

# 利用 Argo 浮标资料研究西北太平洋三维声速分布特征

闫庆勋<sup>1</sup>, 胡建宇<sup>1, 2</sup>

(1. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 2. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005)

**摘要:** 利用西北太平洋海区 2002~2009 年的 Argo 浮标剖面温度、盐度资料构建成  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  水平分辨率的三维声速网格化资料, 并据此分析该海区声速的空间分布及季节变化特征。研究表明: 该海区 10 m 层等声速线分布的季节变化较为明显, 春、冬季的等声速线几乎与纬线平行, 黑潮流经区域等声速线呈现一定的弯曲。100 m 层等声速线分布的季节变化较小: 北赤道流区, 等声速线从外海向近岸延伸; 吕宋岛东南部沿海, 等声速线向南弯曲; 吕宋岛、台湾岛东部等声速线呈现偏北方向的弯曲; 琉球群岛附近, 等声速线朝北偏东方向弯曲。此外, 研究海区存在深海声道, 声道轴最深的区域主要在吕宋海峡和日本东南部海区, 其中吕宋海峡处的声道轴有显著的季节变化特征。可见, 利用 Argo 浮标资料可以初步得到西北太平洋声速的空间分布及其季节变化特征, 随着 Argo 剖面资料的增多, 对该海区的声速场认识将会愈加清晰。

**关键词:** 西北太平洋; Argo 浮标资料; 声速分布; 声道轴; 季节变化; 西边界流

中图分类号: P733 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)03-0022-08

由于声波在海水中的传播性能较好, 因此, 了解海区内的三维声速分布情况对水下通讯、渔业生产和海洋开发等有着极其重要的作用<sup>[1]</sup>。

1994 年, 孙琪田等<sup>[2]</sup>利用温、盐、声等参数对西北太平洋( $0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ ,  $100^\circ \sim 170^\circ\text{E}$ )的水声环境条件进行划分, 对西北太平洋的深海声道分布有了全貌的认识, 但是  $5^\circ \times 5^\circ$  的分辨率远不能满足需要。国际 Argo 计划从 2000 年底正式实施以来, 为研究大洋海区声场特征提供了大量实测资料, Argo 浮标自动在海上工作, 重复采集海洋 0~2 000 m 层的温、盐、压强剖面数据<sup>[3]</sup>。利用 Argo 浮标资料, 金国栋等<sup>[4]</sup>通过统计的方法研究  $20^\circ \sim 22^\circ\text{N}$ ,  $127^\circ \sim 130^\circ\text{E}$  海区内的声场特征, 但该研究仅关注 Argo 资料分布较为密集的局部海区声速分布的时间变化。可见, 以前关于西北太平洋声速分布的研究尚不多见。

本文利用 Argo 浮标剖面资料构建西北太平洋海区高分辨率的三维声速场, 分析该海区声速的空间分布以及季节变化特征。

## 1 资料和方法

本文所采用的 Argo 浮标资料全部来自中国 Argo 实时资料中心, 下载地址为 <ftp://ftp.argo.org>。

cn/pub/ARGO/global, 研究区域选定在  $10^\circ \sim 34^\circ\text{N}$ ,  $120^\circ \sim 140^\circ\text{E}$ (图 1), 浮标剖面的时间范围为 2002 年 3 月~2009 年 2 月。本研究季节划分方式: 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12~次年 2 月为冬季。

利用下载到的数据, 通过观察各个剖面的温、盐分布情况, 并结合 Argo 资料处理的相关文献[5-7]进行质量控制。符合质量控制标准的剖面时空分布相对均匀(图 2), 共计 14 795 个, 具体春季 3 242 个, 夏季 3 695 个, 秋季 3 875 个, 冬季为 3 983 个。首先将得到的剖面资料线性插值到标准层, 采用的标准层具体为 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200, 1 300, 1 400, 1 500, 1 750, 2 000 m。

距离反比加权方法是较为常用的空间内插方法之一, 该方法考虑采样点与插值点之间的距离不同

收稿日期: 2011-10-11; 修回日期: 2012-12-31

基金项目: 国家“973 计划”项目(2012CB417402); 国家自然科学基金项目(41121091); 厦门大学“大学生创新性实验计划”项目

作者简介: 闫庆勋(1987-), 男, 河北大城人, 在读硕士生, 主要从事物理海洋学方向研究。E-mail: [qingxunyan@gmail.com](mailto:qingxunyan@gmail.com); 胡建宇, 通信作者, 教授, E-mail: [hujy@xmu.edu.cn](mailto:hujy@xmu.edu.cn)

而对插值点变量的贡献大小不同<sup>[9]</sup>, 因而能够较为准确地反映海洋温度、盐度结构。故本文采用该插值方法构建各个标准层的网格化温度、盐度数据, 所采用的插值公式如下:

$$y(m,n) = \frac{\sum w_r Y(r)}{\sum w_r}$$

其中,  $w_r = \exp(-\frac{d^2}{L^2})$ ,  $y(m,n)$ 为插值点的数值,  $Y(r)$ 为已知点的数值,  $d$ 为已知点到插值点的距离,  $L$ 为参数, 取 $L=1$ , 即插值精度为 $1^\circ$ 。利用该公式将温度、盐度变量插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的网格上。

声速计算采用《海洋调查规范(调查资料处理)》<sup>[10]</sup>提供的经验公式:

$C(S,t,p) = C_w(t,p) + A(t,p)S + B(t,p)S^{3/2} + D(t,p)S^2$   
 其中  $C$  代表声速(m/s),  $S$  为实用盐度,  $t$  为海水温度( $^\circ\text{C}$ ),  $p$  为海水压强(MPa),  $C_w(t,p)$ 、 $A(t,p)$ 、 $B(t,p)$ 、 $D(t,p)$ 均为关于 $t$ 和 $p$ 的参数, 详细表达式参考文献[10]。

这样, 利用三维网格化温、盐数据, 以及上述声速经验公式, 计算得到一套季节平均的三维网格化

声速资料。

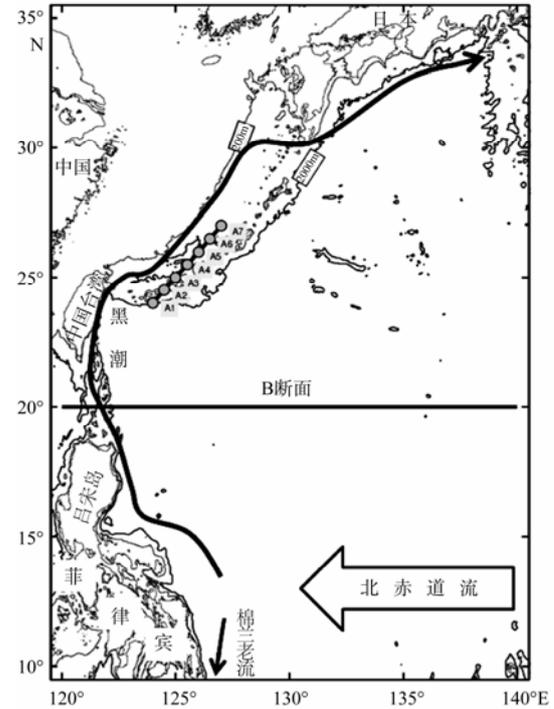


图1 西北太平洋地形及主要流系示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Topography and major currents in the Northwestern Pacific Ocean

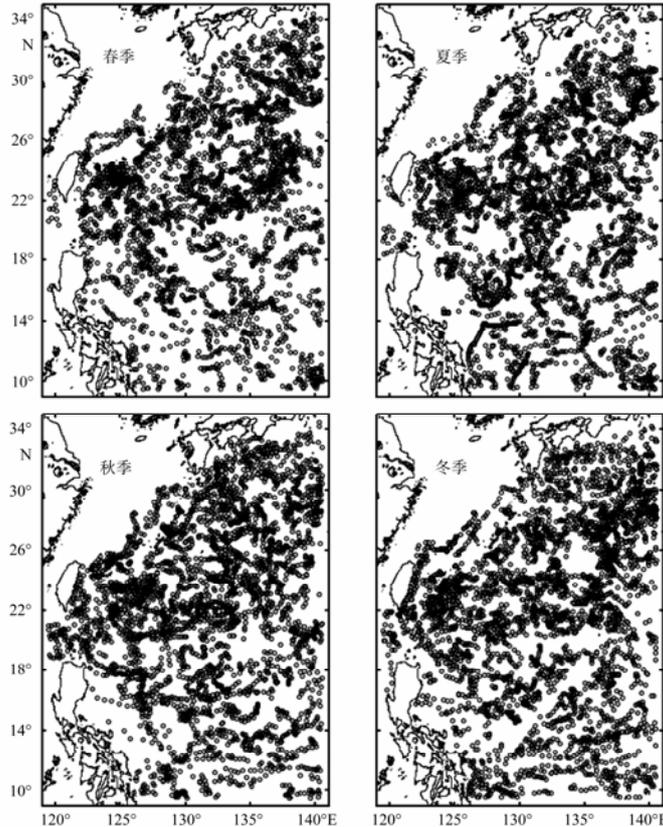


图2 Argo 浮标剖面的时空分布

Fig. 2 Spatial and temporal distributions of the Argo float profiles

## 2 研究结果

### 2.1 水平分布

研究区域的水深大部分超过 2 000 m, 各水层的声速分布具有如下趋势: 上层声速大, 随着深度的增加, 声速逐渐减小; 在深海区到达一定深度, 声速达到极小值; 然后随着深度的继续增加, 声速反而增加; 因而该区域呈现明显的深海声道

特征。

本文选取受太阳辐射影响较为明显的 10 m 层和北赤道流、西边界流影响明显的 100 m 层作为代表, 对声速的水平分布特征进行分析。

图 3 给出了各季节 10 m 层声速的水平分布。受太阳辐射的影响, 研究海区南部上层水温高于北部, 由于温度对声速的影响最大<sup>[11]</sup>, 因而该层的声速在四季均呈现南高北低的特征。

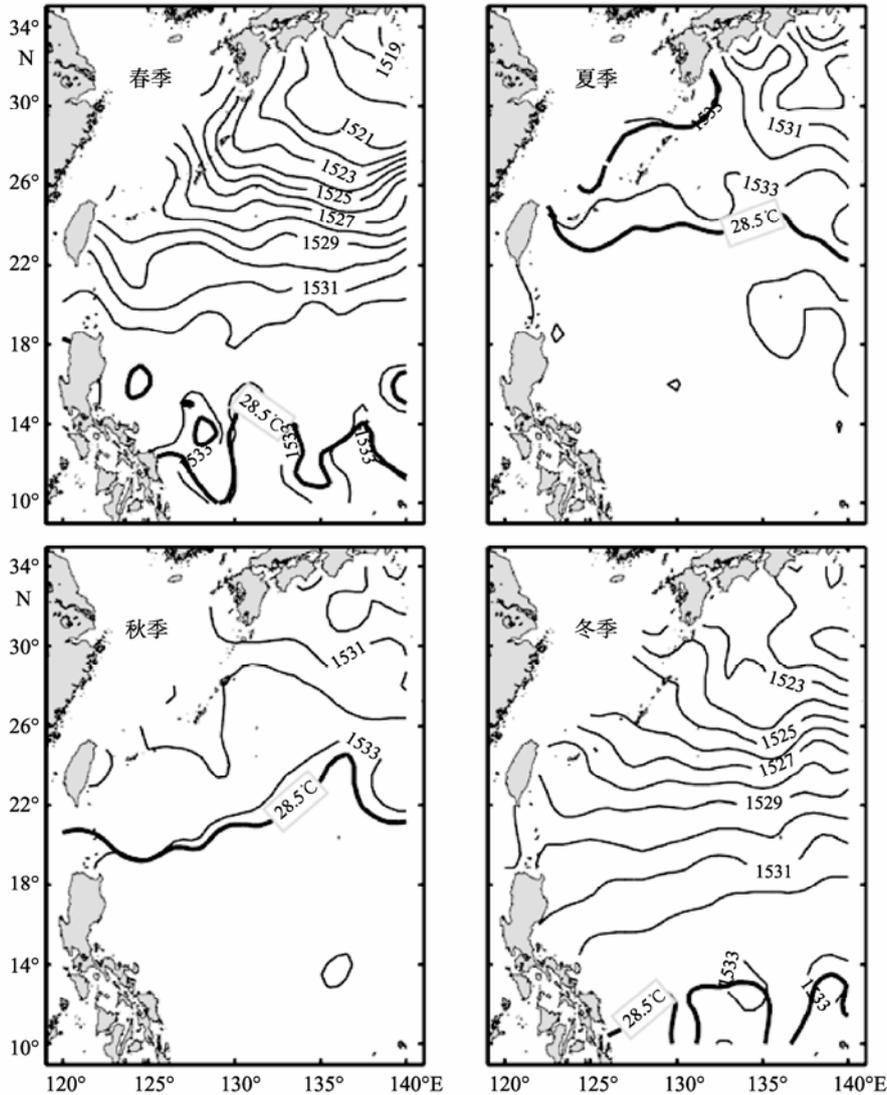


图 3 研究海区 10 m 层声速(m/s)的季节变化特征

Fig. 3 Seasonal variation of sound speed (m/s) at 10 m layer of the investigated area

春季, 日本南部海区 1 521 ~ 1 522 m/s 的等声速线从西向东先呈南北走向, 然后呈西北-东南走向, 琉球群岛以东海域的等声速线基本与纬线平行, 且等声速线较为密集, 声速的最大经向梯度达  $3.2 \times 10^{-5}$

$s^{-1}$ , 出现在(140°E, 27°N)附近, 这与该海区存在的温度梯度相对应; 但研究海区南部的 1 533 m/s 等声速线沿纬线方向波动较大, 该区域 28.5°C 等温度线(图 3 中黑色粗线)也有类似特征。该区域的地转流场(参

考零面设为 1 500 m)表明(127°E, 13°N)附近存在一个气旋型涡; 130°E 以东, 北赤道流蜿蜒向西运动, 因此推测流场结构决定了该海区 28.5°C 等温线的结构, 进而决定了 1 533 m/s 等声速线的形态, 其他季节也存在类似特征。

夏季, 该区域等声速线分布较稀疏, 24°N 以南的大部分区域声速变化小于 1 m/s(介于 1 533 ~ 1 534 m/s 之间); 24°N 以北, 等声速线分布相对密集; 声速的经向梯度基本呈现北高南低的特征, 最大经向梯度出现在(138°E, 33°N)附近, 达  $1.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 日本南部 1 530 ~ 1 532 m/s 等声速线大致呈现西北-东南走向, 但波动较大, 这与该区域的等温线分布较为接近。

秋季的声速分布与夏季相似, 大致以 22°N 为界, 南部声速大致在 1 533 ~ 1 534 m/s 之间, 变化较小, 北部声速的经向梯度较夏季同样海区偏小。

冬季, 日本南部的 1 522 ~ 1 524 m/s 等值线基本先呈南北走向, 再折向东南; 在 15°N ~ 29°N 之间, 等声速线与纬线基本平行; 15°N 以南, 声速变化不大, 在 132°E 以东出现两个大于 1 533 m/s 的声速极大值核心区; 从南向北, 声速的经向梯度逐渐增大, 在(140°E, 27°N)附近, 经向梯度达  $1.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 吕宋岛东北部, 1 530 m/s 等声速线有北偏西方向的弯曲, 而在台湾岛东部和琉球群岛附近, 等声速线有北偏东方向弯曲, 这与春季特征基本相同, 不同之处在于, 春季的弯曲位置基本位于琉球群岛西部, 而冬季在琉球群岛的中、南部, 弯曲位于群岛西侧, 北部弯曲则位于群岛东侧。

从以上分析容易看出, 研究海区 10 m 层的等声速线分布随季节变化明显; 春、冬季节, 等声速线在黑潮流经区域有较为明显的沿流向的弯曲, 但弯曲发生的位置略微不同, 主要表现在琉球群岛的北部区域; 另外, 春、冬季节较夏、秋季节同一位置声速值偏小, 但声速经向梯度偏大, 最大经向梯度位置明显不同, 且南、北部的声速差异也偏大, 这些特征与对应的温度分布(图未给出)基本一致。陈秋颖等<sup>[12]</sup>利用 SODA 资料描述了该海区表层类似的温度分布特征, 据此推断由于夏季太阳直射位置位于北半球, 从而导致该海区水温加热相对均匀, 又由于海水对太阳辐射的响应有一定滞后, 因而秋季的声速分布与夏季相似, 但声速值偏小; 春、冬季, 反之。

另外, 如图 3 所示, 春、夏、秋季, 1 533 m/s 等声速线与 28.5°C 等温线位置基本相同, 而 28.5°C 等

温线常作为定义西太暖池的标准<sup>[13]</sup>, 因此研究海区 10 m 层 1 533 m/s 等值线可近似认为是西太暖池在该海区相应季节的北界, 其变化可近似表征西太暖池的南移与北扩。由此可知, 夏、秋季节西太暖池北扩明显, 可到达 22°N ~ 26°N, 而冬、春季节, 西太暖池限制在 15°N 以南。

各个季节 100 m 层的声速分布如图 4。从整体上看, 各个季节的等声速线分布趋势基本一致, 主要可分为三个区域。北赤道流区(基本在 12°N ~ 15°N 之间), 春、夏季 1 533 m/s 等声速线可以从东部一直延伸到西边界, 到达近岸后, 分别沿岸向偏北、偏南方向弯曲; 秋、冬季, 1 533 m/s 等声速线仅延伸到 130°E 附近。西边界流区(主要指吕宋岛、台湾岛以东的近岸区, 以及琉球群岛附近区域), 各季节特征基本一致: 吕宋岛东南沿海, 等声速线向南弯曲; 吕宋岛东部, 等声速线呈现北偏西方向的弯曲; 台湾岛东部, 等声速线有偏北方向的弯曲; 琉球群岛附近有北偏东方向的弯曲, 而弯曲的位置随季节而变化, 这可能与黑潮流轴的季节性摆动有关。而研究海区的其他区域, 春、冬季等声速线几乎与纬线平行, 而夏、秋季节等声速线沿纬线变化较大。总而言之, 100 m 层的声速分布受北赤道流、西边界流(主要是黑潮、棉兰老流)影响较为明显, 而季节变化相对 10 m 层较小。

研究区域大部分呈现深海声道特征, 仅在靠近东海陆架的区域受水深影响, 最小声速值基本位于近海底处。研究海区的声道轴(即声速最小值的连线)基本在 900 ~ 1 400 m 之间, 大致呈现南部较浅, 往北方向越来越深, 而东海陆架附近声道轴较浅(图 5 中的灰色区域, 声道轴深度介于 200 ~ 900 m 之间), 最浅处仅有 200 m。张旭等<sup>[14]</sup>利用 Argo 资料分析了菲律宾海区声道轴分布的季节特征, 指出该海区深海声道轴深度介于 900 ~ 1 200 m 之间, 与本文结果基本一致。由图 5 可见, 声道轴最深的位置主要分布在日本东南部海区和吕宋岛周围海域。春季, 吕宋海峡北部声道轴在 1 300 ~ 1 400 m 之间, 南部在 1 200 ~ 1 300 m 之间; 日本以南大部分海区声道轴在 1 100 ~ 1 200 m 之间。夏季, 吕宋海峡处的声道轴均在 1 300 ~ 1 400 m 之间; 日本南部深海声道轴最深达 1 200 ~ 1 300 m 之间。秋季, 吕宋海峡处的声道轴相比夏季变浅, 主要在 1 100 ~ 1 200 m 之间, 仅在南端小部分区域及吕宋岛东部近海达到 1 300 ~ 1 400 m; 日本南部海区声道轴分布与夏季相近。冬

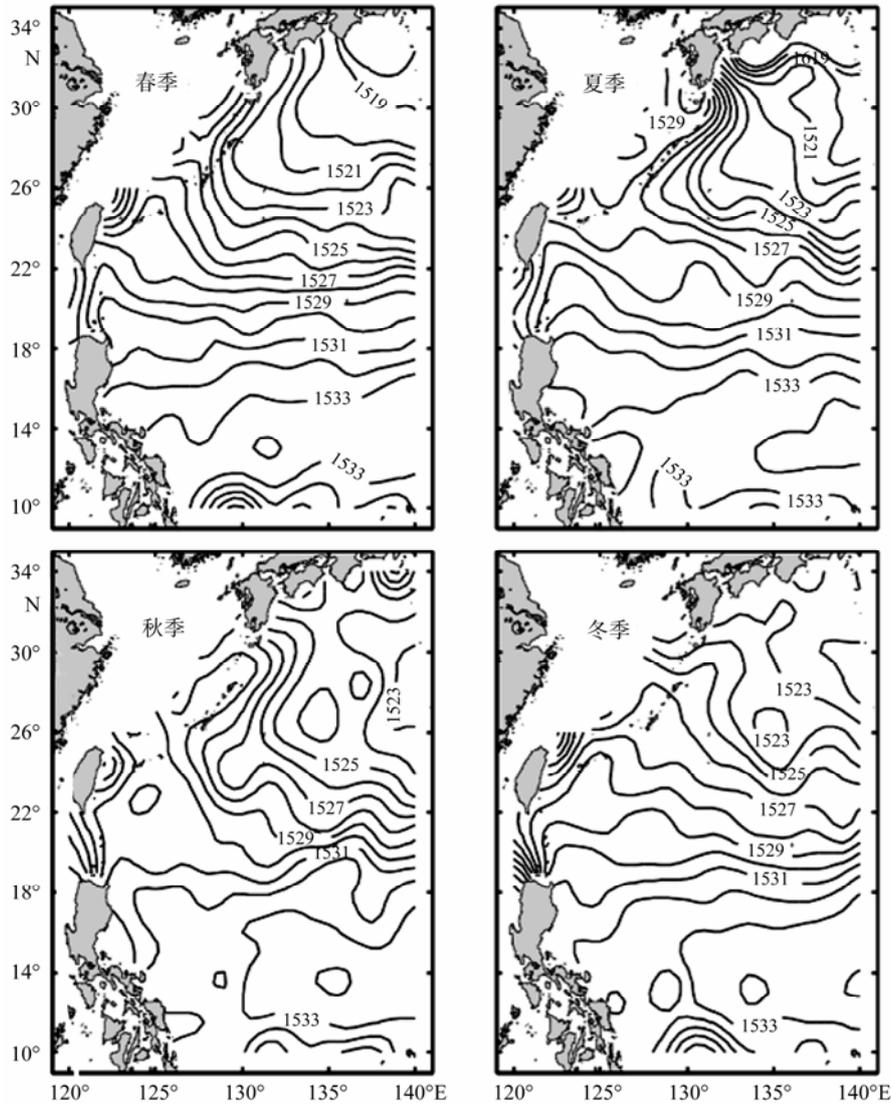


图4 研究海区 100 m 层声速(m/s)分布的季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variation of sound speed (m/s) at 100 m layer of the investigated area

季, 吕宋海峡处的深海声道轴分布与秋季相似, 日本南部声道轴在 1 200 m 以上的区域面积远小于夏、秋季。

## 2.2 断面分布

吕宋海峡是进出南海的重要通道之一, 冲绳海槽是太平洋西边界流黑潮的流经之地, 基于此, 选取跨越冲绳海槽的一个断面(A 断面, 如图 1)和 20°N 断面(B 断面, 如图 1)进行分析。

### 2.2.1 冲绳海槽断面

冲绳海槽断面的声速分布如图 6 所示, 该断面等声速线分布较为平滑, 呈现深海声道特征。夏、秋季, 声道轴稳定在 1 000 m; 春季 A4 ~ A7 站之间声

道轴位于 1 000 m, A4 到 A3 站随地形爬升声道轴变浅至 900 m; 冬季声道轴从 A4 站到 A7 站呈现变浅趋势, 其原因有待于今后的进一步分析。代民果等<sup>[15]</sup>利用 GDEM(Generalized Digital Environmental Model) 数据分析了冲绳海槽一个断面的声速分布情况, 本文所选取的断面与该断面位置相近, 通过比较, 声速分布情况基本相似, 仅在春季和夏季上层, 本文的最大声速值偏低(代民果等<sup>[15]</sup>的结果: 春、夏季上层最大声速分别在 1 537 m/s 左右和 1 540 m/s 左右, 本文结果: 春、夏季最大声速均不超过 1 535 m/s)。出现该种差异可能是由于代民果等<sup>[15]</sup>利用某一个月的结果代替季节的平均。

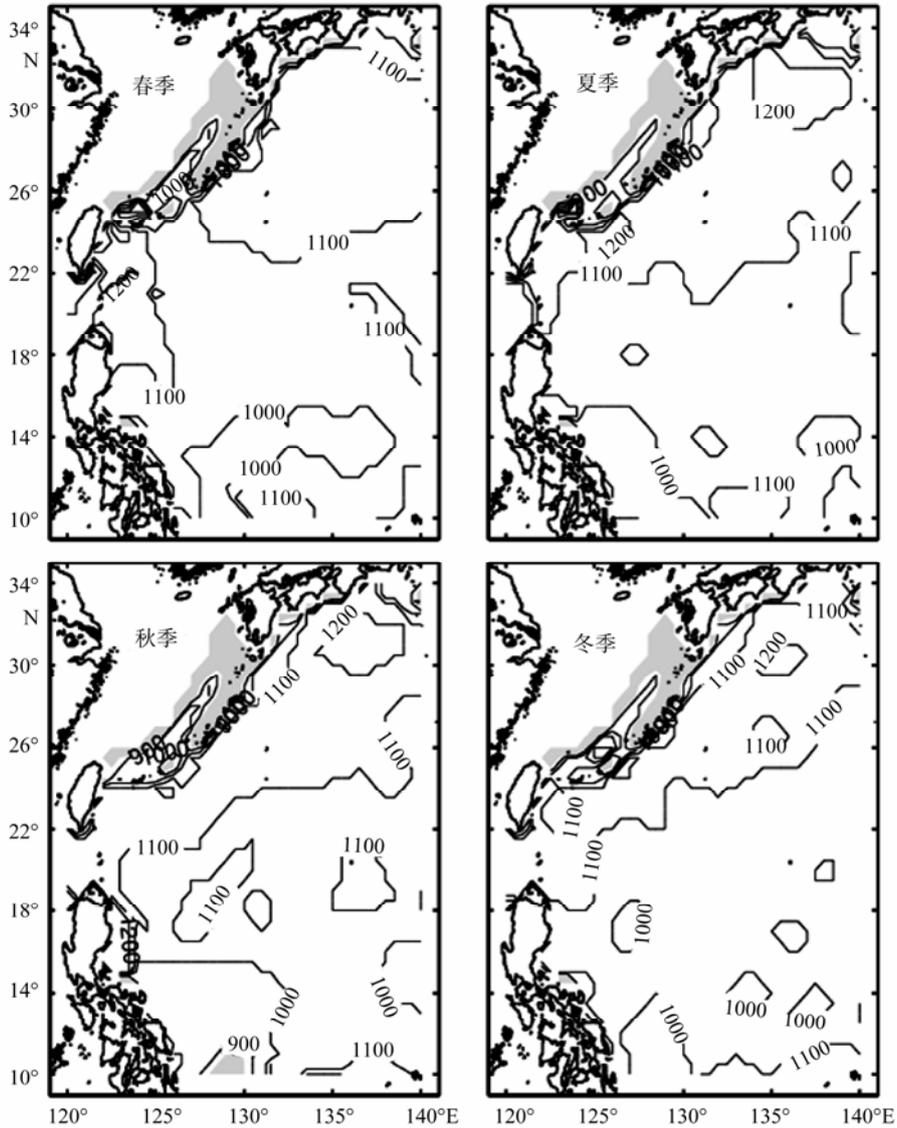


图 5 各季节声道轴深度(m)分布

Fig. 5 Distributions of the depth of sound channel axis (m) in seasons

### 2.2.2 20°N 断面

20°N 断面的也呈现深海声道特征, 秋、冬季节, 声道轴的深度基本在 1 000 ~ 1 100 m 之间, 变化幅度不是很大; 而春、夏季, 以 122°E 为界, 以东海域的声道轴较为平直, 在 1 000 ~ 1 100 m 之间, 但在 122°E 以西海域, 即吕宋海峡附近, 声道轴明显变深, 在 1 300 m 左右(如图 7)。等声速线分布的季节变化不显著, 也以 122°E 为界, 东部等声速线基本与等深度线平行, 西部黑潮常年流经该处, 其携带的高温水导致 600 m 以上水层等声速线向上弯曲, 声速垂向梯度较大; 600 m 至声道轴, 等声速线向下弯曲; 声道轴以下, 等声速线又呈水平分布, 且声速垂向梯度较小。

## 3 小结

本文利用 2002 ~ 2009 年间西北太平洋的 Argo 浮标资料构建了气候态季节平均的声速场, 通过选取代表性的平面和断面, 分析该区域内三维声速的季节变化特征以及声道轴深度的季节变化情况, 得出以下结论: (1) 研究海区 10 m 层的等声速线分布随季节变化明显; 春、冬季节, 等声速线在黑潮流经区域有较为明显的沿流方向的弯曲, 但弯曲发生的位置略微不同, 主要表现在琉球群岛的北部区域。(2) 研究海区 100 m 层等声速线分布随季节变化均呈现出如下特征: 北赤道流区, 等声速线有向近岸延伸的趋势; 吕宋岛东南部外海, 等声速线向南弯曲; 吕

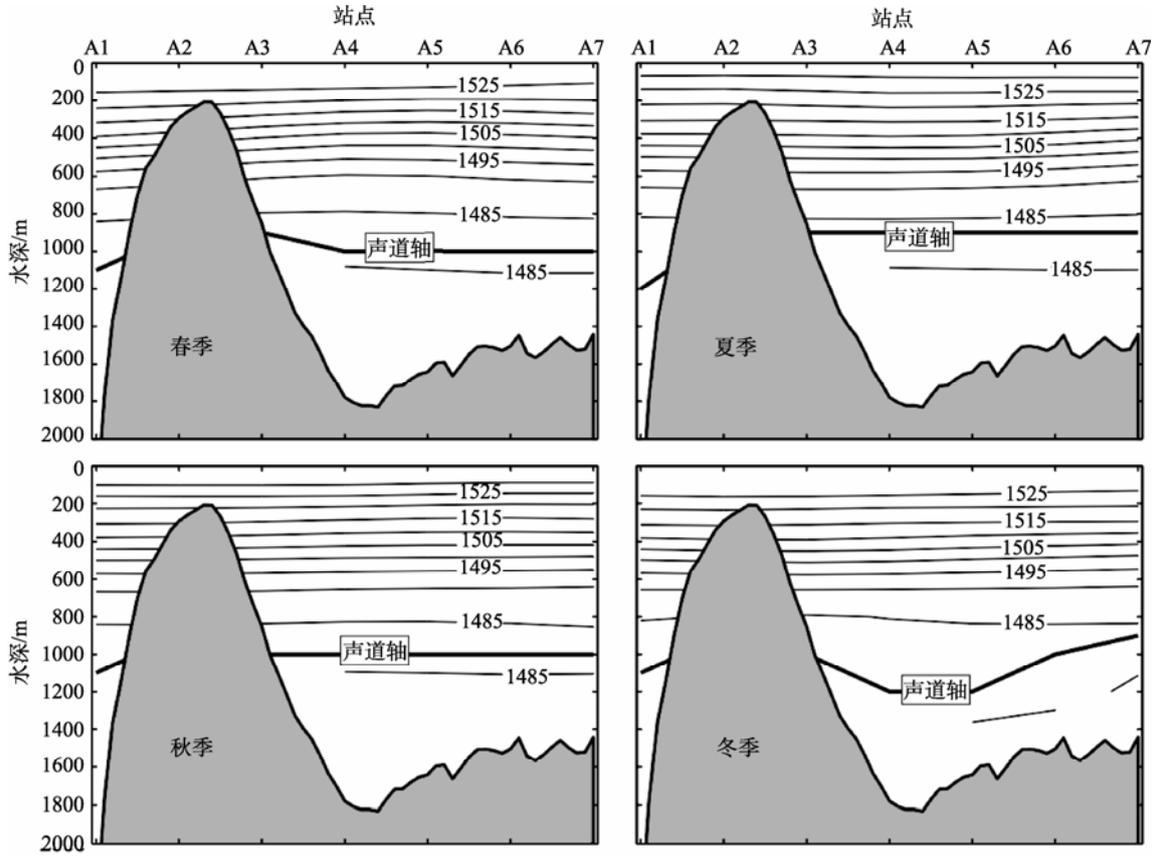


图 6 冲绳海槽断面声速(m/s)的季节分布

Fig. 6 Sound speed (m/s) distributions along the Okinawa Trough in seasons

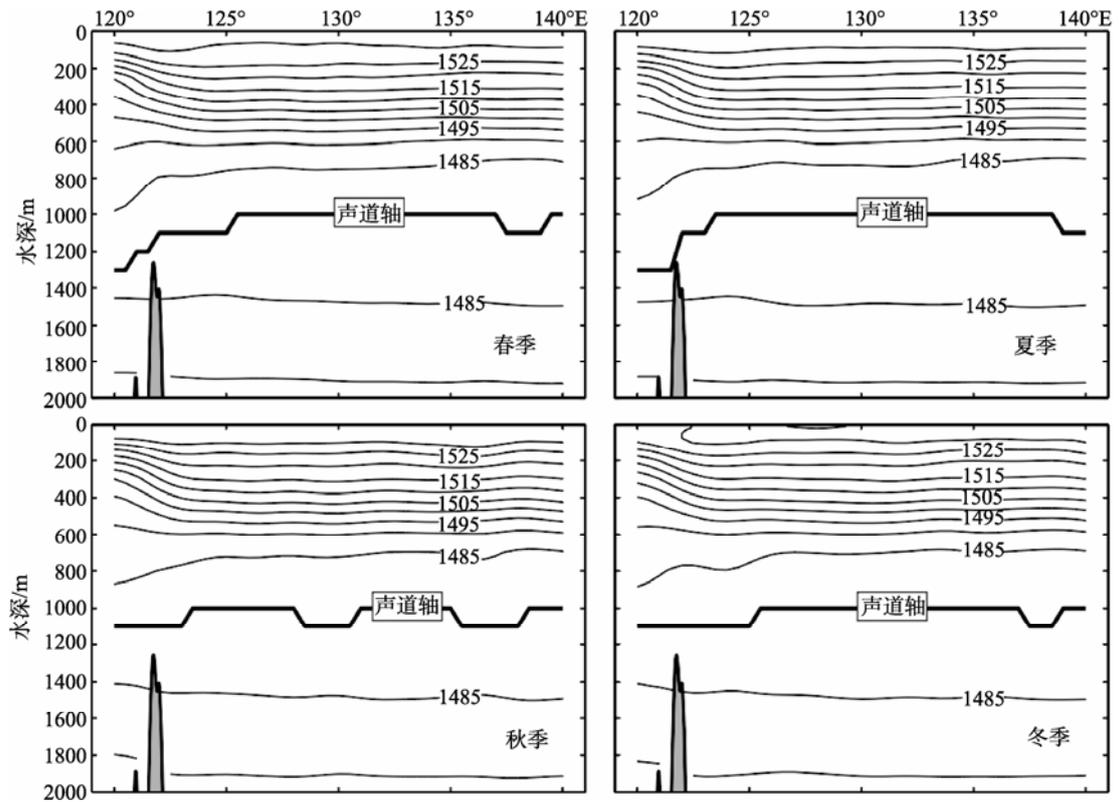


图 7 20°N 断面声速(m/s)的季节分布

Fig. 7 Sound speed (m/s) distributions along 20°N in seasons

宋岛、台湾岛东部等声速线呈现偏北方向的弯曲；琉球群岛附近，等声速线呈现北偏东方向的弯曲。(3) 研究区域大部分海区呈现深海声道特征，声道轴大都在 900~1400 m 之间，深海声道轴较深的区域主要位于在吕宋海峡和日本东南部海区，其中吕宋海峡处的声道轴深度随季节变化显著，主要表现在春、夏季较深，而秋、冬季相对较浅。

参考文献:

- [1] 冯士筭, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 350-369.
- [2] 孙琪田, 张恩夫. 西北太平洋水声环境条件的分析研究[J]. 海洋通报, 1994, 13(2): 24-27.
- [3] The Argo Science Team. Report of the Argo science team and meeting (AST-2)[R]. Southampton, UK: Southampton Oceanography Center, 2000.
- [4] 金国栋, 张永刚, 张旭, 等. 基于 Argo 数据的海洋声场特征分析及其对作战的影响[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(11): 176-180.
- [5] 许建平. 中国 Argo 大洋观测网试验[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 35-50.
- [6] Carval T, Keeley B, Takatsuki Y, et al. Argo data man-

- agement User's manual (Version 2.1) [EB/OL]. 2010-02-27. <http://www.usgodae.org/argo/argo-dmuser-manual.pdf>.
- [7] Roemmich D, Gilson J. The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program [J]. Progress in Oceanography, 2009, 82(2): 81-100.
- [8] Nitani H. Beginning of the Kuroshio [C]//Stommel H, Yoshida K. Kuroshio – its physical aspects. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 129-163.
- [9] 李新, 陈国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2010, 15(3): 260-265.
- [10] GB12763.7-91, 海洋调查规范(调查资料处理)[S].
- [11] 胡建宇. 物理海洋学基础[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1995: 190-197.
- [12] 陈秋颖, 杨坤德. 西北太平洋海表温度的季节变化特征[J]. 水声工程, 2010, 34(10): 65-68.
- [13] Cravatte S, Delcroix T, Zhang D, et al. Observed freshening and warming of the western Pacific Warm Pool[J]. Climate Dynamics, 2009, 33:365-589.
- [14] 张旭, 张永刚, 张胜军, 等. 菲律宾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.
- [15] 代民果, 黄大吉, 章本照. 琉球群岛附近海域声场分析[J]. 海洋学报, 2005, 27(1): 45-50.

### 3-D characteristics of sound speed in the Northwestern Pacific Ocean with Argo float Data

YAN Qing-xun<sup>1</sup>, HU Jian-yu<sup>1, 2</sup>

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), Xiamen 361005, China)

Received: Oct., 11, 2011

**Key words:** the Northwestern Pacific Ocean; Argo float data; sound speed; sound channel axis; seasonal variation; western boundary current

**Abstract:** We constructed a seasonally 3-D sound speed dataset with  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  horizontal resolution, using the Argo profiles observed in the Northwestern Pacific Ocean during 2002~2009, and then analyzed the characteristics of spatial distribution and seasonal variation of sound speed. The results showed that the distribution of the sound speed contours at the 10 m layer varied significantly in different seasons; in spring and winter, the velocity contours approximately appeared to be zonal distribution and had some bending towards specific direction in the Kuroshio zone. The seasonal variation was not evident at the 100 m layer and the main features were as follows: the sound speed contours extended toward the coast in the North Equatorial Current zone, bended southward in the east of the southeast of the Luzon Island and northward in the east of the Luzon Island and the Taiwan Island, and bended northeastward near the Ryukyu Islands. In addition, there existed deep sound channel in most of the investigated area; the greatest depth of the sound channel axis was located in the Luzon Strait and the southeast of Japan, especially possessing a marked seasonal variation in the Luzon Strait. With the accumulation of the Argo float profiles, the sound speed distribution of the investigated area will become clearer.

(本文编辑: 刘珊珊)