

滩角地形时空变化过程分析^{*}

李志强^{1, 2}, 陈子葵¹

(1 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275;
2 广东海洋大学海洋工程系, 广东 湛江 524088)

摘 要:以观测到的一个在较长时间存在的滩角为研究对象, 研究了常浪条件下滩角的变化过程。选取其代表性的凸部和凹部剖面数据, 应用经验特征函数分解的方法, 结合现场观测的地形动力要素和现象, 得到滩角地形变化的时空特征: ①滩角的凸部是滩角形态的控制因素, 对外动力的响应最为敏感。凸部的顶点是凸部形态变化的一个转折点, 凹部的形态变化表现出一种线性特征; ②常浪条件下, 近岸水下沙坝运动过程对滩角变化起主要控制作用, 表现为海滩的蚀积变化; ③滩面冲流变化过程和波浪变化过程是滩角地形变化的次要模式, 将水下沙坝带来的泥沙在滩面上重新分布, 促使滩角地形不断地调整。

关键词:滩角; 经验特征函数; 地形动力; 海滩过程

中图分类号: P737.4 P736.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 05-0109-05

天然海滩位于海陆相互作用的动力敏感地带, 海滩变化过程是海岸波、流、风等动力因子和海滩地形相互作用的结果^[1-2]。其中海滩的滩面位置又是这些动力相互作用最为明显的地带。每次近岸入射波浪都可能在滩面上形成上冲流, 冲流在滩面上冲的过程中同时伴随着水的下渗, 最后达到一定高度后又回流, 与海滩内渗出的水流一起返回到碎波带。在上冲和回流的过程中, 滩面泥沙都发生大量的输移过程, 因此每次冲流过程完成后, 滩面地形都有变化, 反过来又会影响到下一次的冲流过程 (如冲流可能达到的高度、冲流路径、冲流速度和输沙能力等)。此外, 冲流未能达到的地方, 风也能吹走滩面的泥沙, 而使滩面地形发生变化。

滩角正是上述相互作用过程的产物, 也是海滩上所观测到的、最使人迷惑不解的韵律特征地形之一^[1]。滩角由产生到消亡时间很短暂, 有时仅存在数小时, 但与碎波带动力要素有密切关系, 是海滩状态的指示性特征地形, 因此一直吸引着研究者的目光。滩角研究主要包括如下几个方面内容: ①滩角的形成过程如何, 即滩角形成的机制; ②滩角与近岸环流的关系; ③滩角是否可以用来解释更大尺度的近岸地形, 如海岸新月形地形; ④滩角反映何种海滩状态, 是侵蚀后退还是沉积堆积。这些问题经常也是交织在一起的^[3-11]。为了突出滩角的演化过程, 这些研究往往是选定在极端海况条件下

进行。在天然海滩中, 常浪条件是更为常见的海况条件, 滩角也可能在常浪条件下长时间内存在, 并随着波浪条件的调整而地形发生变化。这种变化过程也是海滩动力要素和地形相互耦合作用的结果, 包含有大量的海滩过程信息, 反映了海滩状态的变化。本文将借助经验特征函数对滩角地形这种变化过程的时空特征进行研究。

1 研究地点环境背景

研究地点位于粤东碣石湾西部一半开敞岬间海湾, 向东开敞。滩海岸地形为连岛砂坝 (图 1)。海滩长约 6 km, 海底坡度较陡, 波浪传播到距离岸线很短距离才破碎, 破碎带很窄。岸滩不宽, 50~100 m, 滩面主要由中粗砂组成, 高大滩肩与陡

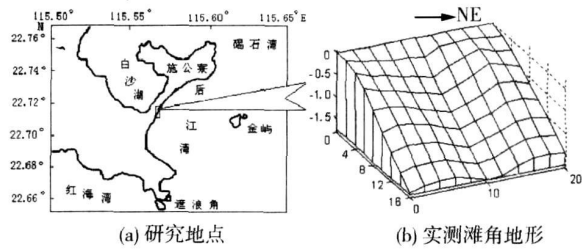


图 1 研究地点示意图 (a) 与实测滩角地形 (b)
(图 b 坐标单位: m)

Fig. 1 Sketch map of the study location (a) and surveyed beach cusp topography (b unit: m).

^{*} 收稿日期: 2007-01-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40576041); 广东海洋大学引进人才科研启动资金资助项目 (E06049)
作者简介: 李志强 (1974 年生), 男, 博士; 通讯联系人: 陈子葵; Email: eesczs@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

滩面是海滩上地形的主要特征。观测点位于海滩的中部反射段, 观测期间, 碎波带发育有沙坝—槽沟地形, 槽沟深约 0.5~1 m, 滩面发育有滩角和滩肩地形, 滩面坡度约为 0.085。

据当地海洋站的长期观测资料分析, 湾口外开阔海区平均波高约 1.2 m, 平均周期约为 4 s, 风速、风向及波向变化都较大。平均潮差仅 0.84 m, 平均大潮差约为 1.1 m, 海滩属波控弱潮海岸。

2 研究方法

2.1 现场观测

2003 年 10 月 16—31 日, 在海滩中部进行现场地形测量和水动力观测。

滩角地形测量采用打桩与简单测量方法相结合的办法。先在海滩中部选择一个典型滩角, 实测间距为 18.0 m。在滩角的两个凸部之间用 1.2 m 高, 直径 1.0 cm 的铁桩布设 11 个剖面 (剖面间距为 2 m) 观测点, 然后对所有的观测剖面进行高程联测。采用文献 [12] 的简单测量方法逐日按间距 2 m 垂直海岸方向进行滩角地形变化测量, 向海测量的界限为海滩水线附近, 长度为 16 m, 即以 11×9 的 2 m×2 m 网格控制一个滩角的形态变化。

波流观测仪为 S4 波流仪。观测期间每天早上 09:00 时左右投放在碎波带的槽内, 下午约 18:00 时左右收回。记录主要数据为波面、流速和流向。采样频率为 2 Hz。

2.2 资料处理分析

由于在碎波带内的水位变化数据受到仪器移动的影响, 这里不采用直接观测数据计算潮汐水位变化, 而是根据 2001 年 8 月 22—23 日在碎波带外 15 m 水深处的水位观测记录, 利用调和分析法推算出观测期间后江湾潮汐水位变化情况 (图 2)^[13]。根据现场的对比, 推算结果与实际的水位变化很一致。观测共进行了 16 d, 潮汐正好经历了一个大小潮过程。10 月 16 日潮差最小, 为 0.97 m。10 月 29 日潮差最大, 为 1.47 m。10 月 25 日潮差接近最低, 为 0.99 m, 高潮水位最低, 为 0.44 m。图 2a 为高潮水位变化过程。

根据现场的观测, 观测期间以涌浪为主, 在早晨和傍晚受当地风场影响有一定的混合浪成分。对波浪观测数据按整点, 取 4 096 个波面记录 (采样频率 2 Hz) 采用上跨零方法计算波周期 T 、有效波高 H_s 、最大波高 $H_{m\max}$, 然后每天进行平均得到该日的波周期 T 和有效波高 H_s , 并选取当日最大波高 $H_{m\max}$ (图 2b、c、d)。其中 10 月 26 日和 31 日因仪器故障没有波浪观测记录。观测期间有效波高

的变化范围为 0.38~0.64 m, 最大波高变化范围为 0.60~1.24 m, 波高相对较小。周期变化范围 4.64~9.39 s。由图可以看出有效波高、最大波高、周期的变化趋势基本上一致。从波浪的变化幅度和现场观测来看, 可以认为在观测期间, 波浪基本上处于常浪条件。由于波浪性质没有发生根本性改变, 使得滩角地形也随之在调整中, 但没有出现消亡现象, 这与以前大多数的研究情况有所不同, 也为研究滩角地形的时空变化特征提供了一个良好的样本。

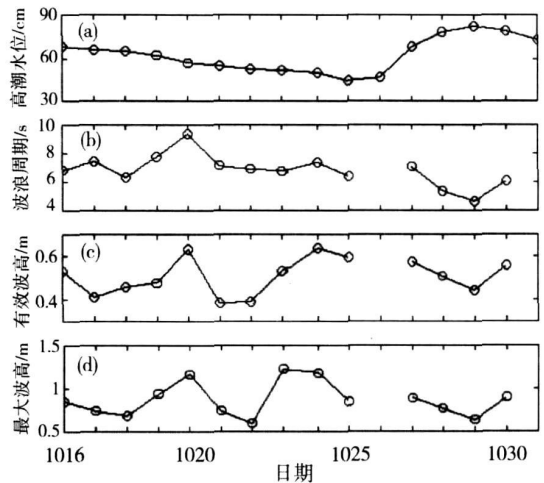


图 2 水动力时间序列
Fig. 2 Time series of hydrodynamics

2.3 经验特征函数

滩角地形变化快, 而且碎波带和冲流带动力复杂, 因此很难对其动力状况进行精确的观测, 这正是滩角地形变化过程研究的难点所在。自 20 世纪 70 年代以后, 一些研究人员开始将经验特征函数 (empirical eigenfunction, 简称 EOF) 引入海滩研究中, 主要应用在分析海滩剖面的时空变化过程^[2, 14-16]。此方法具有收敛快, 各特征函数相互正交, 即代表了相互独立的海滩变化过程, 因此能以少数特征型式代表原始数据场的主要特征, 客观地描述海滩剖面地形变化与主要时间结构。海滩剖面高程的经验特征函数可以表示为:

$$H_{ij} = \sum_{p=1}^n T_p X_{pj} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中, H_{ij} 为第 i 天第 j 个测量站点的高程观测值; T_p 为时间特征函数, X_{pj} 为空间特征函数。从而可以计算最大特征值占海滩剖面数据总方差 90% 及其余特征值占海滩剖面数据残余总方差 90% 的特征函数, 剩余的特征函数则视为海滩剖面变化的纯

随机过程而不再讨论。

3 计算结果与分析

3.1 结 果

滩角的凸部和凹部是滩角地形最显著的特征点，对滩角形态起控制作用，其余部位的变化介于两者之间。因此选取位于滩角凸部和凹部的 2 条剖面为滩角地形的代表性剖面，它们分别是西南数第 1 条测量剖面 and 从西南数第 6 条测量剖面（图 1）。由此分析出的滩角地形时空变化特征即可反映滩角变化的整体特征。图 3 是观测期间 2 条剖面的测量结果。这里以实测点来构成分析样本，故（1）式中， $n=9$ ， $m=16$ 。

经验特征函数分解后，第 1 剖面的前 3 个经验特征值分别为 142.82、0.439 和 0.097，第 6 条剖面的前 3 个特征值分别为 196.20、0.23 和 0.039。两条剖面的第 1 特征值对总方差的贡献量均超过了 99%，两者第 2、3 特征值占剩余方差的贡献量分别为 73.34%、16.27%（累计为 89.61%）和 79.84%、13.49%（累计为 93.33%）。说明前 3 个特征函数可以代表滩角凸部和凹部的主要变化过程。

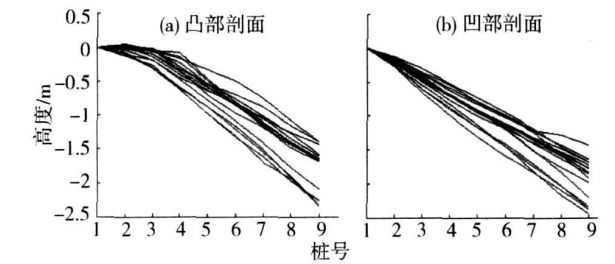


图 3 实测滩角剖面变化过程
Fig. 3 Variations of beach cusp profiles

3.2 滩角剖面变化主要过程及地形动力学意义

两条剖面第 1 特征值占的方差都最大，是海滩变化的主要过程，其对应的特征向量（ x_1 ）描述的是海滩剖面在外动力作用下变化的主要模式。由空间函数可以看出（图 4），两者的变化趋势是相同的，只是第 1 条剖面，在距起测点 4~5 m 的位置处有一明显的转折点，该点对应于滩角的凸部的上凸位置，表明凸部顶点是滩角泥沙运动的一个转折点。第 6 条剖面第 1 特征值对应的特征向量呈平直特征。说明观测期间，海滩体积的增减对海滩形态变化起主要作用。因此，第 1 特征值代表的是 16 d 内两滩角剖面泥沙蚀积的平均状况。从时间函数来看（图 5），在整过观测期间，这种变化的

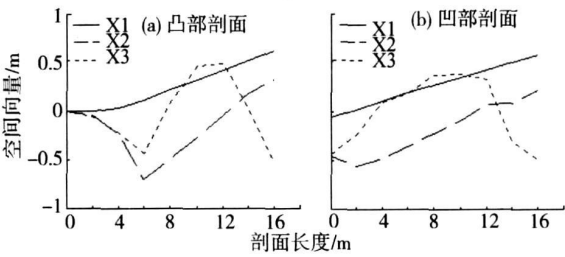


图 4 滩角剖面变化的主要空间特征函数
Fig. 4 Spatial eigenfunctions of the horn and the embayment of the cusp

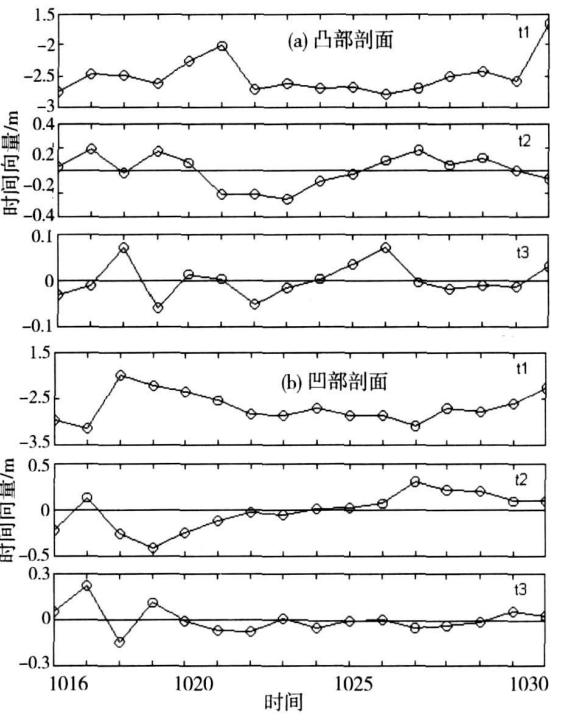


图 5 滩角凸部和凹部剖面变化的主要时间特征函数
Fig. 5 Temporal eigenfunctions of the horn and the embayment of the beach cusp

周期性不明显。结合现场观测，两条剖面的第 1 特征值可以认为是由水下沙坝并岸过程引起的，定义为沙坝运动过程。从 10 月 16 日开始，水下沙坝逐渐向岸运动，到 10 月 31 日基本上完成。由于其贯穿了整个观测期间，因而时间函数没有表现出明显的周期，但都有两条剖面对应的的时间函数过程均有一个明显的由小到大的变化趋势。计算海滩体积，发现海滩处于堆积过程中，这与观测期间建设性的涌浪性质是吻合的。

两条剖面第 2 特征值对应的空间函数（ x_2 ）变化的总体趋势也是相同的，凸部和凹部在距起测点 14~16 m 处出现蚀积转换点。其地形学意义可以解释为泥沙在滩面的横向运动，是水上与水下地形的耦合相互作用的结果，是水上剖面对近岸作用

的响应过程^[2]。凸部和凹部的侵蚀形式有明显的差异性,凸部的侵蚀主要发生在凸部顶点(4~8 m)附近,凹部的侵蚀在整过滩面上呈线性特征,越往下侵蚀量越大。泥沙从滩面上向下搬运堆积,现场观测到的直接表现是滩面坡度变缓。从两者对应的时间函数(t_2)上可以清楚看到,滩角凸部这个过程具有约 5 d 的周期,滩角凹部具有 7~8 d 的周期。根据剖面蚀积分布特征,同时结合冲流对滩角的作用特性^[19],可以认为第 2 特征值的地形动力学意义是冲流变化过程。文献[18]对碎波带水动力的变化分析也很好证实了这一点。

两条剖面第 3 特征值对应的空间函数(x_3)主要是水上部分的地形变化,泥沙从滩角的上部和下部向中间搬运堆积。凸部的堆积发生在 8~14 m 之间,凹部堆积发生在 4~13 m 之间。凸部和凹部的变化时间函数(t_3)都近似地具有约 2 d 的周期。第 3 特征值推断反映的是波浪要素变化引起的滩角变化过程,特别是与波浪周期的变化过程很相近(图 2)。当然还可能受到波高、波向变化(引起滩角开口朝向的变化)的作用,这里将其定义为波浪变化过程。

4 结 论

本文以常浪条件下观测到的一个在较长时间存在,并且地形处于不断调整的滩角为研究对象,选取其代表性的凸部和凹部剖面数据,应用经验特征函数分解的方法,结合现场观测的地形动力要素和现象,研究了常浪条件下滩角地形变化的时空特征,得到如下结论:

(1) 滩角的凸部是滩角形态的控制因素,对外动力的响应最为敏感。凸部的顶点是凸部形态变化的一个转折点,凹部的形态变化表现出一种线性特征。

(2) 常浪条件下,近岸水下沙坝运动过程对滩角变化起主要控制作用,表现为海滩的蚀积变化。

(3) 观测期间为建设性的涌浪条件,滩面处于堆积过程中,但滩面冲流变化过程和波浪变化过程将水下沙坝带来的泥沙在滩面上重新分布,促使滩角地形不断地调整,是水上剖面对近岸作用的响应过程。

参考文献:

- [1] KOMAR P D. Beach processes and sedimentation[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1978: 429.

- [2] 陈子燊. 海滩剖面时空变化过程分析[J]. 海洋通报, 2000, 19(2): 42-48.
- [3] WRIGHT L D, SHORT A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis[J]. Mar Geol, 1984, 56: 93-118.
- [4] HOLLAND K T. Beach cusp formation and spacings at Duck, USA[J]. Continental Shelf Res, 1998, 18: 1081-1098.
- [5] MASSELINK G. A longshore variation in beach cusp morphology in a coastal embayment[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 335-347.
- [6] KANEKO A. Formation of beach cusp in a wave tank[J]. Coastal Engineering, 1985, 9: 81-90.
- [7] TAKEDA J, SUNAMURA T. Formation and spacing of beach cusps[J]. Coastal Engineering in Japan, 1983, 26: 121-135.
- [8] MASSELINK G, PATTIARATCHI C B. Morphodynamic impact of sea breeze on a beach with beach cusp morphology[J]. J Coastal Res, 1997, 22: 1139-1156.
- [9] MILLER J R, MILLER S M, TORZYNSKI C A, et al. Beach cusp destruction, formation and evolution during a subsequent to an extratropical storm, Duck, North Carolina[J]. J Geol, 1989, 97: 749-760.
- [10] MASSELINK G, HEGGE B J, PATTIARATCHI C B. Beach cusp morphodynamics[J]. Earth Surf Process Landforms, 1997, 22: 1139-1155.
- [11] BUSCOMBE D, MASSELINK G. Concepts in gravel beach dynamics[J]. Earth Science Reviews, 2006, 79: 33-52.
- [12] 李志强, 李志龙, 冯砚青, 等. 一种简易海滩测量方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(增刊): 197-199.
- [13] 邱大洪. 工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 220-224.
- [14] AUBREY D G. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement[J]. J Geophys Res, 1979, 84: 6347-6354.
- [15] AUBREY D G, and Ross R M. The quantitative description of beach cycles[J]. Mar Geol, 1985, 69: 155-170.
- [16] BOWMAN D. Efficiency of eigenfunctions for discriminant analysis of subaerial non-tidal beach profiles[J]. Mar Geol, 1981, 39: 242-258.
- [17] LARSON M, KRAUS N C. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina[J]. Mar Geol, 1994, 117: 75-94.
- [18] 李志强. 波控岬间海湾近岸地形动力过程研究[D]. 广州: 中山大学, 2005.

(下转第 120 页)

ing Geology 1998 49 271 – 276

model for the geometry of two dimensional crack growth

[12] HORGAN G W, YOUNG I M . An empirical stochastic

in soil[J]. Geoderma 2000 96 263 – 276

The Modeling Analysis on Cracking Pattern of Subaqueous Shrinkage Mud Cracks

MA Xiao-ming¹, DAI Jun-sheng¹, ZHAO Zhen-yu^{1, 2}, ZHOU Yao-qi^{1, 2}, AIHEMAITIJIAN¹

(1 Resources and Information Institute, China University of Petroleum, Dongying 257062, Shandong China;
2 Laboratory of Geochemistry & Lithosphere Dynamics, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract By the observation of seven work areas in the coastland of Tangdao Bay, Qingdao, the cracking rules of subaqueous shrinkage cracks in present muddy sediments are researched, and the geologic evolutional model is also established. The results show that (1) Three cracking patterns are as unilateral cracking pattern, bilateral intersectional pattern and central dispersed pattern, respectively. (2) The angle of crack growth is mostly 90° and next 120°. (3) The abnormal pressure action in sand-mud layer plays an important role in cracking, and the forming mechanism of abnormal pressure is similar to the one in the geotectonic framework.

Key words subaqueous shrinkage crack; cracking pattern; angle of bifurcation; abnormal pressure; geologic modeling

(上接第 112 页)

Analysis on Spatial and Temporal Processes of Beach Cusp Variations

LI Zhi-qiang^{1, 2}, CHEN Zi-shan²

(1 Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275;
2 Department of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract A beach cusp existing for a long term under normal wave conditions was measured repeatedly. The beach cusp variations are analyzed with empirical orthogonal function (EOF) using the topography data. Taking the hydrodynamic factors and beach phenomena into account, the following results are deduced: (1) The horn of the beach cusp being sensitive to the morphodynamics may control beach cusp shape. The vertex of the beach cusp is the turning point of the horn profiles variations while the profiles of the embayment changes linearly. (2) Under normal wave conditions, sub-tidal bar movement may control the beach cusp topography variations. (3) Swash and wave variations induce beach cusp subsidiary changing models and redistribute the sand brought by the sub-tidal bar movement on the beachface.

Key words beach cusp; empirical orthogonal function (EOF); morphodynamics; beach processes