

分类号_____密级_____

UDC _____



本 科 毕 业 论 文（设计）

北欧海海洋水团年际变化特征

学生姓名 姚恒恺 学号 010022011072

指导教师 杜凌

院、系、中心 海洋环境学院

专业年级 海洋科学 2011 级

论文答辩日期 2015 年 6 月 4 日

中 国 海 洋 大 学

北欧海海洋水团年际变化特征

完成日期: _____

指导教师签字: _____

答辩小组成员签字: _____

北欧海海洋水团年际变化特征

摘 要

本文利用 1945-2012 年的海水温盐资料分析了北欧海温度盐度、热含量及温盐的垂直结构。结果表明,季节变化显著主要出现在表层。1945-1997 年,北欧海上层海水热含量存在 181 个月显著周期和明显下降趋势;1997-2000 年上层热含量出现异常增加;2000 年以后,上层热含量出现更为显著的下降。其中热含量异常事件起始于 1997 年 5 月。

通过各个特征的时间序列分析了北欧海水团的年际变化特征。NAO 的低频变化对北欧海上层热含量的高频变化可能存在调制作用,表层和次表层温度的年际变化主要受到 NAO 的影响。发现北欧海中下层水在全球变暖停滞阶段出现持续上升现象,2000 年以后中层水存在明显的增暖趋势,其相位明显滞后于 NAO 相位约 8 年。

温盐垂直分布空间区域性特征明显,结果显示 1945-2012 年格陵兰海盆盐度变化的垂直结构主要为负异常,而罗弗敦海盆和挪威海盆则出现先变淡后变咸的趋势,其中罗弗敦海盆深度通常可达 700m。

关键词: 北欧海, 水团, 年际变化, 热含量

Interannual Variations of Water Mass in Nordic seas

Abstract

In this paper, 1945--2012 years seawater temperature and salinity data analysis of the vertical structure of temperature and salinity, heat content, temperature and salinity. The results show a significant seasonal variation in the surface. 1945-1997, the presence of the upper ocean heat content significant period 181 months and a clear downward trend; in 1997-2000 Heat Content abnormal increase; since 2000, the upper heat content appear more significant decline. Wherein the heat content anomalies begin in May 1997.

Through various features of time series analysis of the annual variation of the Nordic seawater, Low frequency NAO modulation may change the effects on high-frequency variations of upper heat content of annual variation of surface and subsurface temperature. It is found in the lower continually rise in global warming hiatus phenomenon, there is a clear warming trend after 2000 in mid-water, which lagged behind the NAO phase phase for about eight years.

Vertical distribution of temperature and salinity show 1945-2012 Greenland basin salinity mainly negative anomaly, and Norwegian Lofoten Basin and the basin first fades and then salty trend, which is usually down to the depth of the Lofoten Basin 700m.

KEY WORDS: NORDIC SEAS, WATER MASS, INTERANNUAL VARIABILITY, HEAT CONTENT

目 录

1 引言	2
1.1 北欧海水团研究意义	2
1.2 北欧海水团研究现状	3
1.2.1 北欧海水团划分	3
1.2.2 北欧海水团季节变化特征	3
1.2.3 北欧海水团年际变化特征	4
1.3 本文主要工作	5
2 数据	5
2.1 温度、盐度资料	5
2.2 NAO 指数数据	6
3 北欧海水团的季节变化特征	7
4 北欧海水团的年际变化特征	11
4.1 北欧海上层热含量年际变化特征	12
4.2 北欧海上层水年际变化特征	15
4.3 北欧海中层水年际变化特征	17
4.4 北欧海水团垂直分布的年际变化	19
4.4.1 格陵兰海盆	19
4.4.2 罗弗敦海盆	21
4.4.3 挪威海盆	23
5 结果与讨论	25
参考文献	26
致 谢	28

1 引言

北欧海（The Nordic Seas，也称 GIN 海）主要由格陵兰海（Greenland Sea）、冰岛海（Iceland Sea）和挪威海（Norwegian Sea）三大海区共同组成。北欧海是联系北冰洋与北大西洋的主要通道，扮演了高温高盐水与低温低盐水缓冲区的重要角色，存在显著的物质能量交换；北欧海是北极涛动核心区（AO）的主体，该区域平均气压可与 AO 指数相互替代，该海域海洋水文要素的气候特征及变化对北半球乃至全球气候有着重要的影响^[1]；有大量热量被储存于北欧海的深海洋盆中，使其成为北半球高纬度海域的热量储存器^[2]；深层水以由压强梯度力驱动的深海溢流的形式返回北大西洋，成为全球热盐环流的重要驱动因素。水团分析是深入了解北欧海海洋水文特征的重要途径，有助于加深对该海域海洋动力环境的认识。

北欧海在维持经向翻转环流（MOC）方面起到了重要的作用，在这里上层暖水的回流水分支在穿越格陵兰-苏格兰海脊海脊时转变为密度水流入北大西洋深层以及其他大洋。正是这支暖水和对应的暖风的存在给北欧带来了温和的气候^[3]。

对比其他海域的研究，北欧海的研究时间更长也更为彻底。早在 1887 年 Mohn^[4]就发表了一篇关于挪威海环流的文章，随后 Helland-Hansen 和 Nansen^[5]的文章以此为依据重点研究了北侧的海洋，他们关于南挪威海、冰岛-法罗海脊的盐度剖面现在仍然为区域环流的判定提供依据。

由于北欧海上层水团分布与变化的复杂性，以及近极地海域水文资料的缺乏和时空不连续，前人对于北欧海水团的研究往往集中在水团的划分、源地、生消机制、海洋环流、融冰、热通量等方面，本文以长达 68 年的连续时间的网格化温盐资料，以上层海水热含量和不同层次上的平均温度、最大温度等温度特征量来刻画北欧海及其主要海盆内水团的变化。

1.1 北欧海水团研究意义

研究北欧海水团的意义有三：第一，北欧海海洋水团、海洋锋与海洋环流密切相关，研究上层水团特征，对于了解北欧海的海水流动和水团追踪与溯源有重大意义；第二，其深层水是深海溢流和大洋热盐环流的重要水源，其产生和运动对全球大尺度环流和气候系统有重要影响；第三，北欧海与北冰洋相连，北欧海海洋水团变化研究有助于深入了解其在北冰洋与北大西洋物质能量交换中的作用，理解其在气候变化中的重要地位。

研究北欧海，其目的是通过加强对北欧海温盐结构、水团、锋面变化特征理解，来探究全球海洋和气候的变化趋势，具有重要的科学意义和应用价值。

1.2 北欧海水团研究现状

1.2.1 北欧海水团划分

从水团来源和存在位置上可以分为大西洋水 (Atlantic Waters)、极区水 (Polar Waters)、北极水 (Arctic Waters) 和陆架水 (Shelf Waters)。由于北欧海的海洋环流与海底地形的分布有关, 其水团分布也受到地形控制, 前人基本按照相对独立的三个海盆以及温盐特征对北欧海水团进行分类。在三个海盆的大类下还可以依据温盐图解对北欧海水团进行非常详尽的划分, Hopkins 等人基于 1972-1985 年水文数据^[6]对此做了一系列工作。

在温盐图解上 (T-S), 三个主要海盆的海水存在互相重叠的部分。依据水团的密度从水团深度上可以分为表层水、中层水和底层水, Aagaard 等人 1985 年通过水文调查数据以位密 27.75 到 27.90 作为判定中层水的依据, 以位密 32.785 (1000m 处) 来区分中层水和深层水^[6-8]。

北欧海上层分布着两条主要流动, 分别是来自大西洋的挪威暖流和来自北冰洋的东格陵兰寒流, 这两条流动最主要流经北欧海的西侧陆架和东侧海域。同时受到海底地形的影响和约束, 挪威暖流的主流还在北欧海中部发生分离形成回流^[9]。主要受到海流因素影响, 北欧海上层水在水平方向可以大致分为受北极低温水影响的西部极区、受大西洋高温水影响的东部大西洋区和分布在冰岛海中部及东北部和格陵兰海中部的北欧海中部过渡区^[10; 11]。

通过水文观测与示踪物分布, Karstensen, J. 等^[12]利用 20 世纪 90 年代资料将格陵兰海在垂向上分为上混合层、中层、深层及底层, 上混合层对于海表强迫的响应较为直接 (小于 1 年), 中层对于上层的对流响应达到年际尺度, 下层响应很弱, 主要来自于北冰洋海水的混合。

前人对于北欧海水团的划分主要是基于特定时段、特定海域海洋调查的实测资料得到各站位温盐图解 (T-S)^[6]和断面图, 再通过一定的方法和人为判断得到的。通过这种方式基于时空上不连续的数据, 划分出来的水团十分复杂, 各个结果不统一。

1.2.2 北欧海水团季节变化特征

北欧海表层水的变化主要受到包括表层冷却、盐度释放和融冰等过程的控制。这些过程在时空场上变化剧烈, 很可能与 NAO、AO 等大尺度大气模式有关^[12]。

各海盆的季节变化中最具显著差异的变化在于格陵兰海由于受到低温低盐的北冰洋水影响, 所以比同层的冰岛海水盐度更低^[10]。自从 20 世纪 60 年代以来, 格陵

兰海上层通过垂直对流方式混合仅能达到 1500m 以上^[12; 13], 格陵兰海中层水变得更暖^[12; 14], 盐度更低, 这极有可能与 90 年代初北冰洋海冰冰量迅速减少有关^[12]。

北冰洋的次表层是格陵兰-苏格兰海脊以北的北欧海海水的源地, 它们经过不同过程的冷却, 最终下沉到北欧海的中层 (500-1000m) 及深层^[15], 在冬季成为了具有连续密度的中层水和深层水。冰岛海在冬季主要存在一层与深层水同样寒冷但盐度更低的中层水, 该中层水在等密度混合之后经过一个最终的冷却过程后转变成为新的深层和底层水^[10]。来自冰岛海和格陵兰海的中层水被输送到挪威海, 冬季北挪威海水顺着法罗-冰岛海脊流向法罗群岛^[16]。

基于对大西洋水在 Faroe-Shetland 向巴伦支海入流区常规断面的测量, Tore Furevik^[17]发现 200m 以上水团存在很高振幅的季节信号及更短周期信号, 而底层水主要以年际变率为主。而在 400m 处年际信号高于季节信号的量级。

挪威海盆的深层水比罗弗敦海盆的深层水有更高的盐度。挪威海盆在 1500m 左右存在盐度极大值区域, 更深层的水团来自格陵兰海^[18]。Blindheim, J. 等发现相比于挪威海盆水, 罗弗敦海盆以及挪威海盆以北的水团更容易受到格陵兰海水的直接影响^[18]。

1.2.3 北欧海水团年际变化特征

1.2.3.1 格陵兰海盆

1965-1970 年的寒冬促进了格陵兰海和挪威海水团垂直混合的强度, 正因此在格陵兰海中心产生了更多的低温低盐的格陵兰海盆深层水, 同时在南挪威海有更多高温高盐水向下流动。从 1980 年至 20 世纪末, 由大西洋水回流带来的高温水对流促使格陵兰海快速增温^[19]。

1.2.3.2 挪威海盆

1950-1980 年在挪威海盆中, 水团主要来自上 300m 层的大西洋水, 期间此大西洋水存在温度与盐度下降趋势, 而在 1980-1990 年同层海水存在升温趋势^[19]。从 1958 年到 2000 年, 挪威海盆深层水温度有轻微的上升, 在接近 3000m 的海底位温从 -1.07°C 上升到 -1.02°C, 这一小数点后的升温可能与北冰洋深层水流经格陵兰海有关。在 20 世纪 20 年代末, 2000m 附近的挪威海深层水上升了 0.1。由于向上增温的延迟, 上层海洋 (1200m) 的增暖在 1990 年被发现^[20]。

在 1980-1996 年期间存在两个暖期, 1983-1984 年和 1990-1992 年, 同时也存在一个冷期, 1986-1988 年。在第一个暖期, 大西洋流的平均流沿北欧海东侧向北流动, 因此温度异常减小。第二个暖期的原因可以解释为向大气输出的热量减少, 或者在北欧海内对流速度增强。温度异常沿着海流向北加强, 盐度异常由大西洋流向

北平流输送同时通过淡水通量加强^[17]。

在 1995-2010 年期间, 挪威海上层海洋热含量存在 3.2Wm^{-2} 增长。这段时间前期为热含量负异常, 随后增长至正异常, 在 2003/2004 年达到最大值, 随后缓慢减小直到 2010 年仍保持正值。北欧海热含量的增长趋势大于全球平均以及北大西洋的热含量增长趋势, 该增长主要与北大西洋水暖平流有关, 也有小部分原因与当地海气热通量的变化有关^[21]。

1.2.3.3 罗弗敦海盆

在 1968-1969 年, 存在两团极冷的水导致整个罗弗敦海盆损失了超过平均状况下的热量, 破坏了罗弗敦海原有的环流, 产生了整个 50 年来最大的一次温度异常。罗弗敦海的年际变化与 NAO 指数相关性较好, 因此冰岛海海水比对应的气温平均的温度异常更高, 而罗弗敦海盆相反的比气温平均的温度异常更低^[22]。

1.3 本文主要工作

本文主要完成了利用温盐垂直剖面图划定北欧海水团的垂向分层, 利用 Ishii 温盐数据在不同层上的水平分布, 研究不同层、不同海盆水团的季节变化特征; 利用北欧海海洋上层和中层热含量、各层水平均温度以及最大温度等水团温度特征量来表征北欧海水团总体的温度场状态以及各个主要海盆独立的温度场状态, 研究各个特征量的水平和垂直分布特征, 以及各个特征的时间序列。通过将各个特征的时间序列与北大西洋涛动指数、全球变暖趋势的对比, 揭示北欧海水团的年际变化特征。本文重点讨论了在 1997 年-2000 年发生的北欧海上层热含量异常事件以及北欧海上层海水热含量和各层水团的年际变化特征。

2 数据

2.1 温度、盐度资料

温盐数据是由 Ishii 等编制的 1945—2012 年海表面以下 1500m 范围内的月平均客观分析的温度和盐度数据, 此分析基于 WOD05/WOA05 (World Ocean Database) 数据集, IRD (L'Institut de Recherche pour le Development) 热带太平洋全球温盐数据、COBE (Centennial in situ Observation Based Estimates) 海表面温度以及 ARGO 浮标数据。本文选用的 Ishii 温盐数据来自 UCAR (University Corporation for Atmospheric Research), 时间跨度为 1945-2012 年, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向有 24 个标准层, 时间间隔为 1 个月。温盐数据的网格和各海盆的网格如图 1 和图 2 点状图所示。格陵兰海总共取点 69 个, 罗弗敦海共取点 39 个, 挪威海共计取点 47 个, 整

个北欧海共计取点 616 个。

本文使用的热含量资料是基于 Ishii 温度数据计算得到的。

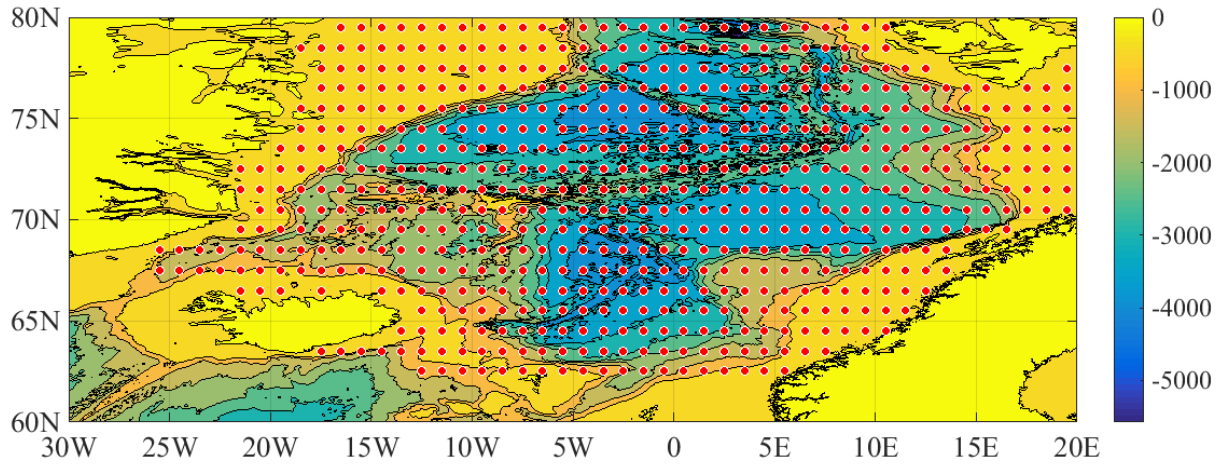


图 1 北欧海温盐资料取点示意图

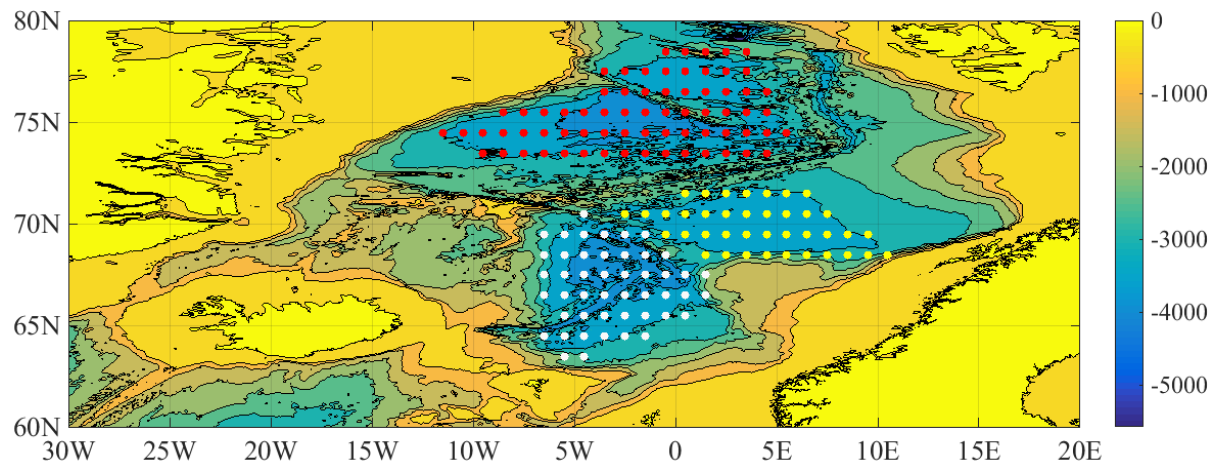


图 2 北欧海各海盆温盐资料取点示意图

(红色为格陵兰海盆、白色为挪威海盆、黄色为罗弗敦海盆)

2.2 NAO 指数数据

NAO 指数数据来自美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的气候预报中心 (CPC) 的月平均数据, 该数据的计算是利用旋转主成分分析法 (RPCA) [23] 对北半球 20°N-90°N 区域 500mb 高的气压异常值做的分析, 该异常值是经过 CPC 基于 1950-2000 年日平均数据标准化得到的。月平均 NAO 指数基于每日 NAO 指数的线性拟合, 可以用来揭示季节性内在变率。

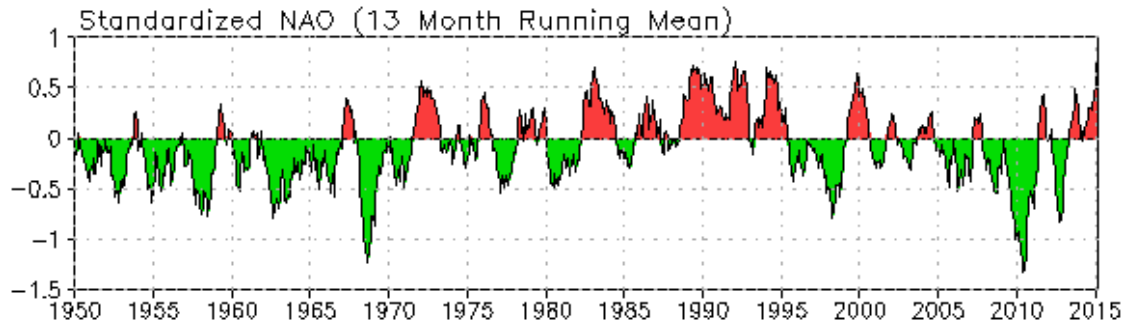


图 3 NAO 指数（经 13 月滑动平均）图片引自 CPC

3 北欧海水团的季节变化特征

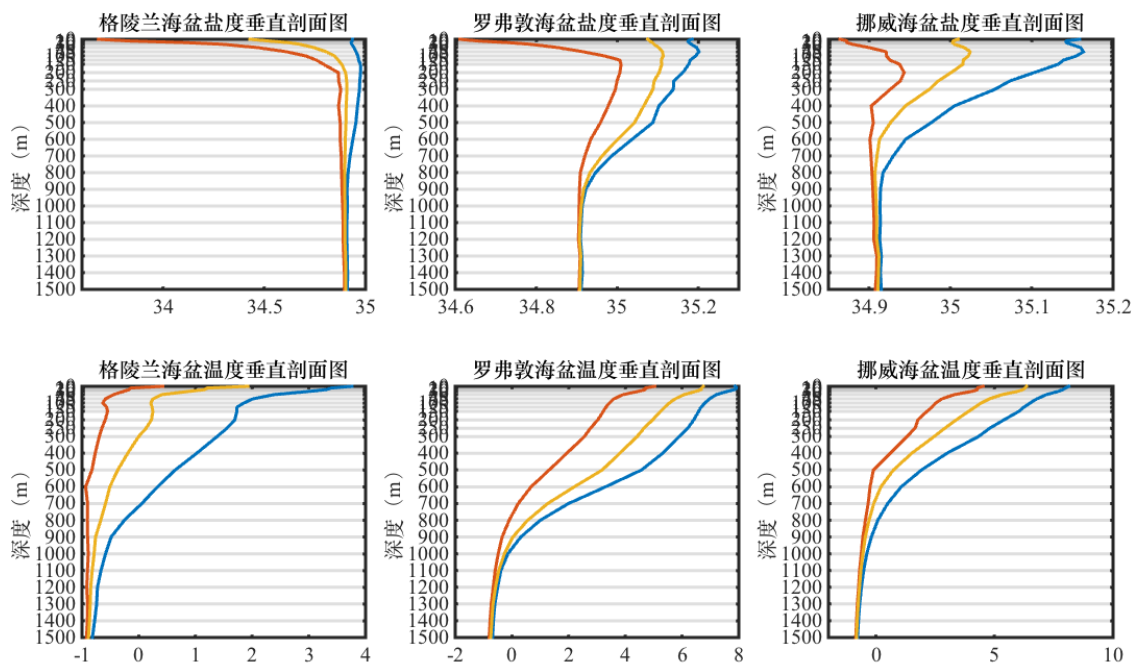


图 4 北欧海温盐垂直剖面图

（红色线为该海盆内所有站点在该层的最小值，蓝色色线为最大值，黄色线为平均值）

由于资料深度的限制，本文对于水团的划分仅限于 0-1500m 的范围内。本文根据北欧海三个海盆的温盐垂直剖面图确定各海盆的表层水（10m）、次表层水（100-250m）、中层水（500-800m），中层以上海水称作上层水，中层以下水体温盐特征几乎无明显变化，本文暂不做定义。本文所称“水团”并非传统上由温盐图解定义的水团，而是一定深度范围内的整层水，这样做简化了水团划分的复杂性，解决了前人对于北欧海水团定义的分歧。

由图 5 可得，对于整个北欧海，仅表层（10m）温盐存在明显的季节变化，1-5 月几乎无明显变化，从 6 月起表层温度迅速增高，表层盐度迅速降低，至 8 月达到温度最大值和盐度最小值，随后温度开始减低，盐度回升。而次表层以下，温度和

盐度场几乎无季节变化。

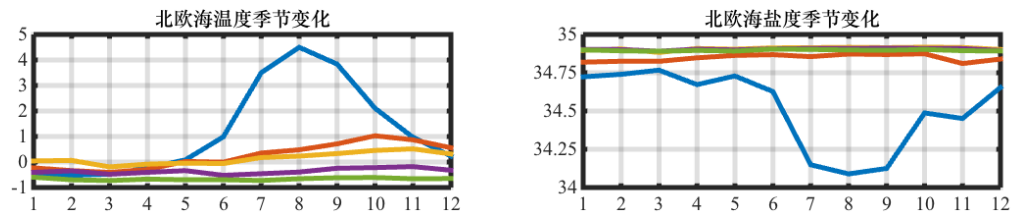


图 5 北欧海温度盐度季节变化时间序列

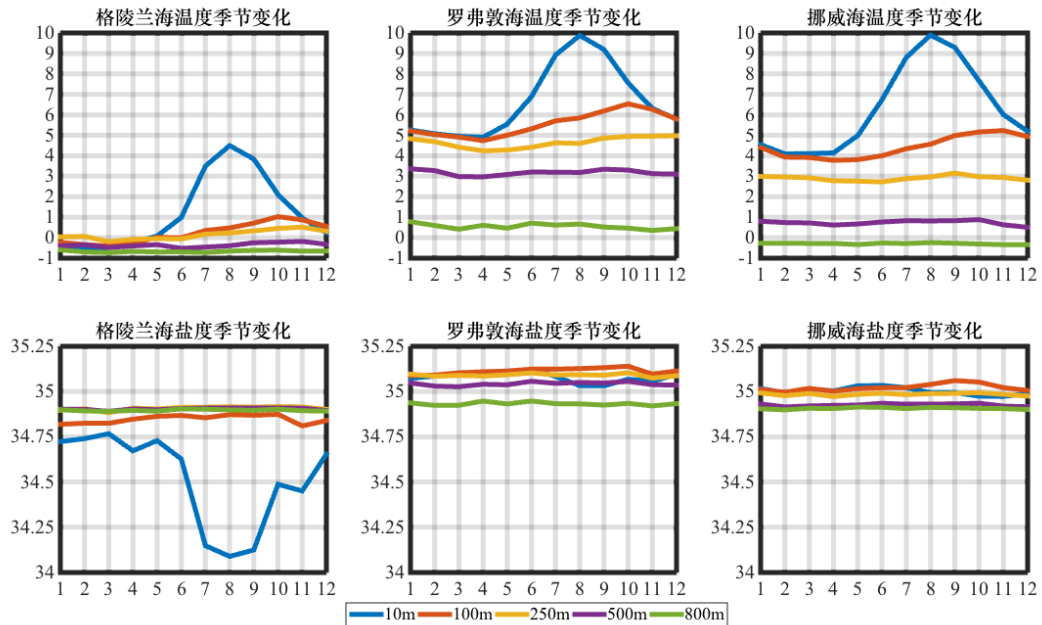


图 6 北欧海主要海盆温度盐度季节变化时间序列

根据图 6，在季节变化上各海盆之间存在显著差异，具体表现在格陵兰海盆的温度常年低于罗弗敦海盆和挪威海盆，除表层外其余各层温度差异较小，表层温度的变化趋势与整个海区一致；而罗弗敦海盆与挪威海盆的变化趋势相仿，温度随深度增大而减小，表层最大温度也出现在 8 月。

对于各主要海盆的盐度季节变化，与温度相似。格陵兰海盆盐度整体低于罗弗敦海盆和挪威海盆，表层最低盐度出现在 8 月，其余各层无明显季节变化；罗弗敦海盆与挪威海盆各层也无明显季节变化，但最大盐度出现在次表层。

由图 7 可知北欧海上层温度场空间分布整体呈东南高、西北低特征，中层底部及以下区域差别几乎消失。上层海水季节变化明显，冬半年（11 月-次年 5 月）整体温度场几乎无明显变化，夏半年自 6 月起，北欧海东南部表层、次表层海水开始出现增温，8、9 月达到最高，10 月逐渐回降，而中层及以下海水随季节鲜有变化。同时，由于地处高纬，北欧海水温整体较低，除夏季外多在 4°C 以下，夏季东南部会增高 10°C 以上。

从北欧海温度方差场分布（图 8）来看，在冬半年（11 月-次年 3 月）期间，整个北欧海的四大海区中只有格陵兰海和冰岛海存在温度变化，且次表层温度方差大于表层。对于北欧海表层，从四月起，以冰岛和格陵兰海连线为中心广泛出现方差高值，八月达到顶峰，其几乎覆盖整个北欧海表层，这一点与温度原始场的夏季东南部升温相对应，该时段，中部作为过渡地带，温度变化最剧烈；九月开始，表层温度方差逐渐回落。对于北欧海次表层，从四月起以挪威海、冰岛海和格陵兰海为中心出现方差高值区，九月达到顶峰，十月开始回落。

北欧海盐度分布（图 9）较温度分布（图 7）而言，较为稳定，这一点由盐度方差的分布（图 10）也可以看出。北欧海北部通过弗拉姆海峡连接北极，受来自北极的低温低盐水影响，盐度常年较低。从春季融冰季（4 月）开始，低盐范围开始向东南部扩大，夏季（7-9 月）范围最大。

将盐度方差分布图（图 10）与温度方差分布图（图 8）对比可以发现，在全年 12 各月中挪威沿岸表层盐度方差均较大，9-12 月挪威沿岸的盐度方差可延伸至次表层，6-11 月格陵兰海沿岸方差较高，7-9 月的中部海区次表层方差较大，可以推断北欧海盐度主要受北极低盐水季节性变化的影响。

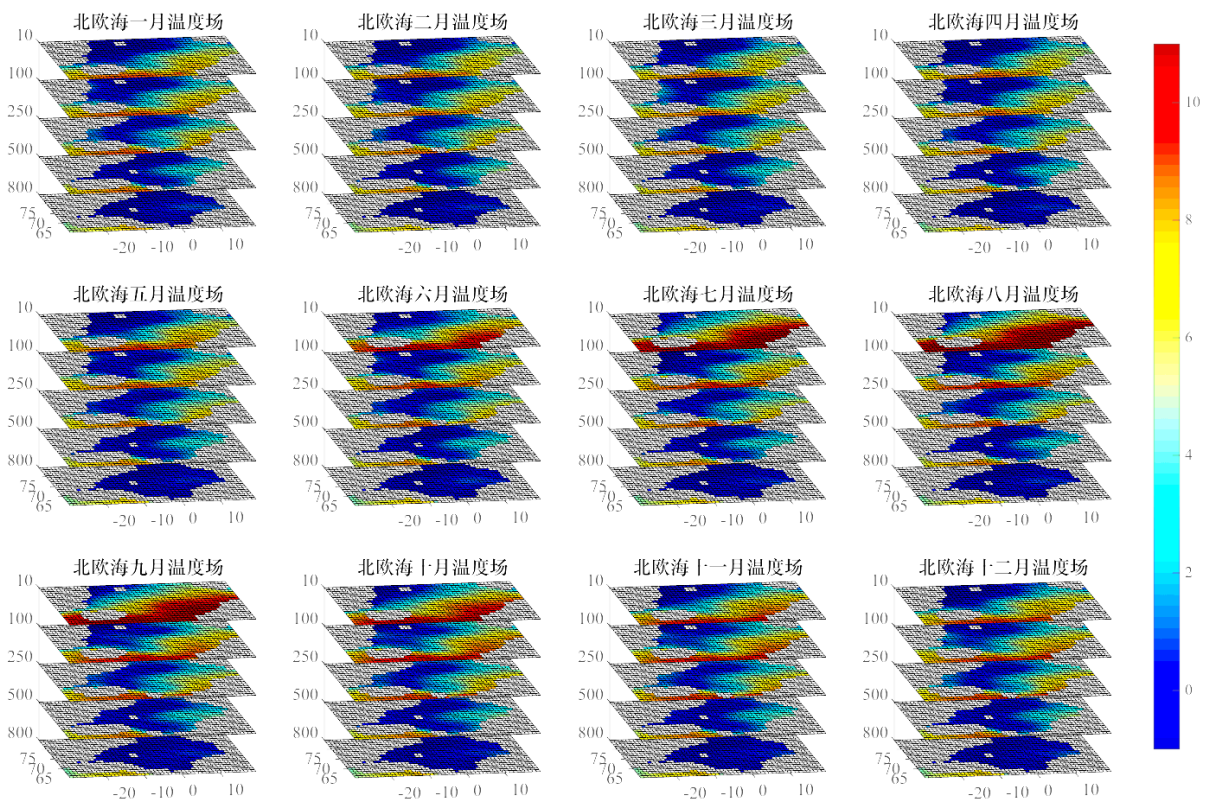


图 7 北欧海温度场季节变化切片图

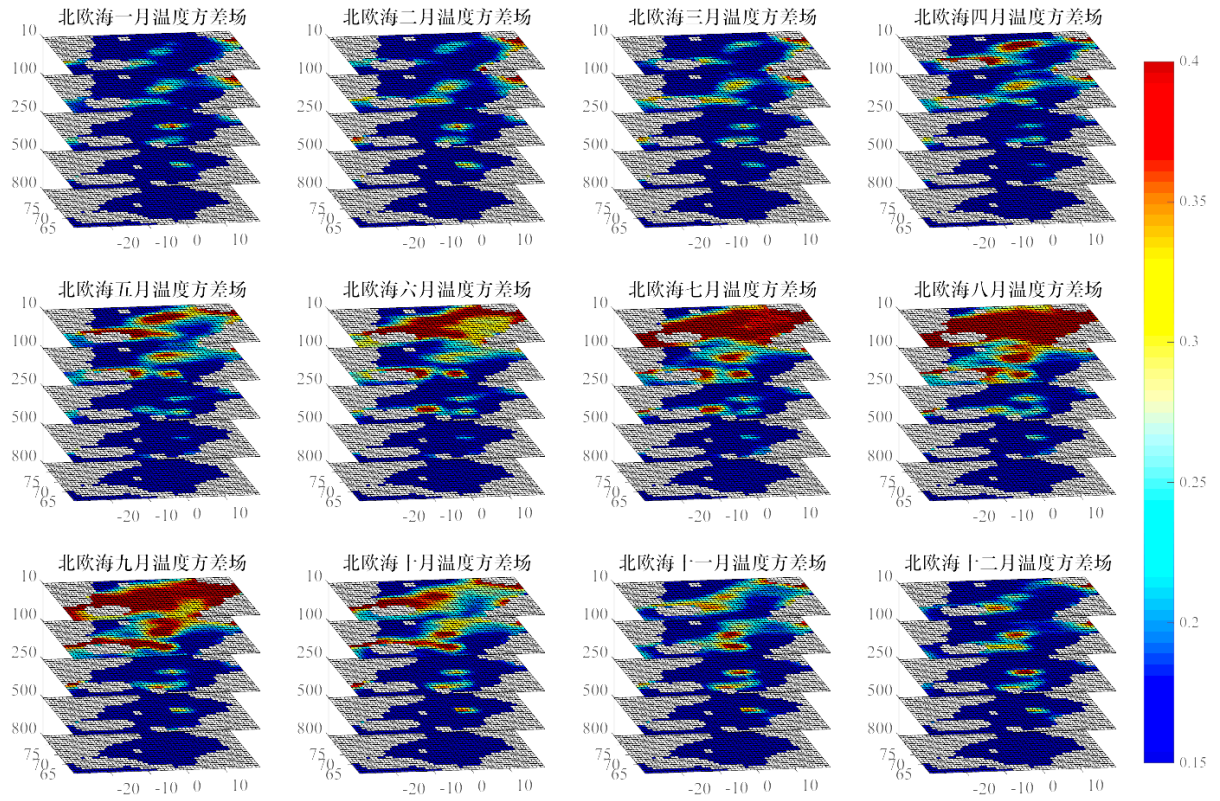


图 8 北欧海温度场方差季节变化切片图

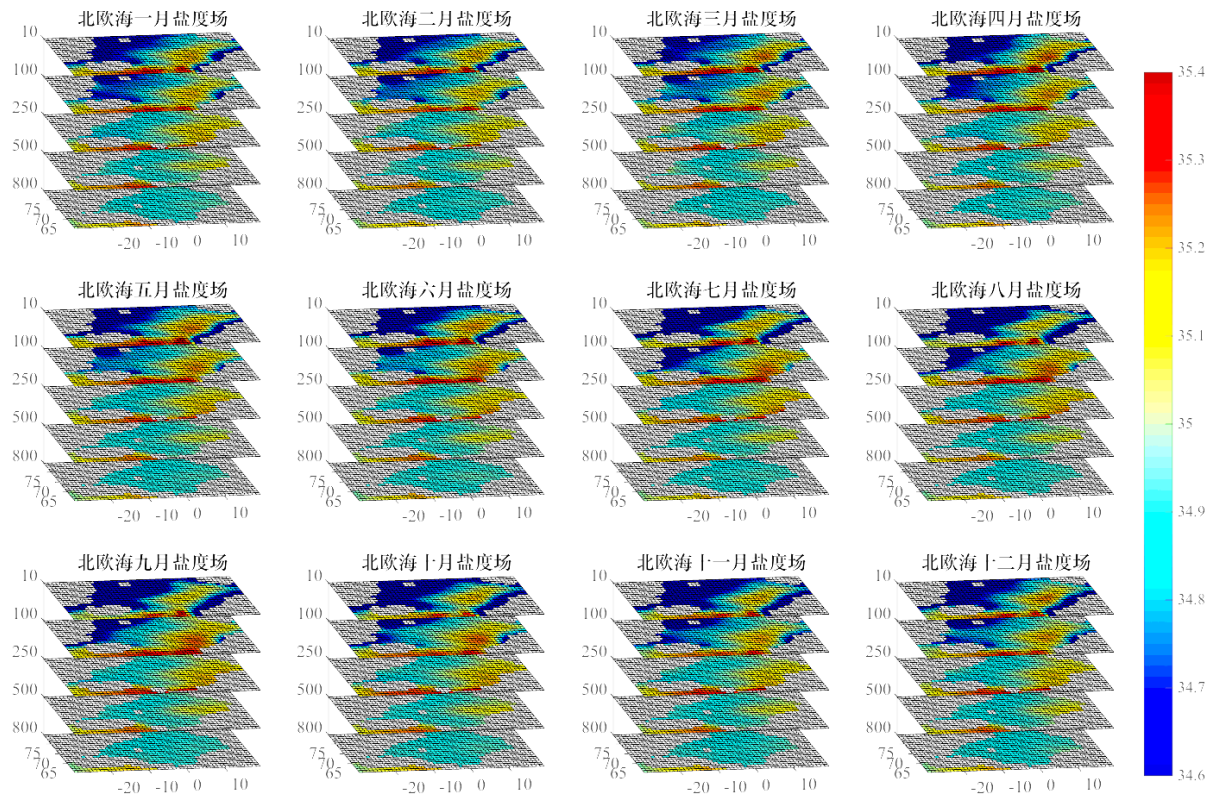


图 9 北欧海盐度场季节变化切片图

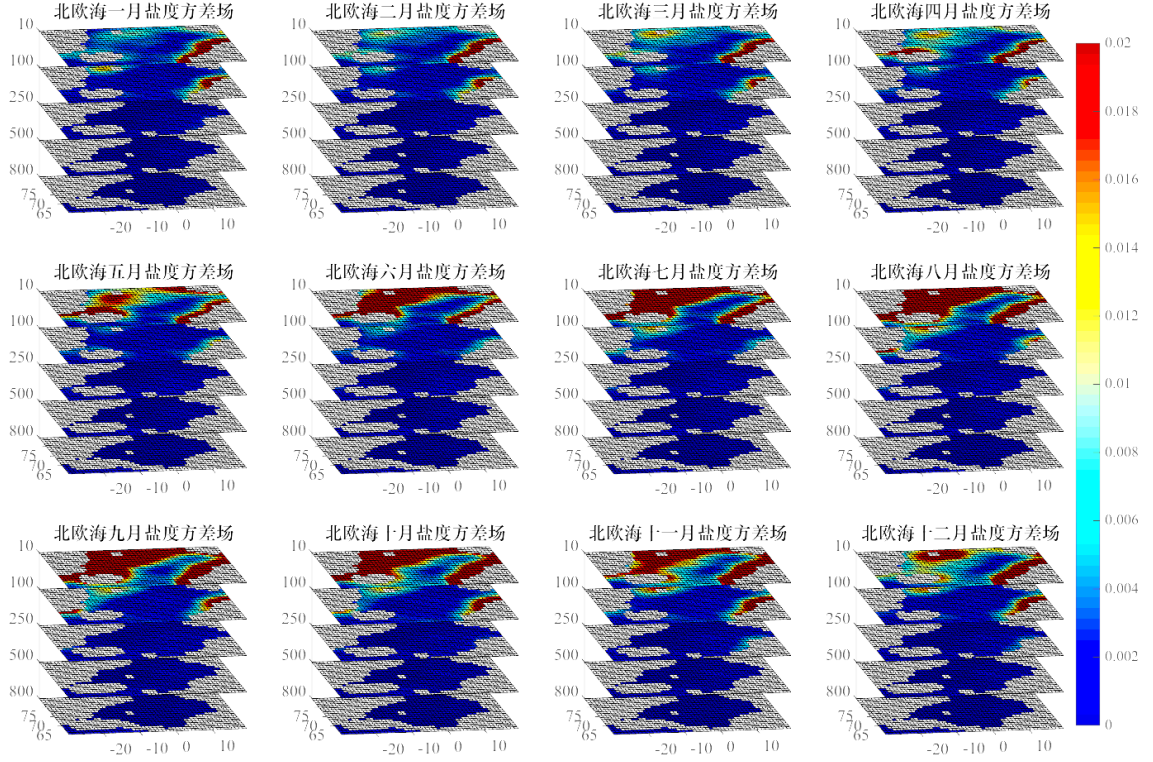


图 10 北欧海盐度场方差季节变化切片图

4 北欧海水团的年际变化特征

本文上一章着重从时间序列和空间分布介绍了北欧海温度和盐度场的季节变化特征，本章将利用以下温度特征量来刻画北欧海上层热含量的年际变化特征和水团的年际变化特征：

1) 热含量。热含量能够从能量和热力学角度反映一定厚度水体的热量信息。

2) 平均温度和最大温度。二者反映一片海区某层水体海水热状况，既反映了其热力学特征，还反映了该层水体的动力学特征；北欧海海区的最大温度相对集中于挪威西北侧海域，这片海域同时也是北欧海常年温度的高值区，因此北欧海最大温度的年际变化反映了该海域的年际变化。

其中各网格点热含量（单位 J/m^2 ）可通过以下公式进行计算^[24]：

$$Q = \int_z^0 C_p \rho T dz \quad (1)$$

式中， T 为海水温度， C_p 为海水定压比热，由（2）式给出：

$$C_p = C_p^0 + A * S + B * S^{3/2} \quad (2)$$

P 为格点海水密度，由（3）式给出：

$$\rho(S, t, p) = \frac{\rho(S, t, 0)}{1 - 10 * p / K(S, t, p)} \quad (3)$$

4.1 北欧海上层热含量年际变化特征

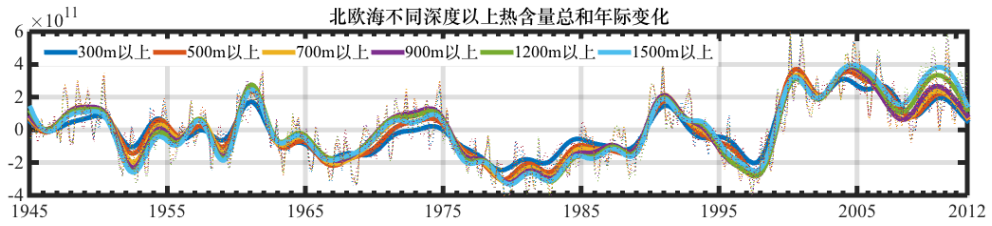


图 11 NAO 指数与北欧海不同深度以上热含量总和年际变化

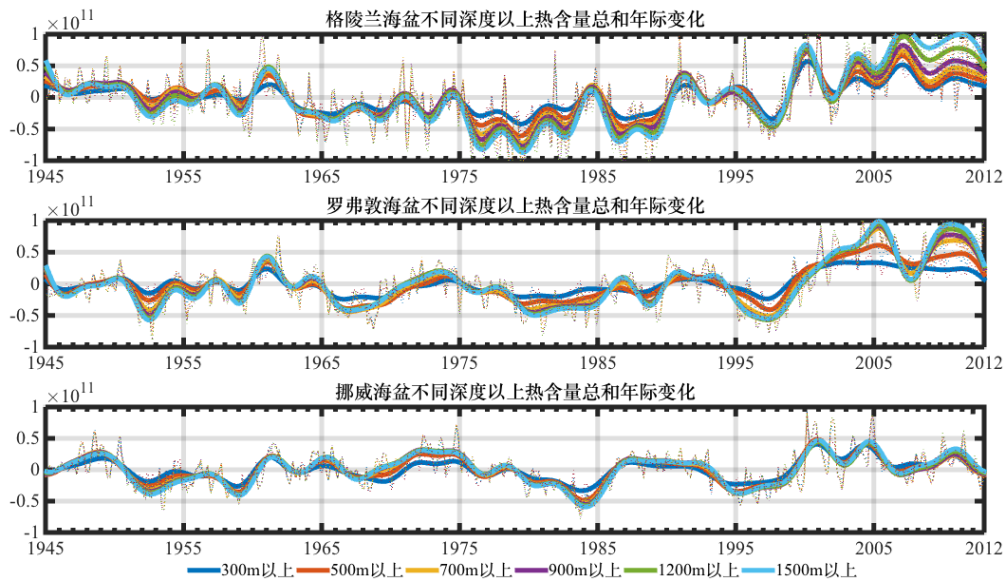


图 12 各海盆不同深度以上热含量年际变化时间序列

从北欧海上层海水热含量年际变化曲线（图 11）整体来看，在 1997 年以前，由功率谱分析得北欧海上层海水热含量存在 181 个月（约 15 年）的显著周期，并以 1961 年、1974 年、1991 年为极高值点，以 1952 年、1967 年、1979 年、1997 年为极小值点；1997 年以后上层海水热含量发生异常上涨，至 2000 年上涨至最高值，此后缓慢降低。通过不同海盆的上层海水热含量时间序列图（图 12）可以得出，北欧海的三个主要海盆的上层海水热含量年际变化虽然相近，但是在局部年份仍有较大区别。

对于几种不同深度以上热含量来说，过程曲线的重合意味着上下层热含量之间变化比较均一，即仅 300m 以上水层存在明显变化，而过程曲线的分离即“平行”变化意味着上下层热含量存在一定差异，即由表及底（此底指数据深度至 1500m）整体水体共同发生变化。由此可以推测 1952-1957 年、1960-1975 年、1979-1987 年和 2008-2012 年发生了整体水体的共同变化，而剩余年份发生的变化主要由上 300m 水体主导的。

图像斜率代表了热含量变化的速率，在 1500m 热含量时间序列包络其他深度以上热含量时，热含量增大过程的分离意味着上层增暖明显快于下层的增暖，而热含量减小过程的分离意味着下层冷却快于上层冷却；当 300m 热含量时间序列包络其他深度以上热含量时，热含量增大过程的分离意味着下层增暖明显快于上层的增暖，而热含量减小过程的分离意味着上层冷却快于下层冷却。

1969 年前后，上 300m 热含量降低，而上 500m 和上 700m 热含量增高，说明上层热量向下传递。类似的过程还发生在 2007 年前后，上 300m 热含量增高，而上 500m 和上 700m 热含量降低，其原因可能是大气热量通过海气相互作用传递给上层海洋，也可能存在中下层海洋热量的向上传递。

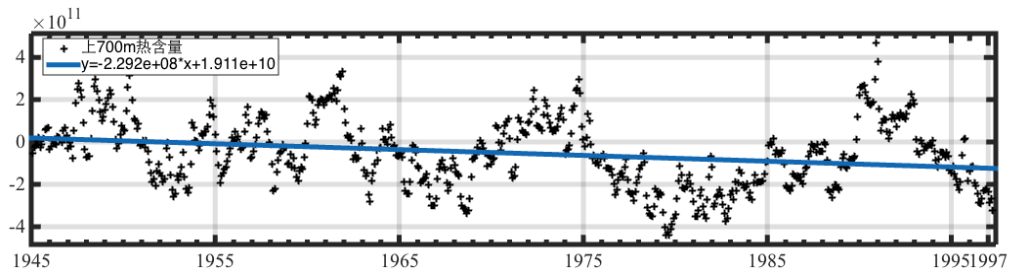


图 13 北欧海上 700m 热含量线性拟合图

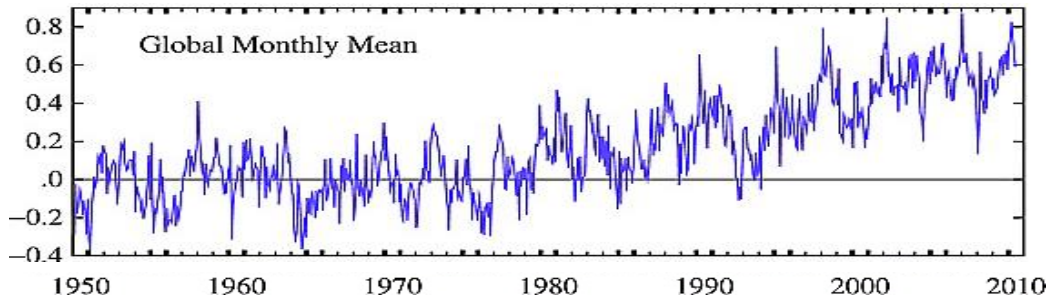


图 14 全球表面温度图片引自^[25]

值得一提的是，以上 700m 热含量为例（图 13），在 1998 年前以 15 年为显著周期，年代际变化很强的时间序列中存在着较弱的降低趋势，该降低趋势虽然只有 $-2.292e+08$ 个单位/月，却与同期的全球变暖的背景场相矛盾，同期全球表面温度存在较快上涨（图 14），考虑到北欧海作为北半球高纬度的一个储热库，且海水的比热容很高，本文猜测北欧海热含量的缓慢降低可能是同期全球变暖的一个重要原因，该问题有待后人继续研究。

下面以上 700m 热含量为例对 1997-2000 年的这次北欧海上层热含量年际变化的异常事件做详细分析。

这次异常事件起始于 1997 年 5 月，此时热含量位于极小值，三个主要海盆全部负异常，负异常中心位于格陵兰海东侧，该次热含量极小值并非 1945-2012 年的最小值，属于第二极小值，热含量总和可低至 $-4.1449e+11$ 个单位；异常事件结束于 2000

年 7 月, 同时也是异常事件后首次热含量极大值, 全海区为热含量正异常, 该次热含量极小值也是 1945-2012 年期间的最大值, 数值可达 $3.2503\text{e}+11$ 个单位, 正异常中心一个出现在挪威海, 另一个出现在格陵兰海东北角, 且前者的值要高于后者。该结论也能从各海盆的热含量年际变化曲线(图 12)上得出。

对于 1997-2000 年的这次热含量异常事件, 是上层海洋(300m 以上)主导的, 并无中层海洋的主要贡献, 振幅可达 $7.3952\text{e}+11$ 个单位, 仅用时 38 个月, 上涨速度高达 $1.9461\text{e}+10$ 个单位/月。在增暖过程中, 由上 700m 热含量空间分布的年际变化图来看(见附录), 1997 年初到 1998 年末热含量负异常的中心由格陵兰东南侧逐渐向南移动, 转移到罗弗敦海盆, 最后到 1999 年 1 月完全移动到挪威海东侧, 在这个过程中格陵兰海盆逐渐出现了热含量北正南负的偶极子式分布, 该分布开始于 1999 年 2 月, 结束于 2000 年 1 月。该分布随后转变为西正东负的偶极子形式, 从 2000 年 10 月开始转变为以格陵兰海盆和罗弗敦海盆交界为中心的热含量正异常现象。

值得注意的是, 本次北欧海上层热含量异常上涨的起始时间为 1997 年, 恰巧与发生在赤道太平洋的厄尔尼诺事件的时间相同, 本次异常上涨的时间跨度(38 个月)也与一个 ENSO 的完整周期(40 个月)相近, 二者之间是否存在一定关联, 二者之间的影响机制是直接影响还是经过大西洋的间接影响, 若间接影响具体的影响形式是何种, 这些问题都仍有待探讨。

另外, 1997-2000 年的这次北欧海上层海洋温度场的异常增温与 2001-2003 年全球海洋热含量的突变存在一定的对应, 同样是热含量, 北欧海的刚好超前全球的 3 年二者是否有一定的联系, 也有学者^[26]认为 2001-2003 年全球海洋热含量的突变结果并非自然变化导致的结果, 而是人为观测系统的转变造成的, 具体突变的原因还有待进一步研究。

在 2000 年 7 月达到热含量极大值后进入新的暖相位平台期, 并开始小幅度浮动下降。三个主要海盆中, 格陵兰海盆与罗弗敦海盆在异常增温前常年处于负热含量状态, 自从本次发生异常增温, 这两个高纬度的海盆就进入了正热含量平台期, 截止 2012 年底已维持了连续 14 年的正热含量, 相对而言较低纬度的挪威海盆却进入了低热含量状态, 并存在持续降低的趋势。值得一提的是, 在新平台期的小幅度幅度浮动下降与 1999-2008 年的全球变暖停滞形式很相似。在时间上新平台期的热含量浮动下降超前于全球变暖停滞约 2 年, 这二者是否也存在一定的关系, 这 2 年的超前是否为北欧海热含量向全球表面传递信号所需时间, 这都值得后人进一步探索。

有学者认为全球表层变暖的速度变缓是由于有更多的热量被转移到大西洋和南大洋的深海, 起初是存在于靠近北极的盐度异常导致的^[27]。北欧海的深层水存在变暖, 格陵兰海盆在 2000-3500m 最先发生变暖, 且有明显加速趋势。从 2007 年开始罗弗敦海盆中心比格陵兰海盆更冷。在 1980 年代早期挪威海盆在 2000m 附近仅有较弱的增暖趋势, 底层并无增暖趋势^[1; 28; 29]。

4.2 北欧海上层水年际变化特征

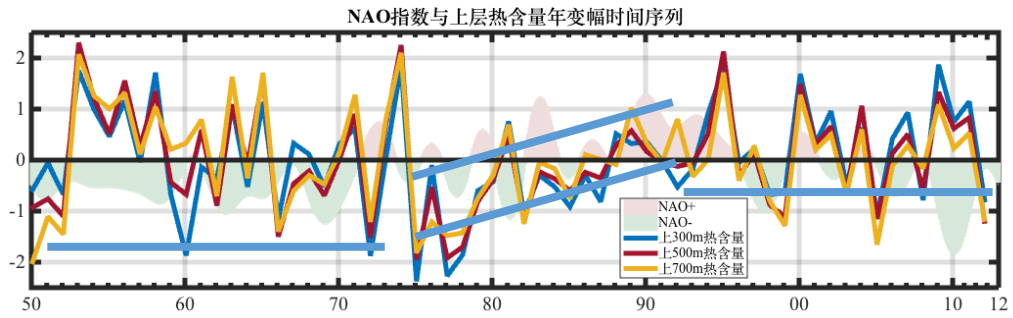


图 15 NAO 指数与上层热含量年变幅时间序列

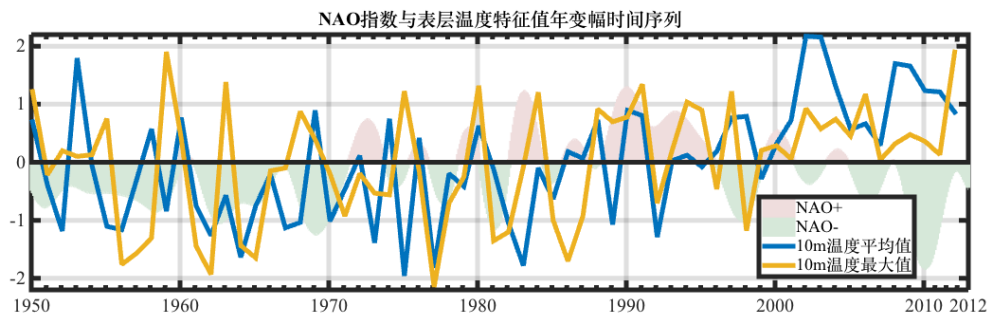


图 16 NAO 指数与北欧海表层温度特征值年变幅时间序列

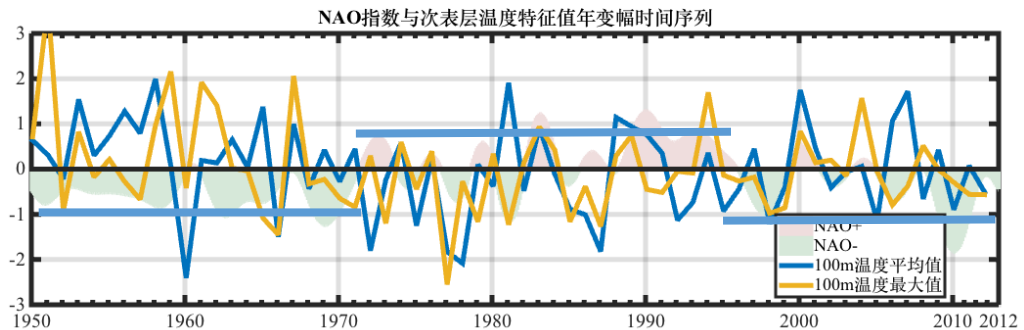


图 17 NAO 指数与北欧海次表层温度特征值年变幅时间序列

北大西洋涛动 NAO (North Atlantic oscillation) 反映了北大西洋地区气压场的变化关系, NAO 指数存在着显著的年际变率, 可以认为是影响北大西洋海区水文状况的一个低频背景场, NAO 能够通过一些列机制在一个较长时间尺度上影响北欧海的大洋环流^[1]。由图 3 可以粗略地判断在 1950 至今期间存在着 3 个主要的位相, 分别是负位相 (1950-1982 年, 下文称 phase1)、正位相 (1982-1995 年, 下文称 phase2) 和负位相 (1995-2012 年, 下文称 phase3)。

在 phase1 和 phase3 期间, NAO 指数以负位相为主, 对应的上层海水热含量的年变幅 (图 15) 虽然存在高频波动, 但总体来看处于较高的位置, 而在 phase2 期

间，对应的上层海水热含量也存在高频波动，同时还有明显的增长趋势，但总体处于较低的位置。可以由此猜测低频变化的 NAO 背景场对高频变化的北欧海上层热含量可能存在一定的调制作用。

在进入 21 世纪以前，北欧海表层温度特征的年变幅（图 16）长期处于一定范围内小幅震荡，直到 2003 年发生年变幅异常，变化幅度达原先最高值的一倍以上，之后缓慢回落。可以发现表层温度特征与 NAO 关系不大。次表层最大温度的年变幅（图 17）与 NAO 的三个 phase 有一定的对应，在 NAOphase1、3 阶段次表层最大温度的年变幅处于相对较高的位置，在 NAOphase2 阶段次表层最大温度的年变幅处于相对较低的位置，且相对 phase1、3 变化更为平稳。次表层的平均温度并无显著变化规律。

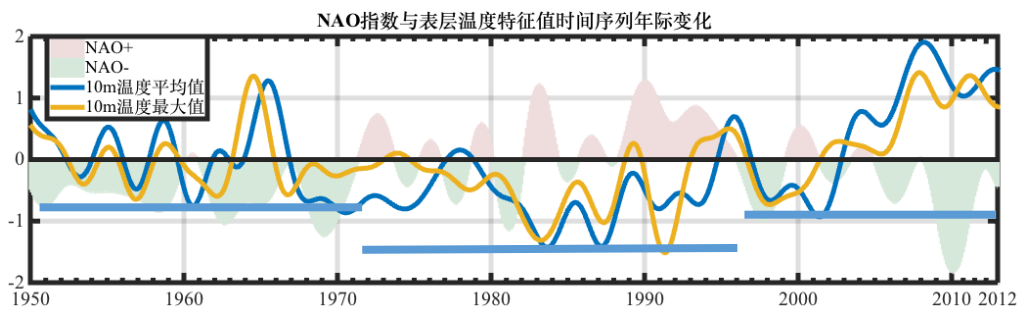


图 18 NAO 指数与北欧海表层温度特征值年际变化时间序列

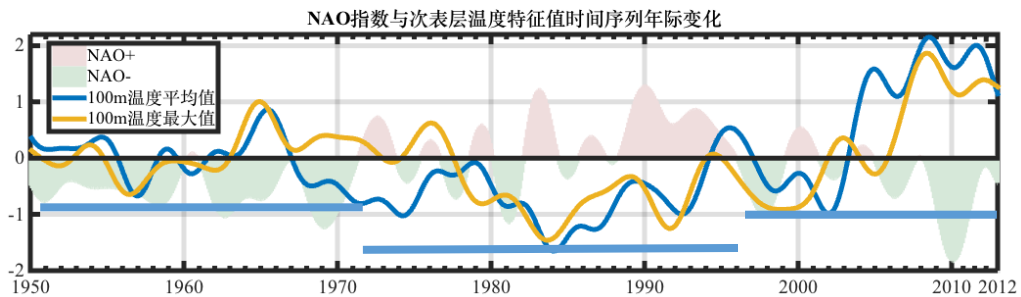


图 19 NAO 指数与北欧海次表层温度特征值年际变化时间序列

表层和次表层的平均温度与最大温度的相位基本一致，不存在超前滞后关系，在 NAO phase1、3 期间平均温度基本处于高值，在 NAO phase2 期间平均温度基本保持低值，且从 1983 年以后存在明显增长趋势。可见表层和次表层温度的年际变化主要受到 NAO 背景场的直接影响。

4.3 北欧海中层水年际变化特征

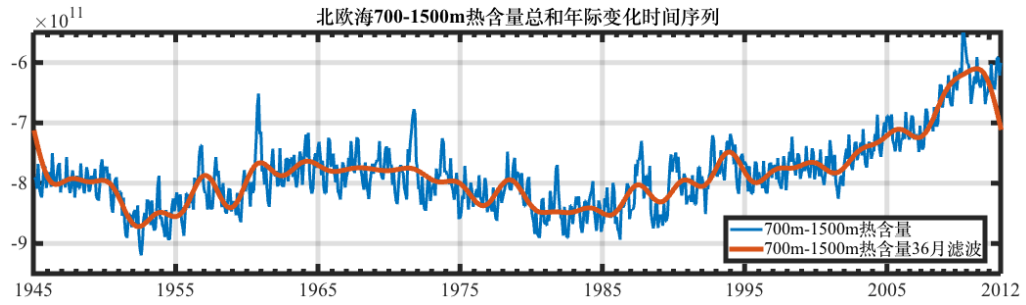


图 20 北欧海中层以下热含量年际变化时间序列

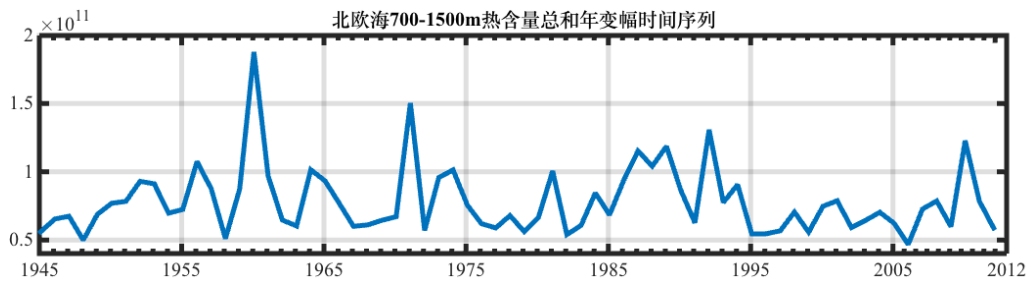


图 21 北欧海中层以下热含量年变幅时间序列

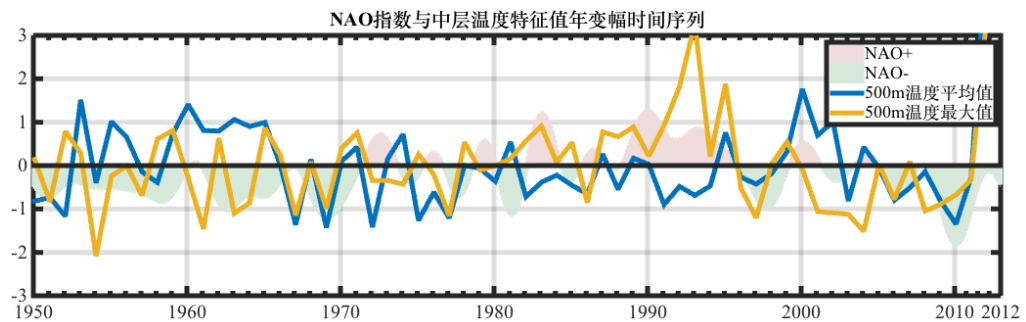


图 22 NAO 指数与中层温度特征值年变幅时间序列

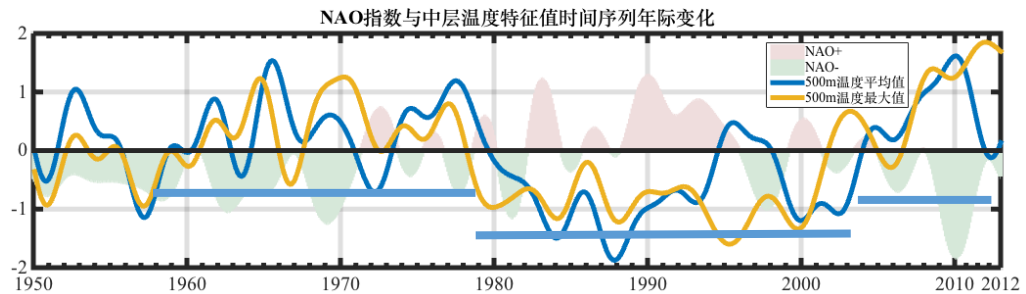


图 23 NAO 指数与中层温度特征值年际变化时间序列

陈幸荣等^[30]研究发现全球表面温度和海洋上层温度在 21 世纪增温变缓，而 700-2000m 的海洋中下层不仅没有增温变缓反而出现持续上升现象。本文通过北欧海中下层（700-1500m）海水热含量时间序列发现了相同的结果（图 20）。中层热含量的年变幅在整个时间序列都较低，但在 1960 年 1971 年、1992 年和 2010 年出现了几次年变幅较高的情况，这几次异常事件值得我们关注。

中层的平均温度年变幅虽然整体较上层海水更小，但在不同 NAO 的 phase 中确实存在明显区别，phase1 期间中层海水平均温度的年变幅整体较高，且振幅较大；phase2 期间中层海水平均温度的年变幅整体较小，变化也更为稳定；phase3 期间出现了中层海水温度的持续下降，2000 和 2012 年出现了年变幅近 60 年的极大值。中层最大温度的年变幅也在 1993 年和 2012 年出现了极大值。

从图 23 中层水温度平均值与温度最大值年际变化关系可以发现，在 1962-1980 年中层海温的最大值明显超前于海温平均值 1-2 年，在 2000-2010 年中层海温的最大值明显超前于海温平均值 2-3 年；在 1950-1960 年和 1980-1990 年期间中层海温的最大值基本与海温平均值处于同相位变化；在 1996 年前后北欧海中层水温度与最大温度发生非常异常的反向变化，北欧海中层水温度发生异常升高，而最大温度却异常减小，可以推测这一异常变化可能与该海区受到 1997/1998 年厄尔尼诺事件影响有关。

从图 23 中层水温度平均值、最大值年际变化与 NAO 背景场的关系能够得出，在 1950-1982 年 NAO 指数基本处于负位相期间中层水温平均值基本高于 -0.8°C ，同期北欧海海温高值区最大温度均高于 -1°C ；在 1982-1995 年 NAO 指数基本处于正位相期间中层水温平均值和最大温度基本低于 -0.8°C ；1995-2010 年，不考虑受厄尔尼诺时间影响的年份，即从恢复温度最大值与平均温度的超前关系的 2000 年起，NAO 指数基本处于负位相，温度平均值与温度最大值本应在 -1°C 的变化区间底部以上震荡，而实际情况却存在远高于 -1 摄氏度的变化，存在明显的增长趋势，该趋势很可能滞后于全球变暖的变化。

中层水的温度特征值的相位明显滞后于 NAO 三个 phase 的变化约 8 年，同时也滞后于上层水的温度特征变化，可以推测温度信号由上层传递到中层可能需要 8 年时间。

4.4 北欧海水团垂直分布的年际变化

4.4.1 格陵兰海盆

4.4.1.1 温度距平垂直结构

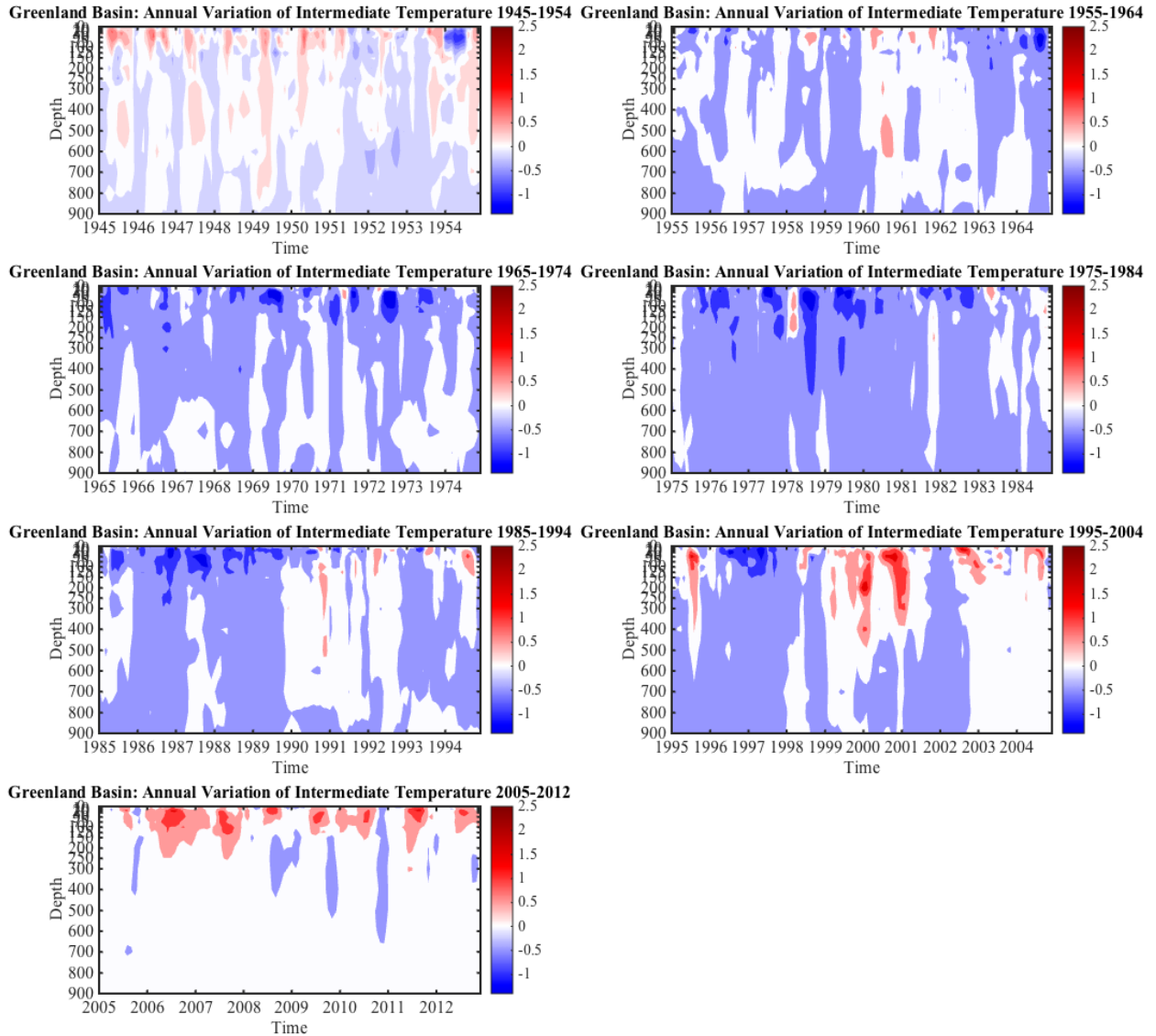


图 24 格陵兰海盆温度距平垂直结构（1945-2012 年）

1945-1954 年这十年中，格陵兰海盆由表层至中层温度以正异常为主，1955 年-1998 年主要为负异常，个别年份不明显；1999-2001 年表层及次表层出现较大正异常，高达 2.5℃ 以上，2005-2012 年又回归正异常，且正异常中心主要集中在表层至次表层。

4.4.1.2 盐度距平垂直结构

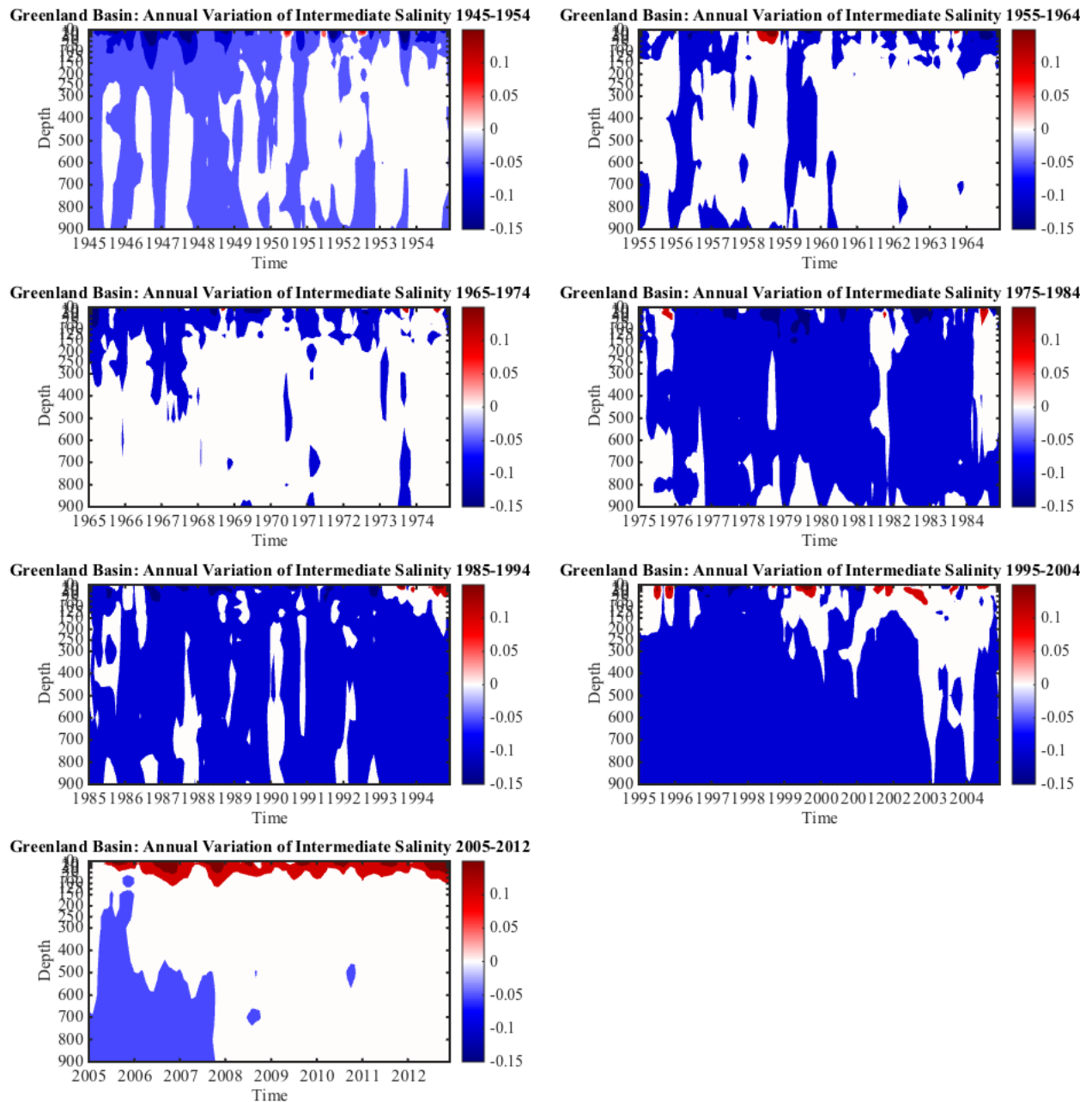


图 25 格陵兰海盆盐度距平垂直结构（1945-2012 年）

格陵兰海盆在 1945-1993 年期间盐度主要以负异常为主，深度可达中层以下，从 1993 年起至 2012 年表层、次表层逐渐恢复正异常，并形成正异常核心区。

4.4.2 罗弗敦海盆

4.4.2.1 温度距平垂直结构

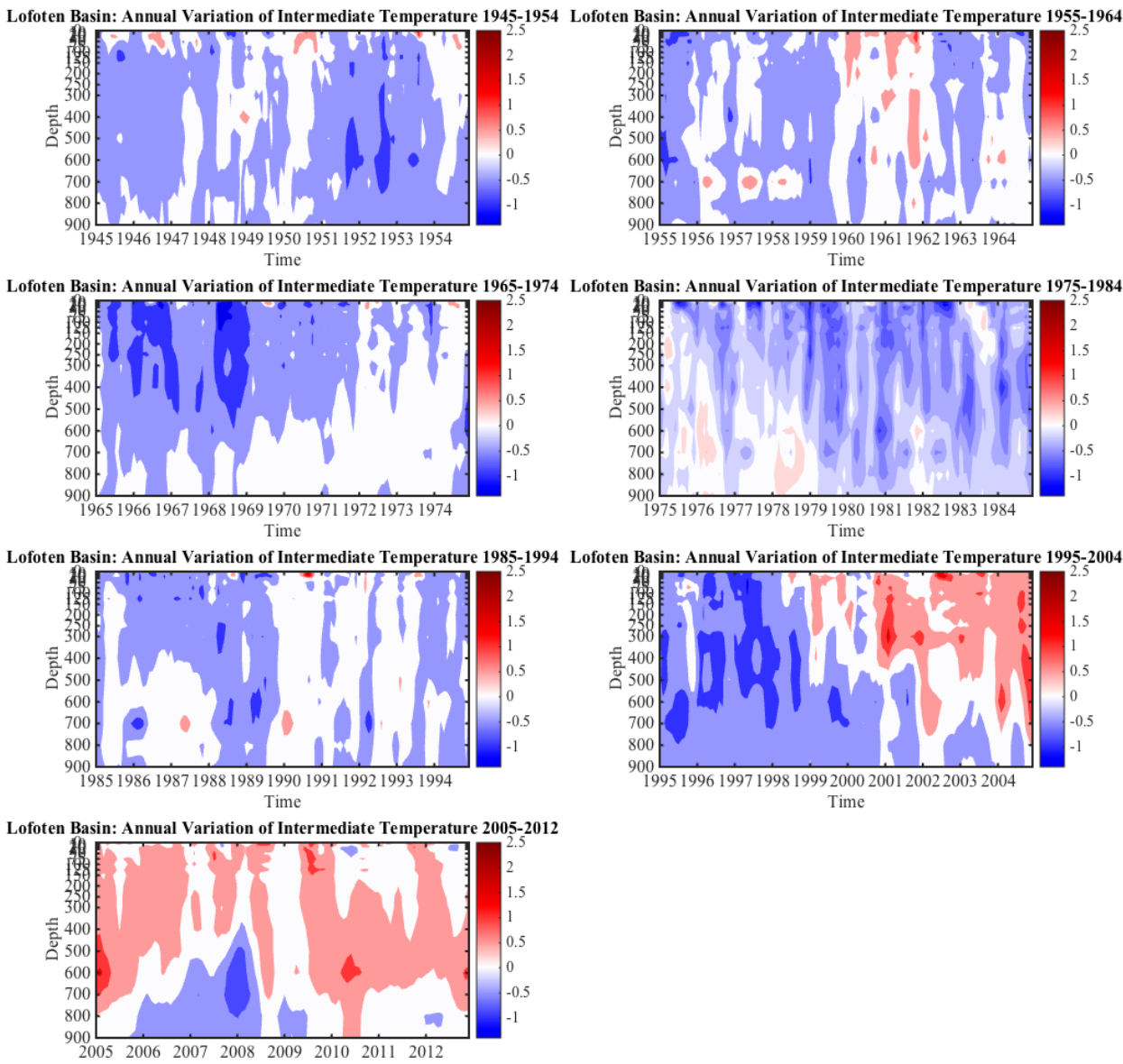


图 26 罗弗敦海盆温度距平垂直结构（1945-2012 年）

1999 年之前，由表层至中层底部整体负异常，期间偶有出现正异常，但时间短、不连续，1999 年之后转为连续的正异常，范围大、强度普遍较强，深度通常可达 700m 以深。

4.4.2.2 盐度距平垂直结构

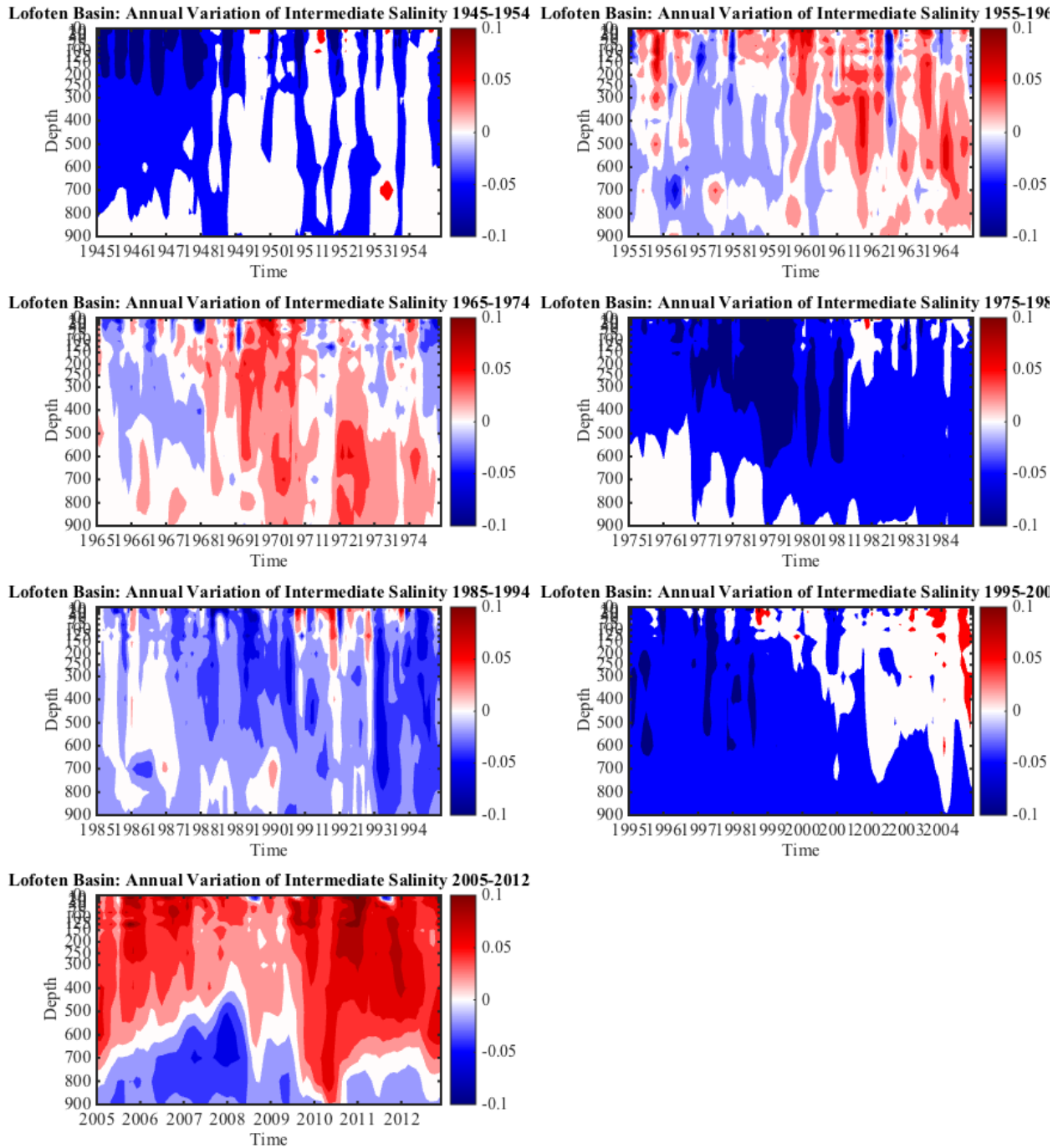


图 27 罗弗敦海盆盐度距平垂直结构（1945-2012 年）

罗弗敦海盆在 1945-1955 年盐度主要以负异常为主，核心区集中在表层、次表层；1955-1974 年期间，盐度主要表现为正异常且核心区较 1945-1955 年偏下，处于中层；而从 1975 年开始，罗弗敦海盆的盐度完全转变为负位相，尤其在 20 世纪 70 年代期间，盐度负异常核心区有明显下沉趋势，由次表层逐渐向中层转移，直到 2002 年又转换回盐度正异常，特别的，在 2005 年以后盐度的正负异常同时存在于罗弗敦海盆中，中层以上为正异常，正常以下为负异常。

4.4.3 挪威海盆

4.4.3.1 温度距平垂直结构

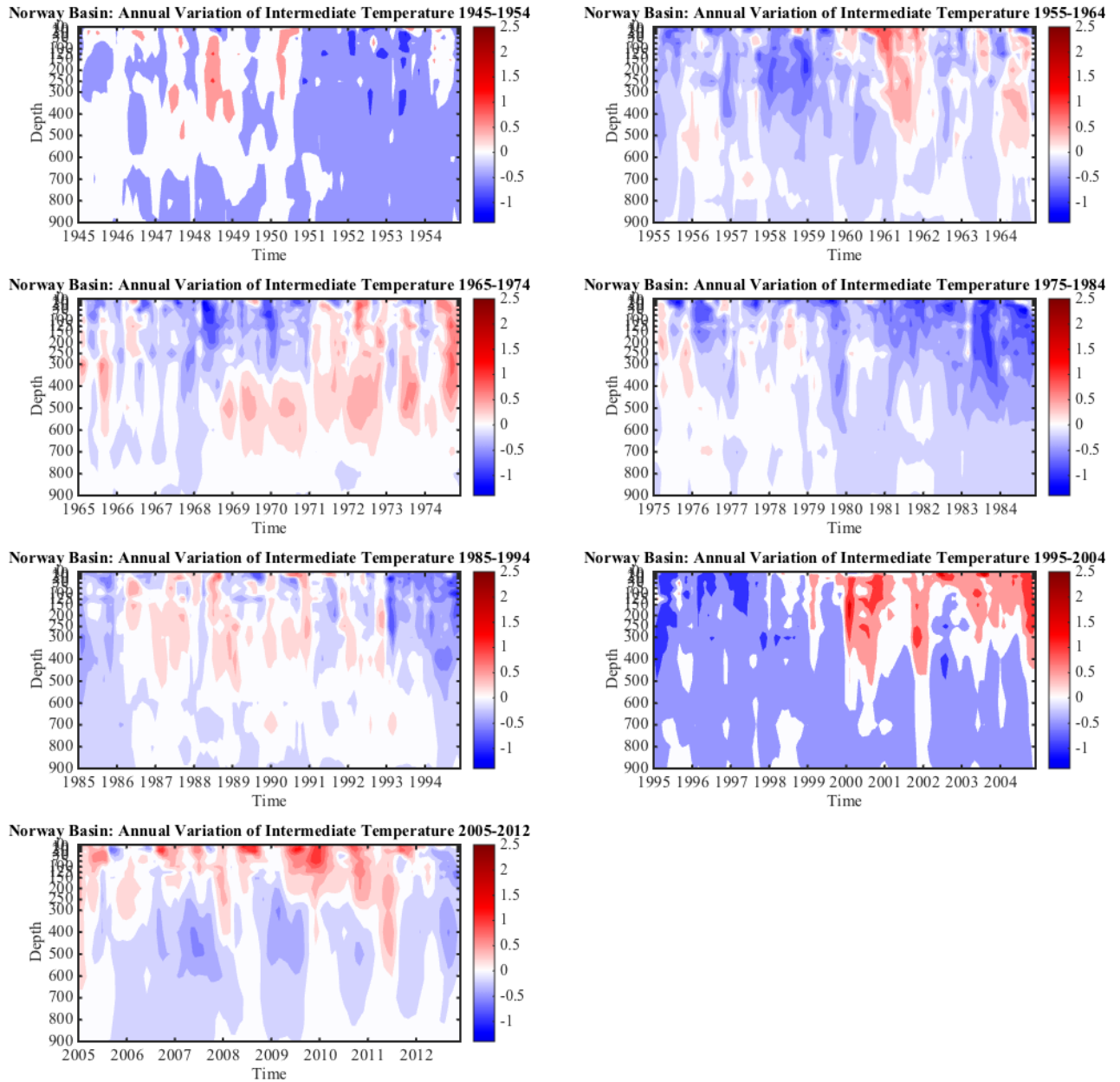


图 28 挪威海盆温度距平垂直结构（1945-2012 年）

1951 年-1971 年，对应 NAO 指数主要表现为负相位，挪威海盆温度以负异常为主，除此之外，直到 2000 年，正负交替出现，异常程度很小，总体上温度性质稳定。其中 1969 年-1976 年以及 1986 年-1993 年，挪威海盆次表层异常增暖。2000-2004 年上层海水正异常明显，之后，较强的正异常频繁出现在表层，下层水常年保持较小负异常。

4.4.3.2 盐度距平垂直结构

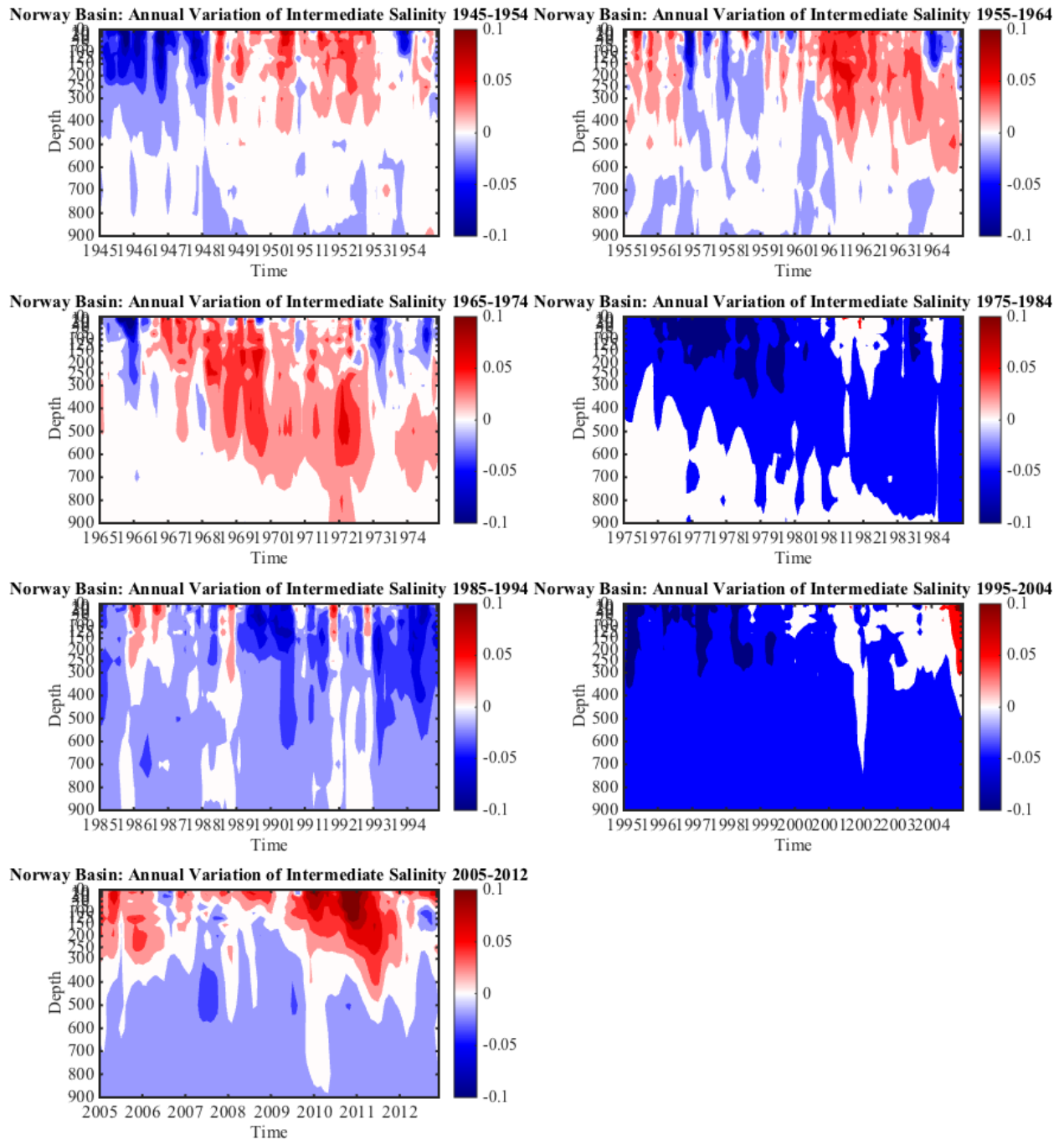


图 29 挪威海盆盐度距平垂直结构（1945-2012 年）

1948 年以前，挪威海盆为盐度负异常，核心区集中于表层次表层；1948 年-1974 年，挪威海盆转换为盐度正异常，深度可达中层底部；1975 年-2003 年，挪威海盆再次转换为负异常，深度比 1948-1974 年更深，可深入中层底部以下；2004 年-2012 年，类似于罗弗敦海盆，出现了正负异常同时出现于挪威海盆，但不同的是正负异常分界线出现在次表层底。

5 结果与讨论

对于整个北欧海，仅表层温盐场存在明显的季节变化，而次表层以下，温度和盐度场几乎无季节变化。各海盆之间存在显著差异，具体表现在格陵兰海盆的温度和盐度常年低于其他海盆，8月格陵兰海盆的温度和盐度最高值，而罗弗敦海盆与挪威海盆的变化趋势相仿。

1945-1997年，北欧海上层海水热含量存在181个月（约15年）的显著周期和明显的下降趋势；1997-2000年上层热含量发生异常增加，增暖达600%；2000年以后，上层热含量出现更明显的下降。本次热含量异常事件起始于1997年5月，三个主要海盆全部负异常，负异常中心位于格陵兰海东侧；结束于2000年7月，正异常中心出现在冰岛海。

NAO的低频变化对北欧海上层热含量的高频变化可能存在调制作用，表层和次表层温度的年际变化主要受到NAO的影响。考虑到2000年以后全球变暖停滞，而北欧海中下层水不仅没有增温变缓反而出现持续上升现象。1996年前后北欧海中层水的平均温度与最大温度发生异常的反向变化趋势，可能与1997/1998年厄尔尼诺事件有关；从第二次世界大战以来全球气温持续增暖，而1985年起北欧海中层水温度才存在明显的增长趋势，该趋势很可能滞后于全球变暖的变化。中层水的温度明显滞后于NAO约8年。

温盐垂直分布空间区域性特征明显，结果显示1945-2012年格陵兰海盆盐度变化的垂直结构主要为负异常，而罗弗敦海盆和挪威海盆则出现先变淡后变咸的趋势，其中罗弗敦海盆深度通常可达700m。

在本文重点研究的北欧海上层热含量的年际变化中存在几个问题有待讨论：

1、在1997年前以15年为显著周期，年代际变化很强的时间序列中存在着较弱的降低趋势，该趋势与同期的全球变暖的背景场增暖趋势^[25]明显不同，本文猜测北欧海热含量的缓慢降低是否可能为同期全球变暖的一个重要原因？

2、本次北欧海上层热含量异常上涨的起始时间为1997年，恰巧与发生在赤道太平洋的东部型厄尔尼诺事件的时间相同，本次异常增暖的时间跨度（38个月）也与一个ENSO的完整周期（40个月）^[31]相近，二者之间是否存在一定关联？

3、1997-2000年的这次北欧海上层海洋温度场的异常增暖与2001-2003年全球海洋热含量的突变^[26]存在一定的对应，同样是热含量，北欧海热含量刚好超前了全球热含量3年，二者是否有一定的联系？

4、2000年以后北欧海上层热含量进入新平台期的小幅度浮动下降与1999-2008年的全球变暖停滞^[30]形式很相似，在时间上新平台期的热含量浮动下降超前于全球变暖停滞约2年，这二者是否也存在一定的关系？

参考文献

- [1] Furevik T, Mauritzen C, Ingvaldsen R: The flow of Atlantic water to the Nordic Seas and Arctic Ocean, rbæk J, Kallenborn R, Tombre I, Hegseth E, Falk-Petersen S, Hoel A, editor, Arctic Alpine Ecosystems and People in a Changing Environment: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 123-146.
- [2] 王晓宇, 赵进平, 李涛, et al. 2012 年夏季挪威海和格陵兰海水文特征分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 346-356.
- [3] Rhines P, Häkkinen S, Josey S A: Is oceanic heat transport significant in the climate system?, Arctic-subarctic ocean fluxes: Springer, 2008: 87-109.
- [4] Mohn H. The Norwegian North Atlantic Expedition 1876–1878[J]. The North Ocean, its Depths, Temperature and Circulation, Christiania, 1887, 17: 212.
- [5] Helland-Hansen B, Nansen F. The Norwegian Sea: its physical oceanography based on Norwegian researches 1900–1904[J]. Report on Norwegian Fishery and Marine Investigations 2, Kristiania, 1909, 390.
- [6] Hopkins T S. The GIN Sea—A synthesis of its physical oceanography and literature review 1972–1985[J]. Earth-Science Reviews, 1991, 30(3–4): 175-318.
- [7] Aagaard K, Darnall C, Foldvik A a T R, T., . Fram Strait current measurements[J]. Department of Oceanography, 1985, 1984-1985.
- [8] Adrov M. Hydrological investigations in the Kopytov area[J]. Trudy PINRO, 1957, 10: 198-211.
- [9] Mauritzen C. Production of dense overflow waters feeding the North Atlantic across the Greenland-Scotland Ridge. Part 2: An inverse model[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1996, 43(6): 807-835.
- [10] Swift J H, Aagaard K. Seasonal transitions and water mass formation in the Iceland and Greenland seas[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1981, 28(10): 1107-1129.
- [11] Rossby T, Prater M D, Sjøiland H. Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(C4): C04011.
- [12] Karstensen J, Schlosser P, Wallace D W R, et al. Water mass transformation in the Greenland Sea during the 1990s[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2005, 110(C7).
- [13] Dickson R, Lazier J, Meincke J, et al.: Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic, Decadal Climate Variability: Springer, 1996: 211-261.
- [14] Blindheim J, Borovkov V, Hansen B, et al. Upper layer cooling and freshening in the Norwegian Sea in relation to atmospheric forcing[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2000, 47(4): 655-680.
- [15] Hansen B, sterhus S. North Atlantic–Nordic Seas exchanges[J]. Progress in

Oceanography, 2000, 45(2): 109-208.

[16] Blindheim J. Arctic intermediate water in the Norwegian sea[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1990, 37(9): 1475-1489.

[17] Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents Seas: 1980 – 1996[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2001, 48(2): 383-404.

[18] Blindheim J, Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s[J]. Ices Journal of Marine Science, 2004, 61(5): 846-863.

[19] Alekseev G V, Johannessen O M, Korablev A A, et al. Interannual variability in water masses in the Greenland Sea and adjacent areas[J]. Polar Research, 2001, 20(2): 201-208.

[20] Blindheim J, sterhus S: The Nordic Seas, Main Oceanographic Features, The Nordic Seas: An Integrated Perspective: American Geophysical Union, 2013: 11-37.

[21] Skagseth , Mork K A. Heat content in the Norwegian Sea, 1995–2010[J]. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 2012, 69(5): 826-832.

[22] Rossby T, Ozhigin V, Ivshin V, et al. An isopycnal view of the Nordic Seas hydrography with focus on properties of the Lofoten Basin[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2009, 56(11): 1955-1971.

[23] Barnston A G, Livezey R E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns[J]. Monthly weather review, 1987, 115(6): 1083-1126.

[24] 吴晓芬, 许建平, 张启龙, et al. 热带西太平洋海域上层海洋热含量的 CSEOF 分析[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(6): 37-46.

[25] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global Surface Temperature Change[J]. Reviews of Geophysics, 2010, 48(4).

[26] Cheng L, Zhu J. Artifacts in variations of ocean heat content induced by the observation system changes[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(20): 7276-7283.

[27] Chen X, Tung K K. Climate. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration[J]. Science, 2014, 345(6199): 897-903.

[28] sterhus S, Gammelsrød T. The abyss of the Nordic Seas is warming[J]. Journal of Climate, 1999, 12(11): 3297-3304.

[29] Xiaoyu W, Jinping Z, Tao L, et al. Deep waters warming in the Nordic seas from 1972 to 2013[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, (03): 18-24.

[30] 陈幸荣, 蔡怡, 谭晶, et al. 全球变暖 hiatus 现象的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 947-955.

[31] 刘秦玉, 谢尚平, 郑小童. 热带海洋 大气相互作用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 146.

致 谢

在本文完成之际，我首先特别感谢指导老师杜凌老师的悉心指导。在杜老师的身上能感受到其对于物理海洋浓厚的科研热情，严谨的治学态度和深厚的知识储备。无论周末亦或节假日，无论工作时间亦或休息时间，通过各种联系方式，杜老师总能在第一时间为我做出的结果、提出的疑问作出准确合理的分析和深入浅出的解答，每次答疑都能融汇贯通业界最新的研究成果，并根据自己和课题组最新的研究进展为本文提出新的思路和方向。但限于研究时间和本人能力有限，有些非常好的想法无法在文中完整呈现。

其次要感谢我的父母，他们为我提供无可替代的支持和鼓励，使我一心专注于科研。另外还要特别感谢未来我的研究生导师吴德星教授以及宋军师兄为本文提供了一些方法上的指导，提出了很多宝贵的意见和建议。

最后，我想感谢在本科毕业论文期间陪伴我一同走过的胡柔、刘媛昕、李娜、黄龔，黄大可，Doge Huang, Chickky Huang 和 Froggy Huang 等同学，我们的研究方向虽然各不相同，但我们互相讨论彼此做出的结果，常常也能碰撞出激烈的火花。我们彼此交流，共同学习，在研究最紧张的时候互相激励，缓解彼此的压力。这段来之不易的科研友情将成为一段毕生难忘的回忆！

本科毕业论文虽然结束了，但我的科研之路才刚刚开始，路漫漫其修远兮，吾将上下而求索！

姚恒恺

2015 年 5 月

附录:

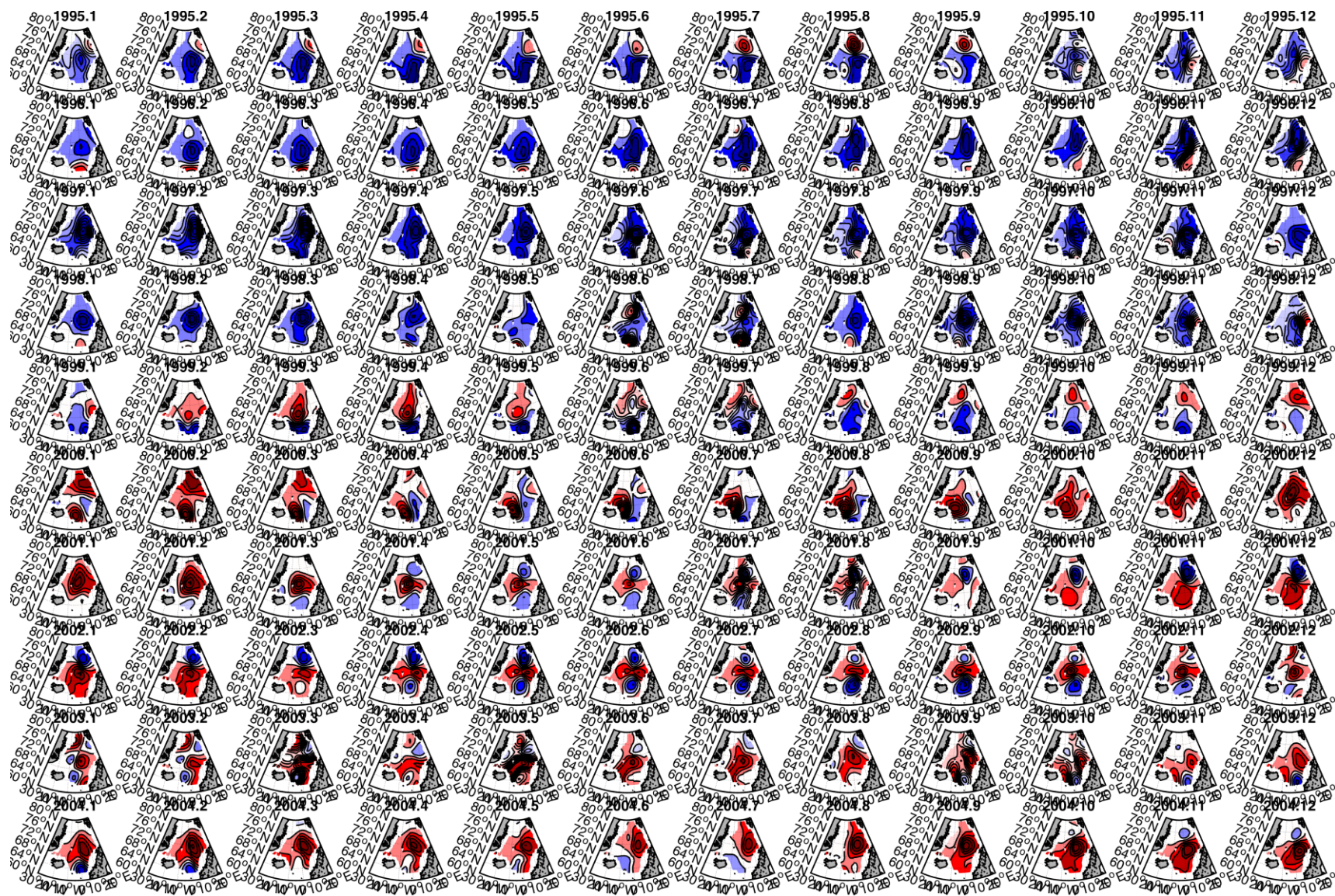


图 30 北欧海上 700m 热含量年际变化空间分布