

# 浙江象山港潮汐汉道细颗粒物质的沉积作用

高 抒 谢钦春 冯应俊

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

## 摘 要

象山港属基岩海岸潮汐汉道, 而其物质供应以细粒沉积物为主. 本文探讨了象山港沉积物分布和悬沙搬运特征, 并以潮交换过程、汉道地形、时间-流速不对称和悬沙沉降性质的综合作用解释其成因. 虽然象山港落潮流占优势, 但由于潮交换作用, 净输沙方向仍指向湾内, 导致纳潮海湾的缓慢淤积. 另一方面, 随潮交换过程输向湾内的粉砂相对较少, 从而造成湾内、外的沉积分异.

象山港(图1)发育在北东向的向斜裂谷内, 纵深约60km. 在后华山至双岙一线(此处纳潮量与水道宽度之比获最大值), 平均海面以下的过水断面面积为 $9.36 \times 10^4 \text{m}^2$ . 此界线将象山港分为内湾和外湾两部分. 内湾大潮纳潮量为 $11.9 \times 10^8 \text{m}^3$ , 湾内有西沪港、铁港和黄墩港等三个次一级的汉道. 外湾呈喇叭口形, 宽度从4.3km渐增至18km. 外湾东北部与佛渡水道相通, 东南部经牛鼻山水道与外海连接.

象山港潮汐为非正规半日潮, 西泽的平均潮差为3.18m, 平均大潮潮差约4.07m. 陆域集水面积为 $1.45 \times 10^3 \text{km}^2$ , 注入湾内的溪流源近流短, 年径流总量小于汉道纳潮量. 湾内掩蔽程度高, 波浪作用微弱. 在外湾, 作为常浪向的东向浪的年平均波高仅0.4m. 比较而言, 潮汐作用是象山港沉积环境中的主导作用.

对象山港已进行了数次调

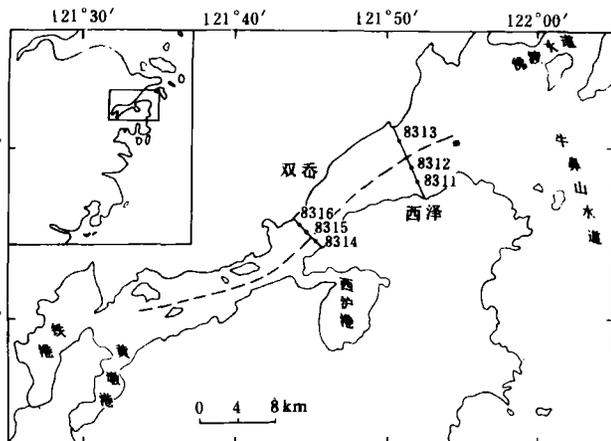


图1 象山港潮汐汉道的地理位置

(——浅地层剖面测线; •为钻孔位置, 8311等为水文泥沙站号)

查, 研究的问题包括潮汐的历时流速不对称及其成因<sup>[1]</sup>、沉积物分布和环流特征<sup>[2]</sup>以及汉道的稳定性<sup>[3]</sup>。本文将讨论象山港细粒沉积物的输运和分选问题。所依据的钻孔位置、浅地层剖面测线和水文泥沙站位见图1。周日水文泥沙观测于1983年冬季进行(大潮: 12月6—7日; 小潮: 12月14—15日), 6个测站构成了内湾断面和外湾断面。此外, 还进行了底质取样和粒度分析工作。

## 一、沉积特征

### (一) 沉积物类型和分布

根据优势粒级组和混合命名法, 象山港表层沉积物可分为砾砂、贝壳砂、粘土-粉砂-砂、粉砂质粘土和粘土质粉砂等五类, 其分布如图2所示。前三类沉积物的分布范围很有限, 象山港水域海底的绝大部分面积为后两类细粒沉积物所覆盖。粉砂质粘土主要分布于内湾, 粘土质粉砂广布于外湾海底, 二者的分布界线位于西泽附近。两类细粒沉积物均有良好的分选性, 在三角图上表现为两个集中的点群(图3)。

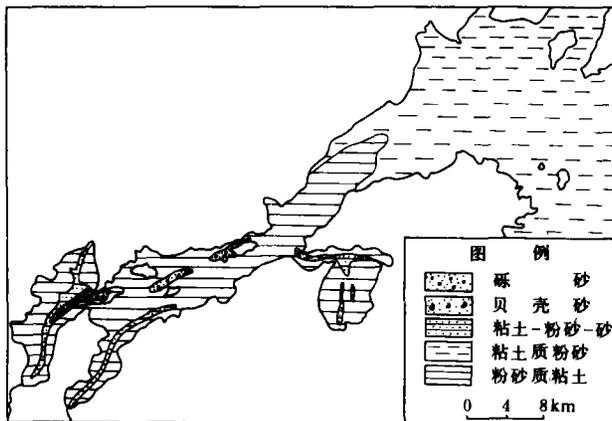


图2 象山港表层沉积物分布

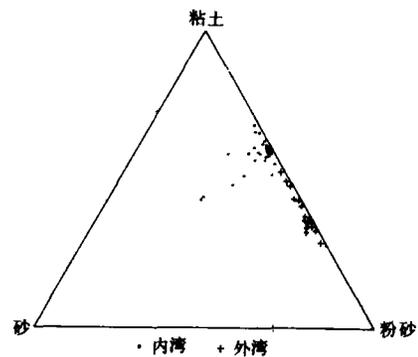


图3 象山港表层沉积物的组成

·内湾 + 外湾

### (二) 汉道沉积体的分布、构造和层序

象山港的汉道沉积体主要有口门及其外侧的浅滩沉积、主汉道沉积和内湾湾顶的潮滩沉积。浅地层剖面探测揭示, 在口门浅滩和主汉道沉积中, 较新的地层厚10—30m, 可分为3层。上层具清晰的层理和底界, 物质较细; 中层的层理和底界模糊, 物质较粗; 下层底面起伏不平, 与下伏地层呈不整合接触。

外湾的钻孔证实, 浅地层剖面上的3层沉积属于全新统。该钻孔获得了长36.62m的岩心, 其中全新统厚22.5m。全新统的下层厚3.25m, 为粘土质粉砂夹细砂和泥质团块, 代表主汉道层序的底部, 是汉道发育初期的产物。8000 a B. P. 海面比现在低15—20m, 约7000 a B. P. 时接近于现在<sup>[4]</sup>, 因此象山港汉道的发育当始于7000—8000 a B. P. 在汉道形成初期, 汉道底部的晚更新世地层受到改造, 留下了底界侵蚀面以及受改造物质和

陆源物质的混合堆积。中层厚0.75 m，为灰黄色细砂，是汉道开始由侵蚀转化为堆积时的产物。全新统的上层厚18.50 m，为粘土质粉砂，具薄互层层理。这是长江泥质沉积物影响浙江海岸<sup>[5]</sup>之后形成的汉道沉积。

潮滩沉积主要分布在三个次级汉道的纳潮海湾内。西沪港、铁港和黄墩港的潮滩面积共计95.3km<sup>2</sup>，占内湾潮滩总面积的78%。潮滩的坡度一般为2—3‰，由于潮水沟的分割，在平面上成为舌状浅滩。潮滩沉积物和沉积构造无明显的分带性，滩面物质为粉砂质粘土，其构造为微层层理，肉眼难以辨别。次级汉道的垂向层序由下层的汉道底部沉积、中层的潮水沟沉积和上层潮滩沉积所构成。

## 二、口门段悬沙的沉积作用

### (一) 沉积动力

#### 1. 口门段水体的潮冲程

潮冲程控制了一个潮周期内悬移质的搬运距离。根据1:50 000地形图和海图的量算，内、外湾断面之间理论深度基准面以下的水体体积为 $11.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，大致相当于内湾断面以内的大潮纳潮量 $11.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此，两断面间的距离(12.6km)近似于口门段水质点的平均潮冲程，即大潮低潮位时位于外湾断面的水体在高潮位时可到达内湾断面。由于外湾断面到第一个支海湾西沪港的距离达15.3km，因此其水体在涨潮期间的运移范围限于口门段主汉道，而不受支海湾“捕获效应”<sup>[6]</sup>的影响。

就悬沙搬运而言，潮冲程的意义是限定了与外海有直接交换关系的水体的范围。在象山港口门段，潮冲程小于口门段长度，故内湾断面水体不能与外海直接交换，而外湾断面到湾口的距离小于潮冲程，其水体可与外海水体进行直接交换。

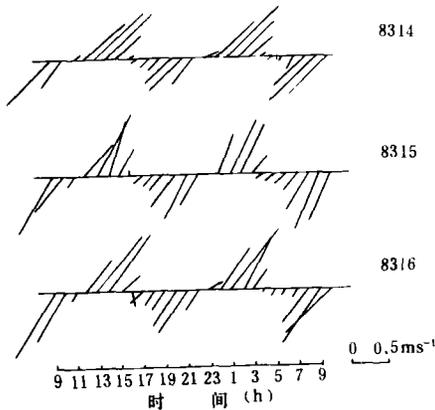


图4 内湾断面大潮垂线平均流速和流向的时间过程

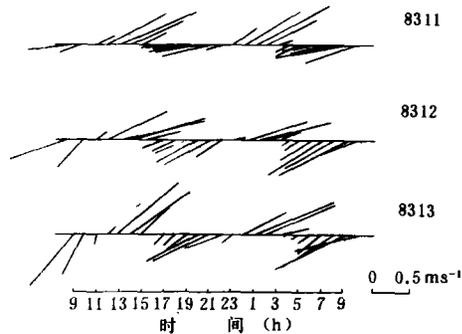


图5 外湾断面大潮垂线平均流速和流向的时间过程

#### 2. 时间-流速不对称

在半月潮海岸的潮汐汉道，涨落潮历时不对称的主要原因是 $M_2$ 分潮与其第一倍潮 $M_4$ 分潮的相互作用，而汉道水深和湾内潮滩发育程度是影响 $M_2$ 和 $M_4$ 分潮位相差的主要因素<sup>[7]</sup>。象山港滩发育，主汉道水深较大，故涨潮历时明显长于落潮历时。

表 1 象山港口门段 6 测站表、底层涨潮、落潮平均流速 ( $V_f$ 和 $V_e$ ) 的比较 (单位:  $\text{ms}^{-1}$ )

站号	层次	大 潮		小 潮	
		$V_f$	$V_e$	$V_f$	$V_e$
8311	表层	0.50	0.83	0.27	0.44
	底层	0.40	0.53	0.25	0.32
8312	表层	0.62	0.82	0.28	0.54
	底层	0.50	0.61	0.26	0.25
8313	表层	0.59	0.87	0.26	0.39
	底层	0.41	0.54	0.18	0.26
8314	表层	0.44	0.68	0.19	0.35
	底层	0.32	0.41	0.21	0.21
8315	表层	0.39	0.70	0.18	0.35
	底层	0.45	0.47	0.26	0.30
8316	表层	0.43	0.76	0.19	0.32
	底层	0.40	0.45	0.20	0.37

涨位涨落历时不对称必然导致潮流的时间-流速不对称。从实测的垂线平均流速看(图 4 和图 5),涨潮流历时比落潮流历时长 1—2h,最大落潮流速大于最大涨潮流速。从各层的时均流速来看,落潮流也明显较强,而且表层的不对称现象比底层更为显著(表 1)。因此,象山港是落潮流占优势的潮汐水道。

### 3. 余环流

重力、地转力和地形的作用使潮汐水道中产生垂向的和水平的余流环流,在象山港亦是如此,从表 2 中可看出,在大潮时象山港口门段水道存在着较强的垂向

和水平的余环流。在位于断面中间的 8312 和 8315 站,表层余流指向湾外,底层指向湾内,余流流向在中层发生逆转,表、底层余流流速为  $5-10\text{cms}^{-1}$ 。在水平分布上,水道北侧(8313 和 8316 站)表层余流指向湾外,而中、底层指向湾内,但水道南侧(8311 和 8314 站)各层余流基本上都指向湾外。因此,余环流表现为表层出底层进和水道北侧进南侧出的特征。小潮时余流减小,垂向和平环流的强度都减弱了。

表 2 象山港口门余流(流向)[单位:  $\text{cm s}^{-1}$  ( $^{\circ}$ )]

潮别	层次	站 位					
		8311	8312	8313	8314	8315	8316
大潮	表层	6 (27)	11 (142)	4 (345)	11 (96)	5 (72)	9 (66)
	中层	11 (328)	8 (142)	4 (180)	7 (66)	9 (268)	3 (232)
	底层	8 (329)	4 (189)	4 (162)	3 (2)	12 (192)	8 (194)
小潮	表层	9 (185)	11 (204)	10 (130)	8 (180)	2 (115)	2 (26)
	中层	5 (320)	4 (254)	2 (122)	3 (180)	6 (280)	1 (110)
	底层	11 (336)	5 (302)	5 (190)	6 (307)	9 (193)	2 (161)

断面余流流量可以下式计算:

$$Q = \frac{A}{2} \int_A V_r |\sin\theta| dA$$

式中,  $A$  为过水断面面积,  $V_r$  为余流流速,  $\theta$  为相对于断面走向的流向。计算表明,大潮时内湾断面的余流流量为  $1890\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , 一个涨落潮周期内的输水量为  $8.5 \times 10^7\text{m}^3$ , 约为纳潮

量的 9%；外湾断面的余流流量为  $700\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ，相当于每个潮周期  $3.2 \times 10^7\text{m}^3$ ，占纳潮量的 3%。可见内湾断面的余环流强于外湾断面。

## (二) 沉积物来源

象山港沉积物有 4 个来源：(1) 海岸和岛屿侵蚀；(2) 生物碎屑；(3) 沿岸河流输沙；(4) 湾外海域。象山港为坚硬的中生代侵入岩和火山岩低山丘陵所怀抱，加上波浪作用微弱，海岸及岛屿岸线的侵蚀速率很低，岸线的平直化过程主要是泥质沉积物充填于基岩海湾的过程。软体动物介壳也是沉积物的一个来源，但其数量很少，贝壳碎屑集中分布的范围极为有限，在大面积分布的泥质沉积中  $\text{CaO}$  含量仅占 3% ±。象山港陆域集水面积小，河流供沙量也很小，年输沙量只有  $14.5 \times 10^4\text{t}$ 。从沉积物的粒径和矿物组成来看，构成象山港沉积体主要成分的泥质物质是来源于湾外海域，以来自长江和内陆架的细粒沉积物为主。

## (三) 悬移质搬运

根据两个断面的流速、流向和悬沙浓度数据，计算了两个涨落潮周期内的各层悬移质时均净通量（表 3）和单宽净输沙量及其方向（表 4）。计算结果显示了以下几个特点：(1) 除个别例外，大潮悬沙净通量和单宽输沙量比小潮大一个量级。(2) 大潮时，内湾断面下层悬沙向湾内输送，上层向湾外输送；而外湾断面各层输沙方向比较散乱，有表层向内而底层向外输送的趋势。就单宽输沙方向而言，二断面情况相似，均为汉道北侧向湾内输送，南侧向湾外输送。(3) 据表 3 和表 4 所列数据推算，大潮时外湾断面向湾内的周日净输沙量为  $6.7 \times 10^4\text{t}$ ，内湾断面为  $2.1 \times 10^4\text{t}$ ；小潮时则分别为  $0.2 \times 10^4\text{t}$  和  $0.6 \times 10^4\text{t}$ 。亦即虽然象山港主汉道落潮流占优势，但沉积物仍为从湾外向湾内输送。上述特点在夏季也同样存在〔1〕。

象山港主汉道存在着涨、落潮输沙能力与实际输沙状况的不一致，其原因与以下特点有关。首先，象山港主汉道存在着较强的水体交换。内湾断面水体交换的主要原因是余流交换（交换量为纳潮量的近十分之一）。外湾断面余流交换量较小，但其潮冲程特点和涨落

表 3 象山港口门悬移质净通量（方向）〔单位： $10^{-2}\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}(\circ)$ 〕

潮别	层次	站 站 位					
		8311	8312	8313	8314	8315	8316
大潮	表层	0.17 (337)	2.47 (214)	3.30 (244)	0.36 (117)	1.22 (48)	0.71 (57)
	中层	0.63 (338)	2.75 (200)	3.35 (221)	0.70 (65)	0.98 (336)	0.27 (38)
	底层	1.13 (41)	2.41 (146)	2.99 (75)	1.04 (37)	4.23 (180)	3.61 (194)
小潮	表层	0.19 (165)	0.18 (181)	0.16 (127)	0.18 (179)	0.07 (89)	0.08 (42)
	中层	0.15 (10)	0.06 (290)	0.06 (217)	0.07 (95)	0.11 (264)	0.03 (101)
	底层	0.49 (339)	0.15 (346)	0.38 (135)	0.21 (306)	0.43 (193)	0.08 (176)

1) 浙江省海岸带资源综合调查队，浙江省海岸带资源综合调查专业报告，1985。

表 4 象山港口门段 6 站位大、小潮两个潮周期的单宽净输沙量(t)和方向(°)

站号	大 潮		小 潮	
	净输沙量	净输沙方向	净输沙量	净输沙方向
8311	5.9	19	1.8	20
8312	27.5	181	1.6	282
8313	20.6	216	2.0	140
8314	8.2	55	0.5	52
8315	2.8	133	2.7	205
8316	26.2	182	0.9	244

流路的不一致(见图 5)均有利于与湾外水体的直接交换。其次,据表 2 和表 3 的对比,内湾断面的悬移质净通量分布形式与余流基本吻合,表明悬沙输运是受余环流控制的。再次,向湾内的净输沙量和潮交换量随大、小潮周期的变化是一致的,说明净输

沙量与潮换流量有直接的关系。最后,象山港沉积物细,悬沙浓度随大、小潮而剧烈变化,在空间分布上自湾外向湾内逐渐降低。由于悬沙沉降速率较低,可以跟涨落潮水体作长距离运动而不致沉降。

上述事实说明象山港主汉道的悬沙搬运是受潮交换过程控制的,即湾外较浑浊的水体通过潮交换过程取代湾内较清澈的水体,从而导致沉积物向湾内的净输运。在交换形式上,内、外断面是不同的。内湾断面主要是余流交换,含沙量较高的水体从下层和汉道北侧随涨潮方向的余流进入。外湾断面主要是直接交换,水体在落潮末期流出湾外,下一个涨潮周期中又受到更浑浊的湾外水体的补偿。由于口门外不同来源的水体进入外湾断面时尚未充分混合,因而导致含沙量和净通量分布的不规则性。在较长的时间尺度上,因潮交换进入湾内的悬沙最终将发生沉降,使象山港纳潮海湾逐渐淤积。

#### (四) 沉积分选作用

象山港粉砂质粘土和粘土质粉砂的分布界线位于内、外断面之间。这种沉积分异的可能原因有二:一是内、外湾粉砂沉积速率相当而内湾粘土沉积速率高于外湾,二是内、外湾粘土沉积速率相当而外湾粉砂沉积速率高于内湾。

象山港近期的沉积速率内湾多低于  $1 \text{ cm a}^{-1}$ ,外湾一般为  $1 - 2 \text{ cm a}^{-1}$  [2],故外湾沉积速率比内湾约高百分之五十。另一方面,内、外湾底质中粘土含量分别约为 60% 和 40% (见图 3)。因此,内、外湾粘土的沉积速率是相近的。故第一种原因应是不重要的。对口门段余环流、时间-流速不对称、潮冲程和沉积物沉降性质的综合分析可以证实,第二种原因才是主要的。

象山港悬沙中粘土和粉砂的相对含量随大小潮周期而变化。大潮期间不仅含沙量大为提高,悬沙粒径也增大了。8312 和 8315 两站的悬沙中径在大潮时分别为  $7.1 \mu\text{m}$  和  $5.0 \mu\text{m}$ ,小潮时减小至  $4.5 \mu\text{m}$  和  $3.6 \mu\text{m}$ 。因此,大潮期间参与悬沙搬运过程的粉砂较多。

由于粉砂的沉速高于粘土,因此其浓度与流速和水深有密切关系,并且导致涨落潮周期内悬沙中径的显著变化(表 5)。悬沙中径的变化是由于憩流时发生沉积的粉砂相对较多。

因口门段水道长于潮冲程, 故较粗物质大多是在主汊道内发生沉降。与此同时, 沉速较低的粘土却极少沉降, 随着潮交换过程继续向湾内搬运。象山港主汊道是落潮流占优势的, 在落潮阶段, 涨憩时沉降于主汊道的较粗物质使部分地被强劲的落潮流向外搬运。由于上述原因, 在潮交换过程中进入内湾的粉砂就相对地少于粘土, 在较大时间尺度上即表现为内、外湾的沉积分异。换言之, 在落潮占优势的、狭长形的、细粒沉积为主的潮汐汊道, 悬沙中较粗部分受到了一种阻挡作用, 不易进入纳潮海湾。

表 5 象山港口门大潮期间悬沙中径的特征值

站位	层次	悬沙中径 $Md(\mu\text{m})$			
		落憩	涨急	涨憩	落急
8312	表层	7.63	5.25	5.03	4.43
	底层	4.99	8.16	6.60	8.14
8315	表层	2.72	5.22	2.47	3.35
	底层	5.79	5.87	5.81	5.46

### 三、结 语

象山港属基岩海岸潮汐汊道, 其细粒沉积物来源于湾外海域。内湾沉积物以粉砂质粘土为主, 外湾以粘土质粉砂为主。口门浅滩、主汊道沉积和湾内的潮滩是主要的沉积体。

象山港存在着显著的时间-流速不对称和余环流。落潮流占主导地位。底层和汊道北侧余流指向湾内, 表层和汊道南侧余流指向湾外。

在口门段水道内侧, 余环流导致了较强的潮交换作用。在近湾口段则存在着水体的直接交换。两种潮交换过程所引起的输沙效应均超过了时间-流速不对称的输沙效应, 导致细粒沉积物向湾内的净搬运。

象山港口门段水道的潮交换作用、潮冲程、时间-流速不对称和悬沙沉降性质等因素的综合作用有利于粘土向湾内搬运, 不利于粉砂向湾内搬运, 故内湾粉砂的沉积速率低于外湾, 造成内、外湾的沉积分选。

### 参 考 文 献

- [1] 蔡伟章等, 象山港潮汐潮流特征及成因探讨, 海洋通报, 4 (1985), 3: 8-11.
- [2] 李家芳等, 象山港海洋自然环境分析及其开发利用前景, 海洋环境科学, 4 (1985), 1: 18-25.
- [3] 高 抒, 东海沿岸潮汐汊道的 P-A 关系, 海洋科学, 1988, 1: 15-19.
- [4] 冯应俊, 东海四万年来海平面变化与最低海平面, 东海海洋, 1 (1983), 2: 36-42.
- [5] 钱立平等, 舟山海岸带沉积与长江三角洲的海进海退, 海洋通报, 2 (1983), 3: 37-44.
- [6] Fischer, H. B. et al., *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979, 241-242.
- [7] Speer, P. E. and D. G. Aubrey, A study of Non linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/estuarine systems, Part II: Theory, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21 (1985), 207-224.