

西太平洋夏季三类声速环境下的 会聚区特性比较*

程 琛, 张 旭, 史 峰

(中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘 要:利用 Argo 剖面数据和水声学数值模型, 分析了西太平洋夏季在热带海区(I型)、亚热带南部海区(II型)和亚热带北部海区(III型)三类典型声速环境下的会聚区特性。声场计算结果表明, 声速环境的区域性差异及声源深度的变化对会聚区声场特性有明显影响。当声源深度为 20 m 时, 热带海区会聚区距离较远, 第一会聚区约为 65 km, 超出亚热带海区约 5 km; 当声源深度为 200 m 时, 亚热带北部海区会聚区距离较远, 第一会聚区约为 60 km, 亚热带南部海区、热带海区依次递减约 5 km。I型和 III型剖面在特定的声源深度条件下出现波导型声场, 当声源位于表层时热带海区产生表面波导, 当声源位于次表层时亚热带北部海区产生次表层波导, 对于 1 kHz 的声波, 波导深度范围内的传播损失比波导深度以外高出 10~20 dB。

关键词:西太平洋; 声速剖面; 会聚区; 声场

中图分类号:P733.21

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2015)01-0056-07

目前, 关于西太平洋的声速环境特性已有大量研究, 关于其混合层^[1-3]、温跃层^[4]和深海声道^[5-6]等参数的气候态分布特征已形成了较清晰的认识。在此基础上, 张旭等^[7]应用 Argo 资料分析了西太平洋冬季和夏季声速剖面整体结构的差异性, 并得出了声速剖面的主要类型特征。由于声波在海洋中的传播特性与所经历的海环境条件密切相关, 西太平洋的声速环境的区域性和季节性差异必然会引起声传播方式的变化。近年来, 一些研究表明, 声速剖面的结构变化能够使会聚区出现明显的偏移^[8-10], 当一些特殊海洋现象存在时还会使会聚区声场产生复杂的变化^[11-12]。然而, 目前对于西太平洋声场环境差异性的认识仍不充分, 具有不同声速结构的海区会使会聚区样式和会聚区距离发生的变化方式和变化程度还没有确定性的结论。针对这个问题, 本文应用 Argo 资料给出了西太平洋夏季三类典型声速剖面, 应用水声学数值方法讨论了这些环境差异对会聚区声场产生的影响。

1 资料与方法

1.1 数据来源及典型海区选取

海区的声速剖面结构取决于水文环境, 本文中采用美国国家海洋学数据中心(NODC)发布的 Argo 剖面数据^[13], 剖面测量范围一般为 0~2 000 m, 采样数据主要包括水温、盐度和压力, 典型空间分辨率约为 3°×3°, 时间分辨率约为 10 d^[14]。根据张旭等^[7]得出的西太平洋典型声速剖面的分布特征, 选取 3 个 5°×5°的深海区域作为西太平洋夏季三类声速剖面主要类型的代表性区域, 经纬度范围分别为(140°~145°E, 5°~10°N), (130°~135°E, 18°~23°N), (142°~147°E, 30°~35°N), 3 个区域的平均水深分别为 5 740, 5 708 和 5 956 m(根据 ETOPO1 数据计算)。取 8 月作为夏季的代表月份, 数据选取的时间范围为 2006—2012 年, 3

* 收稿日期: 2014-08-13

作者简介: 程 琛(1986-), 女, 安徽巢湖人, 助理工程师, 主要从事水下环境测量技术方面研究。

个区域水温、盐度剖面数据分别为 136 组、228 组和 301 组。图 1 显示了研究海区的位置及数据分布情况,图中矩形方框为本文所选海区,方框中的点表示观测剖面的位置。

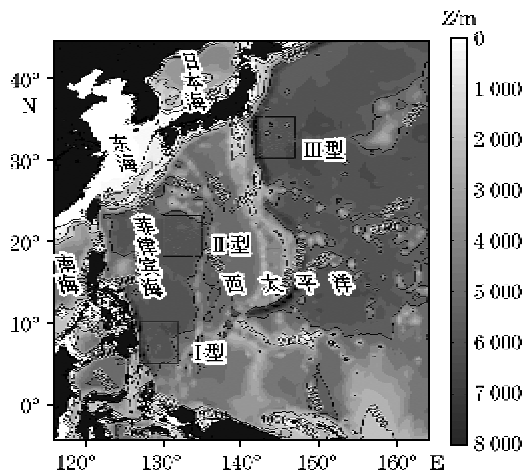


图 1 区域选取及数据分布

Fig. 1 Region selection and data spatial distribution

由 Argo 数据给出的 3 类剖面的平均声速结构见图 2, 本文将其分别定义为热带型(I 型)、亚热带南部型(II 型)和亚热带北部型(III 型)。由图可见, 3 类剖面在 1 000 m 以浅的上层海洋中结构差异明显, I 型剖面主跃层浅而薄, 且跃变较强; II 型剖面的主跃层深而厚, 跃变相对较弱; III 型剖面跃层分为上、下两个部分, 近表层跃层较强, 中层跃层较弱, 其间由一个弱正梯度层相分隔。

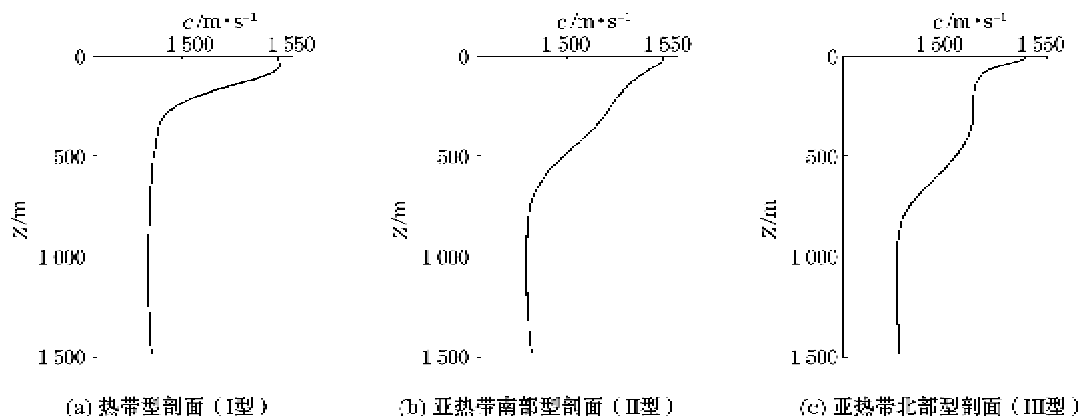


图 2 3 个典型海区的声速剖面比较

Fig. 2 Comparison of sound speed profile in three typical areas

1.2 声速剖面扩充方法

Argo 剖面数据的取样深度约为 2 000 m, 因此无法提供声速剖面的深海部分, 从而不能直接用于深海声传播的计算。针对这个问题, 采用 WOA09 数据集对 Argo 剖面最大采样深度以下的温度、盐度参数进行补充。WOA09 数据集由美国国家海洋学数据中心(NODC)发布, 是根据 1900—2009 年全球范围的历史观测数据经 Levitus 客观分析方法得到的格点数据集, 水平网格为 $1^\circ \times 1^\circ$, 深度范围为 0~5 500 m, 垂直标准层为 33 层^[15-16]。

首先, 在 WOA09 数据集中选取与 Argo 剖面观测时间及经、纬度位置最为接近的气候态剖面, 并根据

Mackenzie 声速经验公式^[17]计算声速剖面。然后,采用 10 m 深度间隔对垂直分层进行加密,对 Argo 观测剖面 and 参考声速剖面分别进行插值处理。考虑到深海声道轴深度以下水文环境趋于稳定,可以将深海声道轴深度到 Argo 剖面最大采样深度之间的深度范围设为过渡区域,在过渡区域中的剖面由 Argo 数据和 WOA09 数据融合得到,在过渡区域之下的剖面由 WOA09 数据提供,表达式为:

$$c(z) = \begin{cases} c_A(z) & (z < Z_U) \\ k_A(z) \cdot c_A(z) + k_w(z) \cdot c_w(z) & (Z_U \leq z \leq Z_D) \\ c_w(z) & (z > Z_D) \end{cases} \quad (1)$$

$$k_A(z) = \frac{Z_D - z}{Z_D - Z_U} \quad (2)$$

$$k_w(z) = \frac{z - Z_U}{Z_D - Z_U} \quad (3)$$

式中, $c(z)$ 为融合后的声速剖面; z 为水深; $c_A(z)$ 为 Argo 数据得到的声速剖面; $c_w(z)$ 为 WOA09 数据得到的声速剖面; $k_A(z)$ 和 $k_w(z)$ 为剖面融合的比例系数; Z_U 为深海声道轴深度,为剖面中声速最小值对应深度,一般为 900~1 100 m; Z_D 为 Argo 剖面的最大采样深度,约为 2 000 m。根据式(1)~(3),两剖面交叠部分之上水层由 Argo 数据提供,之下水层由 WOA09 数据提供;在交叠部分的深度范围由两类数据共同提供。其中越靠近顶部,Argo 数据的权重越大;而越靠近底部,WOA09 数据的权重越大。

1.3 声场计算方法

采用 BELLHOP 高斯束射线模型^[18]计算声场。与简正波模型(如 Kraken)或抛物方程模型(如 MMPE)相比,射线模型的主要优势是能够清晰、准确地描述声能在水平非均匀环境传播过程中的变化方式,因此更适用于本文所选取的西北太平洋深海海区。传统射线模型通常受到高频近似的限制,不能有效计算焦散线附近的传播损失。Porter 等^[18]通过引入地声学中的高斯近似方法提出了 BELLHOP 模型,较好地解决了焦散线对声场计算的影响,在处理声能焦散和完全影区等问题方面相对于传统模型有明显的改进,并且能够适用于复杂三维环境下的声场计算^[18-20]。声场计算过程中的参数设置如下:垂直方向和水平方向的分辨率分别取 5 m 和 0.2 km,声波频率取 1 kHz;掠射角范围取 $-90^\circ \sim 90^\circ$,掠射角间隔设为 0.5° 。根据 Etter^[21]的研究,深海会聚区主要由小掠射角的能量构成,在深海等温层中声速达到近表层声速极大值时的深度称为共轭深度,超出共轭深度的深海水层对会聚区贡献很小。文中所选的 3 类剖面共轭深度均小于 5 500 m,为了便于比较 3 类声场,在计算过程中将底边界均设为 5 500 m。

2 结果分析

由 BELLHOP 模型计算得到的 3 类声速剖面的会聚区声场比较如图 3~图 5 所示。声源深度(SD)设为 20 和 200 m,接收深度(RD)与声源深度相同,深海部分的声速剖面根据 WOA09 数据由式(1)~(3)计算得到。比较图 3~图 5 可以看出,对于 I 型剖面,近表层有厚度约 50 m 的混合层,其下为较强的主跃层,约在 300 m 之下跃变明显减弱。因此,当声源深度为 20 m 时,声场中出现表面声道与会聚区声道并存的现象,近表层能量场较强;当声源深度为 200 m 时,声源已在混合层之下,远场的能量主要由会聚区提供。对于 II 型剖面,上层海洋为单一的负梯度结构,无论声源深度为 20 m 还是 200 m,声场均为典型的会聚区声场,但会聚区的距离随声源位置的不同而呈现出显著变化。对于 III 型剖面,声速跃层出现了间断,当声源深度为 20 m 时,会聚区声场并未受到明显影响,而当声源深度为 200 m 时,声波在次表层出现了类似于 SOFAR 声道的波导现象,能量集中在声源深度附近,同时使会聚区中的传播损失有所增加。

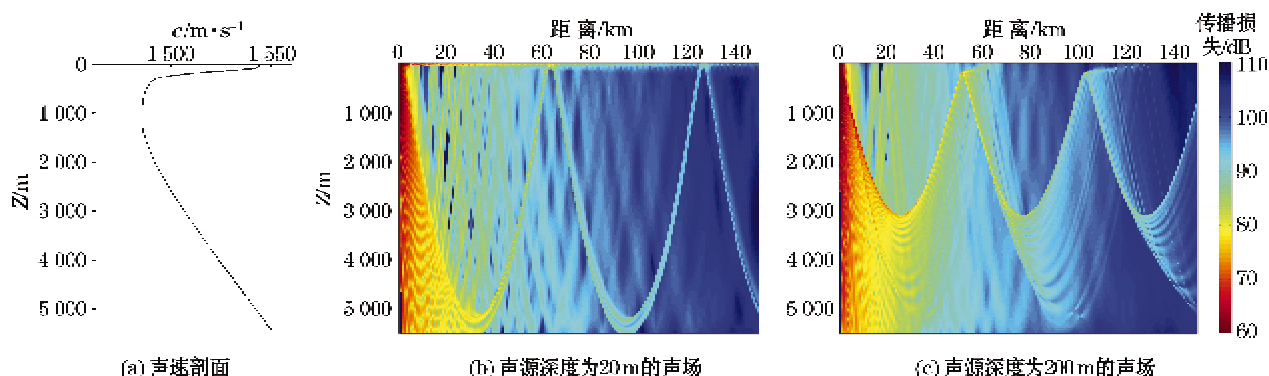


图 3 I 型剖面环境下的典型声场

Fig. 3 Sound field distribution of type I environment

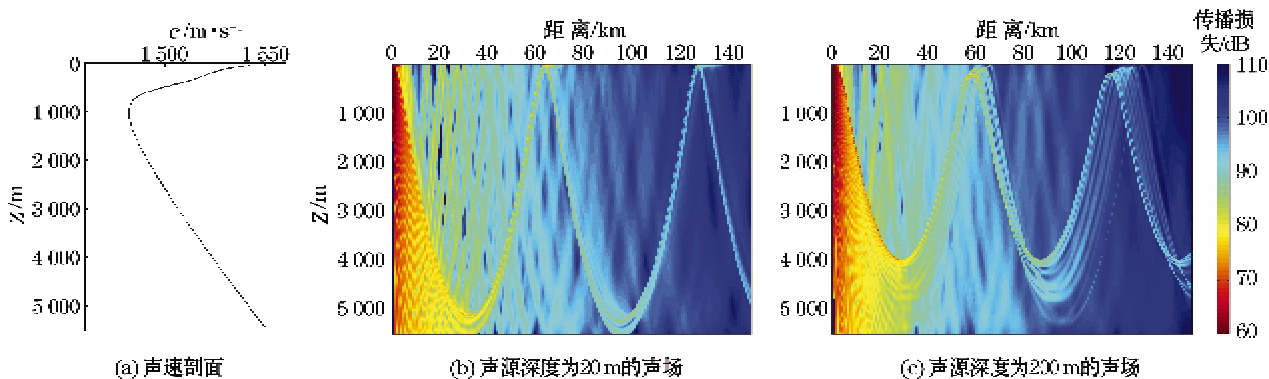


图 4 II 型剖面环境下的典型声场

Fig. 4 Sound field distribution of type II environment

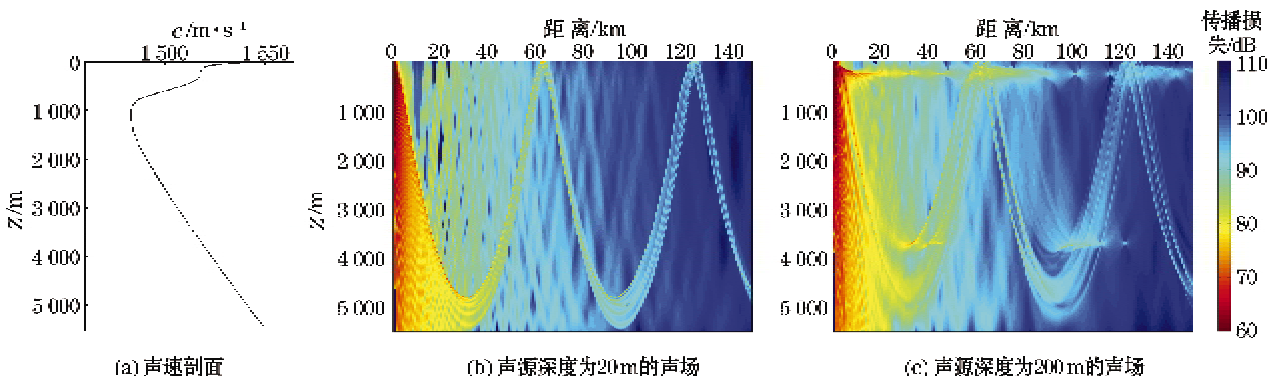


图 5 III 型剖面环境下的典型声场

Fig. 5 Sound field distribution of type III environment

3 类剖面环境下不同声源-接收深度条件的会聚区位置比较见表 1。会聚区位置以传播损失曲线中增益极大值所在位置计算。由表可见,当声源深度和接收深度都在近表层(20 m)时,3 类剖面第一会聚区距离的变化范围为 60~70 km。I 型剖面的会聚区距离最远,II 型次之,III 型剖面的会聚区距离最近,其中 II 型和 III 型剖面的会聚区距离相差约 1 km,而 I 型和 II 型剖面的会聚区相差约 3.5 km。这是因为 I 型剖面的主跃层明显强于 II 型和 III 型剖面,声线在较强的跃层影响上反转时获得了更大的水平距离,这与 Bongiovanini 等^[8]和张旭等^[9-10]的研究结果相一致。

当声源深度和接收深度都在次表层(200 m)时,会聚区距离的变化与声源位于近表层的情况差异较大,3 类

剖面第一会聚区距离的变化范围为 50~60 km。III 型剖面的会聚区最远,II 型次之,I 型会聚的距离最近,每两类剖面的会聚区距离相差 4~6 km。其中,I 型剖面的会聚区与声源位于近表层时出现强烈的反差,这是因为在次表层其主跃层已相当弱,所以在这个深度上会聚区在水平方向获得的反转距离并未受到主跃层的作用,导致会聚区距离迅速减小。相比之下,II 型剖面主跃层较厚,在次表层仍然受到主跃层的影响,因此未出现异常变化。而对于 III 型剖面,在次表层以下存在一个厚度不大但位置较深的主跃层,其强度明显大于 II 型剖面,因此在次表层之下 III 型剖面的会聚区声场中声波经历的跃变最强,其会聚区距离也达到最远。

表 1 3 类声速环境下不同声源-接收深度条件的会聚区位置比较(km)

Table 1 A comparison of convergence zone position between three kinds of sound speed environment in different source-receiver depth(km)

剖面类型	SD=20 m, RD=20 m		SD=200 m, RD=200 m	
	第一会聚区	第二会聚区	第一会聚区	第二会聚区
I 型	65.9	129.6	51.3	102.6
II 型	62.5	125.3	57.8	115.5
III 型	61.6	123.4	61.7	123.1

3 讨论

I 型和 II 型声速剖面为大洋中的常规结构,其主要差异仅在于跃层的位置、厚度和强度不同,而 III 型剖面则表现出了一种双跃层的特殊结构,这些差异直接引起了声场样式的复杂变化。

3 类典型剖面环境下的声传播损失曲线比较如图 6 所示。由图可见,当声源深度为 20 m 时,在会聚区以外的区域,I 型剖面形成表面声道中的传播损失明显小于 II 型和 III 型剖面,传播损失相差 10~15 dB;而当声源深度为 200 m 时,I 型和 II 型剖面均为常规会聚区的声场样式,而 III 型剖面中声源位于声速极小值附近,在其上的负梯度温跃层和其下的正梯度模态水层的约束下,形成了明显的水下波导式传播,样式与深海 SOFAR 声道类似,在会聚区以外的区域其传播损失比 I 型和 II 型剖面减小约 10~20 dB。

需要注意的是,这种次表层波导与表面波导的形成机制并不相同。在 I 型剖面产生的表面声道声场中,声波在混合层的正梯度声速结构影响下,以海面反射的形式传播;而在 III 型剖面的次表层声道声场中,声波在负梯度与正梯度层的共同约束下以完整的水下波导形式传播。次表层声道中的声传播几乎不受海面状况的影响,因此夏季次表层声道的声传播性能比冬季的表面声道更可靠。

对 III 型剖面的形成机制研究目前尚无文献报道,根据其存在区域来看,这种结构类型剖面的形成很有可能与西北太平洋副热带模态水(STMW)的形成及季节性变化有关^[22]。

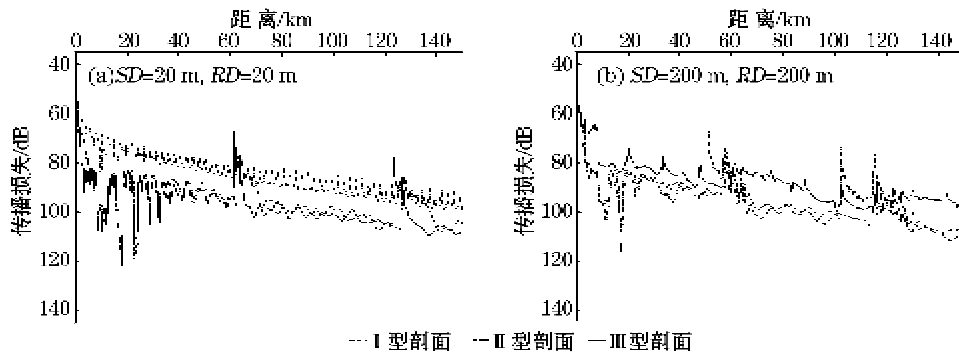


图 6 3 类典型剖面环境下的声传播损失曲线比较

Fig. 6 Comparison of sound transmission loss curves in three typical environments

4 结 论

西太平洋的声速剖面在不同的海区呈现出不同的结构,这种结构的区域性变化对会聚区声场特性有明显影响。通过分析西太平洋夏季 3 类典型剖面环境下的会聚区声场,可以得出以下特征:

1)传播方式和能量分布的差异性。西太平洋夏季的声场不是单一的会聚区模式,在热带海区具备形成表面波导的环境条件,亚热带北部海区具备形成次表层波导的环境条件,声场的具体样式还与声源深度密切相关。对于 1 kHz 的声波,波导深度范围内的传播损失比波导深度以外减小 10~20 dB。

2)会聚区距离的差异性。当声源位于近表层时,西太平洋的第一会聚区范围为 60~70 km,热带海区的会聚区距离最远,随纬度的增加会聚区距离迅速变小,热带海区的会聚区距离比亚热带北部海区超出约 5 km;当声源位于次表层时,第一会聚区范围为 50~60 km,热带海区的会聚区距离最近,随纬度的增加会聚区距离逐渐变大,热带海区的第二会聚区距离比亚热带北部海区约小 10 km。

近年来,随着海洋学数据的不断积累(特别是 Argo 数据),海洋学家对世界大洋海洋现象区域性、季节性变化规律的认识越来越细致。在此过程中,一些学者逐渐发现很多海区的声速剖面结构并不满足传统意义上的“三层结构”类型,致使声传播呈现出不同形式的变异特征。本文是应用 Argo 数据对特殊海洋环境条件下声传播效应研究的一次尝试,海洋学与水声学的交叉研究有利于加深对复杂环境下声传播问题的认识,更深入的工作有待于进一步开展。

参考文献(References):

- [1] SUGA T, IIANAWA K. The mixed layer climatology in the northwestern part of the North Pacific subtropical gyre and the formation area of subtropical mode water[J]. *Journal of Marine Research*, 1990, 48(3): 543-566.
- [2] 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.
- [3] OIINO Y, IWASAKA N, KOBASIII F, et al. Mixed layer depth climatology of the North Pacific based on Argo observations[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(1): 1-16.
- [4] ZHANG X, ZHANG Y G, ZHANG S J, et al. The distribution characteristics and seasonal variabilities of thermocline in the Philippine Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(4): 17-26. 张旭,张永刚,张胜军,等. 菲律宾海温跃层的区域性特征及其季节性变化[J]. *海洋通报*, 2009, 28(4): 17-26.
- [5] MUNK W H, FORBES A M G. Global ocean warming: an acoustic measure[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(11): 1765-1778.
- [6] SUN Q T, ZHANG E F, HAN J. Preliminary analyze for sofar channel of northwestern Pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 17(3): 110-117. 孙琪田,张恩夫,韩军. 西北太平洋深海声道的初步分析[J]. *海洋学报*, 1995, 17(3): 110-117.
- [7] ZHANG X, ZHANG Y G, ZHANG S J, et al. Distribution and seasonal variability of acoustic profile in the Philippine Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(6): 23-34. 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.
- [8] BONGIOVANNI K P, SIEGMANN W L. Convergence zone feature dependence on ocean temperature structure[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 1996, 100(5): 3033-3041.
- [9] ZHANG X, ZHANG Y G. The shift effect of convergence zone caused by varieties of sound speed profile[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(3): 311-317. 张旭,张永刚. 声速垂直结构变化引起的汇聚区偏移[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(3): 311-317.
- [10] ZHANG X, ZHANG Y G, DONG N, et al. The effect of sound velocity spring layer change on acoustic propagation in a convergence zone environment[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(1): 114-121. 张旭,张永刚,董楠,等. 声跃层结构变化对深海汇聚区声传播的影响[J]. *台湾海峡*, 2011, 30(1): 114-121.
- [11] MELBERG L E, ROBINSON A R, BOTSEAS G. Modeling time variability of acoustic propagation through a Gulf Stream meander and eddies[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 1990, 87(3): 1044-1054.
- [12] CARMAN J C, ROBINSON A R. Oceanographic, topographic, and sediment interactions in deep water acoustic propagation. Part II: Gulf Stream simulations[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 1994, 95(3): 1363-1377.

- [13] National Oceanographic Data Center. Operational oceanography group; global argo data repository[EB/OL]. [2013-1-1] http://www.nodc.noaa.gov/argo/basins_data.htm.
- [14] The Argo Science Team. Report of the Argo Science Team 2nd Meeting (AST-2) [R]. Southampton U. K.; Southampton Oceanography Centre, 2000, 1-18.
- [15] LOCARNINI R A, MISHONOV A V, ANTONOV J I, et al. World Ocean Atlas 2009 Volume 1: Temperature[R]. Washington D. C.; U. S. Government Printing Office, 2010;1-40.
- [16] ANTONOV J I, SEIDOV D, BOYER T P, et al. World Ocean Atlas 2009 Volume 2: Salinity[R]. Washington D. C.; U. S. Government Printing Office, 2010;1-40.
- [17] MACKENZIE K V. Nine term equation for sound speed in the oceans[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1981, 70(3): 807-812.
- [18] PORTER M B, BUCHER H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1987, 82(4): 1349-1359.
- [19] BUCKER H P. A simple 3-D Gaussian beam sound propagation model for shallow water[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1994, 95(5): 2437-2440.
- [20] WEINBERG H, KEENAN R E. Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1996, 100(3): 1421-1431.
- [21] ETTER P C. Underwater acoustic modelling and simulation[M]. 3rd ed. London: Spon Press, 2003.
- [22] HANAWA K, TALLEY L D. Mode waters[M]//SIEDLER G, CHURCH J, GOULD J. Ocean circulation and climate. London: Academic Press, 2001: 373-386.

Comparison of Convergence Zone Features Under Three Different Hydrological Environment in the West Pacific Ocean in Summer

CHENG Chen, ZHANG Xu, SHI Feng
(Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: Features of convergence zone (CZ) in the tropical Pacific (type I), south subtropical Pacific (type II) and north subtropical Pacific (type III) in summer are compared by the Argo profiler data and acoustic numerical model. The results show that CZ field can be obviously influenced by the sound speed environment varieties. When the sound source is located 20 m beneath the surface, CZ in tropical area is furthest. The first CZ is about 65 km, which is 5 km further than that in the subtropical area. When a source is located in 200 m depth, CZ in the north subtropical area is furthest. The first CZ position is about 60 km, which is 5 km further than that in north subtropical and tropical areas. Profiles of type I and type III can induce a duct field. Surface duct exists in tropical area when the source is in the surface layer, and the subsurface duct exists in the subtropical area when the source is in the subsurface layer. The sound level in the duct area is 10~20 dB higher than that in the non-duct area (sound frequency 1 kHz).

Key words: Western Pacific; sound speed profile (SSP); convergence zone (CZ); sound field

Received: August 13, 2014