

长江口南支-南港沙波的稳定域<sup>1)</sup>程和琴\*<sup>†††</sup> 时 钟<sup>†</sup> Kostaschuk Ray<sup>††</sup> 董礼先<sup>†††</sup>

\* (华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

† (上海交通大学港口与海岸工程系 上海 200030)

†† (Department of Geography, University of Guelph, Guelph, ON N1G 2W1, Canada)

††† (国家海洋局海洋动力学和卫星海洋学重点实验室 杭州 310012)

**提要** 1997 年枯季和 1998 年特大洪水后期,在长江口南支-南港用直读式海流计和 Endeco/YSI Inc. 174SSM 流速仪定点测量近底和表层流速大小和方向,并采集床面泥沙样品经室内分析得到底沙粒径,用声学测深仪和 Ultra Electronics 旁侧声纳仪走航测量床面形态。结果表明:1) 枯、洪季时落潮流近底和表层流速比涨潮流流速大,落潮流周期比涨潮流周期长,且洪季落潮流表层流速大于枯季时,洪季落潮流周期比枯季时长;2) 床面泥沙枯季时为粗粉砂至极细砂,而洪季时为极细砂至细砂;3) 枯、洪季床面上的沙波形态受落潮流控制,波高与波长之比以及背流面坡度较小,洪季时沙波波高比枯季时高,波长比枯季时长。显然,长江口南支-南港落、涨潮流和床面泥沙粒径及沙波形态的特征均与季节性变化的径流有关。此外,在 Van den Berg and Van Gelder (1993) 底形稳定相图中,作者提出了一个新的沙纹与沙波间的转化边界。

**关键词** 长江口,沙波,稳定域**中图分类号** P736

沙波是河流、河口和浅海环境中的一种常见底形(Best, 1996)。迄今为止,大量底形相图都由室内水槽获得的床沙粒径和起动系数( $\theta'$ )或弗罗德数( $Fr$ )建立,并被广泛应用于预测各种环境中沙波和其他底形稳定域(Leeder, 1983; Dingman, 1984; Allen, 1985; Ashley, 1990; Southard and Boguchwal, 1990; Van den *et al.*, 1993)。从这些研究成果可以看出,底形相图中床沙粒径小于极细砂(0.125mm)或甚至为细砂(0.125—0.15mm)时都没有出现沙波。

长江是世界第四大河,多年平均流量为29300  $m^3/s$ ,受东亚季风影响,高流量出现在夏季。自徐六泾节点向东,长江依次被崇明岛、长兴岛、横沙岛和九段沙分隔为北支和南支、北港和南港、北槽和南槽(图1)。河口环流受径流和潮汐控制(Zhou, 1993; 李军等, 2003),南支-南港河段横

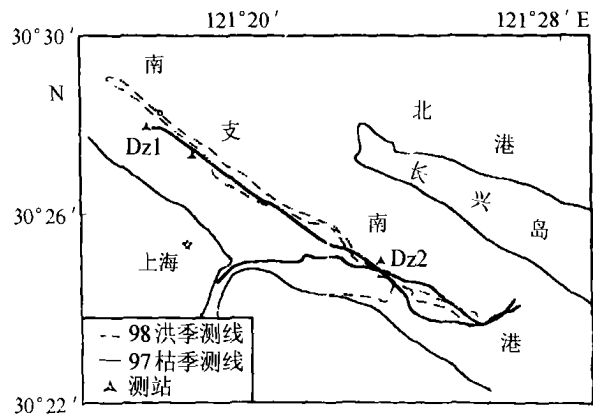


图1 长江口南支-南港研究区中1997和1998两个航次的测线和锚系测点

Fig. 1 Study area at the South Branch and the South Channel of the Changjiang Estuary showing survey lines and anchored stations in 1997 and 1998

1) 国家杰出青年科学基金资助项目,40225014号;国家基础研究发展规划项目,2002CB4124007号、上海市教委曙光计划资助项目,99SG13号。程和琴,教授,E-mail:hqch@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期:2002-10-05,收修改稿日期:2003-12-24

沙岛、高桥、七丫口三个水文观测站的平均潮差为 2.42m。长江口底沙平均粒径为 0.002—0.16 mm, 且河槽较滩粗, 口内较口外海滨粗, 南支粗于北支, 北港粗于南港, 河槽内从上游向下游变细, 自深槽向浅滩变细(杨世伦, 1994)。已有的长江口泥沙研究工作大多注重粘性细颗粒泥沙过程(时钟, 2000), 文献报道的沙波一般出现在横沙岛以西(Zhou, 1993), 而且仅出现在夏季高流量、落潮流最强和床面为细砂时, 横沙岛以东河槽很少或没有沙波出现。由于长江口南支-南港床沙主要由粗粉砂、极细砂和细砂构成, 因此该区域是研究沙波稳定域的理想场所。

## 1 研究方法

### 1.1 数据采集

数据采集于长江枯季(1997 年 12 月 3—5 日)和长江全流域特大洪水后期(1998 年 9 月 8—9 日), 这期间大通站平均流量分别为 20600m<sup>3</sup>/s 和

63800m<sup>3</sup>/s。考虑到南支对下游北、南港和北、南槽发育的重要影响及其他学者的双频测深资料(Zhou, 1993; 杨世伦, 1994; 杨世伦等, 1999), 选择南支下段至南港上段部分水域进行 4 条剖面的走航测量, 船行速度为 1.34—1.79 m/s, 测线总长约为 300km(图 1)。测量使用 80t 木质渔船, 航线和测点采用 1008/586 D. GPS 实时定位。1997 年枯季用直读式海流计测量了床面以上 1m 处流速大小和方向, 但 1998 年洪季因仪器损坏未能测量。枯、洪季表层流速大小和方向、水温以及盐度分别在 2 个锚系测点上用 Endeco/YSI Inc. 174SSM 流速仪进行 14h 的连续测量, 探测器垂直悬挂在水面以下 1m 处。沙波纵剖面 and 平面形态分别由 Inner-space Inc. 声学双频测深仪和 Ultra Electronics Inc. 的 3050L 旁侧声纳仪获得。底沙样品用帽式抓斗采集(1997 年枯季 6 个样品、1998 年洪季 3 个样品), 选取其中三个代表性样品的粒度级配特征列于表 1。

表 1 长江口南支-南港枯(1997)洪、(1998)季底沙粒度级配(%)特征

Tab.1 Distributions of sediment particle sizes during dry season in 1997 and during flood season in 1998 at the South Branch and the South Channel of the Changjiang Estuary

分级名称	粒级(mm)	1997 年 12 月南支下段	1997 年 12 月南港上段	1998 年 09 月南港上段
中砂	0.25—0.50	0.05	0.25	3.89
细砂	0.125—0.25	4.00	20.50	48.44
极细砂	0.063—0.125	32.64	51.52	35.18
粗粉砂	0.031—0.063	32.32	16.17	4.70
中粉砂	0.016—0.031	9.13	2.72	0.00
细粉砂	0.008—0.016	9.88	4.52	0.00
极细粉砂	0.002—0.008	5.07	2.11	0.00
粘土	> 0.002	6.91	2.21	0.00

### 1.2 室内样品及数据分析

以上 9 个底沙样品的粒度特征采用标准筛析法和虹吸法分析获得。沙波波高直接从测深仪记录上读取, 沙波波长则根据测量船的走航速度和 D. GPS 定位数据, 计算两个 D. GPS 定点位置之间的直接距离, 统计两点之间的沙波数量, 计算出沙波的平均波长。由于 1997 和 1998 两个航次的测线绝大部分都与主航槽平行(图 1), 因此, 本文中统计的约 5000 个床面沙波的波脊线绝大部分与测线垂直, 波长接近真值。当测深仪测线与旁侧声纳仪记录上沙波的波脊线不是正交关系时, 获得的波长值仅作定性参考, 不予定量统计和计算。

同时, 根据波高与陡、缓坡长度的比值, 分别计算各沙波的陡、缓坡坡角。旁侧声纳仪的记录数据用来判读由测深仪获得床面形态定性的空间排列和分布格局。

### 1.3 底形相图参数的近似计算方法

迄今, 确定底形相图的参数大多采用平均粒径和起动系数的水槽实验值, 这些相图涉及底形的床沙粒径都大于 0.1mm, 仅 Van den Berg *et al* (1993) 在继 Van Rijn (1984) 之后考虑到有更细粒径底形存在, 他们提出的底形相图参数为无量纲粒径  $D_*$  和与颗粒粗糙度有关的起动系数  $\theta'$ , 因而可谨慎地将其用于长江口南支-南港沙波稳

定域分析。

$$D_* = D_{50} \left[ \frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho \nu^2} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$\theta' = \frac{\tau_0'}{g(\rho_s - \rho) D_{50}} \quad (2)$$

其中,  $D_{50}$  是中值粒径;  $g$  是重力加速度;  $\rho_s$  是颗粒密度;  $\rho$  是流体密度;  $\nu$  是动力粘性系数;  $\tau_0'$  是与颗粒粗糙度共生的表面摩擦边界剪切应力。

值得注意的是, 所有这些相图都是在恒定、均匀流条件下获得的, 而河口(包括长江口)沙波则是在非恒定、非均匀和有地形效应的双向流条件下形成(Villard *et al.*, 1998), 因此, 几乎所有河口沙波分析都假定沙波与落潮时近似恒定和均匀的水流相平衡。沙波之上流速剖面通常被分成代表总应力的上部和代表表面摩擦力的下部(Soulsby, 1997), 并假定床面以上 1m 处流速测量值是流速剖面下部, 利用近壁层定律就可近似地估算长江口南支-南港沙波之上表面摩擦力。该假定较为合理, 因为沙波之上流速剖面下部占整个水流下部的 20%—30% (Berne *et al.*, 1993), 而且水深超过 10m。表面剪切应力  $\tau_0'$  是利用近壁层定律的

表面剪切速度  $u_*'$  来确定:

$$\tau_0' = \rho (u_*')^2 \quad (3)$$

$$\frac{u_b}{u_*'} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0'} \right) \quad (4)$$

其中,  $u_b$  是床面以上某一高度  $z$  处的近底流速;  $\kappa$  是 von Karman 常数;  $z_0'$  是床面粗糙长度, 可用 Soulsby (1997) 简化而成的公式(5)估算:

$$z_0' = \frac{D_{50}}{12} \quad (5)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 水流

图 2 表示研究区内枯(a)、洪(c)季近表层流速大小和方向。图 2b 表示 1997 年枯季床面以上 1m 处流速大小、方向, 因直读式海流计在 1997 年 12 月 5 日 05:00 时停止工作, 近底流速大小和方向记录的持续时间短于表层。1997 年枯季表层(图 2a)和近底(图 2b)流速大小、方向记录呈现相同变化模式, 表明潮周期内水流没有发生明显层化。1997 年和 1998 年测量期间, 相对稳定的落潮流周期远长于涨潮流, 落潮流和涨潮流周期的比

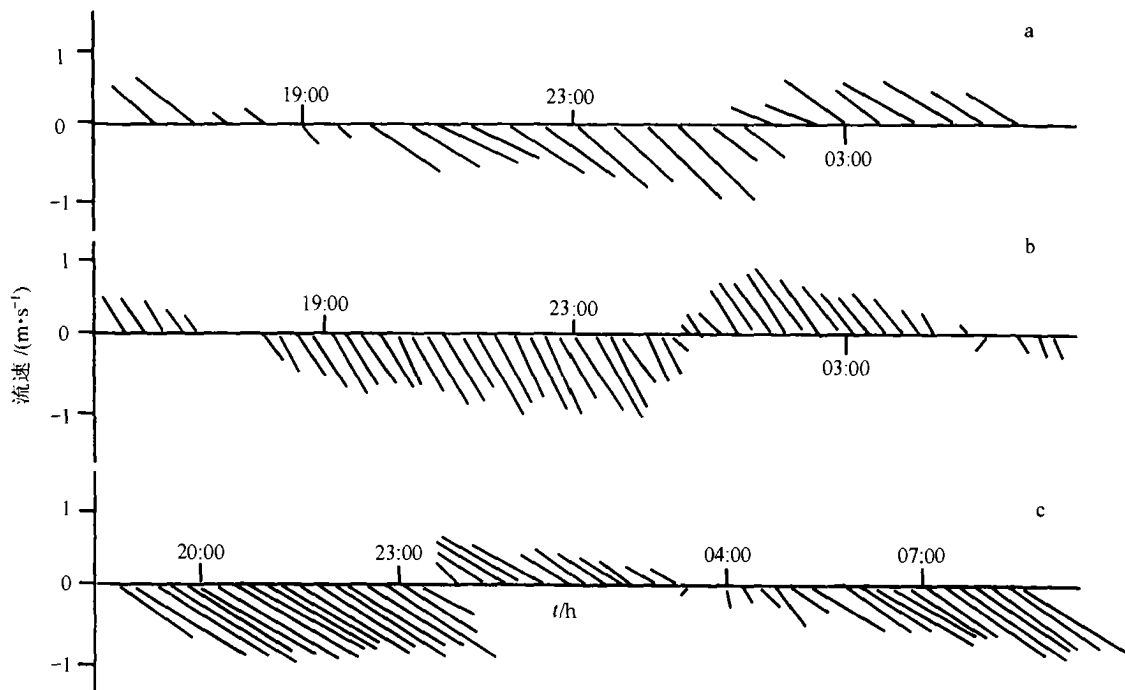


图 2 1997 年 12 月 4—5 日枯季低径流量时南支 Dz1 测站表层(a)和底层(b)、1998 年 9 月 9—10 日洪季高径流量时南港 Dz2 测站表层(c)的流速和流向

Fig. 2 Near surface (a) and bottom (b) current speed and direction during low river discharge measured at station Dz1 on December 4—5, 1997, and near surface current speed and direction during high river discharge (c) measured at station Dz2 on September 9—10, 1998

值分别为 1.34 和 1.4。枯季涨急、落急流速接近,但洪季落潮流速远大于涨潮流速。洪季表层落潮流速大于 2m/s,而枯季时却小于 1.5m/s。洪季平均水深(16.7m)大于枯季(15.4m)。1998 年洪水期间较长的落潮流周期、较强的水流和较大的水深(图 2c),反映了径流量对河口流场的显著影响。

## 2.2 底沙粒径

依据 Udden-Wentworth 粒径分类标准,长江口南支-南港 1997 年枯季床面为粗粉砂至极细砂

(表 1),平均中值粒径  $D_{50}$  为 0.088mm,且含有 20%—30%的细砂(表 2)。1998 年特大洪水后期底沙粒径为极细砂至细砂,平均中值粒径  $D_{50}$  为 0.147mm(表 2)。这些洪、枯季底沙粒径都远小于其他河口沙波(Van den Berg and Van Gelder, 1993; Kostaschuk *et al*, 1996)。1998 年洪季时底沙平均中值粒径  $D_{50}$  大于 1997 年枯季时,反映了典型的长江口洪季床沙粒径粗化模式(Zhou, 1993; 吴凯,1999)。 $D_{50}$ 的计算是从 mm 单位的直方图中直接读取的。

表 2 长江口 1997 枯季和 1998 洪季南支-南港床沙中值粒径  $D_{50}$  和沙波特征

Tab.2 Median particle sizes of bed sediments  $D_{50}$  and dune features at the South Channel and the South Branch of the Changjiang Estuary during the dry season in 1997 and during flood season in 1998

年 份	数值类型	$D_{50}$ (mm)	波长(m)	波高(m)	背流面坡角(°)
1997	最小	0.081	5.40	0.13	0.80
	最大	0.122	51.60	1.31	11.80
	平均	0.088	13.70	0.49	5.60
1998	最小	0.134	8.30	0.50	1.30
	最大	0.161	151.10	3.60	10.40
	平均	0.147	41.40	1.64	6.90

## 2.3 沙波形态

图 3 表示洪季沙波的纵剖面形态,图 4 表示枯季沙波的声纳图像。声纳图像记录呈现出沙波脊线形态从笔直状变化成弯曲状和新月型,具有底形尺度越小、脊线越直的趋势。表 2 是对两个航次沙波剖面特征的总结。枯季波长均小于 30m,平均波长小于 15m 者占 99.5% 以上,但 1998 年特大洪水期间波高和波长的值均远大于枯季时,波长在 20—300m 之间,大于 20m 以上者占 85%,波长大于 100m 以上者占 7%(程和琴等,2000,2001)。1997 年和 1998 年沙波背流面均朝向下流表明沙波受落潮流控制。洪季沙波波高高于枯季、波长大于枯季,是因为洪季时的落潮流流速大、周期长。根据 Ashley (1990) 分类方案,上述大部分沙波归类于大型沙波。枯、洪季的波高/波长比值相似,1997 年枯季为 0.036,1998 年洪季为 0.040。因此,洪、枯季沙波背流面坡度较小(表 2),常常被认为是主要以悬沙方式运输的细颗粒沙波的典型特征(Berne *et al*, 1993)。

## 2.4 底形相图与沙波稳定域初探

枯、洪季时,研究区落潮流周期长、流速大,沙波背流面均朝向下流,且洪季时沙波波高和波高大于枯季时。这些特征表明落潮流和径流对沙波

形成及其形态变化的主要影响。同时,枯季沙波组成粒径和底流速的所有样品都落在常用水槽底形相图沙纹稳定域内(Ashley, 1990)。显然,就长江口南支-南港粗粉砂和极细砂质底沙而言,基于水槽实验确定的沙波稳定域不合适,所以需要研究可适用于野外自然环境中的细颗粒底形相图沙波稳定域,处理和估算底形相图参数可以说是一个重要途径。

依据上述 2.3 计算步骤,估算出长江口南支-南港 1997 年枯季时床沙样品的无量纲粒径  $D_*$  及其起动系数  $\theta'$ 。这些样品均落在 Van den Berg and Van Gelder(1993)相图中的沙纹区(图 5),显然与观测结果(图 3、图 4)不符。枯季时表面剪切速度  $u'_*$  的计算基于水流相对稳定期间(图 2 中 19:00—23:00h)落潮流速测量值的平均值(0.67 m/s);洪季表面摩擦边界剪切应力  $\tau'_0$  因 1998 年洪季近底流速测量值的缺失故不能计算;床面粗糙长度  $z'_0$  的计算基于枯季时床沙样品的中值粒径  $D_{50}$ (表 2),动力粘性系数  $\nu$  取平均水温测量值 11.9℃ 时的 0.01240  $\text{cm}^2/\text{s}$ (清华大学水力学教研室编,1980)。枯季时表面剪切应力  $\tau'_0$  大于无量纲床沙起动系数  $\theta'$ ,表明这些沙波不是残留沉积物。为此,可在 Van den Berg and Van Gelder (1993)相图中提出一个新的沙纹与沙波稳定边界

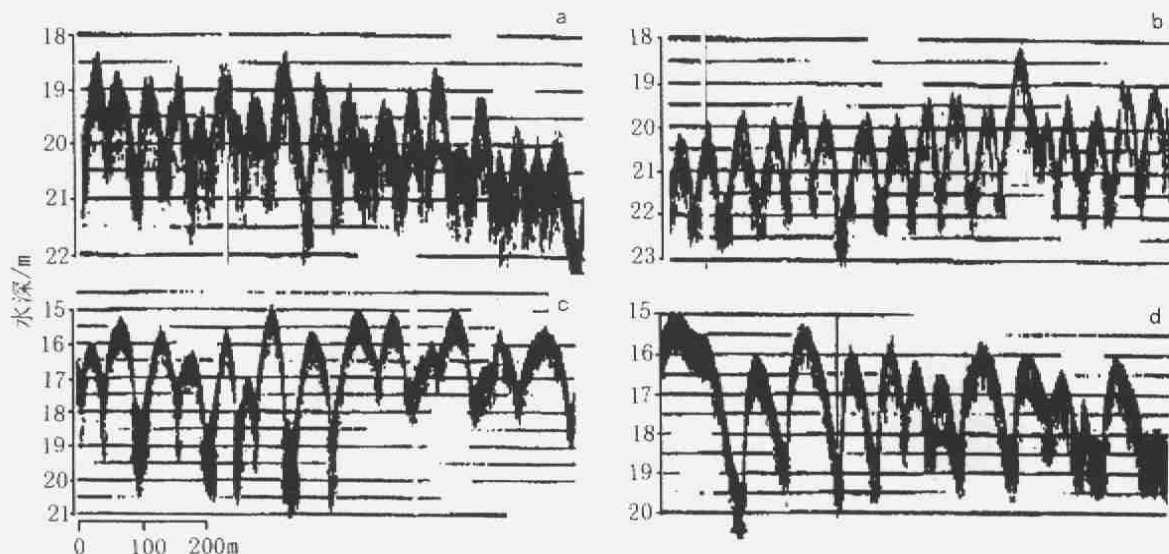


图3 1998年9月8日高径流量时探测到的沙波纵剖面双频测深仪记录。其中,a为直脊状小型沙波,波长10—20m,波高0.9—1.5m;b为中型弯曲状沙波,波长20—40m,波高1.5—2.5m;c为大型弯曲状和新月型沙波,波长40—100m,波高0.7—2.8m;d为大型新月型沙波,波长100—150m,波高1.0—3.5m

Fig.3 Echosounder dune profiles during the high river discharge on September 8, 1998. In Figure 3, a shows small straight crest asymmetric dune with spacing of 10—20m and height of 0.9—1.5m, b shows medium parabolic crescent dune with spacing of 20—40m and height of 1.5—2.5m, c shows large parabolic asymmetric dune with spacing of 40—100m and height of 0.7—2.8m and d shows large asymmetric dune with spacing of 100—150m and height of 1.0—3.5m

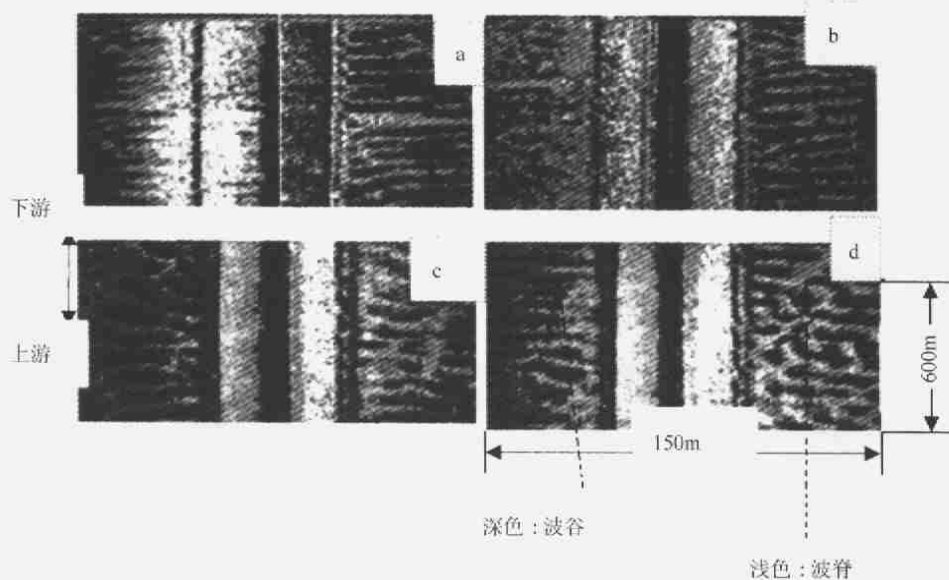


图4 1997年12月3日枯季低径流量时探测到的沙波平面形态旁侧声纳图像。其中,a为直脊状小型沙波,波长5—10m,波高0.1—0.4m;b为中型弯曲状沙波,波长10—15m,波高0.3—0.7m;c为大型弯曲状和新月型沙波,波长15—20m,波高0.2—0.7m;d为大型新月型沙波,波长15—20m,波高0.4—1.0m

Fig.4 Sidescan sonar images of dunes during the low river discharge on December 3, 1997. In Figure, a shows small straight crest asymmetric dune with spacing of 5—10m and height of 0.1—0.4m, b shows medium parabolic dune with spacing of 10—15m and height of 0.3—0.7m, c shows large parabolic asymmetric dune with spacing of 10—15m and height of 0.2—0.7m and d shows large asymmetric dune with spacing of 15—20m and height of 0.4—1.0m

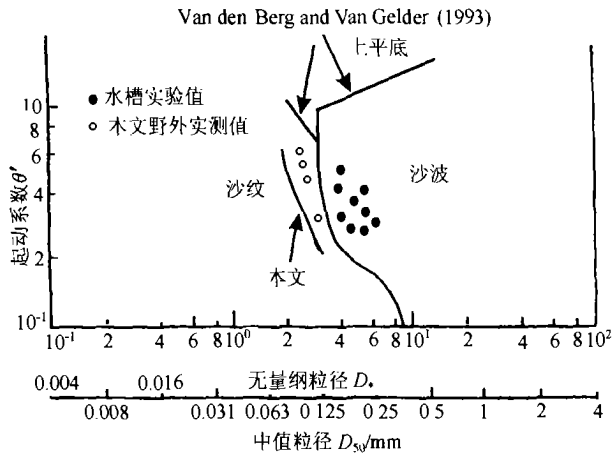


图5 河流和河口沙纹-沙波转化的底形稳定相图,其中基于水槽实验的边界和非长江口的数据来自 Van den Berg and Van Gelder (1993)

Fig.5. Bedform stability diagram for the ripple-dune transition in rivers and estuaries. The flume-based boundary and non-Changjiang data are from Van den Berg and Van Gelder (1993)

(图5),其适用于细颗粒泥沙河口环境的研究,并将接受未来更多野外数据的修正。

### 3 结论

(1) 相对于涨潮流而言,落潮流速大、周期长;与枯季相比,1998年特大洪水期间落潮流速更大、周期更长。

(2) 枯季时底沙为粗粉砂至极细砂,而洪季时则为极细砂至细砂。

(3) 枯、洪季床面上沙波形态受落潮流控制;与枯季相比,洪季时沙波波高较高、波长较长。

(4) 长江径流的季节性变化对河口流场、底沙粒径和沙波形态有重要影响。

(5) 由于水槽实验的底形稳定域不能预测自然环境中水深较大时的粗粉砂至极细砂质底形变化,因而本项研究中在水深 > 1m 的 Van den Berg and Van Gelder (1993) 底形稳定相图中提出了一个新的沙纹与沙波间的转化边界。

### 参 考 文 献

李 军,高 抒,曾志刚等,2003. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异. 海洋与湖沼,34(5):499—510  
 杨世伦,1994. 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,3:23—31  
 杨世伦,张正别,谢文辉等,1999. 长江口南港航道沙波群研究. 海洋工程,17(2):79—88  
 吴 凯,1999. 1998年长江洪水的特点与警示. 地理科学

进展,18(1):20—25  
 时 钟,2000. 长江口细颗粒泥沙过程. 泥沙研究,6:72—81  
 清华大学水力学教研组编,1980. 水力学. 北京:人民教育出版社,8  
 程和琴,宋 波,薛元忠等,2000. 长江口粗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,2:20—27  
 程和琴,李茂田,薛元忠等,2001. 长江口水下微地貌运动高分辨率探测研究. 自然科学进展,11(10):1085—1091  
 Allen J R L, 1985. Principles of Physical Sedimentology. Allen & Unwin, London, 272  
 Ashley G M, 1990. Classification of large scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. Journal of Sedimentary Petrology, 60(1):160—172  
 Berne S, Castaing P, Drezen E I *et al*, 1993. Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to Gironde Estuary (France). Journal of Sedimentary Petrology, 63(5):780—793  
 Best J L, 1996. The Fluid Dynamics of Small-scale Alluvial Bedforms. John Wiley & Sons, Chichester, 67—125  
 Dingman S L, 1984. Fluvial Hydrology. John Wiley & Sons, New York, 64  
 Kostaschuk R, Villard P V, 1996. Flow and sediment transport over large sub-aqueous dunes: Fraser River, Canada. Sedimentology, 43:849—863  
 Leeder M R, 1983. On the interactions between turbulent flow, sediment transport and bedform mechanics in channelized flows. In: Collinson J D, Lewin J eds. Modern and Ancient Fluvial Systems: International Association of Sedimentologists Special Publication 6. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 5—18  
 Soulsby R L, 1997. Dynamics of Marine Sands. Thomas Telford, London, 182  
 Southard J B, Boguchwal L A, 1990. Bed configuration in steady unidirectional water flow: Part 2. Synthesis of flume data. Journal of Sedimentary Petrology, 60:658—679  
 Van den Berg J H, Van Gelder A, 1993. A new bedform stability diagram, with emphasis on the transition of ripples to plane bed in flows over fine sand and silt. In: Marzo M, Puidefabreas C eds. Alluvial Sedimentation. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 17:11—21  
 Van Rijn L C, 1984. Sediment transport, part III: Bedforms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Engineering, 110:1733—1754  
 Zhou C X, 1993. On sand-waves in Yawosha channel of the Yangtze Estuary. Proceedings of the Second International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Chinese Hydraulic Engineering and Hydropower Press, 650—661  
 Villard P V, Kostachuk R, 1998. The relation between shear velocity and suspended sediment concentration over dunes: Fraser Estuary, Canada. Marine Geology, 148:71—81

## STABILITY FIELD FOR SAND BEDFORMS AT THE SOUTH BRANCH AND THE SOUTH CHANNEL IN THE CHANGJIANG (YANGTZE) ESTUARY

CHENG He-Qin<sup>\*†††</sup>, SHI Zhong<sup>†</sup>, Kostaschuk Ray<sup>††</sup>, DONG Li-Xian<sup>†††</sup>

<sup>\*</sup> (State Key Laboratory of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062, China;

<sup>†††</sup> Key Laboratory of Ocean Dynamic Processes & Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

<sup>†</sup> (Department of Harbour & Coastal Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, China)

<sup>††</sup> (Department of Geography, University of Guelph, Guelph, ON N1G 2W1, Canada)

**Abstract** A set of measurements were made at the South Branch and the South Channel during the dry season in 1997 and the flood season in 1998, respectively, in the Changjiang Estuary, China. Dune bed profiles and planform morphology were measured with Thermal Depth Recorder of Inner Space (449M) and Sonar Sidescan (3050L) being deployed along the survey lines at the South Channel. Tidal current velocities were measured from two mooring sites. Near surface current velocity was measured with Current Meter of Endeco/YSI Inc (174SSM) being deployed 1m below the surface over 14h period during both the dry season in 1997 and the flood season in 1998. During the dry season, near bottom tidal current velocity was also measured with a mechanical current meter for 10h deployed 1m above the bed. Six bottom grab samples were taken during the 1997 survey and three samples during the 1998 survey. The particle size distributions of bed samples were determined using standard sieving techniques and the laser Coulter LQ-100A. Ratio of height to length of lee side slope and stoss side slope are calculated to be the lee side slope angle and stoss side slope, respectively. Results show that: (1) near surface ebb tidal velocities exceed 2 m/s during the 1998 flood survey but were less than 1.5m/s during the dry season in 1997 and the ebb tides had longer durations than the flood tides; (2) the bed sediments were composed of coarse silts and very fine sands with an average median particle size of 0.088mm ( $D_{50}$ ) enriched 20%—30% of fine sands during the dry season but of fine sands with a mean median particle size of 0.13mm ( $D_{50}$ ) during the flood season; (3) mean height/length ratios are similar in 1997 (0.036) and 1998 (0.040), and dune lee-sides face downstream in both 1997 and 1998 indicating a dominance by ebb tidal currents and (4) stoss and lee side slope angles are also steeper for flood dunes, probably because of coarser bed sediments in 1998 and dune modification by upstream flood tidal currents in 1997. Therefore, the ebb and flood tidal currents, bed sediment particle size and dune morphology at the South Branch and South Channel in the Changjiang Estuary were controlled by the seasonal runoff variations. And then, a new boundary is proposed for the transition between ripples and dunes based on the Van den Berg and Van Gelder (1993) diagram in deep flows with very fine sand.

**Key words** Stability, Bedforms, Changjiang Estuary