# 温度破纪录事件预测理论研究

封国林<sup>1,2,3</sup> 杨 杰<sup>1,2</sup> 万仕全<sup>4</sup> 侯 威<sup>1,3</sup> 支 蓉<sup>1,2</sup> FENG Guolin<sup>1,2,3</sup> YANG Jie<sup>1,2</sup> WAN Shiquan<sup>4</sup> HOU Wei<sup>1,3</sup> ZHI Rong<sup>1,2</sup>

- 1. 扬州大学物理科学与技术学院,扬州,225002
- 2. 国家气候中心气候研究开放实验室,北京,100081
- 3. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室,北京,100029
- 4. 扬州市气象局,扬州,225009
- 1. College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China
- 2. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
- 3. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Yangzhou Meteorological Office, Yangzhou 225009, China 2008-07-31 收稿, 2008-10-08 改回.

# Feng Guolin, Yang Jie, Wan Shiquan, Hou Wei, Zhi Rong. 2009. On the prediction of record-breaking daily temperature events. Acta Meteorologica Sinica, 67(1):61-74

Abstract Using the daily high/low observational temperature data of 740 stations in China from 1960 to 2005, the statistical characteristics of record-breaking daily temperatures (RBDT) in the last 46 years are analyzed theoretically. Based on the Gaussian distribution of daily temperatures, and using the RBDT as initial conditions, the universal mean of the RBDT is obtained and compared with the result from the iterative Extreme Values Statistics (EVS), with the former being closer to the observational distribution. Then the future possible RBDT are predicted by the former method. In addition, the future distributions of theoretical maximum/minimum values of high/low RBDT are given as well. The results show that the amplitude of extreme temperatures variation change with geographic locations. The extreme high temperatures of Southwest China increase rapidly, and those of West China are lower than other regions of China. On the other hand, the extreme low temperatures decrease fast in the Northeast and Southeast China, while those of the Southwest China are relatively stable.

Key words Record-breaking events, Extreme events, Prediction

**摘 要** 分析中国 740 个常规观测站 1960—2005 年日最高、最低温度器测资料,揭示了 46 年来中国日最高、最低温度破纪录 事件的强度特征。利用历史观测资料验证了日温度极值服从高斯分布,并将历史资料中已知的高、低温破纪录事件作为初始 条件,经冗长的理论推导得到破纪录温度的期望值,与用纯极值理论进行迭代获得的结果相比,前者更符合观测事实,预测效 果更好。在此基础上对中国未来可能发生的高、低温破纪录事件进行了预测评估,给出了各地区高、低温破纪录事件强度理 论上所能达到的最大、最小值分布。结果表明中国各地区极端温度变化幅度差异明显,具有明显的区域特征,西南地区的极 端高温事件强度未来处于较大上升期,西部相对较小;而极端低温事件强度降幅最大的区域位于东北和西北部地区,华中及 西南地区处于相对平稳期。

关键词 破纪录事件,极端事件,预测

中图法分类号 P423

<sup>\*</sup> 资助课题:国家科技支撑计划(2007BAC29B01),国家重点发展基础研究项目(2006CB400503),国家自然科学基金项目(40875040),公 益性行业科研专项(GYHY200806005)。

作者简介:封国林,主要从事非线性气候动力学,极端气候事件、全球变化和气候复杂网络等方面的研究。E-mail: fenggl@cma.gov.cn

# 1 引 言

温度是气候变化研究中最为重要的指标之一, 温度变化对人类的生产生活以及自然环境都会产生 重大影响(Render, et al, 2006;秦大河, 2007)。近 百年来,全球气候正经历一次以变暖为主要特征的 显著变化,频繁发生的极端气候事件已影响到了全 球自然生态系统和人类社会经济生活,成为人类21 世纪可持续发展的严峻挑战之一,促使人们逐渐提 高了对极端温度研究的重视(刘吉峰等,2006;叶笃 正,2006)。但是由于资料和方法上的不足,研究极 端事件及其预测仍然是一个科学难题,相对于平均 气候变化而言,对极端气候变化规律的认识还相当 不够,例如气候变化如何影响极端温度事件的发生 发展规律,极端温度如何响应区域气候变化等(丁一 汇,2006)。全球增暖带来的区域极端事件复杂化问 题越来越严重,其频次、振幅,较之平均气候变率更 为复杂(封国林等,2006;侯威,2006)。因此,研究温 度破纪录事件发生强度和频次的变化规律无疑具有 很重要的实用价值和科学意义。目前,GCM 模拟 只能预测大尺度区域平均气候变化,而对中小尺度 区域气候变量的变化尤其是极端气候变化几乎没有 模拟能力。因此通过研究极端气候事件的概率统计 特征,间接预测评估区域极端气候事件未来变化规 律具有重要的现实意义,譬如极端温度的变化幅度 大小可借助它们的概率分布模式来加以描述(丁裕 国等,2004;邓自旺等,2000)等。

温度破纪录事件被定义为温度分布中的一些特定的极值过程,如果统计对象是极值温度(刘式达等,2000;符淙斌等,1995;杨培才等,2005; Sugihara, et al, 1990),定义的破纪录事件就是极端事件 之一,但在很多情况下,破纪录事件和极端事件并不 等价。温度破纪录事件具有重要的研究价值,它可 以揭示极端温度的某些规律,尤其在全球变暖的背 景下,极端高温破纪录事件可能会导致更加严重的 气象灾害,如高温热浪等(Kiktev,2003; Beniston, 2007; 万仕全,2005);同时,温度破纪录事件的研究 还可以从一个全新的角度揭示全球变暖的演化规 律,预警可能达到的高(低)温极限值。

# 2 资料介绍

资料来源为中国气象局公布的中国 740 个常规 观测站气候资料数据集,选择满足 1960—2005 年连 续观测的站点,经检验有 583 个站点符合要求,个别 缺测用插值方法补齐。将符合要求的中国 583 个观 测站点 1960—2005 年日最高、最低温度观测资料  $x_{\rm Hi}(j), x_{\rm Li}(j), (i = 1960, 1961 \cdots 2005, j = 1, 2 \cdots$ 365)分别按日期 j 重新排列为新的序列形式: $x'_{\rm Hi}$  $(j), x'_{\rm Li}(j), (i = 1960, 1961 \cdots 2005, j = 1, 2 \cdots$ 365)分别按日期 j 重新排列为新的序列形式: $x'_{\rm Hi}$  $(j), x'_{\rm Li}(j), (i = 1960, 1961 \cdots 2005, j = 1, 2 \cdots$ 365), 即分别将对应同一日期的 46 个日最高、最低温度值 按年份排列,得到的新序列共有 365×2=730 条,新 序列长度均为 46(其中闰年未处理)。

将新序列 x'<sub>Hi</sub>(j)、x'<sub>Li</sub>(j)进行距平处理,以 x'<sub>Hi</sub>(j)为例

$$\begin{cases} \overline{x'}_{\text{H}i} = \frac{\sum_{j=1960}^{2005} x'_{\text{H}i}(j)}{46} \\ X_{\text{H}i}(j) = x_{\text{H}i}(j) - \overline{x'}_{\text{H}i} \end{cases}$$
(1)

式中  $i=1,2\cdots 365; j=1960,1961\cdots 2005$ 。 $x'_{Li}(j)$ 的 处理方法相同。关于破纪录事件的一系列研究均基 于距平序列  $x_{Hi}(j), x_{Li}(j)$ ,为表述简便记为  $x_{H}, x_{Lo}$ 。

# 3 破纪录事件概率理论

#### 3.1 破纪录事件

图1给出了高温破纪录事件的示意图,图中虚 线所经过的点即代表高温破纪录事件。下面以高温 破纪录事件为例介绍破纪录事件的相关概率理论 (Render, et al, 2006)。

若序列  $X_{\rm H}$  在某年发生第 i 次高温破纪录事件, 则定义该年为  $t_i$ 年,事件强度为  $T_i$ 。假定序列  $X_{\rm H}$  的 概率密度函数为 p(T),序列  $X_{\rm H}$  变量范围是( $-\infty$ ,  $+\infty$ ),定义序列均值  $T_0 \equiv \int_{-\infty}^{\infty} Tp(T) dT$  为初始破纪 录高温事件。在  $T_0$  值的基础上求第 1 次破纪录事件 期望值  $T_1(>T_0)$ ,由于此时变量的范围变成了( $T_0$ ,  $+\infty$ ),其概率密度函数也相应发生改变,不再是 p(T)而是  $p_1(T)$ ,又因概率密度函数须满足归一化条



因此,定义第1次破纪录高温事件的期望值为

$$T_{1} = \int_{T_{0}}^{\infty} Tp_{1}(T) dT \equiv \frac{\int_{T_{0}}^{\infty} Tp(T) dT}{\int_{T_{0}}^{\infty} p(T) dT} \qquad (3)$$

式(3)的物理含义表示所有最高气温大于  $T_0$  的气 温平均值,即最高气温大于  $T_0$  的数学期望值。我 们定义最高气温大于  $T_0$  的期望值  $T_1$  作为第 1 次 破纪录高温事件的强度,而第 2 次破纪录高温事件 的期望值  $T_2$  就是所有大于  $T_1$  的温度值取平均后 得到的结果。类似地,可以通过递归关系式定义第 k+1 次破纪录高温事件的期望值, $T_{k+1}$ 定义为

$$T_{k+1} \equiv \frac{\int_{T_k}^{\infty} Tp(T) \,\mathrm{d}T}{\int_{T_k}^{\infty} p(T) \,\mathrm{d}T}$$
(4)

其中,p(T)是利用日温度资料拟合得到的概率密度 函数,而不是具体高温破纪录事件的概率密度函数。 因为我们所定义的破纪录事件是日温度概率分布的 数学期望值,是统计意义上的平均值,并不是某一个 具体的破纪录事件值。例如,要求第 k 次破纪录事 件的期望值,那么就把序列的概率密度函数中所有 大于 T<sub>k-1</sub>的温度值取平均的结果作为 T<sub>k</sub>。因此,如 果日温度序列资料的观测长度确定了,通过拟合,式 (3)和(4)中的概率密度函数 *p*(*T*)也就相应固定 了。通过式(3)和(4)可以定义 *T*<sup>k</sup> 的理论值。事实 上,式(4)对任意概率密度分布形式都适用,由此可 以构建高温破纪录事件强度期望值序列,从而从另 一个角度了解温度变化的趋势。

将温度超过 T 的概率  $p_>(T)$  以及温度小于 T 的概率  $p_<(T)$ 分别定义为:

 $p_{<}(T) \equiv \int_{0}^{T} p(T') dT, p_{>}(T) \equiv \int_{T}^{\infty} p(T') dT \qquad (5)$ 假设第 k 次破纪录高温值为  $T_{k}$ ,定义之后的第 n 年 发生第 k+1 次破纪录事件的概率为  $q_{n}(T_{k})$ ,由于 第 k 次破纪录高温事件之后第 1~(n-1)年的高温 纪录值都小于  $T_{k}$  且第 n 年的高温纪录值大于  $T_{k}$ , 因此

$$q_n(T_k) = p_{<}(T_k)^{n-1} p_{>}(T_k)$$
(6)

在实证研究破纪录事件的过程中是针对每年的同一 日期进行统计的,因此每个序列中的温度值都是日 期相同但年份不同,即  $T_k$  与  $T_{k+1}$ 的时间间隔只能 是 1,2,3… $T_k$  与  $T_{k+1}$ 相隔 1 a 的概率为  $p_>$ ,相隔 2 a 的概率为  $p_< p_>$ ,相隔 3 a 的概率为  $p_<^2 p_>$ ,相隔 *n* 年的概率为  $p_<^{n-1} p_>$ ,所以,第 k 与 k+1 次破纪录高 温事件之间的时间间隔的期望值为

$$t_{k+1} - t_k = p_{>} + 2p_{<} p_{>} + 3p_{<}^2 p_{>} + \cdots$$
$$+ np_{<}^{n-1} p_{>} = \sum_{n=1}^{\infty} np_{<}^{n-1} p_{>}$$
(7)

很显然利用公式

$$\sum_{n=1}^{\infty} np^{n-1} dp = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{0}^{p} np^{n-1} dp$$
$$= \sum_{n=1}^{\infty} p^{n} = \frac{p}{1-p} \quad |p| < 1 \quad (8)$$

得

$$\sum_{n=1}^{\infty} np^{n-1} = \left(\frac{p}{1-p}\right)' = \frac{1}{(1-p)^2}, (-1$$

因此,第 k 与 k +1 次破纪录高温事件之间的时间间 隔的期望值为

$$t_{k+1} - t_k = \sum_{n=1}^{\infty} n p_{<}^{n-1} p_{>} = \frac{1}{(1 - p_{<})^2} p_{>} = \frac{1}{p_{>}^2} p_{>} = \frac{1}{p_{>}(T_k)}$$
(10)

# 3.2 序列 X<sub>H</sub>/X<sub>L</sub> 概率分布模型

众多研究表明,类似本文所研究的概率分布模型 *p*(*T*)一般服从单峰铃型分布,如正态分布、对数

正态分布、 $\Gamma$ 分布、 $\beta$ 分布、Weibull 分布、Gumbel 分 布等,基本上能够拟合各种无偏或有偏的分布。其 中尤以 $\Gamma$ 分布拟合正偏分布及 $\beta$ 分布拟合负偏分布 时的参数估计较为复杂,而正态分布是用来拟合偏 度为0或很接近0的分布,其参数估计较为容易(丁 裕国等,2004;龚志强等,2006a)。以南京站点为例 研究序列 $X_{\rm H}$ 概率密度分布类型,由于序列 $X_{\rm H}$ 长 度为46,样本量较少造成拟合分布曲线涨落较大。 为此,做如下处理:统计每年1月15日的最高温度 作为一个日温度序列,数据的年份是1960—2005 年,即序列的样本量为46,但仅有46个样本量还不 足以准确的拟合其概率密度分布函数,因此,为了克 服样本量不足这一困难,保证其拟合分布函数的精 度,基于温度序列具有很好的持续性和连续性,假设 每年1月15日的前15天和后15天的温度数据都 看作是1月15日这一天的温度,作一个简单的平 滑,尽管处理方法比较粗糙,也不失一般的合理性, 扩充以后1月15日的最高温度序列的样本量为46 ×31=1426,同样地,对其他日期的温度序列也进行 类似的处理。

图 2 为南京站点 1 月 15 日、4 月 15 日、6 月 15 日、10 月 15 日的温度概率密度分布(点),虚线为高 斯拟合。由图 2 可以看出 1 月 15 日和 4 月 15 日的 温度分布范围较大,10 月 15 日次之,6 月 15 日最 小;这 4 个日期的日最高温度概率密度分布均很好 地满足高斯分布,概率分布最大值都在 0.1 左右。 同样地,对其它日期以及站点的日最高、最低温度分 布进行统计,结果显示序列  $X_{\rm H}$ 、 $X_{\rm L}$  均较好地符合 高斯分布。文中所有温度破纪录事件的理论分析都 是基于序列  $X_{\rm H}$ 、 $X_{\rm L}$  符合高斯分布这个前提。



图 2 南京站点 1 月 15 日(a)、4 月 15 日(b)、6 月 15 日(c)和 10 月 15 日(d)最高温度概率密度分布 Fig. 2 The probability density distributions highest temperature of Nanjing on (a) 15 January, (b) 15 April, (c) 15 June, and (d) 15 October

## 3.3 破纪录事件概率分布

我们仍然以序列 $X_{\rm H}$ 为例进行说明。符合高斯 分布的序列 $X_{\rm H}$ ,其概率密度函数为(Render, et al, 2006)

$$P(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-T^2/2\sigma^2}$$
(11)

其中,T为日最高温距平,σ为序列 X<sub>H</sub> 的标准偏差。

由于序列  $X_{\rm H}$  均为距平值序列,因此  $T_0 = 0$ ;将 式(11)及  $T_0 = 0$  代入式(3),利用换元积分法,令 u $= T^2/2\sigma^2$ ,将式(3)中的 dT 换成 du,则 du =  $\frac{T}{\sigma^2}$ dT, 高温破纪录事件强度期望值为

$$T_1 = \frac{\int_0^\infty \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-u} du}{\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(0)} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \qquad (12)$$

$$T_{2} = \frac{\int_{T_{1}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} T e^{-T^{2}/2\sigma^{2}} dT}{\int_{T_{1}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} e^{-T^{2}/2\sigma^{2}} dT} = \frac{T_{1} e^{-T_{1}^{2}/2\sigma^{2}}}{\operatorname{erfc}(T_{1}/\sqrt{2\sigma^{2}})}$$
$$T_{k} = \frac{\int_{T_{k-1}}^{\infty} T \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} e^{-T^{2}/2\sigma^{2}} dT}{\int_{T_{k-1}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} e^{-T^{2}/2\sigma^{2}} dT} = \frac{\int_{T_{k-1}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} e^{-T^{2}/2\sigma^{2}} dT}{\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(T_{k-1}/\sqrt{2\sigma^{2}})} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}\sigma} e^{-T_{k-1}^{2}/2\sigma^{2}}}{\operatorname{erfc}(T_{k-1}/\sqrt{2\sigma^{2}})}$$

进一步, 
$$T_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma$$
, 则  $T_k$  可简写为
$$T_k = \frac{T_1 e^{-T_{k-1}^2/2\sigma^2}}{\operatorname{erfc}(T_{k-1}/\sqrt{2\sigma^2})}$$
(13)

其中,式(13)分母经过约分并为了下文进一步的推导,分母可以简写为 erfc(z)的形式,erfc(z)是误差 互补函数,其值的大小只与参数 z 有关。如果所研 究的序列的高斯分布标准偏差确定了,那么根据式 (12)推导出的  $T_1$ ,利用式(13)递推关系得到高温破 纪录事件的系列理论值  $T_2$ , $T_3$ … $T_k$ 。因此,由式 (13)知, $T_k$ 的理论值大小只和高斯分布的标准偏差 有关。如果知道某日期所对应序列  $X_{\rm H}$ 的标准偏差 就可计算出该日期破纪录事件  $T_k$ 的理论值。

通过式(12)计算出  $T_1$ ,将  $T_1$ 代入式(13)中进 行计算可得到  $T_2$ , $T_3$ … $T_k$ 高温破纪录事件序列

$$T_{2} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma e^{-(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma)^{2}/2\sigma^{2}}}{\operatorname{erfc}\left(\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma\right)^{2}/2\sigma^{2}\right)} = \frac{e^{-1/\pi}}{\operatorname{erfc}(1/\pi)}T_{1} \approx 1.712T_{1}$$
(14)

$$T_3 = \frac{T_1 \mathrm{e}^{-T_2^2/2\sigma^2}}{\mathrm{erfc}(T_2^2/2\sigma^2)} \approx 2.188 T_1$$

世代( $T_2/2\sigma$ ) 类似的,如此循环代入计算可得  $T_4 \approx 2.782T_1, \dots,$ 由于  $T_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma$ ,式(13)中分母  $\operatorname{erfc}(z)$ 的参数可写为  $T_k/\sqrt{2\sigma^2} = \frac{(T_k/T_1)}{\sqrt{\pi}}, -$ 般地,当  $k \ge 3$  时,参数  $\frac{(T_k/T_1)}{\sqrt{\pi}}$ 將大于 1,这时误差互补函数可写为渐近式  $\operatorname{erfc}(z) \sim \frac{\mathrm{e}^{-z^2}}{z\sqrt{\pi}}(1 - \frac{1}{2z^2} + \dots)$  (15) 将式(15)代人式(13)中可得  $T_{k+1} = \frac{T_1 \mathrm{e}^{-T_k^2/2\sigma^2}}{\mathrm{erfc}(T_k/2\sigma^2)} \sim \frac{T_1 \mathrm{e}^{-T_k^2/2\sigma^2}}{\sqrt{\frac{2\sigma^2}{\pi}T_k^2}} \mathrm{e}^{-T_k^2/2\sigma^2} \left(1 - \frac{1}{2(T_k/2\sigma^2)} + \dots\right)$  $T_k \left(1 + \frac{\sigma^2}{T_k^2}\right)$  (16)

式(16)的近似形式可写为

$$T_{k+1} - T_k = \sigma^2 / T_k \tag{17}$$

由式(17)可知,随着 k 的增大,高温破纪录事件强度 的落差会越来越小。最后通过求导、积分和近似差 分冗繁计算,得到第 k 次高温破纪录强度的近似简 单形式:

$$T_k \sim \sqrt{2k\sigma^2}$$
 (18)

显然,式(18)的结论是基于日温度分布能用高斯分 布近似来描述,经过冗繁推导和简化得到统计意义 下的结果,即平均状态下的极值,并不特指某一具体 的破纪录事件的强度变化。结果显示,随着 k 值的 增大,破纪录事件的强度大小与 $\sqrt{2k\sigma^2}$ 成正比关系。

基于南京站点的序列  $X_{\rm H}$ ,图 3 给出了实际高 温破纪录事件与由式(18)得到的理论结果的对比, 验证了式(18)的合理性。其他站点情况类似(图 略)。根据式(18),第 k 次高温破纪录事件强度  $T_k$ 与 $\sqrt{2k\sigma^2}$ 成正比。为得到有统计意义的物理量,先 计算每个日期的  $T_k/\sigma$ 值,然后对其求平均,得到  $T_k$ 随的 $\sqrt{k}$  变化情况。如图 3 中所示,南京市的高温破 纪录事件  $T_k/\sigma$  值随 $\sqrt{k}$  呈线性变化,虽然实际发生 的破纪录事件值与理论值有一定的差异,但实际值 总是在理论值上下波动,偏差不大,从而验证了理论 工作的正确性,同时说明了气象要素极端事件具有 一定规律性,为极端事件的预测奠定了良好的数理 基础。因此,基于式(13)、(18)可对未来即将发生的 破纪录事件强度大小进行预测。



# 图 3 南京年均破纪录高温强度和标准偏差

比值与理论曲线  $T_k/\sigma \sim 1.34/k$ 的对比

Fig. 3 Average kth record-breaking high temperature for every day, divided by the daily temperature dispersion versus  $\sqrt{k}$ , the theoretic curve (dashed line with dots) is  $T_k/\sigma \sim 1.34\sqrt{k}$ 

## 4 结果与分析

# 4.1 序列 X<sub>H</sub>、X<sub>L</sub> 分布的标准偏差

由于理论 T<sub>k</sub> 值大小只与序列 X<sub>H</sub>、X<sub>L</sub> 的标准 差有关,因此研究其随日期的变化情况以及各站点 标准差的分布情况是非常有意义的。

标准偏差是统计上用于衡量一组数值中某一数 值与均值差异程度的指标,用来评估数值的变化或 波动程度。温度序列的标准差越大,说明温度变化 的涨落越大,波动性越强。图 4a、4b 分别给出了南 京站点序列 X<sub>H</sub>、X<sub>L</sub> 的标准差年变化情况。从图中 可以看出序列 X<sub>H</sub>、X<sub>L</sub> 的标准差均呈现出夏季较小 而冬季较大的特征,说明冬季时的日温度相较夏季 而言变化幅度更大。

由于区域的极端高温事件几乎都是出现在夏季 而极端低温事件则往往出现在冬季,所以夏季的高 温破纪录事件和冬季的低温破纪录事件相比较其他 季节更值得关注。我们计算了中国 583 个站点夏季 每日的日最高温度标准偏差,然后取平均得到各站 点夏季日最高温度标准差的均值,冬季的日最低温 度作类似处理。



图 4 南京站点温度序列标准偏差年变化 (a. 序列 X<sub>H</sub>, b. 序列 X<sub>L</sub>) Fig. 4 Anual evolution of the standard deviation of the daily temperature of Nanjing (a. X<sub>H</sub>, b. X<sub>L</sub>)

图 5 分别给出了夏季日最高温度平均标准差和 冬季日最低温度平均标准差的分布,图 5a 中夏季日 最高温度的平均标准差呈现较好的纬向分布特征, 总体上自北向南呈逐渐减小,内蒙古东部、黑龙江北 部以及新疆北部地区夏季日最高温度平均标准差最 大,此外重庆、陕西、宁夏、山西、河南一带也是一个 大值区域;而南方大部以及西藏南部则是最小值区 域。与图 5a 不同,图 5b 中冬季日最低温度平均标 准差没有明显的纬向分布特征,东北及西北北部地 区仍是大值区域;但西南、华中等夏季日最高温度平 均标准差的大值区域,即夏季日最高温度涨落较大 的区域其冬季日最低温度涨落却较小;此外新疆西 南部地区的日最低温度涨落也较小,东南沿海及广 东、广西的冬季日最低温度涨落则较大。





#### 4.2 破纪录温度的发生强度及时间

图 6 是根据中国 583 个站点 1960—2005 年日 最高、最低温度观测资料得到的历史最高、最低温度 分布图。

从图 6a 中可以看出中国各地区历史最高温度 相差较大,主要有 3 个高温带,第一个高温带是新疆 大部及内蒙古西部地区,图中的极大值点也出现在 这个区域,最高温度达到了 47.7 ℃;第 2 个高温带 范围较大,从重庆地区向东北方向延伸,直到黑龙江 西部地区,包括了内蒙古、北京、河北、山西、山东、陕 西、湖北、安徽、重庆等地,该区域的最高温度都超过 了40 ℃;第 3 个高温带位于浙江南部、福建、江西、 湖南以及广西的部分地区,该高温带的最高温度也 都超过了 40 ℃。最高温度值较小的区域位于青海 南部、西藏大部,其中最小值出现在西藏的帕里,历 史最高温度仅为 19.3 ℃。图 6b 中历史最低温度的 分布具有较明显的纬向性;华南地区的历史最低温 度值在中国范围内最高;除青藏高原以外,其他区域 的历史最低温度值大体自南向北不断减小,其中最 小值区域是东北北部地区。

对于某一站点的某个日期,预测其未来破纪录 高、低温强度,首先统计其在 1960—2005 年实际发 生的高、低温破纪录事件次数 k,未来(2005 年之后) 第一次发生的高、低温破纪录事件就应当是第 k+1次高、低温破纪录事件。利用式(13)及  $T_0=0$  迭代 计算得到一系列理论的破纪录事件期望值  $T_1, T_2 \cdots$  $T_{k+1}$ ,由于  $T_{k+1}$ 值实际上是距平值,所以预测的第 k+1 次高、低温破纪录事件强度值应该在距平值的 基础上加上该站点该日期的平均温度  $\overline{X'}_{H}, \overline{X'}_{L}$ 。分 别计算出该站点 365 日的未来第一次破纪录高、低 温强度值,并选择其中的最大、最小值作为该站点未 来第一次破纪录高、低温的预测值。



Fig. 6 Distributions of (a) the highest and (b) the lowest temperature in record

图 7a、7b 为利用式(13)及  $T_0 = 0$  迭代计算得 到的未来第一次破纪录高、低温预测值分布,可以看 出理论值与历史记录(图 6)总体上分布较为一致, 但仍然存在一些问题:例如某些站点计算出的未来 第一次破纪录高温预测值比该站点历史资料中的温 度最大值要小,这是不合理的;低温破纪录事件也有 类似的不合理情况出现。出现这种情况的原因可能 在于利用式(13)及  $T_0 = 0$  迭代计算的过程中没有 把实际已经发生的破纪录事件考虑进去,只考虑了 各站点序列 X<sub>H</sub>、X<sub>L</sub> 的标准偏差和平均值,式(13) 中作为初始条件的积分下限是用公式迭代计算得到 的理论值,多步迭代过程中也没有任何实际破纪录 值的介入,理论值与实际值本来就存在或大或小的 偏差,在多步迭代的情况下这种偏差得不到有效修 正最终导致了图 7 中的不合理结果。

考虑到这一点,将实际发生的第k次破纪录事





件强度值 T<sub>k</sub>代替理论值 T<sub>k</sub>作为初始条件积分计 算第 k+1 次破纪录事件的期望值,将式(13)修改为

$$T_{k+1} = \frac{\sqrt{2/\pi}\sigma e^{T_{kr}^2/2\sigma^2}}{\operatorname{erfc}(T_{kr}/\sqrt{2\sigma^2})}$$
(19)

首先对各站点的历史最高温度做回报来检测式 (13)与(19)的准确性,图 8a、8b 分别为采用式(19) 和(13)计算得到的历史最高温度分布。

对比图 8 与图 6a 可以看出,利用式(19)计算得 到的历史最高温度分布同样出现 3 个高温带,与实际情况更为一致,稍有不同的是图 8a 中的第 2 个高 温带并没有像实际情况那样一直延伸到东北地区而 是只延伸到了北京一带;其他两个高温带符合得很



图 8 中国历史最高温度分布回报对比(a. 利用 *T<sub>kr</sub>*值计算,b. 利用 *T<sub>k</sub>*值计算) Fig. 8 Contrast of the distributions of the highest temperature calculated by (a) using actual value *T<sub>kr</sub>* and (b) using theoretical value *T<sub>k</sub>* 

好。图 8b 则与图 6a 相差较大。因此,将实际值作 为初始条件迭代得到的预测值更加接近真实值,由 此计算出的破纪录温度预测值更加合理,从另一个 角度也说明了极端事件的研究和预测的困难性。

图 9 是利用式(19)计算出的修正后的未来第一 次高(低)温破纪录事件预测值分布。从图 9a 中可 以看出,中国未来极端高温达到 40 ℃以上的区域将 会进一步的扩大,原先东部的两个高温带将会合并 为一个大高温带,成为中国最主要的增温地区;破纪 录高温的大值中心仍在新疆地区,将达到 50 ℃以 上;而青藏高原地区作为一个冷源,即使未来发生高 温破纪录事件,其可能的强度值相对于其他区域仍 旧非常小,只有 25 ℃左右;但从图 9b 可以看出,青 藏高原地区未来的破纪录低温可能会达到-55 ℃ 以下;图 9b 中未来第一次破纪录低温的空间分布与 历史最低温度分布(图 6b)较为一致,只是值有所减 小,未来低温破纪录事件最小值中心仍在东北北部 和青藏高原地区。





为了对未来高、低温破纪录事件强度的变化幅 度有一个直观了解,我们给出未来第一次破纪录高、 低温预测值在历史最高、最低温基础上的增幅、降幅 分布(图 10)。从图 10a 中可以看出中国大部分地 区未来第一次破纪录高温增幅都超过了1℃,主要 有 3 个大增幅区域:首先是云南北部、四川南部以及 贵州部分地区,该区域增温最明显,最高可达2.5 ℃ 左右;其次是以陕西、河南及山西一带为中心的区 域,该区域的增幅也达到2℃左右;第3个区域是内 蒙古西部、黑龙江东部以及吉林的部分地区,该区域 相较前两个区域增幅稍小,为1.5 ℃左 右。增幅最小的区域位于东南沿海地区,只有





0.5℃左右。对于破纪录低温(图 10b),降幅最大的区域在西藏南部,可达4℃;东南沿海一带以及 40°N以北的高纬度地区也是降幅较大的区域,约为 2.5℃左右;而降幅程度较小的区域主要有两个:一 是重庆、四川大部、云南西部以及湖南、湖北、陕西、 甘肃的部分地区,二是新疆的西南部地区,这两个区 域的降幅最大只有 0.5℃左右;其余大部分区域降 幅较小且分布比较均匀,主要集中在 1—2℃。

前面给出了中国各地区未来第一次发生高、低



温破纪录事件的强度预测值分布,可以从空间角度 反映各地区未来高、低温破纪录事件强度值的变化 情况。另一方面,未来破纪录高、低温事件的发生时 间上存在什么特征也是人们密切关注的。图 11 给 出了 1960—2005 年南京站点不同日期(1,2,…, 365)高、低温破纪录事件的发生频次,其它站点结果 类似(图略)。从图中可以看出,46 a 中破纪录事件 发生频次较多的日期最多可发生 8 次高温破纪录事 件或7次低温破纪录事件,而发生频次较少的日期



图 11 南京站点高温(a)和低温(b)破纪录事件发生频次 Fig. 11 Numbers of the record-breaking events for (a) daily high temperature and (b) daily low temperature of Nanjing

仅有1次高、低温破纪录事件,差异较大。

3.1节中的式(10)给出了两次连续破纪录事件  $T_k = T_{k+1}$ 之间时间间隔的计算方法。对于某一站 点的某一日期,要预测未来发生破纪录事件的时间, 可以利用式(10)计算出已发生的最后一次(第k次) 破纪录事件和未来即将发生的破纪录事件(第k+1次)之间的时间间隔,在此基础上加上第k次破纪录 事件的实际发生时间 $t_k$ 即可。根据式(10)可以得 到计算未来第一次破纪录事件发生时间的理论式 为:

$$t_{k+1} = \frac{2}{\operatorname{erfc}(T_{kr} / \sqrt{2\sigma^2})} + t_{kr}$$
(20)

其中 T<sub>kr</sub>与 t<sub>kr</sub>分别为已发生的最后一次(第 k 次)破纪录事件强度与实际发生时间。

对于所有站点的每一个日期都可利用式(20)计 算未来破纪录事件的发生时间,由于破纪录事件的发 生频次随站点和日期不同有很大差异,因此利用式 (20)计算得到某一站点各日期未来(2005年之后)第 一次发生高、低温破纪录事件的预测时间,对其求平 均得到该站点未来第一次高、低温破纪录事件的平均 发生时间(年份)。空间分布如图 12a、12b 所示。

从图 12a 中可看出,未来第一次破纪录高温事 件平均发生时间最短的地区将出现在南方,其中以 云南东部以及广东、广西的部分地区最为明显;此 外,湖北、陕西以及新疆的部分地区未来第一次破纪 录高温事件平均发生时间也较短;说明这些地区将 是未来破纪录高温事件发生较为频繁的地区。而在 江浙一带、内蒙古、黑龙江以及青藏高原的大部分地 区,未来第一次高温破纪录事件的平均发生时间都 在百年以上(2100年左右),说明这些区域的极端高 温在其区域气候条件下已达到了较高水平,要打破 现有的高温纪录较为困难。其余大部分地区未来第 一次破纪录高温事件的平均发生时间都在 50-75 a 左右。图 12b 中的各地区未来第一次破纪录低温事 件的平均发生时间在空间分布特征上恰好与破纪录 高温相反,破纪录高温事件发生较频繁的西南地区 及广东地区,其未来第一次破纪录低温事件平均发 生时间较长;而破纪录高温事件平均发生时间较长 的东北地区,其破纪录低温时间的平均发生时间却 较短;整体而言,相较于未来破纪录高温事件的平均 发生时间,破纪录低温事件的平均发生时间明显偏 大,大部分地区都在百年左右,最短的也要50 a左 右。从未来第一次高、低温破纪录事件的平均发生 时间上来看,未来一百年内极端温度事件还将以极 端高温事件为主,这一结论也符合全球变暖、平均温 度升高的事实(王绍武等,1998;龚志强等,2006a)。





## 4.3 破纪录温度的饱和值

4.2节中我们给出了未来第一次高、低温破纪录事件强度的预测值,结果显示未来的极端温度强度与范围会进一步增大,但在现实情况下,一个地区的高、低温纪录不可能不断的被打破,即温度变化有其高温上限和低温下限。在3.3节中也讨论过,随着破纪录事件次数的增多其强度的增幅、降幅在逐渐减小,最终会趋于饱和。考虑到这一点,我们认为

$$\left|\frac{(T_{k+1} - T_k)}{T_k}\right| \leqslant 0.01 \tag{21}$$

 $T_{k+1}$ 相对  $T_k$  的增幅、降幅可以忽略不计,此时的破纪录强度基本达到极限, $(T_{k+1} + \overline{x}')$ 即为破纪录温度的饱和值)。

根据式(20)计算得到中国 583 站点破纪录高、 低温的饱和值(图 13)。从图 13a 可以看出,除青藏



图 13 中国高温(a)和低温(b)破纪录事件饱和值分布 Fig. 13 Distributions of the saturation temperature of record-breaking events for (a) high and (b) low temperature

高原外,大部分地区的高温饱和值都达到了 50 ℃以上,其中大值中心分别位于新疆吐鲁番一带以及云南、贵州、广西 3 省交界一带,其高温饱和的理论值可达 60 ℃;对于常年温度较低的青藏高原地区,在现有气候条件不变的情况下,该地区理论上的高温饱和值只能达到 30 ℃左右。对于破纪录低温饱和值的分布(图 13b),其强度中心为青藏高原以及东北北部地区,这两个区域的低温饱和值达到了一75 ℃,中国的低温饱和值分布除了四川东部及重庆一带的值较高之外,其他大部分区域呈现较好的纬向分布特征,总体自南向北逐渐减小。

图 14 是高、低温饱和值与实际观测的最大值 (即历史最高、最低温)之间的差值,即未来破纪录 高、低温的最大增幅、降幅。从图 14a 可以看出,未 来破纪录高温的增温程度可以明显地分为两大的区 域:一是西北及青藏高原大部分地区,增幅空间较 小;二是广大的中东部地区、东北、华北、华南和西南 云贵高原地区,这些地区的破纪录高温还有较大的 上升空间,目前还远未达到饱和值;尤其以云南、贵 州交界一带以及广西的部分地区增幅空间最大,理 论上该区域的增幅达到 20 ℃以上。破纪录低温最 大降幅的分布相对较复杂(图 14b),存在两个明显 的降温区域:一是北方大部分地区,其极端低温还有 较大的降幅空间,其中以辽宁东部,黑龙江、内蒙古 北部、新疆北部等区域最为明显;二是东南沿海地区 的极端低温也还有较大的下降空间;低温降幅空间 较小的区域是西南及华中地区,尤其是湖北、重庆、 陕西的部分地区,未来破纪录低温的最大降幅只有 5 ℃左右;形成了降温幅度两头大中间小的格局。

破纪录高、低温增幅、降幅空间较大的地区几乎







全部包含了中国国民经济的支柱区域和宝贵的自然 环境、生态资源保护区,其中东北和华南是中国最主 要的产粮区,东部沿海地区是中国目前最重要的工 业基地,极端高、低温事件的不断加剧无疑将会对这 些地区的工农业生产带来巨大的影响(程炳岩等, 2003;龚志强等,2006b);华北是中国生态最为脆弱 的地带之一,也是京畿重地,西南云贵高原具有中国 乃至世界罕见的保存完好的热带雨林和丰富多样的 生态物种资源,随着国民经济的不断发展,城市化和 城市人口进一步扩大,不断加剧的高、低温极端事件 对中国的生态环境、人民的生命财产安全和社会稳 定产生极大影响,这些都是迫切需要研究并加以解 决的战略问题(龚道溢等,2004; IPCC,2007)。

# 5 结 论

本文利用满足 1960—2005 年连续观测的中国 583 个常规观测站的日最高、最低温度数据初步探 讨了近 46 年来中国温度破纪录事件的发生规律。 序列 X<sub>H</sub>、X<sub>L</sub> 的概率密度分布近似为正态高斯分 布,基于这一前提计算温度破纪录事件预测值,结果 显示利用温度历史资料中已有的高(低)温破纪录事 件作为初始条件进行预测更为合理,理论结果将更 接近真实值。未来极端高温破纪录事件的空间分布 特征与历史分布特征相比有一定变化,最明显的是 破纪录高温超过 40 ℃的区域范围将会进一步扩大, 尤以东北中部和西南、广西一带范围增加最为明显, 这与破纪录高温未来增幅程度的分布是一致的,扩 大的区域范围正对应于破纪录高温未来增温程度较 大的区域。而破纪录低温的空间分布相对较稳定, 相较历史最低温度分布并无明显变化,只是强度在 进一步增强,低温降幅最大的区域在西藏南部,其他 大部分地区降幅较平缓。

未来高温破纪录事件的平均发生时间最短的区域为西南部地区以及广东部分地区,该区域将是破纪录高温发生最为频繁的地区;而在江浙一带、东北大部以及青藏高原部分地区破纪录高温平均发生时间最长;未来低温破纪录事件平均发生时间的空间分布恰好与高温情况相反,且破纪录低温平均发生时间普遍较长。未来百年内仍将以极端高温事件为主,符合全球增暖的事实。

各站点破纪录高、低温饱和值及最大理论增幅、 降幅分布显示,对于高温破纪录事件,除了西北地区 增幅空间较小外,其它大部分区域都还有着较大的 增幅空间,尤其是西南地区最为明显;对于低温破纪 录事件,中国北方和东南沿海大部分地区的极端低 温事件还有较大的降幅空间,而西南以及华中地区 降幅空间较小;整体呈现两头大、中间小的降幅分布 格局。

#### References

- Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. 2007. Future extreme events in European climate: An exp loration of regional climate model projections. Climatic Change, 81(Suppl 1): 71-95
- Chen Bingyan, Ding Yuguo, He Juanxiong. 2003. The influence of the global warming on probability of regional extreme temperatures. J Tropical Meteor (in Chinese), 19(4): 429-435
- Ding Yihui, Ren Guoyu, Zhao Zongci, et al. 2007. Detection, Attribution and Projection of Climate Change over China. Desert Oasis Meteor (in Chinese), 1(1):1-10
- Ding Yuguo, Liu Jifeng, Zhang Yaocun. 2004. Simulation Tests of Temporal-Spatiaal Distributions of Extreme Temperatures over China Based on Probability Weighted Moments Estimation. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 28(5), 771-782
- Deng Ziwang, Ding Yuguo, Chen Yeguo. 2000. Effects of global warming on the probability of extreme high temperature event in the Yangtze Delta. J Nanjing Inst Meteor (in Chinese), 23(1): 42-47
- Fu Congbin, Ye Duzheng. 1995. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 19(1): 116-126
- Feng Guolin, Dong Wenjie, Gong Zhiqiang, et al. 2006. Nonlinear

Theories and Methods on Spatial-temporal Distribution of the Observational Data (in Chinese). Beijing: China Metrological Press, 1-227

- Gong Daoyi, Han Hui. 2004. Extreme climate events in northern China over the last 50 years. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59(2): 230-238
- Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Dong Wenjie, et al. 2006b. The research of dynamic structure abrupt change of nonlinear time series. Acta Phys Sinica (in Chinese), 55(6): 3180-3187
- Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Wan Shiquan, et al. 2006a. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm. Acta Phys Sinica (in Chinese), 55(1): 477-484
- Hou Wei, Feng Guolin, Dong Wenjie, et al. 2006. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of north China. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55(5):2663-2668
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis// Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press
- Kiktev D, Sexton D M H, Alexander L, et al. 2003. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. J Clim, 2003, 16 (22): 3560-3570
- Liu Jifeng, Li Shijie, Ding Yuguo, et al. 2006. The discussion of the characteristic zoning method of extreme temperature in China in recent devades. J Mountain Sci (in Chinese), 24(3): 291-297
- Liu Shida, Rong Pingping, Chen Jiong. 2000. The hierarchical structure of climate series. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 58 (1): 111-114
- Qin Dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong, et al. 2007. Updated understanding of climate change sciences. Adv Climate Change Res (in Chinese), 1(1):1-10
- Render S, Mark R Petersen. 2006. Role of global warming on the statistics of record-breaking temperatures. Phys Rev E, 74: 061114
- Sugihara G, May R M. 1990. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurements error in time series. Nature, 344: 734-74
- Wan Shiquan, Feng Guolin, Zhou Guohua, et al. 2005. Extracting useful information from the observations for the prediction based on EMD method. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(4): 516-525
- Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. 1998. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. Qurt Appl Meteor Sci (in Chinese), 9(4):392-401
- Ye Duzheng, Yan Zhongwei, Dai Xingang, et al. 2006. A discussion of future system of weather and climate prediction. Meteoro

Mon (in Chinese), 32(4): 3-8

Yang Peicai, Zhou Xiuji. 2005. On nonstationary behaviors and prediction theory of climate systems. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(5): 556-570

#### 附中文参考文献

- 程炳岩,丁裕国,何卷雄. 2003. 全球变暖对区域极端气温出现概率的影响. 热带气象学报, 19(4): 429-435
- 丁一汇,任国玉,赵宗慈等. 2007.中国气候变化的检测及预估.沙 漠与绿洲气象,1(1):1-10
- 丁裕国,刘吉峰,张耀存.2004.基于概率加权估计的中国极端气 温时空分布模拟试验.大气科学,28(5):771-782
- 邓自旺,丁裕国,陈业国.2000.全球气候变暖对长江三角洲极端 高温事件概率的影响.南京气象学院学报,23(1):42-47
- 符淙斌,叶笃正. 1995. 全球变化和我国未来的生存环境. 大气科 学, 19(1): 116-126
- 封国林,董文杰,龚志强等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论 和方法. 气象出版社, 1-227
- 龚道溢,韩晖. 2004. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报,59(2): 230-238
- 龚志强,封国林,董文杰等. 2006b. 非线性时间序列的动力结构突

变检测的研究. 物理学报, 55(6): 3180-3187

- 龚志强,封国林,万仕全等.2006a.基于启发式分割算法检测华北 和全球气候变化的特征.物理学报,55(1):477-484
- 侯威,封国林,董文杰等. 2006.利用排列熵检测近 40 年华北地区 气温突变的研究.物理学报,55(5):2663-2668
- 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.山地学报,24(3):291-297
- 刘式达,荣平平,陈炯. 2000. 气候序列的层次结构. 气象学报,58 (1):111-114
- 秦大河,陈振林,罗勇等. 2007. 气候变化科学的最新认知. 气候变 化研究进展, 3(2):63-73
- 万仕全,封国林,周国华等. 2005. 基于 EMD 方法的观测数据信息 提取与预测研究. 气象学报,63(4):516-525
- 王绍武,叶瑾琳,龚道溢等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报,9(4): 392-401
- 叶笃正,严中伟,戴新刚等. 2006. 未来的天气气候预测体系. 气 象,32(4): 3-8
- 杨培才,周秀骥. 2005. 气候系统的非平稳行为和预测理论. 气象学报,63(5): 556-570