



废黄河口三角洲的北侧。岸滩物质以  $0.002-0.004\text{mm}$  的粉砂质粘土为主。矿物成分以伊利石为主 (占 65%), 绿泥石 (15%) 及高岭土 (15.4%) 次之, 表明了与黄河输出泥沙的一致性。岸滩及水下岸坡平缓。在沿岸纵深地带数公里至数十公里为滨海盐沼分布, 目前已大部开辟为盐田, 具有典型的平原开敞式淤泥质海岸特征。

众所周知, 本区淤泥岸滩的形成, 是 1128—1855 年间黄河夺淮在此入海的结果。大量黄河入海泥沙的不断堆积形成了以黄河入海口为中心的三角洲平原, 发育分布着宽阔的淤泥质岸滩。而自黄河入海口改道以后, 原来进入本区的大量黄河入海泥沙来源枯竭, 沿岸海洋动力对岸滩物质冲刷作用增强, 整个海岸由淤涨而转入侵蚀过程并延续至今。从历史海岸线的对比中所得出的岸线平均后退速度, 以废黄河口最为强烈, 1913—1975 年平均  $110\text{m/a}$ , 向连云港方向逐渐递减, 这与近岸波浪能量的沿岸分布相一致<sup>[1]</sup>, 反映了波浪作用是造成岸滩侵蚀的主要动力。

为了确保海岸免遭冲蚀, 防止海水入侵。近 30 多年来, 已不断在此进行了海岸防护工程的建设, 基本形成了以沿岸大堤为主体, 辅以堤外丁坝和离岸顺堤相结合的海岸防护工程格局 (图 2), 对稳定岸线起到了积极作用, 但亦存在不少问题。

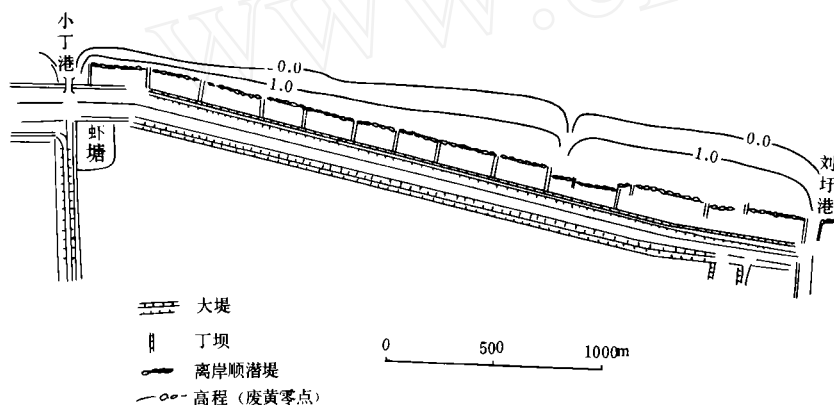


图 2 海岸防护工程平面布置

Fig. 2 Distribution of the coast protecting structures

(1) 海堤 50 年代始建的土质海堤绵延分布于整个海岸地区, 是该区主要的海岸防护建筑物, 堤底高程大致在大潮高潮位或以上部位, 它的存在保护了堤内滩地免遭海潮入侵, 保护了盐田。60 年代以来, 逐步以抛石、直立石护墙或浆砌块石护坡对海堤进行加固, 在局部险工段还在堤顶加造挡浪墙, 以防台风大潮时海浪越顶。

(2) 丁坝 60 年代始在小丁港岸段建造, 以后陆续又在其他岸段修建。丁坝与海堤垂直, 坝长约  $100\text{m}$ , 坝距  $200\text{m}$  左右, 均位于高潮滩部位。

(3) 离岸顺潜堤 70 年代开始, 该区又陆续修建了一些平行于海堤的抛石离岸潜堤, 潜堤位置一般在半潮位附近的中潮滩上部, 堤顶高在平均潮位以下。

## 2 开敞型淤泥质海岸的演变特征

正确认识淤泥质海岸的侵蚀过程及演变规律, 是科学地设计规划海岸防护工程的前提。

由于组成淤泥质海岸的物质是细颗粒的淤泥，在海水动力作用下，冲刷、悬浮和沉降等运动特性均与砂质海岸存在着本质的差异。海岸的动力地貌过程主要通过海滩物质的空间位移来实现的，因而在此基础上构成了与砂质海岸迥然不同的演变过程和地貌形态。从长期观测中发现<sup>[2]</sup>，淤泥质海岸的泥沙运动以悬移质运动为主，悬浮泥沙含量在破波带以内，主要是风浪的掀沙作用；在破波带以外则以强潮流作用为主。由风浪或潮流对海岸的冲蚀而造成的悬浮泥沙，其输移机制主要是潮流在沿岸方向和横向的平流和扩散<sup>[3]</sup>，因此输移范围相当广阔。例如长江口输出的泥沙，不仅可以进入杭州湾参与湾内淤泥岸滩的发育，而且可以继续南下影响浙东沿海港湾淤泥质海岸的地貌过程<sup>[4]</sup>。在苏北以风浪和强潮流为主的海水动力造成对废黄河口水下三角洲的冲蚀。悬沙的扩散范围，根据卫星相片的解译和沿岸观测，至少可以达距岸 10km 以外，悬沙的沿岸运移向北可达连云港附近。由此可见，淤泥质海岸的沿岸输移的空间范围，远远超过了由沿岸破波水流所引起的砂质海岸的沿岸输移范围。

淤泥质海岸的侵蚀与堆积，也是沿岸的不平衡输沙过程。由于淤泥质海岸的输沙空间范围要大大超过砂质海岸，后者的输沙动力主要由沿岸破波水流来完成，往往构成一横向狭窄，纵向距离也较短（韵律地貌即是例证）的封闭系统，只要改变入射波的方向与岸线间的交角，就能改变沿岸输沙状态和引起岸滩的冲淤变化；而前者一般具有宽阔的潮滩和下水岸坡，海岸及输沙的空间范围大，潮流是引起输沙的主要动力，因而沿岸输沙不可能是一个封闭系统，而将是一个横向范围十分宽阔，纵向距离很长的非封闭系统。因此要在淤泥质海岸，尤其是岸线平直开敞的淤泥质海岸上，试图通过某项工程措施，要像砂质海岸那样，在工程后的短期内得到明显的动力地貌响应，改变沿岸输沙状态，达到调整海岸剖面的堆积和侵蚀过程的目的，将是十分困难的。

根据对苏北淤泥质海岸多年来的观测研究，其海岸侵蚀过程，可以归纳为如下特点：（1）造成海岸侵蚀的主要动力是近岸波浪，由于滩地沉积物具有一定抗冲强度，加之潮流动力较弱，因此潮流对岸滩的冲蚀甚微。（2）被冲刷泥沙主要以悬移方式，随沿岸潮流运移扩散，范围甚广，横向上距岸可达 10km 以上，纵向上随潮向北至连云港附近的海州湾湾顶处。（3）整个岸段的输沙表现为净输出过程，被冲刷泥沙中的粘粒物质绝大部分被运移扩散，很少原地沉降，而造成较粗粉细砂残留而形成“粗化”沉积层，不整合地覆盖在下部粘土质淤泥层之上。（4）在持续的冲刷下，潮滩宽度不断变窄变陡，下水岸坡则不断拓宽变缓，岸滩剖面形态呈上凹曲线型。滩面平坦，很少潮沟发育，潮滩物质中的贝壳碎片在击岸浪推移作用下发育成贝壳堤堆积，在高潮线附近断续分布。

### 3 波浪冲蚀作用下淤泥质海岸剖面侵蚀演变模式

通过对江苏北部开敞型淤泥质海岸百余年来侵蚀过程的研究，建立潮水位变动状态下破浪对滩面冲蚀能力的计算模式，来复原淤泥质海滩剖面的侵蚀过程，从而给出冲刷极限平衡剖面，这个结果可以作为该地区护岸工程规划设计的依据。

#### 3.1 破浪冲蚀率的横向分布

淤泥质海滩坡度极其平缓，破碎波基本属崩波型，崩破波在破波区内连续破碎，波高

逐渐衰减,破波水流呈准稳定状<sup>[5]</sup>。在目前尚无法给出破碎波速度场或近底紊动的精确解析解的情况下,可近似地采用线性波理论来描述崩破波的底部切应力过程。连云港地区破波带内波高衰减为:

$$H^{5/2} = 0.445h_b^{3/2} - 0.348h_b^{-0.1}(h_b^{2.6} - h^{2.6}) \dots \quad (3-1)$$

式中  $H$ ——波高;  $h$ ——水深;  $h_b$ ——临界破波水深。

据线性波理论,将上式代入

$$\begin{aligned} U_{*o} &= \sqrt{\frac{fw}{2}} U_{\max} \\ &= \sqrt{\frac{fw}{2}} \frac{\pi H}{\tau \operatorname{sh}(kh)} \dots \end{aligned} \quad (3-2)$$

得到破波带内波浪底切力峰值  $U_{*o}$  的分布。

式中  $fw$ ——底摩擦系数;  $\tau$ ——波周期;  $k$ ——波数。

由于破波带的范围和位置随着来波波高的随机变化及潮水位升降变动发生相应的变化,因此海滩上不同部位的破波底切力变化过程是不同的,考虑这一因素,经适当运算,得

$$U_{*o} = a + b \cos \frac{\pi}{T} t \quad (3-3)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{fw}{2}} \frac{\pi \cdot H_b}{\tau \operatorname{sh}(kh_b)} + k' \left(1 - \frac{\delta_x}{h_b}\right) - b \\ b &= \frac{k' m}{2h_b} \quad k' = - (0.022 + 0.015H_{1/10}) \end{aligned}$$

式中  $\delta$ ——岸滩坡比;  $m$ ——平均潮差;  $H_{1/10}$ ——大西山海洋站波高;  $T$ ——1/2的全潮时。

对于均匀粘性底层的冲蚀率与水流切应力之间的关系,可用下式计算

$$\frac{dE}{dt} = M \left\{ \left( \frac{U_*}{U_{*c}} \right)^2 - 1 \right\} \dots \quad (3-4)$$

式中  $E$ ——单位面积上的冲蚀率 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $M$ ——淤泥冲刷系数 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ); 它与粘性泥沙性状有关;  $U_{*c}$ ——泥沙临界起动切速;  $U_*$ ——底切速。

以  $U_{*o}$  代替  $U_*$ ,  $\Delta t = \left(1 - \frac{U_{*c}}{U_{*o}}\right) \tau$ , 近似地代表波周期内  $U_*$  大于  $U_{*c}$  的历时, 则单位时间内的破波冲蚀率为:

$$E = M \left\{ \left( \frac{U_{*o}}{U_{*c}} \right)^2 - 1 \right\} \left(1 - \frac{U_{*c}}{U_{*o}}\right) \quad (3-5)$$

这样, 半潮周期内破波对滩面淤泥的冲蚀率可以表示为:

$$E = \int_{\alpha}^{\beta} M \left\{ \left( \frac{U_{*o}}{U_{*c}} \right)^2 - 1 \right\} \left(1 - \frac{U_{*c}}{U_{*o}}\right) dt \quad (3-6)$$

积分限  $\alpha$  和  $\beta$  分别代表半潮周期内冲蚀历时的初始时刻与终止时刻, 它们除与破波波高  $H_b$  及离岸距  $\chi$  有关外, 还取决于泥沙临界起动切速  $U_{*c}$ 。(3-6) 式即为潮水位变动状态下淤泥海滩剖面上破波冲蚀率分布的表达式, 其中  $U_{*c}$  由 (3-3) 式给出。对粘性泥沙  $U_{*c}$ , 通过室内试验求得, 据文献[6], 当淤泥容重从 1.05 增至 1.50 时, 相应  $U_{*c}$  由 0.49cm/s 增至

5.33cm/s。取  $U_{*c}$  从 2—5cm/s 间各值分别计算，在连云港  $T=6.25$  小时下，得全潮周期里各不同波高破碎波冲刷率的横向分布（图 3）。由图可知海滩受蚀状态特征：（1）海滩冲蚀量及受蚀范围随波高的增大而增大，同时最大冲蚀点向外海方向移动；（2）不同波高下冲蚀量之间的变幅，由潮间带向潮下带增大。对于大波来说，潮下带部分的冲刷明显于高潮水位岸线的后退；（3）冲蚀量随海滩淤泥的抗冲强度（ $U_{*c}$ ）的增大而减小，当  $U_{*c}$  增至 5cm/s 时，1m 波高以下的波浪对海滩的冲蚀几乎为 0，海滩的冲蚀，遂取决于中、大波浪作用。

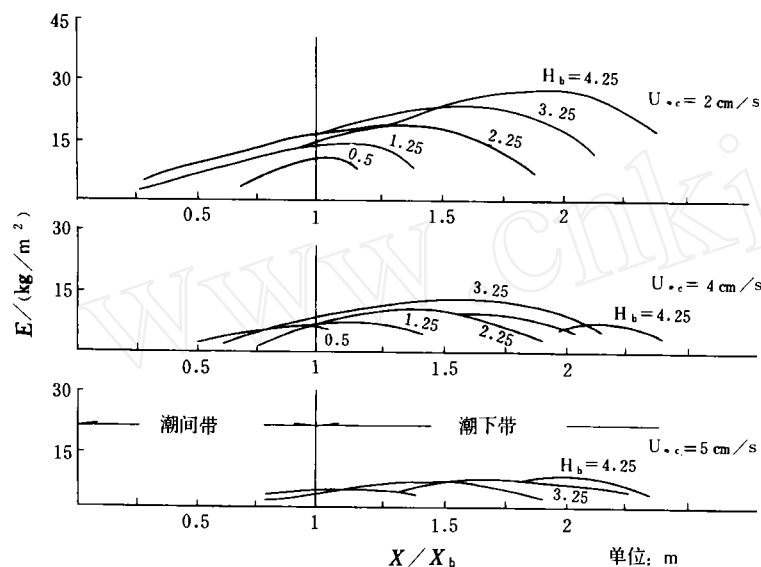


图 3 不同波高破碎波冲蚀率的横向分布图

Fig. 3 Lateral distribution of wave erosion rate on flat

### 3.2 淤泥质海岸剖面的侵蚀演变模式

(3-6) 式中  $E$  值是随波高而变化的随机变量，由于长时间内海滩淤泥冲蚀量  $E$  的数学期望值  $\bar{E}$  作为波浪冲蚀强度  $\epsilon$  的指标，即：

$$\epsilon = \bar{E} = \int_0^{\infty} E(H)P(H)dH \quad (3-7)$$

式中  $P(H)$  ——波高的概率密度函数。

$\epsilon$  在海滩剖面上的分布，给出了在不同大小波浪的综合作用下海滩剖面的平均状态。

平原型淤泥质海岸在侵蚀后退过程中，若无障壁或海湾形成，其自然演变过程将逐渐具有砂质海岸性质。因此淤泥质海岸的不同侵蚀阶段，其滩面物质的抗冲强度将在滩面物质的不断“粗化”过程中发生变化，冲蚀强度  $\epsilon$  在海滩侵蚀过程中不再是恒量。“粗化层”形成使  $U_{*c}$  增大，一些小波浪的冲刷作用几乎为 0，因此在建立海滩侵蚀剖面模式时，随着海滩侵蚀过程的不断进行，应逐渐将次一级的小波浪的冲刷作用剔除，冲刷强度在逐步由更大一级以上波浪所确定，冲蚀强度  $\epsilon$  为时间的函数，据 (3-7) 式得出淤泥质海岸侵蚀海滩演变模式为：

$$\epsilon = \bar{E}(t) \int_{f(t)}^{H_{\max}} E(H_c) p_t(H_c) dH_c \quad (3-8)$$

式中  $P_i(H_e)$  为能造成海滩冲蚀波浪的波高  $H_e$  的概率密度函数,  $H_e = [f(t), H_{\max}]$ ,  $H_{\max}$ ——最大波高值,  $f(t)$ —— $H_e$  的下限函数。

若以全潮历时为时间单元, 由 (3-6) 式得出:

$$\varepsilon = E(t) = \varepsilon M \int_{f(t)}^{H_{\max}} \int_a^b \left\{ \left( \frac{U_{*o}}{U_{*c}} \right)^2 - 1 \right\} \left( 1 - \frac{U_{*c}}{U_{*o}} \right) \cdot p_i(H_e) \cdot d_i \cdot dH_e \quad (3-9)$$

离散求解上式, 取本区连云港大西山海洋站 1961—1973 年实测波高的分布值, 计算得  $\varepsilon$  值分布, 据  $\varepsilon$  分布, 得到侵蚀海滩演变过程模式 (图 4)。从中可以看到概化后的剖面变化特征, 从形态上表现为整个剖面呈上凹曲线。曲率最大处即凹点处位于平均低潮位以下, 侵蚀过程由 1 到 8 剖面, 表现为凹点内移, 凹点向岸剖面变陡变窄, 凹点向下剖面展平拓宽。据计算, 演变历时不断增加, 若以剖面 1 为 1 个时间单元, 则由剖面 7 至 8 的演变历时高 3 140 个时间单元。当海滩侵蚀到剖面 8 时, 本区海滩达侵蚀平衡阶段, 此时凹点处于本区海图—3m—4m 水深处。

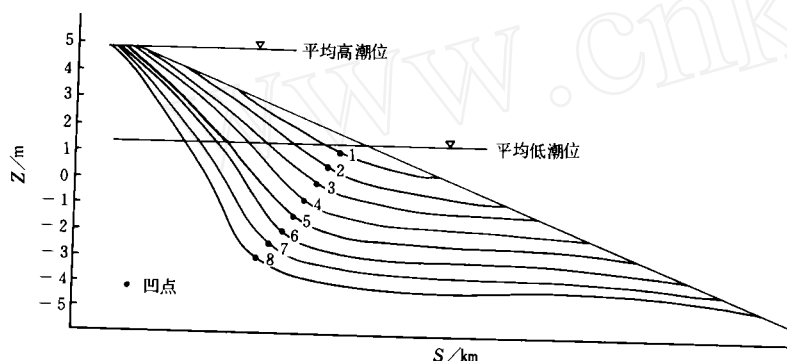


图 4 海滩侵蚀过程演变模式图

Fig. 4 Erosion model of beach profile

### 3.3 研究实例

废黄河口—连云港扒山头之间岸段已经历了百余年来的冲刷过程。以位于灌河口—烧香河口之间的刘圩港和小洼港实测剖面为代表, 从 1962 年以来 30 年的海滩侵蚀过程仍十分明显 (图 5)。在小洼港岸段, 0m 水深线向岸移动了 1 200m, 年均 43m。海滩剖面呈明显上凹曲线, 存在凹点, 凹点以上 (包括潮滩) 明显变窄变陡, 滩坡从 1/295 变为 1/150; 凹点以下滩坡变缓拓宽, 由原来的 1/1 470 展缓为 1/1 580。海滩侵蚀量在凹点以上的近岸部分明显大于凹点以下的远岸部分, 低潮滩 (以平均低潮位线+1.28m 为代表) 下蚀了 2.1m, 而在 -5m 处下蚀仅 0.3m。这些变化与模式显示结果基本一致, 说明侵蚀过程尚在继续, 但速度将减慢。

连云港东西连岛大路口北侧的海滩剖面则代表了达到冲刷极限平衡状态的剖面特征 (图 6)。图示在近 30 年来实测断面的冲淤变幅在 20cm 以内, 剖面形态上反映的上凹曲线, 凹点以上滩坡为 1/60—1/120, 凹点以下则展缓为 1/1 250, 凹点在 -3m—-3.5m 处, 与模式中所显示的侵蚀平衡剖面形态具有良好的对应性。

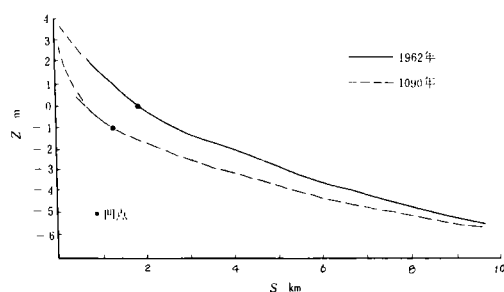


图 5 小洼港海滩侵蚀剖面图  
Fig. 5 Erosion shape of  
the cross sections at Xiaowagang

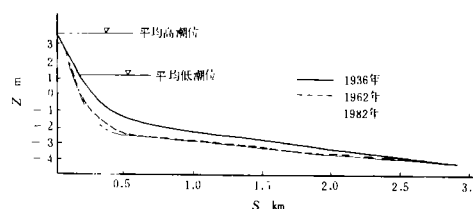


图 6 东西连岛大路口平衡海滩剖面图  
Fig. 6 Equilibrium shape of  
the cross sections at Dalukou

#### 4 讨论和建议

从实际观测和模式分析,表明本区尚处在海岸侵蚀过程的继续阶段,岸滩剖面远未达到侵蚀平衡状态,而淤泥质海岸沿岸输沙状态的改变是引起海岸侵蚀的主要原因。因此要防止海岸侵蚀的继续,必需要使沿岸破浪对岸滩泥沙的冲蚀作用不断地削弱并接近于 0。由于淤泥质海岸的沿岸输沙范围远大于砂质海岸,因此难以概化成二维问题处理。本地区海岸,在目前自然状态下要使海岸剖面由侵蚀趋向稳定,还需要经过相当长的时间。从发育模式上讲,目前的岸滩剖面凹点所在,仍未达到稳定而仍处于侵蚀状态,岸线继续向岸方向移动,水下岸坡还在刷深和拓宽。因此要从整个侵蚀岸滩剖面上采用人工措施来抑制岸滩侵蚀和沿岸输沙的强度是十分困难的。从目前的技术经济水平出发,只能在潮间带滩地的近岸或陆上部分实施工程防护,从一定意义上讲,只能是消极的、被动式的防护。因此对本区海岸工程体系进行规划时,一定要严格地按照本区海岸侵蚀的自然演变规律,对现有工程体系的防护效应和经济合理性进行全面的检讨总结。

目前本区的海岸防护工程体系以海堤为主,辅以丁坝和离岸顺潜堤。原先仅以挡潮为目的而建造的海堤,虽已普遍对土堤堤身进行了加固,在堤外作块石护坡或直立墙保护,但仍不能适应因堤外海滩内移而引起大潮汛时波浪直接对堤身的冲击,尤其在台风季节,险情时有发生,其原因除堤外丁坝和离岸堤工程不能有效地抑制波浪对海滩的冲蚀作用外,海堤本身护坡十分单薄,在工程结构上尚不具有防浪功能也是重要原因。以保护堤外海滩和促淤为目的而建的丁坝和离岸顺潜堤,由于脱离了淤泥质海岸泥沙运动的客观规律,效果不显。此外,波浪入射到丁坝附近,由于经过宽阔的水下岸坡和浅滩后,入射波几乎都成为正向来波行近丁坝,很少产生折射和绕射,亦不能改变泥沙运动的方向和强度。实际观测表明,在丁坝修建以后,丁坝坝囊内泥沙堆积不甚明显,起不到拦截泥沙的作用,其效果不理想是显而易见的。至于离岸顺潜堤修建以后,对于消浪和减少堤内冲蚀作用无疑是有利的。但由于目前离岸顺潜堤修建在距大堤仅百余米的海滩上,并不能抑制堤外滩地及水下岸坡的侵蚀,对侵蚀平衡剖面所面临的问题依然存在。由于潜堤堤身结构单薄,防浪

效果差,当波浪首先在潜堤受阻止破碎,加大了对堤身的冲击,也加速了对堤外滩面的冲刷。潜堤内外滩面高程差在 1m 以上,造成潜堤外坡失稳,堤身下滑。因此,要使潜堤具备消浪能力还必须提高离岸潜堤的抗浪标准。每年必须投入大量石方不断进行加固,实际上相当于在现大堤以外的海滩上再增加一条海堤工程,且其抗浪标准肯定高于现海堤。综上所述,目前在海堤外增加潜堤的做法,在防护效果上并不显著,经济上造成过量投入,无疑是不合理的。因此,在考虑海岸防护工程体系时,应重点加强海堤本身的防浪措施,切不可照搬砂质海岸及其他地区的经验,应根据淤泥质海岸的侵蚀演变规律,因地制宜,不盲目投入。

今后,根据海岸剖面侵蚀演变模式,应进一步加强工程条件下岸滩侵蚀过程的观测工作,预测不同岸段的侵蚀演变趋势。并在此基础上,针对不同岸段侵蚀演变的不同阶段,对现有海岸防护工程体系进行合理调整,以提高工程防护效果。

### 参 考 文 献

- 1 虞志英,金镠,陈德昌. 江苏北部 1=おけう旧黄河三角洲の侵蚀过程. 地形(日), 1986, 7(4): 245—255.
- 2 张勇,金镠. 淤泥质海滩悬沙回归模型的建立及其应用. 泥沙研究, 1987(1): 22—24.
- 3 虞志英,陈德昌,金镠. 连云港地区泥沙运移和冲淤趋势. 见:中国海洋湖沼学会编辑. 第二次中国海洋湖沼科学论文集. 北京:科学出版社, 1983. 241—253.
- 4 恽才兴,蔡孟裔. 利用卫星像片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题. 海洋与湖沼, 1981, 12(5): 391—401.
- 5 Yu Zhiying, Zhang Yong, Jin Lin. The hydrodynamical characteristics of nearshore water and the discharging process of mud flats. Chan. J. Oceanol. Limnol. 19875(2): 97—103.
- 6 黄建维. 连云港泥沙冲刷特性试验研究兼论粘性泥沙冲刷特性. 见:交通部工管司,连云港建港指挥部编辑. 连云港回淤文集. 南京:河海大学出版社, 1990. 125—132.

### 作 者 简 介

虞志英 1935 年生,1957 年毕业于华东师范大学地理系,现任华东师范大学河口海岸研究所教授。长期从事海岸工程条件下海岸动力沉积和动力地貌学的研究,在国内外刊物上发表有“淤泥质海岸水动力特征及人工吹泥条件下的岸滩演变”等论文 20 余篇,专著《淤泥质海岸工程建设对水下岸坡及环境影响预测和对策研究》等 4 部。

## THE EROSION PROCESS OF OPEN MUD BEACH AND ITS PROTECTION ALONG THE COAST OF NORTHERN JIANGSU

Yu Zhiying      Zhang Yong

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

Jin Liu

*(Headquarters of Lianyungang Port Construction, 222042)*

**Key words** North Jiangsu, mud coast, erosion process, coast protecting structure

### Abstract

A quantitative understanding of the pattern of coastal change is an essential prerequisite for the reasonable design of coastal engineering projects. Such an understanding is of course based on the correct recognition of physical background of the coast. Mud beach has its unique morphological feature and changing pattern, which differs from sandy coast. This paper, taking the mud beach as a studying object and putting emphasis on the dynamical background and changing pattern of the present coastal process, establishes a development model of coast erosion under natural conditions and engineering conditions and shows the theoretical maximum erosion profile. This model is proved by practical erosion profile in the Northern Jiangsu coast. The achievement of this study provides a scientific basis for the engineering protection of erosive mud beach and gives an example for establishing the theory of equilibrium profile in mud beach.