

东海 PN 断面黑潮区域声传播数值模拟 *

吕连港^{1 2 3} 袁业立³

(¹ 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

(² 中国科学院研究生院 北京 100039)

(³ 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室 青岛 266061)

提要 利用 BELLHOP 声学模式模拟东海 PN 断面黑潮区域的声传播, 比较夏季和冬季的接收信号。冬季的声速小于夏季的声速, 但是信号到达时间小于夏季的到达时间, 分析表明冬季的声速梯度小于夏季声速梯度, 声线的海面反射次数和海底反射次数小于夏季, 声线的路程短, 声线路程对到达时间的影响超过声速的影响, 于是冬季信号早于夏季到达。

关键词 声传播, PN 断面, 黑潮

中图分类号 P733 **文献标识码** A **文章编号** 1000 - 3096(2003)03 - 0073 - 04

黑潮是典型的西边界流, 它起源于菲律宾以东海域, 在台湾以东进入东海, 沿东海大陆架外缘向东北流动, 穿越土噶喇海峡, 经日本以南海域, 汇入北太平洋海流。黑潮具有流速强、流量大、高温、高盐等特点, 形成强西边界流边缘锋。黑潮锋面区域温、盐、密等水文参数变化剧烈, 使声速产生很强的水平变化和垂直变化, 其中温度的影响最为显著。声速的强变化必然影响声波的发射、传播和接收, 于是对潜艇活动、水声通讯监测、水雷布设等水中武器的使用产生很大的影响^[1]。因此研究黑潮区域的声传播具有重要的军事意义。

黑潮携带了巨大的水量和热量, 它的存在和变异对中国的沿海气候、海洋环境、渔业资源等有重要影响。因此用声层析方法反演黑潮水温 and 流速, 以实现黑潮输运的监测也具有重要意义。海洋声层析是一个具有挑战性的反问题, 正问题声传播的研究是这一反问题的基础。

1 研究区域

在东海黑潮的调查研究中, PN 断面是观测最系统、观测时间最长的一个断面。东海 PN 断面的黑潮比较稳定, 流向基本与断面垂直, 历史调查资料丰富, 所以把东海 PN 断面黑潮海区作为研究区域。PN 断面位置如图 1 所示, 图中黑点表示研究区域的 3 个 CTD 调

查站位, 所选 3 个站位基本位于黑潮主流区域。由图中的水深等值线可以看出研究区域的水深急剧变化。图中站位的水平距离约 25 km, A1 站位的水深是 250 m, A2 站位的水深是 900 m, A3 站位的水深是 1 100 m。

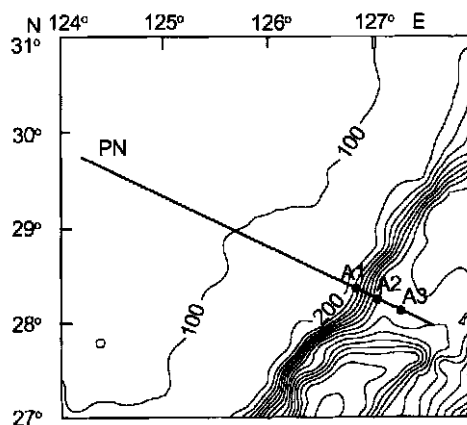


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of studied area

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043811 号。
第一作者: 吕连港, 出生于 1974 年, 博士研究生, 研究方向: 声学海洋学, E-mail: mddc@yeah.net

收稿日期: 2002-11-05; 修回日期: 2002-11-28

2 声速剖面 and 计算条件

研究所用声速剖面由 2001 年 8 月(夏季)和 2002 年 1 月(冬季)东海 PN 断面 CTD 调查资料得到。图 2 是 3 个站位夏季和冬季的声速分布。声速随深度的变化主要是负梯度,使声线向海底弯曲。水深 700 m 以下声速随深度的变化很小。夏季的声速梯度大于冬季的声速梯度,冬季表层 100 m 声速有弱的正梯度存在,形成海表声道,是有利的声传播条件。不论夏季冬季声速的水平差别都很大。总的变化趋势是,由深水区域到浅水区域(A3→A1),同一深度的声速变小,声速负梯度增大,但是夏季 500 m 至 900 m 深的水体和冬季 500 m 至 750 m 深的水体的情况恰恰相反,由深水区域到浅水区其声速负梯度减小。100 m 深以上的水体,夏季和冬季的水平变化都比较复杂。

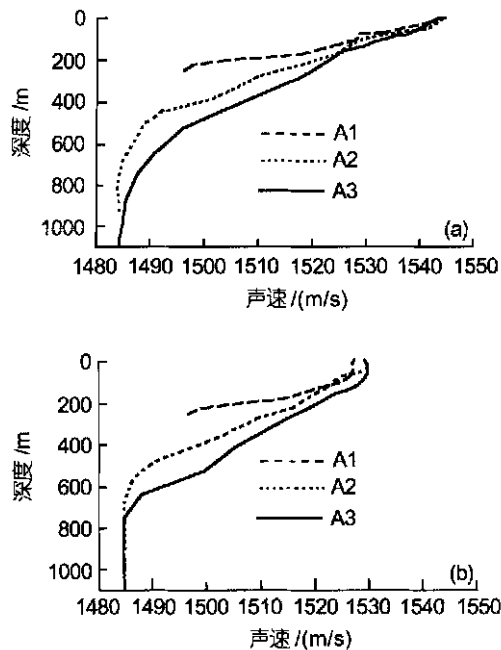


图 2 夏季(a)和冬季(b)的声速图
Fig.2 Sound speed profiles in summer (a) and winter (b)

本文研究利用 BELLHOP 声学模式^[2],该模式使用高斯束追踪代替几何束追踪,把射线作为有高斯强度的波束联合起来,从而使结果更加精确。由于海面空气的介质阻抗远小于海水的介质阻抗,海面的边界条件取绝对软边界^[3],在一般海况条件下假设海面为平面。将海底设定为声学弹性半空间^[3],给出海底的声速、密度和吸收率。数值模拟中的声波频率为

1 kHz。声源位于 A3 站位 150 m 水深处,10 个接收器位于 50 km 处(A1 站位),深度由 30 m 至 120 m,每个接收器间隔 10 m,数值模拟夏季和冬季的声传播。

3 数值模拟结果

图 3 是夏季不同深度接收到的信号,多途比较明显,多途扩展约 1.5 s,有两列比较明显的信号,一列的到达时间约 34.5 s,另一列幅度较大,到达时间约 35.3 s。两列信号的到达时间都随深度的增加而增加,显然是由经海面反射后传播的 2 条声线产生的。由于传播距离比较远,接收器的间隔小,不同深度接

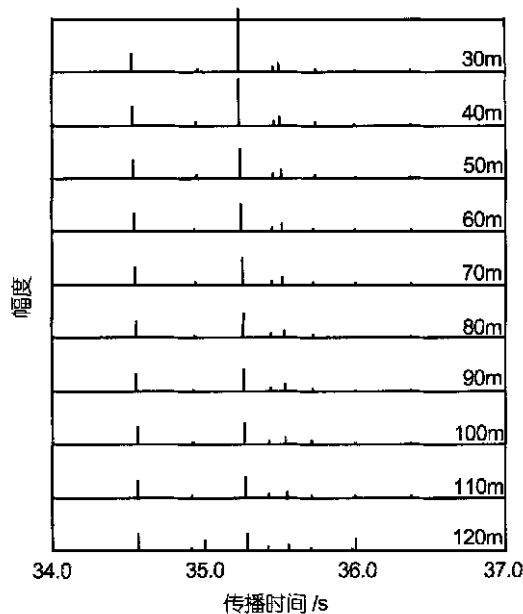


图 3 夏季的接收信号
Fig.3 Arrival patterns in summer

收的信号差别很小。

冬季不同深度接收到的信号多途也比较明显(图 4),多途扩展约 2 s,也有两列比较明显的信号,但是其到达时间比较接近,约 34.6 s 和 34.7 s,其中幅度最大的一列到达时间随深度的增加而减小,是由一条经海底反射后传播的声线产生的,幅度次大的一列是由经海面反射后传播的声线产生的。不同接收深度信号的差异很小。

图 3 和图 4 比较,冬季信号的到达时间小于夏季信号的到达时间。冬季的声速小于夏季的声速,如果到达时间仅受声速的影响,那么冬季的到达时间要大于夏季的到达时间,显然还有其它因素影响声信号的

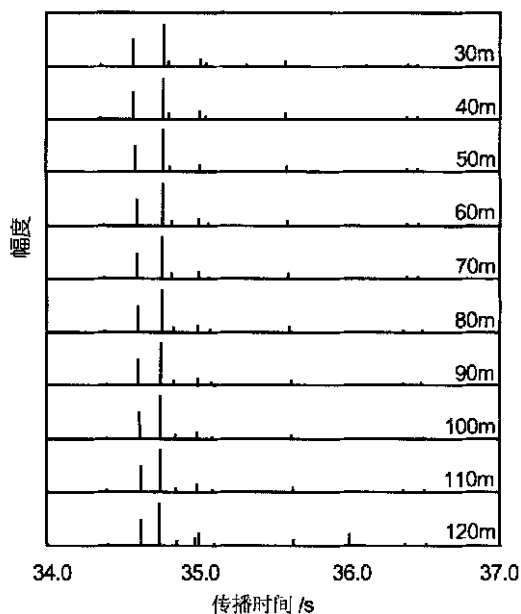


图 4 冬季的接收信号
Fig.4 Arrival patterns in winter

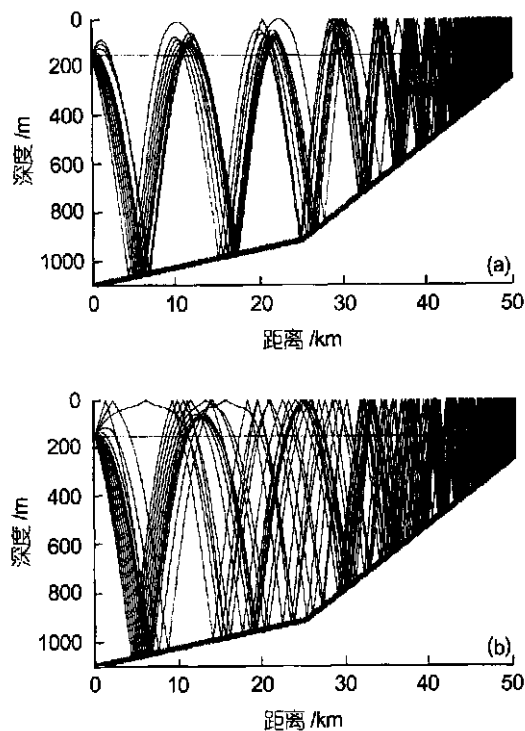


图 5 夏季(a)和冬季(b)的本征射线
Fig.5 Eigenrays in summer (a) and winter (b)

到达时间。

分析夏季和冬季声传播的本征射线(图5),可见夏季传播的本征射线比较集中,冬季的相对散乱,这解释了冬季接收信号多途扩展大于夏季接收信号的多途扩展。图中的水平线表示声源的位置而不是声线。随着海底的抬升,声线两次海底反射的间距减小,海底海面反射次数迅速增加。夏季本征射线在20 km范围内无海面反射,冬季的声线触底间距大于夏季的

触底间距,海底反射次数相对少,到达的声线比较多,说明冬季的声速分布比夏季更有利于声传播。在水平距离确定的情况下海底海面反射次数多则声线的路程增加,这使声信号的到达时间增加。由于冬季声线触底间距大,反射次数少,声线路程相对短,所以冬季

表 1 本征射线的到达时间、幅度、海面反射次数和海底反射次数

出射角度(°)	到达时间(s)		幅度		海面反射次数		海底反射次数	
	夏	冬	夏	冬	夏	冬	夏	冬
- 6.0	35.79	36.11	0.23×10^{-7}	0.11×10^{-7}	15	18	17	18
- 5.0	36.02	35.33	0.13×10^{-7}	0.13×10^{-8}	15	16	18	15
- 4.0	35.73	35.06	0.74×10^{-7}	0.11×10^{-6}	14	14	17	14
- 2.0	35.46	34.82	0.22×10^{-6}	0.19×10^{-6}	13	12	16	13
- 1.0	35.25	34.77	0.54×10^{-6}	0.16×10^{-5}	13	11	15	13
0.0	35.24	34.59	0.11×10^{-5}	1.00×10^{-5}	13	11	15	12
1.0	35.25	34.77	0.62×10^{-6}	0.20×10^{-6}	13	11	15	13
2.0	35.51	35.01	0.36×10^{-6}	0.29×10^{-6}	14	12	16	14
3.0	35.74	34.82	0.14×10^{-6}	0.20×10^{-6}	14	13	17	13
4.0	34.54	35.58	0.70×10^{-6}	0.11×10^{-6}	9	16	12	16
5.0	34.95	36.45	0.15×10^{-6}	0.17×10^{-7}	11	19	14	19
7.0	35.46	36.38	0.22×10^{-7}	0.38×10^{-7}	14	18	16	19

声信号到达早于夏季的声信号到达。

为了定量地比较夏季和冬季的海底海面反射次数,给出接收深度 50 m,相同出射角度的声线的到达时间、幅度、海底反射次数和海面反射次数的夏季和冬季比较(表 1,出射角度为负值的声线自声源向海面传播)。出射角度大的本征声线,冬季的海面反射次数和海底反射次数大于夏季的海面海底反射次数,这是因为夏季的声速梯度大,有些声线不能到达海表面。小出射角的本征射线,冬季的海面反射次数和海底反射次数小于夏季的海面海底反射次数,这是因为冬季的声速梯度小,声线弯曲程度相对夏季小,声线更易于向前方传播。于是这些小出射角的声线路程相对夏季短,路程对到达时间的影响大于声速对到达时间的影响,最后的结果是到达时间早。同时小出射角度的声线幅度大,代表了接收信号的主要的成分,因此冬季的信号到达早于夏季的信号到达。

4 讨论

影响信号到达时间的因素有声速和传播路径。PN断面黑潮海区,夏季的声速高于冬季的声速,声速

本身的变化使传播时间减小;同时夏季的声速负梯度大,声线触底间距小,声线路径长,增加传播时间。总体的影响是夏季声信号的传播时间长于冬季,这说明声线路径对到达时间的影响大于声速的影响。海洋声层析依据声速与传播时间的关系由传播时间反演声速。显然在该海区声速负梯度的这种情况下,声线路径的变化将影响声层析的结果。在浅海声传播中,海底声学特性的影响是很重要的。本文的计算中,将海底设定为声学弹性半空间,给出海底的声速、密度和吸收率。由于缺少对该区域海底声学特性的了解,因此计算中设定的海底参数与实际的差别无法知道。

参考文献

- 1 李凤岐,苏育嵩.海洋水团分析.青岛:青岛海洋大学出版社,2001.36
- 2 Porter MB, Bucker H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. J Acoust Soc Am, 1987 (82): 1 349-1 359
- 3 杨士莪.水声学原理.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1994.3

NUMERICAL SIMULATION OF ACOUSTIC TRANSMISSION IN KUROSHIO ZONE AT THE PN SECTION IN EAST CHINA SEA

Lü Lian Gang^{1 2 3} YUAN Ye-Li³

(¹ Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039)

(³ Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao, 266061)

Received: Nov., 5, 2002

Key Words: Acoustic transmission, PN section, Kuroshio

Abstract

Acoustic transmission in Kuroshio zone at the PN section in East China Sea is simulated with BELLHOP model. Gradient of sound speed in winter is smaller than that in summer. That results in increase in number of reflections and ray path length. Therefore, the travel times of rays are dominated by path length and rays arrive earlier in winter than in summer.

(本文编辑:刘珊珊)