

东海沿岸潮汐汉道的 P-A 关系

高 抒

(国家海洋局第二海洋研究所)

提要 O'Brien 方法广泛应用于砂质海岸潮汐汉道的 P-A 关系研究。本文运用该方法求得东海沿岸 11 个潮汐汉道的 P-A 关系为: $A = 2.55 \times 10^{-4} P^{0.92}$, $\lg A$ 与 $\lg P$ 之间的线性相关系数为 0.97。此结果的分析表明, 东海沿岸潮汐汉道已接近于动态平衡; 在细粒沉积物为主要物源的浙闽强潮基岩海岸, O'Brien 方法也是适用的。

潮汐汉道的内海湾纳潮量 P 与口门断面面积 A 之间的密切关系, 早在本世纪初就有所认识。目前常见的 P-A 关系的经典形式为 O'Brien 于 1931 年所提出^[1]: $A = cp^n$ 。式中, c 和 n 为常数, 均用相关分析法求得。此式是根据美国西部砂质海岸潮汐汉道的统计, 并被作为砂质岸汉道的稳定性判据之一。几十年来, O'Brien 的经典形式得到了广泛的应用。例如, Jarrett 统计了美国东、西部砂质海岸的 100 多个汉道, 得到了与 O'Brien 公式相类似的结果, 但他又发现在不同的区域, 常数 c 和 n 的值存在着差异, 在人工建筑物(如突堤)干扰下, c 和 n 的值也会略有变化^[4]。Shigemura 曾将经典方法推广到日本基岩海岸, 他根据形态指标 A/S 把潮汐汉道分为若干组, 然后对每一组作相关分析, 得到了相关性很好的经验公式, 因此认为经典形式在基岩海岸也是适用的^[5]。另一方面, 也有部分学者对经典 P-A 关系作为汉道稳定性的判据持异议。Bruun 指出, 研究汉道稳定性的正确途径是考虑使汉道开敞和封闭的自然力的对比, 口门断面面积的大小不只是受纳潮量的控制, 还受沉积物来量及其运动的影响^[6]。本文将以东海沿岸潮汐汉道为例, 分析经典 P-A 关系的适用性和局限性。

一、概 况

东海沿岸主要潮汐汉道的分布如图 1 所示。它们属于地质成因的强潮基岩海岸的潮汐汉道。在晚古生代至中生代早期, 浙闽沿海地

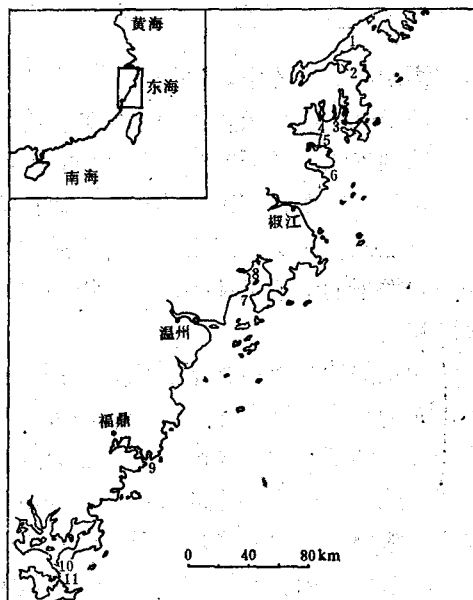


图 1 东海沿岸潮汐汉道的分布

1. 象山港; 2. 西沪港; 3. 岳井港; 4. 胡陈港; 5. 健跳港;
6. 浦坝港; 7. 乐清湾; 8. 清江; 9. 沙埕港;
10. 三都澳; 11. 罗源湾

Fig. 1 Distribution of tidal inlets along the coast of the East China Sea

区属于海西印支地槽褶皱带^[1], 中生代中期隆起为陆, 继而进入燕山期岩浆活动旋迴。在基底地槽沉积的北东向构造和中生代北北东向大断裂及北东东向、北西西向次级断裂的基础上, 早第三纪发生了强烈的区域性断陷活动。冰后期 16000 年 B. P. 至大约 7000 年 B. P. 的海面上升^[2], 形成了众多的溺谷海湾, 为潮汐汉道发育提供了地质和原始地貌基础。

东海沿岸潮汐为正规半日潮, 大部分岸段属强潮海岸。在具有一定纳潮水域和较狭窄口门的溺谷海湾, 潮流作用塑造并维持了由海湾通往外海的潮汐水道, 这些水道与口门内、外侧海湾以及相临的部分开敞海岸共同构成了潮汐汉道系统。

浙闽沿海由于受众多岛屿的掩蔽, 波浪作用相对较弱; 酸性岩浆岩岩层的抗蚀能力又很强, 因此海岸带波浪侵蚀产生的沉积物很少, 沿岸漂砂微弱。潮汐汉道的沉积物主要是来自长江的泥质沉积物。

二、方 法

在潮汐汉道系统中, 口门断面面积 A 和内海湾纳潮量 P 均非常量。 A 随水位的升降而变化; P 随潮差的不同而变化, 还受到沿岸径流、风成增水和气压变化等因素的影响。因此必须选取其特征值。本文所采用的特征值是平均大潮潮差条件下的纳潮量和平均海面以下的口门断面面积。

纳潮量的计算采用如下近似公式: $P=RS$ 。式中, R 为平均大潮潮差, S 为平均大潮高潮位的内海湾纳潮面积。 S 的量算在五万分之一地形图上进行, 先找出潮汐汉道口门的最狭窄处并绘出断面线, 然后量算此断面线向岸一侧的内海湾水域面积。量算方法是求积仪法与方格法的结合, 占满方里网格的部分用方格法计算, 剩余部分用求积仪按规范量算。

口门断面面积的量算是根据同时期的五万分之一海图。在所选取的口门断面线上绘出地形剖面线, 用求积仪量算平均海平面与地形剖

面线之间的面积。

最后对所得的 P 和 A 的两组数据进行线性回归分析。设:

$$A = cP^n, \text{ 即 } \lg A = n \lg P + c,$$

然后用以下各式求出常数 n 和 c , 以及相关系数 r :

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg P_i - \overline{\lg P})(\lg A_i - \overline{\lg A})}{\sum_{i=1}^n (\lg P_i - \overline{\lg P})^2}$$

$$c = \overline{\lg A} - n \overline{\lg P}$$

$$r = n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg P_i - \overline{\lg P})^2}{\sum_{i=1}^n (\lg A_i - \overline{\lg A})^2}}$$

式中, $\lg P_i$ 和 $\lg A_i$ 为各汉道的数值, $\overline{\lg P}$ 和 $\overline{\lg A}$ 为平均值。

三、结 果

1. 基本数据和关系式

用前述方法计算了东海沿岸 11 个主要潮汐汉道的口门断面面积和纳潮量 (见计算值表)。这些汉道纳潮量的数量级为 10^7-10^{10} m^3 , 口门断面面积的数量级为 10^3-10^5 m^2 。规模最大的是三都澳, 其纳潮量为 $5008.45 \times 10^6 \text{ m}^3$, 口门断面面积为 $19.17 \times 10^4 \text{ m}^2$; 规模最小的是乐清湾内的清江, 其纳潮量为 $72.34 \times 10^6 \text{ m}^3$, 口门断面面积为 $0.41 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。总的来看, 东海沿岸的基岩海岸型汉道的规模较砂质海岸型汉道为大。美国太平洋、大西洋和墨西哥湾沿岸的砂质海岸汉道的规模一般为, 纳潮量 10^5-10^8 m^3 , 口门断面面积 10^2-10^5 m^2 。^[4]

表 1 所列数据的相关分析结果见图 2。按前述方法计算的东海沿岸潮汐汉道的 $P-A$ 关系为:

$$A = 2.55 \times 10^{-4} P^{0.92}$$

式中的单位均用 m 制。 $\lg A$ 与 $\lg P$ 之间具有很好的线性关系, 其相关系数 r 为 0.97。

东海沿岸 11 个汉道的 P-A 计算值表

Tab. The P-A Calculations of 11 inlets along the East China Sea

汉道	$A(10^4 \text{m}^2)$	$S(\text{km}^2)$	$R(\text{m})$	$P(10^6 \text{m}^3)$
象山港	9.36	293.7	4.07	1195.36
西沪港	2.08	47.7	4.72	225.14
胡陈港 ¹⁾	0.42	17.0	6.32	107.44
岳井港	1.64	62.4	5.04	314.50
健跳港	0.47	13.5	5.40	72.90
浦坝港	2.13	74.5	5.20	387.40
乐清湾	9.50	266.6	6.14	1636.92
清江 ¹⁾	0.41	11.5	6.29	72.34
沙埭港	3.64	102.4	4.96	507.90
三都澳	19.17	739.8	6.77	5008.45
罗源湾	3.77	215.0	6.68	1436.20

1) 现已人工围封

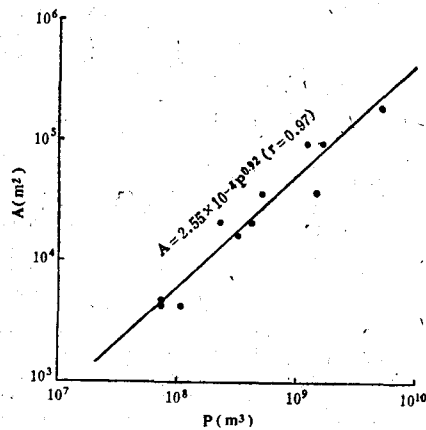


图 2 东海沿岸 11 个潮汐汉道的 P-A 关系

Fig. 2 The P-A relationship based on 11 inlets along the coast of the East China Sea

2. 汉道口门的均衡问题

从东海沿岸潮汐汉道的发育史来看,在汉道形成的初期内海湾和口门的大小均受地质构造和原始地形的控制,因此纳潮量和口门断面面积之间远未达到均衡状态,lgP 和 lgA 也不会具有良好的线性关系。潮汐汉道动力与形态的均衡调整只是在海面基本稳定和长江泥沙影响之后才加快了进程。在现阶段,东海沿岸汉道 P-A 关系已达到很好的相关性,表明纳潮量与口门断面面积之间已接近于均衡状态,汉道发育到了成熟阶段。此外,相关性很好的

P-A 关系也说明,在潮汐、波浪和沿岸漂砂诸因素中,潮汐是决定性的作用。

东海沿岸潮汐汉道 P-A 的均衡关系要归因于长江泥质沉积物供应和潮汐的主导作用。沉积物的堆积是口门面积减小的原因。东海沿岸砂砾质沉积物来量少,因而极少发育典型的砂嘴、砂坝等地貌形态,粗粒沉积物对汉道口门的作用很小。但是,来自长江的细粒沉积物却有较大影响。泥质沉积物的堆积使汉道的内海湾和水道中形成了较厚的全新世沉积层,从而改变了纳潮水域和口门面积的大小。例如象山港内在全新世发育了大片海积平原,口门及其两侧潮汐水道底部的沉积层厚达 8—30 m。

潮流是冲刷口门的主要动力。浙闽沿海潮汐汉道的平均潮差大多超过 4 m,因此潮流成为主导的动力作用,其相对重要性远高于砂质海岸汉道中的潮流作用。砂质海岸汉道一般发育在开敞程度较高的中等潮至弱潮海岸。

3. O'Brien 方法的适用性

O'Brien 于 1969 年提出的美国砂质海岸 P-A 关系为^[7]:

$$A = 9.01 \times 10^{-4} P^{0.85}$$

A 和 P 的单位均用 m 制。与我们所得结果相比, c 值有较大不同,而 n 值颇为接近。这一事实 Jarrett 也早已注意到了,因此对不同地区 and 不同人工干涉程度的汉道分别计算 P-A 关系^[4]。Bruun 在批评 O'Brien 的方法时,也把这一事实作为主要依据之一^[6],但是 O'Brien、Jarrett 和本文的结果都获得了很好的相关系数,这充分说明 P 与 A 之间是有密切关系的。c 和 n 的多变性可以解释为, P-A 关系受区域性因素的影响,即不同区域 P 和 A 在调整到均衡状态时的关系是不同的。人工建筑物如突堤可以影响局部的潮汐和输沙状况,也可使 P-A 关系略有改变。因此, O'Brien 方法可针对不同区域或不同类型的汉道分别应用,汉道达到均衡的程度以相关系数表示,均衡状况下的 P-A 关系由统计结果给出。

Shigemura 的方法^[5]则有所不同。他的

P-A 关系图离散程度高,相关分析表明某些区域的相关系数较小。故在分区域统计的基础上,他又根据 Ras (口门过水面积与海湾平均纳潮面积之比)将汉道分成若干类,对每类分别作相关分析,从而提高了相关系数。其实,指标 Ras 本身就涉及了 P 和 A,用该指标划分的类的 P-A 关系只体现了指标自身。因此,所得 P-A 关系式未必能代表均衡状态下的 P-A 关系。

四、讨 论

P-A 关系研究中的一个问题是, P-A 关系能否作为汉道稳定性的判据。这涉及到对“稳定性”概念的两种理解。第一类稳定性概念是 Escoffier 所提出的^[6],他的稳定性分析是根据封闭曲线,即汉道底部的最大切应力与口门断面面积的关系曲线。在封闭曲线上,与均衡切力对应的口门断面面积有 A_1 和 A_2 两个值 ($A_1 < A_2$)。当 $\hat{\tau} = \hat{\tau}_{eq}$ 和 $A = A_1$ 时,口门处于不稳定均衡状态,如果 $\hat{\tau}$ 有一个微小波动,口门就会增大或趋于封闭。当 $\hat{\tau} = \hat{\tau}_{eq}$ 和 $A = A_2$ 时,口门处于稳定均衡状态,此时外动力的扰动不能改变 A 稳定于 A_2 的趋势。由此可见,Escoffier 的稳定性是指动力与形态之间的动态平衡关系。对于特定的动力环境,只要有充分的发育时间,必有唯一的口门过水面积与之对应。在此意义上, O'Brien 的 P-A 关系可以作为汉道稳定性的判据,因为它也表示了类似的概念。在发育成熟的汉道,一定的纳潮量对应于一定的口门面积。在应用上, O'Brien 方法是用于区域汉道群体稳定性的判别,而不是象 Escoffier 曲线那样用于单个汉道。

作为对此,我们采用 Escoffier 的方法来判断象山港的稳定性,即计算其口门的最大切应力,并与均衡切力相比较。 $\hat{\tau}$ 的计算公式如下:

$$\hat{\tau} = \rho F u^2$$

式中 ρ 为密度, F 为摩擦系数, u 为最大断面平均流速。据象山港冬季大潮的水文资料,口

门最大平均流速为 1.16 m/s (1983 年 12 月 6—7 日测)。若取 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $F = 3 \times 10^{-3}$ ^[9], 则

$$\begin{aligned}\hat{\tau} &= 1000 \times 3 \times 10^{-3} \times 1.16^2 \\ &= 4.0 (\text{N/m}^2)\end{aligned}$$

汉道的最大均衡切力 $\hat{\tau}_{eq}$ 为 3.5—5.5 N/m²^[6], 这表明象山港已接近于均衡状态。这个结果与用 O'Brien 方法所得的结论相一致。

第二类是 Bruun 的稳定性概念^[6]。他认为,稳定性是指潮汐汉道的平面位置和形态、断面形状和断面面积等地貌要素的变化速率的高低。因此,“稳定性”的意义是相对的,在砂质海岸不存在绝对稳定的汉道。汉道稳定程度的高低取决于使汉道保持开敞的因素(潮流)和使汉道趋于封闭的因素(沉积)的对比。据此,他正确地采用纳潮量与沿岸毛输砂量的比值(P/M)作为汉道全面稳定性的判据。

按照 Bruun 的概念, O'Brien P-A 关系就不宜作为稳定性的判据。因为从该关系中不能知道纳潮量随时间的变化速率,所以也无从了解口门断面面积的变化速率。值得指出, Bruun 的稳定性判据的应用也只限于较短的时间尺度。在较长的时间尺度上,同样面临着 P 和 M 随时间变化的问题。此外,对于象东海沿岸那样的砂砾质沉积物缺乏,而泥质沉积物供应丰富的地区, Bruun 的判据也要作些修正。

无论如何, O'Brien 和 Bruun 的理论对稳定性问题都有一个一致的结论,即要保持汉道的稳定,不减少纳潮量是有益的。由于潮汐汉道分布区域和类型的不同。影响稳定性的因素存在着差异,因此参考多种判据是必要的。除稳定性判据之外,对汉道演化问题的其他方面的研究也是必要的。

参 考 文 献

- [1] 施央申等, 1983. 浙闽沿海中生代火山岩基底构造研究。第二次中国海洋湖沼科学会议论文集。科学出版社, 259—269 页。
- [2] 冯应俊, 1983. 东海四万年来海平面变化与最低海平面。东海海洋 1(2): 36—42。

- [3] O'Brien, M. P., 1931. Estuary tidal prism related to entrance areas. *Civil Engr.* 1(8): 738—739.
- [4] Jarrett, J. T. 1976. Tidal prism-inlet area relationships. *GITI Rep.* 3: USCE, WES.
- [5] Shigemura, T., 1980. Tidal prism-Throat Area Relationships of the Bays of Japan, *Shore and Beach* 48 (3): 30—35.
- [6] Bruun, P., 1978. *Stability of Tidal Inlets*, Elsevier Scientific Publishing Company. pp. 245—247.
- [7] O'Brien, M. P., 1969. Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. *Proc. ASCE, J. Waterways and Harbors Div.* 95(WW): 43—52.
- [8] Escoffier, E. F., 1950. The stability of tidal inlets shore and Beach, 8(4): 114—115.
- [9] Kreeke, J. van de, 1985. Stability of Tidal Inlets-Pass Cavallo, Texas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 21(1): 33—43.

P-A RELATIONSHIPS OF TIDAL INLETS ALONG THE EAST CHINA SEA COAST

Gao Shu

(Second Institute of Oceanography, SOA)

Abstract

O'Brien's method is widely used in the study of P-A relationships of the tidal inlets on sandy coasts. In the present paper, the P-A relationship of 11 inlets on the rocky coast of the East China Sea is calculated by the method. The expression is $A = 2.55 \cdot 10^{-4} P^{0.97}$. The linear related coefficient between $\lg P$ and $\lg A$, r , equals 0.97. An analysis of the result shows that the inlets have been approximated to their dynamic equilibrium. O'Brien's method can be applied to the rocky Zhejiang-Fujian coast with megatide and fine sediments as main supply.