

浪流联合作用下潮滩沉积动力过程的 高分辨率数据采集与分析

汪亚平 高 抒 贾建军

(南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093; 国家海洋局海底科学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012. E-mail: ypwang@nju.edu.cn)

摘要 使用 MIDAS-400 用户化数据采集系统在江苏王港潮滩进行了现场观测, 获取了多层位的流速和悬沙浓度的同步数据, 并将高分辨率的压力波动记录转换为波浪数据. 分析结果表明: 潮滩区域的表现粗糙长度远大于底床沉积物粒径量级, 接近于沙纹高度; 浪流联合作用产生的底部切应力大于单纯的潮致切应力, 是导致紊动混合作用和再悬浮作用加剧的主要因素; 潮周期内观测到多个悬沙峰值, 主要与涨潮前锋的水体强烈紊动和再悬浮有关, 平流作用、极端天气状况(如暴雨、强风)也是不可忽视的重要因素; 在涨潮或落潮时间异常延长、水流成为准单向流的较长时段内, 可产生较大的悬沙净输运量. 研究表明, MIDAS-400 系统可以实现浪流联合作用下的潮滩水动力和沉积动力特征的高分辨率观测, 所获数据适用于物质输运过程和机制的分析.

关键词 潮滩 高分辨率数据采集 浪流联合作用 底部切应力 悬沙浓度

潮滩是海岸系统的重要组成单元, 不仅为野生动物提供栖息地, 而且是潜在的土地资源, 还起到了海岸防护的作用. 潮滩上部生长着丰盛的盐生植物, 有机碳埋藏通量较高, 对全球碳循环和气候变化有一定的作用. 然而, 与砂质海滩的研究相比, 对潮滩物质输运、循环和归宿的过程和机制的了解还较为贫乏^[1]. 此外, 潮滩边界层参数的计算, 需要精确观测潮滩淹没时的水流流速结构^[2]; 潮滩环境多变, 表层常为细颗粒沉积物所覆盖, 不易在潮滩上依靠人力进行常规的现场观测. 因此, 有必要发展自动化程度高、时空分辨率高的观测方法.

本文选择江苏王港潮滩作为研究区, 使用“MIDAS-400 用户化数据采集系统”(简称为“MIDAS-400”)进行高分辨率沉积动力过程的观测, 以计算潮滩边界层参数, 探讨浪流联合作用下的潮滩物质输运过程. 该设备是由英国Valeport公司应作者提出的技术要求而生产的. 王港潮滩位于苏北辐射沙脊群内侧的潮间带(图 1), 表层沉积物主要由粉砂组成, 其水动力条件受南黄海旋转潮波和苏北沿岸流的影响^[3]. 研究区接受了辐射沙脊群、长江和废黄河三角洲丰富的物质来源, 海岸不断向海推进, 其速率大约为 $7.3\sim 100\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[4,5]. 以往对于潮滩沉积动力的研究主要是基于常规仪器的现场观测, 逐层测得流速、悬沙数据, 数据同步性较差^[3,6-8], 难以进行

深入的分析.

1 研究方法

1.1 MIDAS-400 用户化数据采集系统的组成与功能

MIDAS-400 主要由以下部件组成: 一组 802 型电磁传感器; 一组 Seapoint 浊度传感器; 电子记录仪, 包括电导率、温度和压力传感器; 电池; 数据记录仪(DataLog 400)软件. 电子记录仪与电池固定在潮滩上(记录仪上端的压力传感器与潮滩表面平齐), 电磁传感器与浊度传感器固定在不锈钢观测架上; 电磁传感器、浊度传感器、电导率、温度和压力传感器共 15 个通道的信号用电缆连接到电子记录仪(图 2). 所有传感器采集的数据均储存于电子记录仪中, 观测结束后用 DataLog 400 软件导出, 并转化为 ASCII 数据文件, 供进一步分析.

由于电磁传感器与浊度传感器的体积较小, 前者顶端球状探头的直径仅 0.055 m , 后者探头宽度与厚度为 0.025 m , 因此, 与传统流速仪(如直读式海流仪)相比, 它们对水流的扰动较小. 电磁和浊度传感器的测量精度可分别达到 $0.005\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和最大浊度值的 0.1% , 分辨率分别为 $0.001\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.001 mV , 测量范围分别为 $-5\sim +5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0\sim 5000\text{ mV}$. 为将浊度计原始记录单位 mV 转换为悬沙浓度单位或标准浊度单位, 需同步采集水样, 获取水样悬沙浓度或标准浊

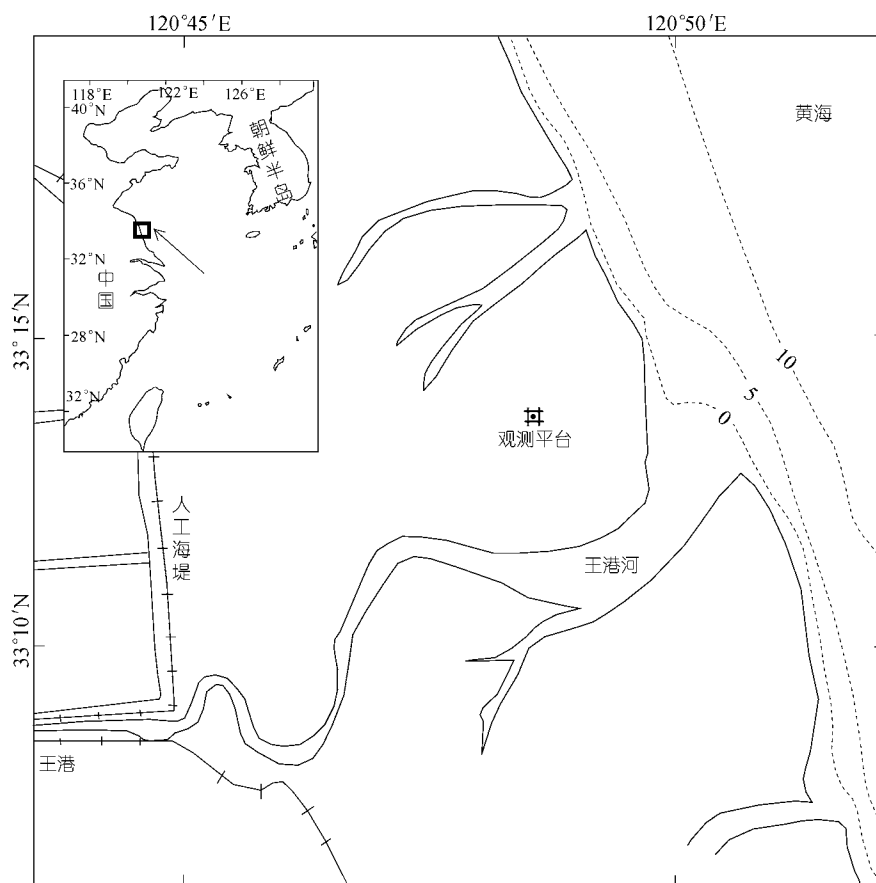


图1 研究区位置图

(据1995年海图; 观测平台处为潮滩观测站; 等深线单位: m)

度,从而对该浊度计的原始记录数据进行标定.电子记录仪包括电导率、温度和压力传感器,可以获得近海底的温、盐、密度和水位,其中压力传感器的精度为最大水深值的0.1%,分辨率达0.005%(满刻度).此外,系统的采样频率可以达到8 Hz,因此,MIDAS-400具有获取波浪数据的能力.其测量的物理参数种类和性能均比机械旋桨式流速仪-光电式浊度计^[9]有了很大提高,尤其是在测量精度和传感器坚固程度方面,这在自然条件复杂的潮滩环境中显得尤为重要.

1.2 现场观测与采样

2003年7月3~10日,在苏北王港潮滩的潮间带下部建立观测站位(33°14'07.0"N, 120°48'33.4"N),电磁与浊度传感器均固定在不锈钢观测架上.观测架四周用绳索固定防止在观测过程中摆动或偏移,下方深入滩面1 m以上,因潮滩主要由粉砂组成,含少

量黏土和极细砂,粉砂物质与观测架之间形成强大的摩擦阻力,使得观测架固定后在数天内均不下陷或移动.为方便取得与MIDAS-400同步的水样数据,在距离仪器观测架约100 m处用毛竹搭建人工平台,平台工作面位于滩面上方约2.5 m(高于当地大潮高水位),水流可以从平台下面自由通过,不影响水流流态与动力状况.

本次野外观测放置了6组浊度传感器和电磁传感器(其中一个电磁传感器未正常工作),安装在距离潮滩表面0.08~1.56 m之间的位置,传感器之间的距离从海底往上递增.系统的采样频率设置为4 Hz.根据水位、水体的浑浊变化情况,间隔10~20 min在浊度-电磁传感器对应高度上的水层用自制采水器采集水样,每次可同步采集3~5层,取水量约为1 L,并准确记录采样时间.此外,在滩面干出时,在观测架附近采集表层沉积物样品,测量沙纹高度.在平台上安装便携式水位记录仪(740型,英国Valeport公司生产)

作临时验潮站, 以便对比 MIDAS-400 压力传感器的观测数据。在观测期间, 有阵风, 风速约 $8\sim 13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 7 月 5 日凌晨暴雨、离岸强风持续数小时。观测区较为平坦, 根据水准测量其坡度为 $1\text{‰}\sim 2\text{‰}$ 。

1.3 样品分析与数据处理

采集水样分为两个子样, 其中一个子样采用过

滤法测定悬沙浓度, 使 $0.2\sim 0.4\text{ L}$ 左右的水样通过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 规格已称重的滤膜(国家海洋局第二海洋研究所生产), 再将附着沉积物的滤膜置于烘箱中, 在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干, 称重。另外一个子样用英国 Malvern 公司的产 Mastersize 2000 型激光粒度仪(测量范围为 $0.02\sim 2000\text{ }\mu\text{m}$, 重复测量误差 $<3\%$)进行测量, 以取得



图 2 MIDAS-400 用户化数据采集系统

1. 电磁传感器, 2. 浊度传感器, 3. 电子记录仪(包含电导率、温度、压力传感器), 4. 电池, 5. 10 m 电缆

悬沙的粒径分布范围。表层沉积物样品经分散预处理后,亦用 Mastersize 2000 型激光粒度仪测量,计算其粒度参数。

为消除数据中的高频波动,对电磁传感器获得的各层流速数据作 5 min 的平均处理,用于绘制流速矢量图。

将 MIDAS-400 原始采样的高频(压力脉冲)水位数据按脉冲持续时间(256 s)分组,计算出各组的平均水位和潮致水位坡度后,作“去均值”和“去趋势”处理,获得同一水平面的水位数据,用“傅里叶变换”作频谱分析,获得波浪能谱数据,再由“反傅里叶变换”计算脉冲波群的海面水位,获得有效/最大波高、平均波周期、总波能等波浪参数。

悬沙输运通量的计算公式为

$$F(t) = \int_H C(z,t) V(z,t) dz = \sum_i C_i(t) V_i(t), \quad (1)$$

式中 H , z , t 分别表示水深、高程(距离潮滩滩面高度)与时间; $i=5$, 为 MIDAS-400 的 5 对流速/浊度传感器所对应的 5 个水层; $F(t)$ 为 t 时刻的悬沙输运通量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); $C_i(t)$ 和 $V_i(t)$ 分别是 t 时刻第 i 水层处的悬沙浓度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 与流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

净悬沙通量 $F_{\text{net}} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$ 的计算公式为

$$F_{\text{net}} = \int_T F(t) dt = \sum_j F_j(t), \quad (2)$$

式中 T 为代表性观测时段(潮周期), j 为该时段内 $F(t)$ 的时间系列。

2 结果与讨论

2.1 水位特征及其他水文参数

以下的分析主要以 2003 年 7 月 4~5 日两个潮周期为例。7 月 4 日 11:35(北京时间,下同)潮水到达观测点,水位上涨,14:30 左右上涨极为缓慢,水流近于停滞,持续时间 10 余分钟,14:58 达到最大水深 1.76 m,之后水位开始下降,至 18:05 露滩(图 3)。潮滩淹没时间为 6.5 h,涨潮历时为 3.4 h,略长于落潮历时。露滩约 6 h 后,潮水又到达观测点。水位上涨较急,2:13 即达到最高水位 1.06 m;落潮较缓,历时长达 3.3 h,比涨潮历时长约 1 h,潮滩淹没时间为 5.5 h (图 3)。7 月 5 日凌晨暴雨造成大量径流,加之较强的离岸风,是造成落潮历时异常延长的主要原因。

此外, MIDAS-400 观测的水深数据与 740 型便携式水位记录仪观测的数据非常吻合(图 3)。对便携式

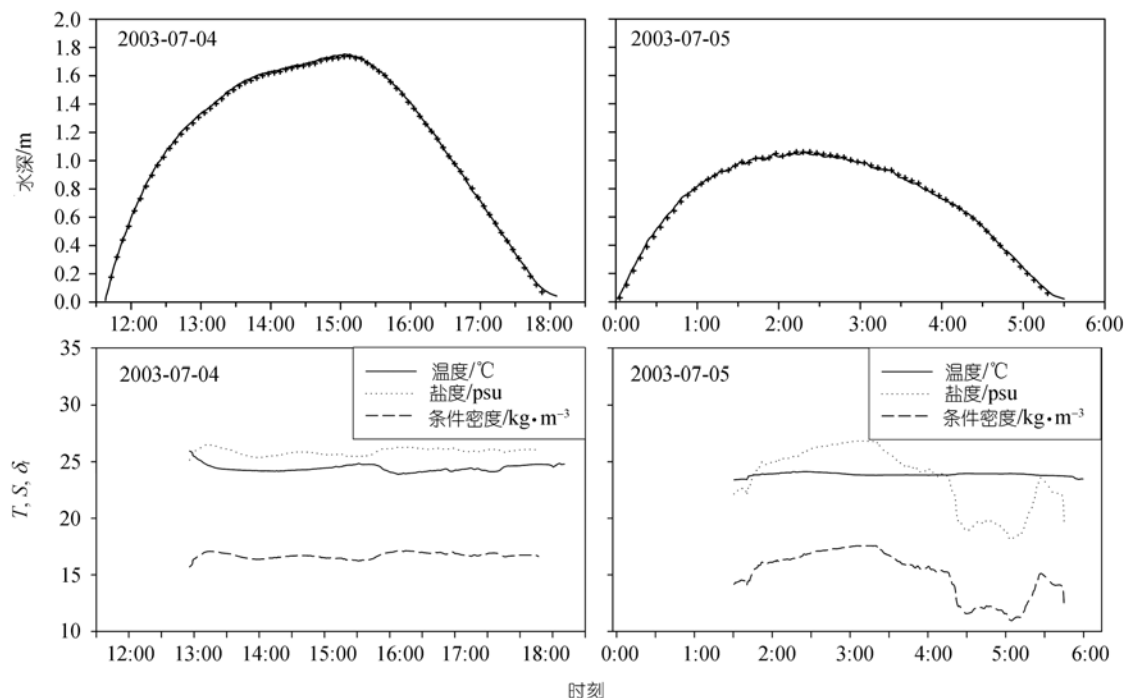


图3 潮滩观测站水位过程曲线和其他海洋物理参数

水位过程曲线为 MIDAS400 观测数据,符号“+”表示 740 型便携式水位记录仪观测数据

水位记录仪 13 个潮周期的观测数据分析表明, 潮滩淹没时间为 5.3~6.6 h, 露滩时间为 5.6~6.9 h, 最大水深与潮滩淹没时间存在显著的正相关关系. 本区的潮汐为半日潮, 但连续的两个潮在周期和水位方面均有较大差异, 属于不规则半日潮.

7 月 4 日, 各种水文参数均较稳定, 温度、盐度和条件密度分别为 23.9~25.1, 25.4~26.5, 16.2~17.2 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 3). 由于受到暴雨影响, 7 月 5 日潮周期内盐度和条件密度有较大波动, 尤其落潮中后期, 由于暴雨在潮滩引起淡水汇聚, 观测点盐度从 26.8 迅速降至 18.1, 条件密度从 16.5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 10.9 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 3).

2.2 流速剖面结构与边界层参数

以 7 月 4 日流速观测数据为例, 在距海底 0.26 m 处 11:42 时最先观测到有效数据, 因当地潮滩微地形的影响, 涨潮初期流向偏北, 流速可达 0.35 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上(图 4), 即涨潮前锋; 潮沟存在类似的流速脉冲现象, 主要与涨潮初期较大的潮位变化率有关^[7], 此时在水位曲线上表现为较大的斜率值(图 3). 之后流速减弱, 流向转为西南, 至 12:30 达到涨潮中期的另一流速峰值, 距海底 0.26 m 处流速 0.19 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 随着距海底高度的增加, 流速逐渐呈增大趋势, 在 0.74 和 1.08 m 处可达 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 之后水流逆时针向东南旋转, 至 14:30~14:45 之间出现憩流期, 从底层向表层水体憩流期依次推迟, 憩流流速低于 0.05~0.10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 并转向海(东)方向. 可见, 憩流期与水流转向出现在最高水位之前, 表明潮滩上的潮波并非单纯驻波, 而是驻波与前进波兼有的混合潮波. 落潮开始后, 流向迅速转为北偏东; 流速逐渐增大, 流向呈顺时针旋转, 至 16:00~16:33 流速达到峰值; 从海底向水表面, 流速达到 0.49~0.71 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 落潮中后期, 流速的减小远不如涨潮末期显著, 基本上保持 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的水平; 仅在底层因距滩面较近、摩擦阻力较大而流速显著减小, 17:53 观测到最小流速 0.17 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

7 月 5 日凌晨有暴雨及强大的离岸风, 加之高潮位较低, 向陆的涨潮流无法形成, 整个涨潮过程中均为偏北向流(图 4). 距海底 0.25 m 水层的最大涨潮流速为 0.26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 涨潮 1 h 后即达憩流期, 流速仅为 0.02~0.05 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向由西北向转为东北向, 而此时水位仅处于涨潮曲线的中部(图 3). 落潮期间, 水流流向基本一致, 为东北向. 从憩流期至落潮末期, 东北向流的时间长达 4 h, 流速从底层向表层依次增大,

底/表层最大流速达到 0.41/0.73 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

潮滩上的流速不对称及混合潮波等效应, 是形成潮致余流的主要原因. 计算表明, 处于潮间带下部的观测点所有水层均存在着向海(东北向)的余流. 中下部水层的余流值相对较小, 中上部水层的余流相对较大. 7 月 5 日潮位较 7 月 4 日低得多, 但 7 月 5 日的余流在数值上并未显著减小, 主要原因是离岸风形成的风生余流、暴雨形成的径流亦占较大比重. 可见, 除潮汐以外的风、雨等极端天气情况也是影响潮滩余流强弱的重要因素.

基于冯卡门-普朗特流速对数剖面公式, 并根据“数据内部一致性”方法^[2], 对 7 月 4~5 日水深大于 1.56/1.00 m 的流速剖面进行分析, 结果表明 7 月 4 日潮周期内有 24.2% 的流速剖面符合对数分布, 而 7 月 5 日潮周期内仅有 4.3% 的流速剖面符合对数分布(表 1), 流速剖面结构显著偏离对数分布的现象主要是由于极端气候条件而造成的.

根据“数据内部一致性”方法^[2]获得的粗糙长度称为表观粗糙长度(z_0), 以有别与经典理论的粗糙长度; 如不特别说明, 拖曳系数(C_{100})以距离海底 1 m 处为基准. 结果表明, 上述边界层参数不仅涨落潮、甚至潮周期之间也有较大差别, 这主要与局部的地貌状况、潮汐和气候条件有关. 由于水深向岸变浅造成的非线性地形效应和海底摩擦力增大的影响, 使涨落潮产生不对称现象, 从而造成涨、落潮之间的水力差异, 使涨、落潮时段内的粗糙长度和拖曳系数(C_{100})也可能产生较大差异. 此外, 暴雨和极强的离岸风使向岸方向的涨潮流几乎消失殆尽, 从而对 z_0 和 C_{100} 值产生影响.

表 1 列出上述边界层参数的平均值, 用以表示潮滩边界层的基本物理状况. 根据 Nikuradse^[10]和 Christoffersen-Jonsson^[11]的经典理论, 在水力学粗糙、平坦无沙纹、底质为砂的海底, 粗糙长度为粒径的 1/12. 将研究区底质平均粒径(表 1)代入此公式, 计算获得的粗糙长度将远远小于上文的表观粗糙长度. Soulsby^[12]研究了具有沙纹和混合沉积物组份的天然海底海, 认为由粉砂-砂混合组成的海底, 平均的粗糙长度和拖曳系数分别是 0.05 mm 和 0.0016; 有沙纹的海底, 其粗糙长度和拖曳系数比无沙纹时分别大 15 倍和 2.3 倍. 可见, 沙纹的存在是造成研究区的粗糙长度较大的主要原因之一, 使得表观粗糙长度在数值上更接近于沙纹波高(表 1). 沙纹尺度的增大或减小, 也使表观粗糙长度的数值增大或减小.

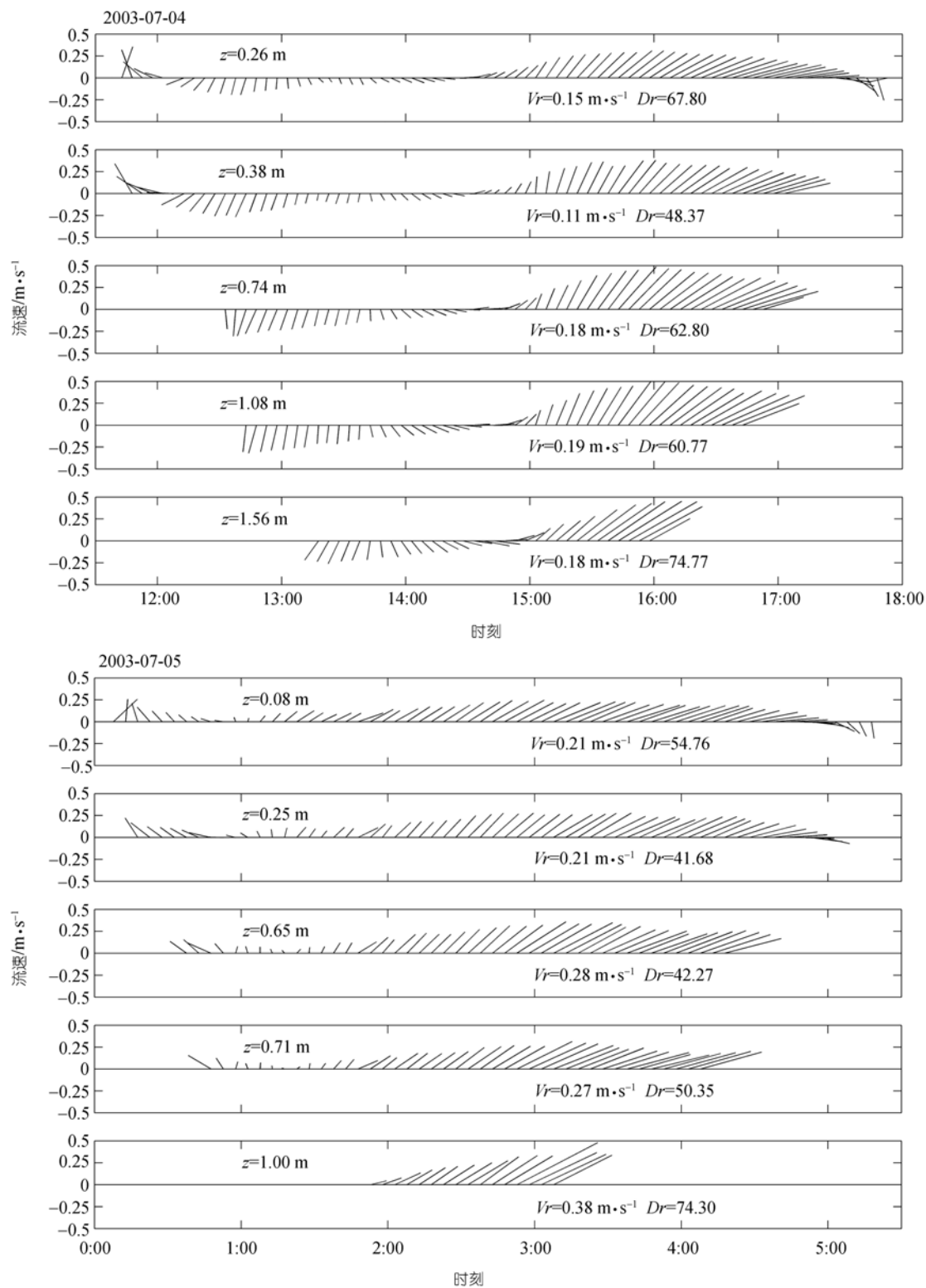


图4 潮滩观测站流速矢量

矢量方向按地球坐标, N(北)和 E(东)分别向上和向右; z 为距潮滩滩面距离(m), V_r 为余流大小($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), D_r 为余流方向($^\circ$)

表 1 基于对数剖面与数据内部一致性检验方法获得的潮滩边界层参数

日期(时间) ^{a)}	剖面数		z_0/m	C_{100}	底质平均粒径(ϕ 值)	沙纹波高/m
	总数	通过检验数				
07/04/2003 (11:35~18:05)	285	31/38 ^{b)}	0.4204/ 0.0159	0.2131/ 0.0093	3.82~6.58 (10.5~70.8 μm)	0.005~0.015 [0.02~0.06]
07/05/2003 (00:00~05:25)	395	17	0.0003	0.0024	同上	同上
07/03~04/2003 (23:20~04:30)	76	22	0.0118	0.0081	同上	同上
10/16~17/2000 (22:45~04:59)	247	225	0.0198	0.0163 ^{c)}	4.16 (55.9 μm)	0.01~0.02 [0.02~0.06]

a) 07/05/2003 为月/日/年, 时刻为北京时间, b) “涨潮/落潮”分别计算, c) 引自文献[9], 拖曳系数为 C_{60}

2.3 波浪特征与浪流联合作用

波浪参数计算结果表明, 随着水深增加, 有效波高和波浪能量密度也增大(图 5). 波浪能量密度集中于 0.5~0.8 Hz, 主要是局地产生的高频波浪, 而不是由外海传播而来. 7月4日下午, 潮位较高, 风由海向陆, 涨潮期间有较大的风区让波浪成长, 在潮周期内有效波高通常可达 0.1~0.2 m 以上, 最大有效波高为 0.4 m, 发生于最高水位之前的转流期; 能量密度主要集中在 0.48~0.64 Hz 范围, 峰值为 $0.11 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. 波浪水质点峰值轨道速度可达 $0.1\sim0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 是波浪对潮滩底床产生切应力的基本动力因素(图 5). 7月5日凌晨, 潮位较低, 有较强的离岸风, 风区较短, 暴雨径流削弱了涨潮流, 使得涨潮期间波浪不能充分成长, 故有效波高峰值迟至落潮中期(03:00~04:00)才出现, 其值为 0.32 m, 其余时段有效波高大多小于 0.1 m; 能量密度主要集中在 0.63~0.84 Hz 范围, 峰值为 $0.05 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 5). 可见, 潮滩地区波浪生长、波浪参数不仅和局地风区(主要取决于风向)大小有关, 还与当地水深(潮位)和海流流向有关, 向岸风具有较长的风区、以及较大水深均有利于波浪成长. 7月4日潮周期存在显著的方向相反的涨、落潮流, 有效波高和水质点峰值轨道速度存在较大波动; 而7月5日的潮周期中, 水流流向基本为偏北向, 与风向一致, 仅在 03:00~04:00 期间有效波高和水质点峰值轨道速度较大, 其余时段均较为稳定.

根据 Soulsby^[12]和 van Rijn^[13]提出的浪流联合模型, 可根据上述波浪参数计算浪流联合作用下的潮滩底部切应力, 二者的计算结果基本一致(图 6). 从 van Rijn 模型的计算结果可知, 7月4日涨潮期间, 底部切应力大多在 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上, 大于单纯流产生的切应力($0.05\sim0.1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$), 单纯波浪产生的切应力也大于单纯流产生的切应力; 落潮期间, 浪流联合作用下的底部切应力与单纯流产生的切应力均迅速增大,

但前者仍大于后者, 最大值分别为 1.22 和 $0.96 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$. 7月5日, 涨潮初期出现一个较大的切应力峰值, 主要是由涨潮初期的较大的流速(脉冲)所致; 落潮期间 03:00~04:00, 波高迅速增大, 使切应力亦异常高, 最大值可达 $1.17 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, 与7月4日落潮期间的最大切应力相当, 而此时对应的单纯流产生的切应力仅为 $0.48 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, 小于单纯波浪产生的切应力. 可见, 在水深较浅的潮滩区域, 波浪叠加可形成较强的动力作用, 使得水动力状况更为复杂.

2.4 悬沙剖面与悬沙输运

与 MIDAS-400 系统同步采集的水样经过滤、称重等实验分析, 获得不同水层悬沙浓度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 用其对相应浊度数据 T (mV)进行标定, 建立悬沙浓度与浊度数据之间的关系(图 7). 根据此关系式, 可将 MIDAS-400 获得的高频、高分辨率浊度值转换为悬沙浓度数据.

涨潮初期, 流速和海底摩擦力均较大, 浪流联合作用的底床切应力可达 $0.4\sim0.7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 6), 使涨潮前锋水体(水深约 $0.1\sim0.3 \text{ m}$)具有极强的紊动混合作用, 海底表层沉积物迅速悬浮, 悬沙浓度可达 $1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上(图 8); 这种现象与潮沟内的观测结果基本一致^[8]. 在整个涨潮期间直至水流转向以前, 底床切应力产生的再悬浮(或侵蚀)作用与平流作用(异地再悬浮)从下部潮滩带来的悬沙, 使得水柱中的悬沙浓度可以维持在较高的水平($0.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). 再悬浮具有一定的分选作用, 使得悬浮颗粒的平均粒径仅为 $7.38 \phi(6 \mu\text{m})$, 小于底床沉积物粒径. 在转流及水位到达最高之前, 悬沙浓度亦出现一个峰值. 而在转流期间(7月4日 14:00~14:45, 7月5日 00:45~01:15), 流速和切应力均降低, 再悬浮作用减弱, 近底部和中上部水体悬沙浓度分别降低至 0.6 和 $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 在水流转向后的最高水位期间(7月4日 14:45~15:15, 7月5日 01:45~02:30), 底部切应力有一定增大, 使底部悬

沙浓度趋于增高,而且因上部水体转流滞后于下部水体(图4),产生一定程度的悬沙层化作用,底部悬沙上扬受到阻滞;此外,上部水体中悬浮颗粒的沉降作用,均使得中上部水体的悬沙浓度不升反降,导致水柱内沿水深的悬沙浓度梯度增大.7月5日01:45~02:30水体中较高的悬沙浓度,除与涨潮初期较强的流速脉冲形成高悬沙浓度有关外,还与极端天气状况有关;尽管此时切应力较小,但强风、暴雨

等极端天气可在潮滩中上部形成高浓度悬沙水体,并由平流作用带至潮间带下部,从而维持那里的高悬沙浓度.

落潮初期,浪流联合作用产生的切应力逐渐增大并达到峰值,导致表、底层悬沙浓度亦急剧增大,例如7月4日15:15~16:00的切应力峰值与悬沙浓度峰值完全吻合.7月5日03:00~04:00,虽然切应力峰值达 $1.17\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$,但悬沙浓度仍呈下降趋势,甚至低

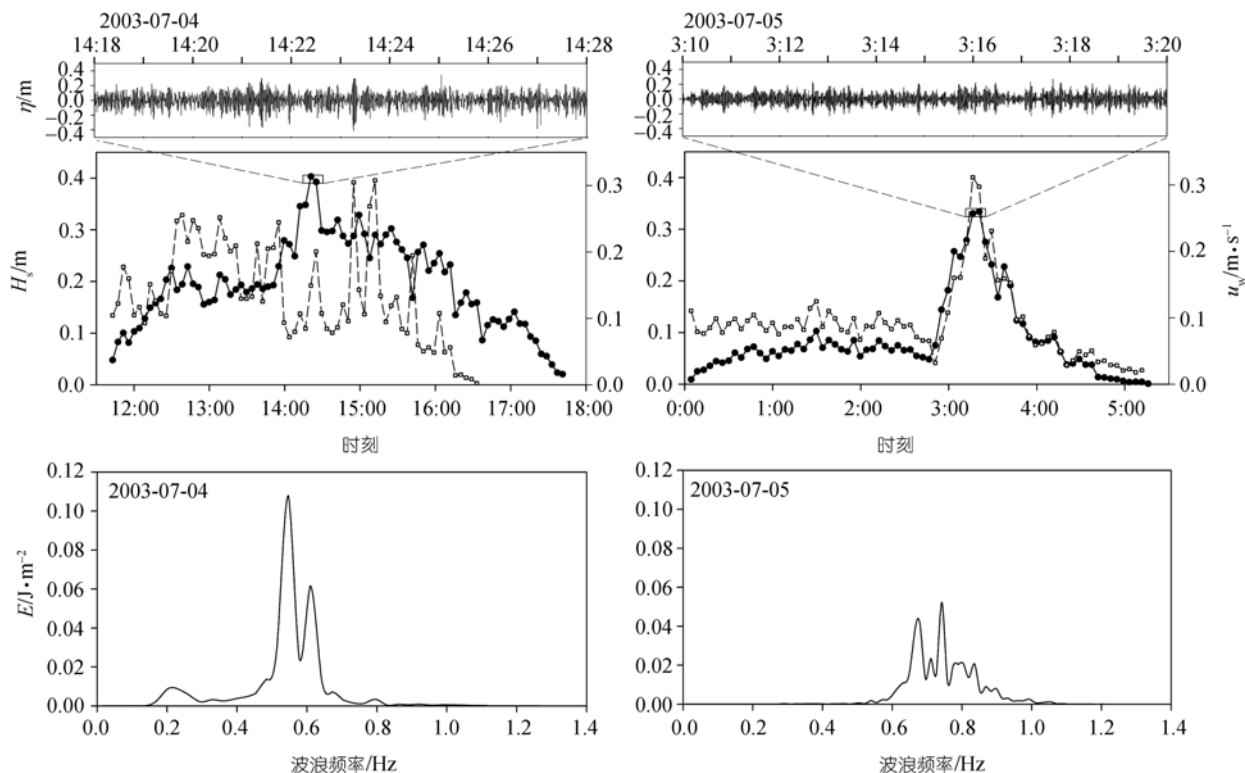


图5 潮滩观测站瞬时水位(η)、有效波高(H_s)、波浪水质点峰值轨道速度(u_w)与波浪能量密度(E)
实线-黑圆点表示有效波高(H_s), 虚线-空心正方形表示波浪水质点峰值轨道速度(u_w)

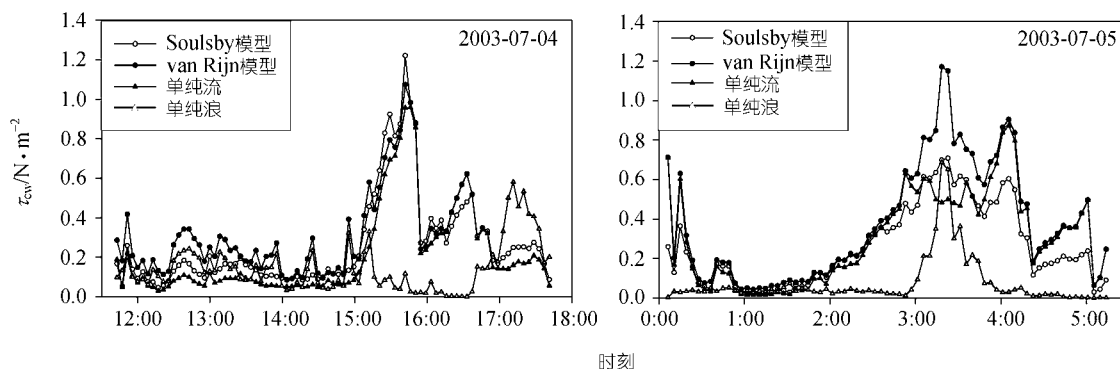


图6 浪流联合作用下的潮滩床底切应力(τ_{cw})

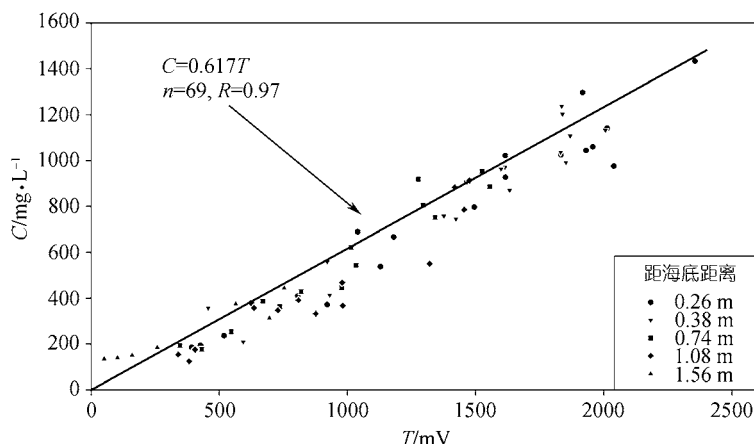


图 7 MIDAS-400 观测浊度(T)与现场同步水样采集所获悬沙浓度(C)的关系

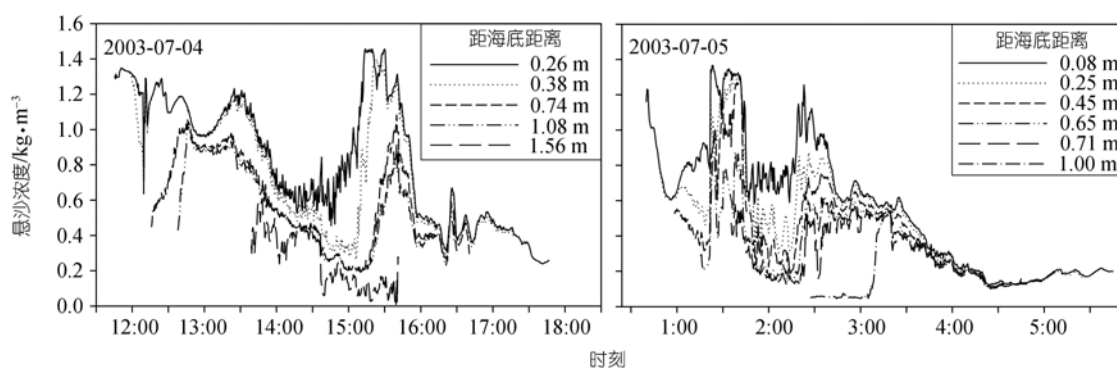


图 8 潮滩观测站悬沙浓度结构

于 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 这可从潮滩床底的可蚀性得到解释. 在研究区内, 随着滩面以下侵蚀深度的增加, 抗蚀能力增强、临界切应力也随之增大^[14,15]. 7 月 5 日, 因暴雨、离岸风导致向海流维持的时间尺度异常增加, 涨潮后期、落潮前期已将当地活动层厚度(相对于潮周期尺度而言)内可侵蚀或再悬浮的沉积物全部剥离、带走, 故落潮后期即使出现较大的切应力, 也不易侵蚀或再悬浮床面沉积物. 加之随着水位的降低, 从高潮滩带来的沉积物愈来愈有限, 最终使悬沙浓度呈下降趋势.

从悬沙通量的计算结果也可看出, 7 月 5 日涨、落潮期间, 悬沙均向离岸(偏北)方向输运(表 2), 尽管 7 月 5 日最大水深比 7 月 4 日小的多, 而且其涨潮或落潮期间输运量仅为 7 月 4 日相应输运量的一半或更少, 但潮周期内的净输运量非常接近, 7 月 4 和 5 日的净通量分别为 1.42×10^3 和 $1.29 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$, 方向均为东北向, 即向海净输运(表 2). 历史观测结果也显示,

该区域悬沙向偏北方向净输运^[9]. 可见, 虽然流速、悬沙浓度的增高可使涨潮或落潮期间的悬沙通量增大, 但不一定能够显著增大整个潮周期的净悬沙通量(表 2). 从 7 月 5 日和 7 月 4 日两个潮周期的特点来看, 这种状况是由于涨、落潮悬沙输运量不对称而引起的, 7 月 5 日的暴雨加强了落潮流的情况, 使得整个潮周期海流成为近似于向海方向的单向流, 从而产生了较大的落潮方向的净通量.

3 结论

对 MIDAS-400 用户化数据采集系统在江苏王港潮滩进行了现场试验, 获取了多层位的潮流流速、波浪和悬沙浓度的高分辨率同步数据. 所获数据显示, 沙纹的形成和浪流联合作用可使表观粗糙长度显著增大; 在潮周期内, 悬沙浓度出现多次显著的峰值, 如涨潮初期较高的流速和海底切应力使水体发生强烈紊动混合, 出现悬沙浓度峰值; 浪流联合作用产生的底部切应力普遍大于单纯流产生的切应力, 导致

表 2 悬沙输运通量

日期(时间)	悬沙通量($\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$)/方向($^{\circ}$)			最大水深/m	最大流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最大悬沙浓度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	涨潮	落潮	净通量			
07/04/2003 (11:35~18:05)	0.96/182 $^{\circ}$	2.04/40 $^{\circ}$	1.42/65 $^{\circ}$	1.75	0.71 (落)	1.46 (落)
07/05/2003 (00:00~05:25)	0.48/16 $^{\circ}$	0.85/48 $^{\circ}$	1.29/36 $^{\circ}$	1.06	0.73 (落)	1.37 (涨)
07/03~04/2003 (23:20~04:30)	0.58/1 $^{\circ}$	1.67/44 $^{\circ}$	2.14/33 $^{\circ}$	1.03	0.76 (落)	1.50 (涨)

再悬浮作用加剧。上述结果表明, MIDAS-400 系统可以实现浪流联合作用下的潮滩水动力和沉积动力特征的高分辨率观测, 适用于物质输运过程和机制的研究工作。

致谢 李占海、王爱军、杨旻、左浩和朱建群等参加了野外观测和采样, 谨致谢忱。本文受到国家自然科学基金项目(批准号: 40576040, 40231010, 40206006)资助。

参 考 文 献

1 Dyer K R. Preface (Properties of intertidal mudflats). *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 1037~1038 [\[DOI\]](#)

2 Collins M B, Ke X, Gao S. Tidally-induced flow structure over intertidal flats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46: 233~250 [\[DOI\]](#)

3 任美镔主编. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986. 571

4 张忍顺, 陈才俊. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究. 北京: 海洋出版社, 1992. 124

5 Zhang R. Suspended sediment transport processes on tidal mud flat in Jiangsu Province, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1992, 35: 225~233

6 汪亚平, 张忍顺, 高抒. 论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应. *科学通报*, 1998, 43(21): 2315~2320

7 Wang Y P, Zhang R, Gao S. Velocity Variations in Salt Marsh Creeks,

Jiangsu, China. *Journal of Coastal Research*, 1999, 15(2): 471~477

8 杨旻, 汪亚平, 高抒. 江苏王港盐沼潮沟的水动力及悬沙输运过程. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4): 23~28

9 Wang Y, Gao S, Ke X. Measurements of boundary layer parameters and suspended sediment transport over the intertidal flats of northern Jiangsu, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(3): 437~448

10 Nikuradse J. *Stromungsgesetz in rauhren rohren, vdi-forschungs-heft* (English translation: *Laws of flow in rough pipes*), 1950. Technical Report, NACA Technical Memo 1292. National Advisory Commission for Aeronautics, Washington DC, 1933. 361

11 Christoffersen J B, Jonsson I G. Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion. *Ocean Engineering*, 1985, 12(5): 387~423 [\[DOI\]](#)

12 Soulsby R L. *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. London: Thomas Telford Publications, 1997. 249

13 van Rijn L C. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam, the Netherlands, 1993

14 Maa J P-Y, Sanford L P, Halka J P. Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland. *Marine Geology*, 1998, 146: 137~145 [\[DOI\]](#)

15 Sanford L P, Maa J P-Y. A unified erosion formulation for fine sediments. *Marine Geology*, 2001, 179: 9~23 [\[DOI\]](#)

(2005-08-29 收稿, 2005-12-20 接受)

348

www.scichina.com