

文章编号:1009-2722(2011)10-0034-007

海滩近岸带中尺度地形动力过程研究进展

李志强

(广东海洋大学海洋工程系, 广东湛江 524088)

摘 要: 海滩近岸带中尺度地形动力过程是海岸海洋科学研究的重要研究内容之一。近 20 年来该领域发展较快, 取得了一些重要的成果。对近岸带中尺度地形动力过程的碎波带地形与沙坝、冲流带地形与滩角、海滩风暴响应、观测技术手段等主要领域的进展进行了总结和评述, 并对我国海滩研究提出要从加强观测手段和制定长期观测计划两方面来加强的建议。

关键词: 海滩近岸带; 中尺度地形动力过程; 沙坝; 滩角; 风暴响应

中图分类号: P737.22

文献标识码: A

近岸带是海岸海洋科学研究中的一个重要区域。一般认为, 近岸带主要指从波浪开始破碎到冲流作用最大极限之间的地带, 主要涉及的范围包括破波带、碎波带和冲流带(图 1)^[1,2], 这是根据波浪的地形动力作用来划分的。海滩近岸过程是指近岸带内各个要素之间, 在不同时间和空间尺度上的相互作用和响应, 即为多个时间尺度和空间尺度的耦合过程。依照近岸带时间和空间尺度的不同, 对其研究大体可以划分为小尺度过程研究、中尺度过程研究和大尺度过程研究等^[3-5]。尽管不同研究者对海滩近岸过程尺度的划分稍有差异, 但一般认为^[3], 小尺度近岸过程的空间尺度为 0.1 mm 至 10 m, 时间尺度在 0.1 s 至 1 d 之间, 主要对近岸带水体小尺度运动、海滩微地形变化、泥沙起动运移、底边界层、气—海相互作用等问题展开研究; 中尺度近岸过程是指空间尺度为 1 m 至 10 km, 时间尺度为 1 s 至 1 a 的过程, 这

是目前近岸过程研究的一个重点领域, 主要研究近岸表面波、长重力波、冲流带地形与动力、近岸带环流、碎波带地形与动力等; 大尺度近岸过程的空间尺度为 1~100 km, 时间尺度从几个月到几十年, 主要研究海岸侵蚀或堆积、岸线演变与防护、海滩平衡剖面形态等。

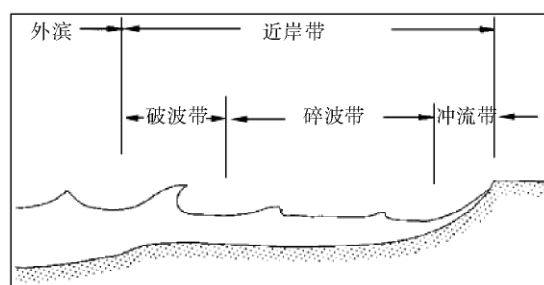


图 1 海滩近岸带划分示意图

Fig. 1 A sketch of the nearshore zone

1 海滩中尺度地形动力学研究意义

中尺度近岸过程在上述海滩过程理论研究的尺度结构体系中起承上启下的作用, 对克服因尺度问题而产生的海滩过程研究的困难^[4,6], 理解

收稿日期: 2011-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40806036); 广东省学科建设专项资金(育苗工程)项目

作者简介: 李志强(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海岸地形动力过程与应用研究。E-mail: qiangzli1974@163.com

小尺度海滩近岸动力过程和建立近岸带大尺度地形模型有重要的意义。以碎波带为例,小尺度海滩近岸过程通过碎波带内的湍流弥散、破波、边界层和底形变化,控制着碎波带内的小范围泥沙输运通量,进而引起中尺度的波、流、地形在垂岸和沿岸方向上的差异,产生泥沙输运梯度,最终导致海滩大尺度的地形变化(侵蚀或堆积)。如果直接从小尺度过程来“自下而上(bottom-up)”地积分得到大尺度地形模型显然是很难理解的,结果往往也是错误的,只有通过分析研究这些中间过程,如波浪变形、环流生消、地形变化等,才能清楚它们之间的内在关系和机理。对于“自上而下(top-down)”地理解和研究海滩过程也是同样的道理。Schwarzer 等^[5]指出,由于各种不同尺度的海岸过程相互作用,必须认真研究短期事件(中尺度过程)才能更好地理解大尺度过程。同时,中尺度海滩近岸过程对海岸工程、海岸管理与保护有应用前景,例如,在风暴过程中,长重力波控制碎波带的能量,将大量的泥沙带离海岸,是造成海岸急剧、严重侵蚀并威胁海岸工程的重要因子^[7-12]。又如,在海滩补沙养护工程中,如果对近岸带中尺度地形动力过程掌握清楚,可以节约时间,减少投资,提高工程的成功率^[13-16]。更应该指出的是,中尺度海滩近岸过程研究在军事上也有重要意义。美国海军研究办公室(Office of Naval Research, ONR)开展了地雷掩埋计划(Mine Burial Program)、沿滨地形动力学计划(Littoral Morphodynamics Program)和前滨泥沙输运研究(Fore-shore Sediment Transport Study)等研究项目,把近岸带地形动力过程作为海滨地雷掩埋和登陆作战的重要课题加以研究。因此,海滩近岸带中尺度地形动力过程是海岸海洋科学一个重要的研究领域,开展这方面的系统研究不仅具有重要的基础研究理论意义,还在海岸工程、海岸管理与保护方面具有重要的应用价值,同时可以为国家军事安全服务。

2 中尺度地形动力过程研究进展

国外一直重视对海滩过程的研究。最初,对海滩近岸带小尺度过程的研究比较多^[6],随着中尺度地形动力过程在理论研究、海岸工程、海岸管

理以及军事安全中的价值日益体现,中尺度地形动力过程研究也越来越受到重视而成为研究热点,取得了一些重要的进展。对于表面波和长重力波已有不少文献进行了概述,在此不再赘述,这里主要对中尺度地形演变过程进行总结。

2.1 碎波带与沙坝

碎波带地形和动力要素极为复杂,也一直吸引着研究者的目光。近岸水下沙坝位置与高度是垂直海岸方向地形变化的主要原因,因而,沙坝成为近岸最重要的中尺度地形和研究对象之一。沙坝有新月形、横向沙坝、多条沿岸沙坝等型式,其形成机理与迁移运动极为复杂。基于近岸带长期或短期观测资料,在近岸带水动力要素的时空变化^[17-22]、沙坝的产生、迁移过程、形态变化、沿岸变化、季节变动等方面得到了一些重要的认识^[23-31]。由于风暴高能事件下沙坝海滩地形显著变化,沙坝发生快速生消过程,给研究沙坝变化过程提供一个良好的样本,因此,很多研究是以风暴过程为背景进行的。目前,风暴作用下的沙坝迁移原因比较清楚,一般认为风暴条件下,长重力波能成为近岸波能的主要部分,而大量的离岸泥沙输运发生在长重力频带,由此形成的垂直海岸方向的泥沙输运梯度导致了沙坝的向海方向迁移。当沙坝向海迁移,破波位置和底部回流也随之向海移动。

值得指出的是,现有的模型还不能预报低能期间碎波带沙坝向岸缓慢的迁移机制。关于沙坝的不少结论是探索性和推断性的,仅适合特定区域。例如, van Enckevort 等^[32]在对 4 个海滩的新月形沙坝的时间和空间变化过程进行分析,以期研究各种关于新月形沙坝成因假设的适用性的过程中,就发现了这样的问题。因此,要理解碎波带的地形动力过程,揭示其中的地形动力行为机制,不仅要对风暴等典型事件进行研究,更重要的是要建立长期观测计划,获得长期的碎波带地形动力数据系列,研究各种环境下动力与地形的变化过程。

2.2 冲流带与滩角

由于冲流带的地形动力要素特点,冲流带地形动力过程经常是小尺度和中尺度结合在一起研究^[33-35]。Larson 等^[36]通过现场观测结合解析方

法研究了冲流带泥沙输运与前滨地形演变的关系;Brocchini^[37]基于对冲流成分的理论分析,建立了一个冲流带模型框架;Masselink 和 Puleo^[38]基于现场观测指出,虽然冲流带本身也是一个地形动力系统,但它与碎波带通过反馈过程紧密相联系而不能将其分割。

滩角是冲流带上一種变动快速的韵律地形,是近岸环流及碎波带与冲流带地形成耦合作用的结果,与海滩状态密切相关^[39-42],因而受到关注。和其他韵律地形一样,以前多从边缘波或长重力波的角度来分析其成因。Werner 和 Fink^[43]在《Science》发表的关于滩角形成的自组织机制理论,带动了关于滩角成因、地形动力过程以及关于冲流带的地形动力学研究^[40-51];Coco 等^[46-49]利用自组织理论对滩角地形成因进行研究,形成了一系列研究成果;Masselink 等^[44,45]对滩角地形动力过程做了较系列研究,建立了一个滩角地形动力过程模型;笔者在国外研究的基础上进行了一定的探讨^[52,53],特别在自组织模拟方面得到了更好地结果。但通过研究也发现这些关于冲流带中尺度地形动力过程的模型在解释现象的形成和其反映的海滩状态方面存在缺陷,还达不到能预测产生和解释结果的要求,很多还只是一个理论框架,有待深入研究。

2.3 海滩对风暴的响应

风暴作用下,泥沙离岸运移,滩肩消失,海滩发生显著的侵蚀变形。这种侵蚀作用具有突发性和局部性,其危害作用极为严重,因而受到越来越多地关注。多数风暴对海滩蚀积过程的影响是季节性或短期($<10\text{ a}$)的,但有时也可能成为控制海滩长期演变的一个控制因素^[54]。例如,1962 年 3 月美国发生了 20 世纪最大的风暴潮,持续了 5 个高潮过程,海岸后退超过了长期的侵蚀趋势,经过了 10 a 或更长时间的堆积,才回到预报的潜在长期趋势所在位置(相当于 150 a),因此,在很长的一段时间来看,该海岸表现为堆积而非侵蚀^[55]。如果有连续的风暴对海滩作用,造成的侵蚀和岸线后退影响可能比单个特大风暴的作用还要强^[56,57]。风暴在海滩上造成的侵蚀部位差异也很大,有沿岸方向的差异,也有垂岸方向的差异^[58-63]。此外,海滩的走向和风暴移动方向的不

同,海滩对风暴的响应差异都十分明显^[64-66]。甚至由于海滩状态和风暴的特征的差异,一些海滩在风暴作用下发生淤积过程^[66,67]。

总的来说,海滩的风暴响应虽然研究较多,但多属于个案研究,还缺乏规律描述性的认识,结论也大多是描述性的。受风暴过程复杂性和观测条件恶劣性的限制,目前对风暴条件下海滩演变的详细过程和内在机理研究还处于起步阶段。华南海滩处于热带风暴作用频繁的地带,对研究风暴作用下的海滩演变过程有先天的优势,无论是开展面上的风暴响应长期观测,还是对海滩地形动力详细过程进行研究,都可能取得重要的成果。我国这方面工作虽然已经开展,但还有待加强。

2.4 观测手段

海滩近岸带观测技术的进步是近 20 年来中尺度海滩过程取得长足进步的重要原因。由于近岸带动力要素和地形变化十分迅速,加上破波、恶劣气象的影响,给近岸带现场观测带来很大的麻烦,也一直限制着相关研究工作的开展。得益于新技术的使用,国外已经建立了海滩长期观测数据库,这对海滩近岸中尺度地形动力学研究十分重要。代表性的数据库有荷兰 JARKUS 剖面数据^[68]、Duck 的 CRAB 剖面数据^[69]和 ARGUS 的视频图像数据^[70]等。CRAB 和视频技术是近 20 年来海滩观测技术手段最重要的进展。CRAB 是一种可以方便研究者到近岸较深水域($-5\sim-6\text{ m}$)进行地形观测的测量工具(图 2),较好地解决了近岸带现场观测的难题,特别是碎波带的观测。美国利用该手段开展了 DUCK94 和 DUACK97

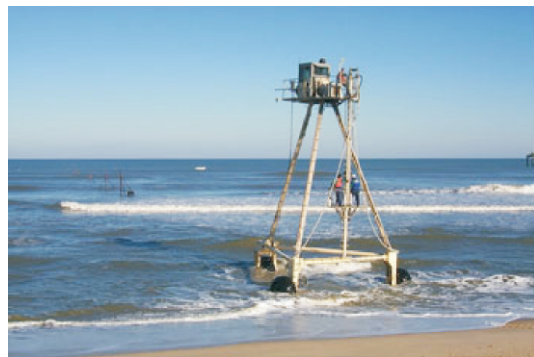


图 2 美国 CRAB 观测平台(据文献[70])

Fig. 2 A CRAB monitoring platform(from reference [70])

2 次系统的大型海滩地形动力过程观测研究。视频技术是一种经济、易行和适应性强的新技术手段。该技术利用连续的视频监测(图 3), 可以获得海滩高频率地形动力学要素数据。20 世纪 90 年代, 美国俄勒冈州立大学成立海岸图像实验室, 在美国海军研究办公室的支持下开始实施 ARGUS 项目, 后来又得到多方面的资助, 现在已经发展到第 3 代, 能准确地提取出岸线位置、海滩



图 3 视频观测平台(据文献[69])

Fig. 3 A Video monitoring platform(from reference [69])

宽度和面积、海滩剖面、近岸沙坝与地形、冲流、波高、水位等重要海滩地形动力学数据。在该技术的支持下, 已经做出了许多重要的海滩地形动力学研究成果^[71-74]。视频观测研究的图像分为单帧图像(Snap-Shot Images)、计时曝光图像(Time-Exposure Images)和方差图像(Variance Images)3 类。前 2 种图像在研究中应用最广, 分别具有简单易行和信息量大的特点。目前全球已有超过 30 个 ARGUS 观测站(图 4), 并在此基础上发展实施了 Cam-Era 和 Coast View 等项目^[75,76]。



图 4 全球 ARGUS 观测站点(据文献[69])

Fig. 4 Locations of Argus stations over the world (from reference [69])

表 1 全球主要长期观测项目概况(据文献[6]和[77]修改)

Table 1 Long-term monitoring programs in the world (modified after [6] and [77])

地点	海岸长度/km	剖面数量	剖面间隔/m	剖面区间范围	持续时间/a	数据年份	采样间隔
Lincolnshire(英国)	38	18	1 000~2 000	潮间带(约 80 m)	31	1959—1990	1 个月
Duck(美国)	1	26	40	沙丘至闭合深度	14	1981—1994	1 个月
JARKUS(荷兰)	500	2 500	200~250	沙丘+海滩	32	1963—1995	1 年
Terschelling(荷兰)	10	70	100~200	前丘至-10 m	4	1993—1996	2 个月
Lubiatowo(波兰)	2.7	5~28	100	沙丘至-5 m	31	1964—1995	6 个月
Ocean City(美国)	13	24	300~600	沙丘至-8 m	5	1988—1993	4 个月
Ebro Delta(西班牙)	35	36	1 000	海滩至-15 m	4	1988—1992	3 个月

3 对我国海滩研究的思考与建议

我国的海滩以岬间海滩为主, 这种海滩的近岸地形动力过程与欧美开敞性海滩相比是有其独特性的。岬湾入射波浪近岸传播的过程中, 受海湾形态和海底地形的折射、绕射、反射、底摩擦等影响, 在湾内变得十分复杂, 沿岸的地形组合和变化过程也变得差别很大。加上我国华南地区夏秋多台风登陆, 冬春季有寒潮作用, 使得中尺度的海

滩地形动力过程独具特色。许多国际著名的海滩学者反复强调和鼓励对岬间海滩近岸过程进行研究^[2,6]。因此, 开展岬间海滩研究可以进一步提高我国海岸海洋基础理论研究层次, 对提高海岸海洋学科在国际上的研究地位具有重要意义。

我国也有不少学者一直致力于岬间海滩的研究, 并取得了一些成果, 但总体上集中在小尺度和大尺度, 中尺度研究工作相对滞后, 这显然无法为我国海岸工程建设和海岸管理工作提供科学准确的依据。综观国内的研究成果也可以看到, 国内

的研究与国外相比还有相当的差距,特别是在观测手段和研究计划上的差距较大。国内现有的研究一般以短期(1 个月左右)观测为主,剖面测量深度一般以观测者低潮涉水最大深度为限,很少有超过破波带的,这极大地限制了海滩中尺度地形动力过程研究的深入开展。de Vriend^[77]曾列举出了世界上最主要的长期观测数据序列(见表 1),这些观测时间上都为多年,甚至达到 30 余年,测量深度一般都超出了海滩破波线。其中美国美国陆军工程兵团在北卡罗来纳州 Duck 镇的现场研究设施(Field Research Facility,简称 FRF)最具代表性,对该数据序列研究是目前在中尺度地形动力学领域研究成果最多,也是最深入的。基于这些思考,笔者建议国内海滩研究应该从加强观测手段(技术)和制定长期观测计划 2 方面来加强海滩研究基础工作。

参考文献:

- [1] 柯马尔 P D. 海滩过程与沉积作用[M]. 北京:海洋出版社,1985:9.
- [2] Thornton E, Dalrymple T, Drake T, et al. State of nearshore processes research II; technical report NPS-OC-00-001[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.
- [3] Sherman D J. Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes[J]. Marine Geology, 1995, 124 : 339-349.
- [4] Larson M, Kraus N. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales[J]. Marine Geology, 1995, 126: 111-127.
- [5] Schwarzer K, Diesing M, Larson M, et al. Coastline evolution at different time scales: examples from the Pomeranian Bight, Southern Baltic Sea[J]. Marine Geology, 2003, 194 (1/2): 79-101.
- [6] Horn D P. Mesoscale beach processes[J]. Progress in Physical Geography, 2002, 26(2): 271-289.
- [7] Holman R A, Bowen A J. Bar, bumps and holes: models for the generation of complex beach topography[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87: 457-468.
- [8] Russell P E. Mechanisms for beach erosion during storms [J]. Continental Shelf Research, 1993, 13 (11): 1 243-1 265.
- [9] Aagaard T, Greenwood B. Suspended sediment transport and the role of infragravity waves in a barred surf zone[J]. Marine Geology, 1994, 118: 23-48.
- [10] Ruessink B G. An empirical energetics-based formulation for the cross-shore suspended sediment transport by bound infragravity waves [J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16(2): 482-493.
- [11] Smith G G, Mocke G P. Interaction between breaking/ broken waves and infragravity-scale phenomena to control sediment suspension transport in the surf zone[J]. Marine Geology, 2002, 187: 329-345.
- [12] Houser C, Greenwood B. Onshore migration of a Swash Bar during a storm [J]. Journal of Coastal Research, 2006, 23: 1-14.
- [13] Anfuso G, Gracia F. Morphodynamic characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: implications for coastal erosion management [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21: 1 139-1 153.
- [14] Browder A E, Dean R G. Monitoring and comparison to predictive models of the Perdido Key beach nourishment project, Florida, USA [J]. Coastal Engineering, 2000, 39: 173-191.
- [15] Davis R A. Comparison of the performance of three adjacent and differently constructed beach nourishment projects on the Gulf Peninsula of Florida [J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16(2): 396-407.
- [16] Benedet L, Finkl C W, Hartog W M. Processes controlling development of erosional hot spots on a beach nourishment project [J]. Journal of Coastal Research, 2007, 23: 33-48.
- [17] Levoy F, Anthony E J, Monfort O, et al. The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France [J]. Marine Geology, 2000, 171: 39-59.
- [18] Levoy F, Monfort O, Larssonneur C. Hydrodynamic variability on megatidal beaches, Normandy, France [J]. Continental Shelf Research, 2001, 21: 563-586.
- [19] Kroon A, Masselink G. Morphodynamics of intertidal bar morphology on a macrotidal beach under low-energy wave conditions, North Lincolnshire, England [J]. Marine Geology, 2002, 190: 591-608.
- [20] Anthony E J, Levoy F, Monfort O. Morphodynamics of intertidal bars on a megatidal beach, Merlimont, Northern France [J]. Marine Geology, 2004, 208: 73-100.
- [21] Houser C, Greenwood B. Hydrodynamics and sediment transport within the inner surf zone of a lacustrine multiple-barred nearshore [J]. Marine Geology, 2005, 218: 37-63.
- [22] Aagaard T, Hughes M, Møller-Sørensen R, et al. Hydrodynamics and sediment fluxes across an onshore migrating intertidal bar [J]. Journal of Coastal Research, 2006, 22: 247-259.
- [23] Deigaard R. A morphology stability analysis for a long straightbarred coast [J]. Coastal Engineering 1999, 36: 171-195.
- [24] Wijnberg K M, Kroon A. Barred beaches [J]. Geomorphology, 2002, 48: 103-120.

- [25] van Enckevort I M J, Ruessink B G. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability[J]. *Cont. Shelf Res.* 2003,23: 513-532.
- [26] Shand R D, Bailey D G, Shepherd M J. Longshore re-alignment of shore-parallel sand-bars at Wanganui, New Zealand[J]. *Marine Geology*,2001, 179:147-161.
- [27] Shand R D. Relationships between episodes of bar switching, cross-shore bar migration and outer bar degeneration at Wanganui, New Zealand[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003,19:157-170.
- [28] Schupp C A, McNinch J E, List J H. Nearshore shore-oblique bars, gravel outcrops, and their correlation to shoreline change[J]. *Marine Geology*, 2006,233: 63-79.
- [29] Ruessink B G. An empirical energeticsbased formulation for the cross-shore suspended sediment transport by bound infragravity waves [J]. *Journal of Coastal Research*,2000, 16:482-493.
- [30] Kroon A, Masselink G. Morphodynamics of intertidal bar morphology on a macrotidal beach under low-energy wave conditions, North Lincolnshire, England[J]. *Marine Geology*, 2002,190:591-608.
- [31] Ruessink B G, Terwindt J H J. The behaviour of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model [J]. *Marine Geology*,2000,163:289-302.
- [32] van Enckevort I M J, Ruessink B G, Coco G, et al. Observations of nearshore crescentic sandbars[J]. *Journal of Geophysic Research*, 2004,109(C06028):17pp., doi:10.1029/2003JC002214.
- [33] Puleo J A, Beach R A, Holman R A, et al. Swash zone sediment suspension and transport and the importance of bore-generated turbulence[J]. *Journal of Geophysic Research*, 2000,105: 17 021-17 044.
- [34] Puleo J A, Holland K T, Plant N, et al. Fluid acceleration effects on suspended sediment transport in the swash zone[J]. *Journal of Geophysic Research*. 2003, 108; 3 350,doi:10.1029/2003JC001943.
- [35] Baldock T E, Holmes P. Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach[J]. *Coastal Engineering*, 1999,36(3):219-242.
- [36] Larson M, Kubot S, Erikson L. Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling[J]. *Marine Geology*, 2004, 212: 61-79.
- [37] Brocchini M. Integral swash-zone models[J]. *Continental Shelf Research*, 2006,26 :653-660.
- [38] Masselink G, Puleo J A. Swash-zone morphodynamics [J]. *Continental Shelf Research*, 2006,26:661-680.
- [39] Wright L D, Short A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis[J]. *Marine Geology*, 1984,56: 93-118.
- [40] Holland K T, Holman R A. Field observations of beach cusps and swash motions [J]. *Marine Geology*, 1996, 134: 77-93.
- [41] Masselink G, Hegge B J, Pattiaratchi C B. Beach cusp morphodynamics [J]. *Earth Surf Process Landforms*, 1997,22:1 139-1 155.
- [42] Masselink G, Pattiaratchi C B. Morphological evolution of beach cusps and associated swash circulation patterns[J]. *Marine Geology*,1998,146: 93-113.
- [43] Werner B T, Fink T M. Beach cusps as self-organized patterns[J]. *Science*, 1993,260: 968-970.
- [44] Masselink G, Pattiaratchi C B. Morphodynamic impact of sea breeze on a beach with beach cusp morphology[J]. *Journal of Coastal Research*, 1997,22: 1 139-1 156.
- [45] Masselink G. Alongshore variation in beach cusp morphology in a coastal embayment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,1999,24: 335-347.
- [46] Coco G, Ohare T J, Huntly D A. Beach cusp: a comparison of data and theories for their formation[J]. *Journal of Coastal Research*,1998,15(3):741-749.
- [47] Coco G, Huntly D A, Ohare T J. Investigation of a self-organization model for beach cusp formation and development [J]. *Journal of Geophysic Research*, 2000, 105: 21 991-22 002.
- [48] Coco G, Huntly D A, Ohare T J. Regularity and randomness in the formation of beach cusp[J]. *Marine Geology*, 2001,178:1-9.
- [49] Coco G, Burnet T K, Werner B T. Test of self-organization in beach cusp formation[J]. *Journal of Geophysic Research*, 2003, 108 (C3), 3 101, doi: 10.1029/2002JC001496.
- [50] Tsuguo S. A predictive relationship for the spacing of beach cusps in nature[J]. *Coastal Engineering*, 2004,51: 697-711.
- [51] Sunamura T, Aoki H. A field experiment of cusp formation on a coarse clastic beach using a suspended video-camera system[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000,25: 329-333.
- [52] 李志强,陈子燊,严 谨,等. 基于自组织机制理论的滩角地形数值模拟[J]. *海洋学研究*,2009,27(1):90-95.
- [53] 李志强,陈子燊. 两种滩角成因假说的实证分析[J]. *热带海洋学报*,2008,27(2):12-17.
- [54] Morton R A, Gibeau J C, Paine J G. Mesoscale transfer of sand during and after storms - implications for prediction of shoreline movement[J]. *Marine Geology*, 1995, 126(1/4):161-179.
- [55] Douglas B C, Crowell M, Leatherman S P. Considerations for shoreline position prediction[J]. *Journal of Coastal Research*,1998,14(3):1 025-1 033.
- [56] Cox J C, Pirrello M A. Applying joint probabilities and

- cumulative effects to estimate storm-erosion and shoreline recession[J]. *Shore & Beach*, 2001, 69(2): 5-7.
- [57] Lee G H, Nicholls R J, Birkmeier W A. Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981—1991[J]. *Marine Geology*, 1998, 148(1/4):163-177.
- [58] 陈子燊. 弧形海岸海滩地貌对台风大浪的响应特征[J]. *科学通报*, 1995, 40(23):2 168-2 170.
- [59] 蔡 锋, 苏贤泽, 杨顺良, 等. 厦门岛滨岸海滩剖面对 9914 号台风大浪波动力的快速响应[J]. *海洋工程*, 2002, 20(2):85-90.
- [60] 蔡 锋, 雷 刚, 苏贤泽, 等. 福建沙质海滩对台风“艾利”的地貌响应研究[J]. *海洋工程*, 2006, 24(1):98-109.
- [61] 陈子燊, 李志强, 王扬圣. 台风作用下海滩剖面地形动力与侵蚀机制分析[C]//第十三届中国海洋工程学术讨论会会议论文集. 北京:海洋出版社, 2007:331-336.
- [62] Regnauld H, Pirazzoli P A, Morvan G, et al. Impacts of storms and evolution of the coastline in western France [J]. *Marine Geology*, 2004, 210(1/4):325-337.
- [63] Meilianda E, Dohmen-Janssen C M, Maathuis B H P, et al. Short-term morphological responses and developments of Banda Aceh coast, Sumatra Island, Indonesia after the tsunami on 26 December 2004 [J]. *Marine Geology*, 2010, 275 :96-109.
- [64] 蔡 锋, 苏贤泽, 夏东兴. 热带气旋前进方向两侧海滩风暴效应差异研究——以海滩对 0307 号台风伊布都的响应为例[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(4):436-445.
- [65] 戚洪帅, 蔡 锋, 雷 刚, 等. 华南海滩风暴响应特征研究[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(9):975-985.
- [66] Alegria-Arzaburu A R, Masselink G. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U. K [J]. *Marine Geology*, 2010, 278:77-99.
- [67] Hill H W, Kelley J T, Belknap D F, et al. The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in Southern Maine, USA[J]. *Marine Geology*, 2004, 210: 149-168.
- [68] Damsma T. KML screenshots-openEarth-deltares wiki [EB/OL]. [2011-07-24]. <http://public.deltares.nl/display/OET/KML+Screenshots>.
- [69] Coastal Imaging Laboratory of Oregon State University. The coastal imaging laboratory web[EB/OL]. [2011-07-24]. <http://cil-www.coas.oregonstate.edu/>.
- [70] USACE. DUCK94 coastal experiment: overview [EB/OL]. [2011-07-24]. <http://www.frfr.usace.army.mil/duck94/duck94.html>.
- [71] Holland K T, Holman R A, Lippman T C, et al. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies[J]. *IEEE J. Ocean Engineering*, 1997, 22(1): 81-92.
- [72] Aarninkhof S, Holman R A. Monitoring the nearshore with video[J]. *Backscatter*, 1999, 10(2): 8-11.
- [73] Stockdon H, Holman R A. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C9): 22 015-22 031.
- [74] Holman R A, Sallenger A H, Lippmann T C, et al. The application of video processing to the study of nearshore processes[J]. *Oceanography*, 1993, 6(3):78-85.
- [75] Bryan K R, Hume T, Payne G. The Cam-Era final report, commissioned research report, year published 2000 [EB/OL]. [2011-07-24]. http://www.smf.govt.nz/results/5058_final.pdf.
- [76] Davidson M. Coast view: home page. [2011-07-24]. <http://141.163.79.209/web/index.html>.
- [77] de Vriend H J. Prediction of aggregated-scale coastal evolution (PACE) [EB/OL]. [2001-07-01]. http://ut-smbs002.sms.utwente.nl/vakgr/civt/mics/mw/deVriend/PACE_Lisbon98/LISBON.html.

MESO-SCALE RESEARCH OF BEACH MORPHODYNAMIC PROCESSES

LI Zhiqiang

(Ocean Engineering Department, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract: Meso-scale beach morphodynamic processes are important to coastal research. There is significant progress in this field during the past two decades. We summarized and reviewed the major progress about surf zone morphodynamic and sand bar, swash zone and beach cusp, beach responses to the storm effect, measurement technical means of this field in this paper. Some suggestions have been put forward for better beach morphodynamic research in China.

Key words: beach nearshore zone; meso-scale morphodynamic processes; sand bar; beach cusp; storm response