

利用输沙量预测现代黄河三角洲 的面积增长*

孙效功 杨作升

(青岛海洋大学河口海岸带研究所, 青岛 266003)

提要 依据1976—1989年黄河三角洲的面积数据及其相应年份的利津站黄河来沙量, 利用单输入、单输出的线性系统模型对黄河三角洲的面积增长进行动态预测研究。结果表明, 这一线性系统模型能较好地反映黄河三角洲的面积增长规律, 且优于灰色系统的GM(1,1)模型。

关键词 现代黄河三角洲 来沙量 面积预测

以前对黄河三角洲的发展预测多限于定性分析, 近来郭永盛等(1992)利用1976—1989年的现行黄河口区卫星影像图量算出的黄河三角洲各年的面积数据, 运用灰色系统的GM(1,1)模型对黄河三角洲的面积增长进行定量预测, 取得了令人满意的效果。然而, 黄河三角洲是一个复杂的灰色模糊系统, 三角洲的发展变化受到诸多因素的制约, 像黄河来沙量、径流量, 海洋动力, 河口外水下地形和河口走向等等, 因而仅利用三角洲的面积数据来进行预测是不够的。但是, 将影响三角洲发展变化的诸方面因素一并考虑来研究黄河三角洲的演变规律又有一定的困难。为此, 本文仅以影响三角洲发育的最主要因素即黄河来沙量和现有的三角洲面积资料来进一步研究黄河三角洲的面积增长规律, 建立相应的动态预测模型并对今后三角洲的面积变化进行预测。

1 研究方法

依据1976—1989年黄河三角洲的面积数据及其相应年份的利津站黄河来沙量, 利用单输入、单输出的线性系统模型对黄河三角洲的面积增长进行动态预测, 并对预测误差进行分析, 结果如下。

2 研究结果

2.1 三角洲面积增长预测的数学模型

对于任一个单输入、单输出的线性系统, 皆可用如下数学模型描述(王文斌等, 1991):

$$\begin{aligned} \frac{d^n Q(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} Q(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n Q(t) = b_m \frac{d^m P(t)}{dt^m} \\ + b_{m-1} \frac{d^{m-1} P(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 P(t) \end{aligned} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金重大项目, 9487005号。孙效功, 男, 出生于1961年12月, 副教授。

收稿日期: 1993年8月7日, 接受日期: 1994年3月24日。

式中, $Q(t), P(t)$ 分别为系统的输出和输入; $a_1, \dots, a_n$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$ 为模型参数。这里以 $Q^{(0)}(i), P^{(0)}(i)$ 分别代表黄河三角洲的年造陆面积和黄河年来沙量, 采用各年相对于 1976 年的三角洲面积增长值和黄河年来沙量的累加值, 即取 $Q(k) = \sum_{i=1}^k Q^{(0)}(i)$ 和 $P(k) = \sum_{i=1}^k P^{(0)}(i)$ 分别为系统的输出和输入, 并采用方程(1)的一阶形式, 于是有:

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \alpha(\otimes)Q(t) = \beta(\otimes) \frac{dP(t)}{dt} + \gamma(\otimes)P(t) \quad (2)$$

式中, $\alpha(\otimes), \beta(\otimes)$ 和 $\gamma(\otimes)$ 为灰参数, 其白化值可通过最小二乘辨识算法求取, 即有:

$$\begin{bmatrix} \alpha(\otimes) \\ \beta(\otimes) \\ \gamma(\otimes) \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

$$\text{式中, } B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(Q(0) + Q(1)) & P^{(0)}(1) & P(1) \\ -\frac{1}{2}(Q(1) + Q(2)) & P^{(0)}(2) & P(2) \\ \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(Q(m-1) + Q(m)) & P^{(0)}(m) & P(m) \end{bmatrix}$$

$$Y = [Q^{(0)}(1) \quad Q^{(0)}(2) \cdots Q^{(0)}(m)]^T$$

模型(2)式的解为:

$$\begin{aligned} Q(t) = & [Q(0) - P(0)\beta(\otimes)]e^{-\alpha(\otimes)t} + \beta(\otimes)P(t) \\ & + [\gamma(\otimes) - \alpha(\otimes)\beta(\otimes)] \int_0^t e^{-\alpha(\otimes)\tau} P(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

其离散形式为:

$$\begin{aligned} Q(k+1) = & [Q(0) - P(0)\beta(\otimes)]e^{-\alpha(\otimes)k} + \beta(\otimes)P(k+1) \\ & + [\gamma(\otimes) - \alpha(\otimes)\beta(\otimes)] \sum_{i=1}^k [e^{-\alpha(\otimes)i} P(k-i+1)] \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 实际验算结果分析

2.2.1 预测模型的建立及其预测结果 在假定现行黄河清水沟流路不变的前提下, 利用 1976—1989 年的黄河亚三角洲面积数据及其相应年份的利津站黄河来沙量数据(郭永盛等, 1992)来建立预测模型, 并以此来预测后续年份的现行黄河亚三角洲的面积增长。其具体数值如表 1 所示。

据表 1 所列数据可计算出黄河亚三角洲的年面积增长值 $Q^{(0)}(k)$, 它同利津站的年黄河来沙量数据 $P^{(0)}(k)$ 一同列于表 2。为检验预测模型的有效性, 先以 1976—1987 年的面积数据和来沙量数据按式(2)进行建模, 并以 1988, 1989 年的面积数据进行验证。由此可得如下预测模型方程:

$$\begin{aligned} Q(k+1) = & -3.9686e^{-0.047097k} + 8.0051P(k+1) \\ & - 0.6546 \sum_{i=1}^k [e^{-0.047097i} \cdot P(k-i+1)] \end{aligned} \quad (6)$$

表 1 等时距面积值及其 GM(1,1) 模型预测值 ($X = Q + 190$)

Tab. 1 The areas at equal time intervals as predicted by GM(1,1) model in modern Huanghe River Delta

时序 (a)	等时距量 算面积 $X(\text{km}^2)$	GM(1,1) 模型 预测值 $\hat{X}(\text{km}^2)$	残差 $e = X - \hat{X}(\text{km}^2)$	相对残差 $q = e/X(\%)$
1976	190			
1977	262	347	-85	-32.44
1978	349	383	-34	-9.74
1979	407	401	6	1.47
1980	427	420	7	1.64
1981	465	440	25	5.38
1982	490	461	29	5.92
1983	550	483	67	12.18
1984	572	506	66	11.54
1985	603	530	73	12.11
1986	537	555	-18	-3.35
1987	541	581	-40	-7.39
1988	562	609	-47	-8.36
1989	618	638	-20	-3.24

表 2 面积预测基本数据及其预测结果

Tab. 2 The basic data of area increment prediction and the predicted area increment in modern Huanghe River Delta

时序 (a)	等时距 面积值 $X(\text{km}^2)$	年增长 面积 $Q^{(0)}(\text{km}^2)$	年来沙量 $P^{(0)}(10^4\text{t})$	$\hat{X}^{(1)}$ (km^2)	$q^{(1)}(\%)^{(1)}$	$\hat{X}^{(2)}$ (km^2)	$q^{(2)}(\%)^{(2)}$	$e^{(2)}$ (km^2)	$\hat{e}^{(2)}$ (km^2)
1976	190								
1977	262	72	9.49						
1978	349	87	10.20						
1979	407	58	7.33	390	4.2	390	4.2	17	35
1980	427	20	3.08	399	6.6	397	7.0	30	11
1981	465	38	11.50	474	-1.9	472	-1.5	-7	-2
1982	490	25	5.42	493	-0.6	492	-0.4	-2	-12
1983	550	60	10.20	549	0.2	550	0.0	0	-19
1984	572	22	9.34	592	-3.5	596	-4.2	-24	-25
1985	603	31	7.56	617	-2.3	625	-3.6	-22	-31
1986	537	-66	1.69	592	-10.2	605	-12.7	-68	-35
1987	541	4	0.96	562	-3.9	583	-7.8	-42	-39
1988	562	21	8.12	590	-5.0	624	-11.0	-62	-43
1989	618	56	5.99	598	3.2	644	-4.2	-26	-46

1) $\hat{X}'$, q' 分别为按 1976—1987 年数据建模所求得的三角洲面积预测值及其相对残差。

2) $\hat{X}''$, q'' , e , $\hat{e}$ 分别为按 1976—1989 年数据建模所求得的三角洲面积预测值、相对残差、预测残差及其估值。

据上式可预测 1988, 1989 年相对于 1976 年的面积增长值, 再加上 1976 年黄河三角洲的面积值即得其相应年份的面积预测值, 其预测结果列于表 2。由表 2 可见, 1988, 1989 年的面积预测值的相对误差分别为 -5.0% 和 3.2%, 其预测结果相当理想, 这表明模型

式(2)可用。

以表 2 中所列全部数据即 1976—1989 年各时段的面积数据和黄河来沙量数据按式(2)重新建模,并以此对三角洲的面积增长进行预测,由此所得到的预测模型为:

$$Q(k+1) = -5.4280e^{-0.166397k} + 8.1589P(k+1)$$
$$- 0.9504 \sum_{i=1}^k [e^{-0.166397i} \cdot P(k-i+1)]$$

(7)

同样据式(7)可计算出各年份相对于 1976 年的面积增长预测值,再加上 1976 年的黄河三角洲面积值即为各相应年份三角洲面积的预测值。其结果也列于表 2。

预测模型建立以后,对于预测值的可信程度必须进行检验。这里采用后验差检验,其精确度的等级按照后验差比值 C 和小误差概率 P 两个指标来衡量(表 3)。预测模型式(7)的后验差比值 $C = 0.24 < 0.35$;小误差概率 $P = 1 > 0.95$ 。对照表 3 可知,该预测模型的等级属 I 级。而 GM(1,1) 模型(表 1)的后验差比值 $C = 0.38 < 0.4$; $P = 0.92 > 0.8$ 。对照表 3 知其预测精度的等级属 II 级。由此可见,这里所采用的模型优于 GM(1,1) 模型。由黄河三角洲实际面积值、GM(1,1) 模型和模型(7)式的预测值所分别绘制的面积增长曲线(图 1)也表明这里所采用的预测模型能更好地反映曲线的摆动。

在现行黄河流路不改道的情况下,只要将后续年份的来沙量累加值输入到模型(7)式中,就可以预测黄河三角洲相应年份相对于 1976 年的面积增长值。由于后续年份的黄河来沙量未知,为了预测 1990—2000 年的三角洲面积变化,并考虑到黄河多年来水沙变化的趋势和阶段性,在此取 1980—1989,1976—1989,1970—1989 和 1950—1989 年 4 个时段的黄河利津站年平均来沙量 6.39×10^8 , 7.13×10^8 , 7.69×10^8 和 9.87×10^8t 分别代表 1990—2000 年间各年份的来沙量,按模型(7)式进行预测,可得到 4 组该期间各年份的黄河三角洲面积预测值,其预测结果列于表 4。由表 4 可知,若 1990—2000 年间的来沙情况分别与 1980—1989,1976—1989,1970—1989 和

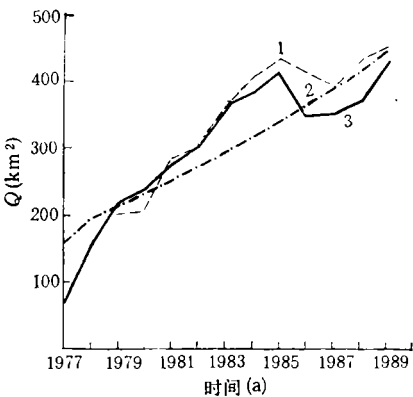


图 1 黄河三角洲面积增长曲线

Fig. 1 The curve of modern Huanghe River Delta area increment

1.本文模型预测曲线; 2.GM(1,1) 模型预测曲线; 3.实际面积增长曲线。

表 3 模型预测精度划分表

Tab. 3 The model's prediction precision in modern Huanghe River Delta

预测精度等级		P	C
I	好	>0.95	<0.35
II	合格	>0.80	<0.40
III	勉强	>0.70	<0.45
IV	不合格	≤ 0.72	≥ 0.65

据邓聚龙,1988;俞赐美,1992。

1950—1989 年的来沙情况相当的话,那么到 2000 年底,1989—2000 年间的黄河三角洲净造陆面积将分别为 255,300,334 和 466km²。

表 4 1990—2000 年黄河三角洲面积增长预测结果 (km²)

Tab. 4 The predicted modern Huanghe River Delta area increment from 1990 to 2000

时序 (a)	时 段 (a)			
	1980—1989	1976—1989	1970—1989	1950—1989
1990	667	673	678	695
1991	689	701	709	743
1992	711	728	740	788
1993	732	753	769	831
1994	753	778	797	871
1995	774	803	825	910
1996	794	827	851	947
1997	814	850	877	983
1998	834	873	903	1 018
1999	854	896	927	1 051
2000	873	918	952	1 084

根据 1950 年以来黄河入海水沙的变化趋势以及黄河中游小浪底等大型水利枢纽工程建设施工的影响,可初步断定 90 年代的来沙状况将好于 80 年代,但将不会超过 70, 80 年代的平均来沙水平。概括以上 4 个预测值,预计到 2000 年底现行黄河三角洲 1989—2000 年间的净造陆面积将介于 250—350km² 之间。

2.2.2 预测误差分析 1979—1989 年共 11 年由模型 (7) 式进行预测的面积残差列于表 2。由表 2 可发现,残差 e 呈负对数增长趋势,于是可用如下对数方程去拟合残差:

$$e(k) = a \ln k + b + \varepsilon_k \quad (8)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, 11$ 分别对应着 1979—1989 年诸年份; a, b 为待估参数; ε_k 为随机误差。据表 2 中所列残差 e 对上式按最小二乘法求解可得如下拟合方程:

$$\hat{e}(k) = -33.5927 \ln k + 34.7220 \quad (9)$$

且有:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1801 & -0.2866 \\ -0.2866 & 0.5469 \end{bmatrix}, \hat{\sigma}^2 = 345.78$$

这里 Q 为待估参数 a, b 的协因数阵; $\hat{\sigma}^2$ 为单位权方差的估值。

按 (9) 式可对模型 (7) 式的预测残差进行估计, 1979—1989 年的预测残差估值 $\hat{e}$ 也列于表 2。按模型 (7) 式预测到 2000 年底的黄河三角洲面积所存在的预测残差由 (9) 式知为 $\hat{e}(2000) = -69\text{km}^2$ 。现给出预测残差的区间估计。在信度 $\alpha = 0.05$ 的条件下, 对于 1979—1989 年的历史值, 其预测残差将以 95% 的概率落于区间 $\hat{e} \pm 1.96\hat{\sigma}$ 之内; 而对于 1990 年以后的预测值, 其预测残差将以相同的概率落于区间 $\hat{e} \pm 1.96\hat{\sigma}(\hat{e})$ 之内(刘承祚等, 1981)。这里预测值 $\hat{e}(k) (k > 11)$ 的方差未知, 为此应先求出其方差, 它可按下式估计(韦博成, 1989):

$$\text{Var}(\hat{e}(k)) = \hat{\sigma}^2(1 + V_0(k)QV_0(k)^T) \quad (k > 11) \quad (10)$$

式中,

$$V_0(k) = \left(\frac{\partial \hat{\theta}(k)}{\partial a}, \frac{\partial \hat{\theta}(k)}{\partial b} \right) = (\ln k, 1)$$

由上式可求得 2000 年底($k = 22$ 时)的面积预测残差的方差为 $Var(\hat{\theta}(2000)) = 517.24$, 从而有 $\hat{\sigma}(\hat{\theta}(2000)) = 22.7 \text{ km}^2$ 。由此便可求得: 2000 年底黄河三角洲的面积预测残差将以 95% 的概率落于区间 $[-113.5, -24.5]$ 之内。照此, 同样可给出其它年份预测残差的区间估计, 即 $[\hat{\theta}(k) - 1.96\hat{\sigma}(\hat{\theta}), \hat{\theta}(k) + 1.96\hat{\sigma}(\hat{\theta})]$ 。

3 结论

3.1 以黄河来沙量为系统输入、以黄河三角洲面积增长为系统输出的三角洲发育演变预测模型优于灰色系统的 GM(1,1) 模型, 它更能反映面积增长曲线的摆动。

3.2 根据本文模型的预测分析, 到 2000 年底, 黄河三角洲 1989—2000 年间的净造陆面积将介于 $250\text{—}350 \text{ km}^2$ 之间。

3.3 现代黄河三角洲面积的增长受河流来沙量、径流量, 海洋动力, 河口外水下海底地形, 原始入海口的形态, 河口位置及朝向, 三角洲发展阶段, 海平面变化和沿岸输沙等多种因素的影响, 但黄河来沙量是影响三角洲面积增长的最根本因素, 本文得出的预测结果进一步说明了这一点。

3.4 黄河三角洲的面积增长预测是在假定现行黄河清水沟流路不变的前提下进行的, 一旦 2000 年前黄河发生改道, 那么旧的系统被打破, 新的系统将建立, 这样据 1976—1989 年的历史数据所建立的预测模型将不再适用于改道以后, 此时须根据改道后的有关数据来建立新的预测模型。

参 考 文 献

- 王文斌等, 1991, 贵州普定后寨岩溶地下水系统灰色预测模型研究, 成都地质学院学报, 18(3): 89—96。
 邓聚龙, 1988, 灰色控制系统, 华中理工大学出版社(武汉), 374—402。
 韦博成, 1989, 近代非线性回归分析, 东南大学出版社(南京), 143—210。
 刘承祚等, 1981, 数学地质基本方法及应用, 地质出版社(北京), 120—134。
 郭永盛等, 1992, 黄河口区域演变的预测研究, 海洋学报, 14(3): 95—103。
 俞赐美, 1992, 长江口北槽航道淤积的灰色预测, 海洋工程, 10(4): 78—85。

PREDICTION OF MODERN HUANGHE RIVER DELTA AREA INCREMENT BY USING THE SEDIMENT DISCHARGE

Sun Xiaogong, Yang Zuosheng

(Institute of Estuarine and Coastal Studies, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

ABSTRACT

Based on the modern Huanghe River Delta area data and the river sediment discharge data measured at the Lijin Hydrometric Station from 1976 to 1989, dynamic prediction of the delta area increment is made by using a single input and single output linear system model whose first order equation is as follows:

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \alpha(\otimes)Q(t) = \beta(\otimes)\frac{dP(t)}{dt} + \gamma(\otimes)P(t)$$

where $\alpha(\otimes)$, $\beta(\otimes)$, $\gamma(\otimes)$ are gray parameters; $P(t)$, $Q(t)$ are system input and output. Assuming the river's course to be unchanged and using this equation, the predicted river-caused delta area increment from 1990 to 2000 will be about 250—350km². The calculated result also shows that the model used here can describe the regularity of the delta area increment with good fitting to the real area increment. The model is much better than the Grey System Model GM(1,1) used before.

Key words Modern Huanghe River Delta Sediment discharge Area increment prediction