

长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨

李九发

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海)

摘要

南汇潮滩位于长江口与杭州湾落潮合流和涨潮分流的缓流区, 滩面宽阔, 滩坡平缓, 平面形态呈犁头型. 潮滩两侧潮位有显著差别, 导致潮滩泥沙纵向输移. 不同滩面高程水沙条件各异, 潮间带涨潮流速、含沙量均大于落潮, 呈涨潮流优势, 净输沙向陆, 大量泥沙在浅滩上落淤. 深水区呈落潮流优势, 净输沙向海. 浅滩与附近深水部分存在二组平面输沙环流系统, 导致滩槽之间、长江口和杭州湾之间的泥沙交换. 向岸大风浪掀沙明显, 引起滩面增长, 横断面形成垂向输沙环流系统, 加速潮滩的塑造过程.

长江每年有 $9.24 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 水量和 $4.72 \times 10^8 \text{ t}$ 泥沙通过河口输入海洋. 巨量水沙下泄, 不仅在滨海塑造了巨大的水下三角洲和河口沙岛〔1〕, 而且在口门附近堆积了宽阔的潮滩. 南汇潮滩就是其中最宽阔的潮滩之一, 它介于长江口与杭州湾之间, 岸线长46.8km, 滩坡平缓, 呈犁头型向海突出, 它的北部一般称为南汇东滩, 南部称为南汇南滩(图1). 目前, 潮间带面积有145km², 每年约以80m左右的速度不断地向海淤涨. 长期以来对海岸潮滩的动力过程、塑造机制及演变规律研究较多, 而对河口附近的潮滩研究较少〔2〕. 本文以大量的现场观测资料为基础, 分析了南汇潮滩水沙运动的基本特性, 并探讨了滩槽之间、长江口与杭州湾之间的泥沙交换规律. 本研究不仅可为长江口潮滩和邻近河槽的形成、发育、演变的研究提供重要的动力依据, 而且对河口潮滩开发利用以及通海航槽治理也有重要的实际意义.

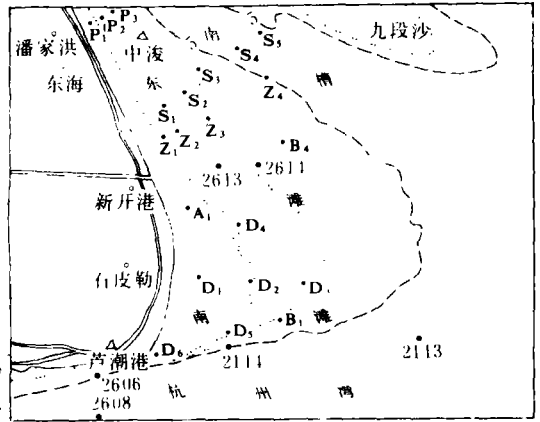


图1. 南汇潮滩地形和观测站位图

一、含沙量的时空变化

(一) 含沙量的空间分布

据多次水文测验资料统计, 南汇潮滩的平均含沙量为 $1.45\text{kg}/\text{m}^3$ 。其中涨潮平均含沙量为 $1.54\text{kg}/\text{m}^3$, 落潮平均含沙量为 $1.34\text{kg}/\text{m}^3$ 。含沙量在空间分布上有较大差异(表1)。

表1 垂线平均流速、含沙量统计表

季 节	潮 型	站 名	涨 潮		落 潮		涨 潮 含 沙 量 (kg/m^3)	落 潮 含 沙 量 (kg/m^3)	滩 面 高 程 (m)	海 区	
			流 速 (m/s)	流 向 (D)	流 速 (m/s)	流 向 (D)					
洪 季	大 潮	Z ₁	0.35	319	0.12	118	4.36	0.87	+2	东 滩	
		Z ₂	0.49	324	0.34	119	3.18	1.48	0		
		Z ₃	0.86	320	0.93	132	3.06	5.51	-2		
	小 潮	大 潮	Z ₁	0.11	326	0.09	132	2.04	0.60	+2	交 汇 区
			Z ₂	0.23	322	0.08	116	0.29	0.40	0	
			Z ₃	0.26	321	0.21	148	0.13	0.16	-2	
		小 潮	D ₁	0.21	224	0.13	122	0.79	1.72	+2	南 滩
			D ₂	0.34	225	0.22	57	1.16	0.72	0	
			D ₃	0.35	214	0.23	49	0.57	0.85	-2	
			D ₅	0.51	224	0.61	50	1.67	1.33	-1	
大 潮	D ₆	0.28	268	0.54	96	1.47	1.11	-2	东 滩		
	B ₁	0.32	260	0.26	76	1.90	1.92	-3			
	B ₂	0.46	292	0.48	128	1.09	1.57	-3			
枯 季	大 潮	Z ₄	0.89	309	1.06	127	1.21	1.85	-5	东 滩	

横向分布: 潮滩水流是随潮位升降而出现周期性的往复于潮滩上的进、退水流, 由于滩面的摩擦作用不同, 使低潮滩到高潮滩的流速呈递减分布(表1)。这种流速分布特点对含沙量的横向分布有着重要的影响, 涨潮水流使滩面泥沙迅速起动, 水流的强烈涡动又使水体含沙量迅速增大; 至落潮期, 经过涨潮憩流阶段, 部分泥沙落淤, 水体含沙量减小。由表1实测资料表明, 南汇潮滩涨潮含沙量高于落潮含沙量。涨潮期从潮下带到高潮滩含沙量逐渐增高, 近岸浅水区含沙量比远岸深水区大, 落潮期相反。

潮滩上含沙量的横向分布规律, 可以建立不同的经验挟沙力公式表示^[3], 即:

$$S = A + B \left(\frac{V^2}{H} \right)$$

式中, A 为冲泻质含量, 或称水体初始含沙量; B 为待定系数, 主要与

悬沙级配和谢才系数 C 有关。利用实测资料可分别确定 A 和 B 值, 从而得出潮间带(大潮高潮位与大潮低潮位之间的海滩)涨潮(S_{f_1})、落潮(S_{e_1})和潮下带(大潮低潮位与-5 m

之间的海滩) 涨潮 (S_{f_2})、落潮 (S_{e_2}) 的垂线平均含沙量关系式:

$$S_{f_1} = 0.76 + 6.89 \left(\frac{V^2}{H} \right), \quad R = 0.79.$$

$$S_{e_1} = 0.58 + 9.21 \left(\frac{V^2}{H} \right), \quad R = 0.86.$$

$$S_{f_2} = 0.008 + 17.15 \left(\frac{V^2}{H} \right), \quad R = 0.96.$$

$$S_{e_2} = 0.35 + 2.24 \left(\frac{V^2}{H} \right), \quad R = 0.86.$$

从以上相关公式和实测资料(表1)看, 潮滩横向水流含沙量不仅是流速的函数, 而且与潮滩上各点的水深和初始含沙量也有密切关系. 这些特性对淤泥质潮滩的剖面塑造具有深刻影响.

垂向分布: 悬沙的垂向分布通常具有表层低、低层高的特点, 由于水深、水流强度的差异, 潮滩上不同部位悬沙垂向分布不尽相同(图2). 潮间带上的中、高潮滩水浅易被搅动, 涨落潮平均含沙量垂向变化不大, 涨潮在 $2.0 \text{ kg/m}^3 \pm$, 落潮在 $1.0 \text{ kg/m}^3 \pm$, 以致悬沙和底沙颗粒组成接近, 均小于 0.007 mm . 潮下带(P_3 测站) 水深流强, 滩面泥沙被掀动, 加上受到南槽中下层含沙量较高的水体影响, 使底层

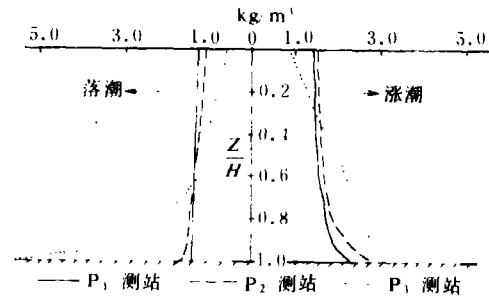


图2 涨、落潮平均含沙量垂线分布图

含沙量增大, 大潮涨潮底层平均含沙量达 3.06 kg/m^3 , 落潮为 5.51 kg/m^3 . 从图2上看, 上层比较均匀, 含沙量较低, 下层向下逐渐增大, 中部有一个转折点, 垂直梯度很大, 床沙中值粒径为 0.011 mm , 悬沙为 0.0028 mm , 滩面泥沙粒径明显粗于悬沙. 然而, 大潮期上、下层含沙量差异大, 垂直梯度大, 特别是在涨、落急时更为明显, 涨、落憩时含沙量很低, 垂向梯度也小. 在暴风浪条件下, 含沙量的垂向分布趋向相对均匀.

(二) 含沙量随时间的变化

潮周期变化: 在一个潮周期中, 含沙量的变化与潮流速的涨落交替和大小变化息息相关, 最大含沙量一般发生在涨落急前后, 最小含沙量一般出现在涨落憩附近. 在涨潮流明显占优势的潮间带, 涨潮平均含沙量大于落潮, 比值为 $1.2-2.0$. 潮下带则相反.

大小潮变化: 无论涨潮还是落潮, 大潮含沙量远大于小潮; 中高潮滩涨潮含沙量, 大潮比小潮大 $11.0-14.0$ 倍; 落潮含沙量, 大潮比小潮大 3.5 倍左右. 潮下带涨潮含沙量, 大小潮的比值为 $13.4-22.7$. 最大实测含沙量大潮期达 21.7 kg/m^3 , 而小潮期末未超过 0.5 kg/m^3 , 二者之比为 43.4 , 这表明长江口南汇潮滩的潮流挟沙能力较强.

洪枯季变化: 通常洪季含沙量比枯季高, 尤其是落潮含沙量差值较大, 其比值为 $2.3-1$

4.3. 它主要受长江来水来沙的季节性变化影响。

暴风周期变化：大风能使潮滩含沙量明显增高，据1983年洪季小潮资料，6级向岸大风的含沙量比无风时高4倍左右，对潮滩的发育、演变有着重大的影响作用。

二、潮滩泥沙输移模式

(一) 平面输沙规律

根据涨、落潮期单宽输沙量和优势沙¹⁾的计算结果(表2,图3),南汇潮滩在平面上存在两组泥沙输移环流系统。

表2 单宽输沙量(kg·s·m)统计表

海 区	站名 和 高程	潮 型	输 沙 量		净出 (+) 净进 (-)	优 势 沙 (%)	海 区	站名 和 高程	潮 型	输 沙 量		净出 (+) 净进 (-)	优 势 沙 (%)
			涨潮	落潮						涨潮	落潮		
东 滩	Z ₁ (+2m)	大潮	36.1	3.5	-32.6	9	交 汇 区	D ₂ (0m)	小潮	24.2	7.9	-16.3	25
	Z ₂ (0m)	大潮	53.3	16.9	-36.4	23		D ₃ (-2m)	小潮	26.8	15.1	-11.7	36
		小潮	3.86	0.9	-3.0	19	南 滩	D ₆ (-2m)	小潮	33.5	68.1	34.5	67
	Z ₄ (-2m)	大潮	313.9	275.3	-38.6	33		2606 (-3m)	大潮	133.6	143.8	10.2	52
南 槽	Z ₄ (-5m)	大潮	117.1	151.6	34.5	57	杭 州 湾 北 岸	2114	大潮	95.8	57.6	-38.2	38
		小潮	3.9	2.3	-1.43	38		(-5m)	小潮	50.4	67.5	17.1	57
	S ₄ (-7m)	寻常潮	66.4	94.7	28.3	59	2608 (-8m)	大潮	433.0	392.8	-40.2	48	

1. 东滩泥沙输移环流系统

东滩毗连长江口南槽，主要受长江河口流系控制，在潮间带涨潮的历时、流速和含沙量均大于落潮(表1)，故单宽输沙量涨潮大于落潮，净输沙方向为NW，优势沙均小于50%，从低潮滩到高潮滩，涨潮优势沙逐渐增大。潮下带-3--5m水域由于受潮滩落潮汇流和长江下泄径流的影响，落潮的历时、流速和含沙量均大于涨潮，单宽输沙量落潮大于涨潮，净输沙方向为SE，优势沙均大于50%。由此可见，在一个潮周期内，潮间带泥沙净

1) 优势沙 = $\frac{\text{涨潮输沙量}}{\text{涨潮输沙量} + \text{落潮输沙量}} \times 100\%$ ，若大于50%为落潮优势沙，而小于50%为涨潮优势沙。

向陆输移,而潮下带泥沙净向海输移,形成一个顺时针向的泥沙输移环流系统,使潮下带的泥沙有可能随涨潮流输向潮间带,促使潮滩淤涨,1982—1984年高潮滩实测年平均淤积厚度15.4cm,中潮滩为9.3cm。

2. 南滩泥沙输移环流系统

南滩毗连杭州湾北岸,主要受杭州湾流系控制,同时也受到长江河口扩散水流的影响,水沙分布比东滩复杂。在石皮勒塘角嘴(D₁₃断面)一带,潮流流向为225°—57°,涨潮流速、含沙量均大于落潮,故涨潮输沙占优势,净输沙方向为SW,输向杭州湾。紧靠杭州湾北岸的南滩南侧(D₆断面)潮流流向近似东—西方向,贴岸落潮流速急,其流速、含沙量、含盐度均大于涨潮,落潮优势流侵蚀滩面,滩坡陡峻,底质组成较粗,净输沙方向为E,指向海外。在离岸较近的2114、2113站,水深为5—6m,大潮期为涨潮优势沙,小潮期为落潮优势沙,输沙方向为W—E。再外面的杭州湾主流断面(2608、2609等测站),涨潮流较强,其涨潮流速和含沙量均大于落潮,呈涨潮优势沙,净输沙方向为W。这样,在一个潮周期内该水域形成一个逆时针向泥沙输移环流系统。潮滩D₁—D₃断面泥沙输向杭州湾,近岸和潮滩南侧出沙,杭州湾进沙,表明长江口与杭州湾存在水沙交换现象。

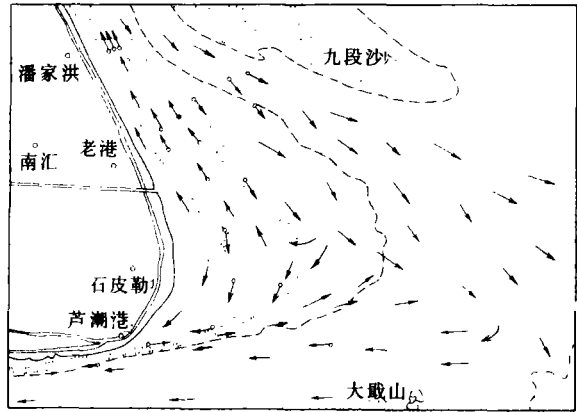


图3 南汇潮滩及邻近水域泥沙输移图

(二) 横向输沙特征

为分析悬沙的横向运动,我们将P断面上中潮滩、低潮滩、潮下带3个测点的全潮实测潮流、泥沙资料,分层计算单位宽度和深度的净向岸和净向海的输沙分量,并绘制成图4A,这是一般天气条件下横向输沙模式。整个断面泥沙净向陆输移,只有潮下带表层水流受长江下泄径流影响,使泥沙净向海输移。计算结果表明,潮间带大潮时上滩优势沙达90%,小潮期上滩优势沙为70%左右,大潮期输沙量明显大于小潮。可见,在一般天气条件下,泥沙在横向上净向滩上输移,使南汇潮滩成为泥沙的堆积场所。图4B是大风天气条件下的横向输沙模式。当日长江口外引水船站最大风速18m/s,风向E,平均波高1.8m,最大波高2.4m,风浪来向与潮滩岸线走向成45°—60°夹角,使中浚站增长2.19m,导致上层水沙净向陆输移,中下层水沙净向深水区输移,滩剖面普遍刷低,形成一个上层进水进沙,下层出水出沙的输沙环流系统,这些特性对潮滩原生沉积构造有很大的影响作用。

(三) 滩槽泥沙交换

南汇潮滩与长江口南槽的水沙交换,一般是通过滩槽之间的平面输沙环流和垂向输沙环流来实现^[4],这已被大量的实测资料所证实(图3和表2)。长江流域来水来沙主要通

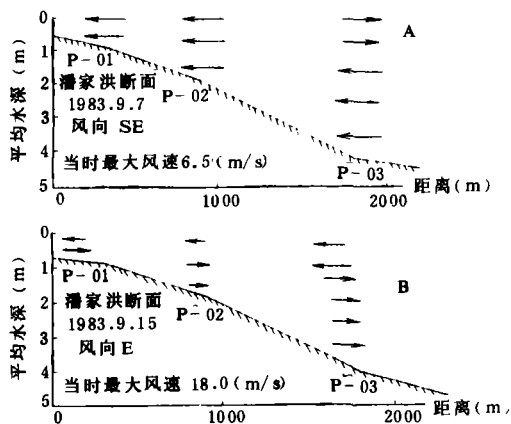


图4 P断面优势沙垂向环流图

带入主槽, 而且在涨转落、落转涨时段产生横向水沙交换。同时, 由于滩槽主流方向的不一致^{[5], 2)}, 引起滩槽水流悬浮物的动量交换, 加速滩槽泥沙交换过程。其三, 由于风浪引起的滩槽水沙交换与风浪的来向、频率及风速有关, 从风浪出现频率和长江口南汇潮滩的走向(336°—156°)看, 对该区滩槽影响最大的NE和SE的向岸风。SE风与潮滩涨潮流向一致, 可加大涨潮流的输沙能力, 并可增大水流紊动强度, 底沙被掀起, 含沙量增大, 在增水环流的作用下, 近底部分泥沙被下层回流带入河槽(图4B)。NE风向与潮滩走向垂直, 一般引起潮滩冲刷, 使含沙量增大, 大量泥沙带入主槽, 尤其是在大风天气, 这种交换更为强烈。例如, 1983年的10号台风, 当时风向E转NE, 风力8级以上, 使潘家洪断面中潮滩面蚀低约30cm, 被侵蚀物质由底流带向航槽, 使南槽航槽内淤积4 Mm³泥沙, 航槽平均淤浅0.5m, 最高达1m, 给长江河口南槽航道的维护带来很大威胁^[6]。

综上所述, 由于环流和波浪对滩地作用性质不同, 潮滩和毗邻的河口河槽之间存在泥沙交换, 或滩冲槽淤, 或滩淤槽冲, 认识这种规律对长江口航槽的治理和潮滩的围垦、开发利用具有重要的实际意义。

(四) 长江口与杭州湾的泥沙交换

长江口与杭州湾的泥沙交换问题一直引人关注, 许多研究者曾从不同的角度进行了探讨^[1]。大量的实测资料证实了长江口与杭州湾存在水沙交换(图5和图3), 但阐明其机制尚未多见。现对南汇潮滩所取得的实测资料进行分析, 确认潮滩北部与南部之间存在较大的水面比降(图6)和潮流位相差(表3), 使潮滩泥沙发生纵向输移, 从而引起相毗邻的长江口与杭州湾水沙交换。

长江口与杭州湾口门之间水面倾斜, 在一个全潮过程中是不同的(图7), 低潮位、涨潮中潮位、高潮位中浚站潮位比芦潮港高。此期间出现长江口水面向杭州湾倾斜, 使长江口水流通过广阔的潮滩进入杭州湾, 在石皮勒断面(D₁₋₃)实测涨潮平均流向为225度

2) 李九发等, 长江口南汇边滩及邻近水域洪季水文泥沙条件分析, 1987。

过主槽下泄, 使主槽中的落潮流大于涨潮流, 水量、沙量落潮占优势, 净输沙量向海。潮间带滩地已如前述, 涨潮流大于落潮流, 涨潮输沙量占优势, 净输沙量向口内输移, 滩与槽之间的水沙也出现相向运动, 主槽出沙, 潮滩进沙, 形成一个水沙环流系统。可见, 滩、槽潮流不对称的分布是导致滩槽之间泥沙交换的重要原因之一。其二, 从滩槽流场分布看, 滩槽之间存在明显的涨落潮流位相差, 一般潮滩比主槽先涨2h多, 先落1h±, 这样潮滩涨潮流将主槽落潮流携带的泥沙直接带上滩, 落潮前期潮滩泥沙也有机会随落潮流

表 3 涨、落潮转流时刻表

站 名	落转涨时刻		涨转落时刻	
B ₁	16:48	4:18	23:08	11:40
1984. 12. 6				
B ₄	17:42	5:56	23:38	12:15
1984. 12. 6				

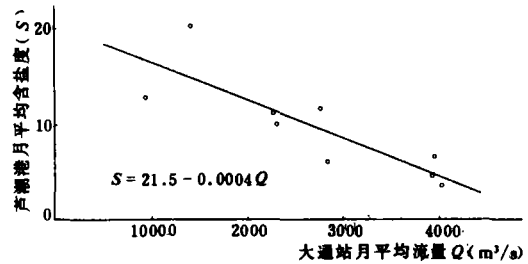


图 5 长江大通站月平均流量与杭州湾芦潮港月平均盐度相关图

左右, 直指杭州湾。从表 2 计算结果看, 该断面呈涨潮优势沙, 其比值均小于 36, 表明大量泥沙净输入入杭州湾。落潮过程中浚站高潮位到中潮位期间, 中浚潮位比芦潮港低, 若前者称为正比降, 则此时出现负比降。石皮勒断面实测落潮流向为 57° 左右, 指向长江口外。落潮平均含盐度亦大于涨潮, 证明了落潮水流来自杭州湾。再从潮滩南、北侧的流场分布看 (表 3), 位于杭州湾一侧的 B₁ 测站的潮流比长江口 B₄ 测点先涨 1 h 多, 先落 0.5 h \pm , 使潮滩南北两侧出现涨、落潮流的位相差, 这也是引起长江口与杭州湾泥沙交换的一个原因。当杭州湾开始涨潮, 长江口仍为落潮流。此时携带泥沙的长江口落潮水流在向南通移过程中, 顺着杭州湾涨潮流进入湾内。从湾口多次盐度实测资料表明, 在一个潮周期中最低盐度往往出现在涨潮初期 1—2 h, 这是来自长江口低盐度落潮水流影响所致。

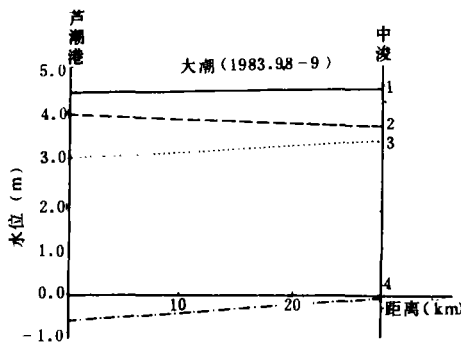


图 6 水面比降

- 1——中浚高潮时潮位线 2——中浚高潮后 2 h 潮位线
3——中浚高潮前 2 h 潮位线 4——中浚低潮时潮位线

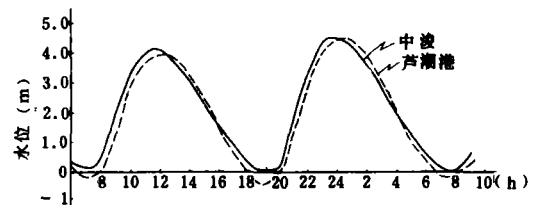


图 7 潮位过程线 (1983 年 9 月)

从以上分析可见, 南汇潮滩是长江口与杭州湾水沙交换的重要场所, 长江口水沙向杭州湾输移, 杭州湾北岸也有少量水沙沿潮滩外缘进入长江口外, 而长江口输入杭州湾的沙量远大于杭州湾输出的沙量, 这种交换是通过潮滩上的平面泥沙输移环流系统来实现的。

三、结 束 语

1. 南汇潮滩是长江口和杭州湾落潮合流、涨潮分流的缓流区泥沙堆积的产物。潮间带涨潮流速、含沙量均大于落潮，呈涨潮优势沙，有利潮滩堆积。潮滩组成物质很细，滩坡平缓。潮下带涨潮流速、含沙量均小于落潮，呈落潮优势沙。这些特点对潮滩的形成、发育有着深刻的影响。

2. 南汇潮滩与邻近河槽存在明显的水沙交换、滩淤槽冲，或槽淤滩冲的输沙规律。

3. SE和NE方向大风浪对潮滩的冲淤变化影响最大，同时引起滩面增水，横断面形成垂向泥沙输移环流系统，滩面被蚀低，大量泥沙输入长江口南航槽，对通海航槽的维护带来很大的威胁。

4. 长江来水来沙在河口潮流及风浪的共同作用下，塑造了南汇潮滩。同时，含沙量的时空分布变化与潮滩的多年变化的长周期、季节性变化的年周期和暴风浪作用的短周期潮滩冲淤变化规律相一致。

本文承沈焕庭和恽才兴教授审阅，徐海根副教授提出意见，孙介民和茅志昌同志参加部分计算工作，谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] Chen Jiyu, *et al.*, Development of the Changjiang estuary and its submerged delta, *Continental Shelf Research*, 4 (1985), 1: 47--56.
- [2] Allersma, E., Mud in estuaries and along coasts, *International Symposium on River Sedimentation Beijing China*, 1980, C 19 1 23.
- [3] 钱宁等, 泥沙运动力学, 科学出版社, 1983, 353—363.
- [4] 恽才兴, 长江口潮滩冲淤及滩槽泥沙交换, *泥沙研究*, 4 (1983), 43--51.
- [5] 沈焕庭、潘定安, 长江河口潮流特性及其对河槽演变的影响, *上海师范大学学报*, 6 (1979), 1: 131--145.
- [6] 顾伟浩, 台风对长江口铜沙航槽回淤的影响, *海洋学报*, 10 (1986), 1: 60--62.