

近 60 年中国冷空气过程的气候变率分析

朱万林^{1,2}, 李清泉^{1,2}, 王遵娅², 沈新勇^{1,3}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估
协同创新中心, 南京 210044

2 国家气候中心 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

摘要: 使用 1960-2019 年中国 2400 个气象站逐日观测气温, 系统地分析了中国各类冷空气过程的气候学特征。结果表明: 中国的寒潮和冷空气过程主要发生在秋季和冬季, 频数和强度有明显的月际和季节差异, 区域型寒潮在秋季发生频数最多, 全国型寒潮、区域型冷空气和全国型冷空气在冬季发生频数最多; 区域型冷空气总体过程(寒潮与冷空气过程之和)平均强度在 2 月最大, 全国型冷空气总体过程平均强度在 11 月最大。近 60 年中国冬季气温可以分为两个时期, 即冷期(1960-1986 年)和暖期(1987-2019 年)。冷期, 冬季全国型寒潮频数呈显著减少趋势(-0.57 次/10 年), 区域型冷空气、全部型(全国型与区域型之和)冷空气过程频数呈显著上升趋势(分别为 1.37 次/10 年、1.28 次/10 年); 暖期, 1 月全国型寒潮频数呈显著下降趋势(-0.17 次/10 年), 而区域型冷空气频数呈显著上升趋势(0.53 次/10 年)。

关键词: 冷空气; 寒潮; 强度; 频数

Climatological Variability of Cold Air Processes over China in Recent 60 Years

ZHU Wanlin^{1,2}, LI Qingquan^{1,2}, WANG Zunya², SHEN Xinyong^{1,3}

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 (NUIST), Nanjing 210044, China;

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: By virtue of the daily temperature observations of 2400 stations in China from 1960 to 2019, the climatological characteristics of the cold event in China are systematically analyzed. The results show that the cold wave and cold air process in China mainly occur in autumn, winter and spring, and the frequency and intensity have obvious monthly and seasonal differences. Regional cold wave has the highest frequency in autumn, and national cold wave and all types of cold air have the highest frequency in winter. The average intensity of regional cold event is the largest in February, and the average

*资助项目: 国家自然科学基金重大项目(41790471), 国家“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0208), 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)资助。

第一作者: 朱万林, 硕士研究生, 主要从事寒潮冷空气特征及成因研究, E-mail: zhuwanlinsh@163.com

通讯作者: 李清泉, 研究员, 主要从事气候动力学、气候模式模拟与预测、季风和海气相互作用研究, E-mail: liqq@cma.gov.cn

intensity of national cold event is the largest in November. Based on the analysis of winter temperature in China, the past 60 years can be divided into two stages, that is, the cold period from 1960 to 1986 and the warm period from 1987 to 2019. In the winter of cold period, the frequency of the national cold wave shows a significant decrease trend (-0.57 times/10 years), and the frequency of regional cold air and all-type (the sum of national type and regional type) cold air processes in winter shows a significant upward trend of 1.37 times/10 years and 1.28 times/10 years, respectively. In the warm period, there is a significantly decreasing trend of national cold wave frequency (-0.17 times/10 years) and a significantly increasing trend of regional cold air frequency (0.53 times/10 years) in January.

Key Words: Cold air; Cold wave; Intensity; Frequency

1 引言

在全球气候变化背景下,我国极端灾害事件频发。冷空气过程特别是强冷空气过程和寒潮过程是我国重大的灾害性天气之一,它具有发生频率高、持续时间长、影响范围广、致灾严重等特点。冷空气过程的频繁发生不仅会造成我国国民经济、特别是农业生产的巨大损失,而且会对环境及人们对生活、健康造成严重的危害和影响。

早在 1957 年,陶诗言(1957)就对东亚冷空气活动进行了研究,并确定了影响我国的冷空气源地和路径。20 世纪 70 年代,陈佑淑等(1974)对冷空气标准进行讨论并将冷空气分为寒潮、强冷空气、中等强度冷空气、及弱冷空气 4 个等级。也有研究寒潮年鉴(1996)根据过程总降温把冷空气过程分为区域型寒潮、全国型寒潮、强冷空气、一般冷空气。王遵亲等(2006)认为最低温度不受太阳辐射的影响,可以较好地反映降温的相对幅度,用最低气温计算降温幅度、进而对寒潮及冷空气过程进行了更加细致的分类。王遵亲等(2006)还利用 1951-2004 年中国 740 站逐日温度资料,对中国寒潮频次的气候特征及其变化进行了分析,并在此基础上讨论了中国寒潮频次减少的可能原因,其结果表明,西伯利亚高压和冬季风强度的减弱使冬季中国地表温度持续升高,而温度的这种变化与中国寒潮频次减少均有密切的联系。徐伟平等(2020)通过研究 20 世纪 90 年代以后华北地区初春低温增强的原因,表明欧亚大陆大气环流异常会导致我国华北地区气旋性增强和经向环流加大,从而引起寒潮等极端低温事件增多。

在全球升温 and 未来持续升温的大背景下,对中国极端温度和极端温度事件的研究已成为中国气候变化领域的重要问题(李金洁等,2019)。在此背景下,中国寒潮发生的频率和强度也出现了明显变化(丁一汇等,2009)。姚勇明等(2011)统计分析表明,从 20 世纪 50-80 年代中国各类寒潮的发生频次呈减少趋势,且强度减弱。黄焕卿和韩雪(2014)利用中国 194 站 1951 年 1 月 1 日-2003 年 5 月 31 日逐日气温资料,发现全国大部地区中强冷空气和寒潮每年发生次数呈减少趋势,但部分地区出现的中强冷空气每年发生次数增多趋势;冬季冷空气发生次数同比秋、春两季减少明显。周琳(2013)利用 1960-2010 年我国 384 站逐日温度资料研究指出我国单站冷空气呈北多南少、北强南弱的分布特征,全国型冷空气活动频数在 20 世纪 60 年代和 90 年代显著减少,而北方冷空气活动频数的年代际变化不大。

迄今国内已有大量研究(曹晓初等,2001;纪中萍等,2007;刘向文等,2009;岳艳霞等,2009;王宗明等,2011;阎琦等,2016;朱晨玉等,2014;毛炜峰,2016;唐熠,2019,)对不同区域冷空气特征进行统计分析。还有学者对寒潮及冷空气预报进行研究,如任金生等(1996)等以数值预报为基础,结合预报经验,并运用能量与诊断、人工智能和延伸预报等多种技术手段,

通过综合决策制作冷空气过程中期预报；陶亦为等（2017）利用集合预报天气预报指数（EFI）对2016年1月寒潮个例的预报进行分析和检验。

综上所述，目前的研究大都针对不同地区冬季冷空气过程，其结果具有很明显的区域型和季节性；且很多研究是早期用有限的资料进行的，很少有人系统地研究中国寒潮和冷空气的气候学变化特征，特别是近年来寒潮和冷空气活动的新特征。因此，本研究的目的是使用最新的1960-2019年中国2400个国家级气象站计算得到的冷空气过程监测资料，系统地分析中国各个季节寒潮及冷空气过程频数和强度的变化特征和规律，以便于全面认识我国冷空气过程的气候特征，为极端天气气候预测提供参考依据。。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用了中国气象局国家气象信息中心提供的2400台站逐日平均气温和日最低气温资料，以及中国气象局国家气候中心提供的中国冷空气过程监测指数，时间范围是1960年1月1日-2019年6月30日。气温资料经过中国气象局国家气象信息中心质量控制，没有做均一化处理。Wang et al. (2012)研究指出，采用均一化和非均一化的逐日最低气温数据不会改变极端气温的分析结果。此外，本文对冷空气过程的判定是采用降温幅度，也就是用本站的某个高温值减去某个低温值，已经去掉了数据整体的系统误差，因而资料均一性问题不会对冷空气的分析产生较大的影响。

2.2 各类冷空气过程的定义

根据中华人民共和国气象行业标准“冷空气过程监测指标”（中国气象局，2018），定义冷空气过程为冷空气发生、发展、结束的天气过程。采用中国2400个国家级气象观测站日最低气温（ $T_{\min}$ ）资料，依据单站降温幅度和日最低气温确定该单站的冷空气强度等级，其强度划分为中等强度冷空气、强冷空气和寒潮3级，划分方法为：（1）单站中等强度冷空气： $8^{\circ}\text{C}>\text{单站}\Delta T_{48}\geq 6^{\circ}\text{C}$ 的冷空气；（2）单站强冷空气：单站 $\Delta T_{48}\geq 8^{\circ}\text{C}$ 的冷空气；（3）单站寒潮：单站 $\Delta T_{24}\geq 8^{\circ}\text{C}$ 或单站 $\Delta T_{48}\geq 10^{\circ}\text{C}$ 或单站 $\Delta T_{72}\geq 12^{\circ}\text{C}$ ，且 $T_{\min}\leq 4^{\circ}\text{C}$ 的天气过程（其中48h、72h内的日最低气温必须是连续下降的）。

每日监测区域内有20%及以上且少于55%观测站单站出现中等及其以上冷空气过程，且持续两日及以上，判定为出现一次区域型冷空气过程；每日监测区域有超过55%观测站单站出现中等及其以上冷空气过程且持续两日及以上，判定为一次全国型冷空气过程。依据某次区域型（全国型）冷空气中达到不同强度等级的单站比率确定该次冷空气过程的强度指数，计算公式为

$$I = (3N_3 + 2N_2 + N_1) / (N_3 + N_2 + N_1) \quad (1)$$

（1）式中， I 为区域型（全国型）冷空气过程强度指数； N_3 为监测区域内出现寒潮的站点数； N_2 为监测区域内出现强冷空气的站点数； N_1 为监测区域内出现中等强度冷空气的站点数。

依据某次区域型（全国型）冷空气过程强度指数确定其强度等级，划分为冷空气过程（ $1\leq I<1.95$ ）和寒潮过程（ $1.95\leq I<3$ ），并根据上述方法定义区域型寒潮过程、全国型寒潮过程、区域型冷空气过程和全国型冷空气过程。

本文把区域型寒潮（冷空气）过程与全国型寒潮（冷空气）过程之和称为全部型寒潮（冷空气）过程，寒潮过程与冷空气过程之和称为冷空气总体过程。

在对寒潮和冷空气过程频数的变化特征进行研究时，采用了线性回归的方法，并利用时间和变量之间的相关系数对变化趋势进行显著性检验。梁苏洁等（2014）指出对于较短的时间序列，传统的Mann-Kendall(M-K)和滑动t检验无法有效检测时间序列后期的突变点，而Rodionov(2016)提出的基于t检验的循序算法STARS(Sequential t-test Analysis of Regime Shift)更为严谨，能

够检测出位于时间序列后期的突变。因此本文采用 STARS 检验方法并结合 11 年滑动平均曲线的变化趋势对中国冬季的温度进行分析和研究。

3 各类冷空气过程频数的特征

本文的统计分析结果表明,近 60 年来,全部型(区域型与全国型之和)寒潮共发生 344 次,其中全国型 175 次,区域型寒潮 169 次,全国型比区域型略偏多;全部型冷空气共发生 1384 次,是全部型寒潮的 4 倍,其中区域型冷空气发生 1256 次,全国型冷空气 128 次,区域型冷空气是全国型冷空气的 9.8 倍;冷空气总体过程(寒潮过程与冷空气过程之和)共发生 1728 次,其中区域型冷空气总体过程发生 1425 次,全国型冷空气总体过程发生 303 次,区域型是全国型的 4.7 倍(图略)。由此可见,冷空气过程发生的次数远比寒潮过程发生的次数多;区域型冷空气过程发生的次数远比全国型冷空气过程发生的次数多,但是全国型寒潮与区域型寒潮发生的次数接近。下面我们将系统地分析各类事件的月、季节、年代、长期变化趋势特征。

3.1 不同月和季节的各类冷空气过程频数特征

首先,我们对每个月和季节各类冷空气总体过程的累积频数进行分析。如图 1 所示,冷空气过程主要发生在除夏季(6~8 月)以外的其他三个季节,其中 11 月累计频数最多,9 月累计频数最少。区域型和全国型寒潮分别在 10 月和 11 月份发生最多,区域型和全国型冷空气过程分别在 11 月和 12 月发生次数最多。全部型寒潮、冷空气、冷空气总体过程累计频数在各月特征基本相同,即 10~12 月份的累计频数明显多于其他月份,尤其是 11 月最多。

1、3、4、11、12 月全国型寒潮比区域型寒潮多,其中 11 月最多;2、5、9、10 月区域型寒潮比全国型寒潮多,其中 10 月最多。对于全部型寒潮,冬季,12 月和 2 月发生的寒潮比 1 月略偏多;春季,3 月最多,其次是 4 月;秋季,11 月最多,其次是 10 月。

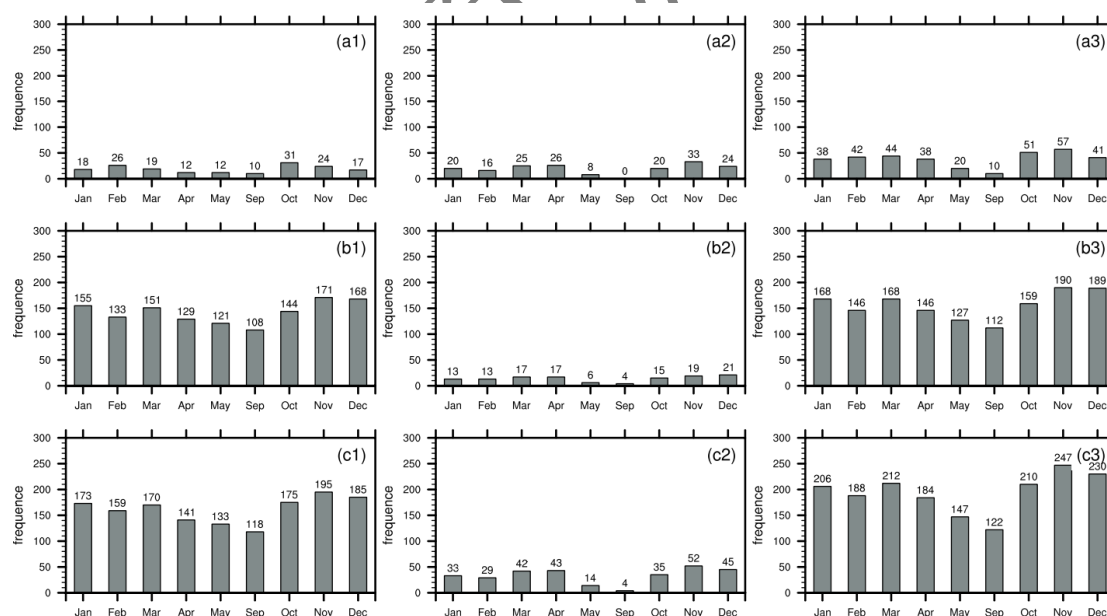


图 1 1960-2019 年各类冷空气过程在不同月的累计发生频数(单位:次)

区域型寒潮(a1), 全国型寒潮(a2), 全部型寒潮(a3)

区域型冷空气(b1), 全国型冷空气(b2), 全部型冷空气(b3)

区域型冷空气总体过程(c1), 全国型冷空气总体过程(c2), 全部型冷空气总体过程(c3)

Fig. 1 The cumulative occurrence frequency of various cold air processes in different months from 1960 to 2019 (unit: times)

regional cold wave (a1), national cold wave (a2), all cold wave (a3)

regional cold air (b1), national cold air (b2), all cold air (b3)

regional cold air overall process (c1), national cold air overall process (c2), all cold air overall process (c3)

图 2 是各类冷空气过程在冬、春、秋三个季节累计频数。由图 2 可见，对寒潮过程来说，秋季是区域型寒潮最为频发的季节，冬季次之，春季最少；与之相反，秋季是全国型寒潮发生次数最少的季节；秋季和冬季是全部型寒潮频发的季节，春季最少。冬季是区域型冷空气（冷空气总体过程）最为频发的季节，秋季次之，春季最少；冬季也是全国型冷空气（冷空气总体过程）最为频发的季节，春季次之，秋季最少。全部型冷空气（冷空气总体过程）在各个季节的累计频数特征与冷空气（冷空气总体过程）过程的区域型季节特征一样。

对于寒潮，全国型寒潮年总次数是区域型寒潮年总次数的 1.3 倍。全国型与区域型寒潮相比较，冬季一样多，春季多 37%，秋季少 18%。全国型寒潮在冬季和春季一样多，比秋季多 10%；区域型寒潮在秋季最多，冬季次之，春季最少，秋、冬季分别比春季多 51%和 37%。全部型寒潮在冬季和秋季一样多，比春季多 16%。对于冷空气过程，全国型在冬季最多，秋季最少；区域型和全部型在冬季最多，春季最少；区域型冷空气年总次数是全国型冷空气年总次数的 10.2 倍、全国型寒潮年总次数的 7.5 倍、区域型寒潮年总次数的 7.6 倍。对于冷空气总体过程，全国型在冬季最多，秋季最少；区域型和全部型在冬季最多，春季最少；区域型冷空气总体过程年总次数是全国型冷空气总体过程年总次数的 5 倍。

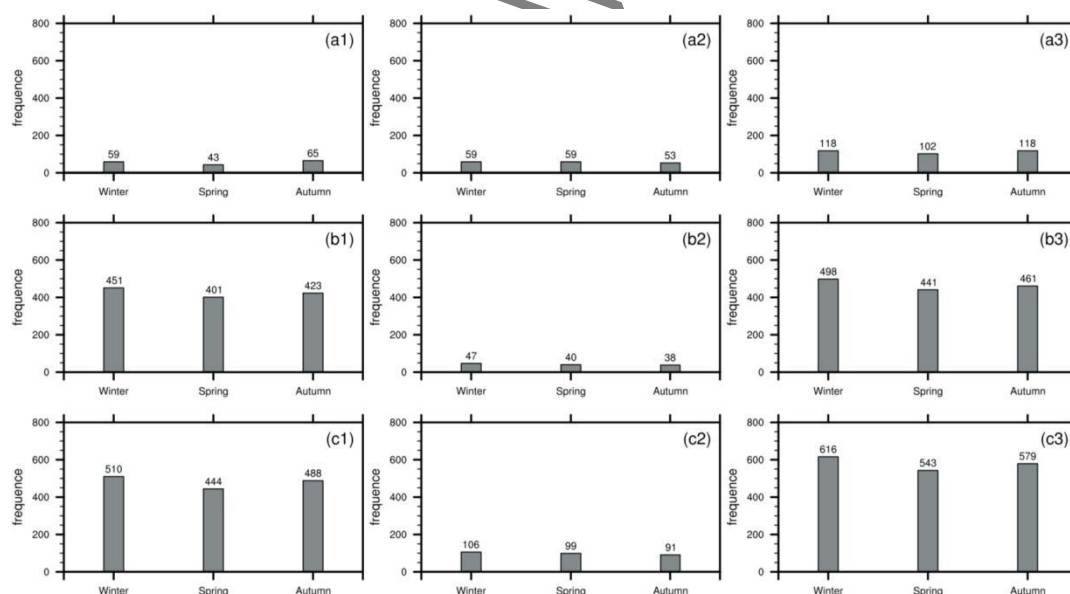


图 2 1960-2019 年各类冷空气过程在冬、春、秋季节的累计发生频数（单位：次）

区域型寒潮 (a1)，全国型寒潮 (a2)，全部型寒潮 (a3)

区域型冷空气 (b1)，全国型冷空气 (b2)，全部型冷空气 (b3)

区域型冷空气总体过程 (c1)，全国型冷空气总体过程 (c2)，全部型冷空气总体过程 (c3)

Fig.2 The cumulative frequency of various cold air processes in winter, spring and autumn from 1960 to 2019 (unit: times)

regional cold wave (a1), national cold wave (a2), all cold wave (a3)

regional cold air (b1), national cold air (b2), all cold air (b3)

3.2 各类寒潮频数的年代际变化趋势

图 3 给出了不同季节三类寒潮过程在每个年代 (10 年) 累计发生次数。由图 3 可见, 在冬季, 每个年代发生全部型寒潮 12-28 次, 其中区域型 6-13 次、全国型 6-18 次; 区域型寒潮经历了增加、减少、增加、减少的年代际变化, 全国型和全部型寒潮经历了减少、增加、减少的年代际变化。区域型寒潮在 20 世纪 70、90 年代偏多, 其他年代偏少; 全国型寒潮在 20 世纪 60 年代发生的次数明显多于其他年代, 20 世纪 80 年代以前, 呈现明显的下降趋势, 随后平缓增加, 21 世纪后减少。全部型寒潮在冬季的年代际变化特征较为明显, 1960—1989 期间, 呈现较明显的下降趋势, 20 世纪 90 年代作为过渡时期, 随后缓慢减少

春季, 每个年代发生全部型寒潮 12-25 次, 其中区域型 3-12 次、全国型 5-13 次; 区域型寒潮经历减少、增加的年代际变化; 全国型寒潮经历了减少、增加、减少的年代际变化; 全部型寒潮经历了减少、增加、减少、增加、减少的年代际变化。区域型寒潮在 20 世纪 60 年代和 70 年代发生次数较多, 到了 80 年代和 90 年代, 发生次数较少, 21 世纪后有所增加。图 3 (b1-b3) 很好的反映区域型寒潮在春季发生频数的年代际差异, 即从 1960—2000 年, 每 10 年发生的次数呈递减趋势, 21 世纪后, 区域型寒潮发生频数明显增加。全国型寒潮发生次数在 20 世纪 60 年代和 21 世纪初较多, 在 20 世纪 70 年代和最近 10 年较少, 总体而言, 21 世纪前全国型寒潮每 10 年的累计频数呈现先减少后增加的年代际特征, 21 世纪后为减少。全部型寒潮频数在 20 世纪 60 年代和 21 世纪初累计频数明显多于其他年代, 1970—2000 年期间没有明显的年代际变化, 该期间每 10 年发生的累计频数基本一致, 近 10 年发生的频数最少。

秋季, 每个年代可能发生全部型寒潮 14-24 次, 其中区域型 6-13 次、全国型 4-13 次; 区域型寒潮经历了增加、减少、增加、减少、增加的年代际变化, 全国型寒潮经历了增加、减少的年代际变化, 全部型寒潮经历了减少、增加、减少、增加的年代际变化。秋季寒潮频数的年代际变化没有春季明显, 20 世纪 80 年代区域型寒潮次数偏少, 只发生了 6 次, 在其他年代发生的次数没有明显差异。全国型寒潮在 20 世纪 60、90 年代发生次数较多, 70、80 年代为一过渡时期, 21 世纪后, 全国型寒潮发生的次数偏少且呈现出递减的变化趋势。全部型寒潮在 20 世纪 60、70、90 年代偏多, 在 80 年代及 21 世纪后偏少。

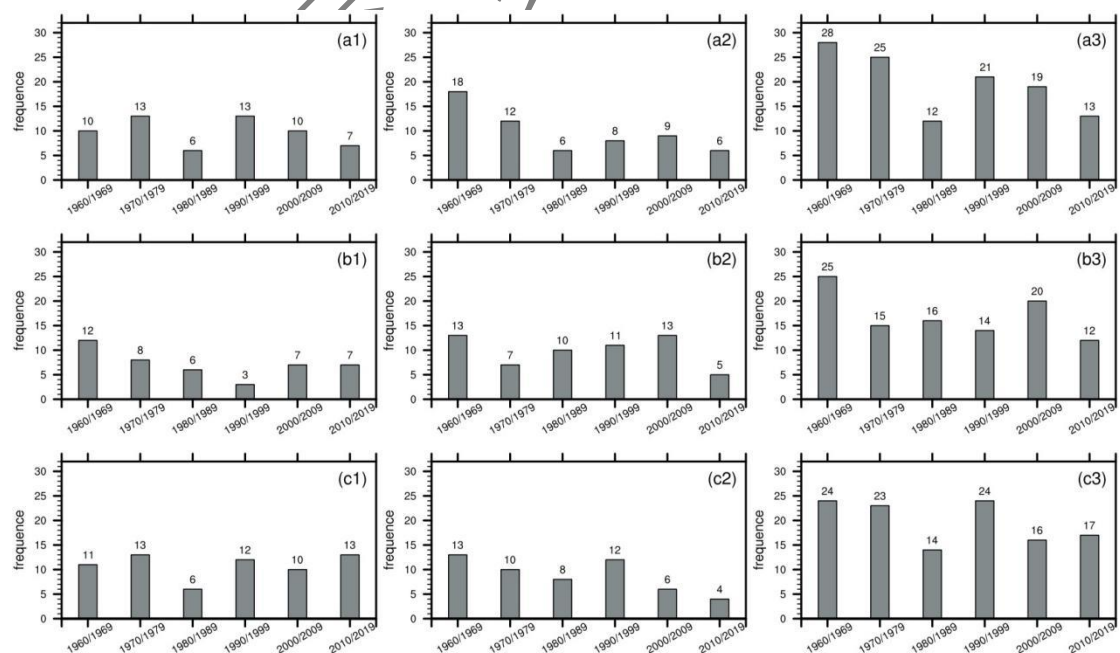


图3 1960-2019年各季节寒潮每10年累计发生频数（单位：次）

冬季区域型寒潮（a1），冬季全国型寒潮（a2），冬季全部型寒潮（a3）

春季区域型寒潮（b1），春季全国型寒潮（b2），春季全部型寒潮（b3）

秋季区域型寒潮（c1），秋季全国型寒潮（c2），秋季全部型寒潮（c3）

Fig. 3 The cumulative frequency of cold waves in each season from 1960 to 2019 (unit: times)

regional cold wave in winter (a1), national cold wave in winter (a2), and all cold wave in winter (a3)

regional cold wave in spring (b1), national cold wave in spring (b2), and all cold wave in spring (b3)

regional cold wave in autumn (c1), national cold wave in autumn (c2), and all cold wave in autumn (c3)

统计三类（全国型、区域型、全部型）寒潮频数在各个季节的变化趋势（图4）发现，除秋季的区域型寒潮表现为增加趋势外，其他季节均表现为减少，其中全国型寒潮频数在冬季和秋季的减少趋势（分别为-0.17次/10年、-0.14次/年）都通过了95%显著性检验，全部型寒潮频数在冬季的减少趋势（-0.21次/10年）通过90%显著性检验。分析每个月寒潮频数变化趋势（图略）发现，冬季1月的全国型寒潮和全部型寒潮的减少趋势分别通过95%和90%的显著性检验。虽然秋季各类寒潮的变化趋势没有通过显著性检验，但是秋季10月和11月全国型寒潮频数的下降趋势通过90%显著检验。

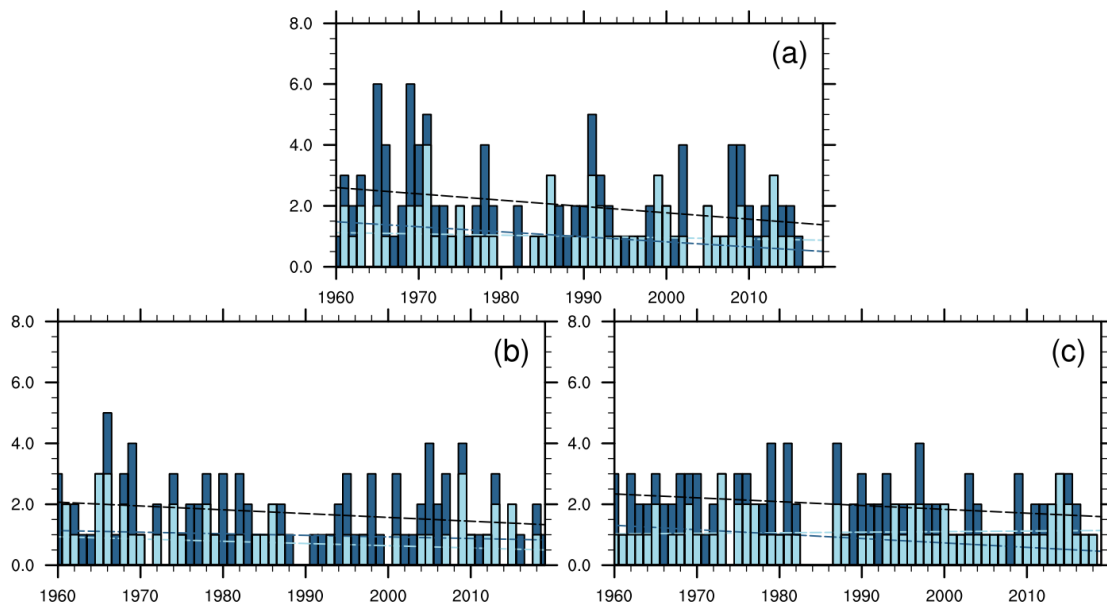


图4 冬季（a）、春季（b）、秋季（c）区域型寒潮（浅蓝柱）、全国型寒潮（深蓝柱）和全部型寒潮（黑框）累积次数及其线性趋势（相应颜色的虚线）（单位：次）

Fig. 4 The cumulative frequency of regional cold waves (light blue columns), national cold waves (dark blue

columns) and all types of cold waves (black boxes) and their linear trends (corresponding colors dotted line) in winter (a), spring (b), and autumn (c) (unit: times)

4 各类冷空气过程强度的特征

4.1 不同月和季节的各类冷空气过程强度特征

每个月各类冷空气过程累积强度（图略）的特征与其累积频数（图1）特征基本一致。区域型寒潮在10月份的累积强度最大，全国型冷空气过程在12月份的累积强度最大，其他过程（全国型寒潮和区域型冷空气）在11月份累积强度最大。值得注意的是三类全部型天气过程（全部型

寒潮、全部型冷空气过程、全部型冷空气总体过程)的累计强度在各月份呈现出相同特征,即 10~12 月份的累计强度明显大于其他月份,其中 11 月累计强度最大。9 月份各类冷空气总体过程的累计强度最小。

下面分析不同月和季节各类冷空气总体过程平均强度(定义为累积强度除以累积频数)的特征。由图 5 可见,区域型、全国型和全部型冷空气过程都在 2 月份平均强度最大,区域型寒潮和全国型寒潮分别在 5 月和 11 月平均强度最大。因为 9 月份没有发生全国型寒潮(见图 1),其强度为零(图 5a2)。在除了 9 月以外的其他月份,全国型寒潮平均强度(为 2.10-2.21)均大于区域型寒潮平均强度(为 2.01-2.11),其中 2 月两者平均强度的悬殊最大。对于全部型寒潮(区域型与全国型之和)来说,冬季,12 月和 2 月发生的寒潮平均强度比 1 月略大;春季,3 月和 4 月的平均强度比 5 月的平均强度略大;秋季,11 月的平均强度则明显大于 9 月和 10 月。

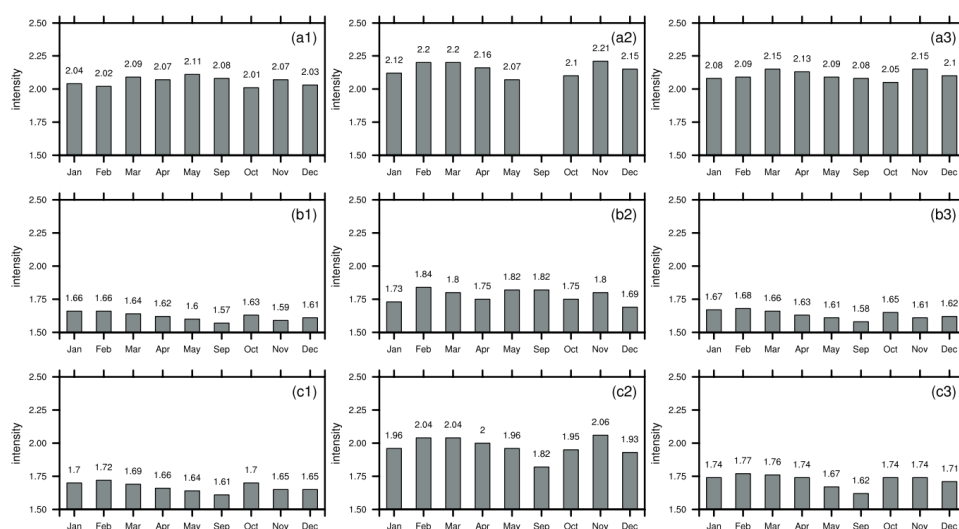


图 5 1960-2019 年不同月份各类冷空气过程的平均强度

区域型寒潮(a1), 全国型寒潮(a2), 全部型寒潮(a3)

区域型冷空气(b1), 全国型冷空气(b2), 全部型冷空气(b3)

区域型冷空气总体过程(c1), 全国型冷空气总体过程(c2), 全部型冷空气总体过程(c3)

Fig. 5 The average intensity of various cold air processes in different months from 1960 to 2019

regional cold wave (a1), national cold wave (a2), all cold wave (a3)

regional cold air (b1), national cold air (b2), all cold air (b3)

regional cold air overall process (c1), national cold air overall process (c2), all cold air overall process (c3)

图 6 是各类冷空气过程在冬、春、秋三个季节的平均强度,由图 6 可见,每个季节寒潮平均强度(>2.0)大于冷空气平均强度(<1.8),全国型寒潮(冷空气)平均强度大于区域型寒潮(冷空气)强度。全国型寒潮平均强度(为 2.15-2.17)均大于区域型寒潮平均强度(为 2.03-2.09),全国型冷空气平均强度(为 1.74-1.78)明显大于区域型冷空气的平均强度(为 1.60-1.64);全国型冷空气总体过程平均强度(为 1.97-2.01)明显大于区域型冷空气总体过程的平均强度(为 1.66-1.69)。在冬季、春季、秋季,全国型寒潮平均强度大小分别是区域型寒潮平均强度的 1.05、1.03、1.06 倍,全国型冷空气的平均强度大小分别是区域型冷空气平均强度的 1.06、1.10、1.11 倍。对比三个季节,全国型寒潮(冷空气)在春季和秋季的平均强度相当,略大于冬季;区域型和全部型寒潮平均强度在春季最大,秋季次之,冬季最小;区域型冷空气、全部型冷空气在冬季、春季、秋季的平均强度依次减少。

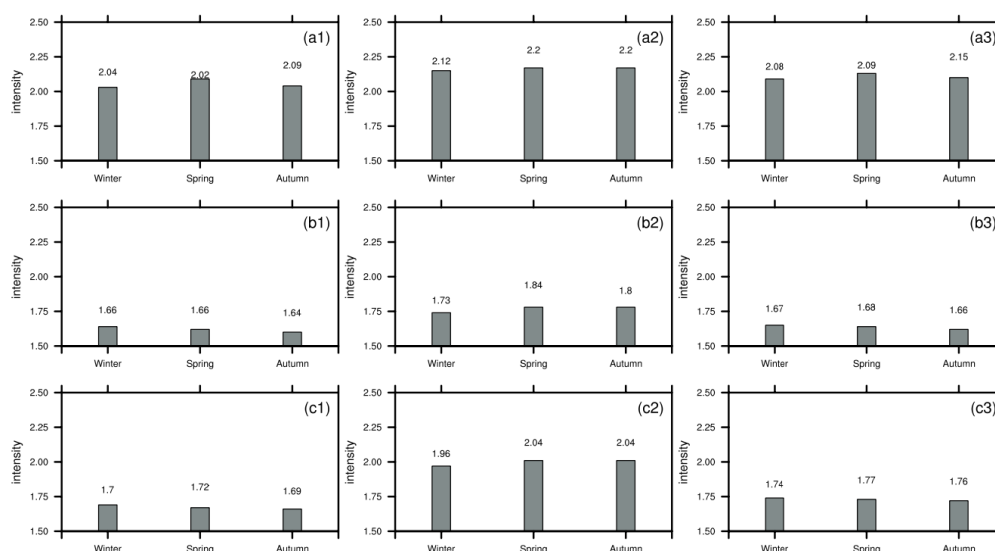


图 6 1960-2019 年冬季、春季和秋季各类冷空气过程的平均强度

区域型寒潮 (a1), 全国型寒潮 (a2), 全部型寒潮 (a3)

区域型冷空气 (b1), 全国型冷空气 (b2), 全部型冷空气 (b3)

区域型冷空气总体过程 (c1), 全国型冷空气总体过程 (c2), 全部型冷空气总体过程 (c3)

Fig. 6 The average intensity of various types of cold air processes in winter, spring and autumn from 1960 to 2019

regional cold wave (a1), national cold wave (a2), all cold wave (a3)

regional cold air (b1), national cold air (b2), all cold air (b3)

regional cold air overall process (c1), national cold air overall process (c2), all cold air overall process (c3)

4.2 寒潮强度长期变化趋势

由图 7 可见, 1960 年-2019 年, 区域型寒潮和全部型的平均强度在春季最强, 大小分别为 2.09 和 2.14, 全国型寒潮的平均强度 (2.18) 在秋季最强。除了区域型寒潮的平均强度在秋季和冬季的变化趋势表现为上升外, 其他类型寒潮的平均强度在各个季节的变化趋势均为下降, 全国型寒潮平均强度在秋季和冬季呈显著下降趋势, 分别为-0.17/10 年和-0.14/10 年, 分别通过 95%和 90%显著性检验, 其中全国型寒潮的平均强度在 11 月和 2 月的下降趋势超过 90%显著性检验(图略); 虽然全部型寒潮的平均强度在冬季的下降趋势不显著, 但是在 12 月的下降趋势超过 90%显著性检验 (图略)。

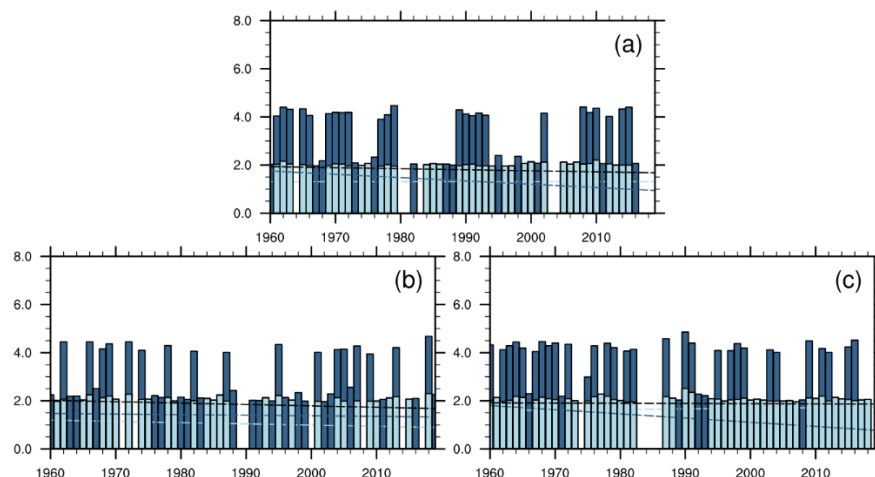


图 7 冬季 (a)、春季 (b)、秋季 (c) 区域型寒潮 (深蓝柱)、全国型寒潮 (浅蓝柱) 和全部型寒潮 (黑框) 平均强度及线性趋势 (相应颜色的虚线)

Fig. 7 The average intensity of regional cold waves (dark blue columns), national cold waves (light blue columns) and all of cold waves (black boxes) and their linear trends (corresponding Dotted line of color) in winter (a), spring (b), and autumn (c)

5 变暖背景下冬季各类冷空气过程的变化特征

5.1 冬季气温的变化

为了详细地分析我国冬季的寒潮及冷空气频数变化特征, 本文首先分析了 1960~2019 年冬季气温的变化特征, 进而对不同时期寒潮和冷空气的特征。如图 8 所示, 冬季平均气温有很强的增暖趋势, 同时叠加有很明显的年代际变化, 这种变化在 11 年滑动平均曲线上, 表现尤为明显。使用 STARS 方法计算冬季气温的突变点, 首先对 59 年 (1960-2019 年) 冬季平均温度预白化 (prewhitening), 设置显著性检验置信水平 $P=0.1$, 由于本文主要考察气温序列的年代际变化, 因此将切断长度 L 设在 10~20 之间, 计算不同 L 下的 RSI (Regime Shift Index) 值, 发现全国春夏秋冬季节气温均具有很强的年代际变化信号。由图 8 可见, 在 59 年冬季, 气温只发生了一次突变, 即以 1986 年冬季为分界, 因此可以将中国冬季气温划分为两个时期, 即冷期 (1960-1986 年) 和暖期 (1987-2019 年)。

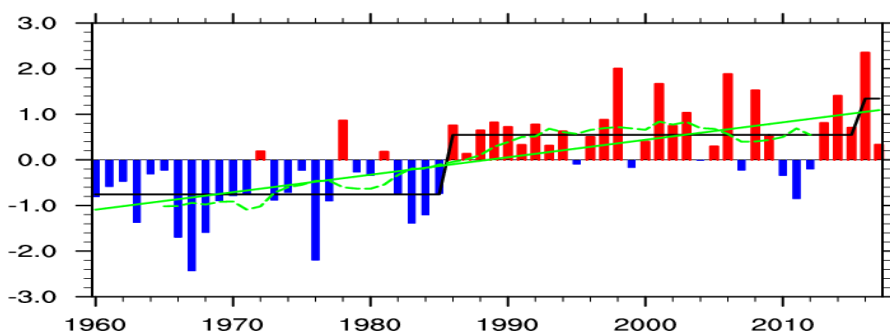


图 8 中国大陆冬季平均气温的时间序列

柱状图表示气温距平; 黑色实线表示突变检验; 绿色实线表示线性趋势; 绿色虚线表示 11 年滑动平均; (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 The time series of average winter temperature in mainland China

The histogram indicates the temperature anomaly; the black solid line indicates the mutation test; the green solid line indicates the linear trend; the green dotted line indicates the 11-year running average; (unit: $^{\circ}\text{C}$)

5.2 冬季各类冷空气过程频数的变化

通过对比分析两个时期冬季寒潮及冷空气的频数（表 1 和图 9）发现，除区域型冷空气、全国型冷空气和全部型冷空气外，其他冷空气过程在暖期（1987-2019 年）内平均每年发生的次数均比冷期（1960-1986 年）内发生的次数少，其中表现尤为明显的为全国型寒潮和全部型寒潮。由图 8 可以明显的看出，冷期冬季我国气温表现为明显的负异常，而暖期冬季我国气温表现为明显的正异常，可见，寒潮及冷空气发生的次数与冬季气温的温度背景存在一定的对应关系：冬季温度偏高，寒潮发生次数偏少，冷空气发生次数偏多；冬季温度偏低，寒潮发生次数偏多，冷空气发生次数偏少。

由表 1 还可以看出，冬季三类寒潮频数在两个时期都表现为下降趋势，但只有冷期冬季的全部型寒潮频数下降趋势通过了 90% 的显著性检验，其大小为 -0.57 次/10 年；冬季三类冷空气频数在两个时期主要表现为上升（只有全国型冷空气频数冷期的趋势为下降），其中区域型冷空气和全部型冷空气的频数在冷期的上升趋势超过 95% 显著性检验，其大小分别为 1.37 次/10 年和 1.27 次/10 年；冬季三类冷空气总体过程在两个时期的变化趋势主要表现为上升（只有全国型冷空气总体过程在冷暖期表现为下降），其中区域型冷空气总体过程频数在冷期的上升趋势超过 90% 显著性检验，大小为 1.25 次/10 年。此外，通过进一步分析冬季的 12 月、1 月和 2 月各类寒潮和冷空气的频数变化趋势发现，冷期 12 月全国型寒潮频数的下降趋势（-0.27 次/10 年）通过了 90% 显著性检验，冷期 2 月全部型寒潮频数（-0.37 次/10 年）和暖期 1 月的全国型寒潮频数（-0.17 次/10 年）下降趋势均通过了 95% 的显著性检验，暖期 1 月的区域型冷空气发生频数的上升趋势（0.53 次/10 年）通过 90% 显著性检验（图略）。

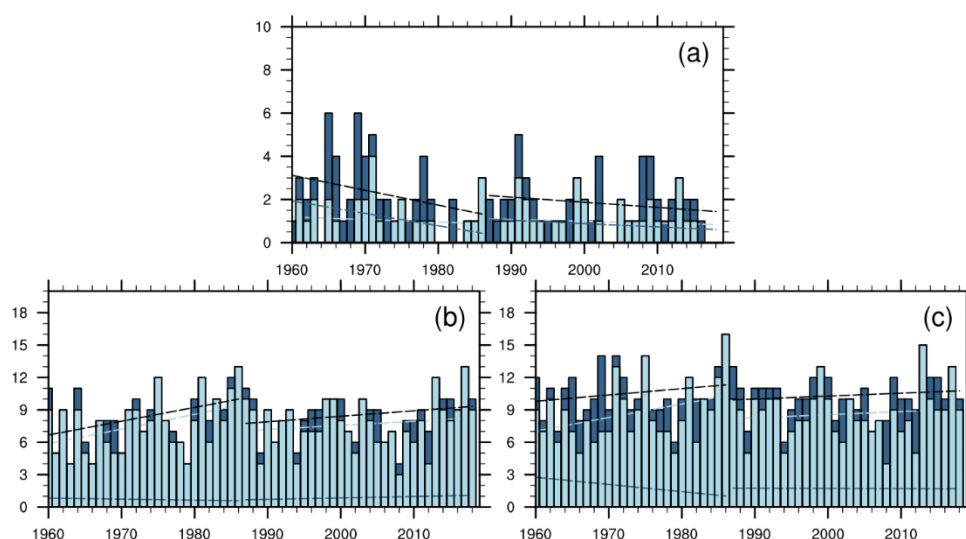


图 9 冬季寒潮(a)、冷空气(b)、冷空气总体过程(c) 累计频数及线性趋势

浅蓝柱表示区域型，深蓝柱表示全国型，黑色框表示全部型；

直线表示相应的线性趋势；（单位：次）

Fig. 9 The cumulative frequency and linear trend of the winter cold wave (a), cold air (b), and cold air cold air overall process (c)

The light blue column represents the regional type, the dark blue column represents the national type, and the black box represents all types;

The straight line represents the corresponding linear trend; (unit: times)

表 1 1960-2019 年冬季寒潮、冷空气和冷空气总体过程的平均发生次数及其变化趋势
Table 1 The average frequency of the cold wave, cold air and the overall process of cold air and its linear trend in the
winter from 1960 to 2019

		1960-1986 年	1987-2019 年
区域型	寒潮	[1.04] (-0.12)	[0.97] (-0.09)
	冷空气	[7.63] (1.37**)	[7.65] (0.38)
	冷空气总体过程	[8.67] (1.25*)	[8.62] (0.29)
全国型	寒潮	[1.19] (-0.57*)	[0.84] (-0.15)
	冷空气	[0.70] (-0.09)	[0.88] (0.13)
	冷空气总体过程	[1.89] (-0.67)	[1.72] (-0.02)
全部型	寒潮	[2.22] (-0.69)	[1.81] (-0.02)
	冷空气	[8.33] (1.28**)	[8.53] (0.51)
	冷空气总体过程	[10.55] (0.59)	[10.34] (0.27)

注：全部型=区域型+全国型；冷空气总体过程=冷空气+寒潮；[]数字表示多年平均冬季总次数，单位：次；（ ）数字表示线性趋势，单位：次/10 年；*和**分别表示显著性通过 90%和 95%置信度检验。

5.3 冬季各类冷空气过程强度的变化

本节定义冬季各类冷过程的次平均强度为冬季总累计强度除以总次数，用以表示平均每次冷过程的强度。

表 2 为 1960 年—2019 年冬季寒潮及冷空气的强度及其变化趋势。由表 2 可见，三类冷空气过程的次平均强度在冷、暖期的特征变化与三类寒潮一致。对比冷、暖期冬季区域型冷空气和全部型冷空气强度的大小，暖期冬季的次平均强度比冷期冬季相应值略偏小，暖期冬季全国型冷空气的次平均强度则比冷期冬季时略偏大，说明暖期冬季全国型冷空气的强度要略强于冷期冬季的。与冷期冬季相比，暖期冬季区域型寒潮次平均强度减小；暖期冬季全国型寒潮次平均强度呈增加；全部型寒潮在暖期冬季的次平均强度比冷期冬季的次平均强度小，由此可见，全部型寒潮(区域型寒潮与全国型寒潮之和)的次平均强度受区域型寒潮的次平均强度影响较大。

表 2 1960-2019 年冬季寒潮及冷空气的强度及其变化趋势

Table 2 The intensity and the linear trend of the winter cold wave and cold air from 1960 to 2019

		1960-1986 年	1987-2019 年
区域型	寒潮	[2.18] (-0.028)	[2.04] (0.045)
	冷空气	[1.67] (0.128)	[1.64] (0.048)
	冷空气总体过程	[1.72] (0.098)	[1.68] (0.093)
全国型	寒潮	[2.15] (-0.120*)	[2.17] (-0.013)
	冷空气	[1.73] (0.027)	[1.82] (0.035)
	冷空气总体过程	[2.00] (-0.092)	[1.99] (0.022)
全部型	寒潮	[2.16] (-0.147*)	[2.10] (0.032)
	冷空气	[1.67] (0.154*)	[1.65] (0.083)
	冷空气总体过程	[1.77] (0.007)	[1.73] (0.115*)

注：全部型=区域型+全国型；冷空气总体过程=冷空气+寒潮；[]数字表示多年平均的次平均强度；（）数字表示线性趋势，单位：强度变化/年；*表示显著性通过 90%置信度检验。

如表 2 所示，冷期（1960-1986 年），冬季区域型寒潮和全部型寒潮强度呈显著下降趋势（通过 90%显著性检验）冬季全部型冷空气强度呈显著上升趋势，通过了 90%性检验；暖期（1987-2019 年），只有全部型冷空气总体过程强度呈显著上升趋势，通过 90%显著性检验，这表明近几年来我国冬季的冷空气总体过程强度相对于冷期有所增加。此外，分析表明 12 月全国型寒潮强度减弱趋势通过 90%显著性检验，2 月全部型寒潮强度减弱趋势通过 95%的显著性检验（图略）。

由表 2 还可以看出，暖期冬季的全国型寒潮、冷空气和冷空气总体过程、全部型寒潮和冷空气总体过程次平均强度比冷期略偏大，特别是全国型寒潮；暖期冬季的区域型寒潮、冷空气和冷空气总体过程、全部型冷空气次平均强度较冷期略偏小；冷期冬季全国型寒潮强度（-0.120/年）和全部型寒潮强度（-0.147/年）呈显著减小趋势，冷期冬季全部型冷空气强度（0.154/年）和暖期冬季全部型冷空气总体过程强度呈显著上升趋势（0.115/年）。

6 结论与讨论

本文系统地分析了近 60 年(1960-2019 年)中国各类冷空气过程发生频数和强度的气候特征，以及变暖背景下冬季各类冷空气过程的变化特征，主要结论如下：

（1）近 60 年来，全部型（全国型与区域型之和）寒潮共发生 344 次，其中全国型 175 次，区域型寒潮 169 次；全部型冷空气共发生 1384 次，其中区域型冷空气 1256 次，全国型冷空气 128 次；冷空气总体过程（寒潮与冷空气之和）共发生 1728 次，其中区域型冷空气总体过程 1425 次，全国型冷空气总体过程 303 次。各类冷空气总体过程的累计频数在 11 月最多，9 月最少；区域型寒潮在秋季发生频数最多，全国型寒潮和全部型冷空气在冬季发生频数最多。对各类寒潮在冬、春、秋季节累计频数长期趋势分析表明，除区域型寒潮累计频数在秋季呈上升趋势，全国型和区域型寒潮累计频数在冬季和春季呈下降趋势，其中冬季下降趋势最显著。

（2）区域型寒潮和全国型寒潮平均强度分别在 5 月和 11 月最大，9 月最小；区域型和全国型冷空气过程平均强度在 2 月份最大；区域型冷空气总体过程平均强度在 2 月最大，全国型冷空气总体过程的平均强度在 11 月最大。对比三个季节，全国型寒潮（冷空气、冷空气总体过程）在春季和秋季的平均强度相当，略大于冬季；区域型（全部型）寒潮平均强度在春季最大，冬季最小；区域型冷空气和冷空气总体过程、全部型冷空气和冷空气总体过程在冬季、春季、秋季的平均强度依次减少。三个季节三类寒潮累计强度都呈减少趋势，其中全国型和全部型寒潮在秋季的显著减少。

（3）1960-2019 年的中国冬季气温时间序列可分为两个时期，1960 年冬季至 1986 年为冷期，1987 年至 2018 年为暖期。暖期冬季的区域型冷空气、全国型冷空气和全部型冷空气平均发生频次比冷期略偏多；暖期冬季的其他冷过程平均每年发生频数较冷期偏少；其中冷期冬季全国型寒潮频数呈显著减少趋势（-0.57 次/10 年），冷期全国型冷空气和全部型冷空气的增加趋势超过 95%显著性检验（大小分别为 1.37 次/10 年和 1.28 次/10 年），暖期各类冷过程在各季节的变化趋势都没有通过显著性检验，但是暖期 1 月的全国型寒潮频数下降趋势（-0.17 次/10 年）和区域型冷空气频数的上升趋势（0.53 次/10 年）分别通过 95%和 90%显著性检验。

参考文献:

- 陈佑淑, 仪清菊, 牟惟丰. 对冷空气标准的一些讨论[J]. 气象, 1974(00):7-10.Chen Y S, Yi Q J, Mou W F. Some discussions on cold air standards[J]. Meteor Mon, 1974(00):7-10.(in Chinese)
- 陈明轩,徐海明,管兆勇. 春季格陵兰海冰变化及与北大西洋涛动和北极涛动的联系[J].南京气象学院学报,2003(04):433-446.Chen M X, Xu H M, Guan Z Y. Interdecadal variations of spring Greenland sea - ice extent and its relationships with North Atlantic and Arctic oscillations [J]. Nanjing Acta Meteor Sin,2003(04):433-446.(in Chinese)
- 曹晓初,叶瑞珠,许爱华.江西省冷空气气候特征分析[J].江西气象科技,2001(04):21-23.Cao X C,Ye R Z,Xu A H,Analysis on the Climatic Characteristics of Cold Air in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Meteor Sci Technol, 2001(04): 21-23.(in Chinese)
- 狄慧.北极海冰年代际转型及其对冬季极端低温的影响[D].中国海洋大学,2014.Di H. Decadal regime shift of Arctic sea ice and corresponding effects on extreme low temperature[D]. Ocean University of China, 2014.(in Chinese)
- 丁一汇,李巧萍,柳艳菊,等.2009.空气污染与气候变化[J].气象,35(3):3-14.Ding Y H,Li Q P,Liu Y J,et al.,2009.Atmospheric Aerosols, Air Pollution and Climate Change [J].Meteor Mon,35(3):3-14. (in Chinese)
- 国家气象中心气候应用室. 寒潮年鉴:1984.9—1985.5[M]. 气象出版社, 1996.Laboratory of Climate Application of National Meteorological Center. The Almanac of Cold Waves. Beijing:1984.9—1985.5[M]. China Meteorological Press. 1996. (in Chinese)
- 韩方红,陈海山,马鹤翟.冬季北大西洋涛动与中国北方极端低温相关性的年代际变化[J].大气科学,2018,42(02):239-250.Han F H,Chen H S,Ma H D. Interdecadal variation in the relationship between North Atlantic oscillation and extreme low temperature over northern China in winter [J].Chin J Atmos Sci,2018,42(02):239-250.(in Chinese)
- 黄焕卿,韩雪.东亚冷空气的变化趋势[J].海洋预报,2014,31(05):69-75.Huang H Q, Han X. Variation trend analysis of the cold airs in East Asia[J]. Marin Forec, 2014, 31(05): 69-75.(in Chinese)
- 何金海,武丰民,祁莉.秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系[J].地球物理学报,2015,58(04):1089-1102.He J H,Wu F M,Qi L. Decadal/interannual linking between autumn Arctic sea ice and following winter Eurasian air temperature [J]. Chin J Geophys, 2015, 58 (04):1089-1102.(in Chinese)
- 胡宜昌,董文杰,何勇.21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J].地球科学进展,2007(10):1066-1075.H Y C,Dong W J,He Y. Progress of the study of extreme weather and climate events at the beginning of the twenty first century [J]. Adv Earth Sci,2007(10):1066-1075.(in Chinese)
- 纪忠萍,谷德军,梁健,等.近 55 年影响广州的强冷空气及其准双周变化[J].大气科学,2007(05):999-1010.Ji Z P, Gu D J, Liang J, et al. The strong cold air occurrences affecting Guangzhou and their biweekly oscillation during the last 55 years [J]. Chin J Atmos Sci, 2007(05): 999-1010.(in Chinese)
- 梁苏洁,丁一汇,赵南,孙颖.近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J].大气科学,2014,38(05):974-992.Liang S J,Ding Y H,Zhao N,Sun Y. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960–2013[J]. Chin J Atmos Sci, 2014, 38(05):974-992.(in Chinese)
- 李金洁,王爱慧,郭东林,等.高分辨率统计降尺度数据集 NEX-GDDP 对中国极端温度指数模拟能力的评估[J].气象学报, 2019,77(3):579-593.Li J J ,Wang A H,Guo D L et al. Evaluation of extreme temperature indices over China in the NEX-GDDP simulated by high-resolution statistical downscaling models[J].Acta Meteor Sin 2019,77(3):579-593. (in Chinese)
- 刘向文,孙照渤,倪东鸿,等.澳洲冷空气活动的季节内和年际变化特征[J].南京气象学院学报,2009,32(01):24-31.Liu X W,Sun Z B,Ni D H,et al.Intraseasonal and interannual features of Australian cold air activity[J]. Nanjing Acta Meteor Sin,2009,32(01):24-31.(in Chinese)
- 毛炜峰,白素琴,陈鹏翔.1951—2015 年乌鲁木齐市降温过程频数及强度气候特征[J].气象,2016,42(11):1351-1363.Mao W Y,Bai S Q, Chen P X.Climate Characteristics of Frequency and Intensity of Cooling Process in Urumqi During 1951-2015[J].Meteor Mon,2016,42(11):1351 -1363.(in Chinese)
- 仇永康,李晓东,仇永炎.我国冷空气活动的特征及其与欧亚大陆积雪的关系[J].应用气象学报,1992(02):235-241.Qiu Y K,Li X D,Qiu Y Y. Statistical features of the cold waves invaded China and their relation to the snow cover area over the Eurasian continent[J]. J Appl Meteor Sci,199(02):235-241.(in Chinese)
- 任金声,王秀文,王洁颖.冬半年冷空气过程中期预报业务系统[J].气象,1996(01):33-37.Ren J S,Wang X W,Wang J Y.The medium-range forecasting system of cold-air activities in winter season [J].Meteor Mon,1996(01):33-37.(in Chinese)

陶诗言.东亚冬季冷空气活动的研究.见:中央气象局编.短期预报手册. 1957.Tao S Y. A study of activities of cold airs in East Asian winter. Handbook of Short-Term Forecast (in Chinese), Chinese Meteorological Administration, Ed. 1957. (in Chinese)

陶亦为,代刊,董全.2016 年 1 月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J].气象,2017,43(10):1176-1185.Tao Y W,Dai K,Dong Q.Extreme analysis and ensemble prediction verification on cold wave process in January 2016[J].Meteor Mon, 2017,43(10):1176-1185.

王宗明,孙照渤,李忠贤,等.1949—2009 年欧亚大陆强冷空气活动频次的变化特征[J].气象与减灾研究,2011,34(01):16-23.Wang Z M, Sun Z B,Li Z X, et al. Variation characteristics of strong cold air activity frequency in Eurasia from 1949 to 2009 [J]. Meteor and Disaster Reduction Res, 2011, 34(01): 16-23.(in Chinese)

王遵娅,丁一汇.近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J].大气科学,2006(06):1068-1076.Wang Z Y and Ding Y H. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Chin J Atmos Sci,2006(06):1068-1076.(in Chinese)

徐玮平,张杰,刘晨,等. 20 世纪 90 年代以后华北初春低温增强和北大西洋海温关系[J].大气科学,2020,44(6):1167-1187.Xu W P,Zhang J, Liu C, et al. Relationship between the Early-Spring Low-Temperature Enhancement in North China and Sea Surface Temperature in the North Atlantic since the 1990s [J]. Chin J Atmos Sci, 2020,44(6): 1167-1187. (in Chinese)

姚永明,姚雷,邓伟涛.长江中下游地区类寒潮发生频次的变化特征分析[J].气象,2011,37(03):339-344.Yao Y M,YAO L,Deng W T.Analysis of the frequency characteristics of the similar cold wave in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].Meteor Mon, 2011,37(03):339-344.

阎琦,田莉,李爽,等.辽宁区域性冷空气多时间尺度变化特征及影响因子[J].冰川冻土, 2016, 38 (02):379-387.Yan Q, Tian L, Li S, et al. Multiple-time scale variations and impact factors of regional cold air in Liaoning Province [J]. J Glaci and Geocry,2016,38(02):379-387.(in Chinese)

岳艳霞,陈静,高祺,等. 气候变暖背景下石家庄冷空气活动的气候特征[J]. 气象与环境学报, 2009(04):36-42.Yue Y X, Chen J, Gao Q, et al. Climatic characteristics of cold air under global warming in Shijiazhuang, Hebeiprovince[J]. J Meteor Environ, 2009(04):36-42.(in Chinese)

朱晨玉,黄菲,石运昊,等.中国近 50 年寒潮冷空气的时空特征及其与北极海冰的关系[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2014,44(12):12-20.Zhu C Y, Huang F, Shi Y H, et al. Spatial-temporal patterns of the cold surge events in China in recent 50 years and its relationship with Arctic sea ice[J]. Period of Ocean Univ, 2014, 44(12): 12-20.(in Chinese)

中国国家标准化管理委员会.GB/T20484-2006.冷空气等级标准[S].北京:中国标准出版社, 2006.China National Standardization Management Committee. GB/T20484-2006. Cold air grade standard [S]. Beijing: China Standards Press, 2006. (in Chinese)

中国气象局.QX/T393-2017.冷空气过程监测指标[S].北京:气象出版社,2018.China Meteorological Administration. QX/T393-2017.Monitoring indices of cold air processes[S]. Beijing: China Meteorological Press,2018.(in Chinese)

周琳.我国冬半年冷空气活动特征及其与海温的关系[D].南京信息工程大学,2013.Zhou L. Variation characteristics of winter cold air and its relationship with sea temperature[D]. Nanjing University of Information Science and Technology, 2013.(in Chinese)

周琳,孙照渤.1961—2010 年我国冷空气的活动特征[J].大气科学学报,2015,38(03):342-353.Zhou L, Sun Z B. Activity characteristics of cold air in China from 1961 to 2010[J]. Trans Atmos Sci,2015,38(03):342-353. (in Chinese)

张培忠,陈光明.影响中国寒潮冷高压的统计研究[J].气象学报,1999(04):3-5.Zhang P Z,Chen G M.A statistical analysis of the cold wave high which influences on China[J].Acta Meteor Sin,1999(04):3-5.(in Chinese)

唐熠,周秀华,郑传新,等.广西重大低温雨雪冰冻过程 500 hPa 信号场异常特征分析[J].气象,2019,45(10):1446-1456. Tang Y,Zhou X H,Zheng C X, et al.Analysis of Abnormal Characteristics at 500 hPa Signal Field in Major Cryogenic Freezing Rain and Snow Processes in Guangxi[J].Meteor Mon,45(10):1446-1456. (in Chinese)Brabson B B, Palutikof J P. The evolution of extreme temperatures in the Central England temperature record[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(24): 16-1-16-4.

Ding Yihui. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia[J]. Meteor Atmos Phys,1990,44(1-4).

Lucie A. Vincent,Éva Mekis. Changes in Daily and Extreme Temperature and Precipitation Indices for Canada over the Twentieth Century[J]. Atmos-Ocean,2006,44(2).

Sergei N. Rodionov. The Problem of Red Noise in Climate Regime Shift Detection[J]. Geophys. Res Lett, 2006.

484 Wang Zunya, Ding Yihui, Zhang Qiang, et al. 2012: Changing trends of daily temperature extremes with different intensities in China [J].
485 Acta Meteor. Sinica, 26(4): 399-409.

《气象》
《气象》