

文章编号: 1001-8166(2011)2-0193-09

# 加拿大海盆双扩散阶梯结构分布与热通量研究\*

赵倩, 赵进平

(中国海洋大学极地海洋过程与全球海洋变化重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 基于 2008 年中国第三次北极科学考察的 CTD 数据, 研究了北冰洋加拿大海盆的双扩散现象。双扩散对流导致的阶梯状均匀混合在加拿大海盆广泛存在, 在加拿大中央海盆及门捷列夫海脊观测到了明显的双扩散阶梯。阶梯结构在深度分布上有显著的空间差异, 在 100~500 m 深度范围内都可能存在双扩散阶梯, 稳定的阶梯结构位于温跃层所在深度, 阶梯高度 1~5 m, 深度较大的阶梯通常是复合阶梯。基于双扩散热通量定律, 估计由双扩散引起的向上垂直热通量约为  $0.05 \sim 0.22 \text{ W/m}^2$ , 表明大西洋水的热量对加拿大中央海盆上层水的热收支不是重要的。但在楚科奇海台区和加拿大海盆南部海域不存在双扩散阶梯, 大西洋水的热量可能对上层海洋结构产生显著影响。

**关键词:** 加拿大海盆; 双扩散; 阶梯结构; 垂直热通量

中图分类号: P731.1 文献标志码: A

## 1 引言

双扩散是指海洋中热扩散系数比盐度扩散系数大 1~2 个数量级而产生的热盐扩散差异所导致的海洋内部混合现象。当海洋中的湍流运动微弱时, 双扩散是形成海洋精细结构的重要现象之一<sup>[1]</sup>。双扩散有 2 种形式: 当暖而咸的海水位于冷而淡的海水之上时, 会发生“盐指”; 当冷而淡的海水位于暖而咸的海水之上, 会发生双扩散对流<sup>[2]</sup>。“盐指”在全球很多海域都可以发生, 因为世界海洋很多海域上层水盐度高于下层水盐度<sup>[1]</sup>。而双扩散对流要求下层水温度高于上层水温度, 主要发生在高纬度海域(北冰洋、威德尔海)和黑海<sup>[3]</sup>。本文研究的是北冰洋加拿大海盆上层水和中层水交界处的双扩散对流。

北冰洋的上层是低温、低盐的北极上层水, 水层厚度大约为 200~300 m。其下是从大西洋进入北冰洋并下沉的高温、高盐的北极中层水, 也称为大西洋水, 广泛分布在加拿大海盆 250~800 m 的深度。由于分子热传导系数  $K_T$  远大于分子盐扩散系数  $K_S$

( $K_T/K_S \approx 100$ )<sup>[1]</sup>, 界面之上的低盐水因受热较快而增温上升, 而界面之下的高盐水因失热较快而冷却下沉<sup>[5]</sup>, 对流运动会在水层中产生混合, 使温度和盐度的铅直分布呈现非常复杂的多层阶梯状结构。

阶梯结构存在的物理基础是湍流运动非常微弱。在北冰洋深水海域湍流运动微弱的原因是由于盐跃层的存在, 导致密度发生较强的层化, 抑制了湍流运动, 使得密度结构整体上非常稳定。强盐跃层与双扩散这 2 个因素的共同作用导致了双扩散阶梯的形成。由于双扩散阶梯是对流产生的, 因此, 双扩散阶梯不仅是温度阶梯, 也是盐度阶梯, 形成的温度和盐度协同变化是加拿大海盆海水重要的垂向结构特征。

对于双扩散的研究有很长的历史。1965 年, Tumer<sup>[5]</sup>通过室内实验对通过双扩散界面的热通量作出推断, 确立了双扩散热通量定律, 即 4/3 通量定律。Neal 等<sup>[6]</sup>首次在北冰洋 300~350 m 的深度范围内观测到温度细结构, 那里暖而咸的大西洋水在冷而淡的海水下方, 温度和盐度都随深度的增加而增加, 观测资料支持了 Tumer 的室内实验结果。此

\* 收稿日期: 2010-05-10 修回日期: 2010-09-17

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“北极环极边界流的结构及其对气候变化贡献的研究”(编号: 40631006)资助。

作者简介: 赵倩(1985), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事极地物理海洋学研究, E-mail: michelle1985122@163.com

后,很多科学家都在加拿大海盆大西洋水的上边界观测到双扩散阶梯结构<sup>[6-12]</sup>。Padman等<sup>[11,12]</sup>利用温度、电导率、速度剪切的细微结构观测研究了加拿大中央海盆的双扩散阶梯结构,阶梯结构发生在 320~430 m 深,由许多均匀层构成,均匀层厚 1~2 m,这些均匀层两两之间存在着几厘米厚但梯度特别大的界面,每层之间的温度差  $\delta\theta \approx 0.004 \sim 0.012$  °C。Padman等<sup>[11,12]</sup>指出,加拿大海盆的双扩散阶梯结构和双扩散对流的实验室研究结果一致,并估计和双扩散混合相关的垂直热通量为  $0.02 \sim 0.1$  W/m<sup>2</sup>。40年来,北冰洋双扩散的观测资料渐渐丰富起来,双扩散成为北冰洋热力学研究的一个重要方面<sup>[2]</sup>。

双扩散在海洋混合与海洋环流中起重要作用。双扩散对流的热盐通量相差 2 个数量级,在温跃层环流与海洋热传输上起重要作用。小尺度的双扩散结构可以与温盐强垂直梯度导致的大尺度环流和大尺度的侧向扰动导致的剪切相联系,双扩散通量对大尺度的海洋特征有重要影响<sup>[2]</sup>。随着大气强迫变化导致的海洋水文特征的变化,双扩散通量是变化的。海气环流模型研究指出,双扩散参数微小的变化就会使向南极的热通量改变 10%~20%<sup>[13,14]</sup>。因此,准确估计双扩散通量的量级和变化,是对大气海洋系统进行准确预测的基础。

北冰洋是双扩散对流现象的典型海域。双扩散阶梯严重抑制了海水向上的热传导,构成了北冰洋海冰冻结的热环境,对北极气候乃至全球气候系统有重要影响<sup>[3]</sup>。最新的研究表明,在当前北极海冰和气候正在发生的快速变化过程中,不仅海洋水文特征发生变化,双扩散通量也发生变化<sup>[15]</sup>。因此,对北极双扩散结构及其热通量的观测与研究仍然需要加强与深入。

虽然只用 CTD 仪器就可以观测到双扩散阶梯现象,但双扩散阶梯的数据并不多,主要是由于观测双扩散阶梯需要非常缓慢地下放仪器,在大多数考察航次都无法用很多时间进行双扩散阶梯的观测。在 2008 年中国第三次北极科学考察中,科考人员用了大量时间,对所有的深水测站进行了双扩散阶梯观测(图 1)。

考察仪器为船载 SBE911Plus 温盐深(CTD)剖面系统,采样频率为 24 Hz,在可能发生双扩散阶梯现象的深度采用低速下放,下放速度控制在 15 m/min 以内。观测时间为 2008 年 8 月 7 日至 9 月 5 日。本文利用该航次的考察数据,对双扩散阶梯现

象进行了深入研究。

## 2 双扩散阶梯的结构特征

### 2.1 背景水文特征

加拿大海盆 60 m 以上的上层海洋温度结构有显著的季节变化,60 m 以下的海水季节变化不明显。在大约 150 m 的深度上存在冷水核,温度接近冰点<sup>[16]</sup>。位于中层的大西洋水几乎没有季节性变化<sup>[15]</sup>,通过北极环极边界流向北冰洋深处平流,分布到整个加拿大海盆<sup>[17,18]</sup>,在 250~500 m 的深度上形成暖核,温度超过 0.5 °C<sup>[16]</sup>。由于盐跃层对湍流的抑制作用,大西洋水向上散失的热量很少,暖核的温度得以大范围保持,成为加拿大海盆典型的温度特征<sup>[19]</sup>。

以 B78 站(145°54'50"W, 77°58'72"N)为例,分析加拿大海盆的典型温盐结构(图 2)。表层 20 m 以内是融冰混合层,温度较低,比较均匀,而盐度变化急剧。融冰混合层以下是融冰水与上层水之间的盐跃层,有时也称为上盐跃层,范围在 50~100 m,150~200 m 的深度上存在冷水核,是冬季陆架上形成的高密度水体向深海盆潜沉的结果,最低温度达到 -1.5 °C。200 m 以下北冰洋上层水与大西洋水之间存在盐跃层,跃层强大,海水非常稳定。盐跃层之下是高温高盐的大西洋水,暖水核的最高温度达到 0.9 °C。从剖面图中可以看到,在盐跃层所在深度范围内,温度和盐度随深度单调递增,是双扩散阶梯形成的必要条件。

数据表明,B78 站在 250~445 m 之间存在明显的双扩散阶梯结构。其中,在 250~280 m 之间 30 m 范围内有 12 个小阶梯,平均高度约 2.5 m,阶梯结构稳定;在 280~360 m 之间存在高度为 5~10 m 的大阶梯和一些小阶梯;在 360~420 m 之间有 2 个高度很大的阶梯,阶梯的高度达到 15~25 m;大阶梯中正在生成小阶梯。425~430 m 之间有 3 个小阶梯,430~445 m 之间是一个约 15 m 厚的均匀层。其中,250~280 m 的双扩散阶梯结构非常稳定。

以往的研究主要侧重于发生双扩散阶梯的水层范围、阶梯的高度统计特性和阶梯之间的层化强度,对阶梯高度的形成特征没有深入研究。数据表明,在 200~300 m 深度范围内的阶梯多为均匀的小阶梯,阶梯结构位于温跃层所在深度,而深度较大的阶梯通常是复合阶梯,即大阶梯中夹杂着小阶梯,深度范围很大。

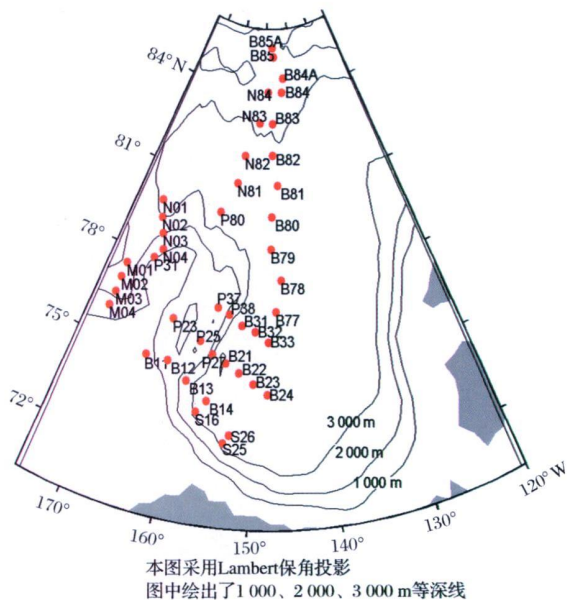


图 1 2008 年北极考察海洋站位图

Fig. 1 Map of observation region of the Arctic expedition in 2008

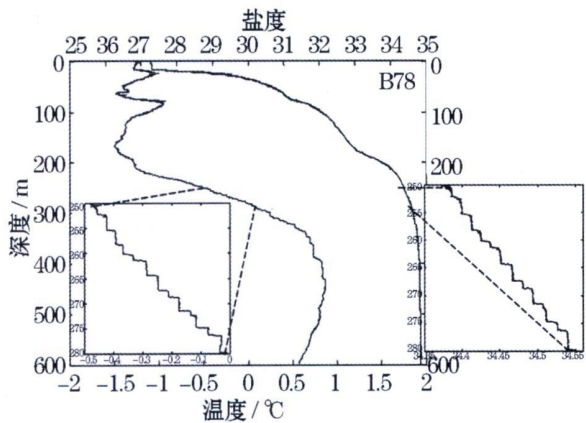


图 2 加拿大海盆 B78 站温度剖面 and 盐度剖面图

Fig. 2 Profiles of temperature and salinity at station B78 in the Canada Basin

从延伸出的放大图中可以看到双扩散阶梯

The expanded scales show the double-diffusive staircase

### 2.2 双扩散阶梯的空间分布

双扩散对流导致的阶梯状均匀混合在加拿大海盆广泛存在, 但双扩散阶梯的发生存在区域差异, 阶梯结构在深度分布上也有显著差别 (图 3)。图 3 给出了双扩散阶梯及其所在深度的空间分布。双扩散阶梯主要发生在加拿大海盆中部和北部的深水海域, 在楚科奇海台 N 断面和门捷列夫海脊 M 断面的深水站位也观测到了双扩散阶梯。但在楚科奇海台内部及加拿大海盆南部, 没有观测到双扩散阶梯现

象。楚科奇冠和北风海脊深度较浅, 最浅处水深只有 200 m, 浅于双扩散阶梯存在的深度, 因此楚科奇海台内部不存在双扩散阶梯结构。而在加拿大海盆的南部也不存在双扩散阶梯结构, 是由于来自太平洋的水体注入, 流动较强, 导致较高的湍流扩散率<sup>[20-21]</sup>, 强湍流运动破坏了双扩散过程。另外, 在加拿大海盆南部有大量的涡旋运动, 加剧了湍流运动<sup>[22-24]</sup>, 导致双扩散阶梯不能存在。总之, 不存在双扩散阶梯主要是由于这些海域湍流运动较强, 失去了双扩散阶梯存在的条件。

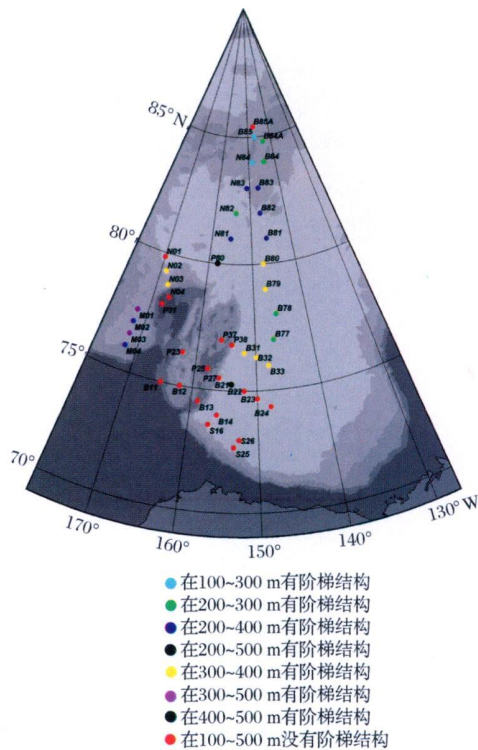


图 3 双扩散阶梯空间分布图

Fig 3 Spatial distribution of double-diffusive staircase structure

在加拿大海盆的北部普遍发生双扩散阶梯现象。双扩散阶梯发生的深度大体上自南向北抬升, 这与大西洋水自南向北抬升有关。深度最大的双扩散阶梯发生在楚科奇海台东部和东北部, 出现在 300~400 m 的深度范围内, 与绕过楚科奇海台的北极环极边界流有关。深度最浅的双扩散阶梯发生在靠近位于 85°N 的阿尔法海脊以南海域, 深度在 100~300 m。显然, 在阿尔法海脊附近中层水的抬升并没有导致湍流混合增强, 双扩散阶梯现象依然清晰。越过阿尔法海脊的站位只有一个, 没有观测到双扩散阶梯。水文数据分析表明, 那里的水体来自北极

边界流的回流, 湍流运动较强可能是双扩散阶梯不能存在的原因。

### 2.3 双扩散阶梯高度分布

各站的 CTD 剖面表明, 双扩散阶梯结构在空间和时间上都存在显著差异。双扩散阶梯的高度并不一致, 其高度分布如图 4 所示。大多数阶梯高度发生在 1~5 m 范围内, 大于 5 m 的阶梯数量很少。在 100~300 m 之间存在的主要是高度在 1~5 m 之间的阶梯, 而在 300~500 m 之间存在的主要是复合阶梯 (图 5)。在复合阶梯的情况下, 大阶梯的高度达到 10~35 m, 而包容的小阶梯高度只有 1~2 m。图 5 中各站都存在稳定的大阶梯结构, 大阶梯之间由小阶梯过渡。这些大阶梯之间的小阶梯经常被观测到, 表明小阶梯是稳定存在的。大阶梯与小阶梯混合存在的局面也许是双扩散阶梯的特征之一。虽然

大阶梯的频数少, 但由于大阶梯的高度大, 其在双扩散阶梯中占有的空间份额很大。

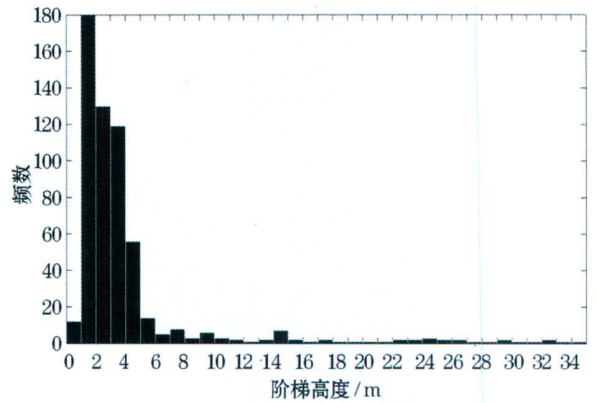


图 4 阶梯高度频数分布图

Fig 4 Frequency distribution of the height of the staircase

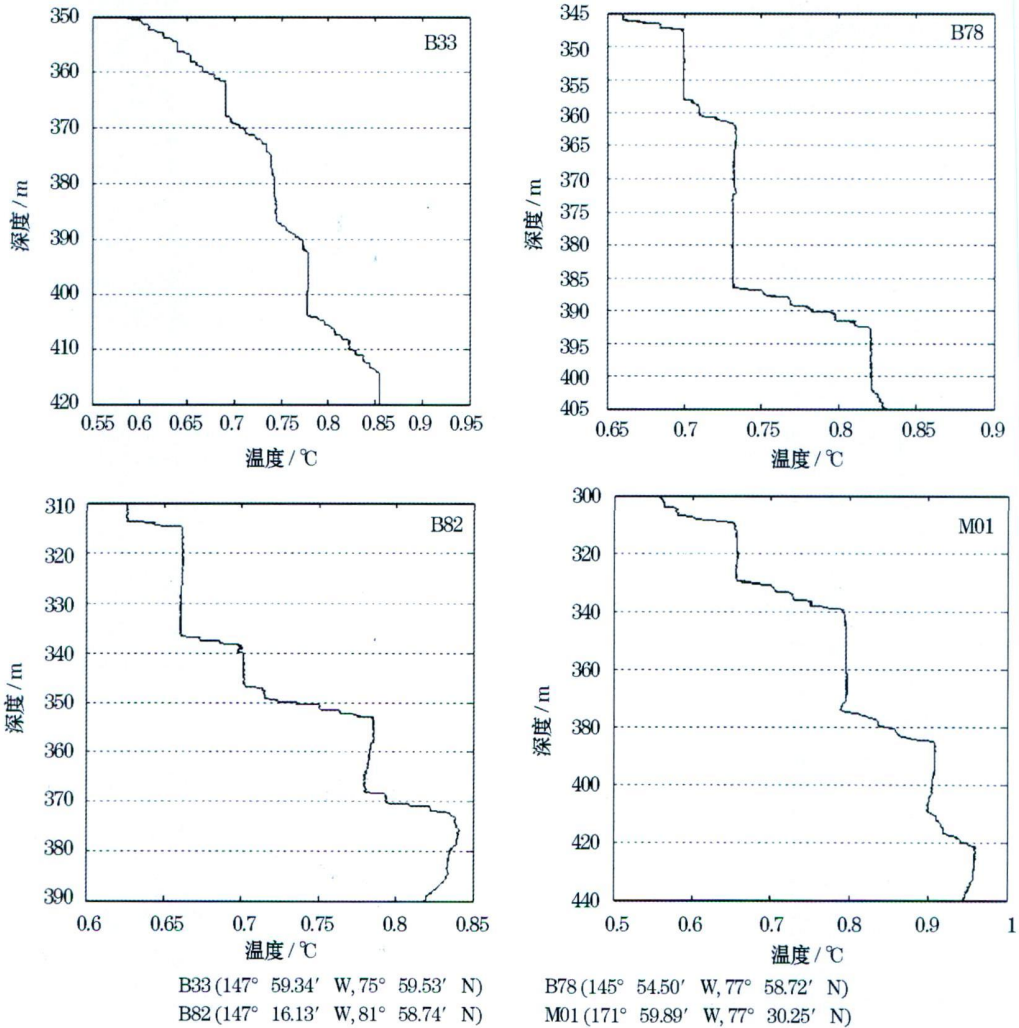


图 5 各站复合阶梯结构图

Fig 5 Composite staircase structure of the various stations



观测结果中的不同高度阶梯混杂的现象说明双扩散阶梯结构很可能是随时间变化的过程。但由于我们没有对双扩散阶梯的连续观测数据, 还不能描述双扩散阶梯随时间的变化, 相信随着连续观测数据和浮标观测数据的不断丰富, 这方面的研究将会进一步深入。

### 3 双扩散阶梯的稳定性比

当温度和盐度都随深度递增时, 会发生双扩散对流现象, 向上的热通量和向上的盐通量 (热通量远大于盐通量) 的联合效应, 导致向下的密度通量, 即向上的浮力通量, 这与湍流混合导致的向下的浮

力通量相反<sup>[2]</sup>。当温度和盐度导致的密度变化相互补偿时, 双扩散阶梯现象非常明显<sup>[3]</sup>。Tumer<sup>[25]</sup>指出, 双扩散层结的相对强度可以用盐度与温度的梯度比  $R_\rho$  来描述, 即稳定性比或密度比。

$$R_\rho = \beta S_z / \alpha T_z \quad (1)$$

其中,  $\alpha = -\rho^{-1} \partial \rho / \partial T$ , 为热膨胀系数;  $\beta = -\rho^{-1} \partial \rho / \partial S$  为盐收缩系数;  $T_z$  和  $S_z$  分别代表温度梯度和盐度梯度,  $T_z = \partial T / \partial z$ ,  $S_z = \partial S / \partial z$ ,  $R_\rho$  表征的是海水双扩散层化的稳定性。双扩散阶梯发生的条件是稳定性比小于扩散系数比<sup>[1]</sup>, 即

$$R_\rho < \kappa_T / \kappa_S \approx 100 \quad (2)$$

其中,  $\kappa_T$  是分子热传导系数,  $\kappa_S$  是分子盐扩散系数。

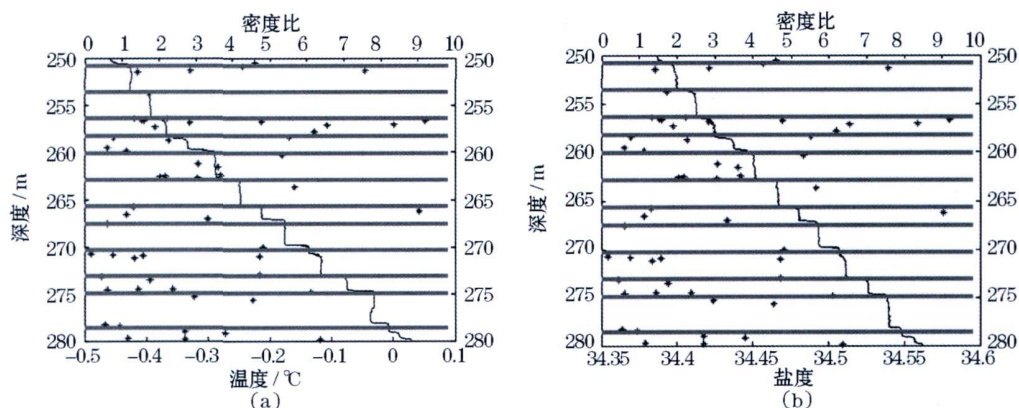


图 6 B78 站双扩散阶梯图 (250~280 m)

Fig 6 Double-diffusive staircase structure at station B78(250~280 m)

(a) 温度; (b) 盐度的垂向分布曲线

图中水平的条状代表相邻均匀层之间梯度特别大的界面, 在界面的两侧, 温度和盐度随深度递增; 条状附近的星号代表每个阶梯的密度比

Profiles of (a) temperature and (b) salinity. The horizontal gray bars indicate a series of sharp interfaces across which both temperature and salinity increase with depth separated by well mixed convective layers. The density ratio for each step is also plotted (magenta asterisk) at the depth of each gradient region between layers

从图 6 中可以看到, 阶梯高度 2~3 m, 灰色的直线代表相邻均匀层之间梯度特别大的界面, 界面两侧位温差  $\delta\theta \approx 0.004^\circ\text{C}$ , 盐度差  $\delta S \approx 0.014$ 。每条灰色的直线附近的\* 号代表在这个界面上的密度比  $R_\rho$ 。密度比主要发生在 10 以下, 远小于扩散系数比。我们对 200~300 m 之间存在双扩散阶梯的所有站位的  $\bar{R}_\rho$  进行估计, 得到  $4 \leq \bar{R}_\rho \leq 10$ ,  $\bar{R}_\rho$  的空间分布如图 7 所示, 表明  $\bar{R}_\rho$  由南向北有增大的趋势, 这主要是因为由南向北的温度梯度有逐渐减小的趋势。在图中 B79 站、B80 站没有值是因为这 2 个站在 200~300 m 范围内没有双扩散阶梯。

几个阶梯  $R_\rho$  的平均值, 得到  $\bar{R}_\rho$  的范围为  $4 \leq \bar{R}_\rho \leq 6$ 。Timmermans 等<sup>[15]</sup>利用 2004—2007 年布放在加拿大海盆的 6 组冰基剖面仪 (IPP) 数据估计  $2 \leq \bar{R}_\rho \leq 7$ 。结果与前人的研究结果在同样的量级, 但由于我们考察的范围大, 观测到的  $\bar{R}_\rho$  的范围更大一些。

### 4 垂直热通量

利用 Kelley<sup>[26]</sup>提出的双扩散热通量公式估计垂直热通量。

$$F_H = 0.0032 e^{(4.8 \bar{R}_\rho^{0.72})} \left( \frac{\alpha g \kappa}{\rho_r P_r} \right)^{1/3} (\mathcal{G})^{4/3} \quad (3)$$

其中, 密度  $\rho \approx 1.029 \text{ kg/m}^3$ , 比热容  $C_p \approx 3.981$

Padman 等<sup>[11, 12]</sup>由 1985 年的观测数据, 计算了

$J/(kg \cdot ^\circ C)$ , 普朗特数  $Pr = \nu/\kappa$ , 运动粘性系数  $\nu = 1.8 \times 10^{-6} m^2/s$  分子扩散系数  $\kappa = 1.4 \times 10^{-7} m^2/s$ ,  $g = 9.8 m/s^2$ , 利用公式 (3) 计算, B78 站 250~280m 之间由双扩散引起的向上垂直热通量约为  $0.19 W/m^2$ 。

为验证该算法合理性和可靠性, 我们把结果与更直接的热通量算法所得结果进行比较, 在忽略湍流混合的情况下, 通过界面传导的分子热通量可以估计为:

$$F_M = \rho C_p \kappa \partial \theta / \partial z \quad (4)$$

其中,  $\partial \theta / \partial z \approx 0.4$  得到分子热通量  $F_M \approx 0.2 W/m^2$ , 与利用双扩散热通量公式 (3) 所得到的结果基本一致。另外, 对 200~300m 之间存在双扩散阶梯的所有站位的向上垂直热通量做了估计, 约为  $0.05 \sim 0.22 W/m^2$ , 由双扩散引起的向上垂直热通量的空间分布如图 8 所示。双扩散热通量的区域差异与靠近大西洋入流的大西洋暖水核有关。从图 8 中可以看到, 双扩散热通量的最大值出现在加拿大海盆西北部部的 N83 站, 这里靠近大西洋暖水核, 大西洋水的热量, 通过热盐扰动从西北向东南平流输送到海盆内部<sup>[19]</sup>; 而最小值出现在  $84^\circ N$  以北的 B84a 站, 在楚科奇海台 N 断面和门捷列夫海脊 M 断面的双扩散热通量也很小, 是由于在这些位置大西洋暖水的势力很弱。

Pachan 等<sup>[11, 12]</sup>利用 1985 年的北极内波实验获得的温度、电导率、速度剪切的细微结构观测数据估计, 与双扩散混合相关的垂直热通量为  $0.02 \sim 0.1 W/m^2$ 。Timmermans 等<sup>[15]</sup>利用 2004—2007 年布放在加拿大海盆的 6 组冰基剖面仪 (IP) 数据估计, 200~300m 之间由双扩散引起的向上垂直热通量约为  $0.05 \sim 0.3 W/m^2$ 。获得结果与 Pachan 等<sup>[11, 12]</sup>的结果相比大了 1 倍, 而与 Timmermans 等<sup>[15]</sup>的结果接近。这些差别很可能体现了双扩散热通量的区域差异, 从图 9 可以看出, 我们考察的覆盖了较大的南北范围, 以往的观测集中于我们考察范围的东南部。

北冰洋海表面的向上垂直热通量大约在几至几十  $W/m^2$  之间<sup>[26~28]</sup>, 而由双扩散引起的向上垂直热通量远小于海表面对海冰的平均热通量。因此, 双扩散阶梯存在的海域大西洋水热量很少进入上层海水, 对加拿大海盆海表面热收支的影响不是重要的<sup>[15]</sup>。在没有双扩散阶梯的海域, 湍流运动很强, 会有更大的向上热量输送, 影响表面的海冰融化过程<sup>[29]</sup>。

尽管在北冰洋与双扩散相关的垂直热通量很小, 但是最近观测到的大西洋水增暖很可能导致更

强更广泛的双扩散现象<sup>[1]</sup>。在楚科奇海台及其周边海域发生中层水增暖现象<sup>[30]</sup>, 最高温度从  $0.5^\circ C$  上升到  $1.2^\circ C$  以上<sup>[16]</sup>。大西洋水的显著增暖可能会影响北冰洋的双扩散现象, 进而将改变北冰洋来自大西洋水的垂直热通量。近期双扩散热通量增加也可能与大西洋水增暖有关, 需要进一步深入研究。

## 5 结果与讨论

北冰洋是双扩散对流现象的典型海域。由于北冰洋常年被海冰覆盖, 实际观测数据稀少, 尤其是能够体现双扩散现象的低速下放的 CTD 数据非常少, 导致对北冰洋双扩散的研究不多。在 2008 年中国第三次北极科学考察中, 对所有可能发生双扩散阶梯现象的深度采用低速下放, 对温度与盐度剖面进行精细观测。这里我们利用这些数据, 对北冰洋加拿大海盆双扩散阶梯结构的特征及时空分布差异做出分析, 对双扩散引起的向上垂直热通量做出估计。

双扩散阶梯结构在深度分布、阶梯的形状和高度上有显著的空间差异。由于楚科奇冠和北风海脊深度较浅, 楚科奇海台内部不存在双扩散阶梯。在加拿大海盆的南部也不存在双扩散阶梯, 是由于太平洋入流导致的强湍流运动破坏了双扩散过程。双扩散阶梯主要发生在加拿大海盆中部和北部的深水海域, 在楚科奇海台 N 断面和门捷列夫海脊 M 断面的深水站位也观测到了双扩散阶梯。双扩散阶梯发生在 100~500m 深度范围内, 其中, 100~300m 之间存在的主要是厚度比较均匀的阶梯, 阶梯高度  $1 \sim 5 m$ , 位于温跃层所在深度; 300~500m 之间存在的主要是复合阶梯。大阶梯的高度达  $10 \sim 35 m$ , 虽然大阶梯的频数少, 但在双扩散阶梯中占有的空间份额并不小。

基于双扩散热通量定律, 对双扩散引起的向上垂直热通量做出估计, 200~300m 之间双扩散热通量约为  $0.05 \sim 0.22 W/m^2$ , 与近期的研究结果接近, 与较早的研究结果相比大了一倍, 可能是中层水增暖导致双扩散热通量增大。但由于双扩散热通量远小于表面混合层对海冰的平均热通量, 大西洋水热量很少进入上层海水, 因此, 在加拿大中央海盆来自大西洋水的垂直热通量对海表面热收支的影响不是重要的。但是在楚科奇海台区和加拿大海盆的南部, 较强的湍流运动导致双扩散阶梯消失, 大西洋水的热量可能对上层海洋结构和热通量产生显著影响。



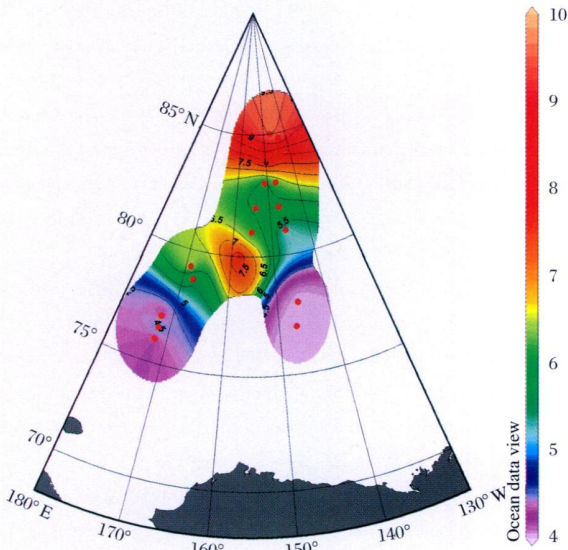


图 7 200 ~ 300 m 之间  $\bar{R}_\rho$  分布

Fig. 7  $\bar{R}_\rho$  distribution between 200m and 300m depth

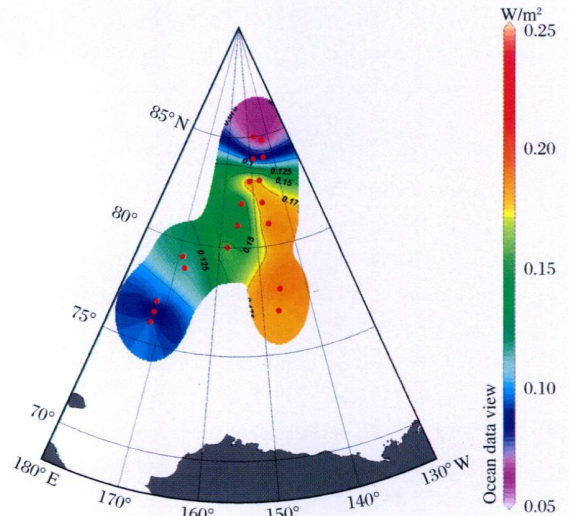
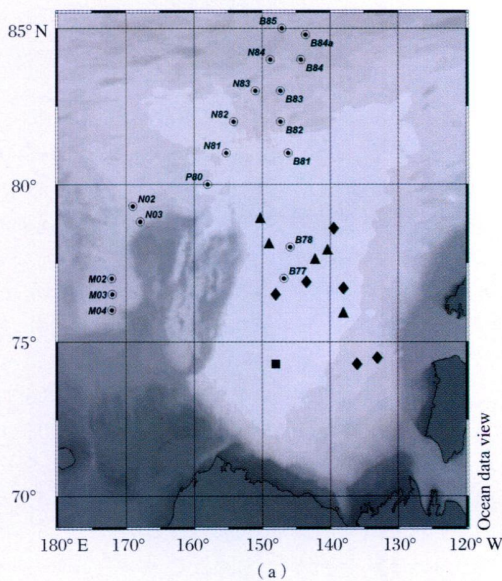
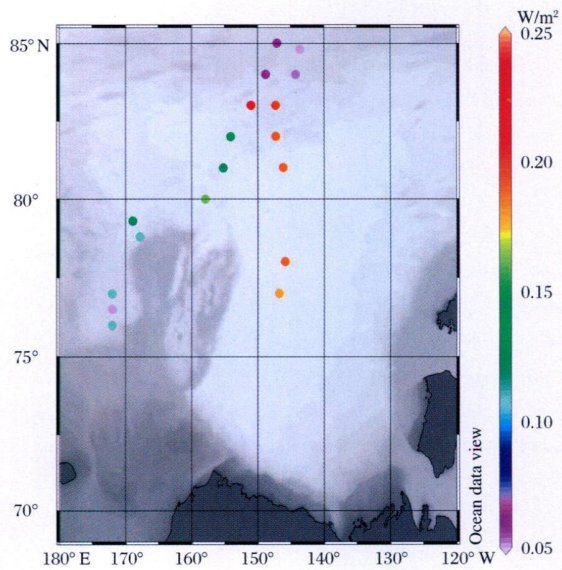


图 8 200 ~ 300 m 之间双扩散引起的向上垂直热通量

Fig. 8 Map of vertical heat fluxes ( $W/m^2$ ) estimated through the double-diffusive staircase between 200 m and 300 m depth



(a)



(b)

图 9 (a) 站点图; (b) 各站位的垂直热通量 ( $W/m^2$ )

Fig. 9 (a) Map of observation region; (b) Map of vertical heat flux ( $W/m^2$ )

○表示本文中来自 2008 年中国第三次北极科考的 CTD 测站; △和◇表示 2004—2007 年 ITP 漂移轨迹的起点和终点<sup>[15]</sup>;  
□表示 1985 年北极内波实验的位置<sup>[11,12]</sup>

Each dot denotes a CTD station from the third Chinese Arctic Expedition in summer of 2008; Triangles denote the start of each ITP track between 2004 and 2007, diamonds denote the end<sup>[15]</sup>; The square shows the 1985 Arctic Internal Wave Experiment region<sup>[11,12]</sup>

**致谢:** 感谢国家海洋局极地考察办公室对本项目的支持, 感谢北极考察队物理组考察队员的努力和雪龙船全体船员的支持。

**参考文献 (References):**

[1] Steek J H, Turckian K K, Thorpe S A. Encyclopedia of Ocean Sciences[M]. San Diego: Academic Press, 2009: 162-170  
[2] Ruddick B, Gargett A E. Oceanic double diffusion: Introduction

- [ J]. *Progress in Oceanography*, 2003, 56(3/4): 381-393
- [ 3] Kelley D E, Fernando H J S, Garrett A E. The diffusive regime of double-diffusive convection[ J]. *Progress in Oceanography*, 2003, 56: 461-481.
- [ 4] Ye Anle, Li Fengqi. *Physical Oceanography*[ M]. Qingdao Qingdao Ocean University Press, 1992: 118-122 [叶安乐, 李凤岐. *物理海洋学*[ M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992: 118-122.]
- [ 5] Turner J S. The coupled turbulent transport of salt and heat across a sharp density interface[ J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1965, 8: 759-767.
- [ 6] Neal V T, Neshyba S, Denner W. Thermal stratification in the Arctic Ocean[ J]. *Science*, 1969, 166: 373-374.
- [ 7] Neal V T, Neshyba S, Denner W. Temperature and conductivity measurements under ice island T-3[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76: 8 107-8 120.
- [ 8] Neal V T, Neshyba S, Denner W. Spectra of internal waves: In situ measurements in a multiple-layered structure[ J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1972, 2: 91-95.
- [ 9] Neal V T, Neshyba S. Microstructure anomalies in the Arctic Ocean[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78: 2 695-2 701.
- [ 10] Perkins R G, Lewis E L. Mixing in the west Spitsbergen current[ J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14: 1 315-1 325.
- [ 11] Padman L, Dillon T M. Vertical fluxes through the Beaufort Sea thermohaline staircase[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 799-806.
- [ 12] Padman L, Dillon T M. Thermal microstructure and internal waves in the Canada Basin diffusive staircase[ J]. *Deep-Sea Research*, 1989, 36: 531-542.
- [ 13] Garrett A E, Holloway G. Sensitivity of the GFDL Ocean model to different diffusivities for heat and salt[ J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22: 1 158-1 177.
- [ 14] Zhang J, Schmitt R W, Huang R X. Sensitivity of the GFDL modular ocean model to parameterization of double-diffusive processes[ J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28: 589-605.
- [ 15] Timmermans M L, Toole J, Krishfield R, et al. Ice-Tethered profiler observations of the double-diffusive staircase in the Canada Basin thermocline[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C00A02.
- [ 16] Zhao Jinping, Gao Guoping, Jiao Yutian. Warming in Arctic intermediate and deep waters around Chukchi Plateau and its adjacent regions in 1999[ J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(8): 1 312-1 320.
- [ 17] Treshnikov A F, Baranov G I. Circulation Structure of Arctic Basins in Waters[ M]. Leningrad: Leningrad Hydrometeoizdat, 1972: 158.
- [ 18] Woodgate R A, Aagaard K, Muench R D, et al. The Arctic Ocean boundary current along the Eurasian slope and the adjacent Lomonosov Ridge: Water mass properties, transports and transformations from moored instruments[ J]. *Deep-Sea Research*, 2001, 48: 1 757-1 792.
- [ 19] McLaughlin F A, Camack E C, Macdonald R W. The joint roles of Pacific and Atlantic-origin waters in the Canada Basin[ J]. *Deep-Sea Research*, 2004, 51: 107-128.
- [ 20] Padman L, Dillon T M, Morison J, et al. Hydrography and microstructure of an Arctic cyclonic eddy[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(C6): 9 411-9 420.
- [ 21] Steele M, Morison J, Emold W, et al. Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: C02027.
- [ 22] Timmermans M L, Toole J, Proshutinsky A, et al. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean observed from Ice-Tethered Profilers[ J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(1): 133-145.
- [ 23] Toole J, Proshutinsky A, Doherty K, et al. Ice-Tethered profilers sample the upper Arctic Ocean[ J]. *Eos Transactions AGU*, 2006, 87(41): 434.
- [ 24] Shi Jiuxin, Zhao Jinping, Jiao Yutian, et al. A sub-surface eddy at inertial current layer in the Canada Basin, Arctic Ocean[ J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2007, 18(2): 135-146.
- [ 25] Turner J S. *Buoyancy Effects in Fluids*[ M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1973: 367.
- [ 26] Kelley D E. Fluxes through diffusive staircases: A new formulation[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 3 365-3 371.
- [ 27] Perovich D K, Elder B. Estimates of ocean heat flux during SHEBA[ J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 1 344.
- [ 28] McPhee M G, Kikuchi T, Morison J H, et al. Ocean-to-ice heat flux at the north pole environmental observatory[ J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): 2 274.
- [ 29] Rudels B, Jones E P, Schauer U, et al. Atlantic sources of the Arctic ocean surface and halocline waters[ J]. *Polar Research*, 2004, 23(2): 181-208.
- [ 30] Krishfield R A, Perovich D K. Spatial and temporal variability of oceanic heat flux to the Arctic ice pack[ J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C07021.



## Distribution of Double-diffusive Staircase Structure and Heat Flux in the Canadian Basin

Zhao Qian, Zhao Jinping

(Key Laboratory of Polar Oceanography and Global Ocean Change,  
Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** Double-diffusive staircase structure is investigated with CTD profile data in the Canadian Basin obtained from the third Chinese Arctic Expedition in summer of 2008. There exist extensive double-diffusive mixed phenomena in the Canadian Basin. Double-diffusive staircase is observed in the central Canada Basin and Mendeleev Ridge. The distribution of double-diffusive staircase has significant spatial difference. There exists double-diffusive staircase through the depth range of 100~500 m. The 1 m to 5 m high staircase is located in the depth of thermocline. However, the staircase is not of uniform height in the deeper depth with a wide depth range which is called composite staircase. On the basis of double-diffusive flux laws, estimated vertical heat fluxes through the staircase are in the range  $0.05 \sim 0.22 \text{ W/m}^2$ , indicating that the vertical transport of heat from the Atlantic Water in the central basin is unlikely to have a significant impact to the Canadian Basin ocean surface heat budget. However, the south on the Canada Basin and Chukchi Plateau where the well-formed staircase is absent possibly dominate the regionally averaged heat flux.

**Key words** Canadian Basin; Double-diffusion; Staircase structure; Vertical heat flux

### 2011年第 3期要目

砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究

..... 李相博, 付金华, 陈启林, 刘显阳, 刘化清, 完颜容, 廖建波, 魏立花, 黄军平  
离子色谱法测定冰川雪冰样品中阴离子含量不确定度评定..... 崔晓庆, 任贾文, 王晓香, 秦 翔  
辽河流域径流对气候变化的响应特征研究 ..... 王国庆, 金君良, 王金星, 贺瑞敏, 刘翠善, 刘艳丽  
大陆下地壳麻粒岩的流变学研究进展 ..... 李丽敏, 刘祥文, 谢战军