

北欧海主要海盆海面热通量的多年变化*

赵进平¹, Ken Drinkwater²

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 挪威海洋研究所 Bergen, N-5024)

摘要: 北欧海有暖流和寒流注入,又发生大量回流,水团特性异常复杂。由于北欧海的环流受地形控制,其水团的分布与4个海盆的分布有密切的关系。本文研究各个海盆热通量变化的差异,以研究获取对北欧海海气相互作用区域差异的认识。北欧海的热量夏季以太阳短波辐射为主,冬季以来自海洋的长波辐射、感热和潜热通量为主。海盆间的差异主要体现在格陵兰海,其变化幅度短波辐射高出50%,长波辐射高出大约40%,潜热高出大约60%,感热高出近4倍。可能的原因是,格陵兰海强烈的感热和潜热释放导致海温降低,气温也受北极冷空气的影响,形成与暖流区迥异的自然环境。过去30年发生了2次显著的热量减少事件。其中,1987年的事件很可能与冰岛的火山喷发有关,火山喷发对短波辐射的影响长达一年之久,导致感热和潜热也同步减少。1998年格陵兰海的潜热和感热明显减少,与北极海冰输出导致的海温偏低有显著关系。文章分析了4个主要海盆热通量的变化与北极涛动(AO)指数的关系。结果表明,发生在冰岛海的向下短波辐射和发生在格陵兰海的感热和潜热与AO相关度较高,体现了与AO的密切关系。这些热通量与AO指数的滑动相关系数表明,1992年以前冰岛海的短波辐射与AO的相关性非常高,而格陵兰海的感热和潜热在1993年后与AO高度相关,是值得深入研究的现象。本文的结果支持以下观点:北欧海对北极涛动的贡献主要是格陵兰海的感热和潜热释放通过冰岛低压区的上升气流影响冰岛低压的云量,从而影响到达的太阳辐射而导致大气环流的变化。

关键词: 北欧海; 热通量; 海气耦合; 北极涛动; 北极涛动核心区

中图分类号: P731.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2014)10-009-11

1 导论

北欧海(Nordic Sea)是连接北大西洋与北冰洋的海域,由格陵兰海、冰岛海和挪威海组成,也称GIN海(见图1)。来自北大西洋的暖流——挪威流沿北欧海东部进入,从巴伦支海和Fram海峡流出北欧海。另一支来自北冰洋的寒流——东格陵兰流沿北欧海西部进入,并通过Denmark海峡流出北欧海。受海底地貌的影响和地形的约束,暖流多次发生从主流分离的现象,称为回流,在北欧海中部形成大范围回流区^[1]。回流区的水体与周边水体交换,形成特有的水团,称为大西洋回流水(Recirculating Atlantic Water)^[2]。由于回流区的水体要比暖流区和寒流区水体的滞留时间更长,有更多的时间发生海气相互作用,成为北欧海海气热交换的主体。在相对较冷的冬季,海洋向大气大量释放热量,导致了深对流和高密度水的形成^[3]。

据此,北欧海的上层分为3个主要区域:在西部受到极地冷水直接影响的极区,在东部受到大西洋暖水直接影响的大西洋区,以及在北欧海中部占据了格陵兰海的中部及冰岛海的中部和东北部的过渡区域^[4-5]。各个区域之间由海洋锋来分隔^[6-8]。

北欧海发生2种海洋对流,形成巨大的下沉流量。最显著的对流是表面冷却和卤水释放导致的对流,即开放海洋对流(Open-Ocean Convection)^[9]。开放海洋对流过程引发海洋中垂直热交换,加强海洋中的热量释放,产生强海气相互作用,同时影响海洋和大气的运动^[10-11]。此外,在格陵兰海的极锋附近,发生大范围的等密度对流,主要是回流水与来自北冰洋水体的混合增密导致的对流^[12-13]。

由于环流和回流都与海底地形有关,北欧海的水团与各个主要海盆紧密联系,北欧海海气界面热通量的差异主要是各个海盆之间热通量的差异。因此,本文研究各个主要海盆海面热通量的差异。在北欧海存在4个大的海盆,分别为格陵兰海、冰岛海、挪威海盆、罗弗敦海盆。其中,冰岛海的深度较浅,大约1000m,其余3个都是深海盆,深度在2800m以上。由于水体来源不同,海水的温度不同,各个海盆的海气交换有很大的差别。其中,挪威海盆和罗弗敦海盆主要是挪威暖流的暖水回流区,水温较高,是主要的感热释放区。而格陵兰海盆是东格陵兰流的回流水和暖流的回流水汇合区,水温较低,感热和潜热的释放都很强烈^[14]。各个海盆的海气交换对北欧海的大气环流有重要的贡献,其中,挪威海盆和罗弗

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“北极海冰与上层海洋环流耦合变化及其气候效应(41330960)”; 南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE0403)资助

收稿日期: 2014-08-20; 修订日期: 2014-09-08

作者简介: 赵进平(1954-), 男, 教授, 博导。E-mail: jpzhao@ouc.edu.cn

敦海盆的暖水回流在不间断的循环过程中不断向大气释放热量,是欧洲热量的主要来源。

北欧海是北大西洋涛动/北极涛动(NAO/AO)的关键海域^[15-16],在气候系统中起到重要作用。NAO明显与系统性的风场距平变化、潜热和感热通量的变化以及海面温度场变化有关^[17-18],亚极区涡旋的海表温度、海冰范围与气压十年尺度变化几乎是同步的^[19],来自格陵兰岛的下降风减弱有助于抑制蒸发,改变了海冰的分布,导致海冰与气压场变化呈正相关关系^[20]。文献[21]通过研究北极涛动(AO)的变化与北半球海面气压场(SLP)变化的关系,指出存在1个以北欧海为主体的北极涛动核心区(AO核心区),AO核心区的平均SLP与北极涛动指数(AOI)高度负相关,相关系数达到0.945,二者几乎可以相互替代。然而,北欧海东西两侧最大温差达到10℃以上,暖流区域寒流区的海气通量也有很大的差别。文献[21]的结果提出1个重要的命题,是什么因素导致AO核心区的气压与AO一致变化?空间不均匀的海洋如何导致大气参数的均匀特性?为此,需要研究北欧海表面热通量如何影响海洋和大气的变化。

迄今为止,北欧海内部的长期连续数据主要有:各国沿岸气象站,位于扬马延岛的气象站,以及位于挪威南部近海的长期监测船(M站,1949—2009)。然而,由于北欧海各项参数的空间变化范围大,这样几个站的数据不足以了解北欧海海气相互作用的全貌。

本文的目的是了解各个热通量的时间变化及其与AO的相关性,采用NCEP-DOE Reanalysis-2在北欧海的格点化数据,研究北欧海海气通量与北极涛动指数的关系,揭示北欧海海洋对北极涛动核心区SLP变化的作用以及对北极涛动的贡献形式。本文的结果深入揭示了北欧海热通量各个分量对海气耦合的响应和反馈,指出北欧海是1个潜热主导的海气耦合海域。

2 热通量的季节变化

2.1 热通量多年月平均分布特征

热通量和气象数据取自NCEP-DOE Reanalysis-2数据集(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/grid-ded/data.ncep.reanalysis2.html#references>),该数据集使用了高级分析与预报系统进行数据同化,是NCEP Reanalysis-1的改进版本。所有数据的网格如图1所示,经度间隔1.875°,纬度间隔1.903°。各个热通量以进入大气的为正,向下辐射以到达海面为正,向上辐射以离开海面为正,潜热和感热以进入大气为正。净短波辐射是指向下的短波辐射减去向上的短波辐射,净长波辐射是向上的长波辐射减去向下的长波辐射。同

期的北极涛动指数数据来自(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html)。所使用的数据长度为30年,从1979年1月~2010年12月。

北欧海的海气热通量有非常显著的季节变化。作者在图2中给出了净短波辐射、净长波辐射、感热和潜热在1月和7月的空间分布图。

北欧海大部分海域位于北极圈之内。冬季(11、12、1月)大部分海域没有短波辐射,夏季短波辐射很好的体现了纬度差异。在东格陵兰流海域,每年大部分时间有海冰覆盖^[22],海冰较强的反照率导致净短波辐射很低,大部分太阳辐射能被反射回太空。

长波辐射的冬夏差异并不大,冬季的净长波辐射略大一些,表明冬季的云量要显著低于夏季,海洋失热更为严重。在东格陵兰流域,冬季净长波辐射略小一些,夏季净长波辐射略大一些。

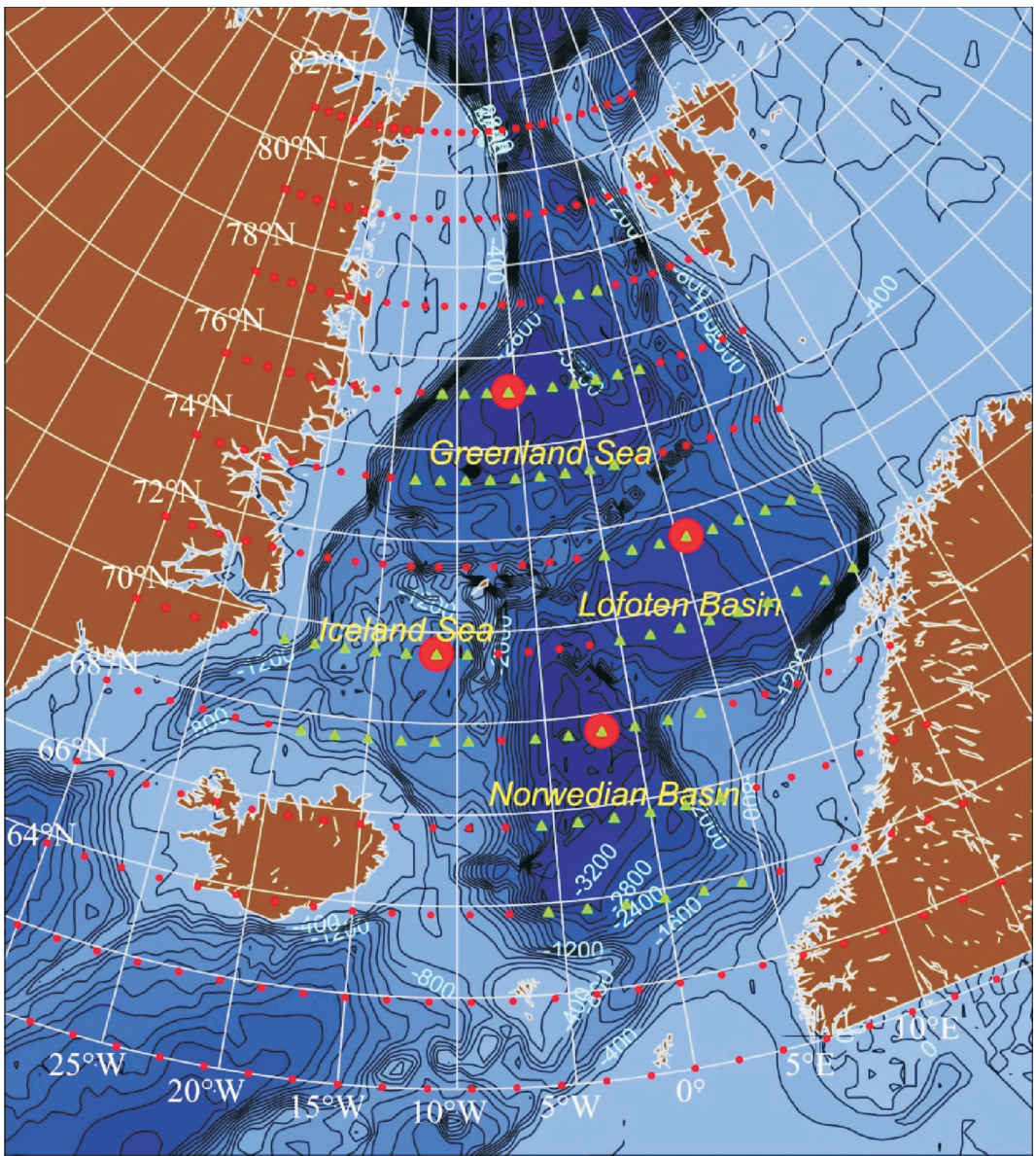
感热通量在夏季比较弱,主要是海气温差较小的缘故。在冬季,发生非常强的感热通量,尤其在格陵兰海盆,感热通量达到极大值,可达200 W/m²以上。在其他海域,感热释放量也达到80 W/m²以上。这样大的感热通量体现了该海域的海洋热量通过感热释放给大气,形成冬季大气运动的主要热源。这种强大的感热释放从10月持续到翌年4月。

潜热通量在夏季较弱,是由于夏季大气湿度较大的缘故。而在冬季潜热释放量非常可观。在挪威海流流域,潜热释放超过100 W/m²,而在回流区,潜热也达到60 W/m²以上,只有在东格陵兰流海域,潜热通量低于30 W/m²。显然,北欧海冬季感热和潜热的释放对欧洲冬季温暖的气候有重要贡献。

可见,在夏季,太阳短波辐射是北欧海大气运动的主要热源,净长波辐射通量与冬季差别不大,感热和潜热通量都很小。而在冬季,长波辐射、感热和潜热提供给大气的热量接近300 W/m²,接近夏季太阳辐射提供的热量,是该海域冬季大气运动的主要热源。

2.2 4个海盆热通量的季节变化

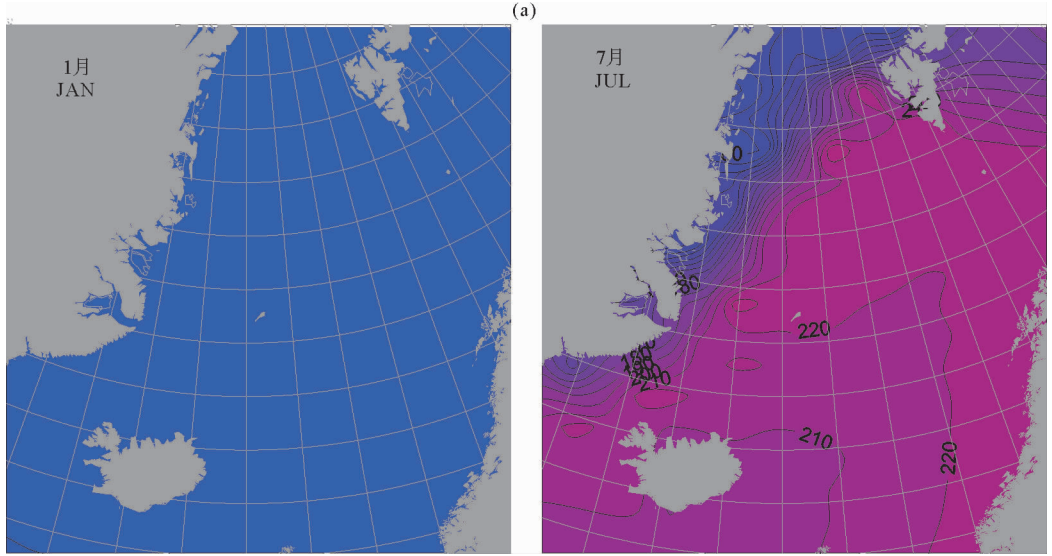
图3给出了4个海盆各个热通量的季节变化情况。净短波辐射夏季最大,其他3种热通量都是夏季最小。各个海盆的净短波辐射相差不大,只有格陵兰海略高。净长波辐射通量也是格陵兰海最高,其他3个海域相差不大。其实,格陵兰海的海表温度要低于挪威海盆和罗弗敦海盆。感热通量格陵兰海是最高的,其他3个海盆相差不大。潜热通量当属暖水区的挪威海盆和罗弗敦海盆最大,其他2个海盆较小,其中,冰岛海的潜热通量要远小于其他海域。值得注意的是,格陵兰海夏季的潜热接近0,表明该海域夏季气温低,湿度大,无法形成蒸发。



(图中小红点是辐射和气象数据的格点; 大红点是 4 个海盆代表点的位置; 绿色三角是用来平均 4 个海盆物理量的格点。The small red dots are the grids for radiation and atmospheric data. The big red dots are the representative location of the four basins. The green triangles are the grid points using for average at each basin.)

图 1 北欧海地形和数据示意图

Fig. 1 Topography of Nordic Seas and the grid of data



(a)

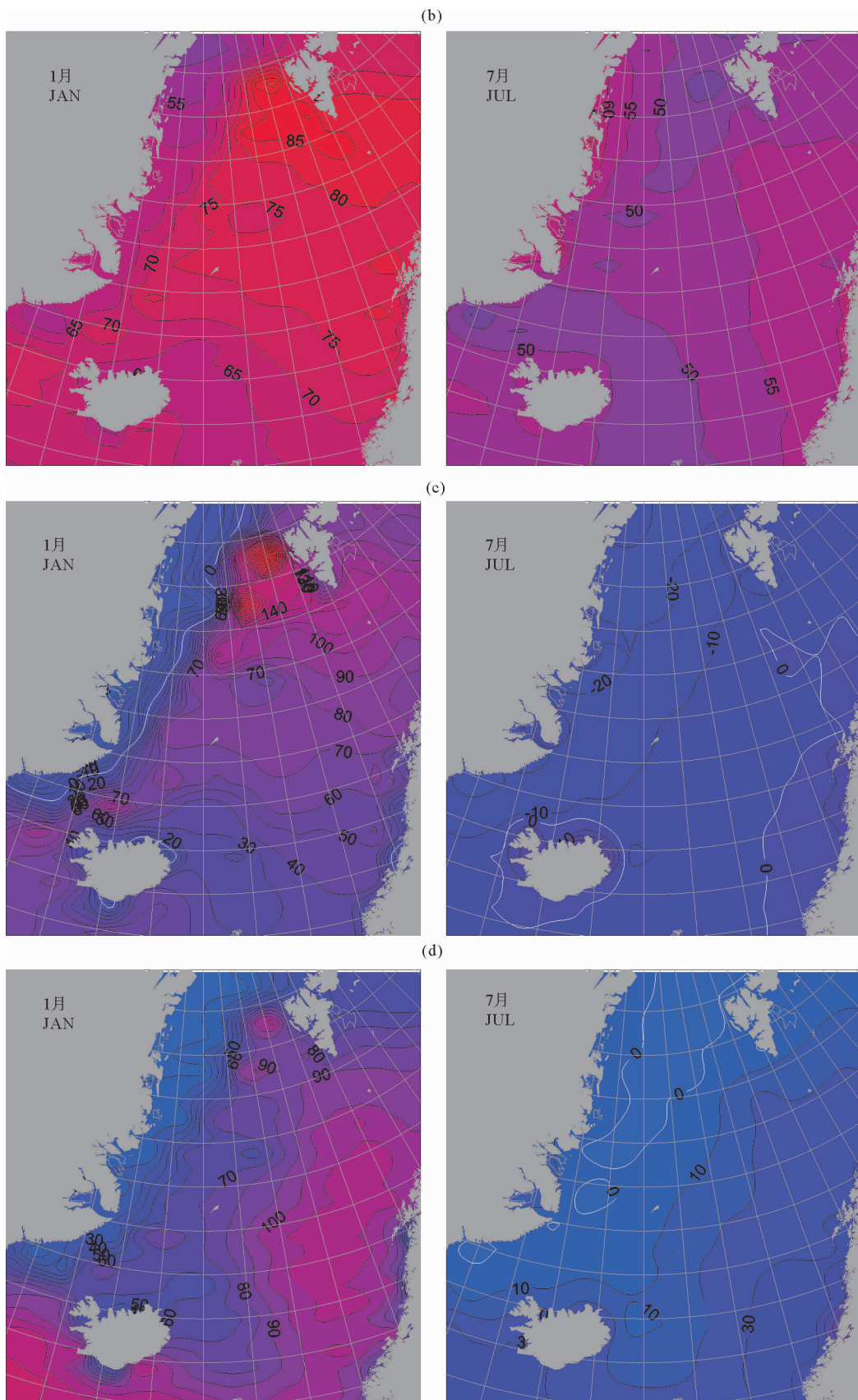
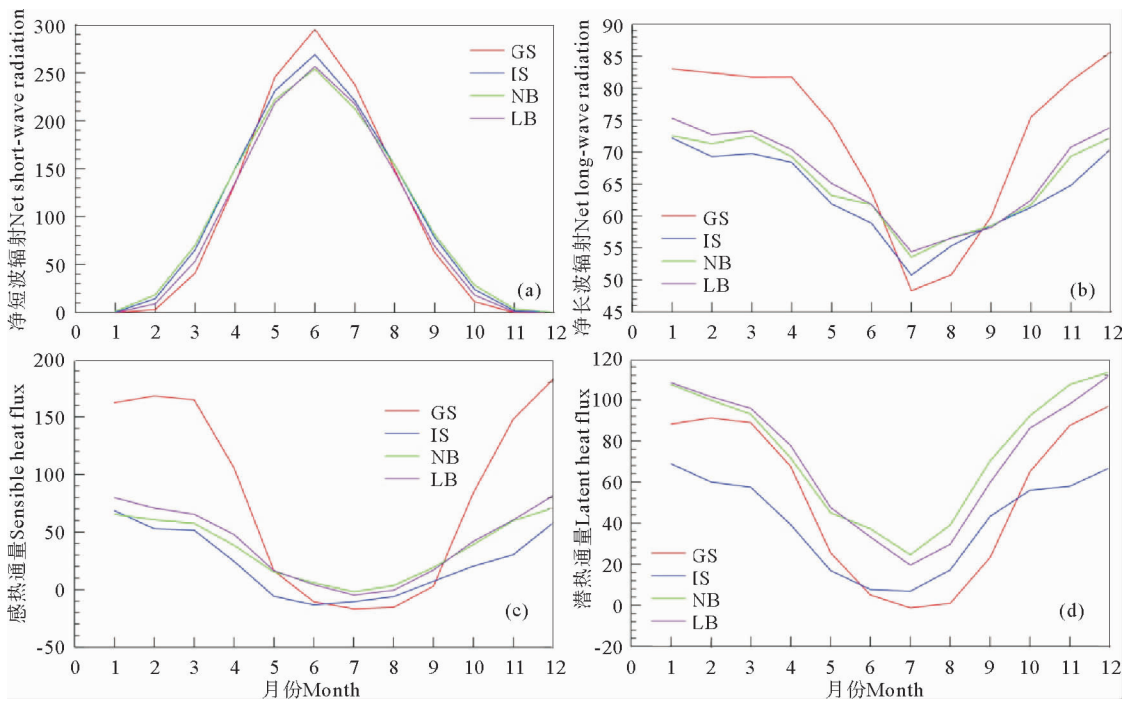


图2 多年月平均1和7月净短波辐射(a),净长波辐射(b),感热(c)和潜热(d)通量的空间分布
 Fig.2 Multiyear monthly average of net shortwave radiation (a), Net longwave radiation (b), Sensible heat (c) and latent heat (d) at January (left) and July (right), respectively



(4 幅图分别为净短波辐射(a),净长波辐射(b),感热通量(c)和潜热通量(d)。分别体现 4 个主要海盆的变化,GS 为格陵兰海,IS 为冰岛海,NB 为挪威海盆,LB 为罗弗敦海盆。The four plots are for the Net shortwave radiation (a), net longwave radiation (b), sensible heat (c) and latent heat (d), respectively for Greenland Sea (GS), Iceland Sea (IS), Norwegian Basin (NB), and Loften Basin (LB).)

图 3 4 个海盆各个热通量分量的季节变化(多年月平均)

Fig. 3 Seasonal variation (multiyear monthly average) of each heat flux component at four basins

2.3 各个海盆热通量的方差

从数据中去掉图 3 中的多年月平均数据,得到各个热通量的距平量。统计各个海盆代表点距平量的方差列于表 1。可见,短波辐射的方差在各个海盆相差不多,只有在格陵兰海盆高出 50%,与该海域的云量相对变化较大有关。各个海域的长波辐射方差相差不多,格陵兰海高出大约 40%,也是由于云量变幅较大的缘故。感热的方差区域差别最大,暖水区的挪威海盆和罗弗敦海盆感热的方差都略高于 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而在冰岛海,感热方差增大到 $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,在格陵兰海盆,感热方差骤升到 $18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。这 2 个海域感热方差变幅增大的原因是近海面气温变幅较大的缘故。潜热方差在格陵兰海变幅较大,达到 $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,而在其他 3 个海盆都在 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,格陵兰海潜热变幅

较大的原因是其湿度变化较大造成的。因此,格陵兰海的感热和潜热通量不仅是海洋失去热量的最主要方式,而且也是变幅最大的热通量,是海洋和大气发生较大幅度变化的主要原因。

3 各个热通量的空间差异

3.1 各个热通量的空间差异和时间变化

为了体现各个海盆的季节变化,本文将图 1 给出的 4 个海盆的中心点为核心,计算中心点与周边海盆各个热通量变化的相关性,以体现各个海盆之间的差异。图 4(a)~7(a)给出了各个海区相关系数大于 0.6 的海域,并计算各个海盆中心点热通量的时间变化的差异(见图 4(b)~7(b))。高相关海域的范围大,意味着其变化对更大的海域具有代表性。

图 4(a)表明,挪威海盆和罗弗敦海盆净短波辐射的相关系数场相互重叠,表明二者的空间一致性较高,表明这 2 个海盆的云量相差不多。而格陵兰海和冰岛海近乎自成体系。图 4(b)为净短波辐射变化的距平,表现出格陵兰海与众不同的较大变幅,冰岛海也与其他 2 个海盆有较明显的差异。净长波辐射的空间一致性最好,4 个海盆的相关系数场高度重叠(见图 5(a)),其时间变化的位相和幅度又有较好的一致性(见图 5(b))。

表 1 各个海盆各热通量的方差

Table 1 Variances of heat fluxes in four basins/ $\text{W} \cdot \text{m}^2$

	短波辐射 Shortwave	长波辐射 Longwave	感热 Sensible	潜热 Latent
格陵兰海(GS)	3.17	2.85	18.11	8.34
冰岛海(IS)	2.26	2.37	8.24	4.82
挪威海盆(NB)	2.00	1.91	5.29	5.24
罗弗敦海盆(LB)	2.34	2.01	5.78	4.88

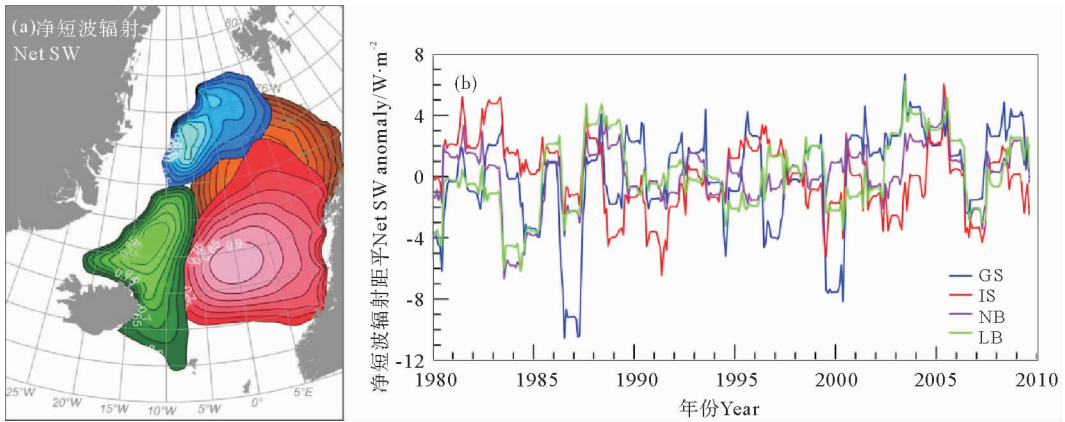


图4 净短波辐射的区域差异和时间变化

Fig. 4 Spatial difference and temporal variation of net shortwave radiation

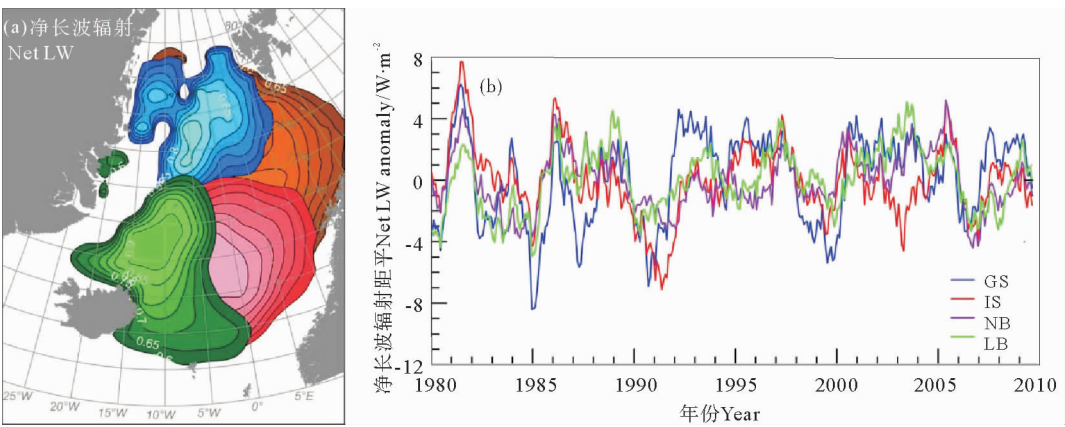


图5 净长波辐射的区域差异和时间变化

Fig. 5 Spatial difference and temporal variation of net longwave radiation

从图6(a)和图7(a)可见,冰岛海、挪威海盆和罗弗敦海盆的感热和潜热相关性都很好,相关系数场相互重叠的区域很大,表明暖流影响区域的感热和潜热特性比较接近。唯有格陵兰海,其感热和潜热都与周边

不一样,相关区域的范围也很小,说明在格陵兰海的感热和潜热特性主要集中在不大的范围内。图6(b),7(b)也表明,格陵兰海的感热和潜热都异常高,其中感热产生的距平非常显著,潜热也是高于其他海盆。

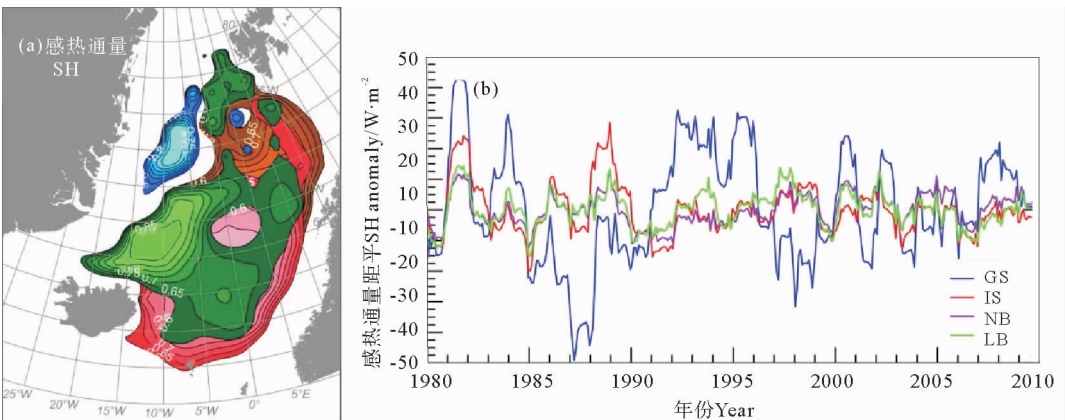


图6 感热通量的区域差异和时间变化

Fig. 6 Spatial difference and temporal variation of sensible heat flux

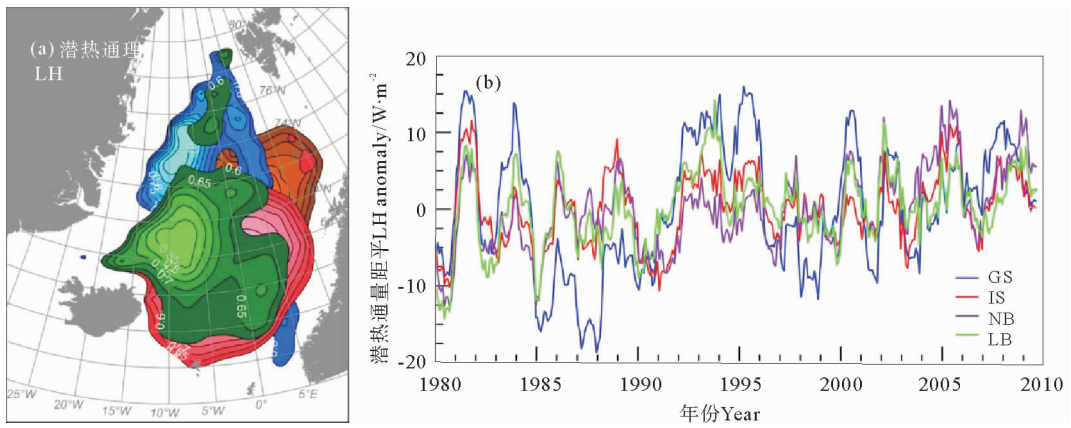


图 7 潜热通量的区域差异和时间变化

Fig. 7 Spatial difference and temporal variation of latent heat flux

3.2 各个热通量变化的一致性

表 2 给出了潜热与其它各个辐射通量距平之间的相关系数,以查看这些热通量变化的一致性。结果表明,短波辐射与潜热通量变化的相关性最小,主要原因是短波辐射主要发生在夏季,而潜热主要发生在冬季。而潜热与长波辐射和感热都有很好的正相关,表明各种与海洋因素密切相关的热通量都有很好的一致性。但是,潜热与感热的相关性更高一些,在格陵兰海,二者的相关系数达到 0.95;在挪威海盆,相关系数也达到 0.82。而潜热与长波辐射的相关系数在 0.51~0.66 之间。

表 2 各个海盆潜热与其他热通量的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of latent heat with other heat fluxes at each basin

	潜热-短波辐射 Latent-shortwave	潜热-长波辐射 Latent-longwave	潜热-感热 Latent-sensible
格陵兰海 (GS)	0.27	0.62	0.95
冰岛海 (IS)	0.24	0.66	0.69
挪威海盆 (NB)	0.49	0.59	0.82
罗弗敦海盆 (LB)	0.20	0.51	0.67

总体来看,挪威海盆与罗弗敦海盆的热通量变化一致,表明暖流区热通量有比较一致的变化。冰岛海虽然有时有比较大的偏差,但更趋向于暖流区的特征,与进入冰岛的伊尔明哥流有关。北冰岛伊尔明哥流沿冰岛北部沿岸流动,将大西洋水带入冰岛海,占据上层 200~300 m 的深度^[23]。只有格陵兰海非常特殊,其短波辐射、感热和潜热都有很大的变幅,与相邻海域完全不同。这与格陵兰海的特殊物理特征有关。在格陵兰海,没有暖流直接流入,强烈的感热和潜热释放,导致海温降低,气温也受北极冷空气入侵的影响,形成与暖流区

迥异的自然环境。此外,格陵兰海的上升气流最弱,云量少,造成净短波辐射高,净长波辐射也高的特点。

3.3 各个热通量变化的特殊事件

从图 4(b)~7(b)可以看出,在过去 30 年发生了几次显著的热量减少事件。其中,短波辐射的减少事件发生在 1986—1987 年和 1999—2000 年。这 2 次强负距平事件很可能与冰岛的火山喷发有关。冰岛在 1986 年 7 月发生了强火山喷发,喷发期持续了大约 15 d;冰岛 2000 年的火山喷发也很强。火山喷发产生的火山灰和气溶胶对太阳短波辐射的影响长达一年以上^[24]。

感热和潜热通量的负距平事件与短波辐射有所不同。1986 年冬季发生的感热和潜热的负距平事件,可以认为也受到火山喷发的影响;而 2000 年发生火山喷发,却没有发生感热和潜热的负距平。1998—1999 年发生显著的感热和潜热的负距平事件。云量的变化也表明,1987 年的短波辐射负距平事件与云量增大直接的关系。而在 1998—1999 年间,云量以低值为主。低云量通常对应于高净长波辐射,但那年的长波辐射也处于低值。因此,只有一种可能,就是海温异常低。这种情形是合理的,因为海温低会导致感热和潜热的下降。1998—1999 年的异常低温不会影响后续年份的短波辐射。

从图 6 和 7 可以看到,感热和潜热通量在 1990—1996 年之间一直保持高值,这段时间恰逢北极涛动的正位相,表明感热通量在这段时间与北极涛动有很好的关系。除了特殊的事件之外,各个热通量的变化更多地与北极涛动相联系。下文将仔细研究各个热通量的变化与北极涛动的关系。

4 热通量变化与北极涛动指数的关系

由于北欧海位于北极涛动核心区,北欧海辐射量的变化与北极涛动应该有密切的联系。但是,由于北

欧海的流系和水团复杂,各个海盆的辐射特性相差很大。为此,本文在此讨论各个海盆的辐射差异,以了解各个海盆对北极涛动的贡献。为了使结果对各个海盆有更好的代表性,本文选取各个海盆中所有点(见图1中绿色三角所示)对各个热通量进行平均,将平均的结果与北极涛动指数进行相关分析。这里,采用了^[25]北

极涛动核心区的概念,即北极涛动指数与北欧海平均气压的高度一致性,用北极涛动指数代表北欧海的平均气压场的变化。其中,由于考虑辐射通量与大气的关系,本文采用向下的短波辐射代替净短波辐射,因为向下的短波辐射与大气吸收的关系更密切。分析结果见表3。

表3 各海盆各热通量与AO指数的相关性

Table 3 Correlation coefficients of each heat flux with AO index at each basin

	向下短波辐射 Down longwave		净长波辐射 Net longwave		感热 Sensible		潜热 Latent	
	格陵兰海 GS	-0.15		0.09		0.30		0.30
	0.04	-0.31	0.02	0.35	0.09	0.72	0.13	0.73
冰岛海 IS	-0.35		-0.35		-0.11		-0.00	
	0.32	-0.59	-0.04	-0.63	0.23	-0.25	0.18	-0.19
挪威海盆 NB	-0.01		-0.27		-0.28		0.10	
	0.25	-0.02	0.04	-0.40	-0.03	-0.47	0.05	0.07
罗弗敦海盆 LB	-0.12		-0.27		-0.15		0.13	
	0.21	-0.01	-0.27	-0.21	-0.31	-0.18	-0.05	0.20

注:在每个海盆上面一行是1997—2008年的相关系数,下面一行的2个数分别为1992年之前数据和1993年之后数据得到的相关系数。

Note: The CC at first line of each basin is for full length data (1979—2008). The CCs at the second line are those before 1992 and after 1993.

从表3可见,向下短波辐射与AO指数相关性较高的在冰岛海,其他海域相关性都比较差,表明发生在冰岛海的短波辐射与AO的关系比较密切。在冰岛海和其他2个暖水海盆净长波辐射与AO有较高的相关性。格陵兰海的感热和潜热与北极涛动指数正相关程度较高,在其他海盆,感热和潜热的变化与北极涛动关系不明显。表3的结果表明,向下短波辐射和净长波辐射与AO相关性最好的都在冰岛海,CC均为-0.35。感热和潜热与AO相关最好的在格陵兰海,CC均为0.30(见图8)。

上述结果表明,以下2个过程是发生在北欧海的重要海气相互作用过程:第一,冰岛海的短波辐射与AO指数相关度较高,是与北极涛动关系密切的过程。短波辐射的变化通常与云量高度相关,4个海盆向下短波辐射变化与云量的相关系数分别为-0.74, -0.74, -0.65和-0.71。因此,云量是影响北极涛动最重要因子之一。第二,发生在暖水海盆中的长波辐射与AO有密切关系,保持大范围的较高相关度。第三,格陵兰海的潜热和感热通量的变化与AO正相关,有可能是北极涛动的驱动因素,至少与AO耦合变化,值得深入研究。

本文通过对2个时间序列进行滑动相关来表现二者的一致程度。设 X_k 和 Y_k 2个时间序列, R_i 是2种信

号以第*i*时刻为中心的相关系数,

$$R_i = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} X_k Y_k}{\sqrt{\sum_{k=i-n}^{i+n} X_k^2} \sqrt{\sum_{k=i-n}^{i+n} Y_k^2}}, i = 1+n, \dots, N-n \quad (1)$$

计算相关系数的时间窗口为±*n*。对各点滑动求取相关系数,就可得到相关系数的滑动变化曲线。在本文中,取*n*=12个月,相当于对2年的数据取相关。图8给出了与北极涛动相关系数较高的这4个热通量的滑动相关系数。

在30年的时间里,相关系数0.3~0.35超过了99.9%的置信度,已经体现了显著的相关性。但从图8和表3可见,如果将这30年分为两段,1989—1992和1993—2009,两段的相关系数相差很大。冰岛海前段的短波和长波辐射与AO的相关系数达到-0.59和-0.63,而后段相关性很差;而格陵兰海正好相反,感热和潜热前段的相关性很差,而后段的相关系数竟高达0.72和0.73。这个结果表明,在1992年以前,冰岛海的短波辐射和长波辐射对AO的贡献可能更大一些,而1993年以后,格陵兰海的感热和潜热对AO的贡献更大一些。作者认为,这可能与较长时间尺度内北极涛动的位相变化有关。1989—1995是北极涛动的正位相期,1992年以前AO总体上在升高,而1993年以

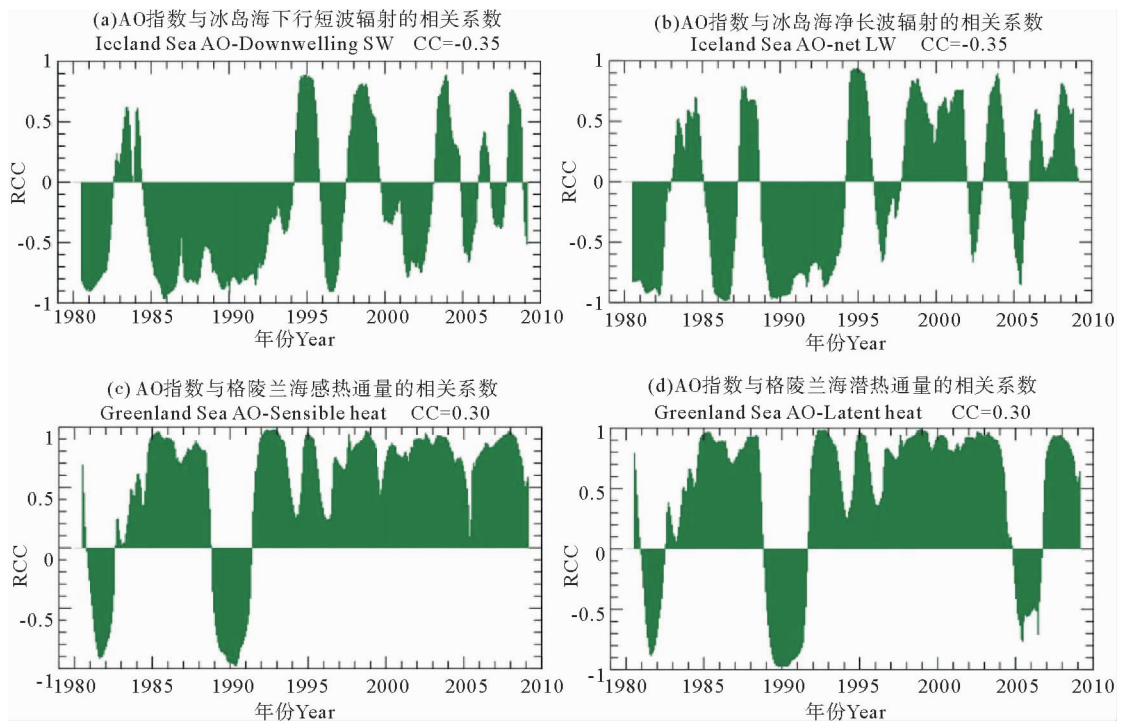


图8 与北极涛动相关性较好的4个热通量
Fig. 8 Heat fluxes well correlated with AO index

后 AO 总体上在降低,各个热通量的在相关性上的差别可能与此有关。对这个现象还无法在物理上给出合理的解释,需要在此基础上深入研究。

5 结果与讨论

北欧海包含有4个海盆,格陵兰海、冰岛海、挪威海盆和罗弗敦海盆。北欧海有暖流和寒流注入,又发生大量回流,其环流和水团特性异常复杂。由于北欧海的环流受地形控制,其水团的分布与海盆的分布有密切的关系。因此,本文研究各个海盆热通量变化的差异,以研究获取对北欧海海气相互作用的全面认识,并通过研究这些热通量与北极涛动指数的相关性,研究北欧海可能的海气耦合过程。

由于特殊的流场特点和地域特征,北欧海短波辐射主要发生在夏季,而来自海洋的长波辐射、感热和潜热通量主要发生在冬季。海洋在冬季强烈地向大气输送热量,与夏季太阳辐射的热量相当。海洋输送的热量在各个海盆很不相同,其中,格陵兰海的月平均长波辐射和感热最大。用方差表现各个热通量的变化幅度得出,最为特殊的是格陵兰海,其短波辐射高出50%,长波辐射高出大约40%,潜热高出大约60%,感热骤升到 $18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,高出其他海盆近4倍。

各海盆热通量变化的相关性分析表明,挪威海盆与罗弗敦海盆的热通量变化比较一致,表明暖流区有一致的变化。冰岛海虽然有时有比较大的偏差,但更

趋向于暖流区的特征。只有格陵兰海非常特殊,其短波辐射、感热和潜热都有很大的变幅,与相邻海域完全不同。在格陵兰海,强烈的感热和潜热释放导致海温降低,气温也深受北极冷空气入侵的影响,形成与暖流区迥异的自然环境。此外,格陵兰海云量少,造成净短波辐射高,净长波辐射也高的特点。

在过去30年发生了几次显著的热量减少事件,其中,短波辐射的减少事件发生在1986—1987年和1999—2000年,可能与1987年和2000年冰岛的火山喷发有关。由于到达的太阳辐射减弱,感热和潜热也同步减少。感热和潜热的变化也与北极海冰的输出量增大,海面温度偏低有显著关系。

文章分析了4个主要海盆热通量的变化与北极涛动指数的关系,结果表明,发生在冰岛海的向下短波辐射和发生在格陵兰海的感热和潜热与AO相关度较高,体现了与AO的耦合变化特性。由于到达海面的短波辐射与云量变化高度相关,短波辐射与AO的高相关是云量变化的结果,因此,AO的驱动因素是云量的变化。而云量主要是海洋的蒸发和大气的上升气流生成的,北欧海位于冰岛低压区,发生在格陵兰海的潜热通量过程可能与云的形成有密切关系,成为北极涛动的驱动因素。本文的统计分析只能指出这种可能性,证实这个机理需要更多的动力学研究。

这些热通量与AO指数的滑动相关系数揭示了一个现象,1992年以前冰岛海的短波辐射与AO的相关

性非常高,1993年后相关性较差;反之,格陵兰海的感热和潜热在1992年以前与AO的相关性并不好,而1993年后与AO高度相关,表明在AO增强过程中主要与辐射特性有关,而AO减弱过程主要与海洋的感热和潜热有关。

参考文献:

- [1] 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 I*, 1996b, 43(6): 807-835.
- [2] 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.
- [3] Meincke J, Rudels B, Friedrich H. The Arctic Ocean-Nordic Seas thermohaline system [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1997, 54(3): 283-299.
- [4] 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.
- [5] Rossby T, Prater M D, Soiland H. Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114, C04011. doi: 10. 1029/2008JC005073.
- [6] VanAken H M, Budéus G, Héhnél M. The anatomy of the Arctic Frontal Zone in the Greenland Sea [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100 (C8): 15999-16014. doi: 10. 1029/95JC01176.
- [7] Kostianoy A G, Nihoul J C J. Frontal Zones in the Norwegian, Greenland, Barents and Bering Seas [M]. // Nihoul J C J, Kostianoy A G, eds. *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions*. Netherlands: Springer, 2009.
- [8] 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): 1079-1091.
- [9] Marshall J, Schott F. Open-ocean convection: Observations, theory, and models[J]. *Rev Geophys*, 1999, 37(1): 1-64.
- [10] Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: the connection to monthly atmospheric circulation[J]. *J of Clim*, 1992b, 5(16): 354-369.
- [11] 邵秋丽, 赵进平. 北欧海深层水形成的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 42-45.
- [12] 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.
- [13] 史文奇, 赵进平. 北冰洋水体对格陵兰海混合增密对流的可能影响分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(6): 19-29.
- [14] Rudels B, Björk G, Nilsson J, et al. The interaction between waters from the Arctic Ocean and the Nordic Seas north of Fram Strait and along the East Greenland Current; results from the Arctic Ocean-02 Oden expedition [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, 55(1): 1-30.
- [15] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation[J]. *Science*, 1995, 269: 676-679.
- [16] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297-1300.
- [17] Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: driving the sea surface temperature[J]. *J of Phys Oceanogr*, 1992a, 22(17): 859-881.
- [18] Kawamura R. A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales[J]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24: 707-715.
- [19] Deser C, Blackmon M L. Surface climate variability over the North Atlantic Ocean during winter: 1900-1989 [J]. *J Climate*, 1993, 6: 1743-1753.
- [20] Slonosky V C, Mysak L A, Derome J. Linking arctic sea-ice and atmospheric circulation anomalies on interannual and decadal time scales [J]. *Atmosphere-Ocean*, 1997, 35(3): 333-366.
- [21] Zhao Jinping, Cao Yong, Shi Jiuxin. Core region of Arctic Oscillation and the main atmospheric events impact on the Arctic[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L22708. doi: 10. 1029/2006GL027590.
- [22] 牟龙江, 赵进平. 格陵兰海海冰外缘线变化特征分析[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 709-717.
- [23] Blindheim J, Østerhus S. The Nordic Seas, Main Oceanographic Features [M]. // Drange H, ed. *The Nordic seas: an integrated perspective oceanography, climatology, biogeochemistry, and modeling*. Washington D. C: AGU, 2005: 11-37.
- [24] Moune S, Sigmarsson O, Thordarson T, et al. Recent volatile evolution in the magmatic system of Hekla volcano[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255: 373-389.
- [25] Zhao Jinping, Cao Yong, Shi Jiuxin. Spatial variation of the Arctic Oscillation and its long-term change[J]. *Tellus*, 2010, 62A: 661-672.

Multiyear Variation of the Main Heat Flux Components in the Four Basins of Nordic Seas

ZHAO Jin-Ping¹, Ken Drinkwater²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Marine Research, Bergen N-5024, Norway)

Abstract: Water masses in the Nordic Seas are complex as there are imports of warm and cold ocean current, and a number of recycles. The spatial distribution of water masses is closely related with the four basins, as the water transport in Nordic Seas are carried by topography-followed currents. The differences of heat flux components in the four basins are studied to understand the spatial difference of the air-sea interaction in the Nordic Seas. The heat flux components of Greenland Sea are quite different, whose variance of shortwave radiation is 50% higher, longwave radiation is 40% higher, latent heat is 60% higher, and the sensible heat is four times than the other basins. The possible reason is its low sea surface temperature reduced by enhanced release of sensible and latent, and its low air temperature influenced by the cold air mass from the Arctic. As the highly consistent of the averaged SLP of Nordic Seas with AO index, the correlation of the heat fluxes of the four basins with AO index is analyzed to show the influence of oceanic heat on atmospheric movement. The high correlation with AO index appeared in both regions; the shortwave radiation in Icelandic Sea, and the sensible and latent heat flux in the Greenland Sea. Running correlation coefficient indicates that the high correlation processes could be divided into two periods; before 1992, the shortwave radiation in Icelandic Sea is highly correlated with AO index; After 1993, the sensible and latent heat in the Greenland Sea are closely correlated with AO index. The result of this study supports the following possibility; the sensible and latent heat release in the Greenland Sea is dominant to the atmospheric processes in the Icelandic area through the upwelled air flow to influence the cloud cover, and hence, the arriving solar radiation.

Key words: Nordic Seas; heat flux; air-sea coupling; Arctic Oscillation (AO); AO core region

责任编辑 庞 旻