第 39 卷第 1 期
2021 年 1 月

海 洋 科 学 进 展
ADVANCES IN MARINE SCIENCE

Vol.39 No.1
January, 2021

研究论文

海洋密度剖面模型及其适用性研究

檀大林[1,2],周济福[1,2*],王 旭[1]

(1. 中国科学院 力学研究所流固耦合重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 工学院, 北京 100049)

摘 要: 海洋密度分层剖面是影响海洋内波生成和演化的关键环境要素,建立密度剖面的参数化模型以描述海洋的密度分布剖面,可以更方便地研究海洋动力环境。在利用当前常用的双曲正切密度剖面模型研究中国南海内波演化时,发现该模型对仅有单一凹向的真实海水密度剖面的模拟效果不佳。以常用的双曲正切密度剖面模型为基础,通过引入一个修正系数,提出了一个改进的密度剖面模型,它在保留原模型可以很好描述海水密度跃层特征的同时,显著提升了模拟的精度。通过与全球不同海域的实测海水密度剖面的时空分布数据进行对比,论证了该改进模型的广泛适用性。

关键词:海水密度; 密跃层;双曲正切模型;修正密度剖面模型

中图分类号:P731.13 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-6647(2021)01-0030-07

doi: 10.3969/j.issn.1671－6647.2021.01.004

引用格式: TAN D L, ZHOU J F, WANG X. A modified density profile model of sea water[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 30-36. 檀大林, 周济福, 王旭. 海洋密度剖面模型及其适用性研究[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 30-36.

海水密度是海洋物理学最重要的参数之一,准确地描述不同时空下的海水密度剖面对海洋基础研究,如内波演化、大洋环流、气候变化等具有重要意义[1-2]。然而海水密度为四维时空变量,数据量巨大且难以像温度、盐度等参数被直接测得[3]。目前主要通过现场应用 CTD 等观测设备间接测量海水密度剖面[4],但现场观测耗资巨大,且所获得的海水密度数据是离散的。如果通过有限的离散数据或者几个特征参数,可以获得近似于真实海水密度垂向分布的解析剖面,那么参数化的海水密度剖面将会为相关海洋现象的定量建模和研究提供便利。例如:在对海洋内波的研究中,往往需要分析浮频率的变化,这时需对海水密度沿垂向坐标求导数,解析剖面比离散剖面无疑更高效、更精确;另外,内波演化与海水密度分布息息相关,海洋内波的演化特征(波幅、速度等)极大地依赖于海水密度跃层的深度、厚度、密度差。海水密度分布解析模型为研究这种依赖关系提供了极大的方便。

真实海洋中往往存在密度跃层,尽管跃层厚度占水深的比例一般很小,但海水的密度变化主要集中在跃层内[5]。因此,准确把握密度跃层特征参数是建立合理的海水密度剖面模型的关键[6]。目前常用的密度剖面模型有多层型、指数型和双曲型。项伟征和沈国光通过建立三层密度分层模型,进行了潜体内波尾迹的形态分析[7]。Chen 和 Song 则研究了三层至 N 层密度分层的随机波解[8]。然而对于实际密度剖面,多层模型所需参数过多且往往需要进行层间密度匹配。苏晓冰等采用指数型的 Holmboe 分层模式来描述流体的密度分布[9],但未与真实海水的密度剖面进行对比。Lamb 和 Xiao 利用双曲正切函数的性质,引入海水平均密度及海洋跃层深度、厚度、密度差四个特征参数,提出了双曲正切密度剖面模型,通过改变相关参数研究了

收稿日期:2020-03-06

资助项目:国家重点研发计划项目——海洋工程动力环境精细化预报与安全保障及评估技术研究(2017YFC1404200);国家自然科学基金项目——内波诱导的柔性构件流向大位移运动规律研究(11572332)

作者简介:檀大林(1992—),男,博士研究生,主要从事水动力方面研究. E-mail: tandalin916@163.com

*通信作者:周济福(1965—),男,教授,博士,主要从事海洋环境与海洋工程方面研究. E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(李 燕 编辑)

海水密度差、跃层深度和跃层厚度与内孤立波相速度、波幅和波能间的定量关系[10]。然而，我们在研究南海内波分裂演化规律时，试图应用该模型对南海真实海洋密度剖面进行模拟，发现该模型对双凹向的“S”型密度剖面模拟效果较好，但对单一凹向的“7”型密度剖面模拟效果很差。

鉴于此，本文以双曲正切模型为基础，通过引入一个修正系数，提出了一个改进的海洋密度剖面模型，使其既可以刻画双凹向的“S”型密度剖面，也可以刻画单一凹向的“7”型密度剖面。同时，利用不同海域、不同月份的密度分布数据，论证了该改进模型广泛的时空适用性。

1　海水密度剖面模型

基于海水密度的分层特点，常用的双曲正切密度剖面模型[10]为

$$\rho(z)=\bar{\rho}-\frac{\Delta\rho}{2}\tanh\left(\frac{z-z_{\mathrm{pyc}}}{d_{\mathrm{pyc}}}\right), \tag{1}$$

式中，$\bar{\rho}$ 为海水平均密度；$\Delta\rho$ 为密度差；z_{pyc} 为密度跃层所处的深度；d_{pyc} 为密度跃层的厚度。图 1 为该密度剖面模型示意图。

我们运用双曲正切密度剖面模型式(1)来模拟真实海水密度剖面。为了评价该密度剖面模型对真实海水密度剖面的拟合程度，借鉴统计学中方差的概念，我们引入了评估因子 S：

$$S=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[(\rho_{\mathrm{model}})_i-(\rho_{\mathrm{obs}})_i\right]^2, \tag{2}$$

式中，ρ_{model} 为密度模型的计算值；ρ_{obs} 为观测值；i 表示不同深度处对应的密度值；N 为垂线上观测点的数目，不同垂线上 N 不同。由式(2)可知，S 越小，意味着密度剖面模型的拟合程度越高，当 $S=0$ 时，密度模型能够精确模拟真实的海水密度。

图 2 为密度剖面模型的模拟结果与真实海水位密剖面的对比，图中黑色实线为对应中国南海的实测位密剖面[11]，其平均密度为 $\bar{\rho}=1\ 025.25\ \mathrm{kg/m^3}$，跃层密度差为 $\Delta\rho=6.5\ \mathrm{kg/m^3}$，其他彩色实线为仅改变密度跃层深度和厚度(具体参数见表 1)，采用双曲正切剖面模型模拟的剖面。无论是直观上，还是通过比较评估因子数值，均可以发现该模型的模拟结果与真实海水密度之间存在较大差距，并且调整相关参数也不能得到更准确的模拟剖面，其中 Case5 为该模型所能达到的最佳拟合结果，其对应的评估因子 S 取最小值。从图 2 可以推知，由于双曲正切函数的性质，该模型可能较适用于双凹向的“S”型分布(形如 Case3 和 Case4 的分布曲线)的模拟，但对单一凹向的“7”型密度剖面(图中的实测剖面)的模拟效果则很差(Case1，Case2 和 Case5)。

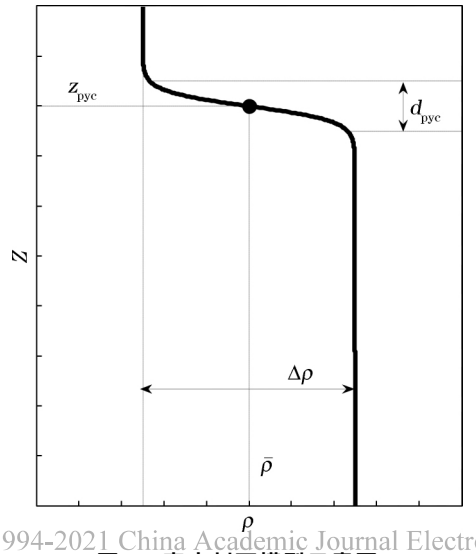

图 1　密度剖面模型示意图

Fig.1　Sketch diagram of density profile

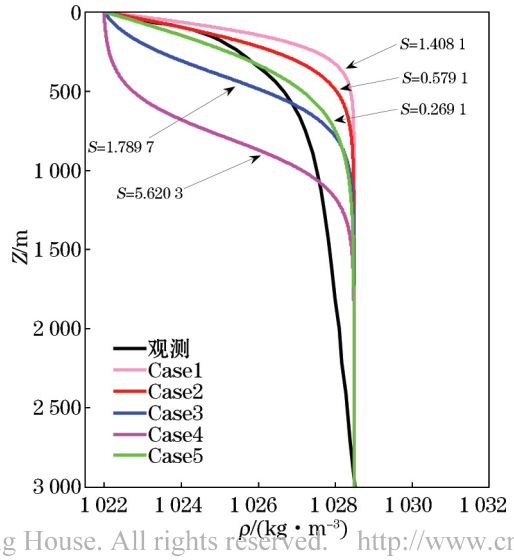

图 2　双曲正切模型结果与实测海水位密剖面对比

Fig.2　Fitting with hyperbolic tangent model vs. measured potential density profile

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 算例参数

Table 1 Parameters of different cases

算 例	跃层深度 z_{pyc}	跃层厚度 d_{pyc}	评估因子 S
Case1	10	200	1.408 1
Case2	10	300	0.570 1
Case3	400	200	1.789 7
Case4	800	200	5.620 3
Case5	10	460	0.269 1

由于双曲正切密度剖面模型各参数物理意义明确，并被广泛用于模拟流体的密度分层结构。因此，我们保留该模型的各项参数，仅在方程中引入一个修正系数，得到如下密度模型

$$\rho(z)=\bar{\rho}-\frac{\Delta\rho}{2}\frac{\sinh\left(\frac{z-z_{pyc}}{d_{pyc}}\right)}{\cosh\left(\frac{z-z_{pyc}}{\lambda\cdot d_{pyc}}\right)}, \tag{3}$$

式中，λ 为修正系数。当 $\lambda=1.000$ 时，改进后的密度剖面模型即等价于原模型。

图 3 为修正后的密度剖面模型与海水密度剖面的对比结果。模型中各项参数设置如下：密度差和平均密度依然分别为 $\Delta\rho=6.5\ \mathrm{kg/m^3}$ 和 $\bar{\rho}=1\ 025.25\ \mathrm{kg/m^3}$，密度跃层所处深度 $z_{pyc}=10\ \mathrm{m}$，密度跃层厚度 $d_{pyc}=200\ \mathrm{m}$。比较评估因子 S 的大小可以发现，通过调整引入的修正系数，改进后的密度剖面模型的拟合精度大幅提高，这表明改进后的模型能够更好地反映真实的海水密度分布。

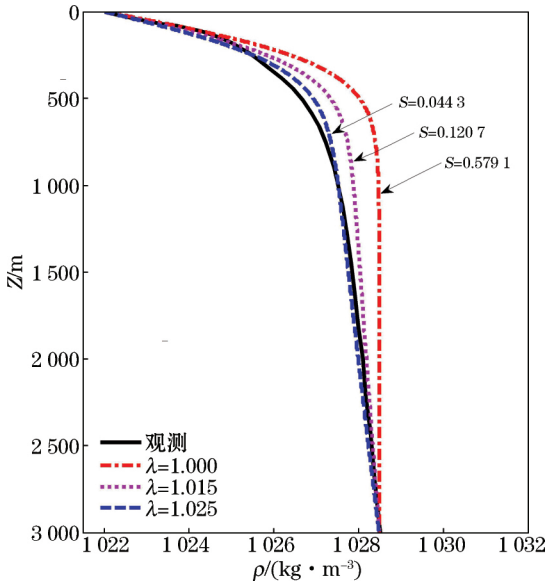

图 3 改进后的模型结果与真实海水密度剖面对比

Fig.3 Comparison between the fitted profile by the modified model vs. in-situ density profile

2 改进密度剖面模型的适用性

上述研究表明，改进后的密度剖面模型能够更为精确地模拟中国南海实测密度剖面。然而，真实海洋中海水密度随着时间和所处海域的不同可能存在较大差异，改进后的密度剖面模型对于描述不同时空条件下的海水密度剖面是否依然适用？我们进一步开展了研究。

研究采用的海水密度(位密)剖面的观测数据均选自 WOD 2013 数据库[12]。为达到模型框架下对实测海水密度剖面的最佳拟合效果，将评估因子 S 设为参考指标，通过改变密度剖面模型的各项参数计算 S 的最小值，S 达到最小值所对应的密度剖面即为该模型下的最佳拟合结果。

首先研究改进后的密度剖面模型对同一海域不同时间海水密度分布的适用性。为此，选取中国南海 12 个月的观测数据，对应的 12 个观测点如图 4 所示。图 5 为改进后的密度剖面模型对 1 月至 12 月典型海水密度剖面的拟合结果。

此外，为研究改进后的密度剖面模型对不同海域同一时间海水密度分布的适用性。选取全球不同海域的 9 个观测点(图 6)，所有观测点的密度剖面数据均为 5 月份观测得到。图 7 为改进后的密度剖面模型对各观测密度数据的拟合结果。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

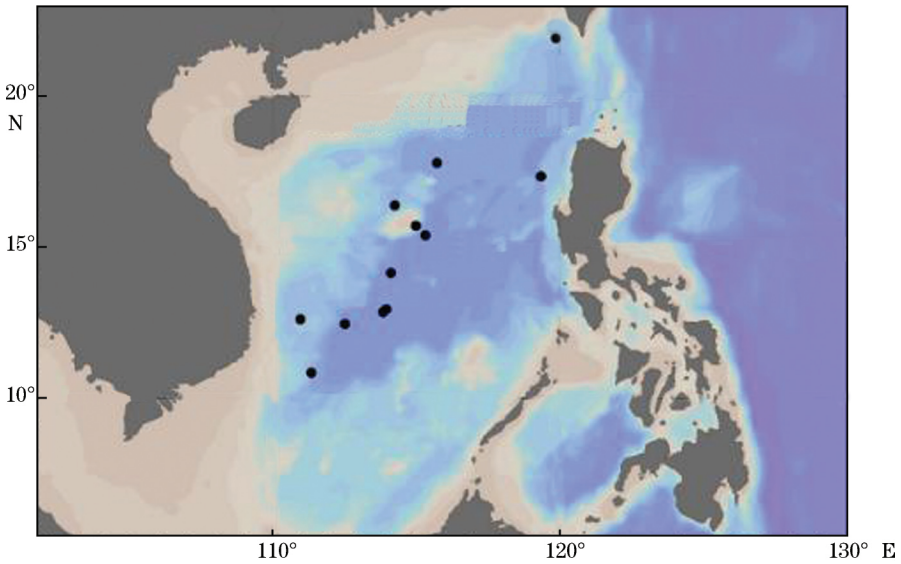

图 4　中国南海选取的 12 个月份的密度剖面观测点

Fig.4　Observation sites of twelve months in the South China Sea

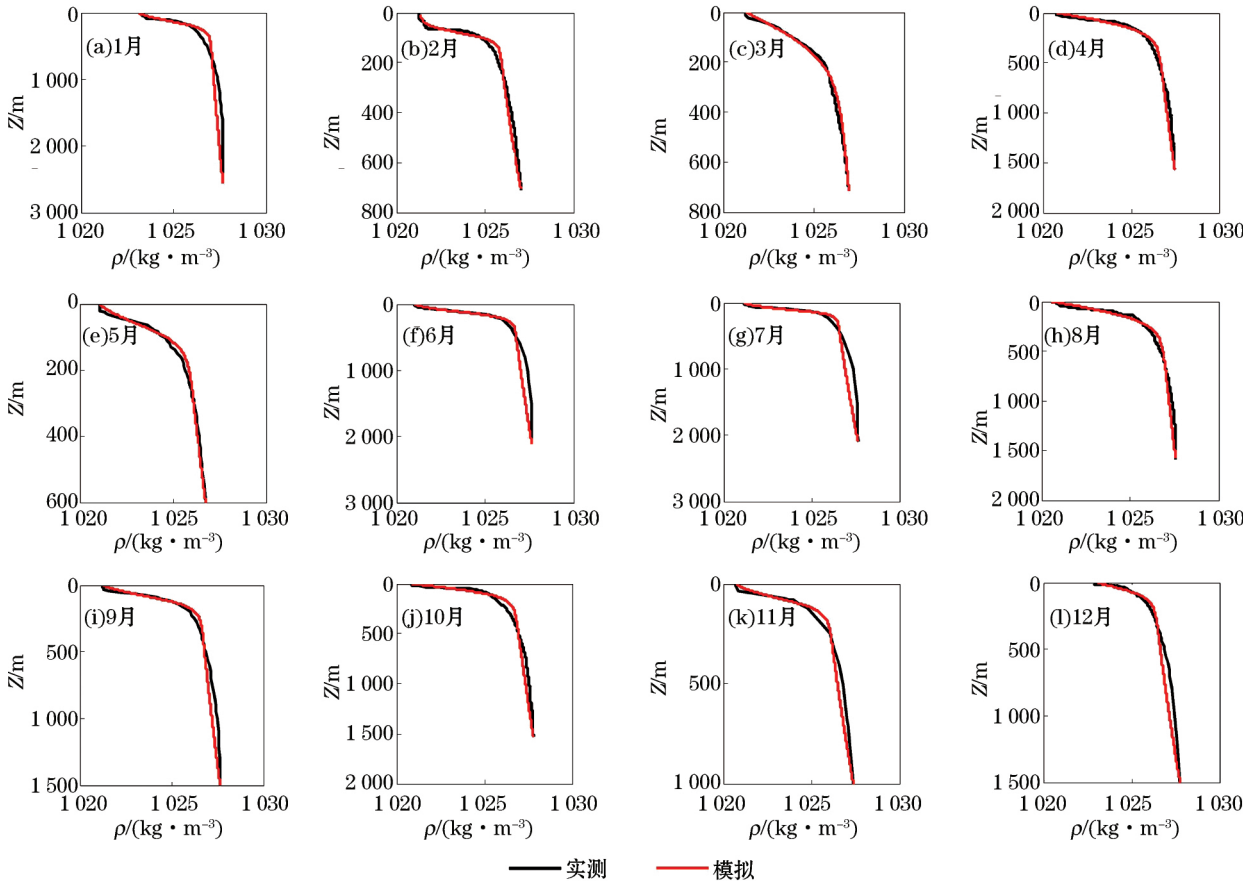

图 5　改进后的密度剖面模型对 12 个月份的模拟结果

Fig.5　The measured potential density profiles in the South China Sea in twelve months and the corresponding fitted profiles by the modified model

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

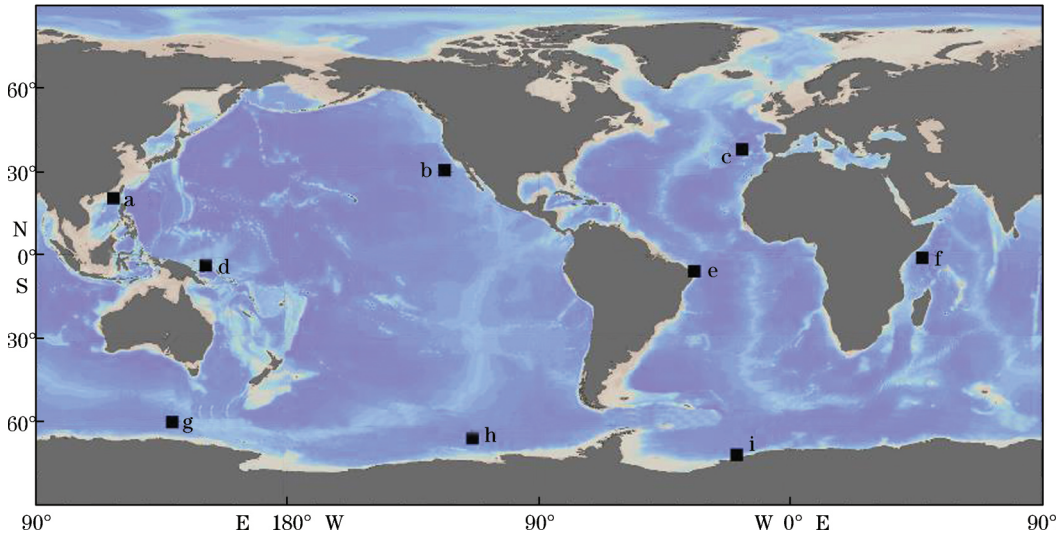

图 6 不同海域的密度剖面观测点

Fig.6 Selected observation sites in global oceans

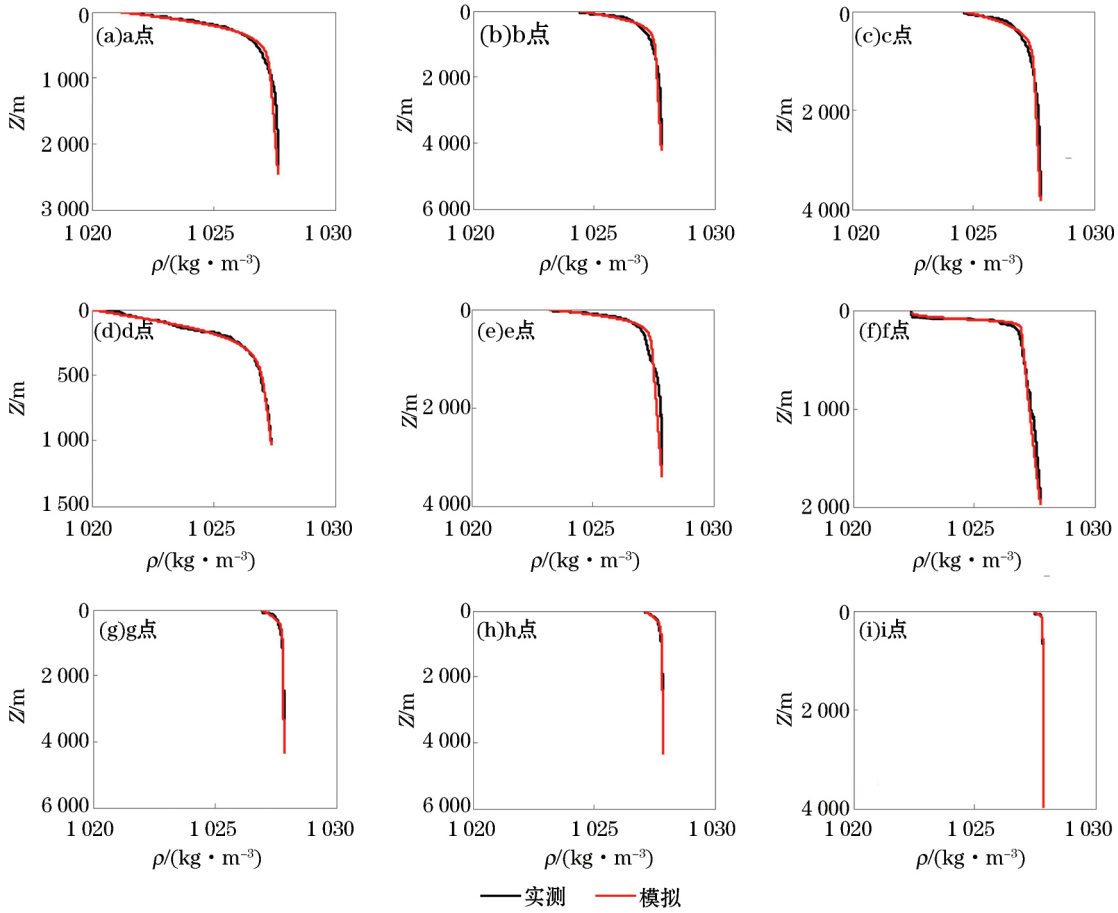

图 7 改进后的密度剖面模型对不同海域观测点的模拟结果

Fig.7 The measured potential density profiles in different oceans and the fitted profiles by the modified model

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

同一海域不同月份（一月～十二月）和同一月份不同观测点（a 点～i 点）密度剖面数据的最小评估因子分别如表 2 和表 3 所示。对比模型改进前后的结果可以发现，改进后的密度剖面模型所对应的评估因子 S 都大幅减小。表明改进后的密度剖面模型能够很好地适用于典型时间和海域的海洋密度模拟。此外，从图 5 和图 7 还可以看出，改进的模型既适用于双凹向的“S”型分布，也适用于单一凹向的“7”型密度分布。

表 2　十二个月份改进前后的密度剖面模型的拟合误差

Table 2　Fitting errors of the modified model and Lamb's model in twelve months

月份	改进前 S 值	改进后 S 值
一月	0.101 8	0.052 1
二月	0.173 0	0.041 4
三月	0.056 8	0.018 0
四月	0.199 2	0.035 3
五月	0.107 1	0.043 6
六月	0.158 5	0.045 8
七月	0.225 7	0.086 7
八月	0.148 8	0.042 5
九月	0.200 4	0.058 8
十月	0.295 2	0.066 9
十一月	0.227 3	0.097 9
十二月	0.333 5	0.054 6

表 3　不同海域观测点改进前后的密度剖面模型的拟合误差

Table 3　Fitting errors of the modified model and Lamb's model in different oceans

观测点	改进前 S 值	改进后 S 值
a 点	0.046 8	0.014 8
b 点	0.029 5	0.011 6
c 点	0.029 9	0.010 2
d 点	0.036 4	0.014 1
e 点	0.069 5	0.020 3
f 点	0.188 7	0.019 0
g 点	0.002 1	0.000 8
h 点	0.002 0	0.000 3
i 点	0.000 5	0.000 1

3　结　论

利用海水密度分布的特征参数解析刻画海水密度分布，可以为研究海洋内波等现象提供方便。在对真实海水密度剖面进行参数化分析的过程中发现，以往常用的双曲正切密度剖面模型仅对双凹向的“S”型密度剖面具有较好的拟合精度，对于更为常见的“7”型密度剖面则效果不佳。本文以常用的双曲正切密度剖面模型为基础，通过引入一个修正系数，提出了一个改进的密度剖面模型。该改进的模型在完全继承了原模型优点的同时，大大提高了对真实海洋密度剖面的拟合精度，使得改进以后的密度剖面模型不仅能够描述双凹向的“S”型密度剖面，而且能够描述更为常见的单一凹向的“7”型密度剖面。利用全球多个典型海域和月份的实际密度剖面观测数据进行论证，表明该改进模型具有广泛的适用性。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献(References):

[1] TAN D L, ZHOU J F, WANG X, et al. Combined effects of topography and bottom friction on shoaling internal solitary waves in the South China Sea[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019, 40(4): 3-16.

[2] YIN S G, ZHU Y Z, ZHONG M, et al. Study on seasonal variations of global ocean mass[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(4): 33-37. **殷述广, 朱耀仲, 钟敏, 等. 全球海水质量季节变化研究[J]. 大地测量与地球动力学**, 2005, 25(4): 33-37.

[3] GUO T T, WANG Z, GUO C C, et al. Sensor measurement technology of sea-water density[J]. Mechine Tool and Hydraulics, 2012, 40(3): 154-156. **郭天太, 王真, 郭冲冲, 等. 海水密度的传感器测量技术综述[J]. 机床与液压**, 2012, 40(3): 154-156.

[4] ZHANG L, YE S, ZHOU S D, et al. Review of measurement techniques for temperature, salinity and depth profile of sea water[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(5): 4-12. **张龙, 叶松, 周树道, 等. 海水温盐深剖面测量技术综述[J]. 海洋通报**, 2017, 36(5): 4-12.

[5] LIU J F, MAO K X, ZHANG X J, et al. The general distribution characteristics of pycnocline of China Sea[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(6): 21-27. **刘金芳, 毛可修, 张晓娟, 等. 中国海密度跃层分布特征概况[J]. 海洋预报**, 2013, 30(6): 21-27.

[6] XU B C, WANG Y Z, TIAN S Z. Simulation of vertical distribution of sea-water density (σ_t) in shallow sea[J]. Journal of Oceanography of HuangHai and BoHai Seas, 1983, 1(1): 9-12. **徐伯昌, 王一支, 田素珍. 浅海海水密度(σ_t)垂直分布的模拟[J]. 黄渤海海洋**, 1983, 1(1): 9-12.

[7] XIANG W Z, SHEN G G. Analysis of submarine-induced internal wave wakes in a stratified fluid[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(4): 20-26. **项伟征, 沈国光. 分层流体中潜体内波尾迹形态的初步分析[J]. 船舶力学**, 2005, 9(4): 20-26.

[8] CHEN X G, SONG J B. Second-order random wave solutions for interfacial internal waves in N-layer density-stratified fluid[J]. Chinese Physics B, 2006, 15(4): 756-766.

[9] SU X B, WEI G, DAI S Q. Two-dimensional algebraic solitary wave and its vertical structure in stratified fluid[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(10): 1143-1151. **苏晓冰, 魏岗, 戴世强. 分层流体中的二维代数孤立波及其垂向结构[J]. 应用数学和力学**, 2005, 26(10): 1143-1151.

[10] LAMB K G, XIAO W. Internal solitary waves shoaling onto a shelf: comparisons of weakly-nonlinear and fully nonlinear models for hyperbolic-tangent stratifications[J]. Ocean Modelling, 2014, 78: 17-34.

[11] GRIMSHAW R, GUO C C, HELFRICH K, et al. Combined effect of rotation and topography on shoaling oceanic internal solitary waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 2014, 44(4): 1116-1132.

[12] BOYER T P, ANTONOV O K, BARANOVA C, et al. World Ocean Database 2013[M]. US: Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2013.

A Modified Density Profile Model of Sea Water

TAN Da-lin[1,2], ZHOU Ji-fu[1,2], WANG Xu[1]

(1. *CAS Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems*, *Institute of Mechanics*, Beijing 100190, China;
2. *School of Engineering Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: The density profile of sea water is a crucial environmental factor affecting the generation and evolution of internal waves. The density profile is usually modeled with hyperbolic tangent function, however it does not work well when it is used to model density profile with a shape like" 7", which is common in ocean. In the present paper, the commonly used hyperbolic tangent density profile model is modified by introducing a correction coefficient. The modified model, inheriting the merits of the original model, can well describe the characteristics of thermocline and is much more accurate than the original model. Application of the modified model in global oceans demonstrates that it can be widely used to model sea water density profile.

Key words: sea water density; pycnocline; hyperbolic tangent model; modified density profile model

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Received: March 6, 2010