

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.024>



西菲律宾海深水沉积物的声速结构特征

周 娇^{1,2}, 田雨杭³, 何高文^{1,2}, 罗伟东^{1,2}, 杨楚鹏^{1,2}, 谭玉芳^{1,2}

1. 自然资源部海洋矿产资源重点实验室, 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 511458
2. 天然气水合物勘探开发国家工程研究中心, 广东广州 511458
3. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东广州 510301

摘 要: 深海沉积物的声速是构建海洋环境声场的基础。对西菲律宾海 4 818~6 630 m 深水海域获取的海底沉积物柱状样的纵波波速、湿密度、孔隙度以及中值粒径等参数进行了测试与分析, 阐明了研究海域海底沉积物声学物理参数基本特征及垂向变化特征, 探讨了物理参数对声速的影响, 并对实测数据及经验方程预测值进行对比, 提出了研究区海底沉积物四种典型声速结构。结果表明, 沉积物纵波波速分布在 1 455~1 674 m/s 之间, 孔隙度介于 61.71%~69.63% 之间, 湿密度介于 1.26~1.62 g/cm³ 之间, 中值粒径介于 7.75~8.42 Φ 之间。研究区沉积物各参数随着埋深变化规律各有差异, 密度对声速的影响要优于孔隙度和中值粒径。通过与底层海水声速、同层内声速剖面以及上层海底沉积物下表面声速的比较, 建立了研究区低声速表面-低声速层-声速减小类型(GMI1)、低声速表面-高声速层-声速增大类型(GMI2)、高声速表面-低声速层-声速减小类型(GMII1型)、高声速表面-高声速层-声速增大类型(GMII2)四种声速结构模型; 中央裂谷带南部(A区)和北部(B区)两个区域沉积物的声学特性与声速梯度变化存在显著差异, 其中A区可分为GMII1型和GMII1-GMI1型, 而B区可划分为GMI2型和GMI1-GMII2型。

关键词: 声速特征; 声速结构; 声速结构模型; 物理参数; 深海沉积物; 西菲律宾海; 海洋地质学。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2025)07-2899-13

收稿日期: 2024-09-12

Characteristics of Sound Velocity Structure in Deep Water Sediments of West Philippine Sea

Zhou Jiao^{1,2}, Tian Yuhang³, He Gaowen^{1,2}, Luo Weidong^{1,2}, Yang Chupeng^{1,2}, Tan Yufang^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China
2. National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou 511458, China
3. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: The sound velocity of deep-sea sediments is fundamental for constructing the acoustic field of the marine environment. This article tests and analyzes parameters such as longitudinal wave velocity, wet density, porosity, and median particle size of sediment column samples obtained from the deep waters of 4 818–6 630 m in the West Philippine Sea. It elucidates the basic characteristics and vertical variations of acoustic and physical parameters of seabed sediments in the study area, explores the

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20240090, DD20221712, DD20230642, DD20190209, DD20230066, DD20242659); 国家自然科学基金基金项目 (No.42302319)。

作者简介: 周娇(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋区域地质调查与研究。ORCID:0000-0002-7591-5200. E-mail:464946523@qq.com

引用格式: 周娇, 田雨杭, 何高文, 罗伟东, 杨楚鹏, 谭玉芳, 2025. 西菲律宾海深水沉积物的声速结构特征. 地球科学, 50(7):2899–2911.

Citation: Zhou Jiao, Tian Yuhang, He Gaowen, Luo Weidong, Yang Chupeng, Tan Yufang, 2025. Characteristics of Sound Velocity Structure in Deep Water Sediments of West Philippine Sea. *Earth Science*, 50(7):2899–2911.

relationship between physical parameters and sound velocity, compares measured data with empirical equation predictions, and proposes four typical sound velocity structures of seabed sediments in the study area. The results show that the longitudinal wave velocity distribution of sediment ranges from 1 460 to 1 674 m/s, the porosity ranges from 62.07% to 69.54%, the wet density varies from 1.34 to 1.62 g/cm³, and the median particle size varies from 7.75 to 8.40 Φ . The sediment parameters in the study area vary with depth, and density has a better effect on sound velocity than porosity and median particle size. By comparing the sound velocity of the bottom seawater, the sound velocity profile within the same layer, and the sound velocity of the lower surface of the upper seabed sediment, four types of sound velocity structure models were established in the research area, involving low velocity surface-low velocity layer-sound velocity reduction type (GMI1), low velocity surface-high velocity layer-sound velocity increase type (GMI2), high velocity surface-low velocity layer-sound velocity reduction type (GMII1), and high velocity surface-high velocity layer-sound velocity increase type (GMII2). There are significant differences in the acoustic characteristics and sound velocity gradient changes of sediments in the southern (Zone A) and northern (Zone B) regions of the Central Rift Valley. Zone A can be divided into GMII1 and GMII1-GMI1 types, while Zone B can be divided into GMI2 and GMI1-GMII2 types.

Key words: sound velocity characteristic; sound velocity structure; geoacoustic model; physical parameter; deep-sea sediment; West Philippine Sea; marine geology.

0 引言

海底表层沉积物通常被视为固液双相介质,代表海水和海底之间的分界面,是海洋声场环境的一个重要组成部分.海底沉积物的声学特性可用于海洋工程研究和资源勘探(阚光明等,2014; Yang *et al.*, 2018; 于盛齐等, 2020; Tian *et al.*, 2023).声波在海底沉积物传播过程中会发生折射和能量耗散等现象,进而影响海底沉积物的声学特性(Potty *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2021a).因此,声速特征是深水海底沉积物结构的重要指示.

海底表层沉积物主要由砂、粉土、黏土和孔隙流体(海水)组成,通常表现出低骨架模量、高孔隙度和含水量,与固结成岩的沉积物不同,其声学特征与沉积环境特征、沉积物结构特征以及物理力学性质等密切相关(Bae *et al.*, 2014; 孙志文等, 2018; Kim *et al.*, 2019).由于沉积物来源的多源性和沉积环境的复杂性,沉积物声学特征具有区域性特征(Kim *et al.*, 2011; Hou *et al.*, 2018a; 孙志文等, 2018; Wang *et al.*, 2018).同理,由于声学特征和沉积物特性具有区域特征,因此其经验方程的适用性有限,基于单一海域的经验方程并不适用于其他海域.在微观上,沉积物的物理性质往往与底质类型相关,不同的底质类型具有不同的物理力学性质(孔隙度、粒度、密度等);在宏观上,不同的研究区域,由于物质来源、水动力条件的不同,往往底质类型也不尽相同.目前已有不少研究集中在了解不同海域海底沉积物的声速与物理性质之间的相关性(Hamilton, 1970; Orsi and Dunn, 1990; 卢博, 1994;

邹大鹏等, 2012; Wang *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2021b; Dong *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023).Meng *et al.* (2018)发现,由于海底沉积物物理和力学性质变化复杂,不同采样站和不同埋深的海底沉积物的声速存在显著差异. Kim *et al.* (2019)在对 32 个海底沉积物岩心样本的研究中发现,物理性质、测深和粒度分布具有很好的相关性,而粒度在物理性质的变化中起着重要作用.由于物理性质随埋深变化,声速结构也会发生变化,因此有必要确定关键区域的声速结构.

西菲律宾海(WPS)是菲律宾海板块的一部分,地形地貌复杂.它从陆源获得的输入沉积物较少,这有利于研究深海沉积物的声速结构.包括研究区在内的 WPS 的大多数研究都集中在地形地貌(张斌等, 2014)、地质结构(Deschamps and Lallemand, 2002; Okino and Fujioka, 2003; 董冬冬等, 2017; 李学杰等, 2017)、沉积物地球化学(褚征等, 2016; 王晨等, 2020; Zhou *et al.*, 2022)、浅层沉积特征和灾害地质特征等(孙美静等, 2020; 方中华等, 2022).最近一项关于菲律宾海深海沉积物声学 and 物理性质之间相关性的研究(孙志文等, 2018)表明,深海数据与浅海回归方程之间的相关性较差.而关于西菲律宾海沉积物声学调查较少、资料缺乏,属于空白区,因此有必要开展该海域沉积物的声学特性研究,深入调查不同海域沉积物的声学特性,才能更好地服务海洋工程和国家安全.

本文对 WPS(水深大于 4 800 m)中获得的深海沉积物进行了沉积物柱状样的声速及物理参数(包括孔隙度、密度和平均粒径)分析,

同时还探讨了它们的垂向变化特征,并对比了实验室实测声速值和回归方程预测值之间的差异.最后,建立了研究区域的声速结构模型,以帮助解释声速结构随埋深的变化.

1 地质背景

西菲律宾海(WPS)位于菲律宾海西部,它是欧亚板块、澳大利亚板块与太平洋板块汇聚地带,板块之间的运动碰撞、俯冲等构造活动强烈,形成复杂的构造单元(李学杰等,2017),研究区位于西菲律宾海中部,如图1a.西菲律宾海盆水深达4 400~7 740 m,海盆中央被一条NW-SE向延伸的长条状的裂谷带分隔开,主要分为主盆地(本哈姆高原和乌尔达内塔高原以东)、西北次盆地、南次盆地(帛琉海盆),盆地内发育有一系列线状深海山、海槽(张斌等,2014).

西菲律宾海盆周围被这些复杂的地形地貌环绕,陆源输入沉积物较少,沉积覆盖少.中央断裂带以西的海盆区沉积物是褐色的黏土沉积,以东的海盆区沉积物是褐色的远洋黏土,主要由陆源风尘物质、海底火山物质和自生组

分组成(褚征等,2016;王薇等,2020).海底高原(如本哈姆隆起)和临近海岭(如帛琉-九州海脊)的火山岩风化产物对研究区碎屑沉积作用有着重要贡献,其影响程度依赖于海底风化作用的强度(鄢全树等,2007).第四纪亚洲内陆风尘物质进入菲律宾海已在不同层面得到证明,包括半定量和定量层面(Wan *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2013; 徐兆凯等, 2013; Yu *et al.*, 2016; 王薇等, 2020).太平洋北赤道流和黑潮等洋流(图1a)也会影响研究区域,从东向西流动的太平洋北赤道洋流将低营养水团带入菲律宾海.菲律宾海也位于东亚季风区,受到季风的严重影响(孙守勋和滕军,2003).这些海洋地质作用影响着研究区沉积物物质的供应和迁移.

2 材料和方法

本研究中利用的样品为广州海洋地质调查局海洋调查船于2020年在西菲律宾海进行的深海地质调查中获取的,共4个柱状沉积物岩心样品(图1b),分别位于中央裂谷带南部(J53、J58)和北部(J43、J44).取样设备为重力柱状取样器,器内设有

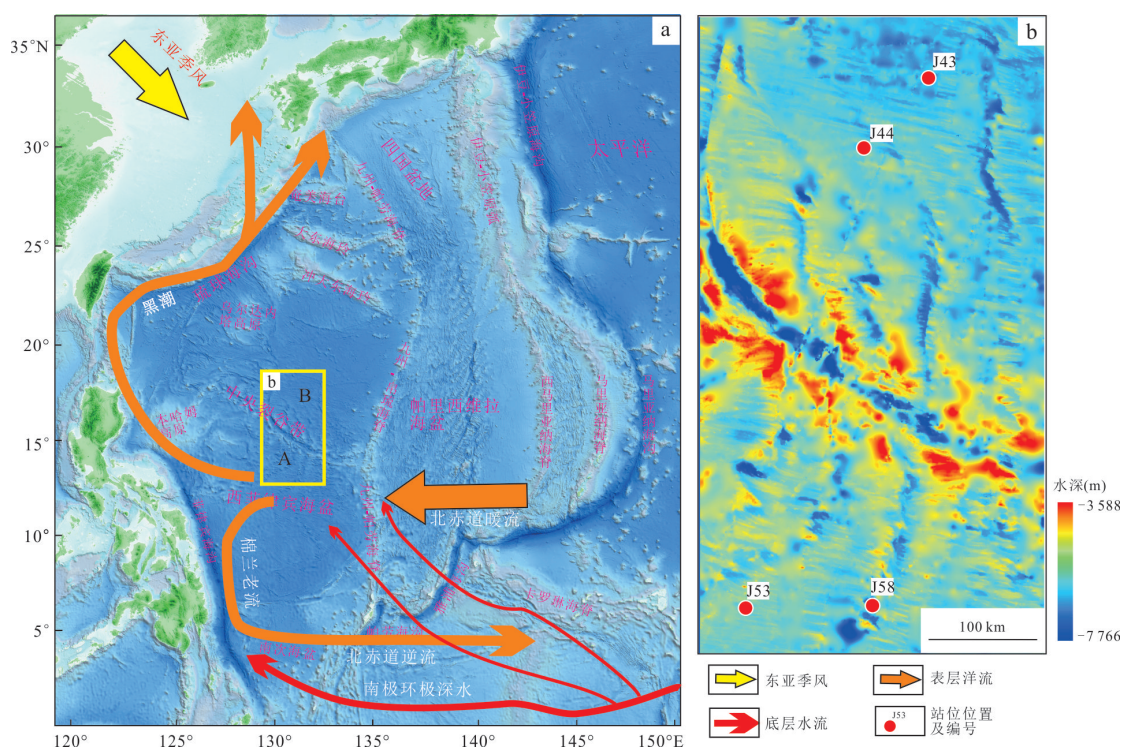


图1 菲律宾海地形图和研究区域示意图(a)和站点的采样位置(b)

Fig.1 Topographic map of the Philippine Sea and schematic diagram of the study area (a) and sampling locations of stations (b)
a. 参考 Qiu(2001), Kawabe and Fujio(2010); b. 水深数据来源于2022年 GEBCO 的最新数据. A 区:中央裂谷带以南, B 区:中央断裂带以北

有机玻璃硬管,沉积物岩心两端密封,有利于水份的保存和岩心的运输.样品主要位于西菲律宾海盆中部的深海盆地区域,水深为 4 818~6 630 m,主要为粉质黏土组成的典型深海沉积物.对柱状样品的顶部 3 m 沉积物以 0.2 m 的间隔分段测量,测定和计算了纵波速度、孔隙度、湿密度和中值粒径等几个主要参数.所有测试均由中国科学院南海海洋研究所完成.

在标准实验室条件(23 ℃,大气压)下,使用便携式 WSD-3 数字声波仪测量了沉积物的声学参数.关于测量方法的细节描述参考 Hou *et al.* (2018a, 2018b).声学换能器与沉积物岩心的顶部直接接触,并通过使用凡士林连接到底部的衬垫.发射波形由信号发生器产生,脉冲信号的中心频率为 100 kHz,沉积物柱状样的长度测量精度为 0.5 mm,传感器校准时间为 t_0 ,信号采样间隔为 0.1 μ s.声速(v_p)计算如下:

$$v_p = \frac{l}{t - t_0}, \tag{1}$$

其中 l 是沉积物样品的长度, t 是通过样品的传播时间, t_0 是传感器校准时间.

使用精度计算方法进行误差分析:

$$S_x = \sqrt{\Sigma(x_i - x)^2 / N}, \tag{2}$$

方程(2)用于重复测量,声速测量的不确定度约为 ± 5 m/s. S_x 是方差值, x_i 是沉积物声速的测量值, x 是平均声速, N 是声速测量的次数.

海水的声速(v_w)可以表示为温度(T)、盐度(S)和埋深(Z)的函数. Wilson (1960) 推导出海水速度的公式:

$$v_w = 1\,449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016Z, \tag{3}$$

在汉密尔顿支持的标准实验室条件下(23 ℃、35 ppt 和大气压)报告了海水的声速.这些条件对应于 1 529.97 m/s 的水声速和 1 024 kg/m³ 的水密度(ρ_w).

声速测试完成后,对粒度、孔隙度、湿密度等物理参数进行了测试和计算.其中,样品粒度采用激光粒度仪(Malvern Mastersizer 2000)分析粒度组分,根据 1/4 Φ 的间隔和矩法对分析结果进行计算,然后可以得到中值粒径(M_d).湿密度(ρ)测试使用切割环法(61.8 mm,高度 20 mm).孔隙度(n)是由颗粒比重和含水量计算得出;通常假设孔隙水密度与上覆(海底)海水的密度相同,可以使用回归公式求解;如果假设沉积物中

固体颗粒的密度为 ρ_s ,孔隙流体的密度为 ρ_w ,可以计算沉积物孔隙度(分数形式):

$$n = 1 - \rho_s(1 + w) / \rho_w. \tag{4}$$

3 结果

结果如表 1 所示,菲律宾海中部深海沉积物的纵波波速分布在 1 455~1 674 m/s 之间,平均为 1 540 m/s;孔隙度介于 61.71%~69.63% 之间,平均为 64.55%;湿密度介于 1.26~1.62 g/cm³ 之间,平均为 1.48 g/cm³;中值粒径介于 7.75~8.42 Φ 之间,平均为 8.25 Φ ;测试结果与世界大洋沉积物的声学性质相似. A 区深海沉积物的声速在 1 468~1 674 m/s 之间,湿密度在 1.26~1.58 g/cm³ 之间,孔隙度在 63.30%~69.63% 之间,中值粒径在 8.13~8.42 Φ 之间;在 B 区,声速在 1 455~1 592 m/s 之间,湿密度在 1.35~1.62 g/cm³ 之间,孔隙度在 61.71%~69.54% 之间,中值粒径在 7.75~8.29 Φ 之间. A 区沉积物的声速和平均粒径明显高于 B 区,密度略低于 B 区,孔隙度与 B 区相当,具有区域性特征.

表 1 研究区海底沉积物的声速和物理性质的范围值

Table 1 Range values of the acoustic velocity and physical properties of seafloor sediment in study area

区域	站位号	极值	v_p (m/s)	n (%)	ρ (g/cm ³)	M_d (Φ)
A	J53	最小	1 535	63.30	1.42	8.13
		最大	1 674	66.16	1.58	8.40
		平均	1 610	64.47	1.50	8.32
	J58	最小	1 468	63.34	1.26	8.31
		最大	1 623	69.63	1.51	8.42
		平均	1 526	65.28	1.42	8.36
	A	最小	1 468	63.30	1.26	8.13
		最大	1 674	69.63	1.58	8.42
		平均	1 565	64.91	1.45	8.34
B	J43	最小	1 478	62.07	1.35	7.75
		最大	1 592	69.54	1.62	8.27
		平均	1 537	64.45	1.49	8.11
	J44	最小	1 455	61.71	1.44	8.15
		最大	1 532	65.77	1.62	8.29
		平均	1 490	63.90	1.51	8.23
	B	最小	1 455	61.71	1.35	7.75
		最大	1 592	69.54	1.62	8.29
		平均	1 515	64.19	1.50	8.16
全区		最小	1 455	61.71	1.26	7.75
		最大	1 674	69.63	1.62	8.42
		平均	1 540	64.55	1.48	8.25

注: v_p 是声速, ρ 是沉积物湿密度, n 是孔隙度, M_d 是中值粒径.

4 讨论

4.1 A 区和 B 区声速与物理性质关系的比较

沉积物由颗粒骨架和孔隙流体组成,深海沉积物的声速取决于其物理性质.研究区沉积物孔隙度介于 61.71%~69.63% 之间,属于高孔隙度, A 区和 B 区的声速与孔隙度呈反比关系(图 2a),随着孔隙度的增加而降低;但 A 区在孔隙度约为 66% 时出现拐点,深海沉积物的声速开始随着孔隙度的增加而增加,而 B 区孔隙度拐点在 68% 左右.研究区深海沉积物的湿密度主要是低密度沉积物,图 3b 显示了 A 区和 B 区深海沉积物的声速与湿密度之间的关系,呈强烈正相关关系.孔隙度和湿密度之间的负线性关系(图 2c)表明孔隙度和湿密度呈反比关系.WPS 的中值粒径范

围为 7.99~8.33 Φ (A 区)和 7.66~8.40 Φ (B 区),变化范围较小,属于细粒沉积物;声速随着中值粒径的增加而增加(图 2d),达到一定临界值后开始随着中值粒径的增加而减小,A 区临界值为 8.2 Φ 左右,B 区临界值为 8.1 Φ 左右.

沉积物的物理性质影响声波在沉积物中的传播(卢博等,2006;Long and Li, 2015;Zou *et al.*, 2021).为了分析物理参数对声速的影响,图 3 绘制了声速和物理参数之间的相关性.相关性分析表明,声速与湿密度具有非常显著的正相关性,相关系数为 0.61;而声速与孔隙度具有显著的负相关性,相关系数为 -0.47;声速与中值粒径的相关性不大,相关系数为 0.26;湿密度与孔隙度具有非常显著的负相关性,相关系数为 -0.92.所以,密度对声速的影响要优于孔隙度和中值粒径,研究结论

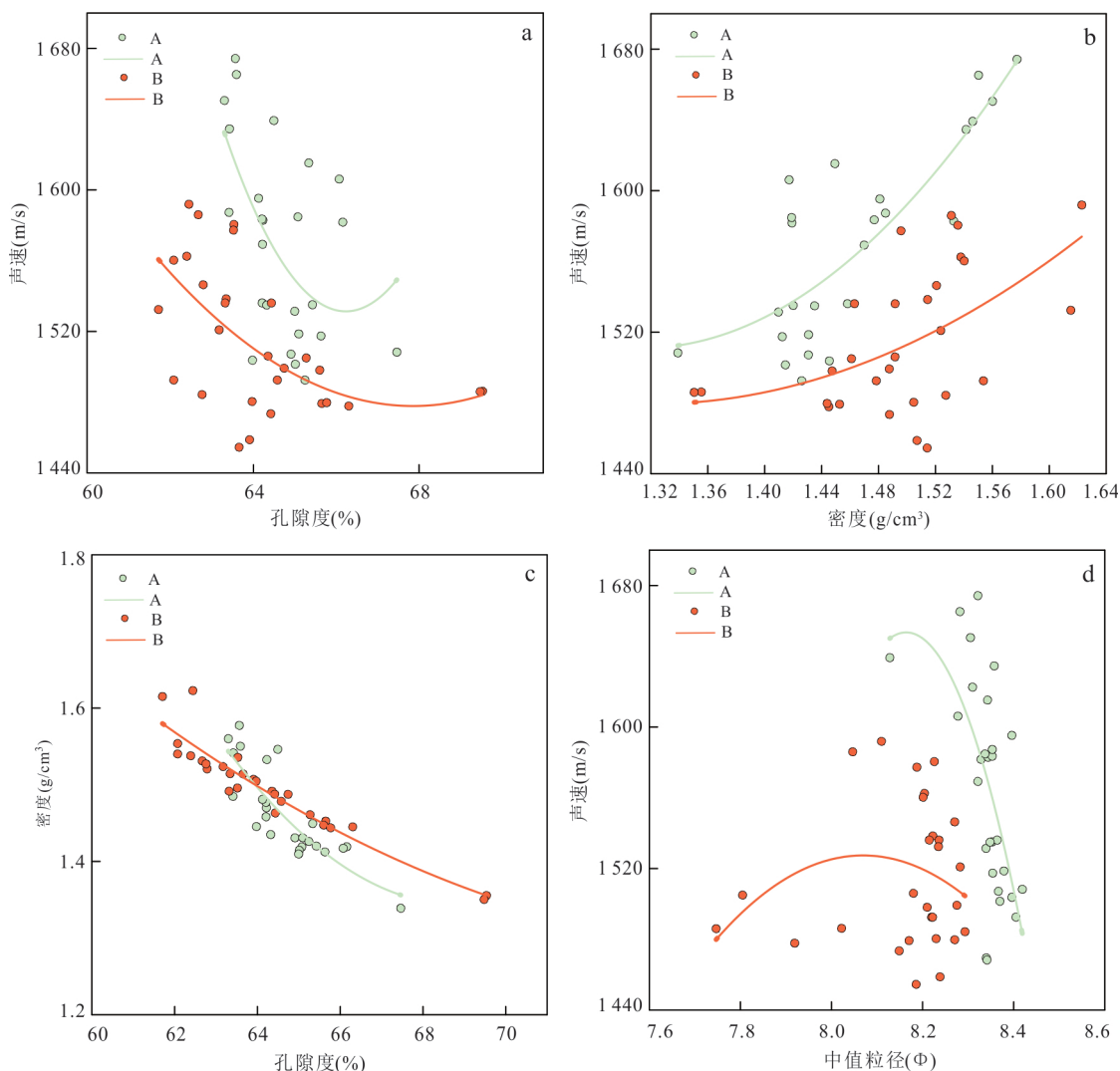


图 2 声速与物理性质之间的关系

Fig.2 Relationship between the sound velocity and the physical properties

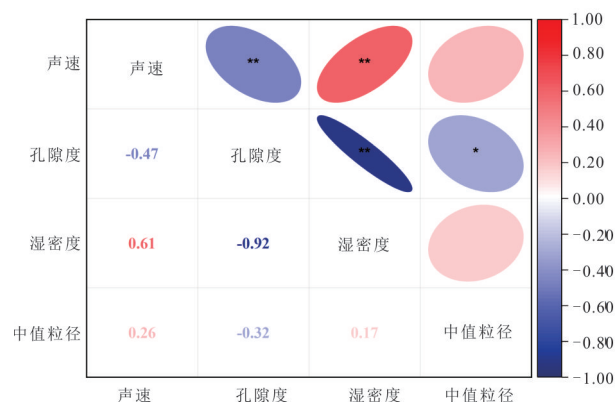


图3 声速与沉积物物理性质之间的相关系数

Fig.3 Coefficient of correlation between the sound velocity and physical properties of the sediments

与 Hou *et al.* (2018a) 结论一致, 密度对声学特性有相对重要影响(图3)。

4.2 声速和物理参数随埋深的变化特征

随着埋深的增加, 松散沉积物逐渐固结, 孔隙度和密度降低。在这些条件下, 声速随埋深呈线性增加, 表明沉积物正常固结(Ryang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014)。图4显示了J52、J53、J44和J43中声速随埋深的变化。WPS中声速的垂直变化很复杂, 与沉积物的物理性质密切相关, 其中声速随着孔隙度的增加而降低, 随着湿密度的增加而增加。

J58的声速在0~120 cm之间相对较高, 在120~300 cm之间相对较低; 声速和密度的垂直变化相似, 总体上随着埋深的增加而减小; 而孔隙度总体上随着埋深的增加而增加, 这与声速变化趋势相反; 孔隙度、密度和埋深之间存在的线性关系。A区两个站位最大孔隙度(69.63%)和最小密度(1.26 g/cm³)位于J58站位的270 cm处。与J58相比, J53的声速变化更为复杂, 声速在1 535~1 674 m/s的大范围内变化迅速, 相差139 m/s, 最大声速(1 674 m/s)位于210 cm处。0~80 cm中值粒径逐渐增加, 在80 cm以下的埋深中值粒径略有波动。除了中值粒径外, J53的其他物理性质变化较大。该站位整体声速随着孔隙度的增加和密度的降低而降低, 反之亦然。

B区的垂直声速在1 455~1 592 m/s之间变化, 最大差异为137 m/s。浅层声速较低, 通常小于1 500 m/s, 这个时候孔隙度相对较高, 超过了62%, 形成了低声速层。J43站0~100 cm的声速较低, 平均声速为1 487 m/s; 其声速在100~150 cm之间增

加, 在150 cm处达到最大值1 592 m/s, 这也是B区两个站位的最大声速; 在150~300 cm之间整体声速平均为1 562 m/s。B区相对较高的孔隙度和低密度值位于J43站10 cm和70 cm的埋深。J44的声速在1 455~1 532 m/s之间, 相差77 m/s, 其整体声速要远低于A区的声速。可能原因是, 西菲律宾海中央裂谷西南部的沉积物主要来自九州-帕劳海脊和马里亚纳海脊周围火山物质的蚀变, 这些火山物质被向西流动的北赤道流带到这里(葛淑兰等, 2007)。吕宋岛火山碎屑的风化产物可能以悬浮形式运输到这里, 亚洲粉尘也可能运输到该地区(Shu *et al.*, 2015)。中央裂谷东北部的沉积物主要来自陆地灰尘和附近的火山物质, 含有少量的海洋自养成分(王晨等, 2020)。陆地沙尘物质主要是干旱内陆地区东亚冬季风携带的碎屑沉积物(Jiang *et al.*, 2013; 徐兆凯等, 2013; Yu *et al.*, 2016)。

笔者认为, 声速的垂直变化在一定程度上受到海山、深海丘陵的影响, 这些多个来源的输入会影响海底沉积物的物理性质, 与沉积物源和盛行洋流的距离可能会影响表层沉积物的分布, 从而影响声速的分布。

4.3 实测声速与预测声速的比较

根据上述研究, 密度是影响本研究区域声速的主要因素。在沉积物物理参数中, 准确的密度参数值不仅可以为沉积物物理声学经验公式提供验证基础, 也可以为海洋地声模型的建立和地球物理声学多参数反演提供参考数据依据。本文使用Hamilton(1980)、Liu *et al.*(2013)和Orsi and Dunn(1990)给出的声速和密度之间关系的经验公式, 计算了研究区的声速, 以验证这些经验公式的适用性。国内外沉积物声速(V_p)与密度(ρ)回归方程如下所示:

$$\text{Hamilton: } V_p = 2\,234.4 - 1\,129.3\rho + 448.1\rho^2, \quad (5)$$

$$\text{Orsi and Dunn: } V_p = 2\,855.7 - 1\,885.9\rho + 652.1\rho^2, \quad (6)$$

$$\text{Liu et al.: } V_p = 1\,872.6 - 670.03\rho + 256.3\rho^2, \quad (7)$$

其中 ρ 是密度, 单位为g/cm³。

在图5中, 将西菲律宾海的实测声速与经验公式(5)、(6)、(7)中预测的声速值进行了比较, 发现它们有一定的差异。其中J53站位实测声速与预测值之间存在显著差异(绝对差值一般在60~165 m/s, 最大可达220 m/s), 且实测值普遍高于预测值。J58站在0~100 cm埋深处的实测声速高于预测值, 而在100~300 cm埋深处实测的声速与Orsi and Dunn(1990)的经验公式预测值符合度较高(绝对差

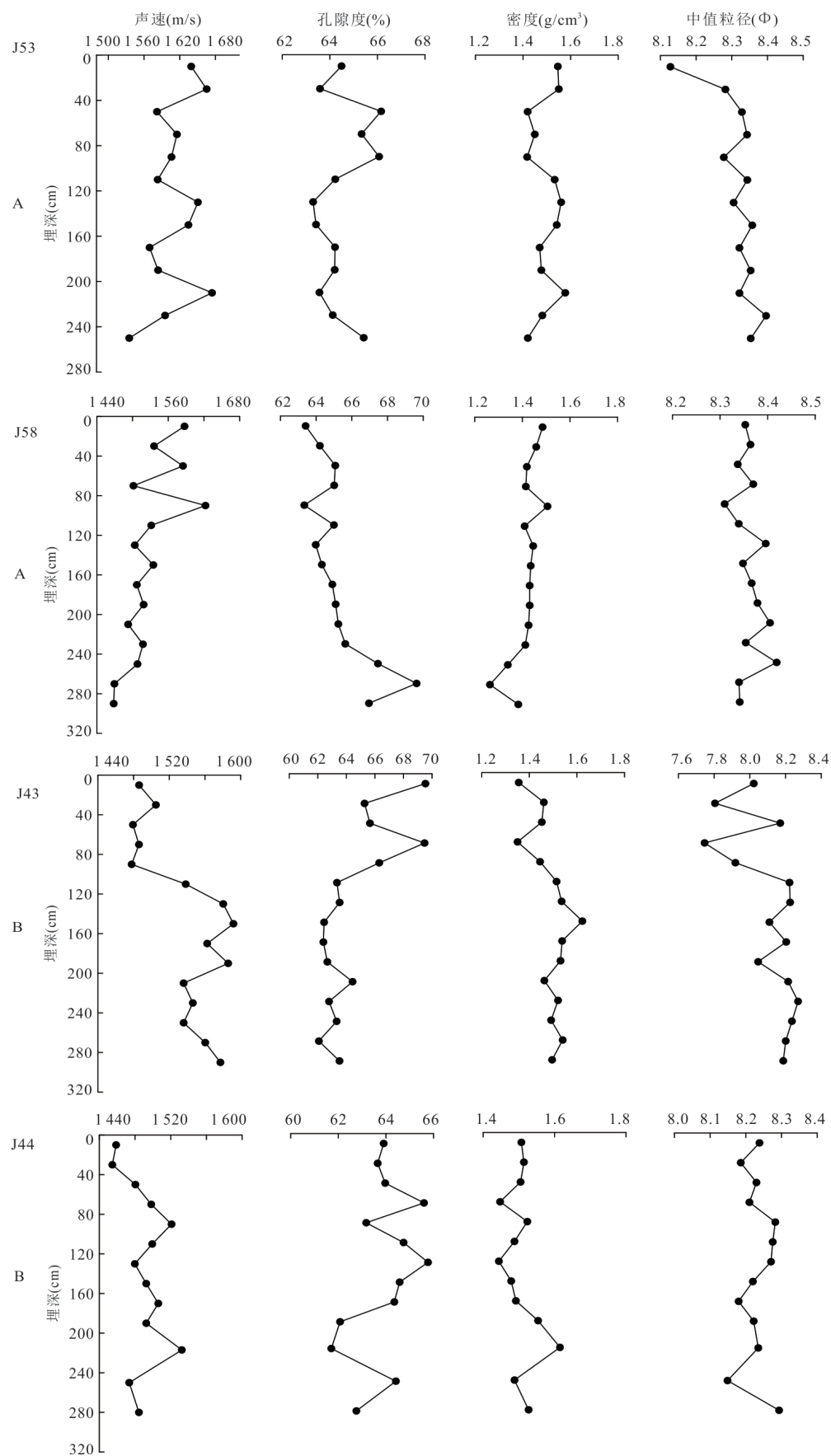


图 4 J53、J58、J43 和 J44 四个站位沉积物声速和物理参数随埋深变化

Fig.4 Changes in sediment sound velocity and physical parameters with depth at four stations J53, J58, J43, and J44

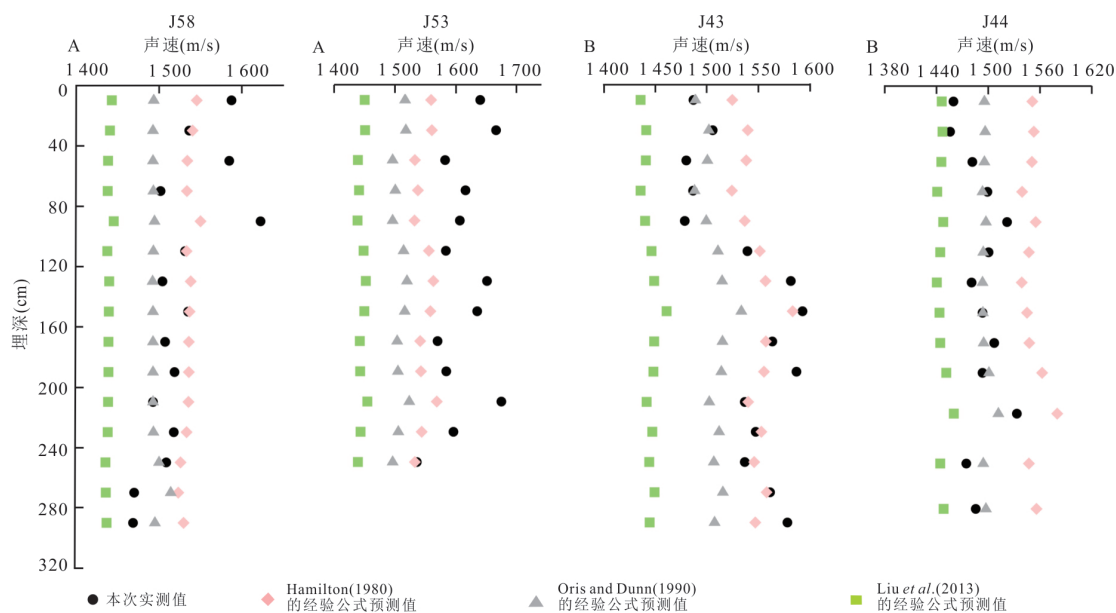


图 5 沉积物实测声速与经验公式预测声速值随埋深的变化

Fig.5 Variation of the measured and empirical formula predicted sound velocity of the sediments with depth

值平均为 23.78 m/s).J43 站在 0~100 cm 埋深处的实测值与 Orsi and Dunn(1990)的经验值符合度较高(绝对差值平均为 12.67 m/s),而在 100~300 cm 埋深处则与 Hamilton(1980)的经验公式声速预测值符合度高(绝对差值平均为 13.69 m/s).总体而言,声速实测值与 Liu *et al.*(2013)预测值符合度较差,可能是 Liu 的数据多来自浅海大陆架或大陆坡,而本文中的数据来自深海.浅海区主要由陆源碎屑颗粒组成,残余沉积的粗颗粒沉积物较多,细颗粒沉积物较少,沉积物颗粒大小不一,孔隙度小,密度大.而深海盆地沉积物以内源沉积为主,沉积物质多以生物沉积为主,沉积物颗粒细,大小相对均一,孔隙度大,密度小.因而浅海与深海的海底沉积环境、沉积物来源、沉积条件和沉积作用过程等有较大差别(Wang *et al.*, 2014).这些结果表明,经验方程的应用范围是有限的,基于单一海域的经验方程不适用于该海域,同一个区域不同埋深范围应参考多个经验方程.

4.4 WPS 深海沉积物的声速结构特征

沉积物的声速结构是影响水下声场的重要因素之一,声学测量与海底沉积物的声学特性和声速剖面有关.在声学反演和声场预测中,声速剖面通常分为沉积层和基底层.沉积层也相当于一层或多层(Belcourt *et al.*, 2020).这种等效方法简化了声速结构,为声场分析和反演带来了便利.

卢博(1995)基于实测的沉积物声速与海水

声速的比值,研究了海底沉积物的声学特性,提出了南海存在三种声速结构,当沉积物的声速(v_p)大于海水的声速(v_w)时,沉积层被定义为高声速海底(HSV),当沉积物的声速低于海水的声速时,沉积层被定义为低声速海底(LSV).邹大鹏等(2022)在此基础上增加了层间声速差异和声速梯度,提出了低声速表面-声速缓慢变化类型、低声速表面-声速增大类型、高声速表面-声速缓慢变化类型和高声速表面-声速增大类型 4 种典型地声结构.根据以上定义,本文在其基础上完善了声速结构类型,增加了声速减小类型,其定义参考公式(邹大鹏等, 2022)如下:

高声速表面: $v_{pis} > v_w$,低声速表面: $v_{pis} \leq v_w$, (8)

高声速层: $v_{pis} > v_{pjb}$,低声速层: $v_{pis} \leq v_{pjb}$, (9)

声速梯度: $g_{vpi} = (v_{pjb} - v_{pis})/h_i$, (10)

具有正声速梯度时: $g_{vpi} > g_{th0}$ 为声速增大类型, $g_{vpi} \leq g_{th0}$ 为声速缓慢增大变化类型, (11)

具有负声速梯度时: $g_{vpi} > g_{th0}$ 为声速减小类型, $g_{vpi} \leq g_{th0}$ 为声速缓慢减小变化类型, (12)

式中, v_p 为声速(即压缩波波速,单位:m/s); g_{vpi} 为声速梯度(即压缩波波速梯度,单位: s^{-1}); h 为沉积物层厚度(单位:m),下标 s、b、i、j、th0 分别表示表层、底层、第 i 层、第 i-1 层、阈值,其中 $i \geq 2$.当 $i=1$ 时对应着海底表层第 1 层,此时与底层海水 v_w 的声速进行比较.本文声速梯度阈值 g_{th0} 设定为 $1 s^{-1}$.由于现场海水声速未知,本研究中的声速比

(r)被定义为标准实验室条件下沉积物声速与海水声速的比值.因此,在标准实验室条件下(23°C 、35 ppt和大气压),海水声速为1 529.97 m/s.

基于以上对应关系,分别建立了A区和B区深海沉积物的声速结构模型如图6所示,建立了研究区四种地声结构模型:(1)GMI1——低声速表面-低声速层-声速减小类型;(2)GMI2——低声速表面-高声速层-声速增大变化类型;(3)GMII1型——高声速表面-低声速层-声速减小类型;(4)GMII2——高声速表面-高声速层-声速增大类型.在A区的J53和J58站位,表层海底沉积物的声速分别为1 639 m/s和1 587 m/s,大于底层海水实验室标准声速,都为高声速表面,3 m埋深内海底沉积物的声速随着埋深的增加而降低,形成声速逐渐较小的声速剖面,属于低声速层.虽然J53站位的沉积物的声速随埋深的增加继续降低,但仍高于海水的声速,测量声速为 $(1\,610 \pm 75)$ m/s,声速变化较大,且具有负声速结构梯度,平均声速梯度为 43.38 s^{-1} ,因此样品所在区域对应着高声速表面-低声速层-声速减小类型(GMII1型).与J53不同,当埋深超过110 cm时,J58沉积物的声速开始小于底层海水实验室标准声速,形成低声速表面(1 504 m/s).根据声速的垂直变化,A区的声速结构可分为GMII1型(J53)和GMII1-GMI1型(J58).

与A区的J53和J58不同,B区表层海底沉积物的声速分别为1 486 m/s和1 459 m/s,都低于底层海水实验室标准声速,为低声速表面.从图4中J44可以看出,除了220 cm层位的声速略高于海水的声速外,其他所有层的声速都小于海水的声速,深海沉积物的声速随着埋深的增加而增加,柱状样测量声速为 $(1\,490 \pm 42)$ m/s,平均声速梯度为 10.63 s^{-1} ,具有正声速梯度结构,因此样品所在区域对应着低声速表面-高声速层-声速增大类型(GMI2型).然而,J43站沉积物的声速特征很复杂,在0~90 cm的埋深范围内整体低于底层海水实验室标准声速,测量声速为 $(1\,491 \pm 14)$ m/s,平均声速梯度为 10.46 s^{-1} ,但声速随着深度的增加而减小,具有负声速结构梯度,所以样品所在区域埋深0~90 cm范围,对应着低声速表面-低声速层-声速减小类型(GMI1);在90~320 cm的埋深范围高于海水的声速,测量声速为 $(1\,564 \pm 28)$ m/s,平均声速梯度为 49.73 s^{-1} ,且声速随着埋深增加而增大,具有正声速结构梯度,样品所在区域埋深90~300 cm范围,对

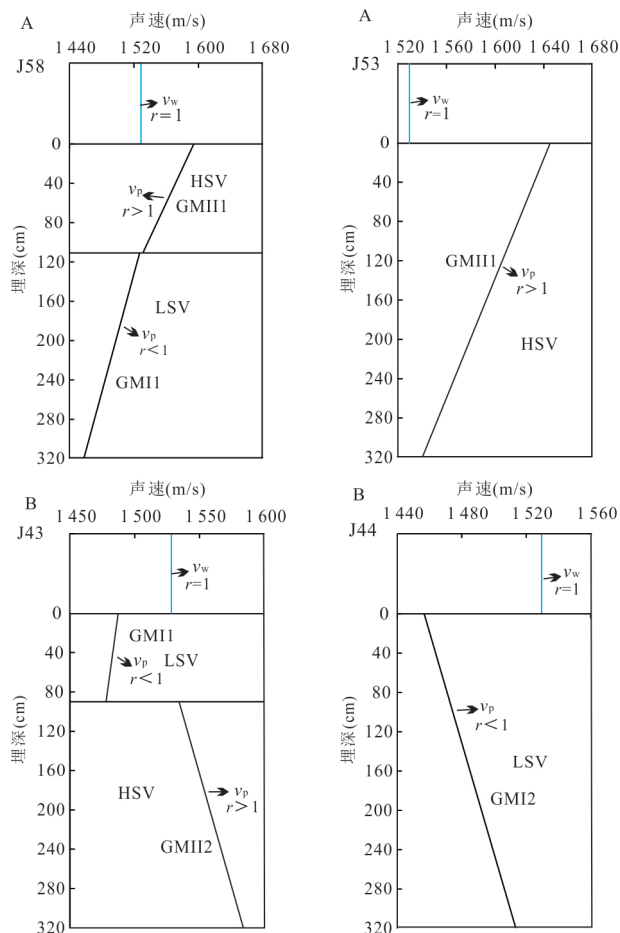


图6 A区和B区深海沉积物的声速结构

Fig.6 Sound velocity structures of deep-sea sediments in Zone A and Zone B

应着高声速表面-高声速层-声速增大类型(GMI2).因此,B区的声速结构可分为两种类型——GMI2(J44)和GMI1-GMI2(J43).

最近的研究表明,沉积物的声速会受到沉积物来源和洋流的影响(Hou *et al.*, 2018a).A区的深海沉积物含有火山碎屑,这是火山喷发的产物(Savov *et al.*, 2006).相比之下,B区的沉积物主要含有钙质和硅质生物,菲律宾岛弧的一定量的碎屑可以通过洋流输送到B区(鄢全树等, 2007).与B区相比,A区的沉积物来源更复杂,颗粒更粗.因此,A区沉积物的声速高于B区.

如图6所示,A区表层海底沉积物的声速属于HSV.然而,J58中沉积物的声速随着埋深的增加而降低,由HSV转变为LSV,沉积历史和沉积过程的变化会导致海底声速剖面非常复杂,火山碎屑可能对表层沉积物声速的影响很强,而且这种影响随着埋深的增加而减弱.B区表层海底沉积物的声速被

归类为 LSV,可能是由于表层沉积物未完全固结,属于松散地层,在 90 cm 以上的埋深,J43 中沉积物的声速高于底层海水实验室标准声速,这意味着 LSV 开始转变为 HSV,J43 中沉积物的湿密度随着埋深的增加而增加,这意味着海底沉积物变得越来越紧密,导致声速增加.物理性质是影响 B 区海底沉积物声速结构的主要因素.

5 结论

本研究分析了 WPS 中声速与深海沉积物物理性质之间的关系.它为 WPS 中的深海沉积物建立了初步的声速结构模型.结论如下:

(1)A 区沉积物的声速高于 B 区,密度略低,孔隙度相当.在 WPS 中,声速的垂直变化是复杂的.它与沉积物的物理性质密切相关,其中声速随着孔隙度的增加而降低,随着湿密度的增加而增加.

(2)密度对声速的影响大于孔隙度和平均粒径.声速实测值与经验值的比较表明,经验公式在一定程度上反映了沉积物声学特征的变化,但不能完全适用于研究区域.

(3)通过与底层海水声速、同层内声速剖面以及上层海底沉积物下表面声速的比较,建立了研究区低声速表面-低声速层-声速减小类型(GMI1)、低声速表面-高声速层-声速增大类型(GMI2)、高声速表面-低声速层-声速减小类型(GMII1 型)、高声速表面-高声速层-声速增大类型(GMII2)四种声速结构模型,其中 A 区的声速结构可分为 GMII1 型和 GMII1-GMI1 型,B 区的声速结构可分为 GMI2 和 GMI1-GMII2.

References

- Bae, S. H., Kim, D. C., Lee, G. S., et al., 2014. Physical and Acoustic Properties of Inner Shelf Sediments in the South Sea, Korea. *Quaternary International*, 344: 125—142. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.058>
- Belcourt, J., Holland, C. W., Dosso, S. E., et al., 2020. Depth-Dependent Geoacoustic Inferences with Dispersion at the New England Mud Patch via Reflection Coefficient Inversion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(1): 69—91. <https://doi.org/10.1109/joe.2019.2900115>
- Chu, Z., Hu, N. J., Liu, J. H., et al., 2016. Rare Earth Elements in Sediments of West Philippine Sea and Their Implications for Sediment Provenance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(5): 53—62 (in Chinese with English abstract).
- Deschamps, A., Lallemand, S., 2002. The West Philippine Basin: An Eocene to Early Oligocene back Arc Basin Opened between Two Opposed Subduction Zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B12): EPM1 - 1 - EPM1 - 24. <https://doi.org/10.1029/2001JB001706>
- Dong, D. D., Zhang, Z. Y., Zhang, G. X., et al., 2017. Tectonic and Sedimentary Features of the West Philippine Basin and Its Implication to the Basin Evolution—Evidence from a Seismic Transection. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 48(6): 1415—1425 (in Chinese with English abstract).
- Dong, J. Q., Sun, H., Zou, D. P., et al., 2023. Model and Prediction Relationship of Sound Velocity and Porosity of Seafloor Sediments. *Journal of Sea Research*, 194: 102413. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102413>
- Fang, Z. H., Li, P. F., Yang, Y., et al., 2022. Analysis on Sedimentary Characteristics of Shallow Strata in Deep Water Environment of Philippine Sea. *Haiyang Xuebao*, 44(3): 53—60 (in Chinese with English abstract).
- Ge, S. L., Shi, X. F., Yang, G., et al., 2007. Rock Magnetic Response to Climatic Changes in West Philippine Sea for the Last 780 ka: Based on Relative Paleointensity Assisted Chronology. *Quaternary Sciences*, 27(6): 1040—1052 (in Chinese with English abstract).
- Hamilton, E. L., 1970. Sound Velocity and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 75(23): 4423—4446. <https://doi.org/10.1029/jb075i023p04423>
- Hamilton, E. L., 1980. Geoacoustic Modeling of the Sea Floor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5): 1313—1340. <https://doi.org/10.1121/1.385100>
- Hou, Z. Y., Chen, Z., Wang, J. Q., et al., 2018a. Acoustic Impedance Properties of Seafloor Sediments of the Coast of Southeastern Hainan, South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.12.003>
- Hou, Z. Y., Chen, Z., Wang, J. Q., et al., 2018b. Acoustic Characteristics of Seafloor Sediments in the Abyssal Areas of the South China Sea. *Ocean Engineering*, 156: 93—100. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.013>
- Jiang, F. Q., Frank, M., Li, T. G., et al., 2013. Asian Dust Input in the Western Philippine Sea: Evidence from Radiogenic Sr and Nd Isotopes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(5): 1538—1551. <https://doi.org/>

- 10.1002/ggge.20116
- Kan, G. M., Su, Y. F., Liu, B. H., et al., 2014. Properties of Acoustic Impedance of Seafloor Sediments in the Middle Area of the Southern Yellow Sea. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 386—395 (in Chinese with English abstract).
- Kawabe, M., Fujio, S., 2010. Pacific Ocean Circulation Based on Observation. *Journal of Oceanography*, 66(3): 389—403. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0034-8>
- Kim, G. Y., Kim, D. C., Yoo, D. G., et al., 2011. Physical and Geoacoustic Properties of Surface Sediments off Eastern Geoje Island, South Sea of Korea. *Quaternary International*, 230(1—2): 21—33. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.07.028>
- Kim, G. Y., Park, K. J., Lee, G. S., et al., 2019. Physical Property Characterization of Quaternary Sediments in the Vicinity of the Paleo-Seomjin River of the Continental Shelf of the South Sea, Korea. *Quaternary International*, 503: 153—162. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.002>
- Li, G. B., Hou, Z. Y., Wang, J. Q., et al., 2021a. Empirical Equations of P-Wave Velocity in the Shallow and Semi-Deep Sea Sediments from the South China Sea. *Journal of Ocean University of China*, 20(3): 532—538. <https://doi.org/10.1007/s11802-021-4476-y>
- Li, G. B., Wang, J. Q., Meng, X. M., et al., 2021b. Relationships between the Sound Speed Ratio and Physical Properties of Surface Sediments in the South Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(4): 65—73. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1764-8>
- Li, X. J., Wang, Z., Yao, Y. J., et al., 2017. The Tectonic Features and Evolution of the West Pacific Margin. *Geology in China*, 44(6): 1102—1114 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. H., Han, T. C., Kan, G. M., et al., 2013. Correlations between the In Situ Acoustic Properties and Geotechnical Parameters of Sediments in the Yellow Sea, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77: 83—90. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.040>
- Long, J. J., Li, G. X., 2015. Theoretical Relations between Sound Velocity and Physical-Mechanical Properties for Seafloor Sediments. *Acta Acustica*, 40(3): 462—468.
- Lu, B., 1994. Sound Velocity and Physical Properties of Shallow Seabed Sediments. *Chinese Science Bulletin*, 39(5): 435—437 (in Chinese).
- Lu, B., 1995. Model of Sound Velocity Structure in Seawater-Sediments. *Marine Science Bulletin*, 14(2): 42—47 (in Chinese with English abstract).
- Lu, B., Li, G. X., Sun, D. H., et al., 2006. Acoustic-Physical Properties of Seafloor Sediments from Near-shore Southeast China and Their Correlations. *Journal of Tropical Oceanography*, 25(2): 12—17 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. S., Liu, S. B., Jia, Y. G., et al., 2018. Analysis on Acoustic Velocity Characteristics of Sediments in the Northern Slope of the South China Sea. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(3): 923—930. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1070-z>
- Okino, K., Fujioka, K., 2003. The Central Basin Spreading Center in the Philippine Sea: Structure of an Extinct Spreading Center and Implications for Marginal Basin Formation. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 108(B1): 2040. <https://doi.org/10.1029/2001JB001095>
- Orsi, T. H., Dunn, D. A., 1990. Sound Velocity and Related Physical Properties of Fine-Grained Abyssal Sediments from the Brazil Basin (South Atlantic Ocean). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(3): 1536—1542. <https://doi.org/10.1121/1.400311>
- Potty, G. R., Miller, J. H., Michalopoulou, Z. H., et al., 2019. Estimation of Geoacoustic Parameters Using Machine Learning Techniques. *Acoustical Society of America Journal*, 146(4): 2987. <https://doi.org/10.1121/1.5137342>
- Qiu, B., 2001. Kuroshio and Oyashio Currents. Academic Press, New York, 1413—1425.
- Ryang, W. H., Kim, S. P., Kim, S., et al., 2013. Geoacoustic Model of the Transverse Acoustic Variability Experiment Area in the Northern East China Sea. *Geosciences Journal*, 17(3): 267—278. <https://doi.org/10.1007/s12303-013-0039-6>
- Savov, I. P., Hickey-Vargas, R., D'Antonio, M., et al., 2006. Petrology and Geochemistry of West Philippine Basin Basalts and Early Palau-Kyushu Arc Volcanic Clasts from ODP Leg 195, Site 1201D: Implications for the Early History of the Izu-Bonin-Mariana Arc. *Journal of Petrology*, 47(2): 277—299. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi075>
- Shu, Y. T., Zheng, Y. L., Xu, D., et al., 2015. The Provenance of Clay Minerals in Core 18 from the West Philippine Basin. *Journal of Marine Science*, 33(4): 61—69. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-909x.2015.04.007>
- Sun, M. J., Gao, H. F., Li, X. J., et al., 2020. Sedimentary Evolution Characteristics since Late Miocene in the Huatung Basin. *Haiyang Xuebao*, 42(1): 154—162 (in Chinese with English abstract).

- Sun, S. X., Teng, J., 2003. Climate Character of the Philippine Sea. *Marine Forecasts*, 20(3): 31–39 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. W., Sun, L., Li, G. B., et al., 2018. The Relationship between the Acoustic Characteristics and Physical Properties of Deep-Sea Sediments in the Philippine Sea. *Marine Sciences*, 42(5): 12–22 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y. H., Chen, Z., Hou, Z. Y., et al., 2019. Geoacoustic Provinces of the Northern South China Sea Based on Sound Speed as Predicted from Sediment Grain Sizes. *Marine Geophysical Research*, 40(4): 571–579. <https://doi.org/10.1007/s11001-019-09387-5>
- Tian, Y. H., Chen, Z., Mo, Y. X., et al., 2023. Effects of Physical Properties on the Compression Wave Speed of Seafloor Sediment in the South China Sea: Comparisons between Theoretical Models and Measured Data. *Frontiers in Physics*, 11: 1122617. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1122617>
- Wan, S. M., Yu, Z. J., Clift, P. D., et al., 2012. History of Asian Eolian Input to the West Philippine Sea over the Last One Million Years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 326–328: 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.02.015>
- Wang, C., Xu, F. J., Hu, B. Q., et al., 2020. Elemental Geochemistry of Core XT-4 Sediments from the Western Philippines Sea since 3.7 Ma and Its Paleoenvironmental Implications. *Marine Sciences*, 44(8): 205–214 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Q., Guo, C. S., Hou, Z. Y., et al., 2014. Distributions and Vertical Variation Patterns of Sound Speed of Surface Sediments in South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 89: 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.03.026>
- Wang, J. Q., Li, G. B., Liu, B. H., et al., 2018. Experimental Study of the Ballast In Situ Sediment Acoustic Measurement System in South China Sea. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(5): 515–521. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1348413>
- Wang, W., Xu, Z. K., Feng, X. G., et al., 2020. Composition Characteristics and Provenance Implication of Modern Dust in the West Philippine Sea. *Earth Science*, 45(2): 559–568 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, W. D., 1960. Equation for the Speed of Sound in Sea Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32(10): 1357. <https://doi.org/10.1121/1.1907913>
- Xu, Z. K., Li, T. G., Yu, X. K., et al., 2013. The Sources of Sediments in the West Philippine Sea in Recent 700 ka and the Records of Major Elements of the Evolution of East Asian Winter Monsoon. *Chinese Science Bulletin*, 58(11): 1048–1056 (in Chinese).
- Yan, Q. S., Shi, X. F., Wang, K. S., et al., 2007. Provinces and Material Provenance of Light Detritus in the Surficial Sediments from the Western Philippine Sea. *Geological Review*, 53(6): 765–773 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. F., Liu, Z. H., Yao, J., et al., 2018. Pore Space Characterization Method of Shale Matrix Formation Based on Superposed Digital Rock and Pore-Network Model. *Scientia Sinica Technologica*, 48(5): 488–498. <https://doi.org/10.1360/n092017-00076>
- Yu, S. Q., Wang, F., Zheng, G. Y., et al., 2020. Progress and Discussions in Acoustic Properties of Marine Sediments. *Journal of Harbin Engineering University*, 41(10): 1571–1577 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. J., Wan, S. M., Colin, C., et al., 2016. Co-Evolution of Monsoonal Precipitation in East Asia and the Tropical Pacific ENSO System since 2.36 Ma: New Insights from High-Resolution Clay Mineral Records in the West Philippine Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 446: 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.022>
- Zhang, B., Li, G. X., Huang, J. F., 2014. The Tectonic Geomorphology of the Philippine Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(2): 79–88 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Cai, P. J., Yang, C. P., et al., 2022. Geochemical Characteristics and Genesis of Ferromanganese Nodules and Crusts from the Central Rift Seamounts Group of the West Philippine Sea. *Ore Geology Reviews*, 145: 104923. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104923>
- Zhou, J. X., Li, Z. L., Zhang, X. Z., et al., 2023. Physics-Based Acoustic Inversion of Sound Velocity and Attenuation in Low-Velocity Marine Sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153(35): A85. <https://doi.org/10.1121/10.0018257>
- Zou, D. P., Wu, Z. L., Sun, H., et al., 2022. Basic Geoacoustic Structure and Geoacoustic Model for Seafloor Sediments. *Haiyang Xuebao*, 44(9): 145–155 (in Chinese with English abstract).
- Zou, D. P., Yan, P., Lu, B., 2012. A Geoacoustic Model Based on Sound Speed Characteristic of Seafloor Surface Sediments of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(3): 80–86 (in Chinese with English abstract).

Zou, D. P., Zeng, Z. W., Kan, G. M., et al., 2021. Influence of Environmental Conditions on the Sound Velocity Ratio of Seafloor Surficial Sediment. *Journal of Ocean University of China*, 20(3): 573–580. <https://doi.org/10.1007/s11802-021-4628-0>

中文参考文献

褚征, 胡宁静, 刘季花, 等, 2016. 西菲律宾海表层沉积物稀土元素地球化学特征及物源指示意义. *海洋地质与第四纪地质*, 36(5): 53–62.

董冬冬, 张正一, 张广旭, 等, 2017. 西菲律宾海盆的构造沉积特征及对海盆演化的指示——来自地球物理大断面的证据. *海洋与湖沼*, 48(6): 1415–1425.

方中华, 李攀峰, 杨源, 等, 2022. 菲律宾海深水环境下浅地层沉积特征分析. *海洋学报*, 44(3): 53–60.

葛淑兰, 石学法, 杨刚, 等, 2007. 西菲律宾海 780ka 以来气候变化的岩石磁学记录: 基于地磁场相对强度指示的年龄框架. *第四纪研究*, 27(6): 1040–1052.

阚光明, 苏远峰, 刘保华, 等, 2014. 南黄海中部海底沉积物声阻抗特性. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(1): 386–395.

李学杰, 王哲, 姚永坚, 等, 2017. 西太平洋边缘构造特征及其演化. *中国地质*, 44(6): 1102–1114.

卢博, 1994. 海底浅层沉积物声速与物理性质. *科学通报*, 39(5): 435–437.

卢博, 1995. 海水–沉积物声速结构模式. *海洋通报*, 14(2): 42–47.

卢博, 李赶先, 孙东怀, 等, 2006. 中国东南近海海底沉积物声学物理性质及其相关关系. *热带海洋学报*, 25(2):

12–17.

孙美静, 高红芳, 李学杰, 等, 2020. 花东盆地晚中新世以来沉积演化特征. *海洋学报*, 42(1): 154–162.

孙守勋, 滕军, 2003. 菲律宾海的气候特征. *海洋预报*, 20(3): 31–39.

孙志文, 孙蕾, 李官保, 等, 2018. 菲律宾海深海海底沉积物声学特性与物理性质相关关系. *海洋科学*, 42(5): 12–22.

王晨, 徐方建, 胡邦琦, 等, 2020. 3.7 Ma 以来西菲律宾海 XT-4 孔沉积物元素特征及其古环境指示意义. *海洋科学*, 44(8): 205–214.

王薇, 徐兆凯, 冯旭光, 等, 2020. 西菲律宾海现代风尘物质组成特征及其物源指示意义. *地球科学*, 45(2): 559–568.

徐兆凯, 李铁刚, 于心科, 等, 2013. 近 700 ka 来西菲律宾海沉积物来源和东亚冬季风演化的常量元素记录. *科学通报*, 58(11): 1048–1056.

鄢全树, 石学法, 王昆山, 等, 2007. 西菲律宾海盆表层沉积物中的轻碎屑分区及物质来源. *地质论评*, 53(6): 765–773.

于盛齐, 王飞, 郑广赢, 等, 2020. 海底沉积物声学特性研究进展与探讨. *哈尔滨工程大学学报*, 41(10): 1571–1577.

张斌, 李广雪, 黄继峰, 2014. 菲律宾海构造地貌特征. *海洋地质与第四纪地质*, 34(2): 79–88.

邹大鹏, 伍智林, 孙晗, 等, 2022. 海底沉积物的基本地声结构与地声模型. *海洋学报*, 44(9): 145–155.

邹大鹏, 阎贫, 卢博, 2012. 基于海底表层沉积物声速特征的南海地声模型. *海洋学报*, 34(3): 80–86.