

日照港工程对海水环境影响的数值预测*

吴永成 翁学传 杨玉玲

(中国科学院海洋研究所)

日照港位于山东省南部日照市石臼湾畔, 濒临南黄海, 港域开阔水深, 常年不冻, 又无淤积之患, 陆域西通中原和欧亚大陆, 是一个不可多得的天然良港。石臼湾水深由西向东逐渐加深, 离岸 3km 处的最大水深即达 10m 以上, 平均水深也在 6—8m 之间。湾内无大径流注入, 几条季节性小河兼作工业废水和生活污水的排放沟, 流量为 500t/d, 其中 COD 含量约为 100mg/L。

日照港始建于 1979 年, 一期工程由万平口向南, 建成开敞式深水栈桥煤炭专用码头。栈桥墩对海水动力条件改变很小, 所以对湾内海水物理自净能力的影响甚微。二期工程以后, 码头全选用重力式结构。正在建设中的东港区码头又位于石臼湾中间, 将海湾西部海岸与外海隔开, 破坏了原来湾内的海水动力环境、使石臼镇的工业废水和生活污水先排入港区, 再外排黄海, 污水在港池内滞留, 恶化了港区水质, 并造成湾西部水质质量下降。本文通过数值预测, 给出了日照港二期工程以后各建设阶段工程对湾内海水物理自净能力的影响和水质恶化程度。

一、现场水文调查和分析结果

在利用数学模型预测工程环境影响时, 除应建立正确的数学模型外, 边界条件的正确选择对计算结果的正确性也至关重要。为了保证计算结果正确, 必须对计算海域的水位、潮流和水质等作详细调查, 所得结果作为预测数学模型边界条件的依据和计算结果的验证资料。

海上调查于 1988 年 7 月 28 日至 8 月 31 日完成, 调查范围为 $119^{\circ}30'E-119^{\circ}35.5'E$, $35^{\circ}18'N-35^{\circ}23'N$ (见图 1)。调查共设 3 个水位站, 7 个海流站, 10 个水质站。水位调查中的 3 号站和 7 号站使用 AANDERAA 自记水位计分别测量 2 昼夜 (每 5 分钟记录一次); 8 号站选在煤码头堤头, 利用 SW-1 型水位计和水尺同时测量一个月 (每小时记录一次)。海流测量全部应用 HLJ-1 型印刷海流计, 每站至少测量 25 小时 (每 5 分钟记录一次)。7 个站的测流分两次完成, 每次至少有 3 站同步进行, 两次观测时间间隔不大于 2 天, 其中 6 号站连续观测 7 天。水质调查中进行了 10 个站的表层海水 COD 等

*中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2253 号。

参加本项调查工作的还有王从敏、张启龙、张以愚、傅聚照、潘海等。

收稿日期: 1991 年 11 月 1 日。

10 余种化学要素测量。

对所得全部调查结果,按海洋调查规范进行了分析。水位调和分析给出 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 、 MS_4 、 N_2 、 K_2 、 P_1 、 Q_1 、 M_0 等分潮的调和常数。分析结果表明,3个测站的

潮汐性质相同,均以半日潮为主, M_2 分潮最大,其次是 S_2 、 K_1 、 N_1 、 O_1 等分潮。3个站各分潮振幅差别不明显, M_2 分潮振幅差也只有 4—5cm,其中 3 号站最大, 8 号站最小。各站相位差别也不大, 3 号站为 195.2° , 7 号站为 202.1° , 8 号站为 197.0° , 说明 3 号站比其他两个站相位早 2° — 7° , 即潮时早 1.0—3.5min。

潮流调和分析指出,石臼湾内各站潮流类型系数均小于 0.5,说明潮流属正规半日潮流;石臼湾内潮流以往复流为主,并按逆时针方向旋转,主轴近似 NE—SW 向。

由于实测 7 个站的海流是分两次完成的,故在比较各站不同潮时流况时,我们首先依据同步测量的潮位对潮流加以

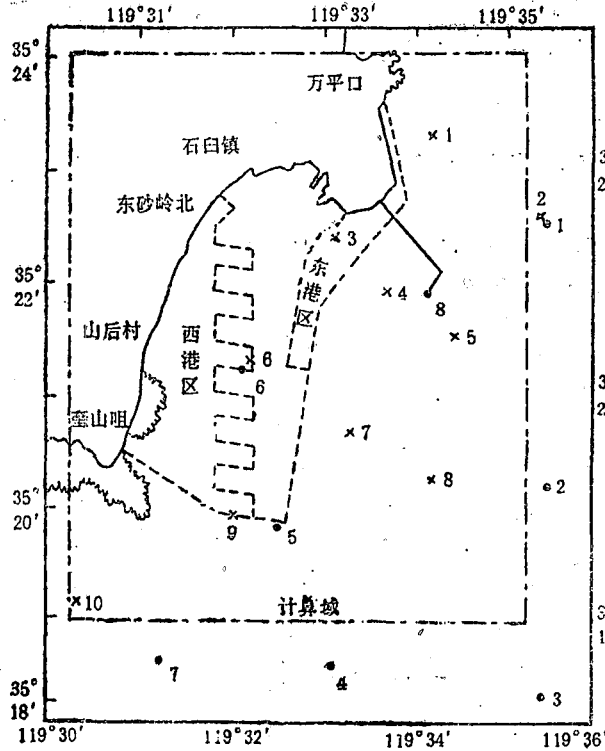
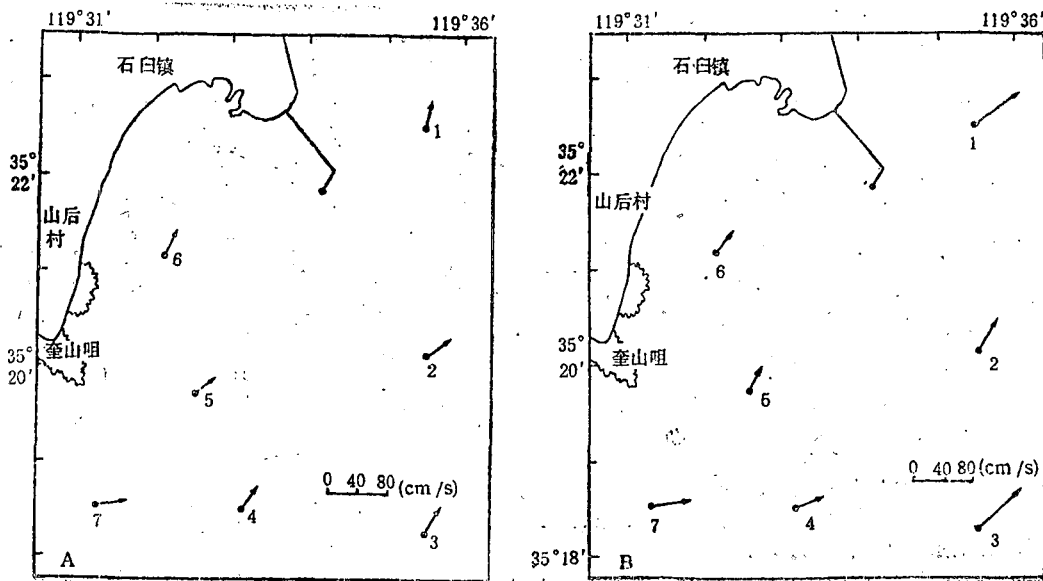


图 1 调查站位和计算域
×水位和潮流测站; ×水质测站



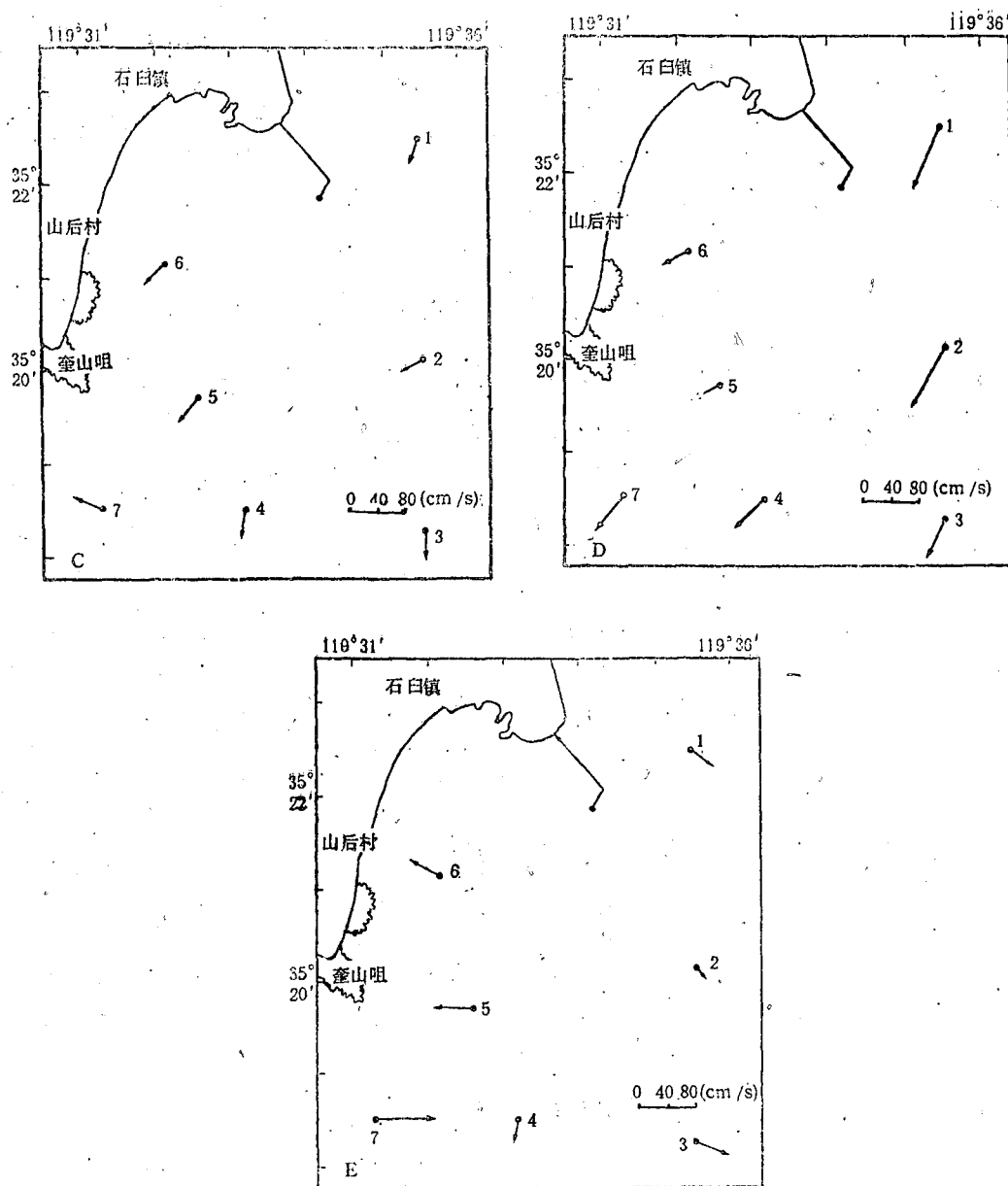


图2 实测潮流、余流场图

A. 高潮后 2 小时的潮流；B. 高潮后 4 小时的潮流；C. 低潮后 2 小时的潮流；
 D. 低潮后 4 小时的潮流；E. 余流；余流流速相应较小，图中比例尺：0, 40, 80
 (cm/s) 应改为 0, 10, 20 (cm/s)

订正, 得到各站相应潮时的潮流值, 再用所得结果绘出潮流图和余流图 (图 2)。由图可见, 落潮时, 1—6 号站潮流流向均为 NE 向, 只有 7 号站为 ENE 向; 流速以湾东侧的 1—3 号站为最大, 湾西侧 5, 6 两站最小, 4, 7 两站居中。涨潮时, 大部分站潮流流向与落潮时相反, 1—6 号站为 SW 向, 7 号站为 W 向; 流速依然是东部 3 个站大于其他各站, 其中 1 号站和 3 号站, 最大流速达 105 cm/s, 7 号站流速只有 28 cm/s。

余流分析结果表明,余流受地形影响明显,离岸较远站的余流流向指向湾外,1—3号站向SE,4号站向S,7号站向E。近岸站的余流流向指向湾内,5号和6号两站均向W。流速以7号站最大,达23.3cm/s,2号站最小,只有3.3cm/s。5、7两站流向相反,该两站附近海域有一小逆时针涡流区,不利于水中物质扩散,现场水质调查结果表明,该区COD浓度比周围偏高。

二、数学模型和计算参数

为了探讨日照港不同建设工程造成的海洋动力条件变化及其对海水中物质扩散的影响,我们对不同工期的潮流场和物质浓度场分别作了模拟或预测。

1. 基本方程

石臼湾内水深最大不超过15m,海水垂直混合较好,故本文使用J.J. Leendertse提出的数值模式(Leendertse, 1967; 王化桐等, 1980)对石臼湾潮流和物质扩散特性进行计算。

采用右手直角坐标系,平面XOY位于平均海平面上,Z轴垂直向上,根据海水受力情况,二维海水运动方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fu = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} (\tau_x^s - \tau_x^b) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} (\tau_y^s - \tau_y^b) \quad (2)$$

根据水量平衡原理,得水量连续方程为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

海水中物质浓度分布模型方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} \quad (4)$$

式中: ξ ——波动水面到平均海平面距离;

h ——平均海平面到海底距离;

H ——总水深, $H = \xi + h$;

u, v —— x, y 方向上的垂线平均速度;

$$u = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} u(z) dz$$

$$v = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} v(z) dz$$

t ——时间;

f ——柯氏系数, $f = 2\omega \sin \phi$;

ω ——地球自转角速度;

ϕ ——计算域的平均纬度;

τ_x^b, τ_y^b —— x, y 方向上海水对海底的摩擦力;

τ_x^s, τ_y^s —— x, y 方向上风对海面的摩擦力;

$$\tau_x^b = \frac{\rho g}{c^2} u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_y^b = \frac{\rho g}{c^2} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_x^s = \rho_a Y_a W^2 \cos \beta$$

$$\tau_y^s = \rho_a Y_a W^2 \sin \beta$$

ρ_a, ρ ——空气和水的密度;

Y_a ——风对海面的摩擦系数;

W ——风速;

β ——风向和 x 轴夹角;

c ——海底面摩擦系数, $c = \frac{H^{1/6}}{n}$;

n ——满宁系数;

C ——海水中物质的浓度;

E_x, E_y ——海水在 x, y 方向上的紊动扩散系数。

2. 计算域和输入条件

(1) 计算域: 本计算采用固定边界, 即海陆边界不随潮位涨落而变动。具体计算域见图 1。

(2) 输入条件: 水深依据日照港规划总图给出的水深值选取, 对不同工期的码头前沿和航道水深均假定为 10m。

强迫潮位是依据海上三个验潮站潮位记录调和分析得到的调和常数, 并考虑外海传来的潮波特征, 给出开边界上东北角、东南角和西南角三点调和常数; 开边界上其他点的调和常数由线性内插求出。虽然石臼湾为半日潮港、在本计算中, 我们对半日潮和全日潮同时加以考虑, 主要模拟了 M_2 、 S_2 、 O_1 和 K_1 四个分潮。

为方便计, 初始条件取 $t=0$ 时, 全域 $u=v=\xi=0$, $C=0.8\text{mg/L}$ 。

边界条件取垂直于闭边界的速度为零, 计算域外的浓度为常数。开边界处水位是已知时间函数。开边界的浓度处理较复杂, 作为潮位控制点上的边界浓度, 当潮流向湾外流时取计算值, 向湾内流时取某一控制值。

3. 计算参数

空间步长: 取 200m;

时间步长: 潮流计算时取 93.1509s, 扩散计算时取 372.6036s;

海面风应力: 取 $\tau_x^s = \tau_y^s = 0$;

满宁系数: $n=0.03$

扩散系数: 根据现场罗丹明-B 扩散实验和水动力条件分析, 本文采用下式:

$$E_x = 5.9 \sqrt{g H u / c},$$

$$E_y = 5.9 \sqrt{g H v / c};$$

排污口位置和 COD 排放量: 根据日照港规划方案, 沿岸污水排放口位于计算网格上的 (20, 36), (16, 37) 和 (7, 10) 三个点上, 各点的 COD 排放量随工期进展而异。

4. 方程求解方法

在上述参数和条件下, 采用目前隐式方向交替法 (ADI 法), 即可求得石臼湾潮流场和 COD 浓度场。

5. 模型验证

为了对所建立的石臼湾潮流和物质扩散模型的可靠程度进行判别, 我们根据 1988 年 7 月和 8 月现场实测的海流和 COD 资料进行验证。图 3 给出 (36, 34), (36, 3), (8, 3)

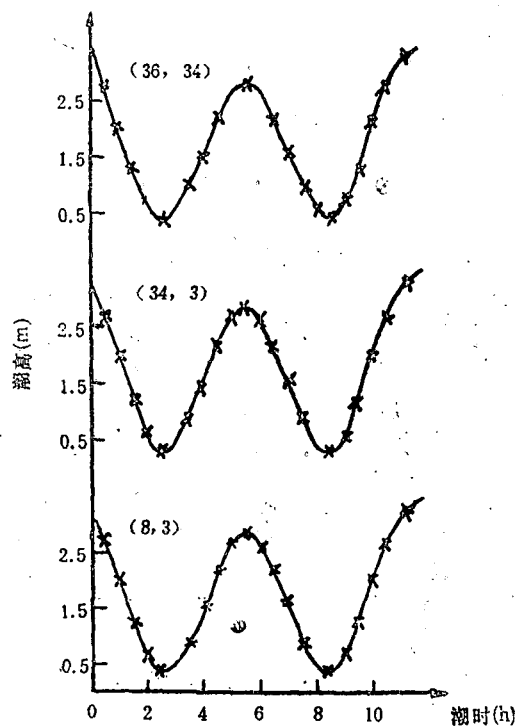


图 3 潮位过程线

三个点的水位的计算值和实测值比较, 图中曲线是计算值, X 点是实测值, 二者十分接近, 说明水位吻合很好。图 4 给出计算所得的每隔 6 小时的潮流矢量图, 矢量长度代表速度大小, 箭头指向表示流向。从图中可以看出, 涨潮流从 NE 向和 E 向流入湾内, 受地形影响转向 S, 流出湾外; 落潮流与涨潮流流况大致相反。潮流流速分布表现为愈往 NW 向, 流速愈小, 湾东北一带流速最大, 为 100cm/s 左右, 湾内石臼镇沿岸最

小，不超过 10cm/s ，另在奎山嘴东部形成一逆时针涡流区，直径约 800m 。潮流的计算结果与实测的潮流分布（见图 2）也很符合。图 5 是现状 COD 浓度分布模拟结果，它与现场调查的 COD 分布（图 6）也较一致。通过水位、潮流和 COD 浓度计算值与现场实测值的对比，两者吻合较好，因而完全可以认为所建立的数学模型和选择的计算参数是合理的。

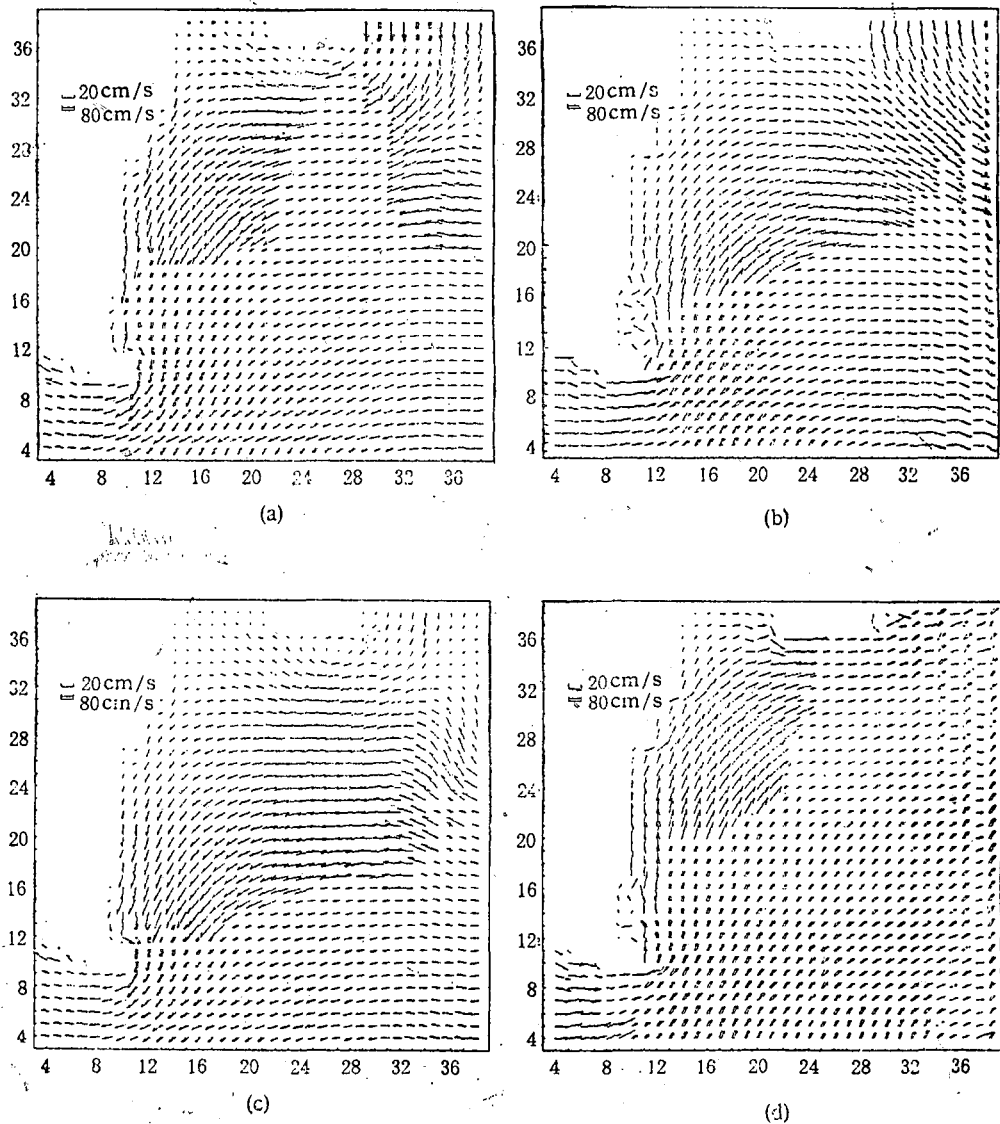


图 4 现状（一期工程建成后）的潮流场图

(a) 潮时 3; (b) 潮时 9; (c) 潮时 15; (d) 潮时 21

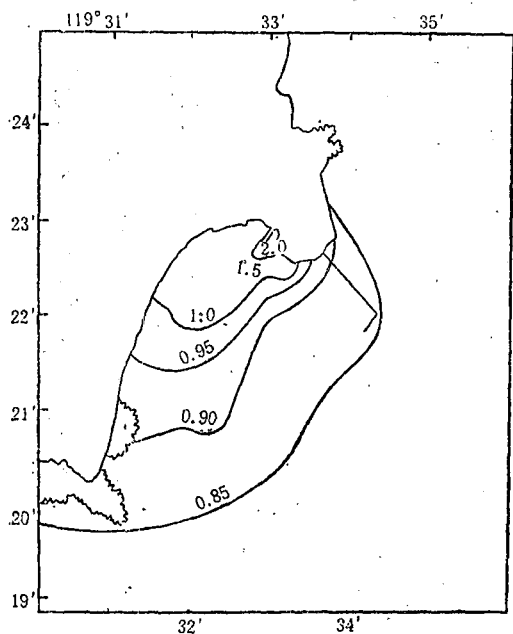


图5 石白湾的 COD 浓度分布
(mg/L, 计算)

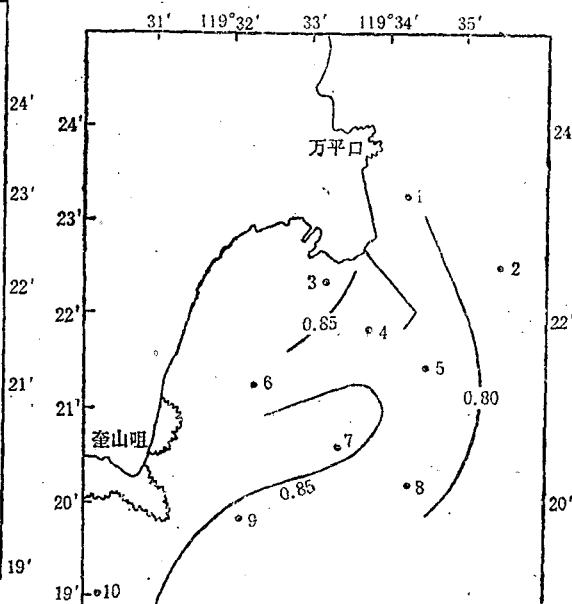


图6 现场实测的 COD
浓度分布图 (mg/L)

三、码头工程对海水环境影响的预测

日照港建设计划分四期完成, 第一期工程建栈桥式煤码头一座, 现已建成投入生产。第二期工程由石白嘴向西南建重力式杂货码头, 现已开工建设。第三和第四期工程由东砂岭北始向南直至奎山嘴, 沿石白湾西海岸建重力式梳状码头。从近年现场调查来看, 栈桥码头对石白湾内海水动力条件和物理自净能力影响很小, 故本次进行的预测主要是针对二期以后各工期的重力式码头对环境的影响。

1. 潮流场预测

数值计算得到的二、三、四期工程对石白湾内潮流影响的结果如图 7, 8, 9 所示。从图 7 中可见, 二期工程修建的东港区突堤码头改变了湾西北部海域的潮流流向, 降低了流速, 原来涨潮时直接由东向西流到石白镇沿岸的海水, 受突堤码头阻挡, 须绕过码头向北流才到达石白镇沿岸, 流速下降到 8cm/s 以下。再有, 涨潮流在码头头部两侧形成两个弱涡流区, 涡流尺度随潮时而异, 涡流区最大直径东侧约 1km, 西侧约 2km。

三期工程建成后, 由于石白湾西岸北段岸线建了 3 个梳状码头, 港池变小, 结果造成港内除航道流速稍有增加外, 其他水域的流速均比二期工程建成时进一步减小。东港区码头西侧的涡流区也南移, 范围变小 (见图 8)。四期工程除在三期工程南再建三个梳状码头外, 为增大港池稳定度在二期突堤码头南端建一防波堤, 结果形成港池只在南端留一 450m 宽的口门与外海相通。受梳状码头和窄小口门的影响, 港内流速变得更小,

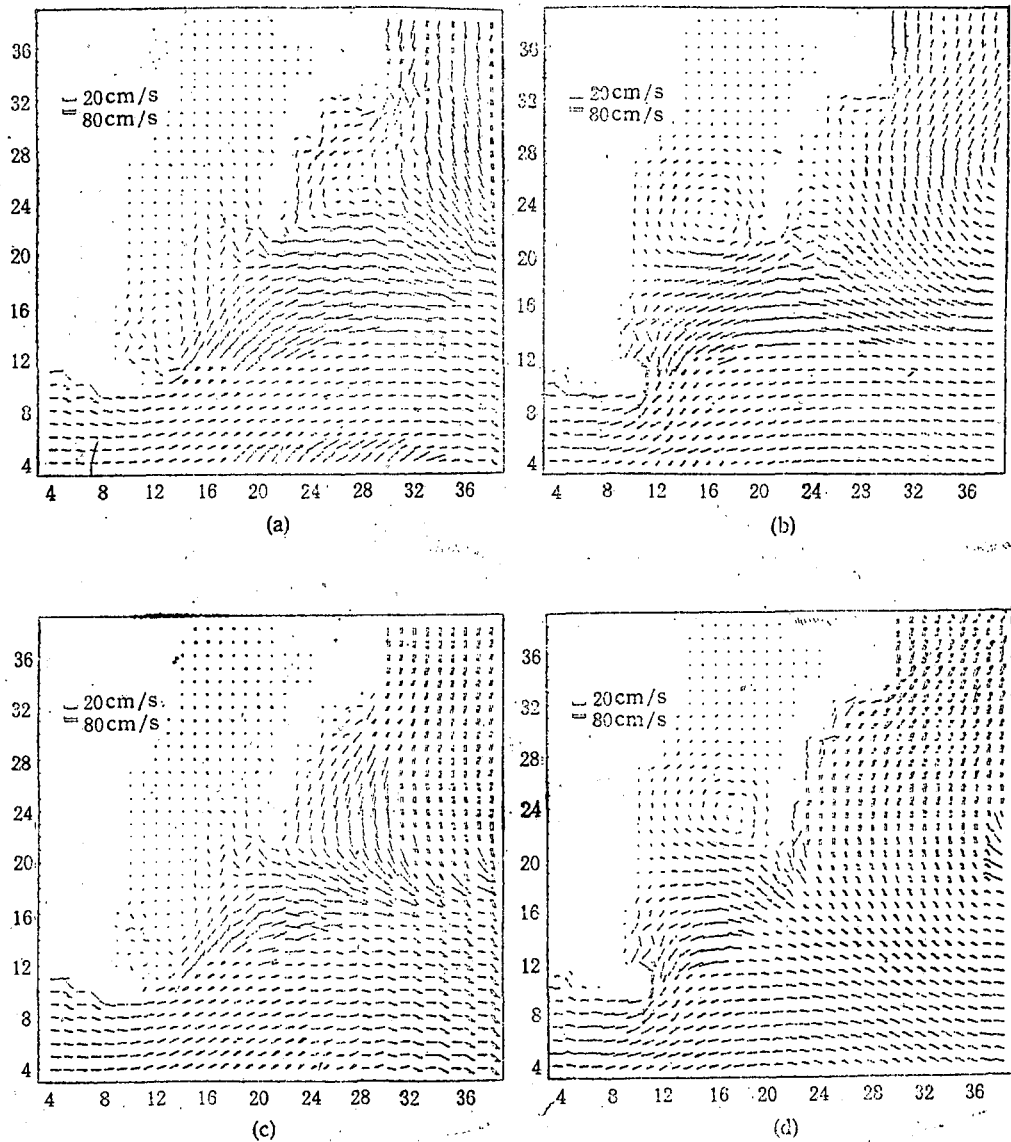


图7 二期工程建成后的潮流场图

(a) 潮时0; (b) 潮时6; (c) 潮时12; (d) 潮时18(图8, 9同)

流向混乱, 但口门通道外流速最大仍有 60cm/s (见图9)。

总的来说, 自二期工程建成后, 随港区条件的改变, 潮流流况也相应变化。原来湾内渔码头一带[计算点(19, 34)和(20, 35)], 流速最大值为 $17\text{--}20\text{cm/s}$, 二期工程建成后便下降为约 5cm/s , 减小了 $70\text{--}75\%$ 。石臼湾西侧中部[计算点(16, 25)], 原来最大流速为 26cm/s , 三期工程建成后降低到 8cm/s 。流向受码头影响更大, 原来湾内大部分水域流向为 NE—SW 向, 二期工程建设以后, 改变成 N—S 向; 四期工程建设

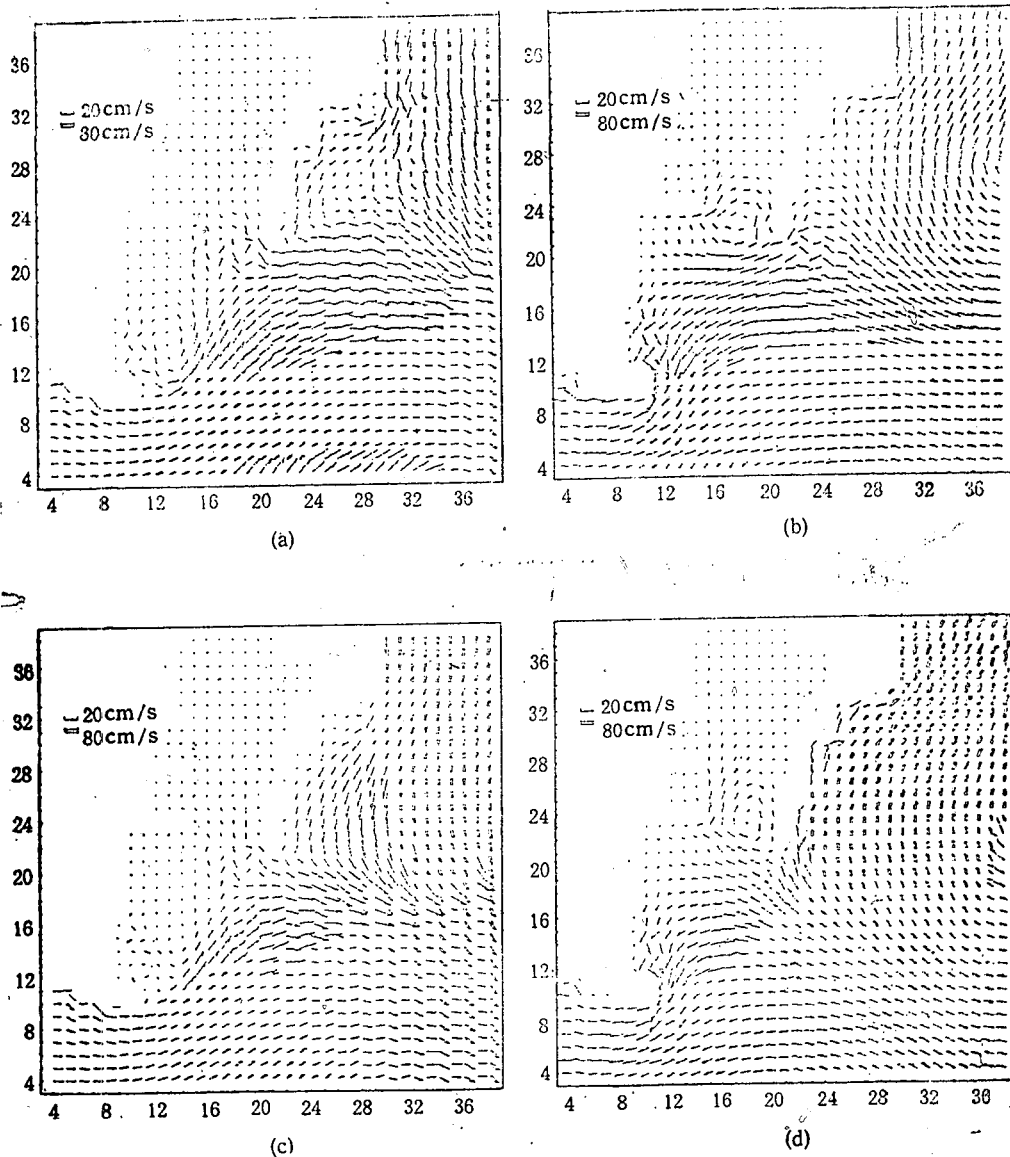


图8 三期工程建成后的潮流场图

后,东西两港区码头围成的港域内,因码头岸线各处不同、流向也各不一样。

2. COD 浓度场预测

图 10, 11, 12 是二、三、四期工程建成后的 COD 浓度场数值预测结果。从图 10 中可以看出,二期工程建成后,石臼镇沿岸水域的 COD 浓度大于 5mg/L , 超过国家规定的三类海水水质标准。在渔船码头和客运码头一带, COD 最大浓度甚至达到 15mg/L , 成为石臼湾水质污染最重区, 海水可能变黑和出现臭味。考虑城市工业的发展和居民的增加, 在三期工程的 COD 预测时, 在湾的西北角增设一新的污水排放口; 预测结果指出 (见图 11), 港池污水负荷量的增加, 造成石臼镇沿岸水质的更大超标, COD 浓度超过

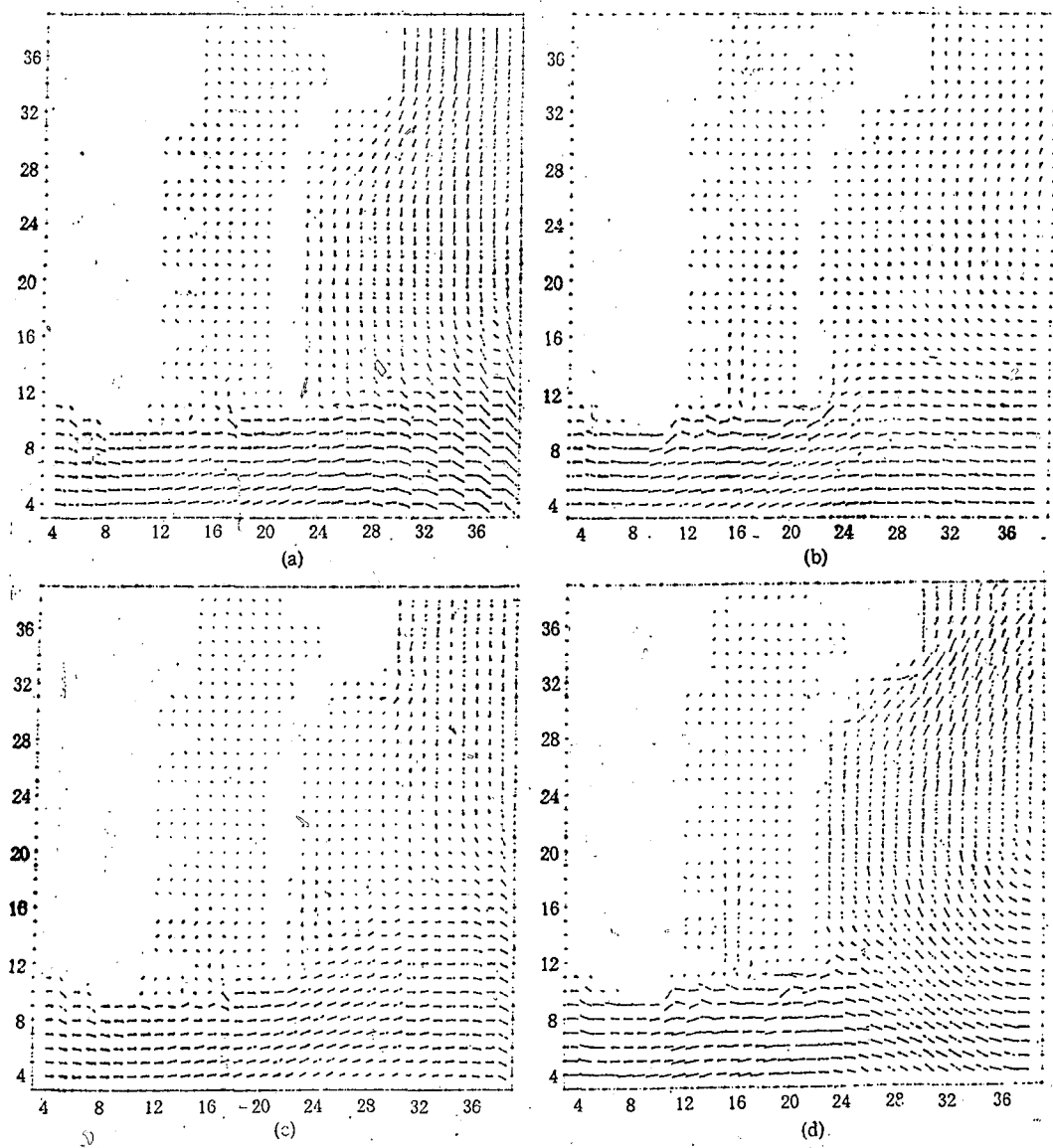


图9 四期工程建成后的潮流场图

10mg/L, 渔船码头一带水质更加恶化。四期工程建成后, 新港池内水质状况与三期工程建成后的状况相比, 只是在梳状码头根部出现污染加重, 其他水域变化较小。关于奎山嘴西新建电厂等的污水排放对港内水质的影响, 在四期工程环境影响的预测中作过考虑, 从预测结果来看 (见图 12), 认为影响不明显, 不构成威胁。

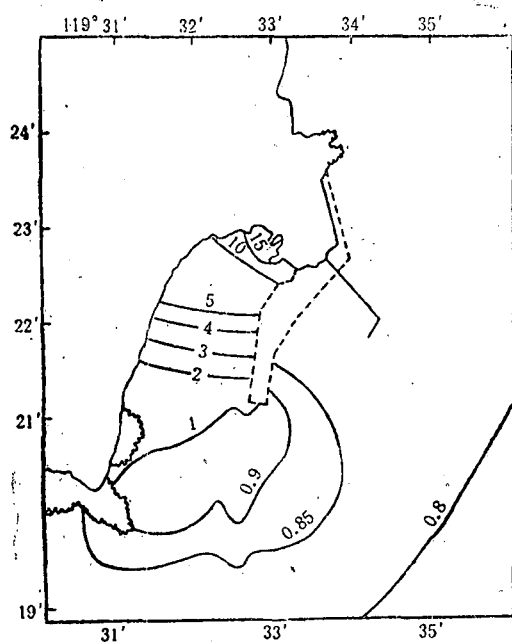


图 10 二期工程建成后的 COD 浓度图
(mg/L) (下同)

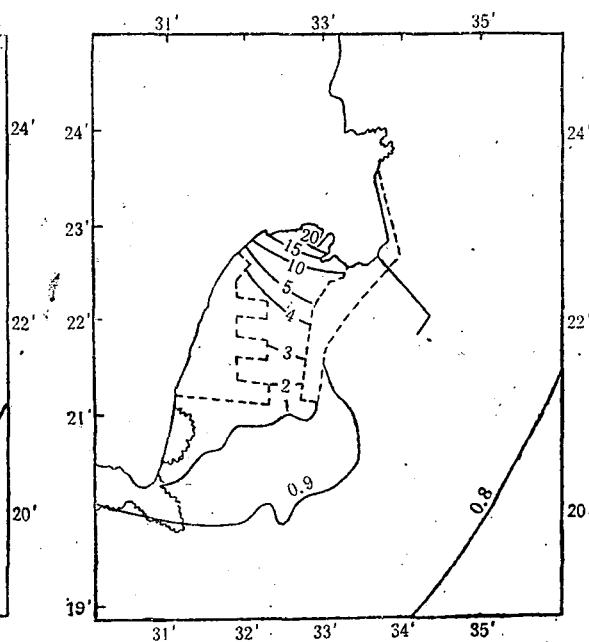


图 11 三期工程建成后的 COD 浓度图

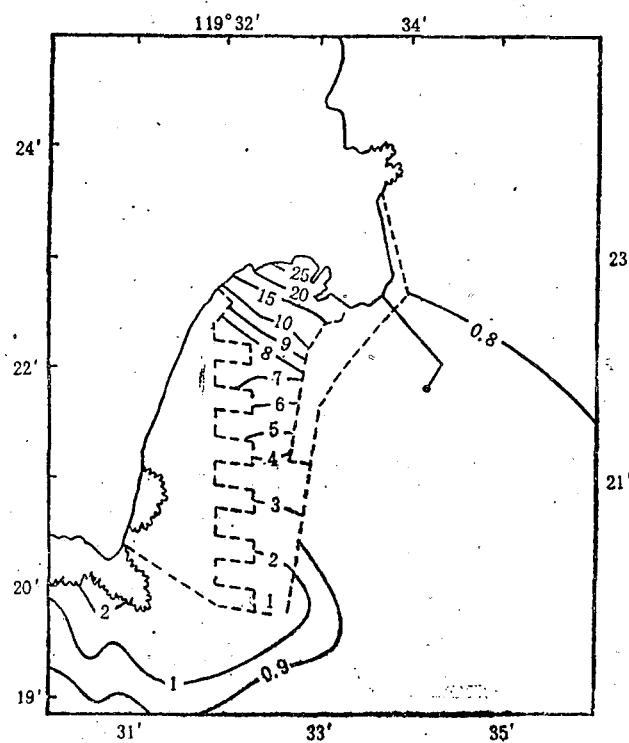


图 12 四期工程建成后的 COD 浓度图

四、结 论

本文通过对不同工期工程对海水环境影响的数值预测,得出以下结论:

1. 从潮流的预测结果来看,日照港工程自二期工程建设以后,将改变石臼湾内大部分水域的水动力环境,引起湾西部的潮流流速减小,流向改变,不利于湾内海水交换和更新。
2. 湾内中部建设重力式突堤码头除改变了湾内流况外,并在突堤码头南端形成两个弱涡流区,尽管涡流强度不大,但仍然会影响污水向外海扩散,不利于海水自净。
3. 从各工期 COD 浓度场预测结果来看,自二期工程建设开始,随着码头驳位的增多,石臼湾西部水域的潮流流速相应变小,海水物理自净能力下降,水质污染加重,个别水域出现超标,甚至达到不允许的程度。从这点讲,日照市城市规划中排污口的选设位置和日照港建设总体规划是不利于海水质量保护的,建议将城市污水排放口改设于港池之外。

参 考 文 献

- 王化桐、方欣华、匡国瑞、杨殿荣、陈时俊, 1980, 胶州湾环流和污染扩散的数值模拟 I. 胶州湾潮流数值计算, 山东海洋学院学报, 10(1): 26—63。
- Leendertse, J. J., 1967, Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation, RM-5294-PR, The Rand Corporation, 1-116.

NUMERICAL COMPUTATION OF EFFECTS OF ENGINEERING ON THE OCEANIC ENVIRONMENT IN RIZHAO HARBOUR*

Wu Yongcheng, Weng Xuechuan and Yang Yuling
(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

Abstract

After investigation and analysis of tidal current and COD in Shijiu Bay, the ADI method based on two-dimensional nonlinear tidal wave equations is used to simulate the space-time distribution of the tidal current and matter concentration fields there after the 1st Shijiu Harbour work is finished. Then the probable space-time variation of tidal current and matter concentration

* Contribution No. 2253 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.

caused by the 2nd to 4th harbour works are forecasted. The results show that the 2nd to 4th harbour works will greatly change the water dynamics of Rizhao Harbour, that with the extension of the mole and breakwater, the current direction along their respective two sides, and the tidal current speed, will be changed, and that eddies will occur around them. This will make the COD concentration increase rapidly along the coast of Shijiu, and water quality will worsen and not be up to the 3rd class seawater quality standard of our country.