

## 黄海温度锋及断面水温分布数值 预报试验研究<sup>\*</sup>

刘克修 赵保仁 朱兰部

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

自 Simpson 和 Hunter(1974)在对夏季爱尔兰海的研究中提出潮混合控制潮汐锋的概念以来,人们相继在许多强潮浅水区发现了潮汐锋现象,并做了大量的研究工作,对锋区的流场结构等特征,以及潮汐锋对周围环境的影响等有了更多的了解。在我国,赵保仁(1985)首先提出黄海存在潮汐锋现象,认为冷水团的温度锋可看作是底层的潮汐锋,并可利用近最大潮流流速计算层化参量来确定黄海潮汐锋(从而亦即温度锋)的位置,而且还可以根据已有调查资料和卫星图片揭示它的一些变化规律。他与合作者的一系列研究工作表明:黄海的潮混合及潮汐锋现象对黄海的温盐和水团分布、层化现象、强温跃层的分布变化、黄海的水平和垂直环流有重要影响和直接关系,进而可以推测黄海的潮混合及潮汐锋现象对黄海的物质运输、生态环境等有着重要的影响,因此研究黄海潮混合形成的温度锋和断面温度分布的数值预报方法是非常有必要的。

以往关于潮汐锋的数值研究大多数是诊断模式,用于求解潮汐锋形成以后锋区的环流结构等,而用数值方法模拟潮汐锋的形成和演化的工作却很少。在国外,只有王东平等(Wang *et al.*, 1990)用二维模型,对垂直涡动扩散和粘性系数采用 Munk-Anderson 格式与湍流封闭格式嵌套的方法以反映边界层的作用,利用实测的大气强迫力和数值计算的潮流模拟了英国 Celtic 海的潮汐锋和海洋层化的变化问题,尚未涉及潮汐锋的形成过程。在国内,Bi 和 Zhao(1993)用一个二维数值模式对黄海 34°N 的潮汐锋进行了模拟,较好地模拟了从 4 月到 8 月潮汐锋的形成和演化过程。在此基础上,我们将进一步利用潮流分布及海面的热量和动量输入条件,以垂直均匀状态为初始条件,模拟黄海各主要断面的温度分布、温度锋和温跃层在增温期的形成和演化过程。

### 一、计算模式

为进行黄海温度锋及断面水温分布的数值模拟,我们采用 Bi 和 Zhao(1993)对黄海西部潮汐锋数值计算提出的数值模式,为使该模式能推广应用于整个黄海,适用于黄海各

<sup>\*</sup> 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2879 号。  
收稿日期:1996 年 2 月 2 日。

个已有观测断面温度锋和水温分布的数值模拟,我们对该模式作了如下一些修改。

垂直涡动粘性系数  $A_v$  和垂直涡动扩散系数  $K_v$  仍基本采用 Munk 和 Anderson (1948) 格式:

$$A_v = A_0(x)(1 + n\sigma Ri/(n-1))^{-(n-1)} + \nu$$

$$K_v = K_0(x)(1 + \sigma Ri)^{-n} + \nu$$

所不同的是,这里引进了修正项  $\nu$ ,它相当于分子热扩散系数,在计算中取  $\nu = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。公式中的参量  $\sigma = 0.3$ ,  $n = 1.5$ ,  $Ri$  为 Richardson 数;  $A_0$  和  $Ri$  的计算采用 James (1978) 的方法,考虑风和潮流的共同影响。此外,在模式计算中,潮流流速  $V$  用各断面  $M_2$  分潮流振幅代替,海面风速资料取自中国科学院海洋研究所和地理研究所 (1977) 的统计结果。

应该指出的是,在上面垂直涡动扩散系数表达式中,  $K_0$  的选取也是很重要的。  $K_0$  有许多不同的取法: James (1978) 假设  $K_0 = A_0$ , 王东平等 (Wang *et al.*, 1990) 取  $K_0$  为常数, Bi 和 Zhao (1993) 据经验分段给出了  $K_0$  的值。为了使数值结果更符合实测情况,我们假定  $K_0$  与海水层化有关,将  $K_0$  取为层化参量  $K$  的线性函数形式

$$K_0 = A_1 + B_1 \times K$$

另外,在模式的温度方程中,光衰减系数  $\gamma$  取为依赖于透明度  $D$  的如下函数形式

$$\gamma = A_2 + B_2/D$$

式中  $A_1, B_1, A_2, B_2$  为待定的拟合常数。为使后报值更接近实测值,在计算中,可以对这些系数在不同断面上的取值加以调整,我们所用的平均值分别为  $4.75 \times 10^{-3}$ 、 $-1.13 \times 10^{-3}$ 、 $0.04$ 、 $0.93$ 。层化参量  $K$  的资料取自赵保仁等 (1994),透明度  $D$  的资料取自朱兰部和赵保仁 (1991) 的统计值。

## 二、数值结果

利用上述模式,我们根据 1979 年的调查资料,对黄海海区的 5 条断面 ( $34^\circ\text{N}$ ,  $35^\circ\text{N}$ ,  $36^\circ\text{N}$ , 成山角-鸭绿江口, 成山角-大连) 做后报试验,以 4 月份的调查资料为初值,模拟各断面 5、6、7、8 月的断面温度分布、温度锋和温跃层的形成和演化过程。图 1 为 1979 年各断面 4 月份的温度分布。由图可以看到,这时海洋呈垂直均匀状态,没有跃层,也没有形成锋面。

图 2、4 分别是计算所得 1979 年  $34^\circ\text{N}$  断面 5、6、7、8 月温度分布及其他断面 7 月温度分布情况 (其他月份图略); 图 3、5 分别给出相应的观测结果以作比较。

将计算结果同实测结果相比较可以看到,从温度随断面分布及层化现象随时间的变化趋势来看,计算与实测表现出较好的一致性,主要表现为:绝大多数断面两者的等温线在冷水团边界区域有逐步抬升趋向,上混合层深度及温跃层厚度随地点水深变浅而减少,跃层强度则有逐步增强之势,其中尤以  $34^\circ\text{N}$ 、 $35^\circ\text{N}$ 、 $36^\circ\text{N}$  断面表现最为明显;在  $34^\circ\text{N}$  断面左端浅水处两者均显示该处温度呈垂直均匀分布,其他断面则无此特征;计算所得海面低温区的位置与实测基本一致,其中尤以强潮混合区 (如  $34^\circ\text{N}$  断面左侧及成山角、大连、鸭绿江口近海) 的海面低温分布区更为接近,等温线在此与海面相交,有形成潮汐锋趋向;

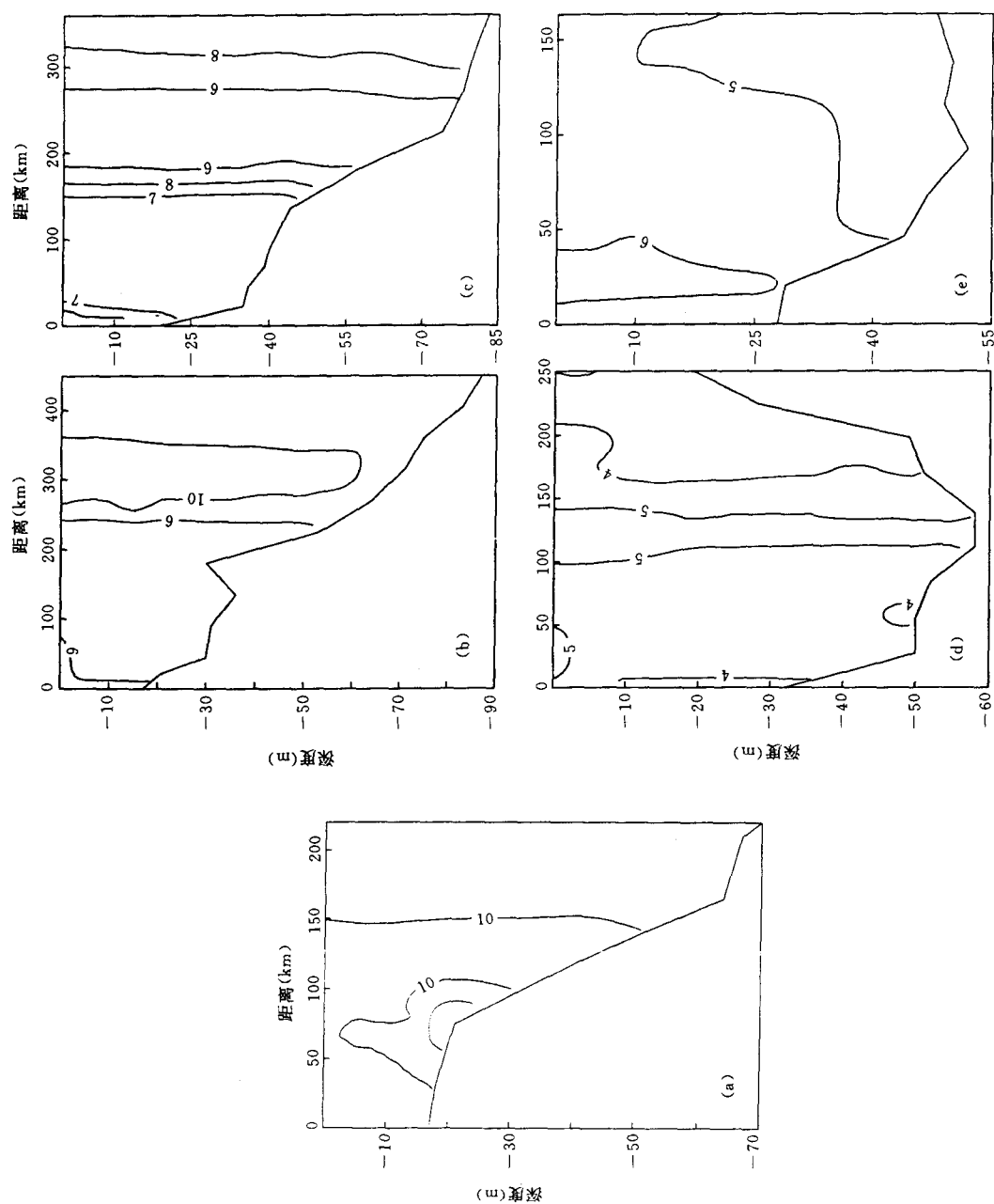


图1 各断面1979年4月份的温度(°C)分布  
(a)34°N; (b)35°N; (c)36°N; (d)成山角-鸭绿江口; (e)成山角-大连

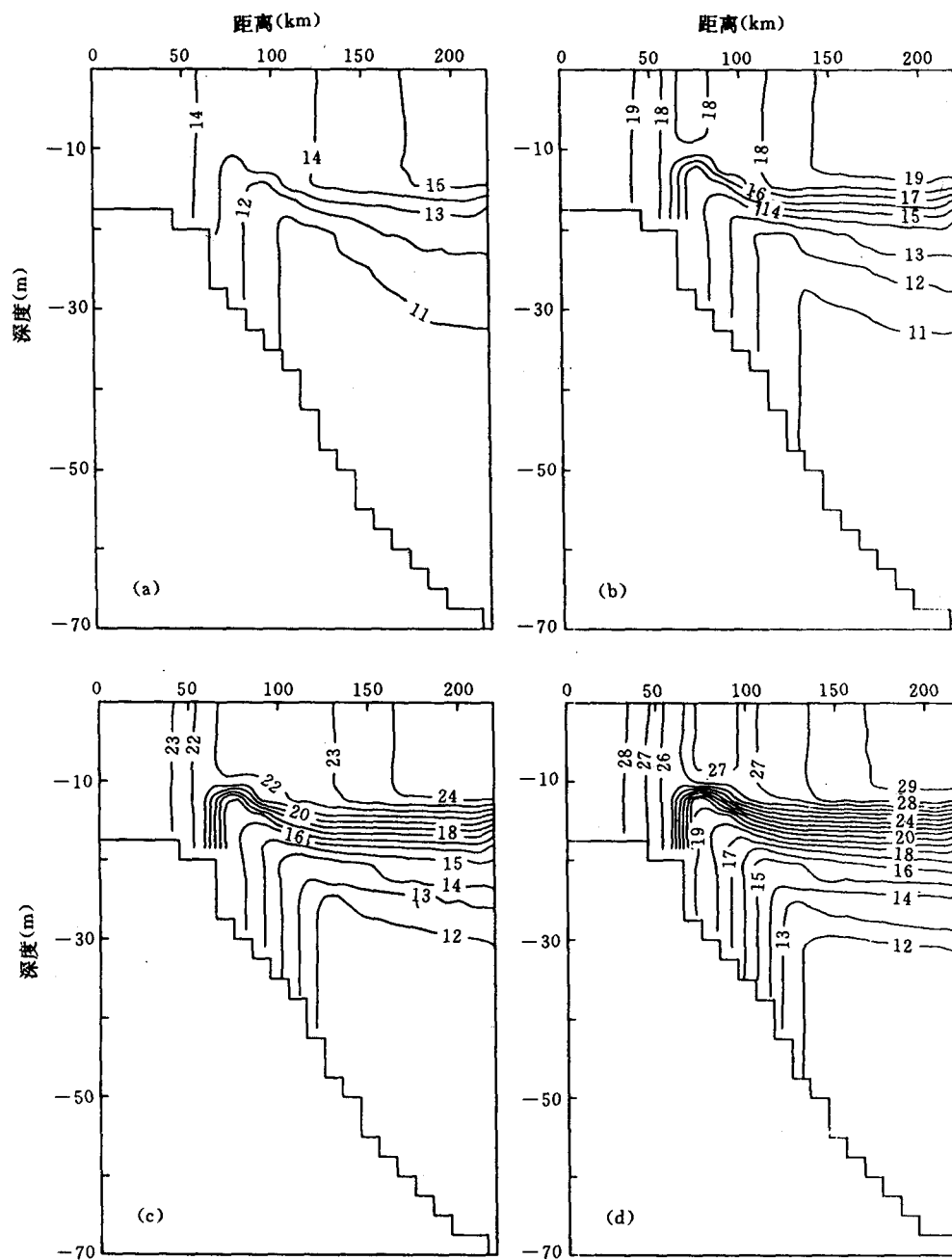


图2 34°N断面1979年各月计算温度(°C)分布

(a) 5月; (b) 6月; (c) 7月; (d) 8月

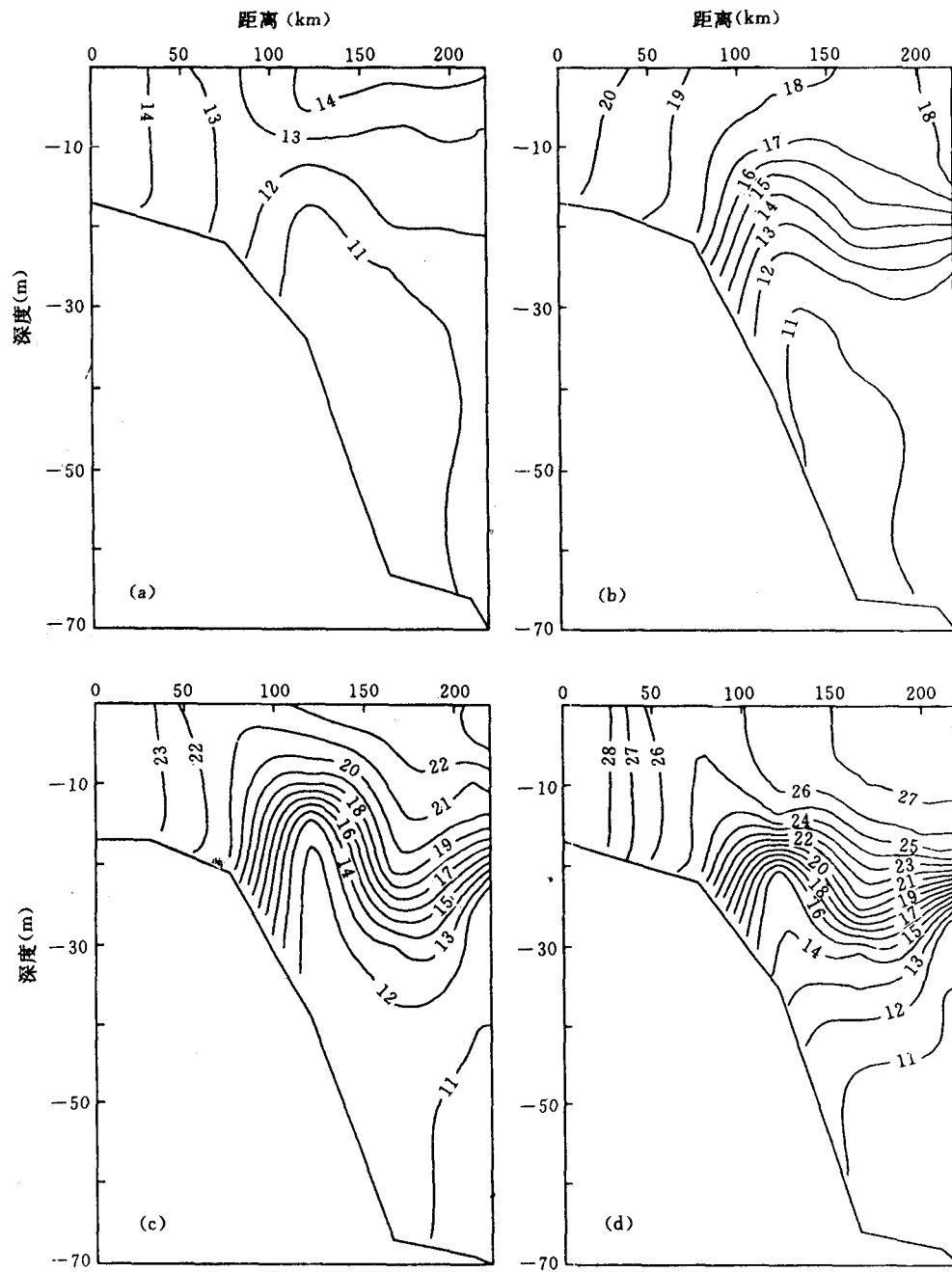


图 3 34°N 断面 1979 年各月实测温度(°C)分布

(a) 5 月; (b) 6 月; (c) 7 月; (d) 8 月

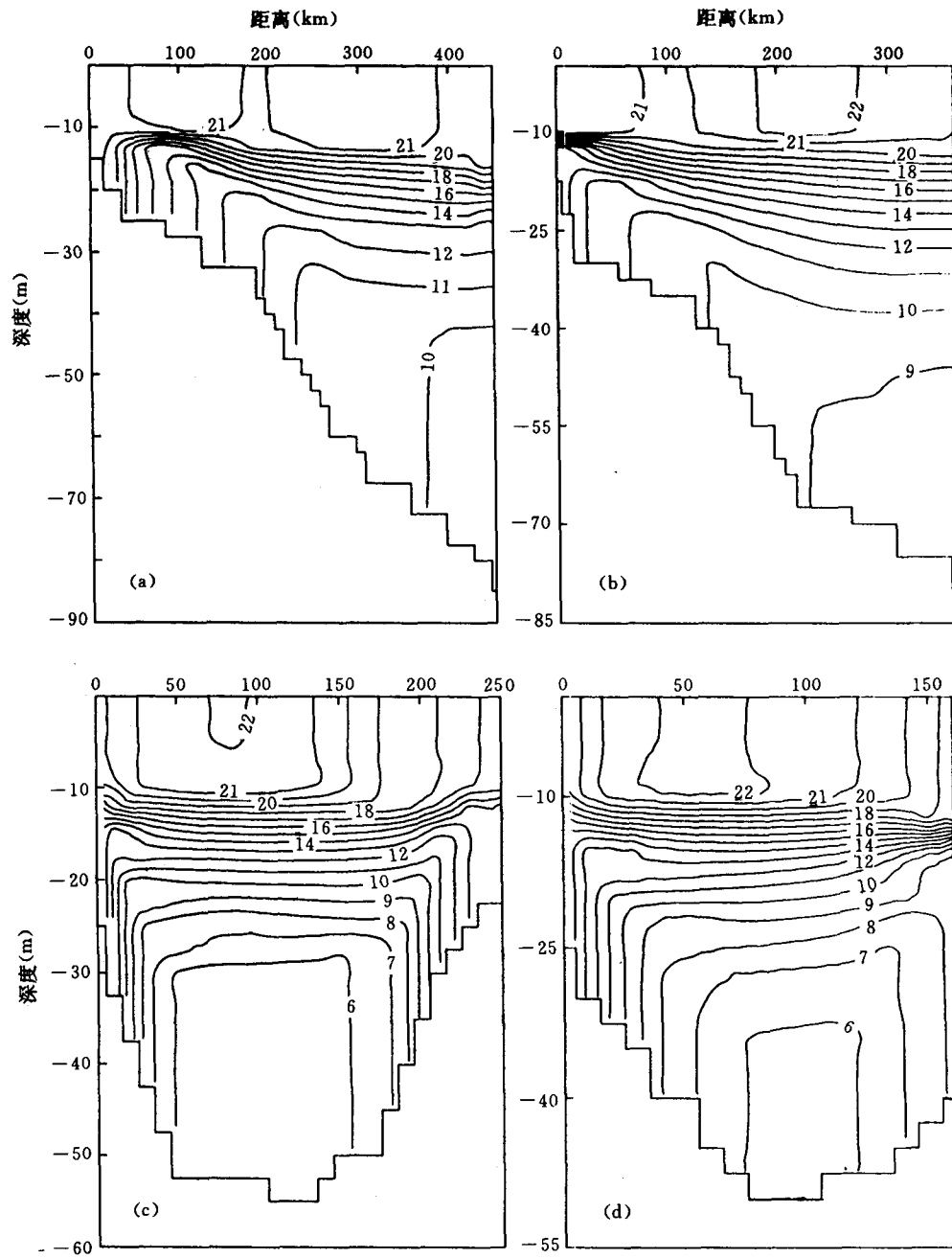


图 4 其它断面 1979 年 7 月份计算温度(°C)分布  
(a) 35°N; (b) 36°N; (c) 成山角-鸭绿江口; (d) 成山角-大连

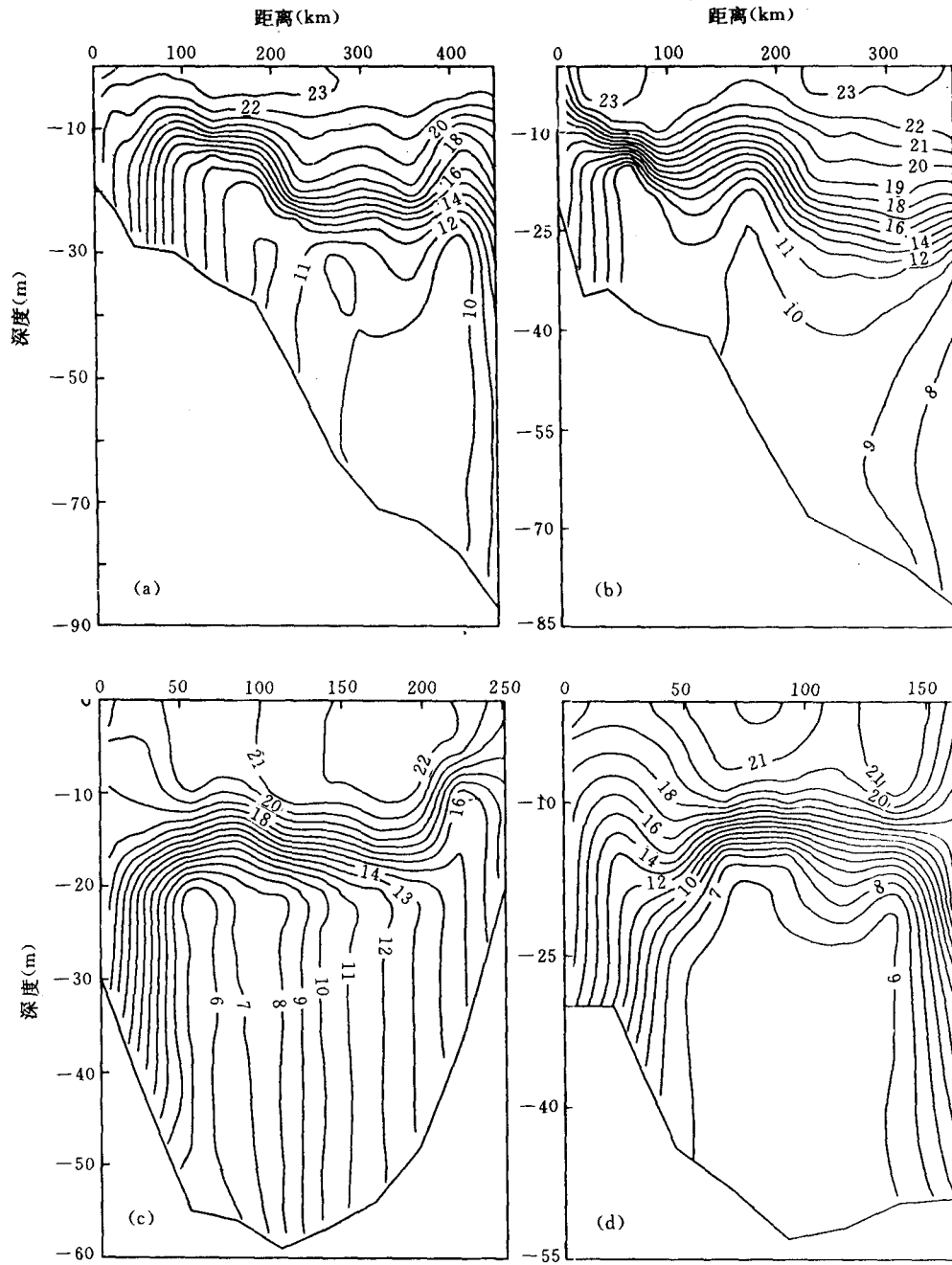


图5 其它断面 1979 年 7 月份实测温度(°C)分布  
(a) 35°N; (b) 36°N; (c) 成山角-鸭绿江口; (d) 成山角-大连

计算和实测同样表明,5月跃层刚刚形成,7、8月才进入强盛期。

为了给出后报结果优劣的定量概念,表1列出34°N断面各站计算所得表、底层温度值及相应的实测值和后报误差(其它断面结果从略)。

表1 34°N断面各站表、底层后报温度(°C)与实测比较

| 站号   | 水层 | 5月    |       |      | 6月    |       |       | 7月    |       |       | 8月    |       |       |
|------|----|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      |    | 实测    | 计算    | 误差   | 实测    | 计算    | 误差    | 实测    | 计算    | 误差    | 实测    | 计算    | 误差    |
| 3084 | 表层 | 14.12 | 14.70 | .58  | 20.40 | 19.40 | -1.00 | 23.31 | 23.64 | .33   | 27.62 | 28.23 | .61   |
|      | 底层 | 14.09 | 14.57 | .48  | 19.63 | 19.27 | -.36  | 23.41 | 23.51 | .10   | 27.69 | 28.09 | .40   |
| 3085 | 表层 | 12.85 | 13.45 | .60  | 18.98 | 18.29 | -.69  | 21.15 | 22.50 | 1.35  | 25.05 | 26.92 | 1.87  |
|      | 底层 | 12.86 | 13.03 | .17  | 18.49 | 14.81 | -3.68 | 21.02 | 16.75 | -4.27 | 24.69 | 19.13 | -5.56 |
| 3086 | 表层 | 14.12 | 13.89 | -.23 | 18.17 | 18.23 | .06   | 22.39 | 22.54 | .15   | 26.84 | 27.42 | .58   |
|      | 底层 | 10.64 | 10.53 | -.11 | 11.27 | 11.38 | .11   | 11.60 | 12.00 | .40   | 13.79 | 12.88 | -.91  |
| 3087 | 表层 | 14.71 | 14.84 | .13  | 17.78 | 19.53 | 1.75  | 22.60 | 23.94 | 1.34  | 26.97 | 28.84 | 1.87  |
|      | 底层 | 10.87 | 10.57 | -.30 | 10.92 | 10.81 | -.11  | 11.25 | 11.05 | -.20  | 10.78 | 11.31 | .53   |
| 3089 | 表层 | 14.71 | 15.14 | .43  | 18.12 | 19.74 | 1.62  | 23.19 | 24.21 | 1.02  | 27.29 | 29.11 | 1.82  |
|      | 底层 | 11.13 | 10.79 | -.34 | 11.35 | 10.90 | -.45  | 10.67 | 11.02 | .35   | 10.02 | 11.16 | 1.14  |

为便于评价,我们提出如下评价标准:后报误差绝对值 $|\Delta t| \geq 2.0^\circ\text{C}$ 为后报不合格, $1.5^\circ\text{C} \leq |\Delta t| < 2.0^\circ\text{C}$ 为合格, $1.0^\circ\text{C} \leq |\Delta t| < 1.5^\circ\text{C}$ 为良好, $|\Delta t| < 1.0^\circ\text{C}$ 为优。表2列出各断面误差统计。

表2 后报合格率(%)统计

| 断面               | 月份 | $\Delta t < 1$ | $1 \leq \Delta t < 1.5$ | $1.5 \leq \Delta t < 2$ | $\Delta t \geq 2$ |
|------------------|----|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| 34°N             | 5  | 100            | 0                       | 0                       | 0                 |
|                  | 6  | 60             | 10                      | 20                      | 10                |
|                  | 7  | 60             | 30                      | 0                       | 10                |
|                  | 8  | 50             | 10                      | 30                      | 10                |
| 35°N             | 5  | 92             | 0                       | 8                       | 0                 |
|                  | 6  | 75             | 4                       | 13                      | 8                 |
|                  | 7  | 38             | 13                      | 17                      | 33                |
|                  | 8  | 67             | 21                      | 0                       | 13                |
| 36°N             | 5  | 55             | 5                       | 14                      | 27                |
|                  | 6  | 68             | 14                      | 5                       | 14                |
|                  | 7  | 50             | 14                      | 27                      | 9                 |
|                  | 8  | 59             | 31                      | 5                       | 5                 |
| 成山角<br>↓<br>鸭绿江口 | 5  | 50             | 20                      | 15                      | 15                |
|                  | 6  | 45             | 15                      | 15                      | 25                |
|                  | 7  | 20             | 25                      | 10                      | 45                |
|                  | 8  | 30             | 15                      | 10                      | 45                |

续表 2

| 断面       | 月份 | $\Delta t < 1$ | $1 \leq \Delta t < 1.5$ | $1.5 \leq \Delta t < 2$ | $\Delta t \geq 2$ |
|----------|----|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| 成山角<br>↓ | 5  | 50             | 6                       | 19                      | 25                |
|          | 6  | 100            | 0                       | 0                       | 0                 |
| 大连       | 7  | 63             | 19                      | 19                      | 0                 |
|          | 8  | 56             | 19                      | 12.5                    | 12.5              |

表 2 表明,除成山角—鸭绿江口断面的后报合格率及优良率较低(分别为 67.5%和 55%)外,其他各断面合格率及优良率分别在 86%、73%以上,总体平均合格率为 84%,优良率为 72%。

以下进一步讨论冷水团边界后报精度,根据绘制的后报与实测温度断面分布图,读取的各断面冷水团边界位置如表 3 所示,表中数值为冷水团内、外边界距断面左边线的距离。

表 3 各断面图中计算和实测的黄海冷水团边界位置(单位 km)

| 断面    |    | 5 月      | 6 月     | 7 月      | 8 月     |
|-------|----|----------|---------|----------|---------|
| 34°N  | 计算 | 60—105   | 60—108  | 53—130   | 47—110  |
|       | 实测 | 66—107   | 75—113  | 75—113   | 75—110  |
| 35°N  | 计算 | 17—120   | 27—126* | 20—150   | 15—203  |
|       | 实测 | 10—80    | 10—180  | 0—153    | 20—170  |
| 36°N  | 计算 | 无*       | 无*      | —27      | —58     |
|       | 实测 | 27—116   | 11—62   | —58      | —54     |
| CY(C) | 计算 | 0—38     | 0—38    | 0—48     | 0—48    |
|       | 实测 | 0—24     | 0—27    | 0—48     | 0—43    |
| CY(Y) | 计算 | 180—228* | 175—239 | 181*—229 | 168—225 |
|       | 实测 | 无        | 196—250 | 99—250   | 187—250 |
| CD(C) | 计算 | 8—22     | 0—45    | 0—40     | 0—60    |
|       | 实测 | 21—29    | 0—41    | 0—39     | 0—47    |
| CD(D) | 计算 | 无        | 无*      | 118—162  | 128—162 |
|       | 实测 | 无        | 142—162 | 135—162  | 127—162 |

注:(1)表中带\*者表示后报失败;(2)CY表示成山角—鸭绿江口断面,CD表示成山角—大连断面;(3)括号内C表示成山角一侧,Y表示鸭绿江口一侧,D表示大连一侧。

由表 3 可见,后报与实测非常接近,两者相差一般都在 10km 左右,很少超过 30km,只有 3 例超过 45km;另有 3 例因计算结果不存在冷水团边界,而实测则存在冷水团边界,故后报失败。总之,后报总成功率为 92%,数值后报是成功的。

### 三、讨 论

利用本模式,我们成功地模拟(后报)了增温期黄海温度分布及冷水团锋面的形成和

演化过程;将后报所得的温度、跃层深度、锋面位置等与实测值相比较可以看出,结果是令人满意的。但应指出,本模式尚存在一些问题和缺陷,主要是:

(1) 由于二维模式的局限性,模式中略去了垂直于断面方向的温度平流;这种温度平流对 36°N 断面温度分布起着重要影响。如在 36°N 断面图上,于 100km 处的深层出现明显的冷平流,使这里 5 月份的实测温度低于 4 月份的实测值(初值)1℃以上,从而影响以下各月的后报精度。

(2) 本模式略去了海面波动和内波作用,因此后报的等温线分布比较平直,而实测等温线的波动则较大,虽然这些波动有的也可能是由资料误差所造成。例如 35°N 断面 6 月份的实测温度在 260km 处等温线就呈现出大幅度的起伏;在我们看来,这可能是由 3 063 站 25—30m 层的资料误差所造成。

(3) 本模式没有考虑径流输入造成的海面浮力输入。例如对成山角—鸭绿江口断面,在鸭绿江口一侧,后报偏离实测较远,这可能与本模式无法考虑鸭绿江口的径流输入有关。

(4) 由于缺乏实际资料,本模式计算中使用的海面风速和热量输入资料为多年平均值,潮流流速取用  $M_2$  分潮流振幅而没有考虑大小潮变化,这些也是引起模式后报误差的重要因素。

### 参 考 文 献

- 中国科学院海洋研究所、中国科学院地理研究所,1977,渤、黄、东海海面热平衡图集,科学出版社,159。
- 朱兰部、赵保仁,1991,渤、黄、东海透明度的分布与变化,海洋湖沼通报,3:1—10。
- 赵保仁,1985,黄海冷水团锋面与潮混合,海洋与湖沼,16(6):451—460。
- 赵保仁等,1994,黄海的风、潮混合特征及其对冷水团边界的影响,海洋科学集刊,35:1—10。
- Bi Yawen & Zhao Baoren, 1993, Numerical study on the tidal front in the western Yellow Sea, *C. J. Oceanol. Limnol.*, 11(4): 305—313.
- James, I. D., 1978, A note on the circulation induced by a shallow sea front, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 7: 197—202.
- Munk, W. H. & Anderson, E. R., 1948, Notes on a theory of the thermocline, *Journal of Marine Res.*, 7:276—295.
- Simpson, J. H. & Hunter J. R., 1974, Fronts in the Irish Sea, *Nature*, 250:404—406.
- Wang Dongping, Chen, D. and Sherwin, T. J., 1990, Coupling between mixing and convection in a shallow sea front, *Continental Shelf Res.*, 10(2): 123—136.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE TEMPERATURE FRONT AND SECTIONAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE IN THE YELLOW SEA\*

Liu Kexiu, Zhao Baoren, Zhu Lanbu  
(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

### ABSTRACT

The formation and evolution of the sectional temperature distribution, thermal front and thermocline in the Yellow Sea during the April to August warming period were simulated with a two-dimensional model. Numerical hindcast experiments were made in five main sections of the Yellow Sea. The hindcast temperature at surface and bottom layers, the thermocline depth and the position of the thermal front at the bottom agreed with measured data. The distribution of temperature and the evolution of stratification were well reproduced by the model. Stations with hindcasted temperature errors less than  $2^{\circ}\text{C}$  and  $1.5^{\circ}\text{C}$  made up 84% and 72% of the total respectively, and the positions of tidal fronts with hindcasted error less than 45km made up 92% of the total. It is shown that the simulation taken with the model is successful and the model may be used to prognostic the thermal front and sectional distribution of temperature of the Yellow Sea.

---

\* Contribution No. 2879 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.