

海洋声学

[苏] Л. М. 布列霍夫斯基 主编

科学出版社

56-333
15.3

5650 52 23

海洋声学

[苏]И.М.布列霍夫斯基 主编
山东海洋学院海洋物理系
中国科学院声学研究所水声研究室

译

科学出版社

1983

1012505

内 容 简 介

这是一部集体完成的专著, 阐述海洋学中一个相当新而发展迅速的学科——海洋声学的最新研究成果。

本书阐明了海洋中声传播的理论、不平整海面 and 海底的声反射和声散射、海水介质随机不均匀性对海洋声传播的影响、海洋噪声以及对海洋声学有重要意义的海洋特性等, 内容广泛, 涉及了海洋声学的各个专题。

本书适于水声方面的科研人员、有关高校教师和高年级大学生阅读。

Л. М. Бреховских

АКУСТИКА ОКЕАНА

Издательство «НАУКА» 1974

海 洋 声 学

〔苏〕Л. М. 布列霍夫斯基 主编

山 东 海 洋 学 院 海 洋 物 理 系 译
中国科学院声学研究所水声研究室

责任编辑 赵徐懿

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1983年3月第一次印刷 印张: 34

印数: 0001—1,400 字数: 790,000

统一书号: 13031·2173

本社书号: 2976·13-17

定价: 5.20元

中译本序

有人预言，到本世纪末，人类研究海洋和发展海洋技术的力量，将与研究宇宙和发展宇航技术的力量并驾齐驱，这可能是很有道理的。人类正面临“能源”和“环境”问题的严重挑战。占整个地球表面71%的浩瀚海洋，关系着人类未来发展的前景。海洋无穷无尽的资源，使当前许多国家再次瞩目于海洋。遗憾的是，人类似乎有点“舍近求远”。从世界范围来看，现在人们对海洋的了解，远比不上对月球的了解。但是，可以预料，这一状况必定会在今后的年月里迅速得到改变。在海洋研究的广阔天地里，许许多多重大发现正期待着我们去播种和收获。在海洋科学技术的研究中，声学方法的优越性是人们所十分熟知的。声波是目前唯一能在海洋中作远距离传播的一种辐射形式。利用声波传播所构成的“积分探头”来探索和监测海洋，将会给经典海洋科学的研究带来非常深刻的变革。因此海洋声学在海洋科学研究的发展进程中具有十分重要的地位和意义。

本书由苏联科学院布列霍夫斯基院士主编，分别由该院声学研究所和与海洋等有关的科学研究人员编写。全书共分九篇，按不同的专题论述了最近二十多年来有关海洋声学的研究成果；内容涉及了水声物理学的各个方面，资料丰富，论述全面。书中列出的不少数据和图表也是很有价值的。在体例上，各个专题的论述有相对的独立性，但由于主编的匠心，全书仍保持了完整的系统性。然而，毕竟由于撰稿人较多，前后照应往往不很紧密，内容叙述上难免有所重复或脱节；有些问题的论述则显得过于简单。同时，书中对某些测量数据的搜集和汇编也或有不足之处。不过，总的说来，这是一本有较高水平的学术著作，值得把它介绍和推荐给读者。

本书不论对水声科学技术的研究或对海洋科学技术的研究都有一定的参考价值。翻译本书的目的，一方面是为了满足从事这几方面工作的读者的需要，另一方面也是为了积极推进声学海洋学的相互渗透和相互促进。人们已开始认识到，在当前，利用科学技术，其中包括声学科学技术，去向海洋索取丰富的宝藏，比征服宇宙更具有迫切性，其可能获得的实际物质利益也比后者大得多。所以，不遗余力地积极推进声学海洋学的相互渗透，不仅具有广阔的前途，而且也具有重要的战略意义。

本书由山东海洋学院海洋物理系和中国科学院声学研究所水声研究室共同译出。考虑到海洋科学和水声科学的专业深度，这种合作是非常必要和有益的。但是，译文和校注工作中的缺点甚至错误，仍然很难避免，竭诚欢迎读者批评指正。

汪德昭

一九八〇年八月



9505

序 言

海洋声学在海洋学中占有特殊的地位。声波是能够在海洋中进行远距离传播的唯一辐射形式。因此，海洋声学——海洋学的一个较新领域——很快就获得了巨大的应用价值。把水下信号传送几千公里的距离；用声学定位法探测小至不大的鱼、大至巨大冰山的水下部分等水下目标；利用声学手段详细测绘海底地形；把声波穿透到海底几公里深处；鱼群的声探测；研究声散射层的海洋生物组成；潜水员的声通讯；海洋中自动仪器的信息传递（水下声遥测）；用水声学方法对破坏性的海啸进行近期预报——这些还远非水声应用的全部内容。声在水下通讯、导航、目标探测以及其他许多方面所起的作用，就和大气中的无线电波的作用一样。诚然，声波的传播要比无线电波慢得多，而且其频率通常比无线电波也低得多，所以在某些方面应用不那么有效。但是，对许多应用来说，目前还没有比水下声波更好的手段。

在大部分海洋中，都经常存在着一个能够提高声学设备效率的有利因素——水下声道，声波（特别是低频声）沿声道能传播非常远的距离而衰减很小。此外，也有许多影响声在水下传播的不利因素。这些因素包括海面与海底的不平整性、水层的各种不均匀性（包括湍流的不均匀性）、内波等等。

在本专著中，作者们试图阐明关于海洋中声场理论和实验研究的最新成果。需要这么一本著作，是因为自1945年《水声学物理基础》一书问世之后，在这一学科领域中，世界上还没有一本叙述得相当完善的书。在 V. M. Albers 主编的《水声学》中涉及的问题相当广，但叙述都很不完整，而且相当零乱。在个别著作中（其中包括 E. Tolstoy 和 C. Clay 的优秀专著），仅仅叙述了问题的某些方面。

在写本专著时，作者们遇到了一系列的困难。因为海洋声学的某些分支仍处在迅速发展之中，今天写的内容，明天就可能过时了。譬如，海水中低频声波的吸收，声波与海面波浪和内波的相互作用等等都属于这类问题。但是，在著述过程中跟随着正在发展的科学动态，必将更有意义。

作者们感谢 И. Ф. Трешетенков 在准备本书手稿过程中所给予的极大帮助。

Л. М. 布列霍夫斯基

目 录

序言	ii
----------	----

第一篇 与海洋声学有关的海洋特性

第一章 海洋中的声速和声吸收	1
§ 1 声速的经验公式	1
§ 2 海水的均匀性	3
§ 3 声吸收	6
第二章 海底	11
§ 4 海底沉积物	11
§ 5 沉积物的分层	14
§ 6 海底地形	15
第三章 散射声波的海洋生物群	21
§ 7 捕捞和观测	21
§ 8 有鳔鱼和有气腔的管水母	22
§ 9 无气腔而有硬质躯体部分的动物	24
§ 10 具有胶质躯体的动物	25
第四章 海面	27
§ 11 波浪的基本理论	27
§ 12 波浪的产生和成长	29
§ 13 风力和波浪的分级	30
§ 14 波浪的统计特性	31
§ 15 谱和波高	33
§ 16 波浪的陡度、曲率和角分布谱	36
§ 17 海面表层内的空气泡	38
第五章 内波	40
§ 18 引言。双层模型	40
§ 19 密度的连续分布。Väisälä 频率	41
§ 20 实验数据	43
第六章 海洋深处的随机不均匀性	45
§ 21 随机场的一般概念和描述	45
§ 22 海洋湍流	48
参考文献	52

第二篇 海洋中声场的基本理论

引言	58
第一章 海洋中声场的射线理论	59
§ 1 声源	59

§ 2	声线的折射	59
§ 3	声强, 聚焦因子, 焦散线	63
§ 4	“三维”折射	65
第二章	海面与海底作为平整界面时的声学特性	68
§ 5	两种液态介质分界面上的反射系数与透射系数	68
§ 6	声波从水中传入空气中及其相反的情况	71
§ 7	水下声源靠近海面时的声场	75
§ 8	固态海底的声反射	79
§ 9	液态分层海底的声反射	82
第三章	声的波导传播	87
§ 10	最简单的波导传播的声线图解	87
§ 11	简正波	90
§ 12	一般情况下的简正波	93
§ 13	连续分层介质中的波导	96
第四章	水下声道	100
§ 14	水下声道的“线性”模型	100
§ 15	会聚区	105
§ 16	声泄漏	108
§ 17	水下声道中的能量关系	111
§ 18	浅海传播	117
第五章	反波导传播	121
§ 19	关于声影区的基本理论	121
§ 20	WKB 近似	122
§ 21	WKB 近似在影区声场分析中的应用	123
§ 22	衍射声线	125
参考文献		127

第三篇 海洋中集总声源的声场

引言	129
第一章 声线图	130
§ 1 大洋中典型的声速垂直分布及相应的声线图	130
第二章 水声线声场	135
§ 2 一般定义	135
§ 3 聚焦因子	136
§ 4 声线的角度特性	140
§ 5 时间关系	142
§ 6 水声线所构成的点源声场	144
第三章 底声线声场	151
§ 7 聚焦因子, 时间特性与角度特性	151
§ 8 海底反射声场	154
§ 9 水声线与底声线构成的总声场	156
第四章 大洋中声场的实验研究	159

§ 10 单频发射和单频脉冲发射时的声场	159
§ 11 单频发射时声场级的测量方法	159
§ 12 单频发射和单频脉冲发射时声压级测量结果的分析方法	161
§ 13 爆炸声源声场的测量和测量结果的分析方法	162
第五章 声场的实验特性	165
§ 14 大洋中声衰减的实验研究	165
§ 15 声场随距离变化规律的实验数据	170
§ 16 平均反射系数的角度关系	173
§ 17 会聚区的声场结构、信号形状	174
结语	177
参考文献	177

第四篇 不平整表面的声散射

引言	179
第一章 声在小尺度不平整性的表面上的散射	181
§ 1 微扰法的一般特点	181
§ 2 绝对软的统计不平整表面上平均声场的近似边界条件	181
§ 3 平均反射系数	182
§ 4 海面的平均反射系数	185
§ 5 二维不平整性。平面问题	189
§ 6 绝对刚性的不平整表面上的反射	191
§ 7 不平整表面附近的点源所产生的平均场	193
§ 8 散射场的空间相关	194
§ 9 夫琅和费带内的散射场	199
§ 10 散射系数	202
§ 11 海面的散射系数	207
§ 12 声在具有不平整界面的表面声道中的传播	209
§ 13 声的组合散射	213
第二章 声在大尺度不平整性的表面上的散射	215
§ 14 基尔霍夫近似的一般特性及其适用范围	215
§ 15 平均场	218
§ 16 场的平均强度	222
§ 17 散射场的起伏	227
§ 18 统计不平整表面的叠加	230
§ 19 近场(菲涅耳带)内的声场	237
§ 20 声信号在大洋底面上散射时的时间起伏	242
§ 21 声在不规则层上的散射	252
参考文献	256

第五篇 波动海面的声反射和声散射

引言	260
第一章 信号经波动海面反射后的起伏	261

§ 1	反射信号的结构及起伏强度	261
§ 2	时间相关与谱	264
§ 3	空间相关	271
§ 4	频率相关	278
第二章	在镜向及其附近由海面二次辐射的声场	281
§ 5	散射场的测量特点	281
§ 6	有效反射系数	283
§ 7	实验数据	286
第三章	海面反向声散射的实验研究方法	290
§ 8	利用无指向性宽带声源时的测量原理	290
§ 9	水下爆炸声源	293
§ 10	接收-记录装置	295
第四章	海面反向散射的实验特征	298
§ 11	海面与近海面层作用的对比	298
§ 12	海面反向散射的平均规律	301
参考文献		305

第六篇 海底的声反射和声散射

引言		308
第一章	海底的声反射及实验方法	309
§ 1	海底声反射的实验研究方法	309
§ 2	实验示意图	310
§ 3	发射-接收的时制	312
§ 4	测量结果的处理	314
第二章	反射信号的统计特性	316
§ 5	振幅的概率分布	316
§ 6	海底的反射区域	319
§ 7	反射信号包络的起伏频率	320
第三章	反射信号的特性与海底总地形的关系	329
§ 8	有效反射系数和振幅分布函数的参数对海底总地形特征的依赖关系	329
§ 9	对结果的讨论	333
§ 10	实验结果与统计不平整界面的反射理论的比较	337
§ 11	不同海底地形区的包络起伏频率	339
第四章	反射信号特性的频率关系和角度关系	340
§ 12	强割裂海底区反射信号特性的频率关系和角度关系	340
§ 13	夷平海底区的反射信号特性的频率关系和角度关系	342
第五章	海底的声散射及研究方法	347
§ 14	问题的提出	347
§ 15	单频脉冲法	347
§ 16	脉冲法	348
第六章	实验数据的分析和处理	353
§ 17	用爆炸脉冲确定海底声散射系数	353

§ 18 实验数据的处理	355
§ 19 测量误差	356
第七章 夷平地形区的声散射	361
§ 20 散射强度的角度特性和频率特性	361
§ 21 散射强度的角度和频率关系与海底不平整性参数间的联系	363
第八章 切割地形区的声散射	365
§ 22 强割裂地形	365
§ 23 强切割地形区散射强度的角度和频率关系与海底不平整性参数间的联系	366
§ 24 海底中等切割地形区的声散射	368
§ 25 海床的不均匀性所产生的声散射	368
第九章 海底地貌特征和声的有效反射系数的确定	372
§ 26 用声学方法确定海底的某些地貌特征	372
§ 27 垂直入射时海底有效声反射系数的确定	373
结语	377
参考文献	378

第七篇 声在海洋声散射层中的散射

引言	381
第一章 在海洋水层中的声散射特性	382
§ 1 声散射层的发现史	382
§ 2 声散射层声学特性的研究	384
第二章 单个动物体的声散射机理	387
§ 3 鱼鳔的共振频率	387
§ 4 振动能量在鱼鳔中的损耗	390
§ 5 鱼鳔的有效散射截面	394
§ 6 海洋动物躯体组织的声散射	398
第三章 声散射层对声波的散射	404
§ 7 体积散射理论的适用性	404
§ 8 各种动物在形成散射场中的作用	405
§ 9 有鳔鱼群的声散射	408
§ 10 获取散射动物信息的声学方法	410
第四章 现场实验研究的方法	413
§ 11 层强度与反向体积散射系数的测量	413
§ 12 遥测技术与记录处理	416
§ 13 有效散射截面与散射体密度的测量	418
§ 14 声散射层的深度和动物区系的确定	421
第五章 海洋现场测量结果	423
§ 15 层强度与散射系数	423
§ 16 大西洋的散射特性与深度及昼夜时间的关系	426
参考文献	430

第八篇 计及介质随机不均匀性时海洋中的声场

引言	435
第一章 随机不均匀性的散射与海洋中的声场	436
§ 1 声波的起伏	436
§ 2 波的散射	438
§ 3 中距离及远距离起伏	439
§ 4 近距离起伏	441
§ 5 声起伏的实验研究	445
第二章 声在海洋中传播时的信号起伏	451
§ 6 问题的一般特性	451
§ 7 振幅起伏谱	456
§ 8 多路径	460
§ 9 信号参数的缓慢变化	467
参考文献	473

第九篇 海洋噪声

引言	476
第一章 海洋噪声场及其研究方法	478
§ 1 噪声场的基本特性	478
§ 2 海洋中的噪声场	482
§ 3 冰下噪声	484
§ 4 生物噪声	487
§ 5 地震噪声	491
§ 6 工业噪声	493
§ 7 海洋噪声场测量的某些特点	495
第二章 海洋动力学噪声	500
§ 8 动力学噪声的平稳性	500
§ 9 海洋动力学噪声的能谱特征	501
§ 10 外海深海动力学噪声的空间相关函数	508
§ 11 海洋噪声场源的空间分布和基本性质	511
§ 12 海洋噪声场的各向异性	516
§ 13 海-气交界层中的动力学过程所引起的次声频噪声	520
§ 14 海洋表层中的空化所引起的噪声	524
结语	529
参考文献	530

第一篇 与海洋声学有关的海洋特性

Н.С.Агеева И.Б.Андреева В.И.Воловов
Ю.Ю.Житковский А.В.Фурдеев
С.Д.Чупров Р.Ф.Швачко

第一章 海洋中的声速和声吸收

§1 声速的经验公式

声波是一种弹性纵波，它的速度由下式确定：

$$c = \left(\frac{K}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1.1)$$

其中 K 为体积弹性模量； ρ 为密度； K 和 ρ 都是温度 T 、盐度 S 和静压力 P 的函数。声速对这三个量的依赖关系通常用经验公式来表示。这样的经验公式最早是由 Kuwahara^[1]提出的。后来，其他的研究人员^[2-13]多次对它进行修正，使其更为准确。迄今公认的最准确的公式是威尔逊公式^[9]。这个公式包括单独依赖于温度、盐度和静压力的各项以及同时依赖于这三个量的项的和，其形式为：

$$c = 1449.14 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_P + \Delta c_{STP} \quad (1.2)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta c_T &= 4.5721T - 4.4532 \times 10^{-2}T^2 - 2.6045 \times 10^{-4}T^3 + 7.985 \times 10^{-6}T^4 \\ \Delta c_S &= 1.3980(S - 35) + 1.692 \times 10^{-3}(S - 35)^2 \\ \Delta c_P &= 1.60272 \times 10^{-1}P + 1.0268 \times 10^{-5}P^2 + 3.5216 \times 10^{-9}P^3 - 3.3603 \times 10^{-12}P^4 \\ \Delta c_{STP} &= (S - 35)(-1.1244 \times 10^{-2}T + 7.7711 \times 10^{-7}T^2 + 7.7016 \times 10^{-5}P \\ &\quad - 1.2943 \times 10^{-7}P^2 + 3.1580 \times 10^{-8}PT + 1.5790 \times 10^{-9}PT^2) \\ &\quad + P(-1.8607 \times 10^{-4}T + 7.4812 \times 10^{-6}T^2 + 4.5283 \times 10^{-8}T^3) \\ &\quad + P^2(-2.5294 \times 10^{-7}T + 1.8563 \times 10^{-9}T^2) + P^3(-1.9646 \times 10^{-10}T) \end{aligned}$$

(单位： c ——米/秒， T ——度， S ——‰， P ——千克/厘米²)

为了用 T ， S ， P 的数据对声速进行实际计算，作出了 Δc_T ， Δc_S 和 Δc_{STP} 的修正表。为了把这些修正量对静压力的关系转换成对深度的关系，必须知道压力 P 对深度 z 的关系。文献[14]给出这个关系为：

$$P = 1.033 + 1.028126 \times 10^{-1}z + 2.38 \times 10^{-7}z^2 - 6.8 \times 10^{-17}z^4$$

(z 为深度，单位是米)

现在，由静压力引起的声速修正量就变成由深度引起的修正量

$$\Delta c_z = 0.1656 + 1.64802 \times 10^{-2} z + 1.4680 \times 10^{-7} z^2 + 4.315 \times 10^{-12} z^3 - 3.48 \times 10^{-16} z^4 - 3.4 \times 10^{-21} z^5 - 1.2 \times 10^{-26} z^6 \quad (1.3)$$

Leroy^[13]指出,海水中声速 c 随 S , T 和 z 而变化的威尔逊关系式可以表示成更简单的形式,而精度并不比 (1.2) 式差,即:

$$c = V_0 + V_a + V_b + V_c + V_d \quad (1.4)$$

其中

$$V_0 = 1493.0 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + z/61$$

$$V_a = 0.1\xi^2 + 2 \times 10^{-4}\xi^2(T - 18)^2 + 0.1\xi\varphi/90$$

$$V_b = 2.6 \times 10^{-4}T(T - 5)(T - 25)$$

$$V_c = -10^{-3}\xi^2(\xi - 4)(\xi - 8)$$

$$V_d = 1.5 \times 10^{-3}(S - 35)(1 - \xi) + 3 \times 10^{-6}T^2(T - 30)(S - 35)$$

这里 z 和 $\xi = z/1000$ 是深度,单位分别为米和千米; φ 为测点的地理纬度,单位是度(它的出现是因为重力加速度与纬度有关,因而在该深度处的静压力也依赖于纬度)。 (1.4) 式常常可以只取第一项 (在 $T \leq 25^\circ\text{C}$ 时,误差不超过 0.2 米/秒)。实际上,在所有情况下,完整公式 (1.4) 给出的海水中声速 c 与威尔逊测量值的均方偏差总计为 0.07 米/秒。

Frye 和 Pugh¹⁾在不久前发表的文章中,在威尔逊数据的基础上给出了又一个更简单的、按照温度 T ($^\circ\text{C}$) 及盐度 S ($\%$) 计算声速的公式:

$$c = 1449.30 + \Delta c_P + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_{TPS}$$

其中

$$\Delta c_P = 1.5848 \times 10^{-1}P + 1.572 \times 10^{-5}P^2 - 3.46 \times 10^{-12}P^4$$

$$\Delta c_T = 4.587T - 5.356 \times 10^{-2}T^2 + 2.604 \times 10^{-4}T^3$$

$$\Delta c_S = 1.19(S - 35) + 9.6 \times 10^{-2}(S - 35)^3$$

$$\Delta c_{TPS} = 1.35 \times 10^{-5}T^2P - 7.19 \times 10^{-7}TP^2 - 1.2 \times 10^{-2}(S - 35)T$$

声速的变化主要是由温度引起的。温度升高引起 K 值增加和密度 ρ 减小,而根据 (1.1) 声速随之增加。下面给出在不同温度区间内,温度变化 1°C 时 Δc_T 的变化值:

$T^\circ\text{C}$	1—10	10—20	20—30	30—40
Δc_T 的变化	4.466—3.635	3.635—2.734	2.734—2.059	2.059—1.804
(米/秒·度)				

盐度对声速的影响比温度小。海水中的各种盐类,由于其离子力大小不同,所以对压缩率 $G = 1/K$ 有不同的影响。离子力等于离子价的平方和浓度乘积的一半。在海水溶液所含的所有盐类中, MgSO_4 具有最大的离子价,但它在海水中的浓度远小于 NaCl 。故后者对压缩率具有决定性的影响,虽然它的离子价较低。文献[2]给出了温度 30°C 时纯盐溶液的声速数据(表1)。温度为 30°C 时,海水中包含的每一种盐类对压缩率和声速的贡献列于表2。

1) Frye H. W., Pugh J. D., A new equation for the speed of sound in sea water. — J. Acoust. Soc. Amer., 1971, 50, №.1(pt.2), 384—386.

按照公式 (1.3), 静压力对声速的修正与深度的关系如下:

z (米)	0	10	100	1000	5000
Δc_p (米/秒)	0.166	0.330	1.815	16.796	86.777

表1 $MgSO_4$ 和 $NaCl$ 对溶液中声速的影响

浓度 (克分子/升)	离子力 (克分子/升)		压缩率 ($\times 10^{12}$ 厘米 ² /达因)		密度 (克/厘米 ³)		声速 (米/秒)	
	$MgSO_4$	$NaCl$	$MgSO_4$	$NaCl$	$MgSO_4$	$NaCl$	$MgSO_4$	$NaCl$
0.1	0.4	0.1	44.863	43.504	1.0071	0.9996	1522.0	1516.4
0.2	0.8	0.2	41.674	42.957	1.0196	1.0039	1534.1	1522.8
0.4	1.6	0.4	39.374	41.981	1.0415	1.0117	1561.6	1534.4
1.0	4.0	1.0	33.305	39.115	1.1116	1.0372	1643.5	1570.0
2.0	8.0	2.0	25.917	35.230	1.2178	1.0736	1780.0	1626.0

表2 海水中各种盐类对压缩率和声速的影响

溶液	浓 度		声 速 (米/秒)	声速增量 (米/秒)	绝热压缩率 ($\times 10^{12}$ 厘米 ² /达因)	压缩率增量 ($\times 10^{12}$ 厘米 ² /达因)
	(克/千克)	(克分子/升)				
蒸馏水	—	—	1510.0	0.0	44.052	-0.000
$NaCl$	26.518	0.4649	1538.2	28.2	41.672	-2.380
$MgSO_4$	3.305	0.0281	1513.4	3.4	43.718	-0.334
$MgCl_2$	2.447	0.0263	1512.9	2.9	43.802	-0.250
$CaCl_2$	1.141	0.0105	1510.9	0.9	43.961	-0.091
KCl	0.725	0.00997	1510.6	0.6	43.999	-0.053
$NaHCO_3$	0.202	0.00246	1510.2	0.2	44.035	-0.017
$NaBr$	0.083	0.00083	1510.0	0.0	44.048	-0.004
$\Sigma = 36.2$					$\Sigma = -3.129$	
根据Зубов的人造海水实验值			1545.8		40.95	
计算值			1546.2		40.92	

在不同的深度范围内, 深度每变化10米时, 声速 c 的变化如下:

z , 米	0	10	100	1000	5000
声速梯度 (Δc 米/秒)/10米	0.165	0.165	0.165	0.168	0.1826

由上述数据可见, 只有在比较小的深度上, 声速对深度的关系才是线性的。在比较大的深度上, 声速随深度的变化比线性规律稍快。

§ 2 海水的均匀性

如上所述, 温度、盐度和静压力中的每一个量的增加都引起声速的增加。为了了解海洋中声速的时空分布规律, 我们简短地分析一下海洋中出现不均匀水团的原因。

投射到海面的太阳能量随纬度和季节而不同。海洋中的热交换主要是由水团移动引起

的¹⁾。其中，垂直环流的产生是由于冬季表层变冷、蒸发使表层的盐度升高以及海水结冰时盐分从海水中析出使表层盐度升高。在某些情况下，垂直环流的作用甚至延伸到海底。波浪对海水表层的混合起着重要的作用。但是表面波浪的穿透深度较小，在差不多一个波长的深度上，它的作用就消失了。

海洋深处冷水层的特点是温度基本上不变。但是，上层温度垂直分布的变化则很大，有日变化，也有年变化。在赤道和两极地区，温度的年变化比较小。图1给出10月和11月沿着经向和纬向垂直分布所测得的大西洋温度垂直分布的例子^[17]。如图所示，在所有情况下，温度随深度而降低。但是在不同的深度，下降的斜率是不同的。在这两个图中，大约在2000米深处，所有的曲线都合并为一条。除小部分地区以外，几乎在所有的海区，2000米以下的温度变化曲线实际上是相同的。在表层，沿着经向剖面，可以观察到温度随纬度不同而强烈变化。

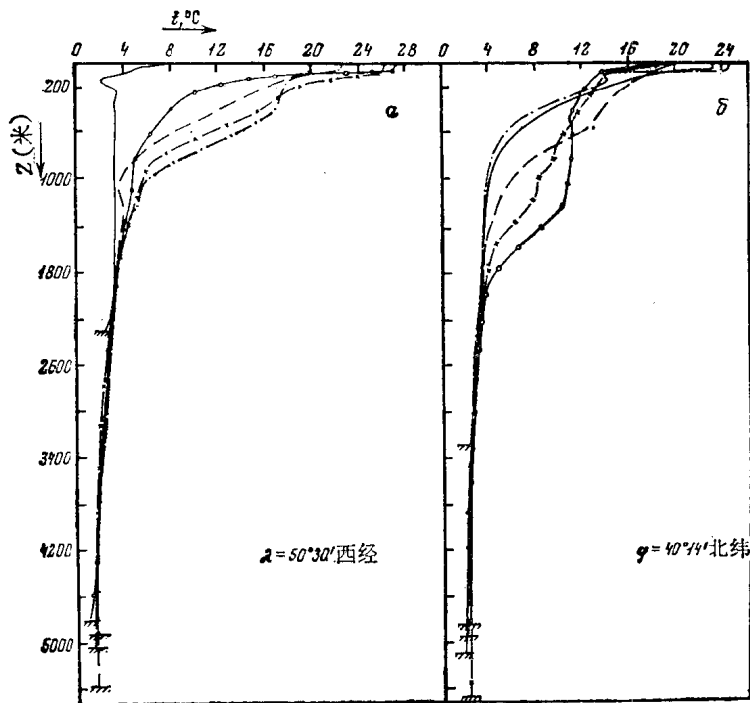


图1 大西洋中的温度垂直分布图： (z)

a ——经向垂直分布图：实线——北纬 $\varphi = 42^{\circ}28'$ ；虚线——北纬 $38^{\circ}49'$ ；点线——北纬 $30^{\circ}13'$ ；叉线——北纬 $20^{\circ}46'$ ；圈线——北纬 $10^{\circ}17'$ ； b ——纬向垂直分布图：实线——西经 $\lambda = 66^{\circ}28'$ ；虚线——西经 $59^{\circ}35'$ ；点线——西经 $40^{\circ}18'$ ；叉线——西经 $19^{\circ}12'$ ；圈线——西经 $10^{\circ}50'$

影响海水盐度的一个重要因素是海表面的蒸发。蒸发提高表层的含盐量。蒸发速率和表层的温度与盐度有关，也和大气状态——湿度、温度、大气压与风有关。因为海水密度既依赖于水的盐度，也依赖于温度，所以盐度高的一层可以位于盐度较低但较冷的一层之上。盐度较高但较热的表层有时可以保持很长一段时间；降雨和从陆地上流入的河水都会使盐度减低。通常，海洋中的盐度随深度而减低。有时盐度随深度的分布具有极小值。

1) 在能量传递中，热传导引起的作用很小^[15, 16]。

在大西洋的南纬45°与北纬20°之间观察到这样的极小值，其深度是700—800米。在印度洋和太平洋也都存在着类似的低盐度中间层。如果不考虑这一水层，那么盐度的变化在冷水区域就比较小。在暖水区域，盐度的变化则非常大，并且和表面的盐度有关。

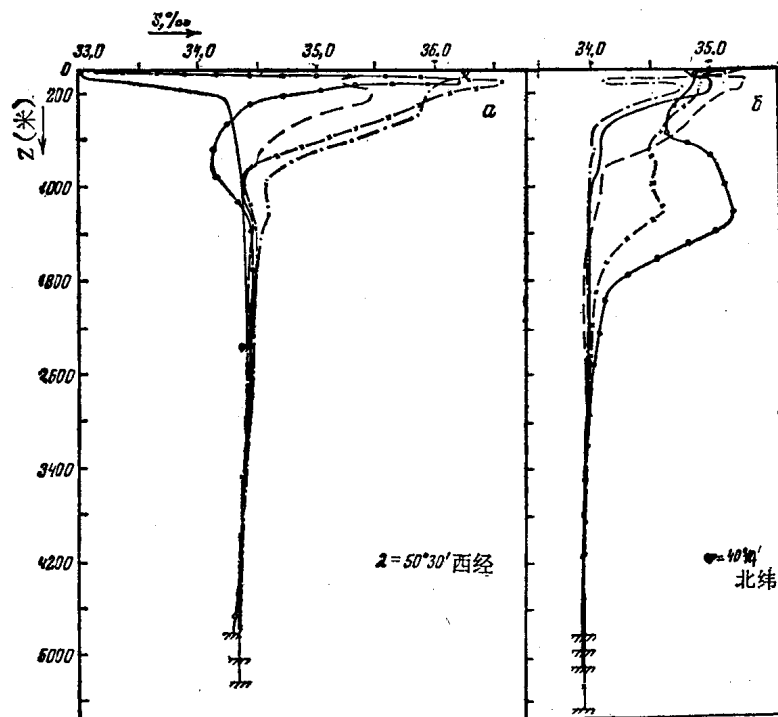


图2 盐度的垂直分布 $S(z)$

a ——相应于图1, a ; b ——相应于图1, b

图2是大西洋中盐度垂直分布曲线的一个例子，相应的温度曲线如图1所示。

我们根据以上关于温度和盐度的讨论，来研究海洋中声速的分布规律。因为温度对声速的影响最大，故在静压力的影响小而温度梯度大的上层海洋中，声速的垂直分布与温度的垂直分布大体一致，只是由于盐度而稍有偏离。因此表层中的声速通常随深度而减小。但温度不变或随深度而稍稍减小的最上面的混合层可能是例外。在该层内，声速可以随深度稍为增加或保持不变。这上层的厚度在热带是50—100米，在两极及其附近则可达500—600米。

在海洋表层还观察到海水垂直分层的“精细结构”，即在温度 T 和盐度 S 的正常梯度的背景上出现温度和盐度恒定不变的部分，甚至出现梯度相反的部分（反梯度层⁽¹⁸⁾）。在深度很大时，温度和盐度随深度变化很小，而声速的增加基本上是由于静压力随深度增加的缘故。

图3是相应于图1, 2的声速随深度分布的曲线。由图3可明显看出，从某一深度开始，声速随深度增加。

在大多数海洋深水区，曲线 $c(z)$ 有极小值，它决定水下声道轴的位置。在不同海区，声速极小值的深度是不同的。在中大西洋，极小值在800—1200米之间。

图4为太平洋和地中海区的 $c(z)$ 曲线（8月）。这些海区的声速极小值在深度较小处。

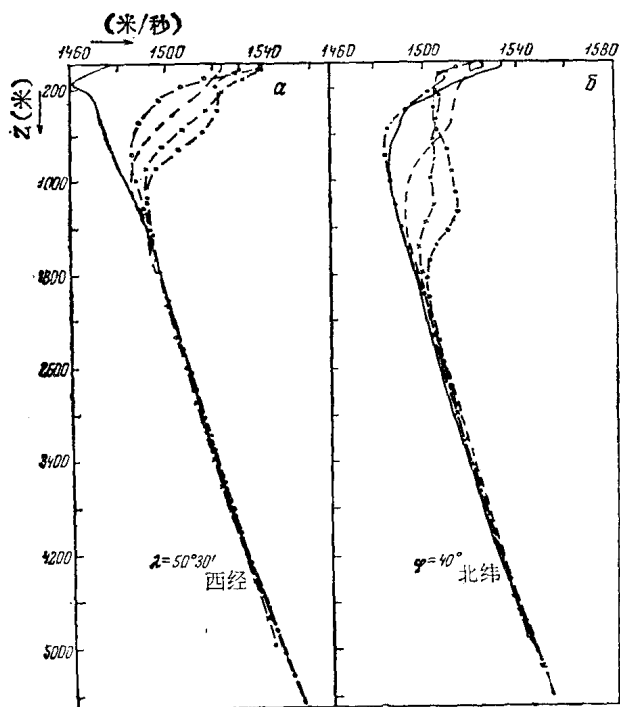


图3 声速垂直分布 $c(z)$
 α ——相应于图1, α 和图2, α ,
 β ——相应于图1, β 和图2, β

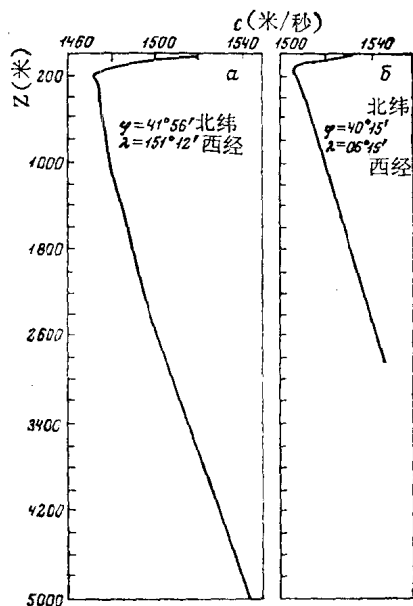


图4 声速垂直分布 $c(z)$
 α ——太平洋, β ——地中海

在声速的时空变化中,应该把季节性变化同具有随机特性的变化加以区别。在赤道区,表面温度的时间变化,因而也是声速的时间变化较小,并具有随机特性;在较高纬度区,则在声速的季节性变化上还叠加着随机变化。Piip^[19]研究了水下声道中 $c(z)$ 的稳定性。 $c(z)$ 在几个小时内有每秒几米的变化是常见的现象(参看第五章和第六章)。

§3 声 吸 收

现在来讨论声在海洋中传播时影响其衰减的那些海洋介质的性质。声衰减是由下述两种因素引起的:海水中声能的吸收和不均匀性,特别是海水中的气泡和含有气体的海洋生物引起的声吸收和声散射。在本节中,我们将研究海水的声吸收机制。

海水中的内摩擦(粘滞性)和热传导引起声能的耗散,因而在传播过程中造成声吸收。粘滞液体的运动方程为^[20]:

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma'_{ik}}{\partial x_k}$$

其中

$$\sigma'_{ik} = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l}$$

是粘滞张量; ρ 是密度; $v = \{v_1, v_2, v_3\}$ 是质点的速度; η 和 ζ 是第一和第二粘滞系数。系数 η 在有切变时出现,称为切变(斯托克斯)粘滞系数;系数 ζ 在液体的体积发生变化