

# 港湾淤泥质海岸的岸线变化数值模拟 和平衡岸弧分析\*

邱建立

(杭州大学, 310028)

**提要** 本文对岸线变化模拟和岸弧分析的现有方法,作了沿岸输沙方程和海岸剖面厚度等特征要素取值方面的修正,使其适用于港湾淤泥质海岸的岸线形态与动态研究;并以舟山岛野鸭山岸段和北仑地区岸段的研究为例,证明了用修正方法预测岸线变化和对比岸弧轮廓的有效性;解释了淤泥质海岸平衡岸弧的成因;还为当地海岸规划与工程设计提供了有价值的岸线动态数据。

根据研究区内海岸动力、泥沙及剖面动态特征,对边界条件的处理和特征要素作了合理的假定和取值,进而用微机模拟了岸线演进速率,并导出结构较简单且与原型相符的岸弧方程。这不仅延伸了平衡岸弧的适用范围,而且取得了与其他研究成果互为验证的岸线动态数据。

## 一、理论方法

一线模型中假定,海岸剖面始终处于平衡,并且只在一定深度范围内变动。剖面的平衡并不单纯与波浪作用有关,其变动厚度可以涉及多种物理现象<sup>[4]</sup>。这些基本假定和认识同样适用于动态平衡的淤泥质海岸。

淤泥质海岸滩坡较缓,岸线位置受潮汐影响变动较大;但是,若将随潮变动的各动力因子均用平均海面情况予以反映,则可以采用平均海面与滩面的交线作为模拟岸线。这实际上,假定各种潮位情况下输沙对剖面的净贡献均发生于平均海面的条件之下。鉴于岸线模拟所采用的平衡剖面一般将泥沙长期(数年至数十年)有效运动范围包括在内,同时,岸线进退是以岸线单元楔块内沿岸进出沙量的对比来衡量的,这一假定是可以接受的。在这一岸线定义下,本文所涉及的野鸭山岸段,平均破波线正好位于实际潮滩波浪作用较强烈、浪蚀坑洼发育的部位,也表明了定义的合理性。下面讨论如何确定输沙方程。

岸线变化模拟只考虑沿岸输沙。一般而言,淤泥质海岸线附近(尤其在破波带内)的泥沙运动是以悬移质为主的,并由破波沿岸流<sup>[4]</sup>沿岸输运。这在本文研究区内濒临潮汐通道的港湾淤泥质海岸的动力条件分析中<sup>[1]</sup>可得到印证。因此,作为淤泥质海岸的初步模拟,可采用下式计算沿岸输沙率:

\* 参加前期研究工作的有冯怀珍教授,逢自安、王宗涛副教授和蒋国俊同志。冯怀珍教授,王宗涛、张志忠副教授对初稿提出修改意见;姚永生同志对岸弧分析做了部分复算工作;国家海洋局第二海洋研究所提供部分资料谨此一并志谢。

收稿日期:1990年1月2日。

$$Q = \frac{S\bar{V}_l A}{a'}, \quad (1)$$

式中,  $S$  为实测含沙浓度(以体积比计);  $a'$  为泥沙孔隙系数<sup>[5]</sup>;  $A$  是由破波水深、破波点离岸距离和滩坡构成的近岸三角形面积( $m^2$ );  $\bar{V}_l$  为破波特征值所决定的沿岸流速度( $m/s$ )。该式不涉及波浪掀沙机制和具体的含沙浓度剖面, 从而使问题得以简化。含沙量和计算沿岸流的波浪资料采用年平均特征值, 以较客观地反映当地动力泥沙条件的平均状况。对模型中其它要素的处理, 需要结合海岸的具体情况而定。将适合于本文研究的  $\bar{V}_l$ <sup>[2]</sup> 代入式(1), 便得到输沙率方程:

$$Q = Q_0 \sin \alpha_b \cos \alpha_b, \quad (2)$$

其中输沙率振幅

$$Q_0 = 1.35 \frac{SU_m H_b^2}{\gamma_b^2 \operatorname{tg} \beta a'} \quad (m^3/s) \quad (3)$$

式(3)中, 1.35 为无量纲系数;  $U_m$  是破波带波浪最大水平轨迹速度 ( $m/s$ );  $H_b$  和  $\gamma_b$  分别为破波波高( $m$ )和破波指数;  $\operatorname{tg} \beta$  为岸滩坡度的正切函数。

据此, 引入岸线平衡定义<sup>[3]</sup>并设沿岸输沙率沿岸线的变率为常数  $K$ ; 取岸线与破波波向正交 ( $\alpha_b = 0$ ) 处为坐标原点,  $y$  坐标轴与破波波向平行, 经过简单地推导可以得到平衡岸弧轮廓的一般表达式:

$$\begin{cases} x = \frac{Q_0}{K} \left( \sin \alpha_b - \frac{2}{3} \sin^3 \alpha_b \right) \\ y = \frac{Q_0}{K} \left( \cos \alpha_b - \frac{2}{3} \cos^3 \alpha_b - \frac{1}{3} \right), \end{cases} \quad (0 \leq \alpha_b \leq 45^\circ). \quad (4)$$

不难看出, 在  $\alpha_b$  取值范围内它是一条接近圆弧形的二次曲线, 其半径主要取决于  $Q_0/K$ 。如果说输沙率振幅  $Q_0$  代表动力泥沙条件, 那么  $K$  便反映地形条件。利用两者的对比关系既可以确定岸线曲率, 也能够解释岸线动态。需要注意的是,  $K$  值的变化与一定波向和岸线定向密切相关, 故不能仅依  $Q_0$  大小解释岸弧曲率。此外, 当对比不同地区岸弧和同地区不同时期岸弧, 以及不同波向的波浪对岸线的影响时, 坐标原点应按上述同一方法选取, 否则便失去对比意义。

## 二、实例研究

### 1. 野鸭山岸段岸线变化的数值模拟

该岸段(图1)年平均海面 2.01m, 模拟岸线即为现代海堤的堤脚岸线, 其平均走向  $324^\circ$ , 直线长度 7km。堤外 0m 以上滩宽 148m, 近岸滩波为 13‰, 滩面组成物质的中值粒径为  $14.3 \mu m$ 。对相隔 25 年的测深资料对比和用多种方法计算的地形冲淤结果<sup>[1-3]</sup>表明, 岸滩年冲淤幅度很小, 剖面存在多年不变的稳定点, 已接近动态平衡, 这一点较严格地符合上述理论的基本假定。

1) 邱建立、冯怀珍, 1989。潮流峡道地区的海岸动力地貌模拟。

2) 杭州大学地理系, 1988。舟山港野鸭山岸段岸滩演变调查研究报告。

3) 国家海洋局第二海洋研究所, 1988。宁波深水港域(东区)岸滩演变调查研究报告。

受亚热带季风影响,本区波浪要素的方向分布(图 2)有两个基本对称的峰值,因而不存在显著的单向波浪流,泥沙只随季节沿岸回移,其结果相当于所有波浪的平均作用方向是在海岸法线方向上;因此,我们只对平均作用方向(取  $236^\circ$ )的波浪作用加以模拟。模拟中取破波波峰线与基线的夹角为  $2^\circ$ , 破波要素  $H_{r,m} = 0.2\text{m}$ ,  $T = 2.2\text{s}$ ,  $\gamma_b = 0.83$ 。

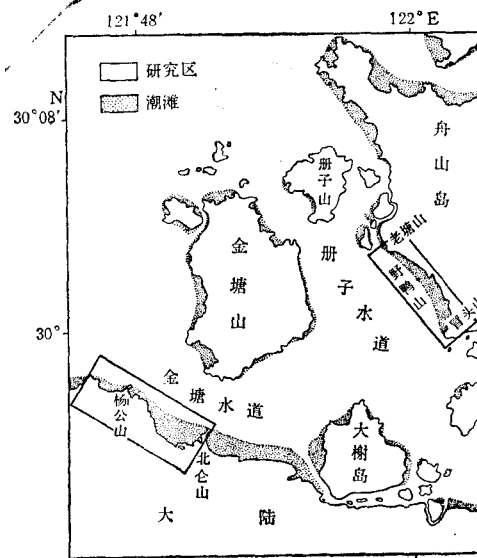


图 1 研究岸段位置(未标出现代海堤)

Fig. 1 Locations of the study sections

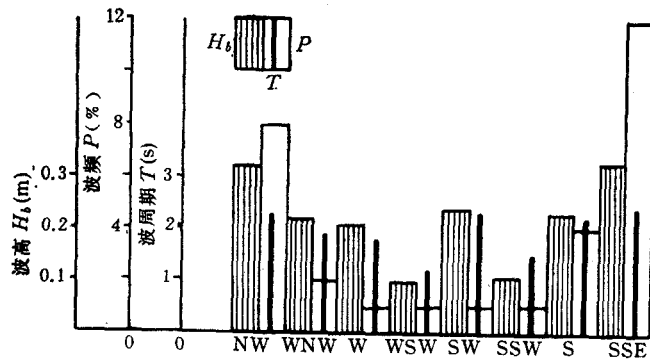


图 2 向岸方向的破波特征值(据野鸭山站一年资料统计)

Fig. 2 Typical data of the breaking waves

据分析,本区潮流主要以其向、离岸流速分量的横向分布和变化对岸滩剖面施加影响<sup>1)</sup>,而这正是岸线模拟的一线理论本身所不予考虑的一面。

该海湾内的悬沙主要由潮流远距离挟运而至,因深水道主流流速大,悬沙物质细,故

1) 同 370 页脚注 1)。

绝大部分悬沙为过境泥沙<sup>1)</sup>。含沙浓度除季节性变化明显外,其它时、空分布的变化不大。据近岸实测悬沙浓度的年变化范围,取  $S = 3.4 \times 10^{-4}$  作为含沙浓度的代表值。本区泥沙空隙系数约变化于 0.42—0.65 之间,模拟中取  $a' = 0.57$ 。将上述破波、泥沙和地形数据代入式(3),可得到该岸段的沿岸输沙率振幅约为  $72\ 532.8\text{m}^3/\text{a}$  (此处时间单位已作了换算)。

在连续性方程中,本区岸线可以忽略其它泥沙得失项。据剖面研究结果<sup>2)</sup>,取剖面厚度  $D = 16\text{m}$ ,这一取值远大于沙质海岸模拟中,年最大有效波高的 2 倍为代表的取值<sup>[4]</sup>,也大于 Dean 等人所认为的相对于 20 年时间尺度的剖面截止水深(约 8m)。本文的取值(16m)一方面反映了淤泥质海岸剖面变动范围与沙质海岸的固有差异,例如前者组成物质细,潮汐、潮流作用的影响可至较深海底的泥沙等;另一方面代表了更长的时间系列(约 25 年)。应该指出,尽管破波造成的沿岸输沙范围主要限于破波带(淤泥质海岸范围更大些),但计算岸线变化应以剖面变动的厚度为依据。

在左、右边界条件的处理中假定,模拟岸段两侧一定范围内的沿岸流以一定的速率向模拟岸段输运泥沙,输沙量的大小取决于两侧波浪和岸线定向条件。为反映湾顶法线两侧波浪的微弱差异造成的影响,左、右边界泥沙进入量分别根据 SSE 和 NW 两个主波方向的波要素和当地岸线定向,用式(2)计算。当然也可以通过调整试验边界参数以达到能够解释终端影响的合理取值。此外,因岸线系坚固的护岸,故假定初始岸线不能后退。

由上述处理可以看出,模型中在一定程度上包含了潮流的作用,因为实测含沙量和剖面变动厚度都无疑含有潮流的影响。从某种意义上说,本区潮流起到供沙作用,而波浪起着修饰岸线的作用。在这种情况下,如何将滩地潮流(即使是微弱的)的沿岸分量直接引入模型结构中,需进一步给以研究。

模拟结果如图 3、表 1 所示。其中第 7 单元在第 21 年才转为缓慢淤进。野鸭山单元的的稳定至少还可以继续维持数十年,相对稳定的单元与其岸线相对外凸有关。

## 2. 平衡岸弧分析

研究岸段的波向随季节变化而更替,而岸弧形成的总时间远长于波向更替周期。因此,可以认为各向波浪是同时作用的,也正因为如此,才会形成近似或完全对称的岸弧<sup>3)</sup>。所以,将坐标原点取在湾顶, $y$  轴向海为正,即认为湾顶处破波波峰与岸线平行, $\alpha_b$  向其两侧逐渐增大。这与岸线变化模拟中对波向的考虑完全一致。式(4)要求  $\alpha_{b,\max} \leq 45^\circ$ ,

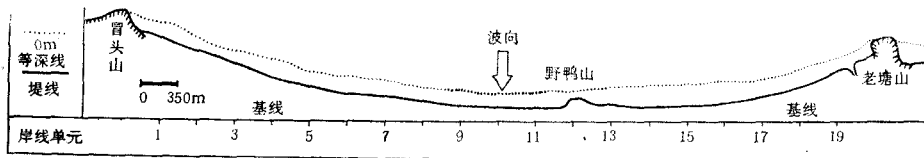


图 3 野鸭山岸线变化

Fig. 3 Variation of the shoreline in Yeyashan area

1) 同 370 页脚注 2)。2) 同 370 页脚注 1)。  
3) 张忍顺编译,1978。南京大学地理科技资料(2)。



据计算,整个野鸭山岸段各向破波的  $\alpha_b < 33^\circ$ , 保保夫<sup>1)</sup>也认为无论何向波浪,  $\alpha_b$  一般  $\leq 52^\circ$ <sup>2)</sup>, 三者基本吻合。在  $Q_0$  已知的情况下, 利用式(4)和实际岸线可反推出  $K$  值。若岸线是平衡的, 则  $K$  基本是一个定值。此取 0m 线代表自然弯曲的静水岸线, 以避开人为筑堤布线影响。由此推得野鸭山岸段的  $\bar{K} = 5.56$ , 故其平衡岸线方程为:

$$\begin{cases} x = 13\,045.47 \left( \sin \alpha_b - \frac{2}{3} \sin^3 \alpha_b \right) \\ y = 13\,045.47 \left( \cos \alpha_b - \frac{2}{3} \cos^3 \alpha_b - \frac{1}{3} \right), \end{cases} \quad (\alpha_{b, \max} = 17^\circ) \quad (5)$$

它与实际 0m 线吻合良好(图 4a)。至于南部偏差的产生, 除岬角本身影响外, 可能还与波浪相对于湾顶并非完全对称和潮流净向南输沙有关<sup>3)</sup>。该岸弧的理论弧长为 7 295m, 实际弧长为 7 280m, 弯曲半径超过 10km。岸弧合宜指数为  $C/P = 11.1$  ( $C$  为弦长,  $P$  为弦中点向岸垂线长), 与圆弧形沙质海滩平衡的一个可能指标  $C/P = 15$  也较接近。连同岸线变化模拟结果, 一致表明本区岸线已基本平衡, 而且相当稳定。

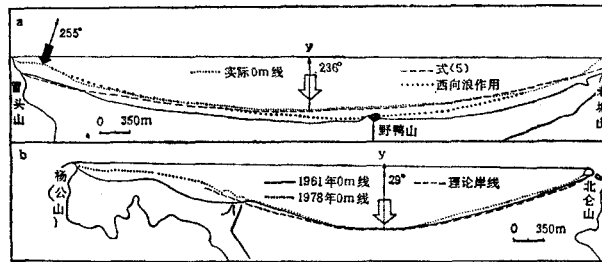


图 4 理论岸弧与实际岸弧的对比

Fig. 4 Theoretical and natural shore-arcs

由于各向波浪都力图使岸线与其达成平衡, 因此还可用平衡岸弧理论分析某一特定方向波浪对岸线的影响。如图 4a 中的粗点线所示, 西向浪将使岸线曲率增大, 在其影响下野鸭山附近可能发生明显冲刷。这一点若得到进一步证实, 则对海岸的防护有着重要意义。

假定野鸭山地区海湾  $Q_0$  因子历史变化不大, 可以推出百年前 (1885 年) 的岸弧  $K$  值 = 9.89。这说明当时岸线已反映出趋于平衡, 但动态上仍向海发展, 至今相对速率已减小了 44%, 今后将进一步减小。现代岸线动态的各种研究成果(表 2)比较接近, 佐证了本文研究方法的有效性。

为分析地形要素引起的岸线动态差异, 取动力、泥沙条件都与野鸭山海岸较接近的北仑山以西岸弧作对比。设  $Q_0$  不变, 则推出  $K_{北仑} = 15.51$  ( $\alpha_{b, \max} < 35^\circ$ )。理论与实际岸弧对比见图 4b。该岸段的  $C/P = 8.6$ 。可见野鸭山岸线的稳定性与北仑区相比更好些。这一结论已得到实际岸线进退速率研究的证实<sup>4)</sup>。此外, 北仑理论岸弧是按 1961 年 0m 线推出的, 西端实际岸线的后来发展几乎与理论岸线重合。这也许预示着该处码头前沿

1) 同 370 页脚注 1)。2) 本文作了换算。3) 同 370 页脚注 2)。

4) 冯怀珍、王宗涛, 1984。北仑港地区海岸地貌发育和岸线变迁。北仑港论文集。

表 2 野鸭山港湾岸线的现代动态数据对比

Tab. 2 Shoreline prograding data of Yeyashan area

研究方法	淤进率范围 (m/a)	平均值 (m/a)	淤进递减率 (m/a)	备注
岸线变化模拟	0—2	0.89	0.01	模拟时段为 20 年
平衡岸弧分析	0.73—2.41	1.57	0.013	参考历史岸线
历史岸线对比①	—	≤2.50	≥0.003	推断的
潮滩沉积研究②	—	0.73	—	一个沉积样品的 $^{210}\text{Pb}$ 测定结果③

① 同 370 页脚注 2)。② 同 370 页脚注 3)。③ 近 10 年来潮滩沉积率为 0.95cm/a, 依此和平均滩坡 13% 推出淤进率。

水深要比 60 年代初更易保持。其他例子如杨公山西侧岸弧  $K = 28.67$ ,  $C/P = 5.5$ , 更往西的另一岸弧 ( $C/P = 3.7$ ) 尚未平衡。通过对不同海湾、不同岸弧折向(凹或凸)以及同一海湾的历史岸弧的对比,有可能制定出用以确定岸弧类型和演变速率的指标。

### 三、结 论

1. 港湾淤泥质海岸的岸线轮廓可与破波特征要素建立联系。经适当修正,现有一线模型和岸弧理论可以用于淤泥质海岸的研究。

2. 在无长期单向波浪作用的条件下,港湾岸线可以形成近似或完全对称的圆弧形轮廓,而不会形成相反情况下的对数螺线形。由于潮流远距离供沙,细粒泥沙又以悬移为主,因此尽管两端岬角无产沙条件和单纯的波浪流被岬角阻断,岸线也难以形成半心脏形侵蚀岸弧。

3. 分别着重于形态和动态的岸弧分析和岸线变化模拟,在理论假定、沿岸输沙率计算等方面可以是统一的,其结果也是可对比的。可将这些研究与海岸剖面 and 近岸海底冲淤研究互为补充,以全面了解海岸的动力地貌过程。

4. 野鸭山港湾岸线已呈平衡的圆弧形轮廓,岸线淤进率很小,稳定性强于北仑岸段。这无疑有利于将其辟为深水港区的工程实践。

### 参 考 文 献

- [1] 邱建立、逢自安,1987. 北仑地区的岸滩动态. 杭州大学学报(自然科学版) 14(4): 502—511.
- [2] 邱建立、庄振业、崔承琦译,1985. 海滩过程与沉积作用. 海洋出版社, 13—170 页, 189—214 页.
- [3] 薛鸿超、顾家龙、任汝述,1980. 海岸动力学. 人民交通出版社, 377—406 页.
- [4] Hanson, H., 1989. Genesis —A generalized shoreline change numerical model. *J. C. R.* 5(1): 1—27.
- [5] Muir Wood, A.M. and C.A. Fleming, 1989. Coastal Hydraulics (2nd ed). The Macmillan Press LTD, London, pp. 128—159.

---

**SHORELINE CHANGE NUMERICAL SIMULATION AND EQUILIBRIUM SHORE-ARC ANALYSIS OF EMBAYED MUDDY COAST**

Qiu Jianli

(*Hangzhou University, 310028*)

ABSTRACT

Improvement of existing methods for simulating shoreline changes and analyzing shore-arcs are made by replacing some parameters in the littoral sand transport equations in order to use them for studying the shoreline forms and dynamics of embayed coasts. The effectiveness of the improved methods in predicting shoreline changes and comparing shore-arc configurations for the Yeyashan area, Zhoushan Island and Beilun area is shown, and the causes of shore-arc formation in the study areas are explained. Also, the results obtained in this paper provided important data on the shoreline evolutions for the local coastal engineering.