

# 冬季南北半球际大气质量涛动与东亚冬季风异常联系的模式验证

钟磊<sup>①</sup>, 卢楚翰<sup>②\*</sup>, 乔年<sup>①</sup>, 管兆勇<sup>①</sup>, 曾跃飞<sup>①</sup>

① 南京信息工程大学 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, 江苏 南京 210044;

② 无锡学院 中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室, 江苏 无锡 214063

\* 联系人, E-mail: luchuhan@nuist.edu.cn

2023-05-18 收稿, 2023-07-15 接受

国家自然科学基金资助项目(41975073); 国家重点研究与发展计划项目(2019YFC1510201); 上海市科学技术委员会项目(20dz1200401); 无锡学院引进人才科研启动基金

**摘要** 南北两半球大气中高纬度之间的相互作用与季风等跨半球的天气气候系统存在着密切联系, 由于涉及全球范围的大尺度环流与能量变化, 其联系途径与机理受到学者们的广泛关注。本文结合 ERA5 再分析资料以及 CMIP6 中 MPI-ESM1-2-HR 模式历史输出资料, 验证了冬季南北半球际大气质量涛动 (Inter-Hemispheric atmospheric mass Oscillation, IHO) 与东亚冬季风异常的联系及其对中国冬季气温的影响。研究表明, 再分析资料以及模式结果均表明冬季 IHO 与东亚冬季风存在显著的正相关关系。IHO 通过全球大气质量再分配与东亚冬季风建立起紧密的联系。当 IHO 为正位相时, 大气质量在欧亚大陆北部异常堆积, 而在中低纬地区异常亏损, 这使得东亚地区海陆气压差明显增大, 冬季风增强, 同时对中国华中地区冬季地表气温具有显著影响; 反之亦然。进一步分析发现, 热带低平流层气温可以通过剩余环流调节臭氧含量经向分布进而影响南极对流层气温, 从而对 IHO 年际变化起主要的驱动作用。

**关键词**

东亚冬季风;  
南北半球际大气质量涛动;  
温度“跷跷板”;  
CMIP6

东亚冬季风 (East Asian Winter Monsoon, EAWM) 是北半球冬季最重要的大气环流系统之一, 对东亚的天气和气候变化起到十分重要的调节作用 (Huang et al., 2012)。西伯利亚高压、对流层中上层的东亚大槽、对流层上层东亚急流和近赤道对流动态地耦合在一起, 构成 EAWM 环流系统 (Wang et al., 2010)。EAWM 一个独特的特点是其跨越的经向温度范围大 (从极地到热带), EAWM 偏强时东亚地表气温异常偏低, 同时冷空气爆发更频繁, 延伸到中纬度地区, 有时到达热带地区 (Chen et al., 2000)。由于冷空气侵入热带地区, EAWM 可在海洋大陆上空引起深对流, 这甚至与澳大利亚夏季季风有关, 因而 EAWM 在全球尺度的物质和能量循环中都起着至关重要的作用 (Eroglu et al., 2016)。EAWM 增强常引起东亚地区寒冷干燥的北

风、低温、强降雪、冰冻和沙尘暴, 以及东南亚地区的强对流 (丁一汇等, 2014)。EAWM 的异常不仅会影响极端天气气候事件发生的频率及强度, 也可能导致前所未有的极端天气气候事件发生 (Zhang et al., 1997; Park et al., 2011; Wu et al., 2011; 王政琪等, 2017)。需要指出的是, 尽管在全球变暖的背景下, 中国冬季平均气温呈现出明显的上升趋势 (Fu and Ding, 2021), 但中国仍然频繁发生区域性寒冷事件 (Lu et al., 2016; 谢韶青和卢楚翰, 2018; 孙晓娟等, 2022; 胡宏博等, 2023)。这与 EAWM 的年际和年代际变化密切相关 (韩永秋等, 2021)。例如, 2020 年 12 月冬季风场与气温异常显示, 东亚季风区内有明显的偏北风异常。通过进一步计算发现, 冬季风指数高达 1.31, 明显较同期偏强, 因此全国大部分地区较常年同期气温偏低。这导致中东部大

**引用格式:** 钟磊, 卢楚翰, 乔年, 等, 2024. 冬季南北半球际大气质量涛动与东亚冬季风异常联系的模式验证 [J]. 大气科学学报, 47(4): 570-580.

Zhong L, Lu C H, Qiao N, et al., 2024. Model verification of the relationship between inter-hemispheric atmospheric mass oscillation and East Asian winter monsoon [J]. Trans Atmos Sci, 47(4): 570-580. doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20230518003. (in Chinese).

部分地区降温及雨雪天气,在12月28—31日部分地区甚至上演了破纪录的大范围极端低温天气,对我国人民生活造成严重的影响(韩荣青等,2021;Bueh et al.,2022)。因此,认识EAWM与全球大气环流的相关联系对理解东亚地区冬季气候变化的成因,揭示全球变暖背景下我国冬季气温变化的规律具有重要的意义。

大气质量是大气环流变化的一个重要表征量,能够直接体现大气环流和气候系统的变化调整(Lorenz,1951;Christy et al.,1989;Yu et al.,2014)。气候系统中大气涛动通过调配大气质量再分布过程与EAWM建立起密切的联系。例如,北极涛动(AO)的不同位相对应着北半球大气质量的再分配,能够显著地影响北半球气候,对EAWM年际以及年代际变化都有重要影响(王林等,2021)。Chen et al.(2013)提出虽然EAWM形成中热带外过程占主导作用,但ENSO作为热带地区海气耦合系统年际尺度上最主要的模态,同样是影响EAWM变异的最重要的一个外强迫因子。北大西洋涛动遥相关作用可以通过南、北两支波列,分别调控南、北支槽系统,协同作用调节中国东南部30°N附近温度(施春华等,2021)。此外,南半球的相关信号同样可以通过南北半球相互作用影响东亚地区冬季气候。例如,南极涛动同样可以通过半球间相互作用调节东亚冬季气温(张乐英等,2017)。

上述研究结果表明,EAWM的年际变异与北半球甚至全球尺度大气质量再分配过程相互关联。南北半球相互作用是季风现象的本质(曾庆存和李建平,2002)。而Guan and Yamagata(2001)发现在把赤道视为特殊边界的情形下,南北半球间大气质量年际异常存在此消彼长的涛动现象,并将之称为南北半球际大气质量涛动(Inter-Hemispheric atmospheric mass Oscillation,简称IHO),它能够反映半球间大气质量交换引起的全球范围大气质量再分布。卢楚翰等(2008)研究了IHO的季节变化特征,发现半球间大气质量通量的季节性周期在对流层中显示出明显的跷跷板结构,这在气候上与东亚季风有关。此后进一步的研究表明IHO与亚洲季风区内大气质量异常分布密切联系,并揭示了夏季IHO与东亚夏季风的关系(Lu et al.,2010;卢楚翰等,2013)。基于这些,Lu et al.(2023)利用再分析资料诊断研究了冬季IHO与海陆气压差的关系,发现冬季IHO与EAWM之间联系存在年代际变化,两者在1979年后表现为更加紧密的正相关关系。

值得注意的是,目前主流的海气耦合模式内部具有自身的大气质量平衡功能,那么在干空气质量守恒的情况下,1979年后IHO与EAWM的年际联系是否存在,两者的相互联系是否更加密切。因此,为进一步验证EAWM与IHO的年际联系以及驱动IHO的外强迫因子,本文将结合1979—2020年ERA5再分析资料以及CMIP6中MPI-ESM1-2-HR模式历史输出资料,研究冬季南北半球际大气质量涛动(IHO)与东亚冬季风异常的联系及其对中国冬季气温的影响。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文采用的资料包括:1)欧洲中期天气预报中心的ERA5分析数据集,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,包括月平均地表气压和地表10 m风场,时间涵盖1979—2020年北半球冬季(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=overview>)。2)1960—2020年经纬度分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的中国冬季地表气温网格化数据集(CN05.1)(吴佳和高学杰,2013)。为方便起见,再分析数据和CN05.1观测数据被称为“观测数据”。3)CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)数据集的历史试验资料(Eyring et al.,2016),所用变量包括月平均地表气压、位势高度场、水平风场、气温以及臭氧,多层资料高度范围为1 000~50 hPa,共14层,覆盖时段为1979—2013年北半球冬季。文中定义冬季为该年12月至次年2月的平均。此外采用双线性插值方法对不同分辨率的资料进行了处理,使其分辨率统一到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 网格。

### 1.2 IHO与EAWM指数

根据Guan and Yamagata(2001),利用地表气压 $p_s$ 定义IHO指数为:

$$m_{\text{NH}} = \frac{2\pi a^2 f_D}{g_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \bar{p}_s(\varphi) \cos\varphi d\varphi,$$

$$m_{\text{SH}} = \frac{2\pi a^2 f_D}{g_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \bar{p}_s(\varphi) \cos\varphi d\varphi,$$

$$I_{\text{IHO}} = m_{\text{NH}} - m_{\text{SH}}.$$

其中: $f_D = 1.0020$ 表示地球形变参数; $\bar{p}_s$ 为地表气压 $p_s$ 纬向平均值; $\varphi$ 为纬度。文中使用相对研究时段(1979—2020年)作为气候态进行标准化后的IHO指数,并定义IHO大于1倍标准差为IHO高值

年, IHO 小于 -1 倍标准差为 IHO 低值年。

为分析与 EAWM 的联系, 同时聚焦大气质量分布以及低层大气活动中心的联系, 本文采用 Wang and Chen (2014) 定义的 EAWM 指数:

$$I_{EAWM} = p_{SL1}^* - \frac{1}{2} p_{SL2}^* - \frac{1}{2} p_{SL3}^*$$

其中:  $p_{SL1}^*$ 、 $p_{SL2}^*$ 、 $p_{SL3}^*$  分别表示西伯利亚 (70° ~ 120° E, 40° ~ 60° N)、北太平洋 (140° E ~ 170° W, 30° ~ 50° N) 和海洋大陆 (110° ~ 160° E, 20° S ~ 10° N) 的相对研究时段 (1979—2020 年) 标准化后的区域内格点海平面气压等权重算数平均。亚洲大陆与邻近海洋的热力对比是东亚冬季风的主要方面, 在海平面气压场有较好表现。并且该指数明确考虑了东亚地区的东风和南北气压梯度, 较好地刻画了 EAWM 变化时的大气环流异常。此外, 与以往的指数相比, 该指数能很好地描述东亚地区冬季平均地面气温的变化, 特别是对极端暖冬或寒冷冬季的变化。

## 2 结果分析

### 2.1 南北半球大气质量涛动与冬季风的联系

海陆间的热力差异导致海陆间大气质量再分布存在显著的差异, 并形成了 EAWM 最直接的驱动力——海陆气压梯度力。半球间大气质量交换通过全球大气质量再分布对东亚区域大气质量异常分布具有显著的影响, 从而建立起 IHO 与季风的联系 (Guan et al., 2010; Lu et al., 2010)。图 1a 展示了观测资料中 1979—2020 年 IHO 和 EAWM 的年际变化特征, 可以发现两者年际变化规律较为吻合。此外, 通过进一步计算发现两者相关系数高达 0.49 (通过置信度为 99% 的显著性检验), 表明冬季 IHO 对冬季风具有重要调控作用。

研究表明, CMIP6 对于南北半球际大气质量涛

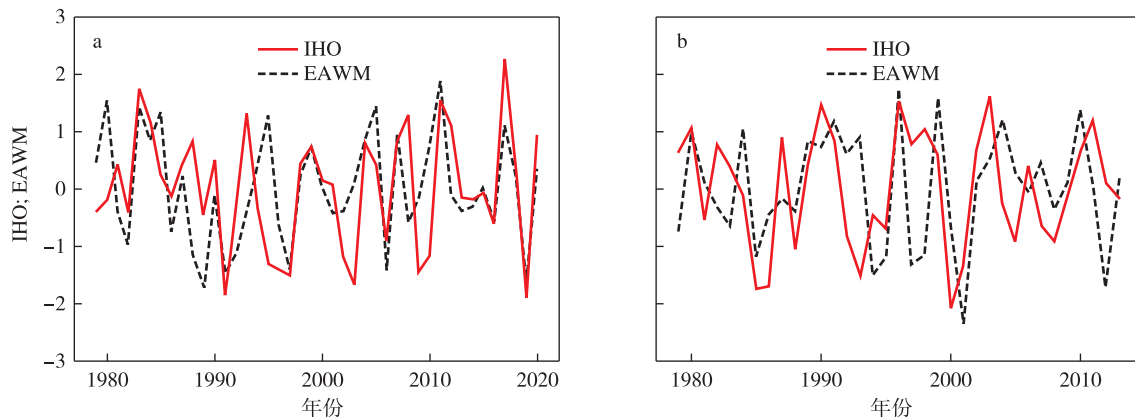


图 1 1979—2020 年 ERA5 (a) 以及 1979—2013 年 MPI-ESM1-2-HR 模式 (b) 中 IHO 与 EAWM 指数

Fig.1 IHO and EAWM indices in (a) the ERA5 during 1979—2020 and (b) the MPI-ESM1-2-HR model during 1979—2013

动的季节特征以及空间结构有较好的模拟能力 (乔年等, 2022)。为验证 IHO 与 EAWM 之间的相关关系, 计算了 CMIP6 中各个模式 IHO 与 EAWM 的相关系数, 发现在 30 个模式中有超过 96.7% 的成员显示两者相关系数为正, 其中 10 个模式通过置信度为 90% 的显著性检验 (表 1), 表明 IHO 与 EAWM 的正相关关系在 CMIP6 的大部分模式中能得到较好验证。Lu et al. (2023) 基于观测资料指出南极地区大气质量变化对 IHO 年际变化起主要贡献。而 MPI-ESM1-2-HR 模式较好地消除了两半球对流层中下层尤其是南极区域的气温偏差, 较真实地反映了大尺度大气温分布以及地表风场的变化 (Gutjahr et al., 2019)。为了进一步分析地球系统模式中的 IHO 与 EAWM 之间的联系以及联系途径并验证南极大气质量变化在半球间大气质量交换的主导性地位, 接下来以 CMIP6 中的 MPI-ESM1-2-HR 模式作为代表展开研究。如图 1b 所示, 模式中 IHO 与 EAWM 在近 30 多年以来的时间演变尤其是年际振荡具有较好的一致性, 存在显著的正相关关系, 两者的相关系数达 0.35 (通过置信度为 95% 的显著性检验)。

半球际大气质量交换伴随着大范围的大气质量再分布, 从而对区域大气质量/地表气压以及低层大气环流产生直接影响。为了进一步分析该模式中 IHO 对低层大气环流的影响, 分别对观测资料以及模式中冬季 IHO 高低年地表气压作合成差值。其结果如图 2 所示, 不难发现, 观测资料以及模式中合成差值结果基本一致。具体而言, 北半球中高纬地区为显著的正异常区, 而显著的地表气压负异常区主要分布在东半球热带与副热带地区。这表明当 IHO 增强时, 有利于北半球中高纬度尤其是欧亚大陆西北部如西伯利亚等区域冷空气的异常堆积。同

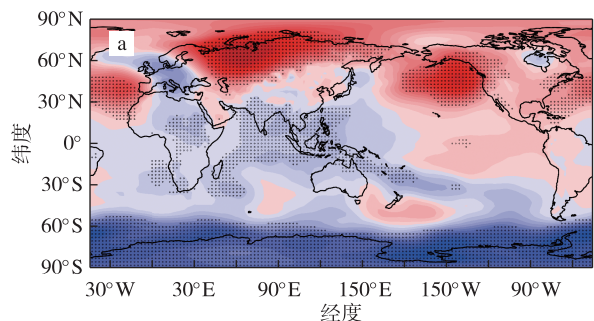
表1 30个CMIP6模式模拟的冬季IHO与EAWM的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between winter IHO and EAWM simulated by 30 CMIP6 models

模式	相关系数	模式	相关系数
GISS-E2-1-G	0.62 <sup>1)</sup>	BCC-CSM2-MR	0.22
MIROC-ES2L	0.51 <sup>1)</sup>	HadGEM3-GC31-LL	0.22
IPSL-CM6A-LR	0.49 <sup>1)</sup>	GFDL-ESM4	0.22
KACE-1-0-G	0.40 <sup>1)</sup>	FGOALS-f3-L	0.21
ACCESS-CM2	0.37 <sup>1)</sup>	MCM-UA-1-0	0.20
MPI-ESM1-2-HR	0.35 <sup>1)</sup>	NESM3	0.15
AWI-CM1-1-MR	0.35 <sup>1)</sup>	NorESM2-MM	0.14
MIROC6	0.33 <sup>1)</sup>	UKESM1-0-LL	0.08
CanESM5-CanOE	0.31 <sup>2)</sup>	GISS-E2-1-H	0.08
INM-CM5-0	0.31 <sup>2)</sup>	CESM2-WACCM	0.07
NorESM2-LM	0.27	CESM2	0.07
CMCC-ESM2	0.27	MPI-ESM1-2-LR	0.06
TaiESM1	0.26	INM-CM4-8	0.01
CanESM5	0.26	GFDL-CM4	0.01
MRI-ESM2-0	0.24	CMCC-CM2-SR5	-0.05

注:1)表示信度<0.05;2)表示0.05<信度<0.1

时,欧亚大陆东部邻近海域以及海洋性大陆区域有显著的质量异常亏损。这种大气质量异常分布显著地增大了东亚地区海陆间的气压梯度,从而有利于EAWM的增强。需要注意的是,观测资料以及模式中均显示南半球以负的异常质量分布为主,这与两半球的大气质量振荡相呼应,其中60°S以南的南极区域都表现为纬向一致的负异常分布。进一步计算了南极负异常区占南半球异常值的比例,即南极地区大气质量合成差值(纬向平均并乘以相应纬度余



弦值)占南半球大气质量合成差值(纬向平均并乘以相应纬度余弦值)之比。观测资料中南极地区质量亏损贡献了57.78%的南半球的负异常质量,而模式中南极地区的质量亏损则贡献了79.83%的南半球的负异常质量,这与丛菁等(2011)揭示的南极地区大气振荡是形成南北半球际大气质量涛动的部分原因的结论相一致。MPI-ESM1-2-HR模式结果与再分析资料所揭示的IHO与EAWM联系以及对地表气压空间分布影响具有较好的一致性,为突显IHO与EAWM联系的可靠性,后续分析主要基于该模式资料。

此外IHO造成的全球大气质量的再分布将引起地表气压场的改变,并伴随着大尺度大气环流以及风场的明显改变(van den Dool and Saha, 1993)。图3展示了IHO高低值年近地面风场的合成差值。可以看出,当IHO异常偏强时,中国东部沿海以及日本南部伴随着显著的偏北风异常,导致东亚沿海30°~45°N季风区域北风增强。结合图2b,当IHO增强时,会引起中纬度地区自西向东的海陆气压梯度显著增强,根据地转平衡关系,将伴随着自东向西的地转偏向力以及相应的北风异常,并引起东亚冬季风增强。特别地,IHO增强与华北以及华中地区的偏东北风异常具有显著的联系并伴随着冷空气入侵。这种异常的环流型可对中国尤其是华中地区冬季气温变化产生重要影响。

为进一步探究IHO对中国冬季气候异常的影响,图4给出了气温对IHO指数的回归系数分布。可以看到,在1979—2013年期间,当IHO增强时,全国(除青藏高原地区)尤其是华中地区地表气温明显下降,而正异常区则主要出现在青藏高原附近。为定量分析IHO对华中地区气温的影响,将华中地

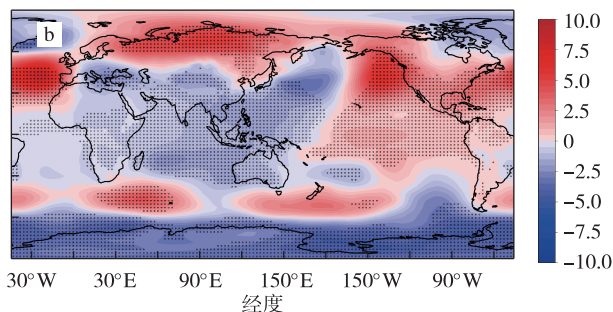


图2 1979—2020年ERA5(a)以及1979—2013年MPI-ESM1-2-HR模式(b)中IHO指数高低年的地表气压合成差值(单位:hPa;打点区域代表通过置信度为90%的双侧t检验)

Fig.2 Composite differences of surface pressure (units:hPa) between strong and weak IHO winters in (a)the ERA5 from 1979 to 2020 and (b)the MPI-ESM1-2-HR model from 1979 to 2013.The dotted areas indicate the 90% confidence levels based on a two-tailed student's *t*-test



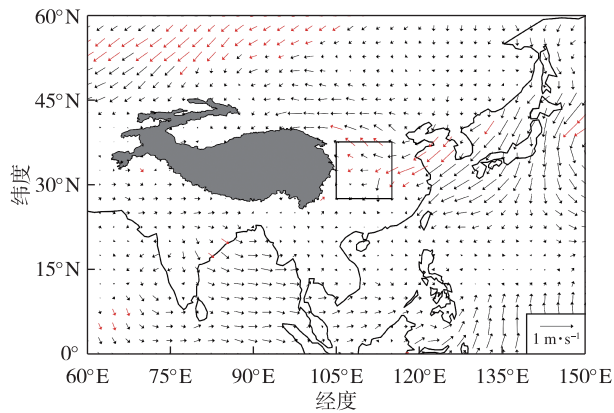


图3 1979—2013年MPI-ESM1-2-HR模式中1000 hPa风场IHO高低年合成差值(单位:m/s;红色箭矢代表通过置信度为90%的双侧t检验;方框区域为华中地区(105°~115°E,27.5°~37.5°N);阴影为青藏高原地区(73°~104°E,28°~38°N))

Fig. 3 Composite difference of 1000 hPa wind field (units: m/s) between strong and weak IHO winters in the MPI-ESM1-2-HR model from 1979 to 2013. The red arrows indicate passing the 90% confidence level in the two-tailed Student's *t*-test. The box area represents Central China (27.5°—37.5°N, 105°—115°E), and the shaded area indicates the Tibetan Plateau (28°—38°N, 73°—104°E)

区的区域平均气温定义为CC指数。CC与IHO指数的年际变化如图4b所示,两者相关系数为-0.29(通过置信度为90%的显著性检验),而利用站点数据计算的CC与ERA5中的IHO相关系数更是达到-0.40(通过置信度为95%的显著性检验),具有显著的负相关关系。这表明,IHO可以通过大气质量

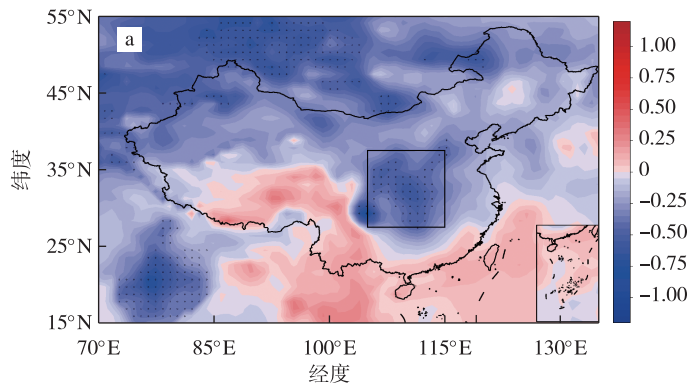


图4 1979—2013年MPI-ESM1-2-HR模式中地表气温对IHO的回归系数(a,单位:°C;打点区域代表通过置信度为90%的单侧学生t检验),以及IHO与CC指数逐年变化(b)

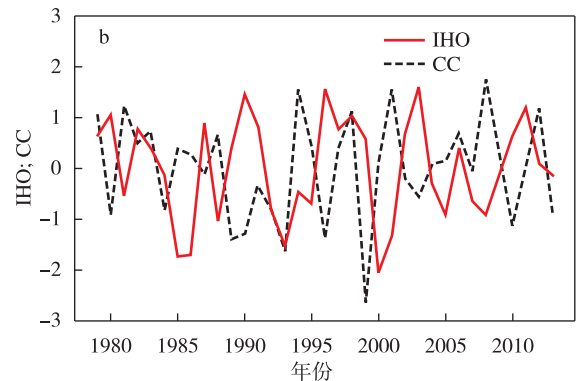
Fig.4 (a) Regression coefficients of surface air temperature (units: °C) on IHO index, and (b) time series of IHO index (red line) and CC index (black line) in the MPI-ESM1-2-HR model during 1979—2013. The values with the black dots in (a) are statistically significant at a 90% confidence level based on a one-tailed Student's *t*-test

异常的再分布显著影响中国区域近地面风场以及地表温度场。当IHO处于正位相时,中国尤其是华中地区出现大范围的负温度异常,增加了低温灾害事件的发生风险。

### 2.2 冬季IHO年际变化的主要驱动因子

前人的研究表明太阳辐射对大气系统加热不均产生大规模大气运动的根本原因,半球间行星热对流环流是半球际大气质量交换的“第一推动力”(曾庆存和李建平,2002)。为研究与IHO相应的异常质量分布及热力环流结构,对IHO指数与纬向平均位势高度以及气温进行相关分析。如图5所示,相关的异常位势高度具有经向跨半球的遥相关特征。具体而言,南半球高纬以及热带对流层中下层为负相关,而南半球中纬以及北半球中高纬由正相关区占据,且显著相关的大值区主要位于南半球的中高纬度地区(图5a)。与之对应,温度的异常相关变化同样也在经向方向上交替出现,并且显著大值区主要分布在南半球中高纬地区以及北半球中纬地区(图5b)。值得注意的是,在南半球60°~90°S区域整层尤其是对流层上部(400~250 hPa)纬向平均位势高度以及气温与IHO都表现为一致的负相关关系,这与Lu et al.(2023)在观测资料中得到的结果一致,表明了经向热力不平衡对半球间大气质量交换具有驱动作用。即当IHO偏强(弱)时,南极上空出现显著的气温与位势高度负(正)异常。南极上空气温降低(升高)导致了内能减少(增加),极涡增强(减弱)的同时整层大气柱收缩(膨胀),势能减小(增大),从而导致了南极区域总能量和大气质量减少(增加),两半球间大气质量差增大(减小)。

由图5可知,南极地区大气质量异常对于IHO



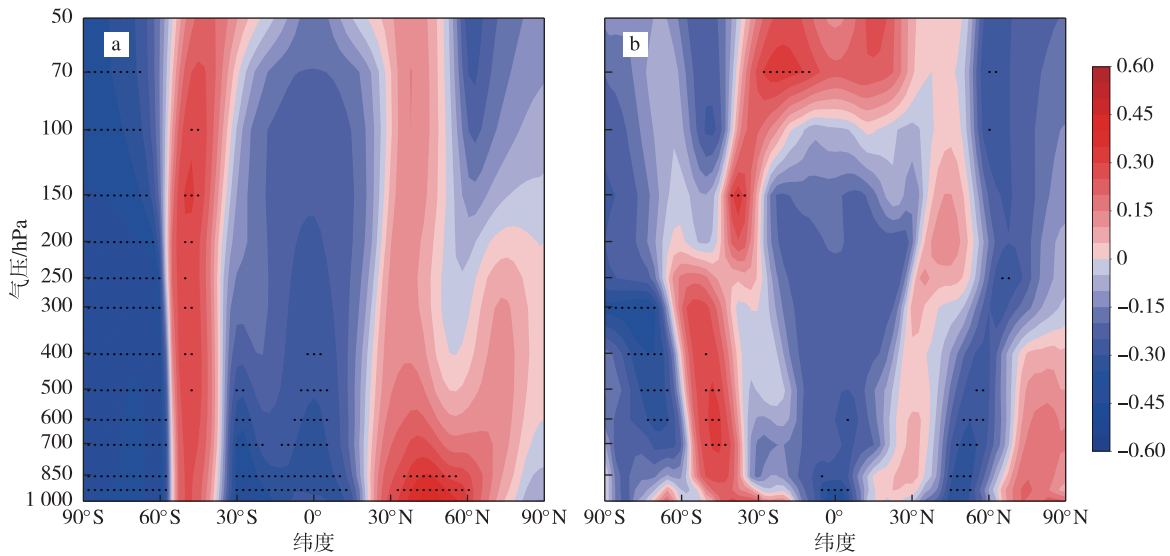


图5 1979—2013年MPI-ESM1-2-HR模式中IHO与纬向平均位势高度场(a)以及平均气温(b)的相关系数(打点区域代表通过置信度为90%的单侧学生t检验)

Fig.5 Correlations of IHO index and (a) zonally averaged geopotential height, and (b) temperature in the MPI-ESM1-2-HR model during 1979—2013. The values with the black dots are statistically significant at a 90% confidence level based on a one-tailed Student's *t*-test

年际变化起主要贡献,南极地区气温异常可能对半球间大气质量交换过程起关键性推动作用。为进一步定量分析南极地区温度对IHO的影响,图6a给出了IHO与南极地区对流层上部平均温度年际变化曲线。从图6a可以发现两者相关系数达到-0.32(通过置信度为90%的显著性检验),表明南极对流层上部气温对IHO年际变化具有重要驱动作用。南极地区由于温度下降、内能减少导致该地区大气质量异常下降,从而驱动大气质量向北输送并增大两半球大气质量差。其中,臭氧是影响南极

地区气温变化的主要因子(陈月娟等,1999)。如图6b所示,计算表明南极地区对流层上部平均温度与臭氧之间存在显著的正相关关系( $r=0.33$ ,通过置信度为95%的显著性检验),表明臭氧含量变化对南极对流层气温起主导作用。南极地区大气臭氧增加,一方面可以通过吸收太阳紫外辐射对平流层大气进行短波加热,另一方面可以放出红外长波辐射调节对流层大气温度,因此在南极地区的极昼时节(北半球冬季),臭氧变化可通过影响太阳辐射进而对南极大气温度以及极涡强度产生显著影响

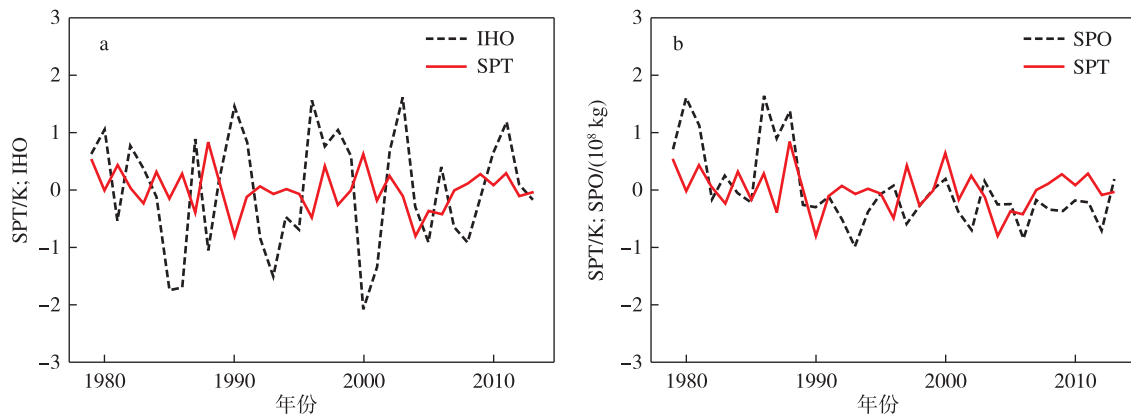


图6 1979—2013年MPI-ESM1-2-HR模式中南极对流层(400~250 hPa)温度(South Polar Temperature,简称SPT;单位:K)与IHO(a)以及臭氧(b;South Polar Ozone,简称SPO;单位: $10^8$  kg)

Fig.6 Time series of South Polar Temperature (SPT; red line; units: K) and (a) IHO index (black line), and (b) South Polar Ozone mass (SPO; black line; units:  $10^8$  kg) in the troposphere (400—250 hPa) in the MPI-ESM1-2-HR model during 1979—2013

(Thompson et al., 2011)。

值得关注的是,图 5b 中 IHO 与气温的显著相关区除了南极地区以外,热带地区 100 hPa 以上的平流层区域也出现了大范围的显著正相关区域。而研究表明,臭氧在太阳辐射强烈的赤道上空形成后,通过剩余环流向高纬度输送,从年际变化看,当这种输送偏弱时,容易伴随热带地区气温(臭氧)偏高,而南极高纬度气温(臭氧)偏低,即两者间呈现反位相的变化(Randel et al., 2002)。计算得到的南极对流层上部气温与全球纬向平均气温相关系数分布如图 7 所示,可以看到南极对流层上部气温与赤道(10°S~10°N)平流层下部(100~70 hPa)气温存在明显的反位相关系。通过进一步计算发现两者的相关系数达到了-0.38(通过置信度为 95%的显著性检验)。这表明,剩余环流可通过动力输送过程调节臭氧含量的经向分布,从而导致极地与赤道间温度呈现“跷跷板”现象,并使得极赤温差呈现周期性变化,从而驱动全球大气环流发生变化。陈权亮等(2009)也指出臭氧的分布会受到行星波破碎激发出的剩余环流的影响并会改变温度场、风场结构,通过影响行星波的传播从而影响对流层大气环流。此外,南半球中纬地区与南极气温同样表现为反相变化。这加强了中高纬间的温度梯度,伴随着绕极环

流加强,从而使得大气向南极热量的输送减少并进一步导致南极气温降低。

### 3 结论和讨论

本文分析了 MPI-ESM1-2-HR 模式中 1979—2013 年冬季 EAWM 与南北半球间大气质量涛动(IHO)的年际关系及其对中国冬季气温的影响,得到以下结论:

1) 1979 年以来,再分析资料以及 CMIP6 中大部分模式尤其是 MPI-ESM1-2-HR 均显示冬季 IHO 与 EAWM 存在紧密联系。当 IHO 为正(负)位相时,欧亚大陆高纬度区域有大气质量堆积(亏损),而欧亚大陆中低纬地区以及邻近海域为大气质量的亏损(堆积),使得欧亚大陆中高纬间经向气压梯度以及东亚地区海陆气压差明显增大(减小),从而使冬季风增强(减弱),并引起了我国尤其是华中地区冬季地表气温显著偏低(高)。

2) 南极地区对流层气温变化所引起的大气质量变化对 IHO 年际变化具有重要的影响。当南极地区温度下降(上升)时,会导致整层大气内能与势能减少(增加),大气质量异常减少(增加),并驱动大气质量向北(南)输送从而调节两半球间大气质量差。

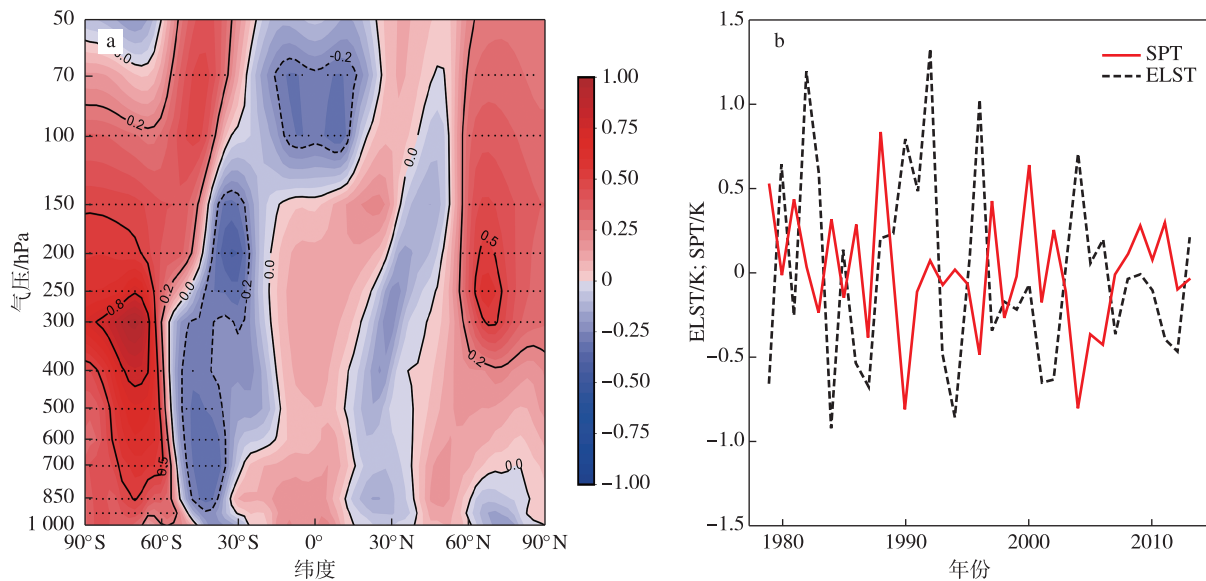


图 7 1979—2013 年 MPI-ESM1-2-HR 模式中南极对流层上部(400~250 hPa)气温(SPT,单位:K)与全球纬向平均气温的相关系数(a),以及 SPT 与赤道平流层下部(100~70 hPa)气温(b; Equatorial Lower Stratosphere Temperature,简称 ELST;单位:K)的年际变化,打点区域代表通过置信度为 90%的单侧学生 *t* 检验

Fig.7 (a) Correlation coefficients of the SPT(units:K) and zonally averaged temperature (units:K); (b) time series of SPT (red line; units:K) and equatorial lower stratosphere (100—70 hPa) mean temperature (ELST; black line; units:K) in the MPI-ESM1-2-HR model during 1979—2013. The values with the black dots are statistically significant at 90% confidence level based on a one-tailed Student's *t*-test

3)在全球变暖尤其是热带地区平流层增温背景下,热带与南极地区气温以及臭氧的负相关关系是引起南极地区气温与臭氧偏低,进而引起南极地区气柱收缩以及大气质量亏损的主要驱动因子,并进一步导致了南北半球间大气质量的不平衡现象。

本文研究表明南极气温变化对半球际大气质量交换有明显驱动作用,然而南极大气温度不仅受臭氧含量影响,还与南极大陆大洋海冰和冰雪覆盖向上的长波辐射有关(Cavaliere et al.,2003)。南极大陆冰雪层是全球大气运动的主要冷源,在地球能量收支中扮演着重要的角色。冬季南极海冰异常通过冰气相互作用对冬春季南半球大气环流南极涛动产生显著影响(Wu and Zhang,2011)。因此,南极冰雪层同样可能在驱动半球间大气质量交换过程中发

挥重要作用。此外,古气候及其模拟研究(Scherer,1991;Pollard and DeConto,2009)表明,南极洲的地形在过去经历了巨大的变化。而在当前由于全球变暖导致全球冰盖融化的时代,与北极海冰快速消融不同,南极海冰出现独特的、复杂的变化(Yadav et al.,2022)。因此,正确理解南极大陆冰雪层与大气气候特征的相互作用同样具有重要意义。

致谢:CMIP6资料取自美国Lorenz国家实验室(LLNL/PCMDI,Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison);ERA5资料取自European Centre for Medium-Range Weather Forecasts;CN05.1数据取自中国科学院气候变化研究中心;文中插图绘制使用Python软件。谨致谢忱!

## 参考文献(References)

- Bueh C, Peng J B, Lin D W, et al., 2022. On the two successive supercold waves straddling the end of 2020 and the beginning of 2021 [J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 591-608. doi: 10.1007/s00376-021-1107-x.
- Cavaliere D J, Parkinson C L, Vinnikov K Y, 2003. 30-year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability [J]. *Geophys Res Lett*, 30(18). doi: 10.1029/2003gl018031.
- 陈权亮, 任景轩, 范广洲, 等, 2009. 行星波波动对平流层剩余环流的影响 [J]. *高原气象*, 28(2): 402-410. Chen Q L, Ren J X, Fan G Z, et al., 2009. Impact of planetary wave on the stratospheric residual circulation [J]. *Plateau Meteor*, 28(2): 402-410. (in Chinese).
- Chen W, Graf H F, Huang R H, 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Adv Atmos Sci*, 17(1): 48-60. doi: 10.1007/s00376-000-0042-5.
- Chen W, Feng J, Wu R G, 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. *J Climate*, 26(2): 622-635. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00021.1.
- 陈月娟, 张弘, 毕训强, 1999. 南极臭氧洞与南极涡旋的变化: IAP模式的试验结果 [J]. *大气科学*, 23(4): 462-468. Chen Y J, Zhang H, Bi X Q, 1999. The influence of Antarctic ozone hole on the Antarctic vortex: simulated by the IAP AGCM [J]. *Sci Atmos Sin*, 23(4): 462-468. (in Chinese).
- Christy J R, Trenberth K E, Anderson J R, 1989. Large-scale redistributions of atmospheric mass [J]. *J Climate*, 2(2): 137-148. doi: 10.1175/1520-0442(1989)002<0137:lsroam>2.0.co;2.
- 丛菁, 卢楚翰, 管兆勇, 2011. 南北涛动与南极涛动及北极涛动的相互作用 [J]. *大气科学学报*, 34(6): 748-755. Cong J, Lu C H, Guan Z Y, 2011. Relationships among IHO, AO and AAO [J]. *Trans Atmos Sci*, 34(6): 748-755. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxb.2011.06.012. (in Chinese).
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等, 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. *气象学报*, 72(5): 835-852. Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al., 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Acta Meteor Sin*, 72(5): 835-852. doi: 10.11676/qxxb2014.079. (in Chinese).
- Eroglu D, McRobie F H, Ozken I, et al., 2016. See-saw relationship of the Holocene East Asian-Australian summer monsoon [J]. *Nat Commun*, 7: 12929. doi: 10.1038/ncomms12929.
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geosci Model Dev*, 9(5): 1937-1958. doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Fu D X, Ding Y H, 2021. The study of changing characteristics of the winter temperature and extreme cold events in China over the past six decades [J]. *Int J Climatol*, 41(4): 2480-2494. doi: 10.1002/joc.6970.
- Guan Z Y, Yamagata T, 2001. Interhemispheric oscillations in the surface air pressure field [J]. *Geophys Res Lett*, 28(2): 263-266. doi: 10.1029/2000gl011563.
- Guan Z Y, Lu C H, Mei S L, et al., 2010. Seasonality of interannual inter-hemispheric oscillations over the past five decades [J]. *Adv Atmos Sci*, 27(5): 1043-1050. doi: 10.1007/s00376-009-9126-z.
- Gutjahr O, Putrasahan D, Lohmann K, et al., 2019. Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the high-resolution model intercomparison project (HighResMIP) [J]. *Geosci Model Dev*, 12(7): 3241-3281. doi: 10.5194/gmd-12-3241-2019.
- 韩荣青, 石柳, 袁媛, 2021. 2020/2021年冬季中国气候冷暖转折成因分析 [J]. *气象*, 47(7): 880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y, 2021. Analysis on



- the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J].Meteor Mon,47(7):880-892.(in Chinese).
- 韩永秋,周连童,黄荣辉,2021.中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系[J].气候与环境研究,26(1):1-17. Han Y Q, Zhou L T, Huang R H, 2021.Characteristics of the extreme low temperature events in China during boreal winter and its relationship to East Asian winter monsoon[J].Climate Environ Res,26(1):1-17.doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018.(in Chinese).
- 胡宏博,黄艳艳,戴金,等,2023.近11年中国寒潮频发的机理分析[J].大气科学学报,46(6):864-875. Hu H B, Huang Y Y, Dai J, et al., 2023. Causes of China's frequent cold waves over the past 11 years[J].Trans Atmos Sci,46(6):864-875.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230509001.(in Chinese).
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al., 2012.Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J].Adv Atmos Sci,29(5):910-942.doi:10.1007/s00376-012-2015-x.
- Lorenz E N, 1951.Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile[J].J Meteor,8(1):52-59.doi:10.1175/1520-0469(1951)008<0052:saivot>2.0.co;2.
- 卢楚翰,管兆勇,梅士龙,等,2008.大气质量南北涛动的季节循环[J].科学通报,53(21):2638-2645. Lu C H, Guan Z Y, Mei S L, et al., 2008. Seasonal cycle of North-South oscillation of air quality[J].Chin Sci Bull,53(21):2638-2645.(in Chinese).
- Lu C H, Guan Z Y, Cai J X, 2010.Interhemispheric atmospheric mass oscillation and its relation to interannual variations of the Asian monsoon in boreal summer[J].Sci China Earth Sci,53(9):1343-1350.doi:10.1007/s11430-010-4023-y.
- 卢楚翰,管兆勇,李永华,等,2013.太平洋年代际振荡与南北半球际大气质量振荡及东亚季风的联系[J].地球物理学报,56(4):1084-1094. Lu C H, Guan Z Y, Li Y H, et al., 2013.Interdecadal linkages between Pacific decadal oscillation and interhemispheric air mass oscillation and their possible connections with East Asian monsoon[J].Chin J Geophys,56(4):1084-1094.doi:10.6038/cjg20130404.(in Chinese).
- Lu C H, Xie S Q, Qin Y J, et al., 2016.Recent intensified winter coldness in the mid-high latitudes of Eurasia and its relationship with daily extreme low temperature variability[J].Adv Meteor,2016:3679291.doi:10.1155/2016/3679291.
- Lu C H, Zhong L, Guan Z Y, et al., 2023.Interdecadal variations and causes of the relationship between the winter East Asian monsoon and interhemispheric atmospheric mass oscillation[J].Climate Dyn,61(9):4377-4391.doi:10.1007/s00382-023-06810-x.
- Park T W, Ho C H, Yang S, 2011.Relationship between the Arctic oscillation and cold surges over East Asia[J].J Climate,24(1):68-83.doi:10.1175/2010JCLI3529.1.
- Pollard D, DeConto R M, 2009.Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years[J].Nature,458:329-332.doi:10.1038/nature07809.
- 乔年,卢楚翰,管兆勇,等,2022.CMIP6模式大气中南北半球际涛动的季节循环[J].大气科学学报,45(6):890-903. Qiao N, Lu C H, Guan Z Y, et al., 2022. Seasonal cycle of interhemispheric oscillation in atmosphere of CMIP6 models [J].Trans Atmos Sci,45(6):890-903.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2021112001.(in Chinese).
- Randel W J, Wu F, Stolarski R, 2002.Changes in column ozone correlated with the stratospheric EP flux[J].J Meteor Soc Japan,80(4B):849-862.doi:10.2151/jmsj.80.849.
- Scherer R P, 1991.Quaternary and tertiary microfossils from beneath ice stream B:evidence for a dynamic West Antarctic ice sheet history [J].Global and Planetary Change,4(4):395-412.
- 施春华,孙伟佳,郭栋,2021.WP和NAO对中国东南部冬季温度的协同影响[J].大气科学学报,44(3):394-404. Shi C H, Sun W J, Guo D, 2021.Synergistic effects of WP and NAO on winter surface temperature in southeastern China[J].Trans Atmos Sci,44(3):394-404.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191227001.(in Chinese).
- 孙晓娟,李骝焱,虞越越,等,2022.1951—2017年冬季中国南方持续性冰冻雨雪事件的气候特征及其与环流异常的联系[J].大气科学学报,45(5):768-777. Sun X J, Li S Y, Yu Y Y, et al., 2022.Climatic characteristics of winter long-lasting freezing rain and snow events in southern China from 1951 to 2017 and their relationship with circulation anomalies [J].Trans Atmos Sci,45(5):768-777.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2020112002.(in Chinese).
- Thompson D W J, Solomon S, Kushner P J, et al., 2011.Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change[J].Nat Geosci,4:741-749.doi:10.1038/ngeo1296.
- van den Dool H M, Saha S, 1993.Seasonal redistribution and conservation of atmospheric mass in a general circulation model[J].J Climate,6(1):22-30.doi:10.1175/1520-0442(1993)006<0022:sracoa>2.0.co;2.
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al., 2010.Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon; the northern and southern temperature modes[J].J Climate,23(6):1495-1512.doi:10.1175/2009jcli3243.1.
- Wang L, Chen W, 2014.An intensity index for the East Asian winter monsoon[J].J Climate,27(6):2361-2374.doi:10.1175/jcli-d-13-00086.1.
- 王林,龚海楠,兰晓青,2021.北极涛动的年代际变化及其气候影响[J].大气科学学报,44(1):50-60. Wang L, Gong H N, Lan X Q, 2021.Interdecadal variation of the Arctic Oscillation and its influence on climate[J].Trans Atmos Sci,44(1):50-60.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201030001.(in Chinese).
- 王政琪,徐影,周波涛,2017.CMIP5模式对东亚冬季风指数变化及其与冬季大气环流和气温关系的模拟评估[J].地球物理学报,60(9):3315-3324. Wang Z Q, Xu Y, Zhou B T, 2017.Evaluation of the CMIP5 models in simulating the change of the East Asian winter monsoon indices

- and their relationship with the wintertime atmospheric circulation and temperature [J]. *Chin J Geophys*, 60 (9): 3315-3324. doi: 10. 6038/cjg20170904. (in Chinese).
- 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[J].*地球物理学报*,56(4):1102-1111. Wu J,Gao X J,2013.A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J].*Chin J Geophys*,56(4):1102-1111. (in Chinese).
- Wu Q G,Zhang X D,2011.Observed evidence of an impact of the Antarctic sea ice dipole on the Antarctic oscillation[J].*J Climate*,24(16):4508-4518.doi:10. 1175/2011jcli3965. 1.
- Wu Z W,Li J P,Jiang Z H,et al.,2011.Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon;once-in-a-century snowstorms in 2007/2008 winter[J].*Climate Dyn*,37(7):1661-1669.doi:10. 1007/s00382-010-0938-4.
- 谢韶青,卢楚翰,2018.近 16 a 来冬季欧亚大陆中纬度地区低温事件频发及其成因[J].*大气科学学报*,41(3):423-432. Xie S Q,Lu C H,2018. Intensification of winter cold events over the past 16 years in the mid-latitudes of Eurasia and their causes[J].*Trans Atmos Sci*,41(3):423-432. doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20160415003. (in Chinese).
- Yadav J,Kumar A,Mohan R,2022.Atmospheric precursors to the Antarctic sea ice record low in February 2022[J].*Environ Res Commun*,4(12):121005.doi:10. 1088/2515-7620/aca5f2.
- Yu Y Y,Ren R C,Hu J G,et al.,2014.A mass budget analysis on the interannual variability of the polar surface pressure in the winter season[J].*J Atmos Sci*,71(9):3539-3553.doi:10. 1175/jas-d-13-0365. 1.
- 张乐英,徐海明,施宁,2017.冬季南极涛动对欧亚大陆地表气温的影响[J].*大气科学*,41(4):869-881. Zhang L Y,Xu H M,Shi N,2017.Influence of the Antarctic oscillation on surface air temperature over the Eurasian continent during boreal winter[J].*Chin J Atmos Sci*,41(4):869-881.doi:10. 3878/j.issn.1006-9895. 1612. 16228. (in Chinese).
- Zhang Y,Sperber K R,Boyle J S,1997.Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon;results from the 1979—95 NCEP/NCAR reanalysis[J].*Mon Wea Rev*,125(10):2605.doi:10. 1175/1520-0493(1997)125<2605:CAIVOT>2. 0.CO;2.
- 曾庆存,李建平,2002.南北两半球大气的相互作用和季风的本质[J].*大气科学*,26(4):433-448. Zeng Q C,Li J P,2002.Interactions between the northern and southern hemispheric atmospheres and the essence of monsoon[J].*Chin J Atmos Sci*,26(4):433-448. (in Chinese).

· ARTICLE ·

## Model verification of the relationship between inter-hemispheric atmospheric mass oscillation and East Asian winter monsoon

ZHONG Lei<sup>1</sup>, LU Chuhan<sup>2</sup>, QIAO Nian<sup>1</sup>, GUAN Zhaoyong<sup>1</sup>, ZENG Yuefei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA), Wuxi University, Wuxi 214063, China

**Abstract** The interaction between mid-high latitudes in the atmosphere of the Northern and Southern Hemispheres is closely related to cross-hemisphere weather and climate systems, such as monsoons. Due to the involvement of large-scale circulation and global energy changes, the correlation pathway and mechanism have garnered extensive attention from scholars. The inter-hemispheric air mass oscillation (IHO) index is defined as the difference in atmospheric mass between the Northern and Southern Hemispheres, reflecting changes in global atmospheric circulation caused by the exchange of atmospheric mass between the hemispheres. Using ERA5 reanalysis data post-1979, the winter IHO showed a significant positive correlation with the East Asian winter monsoon anomaly (correlation coefficient  $r=0.49$ ). The historical output data of the CMIP6 models further verified this relationship, showing a positive correlation in 96.7% of the models, with a correlation coefficient of 0.35 in the MPI-ESM1-2-HR model, statistically significant at the 95% confidence level. Using ERA5 reanalysis data and the historical experimental data of the MPI-ESM1-2-HR model, we verified the influence of IHO anomalies on the interannual variation of the East Asian winter monsoon and the underlying physical processes. The results indicate that the IHO is closely related to the East Asian winter monsoon through the redistribution of global air mass. During a positive IHO phase, atmospheric mass accumulates abnormally deposited in northern Eurasia and decreases in the middle and low latitudes, significantly increasing the sea-land pressure difference in East Asia and strength-

ening winter winds, and vice versa. Additionally, the combined difference in surface pressure between high and low IHO years shows that the Antarctic air mass anomaly contributes most of the negative anomalies in the Southern Hemisphere, indicating that the Antarctic air mass oscillation is the main driver of the North-South air mass oscillation. In the MPI-ESM1-2-HR model, the IHO significantly impacts winter surface air temperature in China, particularly in Central China, with a correlation coefficient of  $-0.29$  between winter surface air temperature and the IHO index in Central China. Analysis of the MPI-ESM1-2-HR model reveals that the correlation coefficient between the IHO and the average temperature of the upper troposphere in the Antarctic region is  $-0.32$  (passing the 90% significance test), indicating that the temperature of the upper troposphere in the Antarctic region significantly drives the interannual variation of the IHO. Ozone is identified as the primary factor affecting temperature changes in the Antarctic region. The mean temperature of the upper troposphere and ozone content in the Antarctic region are significantly positively correlated ( $r=0.33$ , passing the 95% significance test), indicating that ozone changes play a dominant role in the temperature of the Antarctic troposphere. The temperature in the upper Antarctic troposphere is inversely correlated with that in the lower stratosphere of the equator ( $10^{\circ}\text{S}$ — $10^{\circ}\text{N}$ ) at 100—70 hPa, with a correlation coefficient of  $-0.38$  (passing the 95% significance test). This suggests that the temperature at the bottom of the tropical stratosphere influences the temperature of the Antarctic troposphere through residual circulation, regulating the interannual oscillation of the Antarctic air mass and causing the imbalance between the hemispheres. When the tropical stratosphere temperature rises, the ozone and temperature in the upper Antarctic troposphere decrease, leading to significant negative temperatures and geopotential anomalies over Antarctica. The decrease in air temperature over Antarctica reduces internal energy, increases the polar vortex, and contracts the atmospheric column, reducing total energy and atmospheric mass in the Antarctic region, thereby increasing the atmospheric mass difference between the hemispheres, and vice versa.

**Keywords** East Asian winter monsoon; inter-hemispheric atmospheric mass oscillation; temperature “seesaw”; CMIP6

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230518003

(责任编辑:刘菲)