

中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化

翟盘茂, 潘晓华

(国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 利用中国近 50 年逐日最高、最低气温和降水资料, 计算分析北方极端高温、极端低温和极端强降水事件的频率变化趋势。研究结果表明, 中国北方夜间温度极端偏低的日数显著趋于变少; 白天温度偏高的日数则趋于增多, 只有华北南部例外。同时我国北方日最低气温小于 0°C 的日数显著减少, 这使得我国北方, 尤其是东部地区无霜期明显加长。从降水来看, 华北地区强降水事件趋于减少, 但西北地区强降水事件趋于增多。

关键词: 极端高温; 极端低温; 强降水; 中国北方

中图分类号: P467

1 引言

IPCC (2001) 报告指出, 全球平均地面温度在 19 世纪末以来升高了 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ [1]。我国北方地区增暖幅度最为明显, 年平均温度的变化趋势为 $0.2 \sim 0.8^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 在东北地区和内蒙古中东部增暖速度最大, 华北地区相对较小, 南方大部地区没有明显变化趋势, 部分地区有 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的升温趋势 [2]。

最近 10 年来, 气候变暖背景下的极端值和极端事件的变化引起了广泛的关注。Karl 等的研究表明, 过去几十年中, 极端低温事件发生频率以及霜冻日数都有减少趋势, 在美国 [3]、加拿大 [4] 都有同样的结果。20 世纪后半叶逐年的极端最高温度与极端最低温度的差异显著减小 [5]。Manton 等发现在东南亚和南太平洋地区, 自从 1961 年以来, 热日 (hot days) 和暖夜 (warm night) 显著增多, 而冷日和冷夜却减少了 [6]。我国近几十年的气候最高温度略有增温, 最低温度显著增温, 日较差显著变小 [7]。在最近 40-50 年中, 极端最低温度和平均最低温度趋于增高, 尤以北方冬季更为突出 [8]。

对于降水而言, 随着全球的变暖, 降水量增多, 其中许多热带地区降水量增多, 副热带大部降水量减少, 高纬度地区降水量趋于增多。研究表明: 强降水事件在美国、中国、澳大利亚、加拿大、挪威和墨西哥、波兰和前苏联均有所增加 [9]。在全世界的许多区域研究都表明 (IPCC 2001) 降水事件频率的变化要么很小, 要么就很大, 往往总降水量有一个增加, 强降水量就会以更大的比例增加。20 世纪后半叶, 中高纬度大部分地区降水量增加, 强降水或极端降水频率也相应增加 [1]。从我国来看, 全国总降水量变化趋势不明显, 雨日显著减少 [10]。

本文基于我国近 50 年逐日最高、最低温度资料和逐日降水资料, 基于非参数的统计方法, 比较全面客观地分析我国北方近 50 年有关温度和降水极端事件的变化规律, 试图回答我国气候变暖最剧烈的北方地区气候是否更加趋于极端化、极端事件是否更为频繁等问题。

收稿日期: 2003-04-03; 修订日期: 2003-07-28

基金项目: 科技部“我国干旱、半干旱区生存环境变化与预测研究”(973)项目 (G1999043405) [Foundation Item: "973" Project of the Ministry of Science and Technology, G1999043405]

作者简介: 翟盘茂 (1962-), 男, 江苏宜兴人, 研究员, 研究方向为气候变化、气候诊断, E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

潘晓华, George Mason University, VA, USA

2 资料与分析方法

本文所用温度资料为中国大陆 200 测站的逐日最高温度、最低温度资料集,降水资料选自中国 739 个测站的逐日降水量集,资料的时段为 1951~1999 年。以上资料由国家气象中心资料室提供,本文使用的逐日资料在计算各类指数前首先经过了比较严格的质量检查^[1],文中定义的北方包括东北、华北和西北地区。

气候的定义从其本质上看与某种天气事件的概率分布有关。当天气的状态严重偏离其平均态时就可以认为不易发生的事件,不容易发生的事件在统计意义上就可以称为极端事件。目前国际上在气候极值变化研究中最多见的是采用某个百分位值作为极端值的阈值,超过这个阈值的值被认为是极值,该事件可以认为是极端事件;也有人对不同气候要素采用不同分布型的边缘值来确定气候极值,或者取某个影响人类或生物的界限温度作为气候极端值或阈值。气象上,通常把日最高温度在 35℃ 以上的日数称之为高温日数,超过这个温度就会给人类生活和生态环境产生不良影响。霜冻是植物组织在温度降到 0℃ 以下产生的一种冻害,在农业气象中,通常采用最低温度低于 0℃ 作为霜冻的气候指标^[12]。本文把日最高温度超过 35℃ 和日最低温度低于 0℃ 的日数也作为极端温度指标的一部分进行研究。

最高温度大于 35℃ 的日数一般只能出现在热季,而最低温度小于 0℃ 的日数一般出现在冷季。事实上,与当地正常情况相比较,极端高温和低温事件可以在任何季节里发生。因此,本文还定义另外两个相对的极端高温和低温指数,其定义方法是:将某站 1961~1990 年中同日的最高(低)温度资料按升序排列,得到该日第 95(5)个最高(低)温度的百分位值,照此方法可得到 366 个最高(低)温度的第 95(5)个百分位值,将之作为极端高(低)温度事件的上(下)阈值。如果某日的最高温度超越了该日极端温度事件的上阈值,则认为该日出现了极端高温事件;同理如果某日的最低温度超越了该日极端温度事件的下阈值,则认为该日出现了极端低温事件。为了方便描述和区别于最高温度超过 35℃ 的高温事件以及最低温度低于 0℃ 的低温事件,以下将最高(低)温度极端偏高(低)简称为白天(夜间)的温度极端偏高(低)(表 1)。

在我国通常把日降水量超过 50mm 降水事件称为暴雨,把日降水量超过 25mm 的降水事件称为大雨,在我国北方暴雨和大雨都可以看作强降水。事实上,对于不同的地区来说,极端强降水事件是不能

完全用全国统一固定的日降水量简单定义的。因此,在本文中专门根据每一个测站的日降水量又定义了不同地区极端降水事件的阈值。其具体方法是:把 1961-90 年逐年日降水量序列的第 99 个百分位值的 30 年平均值定义为极端降水事件的阈值,当某站某日降水量超过极端降水事件的阈值时,就称之为极端降水事件。

对极端事件阈值的确定,一般具有非参数和参数两种确定法。近年来,一些学者推崇用 Gamma 分布函数进行描述^[13]。Bonsal 指出如果某个气象要素有 n 个值,将这 n 个值按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$, 某个值小于或等于 x_m 的概率^[4]

表 1 温度和降水极端值和极端事件的指标

Tab. 1 Indices for extreme temperature and precipitation

指数	定义
白天温度极端偏高	日最高温度大于 1961-90 年间的第 95 个百分位数
夜间温度极端偏低	日最低温度小于 1961-90 年期间的第 5 个百分位数
高温日数	日最高温度大于 35℃ 的日数
低温日数	日最低温度小于 0℃ 的日数
极端降水事件	日降水量大于 1961-90 年间第 99 个百分位数
大雨	日降水量大于 25 mm
暴雨	日降水量大于 50 mm

式中： m 为 x_m 的序号，如果有 30 个值，那么第 95 个百分位上的值为排序后的 x_{29} ($p = 94.4\%$) 和 x_{30} ($p = 97.7\%$) 的线性插值； n 为某个气象要素值的个数。

采取公式 (1) 来估计百分位值,不但计算方便,而且避免了对要素序列分布的任何假设。这种百分位值的方法与 Gamma 分布比较起来，结果几乎等同。为了研究序列的多年尺度变化，需把高频变化部分滤去。本文采用二项式的不等权滑动平均，其中权重值的分布遵从二项式分布。

有 n 个资料，那么第 m 个资料 T_m 进行二项式的滑动平均后为 (注，下标有变动)：

$$T_m = \sum_{i=-L}^L \varpi_i \times T_{m-i}$$

(2)

其中 ϖ_i 是权重系数， $2L+1$ 为滑动区间。

本文为了滤去 5 年以下的高频变化，在研究气候变化的多年尺度变化时采用了二项式十一点的滑动平均。文中线性变化的趋势的计算采取最小二乘法进行估计，但趋势的检验采用 Kendall-tau 检验，这是一种用于检验时间序列变化趋势的非参数检验方法^[14]。这种方法的优点在于它允许缺测值的存在，并且无需证明资料服从某一特定分布；此外，因为该检验方法的本质是用来检测资料的相对量级，故资料本身量级很小时，依然可以适用。该方法的统计量的计算为：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)(t_j - t_k)$$

(3)

如果

$$\begin{cases} (x_j - x_k) \neq 0, & n_1 = n_1 + 1 \\ (t_j - t_k) \neq 0, & n_2 = n_2 + 1 \end{cases}$$

(4)

则

$$\tau = \begin{cases} s / \sqrt{n_1 n_2}, & n_1 \neq 0, n_2 \neq 0 \\ 0, & n_1 = 0 \text{ 或 } n_2 = 0 \end{cases}$$

(5)

给定显著性水平 α ，在本研究中取 0.05，若 $\tau < t_\alpha$ ，则认为趋势是显著的。

本文中整个北方平均的时间序列是先将站点资料格点化，按面积加权平均的方法得到。

3 温度极端事件的变化

3.1 高温日数

35℃ 以上的高温日数出现在夏季。图 1a 中反映出我国北方在 20 世纪 50 年代初期平均有 10 天左右最高温度大于 35℃，在近 50 年中总体上以 0.5 天 /10 年的趋势在减少 (表 2)，到 1992、1993 年时平均已经不足 5 天，但此后最高温度大于 35℃ 的高温日数显著增多，1997 年达 13 天。

图 1b 为 1951~1999 年我国北方最高温度大于 35℃ 日数线性变化趋势的空间分布图。图中反映出高温日数在华北平原以及河西走廊大范围趋于减少，减少趋势接近 2 天 /10 年；但在西北西部以 2 天 /10 年的趋势趋于增多；西北东部、华北

表 2 中国北方极端事件变化趋势检测 (带下划线部分为在 0.05 水平下具有显著意义)

Tab. 2 Trends in extremes in northern China
(underlined are statistically significant
at the 0.05 level)

事件	趋势 (日/10 年)
白天温度极端偏高	0.80
夜间温度极端偏低	<u>-1.90</u>
Tmax > 35℃ 的高温日数	-0.50
Tmin < 0℃ 的低温日数	2.00
极端降水事件	-0.01
大雨	<u>-0.16</u>
暴雨	<u>-0.05</u>

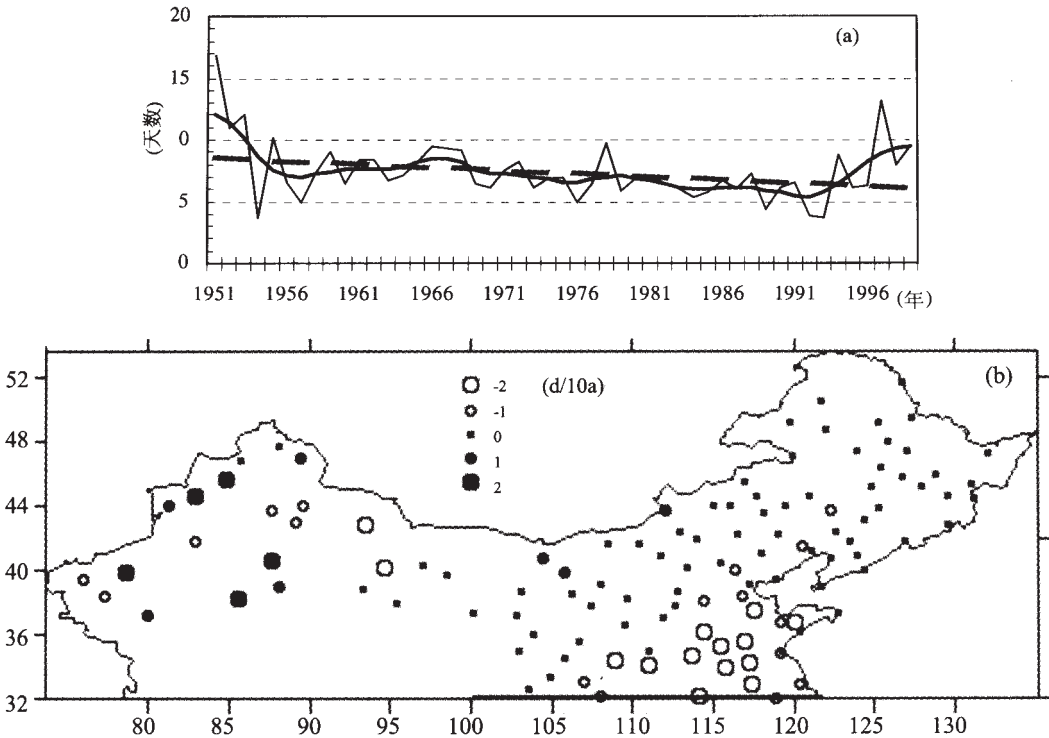


图 1 (a) 我国北方日最高温度大于 35 °C 日数的逐年变化 (细黑线为逐年日数; 粗实线为 11 点二项式滤波; 虚线为其线性拟合); (b) 我国北方不同测站的高温日数的线性变化趋势分布(日 /10 年)
Fig. 1 (a) Variation of the number of days with maximum temperatures above 35 °C in northern China (thin solid line for the number of days; thick line for the 11-point binomially filtered; dashed line for the linear trend) (b) Trends in the number of days with maximum temperatures above 35 °C over northern China (days/10a)

北部和东北大部变化趋势不明显。

3.2 白天温度极端偏高的日数

从北方总体平均来看 (图 2a), 白天温度极端偏高的日数以 0.8 天 /10 年的趋势在增加 (表 2)。在 20 世纪 50 年代初, 每年只有 10 天左右白天温度极端偏高; 但从 80 年代中期以后增加趋势异常明显, 以至于在 1998 年有 25 天出现了极端偏高的情况, 几乎是 50 年代初的 1.5 倍。

从空间分布上看 (图 2b), 在过去 50 年中白天温度极端偏高的日数在我国北方除华北南部地区以 2~4 天 /10 年的趋势减少以外, 大部分地区趋于增多, 西北一些地区达 4 天 /10 年。

3.3 低温日数

从我国北方平均来看, 最低温度不超过 0 °C 的日数以 2 天 /10 年的趋势显著减少 (表 2), 在 1950 年代中后期, 低温日数超过 160 天, 但在 20 世纪最暖的 1998 年, 低温日数不足 140 天 (图 3a)。

从空间分布看 (图 3b), 最低温度不超过 0 °C 的日数在我国北方普遍趋于减少, 在我国东部地区 and 新疆北部最为突出, 一些地区减少趋势达 8 天 /10 年, 也就是说, 在过去 50 年中, 我国北方, 尤其是东部地区霜冻季节最多缩短了 40 天左右, 这种气候变暖趋势的存在, 无疑对我国北方的农业和自然生态系统产生重要影响。

3.4 夜间温度极端偏低的日数

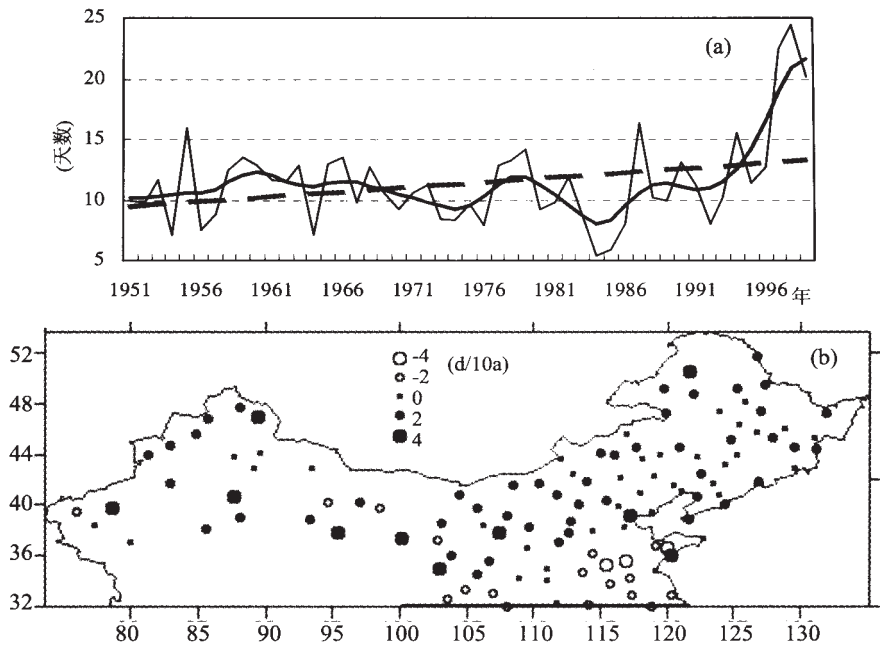


图 2 (a) 我国北方最高温度异常偏高日数的逐年变化 (细黑线为逐年日数; 粗实线为 11 点二项式滤波; 虚线为其线性拟合); (b) 我国北方不同测站最高温度异常偏高日数的线性变化趋势分布 (日 /10 年)
Fig. 2 (a) Variation of the number of days with daily maximum temperature above the 95th percentiles in northern China (thin solid line for the number of days; thick line for the 11-point binomially filtered; dashed line for the linear trend); (b) Trends in the number of days with daily maximum temperature above the 95th percentiles over northern China (days/10a)

从我国北方平均来看 (图 4a), 在最近五十年中夜间温度极端偏低的日数以 1.9 天 /10 年的速度显著减少 (表 2)。在 20 世纪 50 年代中后期和 60 年代后期, 我国北方夜间温度极端偏低的日数每年超过 15 天, 但在 80 年代以后不足 10 天, 到 90 代, 已经不足 5 天。从地区分布来看 (图 4b), 夜间温度极端偏低的日数在我国北方整体趋于减少, 其中在北方东部的华北和东北地区尤为明显, 以 8-12 天 /10 年的速度减少。

4 降水极端事件的变化

4.1 极端降水事件的频率

从本文的定义来看, 极端降水事件在正常情况下平均每年不足 4 天。从整个北方平均来看 (图 5a), 极端降水事件的发生表现出明显的年代际变化特点, 1960 年代中期以前以及 1980 年代中期以后极端降水事件偏多, 1960 年代中期到 1980 年代中期极端降水事件偏少。极端降水事件最多的年份分别为 1964 年和 1998 年, 最少的年份为 1965 年和 1997 年。

从地域分布来看 (图 5b), 我国西北部地区极端降水事件的出现呈现明显增多趋势, 趋势高达 1 天 /10 年, 这种变化趋势实际上使得近期比早期已经增加了近 1 倍; 同时东北西部也趋于增加, 趋势约为 0.5 天 /10 年; 但与此同时, 东北东部到华北大部极端降水事件发生的日数却明显趋于减少。

4.2 大雨和暴雨日数

日降水量大于 25mm 的降水日数在东北平原和华北大部大雨以上降水频率明显减少 (图 6)。因此, 整个北方平均来看, 日降水量大于 25 mm 以上的降水日数以 0.2 天 /10 年

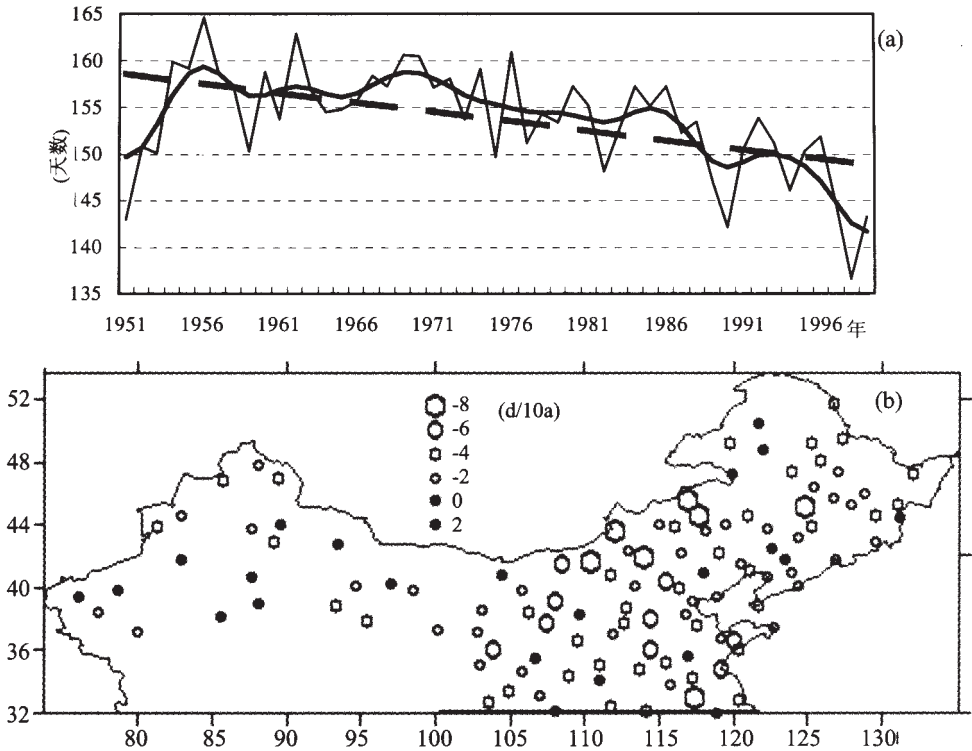


图 3 (a) 我国北方日最低温度小于 0℃ 日数的逐年变化 (细黑线为逐年日数; 粗实线为 11 点二项式滤波; 虚线为其线性拟合); (b) 我国北方不同测站的低温日数的线性变化趋势分布 (日 /10 年)
Fig. 3 (a) Variation of the number of days with maximum temperatures below 0℃ over northern China (thin solid line for the number of days; thick line for 11-point binomially filtered; dashed line for their linear trend); (b) Trends in the number of days with maximum temperatures below 0℃ over northern China (days/10a)

的趋势显著减少 (表 2)。

日降水大于 50 mm 以上 (暴雨) 的降水日数在东北一些地方趋于增多, 但在华北大部暴雨频率明显减少 (图略)。因此, 整个北方平均来看, 日降水量大于 50 mm 以上的降水日数以 0.05 天 /10 年的趋势减少 (表 2)。

5 总结与讨论

对中国北方近 50 年的极端温度和极端降水事件的变化规律研究得出以下主要结论:

(1) 在过去 50 年中我国北方日最高温度超过 35℃ 的高温日数略趋减少, 这种情况在华北平原以及河西走廊尤为明显, 西北东部、华北北部和东北大部变化趋势不很明显, 但在 1990 年代中期以后最高温度大于 35℃ 的高温日数显著增多。我国北方日最低温度低于 0℃ 的低温日数呈十分明显减少趋势, 这种情况在我国东部地区 and 新疆北部最为突出, 在过去 50 年中无霜期最多增加了 40 天, 这种气候变暖趋势的存在, 无疑对我国北方的农业和自然生态系统产生重要影响。

(2) 从北方总体平均来看, 白天温度极端偏高的日数明显趋于增多, 除华北南部地区趋于减少以外, 大部分地区趋于增多, 西北一些地区增加趋势最为明显。与此同时, 夜间温度极端偏低的日数也明显趋于减少, 这种减少的趋势几乎出现在我国北方的所有地区, 其中在华北和东北地区尤为明显。

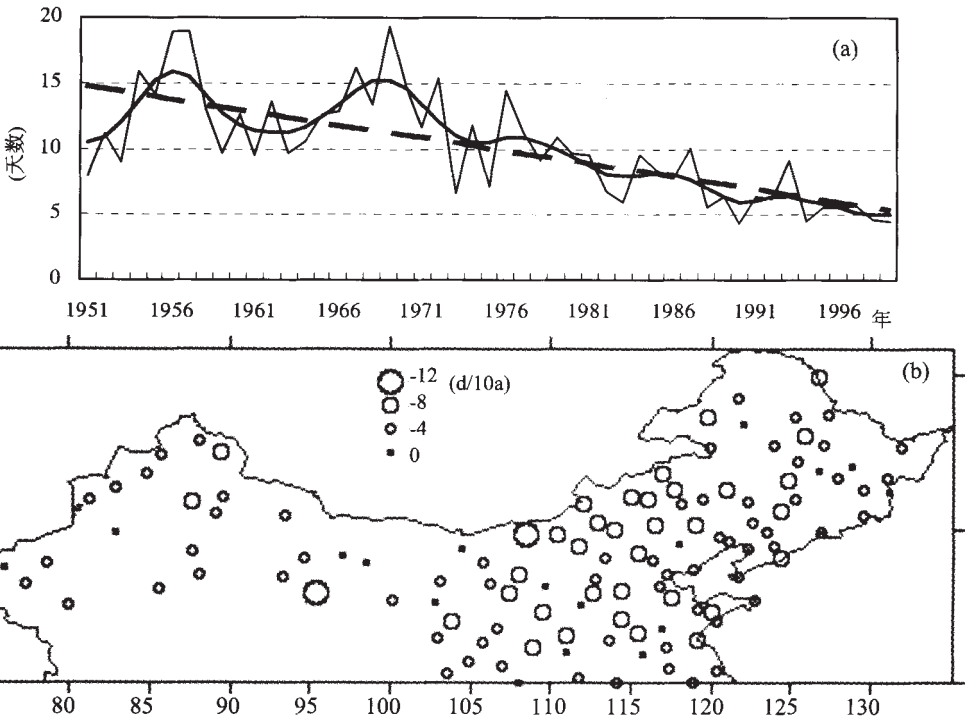


图 4 (a) 我国北方最低温度异常偏低日数的逐年变化 (细黑线为逐年日数; 粗实线为 11 点二项式滤波; 虚线为其线性拟合); (b) 我国北方不同测站最低温度异常偏低日数的线性变化趋势 (日 /10 年)

Fig. 4 (a) Variation of the number of days with daily minimum temperature below the 5th percentiles in northern China (thin solid line for the number of days; thick line for the 11-point binomially filtered; dashed line for their linear trend); (b) Trends in the number of days with daily minimum temperature below the 5th percentiles over northern China (days/10a)

(3) 我国西北部地区极端降水事件的出现呈明显的增长趋势，极端降水事件在近期比早期增加了近 1 倍；东北西部也趋于增加，但东北东部到华北大部极端降水事件发生的日数明显趋于减少。

(4) 日降水大于 25 mm 以上的大雨日数在内蒙古东部和东北东部的长白山脉一带趋于增多，但在东北平原和华北大部大雨以上降水频率明显减少。暴雨日数在东北一些地方趋于增多，但在华北大部暴雨频率明显减少。从整个北方平均来看，大雨和暴雨日数都趋于减少。

参考文献 (References)

[1] IPCC, 2001: Climate change 2001: the science of climate change. Houghton J T, Y Ding, D J Griggs et al. (eds.), Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 156-159.

[2] Qing Dahe. Evaluation of Environment Evolvment over the Western China: Assessment on Environment Evaluation over Western China. Beijing: Science Press, 2002. 2-10. [秦大河. 中国西部环境演变评估: 中国西部环境演变评估综合报告. 北京: 科学出版社, 2002. 2-10.]

[3] Easterling D R, Evana J L, Grosman P Ya et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2000, 81: 417-425.

[4] Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A et al. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada. J. Climate, 2001, 5(14): 1959-1976.

[5] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P M et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half

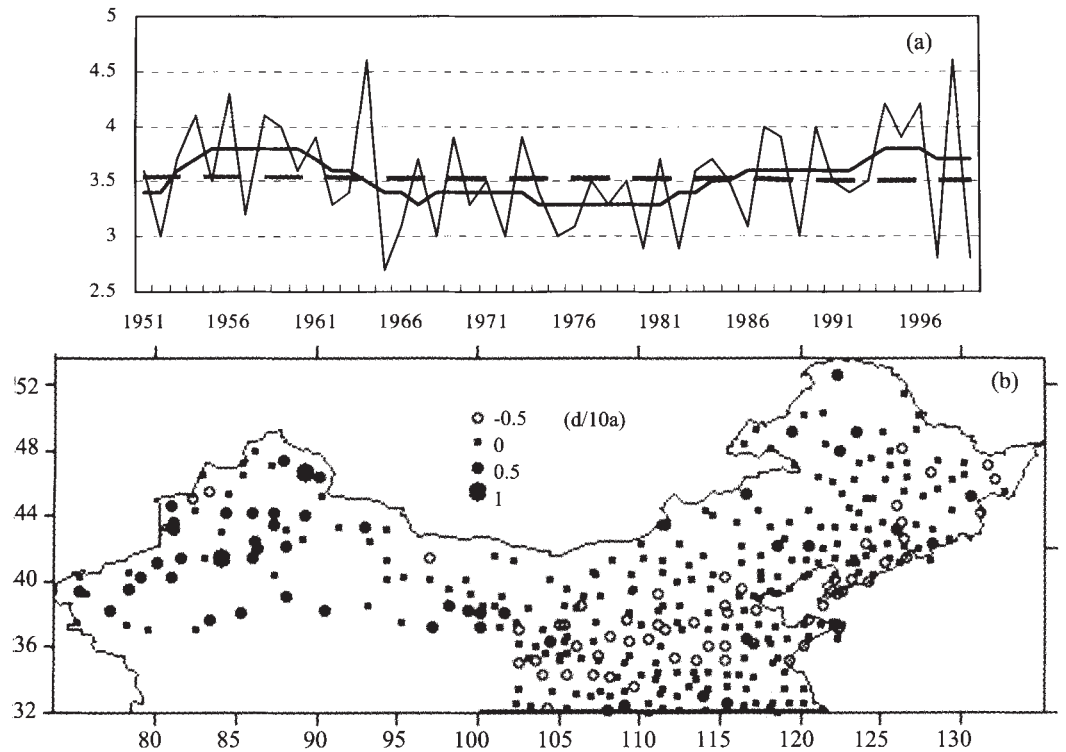


图 5 (a) 我国北方极端降水事件日数的逐年变化 (细实线为逐年日数; 粗实线为 11 点二项式滤波; 虚线为其线性拟合); (b) 我国北方不同测站极端降水事件日数的线性变化趋势 (日 /10 年)
Fig. 5 (a) Variation of the number of days with extreme precipitation in northern China (thin solid line for the number of days; thick line for the 11-point binomially filtered; dashed line for their linear trend); (b) Trends in the number of days with extreme precipitation over northern China (days/10a)

of the 20th century. *Clim. Res.*, 2002, 19: 193-212.

[6] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R et al. Trend in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *Int. J. Climatol.*, 2001, 21: 269-284.

[7] Zhai Panmao, Ren Fumin. Change in China's maximum and minimum temperatures in the past 40 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(4): 418-429. [翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化. *气象学报*, 1997, 55 (4): 418-492.]

[8] Zhai P M, A J Sun, F M Ren et al. Changes of climate extremes in China. *Climate Change*, 1999, 42(1): 203-218.

[9] Groisman P, Karl T, Easterling D et al. Changes in the probability of extreme precipitation: important indicators of climate change. *Climatic Change*, 1999, 42: 243-283.

[10] Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. Detection of trends in China's extreme precipitation. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(2): 208-216. [翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极端值变化趋势检测. *气象学报*, 1999, 57(2): 208-216.]

[11] Pan X H, Zhai P M. Analysis of surface air temperature extremum. *Meteorological Monthly*, The definition of climate extremes over China, Qixiang, 2002, 28(10): 28-31. [潘晓华, 翟盘茂. 我国极端气候极端事件的确定选取与分析. *气象*, 2002, 28(18): 28-31.]

[12] Zhang Yangcai, He Weixun et al. *Conspectus of Agricultural Meteorological Disaster*. Beijing: Meteorological Press, 1991. 149; 352. [张养才, 何维勋等. *中国农业气象灾害概论*. 北京: 气象出版社, 1991. 149; 352.]

[13] Folland C K, Miller C, Bader D et al. Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes, Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997, Breakout Group C: Temperature Indices for Climate Extremes. *Clim. Change*, 1999, 42: 31-41.

[14] Kendall M G, Gibbons J D. *Rank Correlation Methods*, 5th. London, UK: Edward Arnold, 1981. 320.

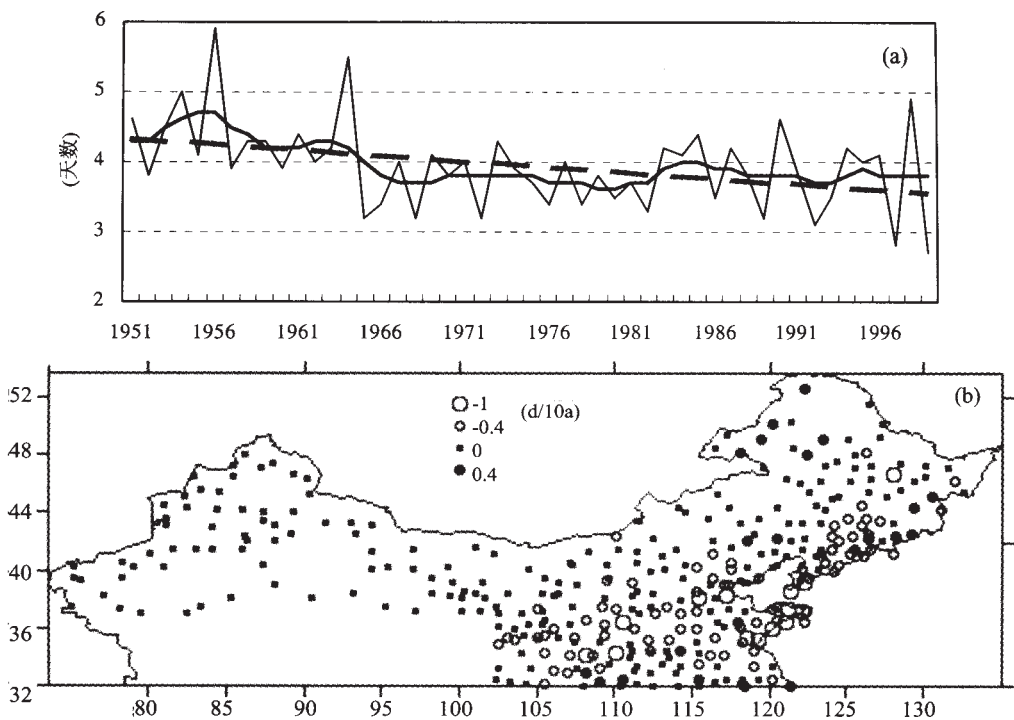


图 6 (a) 我国北方大雨日数的变化 (细黑线为逐年日数; 粗实线为 11 点二项式滤波; 虚线为其线性拟合); (b) 我国北方不同测站大雨日数的线性变化趋势分布 (日 /10 年)

Figure 6 (a) Variation of the number of heavy rain days in northern China (thin solid line for the number of days; thick line for the 11-point binomially filtered; dashed line for the linear trend); (b) Trends in the number of heavy rain days over northern China (days/10a)

Change in Extreme Temperature and Precipitation over Northern China During the Second Half of the 20th Century

ZHAI Panmao, PAN Xiaohua
(National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Study on change of weather and climate extremes has become an important aspect in modern climate change research. Based on the daily surface air temperature data from 200 stations and daily precipitation data from 739 stations during the second half of the 20th century, schemes for analyzing climate extremes were designed mainly according to percentiles of a non-parametric distribution and the gross errors in the daily data were removed based on a newly designed quality control procedure. The spatial and temporal characteristics of change of climate extremes over northern China were studied. The main conclusions are summarized as follows: 1) The number of days with maximum temperatures over 35°C decreased slightly. The decreasing trends are obvious in the North China Plain and the Hexi Corridor. However, since the 1990s, the extreme hot days increased greatly. Meanwhile, the frost days decreased significantly in northern China, especially in the eastern

part of northern China and Xinjiang Uygur Autonomous Region. Increase trends were found for the 95th percentiles of daily maximum temperatures except in the southern part of North China, while obvious decrease trends were found for the 5th percentiles of daily minimum temperatures. 2) The extreme intense precipitation events obviously increased in much of northwestern China but decreased in the eastern part of northeastern China and most parts of North China. The number of heavy rain days increased in eastern Inner Mongolia and eastern Northeast China, but obviously decreased in the Northeast China Plain and North China.

Key words: climate extremes, maximum and minimum temperatures; intense precipitation; northern China