

潮汐汊道稳定性研究综述

郑金海^{1 2} 彭 畅^{1 2} 陈可锋^{2 3} 黄惠明²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 从时间-流速不对称特征、纳潮量-过水断面面积关系、水动力特性、泥沙运动及动力沉积地貌过程的角度, 综述了潮汐汊道稳定性研究的进展, 指出今后潮汐汊道地貌形态动力学研究的主要课题有探求纳潮量-过水断面面积关系物理机制、阐明潮汐汊道水沙运动及沉积地貌相互作用过程、揭示淹没型潮汐汊道稳定机制及拓展复合型潮汐汊道研究等。

关键词: 潮汐汊道, 时间-流速不对称, 纳潮量, 过水断面面积, 水沙运动特征, 地貌形态, 综述

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2012)03-0067-08

Review of research on tidal inlet stability//ZHENG Jin-hai^{1 2}, PENG Chang^{1 2}, CHEN Ke-feng^{2 3}, HUANG Hui-ming²
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: This paper reviews the state-of-the-art of researches on the geomorphologic process of tidal inlets in view of the asymmetric time-velocity features, the volume of tidal prism and wetted cross section area relationship ($P-A$ relationship), the hydrodynamic and sediment transport characteristics. Four main topics in the studies of the geomorphologic process of tidal inlets are summarized: the physical mechanism of $P-A$ relationship; the reciprocity between the hydrodynamics, sediment transport and geomorphologic process; the stability mechanism of the submergible tidal inlets; and the evolution characteristics of the multiple tidal inlets.

Key words: tidal inlets; time-velocity asymmetry characteristics; volume of tidal prism; wetted cross section area; hydrodynamics and sediment transport; geomorphologic process; review

根据 Tver 在《Ocean and Marine Dictionary》^[1]一书中的词源考证, 汊道原意是入口, 是连接海洋与海湾或 湖的短窄水道, 由潮流维持的天然汊道即为潮汐汊道。美国陆军工程兵团海岸工程研究中心出版的《Shore Protection Manual》^[2]给出范围有所扩大的汊道定义, 即汊道是海洋伸入陆地相当远距离的支汊。美国地质研究所出版的《Glossary of Geology》^[3]则认为, 岛屿之间的短窄水道也可称为汊道。

潮汐汊道往往出现在具有中等潮汐(平均潮差 2~4 m)、中等波浪能量(波高在 0.6~1.5 m 之间)的海岸^[4-5]。从形态上来看, 潮汐汊道首先要拥有相应的纳潮水域, 涨潮时作为潮水及其所荷载的能量和物质的储集器, 落潮时又成为释放器, 纳潮水域还须

具有由潮流作用维持的口门, 是纳潮量进出纳潮水域的主要通道。从动力特征上来说, 潮汐汊道则是开敞海域的潮能量随着潮汐涨落周期性进出并深入陆地纳潮区的支汊。纳潮水域的面积、形状和潮汐特征, 决定了口门段过水断面的大小及内外两侧浅滩与水道的特征, 它们构成了一个统一的汊道-潮盆系统。受海岸潮流和波浪联合作用, 潮汐汊道的沉积物经历着沉降、固结、冲刷、搬运的复杂循环过程, 汊道摆动迁移, 浅滩周期性演化, 潮汐汊道地貌形态持续调整^[6-9], 使得潮汐汊道的稳定性问题始终是河口海岸动力地貌演变研究的热点和难点之一。

由于潮汐汊道的产生、发展和消亡与水动力环境、泥沙输运、地貌沉积过程、地貌形态演变等密切

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAB03B01); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室团队研究专项(2009585812); 江苏省“六大人才高峰”第六批高层次人才 A 类计划(苏人社 2009-182); 江苏高校优势学科建设工程(苏政办发 2011-6); 高等学校学科创新引智计划(B12032)

作者简介: 郑金海(1972—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 主要从事港口、航道、海岸及近海工程研究。E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

相关,多年来,许多研究人员主要从时间-流速不对称、纳潮量(P)-过水断面面积(A)关系(以下简称 P - A 关系)、水动力特征、泥沙运动、沉积地貌特征与潮汐汉道稳定性之间联系等角度进行了潮汐汉道稳定性研究。本文分别针对不同研究视角和研究方法,从水动力、泥沙运动、地貌及其相互作用的角度就潮汐汉道稳定性研究进展进行综述。

1 时间-流速不对称特征

潮汐汉道系统的涨落潮历时和涨落潮流速的不等现象称为时间-流速不对称现象^[10-11]。对潮汐汉道而言,潮汐的时间-流速不对称是控制泥沙输运及冲淤的主要因素之一^[12]。通常,根据时间-流速不对称特征可将汉道潮汐系统分为涨潮优势型和落潮优势型^[13-15],前者使沉积物易向潮汐汉道湾内输运并堆积,后者有利于汉道口门稳定性的维持^[13,15]。

大型潮汐汉道由于口门断面在潮周期内变化较小,如胶州湾口门水道大潮期间断面面积只有约 $\pm 9\%$ 的变化^[16-17],这时,涨落潮历时决定了涨落潮流速的变化。因此潮汐汉道系统的涨潮或落潮优势形态往往决定沉积物是向汉道湾内搬运还是向外海输移以及汉道的稳定性,如马来西亚萨吕孟卡泊湖的潮汐汉道,属于落潮优势型,在强劲落潮流的作用下,落潮泥沙通量明显高于涨潮泥沙通量,汉道口门稳定性良好^[18]。然而,汉道泥沙的输运不仅与潮动力有关,也受到涨落潮过程中悬沙含量的影响,因此,仍存在“落潮优势型”汉道的沉积物由湾外向湾内输运的现象^[19]。高抒等^[20]在研究象山港时间-流速不对称输沙效应时指出,虽然象山港为落潮优势型汉道,但潮交换过程引起的输沙效应较强,长时间尺度上,潮交换进入湾内的悬沙将逐渐沉降淤积,使得纳潮海湾逐渐淤积。此外,在半月潮地区,时间-流速不对称主要源于潮汐动力的非线性因素,即复合分潮和浅水分潮的作用^[15,21],同时,还受外海潮波的影响^[22],这复杂化了利用汉道潮汐优势类型判别潮汐汉道稳定性的过程。

对于小型汉道而言,过水断面面积在潮汐涨落周期内变幅较大,在口门断面形态与潮汐水位变化的配合下,汉道时间-流速不对称特征更为复杂,小型潮汐汉道可以形成不同于大型潮汐汉道的不对称类型^[23-24]。贾建军等^[25]研究山东荣成月湖潮汐汉道时间-流速不对称特征时发现,月湖汉道系统既不属于涨潮优势型,也不属于落潮优势型,而是同时存在 4 种潮汐潮流不对称类型,口门输沙过程和汉道的稳定性主要通过复杂的潮流循环机制来调整。Zheng 等^[26]在研究江苏沿海小庙洪汉道系统的稳定

性时也发现类似现象和规律。

因此,简单地以潮汐汉道的时间-流速不对称特征来判别潮汐汉道口门的稳定性还存在不足。实际上,不规则潮汐特征、口门断面滩槽形态、涨落潮水位变化率的差异、潮汐水位不对称、汉道断面特性和纳潮水域纳潮面积之间的匹配等均可能造成复杂的时间-流速不对称现象^[23,27-28],这扭曲了潮汐汉道时间-流速不对称特征与汉道稳定性之间的直接联系。值得注意的是,天然汉道中,人类活动也可能改变汉道的不对称类型,进而导致汉道口门稳定性发生变化^[29],如小海沙坝-湖-潮汐汉道体系曾是一个稳定的系统,但是 20 世纪 80 年代以来太阳河改道工程、北堤修筑工程及盐墩三岛潮滩围垦及网箱养殖,破坏了口门维持的潮汐动力特性,使小海沙坝-湖-潮汐汉道体系失去了自调整作用,直接导致了口门的迅速萎缩^[30]。Edwin 等^[31]研究认为 Zuiderzee 大坝破坏了 Texel 潮汐汉道的稳定性,并给出了人类活动和潮汐汉道落潮三角洲变化过程响应关系的概念模式。

2 潮汐汉道稳定性判别的 P - A 关系

潮汐汉道口门是关系到汉道系统能否维持稳定的重要区段,其稳定性有两个方面含义:汉道口门平面位置的稳定性和汉道口门断面面积的稳定性。由于多数汉道的口门位置相对固定,口门断面面积的稳定成为潮汐汉道稳定的关键。多年来,关于潮汐汉道稳定性的研究也多集中在口门断面与水动力相适应方面^[32]。

O'Brien^[33]在对美国西海岸研究的基础上提出 P - A 关系是研究潮汐汉道口门稳定性的重要方法,这种方法是用幂函数形式把地貌因素与动力因素联系起来,简单实用而在世界不同区域被广泛应用。Johnson^[34]认为,防沙导流堤对沿岸漂沙起着明显的作用, P - A 关系是受导堤影响的,并得出有、无导流堤的 P - A 关系式分别为 $A = 5.784 \times 10^{-2} P^{0.90}$ 和 $A = 5.971 \times 10^{-2} P$ 。Jarrett^[35]通过对美国大西洋、太平洋和墨西哥湾的 3 段海岸 108 个潮汐汉道的数据分析,求出了各自的 P - A 关系和 95% 的置信区间,指出无导堤和单导堤的 P - A 关系在 3 段海岸上略有不同。对于在基岩海岸 P - A 关系的适用性问题,Shigemura^[36]通过选用日本沿海 231 个天然口门的海湾型汉道进行分析,发现这些汉道 P 和 A 的相关性良好。Jarrett 和 Shigemura 均得出同一个结论,即所研究的潮汐汉道系统 P - A 都是幂函数关系,和 O'Brien 原先的关系式无明显差别,且指数 n 大致相同,都在 1 左右,但系数 C 变化则较大。

张乔民^[37]通过对我国华南沿岸 13 个湖和

19 条河口湾及溺谷型潮汐汉道的研究,得出河口湾及溺谷型的 $P-A$ 关系式为 $A = 8.94 \times 10^{-2} P^{0.908}$,而湖型的为 $A = 16.67 \times 10^{-2} P^{1.063}$,由此可见,当纳潮量相同时,湖型汉道与河口湾或溺谷型断面面积之比为 $1.86 \times 10^{-2} P^{0.155}$ 。高抒^[38]求得东海沿岸 11 个潮汐汉道的 $P-A$ 关系为 $A = 2.55 \times 10^{-4} P^{0.92}$,表明东海沿岸潮汐汉道发育已接近于动态平衡,并证明 O'Brien 方法同样适用于以细颗粒沉积物为主要物源的浙闽强潮基岩海岸。张忍顺^[39]通过计算 15 个潮汐汉道的 P 与 A ,得到黄渤海沿岸潮汐汉道天然状态下的 $P-A$ 关系为 $A = 8.45 \times 10^{-2} P^{1.020}$,并通过与南海、东海沿岸 $P-A$ 关系的对比,认为中国海域 $P-A$ 关系中系数 C 和指数 n 差别不大,湖型和海湾-溺谷湾型两种潮汐汉道可求得统一的 $P-A$ 关系式。

作为潮汐汉道的一种特殊形式,淹没型潮汐汉道亦可通过 $P-A$ 关系探讨其稳定性。喻国华等^[40]提出淹没型潮汐汉道由于形态上没有固定的纳潮水域,并存在高潮淹没、低潮露滩的特性,为此将理论最低潮面以下深槽面积确定为断面面积 A ,且认为淹没型潮汐汉道的纳潮量 P 由 4 个部分组成。Zheng 等^[26]根据上述方法,利用数学模型计算分析的结果,建立了小庙洪淹没型潮汐汉道的 $P-A$ 关系表达式,为 $A = 9.84 \times 10^{-2} P^{0.899}$,并通过沿程多断面 $P-A$ 关系校核方法,得出小庙洪水道的稳定已不仅仅表现在口门区域,拟合公式适用于整个小庙洪水道。朱明敏^[41]在对小庙洪水道的 $P-A$ 关系进行综合分析的基础上,研究了水道北面腰沙及冷家沙大范围围垦对小庙洪水道口门稳定性的影响。然而,淹没型潮汐汉道纳潮水域的多变性以及相邻水道-沙洲系统之间复杂多变的水沙交换过程,使得与潮汐汉道稳定性相适应的纳潮量及汉道口门断面的准确、合理界定难度极大,一定程度上限制了 $P-A$ 关系在淹没型潮汐汉道稳定性分析中的推广应用。

潮汐汉道的稳定条件与口门潮汐类型、沉积物组成、波浪特征、径流环境等众多因素相关,且不同汉道的这些条件都存在差异^[42-43],因此,尽管 $P-A$ 关系能近似地估算潮汐汉道的稳定性,但其始终只是一种经验和近似的数学表达^[44]。为克服 $P-A$ 关系理论基础不明确的缺陷,有学者提出运用沉积动力学方法来研究 $P-A$ 关系的形成过程,进而探讨口门水道系统行为的建议^[23]。贾建军等^[45-46]尝试建立了可计算单一潮汐汉道 $P-A$ 关系的沉积动力学方法,并以山东半岛月湖为算例进行了讨论,结果表明,均衡状态潮汐汉道的 $P-A$ 关系的指数 n 稳定在 1.15 左右,而系数 C 的变化较大。但是,利用沉积

动力学方法建立起来的均衡状态也只是就平均状态而言,由于潮汐、波浪和径流等的日、月、季、年变化,以及海湾地貌形态的差异,实际的 $P-A$ 关系仍会表现出一定的波动^[47]。

利用传统 O'Brien 方法确定幂函数曲线时,参与统计分析的汉道系统若未达到均衡状态,或者对大型潮汐汉道系统的纳潮量估算过高^[48],将使得指数 n 变化范围过大,大于 1 或小于 1 的情况均可能出现,同时,由于 C 值与沿岸漂沙、河流径流量及潮汐类型等有关, C 值随区域、地点的不同差异较大,且变幅远大于 n 值的变幅。这使得关于参数 C 和 n 主要控制因素的研究难以确切把握,也限制了对 $P-A$ 关系内在物理机制的深入研究;此外, $P-A$ 关系式的成立是以比较充裕的泥沙供应为条件的,此时较大的过水断面才能对应于较大的纳潮量,但当泥沙供应不足时,使过水断面扩大或口门拓宽的不是纳潮量的增加,而是波浪和风暴的袭击^[49]。上述众多复杂因素实际上也限制了利用 $P-A$ 关系研究潮汐汉道稳定性时的适用范围。

3 潮汐汉道水动力特征与稳定性

早在 1940 年,Escoffier^[50]就提出了阐述潮汐汉道口门稳定性的封闭曲线,如图 1 所示,图中曲线与水平线交点代表了两种均衡的临界状态。当横断面面积 $A \leq A_1$ 时, A 的减小将导致流速的减小,进而 A 继续减小,故 A_1 是不稳的均衡状态,当 $A_1 < A \leq A_2$ 时,由于流速大于保持均衡状态所需要的流速,故 A 将增大,直到 A_2 为止;当 $A > A_2$ 时,流速已低于保持均衡状态的流速,故 A 将减小,直到 A_2 位置,故 A_2 是稳定的均衡状态。O'Brien 等^[51]证明上述结论是合理的。

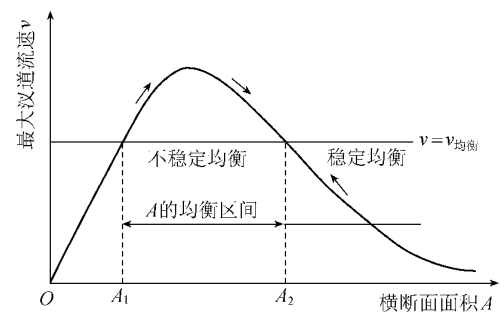


图 1 汉道口门稳定性图解

实际上,汉道潮汐水流受众多因素的影响,如潮流、波浪、汉道水深、海湾表面积等。在不考虑惯性和径流的情况下,Keulegan^[52]得到一个判断口门稳定性的主要参数——饱满系数 $K = \frac{T}{2\pi a_o} \frac{A_C}{A_B} \sqrt{\frac{2ga_o}{F}}$,其中包含开敞海区的潮幅 a_o 、海湾面积 A_B 、横断面

面积 A_C 、阻抗 F 等参数,同时提出对于潮汐汉道存在临界系数 K^* ,当 $K > K^*$ 时,随着横断面面积 A_C 的减小,流速将逐渐增加,并使断面缓慢恢复;相反,当 $K < K^*$ 时,摩擦效应明显,随着 A_C 的减小,流速亦减小,从而使断面也随之减小,汉道逐渐萎缩。研究显示 $K^* = 0.64$ 。Oliveria^[53]证明,汉道在稳定状态下, $K > 0.8$ 在不稳定状态下, $K \leq 0.64$; 在 $0.6 < K \leq 0.8$ 时,水流对底沙的冲刷能力最大。Walton 等^[54]考虑惯性和径流后,用流体力学的方法提出了一个新的饱满系数 K ,并在无径流的情况下与 Keulegan 所提出的 K 系数相比,得到了临界的 K^* ,并把结果应用于美国东海岸两个有径流注入的汉道,得到与它们的历史趋势相一致的稳定性判断,同时证明有径流注入的汉道,其临界饱满系数 K^* 要比没有径流时小。Byrne 等^[55]发现小汉道均衡断面的平均最大流速只有 0.35 m/s ,比海洋汉道要小。Mehta 等^[56]把这种分析方法运用到印度的一些河口发现,这一方法尚有待改进。通常,当流速增加到 $0.9 \sim 1.2 \text{ m/s}$ 时,沙质床上沙丘消失,此时存在一个比较普遍的、能使汉道断面保持稳定的最大口门断面平均流速 $v_{\max}$,O'Brien^[57]研究得到这个流速为 1.06 m/s 。此外,Bruun^[58]发现,汉道口门断面的大潮平均流速仅相差 $10\% \sim 20\%$,大致在 1.0 m/s 左右。Escoffier^[59]利用 O'Brien 的 $P-A$ 关系式,证明均衡速度并非常数,而是随着汉道断面面积的增加而增加的。

汉道的稳定性往往考虑的是中长期演变趋势,但实际天然汉道的封闭或开通则往往与特定动力状态有关,如辐射沙洲中部条子泥海域,潮汐汉道的摆动和调整经常出现在特定的潮动力条件下,并在短时间内发生演化。O'Brien^[60]也指出用平均数值,如年平均潮差下的纳潮量来判断汉道是否会封闭,都不能代表实际情况,所以提出用封闭系数 M 来判断汉道是否封闭。对于某一汉道来说,存在临界值 M_c ,当 $M/M_c \leq 1$ 时,汉道保持开放;当 $M/M_c > 1$ 时,风暴作用一段时间后汉道将封闭。但事实上,由于风暴时的波浪强度等参数难以确定,单纯用公式计算 M 值来判断潮汐汉道是否会封闭还是存在相当难度的。

4 潮汐汉道泥沙运动与稳定性

鉴于潮型的不同,Bruun^[61]引入了最大潮流量和沿岸漂沙量,根据沿岸漂沙量与潮流量的比值关系,来判断汉道口门水深维持的可能性,并指出沿岸泥沙以两种方式从汉道口门内侧运移到口外,即潮流输运和口外沙坝输运,并用 $M/Q_{\max}$ 的比值来区分

泥沙的输运方式,其中 M 为沿岸漂沙量, $Q_{\max}$ 为大潮最大潮流量,当 $M/Q_{\max} < 10$ 时,泥沙以潮流输运为主;当 $M/Q_{\max} > 300$ 时,则以口外沙坝输运为主,实际上泥沙通过口门多是这两种方式的混合。通常,位于有沿岸输沙的海岸上的潮汐汉道是否会被泥沙所淤积,取决于多种因素,径流之外的因素则可综合为最大纳潮量 Ω 和沿岸泥沙输运总量 M ,前者起冲刷作用,后者使汉道趋于萎缩。故 Bruun 等^[62]用 Ω/M 作为汉道的稳定性指标。后来 Aubrey 等^[13,61]又逐步修正了这个指标,把它作为全面稳定性的判据,当 $\Omega/M \leq 20$ 时,汉道口门段成为不稳定的溢流水道;当 $20 < \Omega/M \leq 50$ 时,所有汉道都是典型的沙坝输运,风暴浪在沙坝上破碎,只有在河流丰水期中才能冲刷成明显的汉道形态;当 $50 < \Omega/M \leq 100$ 时,口外沙坝相当发育,但一般还是一条水道穿过沙坝;当 $100 < \Omega/M \leq 150$ 时,口外沙坝形态明显;当 $\Omega/M > 150$ 时,通航条件相当好,口外沙坝小。但是,实践证明 Ω/M 等只能粗略判断拦门沙航道的稳定性,还必须对拦门沙本身的动力地貌因素作直接判断。尤芳湖^[63]提出 $\beta = E_f/E_b$ 作为判别依据,其中 E_f 和 E_b 分别是航道主轴的涨落潮能,并给出 $\beta = 0.797 + 0.65\Delta Z$, ΔZ 是计算 β 时航道的冲淤强度。刘家驹等^[64,65]则在实际工程经验的基础上,结合理论推导给出了拦门沙开挖新航道后的淤积强度计算方法。

季节性封闭的潮汐汉道也是海岸比较常见的汉道形态,为揭示季节性封闭或开通的潮汐汉道的过程控制因素,Ranasinghe 等^[66,67]利用形态动力学模型,反演了沿岸和离岸输沙对汉道演变的影响,结果表明,潮汐汉道的季节性封闭主要受典型动力条件下的向岸或离岸泥沙输运支配,当波浪入射角较小、波陡小于临界波陡时,向岸泥沙输运有助于汉道的封闭,而当波陡大于临界波陡时,离岸泥沙输运则有助于维持汉道的畅通,同时,当波陡远大于临界波陡或者波浪入射角比较大时,沿岸输沙则成为汉道封闭的主导因素。

事实上,潮汐汉道水动力及泥沙输运研究有助于理解潮汐汉道的水动力特性、演变过程及其稳定性^[68,69],然而,由于泥沙输运受潮流、波浪、沉积物特征、三角洲形态等因素影响^[70-71],以及泥沙数据的精度与如何判定数据优劣等的不确定性使得泥沙输运平衡计算受到极大的限制。为此,Pacheco 等^[72]基于最佳评估和不确定性分析方法,给出了综合泥沙输运平衡计算和汉道水动力参数分析的方法来评估潮汐汉道的稳定性。任美锒等^[73]则提出在水文泥沙因素尚不齐全时,可以根据海岸动力地貌

及沉积物的标志进行综合分析,以此判断汉道通航的可能性。

5 动力地貌沉积与潮汐汉道稳定性

从潮汐汉道的沉积过程及地貌环境变迁来探寻潮汐汉道的稳定性受到广泛的关注,如 Varf^[74]研究了潮汐汉道落潮三角洲地貌发育与沉积动力过程的响应,Buijsman 等^[75]给出了荷兰 Marsdiep 潮汐汉道拦门沙地区沙波移动的高度、长度、不对称性和方向,邵全琴等^[76]从现代沉积特征的角度,探讨了三亚沙坝、湖型潮汐汉道和洋浦港湾溺谷型潮汐汉道的发育模式和沉积模式,并认为港湾溺谷型潮汐汉道的发育规模大于沙坝、湖型潮汐汉道,而且港湾溺谷型潮汐汉道比沙坝、湖型潮汐汉道稳定;张乔民等^[77]认为地貌结构、沉积物分布和动力场结构之间的一致性,是落潮三角洲长期稳定的沉积动力过程的结果,是潮汐汉道和落潮三角洲地貌结构稳定性的表现,由此提出湛江港是华南海岸稳定性最好的潮汐汉道之一;Li 等^[78]基于沉积物组成及演化历史,结合沉积动力过程,就水东湾潮汐汉道系统的稳定性进行了探讨。峡道作为潮汐汉道的重要形式之一,是岛与岛、岛与陆以及陆与陆之间的沟通两端较大水体的水流通道的^[79],von Rad 等^[80]曾对位于意大利和阿尔巴尼亚之间的 Otranto 峡道全新世沉积特性进行了系统研究,而 Johnson^[81]曾对飞马海峡峡道的地质学、沉积学、地球物理学、古海洋学以及海底地貌学等方面开展了多学科综合研究。

受限于沉积动力过程的复杂性及地貌演变的中长时间尺度效应,即使针对同一潮汐汉道,不同的研究方法和出发点,也可能得到相异的结论。如黎刚等^[82]通过对 20 世纪 50 年代以来的历史地形资料对比,提出渤海湾曹妃甸东北部老龙沟潮汐汉道地貌演化受波浪和潮流的混合控制,滨外沙坝和分割沙坝的迁移迫使落潮喷射流方向改变,引起落潮水道的摆动。但是,海区地震地层剖面探测结果却表明老龙沟是古河口被潮流改造而成的现代潮汐通道^[83],且老龙沟西支口门受东坑坨西南尾端淤长的影响,引起岬角效应增大、潮流动力增强,导致东槽冲刷发展,而西槽的摆动则与东槽发展产生的挤压作用有关^[84]。

随着卫星遥感技术及高分辨率测量技术的发展及其在地貌演变中的广泛应用,潮汐汉道系统微地貌单元演化受到越来越为广泛的关注。左书华等^[85]基于 GIS 技术研究认为,洋浦湾潮汐汉道地貌经历了古河谷形成阶段、古河谷下切—沉溺阶段、潮汐汉道阶段,长时间尺度上已进入稳定阶段。龚文

平等^[86]根据海南陵水新村港附近海区的卫星遥感图,结合潮汐汉道的动力场,给出了新村港潮汐汉道的落潮主水道表现出有规律的演变、汉道口门稳定性比较高的结论。黄海军等^[87]利用黄河三角洲沿岸 10 个河口、潮汐汉道的 23 幅卫星影像解译并对比了高潮位岸线的位置,探讨了自 1976 年黄河改道以来三角洲岸线的变化特征。

我国南黄海辐射沙脊群地区淹没型潮汐汉道特色显著,汉道—沙洲系统以离岸沙洲为主,次级潮沟摆动频繁,潮汐汉道—沙洲系统稳定性研究备受瞩目。黄海军等^[88-89]根据南黄海海底辐射沙洲 1973—1993 年 9 幅时相卫星影像及海岸带调查资料分析,指出辐射状潮汐汉道—沙洲系统演化处于较稳定阶段,并论述了沙洲变迁主要方式,外围沙洲向中心迁移,潮沟两侧沙洲消长,次级潮沟消长,沙洲变迁。吴曙亮等^[90]通过对 20 世纪 70—90 年代 3 期卫星图像的解译和对比,认为辐射沙洲区的潮汐汉道摆动具有明显的分区性,以草米树洋为界,北部等深线呈向左逆时针移动,南部等深线则呈向右顺时针摆动。刘春燕等^[91]根据 1988—2008 年的 TM 影像,对江苏辐射沙洲地区 5 条主要潮沟的动态演变研究方法进行了探讨,并针对潮沟的特殊地形和复杂多变情况,提出了通过中轴线位置的变化定量地表述潮沟演变的思路。何华春等^[92]综合遥感影像分析、地理信息系统、沉积物粒度、主元素分析及水动力条件分析等方法,认为烂沙洋潮流通道从整体上讲是一条稳定的潮流通带,沉积动力条件较稳定。

由于潮汐汉道的稳定性涉及水动力、泥沙运动、汉道系统地貌演变^[93-94]、沉积环境变迁^[95]及其之间的复杂相互作用,汉道地貌学、汉道动力过程及沉积环境等方面的研究^[96]虽均可作为潮汐汉道稳定性提供重要依据,但始终难以直观地确定多因素相互作用下潮汐汉道稳定性的判别依据。现阶段综合水力学、泥沙动力学和形态测量等研究结果,用统计、理论分析等方法获得一些具有理论和现实意义的潮汐汉道稳定性判别依据是未来研究的重点和方向。

随着泥沙运动理论及物理模型和数值模型建模技术的发展,潮汐汉道的动力及地貌演变模拟研究也逐渐成为潮汐汉道过程研究的重要方法^[97-98],但受制于动力与地貌单元时间和空间尺度的不统一,目前长周期潮汐汉道动力地貌过程已成为基于过程的模型研究的热点和难点问题^[99-100]。

6 研究展望

随着潮汐汉道稳定性研究的进一步发展,对潮汐汉道稳定性内在物理机制的认识也越来越深入,

但由于潮汐汉道稳定性的影响因素众多,未来需要深入研究的课题主要有:

a. 潮汐汉道稳定性的 $P-A$ 关系研究中,为确保得到的 $P-A$ 关系充分反映潮汐汉道的稳定性并作为判别指标,往往要求参与统计分析的潮汐汉道为稳定型汉道,但在未得到 $P-A$ 关系之前,又难以直接判定汉道是否处于稳定或不稳定状态,因此,如何从潮汐汉道的水动力及泥沙运动或沉积地貌等角度,寻求筛选稳定型潮汐汉道参与 $P-A$ 关系的统计分析是深入探求 $P-A$ 关系物理机制及其相关参数变化规律的关键问题。

b. 潮汐汉道的水动力及泥沙运动复杂多变,影响潮汐汉道稳定性的因素难以逐一甄别,现阶段相应的判别指标也呈多样化,但均具有相应的适用范围。因此深入分析潮汐汉道水动力、泥沙、沉积动力特性等因素之间的作用机制,有助于揭示潮汐汉道稳定性的内在物理机制。

c. 作为潮汐汉道的特殊形式,淹没型潮汐汉道的水动力、泥沙运动及沉积动力特征复杂,现阶段借鉴常规潮汐汉道研究方法探索淹没型潮汐汉道稳定性的同时,注重淹没型潮汐汉道动力指标及地貌指标的选取和判别是探索淹没型潮汐汉道稳定性内在机制的重要途径。

d. 潮汐汉道稳定性的研究目前仍以单一汉道系统为主,对于复合潮汐汉道和淹没型潮汐汉道的稳定性研究还不足。直接采用单一汉道稳定性的研究方法或线性分析的方法开展,与后两种复杂潮汐汉道系统表现的强非线性和能在一定时期维持稳定的特性不相符。因此,亟需积累基础资料和研究稳定性的影响因素与主要机制。

e. 随着物理模型和数值模型建模技术的发展以及河口海岸泥沙运动理论的深化,基于过程模型方面的研究也越来越广泛地应用于潮汐汉道的稳定性研究中,目前模型的精度尚有待于进一步提高。因此,未来仍需不断完善河口海岸的水沙运动理论,以此促进潮汐汉道动力地貌过程模拟研究的进一步发展。

参考文献:

[1] TVER D F. Ocean and marine dictionary[M]. Centreville : Cornell Maritime Press ,1979.

[2] U.S. Army Corps of Engineers. Shore protection manua[M]. 2nd ed. Washington ,D. C. : U.S. Government Printing Office , 1975.

[3] BATES R L ,JACKSON J A. Glossary of geology[M]. 2nd ed. Alexandria :American Geological Institute ,1980.

[4] HAYES M O. Barrier island morphology as a function of tidal

and wave regime[C]//LEATHERMAN S P. Barrier island , from the Gulf of St. Laurence to the Gulf of Mexico. New York :Academic Press ,1979 :1-28.

[5] HAYES M O. General morphology and sediment patterns in tidal inlet[J]. Sedimentary Geology ,1980 26 :139-156.

[6] OERTEL G F. Sediment transport on estuary entrance shoals and the formation of swash platforms[J]. J Sediment Petrol , 1972 42 :858-868.

[7] BERTIN X ,CHAUMILLON E ,SOTTOLICHIO A ,et al. Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities :the Marennes-Oléron Bay and the Maumusson Inlet ,France[J]. Continental Shelf Research 2005 25(9) :1115-1131.

[8] JAFFE B E ,LIST J H ,SALLENGER A H Jr. Massive sediment bypassing on the lower shoreface offshore of a wide tidal inlet- Cat Island Pass ,Louisiana[J]. Marine Geology ,1997 ,136 :131 -149.

[9] CASTELLE B ,BOURGET J ,MOLNAR N ,et al. Dynamics of a wave-dominated tidal inlet and influence on adjacent beaches , Currumbin Creek ,Gold Coast ,Australia[J]. Coastal Engineering , 2007 54 :77-90.

[10] BOOTHROYD J C. Tidal inlets and tidal deltas[C]//DAVIS R A Jr. Coastal Sedimentary Environments. New York : Springer-Verlag ,1985 :445-532.

[11] FRY V A ,AUBREY D G. Tidal velocity asymmetries and bedload transport in shallow embayments[J]. Estuarine , Coastal and Shelf Sciences ,1990 30 :453-473.

[12] BOON III J D ,BYRNE R J. On basin hypsometry and the morphodynamics response of coastal inlet systems[J]. Marine Geology ,1981 40 :27-48.

[13] AUBREY D G ,SPEER P E. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems : Part I , observation[J]. Estuarine ,Coastal and Shelf Science ,1985 , 21 :185-205.

[14] BRUUN P ,MEHTA A J ,JONSSON I G. Stability of tidal inlets : theory and engineering[M]. Amsterdam :Elsevier Scientific Publishing Company ,1978.

[15] SPEER P E ,AUBREY D G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems :Part II ,theory [J]. Estuarine ,Coastal and Shelf Science ,1985 21 :207-224.

[16] GAO Shu , WANG Ya-ping. Characteristics of sedimentary environment and tidal inlet evolution of Jiaozhou Bay[J]. Advances in Marine Science 2002 20(3) :52-59.

[17] 高抒 ,汪亚平. 胶州湾沉积环境与潮汐汉道演化特征 [J]. 海洋科学进展 2002 20(3) :52-59.

[18] HOQUE A ,AHAD B ,SALEH E. Hydrodynamics and suspended sediment transport at tidal inlets of Salut Mengkabong Lagoon , Sabah ,Malaysia[J]. International Journal of Sediment Research 2010 25 :399-410.

[19] 蔡伟章 ,陈耕心 ,丁锦仁. 象山港潮汐潮流特征及成因探讨[J]. 海洋通报 ,1985 4(3) :8-12.

[20] 高抒 ,谢钦春 ,冯应俊. 浙江象山港潮汐汉道细颗粒物

- 质的沉积作用[J].海洋学报,1990,12(4):463-469.
- [21] PRANDLE D. Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone[M]. Washington D. C. :American Geophysical Union,1992.
- [22] RANASINGHE R,PATTIARATCHI C. Tidal inlet velocity asymmetry in diurnal regime[J]. Continental Shelf Research, 2000,20:2347-2366.
- [23] 高抒.潮汐汊道形态动力过程研究综述[J].地球科学进展,2008,23(12):1237-1248.
- [24] JIA Jian-Jun,GAO Shu,XUE Yun-chuan. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system,Shandong Peninsula,China[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2003,57(5):783-801.
- [25] 贾建军,高抒,薛允传.山东荣成月湖潮汐汊道的时间-流速不对称特征[J].海洋学报,2003,25(3):68-76.
- [26] ZHENG Jin-hai,ZHAO Ying-hui,CHEN Ke-feng,et al. Numerical analysis of current characteristics in submerged tidal inlet off Jiangsu Coast[C]//Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii,USA:the International Society of Offshore and Polar Engineers(ISOPE),2011:937-943.
- [27] 彭炳健.粤西水东潮汐通道流速不对称及流速模拟分析[J].海洋科学,1987(6):17-22.
- [28] GAO Shu.Physical changes of tidal inlet systems[C]//CROSSLAND C J,KREMER H H,LINDEBOON H J. Coastal Fluxes in the Anthropocene.Berlin:Springer-Verlag,2005:332-336.
- [29] GAO Shu,ZHUANG Z Y,WEI H L,et al. Physical processes affecting the health of coastal embayments:an example from the yue-hu inlet,Shandong Peninsula,China[C]//HONG G H,ZHANG J,PARK B K. Health of the Yellow Sea. Seoul:The Earth Love Publication Association,1998:313-329.
- [30] 王世俊,李春初,田向平.海南岛小海沙坝-泻湖-潮汐通道体系自动调整及恶化[J].台湾海峡,2003,22(2):248-253.
- [31] EDWIN P L,van DERSPEK J F. Long-term morphodynamic evolution of Texel inlet and its ebb-tidal delta,the Netherlands[J]. Marine Geology,2006,225(1):5-21.
- [32] 张忍顺.潮汐汊道研究的进展[J].海洋通报,1984,3(2):89-96.
- [33] O'BRIEN M P. Estuary tidal prism related to entrance areas[J]. Civil Engineering,1931(8):738-739.
- [34] JOHNSON J W. Characteristics and behavior of pacific coast tidal inlets[J]. Journal of Waterways,Harbors and Coastal Engineering Division,1973,99(3):325-339.
- [35] JARRETT J T. Tidal prism-inlet area relationships[R]. Washington D.C. :American Geophysical Union,1976.
- [36] SHIGEMURA T. Tidal prism-throat area relationship of bays of Japar[J]. Shore and Beach,1980,48(3):30-45.
- [37] 张乔民.华南海岸潮汐汊道的P-A关系分析[J].热带海洋,1987,6(2):10-18.
- [38] 高抒.东海沿岸潮汐汊道的P-A关系[J].海洋科学,1988(1):15-19.
- [39] 张忍顺,黄渤海沿岸潮汐汊道的P-A关系[J].海洋工程,1995,13(2):55-61.
- [40] 喻国华,陆培东.江苏吕四小庙洪淹没性潮汐汊道的稳定性[J].地理学报,1996,51(2):127-134.
- [41] 朱明敏.腰沙-冷家沙围垦工程对周边水沙环境的影响[D].南京:河海大学,2011.
- [42] GAO Shu,COLLINS M. Tidal inlet equilibrium,in relation to cross-sectionoal area and sediment transport patterns[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,1994,38:157-172.
- [43] 高抒,张红霞.海南岛洋浦港潮汐汊道的均衡过水断面面积[J].海洋与湖沼,1994,25:468-476.
- [44] 陆培东.潮汐汊道系统及环境响应[D].南京:南京师范大学,2002.4.
- [45] 贾建军,高抒.建立潮汐汊道P-A关系的沉积动力学方法[J].海洋与湖沼,2005,36(3):268-276.
- [46] JIA Jian-jun,GAO Shu. A sedimentological approach to P-A relationships for tidal inlet systems:an example from Yuehu Inlet,Shandong Peninsula,China[J]. Frontiers of Earth Science in China,2008(3):262-268.
- [47] 贾建军.小型潮汐潮道系统的沉积动力过程与演化[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2001:116-118.
- [48] 高抒,张红霞.潮汐汊道A-P关系中参数C和n的控制因素[J].海洋科学,1997(4):23-27.
- [49] 张忍顺,李坤平.滦河三角洲海岸潮汐汊道-潮盆体系的演变[J].海洋工程,1996,14(4):45-52.
- [50] ESCOFFIER E F. The stability of tidal inlets[J]. Shore and Beach,1940(4):114-115.
- [51] O'BRIEN M P,DEAN R C. Hydraulic and sedimentary stability of coastal inlet[C]//Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference. New York:ASCE,1972:761-780.
- [52] KEULEGAN G H. Third progress report on tidal flow in entrances:water level fluctuations of basins in communication with seas[M]. Washington D. C. :National Bureau of Standards,1951.
- [53] OLIVERIA I B. Natural flushing ability in tidal inlets[C]//Proceedings of the 12th Coastal Engineering Conference. New York:ASCE,1970:1827-1845.
- [54] WALTON T L,ESCOFFIER E F. Linearized solution to inlet equation with inertia[J]. Journal of the Waterways,Port,Coastal and Ocean Div,1971,105(4):341-355.
- [55] BYRNE R J,GAMMISCH R A,THOMAS G R. Tidal prism-inlet area relations for small tidal inlets[C]//Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference. New York:ASCE,1980:2517-2533.
- [56] MEHTA A J,OZSOY E. Inlet hydraulics[M]. Amsterdam:Elsevier Scientific Publishing Company,1978.
- [57] O'BRIEN M P. Equilibrium flow area of inlets on sandy coasts[J]. J Waterway Harbor Div,1969,95(1):43-52.
- [58] BRUUN P. Port Engineering[M]. Houston:Gulf Publishing,1973.
- [59] ESCOFFIER F F. Hydraulics and stability of tidal inlet[R].

- Vicksburg ,Mississippi :U. S. Army Engineer Research and Development Center ,1977 :1-72.
- [60] O 'BRIEN M P. Notes on tidal inlets on sandy shore[R]. Vicksburg ,Mississippi :U. S. Army Engineer Research and Development Center ,1976 :1-26.
- [61] BRUUN P. Tidal inlets housekeeping[J]. Journal of the Hydraulic Division ,1967 :93 :167-184.
- [62] BRUUN P ,GERRITSEN F. Stability of coastal inlets[M]. Amsterdam :North Holland Publishing Company ,1960.
- [63] 尤芳湖.防城港潮汐汊道动态稳定问题的研究[C]//中国海洋湖沼学会.第二次中国海洋湖沼科学会议论文集.北京 :科学出版社 ,1983 :229-239.
- [64] 刘家驹 ,张镜潮.淤质泥海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用 :兼论连云港建西大堤后的泥沙问题[J].水利水运科学研究 ,1993 (4) :301-320.
- [65] 罗肇森.潮汐通道拦门沙航道的淤积计算[J].海洋工程 ,1992 ,10 (2) :32-40.
- [66] RANASINGHE R ,PATTIARATCHI C ,MASSELINK G. A morphodynamic model to simulate the seasonal closure of tidal inlets[J]. Coastal Engineering ,1999 :37 :1-36.
- [67] RANASINGHE R ,PATTIARATCHI C. The seasonal closure of tidal inlets : Wilson Inlet : a case study[J]. Coastal Engineering ,1999 :37 :37-56.
- [68] van de KREEKE J. Stability of tidal inlets-Pass Cavallo ,Texas [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science ,1985 :21 :33-43.
- [69] BUONAIUTO F S ,KRAUS N C. Limiting slopes and depths at ebb-tidal shoal[J]. Coastal Engineering ,2003 :48 :51-65.
- [70] LE Xuan-hoan ,HANSON H ,LARSON M ,et al. Modeling regional sediment transport and shoreline response in the vicinity of tidal inlets on the Long Island coast ,United States [J]. Coastal Engineering ,2011 :58 :554-561.
- [71] HICKS D M ,HUME T M. Determining sand volumes and bathymetric change on an ebb-tidal delta[J]. J Coast Res ,1997 ,13 (2) :407-416.
- [72] PACHECO A ,VILA-CONCEJO A ,FERREIRA O ,et al. Assessment of tidal inlet evolution and stability using sediment budget computations and hydraulic parameter analysis[J]. Marine Geology ,2008 :247 :104-127.
- [73] 任美镔 ,张忍顺.潮汐汊道的若干问题[J].海洋学报 ,1984 :3 (3) :352-360.
- [74] VAN L S. Tidal inlet systems bottom pattern formation and outer delta development[D]. Utrecht ,The Netherlands : University of Utrecht ,2002 :2-9.
- [75] BUIJSMAN M ,RIDDERINKHOF H. Long-term evolution of sand waves in the Marsdiep inlet :high-resolution observations [J]. Continental Shelf Research ,2008 :28 (9) :1190-1201.
- [76] 邵全琴 ,王颖 ,赵振家.海南岛潮汐汊道的现代沉积特征研究[J].地理研究 ,1996 ,15 (2) :84-91.
- [77] 张乔民 ,郑德延 ,李绍宁 ,等.湛江港潮汐汊道落潮三角洲沉积动力过程[J].地理学报 ,1995 :50 (5) :421-428.
- [78] LI Chun-chu , YING Zhi-fu , YAN Gan-ran , et al. Morphodynamic processes of tidal inlet and ebb-tidal delta of Shuidong Bay[J]. China Ocean Engineering ,1991 :5 (1) :85-88.
- [79] 左书华 ,李蓓 ,杨华.岛群环境下峡道泥沙问题研究进展[J].海洋地质动态 ,2008 :24 (12) :5-10.
- [80] von RAD U ,FABRICIUS F H. Holocene sedimentation in the Strait of Otranto between the Adriatic and Ionian Seas (Mediterranean) [J]. Marine Geology ,1971 :10 :293-355.
- [81] JOHNSON D A. Physiography ,structure and sediment-current interaction[J]. Marine Geology ,1984 :58 :1-34.
- [82] 黎刚 ,孙祝友.曹妃甸老龙沟动力地貌体系及演化[J].海洋地质与第四纪地质 ,2011 :31 (1) :11-19.
- [83] 王颖 ,邹欣庆 ,汪亚平 ,等.曹妃甸港区开发海岸动力地貌研究[R].南京 :南京大学 ,2006.
- [84] 季荣耀 ,陆永军 ,左利钦.曹妃甸老龙沟潮汐通道拦门沙演变机制[J].水科学进展 ,2011 :22 (5) :645-652.
- [85] 左书华 ,李蓓 ,杨华.基于 GIS 的海南洋浦港洋浦深槽稳定性分析[J].水道港口 ,2010 :31 (4) :242-246.
- [86] 龚文平 ,陈明和 ,温晓骥 ,等.海南陵水新村港潮汐汊道演变及其稳定性分析[J].热带海洋学报 ,2004 :23 (4) :25-32.
- [87] 黄海军 ,樊辉.1976 年黄河改道以来三角洲近岸区变化遥感监测[J].海洋与湖沼 ,2004 :35 (4) :306-314.
- [88] 黄海军 ,李成治.南黄海海底辐射沙洲的现代变迁研究[J].海洋与湖沼 ,1998 :29 (6) :640-645.
- [89] 黄海军.苏北陆岸岸滩主要潮沟近期变迁的遥感解译[J].海岸工程 ,2002 (1) :24-28.
- [90] 吴曙亮 ,蔡则健.江苏省沿海沙洲及潮汐水道演变遥感分析[J].国土资源遥感 ,2002 (3) :29-32.
- [91] 刘春燕 ,张鹰.遥感中轴线法在江苏辐射沙洲潮沟演变监测中的应用[J].海洋科学 ,2011 (2) :72-76.
- [92] 何华春 ,邹欣庆 ,李海宇.江苏岸外辐射沙脊群烂沙洋潮流通道稳定性研究[J].海洋科学 ,2005 (1) :12-16.
- [93] HAYES M O. Morphology of sand accumulations in estuaries [C]//CRONIN L E. Estuarine Research. Singapore :Academic Press ,1975 :3-22.
- [94] DAVIS R A. Coastal Sedimentary Environments[M]. Berlin : Springer-Verlag ,1985 :287-360.
- [95] 张乔民.潮汐汊道沉积动力与现代地貌过程国外研究进展[J].海洋通报 ,1992 ,11 (1) :84-92.
- [96] 高抒.从地貌学观点看潮汐汊道研究方向[J].海洋通报 ,1989 :3 (3) :86-90.
- [97] 熊绍隆 ,曾剑 ,韩海霖.潮汐河口泥沙物理模型若干问题探讨[J].水利水电科技进展 ,2010 :30 (1) :19-23.
- [98] 汤立群 ,陈洁 ,申锦瑜 ,等.风暴作用下河口动力过程数值模拟研究进展[J].水利水电科技进展 ,2009 :29 (5) :78-83.
- [99] ROELVINK J. Coastal morphodynamic evolution techniques [J]. Coastal Engineering ,2006 :53 :277-287.
- [100] 陆永军 ,季荣耀.潮汐通道系统动力地貌演变的数值模拟研究进展[J].水利水运工程学报 ,2009 (2) :93-104.

(收稿日期 2011-10-11 编辑 熊水斌)