海洋中的低频声吸收

M. Schulkin

M. Schulkin　华盛顿大学应用物理实验室
H. W. Marsh　北卡罗里纳州226信箱

本文对近年来海洋上和实验室中关于低频声吸收的研究工作（温度依赖性、pH 依赖性、硼浓度及压力的影响）进行了审核，以便尽量为声纳预报和设计提供一个与现有知识相符的实用表达式。已经发现，在海洋中观察到的 pH 值范围内，波长吸收极大值对声道轴深度处的 pH 值呈指数依赖关系。利用海水粘滞性的温度依赖关系和弛豫过程的活化能检验了弛豫频率对温度的依赖关系。弛豫频率依赖于盐度的平方根是和现有的数据和理论相符的。

引　言

Yeager 等人[2]、Simmons[3]、Fisher 和 Simmons[4]以及 Глотов[5] 已经发表了一些实验室实验结果，目的在于对 Thorp[6,7]、Lovett[8]、Mellen 等[9] 以及 Skretting 和 Leroy[10]等人的海上测量结果作出解释。从 1 千赫以下直到 10 千赫这一频段内的离子弛豫吸收，已经查明是海水中的硼和它的衍生物所引起的。硼和氯度之间存在恒定的比例关系。对于氯度为 19.00‰[11] 的海水，硼的浓度是 0.0046‰。也就是说，当海水盐度为 35‰时，硼的浓度为 4.38×10^{-4} 克分子/升（利用公式 $S‰=1.80655Cl‰$[12]。）

硼对低频吸收具有重要作用的主要证据是由 Yeager 等人提供的。他们按 Lyman-Fleming 人造海水的配方，先配制了不含硼酸的人造海水，结果没有发现低频弛豫过程。当加入硼酸后，就出现了一个弛豫过程，其弛豫频率恰好在海上测量中所发现的弛豫频率范围内。

Yeager 等人和 Simmons 还完成了其他的实验室实验和理论分析，指出硼酸和碳酸根是造成低频声吸收特性的原因。他们也注意到四硼酸钠（硼砂）溶液也能产生类似的结果，但 pH 值不同。Глотов[5]发现，当四硼酸钠溶液含有与海洋同样的硼浓度时，它的弛豫频率和海洋中的观察值相近，但吸收大约是海洋中的 7 倍。根据他的硼酸溶液的测量结果，当外推到大洋中的硼浓度时（温度约 12°C），吸收约为 0.06 分贝/公里，与海洋中的观察值一致。但弛豫频率为 5.7 千赫，大约是海洋的 4～5 倍，他们没有说明这些溶液的 pH 值。

为便于下面讨论，我们先写出逾量吸收与弛豫频率 f_r 的依赖关系：

$$\alpha=Af_rf^2/(f_r^2+f^2) \qquad (1)$$

当 $f=f_r$ 时，$\alpha_r=\frac{1}{2}(Af_r)$。因为 $f_r\lambda=C$，所以 $(\alpha\lambda)_r=\frac{1}{2}AC$ 是波长吸收极大值。式中 C 是声速，A 是一个与化学压缩系数有关的量。应该注意到，只有当 $f\gg f_r$ 时，吸收系数才达到它的最大值 α_{max}，即 $\alpha_{max}\approx Af_r=2\alpha_r$。(1)式可以改写成如下的形式：

$$\alpha=\frac{2(\alpha\lambda)_r}{C}\cdot\frac{f_r f^2}{(f_r^2+f^2)} \qquad (2)$$

Simmons 观察到纯硼酸水溶液具有较高的弛豫频率。但是，当加入 NaOH 使 pH 达到8.0(大洋中参考值)时，弛豫频率就降低了。他的测量结果表明，波长吸收极大值$(\alpha\lambda)_r$对于硼酸溶液的 pH 值有很强的依赖关系，这给本文作者以极大的启发。

然而，Yeager 等人和 Simmons 发现，在大洋 pH 值变化范围内(约 7.3～8.5)弛豫频率对 pH 值的变化是不灵敏的。但他们发现弛豫频率对硼的浓度和温度有强烈的依赖关系。

Fisher 和 Simmons[4] 讨论了硼酸-硼酸盐离子二步反应的化学平衡理论：

$$B(OH)_3+(OH)^-\underset{k_{21}}{\overset{k_{12}}{\rightleftharpoons}}B(OH)_3(OH)^-\underset{k_{32}}{\overset{k_{23}}{\rightleftharpoons}}B(OH)_4^- \quad 。 \qquad (3)$$

硼酸的平面三角形分子同氢氧根离子构成一个由扩散控制的离子对，在转变成四面体时体积有较大增加：$\Delta V\simeq 36$立方厘米/克分子。

在本文中，作者完成了关于$(\alpha\lambda)_r$和f_r的海洋资料要素分析。作者没有可能采用与海洋声学测量同时或同地的海洋资料。为了进行分析，对于给定的海域，采用了 pH 值恰好等于全年测量值的中位数的那个站位上声道轴深度处的海洋资料。某一海洋要素的重要性以及它与$(\alpha\lambda)_r$和f_r之间的依赖关系形式是通过计算相关系数和利用其他作者所发表的报告结果确定下来的。本文在进行分析时，利用了 Simmons 列出的六个海域的$(\alpha\lambda)_r$和f_r值表。

一、海洋的声学资料和海洋学资料

表 I 不同海域内海洋低频声学数据(引自 Simmons 论文[3])

海　域	逾量波长吸收极大值[$(\alpha\lambda)_r\times10^5$奈培/波长]	弛豫频率(千赫)
亚　丁　湾	0.82	1.2
红　　海	1.47	1.5
地　中　海	1.31	1.7
大　西　洋	1.11	1.0
太　平　洋	0.47*	1.0
巴　芬　湾	1.10	1.0

* 此值根据 Lovett[8]；根据 Schulkin[15] 则为 0.58。由于 Sheehy 和 Halley 是引用了其他人的高频吸收数据，才得到 $f^{3/2}$ 规律的，结果导致低频吸收值偏小。在 50—200 赫频段内 Sheehy 和 Halley 的数据服从频率平方依赖关系。

表 II 在各海域内采用 pH 资料的海区和月份**

海　域	修订的加拿大制经纬网格编号	有数据的月份
亚　丁　湾	1033(10°—20°N; 50°—60°E)	4,5,9,10,11,12
红　　海	1134(20°—30°N; 30°—40°E)	全年
地　中　海	1200(30°—40°N; 10°—20°E)	1,2,4,5,6,7,8
大　西　洋	1207(30°—40°N; 50°—60°E)	1,2,3,7,8,9,10
太　平　洋	1217(30°—40°N; 150°—160°E)	2,3,8,9,10
巴　芬　湾	1608(70°—80°N; 60°—70°E)	7,8

** 无法对现场的 pH 值进行压力和温度的校正。

在表Ⅰ中，我们列出了引自Simmons论文的各海域声学数据，这些海域的低频吸收测量是由其他研究者在先前完成的。这几个特殊海域是经过挑选的，它们代表了各种海洋条件的极端范围。在表Ⅰ中列出的几个海域内，我们各挑选出一块大小等于10°经度×10°纬度的海区（修订的加拿大制经纬网格），请美国国家海洋数据中心查找了该海区内所有站位的pH资料。结果得到了列有pH值资料的各站位的表格，在这些表格中同时还列出了温度、盐度和声速随深度变化的资料。表Ⅱ列出了所选定的海区编号及可以采用的pH值的分布月份。

下一步是根据深海声道轴深度处的所有pH数据确定pH的中位数和四分位数间距值。在表Ⅲ中列出了这些数值。尽管pH值变化范围十分大，但其中有一些变化是由于测量技术和仪器的差异而造成的。

在表Ⅳ中列出了声道轴深度处的pH值恰好等于pH中位数的那个站位的声道轴深

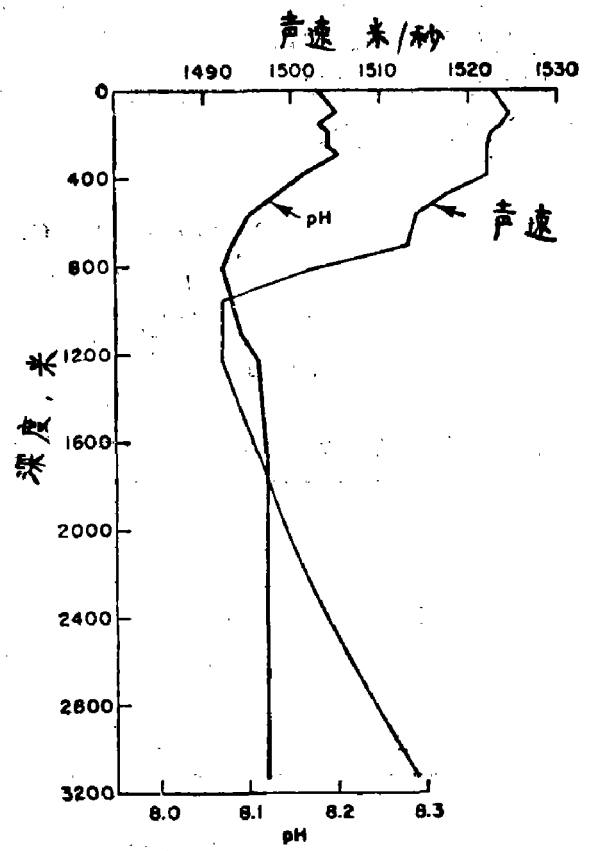

图1 北大西洋(典型站位)

表Ⅲ 获得低频传播数据的各海区声道轴深度处的pH值

海域	pH中位数	四分位数间距	站位个数
亚丁湾	7.82	(7.76—7.87)	44
红海	8.16	(8.04—8.22)	6
地中海	8.17	(8.05—8,22)	32
大西洋	8.09	(8.05—8.11)	23
太平洋	7.67	(7.64—7.80)	21
巴芬湾	8.01	(7.98—8.08)	14

表Ⅳ pH值等于其中位数的站位上声道轴深度处的数据*

海域	月份	声道轴深度(米)	温度(℃)	盐度(‰)	声速(米/秒)	pH
亚丁湾	5	300	14.31	35.73	1511.0	7.83
红海	11	190	22.06	40.49	1537.1	8.20
地中海	8	150	14.18	38.68	1511.8	8.19
大西洋	2	1321	4.65	35.03	1491.5	8.09
太平洋	3	892	3.72	34.05	1479.1	7.67
巴芬湾	7	50	−1.49	33.65	1441.3	8.02

* 当不存在pH值恰好等于中位数的站位时，则选择比中位数稍高一些的那个站位的值来计算($\alpha\lambda$)，与pH值的相关系数。

度上的海洋水文数据。当不存在 pH 值恰好等于中位数的站位时，则采用比中位数稍高一些的那个站位的数据。在声道轴深度处的海洋水文数据是十分稳定的。

图 1 是北大西洋某一站位的声速和 pH 随深度变化的实列。不同的海域 pH 值随深度的变化具有独特的形式。

二、$(\alpha\lambda)_r$与海洋学变量的相关

根据表Ⅲ和表Ⅳ中列出的数据，我们计算了 $(\alpha\lambda)_r$ 与有关的海洋变量的相关系数。结果列于表Ⅴ。值得注意的是 $\ln(\alpha\lambda)_r$ 与 pH 值的相关系数为 0.97。其次比较重要的是 $(\alpha\lambda)_r$ 与盐度的相关系数，但相关系数已小得多了。温度和深度(压力)对 $(\alpha\lambda)_r$ 的直接影响看来是次要的，它们只能通过影响 pH 值随深度的变化而发生作用。盐度与温度的相关性可由熟知的均匀水体的 TS(温、盐)关系得出。这组数据的温度对盐度的相关系数是 0.85。pH 对盐度的相关系数是 0.46。

表 Ⅴ 波长吸收极大值 $(\alpha\lambda)_r$ 与海洋要素的相关系数

海洋要素	相关系数 $(\alpha\lambda)_r$	相关系数 $\log(\alpha\lambda)_r$
pH	0.96	0.97
盐度	0.58	0.48
温度	0.26	0.21
声道轴深度	0.16	0.16

在大洋的 pH 值变化范围内 (7.3～8.5)，$(\alpha\lambda)\gamma$ 对 pH 的依赖关系显然是通过硼酸盐离子浓度的对数与 pH 值成正比而出现的。这意味着硼酸盐离子的浓度与氢氧根离子的浓度成比例。这一点可以从图 2 看出(它是根据 Stumm 和 Morgan 所著的书[15]改画的)，此图表明大洋的 pH 值主要由碳酸—碳酸氢盐离子—碳酸盐离子的平衡状态所控制。而硼酸—硼酸盐离子的平衡对大洋 pH 值的影响是次要的，当 pH 值小于 9 时硼酸的浓度几乎保持不变。

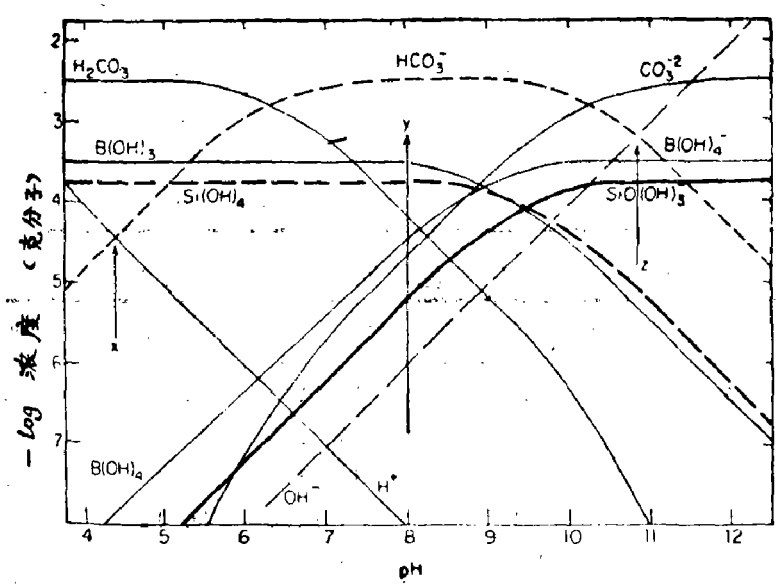

图 2 硼酸和硅酸对碳酸盐平衡的影响。各种离子(分子)的浓度与 pH 值的依赖关系。(根据 Stumm 和 Morgan 所著的书[15]改画。)

在大洋里如果硼酸的离子化学平衡可以近似地用一步过程来表示，即：

$$B(OH)_3 + (OH)^- \rightleftharpoons B(OH)_4^-, \quad (4)$$

则硼酸盐离子的浓度可由下式给出

$$[B(OH)_4^-] = K_B[B(OH)_3] \cdot [(OH)^-]。 \quad (5)$$

式中 K_B 是反应的平衡常数，方括号代表浓度。一般说来硼酸的浓度在感兴趣的 pH 范围内的变化是不明显的。这意味着对于给定的 pH 值*，硼酸盐离子的浓度是与盐度成正比的**。但是，当把 $(\alpha\lambda)_r$ 的数据与 pH 的数据组成一定的关系式后，$(\alpha\lambda)_r$ 与盐度的相关就消失了。这表明盐度的贡献已被容纳于 pH 关系之中。因此在我们的 $(\alpha\lambda)_r$ 公式中不包含盐度 S。

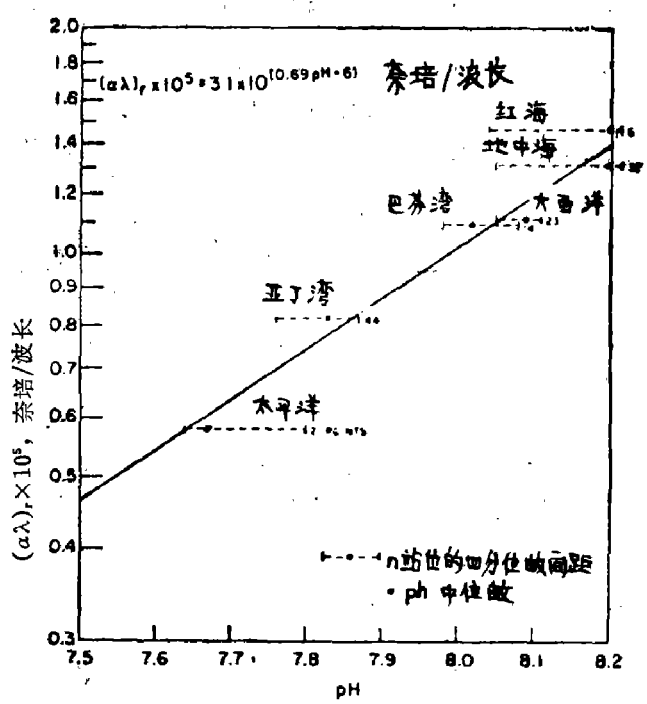

图 3 在声道轴深度处的 $(\alpha\lambda)_r$ 与 pH 的关系

根据本文的研究结果，可得到 $(\alpha\lambda)_r$ 与 pH 值关系的最终表达式：

$$(\alpha\lambda)_r \times 10^5 = 3.1 \times 10^{(0.69pH-6)} \text{ 奈培/波长} \quad (6)$$

此式已在图 3 中画出。它与 Mellen 和 Browning 结果的关系示于图 4，该图画出了比值 $(\alpha\lambda)_r$ // Thorp 与 pH 的关系。

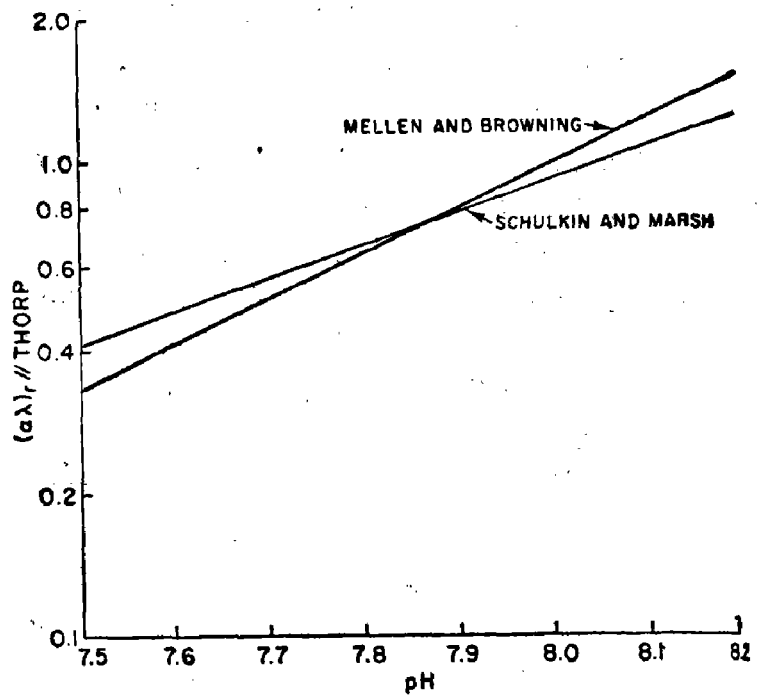

图 4 Mellen-Browning 和 Schulkin-Marsh 所得的 $(\alpha\lambda)_r$ // Thorp 比值比较

* 原文为盐度。

** 因为海水中硼酸的浓度与盐度成正比。(校注)

检验结果表明，这二条线都处于$(\alpha\lambda)_r$和pH的测量值变化范围之内。对于不同海域pH的选取方法是不同的。为了确当地代表北大西洋，究竟是用本文所选定的pH值，还是用Mellen和Browning所选定的pH=8.0呢？此外我们还注意到Mellen和Browning所采用的北大西洋的$(\alpha\lambda)_r$// Thorp值与Simmons的表中的相应值稍有不同。

三、弛豫频率f_r和海洋学变量的相关

利用表Ⅲ和表Ⅳ的数据，我们计算了弛豫频率f_r与有关的海洋学变量的相关系数。得到的结果列于表Ⅵ。

表Ⅵ 弛豫频率f_r和各种海洋要素的相关

海洋要素	相关系数 f_r	相关系数 $\log f_r$
盐　　度	0.81	0.83
温　　度	0.68	0.68(对$1/T$)
pH	0.39	0.39
声道轴深度	0.30	0.31

出乎意料的是弛豫频率与盐度的相关系数要比与温度的相关系数来得大。弛豫频率与$\frac{1}{T}$的相关要稍大于与T的相关，这里T是绝对温度。弛豫频率与pH及声道轴深度(压力)的相关性是小的。

下面我们依次讨论弛豫频率对硼浓度(盐度)、pH值和温度的依赖关系。

A. 弛豫频率对硼浓度的依赖关系

对于象(4)式那样的一步反应，其弛豫频率可以根据速度常数、活度和浓度来计算[3,16,17]。一般说来可以预期弛豫频率是与反应物的浓度有关的，但是它们之间的特定关系式则取决各个化学参数的相对大小。在能够合理地反映海水环境的条件下，近似关系式$f_r \approx S^{1/2}$可以认为是正确的，而Глотов[5]和Simmons[3]的实验室测量确实也得到了这一关系。通过对表Ⅲ和表Ⅳ中的各项数据的相关分析，作者发现平方根关系是十分令人满意的。

B. 弛豫频率对pH的依赖关系

Yeager等人通过在海水中加入少量HCl或KOH的方法以调节海水的pH值，发现在7.17到8.54这段pH值范围内弛豫频率是和pH值没有关系的。Simmons的测量也证明在7.3到8.5这一海洋pH值范围内弛豫频率保持不变。因此看来在海洋中由pH值所确定的只是溶液中的硼酸盐离子的浓度，而不是离子排列的弛豫时间。

C. 弛豫频率的温度关系

Simmons以及Mellen和Browning所发现的弛豫频率的温度关系看来是和Глотов[16]*关于海水中$MgSO_4$弛豫和结构弛豫的温度关系理论不一致的。

Глотов[16]早已指出：与海水中的$MgSO_4$弛豫有关，海水的宏观粘滞性(通过它的势垒)对弛豫频率f_r的影响要比$MgSO_4$缔合能的影响要大。对于纯水分子的结构弛豫来说也有类似的关系。我们也注意到Глотов的理论也考虑了我们早期的经验观察结果[19]，即$MgSO_4$离子弛豫和纯水分子的结构弛豫的温度关系的同一性。

按照Глотов的理论，海水宏观粘滞系数(作为温度和盐度的函数)，可由下式给出：

* 原文中为5，但文献5未讨论f_r与温度的关系。

$$\eta(T,S)=A(S)Te^{-\Delta u(S)/RT} \tag{7}$$

这里 T 是绝对温度(°K), $\Delta u(S)$是势垒或粘滞性的活化能，它是盐度的函数，单位用卡/克分子; R 是普适气体常数 1.987 卡/克分子/°K。这一温度关系的形式已经从北极低温声传播测量的弛豫频率随温度的变化[20]中得到了附加的支持。

因此海水中由离子弛豫和结构弛豫引起的体积粘滞的弛豫频率可由下式给出：

$$f_r(T,S)=B(S)[T/\eta(T,S)]e^{-\Delta h/RT} \tag{8}$$

这里 Δh 是弛豫过程的缔合能。把粘滞系数表达式代入(8)式后即得到下式：

$$f_r(T,S)=B(S)e^{-(\Delta u+\Delta h)/RT} \tag{9}$$

从 $\ln f_r(T,S)$ 对 $-\frac{1}{T}$曲线的斜率可以得出弛豫过程的活化能 $+(\Delta u+\Delta h)$值。

利用纯水粘滞系数的表格[21]，可以得出活化能 Δu 为 4.91 千卡/克分子。另外由海水粘滞系数的表格[11]，发现 $\Delta u(S)$ 可以用一个二次幂级数来表示。当盐度 $S=35‰$时，Δu 等于 4.81 千卡/克分子。这意味着 $\ln f_r$ 对$\frac{1}{T}$曲线的斜率必须是一个绝对值比 4.81 千卡/克分子更大一些的负值。其差值正好等于弛豫过程的缔合能。缔合能虽然可能是一个比较小的量，但是当产生吸收时它必定是一个正数。

Simmons 将海洋的声学数据和实验室数据进行归纳后得到弛频 f_r 的经验表达式为：

$$f_r=0.9(1.5^{t/18})\text{千赫} \qquad S=35‰ \tag{10}$$

这里 t 是摄氏温度。Mellen 和 Browning 用了另一个等值的表达式：

$$f_r=10^{(t-4)/100}\text{千赫} \tag{11}$$

当变换成 Глотов 所给出的形式时，上面二个表达式成为：

$$f_r=\frac{7.85\times10^{-6}\times10^{242/T}}{[\eta(T,35)/T]}\text{千赫} \tag{12}$$

这相当于缔合能是一个负值 $\Delta h=-1.11$ 千卡/克分子，这是不可能的。这里再重复一遍我们的看法：对于扩散控制的离子反应，当它由三角形形式变为四面体结构时并不需要很大的能量，但它终究是需要一些能量的。

图 5 画出了 $\log f_r$ 与$\frac{1}{T}$关系的二条曲线：(a)实线是按 Simmons 以及 Mellen 和Browning 公式计算的；(b) 虚线代表只考虑了海水粘滞活化能的结果。在画虚线时我们有意让它通过 Thorp 的实验点，可以看出这条虚线和符合实验点的最佳曲线的差别是不大的。由硼酸——硼酸盐离子反应的活化能所提供的任何贡献都会使这条曲线变得更陡。根据虚线与实验点相符的实际情况，我们建议在没有得到更好的有用信息之前还是采用虚线所代表的弛豫频率表达式。因此本文推荐的 f_r 表达式如下：

$$f_r=6.1(S/35)^{1/2}10^{\left[3-\left(\frac{1051}{T}\right)\right]}\text{千赫} \tag{13}$$

四、实用的低频逾量吸收公式

海洋中由于硼的存在而引起的低频逾量吸收可以由下式计算：

$$\alpha=\left[\frac{2(\alpha\lambda)_r}{C}\right]\frac{f_rf^2}{f_r^2+f^2}\times10^3\text{奈培/米} \tag{14}$$

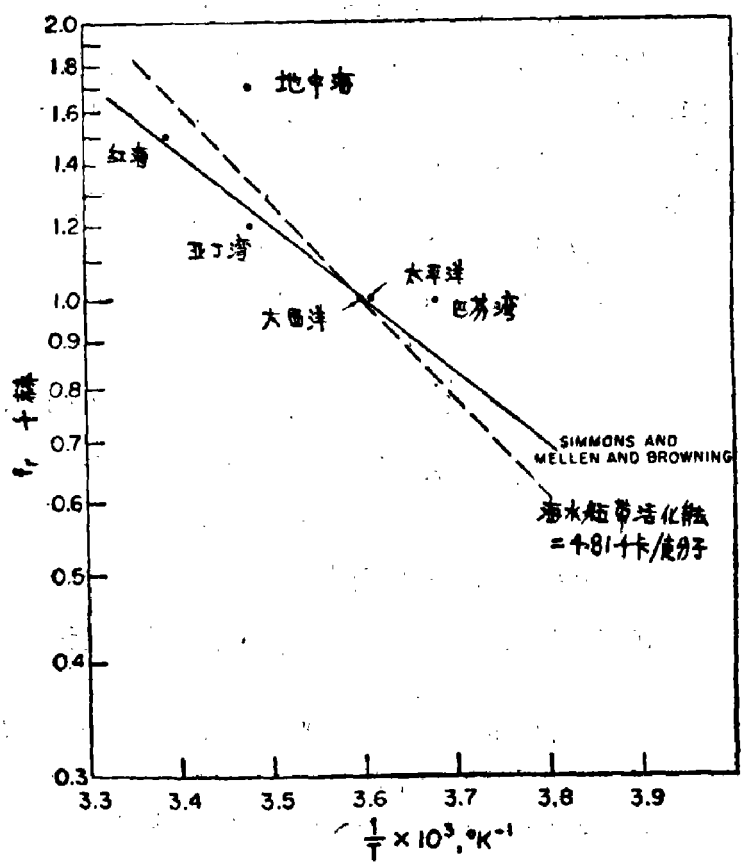

图 5 $\log f_r$ 与 $\frac{1}{T}$ 的关系。实验曲线和海水粘滞活化能曲线的比较

这里

$$(\alpha\lambda)_r\times10^5=3.1\times10^{(0.69\mathrm{pH}-6)}\ \text{奈培/波长}$$

$$f_r=6.1(S/35)^{1/2}10^{\left[8-\left(\frac{1051}{T}\right)\right]}\ \text{千赫。}$$

T 是绝对温度(°K)。各符号的意义见正文。单位奈培/米要转换成分贝/千码时应乘以 7.943×10^3*。在表Ⅶ中列出了(6)式和(13)式的计算值和实验测量值。误差分析表明，$(\alpha\lambda)_r$ 的平均误

表 VII 低频预报公式的误差分析

海域	逾量波长吸收的极大值 $[(\alpha\lambda)_r\times10^5$奈培/波长$]$		弛豫频率(千赫)	
	测量值	计算值	测量值	计算值
亚丁湾	0.82	0.78	1.2	1.35
红海	1.47	1.41	1.5	1.80
地中海	1.31	1.39	1.7	1.40
大西洋	1.11	1.18	1.0	1.00
太平洋	0.47**	0.61	1.0	0.96
巴芬湾	1.10	1.06	1.0	0.83
	平均误差 $+0.007\times10^{-5}$ 奈培		平均误差 -0.01 千赫	
	均方根偏差 0.06×10^{-5} 奈培		均方根偏差 $+0.20$ 千赫	

** 根据 Lovett 的结果[8]；本文中根据 Schulkin[15] 的结果改为 0.58。

* 将奈培/米转换成分贝/公里时应乘以 8.686×10^5（译注）

差为 $+0.007\times10^{-5}$ 奈培，它的均方根偏差为 0.06×10^{-5} 奈培。弛豫频率 f_r 的平均误差为 -0.01 千赫，它的均方根偏差为 0.20 千赫。

五、结　论

根据许多研究人员的实验室和海上测量结果，已经揭示出海水中有一个由硼引起的化学弛豫过程，由此产生了逾量弛豫声吸收，其弛豫频率是在 1 千赫附近，典型的波长吸收极大值 $(\alpha\lambda)_r$ 为 10^{-5} 奈培/波长。具有共同性的是：好几个实验都表明 f_r 与温度和硼的浓度有关；而 $(\alpha\lambda)_r$ 则密切地依赖于 pH 值。f_r 和 $(\alpha\lambda)_r$ 对于压力的依赖关系属于次要的效应。在考虑了上述的一些参量依赖关系后，所有的海上的实验可以得出一致的结果(在实验误差范围之内)。至于硼酸化学弛豫过程的精确的化学动力学以及其它参与反应的物质（例如 CO_2）对这一弛豫过程的影响则尚未完全了解。

参 考 文 献

[1] 当本文准备发表时，Mellen 和 Browning[18] 发表了 $\log(\alpha\lambda)_r$ 对 pH 的依赖关系，这种依赖关系也被本文的作者所发现了。

[2] E. Yeager, F. H. Fisher, J. Miceli 和 R. Bressel "Origin of the low-frequency sound absorption in sea water" J. A. S. A. 53, 1705—1707 (1973).

[3] V. P. Simmons, "Investigation of the 1-KHz sound absorption in sea water,"博士论文(美加州大学，1975)(未发表)

[4] F. H. Fisher, V. P. Simmons, "Discovery of boric acid as cause of low frequency sound absorption in the ocean," IEEE Ocean '75, 21—24 (1975).

[5] В. П. Глотов, Акуст Жур. XXII Вып. 1. 125—126 (1976).

[6] W. H. Thorp, "Deep-ocean sound attenuation in the sub-and low-kilocycle-per-second range", J. A. S. A. 38, 648—654 (1965).

[7] W. H. Thorp, "Analytic discription of the low frequency attenuation," J. A. S. A. 42, 270—271 (1967).

[8] J. R. Lovett, "Northeastern Pacific sound attenuation using low frequency CW sources," J. A. S. A. 58, 620—625 (1975).

[9] R. H. Mellen, D. G. Browning, J. M. Ross, H. M. Merklinger, "Low-frequency sound attenuation in Baffin Bay," J. A. S. A. 57 1207—1202 (1975).

[10] A. Skretting, C. C. Leroy, "Sound attenuation between 200Hz and 10KHz," J. A. S. A. 49, 276—281 (1971).

[11] H. U. Sverdrup, H. W. Johnson, and R. H. Fleming 著，"海洋"科学出版社(1958)第一卷，第 60 页。

[12] A. C. Duxbury, The Earth and Its Oceans (Addison-Wesley, Reading, MA, 1971), P.116.

[13] M. Schulkin, "Eddy viscosity as a possible acoustic absorption mechanism in the ocean" J. A. S. A. 35, 253—254 (1963).

[14] 作者对数据服务科科长 James Churgin 先生的合作表示诚挚的感谢。

[15] W. Stumm and J. J. Morgan, Aquatic Chemistry (Wiley-Interscience, New York), P.140。

(下转第52页)

[20] A. S. Laughton, "Sound Propagation in Compacted Ocean Sediments," Geophysics 22, 233—260 (1957).
[21] J. W. Strutt Lord Rayleigh, The Theory of Sound (Dover Publications, Inc., New York, 1945), 2nd ed., Vol.2, pp.78—82.
[22] H. W. Marsh, T. G. Bell and C. W. Horton, Reflection and Scattering of Sound by the Sea Bottom, AVCO Marine Electron. Office, Ed. (AVCO Marine Electronics Office, New London, Conn., 1965), Part II, pp.29—40.
[23] B. F. Cole, "Marine Sediment Attenuation and Ocean-Bottom-Reflected Sound," J. Acust. Soc. Amer. 38, 291—297 (1965).
[24] A. B. Wood and D. E. Weston, "The Propagation of Sound in Mud," Acustica 14, 156—162 (1964).
[25] J. J. Gallagher, "Variability in Derived Sediment Sound Velocity as a Function of Core Analysis and its Effect in Determing Theoretical Bottom Reflectivity," U. S. Navy Underwater Sound Lab. Tech. Memo. 2213-78-68 (20 Feb. 1968).

译自 J. A. S. A. Vol.44, No.4 1968 P.1130—1138

魏兴武译　李玉昕校

（上接第41页）

[16] В. П. Глотов."淡水和海水中硫酸镁电离度弛豫时间温度关系的计算"。水声学（水声译丛）第4期31～35 (1966)。
[17] J. Stuehr and E. Yeager, "The propagation of ultrasonic wave in electrolytic solutions" in Physical Acoustics, edited by W. P. Mason (Academic, New York, 1965), Vol.2. Part A, Chap. 6.
[18] R. H. Mellen and Browning "Variability of low-frequency sound absorption in the ocean: pH dependence" J. A. S. A. 61, 704—706 (1977).
[19] M. Schulkin, H. W. Marsh."海水声吸收"水声学(声学译丛)第1期，57—63 (1965)。
[20] J. T. Shaw and G. R. Garrison, "Table of sound absorption in Sea Water" Tech. Note 1-77, Applied Physics Laboratory University of Washington, Seattle (1977).
[21] R. C. Weast, Ed., Handbook of Chemistry and Physics (Chemical Rubber, Cleveland, 1975—1976), 56th ed., P. F49.
[22] M. J. Sheehy and R. Halley, "Measurements of the Attenuation of Low Frequency Sound," J. A. S. A. 29, 464—469 (1957).

译自 Jour. Acoust. Soc.Am., Vol.63, No. 1, 1978. p. 43—48

蒋济良　万世敏译　裘辛方校