

丁裕国 江志红 著

极端气候研究方法导论

(诊断及模拟与预测)



气象出版社

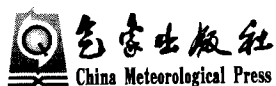
China Meteorological Press

国家自然科学基金(40875058)项目成果之一

极端气候研究方法导论

(诊断及模拟与预测)

丁裕国 江志红 著



内 容 简 介

本书从气候系统复杂性及其不确定性的基本思想出发,阐明气候变量的概率属性及其数学模式理论,并由此引入气候概率分布的形成机制,从而将气候变化的统计意义深化为气候概率分布参数和型态的变化,着重从气候数值模拟的降尺度、气候极值统计和气候极值随机过程等多种理论相结合的观点叙述气候极值事件的诊断、模拟和预测方法。本书力图较系统地阐述涉及这一领域的各种基本理论和方法,以供广大科技工作者参考应用。

全书共分三篇,其中第一篇(1~3章)为理论基础,着重叙述极端气候的概率意义及其形成机制与气候变化的关系;第二篇(4~6章)为极端气候概率与时空变化特征诊断,着重阐明气候的极值分布理论及其描述方法和极端气候时空变化特征的诊断;第三篇(7~9章)为极端气候的模拟与预估,着重阐明借助于全球模式输出信息的降尺度细化方法,并由此进一步生成未来区域气候情景,从而预估气候极值统计特征。书中最后还简介了当前该领域的国内外研究进展。

本书内容涉及较宽知识面,在考虑知识结构系统性和发散性相结合的基础上安排章节顺序。读者阅读本书不必拘泥于逐章顺序,尤其是已经具备概率统计基础的读者,可根据需要选章参考。本书也适合一般需要了解极端气候变化规律的非气象科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

极端气候研究方法导论/丁裕国,江志红著. —北京:气象出版社,2009.5

ISBN 978-7-5029-4761-3

I. 极… II. ①丁…②江 III. 气象灾害-研究方法 IV. P429-3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 076209 号

Jiduan Qihou Yanjiu Fangfa Daolun

极端气候研究方法导论

丁裕国 江志红 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:吴晓鹏

封面设计:王 伟

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:397 千字

版 次:2009 年 5 月第 1 版

印 数:1~1000

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:15.5

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

定 价:35.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前言

近十多年来,世界各地频繁出现的极端天气气候事件给全球造成了众多的灾难性后果,目前,极端气候问题已成为各国政府和公众及科学界关注的全球环境变化的焦点之一。早在 20 世纪末,国际上就已有许多学者共同发出“关于加强极端天气气候事件长期观测变率及其未来变率预测研究”的联合呼吁,引起了全球气候科学家的重视。

自 20 世纪 90 年代以来,一些学者已经注意到伴随着平均气候的变化,极端气候也在不断变化,且其变率往往远大于平均气候变率。但是,就世界范围而言,由于缺乏气候极值的高质量的长期观测资料,人们对各地或不同区域的极端气候及其长期变率特征的认识并不全面,特别是从理论上对极端气候成因机制及其模拟试验和预测模型的研究还相当欠缺。随着全球变暖日渐加剧,各地极端气候事件频发,与平均气候变化的研究相比,极端气候的研究依然是一个薄弱环节,不少问题还有待深入探讨。例如,描述极端气候的指标;极端气候的区域型态及其长期变率;极端气候与全球平均气候变化的定量关系;未来极端气候预估以及极端气候引发自然灾害的风险评价等,一系列问题都需要大力加强创新研究或填补空白,这也正是作者著述本书的初衷。

本书从气候系统复杂性和不确定性的基本思想出发,首先阐明气候变化的统计意义及其概率属性并给出其数学模式,由此引入气候概率分布的形成机制,从而将气候变化的统计意义深化为气候概率分布参数和型态的变化。着重从气候数值模拟的降尺度技术、气候极值统计理论和气候极值随机过程等多种理论与方法相结合的观点叙述气候极值事件的诊断、模拟和预测方法。为此,作者力图较系统地阐述涉及这一领域的各种基本理论和方法,以供广大科技工作者参考应用。

本书的基本素材主要引自作者及其科研小组多年从事该领域教学和研究成果的积累,部分内容是国家自然科学基金项目“基于降尺度技术的中国未来极端降水变化的预估研究”有关成果,还有部分取自于国内外同行专家。全书共分 9 章,除第 7 章和第 8 章由丁裕国和江志红共同撰写外,其余各章均由丁裕国撰写并对全书统一润笔。本书得益于新疆维吾尔自治区气象局科研所前所长张学文教授多年来对作者在学术上的启迪和支持。为本书作出贡献的学者还有:刘晶淼教授、张耀存教授、程炳岩教授,以及刘吉峰、王冀、金莲姬、张永领、何卷雄、程正泉、况雪源博士和蔡敏、王大钧、李云、郑春雨、魏锋、谢志清硕士等,在此一并致谢!

本书的出版,得到了气象出版社陈云峰总编的极大关心和支持,吴晓鹏编辑为本书的出版给予了大力支持和帮助,作者在此一并深表谢忱。

限于作者学术水平,书中不当之处在所难免,敬希专家学者及广大读者不吝赐教。

丁裕国

2009 年 1 月于南京信息工程大学

引 言

近十多年来,世界各地因极端天气气候事件所引发的自然灾害给人类社会和生态环境造成的直接经济损失呈指数上升趋势,由此而导致的人类死亡率也在不断增长。例如,各地出现的洪涝、干旱、暴雨、飓风、严寒、高温等极端天气气候事件,它们的频发或持续,往往造成极其严重的自然灾害。根据最近的统计,全球气候变化及相关的极端天气气候事件所造成的经济损失在过去 40 年中平均上升了 10 倍。仅就中国而言,由于极端天气气候事件而引发的气象灾害就占整个自然灾害的 70% 以上。研究表明,由人类因素所造成的全球气候变暖,几乎与自然因素相当,甚至超过了自然气候系统的变化幅度,而极端气候事件发生的频率和强度也在改变。然而,长期以来,关于极端气候的研究甚少,故使该领域成为气候变化研究的一个薄弱环节。直至 20 世纪 90 年代中期以来,极端气候问题才逐渐成为全球气候变化研究的一个热点。

1 什么是极端气候事件?

严格说来,“极端天气事件”和“极端气候事件”是两个不同的概念,前者是指在特定地区所发生的“罕见”天气事件,例如,某一种气象变量的概率分布曲线两端的尾部所对应的 5%(或 1%,2%)分位数就是一种小概率事件(本书第 1 章将要详述)。当然,对于不同地区,极端天气的特征不尽相同,故所谓“罕见(即小概率)”也是因地而异的。至于极端气候事件,理论上应是某一特定地区和特定时期内许多极端天气事件的平均状况或多年一遇的“极端罕见”状况。值得指出的是,关于极端气候(事件),人们历来都习惯于从不同的角度来理解和认识,至今还没有统一的公认的明确定义,而且人们往往将极端天气和极端气候事件混为一谈,并不加以区分。不过,WMO 在公布气候资料时早就沿用了气候统计中常用的概率(百)分位数(例如,观测样本中出现 1%,2%或 5%的最大或最小值)作为气候极端值的阈值,超过这个阈值即认为是气候极值。可见气象学界早就注意到气候极值问题。但是真正将极端气候与气候变化联系起来并借助于统计极值理论研究极端气候及其变化,只是 20 世纪 90 年代以后才逐渐受到重视。而在常规气候观测记录和气候统计项目中的极端气候要素或变量,例如,逐日极端温度(日最高气温、日最低气温),极端日降水量(出现于某一时段记录中的日降水最大值),极端风速(含瞬时风速和平均风速的极大值),最长连续雨日数,最长无雨日数等,或者某一站点或区域的异常暖月(月平均温度的异常)、日最低温度超过某一指定值的天数、东亚台风、美洲飓风或热带气旋事件等,再如,霜冻、冻害事件,干旱事件,低温连阴雨事件,干热风事件,等等,都属于极端天气或气候事件的范畴。因此,尽管 IPCC 近年已提出了极端天气和极端气候事件的概率定义,但究竟什么是“极端天气和极端气候事件”,迄今为止并没有公认的明确的统一指标。

一般说来,极端气候事件可从下列三方面特征来定义:(1)事件发生的频率相对较低;(2)事件的强度相对较大(或较小);(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,往往并不同时具备以上三方面特征,如干旱区的极端降水,强度并不会很大,而且可能对

社会经济还是有利的。根据 IPCC 报告,对某一特定地点和时间,极端天气事件就是发生概率很小的事件,通常发生概率只占该类天气现象的 10% 或者更低,而极端气候事件就是在给定时期内,大量极端天气事件的平均状况,这种平均状态相对于该类天气现象的气候平均态也是极端的。从气候学研究的角度来看,这种极端气候事件的定义简洁而明确,虽然只涉及事件的发生概率,但却避免了事件的绝对强度随区域不同而很难用同一标准作比较的问题。

目前,国际上已经有学者提出了一些度量极端气候的定量指标(详见第 1 章),IPCC 也曾建议采用这些指标作为业务和研究的依据,但作者认为,一方面这些指标仅包括温度和降水,另一方面还是没有能从理论意义上给出其一般性定义。所谓极端天气气候事件,实质上就是超出一定阈值的天气气候极端值(例如某气象要素所出现的正负距平超出某一临界值)直接或间接导致影响人类社会的某种自然灾害发生,由这类极端值所引发的灾害性事件就是极端天气气候事件。应当指出,极端天气气候事件总是出现于一定区域和一定时段上具有较小概率的事件。例如,多年不遇的大洪水、大暴雨或大范围持续干旱等。由此可见,研究极端天气气候事件必然涉及它们的概率和概率分布模式。

从现代气候学的气候定义来认识极端气候事件更具有理论上的普适性。早在 20 世纪 80 年代,Houghton(1984),在他主编的《全球气候》这一权威著作中,就已提出了现代气候的定义,气候应从气候系统(包括大气、海洋、陆面、冰层和生物圈等)的全部统计特征来加以认识。他指出,天气振动可视为一种多元随机过程,而在某一足够长时间域上,天气振动所表现出来的各种统计特征的总和(如平均值、方差、时空相关函数、极值等)就是气候。由此可见,气候的概念不仅与统计学含义具有密切的联系,还应从气候的变化特性来加以理解。换言之,气候是变化着的“气候”,而不是静止的“气候”。假定某气候要素在足够长时段中(例如 30 年)其振动幅度的取值可用正态概率分布来描述(例如温度),它的概率密度函数曲线两端偏离均值或中值很远的尾部所对应的极端值及其概率,就代表了完整的气候极值统计特征,由此而引发的一系列灾害性事件正是极端气候事件。本书第 4 章将专门介绍有关气候极值统计分布的描述方法。

2 极端气候对社会和生态环境的影响

极端气候事件的频率与强度变化对全社会所造成的直接经济损失相当巨大,据统计,仅在 1991—2000 年的十年里,全球每年受到气象水文灾害影响的平均人口数为 2.11 亿,它已超过了同期因战争冲突而受到影响的总人口数的 7 倍。其中,亚洲是遭受自然灾害袭击最为频繁的大陆,在 1990—2000 年期间,该地区自然灾害占全球所有极端气候事件的 43%。而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 年中已上升了 10 倍。以美国 90 年代为例,天气气候极端事件使该国平均每年的经济损失高达 50 亿美元之多。1998 年中美洲地区由于 Mitch 飓风产生的洪水和山崩曾导致一万人丧生。同年中国长江中下游的特大洪水也造成了上千人和上千亿元人民币的损失。研究表明,若夏季出现连续数日最低气温超过 30℃,由于热强迫所导致的人类和饲养动物死亡率和发病率就会呈指数增加,从理论上说,极端气候事件的影响问题,并不仅仅是由气候极端值产生的直接后果,而是人类社会与自然生态系统对于天气气候极值的某种非线性响应的结果。换句话说,气候变化尤其是极端气候的频发对于人类社会和生态系统的影响,一方面来自于自然气候系统本身的变化,另一方面又包含了人类活动和自然因素的相互作用及其反馈效应,加之社会和生态系统本身的脆弱性,才会导

致一系列严重的后果发生。一个最明显的例证是,40年代,每当飓风活跃季节,当时侵袭美国海岸的飓风非常频繁,但其对社会和生态系统的影响相比于50年代以后至今的各个年代而言,却并不是很突出的,尽管飓风的发生频率和强度并不一定逐年呈上升趋势,但飓风对人类社会的影响却有年年增大的趋势。其中一个重要原因是,由于人口和社会基础设施不断增加,导致各地对于灾害的承受力相对下降,最终必然使得人类社会和环境及生态系统本身的脆弱性反而增加了。不难想象,在某个沿海地区,若是人口稠密且经济发达,热带风暴频率增大所造成的负面影响(包括人类生命与经济财产损失)必然要比人口稀少且经济欠发达地区更为巨大。近年来,东、西两半球多次遭遇的热带风暴所引发的各种自然灾害其直接经济损失和人员伤亡事件就是典型的例证之一。类似的例证举不胜举。例如,1983年夏季,美国中西部的热浪导致大范围谷物减产;同年冬季的霜冻又使得佛罗里达州许多树木死亡。而在2003年夏季,几乎席卷整个北半球的高温事件,曾造成各地出现严重的旱灾和热浪,尤其是造成夏季人口死亡率上升,相当惊人。大多数地区的历史气象记录表明,当年高温事件的强度、持续性和频率均为历史所罕见,几乎波及整个欧亚大陆各国。据报道,法国西南部6月平均气温比历年高 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$,瑞士6月平均气温创250年来的最高纪录;7月10日英国伦敦气温高达 38.1°C ,打破了1990年创下的高温纪录(37.1°C)。德国各地更是高温频频,局部地区逼近或超过 40°C 。印度气温则上升到 $45\sim 49^{\circ}\text{C}$,因热浪丧生的人数超过1300人。此外,南亚和中东的许多国家也大都出现了持续 40°C 以上晴热高温天气,局部地区最高气温竟达 $44\sim 46^{\circ}\text{C}$ 之高,几乎所有国家和地区无一幸免。当年高温使欧洲森林大火频发,俄罗斯100万 hm^2 森林被火烧毁。严重的干旱使农业大幅减产,德国的农业损失估计在 $10\%\sim 20\%$ 之间,意大利的损失高达 $20\%\sim 40\%$,欧洲其他国家也都因此而遭受不同程度的农业损失。同年中国夏季也遭受高温干旱的严重危害,罕见的高温席卷了大半个中国。浙江、福建、江西、广东、湖南、湖北等地同时出现了 40°C 以上的高温,很多县市的气温记录都创历史同期新高。所有这些事例都充分说明,极端气候事件的频繁出现其影响巨大,而现代社会和经济对极端气候事件的影响也更为敏感。无怪乎近年来无论是公众或媒体,无论是决策者或科学家都在惊呼“气候是否变得更加极端化了?”

3 极端气候的研究方法

现代气候学认为,气候的形成是全球气候系统内外部多种因素错综复杂的相互作用的结果。由于其相互作用过程随时间的推移处于无休止的变化之中,它们涉及各个子系统内部以及各子系统彼此之间的各种动力的、物理的、化学的和生物的过程,由此导致气候的长期平均状态和偏离平均态的各种时间尺度的变化。除此以外,整个地球气候系统还会受到来自各种天体运动和地球内部运动的渐变或突变因素的冲击而对其施加各种外部强迫作用,例如地球轨道参数变化、火山爆发、太阳活动等。从这个意义上说,全球或任一地(点)区的气候状态在不同的时空尺度上始终是变化的。“气候”的概念必须从气候系统的全部统计特性和物理过程及其变化来认识。

关于气候系统的概念,近年来各种版本的教科书和中外论著已有相当多的论述,有关这一论题的更深层探讨,不在本书论述之列。这里仅只针对其复杂性所导致的不确定性问题借以引述。

3.1 气候系统的复杂性与不确定性

气候变化过程的复杂性主要由下列三方面因素而产生。其一,气候系统各子系统本身具有显著不同的物理属性;其二,气候系统及其内外部因子之间的相互作用具有时空多尺度性;其三,气候变化成因的多样性。

以五大圈层中的大气圈为例,它是气候系统中最主要最活跃的子系统,其垂直方向由对流层、平流层、中间层和热层组成,而对流层则是气候变化的主要场所。大气具有易变性、动力不稳定性、能量耗散性。它之所以处于运动之中,全靠其他子系统和气候系统外部(太阳辐射)能量的补偿来维持。假如没有补充大气动能的物理过程,大气运动和能量传输就会被摩擦消耗殆尽而终止运行,其时间极限大约只有一个月。由于大气密度和比热容相对较小,使其在受热时易变为不稳定,因而它对于外部强迫的响应要比其他子系统迅速。而太阳短波辐射和地球长波辐射在大气中的传输受大气成分变化的影响,尤其是温室气体效应强弱变化的影响相当大。此外,大气作为地球外围圈层的流体,在旋转地球上运动,服从流体力学中旋转流体的运动规律,具有平流和湍流的混合特性、非线性特性及其与边界层和大气内部的摩擦效应,这些特性都可能隐含着不确定性。

当然,海洋在气候系统中的作用更是不可忽视。覆盖全球 70% 面积的海洋,由于其热容巨大(地球上巨大能量库),平均约有 70 m 深(对海洋混合层而言),其贮热能力比大气高出 30 倍。而其热量输送,虽比大气缓慢,但其输送量远高于大气。海洋表层可通过潜热将其贮热释放。海水对流的形式主要是局部冷却,而不是加热,因而海洋内部的垂直涌动受海面冷却、海水密度、含盐度等因素的影响很大,海洋上层对于大气和冰雪圈的相互作用,其特征时间尺度为几个月到几年,对于深海,其特征时间尺度则为数百年。海洋在气候系统中的作用主要有两方面,其一,大气—海洋耦合变化中的动力与热力相互作用;其二,海洋内部物理过程。前者为海—气间的动量、热量、物质交换,后者为海洋环流(包括深层温盐环流)的变化。由于海洋加热场的不均匀性,大气与海洋之间的各种相互作用在时空分布上都极不均匀,尤其是热带和赤道洋面的暖、冷水事件所形成的物理过程(如 El Nino 和 La Nina 事件)更是人们关注的焦点,其变化过程很复杂,所以海—气之间的相互作用不可避免地具有不确定性。

至于陆面、冰雪圈和生物圈及其与大气的相互作用过程就更加复杂了。尤其是陆面与大气的热量、水分和动量交换过程相当复杂。至今这些物理过程的描述都无法完满地融入气候模式的动力框架之中,而只能用参数化的形式加以描述,由于无法完全客观量化及其尺度匹配的困难,更使其产生较多的误差和不确定性。最明显的是,生物圈及其内部过程的复杂性。例如,人类活动作为特殊的生物活动对气候产生直接或间接的影响,近年来人类活动产生的气候影响已经与自然气候变化的量级相当,而人类的城市化效应,大规模开垦、放牧、砍伐森林,工地排放污染物、碳化物、粉尘等都严重地改变了大气中某些成分的浓度(如 CO_2 , CH_4 , CFC 等),导致不断加剧的温室效应和局地地表辐射平衡与热平衡的变化。而这些对温室效应强度至关重要的微量气体浓度及其变化,目前还都无法精确地估计,因而具有相当多的不确定性。

在地球漫长的生命史(约 50 亿年)上,气候状态的变化其时间尺度的跨度相当巨大。全球各地气候变化的时间尺度谱几乎覆盖了全部频率段。而不同时间尺度的变化呈相互叠加、相互交织的状态,构成一幅幅错综复杂的气候变化图像。一般说来,较长时间尺度气候变化总是较短时间尺度变化的背景,较短时间尺度的气候变化总是叠加于较长时间尺度的气候变化背景之上,从而形成一种层层嵌套,层次分明的复杂变化图像。

另一方面,气候变化的不同时间尺度往往对应着不同的空间尺度。例如,一个地点的温度和降水其长期变化大约代表直径为 10 km 范围的气候变化,太平洋或大西洋暖洋流的长期变化大致代表 $10^2 \sim 10^3$ km 的中尺度气候变化,欧亚大陆环流指数或环流型的长期变化属于 10^4 km 的大尺度范围,北半球乃至全球的气候变化则代表了 10^5 km 以上的行星尺度变化。关于时间尺度和空间尺度的匹配,从近百年全球或半球气候变化的观测事实已可见一斑。

研究表明,气候变化时空尺度的多样性是与其成因相对应的。不过,这只是一种定性的非严格的对应关系。一般的,可将气候变化因子分为两大类,一类为外部因子,一类为内部因子。前者基本上不受气候系统状况的影响,即气候系统对这些因子没有反馈作用;后者则是气候系统物理过程及复杂的相互作用过程所产生的原因。例如,地球气候系统主要能量来源的太阳辐射自古以来就有变化(包括光辐射及微粒辐射),其可能时间尺度在 $10^0 \sim 10^9$ 年范围内。据最近的数值实验研究表明,火山灰气溶胶及人类活动排放的硫酸盐气溶胶两者作用不完全一样,后者为间接效应,主要通过云滴的反射率增高,影响辐射吸收,因而许多研究指出,火山灰气溶胶和人类排放气溶胶有抵消温室效应的冷却作用,在区域性气候变化中不可低估。而人类活动是近一百多年来新增加的一类气候变化原因。所有这一切,都给气候变化的研究增加了复杂性,毫无疑问,这就导致了气候系统既有确定性的一面,更有不确定性的一面。从哲学的高度上说,确定性与不确定性(或随机性)两者是事物的对立统一体。近年来的研究更加表明了气候系统的上述不确定性所导致的气候预测不确定性,大致可归结为下列 7 个方面的原因:

- 1) 温室气体的不确定性;
- 2) 云对辐射作用的制约;
- 3) 降水与蒸发的不确定因素;
- 4) 海洋热量输送与贮存的不确定性;
- 5) 生态系统过程的未知因素;
- 6) 外部强迫的不确定性,如天文因素、太阳辐射、火山爆发、地球轨道参数等,都难以估计;
- 7) 大气、海洋系统本身的可预报性更有不确定性。

由于上述这些因素目前都难以克服。加之气候系统模式本身的数学物理基础等问题,必然导致模式本身仍然不够完善。正如 IPCC 第三次评估报告所指出的,目前描述气候模式的气候敏感性范围较大。这是由于气候模式虽然已经是高时间分辨率的全球陆海气耦合模式,甚至已嵌套复杂地形的高分辨率的细网格区域模式,但对于云、海洋、极地冰盖等物理和化学过程的描述还很不完善,尤其是云水交换、海洋环流及区域降水等变化主要涉及气候敏感性和反馈机制,因而仅就平均温度的预测而言仍有相当大的差异,更不能保证极端气候的准确预测。

尽管目前已经认识到人类排放温室气体浓度的增大是造成当代气候变暖的一大因素,但目前仍不清楚自然变率与人类因素变率两者对气候变化的贡献之比和各自的量值。所有这些都增加了气候模拟结果的不确定性。当然,气候变化研究的一个重要任务就是要不断减小气候变化预测的不确定性,提高预测的精度与信度,只有这样包括极端气候在内的气候变化的预测准确性和可信度才可进一步提高。

3.2 研究极端气候必须考虑其概率性

由于上述这些众多缘故,加之极端气候事件的变率相比于平均气候的变率更强,因此,研究极端气候更不应当仅仅局限于确定论的数学模式。20 世纪 70 年代以来,非线性科学的发展表明,一个确定性系统往往具有内在随机性行为,即使是一个很小的随机力,也能对确定性系统产生重要的影响,甚至改变宏观系统的命运。尽管关于非线性系统科学的耗散结构论、协同论、突变论也已流行多年,但如何有效地用于气候变化科学,仍然没有重大的突破。迄今为止,大气科学仍然将天气气候的演化过程描述为一组微分方程的初值问题。这种确定论的动力学框架,建立于牛顿力学基础之上的纳维—斯托克斯体系之中,其局限性是必然的。众所周知,在现实世界中,无论怎样复杂的方程式都不可能是实际现象的无限复杂性的等价反映,它们充其量不过是相对精确或相对逼真地描述了现象,而不是现象本身的全部写照。

概率统计学理论和方法作为一种有力的分析、模拟、预测工具,历来被应用于天气和气候学的研究中,经久不衰。之所以如此,其原因正在于:1)由于气候系统不但具有确定性的一面,更具有不确定性的一面,导致在一个相当长时期内,动力数值模式的不完善性是难以克服的;2)气候记录是实验性观测记录(大气气候系统本身就是一个实验场所),不可避免地存在观测误差;3)气候观测记录一般总是按时间序列的形式,分布于全球或区域的大量网格点或测站上,形成在时间空间域上浩如烟海的庞大气候资料集。气候变化的各种时间尺度信号都会蕴涵于这个庞大的气候资料集当中。若想从中分析归纳气候变化的规律,判断其成因或据以预测未来的气候变化,除了动力数值模拟方法以外,应用概率统计学理论与方法,利用历史气候观测记录的信息建立各种适当的统计模型是非常有益的途径。既然实际的气候系统时时刻刻都在经受着不确定性因素的挑战,气候在很大程度上具有概率性。所以,仅仅立足于无限精密地测量来确定气候过程的初值并以此为依据建立确定论模型用以预报其未来,这只考虑了气候系统确定性的一面,它必定仍有相当多的缺陷,因为这种确定论模型毕竟是理想化描述的极限。从客观上说,即使系统的“内在随机性”可以消除,自然气候系统也不可能完全借助于确定性模型来描述,因为“外在随机性”总是不可避免的。最近,美国密歇根大学的亨利·N. 波拉克教授(2003)在其所著《不确定的科学与不确定的世界》一书和法国科学家大卫·路爱勒博士(1991)在其所著《机遇与混沌》一书中特别对自然界(尤其是气候系统)的不确定性问题作了精辟的论述,更加支持了上述观点。

事实上,研究气候系统的任何一个子系统,都不能回避气候具有概率性即不确定性的一面。当今数值天气预报和气候模拟研究中已经愈来愈多地融进了一些概率统计原理和方法,例如,动力模式基础上的集成预报就有随机统计试验方法的应用;数值天气预报和动力气候模拟的客观分析、四维同化、初值化等手段也都具有统计处理方法,而数值预报产品的 MOS 预报或 PP 预报以及各种物理过程的参数化大多也借助于概率统计学方法来解决,近年来,将气候模式模拟的全球尺度气候预测结果,采用统计降尺度(statistical downscaling)或统计—动力降尺度(statistical-dynamic downscaling)方法细化为区域(或局地)气候情景,已成为全球各地未来气候情景预估的重要工具。这些都有力地证明了考虑气候概率性问题的重大意义。

3.3 如何研究极端气候?

基于上述观点,一般可将气候变量视为随机变量,而气候极值就是这种气候随机变量的复杂函数,它更加需要采用包括极值统计分布理论在内的各种统计学方法和理论。所以,在本书第一篇(1~3 章)的理论基础中,首先叙述了极端气候的概率意义和气候概率分布形成机制与

气候变化的关系,并由此引入极端气候的指标体系;接着在第二篇(4~6章)中阐明极端气候概率分布模式与时空变化特征的诊断方法;在第三篇(7~9章)中,着重叙述极端气候的模拟与预估。重点阐明借助于全球模式输出信息的降尺度细化方法,进一步生成未来区域气候情景,并由此预估气候极值统计特征的方法步骤。

另一方面,目前全球海陆气 GCM 耦合模式所模拟的各种排放方案下的未来气候情景已具有时间上的高分辨率,但其空间尺度分辨率仍有细化的必要,在全球不同地区采用嵌套的区域模式已经成为研究区域尺度气候状况的有力工具,但其模式输出信息也仅对平均气候变化有较高的置信度。由于平均气候变化与极端气候变化之间存在着复杂的相互关系,目前,虽然国际上已经有一些动力模式能够直接给出区域或局地极端气候的预估信息,但目前大多数动力模式都存在空间分辨率的局限性。所以,迄今为止,我们尚不能完全依赖于由动力气候数值模拟直接寻求极端气候变化的规律。在一般情况下仍然必须借助于动力气候数值模拟与统计极值分布模式及随机模拟等各种方法相互结合起来研究区域的或局地的极端气候状况。作者认为,根据历史气候记录提取气候极值信息并诊断其变化规律离不开各种统计手段。目前,极端气候异常事件的许多统计特征量与平均气候及其变率的线性或非线性关系已经有了一定的理论基础(如极值分布理论,统计分布函数的熵理论,平稳过程的交叉理论,随机点过程理论等),而各种气候数值模式模拟的最新结果也表明,模拟的平均气候场及其变率已经有相当的可靠性,在给定的初边值条件下作第二类气候预报(气候强迫敏感性试验)与观测结果已相当一致。因而,借助于优良的气候数值模式输出结果,预测各种条件期望气候情景下,出现气候极端值引发自然灾害的风险(概率)及其区域型态研究也已具备了一定的条件。

然而,由于目前人们对全球各地极端气候的变化还缺乏全面系统的认识。对于极端气候的各种研究也都处于刚刚起步的阶段。因此,要研究极端气候变化的各种问题,必须具备动力气候数值模拟和统计气候学两个方面的知识体系,采用动力学和统计学相结合的多种途径和方法加以综合研究。

目 录

前言

引言	(i—vii)
----------	---------

第一篇 理论基础

第 1 章 极端气候变化的概率意义	(1)
1.1 气候事件及其概率	(1)
1.2 气候变量及其概率分布	(4)
1.3 气候变化的概率意义	(13)
1.4 常规观测中的气候极值和极端气候指标	(15)
1.5 描述极端气候的指标体系	(16)
第 2 章 气候概率分布模式拟合	(22)
2.1 离散型变量分布模式	(22)
2.2 连续型变量分布模式	(27)
2.3 总体、样本、样品与抽样分布	(42)
2.4 参数估计与拟合效果检测	(45)
2.5 由观测资料拟合分布模式的步骤	(54)
第 3 章 气候概率分布的成因机制与统计模拟	(58)
3.1 不确定性的信息度量:熵的概念	(58)
3.2 最大熵原理	(64)
3.3 气候概率分布的成因机制	(66)
3.4 模拟气候概率分布的 Monte-Carlo 方法	(71)
3.5 广义(时空域)气候概率分布	(74)

第二篇 极端气候概率与时空分布特征

第 4 章 极端气候概率特征描述	(79)
4.1 经典极值分布理论	(79)
4.2 基于 AM 抽样的广义极值分布模式	(83)
4.3 基于 POT 抽样的广义帕雷托(GPD)分布模式	(91)
4.4 GEV 与 GPD 模式参数的关联性	(91)
4.5 GEV 与 GPD 模式应用实例	(93)
4.6 经典极值分布的某些应用	(97)
第 5 章 极端气候的时域变化规律分析	(101)

5.1	气候时间序列的统计结构	(101)
5.2	极值变化过程的特殊性	(108)
5.3	平稳过程的交叉理论	(110)
5.4	气候时间序列的极值特征分析	(112)
5.5	实际时间序列样本估计公式	(117)
5.6	Markov 过程与 Markov 链	(123)
5.7	Poisson 随机点过程	(127)
第 6 章	极端气候状况时空分布特征的诊断	(129)
6.1	一般诊断方法简述	(129)
6.2	极端气温变化的分区及其时空分布特征	(137)
6.3	我国东部地区极端降水的时空分布特征	(146)
6.4	西北地区极端干期的概率参数时空分布特征	(148)

第三篇 极端气候的模拟与预估

第 7 章	全球气候模拟结果的降尺度精细化	(151)
7.1	降尺度精细化的必要性	(151)
7.2	降尺度方法	(153)
7.3	动力降尺度(DD)方法	(154)
7.4	统计降尺度(SD)方法	(156)
7.5	运用降尺度方法的关键步骤	(173)
7.6	应用实例	(178)
第 8 章	未来全球气候情景下的极端气候预估	(189)
8.1	平均气候与极端气候的关联性	(189)
8.2	极端气候模拟预估的一般步骤	(193)
8.3	极端气候统计特征的模拟	(195)
8.4	基于 ECHAM5 模式的局地流域极端气温和降水变化预估(实例之一)	(200)
8.5	基于 IPCC AR4 耦合模式的本世纪中国极端气候变化预估(实例之二)	(205)
8.6	基于可变分辨率模式的本世纪中国区域极端气候预估(实例之三)	(211)
第 9 章	极端气候研究进展	(214)
9.1	观测和模拟研究	(214)
9.2	极值统计分布模式的应用	(219)
9.3	降尺度方法述评	(222)
9.4	极端气候研究展望	(224)
后记		(225)
参考文献		(227)

第一篇 理论基础

第1章 极端气候变化的概率意义

正如引言所述,“气候”在很大程度上具有概率性。从这个意义上说,一切气候事件(包括极端气候事件)的诊断、模拟和预测,其理论基础必然涉及气候及其变化的基本概率属性。地球上任何地点或地区乃至全球气候所发生的变化,实际上都是某种表征气候状况的变量其围绕相应平衡状态的概率分布型态有了某种改变。而在其概率分布的两端尾部大约 10%(或 5%)概率以内所对应的小概率事件及其分位数(见 1.2 节)正是所谓的“极端天气和气候”的统计特征。

为了深刻阐明气候的这些概率特性,一般可以认为,气候变量是某种随机变量,它们的数据结构也可以用某种最佳的概率分布型(模式或模型)加以描述。本章主要阐述气候变化的概率分布属性和极端气候统计特征的描述等问题。

1.1 气候事件及其概率

1.1.1 气候事件定义

众所周知,在量子力学中,对于微观体系的一次测量结果通常并不足以有把握地预测微观体系的某一特性,这种一次测量又被称为一次试验(或实验),而大量相似的实验,就有可能说明微观体系的某一特性。换言之,我们并不注意单个体系(即实验),而是考虑由非常大数目的 N 个体系所组成的集合,这就是统计物理学中所谓的“统计系综(简称系综)”。原则上, N 被想象为任意大($N \rightarrow \infty$),而每一个体系的相似是指满足相同的实验条件而言。假定实验的一个特殊结果(称其为事件)用 r 标记,并且在系综的 N 个体系中有 N_r 个结局显示这个结果(事件),那么,下列比值

$$P_r = \frac{N_r}{N} \quad (N \rightarrow \infty) \quad (1.1.1)$$

称之为结果或事件 r 的出现概率,又称为几率。式(1.1.1)正是概率论中“古典概率”的定义。换言之,在一定的条件下重复若干次相同的实验,某个事件 r 出现的次数 N_r 与其实验总次数 N 之比称之为某事件的概率,这就是概率的古典定义。显然,根据此定义,概率在 0 与 1 之间取实数值。一般说来,对于某一事件 r ,若事先并不知道其是否出现(或发生),但它出现的可能性大小能够用其概率 P_r 加以度量。通常我们就称这样的事件为“随机事件”。显然,随机事件就是具有不确定性的事件。从这个意义上说,“概率”本质上就是对随机事件不确定性的一种度量。在极端情况下,若某事件在一定的条件下必然不会出现,即称它为“不可能事件”,其概率为 0,相反,若某事件在一定的条件下必然会出现,即称它为“必然事件”,其概率为 1。

在一般情况下,某个随机事件 r 的出现概率为 $0 \leq P_r \leq 1$ 。

在相同的条件下,对于任何气象(或气候)变量的一次观测,都可近似地看作为一次试验或实验,如同上面的定义,对于相同的条件下所得的观测记录,统计其出现某一事件(符合某一特殊结果)的比值

$$P_r = \frac{N_r}{N} \quad (N \rightarrow \infty) \quad (1.1.2)$$

通常称为该事件出现的相对频数,又称为频率,概率理论早已证明,在试验次数相当大($N \rightarrow \infty$)的条件下,频率将以概率 1 收敛到它的概率,即有 $\lim_{N \rightarrow \infty} P(P_r \rightarrow P) = 1$,这里的 P 即为事件的概率。在一般情况下,频率 P_r 只是概率 P 的一种实验值(又称样本值)。后面将要看到,通常若用频率来代表概率,应考虑其与真实概率的偏差大小,且样本愈大,频率对于概率的代表性愈好。

1.1.2 气候概率的基本运算

根据习惯,通常用大写字母 $A, B, C, \dots$, 代表各个事件,而各个事件之间又可相互关联而组成复合事件。常用的有:

1) 若事件 A 与事件 B 同时出现,则记为 AB 或 $A \cap B$, 并称其为事件 A 与事件 B 之“积事件”(或事件之交)。

2) 若记事件为 A , 则 A 不出现的事件记为 $\bar{A}$ 。

3) 若事件 A 与事件 B 中至少出现其一,则记为 $A+B$ 或 $A \cup B$, 并称其为事件 A 与事件 B 之“和事件”(或事件之合)。

4) 若事件 A 出现必然导致事件 B 出现,则记为 $A \subset B$ 或 $B \supset A$, 并称其为事件 B 包含 A , 或称 A 是 B 的特款。特别当 $A \subset B$ 和 $B \supset A$ 同时成立,则称 A 与 B 为等价事件,并记为 $A=B$ 。

5) 若事件 A 出现必然导致事件 B 不出现(反之亦然),则记为 $A \subset \bar{B}$ 或 $\bar{B} \supset A$, 称事件 A 与事件 B 互不相容或说 A 与 B 是互不相容事件。

6) 互不相容事件的推广和特例:

(i) 互不相容事件完备群: 若事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 两两互不相容, 而每次必然出现其中之一件, 则称事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 为一个互不相容事件的完备群。换言之, 我们有

$$A_1 + A_2 + \dots + A_n = U \text{ (必然事件)} \quad (1.1.3)$$

(ii) 互逆事件: 若事件 A 与事件 B 互不相容, 但每次必然出现其一, 称事件 A 与事件 B 为互逆事件, 可见

$$A + B = U \text{ (必然事件)}, \text{ 或 } AB = V \text{ (不可能事件)} \quad (1.1.4)$$

事件的概率除直接由频率估计以外, 一些复合事件的概率还可由组成它们的简单事件概率通过适当的运算求得。这些运算可归结为如下几个定理:

1. 加法定理

定理 1 若事件 A 与事件 B 互不相容, 那么, 它们的“和事件”的概率等于各个事件出现概率之和

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (1.1.5)$$

由此可推广到多个事件互不相容的情形,设有多个两两互不相容事件,则其和事件的概率为

$$P(A_1 + A_2 + \cdots + A_n) = P(A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \cdots + P(A_n)$$

换言之,如有事件 $A = A_1 + A_2 + \cdots + A_n$

则

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2) + \cdots + P(A_n) \quad (1.1.6)$$

通常 $P(A)$ 称为事件 A 的总概率。由此又可得下列定理:

定理 2 若事件 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 为互不相容事件的完备群,则必有

$$P(A_1) + P(A_2) + \cdots + P(A_n) = 1 \quad (1.1.7)$$

尤其当 $A+B=U$ 或 A 与 $\bar{A}$ 为互逆事件,就应有

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (1.1.8)$$

所以又可写为

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad (1.1.9)$$

如前所述,一般的,任一事件 A 的概率都有

$$0 \leqslant P(A) \leqslant 1 \quad (1.1.10)$$

2. 乘法定理

定理 3 事件 A 与事件 B 之“积事件”(或事件之交)的概率等于两种事件的概率之乘积,这就是:一事件的概率与另一事件的条件概率之乘积,通常写为公式

$$P(AB) = P(A)P(B/A) \quad (1.1.11)$$

或

$$P(AB) = P(B)P(A/B) \quad (1.1.12)$$

上式中, $P(A/B)$ 称为在事件 B 出现条件下事件 A 出现的条件概率,反之, $P(B/A)$ 称为在事件 A 出现条件下事件 B 出现的条件概率,上述概率均简称为条件概率。通常将 $P(A)$ 或 $P(B)$ 称为事件 A 或 B 的无条件概率,这就是通常气象上所说的“气候概率”。在气候诊断或预测中,通常将条件概率与前期预报因子变量联系,考虑其前期预报因子条件出现时预报变量出现的条件概率。

推广至一般情况,还可有公式

$$P(A_1 A_2 \cdots A_n) = P(A_1)P(A_2/A_1) \cdots P(A_n/A_1 A_2 \cdots A_{n-1}) \quad (1.1.13)$$

定理 4 如两事件随机不相关,两事件同时出现的概率即两事件之积的概率为

$$P(AB) = P(A)P(B) \quad (1.1.14)$$

推广为一般,就有

$$P(A_1 A_2 \cdots A_n) = P(A_1) P(A_2) \cdots P(A_n) \quad (1.1.15)$$

3. 全概率公式与贝叶斯定理

若事件 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 为互不相容事件的完备群, 今有任一事件 B , 仅能联同其中的任一事件 A_i 出现, 并写为符号

$$B = BA_1 \cup BA_2 \cup \cdots \cup BA_n \quad (1.1.16)$$

可见, $BA_1, BA_2, \dots, BA_n$ 为互不相容事件, 所以, 按加法定理和乘法定理, 应有

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B/A_i) P(A_i) \quad (1.1.17)$$

上式称为全概率公式。它就是前面提到的总概率定理式(1.1.6)的另一种形式。在乘法定理式(1.1.11)或(1.1.12)成立的前提下, 应用全概率公式, 可以进一步推证出贝叶斯公式

$$P(A_i/B) = \frac{P(A_i) P(B/A_i)}{\sum_{j=1}^n P(A_j) P(B/A_j)} \quad (1.1.18)$$

贝叶斯公式表明, 在事件 B 已发生的条件下, 互不相容事件完备群 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 中任一事件 A_i 发生的(条件)概率, 可按上述贝叶斯公式计算。全概率公式和贝叶斯公式是概率统计学的最重要的基础性公式, 它们在气候统计诊断与预测应用中具有十分重要的作用。

1.2 气候变量及其概率分布

1.2.1 随机变量

前面提出, 随机事件是在一定条件下进行随机试验所得结果的总称, 它是具有一定概率的事件。在某一次试验(如气象观测)中, 它可能出现, 也可能不出现, 因此, 尽管它具有一定的概率, 但每次试验的可能结果仅有两种: 事件 A , 或者出现(记为 A); 或者不出现(记为 $\bar{A}$)。

将上述概念推广, 在一定的条件下, 对某一事件(或现象)做试验(例如气象观测), 其可能结果不止有两种, 而是有若干种或无数种, 那么, 在大量重复试验(或观测)的基础上就可发现, 这些可能结果都有一定的概率与之对应, 因此, 我们不能仅用随机事件来代表, 而必须用某一数量 X 来表示, 通常简称 X 为随机变量。例如, 某地的年降水量, 年降水日数, 年平均气温等气候要素, 都可视为一定气候时期内的随机变量。其观测得到的数值是随着观测结果而不断变化的, 我们事先并不能根据给定的条件知道它们到底取什么数值, 但它们出现某一数值或某一数值域的可能性(即频率或概率)却相对稳定, 并有一定的规律可循。一般说来, 各种气象气候要素都可作为随机变量来处理, 它们的观测记录就是相应随机变量的取值。

按照随机变量取值的性质来看, 可将其分为两种类型: 离散型随机变量和连续型随机变量。前者是指某一随机试验(或观测)其可能结果事先能被一一列举的随机变量, 例如, 一年中的各种天气日数、雨日数或某季节中满足一定条件的天气事件发生的次数(如登陆台风的次数、冷空气活动次数等)。而后者是指某一随机试验(或观测)其可能结果事先无法被一一列出, 而是充满数轴的某一数值区间(例如某实数区间)的随机变量。一般说来, 气压、温度、降水