

近53年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素

刘宪锋^{1,2}, 朱秀芳^{1,2}, 潘耀忠^{1,2}, 李双双^{1,3}, 张东海^{1,2}, 刘焱序⁴

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875;

3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

4. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 利用内蒙古及其周边121个气象台站1960-2013年逐日最低气温数据, 辅以分段线性回归模型、趋势分析及相关分析等方法, 本文探讨了近53年内蒙古寒潮频次的时空变化特征及其影响因素。研究发现 (1) 近53年内蒙古单站寒潮频次总体呈下降趋势, 降速为-0.5次/10a (-2.4~1.2次/10a), 其中1991年之前降速为-1.1次/10a (-3.3~2.5次/10a), 而1991年之后呈增加趋势, 增速为0.45次/10a (-4.4~4.2次/10a); 春季寒潮变化趋势与年变化趋势一致, 且在各季节中变化最为显著; 寒潮频次年内变化呈“双峰”结构特征, 且以11月最多; (2) 空间上, 内蒙古单站寒潮频次具有显著的空间差异特征, 高发区集中在内蒙古的北部和中部地区, 且北部高于中部。年代尺度对比来看, 20世纪60-90年代寒潮高频区域范围在减少、低频区域范围在增加; 而21世纪初期高频区域范围有所增加, 增加区主要为内蒙古东部的图里河、小二沟, 以及中部的西乌珠穆沁旗等地; (3) 就年尺度而言, 寒潮主要受AO、NAO、CA、APVII和CQ控制, 而各季节驱动因素有所差别, 冬季寒潮与AO、NAO、SHI、CA、TPI、APVII、CW和IZ均达到显著相关关系, 说明冬季寒潮受多种因素共同控制; 秋季寒潮主要受CA和IM影响; 而春季寒潮与CA和APVII关系显著。

关键词: 寒潮; 分段线性回归; Sen+Mann-Kendall分析法; 时空变化; 影响因素; 内蒙古
DOI: 10.11821/dlxb201407013

1 引言

极端气候事件是指某类气候要素量值或统计值显著偏离其平均态、且达到或超过其观测或统计量值区间上下限附近特定阈值的事件^[1]。与气候平均态相比, 极端气候事件的发生更具反常性、突发性和不可预见性, 其对气候变化响应也更为敏感^[2], 并将对人类社会和自然环境产生巨大而深远的影响^[3]。IPCCAR5指出, 过去60年(1951-2012)全球平均气温上升0.72℃(0.49~0.89℃)^[4], 而我国1960-2009年地表平均气温亦升高了1.38℃, 远高于全球或北半球同期增温速率^[5], 以北方增暖最为明显, 由此导致极端气候事件出现的频率和强度呈现出增加趋势^[6-7]。极端事件(如洪水、干旱、热浪和寒潮等)的增多加重了人们的担忧, 使全球气候变化问题成为全球范围内最受关注的科学问题, 并受到了国内外学者和公众的广泛关注与研究。在众多极端气候事件中, 寒潮作为最主要的极端低温事件, 其对社会经济、生态系统以及人类健康的影响最为明显也最为直接, 因而成为最主要的气象灾害之一, 受到了学者们的广泛关注。

收稿日期: 2014-05-12; 修订日期: 2014-06-22

基金项目: 国家“高分辨率对地观测系统”重大专项资助 [Foundation: Major Project of High-resolution Earth Observation System]

作者简介: 刘宪锋(1986-), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士研究生, 主要从事资源环境遥感、灾害遥感研究。

E-mail: flouxianfeng7987@163.com

通讯作者: 朱秀芳(1982-), 女, 浙江人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业监测、灾害监测、土地利用/覆盖与气候响应、地表过程建模等方向的研究。E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

随着全球气候变化课题日益受到学界高度关注, 针对寒潮等极端气候研究日益成为国内外气候变化和综合防灾减灾研究领域的热点问题^[3]。寒潮作为影响我国冬半年的主要灾害性天气, 对社会经济造成了严重的损失。我国学者李宪之先生^[8]早在 1955 年就研究了东亚寒潮爆发过程, 并将我国寒潮划分为 3 类; 随后, 陶诗言先生^[9]针对影响我国大陆的冷空气源地和侵袭路径进行了深入分析; 王遵娅^[10]和钱维宏^[11]分别对我国寒潮时空变化及其影响因素进行了深入分析, 前者认为西伯利亚高压和冬季风强度的减弱是寒潮频次减少的可能原因, 而后者指出我国寒潮频次、降温事件、升压频率和大风频次都在减少, 在一定程度上导致了冬季最低温度平均值的升高, 从而形成持续的暖冬。事实上, 我国不同区域寒潮频次呈现出不同程度的减少趋势, 且区域间差异较为显著, 甚至有些地区近年来出现增加趋势^[12-15]。在气候变暖背景下, 生态系统对极端低温事件的脆弱性逐渐增加, 因此, 关注极端低温 (如寒潮) 的时空变化特征及其归因研究对生态系统健康可持续发展显得尤为重要。

内蒙古地区以草原生态系统为主, 草原面积约占全国天然草原面积的 20%^[16]。该地区不仅是全球变化最为敏感的区域之一, 而且也是我国寒潮侵袭最为严重的地区之一。极端气候事件的增多, 增加了气象灾害的不确定性, 使农牧业生产风险在加大, 危害生态安全和粮食安全^[17]。目前, 关于内蒙古近 53 年寒潮频次的时空变化特征及其可能影响因素尚不明晰。基于上述认识, 作者站在地理视角, 利用最新气象观测资料, 辅以分段线性回归模型、Sen + Mann-Kendall 分析法以及相关分析等手段, 分析内蒙古近 53 年 (1960-2012 年) 寒潮频次的时空变化特征, 并对其影响因素进行分析, 以期为应对气候变化和综合防灾减灾提供参考依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

内蒙古地处中国北部边疆 (37°24'~53°23'N 和 97°12'~126°04'E), 是我国北方重要的生态屏障。全区气候属于干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带^[18], 其中大兴安岭和阴山山脉成为全区气候差异的重要自然分界线。植被类型从东北到西南依次为森林、草原、荒漠。同时, 内蒙古也是我国重要的畜牧业生产基地, 近几十年来, 全球气候变暖、人类活动加强等因素, 进一步加剧了生态环境的恶化程度, 且该区大部分植被处于干旱、半干旱的农牧交错地区, 生态环境十分脆弱, 从而成为对全球变化响应最为敏感的地区之一。

2.2 数据来源

为保证资料的完整性和连续性, 建立均一、稳定的气温序列, 本研究依据资料的连续性、最长时段性等标准, 共选取研究区及其周边 121 个气象台站的逐日最低气温数据, 资料时间跨度为 1960-2013 年, 所选站点均经过了严格的质量检查和控制, 包括极值检验和时间一致性检验等, 消除了非气候因素造成的影响, 以上数据源自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。个别站点缺失数据采用邻近站点插值方法进行插补, 并进行一致性检验。应说明的是, 选取邻近站点插值法的

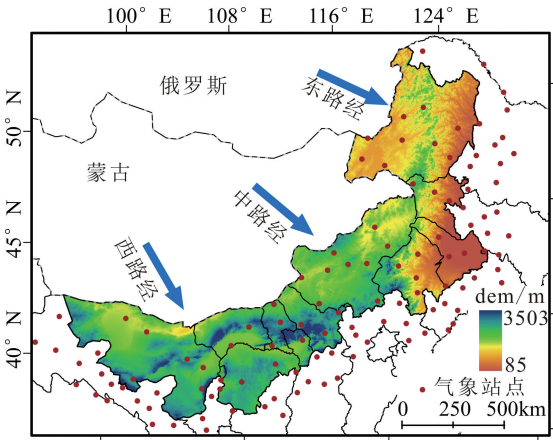


图 1 研究区概况及站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of meteorological stations

原因是由于线性回归插补方法有可能平滑掉日间温差,进而对寒潮频次计算结果造成影响。另外,本文将当年9月1日-次年5月31日范围内的寒潮次数定义为一个完整的寒潮统计年的寒潮发生频次,如1960年9月1日-1961年5月31日期间发生的寒潮次数作为1960年的寒潮频次,依此类推。

为分析内蒙古寒潮频次变化的影响因素,本文选取一系列与该区域气温变化密切相关的环流因子,作为寒潮频次变化的驱动因素,其中西伯利亚高压指数(SHI)采用NCEP/NCAR再分析资料中的逐月海平面气压数据计算获得;冷空气(CA)、青藏高原指数(TPI)、亚洲极涡强度指数(APVII)、东亚大槽强度(CQ)、东亚大槽位置(CW)、亚洲纬向环流指数(IZ)以及亚洲经向环流指数(IM)等逐月环流指数取自中国气象局国家气候中心气候变化与预测研究室发布的74项环流指数数据集;北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)等逐月指数取自美国国家海洋和大气管理局的气候预测中心(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)。

本研究中采用的生态区矢量边界数据取自世界野生动物基金会的Terrestrial Ecoregions数据(<http://www.worldwildlife.org/>),该数据将全球划分为825个生态区,其中内蒙古地区共有13个生态区^[19]。根据内蒙古的气候特征和植被分布特征,并结合前人研究成果^[20],将内蒙古分为三大生态区:东部森林生态区(I区)、中部草原生态区(II区)和西部荒漠生态区(III区)。

2.3 研究方法

2.3.1 寒潮标准定义 依据《中华人民共和国国家标准》中的《寒潮等级》(GB/T 21987-2008)和《冷空气等级》(GB/T 20484-2006)中的规定,单站寒潮定义为:某地的日最低(或日平均)气温24 h内降温幅度≥8℃,或48 h内降温幅度≥10℃,或72 h内降温幅度≥12℃,而且使该地日最低气温≤4℃的冷空气活动。区域寒潮是指一次寒潮过程中,区域内40%以上站点均发生寒潮,则定义为一次区域寒潮。由于日平均气温并非实际测得的温度,而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^[11]。因此,本文采用最低气温计算寒潮发生频次。

2.3.2 Sen趋势分析和Mann-Kendall统计检验方法 本文采用非参数化趋势度^[21]方法来计算内蒙古寒潮频次的变化趋势,并通过Mann-Kendall^[22]统计检验法对变化趋势的显著性进行检验。Sen趋势分析方法的优点是不需要样本服从一定的分布,并且不受异常值的干扰,对测量误差或离群数据具有较强的规避能力。公式如下:

$$\beta = \text{mean}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad \forall j > i \tag{1}$$

式中,β为变化趋势;i、j为时间序数;x_i、x_j分别表示第i、j时间的寒潮频次;当β>0时,表明寒潮频次呈上升趋势;当β<0时,表明寒潮频次呈下降趋势。本文中规定Mann-Kendall检验达到0.05显著水平即认为寒潮频次发生显著变化。

2.3.3 分段线性回归模型 为检测近53年内蒙古寒潮频次变化趋势的一致性,本文采用分段线性回归模型进行分析。由于该模型能够有效提取长时间序列数据变化趋势的转折点,有效弥补一元线性回归无法真实反映变化趋势的缺陷,已被广泛用于气候变化趋势分析^[23-24],公式如下:

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon, & t \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2(t - \alpha) + \varepsilon, & t > \alpha \end{cases} \tag{2}$$

式中,y表示寒潮频次;β₀为截距;β₁和β₁+β₂分别表示转折点前后的斜率;t为年份;α是检测出的时间序列转折点;ε表示残差。以上各项系数均由最小二乘法求得,并定义显著水平达到0.05,即可认为发生显著变化。

3 结果分析

3.1 寒潮的时间变化特征

3.1.1 区域尺度 1960-2012年内蒙古单站寒潮频次呈显著下降趋势(图2a), 降速为-0.5次/10a ($P < 0.01$)。由图可见, 寒潮频次变化具有明显的阶段性特征, 基于分段线性回归模型, 笔者检测出1991年为寒潮频次变化的转折点, 并分别对分段特征进行线性拟合, 结果表明: (1) 1960-1991年单站寒潮频次呈显著下降趋势, 降速达-1.1次/10a ($P < 0.01$); (2) 1991-2012年则呈增加趋势, 增速为0.45次/10a ($P = 0.21$)。我们进一步统计了持续2天和持续3天寒潮频次变化特征, 发现两者均在20世纪80年代中期发生转折, 但变化趋势存在差异: (1) 近53年持续2天寒潮频次呈显著下降趋势 (-0.016次/10a), 其中1985年之前呈极显著下降趋势 (-0.041次/10a), 1985年之后趋势并不明显; (2) 持续3天寒潮频次整体呈微弱下降趋势 (-0.0008次/10a), 但1984年之前呈显著下降趋势 (-0.014次/10a), 而之后呈显著增加趋势 (0.01次/10a)。

由于春季寒潮(如倒春寒)对当地农牧业生产造成的影响尤为严重, 我们重点分析了春季寒潮的变化趋势。图2b显示春季寒潮频次同样在1991年发生转折, 且1991年之前下降趋势为-0.5次/10a ($P < 0.01$), 高于秋季 (-0.4次/10a, $P < 0.01$) 和冬季 (-0.2次/10a, $P = 0.22$)同期趋势; 而1991年之后呈缓慢增加趋势, 同样春季 (0.165次/10a) > 秋季 (0.164次/

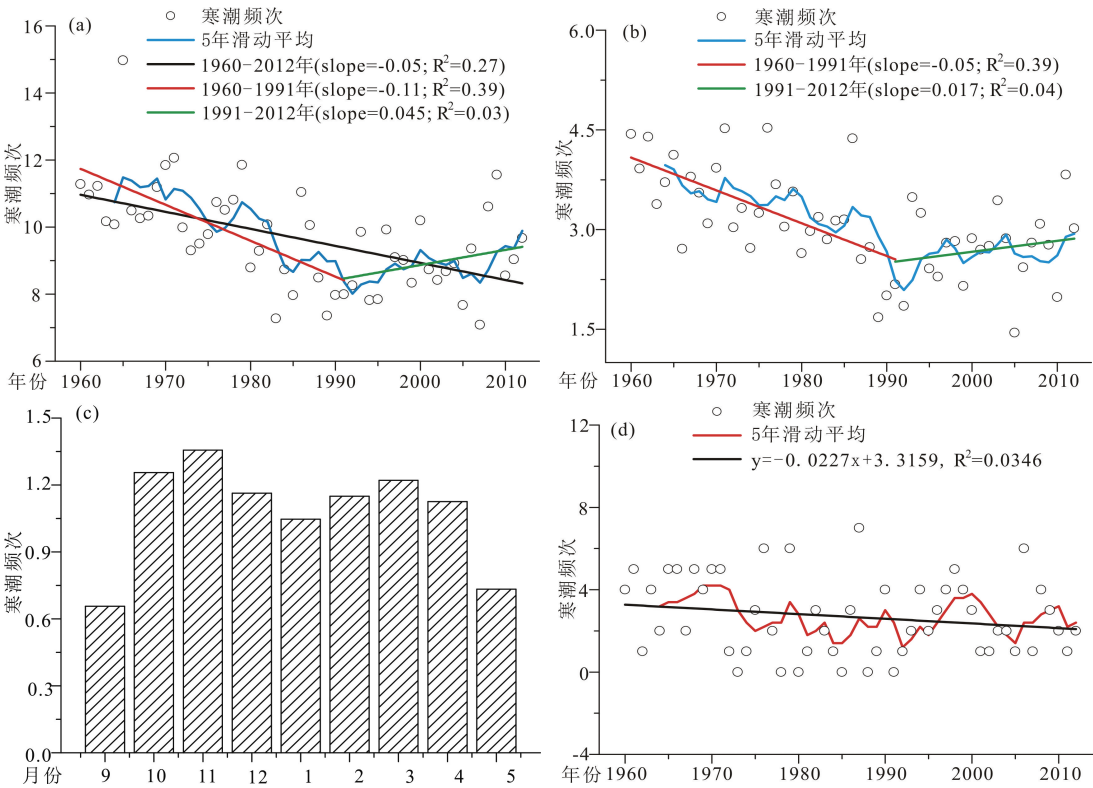


图2 1960-2012年内蒙古寒潮频次时间变化特征
(a.单站寒潮频次年际变化; b.单站寒潮频次春季变化; c.单站寒潮频次月份变化; d.区域寒潮频次变化)
Fig. 2 Temporal variation of cold surge frequency in Inner Mongolia during 1960-2012
(a. Annual variation of cold surge of single station; b. Spring variation of cold surge of single station;
c. Monthly variation of cold surge of single station; d. Regional variation of cold surge)

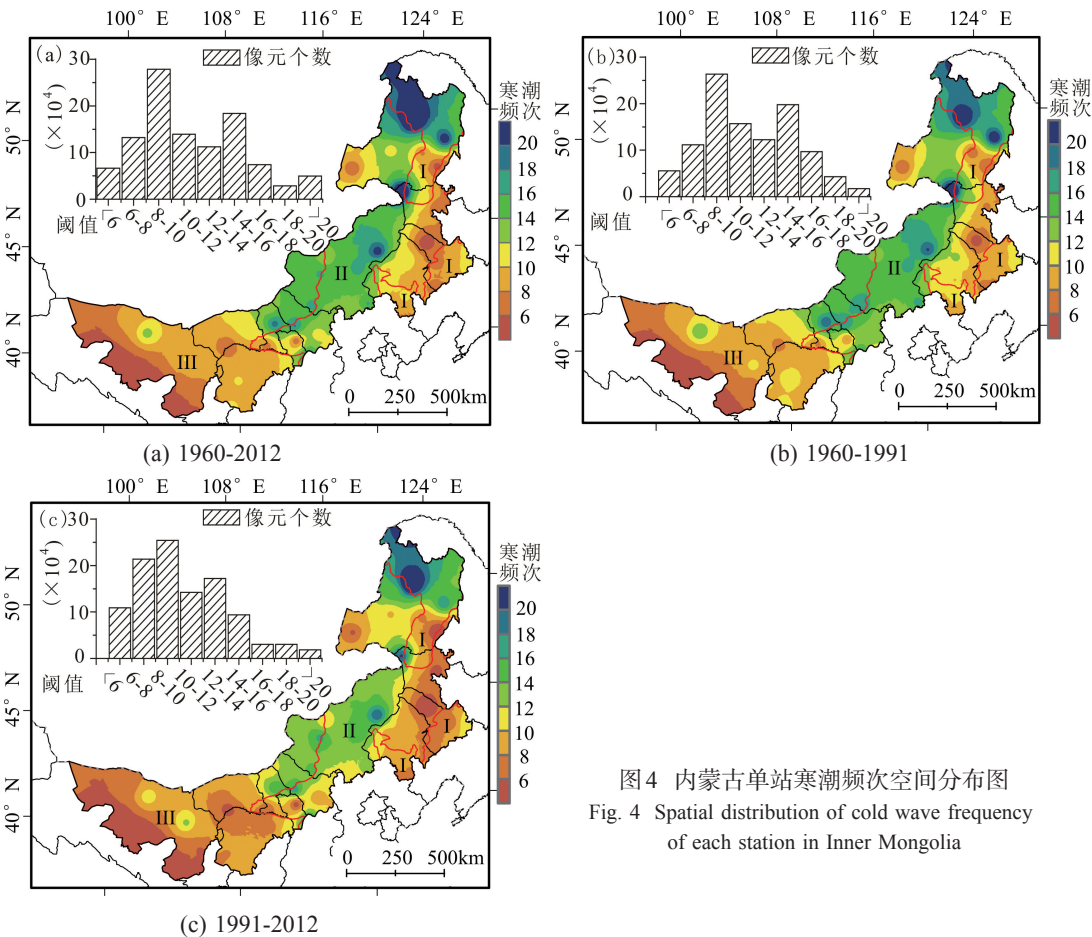


图4 内蒙古单站寒潮频次空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of cold wave frequency of each station in Inner Mongolia

珠穆沁旗近年来寒潮频次显著增加。

3.2 内蒙古寒潮空间变化特征

3.2.1 内蒙古寒潮空间分布特征 在空间上，内蒙古单站寒潮频次具有显著的空间差异，高发区主要集中在内蒙古的北部和中部地区，该区域集中位于大兴安岭西侧和阴山的北部，且北部地区寒潮频次高于中部地区 (图4a)。从频次分布图来看，近53年内蒙古单站寒潮频次呈“双峰”结构，频次在8~10次和14~16次的区域所占比例分别为26.17%和17.28%。分区结果显示，森林区寒潮频次空间差异较大，大兴安岭北部区寒潮频次在20次以上，而大兴安岭中部和西辽河平原的大部分地区寒潮频次小于10次；草原区大部分地区寒潮频次在14次以上，高值区分布在内蒙古高原东部区，以西乌珠穆沁旗地区最高；而荒漠区寒潮频次呈东北向西南递减的空间分布特征，其东部的西河套平原和内蒙古高原西部区寒潮频次在14次以上，而其西部大部分地区在10次以下。

依据分段线性回归计算结果，文中分别分析了转折点 (1991年) 前后的寒潮频次空间分布特征。就空间格局而言，我们发现1960-1991年寒潮空间分布特征与近53年分布特征基本一致 (图4b)，明显不同的是该时期大兴安岭北部区高频 (20次以上) 区域少于53年平均值，由此说明该区域高频寒潮主要由1991年之后贡献，这一点由图4c可以得到证实；另外，1991年之后草原区寒潮频次整体减少，高值区零星分布在西乌珠穆沁旗和西河套平原等地区 (图4c)。年代尺度对比来看 (图略)，20世纪60-90年代单站寒潮高频区域在减少、低频区域在增加，而21世纪初期高频区域有所增加，进一步证实近年来全球气候变化导致了极端事件发生频率和强度在加大。从以上分析可以看出，寒潮高发区与内蒙古森

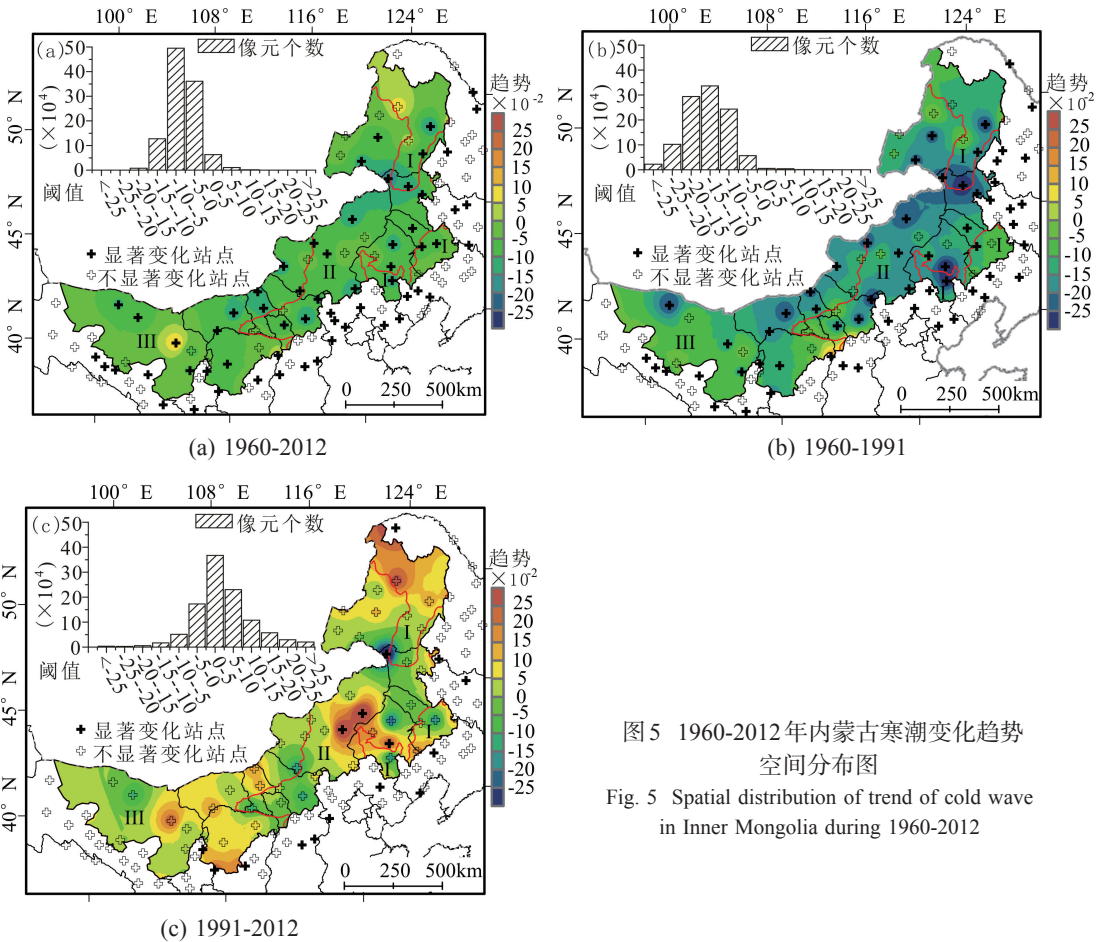


图5 1960-2012年内蒙古寒潮变化趋势空间分布图
Fig. 5 Spatial distribution of trend of cold wave in Inner Mongolia during 1960-2012

林和草原分布区基本一致，并且近年来寒潮发生频次和强度呈增加趋势，由此推断空间位置上的叠加势必会对当地农牧业生产造成严重影响。

3.2.2 内蒙古寒潮空间趋势特征 依据分段线性回归模型计算结果，文中同样计算了整个研究时段及转折点前后的Sen趋势度，并对变化趋势进行M-K显著性检验。图5a可以看出，整个研究时段变化趋势介于-2.4~1.2次/10a，其中呈减少趋势的区域占整个研究区的93.04%，且明显减少的区域分布在兴安盟的西北部、锡林郭勒盟的东北部以及包头地区等；呈增加趋势的零星分布在呼伦贝尔的图里河站以及阿拉善盟的巴音毛道站。

分段分析表明：1960-1991年变化趋势介于-3.3~2.5次/10a (图5b)，减少趋势显著大于整个研究时段的趋势，其中99%以上的区域均呈减少趋势，且减少趋势大于-1次/10a的区域占70.82%，显著多于整个研究时段的12.67%，其中呈显著减少的区域主要分布在赤峰市的赤峰站、翁牛特旗站、兴安盟的索伦站、锡林郭勒盟的东乌珠穆沁旗站，以及阿拉善盟的额济纳旗站。而1991-2012年寒潮频次变化趋势介于-4.4~4.2次/10a (图5c)，呈减少趋势和增加趋势的区域分别占23.72%和76.28%，显著增加区域主要分布在锡林郭勒盟的锡林浩特和西乌珠穆沁旗等地。

从以上分析可以看出，整个研究时段的趋势并不能很好地解释内蒙古寒潮频次变化特征，而分段线性拟合较好地刻画了不同时段的变化趋势，对于全面认识气候变化背景下极端事件变化趋势具有重要意义。

表 1 内蒙古寒潮频次与影响因子的相关分析

Fig. 1 Correlation coefficients between cold surge frequency and its influencing factors

因子	AO	NAO	SHI	CA	TPI	APVII	CQ	CW	IZ	IM
全年	-0.41**	-0.31*	0.13	0.50**	0.11	0.47**	-0.34*	-0.08	0.22	0.21
秋季	-0.13	0.05	0.15	0.33*	-0.01	0.23	-0.13	-0.17	0.18	0.35*
冬季	-0.36**	-0.40**	0.32*	0.45**	0.37**	0.48**	-0.10	-0.32*	0.29*	0.06
春季	-0.14	-0.13	0.08	0.38**	0.08	0.39**	-0.00	-0.12	0.25	0.13

注：*为通过显著水平 0.05 检验；**为通过显著水平 0.01 检验。

4 影响因素分析

4.1 大气环流的影响

已有研究表明：气候系统的涛动会导致区域大气环流的异常，进而影响区域气候的特征^[25-26]。本文利用相关分析方法，探讨了寒潮频次变化的可能影响因素（表 1）。我们发现，内蒙古寒潮频次与 AO、NAO 呈显著负相关关系，相关系数分别为 -0.41 ($P < 0.01$) 和 -0.31 ($P < 0.05$)，其中冬季寒潮频次与冬季 AO、NAO 呈极显著负相关关系，相关系数分别为 -0.36 和 -0.40，均通过了显著水平 0.01 的检验。而寒潮频次与 CA、APVII 呈极显著正相关关系，相关系数分别为 0.50 ($P < 0.01$) 和 0.47 ($P < 0.01$)，其中 CA 在不同季节均呈显著正相关关系，而除秋季外，APVII 与冬季和春季的相关系数均达到 0.01 显著水平。

此外，寒潮频次与 TPI、SHI、CW、IZ 的相关性仅在冬季达到显著相关，而与 IM 在秋季呈显著正相关关系。就年尺度而言，寒潮主要受 AO、NAO、CA、APVII 和 CQ 控制。然而，各季节控制因子有所差别，除 CQ 和 IM 外，冬季寒潮与各因子均达到显著水平 0.05 以上的相关性，说明冬季寒潮受多种因素共同控制；秋季寒潮主要受 CA 和 IM 影响；而春季寒潮与 CA 和 APVII 关系显著。基于以上分析，本文进一步对与内蒙古寒潮频次密切相关的影响因素的变化特征进行重点分析，以得到更为细致的事实。

北极涛动 (AO) 对北半球大气环流以及冬半年北半球近地面许多气候要素都有显著影响^[27]，冬季北极涛动通过影响西伯利亚高压和东亚大槽等区域性大气环流来影响冬季风强度，进而引起区域气温的变化。研究发现，近 53 年 AO 指数呈增加趋势，分段模型检测出其在 1989 年发生负位相转为正位相的转折，与陈豫英^[28]等人研究结论一致。1989 年之前 AO 指数呈增加趋势 ($P = 0.07$)，反映了极地高气压逐渐减弱而中纬度偏低气压逐渐增强，极涡加强，将冷空气控制在极地，从而使西伯利亚高压和冬季风强度减弱，向南爆发的冷空气频次下降，与本文寒潮频次变化趋势一致；1989 年之后 AO 指数呈下降趋势 ($P = 0.12$)，负相位有所增加，极涡减弱，西伯利亚高压和冬季风强度增强，向南爆发的冷空气频次增加，与本研究结果一致。同样的趋势也在北大西洋涛动 (NAO) 指数的长期变化趋势中检测出来。以上分析说明 AO 和 NAO 是内蒙古寒潮的重要影响因素。

西伯利亚高压是寒潮发生的关键影响因素，本文选取 (40°N~60°N, 80°E~120°E) 区域作为西伯利亚高压的主体，通过计算该区域海平面气压平均值，并经过标准化处理得到西伯利亚高压指数 (SHI)。我们发现，内蒙古寒潮频次与 SHI 仅在冬季呈显著正相关关系，而在秋季和春季均呈弱的正相关关系，其原因主要是：西伯利亚高压在冬季较强，对我国寒潮频次影响较大，而在秋季和春季强度较小所致，与前人研究结论较为一致^[10]。

值得注意的是，龚道溢^[29]等人建立的近百年西伯利亚高压时间序列表明：西伯利亚高压在 20 世纪 60 年代最强，而 80-90 年代变弱，与本文寒潮频次的年代际变化特征相吻合，进一步印证了西伯利亚高压是影响我国寒潮频次的重要因素。从长期趋势来看，SHI 在 1991 年发生转折，与寒潮频次变化转折年份一致，其中 1991 年之前两者变化趋势较为一致，而 1991 年之后，西伯利亚高压指数上升趋势远高于寒潮频次上升趋势。

4.2 地形地貌的影响

大气环流和地理条件分别作用于气候,其中大气环流能够在较大尺度上较好解释寒潮的空间分布特征,而区域内部地形差异成为探讨寒潮分布不均的重要因素。地形对区域水热条件具有再分配的作用,并能够对入侵冷空气起到阻挡和分流作用,因此其对寒潮的影响意义重大。研究区主要山脉包括位于东部的东北—西南走向的大兴安岭山脉和中部东西走向的阴山山脉,两者形成的面向西北方向的夹角区域直接受到西伯利亚冷空气的影响,成为内蒙古寒潮最严重的区域,而大兴安岭山脉东部和阴山山脉南部寒潮频次较少,形成明显的空间分异特征,其原因可能是冷空气爆发后长驱直入,到达大兴安岭西麓和阴山北麓,一方面由于山体阻挡作用,冷空气爬坡速度较慢,造成冷空气的滞留,从而在山前形成寒潮高频区;另一方面由于两山脉形成“易进难出”型^[30-31]的外围地形特征,同样加重了寒潮的危害。而当入侵冷空气越过山体后,在重力作用下,移动速度较快,对局地气候影响时间较短,从而使大兴安岭东部和阴山南部地区的寒潮频次较少。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 近53年内蒙古单站寒潮整体呈下降趋势,降速为-0.5次/10a (-2.4~1.2次/10a),并具有明显的阶段性变化特征,其中1991之前呈显著减少趋势,降速达-1.1次/10a (-3.3~2.5次/10a);而1991年之后呈增加趋势,增速为0.45次/10a (-4.4~4.2次/10a)。春季寒潮频次变化趋势与年变化趋势一致,且在各季节中变化最为显著;而寒潮频次年内变化表现为“双峰”结构,高频期主要集中在10-11月和次年3月,且11月发生频次最多。

(2) 空间上,内蒙古单站寒潮频次具有显著的空间差异特征,高发区集中在内蒙古的北部和中部地区,且北部高于中部。年代尺度对比来看,20世纪60-90年代寒潮高频区域范围在减少、低频区域范围在增加;而21世纪初期高频区域范围有所增加,增加区主要为内蒙古东部的图里河、小二沟,以及中部的西乌珠穆沁旗等地;此外,寒潮高发区与内蒙古森林和草原分布区基本一致,空间位置上的叠加势必会对当地农牧业生产造成严重影响。

(3) 近53年内蒙古寒潮频次呈减少趋势的区域占整个研究区的93.04%。分段研究发现,1960-1991年减少趋势显著大于整个研究时段的发展趋势,其中99%以上的区域均呈减少趋势,且减少趋势大于-1次/10a的区域占70.82%,显著多于整个研究时段的12.67%;而1991-2012年呈减少趋势和增加趋势的区域分别占23.72%和76.28%,显著增加区域主要分布在锡林郭勒盟的锡林浩特和西乌珠穆沁旗等地。

(4) 就年尺度而言,寒潮主要受AO、NAO、CA、APVII和CQ控制,而各季节驱动因素有所差别,冬季寒潮与AO、NAO、SHI、CA、TPI、APVII、CW和IZ均达到显著相关关系,说明冬季寒潮受多种因素共同控制;秋季寒潮主要受CA和IM影响;而春季寒潮与CA和APVII关系显著。内蒙古寒潮频次变化趋势表明,近年来寒潮频次呈现增加趋势,与全球气候变化背景下,极端气候事件不断增加的事实一致。

5.2 讨论

在全球气候变暖背景下,大气环流特征、极端气候事件的频率和强度均发生了显著变化,需要关注和加强这一领域的研究和分析,提高对极端气候事件的认识水平,并且未来生态系统会逐渐适应温暖的气候,对极端低温事件的脆弱性逐渐增加,一旦发生寒潮等极端低温事件将会对生态系统的结构和功能造成巨大而深远的影响。

值得注意的是,春季是农作物播种的关键时期,此阶段如果遭受寒潮等低温灾害将会造成巨大的经济损失,因此,加强春季倒春寒特征的分析对于农业生产具有举足轻重的作

用。同时,穆少杰^[19]等研究发现近 10 年内蒙古锡林郭勒高原东南部植被覆盖度显著减少,该区域与本研究的近 10 年寒潮高发区相吻合,而寒潮(尤其是春季寒潮)是否是造成植被覆盖变化的影响因素之一需要进一步研究和验证。

另外,寒潮对当地牧草返青也会造成一定的影响,尤其是近年来草原区寒潮强度呈增大趋势,由此带来的对当地农牧业的不利影响尚不明晰,因此,关注寒潮事件时空变化特征,加强寒潮风险评估是有效提高气候变化适应能力、增强综合防灾减灾能力的重要手段,值得进一步关注。

参考文献 (References)

- [1] Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Fang Xiuqi et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 3-12. [郑景云, 郝志新, 方修琦 等. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 3-12.]
- [2] Cui Linli, Shi Jun, Zhou Weidong. Characteristics of extreme temperature variations and their response to urbanization in Shanghai. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(1): 93-97. [崔林丽, 史军, 周伟东. 上海极端气温变化特征及其对城市化的响应. *地理科学*, 2009, 29(1): 93-97.]
- [3] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [4] Stocker D Q. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, IPCC, 2013.
- [5] National Assessment Report on Climate Compiling Committee. Second National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 2011. [《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [6] Zhai Panmao, Ren Fumin. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(4): 418-429. [翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化. *气象学报*, 1997, 55(4): 418-429.]
- [7] Zhai P, Sun A, Ren F et al. Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 203-218.
- [8] Li Xianzhi. The research of cold wave in East Asia//China Modern Science on the Election Issue, 1955. [李宪之. 东亚寒潮侵袭的研究//中国近代科学论著选刊, 1955.]
- [9] Tao Shiyao. A synoptic and aerological study on a cold wave in the Far East during the period of the breakdown of the blocking situation over Euroasia and Atlantic. *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. *气象学报*, 1957, 28(1): 63-74.]
- [10] 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*, 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. *大气科学*, 2006, 30(6): 1068-1076.]
- [11] Qian Weihong, Zhang Weiwei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years. *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. *大气科学*, 2007, 31(6): 1266-1278.]
- [12] Zhou Y, Ren G. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008. *Climate Research*, 2011, 50(2): 125-139.
- [13] Chen Yeguo, He Dongyan, Nong Mengsong. Change of cold wave in the Nanning area under global warming. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(4): 245-249. [陈业国, 何冬燕, 农孟松. 全球变暖背景下南宁地区寒潮活动的变化. *气候变化研究进展*, 2008, 4(4): 245-249.]
- [14] Wang Zhengwang, Zhao Guixiang, Zhang Ruiting et al. Characteristic analysis of cold wave weather in southeast area of Shanxi Province during last 40 years. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(6): 55-60. [王正旺, 赵桂香, 张瑞庭, 等. 山西东南部地区近 40 年寒潮气候特征分析. *自然灾害学报*, 2010, 19(6): 55-60.]
- [15] Mansur Sabit. Climatic characteristics of cold wave and its impact on agriculture in southern Xinjiang in recent 60 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2145-2152. [满苏尔·沙比提. 南疆近 60 年来寒潮气候特征及其对农业生产的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(12): 2145-2152.]
- [16] Guo Linghui, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng et al. Change trends of growing season over Inner Mongolia in the past 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(4): 505-512. [郭灵辉, 吴绍洪, 赵东升, 等. 近 50 年内蒙古地区生长季变化趋势. *地理科学*, 2013, 33(4): 505-512.]
- [17] Wang Mingjiu, Zhang Cunhou. Climate change in Inner Mongolia grassland and the effects on pastoral animal

- husbandry. Inner Mongolia Prataculture, 2013, 25(1): 5-12. [王明玖, 张存厚. 内蒙古草地气候变化及对畜牧业的影响分析. 内蒙古草业, 2013, 25(1): 5-12.]
- [18] Sun Yanling, Guo Peng, Yan Xiaodong et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 407-414. [孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407-414.]
- [19] Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268. [穆少杰, 李建龙, 陈奕兆 等. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [20] John R, Chen J, Lu N et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2018-2032.
- [21] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [22] Kendall M G. Rank Correlation Methods. 1948.
- [23] Tomé A R, Miranda P M A. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L02207.
- [24] Sun J, Wang X, Chen A et al. NDVI indicated characteristics of vegetation cover change in China's metropolises over the last three decades. Environmental monitoring and assessment, 2011, 179(1-4): 1-14.
- [25] Ding Yihui, Wen Shigeng, Li Yunjin. A study of dynamic structures of the Siberian high in winter. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 49(4): 430-439. [丁一汇, 温市耕, 李运锦. 冬季西伯利亚高压动力结构的研究. 气象学报, 1991, 49(4): 430-439.]
- [26] Wen C, Graf H F, Ronghui H. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(1): 48-60.
- [27] Yao Junqiang, Liu Zhihui, Yang Qing et al. Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 291-302. [姚俊强, 刘志辉, 杨青 等. 近 130 年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子. 地理学报, 2014, 69(3): 291-302.]
- [28] Chen Yuying, Chen Nan, Ma Jinren et al. Variety of Ningxia cold waves in the last 48 years and its possible reasons. 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. 自然资源学报, 2010, 25(6): 939-951.]
- [29] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China. 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. 地理学报, 2003, 58(4): 559-568.]
- [30] Huang Shoubo. Advance in the investigation of the topographical microclimate in China. Geographical Research, 1986, 5(2): 90-101. [黄寿波. 我国地形小气候研究概况与展望. 地理研究, 1986, 5(2): 90-101.]
- [31] Lv Jiong. Topographical features and frost damage. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(2): 149-158. [吕炯. 地形与霜冻. 地理学报, 1956, 22(2): 149-158.]

The spatial-temporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years

LIU Xianfeng^{1,2}, ZHU Xiufang^{1,2}, PAN Yaozhong^{1,2},
LI Shuangshuang^{1,3}, ZHANG Donghai^{1,2}, LIU Yanxu⁴

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Using the daily minimum temperature data of 121 meteorological stations in Inner Mongolia and its surrounding areas, this paper analyzed the spatiotemporal variation of cold surge and its possible influencing factors in Inner Mongolia during 1960-2012, based on piecewise regression model, Sen+Mann-Kendall model, and correlation analysis. The results

show that, (1) The occurrence frequency of single-station cold surge presented a decreasing trend in Inner Mongolia during recent 53 years, with a linear tendency of -0.5 times/10a (-2.4-1.2 times/10a), of which a significant decreasing trend was detected before 1991, being -1.1 times/10a (-3.3-2.5 times/10a), while an increasing trend of 0.45 times/10a (-4.4-4.2 times/10a) was found after 1991. On the seasonal scale, the trend of spring cold surge was consistent with that of the annual value, and the most obvious change of cold surge also occurred in spring. The frequency of monthly cold surge showed a bimodal structure, and November witnessed the highest incidence of cold surge. (2) Spatially, the high incidence of cold surge is mainly observed in the northern and central parts of Inner Mongolia, and higher in the northern than the central part. The inter-decadal characteristic also detected that high frequency and low frequency regions presented a decreasing trend and an increasing trend, respectively, during 1960-1990, while high frequency regions expanded after the 1990s, regions with high frequency of cold surge were mainly distributed in Tol Gol, Xiao' ergou, and Xi Ujimqin Banner. (3) On annual scale, the cold surge was dominated by AO, NAO, CA, APVII, and CQ, while the difference in driving forces among seasons was detected. Winter cold surge was significantly correlated with AO, NAO, SHI, CA, TPI, APVII, CW, and IZ, indicating that cold surge in winter was caused multifactor. Autumn cold surge was mainly affected by CA and IM, while spring cold surge was significantly correlated with CA and APVII.

Key words: cold surge; piecewise regression; Sen+Mann-Kendall; spatiotemporal variations; influencing factors; Inner Mongolia