

珠江河口海区潮流的数值模拟*

韩保新 郭振仁 先开康

于宾 黄方

(国家环保局华南环境科学研究所, 广州 510655)

(国家海洋局南海分局, 广州 510300)

摘要 应用 ADI 法首次对整个珠江河口海区的潮汐和潮流进行了数值模拟。与实测值相比, 潮位、潮流场、余流场和八大河口门潮量等的模拟计算结果令人满意; 还计算了拉格朗日余流场和拉格朗日标识质点运动轨迹, 并对此进行了探讨。

关键词 珠江口 潮流数学模型 拉格朗日

珠江口为世界少数复杂而又特殊的河口之一, 对它的研究历来是各学科的热点。过去曾有许多学者对珠江口的潮汐和潮流进行过分析, 但这些分析均是以实测资料为基础的特征分析^[1-3], 而未从数值计算的角度出发对珠江口进行研究, 本文系这方面的报告, 为珠江口水环境容量的研究打下了基础。

一、数学模拟方法

1. 基本方程组

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

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

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

式中, u, v 分别为 x, y 方向的速度分量; ζ 为水位, h 为水深, $H = h + \zeta$; ρ 为海水密度; f 为 coriolis 参数; c 为 Chezy 系数, 糙率 n 取 0.020—0.026; Al 为侧向涡动粘性系数, 本海区取 300; τ 为海面风应力。

方程 (1)–(3) 求解采用双时间层的有限差分方法——ADI 法^[4,6]。

2. 计算网格空间步长 $\Delta x = \Delta y = 2000\text{m}$, 时间步长 $\Delta t = 100\text{s}$

为能正确重现外海边界不同潮型的变化, 本文用调和分析方法分析了设在外海开边

* 此文为“七五”攻关项目“珠江河口海区水环境容量及功能区划分”课题的部分内容。
接受日期: 1991 年 7 月 21 日。

界上铜鼓、青栏头、高栏岛外、大万山、担杆尾、担杆头和香港横澜等 7 处的短期同步观测潮位资料,并选取 $O_1, M_1, P_1, K_1, J_1, OO_1, M_2, L_2, S_2, K_2, M_4, MS_4, M_m, Msf$ 等 14 个分潮作为外海开边界的控制水位。为避免由于径流和浅水效应、岸界反射等所致的河口潮波变形,采用八大河口门的实测水位作为内陆河口的控制水位。

3. 拉格朗日流场模拟方法

设以 $U_E[xi(t), t]$ 表示第 i 个海水微元的欧拉速度,当 Δt 足够小,由泰勒级数逼近,并忽略 Δx^2 以上项,则该微元从 t_{N-1} 时刻到 t_N 时刻的位置改变可用下式确定^[5,7]:

$$xi(t_N) = xi(t_{N-1}) + \int_{t_{N-1}}^{t_N} \left\{ U_E[xi(t_{N-1}), t] + \int_{t_{N-1}}^{t_N} U_E[xi(t_{N-1}), t'] dt' \nabla_H U_E[xi(t_{N-1}), t] \right\} dt \quad (4)$$

由 (1.4) 可计算一个昼夜的拉格朗日(简称拉氏)漂移 $x_{Li}(t)$ 和拉氏速度 $U_{Li}(t)$, 即:

$$U_{Li}(t) = x_{Li}(t)/TL = [xi(tm) - xi(to)]/TL \quad (5)$$

式中, TL 为一个太阳日; tm, to 为一个太阳日的终了和开始时刻。

二、模拟结果的验证

在珠江口伶仃洋的九洲港、舢舨洲和赤湾, 实测潮位与计算潮位吻合良好, 除位相几乎一致外, 其绝对误差一般都小于 7cm(图 1)。

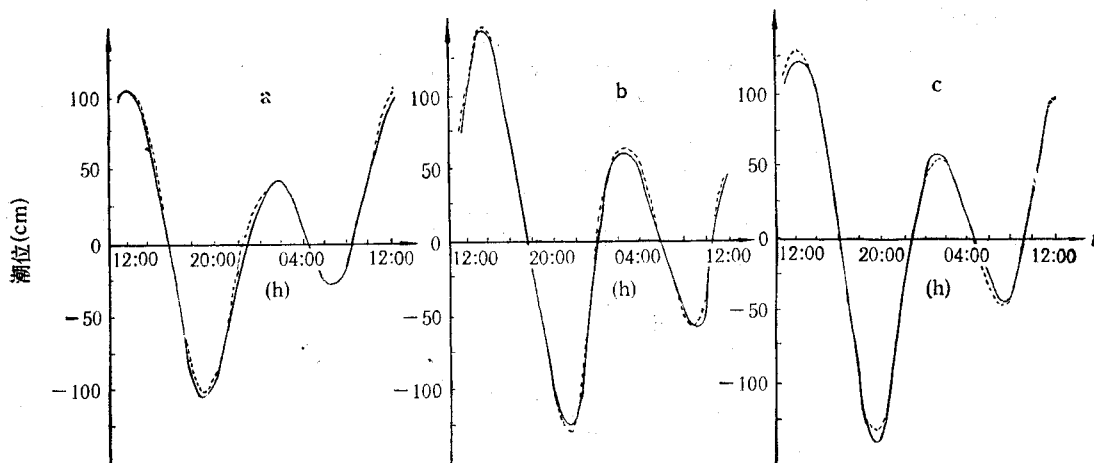


图 1 珠江河口海区实测潮位与计算潮位曲线

Fig. 1 Observed and computed tidal level in Pearl River Estuary

a. 九洲港; b. 舢舨洲; c. 赤湾。---实测潮位; ——计算潮位。

经与南海海洋调查技术中心 10 余年来在珠江口实测的余流对比, 模拟的余流场较有代表性。表 1 为 1989 年 7 月 22—23 日计算余流与同步实测余流比较。由表 1 可知, 计算余流量值除在高栏岛外稍大外, 其余基本一致, 计算余流方向也与实测余流的总体方向一致。

本次计算的八大口门净泄量为 $96490.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 很接近历年实测的丰水期净泄

表 1 实测余流与计算余流

Tab. 1 Observed and computed residual currents

站 位	实 测 值		计 算 值	
	流 速 (cm/s)	流 向 (°)	流 速 (cm/s)	流 向 (°)
ID (赤湾)	2.6	229	3	103
IC (担杆)	9.7	69	8	85
IB (高栏)	7.8	251	16	267

表 2 珠江口八大口门丰水期净泄量 ($10^4\text{m}^3/\text{d}$)

Tab. 2 The net flows of the eight mouths of the Zhujiang River Estuary in the flood period

口 门	虎 门	蕉 门	洪奇沥	横 门	磨刀门	鸡啼门	虎跳门	崖 门	合 计
实 测	23695.6	22722.8	8756.7	14832.8	37161.7	8301.6	8362.2	6916.7	110759.7
百分比	18.12	17.38	6.7	11.34	28.42	6.36	6.40	5.29	100.0
计 算	23926.5	21285.3	9029.5	14908.7	37231.2	8275.9	8451.1	6836.2	96490.5
百分比	18.41	16.38	6.95	11.47	28.65	6.37	6.50	5.26	100.0

量^[3],而且各口门所占的百分比也较一致(见表 2)。

三、流场的数值分析

1. 计算流场时空变化规律

潮周期内各时刻、各区域的流态相差甚大,一般在外海的大万山、担杆一带落潮(或涨潮)2小时以后,最北处的舢舨洲才开始落潮(或涨潮)。在内伶仃水域,流速度值比其它水域要大,在崖门口、虎门口、蕉门口和磨刀门口等河口处,最大落潮流速可达 1.5m,同时在大濠岛—香港陆界之间也有流速大值出现。从整个流场大小来看,落潮流速一般比涨潮流速大 1/3 左右。

落潮时的主要流态,在内伶仃潮流以南向为主;在桂山岛以北潮流朝南及西南向。在大万山岛两侧,当为高高潮—低低潮时(图 2a),表现为偏东向的朝南流,并在担杆—香港之间自西向东流出;当为低高潮—高低潮时(图 2b),在大万山以东为朝东向落潮流,在大万山以西,呈西或西南向流。值得注意的是,在高低潮附近,东部的担杆头—香港开边界有香港一侧进,担杆头一侧出之流态出现(图略)。

涨潮时的主要流态与落潮时的流态基本相反(图 3)。在内伶仃水域为朝北向流,在大万山附近及以东外海表现为朝北向流,在大万山以西为自东向西或自东向西北向流。在东部开边界,当在低高潮附近时,有担杆头一侧进、香港岛一侧出的流态(图略);而在高高潮附近时,则有香港一侧进、担杆头一侧出的流态出现(图略)。

2. 欧拉余流特征

珠江口的余流(图 4)在各河口附近出现最大值,如磨刀门口、横门口和崖门口等余流可达 30—40cm/s。在内伶仃余流值分布为 3—26cm/s,从横门、洪奇沥和蕉门的来水使

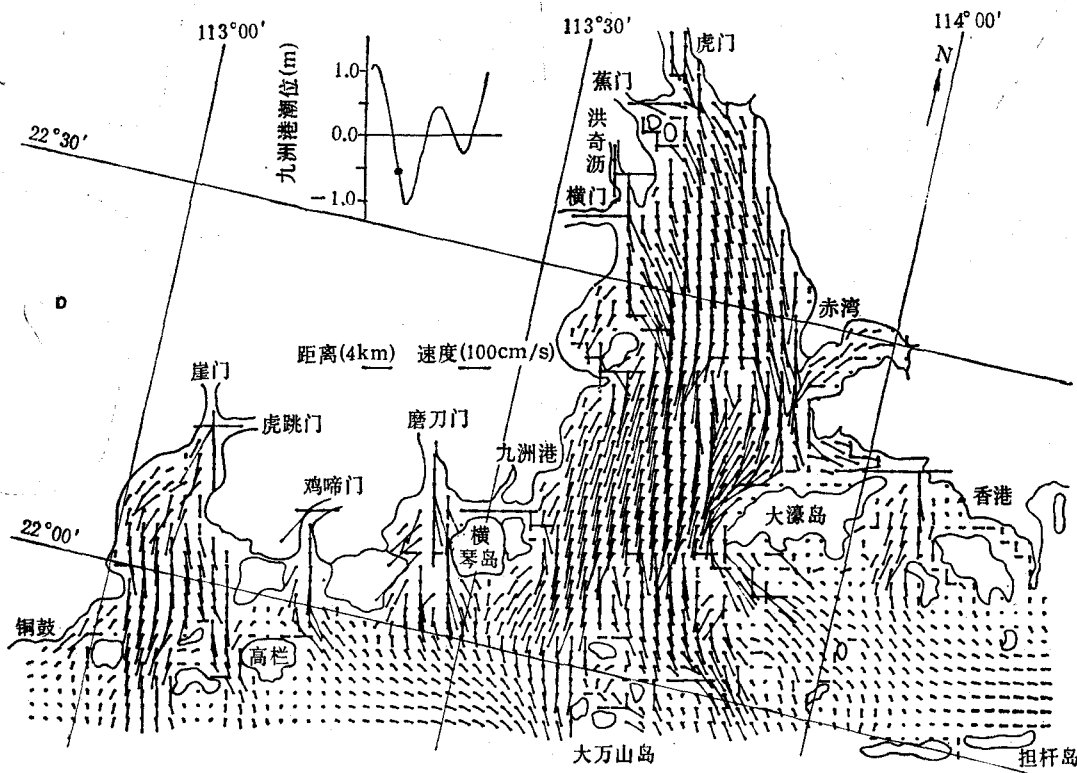
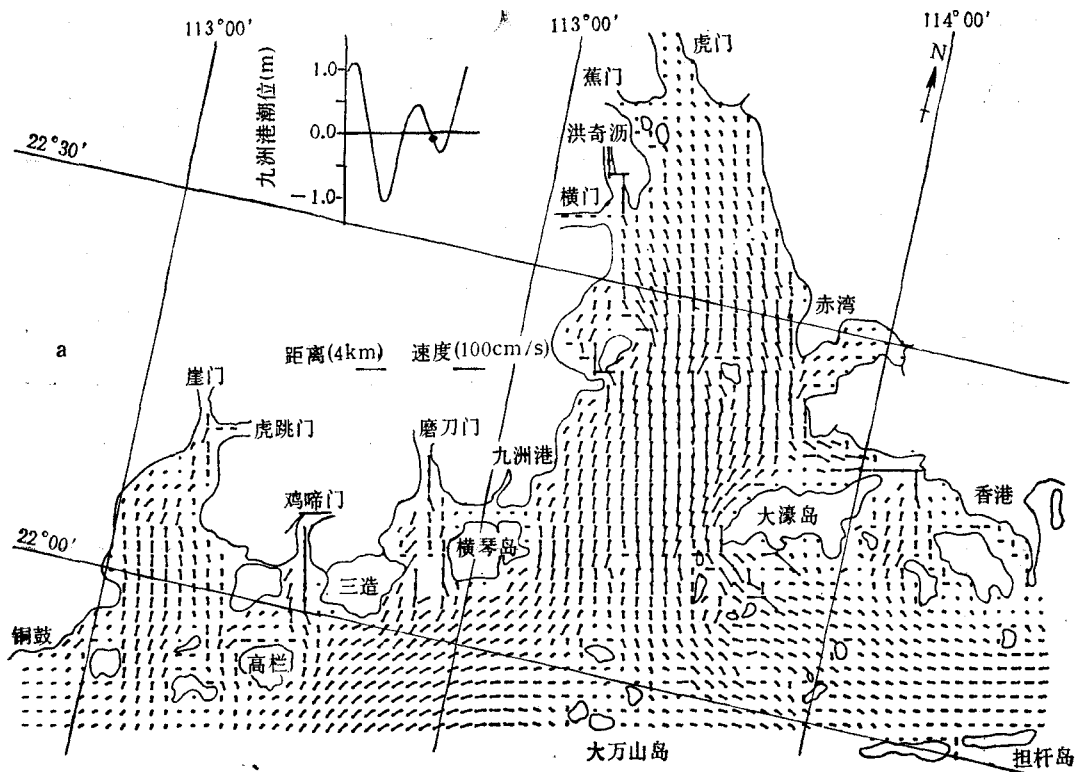


图2 珠江口计算落潮流场

Fig. 2 Computed ebb tidal current fields in the Zhujiang River Estuary

a. 22日, 17:00; b. 23日, 05:00.

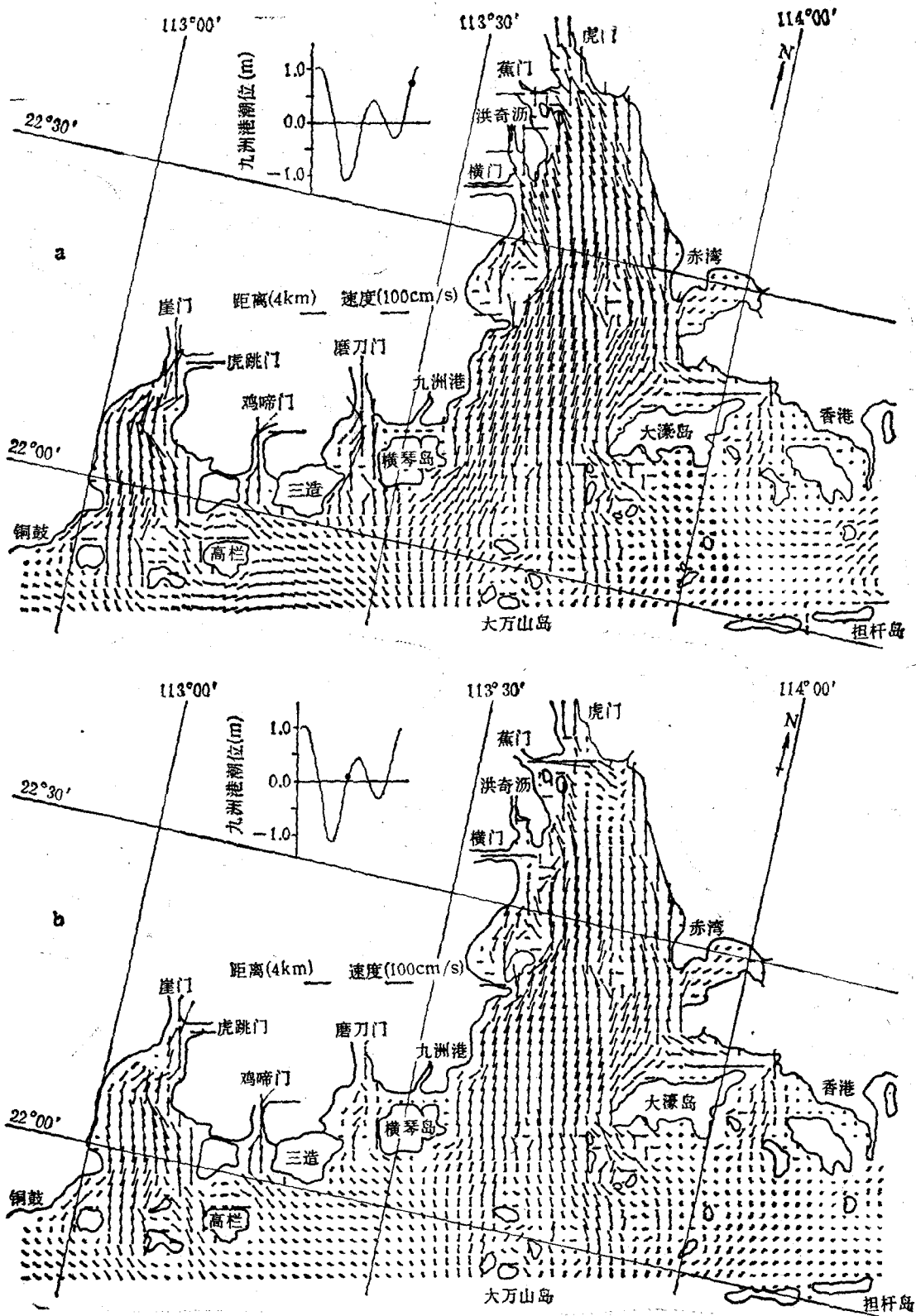


图3 珠江口计算涨潮流场
 Fig. 3 Computed flood tidal current fields in the Zhujiang River Estuary
 a. 22日, 23:00; b. 23日, 11:00.

内伶仃西部余流呈自西北往东南向,而从虎门的来水则由于地形和科氏力等的作用朝南向流,且随着流程的不断加长,至内伶仃岛时其流向已明显由偏东转向偏西。与以往的现场观测一样,在内伶仃岛以南存在一顺时针向小余环流,在淇澳岛附近也出现上溯的余环流。在珠海市近岸一侧一般表现为较弱的余流,量值为 $1-6\text{cm/s}$;在大濠岛和香港之间的急水门,表现为自伶仃洋暗士顿水道流向香港水域,再从香港岛水域向东南流出外海。在大万山岛和桂山岛一线以东水域,余流呈自西向东流,量值约为 $2-14\text{cm/s}$,且在桂山岛附近有一逆时针向小余环流。在大万山岛至大横琴一线以西,余流朝西和西南向流,流速量值较大万山东部的为大,一般可达 $8-17\text{cm/s}$ 。

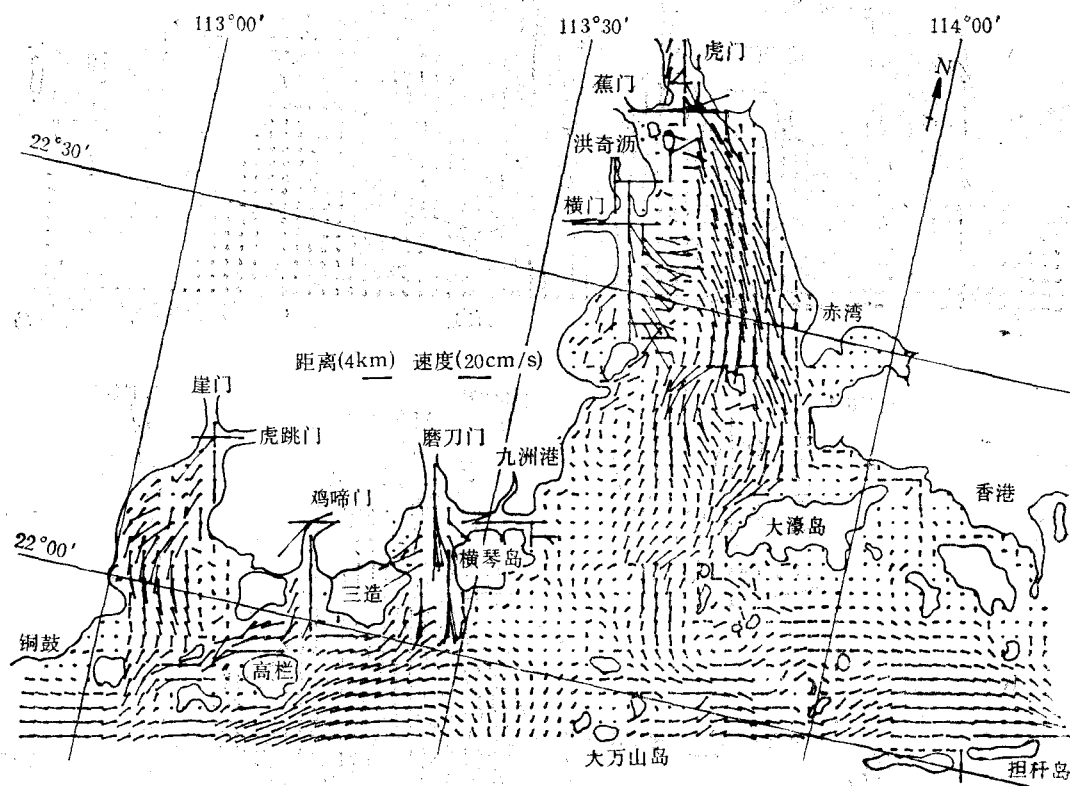


图4 珠江口计算欧拉余流场(1989年7月22—23日)

Fig. 4 Computed Eulerian residual current field in the Zhujiang River Estuary (1989. 7. 22—23)

3. 拉格朗日余流与海域水交换程度的区别

由于拉氏余流可表示污染物输运的速度和方向,所以可借此划分海域水交换的活跃程度。作者选择了高高潮、低低潮、低高潮和高低潮等四个不同起始时刻计算了拉格朗日余流场,鉴于篇幅所限,本文仅列出其中二个代表时刻起算的结果(图5)。计算结果表明,不同时刻起算的情况大致相同。与欧拉余流相比,其分布特征也大体相似,但在内伶仃和黄茅海等地拉氏余流相对较弱;而在磨刀门口及高栏岛以东,拉氏余流相对较强。在深圳湾口,拉氏余流在高高潮时起算较大,且均指向湾外。在伶仃洋西部水域,即横门和洪奇沥出海口外,有一约 $60-70\text{km}$ 的顺时针向环流,量值最大可达 $10-13\text{cm/s}$ 。在伶仃洋西

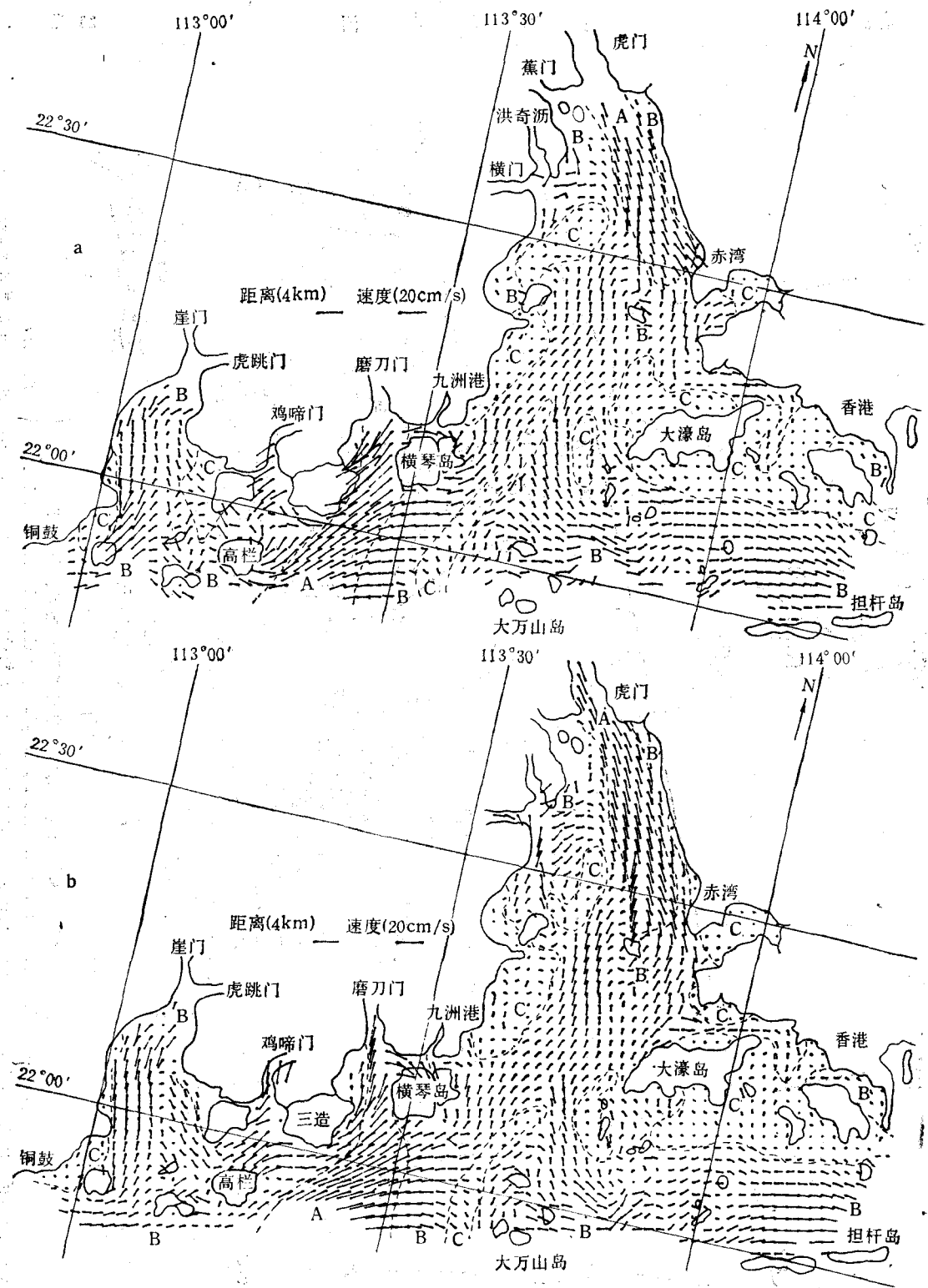


图5 拉格朗日余流场及水交换程度分区

Fig. 5 Lagrangian residual current field and the regional division of the extent of water exchange
 a. 高高潮时始算; b. 低低潮时始算。分区线: A水交换活跃区; B水交换良好区; C水交换滞换区。

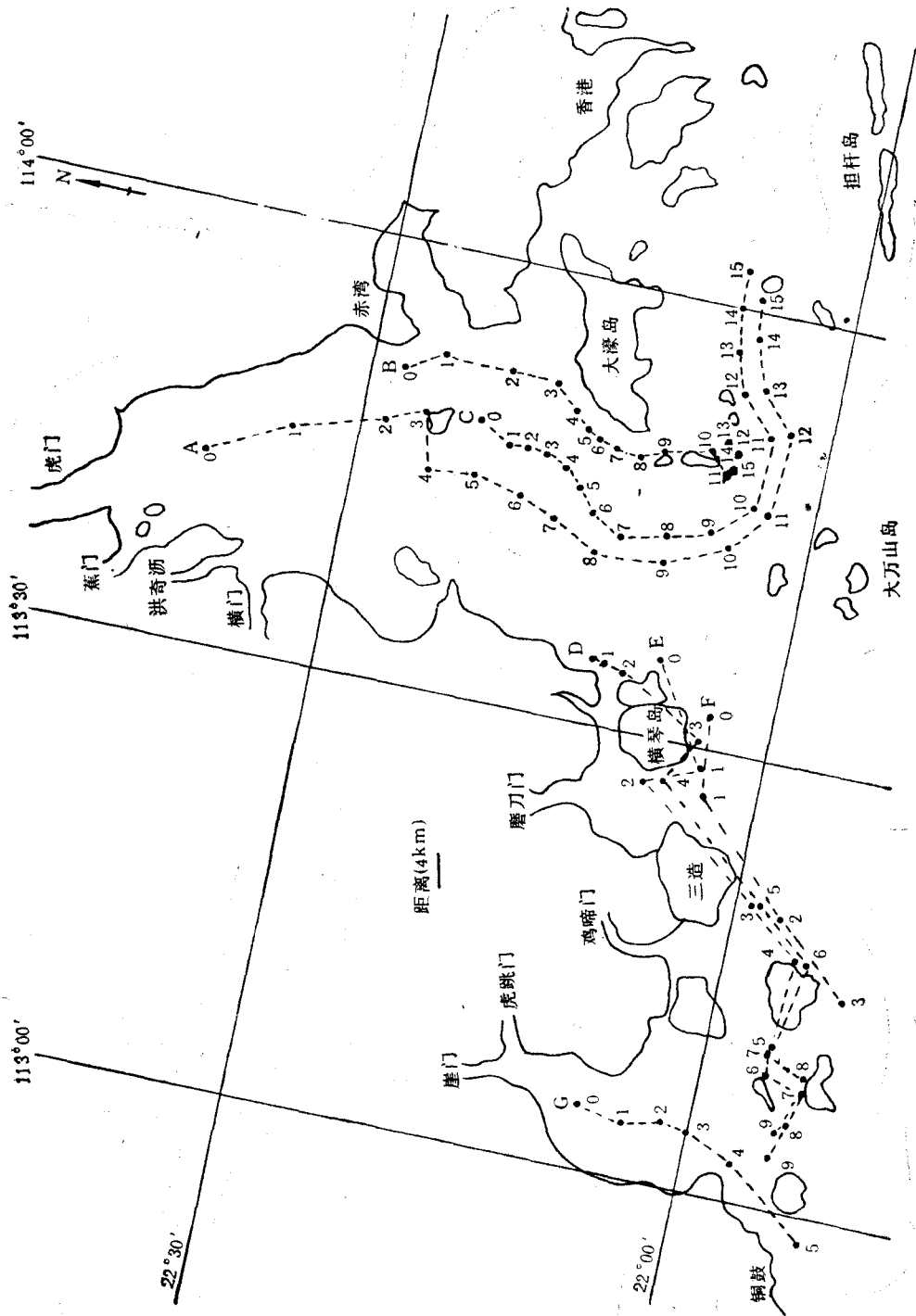


图 6 珠江河口海区计算拉格朗日质点漂移轨迹
 Fig. 6 Drifting tracks for computed Lagrangian particles in the Zhujiang River Estuary
 ● 潮周日后质点新位置; 数码 1, 2, 3, …… 经历的潮周日数; --- 两潮周日之间质点的相对位置。A, B, C, …… G 各可能的污水排口(质点计算起始位置)。

侧珠海市近岸有一微弱的顺时针环流, 最大值仅为 6cm/s 。在桂山岛东南也有一逆时针小环流。在香港周围水域, 拉氏余流一般也表现较小, 但在急水门拉氏余流显著增大。按上述计算结果, 珠江口水交换能力大致可划分为三级。

(1) 水交换活跃区 该类区包括磨刀门河口海区和虎门口沿矾石水道及伶仃水道的“狭长”形海区, 该区的拉氏余流约为 $15\text{—}20\text{cm/s}$ 。

(2) 水交换良好区 该区包括计算域的大部分, 要有内伶仃东西两侧近岸海区、内伶仃岛周围及以南大片海区、大万山和担杆以北海区, 以及黄茅海和高栏岛周围海区。该区的拉氏流速一般在 $7\text{—}15\text{cm/s}$ 。

(3) 水交换滞换区 由于地形及余环流等的影响, 该区拉氏余流一般均小于 7cm/s 。主要包括有香港岛—大濠岛邻近水域, 珠海近岸水域以及深圳湾内水域。

4. 拉格朗日质点输运轨迹

为研究珠江口内各建议的污水排海点的污水去向, 作者计算了 7 个不同排放点的拉氏质点漂移(图 6)。在计算中发现, 质点的逐时运动轨迹呈螺旋状推进。

A 点代表虎门口外标识点, 质点开始时自北向东南方向移动, 三天后抵达伶仃岛, 因受地形影响而转向西, 第四天后转向西南方向移动, 第八天开始逆时针转向, 至第十五天时抵达外伶仃岛。妈湾外 B 点为深圳市污水排海点, 可见质点即不进入深圳湾, 也不沿暗士顿水道朝香港方面运动, 而是转向沿大濠岛西侧运动。在大濠岛一侧质点运动较慢, 南下到桂山岛附近呈原地回旋。C 点为拟建的内伶仃特大型燃煤电厂排水点, 其质点运动轨迹介于 A 点和 B 点的轨迹之间, 质点运动速度也较 A 点的慢。D 点、E 点和 F 点为讨论的未来澳门污水排海点。D 点和 E 点的计算表明, 标识质点顺时针向绕大横琴岛后会沿磨刀门口上溯, 尔后再下退、漂移至西部的高栏岛和荷苞岛海区。在 F 点, 标识质点运动显著加快, 至第三潮周期时已抵达高栏岛外。G 点为代表崖门口和虎跳门口处标识点。计算表明, 质点到第三潮周期后沿黄茅海西岸运动, 至第五潮周期后进入铜鼓水域。

参 考 文 献

- [1] 何洪钰, 1982, 珠江三角洲河口区的潮汐分析(上, 下), 人民珠江, 4: 15—22; 5: 27—32。
- [2] 珠江口海岸带和海洋资源综合调查大队编, 1986, 珠江口海岸带和海洋资源综合调查研究文集, 广东科技出版社, 第 4 集。
- [3] 董兆英, 1985, 珠江口余流特征分析, 热带地理, 5(3): 177—185。
- [4] 王化桐等, 1980, 胶州湾环流和污染扩散的数值模拟 I. 胶州湾潮流计算, 山东海洋学院学报, 10(1): 26—63。
- [5] 陈时俊等, 1983, 胶州湾物理自净能力的研究, 海洋环境科学, 2(2): 11—27。
- [6] Awaji, T., Imasato N. and Kunishi, H., 1980, Tidal Exchange through a strait: A Numerical Experiment Using a Simple Model Basin, *J. Phys. Oceanogr.*, 10(11): 1499—1508.
- [7] Leendertse, J. J., 1970, A water-quality simulation model for well-mixed, Estuaries and Coastal Seas Vol. I, The Rand Corp., California, pp. 1—70.

NUMERICAL MODELLING OF THE TIDAL CURRENT IN THE ZHUJIANG ESTUARY

Han Baoxin, Guo Zhenren, Xian Kaikang

(*South China Institute for Environment Science, N.P.A, Guangzhou 510655*)

Yu Bin and Huang Fang

(*South China Sea Branch, SOA, Guangzhou 510300*)

ABSTRACT

The tides and tidal currents in the Zhujiang Estuary are simulated by employing finite difference methods. The computed areas include the whole Zhujiang Estuary where the tides and tidal currents are influenced by the eight mouths of the Zhujiang. The computed tidal levels and tidal currents are in good agreement with field measurements, and the comparison between the calculated tidal influxes and the field observations exhibits excellent agreement. According to the computed tidal current, the first author also computes Lagrangian residual currents and discusses the exchange extent of the water bodies. In addition, the Euler-Lagrangian method is used to track the trajectory of pollutant water mass from the possible outlets in the estuary.

Key words Zhujiang Estuary, Tidal current, Numerical Modeling, Lagrangian.