

北欧海大气低空辐合辐散的东-西振荡模态及其相应的大气遥相关异常环流*

张书萌¹, 黄菲^{1,2,3**}

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 海洋高等研究院, 山东 青岛 266100; 3. 宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315000)

摘要: 北欧海作为连接北冰洋和北大西洋的重要海域,其由热效应产生的辐合场值得关注。本文利用 NECP/NCAR 的速度势函数(Velocity Potential, VP)数据表征北欧海辐合辐散场,发现在秋冬季北欧海上空大气低层存在一个独立的辐合区域。经验正交函数分解结果表明,北欧海上空的 VP 显示出除了表征北极涛动的全区一致型模态外,还表现出一个东西向辐合辐散反位相的东西振荡型模态。该模态与一支连接北大西洋涛动(NAO)和欧亚遥相关(EU)的复合型大气遥相关波列有关,北欧海表层潜热和感热异常加热通过影响低空大气的异常辐合辐散,与北大西洋偶极子型海温异常加热共同作用,加强了 NAO 异常环流;同时高空急流波导作用加强了从北欧海到东亚的 EU 波列,使得位于 NAO 和 EU 之间的北欧海成为连接 NAO 和 EU 大气遥相关波列的“中继站”,进而通过这种复合型大气遥相关波列将北大西洋与东亚大气环流联系起来,形成对东亚地区天气气候的远程影响。

关键词: 北欧海; 低空辐合; 速度势; 北大西洋涛动; 欧亚遥相关波列

中图分类号: P421.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)04-001-12

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20200136

引用格式: 张书萌, 黄菲. 北欧海大气低空辐合辐散的东-西振荡模态及其相应的大气遥相关异常环流[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 1-12.

ZHANG Shu-Meng, HUANG Fei. The east-west oscillation mode of Nordic Seas convergence field and its associated atmospheric teleconnection anomalous circulation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(4): 1-12.

北欧海由挪威海、格陵兰海和冰岛海组成,东邻斯堪的纳维亚半岛,西靠格陵兰岛东岸,北连巴伦支海和北冰洋中部海域,南接北大西洋,是沟通北冰洋海域与外界海洋的三个通道之一。比起另外两个通道:白令海峡和加拿大群岛,北欧海的宽度要大得多。作为同纬度秋冬季气温最高的区域,北欧海热收支的变化受到多种因素的影响,同时其自身变化也是影响周边区域大气、海洋演变的一大要素。作为连接北大西洋和北冰洋的重要海域,北欧海区在北大西洋暖流将热量向北输送到北冰洋的过程中起着重要的作用,同时也在北冰洋淡水输出的过程中也起到调节的作用^[1]。温暖的大西洋入流水使北欧海域成为一个秋冬季的少冰-无冰海域。在冬季,几乎无冰的北欧海成为最大的海洋暖平流输入渠道,同时也是对辐射吸收最强的海域。因此,北欧海的热效应在北极变化中起到的重要作用在近些年逐渐受到广泛重视。Schlichtholz^[2]指出,夏

季北欧海的热通量变化可能会影响整个北极冬季的环流形式。因此对于北欧海的热效应的研究有充分的必要性。

湍流热通量(Turbulent heat flux, THF)是研究一个区域热收支中的一个直观的变量,但对于北欧海的热效应来说 THF 并不是最合适的代表量。Zhao 和 Drinkwater^[3]指出,由于复杂的地形和云层条件,THF 在北欧海域的各个细分海区的变化不同。同时,THF 虽然广泛用于表示局部热量传输,但这一气象参数只能描述气-海界面的垂直热输运。为了揭示平流效应,需要一个“更大尺度”的气象参数来描述这一地区的总体热效应。考虑到北欧海的热量主要来源于近地面层,这种局地热效应伴随着大气的低空辐合和高空辐散,因此本文将着眼于对北欧海低空大气辐合辐散特征的研究。

以往的研究表明,北极涛动(AO)的核心区主要位

* 基金项目:国家重点研究发展计划项目(2019YFA0607004);国家自然科学基金项目(42075024,41906194,41575067)资助

Supported by the National Key Scientific Research Program of China (2019YFA0607004); the National Natural Science Foundation of China (42075024,41906194,41575067)

收稿日期:2020-04-30; 修订日期:2020-05-29

作者简介:张书萌(1993-),男,硕士生。主要从事气候动力学等方向的研究。

** 通讯作者:E-mail: huangf@ouc.edu.cn

于北欧海上空^[4],即北欧海区域平均的海平面气压变化可以很好地代表半球尺度 AO 的变化,同时 AO 的唯一正反馈区也出现在北欧海^[5],这表明北欧海有可能是激发 AO 的关键源汇区。速度势函数(Velocity Potential, VP)场是一个能很好地表征大气源汇分布的物理量场,因此我们选择 VP 来表示北欧海对流层低层的辐合辐散效应。这个气象变量场在低纬地区常用来表征由大气辐合或辐散而产生的热源或热汇。在中高纬度地区大气的辐合辐散并不仅仅由热源或热汇效应决定的,还包含大气的动力辐合辐散效应,因此大气的 VP 场能很好地体现由热力或动力作用造成的大气非地转分量的变化,Yang 和 Magnúsdóttir^[6]曾用 200 hPa 速度势来描述向极地的水汽输送事件。

本文将使用 VP 来表征风场辐合辐散的分布,对北欧海低层大气的辐合辐散特征进行描述和分析,研究北欧海地区 VP 的主模态时空变化特征,并进一步揭示北欧海局地的辐合辐散与大尺度大气环流遥相关的联系。

1 资料和方法

本文采用的速度势函数(VP)资料为 NCEP/NCAR 的再分析资料,时间长度为 1978—2016 年,水平分辨率为 192×94 的高斯格点,垂直方向是 sigma 坐标的 5 层,本文使用的是最低层(sigma=0.949)数据来代表近地面的大气辐合辐散状况。在这组数据中,VP 的正值代表着大气辐合;表面湍流热通量(THF)的数据由表面潜热通量(Latent heat flux, LHF)和感热通量(Sensible heat flux, SHF)相加得出;净热通量(Net heat flux, NHF)数据为 THF 叠加净长波辐射通量(Net longwave radiation flux, NLR)和净短波辐射通量(Net shortwave radiation flux, NSRF)得出;辐射通量的方向是向下为正;LHF、SHF、NLR 和 NSRF 的数据来自 NCEP/NCAR,均为月平均数据,其时间长度和格点形式与 VP 数据相同。

位势高度、气温和纬向风风速数据来自欧洲中心 ERA-Interim (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Re-Analysis)的再分析数据^[7]。数据分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 的均匀格点,时间为 1979—2016 年。

本文主要采用了经验正交函数分解(Empirical orthogonal function, EOF)、回归分析和合成分析等方法。通过 EOF 对北欧海 VP 变化进行分解,获取不同特征的模态并寻找模态相关的大尺度大气环流。应用回归分析评估北欧海 VP 模态在水平、垂直方向的影响范围和影响时间。合成分析用于分析北欧海影响大尺

度环流的具体物理机制。

2 北半球速度势函数场的气候特征

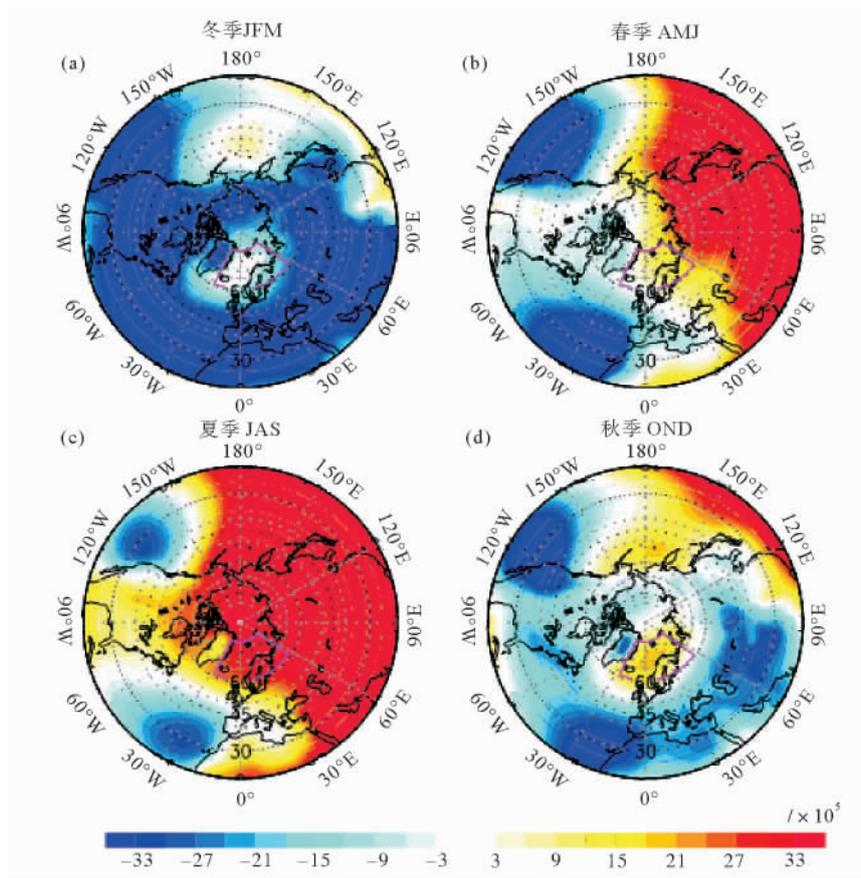
图 1 为 $20^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$ 范围的不同季节低空 VP 的多年气候平均场,可以看出春夏季节(见图 1(b)~(c))北半球中高纬度的 VP 场呈现出海-陆-海的正负相间分布特征,北太平洋东部和北大西洋上空出现两个辐散中心,欧亚大陆和西太平洋地区则为大范围的辐合区域。从春季到夏季的季节转换中,位于欧亚大陆和西太平洋上的 VP 正值区向北延伸,而在由夏至秋的季节转换中(见图 1(d))正值区呈现一致性的向南收缩。10~12 月(见图 1(d))北欧海域上空的 VP 正值区与退回北回归线附近的正值区主体部分分离,形成了一个独立的正值区。这一独立的区域的 VP 场在 12 月前保持总体正值,表明在这三个月期间,该地区有持续的风场辐合。在冬季(见图 1(a))北欧海地区的辐合区逐渐减弱并消散,表明这种独特的“独立 VP 正值区”的空间分布主要存在于 10~12 月。从图 1(d)可以看出,北欧海域上空的独立正值区是 60°N 以北高纬度极区内的唯一的正值(辐合)区。其主体位于北欧海,沿着斯堪的纳维亚半岛的西海岸,向东延伸至巴伦支海。通过对 1978—2016 年每年 10~12 月北半球低空 VP 场的分析发现:在大部分年份北欧海上空均存在显著的辐合区(图略),表明北欧海上空的辐合区不仅在气候态上显著,在年际变化上也存在明显信号。因此我们将针对这一秋冬季节存在于北欧海的 VP 独立正值区进行进一步研究。

3 北欧海速度势函数场的时空主模态特征

3.1 北极涛动模态

根据图 1 中 VP 正值区位置,本文将北欧海及周边(见图 1 中紫色框内区域, $60^\circ\text{N} \sim 80^\circ\text{N}$, $30^\circ\text{W} \sim 60^\circ\text{E}$)区域确定为研究区域。为了更深入地探究北欧海秋季(10~12 月)VP 的年际变化时空主模态特征,本文采用了 EOF 方法对研究区域内 1978—2016 年秋季(10~12 月平均)VP 进行分析。

EOF 分解的结果显示前两个模态的方差贡献分别为 73%,14%。经过 North 检验^[8]确定,前两个模态互相独立。其中 EOF 第一模态(EOF1)的空间分布呈区域一致性的正值模态分布(见图 2(a)),EOF1 的时间序列 PC1(见图 2(b))与北欧海区域平均 VP 指数相关性超过了 0.99,同时 PC1 与同时期的 AO 指数相关系数达到 0.89。这表明北欧海 VP 的年际变化最主要模态体现了 AO 的变化,也进一步证实了北欧海的确是“AO 核心区”。



(a)冬季 1~3 月;(b)春季 4~6 月;(c)夏季 7~9 月;(d)秋季 10~12 月。纬度范围为 20°N~90°N,紫色框内为北欧海区域。(a) Winter Jan.~Mar.; (b) Spring April~June; (c) Summer July~Sept.; (d) Autumn Oct.~Dec.. Inside the purple frame is the study area.)

图 1 四个季节的低层($\sigma=0.995$)速度势函数 1978—2016 气候态平均场

Fig.1 Climate mean state of surface ($\sigma=0.995$) velocity potential filed in 20°N~90°N from 1978 to 2016 for each season

3.2 北欧海东西振荡模态

第二模态方差贡献是 14.4%，其空间分布与时间序列如图 2(c), (d) 所示。从图 2(c) 中可以看出, 不同于第一模态的区域一致性, 第二模态的空间分布呈现出明显的东西向偶极子分布: 其正位相区域位于格陵兰岛东部的海域, 负位相区域位于斯堪的纳维亚半岛东部的东欧平原上, 这种分布具有明显的海-陆分布特征。从第二模态时间序列 PC2 (见图 2(d)) 来看, 第二模态的年际变化在 1970 年代末到 1980 年代末这段时间里较为显著。在前 11 年 (1978—1988) 中有 7 年的矩平超过了一倍标准差, 其中 1983 和 1984 年的矩平都接近或超过两倍标准差, 而后 28 年中仅有 8 年的矩平超过一倍标准差。

20°N~90°N 低空 ($\sigma=0.995$) VP 对 PC2 的回归场 (见图 3(a)) 表明, EOF2 的主要信号除了北欧海范围内的偶极子型分布外, 在其南方的北大西洋中纬度区域也存在显著的负相关区域。这表明北欧海的东西振荡模态并不仅仅是北欧海局地的低空大气辐合辐散造成的, 而是与北大西洋到北欧大范围的异常环流相联系。北大西洋上大气内部变率最显著的信号是北

大西洋涛动 (North Atlantic oscillation, NAO), 将 PC2 与 NAO 指数做同期相关可以发现, 该模态与 NAO 显著相关 (见图 2(d)), 相关系数达 0.56 (见表 1), 超过了 99% 的显著性检验。从高层 ($\sigma=0.210$) 的 VP 回归场可以看出, 北欧海低空大气的这种辐合辐散东西振荡主要发生在对流层中下层, 对流层上层并没有非常显著的辐合辐散变化, 只有北大西洋中部存在着低层辐散高层辐合的环流配置 (见图 3(b)), 表明北欧海上空不存在类似于热带地区深对流的垂直结构特征。

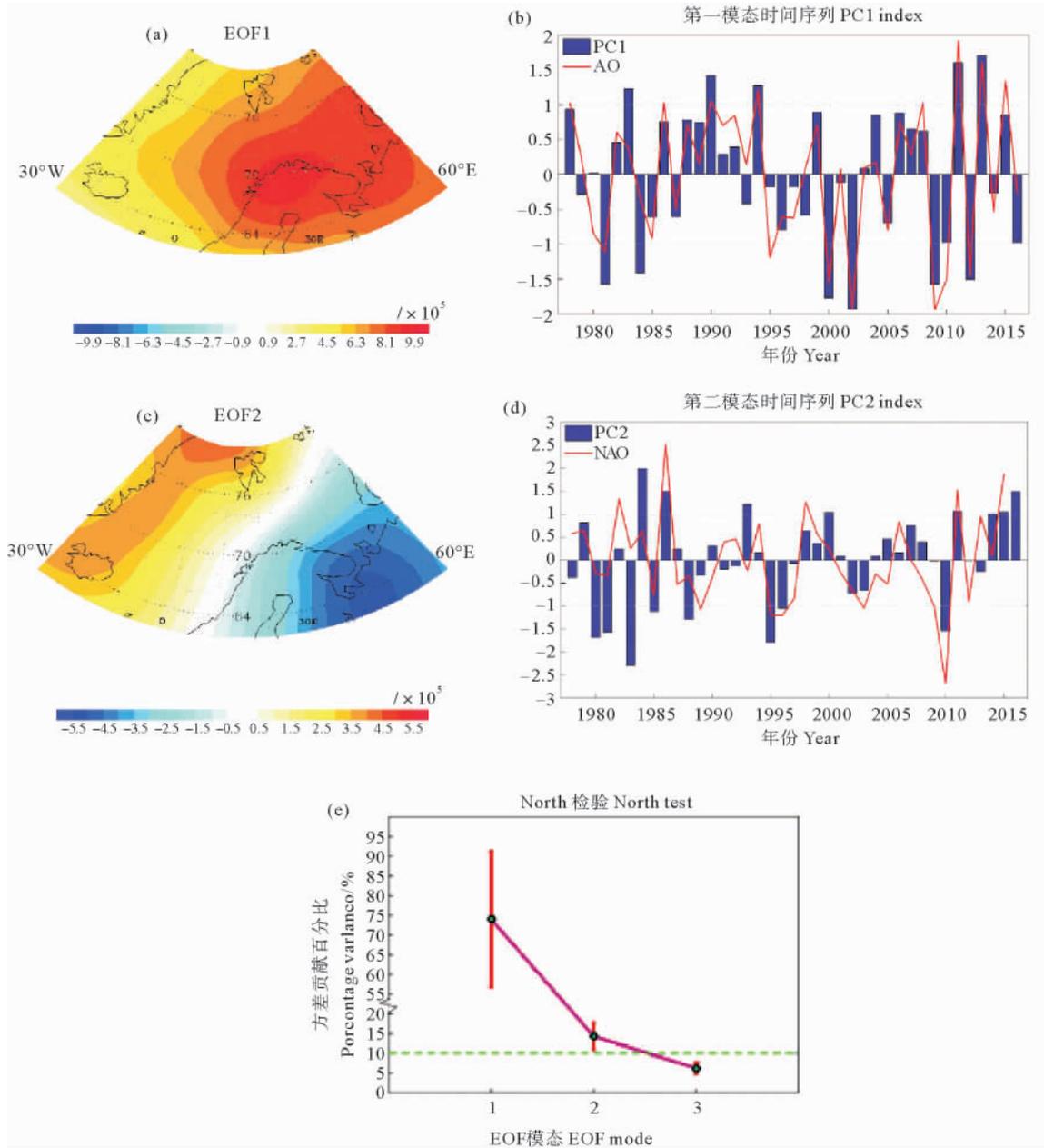
4 相应的大气遥相关异常环流

4.1 位势高度场

为了探索 EOF2 对不同高度大气的影响, 将北半球秋冬季 20°N~90°N, 300~1 000 hPa 的位势高度场回归到 PC2 (见图 4), 可以发现, 在位势高度的回归场中最显著的特征是北大西洋-格陵兰岛-斯堪的纳维亚半岛呈现出正-负-正的波列分布, 北欧海的东西反位相分布将 NAO 联系起来构成一个三极子型的波列。对比图 3(a) 中低空速度 VP 回归场中的三个显著区域, 位势高度回归场的三个显著区域均偏西。同时, 经过

对比高层和低层 VP 的回归场发现:大西洋扇区的三极子型异常分布在各个高度层均显著存在,且主体位置基本一致,显示出一种垂直方向上的准正压结构。另外,注意到在对流层上层的 300 和 500 hPa 位势高度回归场上,中亚地区出现了低层所没有的显著负异常信号,与日本海上空的正异常信号构成欧亚遥相关(EU)

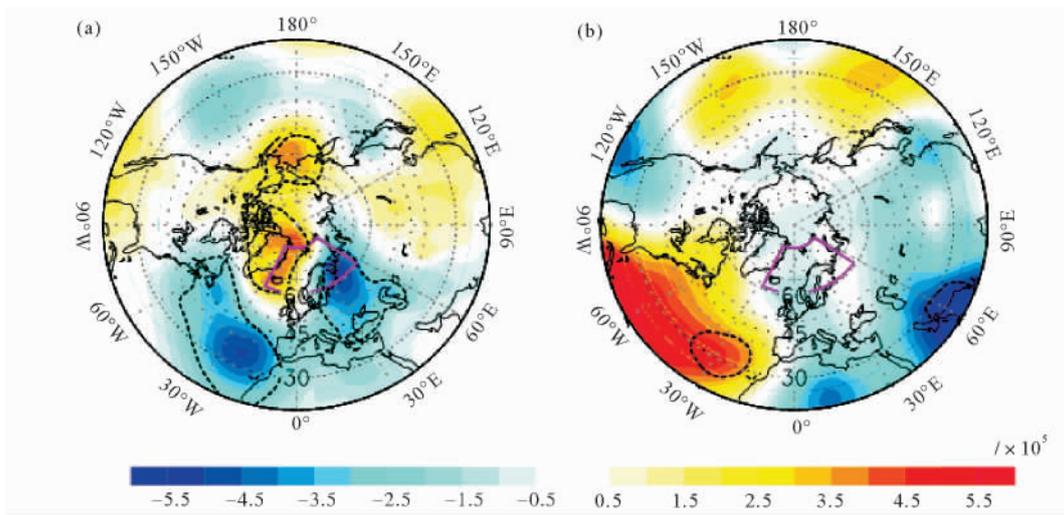
波列。北欧海的東西振荡型分布正好将东亚的显著区域与大西洋扇区的三极子型分布相联系,形成了一支连接 NAO 和 EU 的复合型大气遥相关波列。该遥相关波列在对流层的中高层信号更加显著,可能与高空急流波导的作用有关。



((a)(c)分别为第一模态和第二模态的空间场;(b)(d)中柱状为第一模态和第二模态时间序列;(b)中红线为 1978—2016 年秋冬季(10~12 月平均)AO 指数;(d)中红线为同样方式计算的同期 NAO 指数;(e)EOF 前三个模态的方差贡献百分比及其 North 检验。(a) (c) Shows the spatial distribution for EOF1&EOF2; Blue bars in (b) (d) shows the time series for EOF1&EOF2; Red line in (b) represent AO index; Red line in (d) represent NAO index. (e) The north test of EOF analyze.)

图 2 北欧海秋冬季低层速度势 EOF 前两个模态的空间场与时间序列

Fig.2 Spatial distribution and time series for the first two leading mode of Nordic Seas OND VP field



((a)为低空(sigma=0.995)速度势的回归场;(b)为高空(sigma=0.210)速度势的回归场。黑色虚线内为通过95%显著性检验的区域。(a) The lower level (sigma=0.995) VP regression field; (b) The higher level (sigma=0.210) VP regression field. Areas inside the black dash line pass the 95% significant t-test.)

图3 20°N~90°N 速度势对 PC2 的回归

Fig.3 20°N~90°N VP regress to PC2

表1 PC2,NAO,EU 遥相关波列(斯堪的纳维亚型) 指数的相关度

Table 1 The relevancy between area average PC2, NAO, EU (SCA)

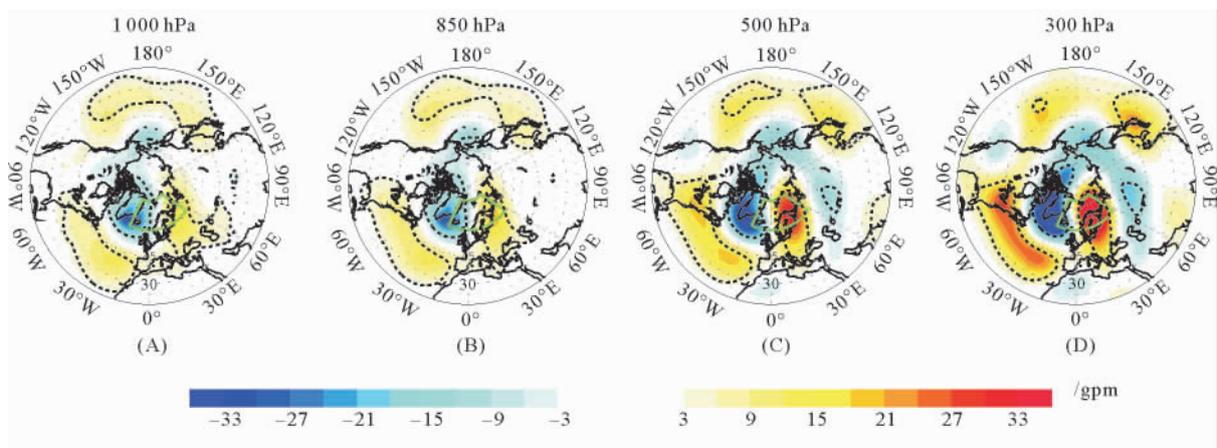
	PC2	NAO	EU(SCA)
PC2	1	0.560**	0.591**
NAO		1	0.002
EU(SCA)			1

注:三个时间序列的时间范围均为1978—2016年。**代表相关系数通过了99%信度检验。

Note: The time range of the three indexes are from 1978 to 2016.

** Represent the relevancy pass 99% confident test.

EU波列的概念首先由Wallace和Gutzler^[9]提出,是北半球主要的遥相关波列之一。EU波列位于对流层中层,东西走向横跨亚欧大陆。前人研究表明,EU波列会对亚欧大陆,尤其是东亚造成重大影响^[10-12]。刘毓赞等^[13]研究发现,冬季EU指数年际变化周期在1960—1980和1990年后存在转变,这与PC2时间序列的特点有一定的相似性。EU的计算方法为使用旋转经验正交函数(REOF)对北半球500 hPa位势高度进行分解,其分解结果中包含多种EU模态。通过与前人工作的对比,本文发现PC2与斯堪的纳维亚型EU波列(EU-SCA)模态的时间序列有最高的相关度,相关系数达到了0.59(见表1),超过99%的置信



(黑色虚线内为通过95%显著性检验的区域。Areas inside the black dash line pass the 95% significant t-test.)

图4 20°N~90°N 1 000、850、500 和 300 hPa 位势高度对 PC2 的回归场

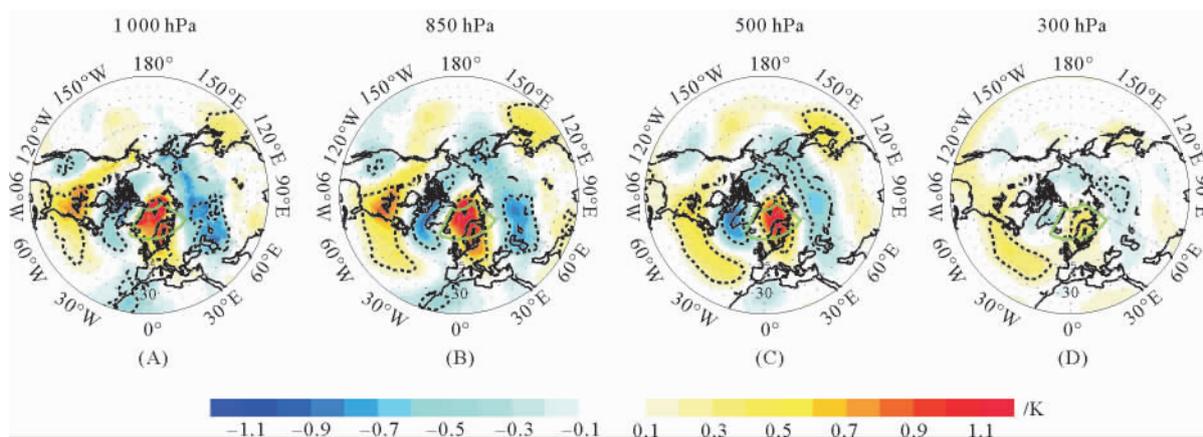
Fig.4 20°N~90°N geopotential height from 1 000、850、500 and 300 hPa regress to PC2

度检验。EU-SCA 模态特征为西欧沿岸和西伯利亚的位势高度负异常中心和斯堪的纳维亚上空的位势高度正异常中心,与对 PC2 的 500 hPa 回归场(图 4(c))中的遥相关波列模态有一定的相似性。

4.2 气温场

在 1 000、850 以及 500 hPa 气温的回归场中(见图 5(a)、(b)、(c))也可以发现类似的横贯北美-大西洋-欧亚的波列状异常分布,其位置和位势高度回归场中的异常信号位置存在一定的位相差。同时作者发现在对流层的中低层,气温的这种遥相关波列信号更强,而对

流层的高层 300 hPa 上信号显著减弱,这可能反映了秋季北欧海海洋对低空大气的异常加热作用更强,高空则急流的动力作用可能更强些。北欧海上空大气位势高度在对流层中下层主要与上游的 NAO 遥相关波列的变化一致,而在对流层的中上层则还与 EU 波列的向下游传播有关。因此我们认为,北欧海的大气源汇就像一个信号的“中继站”,把上游的 NAO 和下游的 EU 两个大气遥相关波列信息联系了起来。因此,北欧海 VP 的东西振荡型模态,可能是链接 NAO 和 EU 大气遥相关的纽带。



(黑色虚线内为通过 95% 显著性检验的区域。Areas inside the black dash line pass the 95% significant t-test.)

图 5 20°N~90°N 1 000、850、500 和 300 hPa 气温对 PC2 的回归场

Fig.5 20°N~90°N temperature from 1 000、850、500 and 300 hPa regress to PC2

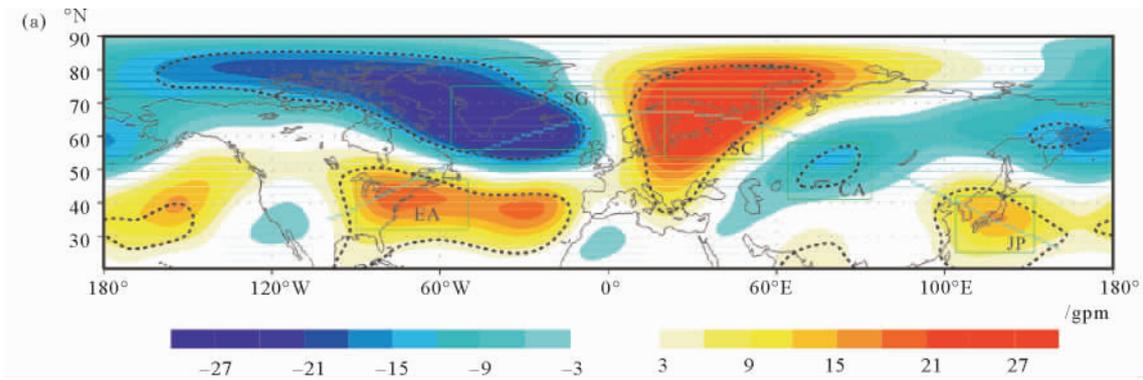
5 NAO-EU 联合遥相关波列“中继站”作用的机制分析

5.1 NAO-EU 联合遥相关波列的传播特征

为了进一步了解 NAO-EU 波列的传播特点,选取 500 hPa 位势高度对 PC2 的回归场进行进一步分析,利用图 6(a)中的位势高度异常场的 5 个极大(小)值中心,拟合出一条连接由北美东岸、格陵兰岛南部海域、斯堪的纳维亚半岛、中亚至日本海的“大圆波列”传播路径。

选取 PC2 中典型正负位相(标准差绝对值大于 1)年份中“大圆波列”传播路径上各个点的 500 hPa 位势高度进行合成分析,其中典型正位相年份为 1984、1986、1988、1993、2000、2011、2015 和 2016 年,典型负位相年份为 1980、1981、1983、1985、1988、1995、1996 和 2010 年,时间跨度为 9 月 1 日至次年 1 月 31 日,共 5 个月。由图 6(b)、(c)可见,无论是在第二模态典型正位相还是典型负位相下,从 10 月开始均能观测到由

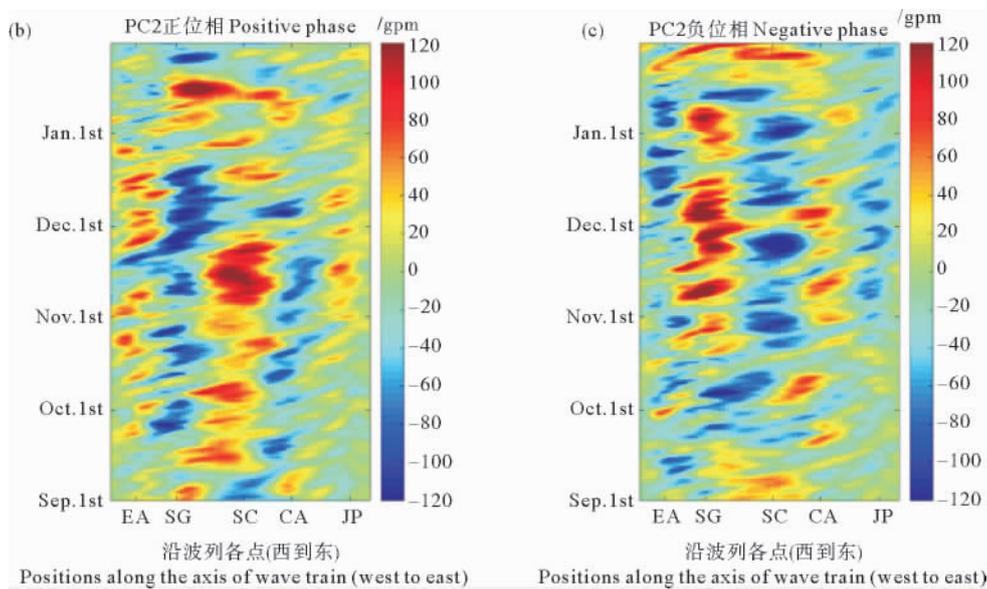
北美东岸向日本海即自西向东的位势高度异常传播,证实了 500 hPa 位势高度对 PC2 的回归场中的“大圆波列”的确为存在上下游效应的真实信号,是欧亚遥相关波列的一种。从持续时间上来看,由五个异常区组成的“两波半”结构在 10 月中旬左右出现,格陵兰南部和斯堪的纳维亚半岛的信号最为突出,中亚到日本海的位势高度异常相对偏弱但同样明显。对于北美东岸地区,中亚-日本海在 PC2 典型正位相年份中从 10 月初到 12 月底均有显著正异常信号,而在 PC2 典型负位相年份的显著负异常信号在 11 月才出现。这可能是由于这一高度场异常信号存在于北美东岸-北大西洋海域的广阔区域,且正负位相下异常中心位置不同,导致这一区域的实际异常中心不一定在假定波列传播路径附近。位势高度回归场中的“两波半”异常结构在次年 1 月后逐渐转化为一波结构,即第二模态的影响主要在 10~12 月这段时间,且波动的传播主要发生在 10~11 月的秋季,这可能与北欧海秋季来自海表面的异常加热有关^[9]。



(浅蓝色线为波列假定路线, 黑色虚线内为通过 95% 显著性检验的区域。The wathet blue line is the assumed wave train route, Areas inside the black dash line pass the 95% significant t-test.)

图 6(a) 500 hPa 北半球位势高度对 PC2 的回归场

Fig.6(a) 20°N~90°N geopotential height from 500 hPa regress to PC2



(图中 EA、SG、SC、CA 和 JP 分别代表北美东部、格陵兰南部、斯堪的纳维亚半岛、中亚以及日本海。EA, SG, SC, CA and JP refers to east North America, south of Greenland, Scandinavia, Centro Asia and Japan Seas.)

图 6(b)、(c) PC2 典型正负位相下沿波列假定路线的逐日位势高度异常

Fig.6(b)、(c) Daily geopotential height anomaly along the assumed wave train route in PC2 positive/negative phase

5.2 下垫面非绝热加热的贡献

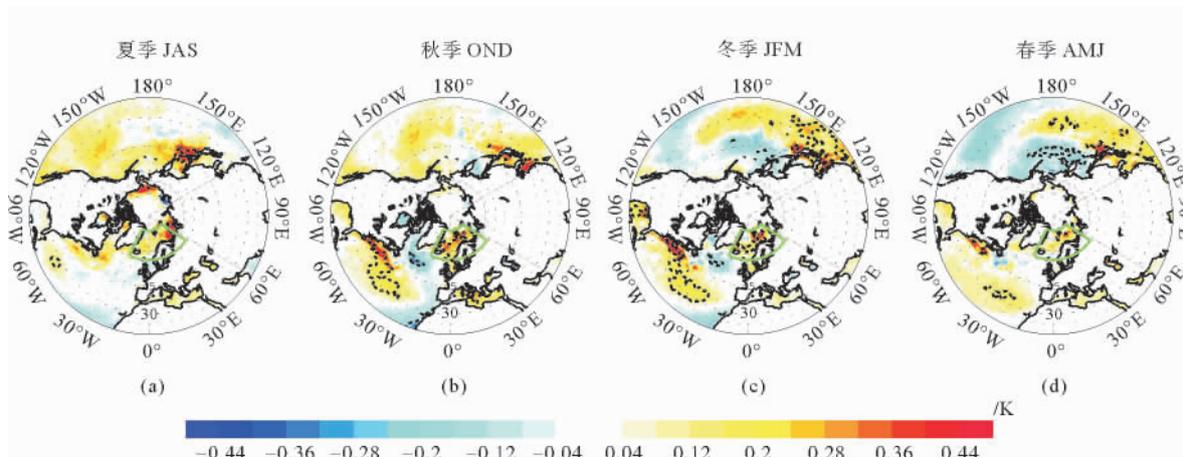
NAO-EU 联合遥相关波列由 500 hPa 的一系列位势高度异常组成, 路径通过了北大西洋、北欧海、斯堪的纳维亚半岛、中亚、日本海这几个热力性质不同的下垫面。为了了解海温在 NAO-EU 波列传播过程中的作用, 将四个季节(前期 7~9 月, 同期 10~12 月, 后期次年 1~3 月, 后期次年 4~6 月)的 SST 回归到 PC2, 在 10~12 月, 北大西洋扇区存在一个偶极子型的海温异常, 与北欧海海温异常共同构成了一个三极子型海温异常(见图 7(b)), 分别对应着图 4(a) 中 500 hPa 位势高度在北美东岸、格陵兰南部、堪的纳维亚的异常中心。北大西洋海表面温度的这个三极子型分布可以持续到其后期的冬春季节, 有利于加强 NAO-EU 联合遥

相关波列的上游环流。

大气异常加热的垂直分布, 影响着高低空大气环流的不同异常响应。将沿波列格点上 1 000~100 hPa 各层的 10~12 月平均气温(1978—2016)回归到 PC2 (见图 8), 可以发现, 沿 NAO-EU 联合遥相关波列, 气温的异常在对流层也出现冷暖相间的波列分布, 且在 300 hPa 上下出现相反的温度异常结构。根据气压倾向方程, 当非绝热加热随高度增加(减小)时, 等压面高度将降低(升高), 这里可以看到, 在存在 SST 正异常的北美东岸(EA)、北欧海(SG 与 SC 之间)和日本海(JP)上空, 气温异常随高度的增加而减弱, 有利于位势高度的升高; 而在格陵兰(SG)和中亚地区(CA), 300 hPa 以下为冷异常, 其上为暖异常, 对应着非绝热加热随高度

增加,有利于等压面的降低产生低压异常。这种异常分布很好地解释了 NAO-EU 遥相关波列的位势高度场(见图 4)上的正压波列的结构特征,300 hPa 正好处

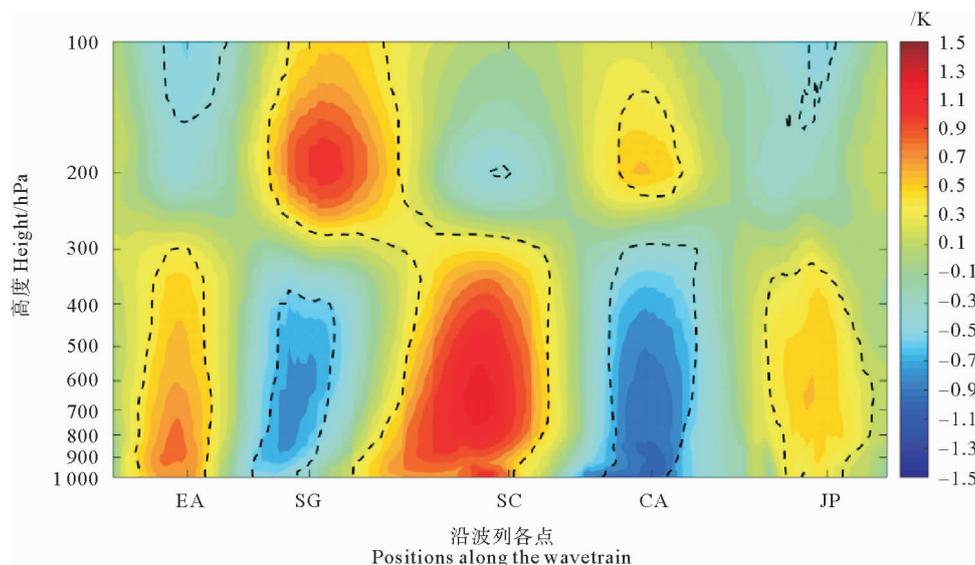
于对流层上层冷暖反位相的交界面,因此 300 hPa 气温场上的异常波列信号最弱(见图 5(d))。



(黑色虚线内为通过 95% 显著性检验的区域。Areas inside the black dash line pass the 95% significant t-test.)

图 7 四个季节((a)7~9月、(b)10~12月、(c)次年1~3月以及次年(d)4~6月)的 SST 对 PC2 的回归

Fig.7 SST in four seasons regress to PC2



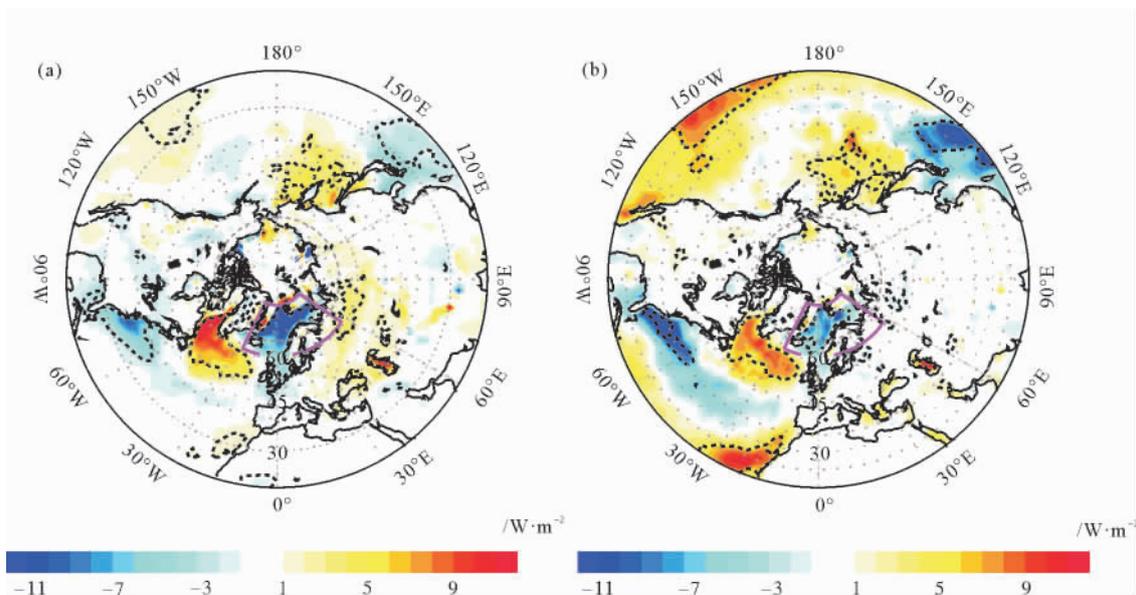
(x 轴位置与图 6 (b)(c)中的相同。The positions of x axis are same with Fig.6(b)(c).)

图 8 沿波列假定路线 10~12 月平均(1978—2016)气温对 PC2 回归的位置-高度场

Fig.8 October-December averaged (1978—2016) temperature (regress to PC2) position-height filed along the assumed wave train route

从图 8 我们还注意到在北欧海区域(SG 和 SC 之间)300 hPa 以下的对流层中气温异常出现两个最大中心,一个在近地面的 1 000 hPa,另一个在 600~700 hPa 的对流层中下层,这可能与该区域同时受较强的感热(见图 9(a))和潜热(见图 9(b))加热有关。与北大西洋-北欧海的 SST 的三极子型异常分布(见图 7)相一致,感热和潜热都呈现出三极子型的异常分布。在 SST 正(负)异常区域,感热和潜热均为负(正)异常,表

明海洋向大气放热(吸热),加热(冷却)了大气,使得大气出现异常的高压或低压响应,形成大气遥相关异常波列。北欧海正处于北大西洋南北偶极子型的 NAO 遥相关波列的北支和 EU 遥相关波列的西极之间,其感热和潜热异常加热的共同作用有利于维持北欧海区域的東西辐合辐散的振荡型分布,有利于北欧海成为连接 NAO 和 EU 的“中继站”。



(虚线内部分通过 95% 显著性 t 检验。Areas inside the black dash line pass the 95% significant t-test.)

图 9 秋冬季(10~12月)20°N~90°N 表面感热通量(a)和潜热通量(b)对 PC2 的回归场

Fig.9 OND northern hemisphere (20°N~90°N) surface sensible heat flux (a) and latent heat flux (b) regress to PC2

5.3 西风急流波导的贡献

前文中,我们从下垫面非绝热加热的角度解释了 PC2 对应的 NAO-EU 遥相关波列在北大西洋与 NAO 拥有显著相关的原因。但未能解决 4.1 中提出的为何位于中亚-日本海的位势高度异常波列在高空(300、500 hPa)比低空(850、1 000 hPa)信号更为显著的问题。显然,异常波列的亚洲段(中亚-日本海)受到了与北大西洋段(北美东岸-格陵兰-斯堪的纳维亚)不同因素的主导。从高空动力因素的角度出发,作者发现 300 hPa 纬向风对 PC2 的回归场中存在显著的风速增强异常(见图 10(a)),其中最强的风速异常位于北大西洋极锋急流东侧。300 hPa 纬向风回归场中北大西洋扇区也存在类似 NAO 和非绝热加热的三极子分布,与位势高度场的异常波列分布(见图 4)满足一致的风压关系。在西风急流下游的东亚地区,对应 NAO-EU 联合波列的亚洲段,东亚急流区的北侧也出现了风速异常增强,这有利于来自北大西洋的异常信号沿西风波导向下游传播。为了证明东亚上空的波动信号是来自上游的北大西洋,本文绘制了 PC2 典型正负位相下的 T-N 波作用量^[14]及其对应的准地转流函数(Quasi-geostrophic stream function, QG-SF)场(见图 10(b)、(c))。在 PC2 典型正负位相下都能看到沿图 6(a)中假定波列路径的波作用量信号。在中纬度准地转条件下,QG-SF 与 500 hPa 位势高度对 PC2 的回归场的分布基本一致。因此,可以确定波列从北大西洋向东北经过北欧海的“中继站”作用,再向东向南方向向下游传播,NAO-EU 波列从欧洲到东亚的传播中,高空急流波导起了重要作用。低空大西洋海洋的非绝热加热贡献较强,对

NAO-EU 波列的大西洋段产生较强作用,而亚洲大陆上没有强的下垫面异常加热的补充,高空急流波导作用占据主导。这解释了为何位于中亚-日本海的位势高度异常波列在高空比低空信号更为显著的问题。

6 结论与讨论

本文使用了 NCEP/NCAR 的 VP 资料,发现了秋冬季节北欧海低空存在一个独立的辐合区。在此基础上使用 EOF 分解得到了区域一致性的第一模态和东西振荡型的第二模态。其中第一模态作为北欧海 VP 的年际变化最主要模态,体现了 AO 的变化,进一步证实了北欧海的确是 AO 的核心区。从 VP 回归场中作者发现,北欧海的東西振荡模态与北大西洋到北欧大范围的异常环流相联系,而不仅仅体现北欧海局地的低空大气辐合辐散。东西振荡模态的时间序列 PC2 与 NAO 的高相关说明这是一个与北大西洋联系更紧密的模态。在高层位势高度对 PC2 的回归场中存在一支连接 NAO 和 EU 的复合型大气遥相关波列。因此,北欧海 VP 的东西振荡型模态可能是链接 NAO 和 EU 大气遥相关的纽带。各高度气温和位势高度对 PC2 的回归场中匹配的异常信号表明,北欧海表面的异常加热形成的辐合可能与这一复合型大气遥相关波列相关。在 PC2 的正负位相年份这种自东向西传播的位势高度异常信号都显著存在,波列的正负中心分布在北美东岸、格陵兰南部、斯堪的纳维亚半岛、中亚和日本海,且这种“两波半”结构的波列仅存在于 10~12 月,在之后次年 1 月转化为准一波的模式。

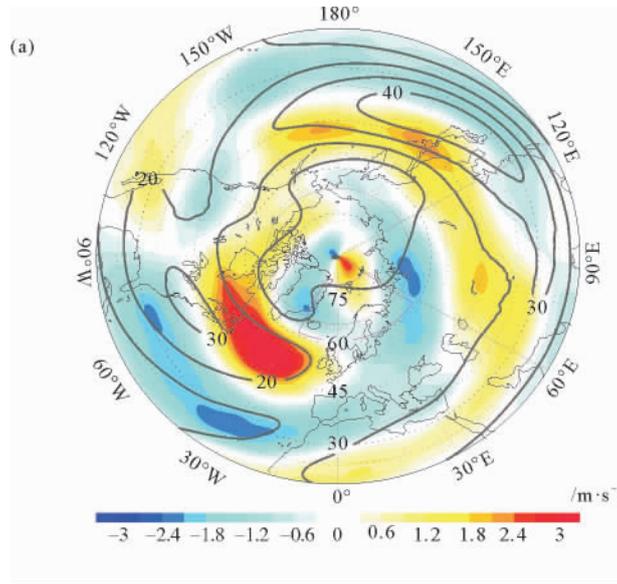


图 10(a) 秋冬季 300 hPa 纬向风速对 PC2 的回归(填色)及秋冬季 300 hPa 纬向风气候态(等值线)

Fig.10(a) OND 300 hPa zonal wind regress to PC2 (shading) and the climate mean state of 300 hPa zonal wind (contour)

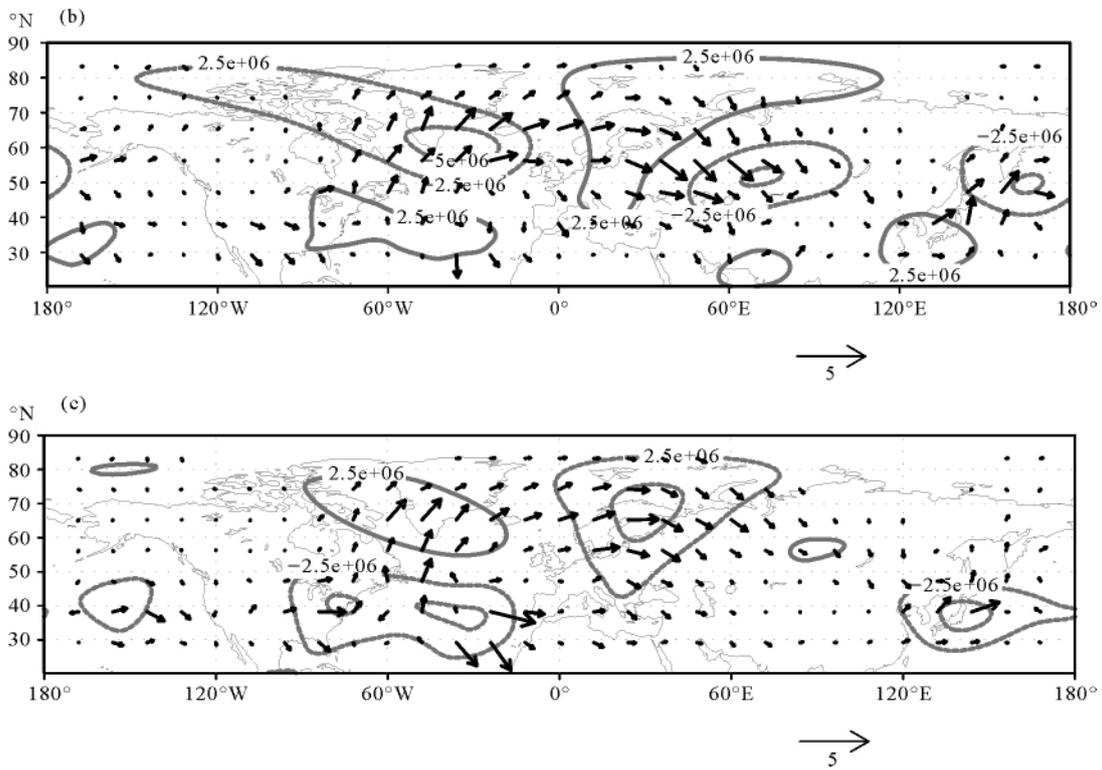


图 10(b)、(c) PC2 典型正(负)位相下的 T-N 波作用量(箭头)及对应的准地转流函数(等值线)

Fig.10(b)、(c) T-N wave activity flux (arrow) and its corresponding quasi-geostrophic steam function (contour) in PC2 positive/negative phase

在 SST 和沿波列不同高度气温对 PC2 的回归场中,发现北大西洋海温偶极子异常和北欧海海温异常组成的三极子型海温的异常分布,在北大西洋扇区加强了类 NAO 的大气遥相关异常。在对流层中上层,由于高空急流波导的作用,加强了北欧-中亚-日本海的 EU 大气遥相关波列,处于 NAO 和 EU 之间的北欧海

因此成为了连接这两个大气遥相关波列的“中继站”,造成北大西洋的异常信号对东亚异常环流的远程影响。

北欧海位于 EU 遥相关波列的路径和 NAO 之间。通过对该复合型大气遥相关波列的研究表明,北欧海的东西振荡模态可能是连接北大西洋与东亚大气环流

相联系的纽带。对于下游的东亚(日本海)地区来说, 北欧海 VP 的东西振荡模态具有一定的预报意义, 具体影响途径和物理机制有待后续工作的进一步研究。

参考文献:

- [1] Segtnan O H, Furevik T, Jenkins A D. Heat and freshwater budgets of the Nordic Seas computed from atmospheric reanalysis and ocean observations[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2011, 116, C11003, doi: 10.1029/2011JC006939.
- [2] Schlichtholz P. Empirical relationships between summertime oceanic heat anomalies in the Nordic seas and large-scale atmospheric circulation in the following winter[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47 (5-6): 1735-1753.
- [3] Zhao J, Drinkwater K. Multiyear variation of the main heat flux components in the four basins of Nordic Seas[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 37(2): 165-179.
- [4] Zhao J, Cao Y, Shi J X. Core region of arctic oscillation and the main atmospheric events impact on the arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(22): L22708.
- [5] Zhao J, Drinkwater K, Wang X. Positive and negative feedbacks related to the Arctic Oscillation revealed by air-sea heat fluxes[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2019, 71(1): 1596519.
- [6] Yang W, Magnusdottir G. Springtime extreme moisture transport into the arctic and its impact on sea ice concentration[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122: 5316-5329.
- [7] Berrisford P, Kállberg P W, Kobayashi S, et al. Atmospheric con-
servation properties in ERA-Interim[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(659): 1381-1399.
- [8] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [9] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter[J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(4): 784-812.
- [10] Takaya K, Nakamura H. Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(23): 9445-9461.
- [11] Wang L, Chen W. An intensity index for the East Asian winter monsoon[J]. *J Climate*, 2014a, 27: 2361-2374. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00086.1
- [12] Wang L, Chen W. The East Asian winter monsoon: reamplification in the mid-2000s[J]. *Chin Sci Bull*, 2014b, 59: 430-436. doi: 10.1007/s11434-013-0029-0.
- [13] 刘毓赞, 陈文. 北半球冬季欧亚遥相关型的变化特征及其对我国气候的影响[J]. *大气科学*, 2012, 36(2): 423-432.
Liu Y, Chen W. Variability of the Eurasian teleconnection pattern in the Northern Hemisphere winter and its influences on the climate in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2012, 36(2): 423-432.
- [14] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(6): 608-627.

The East-West Oscillation Mode of Nordic Seas Convergence Field and Its Associated Atmospheric Teleconnection Anomalous Circulation

ZHANG Shu-Meng¹, HUANG Fei^{1,2,3}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Physical Oceanography Laboratory/Institute of Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

Abstract: As an important water connecting Arctic Ocean and North Atlantic, the Nordic Seas is of special concern for its heating effect and convergence/divergence field. This paper uses the velocity potential (VP) data from NCEP/NCAR to represent the convergence field over Nordic Seas. In October to December (OND) the climate state of VP shows an isolated convergence area over Nordic Seas. Except an area consist mode which represent the Arctic oscillation (AO) variation, an east-west oscillation mode is also found in the empirical orthogonal function result for Nordic Seas OND VP field. The east-west oscillation mode is related to a complex atmospheric teleconnection wave train connecting the North Atlantic Oscillation (NAO) and Eurasian teleconnection (EU). By effecting the low-level atmosphere convergence field, surface latent and sensible heating over Nordic Seas can consist with the heating by North Atlantic SST dipole anomaly, together strengthen the NAO anomaly circulation. At the same time, the high-altitude jet stream waveguide effect strengthen the wave train from Nordic Seas to East Asia, making Nordic Seas becomes the "relay station" which connecting the NAO and EU atmospheric teleconnection wave train, and then connects the north Atlantic with the east Asian atmospheric circulation through this composite atmospheric teleconnection wave train, forming the remote influence on the weather and climate in East Asia.

Key words: Nordic Seas; low-level convergence; velocity potential; North Atlantic oscillation; Eurasian teleconnection

责任编辑 庞旻