

一种新的声速剖面结构参数化方法

张旭¹, 张永刚¹, 张健雪², 董楠¹

(1 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023; 2 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 在 Munk 模型和 GDEM 模型的基础上, 提出了一种新的声速剖面结构参数化模型, 即分层声速剖面模型 (LSSPM)。模型用含 9 个参数的四层分段函数分别描述混合层、主跃层、深海声道层和深海等温层的声速结构, 形式简明、直观。数值实验结果表明, LSSPM 模型对声速剖面的拟合可达到较高的精度, 且对于中国周边的深海和浅海区域有较好的适用性。

关键词: 声速剖面; Munk 模型; GDEM 模型; 经验正交函数 (EOF); 分层声速剖面模型 (LSSPM)

中图分类号: P733.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)05-0054-07

1 引言

海洋声速剖面反映了局地海区声速在垂直方向上的结构特征, 它由水温、盐度等水文环境要素所决定, 对声传播及声信道特性具有重要影响。随着海洋学观测资料的不断积累, 数据集中剖面样本的数量越来越庞大, 这些剖面数据的垂直采样分辨率往往大小不一, 对水声传播计算的预处理造成了困难。此外, 海上观测到的数据往往不能提供完整的声速剖面结构, 因此不能直接用于水声学模型的计算。声速剖面结构参数化模型能够实现对声速剖面数据的简化描述与扩展, 因此对于解决上述问题具有一定的实际意义。

目前, 声速剖面结构参数化模型主要分为两类: 一是解析函数模型 (如 Munk 模型、GDEM 模型), 二是经验正交函数模型 (EOF 模型)。

解析函数模型用一系列数学表达式及参数描述声速随深度的变化关系。自 Ewing 和 Worzel^[1] 发现深海声道现象之后, 以深海声道特征值为基本参数的声速剖面模型开始发展起来, 如两层线性模型、Hirsch-Carter 模型^[2] 等。在这些研究的基础上, Munk^[3] 根据实测深海密度结构的层化特征, 提出了

一种适用于中纬度深海海区的经典声速剖面模型。这种指数表达式的描述方式适用于深海声道型的剖面结构, 在近几十年的相关研究中被广泛引用。为了满足海军业务化的需求, Davis 等^[4] 提出了 GDEM (Generalized Digital Environmental Model) 模型, 用更复杂的函数组合描述水温和盐度剖面, 再根据经验公式得到声速剖面。Teague 等^[5] 的研究表明, GDEM 模型对不同海域的真实海洋环境具有广泛的适用性。目前, 美国海军已经利用 GDEM 模型建立起水平网格为 $(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$ 的全球水文环境数据集^[6-7]。

经验正交函数模型又称 EOF (Empirical Orthogonal Function) 模型, 它用一组相互正交的函数向量来描述声速剖面样本序列相对于平均声速结构的扰动或变化。对于分解后的 EOF 时间函数和空间函数, 只需要用前几阶函数就可以较为准确地重构序列中的任一剖面, 大大减少了描述声速垂直结构所需要的参数。LeBlanc 等^[8] 的研究表明, EOF 是描述声速剖面最有效的基函数, 近年来的相关研究进一步证明了这种方法的可行性和有效性^[9-11]。

然而, 目前报道的这些模型在描述中国近海具体的声速场环境时都表现出一定程度的不足^[12]。

收稿日期: 2009-07-03; 修订日期: 2011-04-08。

作者简介: 张旭 (1982—), 男, 黑龙江省萝北县人, 博士, 主要从事军事海洋学研究。

本文的目的是在 Munk 模型和 GDEM 模型思想的基础上,提出一种对中国近海环境适用性更好,且更加直观、有效的声速剖面结构参数化模型。

2 模型建立

中国周边海域的深海声速剖面大多满足混合层、主跃层和深海等温层构成的“三层结构”。考虑到声道轴附近的声速梯度较小,且从负梯度结构逐渐变为正梯度结构,不适合用主跃层或深海等温层的表达式描述,因此以下将深海声道轴附近划分为一个单独的水层,定义为深海声道层。这样,深海声速剖面可由四层结构表示(图1)。

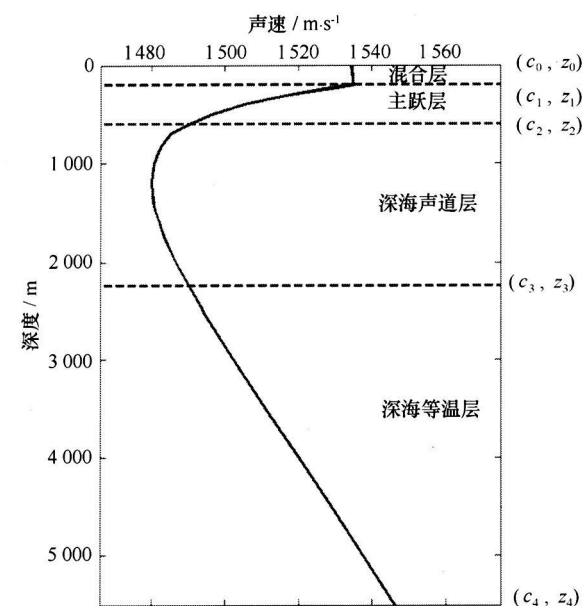


图1 典型深海声速剖面的分层结构示意图

选取5个特征深度 z_0, z_1, z_2, z_3, z_4 分别表示海面、混合层底、主跃层底、深海等温层上边界和海底的位置,这5个特征深度构成了图1所示声速剖面各层的边界: $[z_0, z_1]$ 为混合层, $[z_1, z_2]$ 为主跃层, $[z_2, z_3]$ 为深海声道层, $[z_3, z_4]$ 为深海等温层。假设深海声道轴深度(剖面中声速最小值所在深度)为 z_m , 则 $z_m \in (z_2, z_3)$ 。以下根据4个水层不同的声速结构特征建立拟合函数 $F(z)$ 随水深 z 的变化关系。

对于混合层,声速通常为正梯度结构,层中梯度值变化缓慢,可由二次多项式表示:

$$F(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 \quad z_0 \leq z \leq z_1, \quad (1)$$

式中, a_0, a_1, a_2 为多项式系数。

对于主跃层,声速为较强的负梯度结构,采用 GDEM 模型中描述上层水温剖面的幂函数形式

表示^[5]:

$$F(z) = \frac{1}{1 + (z/A)^{2B}} \quad z_1 < z \leq z_2, \quad (2)$$

式中,系数 A 和 B 的意义与 GDEM 模型中的表达式相同^[5], A 表征跃层的核心位置(声速梯度极大值所在深度), B 表征跃层核心位置附近的声速梯度强弱。

对于深海声道层,采用 Munk 经典深海声道模型的表达式描述^[3]:

$$F(z) = c_m [1 + \epsilon(\eta + e^{-\eta} - 1)] \quad z_2 < z \leq z_3, \quad (3)$$

式中, η 表示无量纲化的深度, $\eta = 2(z - z_m)/D$; z_m 和 c_m 分别为声道轴处的深度和声速; D 表示声道厚度尺度;扰动系数 $\epsilon = D \cdot \gamma_A/2$, 其中 γ_A 为绝热速度梯度(根据 Munk^[3] 的推导, $\gamma_A = 0.0114 \text{ km}^{-1}$)。

对于深海等温层,声速为正梯度结构,梯度值变化缓慢,可由二次多项式表示:

$$F(z) = b_0 + b_1z + b_2z^2 \quad z_3 \leq z \leq z_4, \quad (4)$$

式中, b_0, b_1, b_2 为多项式系数。

分段函数建立之后,为了使声速剖面在四个水层的边界处保持连续,还需要根据五个特征深度处的声速值将拟合函数集合映射到声速剖面函数集合。这里采用线性变换的方法来处理,将第 i 层拟合函数 $F(z)$ 变换为声速剖面函数 $c(z)$ 的表达式为:

$$\frac{c(z) - c(z_{i+1})}{c(z_i) - c(z_{i+1})} = \frac{F(z) - F(z_{i+1})}{F(z_i) - F(z_{i+1})} \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

式(1)~(5)即为由四层分段函数构成的声速剖面结构参数化模型,共含有9个参数,本文将其命名为分层声速剖面模型(LSSPM, Layered Sound Speed Profile Model)。在具体计算过程中,首先要根据声速剖面样本确定各特征深度的位置: z_0 和 z_4 分别为海面和海底深度;混合层底深度 z_1 可由近表层声速极大值的位置确定;主跃层底的深度 z_2 和深海等温层上边界的深度 z_3 由深海声道层来确定(本文取比声道轴处声速 c_m 大 5 m/s 的声速值作为参考声速值 c_r , 根据 c_r 在深海声道轴两侧限定的深度范围确定 z_2 和 z_3 的位置)。

3 模型适用性分析

以下通过一些深海和浅海区域的例子来验证 LSSPM 模型在中国周边海域的适用性。图2给出了应用 LSSPM 模型对4个典型深海区域的声速

剖面进行拟合的例子,选取的海区分别为南海中部海区(12°5′N, 115°5′E)、西太平洋热带海区(7°5′N, 130°5′E)、西太平洋亚热带海区(16°5′N, 130°5′E)和西太平洋温带海区(25°5′N, 130°5′E),数据来自 WOA05 数据集(WOA05 数据集^[13-14]由美国国家海洋学数据中心(NODC)发布,是根据 1900—2005 年全球范围内的水温和盐度剖面观测数据经过 Levitus 客观分析方法得到的

三维格点数据集,水平网格为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直范围为 0~5 500 m)。从拟合效果来看,模型能够较为准确地描述这些区域声速结构的形态特征,不同海区不同季节的声速剖面结构在混合层、主跃层、深海声道层的差异性得到了充分的反映。表 1 给出了这些声速剖面的初始量值以及计算得到的模型拟合参数,以下对各层函数参数的意义进行简要的分析。

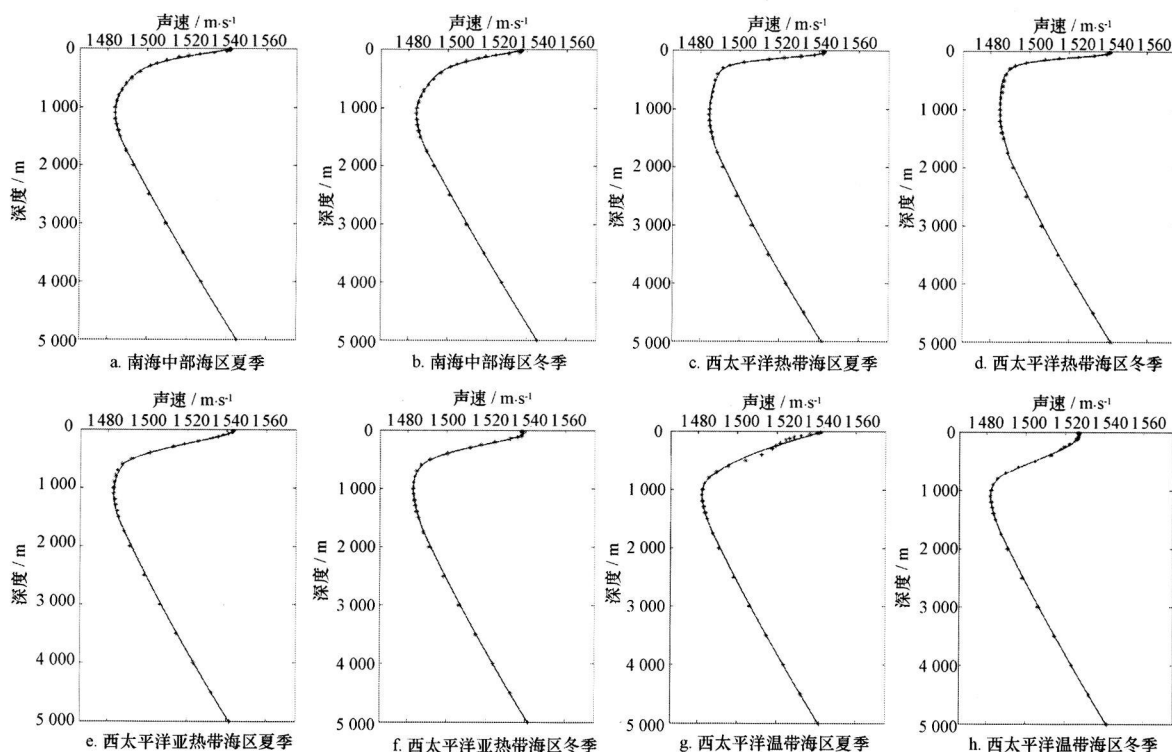


图2 中国近海典型深海区域拟合声速剖面与原始数据的比较

实线表示应用分层声速结构模型拟合得到的剖面,点表示原始数据,数据来自 WOA05 数据集

对于混合层和深海等温层,都采用二次多项式拟合,常数项系数 a_0 和 b_0 都为声速值的量级,一次项系数 a_1 和 b_1 则具有声速梯度的量级,而二次项系数 a_2 和 b_2 量值比一次项系数小得多。这反映了两个水层中声速剖面结构以线性变化为主,二次项仅起到了一定程度的辅助调节作用。

对于主跃层,跃层的强度和范围主要由系数 A 和 B 来控制。这里通过一个例子来说明系数 A 和 B 与声速剖面结构的关系。假设某一深海声速剖面的主跃层深度范围为 50~300 m,跃层中声速值的

变化范围为 1 500~1 535 m/s,图 3 给出了系数 A 和 B 变化时声速剖面形态发生的变化。由图可见,系数 A 量值越大,跃层中梯度较强的部分所在深度越大;系数 B 越大,系数 A 所确定的深度附近声速梯度越强。根据表 1,系数 A 的量值与不同海区主跃层的核心深度具有较好的对应性,在跃层较浅的南海中部和西太平洋热带海区 A 的量值较小,而在跃层较深的西太平洋亚热带和温带海区 A 的量值较大;而系数 B 则与跃层强度的变化相对应,在跃层较强的西太平洋热带海区 B 的量值明显大于其他区域。

表 1 中国近海典型深海区域声速剖面的初始量值设置及拟合参数
(数据来自 WOA05 数据集)

		南海中部海区 12°N, 115°E		西太平洋热带海区 7°N, 130°E		西太平洋亚热带海区 16°N, 130°E		西太平洋温带海区 25°N, 130°E	
		夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
声速剖面 初始量值	z_0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	c_0	1 541.5	1 537.0	1 542.3	1 540.6	1 543.2	1 537.8	1 542.3	1 526.7
	z_1	0 0	20 0	30 0	20 0	30 0	70 0	0 0	50 0
	c_1	1 541.5	1 537.2	1 542.5	1 540.8	1 543.3	1 538.3	1 542.3	1 526.9
	z_2	626 0	642 9	368 0	312 6	580 9	576 4	757 6	759 0
	c_2	1 488.7	1 488.9	1 489.5	1 489.8	1 487.8	1 487.9	1 486.9	1 487.0
	z_3	1 700.7	1 728.8	1 825.3	1 840.6	1 710.1	1 719.2	1 701.6	1 713.4
	c_3	1 488.7	1 488.9	1 489.5	1 489.8	1 487.8	1 487.9	1 486.9	1 487.0
	z_4	5 000.0	5 000.0	5 500.0	5 500.0	5 500.0	5 500.0	5 500.0	5 500.0
	c_4	1 545.1	1 545.2	1 550.9	1 550.9	1 550.8	1 550.8	1 550.7	1 550.6
模型拟合 参数	z_m	1 100.0	1 100.0	1 100.0	1 100.0	1 100.0	1 100.0	1 100.0	1 100.0
	c_m	1 483.7	1 483.9	1 484.5	1 484.8	1 482.8	1 482.9	1 481.9	1 482.0
	a_0	—	1 537.0	1 542.2	1 540.6	1 543.2	1 537.8	—	1 526.7
	a_1	—	0.03×10^{-2}	0.43×10^{-2}	1.05×10^{-2}	0.07×10^{-2}	1.36×10^{-2}	—	0.51×10^{-2}
	a_2	—	0.05×10^{-4}	0.45×10^{-4}	-1.22×10^{-4}	0.20×10^{-4}	-1.01×10^{-4}	—	-0.23×10^{-4}
	A	1.90×10^2	2.10×10^2	1.49×10^2	1.32×10^2	3.65×10^2	3.36×10^2	7.54×10^2	7.56×10^2
	B	0.8	0.8	1.6	1.5	1.1	1.2	0.9	1.1
	D	0.96×10^3	0.94×10^3	2.09×10^3	2.47×10^3	1.22×10^3	1.07×10^3	0.65×10^3	0.69×10^3
	b_0	1 462.6	1 461.7	1 465.4	1 465.6	1 465.0	1 464.7	1 463.2	1 462.9
	b_1	1.43×10^{-2}	1.47×10^{-2}	1.14×10^{-2}	1.12×10^{-2}	1.16×10^{-2}	1.18×10^{-2}	1.25×10^{-2}	1.27×10^{-2}
RMSE	b_2	4.58×10^{-7}	4.06×10^{-7}	7.81×10^{-7}	8.01×10^{-7}	7.42×10^{-7}	7.24×10^{-7}	6.35×10^{-7}	6.12×10^{-7}
		0.41	0.36	0.33	0.37	0.37	0.35	0.69	0.40

注: 水深($z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_m$)的单位为 m, 声速($c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_m$)的单位为 m/s, RMSE 单位为 m/s。

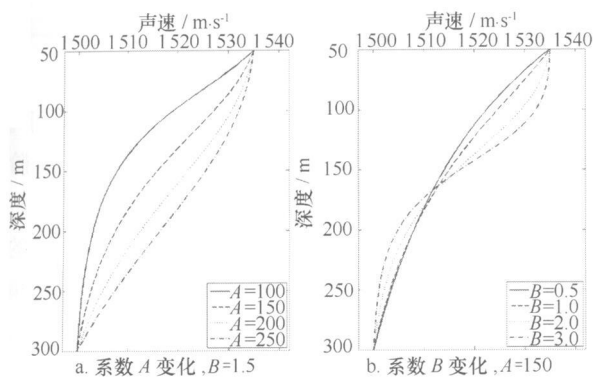


图 3 系数 A 和 B 变化对声速剖面结构的影响

深海声道层的结构主要由系数 D 来控制。系数 D 反映了深海声道的垂直空间尺度, 其变化范围

约为 500~2 500。根据表 1, 西太平洋热带海区的声道厚度较大, D 值超过 2 000; 亚热带海区和南海次之, D 值约为 900~1 200; 温带海区的声道厚度较小, D 值仅为 600~700。这些量值反映出的声速结构特征与图 2 中的剖面形态特征较为一致。

在浅海大陆架区域, 通常不存在深海声道层和深海等温层, 主跃层也相应地由季节性跃层所取代。因此对于浅海中的情况, 四层模型退化为两层。此时的声速剖面结构相对简单一些, 只用混合层和跃层中的 5 个参数就可以实现对声速剖面的描述。图 4 给出了几类典型浅海声速结构拟合的例子。由图可见, LSSPM 模型对于浅海中不同类型的声速结构同样有较好的适应性。与原始

数据相比, 拟合函数能够较完整地反映声速剖面的结构特征, 且表现出更为平滑的特性。需要注意的是, 对于声速梯度变化较剧烈的水层(如图 4f

中的跃层底部), 拟合函数产生了一定程度的偏差, 这是由数据点过于稀疏引起的, 偏差将随着数据采样的加密而变小。

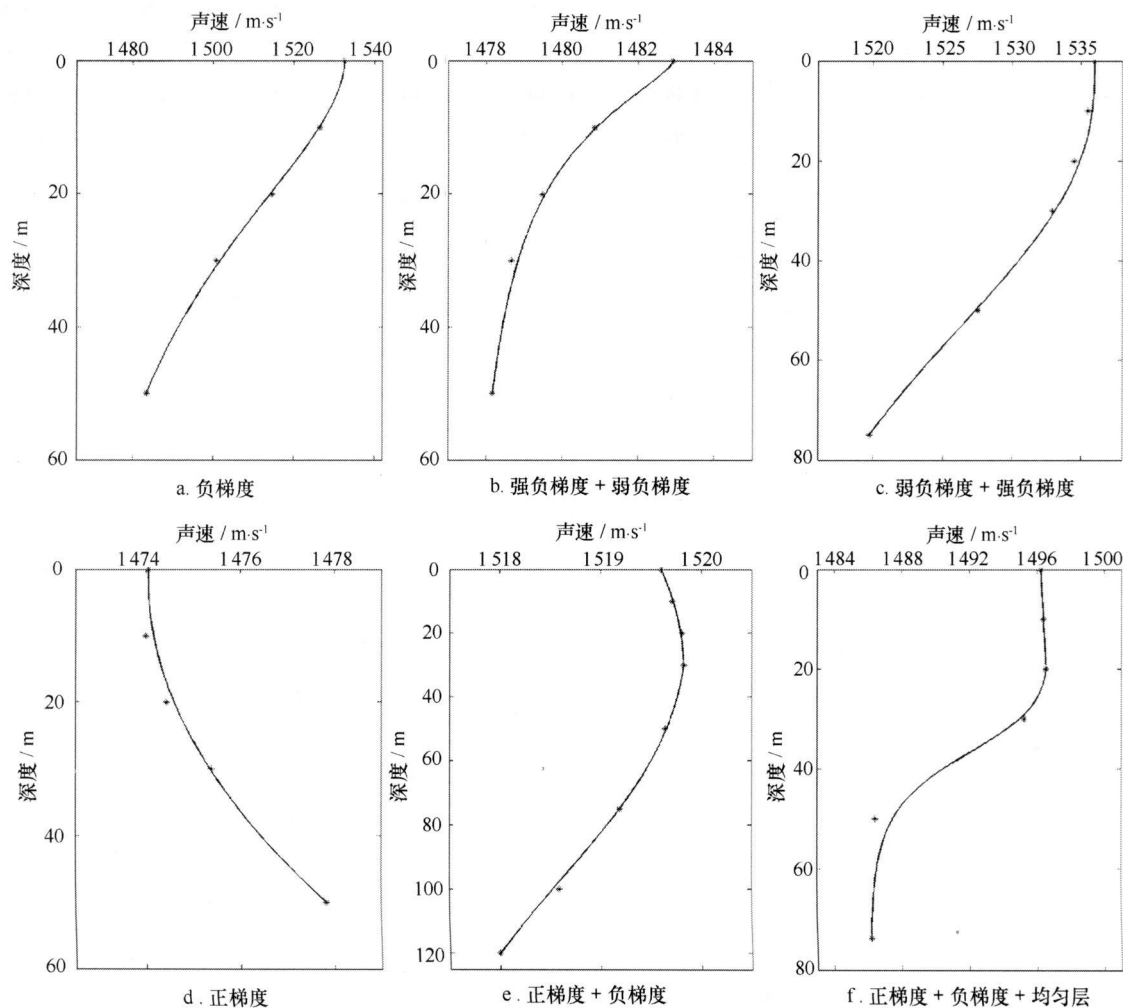


图 4 中国近海典型浅海声速结构拟合结果与原始数据的比较

实线表示应用分层声速结构模型拟合得到的剖面, 点表示原始数据, 数据来自 WOA05 数据集

4 几种模型的比较

以下选取冬季西北太平洋亚热带海区的一组样本, 对 EOF 模型、Munk 模型、GDEM 模型和 LSSPM 模型拟合声速剖面的均方根误差 (RMSE) 进行比较(数据来自 WOA05 数据集, 区域范围为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$, 剖面样本数量为 100 个)。

根据 4 种模型的拟合结果, EOF 模型的精度最高, 且它的精度可以通过 EOF 阶数的选取来控制, 选取前 3 阶 EOF 拟合时 RMSE 约为 1 m/s , 而选取

5 阶以上的 EOF 可使 RMSE 减小到 0.5 m/s 以下。LSSPM 模型和 GDEM 模型精度都介于前 5 ~ 12 阶 EOF 之间, GDEM 模型的拟合精度为 $0.18 \sim 0.65 \text{ m/s}$, 平均为 0.31 m/s ; 而 LSSPM 模型的 RMSE 范围为 $0.20 \sim 0.71 \text{ m/s}$, 平均 0.34 m/s , 精度略低于 GDEM 模型。与其他几种模型相比, Munk 模型精度最低, RMSE 为 $2.08 \sim 3.85 \text{ m/s}$, 平均为 2.54 m/s 。图 5 给出了 4 种模型对某一声速剖面拟合的例子。比较这些结果可以看出, EOF 模型、GDEM 模型和 LSSPM 模型对于实际海区中的声速剖面都有较好的拟合效果; 而 Munk 模型作

为经典的理想模型,不能反映出具体海洋环境的复杂变化特征。

EOF 模型虽然可以达到较高的拟合精度,但它的缺陷也非常明显。EOF 模型在对声速剖面矩阵分解之前要求样本集中的各个剖面都插值到标准层,因此受到样本采样深度的限制。例如,Argo 浮标观测资料中有很多样本达不到 2 000 m 的深度,若样本序列中有的剖面采样只有 1 000 m,那么计算的结果也只能达到 1 000 m 的深度。这种“短板效应”使得 EOF 模型得到的声速剖面往往是不完整的。而且模型参数不具有直观意义,不能通过参数对声速剖面结构进行控制。

Munk 模型、GDEM 模型和 LSSPM 模型都采用函数表达式的形式描述声速剖面结构,具有较好的扩展性。Munk 模型虽然能较好地反映声道轴附近的声速结构,但由于模型结构过于理想化,不能适用于真实海洋环境的描述。GDEM 模型能够通过参数变化调整剖面结构,但需要使用大量的参数(30 个)分别构建水温和盐度剖面,因此描述效率不高,而且大多数参数没有直观的意义。特别是对于温跃层以下的水层,水温和盐度剖面分别要用 7 阶和 5 阶多项式描述,形式较为繁琐,且高阶多项式在有数据起伏的条件下易出现摆动,这可能使声速结构出现难以预料的变化。

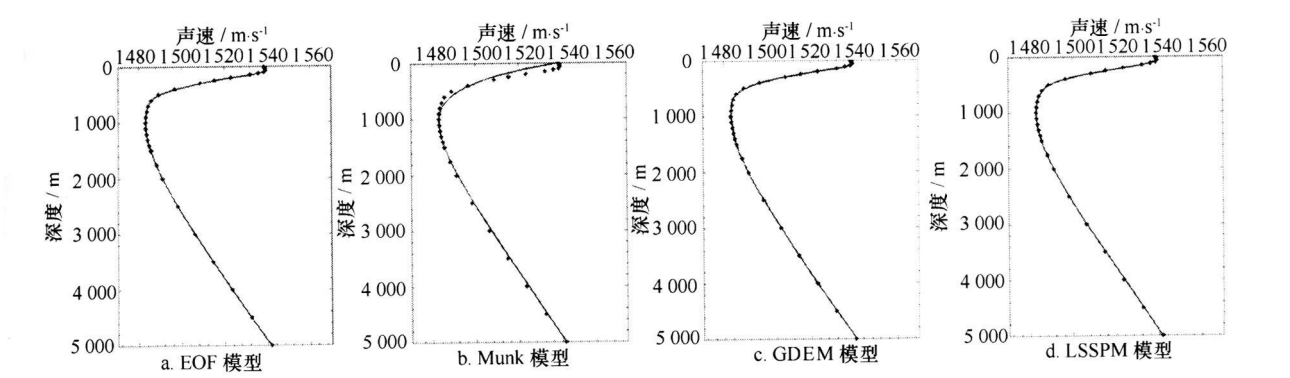


图 5 4 种模型拟合西北太平洋某海区声速结构的比较
实线表示拟合得到的剖面,点表示原始数据,数据来自 WOA05 数据集

相比之下,LSSPM 模型直接从声速结构出发,比 GDEM 模型减少了 21 个参数,提高了声速剖面的描述效率。此外,模型各参数与声速剖面的形态

特征也有较好的对应关系,可对各个层次的声速结构进行有效地控制。表 2 对 4 种声速剖面结构参数化模型的特性进行了比较。

表 2 4 种声速剖面结构参数化模型的特性比较

	EOF	Munk 模型	GDEM 模型	LSSPM 模型
描述变量	水温/盐度/声速	声速	水温和盐度	声速
拟合精度	最高	较低	较高	较高
参数数量	与剖面数量和垂直层数选取有关	3 个	30 个	9 个
参数直观性	较差	较好	适中	较好
剖面可控性	无法控制	较差	适中	较好
剖面扩展性	无法扩展	较好	较好	较好

5 结论

针对传统声速结构模型的不足,提出了一种新的声速剖面结构参数化模型,即分层声速剖面

模型(LSSPM 模型)。模型用含 9 个参数的分段函数分别描述混合层、主跃层、深海声道层和深海等温层的声速结构,结合了 GDEM 模型处理跃层结构和 Munk 模型处理深海声道层结构的优势,对于

中国近海典型的深海和浅海海区都有较好的适用性。

西北太平洋海区的数值实验结果表明, LSSPM 模型对于声速剖面拟合的 RMSE 范围为 0.20 ~ 0.71 m/s, 平均为 0.34 m/s, 介于前 5 ~ 12 阶 EOF

之间。与传统声速结构参数化模型相比, LSSPM 模型参数简明、直观, 与各层的声速结构特征有较好的对应性。它的拟合精度虽略低于 GDEM 模型, 但与之相比使用的参数减少了 21 个, 对声速结构的描述效率更高。

参考文献:

- [1] EWING M, WOZEL J L. Long-range sound transmission[J]. Geol Soc Am Mem, 1948, 27: 1—35
- [2] HIRSCH P, CARTER A. Mathematical models for the prediction of SOFAR propagation effects[J]. J Acoust Soc Am, 1965, 37: 90—94
- [3] MUNK W H. Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to SOFAR[J]. J Acoust Soc Am, 1974, 55: 220—226
- [4] DAVIS T M, COUNTRYMAN K A, CARRON M J. Tailored acoustic products utilizing the NAVOCEANO GDEM (a generalized digital environmental model)[C] // Proceedings, 36th Naval Symposium on Underwater Acoustics. San Diego: Naval Ocean Systems Center, 1986
- [5] TEAGUE W J, CARRON M J, HOGAN P J. A comparison between the generalized digital environmental model and Levitus climatologies[J]. J Geophys Res, 1990, 95: 7167—7183
- [6] PERRY M D. Value Aided satellite altimetry data for weapon presets[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2003
- [7] MANCINI S. Sensitivity of satellite altimetry data assimilation on a naval anti-submarine warfare weapon system[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2004
- [8] LeBLANC L R, MIDDLETON F H. An underwater acoustic sound velocity data model[J]. J Acoust Soc Am, 1980, 67: 2055—2062
- [9] 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等. 浅水声速剖面用经验正交函数(EOF)表示的可行性研究[J]. 应用声学, 1999, 18(2): 21—25
- [10] PENG L H, WANG L, QIU X F, et al. Modal wave number tomography for South China Sea front[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(2): 289—294
- [11] 何利, 李整林, 张仁和, 等. 东中国海声速剖面的经验正交函数表示与匹配场反演[J]. 自然科学进展, 2006, 16(3): 351—355
- [12] 张旭, 张永刚, 张胜军, 等. 经验正交函数与广义数值环境模式重构声速剖面的比较[J]. 应用声学, 2010, 29(2): 115—121
- [13] LOCARNINI R A, MISHONOV A V, ANTONOV J I, et al. World ocean atlas 2005, volume 1: temperature[R]. Levitus S. NOAA Atlas NESDIS 61. Washington D. C.: Government Printing Office, 2006
- [14] ANTONOV J I, LOCARNINI R A, BOYER T B, et al. World ocean atlas 2005, volume 2: salinity[R]. Levitus S. NOAA Atlas NESDIS 62. Washington D. C.: Government Printing Office, 2006

A new model for calculating sound speed profile structure

ZHANG Xu¹, ZHANG Yong-gang¹, ZHANG Jian-xue², DONG Nan¹

(1 Unit 91550 of PLA, Dalian 116018, China; 2 Institute of Marine Environment, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: A new model for calculating sound speed profile (SSP) structure, namely Layered Sound Speed Profile Model (LSSPM), is developed based on Munk model and Generalized Digital Environmental Model (GDEM). In this model, the SSP structure composed of mixed layer, thermocline, deep channel layer and deep isothermal layer is depicted respectively by a set of expressions with 9 coefficients, which have a concise and distinct form. The results of numerical experiments show that LSSPM can provide a precise calculation for SSP fitness, and can be applicable for both deep and shallow sea areas adjacent China

Key words: sound speed profile (SSP); Munk model; Generalized Digital Environmental Model (GDEM); empirical orthogonal functions (EOF); Layered Sound Speed Profile Model (LSSPM)