

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020112301

菲律宾海中部海域声速剖面结构及季节性变化

李攀峰^{1,2}, 颜中辉¹, 杜润林¹, 孙波¹, 刘李伟¹, 杨源¹, 于得水¹

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

摘要: 利用 2019 年菲律宾海中部海域经质量校正后的 Argo 浮标数据, 采用 Wilson 第二方程式计算得到每个浮标站位不同水深的声速值, 分析了研究区声速的垂向结构、水平分布及季节性变化特征, 并初步探讨了声速与海底地形的关系。结果显示研究区声速在垂向上表现为典型的三层结构, 从上到下分别是混合层、主跃变层、深海等温层; 声速在 100 m 以浅受季节影响最大, 100~800 m 影响程度基本一致, 800 m 以深逐渐减弱, 1200 m 以深基本不受影响。声速水平分布特征主要表现为: 声道轴深度为 900~1100 m, 大致呈现南部较浅、北部较深的趋势, 季节性变化不大; 声速值在 200 m 以浅表现为南高北低, 200~700 m 为北高南低, 800~1100 m 为中间高、四周低, 1200 m 以深为南高北低。九州-帕劳海脊声道轴附近深度声速受地形影响明显低于周围海域。

关键词: Argo 浮标; 海水声速剖面; 声道轴; 季节性变化; 菲律宾海中部

中图分类号: P313

文献标识码: A

Structures and seasonal variation of sound velocity profiles in the central Philippine Sea

LI Panfeng^{1,2}, YAN Zhonghui¹, DU Runlin¹, SUN Bo¹, LIU Liwei¹, YANG Yuan¹, YU Deshui¹

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao 266071, China

Abstract: With the mass-calibrated Argo buoy data of 2019 from the central Philippine Sea, the sound velocity values at different water depths are calculated using Wilson's second equation, and the vertical structure, horizontal distribution patterns and seasonal variations of sound velocity are analyzed, and the relationship between sound velocity and seafloor topography was preliminarily discussed. It is found that the sound velocity in the study area has a typical three-layer structure in vertical direction, from the top to the bottom they are successively the mixed layer, the main thermocline layer, and the deep isothermal layer. The sound velocity in the water less than 100 m is mainly effected by the season, and the influence remains the same from 100 to 800 m in water depth. The influence is gradually weakening from 800 m to deep, and for the water deeper than 1200 m the sound velocity remains stable. The horizontal distribution of sound velocity shows that when the depth of the sound channel axis is between 900 and 1100 m, it is roughly shallow in the south and deep in the north, with little seasonal variation; when the water depth is less than 200 m, the sound velocity is high in the south and low in the north, for the water in depth of 200-700 m, the velocity is high in the north and low in the south, when the water is in the range of 800-1100 m, it is high in the middle and low in the south, for the area with water depth deeper than 1200 m the velocity is high in the south and low in the north. The sound velocity near the deep sound channel axis of the Kyushu-Palau ridge is significantly lower than that of the surrounding area due to the influence of topography.

Key words: Argo buoys; sound velocity profile; deep sound channel axis; seasonal variation; Central Philippine Sea

声波在海水中的传播速度主要由海水水温、盐度、压强等要素所决定, 海水声速剖面则反映了局部海区垂直方向上的结构特征^[1]。海洋声速对海水深度精确测量、海洋灾害预警等方面起着十分重要的作用, 同时也是海上军事活动最重要的参数, 很

大程度上影响着军事活动的策划和行动等^[2]。不同海域, 由于受海流和大气环流等因素的影响, 声速的垂直结构各不相同, 水平方向的分布也不均匀, 并随季节更替发生改变。

菲律宾海是毗邻中国大陆的一个独特海域, 位

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20191003)

作者简介: 李攀峰 (1987—), 男, 工程师, 主要从事深海地质研究工作, E-mail: lpf_320@126.com

通讯作者: 杜润林 (1987—), 男, 助理研究员, 主要从事海洋地质研究工作, E-mail: durunlin123@163.com

收稿日期: 2020-11-23; 改回日期: 2021-01-19。 周立君编辑

于西太平洋边缘,四周被岛弧和海沟包围,也是西太平洋最大的边缘海盆^[3]。菲律宾海不仅是太平洋与印度洋之间的交通要道,也是亚洲国家水路通往美洲和大洋洲的主要海上通道,其经济、军事地位十分重要^[4]。国内外已有多个学者对菲律宾海的水声速结构和特征进行了分析,比如张旭在菲律宾海分别选取了 3 个海域进行了声速剖面结构特征及季节性变化讨论^[4];曹震卿选择西太平洋第一、第二岛链间海区 6 个位置点,分析声速剖面数据并在设定条件下利用模型仿真分析了声传播情况^[5];程琛分析了 18°~23°N、130°~135°E 范围内夏季汇聚区声场特征,探讨了能量传播损失情况^[6];王彦磊利用 2006 年 Argo 资料计算了西北太平洋海域 0~1500 m 声速剖面,并模拟了典型声速结构的声传播损失场^[7];Bingham F M, Munk W H 对西太平洋的混合层、温跃层、深海声道等参数进行了初步分析^[8-9]。

以往学者利用 Argo 浮标构建了西太平洋三维声速场,并分析了声速时空分布及季节性变化,也在声传播损失场等方面取得了较为完善的认识,但因研究年代较早尚存在如下不足:一是菲律宾海 Argo 浮标数量较少,对菲律宾海中部海域声速结构

的认识不够充分;二是菲律宾海地形地貌复杂多变,但以往文章均未分析地形对海域声速的影响情况。本文选取该海域 2019 年全年的 Argo 浮标试图对上述问题进行分析探讨。

1 研究区概况

研究区位于菲律宾海中部,坐标范围为 12°~30°N、126°~144°E,面积达 397.4 万 km²,占整个菲律宾海的 65% 以上。采用 GEBCO(The General Bathymetric Chart of the Oceans)精度为 15 s 的 DEM 数据绘制了研究区的水深地形图(图 1)。

研究区主要发育西菲律宾海盆、九州-帕劳海脊、帕里西维拉海盆、四国海盆、伊豆-博宁-西马里亚纳岛弧等^[3, 8-12]。西菲律宾海盆位于菲律宾海西部,水深为 5000~6000 m。海盆中央被 NW-SE 向延伸的中央海盆扩张中心所分割,该扩张中心水深最深处超过 7700 m;东北部发育与中央裂谷走向近乎平行的冲大东海岭、大东海脊、奄美海台等。帕里西维拉海盆、四国海盆位于菲律宾海东部,二者以索夫干断裂为分界,水深为 4000~5500 m,最深

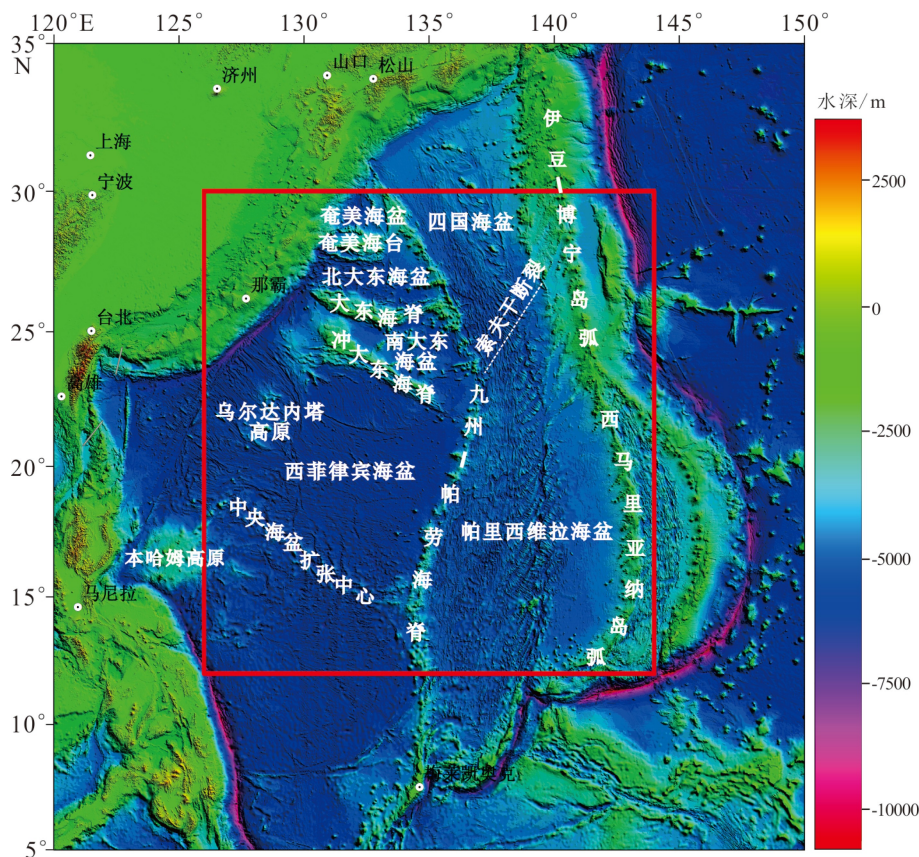


图 1 研究区范围及水深地形图

Fig.1 Bathymetric map showing the survey area

处位于已停止活动的中央裂谷处, 局部水深超过 7 100 m^[13]。帕里西维拉海盆在中央裂谷以西水深较深, 盆底为丘状起伏, 地形大致呈 NNE 向弧形的雁形排列; 中央裂谷以东水深一般较西部浅 300~500 m, 地形相对较为平坦, 应与西马利亚纳岛弧火山碎屑物质覆盖海底有关。四国海盆水深为 4 000~5 000 m, 且表现为南深北浅, 从地化参数分析其为典型的陆源沉积, 物源主要来自日本岛^[14]。九州-帕劳海脊目前学术界多认为其为残留岛弧, 测年数据显示 23 Ma 左右已经停止了活动^[12]。海脊总长约 2 900 km, 两侧有明显的不对称性, 西坡平缓而东坡较为陡峭; 从展布方向上可明显划分为 4 段, 26°44'N 以北为一段, 走向约为 146°; 23°23'~26°44'N 为一段, 走向约为 156°; 14°36'~23°23'N 为一段, 走向约为 198°; 14°36'N 以南为一段, 走向约为 176°。

2 资料和方法

2.1 资料获取

Argo 观测系统由大量布放在全球海洋中自由漂移的 Argo 剖面浮标组成, 大部分浮标的停留深度为 1 000 m, 定期下潜到 2 000 m 深度然后上浮至海面, 在下潜上浮的过程中会采集海水温度、盐度等核心数据^[15]。中国 Argo 实时资料中心 2020 年 1 月更新发布了经过质量控制后的全球海洋 Argo 散点资料集 (V3.0) (网址为 <ftp://ftp.argo.org.cn/pub/ARGO/global/>), 该数据集包含 1997—2019 年全球的 Argo 浮标数据。首先利用计算机自动检验完成 MEDD 尖峰检测、Racape 毛刺检测和气候态检测等 16 个步骤, 然后通过专业人员逐一审核温度盐度瀑布、T-S 曲线和浮标漂移轨迹等图件进行质量控制, 从而确保数据的可靠性^[16]。

本文选取研究区 2019 年全年的 Argo 剖面, 提取水温、盐度、压力值进行海水声速的分析和研究。观察发现编号以 290 开头的浮标采集时间间隔一般为 5 d, 某些站位会缩短为 1~4 d; 编号以 590 开头的浮标采集时间间隔一般为 10 d。

2.2 资料整理

利用 Python 编程对获取的 2019 年全球数据按研究区范围进行了裁剪, 并按照春季 (3—5 月)、夏季 (6—8 月)、秋季 (9—11 月)、冬季 (12 月, 1—2 月) 对站位进行了整理, 具体站位见图 2。

2.3 声速计算

声速计算采用 Wilson 第二方程式^[17], 该方程式在适用范围内测量精度可达 0.3 m/s^[18-19]; Argo 浮标中压强与水深的换算采用 Saunders 推导的经验公式^[20]。

2.4 声速插值

研究区 Argo 浮标采集深度大多为 10~2 000 m, 100 m 以浅提取 20、50、100 m 作为标准层; 100 m 以深提取 200、300、400、...、1 800、1 900 m 作为标准层。采用线性函数对标准层的声速值插值后进行声速场的分析研究。

3 结果

3.1 声速剖面的结构及季节性变化

选择研究区不同区域的浮标站位 (图 3), 每个站位分别提取 1 月、4 月、7 月和 10 月的声速剖面分析垂向结构特征。图中 a 为 2903326 号浮标, b 为 2903332 号浮标, c 为 5903808 号浮标, d 为 2902703 号浮标; d 区域由于该浮标 8 月份以后无数据, 缺失 10 月份的声速剖面。

站位具体的声速剖面结构见图 4, 从图中可知研究区的声速结构为典型的三层结构, 上层为混合层, 声速一般为正梯度变化, 在某个深度范围内出现表层声速极大值; 接着随深度增加声速值逐渐变小, 到 1 000 m 左右时出现声速极小值, 此极小值也被定义为声道轴。在声速极大值与声道轴之间声速为负梯度变化, 为主跃变层。主跃变层根据梯度大小一般可划分为两层结构, 上层声速变化较慢, 梯度小, 该跃变层的底界深度随着季节变化而变化, 一般春、夏季节深, 而秋、冬季节浅; 下层上部水深声速梯度较大, 下部随着接近声道轴位置声速梯度急剧变小, 声速曲线趋于收敛。声道轴以下为深海等温层, 水温为 2~4 °C, 声速值主要受压力影响, 声速梯度为正值, 且梯度值较小, 声速缓慢增大。值得注意的是, 混合层声速为正梯度变化, 主跃变层声速为负梯度变化, 当正负梯度共同作用且正梯度在上层时会产生一种特殊的传播模式, 声线会在该分层界面处分开, 混合层内会向上偏转, 当进入下层海水时会向下偏转, 这个边界称为“声层”, 最大声速对应的深度为层深。在超过某个极小的范围以外时, 从声源发出的声线将永远无法触及恰好在层下方的区域, 该区域称为“声影区”, 适

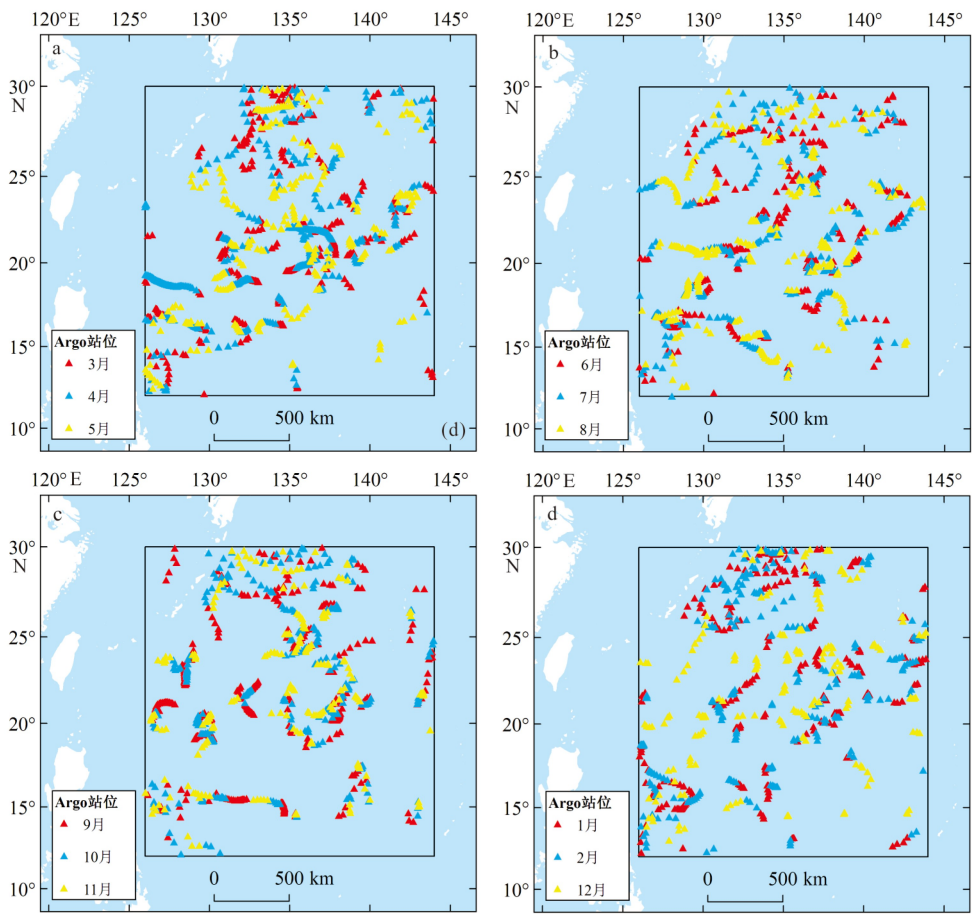


图 2 研究区 2019 年 Argo 浮标站位图
a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季。

Fig.2 Location map of Argo buoys in 2019
a. Spring, b. Summer, c. Autumn, d. Winter.

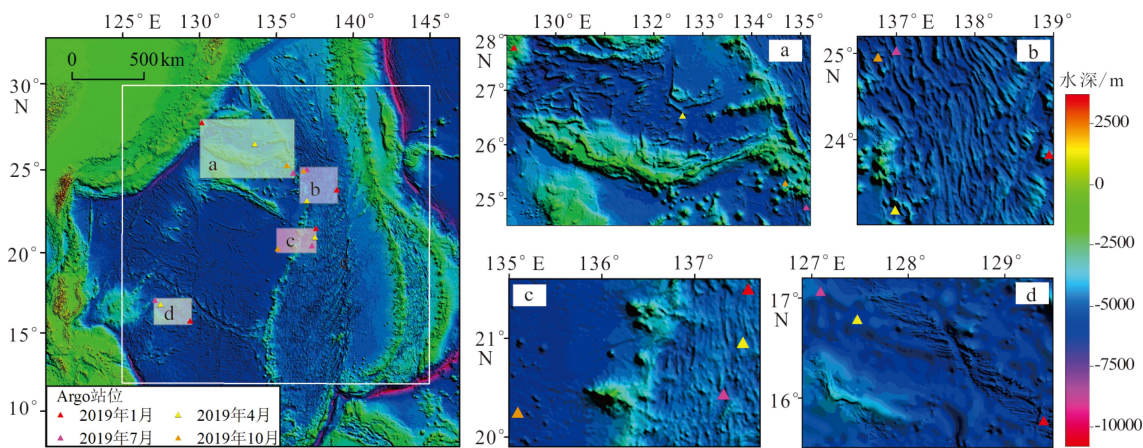


图 3 浮标站位位置图

Fig.3 Location map of Argo buoys

合于潜艇的隐藏行为。

从位置分析,区域 a、b、c 浮标位于 20°N 以北,声速结构相似,混合层厚度一般为 100 m 以内;声道轴深度约为 1000 m,主跃变层厚度约为 400~500 m。

区域 d 浮标声速结构与前 3 个区域明显不同,混合层以下季节性跃变层较薄,一般为 100 m 左右;声道轴深度约为 800 m,主跃变层较厚,厚度约 600 m。该区域声道轴的深度较小可能与自东向西的北赤

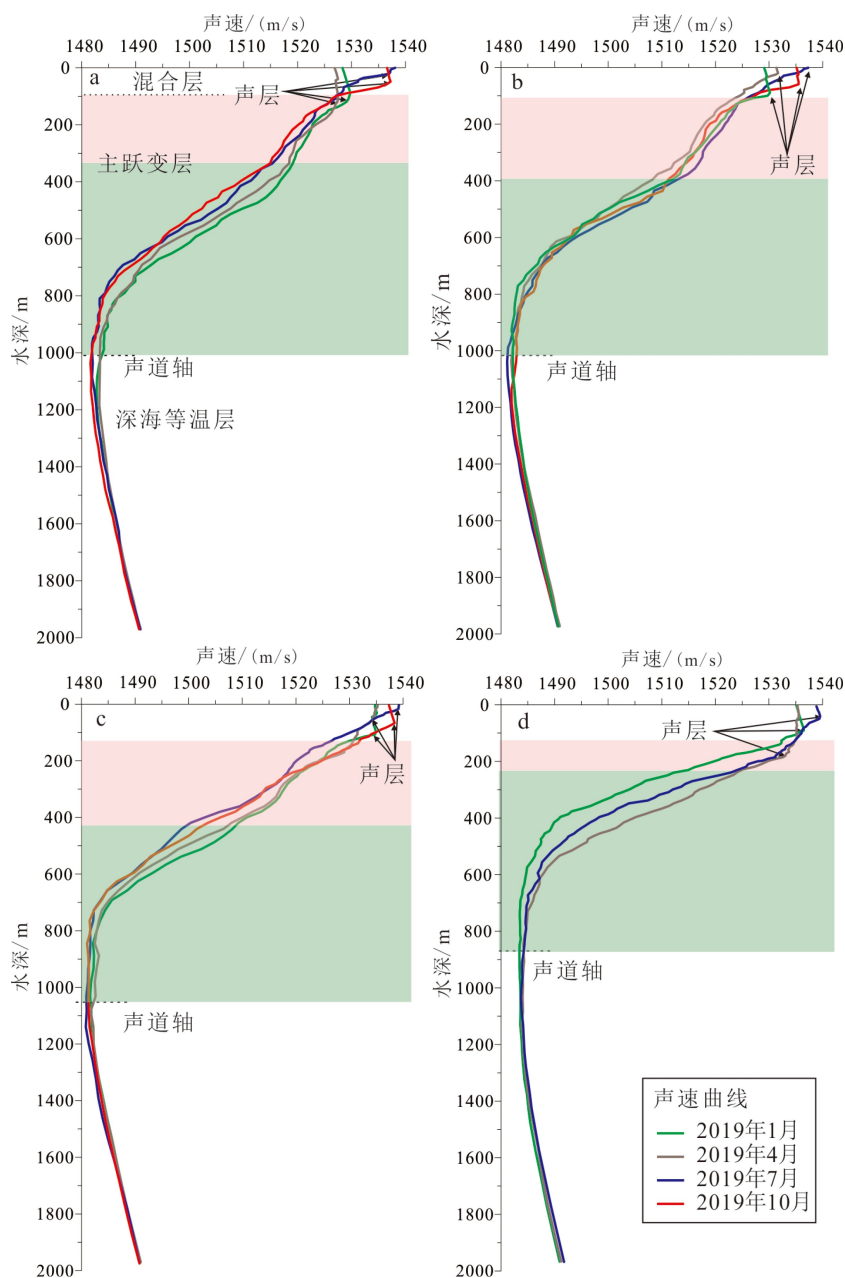


图 4 典型声速结构图

a、b、c、d 为图 3 浮标站位区域。

Fig.4 Structure maps of sea water sound velocity

a, b, c and d represent the respective buoys.

道暖流到达菲律宾沿岸分叉向南偏转产生的棉兰老涡旋以及棉兰老岛离岸东南方向反气旋涡旋产生的棉兰老潜流^[21-22]有关。

3.2 声层水平分布及季节性变化

海洋表面由于热量、淡水交换(强迫场)等作用会形成混合层,而声层深度反映了混合层的厚度,随区域和季节变化明显,其厚度是决定声传播性能的最重要指标^[15]。研究区声层的深度随季节变化明显,冬季最深,一般为 50~120 m;春季较深,一般

为 20~100 m;秋季较浅,一般为 30~70 m;夏季最浅,一般都小于 50 m(图 5)。

3.3 声道轴水平分布及季节性变化

声源位于声道轴附近时,在一定角度范围内射出的声线被限制于声道内传播,这部分声线不受海面散射和海底反射,声信号传播很远,因此声道轴可用于建立海上救助系统、海啸预报系统及测定导弹溅落位置等。同时深海声道的存在致使海水速度结构发生变化,声道轴上部声速因海水温度的升

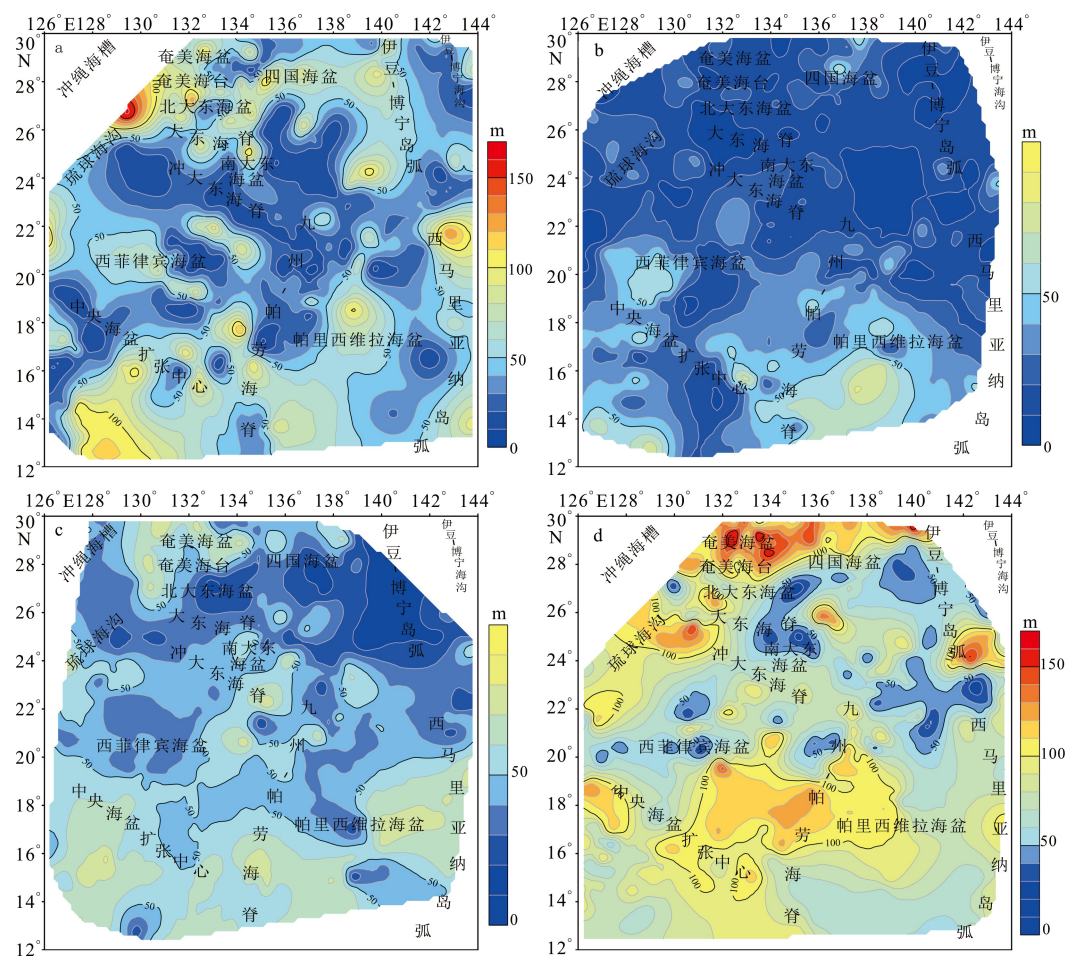


图5 声层平面分布图

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季。

Fig.5 Plane distribution of sonic layer

a. Spring, b. Summer, c. Autumn, d. Winter.

高而变大,声道轴下部声速随海水压力增大而变大,从而会影响到地震波的振幅,在做海洋地震资料处理时,就要考虑深海声道的影响,否则会影响偏移剖面的能量显示^[23]。

研究区为典型的深海声道,声道轴基本为900~1100 m,大致呈现南部较浅、北部较深,并随季节更替出现较小变化(图6)。其中四国海盆及奄美海盆海域声道轴较深,为1100~1200 m,而中央海盆扩张中心以南到九州-帕劳海脊以西海域声道轴较浅,基本都在900 m以下,特别是菲律宾海沟海域变浅到600~700 m。春季16°N以南、帕劳海脊以西海域声道轴为800~900 m;帕里西维拉海盆18°N以南、帕劳海脊以东有一NW-SE向舌状海域声道轴为1000~1200 m,舌尖向帕劳海脊延伸;22°N以北海域声道轴基本为1000~1200 m。夏季声道轴1000 m等深线向北延伸,最北到达25°N;中央海盆扩张中心以南海域声道轴为600~900 m;奄美海盆东部海

域声道轴最深达1000~1200 m。秋季研究区大部分海域的声道轴为700~1000 m,并在西马利亚纳岛弧海域、帕劳海脊南部海域、西菲律宾海盆西南部海域出现3个声道轴深度较浅海域,为700~900 m;四国海盆北部海域声道轴最深,为1140~1200 m。冬季24°N以南海域声道轴在1000 m以下,其中西菲律宾海盆16°N以南海域声道轴为600~900 m。

4 讨论

4.1 声速场垂向的季节性变化

利用插值获得的标准层声速值,统计了不同季节声速的变化范围、平均值及标准差(表1)。通过中心化处理得到各季节标准层平均声速值的差值,反映声速值在垂向上的季节性变化(图7a),标准差反映了各季节不同深度声速变化程度(图7b)。

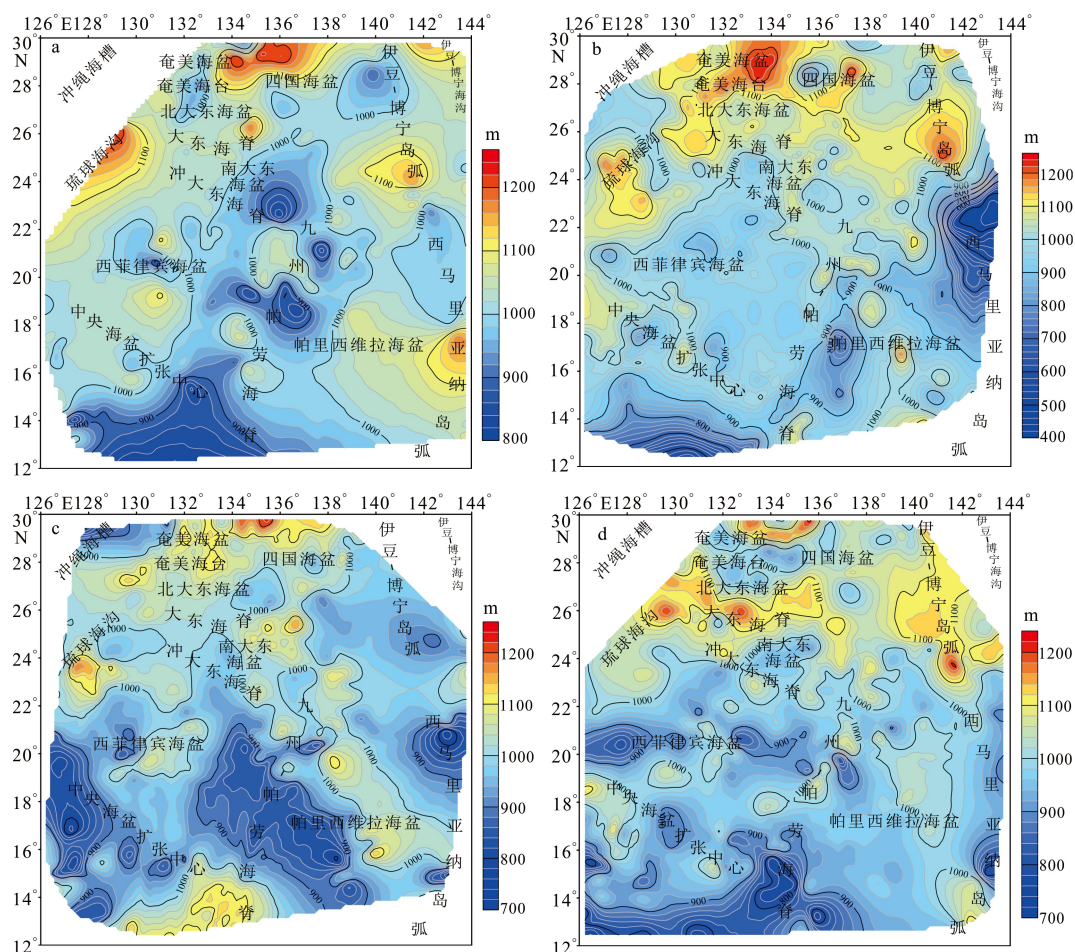


图 6 声道轴平面分布图

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季。

Fig.6 Plane distribution of sound channel axis

a. Spring, b. Summer, c. Autumn, d. Winter.

结合表 1 和图 7 可以看出声速在垂向上变化特点为: 100 m 以浅受季节变化影响较大, 其中声速值夏秋季节较大, 春冬季节较小, 声速季节性变化超过 6 m/s; 在约 100 m 处声速交汇于一点; 100~800 m 声速变化较小, 不超过 2 m/s, 且表现为春、夏季基本一致, 100~300 m 范围秋冬季节基本一致, 500 m 以深冬季声速最大且秋季声速明显变小; 800 m 以深声速季节性变化逐渐减弱。200 m 以深全区声速变化逐渐增加, 400~500 m 最为剧烈, 变化幅度为 35~40 m/s; 800 m 以深声速变化逐渐减小, 1200 m 以深全区声速基本一致, 变化幅度为 2~5 m/s。

4.2 声速水平分布特征

各深度声速水平变化基本与温度变化一致。20 m 全区位于混合层内, 声速值基本表现为南高北低, 主要原因是海水温度南高北低所致; 以 1535 m/s 等声速线(基本为 24°N)为界, 南部声速梯度小, 变

化缓慢, 北部声速梯度大, 变化较快, 如图 8a。大约从 200 m 开始从西南海域出现声速低异常区, 到 300~400 m 时异常区范围扩大, 同一位置声速下降梯度可达 0.1 s^{-1} , 至 500 m 以深声速梯度才基本回归正常(图 8b、c)。由于该冷水流的存在致使 200~700 m 范围内声速值基本表现为南低北高, 与表层声速变化规律相反; 声速变化与温度相关度极高, 推测原因是棉兰老潜流^[22]携带深层冷水流向浅层所致。800~1100 m 范围内声速值表现为中间高四周低。1200 m 以深声速水平方向变化减小, 随深度增加变化幅度减小, 基本表现为南高北低的分布特征(图 8d)。大约 200 m 以浅伊豆-博宁海沟与四国海盆东之间出现一处声速低异常区, 水深越浅影响范围越小, 至 20 m 深度处, 异常区西界已东缩至伊豆-博宁岛弧, 该低异常区与海水温度有很好的对应关系, 应为一个中小尺度范围的冷水团。

表 1 研究区各季节标准层声速值
Table 1 The sound velocity of the standard layer in each season

深度/m		20	50	100	200	300	400	500	600	700	800
春季	最大值/ (m/s)	1539.2	1537.8	1537.7	1533.9	1524.0	1523.2	1523.7	1522.4	1505.8	1497.6
	最小值/ (m/s)	1516.2	1514.6	1513.9	1502.3	1491.5	1486.2	1483.7	1483.2	1481.3	1479.9
	变化值/ (m/s)	23.0	23.2	23.8	31.6	32.5	37.0	40.0	39.1	24.5	17.7
	平均值/ (m/s)	1532.6	1531.7	1530.1	1522.5	1515.1	1507	1498.2	1491	1486.4	1484.1
	标准差	4.57	4.50	4.73	3.39	4.66	6.65	6.79	5.52	3.67	2.31
夏季	最大值/ (m/s)	1539.8	1540.0	1538.1	1532.0	1524.1	1522.8	1523.7	1521.4	1504.0	1497.5
	最小值/ (m/s)	1525.5	1519.3	1516.9	1506.4	1491.2	1487.6	1484.8	1483.5	1481.4	1480.4
	变化值/ (m/s)	14.3	20.6	21.2	25.6	33.0	35.2	38.9	37.9	22.6	17.0
	平均值/ (m/s)	1536.9	1534.5	1530.4	1522.5	1515.2	1506.9	1498.2	1491.2	1486.5	1484.1
	标准差	2.37	3.62	4.44	3.03	4.40	6.95	7.10	5.43	3.50	2.20
秋季	最大值/ (m/s)	1538.6	1538.8	1538.3	1531.2	1523.4	1523.3	1521.0	1515.8	1506.0	1497.5
	最小值/ (m/s)	1527.4	1525.7	1518.3	1491.3	1487.8	1485.0	1484.5	1482.8	1480.1	1479.2
	变化值/ (m/s)	11.2	13.2	20.0	39.9	35.6	38.3	36.5	33.0	25.9	18.4
	平均值/ (m/s)	1536.7	1535.9	1530.5	1521.3	1514.4	1505.9	1497.1	1490	1485.7	1483.5
	标准差	1.49	2.30	4.31	2.88	4.24	6.43	6.02	4.28	2.73	1.74
冬季	最大值/ (m/s)	1537.3	1537.9	1538.0	1533.5	1523.6	1523.3	1521.2	1516.6	1507.8	1499.5
	最小值/ (m/s)	1519.8	1520.2	1520.7	1509.2	1492.6	1486.9	1484.8	1483.3	1480.7	1480.7
	变化值/ (m/s)	17.5	17.7	17.3	24.3	30.9	36.4	36.3	33.2	27.1	18.8
	平均值/ (m/s)	1531.3	1531.6	1530.6	1521.3	1514.3	1506.6	1498.4	1491.5	1486.8	1484.3
	标准差	4.34	4.39	4.27	3.04	5.75	8.01	7.69	6.08	4.21	2.71
深度/m		900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
春季	最大值/ (m/s)	1490.8	1487.6	1486.5	1485.8	1486.2	1486.7	1487.4	1488.3	1489.3	1490.3
	最小值/ (m/s)	1479.7	1480.0	1480.4	1481.1	1482.0	1482.9	1484.2	1485.2	1486.4	1487.8
	变化值/ (m/s)	11.1	7.6	6.1	4.7	4.2	3.8	3.3	3.1	2.9	2.5
	平均值/ (m/s)	1483.0	1482.7	1482.7	1483.1	1483.7	1484.5	1485.4	1486.5	1487.6	1488.8
	标准差	1.57	1.2	1.07	0.92	0.79	0.69	0.61	0.54	0.49	0.43
夏季	最大值/ (m/s)	1490.6	1487.1	1486.9	1487.0	1487.2	1487.5	1488.3	1488.8	1489.6	1490.7
	最小值/ (m/s)	1480.0	1480.0	1480.4	1481.3	1482.2	1483.0	1484.1	1485.3	1486.4	1487.7
	变化值/ (m/s)	10.6	7.1	6.5	5.7	5.0	4.5	4.2	3.5	3.2	3.0
	平均值/ (m/s)	1482.9	1482.6	1482.6	1483.0	1483.6	1484.4	1485.4	1486.5	1487.6	1488.8
	标准差	1.50	1.18	1.07	0.96	0.78	0.66	0.58	0.53	0.48	0.42
秋季	最大值/ (m/s)	1490.2	1487.4	1485.5	1485.7	1485.8	1486.5	1487.2	1488.2	1489.2	1490.3
	最小值/ (m/s)	1479.3	1479.6	1479.9	1480.9	1481.9	1483.1	1484.2	1485.2	1486.5	1487.7
	变化值/ (m/s)	10.9	7.8	5.6	4.8	3.9	3.4	3.0	3.0	2.7	2.6
	平均值/ (m/s)	1482.5	1482.2	1482.3	1482.7	1483.4	1484.3	1485.2	1486.3	1487.5	1488.7
	标准差	1.26	1.06	0.94	0.81	0.69	0.59	0.53	0.49	0.45	0.41
冬季	最大值/ (m/s)	1493.9	1487.8	1485.8	1485.9	1486.1	1486.7	1487.2	1488.0	1488.9	1490.0
	最小值/ (m/s)	1480.0	1480.2	1480.5	1481.2	1482.0	1482.9	1483.9	1485.0	1486.3	1487.7
	变化值/ (m/s)	13.8	7.5	5.3	4.7	4.1	3.8	3.3	3.0	2.6	2.3
	平均值/ (m/s)	1483.1	1482.6	1482.6	1483.0	1483.6	1484.4	1485.3	1486.4	1487.6	1488.8
	标准差	1.83	1.12	0.97	0.85	0.75	0.66	0.60	0.54	0.49	0.44

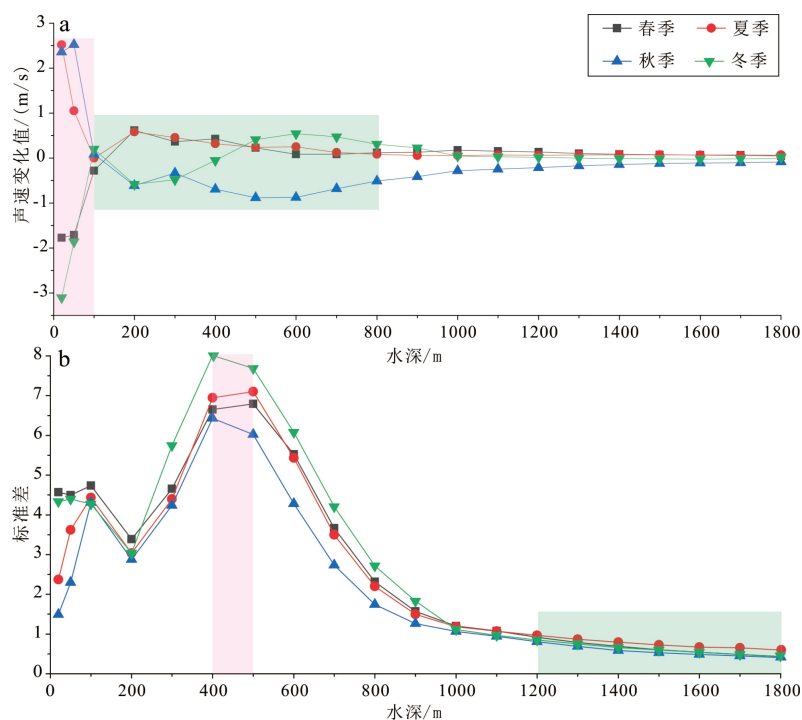


图 7 各季节标准层声速变化

Fig.7 Variation of sound velocity with the season

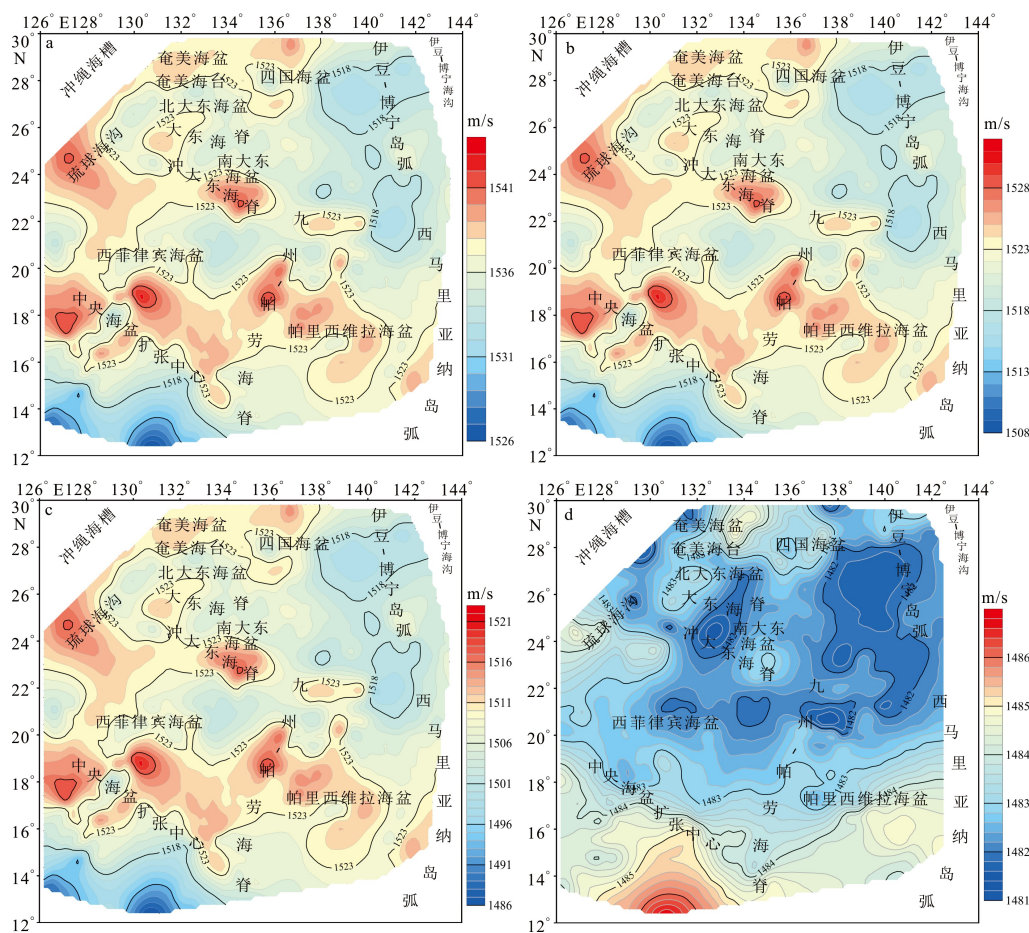


图 8 声速平面分布图

a. 20 m, b. 200 m, c. 400 m, d. 1200 m.

Fig.8 Plane distribution map of sound velocity

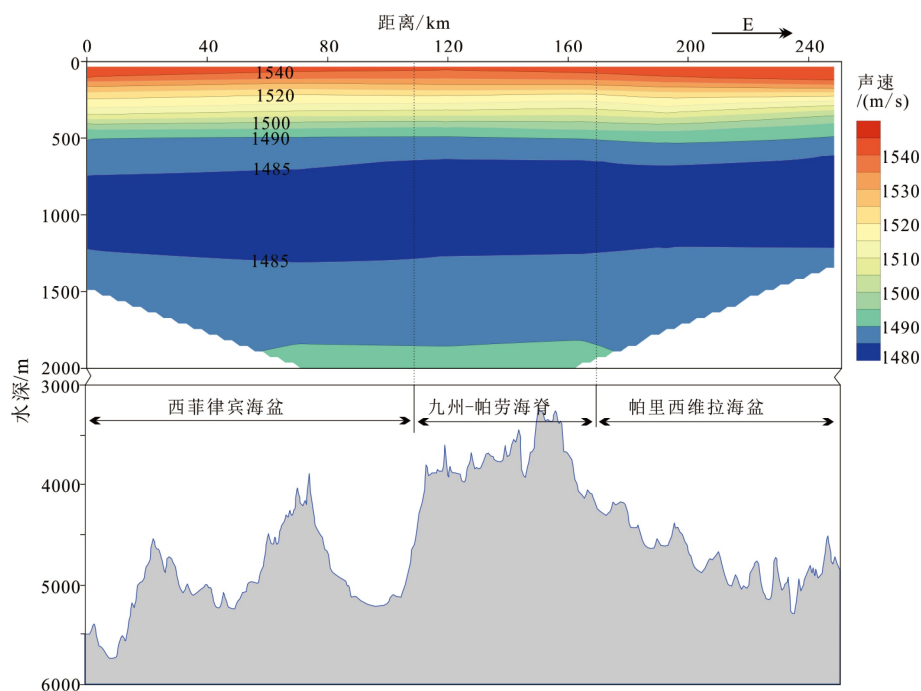


图9 经向声速剖面断面图

Fig.9 Sound velocity profile in longitude direction

4.3 海底地形与海水声速的关系

菲律宾海广泛存在海底斜坡、海山等复杂地形,海底地形变化与海水声速结构的联合作用会对声速传播产生重要影响^[24]。考虑到声速剖面纬向变化比较快,本文选择一条横跨西菲律宾海盆、九州-帕劳海脊、帕里西维拉海盆的经向断面对海底地形与海水声速的关系进行初步分析。

断面的声速分布如图9所示,声速站位测量的深度为1500~2000 m,从前述讨论可知1200 m以下深度声速水平方向变化不大,故讨论1500 m以浅深度可以代替全水深情况。从图中可以看出500 m以浅等声速线基本平行,地形影响不太明显;靠近声道轴九州-帕劳海脊等声速线明显有上凸,可能反映地形比较高的海域声道轴位置更浅一些。造成这种现象的原因推测为深层冷水遇到地形阻挡时会向上运动,导致海脊上层海水温度比周围海域要低,而海水温度与声速呈正相关,因此,海脊附近声速会低于周围海域。

5 结论

(1)菲律宾海中部海域的声速垂向上表现为典型的三层声速结构,上层混合层声速为正梯度变化,中层主跃变层声速为负梯度变化,下层深海等温层声速为正梯度变化。海水声速在100 m以浅受

季节变化影响较大;100~800 m声速季节性变化相对较小,其中春、夏季节声速基本一致,秋冬季节在100~300 m范围声速基本一致,500 m以深秋季声速明显变小;800 m以深声速季节性变化逐渐减弱;1200 m以深基本不受季节影响。

(2)菲律宾海中部海域声层的深度随季节变化明显,冬季最深,春季较深,秋季较浅,夏季最浅;声道轴基本位于900~1100 m深度,大致呈现南部较浅、北部较深的变化趋势。

(3)菲律宾中部海域声速在同一平面的变化趋势为:各深度声速水平变化基本与温度变化一致;200 m以浅基本呈现南高北低;200~700 m表现为北高南低,400 m左右声速变化最为剧烈;800~1100 m表现为中间高四周低;1200 m以深声速水平方向变化减小,且随深度增加变化幅度减小,基本表现为南高北低的分布特征。

(4)复杂的海底地形变化一定程度上会对海水声速结构产生影响,九州-帕劳海脊海域声速在声道轴附近深度明显低于周围海域。

参考文献 (References)

- [1] 张旭, 张永刚, 张健雪, 等. 一种新的声速剖面结构参数化方法[J]. 海洋学报: 中文版, 2011, 33(5): 54-60. [ZHANG Xu, ZHANG Yonggang, ZHANG Jianxue, et al. A new model for calculating sound

- speed profile structure [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(5): 54-60.]
- [2] 吴碧, 陈长安, 林龙. 声速经验公式的适用范围分析[J]. *声学技术*, 2014(6): 504-507. [WU Bi, CHEN Changan, LIN Long. Analysis of applicable scope of empirical equation for sound velocity [J]. *Technical Acoustics*, 2014(6): 504-507.]
- [3] 张斌, 李广雪, 黄继峰. 菲律宾海构造地貌特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(2): 79-88. [ZHANG Bin, LI Guangxue, HUANG Jifeng. The Tectonic Geomorphology of the Philippine sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(2): 79-88.]
- [4] 张旭, 张永刚, 张胜军, 等. 菲律宾海的声速剖面结构特征及季节性变化[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(6): 23-34. [ZHANG Xu, ZHANG Yonggang, ZHANG Shengjun, et al. Distribution and seasonal variability of sound speed profile in the Philippine Sea [J]. *Journal Article*, 2009, 28(6): 23-34.]
- [5] 曹震卿, 张永刚, 李庆红, 等. 西太平洋一、二岛链间海区声传播的季节因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(29): 20-29. [CAO Zhenqing, ZHANG Yonggang, LI Qinghong, et al. Analysis of seasonal factors to acoustic propagation between the areas of first and second island chains in the Western Pacific Ocean [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(29): 20-29.]
- [6] 程琛, 张旭, 史峰. 西太平洋夏季三类声速环境下的会聚区特性比较[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(1): 56-62. [CHENG Chen, ZHANG Xu, SHI Feng. Comparison of convergence zone features under three different hydrological environment in the west Pacific Ocean in summer [J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(1): 56-62.]
- [7] 王彦磊, 高建华, 李杰, 等. 西北太平洋水声环境区划及声传播特征[J]. *海洋通报*, 2013, 32(1): 85-91. [WANG Yanlei, GAO Jianhua, LI Jie, et al. Zoning and propagation loss characteristics of underwater acoustic environment in the Northwest Pacific Ocean [J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(1): 85-91.]
- [8] Bingham F M, Suga T. Distributions of mixed layer properties in North Pacific water mass formation areas: comparison of Argo floats and world Ocean Atlas 2001 [J]. *Ocean science*, 2006, 2(1): 61-70.
- [9] Munk W H, Forbes A M G. Global ocean warming: an acoustic measure [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(11): 1765-1778.
- [10] 吴时国, 范建柯, 董冬冬. 论菲律宾海板块大地构造分区[J]. *地质科学*, 2013, 48(3): 677-692. [WU Shiguo, FAN Jianke, DONG Dongdong. Discussion on the tectonic division of the Philippine Sea Plate [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(3): 677-692.]
- [11] Barth A P, Tani K, Meffre S, et al. Generation of Silicic Melts in the Early Izu-Bonin Arc Recorded by Detrital Zircons in Proximal Arc Volcaniclastic Rocks From the Philippine Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18: 3576-3591.
- [12] Ishizuka O, Taylor R N, Yuasa M, et al. Making and breaking an island arc: A new perspective from the Oligocene Kyushu-Palau arc, Philippine Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 12: 1-40.
- [13] 殷征欣, 李正元, 沈泽中, 等. 西太平洋帕里西维拉海盆不对称性发育特征及其成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(1): 218-229. [YIN Zhengxin, LI Zhengyuan, SHEN Zezhong, et al. Asymmetric Geological Developments and Their Geneses of the Parece Vela Basin in Western Pacific Ocean [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2019, 49(1): 218-229.]
- [14] 许淑梅, 张晓东, 翟世奎. 四国海盆起源与沉积环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 119-123. [XU Shumei, ZHANG Xiaodong, ZHAI Shikui. The Origin and Sedimentary Environment Evolution of the Shikoku Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 119-123.]
- [15] 南明星, 段睿. 基于Argo数据的北太平洋声速剖面研究[J]. *电声技术*, 2004, 24(2): 119-123. [NAN Mingxing, DUAN Rui. Research on the Sound Speed Profile in the North Pacific Ocean Using the Argo Data [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 119-123.]
- [16] 李兆钦, 刘增宏, 邢小盟. 全球海洋Argo散点资料集(V3.0)(1997—2019)用户手册. [LI Zhaoqin, LIU Zenghong, XING Xiaogang. User Manual for Global Argo Observational data set (V3.0) (1997-2019).]
- [17] Wilson W D. Extrapolation of the equation of the speed of sound in sea water [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34(6): 866-866.
- [18] 魏宗坤. 高精度声速剖面测量系统研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2019. [WEI Zongkun. The Research on High Precision Sound Velocity Profile Measurement System[D]. Heilongjiang: Harbin Engineering University, 2019.]
- [19] 陈希, 李妍, 李振锋, 等. 一种基于声信号的海洋温跃层特征参数寻优反演方法: CN201910684576.7[P]. 2019-11-01. [CHEN Xi, LI Yan, LI Zhenfeng, et al. An inversion method of ocean thermocline characteristic parameter optimization based on acoustic signals: CN201910684576.7[P]. 2019-11-01.]
- [20] Saunders P M. Practical conversion of pressure to depth [J]. *Journal of physical oceanography*, 1981, 11: 573-574.
- [21] 康霖, 王凡, 陈永利. 北太平洋低纬度西边界流(NMK)的时空特征[J]. *海洋预报*, 2011, 28(3): 32-39. [KANG Lin, WANG Fan, CHEN Yongli. Characteristics of temporal and spatial distribution of North Pacific low-latitude Western Boundary Currents [J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(3): 32-39.]
- [22] 杨蓓蓓, 林霄沛. 棉兰老流与棉兰老潜流季节内变化研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(6): 21-28. [YANG Beibei, Lin Xiaopei. Intraseasonal variability of the Mindanao current and the Mindanao undercurrent [J]. *Periodical of ocean university of China*, 2016, 46(6): 21-28.]
- [23] 韩复兴, 孙建国, 王坤. 深海声道对波场传播的影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(3): 444-450, 467. [HAN Fuxing, SUN Jianguo, WANG Kun. Deep Sea Channel Influence on Wave Field Energy Propagation [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(3): 444-450, 467.]
- [24] 胡治国. 深海复杂地形环境下声传播规律及其空间相关性研究[D]. 中国科学院大学, 2018. [HU Zhiguo. Study on The Law of Sound Propagation and Its Spatial Correlation Characteristics in The Deep-sea Complex Terrain Environment[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]