

上海淤泥质潮滩潮锋作用及其形成机制初步探讨*

徐 元* 王宝灿 章可奇

(华东师范大学河口海岸研究所)

提 要: 本文具体讨论了上海淤泥质潮滩的潮锋作用过程, 定性给出了潮锋的形成机制, 认为潮锋作用及其水体高含沙量现象的本质在于“潮锋带水体水流加速效应”, 即, 由于潮滩坡面变化平缓的特殊性, 涨潮水体前锋沿程存在着一持续时间可达数十分钟的水流加速过程。最后, 本文初步探讨了潮锋作用在滩面塑造过程中的地位, 并重新定义了潮锋作用的内容。

主题词: 淤泥质潮滩 潮锋 含沙量 滩涌 滩面塑造过程

分 类: (中图法) P72 P731.23 (科图法) 57.1513 57.155

1 研究背景

潮锋作用及其重要性越来越受到重视, 国内外潮滩研究者从各种角度对潮锋性质作过不同程度的研究^[1,3,7,8], 分别从潮锋带水体的含沙量变化、沉积物结构分布、有机质含量变化以及水力特征等方面作了分析。但潮锋作用的较完整的定义(Flood Surge/Flood Front)直到80年代末才被明确提出^[2,12], 即在涨潮水体前锋与潮滩平缓滩面的交切处, 水体与滩面摩擦产生强烈紊动, 并导致潮滩沉积物向上急剧掀动、扬起, 随涨潮流

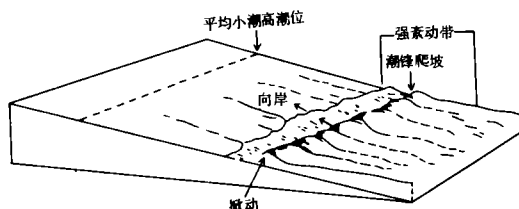


图1 淤泥质潮滩潮锋过程示

意图(据 Wang, B.C. et al, 1988 改)

Sketch of flood surge going upslope on a muddy tidal flat (after Wang Baocan et al, 1988)

本文1993年4月12日收到, 1994年4月1日收到修改稿。

* 徐元现工作单位为: 交通部第三航务工程勘察设计院。

* 国家自然科学基金资助项目(49106060)

向岸迁移(图 1)。但潮锋作用形成的具体机制及潮锋作用在整个潮滩水沙输移和滩面塑造过程中所居的地位迄今尚不十分明确。上海潮滩属典型的开敞性淤涨潮滩,其形成和发展的条件是显著的潮汐作用(平均潮差 2.7—3.5m)、岸外有面向广海的低波能缓坡带以及长江丰富的泥沙供应,而有别于堡岛式^[10]、或半封闭式潮滩^[4]。区域性海平面、泥沙供应及沿岸水域波能的季节性变化对上海潮滩的发育均有深刻的影响(图 2,表 1)。

上海潮滩沉积物以粘土和粉砂为主,整个潮间带以低潮滩的粗粉砂或中—粗粉砂为最粗。尽管整体粒度细,但其平均粒径仍有明显的自低潮滩向高潮滩减小的规律,而潮下带则多由粗粉砂及极细砂组成。含泥量从低潮滩向高潮滩逐渐增加,在高潮滩富集可达 20%以上。潮间带生物种类较为单一,植物类型主要为芦苇(*phragmites australis*)和海三棱蔗草(*Scripus marigueter*, 又称秧草),底栖动物以低生产力为特征,其平均生物量仅为 22.1g/m²^[5],因而,生物在潮滩发育中的地位相对是次要的,高潮滩依植物类型不同向海可分为芦苇带和草滩带,中潮滩和低潮滩为光滩(图 3)。

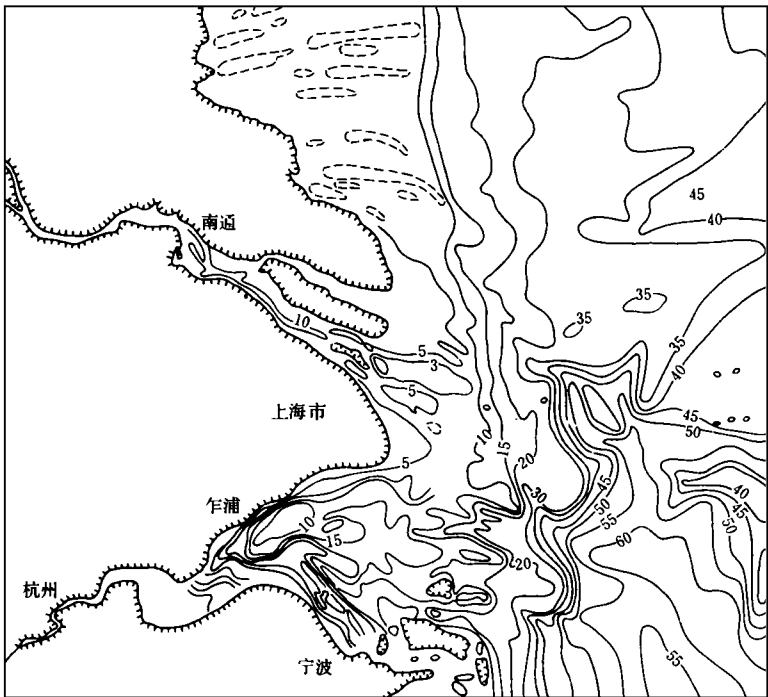


图 2 长江口杭州湾形势及水下地形图
Geographical outlay and subaqueous contour of
Changjiang River Mouth and Hangzhou Bay

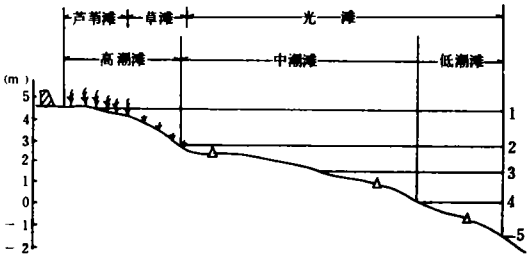
表 1 上海地区沿岸平均海面、高平潮表层含沙量及波高季节变化
Seasonal Variations of mean seagevel, High Water Level Surface
Concentration and Mean Wave Height along Shanghai Coast

项 目 \ 月 份		一 月	二 月	三 月	四 月	五 月	六 月	七 月	八 月	九 月	十 月	十 一 月	十 二 月
平 均 海 面 (m)	中 浚	2.21	2.19	2.20	2.32	2.35	2.48	2.47	2.55	2.51	2.51	2.42	2.27
	金山咀	1.69	1.71	1.83	1.83	1.94	2.09	2.04	2.12	2.20	2.08	1.90	1.77
含 沙 量 (g/l)	芦 漕 港	1.175	1.142	1.095	1.050	0.679	0.462	0.476	0.542	0.737	0.688	0.850	1.194
	金山咀	1.056	0.861	0.759	0.500	0.512	0.486	0.398	0.260	0.337	0.498	0.359	0.627
平 均 波 高 (m)	引水船	0.9	1.0	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	1.2	0.8	1.0	1.0	1.1
	金山咀	0.20	0.19	0.27	0.24	0.27	0.25	0.42	0.25	0.26	0.24	0.23	0.18

* 吴淞零点 Wusong Datum

2 研究方法

1982—1992 年，先后多次分别在长江口南边滩的东海农场、杭州湾湾口的芦漕港和杭州湾北岸的金汇港、张家厍、漕泾和金山咀等地的潮间带上（图 4），洪、枯季分别在中潮滩上部、下部及低潮滩（图 3），放置印刷海流计（HLJ1-1 型，两至三台，用于记录时间间隔为 10 分钟至 30 分钟不等的滩面水流流速流向）。海流计用铁三角架悬挂，三角架加固，以避免下沉或水流冲刷移位，仪器底部距滩面 15—30cm 左右。同时，多次在涨、落潮过程中系统地采取潮锋水样和退潮尾部水样（图 4），为便于对比和保证资料精度，仅取无风浪或微风浪期间所测资料用于分析。



1. 平均大潮高潮位，2. 平均小潮高潮位，
3. 平均潮位，4. 平均小潮低潮位，5. 平均大潮低潮位。

3 结 果

潮锋带具有含沙量大大高于其后水体的特征，这种特征的时空变化决定于滩面水流过程，而这种过程又与潮波运动的性质有密切关系，表现在潮锋作用在滩面沿程的强度变化上（表 2）。

图 3 上海潮滩潮间带分带及印刷海流计位置 (△) 示意图
Division of intertidal zone in the tidal flat along Shanghai coast and distribution of auto-printcurrent meters in the tidal flat profile

在潮波性质为驻波的杭州湾北岸, 涨潮初始阶段, 潮锋带无明显的锋面波状紊动 (本文称这种锋面波状紊动为“滩涌”), 水流流矢向岸线的方向偏转 (表 2a)。在同一测点 (低潮滩), 水深由 8cm 增至 30cm 再至 70cm, 含沙量由 2.18g/l 变为 2.63g/l 再减至 0.34g/l, 变幅达 7~8 倍, 且锋后的水流流矢又趋于平行岸线; 潮位接近中潮位时, 潮锋带出现高约 30cm 的滩涌, 锋带展宽, 含沙量增大, 水流流向进一步向岸线的方向偏转。同一测点 (中潮滩) 当水深增加, 底部含沙量同样先增后减, 当潮位上升接近高潮位时, 潮锋带含沙量减小, 且随水深增大其变化较小, 水流流矢指向岸线, 滩涌消失; 当潮位进一步上升, 潮锋带进入高潮滩中上部, 由于植物的捕沙消能作用, 含沙量锐减。可见, 潮波性质为驻波的杭州湾北岸潮滩, 其潮锋带水流速度、水体含沙量均表现为自海向岸沿程先增加后减小的过程, 流矢则不断向指向岸线的方向偏转; 而对于同一测站而言, 潮锋带水流存在着一加速过程 (图 5a、b, 表 2a)。

与杭州湾北岸潮滩类似, 在岸外潮波以前进波占优的长江口南边滩, 自低潮滩向高潮滩潮锋带水流在同一测点也存在一回速过程 (图 5c、d), 但其潮锋过程除沿程水流流矢也向指向岸线的方向偏转外, 其空间变化与杭州湾北岸潮滩的潮锋过程是不同的。在涨潮初始阶段, 低潮滩下部潮锋带已有明显的滩涌, 上部滩涌的高度可达 20cm; 至中潮滩, 滩涌的幅度反而有所减小, 但到上部滩涌的幅度再次增大, 至高潮滩下部 (草滩带外缘) 最大可达 30cm, 潮锋带宽度可达 200m; 潮锋进入草滩后, 初期滩涌仍保持在 5cm 左右的幅度, 近芦苇带时消失, 潮锋蜕变为片状水流。

从潮锋水体含沙量的空间过程看 (表 2b), 长江口南自低潮滩下部到上部, 潮锋带水体含沙量有一明显增幅, 这表明岸外水体在经过低潮位时, 水体的含沙量较低, 在向岸的加速过程中, 水体的挟沙力相应提高; 在潮锋到达中潮滩中部时, 水体的含沙量基本与中潮滩下部年潮锋水体相近, 甚至有了下降。一方面可能由于滩面底形的变化, 另一方面可能由于潮锋水流极值流速出现时刻也表现出区域特性; 潮锋到达中潮滩上部和高潮滩下部, 含沙量可有一定程度的增加; 进入高潮滩后, 同样由于植物的捕沙消能, 水体含沙量减小。

为进一步了解潮锋含沙量的时空变化, 在东海农场沿滩做了一组跨大小潮周期的潮锋带逐日连续采样及数组大潮与小潮的对比采样。选取其中高潮滩下部 (秧草带外缘, 以避开植物消能作用干扰)、中潮滩中部、低潮水边线附近 (开始涨潮后半小时左右采样) 作对比, 其

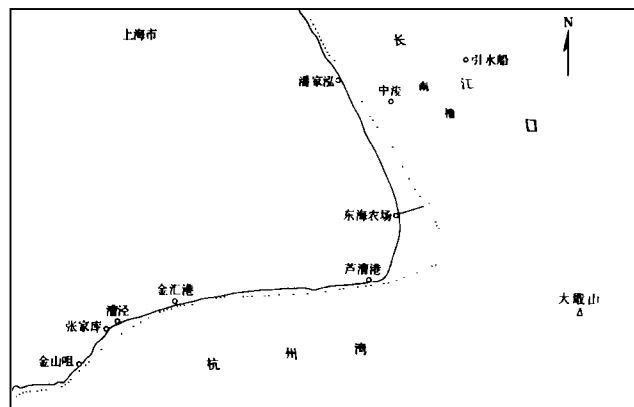


图 4 上海淤泥质潮滩分布和工作地点
(Δ 水文站, — 印刷海流计布点, 潮间带外边界)
Distribution of muddy tidal flats
along Shanghai coast and study sites (Δ Synoptic
stations, — Sites of auto-print current
Meters, Lower limit of intertidal zone)

表 2 潮滩潮锋带水沙特征值

a. 张家厓潮锋带水流及含沙量 (据陈宏达, 1987)
b. 东海农场不同潮汛潮锋带水体含沙量 (g/l)

Eignvalues of flood surge on tidal flats

a. Current Speeds, Ditections and Concentrations (Zhangjiashe, after Chen, H.D. , 1987)
b. Concentrations of Flood Surges in Different Tides (East Sea Farm)

a.

水深 cm	低 潮 滩			中 潮 滩			高 潮 滩 下 部			高 潮 滩 上 部		
	流速 cm/s	方向 (度)	含沙量 (g/l)	流速 cm/s	方向 (度)	含沙量 (g/l)	流速 cm/s	方向 (度)	含沙量 (g/l)	流速 (cm/s)	方向 (度)	含沙量 (g/l)
8	5.8	265	2.18	16.7	320	2.38	6.0	320	1.48	5.0	330	0.26
30	10.0	295	2.63	18.5	295	2.81	16.0	330	1.33	6.0	330	0.35
70	16.7	275	0.34	18.5	280	1.19	11.7	330	1.39			

b.

潮 汛	部 位	低潮滩下 或中部	低潮滩上或 中潮滩下部	中潮滩 中部	中潮滩 上部	高潮滩下部 (秧草外缘)	高潮滩中部 (芦苇外缘)
大潮 1		51.8172	61.6709	19.7341	28.2349	16.7015	5.7438
小潮 1			14.5031	10.0022	4.5724	5.9102	0.5740
小潮 2			2.6322	3.0710	2.4855	2.4104	
大潮 2		24.4971	97.3428	80.8413	38.5488	3.6975	2.6501
小潮 3		3.9329	4.0731	4.3694	2.8412	3.6003	
大潮 3		7.4115	10.1144	15.1259	24.8573	34.2135	16.7670

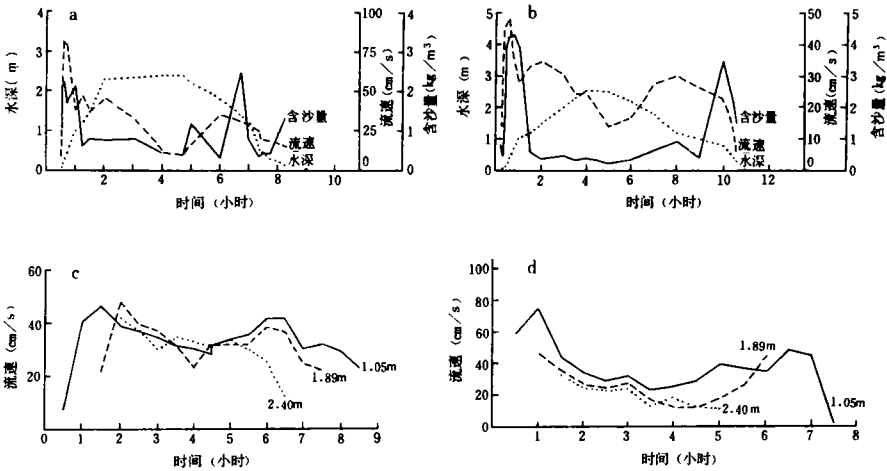


图 5 潮滩近滩面水流特征过程

Processes of Current Characteristics over the surfaces of tidal flats

中前两点每次取样位置不变,而低潮水边线随潮汛而变。

为便于比较,对原始数据作如下处理:时间过程,在所选三点的含沙量值中,分别选取各点最小值来除该点的所有数据;空间过程,以各测次中潮滩含沙量分别除其余两测点含沙量(表 3)。可以发现,潮锋带水体含沙量,同样符合潮滩水体含沙量大小潮变化规律,即大潮时含沙量大、小潮时含沙量小,大小潮变化幅度可达 50 倍。含沙量空间过程比其时间变化复杂。但在东海农场潮滩,一般来说中潮滩的含沙量要比其余两测点处低,尤其是初涨时的含沙量常比中潮滩高得多。

表 3 东海农场潮滩潮锋带含沙量相对值的时空变化
Temporal and spatial variations in relative concentration
values of flood surges over tidal flat at east sea farm

测次		I-1 (大潮)	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6 (小潮)	II-1 (小潮)	II-2 (大潮)	III-1 (小潮)	III-2 (大潮)
时 间 上	高潮滩	12.76	25.69	28.76	5.47	2.67	1.00	1.00	36.98	1.00	1.88
	中潮滩	9.72	48.39	23.31	5.04	2.25	1.00	1.00	26.32	1.00	5.32
	低潮滩	10.65	12.68	26.23	3.98	3.42	1.00	1.00	15.51	1.00	9.71
空 间 上	高/中	1.43	0.58	1.35	1.18	1.29	1.09	0.81	0.48	1.39	0.41
	低/中	2.63	0.63	2.74	1.89	3.64	2.40	0.86	1.20	1.24	1.90

潮锋带水体含沙量在时间上的变化基本反映大小潮周期,符合全潮周期涨潮过程中的沿滩流速变化,但也与当时当地的滩面状况有关。如 I-1 组水样含沙量反而比 I-2 组水样小(表 2b),原因在于该次大潮汛前上海地区刚经历 9219 号台风边缘影响,滩面物质粗化相对不易再悬浮。采 I-1 组水样当天潮滩处于风暴后淤积状态,至第二天整个滩面淤高 2—3cm,尤其是中潮滩达 5—8cm。相应地,其泥沙固结程度差,相对容易起动。含沙量的变化,反映了滩面物质在时空上的差异,也暗示着由于岸外潮波性质以前进波占优,东海农场潮滩潮锋带水流在空间变化上可能有其特殊性。

4 讨 论

从多次施放海流计及野外实地观测发现,在涨潮前锋水层厚度小于 30—40cm 时,存在着比随后水流平均流速高 1—3 倍的流速(图 5),这种流速一般可维持 30min 左右,与此同时水体的含沙量大大地高于随后的水体。形成这种高含沙量的原因就是较薄水层中在较短时间内存在的较大流速。下面提出出现这种现象的可能机制并作定性描述。

半日潮潮波周期长达 12 小时,涨潮过程一般也在 4—6 小时左右。考虑滩面某一点,经历潮锋作用这种流速脉动时间仅 30min 左右,故滩面涨潮前锋水流可理想地看作单向水流。

滩面上两点 A 和 B 处,分别取垂线 A 和 B(图 6)。考虑较短时段 $\Delta T(T_2-T_1)$,时刻 T_1 ,垂线 A 位于水边线,流速为零;垂线 B 的取法,要求满足其所在位置为该时刻潮锋作用最完善处。时刻 T_2 ,垂线 A 处为该时刻潮锋作用最完善处。从时刻 T_1 至时刻 T_2 ,单宽过水体积

尚小,而过水体积变率很大,因而尽管垂线 A 的过水量与潮位成正比增加,其水流过程仍可近似看作单位时间内垂线 B (流速为时刻 T_1 时该断面流速) 的单宽过水量,需在该时间段内通过垂线 A 变面积单宽面积的过程。显然,该时间段从垂线 B 到垂线 A 的水流必需存在一个流速加速过程,本文称之为“潮锋带水流加速效应”。

值得注意的是,上述流速的脉冲增大只存在于潮锋的极浅水层之中。水深达到一定后,通过前后垂线水量的变率相对于水量已很小,“加速效应”则不再明显。而且水深较大后,由于滩面摩阻,底层水流流速相对比上层水流小,水体开始出现某种形式的流速分层,在一定范围内,由于表层流速较底层流速大,前方滩地滞阻水流,造成表层水体壅水,形成外形类似船涌 (Boat Swell) 的滩涌。

“波浪掀沙,潮流输沙”一直为国内淤泥质海岸研究者所沿用。但研究表明,至少在淤泥质潮滩潮间带,这种提法很大程度上存在着局限性,也即曾被认为不起重要作用的潮流掀沙作用有明显的作用^[11]。在上海潮滩表现为,即使在风浪平静的涨潮过程中,潮锋带水体的含沙量亦可达 $10\text{kg}/\text{m}^3$,而区域水体的含沙量多在 $0.5\sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 间 (即使是在底层)。当然,在向岸风浪作用下,潮锋带水体的含沙量也许会更高。

在南 Wales 强潮潮滩 (平均潮差 5.2m ,颗粒中径 3Φ), 曾测得波浪对沉积物的平均扰动深度有季节变化,夏季 8.83mm , 冬季 19.48mm (Carling, 1982)^[9]; 在同样为强潮潮滩的江苏潮滩 (平均潮差 4.62m , 颗粒中径 6.03Φ), 潮锋带水体对滩面沉积物的扰动深度在 5cm 左右 (张忍顺, 1986)^[4]; 中等潮差的上海潮滩 (平均潮差 $2.7\sim 3.5\text{m}$, 颗粒中径 5.34Φ), 潮锋带水体对滩面沉积物的扰动深度在 $2\sim 5\text{cm}$, 最大可达 8cm 。尽管上述各地潮滩在各方面有各自发育的特殊性,但对比后可以看出,潮锋与波浪两者对沉积物扰动深度属同一量级,且潮锋扰动要比一般风浪扰动为大。

潮锋带水体以其含沙量大大高于其后水体为特征,所含悬沙有两个来源:一是水体尚在潮间带外已携泥沙;二是潮滩沉积物的再悬浮。潮锋带延续时间在 30min 左右的较大流速脉动的存在,为潮锋带水体的高含沙量现象提供了合理的解释。这种较随后水流平均流速高 $1\sim 3$ 倍左右的流速脉动 (图 5), 与相伴随的滩涌相结合,使得滩面沉积物被扰动甚至可被成层掀起。

被扰动的泥沙并未完全随潮锋向前运移,相反大部分重新沉降到滩面上,只有一部分被带至相对较高部位,滩地随后就被泥沙含量较低的潮水漫越。但这并不意味着潮锋作用对潮滩发育的影响只限于涨潮水体前缘本身。

考虑滩面水沙输移过程和潮滩发育,除了一定数量的水沙向岸输移外,潮锋作用的影响可以延伸至落潮的最后时段,甚至是以后潮次的潮流过程中。因为正是潮锋水体扰动沉积物,

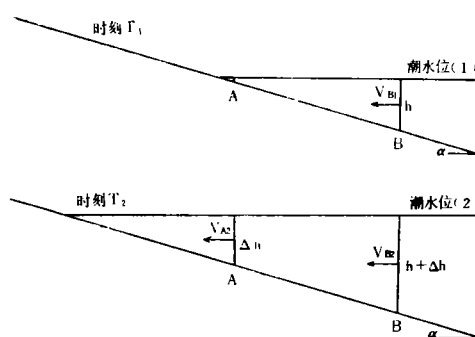


图 6 潮锋带水流流速加速效应形成机制示意图
Sketch of mechanism of velocity accelerate effect in flood surge zone

影响其固结作用,降低滩面物质的抗冲刷能力而易于被以后水流起动、运移。单就潮滩水沙输移过程而言,至少可以这样认为,即使没有风浪作用参与,潮滩也有水沙输移,(其中包括滩面再悬浮泥沙迁移),并表现出随潮流调整的滩面发育特点。因而,潮滩水沙输移的完整表达可能是,潮流(包括潮锋)与波浪共同掀沙,输沙¹⁾。

根据以上分析,可以看出淤泥质潮滩滩面的潮锋带薄层水体,存在着历时数十分钟的流速加速过程,其流速极值可达全潮周期内平均流速的1—3倍。这种流速脉动的发现,可以较圆满地解释潮锋带水体高含沙量特征,尤其是当滩面水深小于30—40cm时,其底部水体含沙量极高而呈密度流性质的现象。

潮锋带水体的富含沙量特性可能暗示着,对于淤泥质潮滩滩面水体(至少是潮锋带)来说,由于泥沙为粘性细颗粒物质,水体呈高紊动状态,水体流速与含沙量之间不存在单值(单范围)对应,因而一般意义下水体“挟沙力”的概念是不适用的。

潮锋对潮滩发育过程的影响,并不只限于涨潮前缘本身,其影响可以一直滞后延伸至整个全潮过程,甚至是以后潮次的潮流过程中。

考虑潮锋带的流速脉动。薄层水体与滩面物质的交切摩擦、涨潮过程中的“滩涌”、天文潮性状下的滩面潮流过程以及风浪作用的共同影响,可为淤泥质潮滩滩面的水沙输移形式提供一种较为完整的表述,即潮流(包括潮锋)与风浪共同掀沙,潮流输沙。这种概念模式,可以较全面地认识淤泥质潮滩的发育及其滩面塑造过程。

由上面淤泥质潮滩潮锋带水体水沙特征分析与讨论,潮锋作用可以定义为:在滩坡平缓的淤泥质潮滩潮间带,沿程涨潮水体前锋存在着一历时有数十分钟的水流加速过程,高流态的薄层水体(数十厘米)与滩面摩擦而产生强烈紊动,滩面沉积物被掀动悬移而水体呈高含沙量密度流性质,结果造成泥沙向岸净输移。

参 考 文 献

- [1] 王宝灿等. 温州海区海岸和潮间带基本特征. 全国海岸带和海涂资源综合调查. 温州试点区报告文集, 1981: 161—190.
- [2] 王宝灿等. 海岸动力地貌. 华东师范大学出版社, 1989: 222.
- [3] 陈宏达. 杭州湾北岸(漕泾岸段)潮滩沉积过程. [硕士学位论文] 华东师范大学河口海岸研究所, 1987.
- [4] 张忍顺. 江苏省淤泥质潮滩的潮流特征及悬移质沉积过程. 海洋与湖沼, 1986, 17 (3): 235—245.
- [5] 蔡尔西等. 杭州湾北岸潮间带生态学研究 I: 软相底栖动物群落调查. 海洋学报, 1980, 2 (4): 122—131.
- [6] Anderson F E. Observations of Some Sedimentary Processes Acting on a Tidal Flat; Marine Geology 1973, 14 (2): 101-116.

1) 依 Wells 等 (1978, 1981) 的潮滩波浪类孤立波观点, 这种在潮滩上传播的波浪有单独输送沉积物的能力。结合这种观点, 潮滩水沙输移的完整表达应为, 潮流(包括潮锋)与波浪共同掀沙, 共同输沙。

Wells, J. T. 1978 Suspension and Transportation of Fluid Mud by Solitary-like Wave; Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol. 2: 1932-52

Wells, J. T. et al 1981 Physical Processes and Fine-grained Sediment Dynamics, Coast of Surinam, South America; J. of Sedimentary Petrology 51 (4): 1053-68

- [7] Anderson F E. The Variation in Suspended Sediment and Water Properties in the Flood Water Front Traversing the Tidal Flat; *Estuaries* 1980, 3 (1): 28-37.
- [8] Anderson F E et al. Seasonal and Spatial Variability of Particulate Matter of a Muddy Intertidal Flood Front; *Sedimentology* 1984, 31: 383-394.
- [9] Carling P A. Temporal and Spatial Variation in Intertidal Sedimentation Rates; *Sedimentology* 1982, 29 (1): 17-23.
- [10] Klein G D. *Clastic Tidal Facies*, Continuing Education Publication Company, Champaign, Illinois, 1977.
- [11] Van Straaten K N et al. Tidal Action as a Cause for Clay Accumulation; *J. of Sedimentary Petrology*, 1958, 28: 406-413.
- [12] Wang Baocan et al. Mudflat Deposition along the Wenzhou Coastal Plain in Southern Zhejiang, China: Tidal-influenced Sedimentary Environment and Facies, P. L. de Boer et al (eds.) 1988: 265-274.

ON FLOOD SURGE OVER MUDDY TIDAL FLAT ALONG THE SHANGHAI COAST AND ITS MECHANISM

Xu Yuan Wang Baocan Zhang Keqi

(East China Normal University)

Subject terms: Muddy Tidal Flat, Flood Surge/Flood Front, Suspended Sediment Concentration, Tidal Flat Swell, Current Accelerate Effect, Process of Tidal Flat Development

Abstract

The existence of flood surge and high suspended sediment concentration in the flood surge zone has long been discerned, but its significance in the development of tidal flat and its mechanism are not very clear yet. This Paper deals with the flood surge process over muddy tidal flat along the Shanghai Coast, proposes a qualitative model to explain the nature of the phenomenon of high suspended sediment concentration in the flood surge zone and the mechanism of flood Surge whose intrinsic quality is that there exists a current accelerating effect which lasts scores of minutes along the tidal flat in flood surge zone, and discusses its importance to the development of muddy tidal flat along Shanghai coast. Finally, a new definition of flood surge is put forward.