

浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法

李娇1,2 任国玉2 战云健2,3

(1 辽宁省铁岭市气象局,铁岭 112000; 2 中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081; 3 中国气象科学研究院,中国气象局,北京 100081)

摘要:比较了极端气温事件研究中,绝对阈值和相对阈值指数的适用范围。归纳总结了近年来国内外在陆地极端气温事件研究中,相对阈值百分位选取、修订以及资料和计算方法的异同,评价了不同计算方法的优缺点和适用范围,讨论了参考期选取的影响。综合已有研究结论发现,采用不同的相对阈值计算方法检测出的极端气温事件长期趋势以及变异性特征差异极小。为了增强极端气温事件趋势变化分析的统计意义,以及对不同研究和不同区域分析结果进行比较,在资料选择和处理、阈值计算方法、气候基准期的确定等方面还需要进一步完善和规范。

关键词: 极端气温事件,绝对阈值,相对阈值,计算方法,气候参考期

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.006

Discussion on Threshold Determination in Defining Extreme Temperature Indices

Li Jiao^{1, 2}, Ren Guoyu², Zhan Yunjian^{2, 3}

(1 Tieling Meteorological Service, Liaoning Province, Tieling 112000 2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: In this paper, the application scope of fixed threshold and percentile threshold index is compared during extreme temperature events. Also, the determination of percentile thresholds for defining extreme temperature indices in studies of long-term change of extreme temperature events is briefly summarized, and the differences of data and calculation methods used in different studies are compared. The effect of reference-period selection on percentile threshold values and the results of analyses are discussed. It is clear from the overview that both advantages and disadvantages exist for different methods of percentile threshold determination. It is found that the long-term trends of extreme temperature events detected are almost the same when different methods of calculation are used. In order to enhance the significance of the statistical analysis of extreme events, trends and to compare the analyses among different studies and different regions, however, it is necessary to further improve the methods of data selection, data processing, threshold calculation methods and the usage of climate baseline period. It is advisable to consistently use the uniform methods for determining percentile thresholds.

Keywords: extreme temperature events, fixed threshold, percentile threshold, methods of calculation, climate baseline period

1 引言

气候变化伴随着极端天气、气候事件频率和强度的变化。了解全球和区域极端气候事件长期变化规律,是当前气候变化监测、检测和预估研究的重要方面,对于气候变化影响和适应性评价也有帮助。

极端气温事件是极端天气与气候事件中的一类, 其定义方法有很多^[1-3]。目前国际上主要采用极端气温

收稿日期: 2012年6月20日; 修回日期: 2013年5月15日

第一作者: 李娇 (1986—), Email: lijiaostu@163.com 通信作者: 任国玉, Email: guoyoo@cma.gov.cn

资助信息:国家科技支撑计划(2007BAC29B02);公益性

(气象) 行业科研专项 (201206024)

指数来研究极端气温事件。由于各国、各地区极端指数定义不一,研究方法不同,气候变化检测、监测和指数专家小组选取了16个极端气温指数(14个常用指数见表1),用于区域或全球极端气温事件变化的分析。这些极端气温指数是基于简单的数学统计,除去反映季节或年内最大、最小值的极值指数外,都是采用阈值指标来度量的。超过阈值的值被认为是极值,该事件称为极端事件。阈值又分为绝对阈值和相对阈值。

本文比较了绝对阈值和相对阈值指数的适用范围,重点讨论相对阈值的确定方法。不同研究者对相对阈值的选择、修订、样本选取、样本容量和计算方法不尽相同,导致计算的阈值有所差别;同时参考期

次「市州1000場(加11900									
序号	代码	名称	定义						
1	FD0	霜冻日数	日最低气温(TN)<0℃的全部日数	d					
2	SU25	夏季日数	日最高气温(TX) >25℃的全部日数	d					
3	ID0	结冰日数	日最高气温(TX)<0℃的全部日数	d					
4	TR20	炎热夜数	日最低气温(TN) >20℃的全部日数	d					
5	TXx	月极端最高气温	每月内日最高气温的最大值	$^{\circ}\!\mathbb{C}$					
6	TNx	月最低气温极大值	每月内日最低气温的最大值	$^{\circ}\!\mathbb{C}$					
7	TXn	月最高气温极小值	每月内日最高气温的最小值	$^{\circ}\!\mathbb{C}$					
8	TNn	月极端最低气温	每月内日最低气温的最小值	°C					
9	TN10p	冷夜日数	日最低气温(TN)<10%分位值的日数	d					
10	TX10p	冷昼日数	日最高气温(TX)<10%分位值的日数	d					
11	TN90p	暖夜日数	日最低气温(TN)>90%分位值的日数	d					
12	TX90p	暖昼日数	日最高气温(TN)>90%分位值的日数	d					
13	WSDI	热日持续指数	每年至少连续6天日最高气温(TX)>90%分位值的日数	d					
14	CSDI	冷日持续指数	每年至少连续6天日最低气温(TX)<10%分位值的日数	d					

表1 常用的极端气温指数

的选择不同也提出了相对阈值的代表性问题。本文主 要针对这些问题进行简要总结与讨论。

绝对阈值指数

绝对阈值指数是选取某个影响人类或生物的界 限气象要素值来定义的指数。例如:将日最高气温高 于35℃的日数作为高温日数(事件),将日最低气温 低于0℃的日数作为霜冻日数(事件)。绝对阈值指 数定义的极端事件较为直观, 计算简单。绝对阈值气 温指数由于基于固定值,在全球各地的适用性有所差 别,在估算线性趋势时要慎重。Zhou等[4]在中国大陆 绝对气温指数趋势变化分析时做如下处理, 认为在研 究时段的2/3年份未出现某项极端事件记录,则估算 该站该指数的线性趋势是不可信的。绝对阈值指数适 用于空间变率较小的地区, 当研究区域气候差异较大 时,通常采用相对阈值指数来表征。

3 相对阈值指数

3.1 相对阈值的定义方法

相对阈值指数是相对于当地气候态的百分位临界 值定义的,即从概率分布角度统计的小概率事件。这 种定义方法考虑了不同地区气候的差异性, 避免了极 端气温事件绝对强度随区域不同,难以用同一标准做 比较的问题[5]。百分位阈值是相对阈值的代表,它是 基于气候重现期的思想[6]。重现期反映了小概率事件 平均发生的时间间隔或年数, 重现期越长表明发生概 率越小,类似事件越是稀有。具体的重现期计算与选 取的百分位数值和样本容量有关。目前相对阈值的应 用较为广泛。

例如:冷(暖)日和冷(暖)夜指数是根据当 地日最高、最低气温分布中最冷和最暖的某一分位数 值,估计出一年或年内特定时段内极端气温事件发生 的频次。将某站参考气候期内同日的最高气温资料按 升序排列,得到该日第x(100-x)个百分位值,这 样依次得到366个值,将其作为逐日的极端高温事件 的上(下)阈值。当某日最高气温大于等于(小于等 于) 此阈值时,认为该日发生了暖(冷) 昼事件。暖(冷) 夜事件则以逐日最低气温为研究对象, 定义同上。

具体百分位数的选择取决于业务和研究需要。 一般来说, 气候变化研究中的极值不宜取的太极 端,典型重现期不能太长,这样可以确保每一年都 检测出足够数量的极端事件, 使得气候变化分析更 具统计意义。一般极端气温事件的百分位数值多取 为90%(10%)或95%(5%),也有人分别取99%和 1%[7,8],将此概率所对应的气温临界值定义为极端气 温事件的阈值。

3.2 相对阈值的修订

为了去除逐日阈值曲线中包含的天气尺度扰动, 得到光滑的逐日阈值曲线,需对其进行低通滤波处 理。黄丹青等^[9]认为滤去8d以下波动的逐日阈值修订 方法,能够更合理地检测极端气温事件;张雷等[10]参 考前人工作,将气温百分位阈值采用5日滑动平均处 理, 使得逐日阈值更加连续。不同的研究对极端气温 阈值的修订方法不同, 也有研究未对逐日阈值进行滤 波。总体来说,这对检测出的极端事件的频率及趋势 变化影响很小。

4 相对阈值研究中存在的问题

4.1 资料问题

对极端气温事件的研究主要采用逐日最高、最低 气温观测资料。例如,有研究以日最高(低)气温第 95(5)百分位定义的阈值,用来检测特定季节高温 热浪和寒潮事件[11]。也有研究[9,12]以日平均气温资料



来选取百分位阈值,分析相对高、低温事件。按照极 端事件的统计学定义, 第一种样本的概率分布双尾侧 分别对应日间和夜间的相对暖、冷事件; 日平均气温 反映逐日气温的平均状态,以日平均气温为研究对象 可以检测出全天平均状态下的暖、冷事件。因为最低 和最高气温在很多台站呈现出非对称性趋势,利用两 种资料检测出的极端气温事件频次趋势变化可能有所 差别。实际研究中,究竟采用哪种资料作为样本,要 依照研究目的和资料可获得性等进行选择。

黄丹青等^[9]以日平均气温资料为研究对象,确定 了以90%(10%)为标准的日、旬、月和季四种不同 时间尺度的极端高(低)温事件阈值。将相对阈值的 定义方法分别应用于逐日、逐旬、逐月和逐季尺度, 这样一年中分别得到365,36,12和4个阈值。不同时 间尺度的阈值随时间的分布形势基本一致, 但研究时 段内逐日超过高阈值日数的时间分布具有不同特点。 超过日尺度高阈值的日数分布均匀,为3~5d;超过 旬尺度高阈值的日数在0~14d: 而基于月阈值和季阈 值得到的日数取值范围更广。因此,基于逐日时长的 资料(样本)选取方式检测极端气温事件更为合理。

但是,逐日气温阈值的定义表明,这种方法可供 使用的样本量有限,只有30个。为了增加概率分布参 数估计的稳定性, Folland等[13]提出增加额外的数据来 扩充样本量的思想。增加的数据要相对独立、并能够 准确代表该目的概率分布特征。Jones等[14]完善了这 种做法,采用某日及前后间隔各5d的5个数据作为样 本(5SD)。最近国外的研究中多是采用连续5d的资 料,即以某日为中心,补充前后2d的资料(5CD)。 这样在标准气候期中,有5×30个样本来反映当日的 气候分布。国内研究多未详细说明是否增加以及如何 扩充样本量。

4.2 计算方法不同

百分位阈值的主要计算方法有三种: (1)针对 不同气候要素采用不同分布型的边缘值来确定阈值;

(2) 采用经验公式计算某个百分位值作为极端事件 的阈值; (3) 累积频率法(CDF)。第一种参数化 方法, 计算较为复杂, 同时参数估计和选取的概率分 布类型会增加阈值的不确定性。第二种经验公式方法 计算简单,不受错误值干扰,但是当数据结构不服从 正态分布时, 用经验公式法求得的阈值同样具有不确 定性。第三种累积频率法同样不需要了解气象要素的 具体统计模型,但是,当确定的组数较少时,求算阈 值的精确性较差。

不同分布型的边缘值方法。该方法要考虑气象

要素的概率分布特征,然而不同的气象要素概率分布 函数有所不同。在实际确定某一分布时,通常用极 大似然方法根据均值μ、方差2σ和变化系数来确定。 但参数估计和选取的概率分布类型会增加阈值的不确 定性。气温要素的概率分布一般都服从正态分布,但 大多数情况下,并非严格正态。特别是台站气温的月 (年) 平均值, 在一定程度上近似为正态或偏度很小 的铃型分布。总体来说, 月平均气温、平均最高和最 低气温等,是否基本符合正态分布,常因地区、季节 而略有差异[6]。

Folland等[13]提出计算百分位阈值的三个步骤。首 先计算逐目的30年气候平均值,然后逐日去除30年的 均值(即计算距平值)以消除年际变化;最后对逐日 的距平值选择一个合适的概率分布函数进行拟合来计 算某个百分位的阈值。

Jones等[14]进一步给出了估算阈值的详细步骤,介 绍了逐日基准气候值的算法。例如1月1日的平均气温 是30年基准气候期内1月1日气温的平均:在非闰年2 月29日的值由2月28日和3月1日平均算出。由于这366 个值不能产生一个光滑的日平均温度的年际序列,需 要进行平滑。文中采用11点的二项式滤波,滤去8.8d 以下的天气变化。同样以距平值拟合气象要素的概率 分布函数,来求算百分位值。

经验排序公式法。经验排序公式法根据顺序统计 量的累积概率与数据排序后的位置建立相关联系,估 计百分位值。经验公式方法计算简单,不受错误值干 扰, 近年来广泛用于极端事件百分位阈值的估计。

方法1: 设某个气温变量有n个值,将这n个记录 按升序排列,得到 x_1 , x_2 , …, x_n , 则百分位值为^[15]:

$$x_0 = (1 - a) x_i + a x_{i+1} \tag{1}$$

式中: j=[p(n+1)], a=p(n+1)-j。 j为气温记录按大小 升序排列后的序号; p为百分位值对应的概率; 方括 号表示数值取整; n为序列样本容量。

方法2: 如果某个气温变量有n个值,将这n个记 录按升序排列 x_1, x_2, \dots, x_n , 某个值小于或等于序号 为m对应的事件出现概率为[16]:

$$p = (m - 0.31)/(n + 0.38) \tag{2}$$

式中: $m \to x_m$ 的序号, $n \to x_m$ 有温变量记录的个数。 如果有30个值,那么第95个百分位值为排序后的x29 (p = 94.4) 和 x_{30} (p = 97.7) 的线性插值。

需要注意的是: 只有当分析的数据服从或近似服 从正态分布时,这两个经验公式才能得到较准确的结 果[17]。但对于不同地区和不同季节的气温序列,正态 分布存在不同程度的偏态性质, 因此采用以上两个公 式确定的百分位值会有一定偏差。周云等[17]以偏态分 布下的累积概率分布函数,通过理论推导和数值模拟 建立新的经验百分位值估计公式,丰富了非正态分布 条件下经验公式的选择。Folland等[18]则列举了满足其 他分布(潜在正态分布、Gamma分布和指数分布)的 经验公式。

累积频率法(CDF)。李庆祥等[19,20]和黄丹青 等[9, 21-23]根据气温要素的实际样本频率分布作为实际 概率分布的近似,确定样本频率分布的组数,求得变 量的频率分布后,利用累积频率分布确定百分位阈 值。例如将第90百分位与按分组后各组的累积频率值 相比较, 落入某两组的累积频率值时, 采用线性插值 求取第90百分位值。

该方法不需要了解气象要素的具体统计模型, 因此避免了任何分布假设。但是, 当确定的组数较少 时, 求算阈值的精确度较差。李庆祥[19]认为根据最 高气温的实际样本频率分布作为实际概率分布的近 似,在极端高温阈值的选择上较前两种经验公式效 果要好。

不同方法计算的阈值具有一定差别, 因而检测 出的极端气温事件的日数也有差别, 但对极端气温事 件频率和强度的趋势变化影响很小。Zhang等[24]采用 经验公式和高斯分布函数分别获得百分位阈值方法, 计算得到的极端气温日数比率(大于阈值日数与总日 数的比值) 差别很小。Bonsal等[16]认为采用经验公式 (方法2)和Gamma分布函数检测出的极端气温事件 频率长期趋势以及年际变率几乎相同。

4.3 参考期选择

由于各个国家、各个台站建站时间不同,为了更 好地比较不同站点、不同研究时段的极端气温事件, 国外文献多以世界气象组织规定的某一30年基准气候 期作为气候参照时段,在基准气候期内确定阈值作为 极端气温事件的标准,来评估极端气温事件频率和强 度相对于该时期的变化程度。在基准气候期选择的阈 值具有相对稳定性和可比性, 因此可以沿用到未来一 段时间,不同站点间也可以进行比较。也有文献在整 个研究时段选取阈值[13, 25, 26],用以研究整个时段内的 极端气温事件的总体变化情况。近几年,国内研究多 在基准气候期内选取阈值[27-30]来分析极端气温事件的 变化。

以整个研究时段作为参考期, 选取气温相对阈值 的一个主要问题是, 计算获得的台站极端气温指数的 气候平均值和平均重现期相同[8,12]。例如,文献[12] 给出的各个代表站极端低温指数T10%和极端高温指

数T90%的40年平均值是相同的,都为36d,平均重现 期都为10d(表2)。因为对于某一天,40年中日平 均气温低于T10%阈值的天数都是4d,全年按照365个 历日计算,极端低温日数共有1460d,40a平均每年 36.5d。在这种情况下, 进行区域之间极端气温事件的 气候学比较就很困难。

表2 各代表站极端低温、高温日数的多年 (1961-2000年)平均值

代表站名	乌鲁木齐	沈阳	兰州	成都	南京	福州
T10%/d	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)
T90%/d	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)	36 (10)

注:此表据文献[12]改制,括号内为平均重现期

在基准参考期计算相对阈值的方法也存在问题。 Zhang等[24]采用蒙特卡罗模拟试验发现: 基准气候期 内确定的极端气温百分位阈值指标,由于抽样的不确 定性, 阈值在基准气候期前后存在非均一性, 当许 多站点求算平均时,这种非均一性更加明显。因此 估计的极端事件频数在趋势分析时会产生错误结论。 Zhang等^[24]对该问题进行了处理,bootstrapping方法的 提出和应用减少或消除了有关极端气温指数趋势估计 中的可能偏差。

对于参考期的选择, Jones等[14]认为: 当两个时 期的平均气温相差不大时,选择不同的参考期对极 端气温事件的检测结果不是很敏感。他们分别采用 1931-1960年和1961-1990年作为参考期,得到的极 端冷、暖事件日数相差不大,因为这两个时段的平均 气温几乎没有差异。他指出,如果极端气温事件阈值 在一个变化的参考期内确定,则可能会得到有所不同 的结论。

气候状态的改变影响极端事件概率的情况有3种 可能情况:气候要素均值发生变化,气候要素变率 (标准差) 发生变化,变率和均值同时变化。气候状 态的不同变化对极端事件的影响是不同的。有研究表 明[31], 平均值的很小变化会导致极端事件频率发生 很大变化;标准差变化对极端事件频率的影响要大于 均值变化的影响。参考期的选择一般对极端气温阈值 本身和极端气温事件的气候学特征分析有影响,然而 在全球气候变暖的背景下,随着气候参考期(目前为 1981-2010年)不断调整,参考期的选择对于极端气 温事件的长期趋势变化的影响还有待于进一步研究。

结论与讨论

本文归纳总结了近年来国内外在陆地极端气温事 件研究中,绝对阈值和相对阈值指数的适用范围。重 点评述了相对(百分位)阈值选取、修订以及样本和



计算方法的异同,评价了不同计算方法的优缺点和适 用范围,讨论了参考期选取对分析结果的影响。

已有研究对相对阈值选择、修订、样本选取、样本容量和计算方法不尽相同,导致计算的极端气温事件阈值有所差别,检测出逐年的和各个年代极端气温事件的频数也略有不同,但总体来说,不同计算方法一般只对阈值本身和极端气温事件年际、年代际变化分析结果具有影响,而对于极端气温事件长期趋势研究结果几乎没有影响。对极端气温事件气候变化分析结果影响比较大的主要是资料选取和处理方法,需要今后给予足够重视。不同的参考期选取对于极端气温事件的长期趋势变化的影响还有待于进一步研究。

但是,为了增强极端气温事件趋势变化分析的统计意义,同时为了增加不同研究和不同区域分析结果之间的可比性,在极端气温事件阈值定义、计算方法和气候基准期选择等方面,确实需要进一步完善和规范。

参考文献

- [1] 马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系.地理学报, 2003, 58(增刊): 11-20.
- [2] Andrew F, David E, Bryan W. Climate variability and the frequency of extreme temperature events for nine sites across Canada: implications for power usage. Journal of Climate, 1999, 12(7): 2490-2502.
- [3] 章大全, 钱忠华. 利用中值检测方法研究近50年中国极端气温变化趋势. 物理学报, 2008, 57(7): 4634-4640.
- [4] Zhou Y Q, Ren G Y. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008. Climate Research, 2011, 50: 125-139.
- [5] 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究. 北京: 科学出版社, 2012: 3-6.
- [6] 丁裕国, 江志红. 极端气候研究方法导论. 北京: 气象出版社, 2009: 79-80, 54-55
- [7] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1301-1330.
- [8] KleinTank A M G, KÖnnen G P, Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. Journal of Climate, 2003, 16: 3665-3680.
- [9] 黄丹青, 钱永甫. 我国极端温度事件的定义和趋势分析.中山大学学报,2008,47(3):112-116.

- [10] 张雷,任国玉,刘江,等.城市化对北京气象站极端值气温指数趋势变化的影响.地球物理学报,2011,54(5):1150-1159.
- [11] 潘晓华, 翟盘茂. 气温极端值的选取与分析. 气象, 2002, 28(10): 28-31.
- [12] 刘学华,季致建,吴洪宝,等.中国近40年极端气温和降水的分布 特征及年代际差异.热带气象学报,2006,22(6):618-624.
- [13] Folland C, 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. Climatic Change, 1999, 42: 31-43.
- [14] Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. The use of indices to identify changes in climatic extremes. Climatic Change, 1999, 42: 131-149.
- [15] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, 2002, 19: 193-212.
- [16] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. Journal of Climate, 2001, 14: 1959-1976.
- [17] 周云, 侯威, 钱忠华, 等. 基于偏态分布的百分位估计公式的建立. 物理学报, 2011, 60(8): 089201-1-089201-9.
- [18] Folland C, Anderson C. Estimating changing extremes using empirical rangking methods. Journal of Climate, 2002, 15: 2954-2960.
- [19] 李庆祥, 黄嘉佑. 对我国极端高温事件阈值的探讨. 应用气象学报, 2011, 22(2): 138-144.
- [20] 李庆祥, 黄嘉佑. 北京极端低温事件的长期变化趋势. 高原气象, 2012, 31(4): 1145-1150.
- [21] 黄丹青, 钱永甫. 极端温度事件区域性的分析方法及其结果. 南京大学学报, 2009, 45(6): 715-723.
- [22] Huang D Q, Qian Y F, Zhu J. Trends of temperature extremes in China and their relationship with global temperature anomalies. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(4): 937-946.
- [23] 黄丹青, 钱永甫. Community Climate Model 3模拟夏季极端降水的初步分析.南京大学学报, 2007, 43(3): 238-248.
- [24] Zhang X, Gabriele H, Francis W Z, et al. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. Journal of Climate, 2005, 18: 1641-1651.
- [25] 游庆龙,康世昌,李潮流,等. 三江源地区1961—2005年气温极端事件变化. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 232-236.
- [26] 张宁, 孙照渤, 曾刚. 1955—2005年中国极端气温的变化. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 123-128.
- [27] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. 地理学报,2003,58(增刊): 001-010.
- [28] 周雅清,任国玉.中国大陆1956—2008年极端气温事件变化特征分析.气候与环境研究,2010,15(4):405-417.
- [29] 任玉玉,任国玉. 1960—2008年江西省极端降水变化趋势. 气候与环境研究, 2010, 15 (4): 462-469.
- [30] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 西北地区东部夏季极端降水量非均匀性特征. 应用气象学报, 2008, 19(1): 111-115.
- [31] 丁裕国, 申红艳, 江志红, 等. 气候概率分布理论及其应用新进展. 气象科技, 2009, 37(3): 257-262.