

朱万林,李清泉,王遵娅,等,2022.近60年中国冷空气过程的气候变率分析[J].气象,48(1):1-13. Zhu W L, Li Q Q, Wang Z Y, et al, 2022. Climatological variability of cold air processes over China in recent 60 years[J]. Meteor Mon, 48(1):1-13 (in Chinese).

## 近 60 年中国冷空气过程的气候变率分析\*

朱万林<sup>1,2</sup> 李清泉<sup>1,2</sup> 王遵娅<sup>2</sup> 沈新勇<sup>1,3</sup>

1 南京信息工程大学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

**提 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 $[-0.57 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ ,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  $1.37 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $1.28 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ];暖期,1 月全国型寒潮频数呈显著下降趋势 $[-0.17 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ ,而区域型冷空气频数呈显著上升趋势 $[0.53 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 。

**关键词:** 冷空气,寒潮,强度,频数

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.010401

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

ZHU Wanlin<sup>1,2</sup> LI Qingquan<sup>1,2</sup> WANG Zunya<sup>2</sup> SHEN Xinyong<sup>1,3</sup>

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

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

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

**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 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.

\* 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”项目(2019QZKK0208)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)共同资助

2020 年 10 月 28 日收稿; 2021 年 1 月 4 日收修定稿

第一作者:朱万林,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,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

In the winter of cold period, the frequency of the national cold wave shows a significant decrease trend  $[-0.57 \text{ times} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ , 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  $1.37 \text{ times} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  and  $1.28 \text{ times} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , respectively. In the warm period, there is a significantly decreasing trend of national cold wave frequency  $[-0.17 \text{ times} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$  and a significantly increasing trend of regional cold air frequency  $[0.53 \text{ times} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$  in January.

**Key words:** cold air, cold wave, intensity, frequency

## 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。

陶诗言(1955)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。国家气象中心气候应用室(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。王遵娅和丁一汇(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,进而用最低气温计算降温幅度,并对寒潮及冷空气过程进行了更加细致的分类。王遵娅和丁一汇(2006)还利用1951—2004年中国740个站逐日温度资料,对中国寒潮频次的气候特征及其变化进行了分析,并在此基础之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有密切的联系。Ding(1990)、张培忠和陈光明(1999)在20世纪末分析了影响中国的寒潮冷高压的活动情况,指出冷高压中心强度的发展增强对寒潮爆发具有重要意义。徐玮平等(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。

在全球升温和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(胡宜昌等,2007;李金洁等,2019)。丁一汇等(2009)研究发现,上述变暖背景下的中国寒潮发生的频数和强度也出现了明显变化。姚永明等(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个站1951年1月1日至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呈增多趋势;冬季冷空气发生次数同比秋、春两季减少明显。周琳和孙照渤(2015)利用1960—2010年我国384个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。

仇永康等(1992)、曹晓初等(2001)、纪忠萍等(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)、毛炜峰等(2016)、唐熠等(2019)等大量研究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,如任金声等(1996)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;而且,很多研究是早期用有限的资料开展的,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。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用了国家气象信息中心提供的 2400 个台站逐日平均气温和日最低气温资料,以及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 日至 2019 年 6 月 30 日。气温资料经过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,也就是用本台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。

### 1.2 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,2017),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,将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 48 h、72 h 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( $I$ ),计算公式为

$$I = \frac{(3N_3 + 2N_2 + N_1)}{(N_3 + N_2 + N_1)} \quad (1)$$

式中: $N_3$  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  $I$  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。

在对寒潮过程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水平检验。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。

## 2 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,约是全部型寒潮的 4 倍,其中区域型冷空气发生 1256 次,全国型冷空气则为 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。

## 2.1 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 月累积频数最多,9 月累积频数最少。区域型和全国型寒潮分别在 10 月和 11 月发生最多,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、冷空气总体过程累积频数在各月特征基本相同,即 10—12 月的累积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 2 是各类冷空气过程在冬、春、秋三个季节累积频数。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)在各个季节的累积频数特征与冷空气(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,秋季和冬季分别比春季多 51%和 37%。全部型寒潮在冬季和秋季一样多,都比春季多 16%。对于冷空气过程,全国

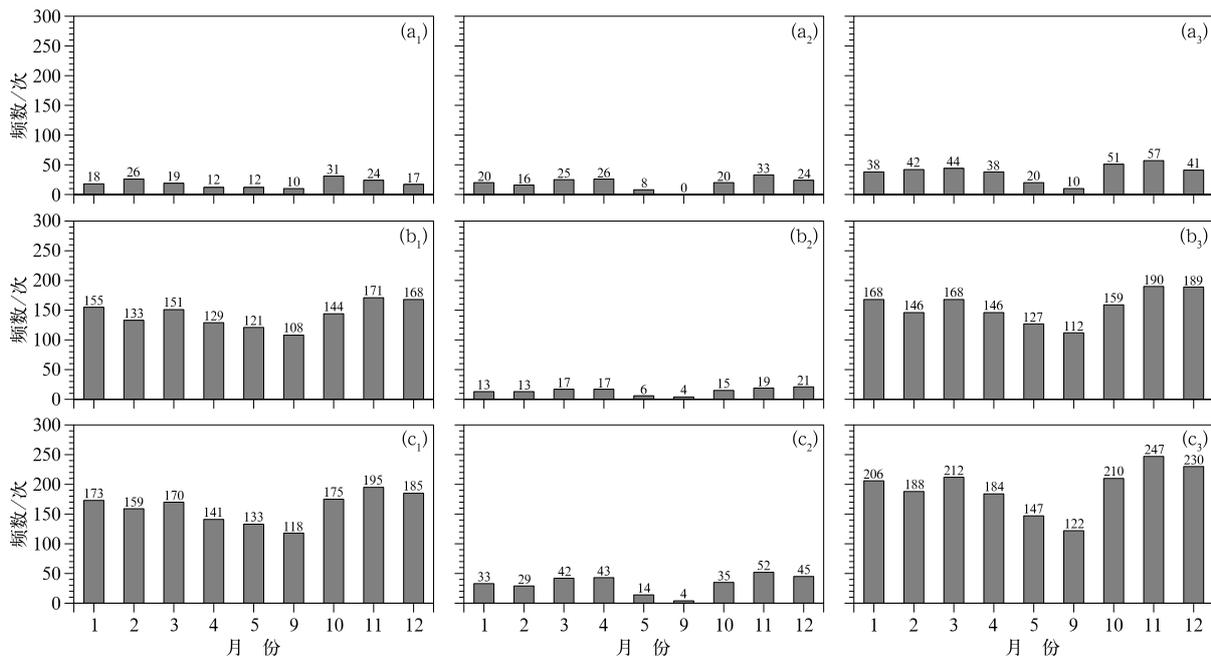


图 1 1960—2019 年各类冷空气过程在不同月份的累计发生频数

(a<sub>1</sub>) 区域型寒潮, (a<sub>2</sub>) 全国型寒潮, (a<sub>3</sub>) 全部型寒潮,

(b<sub>1</sub>) 区域型冷空气, (b<sub>2</sub>) 全国型冷空气, (b<sub>3</sub>) 全部型冷空气,

(c<sub>1</sub>) 区域型冷空气总体过程, (c<sub>2</sub>) 全国型冷空气总体过程, (c<sub>3</sub>) 全部型冷空气总体过程

Fig. 1 The cumulative occurrence frequency of various cold air processes in different months from 1960 to 2019

(a<sub>1</sub>) regional cold wave, (a<sub>2</sub>) national cold wave, (a<sub>3</sub>) all cold wave,

(b<sub>1</sub>) regional cold air, (b<sub>2</sub>) national cold air, (b<sub>3</sub>) all cold air,

(c<sub>1</sub>) regional cold air overall process, (c<sub>2</sub>) national cold air overall process, (c<sub>3</sub>) all cold air overall process

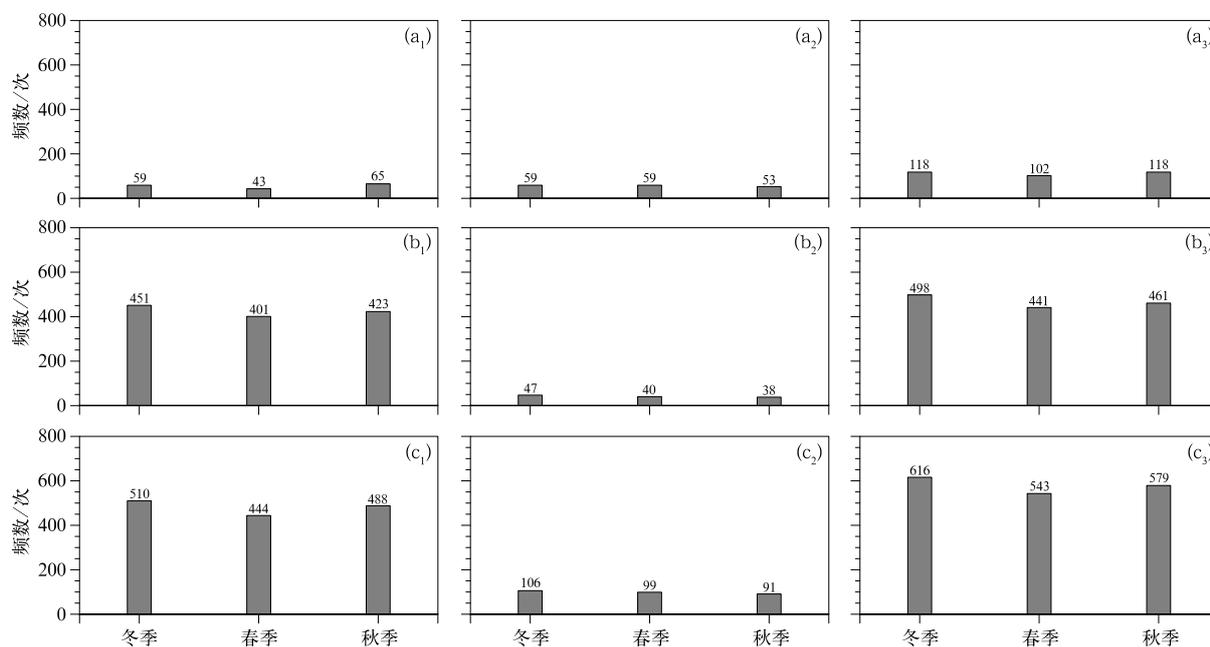


图 2 同图 1, 但为冬季、春季和秋季

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for winter, spring and autumn

型在冬季发生最多, 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。

## 2.2 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 年代、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 年期间, 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

历了减少、增加的年代际变化; 全国型寒潮则呈减少、增加、减少的年代际变化; 全部型寒潮则经历减少、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 3b<sub>1</sub>~3b<sub>3</sub> 很好地反映区域型寒潮在春季发生频数的年代际差异, 即 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 年的累积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 世纪初累积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 年发生的累积频数基本一致, 近 10 年发生的频数最少。

秋季, 每个年代发生全部型寒潮 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, 全国型寒潮则呈增加、减少的年代际变化, 全部型寒潮则经历减少、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

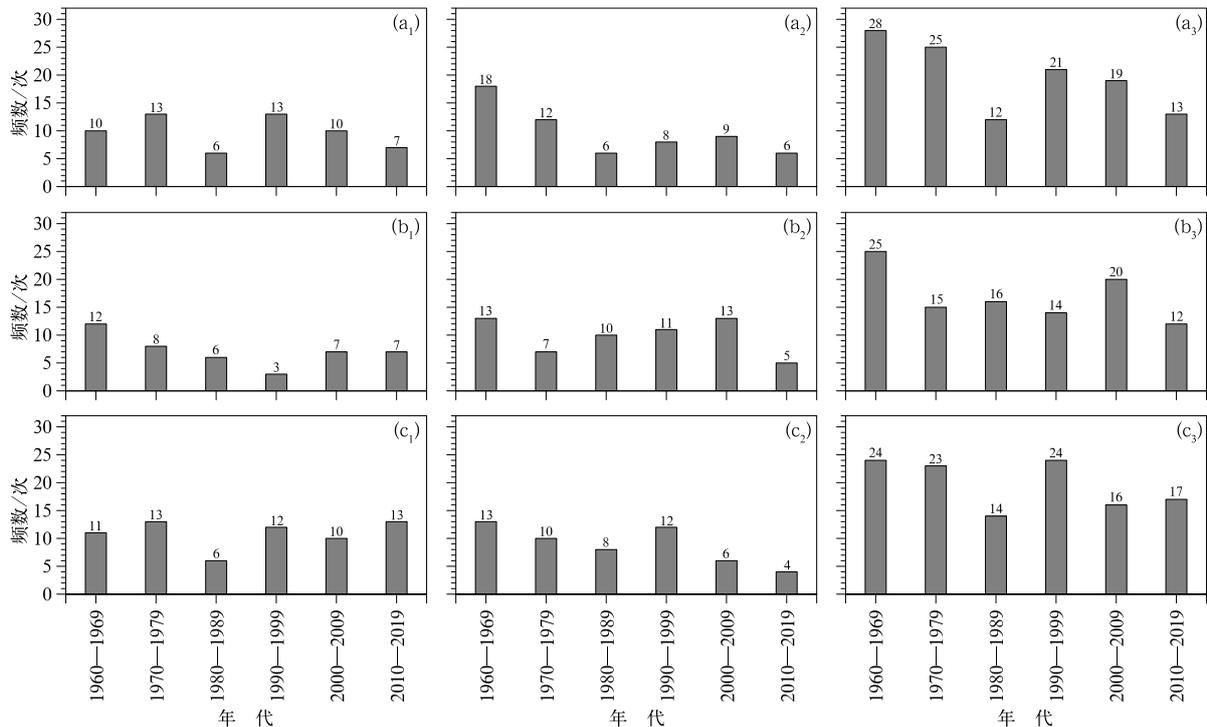


图 3 1960—2019 年各季节寒潮每 10 年累积发生频数

(a<sub>1</sub>) 冬季区域型寒潮, (a<sub>2</sub>) 冬季全国型寒潮, (a<sub>3</sub>) 冬季全部型寒潮,  
 (b<sub>1</sub>) 春季区域型寒潮, (b<sub>2</sub>) 春季全国型寒潮, (b<sub>3</sub>) 春季全部型寒潮,  
 (c<sub>1</sub>) 秋季区域型寒潮, (c<sub>2</sub>) 秋季全国型寒潮, (c<sub>3</sub>) 秋季全部型寒潮

Fig. 3 The cumulative frequency of cold waves in each season from 1960 to 2019

(a<sub>1</sub>) regional cold wave in winter, (a<sub>2</sub>) national cold wave in winter, (a<sub>3</sub>) all cold wave in winter,  
 (b<sub>1</sub>) regional cold wave in spring, (b<sub>2</sub>) national cold wave in spring, (b<sub>3</sub>) all cold wave in spring,  
 (c<sub>1</sub>) regional cold wave in autumn, (c<sub>2</sub>) national cold wave in autumn, (c<sub>3</sub>) all cold wave in autumn

纪 60 年代、90 年代发生次数较多,70 年代、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 和 90 年代偏多,在 80 年代及 21 世纪后偏少。

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  $\cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $-0.14$  次  $\cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]都通过了 0.05 显著性水平检验,全部型寒潮频数在冬季的减少趋势[ $-0.21$  次  $\cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]通过 0.10 显著性水平检验。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 0.05 和 0.10 的显著性水平检验。虽然秋季各类寒潮的变化趋势没有通过显著性水平检验,但是秋季 10 月和 11 月全国型寒潮频数的下降

趋势通过 0.10 显著性水平检验。

### 3 各类冷空气过程的强度特征

#### 3.1 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 月的累积强度最大,全国型冷空气过程在 12 月的累积强度最大,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)的累积强度在各月份呈现出相同特征,即 10—12 月的累积强度明显大于其他月份,其中 11 月累积强度最大。9 月各类冷空气总体过程的累积强度最小。

下面分析不同月和季节各类冷空气总体过程平

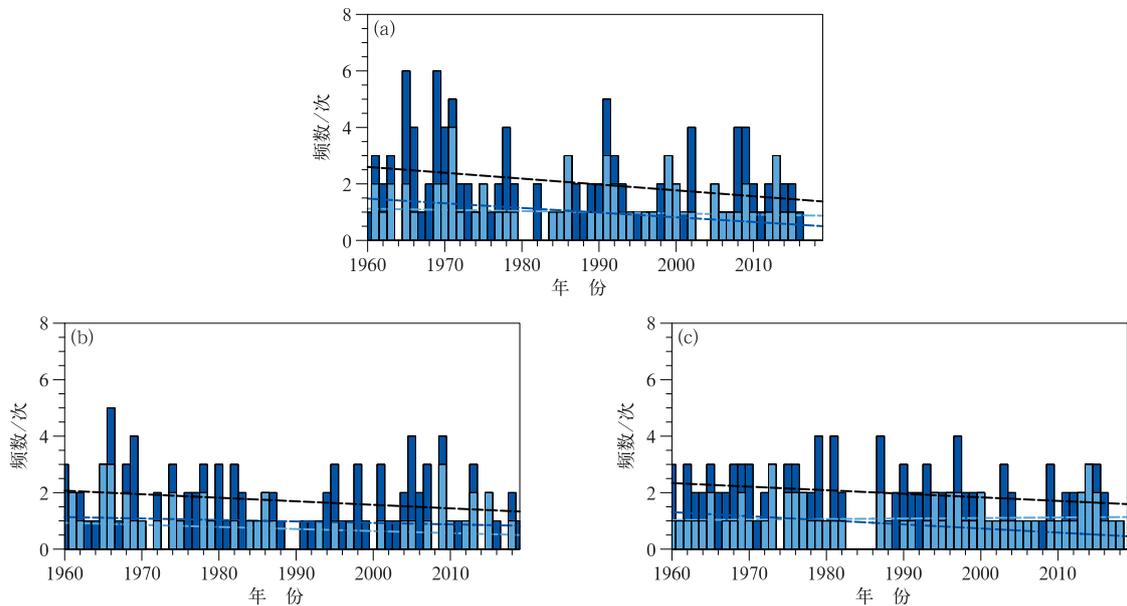


图 4 1960—2019 年冬季(a)、春季(b)、秋季(c)区域型寒潮(浅蓝柱)、全国型寒潮(深蓝柱)和全部型寒潮(黑框)累积频数及其线性趋势(相应颜色的虚线)

Fig. 4 The cumulative frequency of regional cold waves (light blue column), national cold waves (dark blue column) and all types of cold waves (black box) and their linear trends (corresponding color dotted line) in winter (a), spring (b), and autumn (c) from 1960 to 2019

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 月没有发生全国型寒潮(图 1),其强度为零(图 5a<sub>2</sub>)。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(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 月的略大;秋季,11 月的平均强度则明显大于 9 月和 10 月。

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(2.15~2.17)均大于区域型寒潮平均强度(2.03~2.09),全国型冷空气平均强度(1.74~1.78)明显大于区域型冷空气的平均强度(1.60~1.64);全国型冷空气总体过程平均强度

(1.97~2.01)明显大于区域型冷空气总体过程的平均强度(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。

### 3.2 寒潮强度长期变化趋势

由图 7 可见,1960—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 $-0.17 (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-0.14 (10 \text{ a})^{-1}$ ,分别通过 0.05 和 0.10 显著性水

平检验,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 0.10 显著性水平检验(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 0.10 显著性水平检验(图略)。

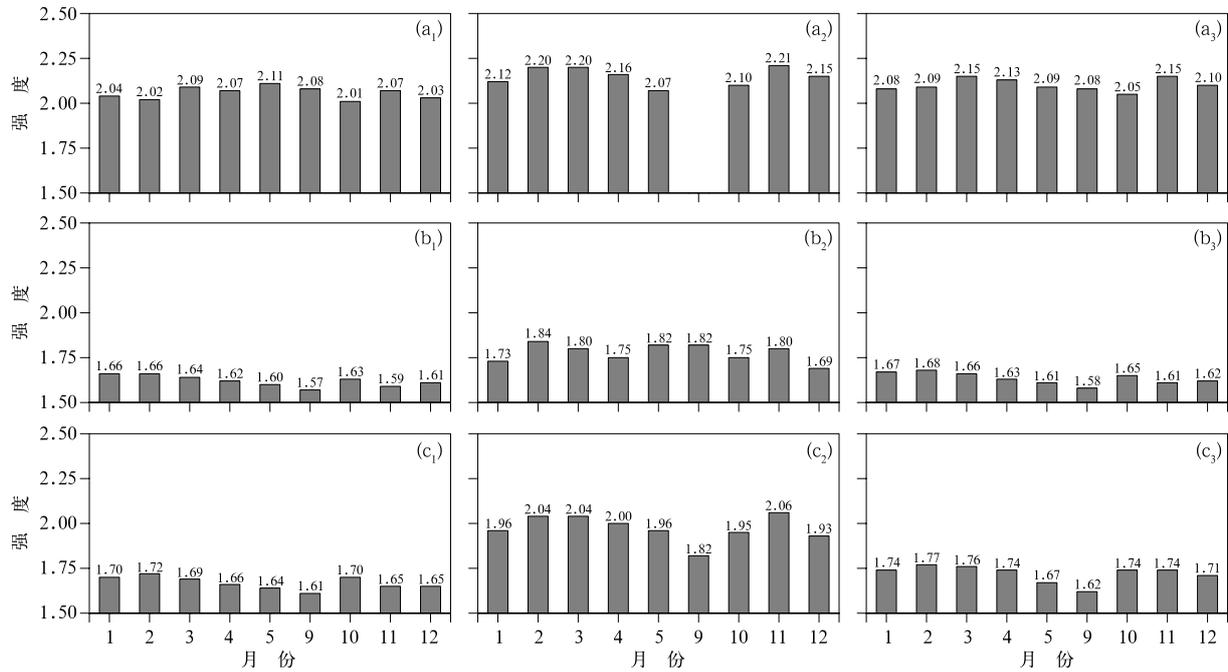


图 5 同图 1, 但为平均强度

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for the average intensity

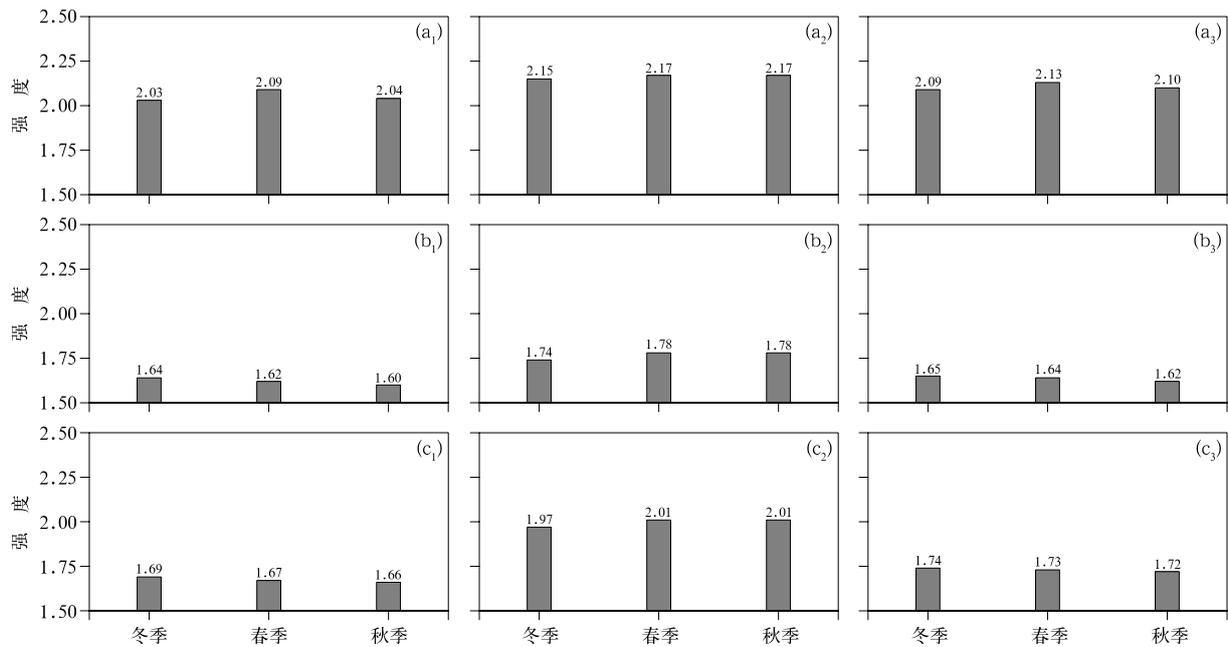


图 6 同图 1, 但为冬季、春季和秋季的平均强度

Fig. 6 Same as Fig. 1, but for the average intensity in winter, spring and autumn

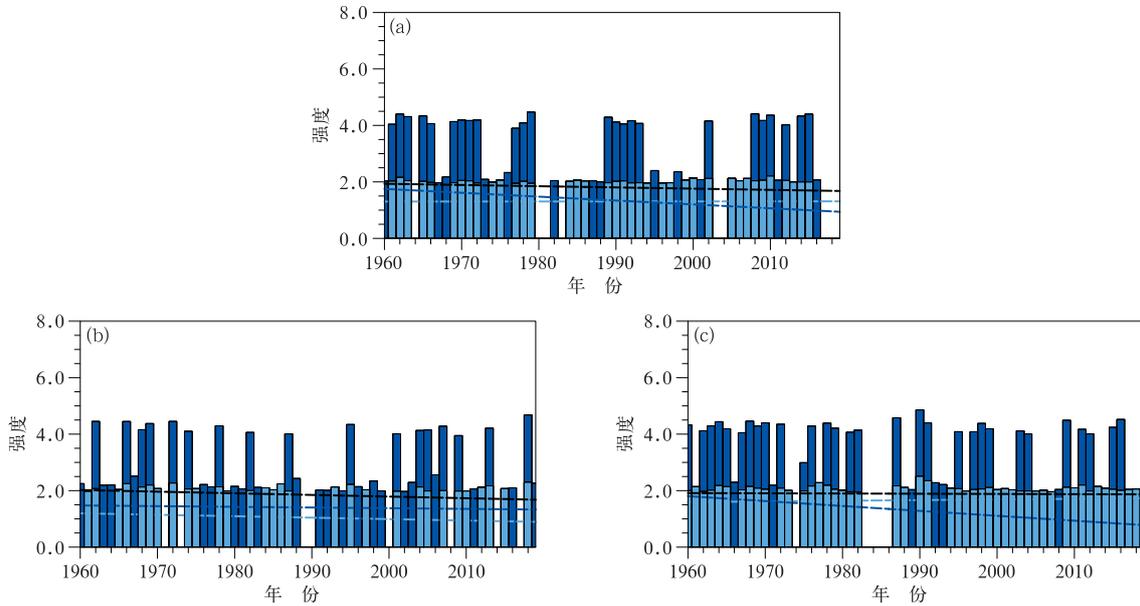


图 7 同图 4, 但为平均强度及其线性趋势

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for the average intensity and linear trend

### 4 变暖背景下冬季各类冷空气过程的变化特征

#### 4.1 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, 设置显著性检验水平  $P = 0.10$ , 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, 计算不同  $L$  下的 RSI (regime shift index) 值, 发现全国春季、秋季、冬季气温均具有很强的年代际变化信号。由图 8 可见, 在 59 年冬季中, 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)。

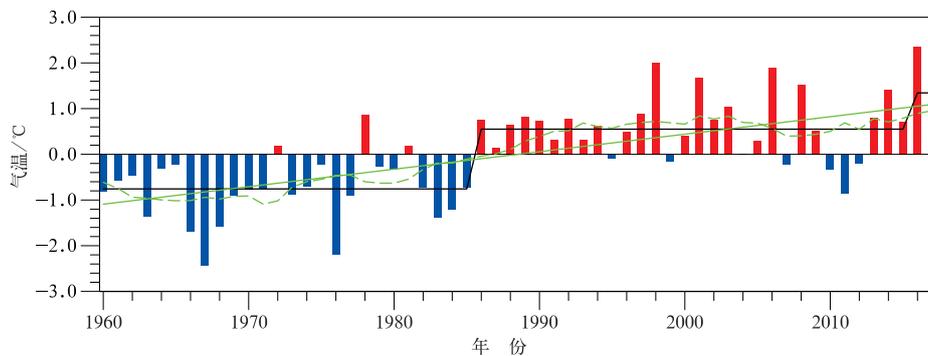


图 8 1960—2019 年中国大陆冬季平均气温的时间序列

(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)

Fig. 8 The time series of average winter temperature in mainland China from 1960 to 2019

(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)

## 4.2 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 可以明显地看出,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国型寒潮频数下降趋势通过了 0.10 的显著性水平检验,其大小为  $-0.57 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ;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 0.05 显著

性水平检验,其大小分别为  $1.37 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  和  $1.27 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ;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 0.10 显著性水平检验,为  $1.25 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。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 [ $-0.27 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ] 通过了 0.10 显著性水平检验,冷期 2 月全部型寒潮频数 [ $-0.37 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ] 和暖期 1 月的全国型寒潮频数 [ $-0.17 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ] 下降趋势均通过了 0.05 的显著性水平检验,暖期 1 月的区域型冷空气发生频数的上升趋势 [ $0.53 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ] 通过 0.10 显著性水平检验(图略)。

## 4.3 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积强度除以总次数,用以表示平均每次冷过程的强度。

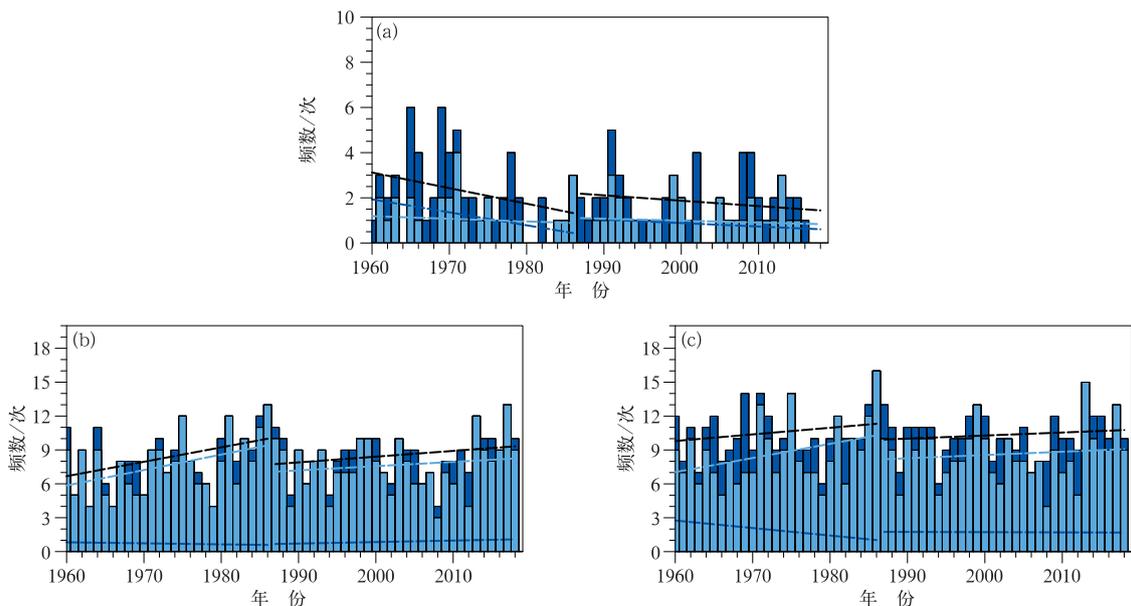


图 9 1960—2019 年冬季寒潮(a)、冷空气(b)、冷空气总体过程(c)累积频数及线性趋势  
(浅蓝柱表示区域型,深蓝柱表示全国型,黑色框表示全部型;直线表示相应的线性趋势)

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

**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 and the linear trend of the cold wave, cold air and the overall process of cold air in the winter from 1960 to 2019**

类型	天气过程	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 a)<sup>-1</sup>; \* 和 \*\* 分别表示通过 0.10 和 0.05 显著性水平检验;下同。  
 Note: all type=regional type+national type; the overall process of cold air=cold air+cold wave. The number in  
 [] represents the total number of winters averaged over the years, unit: times; the number in () represents  
 a linear trend, unit: times·(10 a)<sup>-1</sup>; \* and \*\* respectively indicate having passed significance tests of  
 0.10 level and 0.05 level. Same as below.

表 2 为 1960—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 同表 1,但为强度及其变化趋势**

**Table 2 Same as Table 1, but for the intensity and the linear trend**

类型	天气过程	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:[]数字表示多年的次平均强度;()数字表示线性趋势,单位:a<sup>-1</sup>; \* 表示通过 0.10 显著性水平检验。  
 Note: The number in [] represents the average intensity of the multi-year average; the number in () represents  
 a linear trend, unit: a<sup>-1</sup>; \* indicates having passed significance test of 0.10 level.

如表 2 所示,冷期,冬季全国型寒潮强度(-0.120 a<sup>-1</sup>)和全部型寒潮强度(-0.147 a<sup>-1</sup>)呈显著下降趋势,通过了 0.10 显著性水平检验,冬季全部型冷空气强度(0.154 a<sup>-1</sup>)呈显著上升趋势,通过了 0.10 显著性水平检验;暖期,只有全部型冷空气总体过程强度(0.115 a<sup>-1</sup>)呈显著上升趋势,通过了 0.10 显著性水平检验,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了 0.10 显著性水平检验,2 月全部型寒潮强度减弱趋势通过了 0.05 的显著性水平检验(图略)。由表 2 还可以看出,暖期冬季的全国型寒潮和全国型冷空气过程次平均强度比冷期大,其余 7 类冷空气过程在暖期的次平均强度比冷期小。

## 5 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 1 384 次,其中区域型冷空气 1 256 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 1 728 次,其中区域型冷空气总体过程 1 425 次,全国型冷空气总体过程 303 次。各类冷空气总体过程的累积频数在 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。对各类寒潮在冬季、春季、秋季节累积频数长期趋势分析表明,除区域型寒潮累积频数在秋季呈上升趋势,全国型和区域型寒潮累积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—1986 年为冷期,1987—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;暖期冬季的其他冷空气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,为 $-0.57 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。冷期全国型冷空气和全部型冷空气的增加趋势超过 0.05 显著性水平检验,大小分别为 $1.37 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.28 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ;暖期各类冷过程在各季节的变化趋势都没有通过显著性水平检验,但是暖期 1 月的全国型寒潮频数下

降趋势[ $-0.17 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]和区域型冷空气频数的上升趋势[ $0.53 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]分别通过 0.05 和 0.10 显著性水平检验。

## 参考文献

- 曹晓初,叶瑞珠,许爱华,2001. 江西省冷空气气候特征分析[J]. 江西气象科技,24(4):21-23. Cao X C, Ye R Z, Xu A H, 2001. Analysis on climate features of cold weather Jiangxi Province[J]. Jiangxi Meteor Sci Technol, 24(4):21-23(in Chinese).
- 陈明轩,徐海明,管兆勇,2003. 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,26(4):433-446. Chen M X, Xu H M, Guan Z Y, 2003. Interdecadal variations of spring Greenland sea-ice extent and its relationships with North Atlantic and Arctic oscillations[J]. J Nanjing Inst Meteor, 26(4):433-446(in Chinese).
- 陈佑淑,仪清菊,牟惟丰,1974. 对冷空气标准的一些讨论[J]. 气象,1(1):7-10. Chen Y S, Yi Q J, Mou W F, 1974. Some discussions on cold air standards[J]. Meteor Mon, 1(1):7-10(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,1996. 寒潮年鉴:1984. 9—1985. 5[M]. 北京:气象出版社. Laboratory of Climate Application of National Meteorological Centre, 1996. Cold Wave Yearbook: September 1984—May 1985[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 胡宜昌,董文杰,何勇,2007. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展,22(10):1066-1075. Hu Y C, Dong W J, He Y, 2007. Progress of the study of extreme weather and climate events at the beginning of the twenty first century[J]. Adv Earth Sci, 22(10):1066-1075(in Chinese).
- 黄焕卿,韩雪,2014. 东亚冷空气的变化趋势[J]. 海洋预报,31(5):69-75. Huang H Q, Han X, 2014. Variation trend analysis of the cold airs in the East Asia[J]. Mar Forecasts, 31(5):69-75(in Chinese).
- 纪忠萍,谷德军,梁健,等,2007. 近 55 年影响广州的强冷空气及其准双周变化[J]. 大气科学,31(5):999-1010. Ji Z P, Gu D J, Liang J, et al, 2007. The strong cold air occurrences affecting Guangzhou and their biweekly oscillation during the last 55 years[J]. Chin J Atmos Sci, 31(5):999-1010(in Chinese).
- 李金洁,王爱慧,郭东林,等,2019. 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,77(3):579-593. Li J J, Wang A H, Guo D L, et al, 2019. Evaluation of extreme temperature indices over China in the NEX-GDDP simulated by high-resolution statistical downscaling models[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):579-593(in Chinese).
- 梁苏洁,丁一汇,赵南,等,2014. 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,38(5):974-992. Liang S J, Ding Y H, Zhao N, et al, 2014. 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*, 38(5):974-992(in Chinese).
- 刘向文,孙照渤,倪东鸿,等,2009. 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*, 32(1):24-31. Liu X W, Sun Z B, Ni D H, et al, 2009. Intraseasonal and interannual features of Australian cold air activity[J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 32(1):24-31(in Chinese).
- 毛伟峰,白素琴,陈鹏翔,2016. 1951—2015 年乌鲁木齐市降温过程频数及强度气候特征[J]. *气象*, 42(11):1351-1363. Mao W Y, Bai S Q, Chen P X, 2016. Climate characteristics of frequency and intensity of cooling process in Urumqi during 1951—2015 [J]. *Meteor Mon*, 42(11):1351-1363(in Chinese).
- 仇永康,李晓东,仇永炎,1992. 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*, 3(2):235-241. Qiu Y K, Li X D, Qiu Y Y, 1992. Statistical features of the cold waves invaded China and their relation to the snow cover area over the Eurasian Continent[J]. *Quart J Appl Meteor*, 3(2):235-241(in Chinese).
- 任金声,王秀文,王洁颖,1996. 冬半年冷空气过程中期预报业务系统[J]. *气象*, 22(1):33-37. Ren J S, Wang X W, Wang J Y, 1996. The medium-range forecasting system of cold-air activities in winter season[J]. *Meteor Mon*, 22(1):33-37(in Chinese).
- 唐熠,周秀华,郑传新,等,2019. 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*, 45(10):1446-1456. Tang Y, Zhou X H, Zheng C X, et al, 2019. 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).
- 陶诗言,1955. 东亚冬半年冷空气活动过程的经验研究[C]//中央气象局. 短期预报手册. Tao S Y, 1955. An empirical study on the cold air activity process in East Asia for the half year in winter [C]// National Meteorological Centre. *Manual of Short-Range Forecast*(in Chinese).
- 陶亦为,代刊,董全,2017. 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*, 43(10):1176-1185. Tao Y W, Dai K, Dong Q, 2017. Extreme analysis and ensemble prediction verification on cold wave process in January 2016[J]. *Meteor Mon*, 43(10):1176-1185(in Chinese).
- 王宗明,孙照渤,李忠贤,等,2011. 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*, 34(1):16-23. Wang Z M, Sun Z B, Li Z X, et al, 2011. Variation characteristics of strong cold air activity frequency in Eurasia from 1949 to 2009 [J]. *Meteor Disaster Reduct Res*, 34(1):16-23(in Chinese).
- 王遵娅,丁一汇,2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. *大气科学*, 30(6):1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H, 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(6):1068-1076(in Chinese).
- 徐玮平,张杰,刘晨,等,2020. 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*, 44(6):1167-1187. Xu W P, Zhang J, Liu C, et al, 2020. 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*, 44(6):1167-1187(in Chinese).
- 阎琦,田莉,李爽,等,2016. 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*, 38(2):379-387. Yan Q, Tian L, Li S, et al, 2016. Multiple-time scale variations and impact factors of regional cold air in Liaoning Province[J]. *J Glaciol Geocryol*, 38(2):379-387(in Chinese).
- 姚永明,姚雷,邓伟涛,2011. 长江中下游地区类寒潮发生频次的变化特征分析[J]. *气象*, 37(3):339-344. Yao Y M, Yao L, Deng W T, 2011. Analysis of the frequency characteristics of the similar cold wave in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Meteor Mon*, 37(3):339-344(in Chinese).
- 岳培霞,陈静,高祺,等,2009. 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*, 25(4):36-42. Yue Y X, Chen J, Gao Q, et al, 2009. Climatic characteristics of cold air under global warming in Shijiazhuang, Hebei Province[J]. *J Meteor Environ*, 25(4):36-42(in Chinese).
- 张培忠,陈光明,1999. 影响中国寒潮冷高压的统计研究[J]. *气象学报*, 57(4):493-501. Zhang P Z, Chen G M, 1999. A statistical analysis of the cold wave high which influences on China[J]. *Acta Meteor Sin*, 57(4):493-501(in Chinese).
- 中国气象局,2017. 冷空气过程监测指标:QX/T 393—2017[S]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2017. *Monitoring indices of cold air processes: QX/T 393—2017[S]*. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 周琳,孙照渤,2015. 1961—2010 年我国冷空气的活动特征[J]. *大气科学学报*, 38(3):342-353. Zhou L, Sun Z B, 2015. Activity characteristics of cold air in China from 1961 to 2010[J]. *Trans Atmos Sci*, 38(3):342-353(in Chinese).
- 朱晨玉,黄菲,石运昊,等,2014. 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*, 44(12):12-20. Zhu C Y, Huang F, Shi Y H, et al, 2014. Spatial-temporal patterns of the cold surge events in China in recent 50 years and its relationship with Arctic sea ice[J]. *Period Ocean Univ*, 44(12):12-20(in Chinese).
- Ding Y H, 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia[J]. *Meteor Atmos Phys*, 44(1/2/3/4):281-292.
- Rodionov S N, 2006. The problem of red noise in climate regime shift detection[J]. *Geophys Res Lett*, 31:L12707.
- Wang Z Y, Ding Y H, Zhang Q, et al, 2012. Changing trends of daily temperature extremes with different intensities in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 26(4):399-409.

(本文责编:俞卫平)