

# 基于分层 EOF 的深海声速剖面 时变特征建模

张林虎<sup>1,2</sup>, 刘 杨<sup>1,2\*</sup>, 刘焱雄<sup>1,2</sup>, 陈冠旭<sup>1,2</sup>, 李梦昊<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

2. 自然资源部海洋测绘重点实验室, 山东青岛 266061)

**摘 要:** 针对目前局部海域小时间尺度声速场建模方法未顾及不同深度区间内声速变化规律的问题, 本文根据实测深海声速剖面的统计特征, 提出了声速剖面分层方法, 并进一步基于经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)提出了局部小时间尺度的声速剖面分层时变模型构建方法。利用南海实测全海深声速剖面数据, 分析了分层 EOF 第一模态系数和等效平均声速的日变化特征, 并比较了不同拟合模型的精度。最后, 利用试验海区的温度和潮汐数据分析了声速剖面周期变化的影响因素。结果表明: ①声速剖面分层 EOF 第一模态系数及等效平均声速具有日周期变化特征, 上层声速日周期变化特征不明显, 中层声速日周期变化特征较明显, 下层声速变化较小但仍具有日周期变化特征; ②局部海域小时间尺度声速拟合应考虑长期变化项的影响; ③试验海区声速剖面 EOF 第一模态系数变化与温度显著相关, 提取的声速剖面时变特征与海区潮汐周期特征基本吻合。

**关键词:** 经验正交函数(EOF); 声速剖面; 日周期变化; 第一模态系数

中图分类号: P733.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)03-0209-14

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220126001

引用格式: 张林虎, 刘杨, 刘焱雄, 等. 基于分层 EOF 的深海声速剖面时变特征建模[J]. 海岸工程, 2022, 41(3): 209-222.

ZHANG L H, LIU Y, LIU Y X, et al. Modeling of time-varying characteristics of deep-sea sound velocity profile based on layered-EOF[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(3): 209-222.

海洋占地球表面积 71%, 平均深度 3 700 m<sup>[1]</sup>, 如今正成为世界各国争夺资源的主战场。一切海洋活动都离不开精密的位置服务, 而深海声速随海洋动态环境在 1 400~1 600 m/s 的某个区间内变化<sup>[2]</sup>, 成为制约水声精密定位精度的主要因素, 因此需对深海声速的变化规律展开研究。高精度的深海声速剖面主要依靠声速仪、温盐深仪进行点位观测获取, 受观测手段制约, 尚无法对整个目标观测海域的声速场进行全面、连续的观测, 因而需要根据实测数据构建观测区域内的声速剖面模型, 以获得特定时间和地点的声速剖面。经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)模型法是声速剖面的主要构建方法, 它可以通过分析目标海域内历史观测数据的矩阵特征值与特征向量有效提取声速剖面的主要特征<sup>[3]</sup>。

Leblanc 和 Middleton<sup>[3]</sup> 于 1980 年首次提出了采用经验正交函数(EOF)分析海洋声速剖面的方法, 其后相关研究陆续开展。Davis 试验验证了 EOF 作为基函数描述声速剖面的方法具有最小均方根最优性<sup>[4]</sup>; 丁继胜等<sup>[5]</sup> 基于实测声速剖面簇, 利用经验正交函数计算了目标海域任意位置处的声速剖面, 并依此对多波束边缘

收稿日期: 2022-01-26

资助项目: 国家重点研发计划项目——国家 PNT 体系弹性化架构设计与关键技术示范验证(2020YFB0505805); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——广播式远程精密水下导航定位技术与方法研究(GY2022S03); 国家自然科学基金项目——顾及声速水平梯度影响的海底大地基准点 GNSS-A 精密定位方法研究(42004030); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费“问海计划”项目——水下通信导航核心关键技术研究(2021WHZZB1002); 山东省技术创新引导计划项目——海洋弹性 PNT 试验系统构建与应用示范(2020YFB0505800)

作者简介: 张林虎(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水声定位技术方面研究. E-mail: zhanglinhu@fio.org.cn

\* 通信作者: 刘 杨(1987—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海洋导航定位技术方面研究. E-mail: yangliu@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

数据进行声线折射改正,取得了较好的效果;张旭等<sup>[6]</sup>基于 Argo 数据利用 EOF 方法分析了台湾以东海域声速垂直结构的时空变化特征;这些研究表明采用经验正交函数模型分析声速剖面数据是可行的。不同阶数的 EOF 表达声速剖面的精度和效率存在差异。Park 等研究认为利用声速剖面簇的前 5 阶 EOF 就能较为准确地描述任意声速剖面<sup>[7]</sup>。周士弘和张茂有利用少于 5 阶的 EOF 描述台湾东北部海域声速场,并尝试采用 EOF 方法预报声速剖面<sup>[8]</sup>。国内外相关工作集中于对浅海声速剖面的研究,而对深海声速剖面的研究则主要基于 Argo 浮标观测数据开展。由于 Argo 浮标声速剖面观测数据分布稀疏(空间分辨率约为 1°)且采样时间间隔较大(10~30 d),不适用于局域较小时间尺度的深海声速剖面特征分析。

由于不同深度处的深海声速剖面存在不同的声速变化规律和特征,以及声速观测设备的观测深度范围不同,所以需要采用分层的方式分析声速剖面。刘杨范等<sup>[9]</sup>针对声速在浅层水体的复杂性与深层水体的平稳性特点,提出了双层经验正交函数建模法,并采用自适应方法确定出合理的阶次。由于经典深海声速剖面分为混合层、深海声道层和深海等温层三层<sup>[10]</sup>,因而采用双层正交函数建模法不适用于深海声速剖面。声速时空变化特征与海洋环境相关,陈小宇采用 EOF 将声速剖面分为背景场和扰动场,分析了声速变化与潮汐现象之间的关系<sup>[11]</sup>;孙文舟等提出了一种简化模型解析声速剖面 EOF 第一模态时间系数和空间函数变化规律,并认为温度是影响时空变化规律的主要因素<sup>[12]</sup>。

因此,本文基于较小时间尺度(时间间隔为 6 h)的深海声速剖面实测数据,首先分析深海声速观测数据的统计特征,结合经典深海声速剖面分层,将目标海域声速剖面分为上、中、下三层;然后,采用分层 EOF 方法分析目标海域不同深度层第一模态时间系数的变化规律,采用 2 种时域拟合模型描述时变规律并比较其拟合精度,并利用等效平均声速验证拟合模型的合理性;最后,探究声速剖面周期性变化特性的影响因素。

## 1 声速剖面分层 EOF 建模

### 1.1 深海声速剖面分层深度选取

不同深度层声速剖面随时间和空间变化的特征不同,需要根据声速时空变化特征对剖面进行分层,以减小不同分层中声速剖面时空变化特征对构建模型的影响。本文利用不同声速剖面簇的同深度标准差、声速标准差梯度、平均声速剖面垂直梯度三种声速剖面统计特征对深海声速剖面进行分层。其中,不同声速剖面簇的同深度标准差表示声速随时间变化的剧烈程度,声速标准差梯度表示同深度标准差随深度变化的程度,平均声速剖面垂直梯度表示声速剖面随深度变化的程度。

假设观测区域内获得  $M$  个  $N$  层的标准声速剖面数据集。第  $m$  层的同深度声速标准差  $\sigma_m$  定义为:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (S_i - \bar{S})^2}{M-1}}, \quad (1)$$

式中:  $M$  为第  $m$  层声速观测个数;  $S_i$  为第  $m$  层第  $i$  次声速观测值;  $\bar{S}$  为第  $m$  层声速观测均值。

第  $m$  层的声速标准差梯度  $\nabla\sigma_m$  定义为:

$$\nabla\sigma_m = (\sigma_{m+1} - \sigma_m) / \Delta z_m, \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{m+1}$  为第  $m+1$  层同深度声速标准差;  $\Delta z_m$  为第  $m$  层的水层厚度。

第  $m$  层的声速垂直梯度  $g_m$  定义为:

$$g_m = (S_{m+1} - S_m) / \Delta z_m, \quad (3)$$

式中:  $S_{m+1}$  为第  $m+1$  层声速;  $S_m$  为第  $m$  层声速。

### 1.2 分层 EOF 方法

假设观测区域内的声速剖面有  $M$  个,经过数据预处理,最终获得  $M$  个  $N$  层的标准声速剖面数据集  $S$ 。根

据经典深海声速剖面变化特点并结合目标海域的声速变化统计特征, 可以将标准声速剖面数据集  $\mathbf{S}$  划分为上、中、下三个深度区间层:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_u \\ \mathbf{S}_b \\ \mathbf{S}_d \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{S}_u$ 、 $\mathbf{S}_b$ 、 $\mathbf{S}_d$  分别为上、中、下三层的声速剖面, 可分别表示为  $\mathbf{S}_u = \begin{bmatrix} s_1(h) & s_2(h) & \cdots & s_M(h) \\ s_1(2h) & s_2(2h) & \cdots & s_M(2h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1(D_1h) & s_2(D_1h) & \cdots & s_M(D_1h) \end{bmatrix}$ ,

$$\mathbf{S}_b = \begin{bmatrix} s_1(D_1h+h) & s_2(D_1h+h) & \cdots & s_M(D_1h+h) \\ s_1(D_1h+2h) & s_2(D_1h+2h) & \cdots & s_M(D_1h+2h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1(D_2h) & s_2(D_2h) & \cdots & s_M(D_2h) \end{bmatrix}, \mathbf{S}_d = \begin{bmatrix} s_1(D_2h+h) & s_2(D_2h+h) & \cdots & s_M(D_2h+h) \\ s_1(D_2h+2h) & s_2(D_2h+2h) & \cdots & s_M(D_2h+2h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1(Nh) & s_2(Nh) & \cdots & s_M(Nh) \end{bmatrix}, \text{ 其}$$

中, 每一行为同一深度处不同声速剖面声速观测值, 每一列为一条声速剖面不同深度处的声速观测值,  $D_1h$  和  $D_2h$  为分界点深度。

对式 (4) 声速剖面数据集  $\mathbf{S}$  逐行取平均获得平均声速剖面  $\bar{\mathbf{S}}$ :

$$\bar{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{S}}_u \\ \bar{\mathbf{S}}_b \\ \bar{\mathbf{S}}_d \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $\bar{\mathbf{S}}_u$ 、 $\bar{\mathbf{S}}_b$ 、 $\bar{\mathbf{S}}_d$  分别为上、中、下三个深度区间层平均声速剖面, 其中,  $\bar{\mathbf{S}}_u = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M s_i(h) \\ \sum_{i=1}^M s_i(2h) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^M s_i(D_1h) \end{bmatrix}$ ,  $\bar{\mathbf{S}}_b =$

$$\frac{1}{M} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M s_i[(D_1+1)h] \\ \sum_{i=1}^M s_i[(D_1+2)h] \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^M s_i(D_2h) \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{S}}_d = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M s_i[(D_2+1)h] \\ \sum_{i=1}^M s_i[(D_2+2)h] \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^M s_i(Nh) \end{bmatrix}。$$

实测声速剖面  $\mathbf{S}$  与平均声速剖面  $\bar{\mathbf{S}}$  做差可获得距平矩阵  $\Delta\mathbf{S}$ <sup>[3,13]</sup>:

$$\Delta\mathbf{S} = \mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{S}_u \\ \Delta\mathbf{S}_b \\ \Delta\mathbf{S}_d \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中,  $\Delta\mathbf{S}_u$ 、 $\Delta\mathbf{S}_b$ 、 $\Delta\mathbf{S}_d$  分别为上、中、下三层的距平矩阵。

距平矩阵  $\Delta\mathbf{S}_u$ 、 $\Delta\mathbf{S}_b$ 、 $\Delta\mathbf{S}_d$  对应的协方差矩阵  $\mathbf{R}_u$ 、 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{R}_d$  计算方法为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_u = \frac{1}{M} \langle \Delta\mathbf{S}_u \Delta\mathbf{S}_u^T \rangle \\ \mathbf{R}_b = \frac{1}{M} \langle \Delta\mathbf{S}_b \Delta\mathbf{S}_b^T \rangle \\ \mathbf{R}_d = \frac{1}{M} \langle \Delta\mathbf{S}_d \Delta\mathbf{S}_d^T \rangle \end{cases}. \quad (7)$$

进而,对协方差矩阵求解特征值和特征向量:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_u \mathbf{F}_u = \lambda_u \mathbf{F}_u \\ \mathbf{R}_b \mathbf{F}_b = \lambda_b \mathbf{F}_b, \\ \mathbf{R}_d \mathbf{F}_d = \lambda_d \mathbf{F}_d \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\lambda_u$ 、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_d$ 分别为 $\mathbf{R}_u$ 、 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{R}_d$ 的特征值矩阵, $\mathbf{F}_u$ 、 $\mathbf{F}_b$ 、 $\mathbf{F}_d$ 分别为 $\mathbf{R}_u$ 、 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{R}_d$ 与 $\lambda_u$ 、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_d$ 对应的特征向量。

将特征值按照从大到小的顺序重新排列:

$$\begin{cases} \lambda_u = \text{diag} [ \lambda_u^1 & \lambda_u^2 & \cdots & \lambda_u^{D_1} ] & \mathbf{F}_u = [ f_u^1 & f_u^2 & \cdots & f_u^{D_1} ] \\ \lambda_b = \text{diag} [ \lambda_b^1 & \lambda_b^2 & \cdots & \lambda_b^{D_2-D_1} ] & \mathbf{F}_b = [ f_b^1 & f_b^2 & \cdots & f_b^{D_2-D_1} ], \\ \lambda_d = \text{diag} [ \lambda_d^1 & \lambda_d^2 & \cdots & \lambda_d^{N-D_2} ] & \mathbf{F}_d = [ f_d^1 & f_d^2 & \cdots & f_d^{N-D_2} ] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_u$ 、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_d$ 分别为 $\mathbf{R}_u$ 、 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{R}_d$ 的排序后的特征值矩阵, $\mathbf{F}_u$ 、 $\mathbf{F}_b$ 、 $\mathbf{F}_d$ 分别为 $\mathbf{R}_u$ 、 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{R}_d$ 与 $\lambda_u$ 、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_d$ 对应的特征向量, $D_1$ 、 $D_2-D_1$ 、 $N-D_2$ 分别为上、中、下深度区间层解算的特征值个数。

每一个深度层内,模态系数矩阵 $\mathbf{A}$ 定义<sup>[14]</sup>为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}^T \Delta \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1M} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \cdots & \alpha_{NM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_N \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{a}_N$ 为第 $N$ 阶模态系数。

基于 EOF 模态矩阵的方差贡献率<sup>[15]</sup>,分别在上、中、下三个深度区间层内取前 $i$ 、 $j$ 、 $k$ 个特征值,及其对应的特征向量和模态系数矩阵。以下层为例,特征值矩阵 $\lambda_{dk}$ 、特征向量矩阵 $\mathbf{F}_{dk}$ 及模态系数矩阵 $\mathbf{A}_{dk}$ 分别表示为:

$$\lambda_{dk} = \text{diag} [ \lambda_d^1 & \lambda_d^2 & \cdots & \lambda_d^k ], \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_{dk} = [ f_d^1 & f_d^2 & \cdots & f_d^k ], \quad (12)$$

$$\mathbf{A}_{dk} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1M} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{k1} & \alpha_{k2} & \cdots & \alpha_{kM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_k \end{bmatrix}. \quad (13)$$

同理可得到 $\lambda_{ui}$ 、 $\mathbf{F}_{ui}$ 、 $\mathbf{A}_{ui}$ 、 $\lambda_{bj}$ 、 $\mathbf{F}_{bj}$ 、 $\mathbf{A}_{bj}$ 。对模态系数矩阵进行时变分析,可得到声速随时间的变化规律。对模态系数进行拟合便可获得测量期间任意时刻的模态系数 $\hat{\mathbf{A}}$ ,并解算得到任意时刻的声速剖面:

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{A}} + \Delta \mathbf{S}. \quad (14)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 深海声速剖面数据获取及分层

实验数据来自 2021 年 7 月在南海海域利用声速仪 (Sound Velocity Profile, SVP) 及温盐深仪 (Conductivity, Temperature, Depth, CTD) 观测的深海声速剖面数据,其观测间隔为 6 h,时间跨度为 7 d。采用声速仪及温盐深仪观测获得数据后,需要预处理以获得标准分层的声速剖面数据,处理流程见图 1。其中,温盐深仪测量海水中的温度、深度、盐度信息后,根据声速经验公式计算海水声速值。陈长安等<sup>[16]</sup>对比了 10 种声速经验公式在南海海域的精度,建议使用 Del Grosso 声速经验公式计算声速,本文采用 Del Grosso 声速经验公式计算声速值<sup>[17-18]</sup>。声速观测过程中,受投放仪器设备故障及海流影响,观测剖面深度不是顺序增加,需基于深度对数据进行重排序,并剔除粗差;对于偏离声速剖面主廓线过大的声速数据予以剔除。基于不同分层的数据分布情况进行不同处理:观测深度以内的缺失数据进行插值;观测深度以外数据进行数据延拓;对相同深度的观测值采用调和平均方法获得该深度处声速值,对于标准间隔深度处的声速则取前后一定深度区间内声速的加权平均值;最后对分层内的声速数据取平均以获得深度间隔为 0.5 m 的标准化声速剖面。

经过数据预处理, SVP 测量获得 12 条有效数据, CTD 获得 30 条有效数据(图 2)。声速剖面具有典型的深海声速剖面分层特征<sup>[10]</sup>, 随深度变化可划分为表面层(混合层)、跃变层和深海等温层, 其中跃变层又分为季节性跃变层和主跃变层。声速剖面在水深 0~2 m 处, 受仪器自身温度的影响, 声速变化剧烈且差异较大; 在水深 2~30 m 左右处, 考虑到风浪的搅拌作用导致该水深区间水温相近, 声速变化幅度较小, 具有明显的表面层特征; 在水深 50~1 100 m 处, 声速值随深度增加而减小, 为深海垂直结构中的跃变层; 在水深 1 000 m 以深的声速剖面结构稳定, 层内水温与盐度变化趋于一致, 声速主要受压力变化影响, 所以, 声速随深度增加而增大, 具有明显的深海等温层特征。

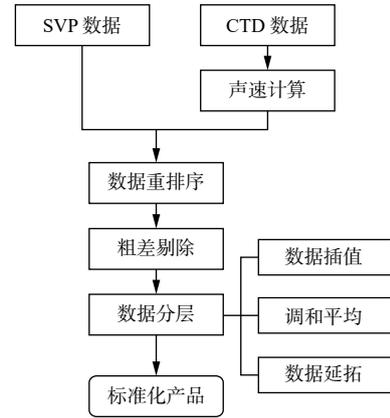


图 1 声速数据预处理流程

Fig. 1 Preprocessing flow of the sound velocity data

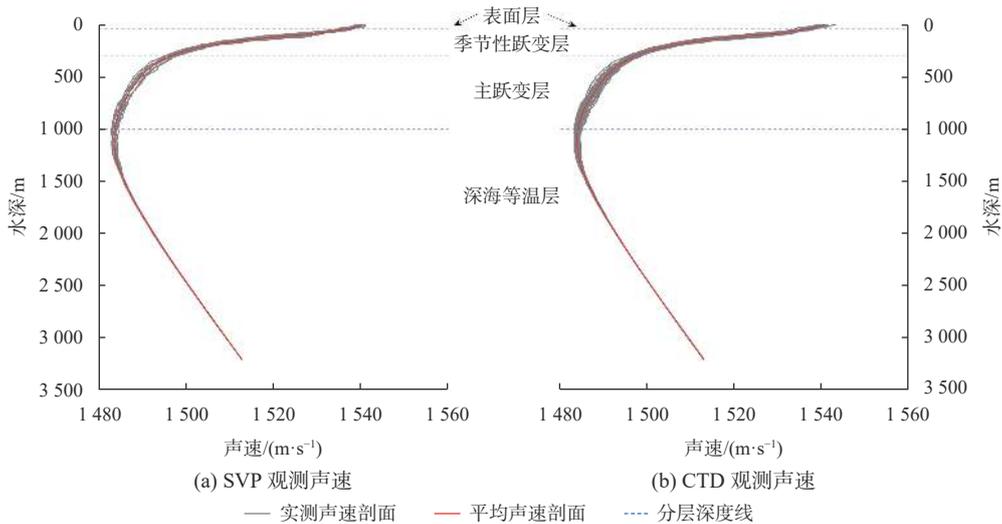


图 2 测区声速剖面示意图

Fig. 2 Sound velocity profiles in the study area

基于实测的声速剖面数据, 本文分别统计了 SVP 和 CTD 测得的声速剖面簇的同深度标准差、同深度声速标准差梯度以及平均声速剖面的声速垂直梯度, 见图 3 和图 4。

由图 3 可以看出, 不同深度声速剖面标准差为 0.02~3.58 m/s, 其最大值出现在 109 m 水深处, 最小值出现在 3 130 m 水深处。由图 4 可以看出, 不同深度声速剖面标准差为 0.02~2.86 m/s, 其最大值出现在 87 m 水深处, 最小值出现在 2 650 m 水深处。综合图 3 和图 4 可以发现: 在水深 0~500 m 左右, 声速标准差梯度数值和声速剖面标准差随深度变化剧烈且数值较大, 声速垂直梯度为负值且梯度绝对值由大到小, 并趋近于 0; 在水深 500~1 500 m 左右, 同深度声速标准差梯度数值变化趋缓且呈现变小趋势, 不同深度声速剖面标准差变化剧烈程度变小且具有随深度变化缓慢降低的趋势, 声速垂直梯度缓慢趋近于 0; 在水深 1 500~3 200 m 左右, 不同深度声速剖面标准差、同深度声速标准差梯度和声速垂直梯度基本稳定, 数值均趋近于 0。

针对不同深度区间声速变化差异并顾及分层点, 应尽量选择声速变化较缓慢的深度<sup>[19]</sup>, 故本文将实测数据声速剖面分为 0~550 m、450~1 550 m、1 450~3 200 m 三层, 为避免出现边界声速不匹配的情况, 不同分层之间设置了 100 m 深度区域的重叠部分。

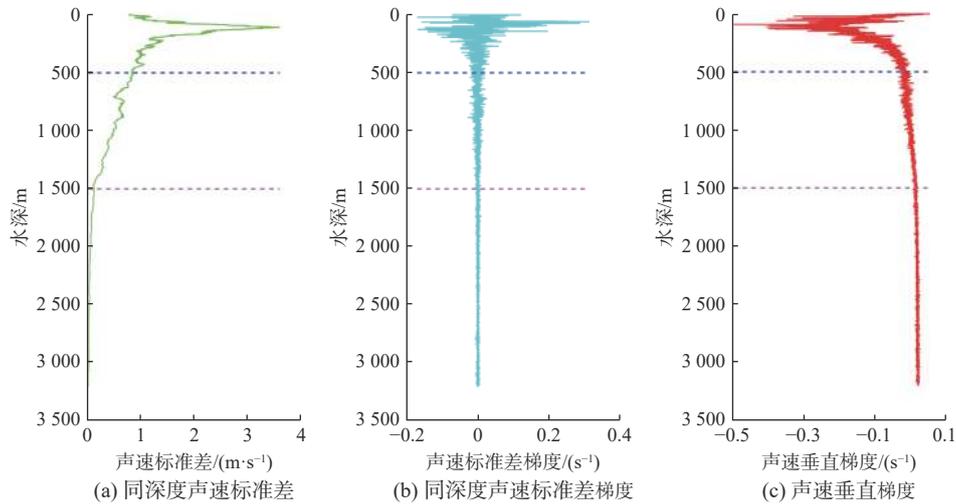


图3 SVP测量声速剖面数据统计特征

Fig. 3 Statistical characteristics of the sound velocity profile data measured with SVP

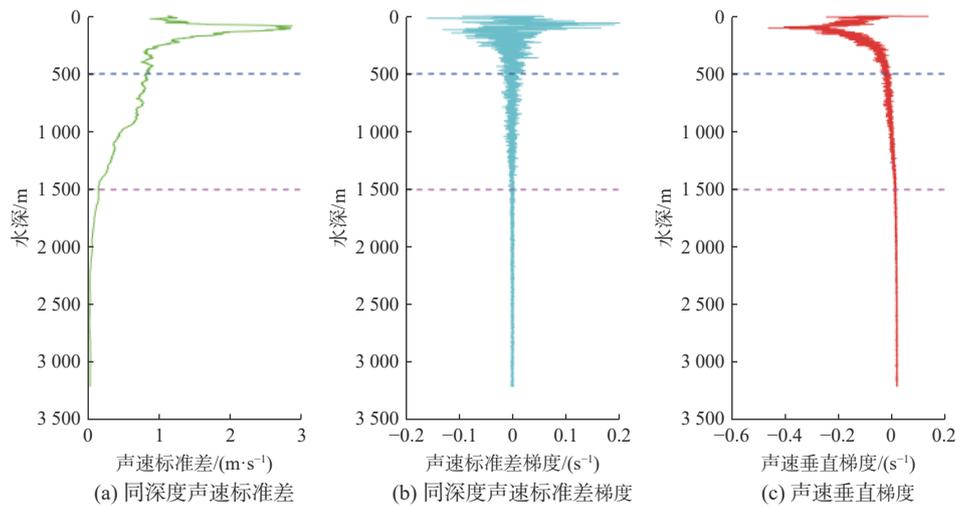


图4 CTD测量数据声速剖面统计特征

Fig. 4 Statistical characteristics of the sound velocity profile data measured with CTD

## 2.2 分层 EOF 第一模态系数时变分析

对声速剖面簇进行分层 EOF 分析时,在不同分层,采用适当的 EOF 阶数能提高运算速度,降低计算数据量,因此,需要选取合适阶数的特征向量和特征值。通常,EOF 各阶次方差贡献率及累计方差贡献率<sup>[15]</sup>能够反映模态分析的有效性,并为分层 EOF 阶数的选择提供依据。前  $m$  阶 EOF 累积贡献率  $Ek_m$  定义为:

$$Ek_m = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{j=1}^k \lambda_j} \times 100\%, \quad (15)$$

式中:  $k$  为分层内协方差矩阵的行数;  $\lambda_i$ ,  $\lambda_j$  分别为第  $i$  和第  $j$  个特征值。

对测量数据进行分层 EOF 分解, SVP、CTD、SVP+CTD 观测数据的结果获得上、中、下三层各阶次方差

贡献率与阶数的关系, 上层声速剖面利用前 3~4 阶获得的反演声速剖面, EOF 方差贡献率即可达到 99%; 中、下层声速剖面利用前 2 阶获得的反演声速剖面, EOF 方差贡献率即可达到 99%, 如图 5 所示。整体而言, 不同声速剖面簇的第一阶次分层 EOF 方差贡献率均在 79% 以上, 分层 EOF 第一模态系数能够反映声速剖面随时间变化的主要特征。

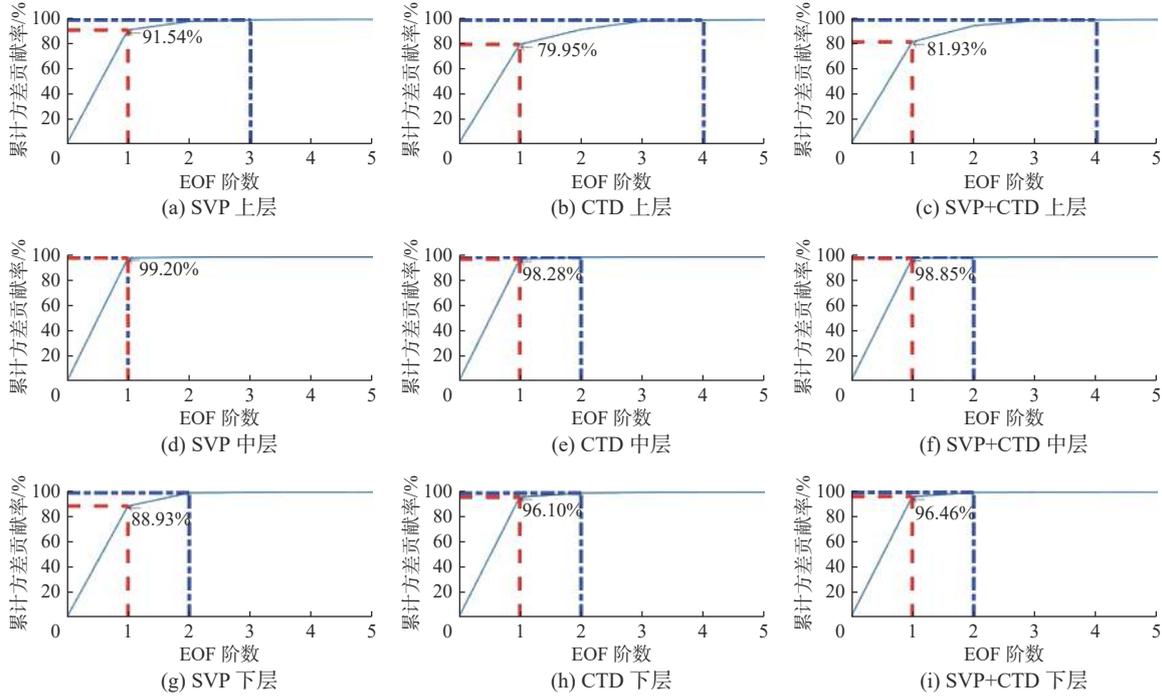


图 5 EOF 累计方差贡献率与阶数的关系

Fig. 5 The relation between the accumulated variance contribution rate and the order of the EOF

本文通过分析分层 EOF 第一模态系数研究声速剖面的时域变化规律, 假设声速剖面时变规律  $C_T$  符合正弦变化, 则:

$$C_T = A_1 + A_2 \cdot \sin\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi + \varphi\right) = A_1 + A_{21} \cdot \sin\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi\right) + A_{22} \cdot \cos\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi\right), \quad (16)$$

式中:  $T_D$  为声速剖面观测的以天为周期的时间;  $A_1$ 、 $A_{21}$ 、 $A_{22}$  为常数项和周期项系数, 其中  $A_{21} = A_2 \cdot \cos(\varphi)$ ,  $A_{22} = A_2 \cdot \sin(\varphi)$ 。

基于 SVP 和 CTD 声速剖面观测数据集, 以及 2 种数据的所有观测结果组成的声速剖面观测数据集 (简称 SVP+CTD 数据集) 对深海声速剖面进行分层 EOF 分析, 采用一阶傅里叶函数拟合分层 EOF 第一模态系数的日周期变化规律, 拟合结果 (图 6) 表明, 上、中层 EOF 第一模态系数的日变化规律均较明显, 其中中层较上层日变化规律更加明显, 其数据拟合误差见表 1。

声速剖面的时域变化具有日周期、季节性和年际变化特征, 声速剖面测量时间跨度约为一周, 其时域变化会受到季节性和年际长期项的影响, 同时长期项引起的声速剖面时域变化在观测期间近似可视为线性变化, 故在一阶傅里叶拟合基础上添加线性项并进行对比分析。拟合日周期的分层 EOF 第一模态系数变化的方法为:

$$MN_1(T_D, H) = a_1 + a_2 \cdot \sin\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi\right) + a_3 \cdot \cos\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi\right) + a_4 \cdot H, \quad (17)$$

式中:  $MN_1(T_D, H)$  为第一模态系数的时变规律项;  $T_D$  为声速剖面观测的以天为周期的时间;  $H$  为声速剖面观测与首次声速剖面观测的时间延迟;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  为拟合系数, 由最小二乘法计算获得。

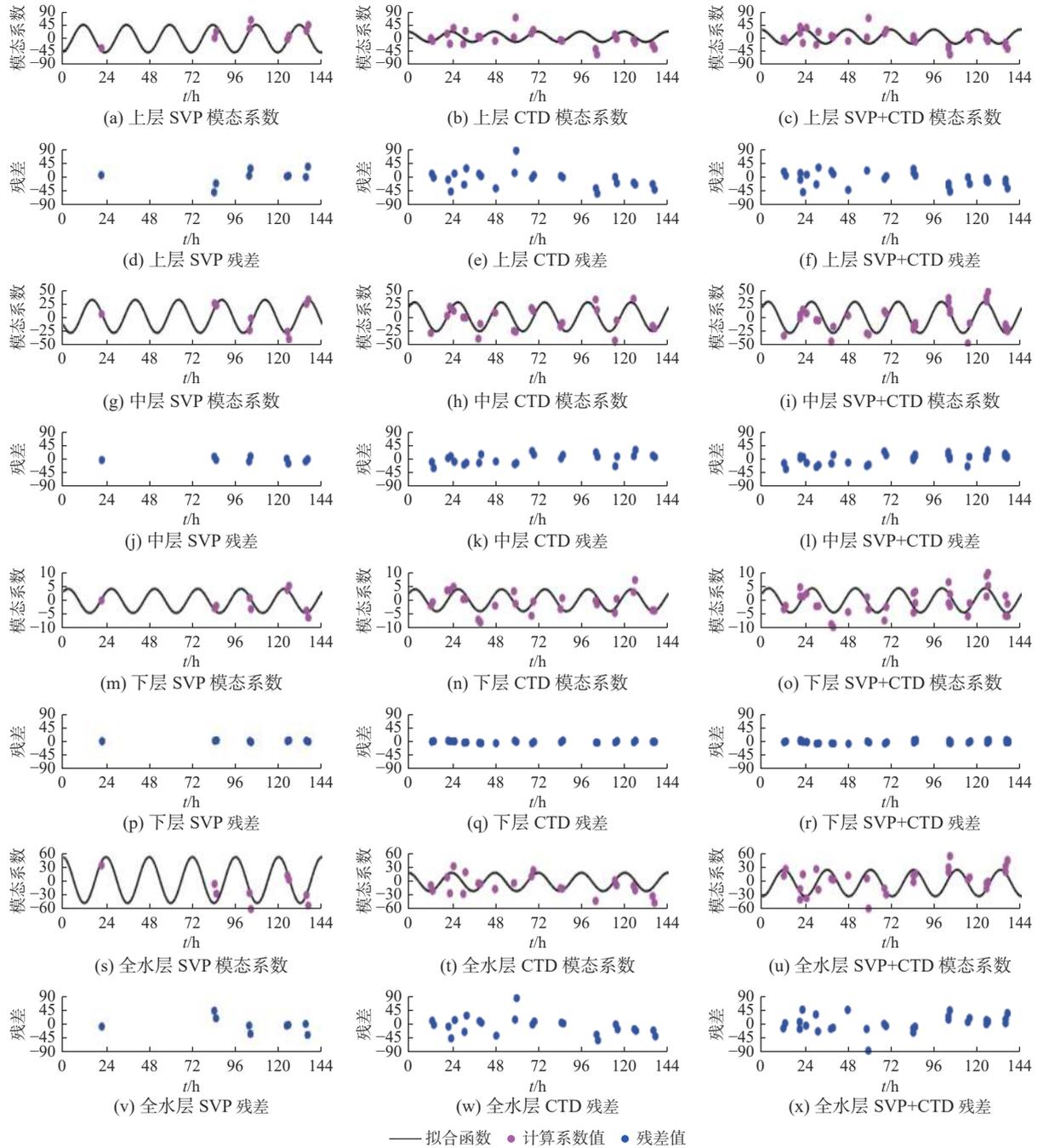


图 6 不考虑长期线性变化项的第一模态系数时间变化

Fig. 6 The temporal variations of the first mode coefficient of EOF without considering the long-term linear variation term

表 1 第一模态系数拟合残差标准差

Table 1 The standard deviation of fitted residuals of the first mode coefficients of EOF

水层	不考虑长期线性变化项			考虑长期线性变化项		
	SVP 数据集	CTD 数据集	SVP+CTD 数据集	SVP 数据集	CTD 数据集	SVP+CTD 数据集
上层	22.06	27.66	27.53	22.02	27.64	27.50
中层	6.66	15.28	15.01	6.66	14.28	13.93
下层	1.52	2.41	3.61	1.52	2.41	3.55
全水层	21.16	27.46	26.04	21.21	27.45	26.03

对深海声速剖面进行分层 EOF 分析, 采用添加线性项的一阶傅里叶函数拟合分层 EOF 第一模态系数的日周期变化特征, 拟合结果如图 7 所示。由图 7 可知: 不同分层的 EOF 第一模态系数时变规律特征不同; 中层比上层第一模态系数日周期变化特征更明显。对比 2 种模型的拟合残差标准差(表 1)发现, 所有分层及不同种类数据在添加线性项之后, 拟合效果基本有所改进, 且中层改进幅度大于其他层。

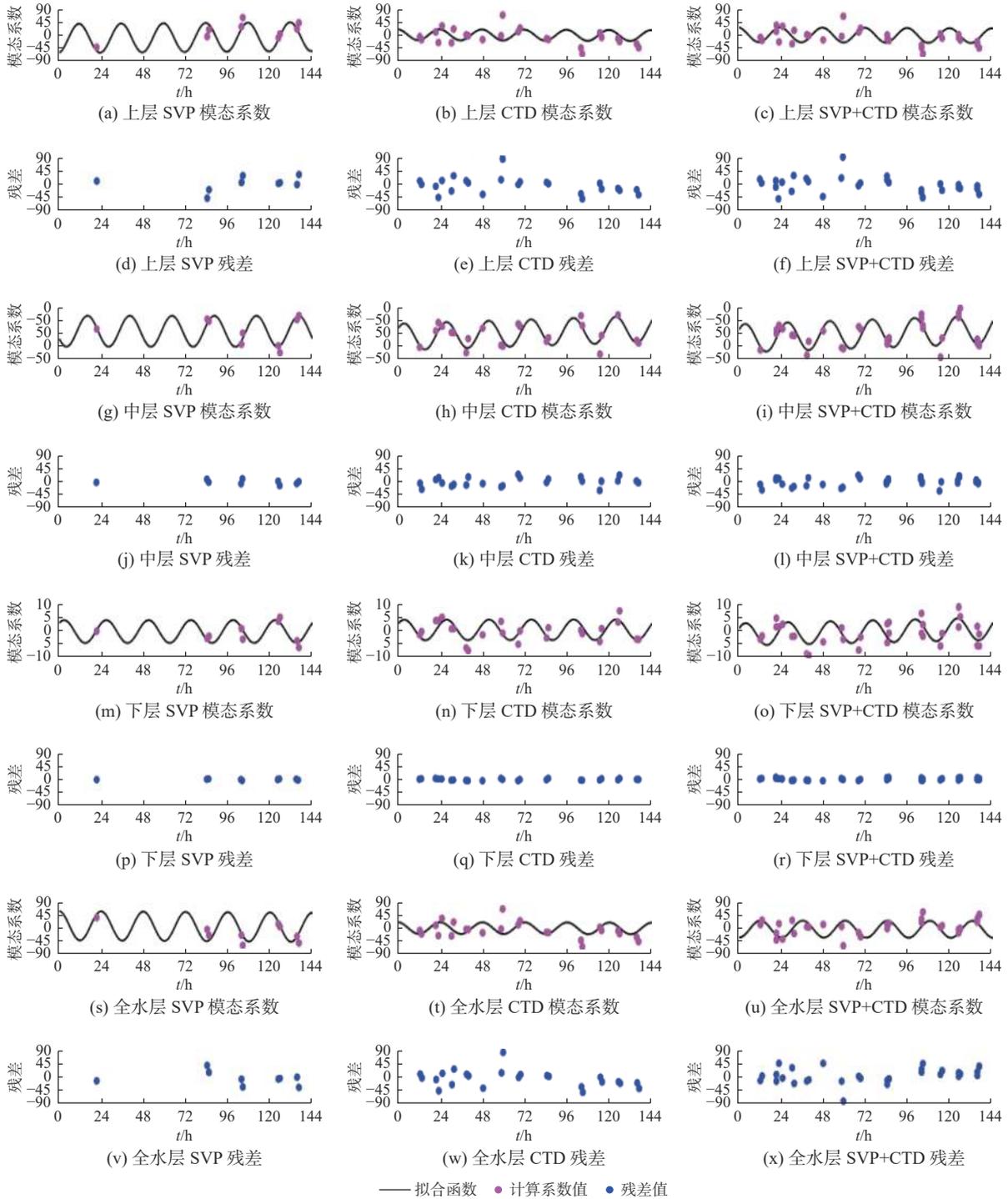


图 7 考虑长期线性变化项的第一模态系数时间变化

Fig. 7 The temporal variations of the first mode coefficient of EOF with the consideration of the long-term linear variation term

### 2.3 声速剖面时变特征分析

在 EOF 分析过程中,对分层 EOF 模态系数进行拟合可获得测量期间任意时刻的模态系数,并解算得到任意时刻的声速剖面,但模态系数不具有明确的物理意义。因此,本文采用添加线性项的一阶傅里叶函数拟合分层等效平均声速的日周期变化特征,基于等效平均声速的日周期变化特征进一步反映声速剖面的时变特征。拟合日周期的分层等效平均声速变化的方法为:

$$ES(T_D, H) = a_1 + a_2 \cdot \sin\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi\right) + a_3 \cdot \cos\left(\frac{T_D}{24} \cdot 2\pi\right) + a_4 \cdot H, \quad (18)$$

式中:  $ES(T_D, H)$  为等效平均声速的时间变化项;  $T_D$  为声速剖面观测的以天为周期的时间;  $H$  为声速剖面观测与首次声速剖面观测的时间延迟;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  为拟合系数,采用最小二乘法计算获得。通过采用添加线性项的一阶傅里叶函数拟合分层等效平均声速结果发现,不同分层声速剖面均具有日周期变化特性,中层日周期变化特征较上层日周期变化特征更明显(表 2 和图 8)。声速剖面的等效平均声速与第一模态系数变化规律一致,说明第一模态系数的时域变化特征反映声速剖面的时域变化特征。

表 2 等效平均声速拟合残差标准差 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Table 2 The standard deviation ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of fitted residuals of the equivalent average sound velocity

水层	SVP 数据	CTD 数据	水层	SVP 数据	CTD 数据
上层	0.45	0.53	下层	0.02	0.10
中层	0.14	0.25	全水层	0.10	0.13

### 2.4 影响因素分析

EOF 第一模态系数变化的影响因素有温度日变化和年变化引起的海水声速周期性变化,且影响随深度增大而减小<sup>[11]</sup>。本文首先将第一模态系数与温度做相关性分析,结果见表 3。从表 3 中可以看出,分层 EOF 第一模态系数与温度数据具有显著相关性。考虑到太阳辐射对海水温度的影响主要集中于表层至 500 m 以浅的区间<sup>[11]</sup>,推测中层声速或温度变化主要由潮流所致。为此,本文分析声速与潮汐之间的关系。

表 3 EOF 第一模态系数与等效平均温度相关系数

Table 3 The correlation coefficients between the first mode coefficient of EOF and equivalent average temperature

水层	SVP 数据	CTD 数据	水层	SVP 数据	CTD 数据
上层	0.91	0.83	下层	0.79	0.90
中层	0.97	0.99	全水层	0.81	0.59

基于实验海区附近东沙岛验潮站 2021 年 4 月 1 日至 5 月 30 日的潮汐逐时预报数据(<http://global-tide.nmdis.org.cn/>),利用 T\_TIDE 潮汐处理软件包<sup>[20]</sup>对潮汐数据进行调和分析,获得主要分潮的调和常数,结果见表 4。由表 4 可以看出,声速实验区域内声速剖面观测时间段,潮汐的主要影响分潮为  $O_1$  分潮和  $K_1$  分潮。

表 4 主要分潮调和常数

Table 4 Tidal constants of the major tidal constituents

主要分潮	振幅/cm	迟角/(°)	主要分潮	振幅/cm	迟角/(°)
$O_1$	21.00	254.08	$M_2$	17.20	300.04
$K_1$	21.45	311.18	$S_2$	2.15	310.29

注:主要分潮中文名称及周期等参考冯士管等<sup>[21]</sup>。

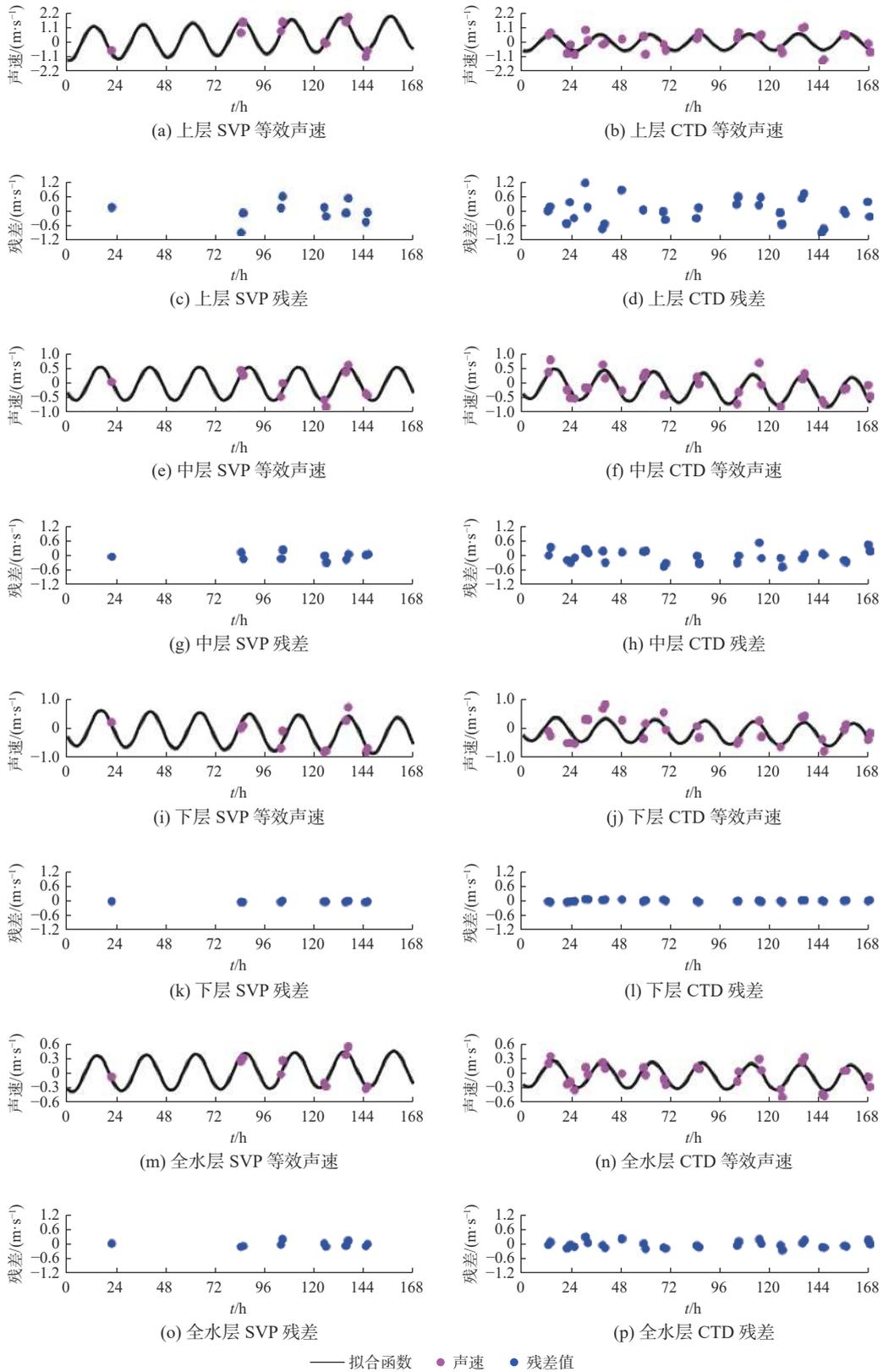


图 8 考虑长期线性变化项的等效平均声速时间变化

Fig. 8 The temporal variations of the equivalent average sound velocity with the consideration of the long-term linear variation term

根据获得的分潮振幅,即可获得区域的潮汐类型<sup>[22]</sup>,潮汐类型指标 $F$ 计算方法为:

$$F = \frac{H_{O_1} + H_{K_1}}{H_{M_2}}, \quad (19)$$

式中: $H_{O_1}$ 、 $H_{K_1}$ 、 $H_{M_2}$ 为 $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 分潮振幅。当 $F \leq 0.5$ 时,潮型为半日潮;当 $0.5 < F \leq 2.0$ 时,潮型为不规则半日潮;当 $2.0 < F \leq 4.0$ 时,潮型为不规则全日潮;当 $F > 4.0$ 时,潮型为全日潮<sup>[23]</sup>。

在声速剖面观测时间段,实验海域潮汐的 $F$ 值为2.47,潮汐类型为不正规全日潮,与余慕耕<sup>[24]</sup>对南海该区域潮汐分布特征的描述一致,与本文提取的声速剖面时变特征也基本吻合。

### 3 结 论

针对南海海域实测的全海深声速剖面,本文提出基于分三层的经验正交函数法分析声速剖面的时域变化特征,并构建局域小时间尺度声速剖面模型对声速时域变化特征进行拟合。根据典型深海声速剖面结构和实测数据不同分层的统计特征,将实测数据深度分为上(0~550 m)、中(450~1 550 m)、下(1 450~3 200 m)三层。对每层声速剖面进行经验正交函数分解,获得模态系数矩阵,并分析第一模态系数的时域变化,获得其日变化特征,进而采用2种模型对声速剖面第一模态系数进行拟合,得到结论如下。

1) 实验海区声速剖面分层 EOF 第一模态系数及等效平均声速具有日周期变化特征,上层声速日周期变化特征不明显,中层声速日周期变化特征较明显,下层声速变化较小但仍具有日周期变化特征。

2) 对于局部海域小时间尺度声速剖面变化拟合过程,应考虑声速剖面长周期变化项的影响。

3) 实验海区声速剖面 EOF 第一模态系数变化与温度显著相关,声速剖面时变特征与海区潮汐周期特征相似。

声速剖面的时域变化特征影响因素的分析局限于对相关关系的研究。下一步本研究工作将对影响因素进行全面分析并分析其因果关系,同时采用不同声速观测值进行模型计算,由于观测仪器精度和系统误差存在差异,需要在声速剖面数据集解算过程中对不同声速剖面数据进行定权处理。

### 参考文献 (References):

- [1] 汪品先. 发展深海科技的前景与陷阱[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 71-79. WANG P X. Developing deep-sea science and technology: perspectives and pitfalls[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(3): 71-79.
- [2] 孙大军, 郑翠娥, 崔宏宇, 等. 水下传感器网络定位技术发展现状及若干前沿问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1121-1136. SUN D J, ZHENG C E, CUI H Y, et al. Developing status and some cutting-edge issues of underwater sensor network localization technology[J]. *Science China (Information Science)*, 2018, 48(9): 1121-1136.
- [3] LEBLANC L R, MIDDLETON F H. An underwater acoustic sound velocity data model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(12): 2055-2062.
- [4] DAVIS R E. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1976, 6(3): 249-266.
- [5] 丁继胜, 周兴华, 唐秋华, 等. 多波束勘测声速剖面场的 EOF 表示方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 446-449. DING J S, ZHOU X H, TANG Q H, et al. Expression of multi-beam echo sounding sound velocity profile with empirical orthogonal functions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 446-449.
- [6] 张旭, 张永刚, 张健雪, 等. 台湾以东海域声速剖面序列的 EOF 分析[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(4): 498-506. ZHANG X, ZHANG Y G, ZHANG J X, et al. EOF analysis of sound speed profiles in sea area east of Taiwan[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(4): 498-506.
- [7] PARK J C, KENNEDY R M. Remote sensing of ocean sound speed profiles by a perceptron neural network[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1996, 21(2): 216-224.
- [8] 周士弘, 张茂有. 海洋声速场的经验正交函数描述及声速剖面预报[J]. 海洋通报, 1999, 18(5): 27-34. ZHOU S H, ZHANG M Y. Study on empirical orthogonal functions expression and prediction of the sound speed field[J]. *Marine Science Bulletin*, 1999, 18(5): 27-34.
- [9] 刘杨范, 王振杰, 赵爽. 多波束测深中声速剖面的分层 EOF 自适应重构[J]. 声学技术, 2020, 39(3): 372-378. LIU Y F, WANG Z J, ZHAO S.

- Layered-EOFs based adaptive reconstruction of sound velocity profile in multi-beam sounding[J]. *Technical Acoustics*, 2020, 39(3): 372-378.
- [10] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 2版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010. LIU B S, LEI J Y. Principles of underwater sound [M]. 2nd Ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010.
- [11] 陈小宇. 基于多源数据的声速场分布式反演与跟踪方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. CHEN X Y. Inversion and tracking of the sound speed field with distributed multi-source data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [12] 孙文舟, 殷晓冬, 暴景阳, 等. 声速剖面 EOF 表示的第一模态解析[J]. *海洋测绘*, 2019, 39(3): 31-35. SUN W Z, YIN X D, BAO J Y, et al. The first model analysis of sound speed profile represented by EOF[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2019, 39(3): 31-35.
- [13] 王文娟, 俞胜宾, 杨凡, 等. 基于距平分析的 Argo 海表温度场重构[J]. *海洋预报*, 2014, 31(6): 68-73. WANG W J, YU S B, YANG F, et al. Reconstruction of SST with Argo data based on anomalies analysis[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(6): 68-73.
- [14] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [15] 张伟涛, 张韧, 王辉瓚, 等. 基于 Argo 观测资料的南海北部海域声速场时空特征分析[J]. *海洋通报*, 2013, 32(3): 275-280. ZHANG W T, ZHANG R, WANG H Z, et al. Analysis on the characteristics of sound speed in the northern South China Sea based on Argo data[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(3): 275-280.
- [16] 陈长安, 吴碧, 王升. 水下声速计算公式的优化选择[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(6): 77-80. CHEN C A, WU B, WANG S. Research on optimization selection of computation formulas for underwater sound velocity[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(6): 77-80.
- [17] DEL GROSSO V A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 56(4): 1084-1091.
- [18] 黄辰虎. 全球海域最优声速计算模型的综合选定(二): 精度分析及实际应用[J]. *海洋测绘*, 2016, 36(4): 16-20. HUANG C H. Selection of optimal sound velocity model in the global ocean, part II: precision analysis and its application[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(4): 16-20.
- [19] 沈远海, 马远良, 屠庆平. 声速剖面的分层经验正交函数表示[J]. *西北工业大学学报*, 2000(1): 90-93. SHEN Y H, MA Y L, TU Q P. On expression of ocean sound profile by layered empirical orthogonal function (EOF)[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000(1): 90-93.
- [20] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28: 929-937.
- [21] 冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. FENG S Z, LI F Q, LI S J. An Introduction to maritime science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [22] 黄祖珂. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. HUANG Z K. Tidal principles and calculation[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [23] 成印河, 梁广建, 朱凤芹, 等. 粤西沿岸海域潮汐特征[J]. *海洋科学*, 2017, 41(6): 111-118. CHENG Y H, LIANG G J, ZHU F Q, et al. Tidal characteristics along coast of Western Guangdong Province[J]. *Marine Science*, 2017, 41(6): 111-118.
- [24] 俞慕耕. 南海潮汐特征的初步探讨[J]. *海洋学报*, 1984, 6(3): 293-300. YU M G. A preliminary study on tidal characteristics of the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1984, 6(3): 293-300.

## Modeling of Time-Varying Characteristics of Deep-Sea Sound Velocity Profile Based on Layered-EOF

ZHANG Lin-hu<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Yan-xiong<sup>1,2</sup>, CHEN Guan-xu<sup>1,2</sup>, LI Meng-hao<sup>1,2</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Oceanic Surveying and Mapping, MNR, Qingdao 266061, China*)

**Abstract:** In view of the problem that the variation of sound velocity in different depth intervals has not been taken into account in the existing methods for the modeling of small time-scale sound velocity field in local sea areas, a method for the layering of sound velocity profiles based on statistical characteristics of the measured deep-sea sound velocity profiles is proposed. Furthermore, a method for the construction of layered time-varying model of local small-scale sound velocity profiles is proposed based on the Empirical Orthogonal Function (EOF). The diurnal variation characteristics of the first mode coefficient of layered-EOF and the equivalent average sound velocity of the sound velocity profiles are analyzed by using the measured data of whole deep sound velocity profiles in the South China Sea, and the accuracy of different fitting models is compared. Finally, the factors affecting the periodic variations of the sound velocity profiles are analyzed by using temperature and tide data in the experimental sea area. The results show that: ①Both the first mode coefficient of layered-EOF and the equivalent average sound velocity of the sound velocity profiles are characterized with daily periodic variation, with the daily periodic variation of sound velocity being not obvious in the upper layer, more obvious in the middle layer and small but still present in the lower layer. ②The influence of long-term variation term should be taken into account in fitting the local and small time-scale sound velocity. ③The change of the first mode coefficient of the EOF of the sound velocity profiles in the experimental sea area is significantly correlated to temperature. And the extracted time-varying characteristics of the sound velocity profiles are basically consistent with the periodic feature of tide in the experimental sea area.

**Key words:** empirical orthogonal function (EOF); sound velocity profile; daily periodic variation; first mode coefficients

**Received:** January 26, 2022