

气候变化中高温破纪录事件的蒙特卡罗模拟研究^{*}

熊开国¹⁾ 杨 杰¹⁾ 万仕全²⁾ 封国林¹⁾ 胡经国^{1)†}

1) 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) 扬州市气象局, 扬州 225009)

(2008 年 4 月 11 日收到, 2008 年 6 月 23 日收到修改稿)

采用蒙特卡罗方法, 分析了南京市 1961 年—2000 年 40 a 日观测温度资料中的高温破纪录事件的统计规律, 并比较了 20 世纪全球变暖和南京市近 40 年来区域变暖背景对其统计规律的影响. 理论分析和蒙特卡罗模拟结果均表明: 近 40 年来南京市第 k 个高温破纪录事件的最概然发生强度与 \sqrt{k} ($k=1, 2, 3, \dots$) 呈线性增长, 而年发生高温破纪录事件的频率随时间 t 呈 $1/(t+1)$ 的衰减趋势, 且平均温度高的年份, 发生高温破纪录事件的概率较大, 反之, 概率较小. 结果还表明: 20 世纪的全球变暖速率 ($v=0.006\text{ }^\circ\text{C/a}$) 和南京市区域的变暖速率 ($v=0.017\text{ }^\circ\text{C/a}$) 在短期内还不至于引起高温破纪录事件的发生强度和发生频率有明显变化, 但持续变暖最终将会使年发生高温破纪录事件的频率渐渐地收敛于一个常数, 近似等于变暖速率的值. 此外, 还研究了日温度之间的自相关和方差变化对高温破纪录事件的影响, 研究发现异方差和弱的自相关对高温破纪录事件的发生强度和概率的影响基本可以忽略.

关键词: 高温破纪录事件, 蒙特卡罗模拟, 全球变暖

PACC: 9260X

1. 引 言

在全球气候变化研究中, “极端气候”研究仍是一个薄弱环节. 如何描述和监测极端气候或表征气候极值的各种统计特征及其变化规律, 已经成为气候变化研究的重要课题之一^[1,2]. 长期以来, 人们主要偏重于对平均气候变化的研究, 对极端气候变化规律的研究还相当不够. 极端气象事件(频率或强度的变化)要比平均气候状况更可能造成对社会和环境的严重影响. 对作为极端事件之一的高温破纪录事件的研究, 目前在国内还很难找到相关文献, 国际上也是刚刚起步, 研究其发生规律特别是全球变暖背景下的发生强度和频次无疑具有重要的科学意义和实用价值.

蒙特卡罗方法也称统计模拟方法, 是以概率统计理论为指导的一类数值计算方法. 许多数学、物理、工程技术中的实际问题, 都可以归结为某种概率

统计模型, 然后用统计方法给出此模型数值解的统计估计值^[3]. 气象上应用统计模拟方法的历史不长, 但已有的工作^[4-21]表明, 利用蒙特卡罗随机模拟方法可以产生符合一定概率或模式的模拟气象资料, 在一定程度上克服了实际观测数据短缺等一系列的问题, 这对于研究气候特征及其变化规律具有很大的意义. 例如, 在气候影响研究中估算极端温度发生的概率可通过蒙特卡罗随机方法模拟不同参数下的极端温度时间序列, 从而计算其发生的概率, 而不同的参数组则可以模拟气候背景条件的改变.

本文对南京市 1961 年—2000 年 40 a 的日高温进行了高温破纪录事件统计分析, 揭示了高温破纪录事件发生强度和发生频率随时间的变化规律. 基于其日温度分布近似为高斯分布, 以及极端事件的基本统计思想^[4,5], 在理论上对南京市高温破纪录事件的最可能发生强度及相应的发生概率进行了预测, 同时结合南京市的实际观测资料和蒙特卡罗模拟对理论分析结果进行了检验.

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB400503)、国家科技支撑计划(批准号: 2007BAC03A01, 2007BAC29B01)和中国气象局气候研究开放实验室开放基金(批准号: LCS-2006-04)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: jghu@yzu.edu.cn

2. 观测资料

本文所用实测温度数据取自国家气象中心资料室,是南京市 1961 年—2000 年 40 a 的逐日观测最高温度、日平均温度和日最低温度. 为了对南京市近 40 a 的年平均最高温度、年平均温度及年平均最低温度的变化情况有直观的了解,文中首先给出南京市近 40 a 的年平均最高温度、年平均温度及年平均最低温度的变化趋势图.

图 1 为南京市 1961 年—2000 年 40 a 的年平均最高温度、年平均温度及年平均最低温度变化趋势及 9 a 滑动平均结果. 由图 1 可以看出,南京市气候变化和全球气候变化整体上是一致的,呈现增暖趋势,其年平均最低温度增暖最为明显,年平均温度次之,年平均最高温度增暖最小. 相比较 20 世纪的全局平均变暖速率 $0.006\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,近 40 a 来南京市年平均温度增加了 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,增暖速率为 $0.017\text{ }^{\circ}\text{C/a}$;年平均最低、最高温度分别增加了 $0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,增暖速率分别为 $0.024\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.003\text{ }^{\circ}\text{C/a}$.

3. 日温度分布

为了了解高温破纪录事件的发生强度和发生频次,我们首先需要知道具体某日(同日)的日温度概率密度分布^[4],这里我们在对日温度概率密度分布

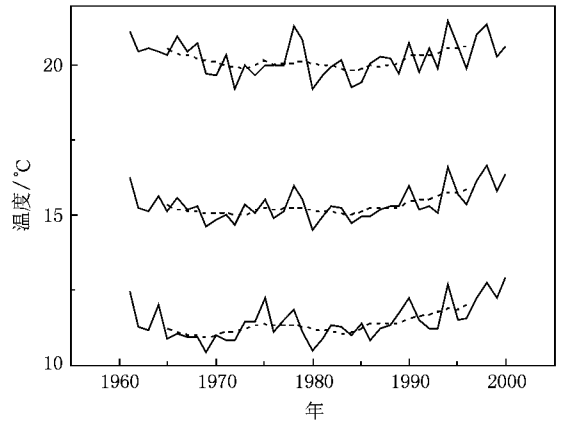


图 1 南京市 1961 年—2000 年 40 a 的温度变化趋势 图中实线从上到下依次为年平均最高温度、年平均温度和年平均低温,虚线为 9 a 滑动平均

进行统计的时候采用的是日平均温度. 对于南京市统计资料为 1961 年—2000 年,那么统计样本就只有 40 个,考虑到样本量太少,统计分布曲线波动比较大,我们将同日的日温度用相应月的日温度进行统计. 如对 1 月的日温度进行统计时,将有 40 个 1 月的日温度数据,那么扩充以后的统计样本量为 1240,在一定程度上克服了统计样本量少造成统计曲线波动较大等问题.

图 2 为南京市 1 月、4 月、6 月、10 月的日温度概率密度分布(方块),实线为高斯拟合曲线. 由图 2 可以明显地看出,年中月的日温度概率密度分布能

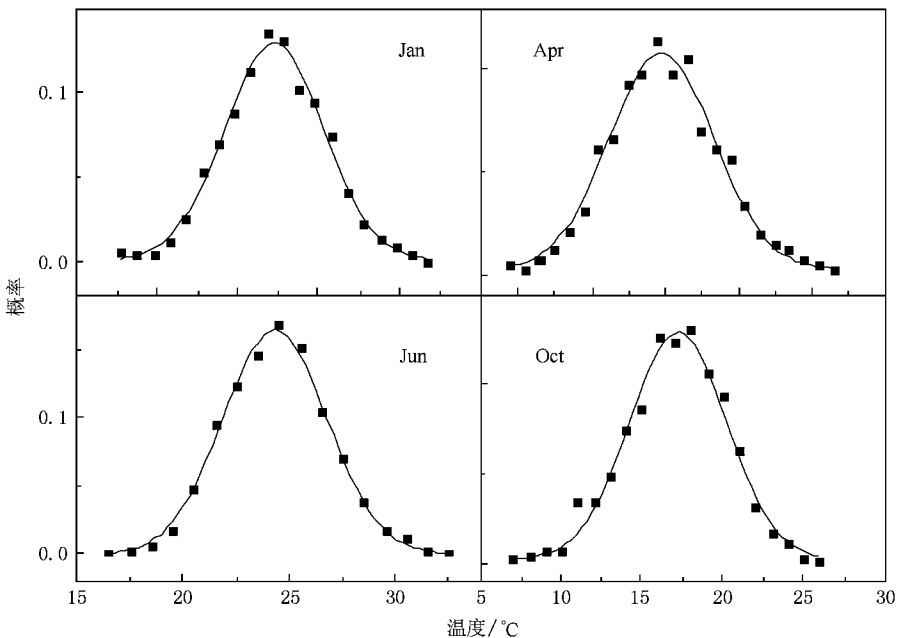


图 2 南京市 1 月、4 月、6 月、10 月的日温度概率密度分布 实线为高斯拟合曲线

用高斯曲线较好拟合。另外,我们也对年中其他月的日温度分布进行了统计分析,发现除了7月份的日温度分布为偏正态分布以外,其他月的日温度分布曲线都能用高斯曲线较好拟合。所以,年中固定某日温度概率密度分布可以近似为高斯分布,从而基于高斯概率密度分布模型的破纪录事件理论用于南京市的日温度分布是可行的。图2中相应日温度的平均和标准偏差分别为2.21,14.98,24.34,16.92和3.07,3.76,2.41,3.12℃。文中所有蒙特卡罗模拟工作和理论分析都是基于日温度概率密度分布为高斯分布。

4. 破纪录高温的理论分析

破纪录温度即传统意义上的打破纪录的温度,主要表现为当前破纪录温度的发生强度一定比以前所有有观测纪录的温度发生强度要强,所有破纪录温度组成的新序列就是一条递增的温度序列。

对于一条长度为 N 的温度序列 $T(i), i=1, 2, 3, \dots, N$,其第 k 个破纪录温度发生强度文中用 T_k 表示,相对应发生时间用 t_k 表示。人们普遍关注第 k 个破纪录温度的平均发生强度和第 k 个破纪录温度的最可能发生强度和最可能发生时间。

理论上,对于概率密度为高斯分布的温度随机序列,其概率密度分布函数为

$$P(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(T-\bar{T})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

其中 \bar{T} 为某日的日平均温度, σ 为相应的标准偏差,对于南京市6月的日温度, \bar{T} 和 σ 的值分别为24.34和2.41℃。

容易理解,第0个破纪录温度的平均强度(对于高斯分布的温度序列也是最可能发生强度)

$$\bar{T}_0 = \int TP(T) dT. \quad (2)$$

第1个破纪录温度的平均发生强度

$$\bar{T}_1 = \frac{\int_{\bar{T}_0}^{\infty} TP(T) dT}{\int_{\bar{T}_0}^{\infty} P(T) dT}. \quad (3)$$

如此类推,第 k 个破纪录温度的平均发生强度

$$\bar{T}_k = \frac{\int_{\bar{T}_{k-1}}^{\infty} TP(T) dT}{\int_{\bar{T}_{k-1}}^{\infty} P(T) dT}. \quad (4)$$

对于较大的 k ,将概率密度分布函数(1)式代入(4)式,可近似得到第 k 个破纪录温度的绝对平均发生强度(第 k 个高温破纪录事件的平均强度减去第0个高温破纪录事件的平均强度,文中所有绝对平均强度均为此意)

$$\bar{T}_k \propto \sqrt{2k\sigma^2}. \quad (5)$$

而第 k 个破纪录温度的平均发生时间

$$\bar{t}_k \propto \sqrt{4\pi k} e^k. \quad (6)$$

第 k 个破纪录温度等于 T 的概率

$$P_k(T) \approx \frac{1}{\Gamma(k + \frac{1}{2})} \frac{T^{2k}}{\sigma^{2k+1}} e^{-\frac{(T-\bar{T})^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

第 t 年发生高温破纪录事件的概率为

$$p(t) = 1/(t+1). \quad (8)$$

第 k 个高温破纪录事件发生在第 t 年累积概率为^[4]

$$p_k(t) = 1/t. \quad (9)$$

5. 破纪录温度的蒙特卡罗模拟

为验证理论预测,我们根据南京市6月的日温度概率密度分布参数进行了蒙特卡罗随机模拟。南京市6月的平均温度为24.34℃,标准偏差为2.41℃,根据这一温度参数用蒙特卡罗方法随机产生了与6月温度具有同一概率密度分布特征的随机变量^[11-21],然后对其进行高温破纪录事件统计。在随后的模拟中发现,模拟结果并不依赖于某一特定的平均值和方差,文中所有模拟参数均来自南京市6月的实际观测温度统计参数。为了产生足够的样本量,我们用蒙特卡罗模拟产生了100000 d,至少1000 a的随机数,即假定一年有100000个6月的日,之所以要产生至少1000 a长度的序列,是为了确保固定日至少有6个破纪录温度发生。

5.1. 高温破纪录事件的发生强度

为了对高温破纪录事件的发生强度和发生频率有个直观的了解,首先根据南京市6月的日温度概率密度分布参数蒙特卡罗模拟,给出了每个高温破纪录事件的发生强度的概率密度分布(图3)及每个高温破纪录事件的平均发生强度(图3、图4)。

(7)式为理论上粗略近似得到的第 k 个破纪录高温等于 T 的概率。模拟结果显示(图3)第 k 个破纪录高温等于 T 的概率分布为高斯分布,符合理论上的分布特征,但是模拟结果相对于理论结果都偏

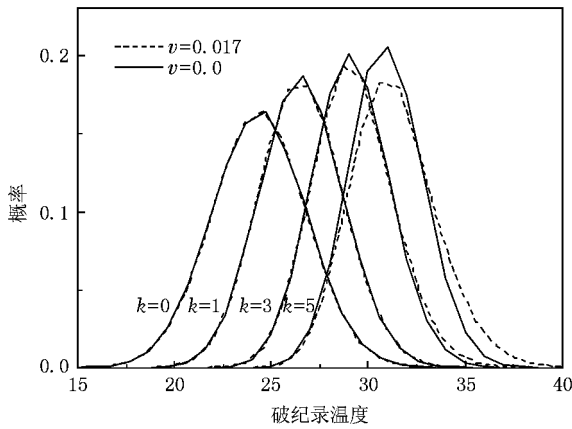


图3 模拟得到的第 k 个高温破纪录事件的发生强度的概率密度分布. 实线为模拟平稳随机时间序列, 虚线为模拟南京市区域变暖(变暖速率 $v = 0.017 \text{ } ^\circ\text{C/a}$)

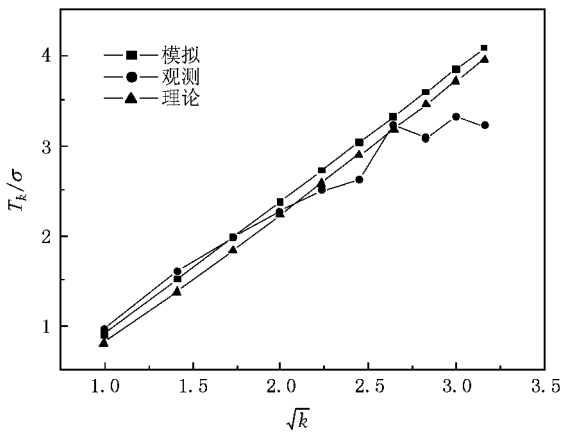


图4 \bar{T}_k/σ 与 \sqrt{k} 的关系. 实菱形连线和实三角形连线的为南京市实际观测结果, 实三角连线和实矩形连线的为理论结果($\bar{T}_k/\sigma = 1.47\sqrt{k}$), 实矩形连线的为模拟结果

大(图4). 另外由图3可以看出, 随着 k 值的不断增大, 第 k 个破纪录高温等于 T 的概率分布曲线变得越来越窄. 这说明 k 值越大破纪录高温的发生强度的波动性和离散程度越小, 越趋向于平均发生强度或者最概然发生强度, 那么我们对其强度的预测结果也越可靠.

对于用概率统计方法研究极端事件, 人们普遍比较关注的是最大可能值、平均值的发生情况. 表1给出了蒙特卡罗随机模拟得到的每个高温破纪录事件的最可能发生强度. 由表1可以看出, 随着 k 值的增大, 连续高温破纪录事件之间强度的间隔变得越来越小, 这与我们的直觉是一致的.

理论上连续破纪录事件中第 k 个破纪录事件

的绝对平均发生强度 $\bar{T}_k \propto \sqrt{2k\sigma^2}$ (图4中实三角连线). 为了与理论进行比较, 我们对南京市高温破纪录事件进行了统计(图4中实菱形连线). 图4中纵坐标 \bar{T}_k/σ 为南京市每天第 k 个高温破纪录事件 T_k/σ ($d = 1, 2, 3, \dots, 365$) 的绝对平均. 由图4可以看出, 实际观测温度得到南京市的 \bar{T}_k/σ 基本上与 \sqrt{k} 呈线性连续增长趋势, 直到 $k = 5$ 实际统计南京市的 \bar{T}_k/σ 与理论都十分接近. 由于具体某天实际观测序列中有6个及以上的高温破纪录事件的天数非常少, 所以对于 $k > 5$ 的 \bar{T}_k/σ 与理论值有一定的偏差, 但是总体还是在理论值附近波动. 图4中实矩形连线为模拟得到的第 k 个破纪录事件的绝对平均强度, 可以看出模拟结果与理论结果趋势上完全一致, 只是模拟值比理论值略大.

表1 高温破纪录事件的最可能发生强度(单位为 $^\circ\text{C}$)

k	0	1	2	3	4	5
模拟($v = 0 \text{ } ^\circ\text{C/a}$)	24.34	26.52	27.96	29.09	30.04	30.89
模拟($v = 0.017 \text{ } ^\circ\text{C/a}$)	24.34	26.53	28.00	29.21	30.28	31.28

5.2. 年发生高温破纪录事件的概率

在对实际观测数据进行高温破纪录事件统计时, 我们将1961年当作第0年, 即假设从1961年开始才有温度观测数据, 理所当然也应将1961年每天温度作为第0个高温破纪录温度, 即1961年1月1日、1月2日、...、12月31日分别为相应固定日第0个高温破纪录事件, 显然1961年就有365个高温破纪录事件, 1961年(相当于第0年)发生高温破纪录事件的概率就是1. 图5为年发生破纪录高温事件概率随时间的演化图. 理论上第 t 年发生破纪录事件的概率为 $1/(t+1)$ (图5中实方形连线). 图5中实圆形连线为实际观测南京市年发生高温破纪录事件的概率. 由图5可以看出, 南京市年发生高温破纪录事件的概率尽管波动比较大, 但大体与理论上的趋势一致. 对比年发生高温破纪录事件概率曲线和年平均温度变化曲线, 发现两者之间存在一定的相关性, 即平均温度高的年份发生高温破纪录事件的概率就大, 平均温度低的年份发生高温破纪录事件的概率就小. 比较明显的是较暖的1964年、1966年、1978年、1979年、1987年、1998年和1999年(其中1998年被认为是近一个多世纪以来最暖的一年^[22]), 这些年中发生高温破纪录事件的概率普

遍都要比理论概率高 0.02 以上,1966 年、1978 年实际年发生高温破纪录事件的概率比理论分别高 0.1 和 0.07。由于统计数据是从 1961 年开始,而 1961 年又是年平均气温相对较高的一年,受 1961 年影响,1962 年年发生高温破纪录事件的概率比理论低 0.04 典型年发生高温破纪录事件概率比理论小 0.02 以上的还有 1970 年—1976 年、1989 年、1991 年、1995 年,基本上都是年平均温度相对较低的年份。

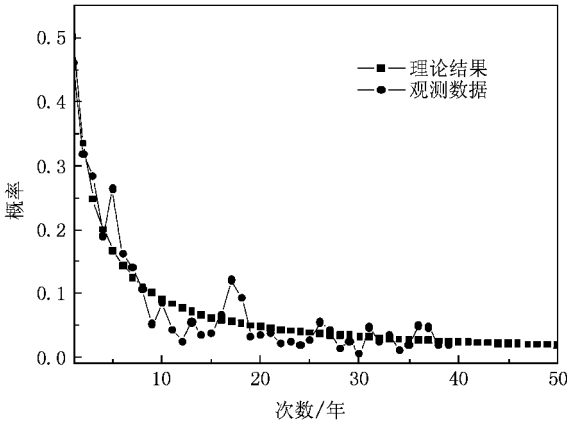


图 5 破纪录事件的年发生概率 实方形连线为理论结果 $1/(t+1)$, 实圆形连线为南京市统计结果

5.3. 第 k 个高温破纪录事件发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率

对于连续破纪录事件之间相隔时间的分布,由于实际观测数据太少,我们采用了累积概率分布。图 6 给出了第 k 个高温破纪录事件发生在第 t 年或者第 t 年以后的概率。对于第 1 个高温破纪录事件发生在第 t 年或者第 t 年后的概率,理论上为 $1/t$ (图 6 中的虚线),实线为南京市的统计结果,虚线和点划线均为模拟结果。由图 6 可以看出,南京市第 1 个高温破纪录事件发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率基本上是符合理论结果的,可能是由于统计数据太少(只有 40 a)或者近 40 a 中出现了多次相对较暖的年份(如上所述的 1964 年、1966 年、1978 年、1979 年、1987 年、1998 年、1999 年),导致南京市实际第 1 个高温破纪录事件发生在 1987 年或者 1987 年以后的累积概率迅速减小。图 6 中点划线为随机模拟平稳时间序列的统计结果,可以看出模拟结果与理论结果几乎一致。

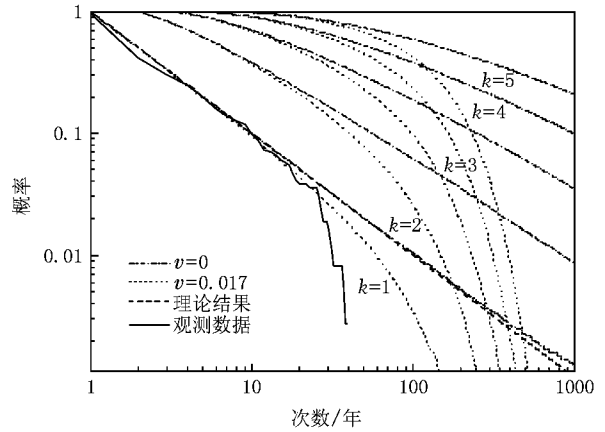


图 6 第 k 个高温破纪录事件发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率 点划线为模拟平稳时间序列,实线为南京市的实际观测序列,虚线为理论结果,点线为添加线性增暖趋势后($v = 0.017 \text{ } ^\circ\text{C/a}$)的结果

6. 全球变暖对高温破纪录事件的影响

全球变暖已成为一个不争的事实。国际气候变化组织专业委员会(IPCC)第三次评估报告指出,20 世纪(1901 年—2000 年)全球平均地表温度升高 $0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$,比第二次报告高出 $0.15 \text{ } ^\circ\text{C}$;第四次评估报告指出,更新的 100 a(1906 年—2005 年)中线性地增加了 $0.74 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($0.56\text{--}0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$),大于第三次评估报告给出的 1901 年—2000 年增加 $0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($0.4\text{--}0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$)。每次报告都比前一次报告中所得到的变暖趋势更强,一个重要的原因就是新评估报告分析时段内增加的年份与以往年份相比都是偏暖的,这也说明了近些年来全球变暖越来越明显。在全球变暖的大背景下,极端事件发生的频次、强度等会如何变化,是第二次评估报告以来气候变化研究中普遍关注的问题。Katz 等^[24]认为,不同于气候平均态的变化,极端事件对气候变化更敏感,与极端事件的发生频率或者强度有关的任何变化都可能对自然和社会产生重大的影响。为了降低极端事件对自然和社会的影响,弄清极端事件的变化趋势、发生原因及机理是减缓措施的必要前提^[11]。这里我们主要研究全球平均温度升高和区域温度升高对高温破纪录事件的发生强度和发生频次的影响。

对于全球变暖,在模拟时我们假定以后的平均温度在当前基础上增加了 vt 。这里 $v > 0$ 为变暖速率,是个比较小的值(20 世纪全球的变暖速率 $v = 0.006 \text{ } ^\circ\text{C/a}$); t 为相对于当前的时间,单位为 a。对于

高斯分布的序列,全球变暖时其分布函数可近似为^[4]

$$P(T, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(T-(T+v))}{2\sigma^2}}. \quad (10)$$

6.1. 全球变暖对高温破纪录事件发生强度的影响

图 3 中虚线为模拟过程中添加了线性变暖趋势项后的高温破纪录事件发生强度的概率密度分布曲线. 对比模拟的平稳时间序列高温破纪录事件(图 3 中实线),可以发现南京市近 40 a 的区域变暖速率 $v = 0.017 \text{ }^\circ\text{C/a}$,会对高温破纪录事件产生一定的影响,使得高温破纪录事件的概率密度曲线右半支普遍右移(我们称为高温部分或者高强度部分),如第 3 个、第 5 个高温破纪录事件. 这说明这样的变暖速率使得高强度高温破纪录事件更容易发生,势必会使某个高温破纪录事件最可能发生的强度有所增加(表 1). 由表 1 可以明显看出:在添加了线性变暖趋势以后,每个高温破纪录事件的最可能发生强度与平稳过程都有所增大,但是增幅不是很大. 此外,我们也用蒙特卡罗模拟研究了 $v = 0.006 \text{ }^\circ\text{C/a}$ (20 世纪的全球变暖速率)和 $v = 0.030 \text{ }^\circ\text{C/a}$ (IPCC 排放情景特别报告中的 21 世纪全球变暖速率)时破纪录事件的发生情况. 对于 20 世纪的全球变暖速率($v = 0.006 \text{ }^\circ\text{C/a}$)对高温破纪录事件发生强度的影响,我们得到的结论和 Redner 等^[4]得到的结论是一致的,亦即 20 世纪的全球变暖速率在短期内还不至于引起破纪录事件发生强度的明显变化,21 世纪的全球变暖速率($v = 0.030 \text{ }^\circ\text{C/a}$)将会使高温破纪录事件的发生强度和频率明显增加.

6.2. 全球变暖对年发生高温破纪录事件概率的影响

与全球变暖对高温破纪录事件发生强度的影响不同, $v = 0.006 \text{ }^\circ\text{C/a}$, $v = 0.017 \text{ }^\circ\text{C/a}$, $v = 0.030 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 的全球变暖速率都将会使年发生高温破纪录事件的概率发生一定的变化(图 7 点线),大的变暖速率对应了较大的年发生破纪录事件的概率. 对比理论结果、模拟结果和南京市统计结果,可以发现全球变暖使每年发生破纪录事件的概率有所增加,三种不同的变暖速率分别会使年发生高温破纪录事件的概率分别收敛于一常数,接近于变暖速率的值.

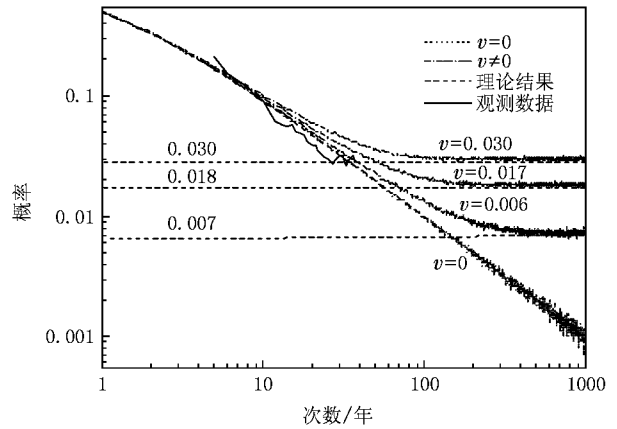


图 7 全球变暖对年发生高温破纪录事件概率的影响

6.3. 全球变暖对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率的影响

此外我们也用蒙特卡罗随机模拟研究了全球变暖对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率的影响. 结果表明, $v = 0.006 \text{ }^\circ\text{C/a}$, $v = 0.017 \text{ }^\circ\text{C/a}$, $v = 0.030 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 的全球变暖速率都使得第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率有所减小(如图 6 中点线, $v = 0.017 \text{ }^\circ\text{C/a}$). 特别是对于比较大的全球变暖速率 $v = 0.030 \text{ }^\circ\text{C/a}$, 在此变暖速率下,第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率迅速的减小,所有的高温纪录将会被较快打破.

7. 方差的变化对破纪录事件的影响

以上模拟结果都是基于方差不变情况下模拟全球变暖对高温破纪录事件的影响,而全球气候的变化不光是年平均温度的变化还有方差等的变化^[24]. 方差体现了数据的离散程度,对于同一均值的概率密度分布函数,方差的增加和减小能直接导致小概率事件(极端事件)发生概率的增加和减小. 已有的很多全球气候变化对极端事件的研究中,都发现方差的变化比平均温度的变化对极端事件的影响更大^[14, 18, 24].

图 8 和图 9 分别为模拟平均温度不变情况下不同的方差对年发生高温破纪录事件概率的影响和对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率的影响. 由图 8 和图 9 可以看出,不同的方差并没有引起两者发生概率的明显变化,这与方

差变化对其他极端事件的影响是不同的。此外，我们也发现不同的平均值对年发生高温破纪录事件概率和对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率几乎没有影响。

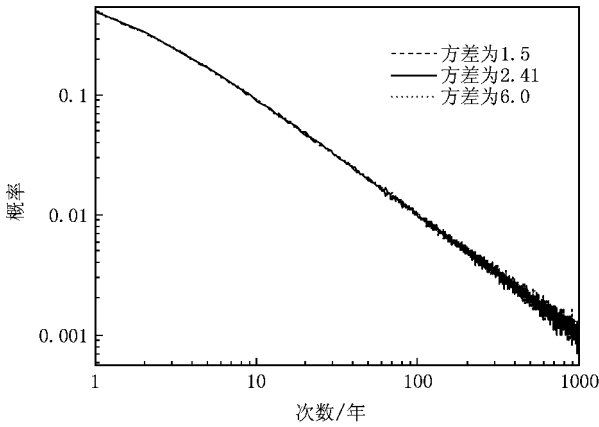


图 8 不同的方差对年发生高温破纪录事件概率的影响

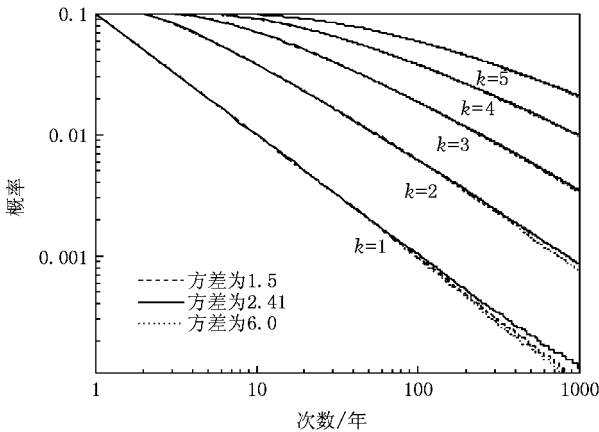


图 9 不同的方差对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率的影响

8. 相关性对高温破纪录事件的影响

目前已有大量的工作证实温度序列之间不但存在短程关联而且还存在着长程关联^[5, 25-29]。刘吉峰等^[16]指出，均值、标准差、自相关系数的变化都会对极值产生影响。临界值一定时，极小值次数随自相关系数的增大而减少。下面我们将就相关性对高温破纪录事件的一些相关性质的影响进行研究。文中我们只考虑短程相关，即相邻两天之间温度的相关。

8.1. 相关性对高温破纪录事件发生强度的影响

我们用一阶自回归模型结合蒙特卡罗模拟研究

了一阶自相关系数 $r = 0.1, 0.5, 0.9$ 时高温破纪录事件的发生情况。由于我们研究的实际时间序列相邻数据间相隔整整一年，所以一阶自相关系数很小。图 10 为南京市日温度一阶自相关系数分布图，可以看出全年 365 d 中大多数时间的一阶自相关系数都落在 -0.2 — 0.2 之间。

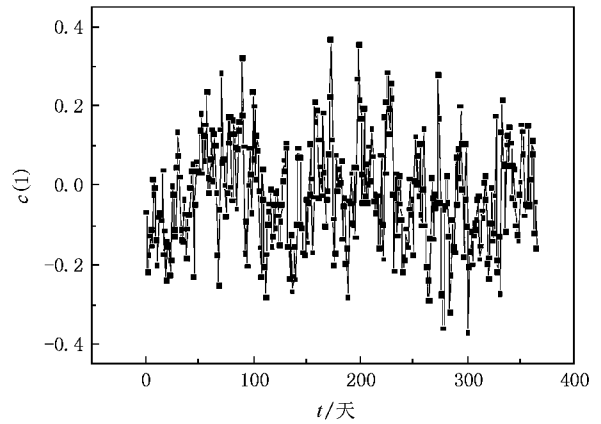


图 10 南京市日温度一阶自相关系数分布

图 11 为一阶自相关系数 $r = 0.5$ 对高温破纪录事件发生强度的影响。可以发现 0.5 的自相关虽然使第 k 个破纪录高温分布曲线的右半支即高温部分的发生概率有所增加，但是低温部分的发生概率却相应有所减小，从而使得第 k 个高温破纪录事件的最可能发生强度保持不变。也就是 0.5 的自相关对第 k 个破纪录高温的最可能发生强度（平均发生强度）没有影响，但是会导致更多的高温破纪录事件。此外 $r = 0.1, 0.9$ 的模拟结果表明： $r = 0.1$ 的自相关对高温破纪录事件的影响几乎可以忽略， $r = 0.9$ 的自相关会加剧 $r = 0.5$ 的趋势。

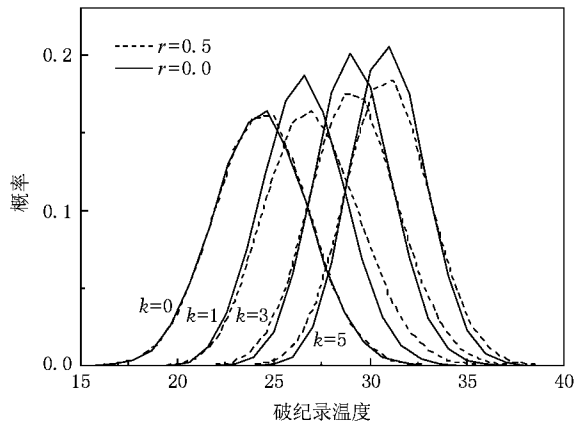


图 11 相关性对高温破纪录事件发生强度的影响

8.2. 相关性对年发生高温破纪录事件概率的影响

图 12 为模拟 $r = 0.1, 0.5$ 的相关性对年发生高温破纪录事件概率的影响(分别用虚线、点线表示). 对比随机序列模拟结果(实线)可以看出, 0.5 的自相关对年发生高温破纪录事件概率的影响很小, 只是使第一年发生高温破纪录事件的概率发生很小的增加, 即使第一年以后的近几年时间内发生高温破纪录事件的概率略有减小.

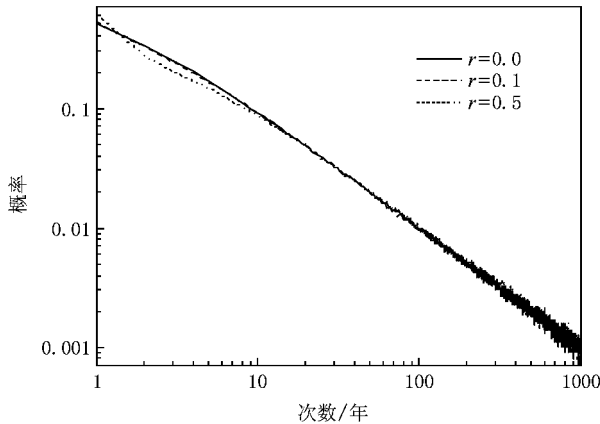


图 12 相关性对年发生高温破纪录事件概率的影响

8.3. 相关性对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后累积概率的影响

相关性对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后累积概率的影响见图 13(虚线). 对比随机模拟结果(实线)可以发现, 0.5 的自相关使得每个高温破纪录事件发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率有所增大, 其中对 $k = 2$ 的影响最大, 随着 k 值的增大影响逐渐变小. 也就是序列的一阶自相关延长了高温破纪录事件的平均发生相隔时间, 使得高温破纪录事件纪录不易被打破. 我们也模拟了一阶自相关系数 $r = 0.1, 0.9$ 时的情况, 其中 0.1 的弱相关对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后的累积概率的影响几乎可以忽略, 而 $r = 0.9$ 的强相关使得相邻高温纪录之间的平均时间间隔变得更长, 高温破纪录事件更不容易发生.

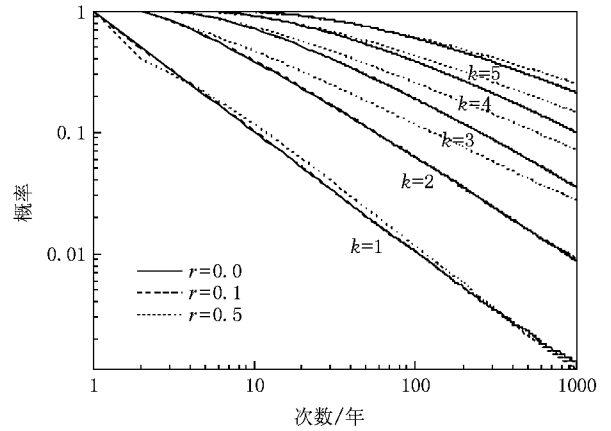


图 13 相关性对第 k 个破纪录高温发生在第 t 年或者第 t 年以后累积概率的影响

9. 结 论

本文采用蒙特卡罗模拟方法, 对南京市 1961 年—2000 年 40 a 日观测温度资料中的高温破纪录事件进行了统计分析. 理论分析和蒙特卡罗模拟结果均表明: 第 k 个高温破纪录事件的 \bar{T}_k/σ 与 \sqrt{k} 关系呈线性增长趋势, 年发生高温破纪录事件的频率随时间 t 呈 $1/(t+1)$ 的衰减趋势. 结果还显示, 年发生高温破纪录事件概率与年平均温度之间存在一定的正相关, 平均温度高的年份发生高温破纪录事件的概率就大, 平均温度低的年份发生高温破纪录事件的概率就小. 温度明显较暖的 1964 年、1966 年、1978 年、1979 年、1987 年、1998 年和 1999 年发生高温破纪录事件的概率普遍都要比理论值高 0.02 以上, 其中, 1966 年、1978 年实际发生高温破纪录事件的概率比理论值分别高 0.1, 0.07. 模拟结果还表明, 20 世纪的全球变暖速率($v = 0.006 \text{ }^\circ\text{C/a}$)和南京市 1961 年—2000 年近 40 a 的区域变暖速率($v = 0.017 \text{ }^\circ\text{C/a}$)还不至于引起高温破纪录事件发生强度的明显变化, 但全球变暖将会导致年发生高温破纪录事件概率的增加. 一定的全球变暖速率会使年发生高温破纪录事件的概率渐渐收敛于一个常数, 近似于变暖速率的值. 在保持平均温度、方差不变的情况下, 自相关系数的增强对第 k 个破纪录高温的最可能发生强度几乎没有影响, 但是会导致高强度高温破纪录事件发生的概率增加.

- [1] Meehl G A , Karl T , Easterling D R , Changnon S , Pielke R , Changnon D , Evans J , Groisman P Y , Knutson T R , Kunkel K E , Mearns L O , Parmesan C , Pulwarty R , Root T , Sylves R T , Whetton P , Zwiers F 2000 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **81** 413
- [2] Easterling D R , Evans J L , Groisman P Y , Karl T R , Kunkel K E , Ambenje P 2000 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **81** 417
- [3] Xiao Y R 1994 *Statistical Computing Method for Probability* (Tianjin : Nankai University Press) p130 (in Chinese) [肖云茹 1994 概率统计计算方法(天津:南开大学出版社)第130页]
- [4] Redner S , Petersen M R 2006 *Phys. Rev. E* **74** 061114
- [5] Eichner J F , Kantelhardt J W , Bunde A , Havlin S 2006 *Phys. Rev. E* **73** 016130
- [6] Woo M K 1992 *Climate Change* **20** 313
- [7] Mearns L O , Katz R W , Schenider S H 1984 *J. Climate Appl. Meteor.* **23** 1601
- [8] Bassett G W 1992 *Climatic Change* **21** 303
- [9] Nagarajan R , Govindan R B 2006 *Physica A* **364** 271
- [10] Reitan C H , Moran J M 1977 *Mon. Wea. Rev.* **105** 1442
- [11] Hu Y C , Dong W J , He Y 2007 *Adv. Earth Sci.* **22** 1066 (in Chinese) [胡宜昌、董文杰、何勇 2007 地球科学进展 **22** 1066]
- [12] Ding Y G , Liu J F , Zhang Y C 2004 *Chin. J. Atmos. Sci.* **28** 771 (in Chinese) [丁裕国、刘吉峰、张耀存 2004 大气科学 **28** 771]
- [13] Deng Z W , Ding Y G , Chen Y G 2000 *J. Nanjing Inst. Meteor.* **23** 42 (in Chinese) [邓自旺、丁裕国、陈业国 2000 南京气象学院学报 **23** 42]
- [14] Chen B Y , Ding Y G , He J X 2003 *J. Trop. Meteor.* **19** 429 (in Chinese) [程炳岩、丁裕国、何卷雄 2003 热带气象学报 **19** 429]
- [15] Xu L R , Luo K L , Chang J , Li A Z 2002 *J. Grad. Sch. Chin. Acad. Sci.* **19** 121 (in Chinese) [徐立荣、雒昆利、常军、李爱贞 2002 中国科学院研究生院学报 **19** 121]
- [16] Liu J F , Ding Y G , Chen B Y 2002 *J. Nanjing Inst. Meteor.* **25** 823 (in Chinese) [刘吉峰、丁裕国、程炳岩 2002 南京气象学院学报 **25** 823]
- [17] Deng H P , Wu Z F 1996 *Acta Geogr. Sin.* **51** 50 (in Chinese) [邓慧平、吴正方 1996 地理学报 **51** 50]
- [18] Wang D J , Chen B Y , Ding Y G 2003 *J. Nanjing Inst. Meteor.* **26** 263 (in Chinese) [王大钧、程炳岩、丁裕国 2003 南京气象学院学报 **26** 263]
- [19] Yu G , Lai G Y , Xue B , Liu X M , Wang S M , Wang A J 2004 *J. Lake Sci.* **16** 193 (in Chinese) [于革、赖格英、薛滨、刘晓玫、王苏民、王爱军 2004 湖泊科学 **16** 193]
- [20] Duan J N , Li X L , Wang G L , Li B G 2001 *J. Soil Water Conserv.* **15** 99 (in Chinese) [段建南、李旭霖、王改兰、李保国 2001 水土保持学报 **15** 99]
- [21] Zhang W F , Zhang J 2002 *Sci. Meteor. Sin.* **22** 294 (in Chinese) [张维锋、张军 2002 气象科学 **22** 294]
- [22] Wang S W , Gong D Y 2000 *Prog. Nat. Sci.* **10** 325 (in Chinese) [王绍武、龚道溢 2000 自然科学进展 **10** 325]
- [23] Xu Z J 1985 *Monte-Carlo Method* (Shanghai : Shanghai Scientific and Technical Publishers) pp5 , 123 (in Chinese) [徐钟济 1985 蒙特卡罗方法(上海:上海科学技术出版社)第5、123页]
- [24] Katz R W , Brown B G 1992 *Climatic Change* **21** 289
- [25] Király A , János I M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 051102
- [26] Bunde A , Eichner J F , Kantelhardt J W , Havlin S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 048701
- [27] Talkner P , Weber R O 2000 *Phys. Rev. E* **62** 150
- [28] Eichner J F , Koscielny-Bunde E , Bunde A , Havlin S , Schellnhuber H J 2003 *Phys. Rev. E* **68** 046133
- [29] Altmann E G , Kantz H 2005 *Phys. Rev. E* **71** 056106

Monte Carlo simulation of the record-breaking high temperature events of climate changes^{*}

Xiong Kai-Guo¹⁾ Yang Jie¹⁾ Wan Shi-Quan²⁾ Feng Guo-Lin¹⁾ Hu Jing-Guo^{1)†}

1) *College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*

2) *Yangzhou Meteorological Bureau, Yangzhou 225009, China*

(Received 11 April 2008; revised manuscript received 23 June 2008)

Abstract

Using Monte-Carlo method, the law of statistics of record-breaking high temperature events has been investigated based on the statistical characteristics of the temperature data registered in 40 years from 1961 to 2000 in Nanjing area, and the influence on the law of statistics of the global warming ($v = 0.006$ °C/a) during 20th century and Nanjing regional warming ($v = 0.017$ °C/a) in last 40 years has also been compared. Both the theoretic analysis and Monte Carlo simulation results show that the most likely probability of its occurrence intensity of the k 'th record-breaking high temperature events takes the form of linear increase with \sqrt{k} ($k = 1, 2, 3, \dots$), and the frequency of the occurrence of record-breaking high temperature events in a year tends to $1/(t+1)$, decreasing with time t , and in years when the average temperature is high, the probability of the occurrence of record-breaking high temperature events is also high, otherwise, the probability is low. The result also indicates that the velocity of global warming ($v = 0.006$ °C/a) in 20th century and the rate of regional warming ($v = 0.017$ °C/a) of Nanjing area in last 40 years are yet insufficient to alter meaningfully the intensity and frequency of record high temperature events. However, such velocity of warming will ultimately make the frequency of the occurrence of record-breaking high temperature events decrease gradually towards a constant, being approximately equal to the warming velocities. In addition, we have also studied the effect of variances and autocorrelation between temperatures in two successive days on record-breaking high temperature events, finding that the effect of different variance and weak autocorrelation on the intensity and probability of occurrence of the record-breaking high temperature events in a year can be neglected.

Keywords : record-breaking high temperature events, Monte Carlo simulation, global warming

PACC : 9260X

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB400503), the State Key Program of Science and Technology of China (Grant Nos. 2007BAC03A01, 2007BAC29B01) and the Open Research Foundation of Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration (Grant No. LCS-2006-04).

[†] Corresponding author. E-mail: jghu@yzu.edu.cn