

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0136

YAN Xiaoyue, JIANG Fengqing, LIU Chao, et al. Individual and coupled influences of large-scale driving factors on extreme cold events in Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1539-1557. [闫小月, 姜逢清, 刘超, 等. 大尺度驱动因子对新疆极端冷事件的单一与耦合影响[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1539-1557.]

大尺度驱动因子对新疆极端冷事件的单一与耦合影响

闫小月^{1,2,3}, 姜逢清^{1,3}, 刘超², 王大刚^{1,2,3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要: 全球变暖背景下, 偶发极端冷事件产生的重大灾害损失不容忽视。探究区域极端冷事件的大尺度驱动因子的耦合影响, 对预估和应对气候变化产生的极端灾害具有重要意义。本文基于新疆1961—2016年53个气象站点的逐日气温资料, 通过反距离加权等方法对极端冷事件的时空演变特征进行分析; 利用交叉小波变换对6个极端冷指数与大尺度驱动因子——北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)和厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)进行多尺度分析; 使用参数假设检验对大尺度驱动因子单一/耦合模式下的冷指数变化进行统计学显著性检验, 随后对大尺度环流机制进行距平合成分析。结果表明: 年均冷指数在时间尺度上均有显著性变化, 新疆气温有明显的变暖趋势; 空间尺度上冷指数在边疆、东疆和伊犁河谷地区的变化幅度远大于其他区域, 存在空间差异性。AO、NAO与冷指数的相关性较强, ENSO与冷指数相关关系最弱但存在明显的时滞效应, 大尺度驱动因子对极端冷指数的总体影响程度为AO>NAO>ENSO。单一模式下, 极端冷事件在AO负位相、NAO负位相和La Niña事件期间易发生。耦合模式下, EI Niño-AO正位相和EI Niño-NAO正位相配置下冷日日数偏多; EI Niño-NAO负位相配置时极端低温值更小; La Niña-AO负位相和La Niña-NAO正位相时极端冷事件发生的可能性更大。EI Niño(La Niña)事件对AO(NAO)有一定的调制作用。新疆极端冷事件更易出现在La Niña-AO负位相、La Niña-NAO正位相时期, 成因与亚欧大陆中高纬度位势异常导致冷空气路径偏西、乌拉尔阻塞加强与偏北气流影响新疆有关。

关键词: 大尺度驱动因子; 极端冷事件; 参数检验; 单一/耦合影响; 新疆

中图分类号: P423; P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1539-19

0 引言

近年来, 全球气候持续变暖导致极端天气/气候事件频发, 对生态环境和人类生产生活产生了不可忽视的影响, 因此对于极端天气/气候事件的研究受到了社会各界的广泛关注^[1-3]。尽管全球变暖是不争的事实, 但各类极端冷事件仍时有发生。有学者提出“北极暖大陆冷”理论, 认为北极地区自1998年以来持续变暖, 而中纬度部分大陆区域出现“变暖停滞”的现象^[4]。“变暖”的惯性思维易使人们对极端

冷事件产生麻痹大意的思想, 会由于准备不足无法高效应对突发的极端冷事件, 继而造成巨大的社会经济损失。比较典型的如2012年, 欧洲爆发大范围的极端冷事件, 造成东欧数百人死亡^[5]; 2016年, 南非部分地区出现反常的极端冷事件, 畜牧业受到重创^[6]。2020年, 突如其来的暴雪让美国“能源中心”得克萨斯州遭遇多年罕见的停电危机, 城市一度陷入瘫痪^[7]。有学者认为, 21世纪许多地区发生的极端冷事件强度不会减弱, 持续时间也不会缩短^[8]。

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171378)资助

作者简介: 闫小月, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究. E-mail: yanxiaoyue19@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 姜逢清, 研究员, 主要从事干旱区气候与环境变化研究. E-mail: jiangfq@ms.xjb.ac.cn

因此,在全球变暖的大背景下,系统研究极端冷事件的时空演变规律对保护生态环境和维持经济社会稳定具有重要意义。

21 世纪初,气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)定义了包括7个极端冷指数在内的27个极端气候指数,使全球极端气候变化指标有了统一规范。随后许多学者使用该指数标准对极端冷事件开展了相关研究^[9-11]。在全球尺度上研究发现,1990年以来欧洲冰冻日(ID)呈增加趋势^[12];19世纪末,南美洲地区夏、秋两季的冷夜数(TN10p)持续减少^[13];亚太地区由于冬季极端冷事件的减少而趋向暖冬^[14]。鉴于极端冷事件影响的增大,其形成机制也引起了重点关注。一般认为极端冷事件的形成受大气内部变率和外部强迫因子的共同影响,其中大气内部变率是直接影响因素,主要包括大尺度驱动因子AO、NAO、ENSO等^[15-17]。

近年来,在全球变暖的背景下,新疆极端冷事件总体上出现次数呈减少趋势,有利于果树、冬小麦和牲畜等安全越冬,但极端天气出现频率加大,冷空气在春季活动更加频繁,对农牧业生产造成了较大影响。过去几年来,众多学者对新疆不同区域的极端冷事件的形成原因进行了多角度研究。陈少勇等^[18]对中国西北地区的极端低温事件进行了统计分析,发现西北地区极端低温事件主要出现在新疆北部和青海高原。张林梅等^[19]指出,新疆阿勒泰地区冬季极端冷事件发生的频次倾向率呈减少趋势,但未来会有所增多,且强度会有所增强。在大尺度驱动因子与新疆极端冷事件相关关系研究方面,关学锋等^[20]认为北疆冬季气温序列与AO的相关程度较高;张扬^[21]认为ENSO对北疆地区的气温变化产生影响,El Niño年北疆地区年平均气温偏高,La Niña年北疆地区气温则偏低。尽管针对中国西北或新疆的极端冷事件研究已取得了不少成果^[22-23],但更多的是关注极端冷事件的时空演变特征及单一大尺度驱动因子对其影响的机制分析,缺乏耦合效应的研究。事实上,大尺度驱动因子的耦合作用是导致极端冷事件频率、强度时空异质性变化的直接原因^[24]。因此,为更全面地理解新疆极端冷事件的成因机制,本文开展了新疆极端冷事件的时空变化特征及大尺度驱动因子对其单一与耦合影响分析,研究结果有利于认识新疆极端冷事件演变的区域特征,有助于全球变暖背景下对新疆极端冷事件的预测预警,进而可为应对灾害风险的防御

工作提供科学依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处 $73^{\circ}40' \sim 96^{\circ}18' E$, $34^{\circ}25' \sim 48^{\circ}10' N$,位于中国西北干旱区,是典型的大陆性气候。由于地形复杂,生态环境脆弱,其对气候变化的反应尤为敏感^[25]。近几十年来,新疆屡次发生雪灾、干旱、洪涝、沙尘暴等自然灾害,严重威胁了人们的生命和社会经济发展^[26]。由于地处欧亚大陆腹地,新疆上空易受异常气旋性环流控制,其西部的偏北风引导高纬地区的冷空气南下导致温度异常偏低,易发生极端冷事件^[27]。本文以天山山脉为界将新疆划分为3个区域,天山山脉以北为北疆,以南为南疆,吐鲁番—哈密盆地一带为东疆。研究区地形及气象站点分布如图1所示。

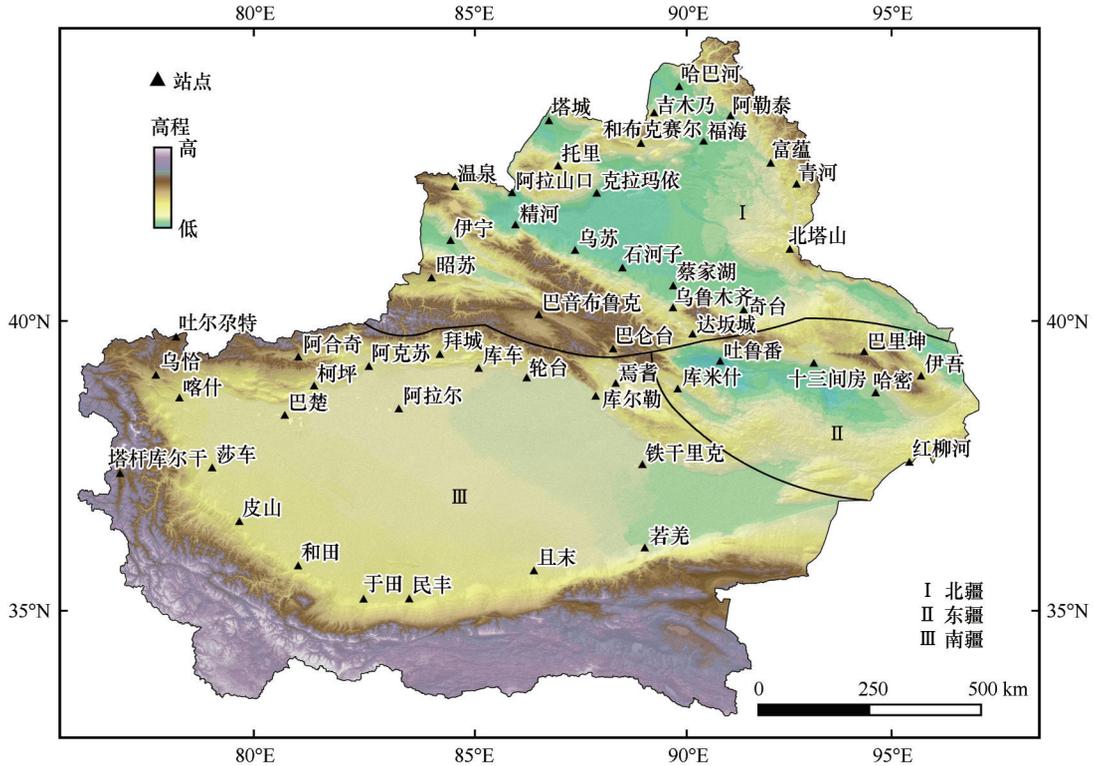
1.2 数据来源

本文选取的气候数据为新疆维吾尔自治区53个气象站点1961—2016年逐日最低气温值和最高气温值,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),均通过均值检验和时间一致性检验。大尺度驱动因子AO、NAO和ENSO指数均来自美国国家大气海洋管理局(<https://www.noaa.gov>),其中AO指数为1 000 hPa高度异常场经验正交函数分析(EOF)所得的第一模态时间系数的标准化序列;NAO指数为标准化500 hPa高度场经验正交函数分析所得第一模态的时间系数;ENSO指数选择MEI数据,该数据为滑动双月平均的海平面气压、纬向地面风场、经向地面风场、海表面温度、表面气温和总云量的6变量经验正交函数分解第一模态的时间系数^[28]。本文使用的1961—2016年再分析资料来源于美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP),水平格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,包括风场、位势高度场和海平面气压场。

通过正负位相差异对AO、NAO指数进行年份划分;计算Niño3.4平均海表温度指数(SST)3个月滑动平均值,当该值为标准差的+0.5(-0.5)倍时,定义为El Niño事件(La Niña事件)^[29]。年份划分如表1所示。

1.3 研究方法

极端冷指数的定义采用ETCCDI推荐使用方式(表2),所选极端冷指数在计算前均通过RClimDex软件(<http://etccdi.pacificclimate.org>)进行严格的



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图无修改

图 1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 Study area and meteorological stations in Xinjiang

表 1 AO、NAO、ENSO 不同位相、冷暖事件年份(1961—2016)

Table 1 Years identified as positive(warm) and negative(cold) phase for AO, NAO and ENSO (1961—2016)

指数	正位相(EI Niño)	负位相(La Niña)
AO	1964, 1967, 1973, 1975, 1976, 1982, 1983, 1986, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1999, 2002, 2003, 2006, 2007, 2008, 2011, 2013, 2015	1961, 1962, 1963, 1965, 1966, 1968, 1969, 1970, 1971, 1972, 1974, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1984, 1985, 1987, 1995, 1996, 1997, 1998, 2000, 2001, 2004, 2005, 2009, 2010, 2012, 2014, 2016
NAO	1961, 1967, 1971, 1972, 1974, 1976, 1978, 1979, 1982, 1983, 1984, 1986, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2007, 2011, 2013, 2014, 2015	1962, 1963, 1964, 1965, 1966, 1968, 1969, 1970, 1973, 1975, 1977, 1980, 1981, 1985, 1987, 1988, 1995, 1996, 1997, 1998, 2001, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012, 2016
ENSO	1963, 1965, 1968, 1972, 1976, 1977, 1979, 1982, 1986, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009, 2014, 2015	1964, 1967, 1970, 1971, 1973, 1974, 1975, 1983, 1984, 1988, 1995, 1998, 1999, 2000, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011

质量控制,后采用该软件对所选各站点的极端冷指数进行计算^[30]。

采用一元线性方程对新疆 53 个气象站点极端冷指数的时间变化趋势进行线性拟合,采用 ArcGIS 10.6 中反距离加权插值法,分析极端冷指数倾向率变化的空间差异^[31-32]。交叉小波变换能够呈现两时间序列在时频域中的相关关系(本文采用 Morlet 小波),交叉小波变换所得能量谱(XWT)反映两序列在不同时频域内相互作用的显著性;所得凝聚谱

(WTC)能够反映两序列在时频域内的相干程度^[33]。

原理如下:

对于两个时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$,交叉小波能量谱(XWT)定义为:

$$W_{xy}(a, \tau) = C_x(a, \tau)C_y^*(a, \tau) \quad (1)$$

式中:序列 $x(t)$ 的小波变换系数为 $C_x(a, \tau)$;序列 $y(t)$ 小波变换系数的复共轭为 $C_y^*(a, \tau)$ 。交叉小波凝聚谱(WTC)定义为:

表2 极端冷指数的定义

Table 2 Definition of extreme cold indices

指数	名称	定义	单位
FD	霜冻日数	日最低温低于0℃的日数	d
ID	冰冻日数	日最高温低于0℃的日数	d
TNn	日最低气温极小值	年内日最低温最小值	℃
TXn	日最高气温极小值	年内日最高温最小值	℃
TN10P	冷夜	日最低温低于标准时段第10百分位日数占全年百分比	%
TX10P	冷昼	日最高温低于标准时段第10百分位日数占全年百分比	%

$$R^2(a, \tau) = \frac{|S(a^{-1}W_{XY}(a, \tau))|^2}{S(a^{-1}|W_X(a, \tau)|^2)S(a^{-1}|W_Y(a, \tau)|^2)} \quad (2)$$

式中： S 为平滑算子； $|S(a^{-1}W_{XY}(a, \tau))|^2$ 为某一频率下两时间序列的波振幅的交叉积； $S(a^{-1}|W_X(a, \tau)|^2)S(a^{-1}|W_Y(a, \tau)|^2)$ 为两序列振动波振幅的乘积。

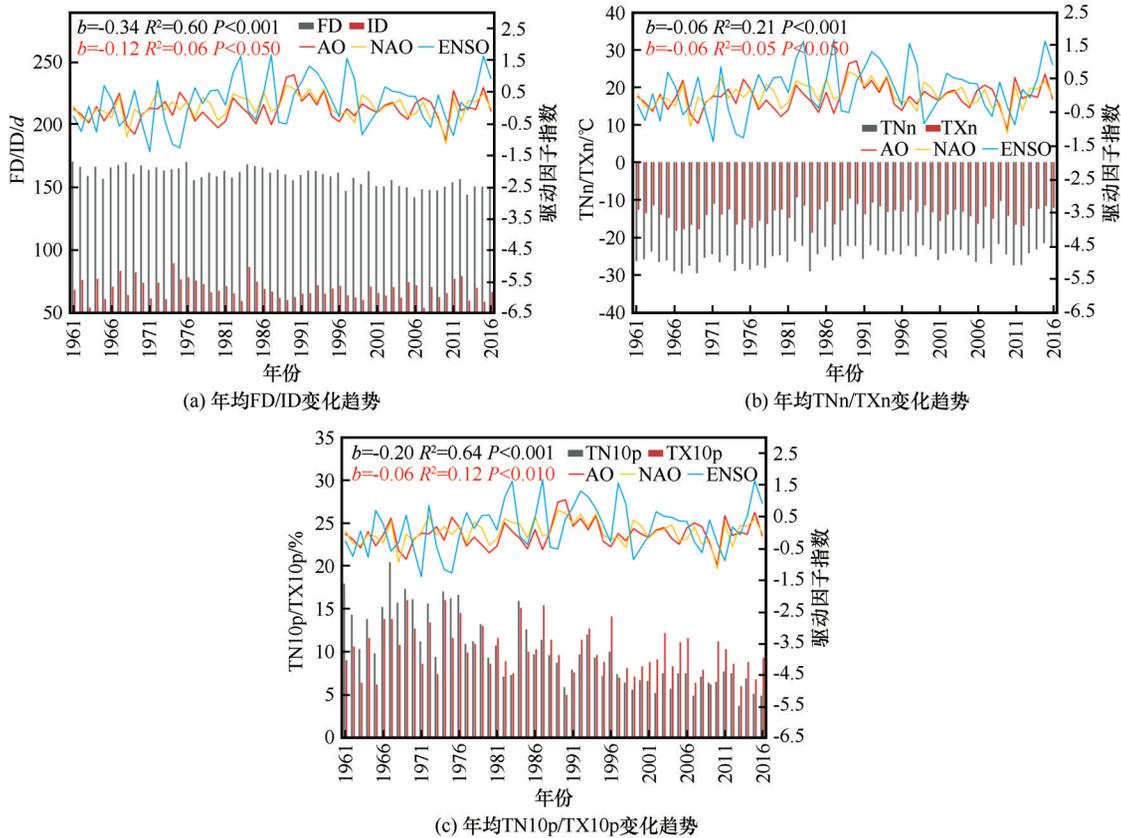
使用参数检验中的独立样本 t 检验，分析大尺度驱动因子不同位相、冷暖事件下的极端冷指数序列变化特征。在 AO、NAO 处于正负位相和 ENSO 处于冷暖事件下，提取各驱动因子不同位相、冷暖事件对应年份下的冷指数序列。利用图示法、Shap-

iro-Wilk 检验判断序列的正态性，若不满足正态性，则序列进行转换^[34]；当序列满足正态性后，采用 F 检验对样本方差进行评估，当方差齐性时，使用独立样本 t 检验对正负位相或冷暖事件下冷指数是否通过 90% 显著性检验进行检测；当方差非齐性时，使用 Satterthwaite 校正 t' 检验^[35]。

2 结果与分析

2.1 极端冷指数的时间变化

所选极端冷指数 FD、ID、TNn、TXn、TN10p、TX10p 和大尺度驱动因子 AO、NAO、ENSO 的年均时间变化序列如图 2 所示。近 56 年来，冷指数 FD、



注：图中 b 为倾向率； R^2 为线性回归拟合优度； P 为显著性检验结果

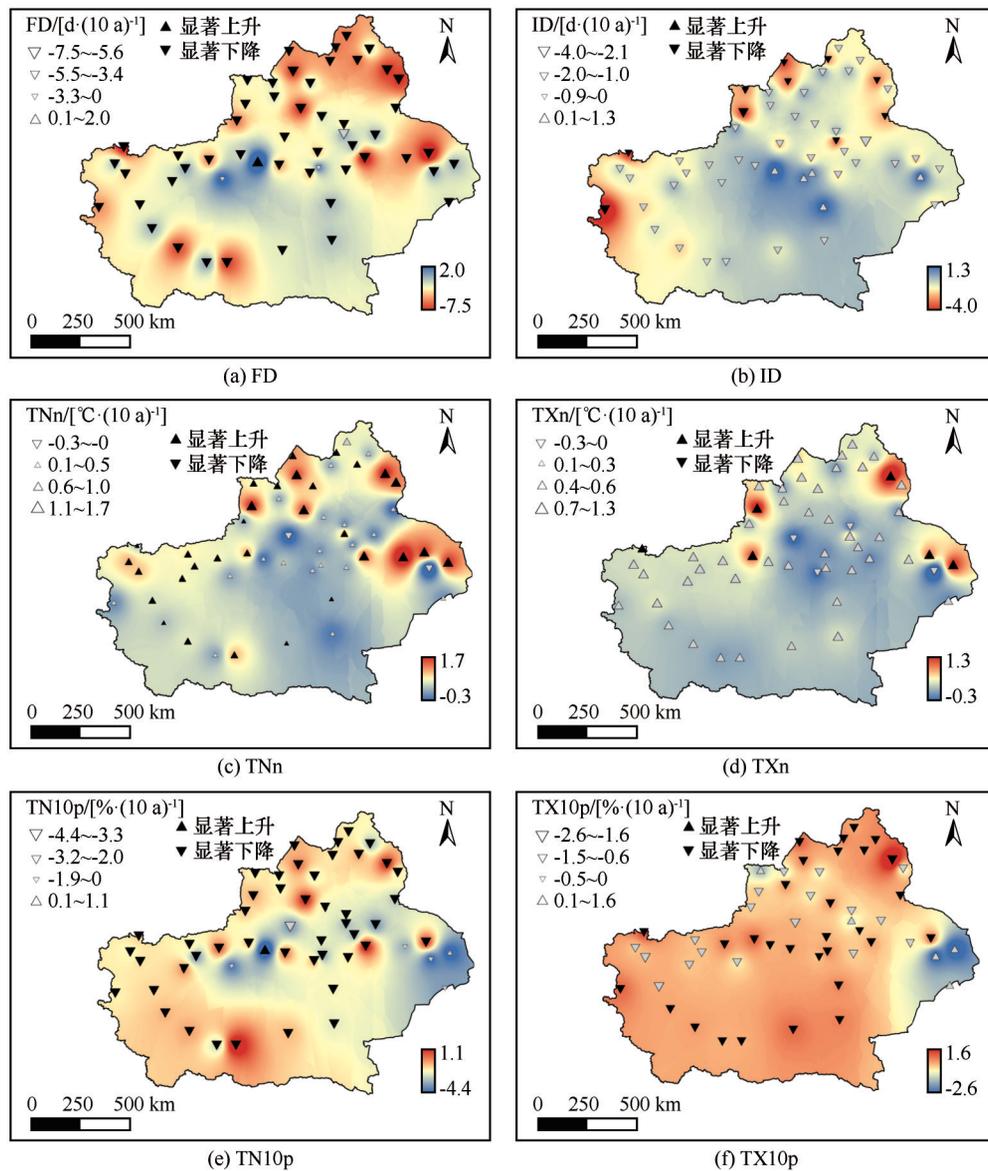
图2 1961—2016年新疆年均极端冷指数及大尺度驱动因子变化趋势

Fig. 2 Variation trend of average extreme cold indices and large-scale driving factors in Xinjiang during 1961 to 2016

ID、TN10p 和 TX10p 均呈下降趋势,倾向率分别为 $-3.4 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $-1.2 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $-2\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.6\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。其中 FD 和 TN10p 通过 99.9% 显著性检验, ID、TX10p 通过 95%、99% 显著性检验, 表明其均为显著下降趋势。TNn 与 TXn 倾向率为 $0.6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 呈显著上升趋势。FD、ID、TNn 和 TXn 波动趋势为“升降交错”; 而在 1981 年以前 TN10p 显著大于 TX10p, 1981 年以后 TX10p 反而大于 TN10p, 二者大小关系发生反转。观察 AO、NAO、ENSO 时间序列可知, AO 与 NAO 总体变化趋势相同, 而 ENSO 较两者变化波动更大。

2.2 极端冷指数的空间分布

所选 53 个站点的冷指数空间分布趋势及时间序列显著性检验如图 3 所示。FD[图 3(a)]、ID[图 3(b)]、TN10p[图 3(e)]和 TX10p[图 3(f)]总体表现为下降趋势, 但变化程度有所不同。其中, FD、TN10p 和 TX10p 分别有 92.5%、86.8% 和 56.6% 的站点呈显著下降趋势 ($P < 0.05$); 尽管 90.6% 气象站点的 ID 呈下降趋势, 但仅有 18.9% 通过 95% 显著性检验。在空间分布上, FD 与 TN10p 的变化趋势较为一致, 阿尔泰山脉南侧、伊犁河谷、吐鲁番盆地北侧和塔里木盆地南缘的变化幅度较大; FD、



注: 箭头上(下)方向表示该站点指数倾向率的上升(下降)趋势; 箭头大(小)表示该站点指数倾向率变化数值的大(小); 箭头黑(灰)色表示该站点通过(未通过)置信度为 95% 的显著性检验

图 3 极端冷指数空间分布趋势及时间序列显著性检验

Fig. 3 Spatial distribution trend of extreme cold indices and time-series significance test

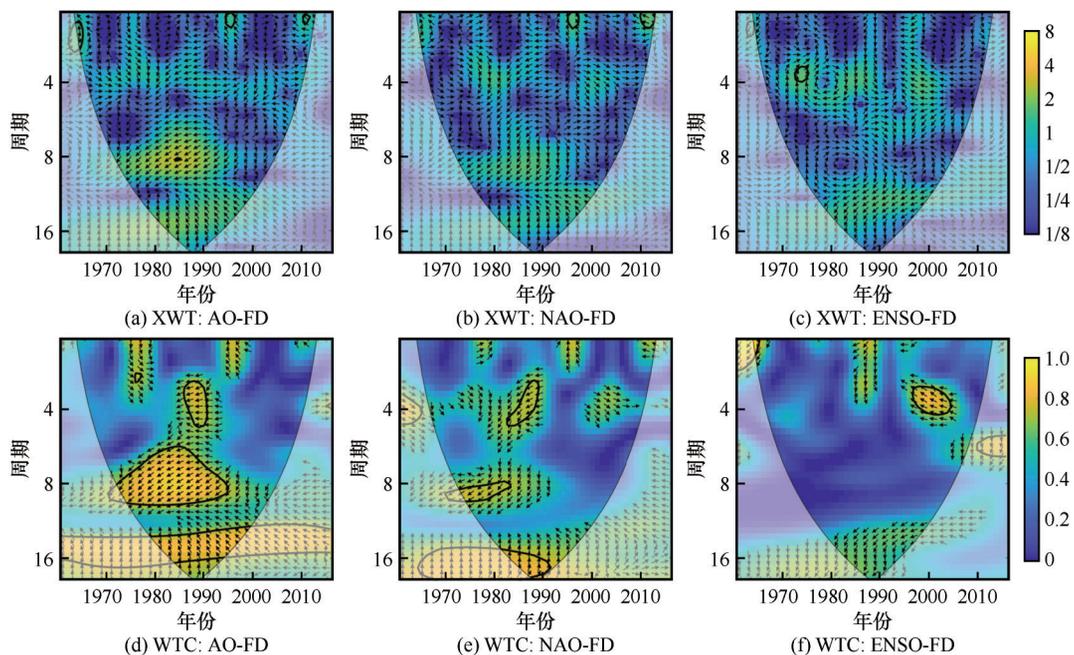
TN10p 和 TX10p 下降倾向率最大分别为 $-7.5 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $-3.4\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-2.6\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ ，而下降倾向率最小仅为 $-0.02 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $-0.04\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.03\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ ，说明冷指数变化幅度空间差异很大。ID 变化幅度较大的地区位于南疆西北部和伊犁河谷地区，低值区位于天山山脉北侧和塔里木盆地南缘。

TNn [图 3(c)] 和 TXn [图 3(d)] 倾向率变化的空间分布基本一致，总体呈现为上升趋势，最大倾向率分别为 $1.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $1.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ；最小倾向率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $0.04 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。分别有 58.5% 和 11.3% 的站点通过 95% 显著性检验；变化幅度较大区域为博格达山南北两侧、伊犁河谷和阿尔泰山脉南侧。总体来看，北疆 TNn 与 TXn 的上

升幅度大于南疆，TXn 的空间差异较小。

2.3 交叉小波分析

由图 4 可知，驱动因子与 FD 在高能量区通过 95% 置信水平检验的区域面积积极其有限 [图 4(a)~4(c)]，对比可知，低能量区的相关关系显著大于高能量区。在低能量区，AO 与 FD [图 4(d)] 存在 4 个显著的共振周期，分别为 2~3 a (1976—1978 年)、3~5 a (1986—1991 年)、6~10 a (1972—1995 年)、12~16 a (1979—2003 年)，二者在 3~5 a (1986—1991 年) 共振周期内呈负相关关系，相关系数 $R > 0.8$ 。NAO 与 FD [图 4(e)] 存在 3 个显著的共振周期，其中 15~17 a (1980s—2000s) 共振周期内，NAO 位相提前 FD 位相 90° 。ENSO 与 FD [图 4(f)] 在 3~5 a (1997—2004 年) 存在一个显著的共振周期。



注：XWT 色柱为周期信号震荡强度，WTC 色柱为小波相关系数平方；黑色细实线区域内为有效谱值区，粗实线为显著性水平超过 95% 的置信区间。→ 表示两者变化位相一致，← 表示两者变化位相相反，↑ 表示前者超前后者位相 90° ，

↓ 表示前者滞后后者位相 90° (下同)

图 4 驱动因子与 FD 交叉小波分析

Fig. 4 Cross wavelet analysis between large-scale driving factors and frost days (FD)

驱动因子与 ID 在高能量区均离散分布 2~3 个共振周期 [图 5(a)~5(c)]，在 1~2 a (1965—1970 年) 共振周期内，AO、NAO 和 ENSO 均与 ID 呈正相关关系；8~10 a (1976—1994 年) 共振周期内，AO 位相比 ID 滞后 90° ；在 9~11 a (1985—1992 年) 共振周期内 NAO 位相比 ID 滞后 90° 。在 2~6 a (1979—1989 年) 共振周期内，ENSO 与 ID 呈显著负相关关系。低能量区中 [图 5(d)~5(f)]，在 8~10 a (1972—1977 年)

共振周期内，AO 位相比 ID 滞后 90° ，且 1~3 a (1965—1975 年) 共振周期内 NAO 与 ID 呈正相关关系；ENSO 与 ID 存在 4 个显著共振周期，在 2~4 a (1995—2003 年) 周期内 ENSO 位相超前 ID 位相 90° 。

由于篇幅原因，仅展示驱动因子与霜冻日 (FD) 和冰冻日 (ID) 两个时间序列的交叉小波 XWT 与 CWT 图谱，其余结果见表 3~表 4。AO 与 6 个冷指数在高低能量区均存在多个共振周期，AO 与 TNn、

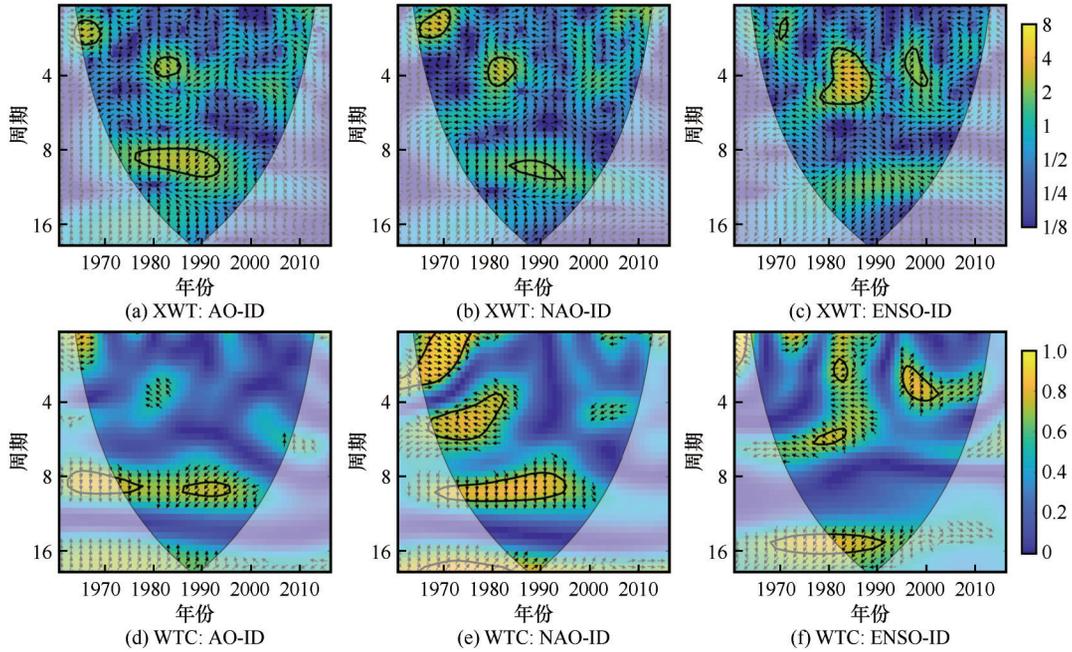


图5 驱动因子与ID交叉小波分析

Fig. 5 Cross wavelet analysis between large-scale driving factors and ice days(ID)

表3 交叉小波能量谱(XWT)结果

Table 3 Results of cross wavelat power spectrum(XWT)

冷指数	AO	相关关系	NAO	相关关系	ENSO	相关关系
TNn	1~2 a (2007—2010年)	AO位相滞后90°	1 a (2005—2010年)	—	2~5 a (1980—1989年)	ENSO位相超前90°
	2~4 a (1980—1990年)	正相关	2~4 a (1980—1988年)	正相关		
TXn	1 a (2008—2010年)	AO位相滞后90°	1 a (2007—2010年)	—	2~5 a (1980—1990年)	ENSO位相超前90°
	2~4 a (1981—1990年)	正相关	2~4 a (1981—1989年)	正相关		
	8~10 a (1973—1987年)	—	—	—		
TN10p	2~3 a (1965—1969年)	—	1~2 a (1965—1973年)	—	1~2 a (1970—1973年)	—
	3~5 a (1983—1994年)	—	2~4 a (1983—1990年)	—	2 a (2009—2011年)	—
	2~4 a (2009—2012年)	正相关	—	—	3~6 a (1981—1994年)	—
TX10p	1~2 a (1965—1969年)	AO位相超前90°	—	—	1~2 a (1970—1972年)	—
	4~5 a (1988—1993年)	AO位相超前90°	1~2 a (1965—1971年)	—	1~2 a (1970—1972年)	ENSO位相滞后90°
	8~9 a (1984—1991年)	负相关	—	—		

TXn 和 TN10p 在高能量区呈显著正相关关系, 与 TX10p 在高、低能量区均表现为显著的负相关。NAO 与 TNn、TXn 在高、低能量区呈显著的正相关

关系, 而在低能量区, NAO 与 TX10p 表现为显著的负相关。ENSO 与各冷指数相关性不强, 仅在低能量区与 TN10p 和 TX10p 呈负相关关系, 但 ENSO 与

表4 交叉小波凝聚谱结果 WTC

Table 4 Results of cross wavelet coherence spectrum(WTC)

冷指数	AO	相关关系	NAO	相关关系	ENSO	相关关系
TNn	2~4 a (1982—1989年)	正相关	1 a (1993—1997年)	NAO位相滞后 90°	1 a (1971—1973年)	—
	2~4 a (2008—2011年)	负相关	2~5 a (1980—1990s)	正相关		
	8~13 a (1985—2004年)	—	7~10 a (1970—1990s)	—	2~4 a (1980—1991年)	ENSO位相超前 90°
	15~17a (1980—1990s)	—	12~20 a (1980—2000s)	—		
TXn	1 a (1993—1997年)	—	1~3 a (1993—2007年)	—	3 a (1987—1990年)	—
	2~4 a (1985—1991年)	正相关	2~5 a (1985—1991年)	正相关		
TN10p	1~6 a (1986—1996年)	AO位相超前 90°	1~2 a (1994—1997年)	NAO位相超前 90°	2~3 a (2007—2012年)	ENSO位相超前 90°
	2~5 a (2008~2015年)	正相关	2~4 a (1965—1971年)	—	2~4 a (1983—1987年)	—
	7~12 a (1970—2000s)	负相关	7~16 a (1971—2003年)	—	6 a (1971—1974年)	负相关
TX10p	1~4 a (1966—1969年)	AO位相超前 90°	2~4 a (1965—1972年)	—		
	3~6 a (1988—1998年)	AO位相超前 90°	6~7 a (2004—2008年)	负相关	5~6 a (1968—1973年)	负相关
	7~10 a (1984—2007年)	负相关	8~9 a (1973—1995年)	—		

各冷指数在高、低能量区存在明显的位相超前/滞后现象。

2.4 大尺度驱动因子单一模态对冷指数的影响

2.4.1 AO

AO正负位相差异下6个极端冷指数的独立样本 t 检验显著性差异如图6所示。37个站点的FD[图6(a)]存在负差异,其中8.1%通过90%显著性检验,16个站点的FD存在正差异,均未通过显著性检验。ID[图6(b)]总体表现为负差异,其中30.4%站点通过90%显著性检验。42个站点的TNn[图6(c)]存在正差异,46个站点的TXn[图6(d)]存在正差异,其中34.8%通过90%显著性检验。TN10p[图6(e)]、TX10p[图6(f)]分别有47、48个站点存在负差异,说明较AO正位相来说,AO负位相时的冷昼、冷夜占比更多。

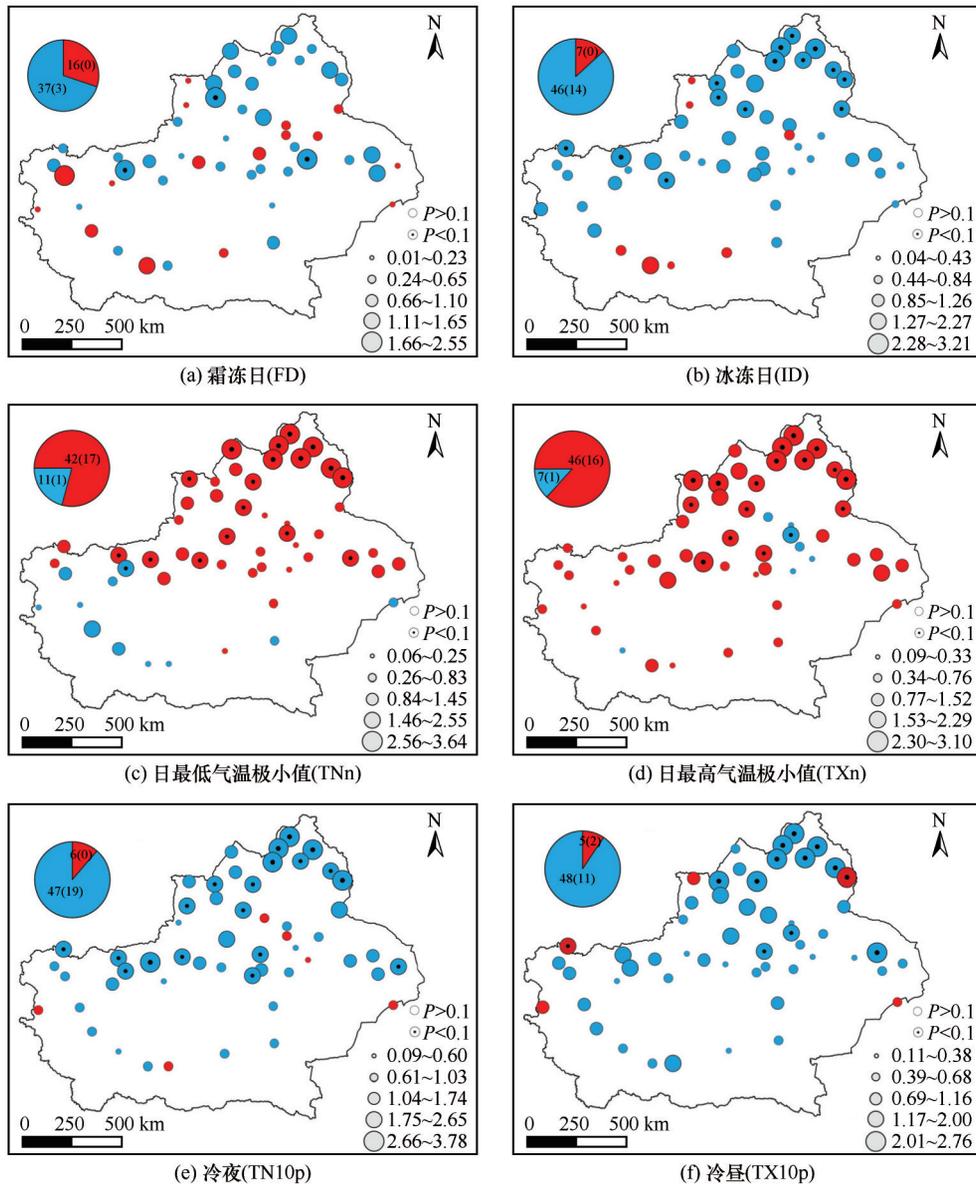
2.4.2 NAO

NAO正负位相差异下6个极端冷指数的独立样本 t 检验显著性差异如图7所示。38个站点的FD[图7(a)]存在正差异,其中13.2%通过90%显著性

检验。15个站点的FD存在负差异,均未通过显著性检验。33个站点的ID[图7(b)]存在负差异,20个站点存在正差异,但仅有6.1%和10%的站点通过90%显著性检验。TNn[图7(c)]、TXn[图7(d)]分别有49、51个站点存在正差异,表明NAO正位相时各站点的TNn、TXn数值更大,即全疆低温值较NAO负位相时更大。34个站点的TN10p[图7(e)]存在负差异,主要分布在北疆、塔里木盆地东缘,其中8.8%通过90%显著性检验。在19个正差异的站点中仅有5.3%通过90%显著性检验。TX10p[图7(f)]检验差异与TN10p相似,说明各站点的TN10p、TX10p在NAO不同位相时期的差异较小。

2.4.3 ENSO

ENSO冷暖期差异下6个极端冷指数的独立样本 t 检验显著性差异如图8所示。FD[图8(a)]、ID[图8(b)]中分别有45、46个站点存在负差异,其中通过90%显著性检验的站点分别为26.7%、13%。48个站点的TNn[图8(c)]存在正差异,基本分布在全疆,其中6.2%存在显著正差异;仅有5个站点的



注：正（负）差异表示为红（蓝）色圆圈；通过（未通过）90%显著性检验的站点表示为实心（空心）圆圈；饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

图6 极端冷指数在单一 AO 模态下的显著性差异

Fig. 6 Significant difference in extreme cold indices for AO positive-AO negative phase

TNn存在负差异,但均未通过90%显著性检验,TXn [图8(d)]检验结果与TNn相似。EI Niño-La Niña事件下的TN10p[图8(e)]、TX10p[图8(f)]基本存在负差异,呈显著负差异的站点分别为2.3%和9.5%;存在正差异的站点均未通过90%显著性检验。

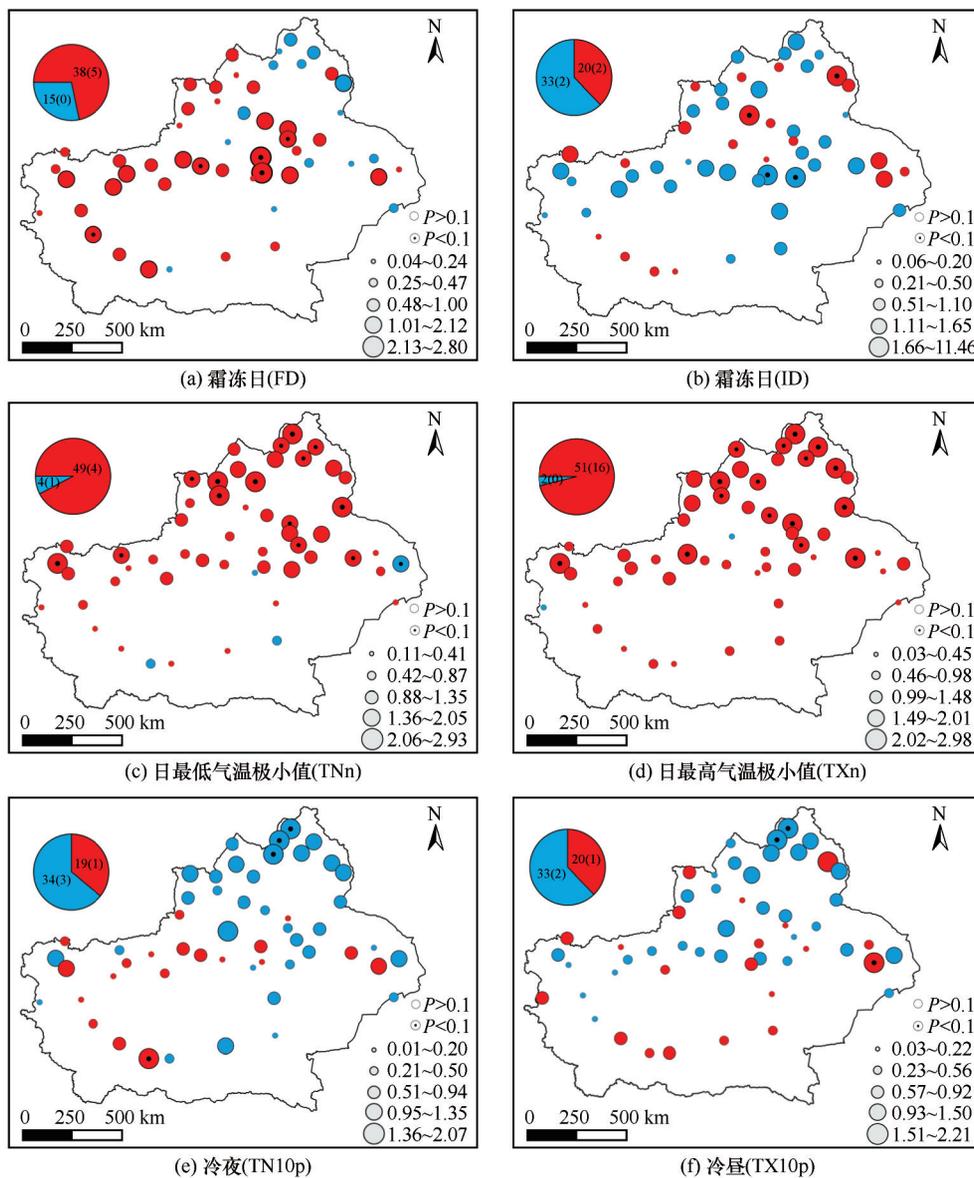
2.5 大尺度驱动因子耦合模态对冷指数的影响

2.5.1 ENSO-AO 模态

EI Niño-AO 耦合模态下6个极端冷指数的独立样本 *t* 检验显著性差异如图9所示。在AO正位相下,FD[图9(a)]、ID[图9(b)]存在正差异的站点多

于负差异站点;AO负位相下,TN10p[图9(e)]存在负差异的站点数量更多;其余冷指数正负差异在站点数量上表现并不明显。这说明EI Niño与AO正位相配置时会出现更多的冷日日数,与AO负位相配置时冷夜占比更多;但极端低温在AO位相的差异下变化较不明显。与单一模态AO驱动结果相比,除TN10p外的*t*检验结果均发生反转,这说明EI Niño-AO耦合模态对新疆极端冷指数的表现有一定的调制作用。

La Niña-AO耦合模态下6个极端冷指数的独立样本 *t* 检验显著性差异如图10所示。与单一模态



注：正（负）差异表示为红（蓝）色圆圈；通过（未通过）90%显著性检验的站点表示为实心（空心）圆圈；饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

图7 极端冷指数在单一-NAO模态下的显著性差异

Fig. 7 Significant difference in extreme cold indices for NAO positive-NAO negative phase

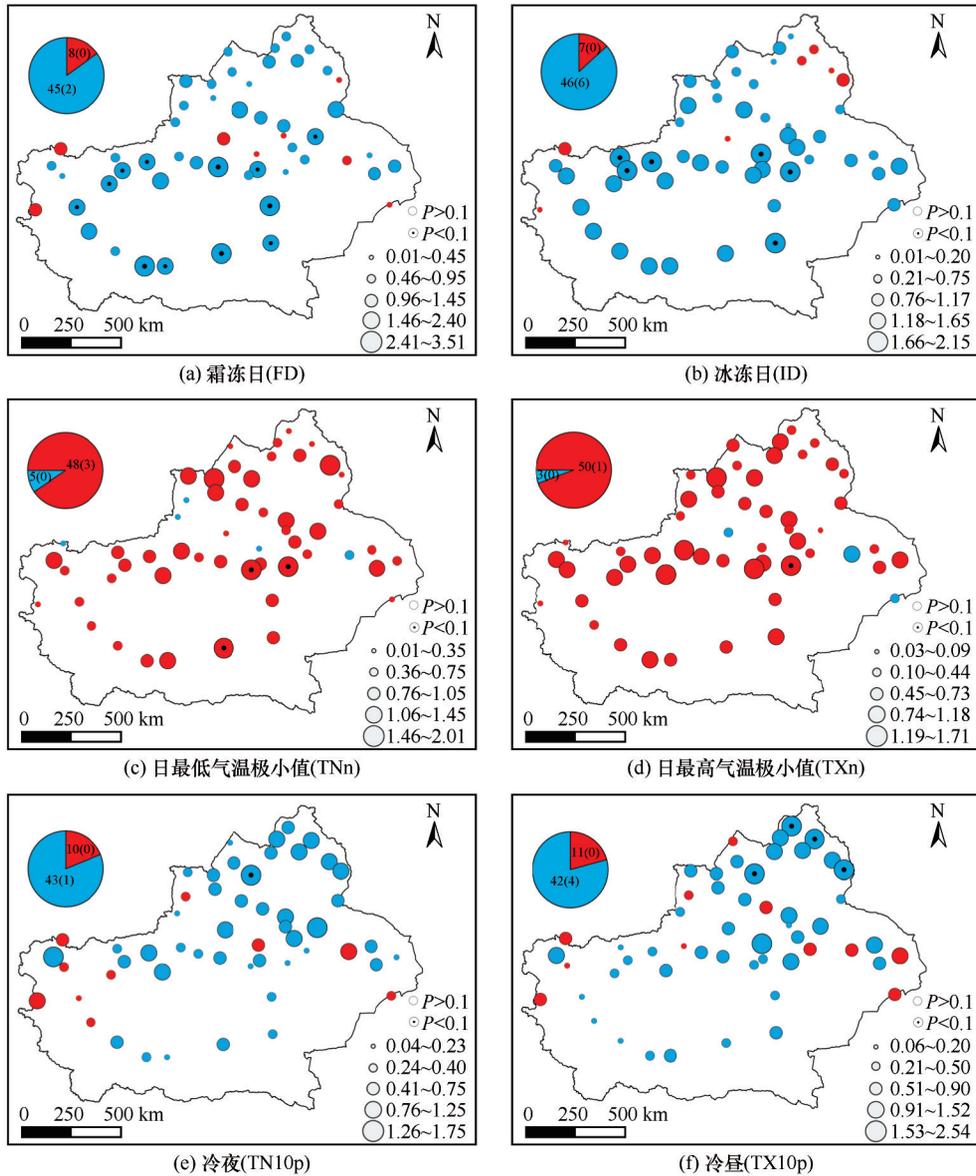
AO 驱动结果相比,在耦合模态中,除 TXn [图 10 (d)] 以外的冷指数均表现为负差异站点数量更多,这说明 La Niña 与 AO 负位相配置时,冷日日数、冷昼和冷夜占比较 AO 正位相偏多。对于极端低温值来说,当 AO 为正位相时, TNn 更低, AO 负位相时 TXn 更低。

2.5.2 ENSO-NAO 模态

EI Niño-NAO 耦合模态下 6 个极端冷指数的独立样本 *t* 检验显著性差异如图 11 所示。NAO 正位相期间,除 TN10p [图 11(e)] 以外的冷指数均为正差异的站点多于负差异站点,说明 EI Niño 与 NAO

正位相配置下,冷日日数较 NAO 负位相更多;但值得注意的是,该配置下更多站点的极端低温值高于 NAO 负位相,说明 EI Niño-NAO 负位相时新疆地区温度更低。与单一模态 NAO 驱动结果相比, EI Niño-NAO 耦合模态下的 ID [图 11(b)] 与 TX10p [图 11(f)] 的 *t* 检验结果发生反转。

La Niña-NAO 耦合模态下 6 个极端冷指数的独立样本 *t* 检验显著性差异如图 12 所示。在 NAO 正位相期间, FD [图 12(a)]、ID [图 12(b)] 和 TN10p [图 12(e)] 存在正差异的站点多于负差异站点; NAO 负位相期间, TNn [图 12(c)] 与 TXn [图 12(d)]



注：正（负）差异表示为红（蓝）色圆圈；通过（未通过）90%显著性检验的站点表示为实心（空心）圆圈；饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

图8 极端冷指数在单一ENSO模态下的显著性差异

Fig. 8 Significant difference in extreme cold indices for EI Niño-La Niña episodes

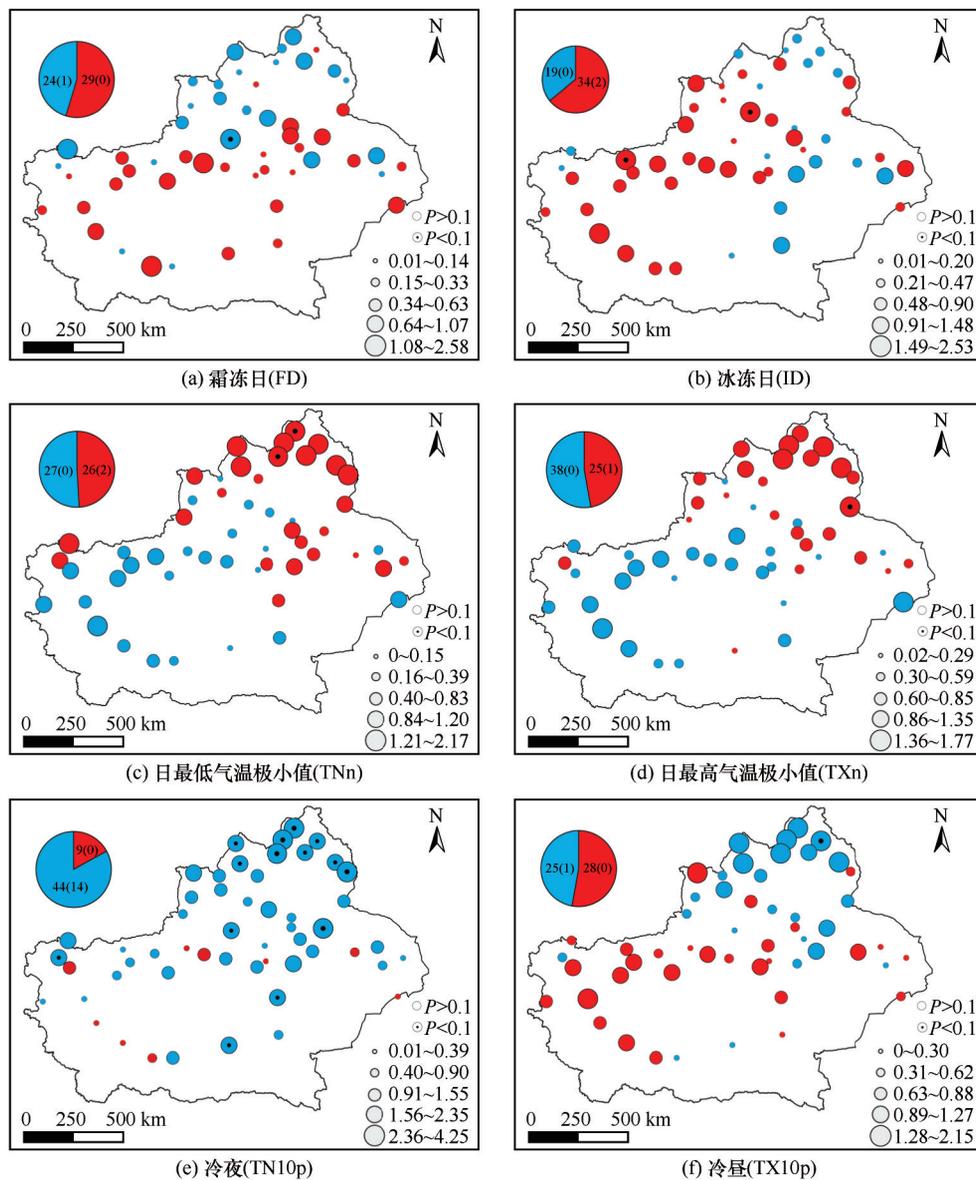
存在负差异的站点数量更多。这说明 La Niña 与 NAO 正位相配置下的冷日日数较 NAO 负位相时更多,且极端低温值也更低。与单一模态 NAO 驱动结果相比,除 FD 与 TX10p 以外的 *t* 检验结果均发生反转。

3 讨论

3.1 极端冷指数时空变化

从时间尺度来看,冷指数 FD、ID、TN10p 和 TX10p 总体呈下降趋势,TNn 与 TXn 呈显著上升趋势,这说明新疆气温有明显的变暖趋势。ID、TXn

和 TX10p 未通过显著性检验的站点分别占比 81.1%、88.7% 和 43.4%,表明以上三种冷指数在时间尺度上的变化并不显著。从空间尺度来看,一部分冷指数(FD、ID、TNn 和 TXn)变化而造成的增温区域主要集中在北疆、东疆和伊犁河谷地区,同时这些区域的冷指数变化幅度远大于其他区域。这与前人研究结果一致。胡文峰等^[36]认为北疆和东疆增温比南疆要明显,吐鲁番盆地是增温最剧烈的地区,南疆的西部是增温最缓慢的区域。陈颖等^[37]同样认为新疆极端冷事件发生的日数趋于减少;北疆西部和天山两侧是气候极端性变化最显著的区



注: 正(负)差异表示为红(蓝)色圆圈; 通过(未通过)90%显著性检验的站点表示为实心(空心)圆圈; 饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

图9 极端冷指数在EI Niño-AO耦合模式下的显著性差异

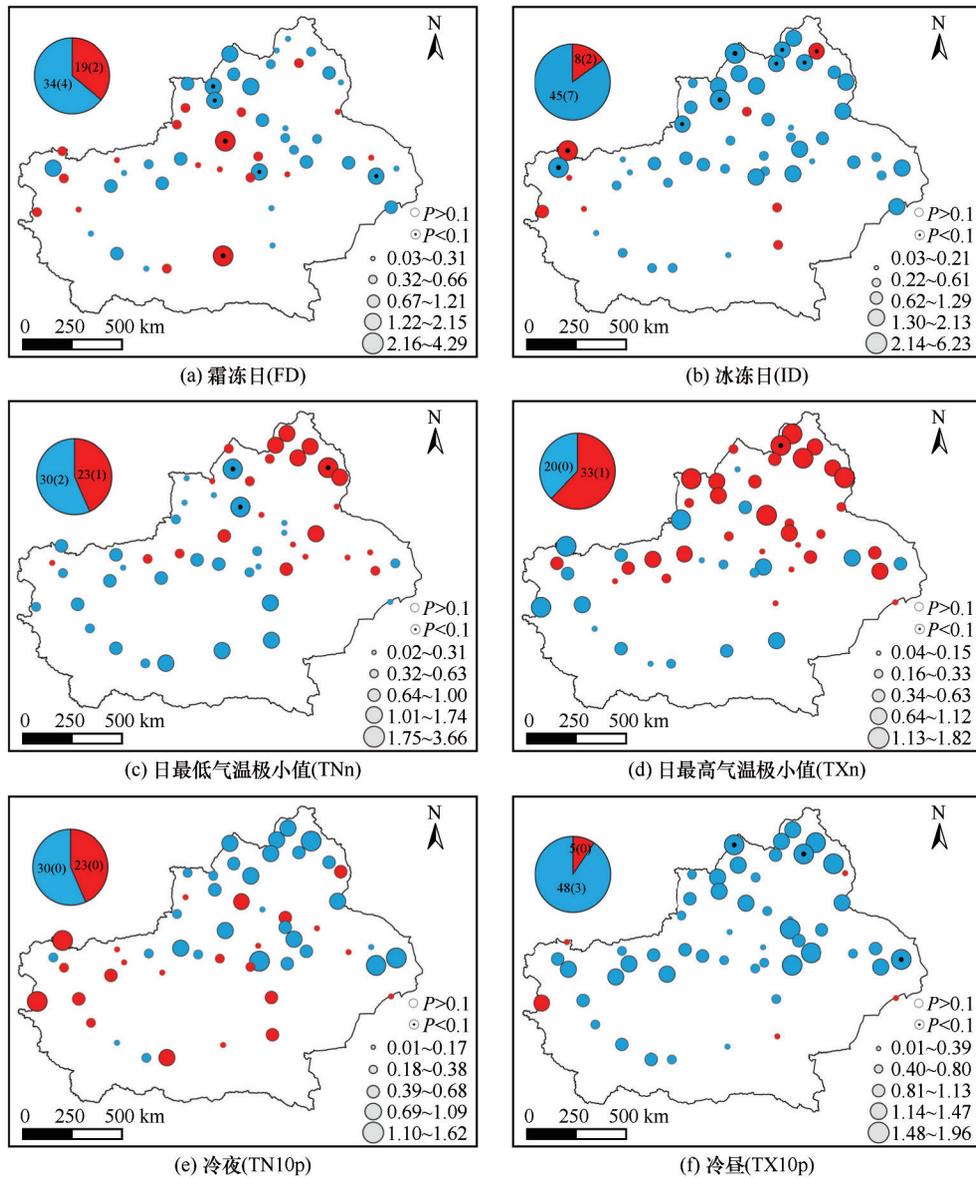
Fig. 9 Significant difference in extreme cold indices for positive AO-negative AO phase in El Niño years

域。出现这种现象的原因之一是由于新疆积雪主要分布在北疆和天山山区,气温增暖使北疆冰雪消融加快,地表反照率的减小使地表吸收更多的太阳辐射,温度升高造成冰雪进一步消融,这种正反馈机制让北疆和天山山区气候的极端性更为显著^[38]。同时,北疆、东疆和伊犁河谷地区作为新疆人口密集区,城市化^[39]与极端冷事件的变化也有密切关系。

3.2 交叉小波与小波相干分析

结果表明,在时频域内驱动因子与冷指数存在不同尺度的共振周期和时滞效应,不同驱动因子与

不同冷指数的相关性也存在差异。综合来看,AO、NAO与冷指数的相关性较为明显,ENSO对冷指数的影响最小,这与慈晖等^[40]的研究结果基本一致。AO与FD、TN10p和TNn的关系尤为密切,由于以上三种冷指数均使用日最低气温计算得出,说明AO对新疆地区的日最低气温影响较大。AO与TNn、TXn和TN10p呈显著正相关,NAO与TNn、TXn呈显著正相关,而ENSO与各极端指数的相关性均不显著,但存在明显的时滞性,其原因可能是ENSO事件具有滞后性,对区域年际气温变化的影响不显著^[41]。



注：正（负）差异表示为红（蓝）色圆圈；通过（未通过）90%显著性检验的站点表示为实心（空心）圆圈；饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

图 10 极端冷指数在 La Niña-AO 耦合模式下的显著性差异

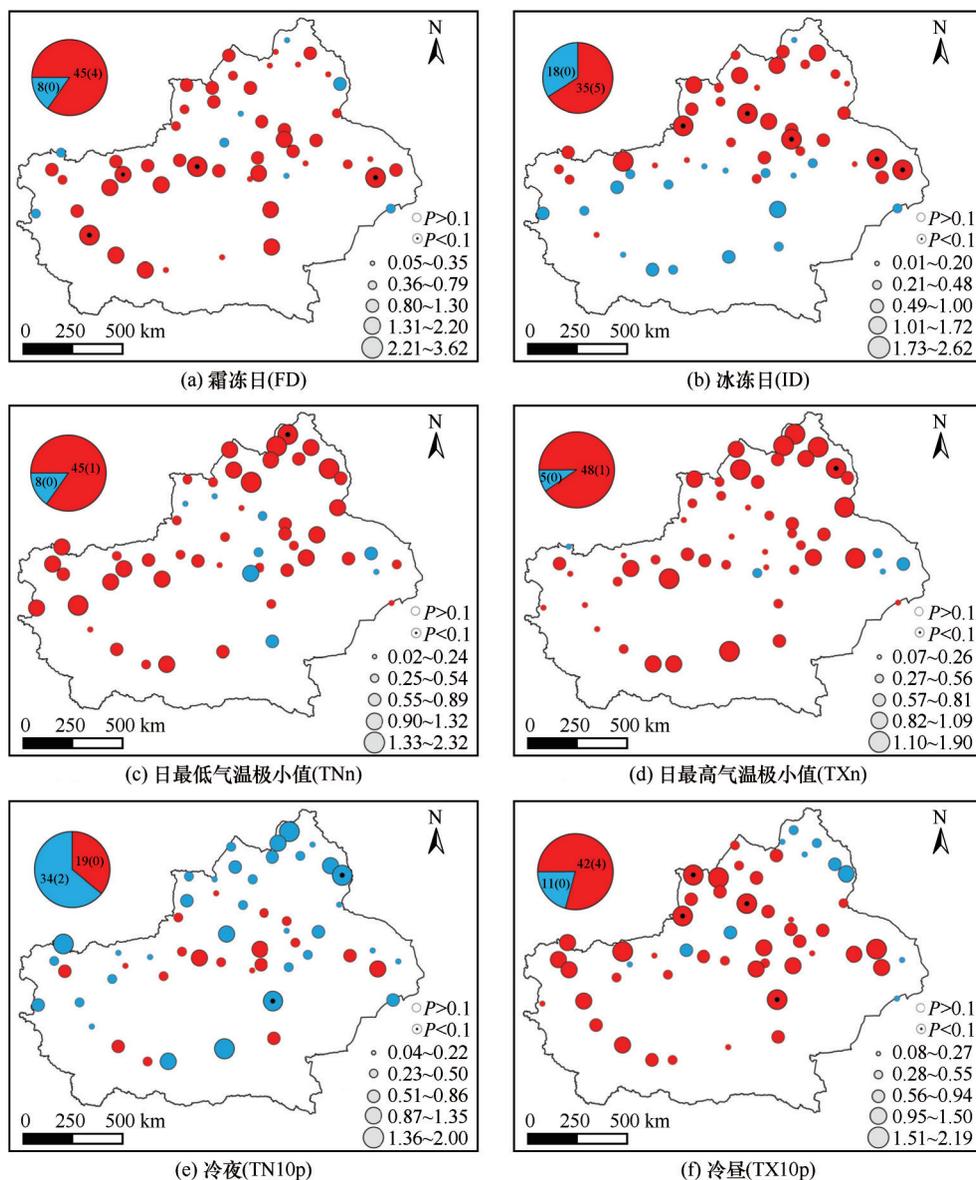
Fig. 10 Significant difference in extreme cold indices for positive AO-negative AO phase in La Niña years

3.3 耦合模态的影响机制分析

有研究结果显示,当AO负位相时新疆更易发生寒潮、暴雪等极端冷事件,这是由于贝加尔湖一带位势高度出现负异常,北半球盛行经向环流异常,乌拉尔山阻塞高压维持且冷空气侵入新疆^[42]。在本文耦合模态的分析中发现,La Niña与AO负位相、La Niña与NAO正位相配置时,新疆极端冷事件更易发生。为了研究出现这种现象差异的机制,挑选耦合模态下ENSO与AO、NAO不同位相的8种组合进行环流场距平合成分析(图13~图14)。

EI Niño与AO正位相配置时[图13(a)],海平

面气压场上北极地区为气压负距平,欧洲、乌拉尔山区域和中国西北存在气压正距平中心;500 hPa位势高度距平场上,亚洲中高纬度呈现“西低东高”的态势,乌拉尔山在距平风场上呈气旋分布。EI Niño与AO负位相配置时[图13(b)],70°N以北海平面气压场为显著正距平,欧亚大陆至北太平洋西部气压分布为“高-低-高”。500 hPa距平风场上,蒙古-西伯利亚呈气旋分布。该两种耦合模态下影响新疆的气流均为偏西气流,不利于极端冷事件的形成。La Niña与AO正位相配置时[图13(c)],欧亚大陆60°N以北与北太平洋海平面气压场分别为显



注：正（负）差异表示为红（蓝）色圆圈；通过（未通过）90%显著性检验的站点表示为实心（空心）圆圈；饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

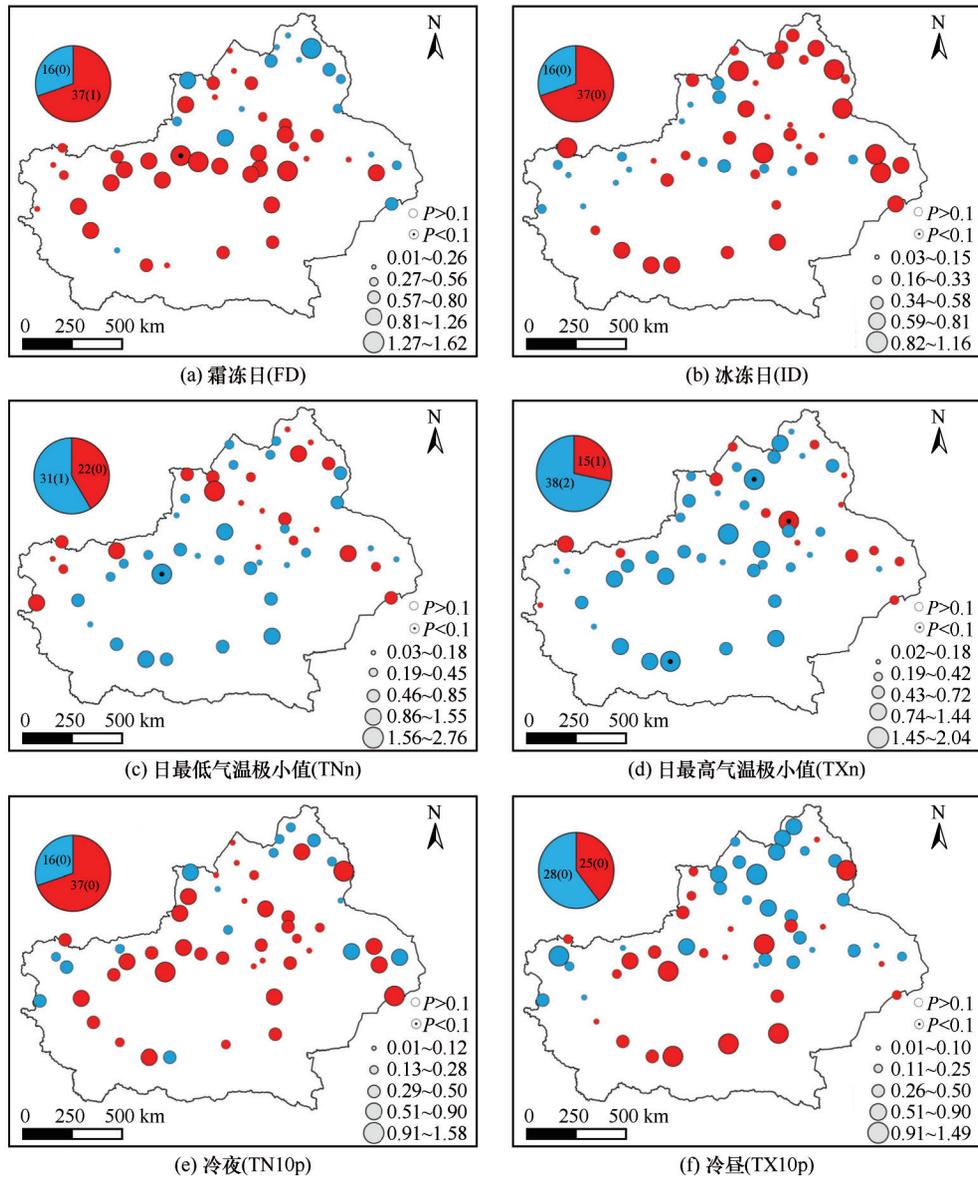
图 11 极端冷指数在 EI Niño-NAO 耦合模态下的显著性差异

Fig. 11 Significant difference in extreme cold indices for positive NAO-negative NAO phase in El Niño years

显著负距平；距平风场上新疆盛行东南气流，冷空气南下受阻，不易发生极端冷事件。La Niña 与 AO 负位相配置时[图 13(d)]，欧亚中高纬度海平面气压场以北正南负为主，乌拉尔阻塞加强；距平风场上新疆位于北风距平区，南下冷空气势力加强，促进极端冷事件的发展。沈柏竹等^[43]认为这种以 La Niña 为背景，AO 为负位相的配置会使极涡偏强，东亚槽偏西偏强。同时，中低纬度区域受高度场负异常影响促使高原高度场偏低，利于区域性极端冷事件的发生^[44]。

EI Niño 与 NAO 正位相配置时[图 14(a)]，乌拉

尔山区域出现气压负距平中心，中国大部分存在气压正距平；500 hPa 距平风场上，乌拉尔山区域存在气旋环流，冷空气南下至中亚向西传输，新疆受西南气流影响。EI Niño 与 NAO 负位相配置时[图 14(b)]，乌拉尔山区域出现气压负距平中心，气压分布由亚洲大陆至北太平洋中东部呈现为“低-高-低”的态势；500 hPa 距平风场上，新疆北部受西风影响。该两种耦合模态下新疆风向分别以西南气流与西风为主，不利于极端冷事件的形成。La Niña 与 NAO 正位相配置时[图 14(c)]，气压分布由亚洲大陆至北太平洋中东部呈现为“高-低-高”的态势，北



注：正（负）差异表示为红（蓝）色圆圈；通过（未通过）90%显著性检验的站点表示为实心（空心）圆圈；饼状图括号内部分为通过90%显著性检验的站点数量

图12 极端冷指数在La Niña-NAO耦合模态下的显著性差异

Fig. 12 Significant difference in extreme cold indices for positive NAO-negative NAO phase in La Niña years

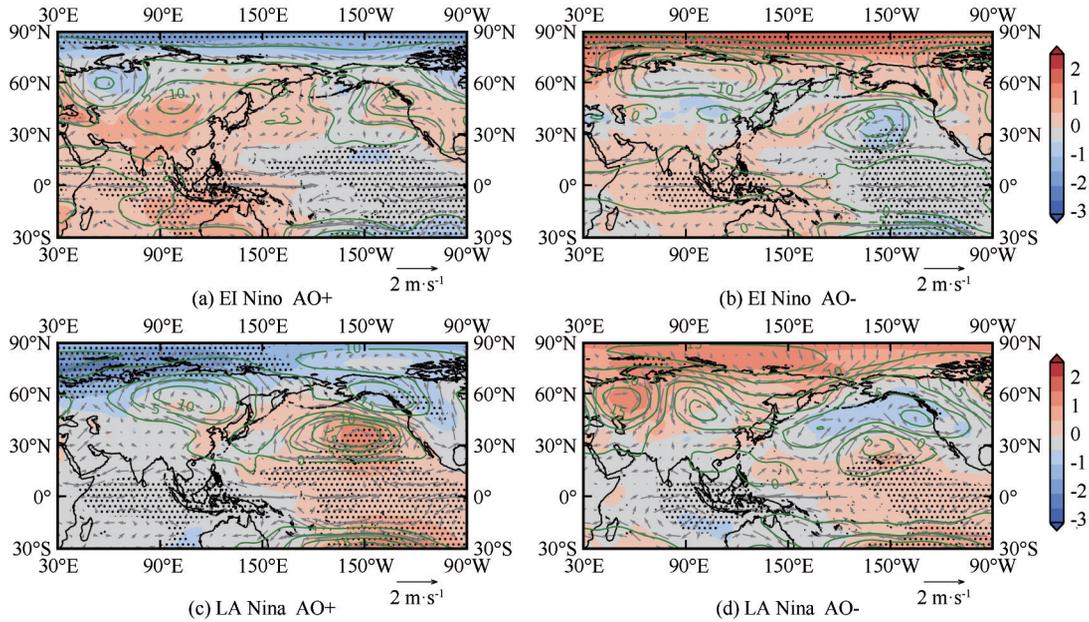
太平洋存在显著的气压正距平中心,新疆存在气压正距平;500 hPa距平风场上,冷空气南下至中国东北后向西传输,新疆受偏北气流影响显著,促进极端冷事件的发展。La Niña与NAO负位相配置时[图14(d)],中亚存在海平面气压场正距平中心,新疆气压分布为“西高东低”。500 hPa距平风场上,乌拉尔山与西伯利亚存在反气旋,新疆受偏北气流影响。

4 结论

本文选用了6个极端冷指数来研究新疆极端冷

事件的时空变化特征,利用交叉小波变换和小波相干对大气环流因子AO、NAO和ENSO指数与极端冷指数进行多尺度相关分析,同时研究了大尺度驱动因子的单一/耦合模态对冷指数的影响。得出以下结论:

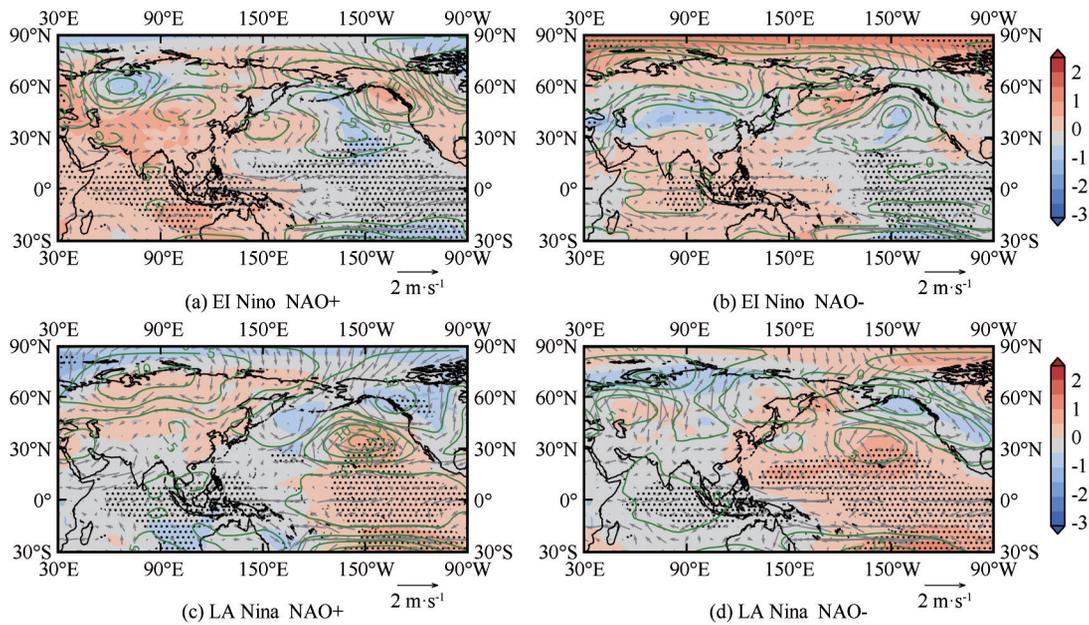
(1)时间尺度上,年均冷指数FD、ID、TN10p和TX10p呈显著下降趋势,冷指数均通过99.9%、95%、99.9%和99%显著性检验;年均冷指数TNn与TXn呈显著上升趋势,分别通过99.9%和95%显著性检验。FD、ID、TNn和TXn波动趋势为“升降交错”;以1981年为时间节点,之前TN10p>TX10p,之



注：海平面气压高（低）于常年平均表示为红（蓝）填色区域（单位：hPa）；黑色打点区域表示海平面气压通过95%显著性检验；等值线表示500 hPa位势高度距平场（单位：gpm）；箭头表示500 hPa矢量风场（单位：m·s⁻¹）

图13 ENSO-AO模态下环流场距平合成图

Fig. 13 The composite circulation fields according to the positive/negative phase between ENSO and AO



注：海平面气压高（低）于常年平均表示为红（蓝）填色区域（单位：hPa）；黑色打点区域表示海平面气压通过95%显著性检验；等值线表示500 hPa位势高度距平场（单位：gpm）；箭头表示500 hPa矢量风场（单位：m·s⁻¹）

图14 ENSO-NAO模态下环流场距平合成图

Fig. 14 The composite circulation fields according to the positive/negative phase between ENSO and NAO

后 $TN_{10p} < TX_{10p}$ 。总体来看,新疆气温有明显的变暖趋势。空间尺度上,冷指数(FD、ID、TNn和TXn)在北疆、东疆和伊犁河谷地区的变化幅度远大于其他区域。北疆TNn与TXn的上升幅度大于南疆,但空间差异较小。

(2)AO、NAO与冷指数的相关性较强, ENSO

与极端冷指数的相关关系最弱但存在明显的时滞效应。大尺度驱动因子对极端冷指数的总体影响效果为 $AO > NAO > ENSO$ 。AO与冷指数FD、TNn和TN_{10p}呈显著正相关,由于其均使用日最低气温值计算获得,说明AO与新疆地区的日最低气温值可能存在较强的相关关系。

(3)单一模态中, AO负(正)位相时冷日数更多(少); NAO负(正)位相和La Niña(EI Niño)事件时极端冷事件发生的可能性更大(小)。以ENSO为背景的耦合模态中, EI Niño-AO正(负)位相、EI Niño-NAO正(负)位相时冷日日数更多(少)。EI Niño-NAO负(正)位相时极端低温值更低(高), EI Niño-AO位相差异对极端低温值影响不大。La Niña-AO负(正)位相、La Niña-NAO正(负)位相时极端冷事件发生的可能性更大(小)。耦合模态中, ENSO对AO与NAO的影响不同, AO(NAO)更易受到EI Niño(La Niña)事件的调制作用。

(4)以ENSO为背景的耦合模态中, La Niña与AO负位相配置时, 欧亚中高纬度海平面气压场以“北高南低”为主, 乌拉尔阻塞加强; 新疆位于北风距平区, 南下冷空气势力加强。La Niña与NAO正位相配置时, 气压分布由亚洲大陆至北太平洋呈现为“高-低-高”的态势, 极地冷空气南下至中国东北后向西传输, 新疆受偏北气流异常影响显著。该两种耦合模态较其他组合更易促进新疆极端冷事件的发展。

新疆极端冷事件的形成是多尺度驱动因子在复杂模态下的综合过程, 本文仅初步分析了三种大尺度驱动因子不同组合模态下的极端冷指数变化过程, 而没有考虑更多的可能引起新疆极端冷事件的其他因素, 如东亚季风、北极海冰和太阳黑子等。多种大气内部变率和外部强迫因子是通过何种动力过程和耦合方式共同影响新疆极端冷事件的形成, 需要在后期研究中重点关注。

参考文献(References):

- [1] Filazzola A, Blagrove K, Imrit M A, et al. Climate Change Drives Increases in Extreme Events for Lake Ice in the Northern Hemisphere [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(18) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1029/2020GL089608>.
- [2] Diffenbaugh N S. Verification of extreme event attribution: Using out-of-sample observations to assess changes in probabilities of unprecedented events [J/OL]. *Science Advances*, 2020, 6(12) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2368>.
- [3] Kettle N P, Walsh J E, Heaney L, et al. Integrating archival analysis, observational data, and climate projections to assess extreme event impacts in Alaska [J]. *Climatic Change*, 2020, 163(2): 669-687.
- [4] Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J/OL]. *Nature Geoscience*, 2014, 7 [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>.
- [5] Luo D H, Yao Y, Feldstein S B. Regime transition of the North Atlantic Oscillation and the extreme cold event over Europe in January-February 2012 [J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(12): 4735-4757.
- [6] Walt A J, Fitchett J M. Trend analysis of cold extremes in South Africa: 1960—2016 [J/OL]. *International Journal of Climatology*, 2020, 41(3) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1002/joc.6947>.
- [7] Wang Weisheng, Lin Weifang, He Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas Blackout to the renewable energy development in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4033-4043. [王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国德州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4033-4043.]
- [8] Kodra E, Steinhäuser K, Ganguly A R. Persisting cold extremes under 21st-century warming scenarios [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(8) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1029/2011GL047103>.
- [9] Tan M L, Samat N, Chan N W, et al. Analysis of precipitation and temperature extremes over the Muda River Basin, Malaysia [J/OL]. *Water*, 2019, 11(2) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.3390/w11020283>.
- [10] Ruml M, Gregorić E, Vujadinović M, et al. Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961—2010 [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 183: 26-41.
- [11] Feng Ru, Yu Ruide, Zheng Hongwei, et al. Spatial and temporal variations in extreme temperature in Central Asia [J/OL]. *International Journal of Climatology*, 2017, 38(1) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1002/joc.5379>.
- [12] Woo S H, Kim B M, Jeong J H, et al. Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over Northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979—2011) [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117 (D18) [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1029/2011JD016929>.
- [13] Rusticucci M. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 106: 1-17.
- [14] Kadokura S, Kato H. Seasonal/regional variation of variability characteristic of daily maximum/minimum temperatures in Japan observed and reproduced by RegCM nested in NCAR-CSM [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2005, 83(1): 69-87.
- [15] Park T W, Hong J G, Park D S R. Intra-seasonal characteristics of wintertime extreme cold events over South Korea [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(5): 2639-2658.
- [16] Liu Xiaowan, Xu Zongxue, Peng Dingzhi, et al. Influences of the North Atlantic Oscillation on extreme temperature during the cold period in China [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(1): 43-49.
- [17] Dai Ying, Tan Benkui. On the role of the eastern pacific teleconnection in ENSO impacts on wintertime weather over East Asia and North America [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(4): 1217-1234.
- [18] Chen Shaoyong, Wang Jinsong, Ren Yan, et al. Evaluative characteristic of extreme minimum temperature of Northwest China in recent 49 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(5): 1266-1273. [陈少勇, 王劲松, 任燕, 等. 近49年中国西北地区极端低温事件的演变特征 [J]. *高原气象*, 2011, 30(5): 1266-1273.]
- [19] Zhang Linmei, Huang Ali, Xie Xiuqin. Variation of extremely low temperature events in winter of Aletai Region [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(1): 89-94. [张林梅, 黄阿丽, 谢秀琴. 新疆阿勒泰地区冬季极端低温事件特征分析 [J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 89-94.]

- [20] Guan Xuefeng, Sun Weiguo, Li Minjiao, et al. Climate change in north Xinjiang and its response to Arctic Oscillation during the period of 1965—2012[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(4): 681-689. [关学锋, 孙卫国, 李敏皎, 等. 1965—2012年新疆北部地区气候变化及其对北极涛动的响应[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 681-689.]
- [21] Zhang Yang. Study on the characteristics and impact factors of climate change in Northern Xinjiang in recent 56 years [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2019. [张扬. 近56年新疆北部地区气候变化特征及影响因子研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2019.]
- [22] Zhao Guoyong, Han Yan, Liu Weizhen, et al. Spatial-temporal variations of extreme temperature events in Xinjiang from 1961 to 2016[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science)*, 2021, 34(2): 248-254. [赵国永, 韩艳, 刘维真, 等. 1961—2016年新疆极端气温事件变化特征[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2021, 34(2): 248-254.]
- [23] Wang Baolong. Study in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, Northwest China during 1960—2009 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [汪宝龙. 1960—2009年新疆极端气温和降水事件的变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [24] Li Chongyin, Yang Hui, Zhao Jingjing. Combinational anomalies of atmospheric circulation system and occurrences of extreme weather/climate events[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(3): 321-333. [李崇银, 杨辉, 赵晶晶. 大气环流系统组合性异常与极端天气气候事件发生[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 321-333.]
- [25] Li Qihu, Chen Yaning, Shen Yanjun, et al. Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1007-1018.
- [26] Chen Xiaoyan. On the construction of Xinjiang natural disaster emergency management system[J]. *Value Engineering*, 2019, 38(18): 14-17. [陈晓艳. 论新疆自然灾害应急管理体系建设[J]. *价值工程*, 2019, 38(18): 14-17.]
- [27] Wang Tianzhu, Zhao Yong. Influences of summer thermal anomalies over the Tibetan Plateau and the tropical Indian Ocean on summer rainfall in the Tarim Basin[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, 26(3): 275-288. [王天竺, 赵勇. 夏季青藏高原和热带印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的影响[J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(3): 275-288.]
- [28] Zhou Ying, Ma Long, Liang Longteng. Response of temperature mutation in Inner Mongolia to its influencing factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 184-193. [周莹, 马龙, 梁珑腾. 内蒙古气温突变及其影响因子间的响应关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 184-193.]
- [29] Chen Wen, Lan Xiaoqing, Wang Lin, et al. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(12): 1355-1362.
- [30] Yin Hong, Sun Ying. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(4): 363-373. [尹红, 孙颖. 基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 363-373.]
- [31] Tian Q, Yang S L. Regional climatic response to global warming: trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s[J]. *Quaternary International*, 2016, 440: 1-11.
- [32] Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961—2007[J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 92-100.
- [33] Hu Sheng, Qiu Haijun, Song Jinxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on runoff process in the north slope of Qinling Mountains: a case of the Bahe River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 967-978. [胡胜, 邱海军, 宋进喜, 等. 气候变化对秦岭北坡径流过程的影响机制研究——以灞河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(5): 967-978.]
- [34] Helsel D R, Hirsch R M. Statistical methods in water resources, in hydrologic analysis and interpretation[M]. USA: Geological Survey Techniques and Methods, 2020: 13-16.
- [35] Goly A, Teegavarapu R S V. Individual and coupled influences of AMO and ENSO on regional precipitation characteristics and extremes[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 4686-4709.
- [36] Hu Wenfeng, Chen Lingling, Yao Junqiang, et al. Analysis of the temporal and spatial evolution of temperature and precipitation in Xinjiang under the background of climate change[J]. *Journal of Fuyang Normal University (Natural Science)*, 2020, 37(3): 90-95. [胡文峰, 陈玲玲, 姚俊强, 等. 气候变化背景下新疆气温和降水时空演变特征分析[J]. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 2020, 37(3): 90-95.]
- [37] Chen Ying, Li Weijing, Shi Hongzheng, et al. Variations of extreme cold(warm) events in winter in Xinjiang under different climate background [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, 10(4): 17-24. [陈颖, 李维京, 史红政, 等. 不同气候背景下新疆冬季极端冷(暖)事件的变化特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(4): 17-24.]
- [38] Wang Hui, Wang Meixia, Wang Shengli, et al. Spatial-temporal variation characteristics of snow cover duration in Xinjiang from 1961 to 2017 and their relationship with meteorological factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 61-69. [王慧, 王梅霞, 王胜利, 等. 1961—2017年新疆积雪期时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 61-69.]
- [39] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in North China[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(6): 1589-1598. [周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J]. *高原气象*, 2014, 33(6): 1589-1598.]
- [40] Ci Hui, Zhang Qiang, Zhang Jianghui, et al. Spatiotemporal variations of extreme temperature events over Xinjiang during 1961—2010[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(4): 129-138. [慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961—2010年新疆极端气温时空演变特征研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(4): 129-138.]
- [41] Xu Jing. The impact of ENSO events to droughts and floods in Qinghai Province[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013. [徐静. ENSO事件对青海省旱涝灾害影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.]
- [42] Zhang Shuping, Zhu Congwen. Possible causes of circulation anomalies associated with subsequent snowstorms over the north of Xinjiang during winter 2009[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(5): 833-846. [张书萍, 祝从文. 2009年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征及其成因分析[J]. *大气科学*, 2011, 35(5): 833-846.]
- [43] Shen Baizhu. The contact and effect of Arctic Oscillation and polar vortex in winter on frequent cold winter occurred in Eurasia since 21th century [D]. Lanzhou: Lanzhou University,

2013. [沈柏竹. 21世纪以来欧亚冷冬频发与冬季AO、极涡的联系及其机理[D]. 兰州大学, 2013.]
- [44] Zhang Tiaofeng, Yang Zhaoming, Wen Tingting, et al. Characteristics and influencing factors of persistent low temperature

events in northeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(4): 897-905. [张调风, 杨昭明, 温婷婷, 等. 青藏高原东北部区域持续性低温事件的特征及影响因子分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 897-905.]

Individual and coupled influences of large-scale driving factors on extreme cold events in Xinjiang

YAN Xiaoyue^{1,2,3}, JIANG Fengqing^{1,3}, LIU Chao², WANG Dagang^{1,2,3}

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

Abstract: The extreme cold events that occur occasionally ought to be valued under the trend of global warming. Meanwhile, exploring the influences of large-scale driving factors on extreme cold events in Xinjiang is of great significance to predict and cope with disasters caused by climate change. Based on extreme cold indices which are calculated by daily air surface temperature data from 53 meteorological stations covering the period from 1961 to 2016. Temporal and spatial characteristics of extreme cold events in Xinjiang have been analyzed using linear regression analysis and Inverse Distance Weighted, it is found that the average extreme cold indices have a significant change in spatial point, this means the temperature of Xinjiang has a increasing trend. In the spatial-scale, the variation range of cold indices in northern Xinjiang, eastern Xinjiang and Ili River Valley have dramatic change rather than other region. Cross wavelet transform are used in order to analyze the relationship between extreme cold indices, including frost days(FD), ice days(ID), daily minimum air temperature (TNn), maximum of daily maximum temperature (TXn), cold nights(TN10p), cold days(TX10p), and large-scale driving factors [Arctic Oscillation (AO), North Atlantic Oscillation (NAO), El Niño and the Southern Oscillation (ENSO)], the result shows that AO and NAO have strong relevance with extreme cold indices, the overall influence of large-scale driving factors on extreme cold indices is AO>NAO>ENSO. Using parametric hypothesis tests verify statistically significant changes in the cold indices characteristics from one phase to another of each oscillation and also in coupled phases. During the individual factor driving modes, the extreme cold events have occurred easier on AO negative phase, NAO negative phase, and La Niña event. During the coupled factors driving modes, the number of cold days are more on El Niño-AO positive phase and El Niño-NAO positive phase, and the lower temperature values of extreme cold events would be smaller on El Niño-NAO negative phase. Extreme cold events are more likely to occur during the La Niña-AO negative phase and La Niña-NAO positive phase. The El Niño (La Niña) event has a modulating effect on the AO (NAO). To explore the mechanism for the coupled modes, the atmospheric circulation systems are discussed via anomalies composite analysis by using National Centers for Environmental Prediction(NCEP) reanalysis data. The extreme cold events in Xinjiang are more likely to occur during the La Niña-AO negative phase and La Niña-NAO positive phase, and the causes are related to the westward path of cold air due to the anomalous mid and high latitude potential in Eurasia, the strengthening of Ural blocking, and the northerly airflow affecting Xinjiang.

Key words: large-scale driving factors; extreme cold events; parametric hypothesis tests; individual/coupled influences; Xinjiang

(责任编辑: 孙建奇)