中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 4 期: 1281 ~ 1289
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

2000年以后北大西洋涛动对中国北方冬季降雪影响增强

周波涛[1,2*], 郭楚儿[1,2], 胡跃鹏[1,2,3], 谢文欣[1,2], 孙博[1,2], 韩婷婷[1,2], 施宁[1,2]

1. 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
3. 浙江省气象台, 杭州 310002
* 通讯作者, E-mail: zhoubt@nuist.edu.cn

收稿日期: 2024-05-20; 收修改稿日期: 2024-12-02; 接受日期: 2025-01-22; 网络版发表日期: 2025-03-18
国家自然科学基金项目(42025502)资助

摘要 中国北方降雪对社会经济和人民生活具有深远影响, 因此, 理解该区域降雪异常变化的物理机制至关重要. 本研究基于1961~2018年的观测和再分析资料, 探讨了中国北方冬季降雪与北大西洋涛动(NAO)的关系. 结果表明, 二者的联系在2000年左右发生了年代际变化. 在2000~2018年期间, NAO与中国北方冬季降雪呈显著的负相关关系. 当NAO位于负位相时, 东亚副热带急流和极锋急流分别趋于北移和南移. 同时, 巴尔喀什湖至贝加尔湖地区的对流层中低层为异常气旋性环流控制. 该大气环流背景有利于冷空气和暖湿空气在中国北方交汇, 从而导致该地区降雪增多. 然而, 在1981~1999年期间, NAO与上述大气环流的联系并不显著, 因而减弱了其与中国北方冬季降雪的联系. 进一步研究表明, NAO与上述大气环流联系的加强可能在于NAO南部中心位置从前一时段到后一时段的西移.

关键词 冬季降雪, 中国北方, 北大西洋涛动, 年代际变化, 大气环流

1 引言

近几十年来, 中国北方降雪强度和降雪量均呈增加趋势(Zhou等, 2021; Chen和Sun, 2022). 由于强降雪的发生会对电力供应、交通安全、农业生产和人民生活等造成严重影响, 因此有必要深入理解中国北方降雪的变化及相关物理机制, 这对防灾减灾意义重大.

目前, 关于中国北方降雪年际和年代际变化的研究已有不少, 并且提出了若干影响因子和相关物理机制(Wang等, 2011; Liu等, 2012; Fan和Tian, 2013; Sun和Wang, 2013; Zhou等, 2017, 2021; Sun等, 2019; Yang等, 2019; Xu等, 2023). 例如, Wang等(2011)发现, 2010年中国东北特大暴雪事件主要因西伯利亚高压和东亚大槽加强所致. 王遵娅和周波涛(2018)指出, 北极涛动、贝加尔湖低槽以及来自印度洋和太平洋的水汽输送共同影响中国北方强降雪的年际变化. Xu等

中文引用格式: 周波涛, 郭楚儿, 胡跃鹏, 谢文欣, 孙博, 韩婷婷, 施宁. 2025. 2000年以后北大西洋涛动对中国北方冬季降雪影响增强. 中国科学: 地球科学, 55(4): 1281–1289, doi: 10.1360/N072024-0151
英文引用格式: Zhou B, Guo C, Hu Y, Xie W, Sun B, Han T, Shi N. 2025. Enhanced influence of the North Atlantic Oscillation on winter snowfall in northern China since 2000. Science China Earth Sciences, 68(4): 1236–1244, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1516-9

© 2025 《中国科学》杂志社

(2023)揭示，前期秋季热带大西洋海表温度升高有利于中国东北冬季降雪增多. 在年代际尺度上，东亚冬季风减弱为中国东北降雪年代际增多提供了有利的环流背景(王会军和贺圣平, 2013). Zhou等(2017)发现，冬季Hadley环流对于中国东北降雪强度增加具有显著贡献. 此外，大西洋多年代际振荡(AMO)由负位相转为正位相有利于中国北方强降雪年代际增多(Zhou等, 2021).

北大西洋涛动(NAO)是北大西洋上空最主要的大气模态，主要表现为亚速尔群岛和冰岛地区之间大气质量的经向跷跷板型分布(Wallace和Gutzler, 1981; Rogers, 1984; Hurrell, 1995). 以往的研究表明, NAO对东亚大气环流和中国气候具有重要影响(例如，Sun等, 2008; Seager等, 2010; Sun和Wang, 2012; 周波涛和崔绚, 2014; Zuo等, 2016; Qiao和Feng, 2016; Xie等, 2019; Du等, 2020; Hu等, 2022). 值得指出的是, 冬季NAO同样影响着中国北方降雪(王遵娅和周波涛, 2018; Sun等, 2021). 不过, 也有一些研究揭示, 冬季NAO对局地气候异常的影响并不稳定(Zhou, 2013; Xu等, 2016; Zuo等, 2016; Feng等, 2018). 因此, 本研究重新审视冬季NAO与中国北方降雪之间的关系. 我们发现二者之间的联系在2000年左右经历了一次年代际增强的变化, 并探讨了这种变化背后的物理机制.

2 数据和方法

本文使用的逐日降水量和地表气温数据来自CN05.1格点数据集，该数据集由中国2400多个台站资料插值得到，其水平分辨率为0.25°×0.25°(吴佳和高学杰, 2013). 大气再分析资料来自美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NECP/NCAR), 水平分辨率为2.5°×2.5°(Kalnay等, 1996). 采用北大西洋地区(20°~80°N, 90°W~40°E)海平面气压经验正交函数分解的第一模态(EOF1)所对应的时间序列作为NAO指数，该指数可以从https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based网站下载得到.

根据以往研究(Zhou等, 2018; Sun等, 2019, 2021), 降雪日的判定标准为: (1) 日降水量不小于0.1mm; (2) 日平均地面气温低于0℃. 中国北方冬季(12~2月, DJF)降雪量定义为该区域内所有降雪日的降水量之和.

罗斯贝波源定义为$RWS=-\nabla\cdot\left[V_\chi(f+\zeta)\right]$(Sardeshmukh和Hoskins, 1988), 其中V_χ、f和ζ分别代表了辐散风、行星涡度和相对涡度. 波活动通量根据Takaya和Nakamura(2001)的方法计算而得. 相关分析和回归分析的信度检验采用双尾的Student's t检验.

3 结果

3.1 NAO与中国北方冬季降雪关系增强

图1a为1961~2018年中国北方冬季降雪的EOF1模态，该模态解释了总方差的25.1%，并能与其他模态相分离(North等, 1982). 由图可见，冬季降雪在中国北方大部分地区总体呈一致型分布，大值区主要位于中国西北的西北部以及东北的东南部和北部，该分布特征与Zhou等(2021)的研究相一致. 选取EOF1模态对应的标准化时间序列(PC1)作为中国北方冬季降雪指数. 该指数与中国北方区域平均的冬季降雪序列具有较高的相关性，二者的相关系数在1961~2018年期间达到0.91(超过99%的显著性水平).

为探讨NAO对中国北方冬季降雪的影响是否稳定, 计算了1961~2018年NAO与PC1序列的21年滑动相关系数. 从图1b可以看到, 二者的负相关关系从20世纪70年代开始逐渐减弱，并在20世纪90年代中期之前维持在零值上下；随后二者的负相关关系逐渐增强，并在2000年之后超过95%的显著性水平. 如果使用其他的NAO指数定义，例如，葡萄牙里斯本站和冰岛斯蒂基斯霍尔米站之间的标准化海平面气压差(Hurrell, 1995)或副热带和中纬度北大西洋之间的标准化海平面气压差(龚道溢和王绍武, 2000), 可以得到相类似的结果.

为便于分析，基于图1b选取样本长度均为19年的两个时段，即1981~1999年(P1)和2000~2018年(P2)，分别表示NAO与中国北方冬季降雪关系不显著时期和显著时期. 在1961~2018年整个期间，NAO与PC1序列的相关系数为–0.41，通过了99%的显著性检验. 但在P1时段，二者的相关系数仅为0.21，远低于90%的显著性水平. 相比之下, P2时段的相关系数达到–0.76, 高于99%的显著性水平. 相应地，NAO与PC1时间序列在2000年之后呈现反位相变化(图1c). 这一结果表明，后期NAO与中国北方冬季降雪之间的强负相关很大程

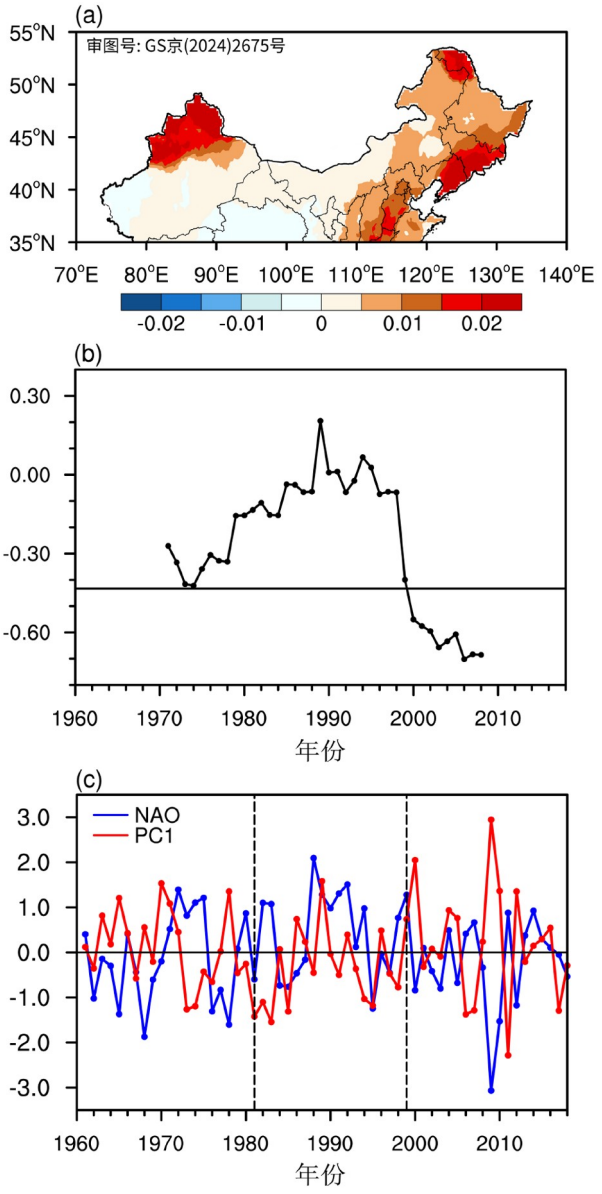


图 1　NAO和中国北方冬季降雪的关系

(a) 1961~2018年中国北方冬季降雪的EOF1模态; (b) NAO和中国北方降雪PC1序列之间的21年滑动相关系数, 水平实线表示95%的显著性水平; (c) 1961~2018年NAO指数(蓝线)和PC1序列(红线)的标准化时间序列

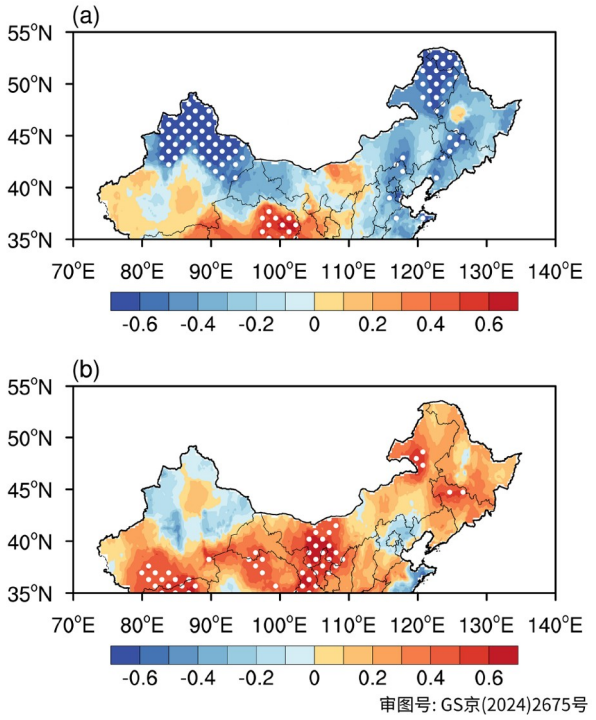


图 2　NAO和中国北方冬季降雪相关系数的空间分布

(a)2000~2018年和(b)1981~1999年期间NAO与冬季降雪之间的相关分布. 打点区域表示通过95%的显著性水平

度上主导了整个时期两者之间的关系. 我们也采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析资料(ERA5)(Hersbach等, 2020)的逐日地表气温和降水数据重新绘制了图1, 得到类似的结果.

图2进一步给出了P2和P1期间NAO与中国北方冬季降雪相关系数的空间分布. 在P2时期, 中国西北北部和东北大部分地区为显著的负相关(图2a), 这种空间分布与图1a展示的EOF1模态空间分布相似. 该结果表明, 负(正)NAO位相对应中国北方降雪偏多(少). 与此不同, 在P1期间, 上述地区的负相关变得不显著, 甚至在中国东北的一些区域出现了正相关(图2b).

综上所述, NAO对中国北方冬季降雪的影响自2000年以来显著加强. 当NAO处于正位相时, 中国北方冬季降雪易于减少; 反之, 当NAO处于负位相时, 有利于中国北方冬季降雪增加.

3.2　物理机制

为探讨NAO与中国北方冬季降雪关系加强的原因, 对比了P1和P2时期与NAO相关的大气环流场的差异. 在P2时期, 与NAO负位相联系的环流异常表现为: 在对流层上层, 40°~60°N的中纬度区域出现异常西风, 60°N以北地区受异常东风控制(图3a); 对流层中层, 贝加尔湖至巴尔喀什湖地区为位势高度负异常(图3b). 由于东亚副热带急流和极锋急流的气候态位置分别位于30°N和57.5°N附近, 上述对流层上层纬向风异常意

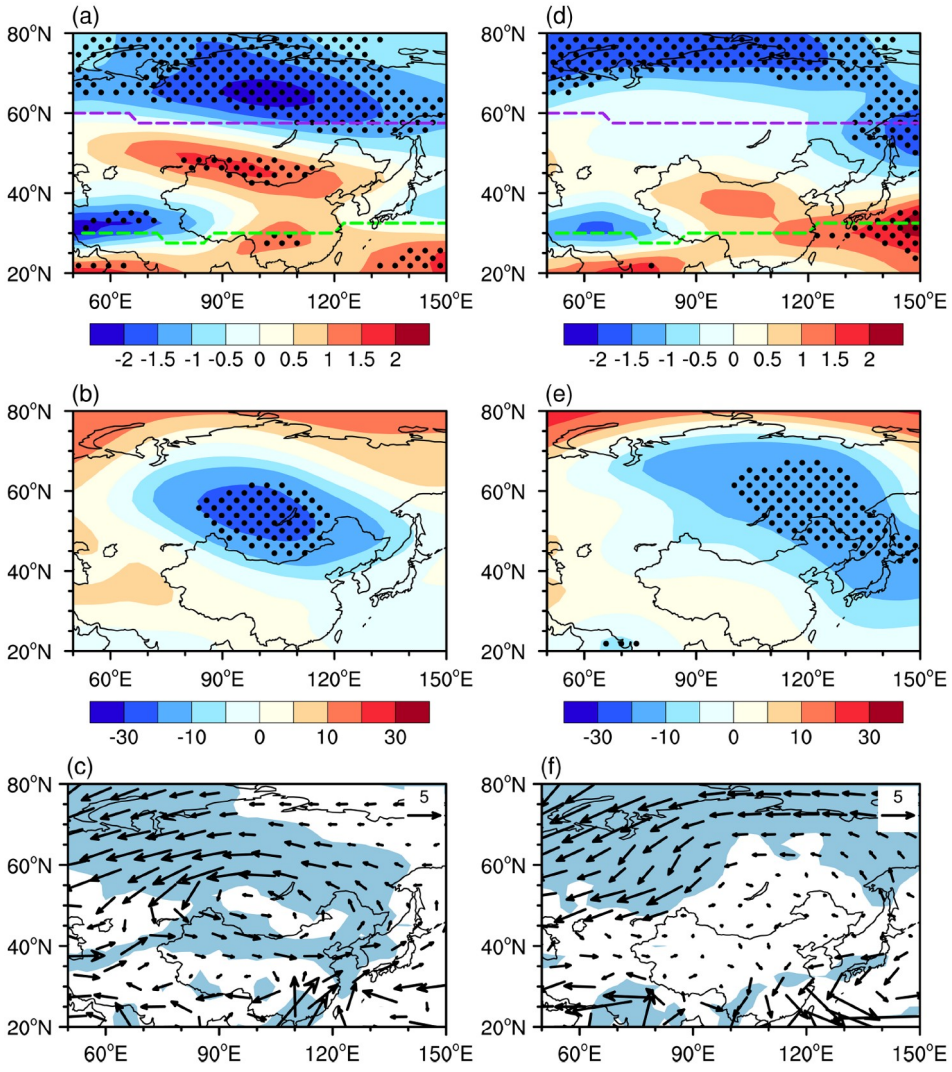


图 3　NAO相关的大气环流异常

(a~c)2000~2018年和(d~f)1981~1999年负NAO指数回归的(a, d)200hPa纬向风(m s^{-1})、(b, e)500hPa位势高度(gpm)和(c, f)从地面积分到300hPa的整层水汽输送通量(kg m^{-1} s^{-1}). (a, d)中的紫线和绿线分别代表东亚极锋急流和东亚副热带急流的气候态位置. (a, b, d, e)中打点区域和(c, f)中的阴影区表示通过90%的显著性水平

味着东亚副热带急流向北移动，东亚极锋急流向南移动，有利于高纬冷空气入侵中国北方(Zhang等，2008; Luo和Zhang，2015; Huang等，2017). 对流层中层负位势高度异常使东亚大槽西移，有利于冷空气在中国北方堆积(Huang等，2017; Zhou等，2021). 此外，贝加尔湖至巴尔喀什湖一带的异常气旋性环流外侧的西风异常利于将西风带和印度洋的水汽输送至西北区域(王遵娅和周波涛，2018)，而与西太平洋异常反气旋环流相关的南风异常可以将南海和西太平洋的水汽向北输送至东北地区(图3c)，结果造成中国北方地区水汽增加. 因此，NAO负位相使更多的冷空气与暖湿气流在中国北方交汇, 有利于该地区降雪的发生.

但在P1时期，与NAO负位相对应的对流层上层纬向风异常却不显著，亦即东亚副热带急流和极锋急流的经向移动不明显(图3d). 与此同时，在对流层中层，贝加尔湖至巴尔喀什湖一带的位势高度负异常的位置偏东(图3e)，结果导致向中国北方地区的水汽输送不显著(图3f). 在这样的背景下, NAO与中国北方冬季降雪的联系减弱.

为什么NAO与上述大气环流的联系在两个时期

会存在差异呢? 以往的研究表明, NAO的不同空间结构可能对大气环流产生不同的影响(Sun等, 2008; Sun和Wang, 2012; Zuo等, 2016). 基于此, 我们检查了NAO在两个时期的空间分布形态. 图4a和4b分别为P2和P1时期负NAO指数回归的冬季海平面气压异常. 无论是P2还是P1期间, NAO负位相都对应着南北偶极型, 北大西洋中纬度地区为海平面气压负异常, 而中高纬度地区为海平面气压正异常. 两时期NAO结构最明显的差异是: 相对于P1时期, P2时期的NAO南部中心向西移动了约15°. 因此, 我们推测NAO南部中心的西移可能加强了P2时期NAO与影响中国北方冬季降雪相关的大气环流之间的联系. 为验证这一推断, 我们绘制了NAO南部中心经度位置同NAO与中国北方冬季降雪PC1序列间的21年滑动相关系数的散点图(图4c). 有趣的是, 21年的滑动相关系数与NAO南部中心经度位置变化呈现显著的线性关系, 两者的相关系数为0.84, 通过99%的显著性水平检验. 这一结果证实NAO南部中心位置的纬向偏移在NAO与中国北方冬季降雪关系增强中起着重要作用.

波源对于波活动具有重要影响(Branstator, 2002; Watanabe, 2004). 因此, 进一步探讨了与NAO相关的波源. 如图5a所示, 与P2时期NAO南部中位置西移相对应, 对流层低层速度势正异常中心也向西移动. 由于低层气流的辐合流入, 对流层高层出现明显的辐散异常(速度势负异常)(图5b). 根据罗斯贝波源理论(Sardeshmukh和Hoskins, 1988), 这样的分布往往会激发波活动通量异常. 由图可见, 北大西洋中纬度区域上空为异常强的罗斯贝波波源(图5b), 伴随的波活动通量也变得更强(图6a). 增强的波活动能够激发东传的罗斯贝波波列至东北亚区域, 进而影响与中国北方冬季降雪相关的大气环流.

相比之下, 与P1时期NAO南部中心位置偏东相对应, 对流层低层速度势正异常中心(图5c)和高层速度势负异常中心(图5d)的位置也发生东移, 而且速度势

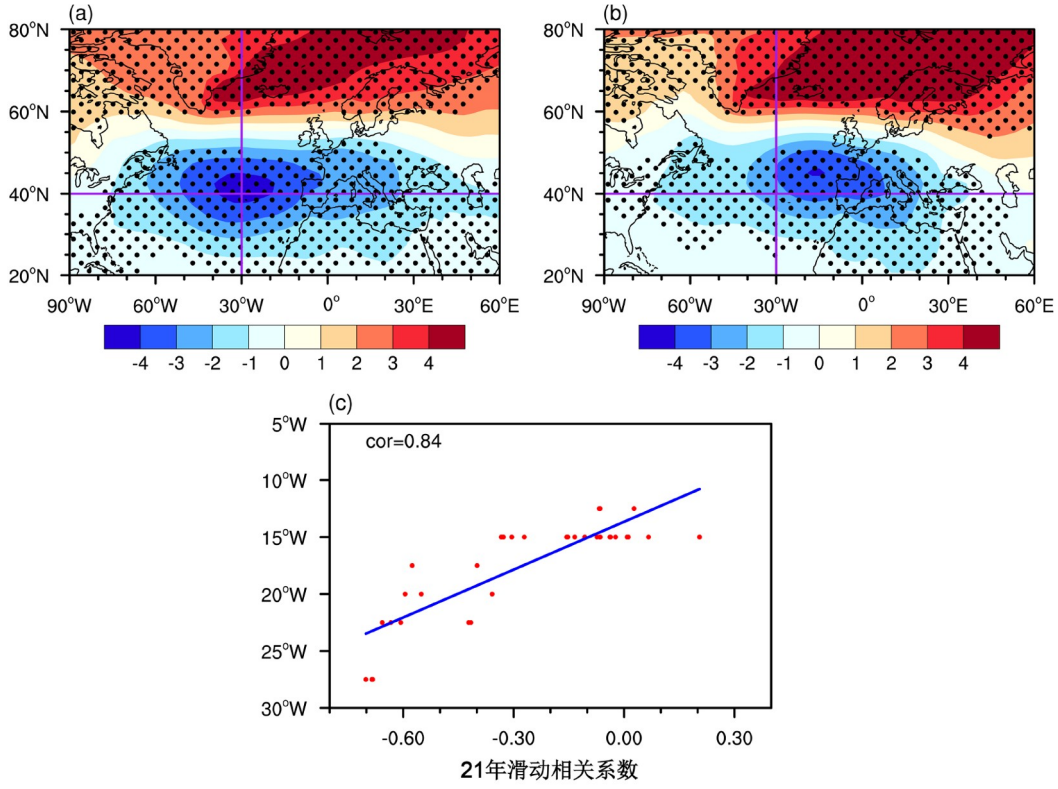


图 4　NAO空间结构的变化

(a)2000~2018年和(b)1981~1999年负NAO指数回归的北大西洋冬季海平面气压异常(hPa), 打点区域表示通过95%的显著性水平; (c) 1961~2018年NAO南部中心经度位置同NAO与中国北方降雪PC1序列间21年滑动相关系数的散点图

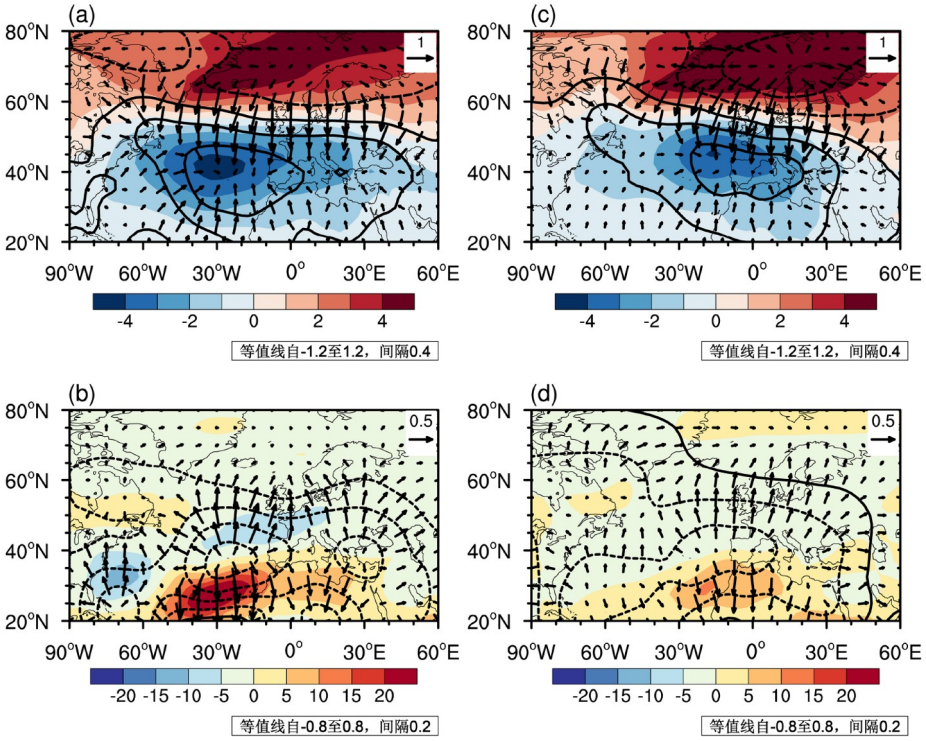


图 5　NAO相关的速度势和罗斯贝波波源

(a, b)2000~2018年和(c, d)1981~1999年负NAO指数回归的(a, c)1000hPa速度势(等值线, $10^6 m^2 s^{-1}$)、辐散风(箭头, $m\ s^{-1}$)和海平面气压(阴影, hPa)以及(b, d)200hPa速度势(等值线, $10^6 m^2 s^{-1}$)、辐散风(箭头, $m\ s^{-1}$)和罗斯贝波波源(阴影, $10^{-12} s^{-2}$)

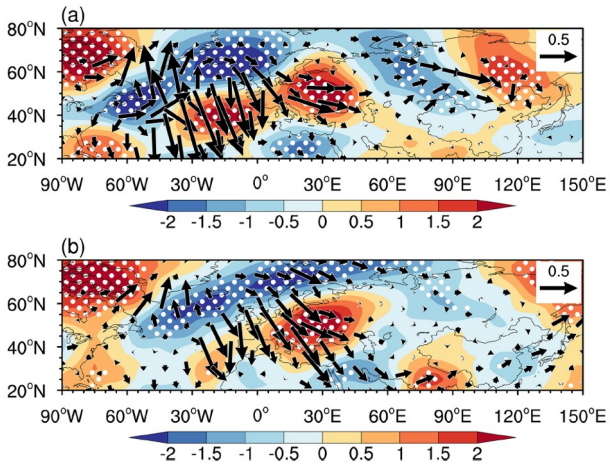


图 6　NAO指数相关的经向风和波活动通量

(a)2000~2018年和(b)1981~1999年与负NAO指数相关的300hPa经向风(阴影, $m\ s^{-1}$)和水平波活动通量(箭头, $m^2\ s^{-2}$). 打点区域表示通过90%的显著性水平

异常的强度较弱，造成北大西洋上空的罗斯贝波波源向东移动并减弱(图5d)，结果导致波活动表现为经向传播至中亚区域的特征(图6b)，无法影响到与中国北方冬季降雪相关联的大气环流，从而减弱NAO与中国北方冬季降雪的联系.

以上研究表明，NAO空间模态的变化可能对中国

北方冬季降雪产生不同的影响. 值得注意的是, 欧亚大陆环流背景的变化也可能影响与NAO相关的大气环流异常(Chen和Wu, 2017; Chen等, 2020a), 这个问题值得进一步地探讨.

4 结论

本研究结果表明, 冬季NAO与中国北方降雪的关系自2000年以来显著增强. 2000~2018年(P2)期间, 冬季NAO与中国北方降雪PC1序列的相关系数高达–0.76(通过99%的显著性水平), 即NAO负位相对应中国北方冬季降雪增多, 反之亦然. 然而, 在1981~1999年(P1)期间, 两者的相关较弱, 相关系数仅为0.21(低于90%的显著性水平).

初步探讨了NAO与中国北方冬季降雪关系增强的相关物理机制. 在P2时期, NAO负位相对应东亚副热带急流北移和东亚极锋急流南移, 同时, 对流层中层巴尔喀什湖至贝加尔湖一带为位势高度负异常, 有利于向南入侵的冷空气在中国北方积聚. 另外, 巴尔喀什湖至贝加尔湖一带的气旋性环流异常利于西风水汽输送至中国西北区域, 南风水汽输送至中国东北地区, 造成中国北方水汽增加. 因此, 更多的冷空气与暖湿气流在中国北方交汇, 利于该区降雪增多. 然而, 在P1时期, NAO与上述大气环流的联系较弱, 从而减弱了其与中国北方冬季降雪的关系.

进一步分析发现, 冬季NAO南部中心位置从P1到P2时期的西移可增强NAO与影响中国北方冬季降雪的大气环流场之间的联系. 在P2期间, 伴随着NAO南部中心位置的西移, 对流层低层辐合异常和高层辐散异常也随之西移, 罗斯贝波波源强度偏强, 位置偏西, 从而在大西洋上空激发强的波活动通量. 强波活动通量进一步激发沿纬向传播的罗斯贝波波列至东北亚地区, 进而影响与中国北方冬季降雪相关的大气环流. 在P1期间, 由于NAO南部中心位置的东移, 罗斯贝波波源向东移动, 相应的波活动通量减弱, 导致与NAO相关联的罗斯贝波波列呈现经向传播特征, 无法到达东北亚地区并影响那里的大气环流.

总之, 本研究揭示NAO南部中心位置西移在NAO与中国北方冬季降雪关系增强中起着重要作用, 该发现有助于深入理解中国北方降雪的变化. 不过, 有关NAO南部中心位置西移的原因仍不十分清楚, 有待今后进一步深入研究. 最近的研究表明(Song等, 2024), 秋季巴伦支-喀拉海海冰年际变率的减弱对于冬季NAO中心位置的移动具有贡献. 北大西洋平均流与风暴轴活动之间的相互作用(Chen等, 2014, 2015a)以及NAO与热带大西洋海表温度关系的变化(Chen等, 2015b, 2020b)也对NAO空间结构的变化具有影响.

此外, 在探讨中纬度气候变率与高纬度的联系时, 北极放大效应和北极海冰减少的作用不容忽视. 已有的研究表明, 北极增暖或海冰减少有利于欧亚大陆冬季降雪和极端冷事件的发生(Cohen等, 2012, 2018; Liu等, 2012; Gao等, 2015; Zhang等, 2022; He等, 2023). 北极放大效应对中国北方降雪的影响及其与NAO作用的对比值得今后进一步研究.

参考文献

龚道溢, 王绍武. 2000. 北大西洋涛动指数的比较及其年代际变率. 大气科学, 24: 187–192

王会军, 贺圣平. 2013. 我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系. 科学通报, 58: 629–633

王遵娅, 周波涛. 2018. 影响中国北方强降雪事件年际变化的典型环流背景和水汽收支特征分析. 地球物理学报, 61: 2654–2666

吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. 地球物理学报, 56: 1102–1111

周波涛, 崔绚. 2014. 北大西洋涛动与西北太平洋热带气旋频数关系的年代际变化. 中国科学: 地球科学, 44: 1026–1033

Branstator G. 2002. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation. J Clim, 15: 1893–1910

Chen H P, Sun J Q. 2022. Future changes in daily snowfall events over China based on CMIP6 models. Atmos Ocean Sci Lett, 15: 100137

Chen S F, Wu R G. 2017. Interdecadal changes in the relationship between interannual variations of spring North Atlantic SST and Eurasian surface air temperature. J Clim, 30: 3771–3787

Chen S F, Yu B, Chen W. 2014. An analysis on the physical process of the influence of AO on ENSO. Clim Dyn, 42: 973–989

Chen S F, Yu B, Chen W. 2015a. An interdecadal change in the influence of the spring Arctic Oscillation on the subsequent ENSO around the early 1970s. Clim Dyn, 44: 1109–1126

Chen S F, Wu R G, Chen W. 2015b. The changing relationship between interannual variations of the North Atlantic Oscillation and northern tropical Atlantic SST. J Clim, 28: 485–504

Chen S F, Wu R G, Chen W, Hu K M, Yu B. 2020a. Structure and dynamics of a springtime atmospheric wave train over the North

Atlantic and Eurasia. Clim Dyn, 54: 5111–5126

Chen S F, Wu R G, Chen W. 2020b. Strengthened connection between springtime North Atlantic Oscillation and North Atlantic tripole SST pattern since the late 1980s. J Clim, 33: 2007–2022

Cohen J L, Furtado J C, Barlow M A, Alexeev V A, Cherry J E. 2012. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling. Environ Res Lett, 7: 014007

Cohen J, Pfeiffer K, Francis J A. 2018. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States. Nat Commun, 9: 869

Du Y B, Zhang J, Zhao S W, Chen H S. 2020. Impact of the eastward shift in the negative-phase NAO on extreme drought over northern China in summer. J Geophys Res-Atmos, 125: e2019JD032019

Fan K, Tian B Q. 2013. Prediction of wintertime heavy snow activity in Northeast China. Chin Sci Bull, 58: 1420–1426

Feng G L, Zou M, Qiao S B, Zhi R, Gong Z Q. 2018. The changing relationship between the December North Atlantic Oscillation and the following February East Asian trough before and after the late 1980s. Clim Dyn, 51: 4229–4242

Gao Y Q, Sun J Q, Li F, He S P, Sandven S, Yan Q, Zhang Z S, Lohmann K, Keenlyside N, Furevik T, Suo L L. 2015. Arctic sea ice and Eurasian climate: A review. Adv Atmos Sci, 32: 92–114

He X L, Zhang R N, Ding S Y, You Q L, Cai Z Y. 2023. Decadal changes in the linkage between autumn sea ice and the winter Eurasian temperature in the 20th century. Geophys Res Lett, 50: e2023GL103851

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan R J, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S, Thépaut J. 2020. The ERA5 global reanalysis. Q J R Meteor Soc, 146: 1999–2049

Hu Y, Zhou B, Han T, Li H, Wang H. 2022. In-phase variations of spring and summer droughts over northeast China and their relationship with the North Atlantic Oscillation. J Clim, 35: 6923–6937

Huang D Q, Dai A G, Zhu J, Zhang Y C, Kuang X Y. 2017. Recent winter precipitation changes over eastern China in different warming periods and the associated East Asian jets and oceanic conditions. J Clim, 30: 4443–4462

Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. Science, 269: 676–679

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteorol Soc, 77: 437–471

Liu J P, Curry J A, Wang H J, Song M R, Horton R M. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. Proc Natl Acad Sci USA, 109: 4074–4079

Luo X, Zhang Y C. 2015. The linkage between upper-level jet streams over East Asia and East Asian winter monsoon variability. J Clim, 28: 9013–9028

North G R, Bell T L, Cahalan R F, Moeng F J. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Mon Weather Rev, 110: 699–706

Qiao S B, Feng G L. 2016. Impact of the December North Atlantic Oscillation on the following February East Asian trough. J Geophys Res-Atmos, 121: 10074–10088

Rogers J C. 1984. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. Mon Weather Rev, 112: 1999–2015

Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. J Atmos Sci, 45: 1228–1251

Seager R, Kushnir Y, Nakamura J, Ting M, Naik N. 2010. Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10. Geophys Res Lett, 37: L14703

Song Z Y, Zhou B T, Xu X P, Yin Z C. 2024. Interdecadal change in the response of winter North Atlantic Oscillation to the preceding autumn sea ice in the Barents-Kara Seas around the early 1990s. Atmos Res, 297: 107123

Sun B, Wang H. 2013. Water vapor transport paths and accumulation during widespread snowfall events in northeastern China. J Clim, 26: 4550–4566

Sun B, Wang H J, Zhou B T. 2019. Climatic condition and synoptic regimes of two intense snowfall events in eastern China and implications for climate variability. J Geophys Res-Atmos, 124: 926–941

Sun B, Wang H J, Wu B W, Xu M, Zhou B T, Li H X, Wang T. 2021. Dynamic control of the dominant modes of interannual variability of snowfall frequency in China. J Clim, 34: 2777–2790

Sun J Q, Wang H J. 2012. Changes of the connection between the summer North Atlantic Oscillation and the East Asian summer rainfall. J Geophys Res, 117: 2012JD017482

Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2008. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature. J Geophys Res, 113:

2007JD009626

Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. J Atmos Sci, 58: 608–627

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Weather Rev, 109: 784–812

Wang H J, Yu E T, Yang S. 2011. An exceptionally heavy snowfall in Northeast china: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model. Meteorol Atmos Phys, 113: 11–25

Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation. J Clim, 17: 4674–4691

Xie T J, Li J P, Sun C H, Ding R Q, Wang K C, Zhao C F, Feng J. 2019. NAO implicated as a predictor of the surface air temperature multidecadal variability over East Asia. Clim Dyn, 53: 895–905

Xu S Q, Fang Y H, Lin Y T, Sun X G, Yang X Y, Gong Z Q. 2023. Enhanced impact of autumn north tropical Atlantic sea surface temperature anomalies on subsequent winter snowfall in Northeast China after 2001. J Clim, 36: 663–675

Xu T T, Shi Z G, Wang H L, An Z S. 2016. Nonstationary impact of the winter North Atlantic Oscillation and the response of mid-latitude Eurasian climate. Theor Appl Climatol, 124: 1–14

Yang Z F, Huang W Y, He X S, Wang Y, Qiu T P, Wright J S, Wang B. 2019. Synoptic conditions and moisture sources for extreme snowfall events over East China. J Geophys Res-Atmos, 124: 601–623

Zhang R N, Screen J A, Zhang R H. 2022. Arctic and Pacific Ocean conditions were favorable for cold extremes over Eurasia and North America during winter 2020/21. Bull Am Meteorol Soc, 103: E2285–E2301

Zhang Y C, Wang D Q, Ren X J. 2008. Seasonal variation of the meridional wind in the temperate jet stream and its relationship to the Asian monsoon. Acta Meteorol Sin, 22: 446–454

Zhou B T. 2013. Weakening of winter North Atlantic Oscillation signal in spring precipitation over southern China. Atmos Ocean Sci Lett, 6: 248–252

Zhou B T, Wang Z Y, Shi Y. 2017. Possible role of Hadley circulation strengthening in interdecadal intensification of snowfalls over northeastern China under climate change. J Geophys Res-Atmos, 122: 11638–11650

Zhou B T, Wang Z Y, Shi Y, Xu Y, Han Z Y. 2018. Historical and future changes of snowfall events in China under a warming background. J Clim, 31: 5873–5889

Zhou B T, Wang Z Y, Sun B, Hao X. 2021. Decadal change of heavy snowfall over northern China in the mid-1990s and associated background circulations. J Clim, 34: 825–837

Zuo J Q, Ren H L, Li W J, Wang L. 2016. Interdecadal variations in the relationship between the winter North Atlantic Oscillation and temperature in south-central China. J Clim, 29: 7477–7493

(责任编委: 张人禾)