

# 长江口水下微地貌运动高分辨率探测研究\*

程和琴 李茂田 薛元忠 周天宇 宋波

华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 1997 年枯季和 1998 年全流域特大洪水后期对长江口区主航槽分别进行了走航和定点探测, 获得了近底紊流猝发、床面泥沙喷发及其伴随的大尺度底形运动的连续时间序列可视图像和数据. 分析结果表明: 细颗粒底沙再悬浮使床沙同步粒径达到与上部水体流速相适应是具有宽粒径分布的细颗粒底沙形成大尺度底形沙波的前提, 因而长江口区大尺度底形沙波不仅与中值粒径有关, 而且与粒度累积百分含量为 16% 时的粒径直接相关. 底形沙波的尺度和运动速率主要受枯洪季流域来沙及其粒径和涨落潮流速影响.

**关键词** 高分辨率微地貌 大尺度底形沙波 紊流猝发 实时同步粒径

自 19 世纪以来有关长江口的研究一直注重较大时空尺度地貌演变, 如特大洪水对河口分汊河道世纪性巨变格局的控制<sup>[1-3]</sup>. 随着徐六泾节点和沿江沿岛堤坝等河口地貌人工控制的增强, 水下微地貌的变化日益受到重视. 20 世纪八九十年代洪季水下沙波<sup>[4-6]</sup>的测量仅根据受水位和气象等多因素影响的测深记录, 而枯季无沙波报道, 且迄今世界大河口区均没有大尺度水下沙波报道, 因而精度和准确性需待进一步证实. 同时, 根据美国地球物理学会泥沙分类标准和国际沉积学会底形分类标准<sup>[7,8]</sup>, 长江口底沙粒径太细(0.030 ~ 0.125 mm)无沙波发育<sup>[9]</sup>, 甚至可被归入粘性范围<sup>[10]</sup>. 本文旨在报道作者于 1997 年 12 月 3 ~ 5 日和 1998 年 9 月 8 ~ 10 日(长江全流域特大洪水后期)在河口区的走航和定点测量结果, 即枯洪季水下三维细颗粒底形沙波运动特征及其与实时同步实测流速和再悬浮底沙浓度变化间的响应关系, 并在此基础上进行细颗粒大河口区大尺度底形形成和运动机制的讨论与预测, 对泥沙回淤、大比例尺水下地形测量、三维流场的数值模拟、港口航道的疏浚以及航道的稳定性等研究将具有重要意义, 同时为正在建设中的长江口深水航道整治等特大工程提供重要的工程实用参数.

## 1 研究区域和研究方法

在长江每年向河口输送的近 5 亿吨泥沙中有 0.8 亿吨粗颗粒泥沙沉积在河口段, 与外海输入泥沙一起组成河口区底沙<sup>[5]</sup>广布于南北两支、南北两港和南北两槽. 长江口底沙平均粒径为 0.002 ~ 0.160 mm, 中值粒径  $d_{50} = 0.002 \sim 0.170$  mm. 平均而言, 长江口底沙平均粒径水

2000-12-04 收稿, 2001-03-18 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 49571007)、上海市科委青年科技启明星计划(批准号: 97QA1406)和上海市教委曙光计划(批准号: 99SG13)资助

域较潮滩粗;水域中口内河道较口外海滨粗;河道中南支粗于北支,北港粗于南港;河道内从上游向下游变细;自深槽向浅滩变细<sup>[11]</sup>. 考虑到南支对下游南、北港和南、北槽发育的控制性影响和前人的测深资料<sup>[2,3]</sup>,选择南支下段至南港上段展开测线总长约 100 km 的 4 条剖面实测工作(图 1),并在南支下游宝山河段和南港上游河段各选择 DZ1 和 DZ2 站进行定点测量.

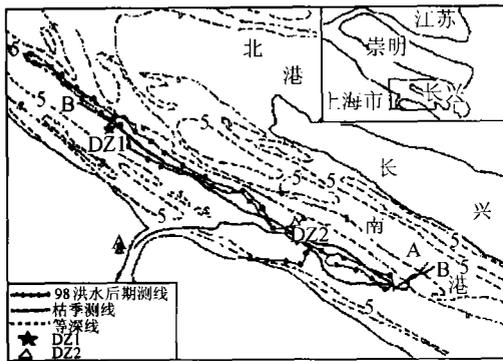


图 1 长江口水下微地貌运动高分辨率探测的测线和测点分布图

调查时使用 80 t 木质鱼船,走航船速 3~4 节,除探测器外的所有观测设备均安装在船舱内.航线和测点采用 1008/586 D. GPS 实时定位.床面纵剖面形态由 Inner-space Inc. 测深仪和 Geo-Chirp 浅地层剖面仪沿 4 条测线获得,两探测器分别垂直悬挂在船右舷水面以下 1 m 处.床面平面形态用 Ultra Electronics 旁侧声纳仪测量,拖鱼状探测器放置在船尾水面漂浮.14 h 连续定点测量响应于流速变化的床面泥沙运动,主要内容有两项:一为用垂直悬挂在调查船左舷离水面以下 1 m 处的 Endeco 流速仪测量底沙上部水体流速变化过程,同时进行的直读式流速仪与加重铅鱼垂

直悬挂在左舷床面以上 1 m;二为用中国科学院东海研究站设计出品的 ACP-1 声学浓度剖面仪测定床面泥沙沿床面运动和再悬浮过程,探测器用加重铅鱼垂直悬挂在船右舷水面以下 6m.底质粒度分析采用筛析法和吸管法.

## 2 水下微地貌运动特征

(1) 粒径:枯季底沙据粒径大小可分为粉砂至细砂,以粗粉砂至极细砂为主,平均粒径  $M_z = 3.00 \sim 5.00 \Phi$ ,部分采样点则以极细砂为主,  $M_z = 3.58 \Phi$ ,且含有 20%~30% 的细砂,因此长江口南支-南港枯季沉积物粒度组成有较宽的粒度分布区间(图 2(a));1998 特大洪水后期时的底沙粒径为极细砂至细砂,以极细砂为主,平均粒径  $M_z = 3.12 \sim 3.50 \Phi$  (0.080~0.125 mm),该粒径比枯季大,粒度分布区间窄(图 2(b)),但远小于国外研究较为详细的河口沙波粒径,如法国 Gironde 河口底沙粒径为 0.32~0.65 mm<sup>[12]</sup>、加拿大 Fraser 河口的底沙粒径为 0.33 mm 左右<sup>[13]</sup>.洪季伴随着底形沙波运动产生再悬浮底沙粒径为 0.070~0.146 mm,大于无床面泥沙再悬浮时的悬浮颗粒粒径 0.04~0.07 mm<sup>[14]</sup>.

(2) 床面形态特征:枯季水深 10.0~17.0 m,平均水深 15.4 m(表 2).测线上旁侧声纳图像均显现出床面具波状起伏的韵律形态.据测深仪和旁侧声纳图谱上沙波的波长、波高和脊的宽度、形态、连续性等参数,可将长江口枯季沙波划分为直脊状小型对称和不对称、弯曲型对称和不对称、新月型对称和不对称、孤立状等 7 种类型(表 1)<sup>[15]</sup>,它们的波长均小于 30 m,小于 15 m 者占 88.5% 以上(表 1,2,图 3(a)).1998 年特大洪水期间测线水深在 13.0~21.3 m,平均水深 16.68 m;床面呈较大尺度波状起伏的韵律形态,其波长和波高远大于枯季时,大尺度底形的波长在 20~300 m 之间,大于 20 m 以上占 85%,波长大于 100 m 以上者占 7%(图 3(b)).这些底形沙波的波长尺度远大于枯季时占 85% 以上的波长尺度(5~15m 之间)<sup>[15]</sup>,却小于一般洪季时的波长尺度值<sup>[5]</sup>.显然长江口区枯季与特大洪水期间的大尺度沙波在规模上、水深、

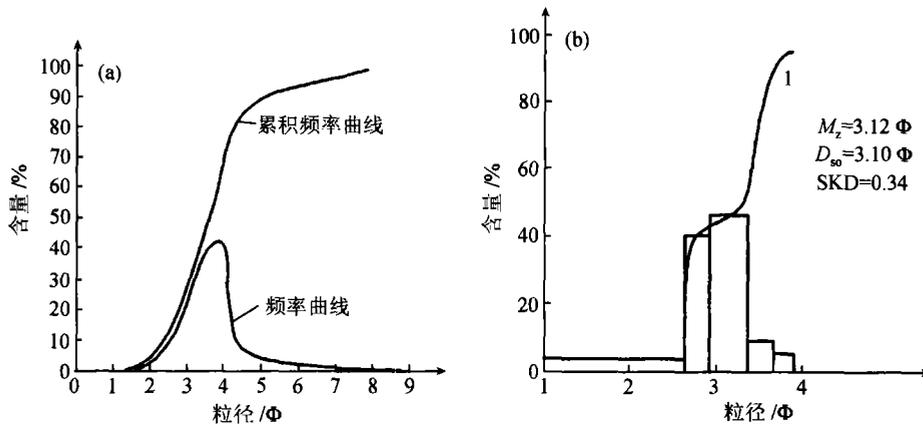


图 2 长江口枯(a)洪(b)季底沙粒度分布累积频率曲线

波高、迎流面和背流面角度以及对称性及其统计特征等方面有较大差异(表 2)。

表 1 长江口 1997 年枯季和 1998 特大洪水期间底形沙波双频测深和旁侧声纳探测记录<sup>a)</sup>

名称	波长/m		波高/m		波/高比		陡坡(下游为主)		百分比(%)	
	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季
直脊状小型对称沙波	无	5~10	—	0.2~0.5	—	25~30	—	3°~5°	—	26.97
直脊状小型不对称沙波	<20	5~12	0.5~1.8	0.1~0.4	6~27	5°~8°	7°~30°	3°~11°	16.86	34.25
弯曲型对称沙波	无	10~15	—	0.3~0.7	—	21~40	—	5°~7°	—	5.60
弯曲型不对称沙波	20~40	10~15	0.9~2.7	0.2~0.7	58~52	50~100	3°~15°	7°~12°	45.35	10.32
新月型对称沙波	无	15~20	—	0.4~1.0	—	20~40	—	5°~6°	—	11.36
新月型不对称沙波	40~100	>15	1.0~3.6	0.5~1.2	15~82	30~50	1.3°~10°	5°~12°	30.80	11.00
孤立状沙丘	无	>30	—	>1.0	—	>30	—	—	—	0.5
大型不对称沙波	>100	—	1.0~3.0	—	37~113	—	0.67°~40°	—	6.98	—

a) 表中“—”为未测

表 2 长江口区 1997 年枯季和 1998 年特大洪水期间水深和底形参数的统计<sup>a)</sup>

参数	水深/m		波长/m		波/高比		$\alpha_1/(^\circ)$		$\alpha_s$	
	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季
平均值	16.68	15.4	41.406	13.67	1.644	0.488	6.952	5.604	6.751	3.792
中值	16.59	15.49	32.547	11.74	1.6	0.45	5.855	5.51	5.775	3.782
尖度	0.278	1.14	2.297	5.757	0.484	0.437	4.226	0.18	1.092	0.098
偏度	0.69	0.645	1.564	2.264	0.696	0.904	1.571	0.169	1.14	0.200
最大值	21.3	20.68	151.09	51.64	3.6	1.31	30.36	11.77	22.93	7.47
最小值	13.8	12.62	8.28	5.39	0.5	0.13	1.33	0.82	0.67	0.670

a)  $\alpha_1$  为背流面陡坡角度;  $\alpha_s$  为迎流面缓坡角度

(3) 底形沙波运动: 南支-南港粗粉砂-极细砂-细砂质河槽床面形态变化(图 3(c)~(h)) 响应于流速( $U$ )变化(图 4):  $U < 50$  cm/s 时, 床面基本保持平整, 无床沙起、悬扬;  $50 < U < 60$  cm/s 时, 床面稍有侵蚀和堆积地貌, 床沙有掀动, 起扬高程达 6~40 cm, 仅有波长为数厘米的沙纹;  $60$  cm/s  $< U < 100$  cm/s 时, 床沙再悬浮(或喷发, ejection)作用加强, 悬沙浓度增大, 形成大型沙纹和小型沙丘;  $100 < U < 110$  cm/s 时, 底沙再悬浮作用急剧加强, 持续时间长且喷发高度大;  $U > 110$  cm/s 时, 底沙再悬浮浓度很大, 且能形成大尺度沙丘。枯季底形沙波的平均出

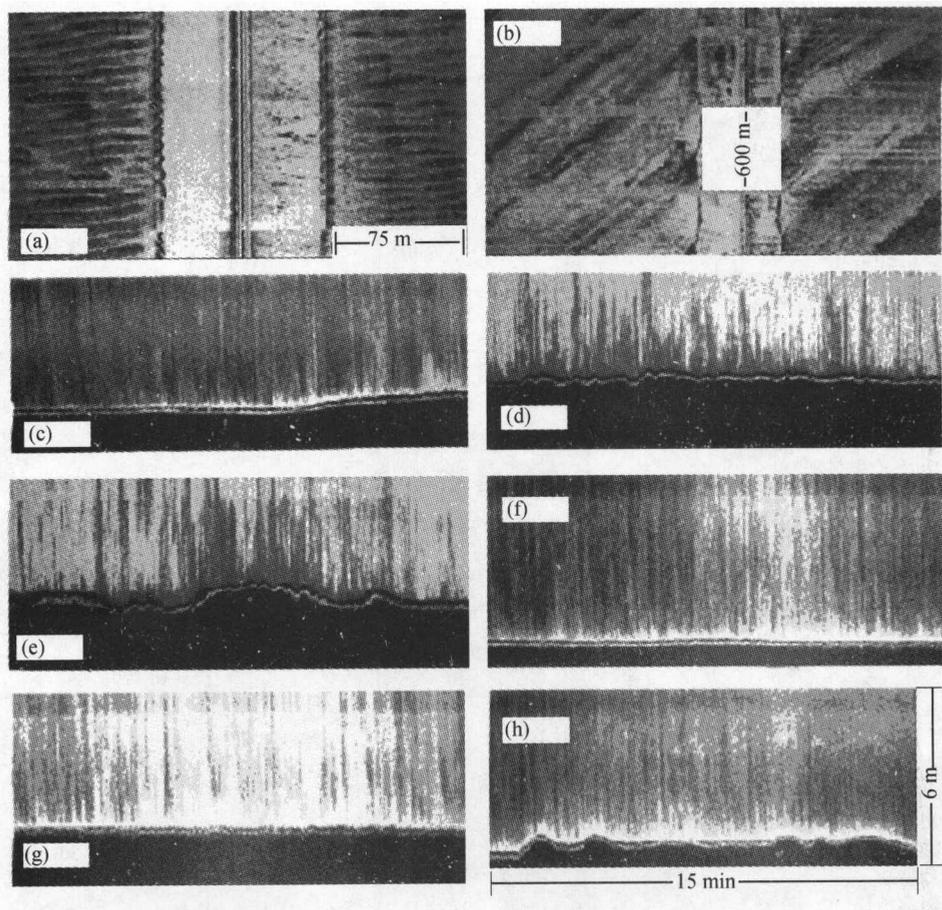


图 3 长江口枯季和特大洪水期间大尺度细颗粒底形沙波的旁侧声纳记录(a,b)和细颗粒底沙随涨落潮流速变化周期发生底形运动和再悬浮输移变化过程的声学悬沙浓度剖面仪(ACP)记录(c~h)

现周期为 30 s 至 1 min,若按平均波长为 13.67 m 和最大波长 51.64 m、最小波长 5.39 m 计算(表 1),则底形沙波的平均运移速率为 29.30 或 13.67 m/min,最大运移速率为 51.64 m/min,最小运移速率为 5.39 m/min. 1998 年长江全流域特大洪水期间河口区底形沙波的平均出现周期为 1~2 min,若按平均波长为 41.4 m 和最小波长 8.0 m、最大波长 151.0 m 计算(表 2),则底形沙波的平均运移速率为 27.6 m/min 或 0.46 m/s,最大运移速率为 151 m/min 或 2.52 m/s,最小运移速率为 4 m/min 或 0.07 m/s.

### 3 结论与讨论

#### 3.1 大河口区细颗粒底沙大尺度底形输移模式

上述长江口洪季和枯季<sup>[14,15]</sup>细颗粒大尺度底形输移特征与细砂级以上粗颗粒沙波<sup>[8,12,13,17~23]</sup>不同,即在涨落潮流作用下,底沙呈静止图 5(a)-细颗粒泥沙起动(图 5(b))和悬扬(图 5(c)~(f))-粗颗粒喷发运移(图 5(d)~(f))的同时,作大尺度底形运动(图 5(d)~(f))-细颗粒起扬、悬扬-静止循环模式的输移(图 5). 这种底沙再悬浮类似水槽显影研究<sup>[24,25]</sup>

中由紊动和猝发导致的悬移质和床面泥沙之间的不断交换<sup>[25,26]</sup>、在野外近砾砂质床底附近观测到的“象猝发那样的信号”<sup>[27-29]</sup>和长江口最大浑浊带粘性沉积物的再悬浮<sup>[30]</sup>等,所以大河口区细颗粒大尺度底形沙波形成和运动可能由较强流速引起的紊流猝发及其所致的底沙再悬浮所致,其与目前普遍认为的底沙再悬浮由底形背流面环流所致<sup>[8,19-23,31]</sup>正好相反。同时细颗粒底沙的再悬浮使得床沙实时同步粒径达到与上部水体流速相适应,并进行相应时空尺度的底形运动。因此长江口区细颗粒大尺度底形沙波运动不仅与中值粒径  $d_{50}$  有关,而且与粒度累积百分含量为 16% 时的粒径  $d_{16}$  直接相关。同时由于研究区位于长江口拦门沙以内河段,两岸人工堤坝连续稳固,因此底形沙波的形成发育主要受流域来沙和波流条件等因素影响,而研究区附近的高桥水文观测站多年平均波高 0.35 m,石洞口平均波高 0.3 m,因此除了风暴潮以外长江口门以内正常天气条件下波浪对沉积物没有显著影响<sup>[5]</sup>。

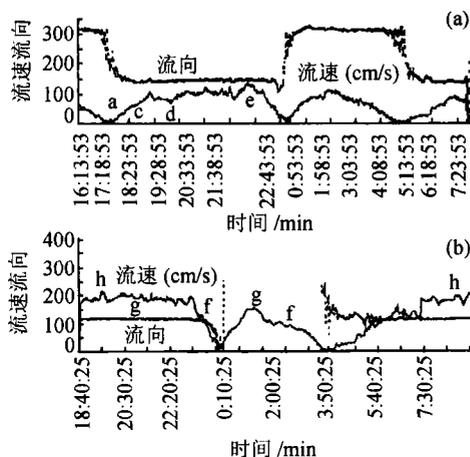


图 4 长江口枯季(测量时间:1997-12-04~05)和特大洪水期间(测量时间:1998-09-09~10)连续 14 h 流速流向变化图  
相应的床沙再悬浮和底形运动特征见图 3

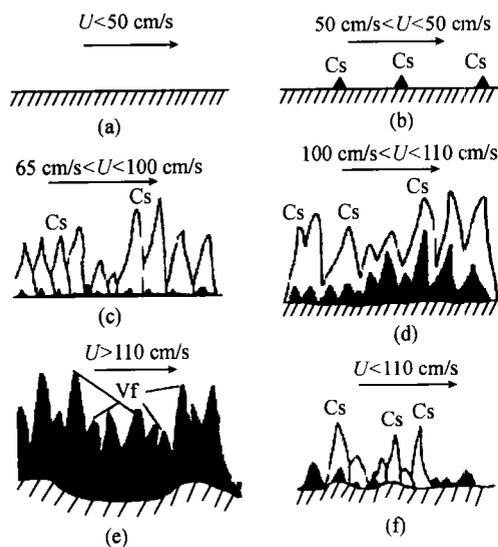


图 5 长江口细颗粒底沙输移模式

$U$ : 水面以下 1 m 处 Endeco 流速;  $Cs$ : 粗粉砂;  $V_f$ : 极细砂

长江口属不正规半日潮,近口门最大潮差可达 5 m,潮差向上游逐渐减少,口内潮流主要受地形地貌控制。研究区沙波尺度随流速增大而增大(图 3、4),落潮流速大于涨潮流速(图 4),且落急历时 196 min,远大于涨急历时 40 min,故研究区底形沙波主要为落潮流控制。此外,大潮期间平均流速为 110 cm/s,大于小潮期间的 70 cm/s<sup>[6]</sup>,因而大潮期间沙波尺度大于小潮期间,由此推算,风暴潮期间沙波运动尺度和速率应

### 3.2 流域来沙与沙波运动

枯季底沙粒径小于洪季时(图 2)、枯季底形沙波尺度明显小于洪季时(表 1 和图 3)和枯季沙波运动速率大于洪季时(图 4)等表明:同等潮流条件(大小潮或涨落潮)下,枯洪季流域来沙(输沙量及其粒径)直接控制河口区水下微地貌的颗粒组成和底形沙波尺度和运动速率<sup>[5]</sup>。1998 特大洪水期间底形沙波尺度小于一般洪水期<sup>[4-6]</sup>,其原因可能为上游众多水利工程导致来沙粒径的减小,另一可能是回声测量记录<sup>[4-6]</sup>受测量船和水位稳定性及气象条件等诸多因素影响会出现很大的误差,但本调查配以不受上述因素影响的旁侧声纳扫描仪,因此,流域来沙对沙波运动影响的可能性较大。

### 3.3 潮流与沙波运动

长江口属不正规半日潮,近口门最大潮差可

更大.

### 3.4 沙波运动速率的精度

受仪器条件限制缺乏有效的沙波运动速率测量,关于水下沙波移动方向和速度的计算极为复杂,因为边界条件不同,采用的水下沙波移动速率的计算公式也将不同.就长江口而言,本文上述利用 ACP 方法获得的数值大于日本学者筱厚计算值<sup>[6,22,23]</sup>.但该沙波运动速率值与风洞实验的沙丘运动速率值<sup>[32,33]</sup>相近.

**致谢** 本项目的研究自始至终得到了陈吉余院士、王宝灿教授以及其他同志的帮助,在此一并致以诚挚和衷心地感谢.

## 参 考 文 献

- 1 陈吉余,等.长江三角洲的地貌发育.见:陈吉余主编,长江河口动力过程和地貌演变.上海:上海科学技术出版社,1989. 1
- 2 陈吉余.两千年来长江河口发育的模式.见:陈吉余主编,长江河口动力过程和地貌演变.上海:上海科学技术出版社,1989. 31
- 3 陈吉余.长江河口的自然适应和人工控制.见:华东师范大学学报编委会,长江河口最大浑浊带和河口锋研究论文选集.上海:华东师范大学出版社,1995. 1
- 4 Zhou Chengxi. On Sand-wave in Yawosha Channel of the Yangtze Estuary. In: Proceedings of the Second International Symposium of River Sedimentation. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1993. 650 ~ 661
- 5 李九发.长江口底沙运动规律.海洋与湖沼,1995,7(4): 441
- 6 杨世伦,等.长江口南港航道沙波群研究.海洋工程,1999,17(2): 79
- 7 Subcommittee on the Sediment Terminology, AGU. Report on the Subcommittee on Sediment Terminology, American Geophysical Union. Trans of AGU, 1947, 28(6): 936
- 8 Ashley G M, et al. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. J Sedimentology Petrology, 1990, 60(1): 160
- 9 Van den Berg, J H, et al. Prediction of suspended bed material transport in flows over silt and very fine sand. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1393
- 10 Komar P D, et al. Grain shape effects on settling rates. Journal of Geology, 1978, 86: 193
- 11 杨世伦.长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释.泥沙研究,1994, 3: 23
- 12 Berne S, et al. Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to Gironde Estuary (France). Journal of Sedimentology Petrology, 1993, 63(5): 780
- 13 Kostaschuk R A, et al. Macroturbulence generated by dunes: Fraser River, Canada. Sedimentary Geology, 1993, 85: 25
- 14 严肃庄,等.长江口悬浮体的粒度特征.上海地质,1994, 51(3): 50
- 15 程和琴,等.长江口粗粉砂和极细砂输移特性研究——幕式再悬浮和底形运动.泥沙研究,2000, 1: 20
- 16 Cheng H Q, et al. Bed-forms and episodic of silt and very fine sand in the Changjiang Estuary. Trans of AGU, 1998, 79(17): S122
- 17 程和琴,等.现代盐水楔河口湾底沙推移速度的估算方法.海洋科学,1998, 1: 27
- 18 程和琴,等.波、流联合作用下的近岸沙波稳定性研究进展.地球科学进展,1996, 11(4): 367
- 19 Nelson J M, et al. Mechanics of flow over ripples and dunes. J. G. R., 1989, 94(C6): 8146
- 20 Nelson J. M, et al. Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed-forms. Water Resources Research, 1993, 29: 3935
- 21 Bagnold R A. Beach and nearshore processes. Part 1, Mechanics of marine sedimentation. In: Hill M N, ed. The Sea, New York: Wiley-Interscience, 1963. 507 ~ 528
- 22 王尚毅,等.南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆架海底沙波动态分析.海洋学报,1994,16(6): 123

- 23 钱宁, 等. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1986. 87~94, 298
- 24 Rao K N, et al. The bursting phenomena in a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1971, 48: 339
- 25 Sumer BM, et al. Particle motion near the bottom in turbulent flow in an open channel. *J Fluid Mech*, 1978, 86: 109
- 26 Offen G R, et al. A proposed Model of the Bursting Process in Turbulent Boundary Layers. *J Fluid Mech*, 1975, 70: 209
- 27 Heathershaw A D, et al. Sea-bed noises reveal role of turbulent bursting phenomena in sediment transport by tidal currents. *Nature*, 1985, 316: 339
- 28 Thorne P D, et al. In situ acoustic measurements of marine gravel threshold and transport. *Sedimentology*, 1989, 36: 61
- 29 Lapointe M F. Burst-like sediment suspension events in a sand bed river. *Earth Surf Process, Landforms*, 1992, 17: 253
- 30 Shi Z, et al. Acoustic imaging of cohesive sediment resuspension and re-entrainment in the Changjiang Estuary, East China Sea. *Geo-Marine Letters*, 1997, 17: 162
- 31 Kostaschuk R A, et al. Flow and sediment transport over large sub-aqueous dunes: Fraser River, Canada. *Sedimentology*, 1996, 43: 849
- 32 刘贤达. 实验风沙物理与工程. 北京: 科学出版社, 1995. 57
- 33 朱震达. 风沙地貌实验特征. *风沙管理*, 1962, 4: 89