

中国冬季区域性极端低温事件分类及其与气候指数极端性的联系*

王晓娟¹⁾²⁾ 沈柏竹¹⁾ 龚志强^{3)†} 封国林⁴⁾

1) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) (常熟理工学院物理与电子工程学院, 常熟 215500)

3) (国家气候中心监测诊断室, 北京 100081)

4) (中国气象局国家气候中心开放实验室, 北京 100081)

(2013年4月10日收到; 2013年7月1日收到修改稿)

基于区域性极端低温事件客观识别技术, 对 1951—2010 年中国冬季的区域性极端低温事件进行客观识别. 根据事件的空间分布特征, 将综合指数前 60 位的事件划分为全国型、东部型、东北-华北型、华北-华南型、北方型和西北-华南型六类; 通过分析不同区域类型低温事件形成的环流背景场验证了分类的有效性. 在此基础上, 以 1971 年 1 月 21 日开始的典型事件为例, 分析了事件对应的海温场、高度场和风场的异常, 确定与区域性极端低温事件联系较密切的可能气候因子, 进而分析不同类型事件与各气候指数异常的对应关系. 总体而言, 赤道中东太平洋海温指数异常偏小、北太平洋涛动指数异常偏小、北极涛动指数异常偏小和冬季风异常偏强时, 发生区域性极端低温事件的概率较高; 且这四种指数的历年冬季平均值达到 15%(或 85%) 极端阈值的年份中, 发生区域性极端低温事件的百分率分别达到 80.0%, 77.8%, 60.0% 和 62.5%, 从而为区域性极端低温事件的诊断和预测研究等提供了一定的参考.

关键词: 区域性极端低温事件, 空间分类, 气候指数, 极端

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.62.229201

1 引言

近半个世纪以来, 在全球变暖的整体格局下, 亚洲及中国大部分区域的温度呈持续增长的趋势^[1,2]. 中国的年平均气温在过去的 50 年里上升了约 1.1 °C^[3]. 与此同时, 在全球变暖的背景下, 地球气候系统也存在着各种类型的短时期、区域性的异常变化. 例如, 近几年北半球范围内区域性极端低温事件 (regional low temperature extreme events, RELTE) 频繁发生, 且影响范围大、持续时间长. 就我国而言, 近年来频繁发生的 RELTE 主要有: 2008 年 1 月中国南方地区经历了历史上罕见的

大范围低温、雨雪和冰冻灾害^[4-6]; 2009/2010 年冬季, 包括中国在内的北半球多个国家和地区遭受大范围低温冰雪的袭击; 2011 年 1 月, 我国发生了近年来极为罕见的一次全国性极端低温事件, 其影响范围之广、持续时间之长是 1977 年以来最重大的一次事件^[7].

全球增暖背景下, 区域性极端低温事件的频繁发生往往会造成巨大的灾难. 这也对 RELTE 的检测、诊断分析及其预测等提出了新的挑战^[8-14]. 目前, 国内已经开展了一些相关研究, 例如: 张宗婕和钱维宏^[15] 发展了针对区域持续性低温事件的识别技术, 建立了区域持续性低温事件库, 初步分析了低温事件的时空特征; 任福民等^[16] 在客观

* 国家自然科学基金 (批准号: 41305075)、国家重点基础研究计划 (批准号: 2012CB955203, 2012CB955902) 和公益性行业专项 (批准号: GYHY201106016) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gzq0929@126.com

天气图分析法的基础上,提出了一种持续性区域极端事件客观识别方法,能够有效识别事件的空间范围和时间持续的过程特征;龚志强等^[17]对该方法进行完善,发展了区域性极端低温事件客观识别技术(objective identification technique for regional low temperature extreme events, OITRELTE),并建立了检测得到的RELTE库;王晓娟等^[18]利用OITRELTE对我国近50年的区域性低温事件进行了检测,并从空间分布和时间变化趋势等角度研究了RELTE的时空变化特征.此外,张宗婕和钱维宏^[19]通过大气变量物理解析的方法,提取出对极端事件有指示意义的天气尺度扰动信号,追踪区域性极端事件发生之前天气扰动的来源、传播路径及提前时间(日数).龚志强等^[20]分析了欧亚500 hPa高度场关键区异常配置与中国冬季RELTE的联系.但值得指出的是,由于气候系统是一个复杂的多种因子相互作用的系统,气候诊断和预测离不开各种环流和海洋指数等^[21-25].因此,本文在前人研究基本确定一些可能影响要素的前提下,借鉴已有的RELTE研究成果^[17,18],分析不同类型事件与各种环流和海洋指数等的联系,尤其探讨各种指数出现极端异常情况下与RELTE的对应关系,这将有助于深入理解RELTE形成的机制及其与气候系统背景因子的联系,进而对RELTE有全面的认识.

2 资料与方法

OITRELTE检测所用的逐日最低温度资料为:国家气象信息中心发布的经过质量控制的731站点的逐日最低温度资料,研究时段为1951—2010年当年11月份至次年3月份.环流背景分析采用NCEP/NCAR逐日高度场和风场资料^[26],水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,垂直分辨率为17层.海表温度资料采用1961—2010年NOAA ERSST的逐月海面温度资料^[27],分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$.

北太平洋涛动(NPO)指数采用刘宗秀等^[28]计算的500 hPa高度场的区域均值差的标准化值;西风漂流区海表温度指数采用廉毅等^[29]计算的规定区域的海表温度的平均值的标准化值;西太平洋副高西伸脊点、西太平洋副高脊线、亚洲极涡强度、亚洲极涡面积、东亚槽强度、东亚槽位置指数采用国家气候中心的74项环流指数;北极涛动(AO)指数和赤道中东太平洋海温(NINO3.4)指数采用

NCEP网站的逐月资料.冬季风指数采用施能等^[30]定义的海陆500 hPa高度场的差值重新计算得到.考虑到各种指数多数为逐月资料,在分析与区域性低温事件联系时,根据事件发生的月份和持续时间进而考虑当月的指数值或两个月指数的平均值的异常情况.

RELTE的识别采用Ren等^[16]、龚志强等^[17]发展的OITRELTE.该方法主要包括:1)极端低温阈值的确定;2)极端低温事件空间区域的识别;3)空间区域的连续性过程提取;4)指标体系.首先,对单日极端低温事件进行空间区域识别,进而识别临时事件和低温带的重合信息,对每日临时事件和低温带的信息进行整合,可客观识别出连续过程的极端低温事件.采用该技术对1951—2010年的我国冬季区域性低温事件进行客观识别以建立RELTE库.

区域性极端低温事件,既包含空间特征,又包含时间演变特征,因此采用两个级别的指标^[17,13]:一级指标为过程量,二级指标为逐日变化量.二级指标主要描述一次极端低温事件的逐日演变,主要包括逐日极端值(Q_d)、逐日累计强度(L_d)、逐日影响面积(A_d)和综合考虑上述三种特征的综合指数(Z_d)和事件逐日影响范围几何中心(Loc_d):

$$Q_d = \min(T_j) \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

$$L_d = \sum_j (T_j - T_0^j) \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$A_d = \sum_j (a_j) \quad j = 1, 2, \dots, m_p, \quad (3)$$

$$Z_d = e_1 Q_d + e_2 L_d + e_3 A_d, \quad (4)$$

其中, j 表示逐日发生达到极端事件阈值的站点, T_0^j 表示各台站极端事件阈值, m 为区域性极端事件过程中的逐日台站数.(3)式中计算逐日影响面积时,先采用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率对站点网格化再计算面积, a_j 为每个网格点代表的面积, m_p 为事件过程中逐日最大影响范围内的网格数.(4)式中 e_1, e_2, e_3 为加权系数.一级指标主要描述极端低温事件过程的综合特征,包括过程极端值(Q)、过程累计强度(L)、累计影响面积(A)、最大覆盖面积(A_{\max})、持续天数(N)、综合指数(Z)和事件最大影响范围的几何中心:

$$Q = \min(Q_d) \quad d = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

$$L = \sum_{i=1}^N L_d, \quad (6)$$

$$A_{\max} = \min(A_d) \quad d = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

$$A = \sum_{i=1}^N A_d, \quad (8)$$

$$Z = e_1 Q + e_2 L + e_3 N + e_4 A, \quad (9)$$

其中, d 为事件过程中的某天, N 为事件持续天数, (9) 式中 e_1, e_2, e_3, e_4 为加权系数, 计算过程综合指数时, 先对逐日事件进行标准化, 再加权求和 [18]. 事件几何中心的计算方法如 (10) 式所示,

$$\begin{aligned} Lat &= \sum_{i=1}^m lat_i/m, \\ Lon &= \sum_{i=1}^m lon_i/m, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 lat_i 为单个站点的纬度, lon_i 为单个站点的经度.

OITRLTE 的优点在于: 1) 给定一组参数以后, OITRLTE 能够客观识别区域性极端低温事件, 这类事件有别于传统的单个站点的极值, 而是空间上集中于某一区域, 时间上有一定持续性的事件; 传统的研究中是无法给出此类事件空间范围的界定、起始时间和结束时间的判断等; 2) OITRLTE 同时包含了一套内容相对丰富的指标体系, 能够从事件的极端程度、影响范围、持续时间和综合影响等角度对事件进行多方面的描述.

3 结果与分析

3.1 区域性极端低温事件的分类

利用 OITRELTE 对我国 1951—2010 年当年 11 月份至次年 3 月份的逐日最低温度进行检测, 在一定的检测标准下, 共检测得到区域性极端低温事件 559 次. 图 1 是 559 次区域性极端低温事件几何中心的空间分布情况. 从图中可以看出, 559 次区域性极端低温事件的几何中心存在两个显著的事件带: 东北 - 华北 - 黄淮的事件带, 新疆北部 - 西北中部 - 西北东部的事件带. 此外, 青藏高原东部和西南南部低温事件中心出现的次数也相对密集.

从等概率的角度考虑, 近 60 年中十年一遇的极端异常事件发生的次数约为 6 次, 如果以 10% 作为极端异常事件的划分标准, 则这类综合影响较大

的异常事件约为 60 次. 这 60 次事件的共同特点是: 影响范围大、持续时间长、强度大, 对社会和经济造成的影响大. 因此, 对综合指数值最大的 60 次事件根据其地理位置的不同进行分类. 根据这 60 次区域性极端低温事件最大的影响范围, 我们大致可以将其分成 6 类 (如图 2 所示): 分别是全国型、东部型、东北 - 华北型、华北 - 华南型、北方型、西北 - 华南型. 其中, 全国型共 20 次, 东部型共 15 次, 东北 - 华北型共 5 次, 华北 - 华南型共 7 次, 北方型共 3 次, 西北 - 华南型共 10 次.

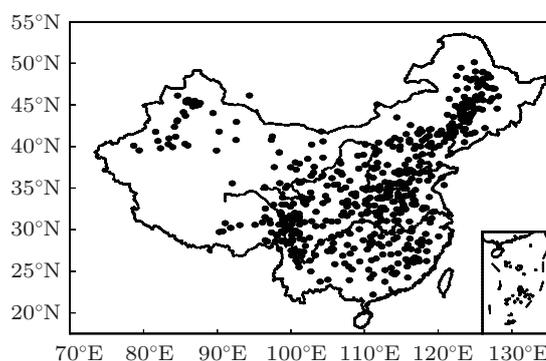


图 1 559 次区域性极端低温事件几何中心的空间分布

为了进一步分析不同区域类型的低温事件对应的环流特征, 将不同类型区域性极端低温事件的 500 hPa 高度场及 850 hPa 距平风场进行了合成分析 (北方型和东北 - 华北型的高度场和距平风场的合成分析特征较为类似, 故下文分析归为一类). 从图 3 可以看出, 全国型区域性极端低温事件的 850 hPa 距平风场在中国的东部地区存在显著的异常偏北风, 西部地区则存在显著异常东北风, 而 500 hPa 高度场中亚槽异常的深厚和稳定, 从而容易形成覆盖我国大部分区域的全国型极端低温事件; 东部型事件的 850 hPa 距平风场在中国的东部地区存在异常的偏北风, 异常风场主要沿着东部路径南下, 且东亚槽显著偏东, 冷空气沿着槽南下, 主要影响中国东北地区, 容易在东部形成大范围持续低温; 东北型和北方型事件则 850 hPa 距平风场在中国的北方地区存在异常偏东北风, 北方冷空气对中国南方地区的影响较小, 东亚槽位置偏东, 相对全国型浅薄一些, 且呈西南 - 东北方向, 不利于冷空气南下影响南方地区; 华北 - 华南型事件对应东亚槽显著偏东, 850 hPa 距平风场在华北以北地区存在显著的异常偏东风, 在华北至华南则存在显著的异常偏

北风, 有利于冷空气影响到南方地区, 西北 - 华南型事件对应东亚槽偏深, 且呈西北 - 东南方向, 有利于冷空气持续南下, 且 850 hPa 距平风场存在显著的

西北至东南沿海的异常西北气流, 容易造成西北至南方地区的低温.

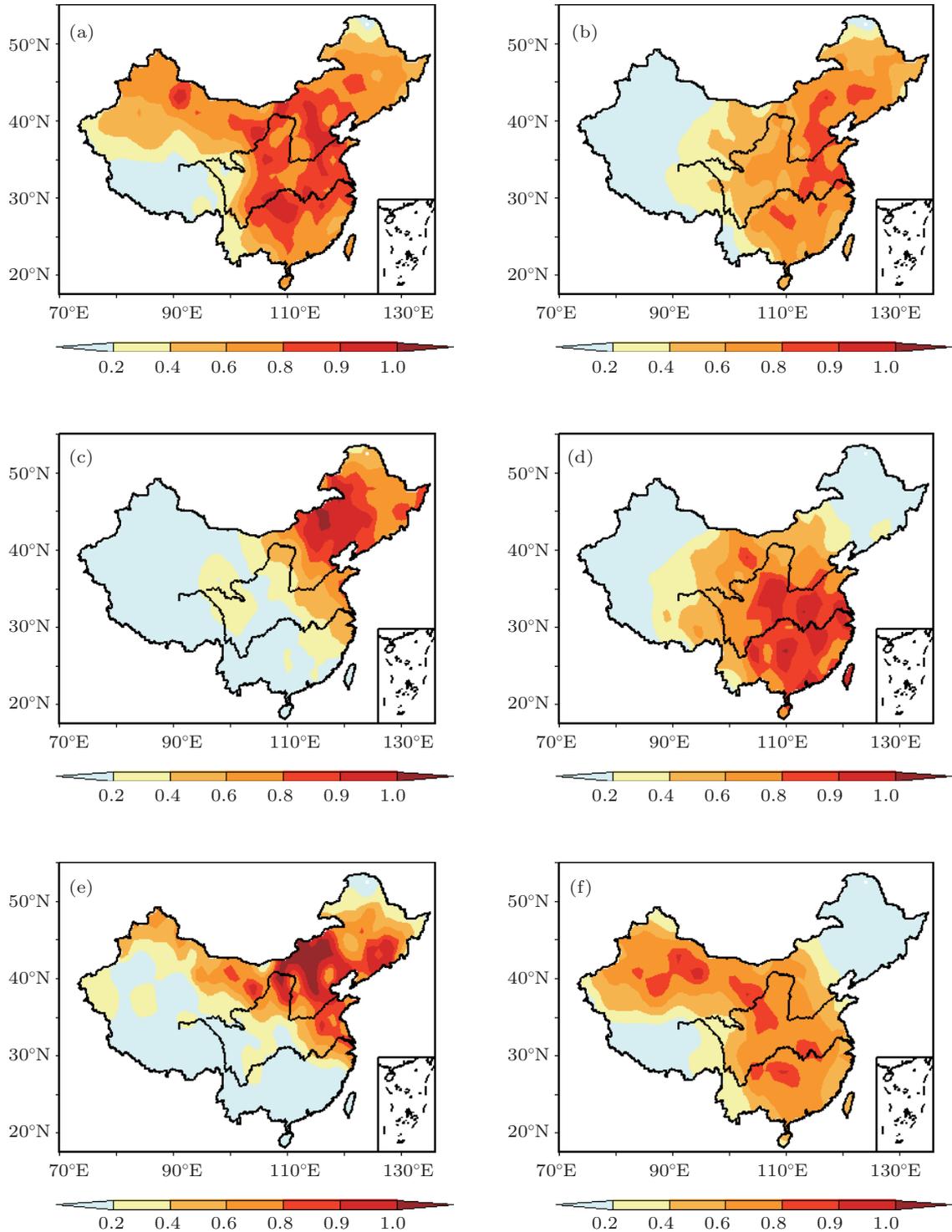


图2 综合指数值最大的60次区域性极端低温事件的分类 (a) 全国型; (b) 东部型; (c) 东北 - 华北型; (d) 华北 - 华南型; (e) 北方型; (f) 西北 - 华南型 (填色图表示的是站点发生区域性极端低温事件的相对频次)

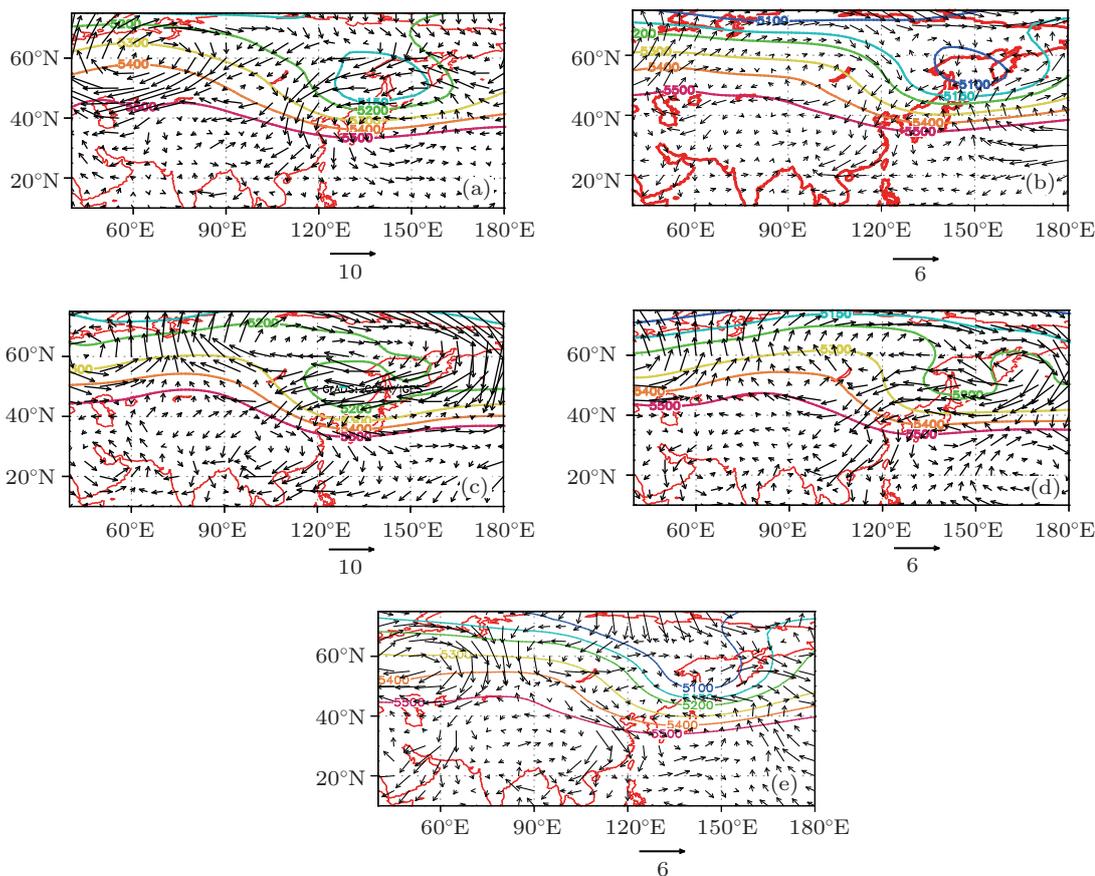


图3 5种主要区域性低温事件类型的合成500 hPa高度场及850 hPa距平风场 (a) 全国型; (b) 东部型; (c) 北方型/东北-华北型; (d) 华北-华南型; (e) 西北-华南型

3.2 区域性极端低温事件个例分析

对区域性极端低温事件分类的基础上, 首先结合个例讨论对区域性极端低温事件需要重点考虑哪些可能的影响因子. 1971年1月21日—2月9日发生了一次典型区域性极端低温事件, 结合该次事件分析与区域性低温事件所对应的大气和海温等可能的影响因素. 该事件持续时间为20天, 过程极端低温值为 -40.4°C , 综合指数值为2.043. 事件主要发生的区域包括内蒙古中部、华北大部、西北东部、西南大部、江南、华南等大范围区域, 属于第四类华北-华南型事件(图4), 且本次事件主要以冷干型为主.

图5是1970/1971年冬季的海表温度距平图. 从图中可以看出: 这次事件期间赤道中东太平洋海温异常偏低, 属于中等强度的La Nina事件范畴. 已有研究表明^[31-36]: 强La Nina事件发生的当年冬季, 亚洲中纬度大气环流的经向发展会异常强烈. 由暖空气构成的高压脊可向北延伸到极区, 引导那

里的冷空气频繁南下, 侵入中国, 造成中国北方和东部大部分地区气温偏低. 同时, 在副热带和热带地区副高位置偏北偏西, 南支槽偏弱, 有利于长江以北地区降水偏多, 南方降水偏少.

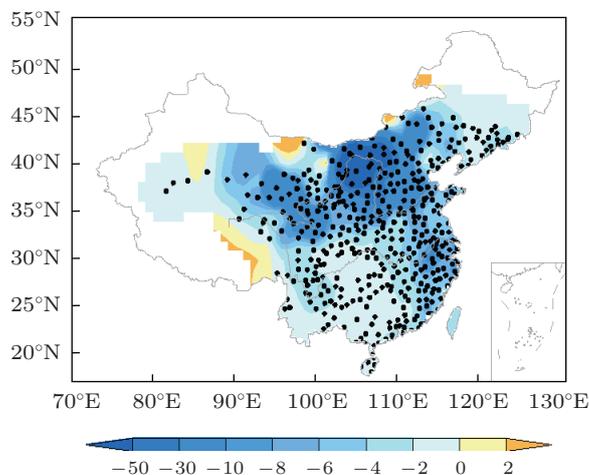


图4 1971年1月21日开始的区域性极端低温事件最大影响范围的站点分布(黑点表示该次事件发生期间达到极端低温阈值的站点; 填色图表示过程累计强度值, 即事件过程中最低温度与极端低温阈值差值的累计值)

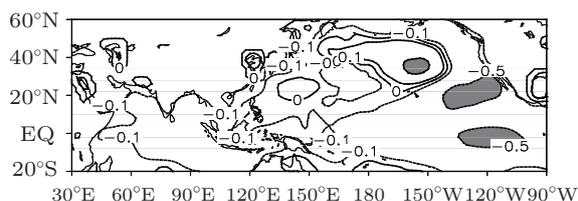


图 5 1970/1971 年冬季的海表温度距平

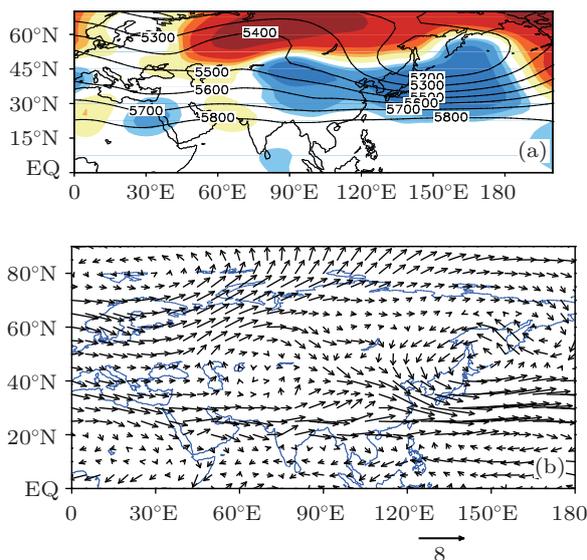


图 6 1971 年 1 月 21 日—2 月 9 日 500 hPa 距平场 (阴影) 和原始场 (等值线)(a), 700 hPa 平均风场 (b)

图 6(a) 中, 500 hPa 原场中东亚大槽位置偏东, 偏强; 对应同期的距平场在中高纬度地区异常偏强, 低纬度地区异常偏弱, 在乌拉尔山附近存在一个异常正距平中心, 有利于乌山阻高偏强, 在白令海附近也存在一个异常的正距平中心, 中国东北区域主要受正距平控制; 在中国东部及日本南部附近存在一个异常的负距平中心. 从这种北高南低形势的维持有利于冷空气持续活跃, 并南下影响我国. 图 6(b) 中 700 hPa 距平风场可以看出, 来自青藏高原北部的西北风距平偏强, 并且我国华北及以南地区为异常的东北风控制, 两支异常气流在江南等地交汇, 为华北 - 华南地区出现区域性极端低温事件提供了冷空气条件. 此外, 图 6(b) 中孟加拉湾及南海区域的异常的南风距平较弱, 这样不利于副热带高压西侧的偏南风把南方暖湿空气向北输送, 不容易造成冷暖空气在中国长江中下游及其以北地区交汇而形成持续性的低温雨雪天气.

通过上述分析可以看出, 区域性极端低温事件的诊断研究必然离不开对下列因子的异常情况

进行分析研究: 与 500 hPa 高度场相联系的东亚槽、NPO、西太平洋副高、与海平面气压相联系的 AO、与海温相联系的 NIINO 3.4 海温指数等.

3.3 各类区域性极端低温事件与指数异常的对应关系

通过统计各类区域性极端低温事件与主要同期气候指数异常的对应关系, 从而进一步探究各类事件发生的可能内在机制. 表 1 给出了 1951—2010 年持续天数 10 天以上, 综合指数排序最靠前的 33 次区域性极端低温事件. 其中主要时间发生在 12 月份的事件有 7 次, 发生在 1 月份的有 19 次, 发生在 2 月份的有 7 次, 因此 1 月份是区域性低温事件的高发期. 这 33 次低温事件中, 1980 年之后有 11 次, 1980 年之前则有 22 次, 这可能与全球增暖有一定的联系. 结合概率统计方法, 分析区域性极端低温事件与海温和大气环流指数之间的可能联系, 重点揭示各类指标异常情况与发生区域性极端低温事件的对应关系, 尤其是揭示指数极端性与区域性极端低温事件的联系.

在表 1 中, 33 次区域性极端低温事件对应的各指数的不同情况分别用符号“1”, “0”, “-1”三种状态来表示. 其中符号“1”表示指数有利于低温的出现, 并已达到异常 (超过均值的 0.5 倍标准偏差); 符号“0”表示指数是符号一致的正常态 (处于均值与 0.5 倍标准偏差之间), 即有利于低温的出现但并未达到异常; 符号“-1”表示指数是符号相反的负异常态, 即不利于低温的出现. 从表 1 可以看出, NPO 指数异常偏小, NIINO3.4 异常偏低, 亚洲区极涡强度和面积、AO 指数异常偏小和冬季风指数偏强的异常情况与区域性极端低温事件有较好的对应关系. 如果考虑符号一致的正常态, 概率百分比均超过了 60.0%; 其中 NPO 指数异常偏小、亚洲区极涡面积和冬季风强度达到正异常的概率均达到了 50.0%以上. 此外, 东亚槽位置异常偏深和西风漂流区海温指数异常偏强与区域性极端低温事件有一定的对应关系, 联系符号一致的正常态则对应的百分比都大于 50.0%. 但副高西伸脊点、副高脊线位置异常偏北、东亚槽强度的异常情况与区域性低温事件的对应关系则相对差一些. 同时, 根据不同类型低温事件对应各种指数的“1”出现的概率是否超过 50%, 作为该类型的低温事件与相

应指数是否具有较好对应关系的判断标准(超过则有,不超过则无),进而确定与不同类型事件对应关系较好的指数(表2). 总体而言, I型事件与AO指数、极涡强度、极涡面积、东亚槽位置和冬季风的对应关系较好; II型事件与NINO3.4、NPO、极涡面积、东亚槽位置和西风漂流区海温的对应关

系较好; III型事件与NPO、副高脊线、极涡强度、极涡面积、AO指数的对应关系相对较好; IV型事件则与NPO、副高脊线、极涡强度、东亚槽强度和西风漂流区海温的对应关系较好; VI型事件则与NINO3.4、极涡面积和冬季风的对应关系较好.

表1 1951—2010年冬季的区域性极端低温事件主要指标及其与海温、环流指数异常值的联系

类型	开始日期	持续天数	NPO	NINO3.4	西伸脊点	副高脊线	极涡强度	极涡面积	东亚槽强度	东亚槽位置	AO	西风漂流	冬季风
I	1959-1-10	11	-1	-1	1	-1	0	-1	-1	1	1	0	0
I	1960-1-14	16	0	0	1	0	0	-1	-1	0	1	-1	0
I	1961-1-9	12	-1	0	1	1	-1	-1	-1	0	1	-1	1
I	1963-1-3	34	1	1	-1	-1	0	-1	1	1	-1	0	1
I	1966-12-29	22	-1	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	0	1
I	1968-1-29	14	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
I	1968-12-29	11	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0	1	1	-1
I	1969-1-27	13	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
I	1972-2-2	10	1	0	-1	-1	-1	1	1	1	0	1	-1
I	1976-12-24	16	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	1	-1	1
I	1977-1-26	11	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1
I	1980-1-29	13	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	0	-1	1
I	1984-1-19	10	1	1	-1	1	1	0	1	1	-1	-1	1
I	1984-1-29	11	1	0	0	1	0	1	-1	1	0	1	1
II	1956-1-18	10	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
II	1957-1-12	13	-1	0	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0
II	1966-12-21	10	1	0	-1	0	1	1	-1	0	1	-1	1
II	1967-12-21	15	1	0	-1	-1	1	1	0	1	0	1	0
II	1973-12-22	17	1	1	-1	-1	0	1	0	0	-1	1	0
II	2000-1-24	11	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
III	1964-1-27	10	0	-1	-1	1	0	0	0	-1	0	-1	0
III	1967-12-4	13	0	0	-1	-1	1	1	0	1	0	1	0
III	2001-1-9	10	1	1	0	1	-1	1	-1	-1	0	-1	-1
III	2009-12-28	12	1	-1	1	0	1	-1	0	1	1	-1	-1
IV	1964-2-16	12	1	-1	-1	1	1	0	-1	-1	0	-1	1
IV	1971-1-21	20	1	1	-1	-1	0	1	1	1	0	1	-1
IV	1993-1-14	13	0	1	0	0	-1	0	1	-1	-1	0	-1
IV	1999-12-20	11	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1
V	1954-12-8	10	1	1	1	-1	1	0	1	1	-1	-1	1
V	1975-12-9	26	0	1	0	-1	1	0	0	-1	-1	1	1
V	1984-12-15	17	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0
V	1991-12-26	11	-1	-1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V	2008-1-22	19	-1	1	-1	1	0	1	-1	-1	-1	-1	1
(正异常态 + 正常态)/ 正异常态			22/17	23/14	11/7	16/10	22/14	24/18	16/10	19/13	21/12	18/14	24/16

注: 其中1表示正异常态,对区域性低温事件正贡献,0表示与1符号一致的正常态,-1表示负异常态,对区域性低温事件负贡献

通过上述分析, NPO 指数为负值, 赤道中东太平洋处于海温异常偏低的 La Nina 状态、AO 指数为负指数, 有利于极涡偏强, 北半球中高纬度高度场在东亚区域以北正南负的形势为主, 相应的乌拉尔山阻高偏强, 东亚槽偏强、中低纬度区域受负距平控制, 这些都利于区域性极端低温事件的发生.

同时, AO 为异常负位相时则容易发生全国范围的 I 类事件. 因此, 区域性低温事件的发生必然是多种因素共同作用的结果, 而 NPO, AO, 赤道中东太平洋海温指数为区域性极端事件的发生提供形势背景. 此外, 就冬季风而言, 冬季风异常偏强, 大多对应发生 I 类和 V 类的区域性低温事件.

表 2 不同类型区域性极端低温事件的主要影响指数

事件类型	NPO	NINO3.4	副高脊线	极涡强度	极涡面积	东亚槽强度	东亚槽位置	AO 指数	西风漂流	冬季风
I				✓	✓		✓	✓		✓
II	✓	✓			✓		✓		✓	
III	✓		✓	✓	✓			✓		
IV	✓		✓	✓		✓			✓	
V		✓			✓					✓

下面分析 NPO 指数、NINO3.4 指数、AO 指数和冬季风指数这些与极端低温事件对应关系较好的指数达到极端事件标准时, 是否对应有区域性极端低温事件, 进而从海温和环流极端性的角度理解区域性极端事件. 表 3 给出了四种指数的冬季平均值达到 15%(或 85%) 极端阈值情况下与持续时间长、影响范围广的区域性极端低温事件(表 1 中的事件) 的对应关系. NPO 指数达阈值的 10 年中, 8 年对应发生区域性极端低温事件, NINO3.4 则 9 年对应 7 年发生, AO 则 10 年对应有 6 年发生, 冬季风则 8 年对应有 5 年发生, 达极端阈值年发生区

域性极端低温事件的百分率分别为 80.0%, 77.8%, 60.0%和 62.5%, 基本都超出了 60.0%. 由此可知, 区域性低温事件本身可能是多种因素共同作用的结果, 其中包括: 1) 单因子极端异常, 并起主导作用而形成区域性低温极端事件; 2) 单一因子未出现极端异常, 但多种因子异常, 多因子的共同作用也会导致极端事件发生. 此外, 由于 NPO, NINO3.4, AO 和冬季风达到极端阈值的年份, 发生重大区域性极端低温事件的概率在 60.0%以上, 即有可能从主要影响因子极端性的角度对常规要素的极端事件进行描述.

表 3 冬季 NPO 指数、NINO3.4、AO 指数和冬季风指数达到 15%的极端阈值与区域性极端低温事件的对应关系

NPO			NINO3.4			AO			冬季风		
达阈值年份	指数值	对应事件	达阈值年份	指数值	对应事件	达阈值年份	指数值	对应事件	达阈值年份	指数值	对应事件
1955	-1.00	✓	1955	25.52	✓	1959	-1.58	✓	1952	2.03	
1956	-1.09	✓	1970	24.97	✓	1962	-1.91	✓	1954	1.61	✓
1961	-1.12		1973	24.79	✓	1965	-1.50		1956	1.02	✓
1962	-1.26	✓	1975	25.03	✓	1968	-2.29	✓	1962	1.40	✓
1967	-0.88	✓	1984	25.37	✓	1969	-1.86		1976	1.23	✓
1970	-0.89	✓	1988	24.73		1976	-2.62	✓	1980	1.34	
1973	-0.80	✓	1998	25.03		1978	-1.30		1983	1.29	✓
1980	-1.10		1999	24.91	✓	1985	-1.81		1995	1.36	
1983	-0.68	✓	2007	24.84	✓	2000	-1.31	✓	—		
1999	-0.83	✓	—			2009	-3.42	✓	—		

注: 画勾则表示这一年出现了区域性极端低温事件

4 讨论与结论

本文利用 OITRELTE 对我国 1951—2010 年当年 11 月份至次年 3 月份的逐日最低温度资料进行了检测, 在一定的标准下, 共检测得到了 559 次区域性极端低温事件. 首先研究了这些 RELTE 几何中心的分布情况, 继而选取此类综合影响较大的异常事件 60 次, 按照事件发生所覆盖的地理位置的不同进行类型的划分. 结合个例, 具体分析了典型 RELTE 发生期间的海温场、风场和高度场的异常特征, 得到一些可能对 RELTE 有影响的气候因子. 在此基础上, 通过统计不同类型 RELTE 与各气候指数异常的对应关系, 进一步研究各类 RELTE 与主要影响因子异常的可能联系, 并分析了四种对应关系较强的指数达到极端异常标准的年份中, RELTE 的发生概率情况. 主要的研究结论如下.

1) 559 次区域性极端低温事件几何中心的分布特征显示: 事件几何中心存在两个显著的事件带, 分别是东北 - 华北 - 黄淮的事件带、新疆北部 - 西北中部 - 西北东部的事件带. 此外, 青藏高原东部和西南南部低温事件中心出现的次数也相对密集. 对 599 次事件中综合指数最大的 60 次事件的影响范围进行分析归类, 按其地理位置的不同大致分为了 6 类: 分别是全国型、东部型、东北 - 华北型、华北 - 华南型、北方型、西北 - 华南型. 通过不同类型事件的 500 hPa 高度场及 850 hPa 距平风场的合成, 简要分析了不同区域类型的低温事件形成的

主要环流异常特征.

2) 以 1971 年 1 月 21 日开始的华北 - 华南型区域性低温极端事件为例, 给出了对应的海温场、风场和高度场等方面的异常特征. 事件发生期间, 赤道中东太平洋海温异常偏低, 是中等偏强的 La Nina 特征. 中高纬度地区高度场异常偏强, 低纬度地区异常偏弱, 呈现北高南低的偶极子形势, 有利于冷空活跃, 并南下影响我国. 同时, 来自青藏高原北部偏强的西北风距平和我国华北及以南地区强大的东北风距平在西南大部、江南、华南等大范围区域的交汇, 直接为华北 - 华南地区出现区域性极端低温事件提供了冷空气条件.

3) 统计了持续时间 10 天以上、综合指数最靠前的 33 次不同区域类型的事件与海温和大气环流等各类指数异常之间的对应关系. 总结了各种类型事件的主要影响指数. 总体而言: NPO 指数异常偏小, NINO3.4 指数异常偏低, 亚洲区极涡强度和面积、AO 指数异常偏小和冬季风指数偏强的异常情况与 RELTE 有较好的对应关系. 如果考虑符号一致的正常态, 对应概率百分比均超过了 60.0%.

4) NPO 指数, NINO3.4 指数, AO 指数和冬季风四种指数的冬季平均值达到 15% (或 85%) 极端阈值的年份中, 发生重大区域性极端低温事件的百分率均超过 60.0%. 因此可以进一步确认这些指数是 RELTE 的主要影响因子, 尤其可以从这些因子极端异常的角度, 为 RELTE 的预测研究等提供一定的参考.

- [1] Zhao Z C, Wang S W, Xu Y, Ren G Y, Luo Y, Gao X J 2005 *Climat. Environ. Res.* **10** 808 (in Chinese) [赵宗慈, 王绍武, 徐影, 任国玉, 罗勇, 高学杰 2005 气候与环境研究 **10** 808]
- [2] Tang G L, Ding Y H, Wang S W, Ren G Y, Liu H B, Zhang L 2009 *Adv. Climate Change Res.* **5** 1673 (in Chinese) [唐国利, 丁一汇, 王绍武, 任国玉, 刘洪滨, 张莉 2009 气候变化研究进展 **5** 1673]
- [3] Ren G Y, Guo J, Xu M Z, Chu Z Y, Zhang L, Zou X K, Li Q X, Liu X N 2005 *Acta Meteorol. Sin.* **63** 942 (in Chinese) [任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁 2005 气象学报 **63** 942]
- [4] Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, Zhang J 2008 *Acta Meteorol. Sin.* **66** 808 (in Chinese) [丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 张锦 2008 气象学报 **66** 808]
- [5] Wang D H, Liu C J, Liu Y, Wei F Y, Zhao N, Jiang Z N, Li Y, Chen J Y, Wang Y F, Shi X H, Xu X D 2008 *Acta Meteorol. Sin.* **66** 405 (in Chinese) [王东海, 柳崇健, 刘英, 魏凤英, 赵南, 姜智娜, 李英, 陈菊英, 王亚非, 施晓晖, 徐祥德 2008 气象学报 **66** 405]
- [6] Shen B Z, Liu S, Lian Y, Feng G L, Li S F, Gong Z Q 2011 *Acta Meteorol. Sin.* **69** 320 (in Chinese) [沈柏竹, 刘实, 廉毅, 封国林, 李尚锋, 龚志强 2011 气象学报 **69** 320]
- [7] Wang X J, Shen B Z, Gong Z Q, Feng G 2013 *Acta Meteorol. Sin.* (in Chinese) [王晓娟, 沈柏竹, 龚志强, 封国林 2013 气象学报] (in press)
- [8] Feng G L, Hou W, Zhi R, Gong Z Q 2011 *Research on Detecting, Diagnosing and Predictability of Extreme Climate Events* (Beijing: Science Press) p5 (in Chinese) [封国林, 侯威, 支蓉, 龚志强 2011 极端气候事件的检测、诊断和可预测性研究 (北京: 科学出版社) 第 5 页]
- [9] Gong Z Q, Wang X J, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4342 (in Chinese) [龚志强, 王晓娟, 封国林 2009 物理学报 **58** 4342]
- [10] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R 2008 *Acta Meteorol. Sin.* **66** 892 (in Chinese) [封国林, 龚志强, 支蓉 2008 气象学报 **66** 892]
- [11] Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3947 (in Chinese) [龚志强, 邹明玮, 高新全, 董文杰 2005 物理学报 **54** 3947]
- [12] Gong Z Q, Zhi R, Feng G L, Zhang Q 2011 *Acta Meteorol. Sin.* **25** 142
- [13] Hou W, Zhang D Q, Qian Z H, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 109203 (in Chinese) [侯威, 章大全, 钱忠华, 封国林 2011 物理学报

- 60 109203]
- [14] Peng J B, Bueh C 2011 *Atmosph. Ocean. Sci. Lett.* **4** 281
- [15] Zhang X J, Qian W H 2011 *Adv. Atmosph. Sci.* **28** 338
- [16] Ren F M, Cui D L, Gong Z Q 2012 *J. Climate* **25** 7015
- [17] Gong Z Q, Wang X J, Cui D L, Wang Y J, Ren F M, Feng G L, Zhang Q, Zou X K, Wang X L 2012 *J. Appl. Meteorol.* **23** 195 (in Chinese) [龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 王艳姣, 任福民, 封国林, 张强, 邹旭凯, 王小玲 2012 应用气象学报 **23** 195]
- [18] Wang X J, Gong Z Q, Ren F M, Feng G L 2012 *Adv. Climate Change Res.* **8** 8 (in Chinese) [王晓娟, 龚志强, 任福民, 封国林 2012 气候变化研究进展 **8** 8]
- [19] Zhang Z J, Qian W H 2012 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **36** 1269 (in Chinese) [张宗姝, 钱维宏 2012 大气科学 **36** 1269]
- [20] Gong Z Q, Wang X J, Feng G L, Ren F M 2013 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **37** (in Chinese) [龚志强, 王晓娟, 封国林, 任福民 2013 大气科学 **37** (in press)]
- [21] Dai X G, Fu Z B, Wang P 2005 *Chin. Phys.* **14** 850
- [22] Shi N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844
- [23] Peng J B, Bueh C 2011 *Atmosph. Ocean. Sci. Lett.* **4** 281
- [24] Wang Q G, Zhi R, Gong Z Q, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2853 (in Chinese) [王启光, 支蓉, 龚志强, 封国林 2009 物理学报 **58** 2853]
- [25] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4342 (in Chinese) [龚志强, 王晓娟, 支蓉, 封国林 2009 物理学报 **58** 4342]
- [26] Kistler R, Kalnay E, Kanamitsu M 2001 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **82** 247
- [27] Smith T M, Reynolds R W 2003 *J. Climate* **16** 1495
- [28] Liu Z X, Lian Y, Shen B Z, Gao Z T, Tang X L 2003 *J. Appl. Meteorol.* **14** 553 (in Chinese) [刘宗秀, 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭, 唐晓玲 2003 应用气象学报 **14** 553]
- [29] Lian Y, Shen B Z, Gao Z T 2004 *Acta Meteorol. Sin.* **2** 781 (in Chinese) [廉毅, 沈柏竹, 高枫亭 2004 气象学报 **2** 781]
- [30] Shi N, Zhu Q G 1996 *J. Tropic. Meteorol.* **12** 26 (in Chinese) [施能, 朱乾根 1996 热带气象学报 **12** 26]
- [31] Mu M Q, Li C Y 1999 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **23** 276 (in Chinese) [穆明权, 李崇银 1999 大气科学 **23** 276]
- [32] He X C, Li Q P, Ding Y H, He J H 2007 *Acta Meteorol. Sin.* **65** 18 (in Chinese) [何溪澄, 李巧萍, 丁一汇, 何金海 2007 气象学报 **65** 18]
- [33] Chen W 2002 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **26** 595 (in Chinese) [陈文 2002 大气科学 **26** 595]
- [34] Wang X J, Feng A X, Zhi R, Feng G L 2012 *Chin. Phys. B* **21** 029201
- [35] Shen B Z, Lin Z D, Lu R Y 2011 *Sci. China: Earth Sci.* **54** 1095
- [36] He W P, Feng G L, Dong W J, Li J P 2005 *Chin. Phys.* **14** 21

The classification of winter regional extreme low temperature events in China and their corresponding relationship to climatic indices extreme anomaly*

Wang Xiao-Juan¹⁾²⁾ Shen Bai-Zhu¹⁾ Gong Zhi-Qiang^{3)†} Feng Guo-Lin⁴⁾

1) (*Department of Atmospheric and Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*College of Physics and Electronic Project, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China*)

3) (*Laboratory for Climate Monitoring and Diagnose, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

4) (*Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

(Received 10 April 2013; revised manuscript received 1 July 2013)

Abstract

We identify China regional low temperature extreme events (RELTEs) in winter during the periods from 1951 to 2010 using objective identification technique for regional low temperature extreme events (OITRELTEs). The 559 RELTEs are identified and classified into 6 types, i.e., nationwide style, east style, northeast-north China style, north-south China style, south style, and northwest-south China style, according to the spatial distribution of these events. The circulation backgrounds of different styles of low temperature events are also analyzed. In addition, taking the classical event that began from January 21st in 1971 for example, anomaly characteristics of sea surface temperature, geopotential height and winds vectors are investigated specifically. Based on these analyses, the corresponding relationships between different types of events and anomalies of climatic indices are further studied, and the relations between mainly influencing index and event are obtained for different types of events. On the whole, when the NINO3.4, the Pacific decadal oscillation, and the Arctic oscillation are small and the winter wind index is strong, the probability with which the RELTE happens is high; in the years in which the winter average values of the four indices reach 15% of extreme threshold, the percentages of occurrence of RELTE reach up to 80.0%, 77.8%, 60.0% and 62.5%, respectively. Therefore, certain signals can be offered for diagnosing and predicting the RELTE from the index anomalies.

Keywords: regional low temperature extreme events, spatial distribution, climatic index, extreme

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.62.229201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41305075), the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB955203, 2012CB955902), and the Special Scientific Research Projects for Public Interest, China (Grant No. GYHY201106016).

† Corresponding author. E-mail: gzq0929@126.com