、竹银和大鳌 5 个测站 1982 和 1983 年水位资料。对逐时水位资料用理想滤波器加汉明窗进行低通滤波消除潮汐因素影响, 截断频率 48h, 再采样间隔 24h。

(2) 风应力 风的资料是香港横栏岛逐时地面风。直接影响水位的是风应力 $\tau = \rho |W| W$, τ 是风应力; W 是风速; ρ 是系数。首先将原始资料分解成东分量和北分量。分别计算风应力然后进行滤波, 滤波器水位使用相同。

(3) 气压 本研究将气压作为海平面变化因素之一, 深圳站气压是 6h 间隔观测的。计算前作了相应的低通滤波处理。

(4) 河流流量 马口站流量受潮汐影响较小并且是日平均值, 使用前没有作低通处理。

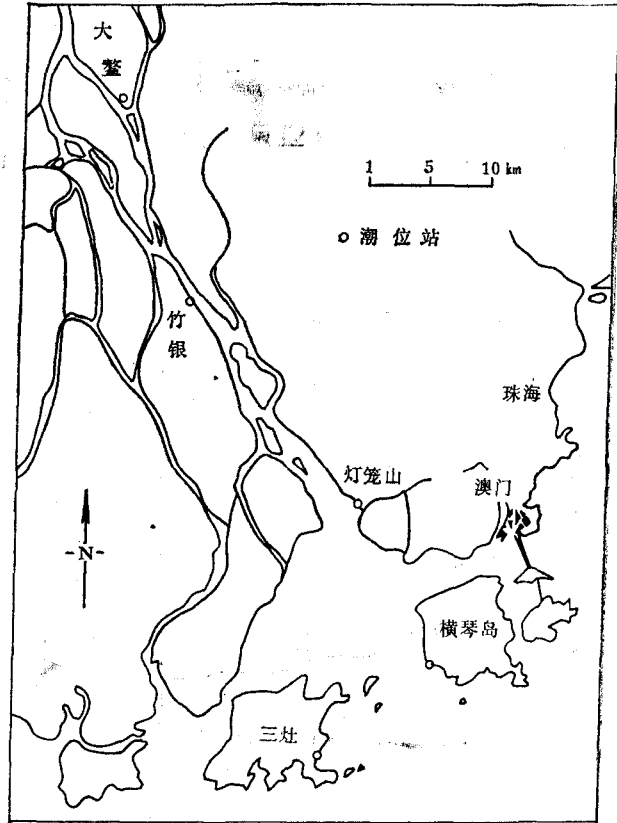


图 1 研究地区图

Fig. 1 Location map of study area

二、动态过程的现代控制论方法

1. 系统辨识和建模

系统辨识就是在输入和输出数据基础上, 从一组给定的模型中, 确定一个与所测系统等价的模型。建模包括模型识别, 参数估计和有效性检验。多变量 CAR 模型可以定义为^[1]:

$$\mathbf{A}(z^{-1})\mathbf{Y}(t) = \mathbf{B}(z^{-1})\mathbf{U}(t) + e(t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{Y}(t)$ 是 $p \times 1$ 维系统输出; $\mathbf{U}(t)$ 是 $r \times 1$ 维系统输入; $e(t)$ 是白噪声; z^{-1} 是单位滞后算子; \mathbf{A}, \mathbf{B} 是 z^{-1} 的矩阵多项式, 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(z^{-1}) &= \mathbf{I} - \mathbf{A}_1 z^{-1} - \dots - \mathbf{A}_{n_a} z^{-n_a} \\ \mathbf{B}(z^{-1}) &= \mathbf{B}_0 - \mathbf{B}_1 z^{-1} - \dots - \mathbf{B}_{n_b} z^{-n_b} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, \mathbf{A}, \mathbf{B} 分别是 $p \times p$ 和 $p \times r$ 维系数矩阵; p 是输出变量个数; r 是输入变量个数; n_a, n_b 分别为输入和输出的阶; \mathbf{I} 是单位阵。由于 CARMA 模型可以用充分高阶的 CAR 模型逼近到任何精度, 本文使用 CAR 模型对各系统建模具有普遍性。采用的最大似然法参数估计具有较好的估计性质。检验模型的残差序列的白色性以判别模型的有效性。

2. 多步最优预报

最优预报器可以对(1)式取条件数学期望得到:

$$Y(t+k|t) = \sum_{i=1}^{n_a} A_i(t+k|t) + \sum_{j=0}^{n_b} B_j U(t+k-d-i|t)$$

记 $Y(t+k|t)$ 为基于 t 时刻以前的信息对 $Y(t+k)$ 的预报值。 $Y(t)$ 是测量值,并规定当 $t+k-i \leq t$ 时 $Y(t+k-i|t) = Y(t+k-i)$ 。 U 是控制量。

三、河口亚潮频率海平面耦合波动特性

1. 自谱特性

首先计算各时间序列的 AR 模型参数谱,计算序列长度为 1 年,采样间隔 1 天。图

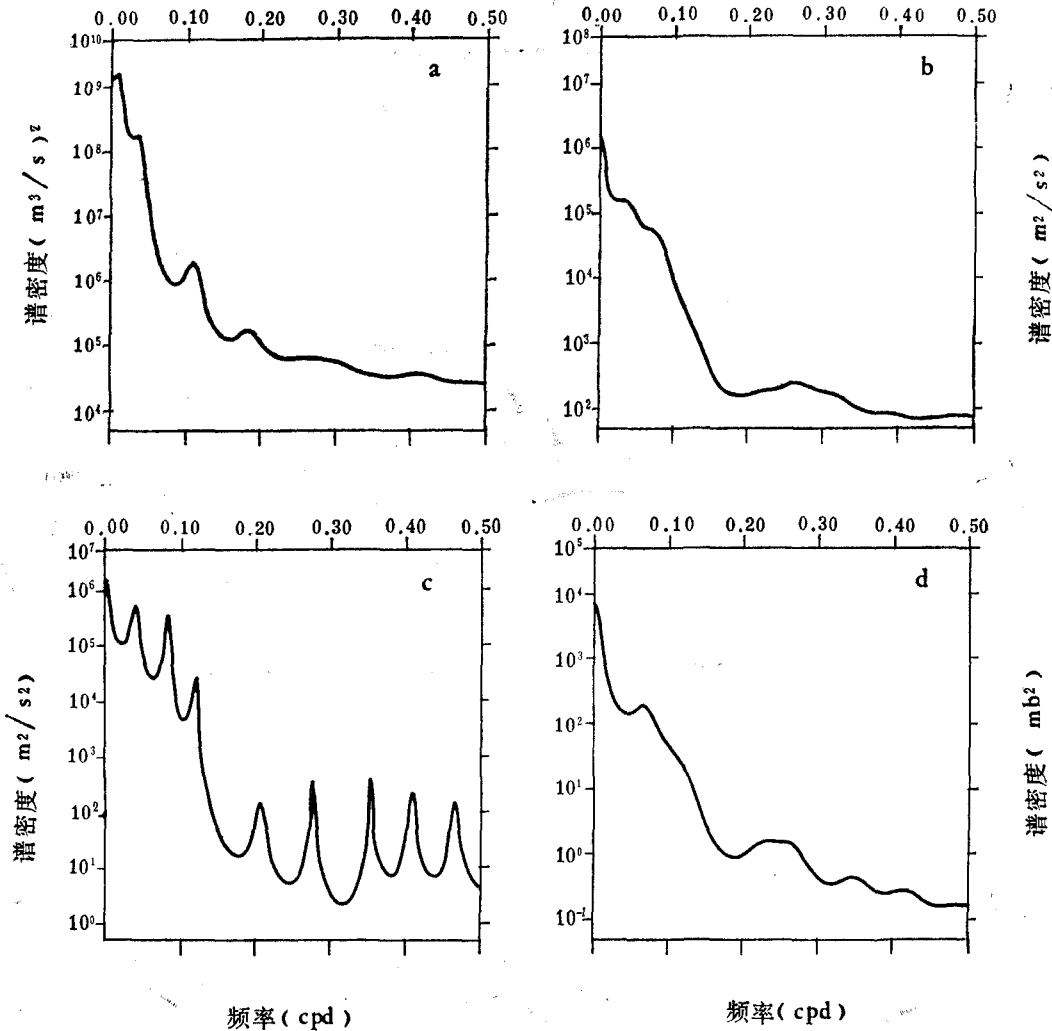


图 2 AR 参数功率谱

Fig. 2 Power spectra

a. 马口流量; b. 风应力北分量; c. 风应力东分量; d. 气压, 1983。

2 和图 3 分别是各控制因素和各站海平面的 AR 模型参数功率谱。

从谱峰分布看,磨刀门河口水位频谱较为复杂。主要是由于河流和口外扰动都较

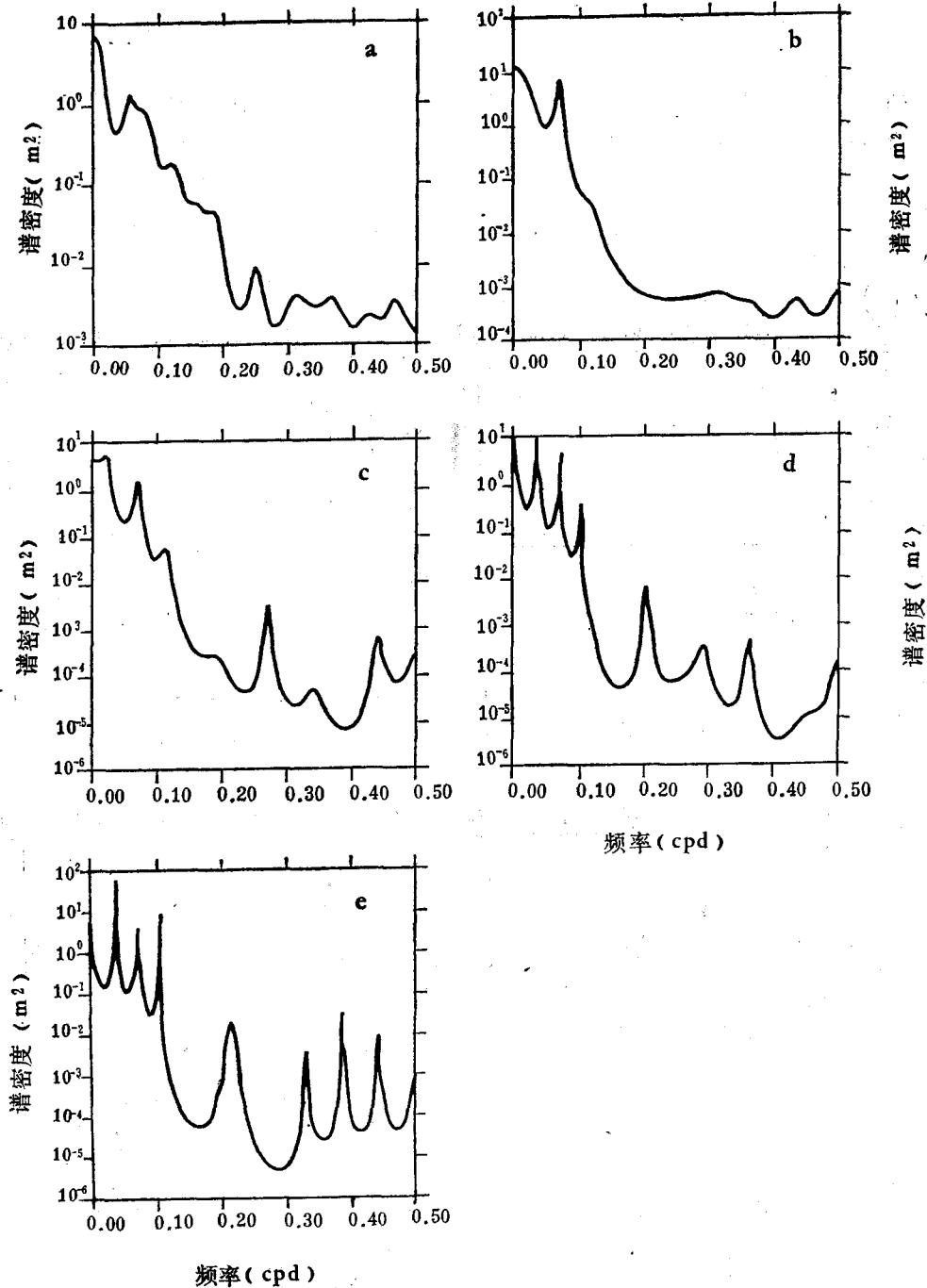


图 3 1983 年亚潮海平面参数功率谱

Fig. 3 Power spectra of sub-tidal mean sea level in 1983

a.大鳌; b.竹银; c.灯笼山; d.横琴; e.三灶。

强。在口外和口门的测站, $>0.20\text{cpd}$ 的频带上有多处峰值, 这些扰动主要从风应力取得能量。高频扰动从口外传至灯笼山以上就大大减弱了。低于 0.2cpd 的扰动的情况较为复杂。总的看, 周期为 14—15 天和 8—9 天的扰动从口外向上传播, 沿河各站都可以辨认。流量造成的 8—9 和 5 天年扰动主要影响上游站, 至灯笼山以下, 流量的作用迅速消失。

2. 相干谱

为了进一步分析亚潮水位和控制因素的波动耦合特性, 对上述时间序列以及水面坡降与水位作了相干谱分析(图4)。大鳌站除了在低频两个很窄频带以外水位与水面坡降的相干谱都是显著相干的。在此河段流量对水位起控制作用。竹银的水位与水面坡降的相干谱表明, 两者只有在小于 0.20cpd 的低频谱带才是显著相干的。口外扰动可以通过水位变

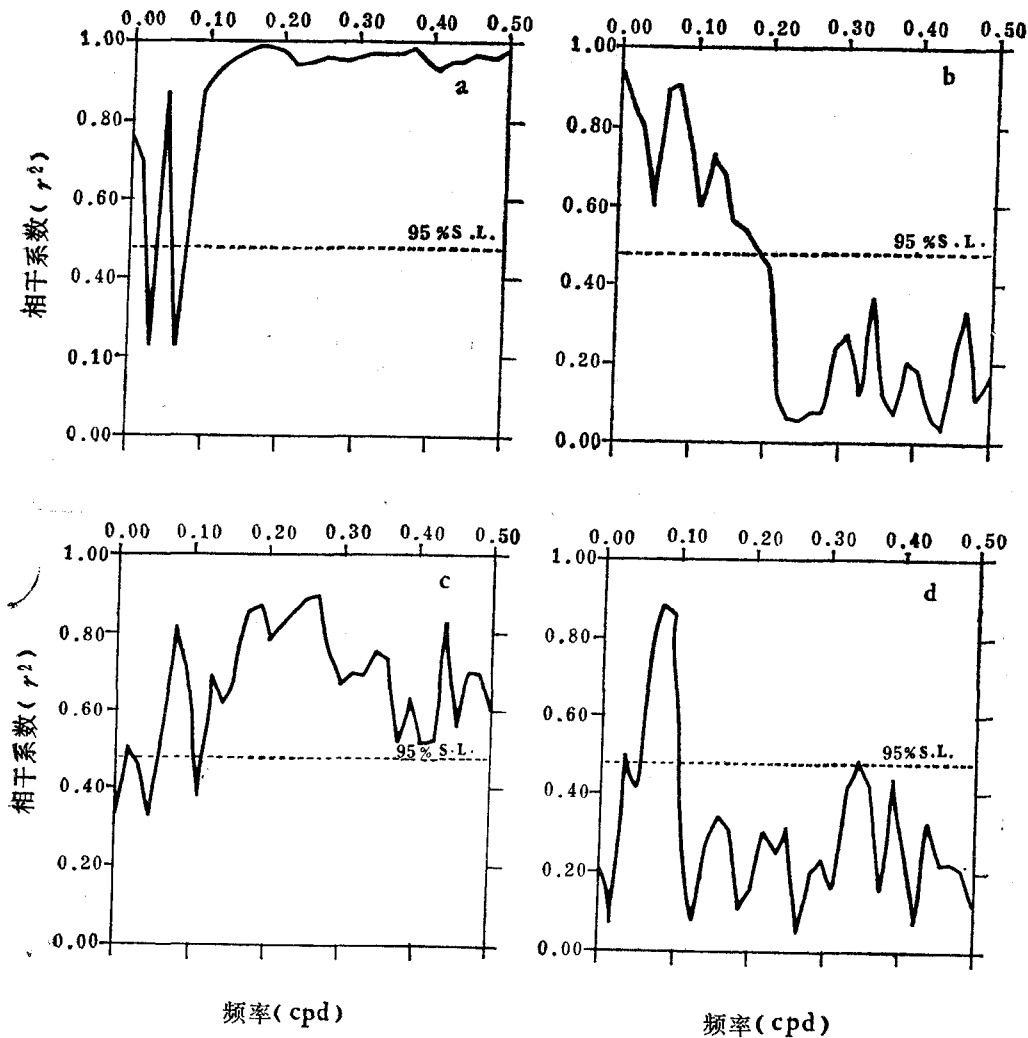


图4 1983年亚潮水位与水面坡降的相干谱

Fig. 4 Coherence spectra between sub-tidal sea level and water slope in 1983

a.大鳌; b.竹银; c.灯笼山; d.横琴。

化传播至灯笼山河段。扰动的高频部分至灯笼山以上迅速衰减,低频部分继续向上传播。

沿海各站的亚潮水位与风应力的两个分量有较高的相干系数。三灶和横琴的亚潮频率水位与入海径流在所有频带上都不显著相干。

灯笼山水位与河流流量除了在 0.01cpd 附近有一低值外都显著相干,与风应力的北分量和东分量在 $> 0.25\text{cpd}$ 的频带上都显著相干。竹银站与此相似而大鳌站亚潮海平面与风应力在所有频带上都不显著相干。

四、河口亚潮频率海平面的控制论模型及多步预报

河口水位系统是一受控系统,采用 CAR 模型作系统模拟。

1. 系统辨识检验

磨刀门河口各站亚潮频率水位及其控制因素构成的系统可用(1)式描写。其中 $Y(t)$ 是平均海平面, $U(t)$ 是 4×1 的控制变量,分别代表马口流量,香港横栏岛风应力的北、东分量和深圳气压。模型的阶数用 F 检验判定。

资料序列是 1982 年一年,资料处理与上节谱分析相同。以输出误差作为目标函数。用最大似然法对上述各站的 CAR 模型进行参数估计。经过 F 检验,所有模型都是二阶的。下面列出各站模型参数。

$$\text{三灶: } A = [0.178E + 01 \quad -0.788E + 00], \quad MSE = 0.14979E - 03$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.708E - 01 & 0.711E - 01 \\ 0.234E + 00 & -0.245E + 00 \\ 0.145E + 00 & -0.171E + 00 \\ 0.694E - 02 & 0.961E - 02 \end{bmatrix}$$

$$\text{大横琴: } A = [0.182E + 01 \quad -0.832E + 00], \quad MSE = 0.14738E - 03$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.763E - 02 & 0.758E - 00 \\ 0.129E + 00 & -0.139E + 00 \\ 0.118E + 00 & -0.133E + 00 \\ -0.825E - 02 & 0.206E - 00 \end{bmatrix}$$

$$\text{灯笼山: } A = [0.172E + 01 \quad -0.807E + 00], \quad MSE = 0.51225E - 03$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.186E + 00 & 0.220E + 00 \\ 0.932E - 01 & -0.968E - 01 \\ 0.586E - 01 & -0.512E - 01 \\ 0.328E - 011 & -0.319E - 01 \end{bmatrix}$$

$$\text{竹银: } A = [0.189E + 01 \quad -0.987E + 00], \quad MSE = 0.86929E - 03$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.195E + 00 & 0.269E + 00 \\ 0.118E + 00 & -0.129E + 00 \\ -0.552E - 00 & 0.601E - 01 \\ 0.388E - 00 & -0.420E - 01 \end{bmatrix}$$

$$\text{大鳌: } A = [0.185E + 01 \quad -0.987E + 00], \quad MSE = 0.174E - 02$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.790E + 00 & 0.921E + 00 \\ 0.185E + 00 & -0.206E + 00 \\ -0.904E - 01 & 0.117E + 00 \\ 0.835E - 01 & -0.591E - 01 \end{bmatrix}$$

其中 MSE 是模型输出与实测值的残差平方和。

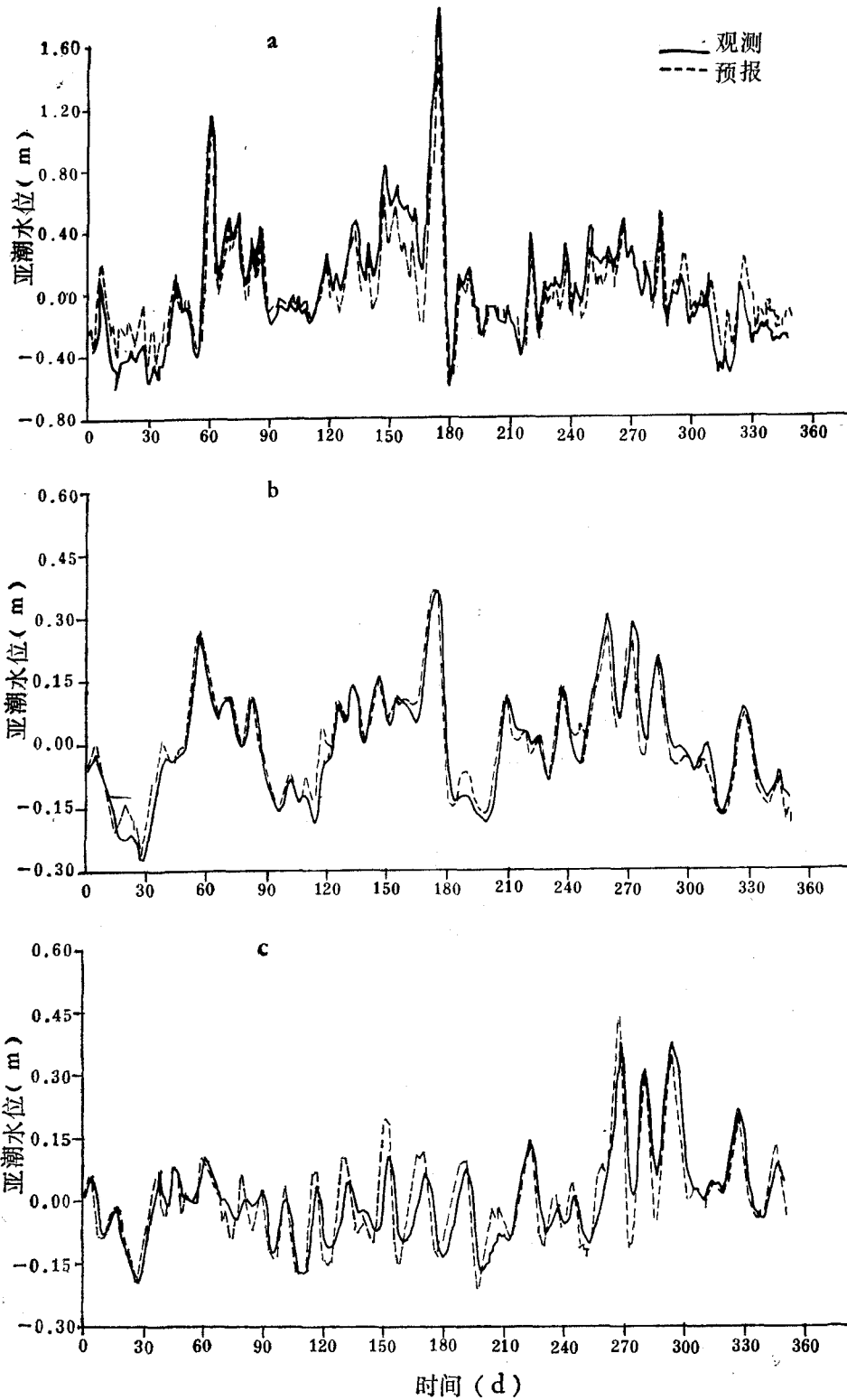


图 5 1983 年亚潮水位多步预报(模型据 1982 年资料辨识)

Fig. 5 Multistep prediction of subtidal sea level, 1983 (based on models identified from 1982 data)

a.大鳌; b.灯笼山; c.横琴岛。

经残差序列的白色性检验,以上模型是有效的。

预报近海特别是河口区实际水位是很困难的,因为河口水位不但受天文潮作用,而且受地形、河流流量、风和气压扰动的直接或间接作用。上节建立的模型实际考虑到上述所有控制因素。在此基础上叠加天文潮预报则可能对实际水位作出预报。本文仅考虑亚潮水文的预报。

应用 1982 年资料辨识的二阶 CAR 模型,按(2)式的取值法则,对河口各站 1983 年水位分别作了三步(天)和一步(天)预报。并对大鳌站水位作了无校正预报(图 5)。

从图 5 可以看到,沿程各站的三天预报值与实测值符合良好。一步预报值与实测值基本重合。预报值与实测值的相符进一步验证了模型的有效性。

五、河口的频域特性与时域系统仿真

1. 河口系统的频域特性

(1) 频率响应 对多变量线性定常系统有 $Y(s) = G(s)U(s)$, $Y(s)$ 和 $U(s)$ 分别是系统输出和输入矩阵的拉氏变换。 $G(s)$ 是传递函数矩阵。频率响应与传递函数有如下简单关系:

$$g^{(i)}|_{s=j\omega} = g(j\omega) \quad (3)$$

式中, $g(j\omega)$ 是复变量。利用系统的连续空间状态方程,分别计算各测站水位对河流流量,风应力和气压的频率响应。频率响应是河口本身的特性。它反映了河口水位对不同的频率输入量的响应。从计算结果及(图 6a)看,磨刀门海平面的频率响应有如下特点。

A. 同一站的最大增益对各输入量是一样的。

B. 水位对流量的增益从大鳌至竹银略有增加,然后向海递减,最大增益在竹银,达 15dB。

C. 海平面对风应力北分量的增益在大鳌、竹银和灯笼山从低频带向高频逐渐增大,至 0.04—0.05cpd 处达最大。大横琴和三灶情况类似,但变化幅度较小。表明海平面在 0.04—0.05cpd 频带上对风应力北分量的响应自口门向上游有增强的趋势,至灯笼山一竹银河段达最大值。

D. 对所有控制因素的响应,竹银站和灯笼山站都显示了很强的振荡特性,向上下游迅速减弱。

(2) 二阶振荡环节 竹银和灯笼山是河口的过渡段。它们的频率响应图表明系统在这一河段有很强的振荡特性。下面从传递函数对系统的振荡特性作一简单的分析。各系统的振荡特性主要由其二阶振荡环节决定。二阶振荡环节可表示为如下形式:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中, ω_n 是环节的固有频率或无阻尼自然频率。二阶振荡环节的响应特性完全由 ζ 和 ω_n 所决定,是反映系统特性的重要参数。 ζ 值反映了振荡特性, ζ 愈小,振荡性愈强; ζ 愈接近 1,系统的振荡性愈弱。系统的谐振频率 ω_r 和谐振峰值 M_r 由 T 和 ζ 确定。实际最大增益频率 ω_m 从波特图读出。

由表 1 可以看到, $\omega_n, \omega_m, \omega_r$ 自河口向海递减,最大增益频率 ω_m 从大鳌的 0.057cpd

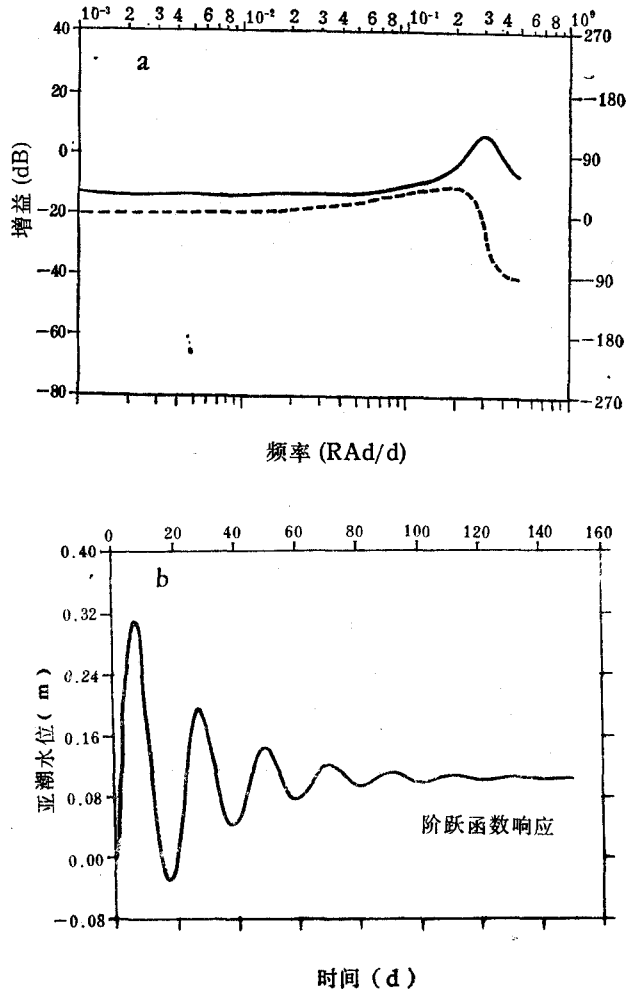


图 6 竹银站亚潮海平面系统对风应力北分量的系统响应
 Fig. 6 System response of sub-tidal mean sea level to north component of wind stress at Zhuyin station
 a. 频率响应; b. 时域响应。

表 1 海平面频率响应特征参数(频率单位: cpd)
 Tab. 1 Characteristics of sea level response (unit: cpd)

站名	ω_n	ζ	ω_r	M_r	ω_m
大 鳌	0.076	0.511	0.052	1.14	0.057
竹 银	0.049	0.128	0.047	3.95	0.047
灯笼山	0.040	0.115	0.039	3.08	0.039
大横琴	0.033	0.597	0.019	1.04	0.031
三 灶	0.016	0.364	0.021	1.48	0.025

递减至三灶的 0.025cpd。海盆愈大,固有频率愈低。阻尼比 ζ 和谐振峰值表明,在竹银和灯笼之间存在一振荡性很强的河段。谐振频率在 0.04—0.048cpd 之间。灯笼和竹银的谐

振值达 3.08—3.95,远大于其它河段。

2. 系统的时域仿真

系统的时间响应是指在输入信号 $U(t)$ 作用下, 输出量 $Y(t)$ 随时间变化的规律。通过求解状态空间方程, 分别计算各站水位对各控制量的阶跃函数的时间响应, 图 6b 是竹银站的时间响应。磨刀门河口的时间响应有如下特点。

(1) 各站的时间响应都显示一定的振荡性, 以竹银至灯笼山河段最为明显, 向上下游迅速衰减, 这与上节频域分析的结果完全一致。

(2) 洪水进入磨刀门水道以后逐渐展平。系统对流量的稳态响应定量地反映了这一过程。大鳌站对流量的稳态响应是 70cm, 竹银站是 38cm, 灯笼山是 21cm, 至大横琴和三灶仅为 2—3cm。

(3) 大鳌站风应力引起的稳态响应在 10—18cm 之间, 与河流相比, 影响是小的。竹银站河流的影响仍然超过风应力的作用。至灯笼山, 亚潮海平面对河流和风应力的响应大致在同一数量级。至河口的大横琴, 对风的响应已大大超过对河流流量的响应。

六、结 论

1. AR 自谱和相干谱分析表明, 磨刀门河口海平面在 0.01—0.5cpd 亚潮频带存在多个高能扰动。这些扰动主要从河流、风和气压变化取得能量形成耦合波动。在研究地区的上游(大鳌、竹银)扰动集中在 0.2cpd 以下的谱段, 主要从河流取得能量。灯笼山以下河段, 主要从风应力, 其次从气压扰动取得能量。频率高于 0.2cpd 的扰动从口外传播至灯笼—竹银河段逐步衰减。低频的扰动能量较高, 能传播的更远。

2. 磨刀门河口‘海-河-大气’系统亚潮频率海平面系统可以用受控 MISO 二阶 CAR 模型较好模拟。本文使用 1982 年资料建模, 对 1983 年沿河口各站亚潮平均海平面进行一步和多步预报。模型预报和系统实际输出符合良好。一步预报的最大均方差(大鳌站)仅为 0.17cm。

3. 多变量频率响应计算表明, 亚潮水位对控制量的响应在不同河段和不同频带上有很大差异。幅频响应相差超过两个数量级。河口的固有周期从上游向海逐渐增大。

4. 时域仿真和频率响应分析都表明, 在河口灯笼山—竹银河段, 亚潮频率的水位系统呈现很强的振荡性。水位的振荡性反映了流速的振荡性, 它对于河口环流, 沉积物输移的作用有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 常春馨, 1982, 现代控制理论概论, 机械工业出版社, 67—124.
- [2] Elliott, A. J., 1978, Observations of the meteorological induced Circulation in the Potmac Estuary, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 6: 285—299.
- [3] Pritchard, D. W., 1952, Estuarine hydrography, *Advances in Geophysics*, 1: 243—280.
- [4] Pritchard, D. W., 1958, The equations of mass continuity and salt continuity in estuaries, *J. Mar. Res.*, 17: 412—423.
- [5] Smith, N. P., 1977, Meteorological and tidal exchange between Corpus Christi Bay, Texas and the north-western Gulf of Mexico, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 5: 511—520.
- [6] Wang, D. P., 1979, Subtidal sea level variations in the Chesapeake Bay and relations to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 9(2): 413—421.

- [7] Wang, Dong-Ping, 1979, Wind-driven circulation in the Chesapeake Bay, Winter 1975, *J. Phys. Oceanogr.*, 9: 564—572.
- [8] Wu, C. Y., 1986, A dynamics and sedimentation study of eastern Atchafalaya Bay, Louisiana. Ph. D. dissertation of Louisiana State University, U. S. A., pp. 190.

A CYBERNETICS STUDY ON THE SUB-TIDAL SEA LEVEL VARIABILITY IN THE MODAOMEN ESTUARINE, ZHUJIANG RIVER

Wu Chaoyu

(*Institute of Estuarine and Coastal studies, Zhongshan University, Guangzhou 510275*)

Xu Jiajuan

(*South China Sea Institute of Oceanology, Academia Sinica, Guangzhou 510301*)

ABSTRACT

The present paper is a cybernetics study on the sub-tidal sea level variations from a more extensive investigation on the "sea-river-atmosphere" system in the Zhujiang River Delta, Guangdong, China. The two-year long continuous time series records of sea level and meteorological reveal large amplitude fluctuations within the sub-tidal range 0.01—0.50 cpd. These fluctuations represent direct or indirect response of the estuary to variations in river discharge, wind stress and atmospheric pressure. MISO CAR models are identified based on 1982 time series records at five stations along the estuary. System output is sea level, system inputs are river discharge, north and east components of wind stress and atmospheric pressure. Models thus obtained and validated are used to conduct multistep prediction of 1983 mean sea level with good agreement. Frequency response analysis based on the models provides some important insights into the system. System simulations reveal, quantitatively, the relative importance and variations of the control variables on sea level in the estuary. Response analyses in both frequency and time domains indicate that the existence of an oscillatory zone in the estuary.

Key words : Estuary, Sub-tidal, Zhujiang estuarine, Cybernetics.