

潮汐汉道 $A-P$ 关系中参数 C 和 n 的控制因素*

高 抒 张红霞

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 与沿岸漂砂相联系的潮汐汉道系统达到均衡态时的 $A-P$ 关系可表示为 $A = CP^n$ 。根据对 $A-P$ 关系的模拟, 本文提出在均衡态条件下 n 值必然大于 1, 潮汐汉道 $A-P$ 关系表现出弱分形现象(分形维数为- 0.15 左右)。其原因是对应于一定强度的沿岸漂砂较小汉道以口门宽度减小、流速增大来维持均衡关系。模拟实验还表明, 参数 C 的大小与沿岸输砂率、淡水径流量和潮汐类型有关, 这些因素对参数 n 也稍有影响。前人研究有时遇到 $n < 1$ 的情况, 这可能是由于统计设计的某些汉道系统未达到与沿岸漂砂强度相应的均衡状态, 或者对大型潮汐汉道系统的纳潮量估算过高。

关键词 潮汐汉道, 稳定性判据, 分形维数, 模拟实验

在地球科学、海洋科学中常用幂函数(Power law)形式的经验公式。例如, 对于沿岸漂砂(Longshore Drift)强度较大的海岸, 潮汐汉道口门的均衡过水断面面积(A)和大潮纳潮量(P)之间的关系可写成^[1]:

$$A = CP^n \quad (1)$$

式中 C 和 n 两个参数的值通过回归分析而确定。根据分形(Fractals)理论, 任何幂函数都是与一个变量随观测尺度而发生变化、或一种形态不随观测尺度而发生变化的现象相联系的。一个经典的例子是, 一段海岸线的长度(L)与用来量度岸线的测尺的长度(R)有关, 两者的关系可表示为幂函数形式^[1]

$$L = \alpha R^{1-D} \quad (2)$$

式中 D 称为分形的维数(Fractal dimension)。因此, 幂的大小是与分形维数相联系的。

对于潮汐汉道的 $A-P$ 关系, n 值大多落在 0.85~ 1.15 范围内^[2,5], 这相当于分形维数为- 0.15~ 0.15。但是, 因为 n 值接近于 1, 所以略大或略小于 1 的 n 值可能是由于观测误差所造成的。因此有理由怀疑 $A-P$ 关系实际上是线性关系, 即分形维数为零。为了确定 $A-P$ 关系究竟是否与分形现象有关, 有必要弄清参数 C 和 n 的控制因素。因此, 本文拟根据海南岛洋浦港潮汐汉道的均衡模式^[3], 通过一系列模拟实验, 来分析这两个参数的控制因素和均衡态 $A-P$ 关系的分形特征。

* 中国科学院院长基金(百人计划)资助项目。王红莉帮助打印文稿, 谨此致谢。
收稿日期: 1996 年 10 月 11 日

1 分析方法

除了使用经验公式(1)计算潮汐汉道的均衡条件之外,对单个潮汐汉道的均衡条件也可根据沉积动力学和地貌学理论来分析。例如,对海南岛洋浦港和其他汉道系统的研究表明,在沿岸输沙量与汉道内沉积物搬运能力在数量级上相近时,该汉道的均衡条件可用以下方程来定义^[3,6]:

$$T_f U_f A + T_f Q = P_m \quad (3)$$

$$T_e U_e A - T_e Q = P_m \quad (4)$$

$$\frac{T_e B q_{se} - T_f B q_{sf}}{T_f + T_e} = \gamma q_l \quad (5)$$

式中各变量的物理意义如表1所示,其中 U_f 、 U_e 和 A 看成是未知变量,其他变量除 q_{sf} 和 q_{se} 外均为自变量。平均涨潮和落潮输沙率(q_{sf} 和 q_{se})的计算可采用Gadd公式^[4]:

$$q_s = k (U_{100} - U_{cr})^3 \quad (6)$$

式中 k 为常数, U_{100} 为底床1 m之上的流速, U_{cr} 为临界起动流速。在已知流速的断面分布和频率分布的条件下, q_s 可表示为断面和时间平均流速的函数(详见文献[3])。在均衡条件下,洋浦港潮汐汉道的有关参数已作了观测和计算(见表1)。所获的 U_f 、 U_e 和 A 值与实测值^[1]极为相近。

表1 洋浦港潮汐汉道均衡态下的基本参数^[3]

Tab. 1 Variables associated with Yangpu Harbour, under equilibrium conditions^[3]

变量	物理意义	数值和单位
T_f	平均涨潮历时	13.2 h
T_e	平均落潮历时	11.6 h
U_f	断面、时间平均的涨潮流速	0.216 m s ⁻¹
U_e	断面、时间平均的落潮流速	0.255 m s ⁻¹
A_E	均衡过水断面面积	6.0 × 10 ³ m ²
P_m	平均纳潮量	62.8 × 10 ⁶ m ³
B	汉道口门宽度	480 m
Q	淡水径流量	25.0 m ³ s ⁻¹
q_{sf}	平均涨潮流输沙率	1.2 × 10 ⁻² kg m ⁻¹ s ⁻¹
q_{se}	平均落潮流输沙率	2.9 × 10 ⁻² kg m ⁻¹ s ⁻¹
q_l	沿岸毛输沙率	6.9 × 10 ⁴ m ³ a ⁻¹
γ	沉积物容重	1.6 × 10 ³ kg m ⁻³
U_{cr}	沉积物临界起动流速	0.190 m s ⁻¹
k	常数	4.48 kg m ⁻⁴ s ⁻²

为了考察过水断面面积 A 怎样随纳潮量 P_m 而变化,利用式(3)~(5)进行一组模拟实验,计算不同 P_m 值下的 A ,然后对所得的一组 A - P 数据进行回归分析,以获取式(1)中的 C 和 n 值。式(3)~(5)表明,除纳潮量外,汉道的均衡过水断面面积 A 还与沿岸输沙量、汉道口门宽度、潮汐类型(半日潮或全日潮)、涨落潮历时和淡水径流量有关。为了分析沿岸输沙率的影响,在模拟实验中采用了 6.9×10^4 和 35×10^4 m³ a⁻¹两个数据。汉道口门的宽度 B 是表征汉道大小的一个参数。它和口门过水断面面积和宽深比的关系如下式所示:

$$R_{B/H} = \frac{B}{H} = \frac{B^2}{A} \quad (7)$$

宽深比的大小与沉积物的类型和输沙率有关^[10]。但是,统计数据表明^[8,11],汉道口门的宽深比相对于汉道规模而言变化不大。当纳潮量 P_m 有数量级的变化时,口门的宽深比保持在同一个数量级内。因此,在模拟实验中采用洋浦港汉道口门的宽深比(即宽深比恒等于38.4)。

为了模拟潮汐因素和淡水径流量的影响,作者构造了无量纲数 K ,其定义为:

$$K = \frac{3600 Q (T_e + T_f)}{P_m} \quad (8)$$

在模拟实验中采用了 $K = 0.035$ 和 $K = 0.35$ 两个数值。

在计算 A - P 关系时,需用大潮纳潮量;它与平均纳潮量的关系按照洋浦港的实测数据定义

为:

$$P = 1.6 P_m \quad (9)$$

在实际计算过水断面面积时,采用如下步骤。 P_m 的范围定在 $10^6 \sim 10^9 \text{ m}^3$ (这是天然汉道的特征范围)。首先输入 P_m 、 K 、 T_e 、 T_r 、 q_l 、宽深比给定值和任意给定的但小于均衡条件下 U_e 值的 U_e 初始值。然后式(8)计算 Q , 根据式(3)和(4)计算相应的 U_r 值, 并使用文献[3]给出的算法计算 q_{sr} 和 q_{sc} 值。之后, 用式(5)计算 B , 用式(3)或(4)计算 A , 用式(9)计算 P , 再利用式(7)计算宽深比。如果所得宽深比与给定值相等, 则所涉及的 U_r 、 U_e 和 A 值代表了均衡条件。如果所得宽深比不等于给定值, 则给 U_e 加一个增量(增量定为 0.001 m s^{-1}), 直至得到均衡条件下的参数为止。

2 结果与讨论

根据前述方法用 K 和 q_l 的 4 种组合(表 2)进行了过水断面面积 A 随纳潮量 P 而变化的模拟实验。对各组 A - P 数据进行了回归分析, 计算而得的 C 和 n 值列于表 2。

模拟实验的结果显示了如下特征。首先, 在所有实验中所获的 n 值均大于 1, 平均为 1.15 左右, 且变幅较小。这就是说, A 与 P 之间的确存在着非线性关系或分形现象, 虽然分形维数较低 ($D = -0.15$)。此种弱分形现象是河道系统在沿岸漂砂的较强的条件下对纳潮量变化的反应相联系的。如前所述, 河道口门的宽深比在纳潮量有数量级变化的情况下只有较小的变化, 故小型河道的口门宽度较大型河道为小。另一方面, 沿岸漂砂的规模受区域性波浪状况的控制, 对于一段海岸而言具有相近的数量级。因此, 较小的河道在口门宽度减小但又必须维持口门水道(即防止沿岸漂砂导致水道淤塞)的条件下, 其反应只能是加大潮流流速, 而这必须靠进一步减小过水断面面积来实现。因此, $n > 1$ 可以认为是沿岸漂砂控制下的均衡河道的特征。

表 2 潮汐河道均衡态模拟实验所得的参数 C 和 n

Tab. 2 Parameters C and n calculated using the data derived from the simulation experiments for equilibrium tidal inlets

模拟实验	K	$Q_l (\times 10^4 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1})$	$C (\times 10^{-5})$	n
1	0.035	6.9×10^4	3.106	1.133
2	0.35	6.9×10^4	1.295	1.122
3	0.035	35×10^4	4.877	1.159
4	0.35	35×10^4	2.297	1.137

外还受到沿岸漂砂强度、纳潮海湾所接受的淡水径流以及潮汐类型的影响。在 K 值相同的条件下, n 随沿岸漂砂强度的增加而稍有增加(表 2)。如果 q_l 相同, 则 n 随着 K 的增大而略减, 即淡水径流量或潮周期的增加可减弱 A 和 P 之间的非线性关系。因此, 在淡水径流量起主导作用的河口, A - P 在系将更接近于线性关系。同样, A 和 P 之间的非线性关系在半日潮区域比全日潮区域更为显著。

其次, 参数 n 除了总体上的弱分形特征之

最后, 参数 C 在各次实验中具有相同的数量级, 但变幅远大于 n 值的变幅(表 2)。例如, 模拟实验 2 与模拟实验 3 之间 C 值可达近 3 倍的差异。从表 2 结果可知, C 值的变幅亦与沿岸漂砂、淡水径流量和潮汐类型有关。如果 q_l 增大, 则 C 值也增加。如果 K 增加(即淡水径流量或潮周期长度增加), 则 C 值减小。这些特征可以解释 C 值为何随区域、地点的不同而多变^[6]的原因。对比式(1)和式(2)、式(9)并考虑到 n 接近于 1, 可推知 C 值的数量级应与 $T_r U_r$ 倒数的数量级相一致, 而后者为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 。

值得注意的是,前人研究中有时得到 $n < 1$ 的结果,最小值为 0.85。这种现象可能是在统计分析中应用了某些不够准确的数据或尚未达到均衡态的汉道的数据所造成的。大型汉道系统的数据往往存在着这些问题。在一个大型汉道的纳潮海湾内,潮位往往在各处是不同时的,例如湾顶仍在涨潮的时候湾口可能已经开始落潮。此时,按传统的方法将高、低潮位之间的体积作为纳潮量,则会过高地估计实际纳潮量。另一方面,在纳潮量很大的汉道系统中,沿岸漂砂可能成为控制汉道口门形态的次要因素,这样的汉道所对应的 $A-P$ 关系将会偏离沿岸漂砂所控制的均衡态。在前人的研究中,常常将旧金山湾那样的大型海湾也包括在内,这必然导致分析结果的改变。

由此推论,若将大型汉道数据去除,则应得到 $n > 1$ 的观测结果。事实也可能正是如此。例如,华南 19 个河口溺谷型汉道的 $A-P$ 关系的统计分析显示 $n = 0.908^{[12]}$,但如果去除其中纳潮面积为 110km^2 以上的大型汉道,则 $n = 1.185$ 。因此,在汉道均衡态研究中,应该首先区分沿岸漂砂控制的均衡态、沿岸漂砂为次要因素的均衡态和非均衡态等三种情形。

3 结语

3.1 沿岸漂砂控制的均衡汉道具有弱分形现象,即 A 与 P 之间为幂函数关系,且幂的值必大于 1,相当于分维数 D 为 0.15 左右。其原因是,当纳潮量减少时,汉道以减小口门宽度、增加潮流流速来维持均衡状态。

3.2 $A-P$ 关系的幂值还受到沿岸漂砂强度、淡水径流量和潮汐类型的影响,如果沿岸输砂率增加,则幂值稍有增加;如果淡水径流量或潮周期增大,则幂值略减。

3.3 均衡汉道 $A-P$ 关系中的参数 C 的数量级受潮流强度和潮汐周期长度的控制,而其变幅则与沿岸输砂率、淡水径流量以及潮汐类型相联系。

3.4 前人研究显示 $A-P$ 关系中的幂值有时小于 1,这可能是由于在统计分析中应用了某些未达到均衡态的大型汉道的数据或对大型汉道的纳潮量估计过高所致。

参考文献

- [1] 张红霞、朱大奎,1989。海岸工程 8(3): 31~ 38。
- [2] 张忍顺,1984。海洋通报 3(2): 89~ 96。
- [3] 高 抒、张红霞,1994。海洋与湖沼 25(5): 468~ 476。
- [4] Gadd P. E., Lavelle, J. W. and Swift, D. J. 1978. *Journal of Sedimentary Petrology* 48: 239-252.
- [5] Gao, S. and Collins, M., 1994. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 38: 157-172.
- [6] Gao, S. and Collins, M., 1994. *Coastal Engineering* 23: 61-80.
- [7] Mandelbrot, B. B., 1967. *Science* 156: 636-638.
- [8] Mehta, A. J., 1977. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division (ASCE)* 103(1): 173-175.
- [9] O'Brien, M. P., 1969. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division (ASCE)* 95(1): 43-52.
- [10] Raudkivi, A. J., 1990. *Loose Boundary Hydraulics* (3rd edition). Pergam on Press, Oxford, 1- .
- [11] Vincent, C.L. and Corson, W. D., 1981. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division (ASCE)* 107(1): 1-9.
- [12] Zhang, Q. M., 1987. *Proceedings of Coastal and Port Engineering in Developing Countries (Vol.1)*. Ocean Press, 412-422.

FACTORS CONTROLLING PARAMETERS C AND n IN THE POWER LAW $A-P$ RELATIONSHIP FOR EQUILIBRIUM TIDAL INLETS

Gao Shu and Zhang Hongxia

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*)

Received: Oct. 11, 1996

Key Words: Tidal inlets, Stability criteria, Fractal dimension, Simulation experiment

Abstract

A tidal inlet system may reach equilibrium in response to the presence of longshore drift. Under the equilibrium condition, the relationship between the cross-sectional area and tidal prism has been expressed as a power law equation: $A = C P^n$. Based upon a series of simulation experiments, the parameter n is shown to be greater than 1 and the $A-P$ relationship is associated with weak fractal characteristics (i.e. the fractal dimension $D = -0.15$). Such a phenomenon is related to the fact that a decrease in the inlet width and an increase in current speeds within the entrance channel as a result of longshore sediment transport enables a small tidal inlet to maintain its equilibrium state. The study shows also that the rate of longshore drift, freshwater discharge into the tidal basin and the type of tides have some influence upon the parameters C and n . Some of the previous investigations have obtained n values less than one; this situation may be caused by the use of the data associated with large inlet systems which have not reached their equilibrium stage, or by an overestimate of the tidal prism data for large inlets.