

胡春丽,焦敏,李菲,等.中国东北地区冬季冷空气活动特征研究.气象科学,2023,43(3):420-426.

HU Chunli, JIAO Min, LI Fei, et al. Study on characteristics of cold air activities in winter over Northeast China. Journal of the Meteorological Sciences, 2023, 43(3): 420-426.

中国东北地区冬季冷空气活动特征研究

胡春丽¹ 焦敏² 李菲³ 李辑¹ 周晓宇³

(1 辽宁省生态气象和卫星遥感中心, 沈阳 110166; 2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166;

3 沈阳区域气候中心, 沈阳 110166)

摘要 利用1961—2017年东北地区164个气象站逐日气温、最低温度资料,按照《冷空气过程监测指标》行业标准,建立东北地区中等强度冷空气、强冷空气和寒潮历史数据集,采用气象统计学方法分析了东北冬季气温、中等强度冷空气、强冷空气和寒潮年际、年代际变化特征。结果表明:东北地区冬季气温呈显著上升趋势,趋势系数为0.45,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,1960s最低,2010s达到最大值;东北地区冬季气温突变时间为1981年,突变前气温负距平为主,突变后气温波动变化明显;东北地区冬季冷空气过程以寒潮为主,冷空气出现日数、发生强度以12月最多、最强;冷空气趋势变化不显著,其中1961—1970强度最强,2001—2010年最弱;东北地区冬季气温突变后冷空气日数减少,强度减弱。

关键词 中国东北; 强降温事件; 特征

分类号: P423; P467

doi: 10.12306/2021jms.0054

文献标识码: A

Study on characteristics of cold air activities in winter over Northeast China

HU Chunli¹ JIAO Min² LI Fei³ LI Ji¹ ZHOU Xiaoyu³

(1 Eco-Meteorology and Satellite Remote Sensing Center of Liaoning Province, Shenyang 110166, China;

2 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China;

3 Shenyang Regional Climate Center, Shenyang 110166, China)

Abstract Based on the daily temperature and minimum temperature data of 164 meteorological stations in Northeast China from 1961 to 2017, in accordance with the “Cold Air Process Monitoring Indicators” of the People’s Republic of China, a historical data set of medium-intensity cold air, strong cold air and cold waves in Northeast China was established. Statistical methods were used to analyze the interannual and interdecadal changes of northeast winter temperature, medium-intensity cold air, strong cold air and cold waves. Results show that the winter temperature in Northeast China shows a significant upward trend, with a trend coefficient of 0.45, which passed the 99% confidence test. It was the lowest in the 1960s and reached the maximum in the 2010s. The sudden change of winter temperature in Northeast China was 1981. Before the sudden change, the temperature was mainly negative anomalies. After the sudden change, the temperature fluctuated significantly. The cold air process in Northeast China is dominated by cold waves. The number of days and intensity of cold air are the most and strongest in December; the trend of cold air does not change significantly, with the strongest intensity from 1961 to 1970 and the weakest from 2001 to 2010. After the sudden change of temperature in winter in Northeast China, the number of cold air days decreased and the intensity weakened.

Key words Northeast China; severe cooling event; characteristics

收稿日期(Received): 2021-01-09; 修改稿日期(Revised): 2021-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2018YFC150042); 中国气象局沈阳大气环境研究所和辽宁省农业气象灾害重点实验室项目(2019SYLAE07); 辽宁省气象局科研项目(BA202110)

通信作者(Corresponding author): 李辑(LI Ji). huchunli0829@163.com

引 言

在全球气候变暖背景下,中国地表平均气温普遍呈上升趋势,增温幅度在不同区域、不同季节呈现一定的规律性,高纬度地区升温幅度高于低纬度地区,冬季升温幅度高于其他季节^[1]。中国东北地区位于北半球中高纬度地带,冬季气温的升高速率明显高于全球、全国平均水平,是冬季升温最显著的地区之一^[2-5]。在冬季总体变暖的背景下,东北暖冬年份明显增多^[6],寒潮频数显著下降,但近年来,东北冬季极端严寒事件却频频发生^[7],如 2000 年低温严寒天气直接造成数千万元的经济损失,对人们的生活和健康造成重大影响。因此探讨气候变暖背景下东北极端强降温事件的新特征新规律,对于积极防御气温异常带来的重大灾害具有重要意义。

前人对东北冬季气温特征及影响因子的研究较多^[8-14],针对东北地区冬季强降温事件分析较少^[15-18],尤其是长时间尺度上不同等级冷空气特征更为少见,因此,选取 1961—2016 年东北地区冬季逐日气温资料,根据单站冷空气强度等级划分标准,利用数理统计分析方法,重点研究强降温过程年际变化及年代际与年际变异之间的联系,探讨气候变暖停滞期,强降温过程发生新特征,研究结果有助于深入了解东北地区冬季气候变化规律,为东北地区不同等级冷空气活动预报预测和防灾减灾提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 资料

选取 1961—2016 年黑龙江、吉林、辽宁省共 164 个地面气象观测站逐日气温、最低温度资料,图 1 为东北地区 164 个地面气象观测站点分布。可见,站点分布较为均匀,时间序列较长。定义 12 月至次年 2 月为冬季(如 1961 年冬季为 12 月—次年 2 月),气候平均值采用 1981—2010 年冬季气温均值。

1.2 冷空气指标及等级

参照中华人民共和国行业标准《冷空气过程监测指标》(QX/T 393-2017)中单站冷空气等级、区域冷空气过程判定。

1.2.1 单站冷空气等级

根据单站的降温幅度和日最低气温定义该站的冷空气强度等级,分为中等强度冷空气、强冷空气和寒潮 3 级。中等强度冷空气为单站 $\geq 6^{\circ}\text{C}$,且 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ 的冷空气;强冷空气为单站 $\geq 8^{\circ}\text{C}$ 的冷空气;

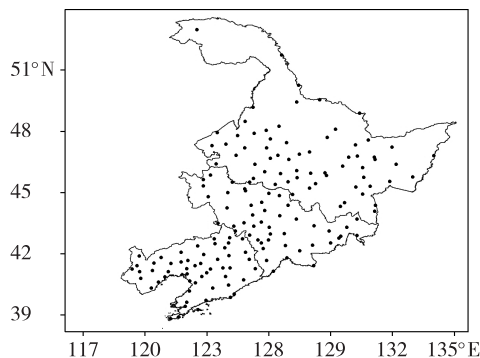


图 1 东北地区 164 个地面气象观测站点分布

Fig.1 Location distribution of 164 meteorological stations in Northeast China

寒潮为单站 $\geq 8^{\circ}\text{C}$ 或单站 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 或 $\geq 12^{\circ}\text{C}$,且最低气温 $\leq 4^{\circ}\text{C}$ 的冷空气(其中 48 h、72 h 内的日最低气温必须连续下降)。

1.2.2 区域冷空气过程判定

监测区域内有 20% 及以上观测站单站出现中等及其以上冷空气,且持续两日及以上,判定为出现一次区域冷空气过程。在一次区域冷空气过程中,经计算,逐日出现中等及以上强度的冷空气站点数若随时间先减少后增加,则此次冷空气过程判定为两次冷空气过程。依照某次区域冷空气过程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:

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

式中: I 为区域冷空气过程强度指数; N_1 、 N_2 、 N_3 分别为监测区域内出现的中等强度冷空气、强冷空气、寒潮站点数。依据某次区域冷空气过程的强度指数(I)确定其强度等级,划分为中等强度冷空气、强冷空气、寒潮天气过程,当 I 值范围为 $[1.00, 1.70)$ 时,为中等强度冷空气过程;当 I 值范围为 $[1.70, 1.95)$ 时,为强冷空气过程;当 I 值范围为 $[1.95, 3.00)$ 时,为寒潮过程。

1.3 方法

采用相关分析、小波分析、趋势系数、气候倾向率等分析气温、冷空气气候变化特征,变差系数表示冷空气变化稳定性,采用 Mann-Kendall 检验方法分析东北地区冬季气候突变点。

2 结果分析

2.1 东北冬季平均气温的变化

1961—2016 年东北地区冬季平均气温呈现显著上升趋势(图 2),趋势系数为 0.45,通过了 $\alpha = 0.01$

的显著性检验,该结果与前人研究基本一致。1960s 呈下降趋势,1970s 波动变化,1976 年为近 56 a 最低值,1980s、1990s 气温呈波动上升趋势,2000s 以来,东北地区平均气温波动较大,2000 年出现第三低值,2012 年出现第五低值,2006 年出现最高值,2015 年出现第二高值,近 17 a 最高、低值相差 6.9 ℃。

1961—2016 年东北地区冬季平均气温的 Mann-Kendall 突变检验(图 3)表明,UF 曲线在 1972 年以后均大于 0,且在 1987 年以后突破临界线,表明 1972 年以来东北地区冬季平均气温呈上升趋势,且 1987 年以后上升趋势显著。UF 和 UB 曲线在 1981 年左右出现交点,且交点在临界线之间,说明 1981 年为东北地区冬季平均气温发生突变的时间。利用本文处理的冬季 1961—2007 年气温资料,得到突变点为 1986/1987 年,结论与已有研究相同,资料延长至 2016 年,突变点为 1981 年,东北地区冬季气温突变点发生改变。

以 1981 年为分界点,分析突变前、后东北地区年平均气温的变化趋势,可知,突变前 21 a 冬季平均气温为-14.1 ℃,只有 3 a 是正距平,低于平均气温的气温负距平年份占 85.7%,气温较平均值低 1.43 ℃,平均气温最低的年份出现在 1976 年,比平

均值低 4.08 ℃,年际变化呈显著升高趋势,增温速率 0.54 ℃/(10 a);突变后的 35 a 年冬季平均气温为-12.6 ℃,呈波动变化特征,气温较平均值高 0.07 ℃,平均气温最低的年份出现在 2000 年,比平均值低 3.6 ℃,年际变化呈升高趋势,增温速率为 0.33 ℃/(10 a),变化趋势小于突变前。

2.2 东北冬季冷空气事件的变化

2.2.1 冷空气日数

统计东北地区历年不同等级的冷空气出现日数,如图 4 所示。可见,1961—2016 年冷空气平均出现日数特征为寒潮>强冷空气>中等强度冷空气,寒潮平均发生日数为 9.02 d,强冷空气为减少趋势,趋势系数为-0.17,气候倾向率为-0.485 d/(10 a),均方差为 4.51,变差系数为 0.5,寒潮发生日数最多在 1978 年(21 d)、1969 年(21 d)、1986 年(19 d)和 2009 年(17 d),在 2003、2007、2011 年未出现寒潮天气过程。中等强度和强冷空气出现日数变化趋势不显著,均未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,分别为弱的增加和减少趋势,气候倾向率为 1.21 d/(10 a)、-0.04 d/(10 a)。中等强度(强)冷空气在 1971(1968 年)和 1988(1996 年)年出现日数最多,达到 10 d,中等强度(强)冷空气未出现年份为 7

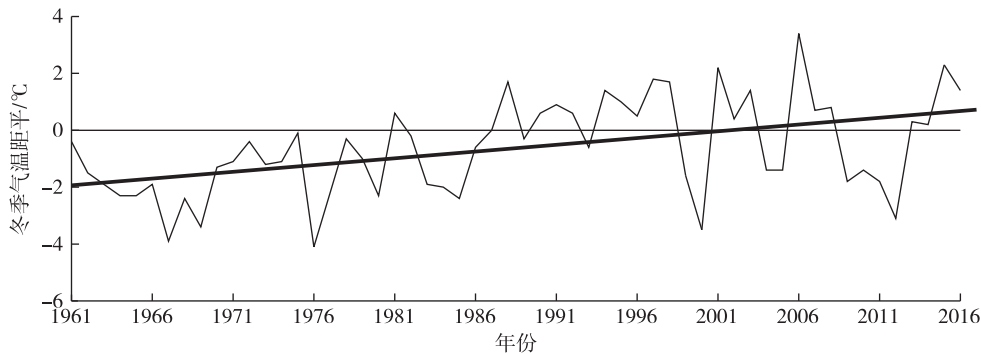


图 2 1961—2016 年东北地区冬季平均气温距平年际变化
Fig.2 Interannual variations of winter average temperature in Northeast China during 1961-2016

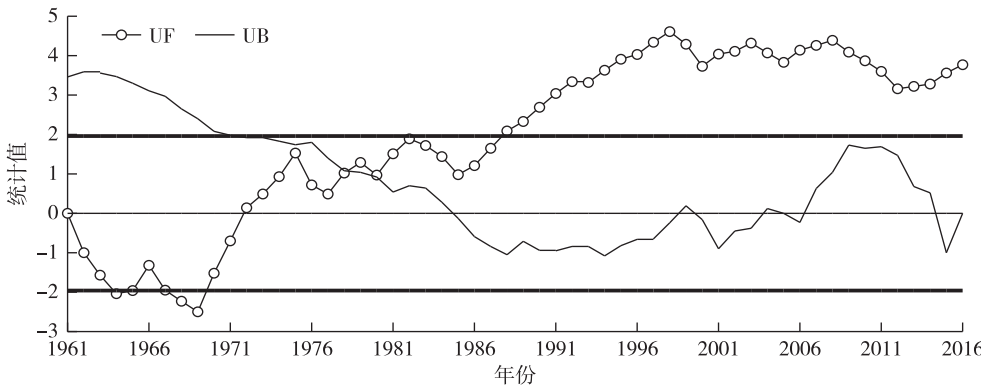


图 3 1961—2016 年东北地区冬季平均气温的 Mann-Kendall 检验
Fig.3 Mann-Kendall test of average winter temperature in Northeast China during 1961-2016

(14)a,出现在2000年以后分别占42%和36%。三者的相关系数结果揭示了中等强度冷空气、强冷空气和寒潮出现日数上无相关性。

2.2.2 冷空气强度

图5为东北地区冷空气强度指数的年际变化特征,自1961年以来冷空气强度呈现不显著的变弱趋势,速率为 $0.043/(10\text{ a})$ 。冷空气最弱的5 a依次为2007、2011、2003、1983、1962年,最强5 a依次为1961、1979、1965、1995、2001年。

2.2.3 月内特征

逐月分析中等强度冷空气、强冷空气和寒潮(统称冷空气)出现总次数的时间变化,如图6所示,平均来看,12、1、2月冷空气出现次数相差不大,分别为2.45、1.98、1.96次,12月出现冷空气事件相对较多,2月最少。变化趋势上,12月冷空气出现次数略增加,1、2月略减少,但均未通过显著性检验。各月冷空气次数相关性较小,未通过显著性检验。分月冷空气强度的时间变化见图7,1月冷空气强度呈弱的增强趋势,12、2月强度呈弱的减弱趋势。近56 a 12月冷空气强度最强,其次是2月,1月强度最弱,12至次年2月未出现冷空气事件年份分别为3、5、5 a。各月冷空气日数和强度相关系数分别为0.38、0.47、0.4,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,强度较强的冷空气持续时间一般偏长。

2.2.4 年代际特征

表1给出了不同年代背景下,冷空气强度、不同等级冷空气日数、冬季气温距平,平均时段选取1981—2010年,在气温最高的2001—2010年,冷空气强度指数最小,中等强度冷空气、强冷空气日数、寒潮日数均为最低值。在气温最低的1961—1970年,冷空气指数最大,各等级冷空气日数为次大值,表明极端强降温事件降温幅度在1961—1970年较1971—1980年偏强。

2.3 突变点前后冷空气特征

自1961年东北冬季气温经历了两个阶段,1981年为东北地区冬季气温突变点。冬季冷空气强度累积距平结果揭示冷空气强度大致同样经历了两个阶段(图略):1961—1981年累计距平结果呈上升趋势,冷空气强度持续增强,1981—2016年强冷空气强度稳定期。冷期(1961—1981年)和暖期(1982—2016年)东北地区冬季冷空气强度指数、日数、气温距平同、异号率结果如表2所示,可见,在偏冷期,以气温偏低冷空气偏强年份为主(占71%),气温偏低年份冷空气日数偏少、偏多频率分别占48%和38%。表明冷期气温偏低与冷空气日数不存在相关性,气温偏低年份一般冷空气偏强。偏暖期气温偏高年冷空气偏强的频率相对较大,达到43%,气温偏高年冷空气日数偏多的频率高于气

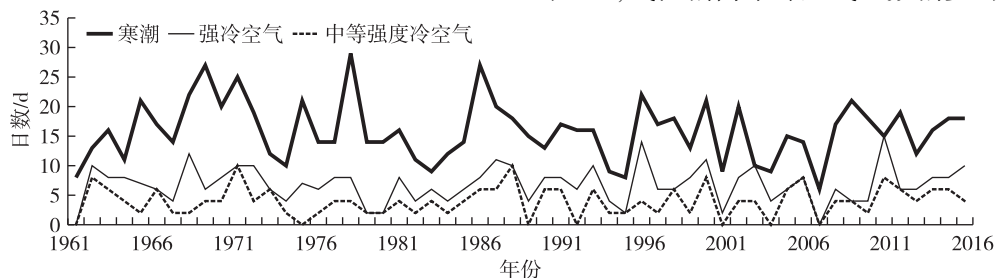


图4 1961—2016年东北地区冬季不同等级冷空气日数年际变化

Fig.4 Interannual variation curve of the number of cold air days of different grades in winter in Northeast China during 1961-2016

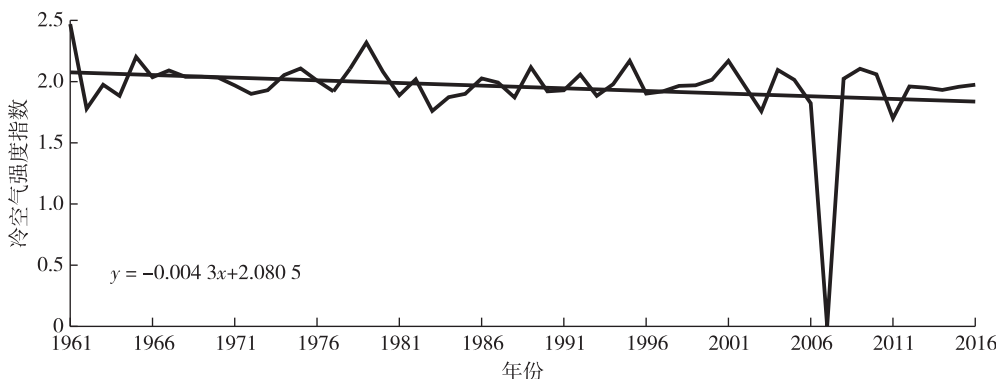


图5 1961—2016年东北地区冬季不同等级冷空气强度年际变化

Fig.5 Interannual variation curve of cold air intensity of different grades in winter in Northeast China during 1961-2016

表 1 东北地区冬季冷空气强度指数、日数、气温距平年代际变化

Table 1 Interdecadal changes of the intensity index, number of days, and temperature anomaly of winter cold air in Northeast China

年份	冷空气 强度指数	中等强度 冷空气日数/d	强冷空气 日数/d	寒潮 日数/d	各等级冷空气 日数总计/d	冬季气温 距平/℃
1961—1970	2.0 544	3.8	3.1	10.0	16.9	-2.13
1971—1980	2.0 385	3.6	2.7	10.9	17.2	-1.38
1981—1990	1.936	4.4	2.5	8.6	15.5	-0.45
1991—2000	1.978	3.8	3.7	8.2	15.7	0.22
2001—2010	1.801	3.2	2.0	8.7	13.9	0.29
2011—2016	1.912	5.6	3.2	7.5	16.3	-0.11

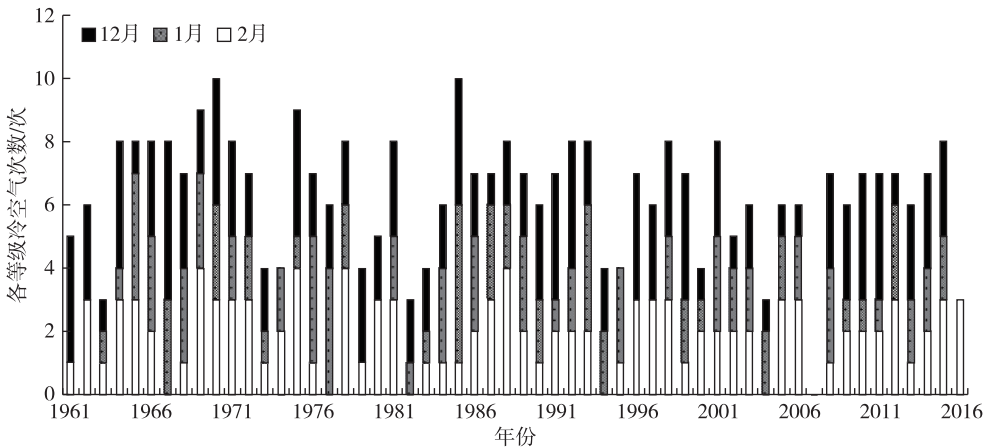


图 6 1961—2016 年东北地区冬季不同等级冷空气各月出现次数年际变化

Fig.6 Interannual variation of the monthly occurrences of different grades of cold air in Northeast China during 1961-2016

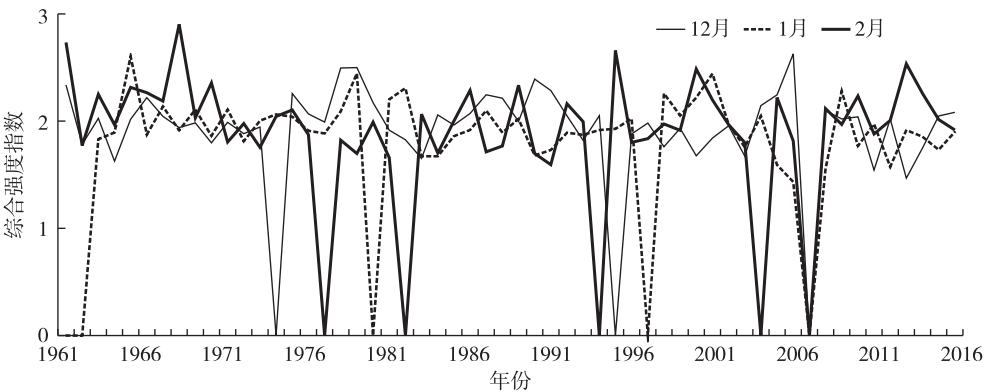


图 7 1961—2016 年东北地区冬季不同等级冷空气各月强度年际变化

Fig.7 Interannual variation of monthly intensity of different grades of cold air in winter in Northeast China during 1961-2016

温偏低年冷空气日数。结果表明,在气候偏暖大背景下,东北气温气候变率相对较大,易发生极端低温事件,该结论与前两节基本一致。

冷(暖期),东北地区冷空气强度平均指数为 2.03(1.91),中等强度冷空气、强冷空气、寒潮平均出现日数分别为 3.7 d(4.1 d)、3.0 d(2.8 d)、10.3 d(8.3 d)。相比冷期,除中等强度冷空气出现日数

略增加外,冷空气和寒潮出现日数减少,冷空气强度变弱。

3 结论

(1) 1961—2016 年东北地区冬季平均气温呈显著的上升趋势,趋势系数为 0.45,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,2000s 以来,东北地区平均气温波动

表 2 东北地区冬季冷空气强度指数、日数、
气温距平、异号率统计

Table 2 Winter cold air intensity index, number of days,
temperature anomaly, and different signs in Northeast China %

	1961—1981 年冷期	1982—2016 年暖期
T ₋ I ₊	71	28
T ₋ I ₋	14	14
T ₊ I ₊	10	43
T ₊ I ₋	5	15
T ₋ S ₊	48	26
T ₋ S ₋	38	17
T ₊ S ₊	10	34
T ₊ S ₋	4	23

注:T₊、T₋分别表示气温正、负距平,S₊、S₋分别表示冷空气日数正、负距平,I₊、I₋分别表示冷空气强度正、负距平。

较大,易出现极端温度事件。东北地区冬季平均气温突变时间较 1961—2007 年的 1986/1987 年变化为 1981 年。

(2)1961—2016 年东北地区冬季强降温事件平均出现日数特征为寒潮>强冷空气>中等强度冷空气;冬季不同等级强降温事件强度呈不显著的减弱趋势,不同等级强降温事件发生日数呈不显著增加或减少趋势;12 月为东北冬季强降温事件强度最强,发生日数最多的月份。

(3)2001—2010 年东北地区冬季冷空气强度指数最小,为冷空气强度最弱的 10 a。冬季气温突变点前的偏冷期,以气温偏低冷空气偏强年份为主,占 71%,突变点后偏暖期,气温偏高年冷空气偏强的频率相对较大,达到 43%,东北气温突变后强降温事件出现日数减少,强度变弱。

参 考 文 献

[1] 沈志超,任国玉,李娇,等. 中国东北地区冬季气温变化特征及其与大气环流异常的关系. 气象与环境学报, 2013, 29(1): 47-54.
SHEN Zhichao, REN Guoyu, LI Jiao, et al. Winter temperature variability and its relationship with atmospheric circulation anomalies in Northeast China. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 2013, 29(1): 47-54.

[2] 孟鑫,张瑜,李慧琳,等. 东北冬季气温变化异常特征及其与 AO 的联系. 干旱气象, 2017, 35(3): 383-390, 419.
MENG Xin, ZHANG Yu, LI Huilin, et al. Air temperature anomaly variation in winter of Northeast China and its relations with AO. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 2017, 35

(3): 383-390, 419.

[3] 程洁,欧阳杨,张佳琦,等. 我国东北地区冬季气温时空变化特征分布的研究. 林业科技情报, 2017, 49(3): 106-112.
CHENG Jie, OUYANG Yang, ZHANG Jiaqi, et al. Study on temporal and spatial variation of winter temperature in Northeast China. Forestry Science and Technology Information (in Chinese), 2017, 49(3): 106-112.

[4] 刘实,隋波,涂钢,等. 我国东北地区冬季气温变化的东亚冬季风背景. 应用气象学报, 2014, 25(1): 11-21.
LIU Shi, SUI Bo, TU Gang, et al. The East Asian winter monsoon background on the variation of winter air temperature in Northeast China. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2014, 25(1): 11-21.

[5] 李超,张庆云. 冬季 1 月东北地区气温异常和前兆性信号. 科学通报, 2012, 57(31): 3000.
LI Chao, ZHANG Qingyun. January temperature anomalies over Northeast China and precursors. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(6): 671-677.

[6] 陈峪,任国玉,王凌,等. 近 56 a 我国暖冬气候事件变化. 应用气象学报, 2009, 20(5): 539-545.
CHEN Yu, REN Guoyu, WANG Ling, et al. Temporal change of warm winter events over the last 56 years in China. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2009, 20(5): 539-545.

[7] 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. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 405-417.
ZHOU Yaqing, REN Guoyu. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956-2008. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2010, 15(4): 405-417.

[8] 刘实,闫敏华,隋波. 东北三省冬季气温变化的有关研究进展. 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 357-361.
LIU Shi, YAN Minhua, SUI Bo. Advances in the research of winter air temperature variation of three provinces in Northeast China. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2009, 5(6): 357-361.

[9] 胡秀玲,刘宣飞. 东北地区冬季气温与北极涛动年代际关系研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 640-648.
HU Xiuling, LIU Xuanfei. Decadal relationship between winter air temperature in Northeast China and arctic oscillations. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2005, 28(5): 640-648.

[10] 叶更新,宋玉明. 冬季气温急剧升、降日期与东北夏季低温的联系. 气象科学, 2010, 30(1): 99-105.
YE Gengxin, SONG Yuming. Relationship between cold (warm) wave onset date and summer freezing damage in northeast China. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2010, 30(1): 99-105.

[11] 杨素英,王谦谦,孙凤华. 中国东北南部冬季气温异常及其大气环流特征变化. 应用气象学报, 2005, 16(3): 334-344.
YANG Suying, WANG Qianqian, SUN Fenghua. The winter air temperature anomalies and the changes of the atmosphere circulation characteristics in southern northeast China. Journal of

- Applied Meteorological Science (in Chinese), 2005, 16(3): 334-344.
- [12] 杨素英. 东北地区冬季气温异常的时空变化特征及其与热带印度洋海温异常的关系[硕士学位论文]. 南京: 南京气象学院, 2003.
- YANG Suying. Spatial/Temporal variations of winter air temperature in North-east China and the relationship between SSTA in tropical Indian Ocean and the air temperature[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2003.
- [13] 高峰, 隋波, 孙鸿雁, 等. 1951—2008 年东北地区冬季气温变化及环流场特征. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 12-16.
- GAO Feng, SUI Bo, SUN Hongyan, et al. Variation characteristics of winter air temperature and circulation field from 1951 to 2008 in the Northeast China. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 2011, 27(4): 12-16.
- [14] 徐迪, 任保华, 郑建秋, 等. 中国东北地区冬季气温趋势及反相模态分析. 气象科学, 2017, 37(1): 127-133.
- XU Di, REN Baohua, ZHENG Jianqiu, et al. Analysis of trend pattern and seesaw pattern of winter temperature in Northeast China. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2017, 37(1): 127-133.
- [15] 钱维宏, 张玮玮. 我国近 46 a 来的寒潮时空变化与冬季增暖. 大气科学, 2007, 31(6): 1266-1278.
- QIAN Weihong, ZHANG Weiwei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2007, 31(6): 1266-1278.
- [16] 马晓青. 中国暖冬时期强寒潮事件的分析[硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- MA Xiaqing. Analysis of strong cold waves in China during warm winter periods[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese), 2007.
- [17] 王遵娅, 丁一汇. 近 53 a 中国寒潮的变化特征及其可能原因. 大气科学, 2006, 30(6): 1068-1076.
- WANG Zunya, DING Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2006, 30(6): 1068-1076.
- [18] 黄丹, 耿焕同, 谢佩妍, 等. 基于 FMM 算法的我国寒潮路径分类及气候特征分析. 气象科学, 2018, 38(6): 759-767.
- HUANG Dan, GENG Huantong, XIE Peiyan, et al. Classification of cold wave paths in China and analysis of climate characteristics based on FMM algorithm. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2018, 38(6): 759-767.