

何琰 赵进平. 北欧海的锋面分布特征及其季节变化[J]. 地球科学进展 2011, 26(10): 1 079-1 091. [He Yan, Zhao Jinping. Distributions and seasonal variations of fronts in GIN seas[J]. Advances in Earth Science 2011, 26(10): 1 079-1 091.]

北欧海的锋面分布特征及其季节变化^①

何 琰 赵进平

(中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

摘 要:利用多年月平均格点数据分析了北欧海主要锋面的分布特征和季节变化规律,并讨论了月平均数据分析锋面适合使用的方法。月平均数据显示的锋面出现间断或多重的现象是锋面侧向摆动造成的,这是月平均数据的一大特点。北欧海各锋面主要水文和季节变化特征差异很大。东格陵兰极地锋在夏季锋面强度大,锋面较连续完整,而冬季强度小,锋面结构零散。9月由于东格陵兰寒流势力最强,可观察到温度梯度较大且连续的东格陵兰锋。北极锋的季节变化在水平方向呈“哑铃型”分布,中段摆动较南北两端小。由于挪威海流在冬季出现的最大流量引起挪威海流的流幅在该处加宽,莫恩海脊锋冬季向西北移动,对前人文章中基本上没有季节性移动的说法进行了修正和补充。冰岛—法罗群岛锋随深度增加向南移动,锋面强度增强,这是溢流造成的。

关 键 词:北欧海; 季节变化; 东格陵兰极地锋; 北极锋; 冰岛—法罗群岛锋

中图分类号: P731.21 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2011)10-1079-13

1 引 言

北欧海是格陵兰海(Greenland Sea)、冰岛海(Iceland Sea)和挪威海(Norwegian Sea)的通称,也被称为GIN海。它的海底地貌盆脊交错,挪威暖流(Norwegian Current)和东格陵兰寒流(East Greenland Current, EGC)在此交汇(图1),使得北欧海的水文特征十分复杂。同时,因为它占据着北冰洋与大西洋联通的最主要通道的特殊地理位置,北欧海作为全球海洋热盐环流的重要组成部分,深刻地影响着北极以至全球的气候变化。

海洋锋是特征明显不同的2个水体之间的狭窄过渡带,是海洋内部物质运动和能量交换的敏感区域,研究北欧海洋锋在科学研究和渔业生产等方面有着重要的价值。北欧海有5条主要锋面,大体位置如图2所示,分别是东格陵兰极地锋(East Greenland Polar Front, EGPF)、北极锋(Arctic Front, AF)、冰岛—法罗群岛锋(Iceland-Faeroe Front,

IFF)、挪威陆架锋(Norwegian Shelf Front, NSF)和冰岛沿岸锋(Iceland Coastal Front, ICF)。

Swift等^[1]根据水团特性将北欧海的上层分为3个主要区域:西部受极地冷水直接影响的极地区(Polar domain)、东部受大西洋暖水直接影响的大西洋区(Atlantic domain)以及中部的过渡区域(Arctic domain)。北欧海的锋面大都存在于上述区域之间,与各区域内部海流和水团的变化有密切的联系。锋面的位置分布还受地形控制,基本与海脊或大陆坡折位置重合。文中使用多年月平均数据得到的500 m以深温盐场基本无变化,因此,本文研究的是500 m以浅的海洋锋面的特征。

Helland-Hansen等^[2]最早用“Arctic water”这一概括性的术语将过渡区与两侧水体进行区分,将其定义为大西洋源地水与极地源地水在北欧海形成的混合物,其中还混有挪威海在冬季冷却水、夏季融冰冲淡水等,温度介于0~2℃,盐度介于34.6~34.9 psu之间。随着研究的进展,Arctic water的概念被

① 收稿日期:2011-04-28;修回日期:2011-09-07。

* 基金项目:国家自然科学基金项目“北极活动核心区的关键海洋学过程研究”(编号:40876006)资助。
作者简介:何琰(1984-),女,吉林四平人,博士研究生,主要从事极地物理海洋学研究。E-mail: jane1103@ouc.edu.cn

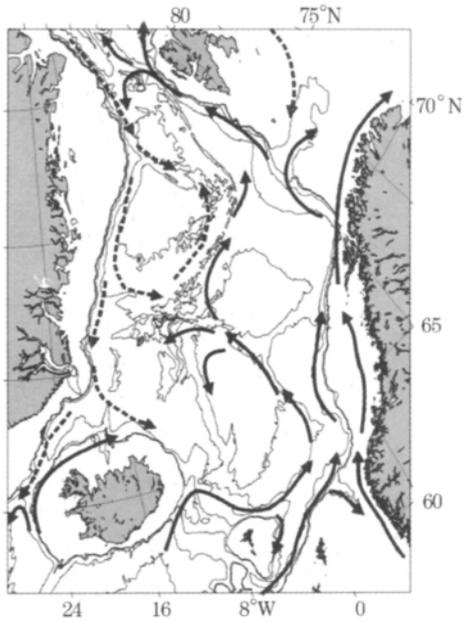


图 1 北欧海流场图^[16]

Fig. 1 Schematics of the upper layer circulation in the GIN seas^[16]

扩展并细化,如下层北极中层水(lower Arctic intermediate water),它是大西洋水冷却下沉的产物,深度可以扩展到约 800 m,温度介于 0~3 °C,盐度高于 34.9 psu,也归属于 Arctic water^[1],在近期的研究中它被称为大西洋回流水(Recirculating Atlantic Water)^[3]。

东格陵兰极地锋介于 Polar Domain 与 Arctic Domain 之间,基本沿格陵兰大陆架分布,是极地锋在格陵兰海中的部分,在 1976 年由 Wadhams 等^[4]根据潜断面调查结果命名。东格陵兰极地锋位于 EGC 的东边界,EGC 携带的极地冷水团对锋面影响很大。极地冷水占据从表层至 150 m 的平均深度。它的温度介于 0 °C 与冰点之间,盐度小于 30 psu,在夏季通常在 50 m 附近出现温度极小值^[5]。1981 年 Paquette 等^[6]使用在东格陵兰极地锋区北部密集布放的 CTD 资料分析发现了大西洋回流中存在一个高温高盐的大西洋中层水核心,它沿锋面分布,并可以观察到显著的微结构。Manley 等^[7]通过为期 4 周对温度和海流的锚定观测,发现在 78°40'N 附近的东格陵兰极地锋两侧海流有显著差异。

北极锋基本沿经向分布,它将挪威海流和西斯匹次卑尔根流携带的暖而咸的大西洋水与 Arctic domain 中冷而淡的水体区分开来^[8]。挪威海流及支流中携带的温度高于 2 °C,盐度高于 35 psu 的挪威大西洋水(Norwegian Atlantic Water, NAW)占据

了北欧海的东部^[9]。

北极锋是条明显的温度锋,它的水平空间分布特征沿西北—东南的经向分布基本分为 3 条锋面。北段锋面(74~80°N)被称为西斯匹次卑尔根锋(West Spitsbergen Front, WSF)。它沿 Knipovich 海脊向北,将西斯匹次卑尔根流携带的暖而咸的大西洋水与冷而淡的西斯匹次卑尔根陆架水分隔,并通过局地的回流与 Polar front 在 Fram 海峡合并。由于格陵兰涡流周围大尺度海流的辐聚效应,在格陵兰海盆中部可以观测到若干独立锋^[10]。Cottier 等^[11]从温盐特征讨论了 AF 的双扩散环境以及混合增密的潜力。中段锋面(70~74°N)也称为莫恩海脊锋(Mohn Ridge Front, MRF),由于受地形强烈控制而几乎与莫恩海脊重合,被认为几乎没有季节性摆动^[12]。南段锋面(65~70°N)又名扬马延锋(Jan Mayen Front, JMF),沿扬马延海脊经向伸展。

Smart^[13]基于 2 300 个 AXBT 的温度观测,定义了扬马延锋、冰岛沿岸锋、冰岛—法罗群岛锋和挪威海流锋等,对北欧海锋面的研究做出了很大的贡献。冰岛—法罗群岛锋归属亚极地锋系,稳定存在于冰岛—苏格兰海脊(Iceland-Scotland Ridge, ISR)的上方,它的北方是东格陵兰流在 68~69°N 处分离出的东冰岛寒流(East Icelandic Current),南方是通过冰岛—设得兰群岛通道进入北欧海的挪威海流的西侧支流——冰岛—法罗群岛入流(Iceland-Faroe inflow),它是挪威海流跨越格陵兰—苏格兰海脊进入北欧海域的 3 支入流中流量最大的,为(3.5±0.5) Sv^[14]。

挪威陆架锋存在于挪威海流携带的大西洋水与挪威沿岸水之间。挪威表层沿岸水(Norwegian surface coastal water)位于挪威沿岸,是陆源淡水与海水的混合物。其盐度介于 33.0~34.9 psu,局地变化很大,在春季由于融雪增加陆地径流而达到最小值。其温度季节变化明显,夏季可升至 7~12 °C,冬季则降至 4~6 °C^[15]。挪威沿岸水在沿挪威向北流动过程中,因与大西洋水发生跨越锋面的混合而增加盐度,增加率约为 1 psu/600 km^[2]。

冰岛沿岸锋存在于伊尔明哥流(Irminger Current)的冰岛沿岸支流(即北冰岛伊尔明哥流, North Icelandic Irminger Current)与东格陵兰流和东冰岛流所携带的水体之间,位于冰岛东部和北部陆架区域。伊尔明哥流沿冰岛北部沿岸流动,将大西洋水带入冰岛海。北冰岛伊尔明哥流占据上层 200~300 m 的深度,它所携带的大西洋水体积与冰岛西部的风场在不同的响应时间上有相关性^[16]。20 世

纪 60 ~ 70 年代, 由于渔业发展的需要, 冰岛沿岸锋被反复观测过^[17], 但由于该锋区完全位于冰岛的专属经济区内, 锋区观测的信息很少公布。

挪威海流锋(Norwegian Current Front, NCF) 和巴伦支海极地锋(Barents Sea Polar Front, BSPF) 虽然在图 2 中标出, 但前者所处深度较深, 500 m 以浅的信息较少; 后者主要存在于巴伦支海内, 在北欧海域只占据斯瓦尔巴德岛西北角, 它的特征和季节变化也主要发生在巴伦支海^[18], 与北欧海域直接关系不大, 因此本文对这 2 个锋面将不做重点介绍。

对北欧海的研究历史很长^[5]。早期(20 世纪 70 年代以前) 研究将锋面看做水团边界, 认为锋面相对静止且不可穿越。随着认识的加深, 人们逐渐将海洋锋作为一种复杂的、其内部动力过程可以实现自我维持的物理现象加以研究^[15]。以往关于锋面的研究主要是使用海洋调查数据, 包括浮标数据^[19]和潜艇数据^[4]。垂直于锋面的断面观测数据可以清晰地给出锋面的强度和宽度^[10], 这些数据对于认识锋面的结构是必不可少的。然而, 海洋调查数据的最大不足是, 每次调查只能获得当时锋面的特征, 对于那些位置有较大范围变化的锋面, 难以体现锋面位置变化的特征, 需要对很多次的观测进行统计。另外, 每个航次考察的范围有限, 难以完整地理解整个海域锋面的分布特征。由观测数据和数据同化产生的格点化数据可以表现整个海域的温盐分布信息, 可望弥补单次海洋考察数据对锋面表现的不完善之处; 但其空间点距通常大于锋面的水平尺度, 无法体现锋面的强度和宽度等关键信息, 难以用来研究锋面。因此, 迄今为止很少有使用格点化数据研究锋面的成果。

我们认为, 格点化数据虽然不能准确体现锋面的强度和宽度, 但格点化数据最大的优点是可以体现锋面位置变化的整体状况。对于位置基本不变的锋面, 格点化数据可以准确给出锋面的位置; 对于位置在一定范围内摆动的锋面, 格点化数据能够体现锋面摆动的范围及其主要驻留位置的信息; 使用月平均格点化数据还可以获得锋面位置季节变化的信息。因此, 本文利用多年月平均数据, 研究锋面和水团基本空间分布与变化特征, 认识该海域海洋物理结构的总体特征及其对大气气候态特征的贡献方式。

2 数据与锋面的分析方法

2.1 数据介绍

本文使用的温盐数据是基于美国伍兹霍尔海洋

研究所 HydroBase 2 数据集, 通过沿等密度面的网格化与差分技术构建而成的三维多年月平均格点化数据(沿等密度面平均和差分算法介绍可参见网址: <http://www.whoi.edu/science/PO/hydro-base>)。

HydroBase 2 数据集主要来自 World Ocean Database 2001, WOCE Hydrographic Programme, NSIDC (Joint U. S. / Russian Atlas of the Arctic Ocean), ICES, BarCode (Barents and Kara Seas Oceanographic Database), 以及其他个人通过采购信息系统收集的各种数据, 数据的时间范围为 1953—2002 年。空间精度为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

2.2 锋面的确定方法

北欧海上层海洋的厚度在 500 m 以浅, 都存在锋面的信息, 但锋面有一定的垂向变化。为了排除海表面处太阳辐射、大气等因素的干扰, 本文采用 100 m 深度的数据来分析海洋锋面的特征。在 500 m 以深, 北欧海的水文特征无明显的季节变化; 500 m 以浅的部分, 温盐结构存在明显的季节变化, 海洋锋的特征也随之变化。

研究中通常采用某温度或盐度等值线来描述锋面的位置^[10, 18], 这种方法适用于分析断面观测数据, 但多年月平均格点化数据无法沿用此方法。以扬马延锋区($10 \sim 5^\circ \text{W}$, $65 \sim 70^\circ \text{N}$) 为例: 该锋面主要是温度锋, 图 3 给出了 2、5、8、11 月该锋区内温度梯度不小于 $0.015^\circ \text{C}/\text{km}$ 的数据点个数随温度分布的频数直方图, 以及对应的平均温度梯度(图 3 中折线)。数据表明锋区内各温度值并没有特异性, 占优势的温度对应的锋面强度不一定最大, 无法确定锋面中轴线与哪条等温线位置重合。由于格点化数据包含了锋面摆动的信息, 某条等温线并不代表锋面的确切位置, 而是锋面位置摆动叠加的结果, 因此我们根据锋面处的温度或盐度梯度最大的原理, 利用梯度场来确定锋面的位置和走向。由于该海域平均气候态温度和盐度的水平梯度分别不大于 $0.01^\circ \text{C}/\text{km}$ 和 $0.001 \text{ psu}/\text{km}$ ^[17], 考虑到月平均格点数据温度梯度状况和锋面摆动导致的梯度减小, 我们将 $0.015^\circ \text{C}/\text{km}$ 作为判定温度锋的阈值, 将 $0.002 \text{ psu}/\text{km}$ 作为判定盐度锋的阈值, 采用锋区内梯度值最大点连线来代表锋面中轴线的位置, 获得直观清晰的锋面位置。

我们在分析月平均数据时常会看到某段锋面时而清晰存在, 时而很模糊, 甚至出现多重锋或锋间断的情形, 看起来似乎月平均数据难以用来研究锋面。

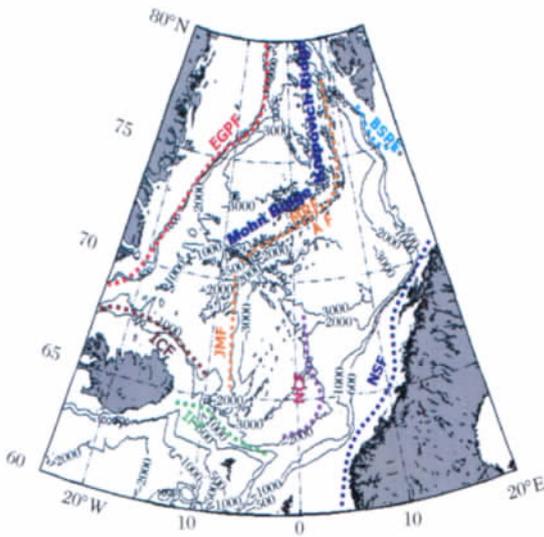


图 2 北欧海主要锋面分布示意图

Fig. 2 Locations of the main frontal zones in the GIN seas

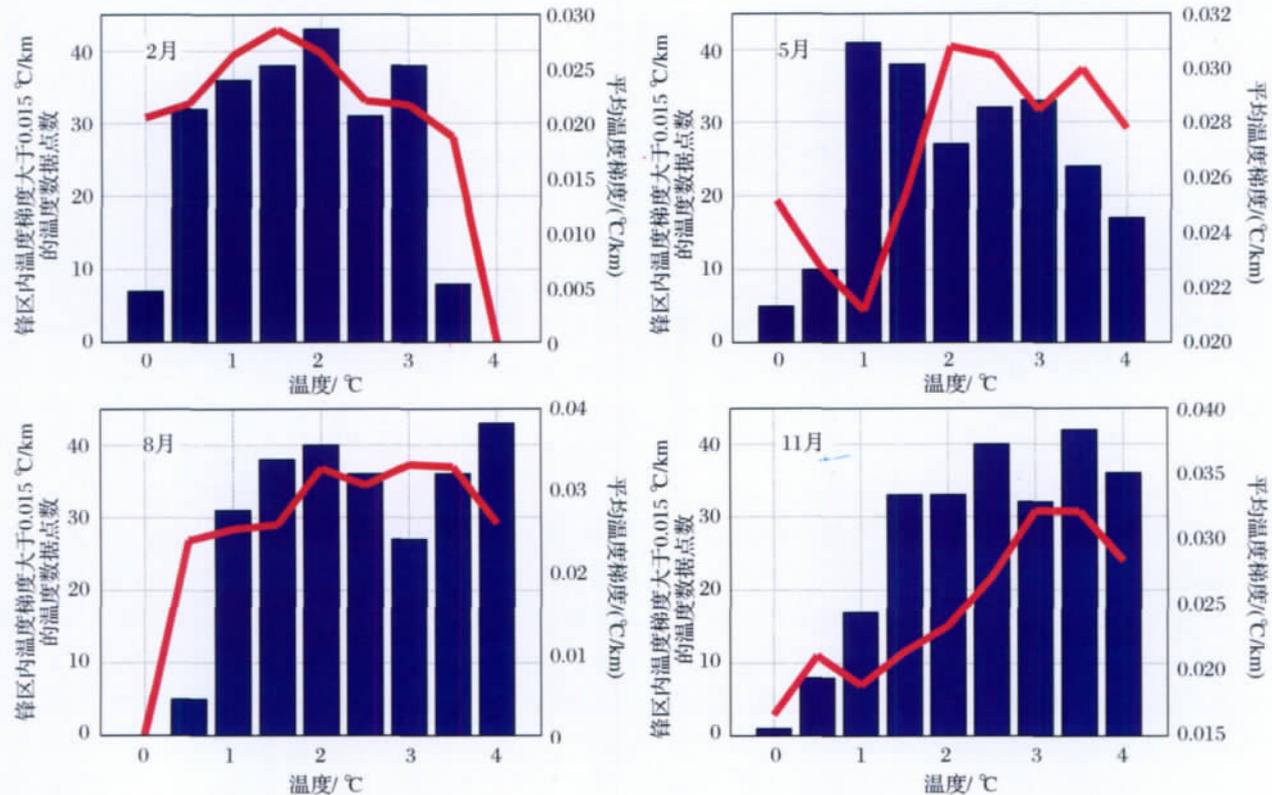


图 3 扬马延锋区 2、5、8、11 月温度梯度频数直方图

Fig. 3 Frequency histogram of temperature gradient in JMF zone in February, May, August and November

格陵兰寒流携带的极地水 (Polar Water) 与 Arctic Water 的锋面,是个显著的盐度锋,它的盐度梯度较北欧海其他锋更为明显(图 4)。同时该锋也是温度锋,在 7~12 月温度锋非常清晰,表明在这些月份格陵兰海温度较高,梯度明显,同时东格陵兰流比较稳

实际上,利用月平均数据得到锋面的清晰程度表达了锋面的稳定程度。当锋面位置长期稳定地存在于某个位置附近时,锋面特征就特别明显,较低的数据空间分辨率会减弱锋面的梯度,但不会抹杀锋面的位置特征。而那些锋面模糊、梯度值小的海域,则意味着锋面存在频繁的侧向摆动。因此,月平均数据既可以体现锋面的平均状况,又可以反映锋面的摆动情况,是认识锋面的宝贵数据源。

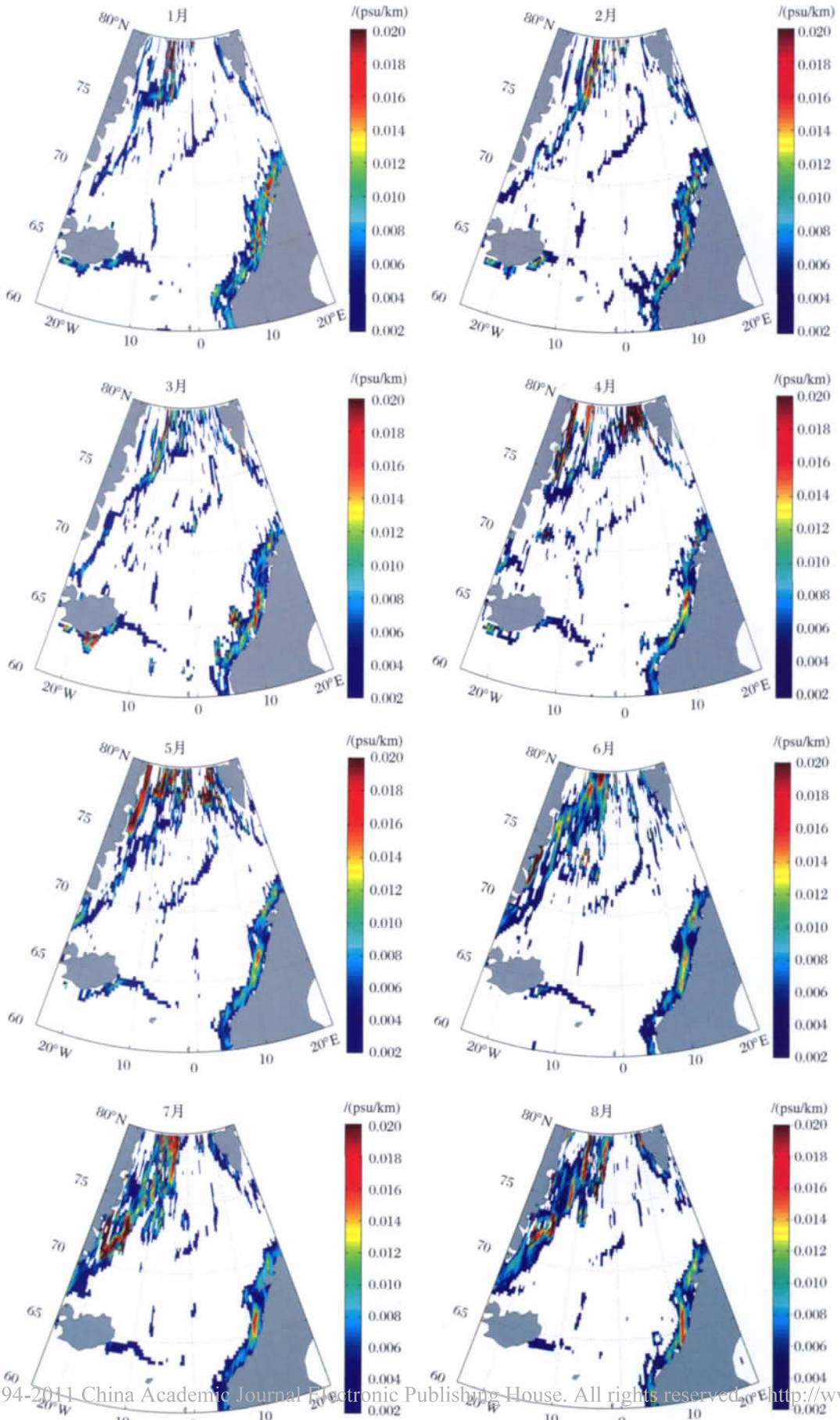
图 4 和图 5 是北欧海 100 m 深度上的盐度和温度梯度分布图,图中显示的温度梯度与盐度梯度可以体现锋面的走向,体现了锋面的连贯性。各锋面的特征在以下各节中描述。

3 东格陵兰极地锋

格陵兰极地锋沿格陵兰岛陆架分布,主要是东

定。在 1~6 月温度梯度较小,有些月份比较模糊(图 5),体现了在这些月份锋面位置不太稳定,有较大幅度的摆动。

从温盐大面图可以看到,1~3 月东格陵兰流基本位于东侧的格陵兰陆架之上;4、5 月随着气温回



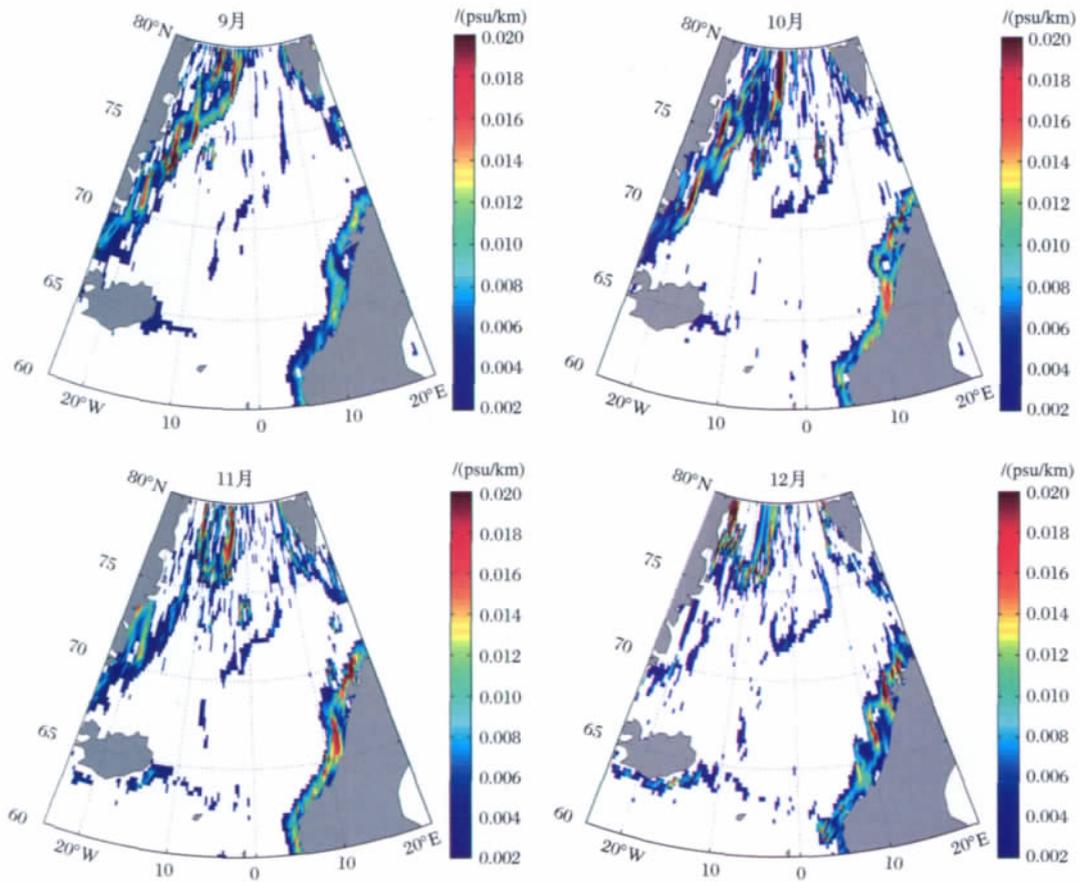


图 4 北冰海逐月次表层(100 m) 盐度梯度图

Fig. 4 Monthly patterns of sub-surface layer (100 m) salinity gradient in the GIN seas

升,北冰洋进入海冰融化期,出流增强,东格陵兰流的范围向格陵兰陆坡扩展,在 Fram 海峡中部(约 0°E 附近)、 $75\sim 80^{\circ}\text{N}$ 出现大量低温特征的极地水,EGPF 因此出现多重锋面的结构;6~9月,北冰洋海冰剧烈融化,格陵兰大陆坡以上的海域被东格陵兰流占据,向东流入海盆的分支海流的流量也随之增大,EGPF 的强度增强,锋面的连续性较好,位置向东移动,深度加深;10月以后,气温逐渐降低,北极的融化期结束,东格陵兰流流量减小,锋面强度减弱,再次出现空间不连续的现象(图4)。

在 Fram 海峡南部温度和盐度梯度场时常出现多重锋现象,即有多个梯度极大值。这些多重锋面信号清晰,跨越多个格点,并不是锋面位置摆动的结果,而是确实存在的现象。多重锋与发生在那里的回流有关,到达 Fram 海峡南北的暖流多次发生分叉形成回流,各个回流平行于 EGC 向南流动。回流与海底地形有关,每一个回流都由特定的地形特征所决定,因此,不同的回流之间存在水团结构的差异。

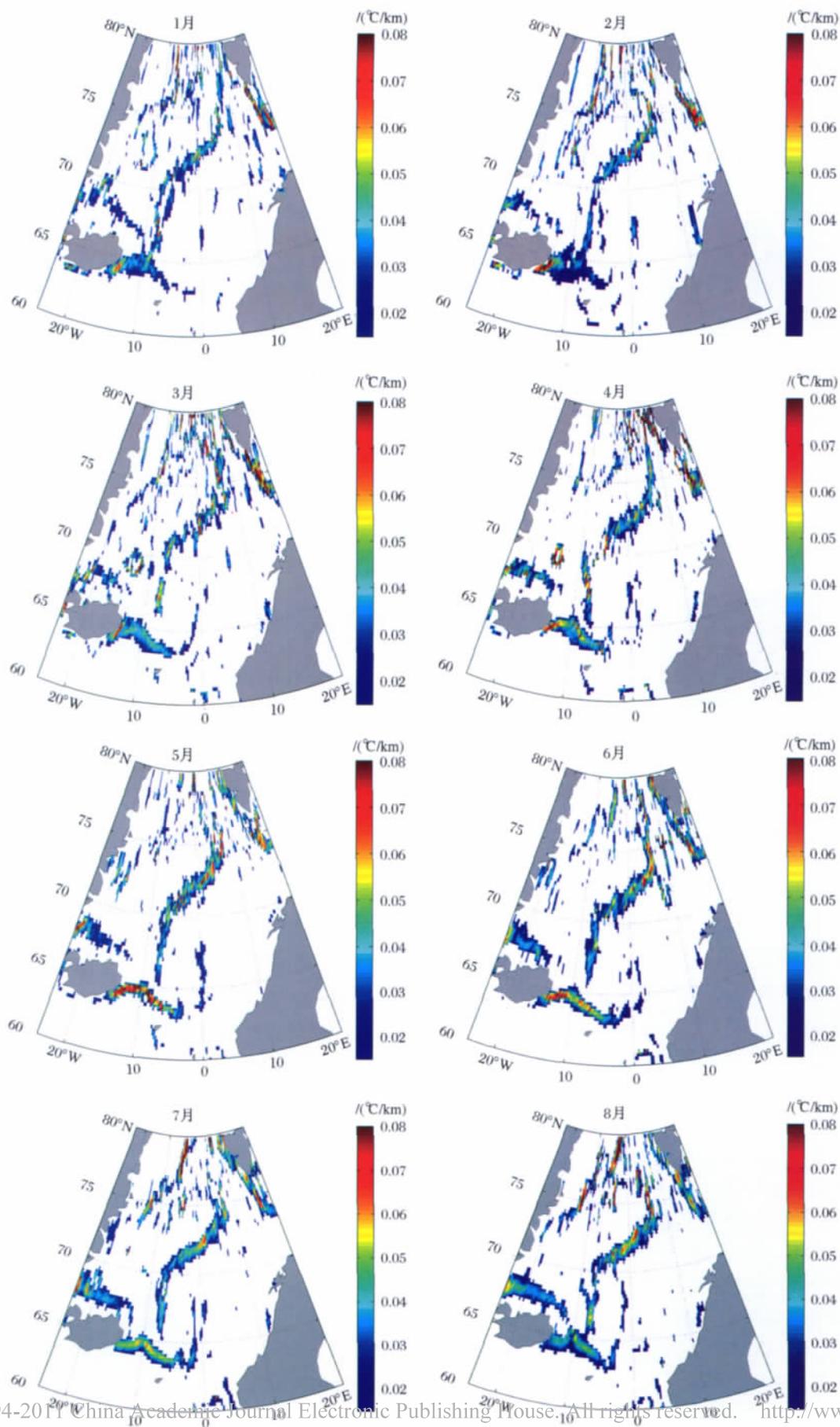
在那个狭窄的海域形成较大的梯度。

总之,EGPF 的季节变化主要体现在夏季锋面强度大,锋面较连续完整,而冬季强度小,锋面结构零散。9月,表层可观察到温度梯度较大且连续的东格陵兰锋,其他月份,EGPF 的温度梯度并不连续。这说明9月北冰洋海冰剧烈融化,大量冷而淡的水从 Fram 海峡流出,东格陵兰寒流势力相对最强。9月东格陵兰寒流在格陵兰陆架上完全蔓延展开,回流的影响在该月份并没有对锋面造成过多的影响。

4 北极锋

4.1 北极锋的分布特征

由于局地回流的影响,西斯匹次卑尔根锋(WSF)在狭窄的 Fram 海峡受地形的控制作用减弱,锋面位置随回流的强弱变化而摆动。多年平均数据显示的是多年平均的锋面位置,因此呈现出的结构特征是杂乱的。在 80°N 以南的 Fram 海峡内,



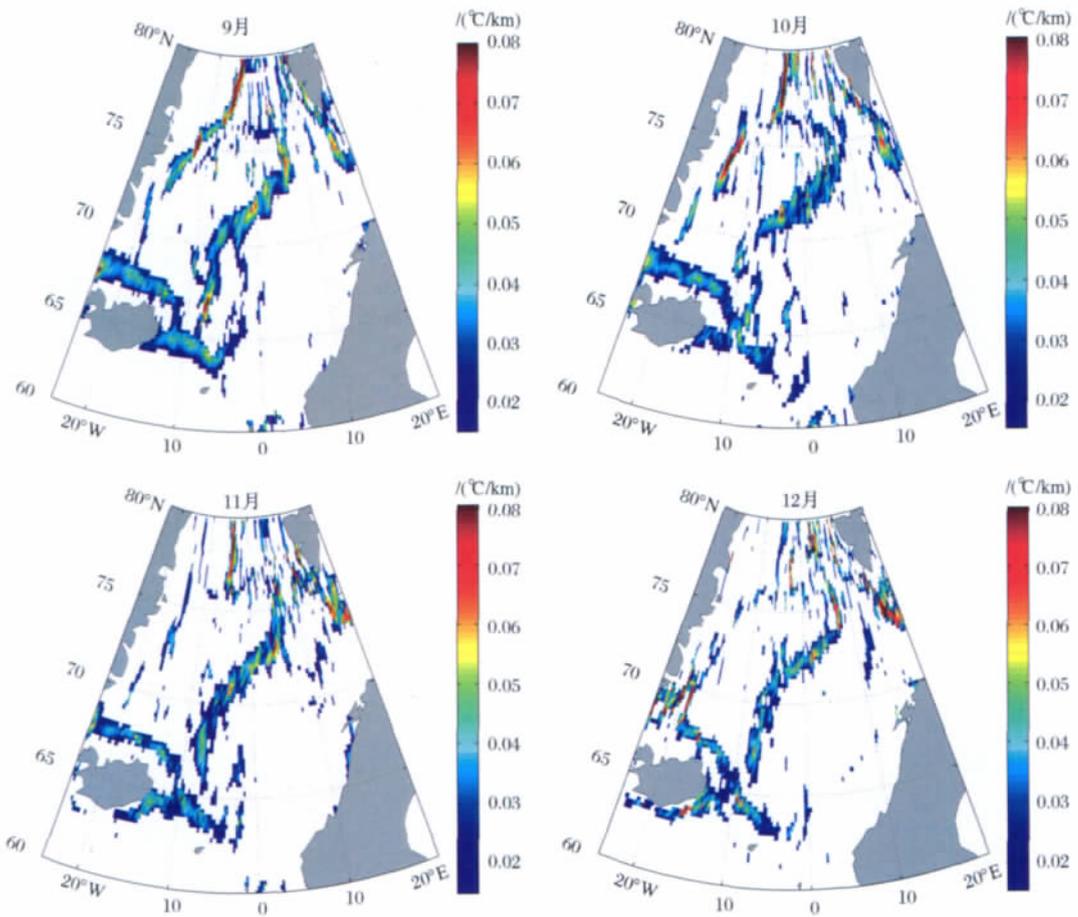


图 5 北欧海逐月次表层(100 m)温度梯度图

Fig. 5 Monthly patterns of sub-surface layer (100 m) temperature gradient in the GIN seas

WSF 并没有清晰地显示出与极地锋合并的现象,可见二者是在 80°N 以北的海域合并的。莫恩海脊锋(MRF)的水平空间特征十分明显,锋面基本沿莫恩海脊(Mohn Ridge)规则分布,锋面强度高,这与莫恩海脊对挪威暖流的阻挡作用有关,是强烈受地形控制的一段锋面。扬马延锋(JMF)的锋面强度较小,在 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 之间出现最大温度梯度和强烈的温度跃层(图 7)。

AF 的锋面位置从表层开始随深度增加逐渐向西南移动,这种垂直分布与大西洋暖水的楔形分布有关。值得一提的是,扬马延锋在 $300\sim 400\text{ m}$ 深度上发生“弯曲”。以 2 月为例(图 6),在梯度图里可以看到在 300 m 深度上位于 5°W 以西的温度梯度消失,而在 400 m 深度上的东侧的锋面替代了较浅深度的锋面而与莫恩海脊锋相连。这种现象常年存在,并不是季节性的,图 7 中的 4 幅图分别代表了 2、5、8、11 月 66°N 断面 500 m 以浅温度剖面,红圈部分显示了常年存在的 2 处锋面的位置。西侧的较

浅锋面基本存在于 300 m 以浅,挪威海流携带的大西洋水(NAW)与东冰岛流携带的极地冷水相互作用产生的扬马延锋,是 AF 的一部分;东侧出现在 400 m 的较深锋面则是挪威海流锋。多年月平均数据在 100 m 尚无此锋面信息,直到 $300\sim 400\text{ m}$ 锋面才出现。因此所谓“弯曲”并不是真实的锋面弯曲现象,而是由于在不同深度上,与莫恩海脊锋相连的 2 条锋面所处位置不同造成的。

4.2 北极锋的季节变化

Arctic front 的季节变化特征在南北方向呈现“哑铃型”季节变化特征:南、北段随季节东西摆动幅度较大,中段锋面由于莫恩海脊的地形约束等原因而摆动幅度不大。

图 8 显示了莫恩海脊锋的季节变化。由于海脊强烈的约束作用,锋面呈东北—西南走向。多年平均数据清晰地显示了该锋在冬季向西北移动,这主要与挪威海流流量的季节变化有关。Gould 等^[20]基于对海流观测,计算得出挪威海流的年平均流量为

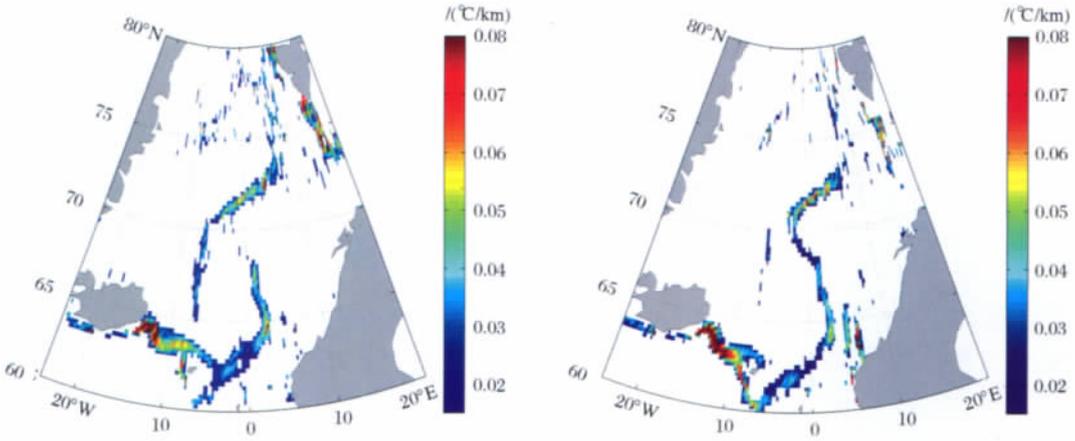


图 6 2 月 300 m (左) 和 400 m (右) 温度梯度图

Fig.6 300 m (left) and 400 m (right) layer temperature gradient patterns of February

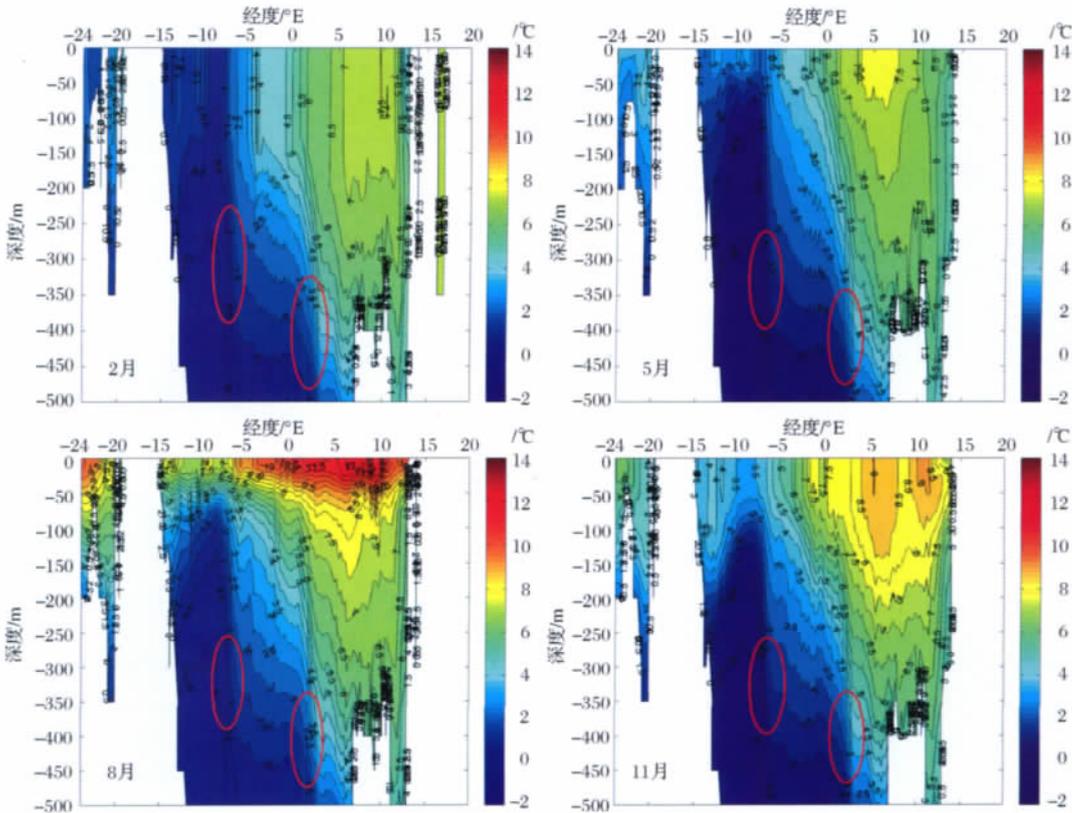


图 7 2、5、8、11 月 66°N 断面 500 m 以浅温度图

Fig.7 Upper 500 m temperature profiles of 66°N section in February, May, August and November

图中的红圈标明了 2 条温度锋的大体位置

Red cycles indicate the locations of the two temperature fronts

7.5 Sv, 流量在冬季达到最大。Pistek 等^[21] 以及 Samuel 等^[22] 通过卫星高度计数据,也都指出其月平均流量冬季最大,夏季最小。挪威海流在冬季出现的最大流量引起挪威海流的流幅加宽,导致了莫恩海脊锋的西北向移动。

显的季节性变化。次表层(100 m) 锋区温度随着太阳辐射和气温的季节变化却有着较清晰的季节特征(图 3 中的红色曲线)。春季锋轴对应的平均温度为 2 °C; 夏季随着太阳辐射的增强和气温的升高,锋轴温度升高,锋强也超过 0.034 °C/km,为全年最大,秋季太阳辐射减弱,气温降低,锋轴对应的平均

© 图 9 显示,多年平均的 JMF 空间位置不存在明

温度降至 3.5 °C; 冬季锋强达到最小, 锋轴平均温度也降至 1.5 °C。

由于 AF 北段锋面受回流的影响出现较大幅度 和东西方向位置摆动, 月平均数据不能清晰反映锋面的位置(图 5), 也无法体现其季节变化规律。然而, 这也体现了北段锋面的自然状况: 在那里, 流幅变窄, 回流增强, 流速受北冰洋物理过程的影响, 锋面位置的频繁摆动是适应各种变化的自然结果, 也是该海域锋面的重要特征之一。

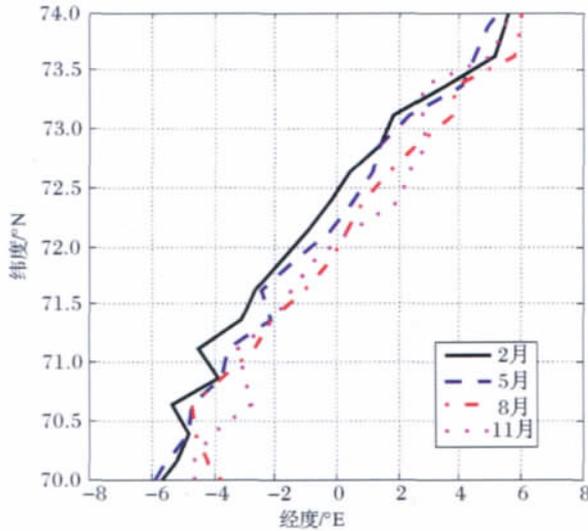


图 8 莫恩海脊锋次表层(100 m)锋轴季节变化图

Fig. 8 Seasonal movement of MRF at 100 m depth

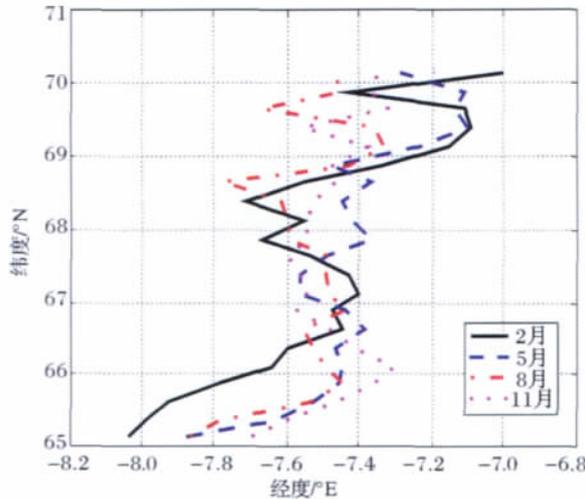


图 9 扬马延锋次表层(100 m)锋轴季节移动

Fig. 9 Seasonal movement of JMF at 100 m depth

5 其他海洋锋

5.1 冰岛—法罗群岛锋

IFF 同时具有温度锋和盐度锋的特征。由于受到冰岛—苏格兰海脊的限制, 其位置基本与 ISR 平

行(图 5), 但由于地形和海流情况的不同, 其东西两段的空间特征有所不同。由于受到冰岛—法罗群岛入流的影响, IFF 随深度减小而向北延伸, 东段延伸速度大于西段, 但位置上东段始终比西段偏南。在 10°W 附近, 在海底地形和岸线的共同作用下, IFF 发生向北弯曲的现象, 这已经被前人发现并在模式中讨论过^[13, 23]。西段的锋面梯度强于东段。100 ~ 500 m, IFF 随深度增加向南延伸, 强度增强, 东段随深度增加向南延伸的范围更大, 在 400 m 深度上已经延伸到法罗群岛南方(图 10)。这种特征与溢流有关。图 11 的黑色虚线框中 IFF 之上的温度梯度随深度增大而逐渐增大, 从北向南逐渐加深。ISR 是溢流形成的“门槛”, 低温低盐的溢流水在跨过海脊时由于水深变浅, 水体受到抬升与上层高温的 NAW 靠近, 形成较大的温度梯度, 而在冷水不断南流的过程中, 与南方较为深厚的势力较强的 NAW 产生的温度梯度会逐渐增大, 锋面位置也会逐渐加深。

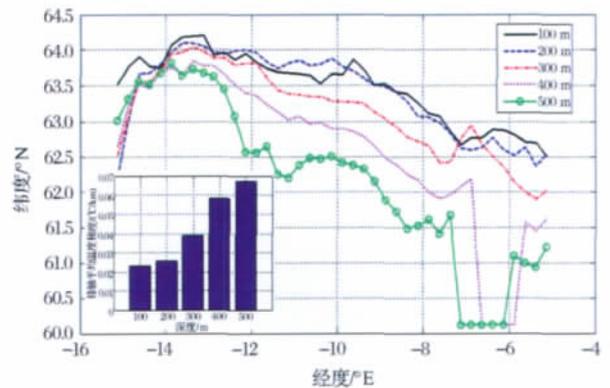


图 10 IFF 锋轴垂向变化图

Fig. 10 Vertical locations of IFF

左下角插图为锋轴平均梯度图

The lower left panel is mean values of frontal gradient

Willebrand 等^[19] 根据锚定数据得到 IFF 侧向摆动的主要周期大约为 10 天, 并推断其可能是由于斜压不稳定所造成。由于海洋锋在时空上存在多尺度的特性, 月平均数据虽无法显示短期特征却可以把握长期整体的变化规律。从月平均数据可以看到锋面跨度较宽, 表现的季节变化规律主要为: 温度梯度常年存在, 但夏半年较大, 冬半年较小。IFF 强度在 5 月达到最大, 且宽度最窄, 这说明 5 月的 IFF 侧向摆动幅度从全年来看是最小的。由于冰岛—法罗群岛入流流量的季节变化可以忽略^[14], 因此 IFF 的季节变化主要受东冰岛流的流量影响。东冰岛流流量

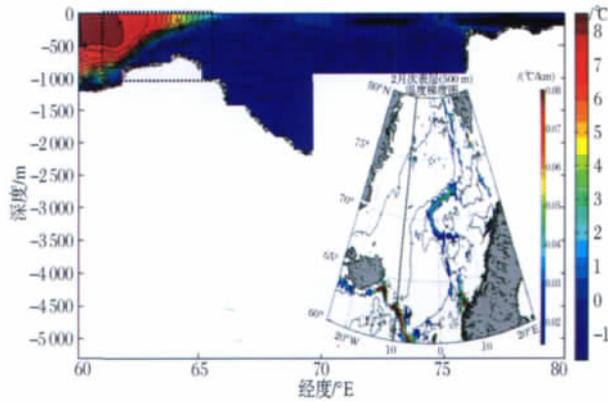


图 11 沿 10°E 经向断面 2 月份温度图

Fig. 11 Temperature profile of 10°E section in February

在 4、5 月达到最大值, 因此在 5 月 IFF 锋强最大。

5.2 挪威陆架锋

NSF 存在于挪威海流携带的大西洋水与挪威沿岸水之间, 是明显的盐度锋和密度锋。挪威陆架水通常被认为是波罗的海表层流从斯卡格拉克海峡向西流出的海流, 盐度较低, 与高盐的挪威海流之间存在较大的盐度梯度。从盐度梯度图(图 4)上可以看到, NSF 清晰地存在于挪威沿岸, 它的盐度梯度在 65°N 附近迅速增大, 这是由于挪威海流在跨过格陵兰—苏格兰海脊后, 在 65°N 以南的海域, 西边支流几乎沿 2 000 m 等深线前进, 这就造成了在 65°N 附近挪威海流的流幅十分狭窄, 挪威海流与挪威沿岸水的梯度因此增强, 盐度梯度增大。由于挪威海岸曲折, 峡湾众多, 锋面在海湾处会发生弯曲, 如位于约 67°N 的西峡湾附近的 NSF 全年都存在弯曲现象, 且锋面强度较南北两侧均较小。NSF 稳定的位于挪威陆架之上, 空间分布无明显季节变化。强度在秋冬季较强, 春夏季较弱, 这主要与挪威海流冬季流量较大有关。

5.3 冰岛沿岸锋

ICF 存在于冰岛以北和以东的陆架之上, 是由北冰岛伊尔明哥流和东冰岛流相互作用形成的一条明显的温度锋。图 12 是 ICF 锋轴季节图, 从图 12 中可以看到, ICF 的空间分布并无明显季节变化。图 5 显示了锋强的季节变化。夏季 ICF 最显著, 锋面整洁连续, 锋强达到最大; 冬季锋面出现不连续现象, 锋面的东段几近消失。这是因为冬季东冰岛流的流量减小, 流至冰岛东北部时已经势力减弱, 与东冰岛伊尔明哥流在冰岛东北部形成的锋面南北向摆动很大, 造成多年平均的 ICF 东段锋面梯度过小。

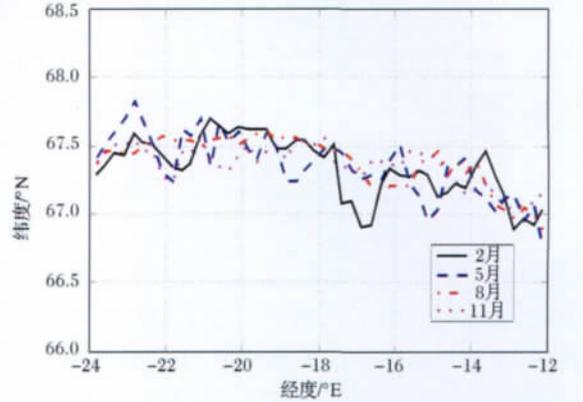


图 12 ICF 次表层(100 m)锋轴季节变化图

Fig. 12 Seasonal movement of ICE at 100 m depth

6 结 论

海洋锋有明显的时间变化和空间摆动, 但人们有时更关心海洋锋在一定时间的平均状况。获取锋的平均状况有 2 种方法, 一是根据多次观测数据统计获取锋的平均信息, 二是根据月平均温盐数据研究锋的平均状况。本文利用后者研究北欧海的主要海洋锋及其季节变化。

(1) 既能反映锋面的基本位置又能体现锋面侧向摆动是月平均数据的一大特点。锋面在月平均数据中表现的间断或多重的现象, 是锋面侧向摆动造成的。经过比较发现用温盐梯度值来确定锋面位置比等值线更合适。

(2) 北欧海锋面的主要水文特征: EGPF 主要是盐度锋, 其温度锋的特征只有在夏季才清晰可见。AF 沿经向分为 3 段: 北段因局地回流而结构杂乱, 中段受地形控制而分布规整, 南段的垂直结构在 300 ~ 400 m 深度发生弯曲。IFF 的盐度锋与温度锋在位置上完全一致, 基本与冰岛—苏格兰海脊平行。随深度增加, 其锋面强度增强, 位置向南延伸, 东段向南延伸距离更大, 这是向南的溢流水受海脊抬升而与上层大西洋水温度梯度逐渐增大造成的。NSF 是明显的盐度锋和密度锋, 清晰地存在于挪威沿岸, 它的盐度梯度在 65°N 附近迅速增大, 这是由于挪威入流走向发生弯曲造成的。由于挪威海岸曲折, 峡湾众多, 锋面在海湾处会发生弯曲。

(3) 北欧海锋面的季节变化特征: EGPF 夏季锋面强度大, 锋面较连续完整; 冬季强度小, 锋面结构零散。表层只有在 9 月可观察到较强大且连续的锋面, 这是由于 9 月北冰洋海冰剧烈融化, 大量冷而淡的水从 Fram 海峡流出, 东格陵兰寒流势力达到最强, 抵消了大西洋回流的影响, 使锋面较为稳定。

AF 的季节变化在水平方向呈“哑铃型”分布,中段在莫恩海脊附近的摆动虽较南北两侧更弱,但仍然存在。冬季由于挪威海流流量增大,导致该处加宽,使莫恩海脊锋向西北移动,这对 Nilsen 等^[12]关于该锋基本没有季节性移动的说法进行了修正和补充。IFF 在夏半年锋强较大,冬半年锋强较小。5 月锋强达到最大值是因为东冰岛流流量在 4、5 月达到最大值。NSF 稳定的位于挪威陆架之上,空间分布无明显季节变化。锋强在秋冬季较强,春夏季较弱,这主要与挪威海流冬季流量较大有关。ICF 的空间分布并无明显季节变化,锋强在夏季最显著,冬季则出现不连续现象,锋面的东段几近消失,这是由于冬季东冰岛流的流量减小,东段锋面南北向摆动很大,造成多年平均的 ICF 东段锋面梯度过小。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Helland-Hansen B, Nansen F. The Norwegian Sea, Its Physical Oceanography based upon the Norwegian Researches 1900-1904 [R]. Report on Norwegian Fishery and Marine-Investigations 11 (2). Kristiania det Mallingske Bogtrykkeri, 1909.
- [3] Rudels B, Fahrbach E, Meincke J, et al. The East Greenland Current and its contribution to the Denmark Strait overflow [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(6): 1133-1154.
- [4] Wadhams P, Gill A E, Linden P F. Transects by submarine of the East Greenland Polar Front [J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1979, 26(12): 1311-1327.
- [5] Aagaard K, Coachman L K. The East Greenland Current north of Denmark Strait: Part I [J]. *Arctic*, 1968, 21(3): 181-200.
- [6] Paquette R G, Bourke R H, Newton J F, et al. The East Greenland Polar front in autumn [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C3): 4866-4882.
- [7] Manley T O, Hunkins K L, Muench R D. Current regimes across the east Greenland polar front at 78°40' north latitude during summer 1984 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C7): 6741-6753.
- [8] Dietrich G. Atlas of the Hydrography of the Northern North Atlantic Ocean [M]. Copenhagen: International Council for the Exploration of the Sea, 1969.
- [9] 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.
- [10] Van Aken H M, Quadfasel D, Warpakowski A. The arctic front in the Greenland Sea during February 1989: Hydrographic and biological observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C3): 4739-4750.
- [11] Cottier F R, Venables E J. On the double-diffusive and cabbelling environment of the Arctic Front, West Spitsbergen [J]. *Polar Research*, 2007, 26(2): 152-159.
- [12] Nilsen J E Ø, Falck E. Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948-1999 [J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 70(1): 58-90.
- [13] Smart J H. Spatial variability of major frontal systems in the North Atlantic-Norwegian Sea area: 1980-1981 [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14(1): 185-192.
- [14] Hansen B, Østerhus S, Hátún H, et al. The Iceland-Far inflow of Atlantic water to the Nordic Seas [J]. *Progress in Oceanography*, 2003, 59(4): 443-474.
- [15] Kostianoy A G, Nihoul J C J, Rodionov V B. Physical Oceanography of Frontal Zones in the Subarctic Seas [M]. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [16] Blindheim J, Østerhus S. The Nordic Seas, main oceanographic features [C] // Drange H, et al, eds. The Nordic Seas: An Integrated Perspective Oceanography, Climatology, Biogeochemistry, and Modeling. Washington DC: AGU, 2005: 11-37.
- [17] Kostianoy A G, Nihoul J C J. Frontal zones in the Norwegian, Greenland, Barents and Bering Seas [C] // Nihoul J C J, et al, eds. Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions. Dordrecht: Springer, 2009: 171-190.
- [18] Parsons A R, Bourke R H, Muench R D, et al. The Barents Sea Polar front in summer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C6): 14201-14221.
- [19] Willebrand J, Meincke J. Statistical analysis of fluctuations in the Iceland-Scotland frontal zone [J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1980, 27(12): 1047-1066.
- [20] Gould W J, Loynes J, Backhaus J. Seasonality in slope current transport N. W. of Shetland [C] // ICES Station of Meeting 1985, C. M, 1985.
- [21] Pistek P, Johnson D R. Transport of the Norwegian Atlantic Current as determined from satellite altimetry [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(13): 1379-1382.
- [22] Samuel P, Johannessen J A, Johannessen O M. A study on the inflow of Atlantic Water to the GIN Sea using GEOSAT altimeter data [C] // Johannessen O M, et al, eds. The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment: The Nansen Centennial Volume. Washington DC: AGU, 1994: 95-108.
- [23] Griffiths C. A fine resolution numerical model of the Iceland-Faroe front with open boundary conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C8): 15915-15931.

Distributions and Seasonal Variations of Fronts in GIN Seas

He Yan , Zhao Jinping

(Key Laboratory of Physical Oceanography , Ministry of Education , Ocean University
of China , Qingdao 266100 , China)

Abstract: The spatial distributions and seasonal variations of the main fronts in GIN seas are analyzed by grid data of monthly mean of temperature and salinity. The suitable application method for monthly data in frontal study is discussed. As the fronts often move or swing , the front information in monthly data has been blurred and the fronts obtained by monthly mean temperature and salinity sometimes show interrupted front and multi-front phenomena. However , the blurry fronts are just the averaged status of fronts , which can only be revealed by monthly data. The fronts show significant diversity in their characteristics and seasonal variations. The East Greenland Polar Front (EGPF) is mainly a salinity front , being evident and continuous in summer and weak and interrupted in winter. The EGPF is also a temperature front in summer. The obvious temperature gradient and uninterrupted shape appears in September , being attributed to the maximum temperature difference between the East Greenland Current and the return currents at that time , which keeps the location of EGPF relatively stationary. The Arctic Front (AF) has a seasonally spatial variation with "dumbbell" shape—The seasonal displacement near the northern and southern parts of the front is much larger than that in the middle part , showing the larger swinging amplitude there. AF near the Mohn Ridge was addressed as a no-motion part , however , AF by this study is revealed to move northwestward in winter because the flux of Norwegian Current reaches the maximum then and induces the broadest width of the current near the Mohn Ridge area. A special characteristic of the Iceland-Faroe Front is that the interface of the front appears more southward and stronger in deep part , which is caused by the overflow above the ridge.

Key words: GIN seas; Seasonal variance; East Greenland Polar Front; Arctic Front; Iceland-Faroe Front.

2011 年第 11 期要目

内陆河流域森林生态系统生态水文过程研究	程国栋 赵传燕 王 瑶
卫星遥感反演降水研究综述	刘元波 傅巧妮 宋 平 赵晓松 豆翠翠
利用雨雪分寸重建福州前汛期雨季起始日期的方法研究	葛全胜 丁玲玲 郑景云 郝志新
印度尼西亚海与印度尼西亚贯穿流研究概述	杜 岩 方国洪