

# 潮汐通道外泄水流喷射扩散对 拦门沙形成的作用

田向平

(地理学系)

## 摘 要

本文从射流的角度探讨了水东泻湖海湾潮汐通道外泄水流的扩散运动,根据实测流速资料推求射流流速的沿程变化,提出该泻湖海湾的射流扩散模式,以射流的动力体系阐述了拦门沙的物质组成、沉积结构和其形成过程,并预测了将来在拦门沙上进行工程治理后的射流扩散变化和拦门沙位置的变动,以及治理工程成功与否的可行性判断。

**关键词** 潮汐通道,外泄水流,射流扩散,射流模式,拦门沙,水东泻湖湾

沿海地区分布着许多泻湖湾,它们的共同之处是存在着狭窄的通道和外海相连,以使湾内水体能与外海水体交换。一般而言,通道口的水深良好,可满足深水船舶通航要求,然而,在通道向海末端存在拦门沙堆积体,水深很浅,阻碍着船舶的进出,所以,湾内港口建设的首要问题是治理拦门沙,这也是进一步开发利用海湾的关键。为了作出在拦门沙区开挖航道的可行性判断,必须研究拦门沙形成原因,其中重要的是水流运动特性对拦门沙形成的作用,本文即试图从潮汐通道外泄水流喷射扩散的角度来探讨这一问题。

## 1 水东泻湖水文概况

水东泻湖湾位于广东省西部电白县境内,面积约 $32\text{km}^2$ ,湾口有一条宽达400m,深度大于5m的潮汐通道与外海相通(见图1),通道口门附近几公里水深均在10m以上,适宜兴建万吨级深水泊位码头,但通道末端的拦门沙堆积体最浅水深仅1.9

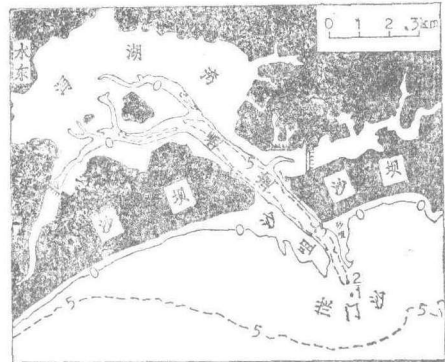


图1 水东泻湖湾示意图

Fig. 1 Geography of the Shuidong lagoon

本文1990年3月1日收到

\*本文根据地理学系海岸河口研究室在水东泻湖湾进行工作所收集的有关资料写成

m, 水深小于 5 m 的长度约为 2 km, 乃船舶进出港湾的一大障碍。

水东港湾的潮汐性质属不正规半日潮, 潮汐日不等现象显著, 其平均潮差 1.75m, 实测最大潮差 4.09m, 小潮纳潮量为 3752 万 m<sup>3</sup>, 大潮纳潮量为 5914 万 m<sup>3</sup>。由于集水面积小(约 180 km<sup>2</sup>), 湾内无大河注入, 除暴雨时有较多径流注入外, 平时径流对港湾的影响甚微, 实测湾口盐度, 夏季为 19~25‰, 冬季为 30~32‰, 因此, 本港湾基本上受潮汐动力所控制。通道口外的滨岸地带主要由波浪动力所控制, 1984 年实测年平均波高为 0.68m, 平均周期为 3.4 秒, 常浪向为 SE(频率 37.9%), 其次为 SSE(频率 18%), 而每年 5~9 月, 则以 S、SSW 和 SW 向浪为主(这 3 个浪向所占频率 26.5%)。

由于受地形影响, 水东港湾的潮波具有驻波性质, 潮流一般在高潮位和低潮位时憩流, 而流速峰值出现在中潮位附近, 实测潮汐通道涨、落潮最大流速分别为 1.20 m/s 和 1.44 m/s, 流速呈不对称性分布, 落潮期平均流速大于涨潮期平均流速, 落潮历时则小于涨潮历时。

## 2 通道外泄水流湍流喷射扩散模式

由于沿岸海水随潮汐的涨落进出港湾, 而注入湾内的淡水甚少, 因此水体的密度差异甚微, 可作为均质水体看待。对于均质水体, 水流的喷射型式取决于惯性力与粘滞力之比, 以雷诺数表示<sup>[1]</sup>:

$$R = \frac{u_0 [h_0 (b_0/2)]^{1/2}}{\nu} \quad (1)$$

式中,  $u_0$  是射流口的平均流速;  $h_0$  和  $b_0$  分别是射流口的深度和宽度;  $\nu$  是水体运动粘滞系数。据 Pearce(1966)<sup>[2]</sup> 研究, 当  $R > 3000$  时, 水流射流为完全湍流喷射。水东潮汐通道口中潮位时的平均水深为 10.27m, 宽度为 425m, 平均流速 1.04m/s, 取  $\nu$  为  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, 把这些数据代入(1)式, 得  $R$  为  $4.86 \times 10^7$ , 这一数值远远大于 3000, 可见水东潮汐通道的外泄水流为完全湍流喷射扩散。

水东潮汐通道口外两侧发育着沙咀, 其对水流的扩散有较大的阻碍作用, 尤其在落潮近中潮位后, 由此把该潮汐通道水流射流扩散模式概化为两区: 第一区邻接通道口, 水深较大, 水流可发生垂向及横向的射流扩散, 所以考虑这一区的水流喷射性质主要为轴向射流; 第二区位于拦门沙地区, 水面宽广, 水深较浅, 由于底部的摩擦影响, 垂向射流扩散受阻, 认为该区主要是横向的射流扩散。

根据射流理论, 在第一区长度( $X_e$ )的范围内, 轴线流速是恒定的, 而第二区的轴线流速随距离的增加而减小。若不考虑摩擦作用, 在平面射流的情况下, 据 Wright(1974)研究, 轴线流速  $u_{\max}$  与射流口处流速  $u_0$  有如下的关系<sup>[1]</sup>:

$$\frac{u_{\max}}{u_0} = \frac{b_0/2}{\epsilon I x} \quad (2)$$

式中,  $I$  是截面流速分布相似函数的积分;  $x$  是距射流口的距离;  $\epsilon$  是射流扩散率;

$$\epsilon = \frac{d(b/2)}{dx} \quad (3)$$

对于完全湍流喷射扩散,  $\epsilon$  和  $I$  为固定值, 分别为 0.22 和 0.316<sup>[1]</sup>。

在第一区与第二区的交界点上,  $u_{\max}$  等于  $u_0$ , 因此, 第一区长度( $x_e$ )为:

$$X_e = \frac{b_0}{2\varepsilon I} \quad (4)$$

当忽略射流与周围水体的摩擦而仅考虑床底摩擦时, 距射流口  $x$  处的垂线平均流速  $\bar{u}$  与  $u_0$  有如下关系<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = \exp[-k(x/\bar{h})] \quad (5)$$

式中,  $\bar{h}$  是射流口至  $x$  区间内的平均深度;  $k$  是谢才系数的函数;

$$k = g/c^2 \quad (6)$$

式中,  $c$  是谢才系数;  $g$  是重力加速度. 按曼宁公式:

$$c = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (7)$$

式中,  $n$  是糙率;  $R$  是水力半径. 对于本港湾而言, 在区间  $x$  内,  $R$  可以  $\bar{h}$  代换, 由此, (5)式可写为:

$$\bar{u} = u_0 \exp[-gn^2 x / \bar{h}^{4/3}] \quad (8)$$

根据水东潮汐通道的床底情况, 取糙率  $n$  为 0.025. 按 (8) 式以通道口 (3 站) 的流速对通道口外测流站 (1 站和 2 站) 落潮中潮位时的垂线平均流速进行验证计算, 如表 1 所见, 计算值与实测值近于一致, 可见 (8) 式符合水东港的实际情况.

表 1 计算流速(m/s)与实测流速比较

Tab.1 Contrast between the velocities(m/s) observed and velocities calculated using Equation(8)

3 站		2 站		1 站	
实测	计算	实测	计算	实测	计算
1.34	0.80	0.85	0.69	0.71	
1.43	0.90	0.88	0.72	0.72	
1.09	0.61	0.65	0.53	0.51	

当考虑到流速因床底摩擦作用而沿程衰减时, 则 (4) 式改写为:

$$X_e = \frac{b_0}{2\varepsilon I} \exp(-gn^2 x / \bar{h}^{4/3}) \quad (9)$$

经过试算, 得到中潮位时第一区水流轴向射流长度  $X_e$  为 1945m.

假定没有横向拖拽 (这种情况是存在的, 但在考虑射流扩散宽度时, 可忽略其影响), 即设某一时刻通过射流口的流量沿程不变, 因而流速的衰减必导致横向的扩散:

$$b_0 h_0 u_0 = b h \bar{u} \quad (10)$$

由此, 水流横向扩散宽度为:

$$b = \frac{b_0 h_0}{h} \exp(gn^2 x / \bar{h}^{4/3}) \quad (11)$$

式中,  $b$  和  $h$  分别为距射流口  $x$  处的射流扩散宽度和截面平均水深. 将第一区射流长度  $X_e$

代入(11)式, 计算得Xc 处的射流扩散宽度 bc 为1003m.

目前拦门沙顶位于射流口外3020m, 由于拦门沙地区水浅, 床底的摩擦阻力较大, 因而取糙率 n 为0.03, 计算得此处射流扩散宽度为3108m. 依据上述数据绘制的水东潮汐通道外泄水流湍流喷射扩散模式概图见图 2.

### 3 射流扩散对拦门沙形成的作用

拦门沙坝的形成与水流的扩散型式密切相关, 例如, 若为轴向射流扩散, 则能量集中, 水流挟带泥沙的能力较强, 泥沙不易沉积, 因而水深较大; 如果是横向射流扩散, 则水流能量分散, 有利于泥沙的沉积, 使拦门沙坝得以发育.

从图 2 可以看出, 水东港通道口下泄喷射流的动力状况基本与地形相符, 如第一区的轴向射流发生在通道外侧深槽区, 其与第二区的交界处恰好是深槽向海的前端位置, 第一区两侧的扩散边界发育着沙咀, 它们从口门向海延伸, 但延伸的长度不超出第一区. 在第二区, 由于水流发生横向射流扩散, 挟沙能力降低, 造成泥沙沉积, 形成拦门沙坝. 作为横向射流的结果, 第二区的喷射水流主要从目前拦门沙区的东、南、西 3 个缺口注入外海. 按(8)式对拦门沙顶流速进行推算, 得到坝顶落潮最大垂线平均流速为38cm/s, 落潮期垂线平均流速为27cm/s.

依据沙玉清泥沙止动流速公式<sup>[3]</sup>, 计算得水东港拦门沙坝细沙的止动流速为37cm/s. 由于落潮平均流速远低于泥沙止动流速, 泥沙被喷射水流挟带到拦门沙地区时, 就逐渐沉降下来.

根据拦门沙地质钻孔资料分析, 标高-6m以下是基岩风化壳, 在风化层上依附约1m厚的粘土和沙质粘土等残留古泻湖沉积物, <sup>14</sup>C测年为17000~6800年前. 再上即由中粗沙、细沙和沙质淤泥组成的拦门沙松散堆积物, 厚3~5m, 测年资料分析得知, 它们是近6千年来发育形成的. 这些松散堆积物的粒度分布在垂直方向自下而上由细变粗(沙质淤泥→中粗沙); 从陆向海的水平方向上, 则由粗到细变化(中粗沙→沙质淤泥), 表示它们是一套海退沉积物. 拦门沙顶部则是厚约1m的细沙层, 为现代沿岸漂沙物质.

水东港拦门沙的这种沉积物组成和结构特点与泻湖湾通道外泄水流的射流动力体系是相吻合的, 由于射流水流与边界水体的掺混和拖拽作用, 使边界水体发生伴随流动, 同时, 亦有部分边界水体加入到射流水体中, 为了维持水流的连续性, 必须有其他水体来补偿, 因而周围水体流向射流区, 由此, 周围水体中的泥沙亦被挟带到射流区, 加上波

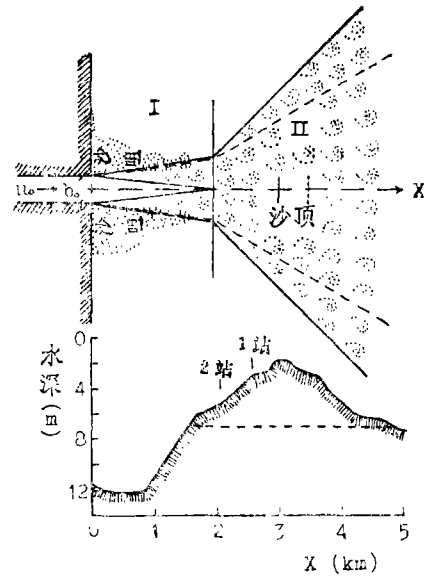


图 2 水东潮汐通道泄流喷射扩散模式概图  
Fig. 2 Sketch of outflow jet diffusion model in the Shuidong tidal inlet

浪作用下的沿岸漂沙从两侧向射流区运动, 其一部分泥沙沉积在轴向射流区两侧边界形成沙咀, 一部分泥沙则被喷射水流挟带到拦门沙地区, 在这里, 水流流速低于泥沙的止动流速, 泥沙由粗到细逐渐发生沉降, 泥沙的不断堆积最终形成拦门沙坝。而沙咀的形成、发展, 其不断地向海延伸, 使得潮汐通道口亦向海移动, 据研究, 约6000~2000年前, 水东潮汐通道口位置曾由陆向海外移<sup>[4]</sup>, 则射流区域亦曾逐渐向海迁移, 致使拦门沙整体向海移动, 故拦门沙松散堆积体具有海退型式的沉积物组成和结构特点。

#### 4 拦门沙航道开挖后的变化预测

水东港万吨级泊位的兴建, 依照船舶通航要求, 第一期须在拦门沙地区开辟一条深达-7m, 宽200m(边坡120m)的航道以便船舶乘潮进出。当航道开挖后, 射流模式、拦门沙地区的水流运动和拦门沙位置的变化趋势, 以及工程效果如何?

当开挖航道后, 计算得轴向射流区长度 $X_e'$ 为1952m, 宽度 $b_e'$ 为971m。考虑到拦门沙顶物质主要为细沙, 而细沙物质又是在目前的水动力条件下沉积在拦门沙地区, 由此, 新的拦门沙区也将形成于与目前水动力条件相同的地方, 如以目前拦门沙顶落潮期垂线平均流速27m/s作为新拦门沙顶所应具有的条件, 则新的拦门沙顶将出现在通道口外3489m, 相应的扩散宽度为2738m。航道开挖后的通道泄流喷射扩散模式概图见图2(虚线)。

如图2所见, 航道开挖后, 轴向射流区的平均水深略有增大, 所以其射流长度亦略为增长, 而宽度则稍微缩窄, 说明加强了轴向射流, 但总的来说, 第一区所受的影响甚小。受航道开挖影响最大处位于原拦门沙区, 由于水深显著增大, 床底的摩擦阻力也大为减小, 因而横向射流减弱, 轴向射流加强, 扩散宽度亦随之缩窄, 由此, 流速将增大, 在原拦门沙顶处, 计算得开挖航道后的落潮最大垂线平均流速为47cm/s, 落潮期垂线平均流速为34cm/s, 分别比开挖航道前增大9cm/s和7cm/s(即分别增大约24%和26%), 以致细沙在原拦门沙顶处难以沉积, 而被水流挟带到更远一些的地方, 所以新的拦门沙顶将出现在原拦门沙顶外469m处, 在这里, 周围水深较原拦门沙顶处大, 泥沙淤积加厚则较缓慢。由于从湾内带来的泥沙少, 所以拦门沙淤积的速率主要取决于沿岸漂沙量, 但水东港的沿岸漂沙量不算大, 年净漂沙量仅为18.2万 $m^3$ , 而且主要为潮流转运到拦门沙地区。如上所述, 由于拦门沙航道开挖后增大了第二区轴向射流强度, 即加强了水流挟带搬运泥沙的能力, 加之漂沙量小, 所以航道开挖后的泥沙回淤速率也较低, 因此, 水东港拦门沙航道的开挖是可以取得成效的。

但应指出, 航道开挖后若不再疏浚, 听其自然发展, 则由于第一区的射流动力变化甚微, 拦门沙有可能逐渐恢复成原来的状况, 所以, 定期进行疏浚以维持航道开挖后的射流区水流动力强度和航道水深是必要的, 如有可能, 于第一区修筑某种合适的工程用以增加该区射流动力强度和阻碍沿岸漂沙进入射流区将有利于拦门沙地区泥沙回淤状况的改善。

#### 5 结 语

本文提出的泻湖湾潮汐通道外泄水流湍流喷射扩散模式, 与水东港通道口外的水流动力和水下地形的实际状况是比较相符的, 当然文中提出的航道开挖预测还有待于以后

航道试挖实践的检验。这种方法对于探讨泻湖湾潮汐通道的拦门沙坝的形成及其航道开挖可行性分析仅是一个尝试。推而广之,江河水体流入大海也是一种水流射流型式,因此,上述模式亦可用于分析河口地区拦门沙坝的形成演变和治理。

### 参 考 文 献

- [1] Wright L D et al., *Journal of Geology*, 82 (1974), 751~778
- [2] Pearce A F, Critical Reynolds number for fully—developed turbulence in circular submerged water jets: nat. mach. Eng. Research Inst., Council Sci. and Indus. Research (Pretoria, South africa), CSIR Rept. MEG 475, 1966
- [3] 沙玉清,泥沙运动学引论,中国工业出版社,1965,172~176
- [4] 李春初等,科学通报,1986,20

## The Effect of Outflow Jet on the Formation of Entrance Bar in Tidal Inlet

Tian Xiangping\*

### Abstract

The tidal inlet of the Shuidong lagoon is deep and navigable, however, there is a entrance bar which hinders shipping because of the shallow water depth. On the basis of jet, this paper deals with the diffusion of outflow and jet velocity variation with the distance seaward and suggests the jet diffusion model in the Shuidong lagoon. It is expounded that sediment component and structure of the entrance bar as well as its evolution responded well to jet dynamic system. Changes of the jet diffusion and the entrance bar situation and possibility in project are estimated when the entrance bar is to be harnessed with project in the near future.

**Keywords** tidal inlet, outflow, jet diffusion, jet model, entrance bar, Shuidong lagoon

---

\*Department of Geography