

汪靖,常越,杨修群,等.欧亚积雪与京津冀秋季10—11月霾日频数年际变率的联系及其可能机制.气象科学,2020,40(5): 711-720.

WANG Jing, CHANG Yue, YANG Xiuqun, et al. Relationship between the Eurasian snowpack and interannual variations of haze frequency over the Beijing—Tianjin—Hebei region in October and November as well as associated possible mechanisms. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(5): 711-720.

欧亚积雪与京津冀秋季10—11月霾日频数 年际变率的联系及其可能机制

汪靖^{1,2} 常越³ 杨修群⁴ 柳艳菊⁵ 何金海¹

(1 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/
气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044; 2 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 3 广东省气象局, 广州 510640;
4 南京大学 大气科学学院, 南京 210023; 5 国家气候中心, 北京 100081)

摘要 基于1980—2017年京津冀地区定时观测资料、欧亚陆面积雪资料、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)再分析资料、美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料以及英国哈德莱中心提供的海冰密集度资料,分析了秋季10—11月京津冀霾日频数年际变率与同期欧亚积雪的物理联系,并通过气候统计诊断和敏感性试验探讨了积雪异常影响京津冀10—11月霾日频数年际变率的可能机理。结果表明,10—11月京津冀霾日频数年际变率与同期东欧—西伯利亚平原地区(记为 R_{Eu} ; $50^{\circ}\sim 60^{\circ}N$, $40^{\circ}\sim 80^{\circ}E$)积雪厚度和积雪覆盖度均呈现显著的正相关关系。 R_{Eu} 积雪正异常与其西北侧的挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧地区上空大气冷源密切联系,该冷源可激发一个自上述区域途经 R_{Eu} 一直到东北亚的准正压大尺度纬向Rossby波列来调制影响京津冀霾日频数年际变率的关键环流系统,即东北亚异常反气旋。上述异常环流背景下,京津冀地区对流层低层为偏南风异常所控制,稳定大气层结易于建立,边界层高度偏低、地面风速偏弱且相对湿度偏高。该环境条件有利于霾天气发生发展,使得同期霾日偏多。作为预测信号,当前期9月楚科奇海—西波弗特海海冰偏少(多)时,10—11月京津冀霾日可能偏多(少)。

关键词 京津冀地区; 10—11月霾日频数; 年际变率; 积雪; 环流异常

分类号 P461.6

doi 10.3969/2020jms.0071

文献标识码 A

Relationship between the Eurasian snowpack and interannual variations of haze frequency over the Beijing—Tianjin—Hebei region in October and November as well as associated possible mechanisms

WANG Jing^{1,2} CHANG Yue³ YANG Xiuqun⁴ LIU Yanju⁵ HE Jinhai¹

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of
Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2 Tianjin Institute of
Meteorological Science, Tianjin 300074, China; 3 Guangdong Meteorological Bureau, Guangzhou 510640, China;
4 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5 National Climate Centre, Beijing 100081, China)

Abstract Based on the ground-timing observation data in the Beijing—Tianjin—Hebei (BTH)

收稿日期(Received): 2020-08-02; 修改稿日期(Revised): 2020-08-18

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0104)

通信作者(Corresponding author): 何金海(HE Jinhai). hejhnew@nuist.edu.cn

region, the surface Eurasian snowpack data, the ECMWF and the NCEP/NCAR reanalysis datasets, and the Hadley Centre's Arctic sea ice concentration data from 1980 to 2017, the present study investigates the physical linkage between the interannual variations of haze frequency over the BTH region in October—November and the concurrent Eurasian snowpack. Furthermore, the connected potential mechanisms are also discussed via the climatic statistical diagnosis and numerical sensitive experiments. Results show that the interannual variability of the October—November haze frequency over the BTH region shows a significant positive correlation with the simultaneous snow depth as well as the snow-cover extent over the eastern Europe—Siberian plain (R_{Eu} for short; 50° — 60° N, 40° — 80° E). Those localized positive snowpack anomalies are closely tied to the anomalous atmospheric diabatic cooling areas to its northwest side, i.e. Norwegian Sea—Barents Sea sector and the northern and eastern European regions, which can in turn excite a large-scale zonal quasi-barotropic Rossby wave train from the area around the key area R_{Eu} to the Northeast Asia, modulating the climate variability in the concurrent Northeast Asian anticyclonic anomaly, a key circulation system leading to a higher number of the simultaneous haze days in the BTH region. Under such circumstances, the lower troposphere over the BTH region is dominated by anomalous southerly winds. The in situ stable stratification can be easily set up, and the boundary layer height is lower than normal, along with the weakened surface wind velocity and enhanced surface relative humidity. The above environmental conditions are conducive to the occurrence and development of localized haze weather, thus resulting in more frequent haze events. As a precursory signals, the preceding decrease in the September Chukchi—West Beaufort Sea ice may lead to a higher number of October—November haze days over the BTH region, and vice versa.

Key words BTH region; October—November haze frequency; interannual variations; snow cover; circulation anomalies

引 言

霾是指大量细微干气溶胶颗粒物(以 $PM_{2.5}$ 为主)均匀地浮游在空中,造成空气浑浊、近地面水平能见度小于 10 km 的天气现象^[1],它与气溶胶联系密切。霾天气通常伴有空气污染^[2],可严重危害人体健康^[3],因此受到社会各界广泛关注。

近年来,我国经济迅猛发展导致化石能源大量消耗^[1],气溶胶质量浓度处于较高水平^[4],这是造成霾污染频发的重要物质原因^[2]。京津冀地区包含首都经济圈和雄安新区等经济发达区域,能源消耗较大。另外,其西侧与北侧的燕山、太行山和军都山等局地山脉形成的“弓状地形”,阻挡和削弱了冷空气活动^[5],容易引起华北地区霾天气的发生,使京津冀地区成为我国中东部霾污染最重、发生频次最高的区域之一^[6]。

大量研究发现,除了人为排放原因之外,气候因子也显著影响我国中东部霾气候变率,主要包括海温、海冰和积雪^[7-11]。其中,海冰和积雪统称为冰雪圈强迫因子^[12],可对北半球冬季气候异常产生明显影响^[13-14]。华北地区霾日数在冬季最

多^[15],大量研究着眼于探索冰雪圈等外强迫因子对冬季霾气候变率的影响。例如,前期秋季欧亚积雪异常可通过激发东大西洋/西俄罗斯遥相关波列使得 12 月华北霾日偏多^[11]。值得指出的是,京津冀秋季霾日频数仅次于冬季^[15],也属于霾污染多发季节,因而其年际异常的成因同样受到广泛关注。研究表明^[7-8,16],中心位于日本海的东北亚异常反气旋(Northeast Asian Anticyclonic Anomaly, NEAACA)是京津冀秋季霾日频数年际偏多的关键环流系统。欧亚积雪在 10—11 月开始有个迅速增长的过程,因此认为 10—11 月为积雪季节的初始时段^[17]。然而,10—11 月京津冀霾日频数较初秋 9 月明显偏多^[15],根据上述观测结果,可提出如下问题: 10—11 月欧亚积雪正异常是否与同期京津冀霾日数偏多相联系? 如果有联系,欧亚积雪是否可以通过调控 NEAACA 进而使得霾日偏多? 如果可以,具体调控方式又是什么? 对这些问题的研究可为当地政府部门有效预测和提早治理秋季霾污染提供一定的参考依据,是京津冀协同发展的客观需求,具有明显的社会经济意义。

1 资料和方法

本文使用的资料包括: (1) 美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的月平均大气环流再分析数据集^[18],水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; (2) 欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)提供的月平均行星边界层高度(Planetary Boundary Layer Height, PBLH)资料^[19]以及陆地积雪深度资料(ERA-4/Land)^[20],水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$; (3) 美国罗格斯大学提供的周平均北半球陆面积雪覆盖度资料^[21],水平分辨率为 88×88 (格点数); (4) 英国哈德莱中心提供的月平均海冰密集度资料^[22],水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$; (5) 中国国家气象信息中心提供的地面 02 时、08 时、14 时和 20 时(北京时,下同)定时气象观测数据集。上述资料时间范围为 1980—2017 年。

本文中霾日定义参照 CHEN, et al^[15]提出的基于地面气象台站的相对湿度($<90\%$)、水平能见度和风速($<7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)观测资料来判定某日是否出现霾。每日 4 个时次(02 时、08 时、14 时和 20 时)中,任何一个时次有霾发生,则当日记为霾日。需要注意的是,由于能见度的观测从 2014 年开始由人工观测改为自动观测,判定霾现象的能见度阈值由先前的小于 10 km 修订为小于 7.5 km。文中使用的气候诊断与统计方法主要包括波活动通量(Wave Activity Flux, WAF)^[23]、相关分析、回归分析和滑动平均,统计显著性检验均基于双侧学生 t 分布。

本文使用的数值模式是由 JIANG, et al^[24]基于美国地球物理流体力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)的全球干谱模式(Held, et al^[25]开发的),简称 GFDL AGCM(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Atmospheric General Circulation Model)。其水平分辨率为 T42,垂直方向上均匀地分为五层(σ 坐标系),大气顶层对应 $\alpha=0$,大气底层对应 $\alpha=1$ 。该模式已被用于验证海温调控京津冀霾日频数年际变率的物理机制^[7]。

2 结果分析

2.1 10—11 月欧亚积雪与同期京津冀霾日频数年际变率的联系

参照 WANG, et al^[7,16]有关霾日指数的构建方法,利用京津冀地区空间分布均匀、数据质量控制较好的 20 个国家级基准台站(图 1)气象观测数据,

构建 10—11 月京津冀霾日指数(ONHD_{BTH} ; 图 2),即上述 20 个台站 10—11 月霾日数平均值。利用 ONHD_{BTH} 指数时间序列的 9 a 滑动平均值表征其年代际分量, ONHD_{BTH} 指数的年代际分量可由原始序列减去其年代际分量得到^[7]。 ONHD_{BTH} 指数年代际分量时间序列参见图 2。

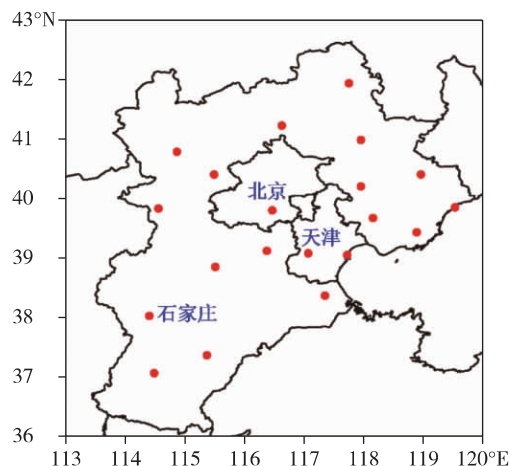


图 1 京津冀地区 20 个气象观测台站空间分布

Fig.1 Locations of 20 meteorological sites in the BTH region

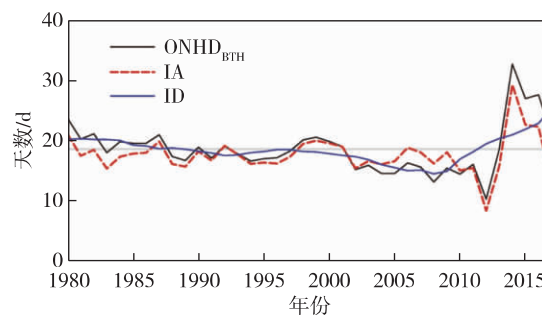


图 2 1980—2017 年 ONHD_{BTH} 指数(黑实线;单位: d) 及其年代际分量(ID, 蓝实线;单位: d) 和年际分量(IA, 红虚线;单位: d) 时间序列; 灰直线表示 ONHD_{BTH} 指数 1980—2017 年平均

Fig.2 Time series of the ONHD_{BTH} (black line; unit: d), along with its interdecadal component (blue line; unit: d) and interannual component (red line; unit: d) for the period 1980—2017; the gray horizontal line delineates the average climate value of the ONHD_{BTH} during 1980—2017

在研究积雪对气候异常的影响时,前人通常采用积雪覆盖度和积雪深度这两个指标^[11,26]。为进一步探索欧亚积雪异常对京津冀 10—11 月霾日频数年际变率的影响,本文首先考察 ONHD_{BTH} 指数年代际分量与同期欧亚积雪覆盖度和积雪深度的联系(图 3)。在欧亚地区,霾日频数年际变率与黑海到巴尔喀什湖北的东欧—西伯利亚平原地区($50^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}, 40^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{E}$) 积雪覆盖度(图 3a) 和积雪深度(图 3b) 均呈现显著正相关关系,相关系数分别为

0.47(r_1) 和 0.43(r_2), 均通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验。上述区域积雪覆盖度/深度与霾日频数均显著相关, 其共同相关区域记为欧亚积雪关键区(R_{Eu})。当 R_{Eu} 积雪覆盖度/深度出现正(负)异常时, $ONHD_{BTH}$ 指数偏高(偏低), 即霾日偏多(偏少)。为综合研究积雪覆盖度/深度对 $ONHD_{BTH}$ 指数年际变率的影响, 参考 ZOU, et al^[12] 的方法构建欧亚综合积雪指数(Eu_SSI_{ON}), 具体表达为:

$$Eu_SSI_{ON} = \frac{r_1 \times ESC + r_2 \times ESD}{r_1 + r_2} \quad (1)$$

其中: ESC 为 10—11 月 R_{Eu} 区域平均的积雪覆盖度; ESD 为 10—11 月 R_{Eu} 区域平均的积雪深度。

$ONHD_{BTH}$ 指数与 Eu_SSI_{ON} 指数呈现显著的正相关关系, 其相关系数为 0.47, 通过了 $\alpha=0.01$ 的置信水平检验, 可解释 22% 的霾日频数年际变率总方差。

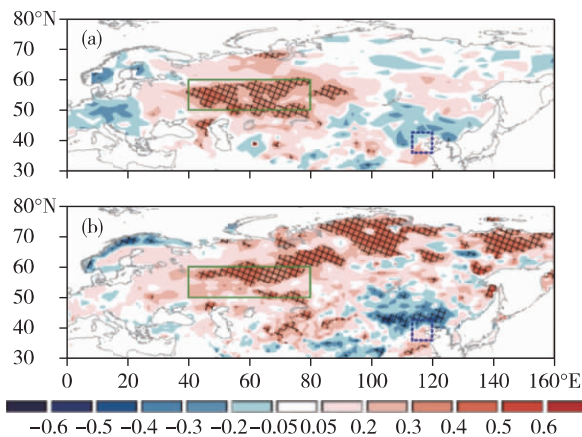


图3 1980—2017 年 $ONHD_{BTH}$ 指数年际分量与同期 10—11 月欧亚地区 ($30^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$; $0^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 积雪覆盖度 (a) 和积雪深度 (b) 相关系数的空间分布; 补丁状区域表示相关系数通过 $\alpha=0.1$ 信度检验; 绿色方框 ($50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$; $40^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$) 表示 $ONHD_{BTH}$ 指数年际分量与欧亚地区积雪覆盖度和积雪深度均呈现显著正相关的区域, 下同; 蓝色虚线方框表示京津冀研究区域

Fig.3 Correlation coefficients between the interannual component of $ONHD_{BTH}$ and concurrent October—November (a) snow-cover extent and (b) snow depth over the Eurasian region ($30^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$; $0^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) for the period 1980—2017; correlation coefficients significant at the 90% confidence level are cross-hatched; the green solid box ($50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$; $40^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$) denotes the key area with significant correlations, the same hereinafter; the blue dashed box delineates the research domain of the BTH region

2.2 10—11 月欧亚积雪异常影响同期京津冀霾日频数年际变率的物理机制

为探讨有关物理机制, 首先给出 R_{Eu} 积雪正异常年与负异常年 500 hPa 环流异常差值场 (图 4a)。可以发现, 存在中心位于日本海上空的 NEAACA 与

欧亚积雪正异常相联系。此 NEAACA 在京津冀霾日偏多年异常显著 (图 4b), 表明该异常反气旋是京津冀霾日偏多的关键环流系统, 这与以往研究结果一致^[7,16]。其中与 R_{Eu} 积雪正异常年相关联的环流异常形态与霾日偏多年极其类似, 特别是 NEAACA (包括其中心位置) 以及 100°E 以西中高纬气旋性异常环流。为定量表征该 NEAACA, 需构建其相关指数。根据图 4b 中显著异常高度场的空间分布, 定义区域 ($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均的 500 hPa 高度场为 NEAACA 指数。NEAACA 指数与 $ONHD_{BTH}$ 指数呈现同位相变化趋势 (图略), 相关系数为 0.4, 通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验。这里, 将标准化的去趋势 Eu_SSI_{ON} 指数大于 (小于) 0.5 (-0.5) 的年份定义为 R_{Eu} 积雪正 (负) 异常年, 标准化 $ONHD_{BTH}$ 指数年际分量大于 (小于) 0.5 (-0.5) 的年份定义为霾日偏多 (偏少) 年。

通过上述分析引出以下问题: R_{Eu} 积雪正异常能否通过调制同期 NEAACA 进而远距离影响京津冀霾日频数年际变率? 从 Eu_SSI_{ON} 指数回归的大尺度异常环流场可以看出 (图 5), 欧亚中高纬确实存在一个大尺度 Rossby 遥相关波列与 R_{Eu} 积雪正异常相联系, 该波列呈现准正压结构 (图略), 在对流层中层 (500 hPa) 表现较为显著 (图 5)。从高度场异常的空间分布来看, R_{Eu} 附近高度场呈现显著负异常 (气旋性环流异常), 其中心位于哈萨克斯坦一带; 在 R_{Eu} 东南侧有一个异常反气旋性环流与该波列相联系, 此反气旋性环流即为 NEAACA。此外, 与 “+” 高度场空间分布 (图 5) 相对应的是相对涡度场异常的 “+” 空间分布 (图 6), 上述波列在相对涡度合成差值场上也表现得非常清楚。

上述异常环流背景下, 与积雪异常相联系的近地层气象要素也表现出显著的异常。较为明显的特征是, R_{Eu} 积雪正异常年, 京津冀及其附近区域近地层为相对湿度显著正异常区所控制 (图 7a), 正异常中心位于河南、山东和河北省交界处。京津冀相对湿度正异常主要与该地区显著正 850 hPa 经向风异常有关 (图 7d), 而该南风异常与上述 NEAACA 相联系, 指示南下冷空气势力偏弱。在该 NEAACA 西侧的华南一直到华北为一致的显著南风异常所控制 (图 7d), 我国东部上空有南北两个正 850 hPa 经向风异常中心, 其中北方中心与京津冀附近相对湿度正异常中心相对应, 有利于南方的污染物和水汽向华北一带输送。此外, 京津冀一带偏弱的地面风速 (图 7c) 使大气水平扩散能力减弱, 有利于水汽

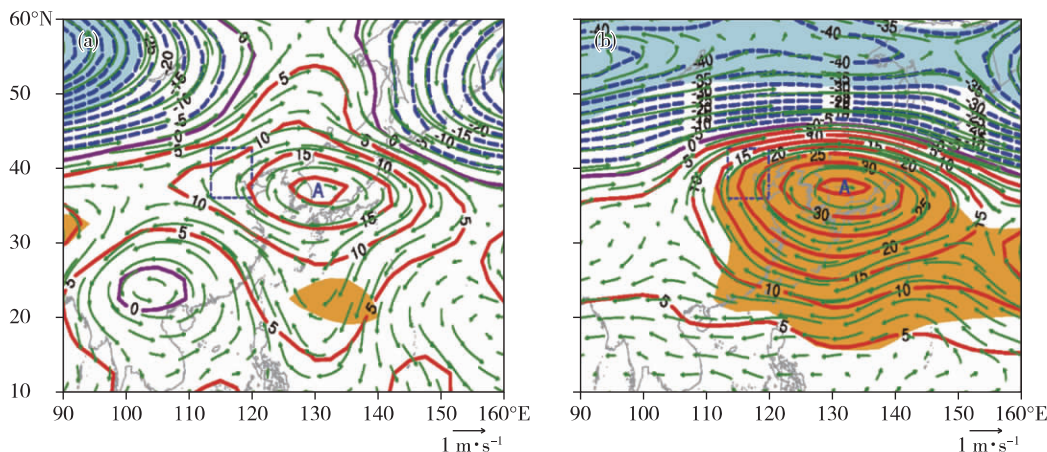


图4 500 hPa 位势高度场异常(等值线;单位: gpm)和500 hPa 风场异常(矢量;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)合成差值:

(a) Eu_SSI_{ON} 指数正异常年与负异常年合成差值; (b) $ONHD_{BTH}$ 指数正异常年与负异常年合成差值

(黄色阴影区域表示高度场合成差值通过 $\alpha=0.1$ 置信水平检验;蓝色虚线方框表示京津冀研究区域;字母 A 表示反气旋性差值环流中心)

Fig.4 Composite analysis of positive and negative anomaly fields of 500 hPa geopotential height (contours; unit: gpm) and 500 hPa winds (vectors; unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) for (a) Eu_SSI_{ON} and (b) $ONHD_{BTH}$ (Height anomalies that are significant at the 90% confidence level are shaded in yellow; the blue dashed box delineates the research domain of the BTH region; the letter A represents the center of anticyclonic anomaly)

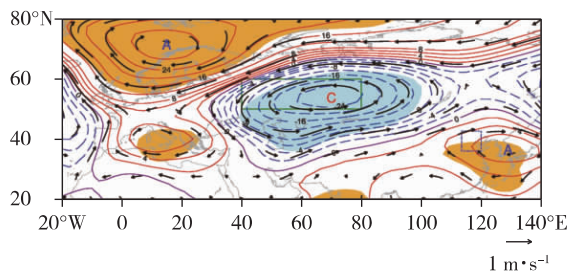


图5 1980—2017 年去趋势的标准化 Eu_SSI_{ON} 指数线性回归的 10—11 月 500 hPa 位势高度场异常(等值线;单位: gpm)和 500 hPa 风场异常(矢量;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); 阴影区域表示高度场回归系数通过 $\alpha=0.1$ 置信水平检验;蓝色虚线方框表示京津冀研究区域;字母 A (C) 表示反气旋性(气旋性)异常环流中心

Fig. 5 Regressed anomalies at 500 hPa of October–November (contours; unit: gpm) and wind field anomaly at 500 hPa (vectors; unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), with respect to the normalized detrended Eu_SSI_{ON} index for the period 1980–2017; regression coefficients of height anomalies that are significant at the 90% confidence level are shaded; the blue dashed box delineates the research domain of the BTH region; the letter A (C) represents the center of anticyclonic (cyclonic) anomaly

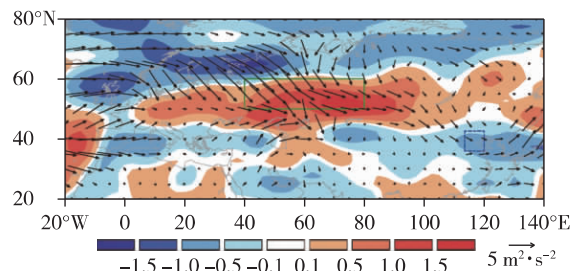


图6 3 个最高 Eu_SSI_{ON} 指数年(1993、2015 和 2016 年)和 3 个最低 Eu_SSI_{ON} 指数年(2008、2010 和 2013 年)同期 500 hPa WAF(矢量;单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)以及相对涡度(阴影;单位: 10^{-5} s^{-1})合成差值空间分布(高指数年减去低指数年)

Fig.6 Composite differences of 500 hPa WAF (quiver; unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and relative vorticity (shading; unit: 10^{-5} s^{-1}) between the three highest years (1993, 2015 and 2016) and three lowest years (2008, 2010 and 2013) of Eu_SSI_{ON} index (the highest minus the lowest)

和污染物在本地积聚。此外京津冀部分区域地面气温呈现较弱的负异常(图 7b),这与 R_{Eu} 积雪正异常引起的大范围冷却效应有关(图 8)。但此温度负异常较为浅薄,京津冀上空 850 hPa 及以上为显著温度正异常所控制(图 8),这种温度异常的垂直结构有利于京津冀逆温层结的建立(图 7e),此时近地层大气偏向稳定,使边界层高度偏低(图 7f)^[2]。上述情形下,大气垂直扩散污染物和水汽的能力也偏弱,使其更容易在边界层内积聚。综上,关键区 R_{Eu} 积雪偏多时,影响京津冀的冷空气势力偏弱,京津冀近地层为偏南风异常且地面风速偏弱,使同期大

气停滞即静稳日偏多^[27]。这种环境条件下,京津冀的近地层气象要素与颗粒物的正反馈循环效应显著^[2]。比如,偏低的 PBLH 使得近地层 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高,而偏高的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度又通过气溶胶—辐射相互作用使得 PBLH 偏低。上述因子的正反馈循环作用可导致霾日偏多。

上述分析表明,存在一个大尺度遥相关波列与 R_{Eu} 积雪正异常相联系,进而可调制京津冀霾日频数年际变率。那么 R_{Eu} 积雪正异常为什么会激发该波列? 为了回答这个问题,首先给出 Eu_SSI_{ON} 指数回归的同期温度异常空间分布(图 8)。 R_{Eu} 积雪正异常可造成欧亚中高纬度大范围地区对流层内气温显著偏低,尤其是低层气温偏低尤为明显。上述温

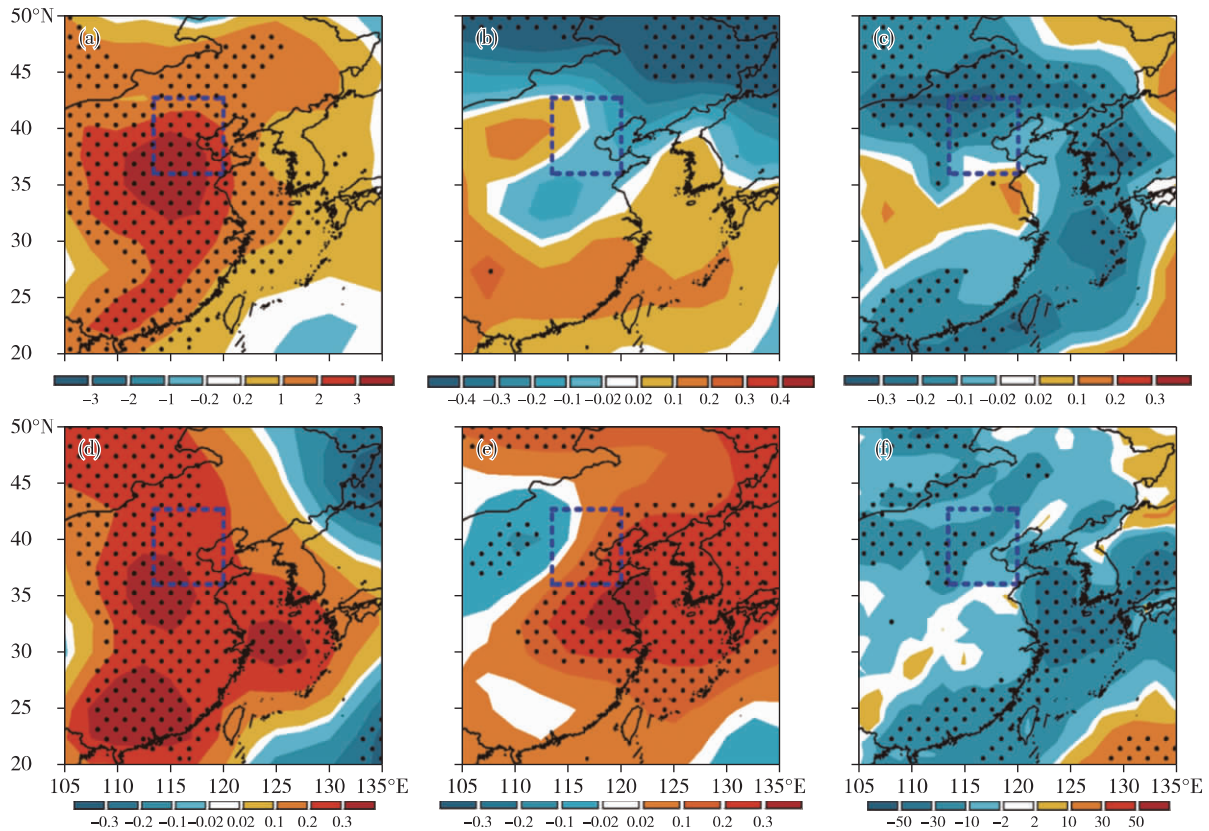


图7 1980—2017年去趋势的标准化 Eu_SSI_{ON} 指数线性回归的同期 (a) 地面相对湿度异常 (阴影; 单位: %), (b) 地面气温异常 (阴影; 单位: $^{\circ}\text{C}$), (c) 地面风速异常 (阴影; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 850 hPa 经向风异常 (阴影; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (e) 850 hPa 和 1 000 hPa 温差异常 (阴影; 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (f) PBLH 异常 (阴影; 单位: m); 点状区域表示回归系数通过 $\alpha=0.1$ 置信水平检验的区域

Fig.7 Regressed patterns of meteorological parameters onto the normalized detrended Eu_SSI_{ON} index, including (a) surface relative humidity (shaded; unit: %), (b) surface air temperature (shaded; unit: $^{\circ}\text{C}$), (c) surface wind speed (shaded; unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 850 hPa meridional winds (shaded; unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (e) air temperature between 850 and 1 000 hPa (shaded; unit: $^{\circ}\text{C}$), and (f) PBLH (shaded; unit: m), for the period 1980—2017; regression coefficients that are significant at the 90% confidence level are stippled

度负异常中心恰好与 R_{Eu} 相重合。值得注意的是, 气温负异常随着高度增加呈现减弱的趋势, 地面气温负异常最强、最显著 (图 8c)。上述情形下, R_{Eu} 上空较强的大气冷却效应所造成的气柱冷却收缩效应有利于 R_{Eu} 地区高度场偏低 (图 5), 因而该处异常气旋性环流易于建立。此异常气旋性环流西北侧出现显著东北风异常 (图 5), 表明存在明显的冷空气从高纬度南下, 且此处大气响应较为显著, 具体表现为北极圈内挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧中高纬平原地区存在与 R_{Eu} 积雪正异常相联系的显著的大范围大气冷源, 该冷源引起的非绝热冷却效应在对流层低层 (850 hPa) 最为显著 (图 9), 且随高度呈现递减的趋势 (图略)。在此情形下, R_{Eu} 西北部的挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧上空易于形成反气旋性环流异常 (图 5、6)。事实上, 与 R_{Eu} 积雪正异常相联系的显著大气响应位于北欧及其附近区域, 从 WAF 空间分布可以看出, 上述波列源头位于高纬度地区 (图 6), 有明显的

Rossby 波能量从高纬地区途经 R_{Eu} 向下游的京津冀及其附近区域传播, 这有利于 NEAACA 的发展、加强与维持。

利用 GFDL AGCM 模式设计敏感性试验验证上文提出的物理过程。由前文分析可知, R_{Eu} 出现积雪正异常时, 强烈的大气冷却作用使其上空出现显著的异常气旋性环流, 该物理过程是明确的。此时, 气旋性环流西北侧出现显著东北风异常, 表明该地区大气响应较为显著, 存在显著大气冷源 (图 9)。为此, 针对 R_{Eu} 积雪正异常, 本文设计了一个非绝热冷却试验 (C_{Eu}) 以用于验证该物理过程, 大气冷源放置在上述非绝热冷却较为显著的区域 (图 10), 最大冷却率为 $1 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$, 放置在 850 hPa, 冷却中心位于 ($68.37^{\circ}\text{N}, 14.06^{\circ}\text{E}$)。在加入局地理想非绝热冷却之后, 在第 2 d 即模式预热阶段 (图 10a), 冷却源东南侧 R_{Eu} 附近就已经出现了高度场负异常, 冷却源西侧出现高度正异常, 中高纬有一个波列开始初步建立; 第 5 d 开始 (图 10b), R_{Eu} 附近出现了显著的

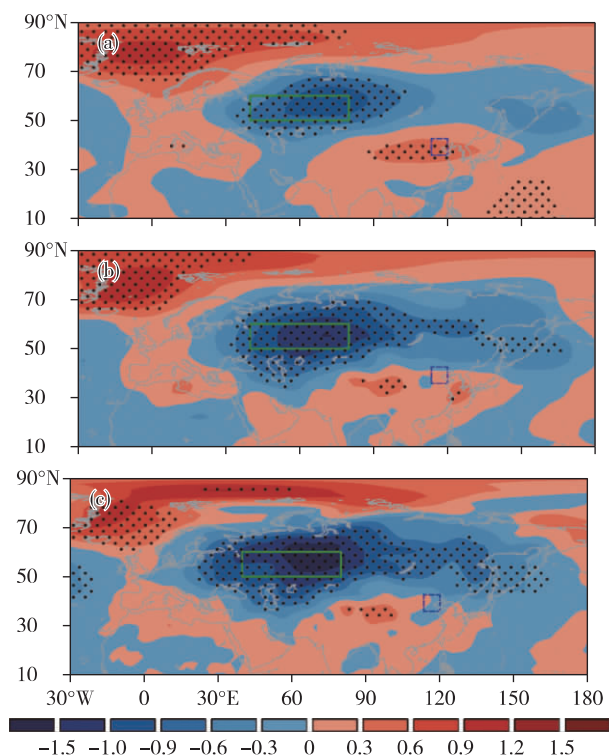


图 8 1980—2017 年去趋势的标准化 Eu_SSI_{ON} 指数线性回归的同期温度异常 (阴影; 单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 500 hPa; (b) 850 hPa; (c) 地面 (点状区域表示回归系数通过 $\alpha=0.05$ 置信水平检验)

Fig. 8 Regressed anomalies of (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, and (c) surface air temperature (shaded; unit: $^{\circ}\text{C}$) with respect to the normalized detrended Eu_SSI_{ON} index for the period 1980—2017 (Regression coefficients that are significant at the 95% confidence level are dotted)

负高度中心(气旋性环流异常),该波列进一步发展并向下游传播;第 10 d 及以后时段(图 10c—h),模式结果趋于稳定,形成了一个自冷却源向下游传播的大尺度波列,两个“+”异常中心模拟较好,挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧上空的反气旋性环流异常也模拟较好,这与观测结果较一致(图 5)。在此情形下,京津冀为异常反气旋性环流控制。综上,NEAACA 的建立确实可受到与 R_{Eu} 积雪正异常相联系的 Rossby 波列调制,该敏感性试验较好地验证了上文所提出的物理过程。

2.3 京津冀霾日频数年际变率的前兆信号

前文分析指出,与 10—11 月 R_{Eu} 积雪正异常相联系的是同期挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧中高纬平原大气冷源,它可通过激发 Rossby 波列调制 NEAACA 使得京津冀同期霾日偏多。事实上,当给定一个大气冷源时,大尺度 Rossby 波列可被较好地模拟出来, R_{Eu} 上空有明显气旋性环流异

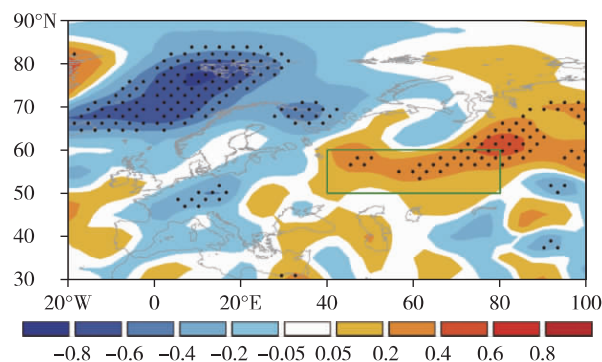


图 9 1980—2017 年去趋势的标准化 Eu_SSI_{ON} 指数线性回归的同期 850 hPa 非绝热加热/冷却异常 (阴影; 单位: $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$) (点状区域表示回归系数通过 $\alpha=0.05$ 置信水平检验)

Fig. 9 Regressed anomalies of 850 hPa diabatic heating/cooling (shaded; unit: $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$) with respect to the normalized detrended Eu_SSI_{ON} index for the period 1980—2017 (Regression coefficients that are significant at the 95% confidence level are dotted in black)

常,可使 R_{Eu} 上空有显著降水异常(图略),导致关键区积雪偏多,从而可使该波列得以进一步发展和加强。然而,热源和积雪这种相关关系是同期的,不具有预测霾日频数年际异常的前兆意义。已有研究指出^[26,28],北极地区海冰异常可能是上述区域热力异常的影响因素。为此,本文首先根据图 9 中 850 hPa 非绝热冷却异常的数值选取热力异常关键区($65^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}, 0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{E}$),然后计算关键区非绝热加热/冷却与前期夏季(图 11a)、前期 9 月(图 11b)以及同期(图 11c)北极地区海冰密集度的相关系数。相关系数稳定且较为显著的区域集中在楚科奇海—西波弗特海海域(蓝色方框; $71^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}, 180^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$;记为 A 区域),并且与 A 区域海冰密集度的正相关关系在 9 月达到最大,相关系数为 0.39,通过了 $\alpha=0.05$ 的置信水平检验。当前期 9 月 A 区域海冰面积偏少时,10—11 月挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧中高纬地区确实可出现显著大气非绝热冷却(图 12)。因此,A 区域海冰异常可视为京津冀霾日频数年际变率的前兆信号,A 区域 9 月海冰面积偏少时,后期 10—11 月京津冀地区霾日可能偏多。而积雪的自相关性较差,10—11 月 R_{Eu} 区域积雪覆盖度/深度与其前期积雪覆盖度/深度相关系数很低(图略),因此前期 R_{Eu} 区域积雪异常不能作为霾日频数年际变率的前兆信号。此外,前期 A 区域海冰面积偏少导致 10—11 月京津冀霾日数偏多的可能机理值得进一步开展研究。

3 结论

本文利用气候诊断分析以及数值模拟的方法

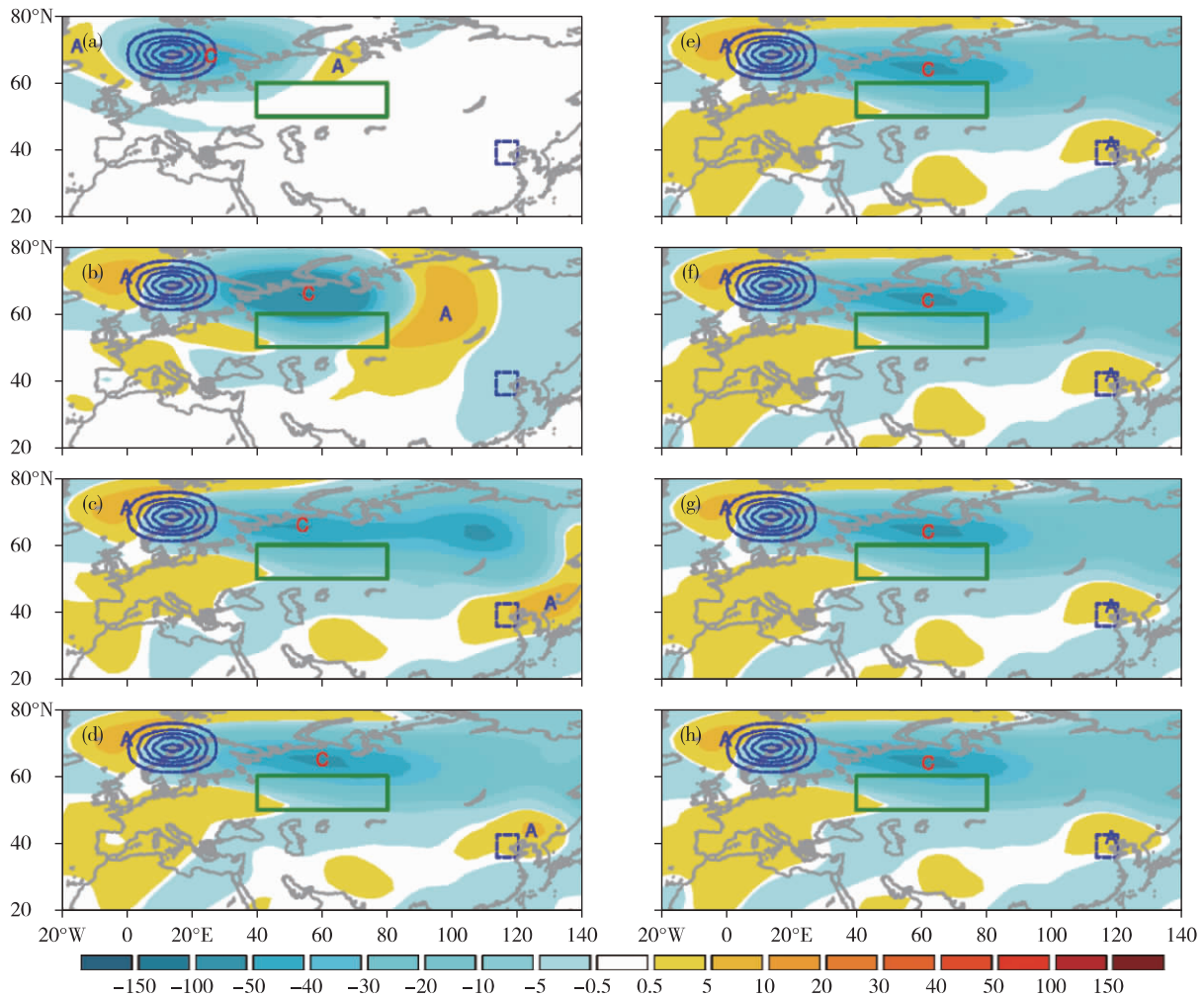


图 10 理想非绝热冷却试验 (C_{EU}) 中 500 hPa 位势高度场异常 (阴影; 单位: 10 gpm) 随时间的演变:

(a) 2 d; (b) 5 d; (c) 10 d; (d) 15 d; (e) 20 d; (f) 30 d; (g) 40 d; (h) 60 d

(蓝色等值线表示加入的非绝热冷却廓线; 字母 A (C) 表示高压 (低压) 异常环流中心)

Fig.10 Temporal evolution of the response of anomalous Z500 (shaded; unit: 10 gpm) in C_{EU} : (a) 2 d; (b) 5 d; (c) 10 d; (d) 15 d; (e) 20 d; (f) 30 d; (g) 40 d; (h) 60 d (The blue contours indicate the imposed idealized cooling; the letter A (C) represents the center of anomalous high (low))

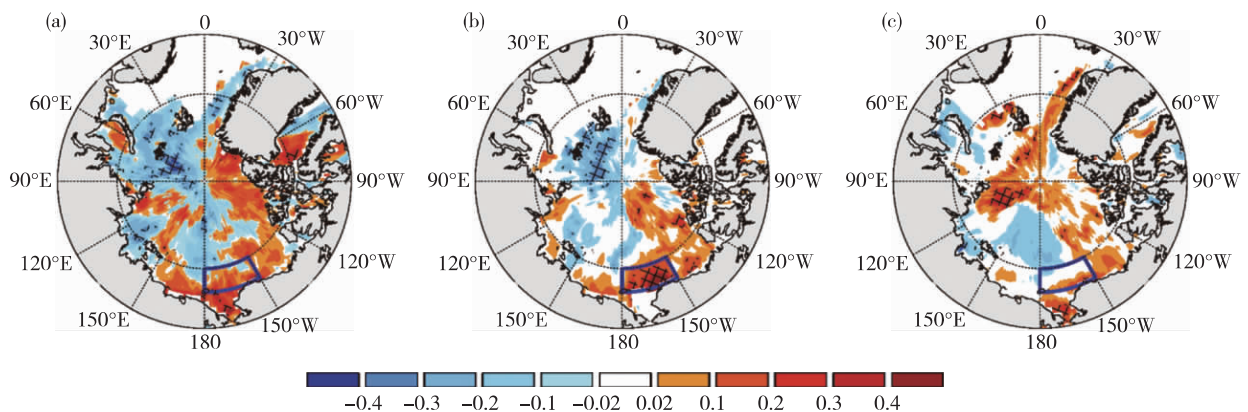


图 11 1980—2017 年去趋势的标准化 10—11 月区域 ($65^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}, 0\sim 30^{\circ}\text{E}$) 平均的 850 hPa 大气加热/冷却与前期夏季 (a)、前期 9 月 (b) 以及同期 (c) 北极海冰密集度相关系数的空间分布; 补丁状区域表示相关系数通过 $\alpha=0.1$ 置信水平检验; 蓝色扇形框表示海冰关键区 ($71^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}, 180^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$)

Fig.11 Correlation coefficients between the normalized detrended area-averaged ($65^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}, 0\sim 30^{\circ}\text{E}$) diabatic heating/cooling and previous summertime (a), September (b), and concurrent (c) Arctic sea ice for the period 1980—2017; correlation coefficients significant at the 90% confidence level are cross-hatched; the blue frame ($71^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}, 180^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$) denotes the key area with significant correlations

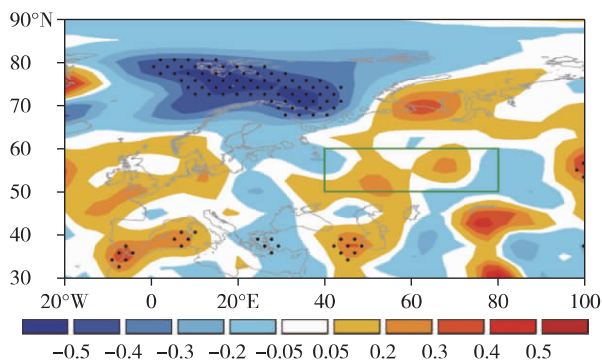


图 12 1980—2017 年去趋势的标准化 9 月 A 区域海冰密集度线性回归的 10—11 月 850 hPa 非绝热加热/冷却异常 (等值线; 单位: $K \cdot d^{-1}$); 点状区域表示回归系数通过 $\alpha = 0.05$ 置信水平检验

Fig.12 Regressed anomalies of 850 hPa October–November diabatic heating/cooling (contour; unit: $K \cdot d^{-1}$) with respect to the normalized detrended prior September sea-ice concentration over Region A for the period 1980–2017; regression coefficients that are significant at the 95% confidence level are dotted

研究了 10—11 月欧亚积雪异常与同期京津冀霾日频数年际变率之间的物理联系及其可能机制。结论如下:

(1) 京津冀地区 10—11 月霾日频数的年际变率与欧亚积雪关键区 R_{Eu} 综合积雪指数 Eu_SSI_{ON} 有较好的正相关关系, 相关系数为 0.47, 通过了 $\alpha = 0.01$ 的置信水平检验。

(2) R_{Eu} 积雪正异常与北极挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧中高纬平原上空的大气冷源密切联系, 可激发一个源自上述区域的大尺度 Rossby 波列。该遥相关波列的另外两个异常环流中心分别位于积雪关键区的哈萨克斯坦(气旋性环流异常)以及东北亚地区(反气旋性环流异常), 并且沿着该波列有明显的 Rossby 波能量向东北亚一带传播, 使得京津冀霾日频数年际变率关键环流系统 NEACA 得以发生、发展和维持。上述异常环流背景可形成有利于霾发生的气象条件。

(3) 10—11 月京津冀霾日频数年际变率的可能前兆信号为前期 9 月楚科奇海—西波弗特海海域海冰面积。当海冰面积偏少, 后期京津冀霾日偏多。前期海冰偏少与后期挪威海—巴伦支海海域以及北欧到东欧中高纬平原大气冷源密切联系, 继而可激发上述遥相关波列使得霾日偏多。

参 考 文 献

[1] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾—霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58(13): 1178–1187.

ZHANG Xiaoye, SUN Junying, WANG Yaqiang, et al. Factors contributing to haze and fog in China. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 2013, 58(13): 1178–1187.

[2] AN Zhisheng, HUANG Rujin, ZHANG Renyi, et al. Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(18): 8657–8666.

[3] LIU Cong, CHEN Renjie, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. N. Engl. J. Med., 2019, 381(8): 705–715.

[4] LI Zhanqing, Lau W K M, Ramanathan V, et al. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. Rev. Geophys., 2016, 54(4): 866–929.

[5] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 2014, 34(1): 1–11.

WU Dui, LIAO Biting, WU Meng, et al. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 2014, 34(1): 1–11.

[6] QUAN Jiannong, ZHANG Qiang, HE Hui, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). Atmos. Chem. Phys., 2011, 11(15): 8205–8214.

[7] WANG Jing, ZHU Zhiwei, QI Li, et al. Two pathways of how remote SST anomalies drive the interannual variability of autumnal haze days in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China. Atmos. Chem. Phys., 2019, 19(3): 1521–1535.

[8] WANG Jing, LIU Yanju, DING Yihui, et al. Impacts of climate anomalies on the interannual and interdecadal variability of autumn and winter haze in North China: a review. International Journal of Climatology, 2020, 40(10): 4309–4325.

[9] CHANG Yue, WANG Jing, ZHU Zhiwei, et al. A salient oceanic driver for the interannual variability of wintertime haze days over the Pearl River Delta region, China. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140(1): 739–750.

[10] WANG Jing, LIU Yanju, DING Yihui. On the connection between interannual variations of winter haze frequency over Beijing and different ENSO flavors. Science of the Total Environment, 2020, 740: 140109. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140109.

[11] YIN Zhicong, WANG Huijun. The strengthening relationship between Eurasian snow cover and December haze days in central North China after the mid-1990s. Atmos. Chem. Phys., 2018, 18(7): 4753–4763.

[12] ZOU Yufei, WANG Yuhang, ZHANG Yuzhong, et al. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. Science Advances, 2017, 3(3): e1602751.

[13] 黄士松, 杨修群, 蒋全荣, 等. 极地海冰变化对气候的影响, 气象科学, 1995, 15(4): 46–56.

HUANG Shisong, YANG Xiuqun, JIANG Quanrong, et al. The effects of the polar sea ice on climate. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 1995, 15(4): 46–56.

[14] 杨修群, 黄士松. 欧亚雪盖的气候效应及其在冬季风形成中的

- 作用. 南京大学学报(自然科学版), 1992, 28(2): 326-335.
- YANG Xiuqun, HUANG Shisong. Climatic effects of Eurasian snow cover and their impact on the formation of winter monsoon circulation. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)* (in Chinese), 1992, 28(2): 326-335.
- [15] CHEN Huopo, WANG Huijun. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(12): 5895-5909.
- [16] WANG Jing, ZHAO Qiaohua, ZHU Zhiwei, et al. Interannual variation in the number and severity of autumnal haze days in the Beijing—Tianjin—Hebei region and associated atmospheric circulation anomalies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, 84: 1-9.
- [17] Henderson G R, Peings Y, Furtado J C, et al. Snow-atmosphere coupling in the Northern Hemisphere. *Nature Climate Change*, 2018, 8(11): 954-963.
- [18] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [19] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [20] Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, et al. ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(1): 389-407.
- [21] Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. Global snow cover monitoring: an update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(9): 1689-1696.
- [22] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: 440.
- [23] 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. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(6): 608-627.
- [24] JIANG X A, LI T. Reinitiation of the boreal summer intraseasonal oscillation in the tropical Indian Ocean. *Journal of Climate*, 2005, 18(18): 3777-3795.
- [25] Held I M, Suarez M J. A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, 75(10): 1825-1830.
- [26] LI Fei, Orsolini Y J, WANG Huijun, et al. Atlantic multidecadal oscillation modulates the impacts of Arctic sea ice decline. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(5): 2497-2506.
- [27] ZHANG Xiaoye, XU Xiangde, DING Yihui, et al. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(12): 1885-1902.
- [28] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464, 1334-1337.