

国外论文译述

温、盐度不同的海水混合时的密度增大作用*

H. H. 朱保夫

海水最令人注意的特性之一，就是在其混合时的密度增大作用。这种特性在苏联文献中到现在为止研究得很少¹⁾。在我所知道的一些外国文献中，这个性质也没有引起注意。本文主要包括了到今天为止我所发表过的一切文章，其次补充了我已经发表过最近又加以重写的材料。

蒙 A. И. 多布罗沃尔斯基阅读过本文并作了重要的指正，作者深表感谢。

一、海水异常的热学性质

海水，尤其在低温时，具有一些独特的性质。

海水的热容量，除氢和液体氨以外，比所有物质的都高。海冰的融解热，也除了氨以外，比所有其它物质的都高。至于海水的蒸发热，也比任何其它物质的都大。

在结冰时，水的密度会骤然减少几乎9%。除去水而外，只有生铁、硝酸钾、铋及其与铈和钠的某些化合物才具有这种特性。

水的最大密度值温度并不等于结冰的温度。如图1所指出的：

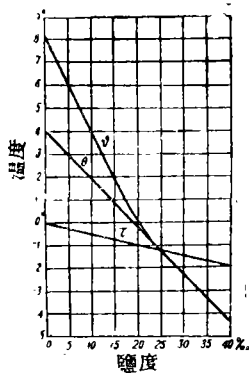


图1 结冰温度及最大密度值的温度

曲线 τ ——盐度不同的海水的结冰温度。

曲线 θ ——盐度不同的海水的最大密度值温度。

曲线 ϑ ——当海水的密度与它在结冰温度时之密度值相等时的温度。

从图中看出，所有这三个温度都随着

盐度的增加而降低，而且在温度为 1.33° 及盐度为 24.695‰ 时彼此相等。

图2所示为温度从 -2° 到 $+10^\circ$ 以及盐度从 3‰ 到 7‰ 时，各种密度下海水 TS 图解的一部分²⁾。

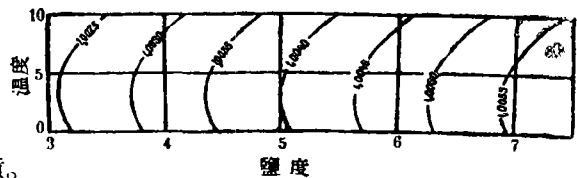


图2 TS 图解

在图2中以及根据对其它温度盐度所画出的 TS 图解可以看出，等密度线(和等比容线)向低盐度和低温度的方向凸出，而且曲线本身根据其形状而言象抛物线。这种形式的曲线是由于水非常复杂的结构所形成的³⁾。

勒曼劳 (Раман Рао) 认为水的整体是由水汽(水的单分子缔合)、水(水的双分子缔合)和冰(水的三分子缔合)的分子组成的。这些分子在不同温度的水中所含的百分比如表1所示。

* H. H. 朱保夫: 1957. Уплотнение при смешении морских вод разной температуры и солености. Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Географический Факультет Кафедра Океанологии Москва. 49 pp.

1) H. H. 朱保夫: Морские воды и льды. М., 1938, 51—52 页; Льды Арктики. М., 1945, §6; Динамическая океанология. М.-Л., 1947, §12; Избранные труды по океанологии. М., 1955, IX.

2) H. H. 朱保夫: Морские воды и льды. М., 1938, §1.

3) H. H. 朱保夫: Морские воды и льды. 1938, §1.

表 1

相 态 分 子	水			
	冰	0°	4°	38°
水的单分子 (H ₂ O) ₁	0	19	20	29
水的双分子 (H ₂ O) ₂	41	58	59	50
水的三分子 (H ₂ O) ₃	59	23	21	21

海水温度的每一变化都会引起各种结构的分子含量百分比发生变化,并能引起热容量、融解热和蒸发热的增加和最大密度值温度的加大以及 TS 图解中等密度线更加凸出。

近来对于水的结构又有其它解释,即认为,尤其是当温度不高时,液体与固体的微小晶体相似。液体的晶体具有很小的尺寸和其形状的可变性,而且当温度升高时,即融解在它周围的无定形的薄层中。

从别尔纳(Бернал)和福勒(Фоллер)所进行的对于水的 X 光衍射摄影证明,就结构上讲,冰与鳞石英相象而水与石英相似¹⁾。当温度从 0° 到 4° 时在水中还部分地保留着冰的鳞石英状的结构,这种结构与密度的异常性有关。利用水的晶体结构也可以说明冰和水的其它许多性质。斯却尔特(Сцюарт)指出,结构的形式不能精确地判明,它是随着水温的变化而互相转移,且每一种形式只与一种温度相适应。

水结构的这种特殊性形成混合时的密度增大作用。

二、混合时的密度增大作用

在研究水团的混合时,一般都利用下列简单的混合公式,即

$$s = \frac{\sum m s}{\sum m} \quad (1)$$

$$t = \frac{\sum m t}{\sum m} \quad (2)$$

式中 s 和 t ——混合物的平均盐度和温度,

$\sum m$ ——水混合时的总质量,

$\sum m s$ 和 $\sum m t$ ——水混合时的质量分别与平均盐度和温度的乘积和。

应用公式(1)来计算平均盐度不会发生任何

错误。但是,应用公式(2)来计算混合后的平均温度就会发生某些问题。实际上,在混合时所发生的某些作用,多少总能影响到混合物的温度,其中主要的有下列几种:

1. 绝热现象,亦即压力变化所引起的温度变化现象。
2. 盐度不同的水团混合时,因溶液浓度增减所产生的热而引起的物理化学现象。
3. 当温度盐度变化时海水热容量的变化。
4. 水质点的运动转变为热能时所引起的能量消耗(或耗散)。
5. 海水温度变化时各种分子结构的重新组合。

关于上述现象对混合物温度的影响几乎还全不清楚,所以必须作出一些可能的假定。

在研究垂直方向的混合时,首先必须注意到,通过任一虚构的水平截面从下方跑到上面来的水质点数目,和在同一时刻通过这个同一截面由上方跑到下面的相同。

从而得到,在质点从海面下沉到其混合下界的过程中,其温度由于绝热而有少许升高,而在同一时刻从混合下界上升到海面的质点的温度也由于绝热而有若干降低。第一次近似地可以认为,上升到海面的和向深处下沉的质点温度的改变量虽然在符号上相反,但量值上相等。此外,绝热的改变量很小(约 0.0001 度/米),而且当水平方向混合时一般等于零。所以当研究某一方向上的混合时可以假定,绝热现象不影响混合物的温度。

根据简单的计算以及从观察 TS 图解表明,盐度不同但温度相同的水混合时,密度增大的作用等于零。因此,海水盐度增减时产生的热所引起的的作用可以忽略。

海水的热容量当其盐度自 0 升高到 40‰ 时降低约 0.07,当温度自 0 升高到 30° 时降低不到 0.01 克-卡/度,即比盐度变化时所降低的要小得多。假定当混合时一部分质点增加了它的热容量,此时另一部分的热容量降低。这样,根据第一次近似,我们就可以认为热容量的变化对混合物温度的影响很小。

1) 鳞石英和石英是硅石的变形。在融解温度时,和冰与水的情形一样,其密度之比为 0.9。

消耗的现象根据其结果来说,与上面所列举的有所不同。混合,这是一种各个质点的不断的运动同时伴随着运动能量转换为热能的过程。由于消耗,混合物的温度不断地升高。但是,我们知道,更正确地说,我们有充分理由假定消耗对混合物温度的影响很小,在第一次近似的情形下可以忽略。

这样一来,混合时形成密度增大作用的主要因素,就是水温度变化时水分子结构的重新组合。上面所列举的作用对混合物温度的影响可认为是不重要的,而且可根据公式(2)来计算混合物的温度。

然而,根据混合公式我们尚不能求出密度,应该写为

$$\rho = \frac{\sum m \rho}{\sum m} + \Delta \rho \quad (3)$$

其中 ρ —— 密度,

$\Delta \rho$ —— 混合时密度增大作用所引起的密度增量。

把混合物的密度增量引进计算的必要性,可以用下列实例来说明:

我们将两种质量相等的淡水混合,一种温度为 8.2° , 另一种为 0° 。开始的密度均等于 0.99987 。根据混合公式,混合物的温度约为 4.1° , 但根据 TS 图解来看,混合物的密度几为 1.00000 , 即比未混合前两种水的密度大 0.00013 。

温度不同但盐度相等的海水混合时可能发生密度增大作用,尤其对于盐度较低 (24.695%) 的水 (即对于那些最大密度值温度大于结冰温度的海水)¹⁾ 是这样。

例如,我们把质量相等的盐度一样 ($S=10\%$) 但温度不同的两种水混合。使第一种水的温度为 0° 而另一种为 10° 。这两种水的密度将分别等于 1.00802 和 1.00755 。按照公式(2)求得这两种水混合后的平均温度为 5° 。把 $t=5^\circ$ 和 $S=10\%$ 代入 TS 图解中就得到混合物的密度为 1.00796 , 同时,根据混合公式所求得的密度等于 1.00778 , 换言之,在所考虑到的例子中,混合时的密度增大作用等于 0.00018 。

已经说过,从简单的计算以及它和 TS 图解的对照中都证明,盐度不等而温度相同的两种水团

按任意比例混合时,任何密度增大作用都不会产生。

最后,从 TS 图解可知,任意盐度温度而密度相等的两种海水于任意比例下混合后,其密度永远大于混合前各种水的密度。

例如,将质量相等的两种水混合,其一温度等于 -1.5° 盐度为 27.35% (近似于拉布拉多海流水的特性), 另一种温度为 30° 盐度 35.34% (近似于湾流发源地的水的特性)。

其每一种水未混合前的密度等于 1.02200 。这些质量相等的水混合后的温度约为 14.2° , 盐度约 31.34% 密度约 1.02334 。

这样,在所考虑的情形下,由于混合使得密度增加 0.00134 , 这个值是极为显著的。实际上,例如对于湾流而言,当盐度增加 1.76% 或温度降低 4.4° 时也会产生同样的结果。

三、密度增大作用与混合比的关系

图 3 所示的一部分 TS 图解²⁾ 中给有:

A 水的 TS 点 ($t=2.6^\circ$, $S=11.05\%$, $\alpha=0.99121$) 和 B 水的 ($t=13.6^\circ$, $S=12.19\%$, $\alpha=0.99133$)。

将图中 A B 点联结即成所谓“直线混合”。实际上,如果已知的水按任意比例混合,我们就能得

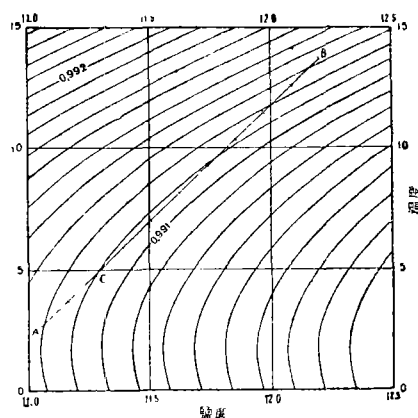


图 3 TS 图中的直线混合

1) Н. Н. Зубов. Морские воды и льды. 1938. 52 頁。

2) 在此 TS 图解中所画的不是等密度线而是等比容线。

到一种混合物,这种混合物是用 AB 直綫上的 TS 点(例如 C 点)表示出其温度和盐度的。混合比可用下列公式求得:

$$\frac{m_A}{m_B} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}}, \quad (4)$$

式中 m_A —— A 水的质量,
 m_B —— B 水的质量。

为了简化所有计算起见,把直綫 AB 分为十段,而混合物的温度盐度可根据公式(1)和(2)求出,或直接从 TS 图解中取出,或根据下列公式算出:

$$P = \frac{nP_A + (100-n)P_B}{100} \quad (5)$$

式中 P ——混合物的某种海洋学特性,

P_A 和 P_B ——参加混合的水团的海洋学特性,

n ——混合物中 A 水所占的百分比,

$100-n$ ——混合物中 B 水所占的百分比。

以点 C 所表示的混合物,其中含有 80% 的 A 水和 20% 的 B 水。

表 2 中所列的一些数据是根据公式(5)求出的:

表 2

1	2	3	4	5	6	7
%A	%B	t°	$S\%$	$\rho_{\text{БЛИЗ}}$	$\rho_{\text{ИЕТ}}$	$\Delta\rho$
100	0	2.6	11.05	1.00887	1.00887	0.00000
90	10	3.7	11.16	886	893	07
80	20	4.8	11.28	885	898	13
70	30	5.9	11.39	883	901	18
60	40	7.0	11.51	882	902	20
50	50	8.1	11.62	881	901	20
40	60	9.2	11.73	880	899	19
30	70	10.3	11.85	879	895	16
20	80	11.4	11.96	877	890	13
15	85	12.0	12.02	876	886	10
10	90	12.5	12.08	876	883	07
0	100	13.6	12.19	875	875	0

第 1 栏—— A 水在混合物中的百分比;

第 2 栏—— B 水在混合物中的百分比;

第 3 栏——根据公式(5)求得的混合物的温度;

第 4 栏——根据公式(5)求得的混合物的盐

度;

第 5 栏——根据公式(5)求得的混合物的密度;

第 6 栏——取自 TS 图解的混合物的密度,其温度盐度值系取自第 3、4 栏所载的;

第 7 栏——第 6 栏与第 5 栏之差,此值决定出混合时密度增大作用的大小。

表 2 中第 7 栏的数据画在图 4 中。沿垂直轴取为混合时密度增大作用的值。在下面的水平轴

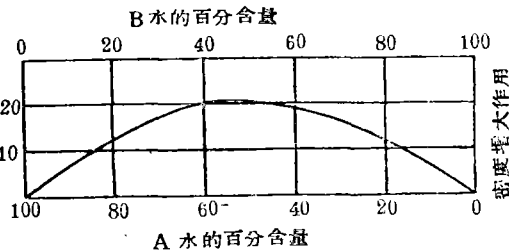


图 4 水在其混合物中的百分含量

表示 A 水在混合物中的百分含量。在上面的水平轴表示 B 水的百分含量。直綫 AB 表示直綫的混合,曲綫 AB 表示 A 、 B 水以各种不同的比例混合时的密度增大作用。

研究了表 2 和图 3、4 以及写本文时所作的其它许多图表,我们就可得出下述结论:

1. 不同盐度但温度一样的水团按任意比例混合时,不会出现密度增大作用。

2. 温度不等而盐度几乎一样的水团混合时密度增大作用达到其最大值。

3. 相同的水团混合时密度增大作用达到的最大值与混合比有关。

4. 参与混合的水团其温度盐度虽相差较大,但密度增大作用的绝对值更大一些。

5. 密度相等但温度盐度不同的水团按任意比例混合时,混合物的密度永远大于参加混合的任一水的密度。

6. 由表 2 第 6 栏又可注意到,如果 A 水在混合物中的百分含量小于 15%,而 B 水在混合物中的百分含量大于 85%,则混合物的密度小于 A 、 B 水当初的密度。其它情形则混合物的密度大于两种参加混合的水当初的密度。

7. 还应该再强调,混合时的密度增大作用由等密度綫的凸度决定。然而,由于在任意温度盐

度的場合下,等密度綫都保持曲綫形式,所以混合时的密度增大作用对于海水一般都有影响。有些情形(尤其是高温度高盐度的情形)密度增大作用可能是很小的,可以忽略。在其它情形(尤其是低温度低盐度的情形)密度增大作用是这样的大,以致在任何情形都不可能将其忽略。

最后应该指出,混合时的任何密度增大作用都能引起:第一,海面的降低,第二,混合物中密度較大的水向深处下沉。

四、垂直方向混合的一些特性:

在洋水的垂直方向混合上,起着主要作用的是:风的、潮汐的和密度的混合¹⁾。

风混合与潮汐混合其特征如其名称所示,它們和热交换以及和邻近大气的水交换无关。它們之間的区别仅在于风混合是自上而下的扩张,而潮汐混合却相反是自下而上。密度混合是由于温度的变化而形成的,蒸发和結冰使之大洋表层的密度增加。

考虑水团垂直混合的結果时,我們可取底为一个单位的鉛直水柱来分析风混合、潮汐混合以及由于温度变化和結冰所形成的密度混合所生的一切現象。当然,在这种情况下,假如此水柱的密度不变,其质量也就不变。因为变化的只能是所研究的水柱的密度和高度。因此我們可以写出

$$m = h_1 \rho_1 = h_2 \rho_2 \quad (6)$$

式中 m ——质量,

h ——所考虑水柱的高度,

ρ ——密度。

由此公式可知,設若某水柱的密度增加,則其高度减小,因而海平面相应地下降。明显地,对于蒸发所形成的密度混合的情形,公式(6)不能应用,因为当蒸发时,所考虑水柱的质量本身就在减少。

当水层混合时,海面降低的值可根据下列公式求得:

$$\Delta h = \frac{2 h \Delta \rho}{\rho_1 + \rho_2} \quad (7)$$

式中 $\Delta \rho$ ——混合时的密度增大作用,

h ——混合水层的总高度,

$\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ ——混合水层的平均密度。

应该指出,只是在密度較小的水在密度較大的水上时,水层之間才能有稳定的平衡,而且密度的差越大,平衡也越稳定。海塞堡(Хессельберг)和斯費德魯普(Свердруп)²⁾根据这一原理,在理論海洋学中引进关于海中水层垂直稳定度的概念。这个概念是以下述假定为根据:混合强度不只是决定于形成某种混合的因素,而且也决定于阻力。这种阻力是由于一个水层在另一水层下面混合时所表现出来的。由于这个假定,海塞堡和斯費德魯普导出公式:

$$E = \frac{d\rho}{dz} - \frac{d\rho}{dt} \frac{d\xi}{dz} \quad (8)$$

式中 $\frac{d\xi}{dz}$ ——温度的絕热变化。

公式的第一項表示不考虑压缩性的校正量时密度的垂直梯度,第二項是絕热的校正量。

絕热的校正量很小,因此判断大洋(密度梯度大的地区)上层的稳定度时这个校正量通常都忽略。在大洋深处(相反地該处密度梯度很小)絕热校正量能够起决定性的作用。前曾說过(§2),在研究混合时,絕热校正量一般可以忽略。

与混合发生以及因混合时的密度增大作用而引起的海面降低的同时,混合水层的重心发生垂直的位移。

关于在风混合时重心移动問題的最初解答,是由洗密特(Шмидт)提出的³⁾。

这个解答的根据是:在稳定平衡时,密度較小的水在密度較大的水的上面。在混合过程中,上层的密度增加而下层的密度减小,因此,重心向上升起。

1) Н. Н. Зубов. Основы учения о проливах Мирового океана. М., 1956, §16—19.

2) Hesselberg Th. u. Sverdrup H. U. Die Stabilitätsverhältnisse des Seewassers bei vertikalen Verschiebungen, Bergens. Mus. Aarbok, N15, 1914—1915.

也可参考: Н. Н. Зубов. Динамическая океанология. М.-Л., 1947, §10.

3) Schmidt H. Ueber den Energiegehalt der Seen. Int. Revue, Hydrogr. Süpl. zu bd. VI, Marz, 1915.

也可参考: Н. Н. Зубов. Динамическая океанология. М.-Л., 1947, §17.

洗密特根据由公式(6)演变出来的下列公式来计算这一升高的大小。

$$\Delta Z = \frac{(\rho_2 - \rho_1) h_1 h_2}{2(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2)} \quad (9)$$

式中 h_1 和 h_2 ——混合前两层的高度,

ρ_1 和 ρ_2 ——混合前两层的密度, 同时

$$\rho_2 > \rho_1,$$

ΔZ ——混合后公共重心的升高。

然而洗密特公式不能计算出海面的降低。把适当的校正值代入公式后, 可写为

$$\Delta Z = \Delta Z_0 - \frac{\Delta h}{2} = \frac{(\rho_2 - \rho_1) h_1 h_2}{2(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2)} - \frac{h \Delta \rho}{\rho_2 + \rho_1} \quad (10)$$

从公式(10)可知, 如果 $\Delta Z_0 = \frac{\Delta h}{2}$, 则 ΔZ 亦即重心的升高为零。如果 $\rho_2 = \rho_1$, 则 $\Delta Z_0 = 0$ 而且 $\Delta Z = -\frac{\Delta h}{2}$, 亦即重心不仅没有升高, 而且甚至在降低。最后, 如果混合的是不同盐度而温度相等的水, 则混合时的密度增大作用与水面的降低等于零, 且 $\Delta Z = \Delta Z_0$ 。

我们假定, 有两种彼此重叠的水层各高 10 米。第一种的温度和盐度等于 -1.0° 和 27.35%, 但第二种的是 $+30^\circ$ 和 35.35%。根据 TS 图解知各层的密度都等于 1.02200。

如果考虑到混合时的密度增大作用, 则按照混合公式知混合物的温度为 14.2° , 盐度为 31.37%, 但根据 TS 图解得到的混合物的密度为 1.02334。

再利用公式(6), 我们得到, 当 $h' = 20$ 米, $\rho' = 1.02200$ 且 $\rho'' = 1.02334$ 时,

$$h'' = \frac{20 \cdot 1.02200}{1.02334} = 19.974 \text{ 米}$$

式中 h' ——混合前水层的高度,

h'' ——混合后水层的高度,

这样一来, 由于混合, 所研究区域的海面降低 0.026 米, 而重心降低 0.013 米。

早在 §3 中已经注意到, 混合时密度增大作用的大小不只决定于混合比, 而且也决定于直线混合与等密度线相交的角度。

图5所指出的是我们于 1935 年在北纬 $82^\circ 42'$

和东经 $87^\circ 04'$ 地区¹⁾ 设立的海洋站的 TS 曲线²⁾。

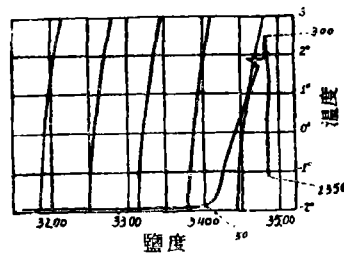


图 5 北纬 $82^\circ 42'$ 东经 $87^\circ 04'$ 站的 TS 曲线

如果忽略小的弯曲(不精确的观测可能产生的), 则所研究的 TS 曲线由三条直线构成。

第一条直线是按照结冰温度画出的, 亦即几乎垂直于海面到 50 米观测层的等密度线。在这一层中垂直稳定度大, 然而混合时可能的密度增大作用很小。

第二条直线是从 75 到 300 米画出的线, 几乎平行于等密度线。这一层中稳定度小, 但混合时可能的密度增大作用大。

最后, 第三条直线是从 300 米到海底 (2365 米) 画出的线, 几乎平行于等盐度线。这一层中稳定度小, 而混合时可能的密度增大作用也大。

表 3

1	2	3	4	5	6	7
Z	t°	S%	ρ	ρ_{cp}	ρ_{net}	$\Delta \rho$
0-1.7	31.60	1.02544		1.02641	1.02641	0.00000
50-1.7	33.98	1.02737				
75-1.3	34.20	1.02754		1.02767	1.02775	0.00008
300+2.7	34.85	1.02781				
300+2.7	34.85	1.02781		1.02788	1.02795	0.00007
2000-0.7	34.85	1.02794				

表 3 所列的是假定所考虑的混合的水质量相等时, 某些观测的结果。

在此表中:

1) Н. Н. Зубов. Динамическая океанология. М.-Л., 1947, 46 页。

2) 表示各个观测层上观测到的温度盐度及密度的 TS 点在 TS 图解中的联结, 就叫作海洋站的 TS 曲线。

- 第 1 栏——观测层；
 第 2 和第 3 栏——观测得的温度和盐度；
 第 4 栏——由 $T S$ 图解所取得的密度；
 第 5 栏——根据混合公式求出的密度；
 第 6 栏——由 $T S$ 图解所取得的混合物密度；
 第 7 栏——混合时的密度增大作用（即第 6 栏与第 5 栏之差）。

表中值得注意的是：

1. 从 0 到 50 米的水混合时，观察不到密度增大作用，这是一切不同盐度但温度一样的水团混合时的特性。
2. 75—300 米与 300—2000 米的水混合时，其密度增大作用可以观测到，而且密度增大作用的大小超过观测的可能误差好几倍。
3. 从上面数第三层的水混合时，混合物的密度比混合水层的当初密度要大。

五、风混合

风的垂直分量所表现出的扰动在大洋水的表层产生波浪和涡旋，涡旋渐渐通过所有更深的地方，使得它们和表层混合。同时风在水上的摩擦和在波浪的背面上的压力产生了风海流。

在此过程中，风的能量一部分用于形成水质点的水平的和垂直的运动，一部分用于能量的消

耗，即运动能转变为热能，其结果是升高了运动水层的温度。如果忽略能量的消耗，而且假定在海水与大气之间没有任何的热交换，则在所研究的无论多长的过程中，混合水层的平均温度保持不变。

在水层的界面上也能发生类似的现象，在这一层中以大的速度而运动的水层起着风的作用，同时为了得到界面破坏和涡旋形成的同样效应，速度的梯度必须比空气与水之间的要小得多¹⁾。

我们假设，在所研究的海区，深度等于 30 米，首先把它看成是三个彼此重迭的均匀水层，其物理化学特性在表 4 中列出。

表 4

层号	厚度(米)	t°	$S\%$	ρ
I	0—10	-1.6	27.33	1.02198
II	10—20	6.8	28.00	1.02198
III	20—30	5.6	28.50	1.02250

这几层在混合前的公共重心在高出海底 14.9983 米处。

表 5 中所列的是上面两层(上面的一行)和所有三层(下面的一行)混合后的值：

表 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
层号	t°	$S\%$	ρ	$\Delta\rho$	h (米)	Δh (米)	Z (米)	ΔZ (米)
I—II	2.6	27.66	1.02210	0.00012	29.99765	-0.00235	14.99752	-0.00078
I—II—III	3.6	27.94	1.02224	0.00009	29.99746	-0.00254	14.99873	+0.00043

第 2 和第 3 栏——根据混合公式算出的平均温度和盐度；

第 4 栏——按照混合物的温度和盐度（第 2 和第 3 栏中的值）由 $T S$ 图解取得的密度；

第 5 栏——是由 $T S$ 图解取得的密度和按混合公式算出的密度相减而得到的密度增大作用的值；

第 6 栏——根据公式 (6) 求得的混合水层的高度。我们已经看到过，这个公式是根据在风混合时水层的质量不变求得的；

第 7 栏——由混合水层的高度（第 6 栏）与该层在混合前高度（表 4）之差而得到的水层高度的减小量；

第 8 栏——根据第 4 和第 6 栏亦即用混合时的密度增大作用所求得的重心在海底以上的高度；

第 9 栏——根据第 4 和第 5 栏所求得的重心

1) Н. Н. Зубов. Морские воды и льды. М.-Л., 1938, 161 頁。

的位移。

将表 4 和 5 加以分析,可以得出下述結論:

1. 根据海塞堡和斯費德魯普的說法,表 4 中所假定的上面两层稳定度等于零(密度梯度和絕热的校正量等于零),因而在这些水层中似乎沒有混合时的阻力。可是,甚至在所假定的情形下,质点間运动的摩擦阻力仍是存在的。此外,任何混合都不可能是瞬息的,同时它扩张得越深,所需的时间也就越长。这样一来,得出关于混合速度的概念,这个問題至今几乎还没有研究过。

2. 虽然在开始的时候, I 和 II 层的密度是一样的,然而計算指出,当第一层和第二层的上部混合时,密度增大作用就已经开始了。开始时, I、II 层的密度为 1.02198。第 I 层和 II 层的上面的一米混合后,混合物的温度就等于 -0.8° , 盐度等于 27.40‰ 而且密度等于 1.02203, 亦即比一切还没有混合时的第 II 层的密度大 0.00005。又指出,在和第 II 层的上半部分混合后,混合物的密度增加到 1.02210, 亦即比第二层下半部的密度高 0.00012。所以第 I、II 两层水的混合开始后,混合了的和还没有进行混合的水层之間的界面上开始产生負的稳定度,然后与整个第 II 层发生密度混合,因而加速了风的混合¹⁾。这种现象值得特别注意。

3. 实际上,象我們所看到的,只有风的能量使从上面数第一层和第二层的上部混合,由于混合时的密度增大作用,使得混合物的密度比所有还没有混合的第二层一部分的密度大。明显地,上层这种密度的增大形成密度的混合,这种混合逐渐遍及于整个第二层。

这种风混合的发生是飞跃式的:其能量主要用于克服密度飞跃的純粹风混合轉变为密度混合,这种混合是由于混合时的密度增大作用而形成,并加速其混合向深处扩张。

4. 不同温度盐度的水混合时发生的海面降低自然与混合物的密度增大作用有关。

5. 已經說过,洗密特首先就注意到,混合时发生的重心的位移,当然也与密度增大作用有关。但是,洗密特沒有考虑到混合时的密度增大作用,而且假定上面密度小的水层和下面密度大的水层混合时,重心永远向上升起,同时还导出公式来计算风的功,这部分功用于混合时重心的升高,即

$$R = mg \Delta Z \quad (11)$$

式中 m ——混合后水层的质量,

g ——重力加速度,

ΔZ ——重心的升高²⁾。

在 §4 中我們看到,由于混合时的密度增大作用,混合水层的重心不仅能升高,而且甚至还会降低。所以洗密特所提出的那种公式是不正确的,而且利用这些公式就不可能不考虑密度增大作用。

六、潮汐混合

許多观测指出³⁾, 潮流中速度的垂直分布类似于河流中速度的垂直分布,即上面的速度垂直梯度小而靠近地面的大。在最深的地方潮流的速度很小,第一次近似地等于零。关于这一点,必须注意到风混合与潮汐混合間所存在的差異。

自上而下扩张的风混合,是随着风的开始而开始,随着风的停息而終止。密度的垂直梯度愈小,风愈强而且作用的时间愈长,則风混合的扩张深度愈大。

自下而上扩张的潮汐混合与风混合以及密度混合无关,而且其强度在一昼夜、一月和一年的过程中都有变化。因而在正常的潮汐范围内的潮汐现象是:流动速度和水面的振动在朔望时加强,上下弦时减弱。結果,潮汐混合在上下弦时的“上限”(即其扩张的上界)低于朔望时潮汐混合的上限。

表 6

米(从...到...)	t°	$S \%$	ρ
0—10	15	30.43	1.02250
10—30	5	28.42	1.02250

1) Н. Н. Зубов. Динамическая океанология. М.-Л., 1947, 42 頁。

2) Н. Н. Зубов. Динамическая океанология М.-Л., 1947, 57 頁應該指出,在此书中(1947年)。我曾做了論証,同时对洗密特的公式做了不充分的評論。

3) Н. Н. Зубов. Динамическая океанология. М.-Л., 1947, 194 頁。

表 6 的第一行中是上水层的初始温度、盐度和密度。第二行是下水层初始的温度、盐度和密度。

从表 6 可以看出,虽然表面的和邻近底部的水层温度与盐度相差很大,但其密度是一样的。

所研究的海区深度等于 30 米。为了简单起见,可以假定在上下弦时的潮汐混合,形成厚度为 20 米的底层,而风混合形成均匀的上层。

表 7、

米(从...到...)	t°	$S\%$	ρ
30—9	5.5	28.50	1.02252
30—5	7.0	28.32	1.02259
30—9	8.3	22.09	1.02268

表 7 的计算,是假定在朔望时潮汐混合的“上限”开始升高,因而使第一层的下面几米也逐渐产生潮汐混合时求得的。

表 7 的第一行中所列的,是第二层与第一层的下 1 米混合后的平均温度和盐度。

第二行中所列的,是第二层与第一层的下 5 米混合后的平均温度和盐度。

第三行中所列的,是整个第一层与第二层混合后的平均温度和盐度。

将表 6 和表 7 对照,我们可看出,第二层与第一层的下部混合后,由于混合时的密度增大作用,邻近底部的水层的密度就已经升高到 1.02252,而一、二两层完全混合后达到 1.02263。

现在假定,在下面的 20 米的水层中,通常盛行着上下弦的潮汐混合,同时风力加强。在这样的情形下,风混合的下界向下移,而且透入到潮汐混合的上层中。证明在这种假定的情形下,混合物的密度也高于底层的初始密度。

于是,在上层与底层的上 1 米混合时得到:混合物的温度为 14.1° , 盐度 30.25% 以及密度为 1.02254。最后,一、二两层混合后,混合物的密度将如表 7 所指出的,等于 1.02263。不难证明,假如质量几乎相等的水混合,则象表 6 所指出的密度增大作用将可能达到最大值,同时混合物的密度将等于 1.02268。

因而表 6 中所指的水层在任何方向从上向下

或从下向上的混合都不能发生,而且当按某一比例混合时,将得到很大的密度增大作用(达 0.00018)。

与各层的密度增大的同时,还发生海面的降低。特别在所研究的情形,两水层潮汐混合后,水面降低到 29.996 米。

还应该再强调,根据海塞堡和斯费德鲁普的说法,水层的稳定度与相混合的水层的密度之差成比例。然而根据洗密特的意见,重心的升高也与此差值成比例,这是不对的。

例如,在混合前两层的密度一样,其公共重心因而将在海底以上 15 米的高度处,但两层混合后,其公共重心将在海底上方 14.998 米的高度,换句话说,当所研究的水层混合时,重心不仅没有升高反而降低。

七、密度混合

早就说过,海水各层之间的稳定平衡,只有在这样的条件下:即密度较小的水层在密度较大的水层上方才有可能。

大洋表层由于温度改变、结冰和蒸发而发生密度增大作用时形成密度混合。但是,当温度改变以及结冰时,参加混合的水柱质量不变。温度改变和结冰所造成的密度混合在这一点上和风混合以及潮汐混合相似。蒸发使之混合水柱的质量减少,而且这种计算多少有些复杂。

表 8

层号	米(从...到...)	t°	$S\%$	ρ
I	0—10	5.0	28.42	1.02250
II	10—20	-1.5	28.10	1.02260
III	20—30	4.0	28.70	1.02281

表 8 中所列的是三层彼此重迭的水在初始时刻的温度、盐度和密度。每层的高度为 10 米,海的总深度 30 米。应该注意,第 II 层的温度对其盐度而言是结冰的温度,而且第 II 层是其中的一个冷的中间水层。

显然,为了使上面的第一层与第二层的密度混合能够发生,必须使第 I 层的密度(在相同盐度的条件下)由于其冷却至少增大到第 II 层的密度。

由 T_S 图解可以求出,当盐度为 28.42% 和密

度为 1.02260 时温度等于 3.9° 。

其次,在开始冷却前,第 I 层中每高一厘米的水柱含有 1.02250 克海水,高为 10 米的水柱中则含有 1022.50 克水。

如果假定海水的热容量在一切温度和盐度的情形都等于 1 克-卡/度,则为了使高 10 米底 1 平方厘米的水柱温度降低 1.1° , 必需从海面的每一平方厘米还输给大气 $1022.50 \times 1.1^{\circ} = 1124.75$ 克/卡的热。

表 9

米(从...到...)	t°	S‰	ρ
0—10	3.9	28.42	1.02260
0—11	3.4	28.39	1.02261
0—15	2.1	28.31	1.02264
0—20	1.2	28.26	1.02265

表 9 中所列的,是高度用米表示的水层混合后的共同温度、盐度和密度。

表中第一行指的是第 I 层的(上面 10 米)密度增大到 1.02260,即等于第 II 层的密度以后,第 I 层的特性值。然而,奇怪的是,在第 II 层的上 1 米参加混合后,由于混合时的密度增大作用,使得其共同密度等于 1.02261,亦即大于所有的第 II 层下部的密度。有趣的是,第 II 层的上半部参加混合后,共同密度高达 1.02264。这样一来,在所研究的例子中,由于混合时的密度增大作用,在密度混合时发生奇怪的现象。

首先为了保证这种混合的可能性,海面的每平方厘米要还给大气 1125 克-卡路里的热。第 I 层和第 II 层混合的最初时刻就已出现了混合时的密度增大作用,并且实际上,正是由于这种密度增大作用,一、二两层在依赖重力而混合时才没有任何热的输出。

于是,由于热量向大气的输出和第一、二两层的混合,上面 20 米的水的特性则变成:温度 1.2° , 盐度 28.26‰ 和密度 1.02265。但第 III 层的密度等于 1.02281。因而,为了上面 20 米的水和第 III 层能够混合,必须把混合后的水层的共同密度至少增大 0.00016。可是,仅使 I、II 两层混合后温度降低也是办不到的。实际上,甚至在此水层冷却至 -1.5° , 亦即达到结冰的温度(为此,海面的

每一平方厘米应该向大气输出约 5400 克-卡),其密度也祇能增大到 1.02281,亦即比第 III 层的密度小 0.00008。上面几米的密度之继续增大,祇有依赖于结冰时上层盐度的增加才有可能形成。

表 10

层 号	t°	S‰	ρ
I—II	1.2	28.26	1.02265
I—II	-1.5	28.26	1.02273
I—II	-1.5	28.36	1.02281

表 10 的第一行所指的,是 I、II 两层混合后的共同温度、盐度和密度。

第二行指的,是当将其冷却至结冰温度时, I、II 两层混合后的结冰温度、盐度和密度。

第三行指的,是其密度开始等于第 III 层的密度之后, I、II 两层混合后的结冰温度、盐度和密度。

由 TS 图解按照所记载的数据——结冰温度 -1.5° 和密度 1.02281 即可求得新的盐度。

于是,为了它能够与第 III 层混合, I、II 两层混合后的盐度必须增大 0.00008,这一点祇在结冰时才有可能。

为了计算冰的厚度,此厚度对于求水的密度来说是必须的,可以利用我建议的近似公式:

$$i = 1.1 Z \frac{\Delta S_w}{S_w} \quad (12)$$

式中 i ——冰结成的厚度,

Z ——能在上面结冰的水层厚度¹⁾。

此公式是在下列假定下得到的:

- 1) 水的密度与冰的密度之比等于 1.1,
- 2) 由海水所结成的冰,其盐度等于零,
- 3) 冰结成的厚度与在其上能结冰的水层厚度相比是很小的。

在此公式中,令 $Z=20$ 米, $\Delta S=0.08\%$ 和 $S_w=28.36\%$, 得

$$i = 62 \text{ 厘米} = 55.8 \text{ 克冰。}$$

考虑到纯冰的结晶热等于 80 克-卡/度,得出为了生成 55.8 克的冰,必须从每平方厘米的海面向大气输出 4464 克-卡的热。

1) Н. Н. Зубов. Морские воды и льды. М., 1938, 167 頁.

大家都知道,把冰的密度 (ρ_i)、水的密度 (ρ_w)、冰的总厚度 (i) 和在水中冰被淹没的深度連系在一起的公式是:

$$z = \frac{\rho_i}{\rho_w} i \quad (13)^{1)}$$

假定冰和水的密度之比等于 0.9, 以及冰的总厚度等于 62 厘米, 我們得到其淹没部分的厚度等于 56 厘米。从而得出, I、II 两层混合以及計算出其中高为 62 厘米的冰以后, I、II 两层所剩的水的高度等于 19.44 米。

表 11 中的第一行指的, 是当考虑到水中結成厚度为 62 厘米的冰层时, I、II 两层水混合后的温度、盐度和密度。

第二行指的, 是在从上面数第三层的上 1 米和 I、II 两层混合后的同一特性。

第三行所指的, 是当第 III 层的上半部和 I、II 水层混合后的同一特性。

第四行指的, 是 I、II 水层和第 III 层的上 7 米混合后的同一特性。

第五行指的, 是整个第 III 层与 I、II 层混合后的同一特性。

表 11

行 号	t°	$S\%$	ρ
1	-1.5	28.36	1.02281
2	-1.2	28.33	1.02282
3	-0.4	28.43	1.02284
4	0.0	28.45	1.02285
5	+0.4	28.48	1.02285

表 11 中最特别的是:

1. 在与第 III 层混合的过程中, 混合物的温度逐渐升高, 而且最后当所有 I、II 和第 III 层中的水团完全经过密度混合后, 它就等于 $+0.4^\circ$ 。此时, 混合中从第 III 层中所释放出来的热量为 $(4.0^\circ + 1.5^\circ) \times 1000 = 5500$ 克-卡路里。这一热量在理論上足够融化厚度达到 62 厘米的整个的冰块。同样地, 假如这块冰融化后变成一层高度约为 56 厘米的純水层, 則以后的混合就困难了。

2. 根据假定, 混合时所形成的是純冰, 因而其融化的温度等于 0° 。其实, 如表 11 的第四行

所示, 这一温度祇是在第 III 层的上面 7 米发生密度混合后才能达到。这里我們接触到一个最有意义的, 但还远远沒能完全解决的关于水和冰共同存在的问题²⁾, 以及另外一些复杂的问题, 这些问题的闡明还没有包括到现代作品的任务中来。

3. 在 I、II 水层(已經选定冰层的高度为 62 厘米)与第 III 层密度混合开始前, 其密度为 1.02281。然而, 在 I、II 层刚刚开始与第 III 层的上部混合时, 混合时的密度增大作用就立刻开始。实际上, 从表 11 我們看出, I、II 层混合后的密度, 在与第 III 层开始混合前等于 1.02281。只在 I、II 层和第 III 层上 1 米混合时, 其共同密度升高到 1.02282, 而在与第 III 层的上 7 米混合后, 甚至达到 1.02285, 这就形成了混合时产生密度增大现象的所有水层的混合。

4. 当时³⁾, 我曾經于海洋学中, 特别是在密度混合的理論方面, 引进两个很重要的且有着实际意义的概念, 即結冰指数和輸热指数。

在所研究的例子的表 9—11 中我們看出, 要将 I 层的温度降低 1.1° (足够使 I 层的密度升高到 II 层的密度), 必須从每平方厘米的海面輸出 1125 克-卡路里。因此我們也看出, 要使 I 层和 II 层混合不需要輸給大气任何热量, 那么, 这混合的发生, 就依赖于混合时的密度增大作用。其次, 要使 I、II 层混合后的水, 冷却至結冰的温度(在所給的情形系冷却至 -1.5°), 必須从每一平方厘米的海面輸給大气 5400 克-卡路里。

总之, 要使原来等于 4° 的海表面的温度, 变到結冰的温度, 每平方厘米的海面必須輸給大气下列热量

$$1125 + 5400 = 6525 \text{ 克-卡,}$$

这个值就是結冰指数。

我把要使密度混合达到底部所需要的, 从一平方厘米的海面輸出的热量(卡路里数)叫做底层水的輸热指数⁴⁾。在所取的例子中, 輸热指数等于

1) Н. Н. Зубов. Льды Арктики. М., 1945, 130 頁.

2) Н. Н. Зубов. Льды Арктики. М., 1945, §62.

3) Н. Н. Зубов. Льды Арктики. М., 1945, §32.

4) Н. Н. Зубов. Морские воды и льды. М., 1938, §38.

1125 + 5400 + 4480 = 11005 克-卡路里,

在此例中:

1125 克-卡用于把 I 层的密度升高到 II 层的密度,

5400 克-卡用于把 I、II 层的温度降低到结冰温度,

4480 克-卡用于产生质量为 56 克的冰。

5. 最值得注意的,是在所取例子中混合时的密度增大现象我们遇见两次:第一次是当 I、II 两层混合时,第二次是在早已混合的 I、II 层与第 III 层混合的时候。

在表 9—11 中曾经指出,有冷的中间水层存在的情形下密度混合时的现象。表 12 中指出有热的中间水层存在时,初始的温度盐度和密度的垂直分布。假定在最初,第 I 层的密度和第 II 层的相同。

表 12

米(从...到...)	t°	S‰	ρ
0—10	-0.7	30.84	1.02480
10—20	3.9	31.20	1.02480
20—30	0.0	31.25	1.02512

我们早就看到,如果把密度相同但温度盐度不同的两个水层混合,则无论按照多大混合比,混合物的密度都将大于参加混合的水团密度,而且在几乎相等的水团混合时,混合物将有最大的密度。实际上,在后一种情形,上面两层混合物的特性是:温度 1.6° , 盐度 31.02% 和密度 1.02484, 亦即比混合前的水层密度大 0.00004。

从而得出,只要海面的温度稍微一降低,密度混合就立刻开始渐渐向深处扩张,并且逐渐占满了上面第一层的整个厚度。因此,我们看出,实际上要使上面两层混合,仅需向大气输出不大的热量。在这些层,密度混合时起主要作用的,不是热量向大气的输出,而是混合时的密度增大作用。

要使早就混合了的上面两个水层和第三层能够混合,必须比较它们的密度。

把结冰温度 -1.7° 和盐度 31.02% 代到 TS 图解中,得到密度 1.02497。因此,对于比较密度而言,祇是降低 I、II 层的混合物的温度是不够的,此外必须加大混合物的盐度。

把结冰温度 -1.7° 和密度 1.02512 代到 TS 图解中,得到盐度 $S=31.20\%$ 。因此要使其能够与 III 层混合,必须把 I、II 层的混合物盐度加大 $31.20-31.02\%=0.18\%$ 。这在结冰时是可能达到的。

根据公式 (12) 得到:

$$i = 1.1 \times 20 \times \frac{0.18}{31.20} = 1.27 \text{ 米冰,}$$

结冰的厚度为 1.27 米后,我们将有下列海洋学特性的分布(参看表 13):

表 13

层 号	Z	t°	S‰	ρ
I+II	19	-1.7	31.20	1.02512
III	10	0.0	31.25	1.02512
I+II+III	29	-1.1	31.22	1.02513

表 13 的第二栏指的,是结成厚度为 1.27 米的冰以后混合水层的近似厚度。

从表 13 看出,要使上面的两层与第三层相混合,如同使上面两层彼此混合一样,祇需向起着类似于“保险瓣”作用的大气输出很小的热量。这种“保险瓣”祇是在刚刚开始混合时,后来进行着的已经依赖于混合时的密度增大作用,比较确切些说,依赖于重力。

在所取例子中,和有冷的中间水层存在的情形一样,混合时的密度增大作用也遇到两次:第一次是第一层和第二层混合的时候,第二次是当 I、II 层的混合物与第三层混合的时候。这不是偶然的,假如所研究的不是三层而是四层的混合,则混合时的密度增大作用将不是二次而是三次,即

- 1) 当 I、II 层混合时,
- 2) 当 I、II 层的混合物与 III 层混合时,
- 3) 当 I、II、III 层的混合物与 IV 层混合时,等等。

这种现象根据这样一个定律,即如果两种密度相等但温度盐度不同的水层混合,则在任意混合比的情形,混合物的密度都要大于参加混合的水层的密度,而且在几乎相等的水团混合时,混合物将有最大密度。

在密度混合的过程中,上层的密度由于温度的降低和盐度的升高(结冰时),必须要等于其下

层的密度。

为此,应当由大洋向大气輸出充分的一定热量。当各个参加混合的水层密度相等以后,要使密度混合依赖于混合时的密度增大作用而开始,只需要給大气輸出不多的热量。这种依赖于密度增大作用的混合,直到所研究的水层还未混合,以及密度还没成为均匀时,都起着主要的作用。然后要使水层混合后的密度达到其下层的密度,必須再向大气輸出充分的一定热量。

因此,由于混合时的密度增大作用,在垂直方向密度混合的发生也是“飞跃式”的:首先由于热量向大气的輸出是为了把温度盐度均匀的上层水的密度,升高到其下层的密度,然后,上层和其下层的混合,主要依赖混合时的密度增大作用。这时,从大洋向大气的热量輸出虽然仍在繼續,但起的只是特殊的“保險瓣”的作用,所以可能是很小的:这里重力起着主要的作用。

八、各种起因的混合同时作用

直到現在,我們分別地研究了各种起因的混合現象。然而,自然界中經常有的,是一种混合和另一种混合的总效应。因为各种混合同时作用的过程,即使是简单的和近似的,也还没有滿意地解决,首先着眼于各种起因的混合的某些特性上,其次才是关于其同时作用的問題。

三种主要的混合的特性如下:

从上而下扩张的风混合,一般地于其扩张的下界形成温度盐度及密度的飞跃。我們用 W 表示这种混合的扩张深度。

从下而上扩张的潮汐混合,一般地于其扩张的上界形成温度盐度和密度的飞跃。用 T 表示此混合扩张的高度。

从上而下扩张的密度混合,一般地在其扩张的下界不产生显著的密度飞跃。假如混合时沒有結冰,則和风混合时一样,形成密度的飞跃层。在相反的情形,显著的盐度飞跃也不能产生。我們用 D 表示密度混合的扩张深度。

在混合过程中,密度的飞跃起着主要的作用,因为这些飞跃妨碍而且有时限制某种起因的混合进一步扩张。

当 §7 中已讲过的底层水的輸热形成时,从海

面到海底的整个水层,都进行某种起因的混合,这对于海洋生物的生活条件有更大的意义,这一点,当所研究的海区深度 Z 小于 W 、 T 或 D 中的某一个值时就会发生。

实际上,对于生活在海底生物的发展來說,除去其它条件,还必须或多或少地經常更換底层的水。如果沒有更換或者更換的不够充分,則氧的含量随着時間而減少,造成分解后的有机物质的沉积、硫化氢的积累和底部生命的死亡。同时,表层对于生命來說也变成貧瘠的,因为海底生物死亡后,残余下的营养物质已經不能再返回海面,因此不能构成有机物质的循环。

反之,在底层与表层水的交换相当强的海区,不仅海底生命得以蓬勃发展和提高“海底的生物生产力”,而且在海的上层造成对于浮游生物的成长來說极为有利的条件。实际上,当所有的水进行混合时,飽含着氧(不論是从直接与大气接触得来,或是由于浮游植物的光合作用得来)的表面水,早晚总能到达海底以更換底层的水,同样的,当底层水上升时,丰富了表层营养物质的含量,沒有这些营养物质,浮游植物的生长是不可能的。

例如,現在假定,风混合与密度混合同时发生。先不管数值的計算,我們可以取,在其它条件相同时,混合水层的总深度小于 $W + D$ 而且在任意条件下都大于其中的每一个。

简单而确实的情形,当同时作用有两种混合时,或是密度混合加潮汐混合,或是风混合加潮汐混合,亦即两种扩张方向相向的混合。对于后一种情形,已經做过一些計算 (§6),从而看出,混合在任何方向都不能扩张,在相混合的水的边界面附近造成密度的升高,称其为底层的密度混合。

應該注意,根据观测,风混合只在很少的情形能扩张到 50 米深度。潮汐混合的影响也只在很少的情形能扩张到比海底上面 50 米更大的高度。密度混合扩张得很深。这特别表现在暖流区域,該处密度的垂直梯度一般很小。在西伯令海区域和东格陵兰海的区域,密度混合能扩张到几百米。

已經說过,在自然界中我們观察到的大多数情形都是几种不同起因的混合同时作用,而且其中每一种都是重要的。此外,大洋的若干海区在一年的各个季节中进行着不同的混合。

例如, 亞速海中夏季的垂直混合几乎完全由风造成, 冬天的时候, 海中到处复盖着冰层, 引起密度混合。

白海的海口在整个一年中盛行着潮汐混合, 此混合在夏季因暴风而加强, 而在冬季, 特别在结冰的时候是因有密度混合而加强。

在巴倫支海, 特别在北喀普流的区域, 不論冬季和夏季, 密度混合都起着主要作用, 这种混合由于北喀普流是暖流而加强, 而暖流在其扩张的寒冷地区輸給大气以大量的热量。

在巴倫支海的不结冰的地区, 秋冬时期密度混合常常由于反复的暴风而加强。

在巴倫支海的若干浅水区域, 秋冬时期产生所有这三种混合, 其中最强的是潮汐混合。

九、各种水的混合

在世界洋的若干地区, 时常会发现由于一些具有各种海洋学特性的水混合而形成的海水。

表 14

层	t°	$S\%$	ρ	%
A	0.0	34.50	1.02772	50
B	10.0	33.50	1.02580	20
C	2.0	32.50	1.02600	30

表 14 指出 A、B 和 C 水的海洋学特性, 以及这些水在混合物中的百分量。

根据混合公式計算时, 得到混合物的海洋学特性为:

$$t = 2.6^{\circ}, S = 33.70\%, \rho = 1.02682$$

但是, 如把 $t = 2.6^{\circ}$ 和 $S = 33.70\%$ 代入 TS 图解中, 我們得到 $\rho = 1.02691$ 。因此, 混合时的密度增大作用等于 0.00009。

在所述的例子中, 混合时的密度增大作用虽然发生, 但所有混合物的密度都小于 A 水的密度。可設想选取这样一种水, 在它按任何比例混合时, 混合物的密度总大于混合前的任一种水的密度。为了証明, 举很简单的混合的例子。

表 15 中指的, 是溫度盐度不同但密度相等的水的海洋学特性。

根据混合公式計算时, 得到

$$t = 3.4^{\circ}, S = 7.80\%, \rho = 1.00614$$

把 $t = 3.4^{\circ}$ 和 $S = 7.80\%$ 代入 TS 图解中, 則得到 $\rho = 1.00628$, 从而 $\Delta\rho = 0.00014$ 。

表 15

层	t°	$S\%$	ρ	%
A	-0.4	7.71	1.00614	50
B	5.2	7.71	1.00614	30
C	10.0	8.16	1.00614	20

从这个简单的例子得出, 当溫度盐度差别很大而密度又非常接近的水混合时, 我們所得到混合物的密度, 大于开始混合前任意水的密度。

在海洋学上, 通常提出这样的問題: 試根据观测所知三种或更多的水以及其混合物的特性, 混合的水的质量在混合物中的百分含量是多少? 可是这个问题的解答, 并不象初看起来那样的简单。

因此, 我們看出, 如有适当的 TS 图解可供利用, 其中 TS 点代表个别混合的水团, 則可得到密度超过原来水团的混合物。密度的增加引起水面的降低以及混合物向深处下沉。

十、結論

我們已經知道, 海水的主要垂直混合是: 风混合、潮汐混合与密度混合。其中每一种都可以单独产生与其它作用无关, 或者与所研究的某种其它混合同时产生。根据这一点去分析許多例子, 然后可証明出, 在每一种混合中密度增大作用都起着或多或少的重要作用。应该强调, 在所研究的例子中盐度比較高。假如为了分析而选取的例子具有低盐度低溫度的范围内, 等密度綫在 TS 图解中更为凸出。很多例子可以証明, 在所有的溫度盐度的情形, 混合时的密度增大作用都存在, 但为此必須有更精确地求得溫度、盐度和更重要的是密度的可能性。

为了計算, 我利用了一般的图解法¹⁾, 其中允許在計算时产生的誤差为溫度到 0.1° , 盐度到 0.01% , 密度到 0.00001 和混合时的密度增大作用到 $0.00001-0.00002$ 。

1) Н. Н. Зубов и К. М. Спиров. Альбом океанологических графиков. М., 1941.

尽管这个图的尺寸很小, 但能很好地說明許多現象, 尤其是, 它指出海塞堡、斯費德魯普和洗密特在海洋学中經常应用的, 不考虑混合时密度增大作用的公式需要再加以研究。

总结最近的研究成果, 得出下述結論:

1. 溫度的每一变化所引起的分子結構的改变是海水的显著的特性之一。

2. 水結構的这些改变引起: 結冰温度和最大密度不一致, $T S$ 图解中的等密度綫和等比容綫向低温低盐的方面呈拋物綫狀的凸出, 而且重要的是, 引起温度盐度不同的水团混合时的密度增大作用。

3. 由于 $T S$ 图解的等密度綫在任意温度盐度的情形都是曲綫 (不是直綫), 因而混合时的密度增大作用在任意温度盐度的情形下都是可能的。

4. 混合时密度增大作用的大小, 首先与水团的混合比有关, 其次, 与 $T S$ 图解中直綫混合的方向有关。

5. 写本文时所作的許多計算指出, 在两种质量不等温度盐度不同的水团混合时, 尤其是混合水团的温度盐度彼此相差很大时, 混合时的密度增大作用达到其最大值。

6. 在一般精确度的范围内, 温度盐度的决定和密度的計算可以认为, 当任意盐度但温度相同的水混合时, 密度增大作用实际上并不发生。

7. 可足够近似地认为, 混合的水团在温度不同但盐度相等的条件下, 混合时的密度增大作用达其最大值。

8. 不同温度盐度但密度相等的水按任意比例混合时, 混合物的密度大于混合水团中的任一密度。

9. 在混合时密度增大作用进行的过程中, 下层的密度可能小于已經混合了的上层的密度。在这种情况下, 立刻发生垂直方向的混合, 这种混合与一般的密度混合完全相似。

10. 应该記住, 风混合的产生和保持是由于风的能量。由于潮汐作用的能量而产生潮汐混合 (主要由于潮流中的速度梯度)。一般密度的发生依赖于热量从海洋向大气的輸出, 由于这种輸出, 表层的密度增加。当表层密度一大于其下层的密

度时, 就立刻开始由重力作用所引起的混合。海水中的分子作用形成混合时的密度增大作用。当由于某一原因使得上层混合物的密度一大于下层密度时, 就立刻开始重力所引起的混合。

11. 与混合时的密度增大現象有关的所有这三种主要混合——风混合、潮汐混合及密度混合——都是“飞跃式”的进行。

12. 风混合时在克服密度飞跃的过程中, 风能量起着主要的作用。在均匀水层混合的过程中, 混合时的密度增大作用起着基本的作用 (由重力所引起的)。

13. 潮汐混合时, 潮汐的能量主要用于克服密度的飞跃。在各层混合的过程中, 混合时的密度增大作用仍起着主要作用。

14. 密度混合时, 在密度相同但温度盐度不同的水层形成过程中, 热量由海洋向大气的輸出起主要的作用。在密度相同但温度盐度不同的水层混合过程中, 由混合时的密度增大作用所产生的混合起主要的作用。

15. 除了主要的混合——风混合、潮汐混合与密度混合外, 海洋中还存在有其它的, 例如, 速度梯度形成的机械混合, 生物的活动和运动形成的生物混合, 例如浮游生物羣的垂直迁移等等。显然, 在这种混合时, 同样能够产生混合时的密度增大作用。

16. 混合时的密度增大作用經常引起海面的某些降低, 以及混合水层的重心向某一方向垂直移动。

17. 应该記住, 大洋中风混合与密度混合从海面扩张到比較小的深度。潮汐混合从海底向上也只扩张到海底以上比較小的高度。于世界洋的主体水层内, 海流的速度梯度所引起的机械混合能影响到任意深度。这种情况是特别重要的。

实际上, 速度梯度所形成的混合, 能够同时产生混合时的密度增大作用。我們曾看出, 混合时的密度增大作用在低温以及混合水团的盐度相等的情况下, 达到其最大值是很可能的。这种情形在世界洋的深水中恰好可被观测到。因此, 我們有充分根据可以假定, 在形成世界洋深层水的均匀性方面起主要作用的是混合时的密度增大作用, 这是海水的一种奇怪的性质。

在近代的著作中，並沒有完全解决所有的与混合时的密度增大現象有关的問題。实际上只証明了这些現象的共同性，并在例子中指出它的大小和其計算的方法。这可以用到目前为止任意起因的混合过程之主要問題還沒解决來說明。

例如，某种混合既然不能瞬息地产生。那么可以問，要使它全部混合，亦即要使当初在混合水层上面的水质点沉降到下面去需要多少時間？关于這個問題大致地可以这样回答：显然，混合所需要的时间与混合水层的厚度成比例。

我們同样不能回答这样的問題：在克服观测到的和在混合水层的上面或下面形成的密度梯度方面需要多少時間？显然，这种所需的时间，例如在风混合时，与密度梯度成正比而且与风速的平

方成反比。

其次，例如，我們知道要使密度混合持續产生，海洋需要向大气輸出多少热量，但我們不知道向大气輸出这些热量所需要的时间。显然，这个時間正比于水和大气的水温之差。

此外，关于混合中能量耗散的現象，我們还什么也不知道。

而許多类似的还没有解决的問題可能提出来。其中大部分归之于混合速度的問題，不論是均匀海还是成层的海中，不知道这一点，要了解混合时密度增大作用的結果是很难的，甚至是不可能的。

(山東大学海洋系譯)