

# 中国近海温跃层判定方法的研究

郝佳佳<sup>1,2,3,4</sup>, 陈永利<sup>1,2</sup>, 王 凡<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环境与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 中国科学院 烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 根据东海以及南海东北部多组资料, 探讨了拟阶梯函数法和垂向梯度法在浅海区(水深 < 200 m)、陆架坡折海域(水深在 200 m 左右)和深水开阔海区(水深 > 200 m)的应用情况, 分析了温跃层在陆架坡折海域的水平衔接问题。对比分析表明: 在浅海区, 两种方法结果比较一致, 特别对某些垂直温度梯度较弱的曲线, 拟阶梯函数法和实际水文廓线符合更好。陆架坡折海域, 垂向梯度法对于温度梯度相对较弱的跃层刻画不好, 而拟阶梯函数法可以对较弱温跃层进行判定, 与实际垂直水文结构一致。深水开阔区域, 垂向梯度法所得温跃层特征量与实际符合较好, 而拟阶梯函数法获得的温跃层强度偏大。因此, 对本研究海域来说, 当水深 200 m 时, 采用拟阶梯函数法, 当水深 > 200 m 时采用垂向梯度法, 最小判定标准统一采用 0.05 /m, 可以有效避免陆架坡折海域的水平不连续问题, 与实际水文廓线符合较好。

**关键词:** 温跃层; 判定方法; 拟阶梯函数法; 垂向梯度法; 水平不连续

**中图分类号:** P73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2008)12-0017-08

我国邻近海域各种海洋环境要素时空分布极其复杂, 海洋温跃层是该海域中的重要现象, 其分布和变化不仅关系到水团垂直边界的划定, 而且直接影响到潜艇活动和声仪器的使用以及海洋渔业的发展。因此, 国内外对于温跃层, 不论是关于大洋温跃层理论, 还是浅海温跃层的分析与诊断都作了大量工作。特别是有关中国近海陆架海区温跃层的分析成果丰硕<sup>[1-8]</sup>, 得到了季节性温跃层的基本变化规律和机制。

在温跃层的分析过程中, 通常用跃层的示性特征量(跃层深度、跃层强度、跃层厚度)来描述跃层现象。因此如何准确地确定温跃层的上下界, 进而得到温跃层的特征量, 就显得尤其重要, 国内学者针对这一方面也作了大量的研究<sup>[9-14]</sup>。目前温跃层判定的主要方法包括: 垂向梯度法、曲率极值点法、S-T 法(自海面向下, 与表层温度值之差大于 0.5 的温度值所在深度为温跃层上界深度<sup>[15]</sup>)和拟阶梯函数法。这几种方法均存在一定的局限性, 垂向梯度法在浅海(水深 < 200 m)采用 0.2 /m, 开阔海区(水深 > 200 m)采用 0.05 /m 的最低判定标准, 因此在深水和浅水之间形成水平分布的不连续。最大曲率点法在用标准层资料绘制出温度深度曲线后, 用此法可以很直观地确定跃层上下界深度, 但对于曲率不明显或多跃层情况, 此方法给数据分析带来困难。S-T 法主要适用于深水大洋区, 对于近海受太阳辐射、降水及冲淡水等影响明显的区域是不合适的, 另一方面它只能确定跃层上界深度。而近期的拟阶梯函数法是根据陆架海区温度垂直结构特点

提出的, 其在大洋区使用效果并不理想。因此, 在以往温跃层特征分析文献中, 绝大多数采用垂向梯度法。

特别地, 针对垂向梯度法在浅水和深水之间造成的不连续, 也有学者专门进行了研究。潘爱军等<sup>[16]</sup>通过对南海东北部陆架坡折海域跃层判定的讨论, 曾指出采用 0.1 /m 的最低判定标准, 可以保证温跃层的水平连续分布。但这也只是对个别海域的分析, 而且这种标准也带有一定人为因素。因此, 作者旨在寻求一种不受人为因素影响, 可以适用于中国近海的温跃层判定方法, 以保证温跃层在陆架坡折海域的水平连续分布。

## 1 资料及方法

### 1.1 资料

作者利用中国科学院海洋研究所“中国海洋科学数据库”在中国近海及西北太平洋海域的标准层资料, 利用 Akima 插值方法插值到 1 m 层上, 对温跃层判定方法在浅海区(水深 < 200 m)、陆架坡折海域(水深在 200 m 左右)和开阔海区(水深 > 200 m)的应用情况进行检验。图 1 为本文选择的进行温跃层判定方法检验的站点位置。

收稿日期: 2008-09-01; 修回日期: 2008-10-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx3-sw-222);

国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411802)

作者简介: 郝佳佳(1981-), 男, 山东潍坊人, 博士, 从事中国近海水文分析及数值模拟工作, E-mail: jjhao@yic.ac.cn; 陈永利, 通讯作者, 电话: 0532-82898853, E-mail: ylchen@ms.qdio.ac.cn

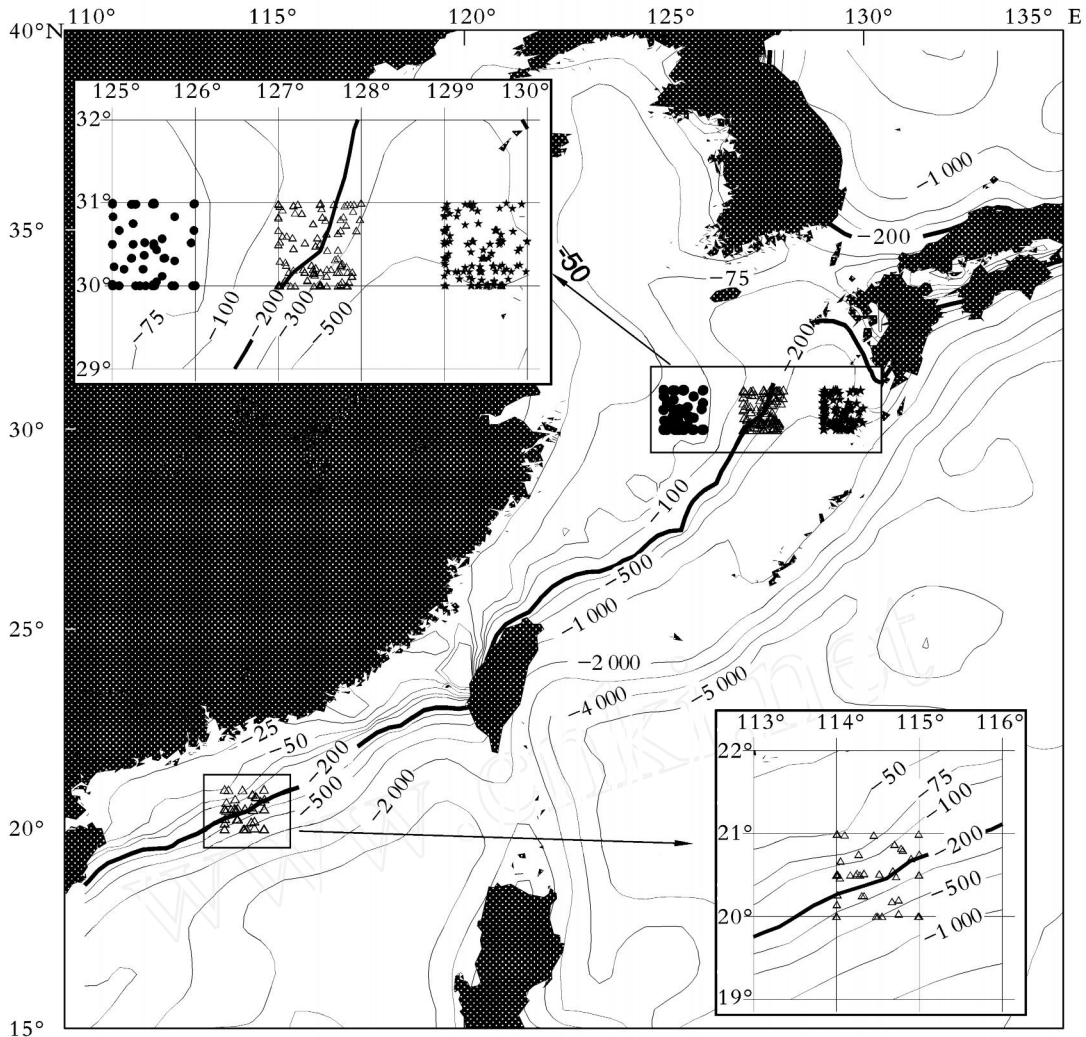


图 1 研究海域水深及温跃层判定方法检验资料位置

Fig. 1 Bathymetry of the study areas and location of the test data

## 1.2 方法

主要考虑垂向梯度法和拟阶梯函数法在各海区的应用情况。

**垂向梯度法:**如果自海面到海底将海水分为  $N$  层,各层的深度和水温标号为  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n; T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ 。

$$\text{温跃层强度} = \left( \frac{-T}{Z} \right)_{\max} = \left( \frac{T_k - T_{k+1}}{Z_{k+1} - Z_k} \right)_{\max} \quad (1)$$

采用“从强选取”的原则,当一个温度剖面中某一段的垂直梯度大于临界值(0.2 /m,水深 200 m 时; 0.05 /m,水深 > 200 m 时)时,确定该段为温度跃层,以该段的顶部水深为跃层上界(亦称跃层深度),该段的厚度为跃层厚度,该段整个垂向温度梯度为跃层强度<sup>[17]</sup>。

**拟阶梯函数法:**Chu 等<sup>[18]</sup>按照温度跃层的概念,基于梯度分布特征考虑,将海水理想划分为上均匀层(混合层)、跃层和下层(陆架区呈均匀层;大洋区呈指数分布)三层垂直结构,提出了描述温跃层的参

数化模型。与此类似,葛人峰等<sup>[12]</sup>提出了一个用拟阶梯函数拟合陆架区温度垂直分布曲线,求解温跃层特征量的计算方法。其函数表现形式为:

$$\begin{cases} t = A & p < a \\ t = r(p - a) + A & a < p < b \\ t = B & p > b \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $t$  为拟合温度值;  $p$  为压力值 ( $a, b$  等同于水深值);  $a$  为跃层上界深度;  $b$  为跃层下界深度;  $r$  为跃层强度;  $A$  为上均匀层平均温度;  $B$  为下均匀层平均温度。

按照以上温度要素的垂直结构形式,用最小二乘法确定上式中的  $a, b$  和  $r$ ,即可得到  $a, r$  和跃层厚度  $H (H = b - a)$ 。最佳的跃层参量的选取,由最小二乘法确定函数的最优系数,使其均方差达到最小。

$$S = \frac{1}{N - 2} \sum_{i=1}^N (t_i - t_i)^2 \quad (3)$$

式中,  $t$  为实测温度,  $t$  为由式 (2) 计算的温度,  $i = 1, 2, \dots, N$  层。

与垂向梯度法深水最低标准 ( $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ) 相匹配,在水深小于  $200 \text{ m}$  的区域,取区分跃层与均匀层的最小标准为  $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$  (其远小于传统定义的温跃层判定标准  $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ),判断温度的一阶差分值得到大于给定的最小标准的两端位置,然后利用最小二乘法得到跃层的精确上下界,从而确定温跃层特征示量。以下作者将针对东海以及南海海域,分别在浅水区、陆架坡折区和深水区对拟阶梯函数法和垂向梯度法进行比较。

## 2 结果

### 2.1 东海东北部海域

#### 2.1.1 浅水区

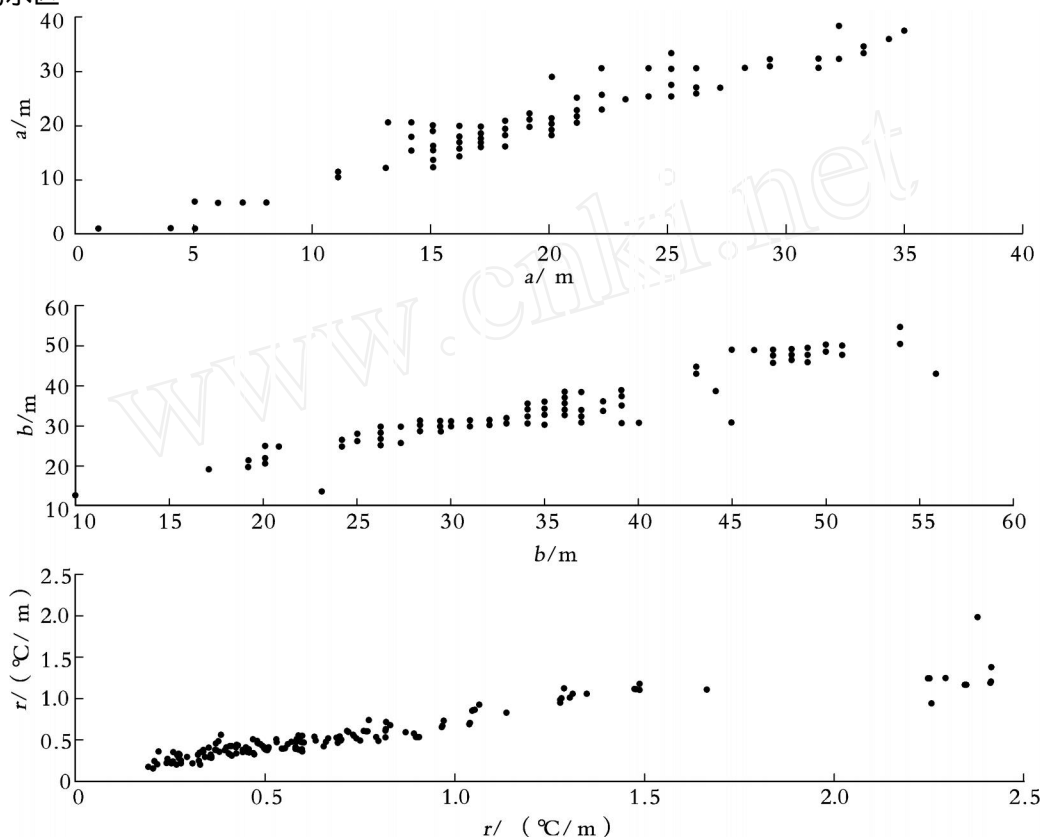


图2 拟阶梯函数法(横轴)和垂向梯度法(纵轴)在浅水区的比较

Fig.2 Comparison of the quasi-step function method ( $x$ -axis) and vertical grads method ( $y$ -axis) in shallow waters

通过几种不同类型分布温度廓线的判定结果可以看出,不管要素垂直结构形态如何,拟阶梯函数逼近法得到的跃层上、下界深度和强度均较好地符合要素垂直结构趋势(图 3A1, A2)。但是对于个别曲线来说,两种方法得到的结果有较大区别。图 3B1, B2 显示,对于垂直温度梯度  $< 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ,但温度梯度仍较大的廓线,垂向梯度法显示无跃层,而阶梯函数法可以得到跃层段。同样地,对于图 3C1, C2 中深层 ( $30 \text{ m}$  以下)温度梯度接近  $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$  的跃层段,阶梯函数法也有体现,而垂向梯度法判定的温跃层下界

首先在浅水区域 ( $30^\circ \sim 31^\circ \text{N}, 125^\circ \sim 126^\circ \text{E}$ ),选用 8 月份 189 组观测资料,对拟阶梯函数法与垂向梯度法确定温跃层上、下界深度和强度分布情况比较可以发现,除个别曲线差别较大以外,两种方法所得的温跃层特征要素符合较好(图 2)。两种方法获得的温跃层三要素的相关系数分别达到  $R = 0.97, 0.94$  和  $0.95$ ,置信度均超过  $95\%$ 。拟阶梯函数法获得的平均温跃层上、下界深度和强度分别为  $18.6 \text{ m}, 34.0 \text{ m}$  和  $0.66 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ,相应地,垂向梯度法获得的分别为  $19.8 \text{ m}, 33.8 \text{ m}$  和  $0.53 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ,由此可见,两种方法的计算结果基本一致。

较浅,和实际水文廓线的下拐点不符合。图 3 D1, D2 中,多温跃层分布不明显的曲线,阶梯函数法中将它们作为一个温跃层处理。由这三组水文廓线对比可以看到,对于温度梯度相对较小,但又接近  $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$  的曲线,利用阶梯函数法,可以将其作为温跃层处理,与实际温度垂直分布趋势符合得较好。所以,对于大多数廓线来说,两种方法同样适用于浅水区域,所得到的温跃层要素差别不大且均与实际水文垂向结构一致,而对某些垂直温度梯度较弱的曲线来说,拟阶梯函数法更好,所以在浅水区域,采

用拟阶梯函数法相对较好些。

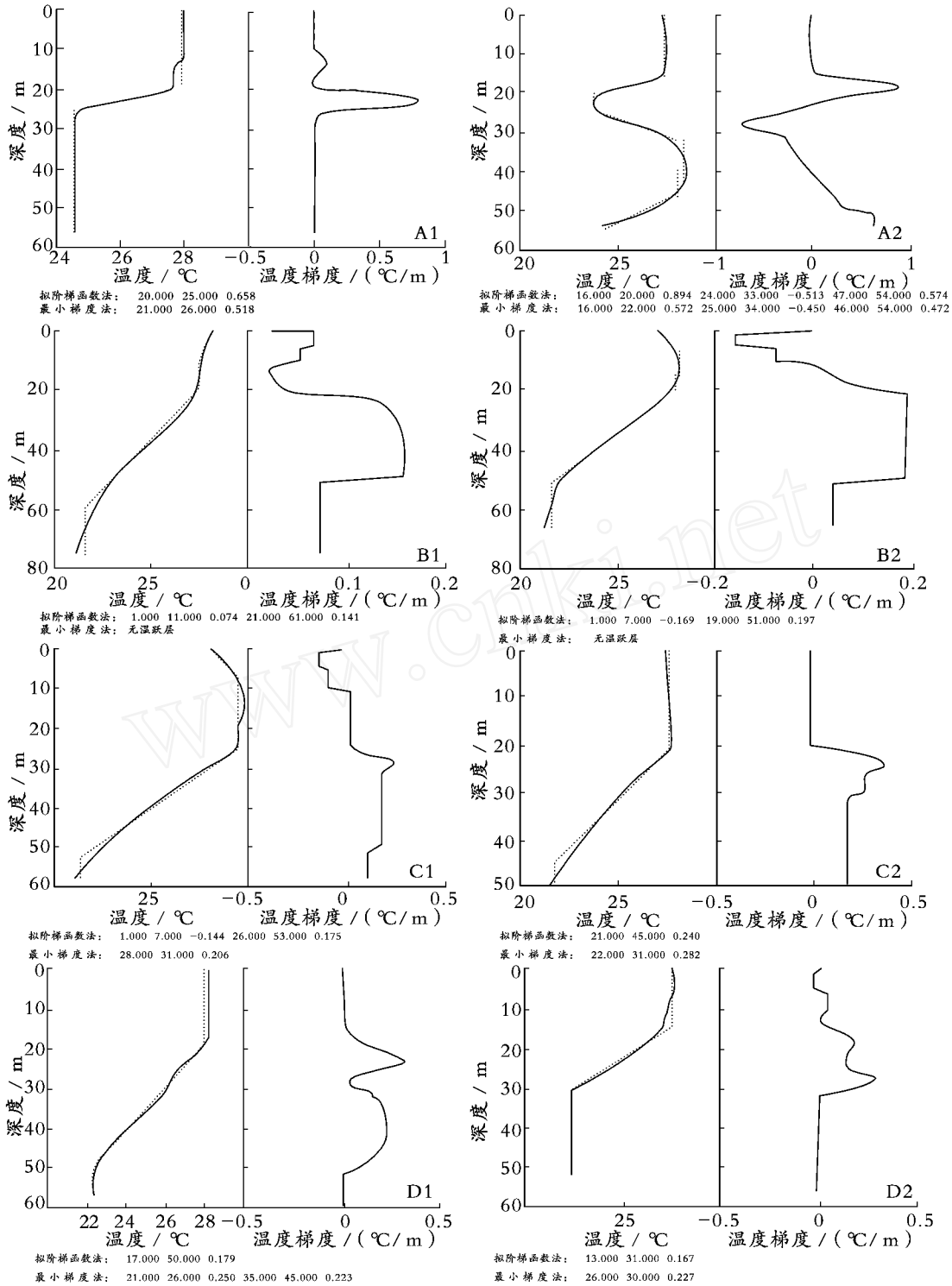


图3 原始曲线(实线)与拟合曲线(虚线)在浅水区的对比

Fig. 3 Comparison of the measured (solid) and fitted temperature profiles in the shallow waters

每张图下为计算所得的温跃层上、下界深度和强度

The calculated thermocline upper, lower boundaries and gradients are under each map

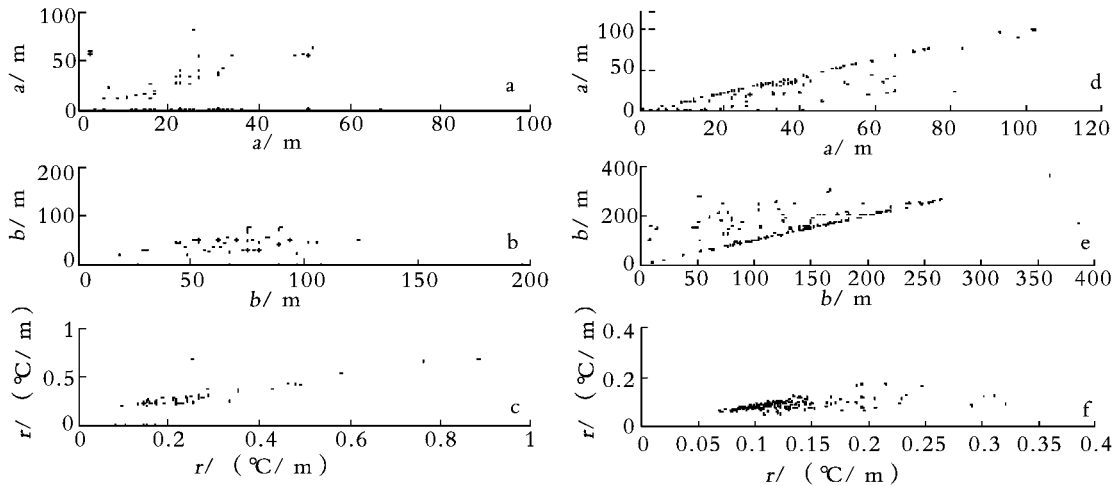


图4 拟阶梯函数法(横轴)和垂向梯度法(纵轴)的比较

Fig.4 Comparison of the quasi-step function method (x-axis) and vertical grads method (y-axis)

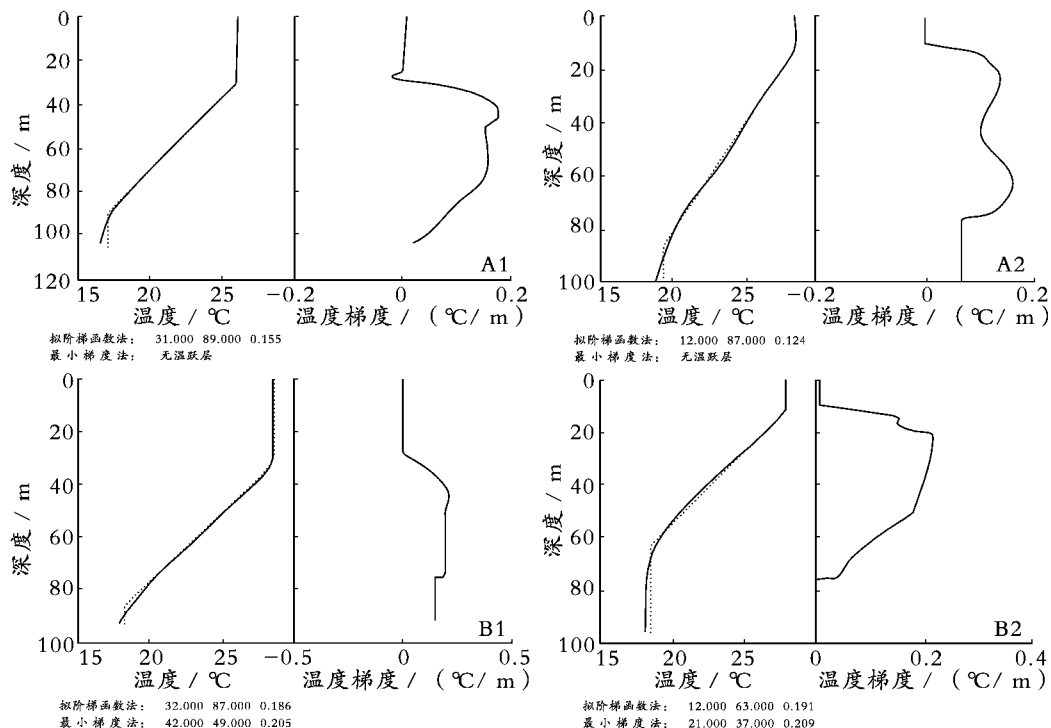
a,b,c. 陆架坡折海域;d,e,f. 深水开阔海域  
a,b,c. shelf break waters; d,e,f. open seas

2.1.2 陆架坡折海域

为了研究两种方法在陆架坡折海域(200 m左右)的应用情况,作者选取了东海(30°~31°N,127°~128°E)8月份181条水文廓线分析比较它们所获得的温跃层情况。由获得的温跃层上、下界深度和强度分布情况(图4a,b,c)可以发现,两种方法得到的结果存在明显的差异,垂向梯度法所确定的温跃层上(下)界比拟阶梯函数法整体偏大(小),同时还有一部分站点显示无温跃层(位于横轴上)。那么哪一种结果更符合

实际情况呢?下面将就具体水文廓线进行分析。

由原始曲线与拟合曲线的对比发现,图5A1,A2曲线若采用垂向梯度法0.2 °C/m的最小强度标准,则显示没有温跃层;若采用拟阶梯函数法则可以判定得到温跃层,和实际情况较好符合。图5B1,B2曲线若采用垂向梯度法,则温跃层下界分别为49 m和37 m,而实际温跃层的下拐点要深得多,同时垂向梯度法所确定的温跃层上界比实际拐点要深,而采用拟阶梯函数法所得温跃层上、下界和实际情况符合



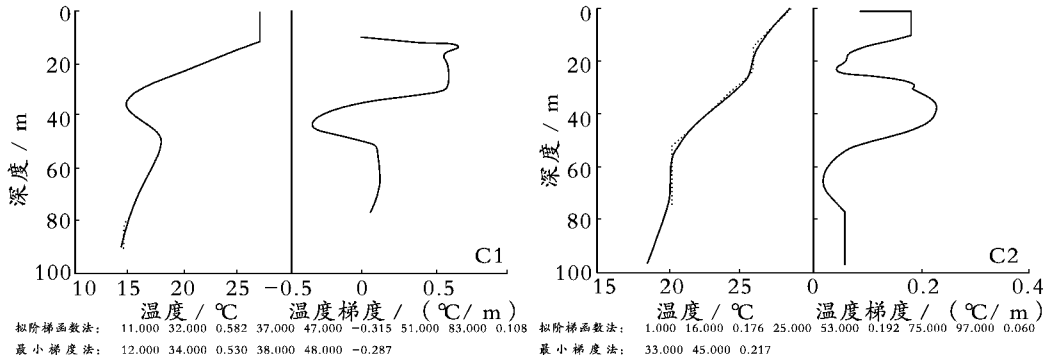


图5 原始曲线(实线)与拟合曲线(虚线)在陆架坡折海域的对比

Fig. 5 Comparison of the measured (solid) and fitted temperature profiles (dashed) in the shelf break waters

很好。图5C1,C2曲线,由于采用垂向梯度法对于相对较弱的温跃层没有显示,因此无法准确刻画出多温跃层结构的分布,特别是C2曲线,实际在上表层存在一个季节性温跃层,而采用垂向梯度法并没有判别出来,因此采用拟阶梯函数法可以更准确地刻画出水文垂直分布情况,有利于更准确地分析季节性温跃层的变化特征。从这几组曲线可以看到,垂向梯度法对于温度梯度相对较弱的跃层刻画不好,0.2 /m的最小强度标准只能判定出强度较强的跃层段,如果通过降低最小判定标准来改善判定结果,那么最小标准的具体确定随每条水文廓线而变,也容易受人为选择的影响。因此,在陆架坡折海域,采用拟阶梯函数法可以避免人为选择最小标准的影响,与实际水文垂直结构符合较好。

2.1.3 深水开阔海域

如图4d,e,f所示为深水开阔海域(30°~31°N,

129°~130°E)8月份208条水文廓线阶梯函数拟合与梯度法的对比。由获得的温跃层上、下界深度和强度分布情况(图4d,e,f)可以发现,两种方法得到的结果存在明显的差异,垂向梯度法所确定的温跃层上(下)界比拟阶梯函数法整体偏小(大),而对于温跃层强度来说,拟阶梯函数法所得结果偏大。同样地,下面将就具体水文廓线,分析哪种结果更符合实际情况。

从图6曲线可以看出,采用两种方法所得的温跃层特征量差别明显,其中梯度法深水0.05 /m标准所得温跃层特征量与实际符合较好,而阶梯函数法获得的温跃层强度偏大。这是由于大洋区下均匀层温度缓慢减小,其分布接近指数形态,下均匀层不能简单地采取平均温度来代替。因此,在深水开阔海域,可以直接采用梯度法深水0.05 /m标准来确定温跃层。

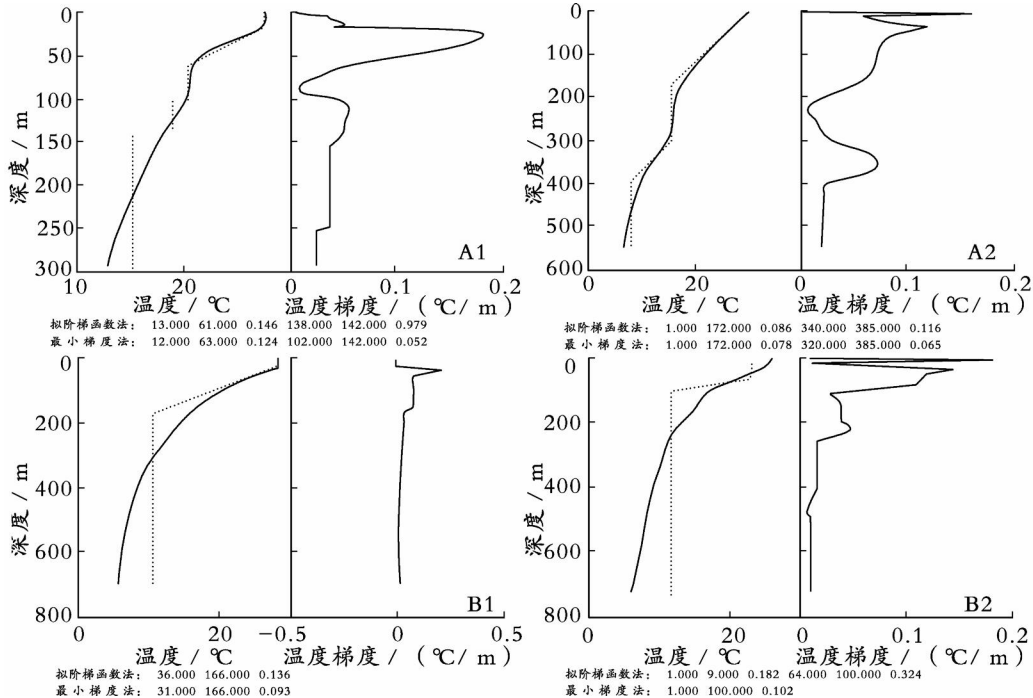


图6 原始曲线(实线)与拟合曲线(虚线)在深水开阔海域的对比

Fig. 6 Comparison of the measured (solid) and fitted temperature profiles (dashed) in the open seas

## 2.2 南海东北部海域

南海海域与东海海域相比,有其自身的水文垂直结构特征,为了研究两种方法在南海东北部陆架坡折海域的应用情况,作者选择 20°~21°N, 114°~115°E 区域 8 月份 92 条水文廓线进行研究。分析表明两种方法获得的温跃层上、下界深度和强度存在明显的差异(图略)。由水文廓线个例分析发现,对于水深小于 200 m 的水文廓线(图 7A1, A2),若采用垂向梯度法的 0.2 /m 的最小强度标准,则显示没有温跃层或者不能完整显示温跃层结构。和东海区类似,这是因为此

处温跃层相对偏弱(小于 0.2 /m),若直接降低最小强度标准,则具体应选择何种标准也因具体水文廓线而定,而拟阶梯函数法可以不受最小强度标准的限制,准确确定温跃层的上、下界温度拐点。对于水深大于 200 m 的水文廓线(图 7B1, B2),可以看到 B1 曲线两种方法确定的温跃层差别不大,而对于更深的水文廓线(B2, 水深 540 m),拟阶梯函数法获得的温跃层明显偏强。因此,对于南海东北部来说,同样地,水深小于 200 m 时,拟阶梯函数法确定的温跃层较准确,而水深大于 200 m 时,垂向梯度法相对较好些。

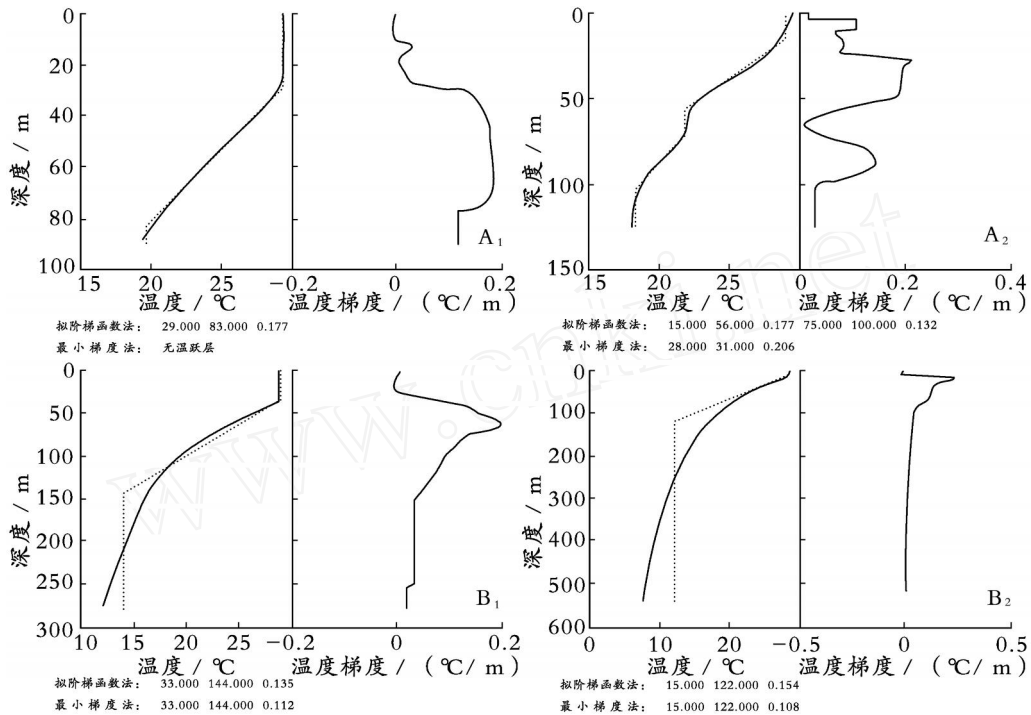


图 7 原始曲线(实线)与拟合曲线(虚线)在南海东北部的对比

Fig. 7 Comparison of the measured (solid) and fitted temperature profiles (dashed) in the northeastern South China Sea

## 3 结论

针对东海以及南海东北部海域,分别在浅水区、陆架坡折区和深水开阔海域选取历史观测资料,对拟阶梯函数法和垂向梯度法的应用情况进行了对比。

浅水区域,对于大多数廓线来说,两种方法得到的温跃层要素差别不大,且均与实际要素垂向结构一致,而对某些垂直温度梯度较弱的曲线来说,拟阶梯函数法更好。陆架坡折区域,垂向梯度法对于温度梯度相对较弱的跃层刻画不好,而拟阶梯函数法可以对较弱温跃层进行判定,与实际水文垂直结构一致。深水开阔区域,垂向梯度法所得温跃层特征量与实际水文垂直结构符合较好,而阶梯函数法获得的温跃层强度偏大,这是由于大洋区下均匀层温度缓慢减小,其分布接近指数形态,下均匀层不能简

单地采取平均温度来代替。

综合以上分析,大洋区(水深 > 200 m)可以直接采用垂向梯度法,浅水区(水深 < 200 m)采用拟阶梯函数法,最低划分标准统一采用 0.05 /m。采用两种判别方法的优点在于:在陆架区用统一的量化标准判定跃层,不受最低跃层标准的限制,摆脱了人为主观因素,同时可以消除传统垂向梯度法在陆架浅、深水区造成的不连续。

### 参考文献:

- [1] 毛汉礼,邱道立. 第四章:中国近海温、盐、密度的跃层现象 [A]. 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. 全国海洋综合调查报告,第三册 [C]. 北京:科学出版社,1964. 116.
- [2] 蓝淑芳,顾传成,傅秉照. 渤海、黄海、东海水温垂直结构统计特征分析 [A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋

## 研究报告 REPORTS

- 科学集刊(25) [C]. 北京:科学出版社,1985. 11-25.
- [3] 于洪华. 东海温跃层特征分析 [J]. 东海海洋,1988,6(1):1-11.
- [4] 屠金钊. 渤、黄海温度跃层的分布与变化 [J]. 海洋通报,1992,11(4):27-32.
- [5] 徐锡祯,邱章,龙小敏. 南海温跃层基本特征及一维预报模式 [J]. 海洋与湖沼,1993,24(5):494-502.
- [6] 邱章,徐锡祯,龙小敏. 1994年9月南沙群岛调查海区的跃层特征 [J]. 热带海洋,1996,15(2):61-67.
- [7] 陈希,沙文钰,李妍. 南海北部海区温跃层分布特征及成因的初步分析 [J]. 海洋预报,2001,8(4):9-17.
- [8] 邹娥梅,熊学军,郭炳火,等. 黄、东海温盐跃层的分布特征及其季节变化 [J]. 黄渤海海洋,2001,19(3):8-18.
- [9] Li F Q. On the determination of upper and lower bounds of the high gradient layers in the ocean [J]. *Collected Oceanic Works*, 1983, 6(1):1-7.
- [10] 贾旭晶,刘秦玉,孙即霖. 1998年5~6月南海上混合层、温跃层不同定义的比较 [J]. 海洋湖沼通报,2001,1:1-7.
- [11] 吴魏,方新华,吴德星. 关于跃层深度确定方法的探讨 [J]. 海洋湖沼通报,2001,2:1-7.
- [12] 葛人峰,乔方利,于非,等. 陆架海区温跃层特征量的一种计算方法——拟阶梯函数逼近法 [J]. 海洋科学进展,2003,21(4):394-400.
- [13] 周燕遐,范振华,颜文彬,等. 南海海域BT资料、南森站资料计算温跃层——三项示性特征的比较 [J]. 海洋通报,2004,23(1):22-26.
- [14] 张媛,吴德星,林霄沛. 东海夏季跃层深度计算方法的比较 [J]. 中国海洋大学学报,2006,36(增刊):1-7.
- [15] Sprintall J, Tomczak M. Evidence of the barrier layer in the surface layer of the Tropics [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C5):7 305-7 316.
- [16] 潘爱军,郭小钢,许金电,等. 南海东北部陆架坡折海域跃层判定讨论 [J]. 热带海洋学报,2006,25(5):8-12.
- [17] GB12763.7—91. 海洋调查规范——海洋调查资料处理 [S].
- [18] Chu P C, Fralick Jr C R, Haeger S D, *et al.* A parametric model for the Yellow Sea thermal variability [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 10 499-10 507.

## A study of thermocline calculations in the China Sea

HAO Jia-jia<sup>1, 2, 3, 4</sup>, CHEN Yong-li<sup>1, 2</sup>, WANG Fan<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave Studies, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves (KLOCAW), the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, the Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Received:** Sep. , 1, 2008

**Key words:** thermocline; determining method; quasi-step function approximation method; vertical gradient method; horizontal discontinuity

**Abstract:** Based on observations data in the northeastern East China Sea and South China Sea, the applications of the vertical gradient method and the quasi-step function approximation method in shallow waters (depth < 200 m), the shelf break waters (about 200 m) and open seas (depth > 200 m) were analyzed to solve the horizontal discontinuity of the thermocline calculations in the shelf break waters. The results show that: in shallow waters, the results of these two methods are consistent, particularly the results are more consistent with the actual hydrological profile for some vertical temperature gradient weaker curve using quasi-step function approximation method. In the shelf break waters, quasi-step function approximation method pictures the thermocline better because the vertical temperature gradient is weaker. In open seas, the thermocline calculated by the vertical gradient method is more approaching the actual hydrological profile; however the gradient is too larger using quasi-step function approximation method. Therefore, the quasi-step function approximation method is used in the waters where the depth < 200 m, and the vertical gradient method is used in the waters where the depth > 200 m with the uniform minimum criteria (0.05 / m), avoiding the horizontal discontinuity of the thermocline.

(本文编辑:刘珊珊)