

乐清湾的动力沉积过程

许卫忆 陈耕心 李伯根

(国家海洋局第二研究所, 杭州, 310012)

提要 主要采用二维潮波、泥沙输运途径的数值模拟, 定量地展示了泥沙在乐清湾内的输运途径和沉降过程。模拟结果表明, 乐清湾大致以 10m 等深线为界, 其东部的涨潮流主要来自玉环岛与横趾山之间的深槽; 水流在一周日内的轨迹为一宽约 1km 的狭带; 此流态有利于泥沙向南的净输运, 从而有利于此海域深水航道的维持。10m 等深线以西水流轨迹为一较宽的带状结构, 有利于泥沙向西、西北的净输运。华歧潮滩附近水流运动轨迹利于泥沙向北、向西的净输运, 从而有利于华歧潮滩的发育。此外, 本文还定性讨论了楚门潮滩特征的成因, 主要是漩门口堵截前丰富的湾外泥沙以及驻波型潮波与漏斗状地形。

关键词 数值模拟 动力沉积过程 乐清湾

乐清湾位于浙江省南部, (其北部另称乐清澳) 总面积约 463.6km², 其中潮滩约 220.8km², 主要为华歧潮滩与楚门潮滩。湾东端原有一狭窄水道(漩门口), 为围垦需要于 1977 年筑坝堵截成连接大陆与玉环岛的通道(图1)。至目前为止坝内并未发生预想的淤积, 有些水域甚至出现冲刷。本文从动力因素出发讨论了楚门潮滩特征的成因, 并用数值方法模拟了湾内泥沙的输运途径, 从定量意义上给出湾外泥沙在湾内迁移、沉降过程, 分析了华歧潮滩和大麦屿航道维持与发展的动力条件, 为今后海湾的开发、环境保护和管理提供参考依据。

一、乐清湾的沉积环境

由于地形的影响, 潮波进入乐清湾内成为驻波型潮波。在漩门堵口前, 潮波有二支, 一支由漩门湾自东南向西北进入乐清澳; 另一支由乐清湾口传入, 二支潮波在苔山—鹰公一线汇合并向湾顶传去。堵口后, 仅剩一支潮波, 漩门口至鹰公间的潮差、潮流、涨落潮历时、平均海平面均受影响。湾内潮汐特性除湾顶外均为正规半日潮、潮差较大, 多年平均值在 4m 以上, 为我国强潮海区之一。其平均涨潮历时略长于落潮, 差值甚小, 除个别站外, 大多小于 20 分钟。湾内潮流主要为往复流, 在漩门堵口前流速很大, 曾测得 5m/s; 其余区域实测最大涨潮流速为 1.52m/s, 最大落潮流速为 1.67m/s。涨、落潮流历时在全区内有差异, 总的趋势为西侧涨潮流历时长于落潮流历时; 东侧反之。因而在同一纬向断面上的转流时间不同, 一般涨潮流转落潮流东侧早 0.5—1.0h。

据浙江省海岸带资源综合调查资料, 浙江沿海泥沙的来源有: 1. 沿岸河流输沙, 2. 长江入海泥沙, 3. 内陆架供沙。对于乐清湾而言, 湾内虽有 32 条山溪和小河, 其地表产沙可在洪水期向湾内输入, 但因流域面积为 1280km², 其侵蚀模数为 50—150t/km², 因此年平

均泥沙流失量约达 12.8 万吨。而湾口南侧虽受瓯江的影响,但瓯江多年平均输沙总量为 273 万吨,其中大部分沉积在瓯江口门以内的河段,少部分可出瓯江口外形成水下沙洲,其北界仅延伸到大、小门岛附近。这两方面的泥沙总量相对占乐清湾近一半面积的潮滩而言是微不足道的,而最主要的是来自内陆架的再悬浮物质和长江入海南移的细颗粒物。由于乐清湾外处高能环境,因而潮差大(平均潮差 4m 以上),流急(平均流速约 0.5m/s),波浪较强(年平均波高为 1.0—1.2m,周期为 5.2—5.6s)。在潮流和波浪作用下,近岸区水深 50m 以内由粘土质沙和粉沙质粘土组成的海底沉积物易发生再悬浮,部分物质即随潮流进入乐清湾参与潮滩塑造活动。

二、楚门潮滩特征的成因

楚门潮滩有以下特征:(1) 楚门湾航道东侧、北侧滩面高于西侧和南侧;(2) 北侧潮滩边缘陡直,南侧较平缓;(3) 漩门堵口前北侧滩面发育,堵口后北侧趋于稳定甚至侵蚀,南侧发育增强。这些特征与楚门湾内特别是漩门口的水动力条件密切相关,以下通过一个大潮日的涨、落潮过程说明。

1. 涨潮

落潮末期,楚门湾内含沙量相对较低的水体主要集中于较深的航道内,潮滩已大部出露。涨潮初期由于流速小,冲刷海底泥沙的能力弱,涨潮 1—2h 后流速增大已淹没中潮位以下的潮滩,滩上尚未固结的泥沙易被冲刷。在加留屿以西的水体主要是含沙量较低的水体,因而这种冲刷作用尤其明显,而加留屿以南的潮滩已被湾外高含沙水体控制,处于相对饱和状态,尽管流速增大,中潮位以下滩面泥沙被掀动,但难以被水流带走,只能在附近再沉降。湾外高含沙水体在漩门口时最大流速可达 5m/s,水流具有很强的挟沙能力,自内陆架携带大量泥沙进入楚门湾,实测含沙量达 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 以上。过漩门口后,地形逐渐开阔,水流速度下降,泥沙沿程沉降。由于科氏力的影响,泥沙向右侧(即航道东、北侧)偏聚,利于右侧潮滩的发育。从漩门口至分水山的距离为 11.7km,堵口前涨潮流历时约 6 小时 08 分,大潮日平均涨潮流速为 0.41m/s,半个月平均涨潮流速为 0.34m/s,分水山附近为漩门口输入泥沙的前沿,在涨潮末最大可能到达的范围。前沿到达分水山附近时流速已很小并将转成落潮流,此时泥沙容易沉降。

2. 落潮

涨潮末期,楚门湾内已充满湾外水体,憩流时泥沙沉降使水体含沙量减少(最高实测值为 $2.07\text{kg}/\text{m}^3$)。落潮初期流速小不易起动已落淤的泥沙,因而潮滩高潮位附近不易受侵蚀。随着水位的下降,滩面逐渐出露,流速增强,尤其在中潮位附近侵蚀作用最强,因而高程处于中潮位附近的航道南、西侧潮滩滩面和北侧边缘中部都受到较大侵蚀。此外,在落潮过程中,由于地形束窄,水流加速增强了挟沙能力,加上科氏力的影响使落潮流右侧(即航道南、西侧)的侵蚀作用强于左侧。这不仅说明了楚门潮滩特征的成因,还表明平均潮位以上的潮滩容易淤积不易侵蚀,平均潮位以下的潮滩较易侵蚀。

漩门堵口后,湾外泥沙只能通过乐清湾口,经过 3 或 4 个涨潮过程才能进入楚门湾,此时,其含沙量(实测小于 $1\text{kg}/\text{m}^3$)要比原先经漩门口输入水体的含沙量低得多。由于输入泥沙的减少就不可能在楚门湾内发生预想的淤积。此外,漩门口大坝处流速为零,尽

管涨潮流在楚门湾仍受到束窄作用,但流速却逐渐减弱,使泥沙沿程沉降。落潮时流速则沿程增大,侵蚀能力也随之增强,造成漩门堵口后航道南、西侧发育优于北、东侧,而北、东侧的侵蚀加强。

三、乐清湾泥沙输运数值模拟

从乐清湾进入乐清澳的泥沙不是由湾外一个涨潮过程带人的,而是经过在湾内沉降一再悬浮—输运几个反复的过程输入的。为阐明此过程,本文进行了乐清湾二维潮波、泥沙输运、水质点的拉格朗日轨迹数值模拟。控制方程为:

$$\partial U / \partial t + U \partial U / \partial x + V \partial U / \partial y - fV + g \partial E / \partial x + gU \sqrt{U^2 + V^2} / (C^2 H) = 0 \quad (1)$$

$$\partial V / \partial t + U \partial V / \partial x + V \partial V / \partial y + fU + g \partial E / \partial y + gV \sqrt{U^2 + V^2} / (C^2 H) = 0 \quad (2)$$

$$\partial E / \partial t + \partial(HU) / \partial x + \partial(HV) / \partial y = 0 \quad (3)$$

$$\partial HS / \partial t + \partial(HUS) / \partial x + \partial(HVS) / \partial y = \alpha W(S^* - S) \quad (4)$$

式中, U, V 为垂向平均流速的东、北向分量; E 为相对于平均海平面的垂向位移, t 为时间, g 为重力加速度, f 为科氏参数 ($=2\omega \sin \phi$), ω 为地转角速度, ϕ 为纬度, H 为自由面下水深, C 为谢才系数, S 为泥沙浓度, S^* 为水流挟沙能力 ($=K|\vec{U}|^2/H$), K 为挟沙能力系数, α 为泥沙颗粒的沉降概率, W 为泥沙的沉降速度。

动量方程采用全隐式 ADI 方法计算水位和流场^[3],再用分步法和 Euler-Lagrange 法求解泥沙方程的对流项,得出泥沙含量的中间过渡值,即

$$((HS)^{n+\frac{1}{2}} - (HS)^n) / \Delta t + \partial(HUS) / \partial x + \partial(HVS) / \partial y = 0 \quad (5)$$

$$((HS)^{n+1} - (HS)^{n+\frac{1}{2}}) / \Delta t = \alpha W(S^* - S) \quad (6)$$

由式 (5) 得出 $S^{n+\frac{1}{2}}$,再由式 (6) 得出 S^{n+1} 。计算区域见图 1。在各开边界上以 O_1, K_1, M_2, S_2 四个分潮的调和常数给出潮位边界条件,以实测泥沙含量作为泥沙边界条件,以同期获得的湾内若干站点潮位调和常数及潮流、泥沙资料作为验证条件。动量方程初值取潮位、流速均为零,待计算稳定后再求解泥沙方程(其初值在湾内为零,湾口边界给实测

表 1 乐清湾潮位的计算结果检验

Tab. 1 Comparison between model and survey of Tidal level in Leqing Bay

站 名	高潮 (m)			低 潮 (m)			位相(相对于东白)(°)		
	计 算	实 测	相对误差 (%)	计 算	实 测	相对误差 (%)	计 算	实 测	相对误差 (%)
小 岙	3.26	3.40	4.4	-3.16	-3.25	2.8	0.5	0.5	0
大麦屿	3.26	3.27	0	-3.16	-3.33	5.1	0.5	0.5	0
华秋洞	3.22	3.38	4.7	-3.11	-3.14	1.0	4.5	2.0	2.5
分水山	3.34	3.49	4.3	-2.81	-3.13	10.2	6.0	4.5	1.5
海 山	3.34	3.78	11.6	-2.83	-3.66	22.7	8.5	5.5	3.0
东 山	3.34	3.33	0	-2.97	-3.41	12.9	6.5	4.5	2.0
平均误差			4.2			9.1			1.5

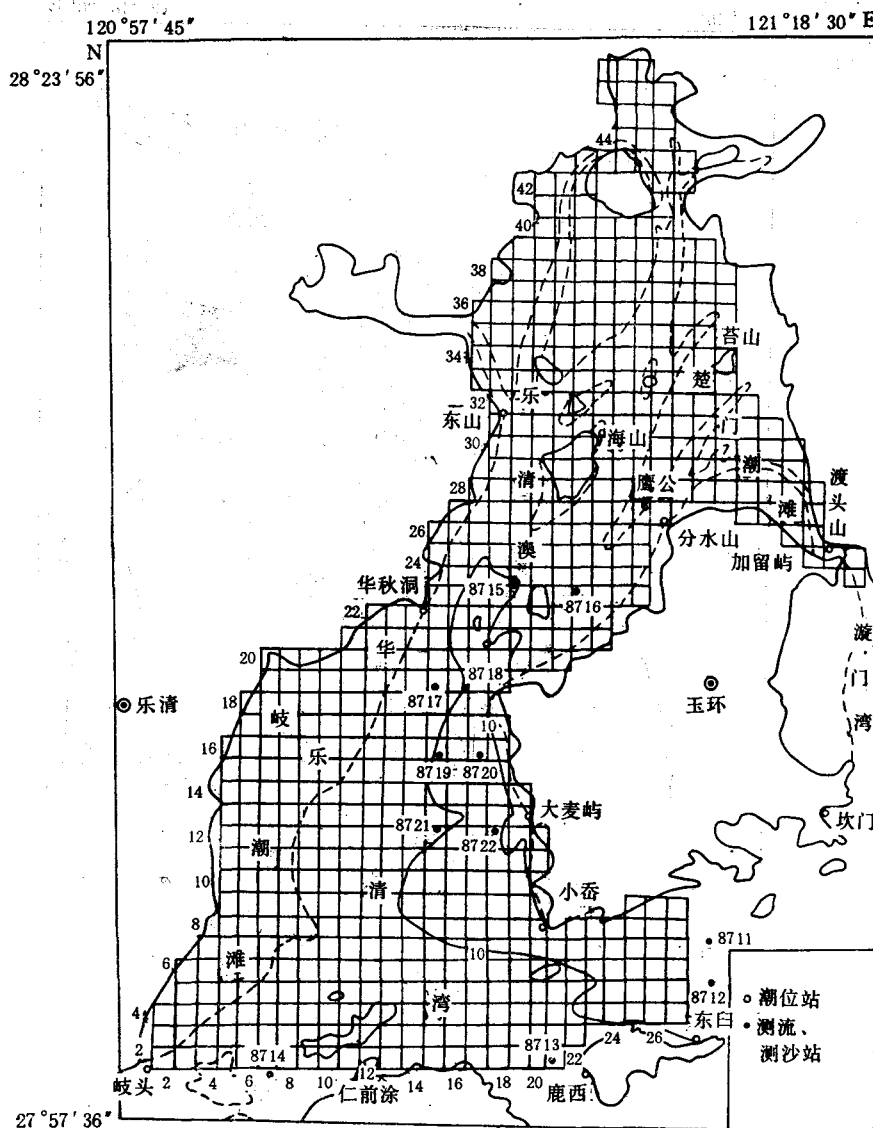


图 1 乐清湾测站及计算网格图

Fig. 1 Location of station and computation grid in Leqing Bay

值)。泥沙方程中湍流扩散项未予考虑, 而仅考虑平流扩散及水体与海底间的垂向交换。可以把空间某点一个大潮日海底泥沙的盈亏作为该地的冲淤量。初算结果未出现大冲大淤现象, 计算中不考虑水深变化对水流的反馈作用。

由于浙江沿海多年秋、冬大潮日全潮垂线平均含沙量从数量级意义上变化不大, 因而本计算使用的 1987 年 10 月大潮日的泥沙、潮流资料, 1986 年 10—11 月历时一月的潮位资料所得计算结果具有一定的代表意义, 可采用秋、冬季约 40 个大潮日的冲淤量作为全年冲淤量, 得出乐清湾冲淤区域分布图。经与实测水下地形变化对比, 年冲淤量在数量级意义上是一致的(表 3)。从表 1, 2 可知潮位、潮流有较高精度。考虑到泥沙方程中含沙

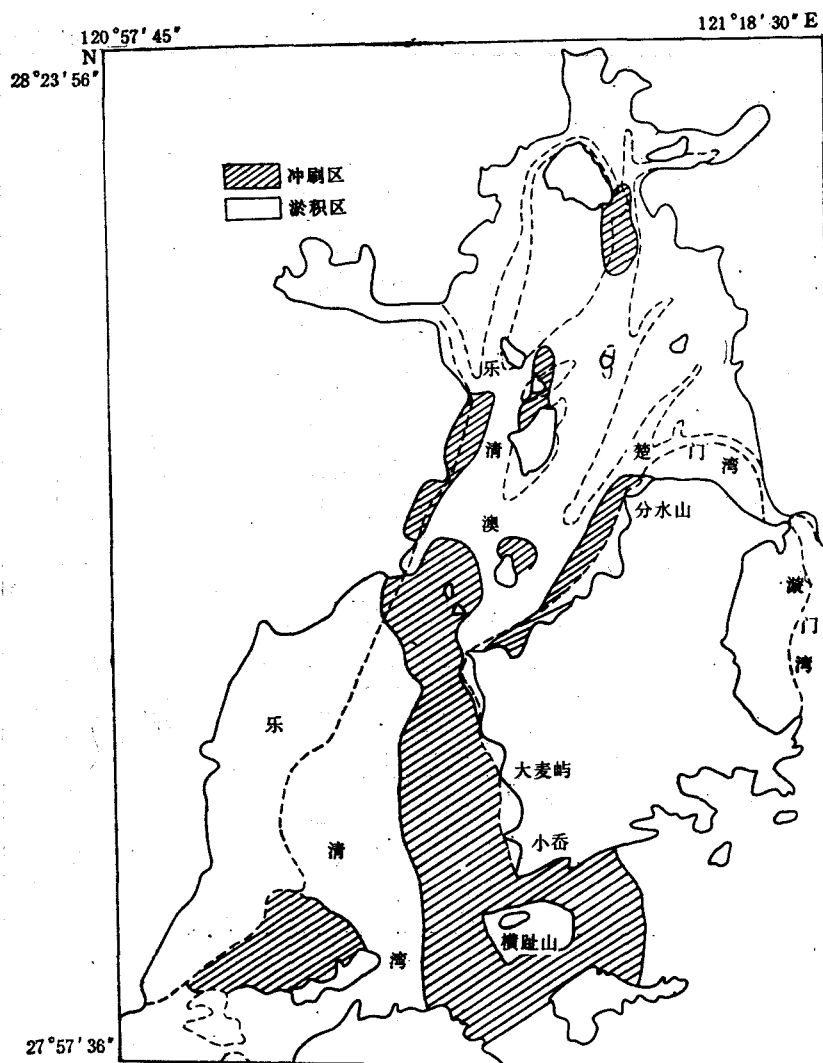


图2 乐清湾冲淤区域分布图(现状模拟)

Fig. 2 Distribution of the erosion and siltation areas

量与流速间的非线性关系,相对误差为 15% 的流速,表中泥沙的精度仍是可取的。冲淤区域分布(图 2)也基本反映了实际情况。

取 60 个跟踪点,分涨潮始与落潮始起算轨迹(不同的起算时刻有不同的轨迹)。计算每个时刻各跟踪点的空间位置及其单位底面积水柱中的总沙量,得出一平均大潮日水柱的运移途径和水柱总沙量的沿程变化(图 3)。模拟结果表明,“冲淤”是一个动态平衡的概念,对某一空间点一个大潮日过程可以有冲刷和淤积的不同时段,不是单纯的冲或淤。对某一水柱也是不断地进行泥沙交换,总沙量不是单纯的增加或减少。现择取几个代表性跟踪点讨论其运移过程(重点在于说明华歧潮滩和大麦屿外深水航道得以维持的条件),并选跟踪点 a 说明它在一大潮日中,泥沙沿程变化的过程曲线(图 3)。

从图 3 中可看到在小岙东南至大麦屿以西总沙量上升,即该区段海底冲刷,而再续继

表 2 乐清湾潮流与含沙量的计算结果检验

Tab. 2 Comparison between model and survey of Tidal current and concentration of sediment in Leqing Bay

站号	涨潮流速 (m/s)			涨潮方向 (°)			落潮流速 (m/s)			落潮方向 (°)			平均含沙量 (kg/m ³)		
	计算	实测	相对误差 (%)	计算	实测	差值	计算	实测	相对误差 (%)	计算	实测	差值	计算	实测	相对误差 (%)
8715	1.04	0.77	35	23	31	6	1.29	1.00	29	207	210	3	0.27	0.28	3.6
8716	0.78	0.78	0	16	28	12	0.97	1.04	6.7	199	204	5	0.17	0.29	41
8717	0.70	0.76	7.9	23	3	20	0.78	1.24	37	196	188	8	0.24	0.16	50
8718	1.00	0.98	2	14	16	2	1.14	1.09	4.6	189	217	28	0.08	0.22	64
8719	0.89	0.86	3.5	2	7	5	1.09	1.03	5.8	180	185	5	0.18	0.17	5.9
8720	1.07	1.00	7	349	336	13	1.30	1.47	11.6	170	157	13	0.12	0.26	54
8721	0.95	0.95	0	350	335	15	1.20	1.20	0	170	201	31			
8722	1.04	1.06	1.9	350	349	1	1.37	1.35	1.5	166	171	5	0.18	0.18	0
平均误差			7.2			9.3			12.0			12.3			31.1

表 3 乐清湾年冲淤率 (cm)^① 的计算结果检验

Tab. 3 Comparison between model and survey of Annual rates of erosion/siltation in Leqing Bay

地 点	渡头对岸—渡头	鹰公—分水山	华秋洞	外屿	鸡蛋山	牛头颈	大麦屿西滩	大麦屿东滩
实 测	+20—+30	-4—-26	-36	-7	-23	-15	-4—-5	-2—-6
计 算	+12	-13	-23	-2	-4	-6	-4	-5

① 除华秋洞浅滩是 11 年平均值外,其余均为 5 年平均值,+为淤,-为冲。

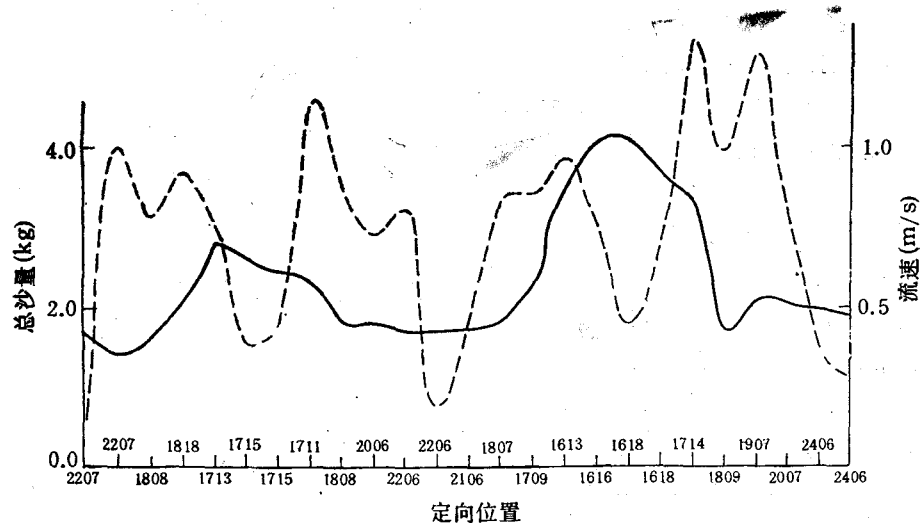


图 3 总沙量沿程变化图

Fig. 3 Variation curve of total sediment in a labelled water column in Leqing Bay

横坐标数字前两位为列,后两位为行。

北上时,因流速下降使泥沙在大麦屿至鸡蛋山段落淤,落潮时尤其在牛头颈西至小岙西南

段淤积最甚。在第二个涨落潮过程即从 1807→1618→1809 途中,冲刷与淤积量相同。但自 1809→2406 段冲刷显著,即把牛头颈西南段淤积的泥沙再起带出乐清湾。下面将简述几个跟踪点轨迹。

1. 起始时刻为涨潮初(图 4)

(1) 点 *a* 小岙东南 2km → 鸡蛋山西 → 小岙东南 2km → 外屿西南 2km → 小岙 → 出湾。总沙量由 1.45→2.70→1.68→3.88→2.1kg。性质为泥沙带出乐清湾。

(2) 点 *b* 横趾山以西 → 鸡蛋山西 5km → 原出发点以南 1km → 鸡蛋山西 6km → 原出发点以南 3km。总沙量由 1.8→4.0→2.0→4.4→0.6kg。性质为泥沙带进乐清湾。

(3) 点 *c* 大麦屿西 1.5km → 江岩山南 1km → 牛头颈西 1.5km → 江岩山西 0.5km → 小岙西。总沙量由 1.7→1.1→2.2→5.0→0.8kg。性质为在每一涨落潮过程中又分不同冲淤时段,总效果为在乐清湾冲刷 0.9kg、在乐清澳沉降 1.8kg,即带入乐清澳的 0.9kg 泥沙来自出发位置以南海区。

2. 起始时刻为落潮初(图 4)

(1) 点 *d* 华秋洞东南 0.5km → 小岙西 6km → 外屿西 5km → 小岙西南 6km → 鸡蛋山西北 7km。总沙量由 2.9→1.5→3.8→3.1→1.8→4.0kg。性质为将进入乐清湾的泥沙向北向西输运。

(2) 点 *e* 外屿西北 1.0km → 小岙东南 3km → 大麦屿西 2.5km → 小岙东南 3.5km → 鸡蛋山西 2km。总沙量由 3.5→1.6→2.5→1.6→3.7kg。性质为乐清澳泥沙外泄至乐清湾,一部分在湾内沉降,一部分排出乐清湾。

(3) 点 *f* 分水山西北 0.5km → 鸡蛋山西 2.5km → 毛诞山西南 1.5km → 鸡蛋山西 2.5km → 毛诞山西南 1.5km。总沙量由 2.0→1.8→4.4→3.5→2.0→5.3kg。性质为分水山附近泥沙及乐清湾的泥沙向毛诞山西输运。

根据上述数值模拟计算结果可以对乐清湾动力沉积过程有进一步的认识。大致以乐清湾 10m 等深线为界,其东部的涨潮流主要来自玉环岛与横趾山之间的深槽,水流在一周日内的轨迹为一宽约 1km 的狭带状结构,横向摆动较弱。随着涨潮流,泥沙向北输运,落潮时又向南输运。由于此区域落潮流速明显大于涨潮流速,落潮流历时长于涨潮流历时,造成泥沙向南的净输运,这有利于深水航道的维持。离开此狭带向东,跟踪点的轨迹南北距离缩小,且向岸边靠拢,有些跟踪点终止于岸滩上,它表明近岸水体,尤其是来自乐清澳落潮流近岸水体中的泥沙,在玉环岛西侧岸滩的发育上起着重要作用。10m 等深线以西区域的涨潮流主要来自横趾山与鹿西岛之间的水道和鹿西岛与大门岛之间的黄大峡,此区域内水流在一周日内的轨迹呈较宽(约 2km)的带状结构,水流在涨落潮过程中逐渐向西偏移,流速也减弱,加上涨潮流历时增长造成泥沙向西、北的净输运。同样,乐清湾西侧华歧潮滩附近及瓯江口北沙头水道的水流都促使泥沙向潮滩上输运或向湾内输运,这有利于滩地的发育。

四、漩门堵口对乐清湾冲淤动态影响

经模拟,漩门堵口对乐清湾(不含乐清澳)的流场结构无明显影响。据实测泥沙含量

有较大变化。堵口前由乐清澳进入乐清湾的落潮流的泥沙含量高于涨潮流¹⁾,这是由于分水山附近来自乐清湾口和漩门口的两股涨潮流间的泥沙交换,使流向乐清湾的落潮流中携带了来自漩门口的湾外泥沙。此落潮流在通过较窄的华秋洞—外屿以后流速减缓,水流中部分泥沙易沉降,从而形成鸡蛋山西南3—4km的浅滩,如上节模拟所示,部分近岸水流中的泥沙对玉环岛西侧岸滩的塑造起重要作用。

漩门堵口后,来自乐清澳的落潮流中泥沙含量下降为 $0.2\text{kg}/\text{m}^3$ 左右。由于水流的冲刷能力不仅与流速有关,还与水流中泥沙的饱和程度有关,因而低含沙的落潮流既减少了

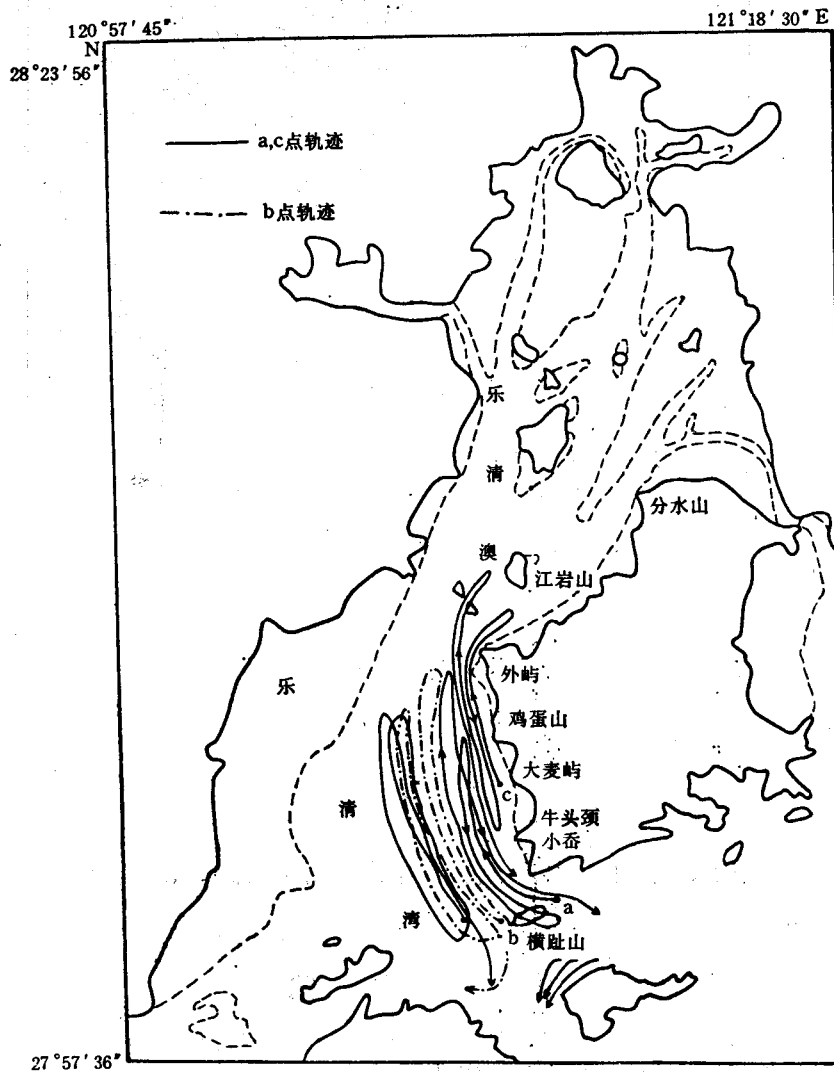


图4 跟踪点轨迹图

(a. 涨潮始, b. 落潮始)

Fig. 4 Track of the labelled particle in Leiqing Bay

1) 据原水电部第十二工程局 1971 年测量资料。

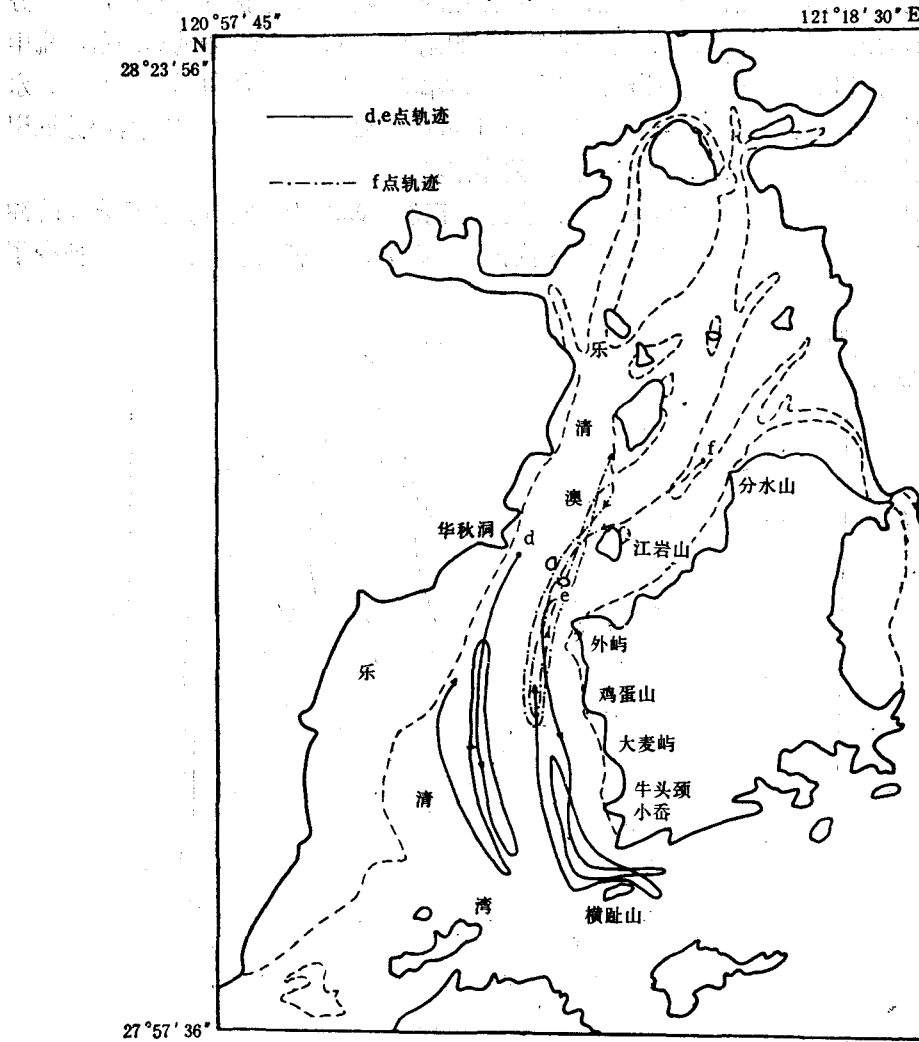


图 4 (续)

浅滩、岸滩的泥沙来源,也起了一定的冲刷作用,导致上述浅滩面积逐渐缩小,玉环岛西侧岸滩淤积减缓。

参 考 文 献

- [1] Cheng R. T., V. Casulli and S. N. Milford, 1984. Eulerlagrangian solution of the convection-dispersion equation in natural coordinates. *Wat. Res.* 20(7): 944—952.

THE DYNAMICAL PROCESS OF SEDIMENTATION IN LEQING BAY

Xu Weiye, Chen Gengxin and Li Bogen

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou, 310012)

ABSTRACT

A two-dimensional numerical simulation is made for the tide and the path of sedimental transportation in Leqing Bay. It presents the processes of the transportation, siltation of the sediment quantitatively.

The results show that the 10 m isobath is the demarcation line. In the eastern area off this line, the flood current comes mainly from the waterway between the Yuhuan Island and the Henzhi Island. The trajectory of the flow in one spring tidal day is a narrow belt. For the net transportation of sediment from north to south it is the dynamical condition of maintaining the deep waterway off the Damaiyu Port. In the western area off 10 m isobath the trajectory of flow is for the transportation of sediment to west and north-west, the trajectory of flow near the Huaqi Flat is for the transportation of sediment to north and west, both contributing to the development of the Huaqi Flat.

Before building the Xuanmen Dam, the standing wave of tide and funnel-type topography are the main condition for the formation of the characteristic Chumen Flat.

Key words Numerical simulation, Dynamical process of sedimentation, Leqing Bay.