杨宁,闫敏慧,陈农,等.2024. Rossby波传播特征及其对北极东北航道起始段海域天气的影响研究[J].暴雨灾害,43(5):551-559. YANG Ning, YAN Minhui, CHEN Nong, et al. 2024. Study on the propagation characteristics of Rossby wave and its influence mechanism on weather at the initial section of the Northeast Passage in the Arctic [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):551-559 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-089

Rossby波传播特征及其对北极东北航道起始段海域天气的影响研究

杨宁,闫敏慧,陈农,钱眺,王蕾,张金峰,周莹
(黑龙江省气象服务中心,哈尔滨 150030)

摘 要:北极东北航道起始段海域位于我国黄渤海,大风和强降水是可能威胁到该海域航运安全的主要灾害性天气类型。其中寒潮天气过程伴随的冷空气大风以及热带气旋、温带气旋等天气系统产生的大风、强降水等灾害性天气,对该海域航运安全造成很大影响。利用1991—2020年美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)全球逐日再分析资料,分析了北极东北航道适航期(7—10月)Rossby波沿高空急流能量传播特征及其对北极东北航道起始段海域天气的影响,特别是对强降水的影响。结果表明:(1)沿北半球副热带地区250 hPa高空西风急流轴经向风表现为纬向三波型准静止的Rossby波形态;(2)高空250 hPa大气准静止Rossby波波源位于地中海地区,波动在此激发并沿急流向东传播,传播过程中波动能量耗散,但波源即地中海地区能量的不断注入,使其得以维持和加强;(3)波作用通量散度指数与北极东北航道起始段海域降水量、风速相关系数绝对值达0.5以上,其中位于我国东北部至鄂霍茨克海地区的波作用通量指数与降水量和风速相关系数的绝对值均接近0.9,属于强相关,说明Rossby波沿高空急流传播时能量汇集、加强,对北极东北航道起始段海域的降水量、风速影响较大,从而可触发强降水、大风等灾害性天气;(4)当Rossby波扰动偏强时,向下游传播能量偏强,则西风急流加强,垂直上升运动增强,导致北极东北航道起始段海域降水异常偏多。

关键词: Rossby波;北极东北航道;波作用通量散度;波源
中图法分类号: P461⁺.2　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-089

Study on the propagation characteristics of Rossby wave and its influence mechanism on weather at the initial section of the Northeast Passage in the Arctic

YANG Ning, YAN Minhui, CHEN Nong, QIAN Tiao, WANG Lei, ZHANG Jinfeng, ZHOU Ying

(*Heilongjiang Meteorological Service Center*, *Harbin* 150030)

Abstract: The initial section of the Arctic Northeast Passage is located in the Yellow Sea and Bohai Sea of China. The severe weather types that may threaten the safety of shipping in this area are mainly strong winds and heavy precipitation. Among them the cold air gale accompanied by the cold wave process, as well as the disastrous weather such as strong wind and heavy precipitation caused by weather systems such as tropical cyclones and extratropical cyclones, have a great impact on shipping safety in this area. Based on the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) global daily reanalysis data from 1991 to 2020, we analyze the energy propagation characteristics of the Rossby wave along the upper-level jet stream during the seaworthiness period (July to October) of the Arctic Northeast Passage and its impact on the weather in the initial section of the Arctic Northeast Passage, especially on heavy precipitation. The results are as follows. (1) The meridional wind along the 250 hPa westerly jet axis in the subtropical region of the Northern Hemisphere shows a zonal three-wave quasi-stationary Rossby wave pattern. (2) The atmospheric quasi-stationary Rossby wave source at 250 hPa is located in the Mediterranean region. The wave is excited here and propagates eastward along the jet stream. Although the wave energy is dissipated during the propagation process, continuous input of energy from the Mediterranean region maintains and strengthens the wave. (3) The absolute value of the correlation coefficient

收稿日期: 2023-05-04;**定稿日期:**2023-11-09
资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021D017)
第一作者: 杨宁,主要从事专业气象预报及中期天气过程研究。E-mail:yangn77@163.com
通信作者: 闫敏慧,主要从事专业气象预报研究。E-mail:1076031215@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

between the key area of the wave action flux divergence and the precipitation and wind speed in the initial section of the Arctic Northeast Passage is greater than 0.5. While the absolute value of the correlation coefficient between the key area wave action flux index and the precipitation and wind speed is close to 0.9, indicating a strong correlation, it shows that the energy of the Rossby wave is concentrated and strengthened when it propagates along the upper jet stream, significantly influencing the precipitation and wind speed in the initial section of the Northeast Passage of the Arctic, thus triggering disastrous weather such as heavy precipitation and strong winds. (4) When the Rossby wave disturbance is stronger, the downstream propagation energy is also stronger. The westerly jet is then strengthened, and the vertical upward motion is enhanced. This results in an abnormal increase in precipitation in the initial section of the Arctic Northeast Passage.

Key words: Rossby wave; Arctic Northeast Passage; wave action flux; wave source

引 言

在全球气候变暖的背景下，近几十年北极区域表层气温升温幅度较大，海冰覆盖范围显著减少(Gao et al.，2015；Shi et al.，2015；区丽连等2021)。桂大伟等(2019)、季青等(2021)研究发现，随着北极海冰大规模缩减，北极航道适航性逐渐提高。北极航道是指穿越北冰洋，连接太平洋和大西洋的海上航线集合。“东北航道”以大西洋为坐标原点，由巴伦支海出发，经过欧亚大陆北方，穿过白令海峡到达太平洋北极东北航道较传统航道航程更短、海运成本更低、避开东南亚和索马里地区海盗的威胁安全性更高等优点突出，但天气、气候条件制约着北极东北航道通航，北极东北航道起始段海域位于我国黄渤海强降水、大风、低温冰冻等灾害性天气均对起始段海域出行安全航行构成威胁，因此对北极东北航道起始段海域灾害性天气开展气候态研究对后续气象预报意义重大。

前人研究过海冰冰情与船舶的破冰能力两大因素对北极东北航道船舶航行风险的影响(Zhang et al.，2020)。李振华(2017)利用北极海冰密度数据，提取分析北极东北航道的通航窗口、水域通航情况和海冰密集度等冰情要素的变化情况，确定了北极东北航道的通航条件。刘泉宏(2022)指出应用深度学习进行海冰预报，从而降低海冰变化机理的复杂性和海冰预报的不确定性为北极航道航行安全带来的风险。我国是近北极国家，对北极航道的研究起步较晚，在北极航道研究领域成果相对较少(间力，2011；胡麦秀，2020)，对北极航道的研究主要集中在海冰状况、航道开通意义以及法律地位等层面，气象要素(风速、降水等)对北极东北航道航行影响的研究甚少，对北极东北航道灾害性天气规律认识不足。

研究表明，行星波活动的异常必然造成大气环流的持续性异常(贾建颖等，2020)。学者Yeh (1949)开创性地提出了大尺度大气长波(Rossby波)的频散理论，使得大气环流演变中的“上游效应”得到了很好的解释，2005年波射线理论被应用于研究低频Rossby波能量的传播特征，并且其在传统波流相互作用的理论基础上，证明了波能关系与大气能量循环关系的一致性，说明Rossby波波动能量的传播过程实质是大气能量循环的一部分(冉令坤等，2005；张若楠等，2018；俞子闲等，2020)。史文丽等(2021)指出准静止Rossby波频散形成遥相关波列，对亚洲甚至全球的天气和气候都有重要影响。部分学者研究表明沿急流传播的Rossby波能量频散及扰动影响我国夏季降水异常分布，是造成东亚夏季大气环流的季节循环提前和延迟的主要原因(李娜等，2020；杨宁等，2020；Yuan et al.，2022)。

由于航海运输的航程时段一般较长，海事部门更关注提前量在10 d以上的该类产品的预测产品，但目前国内外中期和短期气候趋势预测准确率仍偏低，因此气候预测方面的相关研究具有重要的应用价值。本文研究气候系统中大气的能量交换，以气候态及大尺度波动作为主要研究内容，研究北极东北航道起始段海域气候特征以及大尺度波动传播对该海域天气的影响，分析波动传播特征及其与北极东北航道起始段海域气象要素变化的联系，并以强降水天气为例，研究Rossby波传播对起始段海域灾害性天气的影响机理，以期丰富北极东北航道起始段海域天气预测的气候态理论，为北极东北航道起始段海域的气象服务提供支撑。为方便研究，本文将经纬度范围(120°—150°E，30°—45°N)定义为北极东北航道起始段海域。

1 资料和方法

1.1 资料说明

采用1991—2020年适航期(7—10月)共30 a美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction，NCEP)的全球逐日再分析资料，包括：(1) 分布在17层等压面上的水平纬向风、水平经向风和位势高度场，水平分辨率为2.5°×2.5°，格点数为144×73；(2) 整层可降水量，水平分辨率为2.5°×2.5°。

1.2 研究方法

1.2.1 *滤波方法*

大气扰动由多种尺度波动形成，扰动场为剔除纬向平均零波的多种尺度波合成，本文采用傅里叶(Fourier)谐波变换，对所需资料进行谐波分析。谐波分析是

对某一时间序列(周期为任意的已知周期T)，将其当作是由基波与许多的谐波成倍数的叠加，其基本周期是该序列的长度(即$T=n$)，将其称为基波，而其余波的频率分别是基波频率的2，3，4，……，p倍，称为谐波，则频率分别为基波的1/2，1/3，1/4，……，1/p (其中，p为谐波数)。

1.2.2 涡度源方程

根据Sardeshmukh等(1988)的研究，由于大气中的大尺度辐散风场主要与非绝热加热不均及大地形有关，所以异常的涡度源S'基本上代表了定常的外部强迫源对大气定常行星波的强迫。对流层上层定常辐散场所产生的涡度源可以表示为

$$S'=-\overline{V}_x\cdot\nabla\xi'-V_x'\cdot\nabla(\overline{\xi}+f)-(\overline{\xi}+f)D'-\xi'\overline{D} \tag{1}$$

其中，$\overline{V}_x$为夏季气候平均的辐散风，V_x'为夏季气候异常的辐散风，$\overline{\xi}$为夏季气候平均的相对涡度，ξ'为夏季气候异常的相对涡度，$\overline{D}$为夏季气候平均的散度，D'分别为夏季气候异常的散度。

1.2.3 波作用通量诊断方程

比较大气动力学中三种Rossby波诊断方法的特征差异和实用性发现，Takaya和Nakamura(1997)所推广的plumb波作用通量，更适用于复杂的环流背景场，可以更好地描述振幅较大的西风带Rossby波扰动，它是波动能量传播的一种度量，水平分量可以表示Rossby波波动能量的水平传播方向以及能量的强弱。

$$W=\frac{P}{2|U|}\begin{vmatrix}U(\psi_x'^2-\psi'\psi_{xx}')+V(\psi_x'\psi_y'-\psi'\psi_{xy}')\\U(\psi_x'\psi_y'-\psi'\psi_{xy}')+V(\psi_y'^2-\psi'\psi_{yy}')\\\frac{f_0^2}{S^2}\left|U(\psi_x'\psi_p'-\psi'\psi_{xp}')+V(\psi_y'\psi_p'-\psi'\psi_{yp}')\right|\end{vmatrix} \tag{2}$$

其中，W为波作用通量，为准地转扰动流函数，U和V是平均气流的基本流场(矢量)，p为气压除以1 000 hPa，为水平风速的气候值，S^2为静力稳定度参数。

$$\nabla\cdot W=\frac{\partial W_x}{\partial x}+\frac{\partial W_y}{\partial y} \tag{3}$$

在西风条件下，波作用通量表现为一个矢量，该矢量的方向与Rossby波能量传播方向相同，也与波动群速度的矢量方向相同，其绝对值的大小与波动能量的传播速度成正比。$W>0$时，波作用通量辐散，表示波作用的输出，平均西风加强，这主要是科氏力产生的西风加速的趋势；反之，$W<0$时，波作用通量辐合，代表波作用的汇合，平均西风减弱。

2 北极东北航道适航期Rossby波沿高空急流传播特征分析

图1给出北极东北航道示意图。图2a为1991—2020年北极东北航道适航期(指7—10月，下同)北半球250 hPa平均纬向风场空间分布。分析可知，北半球副热带地区上空存在一条风速大值带，急流带上风速分别在欧洲和北美洲西岸减弱，形成北美至大西洋东部和中东至太平洋东部的两个相对独立的东西半球急流带，后者为本文所研究的Rossby沿其传播的高空急流带，在沿40°N的高空西风急流轴上存在三个风速大值中心。图2b给出的经向风空间分布中，沿急流轴经向风在长波尺度上交替出现，南北风转化的经向风零值及其附近为西风极大值区域，对应西风急流轴上的三个风速大值中心，表现为沿高空急流上纬向三波型准静止的Rossby波形态。此外，在亚洲急流入口区黑海附近南风最强，超过6 m·s^{-1}，科氏力作用于南

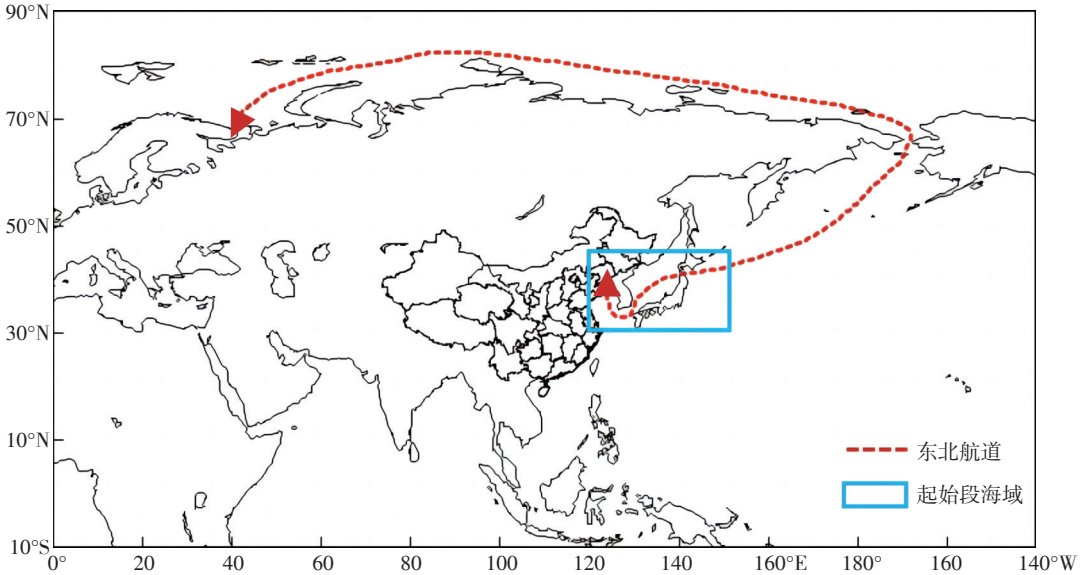


图1 北极东北航道起始段海域相对位置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the area at the initial section of the Northeast Arctic Passage

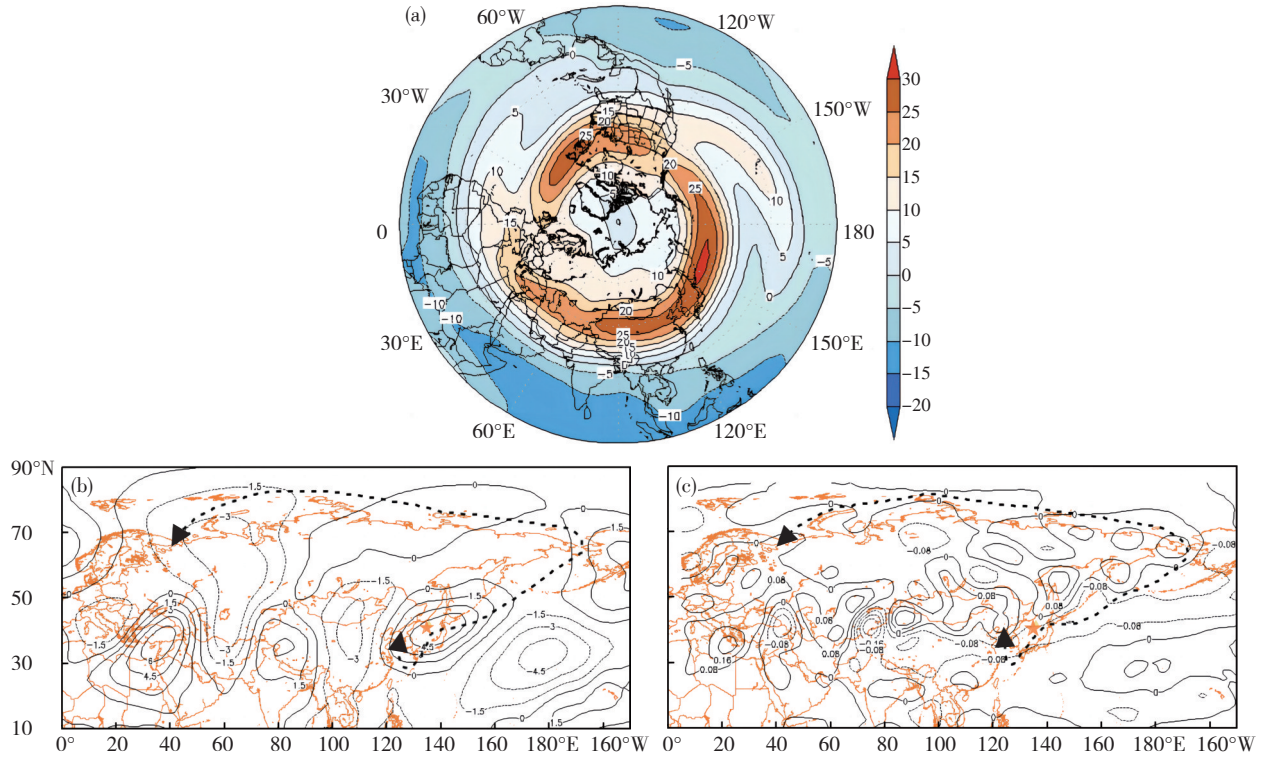


图2 1991—2020年北极东北航道适航期北半球250 hPa平均纬向风场(a,单位:m·s^{-1},图中最外围纬圈是赤道)、平均经向风场(b,单位:m·s^{-1})和涡度源S′(c,单位:10^{-11} s^{-2})的空间分布(黑虚线为北极东北航道示意图)

Fig. 2 Average zonal wind field (unit: m·s^{-1}, the outermost latitude circle in the figure is the equator), (b) Average meridian wind field (unit: m·s^{-1}), and (c) Vorticity source S' (unit: 10^{-11} s^{-2}) at 250 hPa in the northern hemisphere during the seaworthiness period from 1991 to 2020 (The black dotted line is a schematic diagram of the Northeast Passage of the Arctic)

风有利于西风加强,准静止Rossby波列被激发并沿急流向东传播,在亚洲急流出口区180°E附近受北风控制,科氏力作用于北风有利于西风减速,准静止Rossby波列经向风速度沿西风急流东传过程中发生减速。

从1991—2020年250 hPa定常辐散场强迫出的异常涡度源空间分布(图2c)可见,正涡度源异常大值中心在地中海地区,即此处为Rossby波上游波源,波动由此激发,正负涡度源沿西风急流轴交替出现,并向东逐渐减弱,图中主要表现为沿40°N的正涡度源异常极大值中心位于地中海地区,其东侧为一位于40°E附近的负涡度源异常次大值中心,向东传播,其下游我国新疆北部有一正涡度源异常中心;在鄂霍次克海地区也有一个正涡度源异常大值中心,其中心值与地中海地区异常大值中心相同,说明该地区同样为Rossby波波源区,可激发Rossby波继续向东向南传播,其南部日本海附近为一负涡度源异常区。

采用波作用通量的水平分量来诊断250 hPa上准静止Rossby波能量的水平传播特征以及波流相互作用(Liu et al.,2017;李慧等,2019)。从波作用通量散度分布(图3)上来看,强的辐合辐散中心基本位于25°—50°N的高空西风急流控制区,地中海至里海为波作用通量的最强辐散区,波动由此激发并沿急流向东、向南传播,向东传播的水平波作用通量逐渐减弱,北极东北航道起始段海域主要受160°E附近的高空西风急流大值区的偏西风控制,强降水等灾害性天气多发生在急流轴南侧动力强迫抬升区域,这种急流轴南侧的强的波流相互作用将影响北极东北航道起始段海域。波动传播理论指出,Rossby波能量的频散路径易从静止波数较小的区域折向较大的区域,急流区是静止波数的极大值区,波动能量频散由波源出发,折向急流区,然后沿着急流轴传播。Rossby波自地中海至里海地区(波作用通量散度关键区Ⅰ:10°—40°E,30°—40°N)向下游频散,波动能量在伊朗高原上空堆积,继续东传至青藏高原西部地区有一波作用通量辐散次大值中心(波作用通量散度关键区Ⅱ:70°—90°E,27°—37°N),反映波作用通量的输出,促使西风加强,波动能量下游传播过程中能量强度有所减弱,至我国东南部为弱波作用通量辐散区,但我国东北部至鄂霍茨克海地区存在另一个波作用通量辐散大值中心(波作用通量散度关键区Ⅲ:120°—160°E,40°—55°N),对应上述正涡度源异常大值中心。上述分析表明,此处存在异常环流强迫源,可激发Rossby波能量向下游传播,波矢量向东南直指日本南部海域,使得向下游频散的Rossby波能量得以补充加强,

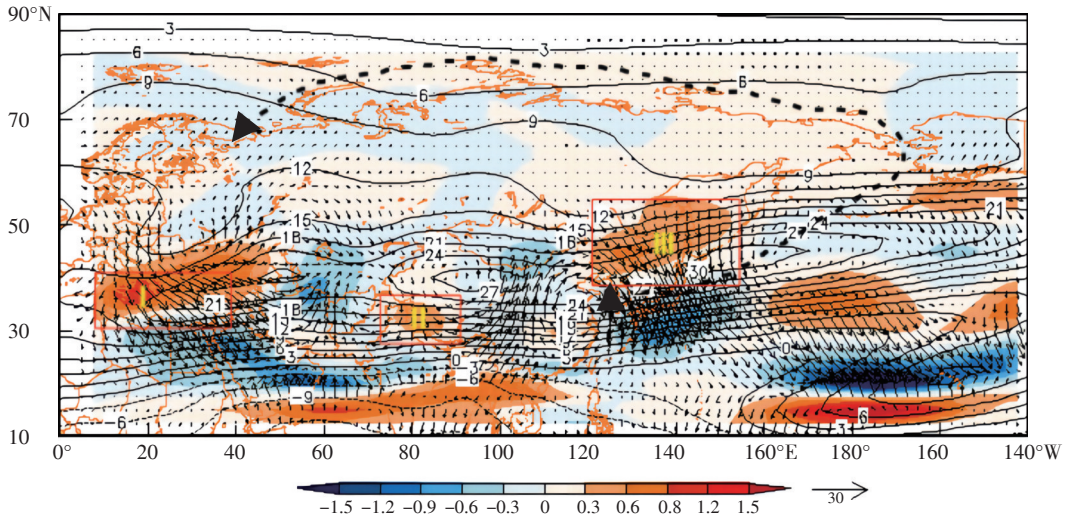


图3 1991—2020年北极东北航道适航期北半球250 hPa水平波作用通量(箭矢，单位：$m^2 \cdot s^2$)和波作用通量散度(填色，单位：$10^{-6}\ m \cdot s^2$)以及平均纬向风场(等值线，单位：$m \cdot s^{-1}$)分布图(I、II、III分别代表文中定义的三个波作用通量散度关键区)

Fig. 3 The horizontal wave action flux (arrow vector, unit: $m^2 \cdot s^2$), wave action flux divergence (color-filled, unit: $10^{-6}\ m \cdot s^2$), and mean zonal wind field (isoline, unit: $m \cdot s^{-1}$) distribution map at 250 hPa in the northern hemisphere during the seaworthiness period from 1991 to 2020. (I, II, and III represent the three key regions of wave action flux

在该海域有强的波作用通量辐合中心，波动能量在此地汇合，利于北极东北航道起始段海域灾害性天气的发生和维持。

3 Rossby波传播特征与研究海域灾害性天气变化的关系

为研究Rossby波传播对北极东北航道起始段海域灾害性天气(主要为大风和强降水)的影响，采用可代表准静止Rossby波传播和波流相互作用的波作用通量散度指数(用W表示)，研究其与北极东北航道南端起始段海域的整层可降水量及风速之间的关系。

3.1 波作用通量散度与研究海域气象要素随时间演变特征分析

从波作用通量散度指数与航道起始段海域整层可降水量随时间演变(图4)来看，航道起始段海域整层可降水量从7月初上升，至7月下旬达极大值，随后降水量逐步减少。三个波作用通量散度指数随时间变化曲线与整层可降水量随时间变化表现为反向振荡

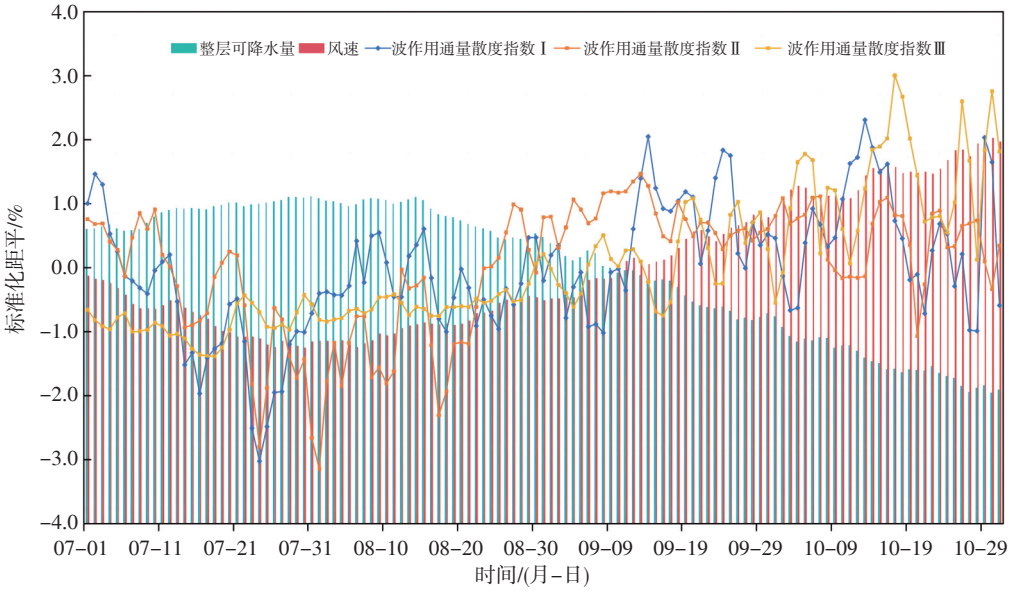


图4 1991—2020年北极东北航道起始段海域适航期波作用通量散度指数标准化距平与整层可降水量和平均风速标准化距平随时间演变曲线

Fig.4 The normalized anomaly of wave action flux divergence index, the normalized anomaly of precipitable water vapor, and average wind speed variations in the sea area of the initial section of the Arctic Northeast Passage during the seaworthiness period from 1991 to 2020

趋势。计算波作用通量散度指数与整层可降水量的线性相关系数(表1)可见，二者线性相关系数均为负值且通过了α=0.05的显著性水平t检验，波作用通量散度指数与起始段海域整层可降水量为显著负相关关系，说明波作用通量散度关键区Rossby波辐合偏强时，整层可降水量偏多，同时对比三个关键区与整层可降水量相关系数大小可知，波作用通量散度关键区Ⅲ与整层可降水量相关性最好，该区域位于起始段海域上游地区，说明波作用通量散度关键区Ⅲ的Rossby波能量频散与起始段海域整层可降水量密切相关，波动能量变化则降水量大小随之显著变化。

表1 1991—2020年北极东北航道适航期波作用通量散度指数与气象要素相关系数

Table 1 The correlation coefficient between wave action flux divergence index and meteorological factors in the Northeast Passage of the Arctic during the navigable period (from 1 July to 31 October) from 1991 to 2020

关键区	波作用通量指数与整层可降水量相关系数	波作用通量指数与风速相关系数
Ⅰ	−0.49*	0.51*
Ⅱ	−0.52*	0.55*
Ⅲ	−0.87*	0.86*

*表示通过α=0.05的显著性水平t检验

由波作用通量散度指数标准化距平与航道起始段海域平均风速标准化距平随时间变化曲线(图4)可见航道起始段海域风速随时间演变先降后升，八月上旬为风速最小时段，并与波作用通量散度指数W-Ⅰ、W-Ⅱ、W-Ⅲ随时间变化大体呈同步振荡趋势。由表1可知风速与三个波作用通量散度指数呈显著正相关关系，且相关性较高，均通过了α=0.05的显著性水平t检验，其中，指数W-Ⅲ与起始段海域风速相关系数最大，均达0.8及以上，说明波动能量沿高空西风急流轴传播，航道起始段海域风速受波作用通量散度关键区Ⅲ处Rossby波活动最大，当该散度关键区Rossby波辐散偏强时，Rossby波能量偏强且传播速度较快，波流相互作用偏强，则风速偏大。

3.2 Rossby波传播与研究海域气象要素相关性分析

为更细致地分析和验证Rossby波传播与北极东北航道研究海域气象要素之间的联系，本文采用可代表准静止Rossby波传播和波流相互作用的波作用通量散度指数，研究其与北极东北航道南端起始段(120°—150°E，30°—45°N)及东段(150°—180°E，45°—60°N)海域的整层可降水量和风速之间的关系。

图5a为起始段海域整层可降水量与波作用通量散度场相关系数分布(东段海域分布图略)，可以看出整层可降水量与波作用通量散度场相关性好，即降水量大小受波动能量频散强度影响较大，且显著负(正)相关区域位置分布与波作用通量辐散(辐合)关键区相吻合，表明上游波作用通量强辐合时，起始段海域整层可降水量偏多；分析起始段海域风速与波作用通量散度场相关系数分布(图5b)可知，显著正(负)相关区域位置分布与波作用通量辐散(辐合)关键区相吻合，表明起始段、东段海域(东段海域分布图略)风速与波作用通量三个辐散关键区强度同步变化，风速强弱变化与Rossby波能量频散的强弱有较好的相关关系，说明当上游波作用通量强频散，波流相互作用较强时，研究海域风速较大。

4 Rossby波传播对北极东北航道起始段海域强降水天气影响机理分析

本文以强降水为例，研究Rossby波传播对北极东北航道起始段海域灾害性天气影响机理。1991—2020年北极东北航道起始段海域适航期整层可降水量标准化序列(图6)中，标准化距平百分率大于1.0的年份为降水正异常年，定义为强降水年(包括1998、

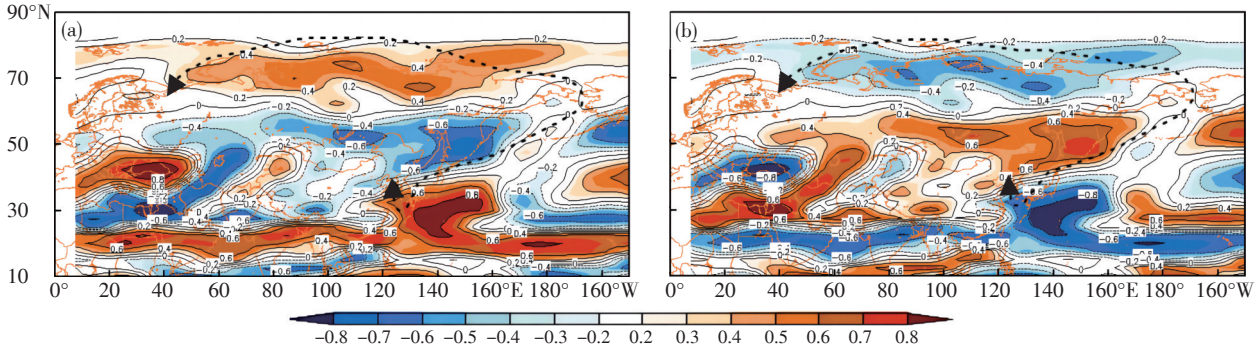


图5 1991—2020年北极东北航道适航期起始段海域整层可降水量与波作用通量散度场相关系数分布图(a)和起始段海域风速与波作用通量散度场相关系数分布图(b)

Fig.5 (a) The correlation coefficient distribution of the whole layer of precipitable water and wave action flux divergence field in the initial section of the sea area and (b) the correlation coefficient distribution of wind speed and wave action flux divergence field in the initial sea area during the navigable period of the Arctic Northeast Passage from 1991 to 2020

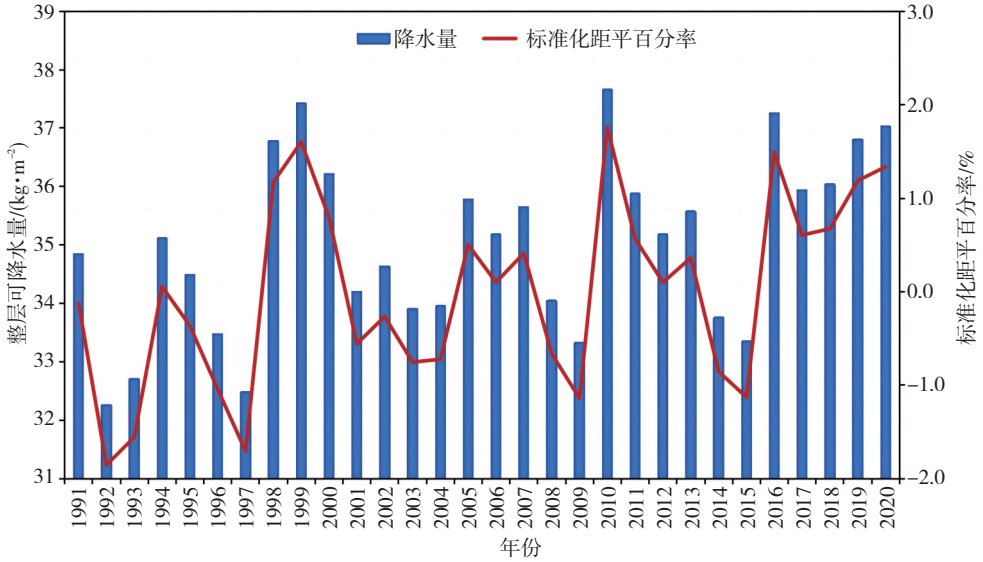


图6 1991—2020年北极东北航道起始段海域适航期整层可降水量(单位：kg·m^{-2})与标准化距平逐年变化(单位:%)

Fig.6 The precipitable water (unit: kg·m^{-2}) and standardized anomaly of the whole layer in the sea area of the initial section of the Arctic Northeast Passage changed year by year (unit: %) during the seaworthiness period from 1991 to 2020

1999、2010、2016、2019、2020年，共6a，下同)。

图7给出强降水年份涡度源距平场、波作用通量距平场、位势高度距平场以及垂直速度距平场合成图，由图7a可见，正负涡度源沿西风急流轴交替出现，正涡度源极大值中心位于鄂霍次克海地区，表明此处为Rossby波波源，激发Rossby波向东向南传播，同时研究涡度源距平场发现，起始段海域为涡度源负距平区域，其上游地区为涡度源正距平区域，说明强降水年份起始段海域受其上游正涡度源异常扰动影响，波源扰动偏强，Rossby波能量偏强；分析强降水年份波作用通量散度及纬向风距平分布(图7b)可见，纬向风正距平区域主要位于40°N以南地区，急流位置偏南，

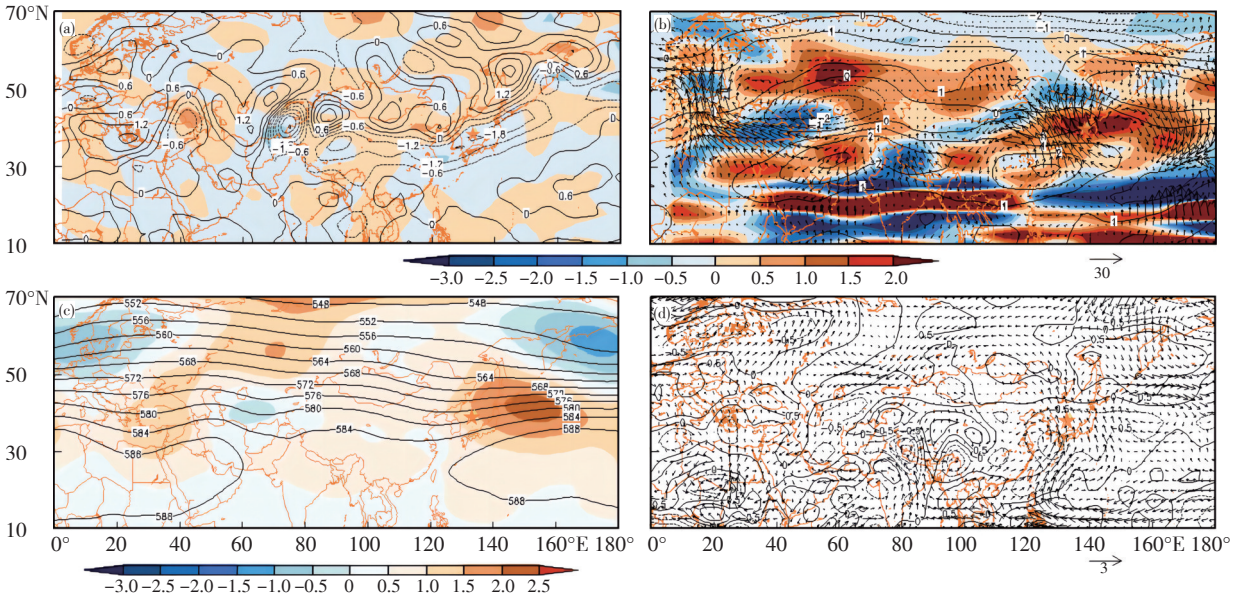


图7 1991—2020年北极东北航道起始段海域适航期强降水年份250 hPa涡度源S'(等值线，单位：10^{-11} s^{-2})和涡度源距平(填色，单位：10^{-11} s^{-2}) (a)，250hPa纬向风距平(等值线，单位：m·s^{-1})和波作用通量散度距平(填色，单位：10^{-6} m·s^{2})以及波作用通量距平(箭矢，单位：m^{2}·s^{2}) (b)，500 hPa位势高度场(等值线，单位：dagpm)和位势高度距平场(填色，单位：dagpm) (c)，850hPa垂直速度距平(等值线，单位：10^{-2}Pa·s)和风场距平(箭矢，单位：m·s^{-1})(d)合成图

Fig.7 The composite maps of the characteristics during heavy precipitation years in the initial section of the Arctic Northeast Passage during the seaworthiness period from 1991 to 2020. (a) 250hPa vorticity source S' (contour, unit: 10^{-11} s^{-2}) and vorticity source anomaly distribution (shadow, unit: 10^{-11} s^{-2}), (b) 250hPa zonal wind anomaly (contour, unit: m·s^{-1}), wave action flux divergence anomaly (shadow, unit:10^{-6} m·s^{2}) and wave action flux anomaly (arrow, unit: m^{2}·s^{2}), (c) 500–hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and geopotential height anomaly field (shadow, unit: dagpm), (d) 850 hPa vertical velocity anomaly (contour, unit: 10^{-2} Pa·s) and wind field anomaly (arrow, unit: m·s^{-1})

同时鄂霍茨克海地区有急流正异常大值中心，起始段海域位于该大值中心入口区，且受波作用通量散度强辐散控制，波流相互作用导致该区域西风加强，波作用通量散度三个关键区处均为波作用通量散度负距平区，负距平值达-3×10^{-6} m·s^2，与前文3.1所得结论相符，即波作用通量散度关键区强辐合时，起始段海域降水偏强，对应降水正距平年，且波作用通量矢量距平值较大，强降水年份Rossby波能量传播偏强，Rossby波对其下游大气环流的调制作用有利于位于急流入口区的起始段海域低空急流和对流上升运动的发展；由图7c可见，西北太平洋副热带高压呈带状分布，起始段海域受上游短波槽东移影响，盛行西南风，同时受有利于降水的西低东高位势高度距平形势控制；由图7d可见，强降水年份起始段海域受850 hPa异常偏南风影响，同时低层850 hPa存在垂直上升运动，低层西南暖湿气流和水汽输送显著增强，进而导致降水异常偏多。降水异常偏多大多为强对流天气引发的强降水所致，故强降水年份容易产生下击暴流、阵风锋、短时强阵风等影响航运安全的灾害性天气。

5 结论与讨论

利用1991—2020年7—10月NCEP逐日再分析资料，研究了Rossby波沿高空急流活动的频散、能量传播及其与北极东北航道起始段海域适航期气象要素间的关系，并以强降水为例分析了Rossby波传播对灾害性天气的影响机理，得出以下主要结论：

(1) 北半球副热带地区250 hPa上空存在高空西风急流带，沿急流轴经向风表现为纬向三波型准静止的Rossby波形态，在急流入口处准静止Rossby波列被激发并沿急流向东传播。

(2) 地中海地区为北极东北航道适航期Rossby波的波源，波动由此激发，波列自西向东传播，波动能量在传播过程中产生摩擦耗散，但上游能量的注入，使其得以维持和加强，Rossby波波动能量的传播影响整个波作用通量场辐合辐散中心的分布和强弱。

(3) 波作用通量散度指数与北极东北航道起始段海域的整层可降水量以及风场相关性显著，随时间振荡的规律性较好，即Rossby波的传播和能量变化对北极东北航道起始段海域的降水量、风速影响较大。

(4) 研究Rossby波传播对起始段海域强降水的影响机理发现，北极东北航道起始段海域降水异常偏多年份，Rossby波扰动偏强，向下游传播能量偏强，西风急流加强，垂直上升运动增强，高低空配置有利于起始段海域降水异常偏多。

本文采用波作用通量方法，对北极东北航道适航期北半球上空沿高空急流Rossby波传播特征和波动能量与北极航道起始段海域气象要素的关系进行了研究，探讨了波源处强信号特征，该研究结果对北极东北航道起始段海域灾害性天气中期预报分析具有一定的指示意义。但针对上游系统波动的传播及其对下游海域天气异常的影响研究不够深入，缺少对多种类型的灾害性天气异常形成机理的研究，是下一步需要深入探讨的重点问题。

参考文献(References):

桂大伟,庞小平,雷瑞波,等.2019.北极海冰输出区域海冰运动变化特征及其与北极航道适航性的关系[J].海洋学报(中文版),38(8):101–110. Gui D W, Pang X P, Lei R B, et al. 2019. Changes in sea ice kinematics in the Arctic outflow region and their associations with Arctic Northeast Passage accessibility [J]. Acta Oceanologica Sinica,38(8):101–110 (in Chinese). doi:10.1007/s13131–019–1451–1

胡麦秀,冀丙蕾.2020.依托北极东北航道建设"冰上丝绸之路"研究综述[J].海洋开发与管理,37(2):12–18. Hu M X, Ji B L. 2020. A summary of studies on the 'Ice Silk Road' based on the construction of the Arctic Northeast Passage [J]. Ocean Development and Management, 37(2):12–18 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1005–9857.2020.02.002

季青,董江,庞小平,等.2021.北极东北航道夏季海冰冰情与适航性分析[J].船舶力学,25(8):991–1000. Ji Q, Dong J, Pang X P, et al. 2021. Analysis of sea ice conditions and navigability of Arctic Northeast Passage in summer [J]. Journal of Ship Mechanics,25(8):991–10002 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007–7294.2021.08.002

贾建颖,刘毅.2020.夏季南亚高压对流层中上层异常暖中心时空分布特征及其激发的大气波动[J].地球物理学报,63(10):3626–3639. Jia J Y, Liu Y. 2020. Spatial–temporal characteristics of the Asia high warm center and atmospheric waves excited by it in upper troposphere [J]. Chinese Journal of Geophysics,63(10):3626–3639 (in Chinese). doi:10.6038/cig2020N0162

间力.2011.北极航道通航环境研究[D].大连:大连海事大学. Jian L. 2011. Research on the navigable environment of arctic shipping routes [D]. Dalian: Dalian Maritime University. doi:10.7666/d.y1895847

李振幅,陈卓,关云潇.2020.北极"通实力":从北极联通到大北极和泛东北亚[J].东北亚经济研究,4(1):69–84. Li Z F, Chen Z, Guan Y X. 2020. Arctic 'Connective Power': From the Arctic Unicomto the Great Arctic and Pan–Northeast Asia [J]. Northeast Asia Economic Research, 4(1):69–84 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:DBYA.0.2020–01–010

李娜,肖子牛,赵亮.2020. 2018年夏季东北极端高温事件物理机制分析[J].气候与环境研究,25(5):469–482. Lin, Xiao Z N, Zhao L. 2020. Analysis on the mechanism of the 2018 summer extreme high temperature event in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research, 25(5):469–482 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2020.19100

李振华.2017.基于冰情分析的北极东北航道通航条件研究[D].大连:大连海事大学. Li Z H. 2017. Study on navigation conditions of the northeast arctic passage based on ice analysis [D]. Dalian:Dalian Maritime University

李慧,陆尔,翟盘茂,等.2019. Rossby波和热带对流活动对2010年6月梅雨发生前后我国东部两次强降水过程的影响[J].大气科学学报,42(6):

824–834. Li H, Lu E, Zhai P M, et al. 2019. The impact of Rossby waves and the tropical convection activities on two precipitation events occurring before and during the June 2010 Meiyu period [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,42(6):824–834 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170321001

刘泉宏,张韧,汪杨骏,等. 2022.深度学习方法在北极海冰预报中的应用[J].大气科学学报,45(1):14–21. Liu Q H, Zhang R, Wang Y j, et al. 2022. Application of deep learning methods to Arctic sea ice prediction [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(1):14–21 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211009002

潘常虹,李振福,孙冬石.2020.基于 Stackelberg 博弈的中国投资北极航道沿线港口开发策略[J].资源科学,42(11):2106–2118. Pan C H, Li Z F, Sun D S. 2020. Strategy of China's investment in Arctic Passage development based on Stackelberg game theory [J]. Resources Science,42(11):2106–2118 (in Chinese). doi:10.18402/resci.2020.11.05

区丽连,付东洋,刘贝,等.2021.基于 AMSR–2 微波遥感数据的北极海冰面积时空变化[J].广东海洋大学学报,41(6):64–72. Ou L L, Fu D Y, Liu B, et al. 2021. Spatio–temporal variation of arctic sea ice area based on AMSR–2 microwave remote sensing data [J]. Journal of Guangdong Ocean University,41(6):64–72 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–9159.2021.06.008

冉令坤,高守亭,李崇银. 2005.辐散风作用下低频 Rossby 波的能量传播[J]. 气象学报,63(1):13–20. Ran L K, Gao S T, Li C Y. 2005. Propagation of low–frequency Rossby wave with divergent wind [J]. Acta Meteorologica Sinica,63(1):13–20 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577–6619.2005.01.002

史文丽,费建芳,黄小刚,等.2021.热带气旋 Rossby 波能量频散问题研究进展,地球物理学报,64(3):752–764. Shi W L, Fei J F, Huang X G, et al. 2021. Advances in the research of Rossby wave energy dispersion of tropical cyclone [J]. Chinese Journal of Geophysics,64(3):752–764 (in Chinese), doi:10.6038/cjg2021N0425

杨宁,金荣花,肖天贵,等.2020.夏季沿亚洲副热带西风急流 Rossby 波传播及其与我国降水异常的联系[J].气象,46(1):114. Yang N, Jin R H, Xiao T G, et al. 2020. Propagation of Rossby wave along Asian subtropical westerly Jet in summer and its impact on anomaly of precipitation in China [J]. Meteorological Monthly,46(1):1–14 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2020.01.001

俞子闲,郭栋,李丽平,等.2020.南亚高压区 Rossby 波能量向上穿越对流层顶传播的特征与机制[J].地球物理学报,63(1):73–85. Yu Z X, Guo D, Li L P, et al. 2020. The characteristics and mechanism of Rossby–wave energy vertical propagation crossing tropopause in South Asia High region [J]. Chinese Journal of Geophysics,63(1):73–85 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2020L0626

张若楠,孙丞虎,李维京.2018.北极海冰与夏季欧亚遇相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响[J].地球物理学报,61(1):91–105. Zhang R N, Sun C H, Li W J. 2018. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China [J]. Chinese Journal of Geophysics,61(1):91–105 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2018K0755

Gao Y O, Sun J O, Li F, et al. 2015. Arctic sea ice and Eurasian climate: a review [J]. Advances in Atmospheric Sciences,32(1):92–114. doi:10.1007/s00376–014–0009–6

Liu Z L, Pang C G. 2017. The rhines elfect on the geographical characteristics of altimeter–observed eddies [J]. Acta Oceanologica Sinica,36(9):10–14. doi:10.1007/s13131–017–1105–0

Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence [J]. Journal Of The Atmospheric Sciences,45(7):1228–1251. doi:10.1175/1520–0469(1988)045<1228:tgogrf>2.0.co;2

Shi L J, Lu P, Cheng B, et al. 2015. An assessment of arctic sea ice concentration retrieval based on "HY–2" scanning radiometer data using field observations during CHINARE–2012 and other satellite instruments [J]. Acta Oceanologica Sinica,34(3):42–50. doi:10.1007/s13131–015–0632–9

Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave–activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. Geophysical Research Letters,24(23):2985–2988. doi:10.1029/97GL03094

Yang L, Cai Y, Wei Y, et al. 2019. Choice of technology for emission control in Port Areas: A supply chainPerspective [J]. Journal of Cleaner Production,240(12):1–14. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118105

Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere [J]. Journal of Atmospheric Sciences,6(1):1–16. doi:10.1175/1520–0469(1949)006<0001:OEDITA>2.0.CO;2

Yuan C, Zhang W, Zhong Y, et al. 2022. North Atlantic forcing of autumn drought in Southwest China [J].Atmospheric and Oceanic Science Letters,15(1):76–80. doi:10.1016/j.aosl.2022.100152

Zhang C, Zhang D, Zhang M Y, et al. 2020. An integrated risk assessment model for safe Arctic navigation [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice,142:101–114. doi:10.1016/j.tra.2020.10.017

（责任编辑　何明琼）