

文章编号: 1674-5566(2009)03-0351-08

# 年平均风场作用下大亚湾水交换的数值模拟

王 聪<sup>1</sup>, 林 军<sup>1,2</sup>, 陈丕茂<sup>3</sup>, 章守宇<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062;

3. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

**摘 要:** 对大亚湾 2006 年和 2007 年的风场资料进行分析, 数值模拟年平均风场作用下大亚湾的余流场, 采用保守物质输运扩散法研究大亚湾的水交换能力。把大亚湾分成 7 个子区域, 计算整个海湾和各子区域的水体更新时间, 比较了各子区域水交换能力的强弱。大亚湾水交换能力总体为: 南部优于北部, 东部优于西部; 年平均风场大大加速了大亚湾的水交换速率, 全湾平均水体更新时间由仅考虑潮流作用时的 82.5 d 降低为 26.0 d; 风场作用下的表、底层环流差异较大, 表层水交换能力略高于底层。

**关键词:** 大亚湾; 水交换; 风场; 数值模拟

**中图分类号:** S 914 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of annual average wind's impact on water exchange in Daya Bay

WANG Cong<sup>1</sup>, LIN Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Pimao<sup>3</sup>, ZHANG Shouyu<sup>1</sup>

(1. College of Marine Sciences Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

3. South China Sea Fisheries Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** Tide and wind-driven residual current of Daya Bay was simulated by a 3D numerical estuarine and coastal ocean model after data analysis of wind field in 2006 and 2007. Method of tracer matter transportation and diffusion was applied to study water exchange of Daya Bay. The Daya Bay was divided into seven parts to compute the water refresh time respectively. The water exchange capability of the southern part was better than northern part and the eastern part better than western part. Annual average wind accelerated the water exchange rate of Daya Bay strongly for the gulf average water refresh time reduced from 82.5 d to 26.0 d. The water exchange rate of surface was higher than bottom due to the wind-driven current difference between surface and bottom.

**Key words:** Daya Bay; water exchange; wind field; numerical simulation

收稿日期: 2008-05-19

基金项目: 农业部渔业生态环境重点开放实验室开放基金 (2006-4); 国家“八六三”重点项目课题 (2006AA00303); 上海市教委重点学科 (J50702)

作者简介: 王 聪 (1983-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 专业方向为海洋生态系统工程。E-mail: cwang@stmail.shou.edu.cn

通讯作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

海湾水交换是近岸海洋环境科学研究的一个基本命题,湾内水体通过对流输运和稀释扩散等物理过程与湾外海水发生交换,使水质得到改善。交换不畅的水体,由于污染物的持续累积,往往会形成诸如富营养化等问题。大亚湾是广东省重要的天然港湾,是重要的水产资源自然保护区,又是广东省重点开发区<sup>[1]</sup>。研究大亚湾的水交换能力,可为沿海工业布局、环境功能区划分、环境规划及排污口的选址等提供科学依据;对于水产领域来说,可作为网箱养殖和人工鱼礁工程、海洋牧场建设等水产土木工程方面的基础研究。目前关于水交换还没有一个确定的概念和成熟的研究方法。箱式模型容易高估海湾的水交换能力<sup>[2-4]</sup>;而 Lagrange 质点追踪法虽然考虑流场非均匀性和迁移输运作用<sup>[5-9]</sup>,但却无法反映物质的扩散作用。本文以三维海洋模式 ECOM-si 提供水动力场,尝试采用物质输运扩散方法<sup>[10-15]</sup>研究大亚湾的水交换能力。此方法同时考虑了对流和扩散作用,也能体现环流输运场的时空差异性。

## 1 数值试验方法

### 1.1 模式构建

#### 1.1.1 模式简介

采用 ECOM-si 三维数值模式,是在 POM (Princeton Ocean Model) 的基础上发展起来的<sup>[17-18]</sup>,是当今国内外应用较为广泛的海洋模式,为了能在研究河口海岸问题时能得到更高的计算精度和局部空间分辨率,网格线需要拟合岸线,曲线网格的正交性就较难满足。为此 Chen 等<sup>[16]</sup>、朱建荣等<sup>[17]</sup>发展了一个非正交坐标系下的 ECOM,并在北美五大湖之一的 Superior 湖环流的研究中得到了很好的应用。

初始条件和边界条件:

模式初始条件采用冷启动,边界条件由  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $MU_2$ 、 $NU_2$ 、 $T_2$ 、 $L_2$ 、 $2N_2$ 、 $J$ 、 $M_1$ 、 $OO_1$  16 个分潮合成的潮波驱动。

海面动力学边界条件:

$$\left. \frac{\rho_0 K_m \partial u_i}{D \partial \sigma} \right|_{\sigma=0} = \tau_{0\xi} \quad (1)$$

$$\left. \frac{\rho_0 K_m \partial v_i}{D \partial \sigma} \right|_{\sigma=0} = \tau_{0\eta} \quad (2)$$

$\tau_{0\xi}$ 、 $\tau_{0\eta}$  分别为风应力矢量  $\vec{\tau}_0$  在坐标轴  $\xi$  和  $\eta$  方向上的分量。风应力通过 Large 和 Pond 改进的稳定状态拖曳系数计算:

$$\vec{\tau}_0 = \rho_a C_d W \vec{V}_a \quad (3)$$

$\rho_a$  为空气密度,  $1.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ;  $C_d$  为大气对海面的拖曳系数;  $\vec{V}_a$  为风矢量,  $\vec{V}_a = U_a \vec{i} + V_a \vec{j}$ ;  $W$  为风速,  $W = \sqrt{U_a^2 + V_a^2}$ 。关于  $C_d$ , 有不同的表达式, Large and Pond 给出为:

$$\begin{cases} C_d = 1.2 \times 10^{-3} & W < 11 \text{ m/s} \\ C_d = (0.49 + 0.065W) \times 10^{-3} & W \geq 11 \text{ m/s} \\ C_d = (0.49 + 0.065 \times 25) \times 10^{-3} & W \geq 25 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

海底动力学边界条件:

$$\left. \frac{\rho_0 K_m \partial u_i}{D \partial \sigma} \right|_{\sigma=-1} = \tau_{b\xi} \quad (5)$$

$$\left. \frac{\rho_0 K_m \partial v_i}{D \partial \sigma} \right|_{\sigma=-1} = \tau_{b\eta} \quad (6)$$

$\tau_{b\xi}$ 、 $\tau_{b\eta}$  分别为底摩擦应力矢量  $\vec{\tau}_b$  在坐标轴  $\xi$  和  $\eta$  方向上的分量。其中:

$$\tau_{b\xi} = C_d \sqrt{U^2 + V^2} u_i \quad (7)$$

$$\tau_{b\eta} = C_d \sqrt{U^2 + V^2} v_i \quad (8)$$

底应力拖曳系数  $C_d$  由近海底  $z_0$  处的流速呈对数分布计算:

$$C_d = \max \left[ \frac{k^2}{\left( \ln \frac{z_{0b}}{z_0} \right)^2}, 0.0025 \right] \quad (9)$$

其中  $k$  为卡门常数,  $z_0$  为海底粗糙度, 这里取为  $0.001 \text{ m}$ 。

### 1.1.3 保守物质输运扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - DF_c = DC_0(x, y, z, t) \quad (10)$$

上述式子中  $C$  表示的是保守示踪物质浓度,  $D$  是总水深,  $u$ ,  $v$  和  $w$  分别是  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向的水流速度,  $K_v$  是垂向扩散系数,  $F_c$  是水平扩散系数,  $C_0$  是从扩散源注入的物质浓度。

$$C_0(x, y, z, t) = \begin{cases} 1, & t_1 \leq t \leq t_2; \sigma_k \leq \sigma \leq \sigma_{k+n}; x = \{x_i\}; y = \{y_i\}; i=1, N \\ 0, & \text{其他情况下} \end{cases}$$

上式中  $t_1$  和  $t_2$  是污染源保持释放浓度的开始和结束时间,  $N$  为初始浓度为 1 的网格数, 即湾内所有 7 个分区的网格数,  $\sigma_k$  和  $\sigma_{k+n}$  是污染源所处水层的垂向坐标, 本文中为垂向全水层释放。

### 1.2 计算区域与网格划分

为了比较大亚湾各个局部区域的水交换能力差异, 根据地形和功能区的差别把大亚湾划分成 7 个子区域(图 1)。I 区为范和港湾; II 区为大亚湾顶部划分; III 区为哑铃湾; 大亚湾中东部为 VI 区; IV 区为大鹏澳, 其内有亚湾核电站区; V 区位于大亚湾西南部; VII 区为大亚湾东南部。湾内外分界线为 V 和 VII 区向海一侧、玻沙山角与海柴角之间的连线。

模式采用水平曲线网格, 水平方向上分为  $300 \times 250$  个网格, 水平精度  $50 \text{ m} \sim 1200 \text{ m}$ ; 垂直方向采用  $\sigma$  坐标, 均匀分为 10 层, 计算时间步长取  $10 \text{ s}$ 。模式运行 5 d 确保流场稳定后, 开始进行物质输运扩散的计算。

为了增大潮位差、提高正压效应使计算稳定, 本文把计算区域扩大到大亚湾两侧, 如图 2 所示, 计算区域向西扩大到大鹏湾, 使西边界为闭边界, 向东扩大到红海湾, 只有南部扇形边界为开边界。

### 1.3 水体更新时间的定义

目前关于水交换能力还没有一个确定的概念, 有的学者用半交换时间(物质浓度降为原浓度一半的时间)来定义水交换能力。经计算和分析, 发现浓度降为原浓度的  $0.37(1/e)$  倍后, 物质浓度随时间推移下降的速度相对趋缓。因此, 本文对水交换能力给出如下概念: 在整个海湾给定无量纲初始浓度 1, 某海域保守物质浓度通过对流扩散稀释为初始浓度  $1/e$  倍, 即浓度降为  $0.37$  所需的时间定义为水体更新时间, 作为海湾水交换能力的指标。

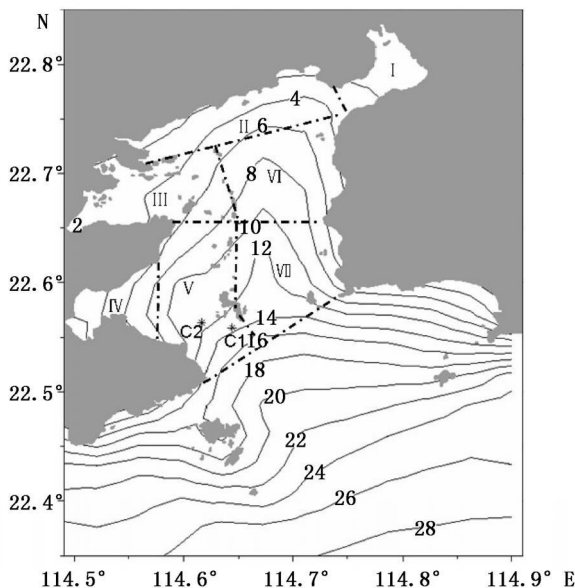


图 1 大亚湾各分区  
Fig 1 Parts of Daya Bay

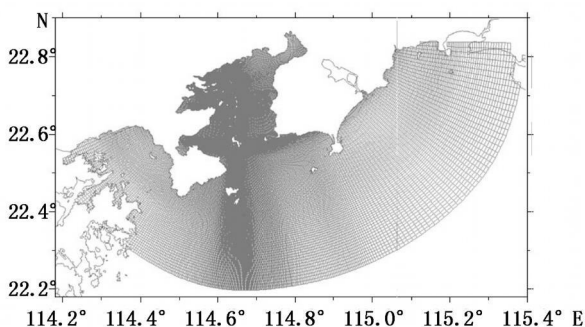
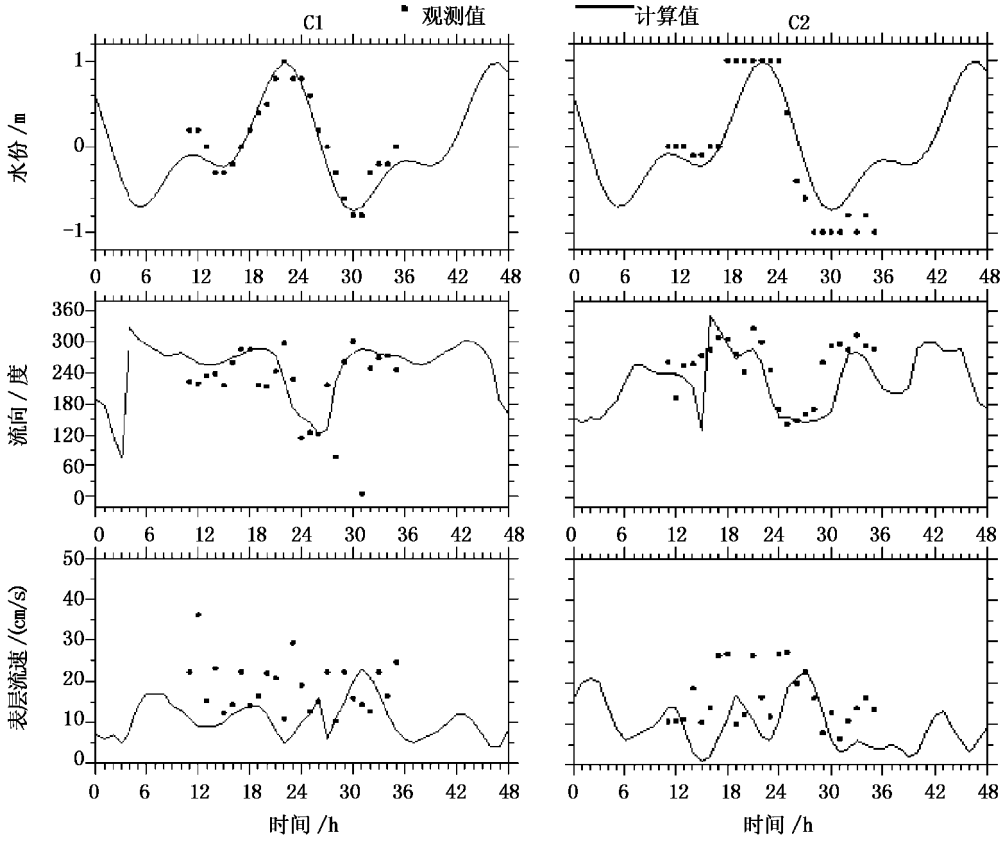


图 2 大亚湾网格图  
Fig 2 Model grids of Daya Bay

### 2 数值模式验证

在潮振动和实时风场 [资料来源: QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds from Colorado Research Associates( version 5.0), 水平精度  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , 时间精度 6 h] 的驱动下, 运行模式对 2002 年 11 月 21 日 11 时—2002 年 11 月 22 日 11 时的一昼夜实测潮位和流速资料 ( 站位见图 1 )

( 3 ) : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

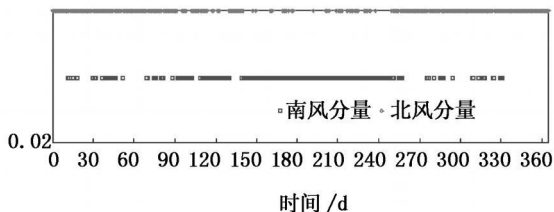


3- (七)

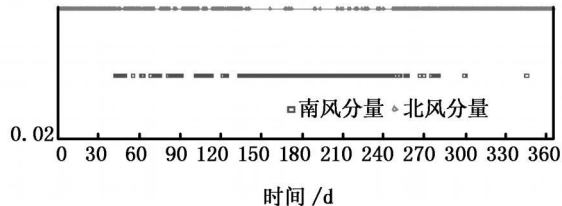
3. 1- K, 2006 2007 II K, ( 1 ); ( 5 ) 2006 2007 K → 274.75, 90.25, 5 -3.6 / ( ); = [ , \* 5 234.25, 130.75, 5 -1.7 / ( ); : 5 7.22 / . ( 5 ) ? , ( 5 ) 4, 5 → 才, 10B 才 3B = [ , 2 ; 4B 才 9B r = , 2 ; -K . = | , 5 ( 3.847 / , 62.1°; 1, -3.4 / ,

-1.8 / ), 2006 10B 1 2007 3B 31 ナ-K - Y \, = ボ  
 ⑤ , 19. \* .

	1-2006、2007			κ 2007			
	. 1-			2006			
	( / )						
2006	282.25	82.75	234.5	130.5	-3.6	-1.7	7.21
2007	267.25	97.75	234.0	131.0	-3.2	-1.9	7.23
⑤	274.75	90.25	234.25	130.75	-3.4	-1.8	7.22

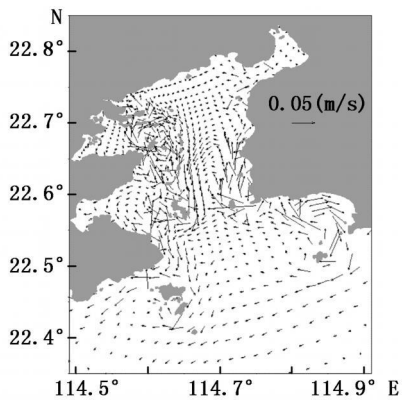


4-2006  
 . 4-

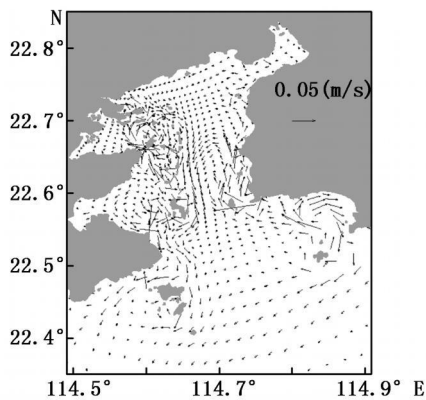


5-2007  
 . 5-

3. 2- II ⑧  
 ⑧ - ジ \ ↓ , 19. ↓ = , [ - ヴ テ ② \* 帥 , ○ ↻ , ○  
 \ 帥 \ , \* ⑧ \ 帥 (12) § . \ ボ ⑤ , 帥 ボ  
 , ⑧ . \* II , Z \* XVI , ♪  
 , \ - \ 帥 II , \* VI \* , ○ II [ -  
 , も ↓ ち ⑧ . ち ⑧ \* (12) \ , 19.  
 II ち ⑧ \ ( 6, 7) \ \ (12) \ エ ヴ ⑧ ; Z  
 \ , マ ≡ (12) \ エ ヴ ⑧ , , Z バ ≡  
 K , バ ち ≡ , Z II \ \* る , Z  
 ≡ \ \ \ ⑧ ; 炮 \ \ エ ヴ ⑧ , 炮 ,  
 (七) \ \ ⑧ , \ エ ≡ (5) \* , \ エ (5) \  
 \ \ ; \ \ ⑤ (12) \ エ \* る , \ ≡ ち ⑧ ②  
 . (5) ② = , ⑤ 0.83 , ち ⑧ ② 0.05 / , II \*

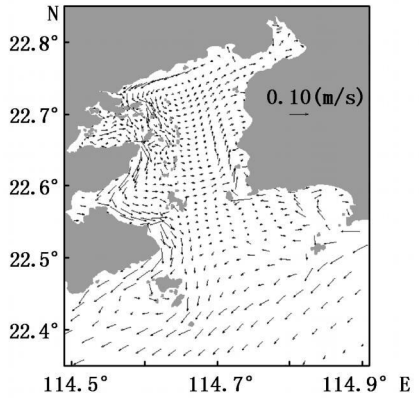
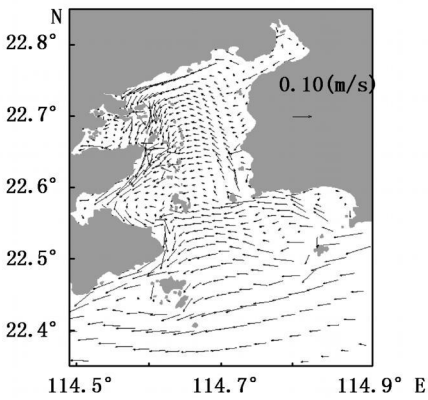


6- ち ⑧

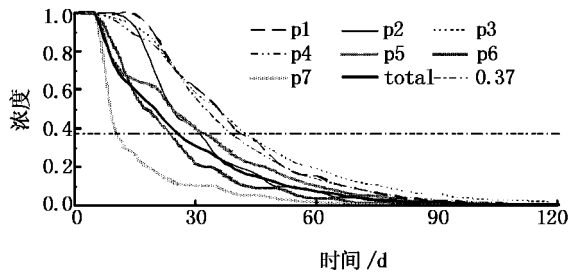
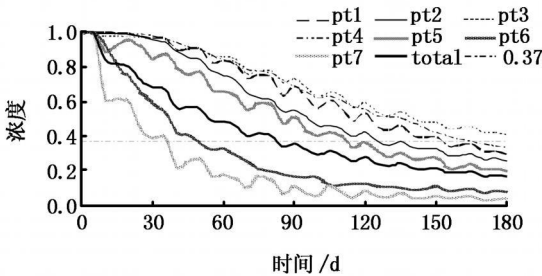


7- ち ⑧

20 , , 子⑧ (七) § , 』子, ②  
 ② 。 ⑤ , 19. II ( 8, 9) Z ②  
 , 19. , 子⑧ r , 0.1 / , (12) § ;  
 ② , (5)② ② , II 90°: (14) ②K ; v  
 ⑧ Z , :Z \ , マ ≡ ≡(12)』エ v ⑧  
 , , Z バ ≡ K , Z バ \ ,  
 ⑥ , Z 炮 , 炮 \ K  
 , 炮 , (5) Z 、 』 \*る , (七) v  
 ⑧ , ≡ (5) 炮 十 ギ \* ;  
 \ ⑤ \*る ; 十 ≡ ② ⑥ 。 | v  
 \* ㄱ (七) \* ㄱ \ 。 ⑧ ㄱ(七) [ — (12): \ ;  
 ⑥ Z ②K ⑥ ; Z III バ Z 』エ  
 , | III \* ; \ ⑥ Z , \* , \  
 (18) エ, 』エ 炮 , 』エ(5) 十 v



3. 3 ③ ⑤ , 19. → ≡ , み (12) , [ Z II \* (12)へ— , 19. ≡ ナ—K φ , ケ  
 ⑤ \* ㄱ , 19. ⇒ , 19. ( 10) ≡ 、 ⇒ , 19. ( 11) ナ ㄱ, → τ II \* ㄱ \* ( 2)。



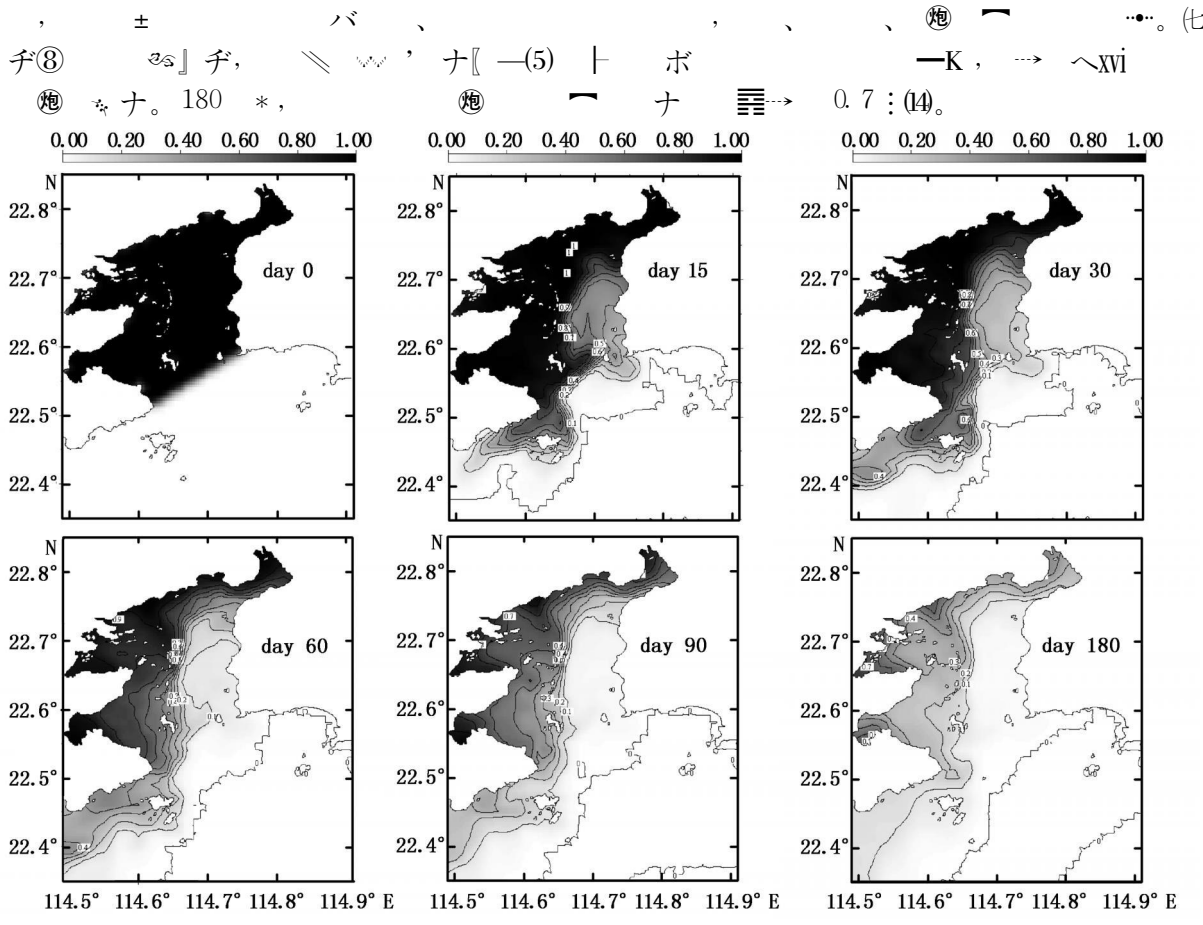
10 ③ , 19. ナ ㄱ ⑤ 11 ③ , 19. ナ ㄱ

2 ⊖ II  
 . 2 ⊖

	II I	II II	II III	II IV	II V	II VI	II VII	☰
, 19. ( )	152.5	125.0	>180	165.0	112.0	49.5	36.0	82.5
, 19. ( )	42.0	31.5	42.5	39.0	33.0	24.0	10.5	26.0

3.3. 1 ⊖ , 19.

S, ほ, ○, [ - (12), 炮。 (2) 炮, \* Ⅲ >Ⅳ >Ⅴ >Ⅵ >Ⅶ >Ⅱ >Ⅰ >Ⅲ, τ II ⑤ ナ Z 180 ≡ |。 (5)② ナ ⑧ §, ( 12)。 (5), 19. ナ →, II バ ≡ ○○ | ⑧, ⑧ ± バ、, 炮 ≡ (七) ナ [ - (5) | ボ ⑧ \* 180, 炮 ナ ≡ → 0.7 : (14)。



12 ⊖ , 19. ナ  
 . 12 ⊖

3.3. 2 ⊖ , 19.

ボ xvi ] : , 19. , ☰ ⑤ \* 26.0, \* 82.5 ギ, \* Ⅲ [ 42.5。 τ II ⑤ ナ Z バ ( 13)。 Z , 19. , τ II \* (5) Ⅲ >Ⅳ >Ⅴ >Ⅵ >Ⅶ >Ⅱ >Ⅰ >Ⅲ ( 2)。 Z , 19. , ⑥ Z

