

黄河河口三角洲演变的数学模拟

陈界仁 陈国祥

(河海大学水文水资源及环境学院 江苏 南京 210098)

摘要 采用经验模型、分析模型和最小功率方法研究河口三角洲演变过程. 根据黄河河口三角洲资料, 利用三个模型计算了河口三角洲岸线或沙咀宽度及岸线的平均延伸情况以及对河口近口段河道水位的影响, 比较分析了各模型的计算结果, 指出了模型不足之处.

关键词 河口三角洲 模型 最小功率法

中图分类号 :TV143 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2001)01-0103-04

河口问题较一般河道问题复杂, 河口水流受河流动力和海洋动力的双重作用. 黄河河口为多沙河流的河口, 随径流输送到河口的大量泥沙绝大部分在河口淤积下来, 形成河口三角洲. 河口三角洲上的水流泥沙可能是单一河道形式运动, 也可能是漫流入海, 形成河口三角洲岸线或沙嘴的淤积延伸、三角洲尾闾摆动. 在海洋动力的作用下, 三角洲岸线或沙咀产生蚀退. 河口三角洲沙嘴的淤积延伸或蚀退、河床抬高及流路摆动改道等一系列演变过程对黄河河口地区的工农业生产发展有很大影响. 1976 年黄河走清水沟流路以来, 随胜利油田开发及东营市的发展, 提出了稳定黄河河口流路的要求, 需对黄河河口三角洲的演变进行研究, 为流路规划设计提供计算方法. 为此, 本文采用数学模型计算河口三角洲演变过程.

1 经验模型(模型 1)

经验模型是根据河口来沙量、三角洲淤积形态确定三角洲岸线或沙嘴的淤积延伸及对近口段水位的影响, 认为三角洲的岸线平行推移, 三角洲前缘也是平行推进. 其过程概化为图 1 所示形式^[1]. 图中 H 为口门附近滨海水深, γ_{s1}' , γ_{s2}' 分别为水下淤积物及三角洲洲面淤积物的干容重, ΔL 为三角洲岸线平均延伸距离. 采用文献 [1] 建立的经验公式, 即

$$\Delta L = \frac{-\frac{1}{2}BH\gamma_{s1}' + \sqrt{(\frac{1}{2}HB\gamma_{s1}')^2 + 2J_aB\gamma_{s2}'W_{ab}}}{J_aB\gamma_{s2}'}$$

(1)

式中 : B ——三角洲淤积影响范围 ; J_a ——三角洲淤积面比降 ; W_{ab} ——三角洲滨海淤积量.

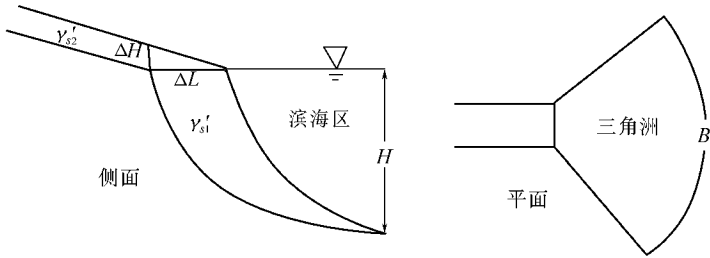


图 1 三角洲淤积概化
Fig.1 Scheme of delta deposition

河口演变对近口段的影响, 一方面表现为三角洲岸线或沙嘴的淤积延伸, 另一方面将引起尾闾及其上游河道相应淤积抬高. 一条流路尾闾河段资料和水槽试验成果给出了如下关系 :

$$\Delta H = J_a \Delta L \tag{2}$$

式中 ΔH ——同流量下由于三角洲淤积延伸而引起的水位升高. 将式(2)计算的水位抬高值加到计算河段的下游边界的水位上, 作为河口近口段的下边界条件, 再利用一维水流泥沙运动数学模型计算近口段的水流泥沙运动和河床冲淤变化, 从而得到河流三角洲系统的水流泥沙及河床演变结果^[2].

2 分析模型(模型 2)

将河口-三角洲系统概化为如图 2 所示的形式. 三角洲尾间的断面为 N , 洲头的断面为 $N-1$, 洲上的水沙运动遵循水流连续方程和沙量连续方程, 不考虑河口三角洲上的横向水流运动及海洋动力的影响.

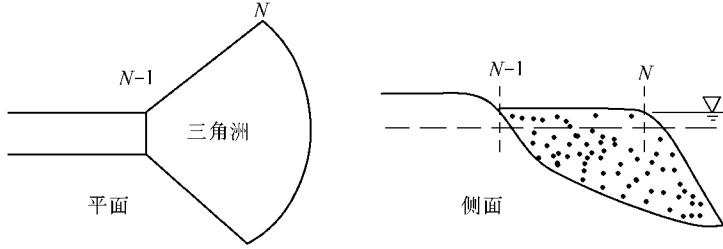


图 2 河口-三角洲系统概化示意图

Fig.2 Scheme of delta system

对于断面 N , 如已知 t 时刻的面积, 则 $t + \Delta t$ 的断面面积为

$$A^{j+1} = A^j + B^j \Delta E - (\Delta A_d) \tag{3}$$

式中 ΔE ——潮位变化; ΔA_d ——冲淤面积; B ——第 N 断面的宽度. 河床变形方程为

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \gamma' \frac{\partial A_d}{\partial t} = 0 \tag{4}$$

式中 γ' ——泥沙淤积物干容重; Q_s ——输沙率. 由式(4)计算冲淤面积 ΔA_d , 用式(3)计算 A^{j+1} .

令

$$\frac{V^{j+1}}{V^j} = \left(\frac{R^{j+1}}{R^j} \right)^m \tag{5}$$

其中指数 m 在 $0 \sim 1.5$ 之间变化^[3]. 如 $m = 0$, 则 $V^{j+1} = V^j$. 为计算方便, 取 $m = 1$, 则有

$$\frac{R^{j+1}}{R^j} = \frac{V^{j+1}}{V^j} = \frac{Q^{j+1} A^j}{Q^j A^{j+1}} \tag{6}$$

由式(6)计算 R^{j+1} . 已知 R^{j+1} 和 A^{j+1} , 则可计算断面 N 的宽度. 设断面为矩形, 有

$$H = \frac{A - \sqrt{A \times A - 8AR}}{4R} \quad B = \frac{A}{H} \tag{7}$$

式中省略了上标 $j+1$. 逐时段计算, 得到各时段的 B, H, A 值. 泥沙不断输送到河口地区, 三角洲岸线向前推进, 其平均延伸用下式计算:

$$\Delta x^{j+1} = \Delta x^j + \frac{Q_s^{j+1}}{\gamma' A^{j+1}} \Delta t \tag{8}$$

式中水位升高值用式(2)计算. 已知 ΔH 值, 再计算近口段水沙运动及冲淤变化过程.

3 最小功率法(模型 3)

河口三角洲概化为如图 2 所示形式. 河口三角洲系统总的水流功率为

$$P = \int_L \gamma Q S_f dx \tag{9}$$

式中 P ——河段总的水流功率; L ——河段长度; γ ——浑水容重; Q ——流量; S_f ——能坡. 将式(9)变成有限差分形式为

$$P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \gamma (Q_i S_{fi} + Q_{i+1} S_{fi+1}) \Delta x_i \tag{10}$$

式(10)给出的总水流功率 P 是断面 N 处宽度 B^{j+1} 的函数. B^{j+1} 按 P^{j+1} 最小为条件确定. 方法如下:

a. $A^{j+1} = A^j + \frac{1}{2}(B^j + B^{j+1})\Delta E - \Delta A_d$, ΔA_d 为冲淤面积,由式(4)确定,断面 N 近似为矩形,则 $A = BH$, 代入式(10),得

$$B^{j+1}H^{j+1} = B^jH^j + \frac{1}{2}(B^j + B^{j+1})\Delta E - \frac{\Delta K(Q_{SV-1}^j - Q_{SV}^j)}{\gamma'\Delta x_{N-1}}$$

(11)

式中水深 H 和河宽 B 是未知量,用试算法求解.

- b. 在假设的 B^{j+1} 和计算的 H^{j+1} 下计算河段的水面线,求得各断面的 S_f .
- c. 用式(10)计算河段水流功率.
- d. 给定一个河宽 B^{j+1} ,得到与之对应的功率 P^{j+1} ,绘 $P \sim B$ 的曲线.
- e. 查曲线上 P^{j+1} 最小时所对应的 B^{j+1} 即为所求之值.
- 河口三角洲岸线平均延伸值用式(8)计算.再根据式(2)计算的水位抬高的影响,计算近口段水沙运动及河床演变.

4 计算实例

以黄河河口三角洲演变计算为例.黄河河口为多沙陆相弱潮河口,感潮段较短,几乎不存在潮流段.到达河口地区的多年平均沙量约为 10 亿 t,其中,约占总量 80%的沙量淤积在陆上及滨海地区,占总量 20%的沙量被输往外海,黄河口每年造陆几十平方公里,河口三角洲在河流动力和海洋动力作用下形成淤进蚀退,河床抬高,流路摆动改道等一系列演变过程.自 1855 年以来,黄河口流路经历了 10 次大的改道,最近一次大的改道是 1976 年黄河走现行清水沟流路入海.对清水沟流路的三角洲演变过程用上述三个模型计算.经验模型中淤积物干容重 γ_{s1}' 和 γ_{s2}' 分别为 1.0 t/m^3 和 1.34 t/m^3 .计算的三角洲岸线或沙嘴的平均延伸结果见表 1.

表 1 三角洲岸线或沙嘴平均延伸距离

Table 1 Averaged extension of delta shore line m

模型	1976 年	1977 年	1978 年	1979 年	1980 年	1981 年	1982 年	累计
模型 1	0	2 513	1 291	955	604	2 347	1 026	8 916
模型 2	0	2 163	1 535	964	1 017	2 182	1 095	8 956
模型 3	0	2 286	1 757	1 074	714	2 429	1 143	9 403
实测	0	2 143	1 429	1 026	1 043	2 000	1 149	8 790

由表 1 可见,三个模型计算的河口三角洲岸线或沙嘴的累计延伸长度都较实测值为大,主要的原因可能是模型中只考虑了径流输沙的作用,而没有考虑海洋动力蚀退的影响.三个模型计算的多年累计延伸长度与实测结果的相对误差分别为 1.4%、1.9%和 7%.从逐年计算结果比较来看,差别则较大,最大相对误差为 40%,这与模型中所选用的参数有关,也说明黄河河口三角洲演变的复杂性.模型计算的三角洲岸线或沙嘴的平均宽度结果如表 2.

表 2 三角洲岸线或沙嘴平均宽度

Table 2 Averaged width of delta km

模型	1976 年	1977 年	1978 年	1979 年	1980 年	1981 年	1982 年	年均值
模型 1	24	27	39	38	34	25	27	30.7
模型 2	22.3	23.6	28.1	34.3	24.6	22.8	26.2	26.0
模型 3	21.1	24.4	26.4	33.5	22.7	23.7	25.1	25.3

从表 2 可见,三个模型计算的河口三角洲多年平均宽度,模型 1 较大,模型 3 较小.野外观测资料表明,黄河河口三角洲单个沙嘴的平均宽度约为 25 km,模型 2 和 3 的计算结果与实测资料基本接近.从逐年计算结果来看,由于水沙条件、边界条件的不同,同一模型计算的河口三角洲平均宽度、平均延伸距离结果不同,如 1979 年来水来沙量较小,洪峰值不大,水流散乱,其延伸距离不大,三角洲淤积影响宽度则较大,在

表 3 水位计算比较

Table 3 The comparrison of water level m

模型	利津	一号坝	西河口	十八公里
模型 1	12.77	10.55	8.99	6.85
模型 2	12.69	10.54	8.99	6.86
模型 3	12.65	10.56	8.97	6.88
实测	12.69	10.76	8.87	6.92

1981年,来水来沙较大,洪峰流量大,水流相对集中在主槽,其延伸距离较大,河口三角洲淤积影响宽度反而不大.模型计算结果初步反映了三角洲水流的运动情况.

河口三角洲岸线或沙嘴淤积延伸,相当于抬高了侵蚀基面,对河口近口段水流泥沙计算有一定影响,应考虑该影响.表3为考虑延伸后,流量为 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 下近口段的计算水位结果.

由表3可见,计算的水位与实测结果基本一致,三个模型的结果有差别,模型3的计算结果与实测值相比较好.如不考虑淤积延伸,利津站计算的水位为 12.62 m ,与实测结果的误差比考虑延伸的误差大.在三个模型中,模型1为经验方法,其中河口三角洲淤积面比降等参数主要依据河口流路不同的时期实测资料确定,有较大的经验性.模型2和3将河口三角洲作为一个系统来考虑,有一定的理论基础.模型2的计算方法较简明,但系数 m 的物理意义还不明确,对于不同的河口需要用实测资料加以确定,模型3的计算稍复杂.上述三个模型的共同缺点是没有考虑海洋动力的影响.本文所计算的黄河河口为一陆相弱潮河口,海洋动力较弱,上述模型是否适用于其它河口还需要进一步加以研究.

5 结 语

a. 本文采用的经验模型、分析模型和最小功率模型计算了黄河河口三角洲淤积影响平均宽度、三角洲淤积延伸的平均距离,并与实测结果进行了比较,结果基本相符.

b. 考虑黄河河口三角洲淤积延伸对河口近口段水流泥沙运动的影响,可提高计算结果的精度.

c. 影响河口三角洲演变因素较多,本文考虑了来水来沙、三角洲尾闾边界条件等的作用,计算了河口三角洲的演变过程.上述三个模型的共同缺点是没有考虑海洋动力的影响,为提高计算结果的精度,需更多精确的实测资料.此外,模型是否适用于其它河口的演变计算,需要进一步加以分析研究.

参考文献:

[1] 王恺忱. 黄河河口发展影响预估计算方法[J]. 泥沙研究, 1988(4): 39~49.
[2] 陈界仁, 陈国祥. 黄河河口段一维水沙数学模型[J]. 水科学进展, 1996(2): 397~403.
[3] Chang H H, Hill J C. Minimum stream power for rivers and delta[J]. J. of Hydraulic Division, ASCE, 1977(12): 1375~1387.

Mathematical Simulation of the Yellow River Mouth Delta Processes

CHEN Jie-ren, CHEN Guo-xiang

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :The river mouth delta process is affected by river dynamics and coastal dynamics. The process of river delta is estimated by empirical model, analytical model and minimum stream power method. The three models are verified with field data of the Yellow River Mouth. The computed results are compared with field data. The demerits of the three models are pointed out.

Key words : river mouth delta ; model ; minimum stream power