第37卷 第1期 海 洋 学 报 Vol. 37, No. 1
2015年1月 Haiyang Xuebao January 2015

屈玲,宋雪珑,周生启. 加拿大海盆东南部锚定观测双扩散阶梯的时间演化研究[J]. 海洋学报,2015,37(1):21—29,doi. 10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2015. 01. 003

Qu Ling, Song Xuelong, Zhou Shengqi. Temporal evolution of mooring-based observations of double diffusive staircases in the southeast Canada Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 21—29, doi. 10. 3969/j. issn. 0235-4193. 2015. 01. 003

加拿大海盆东南部锚定观测双扩散阶梯的时间演化研究

屈玲[1,2],宋雪珑[1,2],周生启[1*]

(1. 中国科学院 南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室,广东 广州 510301; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 加拿大海盆上层,分布着高温高盐的大西洋水和相对低温低盐的盐跃层下部水,两水团之间形成一系列的双扩散阶梯。通过分析2005年8月—2011年8月期间的锚定潜标数据,对双扩散阶梯和这两种水团之间的相互作用进行研究。基于固定盐度范围的方法,在盐度廓线中识别阶梯结构,在盐度34.45~34.83范围内,获取18个阶梯结构,并研究阶梯的参数。发现双扩散阶梯的位温主要受与其接近的水团的影响,同时也受其相邻的阶梯生成或消亡的影响,大西洋水对其上方的双扩散阶梯和盐跃层下部水起到加热作用;而盐跃层下部水的深度变化主导着大西洋水和双扩散阶梯的深度变化。两个相邻的阶梯具有一致的位温和深度变化趋势。通过经验公式,估计大西洋水通过双扩散阶梯向上传输的热通量为0.05~0.6 W/m^2,且由下至上呈现逐渐增大的趋势。最后,估算由双扩散造成的垂向涡扩散系数为3×10^{-6}~3.3×10^{-5} m^2/s,且由下至上呈现逐渐减小的趋势。

关键词: 加拿大海盆;双扩散阶梯;水团

中图分类号: P733.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2015)01-0021-09

1 引言

高温(位温大于0℃)高盐(约35)的北大西洋水(Atlantic Water, AW)通过弗拉姆海峡(Fram Strait)和巴伦支海(Barents Sea)进入北冰洋,流经欧亚海盆进入加拿大海盆[1],广泛分布在300~550 m深度范围内,对北冰洋的热盐平衡起着重要的作用。在高温高盐的大西洋水上方,是低温低盐的盐跃层下部水(Lower Halocline Water, LHW)。通常情况下,LHW表征为盐度34.1的水团[2]。由于海水温度和盐分在分子尺度上的热扩散系数($\kappa_T\approx10^{-7}$ m$^2\cdot$s^{-1})大于盐扩散系数($\kappa_S\approx10^{-9}$ m$^2\cdot$s^{-1}),且两者对海水密度梯度具有相反的作用,由此引起的对流运动,叫做双扩散对流。当低温低盐水在高温高盐水之上时,易于生成双扩散阶梯[3],多发生在北冰洋等海域[4—5]。双扩散的主要特征是其温盐廓线具有阶梯状结构,阶梯由温盐基本均匀的混合层和温盐梯度较大的界面组成(通常情况,混合层的厚度远远大于界面的厚度,因此

收稿日期: 2014-03-26;**修订日期:** 2014-05-11。

基金项目: 国家自然科学基金(41176027,11072253);中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA11030302);热带海洋环境国家重点实验室自主研究项目资助(LTOZZ1304)。

作者简介: 屈玲(1983—),女,山东省曲阜市人,从事海洋中双扩散的研究。E-mail: quling@scsio. ac. cn

* **通信作者:** 周生启,男,研究员,主要从事深海动力学过程(热液喷发);海洋混合、海洋中、小和微尺度过程;湍流热对流及复杂流体等研究。E-mail: sqzhou@scsio. ac. cn

在后面的讨论中，通过分析混合层的性质来研究阶梯的特征）。加拿大海盆中，低温低盐的 LHW 位于高温高盐的 AW 之上的垂向分布，导致两水团之间产生双扩散现象。

双扩散阶梯是加拿大海盆的水文结构特性之一。AW 通过双扩散阶梯向上输运热量和盐分，对北冰洋水体有着重要的影响，前人对其进行了深入的探讨。1969 年，Neal 等[6]发现在加拿大海盆 300～350 m 范围内，存在厚度为 2～10 m 的均匀阶梯。在 1987 年，Padman 和 Dillon[7]应用微结构剖面仪对加拿大海盆南部的阶梯进行观测，发现在 320～430 m 深度范围内的阶梯更明显，且其阶梯厚度约为 1～2 m，通过阶梯向上输送的热通量在 0.02～0.1 W/m^2 范围内。2008 年，Timmermans 等[8]对冰基剖面仪（Ice-Tethered Profiler，ITP）2004－2007 年期间在加拿大海盆内的测量数据进行分析，发现阶梯出现在 200～300 m 范围内，单个阶梯的厚度约为 1 m，但在水平方向上延伸了数百千米，阶梯向上输送的热通量在 0.05～0.3 W/m^2 范围内。2012 年，Polyakov 等[9]通过分析 2003－2004 年期间在拉普捷夫海陆坡（Laptev Sea slope）的高分辨率锚碇点温盐数据，研究了 6 个明显且长期存在的阶梯，这 6 个阶梯的深度为 140～350 m，并对 AW 暖核上方的 4 个阶梯向上输运的热量进行估计，约为 8 W/m^2。在 2004 年的 2 月和 8 月，两股 AW 的强暖流流经锚碇点，在此过程中，阶梯仍保持其自身特性不变。赵倩和赵进平[10]通过分析中国第三次北极科学考察的温盐深仪数据，发现双扩散阶梯的深度在空间上存在差异，其垂向热通量约为 0.05～0.22 W/m^2。2014 年，Lique 等[11]对加拿大海盆内 2003－2011 年期间的锚碇数据进行分析，通过垂向涡扩散系数的参数化，计算 AW 通过阶梯向上输运热量平均为 0.1～0.2 W/m^2。

这些研究表明，双扩散是影响北冰洋内部热通量输送重要机制[9]，然而，很少有人关注双扩散阶梯随时间具有怎样的变化规律，以及双扩散阶梯与其上下水团之间的联系。本研究认为，上下水团的变化，对其会有重要的影响，这也是本研究的初衷。在本文中，首先对锚碇站位处的 AW、LHW 和两者之间 18 个阶梯中的 4 个阶梯在位温和深度方面进行对比，以得到水团和双扩散阶梯之间的联系；最后估算了锚碇站位处，AW 通过双扩散阶梯向上传输的热通量，并评估了双扩散所造成的有效涡扩散系数。

2 观测数据和方法

2003 年 8 月－2013 年 8 月，伍兹霍尔海洋研究所通过波弗特环流观测系统（Beaufort Gyre Observing System，BGOS）项目，在加拿大海盆内部设 4 个锚碇站位（图 1）。这 4 个站位分别记为 A、B、C 和 D，且每个站位的潜标均配置包括麦克莱恩锚碇剖面仪（McLane Moored Profiler，MMP）在内的仪器设备。MMP 集成了温盐深探测仪（Conductivity，Temperature and Depth Recorder，CTD）和二维声学海流计（2-D Acoustic Current Meter，ACM），以 25 cm/s 的垂向速度、1 Hz 的采样频率进行数据的采集。CTD 的温度探头分辨率为 0.01℃，盐度探头分辨率为 0.02，ACM 的测量精度为采集数据的 3%，分辨率为±0.01 cm/s，MMP 数据的前期处理详细过程可参见 Krishfield R 等人所做的技术报告《BGFE 2003－2004 MMP EMCTD and ACM Data Processing Procedures》（未发表，可在 http://www.whoi.edu/page.do?pid=66566 中下载）。本文中对 D 锚碇站位的 MMP 数据进行分析讨论，数据的采集时间、位置以及廓线数目等信息如表 1 所示，在 2005 年 8 月 29 日－2011 年 8 月 11 日期间，MMP 总共采集 1 896 个廓线，经过前期处理后的数据垂向分辨率为 2 m，测量深度范围为 60～2 000 m，廓线之间的采样时间间隔为 6 h 和 48 h（MMP 下潜与上浮时间间隔为 6 h，上浮后与下次下潜的时间间隔为 48 h）。每年 8 月，回收 MMP，导出数据并对仪器进行校正，精确的站位位置会有所变动，表 1 中的站位位置精确至度。

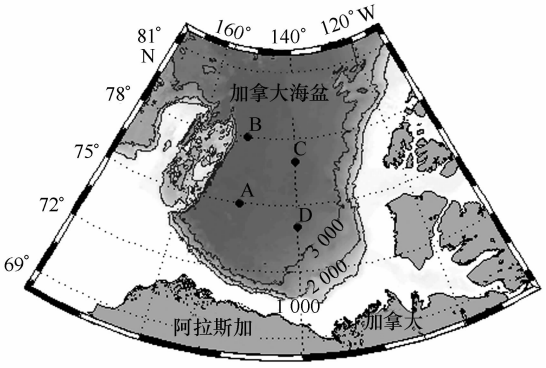

图 1 北冰洋加拿大海盆地形及观测站位分布

Fig. 1 Map of the Canada Basin in the Arctic Ocean and mooring locations

基于阶梯内的盐度相对更加均匀且随时间变化

较小的特性,在温盐阶梯识别时,我们应用固定盐度范围的方法。首先,对连续 5 d 采集的盐度廓线进行概率密度(PDF)分析,每个阶梯的盐度最可几值对应着 PDF 曲线中的每个峰值,例如,识别 1 号阶梯时,取其对应的峰值 S_{p1},在 $S_{p1}\pm0.002\ 7$ 范围内的盐度,都判定为处于该阶梯内。在同一廓线内,取该阶梯内的盐度平均值作为该阶梯的盐度 S,类似的,可以得到阶梯的位温 T,深度 Z,厚度 H。

表 1　D 锚定站位处 MMP 数据说明

Tab. 1　Data description of MMP profiles of mooring location D

位置	深度/m	分析数据 测量时间	廓线数量 /个
74°N,140°W	3 509	2005.08.29 －2011.08.11	1 896

为了检验阶梯的准确性,我们在 D 锚碇站位 111 km 范围内,对相同时间段的冰基剖面仪数据进行分析(所用冰基剖面仪是由伍兹霍尔海洋研究所开发,通过在漂流的浮冰上下放温盐深仪,对北冰洋上层海水进行持续的观测。仪器的温度精度为 0.001℃,垂向分辨率较高,为 0.25 m)。通过对比发现,在 34.4～34.85 盐度范围内,冰基剖面仪探测到 21 个阶梯,而 MMP 探测到 18 个阶梯。其原因是由于 MMP 数据的垂向分辨率为 2 m,无法识别到厚度小的阶梯。

3　关于双扩散阶梯的讨论

加拿大海盆上层由浅至深,依次分布着次表层暖水、太平洋夏季水、太平洋冬季水、LHW 和 AW,具有独特的温盐的垂向分布,其中,次表层暖水具有季节性变化而其他水无明显的季节变化特征[12]。

图 2 为 D 锚碇站位典型的位温廓线和盐度廓线,该廓线是 2005 年 8 月 29 日在(74.00°N,139.98°W)处采集。在图 2a 位温廓线(灰色实线)中,50～100 m 深度范围内,出现局部高温,对应着太平洋夏季水,随着深度的增加,逐渐降温,在 200 m 处达到极小值 T_{min},低至－1.5℃,为太平洋冬季水的冷核,随着深度的继续增加,逐渐增温,在 450 m 处达到极大值 T_{max},高至 0.6℃,为 AW,在增温的同时伴随着阶梯状结构,从局部放大图——图 2b 中可以看到明显的双扩散阶梯结构,位温均匀的阶梯与梯度较大的界面相间分布,随着深度的继续增加,位温逐渐递减。图 2a 盐度廓线(黑色实线)中,由表层至 450 m,盐度急剧增加,并在 200～450 m 范围内,盐度递增的同时同样具有与位温廓线类似的阶梯结构(见图 2b),随着深度的继续增加,盐度缓慢增加。在本文的讨论中,最大位温 T_{max}(盐度范围大于 34.7)处定义为 AW[9];AW 上层为 LHW,同 KikuchiT 等[13]一样,取 $S=34.1$ 处定义该水团。在图 2c 中的温盐图中可以看到,AW 对应的盐度约为 34.8,LHW 对应的盐度为 34.1。由图 2b 中可以看到,双扩散的温盐阶梯出现在 AW 的上方,LHW 的下方。

3.1　AW 和 LHW 变化对双扩散阶梯的影响

在 34.4～34.85 盐度范围内,通过前文所述的固定盐度的判别方法,针对 D 锚碇站位的盐度廓线,识别出 18 个阶梯结构,如图 3 所示。从图中可知,D 锚碇站位处的双扩散阶梯的盐度随时间基本保持不变,盐度在 34.45～34.6 范围内的阶梯的位温随着时间的增加逐渐升温,而盐度在 34.6～34.85 范围内的阶梯随着时间的增加,先逐渐升温,又逐渐降温。双扩散阶梯位温随时间的这种不同的变化,是由何种原因造成的?相邻阶梯之间是否存在关联?下面对此进行分析。在图 4、图 5 中,取 LHW、AW 以及平均盐度分别为 34.452、34.676、34.702 和 34.819 的 4 个阶梯在位温和深度方面分别进行对比分析。

首先分析位温的变化趋势。图 4 为位温随时间的变化:由上至下,依次为 LHW、平均盐度分别为 34.452、34.676、34.702 和 34.819 的 4 个阶梯以及 AW。其中,如图 3 所示,平均盐度约为 34.452 的阶梯为识别出来的阶梯中盐度最小的阶梯,即位于最上方且最接近于 LHW 的阶梯;平均盐度为 34.819 的阶梯为识别出来的阶梯中盐度最大的阶梯,即位于最下方且紧邻 AW。为了使位温随时间变化的整体趋势更加明显,以 25 d 为时间尺度,对位温数据进行平滑。如图 4 所示,2005 年 8 月－2009 年 8 月期间,AW 呈现明显的升温趋势,由约 0.6℃上升至约 0.8℃,但在 2006－2007 年期间,AW 出现一次冷异常事件,位温由约 0.65℃降至约 0.57℃,之后又迅速升温;2009 年 8 月－2011 年 8 月期间,AW 缓慢降温,由 0.8℃降至 0.75℃;平均盐度为 34.819 的阶梯的位温随时间的变化趋势与 AW 位温随时间的变化趋势一致,两者之间的相关系数高达 0.995;平均盐度为 34.702 的阶梯的位温与 AW 的位温变化趋势在 2005 年 8 月－2007 年 3 月期间一致,在 2007 年 3 月,由于该阶梯的下方有新台阶结构生成(见图 3),阻碍下侧的热量向上传输,致使该阶梯的位温出现逐渐递

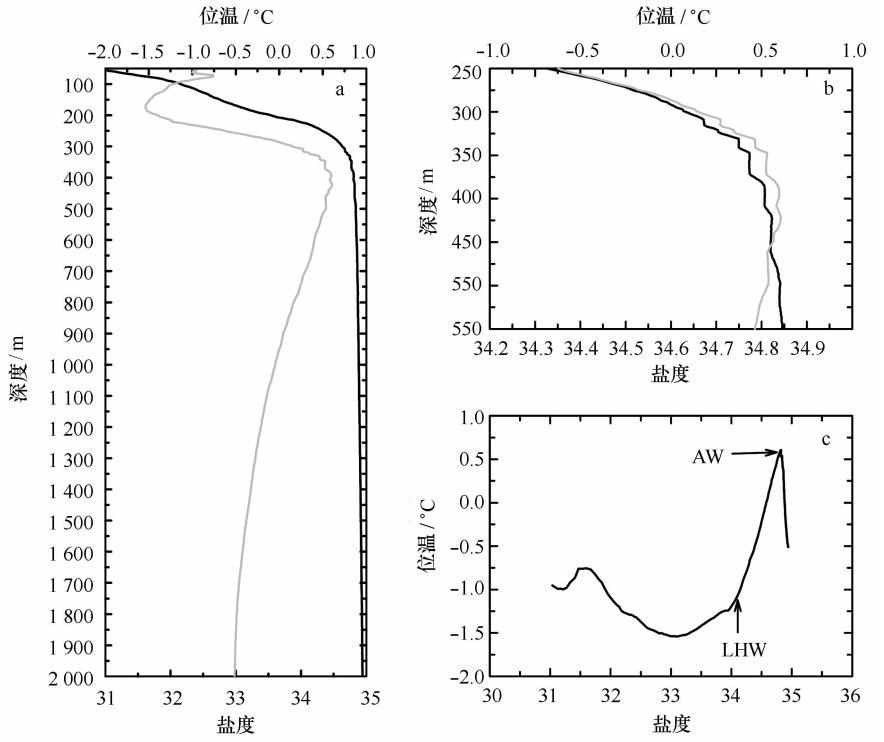

图 2 加拿大海盆 D 锚碇站位典型的位温廓线(灰色实线)和盐度廓线(黑色实线)(a),a 图中 250～550 m 深度范围内温盐廓线的局部放大图(b)和温盐图(c)

Fig. 2 Typical profiles of potential temperature (gray) and salinity (black) at mooring location D(a), closeup of the profiles between 250 to 550 m to show the staircases(b) and the diagram of potential temperature versus salinity(c)

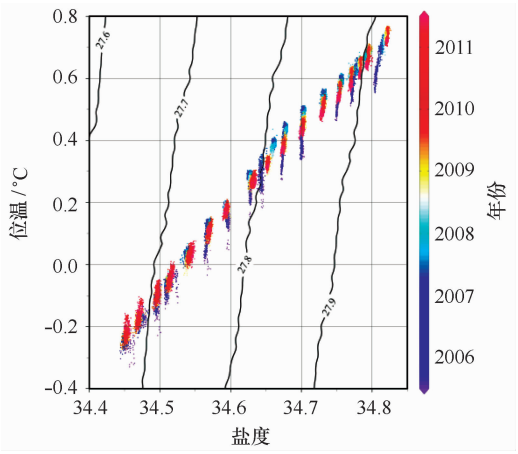

图 3 D 锚定站位 2005－2011 年间,在 34.4～34.85 盐度范围内的阶梯的位温－盐度散点图

Fig. 3 Scatter plot of potential temperature versus salinity (34.4 to 34.85) of the staircases in the double diffusive convection at mooring location D between 2005 and 2011

减的趋势;而平均盐度为 34.676 的阶梯紧邻平均盐度为 34.702 的阶梯,位于其上方,位温随时间的变化趋势基本一致,两者之间的相关系数高达 0.98;平均盐度约为 34.452 的阶梯的位温在 2005 年 8 月－2011 年 8 月期间,整体呈上升趋势,且在 2006－2007 年间的降温幅度明显弱于前面分析的 3 个阶梯,与 AW 的位温变化趋势之间的相关系数为 0.678,而与 LHW 位温之间的相关系数为 0.818,即与 LHW 位温的变化趋势更接近。LHW 在 2005 年 8 月－2011 年 8 月期间呈现升温趋势,由约－1.10℃升至约－0.97℃,即 AW 通过各个阶梯依次向上传输的热量使 LHW 升温。在表 2 中分别列举了上述各阶梯与 AW 和 LHW 之间位温的相关系数,可以看到,越接近 AW 的阶梯,两者之间的位温变化相关系数越高,其位温变化趋势与 AW 的位温变化趋势越相近;而上层与 LHW 相邻的阶梯,其位温变化与 LHW 位温变化之间的相关系数(0.818)高于与 AW 位温变化之间的相关系数(0.678)。综上所述可得,阶梯的位温变化主要受与其接近的水团的位温变化影响。AW 在维持自身升温的同时,对其上方的阶梯进行加热作用,使其位温呈现相似的变化趋势,这也和阶梯位温与 AW 位温之间的相关系数高于它们与 LHW 位温之间的相关系数的结果一致。

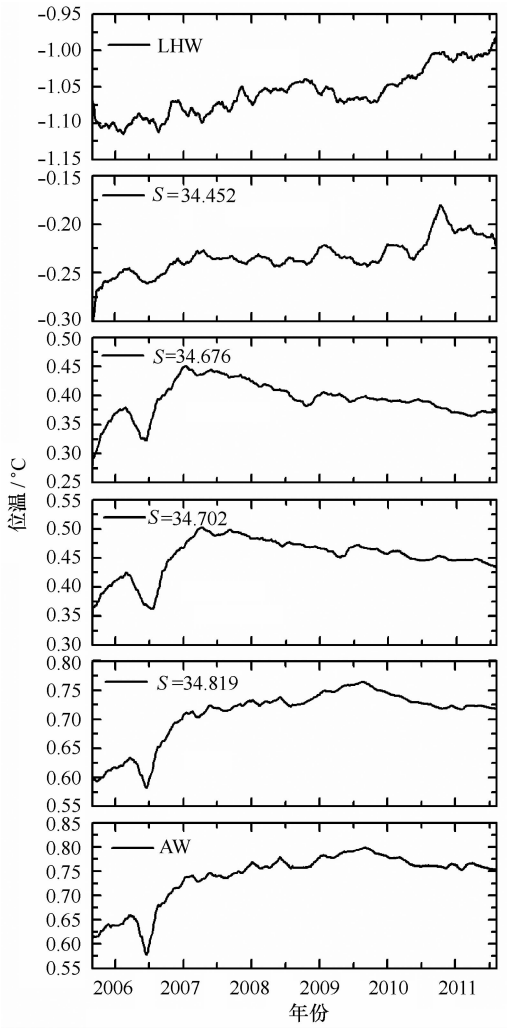

图 4　LHW、平均盐度为 34.452、34.676、34.702 和 34.819 的阶梯和 AW 的位温随时间的变化

Fig. 4　Time series of potential temperatures of the LHW, four staircases and the AW core, the salinity of the four staircases are 34.452, 34.676, 34.702 and 34.819 respectively

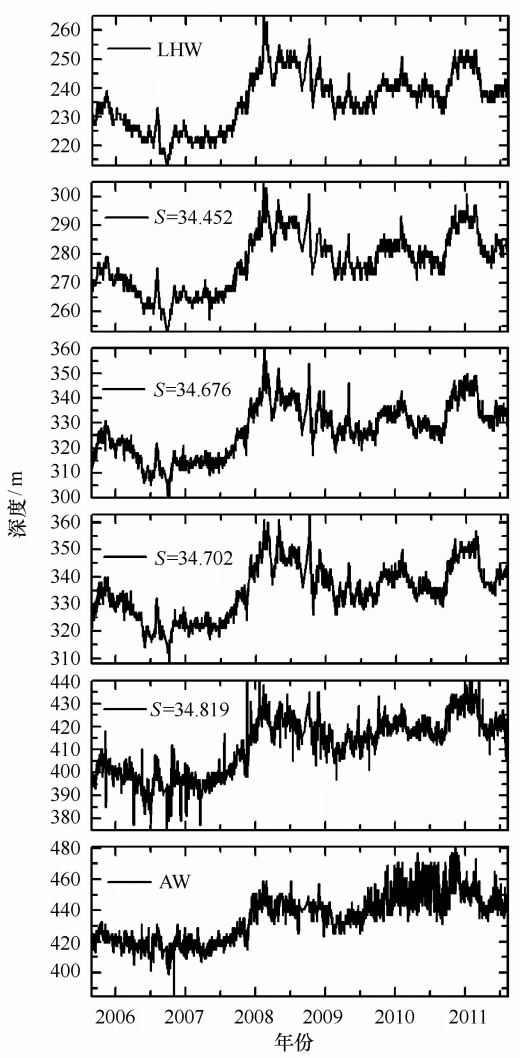

图 5　LHW、平均盐度为 34.452、34.676、34.702 和 34.819 的阶梯和 AW 的深度随时间的变化

Fig. 5　The time series of depth of the LHW, four staircases and AW, the salinity of the four staircases are 34.452, 34.676, 34.702 and 34.819 respectively

表 2　阶梯位温与水团位温之间的相关性

Tab. 2　The correlation coefficients between potential temperture of the saircases layers and that of the AW and the LHW

	34.452 阶梯位温	34.676 阶梯位温	34.702 阶梯位温	34.819 阶梯位温
AW 位温	0.678	0.559	0.659	0.995
LHW 位温	0.818	0.011	0.072	0.584

再分析深度的变化趋势。图 5 为深度随时间的变化:与图 4 相同,由上至下,依次为 LHW、平均盐度分别为 34.452、34.676、34.702 和 34.819 的 4 个阶梯以及 AW 暖核。如图 5 所示,2005 年 8 月－2006 年 8 月期间,LHW 逐渐变浅,由约 230 m 上升至 215 m,随后,又逐渐变深,至 2008 年,深度约为 262 m,之后经历了变浅又变深,在 2011 年 8 月,其深度约为 240 m。平均盐度为 34.452 的阶梯其深度在 255～305 m 范围内变化,随时间的变化趋势与 LHW 深度随时间的变化趋势一致,两者之间的相关系数高达 0.995;平均盐度为 34.676 的阶梯、平均盐度为 34.702 的阶梯,两者的深度随时间的变化趋势与 LHW 深度变化趋势一致,相关系数依次为 0.992、0.990,且这两个相邻阶梯的深度变化趋势一致,两者之间的相关系数高达 0.996;而平均盐度为 34.819 的阶梯,其深度维持 LHW 深度变化趋势,且深度在变化过程中,伴随较多

的跳跃，两者之间的相关系数为 0.958，比其他 3 个阶梯的小；AW 暖核的深度变化亦保持 LHW 深度变化的大趋势，由 420 m 变深至 450 m，加深了约 30 m。在表 3 中分别列举了上述各阶梯与 AW 和 LHW 之间深度的相关系数：各阶梯深度变化与 LHW 深度变化之间的相关系数均大于 0.99，且高于其与 AW 深度变化之间的相关系数。这说明可能是上层的 LHW，而不是下方的 AW 对方阶梯结构的深度起决定性作用；Proshutinsky 等[14]在相同的时间段内观测到加拿大海盆等温线下潜。他们推断由于控制该海域的反气旋北极高压加强，导致了加拿大海盆中波弗特流涡增强，这使得埃克曼抽吸作用加强，进而引起等温线下潜。刘国昕和赵进平[15]对北极冰下埃克曼漂流的影响深度进行了研究，指出冬季较深为 70 m 左右，夏季较浅为 20～30 m。这也说明了埃克曼抽吸作用于上层海洋，水体的下潜是自上而下的，LHW 深度的加深很有可能起因于由埃克曼抽吸所引起的等温线下潜，而 LHW 深度的加深又造成了其下方双扩散阶梯深度的加深。

表 3 阶梯深度与水团深度之间的相关性

Tab. 3 The correlation coefficients between the depth of the staircases and that of the AW and the LHW

	34.452 阶梯深度	34.676 阶梯深度	34.702 阶梯深度	34.819 阶梯深度
AW 深度	0.876	0.881	0.854	0.963
LHW 深度	0.995	0.990	0.992	0.958

3.2 AW 通过双扩散阶梯输运的热通量

类似于瑞利伯纳德对流中的对流环结构[16]，对双扩散中的对流环进行定义[17]：由阶梯和其上层界面的一半（为上边界）以及其下层界面的一半（为下边界）构成。对流环的位温 T_c、盐度 S_c、和深度 h_c 为所包含阶梯的相应参量，厚度 H 为上下边界之间的距离，温差 ΔT 为上下边界之间的位温之差，盐差 ΔS 为上下边界之间的盐度之差。对流环的密度比率 R_ρ 的定义为：

$$R_\rho = \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T}, \tag{1}$$

式中，α 和 β 分别为热扩散系数和盐收缩系数。1990 年，Kelley[18]根据实验数据得到双扩散热通量公式，用以计算通过双扩散向上输送的热通量 F_H：

$$F_H = 0.003\ 2\mathrm{e}^{(4.8/R_\rho^{0.72})} \rho c_p \kappa \left(\frac{g\alpha}{\nu\kappa}\right)^{1/3} \Delta T^{4/3}, \tag{2}$$

式中，ρ 为密度，c_p 为比热，$\kappa = 1.4\times10^{-7}\ \mathrm{m/s^2}$ 为分子热扩散系数，$g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$ 为重力加速度，$\nu = 1.8\times10^{-6}\ \mathrm{m/s^2}$ 为运动黏性系数。

由式(2)可知，对流环的温差对热通量的影响较大。通过与冰基剖面仪数据进行对比发现有 3 个阶梯未被识别到，这些阶梯会影响其相邻阶梯的温差评估，接下来在对流环的研究中，忽略了这些受影响的阶梯。

基于式(2)，可以得到通过各个对流环向上传输的热通量 F_H，如图 6 所示。其中每个黑色散点对应对流环的热通量和盐度，而红色圆点对应该对流环的热通量最可几值和平均盐度。最可几值的求解过程如下所述：例如，对平均盐度为 34.676 的对流环，在 2005 年 8 月－2011 年 8 月期间的热通量进行概率统计分析，得到热通量的概率分布图（见图 7）。图 7 中，最大概率所对应的热通量为该对流环热通量的最可几值，取每个对流环的热通量最可几值，作为该对流环热通量的特征值。由图 6 可知，各对流环的热通量分布范围基本相同，约为 0.05～0.6 $\mathrm{W/m^2}$，与 Padman 和 Dillon[7]所评估的热通量（0.02～0.1 $\mathrm{W/m^2}$）基本一致。热通量的最可几值在 0.15～0.3 $\mathrm{W/m^2}$ 范围内，由下至上呈现逐渐增大的趋势（盐度在 34.45～34.8 范围内）。

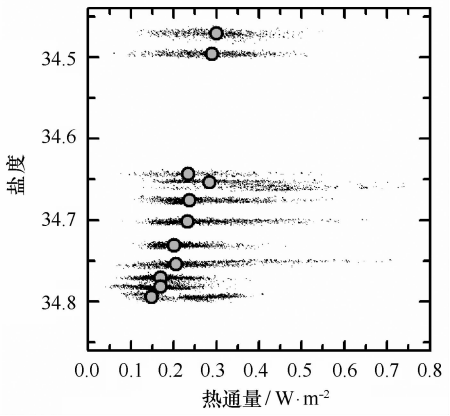

图 6 对流环热通量-盐度散点图

Fig. 6 The heat flux distribution of different convection rolls

灰色圆点为相应对流环热通量的最可几值

The gray dot is the most probable value of heat flux for the corresponding convection roll

垂向涡扩散系数表征跨等密面混合的强度，由于在加拿大海盆内，对其进行直接测量比较困难，所以实测数据较少[19－20]。Timmermans 等[8]指出，加拿大海盆内部湍流强度较弱的海域，温盐廓线中会出现阶

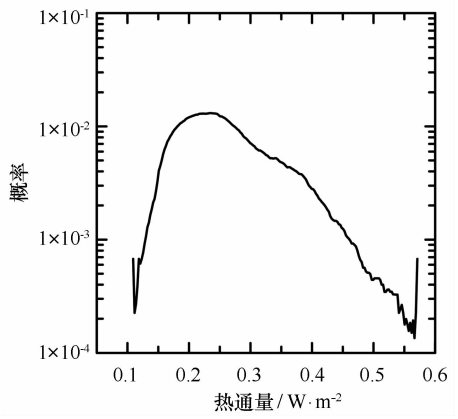

图 7　平均盐度为 34.676 的对流环的热通量的概率分布

Fig. 7　The probability distribution of heat fluxes across the convection roll at the salinity of 34.676

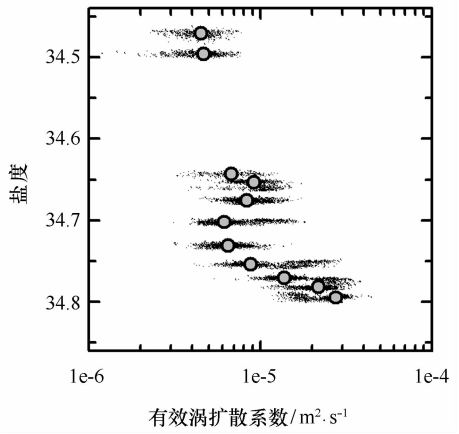

图 8　对流环有效涡扩散系数－盐度散点图

Fig. 8　Scatter diagram of effective eddy diffusivity versus salinity of convection roll

灰色圆点为相应对流环有效涡扩散系数的最可几值

The gray dot is the most probable value of effective vertical diffusivity for the corresponding convection roll

梯状结构,表明有双扩散现象发生。Merryfield[21] 和 Inoue 等[22] 认为,强混合的背景环境下,不能产生双扩散现象。由此,在本文的研究中,可以认为在 D 锚碇站位处的背景环境中无强混合,垂向的物质交换和热交换是由双扩散主导的,这样通过对流环的热通量 F_{HC} 可以得到有效的垂向涡扩散系数 K_T:

$$K_T = \frac{F_{HC}}{C_p \rho \dfrac{\Delta T}{H}}. \tag{3}$$

D 锚碇站位处的有效涡扩散系数 K_T 如图 8 所示,类似于图 6,每个黑色散点对应对流环的 K_T 和盐度,而红色圆点对应该对流环的 K_T 最可几值和平均盐度。K_T 的最可几值的确定过程如同热通量的最可几值。在图 8 中,K_T 分布在 3×10^{-6}～3.3×10^{-5} m^2/s 范围内,且随着对流环盐度的减小,呈现逐渐减小的趋势;在最大盐度的对流环中,K_T 的最可几值取得最大值为 2.8×10^{-5} m^2/s,在最小盐度的对流环中,K_T 的最可几值取得最小值为 4.5×10^{-6} m^2/s。

4　结论

对北冰洋中加拿大海盆内东南部锚定站位处的 MMP 数据进行分析,采用固定盐度的方法,对 AW 和 LHW 之间的双扩散阶梯进行识别,取其中的 4 个阶梯,与 AW、LHW 在位温和深度方面进行对比分析。发现双扩散阶梯的位温主要受与其接近的水团的影响;LHW 的深度变化对 AW 以及两者之间的双扩散阶梯的深度变化起着主导作用。

通过类比瑞利伯纳德对流环,将双扩散的阶梯以及其上层界面的一半和其下层界面的一半视为一个对流环,计算得到 D 锚碇站位处向上传输的热通量为 0.05～0.6 W/m^2,热通量由下至上呈现逐渐增大的趋势。这与前人的估算结果基本一致。估算得到由双扩散造成的有效涡扩散系数约为 3×10^{-6}～3.3×10^{-5} m^2/s,且由下至上呈现逐渐减小的趋势。

致谢:非常感谢波弗特环流探测项目采集和提供的锚碇剖面数据。该项目的研究人员主要来自伍兹霍尔海洋研究所,以及加拿大渔业和海洋科学研究所(http://www.whoi.edu/beaufortgyre)。

参考文献:

[1] McLaughlin F A, Carmack E C, Macdonald R W, et al. The joint roles of Pacific and Atlantic－origin waters in the Canada Basin, 1997－1998[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2004, 51(1): 107－128.

[2] Itoh M, Carmack E, Shimada K, et al. Formation and spreading of Eurasian source oxygen-rich halocline water into the Canadian Basin in the Arctic Ocean[J]. Geophysical research letters, 2007, 34(8).

[3] Turner J S. Double-diffusive phenomena[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1974, 6(1): 37－54.

[4] Huppert H E, Turner J S. Double-diffusive convection[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 106(1): 299－329.

[5] Kelley D E,Fernando H J S,Gargett A E,et al. The diffusive regime of double-diffusive convection[J]. Progress in Oceanography,2003,56(3):461－481.
[6] Neal V T,Neshyba S,Denner W. Thermal stratification in the Arctic Ocean[J]. Science,1969,166(3903):373－374.
[7] Padman L,Dillon T M. Vertical heat fluxes through the Beaufort Sea thermohaline staircase[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans (1978－2012),1987,92(C10):10799－10806.
[8] 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:Oceans (1978－2012),2008,113(C1).
[9] Polyakov I V,Pnyushkov A V,Rember R,et al. Mooring-based observations of double-diffusive staircases over the Laptev Sea Slope[J]. Journal of Physical Oceanography,2012,42(1):95－109.
[10] 赵倩,赵进平. 加拿大海盆双扩散阶梯结构分布与热通量研究[J]. 地球科学进展,2011,26(2):193－201.
Zhao Qian, Zhao Jinping. Distribution of Double-diffusive Staircase Structure and Heat Flux in the Canadian Basin[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 193－201.
[11] Lique C,Guthrie J D,Steele M,et al. Diffusive vertical heat flux in the Canada Basin of the Arctic Ocean inferred from moored instruments[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans,2014.
[12] Bourgain P,Gascard J C,Shi J,et al. Large-scale temperature and salinity changes in the upper Canadian Basin of the Arctic Ocean at a time of a drastic Arctic Oscillation inversion[J]. Ocean Science,2013,9(2):447－460.
[13] Kikuchi T,Hatakeyama K,Morison J H. Distribution of convective lower halocline water in the eastern Arctic Ocean[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans(1978－2012),2004,109(C12).
[14] Proshutinsky A,Krishfield R,Timmermans M-L,et al. Beaufort Gyre freshwater reservoir:State and variability from observations[J]. Journal of Geophysical Research,2009,114(C00A10).
[15] 刘国昕,赵进平. 影响北极冰下海洋Ekman漂流垂直结构与深度因素的研究[J]. 中国海洋大学学报,2013,43(2):1－7.
Liu Guoxin, Zhao Jinping. The Influence of Stratification on Ekman Drift Under Sea Ice[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013,43(2):1－7.
[16] Zhou S Q,Xia K Q. Spatially correlated temperature fluctuations in turbulent convection[J]. Physical Review E,2001,63(4):046308.
[17] Zhou S Q,Qu L,Lu Y Z,et al. The instability of diffusive convection and its implication for the thermohaline staircases in the deep Arctic Ocean [J]. Ocean Science,2014,10(1):127－134.
[18] Kelley D E. Fluxes through diffusive staircases:A new formulation[J]. Journal of Geophysical Research,1990,95,3365－3371.
[19] D'Asaro E A,Morison J H. Internal waves and mixing in the Arctic Ocean[J]. Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers,1992,39(2):S459－S484.
[20] D'Asaro E A,Morehead M D. Internal waves and velocity fine structure in the Arctic Ocean[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans (1978－2012),1991,96(C7):12725－12738.
[21] Merryfield W J. Origin of thermohaline staircases[J]. Journal of Physical Oceanography,2000,30(5):1046－1068.
[22] Inoue R,Yamazaki H,Wolk F,et al. An estimation of buoyancy flux for a mixture of turbulence and double diffusion[J]. Journal of Physical Oceanography,2007,37(3).

Temporal evolution of mooring-based observations of double diffusive staircases in the southeast Canada Basin

Qu Ling[1,2],Song Xuelong[1,2],Zhou Shengqi[1]

(1. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography,South China Sea Institute of Oceanology,Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510301,*China*;2. *University of Chinese Academy of Sciences,Beijing* 100049,*China*)

Abstract:In the upper Canada Basin,double-diffusive staircases are located between the Atlantic Water (AW) and the Lower Halocline Water (LHW). The McLane Moored Profiler (MMP) data measured from August 2005 to August 2011 at subsurface mooring stations are analyzed to explore the relationship between double-diffusive staircases and these two water masses. In the fixed salinity interval between 34.45 and 34.83,eighteen staircases are identified. It is found that the potential temperature of staircases is affected by their adjacent water masses and also the formation and decay of their adjacent staircases. There is heart transfer from the AW to the overlying staircases and the LHW,and the depth variations of the staircases and the AW are determined by the depth of the LHW.

The adjacent staircases show almost the same variation trend between its potential temperature and depth. Based on the empirical formula, the heat flux across the staircase is estimated to be 0.05 to 0.6 W/m^2. The vertical heat flux is found to gradually increase as the salinity decreases upward. In addition, the effective vertical diffusivity, which is caused by double-diffusive convection, is estimated to be about 3×10^{-6} to 3.3×10^{-5} m^2/s, and it gradually decreases as the salinity decreases.

Key words: Canada Basin; double-diffusive staircase; water mass