

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0044

QIAO Xuemei, LIU Puxing. The temporal and spatial characteristics and genesis of cold wave in northern China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):357-367. [乔雪梅, 刘普幸. 中国北方地区寒潮时空特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):357-367.]

中国北方地区寒潮时空特征及其成因分析

乔雪梅, 刘普幸

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 基于中国北方地区269个站点1960-2017年逐日气温观测数据与大气环流指数等, 采用线性回归、相关分析、反距离加权法(IDW)及熵权法等方法, 探讨了近58年中国北方地区寒潮频次的时空变化特征及影响因素, 进而利用研究区耕地面积、人均GDP、农作物播种面积等社会经济统计数据, 从致灾因子、孕灾环境、承灾体易损性、防灾减灾能力四个方面对中国北方地区寒潮进行风险区划分析。结果表明: 近58年来, 中国北方地区寒潮频次总体呈 $0.2 \text{次} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率减少, 近58年研究区域共发生了159.7次寒潮, 其中冬季和十一月份寒潮频次最多。高频次出现在吉林省靖宇县、安图县, 内蒙古阿尔山市、苏尼特左旗、苏尼特右旗, 频次高达508次以上, 平均每年8.8次, 最少寒潮频次出现在华北南部, 新疆喀什和阿克苏。不同等级寒潮频次差距较大, 一般寒潮频次最多, 共102.9次。一般寒潮、较强寒潮、强寒潮、特强寒潮与寒潮频次在空间分布上比较相似, 大体呈由南向北增加的分布规律, 东北地区是寒潮的活跃区, 华北地区的活跃区在内蒙古中部, 西北地区寒潮活跃区主要在新疆阿勒泰地区。年尺度而言, 中国北方地区寒潮主要受CA、APVII、AO和APVAI的影响, 各季节影响因子有所差异, 春季寒潮主要受CQ和CA的影响, 秋季寒潮与APVII、CA、AO关系显著, 冬季寒潮与APVII、CA、AO、SHI均达到显著相关关系。综合风险区划结果表明, 新疆阿勒泰地区、黑龙江大兴安岭地区、吉林省东南部以及山东省为寒潮发生的高风险区, 低风险区分布在新疆阿克苏和喀什地区, 与寒潮频次空间分布相吻合。

关键词: 寒潮频次; 时空特征; 影响因素; 风险区划; 中国北方

中图分类号: P425.5⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0357-11

0 引言

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的上一份报告^[1], 过去三十年气候变化的特点不仅是气温的大幅上升^[2], 而且包括不断增加的极端事件频率^[3-4], 寒潮(寒流)作为一种极端大气事件, 其爆发会伴随降温、大风、雨雪等天气现象, 引发霜冻、雨凇、暴雪等灾害, 影响人类生活的正常发展, 产生相当大的物质损失。

寒潮是影响东亚经济活动的重要极端天气事件之一, 作为东亚冬季风最具活力的子系统, 学者们一直在努力了解其动力起源和影响因素。早在

1950s李宪之^[5]和陶诗言^[6]将东亚地区的寒潮划分为三种类型, 并对东亚冷空气路径进行研究, 发现阻塞高压破坏和长波系统的东移, 会导致东亚寒潮的发生, 张基嘉等^[7]通过波谱分析, 认为横槽转向型寒潮天气过程的基本特征是北半球2波转为3波的主要形式, 这些研究为早期了解寒潮活动特征、建立寒潮预报服务奠定了理论基础。20世纪80年代针对寒潮演变过程、寒潮预报服务相关学者开展了大量的研究工作, 刘怡等^[8]对一次东亚冷空气入侵过程研究, 认为寒潮酝酿的过程是一次地面冷高压交替的过程, 高守亭等^[9]研究发现东亚寒潮期间高空波动同高空急流通过波的动量通量和热量通

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2020-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561080)资助

作者简介: 乔雪梅(1995-), 女, 陕西榆林人, 2018年在宝鸡文理学院获学士学位, 现为西北师范大学在读硕士研究生, 从事干旱区域环境与绿洲建设研究. E-mail: qiaoxm751228@163.com

通信作者: 刘普幸, 教授, 从事干旱区域环境与绿洲建设及树轮水文学研究. E-mail: liupx751228@163.com.

量的辐合相互制约,徐羹慧^[10]综合考虑各种因素提出时效为15 d左右的寒潮中期预报的综合方案,陈静等^[11]用物理过程预报气温变化,设计预报产品,建立了四川盆地寒潮预报系统,预报的准确率比较高。21世纪以来研究多集中在寒潮变化特征及成因方面,Jeong等^[12]研究了北极涛动正负位与寒潮活动的关系,发现北极涛动处于负相位中国寒潮活动频发,Chen等^[13]研究发现东亚寒潮受厄尔尼诺影响频次增多,受拉尼娜影响时寒潮频次减少。对中国气候特征研究发现^[14-15],东北、西北、华北和冬季气温减弱趋势比较明显,在此研究基础上,王遵娅等^[16]研究认为中国寒潮频次减少主要是西伯利亚上空的冷空气与中国地表气温的上升,钱维宏等^[17]发现冬季寒潮频次减少和气旋-大风频次,造成中国暖冬的形成,李峰等^[18]分析了冬半年北极区极地环流形势变化对中国强冷事件的影响。近年来,多采用百分位阈值法、寒潮幅度指数、风浪波谱等方法研究区域性寒潮活动频次与强度^[19-23]。

综上所述,目前国内外寒潮研究集中在寒潮的动力起源、预报方法及影响因素方面,并侧重单一小区域,而对于大范围区域寒潮风险评估的研究几乎很少见。中国北方地区地域广阔,地跨东北、西北、华北16个省(区),气候和地貌类型差异显著^[24],跨多个气候区,是气候过渡的敏感区域,生态环境退化严重且十分脆弱^[25],极端大气事件频发,是受寒潮影响的显著地区。因此,本文基于线性趋势、反距离加权法、熵权法等方法,对中国北方地区寒潮频次的时空特征及影响因子进行研究,而后结合耕地面积、农作物的播种面积、人均生产总值等相关数据,对中国北方地区寒潮进行风险区划,以期为该区域寒潮防灾减灾、应对及预报寒潮灾害提供基础参考依据。

1 研究区概况与资料方法

1.1 研究区概况

中国北方地区是指秦岭淮河一线、阿尔金山、祁连山以及昆仑山以北的广大区域,包括东北、华北、西北三大地区^[26],范围 $32^{\circ}18' \sim 53^{\circ}33'N$, $73^{\circ}15' \sim 135^{\circ}02'E$,海拔 $-153 \sim 8\,091\text{ m}$ (图1)。其中东北地区地形呈半圆环状,大、小兴安岭、长白山从西、北、东部包围着东北平原,地区气候以温带大陆性气候和温带季风气候为主,年平均气

温 $-4.8 \sim 11.3^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $300 \sim 1\,000\text{ mm}$,日照时数 $2\,200 \sim 3\,100\text{ h}$,地区水系丰富但径流年际和年内变化比较大,地带性土壤主要有黑土、黑钙土,森林和草甸大面积的分布;华北地区北部为海拔较高的山地,西部主要是太行山、伏牛山山区,东部为低山丘陵,暖温带大陆性季风气候,光热资源充足,年平均气温在 $1.5 \sim 14^{\circ}\text{C}$ 之间,降水量在 $300 \sim 600\text{ mm}$ 之间,地带性的土壤主要有黄土、棕壤土,地区植被类型以林地和草地为主;西北地区高山、平原和盆地相间分布,温带大陆性气候,地区干燥少雨,蒸发剧烈,温差大,年均温在 $0 \sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间,年均降水量仅 230 mm ,多数河流属内陆流域,受冰川融水影响,地区土壤主要为栗钙土、棕漠土,地区植被主要以荒漠植被为主。

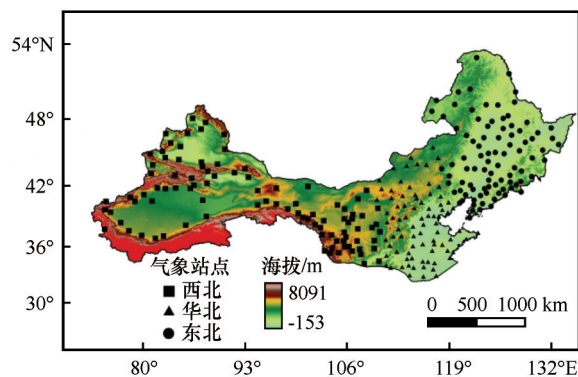


图1 中国北方地理位置和气象站点分布

Fig. 1 Map of geographical location and meteorological stations in northern China

1.2 资料与方法

1.2.1 资料来源

本文选取1960–2017年北方地区269个气象站点逐日气温数据,数据源自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);逐月大气环流数据下载自国家气候中心(<http://www.ncc-cma.net/>)及美国气候预测中心(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>);社会经济统计数据来源于2011–2017年《新疆维吾尔自治区统计年鉴》《内蒙古自治区统计年鉴》《陕西省统计年鉴》《吉林省统计年鉴》等北方地区各省(区)统计年鉴。

1.2.2 寒潮标准与研究方法

本文按照(BG/T 21987-2008)^[27-29]定义中国北方地区寒潮发生的标准,即日平均气温24 h内降低幅度 $\geq 8^{\circ}\text{C}$,且日最低温 $\leq 4^{\circ}\text{C}$;或日平均温48 h内降低幅度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 、或日平均气温72 h内降低幅度

$\geq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且日最低温 $\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，若满足以上三条标准中的其中一条标准，则可判定为一次寒潮，并结合中华人民共和国(BG/T 21987-2008)寒潮等级标准和《气象灾害预警信号发布与传播办法》中的寒潮预警信号的规定来确定中国北方地区单站寒潮强度等级划分(表1)。

表1 单站寒潮等级标准^[30]Table 1 Standard on cold wave in different levels^[30]

寒潮等级	一般寒潮	较强寒潮	强寒潮	特强寒潮
24 h 降温幅度	$\geq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 16\text{ }^{\circ}\text{C}$
日最低气温	$\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
预警信号级别	蓝色	黄色	橙色	红色

(1) 本文应用线性趋势法分析中国北方地区单站寒潮频次的时间变化特征。

$$y_i = b + at_i \quad (1)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, n$ 年； y_i 为气候要素的拟合数值； t_i 为时间； a 为气候倾向率； b 为常数。

(2) 运用 ArcGIS10.2 中的反距离权重法(IDW)分析北方地区寒潮频次空间变化。

(3) 运用相关分析法分析中国北方地区寒潮频次变化的影响因子。

(4) 选取耕地面积、农作物播种面积等8项指标对北方地区寒潮进行风险区划，为消除各指标选取数据中的异质性差异，将各选取指标数据进行归一化处理，再利用熵权法计算各指标因子的信息熵，确定选取指标权重，加权综合评价法确定评价指标综合得分。

① 指标因子归一化

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (2)$$

式中： Y_{ij} 为归一化后的数据； X_{ij} 为初始数据值； $\max(X_i)$ 和 $\min(X_i)$ 为初始数据最大值和最小值。

② 确定信息熵值

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

式中： $P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}$ ，如果 $P_{ij} = 0$ ，则定义

$\lim_{P_{ij} \rightarrow 0} P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ ； E_j 为指标数据信息熵值。

③ 各选取指标数据权重

$$W_i = \frac{1 - E_j}{k - \sum E_j} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (4)$$

式中： W_i 为各选取指标数据的权重。

④ 选取指标评价因子的确定

$$I_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot V_{ij} \quad (5)$$

式中： I_j 为评价指标综合权重； V_{ij} 为对于评价因子 j 选取指标 i 的标准化值； n 为选取指标的个数。

2 中国北方地区寒潮的时空变化特征

2.1 强度的空间变化特征

对中国北方地区269个站点近58年不同强度等级寒潮频次总和加权平均发现，近58年北方地区出现一般寒潮的频次最高，共102.9次，其次是较强寒潮，40.8次，强寒潮、特强寒潮发生的次数为14.7、1.3次。利用反距离加权(IDW)方法，对北方地区269个气象站点近58年的四种类型寒潮发生的频次进行空间插值，分别得到四种类型寒潮频次空间分布(图2)。显然，研究区寒潮频次的空间分布差异显著，但具有相似性，且由南向北增加的特征，从图2可知，近58年北方地区发生一般、较强、强、特强寒潮的频次差距较大。其中，一般寒潮发生的频次东北地区最高在阿尔山市，可达422次，华北地区最高在西乌珠穆沁旗可达352次，西北地区最高为青河县可达264次，其活跃区主要分布在吉林省的白山市、吉林市、通化市、长春市和四平市，内蒙古锡林郭勒盟、乌兰察布盟、额尔古纳市，新疆青河县；较强寒潮频次东北地区最高在阿尔山市可达194次，华北地区最高西乌珠穆沁旗可达189次，西北地区最高为青河县达129次，活跃区分布在吉林省的白山市、吉林市、辽源市，黑龙江漠河县，内蒙古锡林郭勒盟，新疆青河县；强寒潮东北地区最高在东岗镇达112次，华北地区最高在西乌珠穆沁旗达90次，西北地区最高为青河县达95次，活跃区分布在吉林省的靖宇县、安图县、抚松县，黑龙江铁力市，内蒙古阿尔山市、苏尼特右旗、西乌珠穆沁旗、新疆阿勒泰地区北部；而特强寒潮东北地区发生的频次最高在东岗镇达8次，华北地区最高西乌珠穆沁旗频次达13次，西北地区最高为青河县频次达22次，其活跃区主要在内蒙古西乌珠穆沁旗，新疆阿勒泰地区北部，甘肃省的景泰县，其中阿勒泰地区的青河县平均2.6年发生一次特强寒潮。

2.2 频次的时间变化特征

根据寒潮发生标准，对中国北方地区269个站点近58年来寒潮频次总和及逐年寒潮频次加权平均，得到北方地区近58年共发生159.7次寒潮，年平均寒潮频次 $2.8\text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ ，寒潮频次出现最多的是

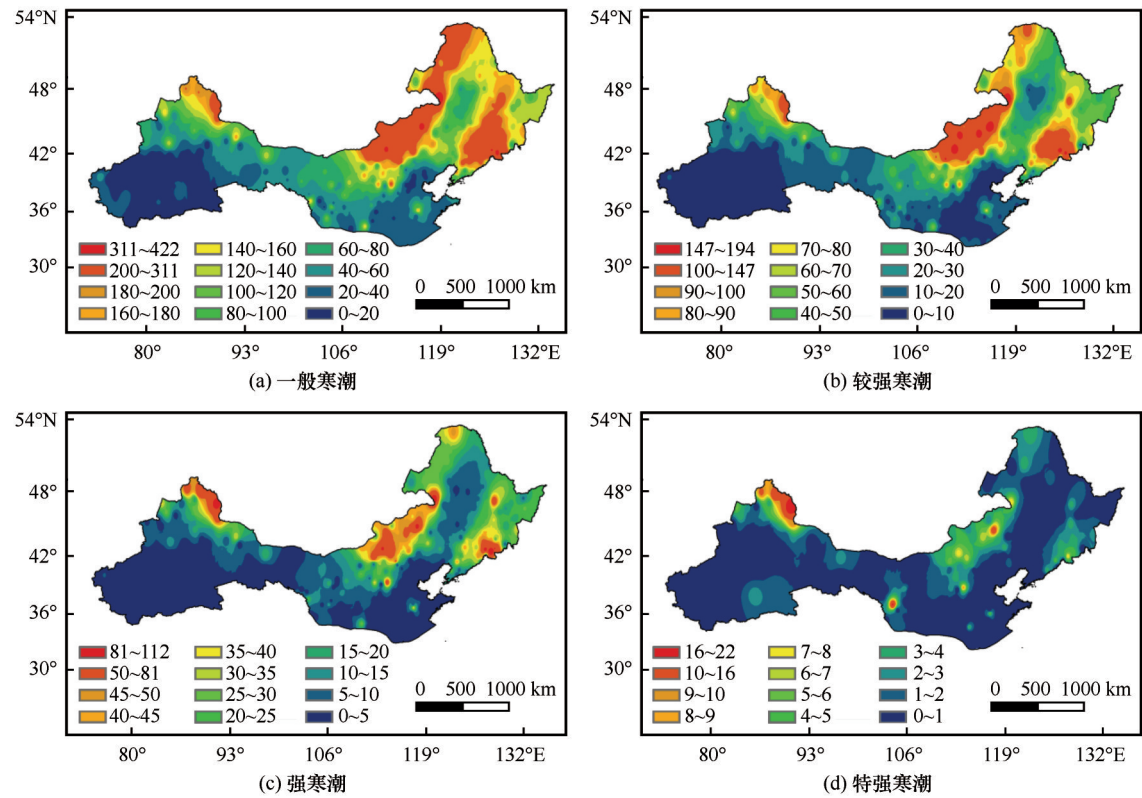


图2 近58年中国北方地区四种类型寒潮发生频次空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the four kinds of cold wave frequencies over northern China, 1960 – 2017

1966年, 5.2次, 2007年寒潮频次最少, 1.3次。从北方地区1960 – 2017年寒潮频次逐年序列及线性趋势[图3(a)]明显的看出, 1960 – 2017年中国北方地区寒潮频次总体呈递减的趋势, 递减的速度为 $0.20 \text{次} \cdot (10\text{a})^{-1} (P < 0.01)$ 。其中, 1960 – 1966年寒潮频次明显增加, 1967 – 1984年寒潮频次在波动中减少, 1985 – 1987年寒潮频次出现跃增, 1989 – 1993年又呈减少趋势, 1994年后略微上升后波动下降, 这与不同区域在全球大背景下寒潮频次变化

的研究结果相同^[31-38]。对北方地区269个站点近58年来寒潮频次变化趋势进行逐一分析, 趋势值的绝对值大小用三角形的大小进行标注, 通过0.05显著性检验站点用空心方框进行标注, 得到1960 – 2017年北方地区各站点寒潮频次年际变化趋势系数显著性检验分布[图3(b)], 由图可见, 北方大部分地区寒潮频次变化趋势为负值, 有一半以上的地区通过了95%显著性检验, 且寒潮减弱趋势比较显著的地方集中分布在东北地区。

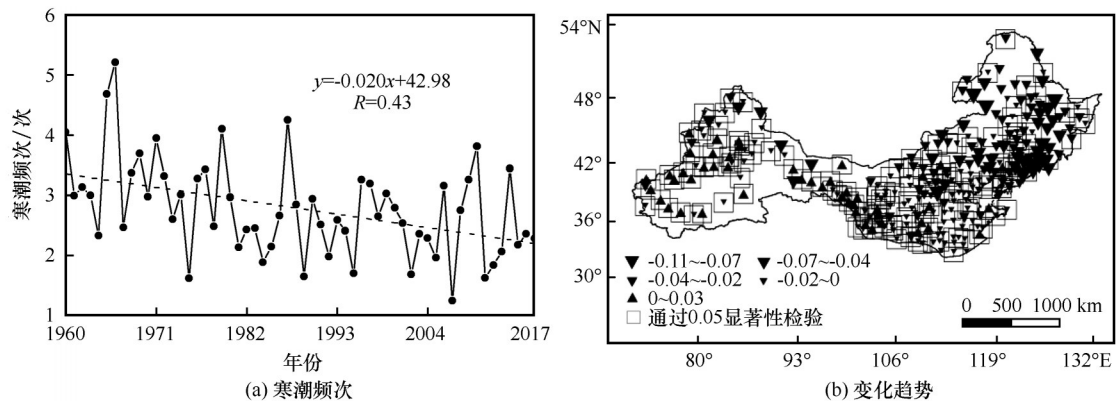


图3 1960 – 2017年中国北方地区寒潮频次逐年序列及线性趋势(a)与各站点寒潮频次年际变化趋势系数显著性检验分布(b)

Fig. 3 Time series and linear trend of cold wave frequency (a) and significance test distribution of annual variation trend of cold wave frequency (b) in northern China, 1960 – 2017

从年代际分布来看(表2), 20世纪60年代寒潮频次出现最多, 平均 $3.5\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$, 其次是70年代, 平均 $3.0\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$, 2000–2009年寒潮频次出现最少, 平均 $2.4\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$, 一般寒潮、较强寒潮、强寒潮与寒潮总频次年代际分布基本一致, 20世纪60年代到80年代寒潮频次逐渐减少, 90年代寒潮发生频次略有增加, 但仍低于20世纪60年代和70年代, 进入21世纪后再次减少, 特强寒潮出现最少, 58年仅1.3次, 其中2000–2009年和20世纪60年代、70年代

均为0.3次, 20世纪90年代0.2次, 2010–2017年和20世纪80年代均为0.1次。四季寒潮频次以冬季出现最多, 共65.5次, 占全年寒潮频次的41%; 其次为秋季, 共50.2次, 占比31.4%; 春季位居第三, 共43.9次, 占比27.5%; 夏季最少仅0.1次, 占比0.06%。月尺度寒潮发生频次以11月份最多, 共31.2次, 其次是12月份和1月份, 6月份和8月份仍然有少数地区出现寒潮, 7月份除了新疆的巴里坤和吐尔尕特, 其它地区几乎没有寒潮出现(表3)。

表2 1960–2017年北方地区不同强度等级寒潮出现频次

Table 2 The number of cold wave of different grades in northern China from 1960 to 2017

	1960–1969年	1970–1979年	1980–1989年	1990–1999年	2000–2009年	2010–2017年
一般寒潮	21.7	19.3	16.6	17.0	15.3	13.0
较强寒潮	9.0	7.7	6.5	6.5	6.1	5.0
强寒潮	3.6	3.0	2.1	2.4	2.1	1.5
特强寒潮	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1
合计	34.6	30.3	25.3	26.1	23.8	19.6

表3 北方地区各月近58年寒潮频次总和

Table 3 Monthly frequency distribution of average cold waves in northern China from 1960 to 2017

月份	1	2	3	4	5	9	10	11	12
频次/次	21.1	17.2	15.8	20.6	7.5	3.2	15.8	31.2	27.2

2.3 频次空间变化特征

由北方地区寒潮频次空间分布可以看出(图4), 中国北方地区寒潮频次差距较大, 寒潮频次较高的地区出现在吉林省的靖宇县、抚松县, 内蒙古的阿尔山市、苏尼特左旗、苏尼特右旗、西乌珠穆沁旗, 寒潮频次都在508次以上, 平均每年8.8次, 寒潮频次较少的区域集中在新疆的阿克苏和喀什地区, 华北地区的天津、北京、江苏、河南、河北南部地区以及山东的东南部地区, 总体来说, 中国北方地区寒潮频次呈由南向北递增的分布规律, 活跃区分布集中在东北地区, 西北新疆的阿勒泰地区, 华北的内蒙古中部地区。

2.4 大气环流的影响

大气环流是全球气候异常的主导因子, 极地作为北半球冷源所在, 其气候系统的变化会导致中高纬大气环流的异常, 从而对欧亚大陆中高纬地区天气形势和气候特征产生影响^[18], 极地强冷高压气团积累加强, 在适宜的高空大气环流配置下, 大规模向南侵袭, 引发大范围气温骤降和气象灾害。为了探讨中国北方寒潮频次变化的影响因子, 选取了与

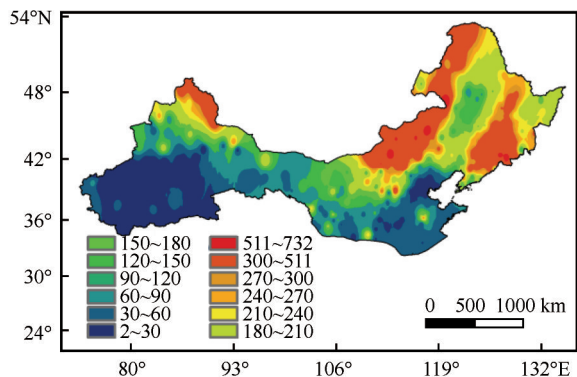


图4 1960–2017年中国北方地区寒潮频次空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of cold wave frequency in northern China from 1960–2017

研究区气温变化紧密相关的大气环流因子冷空气指数(CA)、东亚大槽指数(CQ)、亚洲区极涡面积指数(APVAI)、西伯利亚高压指数(SHI)、青藏高原指数(TPI)、北极涛动指数(AO)、亚洲区极涡强度指数(APVII)与近58年中国北方地区寒潮频次变化进行相关性分析(表4)。

结果表明, 近58年来, 中国北方地区寒潮频次变化受AO、APVAI、CA和APVII影响最大, 与这四个环流因子均呈显著的正相关关系, 相关系数分别为−0.425、0.434、0.538、0.477, 均通过0.01显著性检验, 除此之外, 中国北方地区寒潮活动还受到SHI、CQ的影响, 与SHI呈显著正相关关系, 与CQ呈负相关。各季节受环流因子的影响有

所差别,其中春季寒潮活动主要受CQ和CA的影响,相关系数分别为 $-0.292(P<0.05)$ 、 $0.306(P<0.05)$;秋季寒潮主要受APVII、CA、AO指数的影响,相关系数分别为 $0.391(P<0.01)$ 、 $0.269(P<0.05)$ 、 $-0.297(P<0.05)$;冬季寒潮活动受AO、SHI、CA、APVII影响最大,相关系数分别为

-0.398 、 0.395 、 0.458 、 0.450 ,各环流因子均通过了 0.05 以上的显著性检验水平,显然,大气环流对研究区寒潮频次变化影响较大。基于以上研究,文章对研究区寒潮频次变化的相关环流因子做进一步变化特征分析,以获取更加详细的事实。

表4 中国北方地区寒潮频次变化影响因子的相关性分析
Table 4 The correlation analysis of interannual cold waves in northern China

	TPI	AO	SHI	CQ	CA	APVAI	APVII
全年	0.034	-0.425^{**}	0.297^{*}	-0.170	0.538^{**}	0.434^{**}	0.477^{**}
春季	-0.206	-0.176	0.236	-0.292^{*}	0.306^{*}	0.034	0.195
秋季	0.178	-0.297^{*}	0.045	-0.173	0.269^{*}	0.176	0.391^{**}
冬季	0.204	-0.398^{**}	0.395^{**}	-0.171	0.458^{**}	0.175	0.450^{**}

注: *、**分别表示通过 0.05 、 0.01 显著性检验。

侵入我国北方地区的寒潮主要是集聚在北极、西伯利亚及蒙古的冷高压爆发南下形成,因此,最先探讨北方寒潮频次变化是否与西伯利亚强度变化有关。通过研究西伯利亚高压强度指数与北方寒潮频次变化的相关性,其相关性在冬季和年尺度达到显著相关,在春秋季节相关性并不显著,其最主要的原因因为西伯利亚高压在冬季强度相对较强,而春秋季节较弱,这与相关学者的研究相一致^[16]。龚道溢等^[39]建立了西伯利亚高压强度近百年时间序列,得出西伯利亚高压在1960年代最强,从1980年代后期到1990年代强度减弱。其年代际变化与前文中北方寒潮频次变化相一致,因此,中国北方寒潮频次减少可能与西伯利亚强度的减弱有关。

北极涛动是北半球中、高纬气压反向增长的一种环流模态,其主要通过影响东亚大槽、西伯利亚高压等区域性的大气环流,从而对中国气候产生影响,近年来北极涛动指数呈增强趋势(图5),其正负相位在1989年前后发生突变性的转折,北方寒潮频次在这一年显著减少,1960-1989年北极涛动指数呈增加趋势,极地冷高压减弱,中纬度的偏低压加强,极地冷气团被限制向南扩展,东亚大槽强度和西伯利亚高压减弱,侵入中国的冷空气次数相对减少,与文章北方寒潮频次变化相一致,1989年后北极涛动指数呈减少趋势,东亚的大槽强度和西伯利亚高压增强,冷空气更容易向南倾泻,与本文中国北方地区寒潮频次在1989年后有所增加相符合,以上分析说明,北极涛动指数是影响中国北方寒潮频次变化重要的因素。

极涡是极区大尺度冷性环流系统,大规模强冷

空气的表征,极涡的位置移动、面积大小、强度的变化都可以对中高纬地区天气形势产生影响^[40],亚洲区绕极涡环流异常与东南亚及我国气候变异有密切关系,极涡环流系统在冬季最强,夏季最弱,近58年,亚洲区极涡面积呈显著减少趋势,极涡强度也呈减弱趋势,与北方寒潮频次的变化较为相吻合的正向相关,当亚洲区极涡面积缩小(扩大),北方寒潮频次偏少(偏多),亚洲区极涡强度减弱(增强),寒潮频次偏少(偏多)。

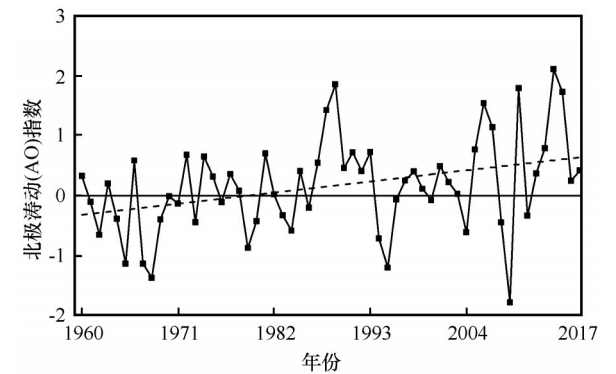


图5 1960-2017年AO指数序列
Fig. 5 Arctic Oscillation index series from 1960 to 2017

3 风险区划

应用气象灾害风险评估的原理,对北方地区寒潮灾害进行风险区划,致灾因子危险性是指引起寒潮灾害的活动频率和强度特征,孕灾环境敏感性是指孕育寒潮灾害的自然地理环境在遭受灾害时的灵敏度,承灾体易损性是指承灾体承受致灾因子造成损失的反应表现,防灾减灾能力是指研究区对寒

潮灾害的防御能力和恢复的程度。因此,选取寒潮频次、强度作为致灾因子危险性风险评估因子;研究区海拔高度、纬度作为孕灾环境敏感性风险评估因子;地区农作物播种面积、耕地面积、人口密度作为承灾体易损性风险评估因子;人均GDP作为防灾减灾能力风险评估因子。标准化处理选取的

各指标数据,进而采用熵权法赋予权重,综合加权评价法计算各指标因子综合得分,规范后的数据用ArcGIS10.2插值在研究区域上,应用自然断点法划分为五个等级的风险区,得到中国北方地区寒潮致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性、防灾减灾能力等级分布图(图6)。

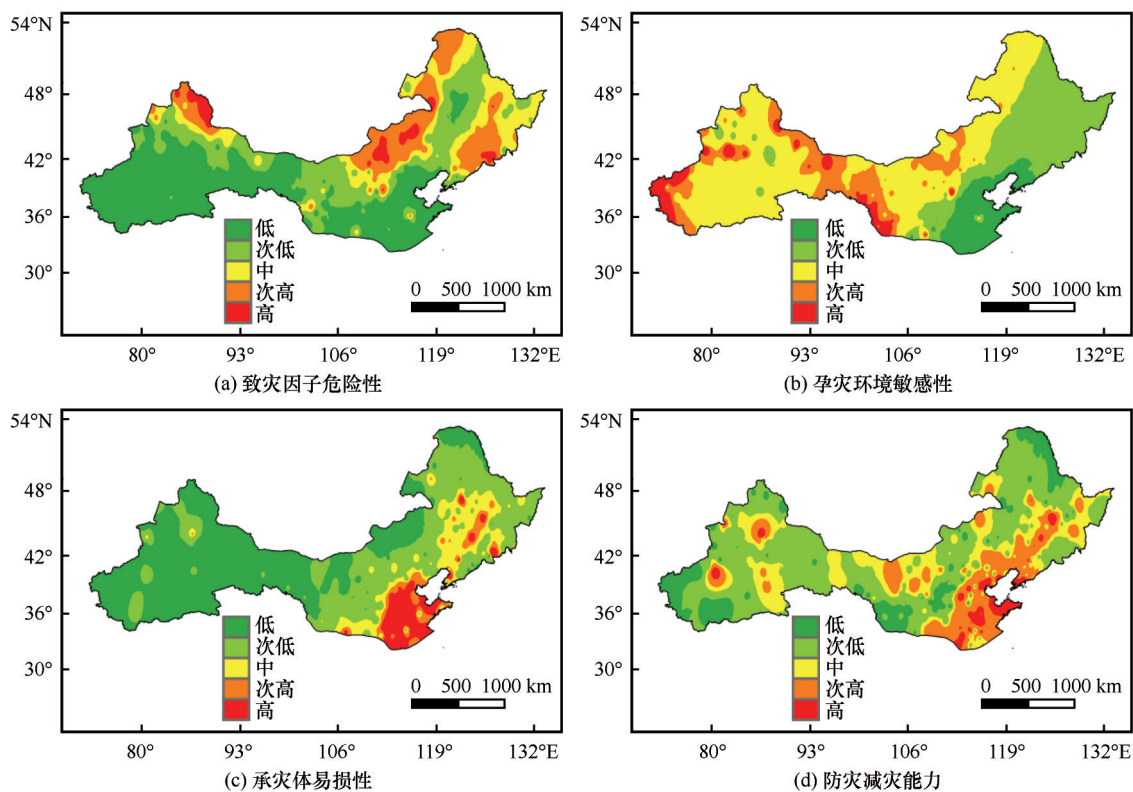


图6 中国北方寒潮灾害风险区划

Fig. 6 Zoning map of disaster risk of cold wave in northern China

由图6(a)可知,中国北方地区寒潮致灾因子危险性等级分布特征,其中高风险区分布在新疆阿勒泰地区,内蒙古锡林郭勒盟和吉林省白山市、吉林市、辽源市;低风险区位于新疆中部和南部地区,甘肃省,陕西省,宁夏回族自治区,华北南部地区,内蒙古中部地区和兴安盟,黑龙江齐齐哈尔市、大庆市和黑河市西北部,吉林省白城市。

由图6(b)可以看出,中国北方地区寒潮孕灾环境的高敏感区分布于新疆的喀什、阿图什、库尔勒和静县、伊宁南部、哈密北部和东部,甘肃省,内蒙古呼和浩特市;低敏感区位于华北南部和辽宁南部。

由图6(c)可知,中国北方地区寒潮承灾体易损性高风险区分布在山东,江苏,安徽,河南东部,河北南部,吉林省安图县和长春市西部地区;低风险

险区位于新疆,甘肃,内蒙古巴彦淖尔盟、锡林郭勒盟和阿拉善盟西部,黑龙江大兴安岭地区。

由图6(d)可以看出,中国北方地区寒潮防灾减灾能力的高风险区分布在新疆和田、喀什、阿图什、阿勒泰、伊宁市和哈密地区,甘肃省,内蒙古阿巴嘎旗、兴安盟和呼伦贝尔中部和东部地区,山西省北部和中部地区,黑龙江黑河市和大兴安岭地区,吉林省白山市;低风险区出现在山东、天津、北京、河南东部地区和辽宁大连。

本文在对中国北方地区寒潮灾害从致灾因子、孕灾环境、承灾体易损性、防灾减灾能力进行风险区划的基础上,标准化处理所有选取的指标因子,进而采用熵权法赋予权重,加权综合评价法计算得到每个指标因子的综合得分(图7),自然断点法划分为五个等级的风险区,得到中国北方地区寒潮灾

害综合风险区划图(图8)。

风险区划结果显示,中国北方地区寒潮灾害综合高风险区分布于新疆阿勒泰地区,山东,江苏,天津,河南东部地区,河北南部地区,安徽阜阳,内蒙古呼和浩特、包头市、呼伦贝尔市和锡林郭勒盟东部,辽宁东部,吉林中部和东部地区,黑龙江大兴安岭地区、伊春市、佳木斯市西部、鹤岗市西部和中部地区、黑河市东北部地区;低风险区分布在新疆喀什地区和田东部地区,综合风险等级评估的结果与寒潮频次、强度的空间分布大体相一致。

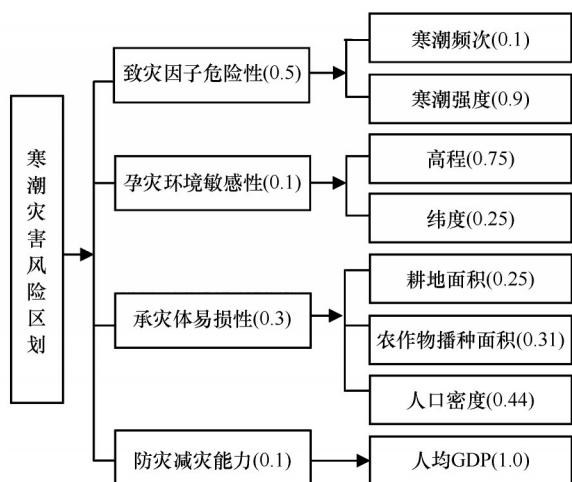


图7 中国北方寒潮灾害风险评价指标体系及其权重值
Fig. 7 The evaluation indicator system and weight values of cold wave in northern China

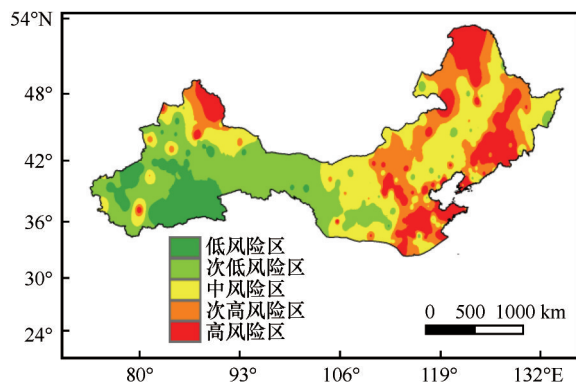


图8 1960-2017年中国北方寒潮灾害综合风险区划图
Fig. 8 Comprehensive risk zoning map of cold wave in northern China, 1960-2017

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)近58年来中国北方地区寒潮频次以0.20

次·(10a)⁻¹速度减少,与全球大背景下不同区域的研究结果相同,且减少趋势比较明显的地区集中在东北地区。近58年北方地区共发生了159.7次寒潮,冬季寒潮频次最多65.5次,十一月份寒潮频次最多31.2次。

(2)从寒潮频次的类型和强度看,中国北方地区寒潮频次差距较大,四种类型寒潮中以一般寒潮频次最多,共102.9次,其活跃区主要在新疆青河县,吉林省的白山市、吉林市和通化市以及内蒙古的锡林郭勒盟、乌兰察布盟、额尔古纳市;其次是较强寒潮频次,40.8次,活跃区在黑龙江漠河县,吉林省靖宇县和抚松县,内蒙古锡林郭勒盟;强寒潮14.7次,活跃区分布在,新疆阿勒泰,吉林省靖宇县和安图县;而特强寒潮发生的频次1.3次,其活跃区主要在阿勒泰地区,阿勒泰地区的青河县特强寒潮频次达22次,平均2.6年就会发生一次特强寒潮。

(3)中国北方地区寒潮频次差异显著,寒潮频次较高的地区出现在吉林省的靖宇县、抚松县以及内蒙古的阿尔山市、苏尼特左旗、苏尼特右旗、西乌珠穆沁旗,频次高达508次以上,平均每年8.8次,寒潮频次较少的区域集中在新疆的阿克苏和喀什地区,天津、北京、江苏、河南、河北南部地区以及山东的东南部地区,大体呈由南向北增加的趋势,与四种类型寒潮频次的空间分布十分相似。

(4)近58年来,中国北方地区的寒潮频次年尺度变化受AO、CA、APVAI和APVII影响最大,与这四个环流因子均呈显著的相关关系,各季节寒潮频次变化受环流因子的影响有所差异,春季寒潮主要受CA和CQ驱动,秋季寒潮与CA、APVII、AO关系显著,冬季寒潮受CA、APVII、SHI、AO的影响最大,与各环流因子均通过0.05以上显著性检验,显然,大气环流对北方地区寒潮频次变化影响较大。

(5)中国北方寒潮灾害综合风险的评估结果表明,高风险区分布于新疆阿勒泰地区,山东,江苏,天津,河南东部地区,河北南部地区,安徽阜阳,内蒙古呼和浩特、包头市、呼伦贝尔市和锡林郭勒盟东部,辽宁东部,吉林中部和东部地区,黑龙江大兴安岭地区、伊春市、佳木斯市西部、鹤岗市西部和中部地区、黑河市东北部地区;低风险区分布在新疆喀什地区和田东部地区,综合风险等级评估的结果与寒潮频次、强度的空间分布大体相一致。

4.2 讨论

本文对中国北方地区 1960 – 2017 年寒潮频次、强度、寒潮频次的年际变化趋势、寒潮频次的空间分布进行分析可得, 研究区寒潮频次总体呈减少趋势的结论与已有学者对中国北方单个区域寒潮的研究相一致^[32–38]; 文中得到的中国北方寒潮高频次, 特强寒潮及寒潮频次的活跃区与实际情况相吻合; 通过探讨了大气环流因子对中国北方地区寒潮频次变化趋势的影响, 发现中国北方地区寒潮频次变化与大气环流直接相关, 这与研究区距离北半球蒙古冷高压中心位置的远近是相一致的。但是, 在气候全球变暖的大背景下, 各种极端异常天气的爆发也会导致寒潮频次、强度的变化, 限于现有时间资料我们没有进一步做探讨, 为了提高对寒潮活动的认识, 更好的掌握寒潮活动规律, 对寒潮活动进行更加准确的预报, 以便提高对寒潮的灾害风险评估与防御, 我们应对寒潮的影响因素和活动变化规律做出更多研究。最后本文对中国北方地区寒潮从防灾减灾、孕灾环境、致灾因子、承灾体进行风险评估, 得出研究区寒潮灾害风险区划等级, 虽然总体寒潮风险区划评估结论与寒潮频次的空间分布相一致, 但研究区范围辽阔, 跨越东北、华北、西北地区以及诸多省份, 受各地区社会经济长序列统计资料来源精度及缺失影响, 我们仅用了 2011 – 2017 年的统计资料和一些指标, 难以实现高精度的风险区划, 在今后的研究中还需进一步完善。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global temperature change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(39): 14288 – 14293.
- [3] Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D5): 109.
- [4] Dai Sheng, Bao Guangyu, Qi Guiming, et al. Impacts of extreme climatic events under the context of climate warming on hydrology and water resources in the Qinghai Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1053 – 1066. [戴升, 保广裕, 祁贵明, 等. 气候变暖背景下极端气候对青海祁连山水文水资源的影响 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1053 – 1066.]
- [5] Li Xianzhi. A study of cold wave in East Asia [M]//*Offprints of Scientific Works in Modern China: Meteorology (1919 – 1949)*. Beijing: Science Press, 1955: 35 – 117. [李宪之. 东亚寒潮侵袭的研究 [M]//中国近代科学论著选刊——气象学 (1919 – 1949). 北京: 科学出版社, 1955: 35 – 117.]
- [6] Tao Shiyan. A synoptic and aerological study on a cold wave in the far east during the period of the break down of the blocking situation over Euroasia and Atlantic [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1957, 28(1): 63 – 74. [陶诗言. 阻塞形势破坏时期的东亚一次寒潮过程 [J]. *气象学报*, 1957, 28(1): 63 – 74.]
- [7] Zhang Jijia, Peng Yongqing, Wang Dingliang. The application of Fourier and spherical harmonics to medium-range forecasting of cold wave [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1982, 5(1): 9 – 14. [章基嘉, 彭永清, 王鼎良. 球谐函数展开在寒潮中期预报上的应用 [J]. *南京气象学院学报*, 1982, 5(1): 9 – 14.]
- [8] Liu Yi, Qiu Yongyan. A case study of cold wave in East Asia using trajectory techniques [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, 50(1): 60 – 71. [刘怡, 仇永炎. 用轨迹法研究寒潮个例 [J]. *气象学报*, 1992, 50(1): 60 – 71.]
- [9] Gao Shouting, Tao Shiyan, Ding Yihui. Upper Wave-East Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(6): 718 – 724. [高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用 [J]. *大气科学*, 1992, 16(6): 718 – 724.]
- [10] Xu Genghui. Medium-term forecast scheme for cold wave [J]. *Meteorological Monthly*, 1985, 11(2): 6 – 10. [徐羹慧. 寒潮中期预报方案 [J]. *气象*, 1985, 11(2): 6 – 10.]
- [11] Chen Jing, Sang Zhiqin. A technique of dynamic-statistics interpretation of NWP and cold wave prediction [J]. *Meteorological Monthly*, 1998, 24(2): 34 – 38. [陈静, 桑志勤. 数值预报产品动力 – 统计释用方法与寒潮预报 [J]. *气象*, 1998, 24(2): 34 – 38.]
- [12] Jeong J H, Ho C H. Changes in occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(14): 256 – 257.
- [13] Chen J C, Li C. The East Asia winter monsoon [M]. *East Asian Monsoon*, 2004: 54 – 106.
- [14] Tu Qipu, Deng Ziwan, Zhou Xiaolan. Study on the regional characteristics of air temperature abnormal in China [J]. *Acta Meteorology Sinica*, 2000, 58(3): 288 – 296. [屠其璞, 邓自旺, 周晓兰. 中国气温异常的区域 [J]. *气象学报*, 2000, 58(3): 288 – 296.]
- [15] Wang Hongyu, Gong Qiang, Sun Fenghua, et al. Temperature anomaly features in Northeast China and East of North China and primarily analysis of its mechanism [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(6): 1024 – 1033. [汪宏宇, 龚强, 孙凤华, 等. 东北和华北东部气温异常特征及其成因的初步分析 [J]. *高原气象*, 2005, 24(6): 1024 – 1033.]
- [16] Wang Zunya, Ding Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6): 1068 – 1076. [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, 30(6): 1068 – 1076.]
- [17] Qian Weihong, Zhang Weiwei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 Years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1266 – 1278. [钱维宏, 张玮玮. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖 [J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1266 – 1278.]
- [18] Li Feng, Jiao Meiyang, Ding Yihui, et al. Climate change of Arctic atmospheric circulation in last 30 years and Its effect on strong cold events in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(2): 209 – 219. [李峰, 矫梅燕, 丁一汇, 等. 北极区近 30 年环流的变化及对中国强冷事件的影响 [J]. *高原气象*,

- 2006, 25(2): 209 – 219.]
- [19] Labajo A L, Egidio M, Martin Q, et al. Definition and temporal evolution of the heat and cold waves over the Spanish central plateau from 1961 to 2010[J]. *Atmósfera*, 2014, 27(3): 273 – 286.
- [20] Spinoni J, Lakatos M, Szentimrey T, et al. Heat and cold waves trends in the Carpathian region from 1961 to 2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(14): 4197 – 4209.
- [21] Ceccherini G, Russo S, Ameztoy I, et al. Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: the case of South America[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2016, 16(3): 821 – 831.
- [22] Capozzi V, Budillon G. Detection of heat and cold waves in Montevergine time series (1884 – 2015)[J]. *Advances in Geosciences*, 2017, 44: 35 – 51.
- [23] Mo Dongxue, Hou Yijun. Study on the growth of wind wave frequency spectra generated by cold waves in the northern East China Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(5): 1509 – 1526.
- [24] Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1951 – 1980 and 1981-2010[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 987 – 997. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 中国 1951-1980 年及 1981 – 2010 年的气候区划[J]. *地理研究*, 2013, 32(6): 987 – 997.]
- [25] He Chunyang, Shi Peijun, Li Jinggang, et al. Scenarios simulation land use change in the northern China by system dynamic model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 599 – 607. [何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 599 – 607.]
- [26] Wang Ling, Xie Xianqun, Su Wen, et al. Changes of maximum and minimum temperature and their impacts in northern China over the second half of the 20th century[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 337 – 343. [王菱, 谢贤群, 苏文, 等. 中国北方地区 50 年来最高和最低气温变化及其影响[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 337 – 343.]
- [27] Luo Ji, Dai Junmei, Yang Hu, et al. Climatic characteristics of cold wave in Xinjiang during the period of 1971 – 2014[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 309 – 315. [罗继, 代君梅, 杨虎, 等. 1971 – 2014 年新疆区域寒潮气候特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 309 – 315.]
- [28] Meng Xiangjun, Wu Zhengfang, Du Haibo, et al. Spatio-temporal characteristics of cold wave over northeast China during 1961 – 2010[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(1): 142 – 147. [孟祥君, 吴正方, 杜海波, 等. 1961 – 2010 年东北地区寒潮活动的时空特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 142 – 147.]
- [29] Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. The spatial-temporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 1013 – 1024. [刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 近 53 年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素[J]. *地理学报*, 2014, 69(7): 1013 – 1024.]
- [30] Yan Qi, Lu Jinglong, Tian Li, et al. Spatial and temporal distributions of cold wave from 1971 to 2011 in Liaoning province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014, 30(4): 63 – 69. [阎琦, 陆井龙, 田莉, 等. 1971 – 2011 年辽宁寒潮时空分布特征[J]. *气象与环境学报*, 2014, 30(4): 63 – 69.]
- [31] Wei Fengying. The characteristics of the variation of the cold wave in China under the background of climate warming[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(3): 289 – 295. [魏凤英. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(3): 289 – 295.]
- [32] Zhao Yuguang, Yu Changwen, He Lihua, et al. Climatic characteristics of cold wave weather and warming winter in Hebei province during 1962 – 2008[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2012, 30(2): 244 – 248. [赵玉广, 于长文, 何丽华, 等. 河北省寒潮的气候特征与冬季增暖[J]. *干旱气象*, 2012, 30(2): 244 – 248.]
- [33] Chen Yuying, Chen Nan, Ma Jingren, et al. Variety of Ningxia cold waves in the last 48 years and its possible reasons[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(6): 939 – 951. [陈豫英, 陈楠, 马金仁, 等. 近 48 a 宁夏寒潮的变化特征及可能影响的成因初步分析[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(6): 939 – 951.]
- [34] Mansu Sabit. Climatic characteristics of cold wave and its impact on agriculture in southern Xinjiang in recent 60 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2145 – 2152. [满苏尔·沙比提. 南疆近 60 a 来寒潮气候特征及其对农业生产的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(12): 2145 – 2152.]
- [35] Zheng Yuping, Gong Hengrui. Climatic characteristics of cold wave in Urumqi[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, 9(6): 56 – 61. [郑玉萍, 宫恒瑞. 乌鲁木齐市寒潮气候特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(6): 56 – 61.]
- [36] Chai Zhonghua, Liu Puxing. Spatial and temporal variations and their causes for the cold period in China's oases during 1960 – 2014[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 743 – 753. [柴中华, 刘普幸. 1960 – 2014 年中国绿洲严寒期的时空变化特征与成因分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 743 – 753.]
- [37] Tang Mengqi, Zeng Gang. Decadal variability of spring cold wave across northeast China in the past 30 years and its possible causes[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22(4): 473 – 486. [唐孟琪, 曾刚. 近 30 多年中国东北地区春季寒潮的年代际变化及其可能原因[J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(4): 473 – 486.]
- [38] Zhang Jian, Xu Liling, Ban Jin, et al. Characteristics and prediction method of first frost of ground in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(3): 629 – 636. [张健, 许丽玲, 班晋, 等. 黑龙江省初霜冻变化特征研究及预测方法[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(3): 629 – 636.]
- [39] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 559 – 568. [龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 559 – 568.]
- [40] Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Principle and methods of synoptic meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992: 266 – 296. [朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 266 – 296.]

The temporal and spatial characteristics and genesis of cold wave in northern China

QIAO Xuemei, LIU Puxing

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the observation data of daily temperature of 269 sites and atmospheric circulation index in northern China from 1960 to 2017, linear regression, correlation analysis, inverse distance interpolation (IDW) and entropy weight method are used to, the temporal and spatial variation characteristics of cold wave frequency in northern China in the last 58 years and its causes were discussed, and then using the socio-economic statistics such as cultivated land area, per capita GDP and sown area of crops in the study area, the risk regionalization of cold wave in northern China was evaluated and analyzed from four aspects, including risk factors, environmental sensitivity, carrier vulnerability, disaster prevention and reduction ability. The results show that in the last 58 years, the frequency of cold wave in northern China decreased 0.20 times per 10 years, a total of 159.7 cold tides occurred in the last 58 years, of which the frequency of cold wave in winter and November was the most, and the maximum frequency appears in Jingyu County, Antu County of Jilin Province, Aershan City, Sonid Left Banner, Sonid Right Banner of Inner Mongolia Autonomous region, frequency up to 508 times, an average of 8.8 times a year, the minimum frequency of cold waves occurred in the south of north China, Kashi and Akesu City of Xinjiang Uygur Autonomous region. There is a big difference in the frequency of cold wave in different grades, the general cold wave frequency is the most, total 102.9 times, the general cold wave, the stronger cold wave, the strong cold wave and extra-heavy cold wave is similar to the cold wave frequency in spatial distribution, and generally shows the distribution law of increasing from south to north. The northeast region is the active region of cold wave, the northwest active region of cold wave is mainly in Aletai of Xinjiang Uygur Autonomous region, the North China active region is in central Inner Mongolia Autonomous region. On annual scale, the cold wave in northern China was dominated by CA, APVII, AO and APVAI, while the influence factors among seasons were detected, spring cold wave is mainly affected by CQ and CA, and the autumn cold wave was significantly correlated with APVII, CA and AO, while winter cold wave was significantly correlated with APVII, CA, AO and SHI. The comprehensive risk regionalization shows that the Aletai region of Xinjiang Uygur Autonomous region, the Daxinganling region of Heilongjiang Province, the southeast of Jilin Province and Shandong Province are the high risk areas of cold wave occurrence, and the low risk areas are mainly distributed in Akesu and Kashi City of Xinjiang, it is consistent with the spatial distribution of cold wave frequency.

Key words: cold wave frequency; temporal and spatial characteristics; influencing factor; risk division; northern China

(责任编辑: 王世金; 编辑: 周成林)