

南海温跃层基本特征及一维预报模式*

徐锡祯 邱章 龙小敏

(中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

提要 根据现有1907—1990年南海大面调查资料,按 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格进行逐月的标准水层的温度统计。在此基础上采用3次样条函数的插值方法计算出整个南海温跃层的深度、厚度和强度并予以相应分析。分析表明,南海温跃层主要分为两种类型:第一类为辐射型,主要分布在南海北部的陆架区内,季节变化显著;第二类为不同水体叠置型,主要分布在广大深水区,它长年存在,季节变化较小。一种温跃层的一维积分预报模式,该模式是基于忽略热平流作用和水平热扩散的前提下,从局部热平衡方程出发,建立了受海面热收支及风混合作用下求解温度垂直分布及温跃层的时空变化。在南海北部水深约300m处进行了单站温跃层后报,结果表明,温跃层的深度、厚度和强度的相对误差均在30%以下。

关键词 温跃层 热平衡 辐射通量 浮性频率

50年代以来,我国已有不少文献讨论分析了南海温跃层分布及其消长的一般规律中国科学院南海海洋研究所(1989);国家海洋局南海分局(1988),阐述了南海不同海区不同时期温跃层的基本特征^{1)~3)}。但这些论述或多限于南海北部水域或是单航次调查资料的分析结果,或没有具体地分析南海温跃层现象等等。本文报告南海温跃层季节分布及一维预报模式,以期为海洋渔业生产、温跃层数值预报模式、海上潜艇和 underwater 通讯提供科学依据。

1 资料来源及处理方法

搜集了1907—1990年期间南海水文调查中温度垂直测量总次数约为2.5万的历史温度资料,主要包括日本和美国海洋资料中心的历史调查资料(至1973年),部分CSK资料;中国科学院南海海洋研究所的南海东北部调查资料及南沙综合考察资料、国家海洋局南海分局的断面调查资料等。对上述资料按 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格,分月进行了各标准层的温度统计,然后根据各标准层的温度值,采用样条函数(王林等,1983)进行内插计算,确定出温跃层深度、厚度和强度。取温跃层强度最低指标值为 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。如果出现多跃层现象,则取第一跃层的上界为温跃层的上界,最后一温跃层的下界为温跃层的下界,并由此求得温跃层的深度、厚度和强度。

* 国家“七五”攻关项目,76-01-08号。

收稿日期:1991年12月12日,接受日期:1992年9月28日。

- 1) 中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室,1964,全国海洋综合调查报告,第三册,41—45。
- 2) 国家海洋局南海分局和国家水产总局南海水产研究所,1979,南海北部大陆架外海底拖网鱼类资源调查报告集,下册,361—364。
- 3) 国家海洋局,1975,海洋水文图集,28—79。

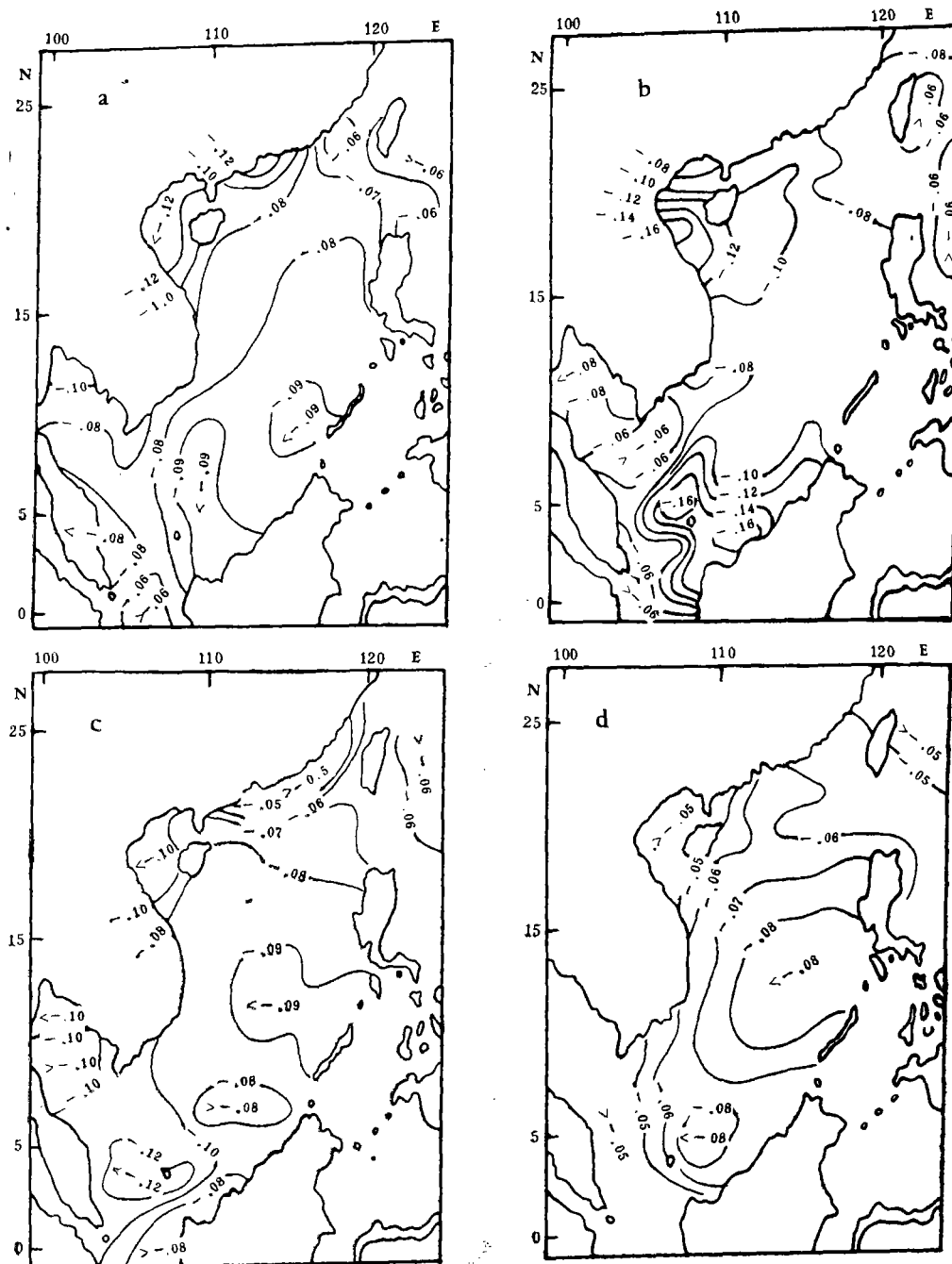


图1 温跃层强度分布

Fig. 1 The distribution of thermocline intensity in the South China Sea

a. 5月; b. 8月; c. 11月; d. 2月。(图2、图3同)。

本文所给出的温跃层基本特性——温跃层的深度、厚度和强度是该海区观测期限(1983年)较长的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格的平均状况。

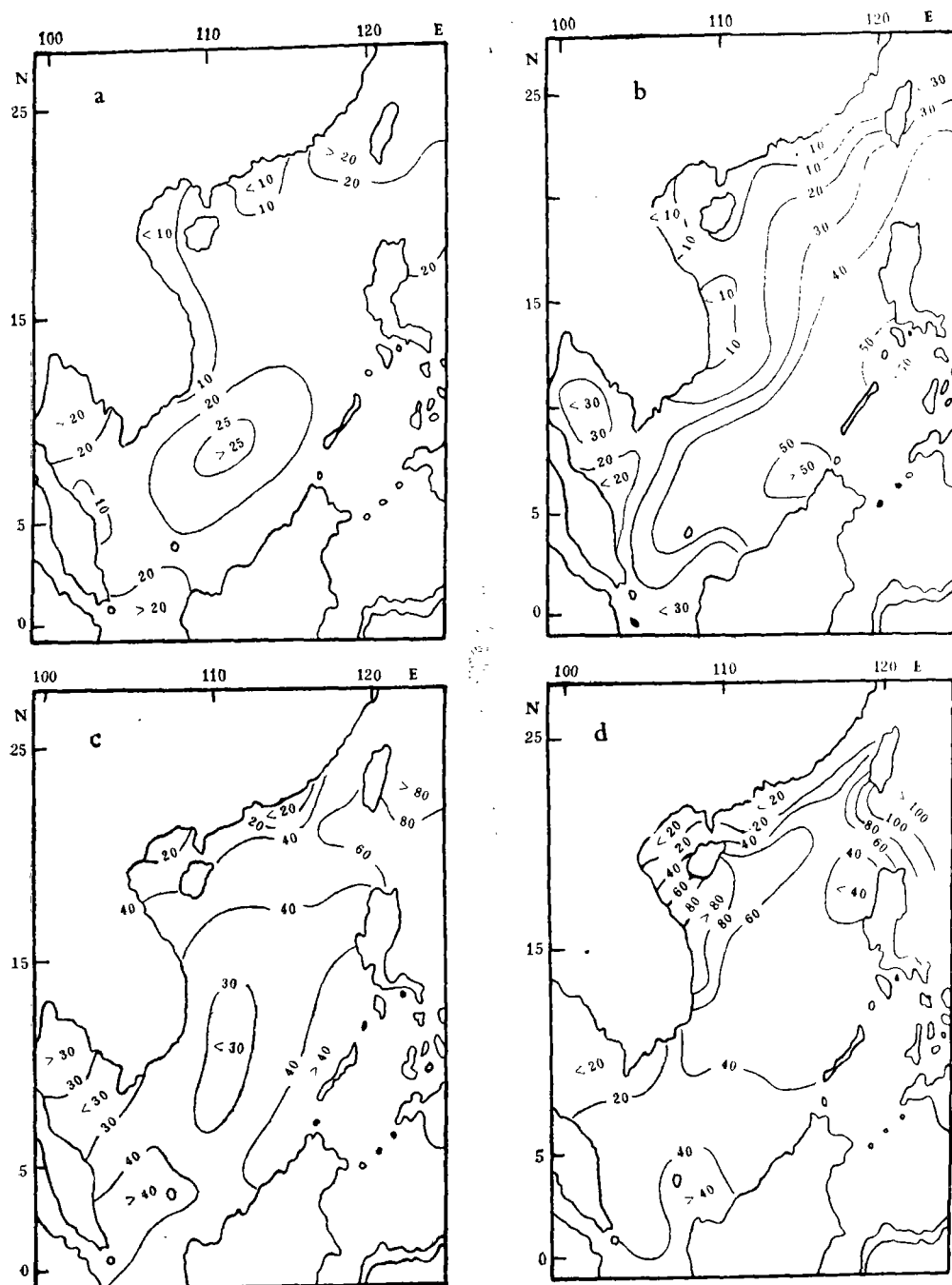


图2 温跃层深度分布

Fig. 2 The distribution of thermocline depth in the South China Sea

2 南海四季的温跃层分布

2.1 春季(3—5月) 春季太阳辐射逐渐加强,陆架浅水区的海水出现分层,温跃层开始形成并逐渐加强。整个南海温跃层强度基本上呈南北强、中间弱的分布状况(见图

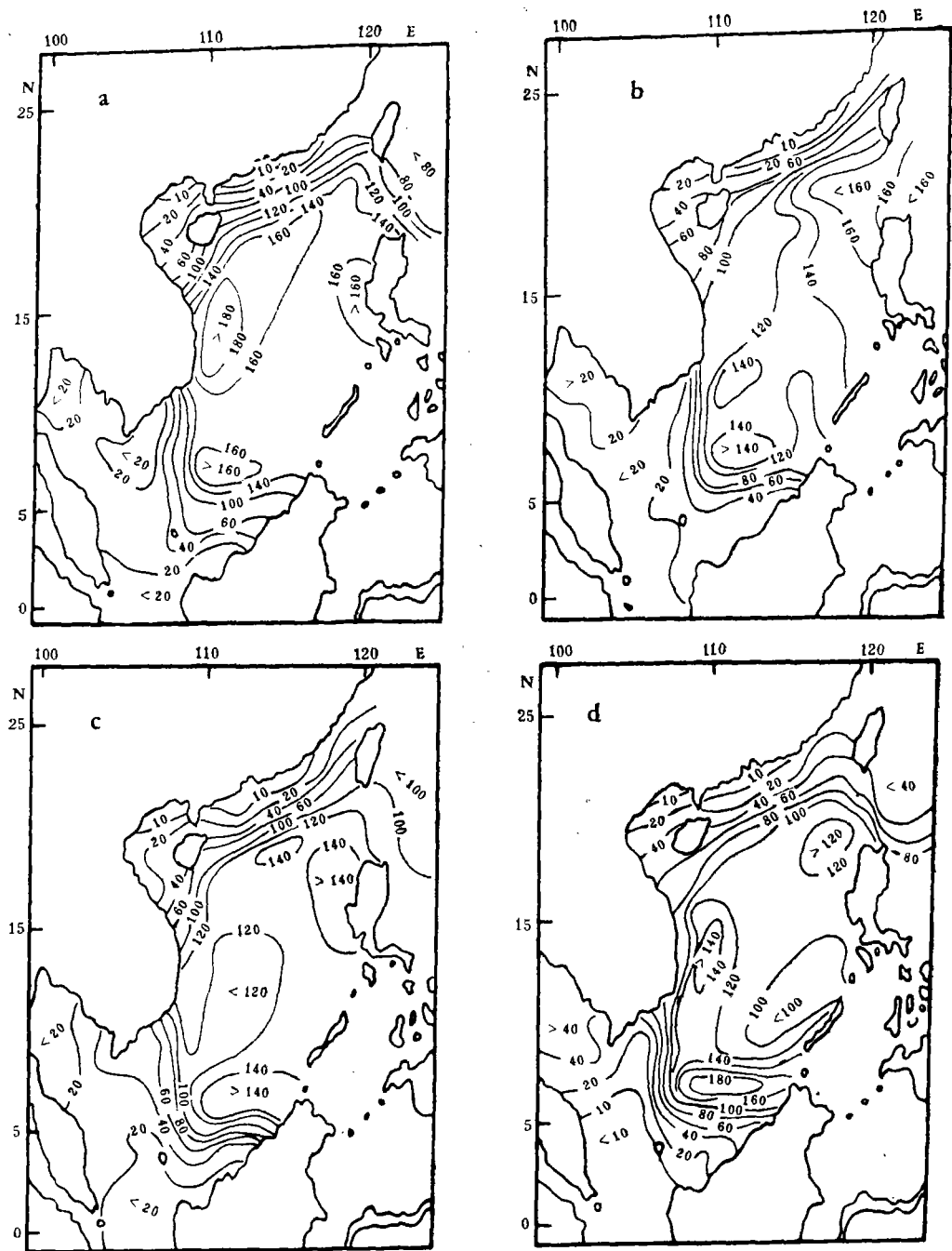


图3 温跃层厚度分布

Fig. 3 The distribution of thermocline thickness in the South China Sea

1a)。在北部近岸区, 3 月份基本上不存在温跃层现象, 4 月期间温跃层迅速成长, 到 5 月份浅水区的温跃层已相当强, 普遍超过 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。加里曼丹岛北部西侧一部分陆架区, 温跃层的强度也略大于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。在广大深水区, 温跃层的强度都保持在 $0.07\text{--}0.09^{\circ}\text{C}/\text{m}$

之间。温跃层上界深度分布自深海的 25m 向近岸变浅到不足 10m (见图 2a)。温跃层厚度变化较大 (见图 3a), 由 10 余米变到 200m, 分布状况与其上界深度相似, 由深水区向陆架区递减。

2.2 夏季 (6—8 月) 夏季是温跃层的强盛期, 陆架区的温跃层继续加强 (见图 1b), 强度大于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的水域倍增, 南海南部形成一个高强度区, 达 $0.22^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 温跃层呈现出浅海强、深海弱的分布趋势十分明显。其上界深度自西北海区不足 10m 向东南海区加深到 50 多米 (见图 2b)。温跃层厚度的分布与春季相似, 自海盆区向陆架区变薄, 这时陆架的情况与春季相当, 而西南部深水区的温跃层厚度则变薄了。南海中部水域的跃层厚度达 190m (图 3b)。

2.3 秋季 (9—11 月) 秋季期间随着太阳辐射的减弱, 海水垂直对流运动逐渐加强, 陆架区温跃层开始减弱, 浅海的温跃层范围缩小。在广大深水区, 温跃层的强度呈自南向北减弱的分布趋势 (见图 1c), 其南部仍然保持在 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上, 北部却降低到 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 左右。这时温跃层的上界深度有所变深 (见图 2c), 普遍大于 30m, 形成自南向北逐渐加深的分布格局, 在台湾海峡南端出现温跃层深度超过 100m 的最大值。温跃层厚度分布与夏季相似, 但普遍变薄了, 最大厚度出现在南部海盆区, 减到 180m 左右, 部分陆架区的浅水跃层现象消失 (见图 3c)。

2.4 冬季 (12—翌年 2 月) 冬季是南海温跃层最弱期, 在东北季风和季风流场等作用下, 绝大多数陆架区的温跃层已经消失, 除南海南部局部区域的温跃层强度稍大于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 外, 其余海区的温跃层强度都在 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下, 且出现一个自中部约为 $0.09^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 向南北递减到 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的分布 (见图 1d)。冬季温跃层上界深度最深, 台湾海峡南缘达 130m, 并由此向西南方变浅到 30 多米, 这时南海温跃层区有一半海域, 其上界位置深于 50m (见图 2d)。温跃层厚度的分布情况是, 除西南部海区仍然维持在 180m 外, 其余海区均较秋季为薄, 但分布趋势仍与秋季相近 (见图 3d)。

3 温跃层的一维预报模式

本模式基于简单的一维热平衡方程, 认为某一深处海水温度的改变量与湍流热扩散之和与辐射热通量取得平衡:

$$\frac{\partial T(z)}{\partial t} + \frac{\partial(WT)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial I(z)}{\partial z} \quad (1)$$

式中, $T(z)$ 是深度 z 处的温度; t 为时间; z 是垂向坐标, 向上为正, $z = 0$ 即位于平均海面上; WT 为湍流热通量; $I(z)$ 是辐射热通量; ρ 是海水密度; C_p 是定压比热。热平衡方程可以保证预报点海水热量的守恒, 但推算不了上均匀层的变化。为此, 将温度垂直分布分为混合层(上均匀层)和混合层以深两个部分分别进行推算。

混合层是热量充分混合的水层, 在风、浪和流等作用下, 湍流充分发展, 整个水层的温度基本均匀, 亦称为上均匀层。对于这一部分水层的热量可以单独处理, Prangmsma(1984) 得到该水层的深度 H 和平均温度值如下:

$$H = 2^{3/4} \mu (Nf)^{-1/2}, \quad T = (U - V) / (H \times \rho \times C_p) \quad (2)$$

式中, $\mu = (\tau_0/\rho)^{1/2}$; τ_0 为风应力; f 为科氏参数, $f = 2\omega \sin \phi$; U 是从海底到海表面的单位水柱中的初始热容与推算时间步长内该水柱的海面热平衡之和; V 为经推算一时

间步长后从海底到混合层下界的单位面积水柱中的热容量; N 为 Brunt-Vaisala 频率, 亦称浮性频率, 其表达式为:

$$N^2 = -g \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} + \frac{g}{C^2} \right)$$

其中 C 是声音在海水中传播的速度 (m/s), g 为重力加速度 (m/s²)。

从某一指定深度 $-z$ 到海表面的单位面积水柱中的热容为:

$$Q = \int_{-z}^0 \rho C_p T(z, t) dz_0$$

如果由于急剧降温或其它原因, 从而导致推算出温度垂直方向上出现逆温, 并且引起了水层不稳定现象时, 则对由 (2) 式给出的混合层的深度和平均温度作如下调节:

$$T_1 = \frac{1}{H_1} \int_{-H_1}^0 T(z) dz, \quad H_1 = H - \Delta H_0$$

调整后的混合层厚度为 H_1 , 较原来的 H 浅了 ΔH_0 。调整后的温度为 T_1 , 较原来的 T 为高。

对混合层以深的水层温度的模拟计算, 是采用局部热平衡方程 (1) 进行的。该方程中的热扩散项 $\frac{\partial(WT)}{\partial z}$, 它的参数化处理采用经典的经验公式:

$$\frac{\partial(WT)}{\partial z} = K_T \frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$z < -H \text{ 或 } z < -H_1$$

式中, K_T 是湍流热传导率, 它的取值为 $K_T = 14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。其次是辐射热通量项 $I(z)$, 在海面, 即 $z = 0$ 处, 辐射热通量项为 I_0 , 以海面热平衡的值代替, 表达式为:

$$I_0 = Q_s - Q_e - Q_v - Q_k$$

式中, $Q_s = 4.186 Q_0 (1 - KC)(1 - r) (\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d}))$, 下同, Q_0 为晴空时到达海面的太阳总辐射; K 为云量系数; C 为总云量; r 为海面平均反射率。

$$Q_e = 4.186 [s\sigma Q_s^2 (a_1 - b_1 \sqrt{e_a}) (1 - KC^2) + s\sigma Q_s^3 (T_w - T_a)]$$

式中, s 为海面的灰度; σ 为 Stefan-Boltzman 常数; Q_a 为海上空气的绝对温度; T_w , T_a 分别为海面海水温度和海面上空气的温度 (°C); e_a 为空气的水汽压 (hPa); a_1, b_1 和 K 均为常数。

$$Q_v = 0.059 \ 86 (597 - 0.6 T_w) (e_w - e_a) V$$

式中, e_w 是根据海水温度计算出的饱和水汽压; V 为离海面 8m 高处的风速 (m/s)。

$$Q_k = 3.9767 \times 10^{-2} (597 - 0.6 T_w) (T_w - T_a) V \quad (\text{式中符号说明同上})$$

在均匀层以下, 辐射热通量对海水的加热作用, 则用下面的参数化函数表示:

$$I(z) = \exp \left[- \left(cz + \frac{b}{1-a} z^{1-a} \right) \right] I_0 \quad (4)$$

式中, z 为混合层以下某一深度; a, b 和 c 为可调参数, 满足 $0 < a, b, c < 1$ 。在海底, 设 $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ 。在开始时刻, 给出海水温度的初值。

由(1),(2)和(4)式得差分表达式如下:

$$T(z, t_{j+1}) = T(z, t_j) + \frac{I_0}{\rho C_p} (c + bz^{-a}) \exp \left[- \left(cz + \frac{b}{1-a} z^{1-a} \right) \right] \Delta t - K_T \frac{T(z - \Delta z, t_j) - 2T(z, t_j) + T(z + \Delta z, t_j)}{\Delta z^2} \Delta t \quad (5)$$

时间步长 $\Delta t = t_{j+1} - t_j$, 取值 1h, 深度步长 Δz 取值 1m。

4 结果与讨论

运用公式(2)和(5),进行了3次为期5天的短期推算,(5)式中的 a, b 和 c 的取值分别为 0.78, 0.174 35 和 0.018。各短期后报的开始日期分别取在 1988 年 4 月 24 日和 1988 年 7 月 20, 24 日。水温的初值采用相应日期的观测结果, 热量计算涉及到的气象要素则引用推算点相邻的东沙气象站的资料。在模式试验中, 对于混合层深度的计算, 除风力和科氏参数外, 在很大程度上依赖于 N 的取值。在推算当中, 取温跃层上界与下界间的 N 的均值 $5.8^\circ\text{C}/\text{m}$, 进行计算。

图 4 为同一站点 3 次不同时期的 5 天模拟结果, 从图中可看到, 预报模式给出的温度垂直分布趋势比较合理, 与实测结果较为一致, 误差很小。

表 1 是由前面所述的样条函数法确定出实测和推算的温跃层特性的结果, 可以看出, 两者在跃层的上界、下界和强度值都是较接近的。最大相对误差都小于 30%。其相对误差的平均值, 上界为 16%, 厚度为 17%, 强度为 20%。

表 1 温跃层特征

Tab. 1 The characterise of thermocline in the South China Sea

日 期	均 匀 层 温 度 ($^\circ\text{C}$)		上 界 (m)		下 界 (m)		厚 度 (m)		强 度 ($^\circ\text{C}/\text{m}$)	
	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测
1988.4.29	25.27	26.30	53	42	140	142	87	100	0.08	0.07
1988.07.25	28.26	28.32	43	50	178	157	135	107	0.07	0.11
1988.07.29	28.65	28.69	46	50	151	168	105	118	0.11	0.10

本模式尽管是一种简化了的近似模拟, 但所得到的结果与实际情况较为一致, 可以大致上反映出南海开阔海区温跃层特性的一般变化规律。上述误差表明, 本模式显然存在着一些不足之足。特别是在水温垂直分布模拟的个例中, 一些水层的模拟结果与实测温度的误差较为明显。究其原因, 除本模式的热扩散及风的涡动混合的处理方法较为简单外, 未能考虑平流引起的水交换以及侧向的热扩散, 则必然导致出较大的误差。另外, 南海是热带风暴的频发区、经过区, 风暴引起的海水混合作用也不容忽视。可惜我们没有风暴前后的有关资料, 未能对此进行探讨。

本文所采用的一维温跃层模式, 其模拟结果仅仅是一种简化了的理想化的情况, 当然

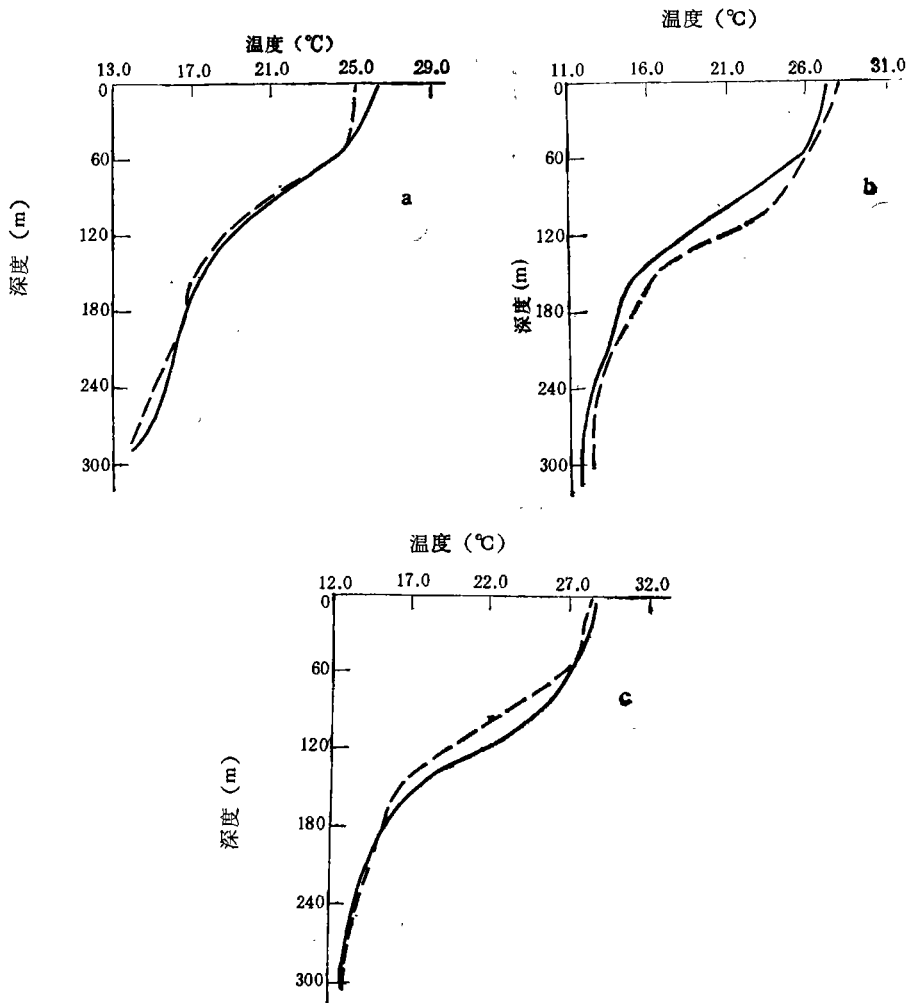


图4 推算与实测温度的垂直分布

Fig. 4 The vertical distribution of observation and computation temperatures in the South China Sea

a. 1988年4月29日; b. 1988年7月25日; c. 1988年7月29日。

——观测结果; ----预报结果。

存在着不足之处。由于温跃层的变化机制十分复杂,要想取得较理想的结果,还需要做大量深入的研究工作。

5 结语

综上所述,南海温跃层主要有如下几点特征。

- 5.1 南海温跃层可分两大类 第一类为辐射型,在近岸陆架区占主要地位,春季显著;另一类是不同水体叠置型,在深海区起主要作用,长年存在,四季变化不大。
- 5.2 由于动力和热力的综合作用,南海温跃层上界深度有明显的季节变化,春季最浅,春夏相当,秋季加深,冬季最深。
- 5.3 温跃层厚度,在陆架区最薄,约10多米;在海盆区最厚,在100m以上。

5.4 温跃层强度季节性较明显,由春到夏季是加强期,由秋到冬季是减弱期。温跃层的强度的水平分布规律是:春夏季基本自陆架区向海盆区减弱;秋冬季反之,自陆架区向海盆区增强。

5.5 南海温跃层的分布特征与海面风场、海气交换、流场、与外海的水交换、潮汐及其变化过程相联系。

参 考 文 献

- 中国科学院南沙综合科学考察队, 1989, 南沙群岛及其邻近海区综合调查研究报告(一), 下册, 科学出版社(北京), 340—342。
- 王 林、张晓卫, 1983, 微型计算机算法与程序, 上海科学技术文献出版社, 136—145。
- 刘高瑛, 1990, 温度场的数值模拟, 重庆大学出版社, 41—69。
- 《南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告》编委会, 1988, 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告, 海洋出版社(北京), 157—183。
- Prangma, G. J. and Kruseman, P., 1984, Aspects of mixed layer modelling applied to JASIN data, *Dynamics of Atmospheres and Ocean*, 8(1984):321—341.
- Wyrki, K., 1961, Physical oceanography of the South-East Asian water, scientific result of marine investigation of the South China Sea and Gulf of Thailand 1959—1961, *Naga Report*, 2:31—33.

THE RADICAL CHARACTERISTICS AND THE ONE-DIMENSIONAL CALCULATED PATTERN OF THE SOUTH CHINA SEA THERMOCLINE

Xu Xizhen, Qiu Zhang, Long Xiaomin

(South China Sea Institute of Oceanology, Academia Sinica, Guangzhou 510301)

ABSTRACT

The present paper consists of two different parts. The first part describes the averaged characteristics of the thermocline in the South China Sea. Investigation data collected at home and abroad from 1907 to 1990 are analyzed season by season. The statistical characteristics of the thermocline in the South China Sea are discussed. The results show that the thermocline is of two types. One has radiative characteristics, and mainly appears in the northern shelves of the South China Sea, has evident annual variation, and is notably the strongest in summer, weakest in winter. The other results from the interaction between the seawater masses, exist in the broad deep sea all the year round, and have no variation. The analysis also shows that the thermocline relates to the wind, sea current, tide and so on.

The calculated pattern of the thermocline is presented in the second part. Based on some assumptions, the thermocline is studied by means of the one-dimensional heat balance equation for the northern South China Sea. Although it is simple, the calculated pattern agrees well with the observation results. The relative errors are only about 16%, 17%, and 20% in the thermocline depth, thickness and intensity, respectively.

Key words Thermocline Heat balance Radiative flux Buoyancy frequency