

谢星昶, 游庆龙, 王雨泉. 2018. 1961~2014 年中国冬季极端低温变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (4): 429–441. Xie Xingyang, You Qinglong, Wang Yuxiao. 2018. Changes in extreme low temperature in China in the winters from 1961 to 2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (4): 429–441, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17034.

1961~2014 年中国冬季极端低温变化特征分析

谢星昶^{1,2,3} 游庆龙^{1,2,3} 王雨泉^{1,2,3}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学中英气候变化与评估研究所, 南京 210044

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 利用中国 691 个无缺测站点的经均一化处理及质量控制的逐日最高、最低气温资料, 基于冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数、冰冻日数、月最低气温极大值以及月最低气温极小值等 6 个由世界气象组织定义的极端气温指数, 分析了 1961~2014 年中国冬季的极端低温变化特征。结果表明: 冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数以及冰冻日数在全国大部分地区均呈现下降的趋势, 下降趋势较为明显的区域集中在东北南部、华北、西北东部、华东、华中、西南及高原地区, 全国整体上下降幅度分别为 $-0.9\text{ d}/10\text{ a}$ 、 $-1.7\text{ d}/10\text{ a}$ 、 $-1.5\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $-1.4\text{ d}/10\text{ a}$ 。最低气温极大值和最低气温极小值在全国范围内则主要呈现上升的趋势, 全国整体上分别为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 极端低温天数在 20 世纪 60 年代至 70 年代中后期呈现波动状, 随后自 20 世纪 70 年代末 80 年代初至 21 世纪初呈明显下降趋势, 从 2006 年左右以后其下降趋势较之前有所减缓, 是对全球变暖减缓背景下的气候响应; 与其他时间段相比, 20 世纪 60 年代至 70 年代为冬季极端低温事件较为频发的时间段, 这可能与该时段陆地冷高压频繁活动有关。

关键词 冬季 极端气温指数 变化特征

文章编号 1006-9585 (2018) 04-0429-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17034

Changes in Extreme Low Temperature in China in the Winters from 1961 to 2014

XIE Xingyang^{1,2,3}, YOU Qinglong^{1,2,3}, and WANG Yuxiao^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Institute of Climate Change and Evaluation between China and UK, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the six indices of temperature extreme defined by the World Meteorological Organization (WMO), this study discusses the extreme low temperature change in China in the winters from 1961 to 2014 by analyzing the daily maximum temperature (Tmax) and minimum temperature (Tmin) data at 691 stations that have no missing values and pass the homogeneity processing and quality control checks. The results show that the numbers of cool days, cool nights,

收稿日期 2017-03-05 收到; **网络预出版日期** 2017-07-26

作者简介 谢星昶, 男, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事极端气温的研究。E-mail: xxyfred@126.com

通讯作者 游庆龙, E-mail: qinglong.you@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0601700, 江苏省杰出青年基金项目 BK20140047

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601700), Jiangsu Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (Grant BK20140047)

frost days, and ice days have decreased in most part of China, particularly in the southern part of Northwest China, North China, the eastern part of Northwest China, East China, central China, Southwest China, and plateau regions with the trends of -0.9 d/10 a, -1.7 d/10 a, -1.5 d/10 a, and -1.4 d/10 a, respectively. The maximum Tmin and minimum Tmin in the winter have increased across the country with the trends of 0.4 °C/10 a and 0.6 °C/10 a, respectively. The number of days of extreme low temperature fluctuated from the 1960s to the mid-1970s, and then exhibited a downward trend from the late 1970s and the early 1980s to the beginning of the 21st century while the declining trend started to slow down since 2006, which is a response to the global warming hiatus. Compared with other periods, the period from the 1960s to the 1970s represented a period with higher occurrence frequency of extreme low temperature events in the winter, which is possibly associated with the frequency and intensity of cold high pressure system over the land.

Keywords Winter, Indices of temperature extreme, Changes

1 引言

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次评估报告(IPCC, 2013)指出全球气候变暖的事实是不可否认的。20世纪50年代以来观测到了许多显著的变化:大气和海洋明显变暖,积雪量与冰盖范围已减小,海平面上升明显,温室气体浓度增加导致温室效应加剧等,这些变化在之前几十年甚至上千年的时间里都未曾有过。而在此背景下的极端气温事件也受到不少学者的关注与研究(任国玉等, 2005; 周雅清和任国玉, 2010; 付冬雪等, 2011)。肖冰霜等(2016)利用均一化资料集分析了中国大陆极端温度的长期趋势,赵俊虎等(2011)揭示了近年来中国季节变化与极端温度事件的联系。任国玉等(2010)定义了两类综合极端气候指数并进行了其趋势分析,任福民和翟盘茂(1998)分析了近40年(1951~1990年)来中国极端气温的变化,结果表明:中国季极端最低温度的变率以春、秋两季为最大,夏季最小;极端最低温度在冬季的增温趋势极其显著;极端最高温度在秋季的降温趋势较明显;极端温度的变化趋势还存在明显的地域性差异。王翠花等(2003)分析了近50年的日最低气温变化,发现其具有明显的上升变暖趋势。张宁等(2008)、杨萍等(2010)通过研究也发现年和季节尺度的极端冷暖指数均反映出增暖趋势,其中冬季极端冷指数变化趋势最为明显。

而冬季作为一年中气温相对最低的季节,其极端低温事件的发生会给农业、交通、人身健康、社会经济等方面带来一定的影响。刘雅星等(2010)的研究表明近46年(1961~2006年)来我国冬季最低、最高日平均温度均明显上升,冬季全国低温

日数的空间分布和年代际变化都呈减少趋势;钱忠华等(2011)从不同气候态的角度出发研究了我国夏冬季的极端温度事件的时空分布型;王晓娟等(2012, 2013)分析了中国冬季区域性极端低温事件的时空特征以及分类,并且指出了其与各气候指数的异常有对应联系。黄菲等(2014a)将中国以 35°N 为界分成南、北方两个区域,分析了冬季极端低温事件的多尺度变化特点,指出北方极端低温频数及强度的年际、年代际变化显著程度相似,而南方以年际变化为主。对大部分的研究工作而言,其选取的研究时段多止于21世纪初期,无法观察到近些年来极端温度的变化,而在气候变暖减缓的大背景下,关注近年来温度变化具有重要意义,故本文以1961~2014年作为研究时段,以分析极端低温在各个时期的变化情况;以往的研究基于典型极端气候指数的分析较少,而极端气候指数能够从其定义角度较直观的呈现与说明温度变化状况,因此本文基于由世界气象组织定义的极端气温指数对其空间变化及时间序列进行分析讨论;此外,中国幅员辽阔,不同的地区其气候也有很大差异,故在总结前人的研究工作基础上将中国划分为8个区域,以便更细致地讨论各区域极端气温指数随时间的变化状况。

2 资料与方法

2.1 资料

本文采用国家气象信息中心(Xu et al., 2013)提供的中国大陆773个站点的逐日最高、最低气温资料,所用资料的时间长度为1961年1月至2014年12月,共53个冬季(将当年12月至次年2月定义为一个冬季),经筛选后选取了691个无缺测站点资料,该资料已经经过严格的质量控制和均一化订正处理,并且充分考虑了测站搬迁、仪器更换、

观测站周边环境的变化等状况, 故能够更加真实地反映出气候自然变化的趋势。

2.2 方法

本文参考了由世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 气候委员会等组织联合成立的气候变化监测和指标专家组 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) 所定义的 27 个典型极端气候指数 (Peterson and Manton, 2008), 计算出冬季各极端气温指数并从中选取了 6 个代表性较好的极端低温指数进行分析 (见表 1)。对于相对阈值指数的确定是采用了百分位定义法 (Manton et al., 2001), 首先将第 10 个百分位值定义为该测站该日的极端低温阈值, 然后用台站均一化后日最高及最低温度资料与阈值比较并统计, 继而得到分析所需的指数。

为便于分析, 本文参考刘雅星等 (2010) 的研究, 结合刘吉峰等 (2006) 对极端气温分区的研究

以及沙万英等 (2002) 对我国自然地理区域界线的研究工作, 大致将我国分为东北、华北、西北、华东、华中、华南、西南以及高原等 8 个区域, 图 1 为全国 8 个区域以及站点分区分布情况。

在分析各极端指数的变化趋势中, 采用气候趋势系数以表示某种气象要素的变化趋势 (魏凤英, 1999), 其定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}}, \quad \bar{t} = (n+1)/2, \quad (1)$$

其中, r 为变化趋势, $i=1, 2, 3, \dots, n$ (n 为样本总长度), x_i 为第 i 个样本所对应的气象要素值, $\bar{x}$ 和 $\bar{t}$ 分别为样本要素平均值及样本长度均值, 该式符合自由度为 $(n-2)$ 的 t 检验分布, 公式为

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (2)$$

由于我国地域广大, 地形复杂, 因此本文在计算全国平均气候时间序列时采用了面积加权的方法 (Jones et al., 1999)。此方法将研究的地区按照经纬度划分成网格 (本文所划分经纬度网格尺度为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$), 继而分别把不同网格里的数据做算术平均, 求得各网格的平均值。最终利用面积加权法算出所有网格点的平均值, 得到区域平均的时间序列。如果划分的网格中为空, 则不计算该网格。公式为

$$Y_k = \frac{\sum_{i=1}^m (\cos \theta) \times Y_{ik}}{\sum_{i=1}^m \cos \theta}, \quad (3)$$

其中, Y_k 为第 k 年区域平均值, $i=1, 2, 3, \dots, m$ (m

表 1 极端气温指数

Table 1 Indices of temperature extreme

分类	名称	代码	意义	单位
相对阈值指数	冷昼日数	TX10p	日最高气温小于 10% 分位值的日数	d
	冷夜日数	TN10p	日最低气温小于 10% 分位值的日数	d
绝对阈值指数	霜冻日数	FD	每月中日最低气温小于 0 °C 的天数	d
	冰冻日数	ID	每月中日最高气温小于 0 °C 的天数	d
极值指数	月最低气温极大值	TNx	每月中日最低气温的最大值	°C
	月最低气温极小值	TNn	每月中日最低气温的最小值	°C

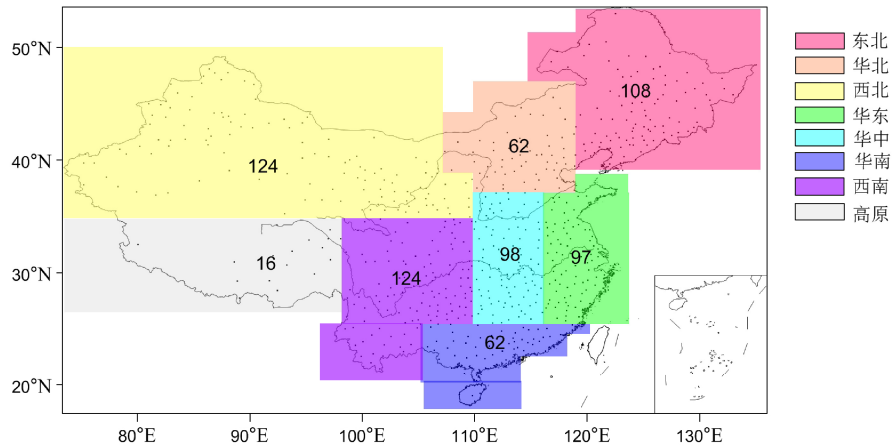


图 1 全国 691 个站点的分区分布 (图中数值表示各个区域所包含的站点数)
Fig. 1 The zoned distribution of the 691 stations in China (the values represent the numbers of stations contained in each region)

为网格数), Y_{ik} 为第 i 个网格中第 k 年的平均值, θ_i 为第 i 个网格中心点的纬度。

3 分析与结果

3.1 中国冬季极端低温指数的空间变化趋势

从 1961~2014 年共 53 个冬季各极端指数的空间趋势分布 (图 2) 可以看出, 极端低温天数即冷

昼日数、冷夜日数、霜冻日数以及冰冻日数 (图 2a、2b、2c、2d) 在全国大部分地区均呈现下降的趋势, 冷昼日数下降趋势较为明显的区域集中在东北东部及南部、华北地区、西北东部、华东以及高原地区, 其余地区的下降趋势较不明显, 而冷夜日数基本上在全国范围内均呈现了较明显的下降趋势, 大多数站点的趋势值均在 $-0.8 \sim -0.6$ d/10 a。霜冻日数下降趋势较为明显的区域集中在华东、华中、华

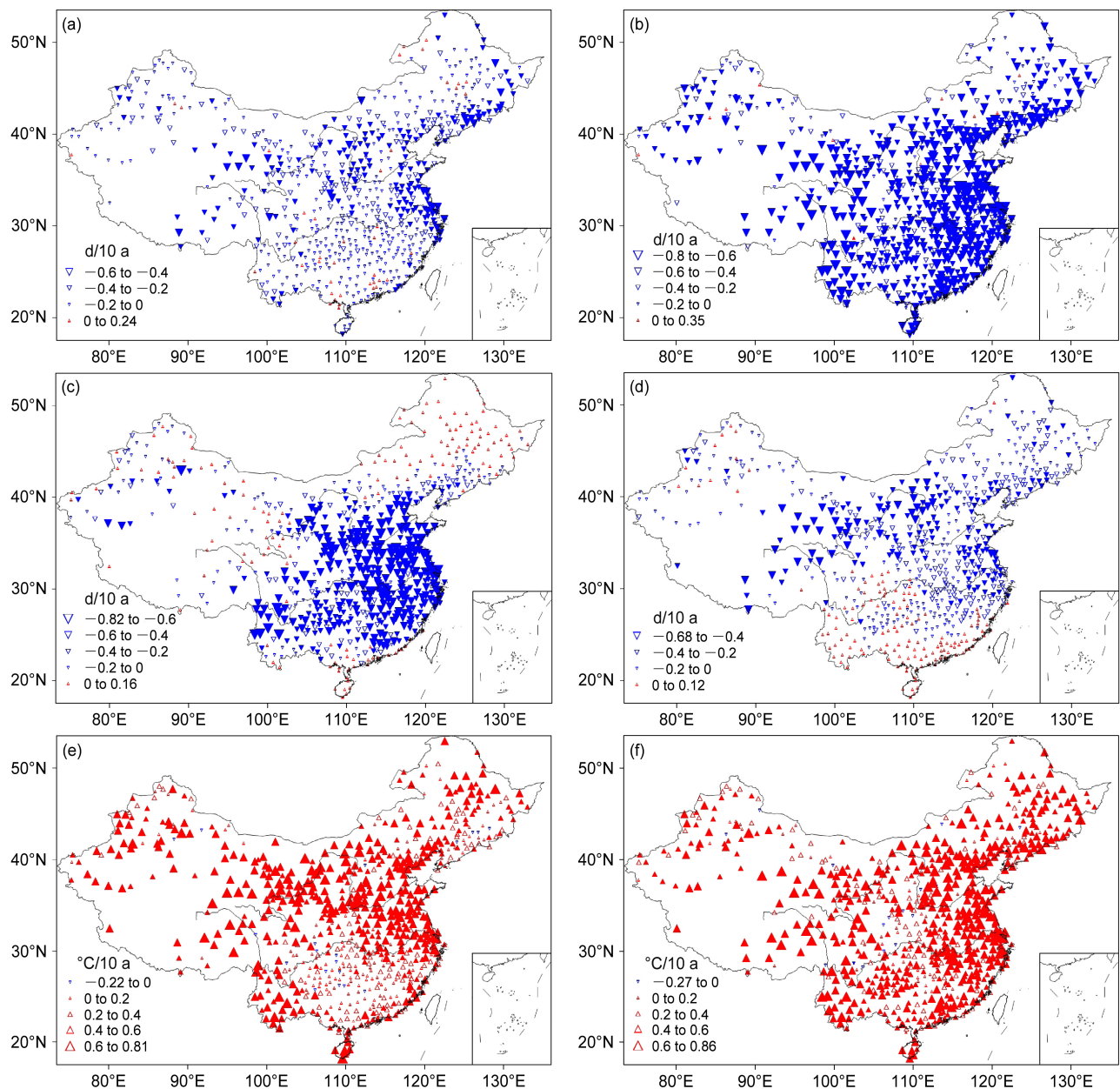


图 2 1961~2014 年中国冬季各极端低温指数的趋势值空间分布 (实心三角形表示通过 95% 显著性检验的站点): (a) 冷昼日数; (b) 冷夜日数; (c) 霜冻日数; (d) 冰冻日数; (e) 月最低气温极大值; (f) 月最低气温极小值

Fig. 2 Spatial patterns of trends for indices of low temperature extreme in China in the winters during 1961–2014 (solid triangles represent values at/above the 95% confidence level): (a) Cool days (TX10p); (b) cool nights (TN10p); (c) frost days (FD); (d) ice days (ID); (e) maximum daily minimum temperature in month (TNx); (f) minimum daily minimum temperature in month (TNn)

南以及西南地区, 其中站点的趋势系数最大可达 $-0.82 \text{ d}/10 \text{ a}$, 表明下降趋势非常显著; 冰冻日数的定义为每月中日最高气温小于 0°C 的天数, 而华南地区的冬季日最高气温常年均在 0°C 以上, 根据此定义及结合台站资料的记录, 该极端低温指数在华南地区为 0, 而单月中具有至少 3 d 或单年中具有至少 15 d 的数据记录及变化才可进行趋势的计算, 故认为华南地区没有冰冻日数变化趋势, 该日数较明显下降的区域为东北南部、华北、西北东部、华东及高原地区, 其较大的站点趋势值在 $-0.68 \sim -0.4 \text{ d}/10 \text{ a}$, 相对霜冻日数而言其下降趋势稍弱。极端低温即月最低气温极大值、月最低气温极小值 (图 2e、2f) 则呈现上升的趋势, 增温幅度较为明显的区域集中在东北、华北、西北、华东、西南以及高原地区。在全国共 691 个站点中, 冷夜日数、月最低气温极小值通过 95% 显著性检验的站点较多, 分别达到了 561 和 534 个; 其次是月最低气温极大值和霜冻日数, 分别为 444 和 341 个; 冷昼日数和冰冻日数较少, 分别为 193 和 171 个。

3.2 中国各区域极端低温指数随时间的变化

对冬季冷昼日数 $\text{TX}_{10\text{p}}$ 的各区域时间序列 (图 3) 来说, 全国平均及各区域在总体上均呈现冷昼日数随时间下降的趋势, 但从各个区域的线性趋势来看, 各指数下降的趋势并不是非常明显, 东北、华北、西北和华东地区的下降趋势分别为 $0.8 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $1.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $0.9 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $0.9 \text{ d}/10 \text{ a}$, 华中、华南以及西南地区的下降趋势分别为 $0.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $0.2 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $0.5 \text{ d}/10 \text{ a}$, 北方地区的下降趋势大于南方地区, 表明冬季北方的变暖幅度和程度要比南方地区明显。而高原的下降趋势在 8 个区中最大 ($1.2 \text{ d}/10 \text{ a}$), 表明高原地区有较为明显的变暖。8 个区域的冷昼日数高值年出现在 20 世纪 60 年代至 80 年代时间段的频次较高, 例如 1967 年、1968 年以及 1976 年, 而在 2000 年之后出现高值年的次数较少, 其中 2007 年为显著的冷昼日数高值年, 西北、华中以及西南地区在该年的冷昼日数值达到了自 2000 年以来的极大值, 而事实上在 2007/2008 年冬季也对应非常严重的南方冰冻灾害事件发生。此外, 在 20 世纪 60 年代至 80 年代期间, 各个区域的冷昼日数呈现出 $5 \sim 7 \text{ a}$ 的周期性变化, 这种周期变化在华北、西北、华东、华南以及西南地区体现的尤为明显。

图 4 为全国 8 个区域及全国平均的冬季冷夜日

数 $\text{TN}_{10\text{p}}$ 随时间的变化序列, 从全国平均来看, 冬季冷夜日数总体上呈下降趋势, 且该趋势大于冷昼日数的下降, 表明日最低气温的变暖更加明显。与全国平均一致的是, 各个区域总体上呈现冷夜日数随时间下降的趋势, 且各个区域的下降趋势均在 $1.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 及以上, 其中华东以及高原地区的下降趋势达到 $2 \text{ d}/10 \text{ a}$, 下降趋势较明显, 表明气候变暖在冷夜日数指数上有很好的体现。除东北地区以外, 其余 7 个区域的冷夜日数极大值年均集中在 20 世纪 60 年代, 其中华北、华东、华中以及西北地区的冷夜日数极大值年份集中在 1966~1968 年, 华南、西南以及高原的冷夜日数极大值年份出现在 1962 年, 华北地区在 1967/1968 年冬季的冷夜日数高达近 33 d, 相比其他区域而言, 华北地区在该年冬季的冷夜日数最多。从图中可以看出冷夜日数极大值年的发生频次和强度均随时间减小。值得注意的是, 东北地区在 2000/2001 年冬季, 其冷昼日数和冷夜日数均出现极大值, 天数均在 20 d 以上, 表明在该地区出现冷冬, 且程度较强, 这很可能是与该年的冬季大气环流系统如蒙古高压的变化活动有关 (刘晴晴等, 2011)。

图 5 为全国各区域的冬季霜冻日数 FD 随时间的变化序列, 与前两个指数相同, 霜冻日数在全国范围内呈随时间减少的趋势, 但该趋势值较冷昼冷夜日数稍小一些。根据霜冻日数的定义 (霜冻日数表示每月中日最低气温小于 0°C 的天数), 对于我国东北、华北以及西北地区的冬季来说, 该指数范围在 $86 \sim 91 \text{ d}$, 对应的 3 个区域霜冻日数的下降趋势分别为 $0.1 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $0.4 \text{ d}/10 \text{ a}$ 和 $0.2 \text{ d}/10 \text{ a}$, 表明在北方地区霜冻日数基本没有随时间而变化或呈现极微弱的下降趋势。位于低纬度的华南地区和冬季作为冷源的高原地区, 其冬季霜冻日数的下降趋势分别为 $0.3 \text{ d}/10 \text{ a}$ 与 $0.2 \text{ d}/10 \text{ a}$, 也表明了冬季的霜冻日数在该两个区域随时间变化不大。冬季霜冻日数的下降较为明显的地区为华东和华中地区, 其下降趋势分别为 $3 \text{ d}/10 \text{ a}$ 和 $2.5 \text{ d}/10 \text{ a}$, 其次是西南地区, 下降趋势为 $1.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。以上表明用霜冻日数以描述冬季我国东部以及中南地区的极端温度变化效果较好。华东、华中以及西南地区的霜冻日数高值年多集中在 20 世纪 60 年代至 80 年代, 并自 20 世纪 80 年代之后, 霜冻日数高值年次数以及持续天数较之前有所减少。另外, 北方地区的冬季霜冻日数呈现了波动变化, 尤其西北区域有显著的波

动, 其峰值, 即霜冻日数高值年的天数随时间基本没有变化, 其谷值, 即霜冻日数低值年的天数随时间而减少。

图 6 为我国 7 个区域及全国平均的冬季冰冻日

数 ID 随时间的变化序列 (华南地区因该指数常年为 0 故无趋势变化, 以下在各表中以 “—” 表示), 对全国平均而言, 冬季冰冻日数总体呈随时间减少的趋势, 其天数值的区间范围小于霜冻日数, 表明

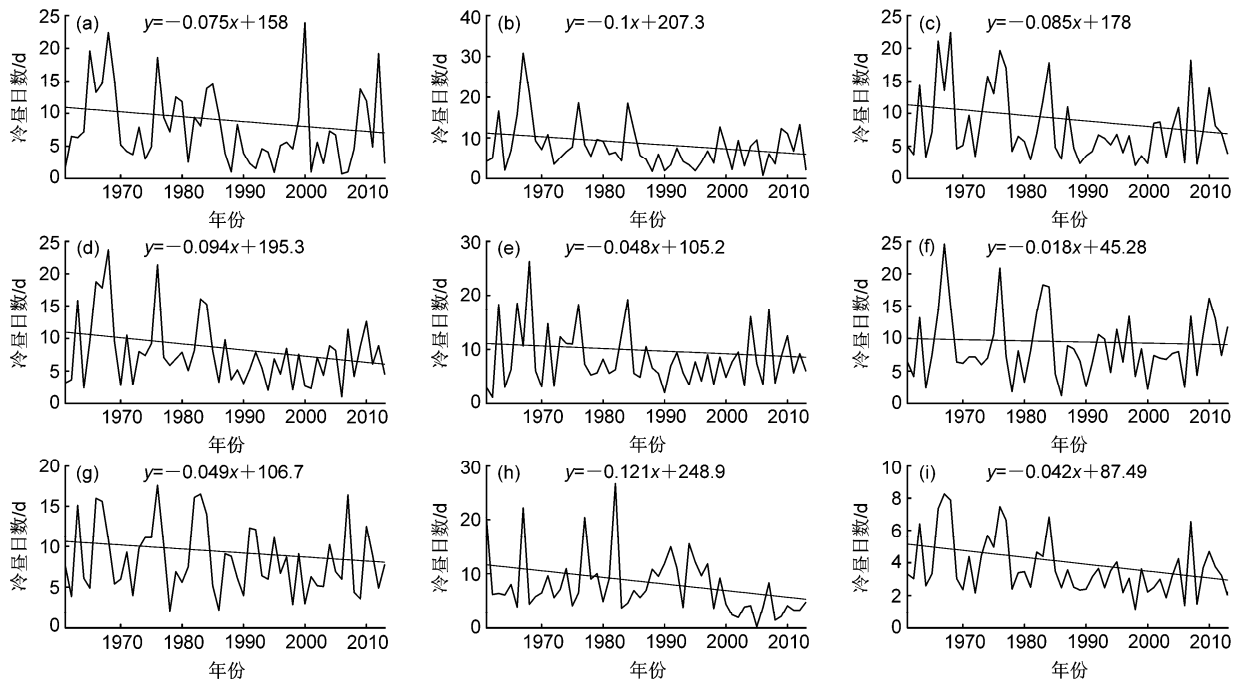


图 3 1961~2014 年冬季中国各区域的冷昼日数时间序列: (a) 东北; (b) 华北; (c) 西北; (d) 华东; (e) 华中; (f) 华南; (g) 西南; (h) 高原; (i) 全国平均。黑色直线为线性回归趋势线

Fig. 3 Time series of TX10p in various regions of China in the winters from 1961 to 2014: (a) Northeast China; (b) North China; (c) Northwest China; (d) East China; (e) central China; (f) South China; (g) Southwest China; (h) the Tibetan Plateau; (i) nationwide mean. Black beelines represent linear regression trends

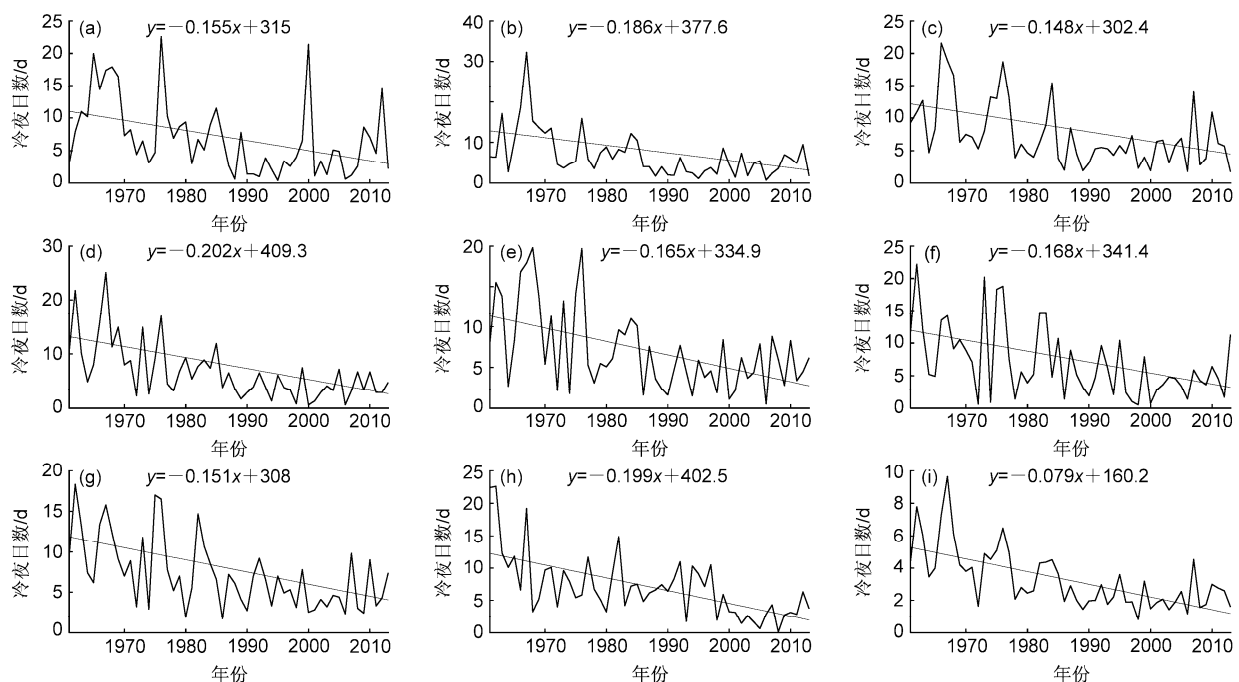


图 4 同图 3, 但为冷夜日数时间序列

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for TN10p

冬季全国整体出现冰冻日数的频次不如霜冻日数高。华东、华中以及西南地区的冬季冰冻日数变化趋势分别为 $-0.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $-0.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 以及 $-0.3 \text{ d}/10 \text{ a}$, 表明在这些地区冰冻日数有轻微的下降趋势。对东北、华北和西北地区来说, 其冬季冰冻日数的变化

趋势分别为 $-0.9 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $-1.7 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $-1.4 \text{ d}/10 \text{ a}$, 较华东、华中和西南地区而言, 北方地区的冬季冰冻日数有较明显的下降趋势, 这也表明冰冻日数指数较合适于描述我国北方地区的冬季低温变化情况。在高原地区的冬季冰冻日数随时间变化趋势为

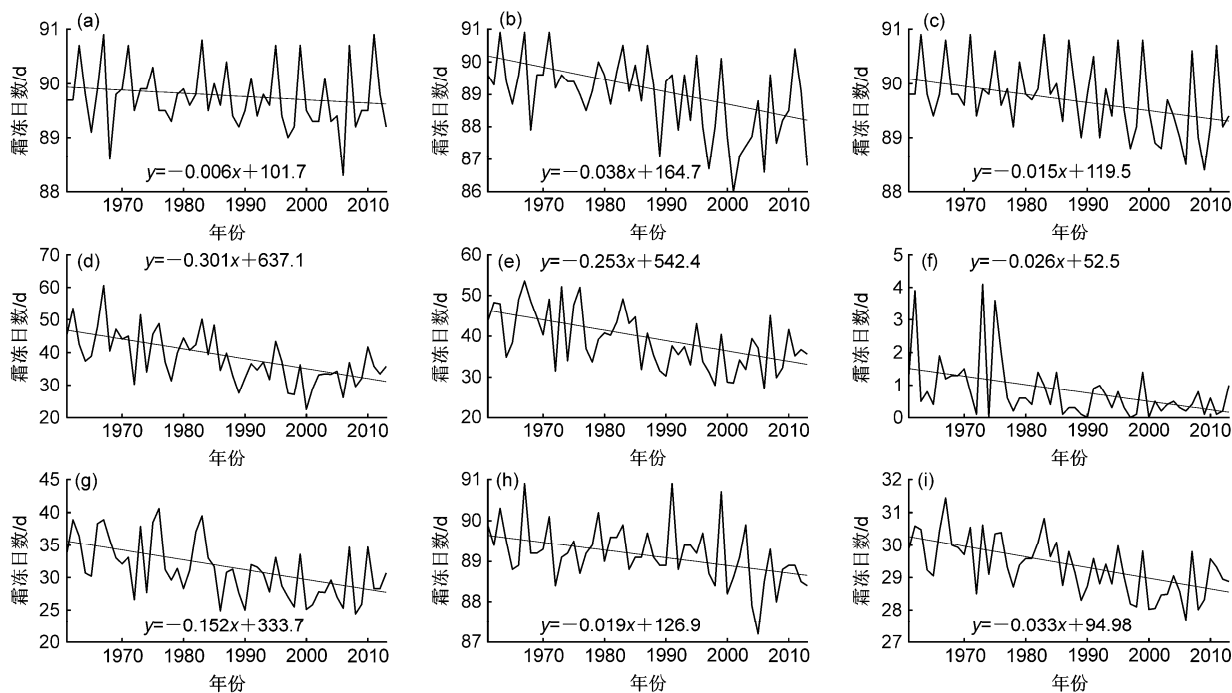


图5 同图3, 但为霜冻日数时间序列

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for FD

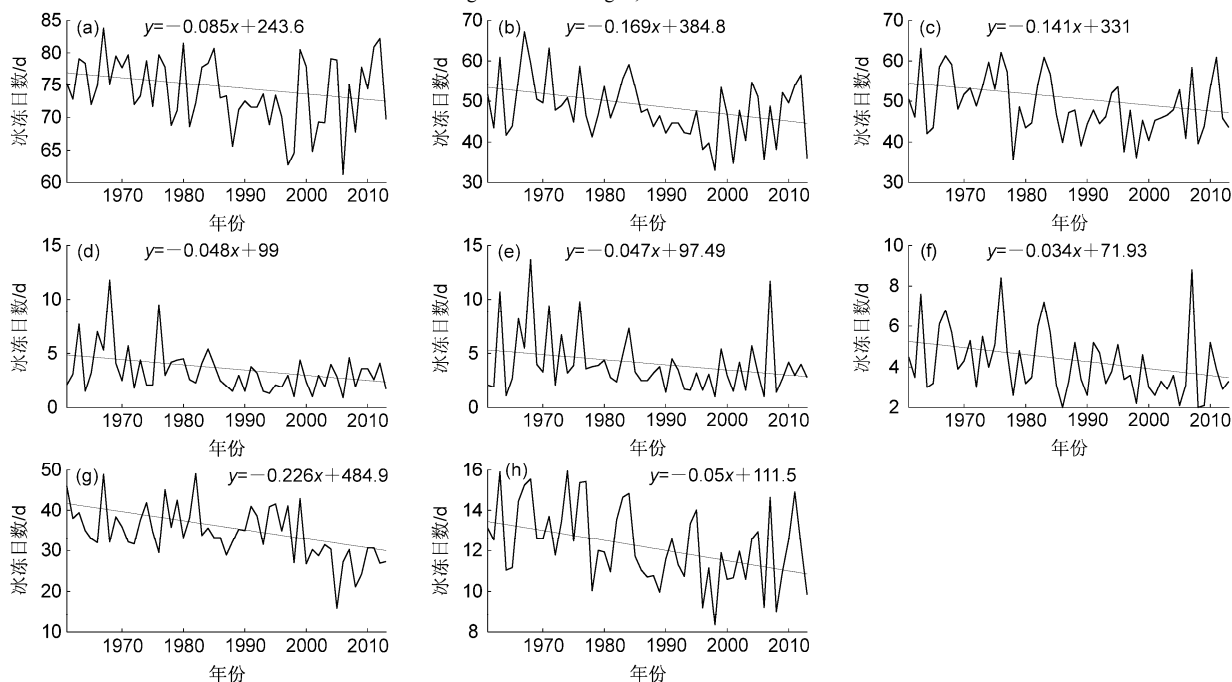


图6 1961~2014年冬季中国各区域的冰冻日数时间序列: (a) 东北; (b) 华北; (c) 西北; (d) 华东; (e) 华中; (f) 西南; (g) 高原; (h) 全国平均。黑色直线为线性回归趋势线

Fig. 6 Time series of ID in various regions of China in the winters from 1961 to 2014: (a) Northeast China; (b) North China; (c) Northwest China; (d) East China; (e) central China; (f) Southwest China; (g) the Tibetan Plateau; (h) nationwide mean. Black beelines represent linear regression trends

-2.3 d/10 a, 其下降趋势大于其余 6 个区域, 表明高原区有较显著的变暖。就全国而言, 各个区域的冬季冰冻日数在 20 世纪 60 年代至 80 年代呈现较稳定的波动, 而在 20 世纪 80 年代之后呈现较明显的下降趋势, 除高原地区以外, 其余地区的冬季冰冻日数在 21 世纪初期之后出现了不同程度的下降趋势减弱的状况, 这也印证了近年来气候变暖减缓的事实。就华中和西南地区而言, 2007 年为冰冻日数高值年, 其天数分别为 11.7 d 和 8.8 d, 远多于 21 世纪以来其他年份的天数, 这也反映了 2007/2008 年南方冬季冰雪灾害所产生的严重影响。

图 7 为全国 8 个区域与全国平均的月最低气温极大值 TN_x 在冬季随时间的变化特征。总体而言, 月最低气温极大值在全国与各个区域均呈现在波动中上升的趋势, 其中东北、华北和西北地区的冬季最低气温极大值的上升趋势分别为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 而华东、华中、华南以及西南的上升趋势分别为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以及 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 表明该极值指数在北方地区的生长比南方地区明显。高原地区的上升趋势为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 体现了较明显的增暖现象。在 1967/1968 年冬季, 许多地区均有最低气温极大值的最小值出现, 且其他极端指数也在该冬季出现了极值, 表明该年冬季较气候态异常寒冷。另外, 在

2011/2012 年冬季, 各个地区的最低气温极大值出现了自 21 世纪以来的极小值, 表明该年冬季相比 2000 年后的年份较为寒冷。图 8 为全国平均及各区域的月最低气温极小值 TN_n 在冬季随时间的变化特征。从全国角度来看, 该指数总体呈现出随时间增加的趋势, 这一点与最低气温极大值相同, 但其线性趋势值稍大于最低气温极大值, 表明月最低气温极小值的变暖略更明显; 与月最低气温极大值类似, 该极值指数在全国各区域也呈现出在波动中上升的趋势, 且指数上升趋势呈现由北向南逐渐减小的分布, 但月最低气温极小值在每个区域的上升趋势值普遍比最低气温极大值在对应区域的趋势值大, 表明气候变暖现象在该指数上得到了更加明显的体现。高原地区的上升趋势为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 也反映了较显著的增暖。在 1976/1977 年华东、华中和西南等地区的冬季月最低气温极小值出现极低值, 对东北地区而言, 该指数在 2000/2001 年冬季也出现了极低值, 这些均与冷昼日数和冷夜日数相类似。

综上所述, 在冬季 6 个极端低温指数的时间序列中, 冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数以及冰冻日数总体上随时间均呈下降的趋势: 在 20 世纪 60 年代至 70 年代中期呈现波动状, 随后至 21 世纪初呈明显下降趋势, 自 2006 年左右以后其下降趋势有所减缓。月最低气温极大值和月最低气温极小值

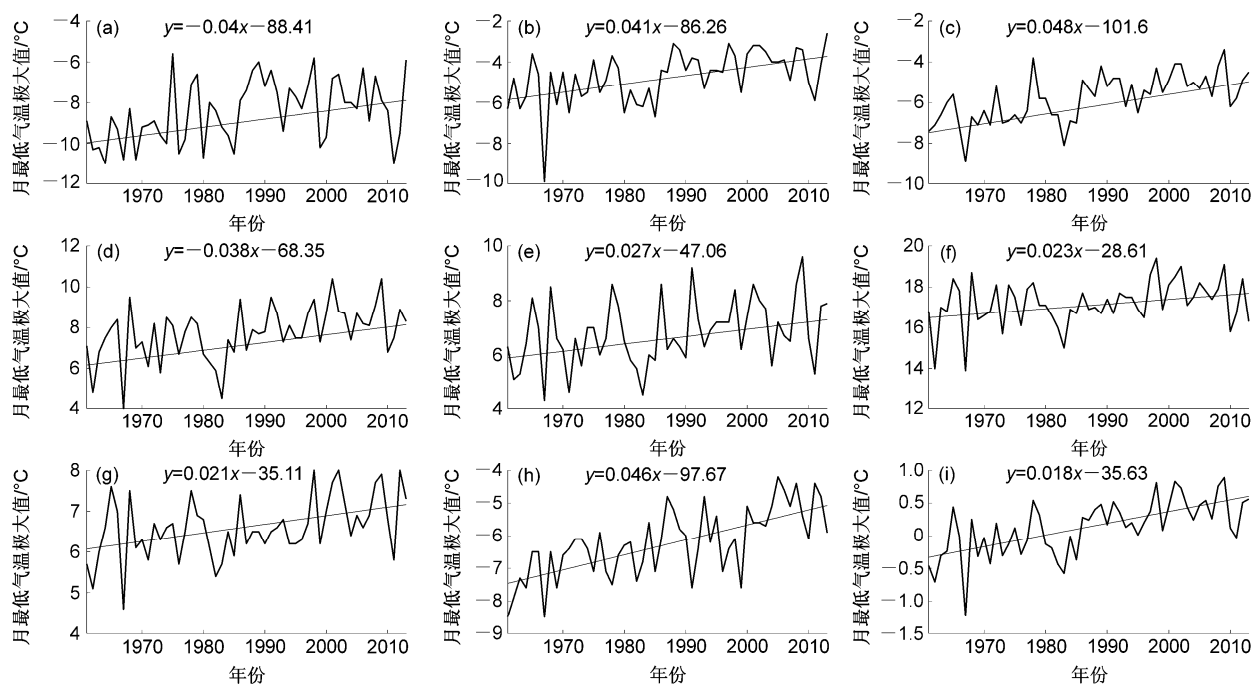


图 7 同图 3, 但为月最低气温极大值时间序列

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for TN_x

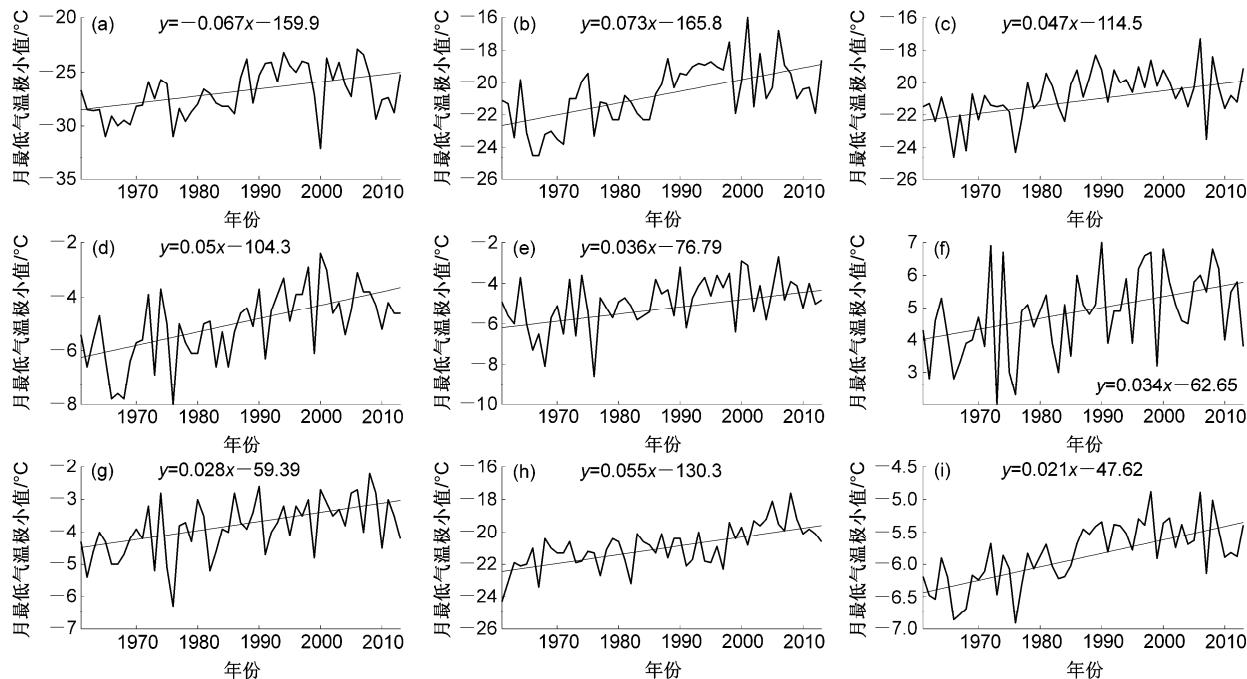


图 8 同图 3, 但为月最低气温极小值时间序列
Fig. 8 Same as Fig. 3, but for TNn

在全国平均及各个区域随时间总体上呈现在波动中上升的趋势,且高原和北方地区的上升趋势大于南方。

4 结论与讨论

本文通过采用 691 个无缺测站点的经均一化处理及质量控制的逐日最高、最低气温资料,基于 6 个极端气温指数,分析了 1961~2014 年中国冬季的极端低温变化特征。表 2 为冬季中国各区域及全国极端低温指数变化趋势,以使总结更加清晰。本文主要结论如下:

(1) 极端低温指数的空间趋势分布为:冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数以及冰冻日数在全国大部分地区均呈现下降的趋势,下降趋势较为明显的区域集中在东北南部、华北、西北东部、华东、华中、西南及高原地区。对霜冻和冰冻日数而言,分别在东北北部及华南地区出现了上升趋势,但趋势不显著。极端低温即冬季最低气温极大值和最低气温极小值在全国范围内则主要呈现上升的趋势,增温幅度较为明显的区域集中在东北、华北、西北、华东、西南及高原地区。

(2) 冬季 6 个极端低温指数随时间的变化特征

表 2 1961~2014 年冬季中国各区域极端低温指数变化趋势
Table 2 Trends of indices of temperature extreme in the regions of China in winter from 1961 to 2014

	变化趋势/d (10 a) ⁻¹				变化趋势/°C(10 a) ⁻¹	
	冷昼日数	冷夜日数	霜冻日数	冰冻日数	月最低气温极大值	月最低气温极小值
东北	-0.8	-1.6	-0.1	-0.9	0.4	0.7
华北	-1	-1.9	-0.4	-1.7	0.4	0.7
西北	-0.9	-1.5	-0.2	-1.4	0.5	0.5
华东	-0.9	-2	-3	-0.5	0.4	0.5
华中	-0.5	-1.7	-2.5	-0.5	0.3	0.4
华南	-0.2	-1.7	-0.3	—	0.2	0.3
西南	-0.5	-1.5	-1.5	-0.3	0.2	0.3
高原	-1.2	-2	-0.2	-2.3	0.5	0.6
全国	-0.4	-0.8	-0.3	-0.5	0.2	0.2

为:冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数以及冰冻日数总体上随时间均呈现下降的趋势,即在 20 世纪 60 至 70 年代中后期呈现波动状,冷昼日数和冷夜日数在大部分区域中呈现了 4~7 a 的周期性变化,而霜冻日数和冰冻日数在各个区域具有较显著的年际变化;随后自 20 世纪 70 年代末 80 年代初至 21 世纪初呈明显下降趋势,从 2006 年左右以后其下降趋势有所减缓。月最低气温极大值和月最低气温极小值在全国各个区域随时间总体上呈现在波动中上升的趋势,且高原和北方地区增暖幅度大于南方地区。

(3) 就各个区域而言, 极端低温天数高值年与极端低温低值年均集中出现在 20 世纪 60 年代至 70 年代, 其中 1966~1968 年与 1976 年的冬季在各个极端指数中出现明显大值(对于极值指数是小值), 表明这些年份的冬季尤为寒冷。东北地区在 2000 年冬季经历了较强程度的极端低温事件。华中与西南地区在 2007/2008 年出现冰冻日数高值, 反映了 2008 年初南方冬季严重的冰雪灾害事件。

此外, 有学者指出自 20 世纪末期以来, 全球气候进入变暖减缓时期(沈永平和王国亚, 2013; 王迪等, 2014; Li et al., 2015)。参考并结合前人的研究, 本文讨论了变暖减缓期(1998~2014 年)冬季全国 8 个区域的各极端低温指数变化趋势(表 3)。对于冷昼和冷夜日数来说, 全国大部分区域均呈现出增加的趋势, 与 20 世纪 70 至 90 年代的极端日数显著减少形成对比, 华南地区的增加趋势最为大, 其冷昼日数达到 4.76 d/10 a, 西北、华东、西南次之; 对霜冻和冰冻日数而言, 除高原地区外的绝大多数区域呈不同程度的增加趋势, 高原的两个指数趋势均为负值, 且冰冻日数的下降趋势较大(-3.36 d/10 a), 表明其在变暖减缓期具有持续变暖或变暖不停滞的特征, 这与以往的一些研究结果一致(Liu and Chen, 2000; Liu et al., 2006; You et al., 2008); 而变暖减缓期时的最低气温极大和极小值在大多区域也表现为降低趋势。

表 4 总结了目前的一些全国及区域极端气温研究进展。通过对比可看出, 对于全中国极端气温的研究时长最近截止到 2012 年, 然而没能反映最近两年的变化情况; 且一些研究没有采用均一化数据, 以及使用基于 WMO 的极端气温指数少, 不能较全面的反映极端气温的变化。因此本文使用更新的经质量控制和均一化处理的数据, 以便全面分析对比极端气温的变化。本文通过 6 个极端气温指数分析了中国 53 个冬季的极端低温变化特征, 真实地反映了我国不同地区极端低温随时间的变化趋势, 体现了近年来气候变暖减缓的事实, 并识别出了个别的强极端低温年, 为之后的个例分析等研究工作提供了依据和准备。然而是什么原因造成了冬季气温升高及极端低温事件的减少, 之前也有学者进行研究, 认为这一现象与许多因素有关: 中国冬季气温可能与北半球极涡变化有所联系, 极涡的不同分型及移动路径与转向的不同可能导致中国冬季平均气温和极端低温出现不同的分型(张婧雯

表 3 1998~2014 年冬季中国各区域极端低温指数变化趋势
Table 3 Trends of indices of temperature extreme in the regions of China in winter from 1998 to 2014

	变化趋势/d (10 a) ⁻¹				变化趋势/°C(10 a) ⁻¹	
	冷昼日数	冷夜日数	霜冻日数	冰冻日数	月最低气温极大值	月最低气温极小值
东北	0.42	0.4	0.08	3.54	-0.35	-0.58
华北	0.85	0.64	0.48	4.16	-0.14	-0.78
西北	2.82	1.44	-0.07	5.67	-0.22	-0.61
华东	2.85	1.23	4.86	0.53	-0.39	-0.51
华中	1.36	1.28	3.48	0.55	-0.14	-0.25
华南	4.76	2.29	0.01	—	-0.92	-0.26
西南	2.09	1.23	1.59	0.46	-0.07	-0.1
高原	0.74	0.51	-0.35	-3.36	0.73	-0.02

表 4 中国极端气温的部分研究

Table 4 Partial studies of temperature extremes in China

研究时段	区域 选定	站点 数量	是否分析		参考文献
			WMO	极端 气温指数	
1951~1990 年	中国	369	否		任福民等(1998)
1951~2000 年	中国	241	否		王翠花等(2003)
1951~2010 年	中国	731	否		王晓娟等(2013)
1955~2005 年	中国	234	否		张宁等(2008)
1955~2006 年	中国	275	否		付冬雪等(2011)
1960~2012 年	中国	542	是		肖冰霜等(2016)
1961~2000 年	中国	166	是		杨萍等(2010)
1961~2006 年	中国	599	否		刘雅星等(2010)
1961~2008 年	中国	526	是		周雅清和任国玉(2010)
1961~2008 年	中国	752	否		赵俊虎等(2011)
1961~2009 年	中国	696	否		钱忠华等(2011)
1961~2010 年	中国	487	否		黄菲等(2014a)
1961~2014 年	中国	691	是		本文

等, 2014); 冬季极端温度的变化可能与北极涛动(Arctic Oscillation, AO)有关, AO 正负相位的交替对应应有冬季气温的异常偏高偏低(丁园园等, 2010; You et al., 2013), 一些地区可能受到了东亚冬季风的影响(Hu et al., 2015), 还可能与蒙古高压强度位置的变化、中高纬度低频振荡、天气尺度瞬变波等有关联(Chen et al., 2013; Horton et al., 2015; 苗青等, 2016); 除了大气环流系统之外, 有些地区的冬季气温还可能与海表温度异常、大陆冬季积雪异常有关(陈海山等, 1999; 康丽华等, 2009; 胡蓓蓓等, 2015); 北极海冰作为一个气候敏感因子, 其年代际变化转型也可能对北半球中高纬冬季极端低温变化趋势产生影响(黄菲等, 2014b), 海拔高度、地形状况等自然因子的不同也在一定程度上影响着极端温度(王琼等, 2013), 并且城市化效应、大气气溶胶变化及全球温度的异

常也与中国极端气温变化存在着或多或少的联系 (Huang et al., 2010; Ren and Zhou, 2014)。这些影响极端气温的因素是否相互联系, 或是否起到协同影响的作用, 都值得我们在今后进一步深入的研究。

参考文献 (References)

- Chen H S, Liu L, Zhu Y J. 2013. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Science China Earth Sciences*, 56 (7): 1266–1280, doi:10.1007/s11430-012-4442-z.
- 陈海山, 孙照渤, 闵锦忠. 1999. 欧亚大陆冬季积雪异常与东亚冬季风及中国冬季气温的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 22 (4): 609–615.
- Chen Haishan, Sun Zhaobo, Min Jinzhong. 1999. The relationships between Eurasian winter snow cover anomaly and EAWM, China winter air temperature [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 22 (4): 609–615, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.1999.04.007.
- 丁园圆, 缪启龙, 王勇. 2010. 中国北方冬季极端温度的变化及其与 AO 相关分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 24 (5): 95–101.
- Ding Yuanyuan, Miao Qilong, Wang Yong. 2010. Variations of the winter extreme temperatures over northern China and their relationships with the Arctic Oscillation [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 24 (5): 95–101, doi:10.13448/j.cnki.jalre.2010.05.003.
- 付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2011. 1955~2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征 [J]. *气象科学*, 31 (3): 274–281.
- Fu Dongxue, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2011. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955–2006 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 31 (3): 274–281, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.03.005.
- Horton D E, Johnson N C, Singh D, et al. 2015. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends [J]. *Nature*, 522 (7557): 465–469, doi:10.1038/nature14550.
- 胡蓓蓓, 黄菲, 晋鹏. 2015. 中国冬季极端低温事件与海温和海冰的关系 [J]. *气候变化研究快报*, 4 (3): 130–141.
- Hu Beibei, Huang Fei, Jin Peng. 2015. The relationship between winter extreme minimum temperature events and sea surface temperature and sea ice in China [J]. *Climate Change Research Letters (in Chinese)*, 4 (3): 130–141, doi:10.12677/CCRL.2015.43015.
- Hu C D, Yang S, Wu Q G. 2015. An optimal index for measuring the effect of East Asian winter monsoon on China winter temperature [J]. *Climate Dyn.*, 45 (9–10): 2571–2589, doi:10.1007/s00382-015-2493-5.
- Huang D Q, Qian Y F, Zhu J. 2010. Trends of temperature extremes in China and their relationship with global temperature anomalies [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (4): 937–946, doi:10.1007/s00376-009-9085-4.
- 黄菲, 胡蓓蓓, 周晓, 等. 2014a. 中国冬季极端低温事件的多尺度特征 [J]. *中国海洋大学学报*, 44 (10): 42–50.
- Huang Fei, Hu Beibei, Zhou Xiao, et al. 2014. Multi-scale variations of winter extreme minimum temperature in China [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 44 (10): 42–50.
- 黄菲, 狄慧, 胡蓓蓓, 等. 2014b. 北极海冰的年代际转型及极端低温变化特征 [J]. *气候变化研究快报*, 3 (2): 39–45.
- Huang Fei, Di Hui, Hu Beibei, et al. 2014. Decadal regime shift of arctic sea ice and corresponding changes of extreme low temperature [J]. *Climate Change Research Letters (in Chinese)*, 3 (2): 39–45, doi:10.12677/CCRL.2014.32007.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basic. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. *Climatic Change*, 42 (1): 131–149, doi:10.1023/A:1005468316392.
- 康丽华, 陈文, 王林, 等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系 [J]. *气候与环境研究*, 14 (1): 45–53.
- Kang Lihua, Chen Wen, Wang Lin, et al. 2009. Interannual variations of winter temperature in China and their relationship with the atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (1): 45–53, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.05.
- Li Q X, Yang S, Xu W H, et al. 2015. China experiencing the recent warming hiatus [J]. *Geophysical Research Letters*, 42 (3): 889–898, doi:10.1002/2014GL062773.
- 刘吉峰, 李世杰, 丁裕国, 等. 2006. 近几十年我国极端气温变化特征分区方法探讨 [J]. *山地学报*, 24 (3): 291–297.
- Liu Jifeng, Li Shijie, Ding Yuguo, et al. 2006. The discussion of the characteristic zoning method of extreme temperature in China in recent decades [J]. *Journal of Mountain Science (in Chinese)*, 24 (3): 291–297.
- 刘晴晴, 王盘兴, 徐祥德, 等. 2011. 蒙古高压一组环流指数及与中国同期气候异常关系分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (6): 889–898.
- Liu Qingqing, Wang P X, Xu X D, et al. 2011. A group of circulation indices of Mongolia High and analysis of its relationship with simultaneous anomaly in the climate of China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (6): 889–898, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.06.012.
- Liu X D, Chen B D. 2000. Climatic warming in the Tibetan plateau during recent decades [J]. *International Journal of Climatology*, 20 (14): 1729–1742, doi:10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1729::AID-JOC556>3.0.CO;2-Y.
- Liu X D, Yin Z Y, Shao X M, et al. 2006. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2003 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111 (D19): D19109, doi:10.1029/2005JD006915.
- 刘雅星, 范广洲, 董一平, 等. 2010. 近 46 年中国冬季日均气温及极端温度的变化 [J]. *成都信息工程学院学报*, 25 (3): 286–292.
- Liu Yaxing, Fan Guangzhou, Dong Yiping, et al. 2010. Variations of winter daily average temperature and extreme temperature in the recently 46 years in China [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 25 (3): 286–292, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2010.03.012.
- Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998 [J]. *International Journal of Climatology*, 21 (3): 269–284, doi:10.1002/joc.610.

- 苗青, 巩远发, 邓锐捷, 等. 2016. 北半球中高纬度低频振荡对 2012/2013 年冬季中国东北极端低温事件的影响 [J]. 大气科学, 40 (4): 817–830. Miao Qing, Gong Yuanfa, Deng Ruijie, et al. 2016. Impacts of the low-frequency oscillation over the extra-tropics of the Northern Hemisphere on the extreme low temperature event in Northeast China in the winter of 2012/2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 817–830, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15189.
- Peterson T C, Manton M J. 2008. Monitoring changes in climate extremes: A tale of international collaboration [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89 (9): 1266–1271, doi:10.1175/2008BAMS2501.1.
- 钱忠华, 侯威, 杨萍, 等. 2011. 最概然温度背景下不同气候态中国夏季极端温度事件时空分布特征 [J]. 物理学报, 60 (10): 109204. Qian Zhonghua, Hou Wei, Yang Ping, et al. 2011. Characteristics of spatiotemporal distribution of extreme temperature events over China mainland in different climate states against the backdrop of most probable temperature [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (10): 109204, doi:10.7498/aps.60.109204.
- 任福民, 翟盘茂. 1998. 1951~1990 年中国极端气温变化分析 [J]. 大气科学, 22 (2): 217–227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951–1990 [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (2): 217–227, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.02.10.
- 任国玉, 陈峪, 邹旭恺, 等. 2010. 综合极端气候指数的定义和趋势分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 354–364. Ren Guoyu, Chen Yu, Zou Xukai, et al. 2010. Definition and trend analysis of an integrated extreme climatic index [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 354–364, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.02.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 701–716, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.001.
- Ren G Y, Zhou Y Q. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over mainland China, 1961–2008 [J]. J. Climate, 27 (6): 2340–2360, doi:10.1175/JCLI-D-13-00393.1.
- 沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 2002. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响 [J]. 中国科学 (D 辑), 32 (4): 317–326. Sha Wanying, Shao Xuemei, Huang Mei. 2002. Climate warming and its impact on natural regional boundaries in China in the 1980s [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 45 (12): 1099–1113, doi:10.1360/02yd9107.
- 沈永平, 王国亚. 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 35 (5): 1068–1076. Shen Yongping, Wang Guoya. 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 35 (5): 1068–1076, doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120.
- 王翠花, 李雄, 缪启龙. 2003. 中国近 50 年来日最低气温变化特征研究 [J]. 地理科学, 23 (4): 441–447. Wang Cuihua, Li Xiong, Miu Qilong. 2003. Variety characteristics of daily minimum air temperature in China in recent 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 23 (4): 441–447, doi:10.3969/j.issn.1000-0690.2003.04.009.
- 王迪, 侯亚红, 何金海, 等. 2014. 不同地区和季节的温度对全球变暖减缓的响应 [C]// 中国气象学会年会: S15 副热带气象及生态环境影响. 北京: 中国气象学会. Wang Di, Hou Yahong, He Jinhai, et al. 2014. Response of temperature to global warming hiatus in different regions and seasons [C]// The 31th Annual Meeting of Meteorological Society of China (in Chinese): S15 Subtropical Meteorological and Ecological Impact. Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 2013. 1962–2011 年长江流域极端气温事件分析 [J]. 地理学报, 68 (5): 611–625. Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. 2013. Extreme temperature events in Yangtze River basin during 1962–2011 [J]. Acta Geograph Sinica (in Chinese), 68 (5): 611–625, doi:10.11821/xb201305004.
- 王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 1960–2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. 气候变化研究进展, 8 (1): 8–15. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Ren Fumin, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960–2009 [J]. Climate Change Research (in Chinese), 8 (1): 8–15, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.01.002.
- 王晓娟, 沈柏竹, 龚志强, 等. 2013. 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 [J]. 物理学报, 62 (22): 229201. Wang Xiaojuan, Shen Baizhu, Gong Zhiqiang, et al. 2013. The classification of winter regional extreme low temperature events in China and their corresponding relationship to climatic indices extreme anomaly [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62 (22): 229201, doi:10.7498/aps.62.229201.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 1999. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 肖冰霜, 马玉霞, 赵天保, 等. 2016. 基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势 [J]. 气象, 42 (3): 339–346. Xiao Bingshuang, Ma Yuxia, Zhao Tianbao, et al. 2016. Long-term trends in extreme temperature over China mainland based on homogenized dataset [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42 (3): 339–346, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.009.
- Xu W H, Li Q X, Wang X L, et al. 2013. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices [J]. J. Geophys. Res., 118 (17): 9708–9720, doi:10.1002/jgrd.50791.
- 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 2010. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征 [J]. 应用气象学报, 21 (1): 29–36. Yang Ping, Liu Weidong, Wang Qiguang, et al. 2010. The climatic change trend and seasonal characteristics of daily temperature extremes in China for the latest 40 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (1): 29–36, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.004.
- You Q D, Ren G Y, Fraedrich K, et al. 2013. Winter temperature extremes in China and their possible causes [J]. International Journal of Climatology, 33 (6): 1444–1455, doi:10.1002/joc.3525.
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2008. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2005 [J]. J. Geophys. Res., 113 (D7): D07101, doi:10.1029/2007JD009389.
- 张婧雯, 李栋梁, 柳艳菊. 2014. 北半球极涡新特征及其对中国冬季气温的影响 [J]. 高原气象, 33 (3): 721–732. Zhang Jingwen, Li

- Dongliang, Liu Yanjiu. 2014. New features of polar vortex and its impact on winter temperature of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (3): 721–732, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00044.
- 张宁, 孙照渤, 曾刚. 2008. 1955–2005 年中国极端气温的变化 [J]. 南京气象学院学报, 31 (1): 123–128. Zhang Ning, Sun Zhaobo, Zeng Gang. 2008. Change of extreme temperatures in China during 1955–2005[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 123–128.
- 赵俊虎, 封国林, 张世轩, 等. 2011. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系 [J]. 物理学报, 60 (9): 099205. Zhao Junhu, Feng Guolin, Zhang Shixuan, et al. 2011. Seasonal changes in China during recent 48 years and their relationship with temperature extremes [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (9): 099205.
- 周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956~2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 406–417. Zhou Y, Ren G Y. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956–2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 405–417, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.08.