

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): 405-417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956-2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 405-417.

中国大陆 1956~2008 年极端气温事件变化特征分析

周雅清^{1,2} 任国玉²

1 山西省晋中市气象局, 晋中 030600

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用 446 个国家级气象站 1956~2008 年共 53 年的日最高、最低气温资料, 分析了我国大陆地区气温极端事件的变化规律。结果表明, 中国大陆地区霜冻日数和结冰日数明显减少, 减少显著的区域集中在北方, 夏季日数和炎热夜数明显增多, 增多显著的区域主要在中东部。日最高(低)气温的极大(小)值整体都有上升趋势, 最高(低)气温的极大值在北方上升较明显, 而在长江中下游和西南地区有下降的趋势; 最高(低)气温的极小值则在全国范围都呈明显上升, 极端最低气温上升尤为显著, 在北方大部分地区升温速率达 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上。冷夜(昼)日数普遍明显减少, 53 年中减少趋势为 $7.9\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ [$2.8\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$]; 暖夜(昼)日数明显增加, 增加趋势为 $7.0\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ [$4.1\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$]。冷夜(昼)日数减少主要发生在冬季, 其次是春、秋季, 而暖昼和暖夜日数增加最显著的季节分别出现在秋季和夏季。从转折时间上看, 绝对指数和极值指数的冷指数是从 20 世纪 80 年代中后期开始显著减少的, 暖指数显著增加的时间则推迟到 20 世纪 90 年代中期。但相对指数的冷指和暖指都是在 20 世纪 80 年代中后期开始显著变化的。

关键词 极端气温指数 最高气温 最低气温 气候变化 中国大陆

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0405-13 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Variation Characteristics of Extreme Temperature Indices in Mainland China during 1956 – 2008

ZHOU Yaqing^{1,2} and REN Guoyu²

1 Jinzhong Meteorological Bureau of Shanxi Province, Jinzhong 030600

2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

Abstract The spatial and temporal patterns of changes in the 12 extreme temperature indices in mainland China are examined based on the data set of daily maximum and minimum temperature during 1956 – 2008. Results show that the frost days and ice days have decreased significantly, with stronger decreases in northern China, whereas summer days and tropical nights have largely increased in central and eastern China. There is a trend for the maximum (minimum) value of maximum temperature (TX) (minimum temperature (TN)) to increase in mainland China as a whole, with the maximum value of TX (TN) significantly increasing in northern China, but decreasing in the region of the middle and lower reaches of the Yangtze River and southwestern China. Trends of the minimum value of TX (TN) have increased rapidly in the most parts of mainland China, especially in northern China reaching more than

收稿日期 2010-01-11 收到, 2010-03-10 收到修定稿

资助项目 国家“十一五”科技支撑项目课题 2007BAC29B02 和 2007BAC03A01

作者简介 周雅清, 女, 1971 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhoyuqxs@126.com

$1.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$. Furthermore, the annual frequency of cool nights (days) has decreased significantly by $7.9\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ [$2.8\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$], and the annual frequency of warm nights (days) has increased significantly by $7.0\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ [$4.1\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$]. The maximum reduction of cold nights/days is found in winter, then in spring and fall. In the meantime, the most significant increase of warm days and nights is found in summer and fall respectively. The absolutely and extremely cold indexes exhibit a notable decreasing trend from the middle-late 1980s, meanwhile the corresponding warm indexes show a pronounced change from the mid-1990s. The relatively cold and warm indexes have significantly changed from the middle-late 1980s.

Key words extreme temperature indices, maximum temperature, minimum temperature, climate change, mainland China

1 引言

19 世纪末、20 世纪初以来,全球平均地表温度明显上升 (IPCC, 2007),近 100 多年来中国地面平均气温升高也很明显 (丁一汇等, 2006)。最近的 50 年,中国大陆地区年平均地面气温升高了 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,增温速率为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ (任国玉等, 2005)。

在陆地平均气温变暖的背景下,极端气温事件由于其对自然和社会系统的严重影响,受到了越来越多的关注 (Easterling et al., 2000; 胡宜昌等, 2007)。Alexander et al. (2006) 分析了全球陆地区域极端气温、降水指数后指出,近 50 年来全球极端气温事件,尤其是与日最低气温相关的极端气温指数变化是非常显著的,70% 以上的全球陆地都显示冷夜明显减少,而暖夜明显增加。Choi et al. (2009) 分析亚太地区 1955~2007 年日气温、降水资料后发现,所研究的地区极端气温事件具有相似的变化规律。Zhai and Pan (2003) 对 1951~1999 年中国极端气温的研究发现,日最高气温大于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温日数略有减少;日最低气温小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温日数显著减少,同时暖日和暖夜增加,另外冷日减少,冷夜减少更明显。Qian and Lin (2004) 统计分析了 11 个极端气温指数后发现:1961~2000 年期间,气温日较差减小;沿黄河流域的 40°N 附近地区,冷日显著减少,黄河中上游、华南沿海及其它一些地区暖日都增加,只有个别地方暖日减少;全国大部地区冷夜减少、暖夜增加,华北、东北地区生长季长度增加,全国大部分地区霜冻期明显缩短,持续暖日数在华北明显增加,而持续冷日数大部分

地区都减小。此外,我国各区域也开展了一些相关研究 (翟盘茂和潘晓华, 2003; 龚道溢和韩晖, 2004; 周秀杰等, 2004; 王鹏祥和杨金虎, 2007; 游庆龙等, 2008; 陈晓光等, 2008)。任国玉等 (2005) 对前期中国气温变化的研究成果总结后指出,自 20 世纪 50 年代开始,全国大范围的寒潮活动逐渐减弱,与低温有关的极端气候事件强度和频率明显减弱,而与高温相关的极端事件强度和频率没有明显增强。

由于各国、各地区的研究方法和使用的指数定义不一,给对比分析全球极端气候事件的变化带来难题。为了解决这个问题,由世界气象组织气候委员会 (WMO-CCL) 和气候变率与可预测性计划 (CLIVAR) 共同发起成立了气候变化检测、监测和指数专家小组,从众多的类似监测、研究计划中选取了 27 个核心指数,其中包括 16 个极端气温指数和 11 个极端降水指数,并编制成软件 RCLimindex (<http://cccma.seos.uvic.ca/etc-cdmi/index.shtml> [2008-10-01])。使用这些推荐的极端气候指数,可以增进不同区域研究结果的可比性,有助于深入认识全球陆地极端气候变化规律和原因。

尽管我国学者对极端气温变化开展了不少研究,但过去的研究多借鉴采用了早期各个研究组的指数定义。另外先前的研究多数侧重在我国某一个区域,或者资料截止年份较早。因此,有必要采用更新的资料和统一的极端气温指数,对我国过去极端气温变化趋势进行分析研究。

2 资料与方法

2.1 资料和质量控制

本文采用的逐日最高、最低气温资料取自国

家气象信息中心整编的中国大陆 730 站的逐日资料数据集。这套资料经过质量控制，但没有进行均一化订正。由于 1956 年后中国西部所有省区才全部有了观测站，考虑到台站地理分布相对均匀的问题，资料时段取在 1956~2008 年。根据序列长度不少于 53 年，资料缺测不超过 5% 的原则，选取其中 446 个台站的资料进行分析（见图 1）。

对所选用的日资料采用 Rclimdex 软件重新进行了质量控制，质量控制分两步：（1）最高气温减去最低气温为负值则标记为错误值，按照缺测值处理；（2）超出平均值 4 倍标准差的记录被标记为出界值，根据相邻台站的对应记录进行人工判断，合理的记录保留，不合理的记录按缺测值处理。经过检验有 336 个台站被检测出有出界值，其中有 3 站 9 个气温值是不合理的，占总资料数的百万分之三，按缺测值进行了处理。

2.2 极端气温指数定义和分析方法

采用的 12 个极端气温指数沿用气候变化检测、监测和指数专家小组的定义。以 1971~2000 年为参考期，使用 Rclimdex 软件计算逐站极端气温指数时间序列及线性趋势，并对趋势的统计显著性进行评估。

将极端指数分为 3 种类型，第一类是基于原始观测数据和固定阈值的指数，简称绝对指数，包括霜冻日数、夏季日数、结冰日数和炎热夜数。由于我国地域宽广，气候复杂，本文还做了

以下考虑：以上基于固定阈值的 4 项指数，当某站在 53 年中有 2/3 的年份没有出现某项极端事件记录时，该站该项指数的趋势可能为 0，也可能很大，估计线性趋势是不可信的，因此该站不参与该项指数的趋势和时间序列的统计，这样得到的中国区域的时间演变才能更真实地反映该项指数的变化情况；第二类为年内日最高（低）气温的极值，简称极值指数，包括年内日最高（低）气温的极大（小）值；第三类为基于相对（浮动）阈值的指数，简称相对指数，包括冷昼（夜）、暖昼（夜）日数等，这些指数的计算分别以某台站 1971~2000 年中某日的最高（低）气温资料的第 90（10）个百分位值作为该站该日统计指数的上（下）阈值，如果某日最高气温超过（低于）其上（下）阈值，则认为该日为一个暖（冷）昼事件，同样，如果某日最低气温超过（低于）其上（下）阈值，则认为该日为一个暖（冷）夜事件。为了方便与其他研究结论对比，将原来定义中超过（低于）上（下）阈值的百分比转换为超过（低于）上（下）阈值的日数。具体定义见表 1。

线性趋势的计算采用最小二乘法，趋势统计显著性检验采用 Kendall-tau 非参数检验方法（魏凤英，1999）。中国区域平均时间序列按照 Jones 网格面积加权平均法（Jones and Hulme, 1996）得到，网格尺寸为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

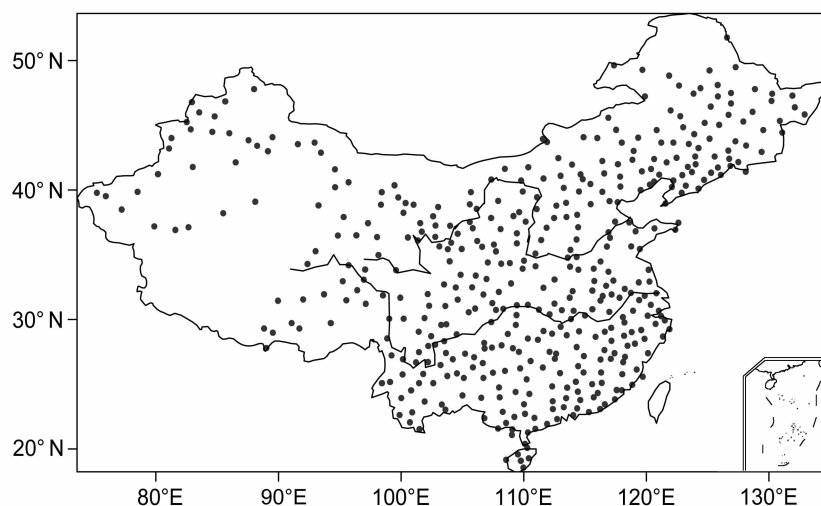


图 1 所选取的气象台站分布图

Fig. 1 Locations of the 446 weather stations in China

表 1 本文所用气温极端指数的定义		
Table 1 Extreme temperature indices used in this study		
代码	名称	定义
FD0	霜冻日数	日最低气温 (TN) $<0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数
SU25	夏季日数	日最高气温 (TX) $>25^{\circ}\text{C}$ 的全部日数
ID0	结冰日数	日最高气温 (TX) $<0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数
TR20	炎热夜数	日最低气温 (TN) $>20^{\circ}\text{C}$ 的全部日数
TXx	极端最高气温	每月内日最高气温的最大值
TNx	最低气温极大值	每月内日最低气温的最大值
TXn	最高气温极小值	每月内日最高气温的最小值
TNn	极端最低气温	每月内日最低气温的最小值
TN10p	冷夜日数	日最低气温 (TN) $<10\%$ 分位值的日数
TX10p	冷昼日数	日最高气温 (TX) $<10\%$ 分位值的日数
TN90p	暖夜日数	日最低气温 (TN) $>90\%$ 分位值的日数
TX90p	暖昼日数	日最高气温 (TX) $>90\%$ 分位值的日数

3 结果与讨论

3.1 绝对指数的趋势变化

表 2 是中国大陆区域极端气温指数的变化趋势,图 2 是绝对指数的平均时间序列曲线图。可见霜冻日数 20 世纪 80 年代中期前为平稳中略有下降,1987 年后迅速减少,近 53 年减少的趋势达到 $3.0\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,比 Zhai and Pan (2003) 得到的 1951~1999 年估计值 $-2.4\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 降幅

要大一些,表明霜冻日数近 10 年来仍在持续减少。同样地,结冰日数也表现为减少趋势,而且也是在 80 年代中期发生了显著变化,但结冰日数变化比霜冻日数变化要缓和。夏季日数在 20 世纪 90 年代中期前变化不大,1994 年后才迅速增加,2006 年和 2007 年达到最多。与夏季日数相似,炎热夜数也是从 1994 年开始呈现显著的上升趋势,到 2005 年达到最大。

表 2 中国大陆 1956~2008 年极端气温指数变化趋势
Table 2 Linear trends in temperature extremes in China during 1956 - 2008

指数	趋势	单位
霜冻日数	-3.0^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
夏季日数	2.1^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
结冰日数	-1.8^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
炎热夜数	2.0^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
极端最高气温	0.1	$^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
最低气温极大值	0.2^*	$^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
最高气温极小值	0.4^*	$^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
极端最低气温	0.6^*	$^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
冷夜日数	-7.9^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
冷昼日数	-2.8^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
暖夜日数	7.0^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$
暖昼日数	4.1^*	$\text{d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$

* 表示通过了 95% 信度检验。

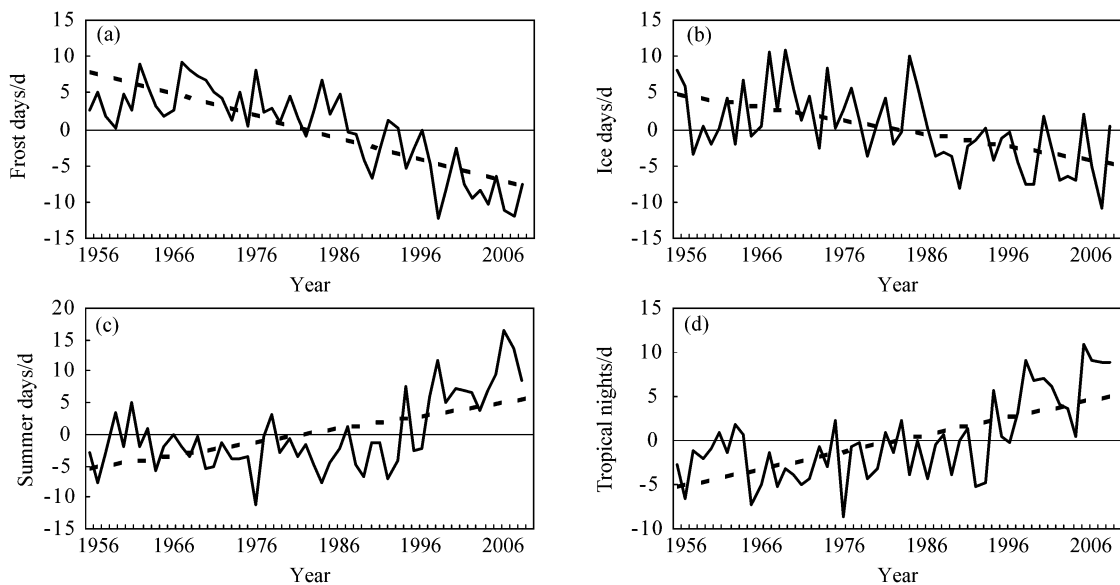


图 2 1956~2008 年中国气温绝对指数距平的时间演变: (a) 霜冻日数; (b) 结冰日数; (c) 夏季日数; (d) 炎热夜数
Fig. 2 Time series of (a) frost days, (b) ice days, (c) summer days, and (d) tropical nights anomalies in China during 1956 - 2008

从趋势的空间分布来看,霜冻日数在全国范围内都是明显减少的(图 3a)。这个结果与 Zhai and Pan (2003) 和 Qian and Lin (2004) 的研究结论是一致的。结冰日数主要出现在 32°N 以北的地区,以减少趋势为主,减少显著的区域主要集中在我国北方的中东部,减少显著的范围和程度比霜冻日数要小得多(图 3b)。与前人的分析结论相比,结冰日数大幅减少的区域基本是一致的,但新疆北部呈增加趋势的站点数明显减少(Qian and Lin, 2004)。夏季日数在全国绝大部分台站都呈增加趋势(图 3c),除北方地区以外,长江中下游和

云南大部增加趋势也较明显,都在 $2\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上。炎热夜数也以增多趋势为主,但明显增多的区域主要集中在我国的中东部地区 and 新疆北部(图 3d)。

综上所述,从时间演变来看,中国大陆绝对冷指数都呈减少趋势,且从 20 世纪 80 年代中后期开始减少显著,而暖指数则以增加趋势为主,但开始发生显著变化的年代要晚至 20 世纪 90 年代中期。从趋势的空间分布看,冷指数在我国北方减少趋势明显,而暖指数则是在中东部增加显著。

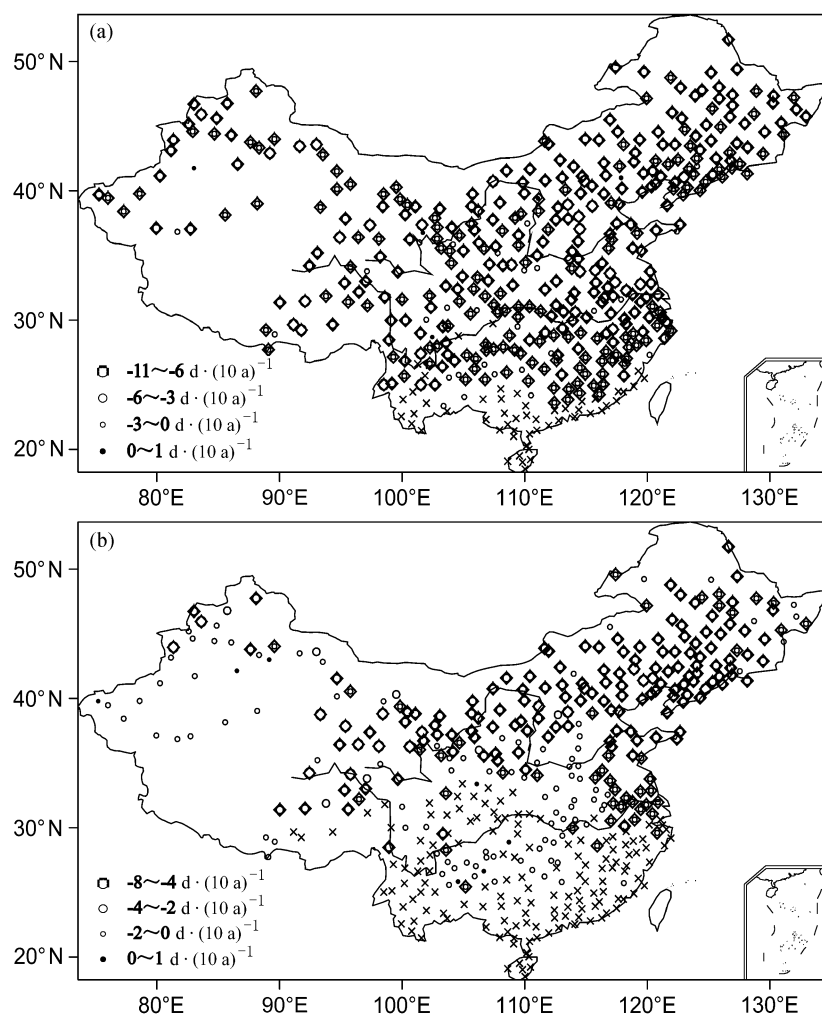


图 3 1956~2008 年中国气温绝对指数趋势的空间分布: (a) 霜冻日数; (b) 结冰日数; (c) 夏季日数; (d) 炎热夜数。●表示正趋势, ○表示负趋势, ×表示无显著趋势, ◇表示趋势显著性通过 95% 信度检验

Fig. 3 Trends distribution of (a) frost days, (b) ice days, (c) summer days, and (d) tropical nights in China during 1956–2008. Solid dots denote positive trend, circles denote negative trend, crosses denote not available, and diamonds indicate that the trends are statistically significant at 95% confidence level

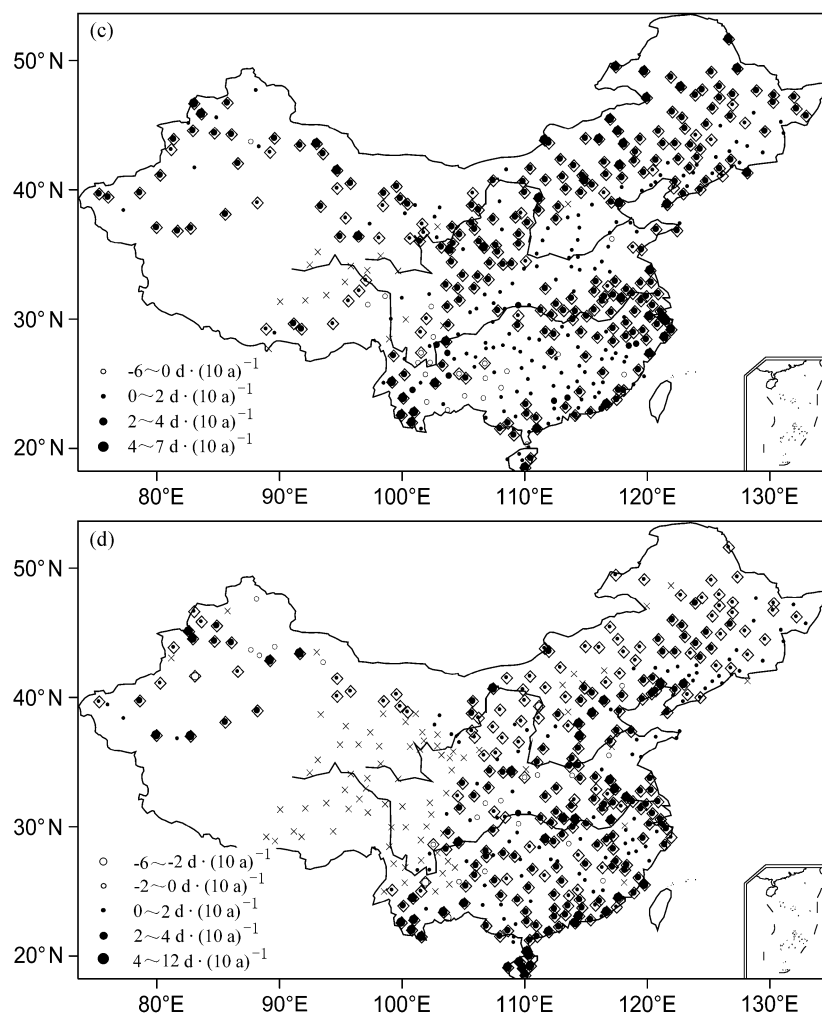


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

3.2 极值指数的趋势变化

由表2可以看到, 极端气温的极大值和极小值都呈上升趋势, 极小值的升高更明显一些, 极端最低气温升高趋势最大, 为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, 而极端最高气温的趋势仅为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$, 没有通过 95% 信度检验。由4个极值指数的时间演变(图4)可以看出, 极端最低气温整体呈波动上升, 20世纪80年代中后期上升尤为明显, 但进入21世纪以来, 除2007年异常偏高外, 一般处于平稳甚至下降态势; 最高气温的极小值在20世纪80年代后期之前变化不明显, 之后缓慢上升, 进入21世纪后的变化与极端最低气温有相似性; 而最低气温和最高气温的极大值在1994年前变化都比较平稳, 之后迅速上升, 进入21世纪以后仍

然保持在较高水平。

从空间分布看, 极端最高气温(图5a)在大部分地区为上升趋势, 华北北部和新疆北部上升趋势较明显, 达到 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上, 而下降区域主要集中在东北南部、华北平原、长江中上游和西南地区; 最低气温的极大值(图5b)与极端最高气温(图5a)的空间分布相比, 下降趋势集中的区域基本一致, 但范围缩小, 上升趋势的范围扩大, 40°N 以北的地区增加趋势都在 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上; 与最高(低)气温的极大值相比, 极小值的上升趋势范围更广, 强度也更大。最高气温的极小值(图5c)在绝大部分地区都是升高的, 特别是在北方、长江中下游和西南地区西部, 升高的趋势都在 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上, 只

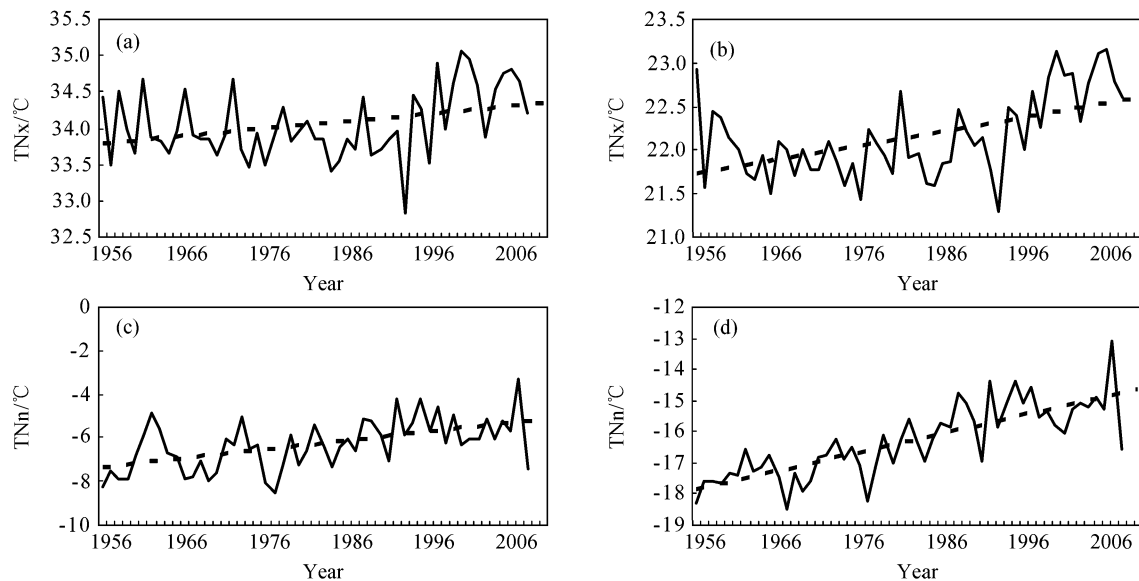


图4 1956~2008年中国气温极值指数的时间演变: (a) 极端最高气温 (TXx), (b) 最低气温极大值 (TNx), (c) 最高气温极小值 (TXn) 和 (d) 极端最低气温 (TNn)

Fig. 4 Time series of (a) maximum value of maximum temperature (TXx), (b) maximum value of minimum temperature (TNx), (c) minimum value of maximum temperature (TXn), and (d) minimum value of minimum temperature (TNn) in China during 1956–2008

有零星站点有下降; 最低气温的极小值 (图 5d) 则在全国范围内都是大幅上升的趋势, 大部分地区升高趋势都在 $0.5^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上, 东北、华北和西北地区中北部以及新疆北部升高趋势达 $1.0^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上。

综上所述, 各极值指数整体都呈上升趋势。从中国大陆区域平均的时间序列看, 最高 (低) 气温的极小值是在 20 世纪 80 年代中后期之后变化开始比较明显, 而极大值则是在 90 年代中期后迅速升高。一个值得注意的现象是, 极端最低气温和最高气温的极小值进入 21 世纪以来一般处于平稳甚至下降态势, 而最低气温和最高气温的极大值在进入 21 世纪以后仍然保持在较高水平上。从趋势的空间分布看, 北方地区极端气温的极大值都有比较明显的上升, 而在长江中下游和西南地区有下降趋势; 极小值则在全国范围都有明显上升, 极端最低气温上升尤为显著。

3.3 相对指数的趋势变化

从表 2 可以看出, 冷夜 (昼) 日数明显减少, 1956~2008 年减少趋势达到 $7.9\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ [$2.8\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$], 暖夜 (昼) 日数明显增多, 增加的趋势达到 $7.0\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ [$4.1\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 从区域平均时间序列看 (图 6), 冷昼和冷夜日数

的时间演变态势大致相似, 20 世纪 50 年代后期减少, 60 年代有所增加, 70 年代到 80 年代中期变化相对平稳, 之后迅速减少, 但由于冷夜日数波动幅度很小, 因此下降趋势更为明显; 暖昼和暖夜日数的时间演变也大致相似, 1987 年前变化不大, 之后迅速增加, 暖夜日数增加更明显。Zhai and Pan (2003) 根据高于 (低于) 参考期 95% (5%) 阈值定义的暖昼和暖夜日数也是从 20 世纪 80 年代中期后开始急剧变化, 但冷夜 (昼) 日数减少和暖夜 (昼) 日数增多的趋势比本文的结果要小得多。这一差异与所选取的时段以及百分位阈值的不同有关。还需要指出, 与冷事件频率的减少比较, 暖事件的增加一般要弱。

从趋势的空间分布看, 冷昼日数 (图 7a) 在东北和华北北部减少比较明显, 达到 $5\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上, 增多的区域主要分布在西南地区; 而冷夜日数 (图 7b) 除西南地区东部的个别台站为弱的增加趋势外, 绝大部分地区都明显减少, 且减少趋势基本都在 $5\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上, 北方以及长江中下游和西南地区西部在 $10\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上。暖昼日数 (图 7c) 除华北地区南部和西南地区东部的部分台站有减少外, 其余大部分地区都明显增加, 其中华北北部、西北、西南西部和华南沿海

地区增加显著, 在 $5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上, 西南地区西部和华南沿海少数台站在 $10 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上。暖夜日数 (图 7d) 变化趋势的空间分布与冷夜日数相反, 全国有零散的减少趋势, 其余绝大部分地区都明显增多, 且增多的趋势基本上都在 $5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上, 西北、华北、西南、青藏高原、华南沿海部分台站在 $10 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上。

本文得到的冷昼 (夜) 日数减少区域与 Qian and Lin (2004) 的研究结论基本一致, 但冷昼日数明显减少的范围更大, 同时增加的范围明显缩

小, 而冷夜日数虽然明显减少和微弱增加的范围没有太大区别, 但减少的趋势明显增强。同样, 暖昼 (夜) 增加的区域也大致相同, 但暖昼明显增多的区域更广。Qian and Lin (2004) 研究的时段为 1961~2000 年, 且剔除了人口在 50×10^4 以上的城市台站, 因此上述差异一方面可能表明相对冷 (暖) 指数的减少 (增加) 趋势近 10 年来有所加强, 另一方面也说明城市化对极端气候的影响是不可忽视的。根据周雅清和任国玉 (2009) 对 1961~2000 年华北地区平均最高、最低气温的城市化影响分析, 对于最高气温而言, $50 \times$

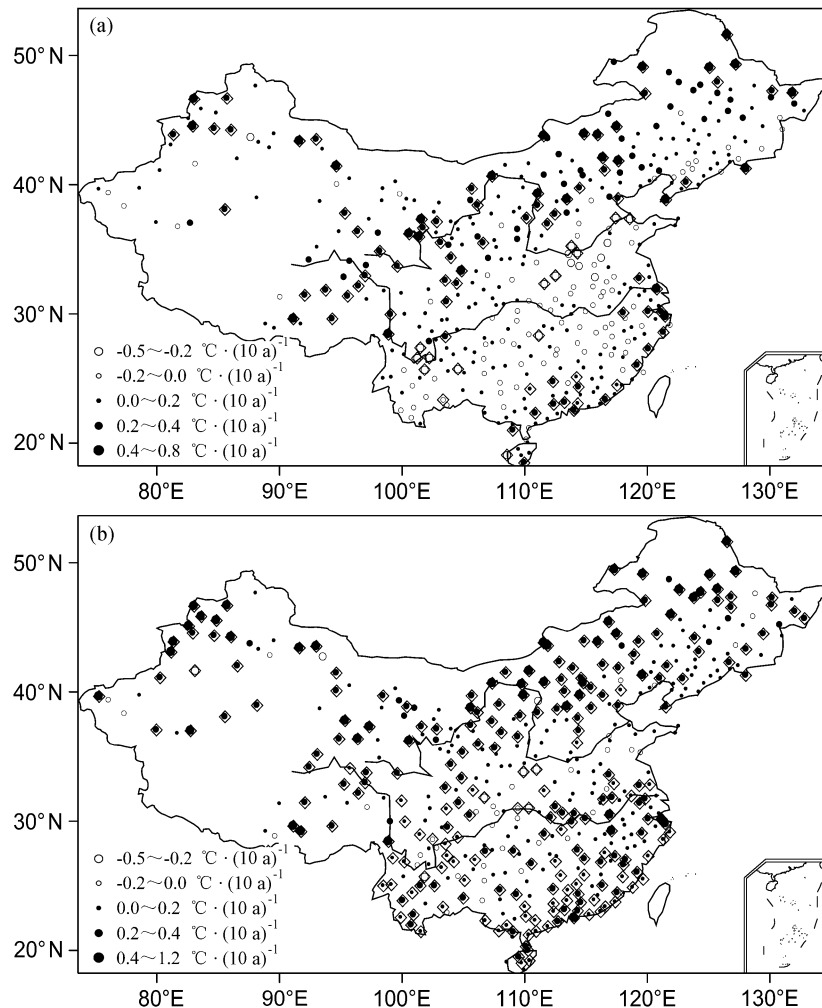


图 5 1956~2008 年中国气温极值指数趋势的空间分布: (a) 极端最高气温 (TXx); (b) 最低气温极大值 (TNx); (c) 最高气温极小值 (TXn); (d) 极端最低气温 (TNn)。●表示正趋势, ○表示负趋势, ◇表示趋势显著性通过 95% 信度检验

Fig. 5 Trends distribution of (a) maximum value of maximum temperature (TXx), (b) maximum value of minimum temperature (TNx), (c) minimum value of maximum temperature (TXn), and (d) minimum value of minimum temperature (TNn) in China during 1956 - 2008. Solid dots denote increasing trend, circles denote decreasing trend, and diamonds indicate that the trends are statistically significant at 95% confidence level

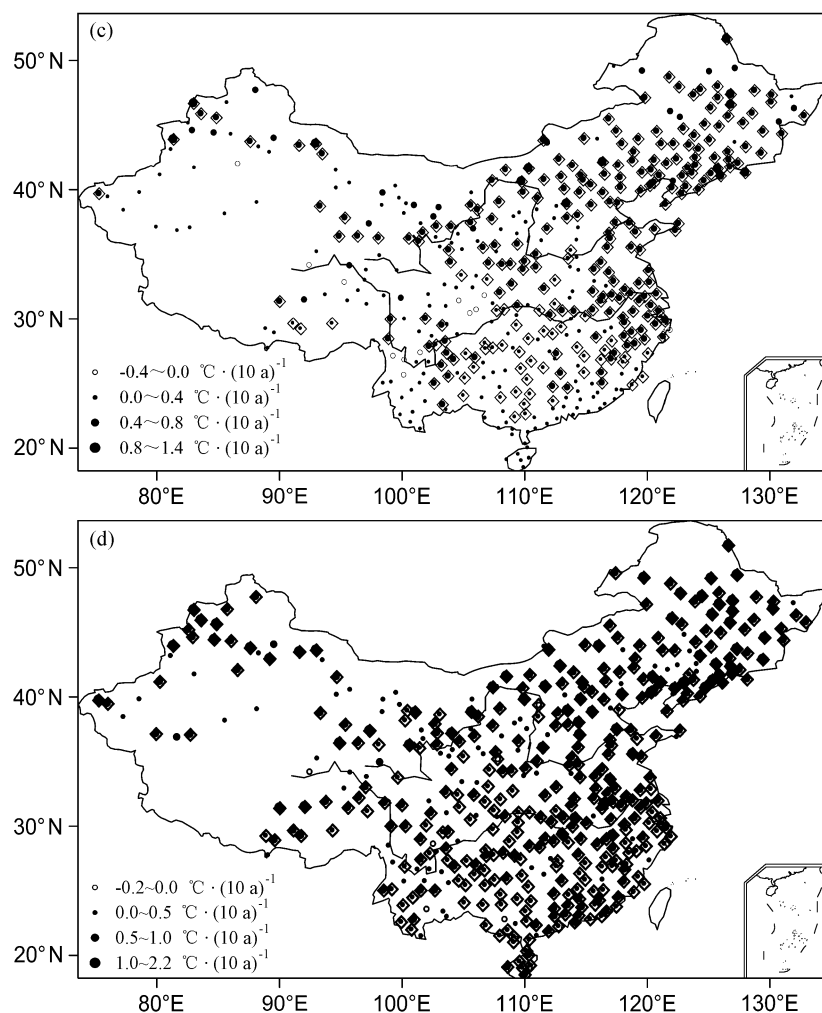


图 5 (续)

Fig. 5 (Continued)

10^4 人口以下的台站城市化影响不十分显著, 而对于最低气温, 不仅 50×10^4 以上人口的大城市站, 而且包括 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$ 人口的小城市站和 $10 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4$ 人口的中等城市站的气温序列中城市化影响造成的增温对全部增温的贡献率都在 50% 以上。因此如何将极端气温指数变化趋势中的城市化影响剔除, 还需要今后进一步研究。

综上所述, 区域平均的相对指数序列中暖指数明显增加, 而冷指数明显减少, 且与最低气温相关的指数比与最高气温相关的指数变化趋势要显著得多。区域平均的相对指数序列都是在 20 世纪 80 年代中后期开始显著变化, 在 2006 年和 2007 年达到极值。从空间分布看, 冷昼日数只在

华北和东北北部减少较明显, 暖昼日数则在西南西部和华南沿海显著增加, 冷夜和暖夜日数在大部分地区变化都很显著, 北方和西南地区西部变化更加明显。

从相对指数的四季变化 (表 3) 来看, 冷昼和冷夜日数减少主要是发生在冬季 (图略), 其次是春、秋季。冬季冷昼日数在全国范围都明显减少, 近一半台站减少趋势达到 $5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上, 明显减少的区域主要集中在北方和华东地区, 秋季冷昼日数在全国绝大部分地区是减少的, 但减少趋势一般在 $5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以下, 明显减少的区域分布在西北地区东部和青藏高原, 增加的趋势主要出现在长江以南, 春、夏季减少趋势的区域明显减小, 尤其夏季近一半台站为增加趋势。而冷夜

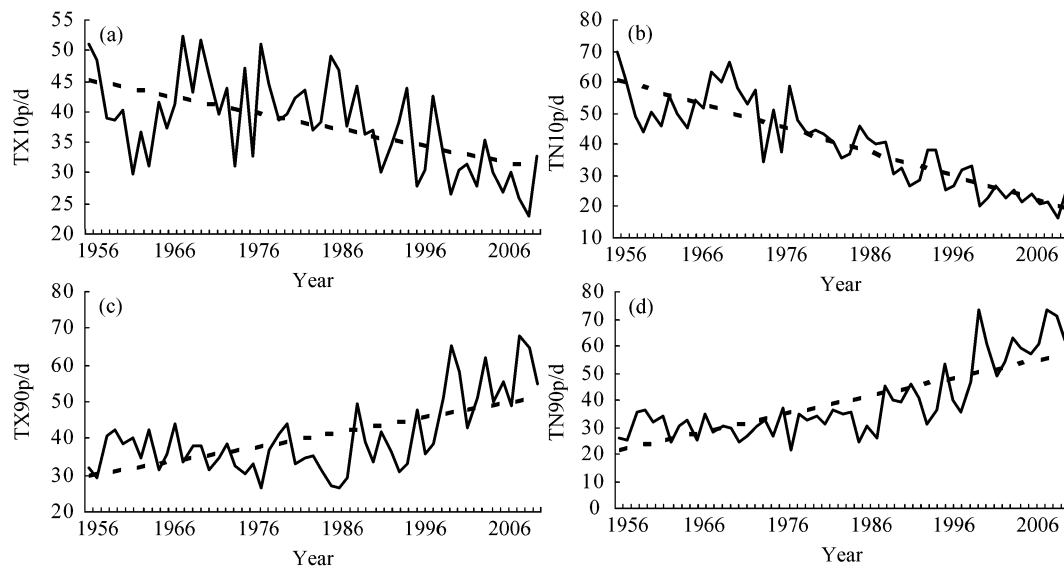


图6 1956~2008年中国气温相对指数的时间演变: (a) 冷昼日数 (TX10p); (b) 冷夜日数 (TN10p); (c) 暖昼日数 (TX90p); (d) 暖夜日数 (TN90p)

Fig. 6 Time series of (a) cool days (TX10p), (b) cool nights (TN10p), (c) warm days (TX90p), and (d) warm nights (TN90p) in China during 1956–2008

表3 中国1956~2008年四季冷夜和暖昼日数变化趋势
Table 3 Linear trends of seasonal cool nights and warm days in China during 1956–2008 $d \cdot (10 a)^{-1}$

	冷夜日数	冷昼日数	暖夜日数	暖昼日数
春季	-7.3	-2.6	6.5	3.6
夏季	-6.2	-1.1	7.8	4.0
秋季	-7.6	-2.9	6.9	4.5
冬季	-10.0	-4.5	6.8	4.1

四季在全国绝大部分地区都是明显减少的,特别是冬季,近一半的台站减少趋势在 $10 d \cdot (10 a)^{-1}$ 以上;其余三季则在我国北方的大部分台站减少非常显著,而增加趋势仅出现在春、夏季我国的中东部。暖昼增加最显著的季节出现在秋季,其次为冬季和夏季,秋季除零散分布一些减少趋势外,基本上都是增加趋势,其中华南沿海的部分地区增加尤为显著,冬季我国中东部有少数减少趋势,而显著增加的区域主要分布在青藏高原东部和西南地区西部,夏季与冬季的分布大致相似,但更加两级分化,增加显著的台站和减少趋势的台站都比冬季要多,春季减少区域与冬季基本一致,但增加显著的区域却明显减小。暖夜四季在全国基本上都是增加趋势,且华北、新疆西部和西南地区增加非常显著,而夏、秋季在华南增加

也十分显著,夏季增加显著的台站更为密集,因此夏季暖夜增加的趋势也最为明显。由此可见我国气温相对指数的趋势变化有较强的季节性和区域性。

4 结论

本文对中国大陆地区近53年的12个极端气温指数的时间演变进行了系统分析,得到以下结论:

(1) 从绝对指数序列的变化来看,冷指数即冷事件频率都呈减少趋势,且从20世纪80年代中后期以后减少显著,而暖指数即暖事件频率则呈增加趋势,但开始发生显著变化的时间推迟到20世纪90年代中期。从趋势的空间分布看,冷事件频率在北方减少趋势明显,而暖事件频率在中东部增加显著;

(2) 从极值指数序列的变化来看,所有极值序列整体都呈上升趋势。最高(低)气温的极小值是在20世纪80年代中后期以后开始明显增加,而极大值则是在20世纪90年代中期后迅速升高。北方地区极端气温的极大值都有较明显的上升,而长江中下游和西南地区存在下降趋势;极小值则在全国范围都有明显上升;

(3) 区域平均的相对指数序列中, 暖指数明显增加, 而冷指数明显减少, 且与最低气温相关的指数比与最高气温相关的指数变化趋势要显著得多。相对指数序列都是在 20 世纪 80 年代中后期开始显著变化。从空间分布看, 冷昼日数只在华北和东北北部减少较明显, 暖昼日数则在西南西部和华南沿海显著增加, 冷夜和暖夜日数在大部分地区变化都很显著, 北方和西南地区西部变化更加明显;

(4) 从相对指数的四季变化来看, 冷昼和冷夜日数减少主要是发生在冬季, 其次是春、秋季; 而暖昼在秋季增加最为显著, 冬季和夏季次之;

暖夜则在夏季增加最显著, 其余三季增加的幅度比较接近。我国气温相对指数的趋势变化具有较强的季节性和区域性。

与前人的研究结果对比表明, 本文获得的气温极端指数变化趋势一般更强, 这主要是因为采用了更新的资料序列。另外, 城市化对极端气温指数序列的影响无疑是很显著的, 特别是对与最低气温有关的极端气温指数序列, 影响更为显著。如何考虑单站和区域平均极端气温指数变化趋势中的城市化影响, 获得消除局地人为影响偏差的极端气温变化趋势估计值, 是需要今后进一步研究的重要问题。

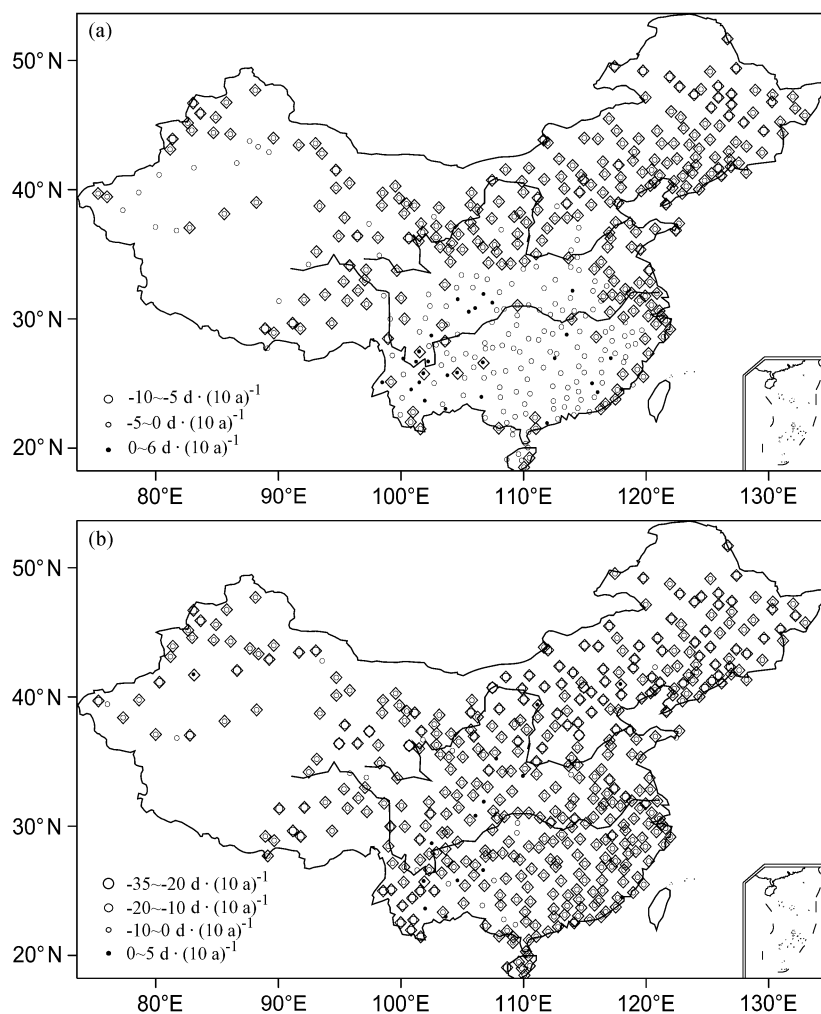


图7 1956~2008年中国气温相对指数趋势的空间分布: (a) 冷昼日数(TX10p); (b) 冷夜日数(TN10p); (c) 暖昼日数(TX90p); (d) 暖夜日数(TN90p)。图例同图5

Fig. 7 Trends distribution of (a) cool days (TX10p), (b) cool nights (TN10p), (c) warm days (TX90p), and (d) warm nights (TN90p) in China during 1956-2008. Symbols are the same as Fig. 5

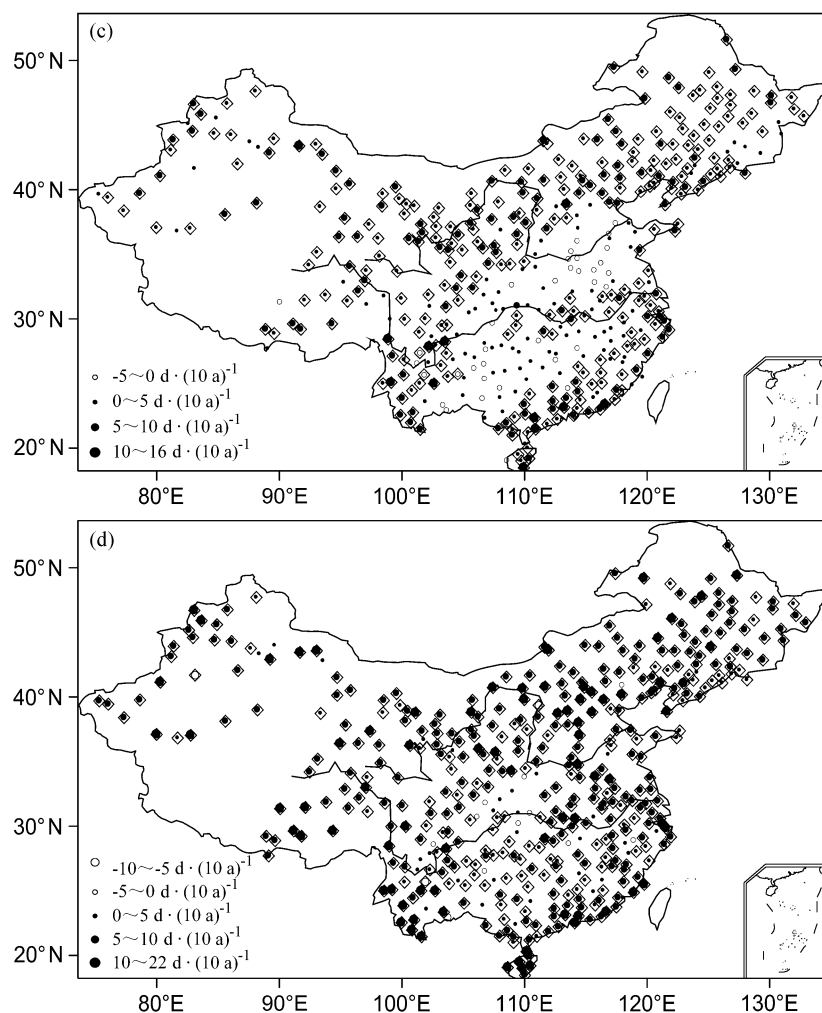


图 7 (续)

Fig. 7 (Continued)

参考文献 (References)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- 陈晓光, Conway D, 郑广芬, 等. 2008. 1961~2004 年宁夏极端气温变化趋势分析 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (2): 73-77. Chen Xiaoguang, Conway D, Zheng Guangfen, et al. 2008. Trends of extreme temperature in Ningxia during 1961-2004 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 4 (2): 73-77.
- Choi G, Collins D, Ren G, et al. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955-2007 [J]. *International Journal of Climatology*, 29: 1-20.
- 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 2006. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (1): 3-8. Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. 2006. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 2 (1): 3-8.
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81 (3): 417-425.
- 龚道溢, 韩晖. 2004. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析 [J]. *地理学报*, 59 (2): 230-238. Gong Daoyi, Han Hui. 2004. Extreme climate events in northern China over the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 59 (2): 230-238.
- 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 2007. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展 [J]. *地球科学进展*, 22 (10): 1066-1075. Hu Yichang,

- Dong Wenjie, He Yong. 2007. Progress of the study of extreme weather and climate events at the beginning of the twenty first century [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 22 (10): 1066 - 1075.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996 pp.
- Jones P D, Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations [J]. *Int. J. Climatol.*, 16: 361 - 377.
- Qian W, Lin X. 2004. Regional trends in recent temperature indices in China [J]. *Climate Research*, 27 (5): 119 - 134.
- 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 (2): 701 - 716. Ren Guoyu, Chu Ziy-ing, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (2): 701 - 716.
- 王鹏祥, 杨金虎. 2007. 中国西北近 45 年来极端高温事件及其对区域性增暖的响应 [J]. *中国沙漠*, 27 (7): 649 - 655. Wang Pengxiang, Yang Jinhua. 2007. Extreme high temperature events and response to regional warming in recent 45 years in northwest China [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 27 (7): 649 - 655.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 1999. *Diagnosis and Forecasting Methods of Modern Climatic Statistics* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 等. 2008. 三江源地区 1961~2005 年气温极端事件变化 [J]. *长江流域资源与环境*, 17 (2): 232 - 236. You Qinglong, Kang Shichang, Li Chaoliu, et al. 2008. Change in extreme temperature over Sanjiangyuan region in the period from 1961 to 2005 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 17 (2): 232 - 236.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年气温和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58 (增刊): 1 - 10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (Suppl.): 1 - 10.
- Zhai P, Pan X. 2003. Trends in temperature extremes during 1951 - 1999 in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (17): 1913 - 1916.
- 周秀杰, 张桂华, 郑红, 等. 2004. 黑龙江省气候变暖对极端天气气候事件的影响 [J]. *气象*, 30 (11): 47 - 50. Zhou Xiujie, Zhang Guihua, Zhen Hong, et al. 2004. Effect of climate warming for the extreme weather climate event in Heilongjiang province [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 30 (11): 47 - 50.
- 周雅清, 任国玉. 2009. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响 [J]. *高原气象*, 28 (5): 1158 - 1166. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2009. The effect of urbanization on maximum, minimum temperature and daily temperature range in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 1158 - 1166.