

研究简报

长江口余流和盐度的二维数值计算*

于克俊

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

长江口是中国第一大河入海处, 其环境最显著的特点是因为长江入海径流而产生长江冲淡水、长江入海泥沙、入海营养盐和有机物等都有显著的季节变化。由于长江入海年径流量约为 9 千亿 m^3 。这样, 长江口外的余流和盐-淡水混合是引人注目的问题。国内许多学者对于这方面进行过调查和研究^[1-3]。其中长江口外关于夏季流轴和盐舌转向东北的原因, 迄今还没有取得一致的意见。本文利用 Liu 和 Leendertse^[4] 的二维非线性运动方程和盐度扩散方程的有限差分解法计算了长江口夏季和冬季的余流和盐度, 从而给出关于流轴和盐舌转向原因的一些定量解释。另外根据计算结果, 对长江冲淡水的物理机制也做了一些分析。最后粗略分析了长江三峡工程对长江口海区的余流和盐度分布的影响。

一、计算方法

1. 基本方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \alpha g(h + \zeta) \frac{\partial s}{\partial x} - A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{u(u^2 + v^2)^{1/2}}{(h + \zeta)c^2} + \frac{\tau_x}{\rho(h + \zeta)} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \alpha g(h + \zeta) \frac{\partial s}{\partial y} - A \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{v(u^2 + v^2)^{1/2}}{(h + \zeta)c^2} + \frac{\tau_y}{\rho(h + \zeta)} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \zeta)v] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial [(h + \zeta)s]}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)us]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)vs]}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[(h + \zeta)D^x \frac{\partial s}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[(h + \zeta)D^y \frac{\partial s}{\partial y} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha s) \quad (5)$$

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1477 号。本文是“长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究”项目下属三级课题的工作报告之一。工作得到方国洪、张法高、曹德明同志的帮助, 谨此致谢。
收稿日期: 1987 年 11 月 24 日。

$$D^x = 5.9(h + \zeta)|u|g^{1/2}/c \quad (6)$$

$$D^y = 5.9(h + \zeta)|v|g^{1/2}/c \quad (7)$$

其中, u, v 分别为 x, y 方向的速度分量; ζ 为水位; h 为水深; A 为侧向涡动粘性系数; D 为扩散系数; τ 为海面风应力; ρ 为海水密度; α 为水平斜压项系数; s 为盐度在水深的垂向平均量。 c 为 Chezy 系数。

方程(1)–(4)求解采用双时间层的有限差分法——ADI 法^[4], 在沿 x 方向求 $u-\zeta-s$ 场及沿 y 方向求 $v-\zeta-s$ 场时, 均采用隐式方程。

2. 初始条件和边界条件

初始条件为: $u = v = \zeta = s|_{t=0} = 0$

固体边界条件取垂直于边界的速度为零, 而 $\frac{\partial s}{\partial n} \Big|_{\text{固}} = 0$ 。

开边界的水位控制条件是:

$$\zeta = H_{m_1} \cos(\sigma_1 t - G_1) + H_{M_2} \cos(\sigma_2 t - G_2) + A_0$$

式中 H_{m_1}, H_{M_2} 分别为 $m_1(K_1, O_1$ 分潮的平均)分潮和 M_2 分潮的振幅; G_1, G_2 分别为 m_1 和 M_2 分潮的迟角; σ_1, σ_2 分别为 m_1, M_2 分潮的角速度; A_0 是由风和径流引起的海面平均高度, 这里是通过实验使长江口断面的径流量满足预定量值而确定 A_0 , 因此, 对于夏季和冬季的情况, A_0 取不同值; 开边界盐度当海水向本计算区域流入时取实测值, 当海水向本区域外流时则以网格的东边界为例由下式计算:

$$s_{i,j,n+\frac{1}{2}} = s_{i,j,n} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (s_{i,j,n} - s_{i-1,j,n}) u_{i-\frac{1}{2},j,n+\frac{1}{2}}$$

3. 参数选择

计算区域 $\Delta x = \Delta y = 5.5 \text{ km}$; $\Delta t = 310.51503 \text{ s}$; $c = 650$; $\alpha^{[5]} = 7.6 \times 10^{-4}$; $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$; $A = 60 \text{ m}^2/\text{s}$;

水深 h 取自 1977 年长江口至韭山列岛海图, 盐度实测值取国家海洋局的标准断面资料, 其中夏季取 1978 年 6—8 月实测资料的各层的平均值, 冬季取 1979 年 2 月资料。

二、计算结果

本文计算区域为 $30^\circ 50' - 32^\circ \text{N}$, $121^\circ 30' - 123^\circ \text{E}$ 。计算主要考虑了径流、风对余流和盐度分布的影响。夏季长江径流量取为 $45380.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 相当于 1956—1977 年长江口夏季径流量的平均情况; 冬季径流量取为 $13493.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 相当于长江径流量一月份的多年平均情况。

1. 余流分布

本文余流指径流、风海流、密度流和潮余流的相互迭加和相互作用的结果。研究的主要目的是风对余流的影响。这样, 从计算无风、南风、北风条件下的余流场来进行分析。

(1) 无风情况

图 1 是仅考虑了长江夏季径流量, 而不考虑风的余流分布。可以看出崇明岛以南长江南支的余流, 由于长兴岛和横沙岛的分割分为两股, 一支经北港过了横沙岛向东北方向流去; 另一支经南港流出长江口后则向西南方向流去。崇明岛以北长江北支的余流在流

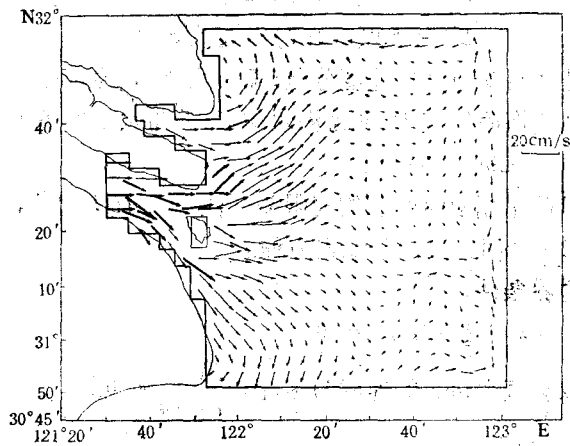


图1 不考虑风的余流分布

Fig. 1 Distributions of residual current without wind effect

出入海口后向东北和西北方向流去。

(2) 南风 and 北风条件下的余流分布

图2的余流分布基本上代表了长江口附近的夏季余流情况。与图1相比较可以看出,长江口内河段中的余流没有什么变化,而长江口外附近的余流受风的影响十分明显,余流的强度不仅增加而且方向改变了。从图2看出,除了自长江北支出来有小股余流流向西北外,其余都流向东北方向。受影响变化最大的是经长江南港入海的一支余流,这支余流在横沙岛以南流向东南,入海后转向东,在122°10'E附近又转向东北方向。我们还计算了风应力 $0.5 \times 10^{-5} \text{N/cm}^2$ 的情况(图略),转向是在122°20'E附近,可见夏季余流转向东北方向与风的方向和强弱有十分密切关系。

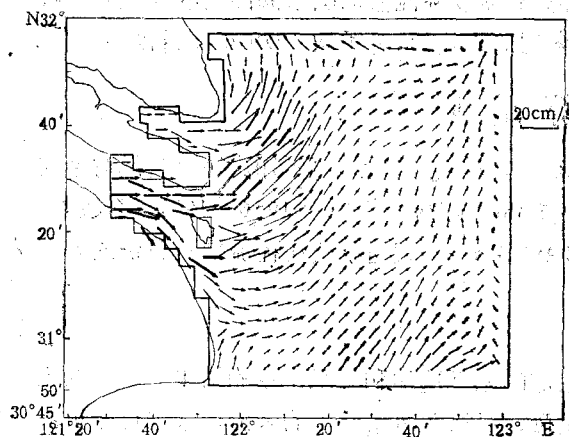


图2 风应力为 10^{-5}N/cm^2 , 方向 360° 的夏季余流分布

Fig. 2 Distributions of residual current in Summer (wind stress = 10^{-5}N/cm^2 , direction 360°)

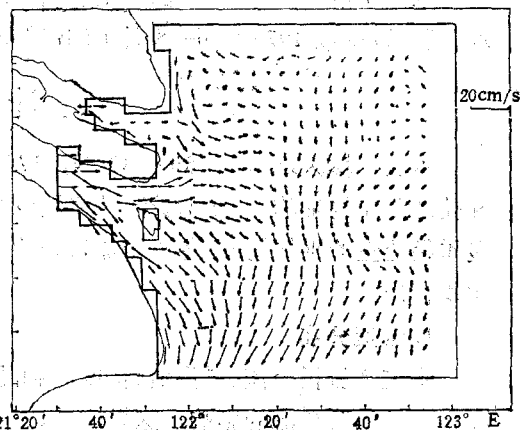


图3 风应力为 10^{-5}N/cm^2 , 方向 180° 的冬季余流分布

Fig. 3 Distributions of residual current in Winter (wind stress = 10^{-5}N/cm^2 , direction 180°)

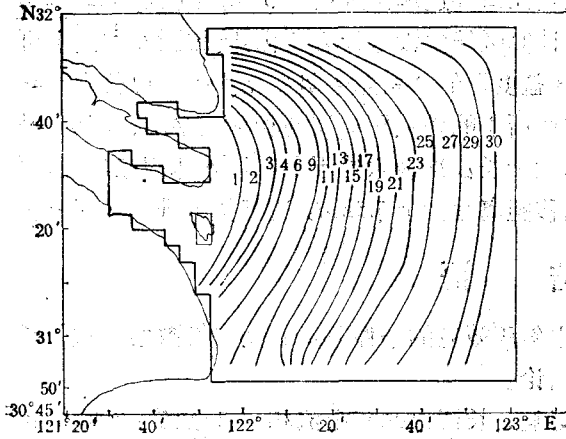


图 4 夏季盐度分布

Fig. 4 Distributions of salinity in Summer

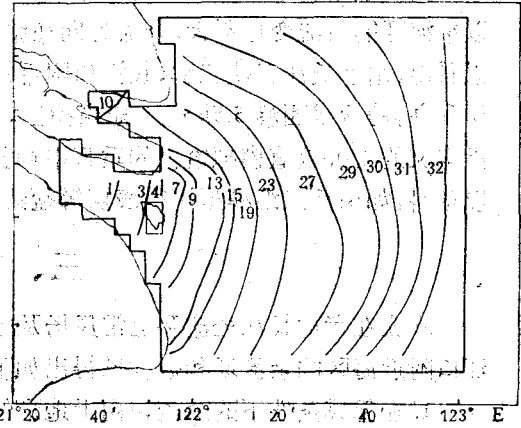


图 5 冬季盐度分布

Fig. 5 Distributions of salinity in Winter

图 3 是以长江冬季的径流量和北风为条件的余流分布，可以看出长江口外附近的余流在北风的作用下，余流方向是东南和南最后转向西南。

由上述可见，长江口内河道中的余流强弱取决于长江径流量的大小，而方向取决于地形分布，受风的影响不大；长江口外近岸海区的余流受长江径流和风的共同影响；长江口外远海的余流受长江径流影响小，受风的影响大。

2. 盐度分布

影响长江口附近海域的盐度扩散的因子主要是长江径流、海区的潮流和海流，风通过海流而对盐度扩散产生影响。本文计算了在上述因子影响下夏季和冬季的盐度扩散。

从图 4 可以看出，夏季由于长江有大量淡水入海的冲稀作用，长江口附近盐度很低，低盐水舌向东北方向伸展，盐舌伸展的方向和余流方向一致；由图 5 所示，冬季盐度远高于夏季盐度，冬季低盐舌指向东南方向，而低盐范围比夏季的大大地缩小，这是由于冬季长江径流量只有夏季的三分之一的缘故。盐舌伸展方向也与冬季余流分布趋势相一致。

3. 长江三峡工程对余流场和盐度场的影响

为了分析长江三峡工程对长江口附近海区的余流和盐度分布的影响，这里计算了将夏季长江径流量缩减五分之一，其他条件不变的情况下的余流场和盐度场。结果表明：长

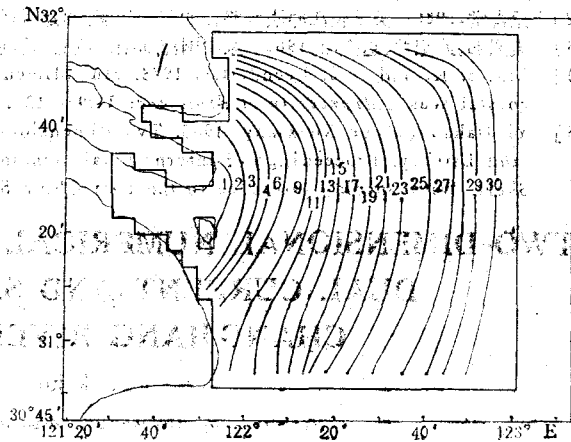


图 6 夏季长江径流缩减 1/5 时的盐度分布

Fig. 6 Distributions of salinity after the reduction of discharge of the Changjiang River by one fifth in Summer

江口内河道中的余流减少了约为 6cm/s, 在长江口外近岸海区约为 3cm/s, 而在 122°10'E 以东海区的余流变化不大, 余流方向在整个计算区域内没有什么变化。比较图 6 和图 4 可以看出, 由于长江三峡工程, 长江口附近海区盐度场的分布总趋势变化不大, 但盐度值有所升高, 等盐线西移 5.5km。应当指出, 这里所说的垂直平均流场和垂直平均盐度场, 是指本文的二维数值模拟给出的垂直平均值, 由于长江冲淡水处于上层, 水体明显层化, 可以预料, 如果用三维模型可得表层等盐线西移距离远大于 5.5km, 这有待于进一步研究。

三、结 语

本文在考虑长江径流和定常风场及水平斜压效应的条件下, 利用二维数值模拟了长江口附近海区的余流场和盐度场得出如下结论。

1. 在无风条件下的余流, 由于地形的影响, 长江口北支余流和北港余流由东转向东北; 南港余流则指向东南再转向西南。在有风的作用下, 夏季由于南风的影响, 南港余流入海后由东转向东北; 冬季由北风作用, 长江口海域余流指向东南再转向西南; 2. 盐度分布总趋势与余流方向一致; 夏季低盐舌偏向东北, 冬季偏向东南; 3. 夏季径流量缩减五分之一时, 长江口附近的等盐线西移约为 5.5km。

参 考 文 献

- [1] 毛汉礼、甘子钧、蓝淑芳, 1963. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨. 海洋与湖沼 5(3): 183—206.
- [2] 乐肯堂, 1986. 关于长江冲淡水路径的若干问题. 海洋科学集刊 27: 221—228.
- [3] 袁耀初、苏纪兰、赵金山, 1982. 东中国海陆架海流的单层模式. 海洋学报 4(1): 1—9.
- [4] Liu, S. K. and J. J. Leendertse, 1978. Multidimensional numerical modeling of estuaries and coastal seas. *Advances in Hydroscience* 11:95—123.
- [5] Yi Jiahao and Ye Xuexiang, 1983. Two-dimensional salinity distribution model in the Changjiang Estuary. *Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, With Special Reference to the East China Sea*. China Ocean Press, 156—165.

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL CALCULATION OF RESIDUAL CURRENT AND SALINITY AT THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY*

Yu kejun

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

ABSTRACT

The distributions of residual current and salinity at the Changjiang River Estuary were computed for summer and winter by using finite-difference method based on two-dimensional nonlinear equation of motion and salinity diffusion equation. The results show that residual current flow northeastward because of influence of south wind in summer, but, in winter, they flow southwestward or southeastward because of influence of north wind. The distribution of salinity corresponds to that of residual currents. Salt tongue tends to be northeastward in summer, but southeastward in winter. Besides, the distributions of isohaline outside of the Changjiang River Estuary were usually westward as a result of less discharge during the winter season. According to those analyses above, author also roughly predicted the possible effects of the Three Gorges project.

*Contribution No.1477 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.