

一种基于相对梯度法的海水温度分层模型*

赵宁¹, 韩震^{1,2**}, 王嵩¹

(上海海洋大学 1. 远洋渔业协同创新中心; 2. 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 提出了一种以海表面温度为输入参数的海水温度分层模型。以 2005—2012 年的 Argo 气候态数据集与 Argo 浮标数据为基础, 采用相对梯度法对海水温度垂向结构进行了分层, 并据此获取了各层拟合方程所需的参数, 包括: 混合层深度、混合层梯度、温跃层上界深度、温跃层下界深度、深层大洋起始深度以及方程拟合系数。本文通过世界大洋数据库 09 版的 CTD/XBT 实测剖面数据对模型进行了检验。检验结果表明, 该模型可以有效地对海水温度结构进行模拟, 特别是 400 m 以上的中上层大洋。模拟结果的总体均方根差(RMSE)为 0.778 °C, 而在水深 400 m 以上的中上层区域误差为 0.494 °C。

关键词: 海水温度; 分层模型; 相对梯度法

中图分类号: P731.11

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2014)09-025-06

在海洋表层, 由于风、流等的混合作用, 形成了一层物理化学性质近似相同的区域, 称为混合层(Mixed Layer, ML)。在混合层之下, 温度随深度变化明显, 称为温跃层(Thermocline)。温跃层之下的深层海水, 温度的变化趋于缓慢^[1]。

根据海水温度的垂向结构特点, 国内外的学者们在 1990 年代就已经开展了利用海表面信息反演海水温度垂向结构的研究^[2-3]。目前, 常用的反演方法为分段拟合法, 即根据各层的特点, 将海洋自上而下分为 2~3, 利用不同方程分别进行拟合。而海水分层, 主要有 3 种方法: 温度差法(Temperature Difference Criterion)^[4-5]、梯度法(Gradient Method)^[6-8]和曲率法(Curvature Method)^[9]。此外, 由于研究区域与目的不同, 研究者们采用的分层标准也各不相同。例如, 在利用温度差法的研究中, Wyrick^[5]采用的温度差为 0.5 °C, 而 Kara 等^[6]则采用 0.8 °C; 在梯度法的研究中, Defant^[7]的标准为 0.015 °C·m⁻¹, Lukas 等^[8]取 0.025 °C·m⁻¹, Chu 等^[9]则取 0.05 °C·m⁻¹作为标准。曲率法虽较温度差法与梯度法更具客观性, 但它易受剖面数据误差的影响^[10]。

本文采用的分层标准是根据 Chu 等^[10-12]在研究中提出的相对梯度法(Relative Gradient)或称梯度比法(Gradient Ratio Method)。其研究表明, 相对梯度法不仅能在一定程度上克服曲率法易受数据误差的缺点, 同时也较温度差法与梯度法更为客观。

同时, 在以往的研究中, 研究者大多关注于各层的拟合方程与拟合系数, 而忽略了一些特殊的海洋结构

对分层的影响。比如, 夏季大洋常见的多温跃层结构就很难利用传统的分段法进行拟合。因此, 本文在传统的分段拟合法的基础上, 以分类取代分层, 对海水垂向结构进行分析, 并根据分析结果建立了海水温度分层模型。

1 数据及研究方法

1.1 研究区域与数据

本文选取 30°N~35°N, 140°E~150°E 的西北太平洋海域作为研究区域(见图 1)。根据研究^[13], 该区域的温度垂向分布具有明显的季节变化特征。

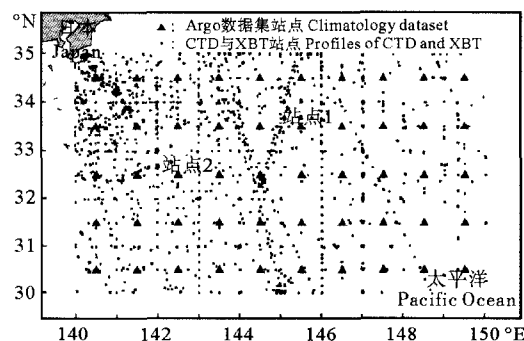


图1 研究区域与站点图

Fig. 1 Map of the study region with the stations

1.2 数据

选取国际太平洋研究中心/亚太数据研究中心(International Pacific Research Center/Asia-Pacific Data-Re-

* 基金项目: 国家发改委卫星高技术产业化示范工程项目(2009214); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室重点项目(201401)资助

收稿日期: 2013-04-22; 修订日期: 2013-09-27

作者简介: 赵宁(1988-), 男, 硕士, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: 343599711@qq.com

** 通讯作者: E-mail: zhhan@shou.edu.cn

search Center)提供的 2005—2012 年网格化的 Argo 气候态数据集(Climatology Dataset)、法国 Coriolis Argo 数据中心提供的 Argo 浮标数据与世界大洋数据库 09 版(World Ocean Database, WOD09)提供的 CTD 与 XBT 数据。图 1 中,三角代表网格化的 Argo 历史数据,圆点代表 CTD 与 XBT 数据(2005 年以来)。

其中,Argo 历史数据包含了水平分辨率为 $1(^{\circ}) \times 1(^{\circ})$ 的长年(2005—2012 年,总计 8 a)平均 Argo 温度数据。每个站点的垂直深度涵盖 0~2 000 m,具体分布如下:0~10 m,每 5 m 为一层,共 3 层;10~50 m,每 10 m 为一层,共 4 层;50~150 m,每 25 m 为一层,共 5 层;150~300 m,每 50 m 为一层,共 3 层;300~1 500 m,每 100 m 为一层,共 12 层;1 500~2 000 m,每 250 m 为一层,共 2 层;总计 27 层。

1.3 海水分层法

首先,本文对 Argo 历史数据提供的温度剖面数据进行逐层计算,获得各层的温度梯度值。梯度计算采用不等距差分法^[14-17],计算公式如下:

$$G_i = \left(\frac{dT}{dz}\right)_i = \alpha_i \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}\right) + (1 - \alpha_i) \left(\frac{T_{i+1} - T_i}{z_{i+1} - z_i}\right), \quad (i=2, 3, 4, \dots, n-1) \quad (1)$$

式中: G_i 为第 i 层的梯度; α_i 为权重($= \frac{z_{i+1} - z_i}{z_{i+1} - z_{i-1}}$); T 为温度; z 为深度; n 为总层数; i 为层数。在表层与低层的梯度分别采用前差后差公式:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_1 = \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_n = \frac{T_n - T_{n-1}}{z_n - z_{n-1}} \quad (3)$$

其后,利用以下公式计算出该剖面各深度的相对梯度 r_i ^[13]:

$$r_i = G_i / G_{\max} \quad (4)$$

式中: r_i 为相对梯度; G_{\max} 为最大梯度值。本文中,最大梯度值主要根据以下步骤进行选取:

A. 选择剖面数据中温度最大值与最小值所在的深度,记为: Z_{\max} 和 Z_{\min} 。

B. 在 Z_{\max} 和 Z_{\min} 之间的深度范围,计算梯度。

C. 取其中梯度的最大值作为该剖面站点的最大梯度值, $G_{\max} = \max(|G_i|)$ 。

根据大量的剖面数据,Chu 等^[10-12] 在研究中提出以相对梯度 0.25 作为混合层判断标准,相对梯度 0.5 作为温跃层判断标准可以比较客观的对混合层与温跃层深度进行判断。以 1 月份站点 1 为例,黑点实线表示温度梯度,而白点实线表示相对梯度,虚线表示混合层与温跃层的判断标准(见图 2)。图中,虚线与实线的交点即为混合层与温跃层所在的深度。

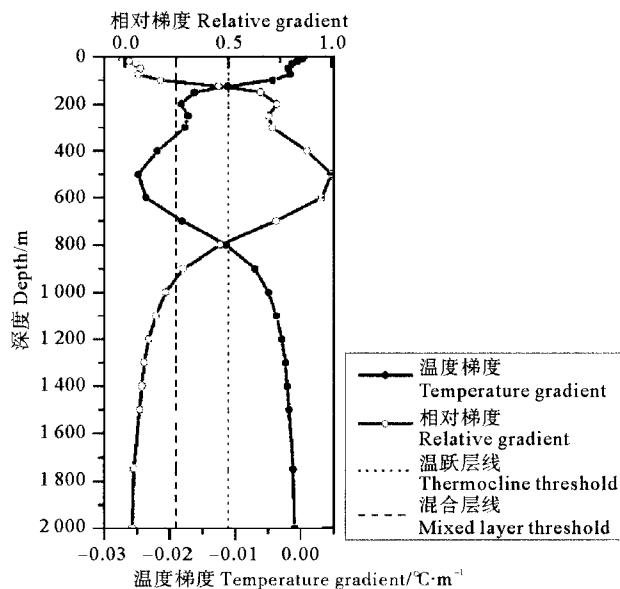


图 2 1 月份站点 1 梯度及相对梯度剖面图(145.5°E, 33.5°N)

Fig. 2 Profiles of gradient and relative gradient of Station 1 in January (145.5°E, 33.5°N)

为了获得该站点海水各层的范围,本文还需对所得结果进行线性插值。设存在相对梯度 r_a 、 r_b ,使得 $r_a < R < r_b$ (R 为 0.25 或 0.5), r_a 、 r_b 所在深度分别为 Z_a 、 Z_b ,则 $Z_{0.25}$ 可由下式计算:

$$Z = \frac{z_b - z_a}{r_b - r_a} (R - r_a) + Z_a \quad (5)$$

根据公式(5),可以获得相对梯度 0.5 对应的深度值,并以此深度作为温跃层上界。

由于本文所选取的研究范围处于中纬度区域,其混合层与温跃层季节性变化幅度较大,尤其是夏季混合层仅为 10~20 m^[13]。因此,线性插值法可能对过浅的混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)造成误判。故在本文中采用 10 m 作为温跃层上界最小值^[18-22]。

与以往分层研究不同的是,本文根据标准所划分的并不是自上而下的 3 层,而是将其划分为 3 类:混合层区域($r_i < 0.25$)、温跃层区域($r_i \geq 0.5$)以及深层大洋区域。因此,根据实际情况,站点垂向结构中可以包含 1 个以上温跃层区域(见图 3)。

1.4 海水温度分层模型

除温跃层外,海洋中其他区域温度变化不明显,因此本文利用分段结果建立了海水分层模型。根据以往对海洋混合层、温跃层以及深层区域以及海水分层的研究^[2,13,23-26],在表层区域采用线性方程拟合;在温跃层区间采用多项式与指数的组合函数进行拟合;在深层大洋区域采用非线性指数拟合方法。本文采用的海水垂向温度剖面方程可以由下式表示:

$$T(z) = SST - G_{\text{mld}} z; \quad 0 < z < \text{MLD}$$

$$T(z) = f(z); \quad z_{\text{UL}} < z < z_{\text{LL}}$$

$$T(z) = SST(A \exp(B \frac{z}{\text{MaxDepth}}) + C \exp(D \frac{z}{\text{MaxDepth}})); z > z_{LL} \quad (6)$$

其中: $T(z)$ 代表某一深度的海水温度; SST 为海表面温度; MLD 表示混合层深度; UL 表示温跃层上界; LL 表示温跃层下界; G_{mld} 为混合层温度梯度; A 、 B 、 C 与 D 为深层大洋拟合系数; MaxDepth 表示剖面最大深度(此处取 2 000 m); $f(z)$ 表示多项式与指数结合的组合函数, 可以表示为:

$$f(z)/SST = a(\exp(-\frac{z-ULD}{TT}))^2 + b \exp(-\frac{z-ULD}{TT}) + c \quad (7)$$

式中: SST 为海表面温度; TT 为温跃层厚度, 即温跃层上下界之差($TT=LL-UL$); a 、 b 和 c 为拟合系数。在各层之间, 采用线性插值法。

本文以 Argo 气候态数据集作为背景场, 对海洋进行分层, 获取各层的深度信息, 而各层的拟合系数是根据 Argo 气候态数据集与区域内(区域内是指以站点为中心的 $1^\circ \times 1^\circ$ 范围)的 Argo 浮标数据确定的。此外, 考虑到实际海洋中, 混合层的季节性变化较大, 故模型应对年中的 12 个月进行分别拟合。

由于本文采用的数据是标准层, 因此在实际计算时, 需在各指标深度所在的标准层区间内使用线性插值。如图 2 所示, 站点 1 的 1 月份混合层深度约为 106 m, 而温跃层上界深度约为 130 m, 分别处于标准层 100~125 m 与 125~150 m 区间内, 因此在模型计算时, 应优先计算该区域范围外的深度范围。而在 100~125 m 与 125~150 m 范围内, 改为采用线性插值。类似地, 站点 2 剖面中采取公式(6)的区域包括水深 0~100、150~700 m 以及 800 m 以下范围, 未覆盖的区域则采用线性插值(即公式(5)的形式)。

2 模型结果与检验

本文选取了 1 与 6 月作为代表月, 以站点 2 (142.5°E , 32.5°N) 为例, 建立了海水温度拟合模型。其中, 6 月剖面图如图 3 所示, 根据相对梯度 0.5 的温跃层判别标准, 可以看出该站点的剖面在 100 m 以上为第一温跃层, 而 400~600 m 区域为第二温跃层, 属于双温跃层结构。

本文使用来自世界大洋数据库 09 版(World Ocean Database 09, WOD09)的 CTD 与 XBT 数据作为模型检验数据, 并采用均方根误差 $RMSE$ 作为评价标准对模型结果进行检验, $RMSE$ 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{i1} - T_{i2})^2} \quad (8)$$

其中, T_{i1} 与 T_{i2} 分别代表模拟值与实测值。

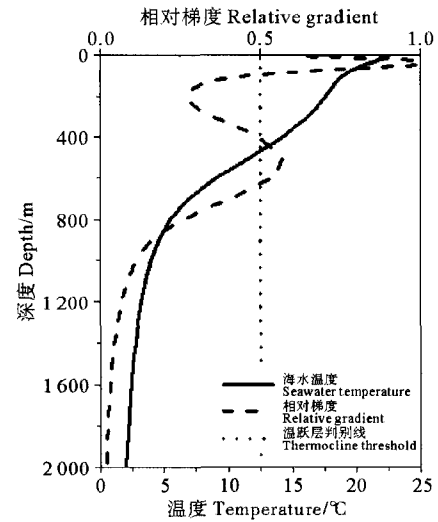


图 3 6 月站点 2 垂向温度结构图

Fig. 3 Vertical temperature structure of Station 2 in June

1 月份的模拟结果如图 4 所示。其中, 实线表示实测水温, 虚线表示模拟水温。图 4(a)与 4(b)的站点均为 2 000 m 水深, 误差分别为 0.574°C 与 0.946°C 。图 4(c)水深 450 m, 误差仅为 0.252°C 。而图 4(d)水深 700 m, 误差为 0.506°C 。说明在 1 月份的 4 个站点中, 由于加入了混合层深度、温跃层上下界深度等参数, 模型对海水温度结构模拟结果较好, 可以反映出不同水层的水温变化。

6 月的模拟剖面如图 5。图 5(a)表层与 300~600 m 范围内都存在温度变化较大的温跃层, 而模拟水温的拟合程度依然较高, 误差仅为 0.433°C 。图 5(b)中, 模拟水温有效地反映出了 100、100~400 与 400~700 m 深度的温度变化趋势, 总体误差为 0.648°C 。图 5(c)的站点虽然误差相对较高, 但是水深 0~200 与 400~800 m 的温跃层结构同样清晰可见, 水深 800 m 以下区域误差很小。因此, 本文提出的模型可以较好地双温跃层进行模拟。

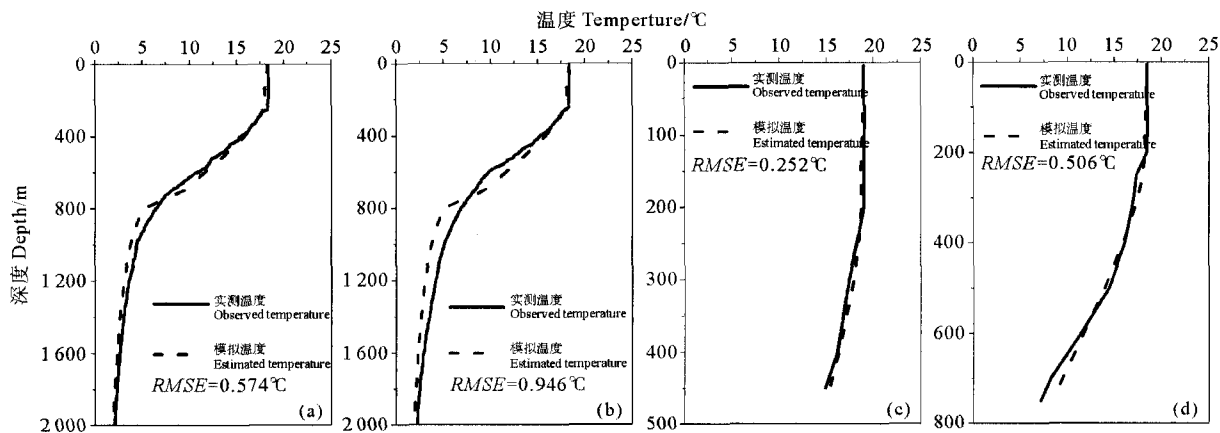
3 讨论

本文依据西北太平洋的历史海温数据, 对区域内的海水温度垂直结构进行了分析, 并引入相对梯度法对海水温度进行分层。根据分层结果与历史剖面数据对不同水层分段进行拟合。模拟结果表明, 本文提出的分层模型可以有效地对海洋混合层、温跃层以及深层大洋进行区分与海水温度反演。

在分层模型的研究中, 利用 Argo 气候态数据集,

基于相对梯度法,对研究区域的海洋垂向分层结构进行了研究。利用分层的结果,建立了海水温度垂向结构参数表,主要获取的参数有:混合层深度、混合层梯

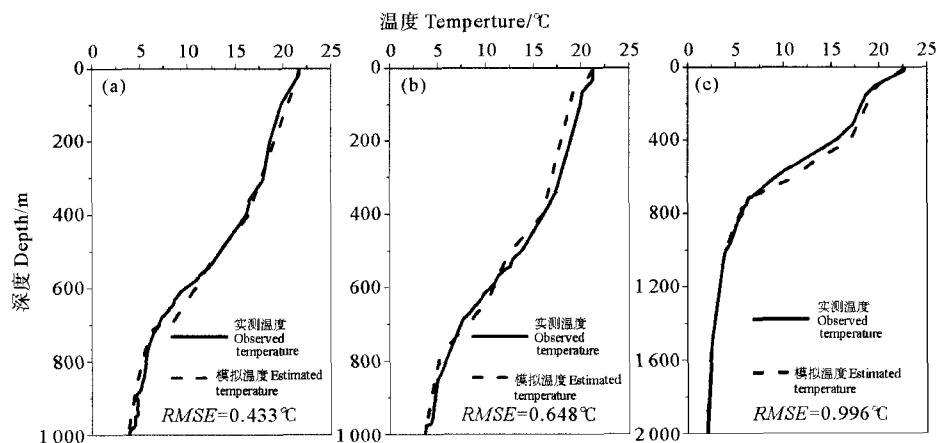
度、温跃层上界深度、温跃层下界深度、深层大洋起始深度以及各方程的拟合系数等。



((a)142.514°E,32.504°N,2006年1月17日12:01;(b)141.986°E,33.014°N,2006年1月17日06:58;(c)143.011°E,32.245°N,2006年1月9日20:57;(d)143.078°E,32.628°N,2005年1月21日21:01。The information of each profile are shown as follows: (a)142.514°E, 32.504°N, 12:01, Jan 17th, 2006; (b)141.986°E, 33.014°N, 06:58, Jan 17th, 2006; (c)143.011°E, 32.245°N, 20:57, Jan, 9th, 2006; (d)143.078°E, 32.628°N, 21:01, Jan, 21th, 2005.)

图4 1月份CTD与XBT实测数据与模型模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between the observed CTD and XBT profiles and estimated temperature in January



((a)142.5°E, 32.321°N, 2007年6月4日00:28;(b)142°E, 33.5°N, 2007年6月4日02:13;(c)143°E, 32.001°N, 2009年6月10日19:31。The information of each profile are shown as follows: (a)142.5°E, 32.321°N, 00:28, Jun 4th, 2007; (b)142°E, 33.5°N, 02:13, Jun 4th, 2007; (c)143°E, 32.001°N, 19:31, Jun 10th, 2009.)

图5 6月份CTD与XBT实测数据与模型模拟结果对比

Fig. 5 Comparison between the observed CTD and XBT profiles and estimated temperature in June

通过对模拟结果的分析,该分层模型可以较好地模拟出西北太平洋的海水温度垂直结构(见图4、5)。在深层大洋区域,发现1月站点反演效果较好,而6月站点误差波动相对较大。1月份的4个站点与6月3个站点模拟结果见表1。从表中可以看出,1月站点中水深400 m以上的误差均小于0.3℃;6月由于存在双温跃层结构,误差相对较高。进一步对研究区域内所有站点的误差进行了统计,结果表明1月与6月总体均方根差(RMSE)为0.778℃,中上层大洋区域(水深小

于400 m)误差仅为0.494℃,而相对较深层区域均方根差相对较大,为0.991℃。这可能是由于深层大洋主要受到该区域的深层水团以及底层洋流影响较大,而与海表温度关系较小。在实际大洋中,控制垂向水温结构的变化因子十分复杂。因此,在某些深度可能出现相对较大的误差(见图4(d),5(c))。结果表明:该模型可以有效地依靠海表温度模拟出海水温度结构;与深层区域的结果相比,在大洋中上层区域的模拟结果更好。

表 1 分层模型 1 与 6 月站点模拟结果误差 (RMSE)
Table 1 Simulation results (RMSE) in January and June

深度/m Depth	1 月 RMSE/℃				6 月 RMSE/℃			
	a	b	c	d	a	b	c	d
0~400	0.274	0.233	0.228	0.272	0.382	0.763	0.678	
> 400	0.626	1.051	0.458	0.920	0.446	0.602	1.130	

海洋中,各水层的深度随区域与时间变化较大^[7,14,18]。尽管模型对不同月份进行分别拟合,然而各层的时间变化并没有在本文进行充分的考虑,尤其是年际变化。另一方面,大洋区域通常存在两种温跃层:永久性温跃层以及季节性温跃层^[25-27]。两者形成机制不一,跃层强度也不同,但本文并没有对两者进行区别对待。因此,对海水各层的判断标准、时间参数的引入以及拟合方程的优化将是下一阶段工作的重点。

参考文献:

[1] Pickard G L, Emery W J. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction [M]. Oxford: Pergamon Press, 1990: 37-47.

[2] Carnes M R L, Mitchell D W Dewitt. Synthetic temperature profiles derived from Geosat altimetry; Comparison with airdropped expendable bathythermograph profiles [J]. Geophys Res, 1990, 95(c10): 17979-17992.

[3] Chu P C, Fan C W, Liu W T. Determination of vertical thermal Structure from sea surface temperature [J]. J Atmos Ocean Technol, 2000, 17(7): 971-979.

[4] González-Pola C, Fernández-Díaz J M, Lavín A. Vertical structure of the upper ocean from profiles fitted to physically consistent functional forms [J]. Deep-Sea Res I, 2007, 54: 1985-2004.

[5] Wyrtki K. The thermal structure of the eastern Pacific Ocean [J]. Dtsch Hydrogr Z, 1964, 8A: 6-84.

[6] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. Mixed layer depth variability and barrier layer formation over the North Pacific Ocean [J]. J Geophys Res, 2000, 105: 16783-16801.

[7] Defant A. Physical Oceanography [M]. Oxford: Pergamon Press, 1961.

[8] Lukas R, Lindstrom E. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean [J]. J Geophys Res, 1991, 96: 3343-3358.

[9] Chu P C, Liu Q, Jia Y, et al. Evidence of barrier layer in the Sulu and Celebes Seas [J]. J Phys Oceanogr, 2002, 32: 3299-3309.

[10] Chu P C, Fan C W. Optimal linear fitting for objective determination of ocean mixed layer depth from glider profiles [J]. J Atmos Ocean Technol, 2010, 27: 1893-1898.

[11] Chu P C, Fan C W. Maximum angle method for determining mixed layer depth from seaglider data [J]. J Oceanogr, 2011, 67: 219-230.

[12] Chu P C, Fan C W. Objective Determination of Global Ocean

Thermocline Strength From Profile Data [C]. New Orleans: 16th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), 92nd American Meteorological Society Annual Meeting, 2012.

[13] 王彦磊, 黄兵, 张韧, 等. 基于 Argo 资料的世界大洋温度跃层的分布特征 [J]. 海洋科学进展, 2008, 26(4): 428-435.

[14] 周燕遐, 李炳兰, 张义钧, 等. 世界大洋冬夏季温跃层特征 [J]. 海洋通报, 2002, 21(1): 16-22.

[15] 陈奕德, 张韧, 蒋国荣, 等. 太平洋海域温跃层分类及其特征分析. 许建平. Argo 应用研究论文集 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 204-214.

[16] 叶志敏, 张铭. 北太平洋冬季海水层结分析 [J]. 海洋预报, 2004, 21(1): 20-26.

[17] 廖洞贤, 王两铭. 数值天气预报原理及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1986.

[18] 芦静, 乔方利, 魏泽勋, 等. 夏季海洋上混合层深度分布研究—Argo 资料与 Levitus 资料的比较 [J]. 海洋科学进展, 2008, 26(2): 145-155.

[19] Dong S F, Kelly K A. Heat budget in the gulf stream region: The importance of heat storage and advection [J]. J Phys Oceanogr, 2003, 34(5): 1214-1231.

[20] Lim S H, Jang C J, Oh I S, et al. Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea [J]. J MarSyst, 2012, 1(96-97): 1-14.

[21] Moisan J R, Niiler P N. The seasonal heat budget of the North Pacific: Net heat flux and heat storage rates (1950—1990) [J]. J Phys Oceanogr, 1997, 28: 401-421.

[22] Qiu B, Kelly K A. Upper-ocean heat balance in the Kuroshio extension region [J]. J Phys Oceanogr, 1993, 23(9): 2027-2041.

[23] 唐秋华, 丁继胜, 杨德海. 三维海水温度遥感信息模型研究 [J]. 海洋科学进展, 2004, 22: 152-156.

[24] 池建军, 孙祥年, 骆永军. 卫星遥感 SSH 数据在水下温度垂直分布反演中的应用研究 [J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 59-61.

[25] 祝建国, 王骥鹏, 陈希. 台湾岛南部海域温跃层个例特征分析 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2005(5): 497-501.

[26] 蒋国荣, 郝少东, 杜涛, 等. 南海北部温跃层逐月变化特征分析 [J]. 海洋预报, 2011, 28(3): 41-45.

[27] Talley L D, Pickard G L, Emery W J, et al. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction [M]. Waltham: Academic Press, 2011: 67-70.

Growth, Mortality and Optimum Catchable Size of *Hexagrammos otakii* in Haizhou Bay and Its Adjacent Waters

SUN Yuan-Yuan, ZAN Xiao-Xiao, XU Bin-Duo, REN Yi-Ping

(College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Based on the data collected by bottom trawling in Haizhou Bay and its adjacent waters in 2011, the population structure, length-weight relationship, growth and mortality of *Hexagrammos otakii* were analyzed. The results indicated that the standard length ranged from 44 to 292 mm with an average of 88 mm and a dominant range of 54~74 mm, and the body weight ranged from 0.35 to 574.3 g with an average of 17.94 g and a dominant range of <10 g. The length-weight relationship can be described with equation $W=4.23 \times 10^{-6} L^{3.31}$ ($R^2=0.9786$, $n=1514$). The growth parameters of von Bertalanffy formula estimated by ELEFAN I of FISAT II were 328 mm (L_{∞}), 0.36 a^{-1} (K) and -0.43 a (t_0). The total mortality coefficient Z estimated referring to length-converted catch curve was 2.06 while the natural mortality M and fishing mortality F were 0.62 and 1.44, respectively and the exploitation rate was 0.70. Beverton-Holt yield per recruitment model simulation showed that for the current fishing mortality, the maximum Y_w/R could be obtained when the age at first capture was delayed to 1.83 a. Considering flexion age, critical age, recruitment and economic interest, it was suggested that standard length of 191 mm was the optimum catchable size of *Hexagrammos otakii* in Haizhou Bay and its adjacent waters.

Key words: *Hexagrammos otakii*; growth; mortality; length frequency analysis; Haizhou Bay

责任编辑 朱宝象

(上接第 29 页)

A Segment-Based Seawater Temperature Model by Using the Relative Gradient Method

ZHAO Ning¹, HAN Zhen^{1,2}, WANG Song¹

(Shanghai Ocean University, 1. Collaborative Innovation Center for Distance-water Fisheries; 2. College of Marine Sciences, Shanghai 201306, China)

Abstract: A segment-based model for estimating the vertical profiles of temperature from the sea surface temperature has been developed. Using the Argo Climatology dataset (2005-2012) and the Argo float profiles, the vertical structure of the seawater temperature in the Northwestern Pacific Ocean was analyzed by the Relative Gradient method. The parameters of each layer were obtained including the mixed layer depth, temperature gradient in the mixed layer, upper thermocline depth, lower thermocline depth, deep ocean depth and coefficients for the fitting equations. The CTD, XBT data from World Ocean Database 09 were used for verifying the model. The results showed that this model performs well, especially in the upper ocean (<400 m). The estimated temperature had a root mean square error (RMSE) of $0.778 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in all the layers and $0.494 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in the upper 400 m.

Key words: seawater temperature; segment-based model; relative gradient method

责任编辑 庞旻