

杭州湾二维潮波计算及底质分布的动力成因*

许卫忆 苏纪兰

(国家海洋局第二研究所, 杭州)

提要 考虑到杭州湾较浅, 面积大而地形变化不剧烈, 沉积物粘性差且其输运方式主要是悬移, 我们假定其单位体积水体内的砂量是达到动态平衡的, 故采用《平衡输砂原理》的 Bagnold 公式计算了沉积物的输运量, 并用净输运量的散度来表征湾内沉积物的冲淤区域的分布。所得结果与实测结果基本相符。从而为今后在类似的河口湾中进行沉积物冲淤预测提供了依据和手段。

在潮波计算中本文采用了 Gray 提出的一种与 Simpson 求积公式相结合的等参有限元方法, 避免了复杂的数值求积计算。对二维潮波计算中出现的短波扰动则采用了适当的平滑手段, 计算结果与实测相比, 符合的程度较高。

杭州湾东西长和南北最宽处分别约 100km, 最窄处仅 20km, 呈喇叭状。湾的北、中部平均水深十余米, 高潮时湾顶水深减至 10m 以下, 可淹没南侧大片滩涂。图 1 为地形简图, 由于计算网格关系, 忽略了北岸的一些狭窄深槽。

对杭州湾潮运动的研究, 以往已有一些成果^{1), [1]}, 但通过潮运动来计算泥砂输运的研究似乎较少。作为杭州湾沉积动力学研究的一个初步尝试, 又考虑到杭州湾是一个半日潮海区, 且以 M_2 分潮为最重要分潮, 我们采用有限元方法计算了湾内 M_2 分潮的二维潮波、潮余流场、沉积物悬移以及推移通量。这些计算结果较好地反映了湾内的潮波特征, 说明了湾内沉积物的冲淤状况。因而这些资料至少可以作为沉积物分布的一种示性指标来对其动力成因作进一步地探讨。

一、控制方程和边界条件

本文计算的控制方程为通常垂向积分的二维潮波方程, 即:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0$$
$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial(H-h)}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2+V^2}}{C^2H} = 0$$

* 本文的图 10 系冯应俊同志提供; 国家海洋局第一海洋研究所郝东明同志参加了本课题中期计算工作; 在计算程序的编制与调试中曾得到朱廷璋同志的帮助。均此, 谨致诚挚的谢意。

收稿日期: 1984 年 4 月 8 日。

1) 钱塘江工程管理局、浙江省河口海岸研究所, 1980。科研成果选编第四辑——潮汐水力计算专辑。

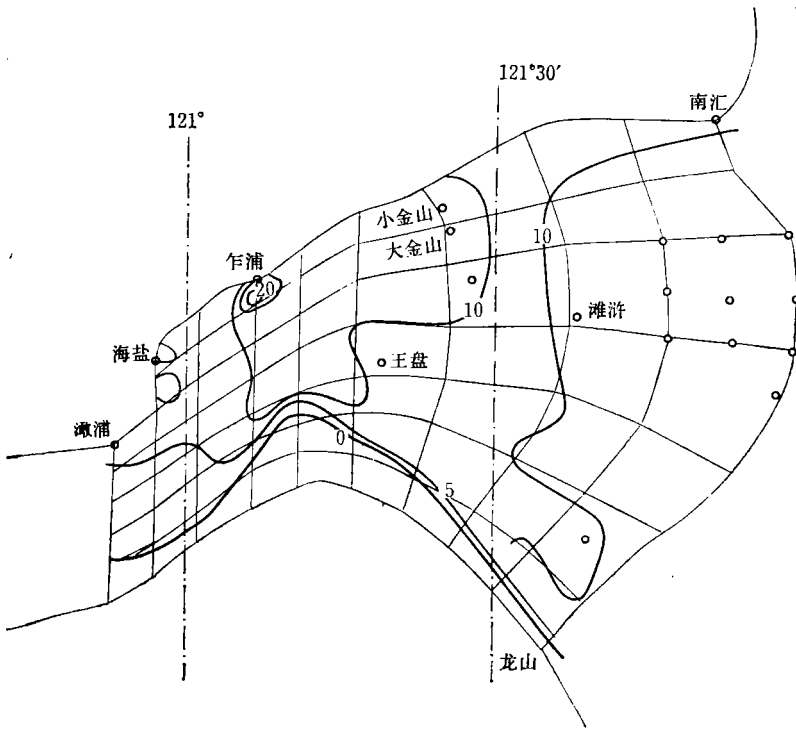


图1 杭州湾地形简图

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial(H-h)}{\partial y} + \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} = 0$$

其中风应力和侧向湍流粘滞力均未考虑,底摩擦应力取流速的二次方形式,密度取作常数。 x 、 y 为正东,正北方向; U 、 V 为垂向平均流速的东、北分量; f 为科氏参数; h 为平均海平面以下的水深; \bar{h} 为相对于平均海平面的水位升高; H 为实际水深($=h + \bar{h}$); C 为谢才系数。

计算区域见图1,东边界为南汇咀,唐璠山,鱼腥脑,伏龙山的连线,并以前3站的水位调潮的水位调和常数作为东边界条件,以澉浦所在经线为西边界,并假定该边界为 M_2 分潮的同潮时线及等潮差线。南北边界取至岸边按固体边界处理即法向流速为零。海盐东北向上的拐角点位于几乎成垂直的边线交点上,为保证两垂直线上法向流速均为零,而取该点上的 U 、 V 均恒为零。

二、计算方法

本计算采用了 W. G. Gray 提出的一种有限元格式来计算潮位、潮流场^[3]。所得结果与实测值相比较是令人满意的。

整个计算区域分成61个四边形元(图1),每个元有九个节点,它们分别为四边形的四个顶点,四条边的中点及四边形的一个内点(对应于坐标变换后的正方形的中点)。由于潮波是一种长波运动,其前进波的传播速度与水深的平方根成正比,因而准确模拟实际

水深是至关重要的。据我们的几个计算实例来看,元内水深变化在5m以内较为适宜。然而准确模拟实际水深剧变区需要把有限元取得小,但为了满足计算稳定性条件,时间步长也随之变小,由此造成了计算机容量和经费上的困难。因此,我们不得不对一些区域的水深作一些歪曲,致使海盐站计算的潮振幅与实测相差7.1%,位相差 10° 。对杭州湾南侧浅滩,我们采取保证有50cm水深的处理,即在低潮位时不“露底”,同时加大摩擦作用来减小水深的失真影响。在深水区谢才系数取 $75\text{m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$,而浅水区取 $45\text{m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$ 。

计算的初始条件取流速与水位均为零,初始第二时刻的水位、流速值分别为5cm和5cm/s。为满足Courant条件,取时间步长为60s。计算结果表明本格式是稳定的,在给定的谢才系数下计算至第3个潮周期时,水位、流速均重现,且所得水位、流速的全潮过程曲线是光滑的,小扰动只在1cm和1cm/s以下。对于所出现的空间上的短波扰动,则取每个节点周围的几个节点平滑来消除之。为考察这种平滑是否会歪曲实际的物理现象,我们以Gray和Lynch所做过的例子^[4]来作试验。在该例中取的网格较稀,目的在于突出短波扰动来与解析解相比较。我们对该区域进行同样网格下的数值计算并进行平滑,得到一条平滑曲线,位于解析解曲线以下,又进行加密网格下的平滑化的数值计算,所得平滑曲线已很逼近解析解曲线(图2)(该组曲线代表开边界上水位达最大值时刻的情况)。这里所谓的解析解是在线性、无科氏力情况下的解,而数值解则加上了非线性项,但科氏力仍未考虑。图2a中的网格为粗网格,细网格为粗网格的x方向上加密一倍,y方向上由于变化很小,而未加密。

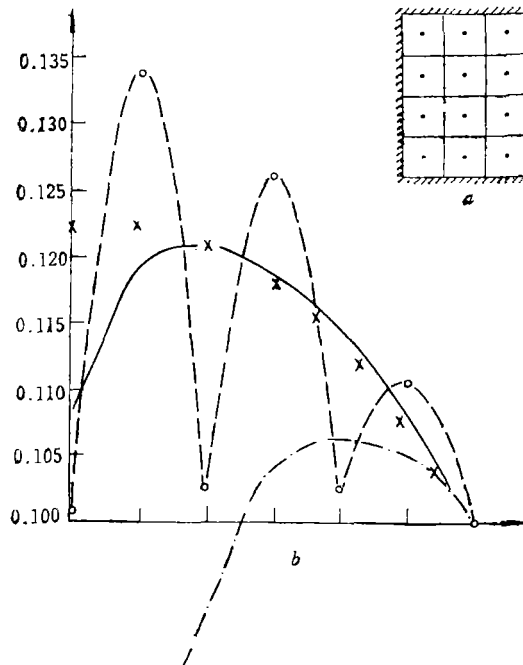


图2 平滑处理的试验结果

a. 试验计算区域; b. 水位; $\times\times\times\times$ 解析解结果(Gray及Lynch); ----未平滑解(Gray及Lynch); -.-稀网格下平滑曲线; ——加密网格下平滑曲线。

本文中杭州湾计算区域的长度与此试验区相似,但网格点间距要比试验区密网的间距还要小一些。因此,可以认为杭州湾计算中的平滑处理,不会对实际的物理现象有很大歪曲,这从下面潮振幅、位相的验证中可以得到证实。当然,平滑对于余流场及泥沙输运场的一些小尺度现象会有一些影响。

三、潮位、潮流计算结果分析

1. 潮位

本计算取 5 个检验点:金山、海盐、王盘、滩浒、乍浦。验证结果见表 1。

表 1 潮振幅、位相的验证结果

站名	潮振幅相对误差(%) (计算-实测)/(实测)	位相误差(°) 计算-实测
金山	-2.4	-1°.0
王盘	-3.5	-0°.5
滩浒	-3.4	-1°.0
乍浦	-4.1	0°.0
海盐	+7.1	+10°.0

其中位相系相对于东边界南汇咀的高潮时而言。

从潮波传播状况来看,在金山以东同潮时线都是向东凸出,等潮差线都是东北-西南向倾斜。在金山所在经线附近,这两种线都几乎成南北向的直线,而至金山以西则逐步向西北倾斜(图 3)。这是因为从金山一线开始,杭州湾南岸浅滩的作用就越来越大,使潮波在湾南部传播速度减慢,而湾北部因水深而潮波传播快,致使同潮时线向西北倾斜;而由于浅滩地形的浅水放大效应,致使南北方向上的同一断面的南岸潮差比北岸大,致使等潮

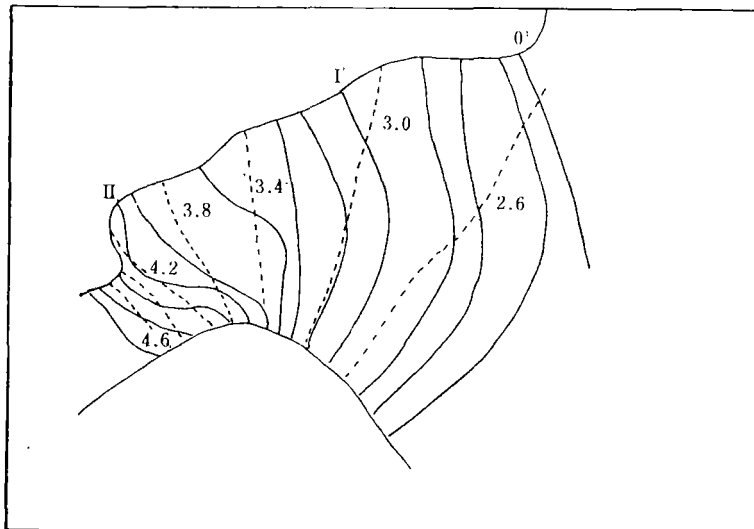


图 3 同潮时线与等潮差线分布图
——同潮时线 (h); -----等潮差线 (m)。

差线也向西北倾斜。1981年浙江海岸带调查结果也证实了这一点。

2. 潮流

在二维潮波数值计算中，潮流计算结果的验证往往难以取得真正满意的结果。本计算中所得最大流速及方向与1981年浙江海岸带调查所获8个站的潮流椭圆要素相比较，速率误差平均为25%，方向误差平均为 $11^{\circ}.6$ 。之所以它比水位的验证要差，主要在于：(1) 潮流观测中一些随机因素的影响；(2) 二维潮波模式与实际观测中离散的数层观测的平均值之间存在误差。

本计算所得流场与以往的研究成果相似^[1]，因而这里仅提供两幅转流时刻潮流图(图

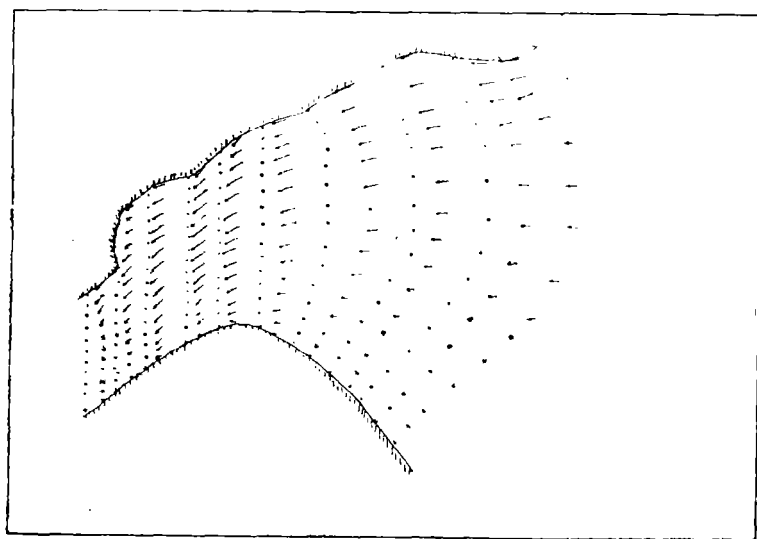


图4 转流前潮流图

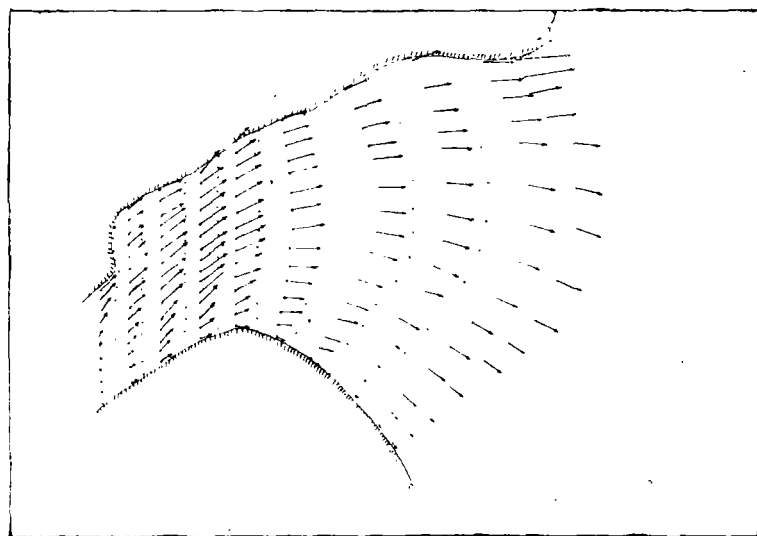


图5 转流后潮流图

4, 5), 而不另赘述。

为了对浅滩作些比较研究, 我们曾进行加大摩擦的计算, 即在深水区谢才系数取为 $45\text{m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$, 浅水区取 $30\text{m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$ 及 $15\text{m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$, 所得流况在深水区基本上与较小摩擦的结果类似(但潮流速率有所不同), 而在浅滩上则有较大变化。

全区开始落潮时潮流流向为东北、东、东南, 约 3 小时后其它区域流向仍为东北、东、东南, 然而在浅滩上则呈辐散状流向西北、北、东北、东南和西南。其中西北向的潮流流出浅滩后与深水区的落潮流汇合转向东北, 西北向、东北向的流出浅滩后在深水区则转向东和东南。约 6 小时后尽管浅滩上仍在落潮, 但大部分海区已开始为涨潮流。当浅滩外深水区涨潮 3 小时后则从浅滩四周即从东南、西南和北面漫上浅滩(图 6)。这种现象是否符合实际情况尚有待滩涂水文测量的验证, 但直观上看来, 它似乎符合浅滩的地形特征。本计算对浅滩仅作一试验, 下面讨论的潮余流、沉积物输运仍属较小摩擦的情况, 即图 3—5 所代表的潮流场的结果。

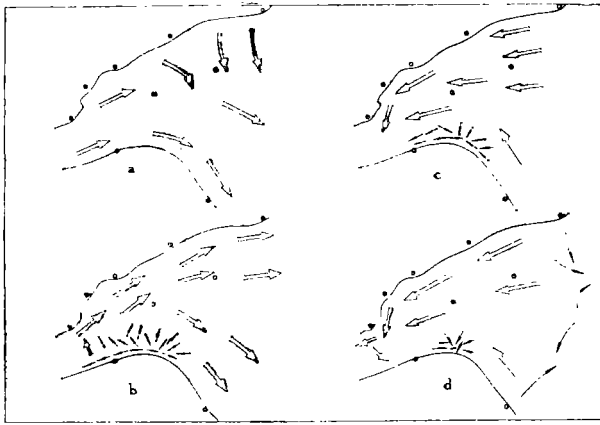


图 6 浅滩试验的潮流图

四、潮余流

本文中的边界条件为 M_2 分潮水位, 而没有潮余流的边界输入。因此, 本计算所得潮余流仅是 M_2 分潮波传入本区后在当地的非线性效应下所产生的潮余流。文中潮余流为各点一个潮周期内的平均值, 即通常说的“欧拉潮余流”。其分布见图 7。如图所示, 除西边界以外(由于边界条件限制所产生的误差, 而使开边界附近的潮余流的计算会有较大误差), 最大潮余流发生于杭州湾西南岸的滩涂上, 且由西南向东北沿程加强(由零增至 4cm/s), 而当越过滩顶后, 余流方向转为东南且逐渐减弱(由 4cm/s 减至零)。南测浅滩以外的深水区如果以大盂山所在经度(约 $121^\circ 08'$) 为界, 则杭州湾可分成东、西两区。西区潮余流方向为西、西南和西北, 且沿程加强; 东区潮余流方向为东北且沿程减弱, 至金山所在经度(约 $121^\circ 20'$) 后潮余流方向折向东、东南且强度变化不大(约为 2cm/s)。

需要说明的是潮余流的存在与沉积物的输运有重要关系, 但二者亦有所不同。潮余流是潮流速度一次方的平均值, 而沉积物输运率则是潮流速度的高幂次方的平均值。在

适当条件下 M_4 分潮流也对沉积物输运有很大贡献,但在潮余流中已没有 M_4 分潮流的成分。因此,本节所讨论的潮余流与下节的沉积物输运既相关联又有所差异,这在下节计算结果中也可以看出。潮余流的分布还可用于讨论随水体作同步运动的物质的输运状况,如溶解物质等。

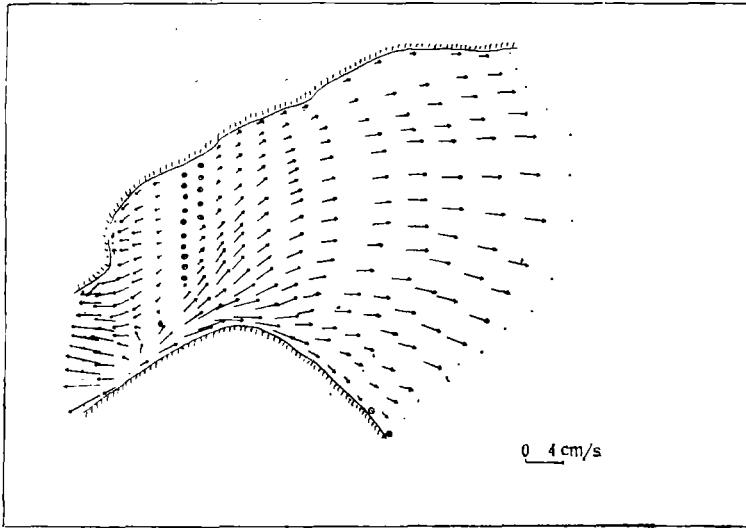


图7 潮余流分布图

五、沉积物输运及湾内冲淤状况

据杭州湾的底质成分,我们计算了 0.008, 0.016, 0.032, 0.063 和 0.125mm 五种粒径的沉积物的悬移单宽输沙率及在 3 种情况下的推移单宽输沙率(即以物质起动流速、物质维持悬浮状态的最低流速及零流速分别作为起算点,所用计算公式的详细讨论见另文¹⁾)。计算结果表明,由于杭州湾潮流速大,3 种起算点所得结果相差不大(仅在粒径为 0.25mm 时输运状况有较大差异)。且计算所得推移量比悬移量小两个量级,因此在本文中我们仅讨论悬移输沙率。计算的公式为:

$$q_{ss} = 0.01U_m^2\tau_0/W = 0.01r_bU_m^4/W$$

其中 W 为沉积物沉降速率(随物质粒径而异); U_m 为水的垂向平均流速; r_b 为底摩擦系数,本文中改取谢才系数即 $C = (g/r_b)^{1/2}$; g 为重力加速度。从公式中可看出, $q_{ss} \cdot W$ 与粒径无关而与水的流速有关,所以据此公式得出的各种粒径的输运方向是相同的,而量值之间相差仅为一个系数。因此,下面讨论的量值均指粒径为 0.008mm 的物质,其它几种粒径的相应值依次为 0.008mm 之值的 $10^{-0.6}$, $10^{-1.2}$, $10^{-1.8}$, $10^{-2.4}$ 倍。

据上述公式计算一个潮周期内的平均值作为输沙率,其分布见图 8(图中数字单位为 $T/m \cdot s$)。

为讨论悬移质输运对杭州湾海底冲淤状况的作用,还计算了各点输运率的散度。图

1) 董礼先、苏纪兰, 1980。黄渤海潮波及沉积物输运的计算。

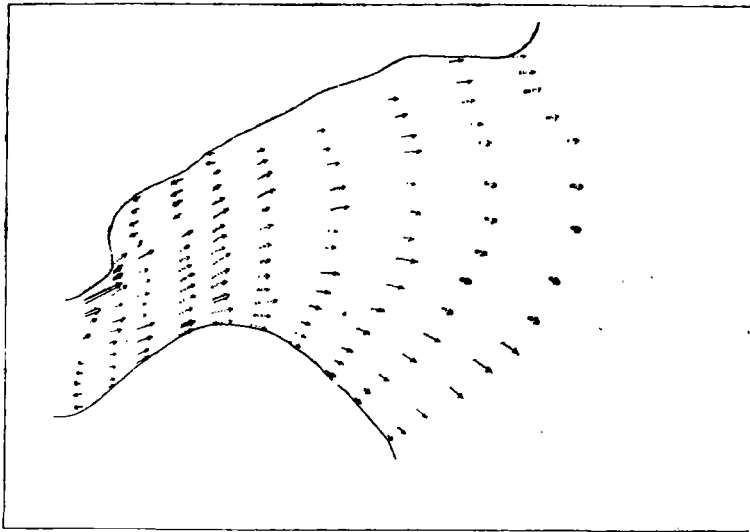


图 8 沉积物输运图

⇒ $Q \geq 10^{-1.5}$; ---- $10^{-1.5} > Q \geq 10^{-2.5}$; → $10^{-2.5} > Q \geq 10^{-3.0}$

9 即为根据散度分布而得出的湾内冲淤状况。其中未注明冲淤的区域 (3, 8 区) 与 4 区所计算出的散度值都很小, 比其它区要小一、两个量级, 因此可以认为这三个区基本上处于动态平衡。各区散度的最大值, 换算成单位面积上的年冲淤量列于表 2。

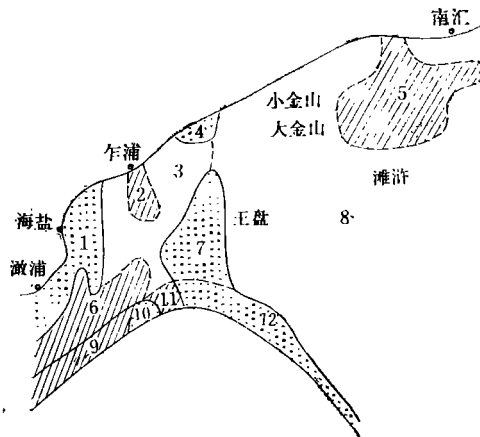


图 9 冲淤分布图

表 2 杭州湾各区最大年冲淤厚度

区号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
厚度 (cm)	8.3	0.83	0.16	0.05	0.67	1.3	1.2	0.33	0.83	1.7	8.3	3.3
性质	淤	冲	冲	淤	冲	冲	淤	冲	冲	淤	冲	淤

为了解杭州湾沉积物潮输运的平衡, 还计算了该区域的总冲淤量, 全年输出量为 2.7

亿吨。由于钱塘江每年向杭州湾输送的沙量仅 700 万吨左右，且杭州湾又并非是明显冲刷剧烈的河口湾，因此在讨论此问题时应考虑长江输出泥沙对该海区的影响。为进一步研究杭州湾沉积动力学，必须考虑边界上泥沙的输入、 M_4 分潮及余流分布和风场对悬浮泥沙运移的影响。图 9 中冲淤区的分布与实地观测¹⁾相比较大体相符。由于条件限制，无法模拟一些小的地形结构，诸如狭长的深沟等，因而也就无法模拟该区域的实际流场，以致影响到冲淤状况的模拟，如海盐附近的流场冲淤状况以及底质分布都未能准确反映。但总的看来，可以认为文中沉积物输运计算是适用的。它表明了本海区底质分布的主要动力因素是潮流。尽管海浪、风暴潮的作用也很大，但其作用仅是局部或短时间的，所造成的后果又在潮流的作用下重新达到新的平衡。

图 10 为杭州湾现代底质分布图，比较图 8—10 可以看出，计算结果与现代底质成分分布基本上是相容的，即在潮流的作用下能维持这种分布特征。如杭州湾西南岸冲刷区内的物质向东北方向上的滩涂输运，反映在底质分布上这两处的底质成分皆为粉砂质泥 (T-Y)，而湾内横贯东西向的细砂-粉砂 (FS-T) 带及另一条粉砂质泥 (T-Y) 带也可以同理说明。必须指出，湾内沉积物粒径分布的动力因素研究在本计算中尚无法进行，这是因为它需要了解各种粒径物质的来源以及湾内沉积物的原始成分后，才能根据动力条件来讨论构成现代沉积物粒径分布的成因。

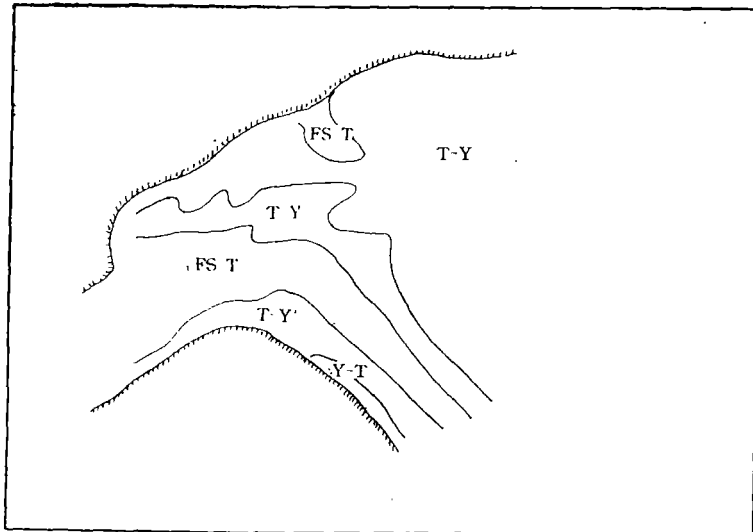


图 10 底质分布图(据冯应俊)

六、存在的问题

本计算中由于条件所限而采用了一些简化手段，这些处理总的来说有利于对整体状况的了解，但对局部区域会造成失真。

1) 据谢钦春、冯应俊、李伯根、李炎、张立人等提供资料。

1. 假定浅滩不露底,它造成的假象是落潮历时要比实际长;
2. 西边界作等潮差线、同潮时线处理可能影响其南侧附近同潮时线、等潮差线的分布;
3. 本计算中取两边开边界平均海平面为相等不尽合理,但由于平均海平面变化受到诸多因素的影响,而又无法从资料中分离出单个分潮在边界两端所引起的平均海平面的差异,因此只能作此简化;
4. 比较潮余流与悬移质输运分布可看到, M_4 分潮对杭州湾沉积物输运有一定影响。尽管文中东边界仅给 M_2 分潮水位,但由于非线性效应也会在湾内产生 M_4 分潮成分,因而若能将 $M_2 + M_4$ 作为西边界条件也许能得到更准确的计算结果。由于资料所限,在东西边界皆未计入 M_4 分潮水位;
5. 东边界上的余流分布和 M_4 分潮及西边界上余流的分布估计对计算结果影响不大,但因无具体资料而无法证实;
6. 悬移质输运公式原适用于河流,是否适用了海湾还有待验证;
7. 有限元方法求解二维潮波方程所遇到的短波扰动,虽经平滑得以消除,但同时也影响到潮余流及泥沙输运的空间短波长变化,这一问题尚待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 毛汉礼、沈鸿书、甘子钧、蓝淑芳, 1964。杭州湾的基本水文特征。海洋科学集刊 1:126—168。
- [2] 冯士祚, 1982。风暴潮导论。科学出版社, 156—160 页。
- [3] Gray, W. G., 1976. An efficient finite element scheme for two-dimensional surface water computation. In: "Proceedings of the 1st Intl. Conf. on Finite Elements in Water Resources" Pentech Press, pp. 433—449.
- [4] Gray, W. G., 1979. On the Control of noise in finite element tidal computations: A semi-implicit approach. *Computers and fluids* 7: 47—67.

THE COMPUTATION OF TWO-DIMENSIONAL TIDAL WAVES AND THE ANALYSIS OF SEDIMENTATIONAL DISTRIBUTION IN HANGZHOU BAY

Xu Weiyi and Su Jilan

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou)

ABSTRACT

Prediction of depositional patterns in estuaries is of primary concern to coastal engineers planning major hydraulic works. For a well-mixed estuary where suspended load is the dominant transport mode, we propose to use the divergence of the distribution of the net suspended load to predict the depositional patterns. The method is applied to Hangzhou Bay, and the results agree well qualitatively with measured results while quantitatively they are also of the right order of magnitude.

The explicit finite scheme devised by Gray was used. In this scheme the Lagrangian quadratic isoparametric elements are used, and the Simpson's rule is used to evaluate integrals over these elements. The combinations of element type and numerical quadrature serves to greatly reduce the computational effort. The computational results agree well with the existing measured results.