第16卷第1期 2020年1月

气候变化研究进展 CLIMATE CHANGE RESEARCH

Vol. 16 No. 1 January 2020

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.075

王岱,孙银川,游庆龙.太平洋年代际振荡对中国冬季最低气温年代际变化的贡献 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16 (1): 70-77 Wang D, Sun Y C, You Q L. Contribution of Pacific Decadal Oscillation to interdecadal variability of winter minimum temperature in China [J]. Climate Change Research, 2020, 16 (1): 70-77

太平洋年代际振荡对中国冬季最低气温 年代际变化的贡献

王 岱^{1,2}, 孙银川^{1,2}, 游庆龙³

 1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与 风险管理重点实验室,银川 750002;
 2 宁夏气象防灾减灾重点实验室,银川 750002;
 3 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京 210044

摘 要:基于 1961—2013 年中国台站的均一化气温数据、NOAA 月平均海温资料和 CMIP5 气候模式数据,利用气候统 计手段,定量分析太平洋年代际振荡 (PDO) 对中国冬季最低气温年代际变化的贡献。结果表明:PDO 的年代际序列 与年代际滤波后的最低气温场在全国大部分地区呈显著正相关,即 PDO 负位相时中国冬季最低气温偏低,反之偏高。 2006 年后中国冬季最低气温变暖减缓,造成这一现象的主要原因是自然变率起到的降温作用,而自然变率又主要由 PDO 起主导作用,约占自然变率贡献的 40% 左右。PDO 对温度的贡献呈现出明显的年代际变化,在变暖减缓期对升 温有明显的负贡献,且负贡献逐渐增大至超过 50%。

关键词:中国区域;太平洋年代际振荡 (PDO);最低气温;年代际变化;贡献

引 言

由于全球气候变暖,气候变化问题越来越受 到关注,气候变暖背景下的极端天气气候事件发 生频率也急剧上升,由此给人类社会带来了巨大 的经济损失。IPCC 第五次评估报告指出^[1],全球 地表持续升温,1880—2012 年全球平均温度已升 高 0.85 ℃ [0.65 ~ 1.06 ℃],全球范围内极端气温 和降水事件发生频率更加频繁、强度更大,因此 对极端气候的研究也日益得到重视。以往的研究 表明,冬季极端低温事件频数与平均气温的均值 和变率有较强的联系^[2-3],一般极端温度突变时间 比平均温度晚 3 ~ 4 a^[4]; 1951—2004 年极端低温 的变化趋势主要表现在与低温有关的极端气候事 件发生频率和强度明显减弱^[5],极端低温日数整 体呈下降趋势^[6-8]; 2005 年以前我国极端最低气 温一直表现出稳定的增温趋势,在 90 年代中后期 达到历史新高,此后略有回落^[9]; 20 世纪 80 年代 后期以来极端低温事件发生的频次逐渐趋于稳定, 但长时间的持续性极端低温事件仍然会发生^[10], 进入 21 世纪,极端低温事件的影响面积和强度减 少,但持续时间增长^[11]。Cohen 等^[12]分季节对北 半球热带外大陆的温度进行趋势分析,发现冬季 气温在 1998 年后的十几年间呈下降趋势,而春、

收稿日期: 2019-04-10;修回日期: 2019-07-22

资助项目: 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03252); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2016KJHM129); 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室指令性项目(CAMP-201905)

作者简介: 王岱, 女, 助理工程师, wangdai1012@126.com, 孙银川(通信作者), 男, 研究员, sunyc@126.com

王岱,等:太平洋年代际振荡对中国冬季最低气温年代际变化的贡献

夏、秋3个季节的气温一直呈上升趋势。Kosaka 等^[13]认为在陆地上明显的降温区出现在欧亚大 陆、美国和澳大利亚,而北半球降温幅度大于南 半球,冬季降温区强度比夏季大。目前对冬季低 温的年代际分析已有不少,梁苏洁^[14]的研究表明 中国区域冬季平均气温和最低气温序列具有很强 的年代际变化信号,1986年以前冬季气温距平为 负,在此之后转为正值,但在2006年以后冬季气 温出现了变暖减缓这一新特征。且冬季欧亚大陆 中纬度地区低温事件频数在2005年之后偏多,冷 强度偏强^[15]。

大尺度的海气耦合对气候的形成和变化有非 常重要的影响。中国气候深受北太平洋海温的影 响,而后者最主要的年代际变化为太平洋年代际 振荡 (PDO)。以往的研究表明, PDO 与我国冬 季气温的年代际变化有较好的一致性,是调控冬 季极端低温的重要环流因子。PDO 会影响到厄尔 尼诺和南方涛动(ENSO)与大气环流间的相关 关系,即 El Niño 和 La Niña 事件对中国冬季气 温的影响并非简单的线性关系^[16-17]。这是因为当 PDO 处于不同位相时 ENSO 和东亚冬季风系统的 关系不同,当 PDO 为负位相时,850 hPa 上位于 菲律宾东部的反气旋位置比 PDO 正位相时偏北, 东亚沿岸低层的偏南风距平可以延伸到 50°N,表 明 ENSO 的信号更容易传播到中高纬地区,并与 中高纬的东亚冬季风系统相互作用, 继而共同影 响中国冬季气温^[18]。还有研究表明,北太平洋海 温变化存在一个年代际通道,这个年代际通道与 PDO 和东亚冬季风有密切联系, 被视为联系中纬 度太平洋和热带太平洋海气相互作用的桥梁^[19-20]。 此外, PDO 很好地对应着冬季阿留申低压和蒙古 高压的同步反相关变化,由此造成纬向海陆气压 差发生相应变化,这就将 PDO 与其上游东亚冬季 风的强度变化紧密联系起来; 20世纪70年代以来, PDO 基本处于年代际正位相,受PDO 的调制作用, ENSO 与东亚冬季风的关系经历了显著的年代际 减弱^[20-22]。

因此,探讨冬季最低气温与 PDO 的关系,有助于深入理解极端低温的年代际变化。极端低温

指数由最低气温计算得到,不同指数所表征的侧 重点不同;另外,对极端低温进行成因分析时, 反映的是影响因子对最低气温的作用,故本文以 中国冬季最低气温为分析对象,重点分析造成冬 季最低气温年代际变化的自然变率原因,并定量 分析 PDO 对最低气温年代际变化的贡献。

1 资料和方法

1.1 资料说明

由于冬季最低气温的减缓持续到 2013 年,以及 PDO 在 2013 年以后逐渐转为正位相,所以本 文的分析时段均为 1961—2013 年,冬季为当年 12 月至次年 2 月。

气温资料采用国家气象信息中心 Xu 等^[23] 研 制的中国 825 个站 1951-2012 年逐月最高气温 和最低气温资料,该资料经过质量控制和均一化 订正,另外将最新的2013年825个站的数据接 入其后,挑选无缺测站524个。海温资料为美国 国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的第2版 延长重构的月平均海温资料。PDO 指数为北太平 洋(20°N以北)月平均海温进行经验正交分解 (EOF 分解)的第一模态时间系数^[24]。选取 9 个 CMIP5 气候系统模式,分别是 BCC-CSM1.1、 BCC-CSM1-1(m), CanESM2, CESM1-CAM5, MIROC5, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, CCSM4、CMCC-CM,应用这些模式的两类试验 输出的逐月地表最低气温资料, 第1类试验为历 史气候模拟试验,从19世纪中后期积分至2005 年12月; 第2类试验为21世纪气候预估试验, 选择中排放情景(RCP4.5)下的气候预估数据, 从 2006 年 1 月积分至 2100 年 12 月。将历史数据 与预估数据进行拼接。

1.2 主要方法介绍

1.2.1 面积加权法

参考目前国际上比较公认的 Jones 等^[25]提 出的网格面积加权平均法。其原理是将站点资 料格点化,即将中国区域范围按经纬度划分为 72

2020年

2.5°×2.5°的176个网格。首先将每个网格内所有 站点的距平值进行算术平均,得到各网格的平均 值。然后利用式(1)对所需区域进行面积加权平 均,得到该区域距平值

$$\Delta T_k = \frac{\sum_{i=1}^{m} \cos\varphi_i \Delta T_{ik}}{\sum_{i=1}^{m} \cos\varphi_i} \quad . \tag{1}$$

式中: ΔT_k 为某区域第*k*年的距平值; ΔT_{ik} 为 第*i*个网格第*k*年的距平值;*m*为格点数; φ_i 为 第*i*个网格所在的纬度。

由于本文所选用的站点分布不均匀,故所有 区域平均得到的序列都是先经过面积加权法将站 点数据格点化以后,再进行区域平均。

1.2.2 去趋势方法

为分析自然变率对冬季最低气温的贡献大小, 根据去趋势方法^[26],利用 CMIP5 模式数据去掉 中国区域最低气温场中人类活动对气温变化的贡 献,得到自然变率所贡献的温度场。传统的去趋 势方法是将观测数据本身的趋势去掉,而本文借 助 CMIP5 模式集合序列,这是因为 CMIP5 模式 数据反映外强迫的影响。对上文提到的 9 个模式 的时空模拟效果进行排名,计算各模式权重,将 模式结果进行加权集合。

定义中国区域平均的观测气温距平场序列 $\overline{T}(n)=\overline{T_{\rm F}}(n)+\overline{T_{\rm I}}(n)$ (F表示外强迫,I表示内部气候变率,即自然变率),由于中国区域平均的模式 集合序列 $\overline{T_{\rm m}}(n)$ 包含了历史时期绝大多数外强迫 场的响应而几乎不包含内部气候变率的响应,且 对变暖趋势的拟合较为合理 ($\overline{T}(n)$ 与 $\overline{T_{\rm m}}(n)$ 的相 关系数为 0.57)。定义 $\overline{T_{\rm F}}(n)=\overline{b_{\rm F}}$ $\overline{T_{\rm m}}(n)$, $\overline{b_{\rm F}}$ 是回归 方程 $\overline{T}(n)=\overline{b_{\rm F}}$ $\overline{T_{\rm m}}(n)+\varepsilon$ (残余项)的系数,则非 外强迫部分可估算为 $\overline{T_{\rm I}}(n)=\overline{T}(n)-\overline{b_{\rm F}}$ $\overline{T_{\rm m}}(n)$ 。这 样确保 $\overline{T_{\rm F}}(n)$ 和 $\overline{T_{\rm I}}(n)$ 是不相关的 (二者相关系数 为 0.04)。尽管 $\overline{b_{\rm F}}$ $\overline{T_{\rm m}}(n)$ 包含了历史数据中大多数 外强迫的变化,但 $\overline{T_{\rm I}}(n)$ 可能仍包含一些外强迫信 息,这些信息是模式集合序列遗漏的,因此考虑 $\overline{T_{\rm I}}(n)$ 作为主要的自然变率部分。根据上述原理, 假设站点 *i* 在第*n* 年的气温 T(n,i) 可表示为

$$T(n,i) = T_{\rm F}(n,i) + T_{\rm I}(n,i) + \varepsilon_{\rm F}(n,i) + \varepsilon_{\rm I}(n,i) \,. \tag{2}$$

温度变化由 4 个部分组成,分别为外强迫贡献的温度变化 $T_{\rm F}(n,i)$,自然变率贡献的温度变化 $T_{\rm I}(n,i)$,及其产生的局地响应贡献 $\varepsilon_{\rm F}(n,i)$ 和 $\varepsilon_{\rm I}(n,i)$ 。后两项对温度长期年代际变化影响很小,故可忽略,只考虑前两项的作用,则

$$T_{\rm I}(n,i) = T(n,i) - T_{\rm F}(n,i) = T(n,i) - b_{\rm F}(i)\overline{T}_{\rm m}(n)$$
 (3)

式中, $b_{\rm F}(i)$ 是用 $\overline{T}_{\rm m}(n)$ 回归观测气温T(n,i)得到的回归系数。以上公式中均用气温距平场(相对于1961—1990年),以消除模式对基准期模拟的偏差,尽可能降低误差。

1.2.3 集合经验模态分解方法(EEMD方法)

为分离出气温序列的年代际信号,利用 EEMD 方法,使其在分解非线性、非平稳序列的 时候具有更好的稳定性,能够提取真实的气候变 化信号^[27-28]。

2 结果分析

2.1 冬季 PDO 与中国区域最低气温的关系

从 PDO 的年代际序列(指高斯 11 a 滤波后 的序列,下同)曲线(图 1)可知,1961—1977 年冬季,PDO 为负位相,表现为太平洋海温整体 偏冷;在 1978—2006 年冬季,为正位相,表现为 太平洋海温整体偏暖^[14];此后 PDO 又转为负位相。 另外,冬季最低气温与 PDO 年代际变化序列有很 好的对应,二者同号率为 60%,即在大部分年份 PDO 负位相对应最低气温偏冷,正位相对应最低 气温偏暖,从 2007 年开始,PDO 转为负位相, 最低气温也呈下降趋势,即气候变暖出现减缓。



用冬季最低气温的年代际变化序列回归全球 海温场,在北太平洋有明显的 PDO 模态,当最低 气温偏高时对应 PDO 正位相,即热带中东太平洋 为正,北太平洋中部为负(图 2)。



图 2 冬季最低气温的年代际变化序列回归全球海温场 Fig. 2 Global SST patterns regressed from the interdecadal series of winter minimum temperature (Shadow area stands for the area with the 0.05 significance level)

用冬季 PDO 年代际变化序列与站点最低气温 年代际序列计算相关系数,发现 PDO 与最低气温 的正相关分布范围很大,几乎整个中国区域内均 通过了 0.05 的显著性检验(图 3)。在回归系数的 空间分布上也有同样的特征(图略),即用 PDO 年代际序列回归最低气温时,全国范围内回归系 数基本为正值,尤其北方通过显著性检验的站点 更多,可见 PDO 与最低气温关系密切。



Fig. 3 Correlation coefficient between the interdecadal series of winter PDO index and minimum temperature in 1961–2013 (Solid symbol stands for the site with the 0.05 significance level)

2.2 自然变率对最低气温年代际变化的贡献

由图 4(a) 可以看出, 1995 年之前观测序列和 模式模拟序列虽然存在偏差和位相差, 但波动的 特征相近, 1995—2005 年模式和观测的趋势较为 一致, 但模式模拟的温度明显高于观测, 2006 年 后模式序列一直呈现明显的增加趋势, 与观测序 列变暖减缓差异较大, 可见模式对于中国区域最 低气温的增温趋势模拟较好(即模式对于人类活 动贡献的温度上升趋势模拟较好), 利用模式序列 去除中国区域最低气温场中人类活动对温度的贡 献, 得出自然变率所贡献的温度变化。

将去趋势后的温度场进行 EOF 分解,表1 是分解后前4个模态的方差贡献,累计方差贡献 达到76.0%,基本可以代表主要的自然变率模态 所贡献的温度变化。第1模态的方差贡献达到 40.8%,是最主要的自然变率模态,时间系数表 现出明显的年代际变化(图4b)。将模式集合序 列和 EOF1 时间序列进行线性相加后,可以看到 其变化序列与观测序列呈现较为一致的变化(图 4a),二者相关系数达到0.857,而模式集合序列 与其他 EOF 模态时间序列分别线性相加后,其与 观测的相关系数比 EOF1 的相关系数略高(表2)。



图 4 观测与模式模拟的中国最低气温距平序列 (a), 观测序列 减模式集合序列及去趋势后最低气温 EOF1 时间系数序列 (b) Fig. 4 Anomaly sequence changes of observed minimum temperature and model ensemble data (a), anomaly sequence changes of observed minimum temperature subtract model ensemble and time series of the first EOF mode (b)

2020年

表 1 去趋势后最低气温 EOF 分解的前 4 个模态的方差贡献 Table 1 Variance contribution of the first four modes of EOF

decomposition of minimum temperature after detrend

模态	方差贡献 /%	累计方差贡献 /%
EOF1	40.8	40.8
EOF2	19.7	60.5
EOF3	11.0	71.5
EOF4	4.5	76.0

表 2 最低气温观测数据分别与模式和 EOF 分量组合的 相关系数

 Table 2 Correlation coefficient between observed minimum temperature and model superposing EOF components

组合	相关系数
模式 +EOF1+EOF3	0.857
模式 +EOF1+EOF4	0.860
模式 +EOF1+EOF2	0.867
模式 +EOF1	0.857
模式	0.569

另外,观测与模式集合序列的差值基本与 EOF1 时间序列吻合,在 1961—1986 年间的相关系数为 0.78,1986 年后,达到 0.86。可以表明,冬季最 低气温的年代际变化,尤其近几年的变暖减缓主 要是 EOF1 所代表的自然变率起主导作用。

用 PDO 年代际变化序列及去趋势后的最低气 温 EOF1 (空间分布乘时间系数) 区域平均的年 代际序列分别回归全球海温场(图 5),可以发现 它们在北太平洋有相似的分布,即北太平洋中部 为负而北美西岸为正(典型 PDO 模态),且两个 场在北太平洋中部及北美西岸区域(20°~ 50°N, 180°~ 140°W)的空间相关系数达到 0.66。EOF1 基本可以代表 PDO 的贡献,即 PDO 作为自然 变率最主要的组成部分,主要造成了最低气温在 2006 年之后的变暖减缓。

为进一步说明 PDO 对最低气温变化的贡献, 更好地理解变暖减缓的含义,用 EEMD 方法分解 最低气温观测场序列、EOF1 反映的以 PDO 为代 表的自然变率序列以及模式代表的外强迫序列, 可以得到各自的非线性趋势项(图 6a),它们均



图 5 PDO 指数 (a) 和去趋势后最低气温 EOF1 的区域平均 序列 (b) 回归全球海温场

Fig. 5 Global SST patterns regressed onto the PDO index (a) and the regional mean sequence of the first EOF mode component (b) (The significance level of the dotted area is 0.05)



图 6 观测、自然变率 PDO 以及外强迫的非线性趋势 (a) 及 其相对于观测的百分比 (b)



王岱,等:太平洋年代际振荡对中国冬季最低气温年代际变化的贡献

表现出明显的年代际趋势。可以看到,外强迫的 变化使 2006 年以后最低气温呈明显增温趋势,而 PDO 的作用使近年来最低气温呈下降趋势,所以 整体上在 2006 年以后表现出变暖减缓的特征。从 图 6(b) 中它们相对于观测的百分比可以看到,外 强迫对于温度的升高一直起正贡献作用,且该正 贡献越来越大,从1986年以前(冷期)不到50% 的正贡献,到1986—2006年(暖期)>50%的正 贡献,再到2006年以后(减缓期)>100%的正贡 献。而 PDO 在冷期时是>50% 的正贡献, 到暖期 时 < 50% 的正贡献,再到减缓期越来越强的负贡 献(<-50%)。所以近年来最低气温变暖的减缓 是外强迫贡献的增温以及自然变率 PDO 贡献的 降温作用叠加的结果。上述非线性趋势的分析可 以更好地理解变暖减缓,它不仅是温度的降低, 也是增温率的降低,即使温度的正距平增加,也可 能是人为外强迫作用的结果,但自然变率 PDO 贡 献的降温作用,减缓了人为外强迫贡献的温度增 加,使冬季最低气温呈下降或者变暖减缓的趋势。

3 结论与讨论

分析 PDO 与中国冬季最低气温的关系,并定 量分析以 PDO 为主要代表的自然变率对冬季最低 气温年代际变化的贡献,得出以下主要结论。

(1) 自然变率 PDO 在 2007 年之后转为负位相, 与此同时中国冬季最低气温也出现变暖减缓。最 低气温距平年代际序列与 PDO 年代际序列在大部 分年份具有同位相变化,且 PDO 的年代际序列与 滤波后的中国最低气温场在全国大部分地区呈显 著正相关,即当 PDO 为负位相时最低气温偏低, 反之偏高。

(2)造成 2006 年后中国冬季最低气温变暖减 缓这一现象主要是自然变率起到降温的作用,而 自然变率又主要由 PDO 起主导作用,约贡献自然 变率的 40% 左右。1961—2013 年间,PDO 对最 低气温的贡献呈现出明显的年代际变化,变暖减 缓时对升温有明显的负贡献,且负贡献逐渐增大 至超过 50%。即自然变率贡献的降温作用,减缓 了人为外强迫贡献的温度增加。

目前有关变暖减缓现象的原因还没有定论, 自然变率观点被更多人认可是造成近年来变暖减 缓的主要原因,即认为人类活动产生的多余热量 进入到深海(海表 700 m 以下),主要是受太平 洋和大西洋的影响。Meehl 等^[29] 认为全球变暖减 缓阶段,全球海表温度空间结构与 PDO 的类 La Niña 型相似,赤道中东太平洋海表温度为负距平, 而在中纬度中西太平洋为正距平,即全球变暖减 缓现象是与 PDO 的负位相联系在一起的, Kosaka 等^[13]也认为,赤道中东太平洋的变冷是导致此次 气候变暖减缓的主要原因。另一种意见则认为是 大西洋经向翻转流 (AMOC) 的影响, Chen 等^[30-31] 认为导致全球变暖减缓的真正原因是大西洋,由 于太阳辐射的作用导致海水蒸发,使热带海表水 的盐度增加,速度更快的 AMOC 将热带高盐度的 海水输送到北大西洋副极地区域,在此过程中热 量会向大气输送。热带的高温海水在遇到高纬度 的海冰时,会将海冰融化,使副极地的海水盐度 减小。信风增强是这个阶段的特征,但不是赤道 东太平洋海水变冷的原因。他们认为在全球变暖 减缓的前半段,AMOC的增强将热带高温高盐的 海水输送到北大西洋,导致那里的海水热含量增 加,作为补偿,势必会造成别的海域热含量减少, AMOC 增强,大气传输的热量将会减弱,进而影 响 PDO。不同研究所用方法和资料的不同,得出 的研究结果亦不同。除了上述所说的变暖减缓的 影响因子目前还具争论,本文基于统计手段,用 于归因分析的气候模式及观测资料的不确定性^[32], 导致本文研究的结果也具有不确定性。另外,用 PDO 序列回归全国最低气温场,得出的回归系数 除了大部分地区为正值外, 在华南和西南部分地 区为负值,用全国区域平均序列做分析时,可能 会抵消一部分, 使分析结果也具有不确定性, 因 此还需利用更科学的手段进行分析和验证。

参考文献

 IPCC. Climate change 2013: the physical science basic contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental

2020年

Panelon Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

- [2] 王颖. 1955—2004 年极端气候事件的时空变化特征研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学硕士论文, 2006. Wang Y. A statistical analysis of the temporal-spatial changing characteristics of extreme climate event over China: 1955–2004 [D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Information Science and Technology, 2006 (in Chinese)
- [3] 张宁.中国极端气温和降水趋势变化研究 [D].南京:南京信息 工程大学硕士论文, 2007. Zhang N. An analysis on change of trend coefficient of extreme climate events in China [D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Information Science and Technology, 2007 (in Chinese)
- [4] 龚志强,王晓娟,崔冬林,等.区域性极端低温事件的识别及其变化特征[J].应用气象学报,2012,23 (3): 195-204. Gong Z Q, Wang X J, Cui D L, et al. The identification and changing characteristics of regional low temperature extreme events [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23 (3): 195-204 (in Chinese)
- [5] 任国玉,初子莹,周雅清,等.中国气温变化研究最新进展[J].气 候与环境研究,2005,10 (4):701-716. Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10 (4): 701-716 (in Chinese)
- [6] 刘学华,季致建,吴洪宝,等.中国近40年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报,2006,22 (6): 618-624. Liu XH, Ji Z J, Wu H B, et al. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22 (6): 618-624 (in Chinese)
- [7] 杨萍,刘伟东,王启光,等.近40年我国极端温度变化趋势和季节特征[J].应用气象学报,2010,21(1):29-36. Yang P, Liu W D, Wang Q G, et al. The climatic change trend and seasonal characteristics of daily temperature extremes in China for the latest 40 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 29-36 (in Chinese)
- [8] 周雅清,任国玉.中国大陆 1956—2008 年极端气温事件变化特征 分析 [J]. 气候与环境研究, 2010, 15 (4): 405-417. Zhou Y Q, Ren G Y. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956–2008 [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15 (4): 405-417 (in Chinese)
- [9] 张宁,孙照渤,曾刚. 1955—2005 年中国极端气温的变化 [J]. 南 京气象学院学报, 2008, 31 (1): 123-128. Zhang N, Sun Z B, Zeng G. Change of extreme temperature in China during 1955–2005 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31 (1): 123-128 (in Chinese)
- [10] 王晓娟, 龚志强, 任福民,等. 1960—2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8 (1): 8-15.
 Wang X J, Gong Z Q, Ren F M, *et al.* Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960–2009 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8 (1): 8-15 (in Chinese)
- [11] 王安乾,苏布达,王艳君,等.中国极端低温事件特征及其耕地暴露度研究[J].资源科学,2017,39 (5):954-963. Wang A Q, Su B D,

Wang Y J, *et al.* The characteristics of extreme minimum temperature events and exposure of farmland in China [J]. Resources Science, 2017, 39 (5): 954-963 (in Chinese)

- [12] Cohen J, Barlow M, Saito K. Decadal fluctuations in planetary wave forcing modulate global warming in late boreal winter [J]. Journal of Climate, 2009, 22: 4418-4426
- [13] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. Nature, 2013, 501 (7467): 403-407
- [14] 梁苏洁.近50年中国冬季气温和冬季风以及区域环流的年代际 变化研究 [D].北京:中国气象科学研究院博士论文,2014. Liang S J. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature and winter monsoon over China mainland and regional atmospheric circulation characteristics in recent 50 years [D]. Beijing: Doctor's Thesis of University of Chinese Academy of Sciences, 2014 (in Chinese)
- [15] 谢韶青.近三十年欧亚大陆中纬度地区冬季低温事件变化特征及其与北极海冰的关系 [D].南京:南京信息工程大学硕士论文,2017. Xie S Q. Characteristics of winter low temperature events changes and its relationship with the Arctic sea-ice in the mid-latitudes of Eurasia past 30 years [D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Information Science and Technology, 2017 (in Chinese)
- [16] Ding R, Ha K, Li J. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean [J]. Climate Dynamics, 2010, 34 (7-8): 1059-1071
- [17] 葛敬文. ENSO 和东亚冬季风对东亚冬季气候的影响研究 [D]. 浙 江:浙江大学博士论文, 2018. A study of the impacts of ENSO and EAWM on the winter climate over East Asia [D]. Zhejiang: Doctor's Thesis of Zhejiang University, 2018 (in Chinese)
- [18] Wang L, Chen W, Huang R H. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35, L20702. DOI: 10.1029/2008GL035287
- [19] Zhou W, Li C Y, Wang X. Possible connection between Pacific Oceanic interdecadal pathway and East Asian winter monsoon [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 34, L01701. DOI: 10.1029/2006G L027809
- [20] 朱益民,杨修群.太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报,2003,61 (6):641-654. Zhu Y M, Yang X Q. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61 (6): 641-654 (in Chinese)
- [21] 李崇银,王力群,顾薇.冬季蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度关系[J].大气科学,2011,35 (2):192-200. Li C Y, Wang L Q, Gu W. Interannual time-scale relationship between Mongolia high and SST anomaly in the north Pacific in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35 (2): 193-200 (in Chinese)
- [22] Zhou W, Li C Y, Wang X. Possible connection between Pacific oceanic interdecadal pathway and East Asian winter monsoon [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34 (1): L01701
- [23] Xu W H, Li Q X, Wang X L, et al. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118 (17): 9708-9720

王岱,等:太平洋年代际振荡对中国冬季最低气温年代际变化的贡献

- [24] 裴琳,严中伟,杨辉.400多年来中国东部旱涝型变化与太平洋 年代际振荡关系[J].科学通报,2015,60 (1):97-108. Pei L, Yan Z W, Yang H. Multidecadal variability of dry/wet patterns in eastern China and their relationship with the Pacific Decadal Oscillation in the last 413 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (1): 97-108 (in Chinese)
- [25] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations [J]. International Journal of Climatology, 1996, 16 (4): 361-377
- [26] Dai A G, Fyfe J C, Xie S P, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability [J]. Nature Climate Change, 2015, 5: 555-559
- [27] Wu Z H, Norden H. Ensemble empirical mode decomposition: a noiseassisted data analysis method [J]. Adcances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1 (1): 1-41
- [28] Wu Z, Schneider E K, Kireman B P, et al. The modulated annual

cycle: an alternative reference frame for climate anomalies [J]. Climate Dynamics, 2008, 31 (7): 823-841

- [29] Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, *et al.* Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods [J]. Nature Climate Change, 2011, 1 (7): 360-364
- [30] Chen X, Tung K K. Climate. Varying planetary heat sink led to globalwarming slowdown and acceleration [J]. Science, 2014, 345 (6199): 897-903
- [31] Chen X, Tung K K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation [J]. Nature, 2018, 559 (7714): 387-391
- [32] 孙颖, 尹红, 田沁花, 等. 全球和中国区域近 50 年气候变化检测 归因研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 2013, 9 (4): 235-245. Sun Y, Yin H, Tian Q H, *et al.* Recent progress in studies of climate change detection and attribution in the globe and china in the past 50 years [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2013, 9 (4): 235-245 (in Chinese)

Contribution of Pacific Decadal Oscillation to interdecadal variability of winter minimum temperature in China

WANG Dai^{1, 2}, SUN Yin-Chuan^{1, 2}, YOU Qing-Long³

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China; 2 Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China; 3 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST), Nanjing 210044, China

Abstract: Based on homogeneity-adjusted temperature data of meteorological stations in China, NOAA monthly mean sea temperature data, and CMIP5 climate model data from 1961 to 2013, the contribution of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) to the interdecadal variability of China's winter minimum temperature was quantitatively analyzed by using climatic statistic methods. Results show that the interdecadal sequence of PDO has significant positive correlation with minimum temperature pattern of decadal filtering at most areas in China, winter minimum temperature is low when PDO is in negative phase, while conversely is high. The phenomenon of hiatus of winter minimum temperature after 2006, is mainly caused by cooling effect of natural variability, in which PDO plays a leading role, accounting for about 40% of natural variability contribution. The contribution of PDO to temperature presents an obvious interdecadal change. PDO has negative contribution to warming, and gradually increase to exceed 50% during 2006–2013.

Keywords: China area; Pacific Decadal Oscillation (PDO); Minimum temperature; Interdecadal variability; Contribution