

极端气候事件的 检测、诊断与可预测性研究

Detection, Diagnosis and Predictability Research of
Extreme Climate Events

封国林 侯 威 支 蓉
杨 萍 章大全 龚志强 万仕全 著

极端气候事件的检测、 诊断与可预测性研究

封国林 侯 威 支 蓉 著
杨 萍 章大全 龚志强 万仕全

科 学 出 版 社

北 京

序 言

联合国政府间气候变化委员会 (IPCC) 第四次评估报告指出, 即使目前大气温室气体停止增加, 但由于其巨大的惯性作用, 在未来 50~100 年全球气候将继续向变暖的方向发展。在全球变暖背景下, 极端气候事件更加复杂多变, 已有的认识、检测和预测手段已难以适应这种变化。极端气候事件发生规律的异常变化对我们现有的科学认识水平提出了严峻挑战。

除了全球变暖可能对极端气候事件有影响之外, 气候系统的年代际自然变化也可能对其有相当的贡献。20 世纪 90 年代以来, 气候系统年代际变率逐渐被人们所重视并成为研究的热点课题, 但对气候系统年代际自然变率位相转折或突变对极端气候事件影响的研究则很少, 尤其是在年代际模态的转折或突变的过渡时期, 时间尺度为 3~5 年, 极端气候事件有何种表现形式, 目前基本上还不清楚。

中国气候与自然地理条件复杂, 受亚洲季风系统的影响, 各种气象灾害及其衍生灾害频繁发生, 给国民经济发展和人民生命财产造成严重损失。因此, 研究中国极端气候事件的发生与演变规律, 检测极端气候事件并研究其可预测性, 提高应对极端气候事件的监测、检测、预测、预警、影响评估和应急决策等灾害风险管理能力, 是一项关系国计民生和百姓安危、刻不容缓的重要任务, 具有十分重大的意义。

《极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究》一书在总结前人有关极端气候事件研究思路和成果的基础上, 从非线性动力学和概率统计理论角度出发, 提出了对当前国内外极端气候事件研究的一些认知和思考, 并取得了一系列具有实际应用价值的成果。作者将非线性动力学理论和方法应用于极端气候事件的检测及评估的研究中; 基于概率统计及极值理论研究了极端气候事件的统计规律, 从极端气候事件的前兆信号出发, 对极端事件的可预报性做了较系统的定量化研究; 尤为可贵的是在当前数值模式对极端气候事件预报能力较低的前提下, 以“破纪录事件”为切入点, 间接预测评估区域未来的极端气候事件变化趋势, 实现了对极端气候事件实际预报的初步尝试; 在年代际干旱趋势预测方面也做了有益的尝试。

《极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究》一书内容丰富, 资料翔实, 从多角度给出了有关极端气候事件研究的大量信息。我相信该书的出版将促进极端气候事件的理论和应用研究, 为极端气候事件的学术研究和业务发展提供技术支持, 为我国相关研究领域的发展做出重要的贡献。

丑纪范

2011 年 12 月 1 日

前言

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。温度的升高不仅直接影响温度极端值的变化，且导致高温干旱和暴雨洪涝等极端气候事件的发生频率与强度出现加剧的趋势。特别是 20 世纪 80 年代以来，受全球气候变化和人类活动的共同影响，全球范围内极端气候事件及其导致的灾害事件频发，呈现出强度大、频次高、影响范围广等特点。IPCC 第四次评估报告指出：1950 年以来，干旱影响的区域扩大、洪水的日强降水事件增加，热带风暴和飓风自 20 世纪 70 年代以来强度和持续时间显著增加。预估未来极端气候发生的频率和强度将明显增强，50 年一遇或百年一遇的气候灾害发生影响区域增多。频繁发生的灾害性天气气候事件已成为人类经济社会可持续发展面临的严峻挑战，越来越引起各国政府和国际机构的重视。

极端事件的发生、发展及其变化规律问题已成为气候学研究领域的热点。已有研究既包括了极端事件的观测事实、模式模拟和影响机制的研究，又有对极端事件成因与极值理论的探讨；在研究方法上既涉及统计学原理，又涵盖了动力学方法。经过前人的不懈努力，极端事件的研究已经取得了长足进步。值得注意的是，尽管非线性气候动力学在认识天气与气候系统的过程和机制方面取得了很大的进展，但在全球变暖大背景下，极端气候事件更加复杂多变，已有的认识、检测和预测手段已难以适应这种变化，主要表现在以下四个方面：

1. 气候系统的短期记忆性通常与一个有限长的时间尺度相联系，而这一有限时间尺度正是系统内在相关性的体现，又与极端气候事件的群发性联系在一起，因此研究气候系统的长程相关性具有重要的意义。到目前为止，从概率理论角度对极端气候事件群发性及其可预测性研究还相对较少。

2. 重大灾害事件往往对应极端气候事件在一段时间内的连续或高频发生，从而在一定程度上打破了各个地区生态系统的平衡状态，因此，重大灾害事件的一个重要表现就是极端气候事件的群发性。所谓极端气候事件群发性，一般分为时间尺度和空间尺度上的群发性，对时间尺度的群发性而言，如果其极值是均匀分布的，即每两个极值之间的回归时间为一定值或等于整个序列极值的平均回归时间，则不存在群发性；反之，如果某一时段内气候要素极值的回归时间的均值明显小于整个序列极值的平均回归时间，则在该时段内气候要素极值存在群发现象。区域与区域之间、季节与季节之间的差异，给极端事件的定义及其分析造成了一定的困难，因此迫切需要在传统极端气候事件定义方法的基础上，结合数学和物理领域相关研究的最新成果，从全新的角度研究极端气候事件的定义及其群发性等问题，旨在进一步丰富和发展极端气候事件的检测技术。

3. 在全球变暖的影响下，我国还伴随有极端降水事件强度趋强、频次趋多等特征。

目前,对全球变暖与极端气候事件之间联系的研究越来越受到气象科学工作者的重视,但多数研究还停留在计算相关系数和趋势分析等层面上,对极端事件的分布规律及其演化特征还处在定性研究的水平,对极端事件的群发性和可预测性等研究涉及甚少。因此急需在已有的极端气候事件研究手段的基础上进一步应用新的数学物理方法,更好地分析现有观测数据的统计特征,进而构建相应的数学模型,通过数值模拟定量地研究全球变暖对极端气候事件时空分布的影响,加深对极端气候事件演化规律的认识。进而根据简单的浅水波方程的理论研究结果,进一步探索极端事件发生的内在机理,为极端事件的可预测性提供理论指导。

4. 近年来,国内外专家在极端气候事件的指标研究、诊断分析等方面取得了长足的进步,我国基础气候数据的时间和空间分辨率的提高也为这些新模型、新理论的应用提供了重要的基础。另外,高质量基础资料以及相应的极端气候事件相关指标的研制也将为我国极端气候事件的研究更加准确、可靠提供保障,为我国极端气候事件的监测、检测和预测提供更有效的依据。

本书首先在第一和第二章就极端气候事件的研究意义、定义、检测技术、变化趋势、空间分布、诊断、模拟和预测等方面的最新研究进展,以及极端气候事件的定义和指标、极值理论、群发性、定量评估、模拟和预测等方面面临的主要科学问题进行扼要介绍。

针对上述目前对极端气候事件研究存在的四个方面的难题,本书首先将非线性动力学应用于极端气候事件的研究中,寻求在极端气候事件理论及方法上的创新和突破。由于极端事件属于小概率事件,作者认为此类事件所对应的演化状态是系统的极端状态,或异常演化状态,偏离了系统自身正常演化状态的范畴。第三章将去趋势波动分析(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)方法和替代数据法相结合,同时引入启发式分割算法和卡方检验,寻找一个临界值为阈值,提出了一种确定极端气候事件阈值的新方法,称为DFA-S方法。通过数值试验从不同的角度验证了DFA-S方法的有效性,得到的阈值是唯一的。前人的工作已经为极端气候事件群发性和持续性特征的研究提供了很好的研究基础、研究思路和研究方法,但量化地界定群发性区域的工作尚未得到很好的开展,群发性极端气候事件识别方法的研发工作也值得进一步探讨。研究极端气候事件群发性和持续性特征的识别方法,可以为极端气候事件群发性和持续性的研究提供技术支撑和理论保障。第四章主要围绕如何识别极端气候事件的群发性和持续性特征进行方法的详细阐述。作者从群发性和持续性特征的识别技术与诊断方法入手,提出“ k 阶最近邻距离丛集点提取算法”,并从极端气候事件的年总频数和年总强度两个角度定义站点的权重,提出了该算法在极端气候事件群发性研究中的检测流程。算法的有效性并不受数据点分布形状的影响,数据点分布形状不同时,在算法的适用范围内,该算法均能有效地将从丛集性质的点提取出来。本章对12种极端温度事件和6种极端降水事件进行了有效性检测。

根据第二至第五章研究得到的理论及方法,本书进一步将其应用于实际资料。在第三章研究的基础上,第六章将DFA-S方法和极端事件综合指标的定义应用于实际观测数据,从一个简化理想模型出发,将阈值、相对极端强度和极端事件发生次数综合

起来,从可预报性的角度给出了极端事件综合指标的定义。在确定中国各站点极端高温事件、极端低温事件和极端降水事件阈值的基础上,讨论了这三类极端事件的阈值、发生次数、发生站点数、发生强度和综合指标的空间分布情况及其年际、年代际变化规律。将中国极端高温事件和极端低温事件的强度分为四个不同等级,将中国极端降水事件强度分为三个不同等级。基于第四章中对极端气候事件群发性和持续性特征的检测识别方法研究,作者在第七章中对温度、降水等极端气候事件的群发性、持续性特征进行识别分析,并研究了极端气候事件群发性的演化特征;群发性强降水事件的大值中心与中国近50年多雨带的分布格局具有非常好的一致性,群发性强降水事件的年代际变化在中国多雨带年代际空间分布格局的形成中贡献了很大的作用。对极端干旱事件持续性的研究发现,中国北方地区干旱的持续性相对长江流域更好,而表征涝的尺度因子的空间分布特征相对较复杂。

极端事件在统计理论中被称为小概率事件,属于边缘分布,其样本量相对一般事件要少很多,而破纪录事件作为极端事件的一种特例,属于重大的气象灾害,本书从理论上进行了相关的初步研究。第五章从理论上研究了温度破纪录事件的统计性质,发现温度破纪录事件的频次和强度是观测序列年份数的函数;同时考虑了全球变暖可能带来的影响,并通过蒙特卡洛模拟验证了这些影响。蒙特卡洛模拟研究还发现,目前的增温速率还不足以显著改变温度破纪录事件的频次,温度破纪录事件的理论推导结果得到了蒙特卡洛模拟试验结果的支持。天气气候极值往往出现于非高斯分布的气象要素中,基于正态假设的极值诊断理论来估计其气候要素的特征量显然会产生较大偏差,第八章基于气象要素分布的偏态性特征利用Box-Cox变换得到的原序列的偏态概率密度分布函数,比正态分布函数能更好地描述原序列的概率分布特征。进一步基于温度资料所符合的偏态分布条件,建立了相应的经验百分位值计算公式。引入统计物理学“最概然”的概念,提出了以最概然要素代替平均要素作为研究气候背景场变化的一个新思路,研究了中国夏季和冬季最概然温度的气候变化特征。众所周知,影响极端气候事件的因素很多,究其本质,全球或局地大气环流型的异常是导致极端事件发生的根源。第九章利用极值理论研究气候模态对区域极端事件的影响,探索大气涛动和变暖因素对月极端降水、月极端温度的时空分布规律的影响;引进具有空间参数化方案的极值模型GPD研究了中国月极端降水、月极端温度的时空分布及其极值的变率与破纪录率的空间特征,主要分析了SO、NAO对不同季节极值的强迫作用,发现降水极值的变率和破纪录率受SO的全局影响比单独受到的影响要大,全局作用大于局部作用;月高温极值对NAO、SO强迫所产生的响应存在明显的空间差异,NAO主要作用区域集中在东北,而SO主要集中在长江流域,对提高短期气候预测准确率有一定的指示意义。极端气候事件演变规律及其可预测性研究是处于世界前沿的重要科学问题之一,第十章从极端气候事件前兆信号出发,对极端气候事件发生前期的规律做了较系统性的量化研究,从非线性系统的模拟数据和实际气象干旱资料两个方面,对前兆信号理论进行了数值验证。研究发现极端气候事件的可预测性随极端程度增加而增加,这有别于传统的认识,为极端气候事件面临的数据量很小、统计规律难以把握等困难提供了新的突破途径。

目前,国内外学者从不同角度对极端气候事件的研究已经取得了一系列进展,但将理论成果实际应用到防灾减灾中还涉及甚少,本书将作初步尝试。第十章中以东北夏季低温作为极端气候事件的一个特例,从气候背景诊断的角度,研究了东北冷涡活动所起的主导作用,明确提出了 NPO 位相是东北夏季气温变化的重要前期信号和预测因子,大气中除了天气尺度的混沌分量外还存在可提取的行星尺度稳定预报分量,在此基础上成功预测了在全球变暖背景下的 2009 年东北夏季低温。此外,在目前数值模式对极端气候事件预报存在瓶颈的现状下,第十一章通过研究气候数据的概率统计特征探讨了近几十年来破纪录高温、破纪录低温、破纪录干旱三种典型气候破纪录事件的时空分布特征及其发生规律,通过蒙特卡洛模拟全球变暖等情景下破纪录事件的发生规律,基于其概率统计特征建立破纪录事件预测模型,预估未来几十年内破纪录事件变化规律,间接预测评估区域未来的极端气候事件变化趋势。第十二章利用中国近 50 年 Palmer 干旱指数资料,结合已有的我国旱涝不同时空尺度演变规律研究成果,针对干旱年代际变化趋势中的转折点构建非线性预测模型,克服了年代际尺度预测中转折点样本量不足的困难,基于状态空间重构理论和嵌入定理,在转折点预测模型中引入时空序列预测方法,开展了中国区域年代际旱涝及其可能转折进行预测研究,这一研究对国家需求具有战略意义。

本书的出版得到了国家自然科学基金重点基金(课题编号:40930952)、国家科技支撑计划项目(课题编号:2007BAC29B01 和 2009BAC51B01)和扬州大学出版基金的共同资助。中国气象科学研究院曹鸿兴研究员、吉林省气象科学研究所廉毅研究员、南京信息工程大学大气科学系施能教授给予了大力支持,在百忙之中修改和校阅了全书,同时感谢中国气象局科技司罗云峰司长,减灾预报司张强研究员,国家自然科学基金委张朝林研究员,国家气候中心宋连春研究员,李维京研究员,培训中心肖子牛研究员提出宝贵的修改意见。感谢课题组研究生给予各方面的帮助。

研究中国极端气候事件的发生与演变规律,检测极端气候事件并研究其可预测性,提高我国应对极端气候事件的监测、检测、预测、预警、影响评估和应急决策等灾害风险管理能力,不仅是全社会一项关系国计民生和百姓安危、刻不容缓的重要任务,更是我国气象科研、业务工作者义不容辞的责任和义务。希望本书的研究结果和思路能为 21 世纪的极端气候事件及气候变化研究尽一份绵薄之力。

由于作者水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请读者指正。

目 录

序言 前言

第一章 极端气候事件研究进展

1

1.1 极端气候事件研究的必要性	1
1.2 极端气候事件研究现状	2
1.2.1 极端气候事件的定义和指标研究	3
1.2.2 极端气候事件的检测研究	6
1.2.3 极端气候事件的频率、强度和趋势研究	7
1.2.4 极端气候事件群发性研究	11
1.3 极端气候事件研究中存在的科学问题	12
1.3.1 不确定性问题	12
1.3.2 极端气候事件综合指标问题	17
1.3.3 极端气候事件时空群发性问题	18
1.3.4 极端气候事件评估的问题	19
1.4 小结与讨论	19
参考文献	20

第二章 极值统计模型

25

2.1 广义极值模型 (GEV)	25
2.1.1 数学描述	26
2.1.2 区组模型的极限分布	26
2.2 广义 Pareto 模型 (GPD)	27
2.2.1 数学描述	27
2.2.2 阈值模型的极限分布	28
2.2.3 阈值公式	29
2.3 中值和均值检测方法	30
参考文献	31

第三章 去趋势波动分析检测方法及初步应用

33

3.1 DFA 方法的基本理论	33
-----------------------	----

3.2 极端气候事件阈值的算法	35
3.2.1 替代数据方法介绍	36
3.2.2 确定极端气候事件阈值的算法	36
3.2.3 算法检验	37
3.2.4 确定极端气候事件阈值	39
3.2.5 极端气候事件阈值检验	47
3.3 小结与讨论	51
参考文献	51

第四章 群发性与持续性特征的检测识别方法

55

4.1 群发性特征的检测识别及适用性研究	55
4.1.1 二维泊松过程理论	56
4.1.2 期望最大化算法 (EM 算法)	56
4.1.3 k 阶最近邻距离算法的适用性研究	57
4.2 群发性特征识别方法的有效性研究	64
4.2.1 空间点过程理论在极端气候事件中的应用	64
4.2.2 群发性特征识别应用的流程设计	67
4.2.3 群发性特征识别的有效性检测	68
4.3 小结与讨论	70
参考文献	71

第五章 破纪录事件分析方法及其预测理论

73

5.1 破纪录事件的理论基础	73
5.1.1 破纪录事件的定义	73
5.1.2 破纪录事件的分类	74
5.2 破纪录事件的概率模型	74
5.3 破纪录事件的预测理论	75
5.3.1 破纪录事件的强度	75
5.3.2 破纪录事件的时间	75
5.3.3 指数分布中的破纪录事件	77
5.3.4 正态分布中的破纪录事件	78
5.4 增温趋势下的温度破纪录事件	80
5.4.1 指数分布	80
5.4.2 正态分布	81
5.5 小结与讨论	82
参考文献	82

第六章 基于 DFA 方法极端气候事件综合指标的判定

85

6.1 基于 DFA-S 方法及综合指标的极端高温事件研究	86
6.1.1 极端高温事件阈值有效性检验	86
6.1.2 极端高温事件发生次数	88
6.1.3 极端高温事件综合指标	91
6.1.4 基于综合指标的极端高温事件研究	96
6.1.5 极端高温事件发生次数的年际变化	97
6.1.6 极端高温事件综合指标的年际变化	97
6.2 基于 DFA-S 方法及综合指标的极端低温事件研究	100
6.2.1 极端低温事件阈值有效性检验	101
6.2.2 极端低温事件发生次数	102
6.2.3 极端低温事件综合指标	103
6.2.4 基于综合指标的极端低温事件研究	106
6.2.5 极端低温事件发生次数的年际变化	108
6.2.6 极端低温事件综合指标的年际变化	109
6.3 基于 DFA-S 方法及综合指标的极端降水事件研究	112
6.3.1 极端降水事件阈值有效性检验	112
6.3.2 极端降水事件发生次数	113
6.3.3 极端降水事件综合指标	116
6.3.4 基于综合指标的极端降水事件研究	120
6.3.5 极端降水事件发生次数的年际变化	121
6.3.6 极端降水事件综合指标的年际变化	122
6.4 小结与讨论	125
参考文献	125

第七章 极端气候事件群发性和持续性特征

127

7.1 极端气候事件群发性特征	127
7.1.1 年际群发性特征	128
7.1.2 气候分区的群发性特征	129
7.2 群发性的年代际空间演变特征	133
7.2.1 年代际群发性指数	133
7.2.2 极端温度事件群发性的年代际空间演变特征	134
7.2.3 极端降水事件群发性的年代际空间演变特征	135
7.3 旱涝灾害的持续性特征	137
7.3.1 使用资料及旱涝因子的定义	137

7.3.2 旱(涝)尺度因子的时间演化特征	141
7.3.3 近1041年气候分区旱涝持续性特征	143
7.4 小结与讨论	147
参考文献	148

第八章 基于概率理论的极端气候事件时空分布特征研究

151

8.1 中国极端温度、降水概率分布的时空变化分析	151
8.1.1 系统聚类法	152
8.1.2 温度、降水极值概率特征区域的划分	153
8.1.3 温度、降水概率分布空间变化特征	154
8.1.4 温度、降水概率分布的季节变化	157
8.1.5 温度、降水概率分布在不同气候态的变化特征	159
8.2 中国夏季高温极值的概率分布特征及其演变	162
8.2.1 夏季高温极值的偏态拟合函数	162
8.2.2 中国夏季高温极值的概率分布特征	163
8.2.3 中国夏季高温极值偏态指数的变化特征	165
8.2.4 中国夏季最概然高温极值的演变	165
8.2.5 剔除不同尺度高温极值对偏态指数和最概然高温极值的影响	166
8.3 中国夏季日平均温度偏态性分布规律研究	167
8.3.1 偏态指数 λ 分布特征	167
8.3.2 偏态指数 λ 变化的含义	169
8.3.3 年际日平均温度对最概然温度的影响	173
8.3.4 不同气候态的最概然温度比较	175
8.4 最概然温度背景下不同气候态中国夏冬季极端温度事件时空分布特征	178
8.4.1 资料及方法	178
8.4.2 不同气候态下极端温度事件空间分布	178
8.4.3 不同气候态下极端温度事件的时间演化	183
8.5 基于偏态分布的百分位估计公式的建立	185
8.5.1 数据与方法	186
8.5.2 顺序统计量	187
8.5.3 基于偏态分布的第 m 个顺序统计量的分布特征	188
8.5.4 经验百分位公式的建立	189
8.5.5 偏态与Jenkinson方法相同百分位下温度顺序统计量位置的比较	193
8.6 小结与讨论	194
参考文献	195

第九章 大气环流基本模态与极端气候事件的联系

197

9.1 月极端降水特征与大气涛动的联系	197
9.1.1 月极端降水的空间分布特征	197
9.1.2 月极端降水对南方涛动 (SO) 的响应	202
9.2 月极端温度特征与大气涛动的联系	204
9.2.1 月极端高温的空间分布特征	204
9.2.2 月极端低温的空间分布特征	206
9.2.3 月极端温度对南方涛动 (SO) 和北大西洋涛动 (NAO) 的响应	207
9.3 月极端温度分布与全球变暖的联系	211
9.3.1 气候变暖对极端高温分布的影响	211
9.3.2 气候变暖对极端低温分布的影响	213
9.4 小结与讨论	214
参考文献	214

第十章 极端气候事件的可预测理论

217

10.1 中国旱涝极端气候事件前兆信号及可预测性研究	217
10.1.1 前兆信号定义及提取原理	218
10.1.2 前兆信号预测性检验	219
10.1.3 中国 PDSI 极端气候事件前兆信号及可预测性	221
10.1.4 中国范围内区域性 PDSI 极端气候事件前兆信号及可预测性	223
10.2 长程相关性与可预测性	225
10.2.1 方法	226
10.2.2 数值试验方案	227
10.2.3 高温资料关联长度的空间分布特征	230
10.2.4 影响高温资料关联长度的因素	232
10.3 极端气候事件再现时间的长程相关性	234
10.3.1 Lorenz 系统极端气候事件长程相关性及其记忆性特征	234
10.3.2 温度资料中极端气候事件的长程相关性及其记忆性	240
10.4 中国降水和温度变化在干旱形成中的作用	242
10.4.1 资料	242
10.4.2 预测模型的构建	243
10.4.3 模型适用性	243
10.4.4 降水与温度在中国干旱形成中的作用	245
10.4.5 概率统计模型预测的回报检验	247
10.4.6 降水及温度变化在中国不同区域干旱形成中的影响	247
10.5 2009 年中国东北夏季低温的预测	250

10.5.1 东北夏季低温事件定义	251
10.5.2 2009 年夏季 500hPa 高度及温度距平分布	252
10.5.3 东北冷涡活动与长春、哈尔滨夏季低温	252
10.5.4 长春、哈尔滨夏季温度典型年大气环流合成场特征	254
10.5.5 极涡、北太平洋海气环流系统年代际变化对长春和哈尔滨夏季平均温度变化影响	257
10.5.6 东北夏季温度与北太平洋涛动的半年-季节尺度遥相关	260
10.5.7 2009 年夏季低温前期环流特征	261
10.5.8 东北冷涡活动异常的前期 500hPa 高度场谐波分析	263
10.6 小结与讨论	264
参考文献	265

第十一章 破纪录事件及其预估

271

11.1 温度破纪录事件的时空分布特征	271
11.1.1 温度破纪录事件频次的分布	271
11.1.2 温度破纪录事件频次的季节性特征	273
11.1.3 温度破纪录事件年发生频次变化趋势	274
11.1.4 温度破纪录事件平均强度的变化趋势	275
11.1.5 温度破纪录事件与太平洋暖池的关系	276
11.2 温度破纪录事件的预估	277
11.2.1 序列 X_H/X_L 分布的标准偏差	277
11.2.2 温度破纪录事件的发生强度及时间	279
11.2.3 温度破纪录事件的饱和值	284
11.3 高温破纪录事件的蒙特卡洛模拟研究	285
11.3.1 南京站 1961~2000 年温度变化特征分析	286
11.3.2 温度破纪录事件的蒙特卡洛模拟	286
11.3.3 温度破纪录事件的累积概率分布	288
11.3.4 全球变暖对高温破纪录事件的影响	288
11.3.5 相关性对破纪录事件的影响	291
11.4 中国干旱指数破纪录事件的时空分布特征	293
11.4.1 资料及研究区域划分	293
11.4.2 PDSI 破纪录事件的定义	294
11.4.3 PDSI 的概率密度分布函数	295
11.4.4 PDSI 破纪录事件发生频次	295
11.4.5 PDSI 破纪录事件的区域特征	296
11.4.6 PDSI 破纪录事件年发生频次变化趋势	298
11.4.7 PDSI 破纪录事件的年代际特征	299

11.4.8 PDSI 破纪录事件强度变化趋势	300
11.4.9 PDSI 破纪录事件和中印度降水及太平洋年代际涛动的关系	301
11.4.10 PDSI 破纪录事件预估研究	302
11.5 小结与讨论	304
参考文献	305

第十二章 年代际旱涝趋势转折预测

309

12.1 年代际尺度旱涝变化特征研究的发展	309
12.1.1 中国年代际旱涝趋势转折的研究	310
12.1.2 影响中国年代际旱涝变化的主要海气系统	311
12.1.3 年代际旱涝趋势转折预测的困难	313
12.1.4 年代际旱涝趋势转折预测的可能途径	315
12.2 中国近 50 年旱涝转折时空分布特征	315
12.2.1 近 50 年 PDSI 概率分布	315
12.2.2 近 50 年区域 PDSI 主周期分析	316
12.2.3 分季节 PDSI 变化趋势分析	319
12.3 年代际旱涝转折与主要气候因子间的关系	325
12.3.1 PDSI 及主要气候系统因子的尺度分离	326
12.3.2 中国 PDSI 各时间尺度分量与 PDO、东亚季风与太阳黑子的关系	326
12.3.3 分季节 PDO、季风指数、太阳黑子与 PDSI 的相关分布	329
12.4 中国干旱趋势年代际转折预测研究	332
12.4.1 干旱趋势转折点的提取与预测	334
12.4.2 干旱序列预测效果回报检验	336
12.4.3 中国未来 30 年干旱趋势转折预测	338
12.4.4 时空序列模型的构建及其在年代际转折预测中的应用	342
12.5 小结与讨论	343
参考文献	345

第一章

极端气候事件研究进展

在全球变暖的气候背景下，区域性洪涝、干旱、高温、台风、雨雪冰冻等极端气候事件（简称极端气候事件）日益加剧，尤其是 20 世纪 80 年代以来，全球范围内频繁发生的极端气候事件给生态环境、经济发展和人民生活造成了严重的影响和损失。极端气候事件的发生、发展及其变化规律问题已成为气候学研究领域的热点。已有研究既包括了极端气候事件的观测事实、模式模拟和影响机制的研究，又有对极端气候事件成因与极值理论的探讨；在研究方法上既涉及统计学原理，又涵盖了动力学方法。经过前人的不懈努力，极端气候事件的研究已经取得了长足进步，因此，本章主要就极端气候事件的研究意义、定义、检测技术、变化趋势、空间分布、诊断、模拟和预测等方面的最新研究进展，以及当前极端气候事件研究面临的主要科学问题进行扼要介绍。

1.1 极端气候事件研究的必要性

IPCC (2007) 第四次评估报告指出，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。20 世纪以来，随着全球变暖趋势的进一步加剧，干旱、洪涝、风暴、热浪、暴雨、龙卷风等极端气候事件频繁出现，给社会、经济和人类生活造成了严重的影响和损失，已经严重影响和制约着人类社会和经济的发展，越来越引起各国政府和国际机构的重视。例如 1998 年中国长江中下游的特大洪水造成了上千人伤亡和上千亿人民币的损失；美国在 1992 年和 1994 年经历了极度的严寒，使交通瘫痪并对经济造成重大影响；从 1998 年至 2001 年在亚洲中部和南部地区的持续干旱，严重危害了伊朗、阿富汗和巴基斯坦等广大地区的农业生产。据估计，全球气候变化及相关的极端气候事件所造成的经济损失在过去 40 年上升了近 10 倍，而且单个气候事件所导致的损失也与日俱增。图 1.1 给出了 1949~2005 年中国气象灾害造成的直接经济损失占灾害总损失的比例，可以看出气象灾害所占比重为 71%，而气象灾害中最容易造成生命和财产损失的是极端气候事件，因此迫切需要开展针对性的研究，为政府部门提供优质、高效的决策咨询报告。

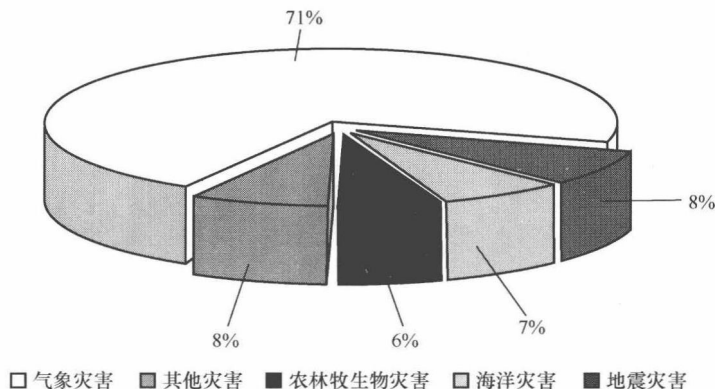


图 1.1 中国 1949~2005 气象灾害造成的直接经济损失占灾害总损失比例（温克刚和丁一汇，2008）

中国东部位位于东亚季风区，是世界上受气象灾害影响最为严重的地区之一，主要的极端气象灾害包括洪涝、干旱、高温热浪、低温冷害等灾害性极端气候事件，具有种类多、强度大、频率高、危害严重等特点。近几年来，中国极端气候事件的发生越来越频繁，破坏性越来越大，并且表现出极为明显的群发性特征。2006 年夏，中国四川、重庆等地发生了百年一遇的干旱，与之相伴的是历史罕见的高温热浪，高温持续时间和高温强度（44.5℃）均创下了当地有气象观测记录以来的历史同期最高（柳艳香等，2007）；2008 年 1 月至 2 月初，中国南方地区经历了大范围低温、雨雪和冰冻灾害，持续时间之长、影响程度之严重均为历史罕见，造成的直接经济损失达上千亿元。

事实表明，中国伴有群发性特征的极端气候事件正在不断加剧。因此，深入探讨极端气候事件的发生、发展规律并研究其可预测性，提高应对极端气候事件及其次生灾害的监测、检测、预警、评估和应急决策的风险管理能力，使人员伤亡和经济损失减小到最低限度，这不仅是保障国家安全、发展经济和防灾减灾的现实需要，更是一项关系国计民生和百姓安危、刻不容缓的重大任务。

1.2 极端气候事件研究现状

当前有关极端气候事件的研究主要是通过统计学原理分析极端气候事件的频率、强度和趋势等。国际上，Easterling (1997)，Gruza (1999)，Manton (2001)，Beniston (2007) 等已经在极端气候事件的定义和指标研究、极端气候事件的观测事实等方面取得了一系列的成果；国内许多学者也在极端气候事件的检测技术、区域性特征、模拟和评估、业务系统建设等方面取得了较大的进展。下面分别从四个方面介绍当前的研究现状。本书着重研究极端气候事件，极端天气事件在某些地方也有所涉及。

1.2.1 极端气候事件的定义和指标研究

Easterling 等 (1997, 2000) 认为可以从很多方面来定义极端气候事件, 如既可以从日极端温度、日极端降水量、大范围冷暖异常来定义, 或者从事件 (如飓风) 的发生与否来定义, 还可以从事件对社会所造成影响的大小来判定。Easterling 等将极端气候事件归为两类: 一类基于简单的气候统计学, 这些极端气候事件每年都会发生, 如非常高或非常低的逐日温度、非常强的逐日或逐月降水量; 另一类是直接由事件发生与否来决定的, 如洪涝、飓风等, 这样的事件对于给定的地点并不是每年都发生。

Beniston 等 (2007) 简单归纳了常用于定义极端气候事件的三种标准: ①事件发生的频率相对较低; ②事件有相对较大或较小的强度值; ③事件导致了严重的社会经济损失。对某一具体的极端气候事件, 往往并不能同时满足以上 3 类标准, 如以第一类标准定义出来的干旱区极端降水, 强度并不会很大, 而且可能对社会经济还是有利的。

IPCC 第三次和第四次评估报告都对极端气候事件作了明确的定义, 对一特定地点和时间, 极端气候事件就是从概率分布的角度来看发生概率极小的事件, 通常发生概率只占该类天气现象的 10% 或者更低 (图 1.2)。这种定义方法考虑了不同地区气候的差异性, 从而避免了事件的绝对强度随区域不同而产生较大差异、难以用同一标准作比较的问题。本书各章节如果没有特殊说明, 极端气候事件均指小概率事件。

气候与某种天气事件的概率分布有关。当某地的气候状态严重偏离其平均态时, 就可以认为是不易发生的气候事件 (图 1.3)。在统计意义上, 不容易发生的值 (事件)

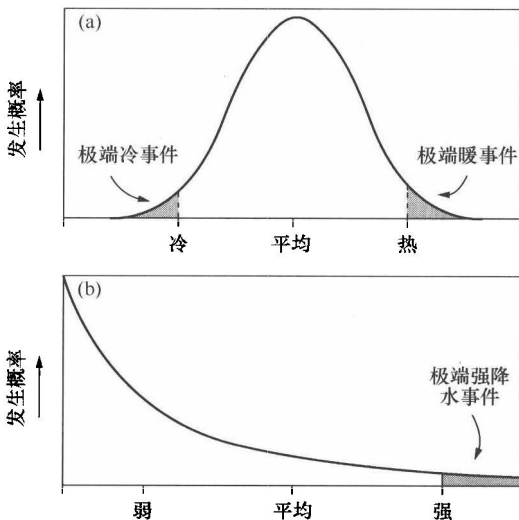


图 1.2 概率分布角度的极端气候事件

(Beniston et al., 2007)

(a) 温度; (b) 降水

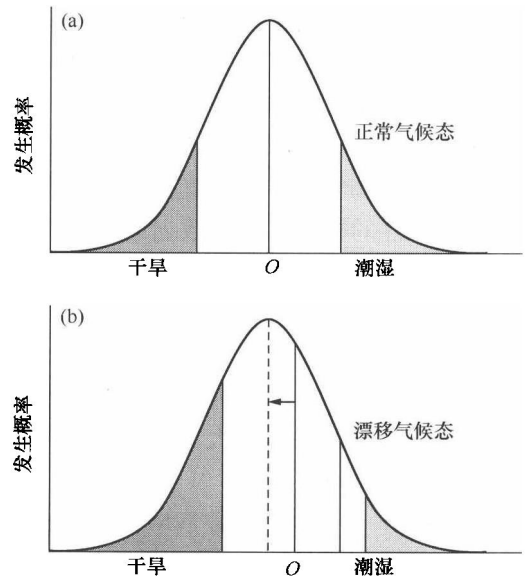


图 1.3 气候状态相对于平均态的偏离

(Beniston et al., 2007)