

任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 2014. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述. 气象, 40(7): 860-874.

极端天气气候事件监测与预测研究 进展及其应用综述*

任福民^{1,2,3} 高 辉² 刘绿柳² 宋艳玲² 高 荣² 王遵娅² 龚志强²
王永光² 陈丽娟² 李清泉² 柯宗建² 孙丞虎² 贾小龙²

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

3 江苏省气候变化协同创新中心, 南京 210093

提 要: 极端天气气候事件(简称“极端事件”)分为单站极端事件和区域性极端事件。本文回顾了极端事件的研究进展, 首先回顾了单站极端温度、极端降水和干旱事件的观测研究及相关指数, 进而对近年来不断增多的区域性极端事件研究做了简要回顾, 最后还回顾了极端事件气候预测研究进展。同时, 对国内外在极端事件气候监测和预测业务现状进行了初步总结, 并指出: 在极端事件气候监测方面中国的业务产品较丰富, 并率先开展了针对区域性极端事件的监测业务, 但在产品表现形式上缺乏统一组织, 特别是英文产品表现力严重不足; 在极端事件气候预测方面, 国家气候中心发展了两种方法: 一个是基于物理统计的 BP-CCA 和 OSR 的干旱预测方法, 另一个基于国家气候中心月动力延伸预报模式(DERF)的高温预测方法。最后, 对极端事件监测和预测业务发展及相关科学问题给出展望, 指出应根据极端事件的业务需求继续加强相关研究和业务能力建设。

关键词: 极端天气气候事件, 区域性极端事件, 研究进展, 气候监测, 气候预测, 业务应用

中图分类号: P466

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.07.010

Research Progresses on Extreme Weather and Climate Events and Their Operational Applications in Climate Monitoring and Prediction

REN Fumin^{1,2,3} GAO Hui² LIU Lülü² SONG Yanling² GAO Rong² WANG Zunya²
GONG Zhiqiang² WANG Yongguang² CHEN Lijuan² LI Qingquan² KE Zongjian²
SUN Chenghu² JIA Xiaolong²

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Climate Centre, Beijing 100081

3 Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing 210093

Abstract: Weather and climate extreme events can be divided into individual extreme events and regional extreme events. This paper reviews the progress of the studies on extreme events. Firstly, the paper pays attentions to observation study on temperature extremes, precipitation extremes, droughts and the related indices at individual station, and then reviews the study about the increasing regional extreme events in recent years and also reviews the study progress in predicting climatic extreme events. Meanwhile, a summary of the current climate monitoring and prediction operations of extreme events in China and in the world has been preliminarily carried out. The results show that the operational products in extreme event monitoring are very rich in China with a leading position in the field of regional extreme event monitoring, but

* 国家自然科学基金项目(41175075 和 41375056)及全球变化重大科学研究计划(2010CB950501 和 2012CB955901)共同资助
2013 年 9 月 6 日收稿; 2014 年 2 月 13 日收修定稿
第一作者: 任福民, 主要从事台风和极端事件研究. Email: fmren@163.com

in the form of products there is not a unified organization, especially in products in English. Regarding the climatic prediction of extreme events National Climate Centre has developed two methods: One is a BP-CCA and OSR drought prediction method based on physical statistics, and the other is high temperature prediction method based on the National Climate Centre Monthly Dynamic Extended Range Forecast (DERF) model. Finally, an outlook of climate monitoring and prediction operations of extreme events and related scientific issues is given, and a stress is made on continuing to strengthen the frontier researches and operational capacity-building of extreme events in the future.

Key words: extreme weather and climate events, regional extreme event, research progress, climate monitoring, climate prediction, operational application

引言

近年来,全球范围极端天气气候事件(以下简称“极端事件”)频发,给社会经济带来严重影响。2003年夏季欧洲热浪、2005年登陆美国的卡特里那飓风、2008年初中国南方冰冻雨雪灾害、2009/2010年中国西南大旱以及2010年6—8月席卷全球的多种事件并存——北半球高温热浪与南半球低温、肆虐南亚和中国的暴雨洪水及其次生滑坡泥石流灾害,引起了全球各界的极大关注。

极端天气气候事件是天气气候的状态严重偏离其平均态,在统计意义上属于不易发生的小概率事件。对于某一特定范围(单点或某一区域)和时间尺度(日、月或年等)的某种天气气候现象,当表征它的指标满足统计上的极端性标准——该指标值高于(或低于)其分布的上限(或下限)末端附近的某一阈值时,称之为极端天气气候事件(WMO,2010)。

如果从研究角度追溯科学界对极端事件关注的进程,大致可以集中在近30年的历史,其成果也主要集中在气候变化方面。20世纪80年代初,美国气象学家Karl等(1984)首先关注极端温度及日较差的研究。由于资料所限,接下来的几年主要围绕北美地区的相关问题进行研究(Karl et al,1986; Plantico et al,1990)。逐步加强的国际合作与交流使得科学界可以更广泛地开展这一领域的观测研究(Karl et al,1991;1993)。

这期间,有两个事件有力地推动了极端事件的研究。一是1988年IPCC的成立及1990年IPCC第一次气候变化评估报告的发表;二是1993年WCRP科学委员会在热带海洋和全球大气计划(TOGA)的成果的基础上提出了气候变率和可预报性研究(CLIVAR)计划。

随着研究的深入,各种极端天气气候事件的指数如雨后春笋般涌现。1997年6月3—6日,由CLIVAR、GCOS和WMO共同资助在美国北卡罗莱纳州阿什维尔市举办“气候极值的指数与指标研讨会”。为了进一步协调、规范、发展和推广这些指数,2003年成立了CCI/CLIVAR气候变化检测、监测和指数专家组ETCCDMI;2005年,海洋学与海洋气象学联合技术委员会JCOMM加入支持后更名为CCI/CLIVAR/JCOMM气候变化检测和指数专家组ETCCDI。ETCCDI的成立,不仅加快推动了极端事件的观测研究,而且加快了极端事件模拟与预估方面的研究步伐。

相对于极端事件的观测研究、模拟与预估,极端事件的气候预测问题受到关注的时间明显偏晚。与极端事件的中短期天气预报(Gallus et al,1999; Sobash et al,2011)相比,极端事件气候预测问题被关注的程度以及所达到的水平都还十分薄弱。在我国,该领域的研究始于最近几年,如刘绿柳等(2008)应用月动力预测模式、动力预测与统计降尺度相结合、物理统计相似三种不同的方法预测未来1~40d的旬、月极端高温发生概率及高温日数。

本文主要围绕极端事件研究中的观测研究和气候预测研究,以及相关的监测和预测技术进行回顾,并对监测和预测技术的业务应用现状给出分析,在此基础上试图对未来的可能发展趋势给出展望。

1 极端事件观测研究回顾

1.1 常用研究方法

1.1.1 极端事件及其重现期

根据所关注的极端事件,选择合适的要素或指数。假设该要素或指数的概率密度函数

(PDF) $f(x)$ 如图 1 所示, 则容易得到定义该极端事件的两个阈值 x_N 和 x_M 。当 $f(x) \leq x_N$ 或 $f(x) \geq x_M$ 时称之为极端事件, 其概率 $F(x_N) = P(X \leq x_N) = \int_{-\infty}^{x_N} f(x) dx$ 通常很小(如 1%、5% 等)。故极端事件也可简单理解为“小概率事件”。

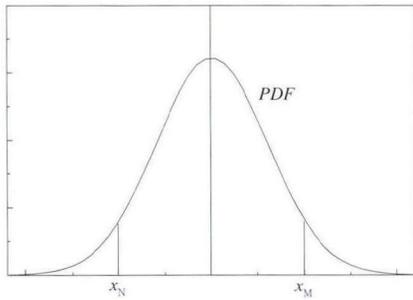


图 1 概率密度函数(PDF)示意图

Fig. 1 A schematic diagram for probability density function (PDF)

表征极端事件的另一个重要概念是重现期(return period)。极端事件重现期 T 是小概率 $F(x_N)$ 的倒数, 即 $T = \frac{1}{F(x_N)}$ 。它实质上是“小概率事件”的另一种表述方式。

1.1.2 经典极值分布

概率分布函数 $F(X) = P(X \leq x)$ 的选用十分关键。假设 X 为一随机变量(如某地日最高气温或日降水量), 令 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ 为 X 的一组随机样本, 假定按升序排列为 $x_1^* < x_2^* < x_3^* < \dots < x_m^*$ 。容易理解, 最大值 x_m^* 和最小值 x_1^* 分别满足

$$x_m^* = \max(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (1)$$

$$x_1^* = \min(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (2)$$

针对抽样序列 x_m^* 和 x_1^* , 如何得到其相应的概率分布函数 $F_m(x)$ 和 $F_1(x)$ 呢?

当抽样序列 x_m^* 和 x_1^* 的样本序列长度 $n \rightarrow \infty$ 时, 极值 x_m^* 和 x_1^* 通常有三种典型分布(丁裕国等, 2009):

Gumbel 分布:

$$F(x) = P\left(\frac{X-\theta}{\beta} < x\right) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\theta}{\beta}\right)\right] \quad (3)$$

$$-\infty < x < \infty$$

柯西型分布:

$$F(x) = P\left(\frac{X-\theta}{\beta} < x\right) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\theta}{\beta}\right)^{-\alpha}\right] \quad (4)$$

$$0 < x < \infty, \alpha > 0$$

Weibull 分布:

$$F(x) = P\left(\frac{X-\theta}{\beta} < x\right) = \exp\left[-\left(-\frac{x-\theta}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (5)$$

$$x \leq 0$$

其中, 参数 θ 为门限值, β 为尺度参数。

1.1.3 两类典型抽样

针对前述抽样, 给出两类典型抽样及其广义极值分布。

第一类为年极值抽样, 亦称 BM(Block Maxima) 抽样或 AM(Annual Maxima) 抽样, 即每年抽取一个极值。此类抽样中前面三种分布型, 即式(3)~(5)可有一个通式:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - k \frac{x-\theta}{\beta}\right]^{-\frac{1}{k}}\right\} \quad (6)$$

式中, k 为线型参数。

第二类为超门限峰值抽样, 亦称 POT(Peaks Over Threshold) 抽样, 即将超过某一阈值的所有样本入选抽样序列。此类抽样的概率分布函数符合广义帕雷托分布(Generalized Pareto Distribution, GPD):

$$F(x) = 1 - \left[1 - k \frac{x-\theta}{\beta}\right]^{-\frac{1}{k}} \quad (7)$$

$$k \neq 0, \theta \leq x \leq \frac{\beta}{k}$$

1.2 极端温度和极端降水

1.2.1 极端温度

继前面提到有关极端温度的研究之后, Horton (1995)、Jones 等(1999)和 Easterling 等(1997)对全球分析后进一步指出, 日最高(低)温度的不同变化趋势使得平均温度上升, 并导致了温度日较差减小。

此后, 出现了大量针对全球不同区域极端温度变化的研究。这些研究从不同区域和多种角度对区域性极端温度的变化给出了更为精细的变化特征和区域性差异。在中国较早的研究有翟盘茂等(1997)、任福民等(1998)、Zhai 等(1999)和严中伟等(2000), 这些研究进一步证实了中国区域极端温度变化中存在的不对称变化特征; 后来的一些研究(谢庄等, 2007; 杨萍等, 2010a; 李庆祥等, 2011; 白莹莹等, 2010; 龚志强等, 2009; 郑祚芳等, 2013)进一步加深了对极端温度季节特征和阈值确定的认识。1961 年以来澳大利亚的极端暖昼和极端暖夜增多, 而极端冷昼和极端冷夜减少(Plummer et al, 1999)。在北欧和中欧, 20 世纪与极端温度的不对称变化相

关联,日较差和霜冻日数均呈现明显的下降趋势(Heino et al,1999)。

由于在极端事件或气候极端值上缺乏统一的定义,加之缺乏覆盖面广足够长序列的资料,这期间的研究主要是区域性或局限于某一国家内的。在ETCCDI的框架下,Frich等(2002)率先分析了全球极端事件在最近50年的变化;Alexander等(2006)则利用统一的指标和更丰富的资料进一步分析指出全球范围极端温度变化中存在的不对称变化特征。

1.2.2 极端降水

对极端降水的关注相对极端温度来得晚。Iwashima等(1993)首先关注日本极端降水的研究,指出日大雨日数表现出明显增多。Karl等(1998)指出1910年以来,美国日极端降水事件明显增多。Suppiah等(1998)分析澳大利亚的极端降水事件,指出无论对于夏半年还是冬半年,大雨均主要表现为上升趋势。Tarhule等(1998)对尼日利亚极端降水的分析表明,撒哈拉地区近期降水的变化主要是由于8—9月期间高强度雨日的减少所引起的。Kunkel等(1999a)分析了北美短期(1~7 d)极端降水事件,表明存在明显的年代际变化。Mason等(1999)分析指出,南非约70%范围的降水极值事件强度在1931—1960年和1961—1990年期间表现出显著增多的趋势。Roy等(2004)指出,印度1910—2000年极端降水事件频数总体上呈上升趋势,其中最大上升趋势出现在印度西北部至南部,而恒河平原东部则表现为下降趋势。Goswami等(2006)对印度季风降水的分析表明,1951—2000年日极端降水事件的频数和量级显著上升。1961—1995年,英国日降水量的强度分布发生了明显改变(Osborn et al,2000),平均而言冬季强度变得更强而夏季强度减弱。

在中国,Zhai等(1999)分析表明,中国年降水量、1和3 d最大降水量以及不同级别的强降水总量没有发现明显的极端化倾向,但中国降水极值变化反映出明显的区域性特点;另一些专家从不同季节和区域分布的角度分析了中国区域各种类型极端降水事件的变化特征(刘小宁,1999;翟盘茂等,2007;宁亮等,2008;杨金虎等,2008a;2008b;闵岫等,2008;陈海山等,2009;崔方等,2009;陈波等,2010;王志福等,2009;李聪等,2012);另外,大城市极端强降水事件(王萃萃等,2009)和不同强度降水事件(王小玲等,2008)的变化问题也受到了关注。

针对全球的研究,Frich等(2002)指出1946—1999年全球极端降水显著的增多趋势主要表现在湿期的总量和暴雨日数上。Alexander等(2006)分析指出,全球降水普遍表现为显著增多的趋势,在整个20世纪总体表现为变湿的趋势,但这些变化在空间上的一致性较温度而言要弱。

1.3 干旱

干旱是一种常见而复杂的现象,它可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱(American Meteorological Society,1997)。干旱的观测研究成果丰硕,但主要集中在近十余年期间特别是气象干旱方面(侯威等,2012;杨小利,2007;邹旭恺等,2005)。从干旱指数应用的角度,可对这些研究大致总结为如下几类:

在帕默尔干旱指数(PDSI)应用研究方面,Dai等(1998)分析了1900—1995年全球干旱变化,发现在许多陆地重旱和过湿事件存在明显的多年至年代变化。20世纪美国干旱表现出很强的变率,其中30和50年代的干旱事件几乎决定了所有长期趋势(Karl et al,1996;Kunkel et al,1999b)。对匈牙利的干旱呈现增加趋势,而湿期减少(Szinell et al,1998);Zou等(2005)研究显示,尽管对全国而言干旱面积不存在明显的升降趋势,但华北地区干旱面积显著增加;李新周等(2006)分析表明中国北方干旱化具有显著的年际、年代际特征;Brázdil等(2009)分析指出1881—2006年捷克干旱事件的持续时间趋于更长且严重程度趋于加重。

利用标准降水指数(SPI),Bonaccorso等(2003)指出西西里岛1926—1996年表现出干旱化的变化趋势;Wang等(2003)分析了中国北方不同级别干旱的变化,指出1950—2000年中国北方主要农业区不同级别干旱均表现出范围扩大的趋势;Vicente-Serrano(2006)指出伊比利亚半岛干旱的空间分布存在很大的复杂性而且干旱分类中也存在较大的不确定性;Khan等(2008)分析指出澳大利亚墨累达令盆地历史上曾出现过比2000—2006年持续干旱更严重的情况;Kasei等(2010)研究了西非沃尔特河流域1961—2005年干旱的强度、面积以及频率的演变特征。

采用降水量或降水距平百分率,廉毅等(2005)分析指出,1961—2000年中国东部气候过渡带主要表现为气候变化干旱化特征;黄荣辉等(2006)指出

从 1976 年之后迄今我国华北地区发生持续干旱。

在干湿指标应用研究方面,马柱国(2005)分析表明我国北方近 100 年干湿指标的变化趋势与降水的变化趋势并不完全一致,在有些地区甚至出现相反的趋势。马柱国等(2007)对全球的分析表明,20 世纪下半叶全球干湿变化趋势具有明显的区域差异,非洲大陆、欧亚大陆、澳洲大陆和南美大陆近 52 年主要以干旱化趋势为主,尤以非洲大陆和欧亚大陆最为剧烈。Qian 等(2003)分析显示,中国东部干湿变化在 20 世纪的最后 20 年主要表现为北方干旱而南方湿润的状态。

在其他指标的应用研究方面,Shiau 等(2001)指出描述干旱特征的更好方法是探索干旱事件的持续时间和严重程度的联合指标;基于同时考虑强度和空间分布,Tran 等(2002)提出了空间干燥度指数并分析了保加利亚的干旱变化,发现干旱可以发生在任何季节并影响到该国的任何地区。邹旭恺等(2008)分析指出近 50 年干旱化存在较大的区域性差异,其中东北和华北地区干旱化趋势尤为显著;Woodhouse 等(1998)对美国过去 2000 年的分析发现,美国中部 20 世纪 30 年代的大干旱 1~2 个世纪才会发生一次。

1.4 极端事件的指数

在极端温度和极端降水的指数研究方面,Folland 等(1999)针对 1997 年在美国举行的“气候极值的指数与指标研讨会”中涉及的温度指标做了总结,给出了一系列重要指数。随后,年总降水量和年总降雪量的变化问题开始被重视,进而 1 日或多日强降水以及不同级别的强降水事件也逐步受到关注。

为了表征极端气候事件的综合表现,Karl 等(1996)针对美国问题提出了气候极端指数(Climate Extremes Index,CEI),即定义了一个由传统的气候极端指标组合而成的新指数。由于在全球大多数地区气象资料样本长度短,限制了很多统计量对于极端性的代表性,于是科学家们开始引入新的定义,即利用超过(或低于)排序序列的某一百分位的多个数值来表征极端性;百分位极值概念的提出,有效解决了因资料不足所带来的极端性的代表性问题,同时也给出了极端性判别的季节性指标。

21 世纪初,ETCCDI 总结了极端天气气候指数研究结果,选择了 27 个核心指数作为推荐指标

(表 1)。如表 1 所示,这些指数集中在气温极值(1~16)和降水极值(17~27)这两类要素上。ETCCDI 还建立了一个专门的网站 <http://cccma.seos.uvic.ca/etccdi/index.shtml>,这有力地促进了这些指数在很短的时间内在研究和业务应用领域在全球得到广泛使用。最近,翟盘茂(2011)和翟盘茂等(2012)对这些指数进行了分类介绍,主要划分为极值统计量、绝对阈值、相对阈值及其他等几类指数。

就干旱指数的研究,可以追溯到较极端温度和极端降水更早的年代。在气象干旱方面,最简单的干旱指数就是不同时间尺度的降水量距平百分率;另一个指标是土壤相对湿度;1948 年由 Penman(1948)提出了干燥度指数;Palmer(1965)提出帕尔默干旱指数 PDSI;后来 McKee 等(1993)发展了单一依赖降水量的标准化降水指数 SPI;后来在业务应用中中国国家气候中心提出了综合气象干旱指数 CI(张强等,2006)。表 2 给出了上述六种常用的气象干旱指数。如果从指数算法中是否仅包含降水一个要素的角度,这些气象干旱指数可以划分为两类:多因素指数和单因素指数。多因素气象干旱指数包括帕默尔指数、干燥度指数和气象综合干旱指数等。单因素气象干旱指数包括降水距平百分率指数和标准化降水指数等。

干旱指数在研究和业务应用需求的推动下不断得到发展,尤其在单因素指数方面。Byun 等(1999)提出了有效降水(effective precipitation)的概念,认为可以利用日降水量随时间衰减的累积函数来表征前期降水对于当前旱涝的影响。之后 Lu(2009)提出用逐日加权平均降水量(WAP)来表征当前的旱涝状况,WAP 实际上就是一种有效降水指数,它能在逐日尺度上反映一个地区的干湿状况;但由于它保留了降水量的概念,其自身存在区域性和季节性差异的先天不足,即不同气候区域和不同季节之间无法使用统一的标准来比较旱涝程度,这使得它的应用受到极大制约。基于 WAP 指数,赵海燕等(2011)发展了一个更适合在中国西南地区实时干旱监测业务的指数;赵一磊等(2013)则发展了改进的 WAP 指数,该指数去除了区域性和季节性差异,并表现出良好的性能。基于标准化降水指数 SPI,Vicente-Serrano 等(2009)发展了标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)。该指数通过引入潜在蒸散发项,包含多时间尺度特征并能够反映温度异常对干旱的贡

表1 27个CCI/CLIVAR/JCOMM气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)推荐指数

Table 1 The 27 indices recommended by CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

序号	名称		定义
	简称	全称	
1	FD	霜冻日数(Number of frost days)	日最低气温 $TN < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数
2	SU	夏季日数(Number of summer days)	日最高气温 $TX > 25^{\circ}\text{C}$ 的日数
3	ID	冰封日数(Number of icing days)	日最高气温 $TX < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数
4	TR	热夜日数(Number of tropical nights)	日最低气温 $TN > 20^{\circ}\text{C}$ 的日数
5	GSL	生长期(Growing season length)	一年中从至少连续6 d日平均温度 $TG > 5^{\circ}\text{C}$ 起算至第一个连续6 d(7月以后,南半球为1月以后)日平均温度 $TG < 5^{\circ}\text{C}$ 之间的日数
6	TXx	月最高温度极大值(Monthly maximum value of daily maximum temperature)	每月中日最高气温的最大值
7	TNx	月最低温度极大值(Monthly maximum value of daily minimum temperature)	每月中日最低气温的最大值
8	TXn	月最高温度极小值(Monthly minimum value of daily maximum temperature)	每月中日最高气温的最小值
9	TNn	月最低温度极小值(Monthly minimum value of daily minimum temperature)	每月中日最低气温的最小值
10	TN10p	冷夜日数(Percentage of days when $TN < 10\text{th percentile}$)	日最低气温 $< 10\%$ 分位值的日数
11	TX10p	冷昼日数(Percentage of days when $TX < 10\text{th percentile}$)	日最高气温 $< 10\%$ 分位值的日数
12	TN90p	暖夜日数(Percentage of days when $TN > 90\text{th percentile}$)	日最低气温 $> 90\%$ 分位值的日数
13	TX90p	暖昼日数(Percentage of days when $TX > 90\text{th percentile}$)	日最高气温 $> 90\%$ 分位值的日数
14	WSDI	异常暖昼持续指数(Warm spell duration index)	每年至少连续6 d日最高气温 $> 90\%$ 分位值的累计日数
15	CSDI	异常冷昼持续指数(Cold spell duration index)	每年至少连续6 d日最高气温 $> 10\%$ 分位值的累计日数
16	DTR	日较差(Daily temperature range)	日最高气温与日最低气温之差的月平均值
17	Rx1day	1日最大降水量(Monthly maximum 1-day precipitation)	每月最大日降水量
18	Rx5day	5日最大降水量(Monthly maximum consecutive 5-day precipitation)	每月连续5 d最大降水量
19	SDII	降水强度(Simple precipitation intensity index)	湿日(日降水量 $\geq 1.0\text{mm}$)降水总量与湿日日数之比
20	R10mm	中雨日数(Annual count of days when $\text{PRCP} \geq 10\text{mm}$)	日降水量 $\geq 10\text{mm}$ 的日数
21	R20mm	大雨日数(Annual count of days when $\text{PRCP} \geq 20\text{mm}$)	日降水量 $\geq 20\text{mm}$ 的日数
22	Rnnmm	日降水大于某一特定强度的日数(Annual count of days when $\text{PRCP} \geq nn\text{mm}$)	日降水量 $\geq nn\text{mm}$ 的日数
23	CDD	持续干期(Maximum length of dry spell)	日降水量 $< 1\text{mm}$ 的最大持续日数
24	CWD	持续湿期(Maximum length of wet spell)	日降水量 $\geq 1\text{mm}$ 的最大持续日数
25	R95pTOT	强降水总量(Annual total PRCP when $\text{RR} > 95\text{p}$)	日降水量 $> 95\%$ 分位值的年累积降水量
26	R99pTOT	特强降水总量(Annual total PRCP when $\text{RR} > 99\text{p}$)	日降水量 $> 99\%$ 分位值的年累积降水量
27	PRCPTOT	湿日降水总量(Annual total precipitation in wet days)	日降水量 $> 1\text{mm}$ 的年累积降水量

表 2 常用气象干旱指数表
Table 2 Common meteorological drought indices

序号	名称		定义
	缩写	全称	
1	Pa	降水量距平百分率(Precipitation anomaly percentage)	降水量距平百分率是表征某时段降水量较常年值偏多或偏少的指标
2	Rsr	土壤相对湿度(Relative soil moisture)	土壤绝对湿度值占田间持水量的百分率
3	AI	干燥度指数(Aridity index)	干燥度指数是表征一个地区干湿程度的指数,亦称湿润指数
4	PDSI	帕尔默干旱指数(The Palmer Drought Severity Index)	帕尔默干旱指数是表征在一段时间内,某地区实际水分供应持续地少于气候适宜水分供应的水分亏缺指数
5	SPI	标准化降水指数(Standardized Precipitation Index)	标准化降水指数是表征某时段内降水量出现概率大小的指数
6	CI	综合气象干旱指数(Composite index)	利用近期月、季等多尺度的标准化降水指数,以及改进的湿润指数进行综合而成的综合性指数

献,即从单因素指数发展变为了多因素指数。

1.5 区域性极端事件

进一步分析表 1 和表 2 的指数和指标,不难发现,这些指数和指标都是只针对单一台站(单点)的极值问题。众所周知,极端天气气候事件,如 2003 年夏季欧洲热浪和 2009/2010 年中国西南大旱通常都是区域性现象,即具有一定影响范围和持续时间的区域性极端事件。

在过去约 10 年时间内,区域性极端事件的研究这一领域正受到越来越多的关注。概括来说,这些研究大致可划分为三个阶段:极端性的时空规律分析、时间序列过程性事件的识别和区域性极端事件的识别。

1.5.1 极端性的时空规律分析

在这一阶段,研究主要是针对台站(单点)极值的时空规律分析来进行。重点是分析极值的时空相关特征,方法上主要借助于相关分析和经验正交函数 EOF)等分析工具。

Oladipo(1986)利用 1975—1978 年生长季(4—9 月)400 多站逐月降水资料和相关性分析技术研究了北美内陆平原干旱的空间分布型并得到四种差异明显的干旱型。Dai 等(1998)采用区域平均的帕尔默干旱指数(PDSI)分析了 1900—1995 年全球多个地区的干旱与多雨期的变化,得到一些关于年际和年代际变化的明确结论;之后,Dai 等(2004)利用延长的更丰富的资料做了更深入的研究,进一步印证了前面的发现。

在中国,黄丹青等(2009)利用阈值统计方法分析单站高温和低温事件的累积频率,给出了我国东部地区极端高温和极端低温事件的区域性特征。闵

岫等(2008)利用中国 542 个台站 1960—2003 年逐日降水资料,分析了中国极端降水事件的区域性和持续性特征。封国林等(2009)分析了 1957—2004 年中国 194 个台站日最高气温资料中出现极值的自相关特征,指出高温极值在时间演变上存在明显的长期持续性特征(自相关或长程相关性)。龚志强等(2009)采用 NCEP/NCAR 1948—2005 年再分析日平均温度资料研究了温度极端事件的区域特征。杨萍等(2010b)采用空间点过程理论分析了极端事件的区域群发性问题。

1.5.2 时间序列过程性事件的识别

这类研究已经注意到极端事件是过程性的,具有起止时间和持续时间。研究工作主要是针对单点或区域平均时间序列中的过程(或事件)识别来进行,内容涉及不同时间尺度(月、年或日等)的时间序列,并给出了时间序列中不同过程(或事件)的判别标准。

Biondi 等(2002)提出用一个数学模型模拟了时间序列的过程(事件),之后 Biondi 等(2005)对该模型进行了改进,并进一步更新模型(Biondi et al, 2008)用于研究时间序列中的事件,将量值高于或低于某一参考值(阈值)的完整而连续的过程定义为事件。如图 2 所示,这样的事件可以由持续时间、累积强度(幅度)和峰值三个变量来进行定量描述。

厄尔尼诺和拉尼娜事件的判别就是时间序列过程性事件判别的典型事例。许多研究(王绍武, 1985;臧恒范等,1991;王世平,1991;Wolter et al, 1993;Trenberth,1997;Trenberth et al,2001;李晓燕等,2007;Hanley et al,2003;Cane,2005;Ashok et al,2007;Kao et al,2009;Yu et al,2011)都关注了厄尔尼诺和拉尼娜事件的判别。譬如,根据逐月

NINO 3 指数逐月时间序列及厄尔尼诺事件的判别标准(NINO 3 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ 至少持续 6 个月),则容易得到有资料以来的所有厄尔尼诺事件,每次厄尔尼诺事件均包含持续时间、累积强度和峰值强度等特征量。

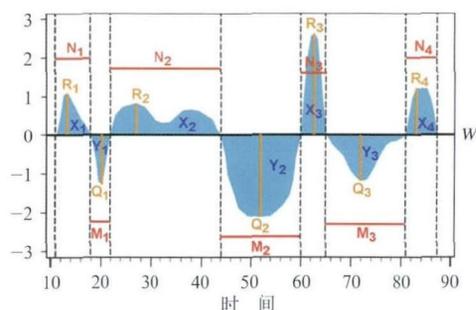


图 2 时间序列过程(事件)演变图

[引自文献 Biondi 等(2008)]

[图中显示了 7 个事件的持续时间(N_i 和 M_i , 虚线间距红色线段)、大小幅度(X_i 和 Y_i , 蓝色阴影区)和峰值(R_i 和 Q_i , 黄色垂线)以及不随时间变化的参考值 w (水平实线)]

Fig. 2 Time-series plot showing the durations [(N_i and M_i ; dashed vertical lines and red horizontal segments), magnitude (X_i and Y_i ; solid blue areas), and peaks (R_i and Q_i ; yellow vertical lines) of 7 episodes in a fictitious record with time-invariant reference level w (solid black horizontal line)]

1.5.3 区域性极端事件的识别

这类研究已经意识到极端事件同时具有区域性和过程性特征,即是具有一定影响范围和持续时间的区域性事件。研究工作针对不同区域性事件的区域性和过程性提出了不同的判别方法和标准。

Dracup 等(1980)研究了干旱事件的定义,指出干旱事件应该包含持续时间、幅度(平均水分亏缺)和严重程度(累积水分亏缺)等特征量。Tang 等(2006)基于逐日资料对 1951—2004 年夏季(4—8 月)中国的持续性暴雨事件做了分析,并提出了从强度、范围和持续时间三个角度定义持续性强降水事件的标准。Andreadis 等(2005)基于月尺度土壤湿度资料研究了 20 世纪美国的区域性干旱事件,并提出了同时从空间和时间两个角度定义区域性干旱事件的标准;Sheffield 等(2009)沿用 Andreadis 等(2005)的方法,研究了 1950—2000 年全球各大洲的区域性干旱事件。

北京大学研究小组在区域性极端事件研究方面

做了较全面的研究。Qian 等(2011)研究了 1960—2009 年中国区域性干旱事件,Ding 等(2011)分析了 1960—2008 年中国区域性高温事件的时空变化特征,Zhang 等(2011)识别了近几年中国区域性低温事件。这些研究工作在区域性极端事件的判别方法及指标上具有如下相同的技术步骤:(1)根据时间序列过程识别方法得到所有单站的过程性事件;(2)给出邻站定义;(3)定义区域性事件:若在同一时间段内有相邻 5 站同时发生同一类型的过程性事件,则定义为一次区域性事件;(4)区域性事件的综合强度指数(CSI): $CSI = F_1 + F_2 + F_3$,其中 F_1 、 F_2 和 F_3 分别是事件持续时间、影响范围和极值强度的标准化指数。

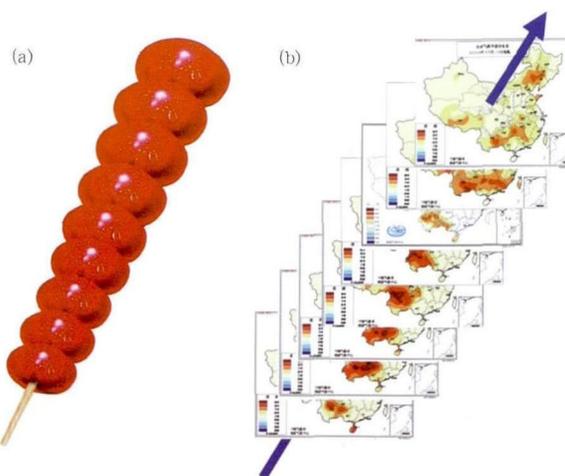


图 3 区域性事件演变过程示意图[Ren 等(2012)]

(a)“糖葫芦串”模型,(b)逐日影响范围串(该过程为 2009/2010 年西南干旱事件)

Fig. 3 A sketch of the variation of regional event: the model of (a) a string of candied fruits and (b) a string of daily impacted areas that represents the October 2009 Southwest China drought

针对区域性极端事件,国家气候中心研究小组开展了一系列研究。任福民等(2010)和 Ren 等(2012)提出了一种区域性极端事件客观识别法(OITREE)。该方法提出“糖葫芦串”模型,并借助该模型思路,将逐日异常带合理地“串”成一串从而构成一个完整的区域性事件(图 3);OITREE 包括 5 个技术步骤:单点(站)逐日指数选定、逐日自然异常带分离、事件的时间连续性识别、区域性事件指

标体系和区域性事件的极端性判别。OITREE 是一种可应用于识别多种区域性极端事件的通用方法,可以根据所关心的问题通过选择合适的单站指数以及设定不同的参数来实现对不同区域性极端事件的识别。目前该方法已经在中国区域性气象干旱事件、强降水事件、高温事件和低温事件等方面得到应用(Ren et al, 2012; 龚志强等, 2012; 王晓娟等, 2012; 赵振国, 1999)。

2 极端事件气候预测研究回顾

传统的气候预测研究主要对象是月和季节的平均气候状况,通过对平均气候异常的预测,可以对极端事件的发生有一定程度的展望。这方面的研究国内有丰富的积累(赵振国, 1999; 陈兴芳等, 2000; 李维京等, 2005)。

本世纪初以来,陆续出现了一些专门针对极端事件的气候预测研究。归纳起来,这些研究可分为统计方法、动力方法和动力统计相结合方法三个方面:

(1) 统计方法即利用历史观测数据,应用各种统计方法建立预报量与预报因子之间的转换函数,预测诸如强降水日数、高温日数、低温日数等极端气候要素。转换函数包括线性回归、非线性回归、人工神经网络(ANN)、典型相关分析(CCA)或主成分分析(PCA)等。预报因子多采用大尺度环流因子或环流特征量。如中国一些学者或业务人员提出的应用均生函数—最优子集回归方法(张尚印等, 2004; 2005; 张德宽等, 2006)、简单回归模型(董蕙青等, 2000)、混合回归模型(周后福等, 2005)对我国部分城市或地区夏季高温日数的预测,应用物理量相似合成方法(刘绿柳等, 2008)预测中国月高温日数分布;应用热带大气低频振荡(MJO)的实时多变量指标预测澳大利亚极端降水概率(Wheeler et al, 2004)。但统计方法所建立的预报对象和预报因子之间多是统计关系,动力学意义不足,往往历史拟合率较高,但预报准确率有限且不稳定。在使用时最好结合预报经验并结合相关大尺度环流影响因子的分布形态与特征给出最终预测意见,如一些地区的极端气候与气候模态的相关,如厄尔尼诺—南方涛动现象(ENSO)、北大西洋涛动(NAO)、北太平洋涛动(NPO)和 MJO(Becker et al, 2013)。柯宗建等(2010)以前期 500 hPa 高度场为预报因子,结合最

优子集回归(OSR)方法建立了对秋季中国区域干旱日数的回归预报模型,达到了良好的预测效果。

(2) 动力方法即首先利用大气模式或海气耦合模式的回报序列,统计所预报的极端气候变量阈值,然后根据气候模式数值模拟结果,预报极端气候的强度、发生概率或频次。如美国国际气候研究所(IRI)(Barnston et al, 2011)应用两步法(two-tiered)多模式动力预测系统预测季节极端气温与降水概率,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)应用多模式集合预测制作发布不同地区极端气温、降水和海平面气压概率分布图,国家气候中心应用月动力气候模式(DERF)预测的旬、月 10% 极端高温落区与高温日数概率预测产品(刘绿柳等, 2008)。随着气候模式的不断发展完善,其预测水平将逐步得到提高,预测产品不断丰富。

(3) 动力统计相结合的方法,即采用模式输出统计预报的释用方法,近年统计方法进一步发展,如与随机天气发生器(Statistic Weather Generator, WG)结合进行极端气候变量的预测。国家气候中心采用月动力延伸气候预测模式(DERF)与最优子集回归(OSR)—WG 综合方法预测旬、月 35℃(和 38℃)高温日数、暖昼日数、冷昼日数、暖夜日数、冷夜日数、极端强降水日数(刘绿柳等, 2008; 2011)。该方法既能够充分利用预测技巧较高的模式输出信息,又兼具统计降尺度的优点,可以预测模式不直接输出的气候变量或者提高模式可直接输出但是技巧较低的要害预报。

3 极端事件的监测与预测业务现状

3.1 气候监测业务

3.1.1 国外

国外极端事件监测业务以美国和澳大利亚为代表,其网页产品小结如下:

美国的产品覆盖全球,产品主要来自三家单位。国家气候资料中心(NCDC)极端事件网页(<http://www.ncdc.noaa.gov/extremes/>)产品丰富,包括北美气候极值监测、美国不同时间尺度极值记录、美国极端气候事件记录、国家气候极值委员会及其活动和州气候极值委员会及其活动。美国气候预测中心(CPC)(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)产品中有关极端事件的有美国及北美的干旱监测、全球台

站降水和气温逐日变化监测。美国亚利桑那州立大学与WMO合作建立了天气气候极值网站(<http://wmo.asu.edu/>),内容涵盖全球天气气候极值、半球天气气候极值、各大洲天气气候极值、世界龙卷风极值和世界热带气旋极值。

澳大利亚的产品主要是针对澳大利亚本国的,其天气气候极值监测系统网页(<http://www.bom.gov.au/climate/extremes/>)产品包括不同时间尺度极值表、气候极值(超阈值、重现期和长期趋势)区域分布图、月和年极值时间演变图以及气候极值记录图表。此外,还有针对某一极端事件的特殊气候报告网页(<http://www.bom.gov.au/climate/current/special-statements.shtml>)。

3.1.2 中国

国内极端事件监测业务在近10年得到了快速发展。

自20世纪90年代末建立气象干旱监测业务以来,于2001—2010年中后期干旱监测范围从全国拓展至全球,并实现了产品上网(<http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/influ/dust.php?dateStr=2012-12#calendar>)。

2004—2006年建立了以全球极端气温和极端降水为主的实时极端事件滚动监测业务,实现对包括多时间尺度(逐日、近10d、近20d、近30d和近90d)全球极端高温、全球极端低温、全球极端降水的实时滚动监测,产品及时展示在国家气候中心网站(<http://ncc.cma.gov.cn/cn/>),2010—2011年对全球资料进行了升级改进,使得产品所真正覆盖的范围进一步扩大(如较此前增加了印度等地区)。

对于中国和全球主要天气气候事件(极端事件)个例的总结分析业务则具有更长的历史,产品主要分别记录在《气候影响评价》、《气候系统监测公报》中。

从服务需求出发,自2008年国家气候中心开始研发具有相对独立性且适合于开展中国极端事件分析服务的“极端天气气候事件监测业务系统平台”,2009年建成1.0版本,历经几年发展于2012年改进为2.1版本。

以上业务系统和产品都是针对单站的极端事件分析。极端事件通常属于区域性事件,即具有一定影响范围和持续时间。基于“糖葫芦串”区域性极端事件客观识别法(OITREE)(Ren et al, 2012),2011—2012年国家气候中心建立了区域性极端事

件监测业务系统,可以对中国四种区域性极端事件进行实时监测和历史事件进行查询,其产品网页为(<http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/cn/monitoring.htm#>)。

世界气象组织(WMO)关注到了中国在极端事件监测领域的发展,于2010年2月2日WMO正式宣布作为区域气候中心的北京气候中心(BCC,即国家气候中心)又增添了一项新的任务:WMO《亚洲极端天气气候事件监测评估中心》在BCC成立。该中心的英文全称为Center for Monitoring and Assessment of Extreme Weather and Climate Events in Asia,简称亚洲极端事件监测中心(Center for Extreme Events Monitoring in Asia, CEEMA)。CEEMA的英文网页为http://bcc.cma.gov.cn/Website/index.php?ChannelID=28&show_product=1。

3.2 气候预测业务

3.2.1 国外

这里仍主要以美国CPC为例介绍国外的极端气候事件预测业务。在CPC,极端事件或灾害事件更多是展望的方式发布。如未来3~7和8~14d可能发生的洪涝、冻雨、暴雨、暴雪、大风、野外火灾等级、严重干旱等。这些展望主要基于他们的天气模式(GFS)和气候模式(CFS)。由于极端气候事件的可预测性仍较低,CPC很注重对产品的检验评估,如Becker等(2013)对CPC海气耦合模式提前1个月预报的美国地表月2m气温、降水与SST预测技巧进行了评估,发现对于干、湿两种极端情况预测命中率偏低,预测的干旱发生频次明显多于实况,特别是北美地区,而预测的湿润情况发生频率却被明显低估了。

在其他国家,如澳大利亚和英国,极端气候事件的预测也逐步开展,如台风、干旱等,但总体而言,CPC的产品更为丰富。

近年来,WMO提出了气候监视(Climate Watch)的概念,也即基于监测实况和未来预测信息综合给出延伸期或季节尺度的预警信号。在2005年WMO发布的气候监视指南(Guidelines on Climate Watches)中明确指出,组建一个气候监视系统的必要结构包括数据和观测、气候监测、气候分析以及长期预报。仍然以美国干旱监测为例,其首先开展综合性监测,所使用的指标(指数)较多。因而在

其发布的监测报告中信息非常丰富,除干旱的等级或强度外,还包括干旱影响类型,主要针对农业、水文和生态系统。再结合月和季节气温降水预测、干旱解除或缓解所需降水的信息、各种中短期预报和模式产品以及统计预报等,就可以得出未来一段时间内干旱的发展趋势及可能的影响评估。

3.2.2 中国

虽然我国的气候预测业务有悠久的历史,但专门性的针对极端事件的预测却刚刚起步。目前主要有两类,一是完全基于物理统计方法,如 BP-CCA 和 OSR 方法(柯宗建等;2010)等。柯宗建等(2010)以前期 500 hPa 高度场为预报因子,结合最优子集回归(OSR)方法建立秋季旱涝预测回归预报模型。研究表明:OSR 预报方法对秋季中国区域的干旱日数具有较高的预报技巧,中国东部地区整体预报水平高于西部地区。对于秋季华西洪涝站数与华南干旱站数,OSR 方法也体现出较好的预报能力。这一类主要是面向月、季时间尺度。另一类基于国家气候中心月动力延伸预报模式(DERF),并参考干旱的持续性,综合得到未来旬、月的干旱预测。刘绿柳等(2011)基于 DERF 模式,应用一步法和两步法两种统计降尺度方法预测极端降水日数。其中一步法以极端降水日数为预报量,两步法首先预报降水距平百分率在以此作为控制条件计算极端降水日数。交叉检验结果表明,两种方法均优于随机预测,冬季两步法预测技巧略高于一步法,夏季一步法略优于两步法。因此综合认为 OSR、OSR 结合 WG 两种统计降尺度方法对月尺度降水或极端降水日数的预测均具有较高的技巧,可作为短期气候预测的重要参考信息。对于极端高温,刘绿柳等(2008)以百分位相对阈值和 35℃、38℃ 绝对阈值作为高温阈值指标,应用月动力预测模式、动力预测与统计降尺度相结合、物理统计相似三种不同的方法,预测未来 1~40 d 的旬、月极端高温发生概率及高温日数。对 2007 年 7 月极端高温预测个例分析表明三种方法均有一定的预测技巧。

4 讨论与展望

从前面的分析不难看出,在极端事件气候监测方面中国的业务产品相对来说比较丰富,不仅有中国范围较全面的产品,也有全球范围的极端事件监测产品;不仅在服务类产品制作方面有明显优势,而

且在区域性极端事件监测领域处于领先地位。但是,与发达国家特别注重网页产品研制这一状况相比较,我国极端事件监测业务主要存在以下三个方面的不足:(1)在产品表现形式上显得缺乏统一组织,(2)网页产品特别是英文产品表现力严重不足,(3)服务类产品的针对性还有待改进。

极端事件气候监测业务未来发展需要加强针对性,如果针对上面三个方面的不足则可以做好以下工作:(1)更加有效地组织好现有力量,做好顶层设计,在继续做好服务类产品开发的同时,应更加注重体现业务能力的网页产品的整合和研发;(2)为了充分展示国家气候中心乃至作为区域气候中心 BCC 的业务能力和作用,可以考虑将国家气候中心现有的极端事件气候监测网页产品整合和改进为统一的中文网页和英文的 CEEMA 网页,并结合业务发展需求来进一步扩充和加强网页建设;(3)服务类系统中如果增加时间序列过程性事件判别软件的研发,由于该方法可以方便地针对任意固定区域来进行该区域历史极端事件的比较,因而可以更大程度地满足对于实时业务中出现的区域性极端事件的服务需求。

气候预测一直是全世界气象学家所共同面临的科学难题,而极端气候事件的预测尤其困难。目前对极端气候事件的监测和预测业务能力非常有限,对于极端气候事件变化规律和形成机理仍然不清楚。因此,在今后一段时间内首先要研究极端气候事件的统计特征的变化规律,其发生的频率和强度的季节、年际和年代际变化特点是什么?其次是影响极端气候事件的主要因子有哪些?影响极端气候事件的前兆因子是否也具有极端性的特点?各个影响因子相互关系对极端气候事件的作用是否具有一致性?极端气候事件的可预报性如何? 这些问题是预测极端气候事件的科学基础。因此,需要从人与自然和谐可持续发展、科学决策与规划的需求出发,从科学层面加强对极端天气气候事件的监测和预警研究,从全球变暖和气候年代际变率的角度来综合认识理解我国极端天气气候事件发生频率、强度和空间分布的变化规律,有可能大大提高我国对极端天气气候事件的预测与预警能力,最终提升我国减灾防灾的能力(刘绿柳等,2011)。

本文所涉及的极端事件主要是从气象要素(或事件)本身极端性的角度来考虑的。随着人们对气候变化重视程度的加深和重大灾害事件的频发,近

年来高影响天气气候事件受到越来越多的关注(李维京,2012;李崇银等,2009;IPCC,2012)。

参考文献

- 白莹莹,高阳华,张焱,等.2010.气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响.气象,36(9):47-54.
- 陈波,史瑞琴,陈正洪.2010.近45年华中地区不同级别强降水的变化趋势.应用气象学报,21(1):47-54.
- 陈海山,范苏丹,张新华.2009.中国近50a极端降水事件变化特征的季节性差异.大气科学学报,32(6):744-751.
- 陈兴芳,赵振国.2000.中国汛期降水预测研究及应用.北京:气象出版社.
- 崔方,郭品文,吴建秋.2009.近50年中国极端降水事件的观测研究.安徽农业科学,37(27):13170-13172.
- 丁裕国,江志红.2009.极端气候研究方法导论-诊断及模拟与预测.北京:气象出版社.
- 董蕙青,涂方旭,李雄.2000.广西高温天气的气候特征及短期气候预测.广西气象,21(增刊):50-54.
- 封国林,王启光,侯威,等.2009.气象领域极端事件的长程相关性.物理学报,58(4):2853-2861.
- 侯威,张存杰,高歌.2012.基于气候系统内在层次性的气象干旱指数研究.气象,38(6):701-711.
- 龚志强,任福民,封国林,等.2012.区域性极端低温事件的识别及其时空变化特征研究.应用气象学报,23(2):195-204.
- 龚志强,王晓娟,支蓉,等.2009.中国近58年温度极端事件的区域特征及其与气候突变的联系.物理学报,58(6):4342-4353.
- 黄丹青,钱永甫.2009.极端温度事件区域性的分析方法及其结果.南京大学学报(自然科学版),45(6):715-723.
- 黄荣辉,蔡榕硕,陈际龙,等.2006.我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系.大气科学,30(5):730-743.
- 柯宗建,王永光,贾小龙,等.2010.中国区域秋季旱涝特征预测.高原气象,29(5):1345-1350.
- 李崇银,黄荣辉,丑纪范,等.2009.我国重大高影响天气气候灾害及对策研究.北京:气象出版社.
- 李聪,肖子牛,张晓玲.2012.近60年中国不同区域降水的气候变化特征.气象,38(4):419-424.
- 李庆祥,黄嘉佑.2011.对我国极端高温事件阈值的探讨.应用气象学报,22(2):138-143.
- 李维京.2012.现代气候业务.北京:气象出版社.
- 李维京,张培群,李清泉,等.2005.动力气候模式预测系统业务化及其应用.应用气象学报,16(增刊):1-11.
- 李晓燕,翟盘茂.2000. ENSO事件指数与指标研究.气象学报,58(1):102-109.
- 李新周,马柱国,刘晓东.2006.中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系.大气科学,30(2):277-284.
- 廉毅,沈柏竹,高枫亭,等.2005.中国气候过渡带干旱化发展趋势与东亚夏季风、极涡活动相关研究.气象学报,63(5):740-749.
- 刘绿柳,孙林海,廖要明,等.2008.国家级极端高温短期气候预测系统的研制及应用.气象,34(10):102-107.
- 刘绿柳,孙林海,廖要明,等.2011.基于DERF的SD方法预测月降水和极端降水日数.应用气象学报,22(1):77-85.
- 刘小宁.1999.我国暴雨极端事件的气候变化特征.灾害学,14(1):54-59.
- 马柱国.2005.我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系.地球物理学报,48(5):1011-1018.
- 马柱国,符斌斌.2007.20世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系.中国科学(D辑),37(2):222-233.
- 闵岫,钱永甫.2008.中国极端降水事件的区域性和持续性研究.水科学进展,19(6):763-771.
- 宁亮,钱永甫.2008.中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析.高原气象,27(5):1010-1020.
- 任福民,崔冬林,王艳姣,等.2010.客观识别区域持续性极端事件的探索研究.中国气象局气候研究开放实验室2009年度学术年会论文,52-54.
- 任福民,翟盘茂.1998.1951—1990年中国极端气温变化分析.大气科学,22(2):217-227.
- 王萃萃,翟盘茂.2009.中国大城市极端强降水事件变化的初步分析.气候与环境研究,14(5):553-560.
- 王绍武.1985.1860—1979年间的厄尔尼诺事件.科学通报,30:927-931.
- 王世平.1991.厄尔尼诺事件的判据、分类和特征.海洋学报,13(5):612-620.
- 王小玲,翟盘茂.2008.1957—2004年中国不同强度级别降水的变化趋势特征.热带气象学报,24(5):459-466.
- 王晓娟,龚志强,任福民,等.2012.1960—2009年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征.气候变化研究进展,8(1):1-15.
- 王志福,钱永甫.2009.中国极端降水事件的频数和强度特征.水科学进展,20(1):1-9.
- 谢庄,苏德斌,虞海燕,等.2007.北京地区热度日和冷度日的变化特征.应用气象学报,18(2):232-236.
- 严中伟,杨赤.2000.登近几十年中国极端气候变化格局.气候与环境研究,5(3):267-272.
- 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.2008a.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,19(1):11-15.
- 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.2008b.中国年极端降水事件的时空分布特征.气候与环境研究,13(1):75-83.
- 杨萍,封国林,刘伟东,等.2010a.空间点过程理论在极端气候事件中的应用研究.应用气象学报,21(3):352-359.
- 杨萍,刘伟东,王启光,等.2010b.近40年我国极端温度变化趋势和季节特征.应用气象学报,21(1):29-36.
- 杨小利.2007.西北地区气象干旱监测指数的研究和应用.气象,33(8):90-96.
- 臧恒范,王绍武.1991.1854—1987年期间的埃尔尼诺与反埃尔尼诺事件.海洋学报,13(1):26-34.
- 翟盘茂.2011.全球变暖背景下的气候服务.气象,37(3):257-262.
- 翟盘茂,刘静.2012.气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾.中国工程科学,14(9):55-65.

- 翟盘茂,任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化. *气象学报*, 55(4):418-429.
- 翟盘茂,王萃萃,李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究. *气候变化研究进展*, 3(3):144-148.
- 张德宽,杨贤为,邹旭恺. 2006. 均生函数-最优子集回归在高温极值预测中的应用. *气象*, 29(4):44-47.
- 张强,邹旭恺,肖风劲,等. 2006. 气象干旱等级. GB/T2048122006, 中华人民共和国国家标准. 北京:中国标准出版社, 1-17.
- 张尚印,王守荣,张永山,等. 2004. 我国东部主要城市夏季高温气候特征及预测. *热带气象学报*, 24(6):750-760.
- 张尚印,张德宽,徐祥德,等. 2005. 长江中下游夏季高温灾害机理及预测. *南京气象学院学报*, 28(6):840-846.
- 赵海燕,高歌,张培群,等. 2011. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性. *应用气象学报*, 22(6):698-704.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场. 北京:气象出版社.
- 赵一磊,任福民,李栋梁. 2013. 一个基于有效降水干旱指数的改进研究. *气象*, 39(5):600-607.
- 郑祚芳,王在文,高华. 2013. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响. *气象*, 39(12):1635-1641.
- 周后福,王兴荣,翟武全,等. 2005. 基于混合回归模型的夏季高温日数预测. *气象科学*, 25(5):505-512.
- 邹旭恺,张强. 2008. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. *应用气象学报*, 19(6):679-687.
- 邹旭恺,张强,王有民,等. 2005. 干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测. *气象*, 31(7):6-9.
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res Atmos*, 111: D05109. doi:10.1029/2005JD006290.
- American Meteorological Society. 1997. Meteorological drought-policy statement. *Bull Amer Meteor Soc*, 78:847-849.
- Andreadis K M, Clark E A, Wood A, et al. 2005. Twentieth-century drought in the Conterminous United States. *J Hydrometeorol*, 6:985-1001.
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Nino Modoki and its possible teleconnection. *J Geophys Res*, 112: C11007. doi: 10.1029/2006JC003798.
- Barnston A G, Mason S J. 2011. Evaluation of IRI's seasonal climate forecasts for the extreme 15% tails. *Wea Forecasting*, 26:545-554.
- Becker E J, Huug van den Dool, et al. 2013. Short-term climate extremes: Prediction skill and predictability. *J Clim*, 26:512-531.
- Biondi F, Kozubowski T J, Panorska A K. 2002. Stochastic modeling of regime shifts. *Climate Research*, 23:23-30.
- Biondi F, Kozubowski T J, Panorska A K. 2005. A new model for quantifying climate episodes. *Int J Climatol*, 25:1253-1264.
- Biondi F, Kozubowski T J, Panorska A K, et al. 2008. A new stochastic model of episode peak and duration for eco-hydro-climatic applications. *Ecological Modelling*, 211:383-395.
- Brázdil R, Trnka M, Dobrovolný P, et al. 2009. Variability of droughts in the Czech Republic, 1881—2006. *Theor Appl Climatol*, 97:297-315. doi:10.1007/s00704-008-0065-x.
- Bonaccorso B, Bordi I, Cancelliere A, et al. 2003. Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17:273-296.
- Byun H, Wilhite Donald A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J Climate*, 12:2747-2756.
- Cane M A. 2005. The evolution of El Nino, past and future. *Earth and Planetary Science Letters*, 230:227-240.
- Dai A, Trenberth K E, Karl T R. 1998. Global variations in droughts and wet spells, 1900—1995. *Geophys Res Lett*, 25:3367-3370.
- Dai A, Trenberth K E, Qian T. 2004. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870—2002; Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J Hydrometeorol*, 5:1117-1130.
- Ding T, Qian W. 2011. Geographical patterns and temporal variations of regional dry and wet heatwave Events in China during 1960—2008. *Adv Atmos Sci*, 28(2):322-337.
- Dracup J A, Lee K S, Paulson Jr E G. 1980. On the definition of droughts. *Water Resour Res*, 16(2):297-302. doi: 10.1029/WR016i002p00297.
- Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277:364-367.
- Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19:193-212.
- Folland C K, Miller C, Bader D, et al. 1999. Workshop on indices and indicators for climate extremes—Breakout Group C: Temperature Indices for Climate Extreme. *Climatic Change*, 42:31-43.
- Gallus, William A. 1999. Eta simulations of three extreme precipitation events: Sensitivity to resolution and convective parameterization. *Wea Forecasting*, 14:405-526.
- Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 314(5804):1442-1445. doi: 10.1126/science.1132027.
- Groisman P Y, Easterling D R. 1994. Variability and trends of total precipitation and snowfall over the United States and Canada. *J Clim*, 7:184-205.
- Hanley D E, Bourassa M A, et al. 2003. A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *J Clim*, 16(8):1249-1258.
- Heino R, Brazdil R, Forland R, et al. 1999. Progress in the study of climate extremes in Northern and Central Europe. *Climatic Change*, 42:151-181.
- Horton B. 1995. Geographical distribution of changes in maximum and minimum temperatures. *Atmospheric Research*, 37:101-

- 117.
- IPCC. 2012. 2012: The IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX) ICDM, 2012; workshop on Dynamics and Predictability of High-Impact Weather and Climate Events. 6-9 August, 2012, Kunming.
- Iwashima T, Yamamoto R. 1993. A statistical analysis of the extreme events; Long-term trend of heavy daily precipitation. *J Meteor Soc Japan*, 71: 637-640.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climatic Change*, 42: 131-149.
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J Clim*, 22: 615-632.
- Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. 1993. A new perspective on recent global warming; Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(6): 1007-1023.
- Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA. *Bull Amer Meteor Soc*, 79: 231-241.
- Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. 1996. Indices of climate change for the United States. *Bull Amer Meteor Soc*, 77: 279-291.
- Karl T R, Kukla G, Gavin J. 1984. Decreasing diurnal temperature range in the United States and Canada from 1941-1980. *J Climate Appl Meteorol*, 23: 1489-1504.
- Karl T R, Kukla G, Gavin J. 1986. Relationship between temperature range and precipitation trends in the the United States and Canada from 1941-1980. *J Climate Appl Meteorol*, 25: 1878-1886.
- Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. 1991. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change. *Geophys Res Lett*, 18: 2253-2256.
- Kasei R, Bernd Diekkruiger, Constanze Leemhuis. 2010. Drought frequency in the Volta Basin of West Africa. *Sustain Sci*, 5: 89-97. doi:10.1007/s11625-009-0101-5.
- Khan S, Gabriel H F, Rana T. 2008. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrig Drainage Syst*, 22: 159-177. doi: 10.1007/s10795-008-9049-3.
- Kunkel K E, Andsager K, Easterling D R. 1999a. Long-Term Trends in Extreme Precipitation Events over the Conterminous United States and Canada. *J Clim*, 12: 2515-2527. doi: 10.1175/1520-0442.
- Kunkel K E, Pielke R A Jr, Changnon S A. 1999b. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts; A review. *Bull Amer Meteor Soc*, 80: 1077-1098.
- Lu Er. 2009. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation; Rationale. *Geophysical Research Letters* 36; L12707. doi:10.1029/2009GL038817.
- Mason S J, Waylen P R, Mimmack G M, et al. 1999. Changes in extreme rainfall events in South Africa. *Climate Change*, 41: 249-257.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J, et al. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
- Oladipo E O. 1986. Spatial patterns of drought in the Interior Plains of North America. *J Clim*, 6: 495-513.
- Osborn T J, Hulme M, Jones P D, et al. 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology*, 20: 347-364.
- Palmer W C. 1965. Meteorological drought. Research Paper No. 45. U. S. Weather Bureau.
- Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A)*, 193: 120-146.
- Plantico M S, Karl T R, Kukla G, et al. 1990. Is recent climate change across the United States related to rising levels of anthropogenic greenhouse gas? *J Geophys Res*, 95: 16617-16637.
- Plummer N, James Salinger M, Nicholls N, et al. 1999. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century. *Climatic Change*, 42: 183-202.
- Qian W H, Hu Q, Zhu Y F, et al. 2003. Centennial-scale dry-wet variations in east Asia. *Clim Dyn*, 21: 77-89. doi: 10.1007/s00382-003-0319-3.
- Qian W H, Shan X, Zhu Y. 2011. Ranking Regional Drought Events in China for 1960-2009. *Adv Atmos Sci*, 28(2): 310-321.
- Ren F, Cui D, Gong Z, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events. *J Clim*, 25: 7015-7027.
- Roy S S, Balling R C. 2004. Trends in extreme daily precipitation indices in India. *Int J Climatol*, 24: 457-466.
- Sheffield J, Andreadis K M, Wood E F, et al. 2009. Global and Continental Drought in the Second Half of the Twentieth Century: Severity-Area-Duration Analysis and Temporal Variability of Large-Scale Events. *J Clim*, 22(8): 1962-1981.
- Shiau J T, Shen H W. 2001. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *J Water Resour Plan Manage ASCE*, 127(1): 30-40.
- Sobash R A, Kain J S, Bright D R, et al. 2011. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts. *Wea Forecasting*, 26: 714-728.
- Suppiah R, Hennessy K. 1998. Trends in seasonal rainfall, heavy rain-days, and number of dry days in Australia 1910-1990. *Int J Climatol*, 10: 1141-1164.

- Szinell C, Bussay A, Szentimrey T. 1998. Drought tendencies in Hungary. *Int J Climatol*, 18:1479-1492.
- Tang Y, Gan J, Zhao L, et al. 2006. On the Climatology of Persistent Heavy Rainfall Events in China. *Adv Atmos Sci*, 23(5): 678-692.
- Tarhule A, Woo M. 1998. Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. *Int J Climatol*, 18:1261-1272.
- Tran L, Gregory Knight C, Victoria Wesner. 2002. Drought in Bulgaria and atmospheric synoptic conditions over Europe. *Geo J*, 57:149-157.
- Trenberth K E. 1997. The Definition of El Nino. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(12):2771-2777.
- Trenberth K E, Stepaniak D P. 2001. Indices of El Nino evolution. *J Clim*, 14:1697-1701.
- Vicente-Serrano S M. 2006. Differences in spatial patterns of drought on different time scales; An analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management*, 20:37-60. doi:10.1007/s11269-006-2974-8.
- Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I. 2009. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim*, 23: 1696-1718.
- Wang Z W, Zhai P M, Zhang H T. 2003. Variation of drought over northern China during 1950—2000. *J Geogr Sci*, 13: 480-487. doi:10.1007/BF02837887.
- WMO. 2010. 2010; Report of the Meeting of the Management Group of the Commission for Climatology. Geneva, 18—21 May 2010.
- Wheeler M, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index; Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 132:1917-1932.
- Wolter K, Timlin M S. 1993. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proc of the 17th Climate Diagnostics Workshop*, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor, Univ of Oklahoma, 52-57.
- Woodhouse C, Overpeck J, et al. 1998. 2000 years of drought variability in the Central United States. *Bull Amer Meteor Soc*, 79: 2693-2714.
- Yu J Y, Kao H Y, Lee T, et al. 2011. Subsurface ocean temperature indices for Central-Pacific and Eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events. *Theor Appl Climatol*. 103:337-344.
- Zhai P M, Sun A, Ren F, et al. 1999. Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, 42:203-218.
- Zhang Z, Qian W. 2011. Identifying regional low temperature events in China. *Adv Atmos Sci*, 28(2):38-351.
- Zou X, Zhai P, Zhang Q. 2005. Variations in droughts over China: 1951—2003. *Geophys Res Lett*, 32: L04707. doi: 10.1029/2004GL021853.