

陈莉, 娄德君, 班晋, 等. 黑龙江省冬季极端寒冷指数的构建及年代际变化研究[J]. 灾害学, 2023, 38(2): 79–84.
[CHEN Li, LOU Dejun, BAN Jin, et al. The Construction of Extreme Cold Index of Winter and its interdecadal Variation Analysis in Heilongjiang Province[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(2): 79–84. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.02.012.]

黑龙江省冬季极端寒冷指数的构建及年代际变化研究^{*}

陈莉¹, 娄德君², 班晋¹, 李帅³, 祝玉梅², 赵佳莹¹, 李亚滨¹

(1. 黑龙江省气候中心, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 齐齐哈尔市气象局, 黑龙江 齐齐哈尔 161006;
3. 黑龙江省气象台, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 利用1961—2020年黑龙江省冬季逐日气温资料, 以连续5 d日平均气温低于一个标准差来判定极端冷事件, 进而利用冷事件的持续天数和气温累计距平构建冬季极端寒冷指数(Extreme Cold Index of Winter, *ECIW*)。在此基础上深入研究了 *ECIW* 的年代际变化特征及其环流差异。结果表明: 近60 a来黑龙江省 *ECIW* 呈显著上升趋势, 且在1987年前后发生了年代际突变, 突变后冬季冷事件强度显著减小。回归分析表明, 突变前的1961—1985年, 当 *ECIW* 强度偏强时, 环流呈现北极涛动负位相和弱的欧亚遥相关型正位相分布特征, 西北高东南低的环流配置下东亚中高纬环流经向度加大, 影响黑龙江省的冷空气较强。而突变后的1991—2020年, 环流呈现典型的欧亚遥相关型正位相分布, 东亚温带急流显著偏弱, 北高南低的配置下黑龙江上空低值系统活跃。对北极涛动、欧亚遥相关型、西伯利亚高压、东亚冬季风等指数与 *ECIW* 的相关和偏相关分析表明, 北极涛动和欧亚遥相关型是影响 *ECIW* 的重要环流因子, 1961—1985年北极涛动是主导因子, 1991—2020年欧亚遥相关型是主导因子。

关键词: 冬季极端寒冷指数(*ECIW*); 年代际变化; 突变前后时段; 北极涛动; 欧亚遥相关型; 黑龙江

中图分类号: P461; X915.5; P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)02-0079-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.02.012

IPCC第6次评估报告指出, 2001—2020年全球地表平均温度较工业化前增暖约1℃, 气候变暖导致未来极端天气气候风险增大。极端天气事件在全球造成人类生命损失、生态系统破坏、财产损失等。全球变暖气候背景下, 中国平均气温和极端气温整体呈现变暖趋势^[1-2], 但与1970年代中后期—1990年代末期的加速变暖时段相比, 1998—2012年出现变暖减缓时期^[3], 中国的冬季平均气温和最低气温也存在变暖减缓现象, 欧亚大陆中高纬地区极端低温事件明显增多^[4-5]。

对于中国及东北地区冬季气温偏低和极端低温事件的检测和归因研究, 已取得一些成果。中国冬半年极端低温事件随时间呈减少趋势, 极端低温事件空间一致性分布在1986年前后发生了突变。低温事件频数与东亚冬季风指数相关较好, 与西伯利亚高压强度显著正相关, 1986年后频次的减少可能与西伯利亚高压的南移并且减弱有关^[2]。亚洲区极涡面积和强度对2012年冬季欧亚大陆极端低温事件影响显著^[6]。北极涛动负位相、北半球极涡面积偏大、强度偏弱及东亚槽偏西等异常通常对应着黑龙江省极端冷事件^[7]。当北极涛动/北大西洋涛动处于负位相时, 偏北风加强, 乌拉尔山—贝加尔湖地区阻塞高压活动增多, 寒潮频发, 造成欧亚大陆冬季范围较大的低温事

件^[8-9]。当欧亚遥相关型处于正位相时, 西伯利亚高压及相应的季风环流增强, 东亚冬季低温事件频发^[10]。当北极海冰减少时, 会通过海洋的非绝热加热过程, 在大气中激发定常罗斯贝波列向下游传播, 导致西伯利亚高压偏强, 利于亚洲中纬度地区(35°~50°N, 50°~130°E)极端低温发生频次增多^[11-12]。而前期热带太平洋海温异常与亚洲中纬度极端低温的关系较北极增暖更为密切^[13]。ENSO可以通过调制北大西洋涛动的位相来影响欧亚大陆冬季气温。东部型和中部型厄尔尼诺事件和东部型拉尼娜事件均对应北大西洋涛动负位相, 欧亚中高纬经向环流加强, 极地冷空气更易南下, 中国北方冬季极端低温频次增多^[14]。北极异常增暖会造成对流层中层位势高度上升, 下游位势高度下降, 东亚大槽加深, 从而导致欧亚冬季气温偏低^[15-17]。北极深层偏暖有利于冬季乌拉尔山阻高加强、中纬度西风急流显著减弱, 使得对流层从低层到中层异常反气旋发展加强, 呈准正压结构, 利于欧亚大陆高纬冷空气南下^[18]。欧亚积雪异常不仅直接影响东亚冬季气温, 还通过影响冬季北极涛动的变化对东亚冬季气温产生间接影响^[19-20]。

^{*} 收稿日期: 2022-10-08 修回日期: 2023-01-28

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020D015); 中国气象局决策气象服务专项重点项目(JCZX2022002)

第一作者简介: 陈莉(1972-), 女, 汉族, 吉林扶余人, 正高级工程师, 主要从事气候与气候变化研究。E-mail: climate_chenli@163.com

通信作者: 娄德君(1973-), 女, 汉族, 江苏邳州人, 正高级工程师, 主要从事气候诊断与预测研究。E-mail: ldj7308@163.com

以上对于冬季平均气温和单次的极端冷事件有一定的研究,但从季尺度研究极端冷事件发生强度的文献还较少。同时极端冷、暖事件的大气环流成因不同,我们以往对于冬季气温的研究,大多是从平均角度开展,在一定程度对极端冷、暖事件的环流信号进行了混合,对于进一步揭示极端气候事件形成机理增加了难度。极端冷事件对处于严寒地区的黑龙江省经济社会和人民生活影响很大,尤其给冬季供暖能源保供工作、冰雪运动和冰雪旅游带来了巨大挑战,如果在极端冷事件发生的同时出现降雪,会对交通、清冰雪和城市运行带来不利影响。因此,本文以黑龙江省为例把极端冷事件从平均气温中分离出来,构建冬季极端寒冷指数,可以客观地反映该区域历史上逐年冬季极端冷事件发生的强度变化,同时在构建冬季极端寒冷指数的基础上,深入分析了该指数异常的环流成因,对于全面认识该区域的气候变化、预测极端事件提供新思路,同时也可以为其他区域开展此类研究提供示范。

1 资料和方法

1.1 资料

黑龙江省 61 个气象站冬季逐日平均气温资料来自于黑龙江省气象数据中心,月平均位势高度、风场等再分析资料来自美国国家环境预报中心。北极涛动(AO)月环流指数资料来自美国国家海洋大气局(NOAA, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>)。所用资料时段均为 1961—2020 年冬季,冬季指 12 月—翌年 2 月,约定 1961 年冬季是指 1961 年 12 月至 1962 年 2 月。

1.2 环流指数定义

西伯利亚高压强度指数(SHI)为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围内面积平均的海平面气压标准化值^[21],如公式(1)所示。欧亚遥相关指数(EU2I)参考 BARNSTON 等^[22]的定义,如公式(2)所示,其中 Z_{500}^* 表示区域内面积平均的 500 hPa 高度标准化值。东亚冬季风指数(EAWMI)为 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 与 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围内 500 hPa 纬向风平均值差值的标准化值^[23],见公式(3)。

$$SHI = SLP^*(80^{\circ} - 120^{\circ}\text{E}, 40^{\circ} - 60^{\circ}\text{N}). \quad (1)$$

$$EU2I = -Z_{500}^*(10^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{E}, 50^{\circ} - 60^{\circ}\text{N}) + Z_{500}^*(50^{\circ} - 60^{\circ}\text{E}, 40^{\circ} - 50^{\circ}\text{N}) - Z_{500}^*(115^{\circ} - 135^{\circ}\text{E}, 40^{\circ} - 50^{\circ}\text{N}). \quad (2)$$

$$EAWMI = |U_{500}(80^{\circ} - 120^{\circ}\text{E}, 25^{\circ} - 35^{\circ}\text{N}) - U_{500}(80^{\circ} - 120^{\circ}\text{E}, 50^{\circ} - 60^{\circ}\text{N})|. \quad (3)$$

1.3 研究方法

1.3.1 冬季极端寒冷指数构建

冬季极端寒冷指数(Extreme Cold Index of Winter, *ECIW*)主要包括 2 个因子,分别是寒冷持续天数 $\tau(\text{d})$ 和气温累计距平 $t_a(^{\circ}\text{C})$ 。

(1) τ 的确定方法:基于历史长序列日气温数据,首先采用标准差法确定黑龙江省冬季极端冷事件,然后计算冬季极端冷事件的累计天数。具体方法为,以历史有记录的日平均气温为序列(本文为 1961—2020 年),计算此序列的平均值和标准差。用每日气温值减去平均值,求得距平序列(Δt),并计算序列标准差(σ)。在此序列中,如连续 5 d 日平均气温距平序列中出现负距平超过 1 倍标准差($\Delta t > \sigma$),定义为一个极端冷事件。若某年冬季出现多次极端冷事件,计算所有极端冷事件

累计持续天数;若没有出现极端冷事件,选取逐日气温距平为负值的持续时间最长的一次作为一般冷事件,计算持续天数;若冬季全时段逐日气温距平均为正,则持续天数为 0。

(2) t_a 的确定方法:计算某年冬季极端冷事件中的所有日数的气温累计距平;若冬季没有出现极端冷事件,选择一般寒冷事件的日数,计算其气温累计距平;计算冬季逐日气温距平,若均为正,则该项为 0。

对 τ 和 t_a 序列进行标准化处理后,得到 S_{τ} 和 S_{t_a} ,构建冬季极端寒冷指数如下:

$$ECIW = S_{t_a} - S_{\tau}. \quad (4)$$

某年 *ECIW* 负值越大,代表该年冬季极端冷事件的强度越大。

经普查,黑龙江省 1961—2020 年间,冬季极端冷事件共发生 51 次,1986 年前共发生 34 次^[7]。60 a 来,*ECIW* 与冬季平均气温距平的相关系数为 0.751,为高度相关。但符号相反的年份有 19 a:*ECIW* 为正、气温距平为负的有 16 a,表明这些年份极端冷事件较弱而冬季平均气温较常年偏低,出现这种现象的原因是冷空气频繁但强度较弱且不持续,差别显著的年份主要有 1972、1983、2009 年,*ECIW*(气温距平)分别为 0.9(−1.20 $^{\circ}\text{C}$)、0.39(−1.42 $^{\circ}\text{C}$)、0.42(−1.57 $^{\circ}\text{C}$);*ECIW* 为负、气温距平为正的有 3 a,表明这些年份极端冷事件较强而冬季气温较常年偏高,出现这种现象的原因可能是当年暖事件更强或极端冷事件强度较弱、次数较少,差别显著的年份是 1982 年,*ECIW* 和气温距平分别为 −0.23 和 0.52 $^{\circ}\text{C}$ 。*ECIW* 和冬季平均气温距平符号相反的现象,说明只用气温距平来分析研究区的与气温相关的气候变化是不够的,极端寒冷指数的构建是对揭示该区域气候变化的有益补充。

1.3.2 其他统计方法

文中使用的统计方法主要包括:相关分析、回归分析、滑动相关、合成分析、*t* 检验、MK 突变检验等^[24]。由于 *ECIW* 的定义主要是为反映极端冷事件的强度,其时间序列中存在极端低值,因此采用对野值不很敏感的 Spearman 相关分析方法分析该指数和环流指数的相关关系。

2 结果分析

2.1 冬季极端寒冷指数(*ECIW*)的变化特征

图 1a 给出了 1961—2020 年黑龙江省 *ECIW* 的标准化时间序列,由图可见近 60 a 来黑龙江省冬季极端寒冷指数呈上升趋势,上升速率为 0.18/10 a,通过了 95% 的置信度检验,这表明冬季冷事件强度随时间呈显著减小趋势。使用步长为 11 a 的滑动 *t* 检验方法和 M-K 检验方法进行了突变检测,得到 *ECIW* 在 1984—1986 年发生了突变,突变后冬季极端冷事件强度明显减弱(图 1b)。统计可知突变前(1961—1986 年)*ECIW* 负指数年为 16 a,约占 62% (16/26)。突变后(1987—2020 年)负指数年 5 年,约占 15% (5/34),可见突变后正指数年明显增多,负指数年明显减少,*ECIW* 发生了明显的年代际变化。值得注意的是,突变后指数为负的 5 a 中有 3 a 出现在 2010 年以后。*ECIW* 的突变时间与我国冬季气温在 1985 年前后发生突变^[25-26]和极端低温事件在 1986 年前后发生突变^[2]基本一致。基于以上结果,下文分突变前、后时段对 *ECIW* 异常的环流特征进行分析。为了消除滑

动窗口选取带来的影响, 去掉了中间过渡的 5 a, 确定突变前为 1961—1985 年, 突变后为 1991—2020 年。对比两时段的 *ECIW* 负指数变化可以看到, 1961—1985 年负指数年占比为 60% (15/25), 1991—2020 年占比为 13% (4/30), 负指数年的占

比由突变前到突变后骤减, 反映出冷事件明显减弱。

2.2 突变前后 *ECIW* 异常的大气环流特征

图 2 为突变前后负 *ECIW* 与同期大气环流距平场的回归系数分布。

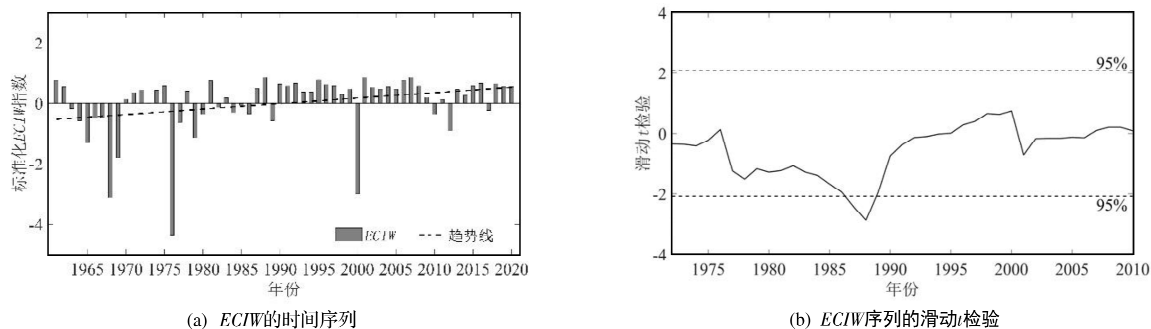


图 1 1961—2020 年 *ECIW* 时间序列和滑动 t 检验

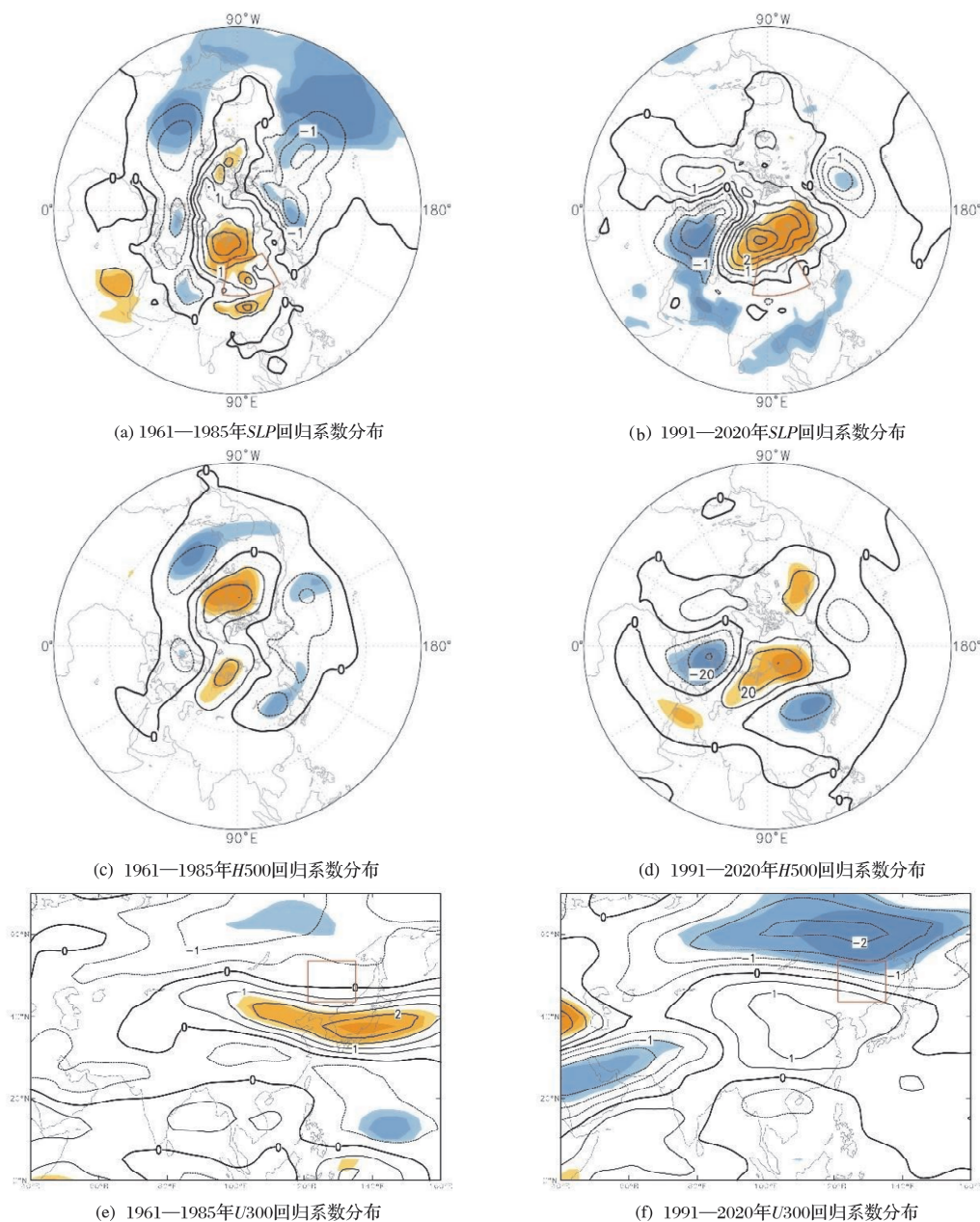


图 2 突变前后负 *ECIW* 与冬季环流场的回归系数分布 (阴影由浅到深表示通过 90%、95%、99% 信度检验; 图 2a、图 2b 中红色实线包围区域为西伯利亚高压活动区域; 图 2e、图 2f 中红色实线包围区域为黑龙江省位置)

海平面气压场(SLP)的回归系数分布显示,当冬季极端冷事件强度偏强时,1961—1985年极涡偏弱,正异常中心位于喀拉海—西西伯利亚平原和格陵兰岛西南侧,负异常中心位于北大西洋至西欧和阿留申群岛附近,均通过95%的置信度检验,SLP距平场呈北极涛动(AO)负位相分布^[27-28],西伯利亚高压^[29,21]和阿留申低压均偏强,东亚冬季风强度增强,有利于冷空气影响黑龙江省(图2a)。1991—2020年西伯利亚高压和阿留申低压强度均较1961—1985年偏弱,但极区正距平强度和范围显著增大,同时在西欧地区出现显著负异常(图2b)。

对流层中层500 hPa高度场(H500)回归系数分布显示,当冬季ECIW强度偏强时,1961—1985年极涡偏弱,正异常中心位于喀拉海附近和北美洲北部,负异常中心位于贝加尔湖至堪察加半岛南侧、北大西洋西部至墨西哥湾,类似北极涛动负位相分布。喀拉海附近正异常中心向南延伸至里海北侧,与其东西两侧的负异常中心形成了“- + -”的纬向波列分布,类似弱的欧亚遥相关型正位相分布^[22]。乌拉尔山脊和东亚大槽均偏强,西北高东南低的环流分布导致东亚中高纬地区环流经向度加大,利于冷空气影响东北地区,造成黑龙江省冷事件偏强(图2c)。1991—2020年乌拉尔山正异常、西欧和东北亚负异常范围较1961—1985年明显增大,环流呈典型欧亚遥相关型正位相分布特征(图2d)。

对流层上层300 hPa纬向风场的回归系数分布显示,当冬季ECIW强度偏强时,1961—1985年东亚中高纬50°N南北两侧纬向风距平符号相反,北侧为负距平,南侧为正距平,负值和正值中心分别位于贝加尔湖北侧和渤海湾—日本岛附近。表明东亚温带急流略偏弱,副热带西风急流异常偏北,有利于在东北地区产生异常的气旋式环流,导致东亚冬季风强度加强和东亚大槽加深,影响黑龙江省的冷空气较强(图2e)。1991—2020年东亚温带急流显著负异常的范围和强度较1961—1985年明显增大,显著负异常区域扩大至50°N纬圈附近,负值中心位于贝加尔湖东北侧,副热带西风急流较1961—1985年明显减弱,正距平中心较1961—1985年略偏西(图2f)。

综上,冬季ECIW强度偏强时,1961—1985年环流呈现北极涛动负位相和弱的欧亚遥相关型正位相,东亚副热带西风急流异常偏北,西伯利亚高压和东亚冬季风偏强,西北高东南低的环流配置下东亚中高纬环流经向度加大,利于冷空气南下影响黑龙江省。1991—2020年环流呈典型欧亚遥相关型正位相分布,东亚温带急流显著偏弱,西伯利亚高压较1961—1985年减弱,东亚冬季风偏强,北高南低的配置下黑龙江上空低值系统活跃。

2.3 影响冬季ECIW异常的关键环流因子

由前文分析可知,影响冬季ECIW异常的环流指数主要有AO、EU2I、SHI和EAWMI,因此进一步分析各环流指数与冬季ECIW的Spearman相关。

由表1可知1961—2020年ECIW与AO显著正相关,与EU2I、EAWMI呈显著负相关,与SHI为弱的负相关。即当AO负位相,EU2I正位相时,东亚冬季风偏强,黑龙江省冬季极端寒冷事件强度大。突变前后对比来看,ECIW与AO和EU2I相关性较好,两个时段均显著相关,通过95%以上信度检验。ECIW与EAWMI在1961—1985年为弱的负相关,1991—2020年相关加强,通过95%信度检验。与SHI在两个时段相关均不显著。

表1 ECIW与同期各环流因子的Spearman相关系数

| | 1961—2020年 | 1961—1985年 | 1991—2020年 |
|-------|------------|------------|------------|
| AO | 0.467** | 0.603** | 0.378* |
| EU2I | -0.566** | -0.502** | -0.691** |
| SHI | -0.180 | -0.261 | -0.085 |
| EAWMI | -0.327** | -0.302 | -0.379* |

注:*,**分别代表通过95%和99%置信度检验

为了确定冬季ECIW与各环流指数间相关关系是否稳定,进行滑动相关分析^[30]。滑动窗长度取为21 a,滑动相关值记在窗口的第11 a,由图3a可见ECIW与AO、EU2I的21 a滑动相关系数基本呈反相变化,且具有阶段性特征,即在1985年以前,与两个指数的相关均特别显著,通过了95%信度检验;1985—1990年间相关性明显减弱均没有通过90%置信度检验;1990年以后,相关又有所增强,与EU2I的滑动相关稳定通过了95%以上信度检验,与AO的相关在1991—2001年通过了90%信度检验,2002年之后则通过95%以上信度检验。而ECIW与EAWMI的相关仅在个别时段通过90%以上信度检验,大部分时段相关不显著。

由于AO和EU2I是主要影响因子,且二者显著负相关,我们进一步进行了ECIW与AO、EU2I的偏相关分析(图3b)。排除EU2I影响后,ECIW与AO的21 a滑动相关在1985年以前相关显著,通过90%以上信度检验,之后相关明显减弱,1998年以后相关逐渐增强,2003年以后通过了90%以上信度检验。而排除AO影响后,ECIW与EU2I的21 a滑动相关在1985年以前明显减弱,大部分时间没有通过90%以上信度检验,1989年以后相关加强,稳定通过95%以上信度检验。可见1961—1985年影响ECIW的主导因子是AO,而1991—2020年影响ECIW的主导因子是EU2I,这与上文环流场分析结果一致。为什么会出现这种情况呢?有没有可能是由于AO和EU2I内部气候变率发生了变化?为此,对AO和EU2I进行了滑动t检验,结果如图4所示,AO和EU2I的确在1980年代末期发生了年代际尺度突变。从EU2I的变化上看,该因子在2010年以后正异常明显增多,这很可能是导致黑龙江省2010年以来ECIW负指数年份较前10余年明显增多的原因。对于AO和EU2I的突变原因,还需要进一步研究。

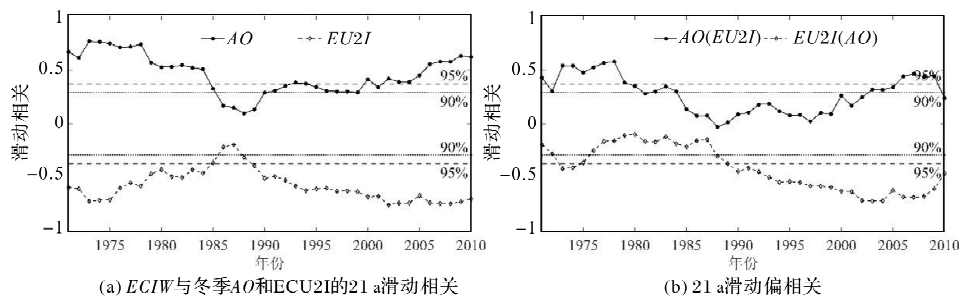


图3 1961—2020年ECIW与冬季AO和EU2I的21 a滑动相关和21 a滑动偏相关(b中括号内为排除影响的因子)

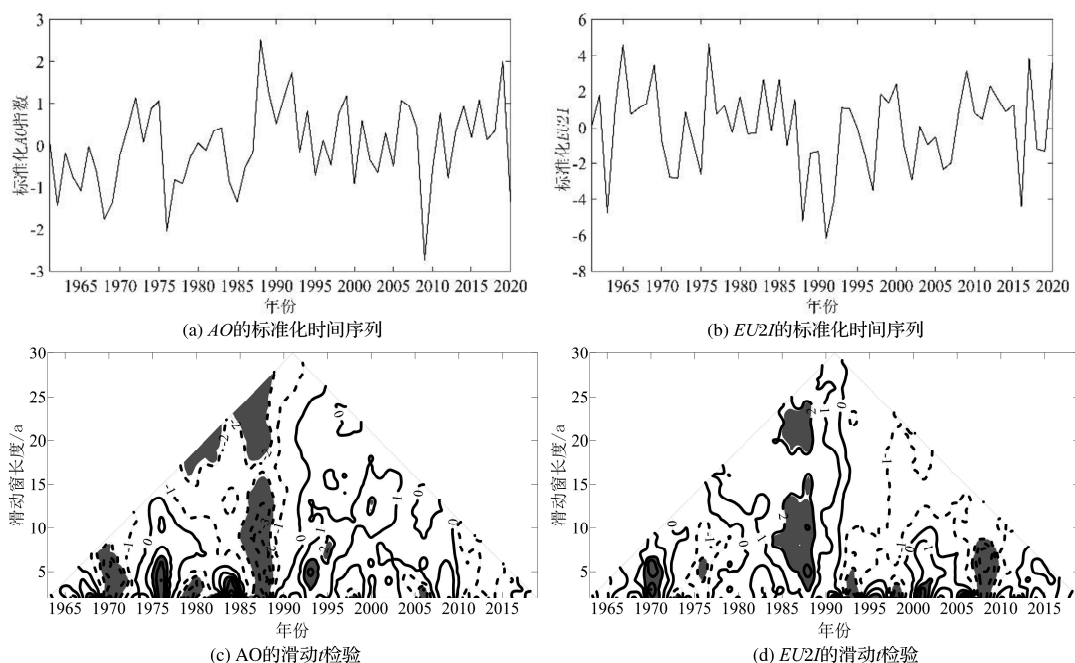


图4 1961—2020 年冬季 AO 和 EU2I 的标准化时间序列和滑动 t 检验

3 结论和讨论

本文介绍了构建冬季极端寒冷指数 ($ECIW$) 的方法, 并对 1961—2020 年黑龙江省冬季 $ECIW$ 变化特征和年代际变化影响因子进行了分析, 结论如下:

(1) 基于冬季寒冷持续天数和气温累计距平构建了冬季极端寒冷指数 $ECIW$ 。1961—2020 年黑龙江省 $ECIW$ 与冬季平均气温距平的相关系数为 0.751, 为高度相关, 但符号相反的年份有 19 年。近 60 a 来黑龙江省冬季极端寒冷指数呈显著上升趋势, 且在 1987 年前后发生了突变, 突变后正指数年明显增多, 负指数年明显减少, 冬季极端冷事件强度显著减小。

(2) 确定突变前 (1961—1985 年)、突变后 (1991—2020 年) 两个研究时段。当 $ECIW$ 强度偏强时, 1961—1985 年环流呈现 AO 负位相和弱的 EU2I 正位相, 西北高东南低的环流配置下东亚中高纬环流经向度加大, 影响黑龙江省的冷空气较强。1991—2020 年环流呈现典型的 EU2I 正位相分布, 东亚温带急流显著偏弱, 北高南低的配置下黑龙江上空低值系统活跃。

(3) 相关分析表明, AO 和 EU2I 是影响 $ECIW$ 的重要环流因子, 1961—1985 年 AO 是主导因子, 1961—1985 年 EU2I 是主导因子。 $ECIW$ 的年代际变化可能与 2 个影响因子在 20 世纪 80 年代末期都发生了年代际尺度突变有关。

本文构建的冬季极端寒冷指数 $ECIW$, 把极端冷事件从平均状态中分离出来, 真实反映了季尺度极端冷事件的情况, 对于当前大多研究是关于单次极端气候事件的现状起到一定的补充作用。基于本文提出的方法和思路, 可以构建该区域冬季极端暖指数并分析其变化特征, 实现对该区域温度变化特征的完整认识。同样, 本文的季尺度极端指数的构建方法, 可以拓展到月、年尺度, 从气温可以扩展到其他要素, 这是未来可以进一步开展的研究。另外, 可以开展针对极端指数的

预测, 然后再预测平均态或总量, 这是对目前短期气候预测的一个有益的补充。有关 $ECIW$ 年代际变化的大气环流成因, 本文提出了 AO、EU2I 的年代际变化可能是造成这两个因子在 $ECIW$ 突变前后主导地位变化的原因, 而 AO 和 EU2I 年代际变化成因还需要进一步研究, 同时在海冰、积雪、海温等外强迫因子如何影响 $ECIW$ 异常方面, 也有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 1955—2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征[J]. 气象科学, 2011, 31(3): 274—281.
- [2] 韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 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, 2021, 26(1): 1—17.
- [3] LI Q X, YANG S, XU W H, et al. China experiencing the recent warming hiatus[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(3): 889—898.
- [4] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 基于均一化资料的中国极端地面气温变化分析[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1352—1363.
- [5] 陈皎, 张耀存. 气候变化背景下陆地极端降水和温度变化区域差异[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 955—968.
- [6] 康彩燕, 胡钰玲, 王式功, 等. 极涡对北半球冬季气温的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(2): 227—234.
- [7] 陈莉, 班晋, 王承伟, 等. 黑龙江省冬季异常冷气候事件判定及其与环流指数的关系[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 54—60.
- [8] 兰晓青, 陈文. 2011—2012 年冬季欧亚大陆低温严寒事件与平流层北极涛动异常下传的影响[J]. 大气科学, 2013, 37(4): 863—872.
- [9] LU C H, XIE S Q, QIN Y J, et al. Recent intensified winter coldness in the mid-high latitudes of Eurasia and its relationship with daily extreme low temperature variability[J]. Advances in Meteorology, 2016, (4): 1—11.
- [10] LIM Y K, KIM H D. Comparison of the impact of the Arctic Oscillation and Eurasian teleconnection on interannual variation in East Asian winter temperatures and monsoon[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(1): 267—279.
- [11] HONDA M, INOUE J, YAMANE S. Influence of low Arctic Sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(8): L08707.
- [12] 李言蹊, 陈海山. 冬季亚洲中纬度极端低温事件与巴伦支—

- 喀拉海异常增暖的关系及联系机制[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 889–900.
- [13] WU B Y. Winter atmospheric circulation anomaly associated with recent Arctic winter warm anomalies[J]. Journal of Climate, 2017, 30(21): 8469–8479.
- [14] 汪子琪, 张文君, 耿新. 两类 ENSO 对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 564–580.
- [15] OVERLAND E, WOOD K R, WANG M Y. Warm Arctic—cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea[J]. Polar Research, 2011, 30(1): 15787.
- [16] MORI M, WATANABE M, SHIOGAMA H, et al. Robust Arctic Sea—ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(12): 869–873.
- [17] KUG J S, JEONG J H, JANG Y S, et al. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 759–762.
- [18] 鑫萍. 极增暖与欧亚冬季气候间的联系及物理机制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [19] COHEN L, FURTADO C, BARLOW M A, et al. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(1): 014007.
- [20] ALLEN R J, ZENDER C S. Forcing of the Arctic oscillation by Eurasian snow cover[J]. Journal of Climate, 2011, 24(24): 6528–6539.
- [21] 朱红霞, 陈文, 冯涛, 等. 冬季西伯利亚高压的主要年际变化模态及其对东亚气温的影响[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 685–692.
- [22] BARNSTON A G, LIVEZEY R E. Classification, seasonality and persistence of low – frequency atmospheric circulation patterns[J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(6): 1083–1126.
- [23] 朱艳峰. 一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 781–788.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 13–60.
- [25] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794–805.
- [26] 李维京, 李怡, 陈丽娟, 等. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化[J]. 应用气象学报, 2013, 24(4): 385–396.
- [27] BALDWIN M, DUNKERTON T. Propagation of the Arctic oscillation from the stratosphere to the troposphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D24): 30937–30946.
- [28] 杨辉, 李崇银. 冬季北极涛动的影响分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 395–404.
- [29] DING Y H, KRISHNAMURTI T N. Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon[J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(10): 2428–2449.
- [30] 林学椿. 统计天气预报中相关系数的不稳定性问题[J]. 大气科学, 1978, 2(1): 55–63.

The Construction of Extreme Cold Index of Winter and its Interdecadal Variation Analysis in Heilongjiang Province

CHEN Li¹, LOU Dejun², BAN Jin¹, LI Shuai³, ZHU Yumei², ZHAO Jiaying¹, LI Yabin¹

(1. Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030, China; 2. Qiqihar Meteorological Bureau, Qiqihar 161006, China; 3. Heilongjiang Meteorological Observatory, Harbin 150030, China)

Abstract: Based on the daily temperature data in Heilongjiang Province from 1961 to 2020, the extreme cold events are judged with the average temperature of consecutive 5 days being lower than one standard deviation, and then the Extreme Cold Index of Winter (*ECIW*) is constructed by using the duration and the cumulative temperature anomalies of cold events. On this basis, the interdecadal variation characteristics of the *ECIW* and its circulation differences are deeply studied. Results show that the *ECIW* in Heilongjiang Province is of a significant upward trend in the past 60 years, and an interdecadal abrupt change occurred around 1987, and the intensity of winter cold events decreased significantly after the abrupt change. Regression analysis reveals that before the abrupt change (1961–1985), when the *ECIW* intensity was stronger, the circulation showed a negative Arctic Oscillation phase and a weak Eurasian atmospheric teleconnection type positive phase distribution characteristics, under the circulation configuration of high northwest and low southeast, the meridional degree of the circulation in the middle and high latitudes of East Asia increases, and the cold air that affects Heilongjiang Province is stronger. After the abrupt change (1991–2020), the circulation showed a typical positive phase of Eurasian atmospheric teleconnection type, the East Asian temperate jet was significantly weaker, and the low – value system over Heilongjiang was active under the configuration. The correlation and partial correlation analysis of Arctic Oscillation, Eurasian atmospheric teleconnection type, Siberian high index, East Asian winter monsoon index with *ECIW* showed that Arctic Oscillation and Eurasian atmospheric teleconnection type are important circulation factors affecting *ECIW*, Arctic Oscillation is the dominant factor before the abrupt change, and Eurasian atmospheric teleconnection type is the dominant factor after the abrupt change.

Keywords: Extreme Cold Index of Winter (*ECIW*); interdecadal variation; periods before and after abrupt change; Arctic Oscillation; Eurasian atmospheric teleconnection type; Heilongjiang