

西北太平洋水声环境区划及声传播特征

王彦磊¹, 高建华², 李杰¹, 张芳蓓¹, 郑红莲¹

(1. 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094; 2. 中国人民解放军 72517 部队, 山东 济南 250022)

摘 要: 基于 2006 年 Argo 资料, 计算西北太平洋海域 0–1 500 m 声速剖面。针对声速结构分类中分类数目难以客观选取和分类结果易陷入局部最优等问题, 采用聚类中心动态调整的遗传编码方案和操作算子, 充分利用模糊聚类与遗传算法的优势, 运用改进的遗传聚类算法对西北太平洋声速剖面进行分类区划。基于声场环境区划结果, 运用 Kraken 简正波传播模型 (Kraken Normal Wave Propagation Model) 模拟典型声速结构的声传播损失场, 借助表征声呐效能的优质因数 (FOM), 分析典型声速结构的传播损失特征及其对声呐探测、水下潜器等活动的影响。

关键词: 水声环境; 西北太平洋; 声传播损失

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932 (2013) 01-0085-07

Zoning and propagation loss characteristics of underwater acoustic environment in the Northwest Pacific Ocean

WANG Yan-lei¹, GAO Jian-hua², LI Jie¹, ZHANG Fang-ran¹, ZHENG Hong-lian¹

(1. 61741 troops of PLA, Beijing 100094, China; 2. 72517 troops of PLA, Jinan 250022, China)

Abstract: Based on the 2006 Argo data, the profile of sound speed from surface to 1 500 meter depth in the Northwest Pacific Ocean was calculated. Then, the profile of sound speed was sorted and districted with the improved genetic clustering algorithm. In order to solve two problems, that is, hard selecting the initial cluster number objectively and clustering results easy being trapped into the local optimal, this method adopted coding project and operation operator of dynamic adjustment of clustering center in the genetic algorithm, taking advantage of the fuzzy clustering and the genetic algorithm. Based on the results of the sound field zoning, sound propagation loss of typical acoustic structure was simulated using the Kraken Normal Wave Propagation Model. Furthermore, with the aid of the FOM indicating sonar performance, the typical sound propagation loss characteristics and its influences on the sonar detection and underwater vehicle activities were analyzed.

Keywords: acoustic environment; the Northwest Pacific Ocean; sound propagation loss

西北太平洋海域具有十分复杂的地形、地貌和 水文气象特征, 开展其海洋环境研究, 特别是影响 声呐探测的海洋中上层声场环境的特征结构、区划 分类和声场传播损失, 具有重要的政治、经济和军 事意义。声场的分布及变化是水下导航、通讯的基 础和影响声呐探测的重要环境因素。目前水声研究 (代民果 等, 2005) 中讨论较多的是在某一假定的 理想水下环境条件下水声的传播规律, 基于实际海 洋资料的声场环境的分型区划研究较少。谢骏等

(2002) 利用有序样本聚类方法对主跃层建立了 3 种聚类模型, 对声速剖面进行分类提取, 但没有对 整个环境声场展开分析。赵建虎 (2007) 和谢骏运 用自组织神经网络对声速剖面进行分类, 证实了该 种方法的可行性, 但在实际应用过程中关于分类数 目难以客观确定的问题仍没有解决。影响声波在海 洋中传播的主要因素有海水声速分布、海底沉积物 与地貌、海浪、海流、海洋内波等 (Paul et al, 2005)。了解和掌握水下声场复杂多变的规律, 对

收稿日期: 2011-12-05; 修订日期: 2012-08-04

基金项目: 国家自然科学基金 (41276045)。

作者简介: 王彦磊 (1979-), 男, 博士, 工程师, 主要从事军事海洋环境保障研究。电子邮箱: wyljess@126.com。

水下目标的探测和现代声呐的设计、操作和使用都有重要意义。随着计算机科学技术的发展,射线理论、简正波、多路径展开、快速声场和抛物线方程等数值模拟方法在计算海洋声学领域中得到迅速发展应用。简正波理论(张歆等, 2000; Michael et al, 1998)是近年来研究较多、发展较快的一种传播模型,目前已有许多优良的计算程序,如 Moatl、Kraken 等。

本文西北太平洋声速剖面数据来源于 Argo 浮标资料。针对声速结构分类中分类数目难以客观选取和分类结果易陷入局部最优等问题,采用聚类中心动态调整的遗传编码方案和操作算子,充分利用模糊聚类与遗传算法的优势,运用改进的遗传聚类算法对西北太平洋声速剖面进行分类区划。基于声场环境区划结果,运用 Kraken 简正波传播模型模拟各类典型声速结构的声传播损失场,借助表征声呐效能的优质因数(FOM),分析典型声速结构的传播损失特征及其对声呐探测、水下潜器等活动的影响。

1 声速剖面结构分类

海面波导、深海声道、汇聚区以及可靠声路径等声场环境效应,都是声传播过程中受到声速剖面结构的强烈影响造成的。对潜艇活动而言,除水深外,海洋中的“地形”主要是指海水的声速分布状况。随着潜艇声呐战的发展,识别相似结构的声速剖面对于分析区域声速结构及其变化规律,对提高声呐探测效能意义重大。

自组织特征网络和模糊 C 均值算法(王彦磊等, 2005),存在对初始化敏感和难以获得全局最优解的固有缺陷;同时其聚类数目也是依照经验选取,主观性强。遗传算法是基于生物自然进化选择思想的随机搜索方法,是一种迭代式优化算法,具有全局搜索和并行计算能力。模糊聚类与遗传算法的优势交叉互补,既可得到全局最优解,又能加快收敛速度。为此,引入改进的遗传聚类算法,其灵魂是“各聚类中心重新组合可以形成不同的新聚类中心”,每一个声速剖面就相当于一个线数据,运用改进遗传聚类算法对所分析海区所有声速剖面(或者说“线数据”)进行区划分类,可以克服聚类数目难以客观优选和易陷入局部最优的问题。

1.1 改进的遗传聚类算法

通过重新设计初始种群、交叉算子、变异算子和目标函数四个方面,来改进遗传聚类算法,从而实现线型数据优化分类。

1.1.1 种群初始化

记待分析的线型数据集为 A 。首先在区间 $[K_{\min}, K_{\max}]$ 内产生一随机整数,从待分类的数据集 $X \subset R^d$ 随机选取 K_i 条线作为聚类线型,重复上述过程 N 次,即可产生 N 个个体的初始种群。

1.1.2 交叉算子

设待交叉的两个父代 $M_a^t = \{X_1, X_2, \dots, X_{K_a}\}$ 和 $M_b^t = \{X_1, X_2, \dots, X_{K_b}\}$, X_i 为个体中的一个基因,代表一条线(即一个剖面),为保证交叉后子代个体中聚类中心数目在 $[K_{\min}, K_{\max}]$ 范围内, M_a^t 父代个体交叉位 k_1 须在开区间 $(\max\{K_{\min}-1, K_a^t - K_a^{t+1}\}, \min\{K_{\max}, K_a^t + K_b^t - K_a^{t+1}\})$ 内随机选取, M_a^{t+1} 在闭区间 $[\max\{K_{\min}, K_a^t + K_b^t - K_{\max}\}, \min\{K_{\max}, K_a^t + K_b^t - K_{\min}\})$ 内随机选取,则 M_b^t 父代个体交叉位 $k_2 = k_1 + K_a^{t+1}$,通过交叉策略,不仅个体中聚类线型得到重新组合,而且聚类线型数目在 $[K_{\min}, K_{\max}]$ 内也得到了动态调整。

1.1.3 变异算子

变异是聚类算法跳出局部最优的关键,采取以下两种变异算法。一是采取从线数据集(声速剖面数据集)中,随机抽取一条线(剖面)来替换待变异个体中的待变异基因。二是采取合并相邻距离很近的聚类中心。考虑到各聚类中心应具有一定距离,当任一个体 M_p^t 中两聚类中心最小间距小于一定阈值时,即可合并为一个聚类中心。即满足 $d(x_i, x_j) = \min\{d(x_e, x_f) | e, f = 1, 2, \dots, K_p, e \neq f\}$, 并且 $d(x_i, x_j) < \sigma$, $\sigma > 0$, 则合并为 $x_{new} = (x_i + x_j)/2$;

1.1.4 设计目标函数

一个线数据可以看成一维向量,可以通过计算两个线数据的相似系数来表征其相似程度,因此可以选择相似系数来度量线线间的距离。可以设计目标函数 F 为:

$$F^t = \frac{2}{(K-1)} \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K \frac{S_i + S_j}{d_{ij}}$$

式中, d_{ij} 为 i 条线型聚类中心与 j 条线型聚类中心相似程度 (即相似系数), S_i 为 i 类内所有线数据样本到其线型聚类中心的相似度。

1.2 聚类步骤

研究区域选取 120°E – 160°E 、 0°N – 50°N 的西北太平洋海域, 采用 2006 年的 Argo 浮标资料, 共计 2 630 个剖面。运用 Fofonoff (Fofonoff et al, 1983) 声速公式计算每个 Argo 温盐浮标的声速剖面, 剖面深度范围选取 0~1 500 m; 根据大洋声速剖面的特点, 按照声速值垂直变化大的深度采样应该密集的原则, 利用 Akima 插值方法将每个声速剖面插值为 111 个深度点声速值。聚类数据矩阵为 $A_{m,n}$, $m = 2630$ 为声速剖面数, $n = 111$ 为表征声速剖面的声速值个数。

Step1: 设置参数: 循环终止条件一为设定最大进化代数 $G_{\max} = 50$; 条件二为设定群体适应度下降梯度阈值 $\delta^0 = (F^1 - F^5)/100$, $\delta' \leq \delta^0$ 当时终止循环进化过程。聚类数目可能最大范围, 种群规模 $N_{\text{ind}} = 50$, 聚类中心合并阈值 $\sigma = d_{\max}/200$, $d_{\max}$ 为聚类空间的距离。

Step2: 进行种群初始化, 生成 N_{ind} 个个体的初始种群。

Step3: 按照模糊 C 均值聚类算法, 计算每个个体中隶属度矩阵, 同时更新聚类中心。

Step4: 执行改进遗传聚类的交叉、变异算子操作。

Step5: 评价个体适应度值, 执行选择算子

Step6: 满足 $\text{Gen} = G_{\max}$ 或 $\delta' \leq \delta^0$ 时, 终止循

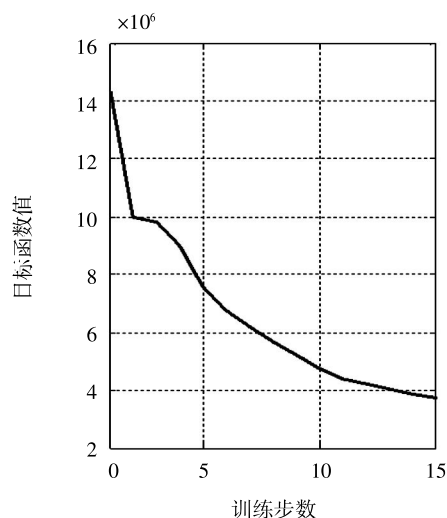
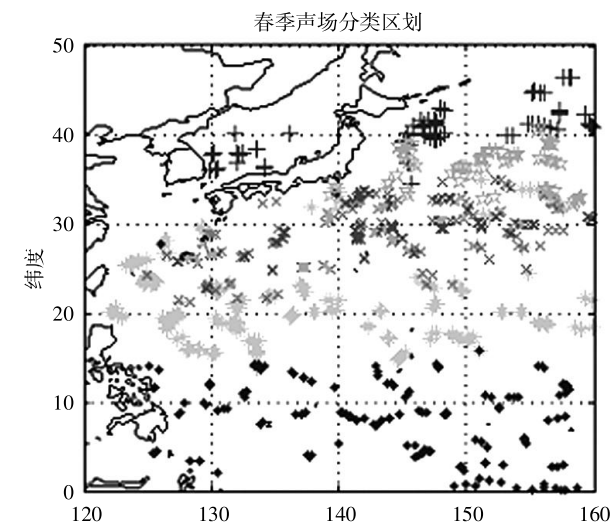
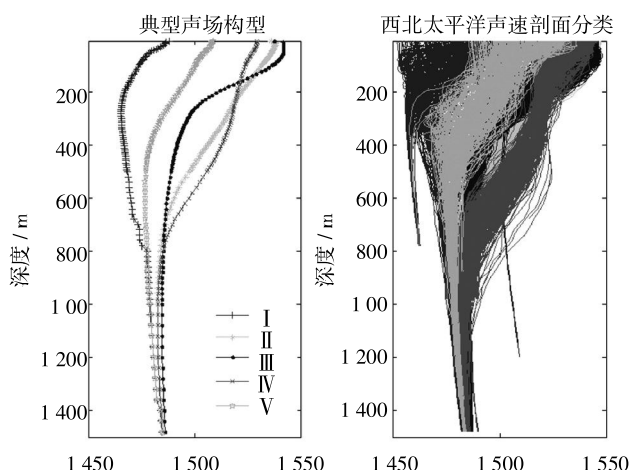


图2 声速剖面分类结果及各类声速剖面的空间分布

环, 输出最优聚类结果, 否则转入步骤 3。

1.3 西北太平洋声速剖面区划结果

遗传聚类程序经过 15 步进化满足循环终止条件二, 遗传聚类终止, 输出聚类中心及各数据隶属度矩阵, 2006 年西北太平洋声速剖面结构被划分为 5 类。其各类的典型声速剖面如图 2 左所示, 西北太平洋区域各类声速剖面地理分布如图 2 右所示, 分析可以得知 5 类剖面区划的特征和地理分布。



I 类型: 该类声速剖面海表处声速值是最小的, 声速剖面最小值出现在 300 m 深度, 0~300 m 间为负的声速梯度, 300 m 深度至海底为正的声速梯度, 说明该类型声速剖面海域声道轴在 300 m。从地理分布上看, 30°N – 35°N 的日本海和 40°N 以北日本以东的广阔洋域。随着季节的不同在 40°N 线有南北微小变化。

II 类型: 该类声速剖面海表处声速值是次最大

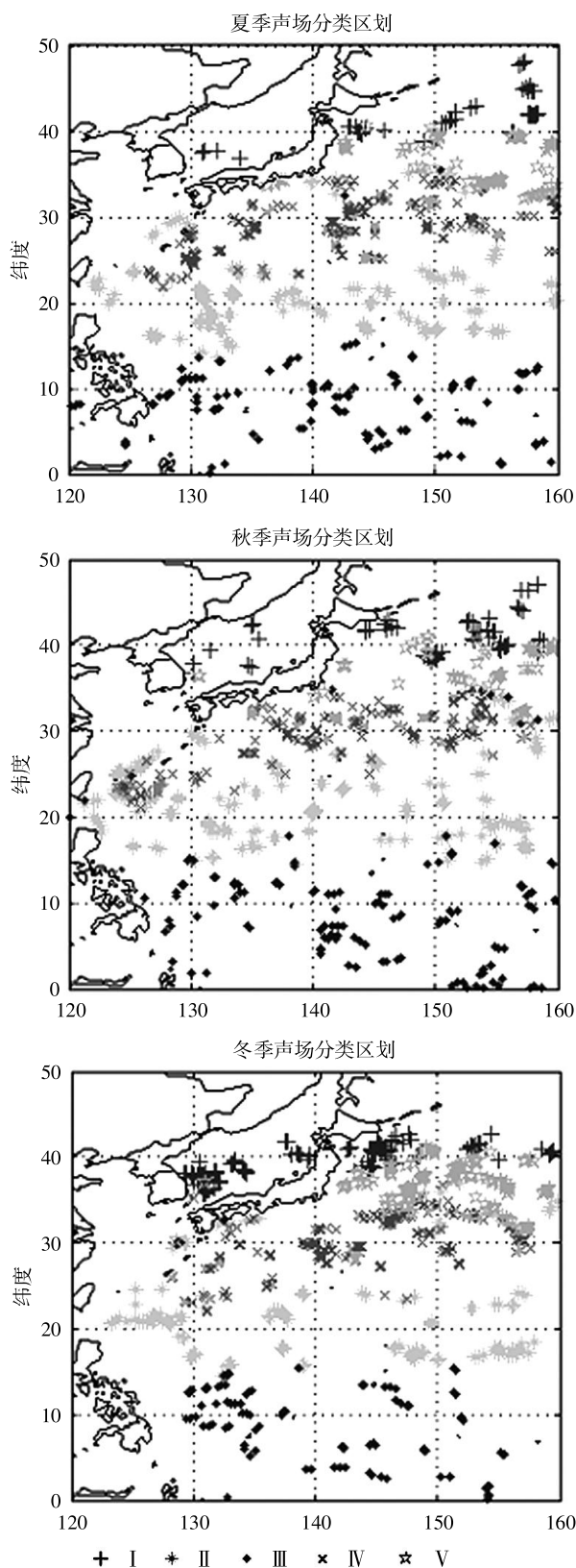


图2 声速剖面分类结果及各类声速剖面的空间分布

的, 声速剖面最小值出现在 1 000 m 左右深度, 0~700 m 为负的声速梯度且其声速梯度值大小基本不

变 (曲线斜率是常数)。其地理分布, 主要在 15°N~25°N 之间的纬向洋域, 在黑潮流经的区域也有分布。秋季的该类型的北界大约向北推移 2 个纬度, 其它季节则无变化。

Ⅲ类型: 该类声速剖面在海表处声速值最大, 剖面呈反“S”型, 声速剖面最小值出现在 1 200 m 以下深度, 0~50 m 间为正的声速梯度, 50~600 m 为负的声速梯度, 上半段绝对梯度值在五类剖面中是最大的, 而下半段绝对梯度值则较小。说明该类型声速剖面具有很强的声跃层。其地理分布主要在, 15°N 以南的广阔洋域, 且不随着季节变化而改变。

Ⅳ类型: 该类声速剖面海表处的声速值居中, 声速剖面最小值出现在 1 200 m 左右深度, 海表面至 800 m 为正声速梯度, 但其声速梯度值则是两头较大, 中间小, 整个剖面呈“S”型。其地理分布, 主要在 25°N~33°N 之间的纬向洋域, 位于黑潮流域后半段及其以南部分海域, 且没有季节变化。

Ⅴ类型: 在五类区划中该类声速剖面海表处声速值是次最小的, 声速剖面最小值出现在 400 m 左右深度, 0~300 m 间为负的声速梯度, 500 m 至海底为正的深度梯度, 但其正梯度值很小。表明其声道轴深度在 400 m 左右。该类型主要分布在 33°N~38°N 日本岛以东区域。

2 典型剖面的传播损失

基于声速剖面区划结果, 运用 Kraken 简正波传播模型模拟各类典型声速结构的声传播损失场, 借助表征声呐效能的优质因数 (FOM), 分析典型声速结构的传播损失特征及其对水下潜器活动、声呐探测等活动的影响。

2.1 模拟声传播损失场

由于我们只关心声速剖面的不同结构对声传播损失的影响, 基于上节西北太平洋声速剖面结构的分型区划结果, 选取最具典型性的第 I、Ⅲ、Ⅳ型声速剖面, 运用 Kraken 简正波传播模型模拟典型声速结构的声传播损失场。

我们只关注声速剖面结构对声传播损失的影响, 海面边界条件和海底边界条件不作为研究重点。以下的各个数值试验均选取相同的海底和海面边界条件: 海面边界条件取绝对软边界, 海底取声

弹性半空间边界条件。同时假定环境声速场各向同性。海域的深度以 Argo 浮标资料的探测深度 2 000 m 为限。

当声源位置处于不同深度，其声传播损失场也不一样；接收器位置深度不同，其接受到的声强也是有很大差别。因此，我们设计一组声源位置和一组接受器位置，来研究特定声速剖面结构下的声传播场。接受器均匀地布设在垂直方向上 0~2 000 m 深度上的 201 个点和水平方向上 0~150 km 范围的 1 001 个点上。声源频率主要选择 100 Hz 的低频频段。声源频率 $f=100$ Hz，声源深度 SD 分别为 200 m 和 800 m，运用 Kraken 简正波传播模型对 I、III、IV 型声速剖面结构进行模拟，可以得到声源位置处于不同深度的声传播损失场。声传播损失按不同声源深度，绘制成以接收器深度为纵坐标、距离为横坐标的填色图。

如图 3 所示，依次为 I、III、IV 型声速剖面声源处于 200 m、800 m 深度的声传播损失场；横坐标代表离开声源的距离，纵坐标代表海洋深度；图中颜色越深，表示声传播损失的能量越小，其值（单位：db）如图右侧的标识条。

I 型：当声源位于声道 300 m 上方 200 m 深度时，由于受到声速剖面结构的负声速梯度的折射，声线向右下传播，又受到正声速梯度的折射，向右上弯曲传播，在边界处受到反射。声波能量在整个环境得以传播。当声源处于声道处，由于声道深度处声速最小，这一声速最小值使海洋的作用就像一个透镜，声速梯度使声线不断向最小声速的深度折射。这时被动声呐的探测距离最大，可以做到超正常接触距离发现目标。当声源位于 800 m 深度时，由于声道到海底间正声速梯度的影响，声线向海面折射，在海面边界得以小的入射角进行反射，声能得以波束形式传播。在声波损失较少的地方形成汇聚区，而在声线很少到达的区域则形成声影区。

III、IV 型：当声源深度处于 200 m 时，其传播损失很大，声波能量被迅速的频散掉了。当声源位置处于 800 m 时，声线传播被迅速折射，向斜下方传播，经海底折射反射，又向斜上方传播，声波能量被限制在 500 m 深度至海底之间，声道下半部被海底所终止，所以存在折射和海底反射的声传播路径。从声速结构上看，III、IV 型的最大不同就是声跃层的位置不同，III 型剖面的声跃层位置在

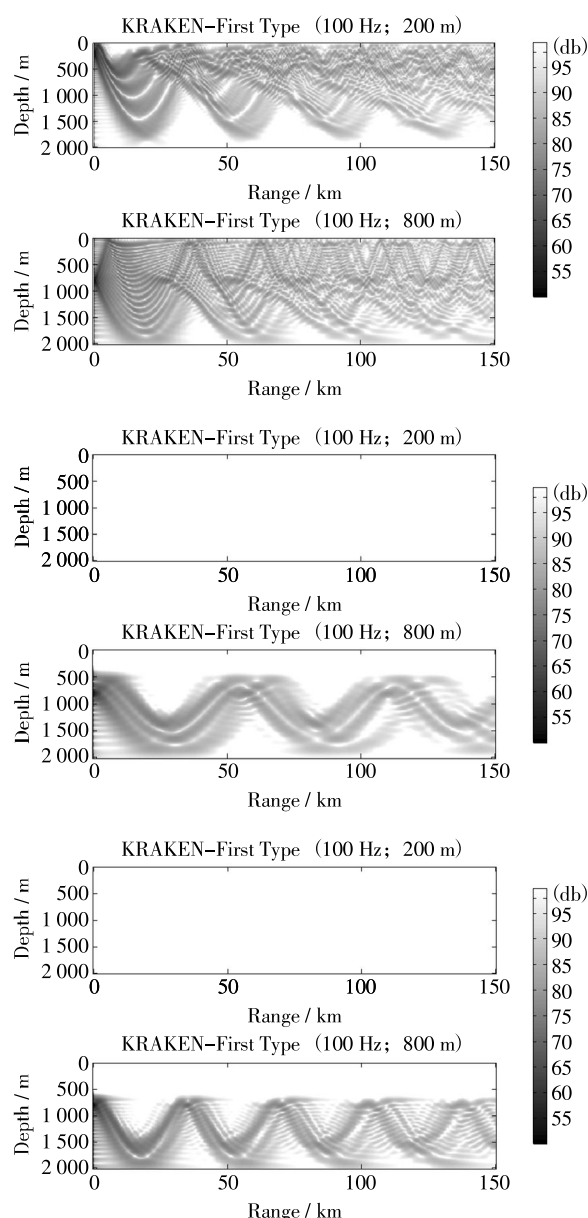


图 3 声源位置位于 200 m 和 800 m 深度传播损失场

100~300 m，而 IV 型在 500~700 m，声跃层的声速负梯度层就像一个盖子，将声传播射线限制在声跃层到海底之间。声跃层就是声传播射线的上限，从图中就可以看出，III 型的声能上界深度大于 IV 型的声能上界，这是与声跃层位置相对应的。被动声呐在这种声速结构环境中探测，应尽量放置在较深的水层。对于潜艇而言，应尽量在声跃层上方，可以取得最佳的隐蔽效能。

2.2 分析传播损失曲线

声呐效能一般用优质因数（FOM）表示，它是衡量声呐性能的一个定量尺度，FOM 值越大声呐的性能越好。对于被动声呐，FOM 值在数值上

等于容许的单程传播损失。对某一特定的声呐，一旦计算出 FOM，就可以在这种声传播损失曲线图上画一条水平直线，使 FOM 的值等于这条直线代表的传播损失。图中位于传播损失曲线以下、FOM 直线以上的区域，就代表了声呐的检测区；FOM 直线以下的区域，就代表了声呐的检测盲区。

取声源位置位于 800 m 深度，接收器深度位于 400 m、600 m、800 m 深度的一组声传播损失曲线，来分析 I、III、IV 型声速剖面的声传播特征。图 4 依次为 I、III、IV 型声传播损失曲线，黑直线代表 85 dB 优质因数，红色实线、绿色点划线和蓝色虚线分别代表接收器位于 400 m、600 m、800 m 深度的损失曲线。

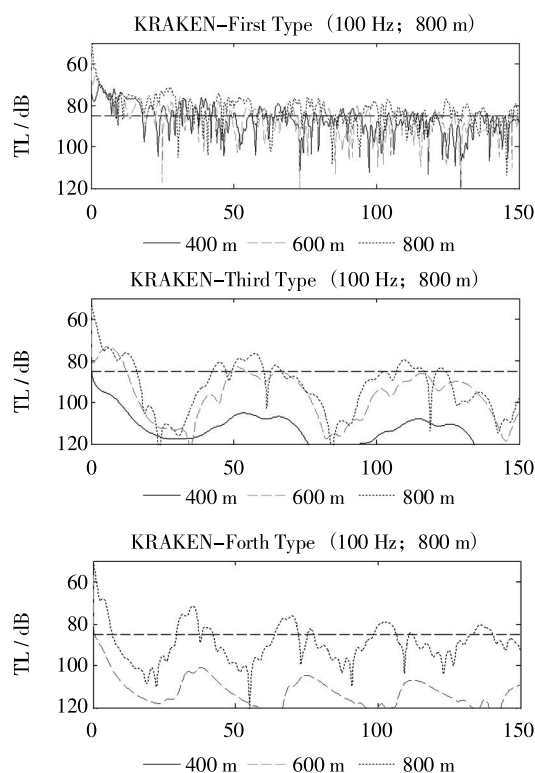


图 4 声源位置为 600 m 和接收器位置为 400 m、600 m、800 m 深度传播损失曲线及 85 dB 优质因数

I 型：3 个深度接收到的声传播损失都比较小，无论是从垂直方向来讲，还是从水平方向来讲，接收器离声源越小，其声播损失就越小。接收器位于 800 m 深度的传播损失要小于其它深度的损失，而声源的位置也在 800 m 深度，这说明：在声场环境的声道中，当声源和接收器位于同一深度时，其传播损失要小于其它深度的声传播损失，并且其传播损失大部分小于 85 dB。如果声呐的 FOM 为 85 dB

时，说明处于该传播深度区域的目标容易被 FOM 为 85 dB 声呐检测到。

III、IV 型：由于声速跃层存在的深度不同，接收器处于 400 m 和 600 m 时，III 型的传播损失小于 IV 型，但都远在声呐的 FOM 之上，也就是说，由于声跃层的存在，对于位于 800 m 深度的声源，位于 400 m 和 600 m 深度的声呐检测不到。当接收器位于 800 m 深度时，其传播损失曲线与声呐 FOM 相交，在 FOM 直线上出现几个汇聚区，III 型出现两个汇聚区（中图蓝色虚线小于 85 dB 部分），距声源的水平距离分别为 55 km、110 km。IV 型出现四个汇聚区（下图蓝色虚线小于 85 dB 部分），距声源的水平距离分别为 35 km、70 km、105 km 和 140 km 处。

对于存在声道效应的海域，在声源的一定开角范围内出射的声线被声道所束缚。这些声线所形成的声束仅照射到部分空间区域，并在某些距离段上聚集起较大能量而形成会聚，在另一些区域，只有经过海底大掠射角反射的声线才能进入。由于经过海底反射的声线携带的能量较少，因此这些区域就形成了声影区。会聚区和影区的交替是水声学中的重要现象（张镇迈等，2006；陈治国等，2005），如果保持接收深度不变而逐渐离开声源，在会聚区就能接收到较强信号，而在影区接收到的信号较弱，甚至接收不到信号。由于汇聚区海洋环境声效应的存在，当目标在汇聚区附近时，容易捕捉到信号；当目标在影区时，就很难发现它。对声场环境各向同性海域而言，意味着以我为中心在相应的距离上存在着若干个环带，当目标进入这些环带时就被我声呐所捕获。

3 结语

基于 2006 年资料 Argo 温、盐浮标资料，计算西北太平洋海域声速剖面，运用改进的遗传聚类方法对声速剖面进行了区划分型，充分发挥了遗传算法和模糊 C 均值聚类算法的优势，又解决了分类数目难以客观优选的问题，区划分型方案具有客观性和合理性；运用 Kraken 简正波传播模型模拟三类典型声速结构的声传播损失场，对比分析其声传播损失曲线及声呐优质因数，阐述声传播损失所形成的海洋环境声效应在声呐探测领域的运用，得出

以下结论:

(1) 西北太平洋海域各类声速剖面结构呈纬向带状分布, 且随季节变化不显著。在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 纬向带存在多种声速剖面。

(2) 声源与声道轴的相对位置对声传播损失能量有着决定性影响, 也直接影响声呐探测效能。对于处在声道深度的主动声呐而言, 最容易发现声道深度附近的目标, 其次是处于声道深度以下的目标, 而最难或不能发现处于声道上边界以浅的目标。

致谢: 中国 Argo 实时资料中心提供了本论文的研究资料, 特此致谢!

参 考 文 献

Fofonoff N P, Millard Jr R C, 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine

science, 1983: 44–53.

Michael B Porter, 1998. The KRAKEN Normal Mode Program(DRAFT).

Paul C. Etter, 2005. Underwater Acoustic Modeling and Simulation (the third edition).

陈治国, 张星, 章新华, 2005. 海洋声场预报及战术应用. 舰船科学技术, 27(4): 66–69.

代民果, 黄大吉, 章本照, 2005. 琉球群岛附近海域声场初步分析. 海洋学报, 27(1): 45–50.

王彦磊, 张韧, 孙照渤, 等, 2005. 基于模糊 C 均值聚类的云图样本修正与云类自动识别. 海洋科学进展, 23(2): 219–226.

谢骏, 浦晓波, 胡均川, 等, 2002. 基于 SOFM 网络的声速剖面聚类研究. 青岛海洋大学学报, 17(1): 25–31.

张歆, 张小蓟, 李斌, 2000. 基于 Kraken 简正波模型的浅海声场分析. 西北工业大学学报, 18(3): 405–408.

张镇迈, 彭朝晖, 2006. 深海表面层声速剖面变化对声传播的影响. 应用声学, 25(6): 359–363.

赵建虎, 周丰年, 张红梅, 等, 2007. 基于自组织神经网络的声速剖面分类方法研究. 武汉大学学报(信息科学版), 32(2): 164–167.

(本文编辑: 郭笋)