

基于图表法的南海北部表面声道分布与成因分析

占鑫伟¹, 屈科^{1*}, 刘宏伟², 谢金怀¹

(1. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;

2. 中国船舶重工集团公司第七一六研究所, 江苏 连云港 222136)

摘要: 表面声道是一种远距离声传输波导, 了解和研究表面声道的分布与成因对提高目标海区声呐的性能有重要意义。本文基于遥感数据, 对南海北部表面声道的分布成因进行研究。采用图表法就温度梯度、盐度梯度对声道形成的贡献进行定量研究, 给出了声道的类型分布, 并结合海洋动力活动及海气相互作用对成因进行分析。研究表明: 春季南海北部表面声道受珠江口冲淡水影响有少量盐度声道分布, 远深海地区受风场影响有较多静压声道分布; 夏季在珠江口强烈的冲淡水影响下产生大范围盐度声道; 秋季冲淡水产生的盐度声道减弱, 因风场产生的静压声道相较夏季增多; 冬季受东北季风影响, 产生几乎覆盖南海北部的大范围静压声道。在粤东沿岸、台湾沿岸的上升流对盐度、混合声道的产生也有较大影响。

关键词: 南海北部海域; 表面声道; 图表法

中图分类号: P733.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 05-0053-05

表面声道的主要特征是声速从海面开始随着深度的增加而单调增加, 可以使声能量不与海底作用, 减少损耗, 形成声波导, 使声能量远距离传播。表面声道对于声呐使用、近海潜艇作战保障有着重大的研究意义。

对于表面声道的声传播特性, 国内外学者已经开展了相关研究。例如, Schulkin M^[1] 提出海面声道传播中声速损失的经验关系式; Pedersen M A^[2] 对射线理论和模态理论计算的传播损耗进行了详细的数值比较, 张旭等^[3] 研究了我国近海的混合层结构变化对表面声道中声传播特性的影响。但是, 现有工作主要集中在理论模型、经验模型和声场特征量计算等方面^[4-11], 缺少对我国南海北部表面声道分布与成因的分析研究等实际性应用。此外, 我国南海北部存在黑潮、上升流、洋流、涡旋、季风、台风、地势等多种因素作用的复杂海洋环

境, 声道分布及成因较复杂, 亟待研究。为填补这一方面的空白, 本文结合南海北部遥感数据, 通过应用一种图表法^[12] 对南海北部声道的季节分布进行分析, 并结合分布规律对成因进行了分析, 给出了关于声道分布与成因的初步结论。

1 方法与示例

1.1 图表法

表面声道 (Surface Sound Duct, SSD) 主要受温度梯度、盐度梯度、静水压力梯度变化影响, 通过比较分析各因素对声速剖面影响, 可以对声道的成因建立定量的分析。由 Medwin H^[13] 声速经验公式, 声速可以表示为温度、盐度、深度的函数:

$$c(T, S, z) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.017T)(S - 35) + 0.016z \quad (1)$$

收稿日期: 2019-09-16

基金项目: 广东海洋大学教育教学改革资助项目 (524210380); 大学生创新创业训练计划资助项目 (CXXL2019253); 广东海洋大学海洋声学信息处理创新团队资助项目 (CCTD201822)

作者简介: 占鑫伟 (1999-), 男, 学士, 主要从事海洋声传播研究。E-mail: zhanxin262@163.com

通讯作者: 屈科 (1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事声场建模及水声学等问题研究。E-mail: quke@gdou.edu.cn

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度, psu ; z 为深度, m 。SSD 中声速梯度为正, 即 $\frac{dc}{dz} > 0$, 声能量向海表面折射。虑声道形成的各因素, 式子可写成:

$$\frac{dc}{dz} = \frac{\partial c}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial c}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial c}{\partial z} > 0 \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 得出 SSD 的表达式:

$$\frac{dc}{dz} = \beta T_z + \gamma S_z + 0.016 > 0 \quad (3)$$

其中,

$$\beta = 4.95 - 0.11T + 0.00087T^2 - 0.01S \quad (4)$$

$$\gamma = 1.34 - 0.01T \quad (5)$$

在式 (3) 中的温度梯度 T_z 、盐度梯度和压力梯度 S_z (常量) 导致了声速随深度的变化。式 (4) 中盐度项的影响远小于其他项, 可以忽略不计。 β 和 γ 可以作为盐度梯度和温度梯度的权系数, 取决于温度。从温度梯度和盐度梯度的角度来看, SSD 的形成条件可表示为:

$$S_z + \frac{\beta(T(z))}{\gamma(T(z))} T_z + \frac{0.016}{\gamma(T(z))} > 0 \quad (6)$$

在以温度梯度和盐度梯度为横纵坐标的二维平面中, 式 (6) 可以表示成一条阈值线, 如图 1 中的斜线所示。平面被阈值线划分为两个区域: 彩色区域和无色区域, 分别位于阈值线上方和下方。当温盐梯度测量值位于彩色区域时, 满足式 (6), 既表示相应的深度中存在 SSD。相反, 若一个梯度测量值位于下方无色区域, 则此深度就不存在 SSD。通过对应深度点的梯度数值点在平面上所处区间就可以对 SSD 是否存在进行判断。

1.2 数据示例

本文使用 2004 年 10 月 3 日于 $22^{\circ}41' \text{N}$, $113^{\circ}8' \text{E}$ 获得的温盐深仪数据示范图表方法的应用。在测量期间, 位于南海的冷涌迅速向南传播。由于强烈的东北季风, 海水垂直方向混合增强, 混合层深度达到了 43 m。冷空气带走了上层海水的的海量, 导致混合层存在轻微的正温度梯度。珠江的冲淡水位于 14 m 以上的深度, 平均盐度梯度约为 0.2 psu/m 。海洋上层形成了 43 m 的声速正梯度层, 温度、盐度、声速剖面如图 1 所示。

为了解海洋控制 SSD 形成的物理机制, 可以利用式 (6) 对声道进行进一步细化为如下 4 个类别:

静水压力声道 (蓝色区域): 静水压力是该

区域声道形成的主要因素。区域由阈值线 $S_z = -0.016/\gamma$ 及 $T_z = 0.016/\beta$ 包围。

盐度声道 (绿色区域): 正盐度梯度是该区域声道形成的主要因素。区域由阈值线 $S_z = -0.016/\gamma$ 及 $T_z = 0$ 包围。

温度声道 (橙色区域): 正温度梯度是该区域声道形成的主要因素。区域由阈值线 $T_z = 0$, $S_z = 0$ 包围。

混合声道 (黄色区域): 所有因素都有助于形成声道, 而温度和盐度的影响大于静压。该区域位于静水压力区域上方并被阈值线 $S_z = -0.016/\beta$ 和 $T_z = 0$ 包围。

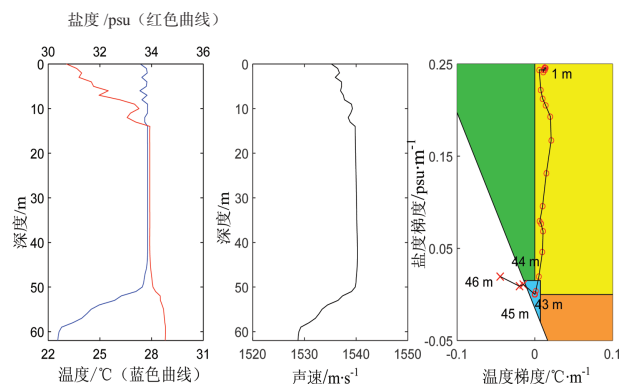


图 1 温盐剖面、声速剖面和图表法图

对示例数据的声道判断如图 1 所示。可以看到 43 m 以后的点就在阈值线下, 所以声道深度为 43 m。声道内的数据点分为两个类型: 混合声道位于上层, 由温度梯度、盐度梯度、静水压力的共同作用形成; 静水压力声道位于下层海水, 静水压力是声道形成的主要因素。

2 南海北部声道分布及成因分析

2.1 遥感数据

本文遥感数据来源为欧洲航天局 (ESA) 下属的哥白尼海洋环境监测中心提供的卫星遥感再分析数据 (Global Ocean 1/12° Physics Analysis And Forecast Updated Daily), 其海面分辨率为 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$, 日更新, 包括温度、盐度和深度。本文选取了 2018 年 4 月 27 日, 8 月 4 日, 9 月 20 日, 1 月 4 日的剖面数据对南海北部春夏秋冬季节分布特性进行分析。

2.2 四季声道分布图

2.2.1 春季声道分布图 春季典例南海北部声道分布如图2所示。盐度声道与少量混合声道出现于珠江口附近和台湾南部沿岸, 静压声道出现于台湾西部、南海东部。

珠江口周围有盐度声道和少量混合声道产生, 珠江河口为河流与海洋的结合区域, 河流受淡水径流控制, 近岸海域多为盐度较高的内陆架水体所控制, 而河口周围为低盐度水与较高盐度海水相互混合、稀释的过渡区域, 若径流足够强大, 密度大的海水与上游来的淡水在河口地区逐渐混合, 并形成向外海排泄的冲淡水, 该过程导致海水盐度下降产生盐度声道, 并且是珠江口盐度声道成因重要因素。春季珠江口就有冲淡水现象, 珠江口外冲淡水体明显具有低盐的特征^[14], 导致盐度下降, 声速随深度的变化, 与上升流相互作用, 产生盐度声道、混合声道, 受季风影响向东西两岸扩散。春季为南海从东北季风向西南季风转换的过渡时期, 但是残留的东北季风仍然具有一定的强度, 台湾西部、南海东部受到海面风的影响, 导致上层海水产生较强的混合, 形成一定深度的混合层, 产生静水压力声道。

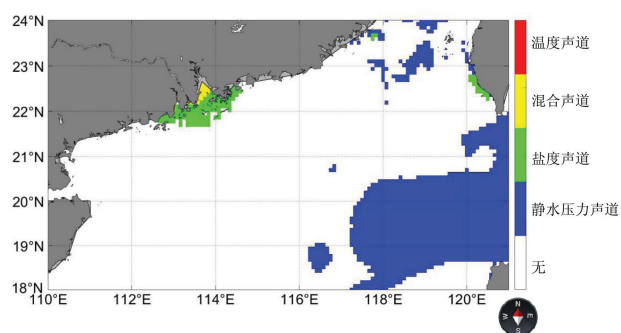


图2 春季典例表面声道分布图

2.2.2 夏季声道分布图 夏季典例南海北部声道分布如图3所示。珠江口周围以及向东方向拓展有盐度声道呈“舌状”分布, 台湾西南沿岸有盐度声道、混合声道出现。台湾浅滩有少量静压声道出现。

珠江流域的径流量随季节变化而变化, 有明显的雨季与旱季, 因冲淡水而产生的声道范围也主要受其影响。相较于春季, 夏季降水量增加, 珠江口即周围河流径流量明显增大, 沿岸河口向南海冲淡水, 导致珠江口冲淡范围剧增, 盐度下降, 生成盐度声道。庞海龙^[14]通过分析断面调查的盐

度数据发现夏季, 粤东沿岸流流向东北, 流量幅度宽, 甚至达到台湾海峡。夏季是南海西南季风最为强盛的时期, 珠江口冲淡方向为东北, 主要受到西南季风的影响。上升流是整个南海北部陆架区夏季的普遍现象^[15], 台湾南部沿岸与珠江沿岸受西南风驱动上层水产生离岸运动产生上升流, 区域次表层高盐度水体被带至表层, 导致盐度上升, 产生盐度声道。夏季风力相较于春季明显减弱, 只有小范围台湾浅滩受风影响产生了静压声道, 整体静压声道相较于春季削弱明显。

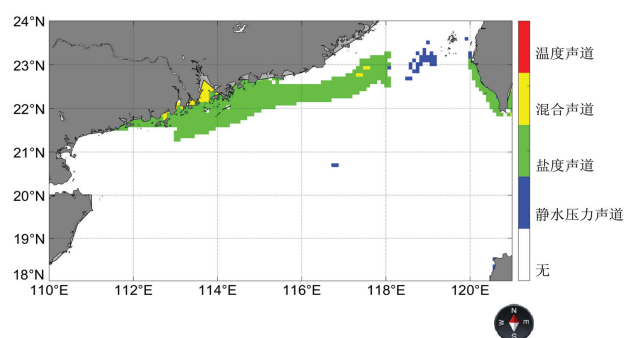


图3 夏季典例表面声道分布图

2.2.3 秋季声道分布图 秋季典例南海北部声道分布如图4所示。珠江口以东方向与西方向有盐度声道分布。台湾海峡南部有盐度声道分布。远深海地区有静压声道分布。

秋季为南海从西南季风向东北季风转换的过度时期, 从9月开始东北季风逐月加强, 导致南海中东部有较大范围海域上层海水混合, 产生静压声道, 相较于春季范围增加明显。在东北季风逐渐加强的同时珠江径流逐月减少, 珠江冲淡水逐渐向岸边退缩, 并且在东北季风的驱动下主要向粤西扩散, 导致沿岸盐度下降, 产生盐度声道, 主要分布在珠江口以西沿岸, 少量分布珠江口以东^[15]。

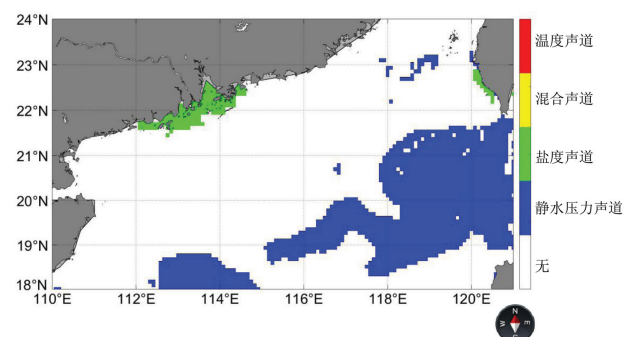


图4 秋季典例表面声道分布图

2.2.4 冬季声道分布图 冬季典例南海北部的声道分布如图5所示。珠江口有少量盐度声道分布，粤东沿岸、台湾东南部有混合声道出现。南海北部有大范围的静压声道出现。

珠江口仍有冲淡水现象，由于珠江仍处在枯水期，径流量小，相较于其它季节只有小范围海域盐度下降，产生了盐度声道，四季中冲淡水产生的盐度声道范围最小。粤东沿岸有上升流现象，导致温度下降、盐度上升，产生了混合声道。冬季是南海东北季风最为强盛时期，南海北部受东北季风影响，上层海水产生混合，产生了大范围的静压声道，几乎覆盖了南海北部。

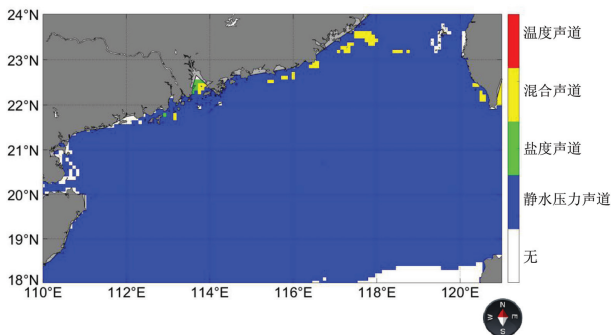


图5 冬季典例表面声道分布图

3 结论

南海北部声道静压声道冬季分布最广，春秋季节相较于冬季有所缩减，夏季分布最少。夏季由于上升流产生的盐度声道、混合声道分布较广，春秋冬季较少。珠江冲淡水的产生的盐度声道也

有较大分布范围，夏季分布范围最广，秋、春、冬季依次减少。

中部深海区主要为静压声道，冬季最为明显，秋夏季其次，夏季最弱，主要成因为季风现象导致上层海水混合，产生静压声道，具有明显的季节性规律。珠江口周围主要为盐度声道，冲淡水导致海水盐度下降产生盐度声道，是珠江口周围形成盐度声道的重要因素。珠江径流量受季节变化影响，有明显的雨季与枯季，冲淡水而产生的声道范围也主要受其影响。春秋东季为枯水季，珠江口附近的盐度声道范围小，夏季珠江口附近的盐度声道范围最最大，由于雨季降水量增大导致珠江巨量径流入海对附近海域的冲淡作用极为明显，产生大范围盐度声道呈现“水舌”状。珠江冲淡水所产生的表面声道扩散路径主要受季风所主导，夏季受西南季风主导，扩散方向为东北方向，春秋季为季风过渡时期，向两岸扩散受，以西为主。广东省东部沿岸、台湾南部沿岸主要为盐度声道、混合声道，主要成因为上升流。南海北部上升流是一种季节性上升流，该上升流的形成与消亡主要取决于南海北部的风场变化。

SSD是一种可用于远程传播的声道，在南海的冲淡水区域中，例如珠江口，它是唯一有效的声道。了解SSD形成的时间特性和分布特性有利于对海表面布放的发射与接收声呐设备性能进行估计。根据区域表面声道的分布特性进行声呐系统布放，可以有效提升设备工作距离，提供性能增益。

参考文献：

- [1] Schulkin M. Surface-Coupled losses in surface sound channels[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1968, 44(4): 1152-1154.
- [2] Pedersen M A. Normal-mode theory applied to short-range propagation in an acoustic surface duct[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1965, 37(1):106-118.
- [3] 张旭, 张永刚, 张健雪, 等. 海洋混合层结构对表面声道中声传播特性的影响分析 [J]. 海洋学报, 2012, 34(1):79-89.
- [4] Wong L A. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 1. Simulations and comparison with observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C5):3156.
- [5] Kim J, Kim H, Paeng D G, et al. Low-salinity-induced surface sound channel in the western sea of Jeju Island during summer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(3):1576-1585.
- [6] Baker W F. New formula for calculating acoustic propagation loss in a surface duct in the sea[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 57(5):1198-1200.

- [7] Zhang R H. Normal mode acoustic field in a shallow-water surface channel[J]. Chinese Journal of Physics, 1975, 24(3): 506-510.
- [8] Weston D E, Esmond C G, Ferris A. The duct leakage relation for the surface sound channel[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(1): 156-164.
- [9] 段睿. 深海环境水声传播及声源定位方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [10] Duan R, Yang K D, Ma Y L. Investigation of long-range sound propagation in surface ducts[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(12): 297-307.
- [11] 赵建昕, 过武宏. 浅海声速剖面结构变化对声呐作用距离的影响 [J]. 海洋技术学报, 2020, 39(4): 22-28.
- [12] Qu K, Piao S C, Zhou J B, et al. Analysis of surface sound duct in the northern shelf of the South China Sea[J]. Shock and Vibration, 2018(1): 1-12.
- [13] Medwin H. Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameters[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 58(6): 1318-1319.
- [14] 庞海龙. 珠江冲淡水扩散路径分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [15] 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述 [J]. 应用海洋学学报, 2003, 22(2): 269-277.

Study on the Distribution And Causation of Surface Sound Duct in the Northern South China Sea Based on Diagrammatic Method

ZHAN Xin-wei¹, QU Ke¹, LIU Hong-wei², XIE Jin-huai¹

1. College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. 726th Research Institute of CSIC Heavy Industries Group, China Shipbuilding Industry Corporation, Lianyungang 222136, China

Abstract: Surface sound duct is an long-distance sound transmission waveguide. In order to improve the performance of sonar systems in the target sea area, it is important to understand the distribution and causes of surface sound duct. Based on remote sensing data, this paper researches the distribution and causation of surface sound duct in the northern South China Sea. To produce a quantitative research, a diagrammatic method is applied to study the contributions of temperature gradient and salinity gradient to the formation of surface sound duct. The distribution types of sound duct are given, and the causes are analyzed in combination with ocean dynamic activities and air-sea interaction. The results show that a few haline ducts exist in the Pearl River Estuary in spring because of the freshening effect. Hydrostatic ducts exist in the deep sea area as a result of the wind. A lot of haline ducts exist in the Pearl River Estuary in summer on account of the strong freshening effect. The scope of haline duct resulting in freshening is reduced in fall and the scope of hydrostatic duct causing the wind increases in fall. The northern South China Sea is almost covered with the hydrostatic duct in winter because of the strong northeastern wind. In the coast of Guangdong and Taiwan Provinces upwelling has an important influence on the formation of haline ducts and hybrid ducts.

Key words: Northern South China Sea; surface sound duct; diagrammatic method